



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ
ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ
ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ
ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ
ΚΑΤΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΙΑΣ ΜΠΑΛΑΝΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανικού Επιστήμης Υλικών Πανεπιστημίου
Ιωαννίνων

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ
ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ
ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ
ΚΑΤΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΙΑΣ ΜΠΑΛΑΝΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανικού Επιστήμης Υλικών Πανεπιστημίου
Ιωαννίνων

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

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

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2020

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	8
Περίληψη.....	9
Abstract.....	10

Κεφάλαιο 1.

Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)

1.1. Μη συμβατικές κατεργασίες.....	12
1.2. Ηλεκτροδιάβρωση (Electrical discharge machining).....	13
1.3. Αρχή λειτουργίας ηλεκτροδιάβρωσης.....	14
1.4. Βασικά στοιχεία ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης.....	16
1.4.1. Τεμαχιο κατεργασίας.....	16
1.4.2. Ηλεκτρόδιο.....	17
1.4.3. Διηλεκτρικό μέσο.....	23
1.4.4. Μηχανισμός κίνησης στους άξονες X–Y.....	25
1.4.5. Δοχείο-δεξαμενή εργασίας.....	25
1.4.6. Σερβομηχανισμός ελέγχου.....	26
1.4.6.1. Ηλεκτρικό μοτέρ.....	27
1.4.6.2. Υδραυλικό σύστημα.....	28
1.4.7. Μονάδα παροχής ισχύος–Γεννήτρια παλμών.....	28
1.4.8. Σύστημα κυκλοφορίας διηλεκτρικού μέσου και έκπλυσης.....	30
1.5. Παράμετροι κατεργασίας.....	32
1.5.1. Παράμετροι ελέγχου.....	33
1.5.1.1. Διαφορά δυναμικού.....	33
1.5.1.2. Ένταση ρεύματος.....	33
1.5.1.3. Διάρκεια παλμού (T_{on}) και μεσοδιάστημα (T_{off}).....	34
1.5.1.4. Κυματομορφή (Pulse Waveform).....	35
1.5.1.5. Πολικότητα.....	36
1.5.1.6. Έλεγχος διακένου.....	36
1.5.2. Παράμετροι απόδοσης.....	36
1.5.2.1. Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR).....	36

1.5.2.2. Λόγος φθοράς εργαλείου (TWR).....	37
1.5.2.3. Τραχύτητα επιφάνειας.....	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

Χαρακτηρισμός και τροποποίηση της επιφάνειας μετά από ηλεκτροδιάβρωση

2.1. Τοπογραφία επιφάνειας μετά από EDM.....	39
2.2. Στρώματα επιφάνειας.....	41
2.3. Μικρορωγμές (Micro Cracks).....	43
2.4. Τροποποίηση επιφάνειας.....	45
2.4.1. Τροποποίηση της επιφάνειας με τη χρήση ηλεκτροδίου που παρασκευάστηκε με κονιομεταλλουργία.....	46
2.4.1.1. Κονιομεταλλουργική οδός.....	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

Κατεργασία εργαλαιοχαλύβων με EDM

3.1. Εργαλαιοχάλυβες.....	53
3.2. Εργαλαιοχάλυβας Calmax.....	56
3.3. Συμπεριφορά εργαλαιοχαλύβων σε EDM.....	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

Πειραματικό μέρος

4.1. Εισαγωγή πειραματικού μέρους.....	60
4.2. Τεμάχιο και ηλεκτρόδιο.....	60
4.2.1. Παρασκευή ηλεκτοδίων με Powder Metallurgy.....	61
4.3. Κατεργασία EDM.....	62
4.4. Χαρακτηρισμός επιφάνειας.....	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

Αποτελέσματα και συζήτηση

5.1. Εισαγωγή πειραματικού αποτελεσμάτων.....	67
---	----

5.2. Ρυθμός μεταφοράς υλικού (MTR).....	67
5.3. Τραχύτητα επιφάνειας.....	72
5.3.1. Ανάλυση τροποποιημένης επιφάνειας.....	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

Συμπεράσματα

6.1. Συμπεράσματα.....	97
6.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	98

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....101

Βιβλιογραφία.....108

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας αυτή την εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Άγγελο Μαρκόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την συνεχή καθοδήγηση του αλλά και για τη συνεχή καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Εμμανουήλ Παπάζογλου και Παναγιώτη Καρμίρη για την απεριόριστη και συνεχή βοήθεια τους που μου παρείχαν τόσο κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων, όσο και κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους, αλλά και για την κατανόηση που έδειξαν όλο αυτό το διάστημα.

Περίληψη

Η κατεργασία μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων ή ηλεκτροδιάβρωση (EDM) έχει καθιερωθεί ως μία από τις σημαντικότερες μη συμβατικές διαδικασίες κατεργασίας στη βιομηχανία κατασκευής καλουπιών και προτύπων. Η EDM είναι μια μέθοδος κατεργασίας ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών που χρησιμοποιεί ελεγχόμενες σπινθήρες, οι οποίοι λαμβάνουν χώρα μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και ενός τεμαχίου προς κατεργασία με την παρουσία ενός διηλεκτρικού ρευστού. Τα τελευταία χρόνια η κατεργασία EDM εκτός από μια διαδικασία αφαίρεσης υλικού έχει χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση της επιφάνειας του τεμαχίου. Ένα από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί τροποποίηση της επιφάνειας είναι με τη χρήση ηλεκτροδίου που παρασκευάστηκε με κονιομεταλλουργία. Στην παρούσα εργασία παρασκευάστηκε Cu-30 wt.% ZrO₂ green compact P/M ηλεκτρόδιο με στόχο την ενίσχυση της κατεργασμένης επιφάνειας με ZrO₂. Το τέμαχιο ήταν εργαλειοχάλυβας Calmax (Uddeholm) και για διηλεκτρικό μέσο χρησιμοποιήθηκε έλαιο. Διεξήχθησαν πειράματα με την ένταση ρεύματος κατεργασίας να κυμαίνεται από $I_p=5$ έως 9 A και ο χρόνος παλμού $T_{on}= 12.8$ έως 50 μs . Για τις διαφορετικές πειραματικές συνθήκες υπολογίστηκε ο ρυθμός μεταφοράς υλικού, Material Transfer Rate (MTR), η τραχύτητα της επιφάνειας και εξετάστηκε και η κατεργασμένη επιφάνεια με οπτική μικροσκοπία, ηλεκτρονιακή μικροσκοπία σάρωσης (SEM), EDS και συνεστιακή μικροσκοπία σάρωσης με laser. Μέσω της EDS ανάλυσης παρατηρήθηκε η παρουσία συστατικών του ηλεκτροδίου στην κατεργασμένη επιφάνεια αλλά και η παρουσία ελλάτωμάτων μέσω της οπτικής και της ηλεκτρονιακής μικροσκοπίας. Βρέθηκε ότι ο ρυθμός μεταφοράς υλικού (MTR) και οι παράμετροι της τραχύτητας της επιφάνειας (S_a και S_z) έχουν άμεση σχέση με τις παραμέτρους της κατεργασίας.

Abstract

The electrical discharge machining (EDM) technique has established as one of the major non-conventional machining processes in die and mold manufacturing industry. EDM is the process of machining electrically conductive materials by using controlled sparks that occur between an electrode and a work piece in the presence of a dielectric fluid. In recent past, it is observed that EDM is not only a material removal process, but can also be used for surface modification. Surface modification can be done with powder metallurgy (PM) electrode as tool. The aim of this work is to investigate the phenomenon of surface modification of tool steel Calmax (Uddeholm) by EDM process using Cu-30 wt. % ZrO₂ powder metallurgy green compact electrode. The effect of peak current and pulse duration on the material transfer rate (MTR) and surface roughness (S_a and S_z) was investigated. A full-scale experiment has been carried out, for pulse currents up to 9A and pulse-on time up to 50 μ s. Machined surfaces were characterized through optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS) and confocal laser scanning microscopy. EDS of the machined surface confirmed the presence of Cu and ZrO₂. Micro cracks and micro voids are observed in the work piece surface. The experimental results revealed that peak current and pulse duration have a significant effect on the MTR and surface roughness parameters (S_a και S_z).

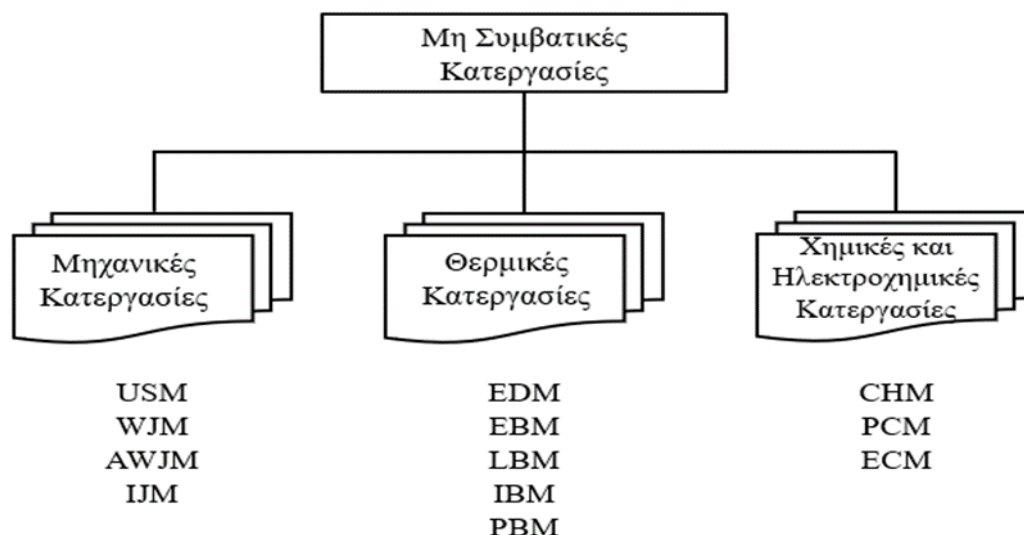
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)

1.1. Μη συμβατικές κατεργασίες

Πολλές από τις τεχνολογίες του σήμερα απαιτούν υλικά που εμφανίζουν βελτιωμένες ιδιότητες όπως υψηλή αντοχή, σκληρότητα, αντοχή στη θερμότητα και ανθεκτικότητα στη φθορά. Οι ιδιότητες αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση των υλικών σε διάφορες εφαρμογές, όμως η μηχανική τους κατεργασία με συμβατικά μέσα παρουσιάζει δυσκολίες.

Οι συμβατικές μέθοδοι μηχανουργικής κατεργασίας έχουν ως αποτέλεσμα το πολύ υψηλό κόστος κατεργασίας και την υποβάθμιση της αντοχής των υλικών. Παράλληλα όμως, απαιτούνται υλικά με πιο σύνθετες γεωμετρίες, με επιφάνειες με χαμηλότερη τραυτήτητα και με ακρίβεια διαστάσεων. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί αρκετές νέες τεχνικές κατεργασίας οι οποίες είναι γνωστές ως μη συμβατικές κατεργασίες. Μια βασική διαφορά μεταξύ των συμβατικών και των μη συμβατικών κατεργασιών είναι ο τύπος της ενέργειας που χρησιμοποιείται. Αναλογα με τη φύση της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του υλικού στις μη συμβατικές κατεργασίες μπορεί να είναι μηχανική, θερμική, χημική ή ηλεκτροχημική όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.1. [1, 2].

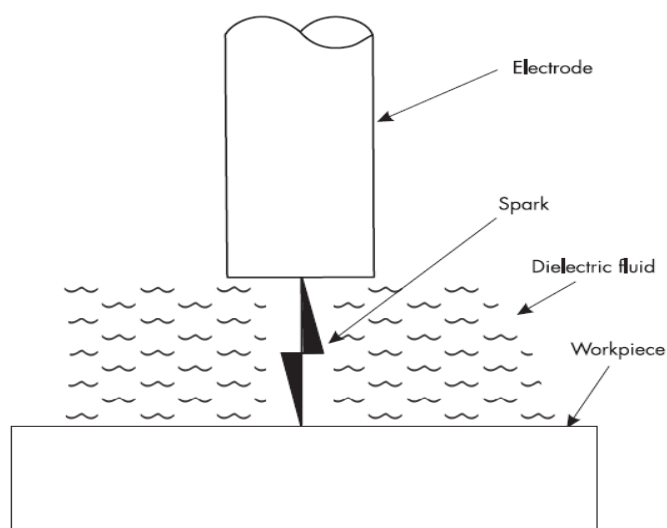


Εικόνα 1.1. Ταξινόμηση Μη Συμβατικών Κατεργασιών [3].

1.2. Ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Machining-EDM)

Μια από τις πιο χρησιμοποιούμενες μη συμβατικές μεθόδους αφαίρεσης υλικού με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας η οποία μετατρέπεται σε θερμική, είναι η κατεργασία μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων ή ηλεκτροδιάβρωση (EDM), η οποία χρησιμοποιείται για την κατασκευή καλουπιών και προτύπων στην αεροδιαστημική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη μικροηλεκτρονική και στη βοϊατρική [4, 5]. Σε αυτή τη διαδικασία, δεν εφαρμόζονται μηχανικές δυνάμεις κοπής επειδή δεν υπάρχει επαφή μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου εργασίας [6]. Οι δύο βασικές κατηγορίες του EDM είναι η ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης-βύθισης (die sinking EDM) και η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM) [4]. Παραδείγματα υλικών που έχουν κατεργαστεί μέσω της EDM αποτελούν οι χάλυβες και τα κεραμικά [7].

Η κατεργασία μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων (EDM) είναι η μέθοδος κατεργασίας ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών χρησιμοποιώντας ελεγχόμενες σπινθήρες, που λαμβάνουν χώρα μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και ενός τεμαχίου προς κατεργασία με την παρουσία ενός διηλεκτρικού ρευστού, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2. Το υλικό αφαιρείται μέσω θερμότητας, η οποία εισάγεται από τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου με τη μορφή σπινθήρα [8].



Εικόνα 1.2. Βασικά στοιχεία ηλεκτροδιάβρωσης [8].

Το EDM χρονολογείται από το 1700, όταν ο Benjamin Franklin ανέφερε το φαινόμενο της διάβρωσης μετάλλων από ηλεκτρικούς σπινθήρες. Αργότερα, το 1770,

ο Joseph Priestly ανακάλυψε τη διαβρωτική επίδραση των ηλεκτρικών εκκενώσεων. Το 1943, οι Dr. B. R. Lazarenko και Dr. N. I. Lazarenko είχαν μια ιδέα να αξιοποιήσουν την διαβρωτική επίδραση μιας ηλεκτρικής εκκένωσης και να αναπτύξουν μια ελεγχόμενη διαδικασία για την κατεργασία υλικών [1]. Από τότε, η τεχνολογία EDM αναπτύχθηκε ταχέως και έγινε απαραίτητη σε αρκετές εφαρμογές, όπως η κατασκευή καλουπιών, η κατασκευή πρωτότυπων κλπ. Το die sinking EDM εφευρέθηκε ήδη από τη δεκαετία του 1940 και το wire EDM επινοήθηκε τη δεκαετία του 1970 [4].

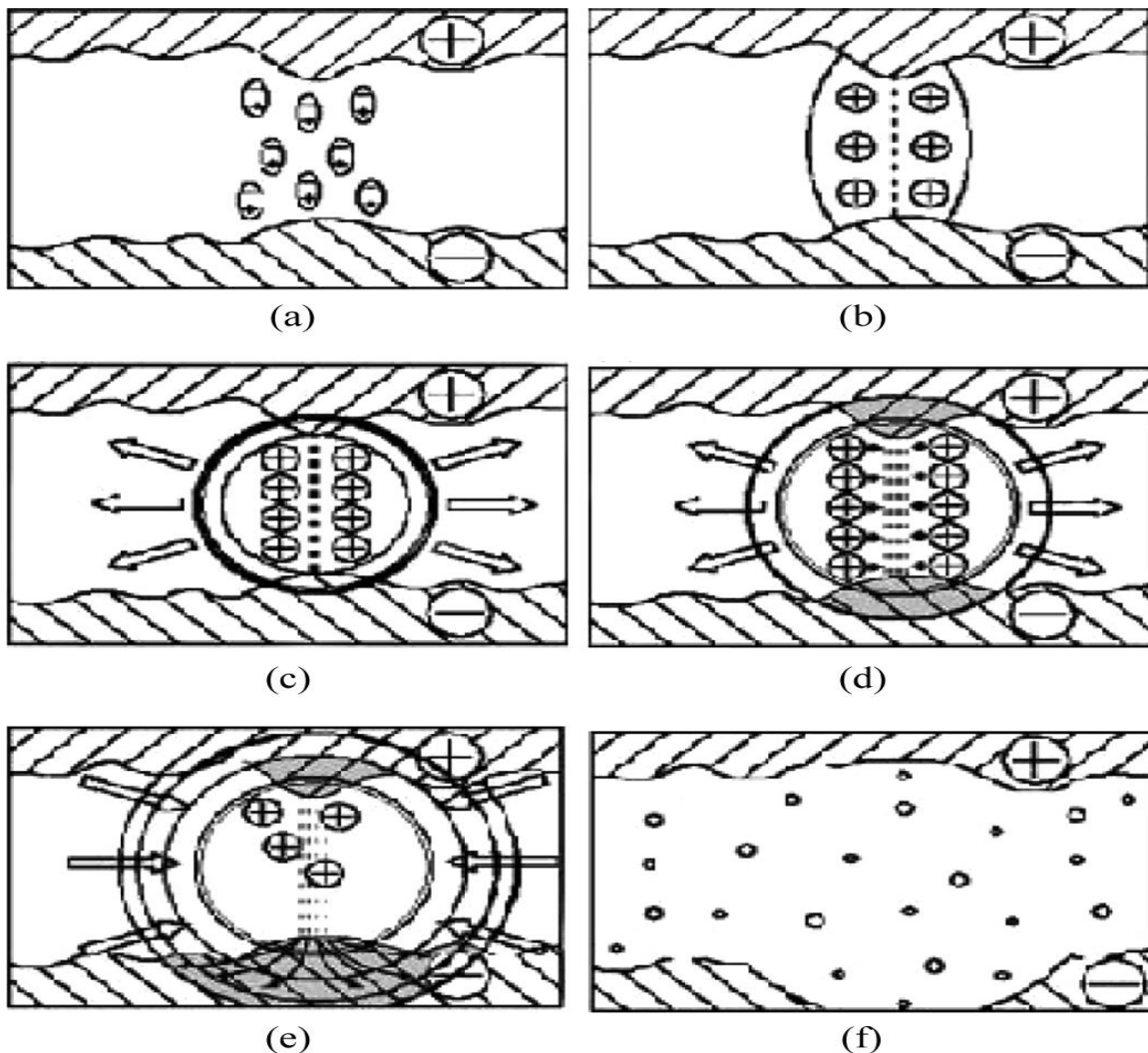
1.3. Αρχή λειτουργίας ηλεκτροδιάβρωσης

Η αφαίρεση υλικού που πραγματοποιείται κατά την ηλεκτροδιάβρωση βασίζεται στην μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων, που συμβαίνει μεταξύ δύο ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών διαφορετικής πολικότητας παρουσία διηλεκτρικού υγρού μέσου.

Κατά την διαδικασία εφαρμόζεται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ του ηλεκτρικά αγώγιμου ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου με την ύπαρξη καθορισμένου διακένου ανάμεσά τους (~ μm). Καθώς το ηλεκτρόδιο κινείται προς το τεμάχιο παρουσία ενός διηλεκτρικού ρευστού (λειτουργεί ως μονωτής και ψυκτικό), σχηματίζεται ηλεκτρικό πεδίο, η ένταση του οποίου αυξάνεται στο σημείο που ελαχιστοποιείται η απόσταση ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο (~10 μm). Υπό την επίδραση του έντονου ηλεκτρικού πεδίου, η διηλεκτρική σταθερά του μέσου που παρεμβάλλεται σπάει (σημείο ιονισμού) και δημιουργείται ηλεκτρικός σπινθήρας. Ο ηλεκτρικός σπινθήρας που σχηματίζεται μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου αναπτύσσει υψηλές θερμοκρασίες (6000-12000 °C) προκαλώντας τήξη και εξάχνωση του υλικού στο σημείο εκκένωσης, οδηγώντας στην απομάκρυνση του υλικού από τα δύο ηλεκτρόδια. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται ένας μικρός κρατήρας τόσο στο ηλεκτρόδιο όσο και στο τεμάχιο. Η θερμότητα, που διοχετεύεται μέσω του σπινθήρα προκαλεί κατάρρευση του ίδιου του σπινθήρα, με το σύστημα να επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Ένα μέρος του τηγμένου υλικού ψύχεται και απομακρύνεται από το διηλεκτρικό υγρό, ενώ ένα άλλο τμήμα του τηγμένου υλικού επαναστερεοποιείται στην κατεργασμένη επιφάνεια.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας πολλές φορές. Η ένταση του ρεύματος υπολογίζεται από τη διαφορά δυναμικού, που

εφαρμόζεται και την αντίσταση του συστήματος, ενώ προσδιορίζει την ενέργεια του σπινθήρα και κατ' επέκταση και το μέγεθος του διάκενου. Ο χρόνος εκδήλωσης του σπινθήρα, ονομάζεται διάρκεια παλμού, T_{on} , ο χρόνος δίχως σπινθήρα–μεσοδιάστημα T_{off} και χρησιμεύει στην αποκατάσταση συνθηκών στο διάκενο, ώστε να μπορεί επαναληφθεί η παραπάνω διαδικασία. Το υλικό, που έχει αποβληθεί λόγω του σπινθήρα, στερεοποιείται σε μικροσκοπικά σφαιρίδια, τα οποία διασπείρονται στο διηλεκτρικό μέσο, μέσω του οποίου και απομακρύνονται. Ο όγκος υλικού, που τυπικά απομακρύνεται σε κάθε ηλεκτρική εκκένωση είναι της τάξης των 10^{-6} – 10^{-4} mm³ με την διαστασιολογική ακρίβεια που επιτυγχάνεται να είναι σε υψηλά επίπεδα [4]. Στην Εικόνα 1.3. φαίνεται η γραφική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της ηλεκτροδιάβρωσης.

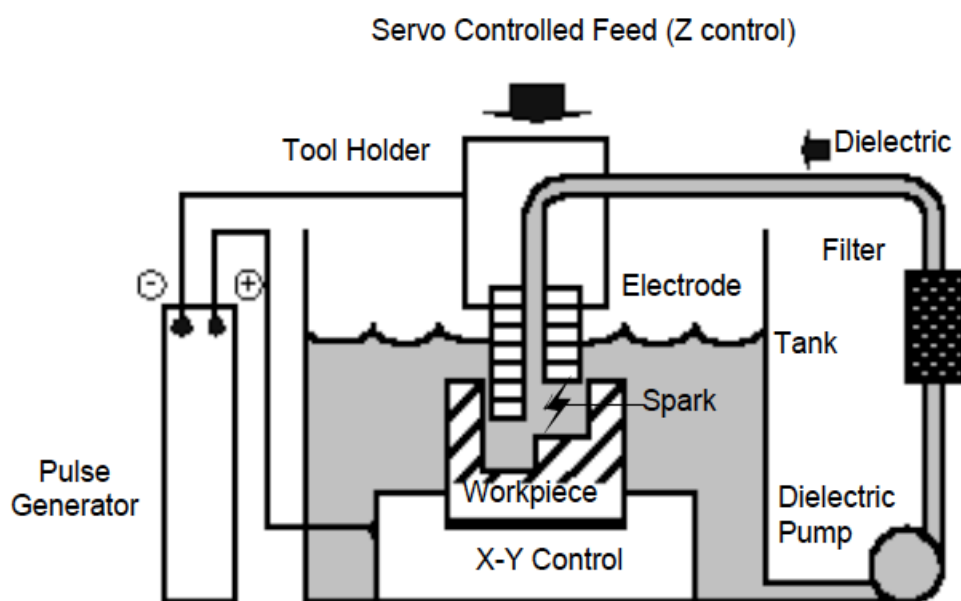


Εικόνα 1.3. Αρχή λειτουργίας ηλεκτροδιάβρωσης: (a) σημείο ιονισμού, (b) έναυση/ ανάφλεξη στήλης πλάσματος, (c) σχηματισμός στήλης πλάσματος, (d) διάδοση στήλης πλάσματος, (e) κατάρρευση στήλης πλάσματος και (f) απομάκρυνση τμημένου υλικού μέσω του διηλεκτρικού μέσου [9].

1.4. Βασικά στοιχεία ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης

Τα βασικά στοιχεία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.4. είναι τα εξής [4, 8]:

- i. Το τεμάχιο κατεργασίας
- ii. Το ηλεκτρόδιο
- iii. Το διηλεκτρικό μέσο
- iv. Ο μηχανισμός κίνησης στους άξονες X-Y
- v. Το δοχείο-δεξαμενή εργασίας
- vi. Ο σερβομηχανισμός ελέγχου
- vii. Η γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών
- viii. Τη δεξαμενή αποθήκευσης διηλεκτρικού μέσου
- ix. Την αντλία και τα φίλτρα του διηλεκτρικού μέσου



Εικόνα 1.3. Βασικά μέρη διάταξης die-sinking EDM [4].

1.4.1. Τεμάχιο κατεργασίας

Η διαδικασία EDM είναι ικανή να κατεργάζεται ηλεκτρικά αγωγικά υλικά ανεξάρτητα από τη σκληρότητα, την αντοχή και άλλες μηχανικές ιδιότητες. Επομένως, η κύρια απαίτηση για κάθε υλικό που χρησιμοποιείται ως τεμαχίου σε EDM είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επίσης, σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότητα της κατεργασίας παίζουν τόσο οι ηλεκτρικές όσο και οι θερμικές ιδιότητες του

τεμαχίου, αφού η ηλεκτροδιάβρωση είναι μια ηλεκτροθερμική διαδικασία αφαίρεσης υλικού. Οπότε, οι παράμετροι του υλικού που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν είναι οι ακόλουθοι [4]:

- i. Υλικό τεμαχία- Χημική σύσταση (Ιδιότητες υλικού)
 - Πυκνότητα
 - Θερμοκρασία τήξης
 - Θερμοκρασία βρασμού
 - Θερμική αγωγιμότητα
 - Θερμοχωρητικότητα
 - Συντελεστής θερμικής διαστολής
 - Θερμότητα σχηματισμού
 - Ηλεκτρική αντίσταση
 - Μετρο ελαστικότητας
- ii. Διαστάσεις τεμαχίου

1.4.2. Ηλεκτρόδιο

Η επιλογή των ηλεκτροδίων είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στο EDM. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, το υλικό αφαιρείται τόσο από το τεμάχιο όσο και από το ηλεκτρόδιο ταυτόχρονα, άρα, είναι σημαντικό να επιλέγονται υλικά με υψηλότερη αντοχή στη φθορά ως ηλεκτρόδια. Έχουν εκπονηθεί αρκετές μελέτες σχετικά με τα κριτήρια επιλογής κατάλληλου υλικού ηλεκτροδίου και τα κριτήρια, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν είναι [4]:

- Υλικό και τύπος τεμαχίου
- Ρυθμός αποβολής
- Αντίσταση-αντοχή σε φθορά
- Επιθυμητή ποιότητα επιφάνειας
- Κόστος κατεργασίας
- Κόστος πρώτων υλών
- Ηλεκτρικές ιδιότητες (ηλεκτρική αντίσταση και αγωγιμότητα)
- Θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία τήξης, βρασμού, θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα)

Οι απαιτήσεις από ένα υλικό ηλεκτροδίου είναι οι εξής [8, 10]:

- Ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Υψηλό σημείο τήξης
- Δομική ακεραιότητα
- Μηχανικές ιδιότητες
- Υψηλή κατεργασιμότητα
- Χαμηλό κόστος

Υπάρχουν δύο κύριες ομάδες υλικών που χρησιμοποιούνται ως υλικά ηλεκτροδίων για το EDM βύθισης: ηλεκτρόδια από μέταλλο και ηλεκτρόδια από γραφίτη. Τα ηλεκτρόδια από γραφίτη έχουν σχετικά χαμηλότερο ρυθμό φθοράς και χρησιμοποιούνται για κατεργασίες ξεχονδρίσματος σε αντίθεση με τα μεταλλικά ηλεκτρόδια, τα οποία αν και παρουσιάζουν υψηλή φθορά, διαθέτουν ιδιότητες, που τα καθιστούν κατάλληλα για κατεργασίες φινιρίσματος.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο ως ηλεκτρόδια είναι τα ακόλουθα [10, 11]:

- Χαλκός:

Είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό ηλεκτροδίων για EDM, λόγω της υψηλής ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας του. Έχει επίσης, καλή δομική ακεραιότητα, η οποία μπορεί να παράγει πολύ λεπτά επιφανειακά τελειώματα. Όμως, παρουσιάζει μερικά μειονεκτήματα, για παράδειγμα έχει μεγάλη ογκομετρική διαστολή, γεγονός που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τις συνθήκες έκπλυσης των σωματιδίων μακριά από το διάκενο. Ακόμα, έχει χαμηλό σημείο τήξης, που οδηγεί σε μεγαλύτερη φθορά. Ένα άλλο μειονέκτημα του χαλκού είναι ότι είναι ένα όλκιμο υλικό και παρουσιάζει δυσκολίες στην κατεργασία του με λειαντικούς τροχούς. Η προσθήκη τελλουρίου στον χαλκό βελτιώνει την κατεργασιμότητά του, αλλά αυξάνει τη φθορά του και μειώνει την ταχύτητα απομάκρυνσης του υλικού σε σύγκριση με τον καθαρό χαλκό. Ο χαλκός χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως το EDM των μετάλλων, των κεραμικών και των σύνθετων υλικών.

- Γραφίτης:

Είναι το δεύτερο πιο συνηθισμένο υλικό ηλεκτροδίων για EDM, λόγω των θερμικών και ηλεκτρικών του ιδιοτήτων, που συνδυάζονται με καλή μηχανική κατεργασία. Σε αντίθεση με τον χαλκό, ο γραφίτης έχει υψηλή αντοχή στη φθορά λόγω του υψηλού του σημείου τήξης. Ορισμένες παράμετροι, μοναδικές για το γραφίτη, είναι σημαντικές για τη διαδικασία EDM, δηλαδή το μέγεθος των

σωματιδίων (τα μικρότερα σωματίδια βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες του γραφίτη που έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερη φθορά των ηλεκτροδίων και καλύτερη τελική επιφάνεια του τεμαχίου), πορώδες, (το οποίο μπορεί να επηρεάσει τις ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες του), αντοχή σε κάμψη και σκληρότητα. Σε σχέση με το χαλκό, ο γραφίτης παρουσιάζει μερικά πλεονεκτήματα όπως ταχύτερη κοπή, χαμηλότερη φθορά και καλύτερη κατεργασιμότητα, ενώ μπορούν να επιτευχθούν συγκρίσιμα επιφανειακά τελειώματα ανάλογα με την τάξη του γραφίτη. Ένα μειονέκτημα του γραφίτη είναι ότι ο επεξεργασμένος γραφίτης παράγει μια μεγάλη ποσότητα σκόνης η οποία μπορεί να διεισδύσει στα εξαρτήματα της μηχανής, αυξάνοντας τη φθορά του εξοπλισμού και μειώνοντας τη ζωή του. Μέταλλα και κεραμικά μπορούν να κατεργαστούν με ηλεκτρόδιο γραφίτη σε EDM.

- Χαλκός-Βολφράμιο:

Σχεδιάστηκε για να συνδυάσει τις καλύτερες ιδιότητες του χαλκού (υψηλές ηλεκτρικές και θερμικές αγωγιμότητες) και του βολφραμίου (υψηλό σημείο τήξης), επιτυγχάνοντας ένα ηλεκτρόδιο χαμηλής φθοράς. Το ηλεκτρόδιο CuW κατασκευάζεται με τεχνικές κωνιομεταλλουργίας. Είναι ακριβότερα από τα ηλεκτρόδια γραφίτη και χαλκού και έτσι περιορίζονται σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως το EDM του WC-Co, οι οποίες είναι πιο δύσκολες στη χρήση με ηλεκτρόδια χαλκού.

- Ορείχαλκος:

Είναι από τα πρώτα υλικά ηλεκτροδίων για EDM που χρησιμοποιήθηκαν λόγω του χαμηλού κόστους και της εύκολης μηχανικής κατεργασίας με συμβατικές μεθόδους. Ωστόσο, λόγω του υψηλού ποσοστού φθοράς, σπάνια χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο και χρησιμοποιείται μόνο σε συγκεκριμένες εφαρμογές για παλαιότερες μηχανές με τροφοδοτικά RC, στα οποία η φθορά δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Η θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητά του δεν είναι τόσο καλή όσο του χαλκού, κατά συνέπεια αναμένεται χαμηλότερος ρυθμός απομάκρυνσης.

- Χαλκός-Γραφίτης:

Πρόκειται για λεπτής κοκκομετρίας γραφίτη διαποτισμένο με χαλκό. Έχει ιδιότητες χαλκού και γραφίτη και παρουσιάζει υψηλότερη ακαμψία, αυξημένη μηχανική αντοχή, αυξημένη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Αποδίδει καλό φινίρισμα επιφάνειας και επιτρέπει τη σταθερή κατεργασία σε δυσμενείς συνθήκες.

Λόγω του υψηλού ποσοστού φθοράς και το υψηλό κόστος, η χρήση του είναι περιορισμένη.

- Βολφράμιο:

Χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπως μικρο-EDM λόγω της υψηλής πυκνότητας, αντοχής εφελκυσμού και υψηλού σημείου τήξης. Από την άλλη πλευρά, έχει χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης υλικού. Είναι επίσης δύσκολο να κατεργαστεί και έχει υψηλό κόστος.

- Άργυρος:

Χρησιμοποιείται σπανίως ως υλικό EDM, αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι έχει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, δομική ακεραιότητα και χρησιμοποιείται όταν είναι επιθυμητές οι κατεργασίες φινιρίσματος. Οι ηλεκτρικές και θερμικές αγωγιμότητες του αργύρου είναι υψηλές, ανώτερες από το χαλκό, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές EDM. Ο συνδυασμός του χαμηλού σημείου τήξης του αργύρου, του υψηλού συντελεστή θερμικής διαστολής και του υψηλού κόστους περιορίζει τη χρήση του ως ηλεκτροδίου.

- Άργυρος-Βολφράμιο:

Παρασκευάζεται με κωνιομεταλλουργία και συνδυάζει την αντίσταση φθοράς του βολφραμίου με την υψηλή αγωγιμότητα του αργύρου, με αποτέλεσμα τη χαμηλή φθορά και την καλή ποιότητα επιφάνειας. Το εύρος των εφαρμογών είναι πολύ περιορισμένο λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής αυτών των υλικών.

- Καρβίδιο του Βολφραμίου:

Λόγω της υψηλής ακαμψίας του και των χαμηλών ιδιοτήτων φθοράς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό ηλεκτροδίου σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα ηλεκτρόδια αυτά, είναι πολύ εύθραυστα. Το καρβίδιο του βολφραμίου δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά ως ηλεκτρόδιο EDM σε σύγκριση με χαλκό ή γραφίτη.

- Αλουμίνιο:

Οι καλές ηλεκτρικές και θερμικές αγωγιμότητες, το χαμηλό κόστος και η κατεργασιμότητα του το καθιστούν κατάλληλο για EDM. Από την άλλη πλευρά, έχει ένα υψηλό συντελεστή διαστολής, οπότε διαστέλεται περισσότερο από άλλα ηλεκτρόδια κατά τη διάρκεια του EDM, και έχει χαμηλό σημείο τήξης, οδηγώντας σε μεγαλύτερη φθορά ηλεκτροδίου σε σχέση με τα άλλα ηλεκτρόδια. Ένα ακόμη

μειονέκτημα είναι η επιφανειακή οξείδωση του ηλεκτροδίου. Αυτά τα μειονεκτήματα περιορίζουν τη χρήση του.

- Τελλούριο-Χαλκός:

Η προσθήκη 0.5-3% τελλουρίου σε χαλκό βελτιώνει την κατεργασιμότητα του χαλκού σε επίπεδο παρόμοιο με του ορείχαλκου.

Στον Πίνακα 1 γίνεται μια σύγκριση ανάμεσα στα μεταλλικά και τα ηλεκτρόδια γραφίτη. Στον Πίνακα 2 παρατίθενται ορισμένες προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίες για κάποια τυπικά υλικά [12]. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται η επίδραση του υλικού του ηλεκτροδίου στο αποτέλεσμα–αποδοτικότητα της κατεργασίας [13].

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταλλικών ηλεκτροδίων και ηλεκτροδίων γραφίτη [12].

ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΓΡΑΦΙΤΗ
Χαμηλό κόστος	Υψηλό κόστος
Υψηλή αντοχή	Υψηλή αντοχή
Υψηλή ασφάλεια κατά τη κατεργασία	Χαμηλότερη ασφάλεια τη κατεργασίας
Δεν απαιτείται έμπειρος χειριστής	Χρειάζεται πεπειραμένο χειριστή
Σχετικά καθαρές επιφάνειες–φινίρισμα	Παραμένουσα σκόνη μετά τη κατεργασία
Μικρές δυνατότητες λείανσης	Υψηλή κατεργασιμότητα
Χαμηλότερες ταχύτητες κατεργασίας και ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)	Υψηλές ταχύτητες κατεργασίας και ρυθμός αποβολής (MRR)
Υψηλός σχετικά ρυθμός φθοράς	Εξαιρετική αντοχή σε φθορά

Πίνακας 2: Ορισμένες προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίες για τυπικά υλικά [12].

ΤΕΜΑΧΙΟ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ	ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
			ΓΙΑ ΞΕΧΟΝΔΡΙΣΜΑ	ΓΙΑ ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ
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
Κράμα Cu-W	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή

Πίνακας 3: Αποδοτικότητα – αποτελεσματικότητα κατεργασίας για διαφορετικά υλικά ηλεκτροδίων [13].

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ EDM	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΓΡΑΦΙΤΗ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΧΑΛΚΟΥ (Cu)	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΧΑΛΚΟΥ- ΒΟΛΦΡΑΜΙΟΥ (CuW)	
Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)	Υψηλός	Μεσαίος		Χαμηλός
Λογος φθοράς εργαλείου (EWR)	Μεσαίος	Υψηλός		Χαμηλός
Τραχύτητα R_a	Υψηλή τραχύτητα με κακή ποιότητα επιφανείας	Χαμηλή τραχύτητα με βέλτιστη ποιότητα επιφανείας		Μέση Τραχύτητα

1.4.3. Διηλεκτρικό μέσο

Καθώς, το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο εργασίας είναι ηλεκτρικά αγώγιμα στο EDM, κατά την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού θα υπήρχε η δημιουργία ανεξέλεγκτων σπινθήρων χωρίς την παρουσία διηλεκτρικού. Το διηλεκτρικό υλικό λειτουργεί ως μονωτής, με τη διηλεκτρική σταθερά του να σπάει κατά τη διάρκεια της εφαρμογής διαφοράς δυναμικού επιτρέποντας στον σχηματισμό ελεγχόμενου σπινθήρα ο οποίος απομακρύνει το υλικό από το τεμάχιο εργασίας. Το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο είναι βυθισμένα μέσα στο διηλεκτρικό υγρό, το οποίο εκτός από μονωτής λειτουργεί και ως ψυκτικό μέσο και βοηθά στην έκπλυση των θραυσμάτων από την κατεργασμένη ζώνη. Για το λόγο αυτό, η επιλογή του διηλεκτρικού μέσου αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα στη λειτουργία του die sinking EDM. Οι σημαντικές ιδιότητες του διηλεκτρικού που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή είναι η χημική συνθεση, το ιζώδες, η υψηλή διηλεκτρική σταθερά και ο ρυθμός ψύξης [4]. Τα πιο συνηθισμένα διηλεκτρικά υγρά που χρησιμοποιούνται είναι το απιονισμένο νερό και προϊόντα πετρελαίου [8]. Μια συγκριτική μελέτη για την απόδοση του απιονισμένου νερού και του ελαίου ως διηλεκτρικό υγρό παρέχεται στον Πίνακα 4.

- Απιονισμένο νερό:

Καθώς παρασύρει τα σωματίδια της κατεργασίας καθίσταται αγώγιμο με τις διηλεκτρικές του ιδιότητες να μεταβάλλονται. Η αλλαγή αυτή επηρεάζει και το σημείο ιονισμού, το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει την αξιοπιστία, αποτελεσματικότητα και σταθερότητα της κατεργασίας. Παρόλο που φαίνεται πως δεν αποτελεί σωστή επιλογή ως διηλεκτρικό μέσο, χρησιμοποιείται συνήθως στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, όπου το τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο δεν βρίσκονται βυθισμένα στο μέσο, αλλά το διηλεκτρικό υγρό με υψηλή ταχύτητα περιβάλλει το σημείο του σπινθήρα και έπειτα να επιστρέφει στη μονάδα συλλογής για καθαρισμό. Έτσι, το απιονισμένο νερό απλά διέρχεται από την περιοχή του σπινθήρα και οι ιδιότητές του παραμένουν σε επιτρεπτά όρια.

- Προϊόντα πετρελαίου:

Είναι υλικά άμεσα διαθέσιμα προς χρήση και δημιουργούν ένα ελεγχόμενο περιβάλλον γύρω από το σημείο του σπινθήρα. Τα συγκεκριμένα έλαια διατηρούν τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους κατά τη διάρκεια εκδήλωσης του σπινθήρα, με την εκλύμενη από το σπινθήρα θερμότητα να διασπά το διηλεκτρικό μέσο σε υδρογόνο,

άνθρακα και αλλά υποπροϊόντα, ενώ ταυτόχρονα δεν επηρεάζονται από την παρουσία υπολειμμάτων–κατακρημνισμάτων. Η ηλεκτρική αυτή σταθερότητα, που παρουσιάζουν τα καθιστά ιδανική επιλογή για την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης.

