

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Πειραματική Μελέτη της Κατεργασίας Ηλεκτροδιάβρωσης Βύθισης (Die Sinking EDM) σε Κράματα Αλουμινίου

Διπλωματική Εργασία

Πλάτων Χ. Σβαρνιάς

Επιβλέπων: Άγγελος Μαρκόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2019

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της ενασχόλησής μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Άγγελο Μαρκόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση ενός απαιτητικού θέματος,το οποίο κέντρισε αμέσως το ενδιαφέρον μου, αλλά και για τη συνεχή καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής.

Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Λάζαρο Εμμανουήλ Παπάζογλου για τη συνεχή υποστήριξη και τις συμβουλές του επάνω στα εξειδικευμένα θέματα της εργασίας αυτής. Η συμβολή του ήταν καθοριστική για τη γρήγορη ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη στη του Εργαστηρίου Κατεργασιών του ΕΜΠ, που ήταν πάντα πρόθυμοι να με βοηθήσουν.

Ακόμη, είμαι ευγνώμων για την υποστήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν οι φίλοι μου, συμφοιτητές και μη, κατά τη διάρκεια της ενασχόλησής μου με την εργασία αυτή και οι οποίοι έδειχναν πάντα κατανόηση όταν δεν είχα χρόνο γι' αυτούς.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, οι οποίοι πάντα πιστεύουν σε μένα και με υποστηρίζουν με κάθε τρόπο σε ότι κάνω.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Πειραματική Μελέτη της Κατεργασίας Ηλεκτροδιάβρωσης Βύθισης (Die Sinking EDM) σε Κράματα Αλουμινίου

Διπλωματική Εργασία του **Πλάτων Χ. Σβαρνιά**

Επιβλέπων: Άγγελος Μαρκόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2019

Περίληψη

Στη διπλωματική αυτή εργασία, παρουσιάζεται μια πειραματική προσέγγιση της κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης, με αναφορά στα βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος, στις παραμέτρους που το επηρεάζουν και στα χαρακτηριστικά που ορίζουν την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα του. Η μέθοδος αυτή συναντάται στην αεροναυπηγική, ναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου και σε άλλες εφαρμογές που απαιτούν τέτοιου είδους κατεργασία.

Στην εργασία αυτή, αρχικά, περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας καθώς και τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου κατεργασίας . Στη συνέχεια, αναλύονται τα βήματα της διαδικασίας της κατεργασίας του αλουμινίου. Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του αλουμινίου αλλά και την λειτουργικότητα της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσηςβύθισης, διεξάγονται μια σειρά πειραματικών μετρήσεων με πληθώρα δεδομένων όπως ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR), ο λόγος φθοράς εργαλείου (TWR), και η τραχύτητα επιφανείας (SR). Επίσης, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται οι σχηματιζόμενες περιοχές-γεωμετρίες επαναστερεοποιημένου υλικού (WL).



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURING TECHNOLOGY DIVISION

Experimental Study of the Electrical Discharge Machining Process (Die Sinking EDM) for Aluminum Alloys

Diploma Thesis

Ву

Plato C. Svarnias

Supervisor: Angelos Markopoulos, Assistant Professor NTUA

Athens, February 2019

Abstract

In this diploma thesis, is presented an experimental approach of the die sinking EDM process with reference to the basic elements of such a system, the parameters that affect such a system and the characteristics that define its efficiency and effectiveness. This method is developed for use in aeronautics, shipbuilding, automotive, and can be used equally in other applications requiring such treatment.

In this thesis, first, is described the nature of the problem as well as the main advantages of this processing method. Next, the steps of the aluminum treatment process are analyzed. To demonstrate the behavior of the aluminum and to the functionality of the imprinting-immersion electrode, a series of experimental measurements with a plurality of data (MRR, tool wear ratio, surface roughness) are applied. Also, the way in which resterilized material geometries (WL) are calculated.

Ακρωνύμια

ЕМП	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
3Δ	Τριών Διαστάσεων/Τρισδιάστατο
EDM	Electrical Discharge Machining
NTUA	National Technical University of Athens
MRR	Material Removal Rate
TWR	Tool Wear Rate
SR	Surface Roughness
WL	White Layer

Πίνακας Περιεχόμενων

Πρόλογος	5
1 Περιγραφή και Ανάπτυξη της Ηλεκτροδιάβρωσης (EDM)	13
1.1 Τι είναι Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)	. 13
1.2 Η Εμφάνιση και η Εξέλιξη της Ηλεκτροδιάβρωσης (EDM)	18
1.3 Βασικά Στοιχεία της Ηλεκτροδιάβρωσης Αποτύπωσης-Βύθισης	19
1.3.1 Τεμάχιο (Workpiece)	21
1.3.2 Ηλεκτρόδιο (Electrode Tool)	22
1.3.3 Διηλεκτρικό Μέσο (Dielectric Fluid)	25
1.3.4 Μηχανισμός κίνησης στους άξονες Χ-Υ (Χ-Υ positioning/machine bed)	27
1.3.5 Δοχείο Εργασίας (Work Tank)	28
1.3.6 Σερβομηχανισμός Ελέγχου (Servo Control System)	29
1.3.7 Μονάδα Παροχής Ισχύος–Γεννήτρια Παλμών (Power Supply Unit–	
Pulse Generator	. 32
1.3.8 Σύστημα Κυκλοφορίας Διηλεκτρικού Μέσου και Έκπλυσης	36
2 Αλουμίνιο	39
2.1 Ιδιότητες του Αλουμινίου	. 39
2.1.1 Κράματα Χυτών	. 41
2.1.2 Κράματα Αλουμινίου Μηχανικής Πλαστικής Παραμόρφωσης	42
2.1.3 Μορφές Διάβρωσης του Αλουμινίου και των Κραμάτων του	44
2.1.4 Προστασία από τη Διάβρωση	44
2.2 Εφαρμογές και Χρήσεις του Αλουμινίου	45
2.2.1 Η Καθιέρωση των Κραμάτων του	45
2.2.2 Σύγχρονες Τεχνολογικές Εφαρμογές	. 46
2.3 Συμπεριφορά του Αλουμινίου στην Ηλεκτροδιάβρωση	49

3 State of the Art	51
3.1 Επίδραση της Ηλεκτροδιάβρωσης στην Τραχύτητα Επιφάνειας	52
3.2 Χαρακτηρισμός Μικροδομών & Επιφανειών	52
3.2.1Τοπογραφία Επιφάνειας	52
3.2.2 Μικροδομή Υποστρώματος (Subsurface Microstructure)	54
3.2.3 Μικρο-Ρωγμές (Micro-Cracks)	55
3.2.4 Ζώνη Επαναστερεομένου Υλικού (White-Layer Zone)	56
4 Πειραματική Διαδικασία	58
4.1 Εργαλειομηχανή	58
4.2 Τεμάχιο-Ηλεκτρόδιο	59
4.3 Πειραματική Διαδικασία-Μετρήσεις	60
5 Αποτελέσματα	65
5.1 Μελέτη Τεμαχίου Αl5052	65
5.2 Μελέτη Τεμαχίου Αl6063	82
6 Ανακεφαλαίωση & Συμπεράσματα	96
6.1 Ανακεφαλαίωση	96
6.2 Συμπεράσματα	98
6.3 Προτάσεις για Μελλοντική Μελέτη	<mark>99</mark>

Περιγραφή και Ανἁπτυξη της Ηλεκτροδιἁβρωσης (EDM)

ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η κατεργασία μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων (EDM) είναι η μέθοδος κατεργασίας ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών χρησιμοποιώντας ελεγχόμενους σπινθήρες, που λαμβάνουν χώρα μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και ενός τεμαχίου προς κατεργασία με την παρουσία ενός διηλεκτρικού ρευστού. Στο Σχήμα 1-1 απεικονίζονται τα βασικά στοιχεία της κατεργασίας EDM.

Οι δύο βασικές «παραλλαγές-τύποι» του EDM είναι η ηλεκτροδιάβρωση βύθισηςαποτύπωσης (die sinking EDM) και η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM).

Η κατεργασία EDM διαφέρει από τις συμβατικές κατεργασίες απομάκρυνσης υλικού καθώς το ηλεκτρόδιο δεν έρχεται σε φυσική επαφή με το τεμάχιο εργασίας. Δεδομένου ότι το ηλεκτρόδιο δεν έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο εργασίας δεν αναπτύσσονται δύναμεις κοπής. Κατά τη διαδικασία της ηλεκτροδιάβρωσης εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο, με ύπαρξη καθορισμένου διακένου ανάμεσά τους. Καθώς το ηλεκτρόδιο πλησιάζει το τεμάχιο παρουσία του διηλεκτρικού μέσου, το οποίο συνήθως είναι απιονισμένο νερό ή κάποιο έλαιο που λειτουργεί ως μονωτής και ψυκτικό, δημιουργείται μια «στήλη» έντονης ηλεκτρομαγνητικής ροής (column of intense electromagnetic flux). Υπό την επίδραση του έντονου ηλεκτρικού πεδίου «σπάει» η διηλεκτρική σταθερά του μέσου που παρεμβάλλεται και δημιουργείται ηλεκτρικός σπινθήρας (single spark to be discharge). Ο σπινθήρας αυτός «εμφανίζεται» στο μικρό διάκενο ανάμεσα σε ηλεκτρόδιο και τεμάχιο (αναφέρεται και ως διάκενο σπινθήρα-spark gap) όπου αναπτύσσονται θερμοκρασίες 6000-12000 °C ανάλογα με τις συνθήκες ψύξης, με αποτέλεσμα την εξάχνωση και τήξη υλικού, και το σχηματισμό ενός «κρατήρα». Το Σχήμα 1-2 απεικονίζει πως οι σπινθήρες εμφανίζονται μεταξύ των πλησιέστερων σημείων του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας [1].





(EDM).

Σχήμα 1-1: Βασικά στοιχεία της Ηλεκτροδιάβρωσης Σχήμα 1-2: Ο σπινθήρας εκδηλώνεται στα πλησιέστερα σημεία μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου κατεργασίας.

