



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ  
ΑΤΤΙΚΗΣ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μελέτη της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης  
επιφανειακών στρωμάτων σύνθετων υλικών**

**Electro-Discharge Machining (EDM) of composite  
surface layers**

**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΥΡΙΟΣ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ (Α.Μ. 48081)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Δρ. ΠΑΝΔΩΡΑ Π. ΨΥΛΛΑΚΗ**

*Αιγάλεω, Φεβρουάριος 2021*



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ  
ΑΤΤΙΚΗΣ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μελέτη της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης επιφανειακών στρωμάτων συνθέτων υλικών**

**Electro-Discharge Machining (EDM) of composite surface layers**

**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΥΡΙΟΣ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ (Α.Μ. 48081)**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

1. ΠΑΝΔΩΡΑ Π. ΨΥΛΛΑΚΗ (Επιβλέπουσα)
2. ΑΝΔΡΕΑΣ ΘΕΟΔΩΡΑΚΑΚΟΣ
3. ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΤΟΣ

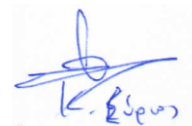
## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κωνσταντίνος Σύριος του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου mec48081 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Κ. Σύριος'.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η διπλωματική εργασία αφορά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση των τεχνικών ηλεκτροδιάβρωσης για την κατεργασία υπέρ-σκληρων υλικών, τα οποία δεν δύνανται να υποστούν κατεργασία με κάποια συμβατική τεχνική. Ειδική έμφαση δίδεται στη τεχνική της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης για τη δημιουργία ενός επιδιωκόμενου επιφανειακού ανάγλυφου σε αγώγιμα υπέρσκληρα υλικά.

Ο αρχικός σχεδιασμός της εργασίας περιελάμβανε την υλοποίηση πειραμάτων στις ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις της Αλμερίας (Ισπανία), -στα πλαίσια εγκεκριμένου έργου SFERA3 ευρωπαϊκής χρηματοδότησης,- προκειμένου να συντεθούν υπέρ-σκληρα υλικά. Στη συνέχεια, τα υλικά αυτά επρόκειτο να υποστούν ηλεκτροδιάβρωση στο εργαστήριο του τομέα «Τεχνολογίας των Κατεργασιών» (Ε.Μ.Π.)

Δυστυχώς λόγω της τρέχουσας κατάστασης της πανδημίας COVID-19, τα αρχικά «ηλιακά πειράματα» στην Αλμερία αναβλήθηκαν για το 2022 και το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας τροποποιήθηκε, ώστε να είναι εφικτή η υλοποίησή της σε εύλογο χρονικό πλαίσιο.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis concerns an up-to-date literature review on the electro-discharge machining (EDM) techniques for the processing of ultra-hard materials that could not be treated via conventional techniques. Special emphasis is given to die sinking electro-discharge machining for achieving a given pattern of surface texturing onto electrical conductive ultra-hard materials.

The initial planning of this particular study aimed at the implementation of a series of experiments at Plataforma Solar de Almeria, PSA (Spain) via SFERA3 European Programme, in order to obtain the necessary materials, which in turn would be treated in the EDM installations of the Manufacturing Technology Laboratory of the School of Mechanical Engineering (N.T.U.A.).

Unfortunately, by the beginning of this study, the pandemic crisis of COVID-19 forced the postponement of the “solar experiments” for 2022, so the content of this diploma thesis had to be re-designed in order to be completed within a reasonable time period.

---

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

	<i>Σελίδα</i>
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	6
3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	9
4. ΡΟΛΟΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ	12
5. ΜΗΧΑΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	16
6. ΚΑΤΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ	18
7. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	20
8. ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΕΡΑΜΟΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	22
9. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	25
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	27
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	28

---

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

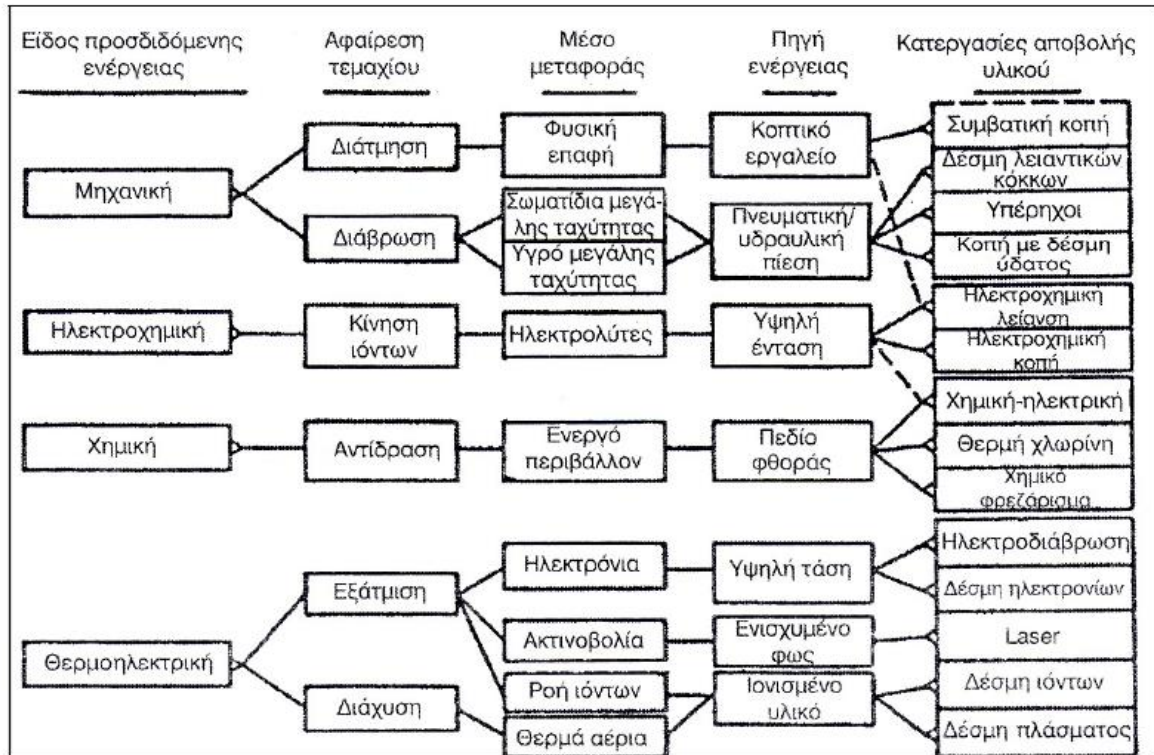
Οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, οι οποίες περιγράφονται από το γενικότερο επιστημονικό πεδίο της Μηχανουργικής Τεχνολογίας, στοχεύουν είτε στον τεμαχισμό των υλικών (cutting) σε τεμάχια μικρότερων διαστάσεων, τα οποία θα υποβληθούν σε περαιτέρω κατεργασίες, είτε στη διαμόρφωση του ανάγλυφου της επιφάνειας (surface texturing) ενός αντικειμένου ώστε, κατά κύριο λόγο, να βελτιωθεί η διάρκεια ζωής του κατά τη χρήση.

Γενικά, οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού διακρίνονται σε αυτές που πραγματοποιούνται:

- (α) με την επαφή ενός κοπτικού άκρου με το προς κατεργασία τεμάχιο, με τις οποίες η απομάκρυνση του υλικού γίνεται με μηχανισμό απόξεσης (abrasion), όπως είναι οι συμβατικές κατεργασίες λείανσης με τη χρήση κοπτικών εργαλείων, π.χ. αδαμαντοτροχού [1], ή
- (β) χωρίς επαφή ενός στερεού εργαλείου με το προς κατεργασία τεμάχιο, όπως είναι οι τεχνικές της ηλεκτροδιάβρωσης, της κατεργασίας με δέσμες laser, η υδροκοπή, κλπ [2].

Μια λεπτομερέστερη ταξινόμηση των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού λαμβάνει υπόψη το μηχανισμό, με τον οποίο λαμβάνει χώρα η αποβολή υλικού (Σχήμα 1, [3]) και βασίζεται σε:

- (α) μηχανικές δράσεις κατά την επαφή και σχετική κίνηση ενός κοπτικού εργαλείου επί της κατεργαζόμενης επιφάνειας του υλικού (τόρνευση, διατμητική κοπή, φραιζάρισμα, κλπ), ή κατά την πρόσκρουση σωματιδίων ή ρευστού υψηλής ταχύτητας με το κατεργαζόμενο υλικό (υδροκοπή, κοπή με υπερήχους, κλπ)
- (β) χημικές ή ηλεκτροχημικές δράσεις χημικών μιγμάτων, με τα οποία επιτυγχάνεται η ελεγχόμενη διάβρωση του κατεργαζόμενου υλικού (χημικό φραιζάρισμα, ηλεκτροχημική λείανση, ηλεκτροχημική κοπή, κλπ)
- (γ) ηλεκτροθερμικές δράσεις κατευθυνόμενων δεσμών ηλεκτρονίων, φωτονίων ή ιόντων (ηλεκτροδιάβρωση, κοπή με δέσμη laser ή με πλάσμα, κλπ).



**Σχήμα 1.** Ταξινόμηση των τεχνικών αφαίρεσης υλικού, βάσει των κύριων δράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία [3].

Η αναλυτική περιγραφή του συνόλου των μεθόδων ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, η οποία εστιάζεται στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης. Άλλωστε, όλες οι συμβατικές μέθοδοι έχουν αναλυθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία και η περιγραφή τους περιλαμβάνεται και στα κλασικά τα εγχειρίδια της Επιστήμης των Υλικών, όπως για παράδειγμα τα [2], [4] και [5].