Οι βασικές λειτουργίες που παρέχει το διηλεκτρικό υγρό σε μια κατεργασία EDM είναι οι εξής [14]:

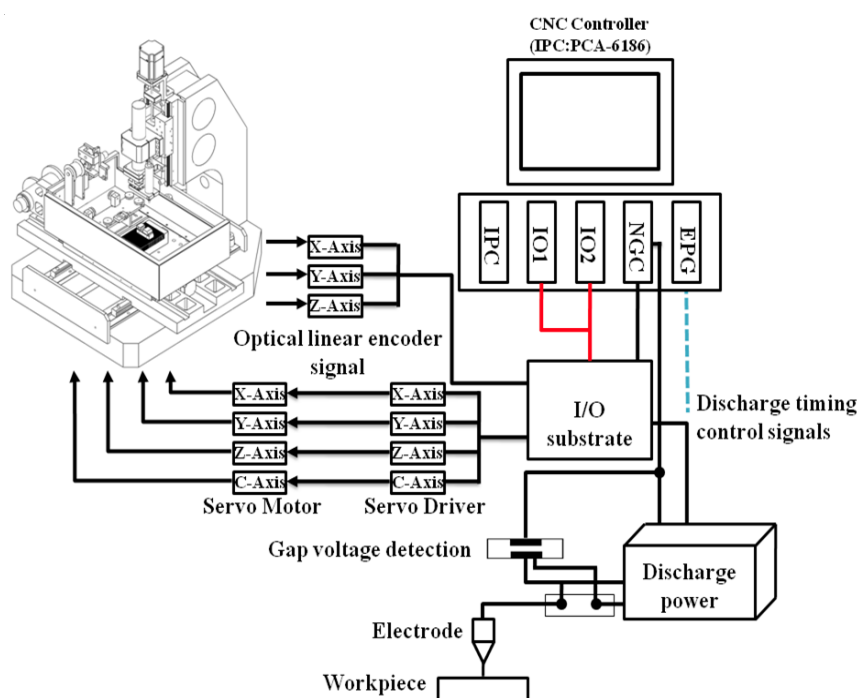
- Η δημιουργία διακένου ορισμένης διηλεκτρικής σταθεράς
- Η ψύξη του ηλεκτροδίου και τεμαχίου
- Η ψύξη των αποβλήτων της κατεργασίας
- Η απομάκρυνση από το διάκενο των αποβλήτων

Πίνακας 4: Σύγκριση ελαίου και απιονισμένου νερού ως διηλεκτρικό μέσο στην ηλεκτροδιάβρωση βύθισης.

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

1.4.4. Μηχανισμός κίνησης στους άξονες X–Y

Η δυνατότητα κίνησης X-Y του ηλεκτροδίου ή του τεμαχίου εργασίας είναι απαραίτητη για τις περισσότερες εφαρμογές. Αυτή η κίνηση μπορεί να επιτευχθεί είτε με την κίνηση της τράπεζας, άρα και του τεμαχίου, είτε με ένα σύστημα που κινεί ολόκληρη την servo κεφαλή (η δεύτερη περίπτωση συναντάται κυρίως σε σύγχρονες CNC εργαλειομηχανές). Απαιτείται ακρίβεια κίνησης η οποία συνδέεται άμεσα με την επιθυμητή διαστασιολογική ακρίβεια του κατεργασμένου τεμαχίου. Τέλος, πρέπει να υπάρχει λειτουργικός μηχανισμός πρόσδεσης και στήριξης του τεμαχίου [8].



Εικόνα 1.4. Γραφική απεικόνιση του μηχανισμού κίνησης σε μηχανή die sinking EDM [4].

1.4.5. Δοχείο-δεξαμενή εργασίας

Το δοχείο εργασίας περιέχει το διηλεκτρικό υγρό όπου το τεμάχιο εργασίας είναι βυθισμένο, εξασφαλίζει ότι το διηλεκτρικό μέσο ανανεώνεται συνεχώς και ότι υπάρχει και διατηρείται η επιθυμητή στάθμη στο υγρό. Διακόπτης στάθμης εξασφαλίζει ότι το σύστημα δεν θα τεθεί σε λειτουργία πριν την καθορισμένη στάθμη, και διακόπτης υπερχειλίσσης προστατεύει από υπερβολικά υψηλή στάθμη υγρού. Επίσης, θερμοστάτης διακόπτει την λειτουργία σε περίπτωση που η θερμοκρασία υπερβεί προκαθορισμένη ανώτατη τιμή [8].

1.4.6. Σερβομηχανισμός ελέγχου

Ο σερβομηχανισμός ελέγχου αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο της κατεργασίας. Είναι ένα αυτοματοποιημένο σύστημα που διατηρεί τη σωστή απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου, ώστε να υπάρχει σταθερότητα και αποδοτικότητα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, να προστατεύεται η προς κατεργασία επιφάνεια, αλλά και να επιτυγχάνεται διαστασιολογική ακρίβεια κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί αποτελεσματικά με ένα ευρύ φάσμα ηλεκτροδίων που κυμαίνονται από μερικά μικρά έως αρκετά εκατοστά [4].

Οι απαιτήσεις από το σερβομηχανισμό είναι [8]:

- Το ηλεκτρόδιο δεν πρέπει να έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο εργασίας
- Το ηλεκτρόδιο πρέπει να προωθείται και να αποσύρεται από το τεμάχιο εργασίας για να διατηρεί τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου σταθερή.

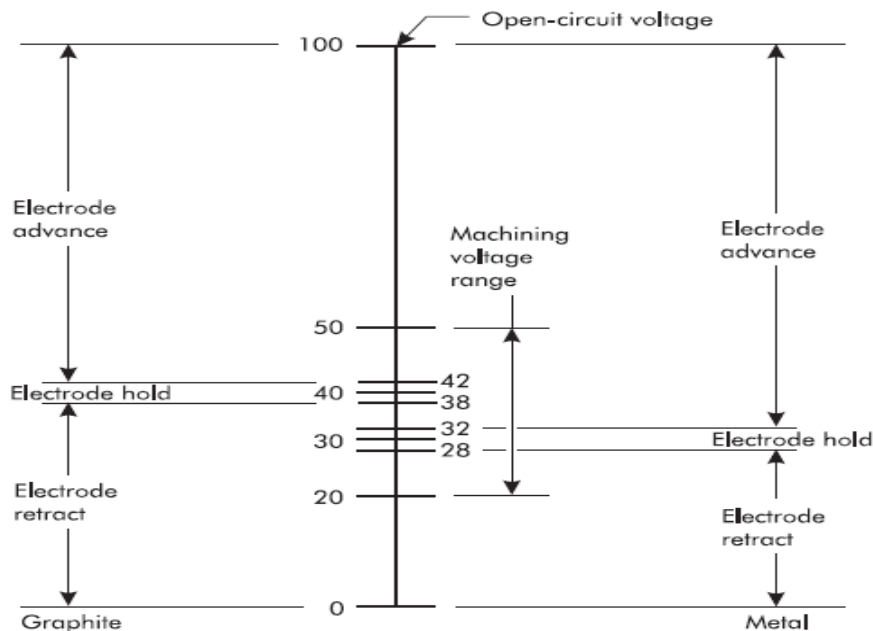
Το σύστημα πρόωσης-απόσυρσης που χρησιμοποιείται για την κίνηση της σερβοκεφαλής, μπορεί να είναι είτε ένα ηλεκτρικό μοτέρ, είτε μια υδραυλική μονάδα. Το σύστημα που χρησιμοποιείται εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και το βάρος των ηλεκτροδίων. Μεγάλες εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούν βαριά ηλεκτρόδια συνήθως χρησιμοποιούν υδραυλικά συστήματα και εκείνα που χρησιμοποιούν μικρότερα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούν ηλεκτρικά μοτέρ [8].

Ο σερβομηχανισμός χρησιμοποιεί τις ηλεκτρικές ιδιότητες του διηλεκτρικού για την λειτουργία του. Το διηλεκτρικό μέσο ενεργεί ως ηλεκτρικός μονωτής μέχρις ότου η διαφορά δυναμικού και η απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου φθάσουν στο σημείο ιονισμού του διηλεκτρικού μέσου. Το διηλεκτρικό υγρό στη συνέχεια αλλάζει από μονωτή σε ηλεκτρικό αγωγό, προκαλώντας την πτώση της διαφοράς δυναμικού από διαφορά δυναμικού ανοιχτού κυκλώματος σε διαφορά δυναμικού σπινθήρα, η οποία βρίσκεται στην περιοχή των 20–50 VDC. Ο σερβομηχανισμός ελέγχου ρυθμίζεται με βάση ένα δυναμικό αναφοράς, το οποίο βρίσκεται σε αυτό το εύρος τιμών. Η απόκλιση ανάμεσα στο δυναμικό αναφοράς και το πραγματικό δυναμικό κατεργασίας χρησιμοποιείται, ώστε το σύστημα σερβομηχανισμού–ηλεκτροδίου να απομακρυνθεί, να πλησιάσει ή να παραμείνει σταθερό σε σχέση με το τεμάχιο [8].

Ο σχεδιασμός του σερβομηχανισμού μπορεί να αποδοθεί ως εξής [8]:

1. Το σύστημα προωθεί το ηλεκτρόδιο προς το τεμάχιο όταν το δυναμικό λειτουργίας είναι υψηλότερο του προκαθορισμένου άνω ορίου αναφοράς
2. Το σύστημα παραμένει σταθερό για δυναμικά λειτουργίας εντός του εύρους αναφοράς
3. Το σύστημα απομακρύνει το ηλεκτρόδιο από το τεμάχιο για δυναμικά λειτουργίας χαμηλότερα του κατώτατου ορίου αναφοράς

Συνήθως ως δυναμικό αναφοράς (V_{th}) για μεταλλικό ηλεκτρόδια ορίζεται τα 30 VDC, ενώ για ηλεκτρόδια από γραφίτη ορίζεται στα 40 VDC (Εικόνα 1.7.), καθώς η χρήση σε ηλεκτρόδια γραφίτη, δυναμικό αναφοράς 30 VDC, προκαλεί μια ανεπιθύμητη κατάσταση λειτουργίας γνωστή ως “DC arcing”.



Εικόνα 1.7. Τυπικά εύρη τιμών δυναμικού αναφοράς για μεταλλικό ηλεκτρόδιο και ηλεκτρόδιο γραφίτη [8].

1.4.6.1. Ηλεκτρικό μοτερ

Το ηλεκτρικό μοτερ συνδέεται απευθείας με έναν κοχλία ακριβείας, ενώ το περικόχλιο είναι προσαρμοσμένο στον κινούμενο άξονα της μηχανής. Δεν πρέπει να υπάρχει καμία παλινδρόμηση σε όλο το σύστημα, από τον κινητήρα έως και τον κινούμενο άξονα στον οποίο είναι τοποθετημένο το ηλεκτρόδιο. Έτσι, με κάθε κίνηση του μοτέρ θα υπάρχει η ανάλογη και προβλεπόμενη κίνηση στον άξονα και το ηλεκτρόδιο, με αποφυγή οποιασδήποτε ανεπιθύμητης αστάθειας κατά τη λειτουργία. Σε αρκετά συστήματα servo μηχανισμού με ηλεκτρικό κινητήρα χρησιμοποιούνται κοχλίες με σφαιρικά έδρανα κύλισης σε προένταση για την μεταφορά της κίνησης

από το μοτέρ στον άξονα. Τέτοια συστήματα έχουν το πλεονέκτημα της χαμηλής τριβής επιτρέποντας την ελεύθερη περιστροφική κίνηση δίχως ανάπτυξη επιπλέον φορτίου κατά την εκκίνηση. Ελαχιστοποιείται με αυτόν τον τρόπο η πιθανότητα κάποιας αναπήδησης του ηλεκτροδίου, καθώς ο κινητήρας, σε διαφορετική περίπτωση, θα χρειαζόταν να υπερνικήσει τη στατική τριβή, αναπτύσσοντας επιπλέον φορτίο. Η προένταση τέλος χρησιμοποιείται για μηδενισμό της παλινδρόμησης του συστήματος [8].

1.4.6.2. Υδραυλικό σύστημα

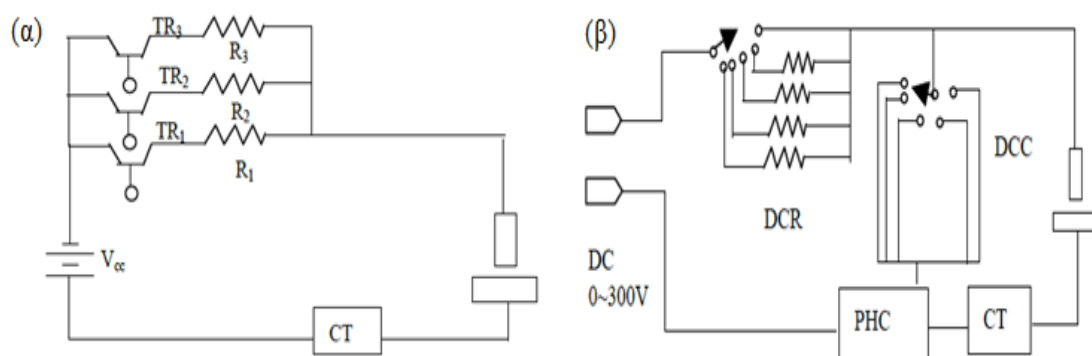
Ο υδραυλικός σερβομηχανισμός είναι απαλλαγμένος από παλινδρόμηση. Όταν ασκείται πίεση από το ρευστό στην μία πλευρά του υδραυλικού εμβόλου, ρευστό εισέρχεται από αυτή τη πλευρά στον κύλινδρο και εξέρχεται από την άλλη, με το έμβολο, μαζί με το βάκτρο να πραγματοποιούν την ανάλογη κίνηση. Όταν δεν υπάρχει ούτε είσοδος, ούτε έξοδος ρευστού από το κύλινδρο το σύστημα παραμένει σταθερό.

Η ροή του ρευστού προς και από τον κύλινδρο, ελέγχεται με σερβοβαλβίδες, οι οποίες με τη σειρά τους ελέγχονται ηλεκτρονικά από τη μονάδα του σερβομηχανισμού. Το σύστημα πρέπει να παραμένει στατικό, εκτός των περιπτώσεων, που του δίνεται η εντολή να κινηθεί. Στα περισσότερα σερβο-υδραυλικά συστήματα υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των βαλβίδων για να διατηρούν στατικό το σύστημα και συνήθως αναφέρεται ως μηδενική θέση. Είναι εξαιρετικά σημαντική η περίπτωση, που το υδραυλικό ρευστό αλλάζει θερμοκρασία, καθώς μπορεί να προκληθεί κίνηση του εμβόλου ανεξάρτητη από τη λειτουργία των βαλβίδων, αλλά λόγω αλλαγής των ιδιοτήτων του ρευστού. Αυτό ονομάζεται drift και λαμβάνεται υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό των συστημάτων από τους κατασκευαστές [8].

1.4.7. Μονάδα παροχής ισχύος–Γεννήτρια παλμών

Τα κυριότερα συστατικά μέρη της μονάδας παροχής ισχύος είναι η πηγή συνεχούς ρεύματος, ο σερβομηχανισμός, ο διανομέας εναλλασσόμενου ρεύματος και η μονάδα προστασίας ηλεκτρικού τόξου συνεχούς ρεύματος. Υπάρχουν κυρίως δύο κύριοι τύποι γεννήτριας παλμών: (α) αντιστάτη-πυκνωτή (RC) και (β) με τη χρήση τρανζίστορ ή ηλεκτρονικών διακοπών.

Μια γεννήτρια παλμών τύπου τρανζίστορ, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.8.(α), αποτελείται από διάφορα τρανζίστορ (TR), αντιστάσεις για το περιορισμό της έντασης του ρεύματος (R) καθώς και από έναν μετασχηματιστή ρεύματος (CT). Οι αντιστάσεις και τα τρανζίστορ συνδέονται παράλληλα μεταξύ της μονάδας παροχής ισχύος συνεχούς ρεύματος και του διάκενου παραγωγής σπινθήρων. Η ένταση ρεύματος αυξάνει ανάλογα με τον αριθμό των τρανζίστορ που ενεργοποιούνται (ανάβουν- switched on) ταυτόχρονα. Η λειτουργία ON-OFF ελέγχεται από τρανζίστορ πεδίου (Field Effect Transistor).



Εικόνα 1.8. (α) Διαγραμματική αναπαράσταση γεννήτριας παλμών με χρήση τρανζίστορ και (β) Διαγραμματική αναπαράσταση γεννήτριας παλμών με αντιστάσεων – πυκνωτών [4].

Η γεννήτρια παλμών τύπου τρανζίστορ είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη γεννήτρια παλμών για EDM βύθισης. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της γεννήτριας παλμών τύπου τρανζίστορ είναι ότι η διάρκεια και η συχνότητα των παλμών μπορούν να ελεγχθούν με ακρίβεια μέσω ηλεκτρονικών διακοπών ON/OFF. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα παροχής-δημιουργίας υψηλής ενέργειας σπινθήρων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αυξημένος ρυθμός αποβολής υλικού κατά τη κατεργασία.

Τα κύρια μέρη μιας παλμογεννήτριας αντιστάσεων-πυκνωτών (Εικόνα 1.8.(β)), είναι οι αντιστάσεις ελέγχου της ηλεκτρικής εκκένωσης, οι πυκνωτές ελέγχου της ηλεκτρικής εκκένωσης, το κύκλωμα ελέγχου μέγιστης έντασης, και ο μετασχηματιστής ρεύματος (CT). Σε ένα κύκλωμα τύπου RC, η διάρκεια παλμού ορίζεται από την χωρητικότητα των πυκνωτών και την αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσης του πυκνωτή με το τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο. Η συχνότητα παλμών εξαρτάται από το χρόνο φόρτισης που ελέγχεται από την αντίσταση (R) που επιλέγεται να χρησιμοποιείται κάθε φορά στο κύκλωμα. Επομένως, η αντίσταση ‘R’

δεν πρέπει να έχει πολύ χαμηλές τιμές, επειδή μπορεί να προκύψει φαινόμενο του ηλεκτρικού τόξου αντί για ηλεκτρική εκκένωση. Η ενέργεια εκκένωσης ορίζεται από τον πυκνωτή που χρησιμοποιείται, αλλά και από τους πυκνωτές, που δημιουργούνται στη διάταξη συγκράτησης του ηλεκτροδίου, στην τράπεζα εργασίας και ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο.

Αν και η γεννήτρια παλμών τύπου RC ήταν ο πρώτος τύπος γεννήτριας παλμών που χρησιμοποιήθηκε στο EDM, η ενέργεια εκκένωσης που παράγεται από τον τύπο RC είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό, είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί πολύ υψηλός ρυθμός αποβολής υλικού από τη γεννήτρια παλμών τύπου RC. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται ευρύτερα στις κατεργασίες μικρο-EDM λόγω της ικανότητάς της να παράγουν σπινθήρες πολύ χαμηλής ενέργειας [4].

1.4.8. Σύστημα κυκλοφορίας διηλεκτρικού μέσου και έκπλυσης

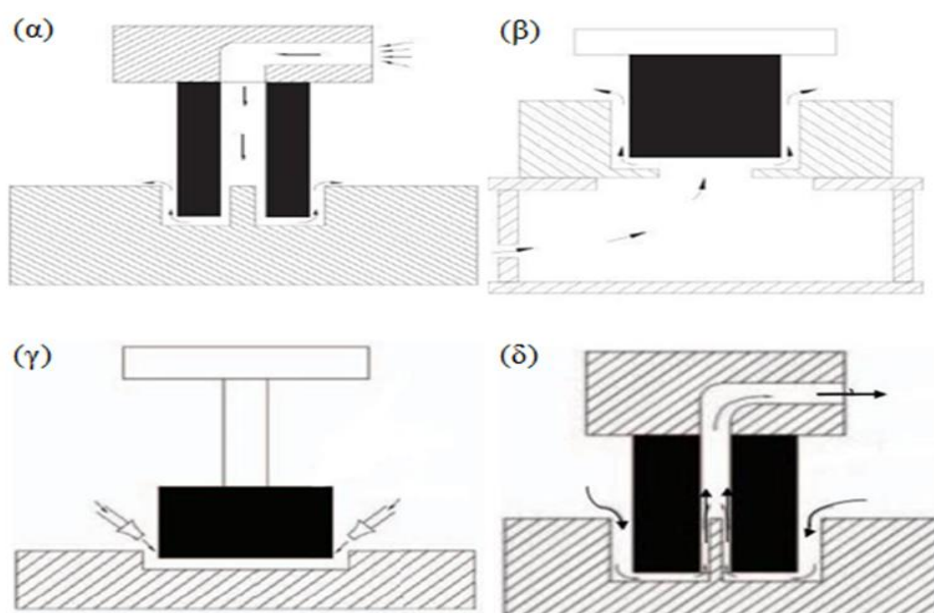
Το σύστημα κυκλοφορίας διηλεκτρικού μέσου και έκπλυσης είναι υπεύθυνο για την έκπλυση των προϊόντων κατεργασίας και την παροχή φρέσκου διηλεκτρικού στη ζώνη κατεργασίας. Τα βασικά μέρη του συστήματος είναι δεξαμενή του διηλεκτρικού μέσου, αντλία, φίλτρο, εγκατάσταση από σωληνώσεις και ακροφύσια. Η αντλία χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του διηλεκτρικού μέσου στο δοχείο εργασίας και το φίλτρο χρησιμοποιείται για να συγκρατεί τα απόβλητα από το διηλεκτρικό μέσο και να εξασφαλίσει την επανακυκλοφορία του φρέσκου διηλεκτρικού στη ζώνη κατεργασίας. Όσο καλύτερες είναι οι συνθήκες έκπλυσης, τόσο μικρότερα νεκρά χρονικά μεσοδιαστήματα (T_{off}) χρειάζονται και άρα καθίσταται η κατεργασία πιο αποδοτική. Οι βασικές λειτουργίες του συστήματος κυκλοφορίας και απόπλυσης είναι οι εξής [4]:

- Να παροχετεύει το διηλεκτρικό μέσο στο διάκενο εκδήλωσης σπινθήρα προκειμένου να απομακρυνθούν αέρια και στερεά κατακρημνίσματα-απόβλητα.
- Να διοχετεύει με φρέσκο-καθαρό διηλεκτρικό μέσο την περιοχή κοπής.
- Να διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία του διηλεκτρικού μέσου πολύ χαμηλότερα από το σημείο εξάχνωσης-ανάφλεξης .
- Να λειτουργεί ως σύστημα ψύξης ηλεκτροδίου-τεμαχίου.

Στην ηλεκτροδιάβρωση βύθισης τόσο το ηλεκτρόδιο όσο και το τεμάχιο εργασίας παραμένουν βυθισμένα στο διηλεκτρικό και η έκπλυση συμβαίνει εξαιτίας

της κίνησης του ηλεκτροδίου. Κατά τη διάρκεια της κίνησης του ηλεκτροδίου, δημιουργείται στροβιλισμός στο ρευστό στο διάκενο μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου για να αφαιρεθούν τα προϊόντα της κατεργασίας [4]. Οι τρεις βασικοί τύποι έκπλυσης (Εικόνα 1.10.), οι οποίοι επιλέγονται ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε κατεργασίας, είναι οι εξής [15]:

- Έκπλυση με πίεση ή μέσω έγχυσης
- Έκπλυση μέσω αναρρόφησης
- Έκπλυση με δέσμη jet ή πλάγια έκπλυση



Εικόνα 1.10. Μέθοδοι έκπλυσης (α) με πίεση και παροχή του ρευστού μέσω του ηλεκτροδίου, (β) Με πίεση και παροχή του ρευστού μέσω του τεμαχίου, (γ) Με δέσμη jet και (δ) Με αναρρόφηση [15].

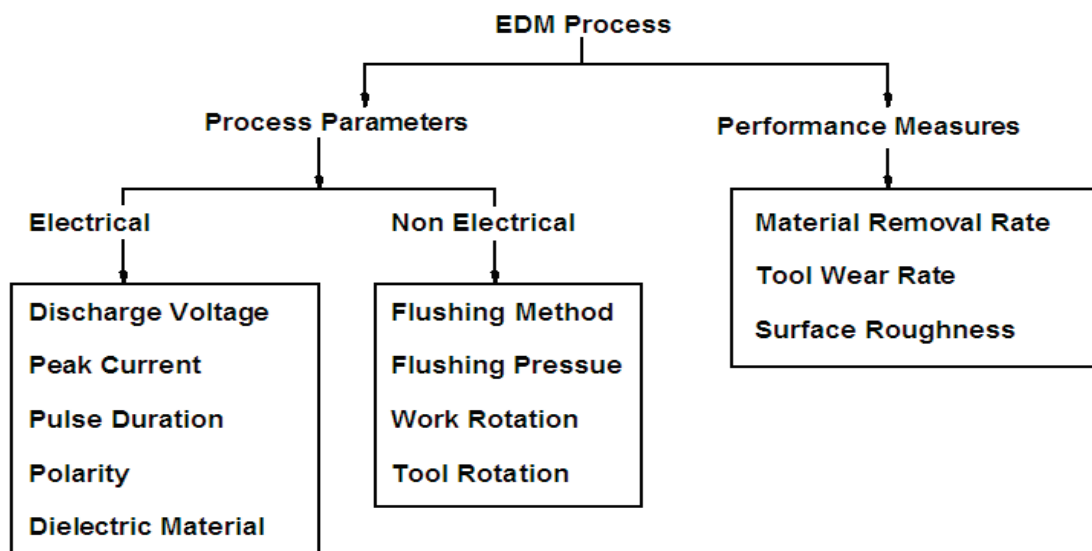
Η πίεση του ρευστού είναι μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο EDM. Σε πολύ χαμηλές πιέσεις είναι δύσκολη η απομάκρυνση στερεών και αέριων προϊόντων της κατεργασίας, ενώ υψηλές πιέσεις επιταχύνουν την φθορά του ηλεκτροδίου και δημιουργούν ανεπιθύμητους στροβιλισμούς. Επίσης, επηρεάζεται και η ποιότητα επιφανείας ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη πίεση. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται πως επιδρά η πίεση της έκπλυσης τους παραμέτρους της κατεργασίας [4].

Πίνακας 5: Μεταβολή παραμέτρων κατεργασίας συναρτήσει της πίεσης απόπλυσης [4].

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

1.5. Παράμετροι κατεργασίας

Οι παράμετροι της κατεργασίας χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις παραμέτρους ελέγχου και τις παραμέτρους απόδοσης κατεργασίας [16].



Εικόνα 1.11. Παράμετροι ελέγχου και παράμετροι απόδοσης της EDM κατεργασίας [17].

1.5.1. Παράμετροι ελέγχου

Ένα θεμελιώδες μέγεθος που ορίζει την κατεργασία είναι η ενέργεια ανά παλμό, η οποία και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_p = V_p * I_p * T_{on} \quad (1.1)$$

Όπου V_p = η διαφορά δυναμικού σε κάθε παλμό, I_p = η ένταση του ρεύματος σε κάθε παλμό, T_{on} = ο χρόνος εκδήλωσης σπινθήρα.

1.5.1.1. Διαφορά δυναμικού

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου κατά την κατεργασία. Υψηλότερες τιμές διαφοράς δυναμικού, οδηγούν σε μεγαλύτερο διάκενο μεταξύ ηλεκτροδίου-τεμαχίου, γεγονός που βελτιώνει τις συνθήκες έκπλυσης και συμβάλλει στη σταθεροποίηση της κατεργασίας. Ο ρυθμός αποβολής υλικού, ο ρυθμός φθοράς του εργαλείου και η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνονται, καθώς, αυξάνεται η διαφορά δυναμικού [18].

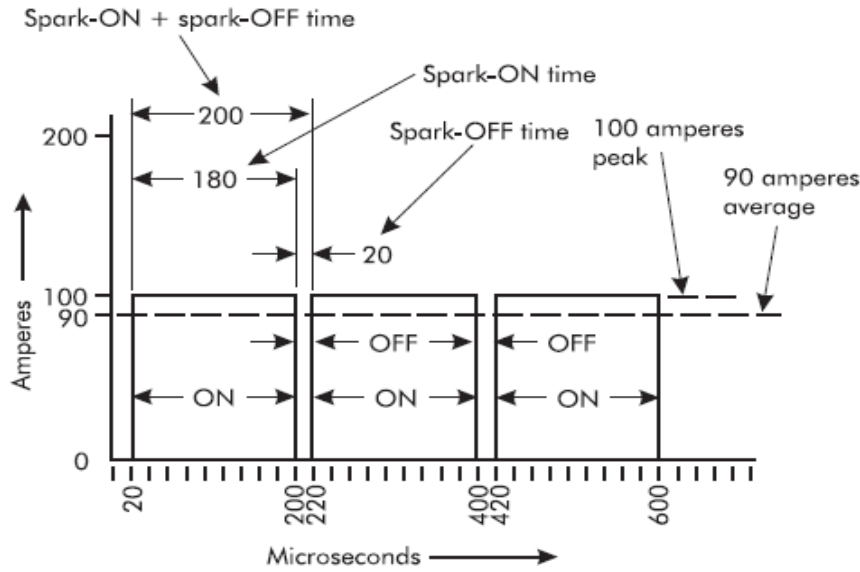
1.5.1.2. Ένταση ρεύματος

Μια από της σημαντικότερες παραμέτρους της ηλεκτροδιάβρωσης αποτελεί η ένταση ρεύματος κατά τη διάρκεια του παλμού. Η ένταση ρεύματος είναι υπεύθυνη για τη διάσπαση του διηλεκτρικού που παράγει την ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για την αφαίρεση των υλικών από το τεμάχιο εργασίας. Όσο υψηλότερη είναι η ένταση του ρεύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται ανά παλμό. Τα υψηλότερα ρεύματα οδηγούν σε μεγαλύτερο MRR, αλλά και σε επιφάνειες με μεγαλύτερη τραχύτητα [4, 16]. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι η ένδειξη στο αμπερόμετρο αποτελεί το μέσο όρο έντασης του ρεύματος κατεργασίας και όχι τη μέγιστη τιμή έντασης ρεύματος (Εικόνα 1.12) [8]. Ο υπολογισμός της μέσης έντασης υπολογίζεται ως εξής:

$$\bar{I}_p = \frac{1}{T_{on} + T_{off}} * \int_0^{T_{on} + T_{off}} I(t) dt \quad (1.2)$$

Ενώ, για ορθογωνικό παλμό, η μέση ένταση ρεύματος υπολογίζεται από τη Σχέση 1.3:

$$\bar{I}_p = I_p * \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = I_p * \eta \quad (1.3)$$



Εικόνα 1.12. Υπολογισμός μέσης έντασης ρεύματος [8].

1.5.1.3. Διάρκεια παλμού (T_{on}) και μεσοδιάστημα (T_{off})

Διάρκεια παλμού ορίζεται ως η χρονική περίοδος κατά την οποία υπάρχει ροή ρεύματος μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας, πραγματοποιείται η διηλεκτρική διάσπαση και τελικά γίνεται η αφαίρεση του υλικού. Άρα, ο ρυθμός απομάκρυνσης του υλικού είναι ανάλογος της διάρκειας παλμού. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια του παλμού, τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα που διέρχεται και συνεπώς οι κρατήρες είναι με μεγάλη διάμετρο και βαθύτεροι. Ως εκ τούτου, η επιφάνεια θα έχει μεγαλύτερη τραχύτητα. Για παλμούς μικρότερης διάρκειας, η τραχύτητα της επιφάνειας είναι μικρότερη [4].

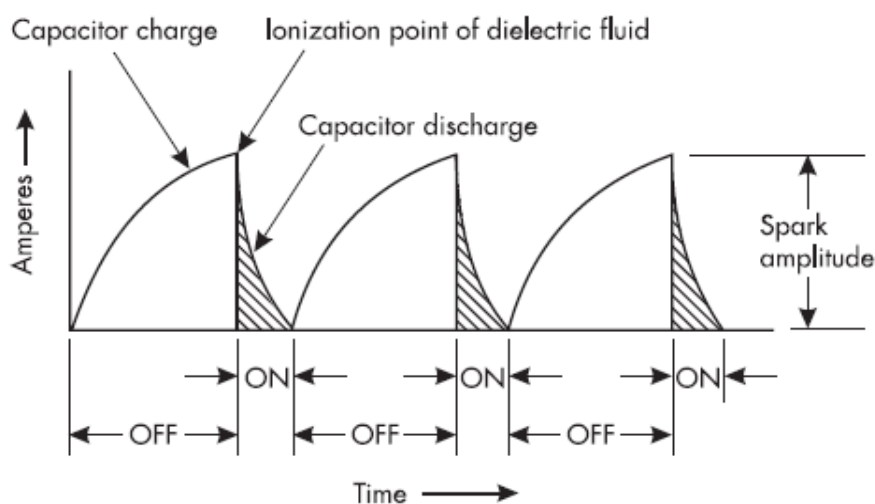
Παρόλο που η υψηλότερη διάρκεια παλμού είναι καλύτερη για την ταχύτερη κατεργασία, η υψηλή διάρκεια παλμού καθιστά τη κατεργασία ασταθής. Όταν ξεπεραστεί η βέλτιστη διάρκεια παλμού για κάθε συνδυασμό ηλεκτροδίου-τεμαχίου, ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού αρχίζει να μειώνεται. Επιπλέον, η υψηλή διάρκεια παλμού μπορεί να οδηγήσει στη μη φθορά του ηλεκτροδίου και με περαιτέρω αύξηση της, προκαλεί την αύξηση του πάχους του ηλεκτροδίου λόγω της σχηματιζόμενης επίστρωσης [18].

Κατά τη διάρκεια του διαστήματος δύο παλμών, το ρεύμα που ρέει διαμέσου του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας κόβεται και συνεπώς δεν υπάρχει σπινθήρισμα κατά τη διάρκεια του διαστήματος παλμών. Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο παλμών ορίζεται ως μεσοδιάστημα. Σε αυτό το χρονικό διάστημα

πραγματοποιείται η απομάκρυνση των αποβλήτων από τη ζώνη κατεργασίας. Όσο υψηλότερες είναι οι τιμές του μεσοδιαστήματος, τόσο πιο αργή είναι η ταχύτητα της κατεργασίας. Όμως, πολύ χαμηλό μεσοδιάστημα καθιστά τη διαδικασία κατεργασίας ασταθής. Οι συνηθισμένοι χρόνοι του μεσοδιαστήματος, αλλά και της διάρκειας παλμού είναι της τάξης των μsec [4].

1.5.1.4. Κυματομορφή (Pulse Waveform)

Η ροή της ενέργειας προς το τεμάχιο περιγράφεται μέσω των κυματομορφών. Αναλογα με τον τύπο της γεννήτριας παλμών, η κυματομορφή διαφοροποιείται. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση κυκλωμάτων με χρήση ηλεκτρονικών διακοπών (electronic switch on/off), οι παλμοί είναι ορθογώνιοι όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.12. Ομως, η κυματομορφή του παλμού σε περίπτωση που η εργαλειομηχανή EDM έχει κύκλωμα R/C να διαφοροποιείται και έχει τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 1.13 [18].



Εικόνα 1.13. Κυματομορφή με παροχή ισχύος από κύκλωμα R/C [8].

Τα κυκλώματα switch on/off παρέχουν μεγαλύτερη απόδοση για τις περισσότερες εφαρμογές EDM και είναι ο τύπος που χρησιμοποιείται περισσότερο. Τα κυκλώματα R/C έχουν μέγιστο όριο ρεύματος περίπου 15 A. Επίσης, χρησιμοποιούνται κυρίως με μεταλλικά ηλεκτρόδια. Συνεπώς, τα κυκλώματα R/C λειτουργούν καλά για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλότερη ενέργεια, με σκοπό την πολύ καλή ποιότητα επιφανείας και την υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια [8].

1.5.1.5. Πολικότητα

Η πολικότητα του ηλεκτροδίου μπορεί να είναι θετική ή αρνητική και αυτό καθορίζει την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος από ή προς το ηλεκτρόδιο. Η επιλογή της πολικότητας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το υλικό του ηλεκτροδίου και το υλικό του τεμαχίου, την ένταση ρεύματος και τη διάρκεια του παλμού. Η θετική πολικότητα του ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται γενικά στην ηλεκτροδιάβρωση εξαιτίας της μικρότερης φθοράς του ηλεκτροδίου και καθιστά την κατεργασία πιο σταθερή για συγκεκριμένα υλικά ηλεκτροδίου και τεμαχίου, αλλά μειώνει το ρυθμό αποβολής υλικού σε σχέση με χρήση ηλεκτροδίου αρνητικής πολικότητας [6, 18].

1.5.1.6. Έλεγχος διακένου

Βασικός στόχος του ακριβούς ελέγχου διακένου είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού αποβολής υλικού (MRR) και η εξασφάλιση υψηλής ποιότητας κατεργασμένης επιφάνειας. Εάν η απόσταση κενού είναι πολύ μικρή, το ποσοστό των παλμών που δεν εκδηλώνουν κανονικό σπινθήρα αυξάνεται, αλλά φαινόμενα ηλεκτρικού τόξου καθιστώντας, έτσι, την κατεργασία ασταθή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού αποβολής υλικού και την αύξηση του λόγου φθοράς εργαλείου (TWR). Σε περιπτώσεις μεγαλύτερου από το προβλεπόμενο διακένου, αυξάνεται το ποσοστό των παλμών που δεν οδηγούν σε σπινθήρα και, έτσι, μειώνεται και εδώ ο MRR [4].

1.5.2. Παράμετροι απόδοσης

1.5.2.1. Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)

Ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR) ορίζεται ως ο όγκος του υλικού που απομακρύνεται κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Το MRR εκφράζεται πιο συχνά από τη μονάδα [mm^3/min]. Μπορεί να υπολογιστεί από τη διαφορά βάρους του τεμαχίου πριν και μετά την κατεργασία. Αποτελεί ένδειξη της ταχύτητας της κατεργασίας, όσο υψηλότερο είναι το MRR, τόσο πιο γρήγορη είναι η ταχύτητα της κατεργασίας. Επηρεάζεται από την ένταση του ρεύματος, το χρόνο παλμού και μεσοδιαστήματος, το duty cycle, και τις ιδιότητες του υλικού προς κατεργασία [4]. Ο ρυθμός αποβολής υλικού, υπολογίζεται ως εξής [19]:

$$MRR = \frac{W_i - W_f}{\rho * t} \quad (1.4)$$

Όπου W_i = το αρχικό βάρος του τεμαχίου, W_f = το τελικό βάρος του τεμαχίου, ρ = η πυκνότητα του τεμαχίου και t = ο χρόνος της κατεργασίας.

1.5.2.2. Λόγος φθοράς εργαλείου (TWR)

Ο λόγος φθοράς του εργαλείου (TWR) ή ο λόγος φθοράς των ηλεκτροδίων (EWR) ή η σχετική φθορά ηλεκτροδίων (REW), ορίζεται ως ο λόγος όγκου του υλικού που απομακρύνθηκε από το ηλεκτρόδιο προς το τεμαχίου και εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό [%]. Είναι αναμενόμενο, ότι η φθορά του ηλεκτροδίου είναι χαμηλότερη από αυτή του τεμαχίου. Η χαμηλότερη τιμή του TWR αναμένεται πάντοτε καθώς αντιπροσωπεύει πιο σταθερή και οικονομική κατεργασία. Ο λόγος φθοράς εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες κατεργασίας (ένταση ρεύματος, δυναμικό διακένου, χρόνος παλμού), από τις ιδιότητες των υλικών (ηλεκτροδίου και τεμαχίου), αλλά και την πολικότητα που χρησιμοποιείται [4].

1.5.2.3. Τραχύτητα επιφάνειας

Η τραχύτητα της επιφάνειας είναι πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ηλεκτροδιάβρωση. Η τραχύτητα της επιφάνειας αντιπροσωπεύεται από την «μέση τραχύτητα επιφάνειας (R_a)», η οποία μετράται σε μικρά [μm] ενώ χρησιμοποιείται συχνά και η μέγιστη τραχύτητα R_{max} [μm].

Μερικές φορές, η ποιότητα της επιφάνειας περιγράφεται με τον όρο «επιφανειακή ακεραιότητα» που περιλαμβάνει την τοπογραφία της επιφάνειας, τα χαρακτηριστικά των σχηματισμένων λόγω κατεργασίας κρατήρων, το «πάχος του επαναστεροποιημένου στρώματος» (recast layer thickness), ελαττώματα επιφάνειας και τραχύτητα. Η τραχύτητα εξαρτάται από το δυναμικό διακένου, την ένταση ρεύματος, και το χρόνο παλμού. Καθώς αυξάνεται η ενέργεια του σπινθήρα-εκφόρτισης, οι κρατήρες που σχηματίζονται είναι πιο χονδροειδείς και κατά συνέπεια αυξάνεται και η τραχύτητα. Επίσης, και το πάχος του αναδομημένου στρώματος εξαρτάται από τις τιμές των αντιστάσεων και των πυκνωτών σε R/C τύπου εργαλειομηχανές, τις μέγιστες τιμές ρεύματος για κυκλώματα switch on/off, και το χρόνο των παλμών. Τέλος η τραχύτητα εξαρτάται και από παράγοντες μη ηλεκτρικής

και ενεργειακής φύσης όπως η πίεση του διηλεκτρικού ρευστού και το υλικό του ηλεκτροδίου [4].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

Χαρακτηρισμός και τροποποίηση της επιφάνειας μετά από ηλεκτροδιάβρωση

2.1. Τοπογραφία επιφάνειας μετά από EDM

Η ηλεκτροδιάβρωση ενδείκνυται στην αποβολή ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού από το κατεργάσιμο τεμάχιο μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και του τεμαχίου κάτω από ένα μέσο κατεργασίας με τη βοήθεια ηλεκτροθερμικής ενέργειας. Με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου, τα οποία διαχωρίζονται από ένα μικρό κενό γεμάτο με διηλεκτρικό υγρό (έλαιο ή απιονισμένο νερό) συμβαίνει ο ιονισμός του διηλεκτρικού ρευστού. Όταν η εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού, ξεπεράσει τη διηλεκτρική σταθερά του μέσου, σχηματίζεται στήλη πλάσματος μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου. Οι υψηλές θερμοκρασίες (6000–12000 °C) που αναπτύσσονται προκαλούν εξάχνωση και τήξη του υλικού, και το σχηματισμό ενός κρατήρα τόσο στο τεμάχιο όσο και στο ηλεκτρόδιο. Το διηλεκτρικό υγρό απομακρύνει από το διάκενο το τηγμένο υλικό σε μορφή θραυσμάτων. Όμως, ένα μέρος του τηγμένου υλικού στερεοποιείται εκ νέου στην κατεργασμένη επιφάνεια, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός επαναστερεοποιημένου στρώματος [20].