Ο σπινθήρας αφαιρεί υλικό τόσο από το ηλεκτρόδιο όσο και από το τεμάχιο εργασίας. αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας σε αυτό το σημείο. Έτσι ο ακόλουθος σπινθήρας εκδηλώνεται στο επόμενο πλησιέστερο σημείο μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας. Το Σχήμα 1-3 απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο αυτό λειτουργεί [2].

Η κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση είναι μια θερμική κατεργασία, όπου το υλικό αφαιρείται μέσω θερμότητας. Η θερμότητα προέρχεται από τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου υπό την μορφή σπινθήρα, με το υλικό να θερμαίνεται μέχρι τα σημεία τήξης και εξάχνωσής του.

Η περιοχή όπου εκδηλώνεται ο κάθε σπινθήρας είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα το διηλεκτρικό υγρό να ψύχει γρήγορα το εξαχνωμένο υλικό, το ηλεκτρόδιο και τις επιφάνειες των τεμαχίων προς επεξεργασία.

Το κύριο χαρακτηριστικό του διηλεκτρικού μέσου είναι ότι αρχικά λειτουργεί ως ηλεκτρικός μονωτής μέχρι να εφαρμοστεί ικανή ηλεκτρική τάση ώστε να λειτουργεί ως ένας ηλεκτρικός αγωγός. Τα διηλεκτρικά υγρά που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία με EDM είναι σε θέση να παραμένουν ηλεκτρικοί μονωτές εκτός από τα πλησιέστερα σημεία μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας. Σε αυτά τα σημεία, όταν υπάρξει ικανή διαφορά δυναμικού, ώστε να «σπάσει» η διηλεκτρική σταθερά (σημείο ιονισμού), το διηλεκτρικό υγρό από μονωτής γίνεται αγωγός. Στο σημείο αυτό εκδηλώνεται και ο σπινθήρας.



Σχήμα 1-3: Ο επόμενος σπινθήρας λαμβάνει χώρα στα πλησιέστερα σημεία μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου κατεργασίας.

Οταν ο σπινθήρας σβήνει, το διηλεκτρικό μέσο επιστρέφει στην προτέρα κατάσταση ως ηλεκτρικός μονωτής. Το Σχήμα 1-4 απεικονίζει τον σπινθήρα που εμφανίζεται μέσα σε μια ιονισμένη στήλη (στήλη πλάσματος) του διηλεκτρικού ρευστού.

Θεωρητικά όλα τα μονωτικά υγρά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διηλεκτρικά. Εντούτοις, λόγω των απαιτήσεων που αναφέρονται παρακάτω, χρησιμοποιούνται σήμερα μόνο το απιονισμένο νερό (για στίλβωση) και οι υδρογονάνθρακες. Αυτοί οι υδρογονάνθρακες μπορούν είτε να παραχθούν με απόσταξη και διύλιση ορυκτελαίου, είτε συνθετικά με επεξεργασία αερίων σε φούρνο συνθέσεως με τη βοήθεια καταλύτη.

Επίσης, με δεδομένο ότι στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης τόσο το τεμάχιο όσο και το ηλεκτρόδιο είναι ηλεκτρικά αγώγιμα, κατά την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού με απουσία του διηλεκτρικού μέσου (υγρού), θα δημιουργούνταν «ανεξέλεγκτοι» σπινθήρες. Το διηλεκτρικό μέσο που χρησιμοποιείται στις μηχανές EDM διαδραματίζει σημαντικό ρόλο κατά την κατεργασία του τεμαχίου. Αυτός αναλύεται εκτενέστερα στις παρακάτω παραγράφους.

Όπως συμβαίνει σε κάθε σπινθήρα, μια μικρή ποσότητα υλικού του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας εξαχνώνεται. Κατά τη εκδήλωση κάθε σπινθήρα το υλικό του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου θερμαίνεται έως τη θερμοκρασία εξάχνωσης, δημιουργώντας ένα «σύννεφο» στο διάκενο εκδήλωσης του σπινθήρα (sparking gap area). Η θερμότητα από το «σύννεφο» αυτό μεταφέρεται στο διηλεκτρικό μέσο, με αποτέλεσμα την ψύξη και στερεοποίηση των ατμών. Όταν ο σπινθήρας είναι απενεργοποιημένος, το εξαχνωμένο νέφος ψύχεται και τέλος, στεροποιείται, διαδικασία που προαναφέρεται παραπάνω.



Σχήμα 1-4: Ο σπινθήρας εκδηλώνεται μέσα σε μια στήλη ιονισμένου διηλεκτρικού υγρού.

Τα Σχήματα 1-5, 1-6 και 1-7 απεικονίζουν τον σπινθήρα που παράγει το σύννεφο ατμών, το νέφος σε εναιώρημα και το εξατμισμένο νέφος να ψύχεται, σχηματίζοντας σφαιρίδια (EDM chips).

Για αποτελεσματική κατεργασία, έχουν μελετηθεί διάφορες μέθοδοι για την σωστή απομάκρυνση των αποβλήτων με βασική αρχή όλων, το διηλεκτρικό μέσο να διέρχεται– ρέει μέσω του διάκενου παρασύροντας τα απόβλητα. Το διηλεκτρικό μέσο στη συνέχεια συλλέγεται και φιλτράρεται, ώστε να απομακρυνθούν από αυτό απόβλητα και άλλα προϊόντα της κατεργασίας διατηρώντας, έτσι, τις ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου σταθερές. Επίσης, κατά την κατεργασία παράγονται αέρια προϊόντα, που προέρχονται από το διηλεκτρικό μέσο κυρίως. Η αποτελεσματική απομάκρυνση αυτών είναι σημαντική κατά το σχεδιασμό της κατεργασίας, καθώς άπτεται της ασφάλειας των εργαζομένων, αλλά και της σωστής και προβλεπόμενης λειτουργίας του μηχανολογικού εξοπλισμού [3][4].



Electrode

Vaporized cloud suspended in dielectric fluid

Workpiece

Σχήμα 1-5: Ενεργός σπινθήρας: εξαχνωμένο υλικό από το ηλεκτρόδιο και το αντικείμενο κατεργασίας.

Σχήμα 1-6: Ανενεργός σπινθήρας: εξαχνωμένο νέφος αιωρούμενο στο διηλεκτρικό υγρό.



SPARK OFF

Σχήμα 1-7: Ανενεργός σπινθήρας: το εξαχνωμένο νέφος στερεοποιείται και σχηματίζει απόβλητα (EDM chips).

Η ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΚΑΙ Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Το 1770, ο Άγγλος επιστήμονας Priestley ανακάλυψε το διαβρωτικό αποτέλεσμα των ηλεκτρικών εκκενώσεων. Μάλιστα, το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από την ανακάλυψη της διαδικασίας αυτής μέχρι και την πρακτική της χρήση, διήρκησε περισσότερο από έναν αιώνα.

Οι Ρώσοι, είναι αυτοί που λαμβάνουν την πιστοποίηση για την ανακάλυψη της διαδικασίας EDM το 1943. Το όνομα "Lazarenko" είναι αυτό που συνδέεται άρρηκτα με τη διαδικασία που αρχικά ονομάστηκε «Spark Erosion», ενώ σήμερα αναφέρεται ως κατεργασία αφαίρεσης υλικού με ηλεκτρική εκκένωση (EDM).

Κατά τη διάρκεια μιας έρευνας για τον τρόπο διάβρωσης επαφών ηλεκτρικών διακοπτών, οι σοβιετικοί επιστήμονες Dr. Boris Lazarenko και Dr. Natalya Lazarenko είχαν την ιδέα και ανέπτυξαν μια διαδικασία διάβρωσης με ηλεκτρική εκκένωση σε διηλεκτρικό υγρό μεταξύ δύο αγωγών. Στο πλαίσιο του πειραματισμού τους, οι Lazarenko χρησιμοποίησαν ως διηλεκτρικό μέσο προϊόντα πετρελαίου, όπου και παρατήρησαν ότι το διηλεκτρικό υγρό δεν εξάλειψε το σπινθήρισμα, αλλά δημιούργησε πιο ομοιόμορφα και προβλέψιμα σπινθηρίσματα, σε σύγκριση με τη λειτουργία στον αέρα.

Οι Lazarenko ανέπτυξαν αρχικά αυτό που ονομαζόταν κύκλωμα Lazarenko. Σήμερα αναφέρεται ως κύκλωμα RC. Χρησιμοποιήθηκε για λίγο στα πρώτα εμπορικά σχέδια EDM. Αυτός ο συγκεκριμένος τύπος γεννήτριας χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα σε μερικές μηχανές EDM για φινίρισμα. Η γεννήτρια που χρησιμοποίησαν είναι RC κύκλωμα (ή κύκλωμα αντιστάτη-πυκνωτή) [5], βασισμένο στο σχέδιο που αναπτύχθηκε από τους Lazarenko. Αυτή η διαδικασία έγινε ένα από τα πρότυπα συστήματα EDM με χρήση σε όλο τον κόσμο. Η χρήση τους επικεντρώνεται σε εφαρμογές που απαιτούν καλή ποιότητα επιφανείας και τη διάνοιξη μικρών οπών υψηλής διαστασιολογικής ακρίβειας.

Βέβαια, παράλληλες ενέργειες συνέβαιναν και στις ΗΠΑ με πρωτεργάτες τους Harold Stark, Victor Harding και Jack Beaver, καθώς παρατήρησαν τα οφέλη της κατεργασίας των ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών με τη χρήση σπινθήρων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι πολλές πειραματικές ενδείξεις τους οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το απιονισμένο νερό καθώς παρασύρει σωματίδια της κατεργασίας καθίσταται αγώγιμο με τις διηλεκτρικές του ιδιότητες να μεταβάλλονται. Η αλλαγή αυτή επηρεάζει και το σημείο ιονισμού, το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει την αξιοπιστία, αποτελεσματικότητα και σταθερότητα της κατεργασίας. Οι μηχανές Stark, Harding και Beaver μπορούσαν να παράγουν 60 σπινθήρες ανά δευτερόλεπτο. Οι μεταγενέστερες μηχανές με βάση το σχεδιασμό τους χρησιμοποιούσαν κυκλώματα RC παροχής ισχύος τα οποία ήταν ικανά να παράγουν χιλιάδες σπινθήρες ανά δευτερόλεπτο, αυξάνοντας σημαντικά την ταχύτητα κοπής [6].

ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ-ΒΥΘΙΣΗΣ

Σε κάθε σχεδιασμό μηχανής EDM, πρέπει να υπάρχουν τρόποι να κινείται το ηλεκτρόδιο σε σχέση με το τεμάχιο εργασίας και να είναι τοποθετημένο έτσι ώστε η κατεργασία να πραγματοποιείται στη σωστή θέση. Το Σχήμα 1-8 απεικονίζει τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος die sinking EDM. Η servo-κεφαλή μετακινεί το ηλεκτρόδιο σε κατακόρυφη κατεύθυνση και διατηρεί τη σωστή απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου και τεμαχίου, ώστε να υπάρξει σπινθήρισμα. Το τεμάχιο κατεργασίας είναι προσαρτημένο πάνω στην επιφάνεια του τραπεζιού κατά τους άξονες X-Y, επιτρέποντας έτσι στον χρήστη να μετακινεί το τεμάχιο χειροκίνητα πετυχαίνοντας στη σωστή θέση την μηχανουργική κατεργασία.



Σχήμα 1-8: Τυπική απεικόνιση μηχανής αποτύπωσης-βύθισης.

Η δεξαμενή εργασίας περιλαμβάνει κανονικά ένα αφαιρούμενο μέρος μπροστά που παρέχει πρόσβαση στο τραπέζι του μηχανήματος για τη συναρμολόγηση και επιθεώρηση του τεμαχίου εργασίας. Η servo-κεφαλή ελέγχεται από το σύστημα «προώθησης– απόσυρσης», γεγονός που βοηθάει στις ρυθμίσεις της μηχανής για μια αποτελεσματική κατεργασία.

Ο πρωταρχικός σκοπός του servo-μηχανισμού είναι να διατηρεί πολύ ακριβή έλεγχο του ηλεκτροδίου με το τεμάχιο κατεργασίας ώστε να διασφαλίζεται η ύπαρξη διακένου. Το χάσμα σπινθηρισμού θα είναι πάντοτε σε μια περιοχή περίπου 0.025-0.102 mm. Οποιαδήποτε κίνηση στη διάταξη που αλλάζει το χάσμα σπινθηρισμού θα προκαλέσει ακανόνιστη λειτουργία του σερβοσυστήματος. Η κίνηση του ηλεκτροδίου, μπορεί να γίνει είτε μέσω ενός ηλεκτρικού μοτέρ, είτε μέσω υδραυλικού συστήματος. Και στις δύο περιπτώσεις, τα συστήματα είναι σχετικά απλά με, στόχο την «μετατροπή» ενός ψηφιακού σήματος σε προκαθορισμένη κίνηση, όταν αυτή είναι απαραίτητη.

Το σύστημα μηχανής EDM αποτελείται από συγκροτήματα και υποσυγκροτήματα που είναι ηλεκτρικά διασυνδεδεμένα καθώς και εξαρτήματα υδραυλικών εγκαταστάσεων. Ο Πίνακας 1-1 παραθέτει τα σημαντικότερα μέρη που αποτελούν ένα σύστημα μηχανής αποτύπωσης-βύθισης EDM [7].

Πίνακας 1-1. Βασικά στοιχεία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης (sinking EDM).

- το προς κατεργασία τεμάχιο (workpiece)
- το ηλεκτρόδιο (electrode)
- το διηλεκτρικό μέσο (dielectric)
- ο μηχανισμός κίνησης στους άξονες X Y (X Y positioning/machine bed)
- o servo μηχανισμός ελέγχου (servo controller)
- η γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών (pulse generator)
- το δοχείο-δεξαμενή εργασίας (work tank)
- δεξαμενή αποθήκευσης διηλεκτρικού μέσου (dielectric reservoir)
- αντλία και φίλτρα διηλεκτρικού μέσου (dielectric pump and filter)



Σχήμα 1-9: Βασικά μέρη μιας διάταξης sinking EDM.

1.3.1 Τεμάχιο (Workpiece)

Η ηλεκτροδιάβρωση δίνει τη δυνατότητα κατεργασίας οποιουδήποτε ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού, ανεξάρτητα της σκληρότητα, της αντοχής και των υπολοίπων μηχανικών ιδιοτήτων του. Άρα, βασική απαίτηση είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του. Ταυτόχρονα όμως, λόγω της θερμοηλεκτρικής φύσεως της κατεργασίας, οι θερμικές ιδιότητες του υλικού επηρεάζουν σημαντικά την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα της κατεργασίας. Οι παράμετροι λοιπόν του υλικού που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν είναι



1.3.2 Ηλεκτρόδιο (Electrode Tool)

Το ηλεκτρόδιο αποτελεί σημαντική παράμετρο της κατεργασίας. Κατά τη διάρκεια της ηλεκτροδιάβρωσης έχουμε ταυτόχρονη απομάκρυνση υλικού τόσο από το τεμάχιο όσο και το ηλεκτρόδιο. Η φθορά του ηλεκτροδίου είναι αποτέλεσμα είτε βομβαρδισμού ηλεκτρονίων είτε θετικών ιόντων, τα οποία συγκρούονται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου με αποτέλεσμα να εκλύεται θερμότητα. Η θερμότητα εξαχνώνει το υλικό των ηλεκτροδίων και έτσι μια μικρή ποσότητα ηλεκτροδίου αφαιρείται με κάθε σπινθήρα. Αυτή η αφαίρεση του υλικού είναι φθορά ηλεκτροδίων. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη επιλογής υλικών ηλεκτροδίου με υψηλή αντοχή στη φθορά, διαφορετικά υπάρχει πιθανότητα – κίνδυνος να καθίσταται η κατεργασία εξαιρετικά δαπανηρή και ασύμφορη.

Έχουν εκπονηθεί αρκετές μελέτες σχετικά με τα κριτήρια επιλογής κατάλληλου υλικού ηλεκτροδίου και τα κριτήρια, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπ'όψιν είναι :

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

Οι απαιτήσεις από ένα υλικό ηλεκτροδίου είναι:

- Υψηλό σημείο τήξης
- Υψηλή κατεργασιμότητα
- Χαμηλό κόστος

Πιο συγκεκριμένα η μηχανική κατεργασία "χωρίς φθορά" απαιτεί έξι πράγματα:

- ηλεκτρόδιο χαλκού ή γραφίτη
- τεμάχιο επεξεργασίας χάλυβα
- θετική πολικότητα ηλεκτροδίου
- μακρύς χρόνος σπινθηρισμού
- διηλεκτρική ροή χαμηλής ταχύτητας μέσω του διακένου σπινθηρισμού και
- ηλεκτρικό κύκλωμα παροχής ισχύος χωρίς πυκνωτές.

Σε συνέχεια των παραπάνω, οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κατηγορίες υλικών για ηλεκτρόδια στην ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης είναι: τα μέταλλα και τα ηλεκτρόδια από γραφίτη. Τα ηλεκτρόδια από γραφίτη έχουν σχετικά χαμηλότερο ρυθμό φθοράς (wear rate) και χρησιμοποιούνται για κατεργασίες ξεχονδρίσματος σε αντίθεση με τα μεταλλικά ηλεκτρόδια, τα οποία αν και παρουσιάζουν υψηλή φθορά, διαθέτουν ιδιότητες, που τα καθιστούν κατάλληλα για κατεργασίες φινιρίσματος.

Τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι:

- Ορείχαλκος (brass): διαθέτει ικανοποιητική αντοχή σε φθορά για κατεργασία χάλυβα, αλλά αυξημένους ρυθμούς φθοράς σε κατεργασίες καρβιδίων βολφραμίου (tungsten carbide). Επίσης, δεν συνιστάται η χρήση του με διατάξεις RC παροχής ισχύος.
- Χαλκός (copper): χρησιμοποιείται είτε ως «καθαρός» χαλκός είτε ως κράμα τελλουρίου χαλκού. Ο χαλκός παρουσιάζει δυσκολίες στην κατεργασία του με λειαντικούς τροχούς (grinding), αλλά έχει χαρακτηριστικά ιδανικά για κατεργασίες «μηδενικής φθοράς» (no wear machining).
- Χαλκός-Βολφράμιο (copper-tungsten): υλικό που έχει προκύψει από πυροσυσσωμάτωση και συναντάται σε συνήθεις αναλογίες 70% βολφράμιο και 30% χαλκός. Έχει υψηλή αντοχή σε φθορά, χρησιμοποιείται συνήθως για κατεργασίες καρβιδίων του βολφραμίου, αλλά είναι μειονέκτημα η δυσκολία κατεργασίας του.
- Ψευδάργυρος (zinc): κράματα ψευδαργύρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά ηλεκτροδίων, παρουσιάζουν όμως υψηλή φθορά.
- Γραφίτης (graphite): είναι διαθέσιμος σε διαφορετικές πυκνότητες, οι οποίες εξαρτώνται από την κοκκομετρία της κόνης από την οποία παράγεται, και η οποία κυμαίνεται από 100 μm έως και 1 μm. Διαθέτει υψηλή αντοχή σε φθορά και υψηλή κατεργασιμότητα, η σκόνη όμως γραφίτη που «δημιουργείται» κατά την κατεργασία του, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν. Ο γραφίτης δεν τήκεται αλλά εξαχνώνεται (sublimes) με τη θερμοκρασία εξάχνωσης να είναι «κοντά» στη θερμοκρασία τήξης των καρβιδίων του βολφραμίου και ως εκ τούτου δεν συνιστάται η χρήση του για κατεργασίες αποπεράτωσης και ακριβείας (fine detailed machining), ενώ ανεξαρτήτου κοκκομετρίας χρησιμοποιείται σε κατεργασίες μηδενικής φθοράς. Τέλος, πρέπει να αποφεύγεται η χρήση του σε διατάξεις με RC παροχής ισχύος.
- Χαλκός–Γραφίτης (copper- graphite): πρόκειται για λεπτής κοκκομετρίας γραφίτη διαποτισμένο (infiltrated) με χαλκό. Συνεχίζει ως υλικό να διαθέτει τα χαρακτηριστικά του «απλού–καθαρού» γραφίτη με επιπλέον την ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού.