Η ηλεκτροδιάβρωση έχει αναγνωριστεί ως μία από τις σημαντικότερες μεθόδους χωρίς επαφή για σκληρά και ψαθυρά υλικά [2, 6, 7] και αποτελεί από τις παλαιότερες μη συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, καθώς: αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1940 [8]. Εφαρμόζεται κυρίως στην κατεργασία σκληρυμένου χάλυβα και στην παραγωγή κοπτικών εργαλείων και μητρών και η αφαίρεση υλικού λαμβάνει χώρα δια της τήξεως του από τη θερμότητα που προσφέρει ηλεκτρικός σπινθήρας [9]. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε αρχικά το 1946 κατά τη μελέτη διάβρωσης των επαφών σε διακόπτες ισχύος [6], πρόκειται

περί του «σπινθηρισμού» που παρατηρείται σε φθαρμένους διακόπτες ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Η ηλεκτροδιάβρωση ενδείκνυται για την κατεργασία υλικών μέγιστης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης περίπου 3 Ωm [6], ή κατ' άλλους 1 Ωm [10], η οποία επιτυγχάνεται όταν σε διηλεκτρικό υγρό που ρέει μεταξύ του προς κατεργασία τεμαχίου και ενός ηλεκτροδίου (εργαλείου) προκαλείται σπινθήρας σε μικρή επιφάνεια του υλικού. Ταυτόχρονα το ίδιο υγρό ψύχει το κατεργαζόμενο τεμάχιο και υποβοηθά την απομάκρυνση των αφαιρούμενων ψηγμάτων.

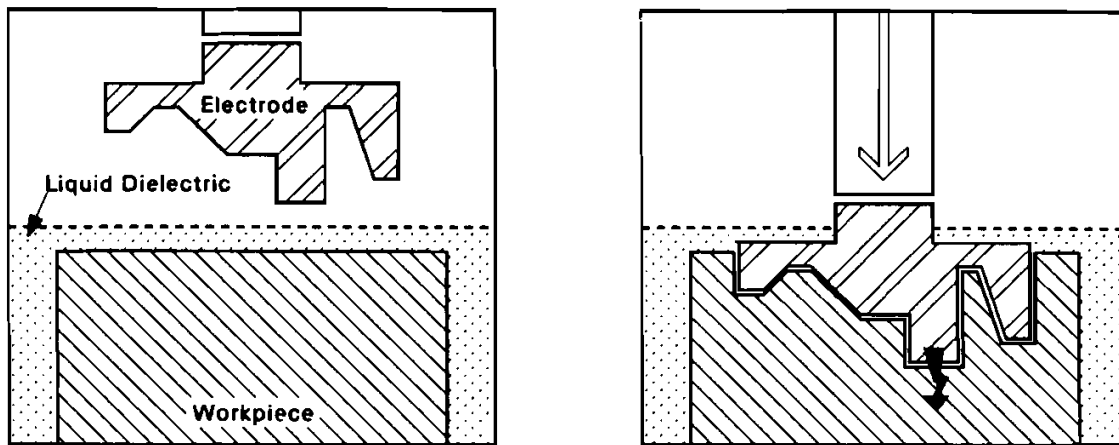


---

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

---

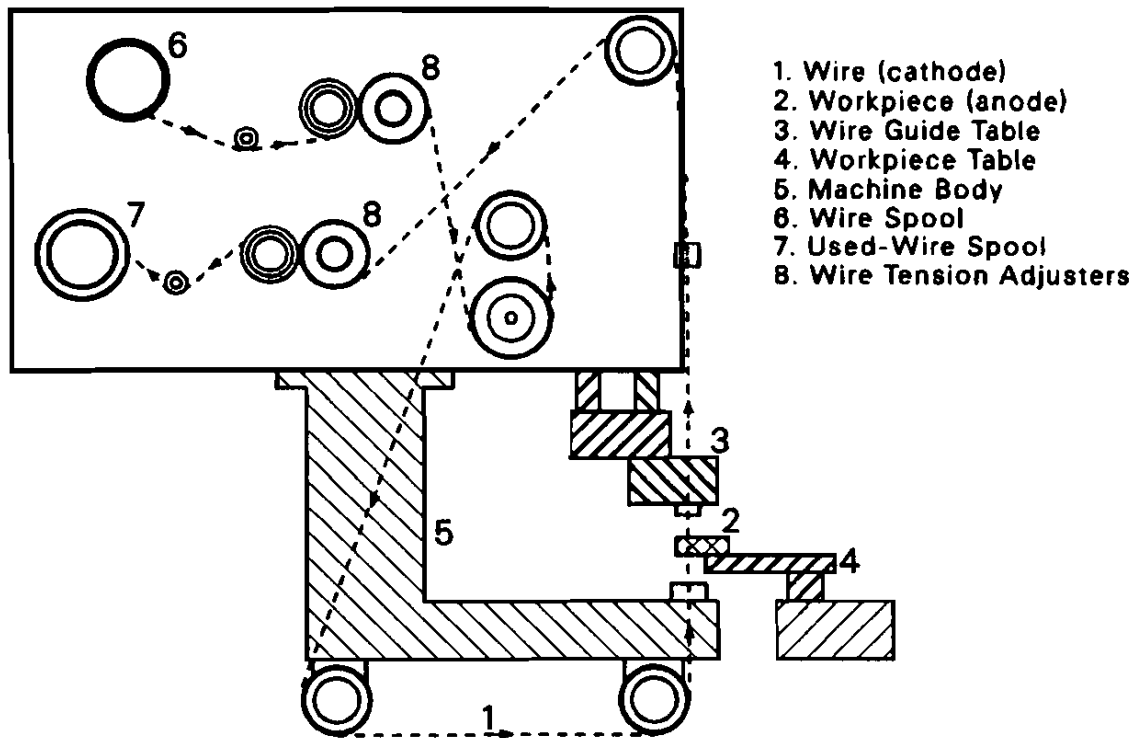
Η μέθοδος περιγράφεται από τους Petrofes & Gadalla [6] και τους Ojha et al. [8]. Συνεχής ηλεκτρική τάση εφαρμόζεται μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου μέχρι να ιονιστεί το διηλεκτρικό υγρό και να προκληθεί σπινθήρας. Διακρίνουμε δύο τύπους μεθόδων ηλεκτροδιάβρωσης: (α) βυθιζόμενης μήτρας (βύθισης) ή τύπου εμβόλου ή κατακόρυφης διάβρωσης ή αποτύπωσης [3, 6] και (β) σύρματος.



**Σχήμα 2.** Σχηματική παράσταση της μεθόδου βυθιζόμενης μήτρας (die sinking electrodischarge machining) [6].

Στη μέθοδο βυθιζόμενης μήτρας (die sinking electrodischarge machining), η οποία προηγήθηκε χρονικά, το ηλεκτρόδιο (εργαλείο) συνδέεται τυπικά στην κάθοδο (+) της πηγής και το τεμάχιο στην άνοδο (-). Σε μια τέτοια διάταξη, η σύνδεση στην κάθοδο της πηγής καθιστά το εργαλείο άνοδο, δηλαδή το εργαλείο έλκει τα ηλεκτρόνια (αρνητικά φορτισμένα σωματίδια) και, αντίστοιχα, για το τεμάχιο έλκει τα βαρύτερα κατιόντα (θετικά φορτισμένα σωματίδια) (Σχήμα 2, [6]). Η επισήμανση αυτή γίνεται διότι μπορεί να προκύψει παρανόηση από τις διαφορετικές διατυπώσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία. Το ηλεκτρόδιο (εργαλείο) έχει σχετικά μεγάλη επιφάνεια διατομής, ώστε να φέρει στην απόληξή του το επιθυμητό σχήμα διαμόρφωσης του τεμαχίου. Ουσιαστικά,

λοιπόν, με τον τρόπο αυτό «εκτυπώνεται» η γεωμετρία της απόληξης του ηλεκτροδίου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, χωρίς τα δύο να έρχονται σε επαφή. Ως διηλεκτρικό υγρό, συνήθως, χρησιμοποιούνται βαρείς υδρογονάνθρακες και κηροζίνη.



**Σχήμα 3.** Σχηματική παράσταση της μεθόδου ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος (wire electrodischarge machining) [6].

Η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire electrodischarge machining) αποτελεί εξέλιξη της κατακόρυφης, όπου αντί για το διαμορφωμένο ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται τανυσμένο μεταλλικό σύρμα διαμέτρου 0,05-0,25mm (Σχήμα 3, [3, 6]. Το σύρμα κόβει το κατεργαζόμενο τεμάχιο σε όλο το πάχος του με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που μια πριονοκορδέλα κόβει όλο το πάχος του κατεργαζόμενου τεμαχίου ξύλου. Το σύρμα (εργαλείο) τυπικά συνδέεται στην άνοδο (-) και το τεμάχιο στην κάθοδο (+) της πηγής, ήτοι καθοδικό σύρμα κόβει το ανοδικό τεμάχιο. Στην περίπτωση αυτή, όπως γίνεται κατανοητό, το κύριο μειονέκτημα είναι η υψηλή φθορά του σύρματος. Ως διηλεκτρικό μέσο χρησιμοποιείται νερό, ενώ το σύρμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα ή από ορείχαλκο. Η ρύθμιση της συγκέντρωσης ιόντων και της τάσης κατάρρευσης του διηλεκτρικού μπορεί να γίνει με μίξη απιονισμένου και τρεχούμενου νερού [11].

Στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος η διάρκεια του παλμού είναι τυπικά μία με δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από την ηλεκτροδιάβρωση τύπου εμβόλου [6] και, αντίστοιχα, η παλμική συχνότητα είναι αυξημένη [10], ενώ η ένταση του ρεύματος είναι σημαντικά αυξημένη [3].

