

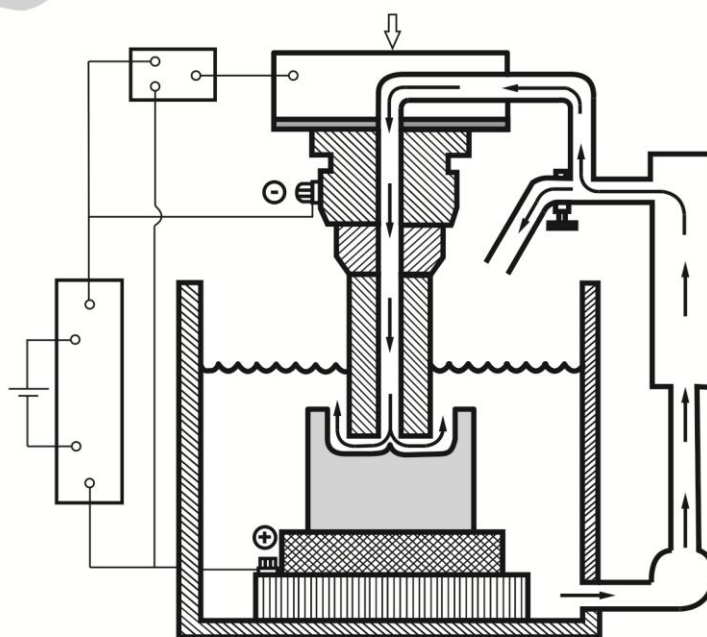


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ



ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΡΑΒΑΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Στους γονείς μου, Γιάννη και Ελένη
για την αμέριστη στήριξη και υπομονή
τους και στην Αναστασία για την
έμπνευση και την υποστήριξη της.

Με την περάτωση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Αριστομένη Αντωνιάδη, για την καθοδήγηση, την υπομονή και την άμεση βοήθεια που πάντα πρόθυμα μου παρείχε, καθώς και τους Δημήτρη Βακόνδιο και Ταξιάρχη Μπελή, για την πολύτιμη βοήθεια και την ουσιαστική στήριξή τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ	8
2.1 Ιστορική αναδρομή	8
2.2 Αρχή λειτουργίας	8
2.3 Παράγοντες κατεργασίας	9
2.3.1 Ηλεκτρικό κύκλωμα	10
2.3.2 Ηλεκτρικές παράμετροι ηλεκτροδιάβρωσης	14
2.3.2.1 Πολικότητα	14
2.3.2.2 Τάση ανοικτού κυκλώματος – Ένταση εκκένωσης – Χρονισμός παλμού τάσης	15
2.3.3 Μη ηλεκτρικές παράμετροι ηλεκτροδιάβρωσης	19
2.3.3.1 Διάκενο	19
2.3.3.2 Έκπλυση διακένου	20
2.3.3.3 Επιλογή διηλεκτρικού	24
2.3.3.4 Υλικό ηλεκτροδίου	27
3. ΔΕΙΚΤΕΣ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	33
3.1 Ρυθμός αφαίρεσης υλικού – MRR	33
3.2 Λόγος φθοράς του εργαλείου – EWR	36
3.3 Ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας	38
3.4 Παράγοντες διασφάλισης της επιτυχίας	46
4. ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	48
4.1 Ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας (Die sinking EDM)	48
4.2 Διάτρηση με ηλεκτροδιάβρωση (ED Drilling)	50
4.3 Ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (w- EDM)	53
4.4 Φραιζάρισμα με ηλεκτροδιάβρωση (ED Milling)	56
4.5 Λείανση με ηλεκτροδιάβρωση (ED Grinding)	58
4.6 Λοιπές παραλλαγές και εφαρμογές της Ηλεκτροδιάβρωσης	60
4.6.1 Πριόνισμα με ηλεκτροδιάβρωση	60
4.6.2 Τροποποίηση επιφανειών με ηλεκτροδιάβρωση (ED Texturing)	61
5. ΝΕΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	63
5.1 Εξέλιξη των μεθόδων και των εφαρμογών	63
5.1.1 Μίκρο-ηλεκτροδιάβρωση	63
5.1.1.1 Διάτρηση μικρό-οπών με ηλεκτροδιάβρωση	64
5.1.1.2 Μίκρο-ηλεκτροδιάβρωση σύρματος	65
5.1.2 Ξηρή ηλεκτροδιάβρωση	66
5.1.3 Ηλεκτροδιάβρωση με υπερηχητική δόνηση	68
5.1.4 Ηλεκτροδιάβρωση με προσθήκη κόνεως στο διηλεκτρικό	69
5.1.5 Ηλεκτροδιάβρωση με βοηθητικό ηλεκτρόδιο	71
5.2 Εξελίξεις στη μοντελοποίηση	73
6. ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	76
6.1 Κίνδυνοι της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση	76
6.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατεργασίας	78

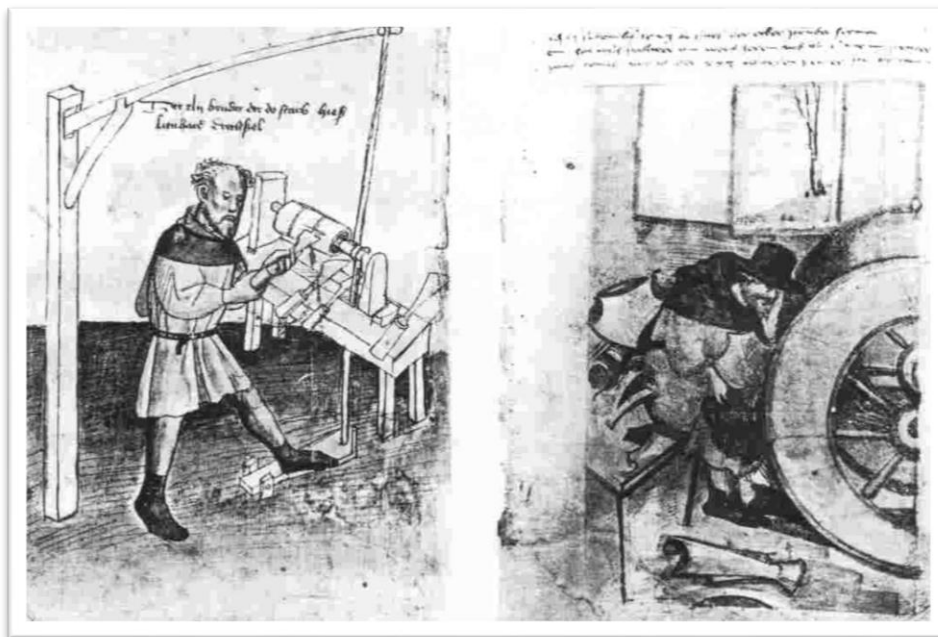
7. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	79
8. ΣΥΝΟΨΗ	80
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επεξεργασία των μετάλλων για τη δημιουργία εργαλείων από τον άνθρωπο, σε πρωταρχικό επίπεδο, συνέβαινε πριν ακόμα και από την εποχή του χαλκού. Η πρόοδος ήταν αργή και σταθερή για χιλιάδες χρόνια, καθώς όμως οι παραγωγικές ανάγκες των κοινωνιών άρχισαν να γίνονται μαζικότερες, οι περιορισμοί της χειρωνακτικής δύναμης γίνονταν όλο και πιο φανεροί.

Η μεγάλη έκρηξη στην πρόοδο της τεχνολογίας ξεκίνησε από το δεύτερο μισό του 18^{ου} αιώνα, με την εκμετάλλευση της δύναμης του νερού, του ατμού και αργότερα του ηλεκτρισμού στην παραγωγή, αντικαθιστώντας εργαλεία και εργασίες που παραδοσιακά γίνονταν με τα χέρια. Παράλληλα με την ανάπτυξη της μεταλλουργίας και την εμφάνιση εργαλείων από κράματα χάλυβα, δόθηκε το έναυσμα για την εκκίνηση της μεγάλης βιομηχανικής επανάστασης.

Η ανάπτυξη της βιομηχανίας και της επεξεργασίας των μετάλλων υπήρξε ραγδαία και οι ανακαλύψεις συνεχείς κι αλυσιδωτές, με κάποιες από αυτές να αποτελούν κομβικά σημεία στην πορεία της εξέλιξης. Σταθμός θεωρείται η κατασκευή μιας μηχανής ακριβούς τόννευσης από τον *John Wilkinson* το 1774 και 23 χρόνια αργότερα, η κατασκευή ενός επιτραπέζιου τόννου, με μηχανικά οδηγούμενο κοπτικό εργαλείο και περιστρεφόμενο φορέα από τον *Henry Maudslay*. Ο τόννος του Maudslay έκανε χρήση για πρώτη φορά του ατέρμονα κοχλίου. Με τον τρόπο αυτό επετεύχθη η επιτάχυνση του κοπτικού με σταθερό ρυθμό και κατ' επέκταση η δημιουργία σπειρώματος με ακριβείς τελικές διαστάσεις. Οι μηχανές αυτές, ήταν οι πρόδρομοι του τόννου που αποτελεί έναν από τους επτά βασικούς τύπους μηχανημάτων κατεργασίας μετάλλων [1].



Εικόνα 1.1 : Ποδοκίνητη και υδροκίνητη τόννευση (1425-1523).

Ο James Nasmyth ανακάλυψε το πρώτο μηχανήμα για πλάνισμα, που επέτρεπε και τη σμίλευση αυλακώσεων στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Το 1818 ο Whitney επινόησε την πρώτη φραιζα, την οποία χρησιμοποιούσε στην κατασκευή πιστολιών, ενώ η πρώτη εργαλειομηχανή φραιζαρίσματος γενικής χρήσης (universal milling machine), με δυνατότητα κίνησης σε όλα τα επίπεδα, παρουσιάστηκε το 1862 από τον J.R.Brown και επιστρατεύτηκε για την παρασκευή ελικοειδών κοπτικών για τρυπάνια. Αργότερα, στα τέλη του 19^{ου} αιώνα έκαναν την εμφάνισή τους και οι πρώτες μηχανές λείανσης και

φινιρίσματος, με χρήση κατευθυνόμενων λειαντικών τροχών ή ζωνών, καθώς και τα πρώτα ηλεκτρικά πριόνια και πρέσες.

Οι μηχανές αυτές που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία μετάλλων, καλύπτουν ουσιαστικά τις επτά βασικές κατηγορίες, που περιλαμβάνουν τις εργαλειομηχανές:

- Τόρνευσης
- Φραιζαρίσματος
- Πλανίσματος (και εγκάρσιου πλανίσματος)
- Διάτρησης
- Λείανσης
- Πριόνισης
- Πρεσαρίσματος

Οι εργαλειομηχανές αυτές αποτελούν τις λεγόμενες συμβατικές εργαλειομηχανές και οι εφαρμογές τους καλύπτουν αντίστοιχα τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας μετάλλων.

Συνοπτικά η μορφοποίηση με συμβατικές εργαλειομηχανές βασίζεται στις ακόλουθες τεχνικές:

- a) Κοπή του πλεονάζοντος μετάλλου και απομάκρυνσή του με τη μορφή γρεζιών,
- b) Κοπή του υλικού με ψαλίδια και
- c) Συμπύεση του κατεργαζόμενου τεμαχίου στο επιθυμητό σχήμα [2].

Από τη δύση του 19^{ου} αιώνα, οι εργαλειομηχανές άρχισαν σταδιακά λειτουργούν με ηλεκτρισμό, αντικαθιστώντας τον ξεπερασμένο πια ατμό, ενώ ταυτόχρονα εξελίσσονταν με τη χρήση για παράδειγμα κοπτικών εργαλείων με πολλαπλές ακμές κοπής, ή αργότερα με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για τον έλεγχο των κατεργασιών. Παρά την όποια πρόοδο όμως η λειτουργία τους βασίζονται στην ίδια πάντα αρχή: το κοπτικό εργαλείο πρέπει να είναι κατασκευασμένο από υλικό σκληρότερο από το υλικό του τεμαχίου που πρόκειται να υποστεί κατεργασία.

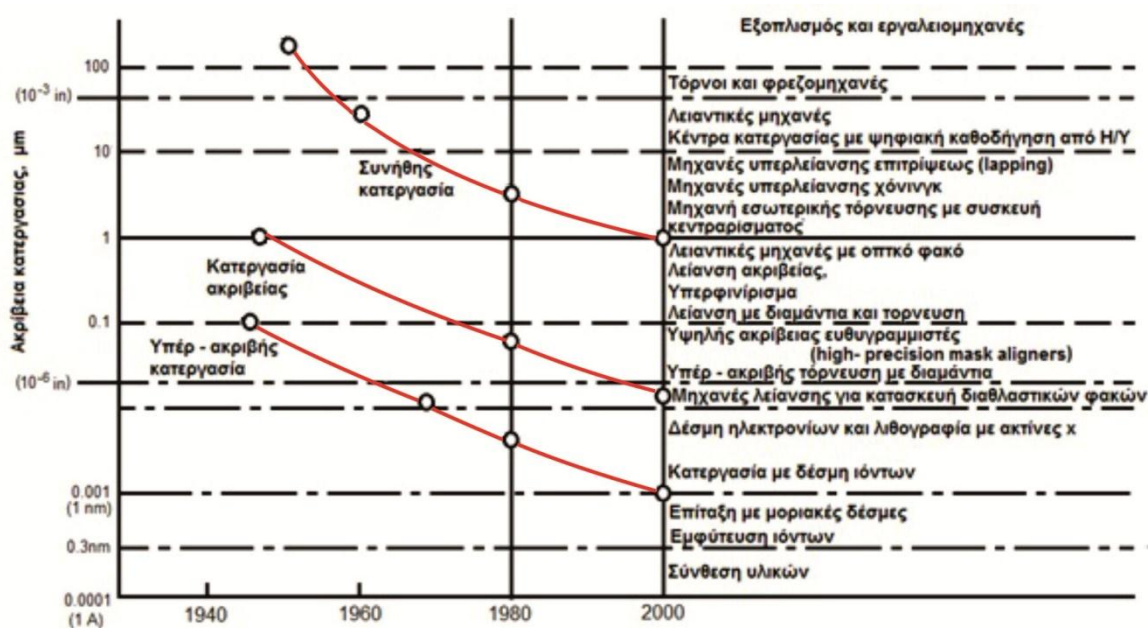
Από τον 19^ο αιώνα και μετά, άρχισαν να αποκαλύπτονται ορισμένα φυσικά φαινόμενα που ήταν άγνωστα όσο αναπτύσσονταν οι συμβατικές εργαλειομηχανές. Η γνώση που προέκυψε από τη μελέτη τέτοιων φαινομένων, χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες εφαρμογές που με τη σειρά τους οδήγησαν στη δημιουργία νέων μεθόδων κατεργασίας. Η λειτουργία των νέων αυτών μεθόδων, έπαψε να βασίζεται στους παραδοσιακούς τρόπους κοπής του μετάλλου. Την ίδια στιγμή τα προβλήματα που προέκυπταν στην βιομηχανία και την παραγωγή, έκαναν επιτακτική την εκμετάλλευση αυτών των νέων εφαρμογών, ειδικά με την εμφάνιση και την ολοένα αυξανόμενη χρήση νέων υλικών και κραμάτων, που ήταν αδύνατο να κατεργαστούν επαρκώς με κάποια από τις συμβατικές μεθόδους.

Στο νέο περιβάλλον που διαμορφωνόταν, οι Snoeys, Staelens και Dekeyser (1986), έστρεψαν την προσοχή τους στη χρήση σκληρότερων και ανθεκτικότερων υλικών στην παραγωγή, όπως σε υψηλής αντοχής και θερμικής ανθεκτικότητας κράματα, καρβίδια, στελλίτες, κεραμικά και άλλα σύνθετα υλικά [3]. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών αυτών, τα καθιστούσαν δύσκολα στην κατεργασία με τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους. Έτσι νέες μέθοδοι, ανεπηρέαστες από τέτοιες ιδιότητες άρχισαν να παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι παράγοντες που είναι συνήθως σημαντικοί για την κατεργασία με τις νέες προηγμένες μεθόδους, είναι διαφορετικοί από τους αντίστοιχους για τις συμβατικές. Κάποιοι από αυτούς είναι η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θερμοκρασία τήξης και τα ηλεκτροχημικά ισοδύναμα.

Πέρα από το πρόβλημα της ποιότητας των υλικών, ήρθε και το πρόβλημα της πολυπλοκότητας στη μορφή που συχνά απαιτείται στα σύγχρονα προϊόντα, καθώς πλέον μπορούμε να φτάσουμε και να εστιάσουμε την κατεργασία σε επιφάνειες που μέχρι πρότινος ήταν αδύνατον. Τη δεκαετία του '60 έγιναν εμφανείς και περαιτέρω περιορισμοί κατά την κατεργασία του αλουμινίου και άλλων μαλακών υλικών που έπρεπε να έχουν

ποιότητα επιφάνειας τύπου καθρέπτη [4]. Η μέγιστη ανεκτή τραχύτητα επιφάνειας ήταν 0,01 μm και η κατεργασία έπρεπε να φέρει αποτελέσματα ακρίβειας σχεδόν 0,1 μm . Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε κοπή με μονοκρυσταλλικό διαμάντι και τα απόβλιπτα (γρέζια) που παράγονταν με αυτό τον τρόπο ήταν ακόμα μικρότερα και από 1 μm , μέγεθος για το οποίο, οι διατμητικές δυνάμεις που εμφανίζονταν στο κοπτικό γίνονταν πολύ μεγάλες.

Άλλοι περιορισμοί σχετικοί με τη λείανση παρουσιάστηκαν όταν άρχισε να γίνεται επιθυμητή η πολύ καλή επιφάνεια φινιρίσματος. Με τη χρήση μονοκρυσταλλικών διαμαντιών κατά την κοπή, προκειμένου να γίνει εφικτό το επιθυμητό φινιρίσμα, προέκυπτε πολύ μεγάλη φθορά στο κοπτικό, ειδικά αν επρόκειτο να κατεργαστούν κεραμικά, γυαλί και άλλα σκληρά και ψαθυρά υλικά. Η ανάγκη για ακρίβεια και υψηλή ποιότητα κατεργασίας έγινε μεγαλύτερη με την παραγωγή προϊόντων μικροηλεκτρονικής.



Σχήμα 1.1 : Οι ακρίβειες των κατεργασιών [1].

Τα βασικά προβλήματα ακριβούς κατεργασίας αντικειμένων με ανοχές των 0,01 μm , με διαστάσεις που ξεκινούν από 1 μm και τραχύτητες επιφάνειας της τάξης των 0,001 μm αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης για τον Taniguchi. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η πρόοδος στη βελτίωση των ακριβειών, κατά τον 20^ο αιώνα. Περιλαμβάνονται επίσης οι μηχανές και οι μέθοδοι υπολογισμού και μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν. Ο Taniguchi διαπίστωσε ότι αυτές οι πολύ καλές ακρίβειες δεν μπορούν να επιτευχθούν από συμβατικές μεθόδους κατεργασίας. Αντίθετα γίνονται δυνατές με τη χρήση προηγμένων μεθόδων κατά τις οποίες άτομα ή μόρια του υλικού μετακινούνται είτε κατά μόνας, είτε σε ομάδες.

Τα προβλήματα λοιπόν που προέκυψαν και έχριζαν αντιμετώπισης οφείλονταν συνοπτικά σε:

- Αδυναμία κατεργασίας των νέων πολύ σκληρών και ψαθυρών υλικών
- Αδυναμία κατεργασίας σύνθετων υλικών με μεγάλες απαιτήσεις ακρίβειας και ποιότητας επιφάνειας
- Αδυναμία απόδοσης πολύπλοκων μορφών στα προϊόντα
- Μεγάλο κόστος και χρόνος κατεργασίας, και
- Πλήρης αδυναμία εφαρμογής συμβατικών μεθόδων

Οι σύγχρονες αυτές μέθοδοι που προέκυψαν για να ικανοποιήσουν τις νέες ανάγκες της αγοράς, της παραγωγής και της τεχνολογίας, αποκαλέστηκαν αρχικά μη συμβατικές, μη παραδοσιακές (non-traditional) και αργότερα προηγμένες (advanced) μέθοδοι κατεργασίας. Βασίζονται, στην ίδια αρχή, ότι η μορφοποίηση του τεμαχίου απαιτεί την αφαίρεση του πλεονάζοντος μετάλλου, με δύο όμως διαφορές:

- 1) Το αποβαλλόμενο μέταλλο δεν έχει τη μορφή του κλασσικού γρεζιού αλλά παρουσιάζεται με ποικίλα σχήματα όπως σφαιρίδια και διάφορα άλλα ακανόνιστα τεμαχίδια και κυρίως,
- 2) Η προσδιδόμενη ενέργεια που κάνει εφικτή την αφαίρεση του υλικού, παύει να είναι εν γένει μηχανική, αλλά μπορεί να είναι χημική, ηλεκτρική, ηλεκτροχημική ή άλλης μορφής [5].

Οι μέθοδοι αυτές που αναπτύσσονται και εξελίσσονται συνεχώς, υπερβαίνουν τις 25 στον αριθμό, ενώ η κάθε μέθοδος παρουσιάζεται και σε αρκετές παραλλαγές. Μπορούν δε να κατηγοριοποιηθούν ποικιλοτρόπως ανάλογα με τη φύση τους και τη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούν. Σύμφωνα με τη δημοφιλέστερη θεώρηση, κατατάσσονται σε κατεργασίες θερμικές, χημικές, ηλεκτροχημικές, υπερήχων και με νερό υψηλής πίεσης. Οι πέντε αυτές ομάδες και μερικές από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους που περιλαμβάνουν, παρουσιάζονται στο πίνακα 1.1.

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	◦ Κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση ◦ Κατεργασία κοπής με σύρμα ◦ Ηλεκτροχημική λείανση με ηλεκτροδιάβρωση ◦ Κατεργασία δέσμη ηλεκτρονίων ◦ Κατεργασία με ακτίνα πλάσματος ◦ Κατεργασία με ακτίνα λέιζερ
ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	◦ Χημικό φραιζάρισμα ◦ Φωτοχημική κατεργασία
ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	◦ Ηλεκτροχημική κατεργασία ◦ Ηλεκτροχημική λείανση ◦ Ηλεκτροχημική λείανση με ηλεκτροδιάβρωση
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ	◦ Κοπή με υπερήχους
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΥΨ. ΠΙΕΣΗΣ	◦ Κατεργασία με νερό υψ. Πίεσης ◦ Κατεργασία με νερό υψ. Πίεσης & λειαντικούς κόκκους

Πίνακας 1.1: Μη συμβατικές κατεργασίες [6].

Από αυτές τις κατεργασίες λίγες μόνο είναι επαρκώς ανεπτυγμένες και αποδοτικές ώστε να εφαρμόζονται στη βιομηχανία με χαρακτηριστικά παραδείγματα τις κατεργασίες με laser, plasma, υπέρηχους, την ηλεκτροχημική κατεργασία και την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση που είναι αυτή με τις περισσότερες εφαρμογές στη βιομηχανία και με το μεγαλύτερο πλήθος εργαλειομηχανών, εγκατεστημένων σε εργοστάσια ανά τον κόσμο.

2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (EDM)

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η διάβρωση των μετάλλων με ηλεκτρικούς σπινθήρες παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Joseph Priestley το 1768, ενώ πέρασαν περισσότερα από εκατό χρόνια μέχρι να προκύψει κάποια πρακτική χρήση του φαινομένου αυτού. Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις με τη μορφή σπινθήρων άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κάποιων έμμεσων προϊόντων και συγκεκριμένα την παραγωγή κολλοειδών διαλυμάτων μέσω της αποσύνθεσης διαφόρων μετάλλων. Οι σπινθήρες όμως δεν χρησιμοποιούνταν σε κάποια κατεργασία μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '30, οπότε και εισήχθησαν τα μηχανήματα αφαίρεσης σπασμένων κοπτικών από ηλεκτρικά τρυπάνια και άλλα κοπτικά εργαλεία [7].

Συνεχίζοντας την έρευνα του Priestley, το 1943 στο πανεπιστήμιο της Μόσχας, δύο Ρώσοι επιστήμονες, το ζεύγος B.R. Lazarenko και N.I.Lazarenko εφηύραν την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση. Ξεκινώντας από τη μελέτη της φθοράς των ηλεκτρικών διακοπών, έφτασαν στο συμπέρασμα ότι οι εφαρμογή ηλεκτρικών εκκενώσεων και του παραγόμενου σπινθήρα, μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατεργασία προσφάτως κατασκευασμένων, νέων μετάλλων και κραμάτων, τα οποία αποδεικνύονταν δύσκολα στη μορφοποίηση από τις υπάρχουσες μεθόδους. Ένα χρόνο αργότερα οι Lazarenkos κατάφεραν να παρουσιάσουν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα κατεργασίας μετάλλων με ηλεκτροδιάβρωση, ενώ την δεκαετία του '50 σημειώθηκε πρόοδος στην σταθεροποίηση του φαινομένου της διάβρωσης [2].

Η πρώτη βρετανική σχετική πατέντα κατατέθηκε από τον Rudoff το 1950 και περίπου την ίδια περίοδο παρουσιάστηκαν αντίστοιχες πατέντες στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Ελβετία. Την ίδια χρονιά χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά γεννήτρια τύπου αντίστασης – πυκνωτή στην ηλεκτροδιάβρωση που αργότερα καθιερώθηκε σαν μοντέλο για την επιτυχή εξέλιξη της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση. Το 1952 η κατασκευαστική Charmilles, μια από τις πρωτοπόρους και μεγαλύτερες εταιρείες το χώρου, δημιούργησε την πρώτη εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης που παρουσιάστηκε στην ευρωπαϊκή έκθεση εργαλειομηχανών το 1955. Στη δεκαετία του '60, η ανάπτυξη των ημιαγωγών έδωσε ώθηση και στην βελτίωση της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση.

Σήμερα η κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση, έχει αναπτυχθεί σε βαθμό που να κατέχει ένα σεβαστό μερίδιο της παραγωγής σε παγκόσμιο επίπεδο. Το μεγάλο ενδιαφέρον των ερευνητών και ολοένα αυξανόμενες ανάγκες για καλύτερα προϊόντα, εξελίσσουν συνεχώς την ηλεκτροδιάβρωση, δημιουργώντας νέες εφαρμογές και παραλλαγές της μεθόδου. Έτσι αναπτύχθηκε κυρίως η ηλεκτροδιάβρωση σε βυθιζόμενη μήτρα, αλλά παράλληλα η ηλεκτροδιάβρωση με σύρμα και οι εργαλειομηχανές για πιο εξειδικευμένες κατεργασίες, όπως η διάνοιξη μικροοπών.

2.2 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM), βασίζεται στην αφαίρεση υλικού με τη βοήθεια θερμικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή προκύπτει από την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική, μέσω μιας σειράς διακριτών ηλεκτρικών εκκενώσεων που εκδηλώνονται μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και του προς κατεργασία τεμαχίου, τα οποία βρίσκονται βυθισμένα σε διηλεκτρικό υγρό [8]. Οι σπινθήρες (εκκενώσεις) οδηγούν σε ανάπτυξη ηλεκτροστατικού πεδίου στο διάκενο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, εντός του διηλεκτρικού. Στο σημείο όπου το διάκενο είναι ελάχιστο, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μέγιστη με αποτέλεσμα τον έντονο ιονισμό του διηλεκτρικού και τελικά την διάσπασή του.

Τη στιγμή αυτή, λόγω της θερμικής ενέργειας που εκλύεται, δημιουργείται ένας αγωγός εκκένωσης (κανάλι πλάσματος) μεταξύ ανόδου και καθόδου, που εξωτερικά αποτελείται

από μανδύα διάπυρρων αερίων και στο κέντρο από πλάσμα. Με τον τρόπο αυτό προκαλείται τοπική τήξη των ηλεκτροδίων. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται εντός του αγωγού εκτείνεται συνήθως από 8000°C έως και 12000 °C [7], φτάνοντας έως και 20000 °C ανάλογα με το υλικό, με αποτέλεσμα την εναπόθεση ενός σημαντικού ποσού θερμότητας και την τήξη του υλικού στην επιφάνεια του κάθε πόλου [9]. Η στιγμιαία θερμοκρασία της επιφάνειας μπορεί να αγγίξει τιμές της τάξης των 10000 °C ή και περισσότερο, προκαλώντας τοπική εξάτμιση των ηλεκτροδίων.

Η εξάτμιση και η διακοπή της τάσης τροφοδοσίας, έχουν σαν αποτέλεσμα την απότομη πτώση της θερμοκρασίας, την ψύξη και ακαριαία στερεοποίηση του τήγματος, συνήθως σε μορφή σφαιριδίων. Αυτό επιτρέπει στο κυκλοφορούν διηλεκτρικό, να διέλθει από το κανάλι πλάσματος και να παρασύρει το τηγμένο υλικό από τις επιφάνειες των πόλων με τη μορφή μικροσκοπικών αποβλίπτων. Αυτή η διαδικασία της τήξης και εξάτμισης του υλικού από την επιφάνεια, έρχεται σε απόλυτη αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, καθώς δεν υπάρχουν μηχανικά παραγόμενα γρέζια [7].

Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις πραγματοποιούνται αλληπάλλληλα με συχνότητα μεταξύ 2.000 έως 1.000.000 εκκενώσεων ανά δευτερόλεπτο. Ο λόγος της ογκομετρικής απομάκρυνσης υλικού ανά εκκένωση, εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και κυμαίνεται από 2 – 400 mm³/min [10]. Το διάκενο ανάμεσα στο εργαλείο και το τεμάχιο διατηρείται σταθερό συνήθως με την σταθερής πρόωσης προσέγγιση του ηλεκτροδίου – εργαλείου που ελέγχεται από ένα σύστημα σερβοκίνησης. Αυτό συμβαίνει καθώς η κάθε εκκένωση πραγματοποιείται κάθε φορά στο σημείο όπου το διάκενο είναι ελάχιστο και με δεδομένο ότι η φθορά του εργαλείου είναι πολύ μικρή. Έτσι καθίσταται δυνατή η αποτύπωση της αντίθετης μορφής του εργαλείου στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου, η οποία μετά το πέρας της κατεργασίας χαρακτηρίζεται από πολλούς μικρούς κρατήρες.

2.3 Παράγοντες κατεργασίας

Από την περιγραφή της αρχής λειτουργίας, διαφαίνεται η δομή του συστήματος, το μεγάλο εύρος των συνθηκών που διέπουν το σύστημα και των αλληλεπιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στα πλαίσιά του. Η σωστή, κάθε φορά, επιλογή των παραμέτρων και συνθηκών της κατεργασίας, είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα κατά τη μελέτη και την εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης. Από την διαμόρφωση των εκάστοτε συνθηκών, καθορίζονται οι παράμετροι εξόδου που αποτελούν τα τρία κύρια κριτήρια για την επιτυχία της κατεργασίας:

- Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού ή MMR (material removal rate),
- Η φθορά του ηλεκτροδίου – εργαλείου (tool ware) και
- Η ποιότητα της επιφάνειας (surface finish)

Με το ρυθμό αφαίρεσης υλικού, αναφερόμαστε στο ρυθμό με τον οποίο, αφαιρείται όγκος υλικού από την επιφάνεια του υπό κατεργασία τεμαχίου. Η φθορά του εργαλείου – ηλεκτροδίου, είναι η φθορά του εργαλείου που αποτελεί το ένα εκ των δύο ηλεκτροδίων και επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Η επιφάνεια του τελικού προϊόντος που θα προκύψει από την κατεργασία, πρέπει αρχικά να έχει τη ζητούμενη μορφή και ακρίβεια στις διαστάσεις της και επιπλέον να έχει την επιθυμητή τραχύτητα και ποιότητα εν γένει.

Οι κυριότερες παράμετροι του συστήματος, που επηρεάζουν τα αποτελέσματα τις κατεργασίας και τις συνθήκες υπό τις οποίες αυτή λαμβάνει χώρα, είναι οι εξής οκτώ :

- Πολικότητα
- Τάση ανοικτού κυκλώματος
- Ένταση εκκένωσης
- Διάρκεια παλμού
- Υλικό του ηλεκτροδίου
- Χρόνος μεταξύ δύο παλμών– χρονισμός παλμού τάσης
- Έλεγχος διάκενου
- Διηλεκτρικό και ρυθμός κυκλοφορίας

Οι προαναφερθείσες παράμετροι μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες με τις τέσσερις πρώτες παραμέτρους να ανήκουν στην κατηγορία των παραμέτρων σχεδιασμού (planning parameters), καθώς εξαρτώνται από τον τύπο της μηχανικής κατεργασίας και από το αν πρόκειται για κατεργασία εκχόνδρισης ή φινιρίσματος. Οι τέσσερις τελευταίες, ονομάζονται παράμετροι κατεργασίας (operational parameters), καθώς ρυθμίζονται ώστε να δημιουργούν τις ιδανικές συνθήκες κατεργασίας ανάλογα με τη μηχανή που χρησιμοποιείται και τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Ο Van Tri (2002), κατατάσσει τις παραμέτρους σε πέντε ομάδες:

1. Διηλεκτρικό υγρό: τύπος διηλεκτρικού, θερμοκρασία, πίεση, σύστημα έκπλυσης
2. Μηχανικά χαρακτηριστικά: σύστημα σερβοκίνησης και σταθερότητα
3. Εργαλείο: υλικό, σχήμα, ακρίβεια
4. Κατεργαζόμενο τεμάχιο
5. Ρυθμιζόμενες παράμετροι: ρεύμα εκκένωσης, τάση διάκενου, διάρκεια παλμού, πολικότητα, συχνότητα φόρτισης, χωρητικότητα πυκνωτή.

Κατά τη θεώρηση του Yussni (2008), οι παράμετροι κατηγοριοποιούνται ως εξής [11]:

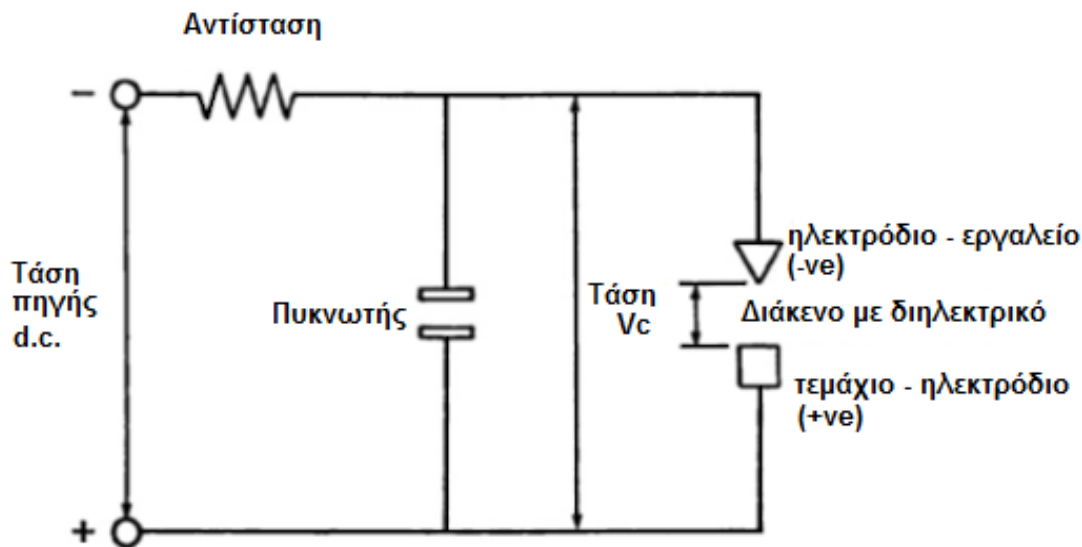
1. Μη ηλεκτρικές παράμετροι
 - Πίεση του εισερχόμενου διηλεκτρικού
 - Προσανατολισμός της ταχύτητας του ηλεκτροδίου
2. Ηλεκτρικές παράμετροι
 - Μέγιστο πλάτος έντασης
 - Πολικότητα
 - Διάρκεια παλμού
 - Τάση τροφοδοτικού

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων, καθιστά επίπονη την μελέτη της κάθε μιας ξεχωριστά. Ειδικότερα για τις παραμέτρους που σχετίζονται άμεσα με το ηλεκτρικό κύκλωμα, τις λεγόμενες ηλεκτρικές παραμέτρους κατά Yussni, η δυσκολία είναι μεγαλύτερη και συνεπώς εξετάζονται συνολικά. Πριν την αναλυτική παρουσίαση των παραμέτρων, κρίνεται σκόπιμο, να γίνει μια ειδική αναφορά στο ηλεκτρικό κύκλωμα και την εξέλιξή του μέχρι σήμερα και της διαδικασίας που οδηγεί από την τροφοδοσία μέχρι και την παραγωγή της σπίνθας κατά την ηλεκτρική εκκένωση.

2.3.1 Ηλεκτρικό κύκλωμα

Στα πρώτα βήματα της ανάπτυξης της ηλεκτροδιάβρωσης, εφαρμόστηκαν χαμηλής συχνότητας εκκενώσεις τόξου, που μέχρι τότε χρησιμοποιούνταν για την αφαίρεση των σπασμένων κοπτικών από τεμάχια που υπόκεινταν κατεργασία με δρόπανο. Τα αποτελέσματα ήταν διόλου ικανοποιητικά καθώς δεν υπήρχε καμία ακρίβεια στην παραγωγή του επιθυμητού σχήματος, η ποιότητα της επιφάνειας ήταν κακή ενώ ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας παλμού, παρέμενε ανεκμετάλλευτο καθώς διαχέονταν σε μεγάλη επιφάνεια.

Οι Lazarenkos συμπεράναν ότι οι ηλεκτρικές εκκενώσεις έπρεπε να έχουν μεγαλύτερη συχνότητα, μικρότερη διάρκεια και να είναι περισσότερο στοχευόμενες προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση της κατεργασίας. Έτσι ανέπτυξαν ένα **κύκλωμα RC** (αντίστασης – πυκνωτή) και συνέδεσαν τα άκρα του κοπτικού και του τεμαχίου στα άκρα του πυκνωτή ο οποίος τροφοδοτούνταν από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 [12].

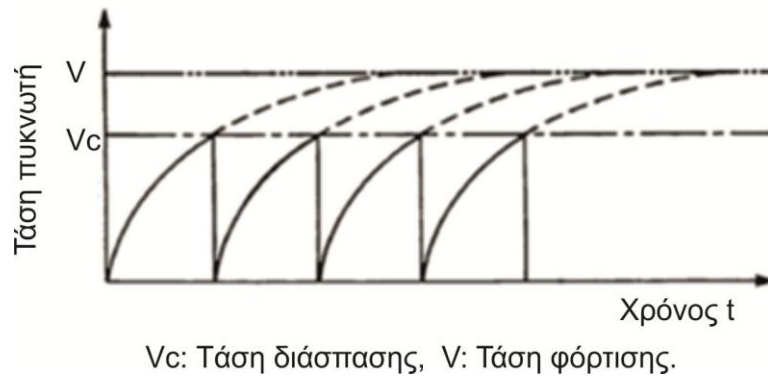


Σχήμα 2.1 : Σύστημα ηλεκτροδιάβρωσης με κύκλωμα RC.

Η αύξηση στην τάση του πυκνωτή θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από την τάση κατάρρευσης μεταξύ ηλεκτροδίου (εργαλείου) και κατεργαζόμενου τεμαχίου όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχεδίου (2.2). Μετά από κάθε εκκένωση ο πυκνωτής επαναφορτίζεται από το τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος ενώ η επόμενη σπίθα θα προκύψει στο νέο ελάχιστο διάκενο, μέχρι να αποτυπωθεί η μορφή του εργαλείου στο κατεργαζόμενο κομμάτι.

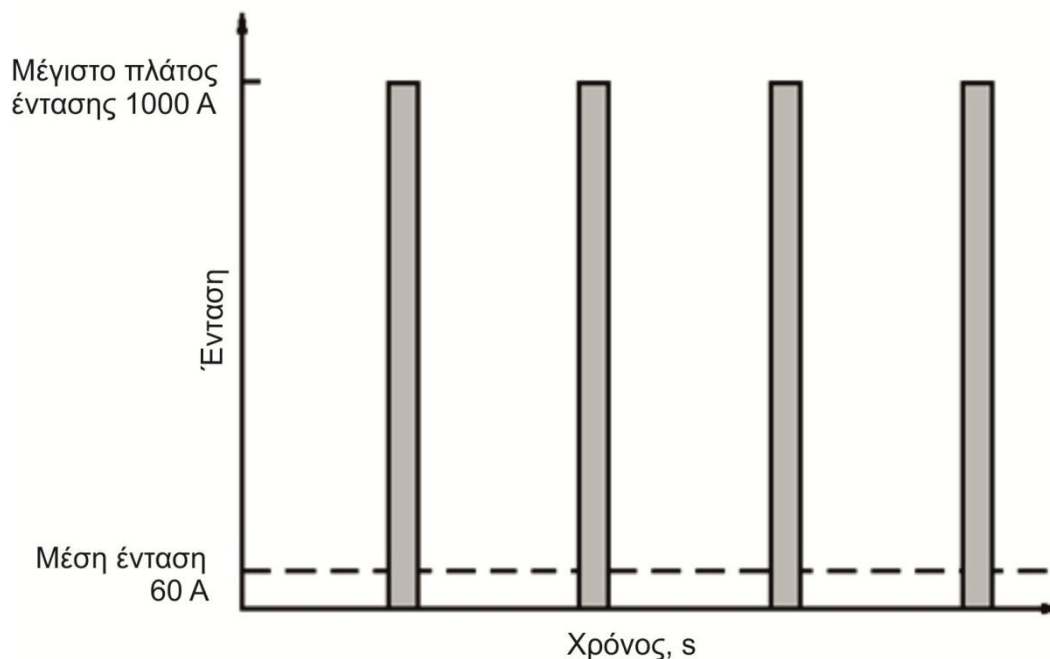
Οι γεννήτριες των RC κυκλωμάτων, που χρησιμοποιήθηκαν από τους Lazarenkos βελτιώθηκαν μέσα στη δεκαετία του '50, αυξάνοντας το ρυθμό αφαίρεσης υλικού από 20 σε $250 \times 10^{(-6)} \text{ m}^3 \text{ hr}^{(-1)}$, όμως τα αποτελέσματα που έδιναν παρέμεναν φτωχά, με κυριότερο πρόβλημα την ποιότητα επιφάνειας που προέκυπτε, σε σχέση με το ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Ενδεικτικά, για ποιότητα επιφάνειας της τάξης των $0.3 \mu\text{m}$, ο λόγος αφαίρεσης υλικού ήταν μόλις $0.02 \times 10^{(-6)} \text{ m}^3 \text{ hr}^{(-1)}$. Εξ αιτίας των χαμηλών αυτών επιδόσεων, η εφαρμογή της κατεργασίας περιορίστηκε στη μέθοδο βυθιζόμενης μήτρας, για την παραγωγή πρεσών και μητρών.

Παρά τις βελτιώσεις, η χρήση κυκλωμάτων RC είχε κάποιους αζεπέραστους περιορισμούς.



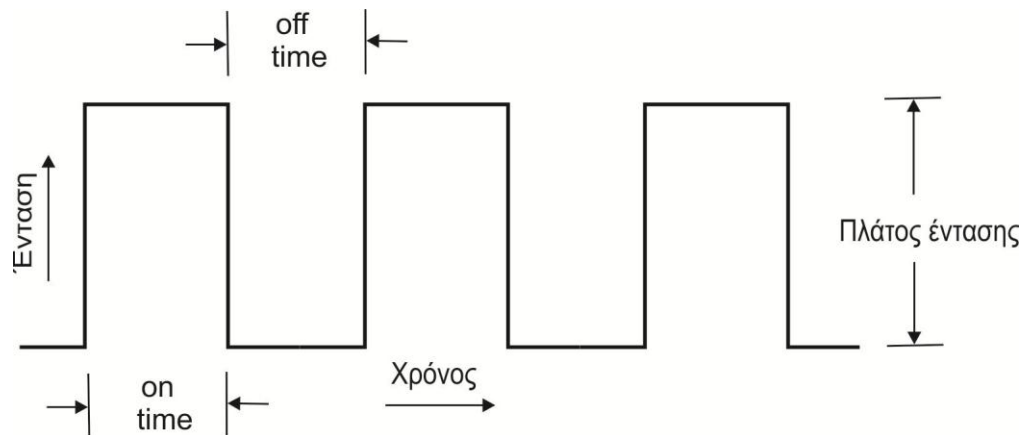
Σχήμα 2.2 : Η μεταβολή της τάσης του πυκνωτή, με το χρόνο.