Στον Πίνακα 1-2 γίνεται μια σύντομη σύγκριση ανάμεσα στα μεταλλικά και τα ηλεκτρόδια γραφίτη.

ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΓΡΑΦΙΤΗ
Χαμηλό κόστος	Υψηλό κόστος
Υψηλή αντοχή	Υψηλή αντοχή
Υψηλή ασφάλεια κατά την κατεργασία	Χαμηλή ασφάλεια κατά την κατεργασία
(high degree of machining safety)	(low degree of machining safety)
Δεν απαιτείται έμπειρος χειριστής	Χρειάζεται πεπειραμένο χειριστή
Σχετικά καθαρές επιφάνειες –φινίρισμα	Παραμένουσα σκόνη μετά την κατεργασία
Μικρές δυνατότητες λείανσης	Υψηλή κατεργασιμότητα
(low grinding index)	(good machinability)
Χαμηλότερες ταχύτητες κατεργασίας &	Υψηλές ταχύτητες κατεργασίας &
Χαμηλός ρυθμός αποβολής υλικού(MRR)	Υψηλός ρυθμός αποβολής υλικού(MRR)
Σχετικά υψηλός ρυθμός φθοράς	Εξαιρετική αντοχή σε φθορά

Πίνακας 1-2.	Σύγκριση	μεταλλικών η	λεκτροδίων	και ηλεκτ	ροδίων γ	ραφίτη.
						T I ·

Στον Πίνακα 1-3 παρατίθενται ορισμένες προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίες για κάποια «τυπικά» υλικά.

TEMAXIO	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ	ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΓΙΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΓΙΑ
			ΞΕΧΟΝΔΡΙΣΜΑ	ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ
Χάλυβας	Γραφίτης	Positive	Χαμηλή	Μεσαία/Υψηλή
Αλουμίνιο	Cu/CuW	Positive	Χαμηλή	Μεσαία/Υψηλή
Χαλκός	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή
Τιτάνιο	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή
Καρβίδια	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή
Κράμα Χαλκού-Βολφραμίου	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή

Πίνακας 1-3. Προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίας για "τυπικά" υλικά.

Στον Πίνακα **1**-4 παρουσιάζεται η επίδραση του υλικού του ηλεκτροδίου στο αποτέλεσμα-αποδοτικότητα της κατεργασίας.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ EDM	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΓΡΑΦΙΤΗ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΧΑΛΚΟΥ (Cu)	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΧΑΛΚΟΥ- ΒΟΛΦΡΑΜΙΟΥ (Cu-W)
ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ (MRR)	Υψηλός	Μεσαίος	Χαμηλός
ΛΟΓΟΣ ΦΘΟΡΑΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ (TWR)	Μεσαίος	Υψηλός	Χαμηλός
ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Ra (ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ)	Υψηλή τραχύτητα με κακή ποιότητα επιφανείας	Χαμηλή τραχύτητα με βέλτιστη ποιότητα επιφανείας	Μέση τραχύτητα

1.3.3 Διηλεκτρικό Μέσο (Dielectric Fluid)

Τα προϊόντα πετρελαίου συχνά αναφέρονται ως ρευστά υδρογονανθράκων, καθώς διασπώνται σε υδρογόνο, άνθρακα και άλλα υποπροϊόντα όταν θερμαίνονται κατά τη διάρκεια του σπινθήρα. Η θερμότητα που εκλύεται από το σπινθήρισμα διασπά το απιονισμένο νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Συνήθως, οι μηχανές βύθισης χρησιμοποιούν διηλεκτρικά υγρά υδρογονανθράκων και οι μηχανές κοπής σύρματος χρησιμοποιούν απιονισμένο νερό. Ωστόσο, μερικές μηχανές κοπής σύρματος είναι σχεδιασμένες για χρήση ρευστών υδρογονανθράκων.

Το διηλεκτρικό υγρό που χρησιμοποιείται στις μηχανές EDM αποτύπωσης-βύθισης είναι ένας ηλεκτρικός μονωτής που αντιστέκεται στη ροή του ηλεκτρικού φορτίου μέχρις ότου η τάση που εφαρμόζεται είναι αρκετά υψηλή ώστε να προκαλέσει την αλλαγή του υγρού σε ηλεκτρικό αγωγό. Το σημείο όταν αλλάζει το υγρό από μονωτή σε αγωγό καλείται σημείο ιονισμού. Στο σημείο ιονισμού, ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή σπινθήρα, ρέει εύκολα μέσω του διηλεκτρικού ρευστού μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας.

Ο χρόνος ενεργοποίησης των σπινθήρων καθορίζει τον χρόνο που θα διαρκέσει η ροή ηλεκτρικής ενέργειας με σπινθήρες επιτυγχάνοντας έτσι, το σημείο ιονισμού. Όταν η ηλεκτρική ενέργεια με μορφή σπινθήρα είναι απενεργοποιημένη, το ηλεκτρικό φορτίο σταματά να ρέει. Ο σπινθήρας στη συνέχεια σβήνει και το διηλεκτρικό το υγρό είναι και πάλι μονωτής. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αφού το σημείο ιονισμού του διηλεκτρικού ρευστού ελέγχει κάθε σπινθήρα. Αυτές οι αλλαγές, από μονωτή σε αγωγό και πάλι σε μονωτή, λαμβάνουν χώρα για κάθε σπινθήρα. Είναι δυνατό αυτή η διεργασία να εμφανιστεί τόσο συχνά όσο 500.000 φορές ανά δευτερόλεπτο (500 kHz) [8].

ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Είναι υλικά άμεσα διαθέσιμα προς χρήση και δημιουργούν ένα ελεγχόμενο περιβάλλον γύρω από το σημείο του σπινθήρα. Τα συγκεκριμένα έλαια διατηρούν τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους κατά τη διάρκεια εκδήλωσης του σπινθήρα, με την εκλυόμενη από το σπινθήρα θερμότητα να διασπά το διηλεκτρικό μέσο σε υδρογόνο, άνθρακα και αλλά υποπροϊόντα, ενώ ταυτόχρονα δεν επηρεάζονται από την παρουσία υπολειμμάτων– κατακρημνισμάτων. Η ηλεκτρική αυτή «σταθερότητα», που παρουσιάζουν τα καθιστά ιδανική επιλογή για την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης.

ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ

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

Οι βασικές «λειτουργίες» του διηλεκτρικού μέσου είναι:

- Να λειτουργεί ως μονωτής ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο, εμποδίζοντας τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος, έως ότου υπάρξει ικανή διαφορά δυναμικού, ώστε να «σπάσει» η διηλεκτρική σταθερά (σημείο ιονισμού) και από μονωτής να γίνει αγωγός. Στο σημείο αυτό εκδηλώνεται και ο σπινθήρας.
- Να λειτουργεί ως μέσο ψύξης ηλεκτροδίου και τεμαχίου. Ο σπινθήρας (ροή ηλεκτρικού ρεύματος) δημιουργεί ροή θερμότητας στην περιοχή ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο. Καθώς το διηλεκτρικό μέσο περιβάλλει την περιοχή του σπινθήρα συμβάλλει στην απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας. Παρ' όλα αυτά, οι υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίζονται στο «μέτωπο» του σπινθήρα, συνεχίζουν να επηρεάζουν τις επιφάνειες του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται η ψύξη του διηλεκτρικού μέσου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Η ψύξη των αποβλήτων της κατεργασίας. Κατά τη εκδήλωση κάθε σπινθήρα το υλικό του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου θερμαίνεται έως τη θερμοκρασία εξάχνωσης, δημιουργώντας ένα «σύννεφο» στο διάκενο εκδήλωσης του σπινθήρα (sparking gap area). Η θερμότητα από το «σύννεφο» αυτό μεταφέρεται στο διηλεκτρικό μέσο, με αποτέλεσμα την ψύξη και στερεοποίηση των ατμών. Η διαδικασία ψύξης ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια και συνεχίζει προς τα μέσα, δημιουργώντας έτσι σφαιρίδια με κούφιο κέντρο-πυρήνα (EDM chips).
- Η απομάκρυνση των αποβλήτων. Τα απόβλητα της κατεργασίας πρέπει να απομακρύνονται από την περιοχή του σπινθήρα, ιδανικά με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο παράγονται. Κατ' αυτόν το τρόπο διατηρείται μια σταθερή πυκνότητα αποβλήτων στην περιοχή του διάκενου καθιστώντας την λειτουργία του servo-μηχανισμού πιο σταθερή. Έχουν μελετηθεί διάφορες μέθοδοι για την

αποτελεσματικότερη απομάκρυνση των αποβλήτων με βασική αρχή όλων το διηλεκτρικό μέσο να διέρχεται-ρέει μέσω του διάκενου παρασύροντας τα απόβλητα. Το διηλεκτρικό μέσο στη συνέχεια συλλέγεται και φιλτράρεται, ώστε να απομακρυνθούν από αυτό απόβλητα και άλλα προϊόντα της κατεργασίας διατηρώντας, έτσι, τις ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου σταθερές.

Να έχει χαμηλό ιξώδες. Αποτελεί επιθυμητό χαρακτηριστικό για την επιλογή του και φυσικά για την χρήση του, καθώς διευκολύνει τη ροή του ρευστού μέσα από το διάκενο σπινθηρισμού. Μικρότερα διάκενα και άρα χαμηλότερης έντασης ρεύμα, όπως επίσης και υψηλότερες συχνότητες, χρησιμοποιούνται σε κατεργασίες αποπεράτωσης για να επιτύχουμε υψηλής ποιότητας επιφάνεια. Το χαμηλό ιξώδες σε διηλεκτρικό μέσο από προϊόντα πετρελαίου, πιθανόν «ακολουθείται» από χαμηλό σημείο ιονισμού, ιδιότητα που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στο σχεδιασμό της, ενώ συνιστάται προσοχή κατά τη χρήση οποιουδήποτε χαμηλού σημείου ανάφλεξης του ρευστό, καθώς υπάρχει η πιθανότητα ανάφλεξης. Κατά τη κατεργασία παράγονται επίσης αέρια προϊόντα, που προέρχονται από το διηλεκτρικό μέσο κυρίως. Η αποτελεσματική απομάκρυνση αυτών είναι σημαντική κατά το σχεδιασμό της κατεργασίας, καθώς άπτεται της ασφάλειας των εργαζομένων, αλλά και της σωστής και προβλεπόμενης λειτουργίας του μηχανολογικού εξοπλισμού [9].