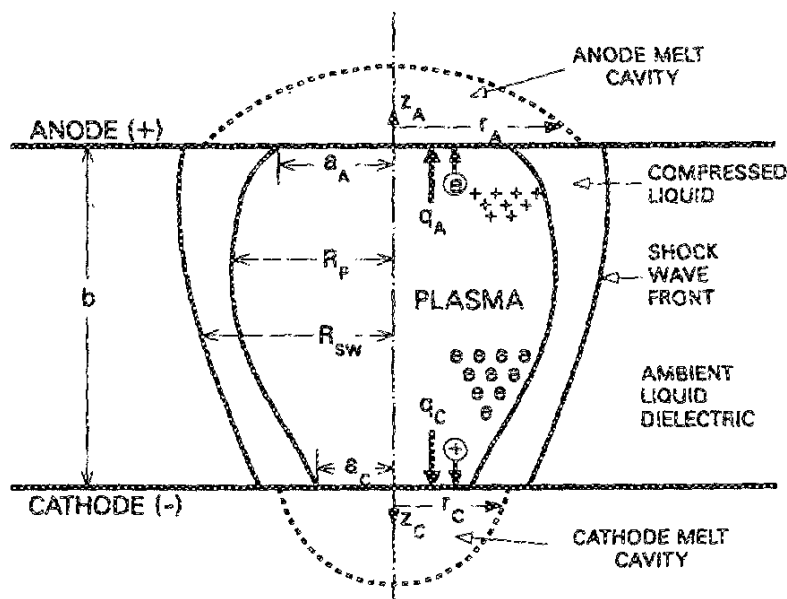
Παραλλαγή της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης είναι η διάτρηση με ηλεκτροδιάβρωση (electrical discharge drilling-EDD). Η πολικότητα είναι ορθή, το διηλεκτρικό είναι υδατικής βάσης και παρέχεται υπό πίεση μέσα από το εργαλείο, Munz et al. [12].

Βασική συνιστώσα μίας εργαλειομηχανής ηλεκτροδιάβρωσης είναι η γεννήτρια παλμών τάσης. Οι τύποι των γεννητριών καθώς και τυπικές μορφές παραγόμενων παλμών ρεύματος παρουσιάζονται στην αναφορά [3].

Συγκρινόμενη με τη μέθοδο ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος, η κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης βυθιζόμενης μήτρας παράγει καλύτερη ποιότητα επιφανείας, καθώς η μεγαλύτερη επιφάνεια διατομής του ηλεκτροδίου δίδει καλύτερα ελεγχόμενο σπινθήρα σε σχέση με το λεπτό ηλεκτρόδιο της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος.

### 3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Οι μηχανισμοί που ενεργοποιούνται κατά την ηλεκτροδιάβρωση περιγράφονται από τους Petrofes & Gadalla [6] και Ojha et al. [8]. Τα βασικά στοιχεία της διάταξης είναι τα δύο ηλεκτρόδια (τεμάχιο και εργαλείο) και το διηλεκτρικό υγρό ανάμεσά τους. Το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι της τάξης των 40μm [7], ενώ η εφαρμοζόμενη συνεχής τάση είναι περί τα 200V (ή 180V σύμφωνα με τους Lee & Lau [10]). Υπό αυτές τις συνθήκες δημιουργείται ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που διεγείρει τα αγώγιμα σωματίδια, προκαλώντας την αιώρησή τους, ώστε να γεφυρώσουν το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων (Σχήμα 4, [13]). Αυτό έχει ως συνέπεια την τοπική κατάρρευση του διηλεκτρικού μέσου και το σχηματισμό αγωγού εκκένωσης. Η τάση μειώνεται στα ~25V (ή 15-45V σύμφωνα με την [3]) και η ένταση του ρεύματος αυξάνεται μέχρι την τιμή που έχει καθορίσει ο χειριστής της διάταξης.



**Σχήμα 4.** Μηχανισμός δημιουργίας πλάσματος μεταξύ των ηλεκτροδίων της διάταξης ηλεκτροδιάβρωσης [13].

Το πλάσμα αναπτύσσεται υπό μορφή περίπου κυλινδρικού αγωγού που περιβάλλεται από φυσαλίδα ατμού και οδηγεί σε ζεύξη των δύο ηλεκτροδίων. Η παράπλευρη ανάπτυξη του πλάσματος εμποδίζεται από την παρουσία του πυκνού διηλεκτρικού υγρού με αποτέλεσμα η ηλεκτρική ενέργεια του σπινθήρα (VI<sub>t</sub>) να συγκεντρώνεται σε μικρό όγκο. Η υψηλή αυτή συγκέντρωση ενέργειας οδηγεί σε σημαντική τοπική αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Κατά τη διάρκεια ενός ενεργού παλμού ρεύματος έχουμε συνήθως τήξη του υλικού σε τουλάχιστον ένα από τα δύο ηλεκτρόδια. Στην περίπτωση κατεργασίας μεταλλοκεραμικού υλικού (WC-Co) αναφέρεται, επίσης, ατμοποίηση του υλικού [11]. Στη συνέχεια, ο παλμός ρεύματος διακόπτεται, η φυσαλίδα ατμών καταρρέει προς το εσωτερικό της αναρροφώντας το τηγμένο υλικό, το οποίο στερεοποιείται, καθώς έρχεται σε επαφή με το διηλεκτρικό και απομακρύνεται με τη ροή του τελευταίου. Οι περιοχές του υλικού που βρίσκονται σε υψηλή θερμοκρασία, λόγω της επαφής με το θερμό πλάσμα, υφίστανται βαφή εξαιτίας της απότομης ψύξης που προκαλεί η του διηλεκτρικού μέσου. Ο ίδιος μηχανισμός επαναλαμβάνεται στον επόμενο παλμό ρεύματος.

Λόγω των ταχύτερα κινούμενων ηλεκτρονίων που βομβαρδίζουν την άνοδο, η τελευταία τήκεται γρήγορα αλλά επαναστεροποιείται λόγω της τοπικής διαστολής του πλάσματος και της συνεπαγόμενης μείωσης της συγκέντρωσης θερμικής ισχύος. Η τήξη στην κάθοδο υστερεί χρονικά λόγω των βραδέως κινούμενων θετικών ιόντων. Η ακτίνα του πλάσματος στην κάθοδο, η οποία εκπέμπει τα ηλεκτρόνια, είναι πολύ μικρότερη της ανόδου. Το πλάσμα στην κάθοδο προσεγγίζεται ικανοποιητικά από σημειακή πηγή θερμότητας για την μοντελοποίηση της αγωγής θερμότητας στο εσωτερικό της καθόδου, [13].

Οι Petrofes & Gadalla [6] παρατήρησαν ότι η κατεργασία αφαίρεσης υλικού σε δύστηκτα αγώγιμα κεραμικά υλικά δεν ακολουθεί τον τυπικό μηχανισμό απομάκρυνσης υλικού που περιγράφηκε, αλλά λαμβάνει χώρα με ένα μηχανισμό «θερμικής αποφλοίωσης». Η υψηλή βάρθρωση της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των υλικών αυτών, προκαλεί τη δημιουργία εσωτερικών τάσεων στο υλικό, οι οποίες οδηγούν σε αποκόλληση των επιφανειακών στρωμάτων του. Όπως είναι φυσικό, η ένταση του μηχανισμού εξαρτάται από τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού [7]. Η αφαίρεση του υλικού λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερο βάθος από τη ζώνη τήξης/ εξάτμισης οδηγώντας αφενός σε αυξημένο ρυθμό αποβολής υλικού, αφετέρου δε σε κακή ποιότητα επιφανείας [10]. Οι Lee & Lau [10] αναφέρουν το ανεπιθύμητο φαινόμενο σχηματισμού

συσσωματώματος ηλεκτροδιάβρωσης («electrodischarge build-up») που σχετίζεται με τη θερμική αποφλοιώση. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες, αποβαλλόμενο υλικό από το κατεργαζόμενο κεραμικό τεμάχιο προσκολλάται και συσσωρεύεται στο ηλεκτρόδιο κατ' αναλογία με τις συμβατικές μεθόδους αφαίρεσης υλικού, στις οποίες το αποβαλλόμενο μέταλλο προσκολλάται σε εργαλείο μονής αιχμής π.χ. σε κοπτικό τόρνου ή πλάνης.

Νεώτερες εξελίξεις της τεχνολογίας της ηλεκτροδιάβρωσης αποτελούν η μικρο-ηλεκτροδιάβρωση (micro-EDM) και η υβριδική ηλεκτροδιάβρωση (hybrid EDM) [8, 14].

Η μικρο-ηλεκτροδιάβρωση αφορά τις κατεργασίες μικροκλίμακας με εργαλείο βολφραμίου, καρβιδίου του βολφραμίου ή ακόμα και χαλκού [14]. Στην υβριδική ηλεκτροδιάβρωση εφαρμόζεται δόνηση σε υπερηχητική συχνότητα, η οποία κινητοποιεί το διηλεκτρικό μέσο και τα ψήγματα της κατεργασίας, κατά τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα του διάκενου. Ο συνδυασμός δονήσεων και πλανητικής κίνησης του εργαλείου επιτρέπει τη μικρο-διάτρηση ακριβείας. Ομοίως, με την εισαγωγή δονήσεων του κατεργαζόμενου τεμαχίου βελτιώνεται η έκπλυση του διηλεκτρικού και δυνητικά αυξάνεται ο ρυθμός αποβολής υλικού [8].

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την ηλεκτροδιάβρωση είναι πολύπλοκα, στοχαστικής φύσεως και γι' αυτό δεν είναι πλήρως κατανοητά. Έτσι η σχετική βιβλιογραφία δεν συγκλίνει προς σε μία ενοποιημένη θεωρία που να τα εξηγεί στο σύνολό τους [3, 8].