Η κατεργασία EDM αποτελεί μια πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία, καθώς περιλαμβάνει πολλαπλά φυσικά φαινόμενα και παράγει ιδιαίτερες μικροδομές στις κατεργασμένες επιφάνειες. Στην μελέτη ενός παλμού συμμετέχουν οι καταστάσεις της ύλης: στερεή, υγρή, αέρια και πλάσμα που εντοπίζονται σε επιφάνειες μερικών εκατοντάδων μικρομέτρων και σε χρόνους από microsecond έως και nanosecond. Επομένως, είναι απαραίτητος ο χαρακτηρισμός της ποιότητας της προκύπτουσας επιφάνειας. Δηλαδή, απαιτείται η κατανόηση των επιφανειακών τοπογραφικών χαρακτηριστικών, οι ιδιότητες των στρώσεων της επιφάνειας που έχουν στερεοποιηθεί και επηρεαστεί από τη θερμότητα, οι παραμένουσες τάσεις, η σχέση τους με τις παραμέτρους εργασίας και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Η μορφολογία μίας κατεργασμένης επιφάνειας, οφείλεται στην μεγάλη ποσότητα θερμότητας που παράγεται κατά την ηλεκτρική εκκένωση, η οποία προκαλεί τήξη και εξάτμιση του υλικού, ακολουθούμενη από ταχεία ψύξη. Η

κατεργασμένη επιφάνεια καλύπτεται από μια άτακτη κατανομή κρατήρων μαζί με ακανόνιστα σημάδια ροής τετηγμένου μετάλλου. Αλλά χαρακτηριστικά της επιφάνειας είναι θύλακες (κοιλότητες) και επεναστεροποιημένα σωματίδια. Οι θύλακες είναι αποτέλεσμα φυσαλίδων αερίου που απελευθερώνονται από το τηγμένο υλικό, ενώ τα σωματίδια είναι τηγμένο μέταλλο το οποίο απομακρύνεται από το τήγμα και έπειτα επεναστεροποιείται και εναποτίθεται στην κατεργασμένη επιφάνεια.

Η διάρκεια του παλμού, η ένταση ρεύματος, οι θερμικές ιδιότητες του υλικού και η σύσταση του διηλεκτρικού μέσου, επηρεάζουν την μορφολογία της επιφάνειας [20-22]. Ο όγκος του κρατήρα εξαρτάται από την ενέργεια ανά παλμό, με τον χρόνο παλμού και την ένταση ρεύματος να έχουν διακριτές επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά του κρατήρα (βάθος και διάμετρο). Ο χρόνος παλμού επιτρέπει στην στήλη πλάσματος να επεκταθεί σχηματίζοντας κρατήρες μεγάλης διαμέτρου, ενώ η ένταση ρεύματος επηρεάζει σημαντικά το βάθος του κρατήρα. Συνεπώς, μπορεί να διαπιστωθεί η εξάρτηση της τραχύτητας R_a με τις συνθήκες κατεργασίας, αφού αυτή αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας ανά παλμό [23].

Τα τοπολογικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού διηλεκτρικού μέσου και υλικού ηλεκτροδίου, καθώς ανάλογα με τη διαθεσιμότητα σε άνθρακα κατά την κατεργασία, λαμβάνουν χώρα διαφορετικά φαινόμενα. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό ως διηλεκτρικό μέσο και ηλεκτρόδιο χαλκού παρατηρούνται ελάχιστες και σπάνιες επικαθήσεις στα όρια των κρατήρων. Αντίθετα, όταν το υλικό του ηλεκτροδίου είναι γραφίτης παρατηρούνται τέτοιες επικαθήσεις, με το φαινόμενο να γίνεται εντονότερο όταν χρησιμοποιείται κάποιο έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο. [22]. Οι μεταβολές πίεσης, θερμοκρασίας αλλά και οι μετασχηματισμοί φάσεων του υλικού κατά την κατεργασία είναι η αιτία για την ύπαρξη παραμενουσών τάσεων (κυρίως εφελκυστικές) οι οποίες οδηγούν σε επιφανειακές ατέλειες (όπως για παράδειγμα ανάπτυξη ρωγμών), μειώνοντας έτσι, σημαντικά την αντοχή του υλικού σε κόπωση και διάβρωση [23, 24].

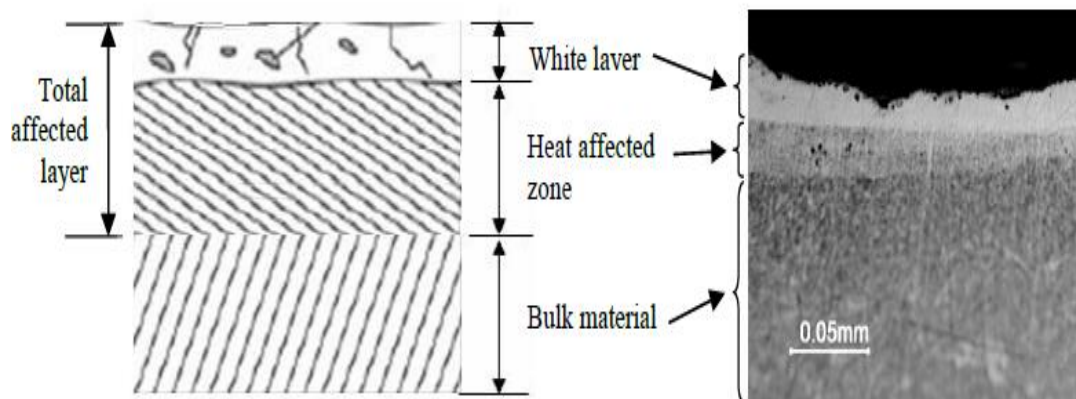
Η διάρκεια παλμών, η ένταση ρεύματος, το υλικό του τεμαχίου και οι ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου, είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την πιθανότητα σχηματισμού ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η ταχεία στερεοποίηση του τηγμένου υλικού δημιουργεί ισχυρές τάσεις συστολής, σε ορισμένες περιπτώσεις

υψηλότερες του ορίου θραύσης του υλικού. Η πιθανότητα για ρηγματώση αυξάνεται για τους μεγάλους χρόνους παλμών, οι οποίοι δημιουργούν μεγάλους κρατήρες και για χαμηλή ένταση ρεύματος, όπου το στρώμα τηγμένου και επαναστεροποιημένου υλικού είναι πολύ λεπτό με αποτέλεσμα τη μεγάλη κλίση αναπτυσσόμενων τάσεων. Τέλος, η αλληλεπίδραση της κατεργαζόμενης επιφάνειας με το διηλεκτρικό μέσο και το υλικό του ηλεκτροδίου αποτελεί σημαντική παράμετρο στην δημιουργία ρωγμών [23].

2.2. Στρώματα επιφάνειας

Η κατεργασμένη επιφάνεια επικαλύπτεται από κρατήρες, θύλακες οι οποίοι σχηματίζονται από εγκλωβισμένα αέρια, επαναστεροποιημένα σωματίδια και μικρορωγμές. Εκτός όμως από τις επιφανειακές αλλαγές, έχουν παρατηρηθεί αλλαγές και στην μικροδομή του υποστρώματος. Η επιφάνεια μετά από την κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης αποτελείται από τρεις διακριτές ζώνες, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 2.1 [25, 26]:

- Επαναστεροποιημένη ζώνη (Recast/ White layer-WL)
- Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (Heat Affected Zone-HAZ)
- Μέταλλο βάσης (Base Metal)



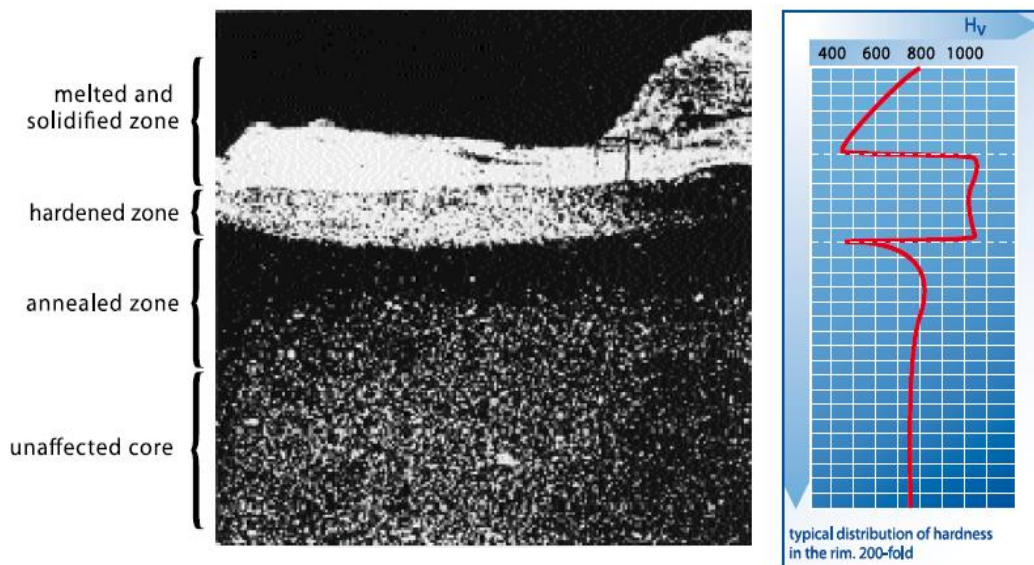
Εικόνα 2.1. Στρώματα επιφάνειας μετά από κατεργασία με EDM [27].

Το επαναστεροποιημένο στρώμα (WL) είναι το ανώτατο στρώμα που εκτίθεται στο περιβάλλον και παίζει σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Σχηματίζεται από το μη αποβαλλόμενο τηγμένο μέταλλο (είτε υλικό ηλεκτροδίου είτε υλικό τεμαχίου) που στερεοποιείται σε

εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα μετά τη διαδικασία εκκένωσης [28, 29]. Έχει υψηλή σκληρότητα, είναι εύθραυστο, πορώδες και έχει παρατηρηθεί και η παρουσία μικρορογμών [25, 30].

Η μικροδομή του WL είναι διαφορετική από το μέταλλο βάσης ως αποτέλεσμα του πολύπλοκου μετασχηματισμού φάσης κατά την ταχεία στερεοποίηση [31]. Τόσο ο Kruth [32] όσο και ο Cusanelli [33] διαπίστωσαν ότι το WL του χάλυβα μετά από EDM αποτελείται κυρίως από δενδριτικές (dendritic) και κιονοειδής (columnar) δομές που προσανατολίστηκαν προς την ίδια κατεύθυνση. Επιπλέον, ο Cusanelli αναφέρει ότι το WL αποτελείται από μια σειρά υποστρωμάτων. Έχει αποδειχθεί ότι, ανάλογα με υλικό του ηλεκτροδίου, το είδος του διηλεκτρικού και τις συνθήκες κατεργασίας, μπορεί να προκύψει μια ποικιλία μικροδομών. Η συνήθης σύσταση της επαναστερεοποιημένης ζώνης είναι μαρτενσίτης, και διάφορα καρβίδια σε ωστενιτική μήτρα. Η τοπική συγκέντρωση άνθρακα στη συγκεκριμένη ζώνη μπορεί να αυξηθεί έως και εννέα φορές σε σχέση με το υπόλοιπο υλικό και είναι αποτέλεσμα της μεταφοράς ατόμων άνθρακα από το διηλεκτρικό μέσο ή/και το ηλεκτρόδιο [23, 29].

Κάτω από το WL βρίσκεται η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (HAZ) ή ανοπτημένη ζώνη. Η ζώνη αυτή δεν τήκεται αλλά εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία ικανή να προκαλέσει μετασχηματισμούς στη δομή [24]. Η σκληρότητα της ζώνης αυτής είναι μικρότερη από το WL, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 2.2 [29]. Το πάχος της HAZ και του WL είναι της τάξης των μικρών και εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες του τεμαχίου και τις παραμέτρους της κατεργασίας [28].



Εικόνα 2.2. Μεταλλογραφική εικόνα για εργαλειοχάλυβα (RIGOR, hardened to 57 HRC) και καμπύλη κατανομής σκληρότητας στα στρώματα της επιφάνειας μετά από κατεργασία EDM [34].

2.3. Μικρορωγμές (Micro Cracks)

Οι γρήγοροι ρυθμοί θέρμανσης-ψύξης που προκαλούνται κατά την διάρκεια της κατεργασίας, οδηγούν στο σχηματισμό ενός θερμικά επηρεαζόμενου στρώματος- Altered Metal Zone, AMZ, (WL και HAZ) στο τεμάχιο. Η δομή αυτού του στρώματος είναι αρκετά διαφορετική από το μητρικό υλικό και παρόλο που προσφέρει αυξημένη αντοχή στη τριβή και την διάβρωση, τα ελαττώματα μέσα σε αυτό, όπως κενά, ρωγμές, παραμένουσες τάσεις κ.λπ. προκαλούν την μηχανική αστοχία του τεμαχίου. Το πιο σημαντικό ελάττωμα, όμως από αυτά, αποτελούν οι μικρο-ρωγμές, καθώς οδηγούν σε μείωση της αντοχής του υλικού στην κόπωση και τη διάβρωση, ειδικά υπό συνθήκες εφελκυσμού [35].

Ο σχηματισμός ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια αποδίδεται στις υψηλές τάσεις συστολής που ξεπέρασαν το όριο αντοχής σε εφελκυσμού του υλικού εντός του WL [36]. Το WL αποτελείται από διάφορα μικροσκοπικά μεταλλουργικά στρώματα και η σύνθεση του εξαρτάται από τις συνθήκες κατεργασίας. Το τηγμένο υλικό, λόγω της εισαγωγής του άνθρακα, συστέλλεται περισσότερο κατά την στερεοποίηση από το υπόλοιπο, μη προσβεβλημένο σε άνθρακα, τηγμένο υλικό αναπτύσσοντας έτσι τοπικά τάσεις, οι οποίες όταν ξεπεράσουν το όριο αντοχής του υλικού εξελίσσονται σε ρωγμές. Μελέτες έχουν δείξει ότι αυξάνοντας την ενέργεια

ανά παλμό αυξάνεται και η πιθανότητα ανάπτυξης ρωγμών, χωρίς αυτό να αποτελεί το γενικό κανόνα [37, 38]. Ρεύματα υψηλής έντασης, σχηματίζουν βαθύτερους κρατήρες με παχύτερες επαναστερεοποιημένες περιοχές ως αποτέλεσμα της εκτίναξης τηγμένου υλικού στα όρια των κρατήρων κατά το πέρας του παλμού. Στις περιοχές αυτές αναπτύσσονται ισχυρές τάσεις μετασχηματισμού. Αντίθετα, μεγάλης χρονικής διάρκειας παλμοί δημιουργούν μεγαλύτερους σε διάμετρο κρατήρες, μικρού βάθους, με το ρυθμό εκτίναξης υλικού στα όρια τους να είναι περιορισμένος. Το τηγμένο υλικό στο κέντρο του κρατήρα σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα, το οποίο ψύχεται, στερεοποιείται και συρρικνώνεται ταχύτατα και γρηγορότερα από το υπόλοιπο υλικό. Οι παραπάνω μηχανισμοί περιγράφουν συνοπτικά τα αίτια δημιουργίας ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια, τόσο για υψηλής έντασης ρεύματα, όσο και για μεγάλους χρόνους παλμού [39]. Τέλος, υψηλή πιθανότητα ρηγμάτωσης έχουν υλικά με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα [23].

Οι επιφανειακές ρωγμές αρχίζουν από την επιφάνεια, διαδίδονται στην επαναστερεοποιημένη περιοχή, και καταλήγουν στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να διαπεράσουν και τα επόμενα στρώματα υλικού και να φτάσουν έως και το υλικό της βάσης. Παρατηρούνται επίσης μικρορωγμές στα όρια των κρατήρων ή/και σε σφαιρικούς ή άμορφους σχηματισμούς από επικαθήσεις. Τέτοιες ρωγμές έχουν τυχαία επιφανειακή κατανομή και χαμηλό βάθος. Με βάση αυτά οι ρωγμές μπορούν να διαχωριστούν σε επιφανειακές, σε αυτές με βάθος και σε μικρορωγμές. Οι ρωγμές με βάθος πολλαπλασιάζονται για κατεργασία υλικών σε απιονισμένο νερό ως διηλεκτρικό μέσο που έχουν υποστεί προηγουμένως βαφή. Οι ρωγμές αυτές ακολουθούν τα όρια των κρατήρων, σχηματίζοντας κλειστούς βρόγχους, διατηρώντας έτσι σχετικά σταθερά μεταξύ τους διαστήματα. Ανάλογης μορφής ρωγμές μπορούν πάντως να παρατηρηθούν και κατεργασίες με έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο. Παράλληλα με τις παραπάνω ρωγμές υπάρχουν και ορισμένες ακτινικές, με σχετικά περιορισμένο πλάτος ανοίγματος και συνήθως σταματούν στην διεπιφάνεια του επαναστερεοποιημένου υλικού και αυτού που έχει επηρεαστεί θερμικά [23, 40].

Η κατεργασία σε έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο και το υλικό του ηλεκτροδίου, επηρεάζουν τη μικροδομή της επαναστερεοποιημένης περιοχής και τις φάσεις που συναντώνται σε αυτή. Οι ρωγμές εσωτερικά της ζώνης είναι ένδειξη υψηλών

εφελκυστικών τάσεων μετασχηματισμού, οι οποίες εξελίσσονται λόγω της παρουσίας άνθρακα. Τέλος, η ύπαρξη εγκλεισμάτων σε ρωγμές με βάθος οφείλεται στο ότι οι συγκεκριμένες ρωγμές, κατά πάσα πιθανότητα, σχηματίστηκαν κατά τα πρώτα στάδια στερεοποίησης του τηγμένου υλικού [23].

2.4. Τροποποίηση επιφάνειας

Η κατεργασία EDM εκτός από μια διαδικασία αφαίρεσης υλικού μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση της επιφάνειας του τεμαχίου [40-42]. Τροποποίηση της επιφάνειας σημαίνει βελτίωση της χημικής και μηχανικής συμπεριφοράς της επιφάνειας του τεμαχίου. Η τροποποίηση της επιφάνειας με συμβατικές μεθόδους (εναπόθεση ατμών (CVD/PVD), εμφύτευση ιόντων και επεξεργασία επιφανειών με laser) χρησιμοποιείται για καλούπια, μήτρες και εργαλεία για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής τους και να μειωθεί το κόστος κατασκευής [43, 44]. Ωστόσο, το υψηλό κόστος του εξοπλισμού και η προεπεξεργασία της επιφάνειας καθιστά αυτές τις διαδικασίες πολύπλοκες και χρονοβόρες. Αντίθετα, η κατεργασία EDM έχει την ικανότητα να τροποποιεί την επιφάνεια κατά τη διάρκεια της ίδιας της κατεργασίας. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας, κατά τη διάρκεια των ηλεκτρικών σπινθήρων, το υλικό από το ηλεκτρόδιο εργαλείου εναποτίθεται στην επιφάνεια του τεμαχίου που κατεργάζεται με μια διαδικασία τήξης και εξάτμισης που λαμβάνει χώρα στην ιονισμένη στήλη σε υψηλή θερμοκρασία. Μεταξύ κάθε ηλεκτρικού σπινθήρα το υλικό του τεμαχίου στερεοποιείται με ταχεία ψύξη λόγω χαμηλής θερμοκρασίας του διηλεκτρικού μέσου. Έτσι, το μεταφερόμενο υλικό από το ηλεκτρόδιο μπορεί να δημιουργήσει μια επίστρωση (White ή Recast layer) πάνω από την κατεργασμένη επιφάνεια υπό κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας σε EDM [40, 45].

Το φαινόμενο της τροποποίησης της επιφάνειας έχει διερευνηθεί στην κατεργασία EDM εδώ και πάνω από πέντε δεκαετίες. Ήδη από το 1965, οι Barash και Kahlon [46] διαπίστωσαν ότι όταν ο μαλακός χάλυβας διαβρώθηκε σε παραφίνη χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο χαλκού, το εξάρτημα ήταν επικαλυμμένο με πολύ σκληρό στρώμα το οποίο ήταν δύσκολο να αφαιρεθεί. Αυτό αποδόθηκε στην ενανθράκωση του στρώματος λόγω του υδρογονανθρακικού μέσου και στη μετέπειτα βαφή του. Η μεταφορά υλικού βρέθηκε να είναι συνάρτηση των διαφόρων ηλεκτρικών παραμέτρων του κυκλώματος. Η υψηλή σκληρότητα της επιφάνειας, η

εξαιρετική θερμική σταθερότητα και η καλύτερη αντοχή στη φθορά του λευκού στρώματος και ο μετασχηματισμός φάσης του έχουν επίσης αναφερθεί από τους Venkatesh και Parasnis [47]. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι το WL που παράγεται σε ένα χαλύβδινο τεμάχιο μετά από μια κατεργασία EDM χρησιμοποιώντας διηλεκτρικό υδρογονανθράκων, έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα από το βασικό υλικό και επομένως εμφανίζει αυξημένη αντίσταση στην τριβή και στη διάβρωση [48]. Ο άνθρακας στο WL εμφανίζεται ως καρβίδιο του σιδήρου (Fe_3C) σε κιονοειδείς (columnar) ή δενδριτικές (dendritic) δομές [32]. Επιπλέον, στην επιφάνεια του τεμαχίου συναντάται και υλικό ηλεκτροδίου [49]. Η τροποποίηση της επιφάνειας μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους [18]:

- Τροποποίηση της επιφάνειας με την χρήση συμβατικών ηλεκτροδίων
- Τροποποίηση της επιφάνειας με τη χρήση ηλεκτροδίου που παρασκευάστηκε με κονιομεταλλουργία
- Τροποποίηση της επιφάνειας με τη χρήση powder-mixed διηλεκτρικού μέσου

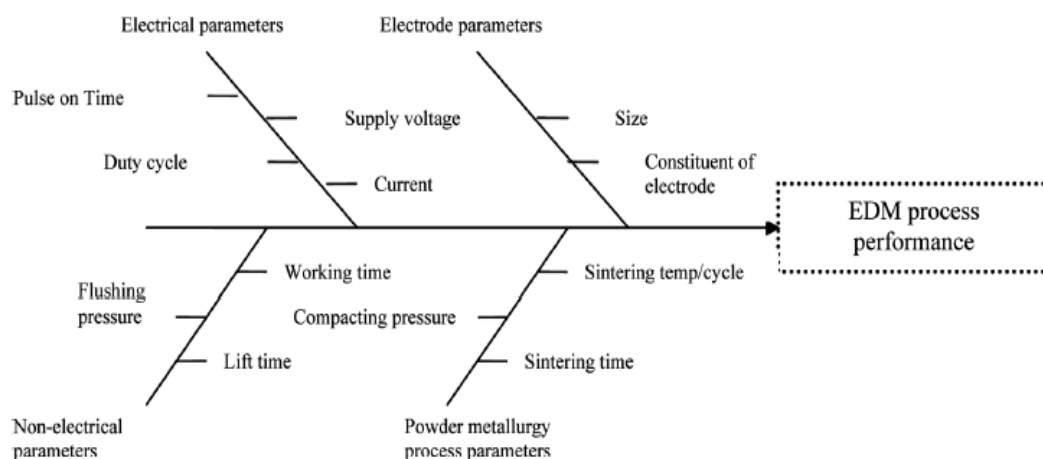
2.4.1. Τροποποίηση της επιφάνειας με τη χρήση ηλεκτροδίου που παρασκευάστηκε με κονιομεταλλουργία

Το κόστος ενός τμήματος που κατασκευάζεται με EDM καθορίζεται κυρίως από το κόστος εργαλείου, το οποίο αποτελείται από το κόστος πρώτης ύλης του εργαλείου, το κόστος παραγωγής του εργαλείου και τον αριθμό των εργαλείων που απαιτούνται για τη λειτουργία [50]. Το μεγαλύτερο κόστος και ο περισσότερος χρόνος για την κατασκευή καλουπιών και προτύπων με EDM είναι στην κατασκευή ηλεκτροδίων, η οποία μπορεί να αντιπροσωπεύει πάνω από το 50% του συνολικού κόστους της κατεργασίας [51]. Το κόστος και ο χρόνος κατασκευής ηλεκτροδίων καθορίζεται γενικά από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και την απαιτούμενη ακρίβεια [10]. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο ως ηλεκτρόδια για EDM είναι ο χαλκός και τα κράματά του, ο ορείχαλκος, ο ψευδάργυρος, το βολφράμιο και ο γραφίτης. Οι συμβατικές μέθοδοι κατασκευής των ηλεκτροδίων περιλαμβάνουν stamping, coining, grinding, extrusion, drawing, turning και milling. Η ανάπτυξη όμως των συμβατικών ηλεκτροδίων είναι αρκετά χρονοβόρα ενώ το κόστος παραγωγής τους είναι αρκετά υψηλό. Η κονιομεταλλουργική οδός (Powder Metallurgy-P/M) αποτελεί μια εναλλακτική τεχνική κατασκευής ηλεκτροδίων, η οποία είναι πιο οικονομική και ταχύτερη από άλλες συμβατικές μεθόδους. Έχει

αποδειχθεί ότι τα ηλεκτρόδια P/M είναι τεχνικά βιώσιμα και οι ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας μπορούν να βελτιωθούν με την αλλαγή των υλικών των ηλεκτροδίων και των παραμέτρων κατεργασίας [52]. Τα ηλεκτρόδια P/M μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους, green compact και sintered.

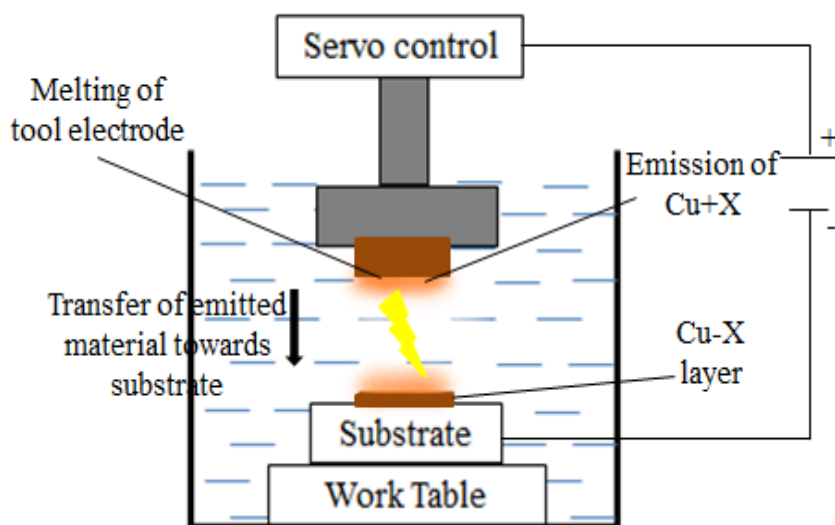
Οι Samuel και Philip συνέκριναν την απόδοση των ηλεκτροδίων κονιομεταλλουργίας με συμβατικά ηλεκτρόδια στο EDM σε συνθήκες κατεργασίας που ευνοούν την τροποποίηση της επιφάνειας. Τα ηλεκτρόδια P/M βρέθηκαν να είναι πιο ευαίσθητα στις μεταβολές της έντασης του ρεύματος και της διάρκειας των παλμών [53]. Η ένταση ρεύματος βρέθηκε να είναι η σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζει τόσο τον ρυθμό φθοράς του εργαλείου (TWR) όσο και τον ρυθμό απομάκρυνσης υλικού (MRR) [54]. Οι παράμετροι της P/M, όπως το μέγεθος των σωματιδίων σκόνης, η πίεση της συμπίεσης και η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην απόδοση του ηλεκτροδίου και κατ' έπекταση και στην απόδοση της κατεργασίας EDM (Εικόνα 2.3.). Τα ηλεκτρόδια που κατασκευάζονται με μεγαλύτερη πίεση συμπίεσης και υψηλότερη θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης έχουν χαμηλότερη ταχύτητα μεταφοράς υλικού και μέσο πάχος επίστρωσης, καθώς υπάρχει ισχυρή σύνδεση μεταξύ των κόνων [55, 56]. Η σκληρότητα του ηλεκτροδίου αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου κατά το στάδιο της πίεσης. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτροδίου αποτελεί βασικό παράγοντα στην επιλογή των ηλεκτροδίων, δεδομένου ότι είναι υπεύθυνη για την έναυση και τη συντήρηση της ηλεκτρικής εκκένωσης. Είναι δύσκολο να αντέξουν τις μηχανικές δυνάμεις που παράγονται κατά τη διάρκεια του ηλεκτρικού σπινθήρα για ηλεκτρόδια συμπιεσμένα σε χαμηλότερες πιέσεις συμπίεσης, επομένως χαλαρά συνδεδεμένα σωματίδια αποσυνδέονται εύκολα οδηγώντας σε υπερβολική μόλυνση διακένου. Καθώς η πίεση της συμπίεσης αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται λόγω της καλύτερης επαφής μεταξύ των σωματιδίων. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτροδίου αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας πυροσυσσωμάτωσης λόγω του στερεού δεσμού μεταξύ των σωματιδίων, αντιστρόφως, το ηλεκτρόδιο που πυροσυσσωμάτωσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες φθείρεται γρηγορότερα λόγω της ασθενούς σύνδεσης μεταξύ των σωματιδίων. Για να επιτευχθεί περισσότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα, η πίεση της συμπίεσης και η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης θα πρέπει να είναι υψηλή κατά τη διάρκεια της κατασκευής ηλεκτροδίων EDM μέσω της P/M. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των

ηλεκτροδίων P/M από την άποψη της κατασκευής είναι ότι σε κατάσταση πυροσυσσωμάτωσης, αυτά μπορούν εύκολα να κατεργαστούν στο επιθυμητό σχήμα με αποδεκτό επίπεδο ακρίβειας [56].



Εικόνα 2.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του EDM με την χρήση ηλεκτροδίου P/M [57].

Κατά την επιφανειακή τροποποίηση του τεμαχίου μέσω του EDM, χρησιμοποιώντας green compact ή sintered P/M ηλεκτρόδιο θετικής πολικότητας (άνοδος), ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας σπινθήρων δρα στο ηλεκτρόδιο και προκαλεί τοπική τήξη του ηλεκτροδίου. Πραγματοποιείται, επίσης, και τήξη του τεμαχίου (κάθοδος) αλλά με χαμηλότερο ρυθμό. Υπό αυτήν την περίπτωση, το υλικό του ηλεκτροδίου που τήκεται απομακρύνεται από το ηλεκτρόδιο και εναποτίθεται στην κατεργασμένη επιφάνεια. Επιπλέον, πρέπει να αναφερθεί ότι ο ρυθμός μεταφοράς υλικού στην περίπτωση χρήσης green compact ηλεκτροδίου είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτό που προκύπτει από τη χρήση ενός πυροσυσσωματωμένου ηλεκτροδίου, λόγω του αδύναμου δεσμού μεταξύ των σωματιδίων των κόνων. Στην Εικόνα 2.4. φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση της επιφανειακής τοποποίησης μέσω EDM την χρήση Cu-X P/M ηλεκτροδίου. Μερικά από τα σχετικά ερευνητικά ευρήματα της τροποποίησης της επιφάνειας με τη χρήση ηλεκτροδίου που παρασκευάστηκε με κονιομεταλλουργία μέσω της κατεργασίας EDM αναφέρονται παρακάτω.



Εικόνα 2.4. Σχηματική αναπαράσταση επιφανειακής τροποποίησης μέσω EDM με τη χρήση P/M ηλεκτόδιο.

Οι Simao et al. [58] μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων απόδοσης της κατεργασίας με σκοπό την επιφανειακή τροποποίηση του εργαλειοχάλυβα AISI H13. Χρησιμοποιήθηκαν μερικώς πυροσυσσωματωμένα WC/Co ηλεκτρόδια και για τον σχεδιασμό του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi. Μέσω της φασματοσκοπίας GDOES (Glow-discharge optical emission spectroscopy) ο βαθμός μεταφοράς των κραματικών στοιχείων του ηλεκτροδίου βρέθηκαν σε βάθος έως 5μm στο τεμάχιο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό ομοιόμορφων επιφανειακών στρωμάτων με την παρουσία μικρορωγμών και την αύξηση της μικροσκληρότητας της επιφάνειας του τεμαχίου.

Οι Patowari et al. [59] μελέτησαν την επιφανειακή ακεραιότητα του χάλυβα C-40, χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο WC-Cu P/M green compact. Ο σκοπός της έρευνας ήταν η μεταφορά του υλικού του ηλεκτροδίου πάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου σε μορφή εναποτιθέμενου στρώματος καρβιδίου βολφραμίου (WC). Η σκληρότητα του εναποτιθέμενου στρώματος ήταν μεγαλύτερη από αυτή του μετάλλου βάσης, ενώ παραλλήλα παρατηρήθηκε ότι με αύξηση της πίεσης κατά της συμπίεσης το MTR και TWR μειώνονται.

Οι Abhishek Das και Joy Prakash Misra [45] τροποποίησαν την επιφάνεια αλουμινίου χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο TiC-Cu P/M green compact. Ο σκοπός της εργασίας ήταν η μέλετη της επίδρασης των παραμέτρων διεργασίας (ένταση

ρεύματος, χρόνος παλμού, σύνθεση και φορτίο συμπίεσης του ηλεκτροδίου) στις παραμέτρους απόδοσης της κατεργασίας (τραχύτητα, σκληρότητα, και μελέτη του WL). Παρατηρήθηκε ότι το εξωτερικό στρώμα της επιφάνειας του τεμαχίου είναι πλούσιο σε Ti αλλά σταδιακά, η ποσότητα Ti στο επιφανειακό στρώμα μειώνεται με το βάθος προς το μέταλλο βάσης. Οι υψηλότερες τιμές έντασης ρεύματος απέδωσαν ένα παχύ στρώμα αλλά και υψηλή τραχύτητα. Επιπλέον, Οι Chundru et al. [60] μελέτησαν την επιφανειακή τροποποίηση του κράματος Ti6Al4V χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο κονιομεταλλουργίας TiC/Cu με μέγεθος σωματιδίων που κυμαινόταν από μέγεθος νανο- έως μικρό. Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό του πειράματος. Έδειξαν ότι η υψηλή αντιδραστική επιφάνεια των νανοσωματιδίων οδήγησε σε καλύτερη ενίσχυση της επιφάνειας με κραματικά στοιχεία από τα άλλα ηλεκτρόδια, άρα σε βελτιωμένη τραχύτητα επιφάνειας και αυξημένη σκληρότητα.

Οι Sidhul et al. [61] μελέτησαν την επιφανειακή τροποποίηση σε χάλυβα EN-31 χρησιμοποιώντας μερικώς πυροσυσσωματωμένο ηλεκτρόδιο W-Cu P/M. Προσδιορίστηκε η βέλτιστη ρύθμιση παραμέτρων για την επίτευξη μέγιστου ρυθμού απόθεσης υλικού και ελάχιστης τραχύτητας της επιφάνειας. Η χρήση ηλεκτροδίου Cu-W P/M και της μεθόδου Taguchi για την επιφανειακή τροποποίηση του Inconel 718 με σκοπό της βελτιστοποίηση των παραμέτρων της κατεργασίας διερευνήθηκε από τους Naveen Beri et al. [62]. Η μικροσκληρότητα βελτιώθηκε από 380.9 HV στο μέταλλο βάσης σε 496.7 HV στην κατεργασμένη επιφάνεια λόγω του σχηματισμού της φάσης $Fe_2W_3C_6$.

Ο Afzaal Ahmed [63] μελέτησε την επίδραση του ηλεκτροδίου Ti-B₄C P/M στις παραμέτρους απόδοσης της κατεργασίας. Ως τεμάχιο εργασίας χρησιμοποιήθηκε αλουμίνιο. Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του πειράματος. Διαπιστώθηκε η μεταφορά σημαντικής ποσότητας υλικού του ηλεκτροδίου (TiB₂-TiC) στην κατεργασμένη επιφάνεια.

Οι Amoljit Singh Gill et al. [64] κατεργάστηκαν χάλυβα H11 με ηλεκτρόδιο Cu-Mn P/M. Για τον σχεδιασμό του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi. Η μικροσκληρότητα βελτιώθηκε κατά 93.7% εξαιτίας του σχηματισμού σεμεντίτη, φερρίτη και καρβιδίου του μαγνησίου, δεν παρατηρήθηκαν μικρορωγμές και επιτεύχθηκε τραχύτητα επιφάνειας με τιμή R_a 3.11 μm . Η επίδραση των παραμέτρων απόδοσης κατεργασίας ερευνηθήκαν και από τους Parveen Goyal et al. για την επιφανειακή τροποποίηση του χάλυβα EN-31 με τη χρήση ηλεκτροδίου Cu-

Mn P/M [65]. Η αύξηση της περιεκτικότητας του μαγγανίου όδηγησε σε αύξηση της μικροσκληρότητας η οποία ωφείλεται στην μεταφορά του μαγγανίου στο τεμάχιο. Η αύξηση της έντασης του ρεύματος και της διάρκειας παλμού φαίνεται να επηρέασαν σημαντικά την τραχύτητα και τη μικροσκληρότητα και στις δύο περιπτώσεις.

Οι Orhan Gülcan et al. [66] μελέτησαν την επίδραση του ηλεκτροδίου Cu-Cr και Cu-Mo P/M στις παραμέτρους απόδοσης της κατεργασίας (MRR, EWR, R_a , σκληρότητα, αντοχή σε φθορά και αντίσταση στη διάβρωση). Ως τεμάχιο εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο χάλυβας SAE 1040. Παρατήρησαν ότι το υλικό ηλεκτροδίου που εναποτέθηκε πάνω από στην κατεργασμένη επιφάνεια αποδίδει υψηλή σκληρότητα επιφάνειας, αντοχή στη διάβρωση και στην τριβή.

Ο Shubhajit Das [67] ερεύνησε το MRR, TWR και R_a , μεταβάλλοντας τις παραμέτρους τις κατεργασίας (σύσταση ηλεκτροδίου, φορτίο συμπίεσης, διάρκεια παλμού και ένταση ρεύματος) χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο κονιομεταλλουργίας W-Cu-Cr και αλουμίνιο για τεμάχιο. Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του πειράματος. Παρατηρήθηκε ότι το ηλεκτρόδιο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σε βολφράμιο έχει ως αποτέλεσμα καλύτερο MTR.

Οι P. Mathan Kumar et al. [68] τροποποίησαν χάλυβα OHNS με ηλεκτρόδιο Cu-CrB₂ green compact και μελετήσαν το MTR και SR μεταβάλλοντας τη σύσταση του CrB₂, την ένταση ρεύματος και τη διάρκεια παλμού. Διαπιστώθηκε ότι το πάχος του εναποτιθέμενου στρώματος αυξάνεται με την αύξηση της έντασης τους ρεύματος και της διάρκειας παλμού.

Αλλά συστήματα ηλεκτροδίων P/M που έχουν χρησιμοποιηθεί για τροποποίηση της επιφάνειας είναι Co-Cr, Cu-Cr-Ni, TiC-WC-Co, Cu-TaC, Cu-B₄C και Al-Mo [69-74].

2.4.1.1. Κονιομεταλλουργική μέθοδος

Η κονιομεταλλουργία (Powder Metallurgy) είναι μια διαδικασία ανάμειξης κόνεων (μπορεί να είναι υγρή ή ξηρή), συμπίεσης σε ένα επιθυμητό σχήμα ή μορφή και στη συνέχεια θέρμανση του συμπιεσμένου υλικού σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα και σε κατάλληλη θερμοκρασία. Η διαδικασία της κονιομεταλλουργίας αποτελείται από τέσσερα στάδια: (α) παραγωγή κόνεων, (β) ανάμειξη των κόνεων, (γ) συμπίεση και (δ) πυροσυσσωμάτωση. Η συμπίεση πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας είναι η επίτευξη ομογενοποίησης

κατά τη διάρκεια της ανάδευσης. Η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης είναι χαμηλότερη του σημείου τήξης του βασικού υλικού, αλλά αρκετά υψηλή για να αναπτυχθεί διάχυση στερεάς κατάστασης (sintering). Κατά τη διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης, στη διαδικασία της διάχυσης οι πόροι που υπάρχουν στο συμπιεσμένο υλικό μειώνονται ή εξαλείφονται. Η μείωση του πορώδους εξαρτάται από το αρχικό πορώδες του συμπιεσμένου υλικού, τη θερμοκρασία αλλά και το χρόνο πυροσυσσωμάτωσης. Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας είναι τα εξής [75]:

- Εξάλειψη ή μείωση της μηχανουργικής κατεργασίας
- Υψηλή παραγωγικότητα
- Περίπλοκα σχήματα
- Ευρείες αλλαγές στις ιδιότητες
- Ευρείες αλλαγές στις συστάσεις
- Εξάλειψη ή μείωση των απορριμμάτων

Οι μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων, τα οποία παράγονται με τη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης εξαρτώνται από την σύσταση, την πυκνότητα και τη δυνατότητα θερμικής κατεργασίας του υλικού. Η τελική πυκνότητα εκφράζεται σε g/cm^3 ή σε % της θεωρητικής πυκνότητας του υλικού (ο λόγος της πυκνότητας του τεμαχίου P/M προς την πυκνότητα του αναλόγου της κλασσικής μεταλλουργίας) και έχει μέγιστη επίδραση στις ιδιότητες του υλικού. Εξαρτήματα της P/M με θεωρητική πυκνότητα μικρότερη του 75% θεωρούνται χαμηλής πυκνότητας, αυτά με θεωρητική πυκνότητα μεγαλύτερη του 90% θεωρούνται υψηλής πυκνότητας. Μεταξύ του 90% και του 75% θεωρούνται ως ενδιάμεσης πυκνότητας [76].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

Κατεργασία εργαλειοχαλύβων με EDM

3.1. Εργαλειοχάλυβες

Οι εργαλειοχάλυβες είναι υλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, που απαιτείται υψηλή μηχανική αντοχή, μεγάλη σκληρότητα και αντίσταση σε φθορά, όπως π.χ. κοπτικά εργαλεία, μήτρες διαμόρφωσης, έμβολα διέλασης, ράουλα έλασης. Η χρήση γίνεται πάντοτε μετά από θερμική κατεργασία βαφής-επαναφοράς.

Τα κύρια κραματικά στοιχεία που συμβάλλουν στη μηχανική ενίσχυση είναι τα ακόλουθα: Ni, Cr, Mo, W, V, Mn, Si, Co. Βασικό χαρακτηριστικό των εργαλειοχαλύβων είναι η ύπαρξη καρβιδίων, είτε σφαιρικού σχήματος (π.χ. καρβίδια του μολυβδαινίου και βολφραμίου στους ταχυχάλυβες) είτε ακανόνιστου-μακρόστενου σχήματος (π.χ. καρβίδια του χρωμίου στους εργαλειοχάλυβες υψηλού ποσοστού άνθρακα και χρωμίου).

Η παρουσία σκληρών καρβιδίων (1500-2500 HV) αυξάνει τη σκληρότητα του χάλυβα και την αντοχή σε φθορά-τριβή. Επιπλέον, σε ορισμένες κατηγορίες (ταχυχάλυβες) επιδρούν και στην εν θερμώ αντοχή. Κατά την καταπόνηση σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως π.χ. σε κοπή υψηλής ταχύτητας, σχηματίζονται νέα καρβίδια (δευτερογενή καρβίδια), αυξάνοντας τη σκληρότητα και την αντίσταση σε φθορά του εργαλείου (δευτερογενής σκλήρυνση). Η ταξινόμηση των χάλυβων, σύμφωνα με το αμερικάνικο σύστημα AISI-SAE, παρουσιάζεται στον Πίνακα 6 [77].