1.3.4 Μηχανισμός κίνησης στους άξονες X-Y (X-Y positioning /machine bed)

Στην ηλεκτροδιάβρωση βύθισης η δυνατότητα κίνησης του ηλεκτροδίου ή και του τεμαχίου κατά τους άξονες X–Y είναι απαραίτητη για την «αποτύπωση» πολύπλοκων γεωμετριών. Αναλόγως του τύπου της εργαλειομηχανής μπορούμε να έχουμε είτε κίνηση της «τράπεζας» και άρα του τεμαχίου, είτε κίνηση ολόκληρης της servo-κεφαλής (η δεύτερη περίπτωση συναντάται κυρίως σε σύγχρονες CNC εργαλειομηχανές). Η ακρίβεια κίνησης είναι μείζονος σημασίας και συνδέεται άμεσα με την επιθυμητή–δυνατή διαστασιολογική ακρίβεια του κατεργασμένου τεμαχίου. Τέλος πρέπει να υπάρχει λειτουργικός μηχανισμός πρόσδεσης και στήριξης του τεμαχίου.



Σχήμα 1-10: Γραφική απεικόνιση του μηχανισμού κίνησης σε μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης.

1.3.5 Δοχείο Εργασίας (Work Tank)

Η δεξαμενή εργασίας περιέχει το διηλεκτρικό υγρό όπου το τεμάχιο εργασίας είναι βυθισμένο. Κατά τη μηχανική κατεργασία, είναι απαραίτητο να γεμίσει το κενό σπινθηρισμού μεταξύ του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου με διηλεκτρικό ρευστό για έλεγχο στις συνθήκες των σπινθήρων.

Συχνά, οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από λαμαρίνα με αφαιρούμενη ή αρθρωτή, μπροστινή πόρτα, για ευκολία στη ρύθμιση του τεμαχίου εργασίας.

Το δοχείο εργασίας εξασφαλίζει ότι το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο βρίσκονται εντός του λουτρού κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ότι το διηλεκτρικό μέσο ανανεώνεται συνεχώς, ότι υπάρχει και διατηρείται η επιθυμητή στάθμη στο υγρό και η θερμοκρασία δεν ξεπερνά ένα ανώτατο όριο. Πλωτός διακόπτης στάθμης εξασφαλίζει ότι το σύστημα δεν θα τεθεί σε λειτουργία πριν την καθορισμένη στάθμη, και διακόπτης υπερχείλισης προστατεύει από υπερβολικά υψηλή στάθμη υγρού. Επίσης, θερμοστάτης διακόπτει την λειτουργία σε περίπτωση που η θερμοκρασία υπερβεί προκαθορισμένη ανώτατη τιμή. Επιπρόσθετα, για την αποφυγή εργατικών ατυχημάτων, οι περισσότεροι κατασκευαστές EDM εκπαιδεύουν τους μηχανικούς σε κατάλληλες διαδικασίες ασφαλείας για αυτό το είδος ρύθμισης. Όλοι οι μηχανικοί θα πρέπει να γνωρίζουν πώς να επαναφέρουν το διακόπτη πλωτήρα μετά την ολοκλήρωση της εργασίας, τις λειτουργίες ρύθμισης και τα σωστά επίπεδα παρακολούθησης υγρών για τη διατήρηση του ακεραιότητα της μονάδας.

1.3.6 Σερβομηχανισμός Ελέγχου (Servo-Control System)

Ο σερβομηχανισμός ελέγχου είναι μια εξαιρετικά σημαντική παράμετρος της κατεργασίας. Αποτελεί ένα αυτοματοποιημένο σύστημα, το οποίο διατηρεί το κατάλληλο διάκενο ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο, ώστε να υπάρχει σταθερότητα και αποδοτικότητα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, να προστατεύεται η προς κατεργασία επιφάνεια, αλλά και να επιτυγχάνεται διαστασιολογική ακρίβεια. Στόχος είναι ο σχεδιασμός, ώστε να λειτουργεί αποτελεσματικά για μεγάλο εύρος μεγέθους ηλεκτροδίων από μερικά μικρά έως αρκετά εκατοστά.

Οι απαιτήσεις από το σερβομηχανισμό είναι:

- το ηλεκτρόδιο να μην έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο
- το ηλεκτρόδιο να «προωθείται» ή να «αποσύρεται» σε σχέση με το τεμάχιο ώστε να διατηρείται «σταθερή» η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο.

Το σύστημα «προώθησης–απόσυρσης» που χρησιμοποιείται για την κίνηση της σερβοκεφαλής, μπορεί να είναι είτε ένα ηλεκτρικό μοτέρ, είτε μια υδραυλική μονάδα. Η επιλογή εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και το βάρος των ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιηθούν. Υδραυλικά συστήματα επιλέγονται συνήθως σε μεγάλες εργαλειομηχανές με βαριά ηλεκτρόδια, ενώ στις μικρότερες συναντώνται κυρίως ηλεκτρικά μοτέρ, με το διαχωρισμό αυτό να είναι ενδεικτικός και όχι απαγορευτικός.

Στην ηλεκτροδιάβρωση ο σερβομηχανισμός ελέγχου «χρησιμοποιεί» για τη λειτουργία του τις ηλεκτρικές ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου. Το διηλεκτρικό μέσο λειτουργεί ως μονωτής έως ότου το σύστημα ηλεκτροδίου τεμαχίου έχει την κατάλληλη σχέση διαφοράς δυναμικού–διακένου και πλέον βρεθεί στο σημείο ιονισμού με το διηλεκτρικό μέσο να λειτουργεί πλέον ως αγωγός. Η «διαφορά δυναμικού ανοικτού κυκλώματος» (open circuit voltage) «πέφτει» σε «διαφορά δυναμικού σπινθήρα» (sparking voltage), η οποία βρίσκεται στην περιοχή των 20–50 VDC. Ο σερβομηχανισμός ελέγχου ρυθμίζεται με βάση ένα «δυναμικό αναφοράς» (reference voltage), το οποίο βρίσκεται στο προαναφερθέν εύρος τιμών. Η απόκλιση ανάμεσα στο «δυναμικό αναφοράς» και το «πραγματικό δυναμικό κατεργασίας» χρησιμοποιείται, ώστε το σύστημα σερβομηχανισμού– ηλεκτροδίου να απομακρυνθεί, να πλησιάσει ή να παραμείνει σταθερό σε σχέση με το τεμάχιο. Στην πραγματικότητα και για πρακτικούς λόγους, το «δυναμικό αναφοράς» έχει ένα «στενό» εύρος τιμών, που όμως εντός των συγκεκριμένων ορίων η κατεργασία παραμένει σταθερή. Ο σχεδιασμός του σερβομηχανισμού μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

- a. το σύστημα προωθεί το ηλεκτρόδιο προς το τεμάχιο όταν το «δυναμικό λειτουργίας» είναι υψηλότερο του προκαθορισμένου άνω ορίου αναφοράς
- b. το σύστημα παραμένει σταθερό για «δυναμικά λειτουργίας» εντός του εύρους αναφοράς
- c. το σύστημα απομακρύνει το ηλεκτρόδιο από το τεμάχιο για «δυναμικά λειτουργίας» χαμηλότερα του κατώτατου ορίου αναφοράς.

Οι κατασκευαστές συνηθίζουν να ορίζουν ως «δυναμικό αναφοράς» (V_{th}) για μεταλλικό ηλεκτρόδια τα 30 VDC, ενώ για ηλεκτρόδια από γραφίτη ορίζεται στα 40 VDC (Σχήμα 1-11), καθώς η χρήση σε ηλεκτρόδια γραφίτη «δυναμικό αναφοράς» 30 VDC προκαλεί μια ανεπιθύμητη κατάσταση λειτουργίας γνωστή ως "DC arcing".





Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση του ηλεκτροδίου, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να γίνει είτε μέσω ενός ηλεκτρικού μοτέρ, είτε μέσω υδραυλικού συστήματος. Και στις δύο περιπτώσεις, τα συστήματα είναι σχετικά απλά με, στόχο την «μετατροπή» ενός ψηφιακού σήματος σε προκαθορισμένη κίνηση, όταν αυτή είναι απαραίτητη.

Ηλεκτρικό Μοτέρ

Βρίσκεται σε άμεση σύζευξη με «κοχλία ακριβείας» (precision lead screw), ενώ το περικόχλιο είναι προσαρμοσμένο στον κινούμενο άξονα της μηχανής (machine axis of movement). Είναι εξαιρετικά σημαντικό να υπάρχει μηδενική «χάρη–παλινδρόμηση» (κατά το δυνατόν) συνολικά στο σύστημα, από τον κινητήρα έως και τον κινούμενο άξονα στον οποίο είναι τοποθετημένο το ηλεκτρόδιο.

Έτσι, με κάθε κίνηση του μοτέρ θα υπάρχει η ανάλογη και προβλεπόμενη κίνηση στον άξονα και το ηλεκτρόδιο, με αποφυγή οποιασδήποτε ανεπιθύμητης αστάθειας κατά τη λειτουργία. Μάλιστα, σε αρκετά συστήματα σερβομηχανισμού με ηλεκτρικό κινητήρα χρησιμοποιούνται κοχλίες με σφαιρικά έδρανα κύλισης σε προένταση (pre-loaded ball screw) (Σχήμα 1-12) για την μεταφορά της κίνησης από το μοτέρ στον άξονα. Τέτοια συστήματα έχουν το πλεονέκτημα της ιδιαίτερα χαμηλής τριβής επιτρέποντας έτσι την





ελεύθερη περιστροφική κίνηση δίχως ανάπτυξη επιπλέον φορτίου κατά την εκκίνηση.