---

## 4. ΡΟΛΟΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

---

Ο ρόλος του διηλεκτρικού μέσου μεταβάλλεται κατά την χρονική πρόοδο της ηλεκτροδιάβρωσης. Αρχικά, το ρευστό δρα ως μονωτής. Στη συνέχεια, η εφαρμογή του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί τοπική κατάρρευσή του με σχηματισμό αγωγού εκκένωσης και εν συνεχεία καναλιού πλάσματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Όπως προαναφέρθηκε το πλάσμα περιβάλλεται από φυσαλίδα ατμών, η οποία το περιορίζει πλευρικά συγκεντρώνοντας την ενέργεια του σπινθήρα σε ικανά μικρή περιοχή προς επίτευξη της διάβρωσης. Εξωτερικά η φυσαλίδα περιβάλλεται από το διηλεκτρικό μέσο. Η υψηλή επιφανειακή τάση του τελευταίου είναι η επιθυμητή ιδιότητα που εξασφαλίζει τη χαμηλή διογκωση του πλάσματος [6]. Επίσης το διηλεκτρικό μέσο απομακρύνει τα υπολείμματα (ψήγματα) της κατεργασίας και ψύχει (βάφει) τις περιοχές που επέδρασε ο σπινθήρας [10].

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται υδρογονάνθρακας ως διηλεκτρικό μέσο και εφαρμόζεται ορθή πόλωση, παρατηρήθηκε ότι λαμβάνει χώρα εναπόθεση άνθρακα στο εργαλείο (άνοδος) όταν η διάρκεια του παλμού υπερβεί μία τιμή-κατώφλι. Η στρώση αυτή του άνθρακα προστατεύει το εργαλείο από περαιτέρω φθορά [15, 16, 17]. Ο εναποτιθέμενος άνθρακας προέρχεται από το οργανικό διηλεκτρικό υγρό και από το κατεργαζόμενο τεμάχιο (κάθοδος), στην περίπτωση της κατεργασίας χαλύβδινων τεμαχίων [15]. Προκειμένου για κοινό ανθρακούχο χάλυβα, ο άνθρακας κατακρημνίζεται και κρυσταλλώνεται στην απόληξη του ηλεκτροδίου κατά τη φάση της ψύξης μεταξύ των διαδοχικών παλμών. Η μεταλλουργική αυτή διεργασία στην περίπτωση των ανοξειδωτων χαλύβων, ευνοείται από την παρουσία Cr και Ni που δρουν ως καταλύτες. Το χαμηλό ιξώδες του διηλεκτρικού είναι επιθυμητό, ώστε να διευκολύνεται η ανακυκλοφορία του και να επιτυγχάνεται ικανοποιητική απομάκρυνση των ψηγμάτων της φθοράς και της θερμότητας (με εξαναγκασμένη συναγωγή) από τα ηλεκτρόδια, στο χρονικό διάκενο μεταξύ διαδοχικών παλμών ρεύματος. Επιπλέον, το διηλεκτρικό θα πρέπει να είναι μη αναφλέξιμο, να είναι χημικά αδρανές ώστε να μην προσβάλλει τα ηλεκτρόδια, και, φυσικά, χαμηλού κόστους και άμεσα διαθέσιμο.

Διηλεκτρικά που πληρούν τα ανωτέρω κριτήρια και έχουν χρησιμοποιηθεί είναι: (α) η κηροζίνη και βαρύτεροι υδρογονάνθρακες, για την ηλεκτροδιάβρωση τύπου εμβόλου και (β) το νερό για την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος. Η ρύθμιση της αγωγιμότητας του διηλεκτρικού μέσου επιτυγχάνεται με τη χρήση προσθέτων, όπως είναι η κόνις γραφίτη σε κηροζίνη [6], ή η ανάμιξη του νερού του δικτύου με απεσταγμένο νερό [6, 11]. Φυσικά, η χρήση νερού ως διηλεκτρικό μέσο έχει περιβαλλοντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους υγρούς υδρογονάνθρακες [14].

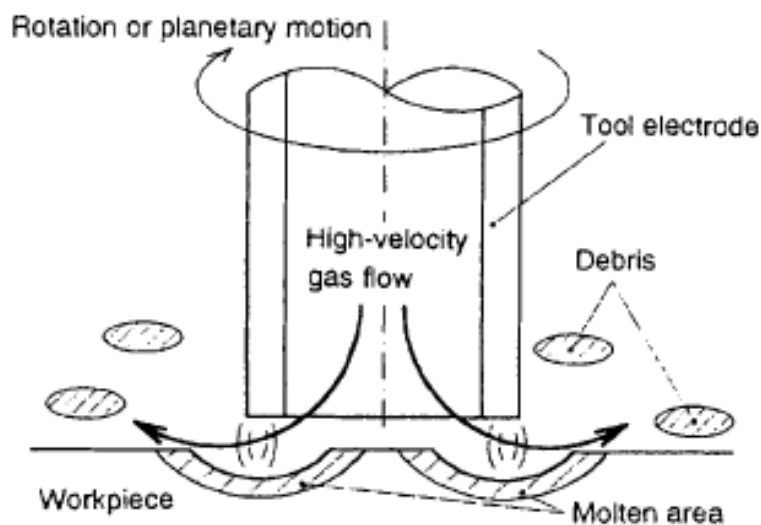
Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, το διηλεκτρικό υγρό ρυπαίνεται από τα ψήγματα του αποβαλλόμενου υλικού, τα οποία απομακρύνονται με σύστημα φιλτραρίσματος. Οι τύποι τεχνολογιών φιλτραρίσματος αναλύονται από τους Petrofes & Gadalla [6]. Σε κάθε περίπτωση, αποτελεσματικότερο φιλτράρισμα των υγρών οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα επιφανείας, συνεπάγεται ωστόσο επιβάρυνση του κόστους της κατεργασίας.

Ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατεργασία της διάτρησης με ηλεκτροδιάβρωση παρουσία διηλεκτρικού υδατικής βάσης [12], κατά την οποία παρατηρούνται «παρασιτικά» ρεύματα λόγω της ηλεκτρόλυσης του νερού στο διάκενο. Στην περίπτωση κατεργασίας με ανάστροφη πολικότητα, αέριο υδρογόνο συσσωρεύεται στο εργαλείο και προκαλεί την τοπική διόγκωση του πλάσματος που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης ενέργειας και, συνεπακόλουθα, της φθοράς του εργαλείου.

Αν και έχει επικρατήσει η χρήση υγρού διηλεκτρικού, είναι δυνατή η ηλεκτροδιάβρωση με τη χρήση σε αέριου μέσου (ξηρή ηλεκτροδιάβρωση) [14]. Στην περίπτωση αυτή, η η ψύξη του τεμαχίου και η απομάκρυνση των ψηγμάτων της κατεργασίας μεταξύ των παλμών επιτυγχάνεται με τη χρήση λεπτότοιχου σωληνωτού εργαλείου μέσω του οποίου διοχετεύεται αέρας ή οξυγόνο υπό πίεση [17]. Σε δοκιμές κατεργασίας χάλυβα με ανάστροφη πολικότητα, διαπιστώθηκε μπορεί να επιτευχθεί μείωση της φθοράς του εργαλείου και αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, με την αύξηση της συγκέντρωσης οξυγόνου λόγω της ενεργοποίησης μηχανισμού οξειδωσης. Προς αποφυγή βραχυκυκλωμάτων (επαφής εργαλείου-ψηγμάτων-κατεργαζόμενου τεμαχίου), στο εργαλείο εφαρμόζεται περιστροφική κίνηση (γύρω από τον άξονά του z) και πλανητική κίνηση μικρής ακτίνας στο x-y επίπεδο. Η κατεργασία αυτή είναι αντίστοιχη της διάτρησης ή του φραιζαρίσματος.



Οι Govindan & Joshi [18] αναφέρονται στα τα περιβαλλοντικά και οικονομικά πλεονεκτήματα της ξηρής ηλεκτροδιάβρωσης. Η παρατηρούμενη αστάθεια του πλάσματος σε αέριο μέσο αποδίδεται στην εκτόνωση σε ατμοσφαιρική πίεση της ροής του παρεχόμενου αερίου. Σε πειραματική μελέτη διάτρησης με ηλεκτροδιάβρωση (Σχήμα 5, [17]), η αστάθεια του πλάσματος περιορίσθηκε με τη δημιουργία συνθηκών υπερπίεσης στις περιοχές εκτόνωσης της ροής του παρεχόμενου αερίου οξυγόνου (αντίθλιψη). Στην ίδια μελέτη με την εφαρμογή στατιστικής ανάλυσης, οι συγγραφείς εκτιμούν τις παραμέτρους που επηρεάζουν περισσότερο το ρυθμό αποβολής υλικού, τη φθορά του εργαλείου και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δημιουργούμενης οπής. Το κύριο συμπέρασμα, στο οποίο κατέληξαν είναι ότι η ξηρή ηλεκτροδιάβρωση διάτρησης μπορεί να είναι εξίσου αποτελεσματική, αλλά πιο ελκυστική από την κλασική ηλεκτροδιάβρωση με υγρό διηλεκτρικό μέσο.