Πίνακας 6: Βασικές κατηγορίες εργαλειοχαλύβων κατά AISI-SAE.

Σειρά κατά AISI-SAE	Βασικά χαρακτηριστικά
Σειρά W (Εργαλειοχάλυβες χαμηλής εμβαιπτότητας).	Οι κυριότερες προσθήκες είναι το Cr (0.20-0.50%), που συμβάλλει στην αύξηση της εμβαιπτότητας και της αντοχής στη φθορά, και το V για την εκλέπτυνση των κόκκων και τη βελτίωση της δυσθραυστότητας. Βάφονται στο νερό. Κύριες εφαρμογές: εργαλεία κοπής και επεξεργασίας ξύλου, μετάλλου, κ.λπ

Σειρά S (Εργαλειοχάλυβες υψηλής αντοχής στην κρούση)	Κύριες προσθήκες: Si, Cr, W και δευτερευόντως Mo ή Ni. Κύριος ρόλος των παραπάνω προσμείξεων είναι η βελτίωση της εμβαιπτότητας και της αντοχής στη φθορά. Από αυτούς τους χάλυβες κατασκευάζονται εργαλεία και έδρανα που καταπονούνται σε κρουστικές φορτίσεις.
Σειρά O (Εργαλειοχάλυβες ψυχρής κατεργασίας, μέσης εμβαιπτότητας)	Κύριες προσθήκες: W, Mn, Cr, Mo. Βάφονται στο λάδι. Κύριες εφαρμογές συναντώνται στην κατασκευή εργαλείων και καλουπιών ψυχρής διαμόρφωσης.
Σειρά A (Εργαλειοχάλυβες μέτριας κραματοποίησης και υψηλής εμβαιπτότητας)	Κύριες προσθήκες: Cr, Mo, Mn, V. Βάφονται στον αέρα. Κύριες χρήσεις: εργαλεία υψηλής αντοχής σε φθορά-τριβή, κύλινδροι ελάσεως, κ.λπ. Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα (1-2.35%) και Cr (12%).
Σειρά D (Εργαλειοχάλυβες υψηλού ποσοστού άνθρακα και χρωμίου)	Δευτερεύουσες προσθήκες: W, Mo, Co, V. Κύρια ιδιότητα αυτών των χαλύβων είναι η εξαιρετικά υψηλή αντοχή στη φθορά-τριβή. Χρησιμοποιούνται ως εργαλεία ψυχρής διαμόρφωσης (π.χ. ράουλα ελάστρων). Κύριες προσθήκες: Cr, W, Mo, V.
Σειρά H (Εργαλειοχάλυβες θερμών κατεργασιών)	Χρησιμοποιούνται ως εργαλεία (μήτρες, καλούπια, έμβολα) θερμών κατεργασιών, όπως θερμή εξέλαση, θερμή σφυρηλάτηση, χύτευση, κ.λπ. Κύριες προσθήκες: W, Mo, Cr, V, Co.
Σειρά T (Ταχυχάλυβες βολφραμίου)	Παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα και αντοχή στη φθορά και αντέχουν επίσης και στη χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως κοπτικά εργαλεία: δράπανα, τρυπάνια, εργαλεία τόννευσης, φρεζαρίσματος.
Σειρά M (Ταχυχάλυβες μολυβδαινίου)	Κύριες προσθήκες: Mo, W, V, Co. Παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες με την παραπάνω σειρά. Εφαρμογές σε εργαλεία κοπής υψηλής ταχύτητας.

Σειρά P (Εργαλειο χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα/ χάλυβες καλουπιών χύτευσης πλαστικών)	Κύριες προσθήκες: Ni, Cr, V, Mo. Παρουσιάζουν μέτρια σκληρότητα και επίσης μέτρια αντίσταση σε φθορά-τριβή. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως καλούπια χύτευσης πλαστικών.
--	---

Η χημική σύσταση των βασικότερων τύπων εργαλειοχαλύβων που χρησιμοποιούνται στις μηχανουργικές κατεργασίες (O, H, D, M, T) παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Χημική σύσταση των κυριότερων εργαλειοχαλύβων.

Σειρά AISI	Χάλυβας	C	Cr	Mo	W	V	Mn	Co
Σειρά O	O1	0.90	0.50	-	0.50	-	1.00	-
	O2	0.90	-	-	-	-	1.60	-
	H11	0.35	5.00	1.50	-	0.40	-	-
	H13	0.35	5.00	1.50	-	1.00	-	-
Σειρά H	H23	0.30	12.00	-	12.00	-	-	-
	H26	0.50	4.00	-	18.00	1.00	-	-
	H42	0.60	4.00	5.00	6.00	2.00	-	-
	D2	1.50	12.00	1.00	-	1.00	-	-
Σειρά D	D3	2.25	12.00	-	-	-	-	-
	D4	2.25	12.00	1.00	-	-	-	-
	D4	1.50	12.00	1.00	-	-	-	3.00
Σειρά M	M1	0.85	4.00	8.50	1.50	1.00	-	-
	M2	1.00	4.0	5.00	6.00	2.00	-	-
	M4	1.30	4.00	4.50	5.00	4.00	-	-

	M7	1.00	4.00	8.75	1.75	2.00	-	-
Σειρά	T1	0.75	4.00	-	18.00	1.00	-	-
Τα	T15	1.50	4.00	-	12.00	5.00	-	5.00

3.2. Εργαλειοχάλυβας Calmax

Ο εργαλειοχάλυβας Calmax είναι ένας χάλυβας κρούσεως με μεγάλη δυσθραυστότητα και χαρακτηρίζεται από:

- Υψηλή ανθεκτικότητα
- Καλή αντοχή σε φθορά
- Καλή διαστασιακή σταθερότητα στη σκλήρυνση
- Καλή συγκολλησιμότητα
- Δυνατότητα σκλήρυνσης με θερμική κατεργασία

Η σύσταση του κράματος και οι φυσικές ιδιότητες του παρουσιάζονται στο Πίνακα 8 και Πίνακα 9, αντίστοιχα [78]:

Πίνακας 8: Χημική σύσταση εργαλειοχάλυβα Calmax.

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Typical Analysis %	0.6	0.35	0.8	4.5	0.5	0.2

Πίνακας 9: Φυσικές ιδιότητες εργαλειοχάλυβα Calmax.

Θερμοκρασία	20 °C	200 °C	400 °C
Πυκνότητα (kg/m ³)	7770	7720	7650
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm ²)	194000	188000	178000
Συντελεστής θερμικής διαστολής	11.7 x 10 ⁻⁶	12.0 x 10 ⁻⁶	13.0 x 10 ⁻⁶
Θερμική αγωγιμότητα (W/m*K)	-	27	32
Ειδική θερμότητα (J/kg*°C)	455	525	608

Ο εξαιρετικός συνδυασμός σκληρότητας και αντοχής στη φθορά καθιστά το Calmax κατάλληλο για εν ψυχρώ εφαρμογές.

3.3. Συμπεριφορά εργαλειοχαλύβων σε EDM

Οι εργαλειοχάλυβες είναι μια ειδική κατηγορία κραματοποιημένων χαλύβων, που περιέχουν διάφορα κραματικά στοιχεία (Ni, Cr, Mo, W, V, Mn, Si, και Co). Κάθε στοιχείο κράματος έχει συγκεκριμένη επίδραση στις ιδιότητες του χάλυβα και παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του υλικού κατά την θερμική επεξεργασία. Αυτοί οι χάλυβες υψηλής αντοχής χρησιμοποιούνται ευρέως σε μήτρες, καλούπια και άλλα εργαλεία σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Για το λόγο αυτό παιτούν βελτιωμένες ιδιότητες επιφάνειας όπως σκληρότητα, αντίσταση στην τριβή και αντοχή στη διάβρωση. Η κατεργασία τους είναι αρκετά δύσκολη, ως εκ τούτου, οι μη συμβατικές τεχνικές χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατεργασία τους. Η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) είναι μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται συχνά στην επεξεργασία των εργαλειοχαλύβων.

Στη διαδικασία EDM η απόδοση καθορίζεται από το ρυθμό απομάκρυνσης υλικού (MRR), τη φθορά ηλεκτροδίων (EW), την τραχύτητα επιφάνειας (SR), την ποιότητα επιφάνειας (SQ) και την ακρίβεια διαστάσεων (DA). Ο Ho και ο Newman [16] ανέφεραν ότι οι ερευνητικοί τομείς της EDM θα μπορούσαν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: (i) μέτρα απόδοσης μηχανουργικής κατεργασίας, (ii) επίδραση παραμέτρων διεργασίας και (iii) σχεδίαση και κατασκευή ηλεκτροδίου.

Επίσης κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η απόδοση κατεργασίας εξαρτάται από τη φθορά και την ποιότητα της επιφάνειας. Αρκετές έρευνες διεξήχθησαν από τους Soni και Chakraverthi [79]. Μελετήθηκαν η ποιότητα της επιφάνειας, ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού, ο ρυθμός φθοράς των ηλεκτροδίων και η διαστασιακή ακρίβεια των χαλύβων και των κραμάτων αλουμινίου σε EDM. Αναφέρεται ότι η μεταφορά σημαντικής ποσότητας υλικού λαμβάνει χώρα μεταξύ του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου κατά την κατεργασία του χάλυβα με τη χρήση περιστρεφόμενου ηλεκτροδίου χαλκού-βολφραμίου και το μεταφερόμενο στοιχείο παρατηρήθηκε στο επαναστεροποιημένο στρώμα του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Τα πειράματα που έγιναν σε εργαλειοχάλυβα AISI P20 ως τεμάχιο και χαλκό ως ηλεκτρόδιο δείχνουν ότι η τραχύτητα της τελικής επιφάνειας αυξάνεται με αύξηση της διαφοράς δυναμικού, της έντασης του ρεύματος και της διάρκειας των παλμών [80]. Οι Marafona και Araujo [81] διερεύνησαν την επίδραση της σκληρότητας του χάλυβα στο ρυθμό απομάκρυνσης υλικού και την τραχύτητα της επιφάνειας του υλικού εργασίας.

Ο Payal et al. [82], εξέτασε τον εργαλειοχάλυβα EN-31 με χαλκό, ορείχαλκο και γραφίτη ως ηλεκτρόδια και ανέφερε ότι τα θραύσματα αφαιρέθηκαν από το τεμάχιο σε μορφή ινών και φύλλων και σε ορισμένες περιπτώσεις απομακρύνονταν ως μεγάλα κομμάτια. Και τα τρία δείγματα που επεξεργάστηκαν από διαφορετικά ηλεκτρόδια έδειξαν διαφορετικό μοτίβο θερμικά επηρεασμένων στρωμάτων-Altered Metal Zone, AMZ, (WL και HAZ), όπου ο γραφίτης έχει μια βαθύτερη AMZ από αυτή του ορείχαλκου και του χαλκού.

Οι Zarepour et al. [83], διεξήγαγαν πειράματα σε EDM του DIN 1.2714 εργαλειοχάλυβα και ανέφεραν ότι η διάρκεια παλμού και η ένταση του ρεύματος έχουν σημαντική επίδραση στη φθορά των ηλεκτροδίων. Η επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στην τραχύτητα της επιφάνειας διερευνήθηκε πειραματικά και διαπιστώθηκε ότι η τραχύτητα της επιφάνειας αυξήθηκε με αύξηση της διάρκειας του παλμού.

Οι Jaharah et al. [84] μελέτησαν την απόδοση ηλεκτροδίου χαλκού όταν κατεργάστηκαν εργαλειοχάλυβα AISI H13. Διερευνήθηκε η επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στην τραχύτητα της επιφάνειας, στο ρυθμό φθοράς των ηλεκτροδίων και στο ρυθμό απομάκρυνσης υλικού. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι η βέλτιστη επιφανειακή τραχύτητα επιτεύχθηκε σε χαμηλή

ένταση ρεύματος (I_p), μικρή διάρκεια παλμού (T_{on}) και μεσοδιαστήματος (T_{off}), αν και υψηλό MRR αποκτήθηκε σε υψηλή ένταση ρεύματος, σε ενδιάμεσης διάρκειας παλμού και χαμηλό T_{off} . Κατάσταση «μηδενικής φθοράς» ηλεκτροδίου (EWR) αποκτήθηκε σε υψηλή ένταση ρεύματος, υψηλή διάρκεια παλμού και χαμηλό T_{off} .

Οι Haron et al. [85] διερεύνησαν την επίδραση της έντασης του ρεύματος και της διαμέτρου των ηλεκτροδίων στο ρυθμό φθοράς των ηλεκτροδίων (EWR) χαλκού και γραφίτη κατά την κατεργασία εργαλειοχάλυβα XW42 (AISI D2) και στο ρυθμό αποβολής υλικού (MRR). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το MRR είναι μεγαλύτερο ενώ το EWR μικρότερο για το ηλεκτρόδιο χαλκού σε σχέση με το ηλεκτρόδιο γραφίτη. Επιπλέον, ανέφεραν ότι η αύξηση της έντασης του ρεύματος και της διαμέτρου των ηλεκτροδίων μειώνουν το MRR και το EWR. Οι Raj και Prabhu [86] συνέκριναν την επίδραση ηλεκτροδίου χαλκού με ηλεκτροδίου χαλκού-νανοσωλήνων άνθρακα (CNT-infused copper electrodes) στις παραμέτρους απόδοσης κατεργασίας σε EDM για χάλυβα AISI D2. Παρατηρήσαν βελτίωση της ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας με την προσθήκη CNT.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

Πειραματικό μέρος

4.1. Εισαγωγή πειραματικού μέρους

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης (die sinking Electrical Discharge Machining-EDM) για ταυτόχρονη αφαίρεση υλικού και τροποποίηση της κατεργαζόμενης επιφάνειας (surface modification). Παράλληλα πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας στην αποτελεσματικότητα τροποποίησης της επιφάνειας με τη χρήση EDM.

Η επιλογή των συνθηκών της κατεργασίας και η χρήση ηλεκτροδίου κονιομεταλλουργίας οδήγησαν στον σχηματισμό άμορφου στρώματος (White Layer-WL) διαφορετικής σύστασης από αυτή του μητρικού υλικού. Μετά από μεταλλογραφική μελέτη στο WL, όπως ήταν αναμενόμενο, εντοπίστηκαν κραματικά στοιχεία που περιέχονταν στο ηλεκτρόδιο προσδίδοντας έτσι, στην επιφάνεια νέα σύσταση και αντίστοιχα επιθυμητά χαρακτηριστικά/ιδιότητες.

4.2. Τεμάχιο και ηλεκτρόδιο

Τα τεμάχια κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ορθογώνια παραλληλεπίπεδα πάχους 7 mm (Εικόνα 4.1.) από εργαλειοχάλυβα Calmax (Uddeholm) πυκνότητας $\rho = 0.7770 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ και η σύσταση τους αναγράφεται στο Πίνακα 10 [78]. Οι διαστάσεις των τεμαχίων ήταν 85×29×7mm. Σε κάθε τεμάχιο πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα σε διαδοχικές θέσεις, με διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυλινδρικής γεωμετρίας Cu και Cu-ZrO₂ και παρασκευάστηκαν με κονιομεταλλουργία.

Πίνακας 10: Χημική σύσταση εργαλειοχάλυβα Calmax.

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Typical Analysis %	0.6	0.35	0.8	4.5	0.5	0.2
Delivery Condition	Soft annealed to approx. 200 HB					



Εικόνα 4.1. Εργαλειοχάλυβας Calmax (Uddeholm).

4.2.1. Παρασκευή ηλεκτροδίων με Powder Metallurgy

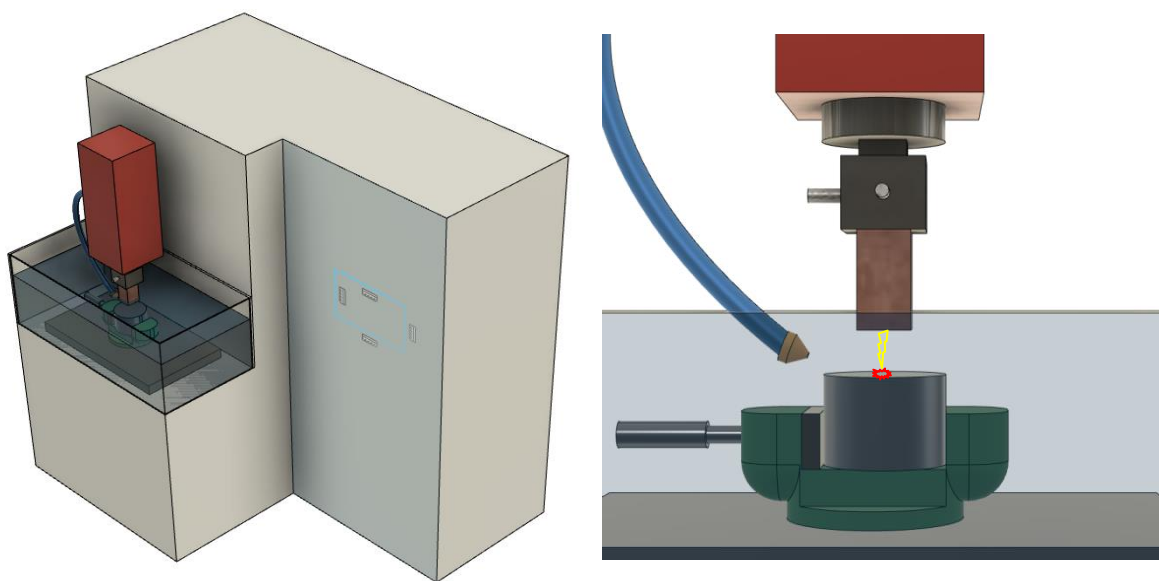
Σκόνη χαλκού (extra pure, <math><63 \mu\text{m}</math>) και σκόνη ζirkονίας αναδεύτηκαν για στα 75 rpm για 20 min και στα 100 rpm για 10 min με σκοπό την ομογενοποίηση τους. Μετά το τέλος της ανάδευσης οι σκόνες συμπιέστηκαν μονοαξονικά στα 100 MPa με υδραυλική πρέσα ορθού πλαισίου (ονομαστικού φορτίου 100tn). Στην συνέχεια τα ηλεκτρόδια πυροσυσσωματώθηκαν. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [87] η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης που επιλέχθηκε ήταν 800 °C για 1 ώρα. Τα ηλεκτρόδια που λήφθηκαν ήταν κυλινδρικής γεωμετρίας, διαστάσεων 15 mm ύψος και 20 mm διάμετρος. Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν ηλεκτρόδια green compact και πυροσυσσωματωμένα (sintered) Cu και Cu-30 wt. % ZrO₂ (Εικόνα 4.2.).



Εικόνα 4.2. (α) Πυροσυσσωματωμένο ηλεκτρόδιο Cu, (β) green compact ηλεκτρόδιο Cu-30 wt. % ZrO₂, (γ) πυροσυσσωματωμένα ηλεκτρόδιο Cu-30 wt. % ZrO₂ και (δ) green compact ηλεκτρόδιο Cu.

4.3. Κατεργασία EDM

Η επιφανειακή τροποποίηση του εργαλειογάλυβα Calmax (Uddeholm) πραγματοποιήθηκε μέσω της κατεργασίας die-sinking EDM. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας σχηματίζεται μια στήλη πλάσματος μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου (Εικόνα 4.3.). Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται προκαλούν εξάχνωση και τήξη του υλικού. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας, κατά τη διάρκεια των ηλεκτρικών σπινθήρων, το υλικό από το ηλεκτρόδιο που μεταφέρεται, εναποτίθεται στην επιφάνεια του τεμαχίου σχηματίζοντας μια επίστρωση (White ή Recast layer) πάνω από την κατεργασμένη επιφάνεια. Ως πηγή υλικού προς μεταφορά στην επιφάνεια εργασίας για το σχηματισμό άμορφου στρώματος (White Layer-WL) διαφορετικής σύστασης από αυτή του μητρικού υλικού επιλέχθηκε το ηλεκτρόδιο green compact Cu-30 wt. % ZrO₂.



Εικόνα 4.3. Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διαδικασίας.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η εργαλειομηχανή Agie Charmilles FO 350 Sp (Εικόνα 4.4), κηροζίνη ως διηλεκτρικό μέσο καθώς και ακροφύσιο έκπλυσης για πιο αποτελεσματική αφαίρεση υπολειμμάτων. Οι παράμετροι της κατεργασίας αλλά και οι πειραματικές μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 11 και Πίνακα 12, αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.5. φαίνονται τα δείγματα μετά από την κατεργασία. Ο υπολογισμός του ρυθμού μεταφοράς του υλικού (MTR) υπολογίστηκε από την Σχέση 4.1 [65]:

$$MTR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (4.1)$$

Όπου W_i = το αρχικό βάρος του τεμαχίου, W_f = το τελικό βάρος του τεμαχίου, και t = ο χρόνος της κατεργασίας.



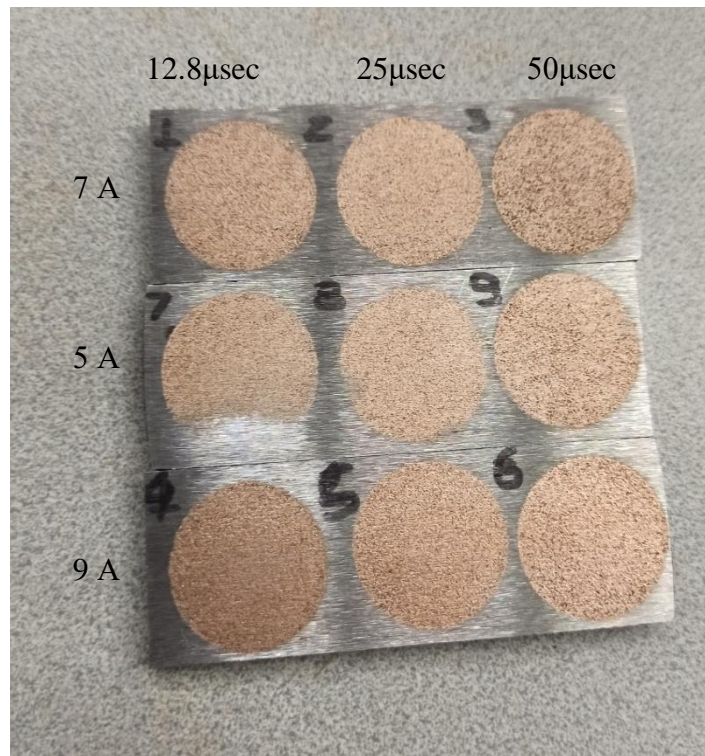
Εικόνα 4.4. Εργαλειομηχανή Agie Charmilles FO 350 Sp.

Πίνακας 11: Παράμετροι κατεργασίας EDM.

Παράμετροι Κατεργασίας	
Ένταση Ρευματος (I_p)	5, 7 και 9 A
Διάρκεια Παλμού (T_{on})	12.8, 25 και 50 μ sec
Δυναμικό Ανοιχτού Κυκλώματος	120 V
Δυναμικό Κλειστού Κυκλώματος	30 V
Duty Factor (η)	0.5

Πίνακας 12: Πειραματικές μετρήσεις με χρήση Cu-30 wt. % ZrO₂ green compact ηλεκτροδίου.

I_p (A)	T_{on} (μsec)	Duty		W_i (g)	W_f (g)	$W_i - W_f$ (g)	t (sec)
		factor	(%)				
5	12.8	50	110.5197	110.5033	0.016333	43	
5	25	50	110.5033	110.4973	0.006	50	
5	50	50	110.4973	110.4767	0.020667	84	
7	12.8	50	109.838	109.9543	-0.11633	28	
7	25	50	109.9543	109.9443	0.01	58	
7	50	50	109.9443	109.9293	0.015	110	
9	12.8	50	113.8723	113.864	0.008333	15	
9	25	50	113.864	113.8377	0.026333	34	
9	50	50	113.8377	113.823	0.014667	43	



Εικόνα 4.5. Τεμάχιο μετά από κατεργασία EDM σε διαφορετικές πειραματικές συνθήκες.

4.4. Χαρακτηρισμός επιφάνειας

Η μελέτη της επιφάνειας των δοκιμίων έγινε με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου. Για την ανάλυση της επιφάνειας των δοκιμίων λήφθηκαν φωτογραφίες σε μεγεθύνσεις $\times 100$, $\times 200$ και $\times 500$. Όμως, για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε περαιτέρω ανάλυση με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) και συνεστιακή μικροσκοπία σάρωσης με laser.

Ο προσδιορισμός της τραχύτητας της επιφάνειας πραγματοποιήθηκε με το προφιλόμετρο επαφής TOPO 01P χρησιμοποιώντας το ISO 25178-2 για την ανάλυση των συλλεγόμενων δεδομένων. Το προφιλόμετρο είναι εξοπλισμένο με μια επαγωγική κεφαλή μέτρησης από διαμάντι σε σχήμα κώνου, με ακτίνα 2 μm και γωνία κορυφής 90° . Το μήκος κύματος αποκοπής ήταν $l_s = 2.5\text{mm}$ με μήκος κοπής 8.0 mm. Για την 3D απεικόνιση της μορφολογίας της επιφάνειας, η ακίδα σάρωσης κάλυψε μια περιοχή με διαστάσεις $1.25 \times 10\text{ mm}$. Η ταχύτητα μέτρησης ήταν 0.5 mm/sec. Οι παράμετροι της τραχύτητας της επιφάνειας που διερευνήθηκαν ήταν η μέση τιμή τραχύτητας (S_a) και η μέγιστη τιμή τραχύτητας (S_z) όπου οι τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

Πίνακας 13: Τιμές τραχύτητας με χρήση Cu-30 wt. % ZrO₂ green compact ηλεκτροδίου.

I_p (A)	T_{on} (μsec)	Duty factor (%)	Μεση Τιμη Τραχύτητας (S_a)	Μεγιστη Τιμή Τραχύτητας (S_z)
5	12.8	50	3.752	65.242
5	25	50	4.533	89.876
5	50	50	5.232	101.135
7	12.8	50	5.27	98.42
7	25	50	4.487	88.262
7	50	50	5.061	115.369
9	12.8	50	11.122	70.9
9	25	50	5.044	68.588
9	50	50	24.059	89.316

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

Αποτελέσματα και συζήτηση

5.1. Εισαγωγή πειραματικού αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα πειραματικά αποτελέσματα που λήφθηκαν, με σκοπό την μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της κατεργασίας (ένταση ρεύματος, διάρκεια παλμών) στην ποιότητα και στα χαρακτηριστικά της κατεργασμένης επιφάνειας. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν είναι τα εξής:

- Ρυθμός μεταφοράς υλικού (MTR)
- Τραχύτητα τροποποιημένης επιφάνειας
- Ανάλυση τροποποιημένης επιφάνειας

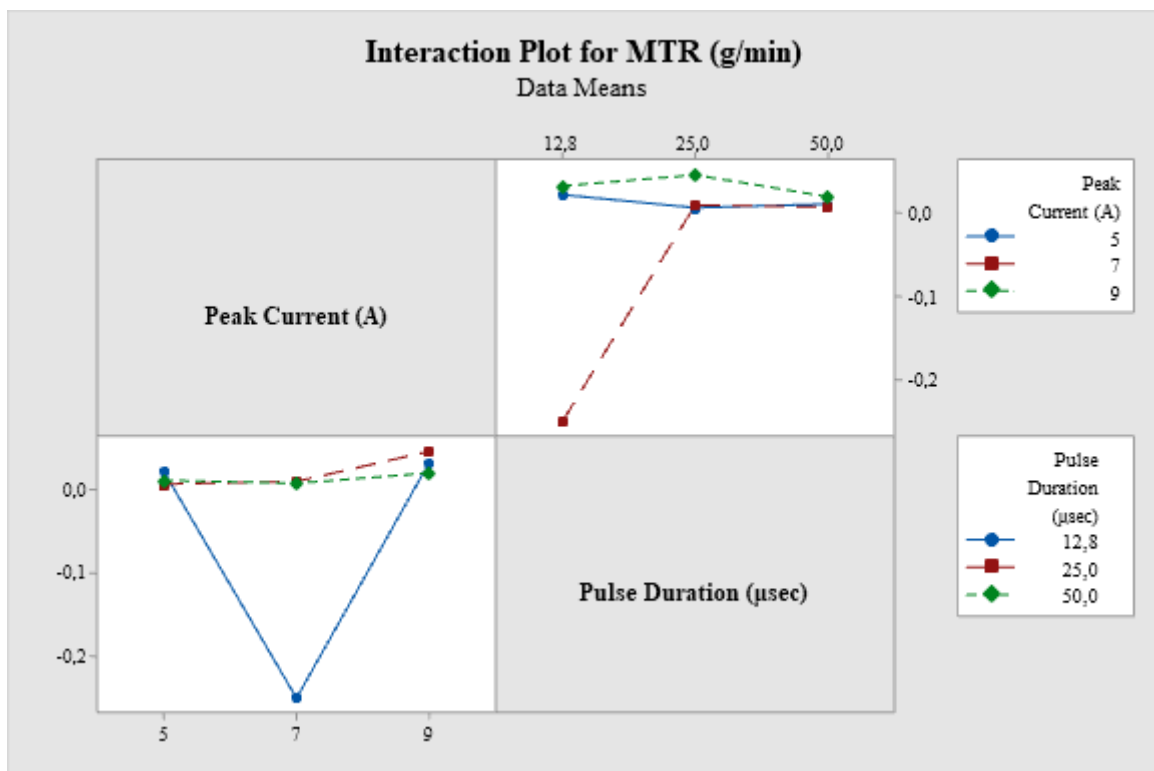
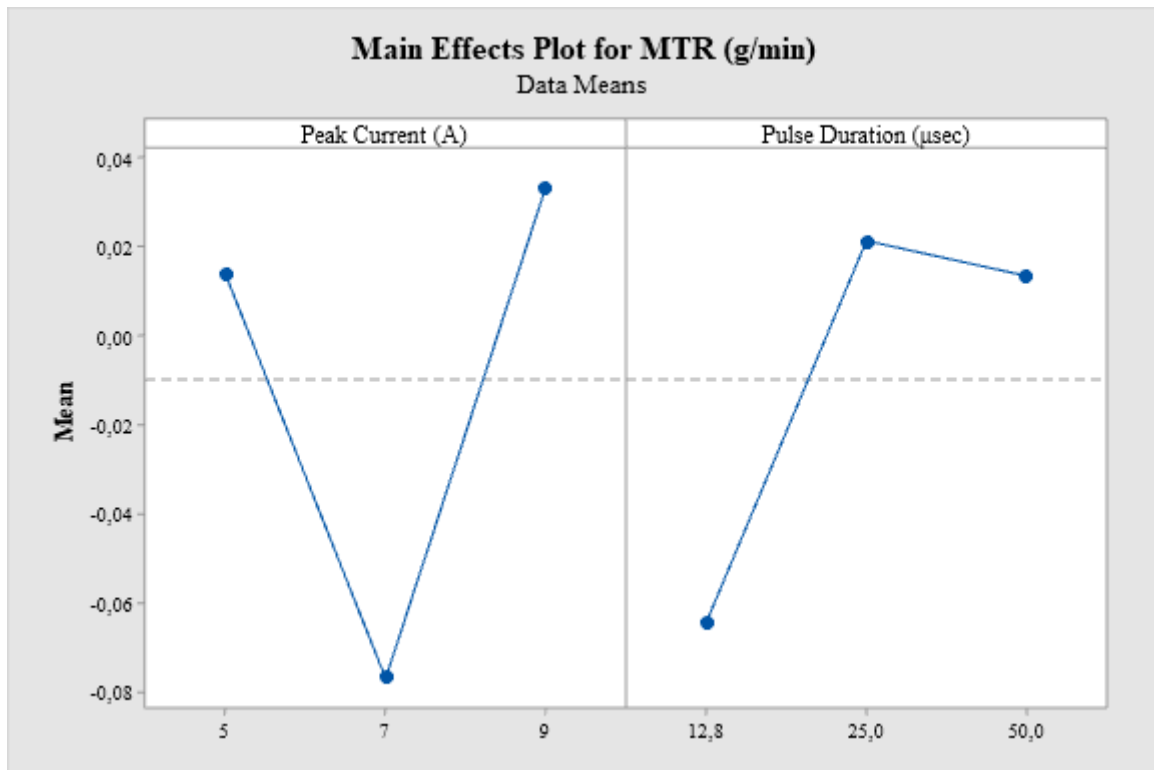
Τα παρακατώ αποτελέσματα είναι αυτά που λήφθηκαν από τη χρήση ηλεκτροδίου green compact Cu-30 wt. % ZrO₂ καθώς ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η τροποποίηση της κατεργασμένης επιφάνειας, δηλαδή της ενίσχυσης της τροποποιημένης επιφάνειας με ZrO₂.

5.2. Ρυθμός μεταφοράς υλικού (MTR)

Ο ρυθμός μεταφοράς υλικού αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο απόδοσης της κατεργασίας για το υπολογισμό της μεταφερόμενης ποσότητας υλικού ηλεκτροδίου στην κατεργασμένη επιφάνεια. Οπότε, το MTR εξαρτάται από τις παραμέτρους της διαδικασίας [88]. Από τα πειραματικά αποτελέσματα του Πίνακα 10 για ηλεκτρόδιο Cu-30 wt. % ZrO₂ green compact και από τη Σχέση (4.1) μπορεί να προσδιοριστεί η σχέση του MTR με τις παραμέτρους της κατεργασίας. Αρχικά, από τον Πίνακα 14 παρατηρείται ότι το MTR λαμβάνει θετικές και αρνητικές τιμές. Τόσο η αφαίρεση όσο και η μεταφορά υλικού πραγματοποιούνται ταυτόχρονα κατά την κατεργασία EDM. Το υλικό του ηλεκτροδίου μεταφέρεται από το ηλεκτρόδιο στην τηγμένη επιφάνεια του τεμαχίου κατά την ηλεκτρική εκκένωση και ταυτόχρονα μέρος του υλικού απομακρύνεται επίσης από αυτό το σημείο. Συνεπώς, το ποσό που παραμένει στην επιφάνεια εργασίας είναι η καθαρή ποσότητα του υλικού που μεταφέρθηκε. Το MTR συναρτήσει της έντασης του ρεύματος και της διάρκειας παλμού φαίνεται από το γράφημα της Εικόνας 5.1.

Πίνακας 14: Πειραματικά αποτελέσματα με χρήση Cu-30 wt. % ZrO₂ green compact ηλεκτροδίου.

Αριθμός Πειράματος	Ένταση Ρεύματος-I _p (A)	Διάρκεια Παλμού-T _{on} (μsec)	Χρόνος καταργασίας (sec)	MTR ($\frac{g}{min}$)
1	5	12.8	43	0.0228
2	5	25	50	0.0072
3	5	50	84	0.0117
4	7	12.8	28	-0.2493
5	7	25	58	0.0103
6	7	50	110	0.0082
7	9	12.8	15	0.0333
8	9	25	34	0.0465
9	9	50	43	0.0205



Εικόνα 5.1. MTR συναρτήσει της έντασης του ρεύματος και της διάρκειας παλμού.

Με βάση τις βιβλιογραφικές αναφορές, έχει βρεθεί ότι το MTR αυξάνεται όταν αυξάνονται η ένταση του ρεύματος και η διάρκεια του χρόνου παλμού. Λόγω της

αύξησης της έντασης του ρεύματος, η ενέργεια της ηλεκτρικής εκκένωσης αυξάνεται προκαλώντας έτσι την αύξηση της ποσότητας του τηγμένου υλικού του ηλεκτροδίου στο σημείο της ηλεκτρικής εκκένωσης. Ακόμη, η αύξηση της διάρκειας παλμού οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού παραγωγής θερμότητας, γεγονός που αυξάνει τον ρυθμό της τήξης και της εξάτμισης του ηλεκτροδίου [89-91]. Όμως, με βάση τα διαγράμματα της Εικόνα 5.1. μπορεί να παρατηρηθεί ότι το MTR αυξάνεται με την αύξηση της διάρκειας παλμού ενώ παράλληλα διαπιστώνεται ότι με αύξηση της έντασης του ρεύματος το MTR μειώνεται.

Αρχικά, όπως φαίνεται από την Εικόνα 5.1. (α), το MTR μειώνεται και λαμβάνει αρνητική τιμή για $I_p = 7A$. Η υψηλή ηλεκτρική ενέργεια της εκκένωσης που συμβαίνει λόγω της αύξησης του I_p , έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας του υλικού που απομάκρυνεται από το υλικό του ηλεκτροδίου το οποίο μεταφέρεται στο τεμάχιο. Όμως, παράλληλα αυξάνεται και η ποσότητα του τηγμένου υλικού στο τεμάχιο, ένα μέρος της οποίας απομακρύνεται μέσω του διηλεκτρικού μέσου ενώ το υπόλοιπο παραμένει στον κρατήρα. Συνεπώς, ο ρυθμός του υλικού που μεταφέρεται στο τεμάχιο είναι μικρότερος από το ρυθμό υλικού που απομακρύνεται, έτσι, η «καθαρή» μεταφορά υλικού είναι χαμηλή ή αρνητική, οπότε το MTR μειώνεται και λαμβάνει αρνητική τιμή. Ωστόσο, με περεταίρω αύξηση της έντασης του ρεύματος το MTR αυξάνεται.

Με την αύξηση της διάρκειας παλμού, η ενέργεια της στήλης πλάσματος και η περίοδος μεταφοράς αυτής της ενέργειας στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο αυξάνονται, οδηγώντας σε αύξηση του MTR (Εικόνα 5.1. (α)). Όμως με περεταίρω αύξηση της διάρκειας παλμού, φαίνεται ότι το MTR ελαφρώς μειώνεται.

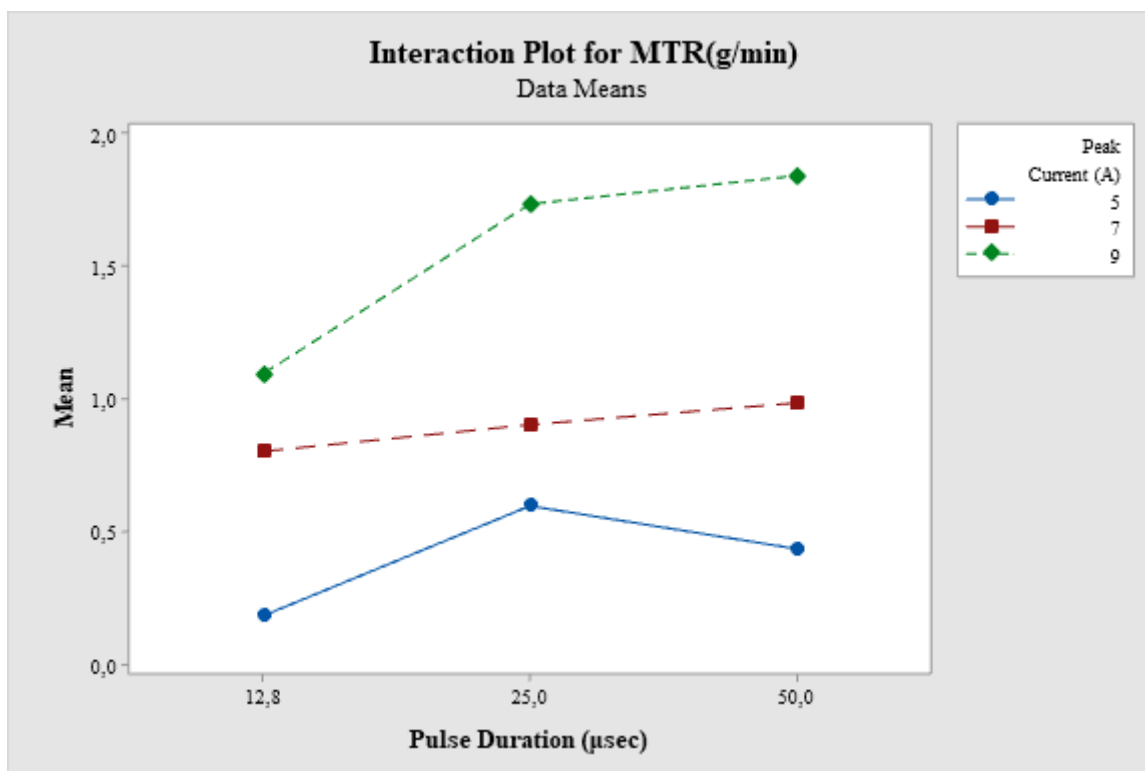
Οι παραπάνω παρατηρήσεις όμως δεν φαίνεται να ισχύουν για όλες τις δοκιμές. Με βάση την Εικόνα 5.1. (β) φαίνεται ότι για $I_p = 7A$ και για $T_{on} = 12.8\mu sec$ το MTR εμφανίζει σημαντικά υψηλή απόκλιση.

Εν συντομία, παρακάτω παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2. η σχέση μεταξύ του MTR με την ένταση του ρεύματος και με τη διάρκεια παλμού για πυροσυσσωματωμένο ηλεκτρόδιο Cu και τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 15. Όπως φαίνεται από το γράφημα της Εικόνα 5.2. το MTR αυξάνεται με την αύξηση της έντασης του ρεύματος και της διάρκειας παλμού. Λόγω της αύξησης της έντασης του ρεύματος, η ενέργεια της ηλεκτρικής εκκένωσης αυξάνεται προκαλώντας έτσι την αύξηση της ποσότητας του τηγμένου υλικού του ηλεκτροδίου

στο σημείο της ηλεκτρικής εκκένωσης. Ακόμη, η αύξηση της διάρκειας παλμού οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού παραγωγής θερμότητας, γεγονός που αυξάνει τον ρυθμό της τήξης και της εξάτμισης του ηλεκτροδίου. Άρα, με βάση τις Εικόνες 5.1. και 5.2. το MTR εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, δηλαδή τις συνθήκες κατεργασίες, το υλικό του ηλεκτροδίου κλ.π.

Πίνακας 15: Πειραματικά αποτελέσματα με χρήση πυροσυσσωματωμένου ηλεκτροδίου Cu.