Ελαχιστοποιείται κατ' αυτόν τον τρόπο η πιθανότητα κάποιας «αναπήδησης» του ηλεκτροδίου, καθώς ο κινητήρας, σε διαφορετική περίπτωση, θα χρειαζόταν να υπερνικήσει τη στατική τριβή, αναπτύσσοντας επιπλέον φορτίο. Η προένταση τέλος χρησιμοποιείται για «μηδενισμό» της «χάρης–παλινδρόμησης» του συστήματος [10].



Σχήμα 1-13: Γραφική απεικόνιση ενός servoμηχανισμού με μοτέρ.

Υδραυλικό σύστημα

Ο υδραυλικός σερβομηχανισμός (Σχήμα 1-14) είναι εξ'ορισμού «απαλλαγμένος» από «χάρη–παλινδρόμηση». Όταν ασκείται πίεση από το ρευστό στην μία πλευρά του υδραυλικού εμβόλου, ρευστό εισέρχεται από αυτή την πλευρά στον κύλινδρο και εξέρχεται από την άλλη, με το έμβολο, μαζί με το βάκτρο να πραγματοποιούν την ανάλογη κίνηση. Όταν δεν υπάρχει ούτε είσοδος, ούτε έξοδος ρευστού από το κύλινδρο το σύστημα παραμένει σταθερό (ηλεκτρόδιο ακίνητο). Η ροή του ρευστού προς και από τον κύλινδρο, ελέγχεται με σερβοβαλβίδες, οι οποίες με τη σειρά τους ελέγχονται ηλεκτρονικά από τη μονάδα του σερβομηχανισμού. Το σύστημα πρέπει να παραμένει στατικό, εκτός των περιπτώσεων, που του «δίνεται η εντολή» να κινηθεί. Στα περισσότερα σέρβο-υδραυλικά συστήματα υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των βαλβίδων για να διατηρούν στατικό το σύστημα και συνήθως αναφέρεται ως «μηδενική θέση» (null position). Είναι εξαιρετικά σημαντική η περίπτωση, που το υδραυλικό ρευστό αλλάζει θερμοκρασία, καθώς μπορεί να προκληθεί κίνηση του εμβόλου ανεξάρτητη από τη λειτουργία των βαλβίδων, αλλά λόγω αλλαγής των ιδιοτήτων του ρευστού. Αυτό ονομάζεται «drift» και λαμβάνεται υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό των συστημάτων από τους κατασκευαστές.



Σχήμα 1-14: Γραφική απεικόνιση ενός υδραυλικού servo-μηχανισμού.

1.3.7 Μονάδα Παροχής Ισχύος- Γεννήτρια Παλμών (Power Supply Unit-Pulse Generator)

Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στην μηχανή EDM αναφέρεται με διαφορετικά ονόματα. Κατασκευαστές στις ΗΠΑ χρησιμοποιούν συχνά τον όρο "παροχή ηλεκτρικού ρεύματος" ενώ οι ασιατικοί κατασκευαστές αναφέρονται συχνότερα στη μονάδα αυτή ως "γεννήτρια" ή "γεννήτρια σπινθήρων". Η γεννήτρια τροφοδοσίας ρεύματος ελέγχει το χρονικό διάστημα εκδήλωσης των σπινθήρων στο κενό σπινθηρισμού και τη σέρβοτροφοδοσία, εξασφαλίζοντας έτσι τη σωστή διατήρηση του χάσματος σπινθηρισμού.

Τα βασικά μέρη που αποτελούν μια μονάδα παροχής ισχύος είναι:

- Πηγή συνεχούς ρεύματος (DC Power source)
- Servo-μηχανισμός (Servo control)
- Διανομέας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC electric power distribution)
- Μονάδα προστασίας ηλεκτρικού τόξου συνεχούς ρεύματος (DC arc protection unit).

Οι γεννήτριες παλμών χωρίζονται συνήθως σε δύο βασικούς τύπους:

- Με χρήση τρανζίστορ ή ηλεκτρονικών διακοπτών
- Αντίστασης–Πυκνωτή (Resistor–Capacitor RC).

Οι γεννήτριες με χρήση τρανζίστορ (Σχήμα 1-15) διαθέτουν τρανζίστορ (TR), αντιστάσεις για το περιορισμό της έντασης ρεύματος (R), και μετασχηματιστή ρεύματος (CT). Οι αντιστάσεις και τα τρανζίστορ, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-15, βρίσκονται σε παράλληλη σύνδεση ανάμεσα στην μονάδα παροχής ισχύος συνεχούς ρεύματος και στο διάκενο παραγωγής σπινθήρων. Η ένταση ρεύματος κατά την δημιουργία σπινθήρα αυξάνεται ανάλογα με το πόσα τρανζίστορ είναι «αναμμένα» (switched on) ταυτόχρονα. Ο μηχανισμός ON/OFF (που πρακτικά δημιουργεί τους ηλεκτρικούς παλμούς στην επιθυμητή συχνότητα) ελέγχεται από τρανζίστορ πεδίου (Field Effect Transistor). Ο τύπος αυτού παλμογεννήτριας είναι ο πλέον διαδεδομένος για εργαλειομηχανές συμβατικής ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της διάρκειας και συχνότητας των παλμών μέσω των ηλεκτρονικών διακοπτών ON/OFF, ενώ ταυτόχρονα έχουν τη δυνατότητα παροχής - δημιουργίας υψηλής ενέργειας σπινθήρων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αυξημένος ρυθμός αποβολής υλικού κατά τη κατεργασία.



Σχήμα 1-15: Διαγραμματική παρουσίαση γεννήτριας παλμών με χρήση τρανζίστορ.

Τα βασικά στοιχεία μιας παλμογεννήτριας αντιστάσεων-πυκνωτών (Σχήμα 1-16) είναι: οι αντιστάσεις ελέγχου της ηλεκτρικής εκκένωσης (discharge control resistors), οι πυκνωτές ελέγχου της ηλεκτρικής εκκένωσης (discharge control capacitors), το κύκλωμα ελέγχου μέγιστης έντασης (peak hold circuit), και ο μετασχηματιστής ρεύματος (CT). Η διάρκεια παλμών σε τέτοιου τύπου γεννήτριες ορίζεται από την χωρητικότητα των πυκνωτών και την αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσης του πυκνωτή με το τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο. Η συχνότητα παλμών εξαρτάται από το χρόνο φόρτισης, ο οποίος ελέγχεται μέσω της «αντίστασης R» που επιλέγεται να χρησιμοποιείται κάθε φόρα στο κύκλωμα. Η «αντίσταση R» δεν πρέπει να έχει πολύ χαμηλές τιμές, καθώς υπάρχει περίπτωση δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου αντί ηλεκτρικής εκκένωσης. Για την «αντίσταση R» υπάρχει μια επιθυμητή «κρίσιμη» τιμή για την οποία αποτρέπονται τέτοια φαινόμενα.

Η ενέργεια εκκένωσης ορίζεται από τον πυκνωτή που χρησιμοποιείται, αλλά και από «διάσπαρτους πυκνωτές» (stray capacitance), που δημιουργούνται στη διάταξη συγκράτησης του ηλεκτροδίου, στην τράπεζα εργασίας και ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο. Οι παλμογεννήτριες τέτοιου τύπου ήταν οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά έχουν περιορισμούς στην μέγιστη ενέργεια εκκένωσης, την οποία μπορούν να παράγουν, περιορίζοντας έτσι και το ρυθμό αποβολής υλικού. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατεργασίες micro–EDM λόγω της δυνατότητας να παράγουν σπινθήρες πολύ χαμηλής ενέργειας.



Σχήμα 1-16: Διαγραμματική παρουσίαση γεννήτριας παλμών με αντιστάσεων-πυκνωτών.

Η μονάδα παροχής ισχύος συνήθως περιλαμβάνει βολτόμετρο και αμπερόμετρο για τη μέτρηση των αντίστοιχων μεγεθών (διαφορά δυναμικού και ένταση ρεύματος) στο διάκενο ηλεκτροδίου–τεμαχίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Συνήθως υπάρχει και ένδειξη σταθερότητας και αποδοτικότητας της κατεργασίας (servo system stability and efficiency), ώστε μέσω άμεσης εποπτείας, να είναι ευκολότερη η επιλογή συνθηκών που θα μεγιστοποιούν αυτές τις παραμέτρους. Εκτός των κατασκευαστικών παραμέτρων της μονάδος ισχύος, οι οποίες κατά κύριο λόγο απασχολούν και είναι στο πεδίο ευθύνης του κατασκευαστή, η τοποθέτηση της στον χώρο λειτουργίας είναι σημαντική παράμετρος. Η ανάγκη για ψύξη της μονάδας ισχύος συνήθως καλύπτεται με χρήση του περιβάλλοντος αέρα με την ταυτόχρονη όμως ανάγκη για εγκατάσταση φίλτρων, τα οποία θα την προστατεύουν από αιωρούμενα σωματίδια με διαβρωτικά, ηλεκτρικά αγώγιμα, και ελαιώδη χαρακτηριστικά, και τα οποία προκαλούν φθορές και καταστροφή της εργαλειομηχανής.



Σχήμα 1-17: Βασικά στοιχεία που απαρτίζουν μια τυπική μονάδα ισχύος.

1.3.8 Σύστημα Κυκλοφορίας Διηλεκτρικού Μέσου και Έκπλυσης

Το σύστημα κυκλοφορίας και έκπλυσης στόχο έχει την τροφοδοσία της «ζώνης κατεργασίας» (machining zone) με «φρέσκο–καθαρό» διηλεκτρικό μέσο, και την απομάκρυνση από αυτήν των προϊόντων κατεργασίας (έκπλυση).

Τα κύρια μέρη του συστήματος είναι (Σχήμα 1-18):

- Δεξαμενή του διηλεκτρικού μέσου (tank/reservoir)
- Αντλία
- Φίλτρα
- Εγκατάσταση από σωληνώσεις και ακροφύσια.