Από το σχήμα 2.2, που δείχνει την διαμόρφωση των τιμών της τάσης σε συνάρτηση με το χρόνο, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι τα μεγαλύτερα διαστήματα του χρόνου, το φορτίο που προσδίδει ο πυκνωτής, αν και μεγάλο, μένει ανεκμετάλλευτο. Στο επόμενο διάγραμμα έντασης ρεύματος – χρόνου του σχήματος 2.3, διαπιστώνουμε ότι η ένταση κορυφώνεται ακαριαία τη στιγμή της εκκένωσης ενώ το ίδιο γρήγορα η τιμή της επιστρέφει σε πολύ χαμηλά επίπεδα, χωρίς να μεσολαβεί σχεδόν καθόλου χρόνος. Επειδή το μέγιστο πλάτος έντασης είναι σε τιμή πολύ μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για την αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο, αυτό έχει σαν συνέπεια το ηλεκτρόδιο να υφίσταται θερμική ζημιά. Επίσης ο ρυθμός της κατεργασίας περιορίζεται από τα μεγάλα διαστήματα απραξίας μεταξύ δύο διαδοχικών εκκενώσεων.



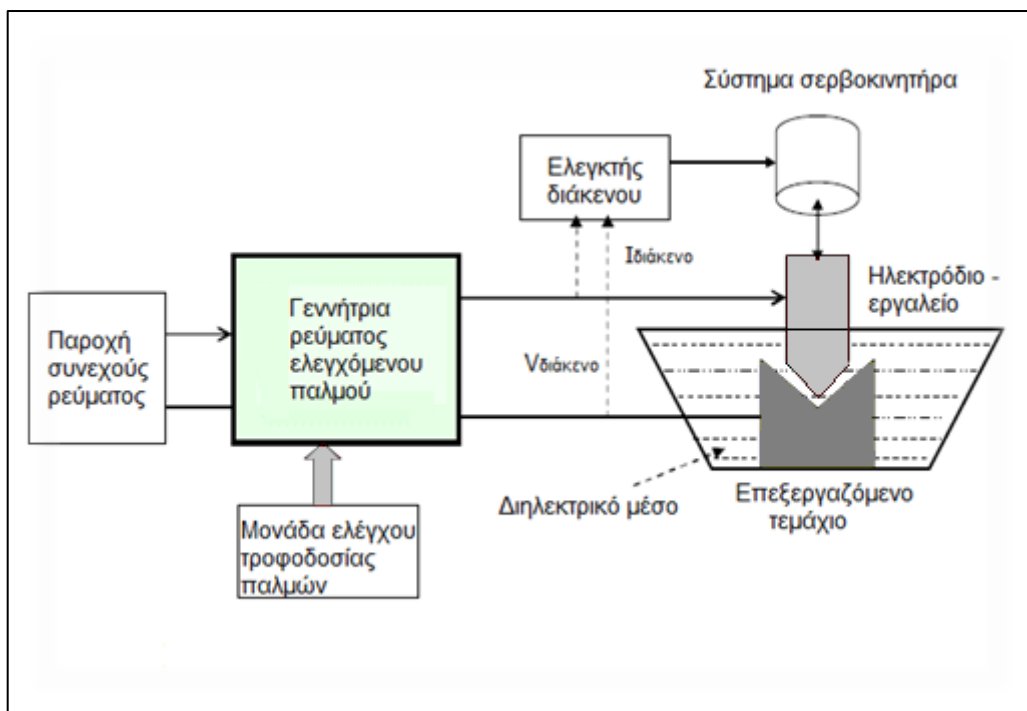
Σχήμα 2.3 : Διάγραμμα έντασης-χρόνου στα πρώτα συστήματα με χρήση RC κυκλωμάτων.

Οι περιορισμοί αυτοί ξεπεράστηκαν με την εισαγωγή των γεννητριών ελεγχόμενου παλμού. Η τυπική κυματομορφή που παράγεται από τις γεννήτριες αυτές, φαίνεται στο διάγραμμα έντασης – χρόνου του σχήματος 2.4.



Σχήμα 2.4 : Ενδεικτικό σχήμα ελεγχόμενων παλμών.

Σε σχέση με το διάγραμμα του σχήματος 2.3, γίνεται φανερή η μείωση του μέγιστου πλάτους έντασης και η αύξηση της διάρκειας και της συχνότητας των εκκενώσεων. Η γεννήτρια παλμών, τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς ρεύματος, ενώ το ρεύμα καταλήγει στο διάκενο της κατεργασίας, αφού πρώτα διέλθει από μια αντίσταση και έναν ηλεκτρικό διακόπτη. Το πλάτος της έντασης καθορίζεται από την τιμή της αντίστασης, την τάση του τροφοδοτικού, την τάση εκκένωσης και από τον χρονισμό του παλμού τάσης. Μια τυπική διάταξη των συστημάτων ηλεκτροδιάβρωσης που χρησιμοποιούν γεννήτρια ελεγχόμενων παλμών παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.5 : Τυπική διάταξη συστήματος ελεγχόμενου παλμού.

Σε σύγκριση με τα RC κυκλώματα, η γεννήτρια ελεγχόμενου παλμού επιτρέπει μεγαλύτερο ρυθμό αφαίρεσης υλικού, με σημαντική μείωση της φθοράς του εργαλείου για συγκεκριμένη ποιότητα της τελικής επιφάνειας. Παρόλα αυτά δεν είναι εφικτή η απόδοση στην τελική επιφάνεια, καλού φινιρίσματος, κάτι που οδηγεί συχνά στη χρήση μηχανών ηλεκτροδιάβρωσης που χρησιμοποιούν και τους δύο τύπους κυκλωμάτων.

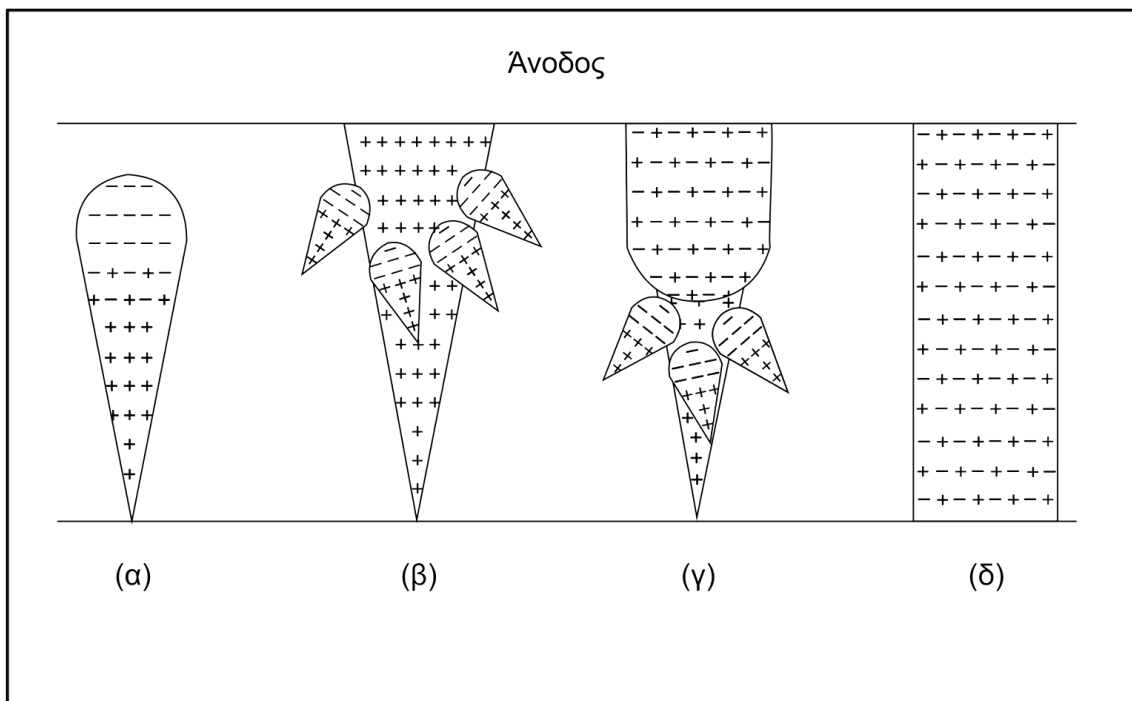
Με τη συνοπτική ανάλυση του κυκλώματος τροφοδοσίας, φάνηκε η σημασία της τάσης, της έντασης και του χρονισμού, του παλμού τάσης της εκκένωσης. Αυτές οι παράμετροι μαζί με τις υπόλοιπες που αναφέρθηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.3.2 Ηλεκτρικές παράμετροι της ηλεκτροδιάβρωσης

2.3.2.1 Πολικότητα (Polarity)

Η πολικότητα των δύο ηλεκτροδίων, δηλαδή του εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, επιλέγεται με στόχο την ελαχιστοποίηση της φθοράς του εργαλείου και την επίτευξη των απαιτούμενων λόγων διάβρωσης. Επίσης το υλικό του προς επεξεργασία τεμαχίου και το υλικό του εργαλείου, επηρεάζουν ενίοτε την επιλογή της πολικότητας.

Ο ρόλος της πολικότητας γίνεται εμφανής τη στιγμή της διάσπασης του διηλεκτρικού, με την εφαρμογή τάσης στα ηλεκτρόδια που βρίσκονται εκατέρωθεν του διακένου. Η διαδικασία της διάσπασης, ή αλλιώς κατάρρευσης του διηλεκτρικού είναι απολύτως στοχευόμενη χωρικά, και συμβαίνει σε ένα κανάλι με ακτίνα της τάξης των 10 μm περίπου. Στην περιοχή αυτή, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που βρίσκονται μεταξύ ανόδου και καθόδου, μαζί με τα ηλεκτρόνια που αποπέμπονται από την κάθοδο λόγω του εφαρμοζόμενου πεδίου, επιταχύνονται κατευθυνόμενα προς την άνοδο. Στην πορεία τους αυτή, συγκρούονται με ουδέτερα άτομα του διηλεκτρικού, δημιουργώντας έτσι θετικά ιόντα και επιπλέον ηλεκτρόνια, τα οποία επιταχύνονται αντίστοιχα προς την κάθοδο και την άνοδο.



Σχήμα 2.6 : Ο μηχανισμός της δημιουργίας σπινθήρα στην EDM :

- (α) Ηλεκτρονική χιονοστιβάδα
- (β) Θετικά ιονισμένα αέρια στο διάκενο
- (γ) Δευτερεύουσες χιονοστιβάδες
- (δ) Ανάπτυξη διαύλου

Όταν ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία γίνει αρκούντως υψηλός, τότε δημιουργείται χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων και θετικών ιόντων, τα οποία φτάνοντας στα άκρα των ηλεκτροδίων δημιουργούν ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Η πορεία των ιόντων με την πρόοδο της διαδικασίας φαίνεται στο σχήμα 2.6. Στο σημείο εκείνο, της επαφής τους με τα ηλεκτρόδια, χάνουν την κινητική τους ενέργεια με τη μορφή θερμότητας. Η θερμοκρασία που φτάνει μέχρι και τους 12.000 C σε συνδυασμό με την υψηλή μετάδοση της θερμότητας (10^{17} W m^{-2}), αυξάνουν τη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων τοπικά σε τιμές μεγαλύτερες από το κανονικό σημείο βρασμού τους.

Παρόλα αυτά εξ αιτίας της υψηλής πίεσης εντός του καναλιού πλάσματος, που φτάνει τις 200 atm λόγω της εξάτμισης του διηλεκτρικού, το υπερθερμαινόμενο μέταλλο δεν εξατμίζεται. Με τον μηδενισμό της τάσης κατά το τέλος του παλμού, η πίεση μειώνεται ραγδαία και κατ' επέκταση το υπέρθερμο μέταλλο εξατμίζεται εκρηκτικά και αποκολλάται από τα ηλεκτρόδια. Το μέγεθος του αποκολλώμενου μετάλλου από την άνοδο και την κάθοδο διαφέρει και εξαρτάται από τη συνεισφορά των ηλεκτρονίων και των κατιόντων στη ροή του ρεύματος. Το ηλεκτρονιακό ρεύμα κυριαρχεί στα πρώτα στάδια της εκκένωσης, καθώς τα κατιόντα είναι δυσκίνητα λόγω του μεγάλου τους συγκριτικά μεγέθους, αφού είναι 10^4 φορές μεγαλύτερα από τα ηλεκτρόνια. Συνεπώς η διάβρωση της ανόδου, είναι αρχικά μεγαλύτερη σε σχέση με της καθόδου.

Καθώς η κατεργασία προχωρά, το κανάλι πλάσματος διευρύνεται ενώ μειώνεται η ένταση του ρεύματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Με την αλλαγή αυτή στη ροή του ρεύματος εξ αιτίας των ολοένα και λιγότερων ηλεκτρονίων, η συνεισφορά των κατιόντων αυξάνεται και αναλογικά, διαβρώνεται πλέον περισσότερο μέταλλο από την κάθοδο. Η διάβρωση μετάλλου από την κάθοδο, μπορεί να φτάσει έως 99,5% , με τη φθορά την ανόδου να περιορίζεται στο 0,5%.

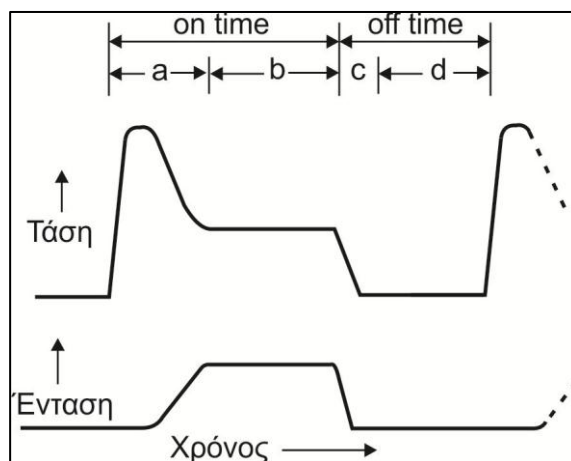
Για τον λόγο αυτό, στην ηλεκτροδιάβρωση, ως επί των πλείστων, η πολικότητα επιλέγεται έτσι ώστε το εργαλείο να είναι η άνοδος [13]. Οι σύγχρονες γεννήτριες εισάγουν αντίστροφη πολικότητα εναλλασσόμενου παλμού “swing pulse” σε προκαθορισμένη συχνότητα για την αποφυγή της δημιουργίας τόξου. Ένας συνήθης τρόπος, είναι να παράγεται ένας αντίστροφος παλμός μετά από κάθε δεκαπέντε κανονικούς παλμούς [14].

2.3.2.2 Τάση ανοικτού κυκλώματος – Ένταση εκκένωσης – Χρονισμός παλμού τάσης

Η τάση εκκένωσης στην ηλεκτροδιάβρωση, σχετίζεται με το διάκενο όπου πραγματοποιείται η εκκένωση και την τάση κατάρρευσης του διηλεκτρικού . Για τα κυκλώματα τύπου RC, η τάση που εφαρμόζεται στα δύο άκρα των ηλεκτροδίων, μέχρι τη στιγμή που κλείνει το κύκλωμα και έχουμε ροή ηλεκτρικού ρεύματος, ονομάζεται γενικά τάση ανοικτού κυκλώματος (open circuit voltage). Θεωρείται τάση σταθερής κατάστασης και η εφαρμογή της διακόπτεται με τη διάσπαση του διηλεκτρικού.

Στα κυκλώματα ελεγχόμενων παλμών, ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει το κύκλωμα, ώστε να υπάρξει μια σειρά αλληπάληλων παλμών τάσης στα ηλεκτρόδια. Η τιμή της τάσης, επιλέγεται με βάση την τεχνολογία της μηχανής και τις συστάσεις του κατασκευαστή, ενώ πρέπει να συνυπολογιστεί επίσης, το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Συνήθως η τάση ανοικτού κυκλώματος ρυθμίζεται στην τιμή των 100 V. Η μορφή του κάθε παλμού μπορεί να ελεγχθεί και συνήθως επιλέγεται ο τετραγωνικός παλμός, αν και στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες μορφές. Ο Bruyn το 1968 χρησιμοποίησε μια γεννήτρια που μπορούσε να παράγει τραπεζοειδείς παλμούς, καταφέροντας να επιτύχει έτσι πολύ χαμηλές φθορές στο εργαλείο. Το πλάτος κάθε τέτοιου παλμού, συνιστά την τάση ανοικτού κυκλώματος στα κυκλώματα ελεγχόμενου παλμού. Η διαδικασία σε σχέση με τα κυκλώματα RC είναι πιο σύνθετη.

Πριν ξεκινήσει η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνεται μέχρι να δημιουργηθεί ένας ιονισμένος διάυλος διαμέσου του διηλεκτρικού. Από τη στιγμή που ξεκινά η ροή του ρεύματος, η τάση πέφτει και σταθεροποιείται στο επίπεδο εργασίας του διάκενου, συνήθως γύρω στα 35 V. Η προρυθμισμένη τάση καθορίζει το πλάτος του διάκενου μεταξύ της προεξέχουσας ακμής του εργαλείου και του επεξεργαζόμενου τεμαχίου. Η εναλλαγές στην τιμή της τάσης κατά την πρόοδο της διεργασίας, είναι ένα από τα τρία ενδιαφέροντα στοιχεία που διακρίνονται στο σχήμα 2.7, με το διάγραμμα τάσης – χρόνου.



Σχήμα 2.7 : Διάγραμμα τάσης και έντασης σε έναν ολοκληρωμένο κύκλο.

Στην περίπτωση που η τάση ρυθμιστεί σε υψηλότερα επίπεδα, αυξάνεται το διάκενο εργασίας κάτι που βελτιώνει τις συνθήκες έκπλυσης και βοηθά την σταθεροποίηση της κοπής. Με την αύξηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος επίσης, αυξάνεται η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου κάτι που συνεπάγεται και την αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού, του ρυθμού φθοράς του κοπτικού και – περιορισμένα - την τραχύτητα της τελικής επιφάνειας.

Στο διάγραμμα του σχήματος 2.7, φαίνεται επίσης η ένταση της εκκένωσης σε συνάρτηση με το χρόνο. Η μέγιστη ένταση κατά τη διάρκεια της εκκένωσης μπορεί επίσης να ελεγχθεί. Επειδή κάθε κατασκευαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετική γεννήτρια για την εργαλειομηχανή, ουσιαστικά τα περιθώρια για την ρύθμιση της έντασης της εκάστοτε γεννήτριας ορίζονται από εκείνον.

Το μέγιστο πλάτος έντασης είναι ουσιαστικά η ενεργός δύναμη που τροφοδοτεί την ηλεκτροδιάβρωση, μετρημένη σε μονάδες έντασης ηλεκτρικού ρεύματος (ampereage) και είναι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στην κατεργασία. Κατά τη διάρκεια κάθε on-time παλμού, η ένταση αυξάνεται μέχρι να φτάσει την προρυθμισμένη της τιμή, η οποία αποτελεί και τη μέγιστη τιμή της έντασης ή μέγιστο πλάτος έντασης (peak current). Υψηλότερη ένταση χρησιμοποιείται στις κατεργασίες εκχόνδρισης και στις κοιλότητες, ή στις λεπτομέρειες μεγάλων επιφανειών. Υψηλότερη ένταση βελτιώνει το ρυθμό αφαίρεσης υλικού αλλά επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα της τελικής επιφάνειας και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου. Νέα, βελτιωμένα υλικά για το ηλεκτρόδιο, κυρίως ο γραφίτης, μπορούν να δουλέψουν σε υψηλές εντάσεις χωρίς ιδιαίτερη φθορά.

Το τρίτο στοιχείο που μπορεί να επισημανθεί στο παραπάνω σχήμα είναι οι διάφορες χρονικές φάσεις του παλμού τάσης. Ο χρονισμός του παλμού τάσης, είναι πολύ σημαντικός, καθώς επηρεάζει όλους του δείκτες που κρίνουν την επιτυχία της κατεργασίας. Στο διάγραμμα τάσης – χρόνου παρουσιάζονται οι τέσσερις χρονικές φάσεις που χαρακτηρίζουν τον παλμό τάσης:

α) Χρόνος ιονισμού:

είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ιονιστεί το διάκενο, δηλαδή ο χρόνος μεταξύ της έναρξης του παλμού τάσης και της έναρξης της εκκένωσης.

β) Χρόνος εκκένωσης:

Αντιστοιχεί στο χρόνο που ο αγωγός εκκένωσης διαρρέεται από ρεύμα εκκένωσης. Πάνω από κάποιο όριο ο χρόνος αυτός μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλη τραχύτητα της επιφάνειας του προϊόντος.

γ) Χρόνος απιονισμού :

είναι ο χρόνος που απαιτείται για τον απιονισμό του διακένου αφού έχει διακοπεί ο παλμός τάσης.

δ) Νεκρός χρόνος:

έχει απιονιστεί πλήρως το διάκενο, δεν υπάρχει ένταση ή τάση στα άκρα του και πραγματοποιείται η έκπλυση.

Οι δύο πρώτοι χρόνοι αποτελούν τον **ενεργό χρόνο (on-time)** ή αλλιώς τη διάρκεια παλμού (pulse duration), ενώ οι δύο τελευταίοι χρόνοι αποτελούν τον **μη ενεργό χρόνο (off-time)**, ή αλλιώς τον χρόνο διαλλείματος (pulse interval). Κάθε κύκλος επομένως, έχει έναν ενεργό χρόνο και έναν μη ενεργό χρόνο οι οποίοι μετρούνται σε μικροδευτερόλεπτα (μsec). Τα σύγχρονα τροφοδοτικά επιτρέπουν την ανεξάρτητη ρύθμιση του ενεργού και μη ενεργού χρόνου του κάθε παλμού. Το εύρος των τιμών τους εκτείνεται ενδεικτικά 2 μέχρι 1000 μs. Σε ιδανικές συνθήκες κάθε παλμός δημιουργεί έναν σπινθήρα (εκκένωση). Στην πράξη όμως έχει παρατηρηθεί ότι πολλοί παλμοί αποτυγχάνουν, εάν η διάρκειά τους και το διάλειμμα που ακολουθεί δεν ρυθμιστούν κατάλληλα, καθιστώντας έτσι την κατεργασία ανεπαρκή. Τέτοιου είδους παλμοί, αποκαλούνται ανοικτοί παλμοί.

Η μεγαλύτερη φθορά του ηλεκτροδίου προκαλείται κατά τον χρόνο ιονισμού. Αν και η ενέργεια παλμού που διατίθεται για την αφαίρεση υλικού είναι ανάλογη με το γινόμενο του αποτελεσματικού ενεργού χρόνου (on-time), της έντασης και της τάσης εκκένωσης, η κάθε μία από αυτές τις θεμελιώδεις μεταβλητές, δεν συνεισφέρει από μόνη της άμεσα στην αφαίρεση υλικού. Μόνο ο χρόνος που ακολουθεί τον ιονισμό είναι αποτελεσματικός στην αφαίρεση υλικού [15]. Σαν εκτίμηση μπορεί να ειπωθεί, ότι η διάμετρος του κάθε κρατήρα, είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης έντασης και το βάθος του είναι ανάλογο του on – time. Από τη στιγμή που όλη η κατεργασία ουσιαστικά συμβαίνει κατά τον ενεργό χρόνο, η διάρκεια αυτών των παλμών και ο αριθμός τους ανά κύκλο, δηλαδή η συχνότητά τους, είναι μεγάλης σημασίας. Η αφαίρεση υλικού είναι ευθέως ανάλογη του ποσού της ενέργειας που εφαρμόζεται σε κάθε ενεργό χρόνο [16].

Αυξάνοντας τη διάρκεια του παλμού, τήκεται περισσότερο υλικό και αφαιρείται από την επιφάνεια του τεμαχίου. Ο κρατήρας που θα προκύψει θα είναι ευρύτερος και βαθύτερος από ότι με παλμό μικρότερης διάρκειας προσδίδοντας τραχύτερη επιφάνεια στο προϊόν. Παρατεταμένης διάρκειας παλμός, επιτρέπει επίσης περισσότερη θερμότητα να μεταδοθεί στο τεμάχιο και να διαχυθεί, ευρύνοντας το επιμεταλλωμένο στρώμα της επιφάνειας και βαθύνοντας την θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Η παρατεταμένη διάρκεια παλμού επομένως, μπορεί να αποβεί αντιπαραγωγική. Όταν ξεπεραστεί η βέλτιστη διάρκεια παλμού για κάθε συνδυασμό ηλεκτροδίου – τεμαχίου, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού αρχίζει να μειώνεται. Η μεγάλη διάρκεια μπορεί επίσης να οδηγήσει το ηλεκτρόδιο σε μια κατάσταση μη – φθοράς από το οποίο περεταίρω αύξηση οδηγεί σε αύξηση της μάζας του ηλεκτροδίου εξ αιτίας επικάλυψης και ενσωμάτωσης των αποβλίπτων επί του ηλεκτροδίου.

Ο κύκλος ολοκληρώνεται, όταν διανυθεί επαρκής χρόνος διαλείμματος έως ότου εκκινήσει ο νέος κύκλος. Ο χρόνος διαλείμματος επηρεάζει την ταχύτητα και τη σταθερότητα της κοπής, καθώς όσο μικρότερο είναι το διάλειμμα, τόσο ταχύτερη θα είναι η κατεργασία. Το

διάκενο πρέπει να απιονιστεί πλήρως ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία συνεχούς εκκένωσης σε κάποιο σημείο. Στην περίπτωση όμως που το διάλειμμα είναι πολύ σύντομο, αυτό δε συμβαίνει, ενώ θα υπάρχουν υπολείμματα αποβλίπτων εντός του διακένου, αφού η έκπλυση θα είναι ημιτελής. Κατ' επέκταση η επόμενη εκκένωση θα είναι ασταθής. Ασταθείς συνθήκες αναταράσσουν την κίνηση του προελαύνοντος ηλεκτροδίου, κάτι που καθιστά σε τελική ανάλυση, τους μεγάλους και σταθερούς μη ενεργούς χρόνους, λιγότερο χρονοβόρους.

Αναφορικά με τους χρόνους κατεργασίας, υπάρχει και ένας δείκτης που αξίζει ειδικής αναφοράς. Πρόκειται για τον παράγοντα εργασίας (duty factor), ο οποίος είναι ουσιαστικά μια ποσοστ看ση της διάρκειας παλμού, σε σχέση με τη συνολική διάρκεια ενός κύκλου. Ο παράγοντας εργασίας φανερώνει την αποτελεσματικότητα της κατεργασίας, αφού όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο υψηλότερη είναι η αποτελεσματικότητα της κατεργασίας. Υπολογίζεται ως ποσοστό, διαιρώντας τη διάρκεια του παλμού με το συνολικό χρόνο ενός κύκλου, όπου ένας κύκλος είναι η συνολική διάρκεια του ενεργού χρόνου και του μη ενεργού χρόνου που τον διαδέχεται (ενεργός χρόνος + μη ενεργός χρόνος) [17]:

$$\text{Παράγοντας εργασίας (\%)} = (\text{διάρκεια παλμού} / \text{συνολική διάρκεια κύκλου}) \times 100. \quad (1)$$

Ο παράγοντας εργασίας, χρησιμεύει και στον υπολογισμό της μέσης έντασης. Με τη μέγιστη ένταση, αναφερόμαστε στη μέγιστη τιμή ηλεκτρικού ρεύματος που διατίθεται για κάθε παλμό από τη γεννήτρια. Η μέση ένταση, είναι η μέση τιμή της έντασης που μετράται στο διάκενο της κατεργασίας, μέσα στη διάρκεια ενός κύκλου. Υπολογίζεται δε, με το γινόμενο του παράγοντα εργασίας και της μέγιστης έντασης.

$$\text{Μέση ένταση (A)} = \text{Παράγοντας εργασίας (\%)} \times \text{Μέγιστη ένταση}. \quad (2)$$

Η συχνότητα του παλμού, είναι ακόμα μία χρήσιμη μεταβλητή που αναφέρεται στον αριθμό των κύκλων που παράγονται στην περιοχή του διακένου, σε χρόνο ενός δευτερολέπτου. Όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο καλύτερο είναι το φινίρισμα της επιφάνειας που επιτυγχάνεται. Με την αύξηση του αριθμού των κύκλων ανά δευτερόλεπτο, μειώνεται η διάρκεια του ενεργού χρόνου. Μικρότεροι ενεργοί χρόνοι, οδηγούν σε λιγότερη αφαίρεση υλικού και δημιουργούν μικρότερους κρατήρες. Αυτό οδηγεί σε ομαλότερες κατεργασμένες επιφάνειες με μικρότερη θερμική ζημία για το τεμάχιο. Η συχνότητα παλμού μετράται σε Hz και υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο [12]:

$$f_{\text{παλμού}} = \frac{1000}{\text{διάρκεια}_\text{κύκλου}} \quad (3)$$

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να ορισθεί η ενέργεια της ηλεκτροδιάβρωσης, η οποία εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$E = V \times I \times T \quad (4)$$

όπου V: η τάση, I: η ένταση του ρεύματος και T: η χρονική διάρκεια της κατεργασίας [18]. Εάν το ρεύμα, αντικατασταθεί με το ρεύμα του ενός παλμού και ο χρόνος αντικατασταθεί με τη συχνότητα η παραπάνω σχέση μπορεί να γίνει:

$$E_p = V_p I_p t_{on} \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \quad (5)$$

όπου V_p : η τάση του ενός παλμού, I_p : το ρεύμα του ενός παλμού, t_{on} : ο ενεργός χρόνος ενός παλμού και t_{off} : ο ο μη ενεργός χρόνος του παλμού.

2.3.3 Μη ηλεκτρικές παράμετροι ηλεκτροδιάβρωσης

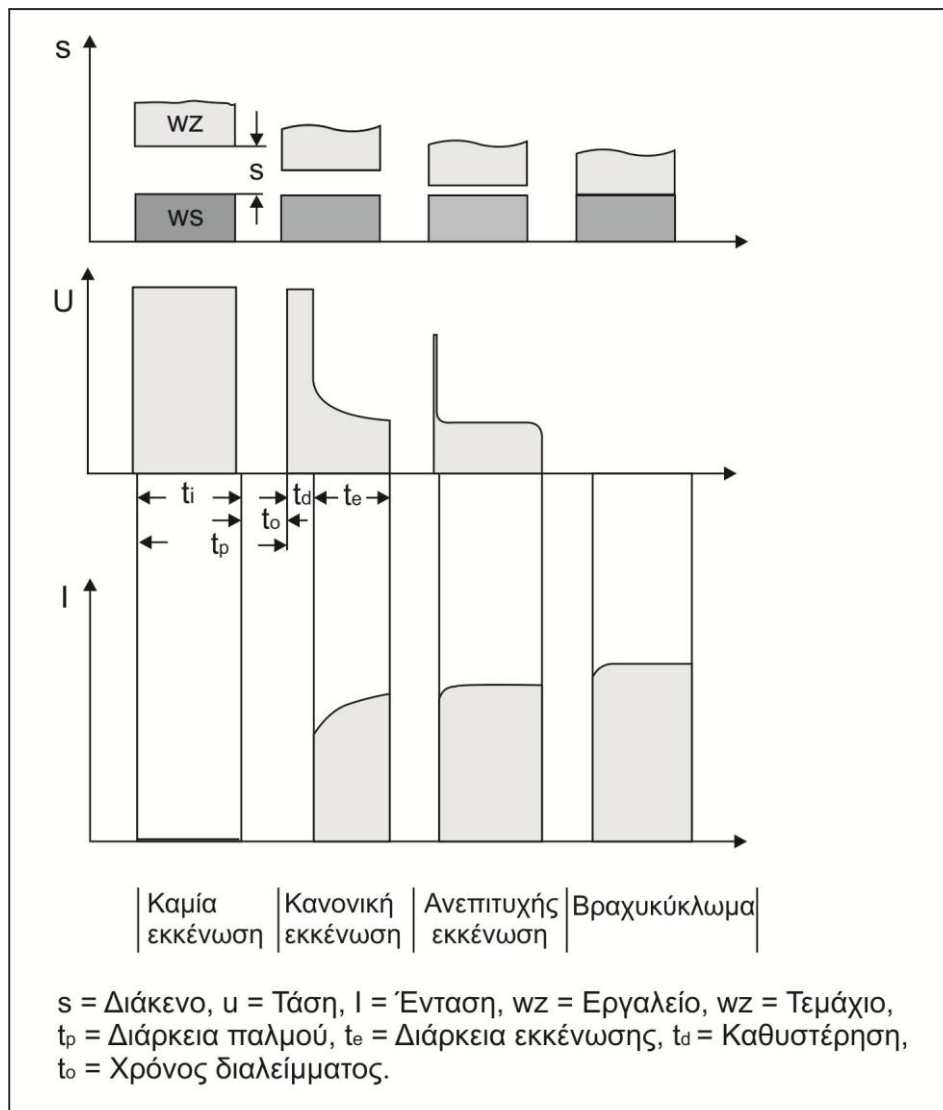
2.3.3.1 Διάκενο

Η ηλεκτροδιέγερση προκύπτει αρχικά, εκεί που υπάρχει το μικρότερο κενό μεταξύ εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου. Αυτή η θέση μεταβάλλεται αναλόγως με τους σπινθήρες των εκκενώσεων που συμβαίνουν ταχέως και διαδοχικά, σε διαφορετικά σημεία επάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου. Γρήγορα έγινε εμφανές, ότι κατά την κατεργασία το διάκενο θα έπρεπε να ελέγχεται. Αφενός μεν για να διασφαλίζονται σταθερές συνθήκες κατά την κατεργασία και αφετέρου, να προστατεύεται η επιφάνεια του ηλεκτροδίου ενάντια σε φαινόμενα δημιουργίας τόξου. Καταστροφή λόγω δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου (arc damage), μπορεί να προκύψει στην επιφάνεια του εργαλείου μετά από επαφή των δύο ηλεκτροδίων, ή με την αναποτελεσματική έκπλυση του διακένου. Τότε η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται συνεχής, οπότε καταστρέφεται το εργαλείο, αλλά και η κατεργαζόμενη επιφάνεια αφού το σχήμα που προσλαμβάνει, αποκλίνει από τις προδιαγραφές.

Για τους λόγους αυτούς αναπτύχθηκαν σερβομηχανισμοί που ελέγχουν το πλάτος του διακένου, μέσω των οποίων ρυθμίζεται, ελέγχεται και κινείται το εργαλείο – ηλεκτρόδιο, διατηρώντας πάντα το διάκενο στην προρρυθμισμένη τιμή του. Χρησιμοποιούνται κυρίως ηλεκτροϋδραυλικά και ηλεκτρομηχανικά συστήματα, με κινητήρες συνεχούς ρεύματος ή βηματικούς. Επίσης, με την εισαγωγή του αριθμητικού ελέγχου θέσης (numerical position control) στα τέλη του '60 και τις αρχές του '70, οι κινήσεις των ηλεκτροδίων έγιναν πολύ πιο ακριβείς. Με τα υπολογιστικά συστήματα αριθμητικού ελέγχου (CNC), η απόδοση της ηλεκτροδιάβρωσης βελτιώθηκε ακόμα περισσότερο στα μέσα της δεκαετίας του '70 [19], ενώ την επόμενη δεκαετία η περαιτέρω ανάπτυξη του αριθμητικού ελέγχου επέφερε δραστικές αναβαθμίσεις στην αποτελεσματικότητα της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση. Με τις CNC εργαλειομηχανές, διευκολύνθηκε η οδήγηση των ηλεκτροδίων σε κοιλότητες που μέχρι πριν ήταν αδύνατο, επιτρέποντας έτσι το φινίρισμα της εκεί επιφάνειας [20].

Η μέθοδος που εφαρμόζεται συνήθως για τον υπολογισμό του διακένου, βασίζεται στη μέτρηση της μέσης τάσης και όχι σε άμεσο υπολογισμό της απόστασης. Για την καλύτερη δυνατή απόδοση, απαιτούνται σταθερότητα του διακένου και υψηλή ταχύτητα αντίδρασης του συστήματος. Ορισμένες φορές, προκαλείται ανάδρομη κίνηση στο εργαλείο, κάτι που είναι εξαιρετικά ανεπιθύμητο. Η ταχύτητα της αντίδρασης πρέπει να είναι υψηλή ούτως ώστε να ανταποκρίνεται σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος ή βραχυκυκλώματος. Στις περιπτώσεις δημιουργίας ανοικτού κυκλώματος συνήθως λόγω μεγαλύτερου διακένου από το επιθυμητό, δεν προκαλείται σπινθήρας, ούτε διάσπαση του διηλεκτρικού με αποτέλεσμα να χάνεται πολύτιμος χρόνος εκκένωσης και να μειώνεται ο ρυθμός της κατεργασίας. Η περίπτωση του βραχυκυκλώματος οφείλεται σε μικρότερο διάκενο από το επιθυμητό και ως επί των πλείστων στην ανεπαρκή έκπλυση του διακένου και την ύπαρξη αποβλίπτων μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Τότε ο σπινθήρας δημιουργείται στα σημεία όπου υπάρχουν τα απόβλιττα και όχι στο σημείο του ελάχιστου διακένου. Εάν το σύστημα ελέγχου αποτύχει να αντιδράσει εγκαίρως μπορεί τότε να υπάρξει ακόμα και επαφή μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.

Υπάρχει περιοχή διακένων όπου η εκκένωση είναι εφικτή, δεν είναι όμως η ενδεδειγμένη, σε κάθε περίπτωση όμως, οποιαδήποτε εκκένωση συμβαίνει με τρόπο διάφορο του ιδεατού αυξάνει το ρυθμό φθοράς του εργαλείου και αλλοιώνει το αποτέλεσμα της κατεργασίας. Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ένα τριπλό διάγραμμα, όπου φαίνεται η επίδραση του διακένου στην ποιότητα της εκκένωσης [18].

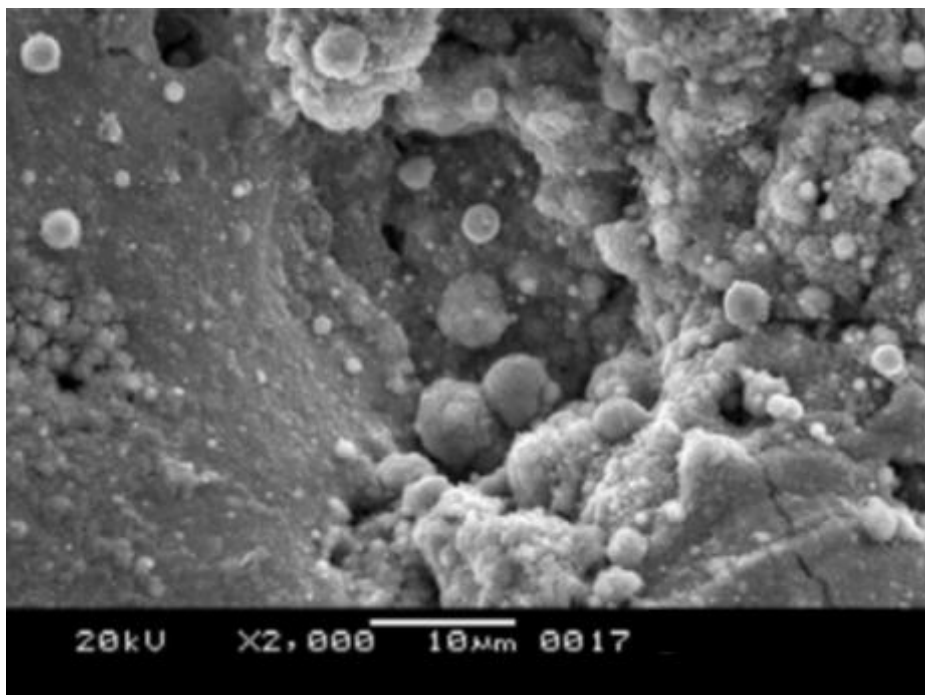


Σχήμα 2.8 : Τριπλό διάγραμμα της επίδρασης του διάκενου στην ποιότητα της εκκένωσης.

2.3.3.2 Έκπλυση του διάκενου

Η κυκλοφορία του διηλεκτρικού υγρού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το προς κατεργασία τεμάχιο, είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία η οποία προσαρμόζεται στο σχήμα του ηλεκτρόδιου, τον τύπο της κατεργασίας και το επιθυμητό τεμάχιο, συνδυάζοντας κατάλληλες ηλεκτρικές παραμέτρους με εγγυημένα αποτελέσματα. Η διαδικασία αυτή αποκαλείται έκπλυση ή flushing.

Κατά την έναρξη της κατεργασίας το διηλεκτρικό είναι καθαρό, δηλαδή δεν υπάρχουν στοιχεία από την αποβολή υλικού κατά την ηλεκτροδιάβρωση. Τα πρώτα απόβλητα δημιουργούνται με την πρώτη διάσπαση του διηλεκτρικού και την αφαίρεση υλικού από τα ηλεκτρόδια. Το τηγμένο υλικό που αποκολλάται από τα ηλεκτρόδια κατά την αφαίρεση υλικού, στερεοποιείται ξανά μέσα το διηλεκτρικό παίρνοντας το σχήμα μικρών σφαιριδίων με διαμέτρους που εκτείνονται από 2 έως και 100 μm όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 : Τα σφαιρίδια τηγμένου μετάλλου κατά την αφαίρεση υλικού [23].

Η παρουσία των κόκκων στο υγρό βοηθά στη δημιουργία σπινθήρων, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η απόδοση της μηχανής. Όμως, εάν η πυκνότητα των κόκκων αυτών μεγαλώνει, σε ένα συγκεκριμένο σημείο ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο παρουσιάζεται ανωμαλία όσον αφορά στη φύση του διηλεκτρικού και δημιουργείται βραχυκύκλωμα, ή αναπτύσσονται διαδοχικές εκκενώσεις στο ίδιο σημείο, οι οποίες προκαλούν ζημιά στο τεμάχιο και στο ηλεκτρόδιο.

Είναι λοιπόν απαραίτητο να εξαλειφθεί ο υπερβολικά μεγάλος αριθμός κόκκων μέσω απομάκρυνσής τους, με τη βοήθεια της κυκλοφορίας του διηλεκτρικού (μέθοδος flushing), ώστε να διατηρείται η σταθερότητα και η ακρίβεια της κατεργασίας και να αποφεύγονται τα προβλήματα. Εξ αιτίας του μικρού διάκενου, τα απόβλιττα απομακρύνονται με την εξαναγκασμένη ροή του διηλεκτρικού. Η εξαναγκασμένη κυκλοφορία επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση αντλίας, είτε ανάλογα με την περίπτωση, με τη χρήση κατάλληλων διατάξεων διοχέτευσης του διηλεκτρικού στο διάκενο, ενώ μια τυπική ταχύτητα που αποκτά η ροή του διηλεκτρικού, είναι μέχρι 1 ms^{-1} .

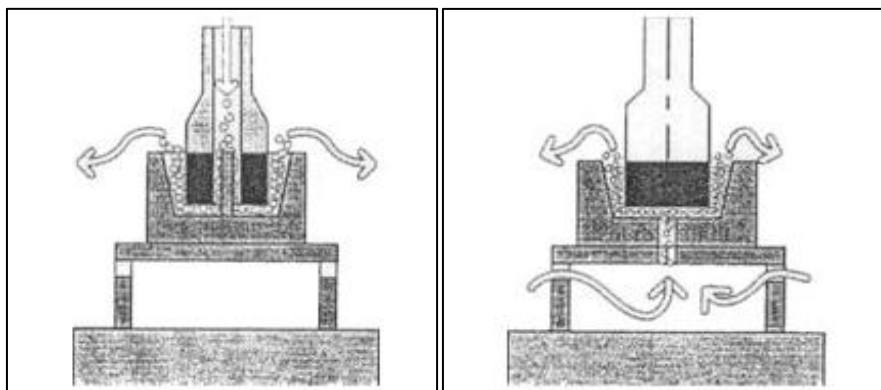
Κάποιες από τις πιο συνηθισμένες διατάξεις περιλαμβάνουν προσαρμογή με πίεση, εξαγωγή με υποπίεση, ροή από πάνω ή από κάτω, μέσα από τρύπες στο εργαλείο ή και στο κομμάτι. Επίσης, η υποβοήθηση της κυκλοφορίας του διηλεκτρικού μπορεί να ενισχυθεί και με παλινδρομική κίνηση του εμβόλου που φέρει το εργαλείο (παλμωτής) και την επακόλουθη αυξομείωση του διάκενου. Οι μέθοδοι εξαναγκασμένης έκπλυσης του διάκενου παρουσιάζονται εκτενέστερα στη συνέχεια:

- **Έκπλυση με σάρωση**

Με τη βοήθεια του παλμωτή, πραγματοποιείται παλινδρομική κατακόρυφη κίνηση του ηλεκτροδίου, η οποία αυξάνει την ταχύτητα απομάκρυνσης του χρησιμοποιημένου αλλά και του νέου καθαρού διηλεκτρικού που το αντικαθιστά στην περιοχή του διάκενου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για τη διάνοιξη μεγάλων οπών χωρίς ανακύκλωση του διηλεκτρικού.