Αριθμός Πειράματος	Ένταση Ρεύματος- I_p (A)	Διάρκεια Παλμού- T_{on} (μsec)	Χρόνος κατεργασίας (sec)	MTR ($\frac{\text{g}}{\text{min}}$)
1	5	12.8	54	0.1841
2	5	25	63	0.5968
3	5	50	59	0.4356
4	7	12.8	16	0.8013
5	7	25	19.5	0.9015
6	7	50	23	0.9835
7	9	12.8	25	1.092
8	9	25	23.5	1.7294
9	9	50	19	1.8358



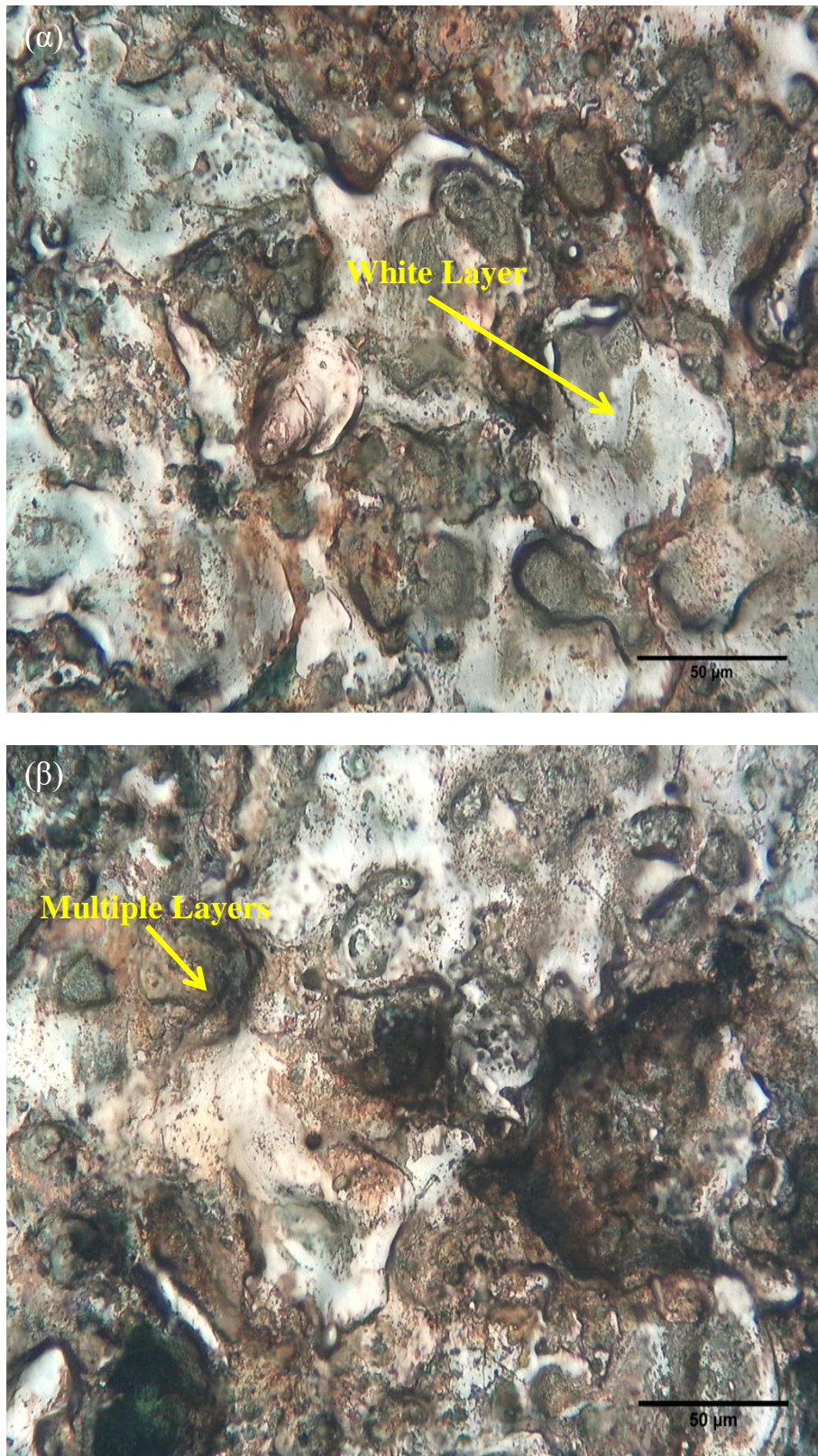
Εικόνα 5.2. MTR συναρτήσει της έντασης του ρεύματος και της διάρκειας παλμού.

5.3. Τραχύτητα επιφάνειας

Σε μια κατεργασμένη επιφάνεια με ηλεκτροδιάβρωση πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις μεταλλουργικές αλλαγές, στο σχηματισμό του θερμικά επηρεαζόμενου στρώματος στο τεμάχιο καθώς και στην επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στην ποιότητα και στα χαρακτηριστικά της κατεργασμένης επιφάνειας.

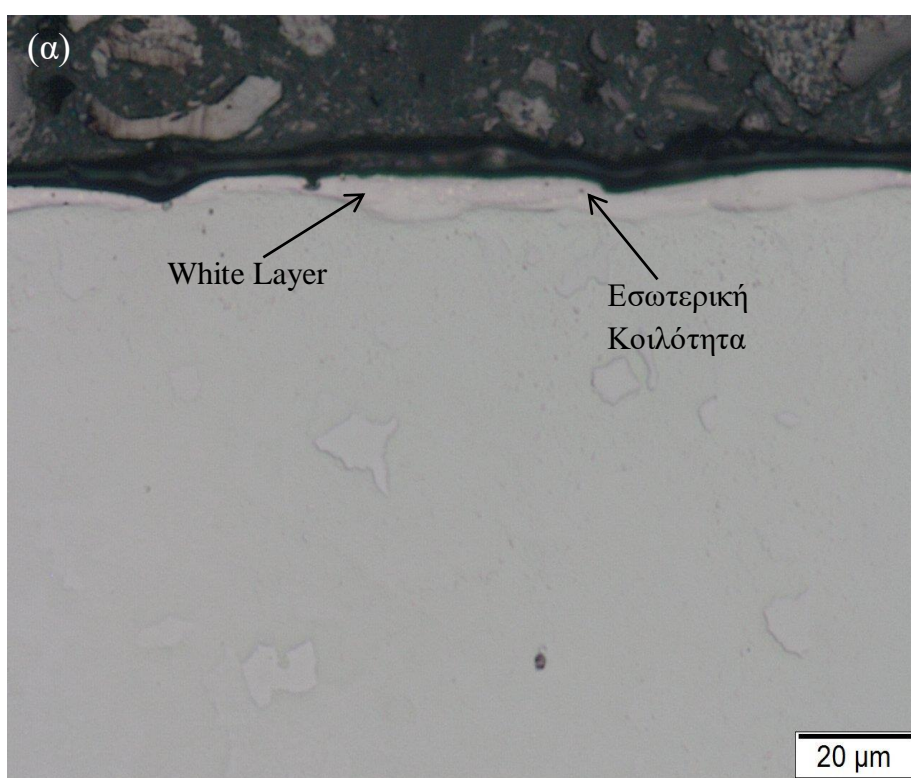
Η μορφολογία της κατεργασμένης επιφάνειας, οφείλεται στην μεγάλη ποσότητα θερμότητας που παράγεται κατά την ηλεκτρική εκκένωση, η οποία προκαλεί τήξη και εξάτμιση του υλικού, ακολουθούμενη από ταχεία ψύξη. Με κάθε εκκένωση, σχηματίζεται ένας κρατήρας στον εργαλειοχάλυβα και στο ηλεκτρόδιο Cu-30 wt. % ZrO₂. Με βάση τις αναφορές [28, 92], από το τηγμένο υλικό που παράγεται από την εκκένωση, μόνο το 15%-35% ή λιγότερο παρασύρεται από το διηλεκτρικό σε μορφή θραυσμάτων, ενώ το υπόλοιπο του τηγμένου υλικού στερεοποιείται εκ νέου στην κατεργασμένη επιφάνεια, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός επαναστερεοποιημένου στρώματος ή White Layer. Η Εικόνα 5.3. που λήφθηκε μέσω οπτικού μικροσκοπίου δείχνει ένα σημαντικό ποσοστό της κατεργασμένης

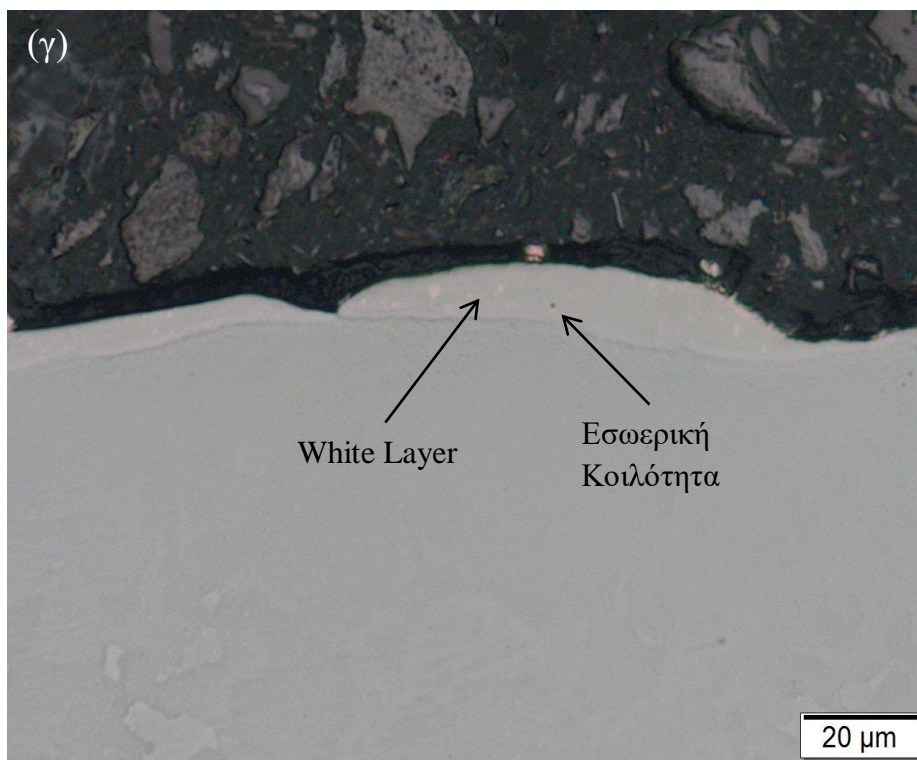
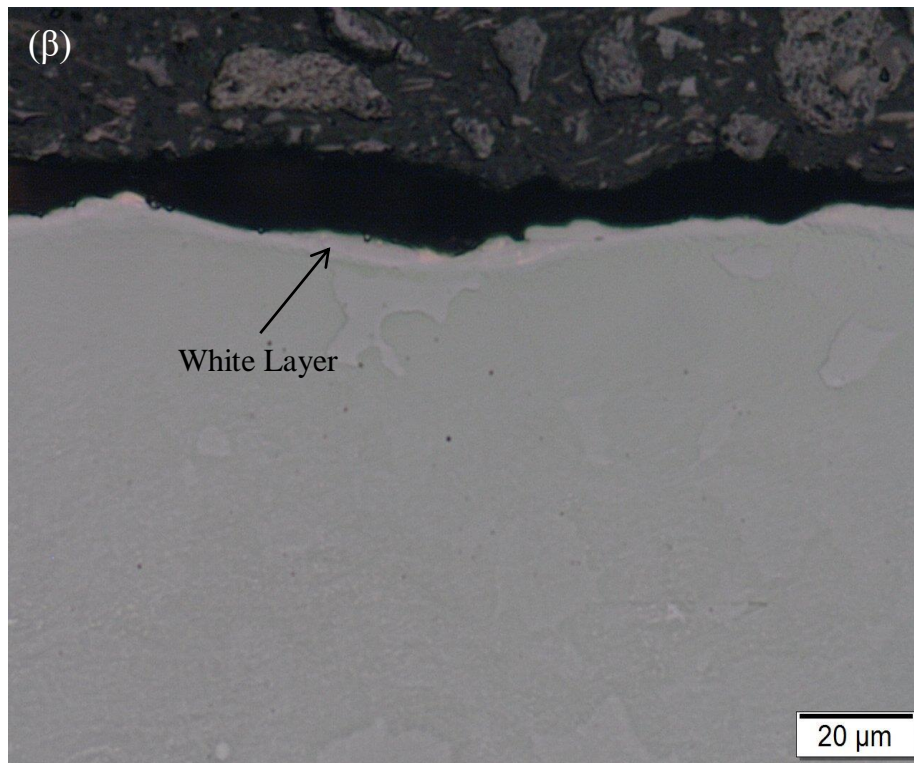
επιφάνειας να έχει καλυφθεί από το WL μετά τη χρήση ηλεκτροδίου Cu-30 wt. % ZrO_2 .



Εικόνα 5.3. (α) Οπτική μικροσκοπία του White Layer όταν (α) $I_p = 5A$ και $T_{on} = 12.8\mu sec$ και (β) $I_p = 5A$ και $T_{on} = 50\mu sec$ (x500).

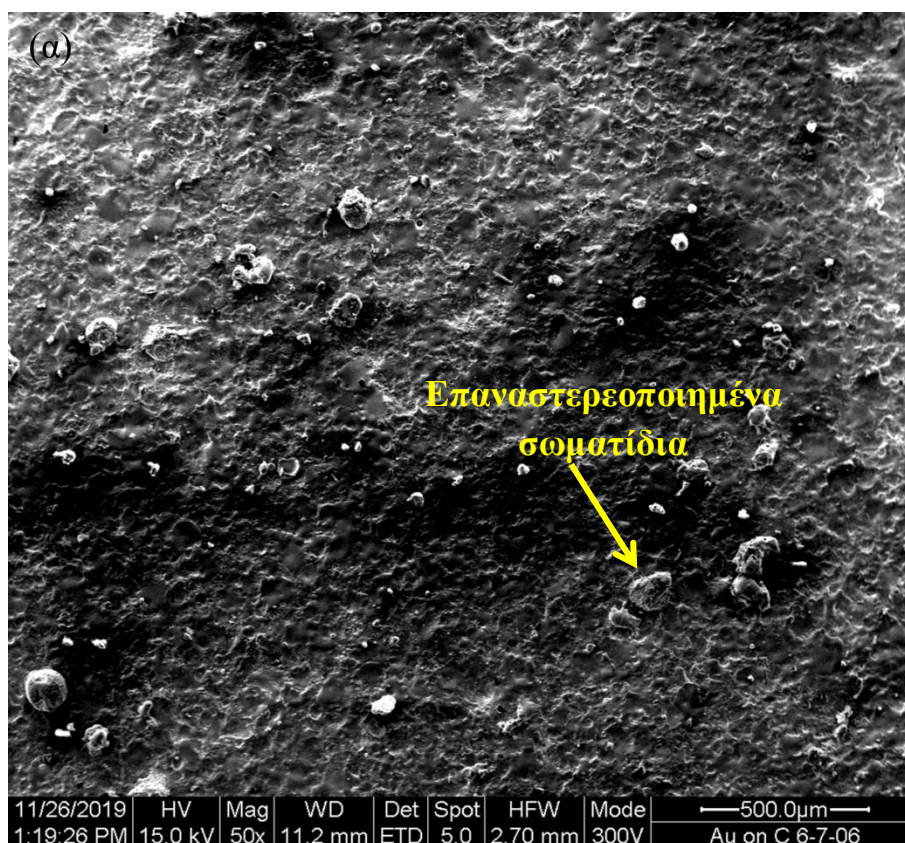
Από την Εικόνα 5.3. (β) μπορεί να παρατηρηθεί και ο σχηματισμός πολλαπλών επαναστεροποιημένων στρώματων, σχηματιζόμενα ως αποτέλεσμα τηγμένου μετάλλου το οποίο απομακρύνεται και έπειτα επαναστεροποιείται σε είδη υπάρχον επαναστεροποιημένου στρώματος. Οι παραπάνω παρατηρήσεις μπορούν να επιβεβαιωθούν και από τις τομές της κατεργασμένης επιφάνειας, σε διαφορετικές πειραματικές συνθήκες όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4. Μπορεί να παρατηρηθεί ένα σχεδόν συνεχές επαναστεροποιημένο στρώμα, το πάχος του οποίου μεταβάλλεται ανάλογα με τις πειραματικές συνθήκες. Ακόμα, εντός του White Layer φαίνεται και η ύπαρξη εσωτερικών κοιλότητων.

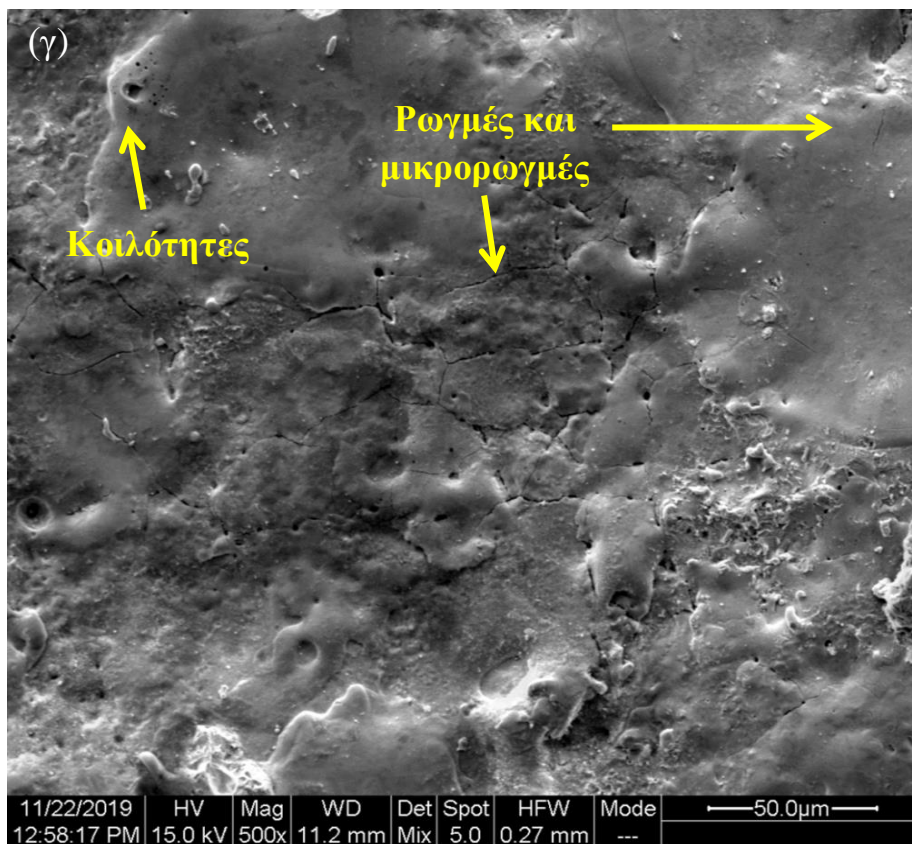
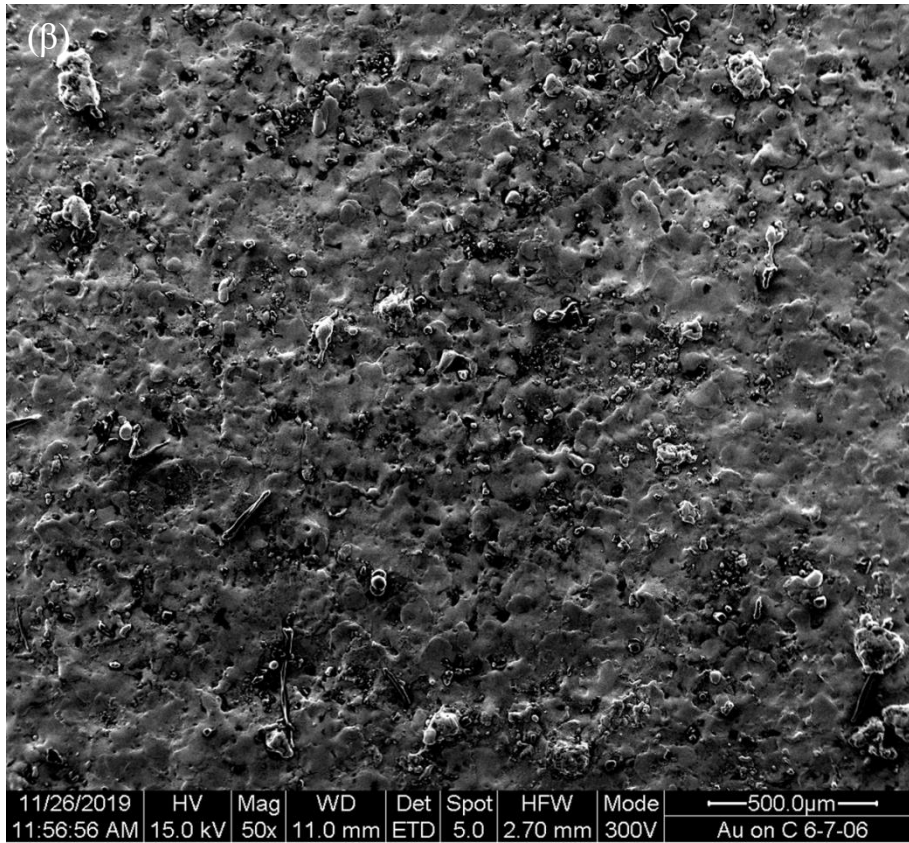


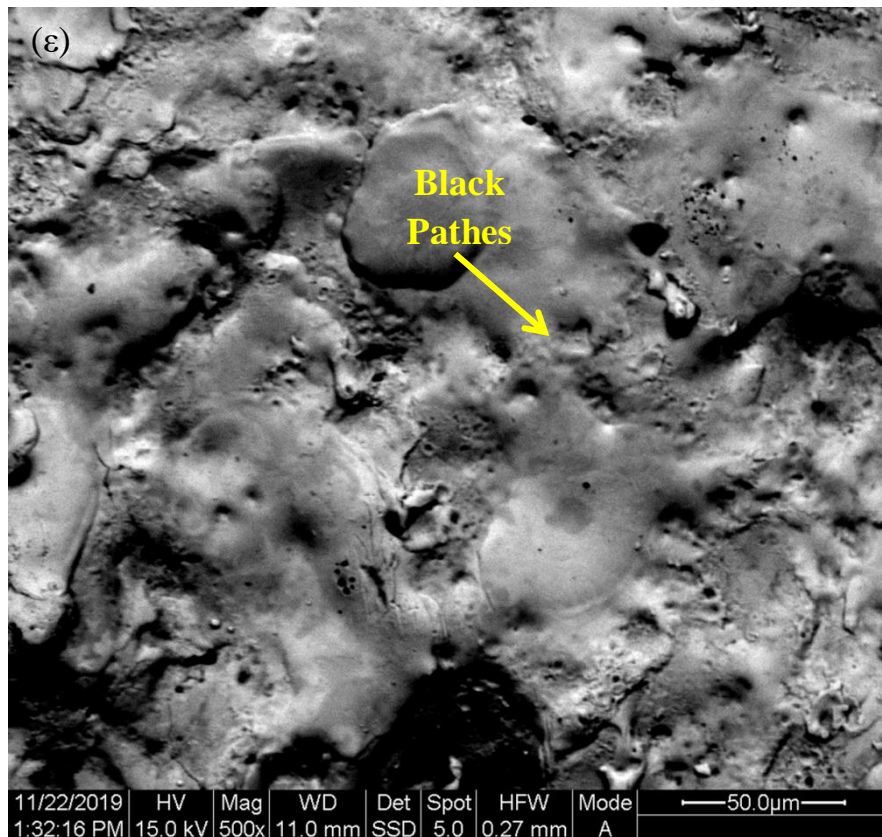
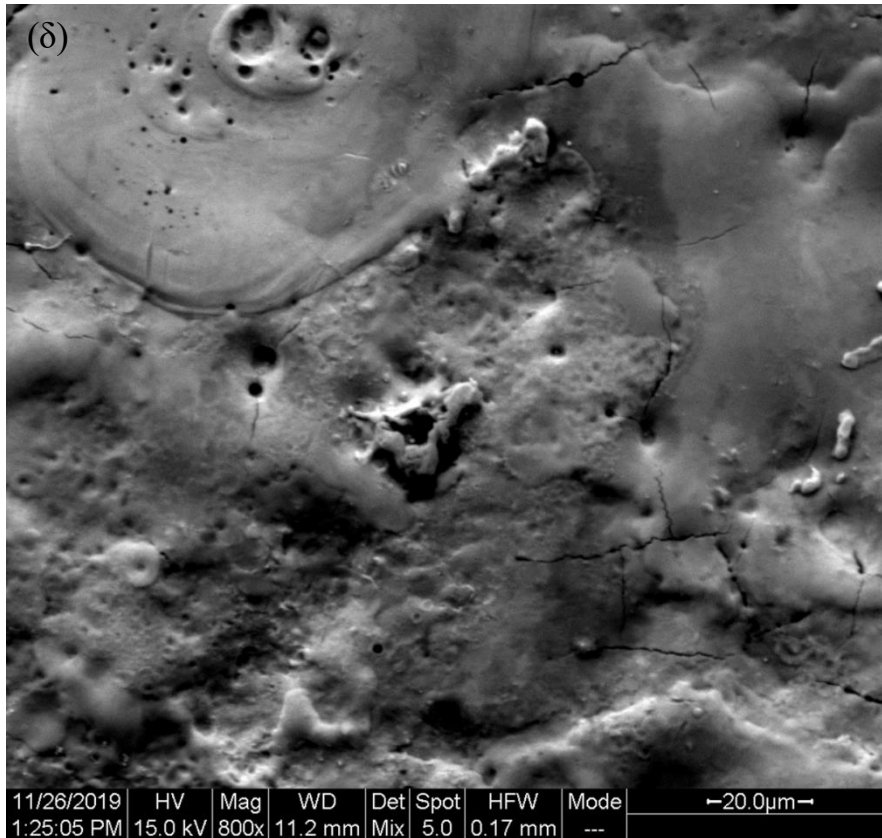


Εικόνα 5.4. Τομές κατεργασμένης επιφάνειας όταν (α) $I_p= 5A$ και $T_{on}= 12.8\mu sec$, (β) $I_p= 7A$ και $T_{on}= 25\mu sec$ και (γ) $I_p= 9A$ και $T_{on}= 50\mu sec$.

Από την Εικόνα 5.5 (α) και (β) που λήφθηκε μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, φαίνεται ότι η κατεργασμένη επιφάνεια του εργαλειοχάλυβα Calmax καλύπτεται από μια άτακτη κατανομή κρατήρων μαζί με ακανόνιστα σημάδια ροής τηγμένου μετάλλου. Στην επιφάνεια παρατηρούνται επαναστεροποιημένα σωματίδια-σφαιρίδια (globules ή droplets) τα οποία προέρχονται από αποβαλλομενο υλικό, είτε του ηλεκτροδίου (σε αέρια, υγρή ή στερεή κατάσταση ενισχύοντας με κραματικά στοιχεία την επιφάνεια του τεμαχίου [93]) είτε του τεμαχίου, τα οποία επαναστεροποιούνται και εναποτίθενται στην κατεργασμένη επιφάνεια. Μπορούν, ακόμη, να παρατηρηθούν και μικρότερα σωματίδια τα οποία πιθανότατα είναι καρβίδια που σχηματίζονται από τη χημική αντίδραση μεταξύ των σωματιδίων άνθρακα που αποσυντίθενται από διηλεκτρικό μέσο (έλαιο) και του υλικού του ηλεκτροδίου [94].





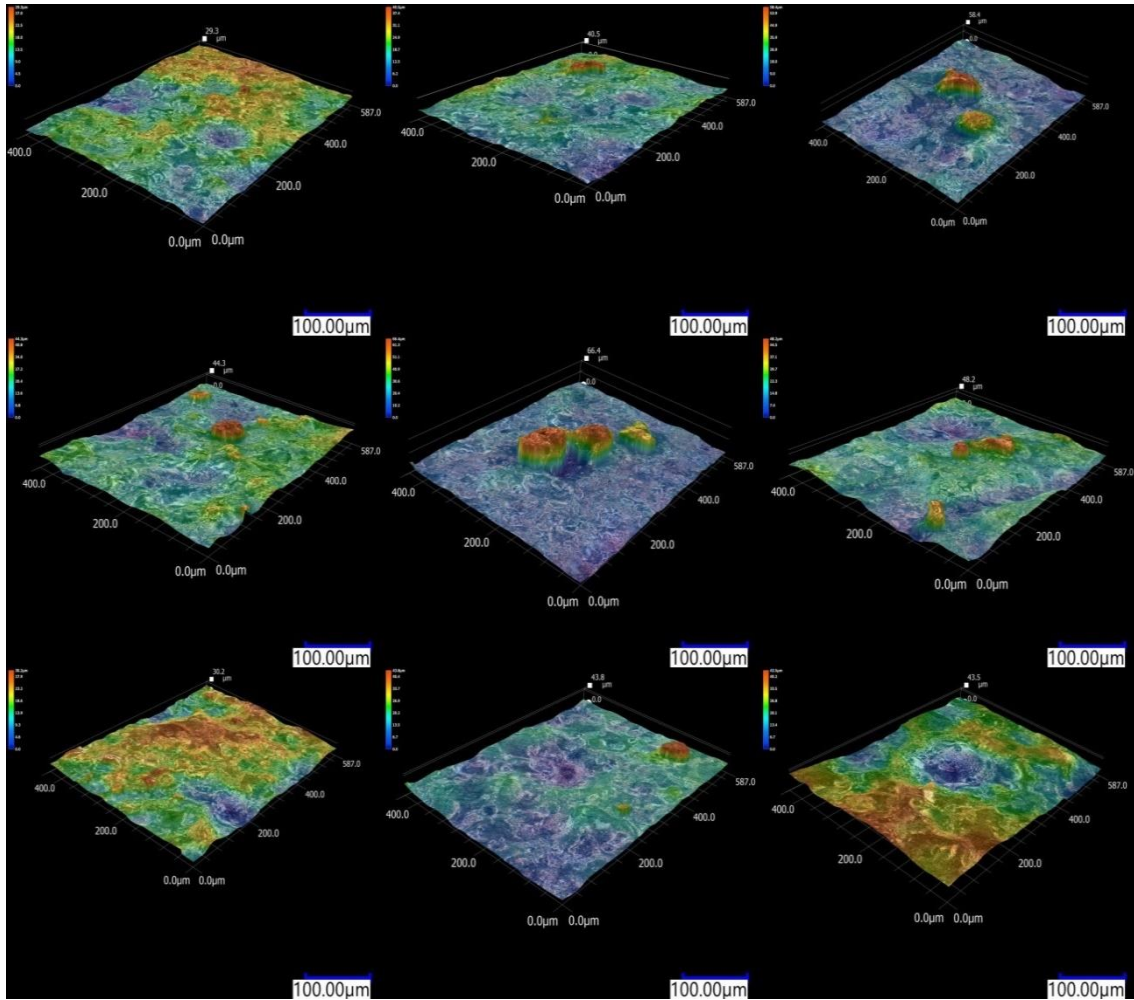


Εικόνα 5.5. Ηλεκτρονική μικρογραφία τροποποιημένης επιφάνειας (α) $I_p=5A$ και $T_{on}=50\ \mu\text{sec}$, (β) $I_p=9A$, $T_{on}=25\ \mu\text{sec}$, (γ) $I_p=7A$ και $T_{on}=50\ \mu\text{sec}$, (δ) $I_p=5A$, $T_{on}=50\ \mu\text{sec}$ και (ε) $I_p=7A$, $T_{on}=12.8\ \mu\text{sec}$.

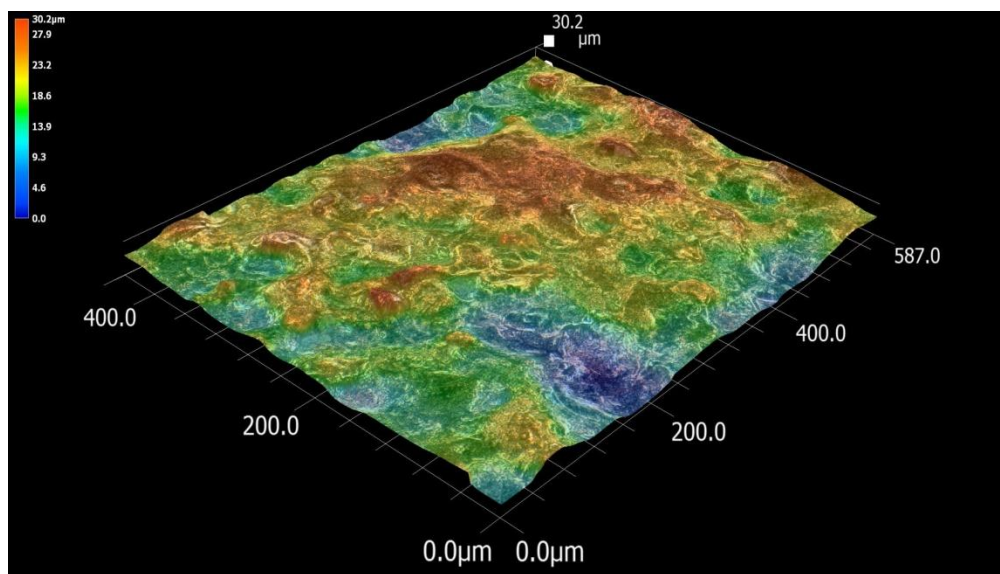
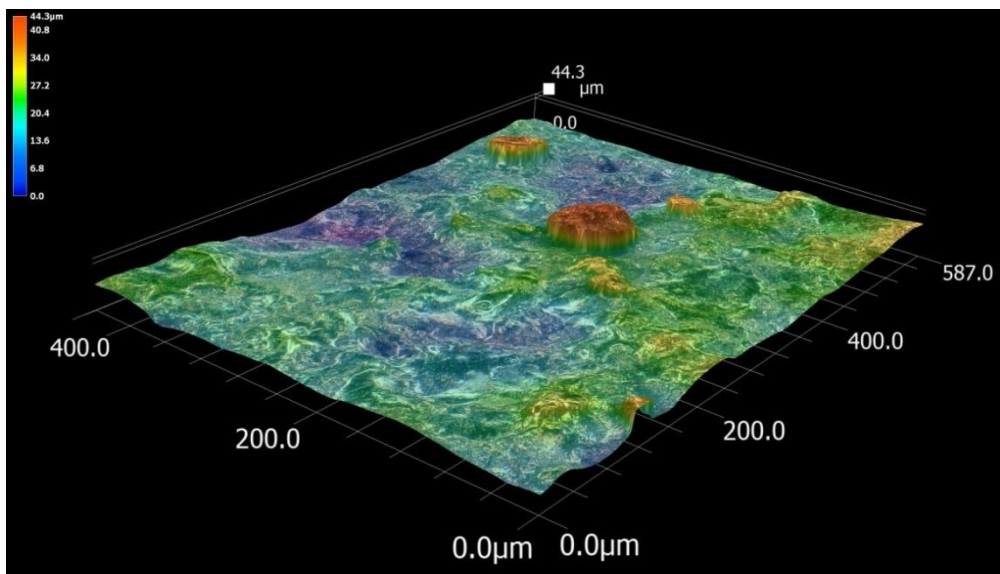
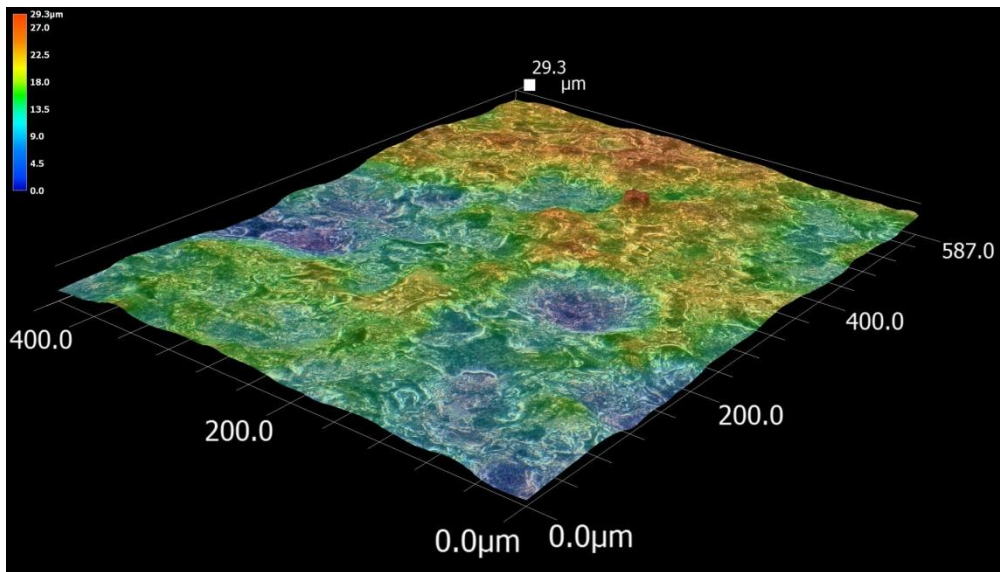
Αλλά χαρακτηριστικά που συναντώνται σε μια κατεργασμένη επιφάνεια με ηλεκτροδιάβρωση φαίνονται στην Εικόνα 5.5. (γ) και (δ). Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα δίκτυο ρωγμών και μικρορωγμές, το οποίο συναντάται όταν χρησιμοποιείται έλαιο ως διηλεκτρικό υγρό αλλά και η παρουσία κοιλοτήτων. Οι γρήγοροι ρυθμοί θέρμανσης-ψύξης που προκαλούνται κατά την διάρκεια της κατεργασίας είναι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη μικρορωγμών, ενώ οι κοιλότητες είναι αποτέλεσμα φυσαλίδων αερίου που απελευθερώνονται από το τηγμένο υλικό.

Η τοπογραφία της επιφάνειας αποκαλύπτει ότι η επιφανειακή τραχύτητα είναι αποτέλεσμα της άτακτης κατανομής των κρατήρων, των επαναστερεοποιημένων σωματιδίων κ.α. Η τραχύτητα της επιφάνειας εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος και τη διάρκεια του παλμού [95]. Σύμφωνα με τους Lee και Tai [35], καθώς η ένταση ρεύματος αυξάνεται, η ενέργεια της ηλεκτρικής εκκένωσης αυξάνεται με αποτέλεσμα την επακόλουθη αύξηση της διάβρωσης του τεμαχίου και επομένως την αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας. Επιπλέον, καθώς η διάρκεια παλμού αυξάνεται, η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που μεταφέρεται στην επιφάνεια του δείγματος αυξάνεται και έτσι περισσότερο υλικό τήκεται. Εάν το τηγμένο υλικό δεν απομακρύνεται από την κατεργασμένη επιφάνεια μέσω του διηλεκτρικού, τότε θα στερεοποιηθεί κατά τη διάρκεια της ψύξης και θα σχηματίσει το WL. Η επίδραση του WL αυξάνει επίσης την τραχύτητα της επιφάνειας.

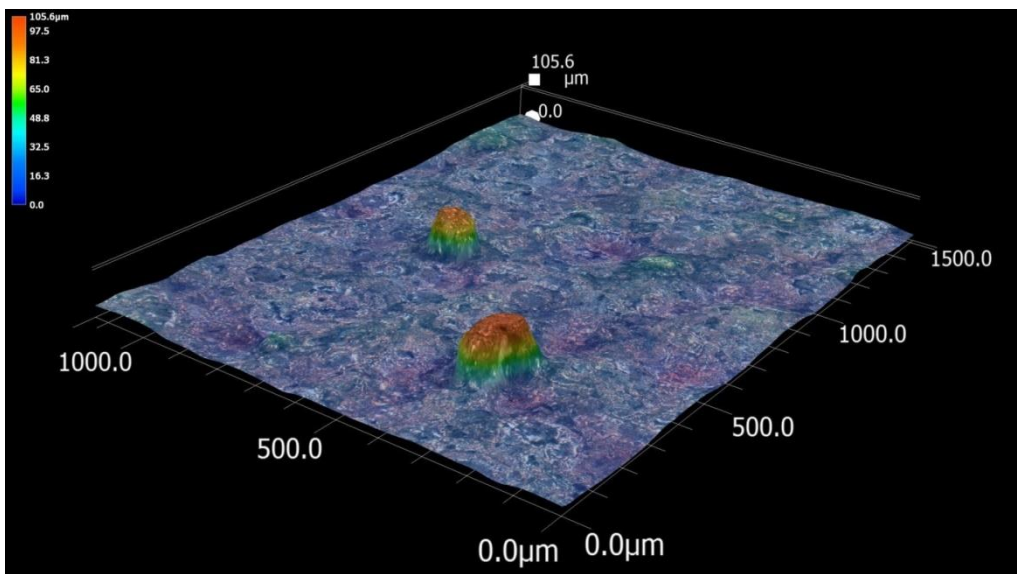
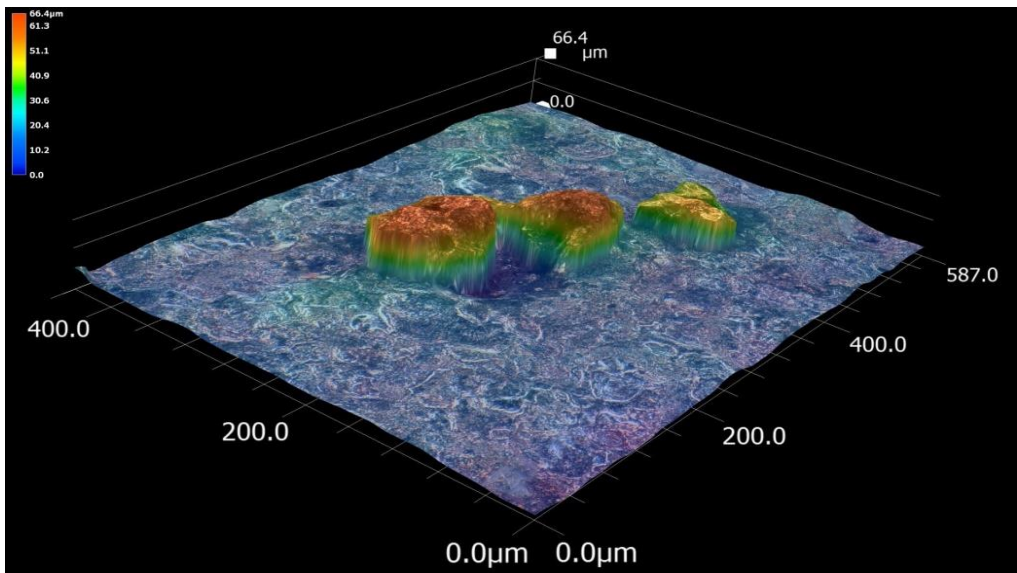
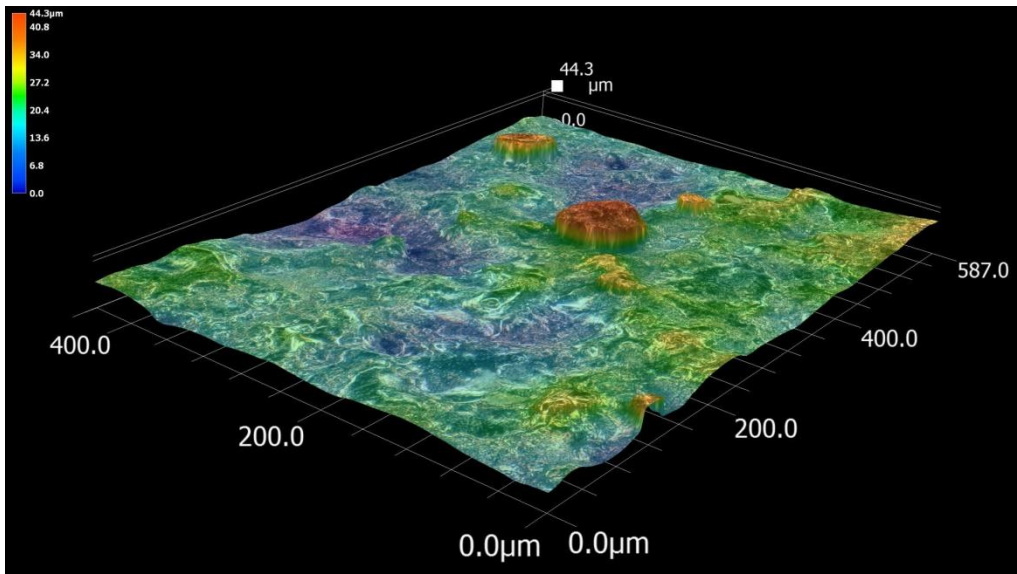
Στην Εικόνα 5.6. φαίνεται η 3-D απεικόνιση της κατεργασμένης επιφάνειας που λήφθηκε με τη χρήση συνθεσιακής μικροσκοπίας σάρωσης με Laser σε όλες τις συνθήκες κατεργασίας όπου τα διαφορετικά χρώματα υποδηλώνουν διαφορετικά ύψη. Οι συνθήκες της κατεργασίας, όπως φαίνεται και από την εικόνα, επηρεάζουν την μορφολογία της επιφάνειας, δηλαδή την τραχύτητα. Στις Εικόνες 5.7. και 5.8. φαίνεται η κατεργασμένη επιφάνεια σε επιλεγμένες συνθήκες κατεργασίας όπου οι διακυμάνσεις της επιφάνειας μπορούν να παρτηρηθούν καλύτερα.