Η αντλία χρησιμοποιείται για την παροχή του διηλεκτρικού μέσου στο δοχείο εργασίας, ενώ τα φίλτρα συγκρατούν τα κατακρημνίσματα—απόβλητα της κατεργασίας καθαρίζοντάς το και εξασφαλίζοντας ότι γίνεται χρήση σταθερής ποιότητας διηλεκτρικού μέσου. Όσο «καλύτερες» συνθήκες απόπλυσης επικρατούν τόσο μικρότερα «νεκρά χρονικά μεσοδιαστήματα» (T_{off}) χρειάζονται και άρα καθίσταται η κατεργασία πιο αποδοτική.

Οι βασικές λειτουργίες του συστήματος κυκλοφορίας και απόπλυσης είναι:

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



Σχήμα 1-18: Διάγραμμα τυπικού συστήματος κυκλοφορίας -απόπλυσης.

Συνήθως κατά την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης τόσο το ηλεκτρόδιο όσο και το τεμάχιο παραμένουν βυθισμένα στο διηλεκτρικό μέσο με την απόπλυση να συμβαίνει–υποβοηθείται από την κίνηση του ηλεκτροδίου. Η κίνηση του ηλεκτροδίου δημιουργεί στροβιλισμούς του ρευστού στο διάκενο ηλεκτροδίου–τεμαχίου και έτσι διευκολύνεται η απομάκρυνση των προϊόντων της κατεργασίας. Σε σύγχρονες εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης υπάρχουν τρείς βασικοί τύποι–μέθοδοι απόπλυσης, οι οποίες και επιλέγονται ανάλογα με τις ανάγκες–ιδιαιτερότητες της εκάστοτε κατεργασίας.

Οι τύποι αυτοί είναι:

- Απόπλυση με πίεση ή μέσω ψεκασμού (Pressure flushing / Injection flushing)
- Απόπλυση μέσω αναρρόφησης (Suction flushing)
- Απόπλυση με δέσμη jet ή πλάγια απόπλυση (Jet or side flushing).

Η πίεση του ρευστού είναι σημαντικός παράγοντας της διαδικασίας. Σε πολύ χαμηλές πιέσεις είναι δύσκολή η απομάκρυνση στερεών και αέριων προϊόντων της κατεργασίας, ενώ υψηλές πιέσεις επιταχύνουν την φθορά του ηλεκτροδίου και δημιουργούν ανεπιθύμητους στροβιλισμούς. Επίσης, επηρεάζεται και η ποιότητα επιφανείας ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη πίεση. Στον Πίνακα 1-5 παρουσιάζεται ενδεικτικά πως επηρεάζει η πίεση απόπλυσης τις παραμέτρους της κατεργασίας και στο Σχήμα 1-19 παρουσιάζονται σχηματικά οι προαναφερόμενοι τρόποι απόπλυσης [3] [11].

Πίνακας 1-5. Μεταβολή παραμέτρων κατεργασίας συναρτήσει της πίεσης απόπλυσης.

Παράμετρος της κατεργασίας	Μεταβολή συναρτήσει της πίεσης
Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)	Μειώνεται ελαφρώς με αύξηση της πίεσης
Σχετική φθορά ηλεκτροδίου (RWR)	Αρχικά μειώνεται και μετά αυξάνεται καθώς
	αυξάνεται η πίεση. Υπάρχει ένα επιθυμητό
	βέλτιστο ελάχιστο για κάθε κατεργασία.
Τραχύτητα επιφανείας (Ra)	Τείνει αρχικά να μειωθεί και στη συνέχεια
	αυξάνεται με αύξηση της πίεσης έκπλυσης.



Σχήμα 1-19: Μέθοδοι απόπλυσης: 1) Με δέσμη jet 2) Με πίεση και παροχή του ρευστού μέσω του ηλεκτροδίου 3) Με πίεση και παροχή του ρευστού μέσω του τεμαχίου 4) Με αναρρόφηση 5) Συνδυασμός μεθόδων.

Αλουμίνιο

2

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

Το αργίλιο ή αλουμίνιο (Aluminium) είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο Al και ατομικό αριθμό 13. Είναι ένα αργυρόλευκο μεταλλικό στοιχείο που ανήκει στην ομάδα IIIA (13) του περιοδικού συστήματος μαζί με το βόριο. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο (3°) πιο άφθονο χημικό στοιχείο συνολικά στον πλανήτη μας, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Κατά βάρος αποτελεί περίπου το 8% του στερεού φλοιού.

Ωστόσο είναι πολύ δραστικό χημικά ώστε να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Αντίθετα, βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά. Η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου είναι ο βωξίτης.



Σχήμα 2-1: Ποικίλα προφίλ αλουμινίου σε σχήματα και τύπους. Το μεταλλικό αλουμίνιο έχει (φαινομενικά) μεγάλη ικανότητα στο να αντιστέκεται στη διάβρωση. Αυτό στην ουσία συμβαίνει γιατί με την έκθεση του μετάλλου στην ατμόσφαιρα σχηματίζει στιγμιαία ένα λεπτό επιφανειακό, μη ορατό, στρώμα οξειδίου του, που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του (φαινόμενο της παθητικοποίησης). Επίσης, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής του πυκνότητας και της μεγάλης του ικανότητας να δημιουργεί μεγάλη ποικιλία κραμάτων, έγινε στρατηγικής σημασίας μέταλλο για την αεροδιαστημική (και όχι μόνο) βιομηχανία. Είναι, επίσης, εξαιρετικά χρήσιμο στη χημική βιομηχανία, τόσο αυτούσιο ως καταλύτης, όσο και με τη μορφή διαφόρων ενώσεών του. Εκτός από τα οφέλη λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών ιδιοτήτων, το αλουμίνιο

Εκτός από τα οφέλη λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών ιδιοτήτων, το αλουμίνιο προσφέρει επίσης, μεγάλα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, μερικά από τα οποία είναι:

- Τα προϊόντα αλουμινίου που προορίζονται για τις οικοδομές, μπορούν να ανακυκλωθούν πλήρως πολλές φορές, εξοικονομώντας ενέργεια και πλουτοπαραγωγικές πηγές.
- Αν και το αλουμίνιο μπορεί να ανακυκλωθεί πολλές φορές, διατηρεί τα αρχικά υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά του. Έτσι, για παράδειγμα, τα στοιχεία ενός παραθύρου μπορούν να ανακυκλωθούν.

Στα μειονεκτήματα του καθαρού αλουμινίου αναφέρονται η μικρή μηχανική αντοχή και το χαμηλό σημείο τήξεως. Το πρόβλημα της μικρής μηχανικής αντοχής αντιμετωπίζεται με την κραματοποίηση που επιτυγχάνεται με την προσθήκη άλλων χημικών στοιχείων σε ορισμένη αναλογία και εν συνεχεία κατάλληλη μηχανική και θερμική κατεργασία.

Οι κυριότερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου (99.997% Al) δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2-1 που ακολουθεί [12].

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ		
	Στοιχεία	Μον.Μετρ.
Ατομικός Αριθμός	13	
Ατομικό Βάρος	26.98	$\left(\frac{g}{mol}\right)$
Σθένος	3	
Κρυσταλλική Δομή	Κυβικό Εδροκεντρομένο (FCC)	
Πυκνότητα (ρ) (20ºC)	2.6898	$(\frac{g}{cm^3})$
Σημείο Τήξης	660,2	°C
Σημείο Ζέσης	2450	°C
Συντελεστής Γραμμικής Διαστολής (α) (0-100ºC)	23.5·10 ⁻⁶	(<u>mm</u>)
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (κ)	237	(W)
Ειδική θερμοχωρητικότητα (c)	0.215	$(\frac{cal}{g \cdot K})$
Ειδική Αντίσταση (ρ) (20ºC)	2.69	(μΩ •cm)
Όριο Διαρροής (S)	20	МРа
Όριο Θραύσης (R)	70	МРа
Σκληρότητα <i>Brinell</i> (HB)	14.2	$\frac{kgf}{mm^2}$
Επιμήκυνση Θραύσης (Α)	60	%
Μέτρο Ελαστικότητας (Ε)	68.3	GPa
Μέτρο Στρέψης (G)	25.5	GPa
Συντελεστής <i>Poisson</i> (σ)	0.34	

Πίνακας 2-1. Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου.

ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Τα κυριότερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται σαν κραματικά στοιχεία στο αλουμίνιο, είναι ο χαλκός, το πυρίτιο, το μαγνήσιο, ο ψευδάργυρος και κατά δεύτερο λόγο το

μαγγάνιο, το χρώμιο, το νικέλιο, το τιτάνιο και ο σίδηρος. Προστίθενται είτε μόνα είτε σε συνδυασμούς.

Οι τελικές ιδιότητες κάθε προϊόντος που θα παραχθεί από αλουμίνιο, επιτυγχάνονται με την επιλογή του κατάλληλου κράματος αλουμινίου, την μέθοδο επεξεργασίας του (μηχανική πλαστική διαμόρφωση ή χύτευση) και τις θερμικές κατεργασίες (βαφή, τεχνητή γήρανση, ανόπτηση κλπ) που θα υποστεί.

Το αλουμίνιο και τα κράματά του, (είτε πρωτόχυτο είτε δευτερόχυτο), διαιρούνται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για χρήση σε χυτήρια (παραγωγή χυτών αντικειμένων)
- Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για μηχανική μεταποίηση (παραγωγή προϊόντων έλασης, διέλασης, ολκής, κλπ).

Οι ιδιότητες των προϊόντων του αλουμινίου ή των κραμάτων του, εξαρτώνται τόσο από την κραματοποίηση όσο και από τις μηχανικές ή θερμικές κατεργασίες που θα υποστεί.

2.1.1 Κράματα Χυτών

Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα ΕΝ τα κράματα αλουμινίου συμβολίζονται με πέντε αριθμητικά ψηφία. Το πρώτο ψηφίο προσδιορίζει την ομάδα των κραμάτων βάσει του κυριότερου κραματοποιού στοιχείου. Το πέμπτο ψηφίο είναι πάντα 0. Του πενταψήφιου αυτού αριθμού προηγείται συμβολισμός που δείχνει την χρήση του κράματος.