- **Έκπλυση με έγχυση**

Η μέθοδος πραγματοποιείται με έγχυση του διηλεκτρικού είτε κάτω από το τεμάχιο, είτε μέσω οπής του ηλεκτροδίου. Σε κάθε περίπτωση, δημιουργείται οπή στο τεμάχιο ή στο εργαλείο και η έγχυση γίνεται μέσω του αντίστοιχου τμήματος, με τη βοήθεια της ανακύκλωσης του διηλεκτρικού. Με τον τρόπο αυτό απομακρύνονται οι κόκκοι και διευκολύνεται η εκκένωση. Παρόλα αυτά η μέθοδος δεν ενδείκνυται για κατεργασία όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και για αυτό συνήθως εφαρμόζεται σε κατεργασίες εκχόνδρισης και στην κατασκευή κύβων.

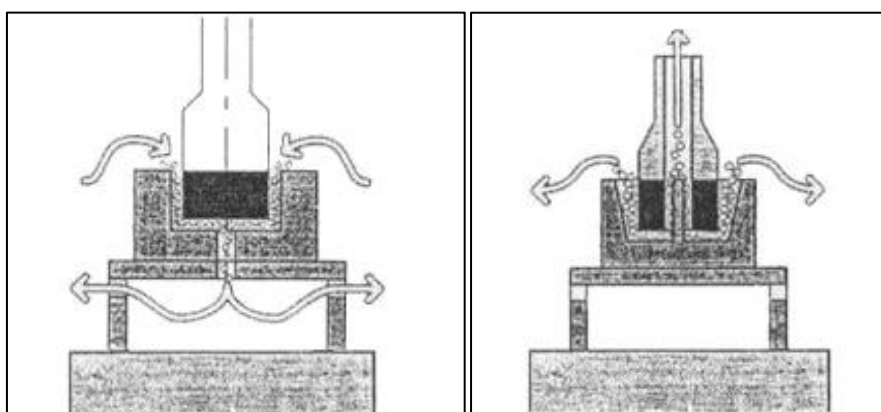


Σχέδιο 2.9 : Έκπλυση με έγχυση με οπή στο τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο αντίστοιχα.

- **Έκπλυση με απώθηση**

Πρόκειται για μέθοδο παρόμοια με την έγχυση, με τη διαφορά ότι το διηλεκτρικό υγρό έχει αντίθετη κατεύθυνση. Οι κόκκοι δεν κινούνται κατά μήκος του ηλεκτροδίου, οπότε δε διευκολύνεται η περαιτέρω εκκένωση.

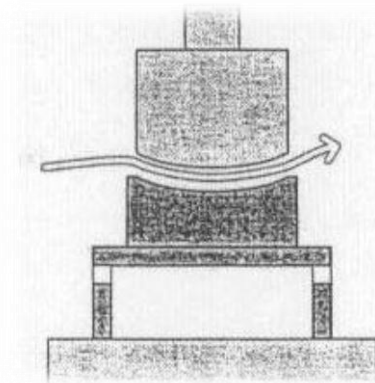
Κατά την κατεργασία φινιρίσματος ή μικρών εγκοπών, το ηλεκτρόδιο μπορεί να κολλήσει στην κοιλότητα και να καταστρέψει την επιφάνεια του τεμαχίου. Για το λόγο αυτό, η τιμή της απώθησης δεν πρέπει να μειώνεται πέραν του 0.5 έως 0.7 kg/cm², καθώς κάτω από αυτές τιμές, η πίεση μπορεί να προκαλέσει μετακίνηση του τεμαχίου, ή παραμόρφωση του ηλεκτροδίου.



Σχέδιο 2.10 : Έκπλυση με απώθηση διαμέσου οπής του τεμαχίου και του ηλεκτροδίου αντίστοιχα.

- **Έκπλυση με πλάγια σάρωση**

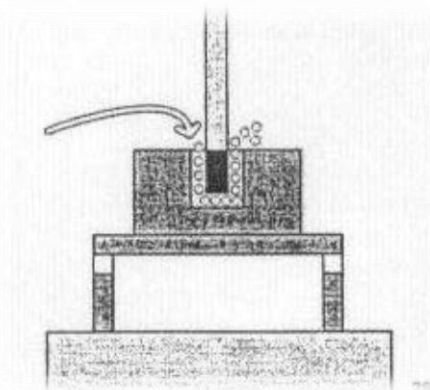
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν δεν επιθυμείται η διάνοιξη οπών στο ηλεκτρόδιο ή στο τεμάχιο. Για την εύρυθμη λειτουργία αυτής της μεθόδου, απαιτείται η προσεκτική εφαρμογή της έγχυσης διηλεκτρικού, ώστε να πραγματοποιείται άριστη σάρωση στην επιφάνεια του ηλεκτρόδιου. Η τεχνική αυτή πραγματοποιείται με τον παλμωτή, ο οποίος επιτρέπει στο διηλεκτρικό να περάσει όταν το ηλεκτρόδιο παλινδρομεί. Η μέθοδος εφαρμόζεται στην παραγωγή μεταλλίων ή στην κατεργασία στενών εγκοπών σε καλούπια χυτών πλαστικών.



Σχέδιο 2.11: Έκπλυση με πλάγια σάρωση.

- **Έκπλυση με παλμική έγχυση**

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει συγχρονισμό της έγχυσης του διηλεκτρικού κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, με τη χρήση ενός παλμωτή. Η παλμική έγχυση χρησιμοποιείται για να αποφευχθεί ένα μειονέκτημα που παρατηρείται συχνά κατά τη διάρκεια της κατεργασίας με μεταλλικά ηλεκτρόδια, όταν επηρεάζεται η ποιότητα της επόμενης κατεργασίας που εμφανίζει ανωμαλίες γύρω από την περιοχή της έγχυσης. Κάτι που γίνεται πιο φανερό με την αύξηση της πίεσης του διηλεκτρικού κατά την έκπλυση.



Σχήμα 2.12: Έκπλυση με παλμική έγχυση [6].

- **Έκπλυση με συνδυασμένες μεθόδους**

Ένας συνδυασμός των μεθόδων απώθησης και έγχυσης, χρησιμοποιείται πολύ συχνά για την κατεργασία καλουπιών, ή συμπαγών τεμαχίων με πολύπλοκα σχήματα. Με τη συνδυαστική μέθοδο αυτή, καθίσταται δυνατή η αποβολή των αερίων και των κόκκων από το σημείο κατεργασίας και εξασφαλίζει την καλή

κυκλοφορία του διηλεκτρικού. Τέλος εγγυάται την ψύξη του τεμαχίου και του εργαλείου.

Η πίεση, ή η υποπίεση που ασκείται στο διηλεκτρικό για τις διεργασίες της έγχυσης και της απώθησης αντίστοιχα εξαρτάται από το αποτέλεσμα που θέλουμε να επιφέρουμε, και τους υπόλοιπους παράγοντες της κατεργασίας όπως είναι τα υλικά των ηλεκτροδίων.

Η υπερβολική ταχύτητα έκπλυσης δεν είναι επιθυμητή. Προκειμένου να αποφευχθεί, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούμε μεταλλικά ηλεκτρόδια, ή όταν εφαρμόζουμε συνεχιζόμενο flushing, οι τιμές της πίεσης και της ελάττωσης της απώθησης πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ελάττωση των παραμορφώσεων των τυχόν ψαθυρών ηλεκτροδίων και σε μεγαλύτερη σταθερότητα της κατεργασίας. Κατά την έκπλυση με παλμική έγχυση, οι παραπάνω τιμές μπορεί να είναι ελαφρώς αυξημένες.

Με τα παραπάνω έγινε σαφές ότι η δύναμη της έκπλυσης, και η επιλογή της ορθότερης μεθόδου ανάλογα με την κατεργασία, επηρεάζουν την αφαίρεση υλικού. Η επίδραση του flushing στο μηχανισμό αφαίρεσης υλικού καταδεικνύεται επίσης, στο κεφάλαιο που αφορά την ποιότητα της επιφάνειας.

2.3.3.3 Επιλογή διηλεκτρικού

Η επιλογή του διηλεκτρικού εξαρτάται από τη μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης που χρησιμοποιείται ή από τις κατεργασίες που πραγματοποιούνται με την εκάστοτε εργαλειομηχανή. Τα βασικά κριτήρια για την επιλογή του διηλεκτρικού πρέπει να είναι τα εξής:

1. Να διαθέτει επαρκώς υψηλή διηλεκτρική δύναμη, ώστε να παραμένει μη αγώγιμο, μέχρι η τάση να φτάσει την τιμή της τάσης διάσπασης.
2. Να είναι ικανό να αποιονίζεται ταχέως μετά από κάθε εκκένωση.
3. Να έχει χαμηλή τιμή ιξώδους και κατ' επέκταση χαμηλή επιφανειακή τάση, ώστε να μπορεί να ρέει ελεύθερα ακόμα και σε μικρά διάκενα.
4. Να έχει χημική ουδετερότητα.
5. Να μη δημιουργεί τοξικούς ατμούς κατά τη διάσπασή του.
6. Να διαθέτει υψηλό σημείο ανάφλεξης, ώστε η παραγωγή αερίων κατά την ανάφλεξή του, να περιοριστεί και να μην δημιουργούνται καθυστερήσεις στη διαδικασία.
7. Να έχει καλές θερμικές ιδιότητες.
8. Να είναι χαμηλού κόστους.

Τα διηλεκτρικά που πληρούν επαρκώς τα παραπάνω κριτήρια και χρησιμοποιούνται εκτενέστερα στην ηλεκτροδιάβρωση, είναι ορισμένα προϊόντα υδρογονανθράκων όπως η παραφίνη, η κηροζίνη ή κάποια ελαφρά έλαια μετασχηματιστών, και τελευταία, το απιονισμένο νερό. Η υψηλή θερμοχωρητικότητα αυτών των υγρών, τα καθιστά αποτελεσματικά και ως ψυκτικά μέσα. Επιπλέον έχουν χαμηλό ιξώδες ώστε να παρασύρουν τα απόβλητα ακόμα και μέσω λεπτών διάκενων, ενώ έχουν υψηλή διηλεκτρική δύναμη και αποιονίζονται ταχύτατα. Η μέχρι ενός σημείου, μονωτική δράση του διηλεκτρικού, είναι σημαντική για την αποφυγή της ηλεκτρόλυσης των ηλεκτροδίων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Οι περισσότερες εφαρμογές ηλεκτροδιάβρωσης σε βυθιζόμενη μήτρα, χρησιμοποιούν την κηροζίνη σαν διηλεκτρικό μέσο. Όμως οι ιδιότητες της κηροζίνης, υποβαθμίζονται όταν η κατεργασία έχει μεγάλη διάρκεια. Ένα επιπλέον μειονέκτημα που μπορεί να αναφερθεί, είναι η μόλυνση της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας του χώρου της κατεργασίας, επίσης οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν κατά την εκκένωση, αποσυνθέτουν την κηροζίνη, με αποτέλεσμα την επικόλληση στοιχείων από άνθρακα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων.

Τελικά, επηρεάζεται η ποιότητα και η ομαλότητα της εκκένωσης από τα προσκολλημένα σωματίδια.

Σε άλλες εφαρμογές της ηλεκτροδιάβρωσης, γίνεται προσθήκη κόνεως από διάφορα υλικά στο υγρό διηλεκτρικό. Όταν προστεθούν υλικά όπως αλουμίνιο, αλουμίνα, πυρίτιο ή νικέλιο σε διηλεκτρικό κηροζίνης, μπορεί να επιτευχθεί χαμηλή τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας και υψηλή αντίσταση στη σκουριά, για το τεμάχιο. Περισσότερα για τη χρήση διηλεκτρικών με προσθήκη κόνεως σε κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης, αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Η σχετικά πρόσφατη εισαγωγή του αποσταγμένου νερού σαν διηλεκτρικό, οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρέχει κατά την ηλεκτροδιάβρωση υψηλής ακρίβειας. Με τις υπόλοιπες παραμέτρους να παίρνουν τις συνηθισμένες τους τιμές, το φινίρισμα της επιφάνειας φτάνει τα 0.06 μm . Το απιονισμένο νερό έχει πολύ μικρότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από το νερό του δικτύου, στα $2 \cdot 10^{-16} \text{ S m}^{-1}$ έναντι $7 \cdot 10^{-3} \text{ S m}^{-1}$. Το γεγονός αυτό θα το καθιστούσε προτιμότερο για διηλεκτρικό, αν δεν προκαλούσε εκτενή οξείδωση στα σιδηρούχα ηλεκτρόδια. Το ελάττωμα αυτό δεν εξαλείφεται με την πρόσμιξη αντισκωριακών προϊόντων, καθώς αυξάνουν απaráδεκτα την αγωγιμότητά του.

Σε σύγκριση με την κηροζίνη, η χρήση νερού σαν διηλεκτρικό για κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης, έχει πολύ μικρότερο κόστος, πολύ καλή θερμική αγωγιμότητα και καθόλου περιβαλλοντική μόλυνση. Έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες σχετικά με τη χρήση απιονισμένου νερού ως διηλεκτρικό. Το 1981 ο Jeswani κατεργάστηκε σε αποσταγμένο νερό καταλήγοντας σε υψηλότερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού και μικρότερο λόγο φθοράς του εργαλείου [21]. Ο Jilani τρία χρόνια αργότερα απέδειξε ότι μπορεί να μηδενισθεί ο λόγος φθοράς του κοπτικού για κατεργασία σε απιονισμένο νερό. Η χρήση υδάτινων διαλυμάτων, εφαρμόστηκε από τον Koenig εξαλείφοντας τον κίνδυνο εκδήλωσης πυρκαγιάς κατά την ηλεκτροδιάβρωση [22].

Ο Chen κατεργάστηκε κράμα Ti-6Al-4V και κατάφερε υψηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού και χαμηλό λόγο σχετικής φθοράς του κοπτικού [23]. Ο Chung ανακάλυψε ότι η χρήση απιονισμένου νερού αντί της κηροζίνης μπορούσε να μειώσει τη φθορά του εργαλείου – ηλεκτροδίου και να αυξήσει το ρυθμό της κατεργασίας κατά την ηλεκτροδιάβρωση μικρο – ημισφαιρίων. Ο Chow πρόσθεσε σκόνη από καρβίδια πυριτίου σε απιονισμένο νερό και το χρησιμοποίησε ως διηλεκτρικό, κατά τη δημιουργία μικρο – σχισμών με ηλεκτροδιάβρωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη της σκόνης από καρβίδιο πυριτίου, αύξησε την ηλεκτρική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού, μεγάλωσε το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων και βοήθησε την εξώθηση των αποβλήτων, αυξάνοντας συνεπώς και το ρυθμό αφαίρεσης υλικού [3].

Το διηλεκτρικό μέσο, επηρεάζει και την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Το 2006, οι Bai και Koo, συνέκριναν τα αποτελέσματα διαφορετικών διηλεκτρικών μέσων στην τροποποίηση της κατεργασμένης επιφάνειας. Χρησιμοποίησαν κηροζίνη και αποσταγμένο νερό για να τροποποιήσουν επιφάνειες υπερκραμάτων (superalloys) με σύνθετα ηλεκτρόδια αλουμινίου – μολυβδενίου. Κάθε τεμάχιο κατεργάστηκε για έξι λεπτά και το αποτέλεσμα για το αποσταγμένο νερό ήταν μεγαλύτερη σκληρότητα ενώ η κηροζίνη απέδωσε καλύτερο φινίρισμα, καλύτερη μορφολογία, λεπτότερο λευκό στρώμα και βραδύτερο λόγο οξείδωσης στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η καλύτερη τιμή για την τραχύτητα ήταν 2.62 μm , ενώ η ένταση του ρεύματος ήταν υψηλότερη στην άνοδο. Κατέληξαν ότι η κηροζίνη επιδρά καλύτερα στο κραματοποιημένο στρώμα που δημιουργείται στην επιφάνεια του τεμαχίου σε σύγκριση με το αποσταγμένο νερό..

Παρόλα τα πλεονεκτήματα του απιονισμένου νερού, όταν αυτό χρησιμοποιείται για την κατεργασία μεγάλων επιφανειών, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού μειώνεται, ενώ το ηλεκτρόδιο – εργαλείο σκουριάζει και φθείρεται ευκολότερα. Για την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σαν διηλεκτρικά υγρά και ορισμένα γαλακτώματα λαδιού - νερού. Ωστόσο η χρήση τους σε εφαρμογές ηλεκτροδιάβρωσης βυθιζόμενης

μήτρας αποδείχθηκε ανεπαρκής και δεν προτιμάται. Ο Liu ωστόσο, ερεύνησε πειραματικά τη χρήση γαλακτωμάτων λαδιού με αποσταγμένο νερό, σε ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας [24]. Το υλικό του ηλεκτροδίου ήταν κυπρίτης με αρνητική πολικότητα. Το γαλάκτωμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από 5% λάδι και 95% αποσταγμένο νερό και τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι η φθορά του εργαλείου ήταν μικρότερη, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού μεγαλύτερος, η τραχύτητα της επιφάνειας μικρότερη και το διάκενο της εκκένωσης μεγαλύτερο. Οι κρατήσεις που δημιουργήθηκαν στην επιφάνεια εργασίας, είχαν μεν μεγαλύτερη διάμετρο αλλά μικρότερο βάθος και ομαλότερες ακμές. Επίσης απουσίαζαν οι μικρορωγμές που εμφανίζονταν με τη χρήση κηροζίνης.

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά, τα υλικά που δύνανται να χρησιμοποιηθούν σε εργαλειομηχανές EDM, με τα κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως είναι το σημείο ανάφλεξής τους και το ιξώδες.

Description	Viscosity of 20° C cSt (mm ² /s)	Flash point (°C)		Tested by Charmilles
		PM	COC	
AVIA 1.M.3 82	3.2	82		
AVIA 1.M.3 I 10	3.4	106		x
AVIA O.H.E	5.5	126		x
BP 180	1.75	70		
BP 200 T	3.5		112	x
BP 250	6		125	x
C.M.T. DASCO COOL 7.04	7		129	x
ESSO MENTOR 28	7.4		120	x
ELF FluxELF I	2.5		90	
ELF FluxELF II	6.5		134	x
SHELL Fluid S 9608	7.9		135	x
SHELLFLUID 2	1.9		59	
SHELLFLUID 4	3.8		110	x
SHELLFLUID 6			118	
SAFCO EROLEC 84	3.7		92	x
MILL-SOREPI H	6.2		132	x
WINTER SHALL MIHAGAN	4.6		115	x
TOTAL-EDM 1	1.8		65	x
TOTAL-EDM 2	3.88		121	x
MOTOREX FRISCO 70	6.4		140	x
CASTROL SE-FLUID 180	3.2		160	x
UNIBREX ERODOL 88	6.1		110	x
WYNN'S ELECTRAFLUID F	3.5	>103		
WYNN'S ELECTRAFLUID P	6	>132		
IGOL ELECTRO 102	4.9	>102		x

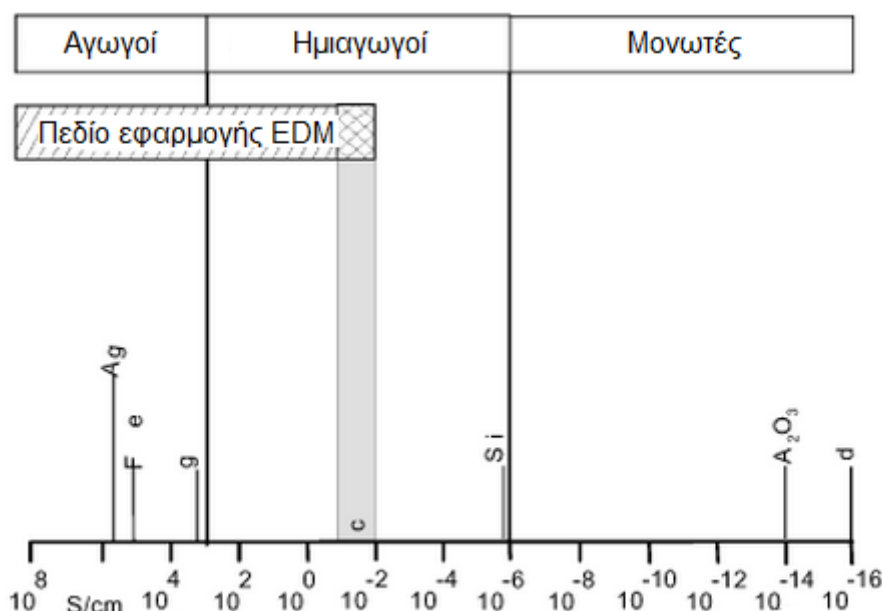
Πίνακας 2.1 : Βασικά χαρακτηριστικά των υλικών των ηλεκτροδίων [6].

2.3.3.4 Υλικό του ηλεκτροδίου

Το ηλεκτρόδιο και το υλικό από το οποίο αποτελείται είναι κομβικής σημασίας για την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση και την αποτελεσματικότητά της. Είναι χαρακτηριστικό ότι το μεγαλύτερο μέρος του κόστους και του χρόνου που καταναλώνεται κατά την παραγωγή μητρών με ηλεκτροδιάβρωση, αφιερώνεται στην κατασκευή των ηλεκτροδίων. Το κόστος της παραγωγής τους μπορεί να αγγίξει το 50% του συνολικού κόστους της κατεργασίας [25]. Η κατασκευή τους συνήθως γίνεται με συμβατικές μεθόδους όπως με αποτύπωση, λείανση, εξώθηση και πιο συχνά τórνευση και φραιζάρισμα, ενώ απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι κατεργασίας που συνοδεύονται από μεγάλη σπατάλη σε υλικό, ειδικά όταν η γεωμετρία του ηλεκτροδίου είναι πολύπλοκη.

Στην επιλογή του σωστού υλικού, σημαντικό ρόλο παίζει το υλικό του τεμαχίου που θα υποστεί την κατεργασία. Η πιο εμπορικά διαδεδομένη εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης, είναι η ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας και το υλικό από το οποίο αποτελούνται συνήθως τα προϊόντα της κατεργασίας αυτής είναι ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή εργαλείων, ή αλλιώς εργαλειοχάλυβας. Η πλειοψηφία των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για κατεργασίες μετάλλων, ξύλων και πλαστικών, είναι κατασκευασμένα από εργαλειοχάλυβες. Οι εργαλειοχάλυβες είναι τραχιά προϊόντα χύτευσης και πρέπει να επιδεικνύουν αντοχή σε συγκεκριμένα φορτία δυνάμεων καθώς και σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.

Αντίστοιχα προϊόντα κατασκευάζονται συχνά και από κράματα ταχυχαλύβων που περιέχουν μολυβδένιο και βολφράμιο, και έχουν μεγάλη σκληρότητα που μπορούν να τη διατηρήσουν σε θερμοκρασίες μέχρι και 540 °C. Η μεγαλύτερη μερίδα των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές κατεργασίες κοπής είναι κατασκευασμένα από αυτά τα υλικά. Ωστόσο κάθε είδους επιφάνεια και υλικό μπορεί να κατεργαστεί με ηλεκτροδιάβρωση, είτε πρόκειται για αγωγό, είτε για ημιαγωγό, αρκεί η ηλεκτρική αγωγιμότητά του να είναι εντός των πλαισίων που φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 2.13. Τα τελευταία χρόνια, με τη χρήση νέων τεχνικών, μπορούν να κατεργαστούν και κεραμικές επιφάνειες όπως περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.13 : Το πεδίο εφαρμογής της ηλεκτροδιάβρωσης βάσει της αγωγιμότητας του τεμαχίου.

Ωστόσο υπάρχουν τέσσερα βασικά κριτήρια, τα οποία εξασφαλίζουν σε κάθε περίπτωση, πολύ υψηλή απόδοση στην κατεργασία. Τα κριτήρια αυτά είναι:

1. Υψηλό σημείο τήξης, ώστε να αυξάνεται ο χρόνος ζωής του.
2. Καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, για να αυξάνει την παραγωγικότητα.
3. Ευκολία στην επεξεργασία του, με τις συμβατικές μεθόδους.
4. Χαμηλό κόστος.

Τα υλικά που πληρούν τις παραπάνω προδιαγραφές, μπορούν να παράξουν καλά αποτελέσματα επιφανειακής τραχύτητας και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται περισσότερο στην πράξη, είναι ο γραφίτης, ο ηλεκτρολυτικός χαλκός, ο ορείχαλκος και το χυτό αλουμίνιο. Το κάθε ένα από αυτά τα υλικά, ανάλογα με τις ιδιότητές του, ενδείκνυται για διαφορετική χρήση, όπως φαίνεται παρακάτω.

Γραφίτης

Ο γραφίτης είναι το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο στις κατεργασίες με ηλεκτροδιάβρωση. Στη μορφή που καθιέρωσε τη χρήση του, έχει πολύ υψηλό σημείο τήξης στους 3000° C και επιδεικνύει πολύ χαμηλή φθορά, που ειδικά για την κατεργασία χαλύβδινων τεμαχίων, αγγίζει ποσοστά μικρότερα του 1%. Με το γραφίτη, επιτυγχάνονται επίσης, πολύ υψηλοί ρυθμοί κατεργασίας.

Τα μηχανικά, ηλεκτρικά και θερμικά χαρακτηριστικά του, είναι άμεσα συνδεδεμένα με την διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης, μέσω της οποίας παρασκευάζεται αυτό το υλικό. Για το λόγο αυτό, κατά την μορφοποίηση των ηλεκτροδίων από γραφίτη, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην αντοχή του σε θραύση και στην αποφυγή αστοχιών στα ευαίσθητα σημεία όπως οι γωνίες. Ακόμη, με το σωστό προσανατολισμό των κόκκων στη δομή του ηλεκτροδίου, βελτιώνεται η επιφανειακή ποιότητα του προϊόντος της κατεργασίας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την αυξημένη χρήση του γραφίτη, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τρόπων χύτευσης και μορφοποίησης τέτοιων ηλεκτροδίων.

Η πυκνότητα του γραφίτη αποτελεί ένδειξη για την καλή λειτουργία του κατά την κατεργασία. Τα τελευταία χρόνια, στα συστήματα ηλεκτροδιάβρωσης ελεγχόμενου παλμού, παρατηρείται αυξημένη χρήση ενός ειδικού, υψηλής ποιότητας γραφίτη που όμως δεν ενδείκνυται για χρήση στα συστήματα ηλεκτροδιάβρωσης με κύκλωμα RC. Γενικά, χαμηλής πυκνότητας γραφίτης, επιτρέπει μεγαλύτερη αποβολή υλικού από γραφίτες με πυκνότητα μεγαλύτερη από 1.8 g/cm³. Γραφίτες με πυκνότητα πέντε φορές μικρότερη από την πυκνότητα του χαλκού, χρησιμοποιούνται συνήθως στις κατεργασίες με ηλεκτρόδια μεγάλου μεγέθους. Ορισμένα στοιχεία για τις βασικές ιδιότητες του γραφίτη, συγκεντρώθηκαν από τον Hatschek και παρουσιάζονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα 2.2.

Πυκνότητα kg m ⁻³	Αντοχή θραύσης (MPa)	Ηλεκτρική αγωγιμότητα mohm-m	Περεταίρω πληροφορίες για χρήση με EDM
1650	41,4	20,3	χρήση για ηλεκτροδιάβρωση χαλύβων για παραγωγή εργαλείων
1750	57,2	14,2	προσδίδει λεπτομέρεια, καλή ταχύτητα με περιορισμένη φθορά, φινίρισμα
1840	82,7	12,4	κατεργάζεται σε πάχος μικρότερο από 0,0125 mm, γωνιακή ακτίνα στα 0,0025 mm
3390	88,3	1,37	συμπυκνωμένος με χαλκό, μειώνει κατά 27% τη δημιουργία πόρων.
2970	96,5	1,78	Χρησιμοποιείται για ηλεκτροδιάβρωση αυλακώσεων και ραβδώσεων

Πίνακας 2.2 : Ιδιότητες ηλεκτροδίων γραφίτη για ηλεκτροδιάβρωση [2].

Ηλεκτρολυτικός χαλκός

Ο χαλκός παρουσιάζει αυξημένη σταθερότητα σαν υλικό, σε συνθήκες ηλεκτρικών εκκενώσεων. Είναι εύκολος στη χύτευση και τη μορφοποίηση και ενδείκνυται για χρήση σε τεμάχια από τα οποία πρέπει να αφαιρεθεί μεγάλη ποσότητα μετάλλου. Η κατασκευή τέτοιων ηλεκτροδίων γίνεται συνήθως με πρεσάρισμα, συρματοποίηση, μηχανική κατεργασία, επεξεργασία με επικάλυψη ή επιμετάλλωση. Η φθορά που υπόκεινται κατά την ηλεκτροδιάβρωση, είναι εφάμιλλη εκείνης του γραφίτη, ενώ όταν χρησιμοποιείται για την κατεργασία ορισμένων υλικών, μπορεί να προσδώσει καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά την ποιότητα της επιφάνειας.

Ορείχαλκος - Μπρούτζος

Ηλεκτρόδια από ορείχαλκο, χρησιμοποιούνταν στα πρώτα βήματα της ανάπτυξης της ηλεκτροδιάβρωσης και χρησιμοποιούνται ακόμα σε οποιαδήποτε αναλογία χαλκού – ψευδαργύρου, βάσει της οποίας ορίζονται και οι περεταίρω ιδιότητές τους. Ενώ αποτελεί ένα πολύ σταθερό υλικό στις συνθήκες της κατεργασίας, η μεγάλη φθορά που του προξενείτε, το καθιστά απαγορευτικό για μαζική χρήση και το περιορίζει σε πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές. Η χρήση κραμάτων χαλκού – κασσίτερου ή αλλιώς μπρούτζου είναι ακόμα πιο περιορισμένη και αφορά συνήθως την κατασκευή βαλβίδων και γρاناζιών.

Χυτό αλουμίνιο

Ηλεκτρόδια από χυτό αλουμίνιο χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροδιάβρωση με συστήματα ελεγχόμενου παλμού. Σε κατεργασίες εκχόνδρισης όπου απαιτείται αφαίρεση μεγάλης ποσότητας υλικού από το τεμάχιο, παράγει αποτελέσματα εφάμιλλα του χαλκού και του γραφίτη. Οι κυριότεροι λόγοι για την επιλογή του αλουμινίου και των κραμάτων του, είναι ο υψηλός λόγος αντοχής – φθοράς, η αντίσταση στη σκουριά από πολλά χημικά, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, μη τοξικότητα, ανακλαστικότητα της επιφάνειας, καλή εμφάνιση, ευκολία στη μορφοποίηση και την κατεργασία καθώς και ο μη μαγνητικός τους χαρακτήρας.

Κατά την επεξεργασία χαλύβδινων τεμαχίων όμως, παρουσιάζει πολύ υψηλό ρυθμό φθοράς, της τάξης του 15% και έτσι η χρήση του έχει περιοριστεί σημαντικά. Οι βασικές χρήσεις προϊόντων αλουμινίου, κατεργασμένων με ηλεκτροδιάβρωση, καταταγμένες με

φθίνουσα σειρά βάσει κατανάλωσης, αφορούν προϊόντα συσκευασίας, εξαρτήματα μέσω μεταφοράς, ηλεκτρικές εφαρμογές και φορητά εργαλεία.

Άλλα υλικά

Η χρήση πολλών ακόμη υλικών έχει ερευνηθεί κατά καιρούς, ως εργαλεία – ηλεκτρόδια σε εφαρμογές ηλεκτροδιάβρωσης. Ηλεκτρόδια από κράματα χαλκού – βορείου, ή βολφραμίου – αργύρου επιδεικνύουν πολύ χαμηλούς λόγους φθοράς και ενίοτε χρησιμοποιούνται. Κάποιες φορές υλικό από κράμα χαλκού – βολφραμίου εφαρμόζεται ως κάθοδος στην ηλεκτροδιάβρωση επιφέροντας υψηλούς δείκτες παραγωγικότητας και πολύ μικρή φθορά. Αποτελεί όμως μια επιλογή, πολύ υψηλού αναλογικά κόστους ενώ παρουσιάζει μεγάλη δυσκολία στη μορφοποίησή του με τις συμβατικές μεθόδους. Έτσι, η χρήση του περιορίζεται στην κοπή βαθιών οπών και κοιλοτήτων για τα οποία απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στην κατεργασία και κυρίως για την κατεργασία τεμαχίων από καρβίδια βολφραμίου, λόγω της χαμηλής φθοράς που παρουσιάζει σε αυτή την περίπτωση. Τέλος, μια νέα τάση που βρίσκει ολοένα μεγαλύτερη ανταπόκριση, είναι η χρήση ηλεκτροδίων κωνιομεταλλουργίας.

Στον πίνακα 2.3 που ακολουθεί, παρουσιάζονται συνοπτικά, κάποια από τα πιο κοινά υλικά ηλεκτροδίων για ηλεκτροδιάβρωση μαζί με τις βασικές τους ιδιότητες και τις συνήθειες τους εφαρμογές.

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ			
ΥΛΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ	ΥΛΙΚΟ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	ΦΑΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ
Γραφίτης	Ανοξείδωτος Χάλυβας	Ξεχόνδρισμα Φινίρισμα	Θετική Αρνητική
Γραφίτης	Χάλυβας	Ξεχόνδρισμα Φινίρισμα	Θετική Αρνητική
Χαλκός	Ανοξείδωτος Χάλυβας	Ξεχόνδρισμα Φινίρισμα	Θετική Θετική
Χαλκός	Χάλυβας	Ξεχόνδρισμα Φινίρισμα	Θετική Θετική
Βολφράμιο - Χαλκός	Χάλυβας	Ξεχόνδρισμα Φινίρισμα	Θετική Θετική
Βολφράμιο - Χαλκός	Σκληρομέταλλο	Ξεχόνδρισμα Φινίρισμα	Αρνητική Αρνητική
Χαλκός - Ψευδάργυρος	Χάλυβας	Ξεχόνδρισμα Φινίρισμα	Θετική Θετική
Χαλκός - Ψευδάργυρος	Σκληρομέταλλο	Ξεχόνδρισμα Φινίρισμα	Αρνητική Αρνητική

Πίνακας 2.3 : Πολικότητα και χρήση ανάλογα με το υλικά της κατεργασίας [18].

Ενώ στον πίνακα 2.4, παρουσιάζονται οι μεταβολές στην πολικότητα των ηλεκτροδίων για κάποιους από τους συνηθέστερους συνδυασμούς υλικών εργαλείου – κατεργαζόμενου τεμαχίου.

ΥΛΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ		
ΥΛΙΚΑ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ
Γραφίτης	Εύκολη κατεργασία, Μικρή φθορά Λεπτόκοκκος = Φινίρισμα, Χοντρόκοκκος = Εκχόνδριση	Καλούπια πρέσας, πλάκες αποκοπής, αποξέστες
Χαλκός	Μικρή φθορά, Μεγάλος ρυθμός αφαίρεσης υλικού, εύκολη κατεργασία	Μικρά εργαλεία Μέγεθος κόκκου από 1 έως 400 μm
Βολφράμιο - - Χαλκός	Ακριβό υλικό, καλή συμπεριφορά φθοράς	Ηλεκτρόδια φινιρίσματος σκληρομετάλλων

Πίνακας 2.4: Ιδιότητες και εφαρμογές των υλικών των ηλεκτροδίων.

Ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας

Το υψηλό κόστος και ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή ηλεκτροδίων από τα προαναφερθέντα υλικά, οδήγησε σε μια νέα τάση στην κατασκευή ηλεκτροδίων, από σύνθετα υλικά κονιομεταλλουργίας. Η παραγωγή ηλεκτροδίων κονιομεταλλουργίας είναι ταχύτερη και πιο οικονομική και αναπτύχθηκε κυρίως από τα μέσα της δεκαετίας του '90 και μετά.

Ένα πολύπλοκης γεωμετρίας ηλεκτρόδιο, κατασκευασμένο με συμβατικές κατεργασίες, μπορεί να κοστίσει εκατό φορές περισσότερο από ένα απλό κυβικό ηλεκτρόδιο. Στην κονιομεταλλουργία όμως, μπορούν να κατασκευαστούν, από την ίδια μήτρα και με ποντάρισμα, περισσότερα ηλεκτρόδια διαφορετικού σχήματος, μειώνοντας το κόστος αισθητά. Για το λόγο αυτό, η κονιομεταλλουργία αποδεικνύεται μια σημαντική εναλλακτική μέθοδος για την παραγωγή ηλεκτροδίων, τα οποία μπορούν να φέρουν τις εκάστοτε επιθυμητές ιδιότητες ανάλογα με τα υλικά από τα οποία αποτελούνται.

Τα ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας, κατασκευάζονται από σκόνη πάχους ενός ή μερικών μm (ένα χιλιοστό του χιλιοστού), με εξαιρετική καθαρότητα, με συμπίεση, σε μεγάλες θερμοκρασίες, από όλες τις πλευρές. Έτσι έχουν τεράστια ομοιομορφία μηχανικών, θερμικών & φυσικών ιδιοτήτων προς κάθε κατεύθυνση, σε αντίθεση με τα συμβατικά ηλεκτρόδια που οι ιδιότητές τους διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την φορά της έλασης ή σφυρηλάτησης και εγκάρσια σε αυτήν. Αποτέλεσμα της σχετικά ακριβής μεθόδου κατασκευής, είναι ότι η τιμή τους σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να υπερβαίνει κατά 400% την τιμή του αντίστοιχου συμβατικού. Η σχέση όμως απόδοσης – τιμής, τελικά αποδεικνύει, ότι τα ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας είναι οικονομικότερα από τα συμβατικά.

Μέσω της διαδικασίας παραγωγής ηλεκτροδίων κονιομεταλλουργίας, που περιλαμβάνει πρεσάρισμα με υψηλή πίεση και θερμοκρασίες ανόπτησης, τα προϊόντα μπορούν να αποκτήσουν τις επιθυμητές θερμικές και μηχανικές ιδιότητες, καθώς και την επιθυμητή μικροδομή. Σαν αποτέλεσμα, επηρεάζεται η πυκνότητα και το σχήμα των πόρων του υλικού. Ένα παράδειγμα, είναι το κράμα χαλκού – βολφραμίου, κατασκευασμένο με κονιομεταλλουργία, όπου τα σωματίδια του βολφραμίου κατανέμονται ομοιογενώς σε ένα υψηλής αγωγιμότητας πλέγμα χαλκού. Τέτοιου τύπου ηλεκτρόδια, παρασκευάζονται τα

τελευταία χρόνια, για την τροποποίηση επιφανειών που έχουν υποστεί ηλεκτροδιάβρωση, βελτιώνοντας την αντίστασή τους σε σκουριά και την αντοχή τους στη φθορά.

Οι Samule και Philip το 1997 [26], συνέκριναν την απόδοση ηλεκτροδίων κονιομεταλλουργίας με συμβατικά ηλεκτρόδια σε κανονική κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης, χρησιμοποιώντας ορθή πολικότητα και σε συνθήκες που δεν ευνοούν την τροποποίηση της επιφάνειας. Τα ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας αποδείχθηκαν περισσότερο ευαίσθητα στις αλλαγές της διάρκειας και της έντασης του παλμού με διαφορετική επίδραση στις παραμέτρους εξόδου όπως ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού, σε σχέση με τα συμβατικά ηλεκτρόδια. Με αυτή τη μελέτη πιστοποιήθηκε η καταλληλότητα των ηλεκτροδίων κονιομεταλλουργίας για ηλεκτροδιάβρωση και η δυνατότητα ελέγχου των ιδιοτήτων τους μέσω της διαδικασίας παραγωγής τους.

Η συμπύκνωση της μάζας τέτοιων ηλεκτροδίων μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη νικελίου. Ενώ σύμφωνα με τον Lin (2001) [27], υπό ορισμένες συνθήκες κατεργασίας τα ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας μπορούν να προκαλέσουν προσθήκη αντί για αφαίρεση υλικού στο τεμάχιο. Αργότερα ο Wang πρότεινε την εφαρμογή αυτής της διαπίστωσης για κατεργασίες επιδιόρθωσης επιφανειών και για τη σκλήρυνση εργαλείων κοπής και καλουπιών, ενώ αποκάλεσε τη διαδικασία θωράκιση με ηλεκτροδιάβρωση (electrical discharge coating).

Κατά την ηλεκτροδιάβρωση με ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας, επιλέγεται συνήθως αρνητική πολικότητα για το εργαλείο, ενώ τα υλικά που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι: αλουμίνιο, χρώμιο, χρώμιο-νικέλιο, χαλκός-κοβάλτιο, χαλκός-μαγγάνιο, χαλκός-κασσίτερος, χαλκός-βολφράμιο, νικέλιο, νικέλιο-κοβάλτιο, νικέλιο-μαγγάνιο, νικέλιο-πυρίτιο, τιτάνιο, τιτάνιο-αλουμίνιο, τιτάνιο-νικέλιο, βολφράμιο-χρώμιο, και βολφράμιο-κοβάλτιο.

Είτε το ηλεκτρόδιο – εργαλείο είναι προϊόν κονιομεταλλουργίας, είτε αποτελείται από τα λεγόμενα συμβατικά υλικά, επηρεάζει σημαντικά τις παραμέτρους εξόδου της κατεργασίας, όπως τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού, το λόγο φθοράς του εργαλείου αλλά κυρίως την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Η επίδραση του υλικού του εργαλείου στην επιφάνεια του τεμαχίου, περιγράφεται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο που αφορά την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.

Στις περισσότερες σχετικές έρευνες που έχουν διεξαχθεί, έχει καταγραφεί επίσης μια συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους του ηλεκτροδίου εργαλείου με τη φθορά του και την παραγωγικότητα της κατεργασίας. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση που προκύπτει από τη βιβλιογραφία, σχετικά με την απόδοση της κατεργασίας, είναι ότι ο λόγος φθοράς του ηλεκτροδίου φαίνεται να μειώνεται για ηλεκτρόδια από υλικά με υψηλό σημείο βρασμού και τήξεως και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του ηλεκτροδίου, εξασφαλίζει την καλύτερη και πιο ομοιογενή κατανομή της ενέργειας των εκκενώσεων στην επιφάνεια του τεμαχίου, με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού.

3. ΔΕΙΚΤΕΣ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η επιτυχία της κατεργασίας, εξαρτάται από την επιλογή και το σωστό συνδυασμό των παραμέτρων της κατεργασίας. Για την εκτίμηση της ορθότητας της επιλογής των παραμέτρων, αλλά και σαν τελικό κριτήριο για την επιτυχία, έχει κυριαρχήσει η χρήση ορισμένων δεικτών, που ποσοτικοποιούν τα αποτελέσματα της κατεργασίας. Αυτοί οι δείκτες είναι :

- Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού ή MMR (material removal rate),
- Ο λόγος φθοράς του ηλεκτροδίου ή EWR (electrode wear ratio), και η ογκομετρική φθορά του κοπτικού ή VEW (volumetric electrode wear).
- Η τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας

Και αποτελούν ουσιαστικά τις παραμέτρους εξόδου της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση.

3.1 Ρυθμός αφαίρεσης υλικού – MRR

Πρόκειται για το ρυθμό με τον οποίο αφαιρείται όγκος υλικού από την επεξεργαζόμενη επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού εξαρτάται από πολλές από τις ιδιότητες του επεξεργαζόμενου υλικού, με κυριότερες το σημείο τήξης και τη λανθάνουσα θερμότητα. Επίσης η τιμή του επηρεάζεται από τις ιδιότητες και το σχήμα του ηλεκτροδίου – εργαλείου και γενικά από τη γεωμετρία και τις διαστάσεις των δύο ηλεκτροδίων και από τον χρόνο κατεργασίας.

Χρησιμοποιείται ως δείκτης παραγωγικότητας καθώς μεγαλύτερες τιμές αφαίρεσης υλικού από το τεμάχιο φανερώνουν μεγαλύτερη παραγωγικότητα της κατεργασίας. Ωστόσο για την επίτευξη μεγάλων τιμών του MRR, θυσιάζεται η ποιότητα και η ακεραιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας και επιβαρύνεται η φθορά που προκαλείται στο ηλεκτρόδιο.