Εικόνα 5.6. Απεικόνιση 3-D κατεργασμένης επιφάνειας με οπτική συνεστιακή μικροσκοπία με Laser σε όλες τις συνθήκες κατεργασίας.



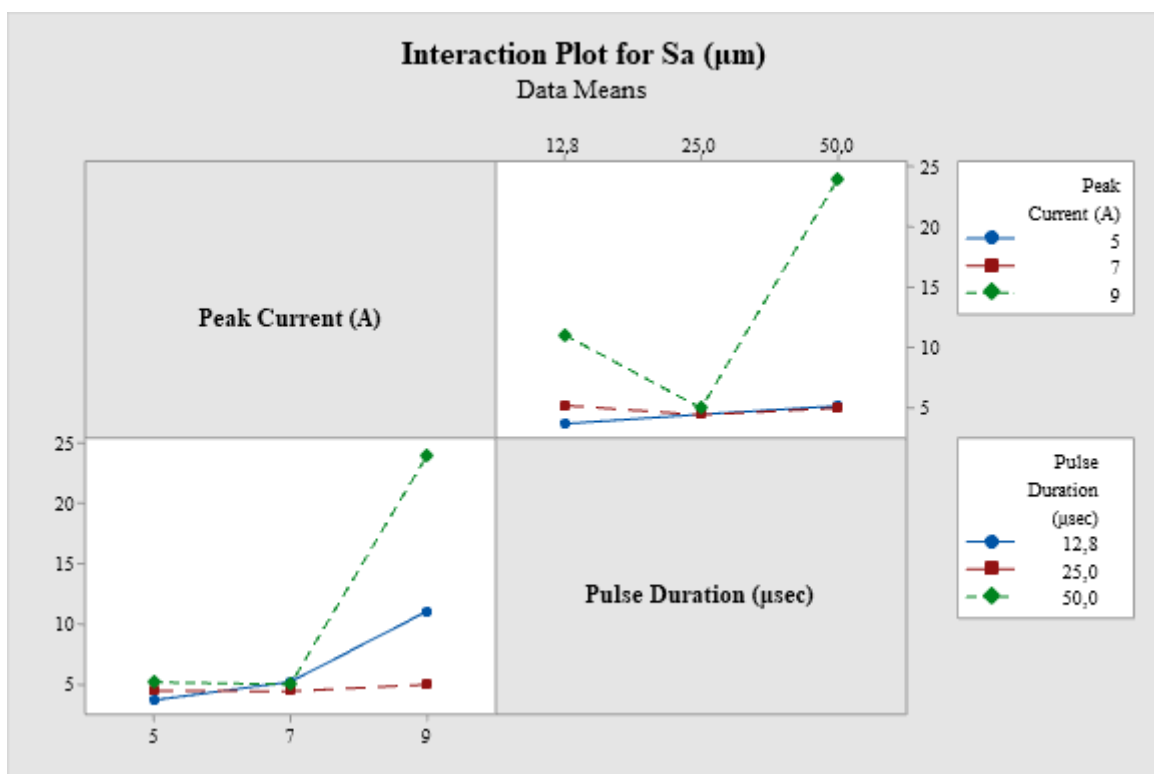
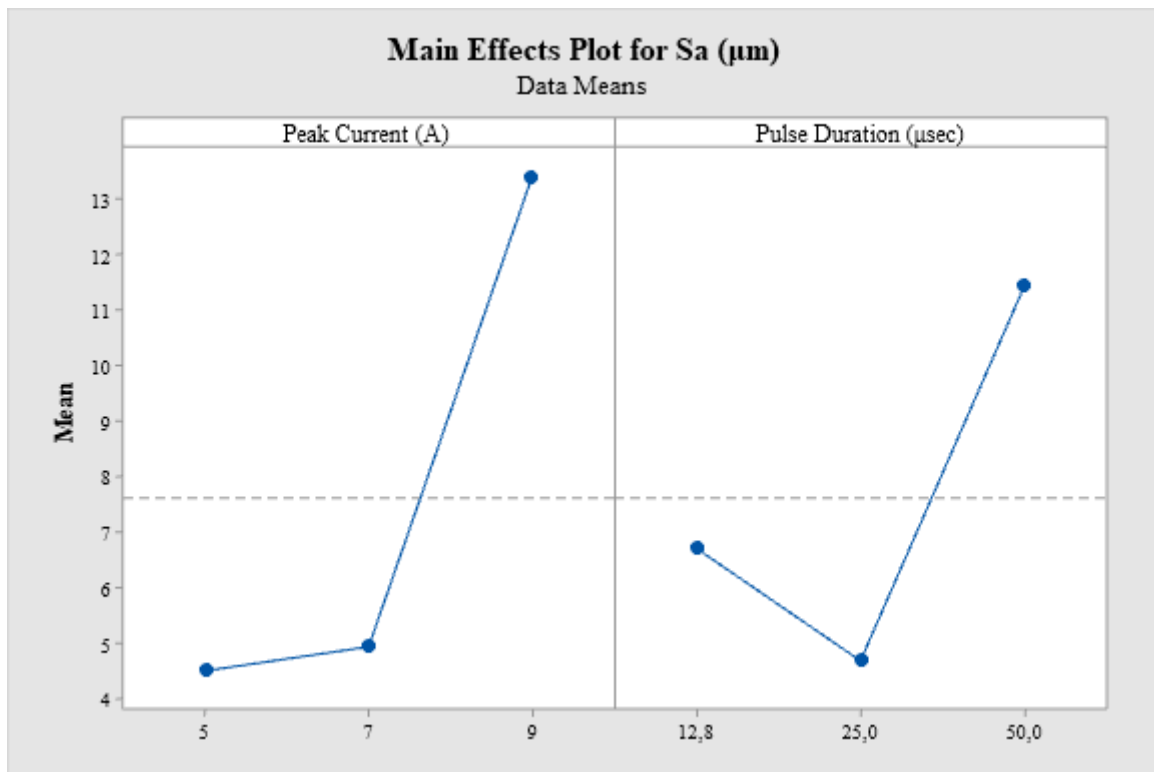
Εικόνα 5.7. Απεικόνιση 3-D κατεργασμένης με οπτική συνεστιακή μικροσκοπία με Laser για $I_p= 5-9A$ και $T_{on}= 12.8 \mu sec$.



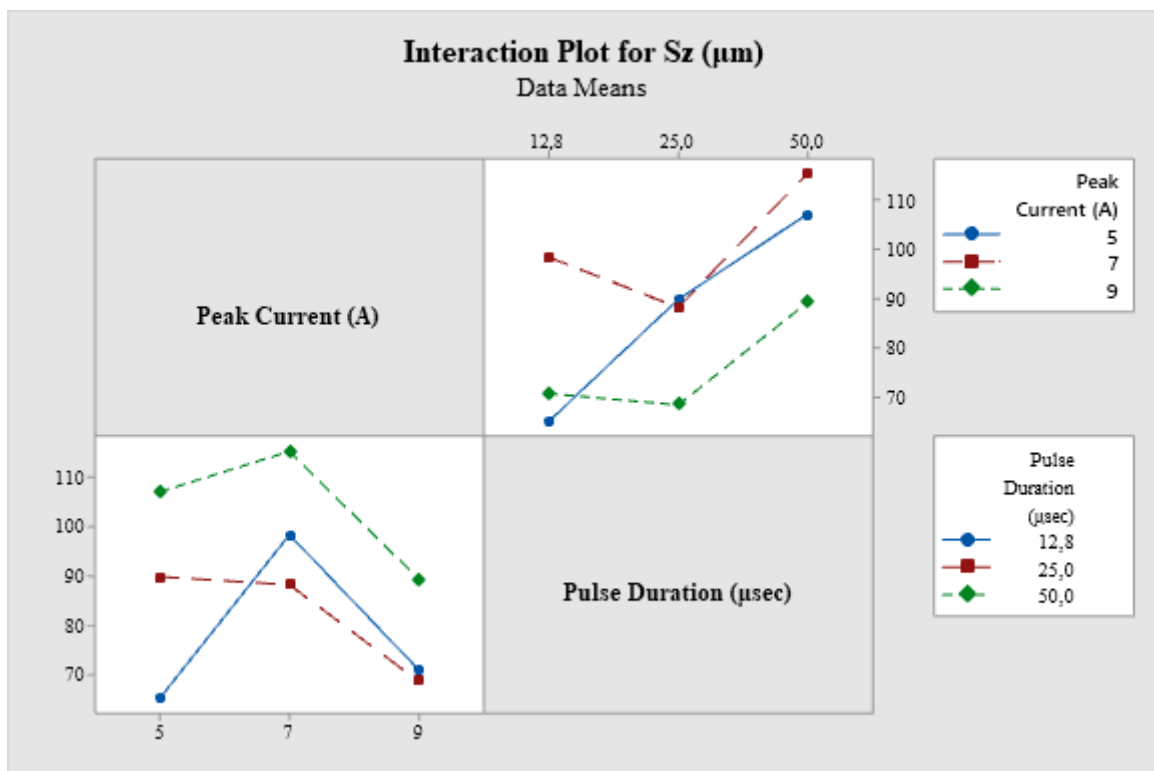
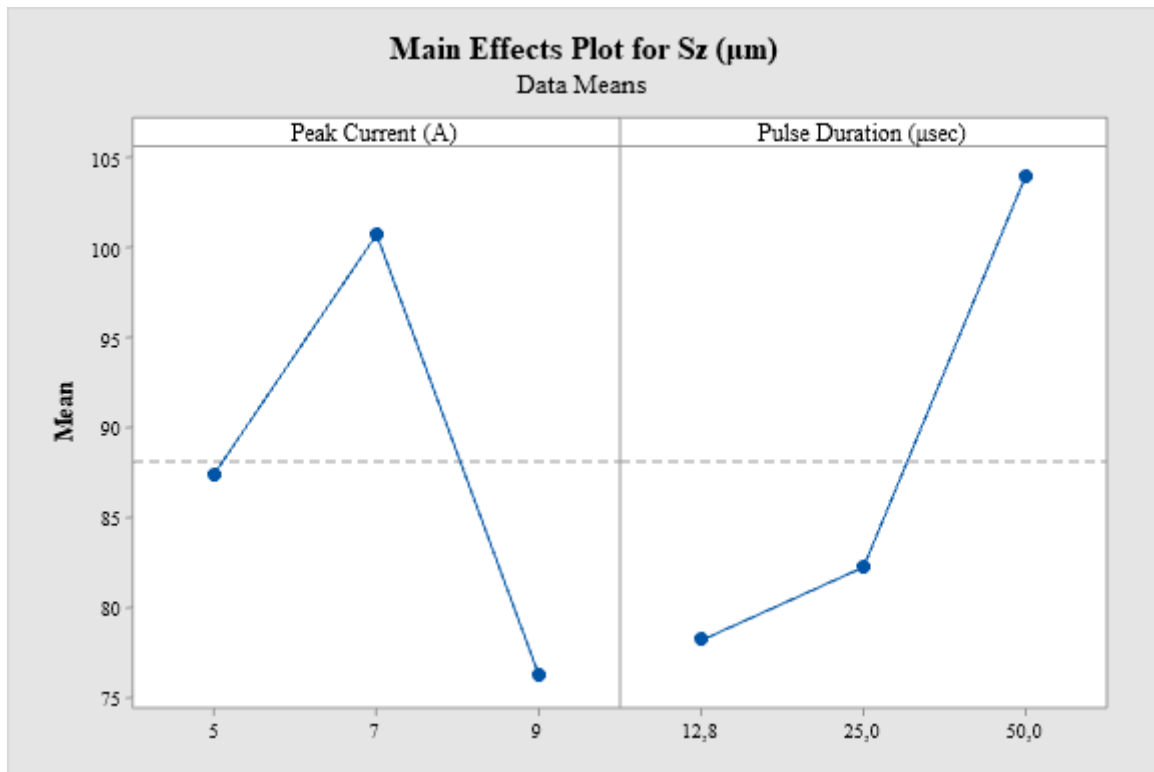
Εικόνα 5.8. Απεικόνιση 3-D κατεργασμένης επιφάνειας με οπτική συνεστιακή μικροσκοπία με Laser για $I_p=7A$ και $T_{on}=12.8-50\mu\text{sec}$.

Οι περισσότεροι ερευνητές ορίζουν την τραχύτητα της επιφάνειας με βάση μία μόνο παράμετρο, την R_a (μέση τιμή τραχύτητας). Ωστόσο, η τραχύτητα της επιφάνειας εξαρτάται από πολλές παραμέτρους (R_z , S_a , S_z κλ.π) [96]. Στην παρούσα εργασία οι παράμετροι της τραχύτητας που εξετάστηκαν ήταν η μέγιστη τιμή τραχύτητας (S_z) και η μέση τιμή τραχύτητας (S_a).

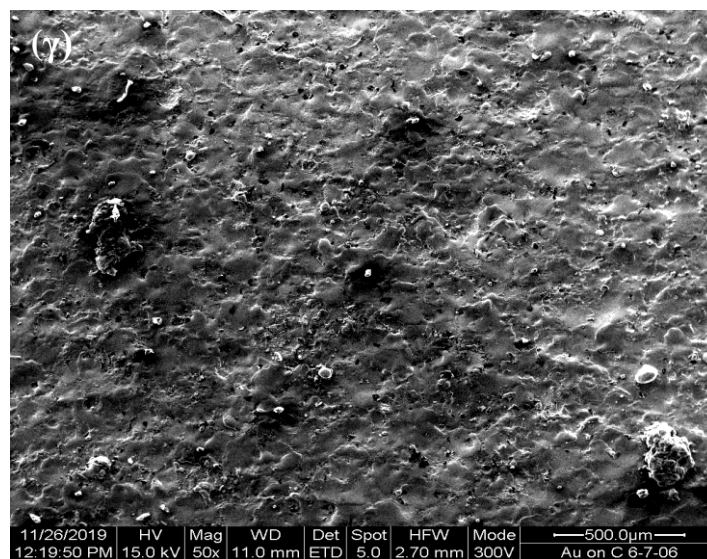
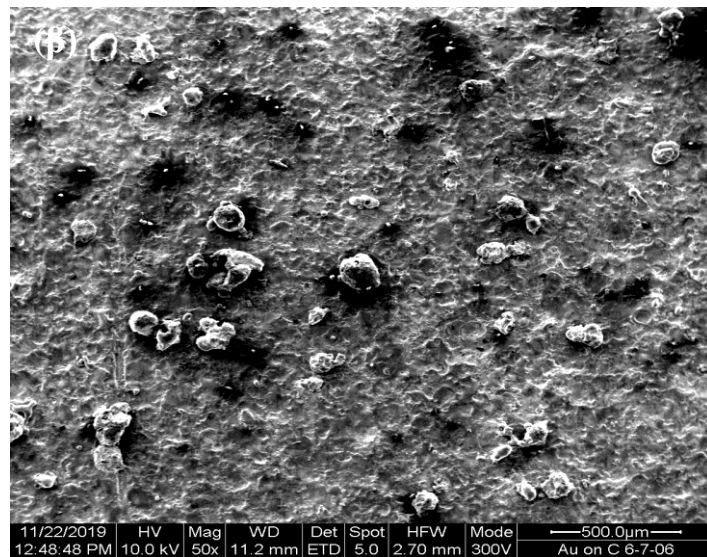
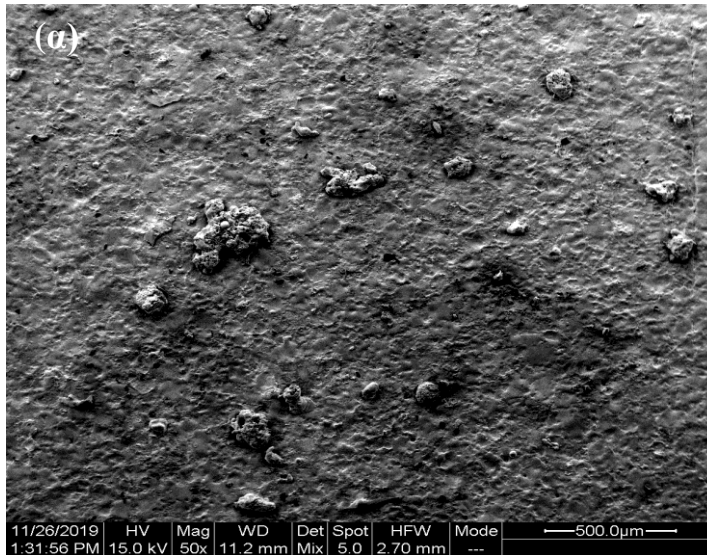
Τα γραφήματα της Εικόνας 5.9. και 5.10. δείχνουν τη μέση τραχύτητα S_a και την μέγιστη τραχύτητα S_z συναρτήσει της έντασης ρεύματος και της διάρκειας παλμού, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από τα γραφήματα το S_a αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ένταση του ρεύματος ενώ στην περίπτωση της διάρκειας παλμού το S_a φτάνει μια ελάχιστη τιμή για $T_{on}=25\mu\text{sec}$ και έπειτα αυξάνεται. Αντιθέτως, το S_z αυξάνεται όσο η διάρκεια παλμού μεγαλώνει ενώ στην περίπτωση της έντασης του ρεύματος το S_z φτάνει σε μια μέγιστη τιμή όταν $I_p=7A$ και στην συνέχεια μειώνεται. Η μείωση της μέγιστης τραχύτητας (S_z) που παρατηρείται με την αύξηση του I_p μπορεί να οφείλεται στην μείωση της πυκνότητας των επαναστεροποιημένων σωματίδιων που παρατηρήθηκε με την αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος (Εικόνα 5.11.). Στην Εικόνα 5.12. φαίνεται η τραχύτητα της επιφάνειας όπου διαφορετικά χρώματα υποδηλώνουν διαφορετικά ύψη.



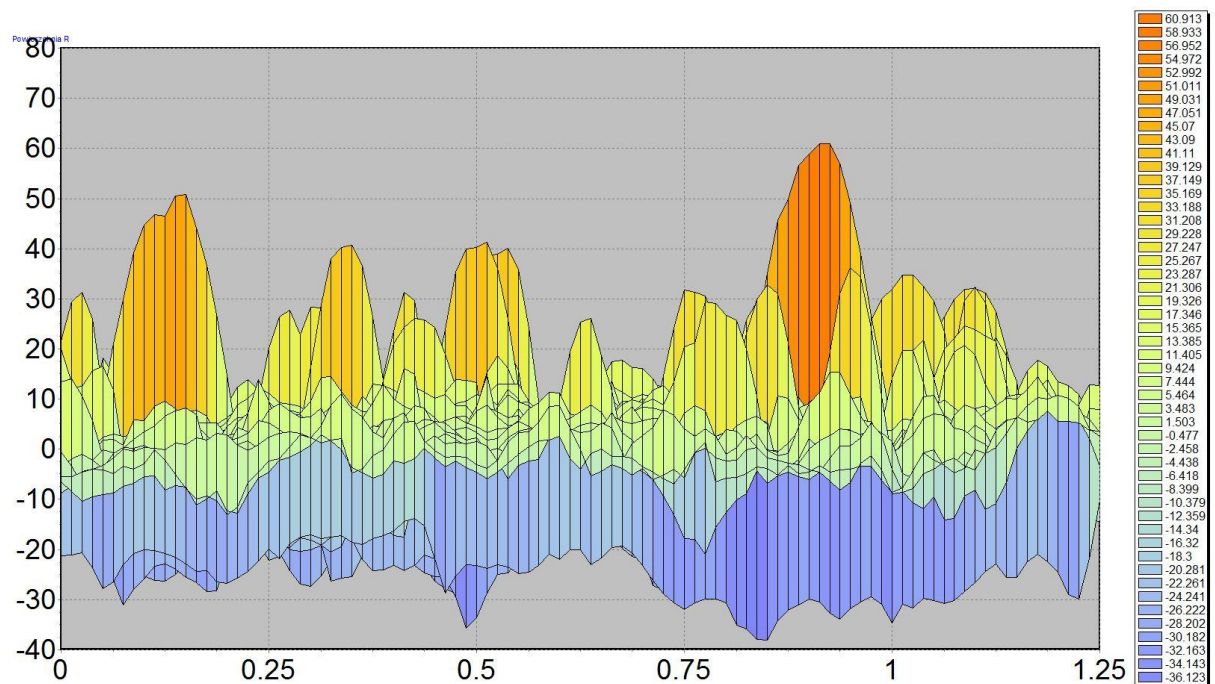
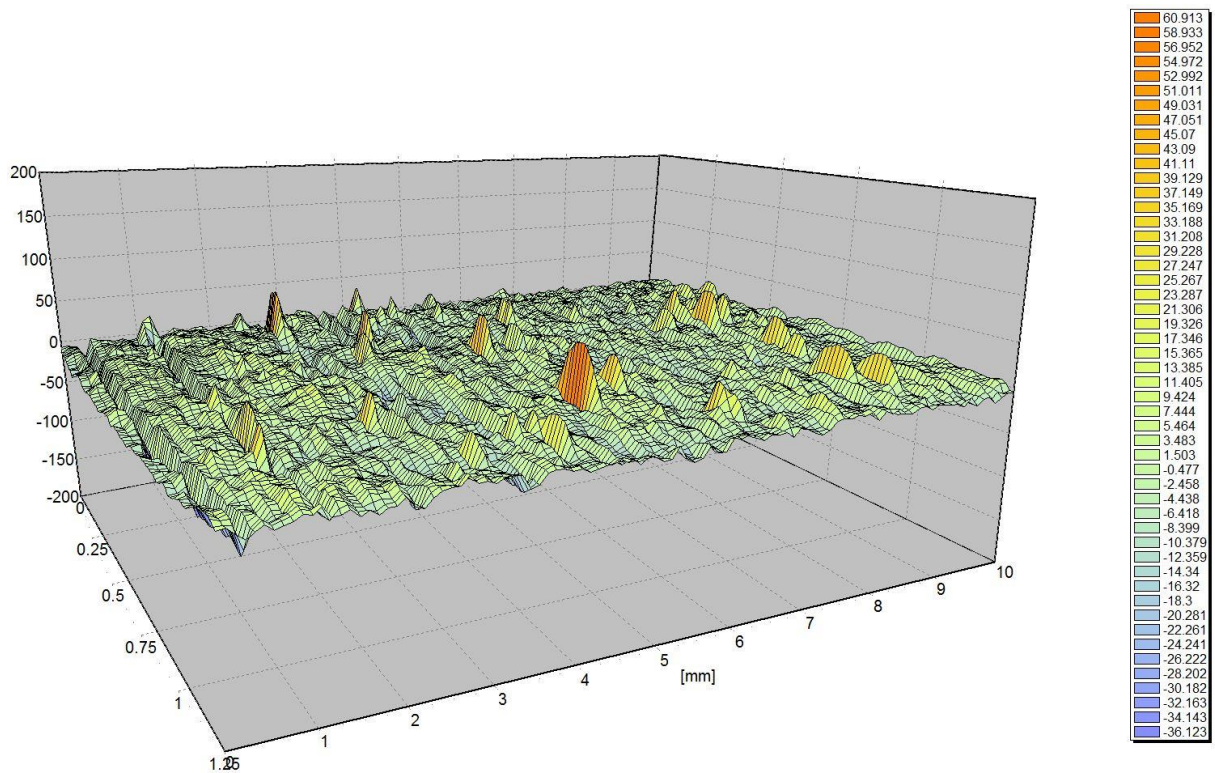
Εικόνα 5.9. Μέση τραχύτητα επιφάνειας συναρτήσεως της έντασης ρεύματος και της διάρκειας παλμού.



Εικόνα 5.10. Μέγιστη τραχύτητα επιφάνειας συναρτήσει της έντασης ρεύματος και διάρκεια παλμού.



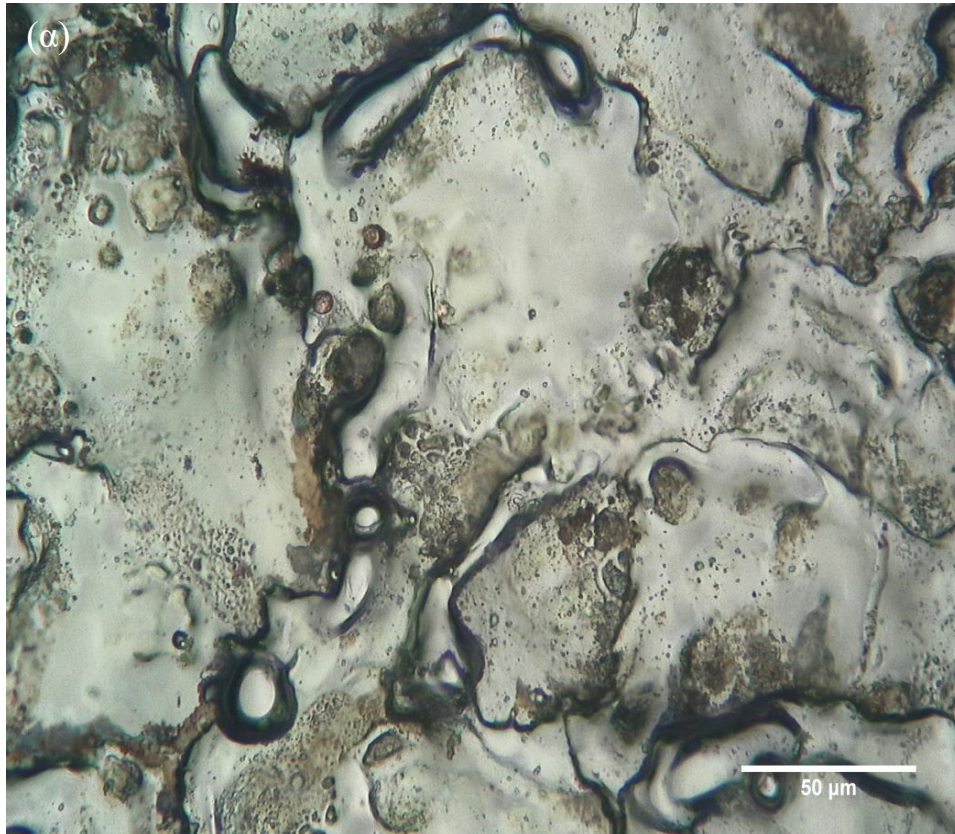
Εικόνα 5.11. Ηλεκτρονική μικρογραφία τροποποιημένης επιφάνειας για $T_{on}= 50\mu\text{sec}$ (α) $I_p= 5\text{A}$, (β) $I_p= 7\text{A}$ και (γ) $I_p= 9\text{A}$.

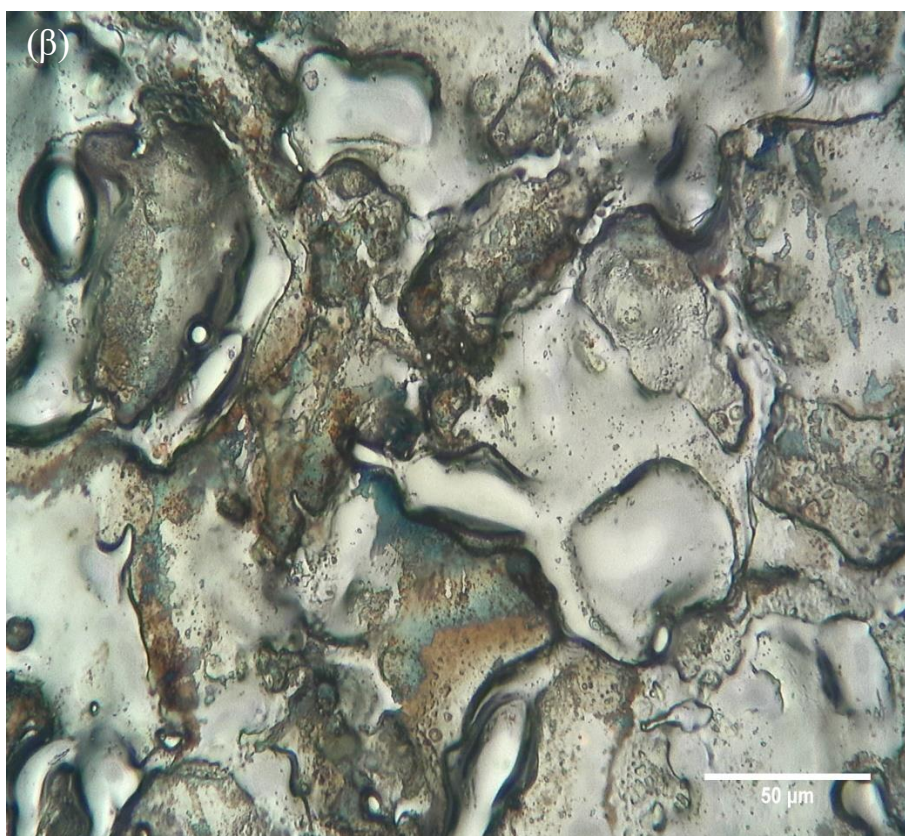


Εικόνα 5.12. Τραχύτητα της επιφάνειας όταν $I_p= 7A$ και $T_{on}= 12.8 \mu sec$.

Η τοπογραφία της κατεργασμένης επιφάνειας με τη χρήση πυροσυσσωματωμένου ηλεκτρόδιου Cu φαίνεται στην Εικόνα 5.13. Στην επιφάνεια παρατηρούνται κρατήρες, επαναστερεοποιημένα σωματίδια-σφαιρίδια (globules ή

droplets), μικρό-ρωγμές και κοιλοτήτες. Ακόμη, παρατηρείται η αύξηση της τραχύτητας με την αύξηση της έντασης του ρεύματος και της διάρκειας παλμού το οποίο φαίνεται να συμφωνεί με το συμπέρασμα των Lee and Tai [35] αλλά και άλλων ερευνητών [95, 96].



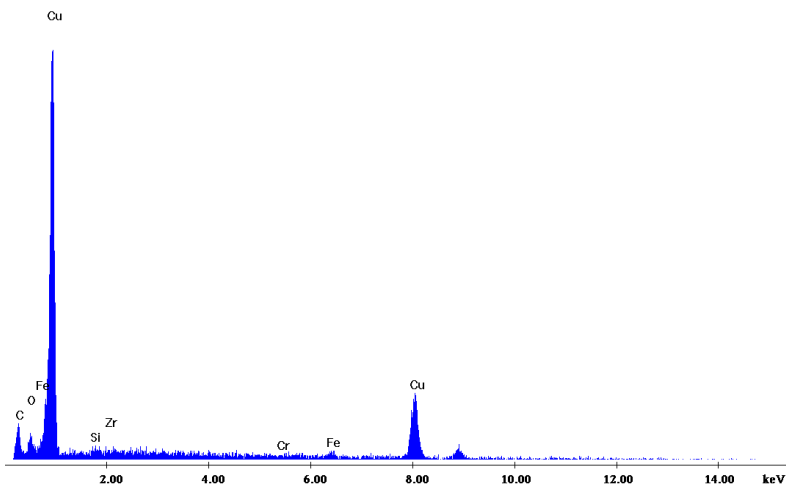
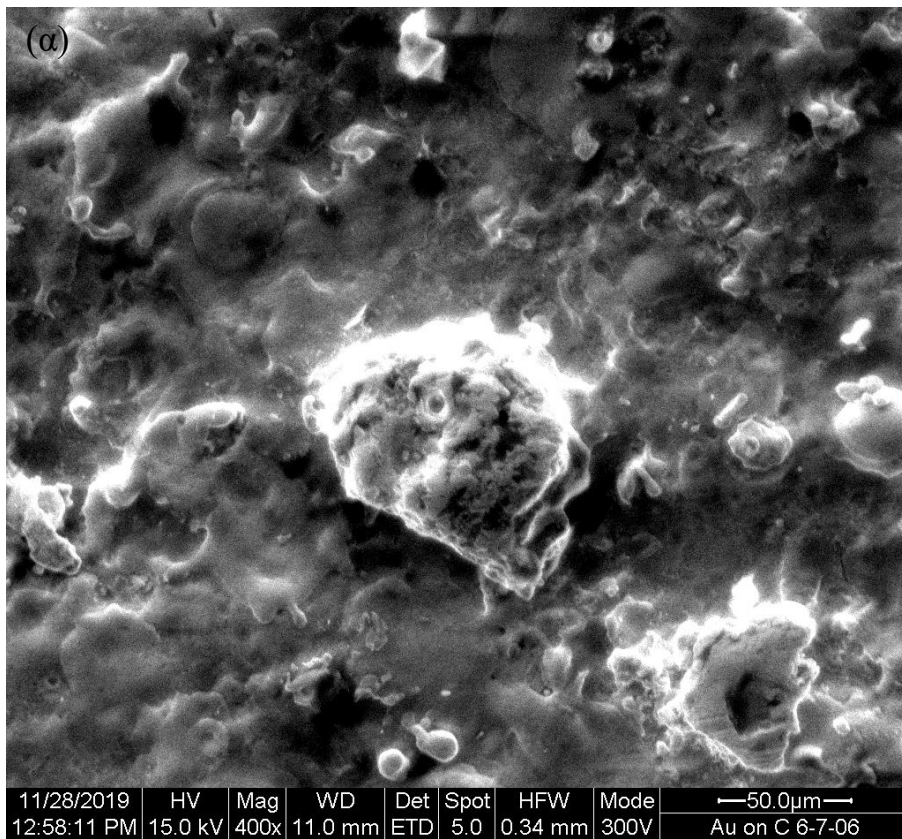


Εικόνα 5.13. Οπτική μικροσκοπία κατεργασμένης επιφάνειας όταν (α) $I_p= 7A$ και $T_{on}= 12.8\mu sec$ και (β) $I_p= 9A$ και $T_{on}= 12.8\mu sec$ (x500).

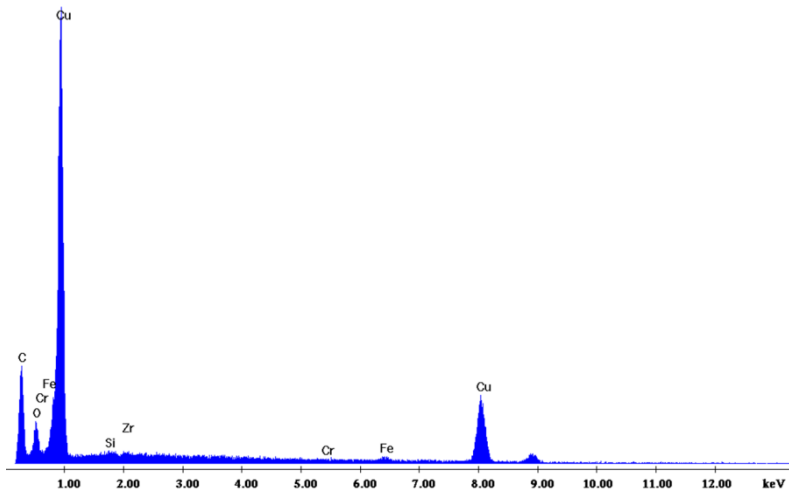
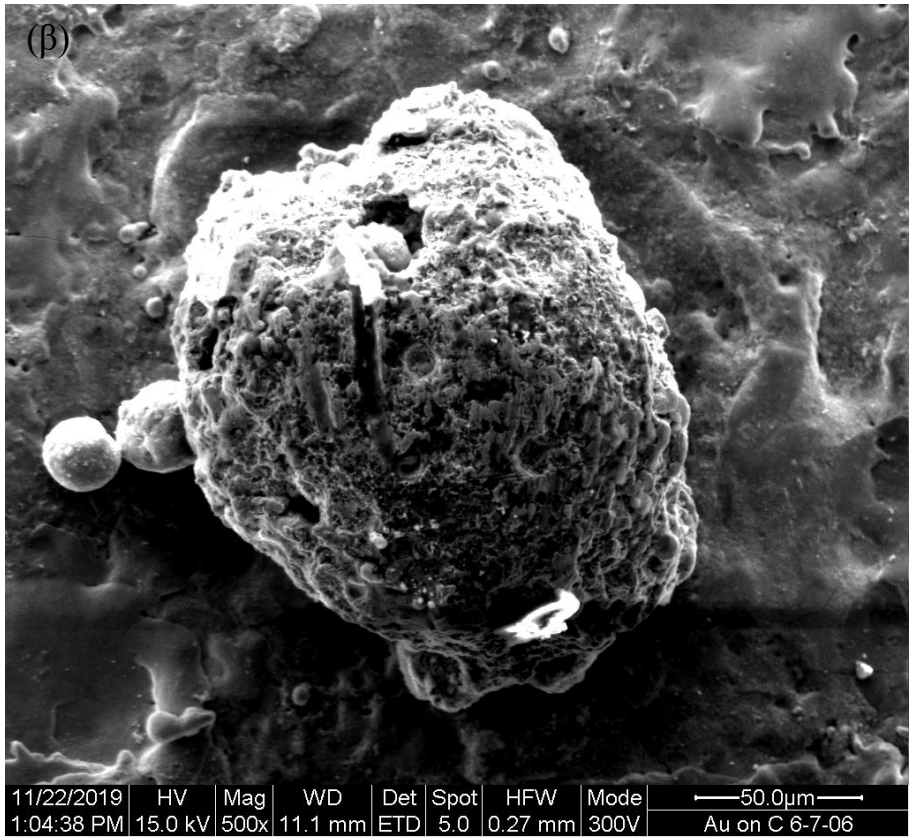
5.3.1. Ανάλυση τροποποιημένης επιφάνειας

Η κατεργασμένη επιφάνεια ερευνήθηκε περαιτέρω με EDS ανάλυση για να επιβεβαιωθεί η μεταφορά υλικού από το ηλεκτρόδιο στον εργαλειοχάλυβα. Στην Εκόνα 5.14. (α) φαίνεται το φάσμα EDS για τη χημική ανάλυση που λήφθηκε σε συνθήκες $I_p=5A$ και $T_{on}= 12.8\mu sec$. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια αξιόλογη ποσότητα υλικού που μεταφέρθηκε (ZrO_2 και Cu) από το ηλεκτρόδιο στην κατεργασμένη επιφάνεια. Εκτός από τη μεταφορά αυτών των δύο στοιχείων, το φάσμα δείχνει επίσης μεγάλη αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, ο οποίος προήρθε από την αποσύνθεση του διηλεκτρικού υγρού λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν. Αξίζει ακόμα να σημειωθεί ότι μετα από σημειακή ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε επαναστεροποιημένο σωματίδιο βρέθηκε η ποσότητα ZrO_2 να είναι 8.15%, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5.15. Η Εικόνα 5.16. δείχνει τη στοιχειακή χαρτογράφηση που πραγματοποιήθηκε μέσω SEM. Με

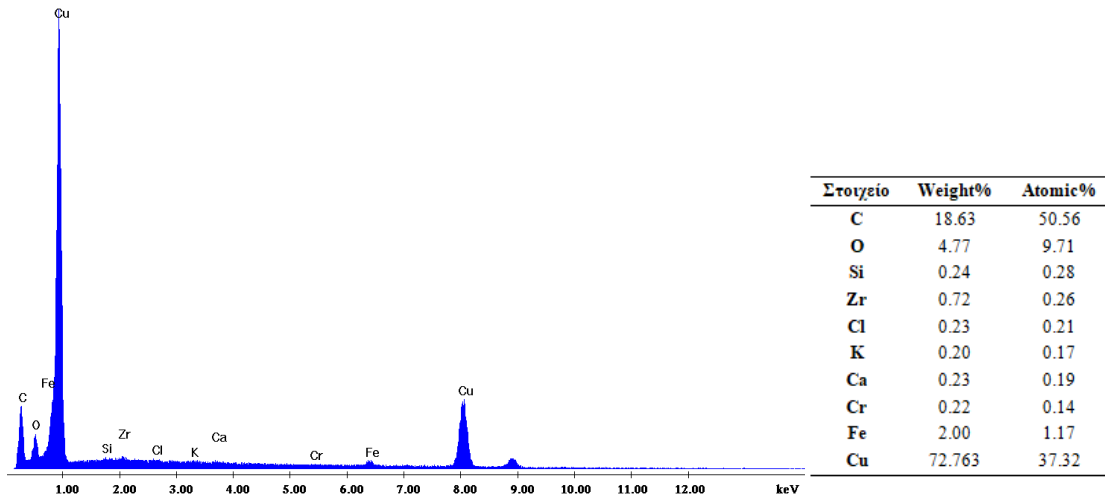
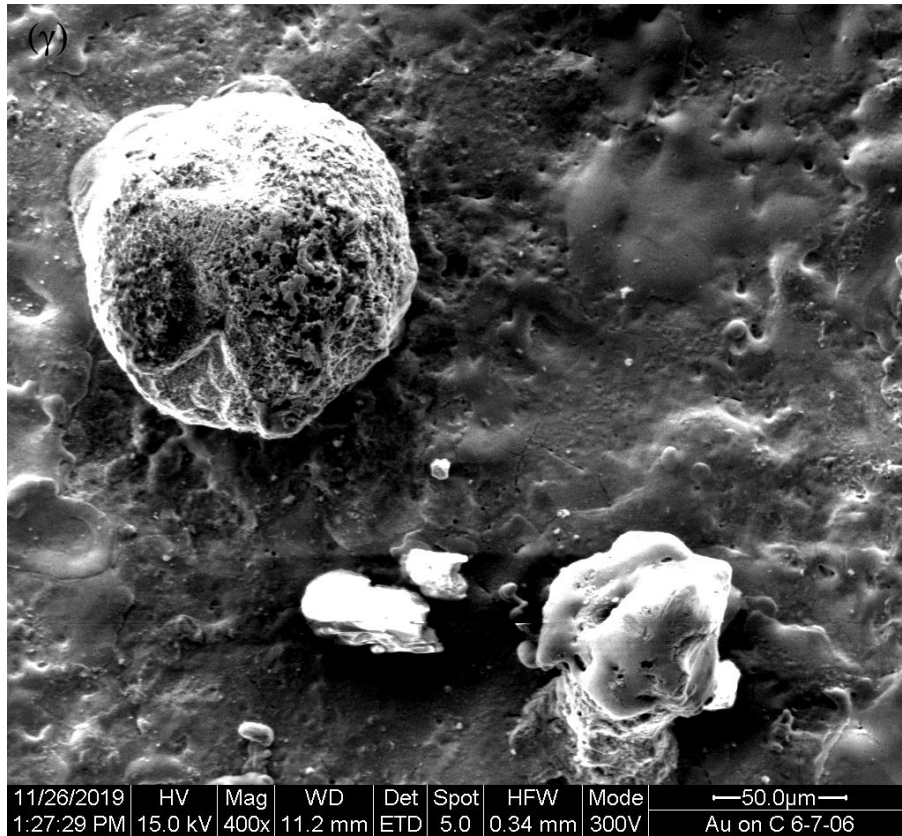
βάση την εικόνα, στην κατεργασμένη επιφάνεια παρατηρείται η παρουσία ζirkονίας και χαλκού.