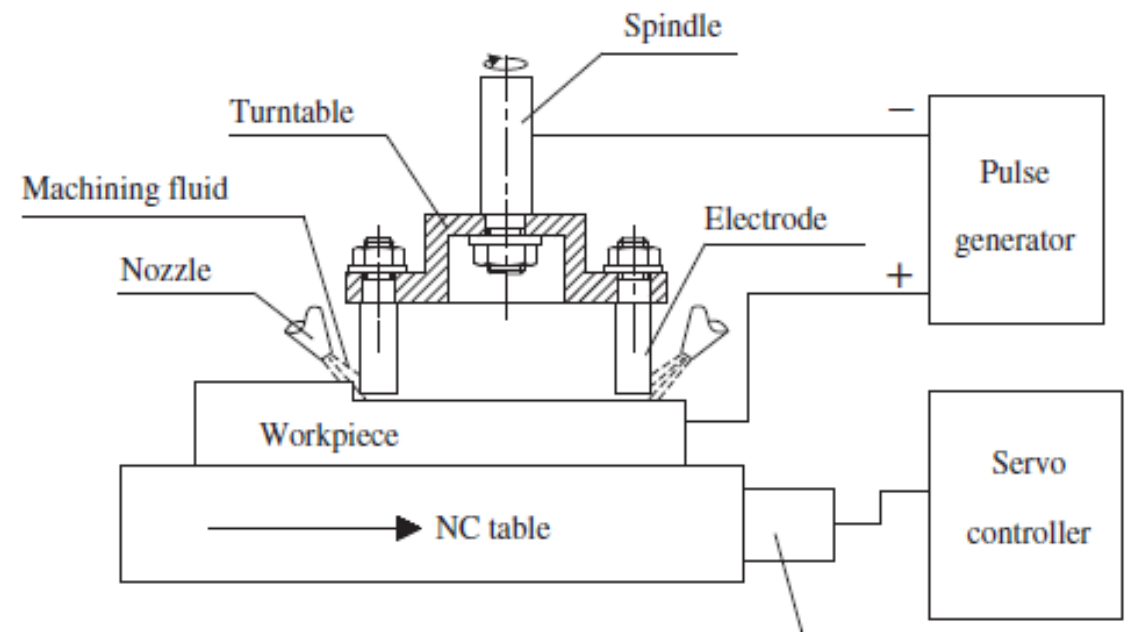


**Σχήμα 5.** Σχηματική παρουσίαση της αρχής διάτρησης υλικών με τη χρήση της μεθόδου ξηρής ηλεκτροδιάβρωσης [17].

Πρόσφατη εξέλιξη στην τεχνολογία των διηλεκτρικών μέσων που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροδιάβρωση αποτελεί η προσθήκη κόνεων στην υγρή φάση (powder-mixed EDM) [8]. Η κόνις διευκολύνει τον ιονισμό του υγρού διηλεκτρικού, ενώ επιπλέον εξασφαλίζει κατεργασία με ικανοποιητικό διάκενο, ώστε να διευκολύνεται η απομάκρυνση των παραπροϊόντων και να επιτυγχάνεται σταθερότητα. Παρατηρήθηκαν αυξημένοι ρυθμοί αποβολής υλικού και μειωμένη φθορά εργαλείου, χωρίς ωστόσο να είναι δεδομένη η βελτίωση στην ποιότητα επιφανείας [8]. Μειονεκτήματα της ηλεκτροδιάβρωσης με

προσθήκη κόνεως είναι η «τεχνολογική ανωριμότητα», το αυξημένο κόστος αρχικής επένδυσης και χρήσης και η ανάγκη περιβαλλοντικής διαχείρισης του διηλεκτρικού υγρού.

Τέλος, η τεχνική της ηλεκτροδιάβρωσης προτάθηκε και για την κατεργασία «φραιζαρίσματος» υλικών (electro-discharge milling), τα οποία είναι δύσκολα κατεργάσιμα με συμβατικές εργαλειομηχανές [19]. Στο Σχήμα 6, παρουσιάζεται μια σχετική διάταξη ηλεκτροδιάβρωσης.



**Σχήμα 6.** Σχηματική παρουσίαση της αρχής «φραιζαρίσματος» υλικών με την εφαρμογή της μεθόδου ηλεκτροδιάβρωσης [19].

---

## 5. ΜΗΧΑΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

---

Αρχικά, ο τυπικός εξοπλισμός ηλεκτροδιάβρωσης περιελάμβανε συστοιχία πυκνωτών στην τροφοδοσία ισχύος, προκειμένου να αποθηκεύεται η απαιτούμενη ενέργεια για τον σπινθήρα. Ωστόσο, εάν δεν εξασφαλιζόταν το ίδιο επίπεδο φόρτισης των πυκνωτών μεταξύ των διαδοχικών σπινθήρων, η ποσότητα του αφαιρούμενου υλικού ανά παλμό μεταβαλλόταν, αντίστοιχα [6]. Υψηλά ποσά αποδιδόμενης ενέργειας, ενώ βοηθούσαν στην επίτευξη υψηλών ρυθμών αφαίρεσης υλικού, οδηγούσαν σε επιφάνειες κοπής χαμηλής ποιότητας. Τέλος, η επαναφόρτιση των πυκνωτών εισήγαγε χρονικές καθυστερήσεις και επιμήκυνση του χρόνου της κατεργασίας [8].

Μέρος των μειονεκτημάτων που προαναφέρθηκαν αντιμετωπίστηκε με τη χρήση γεννητριών παλμικού τύπου, η οποία επέτρεψε την έκλυση (περίπου) σταθερής ενέργειας σε κάθε σπινθήρα, εξασφαλίζοντας σταθερή ποσότητα αφαιρούμενου υλικού άρα και καλύτερη ποιότητα επιφανείας [11]. Με τον τρόπο αυτό, μειώθηκε σημαντικά ο όγκος του υλικού που επαναστερεοποιούνταν στο εσωτερικό κάθε δημιουργούμενης κοιλότητα/κρατήρα.

Όπως και με τις λοιπές μηχανουργικές κατεργασίες, μεγάλη ώθηση στην ηλεκτροδιάβρωση έδωσε η ενσωμάτωση της τεχνολογίας αριθμητικού ελέγχου που επιτρέπουν τη συνεχή λειτουργία μηχανημάτων, πολλές φορές και χωρίς επιτήρηση [6]. Ο αριθμητικός έλεγχος των μηχανημάτων επέτρεψε, επίσης, την παραγωγή περίπλοκων γεωμετριών μέσω του προγραμματισμού της διαδρομής της κατεργασίας, χωρίς να απαιτείται εργαλείο (ηλεκτρόδιο) αντίστοιχα πολύπλοκης γεωμετρίας [8]. Κρίσιμη παράμετρος για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου είναι και η διατήρηση, κατά το δυνατόν, ενός σταθερού διακένου μεταξύ των ηλεκτροδίων με την κατάλληλη διάταξη αυτοματισμού [3].

Όπως προαναφέρθηκε στην ηλεκτροδιάβρωση βύθισης, τυπικά, χρησιμοποιείται ορθή πολικότητα (τεμάχιο συνδεδεμένο με τον αρνητικό πόλο της πηγής), ενώ στην

ηλεκτροδιάβρωση σύρματος ανάστροφη πολικότητα [6]. Πιο πρόσφατα, οι Munz et al. αναφέρουν [12] ότι για την ηλεκτροδιάβρωση βύθισης προτιμάται ανάστροφη πολικότητα για μικρούς χρόνους εκκένωσης και ορθή πολικότητα για μεγαλύτερους χρόνους, β. επίσης το σχήμα 2 των DiBitonto et al. [13]. Το κριτήριο επιλογής είναι η μεγιστοποίηση του αποβαλλόμενου όγκου υλικού από το τεμάχιο και η ελαχιστοποίηση αποβολής υλικού από το εργαλείο (φθορά του εργαλείου). Ο χρόνος εκκένωσης πέραν του οποίου προτιμάται αντιστροφή της πολικότητας εξαρτάται από το ρεύμα εκκένωσης. Γενικά, ανάλογα με το κατεργαζόμενο υλικό και τις συνθήκες κατεργασίας η πολικότητα μπορεί να αλλάξει [12]. Στην ηλεκτροδιάβρωση βύθισης μεταλλικών υλικών, τα ηλεκτρόδια είναι συνήθως κατασκευασμένα από χαλκό και γραφίτη [10]. Για κεραμικά υλικά προτιμώνται αρνητικά συνδεδεμένα (ανάστροφη πολικότητα) ηλεκτρόδια χαλκού, καθώς χρήση ορθής πόλωσης ή γραφίτη ευνοεί τον ανεπιθύμητο εναπόθεση συσσωματωμάτων στο ηλεκτρόδιο [10].

Όταν η μέθοδος της ηλεκτροδιάβρωσης εφαρμόζεται για τη διάτρηση υλικών (electro-discharge drilling EDD), προτιμάται η ανάστροφη πολικότητα και οι σχετικές εργαλειομηχανές σπανίως επιτρέπουν αλλαγές στη συνδεσμολογία, αφού η ανάστροφη πολικότητα αποτελεί τη μόνη ενδεδειγμένη για ικανοποιητικούς ρυθμούς αποβολής υλικού και χαμηλό ρυθμό φθοράς του εργαλείου [12].

Στη σπανιότερα χρησιμοποιούμενη ηλεκτροδιάβρωση με αέριο (ξηρή ηλεκτροδιάβρωση), το εργαλείο είναι συνδεδεμένο στον αρνητικό πόλο της πηγής (ανάστροφη πολικότητα), διότι με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ικανοποιητικός συνδυασμός υψηλού ρυθμού αποβολής υλικού από το τεμάχιο και χαμηλού ρυθμού αποβολής υλικού από το εργαλείο (χαμηλή φθορά) [17].

Η χρήση εναλλασσόμενης πολικότητας μελετήθηκε πειραματικά από τους Xia et al. [16], οι οποίοι διαπίστωσαν τη δημιουργία επίστρωσης άνθρακα και τον μειωμένο ρυθμό αποβολής υλικού και στα δύο ηλεκτρόδια, αφού αυτά εναλλάσσονται στο ρόλο της ανόδου.