Μετράται σε mm³/min και η πραγματική του τιμή, μπορεί να υπολογιστεί μετά το πέρας της κατεργασίας, καθώς, αφού πρόκειται για ρυθμό, ο χρόνος διάρκειας της κατεργασίας είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό του. Για το λόγο αυτό, οποιεσδήποτε ανωμαλίες προκύψουν που αποσταθεροποιούν και επιβραδύνουν την κατεργασία, μειώνουν το ρυθμό και την παραγωγικότητα. Αυτοί οι απρόβλεπτοι παράγοντες, εμφανίζονται συχνά στην πράξη και αποσταθεροποιούν την κατεργασία, μπορεί να οφείλονται σε μη ολοκληρωμένη έκπλυση των αποβλήτων, τη δημιουργία τόξου στο διάκενο, την απρόβλεπτη κίνηση των αποβλήτων εντός του διακένου, την πρόκληση βραχυκυκλώματος και την αυξομείωση της τιμής της έντασης σε σχέση με την προρρυθμισμένη τιμή.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος υπολογισμού του, προκύπτει από τη διαίρεση της απώλειας του βάρους του τεμαχίου κατά την κατεργασία, με τον χρόνο που αυτή διήρκεσε. Για ακριβέστερα αποτελέσματα, η ζύγιση γίνεται με ζυγαριές ακριβείας πριν και μετά το πέρας της διαδικασίας. Μετά την κατεργασία επίσης, το τεμάχιο ενδείκνυται να καθαρίζεται με πεπιεσμένο αέρα ώστε να απομακρύνονται απόβλητα ή υπολείμματα του διηλεκτρικού.

Η σχέση που αποδίδει τον MRR είναι η εξής [8]:

$$MMR = \frac{1000 \times w_w}{\rho_w \times T} \quad (6)$$

όπου ρ_w η πυκνότητα του τεμαχίου και T ο χρόνος διάρκειας της κατεργασίας.

Μια εναλλακτική σχέση, μπορεί να προκύψει με το γινόμενο της ενέργειας της εκκένωσης όπως παρουσιάστηκε στη σχέση (5), με τη σταθερά αφαίρεσης υλικού που χαρακτηρίζει το εκάστοτε υλικό του τεμαχίου. Αυτή η σταθερά α, είναι η αφαίρεση όγκου από το υλικό του τεμαχίου ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως η σχέση που προκύπτει είναι η εξής:

$$E_p = aV_p I_p t_{on} \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \quad (7)$$

Από την παραπάνω σχέση, είναι φανερό ότι οι παράμετροι της τάσης, της έντασης και του ενεργού χρόνου του παλμού είναι ανάλογοι του ρυθμού αφαίρεσης υλικού. Από την εξίσωση επίσης προκύπτει ότι υπό τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας, μικρότερη διάρκεια είναι προτιμότερη για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας.

Έναν ακόμη τύπο για τον υπολογισμό του ογκομετρικού ρυθμού αφαίρεσης υλικού (VRR), δηλαδή του MRR, που προκύπτει μετά από θερμική ανάλυση της κατεργασίας, προτείνει ο Kalpakjian (1997) [10]:

$$MRR = (4 \times 10^4) i T_w^{-1.23} \quad (8)$$

όπου i η ένταση του ρεύματος, και T_w το σημείο τήξης του υλικού του τεμαχίου σε βαθμούς Κελσίου. Μία άλλη μέθοδος για τη μέτρηση του MRR, είναι με τον καταμερισμό της κατεργασμένης επιφάνειας σε τομείς και η μέτρηση του βάθους της κοπής με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου με ακρίβεια κοντά στο 0.001 mm).

Ο MRR χρησιμοποιείται επίσης σαν εργαλείο πρόβλεψης της απόδοσης, στο στάδιο της προετοιμασίας της κατεργασίας. Για την πρόβλεψη του ρυθμού αφαίρεσης υλικού, έχουν αναπτυχθεί διάφορες φόρμουλες υπολογισμού, η κάθε μία από τις οποίες λαμβάνει διαφορετικές παραμέτρους της κατεργασίας σαν μεταβλητές για τον τελικό υπολογισμό. Η επιλογή των παραμέτρων και η μεθοδολογία για την επίλυση, διαμορφώνεται ανάλογα με το μοντέλο ανάλυσης του φαινομένου αφαίρεσης υλικού που υιοθετεί ο εκάστοτε ερευνητής. Για την ανάλυση του φαινομένου της αφαίρεσης υλικού έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικής προσέγγισης μοντέλα. Το μοντέλο της ήλεκτρο – μηχανικής ανάλυσης για βραχυχρόνιους παλμούς (μικρότερους από 5 ms) και το μοντέλο της ήλεκτρο – θερμικής ανάλυσης, για συνήθεις εφαρμογές ηλεκτροδιάβρωσης που περιλαμβάνουν αφαίρεση υλικού λόγω της ενέργειας πλάσματος που παράγεται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.

Οι σχέσεις για την πρόβλεψη της τιμής του MRR που έχουν προκύψει πάνω στη βάση των δύο αυτών προσεγγίσεων, έχουν όλες ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα. Ενέχουν πολύ μεγάλο ποσοστό σφάλματος. Οι πιο αξιόλογες προσπάθειες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα στον προσδιορισμό μιας σχέσης, έγιναν με τη χρήση τεχνικών όπως η διαστατική ανάλυση, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN: artificial neuron networks), τα συστήματα προσαρμοστικών δικτύων ασαφούς αλληλεπίδρασης (ANFIS: adaptive – network fuzzy interference systems) και τα δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης (RBFN: radial basis function networks). Μια μέθοδος που πέτυχε μεγάλη ακρίβεια στην αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων της, με τα πειραματικά αποτελέσματα, αναπτύχθηκε από τον Wang [28]. Η μέθοδος συνδυάζει τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και γενετικούς αλγόριθμους για να βρει μια ολοκληρωμένη λύση στο πρόβλημα της σχεδίασης και βελτιστοποίησης των κατασκευαστικών διαδικασιών. Το σφάλμα αυτού του μοντέλου, είναι 5,6% για την πρόβλεψη του MRR και 4,98% για την πρόβλεψη της τραχύτητας της επιφάνειας.

Έκτοτε μόνον οι Panda & Bhoi κατάφεραν να προβλέψουν τον MRR με μεγαλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιώντας ένα τεχνητό feed forward νευρωνικό δίκτυο στη βάση της τεχνικής back propagation των Levenberg – Marquardt [17]. Το μοντέλο αυτό, παρέχει πιο γρήγορα, ακριβέστερα αποτελέσματα, ενώ αποδίδει καλά στο στοχαστικό περιβάλλον

των πραγματικών συνθηκών της κατεργασίας, χωρίς την κατανόηση των σύνθετων φυσικών φαινομένων, που διέπουν την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση.

Από τις αλληλεπιδράσεις των παραμέτρων της κατεργασίας με τον MRR, υπάρχουν κάποιες που ισχύουν ανεξαρτήτως των υλικών των ηλεκτροδίων.

- **Αύξηση της έντασης του ρεύματος εκκένωσης:**

Η αύξηση της έντασης του ρεύματος, αυξάνει την ενέργεια της εκκένωσης που διαχέεται στην ζώνη της κατεργασίας, οδηγώντας στην παραγωγή ισχυρότερου σπινθήρα και την αύξηση της θερμοκρασίας στο επίκεντρο της κατεργασίας. Η επίδραση αυτής της μεταβολής στους μηχανισμούς αφαίρεσης υλικού, όπως η τήξη και η εξάτμιση, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απωθητικής δύναμης που ακολουθεί την έκρηξη του διηλεκτρικού και επομένως την αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού.

- **Αύξηση της διάρκειας του παλμού:**

Με την αύξηση της διάρκειας του παλμού, αρχικά παρατηρείται αύξηση και στον ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Από μία τιμή και μετά όμως, και πάντα ανάλογα και με τις εκάστοτε συνθήκες της κατεργασίας, παρατηρείται μείωση του MRR. Περισσότερη ενέργεια εκκένωσης διοχετεύεται στην περιοχή της κατεργασίας κατά τη διάρκεια κάθε μεμονωμένου παλμού. Με την χρονική επιμήκυνση του κάθε παλμού, το κανάλι πλάσματος που δημιουργείται κατά την εκκένωση, αποκτά μεγαλύτερη διάμετρο. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη μείωση της έντασης της ηλεκτρικής ενέργειας στο στοχευόμενο σημείο της κατεργαζόμενης επιφάνειας όπου συμβαίνει η εκκένωση. Αντίστροφα με πριν, οι μηχανισμοί της αφαίρεσης υλικού αποδυναμώνονται και κατ' επέκταση μειώνεται ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού [27].

- **Αύξηση της τάσης:**

Υψηλότερες τιμές της τάσης εκκένωσης, αυξάνουν την ισχύ της θερμότητας, προκαλώντας μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού και μεγαλύτερη φθορά στο ηλεκτρόδιο – εργαλείο. Επομένως αύξηση της τάσης συνοδεύεται από αύξηση του MRR και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εκχόνδρισης.

- **Αύξηση του μη ενεργού χρόνου (off – time) του κύκλου κατεργασίας:**

Με την αύξηση του μη ενεργού χρόνου κατεργασίας, παρατηρείται σημαντική μείωση της θερμότητας στην κατεργαζόμενη περιοχή, που δε συμβάλει στην αφαίρεση υλικού. Έτσι ο MRR μειώνεται με την αύξηση του off – time. Μείωση του μη ενεργού χρόνου σε συνδυασμό με αύξηση του ενεργού και άρα των ενεργών παλμών ανά λεπτό, αυξάνει το ρυθμό αφαίρεσης υλικού.

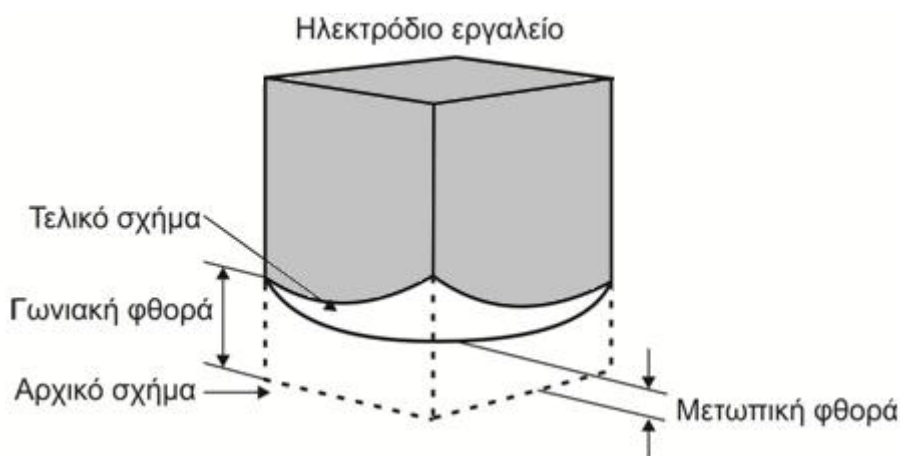
Αναφορικά με το ρυθμό αφαίρεσης υλικού πρέπει να σημειωθεί, ότι σε κάθε περίπτωση, αυξημένες τιμές του MRR έχουν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη μεν παραγωγικότητα, αλλά ταυτόχρονα μειώνουν σημαντικά την ποιότητα της επιφάνειας και για το λόγο αυτό μεγάλοι δείκτες αφαίρεσης υλικού επιδιώκονται στις εργασίες εκχόνδρισης ενώ αποφεύγονται για τις εργασίες φινιρίσματος. Επίσης λόγω των ιδιοτήτων των υλικών, μεγαλύτεροι ρυθμοί αφαίρεσης υλικού, έχουν παρατηρηθεί στις κατεργασίες όπου το υλικό του ηλεκτροδίου είναι γραφίτης και μικρότεροι για ηλεκτρόδια από χαλκό ή αλουμίνιο. Η φθορά του ηλεκτροδίου όπως είναι αναμενόμενο, είναι επίσης μεγαλύτερη για μεγάλους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού.

3.2 Λόγος φθοράς του εργαλείου – EWR

Το δεύτερο κριτήριο για την επιτυχία της ηλεκτροδιάβρωσης, είναι η μικρή φθορά του ηλεκτροδίου – εργαλείου κατά την κατεργασία. Ο λόγος φθοράς του κοπτικού αποκαλείται για συντομία EWR (electrode wear ratio), και αποτελεί το δείκτη που αντικατοπτρίζει το ποσοστό της φθοράς που υφίσταται το ηλεκτρόδιο, καθώς σε κάθε εκκένωση, αφαιρείται υλικό και από τα δύο ηλεκτρόδια με τον ίδιο μηχανισμό αλλά σε μικρότερο ποσοστό.

Η φθορά του κοπτικού είναι σημαντικό να περιορίζεται σε χαμηλά ποσοστά για δύο βασικούς λόγους. Αρχικά το κόστος της παραγωγής αυξάνεται με την αναγκαστική αντικατάσταση του ηλεκτροδίου, όταν πάψει η λειτουργικότητά του. Το κόστος αυτό μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα, αφού η παραγωγή των ηλεκτροδίων είναι δύσκολη για συγκεκριμένα υλικά, και επιπροσθέτως λόγω του εξεζητημένου και περίπλοκου σχήματος που συχνά απαιτείται στην ηλεκτροδιάβρωση. Ο σημαντικότερος λόγος όμως για τον οποίο το κοπτικό δεν πρέπει να φθείρεται σύντομα, είναι ότι οποιαδήποτε αλλαγή στη μορφή του, έχει άμεσο αντίκτυπο στη μορφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Κατ' επέκταση η ακρίβεια των διαστάσεων του τεμαχίου και η τραχύτητα της επιφάνειάς του, μπορούν να ζημιώσουν ανεπανόρθωτα την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Το ηλεκτρόδιο φθείρεται σε δύο τομείς της επιφάνειάς του κυρίως όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Αρχικά στη μετωπική επιφάνεια, το ακραίο, προεξέχον τμήμα δηλαδή του ηλεκτροδίου, που στη συμβατική ηλεκτροδιάβρωση, προσεγγίζει πρώτο την επιφάνεια του τεμαχίου. Η φθορά στα σημεία αυτά λέγεται μετωπική φθορά. Δεύτερον, στις ακμές της επιφάνειας-αιχμής με τις κατακόρυφες πλευρές του, που σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται γωνιακή φθορά.



Σχήμα 3.1: Οι φθορές που υφίσταται το ηλεκτρόδιο – εργαλείο.

Η φθορά της μετωπικής επιφάνειας, αφορά το ποσοστό του υλικού που αφαιρείται από το ηλεκτρόδιο – εργαλείο καθώς προοδεύει η διαδικασία των εκκενώσεων. Η γωνιακή φθορά αφορά την αλλοίωση των συνήθως ορθών γωνιών που σχηματίζει η μετωπική επιφάνεια με τις κατακόρυφες επιφάνειες του εργαλείου, προσδίδοντας καμπυλωτό σχήμα στις ακμές που αρχικά ήταν αυστηρά κάθετες. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η γωνιακή φθορά είναι σχεδόν πάντα, σημαντικά μεγαλύτερη, καθώς οι ακμές εκτίθενται σε πολλαπλές εκκενώσεις από διάφορες κατευθύνσεις ταυτόχρονα.

Ο υπολογισμός της ολικής φθοράς του κοπτικού, μπορεί να προκύψει από διάφορες μεθόδους. Στις περιπτώσεις όπου μελετάται η ηλεκτροδιάβρωση από έναν μόνο παλμό, διαδικασία που απαντάται ευρέως σε διάφορες πειραματικές μεθοδολογίες, η μέτρηση μπορεί να γίνει με εναλλακτική μέθοδο, μετρώντας με ειδικά όργανα το βάθος και τη

διάμετρο του κρατήρα που προκύπτει μετά την εκκένωση. Ο πιο απλός υπολογισμός γίνεται με τη μέτρηση με ζυγαριά ακρίβεια του βάρους του ηλεκτροδίου πριν και μετά την κατεργασία. Δηλαδή γίνεται αρχικά μέτρηση της ογκομετρικής φθοράς του κοπτικού (VEW: volumetric electrode wear) από τον τύπο:

$$VEW = \frac{1000 \times w_e}{\rho_e \times T} \quad (9)$$

Όπου w_e η απώλεια σε βάρος του ηλεκτροδίου κατά την κατεργασία και ρ_e η πυκνότητα του. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο λόγος φθοράς του εργαλείου, σαν ποσοστό, από τον τύπο:

$$EWR = 100 \times \frac{VEW}{MRR} \quad (10)$$

Μια εναλλακτική σχέση που αποδίδει το ρυθμό φθοράς του εργαλείου, περιγράφηκε από τον Kalpakjian (1997) και είναι η εξής :

$$Wt = (11 \times 10^3) \times i \times T_t^{-2.38} \quad (11)$$

όπου, i η ένταση του ρεύματος της ηλεκτροδιάβρωσης και T_t το σημείο τήξης του εργαλείου.

Ο λόγος φθοράς του εργαλείου επηρεάζεται εξίσου σημαντικά από την επιλογή των λοιπών παραμέτρων της διαδικασίας. Κάποιες αποδεδειγμένες αλληλεπιδράσεις που τον χαρακτηρίζουν είναι :

- **Η αύξηση της έντασης του ρεύματος.**
Με σταθερή την τάση εκκένωσης, η αύξηση του ρεύματος της εκκένωσης, προκαλεί αύξηση στη φθορά του εργαλείου. Αυτό συμβαίνει καθώς προσδίδοντας περισσότερη ενέργεια και άρα θερμότητα στα δύο ηλεκτρόδια, το τηγμένο μέταλλο που θα αφαιρεθεί και από τα δύο θα είναι περισσότερο.
- **Η διάρκεια των παλμών.**
Όσο η διάρκεια των παλμών περιορίζεται τόσο περισσότερο αυξάνεται η φθορά του εργαλείου. Αντίστροφως, μεγαλύτεροι σε διάρκεια παλμοί , έχει παρατηρηθεί στην πράξη, ότι μειώνουν τη φθορά του ηλεκτροδίου [4].
- **Ο χρόνος διαλλείματος.**
Ένας άλλος γενικός κανόνας, είναι ότι με τη μείωση του χρόνου διαλλείματος (pulse interval) δηλαδή του νεκρού χρόνου ανάμεσα σε δύο παλμούς, μειώνεται ο λόγος φθοράς του εργαλείου.
- **Η τυρβώδης ροή του διηλεκτρικού.**
Όταν η ροή του διηλεκτρικού στο διάκενο είναι πολύ τυρβώδης, τότε η φθορά του κοπτικού αυξάνεται. Αντίστροφα, η εφαρμογή παλμικής εισροής με πίεση του διηλεκτρικού, έχει επιτρέψει τη μείωση της φθοράς που οφείλεται στην κυκλοφορία του διηλεκτρικού.
- **Η σύσταση των αποβλίπτων.**
Εάν τα απόβλιπτα συνίστανται σε μεγάλο ποσοστό από διαβρωτικά σωματίδια, τότε προκαλείται εκτεταμένη φθορά του εργαλείου κατά την έκπλυση.

- **Το υλικό του ηλεκτροδίου.**

Έχει αποδειχθεί ότι ο λόγος φθοράς του εργαλείου μειώνεται όταν πρόκειται για υλικά με υψηλό σημείο βρασμού, υψηλό σημείο τήξης και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Τα υλικά που παρουσιάζουν τους μικρότερους λόγους φθοράς όταν χρησιμοποιούνται σαν ηλεκτρόδια πέραν του γραφίτη, είναι ο χαλκός (0,023), το αλουμίνιο (0,026) και ο ορείχαλκος (2,187).

Η φθορά του κοπτικού είναι εξίσου σημαντική με το ρυθμό αφαίρεσης υλικού για την απόδοση της ηλεκτροδιάβρωσης. Σε αυτό το πλαίσιο, πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη εφαρμογών που να εκμεταλλεύονται τόσο τα πλεονεκτήματα, όσο και τα μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν την φθορά του εργαλείου.

Μεταξύ άλλων, οι Marafona και Wykes [29], εισήγαγαν ένα, ανθεκτικό στη φθορά, στρώμα άνθρακα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, προσαρμόζοντας τις ρυθμίσεις τις κατεργασίας αναλόγως. Το λεπτό αυτό στρώμα άνθρακα, βελτίωσε σημαντικά τη φθορά του κοπτικού, αφήνοντας σχετικά ανεπηρέαστο το ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Ο Bleys αρχικά εκτίμησε τη μείωση του μήκους του ηλεκτροδίου, βασιζόμενος σε ανάλυση των παλμών. Στη συνέχεια περιόρισε τη φθορά του εργαλείου, ελέγχοντας την κίνηση βύθισης του ηλεκτροδίου κατά την κατεργασία σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, κάποιες άλλες μέθοδοι περιλαμβάνουν αντίστροφη προσομοίωση της κατεργασίας, διατηρώντας το ηλεκτρόδιο στο επιθυμητό σχήμα σύμφωνα με τις διαστάσεις του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

3.3 Ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας

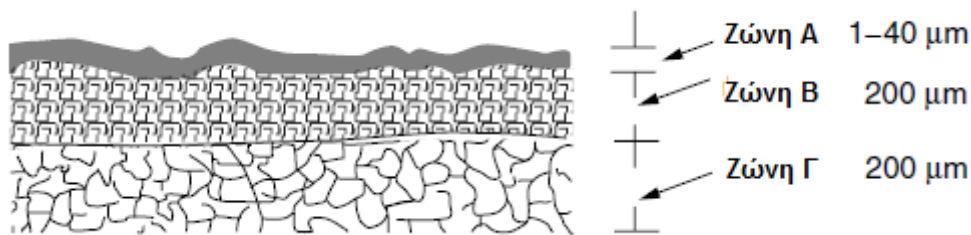
Το τρίτο βασικό κριτήριο για την επιτυχία της ηλεκτροδιάβρωσης, είναι η ακεραιότητα και ο περιορισμός της τραχύτητας της επιφάνειας, σε συνδυασμό με την ακρίβεια των επιθυμητών διαστάσεων του τεμαχίου, κατά το πέρας της κατεργασίας.

Με την ηλεκτροδιάβρωση μπορούν να πραγματοποιηθούν κατεργασίες εκχόνδρισης αλλά και φινιρίσματος, με πολύ καλά αποτελέσματα, αρκεί να γίνει η σωστή επιλογή των παραμέτρων και ο σωστός συνδυασμός υλικών των ηλεκτροδίων. Ο ηλεκτροθερμικός χαρακτήρας της διαδικασίας και ο σύνθετος μηχανισμός αφαίρεσης υλικού όμως, επηρεάζει πολυεπίπεδα την ποιότητα της επιφάνειας.

Η ακεραιότητα της επιφάνειας των προϊόντων της ηλεκτροδιάβρωσης, έχει μεγάλη σημασία για τις βιομηχανικές της εφαρμογές και αποτελεί διαρκώς τομέα μεγάλου ενδιαφέροντος για τους ερευνητές. Επηρεάζει σοβαρά την απόδοση, τη διάρκεια ζωής και την αξιοπιστία των προϊόντων και ουσιαστικά περιλαμβάνει δύο πτυχές, την μεταλλουργία και την τοπογραφία της επιφάνειας. Πραγματεύεται τις πιθανές μετατροπές στα επιφανειακά στρώματα της επιφάνειας κατά το πέρας της κατεργασίας.

Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την εκκένωση μπορεί να φτάσει ακόμα και τους 12000 °C. Κατά συνέπεια, η επιφάνεια του τεμαχίου, υπόκειται σε ορισμένες μεταλλουργικές μετατροπές. Μια μικροσκοπική ανάλυση της κατεργασμένης επιφάνειας, αποκαλύπτει την παρουσία τριών διαφορετικών στρωμάτων όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2:

- Το επιμεταλλωμένο στρώμα (recast layer)
- Το στρώμα της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και
- Το ανοπτημένο στρώμα (converted/annealed layer)



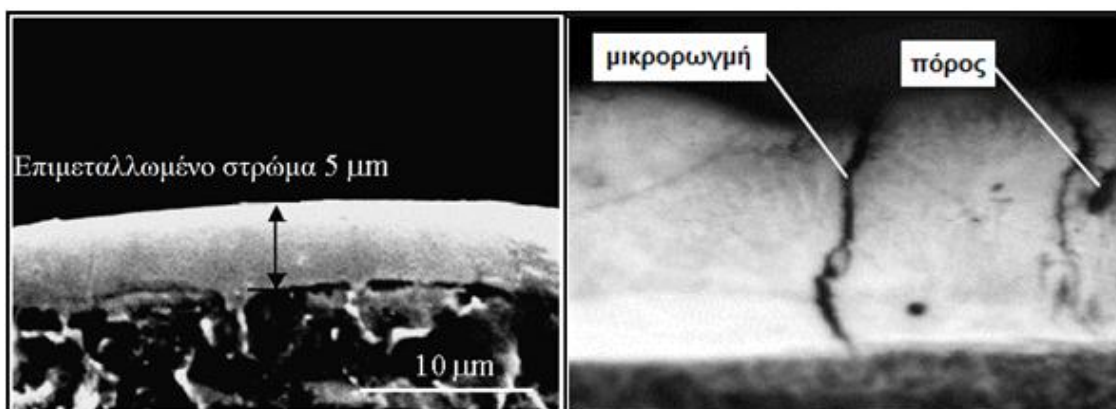
Σχήμα 3.2: Τα τρία στρώματα που σχηματίζονται στην επιφάνεια του τεμαχίου [30].

Επιμεταλλωμένο στρώμα :

Το φαινόμενο της μετατροπής της επιφάνειας κατά την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση, παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1965. Οι Barash και Kahlon βρήκαν ότι όταν μαλακός χάλυβας διαβρώνεται σε υγρή παραφίνη χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο από χαλκό, το τεμάχιο θωρακίζεται με ένα πολύ σκληρό στρώμα το οποίο είναι δύσκολο να αφαιρεθεί με κατεργασίες κοπής ή με λιμάρισμα. Το λευκό αυτό στρώμα, ήταν ένα καρβίδιο από σύνθετο κράμα το οποίο μπορούσε να διατηρήσει τη σκληρότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό αποδόθηκε στην ανθρακοποίηση του στρώματος, από το ανθρακούχο διηλεκτρικό και την ψύξη που ακολουθεί. Η μεταφορά υλικού από το εργαλείο στο τεμάχιο συνδέθηκε με τις ηλεκτρικές παραμέτρους του κυκλώματος.

Σήμερα είναι πλέον γνωστό ότι, όταν το τηγμένο υλικό που αφαιρείται από το τεμάχιο δεν απομακρύνεται αρκετά γρήγορα, επαναστερεοποιείται και σκληραίνει εξ αιτίας της ψυκτικής ιδιότητας τους διηλεκτρικού και κατόπιν προσκολλάται στην κατεργασμένη επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται το πρώτο λεπτό στρώμα με βάθος περίπου 2.5 έως 50 μm και αποκαλείται στρώμα επιμετάλλωσης. Λόγω της ασταθούς συγκεντρωμένης ενέργειας στην περιοχή της εκκένωσης, το πάχος του επιμεταλλωμένου στρώματος αυξάνεται με την αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας της εκκένωσης.

Το στρώμα αυτό είναι εξαιρετικά σκληρό, πορώδες και ενδέχεται να περιέχει μικρορωγμές σαν αυτές που απεικονίζονται στην εικόνα 3.1. Σαρώνοντάς το με ηλεκτρονικά μικροσκόπια, παρουσιάζεται λευκό και εναλλακτικά αποκαλείται λευκό στρώμα. Αυτή η ετερογενής λευκή ζώνη, δημιουργείται από μίγμα στερεών διαλυμάτων πλούσιων σε άνθρακα. Περιέχει χάλυβα και ένα μέρος του αποσυντεθημένων υδρογονανθράκων που εμπεριέχονταν στο διηλεκτρικό.



Εικόνα 3.1: Φωτογραφίες του λευκού επιμεταλλωμένο στρώματος στην επιφάνεια ενός τεμαχίου [31].

Στρώμα θερμικά επηρεασμένης ζώνης :

Κάτω από το πρώτο στρώμα, διαμορφώνεται μια θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Ένας εμπειρικός κανόνας που έχει προκύψει σχετικά με το πάχος της ΘΕΖ, είναι ότι η τιμή του πάχους της, που συνήθως είναι κοντά στα 25 μm , είναι ίση με το δεκαπλάσιο της επιφανειακής τραχύτητας R_a . Ο κύκλος ταχείας εναλλαγής της θερμοκρασίας από θερμό σε ψυχρό και αντίστροφα, σε συνδυασμό με το τηγμένο μέταλλο που διαχέεται κατά την κατεργασία, είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία της ζώνης αυτής. Η θερμοκρασία της περιοχής φτάνει σε πολύ υψηλές τιμές και η θέρμανση διαρκεί αρκετά. Κατόπιν η θερμοκρασία πέφτει απότομα και το μέταλλο ψύχεται και υπόκειται ουσιαστικά σε βαφή.

Ενίοτε δημιουργούνται αστοχίες και οξείες ρωγμές στα όρια των κόκκων. Σαν αποτέλεσμα η αντοχή σε κόπωση του μετάλλου μειώνεται σημαντικά. Αν το επιμεταλλωμένο στρώμα αφαιρεθεί, τότε η αντοχή του τεμαχίου σε κόπωση αυξάνεται κατά μόλις 5%, ενώ αν αφαιρεθούν και τα δύο πρώτα στρώματα, η αντοχή σε κόπωση αποκαθίσταται στο 95% της αρχικής της τιμής.

Στρώμα ανοπτημένης δομής :

Κάτω από τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, βρίσκεται το τελευταίο στρώμα που έχει υποστεί μεταλλουργική μετατροπή και συγκεκριμένα ανόπτηση. Παρατηρείται λοιπόν, μια αλλαγή στην δομή των κόκκων σε σχέση με την αρχική δομή. Το βάθος αυτής της ζώνης μπορεί να φτάσει μέχρι και στα 400 μm από την επιφάνεια του τεμαχίου. Από πρόσφατες έρευνες, έχει αναφερθεί ότι το πάχος του επιμεταλλωμένου στρώματος του τεμαχίου και το επίπεδο της θερμικής ζημιάς που έχει υποστεί το ηλεκτρόδιο, μπορούν να υπολογιστούν, αν αναλύσει κανείς τη ανάπτυξη του καναλιού πλάσματος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Το φαινόμενο της μετάλλαξης, ή τροποποίησης της επιφάνειας και της διαμόρφωσης των τριών προαναφερθέντων στρωμάτων, που παρατηρήθηκε αρχικά από τους Barash και Kahlon, αποτέλεσε και αποτελεί εστία ενδιαφέροντος για πολλούς, από το 1965 και έπειτα. Οι Parasnis και Venkatesh το 1972 [33], παρατήρησαν υψηλή σκληρότητα της επιφάνειας, εξαιρετική θερμική σταθερότητα και μεγαλύτερη αντίσταση στη φθορά του λευκού στρώματος, καθώς και την αλλαγή της σύστασής του. Παρατήρησαν ακόμη ότι αποτελούνταν από καρβίδιο σύνθετου κράματος που διατηρούσε τη σκληρότητά του σε ανεβασμένες θερμοκρασίες. Παρατήρησαν επίσης τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη που υπόκειται του λευκού στρώματος. Οι πρώτες σχετικές έρευνες που διεξήχθησαν με τη χρήση ηλεκτροδίων από συμβατικά υλικά, παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι Basu και Jeswani το 1976 [34], διεξήγαγαν αναλύσεις με ηλεκτρονικό μικρο-αναλυτή (electron microprobe analyzer), για την επικάλυψη και την ανάμειξη υλικού του εργαλείου σε τεμάχια από μαλακό χάλυβα, ταχυχάλυβα και χάλυβα υψηλού άνθρακα. Χρησιμοποίησαν χάλκινο και μπρούτζινο εργαλείο με απιονισμένο νερό και κηροζίνη σαν διηλεκτρικό. Παρατήρησαν ότι για υψηλότερη ενέργεια κατεργασίας, το υλικό του ηλεκτροδίου επικάθονταν λιγότερο στο τεμάχιο, διαχέονταν όμως σε μεγαλύτερο βάθος. Στην περίπτωση του ταχυχάλυβα παρατηρήθηκε η καλύτερη επικάλυψη και στο μαλακό χάλυβα, η χειρότερη. Το απιονισμένο νερό, με υψηλή ενέργεια παλμού, απέδωσε λιγότερη επικάλυψη και μικρότερο βάθος διάχυσης σε σχέση με την κηροζίνη. Φάνηκε επίσης ότι η μέγιστη ένταση του παλμού, βοηθά περισσότερο την επικάλυψη, από ότι το υλικό ή το διηλεκτρικό. Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν την ίδια χρονιά, οι Roethel και Garbajs [35], οι οποίοι κατέληξαν επίσης στο σημαντικό ρόλο των συνθηκών που επικρατούν στο διάκενο, για τη χημική δομή και τις ιδιότητες του επαναστερεοποιημένου τήγματος.

Τα χαρακτηριστικά της κατεργασμένης επιφάνειας, ήταν το αντικείμενο της μελέτης του Lee [36], που προσπάθησε να ποσοτικοποιήσει το βάθος του λευκού στρώματος σε αναλογία με τις παραμέτρους της κατεργασίας και την επιφανειακή τραχύτητα μετά το πέρας αυτής. Βρέθηκε ότι το λευκό στρώμα σχετίζεται με την ενέργεια παλμού, ενώ είναι ανεξάρτητο του υλικού του εργαλείου, για το ίδιο διηλεκτρικό και με σταθερές συνθήκες

έκπλυσης. Οι Kunieda και Yoshida [37], κατέληξαν ότι στην περίπτωση της ηλεκτροδιάβρωσης σε υγρό διηλεκτρικό, υπάρχει μεγαλύτερη φθορά του εργαλείου και μικρότερος ρυθμός αφαίρεσης υλικού, όταν η πολικότητα του εργαλείου, είναι αρνητική. Έτσι ευνοείται η μεταφορά υλικού από το εργαλείο στο τεμάχιο.

Οι Soni και Chakraverti [38] σε έρευνά τους το 1996, χρησιμοποίησαν περιστροφή του εργαλείου μελετώντας την επίδραση της εναλλαγής των τιμών των παραμέτρων στην κραματοποίηση του εργαλείου και στην επιφάνεια του τεμαχίου. Τα τεμάχια αποτελούνταν από υψηλού άνθρακα και χρωμίου χυτοχάλυβες και η μελέτη επικεντρώθηκε στη σκληρότητα σε μικροσκοπικό επίπεδο, στο βάθος του επιμεταλλωμένου στρώματος και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Παρατηρήθηκε σημαντική αλλαγή στη χημική σύνθεση της κατεργασμένης επιφάνειας εξαιτίας της επικάλυψης υλικού του εργαλείου στο τεμάχιο. Για τους Tsukahara και Sone, ο στόχος ήταν η εκμετάλλευση του φαινομένου για τη δημιουργία θωράκισης τεμαχίων από τιτάνιο. Εφαρμόζοντας χαμηλής ενέργειας παλμούς για μικρή διάρκεια και με αρνητική πολικότητα στο εργαλείο, κατάφεραν να δημιουργήσουν ένα άθραυστο στρώμα από καρβίδια τιτανίου. Η κατεργασμένη επιφάνεια παρουσίασε βελτίωση στη σκληρότητα, στις τριβολογικές της ιδιότητες και αυξημένη αντίσταση σε σκουριά [32].

Οι Marafona και Wykes [39], πραγματοποίησαν παραμετρική βελτιστοποίηση της διαδικασίας χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο – εργαλείο από κράμα χαλκού – βολφραμίου με κανονική πολικότητα σε χαλύβδινα τεμάχια υψηλού άνθρακα. Ανακάλυψαν ότι ένα μαύρο στρώμα άνθρακα επικάλυψε στην επιφάνεια του εργαλείου όταν εφάρμοσαν χαμηλής έντασης ρεύμα σε παλμούς μεγάλης διάρκειας. Η παρουσία του στρώματος αυτού, απέτρεπε την περεταίρω φθορά του εργαλείου και εφαρμόζοντας υψηλότερης έντασης ρεύμα, μπορούσαν να αυξήσουν το ρυθμό αφαίρεσης υλικού χωρίς επιπλέον αύξηση στη φθορά του εργαλείου. Πρόσθετες αναλύσεις με ηλεκτρονικούς μικροαναλυτές, έδειξαν ότι το στρώμα αποτελούνταν από άνθρακα σε μεγάλο ποσοστό καθώς και χαλύβδινα στοιχεία όπως σίδηρο και χρώμιο. Υπέθεσαν ότι ο άνθρακας προήλθε από το διηλεκτρικό μέσο.

Ο Mohri την ίδια χρονιά, προέβη σε μια συγκριτική ανάλυση του αντίκτυπου της αλλαγής του υλικού του ηλεκτροδίου κατά τη διαδικασία προσαύξεσης υλικού σε κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος. Χρησιμοποίησε σύρματα βολφραμίου, χαλκού και μπρούτζου με διάμετρο 0.1 mm σαν ηλεκτρόδια – εργαλεία, σε τεμάχια χαλύβδινου *υλικού. Υπό τις ίδιες συνθήκες, ο χάλυβας ήταν αυτός που επικάλυψε στην επιφάνεια του τεμαχίου καθώς το αυτό κατεργαζόταν με χάλκινα και μπρούτζινα ηλεκτρόδια. Μια συνδυασμένη κατεργασία με τη χρήση ηλεκτροδιάβρωσης και λείανσης με τη χρήση σφαιρών, χρησιμοποιήθηκε για την τροποποίηση επιφανειών από κράμα αλουμινίου – ψευδαργύρου – μαγγανίου από τον Yan το 2002. Χρησιμοποιήθηκε χάλκινο εργαλείο και σφαίρες από διοξείδιο του ζirkονίου. Βρέθηκε ότι η αρνητική πολικότητα στο εργαλείο, προσδίδει σκληρότητα στην επιφάνεια. Με αυτή τη συνδυασμένη μέθοδο, κατέστη δυνατή η αφαίρεση των μικρών πόρων και σπασισμάτων από την κατεργασμένη επιφάνεια. Στην ίδια μέθοδο, εφάρμοσε το 2001 ο Lin τη μέθοδο Taguchi, πετυχαίνοντας βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων για τις συνθήκες της κατεργασίας [27].

Αντίστοιχες μελέτες για την τροποποίηση των επιφανειών, πραγματοποιήθηκαν και με τη χρήση ηλεκτροδίων κονιομεταλλουργίας και τα αποτελέσματά τους παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον. Ο Moro με τους συνεργάτες του το 2001, χρησιμοποιώντας χαλύβδινα ηλεκτρόδια με προσθήκη κόνεως τιτανίου κατάφερε να βελτιώσει τη διάρκεια ζωής της παραγόμενης μήτρας από τρεις έως επτά φορές. Η συνεκτικότητα και οι τριβολογικές ιδιότητες τέτοιων επιφανειών, βρέθηκαν επίσης βελτιωμένες [40].

Το 1991 ο Gangahar χρησιμοποιώντας ορειχάλκινα ηλεκτρόδια αποτελούμενα από 90% χαλκό και 10% κασσίτερο, με αντίστροφη πολικότητα σε τεμάχια μαλακού χάλυβα, μελέτησε την κατεργασμένη επιφάνεια με ηλεκτρονικά μικροσκόπια και ανάλυση ακτίνων Χ, κατέληξε στο ότι η τοπογραφία της επιφάνειας είχε τροποποιηθεί από τη διαδικασία

[41]. Τα συστατικά παρουσιάζονταν κυρίως ως Cu_3Sn , ενώ σε μικρότερο ποσοστό ως Cu_6Sn_5 και CuSn . Το συμπέρασμα ήταν η δυνατότητα μετάλλαξης της μεταλλουργικής αλλά και της φυσικοχημικής φύσης της επιφάνειας με τις κατάλληλες αλλαγές στην ποσότητα των συστατικών του υλικού και της κόνεως. Ο Shunmugam χρησιμοποίησε προσθήκη από καρβίδια βολφραμίου που περιείχαν 40% σίδηρο, για τη βελτίωση της αντίστασης σε φθορά, εργαλείων από μαλακό χάλυβα. Με ανάλυση της διάχυσης της ενέργειας, διαπίστωσε την μεταφορά καρβιδίων βολφραμίου στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Στην επιφάνεια επίσης είχε επικαθίσει σίδηρος με τη μορφή ανθρακικού σιδήρου FeC σε διάφορες φάσεις. Τελικώς αναφέρθηκε αύξηση κατά 25-60% στην διαβρωτική φθορά της επιφάνειας.

Τροποποιήσεις στην επιφάνεια τεμαχίων χάλυβα και αλουμινίου, με τη χρήση ηλεκτροδίων από χαλκό, αλουμίνιο, καρβίδια βολφραμίου και τιτάνιο, με διηλεκτρικό λάδι υδρογονανθράκων, πραγματοποίησε ο Mohri το 1993 [42]. Τα χαρακτηριστικά της κατεργασμένης επιφάνειας άλλαξαν σημαντικά καθώς παρατηρήθηκε ότι υλικό του εργαλείου είχε επικαθίσει στο επιφανειακό στρώμα του τεμαχίου. Σημειώνεται ότι η επιφάνεια είχε λιγότερες ρωγμές και μεγαλύτερη αντίσταση στη σκουριά και τη φθορά. Μια ακόμα έρευνα πάνω στην τροποποίηση επιφανειών αλουμινίου έγινε από τον Tsukenawa, ο οποίος χρησιμοποίησε ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας από 64% τιτάνιο και 36% αλουμίνιο, καταφέροντας να επιτύχει δένδριτική στερεοποίηση καρβιδίων τιτανίου στην κατεργασμένη επιφάνεια. Σαν διηλεκτρικό μέσο επιλέχθηκε κηροζίνη και εφαρμόστηκε αρνητική πολικότητα στο εργαλείο. Με την αύξηση του πλάτους του παλμού, σημειώθηκε αύξηση στη διάμετρο και στο βάθος των κρατήρων στο κραματοποιημένο στρώμα. Από τη μελέτη εξήχθη το συμπέρασμα ότι η δύναμη συμπίεσης κατά τη μορφοποίηση των ηλεκτροδίων δεν επηρεάζει την μεταφορά υλικού από το εργαλείο στην επιφάνεια του τεμαχίου.

Ο Kruth πέτυχε την εναπόθεση αλουμινίου σε χάλυβα και καρβιδίων τιτανίου σε αλουμίνιο, χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια από αλουμίνιο και από πρόσμιξη τιτανίου – αλουμινίου αντίστοιχα, με τη χρήση μιας μηχανής ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης [43]. Το εγχείρημα στάθηκε δυνατό, με τη χρήση πορωδών ηλεκτροδίων – εργαλείων με αρνητική πολικότητα, που ευνοούσαν την υψηλή φθορά του εργαλείου. Σε μία συγκριτική μελέτη πάνω στις στην πολικότητα του ηλεκτροδίου, που διεξήχθη στο Ε.Μ.Π., πραγματοποιήθηκε κατεργασία μαλακού χάλυβα με τη χρήση στυλίσκων από πυροσυσσωμάτωση σιδήρου με καρβίδιο βολφραμίου σε περιεκτικότητες 70% και 30% αντίστοιχα. Στο πείραμα δοκιμάστηκε κανονική και αντίστροφη πολικότητα. Η κατεργασμένες επιφάνειες μελετήθηκαν με οπτική μεταλλογραφία, ηλεκτρονικά μικροσκόπια και περίθλαση ακτίνων Χ, μετρήσεις τραχύτητας και δοκιμές μικροσκληρότητας. Διαπιστώθηκε ότι ανεξαρτήτως της εκάστοτε ενέργειας παλμού και πολικότητας, το λευκό στρώμα ήταν παρόν στην επιφάνεια του τεμαχίου και περιείχε ζώνες πλούσιες σε βολφράμιο. Στις ζώνες αυτές, όταν χρησιμοποιούνταν αρνητική πολικότητα και υψηλής ενέργειας παλμοί, φάνηκε ότι δημιουργούνταν ρωγμές και επιφανειακά ελαττώματα.