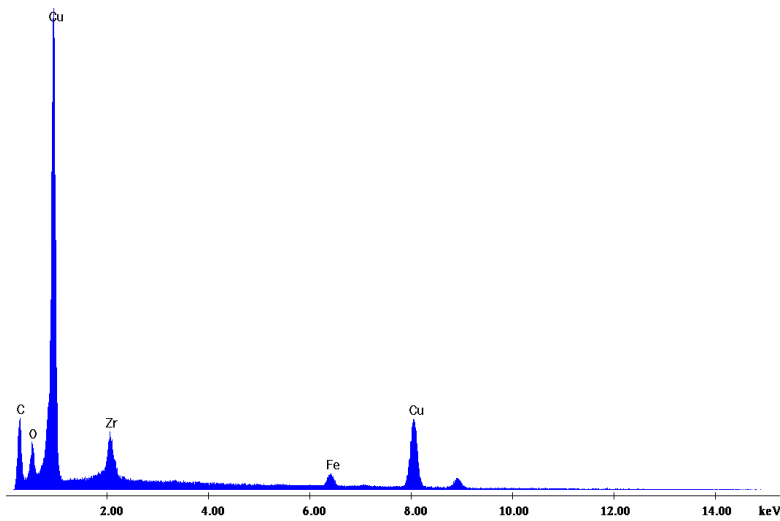
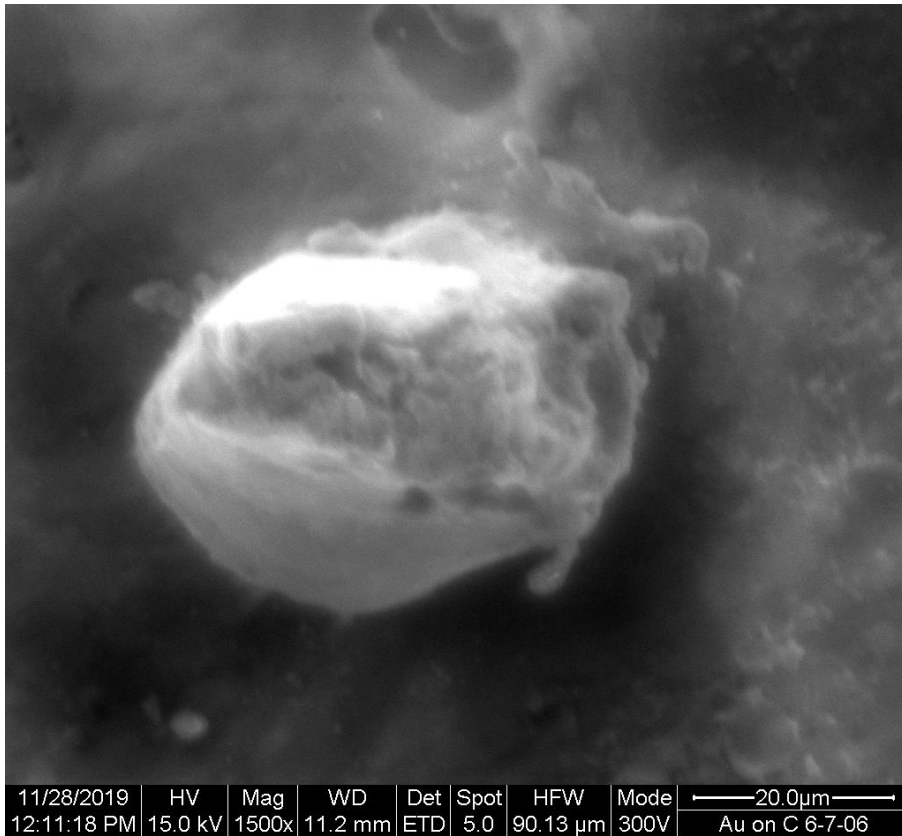
Στοιχείο	Weight%	Atomic%
C	12.01	39.66
O	2.67	6.62
Si	0.46	0.65
Zr	1.07	0.46
Cr	0.45	0.34
Fe	2.93	2.08
Cu	80.42	50.19



Element	Weight%	Atomic%
C	25.01	59.49
O	4.94	8.82
Si	0.30	0.30
Zr	0.72	0.23
Cr	0.11	0.06
Fe	1.70	0.87
Cu	67.23	30.23



Εικόνα 5.14. Γενικευμένη στοιχειακή χημική ανάλυση τροποποιημένης επιφάνειας σε συνθήκες (α) $I_p=5A$ και $T_{on}= 12.8\mu sec$, (β) $I_p= 7A$ και $T_{on}= 50 \mu sec$ και (γ) $I_p=5A$ και $T_{on}=50\mu sec$.

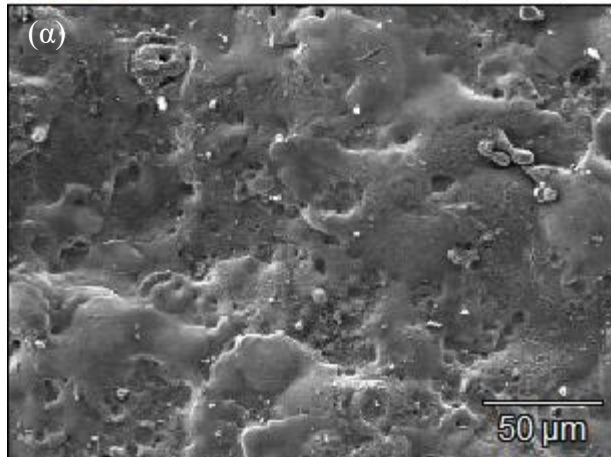


Στοιχείο	Weight%	Atomic%
C	18.44	50.04
O	5.96	12.14
Zr	8.15	2.91
Fe	4.16	2.43
Cu	63.30	32.47

Εικόνα 5.15. Σημειακή στοιχειακή χημική ανάλυση τροποποιημένης επιφάνειας σε συνθήκες $I_p=5A$ και $T_{on}=25\mu sec$.

Grey

52 255



OK

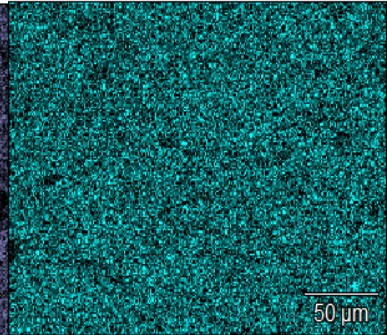
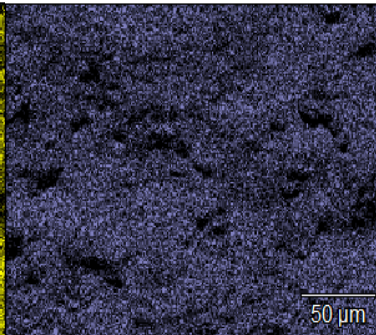
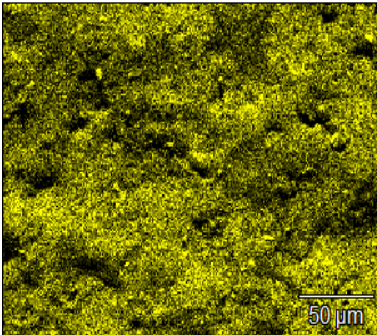
0 28

Si K

0 16

V K

0 10



Cr K

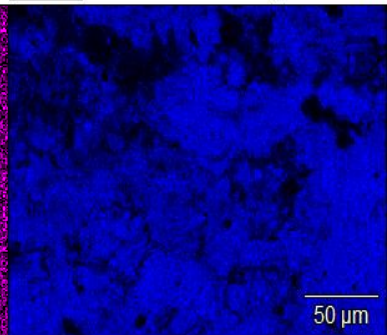
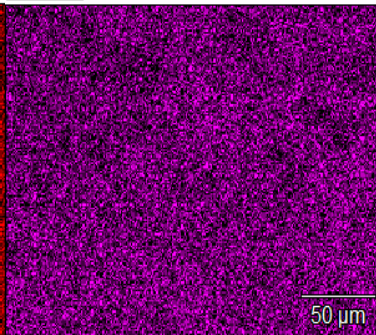
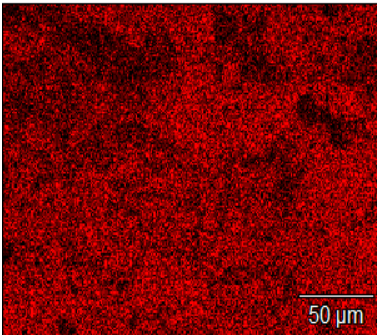
0 13

Mn K

0 9

Fe K

0 50



Cu K

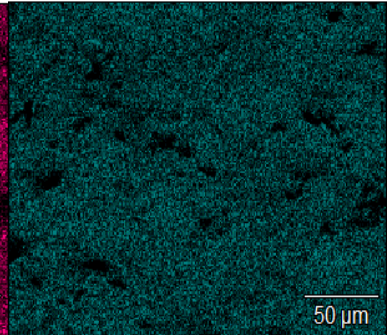
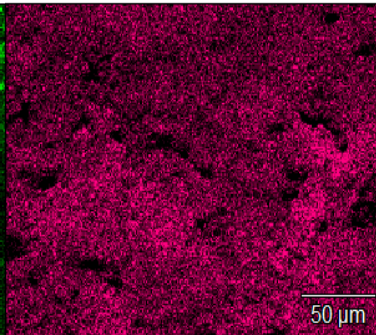
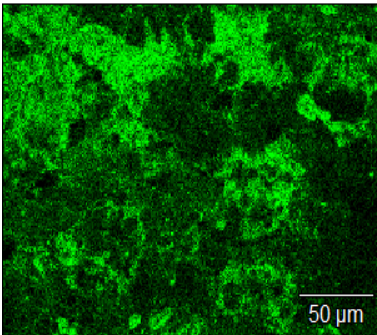
0 30

Zr L

0 27

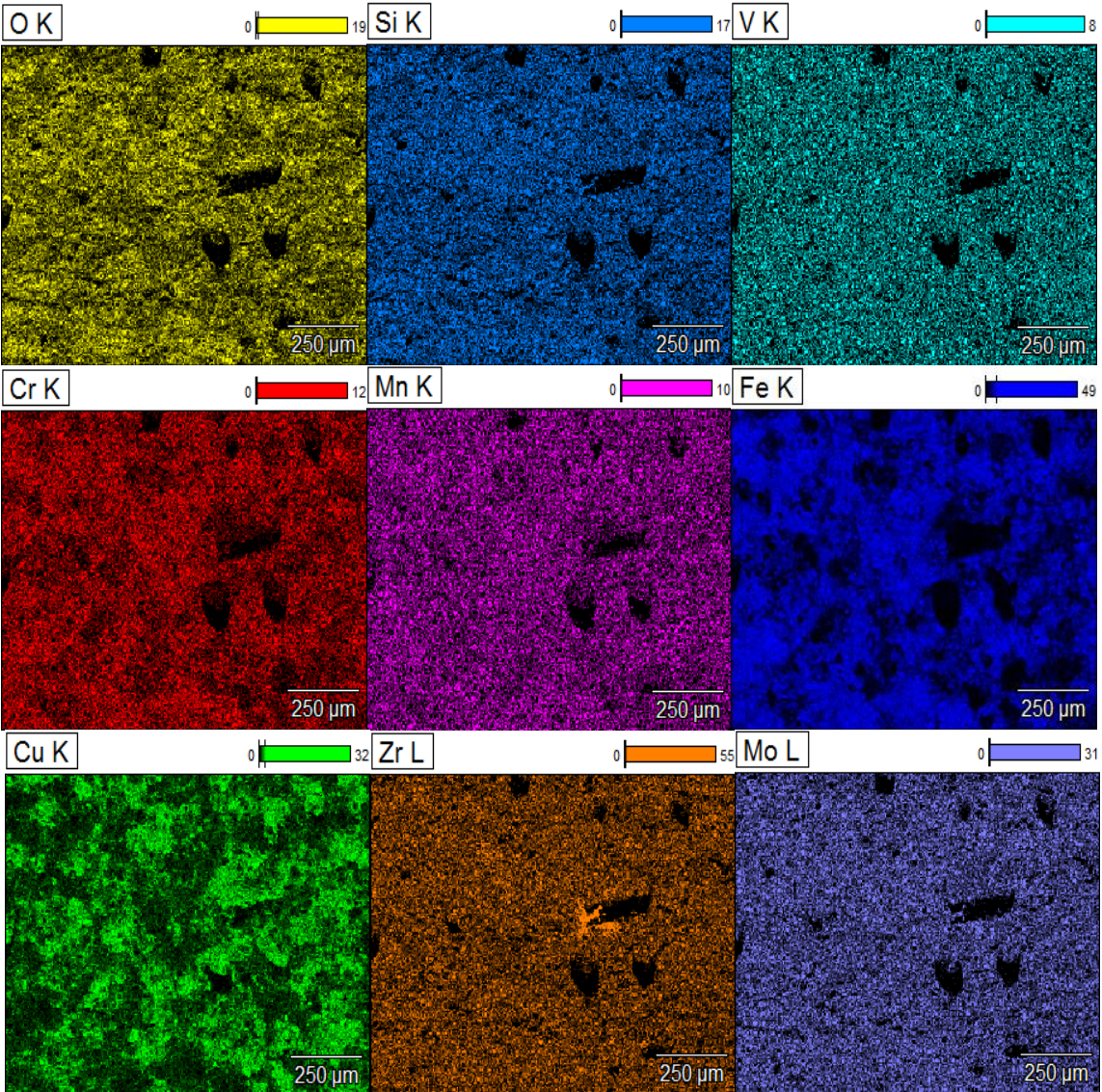
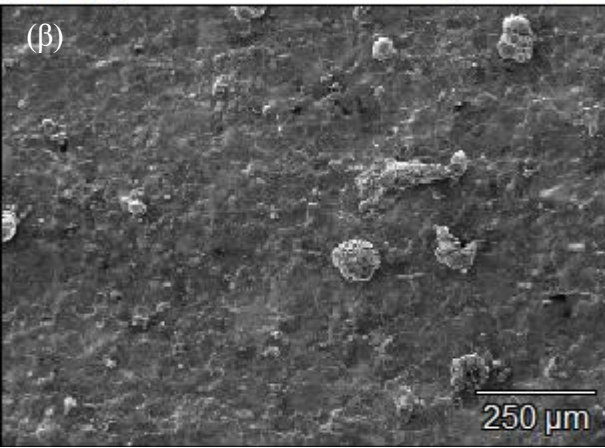
Mo L

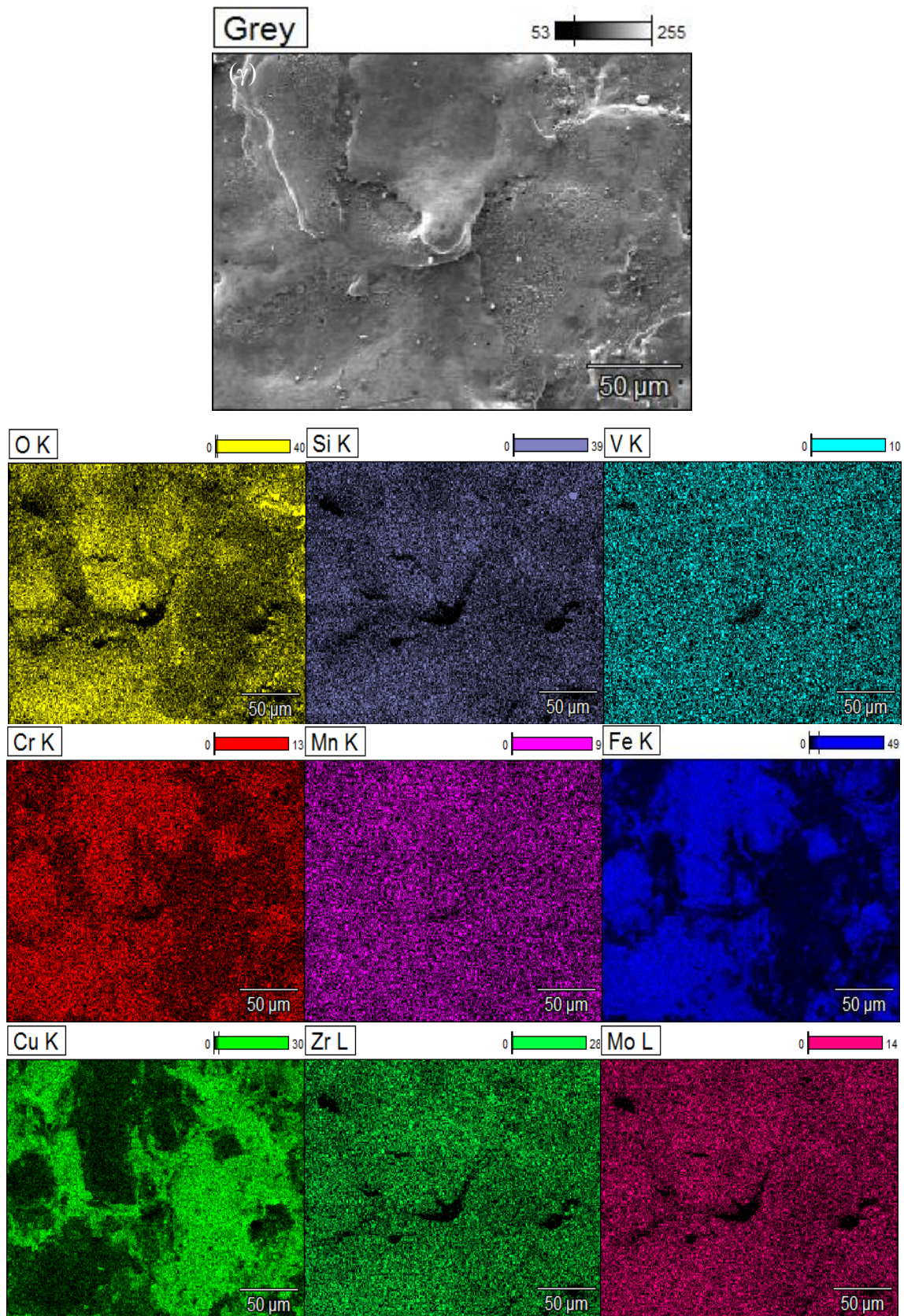
0 14



Grey

33 255





Εικόνα 5.16. Στοιχεική χαρτογράφηση κατεργασμένης επιφάνειας όταν (α) $I_p = 5A$ και $T_{on} = 12.8\mu sec$, (β) $I_p = 7A$ και $T_{on} = 25\mu sec$ και (γ) $I_p = 9A$ και $T_{on} = 50\mu sec$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

Συμπεράσματα

6.1. Συμπεράσματα

Η κατεργασία EDM χαρακτηρίζεται ως μια πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία, καθώς περιλαμβάνει πολλαπλά φυσικά φαινόμενα και παράγει ιδιαίτερες μικροδομές στις κατεργασμένες επιφάνειες. Εκτός, από μια διαδικασία αφαίρεσης υλικού, η κατεργασία EDM διερευνάται και για την τροποποίηση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Τα τελευταία χρόνια, έχουν διεξαχθεί έρευνες για τον προσδιορισμό της δυνατότητας χρήσης ηλεκτροδίου ως πηγή μεταφοράς κραματικών στοιχείων με στόχο την επίτευξη επιθυμητών χαρακτηριστικών/ ιδιοτήτων στο τεμάχιο κατεργασίας. Τα ηλεκτρόδια αυτά, πασκευάστηκαν μέσω κονιομεταλλουργίας (Powder Metallurgy) προκειμένου οι ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας να μπορούν να βελτιωθούν με την αλλαγή των υλικών των ηλεκτροδίων και των παραμέτρων της κατεργασίας. Οι περισσότερες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί μελετούν την επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας (ένταση ρεύματος, διάρκεια παλμού κλ.π) στο ρυθμό αποβολής υλικού, στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου και στην τραχύτητα της επιφάνειας.

Στοχός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης για την τροποποίηση της κατεργαζόμενης επιφάνειας (surface modification) με τη χρήση ηλεκτροδίου που παρασκευάστηκε μέσω κονιομεταλλουργίας. Η κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κατεργασίας και η χρήση ηλεκτροδίου κονιομεταλλουργίας οδήγησαν στο σχηματισμό άμορφου στρώματος (White Layer) μέσα στο οποίο «παγιδεύτηκαν» στοιχεία που περιέχονται στο ηλεκτρόδιο προσδίδοντας στην επιφάνεια νέα σύσταση και αντίστοιχες επιθυμητές ιδιότητες.

Συγκεκριμένα, green compact Cu-ZrO₂ P/M ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε για την επιφανειακή τροποποίηση του εργαλειοχάλυβα Calmax σε διηλεκτρικό μέσο έλαιο (κηροζίνη) με σκοπό την ενίσχυση της κατεργασμένης επιφάνειας με ZrO₂. Διεξήχθησαν πειράματα με την ένταση ρεύματος κατεργασίας να κυμαίνεται από $I_p=5$ έως 9 και ο χρόνος παλμού $T_{on}= 12.8$ έως 50 μsec . Για τις διαφορετικές πειραματικές συνθήκες υπολογίστηκε ο ρυθμός μεταφοράς υλικού (MTR), η τραχύτητα της

επιφάνειας και εξετάστηκε και η κατεργασμένη επιφάνεια. Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι τα εξής:

- Η επιφανειακή τροποποίηση του εργαλειοχάλυβα πραγματοποιήθηκε με επιτυχία χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο κονιομεταλλουργίας. Από την οπτική μικροσκοπία παρατηρήθηκε ο σχηματισμός White Layer σε όλες τις πειραματικές συνθήκες.
- Η ανάλυση EDS επιβεβαίωσε τη μεταφορά υλικού από το ηλεκτρόδιο στον εργαλειοχάλυβα. Αξιόλογη ποσότητα υλικού, 1.07 % ZrO_2 και 80.42 % Cu, μεταφέρθηκε από το ηλεκτρόδιο στην κατεργασμένη επιφάνεια. Εκτός από τη μεταφορά αυτών των δύο στοιχείων, το φάσμα δείχνει επίσης μεγάλη αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, ο οποίος προήρθε από την αποσύνθεση του διηλεκτρικού υγρού λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν.
- Ρωγμές και μικρορωγμές, αλλά και η παρουσία κοιλοτήτων παρατηρήθηκαν στην κατεργασμένη επιφάνεια. Οι θερμικοί κύκλοι, με υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης και ψύξης, που δημιουργούνται από τους σπινθήρες κατά τη διάρκεια του EDM, είναι υπεύθυνοι για τις ρωγμές και μικρορωγμές. Αυτές οι μικρο-ρωγμές και οι κοιλότητες επηρεάζουν την κόπωση, τη διάβρωση και άλλες μηχανικές ιδιότητες.
- Με βάση τα γραφήματα φαίνεται ότι το MTR έχει άμεση εξάρτηση τόσο από την ένταση ρεύματος όσο και από το χρόνο παλμού.
- Τόσο η μέση τραχύτητα όσο S_a όσο και η S_z εξαρτώνται από την ένταση του ρεύματος και από τη διάρκεια παλμού. Η μέση τιμή τραχύτητας S_a αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ένταση του ρεύματος ενώ στην περίπτωση της διάρκειας του χρόνου παλμού το S_a μειώνεται για $T_{on}=25\mu sec$ και έπειτα αυξάνεται. Το S_z αυξάνεται όσο η διάρκεια παλμού μεγαλώνει ενώ στην περίπτωση της έντασης του ρεύματος το S_z αυξάνεται για $I_p=7A$ και στην συνέχεια μειώνεται.

6.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Το φαινόμενο της επιφανειακής τροποποίησης μέσω EDM διερευνάται εδώ και πάνω από πέντε δεκαετίες. Έχουν αναφερθεί σημαντικές βελτιώσεις στις επιφανειακές ιδιότητες και η σκοπιμότητα της διαδικασίας είναι καλά τεκμηριωμένη. Σύμφωνα, λοιπόν, με όσα αναφέρθηκαν στην παρούσα εργασία αλλά και με βάση

βιβλιογραφικές αναφορές που έχουν προηγηθεί, οι πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας χρήσης του EDM με ηλεκτρόδιο κονιομεταλλουργίας για τροποποίηση της κατεργαζόμενης επιφανείας είναι οι ακόλουθες:

- Ηλεκτρόδιο κονιομεταλλουργίας

Περεταίρω διερεύνηση της ανάπτυξης ηλεκτροδίων με συνδυασμούς υλικών όπως καρβίδια (βολφραμίου, τιτανίου κ.λπ.), μαγγάνιο, χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, βολφραμίου, χρώμιο, κοβάλτιο κ.λπ., με P/M και η δυνατότητα χρήσης σε EDM, με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας των υλικών τα οποία είναι δύσκολο να κατεργαστούν, δημιουργώντας, έτσι, προκλήσεις στις βιομηχανίες παραγωγής όπως κεραμικών, σύνθετων υλικών, υπέρ-κραμάτων κ.λπ. Οι ιδιότητες αυτές αυτών των υλικών (όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα) μπορεί να προκαλέσουν το ενδιαφέρον των ερευνητών. Επιπλέον, η σκοπιμότητα της περεταίρω μελέτης για την κατασκευή ηλεκτροδίου χρησιμοποιώντας την τεχνική RP για τη βελτίωση της απόδοσης των εργαλείων και του σπινθήρα είναι απαραίτητη.

- Παράμετροι σύνθεσης ηλεκτροδίου με κονιομεταλλουργία

Τα ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας ταξινομούνται σε δύο τύπους, green compact και sintered. Οι παράμετροι της διαδικασίας της κονιομεταλλουργίας, όπως η πίεση της συμπίεσης, η θερμοκρασία και ο χρόνος πυροσυσσωμάτωσης παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του ηλεκτροδίου στο EDM. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν τις μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των ηλεκτροδίων. Όλα αυτά πρέπει να διερευνηθούν και να βελτιστοποιηθούν σε διαφορετικούς συνδυασμούς.

- Βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας

Η διαδικασία EDM είναι αρκετά πολύπλοκη και δύσκολη, καθώς περιλαμβάνει πολλαπλά φυσικά φαινόμενα, καθιστώντας έτσι τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας σπινθηρισμού εξαιρετικά δύσκολη. Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας είναι πιο περίπλοκη με τη χρήση ηλεκτροδίων επεξεργασμένων με κονιομεταλλουργία καθώς προστίθενται περισσότεροι παράμετροι διεργασίας (όπως πίεση συμπίεσης, θερμοκρασία και χρόνος πυροσυσσωμάτωσης, κ.λπ.) για εξέταση. Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας περιλαμβάνει συχνά τη συσχέτιση των διαφόρων παραμέτρων της διαδικασίας με τις παραμέτρους απόδοσης βελτιστοποιώντας το MRR, ενώ ελαχιστοποιεί η φθορά του ηλεκτροδίου και επιτυγχάνεται η επιθυμητή τραχύτητα της επιφάνειας. Σε πολλές περιπτώσεις, η αναλογία S/N (Signal to noise ratio) μαζί με

την ανάλυση της διασποράς (Analysis of Variance-ANOVA) χρησιμοποιούνται για την μελέτη της κατεργασίας. Οι παράμετροι της διαδικασίας περιλαμβάνουν όχι μόνο τις ηλεκτρικές αλλά και τις μη ηλεκτρικές παραμέτρους και τις παραμέτρους της διαδικασίας της κονιομεταλλουργίας, οι οποίες έχουν αρκετά σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον. Αυτά τα ερευνητικά έργα, άνοιξαν νέους ορίζοντες για την ανεύρεση μιας σταθεροποιημένης διαδικασίας σπινθηρισμού προκειμένου ο βαθμός απόδοσης να βελτιώνεται συνεχώς. Συνεπώς, η συνεχής ερευνητική προσπάθεια για την κατανόηση της διεργασίας σπινθηρισμού, θα εξακολουθήσει να αποτελεί σημαντικό τομέα περαιτέρω ανάπτυξης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Με βάση το ISO 25178-2, οι παράμετροι της τραχύτητας της επιφάνειας είναι οι εξής [97, 98]:

- Μέση αριθμητική τιμή τραχύτητας, S_a , ο αριθμητικός μέσος όρος των απόλυτων τιμών των αποκλίσεων μέσα σε μια δειγματοληπτική περιοχή, A και υπολογίζεται από τη Σχέση 1:

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (1)$$

- Μέγιστο ύψος κορυφής, S_p , μέσα στην περιοχή δειγματοληψίας.
- Μέγιστο βάθος κοιλάδας, S_v , μέσα στην περιοχή δειγματοληψίας.
- Μέγιστη τιμή τραχύτητας, S_z , το άθροισμα της υψηλότερης κορυφής και της βαθύτερης κοιλάδας μέσα στην περιοχή δειγματοληψίας.
- Τετραγωνική μέση τραχύτητα, S_q , είναι η ρίζα του μέσου τετραγωνικού όρου των αποκλίσεων μέσα σε μια δειγματοληπτική περιοχή και υπολογίζεται από τη Σχέση 2:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A |z^2(x, y)| dx dy} \quad (2)$$

- Η ασυμμετρία (skewness) της κατανομής των αποκλίσεων, S_{sk} , και υπολογίζεται από τη Σχέση 3:

$$S_{sk} = \frac{1}{S_{sk}^3 A} \iint_A |z^3(x, y)| dx dy \quad (3)$$

- Η κύρτωση της κατανομής των αποκλίσεων, S_{ku} , και υπολογίζεται από την Σχέση 4:

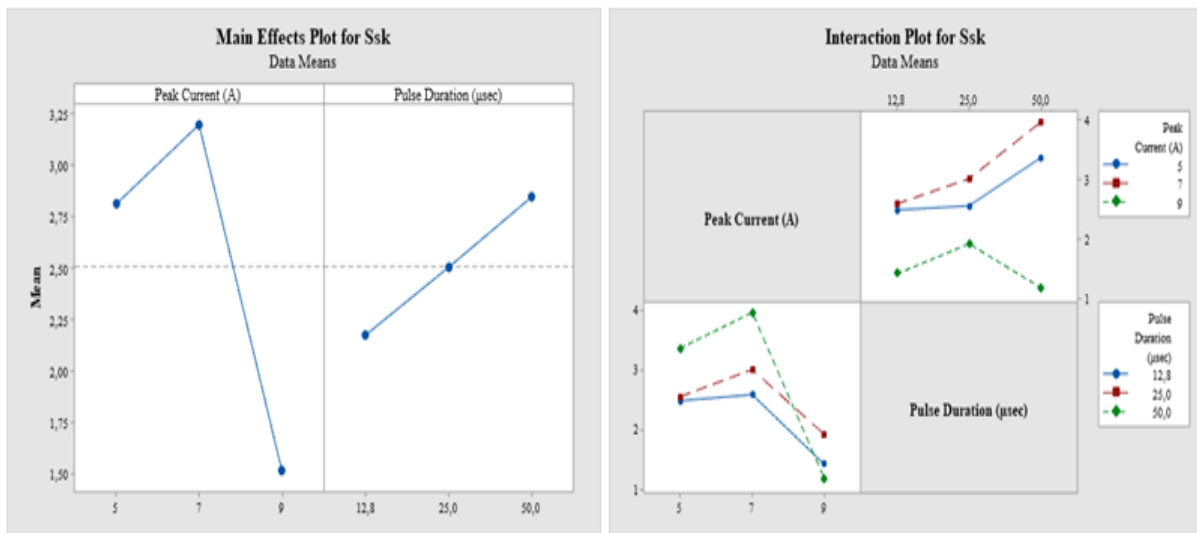
$$S_{ku} = \frac{1}{S_{ku}^4 A} \iint_A |z^4(x, y)| dx dy \quad (4)$$

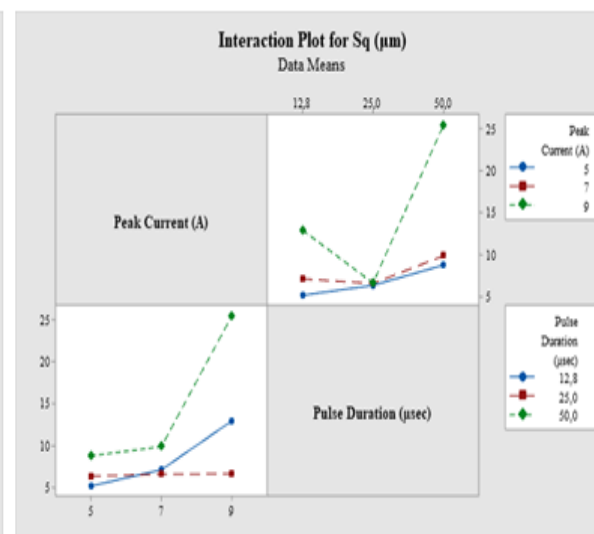
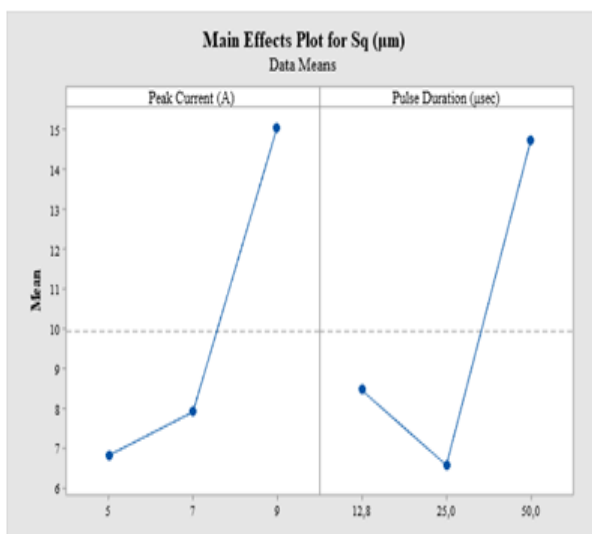
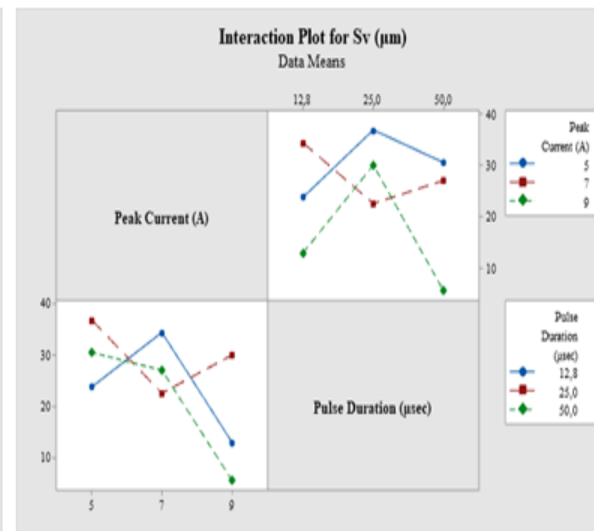
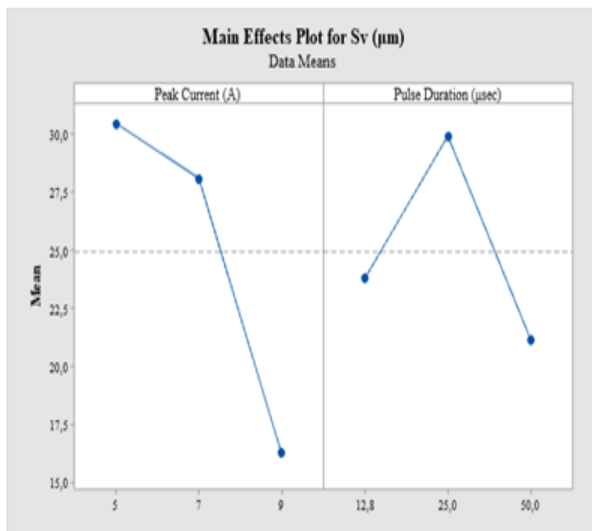
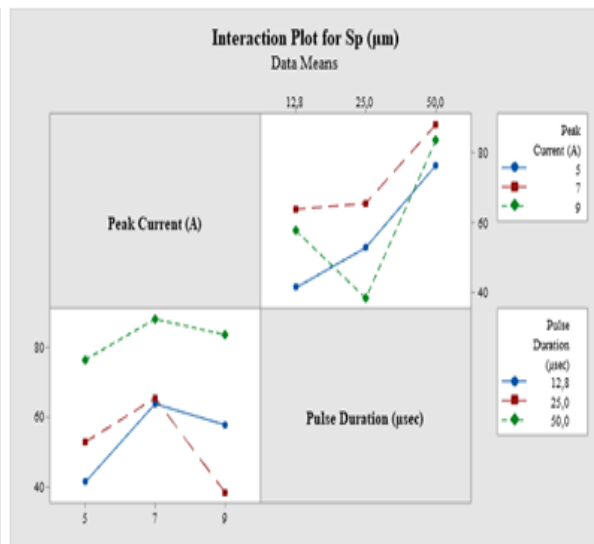
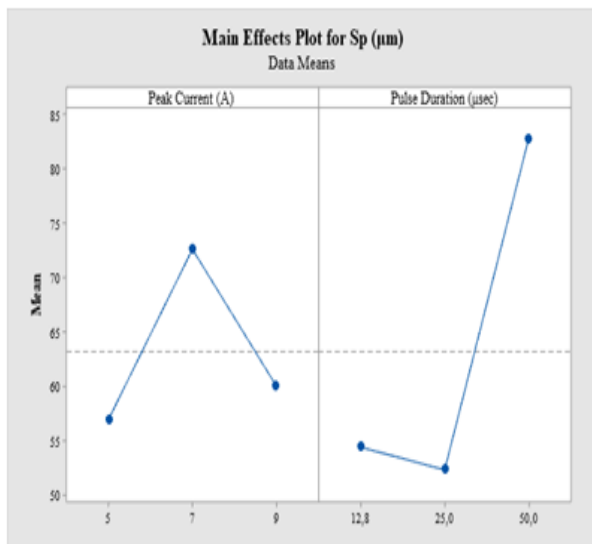
Στον Πίνακα Α παρουσιάζονται οι τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους.

Πίνακας Α: Παράμετροι τραχύτητας.

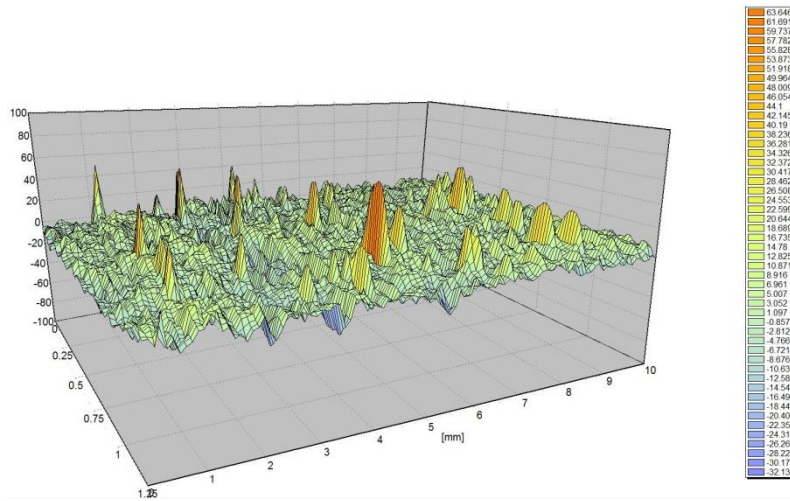
I_p (A)	T_{on} (μ sec)	S_a (μ m)	S_z (μ m)	S_{sk}	S_p (μ m)	S_v (μ m)	S_q (μ m)	S_{ku} (μ m)
5	12.8	3.752	65.242	2.496	41.411	23.832	5.226	9.897
5	25	4.533	89.876	2.564	52.92	36.956	6.412	10.453
5	50	5.232	107.135	3.375	76.53	30.605	8.823	19.88
7	12.8	5.27	98.42	2.598	63.939	34.481	7.169	10.277
7	25	4.487	88.262	3.019	65.603	22.66	6.637	14.936
7	50	5.061	115.369	3.975	88.228	27.141	9.922	21.904
9	12.8	11.122	70.9	1.425	57.903	12.997	12.984	2.449
9	25	5.044	68.588	1.928	38.465	30.123	6.683	4.997
9	50	24.059	89.316	1.188	83.717	5.599	25.503	1.615

Η Εικόνα Α παρουσιάζει τα γραφήματα των παραπάνω παραμέτρων της τραχύτητας συναρτήσει της έντασης ρεύματος και της διάρκειας παλμού. (Υπενθυμίζεται ότι τα γραφήματα για τις παραμέτρους S_a και S_z παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.3.) Στις Εικόνες Β και Γ φαίνεται η 3-D απεικόνιση της κατεργασμένης επιφάνειας σε διαφορετικές συνθήκες όπου παρατηρείται η ύπαρξη κορυφών και κοιλάδων.