---

## 6. ΚΑΤΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ

---

Τα υλικά που μπορούν να υποβληθούν σε κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης είναι τα υπερκράματα, οι ταχυχάλυβες, τα κεραμικά υλικά, τα κεραμομεταλλικά, ή ακόμα και σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας [6, 10, 20], αρκεί τα κατεργαζόμενα υλικά να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Οι Petrofes & Gadalla [6] αναφέρουν ως ελάχιστη απαιτούμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα το  $1/3 \text{ S/m}$  (ή ισοδύναμα άνω όριο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης περί τα  $300 \Omega \cdot \text{cm}$ ). Οι Lee & Lau [10], οι Tuersley et al. [7] και ο Βαξεβανίδης [3] αναφέρουν ως ελάχιστη τιμή το  $1 \text{ S/m}$ . Σε μια άλλη μελέτη, οι Martin et al. [21] παρατήρησαν ένα μεγάλο εύρος της ελάχιστη απαιτούμενης αγωγιμότητα ανάλογα το κατεργαζόμενο υλικό, ωστόσο, σε κάθε περίπτωση οι αναφερόμενες ελάχιστες τιμές αγωγιμότητας είναι κατά πολύ μεγαλύτερες (π.χ. 2-4 τάξεις μεγέθους) των τιμών που προαναφέρθηκαν.

Όταν η χημική σύσταση του κατεργαζόμενου υλικού δεν εξασφαλίζει την ελάχιστη απαιτούμενη αγωγιμότητα για την κατεργασία, τότε στο υλικό διασπείρονται αγωγίμες φάσεις, δηλαδή το υλικό «ντοπάρεται» με αγωγή πρόσθετα. Σχετικά και προκειμένου μη αγωγή υλικά να καταστούν κατεργάσιμα με ηλεκτροδιάβρωση:

- οι Gadalla & Petrofes [6] μελέτησαν την περίπτωση της αλουμίνιας με διασπορά καρβιδίου του τιτανίου,
- οι Lee & Lau [10] την περίπτωση της προσθήκης μετάλλων σε σύνθετα κεραμικά υλικά,
- οι Tuersley et al. [7] «ντόπαραν» κεραμικά υλικά με διασπορά  $\text{TiB}_2$  και  $\text{TiN}$ .

Στην περίπτωση διασποράς λεπτόκοκκης κόνεως  $\text{TiN}$  [21], η αύξηση της αγωγιμότητας επιτυγχάνεται με το μηχανισμό της αγωγιμότητας διήθησης. Παρατηρήθηκε, επίσης, αύξηση και της μηχανικής αντοχής του υλικού, λόγω της ανάπτυξης ενός πεδίου εσωτερικών τάσεων γύρω από τα σωματίδια προσθήκης, το οποίο δυσχεραίνει τη διάδοση ρωγμών. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής είναι η πιθανότητα οξείδωσης της μεταλλικής φάσης, γεγονός που περιορίζει τη θερμοκρασία εργασίας σε χαμηλότερες τιμές.

Εναλλακτικά μονωτικά κεραμικά υλικά μπορούν να υποστούν κατεργασία μετά την εφαρμογή επιφανειακής αγωγίμης στρώσης. Οι Kucukturk & Cogun [28] κάνουν χρήση στα πειράματά τους πολυμερούς επίστρωσης με διεσπαρμένο άνθρακα ενώ ο Kariya [29] αναφέρεται σε μεταλλική επίστρωση. Έψηση απαιτείται για την εξασφάλιση της πρόσφυσης της αγωγίμης επίστρωσης στο κεραμικό υπόστρωμα. Αρχικά η ηλεκτροδιάβρωση λαμβάνει χώρα μεταξύ εργαλείου και αγωγίμης στρώσης. Όταν η τελευταία διαβρωθεί, η αγωγιμότητα εξασφαλίζεται από άνθρακα προερχόμενο από τη διάσπαση του διηλεκτρικού ελαίου (υγρός υδρογονάνθρακας σε αυτήν την περίπτωση), από τη διασπορά κόνεως γραφίτη στο διηλεκτρικό, από ηλεκτρόδιο (εργαλείο) γραφίτη και από τα ψήγματα φθοράς της αγωγίμης επίστρωσης.

---

## 7. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

---

Στα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται η δυνατότητα επίτευξης πολύπλοκης γεωμετρίας, η οικονομικότητα, η ταχύτητα και η απαίτηση περιορισμένου χώρου εργασίας, με ταυτόχρονη καλή ποιότητα επιφάνειας κοπής χωρίς την απαίτηση περαιτέρω στίλβωσης [6, 9]. Αντίστοιχα, οι Gadalla & Tsai [11], οι οποίοι μελέτησαν πειραματικά την ηλεκτροδιάβρωση κεραμομεταλλικών υλικών (WC-Co) παρατήρησαν ότι οι λαμβανόμενες τιμές τραχύτητας και σκληρότητας είναι συγκρίσιμες με αυτές που επιτυγχάνονται με συμβατικές μεθόδους κατεργασίας χαμηλής ταχύτητας με εργαλείο διαμαντιού, ενώ ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού είναι υψηλότερος. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η διαστατική ακρίβεια κατά την κατεργασία της τάξης των 10 $\mu$ m [3].

Ωστόσο, τα αναφερόμενα στη βιβλιογραφία δεν συγκλίνουν στο θέμα της πιστότητας και της ποιότητας της επιφάνειας. Κατά τους Pandit & Rajurkar [9], η στοχαστική φύση του σπινθήρα σε συνδυασμό με την ανομοιογένεια των σύνθετων υλικών οδηγεί σε αβεβαιότητα σχετικά με την ακεραιότητα της τελικής επιφάνειας. Ομοίως, οι Casas et al. [2] αναφέρονται στην δυσκολία επίτευξης επιφάνειας υψηλής ακεραιότητας και στην εμφάνιση μιας θερμικά επηρεασμένης ζώνης, ρωγμών, κρατήρων αυξημένης τραχύτητας και εσωτερικών τάσεων [3]. Οι Lee & Lau [10] και οι Tuersley et al. [7] αναφέρουν ότι επιφάνεια καλύτερης ποιότητας επιτυγχάνεται με ανεστραμμένη πολικότητα (αρνητικός πόλος το εργαλείο/ηλεκτρόδιο και θετικός πόλος το κατεργαζόμενο τεμάχιο), ενώ η ορθή πολικότητα οδηγεί σε «βομβαρδισμό» της κατεργαζόμενης επιφάνειας με τα λίγα και «βαρέα» κατιόντα οδηγώντας σε τοπικούς βαθείς κρατήρες.

Οι Petrofes & Gadalla [6] και Tuersley et al. [7] αναφέρουν ότι, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους, η ανέπαφη κατεργασία δεν εισάγει εσωτερικές τάσεις στο τεμάχιο και, γι' αυτό δεν απαιτείται περαιτέρω θερμική κατεργασία αποτατικής ανόπτησης του υλικού [6]. Ωστόσο, δεν γίνεται μνεία για τις εσωτερικές τάσεις που εισάγονται λόγω του θερμικού αιφνιδιασμού, στον οποίο υπόκειται το κατεργαζόμενο τεμάχιο και για τις οποίες απαιτείται ανόπτηση [2].

Οι Tuersley et al. [7] αξιολόγησαν συγκριτικά συμβατικές τεχνικές αφαίρεσης υλικού με την ηλεκτροδιάβρωση. Εάν στις συμβατικές τεχνικές, οι δυνάμεις κοπής διατηρηθούν σε

χαμηλά επίπεδα ώστε να μην προκληθεί θραύση του υλικού, τότε οι ρυθμοί αποβολής υλικού παραμένουν χαμηλοί. Η απουσία τέτοιων δυνάμεων κοπής στην περίπτωση της ηλεκτροδιάβρωσης, καθιστά την τεχνική κατάλληλη για ξεχόνδρισμα (rough machining) με υψηλούς ρυθμούς αποβολής υλικού [3].

Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο περιορισμός της στην κατεργασία αγωγίων μόνο υλικών [7]. Για την κατεργασία μη αγωγίων εκ φύσεως υλικών, θα πρέπει να γίνει τροποποίηση της μικροδομής τους με τη διασπορά αγωγίων φάσεων ή εφαρμογή επιφανειακής αγωγίμης στρώσης, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο .



---

## 8. ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΕΡΑΜΟΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

---

Η πληθώρα των συνδυασμών των παραμέτρων κατεργασίας και των προς κατεργασία υλικών δυσχεραίνει την πρόβλεψη και τη μοντελοποίηση της ποιότητας της λαμβανόμενης επιφανείας και του ρυθμού αποβολής υλικού κατά την κατεργασία. Οι παράμετροι κατεργασίας που επιδρούν στα μεγέθη αυτά είναι η διάρκεια παλμού του ρεύματος (pulse-on time) ή η διάρκεια εκκένωσης (discharge time), το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών παλμών (pulse-off time), η συχνότητα των παλμών (pulse frequency) και η πολικότητα της συνδεσμολογίας εργασίας (ορθή: ηλεκτρόδιο + τεμάχιο - ή ανάστροφη).