Μια στατιστική ανάλυση του φαινομένου, επιχειρήθηκε από τον Simao το 2003, χρησιμοποιώντας κλασματικό παραμετρικό σχεδιασμό Taguchi. Τροποποίησε χαλύβδινες επιφάνειες με ηλεκτρόδιο κονιομεταλλουργίας από καρβίδια βολφραμίου και κοβάλτιο και προσδιόρισε την επίδραση των κυρίαρχων παραμέτρων την κατεργασίας [44]. Το κραματοποιημένο - τροποποιημένο στρώμα παρουσίασε σχετικά λίγες ρωγμές, μέσο πάχος στα 30 μm και αυξημένη επιφανειακή σκληρότητα στα 1319 HK από 640 HK. Η τάση ανοικτού κυκλώματος φάνηκε να μην έχει ιδιαίτερη επίδραση στη μικροσκληρότητα της επιφάνειας του τεμαχίου.

Ο Patowari [45] με την ίδια πειραματική διάταξη κατεργάστηκε χάλυβα χαμηλού άνθρακα με ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας από καρβίδια βολφραμίου και χαλκό, με τα δύο υλικά να είναι παρόντα στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η επιμετάλλωση πραγματοποιήθηκε σε μόλις τρία λεπτά κατεργασίας και οι σημαντικοί παράγοντες καταγράφηκαν. Η ακόλουθη

ανάλυση της επιφάνειας κατέδειξε κάποιες μικρορωγμές και σημαντική αύξηση στη σκληρότητα από 200 HV σε 1200 HV. Το 2003 ο Tsai, που κατάφερε επίσης να μεταφέρει σωματίδια χαλκού και χρωμίου από ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από ανοπτημένο κράμα χαλκού – χρωμίου, με αρνητική πολικότητα στο εργαλείο [46].

Το μεγάλο πλήθος παρόμοιων μελετών που διεξάγονται πάνω στο θέμα της τροποποίησης ή μετάλλαξης των επιφανειών με τη χρήση ηλεκτροδιάβρωσης και τα χρήσιμα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από αυτή τη διαδικασία, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ηλεκτροδιάβρωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά σε εφαρμογές τέτοιου τύπου. Επιπροσθέτως, η χρήση ηλεκτροδίων κονιομεταλλουργίας, προσφέρει μια ασφαλή μέθοδο επιλεκτικής κραματοποίησης της κατεργασμένης επιφάνειας. Ωστόσο σαν διαδικασία ενέχει ακόμα αρκετές παραμέτρους που δεν έχουν γίνει επαρκώς κατανοητές και κατ' επέκταση απαιτείται σημαντική προσπάθεια από τους ερευνητές, προς αυτή την κατεύθυνση.

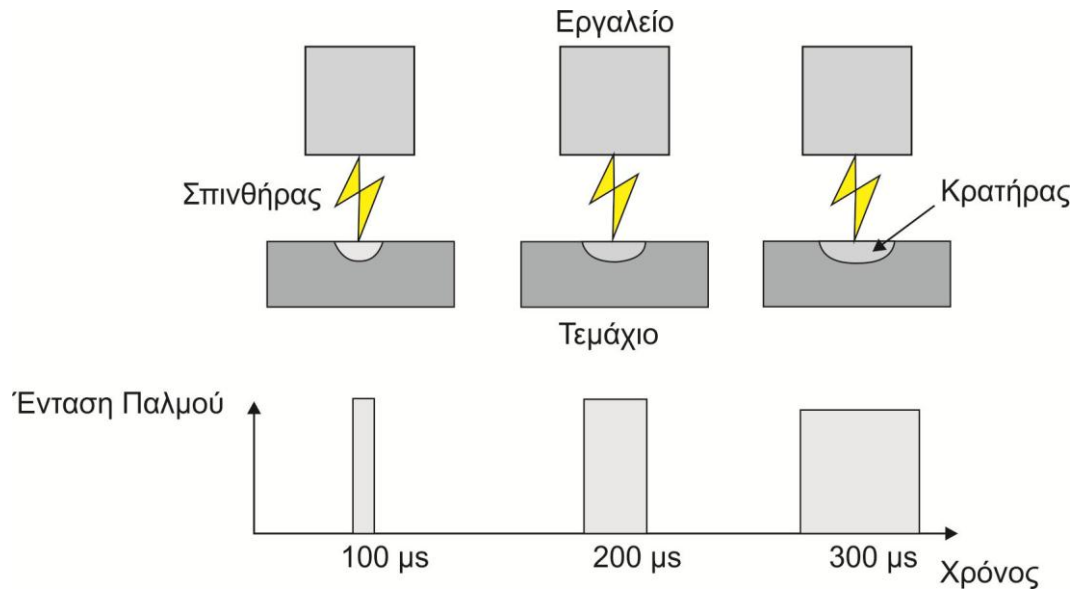
Το κομμάτι της τοπογραφίας, περιλαμβάνει ουσιαστικά τη μορφολογία της επιφάνειας του τεμαχίου. Η επιφάνεια που παράγεται από την ηλεκτροδιάβρωση, συνίσταται από ένα σημαντικό αριθμό κρατήρων που σχηματίζονται από την ενέργεια εκκένωσης. Λόγω των κρατήρων η τελική μορφή της επιφάνειας παρουσιάζει σε μικροσκοπικό επίπεδο, όρη και κοιλάδες. Όσο μεγαλύτερη ανωμαλία χαρακτηρίζει την επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη τραχύτητα παρουσιάζει.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της τραχύτητας (R_a) του τεμαχίου. Ο αριθμητικός υπολογισμός, που επιλέγεται συχνότερα, περιλαμβάνει τη μέτρηση με κατάλληλα όργανα ακριβείας, του βάθους των κοιλάδων και του ύψους των όρεων κατά απόλυτη τιμή. Έχει υπολογιστεί ότι το μέγιστο πλάτος R_t μεταξύ όρους και κοιλάδας που θα υπολογιστεί, εκτιμάται ότι είναι 10 φορές η τραχύτητα R_a . Επίσης εμπειρικά, έχει βρεθεί ότι το μέγιστο βάθος της προσβεβλημένης περιοχής, είναι ίσο με 2,5 φορές τη μέση τιμή της τραχύτητας R_a . Ένας από τους πιο δημοφιλείς τύπους για τον υπολογισμό της μέσης τραχύτητας συναρτήσει της έντασης i_p (A) και της διάρκειας t_p (μs) του παλμού, είναι ο εξής [47]:

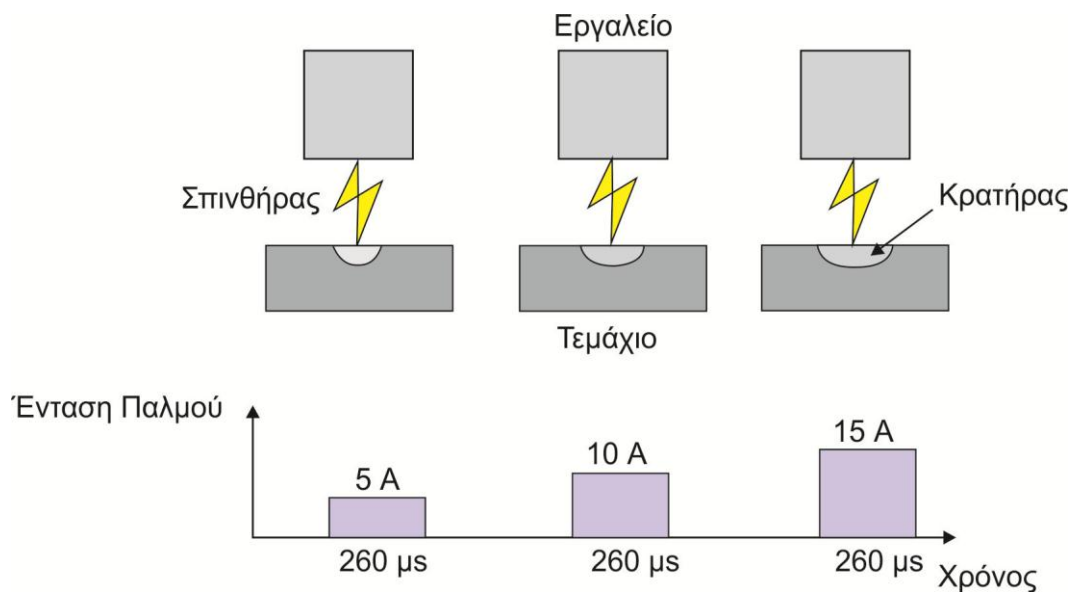
$$R_a = 0.0225 \times i_p^{0.29} \times t_p^{0.38} \quad [11]$$

Παράμετροι της κατεργασίας που επηρεάζουν την τραχύτητα του τεμαχίου :

- Η τραχύτητα της επιφάνειας, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι επηρεάζεται σημαντικότερα από τον ενεργό χρόνο της κατεργασίας (on – time). Η αύξηση της διάρκειας της εκκένωσης, μέχρι ένα σημείο, αυξάνει την τραχύτητα της επιφάνειας. Παρόλα αυτά για μεγαλύτερη διάρκεια παλμού, περισσότερη θερμική ενέργεια διαχέεται στο τεμάχιο, σχηματίζοντας ένα παχύτερο στρώμα θερμικά επηρεασμένης ζώνης που απεικονίζεται στο σχήμα 3.3.
- Ο δεύτερος σημαντικός παράγοντας είναι η ένταση του ρεύματος της εκκένωσης ή πιο συγκεκριμένα η ενέργεια του κάθε σπινθήρα. Μεγαλύτερη ενέργεια παλμού και κατ' επέκταση μεγαλύτερη ενέργεια σπινθήρα, αποδίδει μεγαλύτερη τραχύτητα, όπως γίνεται εμφανές στο σχήμα 3.4.
- Τέλος, το υλικό του ηλεκτροδίου έχει αντίκτυπο στην τραχύτητα της επιφάνειας του προϊόντος. Τα ηλεκτρόδια από χαλκό, αποδίδουν συνήθως χαμηλότερες τιμές R_a σε σύγκριση με τα ηλεκτρόδια από ορείχαλκο. Αυτό συμβαίνει γιατί το αποτέλεσμα της ηλεκτροδιάβρωσης εξαρτάται από το σημείο τήξης και όχι τη σκληρότητα του υλικού του εργαλείου.



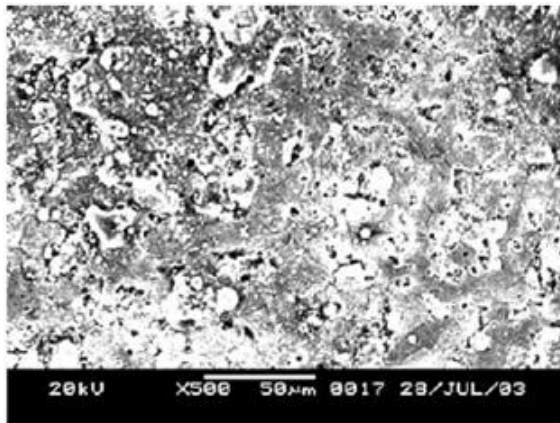
Σχήμα 3.3: Το αντίκτυπο του ενεργού χρόνου του παλμού στην ποιότητα της επιφάνειας και τον MRR.



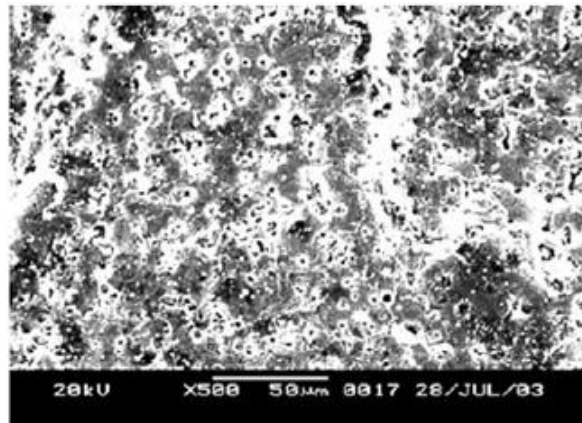
Σχήμα 3.4: Το αντίκτυπο της έντασης του παλμού στην ποιότητα της επιφάνειας και τον MRR.

Μια καλύτερη οπτική των ανωμαλιών που παρουσιάζει η επιφάνεια του τεμαχίου μετά την κατεργασία, προσφέρεται στις παρακάτω φωτογραφίες των εικόνων 3.2 - 3.4 από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Πρόκειται για προϊόντα ηλεκτροδιάβρωσης βυθιζόμενης μήτρας, με χάλκινο κυλινδρικό ηλεκτρόδιο - εργαλείο σε τεμάχιο από ανοπτημένο φερίττη, υλικό που χρησιμοποιείται για μικροσκοπικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Αυτό που αλλάζει σε κάθε εικόνα, είναι η ένταση και ο ενεργός χρόνος του παλμού. Όπως είναι αναμενόμενο, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού αυξάνει όσο αυξάνονται οι παραπάνω μεταβλητές, ενώ η ποιότητα της επιφάνειας, εμφανώς υποβαθμίζεται.

Στις εικόνες φαίνονται επίσης οι ζημιές που προξενούνται στην κατεργασμένη επιφάνεια, όπως διάφορα μικροκενά και μικρορωγμές. Τα μικροκενά είναι ουσιαστικά κλειστές κοιλότητες, που δημιουργούνται από φυσαλίδες αερίου που αποπέμπονται από το τηγμένο μέταλλο τη στιγμή της αναστερεοποίησής του. Τα σπασίματα και οι ρωγμές, δημιουργούνται από θερμικές τάσεις, ενώ το βάθος τους σχετίζεται με το πάχος της επιμεταλλωμένης ζώνης και δεν εξαπλώνονται βαθύτερα από αυτό. Η αιτία ύπαρξης των ανωμαλιών, είναι η θέρμανση που ακολουθείται από απότομη ψύξη, και η ανομοιόμορφη μετάδοση της θερμότητας στις επιφάνειες. Συμπερασματικά, για την αποφυγή εμφάνισης τόσο έντονων ανωμαλιών συνίσταται η εφαρμογή χαμηλής ενέργειας εκκενώσεων.

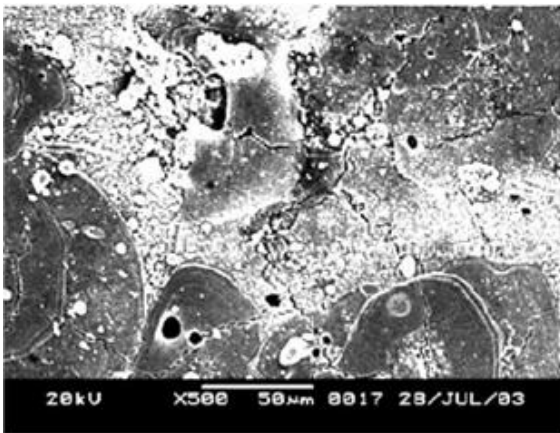


α) $I_p = 0.5 \text{ A}$, $T_{on} = 20 \mu\text{s}$

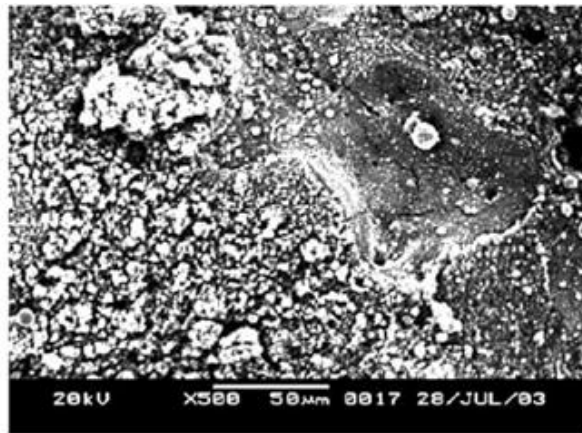


β) $I_p = 0.8 \text{ A}$, $T_{on} = 20 \mu\text{s}$

Σχήμα 3.2 : Η ποιότητα της επιφάνειας του τεμαχίου για ένταση παλμού 0,5 και 0,8 A αντίστοιχα και ενεργό χρόνο διάρκειας 20 μs .



γ) $I_p = 0.5 \text{ A}$, $T_{on} = 180 \mu\text{s}$

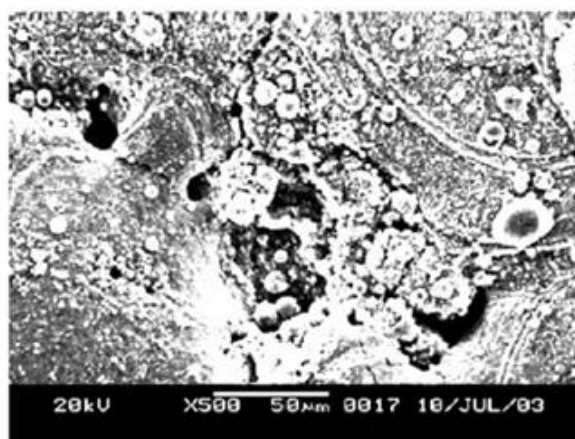


δ) $I_p = 0.8 \text{ A}$, $T_{on} = 180 \mu\text{s}$

Σχήμα 3.3 : Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου, για ένταση παλμού 0,5 και 0,8 A αντίστοιχα και ενεργό χρόνο διάρκειας 180 μs [23].



ε) $I_p = 0.5 \text{ A}$, $T_{on} = 340 \mu\text{s}$



στ) $I_p = 0.8 \text{ A}$, $T_{on} = 340 \mu\text{s}$

Σχήμα 3.4 : Η ποιότητα της επιφάνειας του τεμαχίου για ένταση παλμού 0,5 και 0,8 A αντίστοιχα και ενεργό χρόνο διάρκειας 340 μs .

Τα μειονεκτήματα της επιφάνειας που έχει κατεργαστεί με ηλεκτροδιάβρωση, δημιουργούν συχνά την ανάγκη για περαιτέρω επεξεργασία του τελικού προϊόντος, με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας. Από την πλευρά των ερευνητών, καταβάλλονται συνεχείς προσπάθειες για περεταίρω βελτιώσεις στην ποιότητα της επιφάνειας.

Μια από τις δημοφιλέστερες προτάσεις, βασίζεται στη χρήση σύνθετων ηλεκτροδίων τα οποία αποκαλούνται ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας. Η χαμηλή τους θερμική αγωγιμότητα παράγει λιγότερες ρωγμές, υψηλή διάβρωση και μικρότερη φθορά στην επεξεργασμένη επιφάνεια. Ακόμη καλύτερα αποτελέσματα επετεύχθησαν με τη ανάμιξη κόνεως εντός του διηλεκτρικού υγρού. Τα σωματίδια της σκόνης, διευκόλυναν τη δημιουργία σπινθήρα και μείωσαν την αντίσταση στη διάσπαση του διηλεκτρικού. Το αποτέλεσμα για την επιφάνεια ήταν μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση, αύξηση της σκληρότητας και μείωση των μικρορωγμών, ενώ σημειώθηκε αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού και μείωση της φθοράς του εργαλείου.

Άλλες προσπάθειες, που κυρίως βασίζονταν σε εμπειρικά μοντέλα, έγιναν στα πλαίσια του προσδιορισμού των παραμέτρων της διαδικασίας, ώστε η κατεργασία να αποδίδει τα επιθυμητά επιφανειακά χαρακτηριστικά.

3.4 Παράγοντες διασφάλισης της επιτυχίας

Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να γίνει μια σύνοψη των βασικότερων παραγόντων, που μπορούν να εξασφαλίσουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα για την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση.

Η επιλογή του ορθότερου συνδυασμού υλικών των ηλεκτροδίων και η εφαρμογή της ανάλογης πολικότητας είναι πρωταρχικό μέλημα για την κατεργασία. Η σωστή ρύθμιση των παραμέτρων όπως είναι το διάκενο, η ένταση και ο χρονισμός του παλμού, το υλικό του ηλεκτροδίου και το διηλεκτρικό, είναι κομβικής σημασίας.

Ο λόγος του ρυθμού αφαίρεσης υλικού προς την φθορά του εργαλείου πρέπει να είναι όσο δυνατό μεγαλύτερος. Για παράδειγμα για $MRR=99,5\%$ και $EW=0,5\%$ τότε $MRR/EW = 200$, που είναι μια καλή τιμή και καταδεικνύει μεγάλη παραγωγικότητα. Επίσης η τραχύτητα και ο μετασχηματισμός της επιφάνειας στις επηρεασμένες ζώνες κάτω από την επιφάνεια πρέπει να συγκρατούνται σε χαμηλά επίπεδα.

Για την επίτευξη ακρίβειας στις τελικές διαστάσεις, απαιτείται καλός σχεδιασμός του εργαλείου, με προσαρμογή του σχήματός του προς το σχήμα που πρόκειται να κατεργαστεί και πρόβλεψη της ανθεκτικότητάς του κατά την κατεργασία. Το διάκενο θα πρέπει να διαχωρίζεται σε μετωπικό, πλευρικό και διάκενο των θέσεων μικρής ακτίνας, καθώς εκτός των άλλων εξαρτάται και από τη γωνία του σε σχέση με την κατεύθυνση της πρόωσης. Η κίνηση του ηλεκτροδίου πρέπει να γίνεται στην κατεύθυνση της πρόωσης, έτσι ώστε το μετωπικό διάκενο να παραμένει σταθερό.

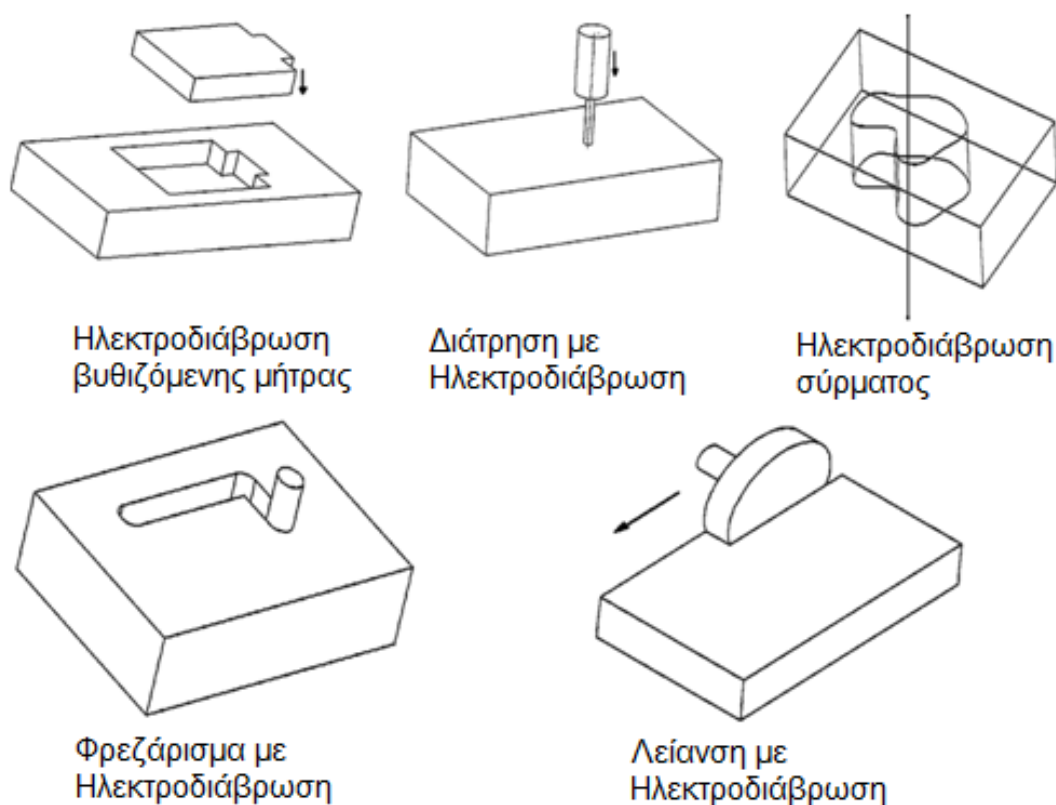
Είτε πρόκειται για κατεργασία φινιρίσματος, είτε για ξεχόνδρισμα, το μέγεθος των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι μικρότερο από το επιθυμητό άνοιγμα που πρόκειται να δημιουργηθεί, ανάλογα με το μετωπικό και το πλευρικό διάκενο που πρέπει να διατηρείται σε κάθε θέση. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο αριθμητικός έλεγχος της κατακόρυφης κίνησης του εργαλείου και ο εφοδιασμός της γεννήτριας παλμών με κυκλώματα προστασίας.

Τέλος η επιλογή του διηλεκτρικού και της μεθόδου έκπλυσης, είναι πολύ σημαντική. Με την εγκατάσταση φίλτρου και ενός συγκροτήματος ψύξης στη διάταξη του συστήματος, επιτυγχάνεται πληρέστερη απαλλαγή του διηλεκτρικού μέσου από απόβλιττα και τη θερμότητα που συμπαρασύρεται από τη θέση κατεργασίας.

4. ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η βασική ή συμβατική διάταξη της ηλεκτροδιάβρωσης όπως περιγράφηκε παραπάνω, αντιστοιχεί περισσότερο στην πιο διαδεδομένη εμπορικά εφαρμογή της κατεργασίας, που είναι η ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας. Ωστόσο η ίδιες αρχές διέπουν και τις υπόλοιπες παραλλαγές της μεθόδου. Συνολικά οι παραλλαγές της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση είναι οι εξής:

- Ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας (sinking EDM)
- Διάτρηση με ηλεκτροδιάβρωση (drilling EDM)
- Ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (cutting EDM ή wire EDM)
- Φραιζάρισμα με ηλεκτροδιάβρωση (milling EDM)
- Λείανση με ηλεκτροδιάβρωση (grinding EDM)



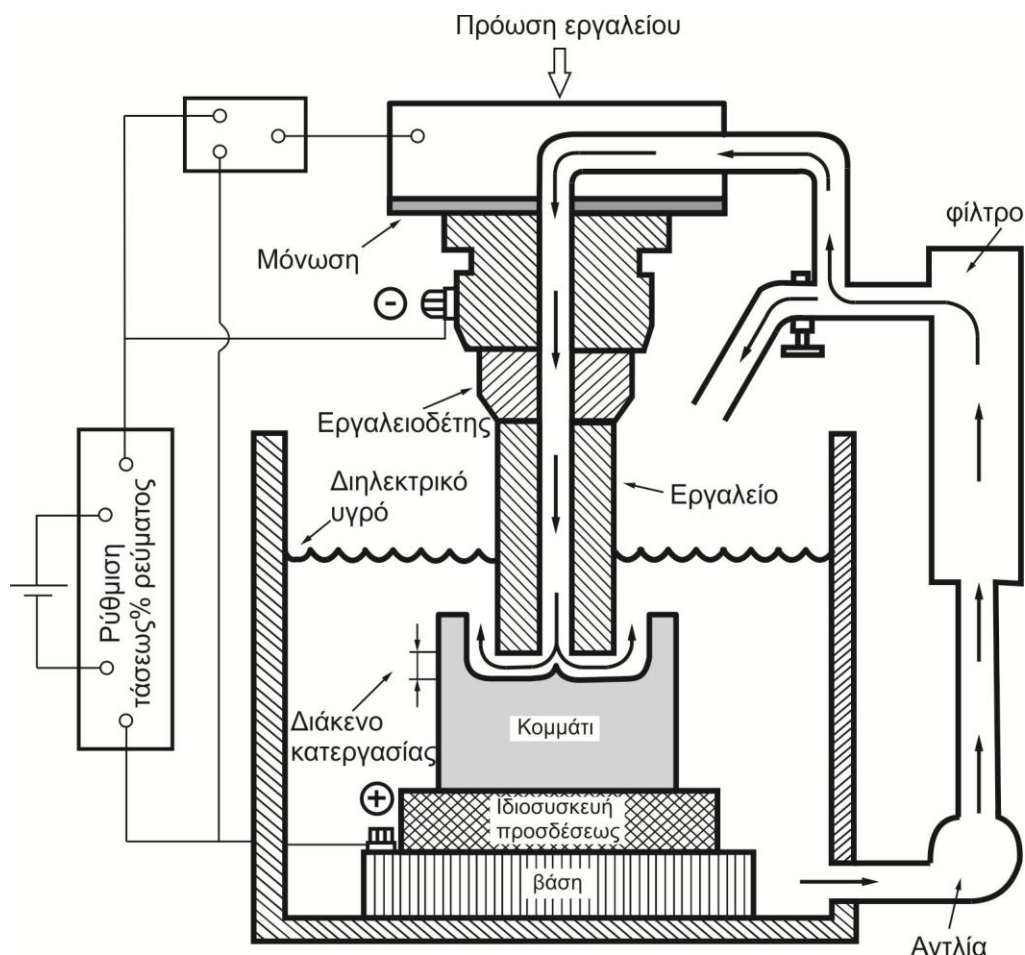
Σχήμα 4.1: Εφαρμογές της ηλεκτροδιάβρωσης.

4.1 Ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας (Die sinking EDM)

Η περιγραφή της κατεργασίας, όπως έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια, αφορά κατά κύριο λόγο την ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας (die sinking) ή ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης, που είναι η εξέλιξη της αρχικής εφαρμογής της κατεργασίας όπως την εμπνεύστηκαν οι Lazarenkos. Ο χαρακτηρισμός της μεθόδου οφείλεται στο γεγονός ότι το εργαλείο – ηλεκτρόδιο, βυθίζεται με σταθερή πρόωση στο τεμάχιο, σε περιβάλλον περιρρέοντος διηλεκτρικού, αποτυπώνοντας επάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου, τη μορφή του, ώστε το τεμάχιο να αποκτά την αντίστροφη μορφή.

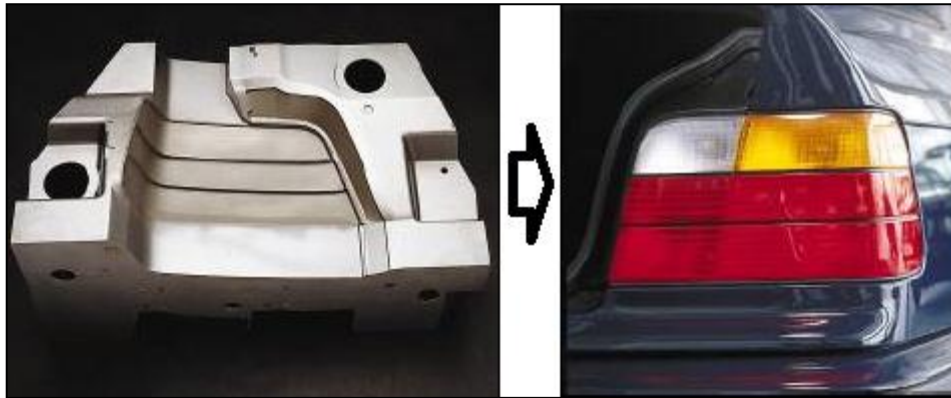
Μια τυπική διάταξη της μεθόδου, φαίνεται στο σχήμα 4.2. Στο σχήμα είναι ευδιάκριτη η κατεύθυνση της πρόωσης η οποία πρέπει να είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ώστε το διάκενο να παραμένει επίσης σταθερό και η ποιότητα της

κατεργασμένης επιφάνειας να είναι βέλτιστη. Φαίνονται επίσης τα σημεία πρόσδεσης των δύο ηλεκτροδίων, του εργαλείου στον εργαλειοφορέα και του τεμαχίου στην τράπεζα της εργαλειομηχανής. Παρατηρείται επίσης η τοποθέτηση μόνωσης, που αποτρέπει τη διαφυγή ηλεκτρικού ρεύματος από τα μεταλλικά μέρη του εργαλειοφορέα. Η έκπλυση του διηλεκτρικού στη συγκεκριμένη εργαλειομηχανή, γίνεται με έγχυση από οπή στο κέντρο του εργαλείου, ενώ η επάνοδος των αποβλήτων στο διάκενο εμποδίζεται από την ύπαρξη φίλτρου.



Σχήμα 4.2: Τυπική διάταξη ηλεκτροδιάβρωσης βυθιζόμενης μήτρας [6].

Η ανάπτυξη της μεθόδου με την πάροδο των χρόνων, την κατέστησε ευρέως διαδεδομένη στην βιομηχανία, όπου χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή καλουπιών, με ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα να απεικονίζεται στην εικόνα 4.1. Η μέθοδος στην απλούστερή της εκδοχή, όπου το ηλεκτρόδιο κινείται μόνο με κατακόρυφη κατεύθυνση, προϋποθέτει για κάθε επιθυμητό σχήμα, τη χρήση εκείνου του εργαλείου με την αντίστοιχη μορφή.



Εικόνα 4.1 : Καλούπι φαναριού, τυπικό προϊόν ηλεκτροδιάβρωσης βυθιζόμενης μήτρας.

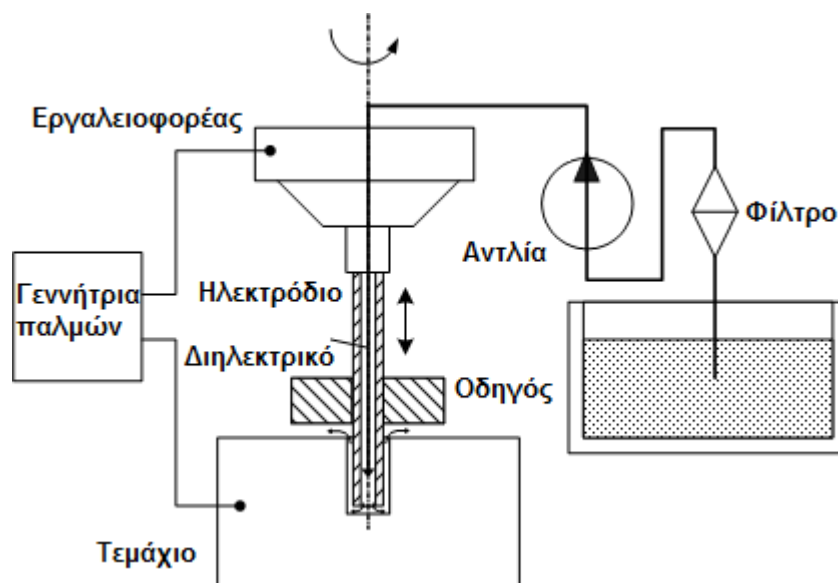
Οι περιορισμοί που προκύπτουν από το γεγονός αυτό, μπόρεσαν να ξεπεραστούν με την ανάπτυξη δύο παραλλαγών της μεθόδου, ώστε με τη χρήση ενός μόνο εργαλείου να μπορούν να παραχθούν περισσότερες μορφές. Οι παραλλαγές αυτές είναι:

- Ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης με οδήγηση τροχιάς:
Η παραλλαγή αυτή επιτρέπει την κίνηση του εργαλείου – ηλεκτροδίου σε περισσότερους από έναν άξονες, χάρη στη χρήση συστημάτων αριθμητικού ελέγχου. Με τη δυνατότητα της περισσότερο ελεύθερης κίνησης του εργαλειοφορέα, μπορούν πλέον με το ίδιο εργαλείο να παραχθούν σημαντικά περισσότερες και πιο πολύπλοκες μορφές.
- Ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης με πλανητική κίνηση:
Η πλανητική κίνηση που χαρακτηρίζει την συγκεκριμένη παραλλαγή της κατεργασίας, έγκειται στην δυνατότητα ταυτόχρονης κίνησης, υπό αριθμητικό έλεγχο, του εργαλείου, στους άξονες Χ και Υ. Συνήθως το τεμάχιο φέρει ήδη το περίγραμμα, με βάση το οποίο κινείται το εργαλείο, πάντα διατηρώντας σωστή απόσταση διάκενου, ώστε να το διευρύνει μέχρι τις επιθυμητές διαστάσεις. Με αυτή τη μέθοδο μπορούν να επιτευχθούν ακόμη πιο πολύπλοκες γεωμετρίες στο σχήμα του τεμαχίου.

4.2 Διάτρηση με ηλεκτροδιάβρωση

Η διάτρηση είναι μια από τις σημαντικότερες κατεργασίες. Περίπου το 50% με 70% του συνολικού χρόνου παραγωγής, ξοδεύεται για τη δημιουργία οπών. Επειδή η διάτρηση κάποιων υλικών με συμβατικές μεθόδους, είναι αναποτελεσματική ή επικίνδυνη, αναπτύχθηκε η διάτρηση με ηλεκτροδιάβρωση.

Κατά την κατεργασία, χρησιμοποιούνται σωληνοειδή ηλεκτρόδια – εργαλεία, τα οποία εργάζονται όπως κατά την ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας. Δηλαδή, δεν είναι πάντα απαραίτητη η περιστροφική κίνηση του δράπανου, όπως στην αντίστοιχη συμβατική κατεργασία της διάτρησης. Το γεγονός αυτό, επιτρέπει τη δημιουργία ακανόνιστου σχήματος οπών, επικλινών ή κωνικών. Μια τυπική διάταξη για τη παραλλαγή της μεθόδου, είναι αυτή του σχήματος 4.3:

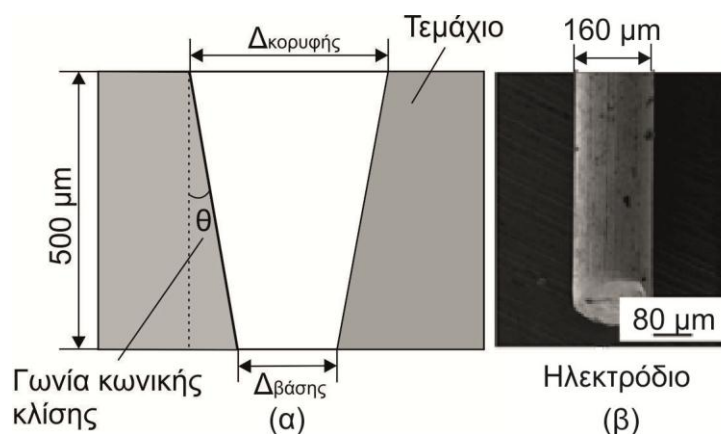


Σχήμα 4.3: Τυπική διάταξη διάτρησης με ηλεκτροδιάβρωση και περιστρεφόμενο ηλεκτρόδιο.

Το εργαλείο στις περισσότερες περιπτώσεις διαθέτει μια διαμπερή οπή από τη βάση έως την αιχμή του, μέσω της οποίας διαχέεται το διηλεκτρικό στο διάκενο της κατεργασίας με πίεση. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η απομάκρυνση των αποβλήτων από την κατεργαζόμενη οπή. Εναλλακτικά, το διηλεκτρικό μπορεί να διοχετεύεται μέσω του τεμαχίου, από οπή που πρέπει να έχει δημιουργηθεί στο τεμάχιο από πριν.

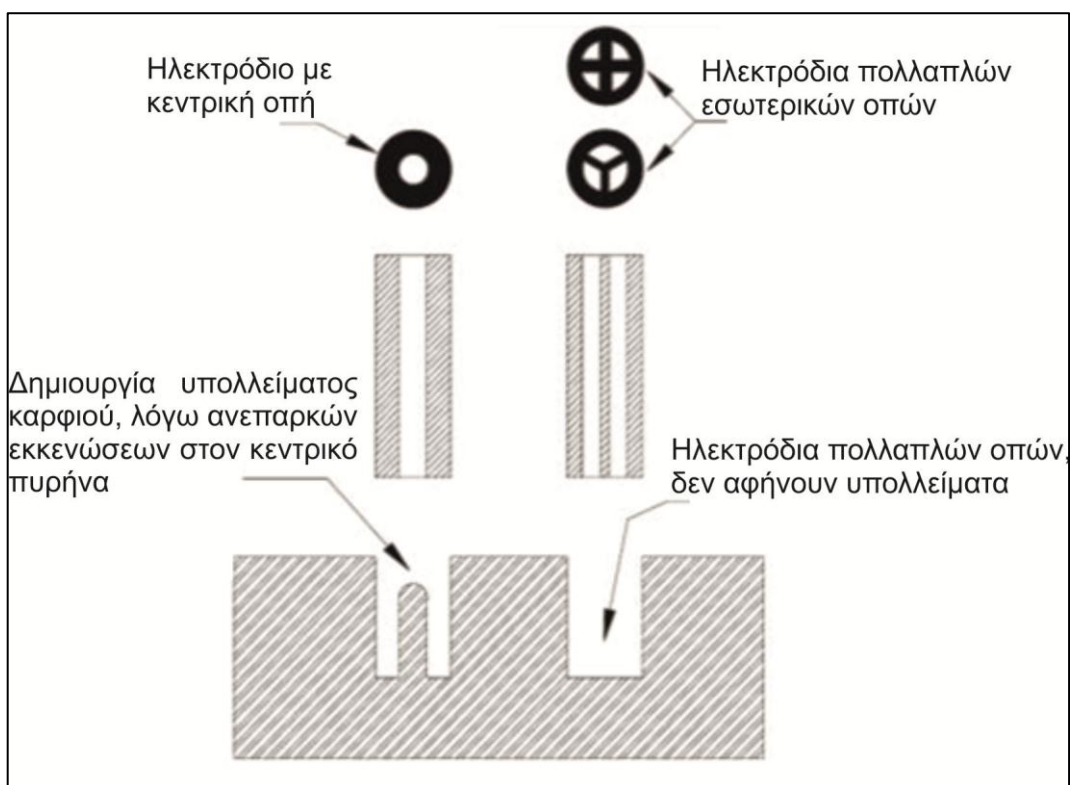
Όπως φαίνεται στο σχήμα (4.3), η διάταξη δε διαφέρει σε πολλά από την αντίστοιχη της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης. Οι σημαντικότερες διαφορές είναι η ύπαρξη ενός αεροκινητήρα με ιμάντα και σύστημα ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής, ο οποίος συνήθως δίνει την περιστροφική κίνηση αν αυτή προβλέπεται για την κατεργασία. Ο οδηγός του δρόπανου που μπορεί να βρίσκεται είτε στον εργαλειοφορέα, είτε λίγο πάνω από το τεμάχιο. Η πρόωση του εργαλείου υπόκειται σε αριθμητικό έλεγχο επίσης. Το ηλεκτρόδιο – εργαλείο και το τεμάχιο έχουν συνήθως θετική και αρνητική πολικότητα αντίστοιχα. Επίσης, η μέτρηση της ποιότητας της επιφάνειας γίνεται με ειδικά όργανα, ενώ υπολογίζεται ως μέση τιμή για όλο το βάθος της κάθε οπής.

Είτε η έγχυση γίνεται από το τεμάχιο, είτε από το εργαλείο, στην διάτρηση με ηλεκτροδιάβρωση, υπάρχει το ενδεχόμενο της διεύρυνσης της διαμέτρου της οπής. Αυτό συμβαίνει ενίοτε, εξ αιτίας των αποβλήτων που προκαλούν επιπλέον δημιουργία σπινθήρων στα τοιχώματα της οπής, καθώς διέρχονται μεταξύ των τοιχωμάτων, ώστε να εξέλθουν από την περιοχή της κατεργασίας. Το φαινόμενο αυτό, προσδίδει στην οπή ένα περισσότερο κωνικό σχήμα με μεγαλύτερη διάμετρο στο σημείο εισόδου του διηλεκτρικού στο διάκενο όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.4. Μια λύση για το παραπάνω πρόβλημα, εφαρμόστηκε με αρκετή επιτυχία από τον Kumagai (2004), ο οποίος πρότεινε τη χρήση ενός σύνθετου ηλεκτροδίου, με μεταλλικό δρόπανο περιβαλλόμενο από το σωλήνα έγχυσης του διηλεκτρικού. Έτσι αποφεύγεται η δημιουργία πλευρικών σπινθήρων κατά τη διάνοιξη οπών με μεγάλο βάθος.



Σχήμα 4.4: Διαμόρφωση κωνικού σχήματος της οπής κατά τη διάτρηση και το ηλεκτρόδιο που παρήγαγε την οπή.

Ένα ακόμα ανεπιθύμητο φαινόμενο, που προκύπτει συχνά κατά την κατεργασία, οφείλεται στο, κενό εσωτερικά, ηλεκτρόδιο μέσω του οποίου διέρχεται το διηλεκτρικό. Επειδή στο μετωπικό άκρο του ηλεκτροδίου υπάρχει η εν λόγω οπή, δεν δημιουργείται εκκένωση στο αντίστοιχο σημείο του τεμαχίου αφήνοντας υπολείμματα σε σχήμα καρφιού όπως στο σχήμα 4.5. Η ανωμαλία που δημιουργείται, μπορεί να προκαλέσει την ανάκληση της κίνησης της μηχανής και την επαναφορά της σε προηγούμενη θέση, αυξάνοντας έτσι το συνολικό χρόνο της κατεργασίας και προκαλώντας αποσταθεροποίηση.



Σχήμα 4.5: Υπολείμματα τύπου καρφιού από ηλεκτρόδιο με κεντρική οπή.