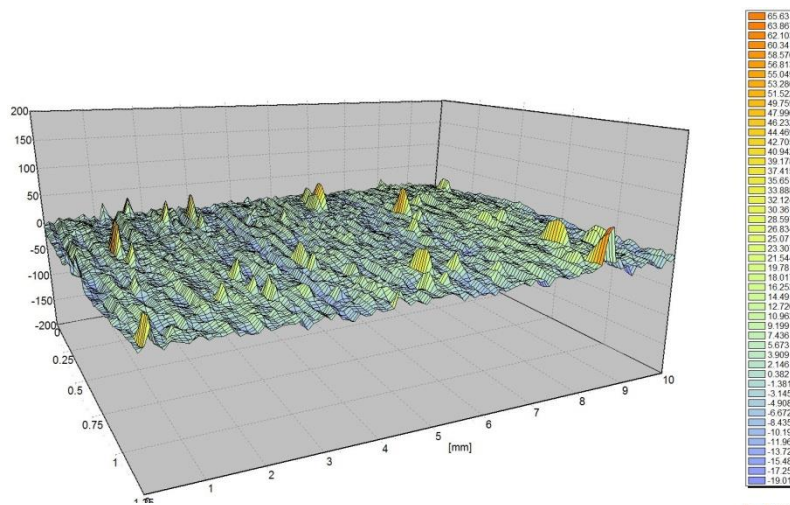




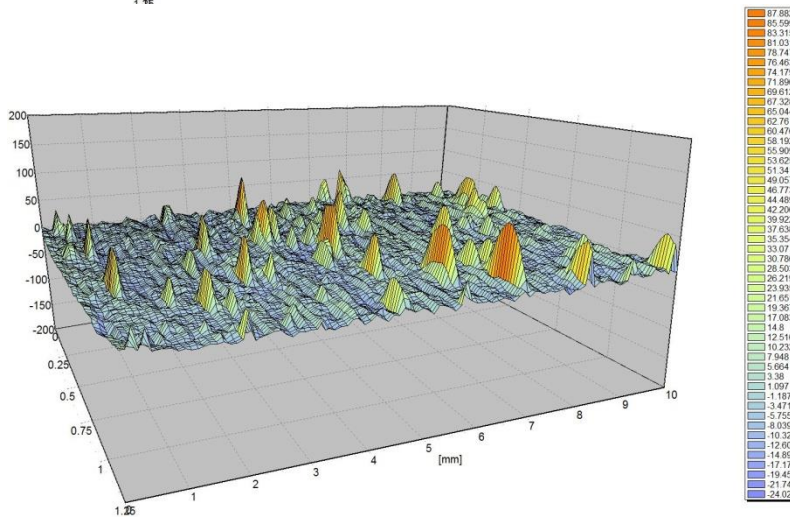
Εικόνα Α. Παράμετροι τραχύτητας επιφάνειας συναρτήσει της έντασης ρεύματος και διάρκεια παλμού.



$I_p = 7A$
 $T_{on} = 12.8 \mu sec$
 $S_a = 5.270 \mu m$

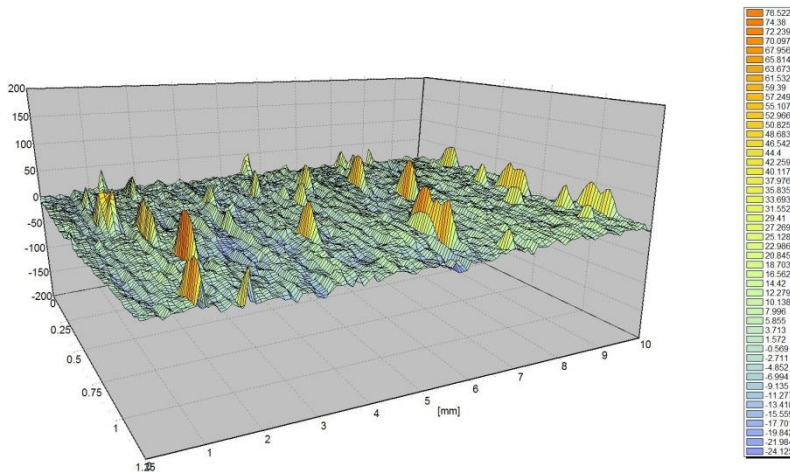


$I_p = 7A$
 $T_{on} = 25 \mu sec$
 $S_a = 4.487 \mu m$

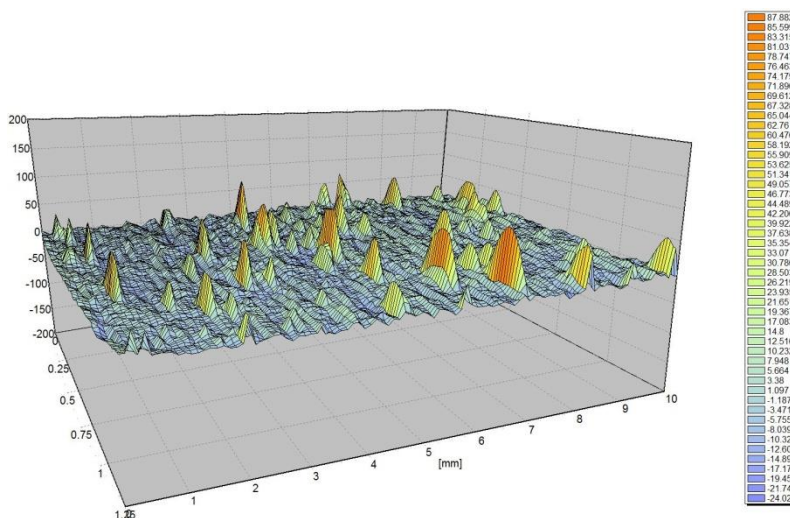


$I_p = 7A$
 $T_{on} = 50 \mu sec$
 $S_a = 5.061 \mu m$

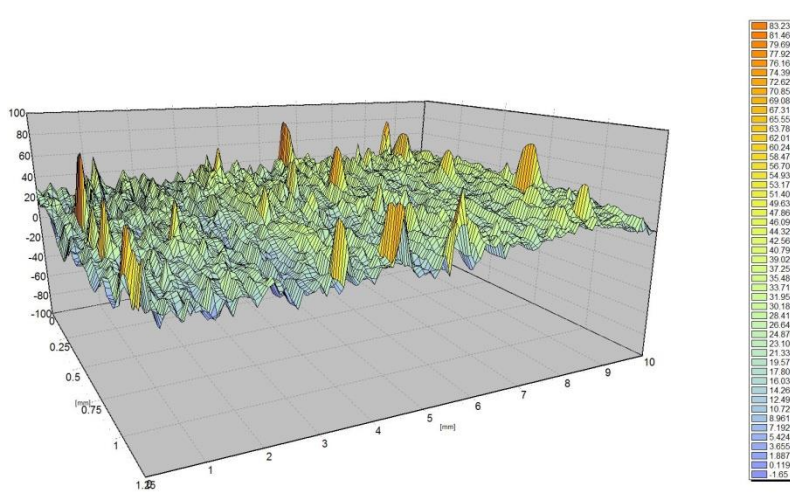
Εικόνα Β. Τραχύτητα της επιφάνειας όταν $I_p = 7A$ και $T_{on} = 12.8-50 \mu sec$.



$I_p = 5A$
 $T_{on} = 50 \mu\text{sec}$
 $S_a = 5.232 \mu\text{m}$



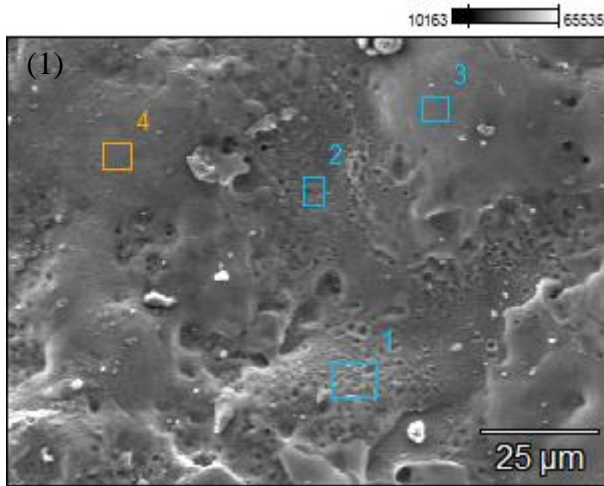
$I_p = 7A$
 $T_{on} = 50 \mu\text{sec}$
 $S_a = 5.061 \mu\text{m}$



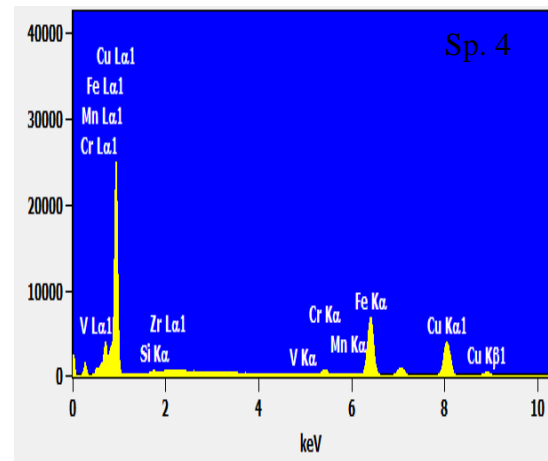
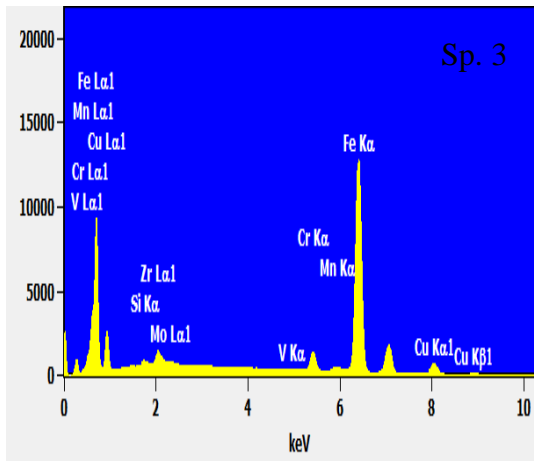
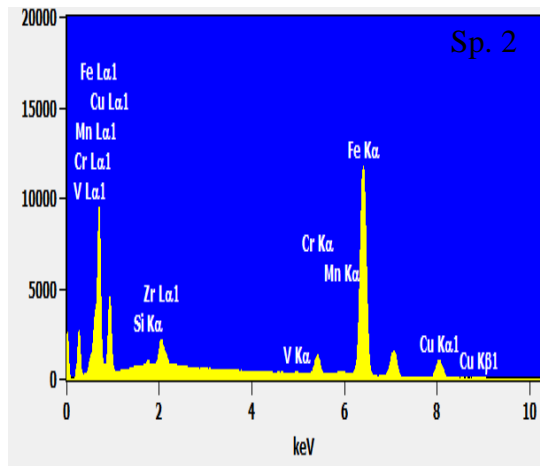
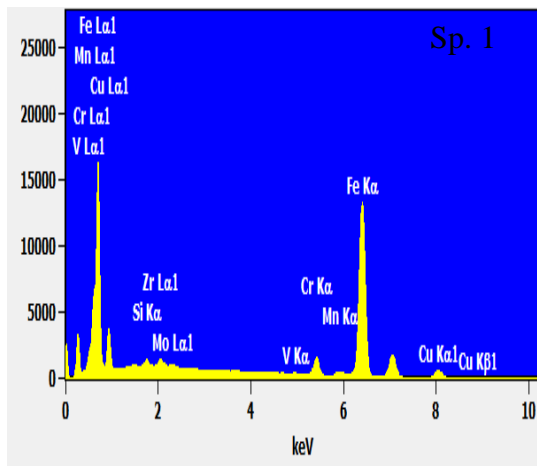
$I_p = 9A$
 $T_{on} = 50 \mu\text{sec}$
 $S_a = 24.059 \mu\text{m}$

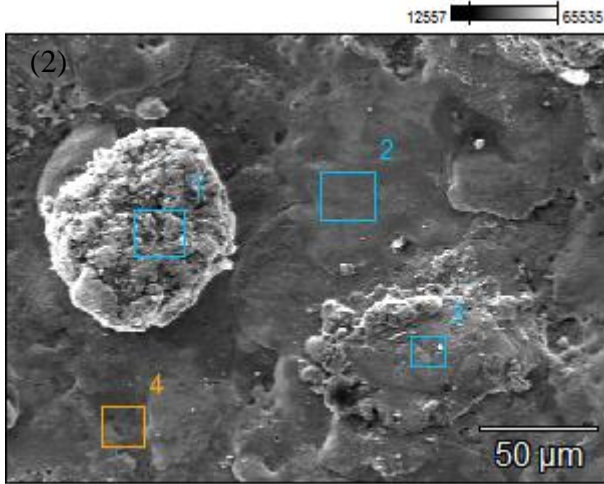
Εικόνα Γ. Τραχύτητα της επιφάνειας όταν $I_p=5-9A$ και $T_{on}= 50 \mu\text{sec}$.

Η Εικόνα Δ (1)-(3) δείχνει τη σημειακή ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε επιλεγμένα σημεία της κατεργασμένης επιφάνειας σε διαφορετικές πειραματικές συνθήκες.

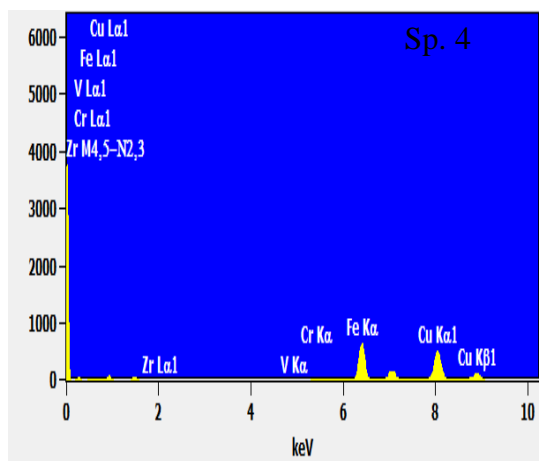
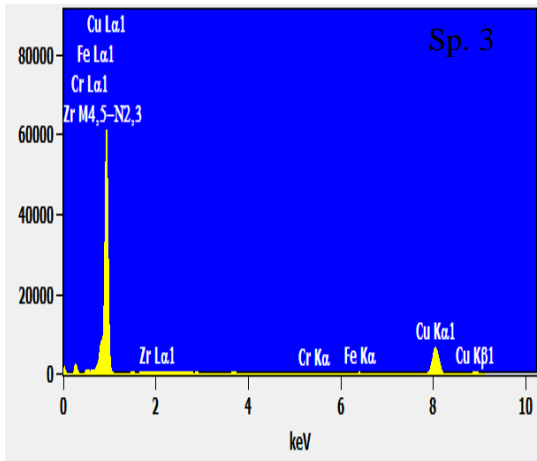
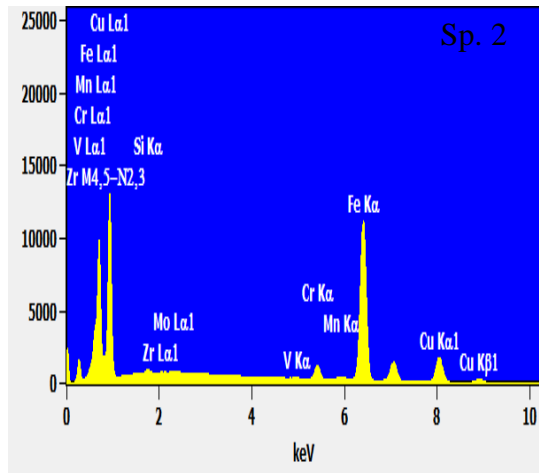
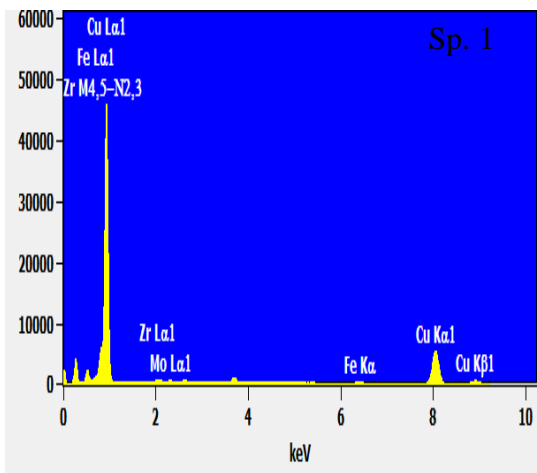


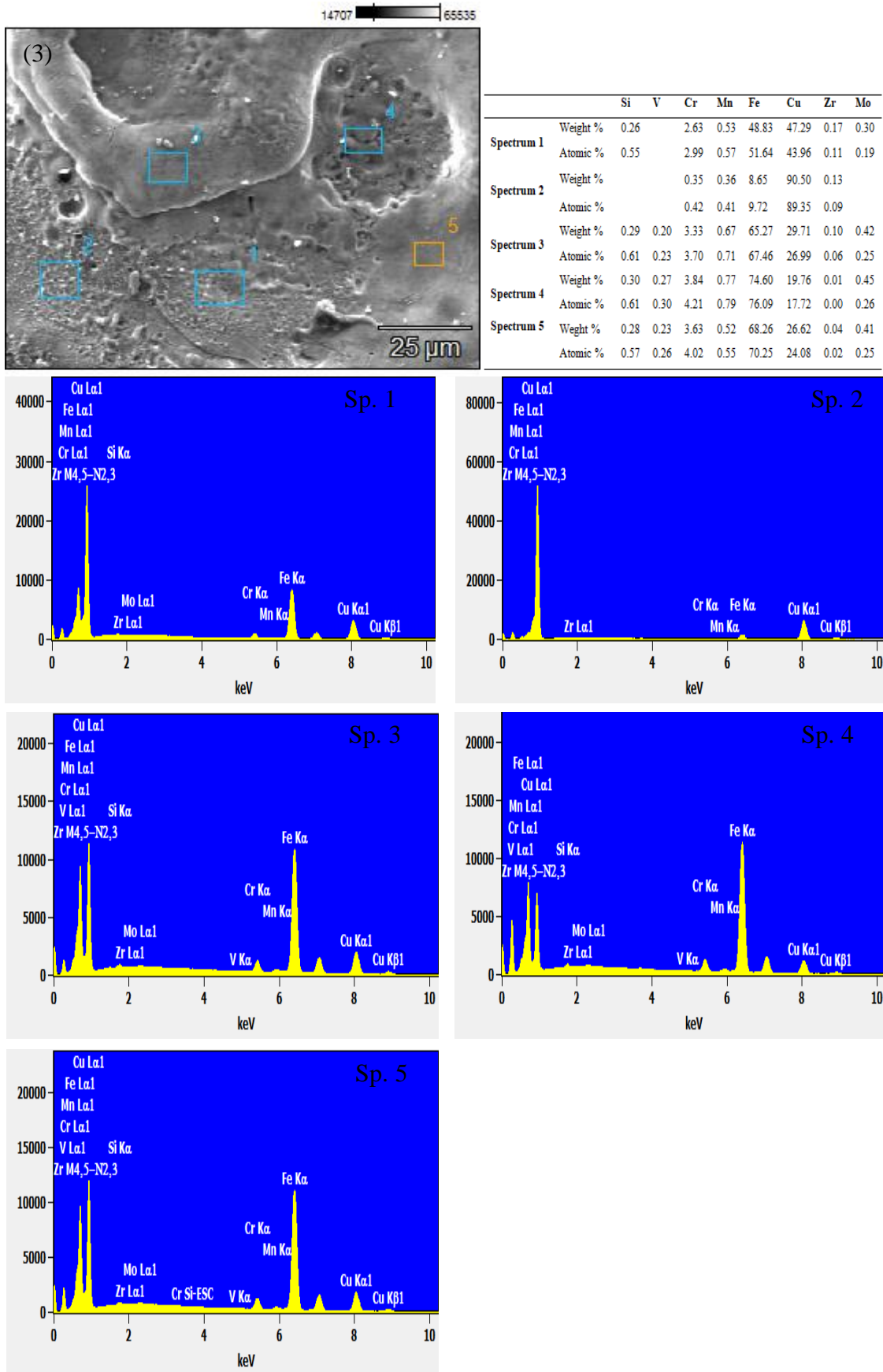
	Si	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zr	Mo	
Spectrum 1	Weight %	0.53	0.18	4.24	1.03	83.86	8.24	1.37	0.55
	Atomic %	1.07	0.20	4.59	1.06	84.61	7.30	0.85	0.32
Spectrum 2	Weight %	0.27	0.20	3.82	0.72	75.13	15.90	3.95	
	Atomic %	0.56	0.23	4.23	0.76	77.35	14.39	2.49	
Spectrum 3	Weight %	0.33	0.15	4.08	0.85	81.54	10.65	2.02	0.38
	Atomic %	0.67	0.17	4.44	0.88	82.84	9.51	1.26	0.22
Spectrum 4	Weight %	0.17	0.14	1.89	0.60	38.00	58.78	0.42	
	Atomic %	0.36	0.17	2.18	0.66	40.84	55.51	0.28	





	Si	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zr	Mo
Spectrum 1	Weight %				1.75	97.20	0.46	0.59
	Atomic %				1.99	97.29	0.32	0.39
Spectrum 2	Weight %	0.33	0.34	3.35	0.71	67.67	27.07	0.11
	Atomic %	0.68	0.38	3.70	0.75	69.68	24.50	0.07
Spectrum 3	Weight %			0.20	2.60	97.02	0.19	
	Atomic %			0.24	2.94	96.68	0.13	
Spectrum 4	Weight %	0.05	0.93		32.70	63.30	0.01	
	Atomic %	0.06	1.09		35.53	63.31	0.01	





Εικόνα Δ. Σημειακή στοιχειακή χημική ανάλυση τροποποιημένης επιφάνειας σε συνθήκες (1) $I_p=5A$ και $T_{on}=12.8\mu sec$, (2) $I_p=7A$ και $T_{on}=25\mu sec$ και (3) $I_p=9A$ και $T_{on}=50\mu sec$.

Βιβλιογραφία

- [1] H. S. Payal, B. L. Sethi, ‘Non-conventional Machining Processes as Viable Alternatives for Production with Specific Reference to Electrical Discharge Machining’, *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 62, 2003, pp. 678-682.
- [2] Shankar Chakraborty, Bijoy Bhattacharyya, Sunny Diyaley, ‘Applications of optimization techniques for parametric analysis of non-traditional machining processes: A Review’, *Management Science Letters*, Vol 9, 2018, pp. 467–494
- [3] Hassan El-Hofy, *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining*, McGraw-Hill, 2005.
- [4] M. P. Jahan, ‘Die-sinking Electrical Discharge Machining’, in M. P. Jahan (ed.), *Electrical Discharge Machining (EDM): Types, Technologies and Applications*, Nova Science Publishers, New York, 2015, pp.1-17.
- [5] Sushil Kumar Choudhary, Dr. R.S Jadoun, ‘Current Advanced Research Development of Electric Discharge Machining (EDM): A Review’, *International Journal of Research in Advent Technology*, Vol. 2, No.3, 2014, pp. 273-297.
- [6] Jaber E. Abu Qudeiri, Ahmad Saleh, Aiman Ziout, Abdel-Hamid I. Mourad, Mustufa Haider Abidi, Ahmed Elkaseer, ‘Advanced Electric Discharge Machining of Stainless Steels: Assessment of the State of the Art, Gaps and Future Prospect’, *Materials*, Vol. 12, Issue 6, 2019, pp. 907-955.
- [7] B. Lauwers, J. Vleugels, O. Malek, K. Bran, K. Liu, ‘Electrical discharge machining of composites’, in H. Hocheng (ed.), *Machining technology for composite materials: Principles and practice*, Woodhead Publishing, 2012, pp. 199.
- [8] Elman C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- [9] I. Puertas, C. J. Luis, ‘A study on the machining parameters optimisation of electrical discharge machining’, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143–144, 2003, pp. 521–526.
- [10] Tiago Czelusniak, Camila Fernandes Higa, Ricardo Diego Torres, Carlos Augusto Henning Laurindo, José Mário Fernandes de Paiva Júnior, Armin

- Lohrengel, Fred Lacerda Amorim, ‘Materials used for sinking EDM electrodes: a review’, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, Issue 14, 2019.
- [11] Rahul Mahajan, Hare Krishna, Ankit Kumar Singh, Ranjan Kr Ghadai, ‘A Review on Copper and its alloys used as electrode in EDM’, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 377, 2018.
- [12] E. B. Guitrau, *The EDM Handbook*, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 1997.
- [13] S. H. Lee, X. P. Li, ‘Study of the effect of machining parameters of the machining characteristics in EDM of tungsten carbide’, *Journal of Material processing technology*, Vol. 115, 2001, pp. 344-355.
- [14] Δρ. Ν. Βαξεβανίδης, *Μη συμβατικές κατεργασίες υψηλού περιβαλλοντικού οφελούς* (Μέρος I): http://triblab.teipir.gr/edu/files/Mi_symbatikes_katergasies_1.pdf
- [15] M. M. Makenzi, B. W. Ikuu, ‘A review of flushing techniques used in electrical discharge machining’, *Proceedings of the 2012 Mechanical Engineering Conference on Sustainable Research and Innovation*, Vol. 4, May 2012.
- [16] K. H. Ho, S. T. Newman, ‘State of the art electrical discharge machining (EDM)’, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, 2003, pp. 1287–1300.
- [17] Sachidananda Taddalase Ganapati, Mohammad Sadiq A. Pachapuri, Chandrashekhar V. Adake, ‘Influence of process parameters of Electrical Discharge Machining on MRR, TWR and Surface roughness: A Review’, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2148, 2019.
- [18] Sanjeev Kumar, Rupinder Singh, T. P. Singh, B. L. Sethi, ‘Surface modification by electrical discharge machining: A review’, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 2009, pp. 3675–3687.
- [19] Shiba Narayan Sahu, Narayan Chandra Nayak, ‘Multi-criteria decision making with PCA in EDM of A2 tool steel’, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, Issue 9, 2018, pp. 18641-18648.
- [20] M. Kunieda, B. Lauwers, K. P. Rajurkar, B. M. Schumacher, ‘Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process’, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 54, Issue 2, 2005, pp. 64-87.

- [21] Ahsan Ali Khan, Mohammed Baba Ndaliman, ‘Surface Quality Produced in EDM with Tungsten Carbide and Copper Compacted Electrodes’, *Advanced Materials Research*, Vol. 1115, 2015, pp. 24-28.
- [22] H. Ramasawmy, L. Blunt, ‘Effect of EDM process parameters on 3D surface topography’, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, 2004, pp. 155-164.
- [23] Bülent Ekmekci, Nihal Ekmekci, Hamidullah Yaşar, ‘Surfaces in Electrical Discharge Machining’, in M. P. Jahan (ed.), *Electrical Discharge Machining (EDM): Types, Technologies and Applications*, Nova Science Publishers, New York, 2015, pp.123-135.
- [24] J. C. Rebelo, A. Morao Dias, D. Kremer, J. L. Lebrun, ‘Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels’, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84, 1998, pp. 90–96.
- [25] A. K. M. Asif Iqbal, Ahsan Ali Khan, ‘Influence of Process Parameters on Electrical Discharge Machined Job Surface Integrity’, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 3, Issue 2, 2010, pp. 396-402.
- [26] L. C. Lee, L. C. Lim, V. Narayanan, V. C. Venkatesh, ‘Quantification of surface damage of tool steels after EDM’, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 28, Issue 4, 1988, pp. 359-372.
- [27] Rodrigo Panosso Zeilmann, Thiago Vacaro, Fernando Moreira Zanotto, Mariana Czarnobay, ‘Metallurgical alterations in the surface of steel cavities machined by EDM’, *Revista Matéria*, Vol. 18, 2013, pp. 1541–1548.
- [28] Ved Prakash, Shubham, P. Kumar, P. K. Singh, A. K. Das, S. Chattopadhyaya, A. Mandal, A. R. Dixit, ‘Surface alloying of miniature components by micro-electrical discharge process’, *Materials and manufacturing processes*, Vol. 33, 2018, pp. 1051-1061.
- [29] L. C. Lim, L. C. Lee, Y. S. Wong, H. H. Lu, ‘Solidification microstructure of electro discharge machined surfaces of tool steels’, *Materials Science and Technology*, Vol. 7, 1991, pp. 239-248.
- [30] Vijaya Babu. T., Dr. J. S. Soni, Dr. M. Lakshman Rao, ‘Analysis and evaluation of heat affected zones (HAZ) of the work piece surface machined using different electrode by Die-sinking EDM of EN-31 die steel’, *The International Journal Of Engineering And Science*, Vol. 5, Issue 3, 2016, pp. 37-42.

- [31] J. F. Liu, Y. B. Guo, 'Modeling of White Layer Formation in Electric Discharge Machining (EDM) by Incorporating Massive Random Discharge Characteristics', *Procedia CIRP*, Vol. 42, 2016, pp. 697–702.
- [32] J. P. Kruth, L. Stevens, L. Froyen, B. Lauwers, 'Study of the White Layer of a Surface Machined by Die-Sinking Electro-Discharge Machining', *CIRP Annals*, Vol. 44, Issue 1, 1995, pp. 169-172.
- [33] G. Cusanelli, A. Hessler–Wyser, F. Bobard, R. Demellayer, R. Perez, R. Flükiger, 'Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, Issues 1–3, 2004, pp. 289-295.
- [34] <https://www.uddeholm.com/files/edm-english.pdf>.
- [35] H. T. Lee, T. Y. Tai, 'Relationship between EDM parameters and surface crack formation', *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, 2002, pp. 877–888.
- [36] H.T. Lee, F.C. Hsu, T.Y. Tai, 'Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode', *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 364, 2004, pp. 346-356.
- [37] L. C. Lee, L. C. Lim, Y. S. Wong, H. H. Lu, 'Towards a better understanding of the surface features of electro-discharge machined tool steels', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 24, 1990, pp. 513-523.
- [38] A. G. Mamalis, G. C. Vosniakos, N. M. Vaxevanidis, J. Prohászka, 'Macroscopic and microscopic phenomena of electro-discharge machined steel surfaces: An experimental investigation', *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 15, Issue 3, 1987, pp. 335-356.
- [39] B. Ekmekci, 'White Layer Composition, Heat Treatment, and Crack Formation in Electric Discharge Machining Process', *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 40B, 2009, pp. 70-81.
- [40] Amoljit Singh Gill, Sanjeev Kumar, 'Investigation of Micro-Hardness in Electrical Discharge Alloying of En31 Tool Steel with Cu–W Powder Metallurgy Electrode', *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 43, 2017, pp. 1499–1510.
- [41] Jorge Simao, David Aspinwall, Fawzy El-Menshawy, Ken Meadows, 'Surface alloying using PM composite electrode materials when electrical discharge

- texturing hardened AISI D2', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, 2002, pp. 211–216.
- [42] Venkata Rao Chundru, Ramji Koonna, Srinivasa Rao Pujari, 'Surface Modification of Ti6Al4V Alloy Using EDMed Electrode Made with Nano- and Micron-Sized TiC/Cu Powder Particles', *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 44, 2018, pp. 1425–1436.
- [43] S. Hamilton, 'Overview of surface treatments currently available to the moulding industry', In: *21st Mould making Conference '95—Innovative Technology for Mould Manufacturers & Users*, Solihull, UK, Institute of Materials, 1995.
- [44] Biing Hwa Yan, Hsien Chung Tsai, Fuang Yuan Huang, 'The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, Issue 2, 2005, pp. 194-200.
- [45] Abhishek Das, Joy Prakash Misra, 'Experimental Investigation on Surface Modification of Aluminum by Electric Discharge Coating Process Using TiC/Cu Green Compact Tool-Electrode', *Machining Science and Technology: An International Journal*, Vol. 16, Issue 4, 2012, pp. 601-623.
- [46] M. M. Barash, C. S. Kahlon, 'Experiments with electric spark toughening', *International Journal of Machine Tool Design & Research*, Vol. 4, 1965, pp. 1–8.
- [47] V. C. Venkatesh, S. Parasnis, 'Surface transformation in high speed steel after electro discharge machining', *Proceedings of the 5th AIMTDR Conference*, 1972, pp. 639–649.
- [48] J. P. Kruth, H. K. Tonshoff, F. Klocke, 'Surface and sub-surface quality in material removal process for tool making', *Proceedings of the ISEM*, Vol. 12, 1998, pp. 33–64.
- [49] S. Rajesha, A. K. Sharma, Pradeep Kumar, 'Some Aspects of Surface Integrity Study of Electro Discharge Machined Inconel 718', *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference*, 2010, pp. 439-444.
- [50] Ali Ozgedik, Can Cogun, 'An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, 2006, pp. 488–500.

- [51] Bhola Jha, K. Ram, Mohan Rao, 'An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining', *Journal of Engineering Science and Technology Review*, Vol. 4, 2011, pp. 118-130.
- [52] Naveen Beri, S. Maheshwari, C. Sharma, Anil Kumar, 'Performance Evaluation of Powder Metallurgy Electrode in Electrical Discharge Machining of AISI D2 Steel Using Taguchi Method', *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 2, 2008, pp. 225-229.
- [53] M. P. Samuel, P. K. Philip, 'Powder metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining', *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 37, Issue 11, 1997, pp. 1625–1633.
- [54] T. A. El-Taweel, 'Multi-response optimization of EDM with Al–Cu–Si–TiC P/M composite electrode', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, 2009, pp. 100–113.
- [55] Promod Kumar Patowari, Partha Saha, P. K. Mishra, 'Artificial neural network model in surface modification by EDM using tungsten–copper powder metallurgy sintered electrodes', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, 2010, pp. 627–638.
- [56] Amoljit Singh Gill, Sanjeev Kumar, 'Surface alloying of H11 die steel by tungsten using EDM process', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 78, 2015, pp. 1585–1593.
- [57] Naveen Beri, Sachin Maheshwari, Chitra Sharma, Anil Kumar, 'Technological Advancement in Electrical Discharge Machining with Powder Metallurgy Processed Electrodes: A Review', *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, 2010, pp. 1186–1197.
- [58] J. Simao, H. G. Lee, D. K. Aspinwall, R. C. Dewes, E. M. Aspinwall, 'Work piece surface modification using electrical discharge machining', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, Issue 2, 2003, pp. 121–128.
- [59] P. K. Patowari, U. K. Mishra, P. Saha, P. K. Mishra, 'Surface Integrity of C-40 Steel Processed with WC-Cu Powder Metallurgy Green Compact Tools in EDM', *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, 2011, pp. 668–676.

- [60] Venkata Rao Chundru, Ramji Koonna, Srinivasa Rao Pujari, 'Surface Modification of Ti6Al4V Alloy Using EDMed Electrode Made with Nano- and Micron-Sized TiC/Cu Powder Particles', *Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 44, Issue 2, 2018, pp. 1425–1436.
- [61] H. S. Sidhul, S. S. Banwait, S. C. Laroia, 'Development of RSM Model in Surface Modification of EN-31 Die Steel Material Using Copper-Tungsten Powder Metallurgy Semi-Sintered Electrodes by EDM Process', *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 1, Issue 6, 2013, pp. 155-160.
- [62] Naveen Beri, Sachin Macheshawari, Chitra Sharma, Anil Kumar, 'Surface Quality Modification using Powder Metallurgy Processed CuW Electrode during Electrical Discharge Machining of Inconel 718', *Procedia Materials Science*, Vol. 5, 2014, pp. 2629-2634.
- [63] A. Ahmed, 'Deposition and Analysis of Composite Coating on Aluminum Using Ti-B₄C Powder Metallurgy Tools in EDM', *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 31, Issue 4, 2015, pp. 467-474.
- [64] Amoljit Singh Gill, Sanjeev Kumar, 'Surface Roughness and Microhardness Evaluation for EDM with Cu-Mn Powder Metallurgy Tool', *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 31, Issue 4, 2015, pp. 514-521.
- [65] Parveen Goyal, N. M. Suri, Sanjeev Kumar, Rajesh Kumar, 'Investigating the surface properties of EN-31 die-steel after machining with powder metallurgy EDM electrodes', *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, 2017, pp. 3694–3700.
- [66] Orhan Gülcan, İbrahim Uslan, Yusuf Usta, Can Çogun, 'Performance and surface alloying characteristics of Cu–Cr and Cu–Mo powder metal tool electrodes in electrical Discharge machining', *Machining Science and Technology*, Vol. 20, 2016, p. 523-546.
- [67] Shubhajit Das, 'Surface alloying of aluminium by W-Cu-Cr powder metallurgy tool electrodes in EDM', *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology*, Vol. 2, Issue 4, 2016, pp. 01-10.
- [68] P. Mathan Kumar, K. Sivakumar, N. Jayakumar, 'Surface Modification on OHNS Steel Using Cu-CrB₂ Green Compact Electrode in EDM', *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, 2018, pp. 17389–17395.
- [69] Ahsan Ali Khan, Mohammed Baba Ndaliman, Mohammad Yeakub Ali, Mas Hafizah Bt Mansor, Nurul-Ain Bt Idrus, 'Surface Modification by EDM using

- Co-Cr Sintered Powder Metallurgy Electrode’, *Advanced Materials Research*, Vol. 576, 2012, pp. 56-59.
- [70] Amoljit Singh Gill, Sanjeev Kumar, ‘Micro-hardness evaluation for surface alloying of H11 die steel with Cu–Cr–Ni powder metallurgy tool in electrical discharge machining’, *Journal Engineering Manufacture*, Vol. 232, 2016, pp.1-13.
- [71] Jorge Simao, David Aspinwall, Fawzy El-Menshawy, Ken Meadows, ‘Surface alloying using PM composite electrode materials when electrical discharge texturing hardened AISI D2’, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, 2002, pp. 211–216.
- [72] Mohammed Baba Ndaliman, Ahsan Ali Khan, ‘Development of Powder Metallurgy (PM) Compacted Cu-TaC Electrodes for EDM’, *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, Vol. 1, 2011, pp. 385-391.
- [73] Can Cogun, Ziya Esen, Asim Genc, Ferah Cogun, Nizami Akturk, ‘Effect of powder metallurgy Cu-B₄C electrodes on work piece surface characteristics and machining performance of electric discharge machining’, *Journal Engineering Manufacture*, Vol. 230, 2015, 1-14.
- [74] Ching-Yuan Bai, Chun-Hao Koo, ‘Effects of kerosene or distilled water as dielectric on electrical discharge alloying of superalloy Haynes 230 with Al–Mo composite electrode’, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, Issues 12–13, 2006, pp. 4127-4135.
- [75] F. C. Cambell, *Metals Fabrication: Understanding the Basics*, ASM International, U.S.A, 2013.
- [76] Γεώργιος Κ. Τριανταφυλλίδης, *Μεταλλογνωσία για το μη Μεταλλουργό Μηχανικό και τον Τεχνολόγο Υλικών*, Έκδοση 2η, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2014.
- [77] Αγγελική Λεκάτου, *Βιομηχανικά Κράματα*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2005.
- [78] https://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_calmax_english.pdf
- [79] J. S. Soni, G. Chakraverti, ‘Effect of electrode material properties on surface roughness and dimensional accuracy in electric-discharge machining of high carbon high chromium die steel’, *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 76, 1995, pp. 46-51.

- [80] M. Kiyak, O. Cakir, 'Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel', *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 191, 2007, pp. 141-144.
- [81] J. D. Marafona, A. Araujo, 'Influence of work piece hardness on EDM performance', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, 2007, pp. 744-748.
- [82] H. S. Payal, R. Choudhry, S. Singh, 'Analysis of electro discharge machined surfaces of EN-31 tool steel', *Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 67, 2008, pp. 1072-1077.
- [83] H. Zarepour, A. F. Tehrani, D. Karimi, S. Amini, 'Statistical Analysis of Electrode Wear in EDM of Tool Steel DIN 1.2714 used in forging dies', *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 187-188, 2007, pp. 711-714.
- [84] A. G. Jaharah, C. G. Liang, S. Z. Wahid, M. N. Ab Rahman, C. H. Che Hassan, 'Performance of copper electrode in electrical discharge machining (EDM) of AISI H13 harden steel', *International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*, Vol. 3, 2008, pp. 25-29.
- [85] C. H. Che Haron, J. A. Ghani, Y. Burhanuddin Y. K. Seong C. Y. Swee, 'Copper and graphite electrodes performance in electrical-discharge machining of XW42 tool steel', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, Issues 1–3, 2008, pp. 570-573.
- [86] S. Oliver Nesa Raj, Sethuramalingam Prabhu, 'Analysis of multi objective optimisation using TOPSIS method in EDM process with CNT infused copper electrode', *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, Vol. 19, 2017, pp. 76-94.
- [87] P. S. Liu, G. F. Chen, *Porous Materials: Processing and Applications*, Elsevier Science & Technology, 2014.
- [88] Maneswar Rahang, Promod Kumar Patowari, 'Parametric Optimization for Selective Surface Modification in EDM using Taguchi Analysis', *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 31, 2015, pp. 422-431.
- [89] Georgios P. Petropoulos, Nikolaos M. Vaxevanidis, Miroslav Radovanoviü, Carol Zoler, 'Morphological-Functional Aspects of Electro-Discharge Machined Surface Textures', *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 55, 2009, pp. 95-103.

- [90] Marin Gostimirovic, Pavel Kovac, Milenko Sekulic, Branko Skoric, 'Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM', *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, Issue 1, 2012, pp. 173-179.
- [91] Mohammadreza Shabgard, Mirsadegh Seyedzavvar, Samad Nadimi Babil Oliaei, 'Influence of Input Parameters on the Characteristics of the EDM Process', *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 57, 2011, pp. 689-696.
- [92] R. Pérez, J. Carron, M. Rappaz, G. Wälder, B. Revaz, R. Flükiger, 'Measurement and metallurgical modeling of the thermal impact of EDM discharges on steel', *15th International Symposium on Electromachining*. Pennsylvania, USA, 2007, pp. 17-22.
- [93] F. Roethel, L. Kosec, V. Garbajs, J. Peklenik, 'Contribution to the micro-analysis of the spark eroded surfaces', *Ann. CIRP*, Vol. 25, Issue 1, 1976, pp. 135–140.
- [94] Z. L. Wang, Y. Fang, P. N. Wu, W. S. Zhao, K. Cheng, 'Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode', *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 129, 2002, pp. 139-142.
- [95] Soo Hiong Lee, Xiaoping Li, 'Study of the surface integrity of the machined work piece in the EDM of tungsten carbide', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, 2003, pp. 315–321.
- [96] Siddhartha Kar, Sujoy Chakraborty, Vidyut Dey, Subrata Kumar Ghosh, 'Optimization of Surface Roughness Parameters of Al-6351 Alloy in EDC Process: A Taguchi Coupled Fuzzy Logic Approach', *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, Vol. 98, 2017, pp. 607–618.
- [97] Panagiotis Karmiris-Obratańska, Krzysztof Zagórski, Jacek Cieślik, Emmanouil L. Papazoglou, Angelos P. Markopoulos, 'Surface Topography of Ti 6Al 4V ELI after High Power EDM', *In: 23rd International Conference on Material Forming (ESAFORM 2020), Procedia Manufacturing*, 2019.
- [98] I. O. Aver'yanova, D. Yu. Bogomolov, V. V. Poroshin, 'ISO 25178 Standard for Three-Dimensional Parametric Assessment of Surface Texture', *Russian Engineering Research*, Vol. 37, 2017, pp. 513–516.