Οι Pandit & Radurkar [9] μελέτησαν την επίδραση των τεχνολογικών παραμέτρων εισόδου της μεθόδου (π.χ. διάρκεια παλμών ρεύματος) στα μεγέθη εξόδου (ρυθμός αποβολής υλικού, τραχύτητα, μήκος μικρορωγμών) και πρότειναν σχετικά μοντέλα πρόβλεψης για κεραμομεταλλικά υλικά. Δεχόμενοι ότι δεν έχουν πλήρως αποσαφηνισθεί τα πολύπλοκα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την ηλεκτροδιάβρωση, δεν παρέχουν τη φυσική αιτιολόγηση διαφόρων πειραματικών παρατηρήσεών τους, όπως είναι η μη-μονότονη εξάρτηση του ρυθμού αποβολής κεραμομεταλλικού υλικού με το ποσοστό μάζας του συνδετικού μετάλλου και με τη διάρκεια του παλμού ρεύματος. Βασιζόμενοι στη μερική διαφορική εξίσωση της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή από το σπινθήρα προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο, επιχείρησαν να προβλέψουν τα μεταβατικά προφίλ θερμοκρασιών και την επιφάνεια του σχηματιζόμενου κρατήρα, ο οποίος θεωρήθηκε ως ισόθερμη επιφάνεια στη θερμοκρασία τήξης. Στη συνέχεια, προχώρησαν στην εκτίμηση του ρυθμού τήξης και αποβολής υλικού. Κατά τη μοντελοποίηση οι Pandit & Radurkar [9] θεώρησαν ότι η αποβολή του υλικού λαμβάνει χώρα μετά την τήξη του πιο δύστηκτου υλικού, ήτοι του WC. Αντιθέτως προς τους προηγούμενους μελετητές, οι Gadalla & Tsai [11] μελετούν το μηχανισμό τήξης του πιο εύτηκτου υλικού, που είναι το συνδετικό μέταλλο (Co) και θεωρούν ότι οι κόκκοι του καρβιδίου «απελευθερώνονται», στη συνέχεια, και απομακρύνονται από την κατεργαζόμενη επιφάνεια.

Οι Petrofes & Gadalla [6] μελέτησαν το μηχανισμό θερμικής αποφλοΐωσης δύστηκτων κεραμικών υλικών κατά την κατεργασία τους με ηλεκτροδιάβρωση. Οι εσωτερικές τάσεις είναι θερμικές και προκαλούνται λόγω της απότομης θέρμανσης και ψύξης της κατεργαζόμενης επιφάνειας υλικού. Με τη σειρά τους, οι τάσεις αυτές προκαλούν την αποκόλληση νιφάδων επιφανειακών στρωμάτων χωρίς τήξη (αποφλοΐωση ή απολέπιση).

Οι Lee & Lau [10] μελέτησαν την περίπτωση ηλεκτροδιάβρωσης σύνθετου υλικού μήτρας αλουμίνιας με διασπορά σωματιδίων καρβιδίου του τιτανίου. Τα πειραματικά αποτελέσματα στοιχειοθέτησαν έναν συνδυαστικό μηχανισμό αποβολής υλικού που συμβαίνει με: θερμική αποφλοΐωση και τήξη και εξάτμιση. Στην ίδια εκτίμηση κατάληξαν μετά από ανάλογη μελέτη και οι Yegui et al. [22].

Οι Lee & Lau [10] αναφέρουν το ανεπιθύμητο φαινόμενο σχηματισμού συσσωματώματος ηλεκτροδιάβρωσης («electrodischarge build-up»). Κατ' αναλογία με τις συμβατικές μεθόδους όπου μέταλλο προσκολλάται σε εργαλείο μονής αιχμής π.χ. σε κοπτικό τόρνου ή πλάνης, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, κεραμικό υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο προσκολλάται και εναποτίθεται στο ηλεκτρόδιο. Στο κατεργαζόμενο τεμάχιο σχηματίζεται, αντίστοιχα, κρατήρας που οδηγεί σε επιφάνεια κοπής κακής ποιότητας. Οι δύο σχηματισμοί από κοινού περιγράφονται με τον όρο «συσσωμάτωμα ηλεκτροδιάβρωσης». Στα σύνθετα κεραμικά υλικά το συσσωμάτωμα είναι αποτέλεσμα ενός δυσμενούς συνδυασμού πολλών παραμέτρων, όπως είναι η ενέργεια του παλμού, η διάρκεια του παλμού, το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών παλμών, οι ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου και, φυσικά, η πολικότητα. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο για υψηλότερη ενέργεια και μεγαλύτερη διάρκεια παλμού, σύντομο χρονικό μεσοδιάστημα μεταξύ διαδοχικών παλμών (που δεν επιτρέπει τον πλήρη απο-ιονισμό της επιφάνειας), ορθή πολικότητα (που οδηγεί σε βομβαρδισμό του τεμαχίου με τα βαρύτερα κατιόντα) και χρήση ηλεκτροδίου κατασκευασμένου από υλικό ανάλογο του κατεργαζόμενου τεμαχίου [7]. Για παράδειγμα, συνιστάται να αποφεύγεται η χρήση ηλεκτροδίου γραφίτη για κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση κεραμικών υλικών. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι αυξημένη ροή του διηλεκτρικού υγρού μειώνει έως και εκμηδενίζει την δημιουργία του συσσωματώματος.

Οι Casas et al. [2] μελέτησαν την επίδραση της κακής ποιότητας της επιφάνειας και των εσωτερικών τάσεων, μετά από κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης, στη μηχανική αντοχή (όριο διαρροής και κόπωσης) πρισματικών δοκιμών από εμπορικά διαθέσιμο κεραμομεταλλικό υλικό λεπτόκοκκου καρβιδίου του βολφραμίου με συνδεδετικό μέταλλο κοβάλτιο (WC-10κ.β.%Co). Οι εσωτερικές τάσεις, πρακτικά, προκαλούν την αύξηση του λόγου φόρτισης  $\sigma_{min}/\sigma_{max}$  (άρα και τη μέση τάση), κατά τη δοκιμή κόπωσης, οδηγώντας το υλικό σε αστοχία υπό συνθήκες χαμηλότερης φόρτισης. Για το λόγο αυτό, μετά από την κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης προτείνεται η στίλβωση της κατεργασμένης επιφάνειας και η θερμική κατεργασία του υλικού (αποτατική ανόπτηση) για τη χαλάρωση των εσωτερικών τάσεων και την ενίσχυση της μηχανικής αντοχής, δηλαδή του ορίου διαρροής και της αντοχής σε κόπωση.

Η μελέτη των Gadalla & Tsai [11] εστιάζεται στον προσδιορισμό των λειτουργικών συνθηκών της χρησιμοποιούμενης μηχανής ηλεκτροδιάβρωσης (τάση, ένταση ρεύματος, διάρκεια παλμού, συχνότητα παλμών) που εξασφαλίζει μέγιστο ρυθμό αποβολής για διαφορετικές συστάσεις και διάσταση κόκκων σύνθετου υλικού WC-Co. Σε όλες τις περιπτώσεις, η χρήση σωστά ρυθμισμένων σύγχρονων μηχανών παροχής ισχύος παλμικού τύπου μπορεί να εξασφαλίσει ικανοποιητική ποιότητα επιφανείας, σε αντίθεση με τις παλαιότερες μηχανές παροχής ισχύος τύπου πυκνωτή που δεν εξασφαλίζουν σταθερή έκλυση ενέργειας σε κάθε σπινθηρισμό, με συνακόλουθη αρνητική επίδραση στην ποιότητα της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

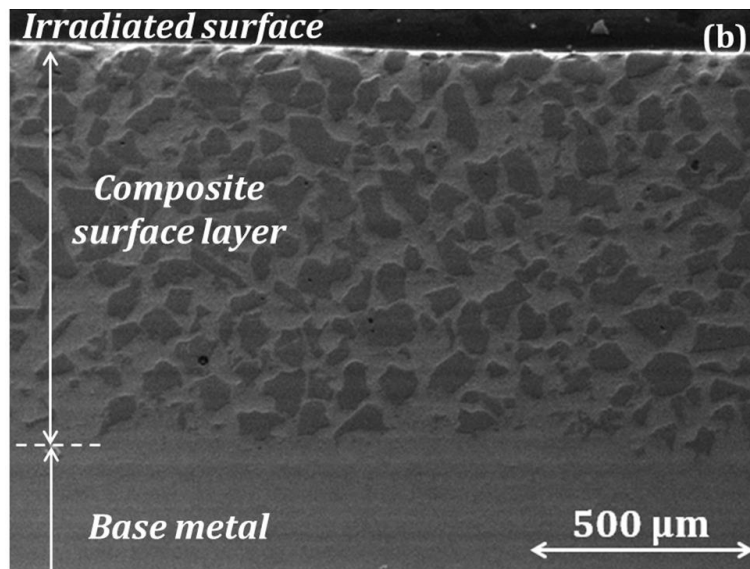
Οι Yegui et al. [22] μελέτησαν την περίπτωση μεταλλοκεραμικού υλικού καρβιδίου του τιτανίου με νικέλιο ως μεταλλική συνδεδετική φάση (TiC70%-Ni30%). Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της διάρκειας του παλμού ρεύματος προκαλεί τη μη-μονότονη μεταβολή του ρυθμού αποβολής υλικού. Αρχικά, όπως αναμενόταν, προκαλείται αύξηση της τιμής του ρυθμού ως μία μέγιστη τιμή. Στη συνέχεια ακολουθεί μείωση του ρυθμού που αποδόθηκε στη συσσώρευση των παραπροϊόντων κατεργασίας που δεν απομακρύνθηκαν από την κατεργαζόμενη επιφάνεια, προκαλώντας, έτσι, αστάθεια του τόξου και δυσλειτουργία του κυκλώματος ελέγχου του διακένου.

---

## 9. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

Όπως αναφέρθηκε στην περίληψη της εργασίας, ο αρχικός σχεδιασμός της διπλωματικής εργασίας περιελάμβανε την υλοποίηση πειραμάτων στις ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις της Αλμερίας (Ισπανία), -στα πλαίσια εγκεκριμένου έργου SFERA3 ευρωπαϊκής χρηματοδότησης,- προκειμένου να συντεθούν υπέρ-σκληρα υλικά μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση διασποράς καρβιδίων σε επιφανειακά στρώματα κοινού ανθρακούχου χάλυβα. Η σχετική μεθοδολογία αναλύεται στις εργασίες [23-26], ενώ μια χαρακτηριστική μικρογραφία τέτοιου επιφανειακού στρώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 7 [25]. Παρόμοια επιφανειακά στρώματα είναι δυνατόν να παραχθούν με τεχνικές συγκόλλησης, οι οποίες συχνά χρησιμοποιούνται για εργασίες αναγόμωσης [27].