Στην αρχική της μορφή, η κατεργασία απέδιδε μέχρι 0.1 mm/min για οπές διαμέτρου από 0,1 έως 0,5 mm με εύρος ανοχών από 0,01 έως 0,05 mm αντίστοιχα. Η διάνοιξη καναλιών ψύξης σε πτερύγια τουρμπίνων κατασκευασμένων από σκληρά κράματα, είναι μια τυπική

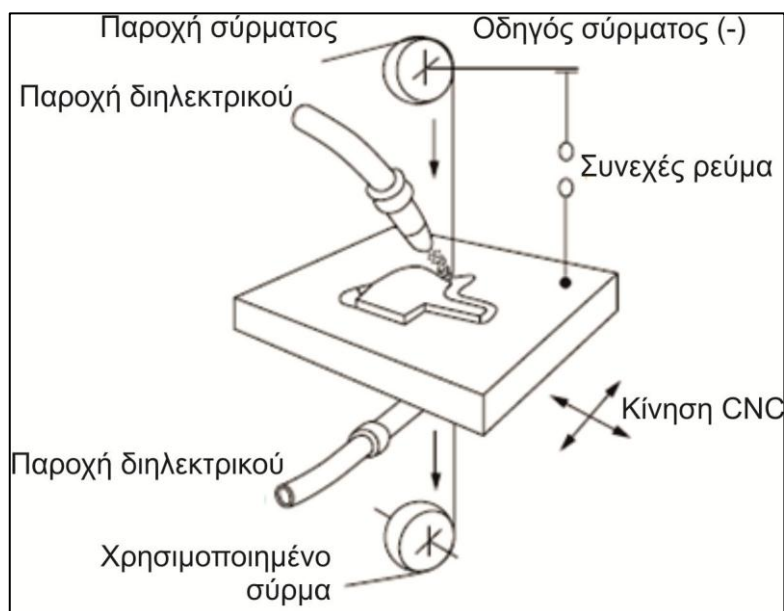
εφαρμογή της κατεργασίας. Με την εισαγωγή υπολογιστικών συστημάτων αριθμητικού ελέγχου, μπόρεσε να καταστεί δυνατή η διάνοιξη με ακρίβεια πολλαπλών οπών με μεγάλους σχετικά ρυθμούς. Η κατεργασία επίσης εφαρμόστηκε συχνά, για την δημιουργία βαθέων οπών (deep holes).

Με τον όρο βαθιές οπές, χαρακτηρίζονται οι οπές που έχουν λόγο βάθους – διαμέτρου ίσο με πέντε, ή και περισσότερο. Καθώς ο λόγος αυξάνεται, δηλαδή αυξάνεται το βάθος και / ή μειώνεται η διάμετρος, η κατασκευή τέτοιων οπών δυσχεραίνεται, ειδικότερα για κράματα όπως τα super alloys. Η κατεργασία αποδίδει μεγαλύτερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού, για μεγαλύτερες τιμές έντασης της εκκένωσης και για μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου. Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, βελτιώνεται για υψηλότερες τιμές της έντασης του ρεύματος και μεγαλύτερης διάρκειας ενεργό χρόνο της κατεργασίας.

Πρόσφατες έρευνες σχετικά με την κατεργασία με περιστρεφόμενο ηλεκτρόδιο, όπως είναι η διάτρηση με ηλεκτροδιάβρωση, έδειξαν ότι η περιστροφή του εργαλείου, ευνοεί την έκπλυση του διηλεκτρικού. Αυτό συμβαίνει λόγω της φυγόκεντρου δύναμης που αναπτύσσεται, χάρη στην οποία, τα απόβλητα παρασύρονται ταχύτερα από τη ζώνη κατεργασίας. Η φυγόκεντρος δύναμη συνεισφέρει πολλαπλά στη διαδικασία καθώς έλκει ποσότητα του διηλεκτρικού στο διάκενο της κατεργασίας, μειώνοντας τον αέρα. Έτσι προλαμβάνεται η δημιουργία τόξου, οδηγώντας σε υψηλότερο ρυθμό αφαίρεσης υλικού και καλύτερο φινίρισμα.

4.3 Ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (w-EDM)

Η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, ή w-EDM (wire EDM), είναι η δεύτερη πιο εμπορική σε ότι αφορά τις εργαλειομηχανές, εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης. Η μέθοδος εξελίχθηκε ιδιαίτερα τη δεκαετία του 1970 εξ αιτίας των νέων ισχυρότερων γεννητριών, τις προηγμένες λειτουργίες που προσφέρονταν από τις εργαλειομηχανές και την καλύτερη έκπλυση που ήταν πλέον δυνατή. Η αρχή της μεθόδου περιγράφεται από το σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Τυπική διάταξη ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος.

Η εφαρμογή αυτή έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης. Η βασική διαφορά από την οποία παίρνει και το όνομά της, είναι η χρήση, αντί του εργαλείου – ηλεκτροδίου σταθερής γεωμετρικής μορφής, ενός συνεχούς

κινούμενου ηλεκτροδίου, με τη μορφή αγωγίμου σύρματος. Το υλικό του σύρματος είναι συνήθως χαλκός με διάμετρο 0,03 έως 0,05 mm. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ο ορείχαλκος, κράματα χαλκού - ψευδαργύρου και όταν πρόκειται για λεπτές εργασίες χρησιμοποιείται σύρμα από μολυβδαίνιο με διάμετρο που μπορεί να είναι μικρότερη από 0,01 mm.

Η τροφοδοσία του σύρματος είναι συνεχής όσο διαρκεί η κατεργασία και κατευθύνεται από το τύμπανο στο οποίο είναι περιτυλιγμένο, στο τεμάχιο μέσω οδηγών, με σταθερή αξονική πρόωση. Πριν το σύρμα κατευθυνθεί στην περιοχή της κατεργασίας, περνά από τη διάταξη σύνδεσής του με τη γεννήτρια παλμών και από μια διάταξη τάνυσης (προένταση), ώστε να αποφεύγεται η παραμόρφωσή του. Προκειμένου να αποκτήσει η επιφάνεια το επιθυμητό σχήμα, η τράπεζα που φέρει το τεμάχιο, έχει την ικανότητα να κινείται σε δύο άξονες, στις περισσότερες εργαλειομηχανές, μέσω υπολογιστικών συστημάτων αριθμητικού ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό ακολουθείται η προορισμένη τροχιά του σύρματος, αφαιρώντας υλικό στο πέρασμά του.

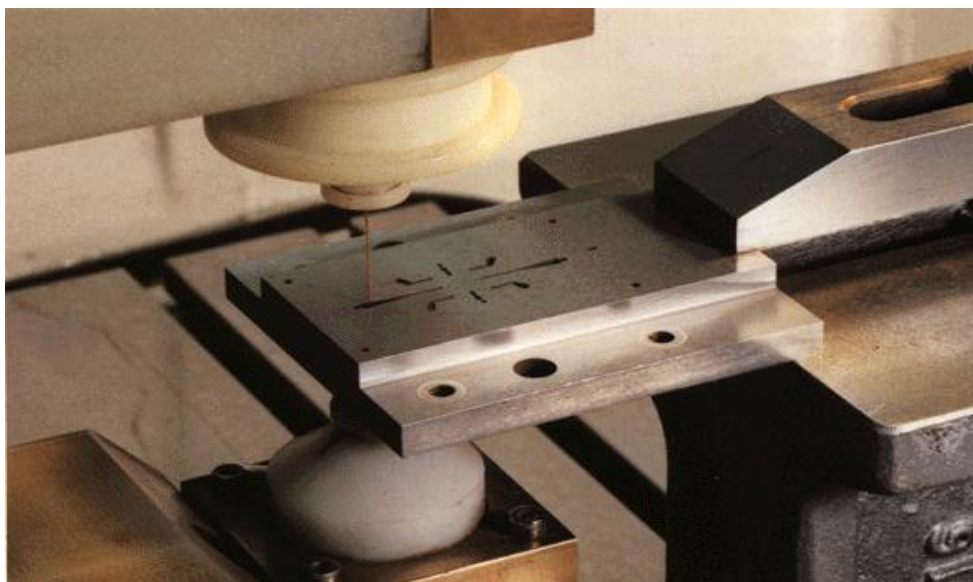
Ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού χαρακτηρίζεται από μια ακολουθία διακριτών εκκενώσεων μεταξύ του τεμαχίου και του σύρματος. Το διάκενο που υπάρχει μεταξύ των δύο, τροφοδοτείται συνεχώς με διηλεκτρικό που συνήθως είναι αποσταγμένο νερό. Το διηλεκτρικό που ψεκάζεται στο διάκενο, ιονίζεται και δημιουργεί τον δίαυλο που χρειάζεται η εκκένωση για να πραγματοποιηθεί. Όπως και στην ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας, στην περιοχή που πραγματοποιείται η εκκένωση, η θερμοκρασία φτάνει σε πολύ υψηλές τιμές με αποτέλεσμα την τήξη και την απομάκρυνση τμήματος του τεμαχίου που συμπαρασύρεται από τη ροή του διηλεκτρικού. Το χρησιμοποιημένο σύρμα καταλήγει μέσω των κάτω οδηγών, σε ένα άλλο τύμπανο περιτύλιξης.

Ενώ όμως στην ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης το εργαλείο συνδέεται στην άνοδο και το τεμάχιο στην κάθοδο, εδώ η πολικότητα είναι συνήθως αντίθετη και το σύρμα συνδέεται στην κάθοδο, ενώ οι παλμοί που εφαρμόζονται είναι πολύ μεγαλύτερης έντασης και μικρότερης διάρκειας. Η φθορά που υπόκειται το σύρμα σαν ηλεκτρόδιο – εργαλείο δεν δημιουργεί μειονεκτήματα στο τεμάχιο, αφού ανανεώνεται συνεχώς. Παρόλα αυτά, διάφορες ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που ασκούνται στο σύρμα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, μπορούν να παραμορφώσουν το σύρμα ή να το ταλαντώσουν και να αποκλίνει από την προκαθορισμένη τροχιά του. Σαν αποτέλεσμα, μπορεί να προκληθούν ορισμένες αποκλίσεις του τεμαχίου από τις ακριβείς διαστάσεις του.

Για την αποφυγή της αποκοπής του σύρματος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές. Μια τεχνική αφορά την πρόβλεψη της θερμικής κατανομής με ακρίβεια, με παράλληλη αύξηση της ταχύτητας και μείωση του συντελεστή μετάδοσης της θερμότητας. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε στη λογική, ότι η ανομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στο σύρμα είναι βασικός παράγοντας που οδηγεί σε σπάσιμο και αποκοπή. Σε άλλη μελέτη αποδείχθηκε ότι η αύξηση της διάρκειας παλμού και της τάσης ανοικτού κυκλώματος, οδηγεί σε μεγαλύτερη φθορά του σύρματος. Πρόσφατα αποδείχθηκε ότι η αποκοπή, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό, από τη δομή του υλικού.

Σε πειραματικές μελέτες που έγιναν πρόσφατα, αποδείχθηκε ότι η ένταση της ενέργειας της κατεργασίας, επηρεάζει την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας καθώς και τις μικρορωγμές που μπορεί να δημιουργούνται. Αντίθετα, η ταχύτητα του ηλεκτροδίου – σύρματος και η πίεση του διηλεκτρικού δεν έχει αντίστοιχο αντίκτυπο.

Κάποιοι μελετητές, επιχείρησαν να μοντελοποιήσουν την ταχύτητα κοπής και την επιφανειακή τραχύτητα της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων και μεθοδολογίας απόκρισης επιφάνειας. Συμπέραναν ότι η ακρίβεια του μοντέλου και για τις δύο προσεγγίσεις ήταν καλύτερη. Στην ίδια κατεύθυνση προτάθηκε σε άλλη έρευνα, η χρήση στρατηγικών ελέγχου βασιζόμενων σε ασαφή λογική, για τη βελτίωση της ακρίβειας της κατεργασίας.



Εικόνα 4.2: Κατεργασία μήτρας εξώθησης, από εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος.

Με την εφαρμογή του σύρματος σαν ηλεκτρόδιο – εργαλείο, είναι δυνατή η κατεργασία τόσο εξωτερικών, όσο και εσωτερικών πρισματικών περιγραμμάτων όπως αυτό της εικόνας 4.2. Στην περίπτωση των εσωτερικών περιγραμμάτων απαιτείται η διάνοιξη οπής, με συμβατικές μεθόδους, ώστε να μπορεί να διέλθει το σύρμα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ένα πρώτο πέρασμα με την προρρυθμισμένη αρχική τροχιά και ακολούθως ένα δεύτερο πέρασμα με διευρυμένη τροχιά, ώστε να επιτευχθούν οι διαστάσεις του τελικού περιγράμματος.

Επιπλέον, εάν η εργαλειομηχανή μπορεί να υποστηρίξει σχετική κίνηση της άνω οδήγησης του σύρματος, σε σχέση με την κάτω, υπάρχει και η δυνατότητα κωνικής κοπής, μη πρισματικών περιγραμμάτων. Με αυτή την εφαρμογή της μη πρισματικής κοπής, μπορούν να κατασκευαστούν αντικείμενα με διάφορες ευθιογενείς επιφάνειες, κάτι που δεν είναι εφικτό με άλλες μεθόδους κατεργασίας όπως για παράδειγμα το προϊόν της εικόνας 4.3. Τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την παραγωγή συσκευασιών και άλλων προϊόντων.



Εικόνα 4.3: Ευθειογενείς επιφάνειες εξολοκλήρου κατεργασμένη με ηλεκτροδιάβρωση σύρματος.

Η παραλλαγή αυτή της ηλεκτροδιάβρωσης βελτιώθηκε σημαντικά με την πάροδο των ετών, και η εφαρμογή της προσανατολίστηκε στην κατεργασία πολύ σκληρών μετάλλων, μια περιοχή της βιομηχανίας όπου η χρήση συμβατικών κατεργασιών δεν αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Έτσι, προτιμάται για την κατεργασία υπέρσκληρων υλικών όπως το πολυκρυσταλλικό διαμάντι και υιοθετήθηκε από αυτοκινητοβιομηχανίες, βιομηχανίες αεροναυπηγικής και τεχνολογίας του διαστήματος, και για εργασίες σε χημικές και πυρηνικές βιομηχανίες.

Η μέθοδος αποδίδει πολύ καλής ποιότητας προϊόντα όταν κατεργάζεται τέτοια υλικά, καθώς μπορεί να κατεργαστεί με ακρίβεια ακόμη και σχήματα περίπλοκης γεωμετρίας και κυρίως γιατί δεν προκύπτουν οι συνήθεις αστοχίες των συμβατικών μεθόδων όπως οι ανωμαλίες και οι διάφορες προεξοχές στην επιφάνεια. Η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος εφαρμόζεται επίσης για την κατασκευή χαλύβδινων εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την μορφοποίηση και παραγωγή καλουπιών, ενώ τα τελευταία χρόνια έχει εφαρμοστεί για την κατεργασία μη αγώγιμων κεραμικών προϊόντων και για κατεργασίες σε μικροσκοπικό επίπεδο.

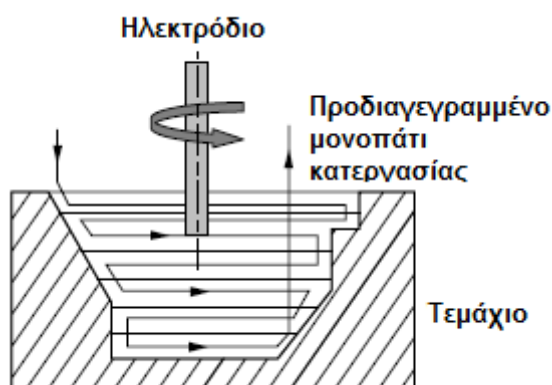
4.4 Φραιζάρισμα με ηλεκτροδιάβρωση (ED Milling)

Το φραιζάρισμα με ηλεκτροδιάβρωση είναι μια παραλλαγή που απαλλάσσει την κατεργασία από αρκετά μειονεκτήματα του συμβατικού φραιζαρίσματος. Εφαρμόζεται με επιτυχία για μεταλλικά, αλλά τελευταία και για μη αγώγιμα κεραμικά υλικά, τα οποία με τις συμβατικές μεθόδους, απαιτούν περισσότερο χρόνο, κόστος και εντονότερη εργασία.

Με την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης, υπάρχει ένας άξονας κίνησης του εργαλείου, που δίνει πρόωση στο συμπληρωματικού σχήματος ηλεκτρόδιο, μορφοποιώντας αντίστοιχα το τεμάχιο. Οι περιορισμοί της τεχνολογίας αυτής, είναι το μεγάλο κόστος και χρόνος που χρειάζονται για την κατεργασία του ηλεκτροδίου – εργαλείου. Επειδή δε, η κατεργασία εξαρτάται εν πολλοίς από τις ανοχές και τη φθορά του εργαλείου, υπάρχει η ανάγκη συχνής αντικατάστασης του. Χρειάζονται πολλά ηλεκτρόδια επομένως, για να φτάσει το τεμάχιο στην επιθυμητή μορφή.

Επίσης, εξ αιτίας της πολύπλοκης γεωμετρίας που συνήθως απαιτείται για το εργαλείο, δημιουργούνται προβλήματα στην ομαλή έκπλυση του διάκενου καθώς δυσχεραίνεται η ροή του διηλεκτρικού. Αυτός ο περιορισμός συναντάται ευρέως, όταν η κατεργασία έχει μεγάλο βάθος, ή όταν υπάρχει μεγάλη μετωπική επιφάνεια κατεργασίας. Το αποτέλεσμα είναι να γίνεται ασταθής η κατεργασία και να υποβαθμίζεται η ποιότητα της τελικής επιφάνειας.

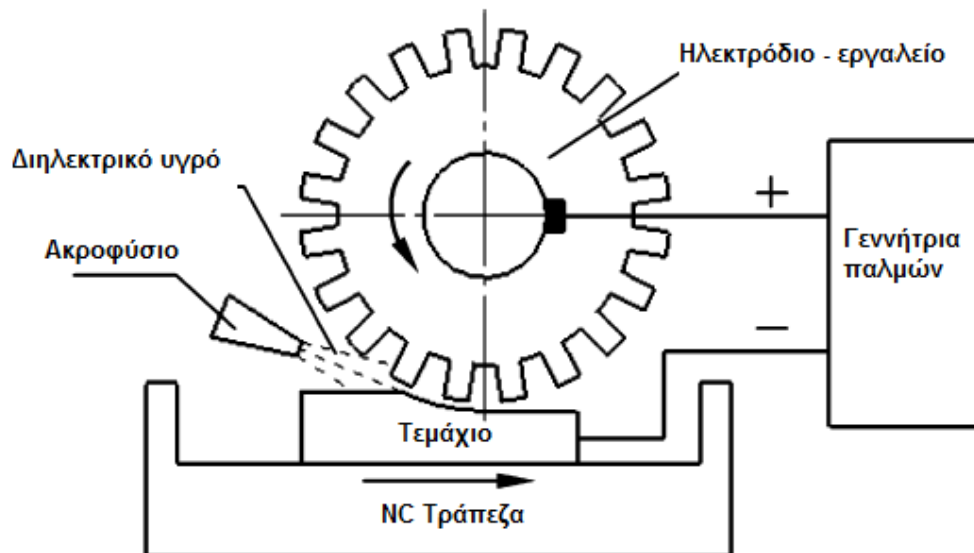
Για την αντιμετώπιση των παραπάνω, εισήχθησαν κάποιες πρωτοπορίες στην κατεργασία φραιζαρίσματος με ηλεκτροδιάβρωση βύθισης, κυρίως με την ανάπτυξη του αριθμητικού ελέγχου, μετά το 1980. Ο Saito πρότεινε αρχικά τη χρήση απλού σχήματος ηλεκτροδίων για διαμόρφωση κοιλοτήτων. Σήμερα η εξέλιξη των εργαλειομηχανών επιτρέπει την κίνηση περιστρεφόμενων κυλινδρικών ή σωληνοειδών ηλεκτροδίων σε τέσσερις άξονες, πραγματοποιώντας ουσιαστικά φραιζάρισμα με ηλεκτροδιάβρωση, σε προδιαγεγραμμένη τροχιά και με πολλαπλά περάσματα όπως στην κατεργασία του σχήματος 4.7.



Σχήμα 4.7: Η κίνηση του ηλεκτροδίου κατά το φραιζάρισμα με ηλεκτροδιάβρωση.

Τα πλεονεκτήματα της κατεργασίας περιλαμβάνουν μειωμένο κόστος και χρόνο κατασκευής του εργαλείου καθώς πρόκειται για κοινά προϊόντα μεταλλουργίας χωρίς περίπλοκες γεωμετρίες. Επίσης πραγματοποιείται καλύτερη έκπλυση του διάκενου, αφού υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου, ενώ επιπλέον μπορεί να εφαρμοστεί και αξονική έγχυση από το εργαλείο εάν κριθεί σκόπιμο.

Το κυριότερο μειονέκτημα είναι ότι η φθορά του κοπτικού έχει μεγάλη επίδραση στην ακρίβεια των διαστάσεων του προϊόντος της κατεργασίας. Επιχειρείται αντιμετώπιση του προβλήματος με μέτρηση σε πραγματικό χρόνο της φθοράς του εργαλείου και άμεση εφαρμογή στρατηγικών συντήρησης. Μια αξιόλογη προσπάθεια στην κατεύθυνση αυτή είναι επίσης η μέθοδος ενιαίας φθοράς του εργαλείου, όπου έχει προκαθοριστεί το μονοπάτι της κατεργασίας με τρόπο τέτοιο, ώστε η φθορά που προξενείτε στο εργαλείο να περιορίζεται από τρισδιάστατη, σε γραμμική. Με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά, το εργαλείο αποκτά ξανά το αρχικό του σχήμα.



Σχήμα 4.8: Διάταξη φραιζαρίσματος ηλεκτροδιάβρωσης με οδοντωτό τροχό.

Στο σχήμα 4.8, απεικονίζεται μια συνήθης διάταξη για φραιζάρισμα κεραμικού τεμαχίου με ηλεκτροδιάβρωση. Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να κατεργαστούν χωρίς βοηθητικό ηλεκτρόδιο, κεραμικά με αντίσταση στον ηλεκτρισμό ακόμα και μεγαλύτερη από 500 Ω cm. Γίνεται χρήση ενός χαλύβδινου οδοντωτού τροχού ως ηλεκτρόδιο – εργαλείο, μια γεννήτρια ελεγχόμενων παλμών και ένα διάλυμα με βάση το νερό σαν διηλεκτρικό. Το εργαλείο συνδέεται με θετική πολικότητα ενώ το τεμάχιο με αρνητική. Ο τροχός περιστρέφεται από έναν κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος, το διηλεκτρικό ψεκάζεται στο διάκενο, ενώ το τεμάχιο κινείται με αριθμητικό έλεγχο προς το εργαλείο, φερόμενο σε τράπεζα.

Κάθε δόντι που περιστρέφεται πλησίον του τεμαχίου, παράγει εκκενώσεις, ενώ σε κάθε διάκενο της οδόντωσης που διαπερνά την περιοχή της κατεργασίας, γίνεται έκπλυση των αποβλήτων, ψύξη της περιοχής και απιονισμός του διακένου. Με τη διάταξη αυτή, φαίνεται λόγω των παραπάνω, ότι παρέχεται μεγαλύτερη σταθερότητα στην κατεργασία.

4.5 Λείανση με ηλεκτροδιάβρωση (ED Grinding)

Η λείανση με ηλεκτροδιάβρωση βασίζεται στις γνωστές αρχές που διέπουν κάθε κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση. Η διάταξη της μεθόδου περιλαμβάνει ένα ηλεκτρικά αγώγιμο, μη λειαντικό ηλεκτρόδιο – εργαλείο σε μορφή περιστρεφόμενου δίσκου, σε αντίθεση με το στατικό ηλεκτρόδιο της κοινής ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης. Το υλικό του ηλεκτροδίου είναι συνήθως γραφίτης.

Το πλεονέκτημα που αποκομίζεται με τη χρήση περιστρεφόμενου ηλεκτροδίου, αφορά την ομογενοποιημένη φθορά του εργαλείου σε όλο το εύρος της επιφάνειάς του. Υπάρχουν ουσιαστικά τρεις διαφορετικές εφαρμογές της λείανσης με ηλεκτροδιάβρωση:

- Επιφανειακή λείανση με ηλεκτροδιάβρωση (surface EDG)
- Λείανση αποκοπής με ηλεκτροδιάβρωση (cut-off EDG)
- Λείανση πρόσοψης με ηλεκτροδιάβρωση (face EDG)

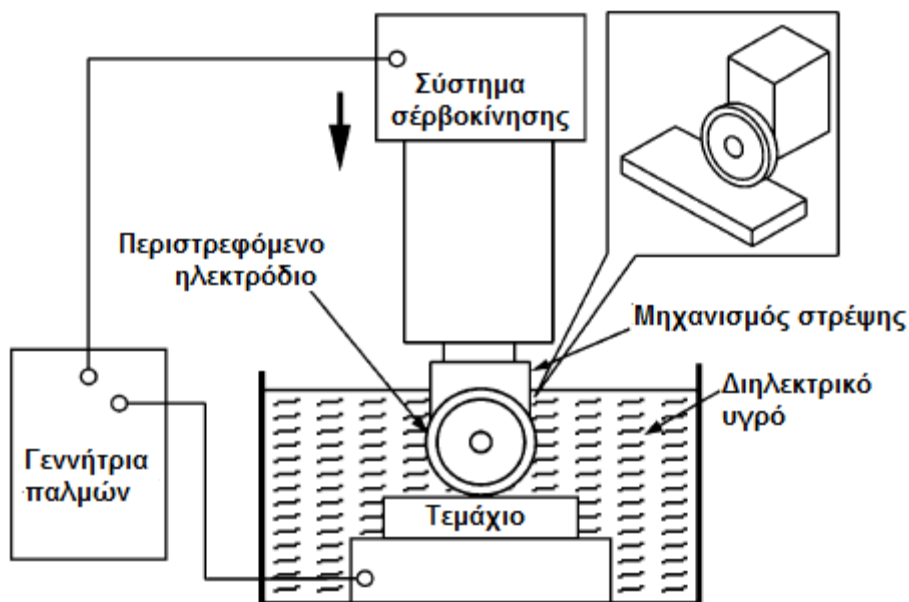
Στην λείανση πρόσοψης με ηλεκτροδιάβρωση, γίνεται χρήση ενός μη λειαντικού εργαλείου σε σχήμα δίσκου που περιστρέφεται σε κάθετο άξονα. Τα ηλεκτρόδια βρίσκονται βυθισμένα σε διηλεκτρικό και συνδεδεμένα με γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Δε

χρειάζεται επιπλέον σύστημα έκπλυσης του διάκενου, καθώς η απομάκρυνση των αποβλήτων γίνεται με την περιστροφική κίνηση του εργαλείου. Επίσης η περιστροφή βοηθά στην αποτελεσματική αποκόλληση του τηγμένου μετάλλου από το τεμάχιο. Σε αντίθεση με τη συμβατική λείανση, δεν υπάρχει επαφή μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, εκτός από την περίπτωση βραχυκυκλώματος. Σαν αποτέλεσμα, η κατεργασία εύθραυστων και λεπτότοιχων τεμαχίων διευκολύνεται.

Η λείανση αποκοπής με ηλεκτροδιάβρωση, έχει αποδειχθεί από πειραματικές μελέτες, ότι είναι πιο παραγωγική και ακριβής από την απλή βύθιση με ηλεκτροδιάβρωση. Ο Koshy με τους συνεργάτες του, υπολόγισαν το ρυθμό αφαίρεσης υλικού, τη φθορά του κοπτικού, την ακρίβεια στην αναπαραγωγή των γωνιών και το φινίρισμα της επιφάνειας και με τις δύο μεθόδους για την ίδια κατεργασία και βρήκαν καλύτερα αποτελέσματα για τη λείανση με αποκοπή.

Η επιφανειακή λείανση με ηλεκτροδιάβρωση της οποίας μια ενδεικτική διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9-, κάνει χρήση ενός ηλεκτροδίου, σχεδιασμένου να μιμείται την κατεργασία της συμβατικής λείανσης με εργαλείο περιστρεφόμενο σε οριζόντιο άξονα. Τα ηλεκτρόδια είναι είτε βυθισμένα σε διηλεκτρικό, είτε αυτό ψεκάζεται από ακροφύσια στο διάκενο της κατεργασίας. Έχει αποδειχθεί από πειραματικά αποτελέσματα, ότι επιτυγχάνονται μεγαλύτεροι ρυθμοί αφαίρεσης υλικού και μικρότερος ρυθμός φθοράς του κοπτικού, όταν εφαρμόζεται θετική πολικότητα στο ηλεκτρόδιο – εργαλείο. Ένα μειονέκτημα της κατεργασίας, είναι η σχετικά μεγάλη ποσότητα υλικού που επικάθεται στην επιφάνεια του τεμαχίου και επιμεταλλώνεται.

Οι παράμετροι της κατεργασίας όπως η κατεύθυνση έκπλυσης των αποβλήτων, η ταχύτητα και η φορά περιστροφής του ηλεκτροδίου δεν επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση της κατεργασίας. Η τραχύτητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας, μπορεί να φτάσει και τα 2 μm . Για να επιτευχθούν χαμηλές τραχύτητες, πρέπει η πολικότητα στο ηλεκτρόδιο να είναι αρνητική, να παρέχεται μικρότερου πλάτους ρεύμα και παλμοί μικρότερης διάρκειας. Με τις αντίθετες ρυθμίσεις αυξάνονται οι ρυθμοί αφαίρεσης υλικού και η τραχύτητα.



Σχήμα 4.9: Τυπική διάταξη επιφανειακής λείανσης με ηλεκτροδιάβρωση.

Εκτός από την απλή εφαρμογή της λείανσης με ηλεκτροδιάβρωση, υπάρχει και μια εναλλακτική κατεργασία με τη χρήση λειαντικών κόκκων. Η λείανση με ηλεκτροδιάβρωση και λειαντικούς κόκκους ή Abrasive Electro Discharge Grinding (AEDG), αποτελεί μια

υβριδική μέθοδο, και ως τέτοια αποσκοπεί στο συνδυασμό μιας συμβατικής με μια προηγμένη μέθοδο κατεργασίας, προκειμένου να βελτιωθούν τα κοινά τους προτερήματα και παράλληλα να εξαιρεθούν ή να μειωθούν τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η χρήση της κάθε μιας ξεχωριστά.

Η κατεργασία συνίσταται από τη συνεργασία και την αλληλεπίδραση δύο συνδυαζόμενων μεθόδων, της λείανσης με ηλεκτροδιάβρωση και της λείανσης με λειαντικούς κόκκους, με σκοπό την αύξηση της παραγωγικότητας. Κατά την κατεργασία δεν χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια γραφίτη ή άλλου μεταλλικού υλικού, αλλά αυτά αντικαθίστανται από έναν τροχό λείανσης με μεταλλικούς δεσμούς στη δομή του. Για το λόγο αυτό, το υλικό πλέον αφαιρείται από το αποτέλεσμα του συνδυασμού της ηλεκτροδιάβρωσης και της μικροκοπής που οφείλεται στην τριβή των λειαντικών κόκκων στην επιφάνεια. Με μετρήσεις που έχουν κατά καιρούς γίνει, έχει αποδειχθεί ότι η κατεργασία υπέρ-σκληρών υλικών, κεραμικών, ανοπτημένων καρβιδίων και άλλων σύνθετων μεταλλικών υλικών με την εν λόγω μέθοδο, παρουσιάζει αυξημένη απόδοση.

Προκειμένου να γίνει εφικτή η μηχανική λείανση σε μηχανή περιστροφικής λείανσης με ηλεκτροδιάβρωση, οι κόκκοι του τροχού έρχονται σε επαφή με το τεμάχιο, χωρίς όμως να δημιουργείται βραχυκύκλωμα, λόγω του μονωτικού χαρακτήρα των αδαμάντινων κόκκων. Η λειαντική δράση βοηθά στην επιτάχυνση της αφαίρεσης των μη αγώγιμων στοιχείων όταν η κατεργασία γίνεται σε τεμάχια αγώγιμου υλικού. Η λείανση, μπορεί επίσης να εξομαλύνει τις όποιες προεξοχές των μη αγώγιμων υλικών που μονώνουν το διάκενο, επιταχύνοντας έτσι την εκκίνηση της ηλεκτροδιάβρωσης. Η μέθοδος μπορεί να λειτουργεί ισορροπημένα αλλά μπορεί να προσφέρει επιπλέον, τη δυνατότητα ελέγχου και επιβολής του κυρίαρχου μηχανισμού, μεταξύ της μηχανικής λείανσης που αποδίδει μια λεπτότερη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και της ηλεκτροδιάβρωσης που περιορίζει τις μηχανικές δυνάμεις. Στην πορεία της κατεργασίας και εξ αιτίας των ηλεκτρικών εκκενώσεων στην επιφάνεια του λειαντικού τροχού, δημιουργείται μια ομοιόμορφη λειαντικού χαρακτήρα επένδυση, στην επιφάνεια του τροχού.

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία είναι το μέγιστο πλάτος της έντασης, ο ενεργός χρόνος του παλμού και η ταχύτητα περιστροφής του τροχού. Η μέθοδος συγκρινόμενη με τη συμβατική ηλεκτροδιάβρωση και τη λείανση με ηλεκτροδιάβρωση και περιστρεφόμενο τροχό από γραφίτη, έδειξε ότι αποδίδει μεγαλύτερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού. Για ορισμένες περιπτώσεις δε, όπως στην κατεργασία τεμαχίων από Ti-6Al-4V, καταγράφηκαν καλύτερα αποτελέσματα και για την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.

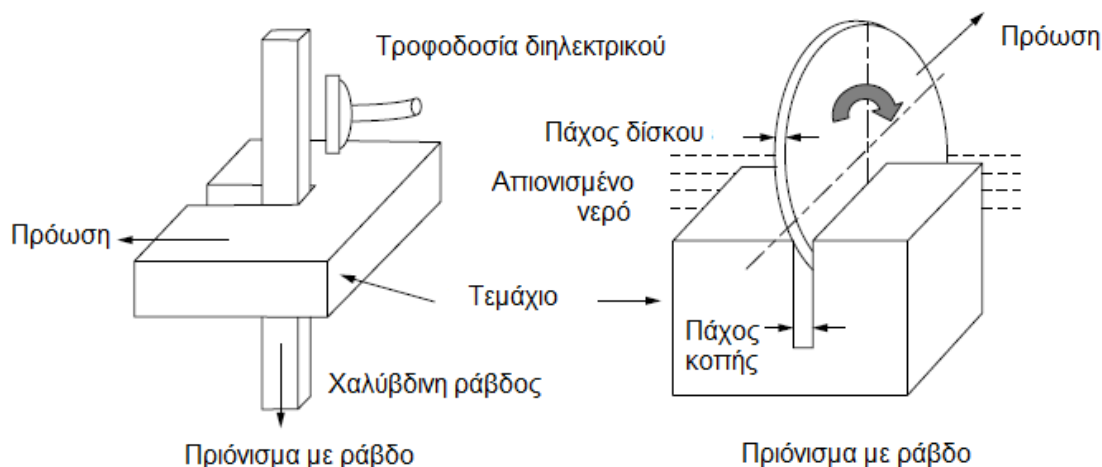
4.6 Λοιπές παραλλαγές και εφαρμογές της ηλεκτροδιάβρωσης

4.6.1 Πριόνισμα με ηλεκτροδιάβρωση

Το πριόνισμα με ηλεκτροδιάβρωση είναι ακόμα μια εφαρμογή της κατεργασίας που χωρίζεται σε δύο παραλλαγές ανάλογα με το σχήμα του εργαλείου – ηλεκτροδίου. Στη μια περίπτωση το εργαλείο έχει σχήμα κυκλικού δίσκου, που περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, κινούμενος με σταθερή πρόωση κατά μήκος της επεξεργαζόμενης επιφάνειας. Στη δεύτερη περίπτωση το εργαλείο είναι μια ειδική χαλύβδινη ράβδος που κινείται παλινδρομικά στον κατακόρυφο άξονα, ενώ το τεμάχιο κινείται με σταθερή πρόωση σε επίπεδο κάθετο στον άξονα κίνησης της ράβδου. Η διάταξη για κάθε περίπτωση απεικονίζεται στο σχήμα 4.10.

Με τη μέθοδο μπορούν να κατεργαστούν τεμάχια οποιασδήποτε σύστασης, αρκεί το υλικό να είναι ηλεκτρικά αγώγιμο. Οι κατεργασίες επιτυγχάνουν ρυθμούς κοπής διπλάσιους από τη συμβατική μέθοδο μηχανικού πριονίσματος. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, είναι ότι αποφεύγεται η πλεονάζουσα κοπή (over cut) στη σχισμή της κατεργασίας, η ποιότητα της

κατεργασμένης επιφάνειας είναι καλή ενώ δεν υπάρχουν γρέζια ή υπολείμματα μετάλλου στην περιοχή της κοπής. Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή στην παραγωγή μπιγέτων και ράβδων.



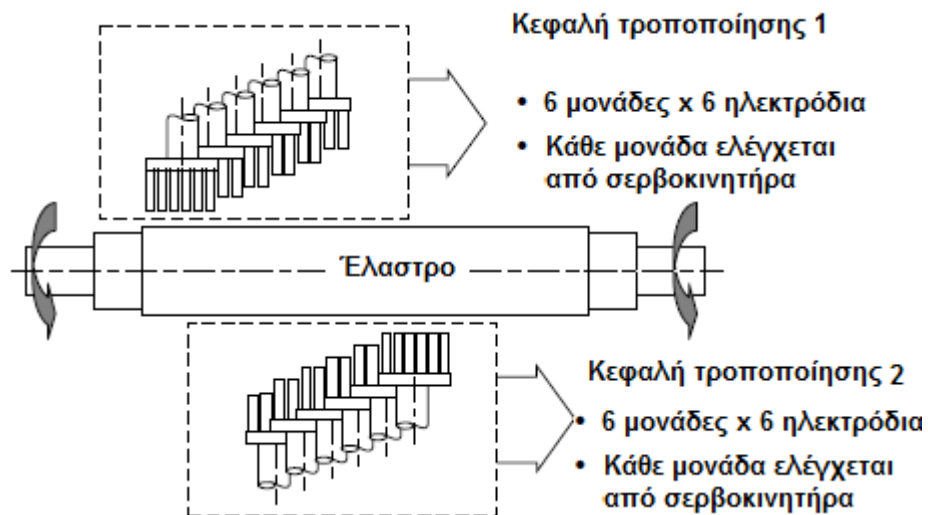
Σχήμα 4.10 : Τυπικές διατάξεις των παραλλαγών του πριονίσματος με ηλεκτροδιάβρωση

4.6.2 Τροποποίηση υφής επιφανειών με ηλεκτροδιάβρωση (EDTexturing)

Η τροποποίηση της υφής των επιφανειών (Texturing), είναι μια τεχνική που συνήθως γίνεται ως προεργασία στις μεταλλικές επιφάνειες που πρόκειται να υποστούν βαφή. Σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε εκτενής αναφορά σε μελέτες που αφορούσαν την επίδραση της μεθόδου στη σύσταση και τις ιδιότητες των εξωτερικών στρωμάτων της κατεργασμένης επιφάνειας. Η λειτουργία της μεθόδου τροποποίησης της υφής είναι ελαφρώς διαφορετική και παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω.

Εφαρμόζεται συνήθως στα χαλύβδινα φύλλα που παράγονται στα τελευταία στάδια της ψυχρής έλασης. Η συμβατική κατεργασία που χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό καλείται σφαιροβολή (shot blasting) και είναι μια ακριβής κατεργασία κατά την οποία η επιφάνεια τραχύνεται, καθώς βάλλεται από σφαιρίδια σκληροχάλυβα, με μεγάλες ταχύτητες [2]. Τα μειονεκτήματα της συμβατικής μεθόδου αυτής, είναι ότι στερείται ελέγχου και συνοχής, ενώ απαιτείται η προστασία του εξοπλισμού που περιβάλλει τα έλαστρα. Επίσης, τα έλαστρα σκληραίνουν καθώς προοδεύει η διαδικασία, κάτι που καθιστά την κατεργασία όλο και λιγότερο αποτελεσματική.

Η εναλλακτική μέθοδος που προτείνεται, με τη χρήση ηλεκτροδιάβρωσης, χαρακτηρίζεται από περιορισμένη αφαίρεση υλικού και επηρεασμό των υποστρωμάτων. Τα έλαστρα περιστρέφονται σε μια δεξαμενή που τροφοδοτείται συνεχώς με ένα λεπτό στρώμα διηλεκτρικού, συνήθως παραφίνης. Το ηλεκτρόδιο που αποτελείται συνήθως από πολυάριθμα τμήματα χαλκού ή γραφίτη, περιστρέφεται και ταυτόχρονα κινείται προς το έλαστρο ή απομακρύνεται από αυτό υπό τον έλεγχο ενός σερβοκινητήρα. Έτσι γίνονται περάσματα του ηλεκτροδίου και δημιουργούνται υψηλής έντασης ηλεκτρικοί σπινθήρες, μικρής διάρκειας και μεγάλης συχνότητας. Έτσι κάθε σπινθήρας δημιουργεί έναν μια εκκένωση και έναν μικρό κρατήρα στην επιφάνεια του ελάστρου, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ενός πυκνού, ενιαίου φινιρίσματος με ματ υφή. Τυπικές τιμές της τραχύτητας R_a είναι από 1 έως 5 μm . Η σωστή επιλογή των παραμέτρων, δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια και πυκνότητα στο αποτέλεσμα.



Σχήμα 4.11: Σύστημα τροποποίησης της υφής των επιφανειών με ηλεκτροδιάβρωση (ED Texturing).

Στο σχήμα 4.11, απεικονίζεται η κατεργασία τροποποίησης της υφής της επιφάνειας, ενός περιστρεφόμενου, κυλινδρικού ελαστρού από χάλυβα, όπου τα ηλεκτρόδια – εργαλεία αποτελούνται από συστάδες δακτυλόμορφων ράβδων. Η κάθε ράβδος, είναι ηλεκτρικά απομονωμένη από τη διπλανή της και είναι πακτωμένη σε κινούμενη από έναν ή περισσότερους σερβοκινητήρες μονάδα, με κατεύθυνση από και προς το κομμάτι εναλλάξ. Η αύξηση του πλήθους των ηλεκτροδίων, έχει βρεθεί ότι αυξάνει μεν το κόστος της μηχανής, αλλά παράλληλα μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο και το κόστος της κάθε κατεργασίας.

5. ΝΕΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 Εξέλιξη των μεθόδων και των εφαρμογών

Οι ολοένα αυξημένες απαιτήσεις της αγοράς δημιουργούν νέες ανάγκες για τη βιομηχανική παραγωγή. Τα πλεονεκτήματα των προηγμένων κατεργασιών και ιδιαίτερα της ηλεκτροδιάβρωσης, οδηγούν το επιστημονικό ενδιαφέρον στη συνεχή διερεύνηση και εξέλιξη της μεθόδου. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, νέες μέθοδοι για περισσότερο εξειδικευμένες εφαρμογές.

Η μέθοδος με την μεγαλύτερη ανάπτυξη είναι αυτή της μικρο-ηλεκτροδιάβρωσης, που φαίνεται να βρίσκει πλήθος εφαρμογών σε μια ραγδαίως αναπτυσσόμενη αγορά. Η επιστημονική έρευνα όμως φαίνεται να στρέφεται και στο συνδυασμό πρακτικών για τη βελτίωση της ηλεκτροδιάβρωσης κυρίως με τη βοήθεια των υπέρηχων και της δόνησης κατά την κατεργασία. Επίσης ερευνάται η ξηρή ηλεκτροδιάβρωση, που φαίνεται να προσφέρει λύσεις και να χαμηλώνει το κόστος της κατεργασίας. Εκτενέστερη αναφορά για την πρόοδο σε αυτούς τους τομείς γίνεται παρακάτω.

5.1.1 Μίκρο – ηλεκτροδιάβρωση

Σύμφωνα με την επιτροπή φυσικών και χημικών κατεργασιών (Committee of Physical and Chemical processes), ο όρος μικρο-κατεργασία, ορίζει την διαδικασία παρασκευής προϊόντων στο εύρος από 1 έως 999 μm και χρησιμοποιούνταν αρχικά για το χαρακτηρισμό της παραγωγής μικροσκοπικών ηλεκτρονικών συσκευών και εξαρτημάτων. Ένας πιο γενικός ορισμός των μικρο-κατεργασιών, αφορά την αφαίρεση υλικού σε μικρο ή νάνο κλίμακα ανεξάρτητα από το μέγεθος του τελικού προϊόντος. Προκειμένου να καταστεί δυνατή, η κατεργασία μικροσκοπικών αντικειμένων, αναπτύχθηκε η κατεργασία της μικρο-ηλεκτροδιάβρωσης.