**Σχήμα 7.** Μικρογραφία Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (S.E.M.) κάθετης τομής επιφανειακά κατεργασμένου δοκιμίου με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας. Το επιφανειακό στρώμα αποτελεί σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας χάλυβα με διασπορά σωματιδίων καρβιδίου του τιτανίου για εφαρμογές υψηλής αντοχής σε φθορά λόγω τριβής.

Στη συνέχεια, τα υλικά αυτά επρόκειτο να υποστούν ηλεκτροδιάβρωση στο εργαστήριο του τομέα «Τεχνολογίας των Κατεργασιών» (Ε.Μ.Π.) προκειμένου να διερευνηθούν οι φυσικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα, ώστε να επιτευχθεί επιφανειακό ανάγλυφο συγκεκριμένης γεωμετρίας (surface texturing) που θα ενίσχυε περαιτέρω την απόδοση των υλικών υπό συνθήκες λιπαινόμενης τριβής.

Δυστυχώς λόγω της τρέχουσας κατάστασης της πανδημίας COVID-19, τα αρχικά «ηλιακά πειράματα» στην Αλμερία αναβλήθηκαν για το 2022 και το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας τροποποιήθηκε σε βιβλιογραφικό, ώστε να είναι εφικτή η υλοποίηση και η παρουσίασή της σε εύλογο χρονικό πλαίσιο.

---

## 10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

---

Με την πρόοδο της επιστήμης των υλικών και την παραγωγή προηγμένων υλικών υψηλών μηχανικών αντοχών και σκληρότητας αναδείχθηκαν και οι περιορισμοί των συμβατικών μεθόδων κοπής με επαφή. Οι υψηλοί χρόνοι κατεργασίας που απαιτούνται, οι απώλειες ενέργειας, οι δαπανηρές εργαλειομηχανές και η ταχεία φθορά των κοπτικών καθιστούν, συχνά, τις συμβατικές τεχνικές αφαίρεσης υλικού ακατάλληλες και αντιοικονομικές. Η ηλεκτροδιάβρωση είναι μία ελκυστική εναλλακτική μη συμβατική μέθοδος κοπής που ενδείκνυται για ταχεία κατεργασία ξεχονδρίσματος μη μονωτικών προηγμένων υλικών. Η τεχνολογία θεωρείται ώριμη καθώς έχει μελετηθεί ήδη από τη δεκαετία του 1940. Οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης υλικού είναι η τήξη-εξάτμιση και η θερμική αποφλοίωση.

Το επιστημονικό πεδίο αναγνώρισης και μαθηματικής περιγραφής των πολύπλοκων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την εφαρμογή της μεθόδου παραμένει υπό διερεύνηση. Στην παρούσα φάση, τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί είναι αποσπασματικά, καθώς αφορούν σε συγκεκριμένα υλικά και περιορισμένο εύρος παραμέτρων. Για την πληρέστερη κατανόηση και την πλήρη διασαφήνιση των μηχανισμών της αφαίρεσης υλικού με την τεχνική αυτή θα πρέπει να αναπτυχθούν γενικότερα φυσικά και μαθηματικά μοντέλα καθολικής ισχύος.

Θα είναι χρήσιμη η εκπόνηση μελετών σύγκρισης του ολικού κόστους της ηλεκτροδιάβρωσης με το ολικό κόστος άλλων συμβατικών και μη συμβατικών μεθόδων κοπής που θα λαμβάνει υπόψη το κόστος αρχικής επένδυσης, συντήρησης και λειτουργίας (αναλωσίμων, ενέργειας, εργατοώρας κλπ) και ανακύκλωσης.

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Kalpakjan, S. & Schmid S. (2019) Μηχανουργική Επιστήμη και Τεχνολογία, 7<sup>η</sup> έκδοση (ελληνική μετάφραση), Εκδόσεις. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- [2] Casas, B., Torres, Y. & Llanes, L. (2006) Fracture and fatigue behavior of electrical-discharge machined cemented carbides, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 24, 162-167.
- [3] Βαξεβανίδης Ν. (2009), Μη συμβατικές κατεργασίες κοπής, Σημειώσεις Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Πανεπ. Θεσσαλίας.
- [4] Callister W., Rethwisch D. (2016), Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, 9<sup>η</sup> έκδοση (ελληνική μετάφραση), Εκδόσεις. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- [5] Wright W., Askeland D. (2018), Υλικά – Δομή, ιδιότητες και τεχνολογικές εφαρμογές, 7<sup>η</sup> έκδοση (ελληνική μετάφραση), Εκδόσεις. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- [6] Petrofes, N.F. & Gadalla, A.M. (1988) Processing Aspects of Shaping Advanced Materials by Electrical Discharge Machining, *Advanced Materials and Manufacturing Processes*, 3(1), 127-153.
- [7] Tuersley, I.P., Jawaid, A. & Pashby, I.R. (1994) Review: Various methods of machining advanced ceramic materials, *J. Mater. Process. Technol.*, 42, 377-390.
- [8] Ojha, K., Garg, R.K. & Singh, K.K. (2010) MRR Improvement in Sinking Electrical Discharge Machining: A Review, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 9(8), 709-739.
- [9] Pandit, S.M. & Rajurkar, K.P. (1981) Analysis of Electro Discharge Machining of Cemented Carbides, *Annals of the CIRP*, 30,1, 111-116.
- [10] Lee, T.C. & Lau, W.S. (1991) Some characteristics of electrical discharge machining of conductive ceramics, *Material and Manufacturing Process*, 6:4, 635-648.
- [11] Gadalla, A.M., & Tsai, W. (1989) Machining of WC-Co Composites, *Materials & Manufacturing Processes*, 4(3), 411-423.
- [12] Munz, M., Risto, M. & Haas, R. (2016) The phenomenon of polarity in EDM drilling process using water based dielectrics, *Procedia CIRP*, 42, 532-536.

- [13] DiBitonto, D.D., Eubank, P.T., Patel, M.R. & Barrufet, M.A. (1989) Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model, *Journal of Applied Physics*, **66** (9), 4095-4103.
- [14] Rajurkar, K.P., Sundaram, M.M., Malshe A.P. (2013) Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining, Proc. 17<sup>th</sup> CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), 13-26.
- [15] Mohri, N., Suzuki, M, Furuya, M. & Saito, N. (1995) Electrode Wear Process in Electrical Discharge Machining, *Annals of the CIRP*, **44**(1), 165-168.
- [16] Xia, H., Kunieda, M. & Nishiwaki, N. (1996) Removal Amount Difference between Anode and Cathode in EDM Process, *International Journal of Electrical Machining*, **1**, 45-52.
- [17] Kunieda, M. & Yoshida, M. (1997) Electrical Discharge Machining in Gas, *Annals of the CIRP*, **46**(1), 143-146.
- [18] Govindan, P. & Joshi, S.S. (2010) Experimental characterization of material removal in dry electrical discharge drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **50**, 431-443.
- [19] Ji, R., Liu, Y., Zhang, Y., Cai, B., Li, X. (2011), High-speed end electric discharge milling of silicon carbide ceramics, *Materials and Manufacturing Processes* **26**(8), pp. 1050-1058
- [20] Singh, B., Kumar, J. & Kumar, S. (2014) Experimental Investigation on Surface Characteristics in Powder-Mixed Electrodischarge Machining of AA6061/10%SiC Composite, *Materials and Manufacturing Processes*, **29**, 287-297.
- [21] Martin, C., Cales, B., Vivier, P. & Mathieu, P. (1989) Electrical Discharge Machinable Ceramic Composites, *Mater.Sci. Eng.*, **A109**, 351-356.
- [22] Yerui, F, Yongfeng, G. & Zongfeng, L. (2016) Experimental Investigation of EDM parameters for TiC/Ni Cermet Machining, *Procedia CIRP*, **42**, 532-536.
- [23] Mourlas, A., Psyllaki, P. & Pantelis, D. (2016) Anti-wear TiC-based Surface Layers using Concentrated Solar Energy, *Key Engineering Materials*, **674**, 296-301.
- [24] Mourlas, A.G. & Psyllaki, P.P. (2016) Application of Concentrated Solar Power for elaborating wear resistant hardfacing surface layers, *Bulgarian Chemical Communications*, **48E**, 266-271.
- [25] Mourlas, A., Pavlidou, E., Vourlias, G., Rodriguez, J. & Psyllaki, P. (2019) Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part I: TiC and



- chromium carbide surface enrichment of common steels, *Surface & Coatings Technology*, 377, 124882, 1-15.
- [26] Mourlas, A., Pavlidou, E., Vourlias, G., Rodriguez, J. & Psyllaki, P. (2019) Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part II: Tungsten carbide surface enrichment of common steels, *Surface & Coatings Technology*, 375, 739-751.
- [27] Chaidemenopoulos, N.G., Psyllaki, P.P., Pavlidou E. & Vourlias, G. Aspects on carbides transformations of Fe-based hardfacing deposits, *Surface & Coatings Technology*, 357, 651-661.
- [28] Kucukturk, G. & Cogun, C. (2010) A new method for machining of electrically nonconductive workpieces using electric discharge machining technique, *Machining Science and Technology*, 14 (2), 189-207.
- [29] Kariya, R.S. (2016) Machining of Nonconductive Ceramics by Electrical Discharge Machining: A review, *International Journal for Scientific Research & Development*, 4 (03),1069-1072.