Η κατεργασία βασίζεται στις αρχές που διέπουν την κλασσική ηλεκτροδιάβρωση με βασικές διαφορές, το μέγεθος του ηλεκτροδίου, την ανάλυση της κίνησης του εργαλείου στους τρεις κάθετους άξονες, την ένταση και την τάση που εφαρμόζεται. Σε αντίθεση με άλλες εφαρμογές της ηλεκτροδιάβρωσης, στην περίπτωση των μικροκατεργασιών η τροφοδοσία του ρεύματος γίνεται αποκλειστικά από κυκλώματα τροφοδοσίας παλμών και όχι από κυκλώματα αντίστασης πυκνωτή με ταλαντωτές χαλάρωσης, τα οποία ελέγχουν την τάση, την ένταση σε προδηλωμένες τιμές πριν την έναρξη της κατεργασίας. Σε αντίθεση, οι γεννήτριες παλμών, η κάθε εκκένωση δε διατηρείται σε προρυθμισμένα επίπεδα αλλά εξαρτάται από το φορτίο του πυκνωτή την κάθε στιγμή.

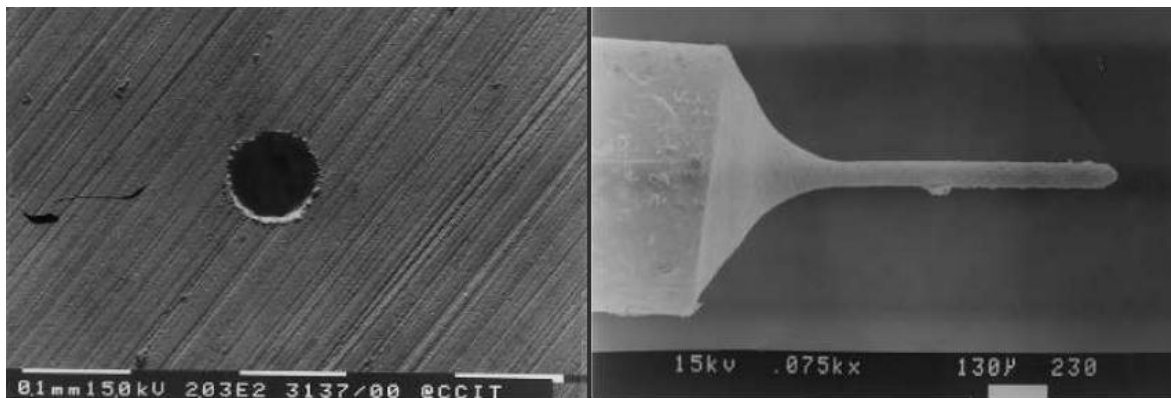
Η διάταξη περιλαμβάνει ένα πιο ευαίσθητο υποσύστημα σερβοκίνησης, με ακρίβεια τοποθέτησης της τάξης των 0,5 μm , η οποία δίνει τη δυνατότητα διατήρησης του διάκενου σε πλάτη της τάξης του ενός μικρομέτρου. Αυτό το πλεονέκτημα, δίνει τη δυνατότητα κατεργασίας μικρο-εξαρτημάτων αντίστοιχου μεγέθους. Μίκρο-κατεργασίες γίνονται με τη χρήση διάφορων μεθόδων της ηλεκτροδιάβρωσης, κυρίως όμως εφαρμόζονται η διάτρηση μικρο-οπών και η μικρο-ηλεκτροδιάβρωση με σύρμα. Στον πίνακα 5.1, αναφέρονται διάφορες μικρο-κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης και οι δυνατότητες που αυτές προσφέρουν.

Παραλλαγή μικρο-ηλεκτροδιάβρωσης	Γεωμετρική πολυπλοκότητα	Ελάχιστο μέγεθος εξαρτήματος μm	Μέγιστος λόγος πλάτους - ύψους	Τραχύτητα επιφάνειας (μm)
Σύρματος	3D	3	~100	0,1-0,2
Αποτύπωσης	3D	~ 20	~15	0,05-0,3
Φραιζάρισμα	3D	~ 20	10	0,2-0,1
Διάτρηση	2D	5	~25	0,05-0,3
Λείανση	3D	3	30	0,5

Πίνακας 5.1: Δυνατότητες των μεθόδων της μικρο-ηλεκτροδιάβρωσης.

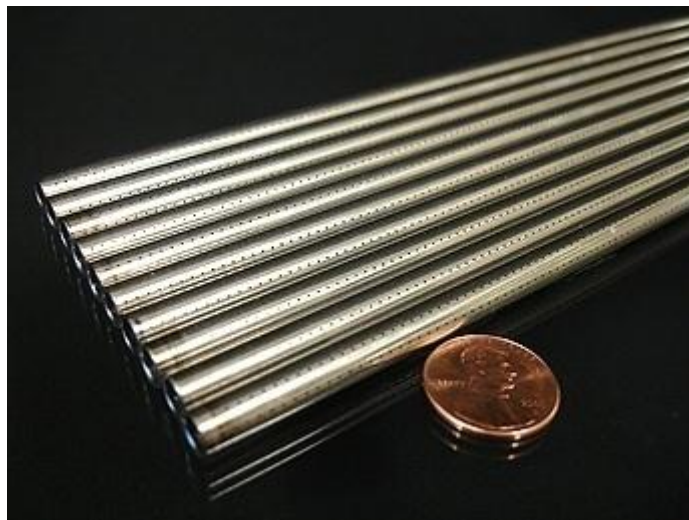
5.1.1.1 Διάτρηση μικρο-οπών με ηλεκτροδιάβρωση

Η ανάγκες της αγοράς, η βελτίωση της μεθόδου σε συνδυασμό με τις αυξημένες δυνατότητες που προσφέρονται σήμερα από τις εργαλειομηχανές διάτρησης, έδωσαν ένα νέο προσανατολισμό στην παραλλαγή αυτή της ηλεκτροδιάβρωσης. Η ηλεκτροδιάβρωση διάνοιξης μικρο-οπών (cm hole drilling), ή αλλιώς high speed drilling EDM (HSDEDM), είναι η εξέλιξη της κατεργασίας, που η εφαρμογή της καθιερώθηκε από πολλές βιομηχανίες τις τελευταίες δεκαετίες. Η εφαρμογή απέκτησε ξεχωριστή ονομασία, αν και η ίδια επεξεργασία μπορεί να γίνει και με την κλασσική μέθοδο διάτρησης με ηλεκτροδιάβρωση. Ωστόσο οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται από τις ειδικά διαμορφωμένες μηχανές για διάνοιξη μικρο-οπών είναι πολύ μεγαλύτερες.



Εικόνα 5.1 : Ηλεκτρόδιο και η μικρο-οπή που κατεργάστηκε με διάμετρο 0,1 mm [48].

Θεωρείται μικρο-κατεργασία και αφορά κατεργασίες διάτρησης οπών, πολύ μικρών διαστάσεων, με ανοχές που αγγίζουν τα 0,003 mm και διαμέτρους έως και 0,1 mm πως η οπή της εικόνας 5.1 ενώ τα βάθη κατεργασίας μπορεί να φτάνουν σε τιμές ίσες με 500 φορές τη διάμετρο του ηλεκτροδίου, με τιμές έως και μισό μέτρο. Οι ταχύτητες διάτρησης δε, έχουν φτάσει σε εντυπωσιακά υψηλές τιμές της τάξης των 3 mm/s. Οπές μπορούν να διανοιχθούν σε κάθε αγωγίμο υλικό ανεξαρτήτως σκληρότητας, όπως για παράδειγμα σε αντικείμενα από τιτάνιο και καρβίδια. Έρευνες πάνω στη σκληρότητα των περιφερειακών τοιχωμάτων των μικρο-οπών, έχουν καταλήξει στο ότι η θερμικά επηρεασμένη ζώνη κατά τη μικρο – ηλεκτροδιάβρωση, είναι χαμηλής σκληρότητας, αντίθετα με το επιμεταλλωμένο στρώμα.



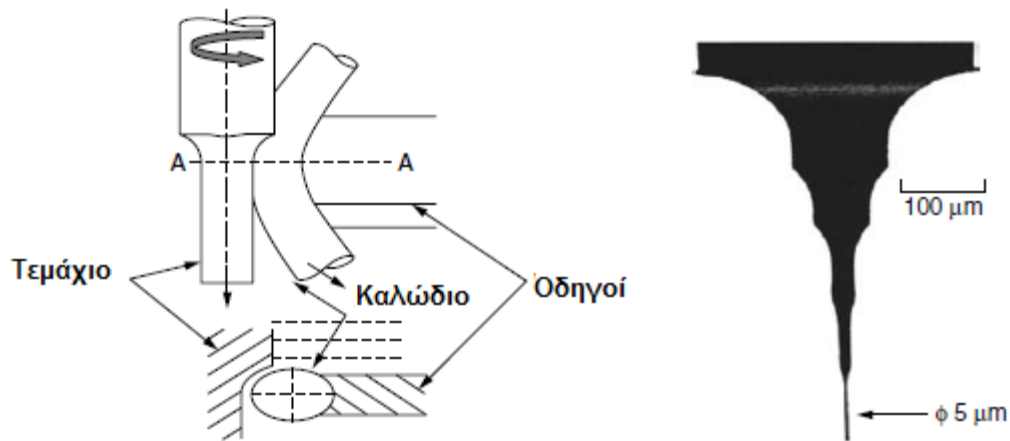
Εικόνα 5.2: Προϊόντα διάνοιξης μικρο-οπών με ηλεκτροδιάβρωση.

Η χρήση της μεθόδου, κυρίως αφορά την κατασκευή μικροαγωγών ψύξης για εργαλεία κοπής, ψεκαστήρες καυσίμου, αγωγούς διοχέτευσης πλαστικού σε καλούπια, εργαλεία αποτύπωσης, συνδετήρες οπτικών ινών, αρχικές κοπές για κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση σύρματος και παραγωγή μικρο-εξαρτημάτων ηλεκτρονικής.

Ο Yan μελέτησε την επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας, στην ποιότητα των μικρο-οπών σε καρβίδια με τη χρήση ηλεκτροδιάβρωσης [49]. Για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της κατεργασίας ο Zhang πειραματίστηκε στην κατεργασία μικρο-οπών σε κεραμικά [50]. Αργότερα ο Wanshheeng παρουσίασε κατεργασία με παράλληλη εφαρμογή υπερηχητικών δονήσεων, για τη δημιουργία οπών με διάμετρο μικρότερη των 0.2 mm και λόγο βάθους – πλάτους μεγαλύτερο του 15. Αποδείχθηκε επίσης η δυνατότητα κατεργασίας οπών αντίστροφης κωνικότητας, με διάμετρο 3 μm και χρόνους κύκλου κατεργασίας αντίστοιχους με εκείνους της κανονικής κατακόρυφης κατεργασίας με συμβατική ηλεκτροδιάβρωση. Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας ήταν εξαιρετική με τραχύτητα $Ra = 0,3 \mu\text{m}$. Τέλος ο Liu, μελέτησε το συνδυασμό μικρο-ηλεκτροδιάβρωσης με υψηλής συχνότητας λείανση (HFDG), για να βελτιώσει την τραχύτητα της επιφάνειας των μικρο-οπών. Κατάφερε μείωση από 2,12 μm σε 0,85 μm .

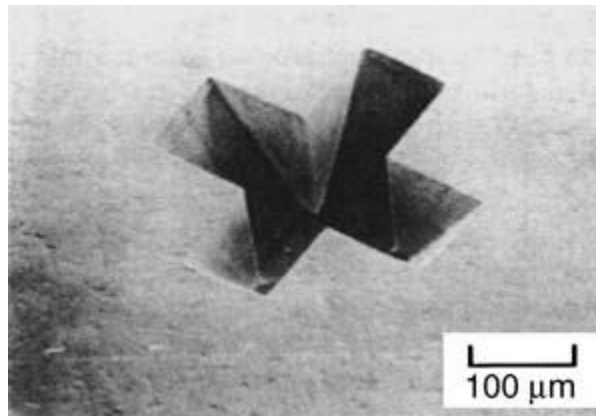
5.1.1.2 Μικρο-ηλεκτροδιάβρωση σύρματος

Η κατεργασία αντικειμένων πολύ μικρών διαστάσεων, έχει βρει μεγάλη εφαρμογή στη βιομηχανία με τη χρήση κυρίως της μεθόδου διάνοιξης μικρο-οπών αλλά και της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος. Στην περίπτωση της μικρο-κατεργασίας με σύρμα, το εργαλείο είναι ένα μεταλλικό σύρμα, το οποίο γλιστράει αργά μέσω ενός οδηγού, στην κατεργαζόμενη επιφάνεια με ρυθμούς αφαίρεσης υλικού από 5 έως 10 mm/min. Η διάταξη της μεθόδου φαίνεται στο σχήμα 5.1, καθώς επίσης και ένα μικρο-καρφί που έχει κατασκευαστεί με αυτό τον τρόπο από τους Masuzawa και Tonshof [3].



Σχήμα 5.1: Μίκρο-ηλεκτροδιάβρωση σύρματος και μίκρο-ήλος κατασκευασμένος με μ-WEDM

Μια καινοτομική μέθοδος παρασκευής μίκρο-οπών, με τη χρήση μίκρο-ήλων ως εργαλείο, αναπτύχθηκε από το 2004. Εργαλειομηχανές για λείανση μίκρο –ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος, κυκλοφορούν ήδη στην αγορά και έχουν δυνατότητα παραγωγής μίκρο-οπών με διάμετρο της τάξης των 5 μm. Ένα παράδειγμα κατεργασμένης επιφάνειας με κυβικό ηλεκτρόδιο μεγέθους 50 μm φαίνεται στο σχήμα 5.2:



Σχήμα 5.2: Μίκρο-κοιλότητα με αιχμηρές γωνίες κατεργασμένη με μίκρο-EDM.

5.1.2 Ξηρή ηλεκτροδιάβρωση

Η πρώτη εμφάνιση της ξηρής ηλεκτροδιάβρωσης, γίνεται σε μια τεχνική αναφορά της NASA το 1985, όπου έγινε χρήση αργού και ηλίου σαν διηλεκτρικά μέσα για διάτρηση οπών με χάλκινο ηλεκτρόδιο.

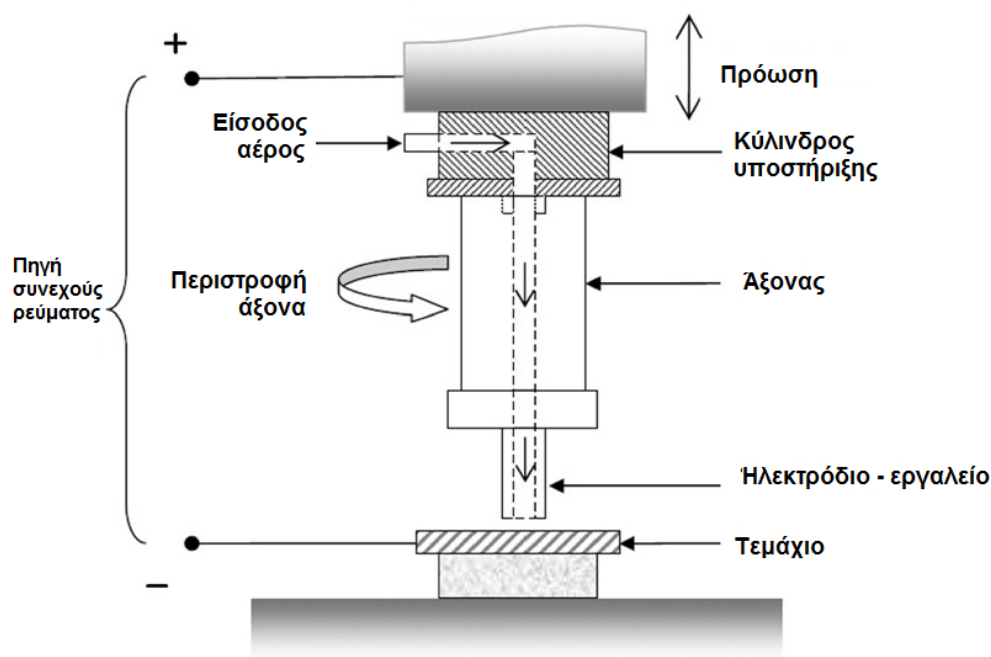
Το 1991 ο Kunienda [37], απέδειξε ότι η εισαγωγή οξυγόνου στο διάκενο, πλαισιωμένο από διηλεκτρικό με βάση το νερό, αυξάνει το ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Το 1997 συνεχίζοντας τις έρευνες, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά αέριο διηλεκτρικό στην κατεργασία αναδεικνύοντας αυτή τη νέα δυνατότητα. Το αέριο ψεκαζόταν με υψηλή ταχύτητα μέσω ενός λεπτότοιχου σωληνοειδούς ηλεκτροδίου και αυτή η πρακτική επικράτησε μέχρι σήμερα. Η τεχνική αναπτύχθηκε κυρίως λόγω του ρυπογόνου χαρακτήρα της κοινής ηλεκτροδιάβρωσης, καθώς με την εξάτμιση των διηλεκτρικών υγρών παράγονται βλαβεροί ατμοί οι οποίοι είναι δύσκολο να διαχειρισθούν.

Η ξηρή ηλεκτροδιάβρωση πλέον, γίνεται με χρήση αερίου, ή μείγματος αερίου και υγρού διηλεκτρικού και εφαρμογή αντίστροφης πολικότητας στα ηλεκτρόδια. Το πλεονέκτημα που εξασφαλίζεται με τον τρόπο αυτό, είναι η συγκέντρωση του υγρού και οι ιδιότητες του διηλεκτρικού, που οδηγούν σε υψηλές αποδόσεις. Ο αέρας υψηλής πίεσης που διοχετεύεται μέσω του ηλεκτροδίου όπως στη διάταξη του σχήματος 5.3, έχει σκοπό την απομάκρυνση των αποβλίπτων και την ψύξη του διάκενου μεταξύ των ηλεκτροδίων. Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση αερίου οξυγόνου σε συνδυασμό με νερό σαν διηλεκτρικό αυξάνει σημαντικά το ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Το ίδιο συμβαίνει με παράλληλη χρήση οξυγόνου και ηλεκτροδίων από χαλκό.

Με τη χρήση αερίου διηλεκτρικού, μπορούν να επιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί αφαίρεσης υλικού, ενώ η παρουσία οξυγόνου, βοηθά στην κατεργασία υλικών μεγάλης σκληρότητας. Επίσης συνδυασμός διηλεκτρικού μίγματος αζώτου – νερού με ηλεκτρόδιο γραφίτη, οδηγεί σε υψηλής ποιότητας φινίρισμα στην ημι-ξηρή ηλεκτροδιάβρωση. Κάποιες τελευταίες μελέτες πραγματοποιήθηκαν, με σκοπό τη βελτίωση της μεθόδου, με την εισαγωγή υπερηχητικών δονήσεων στο τεμάχιο ή με τη χρήση μηχανισμού πιεζομετρικού ελέγχου του διάκενου. Εφαρμογή της μεθόδου έχει γίνει επικουρικά και για κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος.

Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Kunieda και Yoshida το 1997 [37], κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε χάλκινο εργαλείο και χαλύβδινο τεμάχιο, αποκαλύφθηκε ότι στην περίπτωση ηλεκτροδιάβρωσης σε περιβάλλον αέρα, η φθορά του εργαλείου – ηλεκτροδίου είναι πολύ χαμηλότερη και ο ρυθμός αφαίρεσης πολύ υψηλότερος όταν η πολικότητα του εργαλείου είναι αρνητική.

Είναι πλέον γνωστό, ότι κάποια από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, είναι η χαμηλότερη φθορά του εργαλείου, μικρότερο διάκενο, μικρότερο επιμεταλλωμένο στρώμα και θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Επίσης πρόκειται για μια μέθοδο με μειωμένο κόστος εφαρμογής και λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον. Βελτιώνει τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας και μειώνει το κόστος του διηλεκτρικού μέσου. Οι ερευνητική δραστηριότητα, είναι ακόμα ανεπαρκής για να καταστήσει την ξηρή ηλεκτροδιάβρωση, μια βιώσιμη εμπορικά κατεργασία. Υπάρχει σημαντικό κενό στις μεθόδους υπολογισμού των δεικτών παραγωγικότητας της μεθόδου καθώς επίσης και στους μηχανισμούς υπολογισμού και πρόβλεψης των βέλτιστων παραμέτρων, για την εξασφάλιση της καλύτερης απόδοσης της κατεργασίας.



Σχήμα 5.3: Ξηρή ηλεκτροδιάβρωση [53].

5.1.3 Ηλεκτροδιάβρωση με υπερηχητική δόνηση

Η εφαρμογή υπερηχητικής δόνησης, στο ηλεκτρόδιο κατά την ηλεκτροδιάβρωση, έγινε σε πειραματικό στάδιο, ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Ως υπερηχητικό, χαρακτηρίζεται το κύμα δόνησης με συχνότητα κάτω από 16 Kc/s. Κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης σε συνδυασμό με υπερήχους, μπορούν να αποδώσουν το μεγαλύτερο δυνατό ρυθμό αφαίρεσης υλικού για κάθε περίπτωση, μειώνοντας ταυτόχρονα την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.

Εφαρμόζεται για την κατεργασία σκληρών υλικών και κραμάτων όπως οι super alloys και διάφορα σύνθετα υλικά. Στη συμβατική κατεργασία με υπερηχητική δόνηση, χρησιμοποιούνται συνήθως λειαντικά υγρά που περιέχουν στερεά πολύ μικρών διαστάσεων, όπως διαμάντια για τη λείανση της επιφάνειας. Στην ηλεκτροδιάβρωση με τη βοήθεια υπερηχητικής δόνησης, τα λειαντικά υγρά αντικαθίστανται πλέον από διηλεκτρικά υγρά, συνήθως κηροζίνη ή απιονισμένο νερό.

Η υπερηχητική δόνηση εφαρμόζεται είτε στο ηλεκτρόδιο – εργαλείο, είτε στο τεμάχιο, και συνδυαζόμενη με τις ηλεκτρικές εκκενώσεις που συμβαίνουν μεταξύ των δύο οδηγεί σε αποτελεσματική αφαίρεση υλικού. Η δόνηση συντελεί στην απομάκρυνση των αποβλίπτων, στην προσρόφηση του καινούριου διηλεκτρικού και δημιουργεί ιδανικές συνθήκες για τη δημιουργία εκκενώσεων. Το αποτέλεσμα είναι η σημαντική αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού.

Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί πειραματικά για τη διάνοιξη οπών σε κεραμικά υλικά, αυξάνοντας τον MRR, ακόμη στη διάνοιξη μικρο-οπών διπλασιάζοντας το βάθος με ένα πέρασμα. Οι Ghoreishi και Atkinson συνέκριναν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή αξονικής δόνησης, υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων στο ηλεκτρόδιο, με εκείνα από κατεργασία με περιστρεφόμενο ηλεκτρόδιο και συνδυασμό των δύο μεθόδων[51]. Υπολογίζοντας τους δείκτες απόδοσης της εκάστοτε κατεργασίας αποτύπωσης, κατέληξαν στο ότι ο συνδυασμός περιστροφής και δόνησης στο ηλεκτρόδιο αυξάνει κατά

35% τον MRR σε σχέση με την κατεργασία μόνο με δόνηση και κατά 100% σε σχέση με την κατεργασία μόνο με περιστροφή.

Η εφαρμογή της δόνησης μπορεί εναλλακτικά να γίνει και στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Διάνοξη μικρο-οπών σε γυαλί και πυρίτιο έχει πραγματοποιηθεί με αυτή τη μέθοδο, όπου διαπιστώθηκε υψηλή φθορά του εργαλείου και προκειμένου να καταστεί αποτελεσματική η διαδικασία χρησιμοποιήθηκε εργαλείο με ορυκτά διαμάντια. Αργότερα αποδείχθηκε ότι με την εφαρμογή δόνησης στο τεμάχιο, βελτιώνεται η έκπλυση. Επιπλέον, με αύξηση του πλάτους της έντασης και αυξημένη συχνότητα της δόνησης αυξάνεται ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού. Ωστόσο η μέθοδος δεν έχει μελετηθεί αρκετά και απέχει πολύ από την εφαρμογή της στη βιομηχανική παραγωγή.

5.1.4 Ηλεκτροδιάβρωση με προσθήκη κόνεως στο διηλεκτρικό (Powder mixed EDM)

Οι ανάγκες των κατασκευαστικών επιχειρήσεων για μεγάλη ακρίβεια και χαμηλή τραχύτητα των επιφανειών κατά τις κατεργασίες, καθώς και τα προβλήματα αποσταθεροποίησης της διαδικασίας με τη χρήση κηροζίνης ως διηλεκτρικό μέσο, οδήγησαν στη διεύρυνση των δυνατοτήτων της ηλεκτροδιάβρωσης, με την προσθήκη κόνεως στο διηλεκτρικό υγρό. Η μέθοδος εισήχθη στα τέλη της δεκαετίας του '70.

Ο μηχανισμός της ηλεκτροδιάβρωσης με προσθήκη κόνεως (Powder Mixed EDM/ PMEDM), ή αλλιώς της ηλεκτροδιάβρωσης με πρόσθετα (additive EDM), είναι διαφορετικός από εκείνον της συμβατικής ηλεκτροδιάβρωσης. Ένα κατάλληλο υλικό σε μορφή κόνεως (πούδρας) αναμειγνύεται με το διηλεκτρικό υγρό. Όταν η απαραίτητη τάση εφαρμοστεί, το διάκενο που περιέχει τα πρόσθετα σωματίδια και όπου δημιουργείται ο σπινθήρας, μπορεί να αυξηθεί από 25-50 στα 50-150 μm . Αυτό συμβαίνει καθώς τα πρόσθετα, βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά διάσπασης του διηλεκτρικού, η μονωτική του δύναμη ενάντια στο ηλεκτρικό ρεύμα μειώνεται και συνεπώς, το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων αυξάνεται. Η αύξηση του διακένου, κάνει την έκπλυση, αποτελεσματικότερη και ομοιογενή. Κατ' επέκταση, η διαδικασία αποκτά μεγαλύτερη σταθερότητα, με καλύτερους ρυθμούς παραγωγής, μικρότερους λόγους φθοράς του εργαλείου και καλύτερο φινίρισμα για την κατεργασμένη επιφάνεια.

Όταν εφαρμοστεί τάση 80–320 V μεταξύ των ηλεκτροδίων, με διάκενο 25-50 μm , δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο της τάξης 10^5 – 10^7 V/m. Τα σωματίδια της κόνεως ενεργοποιούνται και κινούνται σε εναλλασσόμενη κατεύθυνση, επιταχυνόμενα και φορτιζόμενα από το ηλεκτρικό πεδίο, λειτουργώντας ως αγωγοί. Επιπλέον διατάσσονται σε αλυσίδες, στην περιοχή της εκκένωσης ώστε να δημιουργούν μια αγώγιμη γέφυρα μεταξύ των ηλεκτροδίων, προκαλώντας πρόωρη έκρηξη. Ο σπινθήρας της εκκένωσης δημιουργείται ταχύτερα, προκαλώντας ταχύτερη διάβρωση της επιφάνειας του τεμαχίου.

Το διηλεκτρικό αναμειγνύεται με τα πρόσθετα είτε στη δεξαμενή της κατεργασίας είτε σε άλλη δεξαμενή πριν εισέρθει στη δεξαμενή κατεργασίας. Για καλύτερη κυκλοφορία και για να μην καθιζάνουν τα σωματίδια της κόνεως χρησιμοποιείται αναδευτήρας. Το ακροφύσιο τροφοδοσίας του αναμειγμένου διηλεκτρικού με το σημείο απορρόφησης του από τη δεξαμενή τοποθετούνται όσο το δυνατό κοντύτερα προκειμένου να διατηρούνται τα πρόσθετα σωματίδια μέσα στο διάκενο τον περισσότερο δυνατό χρόνο. Επιπλέον χρησιμοποιούνται μαγνήτες στον πυθμένα της δεξαμενής για να διαχωρίζεται το πρόσθετο από το διηλεκτρικό μετά την κάθε χρήση του. Τα διάφορα ήδη πρόσθετων που χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατεργασία είναι, αλουμίνιο, χαλκός, σίδηρος γραφίτης, πυρίτιο και καρβίδια χαλκού ή πυριτίου.

Τα πρόσθετα σε μεγάλες συγκεντρώσεις βρέθηκε ότι καθιστούν ασταθή και δύσκολη την κατεργασία, καθώς δημιουργείται βραχυκύκλωμα. Πρόσφατα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με την προσθήκη λεπτής κόνεως γραφίτη, σε έλαιο κηροζίνης, κατά την κατεργασία χαλύβδινων εργαλείων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, με προσθήκη 4 g/l

κόνεως γραφίτη, αυξάνεται το απαραίτητο διάκενο για τη δημιουργία εκκένωσης ενώ μειώνεται η τάση διάσπασης του διηλεκτρικού.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου, δείχνουν μεταξύ άλλων ότι μπορεί να βελτιώσει το φινίρισμα και την ποιότητα της επιφάνειας, παράγοντας με γρήγορους ρυθμούς, επιφάνειες ποιότητας καθρέπτη. Επιπροσθέτως, η κατεργασμένη επιφάνεια έχει μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση και στη λείανση. Στο ερευνητικό πεδίο, έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες τα τελευταία δέκα χρόνια που αφορούν τη χρήση της μεθόδου για την τροποποίηση επιφανειών, για την εκμετάλλευση αυτών των δυνατοτήτων. Για την επίτευξη τροποποίησης της επιφάνειας με προσθήκη σκόνης στο διηλεκτρικό, έχει αποδειχθεί ότι πρέπει να προτιμάται αρνητική πολικότητα στο εργαλείο.

Οι Pecas και Henriques, διαπίστωσαν το 2003, ότι με την πρόσμιξη κόνεως πυριτίου στο διηλεκτρικό, εξαλείφθηκαν όλες οι ανεπιθύμητες συνθήκες που επηρέαζαν αρνητικά την κατεργασία [52]. Οι κρατήρες που δημιουργήθηκαν ήταν εξαιρετικά ομαλοί και η επιφάνεια βελτιώθηκε αποκτώντας γυαλιστερή όψη. Σε υψηλές θερμοκρασίες πλάσματος, η σκόνη μπορεί να ενωθεί με τα σωματίδια άνθρακα που αποπέμπονται από το διηλεκτρικό όταν διασπάται, διαμορφώνοντας υψηλής σκληρότητας καρβίδια στην κατεργασμένη επιφάνεια. Σε συνδυασμό με την αύξηση της διάρκειας του παλμού και την συγκέντρωση της σκόνης, το τροποποιημένο επιφανειακό στρώμα, έδωσε μεγαλύτερη σκληρότητα στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η προσθήκη αρωματικών υδρογονανθράκων στο διηλεκτρικό διαπιστώθηκε επίσης ότι επηρεάζει εξίσου την ανάφλεξη και τη φάση της διάσπασης από μεμονωμένους παλμούς, όπως ανέφερε ο Rehbein το 2004 [54].

Κάποια από τα υλικά που έχουν προστεθεί αποτελεσματικά σαν σκόνη στο διηλεκτρικό, είναι το νικέλιο, το κοβάλτιο, ο σίδηρος, το αλουμίνιο, το χρώμιο, το τιτάνιο, ο γραφίτης, το πυρίτιο και το μολυβδένιο με το μέγεθος των κόκκων να κυμαίνεται μεταξύ 1 και 100 μm . Ο Koshy το 1983, διαπίστωσε ότι η προσθήκη στοιχείων στο διηλεκτρικό μπορούσε να προσδώσει τις επιθυμητές ιδιότητες στο επιφανειακό στρώμα των κατεργασμένων τεμαχίων. Ο άνθρακας από το διηλεκτρικό διασπάστηκε και ενώθηκε με τα πρόσθετα στοιχεία δημιουργώντας αντίστοιχα καρβίδια. Για αρνητική πολικότητα του εργαλείου και την ίδια συγκέντρωση σε σκόνη, οι δύο βασικές παράμετροι που επηρεάστηκαν ήταν η διάρκεια και η ένταση του παλμού [55].

Σκόνη τιτανίου σε κηροζίνη χρησιμοποίησε ο Furutani το 2001, για να επιτύχει καρβίδια τιτανίου με σκληρότητα της τάξης των 1600 HV σε χαλύβδινα τεμάχια με αρνητικά πολωμένο ηλεκτρόδιο από χαλκό. Η μέγιστη ένταση έφτανε τα 3 A και η διάρκεια των παλμών ήταν 2 μs . Ένας περιστρεφόμενος δίσκος κρατούσε σταθερή την συγκέντρωση της κόνεως στην περιοχή της κατεργασίας. Μετά από ανάλυση διάθλασης ακτίνων X, αποκαλύφθηκε η παρουσία τιτανίου αλλά και καρβιδίων τιτανίου, στην κατεργασμένη επιφάνεια, με τον άνθρακα να αποδεικνύεται έτσι ότι προήλθε από το διηλεκτρικό [56]. Προσθέτοντας ουρία σε αποσταγμένο νερό για την κατεργασία τεμαχίων από τιτάνιο, ο Yan δημιούργησε νιτρίδια τιτανίου στην κατεργασμένη επιφάνεια, τα οποία βελτίωσαν τα τριβολογικά χαρακτηριστικά και την αντίσταση σε φθορά της επιφάνειας. Με την αύξηση της διάρκειας παλμού παρατηρήθηκε μείωση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού και της σχετικής φθοράς του εργαλείου, ενώ η σκληρότητα σε μικροσκοπικό επίπεδο έφτασε τιμές της τάξης των 250 Hk [46].

Με τη χρήση αγωγίμης σκόνης από υλικά όπως ο γραφίτης και το αλουμίνιο, ή ημιαγώγιμα υλικά όπως η σκόνη πυριτίου, είναι δυνατόν η κατεργασμένη επιφάνεια να έχει ποιότητα επιφάνειας καθρέπτη. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι εκτός από την επιλογή των σωστών ρυθμίσεων της πολικότητας και των χαρακτηριστικών του παλμού, είναι οι ιδιότητες της εκάστοτε σκόνης και το υλικό του τεμαχίου που επηρεάζουν τις παραμέτρους εξόδου του συστήματος, όπως το ρυθμό αφαίρεσης υλικού, τη σχετική φθορά του κοπτικού και την επιφανειακή τραχύτητα. Η χρήση κόνεως γραφίτη ή πυριτίου για την κατεργασία χάλυβα τύπου SKH-54 απέδιδε επιφάνεια ποιότητας καθρέπτη, σε αντίθεση

με τη σκόνη αλουμινίου, ενώ η εφαρμογή αρνητικής πολικότητας στο εργαλείο αποδείχθηκε απαραίτητη για την επιτυχία της διαδικασίας.

Οι Tzeng και Chen αντίθετα, διεξάγοντας πειράματα σε τεμάχια από χάλυβα τύπου SKD-11, με σκόνη χρωμίου, αλουμινίου, χαλκού και πυριτίου, κατέληξαν ότι η σκόνη αλουμινίου απέδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα φινιρίσματος της επιφάνειας με τη σκόνη χρωμίου να έπεται, ενώ η σκόνη από χαλκό είχε τα χειρότερα αποτελέσματα. Φάνηκε ότι εκτός από το συνδυασμό υλικού του τεμαχίου με το υλικό της σκόνης, η απόδοση της κατεργασίας επηρεάζεται επιπλέον από το μέγεθος των κόκκων, τη συγκέντρωση και τις ιδιότητες της σκόνης όπως η πυκνότητα, η αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα και η θερμική αγωγιμότητα [57]. Ο Klocke το 2004 χρησιμοποιώντας τεχνική κάμερας υψηλής ταχύτητας, διαπίστωσε τη μεγέθυνση της διαμέτρου του καναλιού πλάσματος, για διηλεκτρικό εμπλουτισμένο με σκόνη αλουμινίου σε σχέση με το απλό υγρό διηλεκτρικό. Η διαδικασία προέβλεπε παλμούς διάρκειας 100 μ s, ενώ η κάμερα είχε δυνατότητα λήψης φωτογραφιών κάθε 60 μ s, με σκοπό την απαθανάτιση ενός πλήρως ανεπτυγμένου καναλιού πλάσματος. Εκ του αποτελέσματος, φάνηκε ότι σε τέτοιες περιπτώσεις, η ενέργεια των εκκενώσεων διαχέεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια του τεμαχίου. Ο ρυθμός έκπλυσης του διηλεκτρικού επίσης, βρέθηκε ότι επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα τέτοιων κατεργασιών [58].

Ο Narumiya μελέτησε την προσθήκη κόνεως από αλουμίνιο και γραφίτη στο διηλεκτρικό, παρατηρώντας τη βελτίωση στην ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας συγκριτικά με τη χρήση σκόνης πυριτίου [59]. Τα βέλτιστα αποτελέσματα με τη χρήση των παραπάνω υλικών επετεύχθησαν όταν οι διάμετρος των σωματιδίων ήταν μικρότερη από 15 μ m και η συγκέντρωση μεταξύ 2 – 15 gr/l. Ο Mohri μελέτησε την επίδραση της σκόνης πυριτίου στην ποιότητα της επιφάνειας χυτοχάλυβα H – 13. Αυτού του είδους η κατεργασία, προσδίδει καλύτερες και ανθιστάμενες στη σκουριά επιφάνειες με τραχύτητα της τάξης των 2 μ m [42]. Ο Ming απέδειξε ότι η χρήση σωματιδίων από αγωγίμα και ανόργανα οξείδια, αυξάνει τον MRR, μειώνει τη φθορά του κοπτικού και βελτιώνει την ποιότητα της επιφάνειας. Σε άλλη μελέτη από τον Chow, διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη αλουμινίου και πυριτίου σε κηροζίνη κατά την μικρο – ηλεκτροδιάβρωση κραμάτων τιτανίου, επιτρέπει μεγαλύτερο διάκενο. Σαν αποτέλεσμα βελτιώνει την έκπλυση των αποβλήτων και αυξάνει το ρυθμό αφαίρεσης υλικού [60].

Οι Syed και Palaniyandi, δημοσίευσαν στις αρχές του 2012, τα αποτελέσματα της μελέτης του που αφορούσε την κατεργασία τεμαχίων από W300 εργαλειοχάλυβα, με την προσθήκη σκόνης αλουμινίου σε αποσταγμένο νερό. Βρέθηκε ότι ο μέγιστος ρυθμός αφαίρεσης υλικού επετεύχθη με θετική πολικότητα στο εργαλείο, πλάτος έντασης 12 A, ενεργό χρόνο 180 μ s, και χαμηλή συγκέντρωση κόνεως στο 1 g/L. Το λευκό στρώμα μειώθηκε σε μέγεθος, η ποιότητα επιφάνειας και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού βελτιώθηκαν συγκριτικά με την κατεργασία σε καθαρό αποσταγμένο νερό. Ο ελάχιστος ρυθμός φθοράς του ηλεκτροδίου προέκυψε για πλάτος ρεύματος 6 A, ενεργό χρόνο μεγαλύτερο των 240 μ s και συγκέντρωση 1 g/L. Ενώ ο βέλτιστος MRR προέκυψε με θετική πολικότητα, η βέλτιστη ποιότητα επιφάνειας προέκυψε για αρνητική πολικότητα του ηλεκτροδίου.

Η συγκεκριμένη μέθοδος, φαίνεται ότι θα απασχολήσει στο μέλλον, όλο και περισσότερο τις εφαρμογές της ηλεκτροδιάβρωσης και ιδιαίτερα σε θέματα παραγωγικότητας και ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας. Η περεταίρω διερεύνηση της μεθόδου είναι απαραίτητη, προκειμένου να γίνουν πιο κατανοητοί οι μηχανισμοί και τα χαρακτηριστικά της.

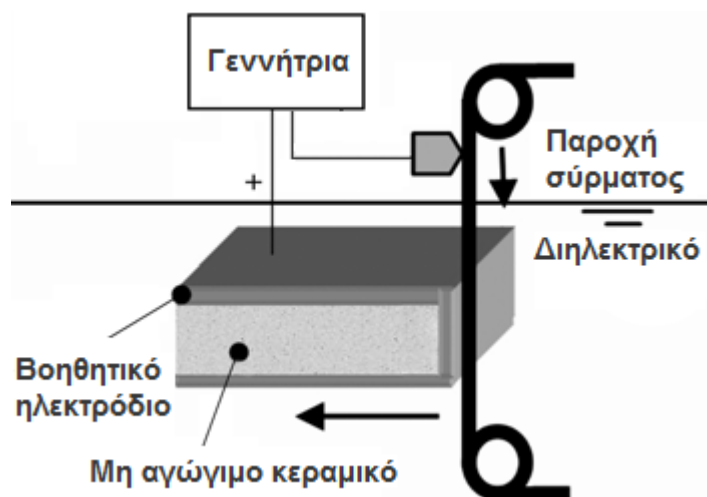
5.1.5 Ηλεκτροδιάβρωση με βοηθητικό ηλεκτρόδιο

Μέχρι πριν μερικά χρόνια, ήταν κοινή πεποίθηση ότι μη αγωγίμα υλικά, ήταν αδύνατο να κατεργαστούν με τη μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης. Πρόσφατα ωστόσο, προτάθηκε μία νέα εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης που επιτρέπει την κατεργασία τέτοιων κεραμικών υλικών όπως τα Si₃N₄, SiC, AlN και ZrO₂. Η μέθοδος αυτή έγινε γνωστή ως “Μέθοδος Βοηθητικού Ηλεκτροδίου” ή AEM (Assisting Electrode Method).

Στη μέθοδο βοηθητικού ηλεκτροδίου, εφαρμόζεται ένα λεπτό αγώγιμο στρώμα στην επιφάνεια του μη αγώγιμου υλικού πριν την έναρξη της κατεργασίας. Καθώς ξεκινά η ηλεκτροδιάβρωση, το στρώμα αυτό τήκεται και διαχέεται στην κεραμική επιφάνεια. Αυτό το αγώγιμο στρώμα, αποτελείται από διασπασμένο άνθρακα που δημιουργείται από την αποσύνθεση ελαίων λιπάνσεως. Ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού ξεκινά αμέσως μετά τη διάλυση αυτού του ηλεκτρικά αγώγιμου προϊόντος, και το στρώμα που διαμορφώνεται θεωρείται το βοηθητικό ηλεκτρόδιο της κατεργασίας. Το διηλεκτρικό που συνήθως χρησιμοποιείται είναι η κηροζίνη.

Φαίνεται ότι στην κατεργασία με βοηθητικό ηλεκτρόδιο, λαμβάνουν χώρα δύο διαφορετικά φαινόμενα σχετικά με τις εκκενώσεις. Το ένα αφορά τη διαδικασία διάχυσης του αγώγιμου στρώματος στην επιφάνεια του τεμαχίου και ομοιάζει με τις κατεργασίες τροποποίησης των επιφανειών με ηλεκτροδιάβρωση. Το άλλο είναι υπεύθυνο για τον πραγματικό μηχανισμό αφαίρεσης υλικού από το τεμάχιο. Σε μελέτες που έχουν γίνει για τις κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης με βοηθητικό ηλεκτρόδιο, έχει παρατηρηθεί ότι στην ακολουθία των διαδοχικών παλμών, παρεμβάλλονται παλμοί μεγαλύτερης διάρκειας από αυτή που έχει προρρυθμιστεί στην γεννήτρια που τους παράγει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ορισμένες από τις εκκενώσεις, διαπερνούν συχνά το αγώγιμο στρώμα και εκδηλώνονται στην υποκείμενη επιφάνεια του κεραμικού που έχει πολύ μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση. Με τον τρόπο αυτό διαμορφώνεται το ανθρακούχο στρώμα που επιτρέπει τις εκκενώσεις στην επιφάνεια του κεραμικού υλικού. Με τους παλμούς κανονικής διάρκειας, πραγματοποιείται τελικά η αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο.

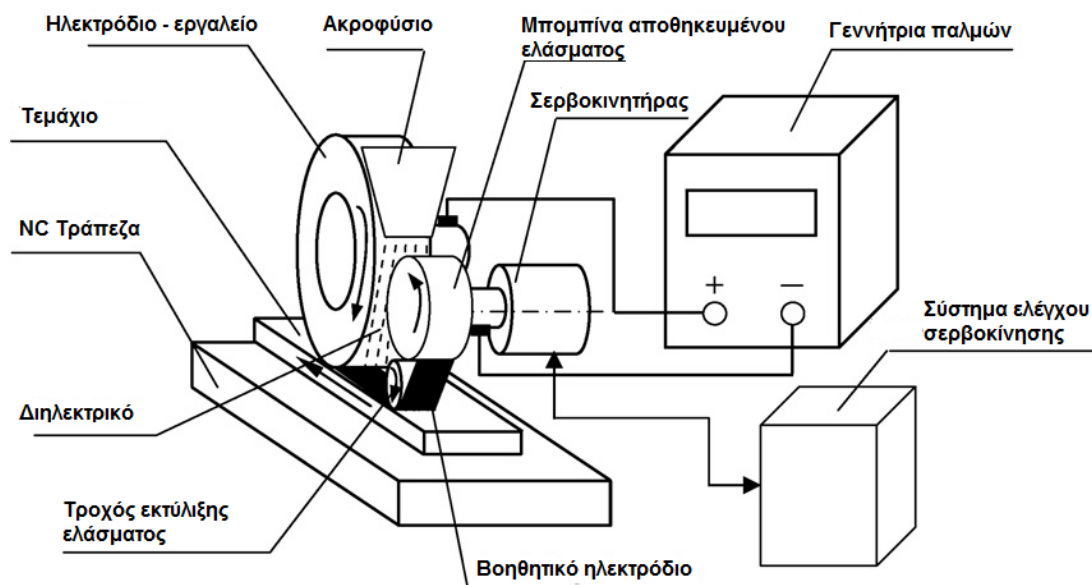
Η χρήση βοηθητικού ηλεκτροδίου μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε παραλλαγή της ηλεκτροδιάβρωσης, ωστόσο οι περισσότερες εφαρμογές κάνουν χρήση της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος. Μια τυπική διάταξη για την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος με βοηθητικό ηλεκτρόδιο παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 : Διάταξη ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος με βοηθητικό ηλεκτρόδιο [37].

Σε αντίστοιχη μελέτη που έκανε ο Mohri με τους συνεργάτες του, κατεργάστηκε κεραμικά τύπου Si₃N₄ και ZrO₂ καταλήγοντας σε ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Το πάχος του αγώγιμου στρώματος αυξάνονταν με την αύξηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος. Στο ηλεκτρικά αγώγιμο στρώμα, βρέθηκαν συστατικά του σύρματος καθώς και του τεμαχίου, ενώ καταγράφηκε η δυνατότητα διάτρησης τέτοιων κεραμικών επιφανειών με την παραπάνω μέθοδο.

Με κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος με βοηθητικό ηλεκτρόδιο, είναι δυνατό να κατασκευαστούν πολύπλοκου σχήματος προϊόντα σε τρεις διαστάσεις. Ωστόσο η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και στις υπόλοιπες παραλλαγές της ηλεκτροδιάβρωσης όπως σε κατεργασίες φραιζαρίσματος.



Σχήμα 5.5: Φραιζάρισμα κεραμικού με ηλεκτροδιάβρωση και βοηθητικό ηλεκτρόδιο.

Μια επίσης διαθέσιμη διάταξη για το φραιζάρισμα με ηλεκτροδιάβρωση, κεραμικών υλικών με τη χρήση βοηθητικού ηλεκτροδίου, φαίνεται στο σχήμα 5.5. Το βοηθητικό έλασμα σε αυτή την περίπτωση διαφοροποιείται. Πρόκειται για ένα μεταλλικό έλασμα το οποίο βρίσκεται αποθηκευμένο και τυλιγμένο σε μπαμπίνα, από την οποία εκτυλίσσεται με τη βοήθεια ενός τροχού με σερβοκίνηση. Το έλασμα σχεδόν εφάπτεται στο κεραμικό υλικό και έτσι η εκκένωση που συμβαίνει μεταξύ περιστρεφόμενου εργαλείου – ηλεκτροδίου και βοηθητικού ηλεκτροδίου αφαιρεί υλικό και από το κεραμικό τεμάχιο. Το διηλεκτρικό ψεκάζεται στο διάκενο με ειδικό ακροφύσιο, ενώ το τεμάχιο κινείται, φερόμενο σε τράπεζα υπό αριθμητικό έλεγχο.

5.2 Εξελίξεις στην μοντελοποίηση

Είναι γεγονός ότι η ηλεκτροδιάβρωση σαν κατεργασία, δέχεται πολλές παραμέτρους ως μεταβλητές. Η ανάγκη για σωστή πρόβλεψη των αποτελεσμάτων που μπορεί να προκύψουν από τον εκάστοτε συνδυασμό των παραμέτρων, όπως είναι η ποιότητα της επιφάνειας και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού, απασχολούν έντονα τους ερευνητές. Από την αρχή της δεκαετίας του '70, οι ερευνητές σε παγκόσμια κλίμακα προσπάθησαν να μοντελοποιήσουν το φαινόμενο της ηλεκτρικής εκκένωσης και του καναλιού πλάσματος που δημιουργείται, καθώς επίσης και του μηχανισμού της διάβρωσης των ηλεκτροδίων κατά την κατεργασία.

Για το σκοπό αυτό προτάθηκαν δύο διαφορετικοί μηχανισμοί για την ανάλυση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού. Μια ήλεκτρο – μηχανική ανάλυση, για μικρής διάρκειας ηλεκτρικούς παλμούς και μια ήλεκτρο – θερμική ανάλυση για την κανονική ηλεκτροδιάβρωση που αφορά την αφαίρεση υλικού μέσω έντονης ενέργειας πλάσματος που παράγεται μεταξύ ανόδου και καθόδου. Η θερμική – ηλεκτρική ανάλυση έχει οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα και σε αυτή βασίζονται κυρίως οι νεώτερες σχετικές επιστημονικές έρευνες.

Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στο έργο του DiBitonto και των συνεργατών του, στα τέλη της δεκαετίας του '80. Το μοντέλο που ανέπτυξαν υπέθετε σημειακή παραγωγή θερμότητας για τη διάβρωση της καθόδου και τα αποτελέσματα που αυτό απέδωσε, συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα εξαντλητικών πειραμάτων που διεξήγαγαν σε συνεργασίας με την AGIE. Τελικά αποδείχθηκε ότι το μοντέλο απέδιδε αποτελέσματα που πλησίαζαν τα πειραματικά περισσότερο, από ότι με κάθε άλλο προϋπάρχον μοντέλο. Το μοντέλο αποτέλεσε σημείο αναφοράς για τα επόμενα χρόνια και υιοθετήθηκε από πολλούς ερευνητές, ενώ χρησιμοποιήθηκε ακόμη, για την ανάλυση θερμικών τάσεων και την ανάπτυξη της ηλεκτροδιάβρωσης με προσθήκη κόνεως. Το 2007 ο Yeo, συνέκρινε εκ νέου τα αποτελέσματα του μοντέλου DiBitonto με τα αποτελέσματα διαφόρων νεότερων θερμικών μοντέλων, σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα της AGIE, με κριτήριο την πρόβλεψη της γεωμετρίας των κρατήρων και την αφαίρεση υλικού από την κάθοδο. Και πάλι το μοντέλο DiBitonto αποδείχθηκε ακριβέστερο, αλλά σχετικά μακριά από τα πειραματικά αποτελέσματα, λόγω των παραδοχών και των απλουστεύσεων που το χαρακτηρίζουν, όπως και όλα τα μοντέλα [61].

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης μοντέλων που θα προβλέπουν κατά το δυνατόν ακριβέστερα τα αποτελέσματα της κατεργασίας ανάλογα με τις παραμέτρους εισόδου, έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές, όπως η διαστατική ανάλυση, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και σύνθετα μαθηματικά μοντέλα.

Διαστατική ανάλυση:

Η διαστατική ανάλυση εφαρμόστηκε ήδη σε έρευνες που έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του '70, με σκοπό την πρόβλεψη της φθοράς του εργαλείου σε ηλεκτροδιάβρωση. Η εξίσωση σχετίζει τον όγκο του διαβρωμένου μετάλλου από το εργαλείο, με την ενέργεια και τη συχνότητα των παλμών, τη θερμική αγωγιμότητα και τη λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης του υλικού του ηλεκτροδίου. Η μέθοδος εφαρμόστηκε και για την ανάλυση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού, λαμβάνοντας υπόψη της ηλεκτρικές και μη παραμέτρους της διαδικασίας. Τα αποτελέσματα του μοντέλου, συμφωνούσαν σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά ευρήματα.

Επίσης προτάθηκε ένα ημί – εμπειρικό μοντέλο, με εφαρμογή διαστατικής ανάλυσης για την πρόβλεψη της ποιότητας της επιφάνειας, του MRR και της φθοράς του εργαλείου. Χρησιμοποιώντας το σχέδιο της πειραματικής διάταξης, αναγνωρίστηκαν οι παράμετροι της διαδικασίας όπως το πλάτος του ρεύματος, το υλικό και η πολικότητα. Τα τελικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το μέσο σφάλμα μεταξύ πρόβλεψης και πειραματικών δεδομένων ήταν μόλις 10% για το ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα για τη σχέση μεταξύ φθοράς του εργαλείου και χρόνου εκκένωσης υπό αντίστροφη πολικότητα, προέκυπταν αντίστροφα από τα αναμενόμενα.

Μαθηματικά μοντέλα:

Από τα πρώτα μοντέλα που προτάθηκαν, ήταν εκείνο της απλής διάβρωσης της καθόδου. Το αρχικό ισοζύγιο ενέργειας για τις εκκενώσεις αερίου, τροποποιήθηκε ώστε να κάνει χρήση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου ως κύρια πηγή ενέργειας που παρέχεται στην επιφάνεια της καθόδου. Αργότερα αναπτύχθηκε το μοντέλο διάβρωσης της ανόδου που αποδέχεται την ένταση του ρεύματος σαν οριακή συνθήκη στην επιφάνεια της ανόδου, υποθέτοντας την γκαουσιανή κατανομή της ροής της θερμότητας στο υλικό της επιφάνειας της ανόδου. Η επιφάνεια στην οποία εμφανίζεται ροή θερμότητας υποτίθεται ότι αυξάνεται με το χρόνο. Ένα ακόμα μοντέλο, αποτελούνταν από τρεις διαφορικές εξισώσεις. Η μία από τη ρευστομηχανική, η δεύτερη από ένα ενεργειακό ισοζύγιο και η τρίτη από δύο εξισώσεις ακτινοβολίας και πλάσματος.

Ο McGeough με τον Rasmussen, ανέπτυξαν ένα δικό τους μοντέλο για την τροποποίηση επιφανειών με ηλεκτροδιάβρωση, που βασίζεται στην επίδραση του διηλεκτρικού και συγκεκριμένα στις αλλαγές που συμβαίνουν στην αντίσταση του, κατά τη διάρκεια των

εκκενώσεων [62]. Οι θεωρητικές εκτιμήσεις, συμφωνούσαν με τα πρακτικά αποτελέσματα στο ότι η τραχύτητα της επιφάνειας καθορίζεται κυρίως από το πλάτος του ρεύματος και από τη διάρκεια του ενεργού χρόνου της κατεργασίας. Μεταγενέστερη μοντελοποίηση για τη διερεύνηση της τραχύτητας κατέδειξε ότι η τραχύτητα αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος της εκκένωσης, της διάρκειας του παλμού και της πίεσης του διηλεκτρικού. Το προφίλ της επιφάνειας μεταφέρθηκε σε υπολογιστή, ψηφιοποιήθηκε και μοντελοποιήθηκε με τη μορφή σειρών Fourier.

Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα:

Οι Gopal και Rajurkar στράφηκαν στη μοντελοποίησης της διαδικασίας με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Με παραμέτρους εισόδου το βάθος κατεργασίας, την ακτίνα του εργαλείου, τον ενεργό και μη ενεργό χρόνο και την ένταση του ρεύματος της κατεργασίας, διαμόρφωσαν το μοντέλο. Συγκρίνοντάς τα ευρήματα με τα πραγματικά δεδομένα και φάνηκε ότι το μοντέλο αυτό έδινε ταχύτερα και ακριβέστερα αποτελέσματα από κάθε προηγούμενο [63]. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν προσαρμοζόμενα συστήματα νέυρο – ασαφών επαγωγών (ANFIS) που αποδείχθηκαν ακριβέστερα με σφάλμα 16,33%.

Περαιτέρω μελέτες βασιζόμενες στην ίδια μέθοδο, χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη του φινιρίσματος. Ο συνδυασμός τεχνητών νευρωνικών δικτύων με γενετικούς αλγόριθμους, οδήγησαν τελικά σε μια πιο ολοκληρωμένη λύση στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης και της μοντελοποίησης της κατεργασίας. Το σφάλμα του μοντέλου κυμαίνεται στο 5.6% για την πρόβλεψη του MRR και στο 4.98% για την τραχύτητα της επιφάνειας. Το σύστημα μοντελοποίησης προσέδωσε μεγαλύτερη κατανόηση γύρω από την αλληλεπίδραση μεταξύ εργαλείου – τεμαχίου. Τέλος οι Panda και Bhoi, ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την πρόβλεψη του MRR με ακριβέστερα και ταχύτερα αποτελέσματα που αποδίδει καλύτερα στο στοχαστικό περιβάλλον των πραγματικών συνθηκών της κατεργασίας χωρίς την κατανόηση των πολύπλοκων φυσικών φαινομένων που χαρακτηρίζουν την ηλεκτροδιάβρωση [17].

Τα βασικότερα μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν, άλλοτε σε μεγαλύτερο και άλλοτε σε μικρότερο βαθμό, τις προσπάθειες για μοντελοποίηση του φαινομένου, οφείλονται στην αδυναμία σωστής εκτίμησης κάποιων παραμέτρων της διαδικασίας και σε ορισμένες υποθέσεις και παραδοχές που αναγκαστικά πρέπει να γίνουν για το λόγο αυτό. Οι υποθέσεις αυτές είναι η σταθερή διάμετρος του σπινθήρα της εκκένωσης, η προσέγγιση της πηγής της θερμότητας ως σημειακή ή ως ομοιόμορφη δισκοειδής και ότι οι ιδιότητες των υλικών των ηλεκτροδίων είναι σταθερές και ανεξάρτητες της θερμοκρασίας.

Υπάρχει λοιπόν η ανάγκη, να αναπτυχθούν περισσότερο περιεκτικά και ρεαλιστικά αριθμητικά μοντέλα για τη διαδικασία. Μοντέλα που θα βασίζονται στη θερμική ανάλυση της ηλεκτροδιάβρωσης για να προβλέπουν με ακρίβεια το σχήμα και το μέγεθος των κρατήρων, προσεγγίζοντας περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες, τροποποιώντας τις υποθέσεις αυτές.

6. ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

6.1 Κίνδυνοι της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση

Όπως όλες οι κατεργασίες που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές, έτσι και η ηλεκτροδιάβρωση χαρακτηρίζεται από ένα βαθμό επικινδυνότητας. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές κατεργασίες που παράγουν γρέζια, υπάρχουν λιγότερες αναφορές ατυχημάτων κατά τη διάρκεια κατεργασιών με ηλεκτροδιάβρωση. Επιπλέον, η συνέπειες των εφαρμογών της ηλεκτροδιάβρωσης στο περιβάλλον είναι επίσης μικρότερες.

Ο σημαντικότερος κίνδυνος που απειλεί όσους εργάζονται σε περιβάλλον κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση, είναι τα αέρια που εκλύονται, όταν το εκτιθέμενο σε υψηλότερες θερμοκρασίες διηλεκτρικό, εξατμίζεται και διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Οι ατμοί ενδέχεται επίσης, να περιέχουν συστατικά των μετάλλων που συμμετέχουν στην κατεργασία.

Το διηλεκτρικό που χρησιμοποιείται μπορεί να πάρει πολλές μορφές, που περιλαμβάνουν υγρά από υδρογονάνθρακες, μεταλλικά έλαια ή ραφινάρισμα συνθετικά. Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την κατεργασία, δεν είναι πάντα ευανάγνωστοι από τους εργαζόμενους και τους χειριστές, οι οποίοι συχνά εκτίθενται σε εν δυνάμει επικίνδυνα αέρια με τη μορφή αερολυμάτων ή ατμών. Είναι επίσης πιθανόν να συσσωρεύονται στο διηλεκτρικό, επιβλαβείς ουσίες οι οποίες να εισέρχονται στον οργανισμό μέσω δερματικής επαφής. Μπορεί ακόμη διάφορα μικροσκοπικά μεταλλικά σωματίδια που βρίσκονται στο χρησιμοποιημένο διηλεκτρικό να αποτελέσουν κίνδυνο για όσους έρχονται σε επαφή με αυτό.

Το χρησιμοποιημένο διηλεκτρικό υγρό, μπορεί να περιέχει επιβλαβή συστατικά, όπως αλιφατικά και πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Η έκθεση του οργανισμού σε τέτοιες ουσίες μπορεί να γίνει μέσω του δέρματος ή του αναπνευστικού. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι προκειμένου να επαλειφθεί ή να ελεγχθεί η έκθεση σε τέτοια συστατικά, κυρίως με τη χρήση απορροφητικών συστημάτων.

Οι υπόλοιποι κίνδυνοι που μπορεί να προκύψουν κατά την εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης, είναι συνήθεις σε περιβάλλον βιομηχανικών κατεργασιών μπορούν να καταταγούν σε επτά βασικές κατηγορίες:

- Κίνδυνοι λόγω υψηλής τάσης

Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, εφαρμόζονται πολύ υψηλές τάσεις, που μπορούν να προκαλέσουν ακόμα και το θάνατο σε περίπτωση επαφής. Οι περισσότερες εργαλειομηχανές τροφοδοτούνται με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα με τάσεις 240 ή 480 Volt. Μέσα στο θάλαμο της γεννήτριας παροχής συνεχούς ρεύματος μπορεί να υπάρχει τάση έως και 300 Volt, που είναι περισσότερο επικίνδυνη. Επίσης υπάρχει η πιθανότητα επαφής με το εκάστοτε ηλεκτρόδιο ή σύρμα όπου λαμβάνουν χώρα οι ηλεκτρικές εκκενώσεις, με εξίσου σοβαρές συνέπειες. Για τους παραπάνω λόγους συνίσταται η σωστή γείωση της εργαλειομηχανής.

- Κίνδυνοι έκρηξης

Ο κίνδυνος έκρηξης ήταν συχνός στο παρελθόν, κατά την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης με χρήση κηροζίνης ως διηλεκτρικό, καθώς όταν εξατμίζεται οι ατμοί που παράγονται είναι αρκετά εκρηκτικοί. Πλέον ο κίνδυνος πηγάζει από τα αέρια παραπροϊόντα της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος ή αποτύπωσης. Τα αέρια που ορισμένες φορές εγκλωβίζονται σε τυφλές οπές και κοιλότητες των ηλεκτροδίων, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων ενίοτε αναφλέγονται και εκρήγνυνται. Ειδικότερα, κατά την ηλεκτροδιάβρωση σε νερό ή διηλεκτρικό από υδρογονάνθρακες, παράγονται υδρογονούχα αέρια που υπό κανονικές συνθήκες

απομακρύνονται αβλαβώς στην ατμόσφαιρα. Αν όμως τα αέρια αυτά εγκλωβιστούν σε κοιλότητες όπου υπάρχει επίσης οξυγόνο που δεν απομακρύνθηκε με τη ροή του διηλεκτρικού, τότε το μείγμα μπορεί να εκραγεί βίαια.

- Κίνδυνοι πυρκαγιάς

Ο κίνδυνος της φωτιάς, σχετίζεται με την ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας. Παρά το γεγονός ότι τα περισσότερα υγρά διηλεκτρικά έχουν σημείο ανάφλεξης μεγαλύτερο από 115° C, εάν τυχόν η θερμοκρασία το υπερβεί, τότε η γεμάτη από διηλεκτρικό δεξαμενή είναι πολύ πιθανό να αναφλεγεί. Για το λόγο αυτό, είναι επιτακτικό να χρησιμοποιείται κάποιο ψυκτικό μέσο, να μην υπάρχει πλεονάζον διηλεκτρικό στη δεξαμενή πέραν των 2-3 mm που καλύπτουν το εκάστοτε υψηλότερο κατεργαζόμενο σημείο του τεμαχίου.

- Χημικοί κίνδυνοι

Χημικοί κίνδυνοι μπορούν να προκύψουν, με τη χρήση καθαριστικών διαλυμάτων που περιέχουν φωσφορικό ή υδροχλωρικό οξύ, για την περιοχή εργασίας των εργαλειομηχανών. Τα προϊόντα αυτά είναι επικίνδυνα σε βιομηχανικό περιβάλλον, αφού μπορεί να αντιδρούν με άλλα προϊόντα της κατεργασίας και να εκλύσουν επικίνδυνα αέρια. Κατά την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης, υπάρχει η πιθανότητα πρόκλησης δερματικών παθήσεων καθώς τα διηλεκτρικά υγρά που χρησιμοποιούνται, πολλές φορές είναι έλαια πολύ μικρής πυκνότητας, που ενδέχεται να διαπερνούν τους πόρους του δέρματος και να προκαλούν δερματοπάθειες.

- Κίνδυνοι λόγω ανάπτυξης βακτηρίων

Οι δεξαμενές συγκράτησης του διηλεκτρικού στις κατεργασίες αποτύπωσης ή σύρματος, αποτελούν ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη βακτηρίων. Σε περίπτωση κατεργασίας ιατρικών εξαρτημάτων, πρέπει να εξασφαλίζεται η καθαρότητα της δεξαμενής.

- Κίνδυνοι δηλητηρίασης

Ο κίνδυνος δηλητηρίασης από μόλυβδο, εμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του '90, με τη χρήση υπενδεδυμένων καλωδίων. Ωστόσο έρευνες των τελευταίων ετών απέδειξαν ότι η παρουσία του μολύβδου στην επένδυση των καλωδίων, δεν αυξάνει τη συγκέντρωσή του στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα.

- Λοιποί κίνδυνοι

Η χρήση διηλεκτρικού, είτε πρόκειται για έλαιο, είτε για νερό, αν βρεθεί στο πάτωμα του εργαστηρίου αποτελεί κίνδυνο πτώσης. Το ίδιο συμβαίνει και με την πιθανή παρουσία των μικροσκοπικών μεταλλικών σφαιριδίων που είναι σαν χιλιάδες μικρές σφαίρες που κείτονται στο πάτωμα χωρίς να είναι ορατές [64].

6.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατεργασίας

Αναφορικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης, είναι κοινώς αποδεκτό ότι η κατεργασία χαρακτηρίζεται ως μια από τις πλέον φιλικές προς το περιβάλλον. Η διακίνηση του διηλεκτρικού είναι κλειστή και επαναλαμβανόμενη διαδικασία χωρίς απώλειες, ενώ τα περισσότερα αναλώσιμα που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία, είναι ανακυκλώσιμα. Κάποια από τα υλικά που απαιτούν ειδική μεταχείριση αναφέρονται παρακάτω:

- Απιονισμένο νερό:
Το απιονισμένο νερό είναι από τα λιγότερο επιβλαβή υγρά της κατεργασίας. Χρειάζεται αντικατάσταση συχνά και παρά το γεγονός ότι μετά τη χρήση απιονίζεται ξανά περνάει από ειδικά φίλτρα μπορεί να φέρει ίχνη ψευδάργυρου και για το λόγο αυτό χρήζει ειδικής μεταχείρισης, συνήθως μέσω εξάτμισης.
- Διηλεκτρικά έλαια:
Τα διηλεκτρικά θεωρούνται εν μέρει εύφλεκτα απόβλητα και για το λόγο αυτό πρέπει να συλλέγονται και να διαχειρίζονται αναλόγως. Η λιγότερο επιβλαβής μεταχείρισή τους γίνεται από εταιρείες που το χρησιμοποιούν σαν καύσιμο σε κλίβανους τσιμέντου.
- Διαλύτες:
Διαλύτες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων από τα ελαιώδη διηλεκτρικά, που παραμένουν στην επιφάνεια του κατεργασμένου τεμαχίου. Τα έλαια αυτά πρέπει να ανακυκλώνονται από εξειδικευμένες επιχειρήσεις.
- Φίλτρα των διηλεκτρικών:
Κατά την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό του διηλεκτρικού, συχνά περιέχουν μέταλλα όπως το χρώμιο, και το κοβάλτιο και αν απορριφθούν με τα κοινά απορρίμματα τότε μπορεί να προκαλέσουν μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα. Τα αντίστοιχα φίλτρα για κατεργασίες βυθιζόμενης μήτρας, πρέπει πάντα να δίδονται για ειδική επεξεργασία προτού απορριφθούν.
- Απιονισμένη ρητίνη:
Η παρθένα απιονισμένη ρητίνη δεν είναι επικίνδυνο μέταλλο. Η κορεσμένη απιονισμένη ρητίνη όμως, περιέχει υπολείμματα διαφόρων μετάλλων από το διηλεκτρικό. Πρέπει να διαχειρίζεται με εξειδικευμένες μεθόδους και να μην καταλήγει στα κοινά απορρίμματα.
- Καλώδια:
Τα επενδεδυμένα καλώδια που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην κατεργασία είναι πλέον πλήρως ανακυκλώσιμα και μπορούν να πωληθούν ως παλιοσίδηρο (scrap).
- Εκπομπές ραδιοκυμάτων:
Η κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση παράγει και εκπέμπει ραδιοκύματα λόγω των εκκενώσεων που συμβαίνουν. Οι πρώτες ραδιοεκπομπές μάλιστα είχαν παραχθεί μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων. Καλό είναι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται, να περιορίζεται.

7. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Η κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση έχει πολλά πλεονεκτήματα, λόγω των διευρυμένων δυνατοτήτων που παρέχει και των λύσεων που προσφέρει σε περιορισμούς των συμβατικών κατεργασιών. Τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροδιάβρωσης, συνοψίζονται παρακάτω :

- Μπορούν να κατεργαστούν υλικά οποιασδήποτε σκληρότητας.
- Είναι δυνατή η υψηλή ακρίβεια διαστάσεων και η καλή ποιότητα επιφάνειας.
- Δεν εμπλέκονται δυνάμεις κοπής κατά την κατεργασία, ενώ τα συστήματα ηλεκτροδιάβρωσης είναι μικρότερα και ελαφρύτερα και ασκούν μικρότερες αντιδράσεις στο τεμάχιο [3].
- Δεν παράγονται γρέζια, ενώ τα μεταλλικά υπολείμματα μπορούν εύκολα να φιλτραριστούν μειώνοντας την περιεκτικότητα σε ξένα σώματα.
- Μπορούν να κατεργαστούν τεμάχια που έχουν υποστεί σκλήρυνση, περιορίζοντας τις παραμορφώσεις που προκύπτουν κατά τις θερμικές κατεργασίες.
- Ιδιαίτερου σχήματος κοιλότητες και καμπύλες, ή μήτρες μπορούν να κατεργαστούν με εργαλεία μέτριου κόστους, με μεγαλύτερη ταχύτητα.
- Το εργαλείο μπορεί να κινείται και στους τρεις κάθετους άξονες διαγράφοντας πολύπλοκα περιγράμματα. Οι συμβατικές εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης μπορούν να προγραμματιστούν για κάθετη, ελλειπτική, ελικοειδή, περιστροφική, κυκλική ή καθοδηγούμενη διανυσματικά κατεργασία.
- Δημιουργεί οπές μόνο με ένα πέρασμα.
- Παρέχει ευχέρεια στη διεξαγωγή εξειδικευμένων κατεργασιών, ή σε περιβάλλον υψηλού κινδύνου, όπως οι επισκευές σε πυρηνικές εγκαταστάσεις, λόγω του υποβρύχιου χαρακτήρα της κατεργασίας.
- Τα συστήματα ηλεκτροδιάβρωσης, φέρουν υποσυστήματα υπολογιστικού ελέγχου και βιντεοσκόπησης, καθιστώντας ακριβή την κατεργασία ακόμα και σε επικίνδυνα περιβάλλοντα.
- Λεπτότοιχα και εύθραυστα αντικείμενα, όπως πτερύγια ή πλέγματα μπορούν να κατεργαστούν χωρίς να παραμορφωθεί το τεμάχιο.

Ωστόσο η φύση της μεθόδου, αλλά και η βραχύχρονη, σχετικά, παρουσία της σε βιομηχανικές και μη εφαρμογές, δεν την έχει απαλλάξει από ορισμένους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί συνοπτικά, είναι οι εξής:

- Περιορίζεται στην κατεργασία κυρίως ηλεκτρικά αγωγίμων υλικών.
- Η ταχύτητα της κατεργασίας είναι σχετικά αργή, κυρίως όταν είναι επιθυμητή η υψηλή διαστατική ακρίβεια και η καλή ποιότητα επιφάνειας.
- Οι ατμοί που παράγονται κατά την εξάτμιση του διηλεκτρικού, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, μπορεί να είναι επικίνδυνοι και δύσκολα ανιχνεύσιμοι.
- Υπάρχει θερμικά επηρεασμένη ζώνη κοντά στις κατεργασμένες, εξωτερικές επιφάνειες των προϊόντων.
- Τα ηλεκτρόδια – εργαλεία κατά την ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας, έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής.
- Υπάρχουν ακόμα αναπάντητα ερωτήματα, για τις δυνατότητες κυρίως των υβριδικών μεθόδων που καθιστούν ακόμα τη χρήση τους στην παραγωγή, επίφοβη.

8. ΣΥΝΟΨΗ

Η κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση, είναι μία προηγμένη μέθοδος κατεργασίας μεταλλικών κυρίως επιφανειών, με θερμοηλεκτρικό χαρακτήρα. Άρχισε να αναπτύσσεται και να χρησιμοποιείται στη βιομηχανική παραγωγή από το δεύτερο μισό του περασμένου αιώνα.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του αγώγιμου εργαλείου και του τεμάχιου που βρίσκονται βυθισμένα σε διηλεκτρικό υγρό. Με την προσέγγιση του εργαλείου στο τεμάχιο, η τάση αυξάνεται και το διηλεκτρικό διασπάται. Σαν αποτέλεσμα, στο σημείο όπου το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι ελάχιστο, προκαλούνται ηλεκτρικές εκκενώσεις που λόγω της μεγάλης θερμότητας που εκλύουν, οδηγούν σε τήξη και αφαίρεση ποσότητας μετάλλου και από τα δύο ηλεκτρόδια. Με τον τρόπο αυτό το τεμάχιο αποκτά σταδιακά το σχήμα του εργαλείου. Κατά την κατεργασία το εργαλείο δεν έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο και δεν υπάρχουν οι τάσεις που χαρακτηρίζουν τις συμβατικές μεθόδους. Η διαδικασία δεν παράγει γρέζια ενώ τα απόβλητα απομακρύνονται με την έκπλυση του διηλεκτρικού υγρού.

Η μέθοδος είναι ιδανική για κατεργασία σκληρών μετάλλων, με πολύπλοκη γεωμετρία και λεπτά τοιχώματα. Η εφαρμογή της έχει καθιερωθεί στη βιομηχανία, κυρίως στην κατασκευή καλουπιών και ευαίσθητων μεταλλικών εξαρτημάτων με καλή ποιότητα επιφάνειας. Η απόδοση της κατεργασίας εξελίσσεται συνεχώς, με την βελτίωση της κατεργασμένης επιφάνειας, του ρυθμού αφαίρεσης υλικού και τη μείωση της φθοράς του κοπτικού.

Οι πωλήσεις εργαλειομηχανών ηλεκτροδιάβρωσης αυξάνονται συνεχώς σε παγκόσμιο επίπεδο. Το ενδιαφέρον των επιστημόνων οδηγεί γοργά τις εξελίξεις στην έρευνα και βελτιστοποίηση της κατεργασίας. Παράλληλα οι διάφορες παραλλαγές της ηλεκτροδιάβρωσης, καλύπτουν μεγάλο εύρος των αναγκών της παραγωγής. Νέες εφαρμογές όπως η μικρο-ηλεκτροδιάβρωση που βρίσκονται ακόμα σε υβριδικό στάδιο, φαίνονται ιδανικές για την παραγωγή και επεξεργασία σύγχρονων υλικών και εξαρτημάτων. Υπάρχουν ακόμα ανεξερεύνητα πεδία, στα οποία οι επιστήμονες πρέπει να επιστήσουν τις προσπάθειές τους, όπως οι μεθοδολογίες για την πρόβλεψη της απόδοσης της κατεργασίας.

Ωστόσο τα πολύπλευρα οφέλη, όπως η ευελιξία, η απουσία γρεζιών και τάσεων με το τεμάχιο, η καλή ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, η δυνατότητα κατεργασίας εκεί που οι συμβατικές μέθοδοι αδυνατούν και ο φιλικός για το περιβάλλον χαρακτήρας της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση, καθιστούν τη μέθοδο δημοφιλή και προμηνύουν περισσότερες εφαρμογές και καλύτερες αποδόσεις για το μέλλον.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Benhabib, B., (2003), "Manufacturing: Design, Production, Automation and Integration", CRC Press, Chapter 1, pp 1-4.
- [2]. McGeough, J.K. (1998), "Advanced Methods of Machining" London: Chapman and Hall Ltd, pp. 2-9, 129-151.
- [3]. Abbas, N.M., Solomon, D.G., Bahari, F.Md. (2007), "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)" International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, pp. 1214-1228.
- [4]. Yilmaz, O., Eyercioglu, O., Gindy, N.N.Z., (2006), "A user friendly fuzzy-based system for the selection of electro discharge machining process parameters", Journal of Materials Processing Technology 172, pp. 363-371.
- [5]. Μανταλιά, Γ., (2009) "Μελέτη των δυνάμεων κοπής στις κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων", Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
- [6]. Emini, N., Alain, D., (2008), "Η Ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Machine, EDM) και Νεώτερες Εφαρμογές της", ΕΜΠ, Αθήνα, pp. 7-44.
- [7]. Malhotra, N., Rani, S., Singh, H., (2008), "Improvements in Performance of EDM – A Review", IEEE Southeastcon Conference, Conference Publications, pp. 599-603.
- [8]. Habib, S.S., (2009), "Study of the parameters in electrical discharge machining through response surface methodology approach", Applied Mathematical Modeling 33, pp. 4397-4407.
- [9]. Pandey, A., Singh, S., (2010), "Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol.2 (6), pp.2172-2191.
- [10]. Kaplajian, S., Schmid, V., (2003), "Manufacturing Processes for Engineering Materials", Prentice Hall, New Jersey, p. 541.
- [11]. Saha, S.K., Choudhary, S.K., (2009), "Experimental investigation and empirical modeling of the dry electric discharge machining process", International Journal of Machine Tools & Manufacture 49, pp.297-308.
- [12]. Choudhary, R., Kumar, H., Garg, R.K., (2010), "Analysis and evaluation of heat affected zone in electric discharge machining of EN – 31 die steel", Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol 17, pp. 91- 98.
- [13]. Mahardika, M., Tsujimoto, T., Mitsui, K., (2008), "A new approach on the determination of ease of machining by EDM processes", International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, pp. 746-760.
- [14]. Ho, K., H., Newman, S., T., (2003) "State of the art electrical discharge machining (EDM), International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43, pp. 1287-1300.
- [15]. Kansal, H.K., Singh, S., Kumar, P., (2007), "Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM)", Journal of Materials Processing Technology 184, pp. 32-41.
- [16]. Singh, S., Bhardwaj, A., (2011), "Review to EDM by Using Water and Powder-Mixed Dielectric Fluid", Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 10, No.2, pp. 199-230.
- [17]. Panda, D.K., Bhoi, R.K., (2005), "Electro-Discharge Machining – A Qualitative Approach", Materials and Manufacturing Processes, 21, pp. 853-862.
- [18]. Γιαννουλάκης, Ν., Ζεπάτος, Γ., Καρατζόγλου, Κ., (2006), "Μη Συμβατικές Κατεργασίες", ΟΕΔΒ, Αθήνα, pp.120-159.
- [19]. Masaki, T., (1990), "Micro – electro discharge machining an its applications" proceeding of IEEE: MEMS, pp. 21-26.
- [20]. Houman, L., (1983) "Electrical Discharge Machining: Tooling, Methods & Applications", Society of Manufacturing Engineers, Dearbern, Michigan pp. 5-19.
- [21]. Jeswani, M. L., (1981), "Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining", Wear 70, pp. 133-139.

- [22]. Jilani, S.T., Pandey, P.C., (1984), "Experimental investigations into the performance of water as dielectric in EDM", *International Journal of Machine Tool Desing and Research*, 24, pp. 31-34.
- [23]. Guu, Y.H., Tsai, K., Chen L., (2007), "An Experimental Study on Electrical Discharge Machining of Magnese Zinc Ferrite Magnetic Material", *Materials and Manufacturing Processes*, 22:1, pp.66-70.
- [24]. Liu, K., Lauwers, B., Reynaerts, D., (2009), "Process capabilities of Micro-EDM and its applications", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [25]. Dursun, K., Cogun, C., (2008), "Use of wire bunch electrodes in electtric discharge machining", *Rapid Prototyping Journal*, 15/4, pp. 291-298.
- [26]. Samuel, M.P., Philip, P.K., (1997), "Powder metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining", *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, Vol.37, Issue 11, pp. 1625-1633.
- [27]. Lin, Y.C., Yan, B.H., Huang, F.Y., (2001), "Surface improvement using a combination of electrical discharge machining with ball burnish machining based on the Taguchi method", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18 9, pp. 673-683.
- [28]. Wang, K., Gelgele, H.L., Wang, Y., Yuan, Q., Fang, M., (2003), "A hybrid intelligent method for modeling the EDM process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, pp. 995-999.
- [29]. Marafona, J., Chousal, J., A., G., (2005), "A finite element model of EDM based on the Joule effect", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, pp. 1–8.
- [30]. El-Hofy, H., (2005), "Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes", McGraw-Hill, pp.115-139.
- [31]. Fukuzawa, Y., Mohri, N., Gotoh, H., Tani, T., (2009), "Three – dimensional machining of insulating ceramics materials with electrical discharge machining", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, pp. 150-156.
- [32]. Kumar, S., Singh, R., Singh, T.P., Sethi, B.L., (2009), "Surface modification by electrical discharge machining: A review", *Journal of Materials Processing Technology* 209, pp.3675-3687.
- [33]. Venkatesh, V.C., Parasnis, S., (1972), "Surface transformation in high speed steel after electro discharge machining", *Proceedings of the 5th AIMTDR Conference*, IIT, Roorkee, India, pp. 639–649
- [34]. Jeswani, M.L., Basu, S., (1976), "Electron microprobe study of deposition and diffusion of tool material in electrical discharge machining", *International Journal of Production Research* 17 (1), pp. 1–14.
- [35]. Roethel, F., Garbajs, V., (1976), " Contributions to the micro-analysis of spark eroded Surface", *Annals of the CIRP* 25 (1), pp. 135–140.
- [36]. Lee, H.G., Simao, J., Aspinwall, D.K., Dewes, R.C., Voice, W., (2004), " Electrical discharge surface alloying", *Journal of Materials Processing Technology* 149, pp. 334–340.
- [37]. Kunieda, M., Yoshida, M., (1997), "Electric discharge machining in gas", *Annals of the CIRP* 46 (1), pp. 143–146.
- [38]. Soni, J.S., Chakraverti, G., (1996), "Experimental investigation on migration of material during EDM of T 215 Cr12 die steel", *Journal of Materials Processing Technology* 56, pp. 439–451.
- [39]. Marafona, J., Wykes, C., (2000), "A new method of optimizing material removal rate using EDM with copper tungsten electrodes", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2), pp. 153–164.
- [40]. Moro, T., Goto, A., Mohri, N., Saito, N., Matsukawa, K., Miyake, H., (2001), "Surface modification process by electrical discharge machining with TiC semi-sintered electrode", *Journal of Japanese Society of Precision Engineering* 67 (1), pp. 114–119.

- [41]. Gangadhar, A., Shunmugam, M.S., Philip, P.K., (1991), "Surface modification in Electrodischarge processing with powder compact tool electrode", *Wear* 143, pp. 45–55.
- [42]. Mohri, N., Saito, N., Tsunekawa, Y., (1993), "Metal surface modification by electrical discharge machining with composite electrodes", *Annals of the CIRP* 42 (1), pp. 219–222.
- [43]. Kruth, J.P., (1995), "Rapid prototyping, a new application of physical and chemical processes for material accretion manufacturing", *Proceedings of the ISEM-XI*, pp. 3–28.
- [44]. Simao, J., Lee, H.G., Aspinwall, D.K., Dewes, R.C., Aspinwall, E.M., (2003), "Workpiece surface modification using electrical discharge machining". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, pp. 121–128.
- [45]. Patowari, P.K., Mishra, U.K., Saha, P., Mishra, P.K., (2006), "Surface modification of C-40 steel using WC-Cu P/M green compact electrodes in EDM", In: *Proceedings of the 1st International and 22nd AIMTDR Conference*, IIT, Roorkee, India, pp. 875–879.
- [46]. Tsai, H.C., Yan, B.H., Huang, F.Y., (2003), "EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, pp. 245–252.
- [47]. Idris, M.K.A.B.M., (2008), "Effects of machining characteristics on electric discharge machine using different electrode materials", *University Malaysia Pahang*, pp. 29-40.
- [48]. Morgan, C.J., Vallance, R.R., Marsh, E.R., "Micro – machining and micro – grinding with tools fabricated by micro electro – discharge machining, *International Journal Nanomanufacturing*.
- [49]. Yan, B.H., Lin, Y.C., Huang, F.Y., Wang, C.H., (2001), "Surface modification of SKD 61 during EDM using powder in the dielectric, *Materials Transactions* 42, pp. 2042-2604
- [50]. Zhang, Y., Chen, Z.C., Lin, L.M., Yuan, A., (2000) "The research on the neuro – fuzzy network control strategy for electrical discharge machining process, *Proceedings of 5th International Conference on Progress Machining Technology*, September 16-20, pp. 440-445.
- [51]. Ghoreishi, M., Atkinson, J., (2002), "A comparative experimental study of machining characteristics in vibratory", *Journal of Materials Processing Technology* 120, pp. 374 – 384.
- [52]. Pecas, P., Henriques, E., (2003), "Influence of silicon powder – mixed dielectric on conventional electrical discharge machining", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, pp. 1465-1471.
- [53]. Saha, K., S., Choudhury, S., K., (2008) "Experimental investigation and empirical modeling of the dry electric discharge machining process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49, pp. 297–308
- [54]. Rehbein, W., Schulze, H.P., Mecke, K., Wollenberg, G., Storr, M., (2004), "Influence of selected groups of additives on breakdown in EDM sinking", *Journal of Materials Processing Technology* 149, pp. 58–64.
- [55]. Koshy, G., Philip, P.K., Geddam, A., (1983), "Hardening of surface layers using electric discharge techniques" *Proceedings of the 11th AIMTDR Conference*, IIT, Madras, pp. 315–319.
- [56]. Furutani, K., Shimizu, Y., (2003), "Experimental analysis of deposition process of lubricant surface by EDM with molybdenum disulphide powder suspended in working oil" *Proceedings of the American Society for Precision Engineering* 30, pp. 547–550.
- [57]. Tzeng, Y., Chen, F., (2005), "Investigation into some surface characteristics of electrical discharge machined SKD-11 using powder-suspension dielectric oil", *Journal of Materials Processing Technology* 170, pp. 385–391.
- [58]. Klocke, F., Lung, D., Antonoglou, G., Thomaidis, D., (2004), "The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge

- machining with small discharge energies”, *Journal of Material Processing Technology* 149, pp. 191–197.
- [59]. Narumiya, H., Mohri, N., Saito, N., Ootake, H., Tsunekawa, Y., Takawashi, T., Kobayashi, K., (1989), “EDM by powder suspended working fluid, *Proceedings of the ISEM- 9*”, Nagoya, Japan, pp. 5–8.
 - [60]. Chen, Y.F., Chow, H.M., Lin, Y.C., Lin, C.T., (2008), “Surface modification using semisintered electrodes on electrical discharge machining”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36, pp. 490–500.
 - [61]. 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, pp. 4095-4103.
 - [62]. McGeough, J.A., Rasmussen, H., (1997), “A theoretical model of electro discharge texturing”, *Journal of Materials Processing Technology* 68, pp. 172-178.
 - [63]. Gopal, I., Rajurkar, K.P., (1992), “Artificial Neural Network approach in modelling of EDM process, *Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks* 2, pp.845-850.
 - [64]. Kern, R., (2008), “Safe and Green EDMing”, *EDM Today*, July / August, pp.22-25.