Πίνακας 2-2.	Συμβολισμοί χυτ	τών κραμάτων.
--------------	-----------------	---------------

KP.	ΑΜΑΤΑ ΧΥΤΩ	RN							
Συμβολισμός-ποιότητας	Συμβολισμός	Κύριο στοιχείο							
	1XXX0	Κανένα (min 99,00% Al)							
	2XXX0	Cu							
EN AB-	4XXX0	Si							
EN AC-	EN AC- 5XXXO Mg								
EN AM-	7XXX0	Zn							
	8XXX0	Sn							
9ΧΧΧΟ Μητρικά κράματα									
Συμβολισ	μοί: Ευρωπαϊκό π	ρότυπο,							
Α: Αλουμίνιο, Β: χελώνο	ι, C: Κράμα για χυτ	τά, Μ: Μητρικό κράμα							

Τα χαρακτηριστικότερα κράματα για την παραγωγή χυτών αντικειμένων είναι αυτά που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε πυρίτιο. Το πυρίτιο βελτιώνει τις ρεολογικές ιδιότητες έτσι ώστε το ρευστό μέταλλο να καταλαμβάνει όλες τις κοιλότητες του καλουπιού.

2.1.2 Κράματα αλουμινίου μηχανικής πλαστικής διαμόρφωσης

Το αλουμίνιο και τα κράματα αλουμινίου που προορίζονται για μηχανική επεξεργασία (έλαση, διέλαση, σφυρηλασία κλπ) προσδιορίζονται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΝ 573 και χαρακτηρίζονται από τη χημική τους σύσταση βάσει διεθνώς αποδεκτού συστήματος που χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς. Το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία δείχνει την ομάδα κράματος σύμφωνα με το σε μεγαλύτερη αναλογία ευρισκόμενο στοιχείο.

KPAMAT	TA MHXANIF	κης πλαστικ	κη <mark>Σ</mark> γιαμοδ	ΦΩΣΗΣ
Συμβολισμός - ποιότητας	Συμβολισμός	Κύριο κραματοποιό στοιχείο	Σκλήρυνση με μηχανική επεξεργασία	Σκλήρυνση με θερμική επεξεργασία
	1XXX	Κανένα (min.99.00% Al)	х	
	3XXX	Mn	Х	
EN AW-	4XXX	Si	х	
	5XXX	Mg	х	
	2XXX	Cu	(X)	х
	6XXX	Mg+Si	(X)	х
	7XXX	Zn	(X)	х
	8XXX	άλλο	(X)	х

Πίνακας 2-3. Συμβολισμοί χυτών κραμάτων μηχανικής πλαστικής παραμόρφωσης.

Κράματα για μηχανική πλαστική διαμόρφωση.Τα κράματα για μηχανική επεξεργασία χωρίζονται σε: θερμοσκληρυνόμενα μη θερμοσκληρυνόμενα.

Κράματα θερμοσκληρυνόμενα

Τα κράματα αυτά αποκτούν τις μηχανικές αντοχές μετά από θερμική επεξεργασία.

- Σειρά 2xxx: κράματα αλουμινίου-χαλκού. Τα κράματα της σειράς αυτής αποκτούν μηχανικές αντοχές υψηλότερες από αυτές του μέσου χάλυβα. Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις κατασκευών, όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές αντοχές. Κάτω από ειδικές συνθήκες παρουσιάζουν μια αυξημένη ευαισθησία στην ατμοσφαιρική διάβρωση, γι΄αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα προστασίας. Τα κράματα της σειράς αυτής μπορούν να συγκολληθούν με ειδικές τεχνικές, μόνον όπως η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική, βιομηχανία όπλων κλπ. Χαρακτηριστικά κράματα 2017, 2024.
- Σειρά 6xxx: κράματα αλουμινίου-πυριτίου-μαγνησίου. Αποτελούν τα κράματα που κατά βάση χρησιμοποιούνται στην διέλαση για την παραγωγή προφίλ. Η ομάδα

αυτή χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες, στην κατηγορία των κραμάτων που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο και πυρίτιο και που σε συνδυασμό με το μαγγάνιο, χρώμιο και ψευδάργυρο εξασφαλίζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες, με χαρακτηριστικά τα κράματα: 6005, 6061, 6082. Η άλλη κατηγορία αποτελείται από κράματα που περιέχουν μικρότερες ποσότητες μαγνησίου και πυριτίου και προσφέρουν μεγάλες ταχύτητες διέλασης, αλλά χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Παρουσιάζουν καλή διακοσμητική συμπεριφορά και έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως στις αρχιτεκτονικές και διακοσμητικές εφαρμογές. Χαρακτηριστικά κράματα: 6063.

Σειρά 7xxx: κράματα αλουμινίου ψευδαργύρου. Ο ψευδάργυρος με το μαγνήσιο είναι τα κύρια κραματικά στοιχεία. Τα κράματα αυτά επιτυγχάνουν τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική βιομηχανία.

Κράματα μη θερμοσκληρυνόμενα

Τα κράματα αυτά αποκτούν τις μηχανικές αντοχές τους ανάλογα με το βαθμό της μηχανικής κατεργασίας που υφίστανται.

- Σειρά 1xxx: Καθαρό αλουμίνιο με 99,00% ελάχιστη καθαρότητα. Το καθαρό αλουμίνιο υποδιαιρείται σε κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αλουμίνιο. Το καθαρό αλουμίνιο χαρακτηρίζεται από την υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και την εύκολη μορφοποίηση. Οι μηχανικές αντοχές είναι σχετικά χαμηλές.
- Σειρά 3xxx: κράματα αλουμινίου-μαγγανίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς αυτής είναι: η εύκολη μορφοποίηση, η καλή αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση, η ευκολία συγκόλλησης με τις συνήθεις μεθόδους. Χαρακτηριστικά κράματα το 3003 και 3004.
- Σειρά 4xxx: κράματα αλουμινίου-πυριτίου. Η παρουσία του πυριτίου ελαττώνει το σημείο τήξης των κραμάτων της κατηγορίας αυτής. Το γεγονός αυτό, καθιστά αυτά τα κράματα κατάλληλα για χρήση ως ηλεκτρόδια πλήρωσης σε εργασίες συγκόλλησης κομματιών αλουμινίου.
- Σειρά 5xxx: κράματα αλουμινίου-μαγνησίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτών είναι: πολύ καλή συγκολλητικότητα, πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες (κρυογενικά συστήματα), πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον, μέσες μηχανικές αντοχές. Χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυπηγική, στη χημική βιομηχανία, στις οικοδομές, στα μεταφορικά μέσα, κλπ. Χαρακτηριστικά κράματα: 5005, 5052, 5754, 5083, 5086, 5182.

2.1.3 Μορφές διάβρωσης του αλουμινίου και των κραμάτων του

Η διάβρωση του αλουμινίου και των κραμάτων του μπορεί να πάρει διάφορες μορφές και να εμφανιστεί είτε σαν γενική διάβρωση της συνολικής επιφάνειας που εκτίθεται στο διαβρωτικό περιβάλλον είτε να λάβει ένα έντονο τοπικοποιημένο χαρακτήρα και να προσβάλλει επιλεκτικά ορισμένες περιοχές της επιφάνειας κατά κανόνα μικρής έκτασης. Η περίπτωση της γενικής διάβρωσης είναι συνήθως σπάνια και παρατηρείται όταν το προστατευτικό οξείδιο είναι διαλυτό στο διαβρωτικό περιβάλλον, όπως συμβαίνει για παράδειγμα σε ορισμένα οξέα. Αντίθετα το αλουμίνιο και τα κράματά του εμφανίζουν συχνότατα το δεύτερο είδος διάβρωσης που εκδηλώνεται όπως αναφέρονται ονομαστικά παρακάτω:

- Διάβρωση κοιλοτήτων
- Σπηλαιώδης διάβρωση
- Φυλλοειδής διάβρωση
- Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση
- Διάβρωση με κόπωση.

2.1.4 Προστασία από τη διάβρωση

Μεταξύ των άλλων μέτρων (κατάλληλη επιλογή κράματος για συγκεκριμένη εφαρμογή, χρησιμοποίηση ειδικών θερμικών κατεργασιών για έλεγχο της μικροδομής, κατάλληλη σχεδίαση των εξ'αλουμινίου αντικειμένων) που συνδέονται άμεσα με την αντοχή του υλικού στη διάβρωση, χρησιμοποιούνται και πρακτικές που επαυξάνουν κατά έμμεσο τρόπο την αντοχή του στη διάβρωση. Μέσω αυτών επιδιώκεται κατά κανόνα ο περιορισμός της επαφής του βασικού υλικού με το διαβρωτικό περιβάλλον.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ακόλουθες πρακτικές:

- a. Ανάπτυξη επί της επιφάνειας προστατευτικών επιστρωμάτων με χημική κατεργασία (conversion coatings)
- b. Ηλεκτρολυτική ανάπτυξη προστατευτικού στρώματος οξειδίου-ανοδίωση (anodizing)
- c. Εναπόθεση στρωμάτων από χρώματα
- d. Χρήση αναστολέων.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Στα πρώτα χρόνια της εμφάνισης του αλουμινίου πραγματοποιήθηκαν αρκετές προσπάθειες για την χρήση του ως δομικού υλικού, μερικές από τις οποίες αρχικά εγκαταλείφθησαν και τελικά ήρθαν και πάλι στην επιφάνεια πενήντα χρόνια αργότερα (1886). Το αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε ως επένδυση βαγονιών σιδηροδρόμων. Ορισμένα από τα πρώτα αυτοκίνητα είχαν αλουμίνιο στο αμάξωμά τους. Ακόμη, υπάρχει μια αναφορά για ένα προκατασκευασμένο φορητό σπίτι από αλουμίνιο το οποίο εφευρέθηκε από τον Howes στο Σιάτλ (1897), το οποίο ζύγιζε μόλις 70kg και προοριζόταν για χρήση από τους χρυσοθήρες του Klondyke (1897) [13].

2.2.1 Η καθιέρωση των Κραμάτων

Προκειμένου το αλουμίνιο να μπορεί να χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό, ήταν απαραίτητο να αναπτυχθούν κατάλληλα κράματα, καθώς το καθαρό μέταλλο ήταν μάλλον χαμηλής αντοχής. Ο πρωτοπόρος της κατασκευής κραμάτων ήταν ο Γερμανός μεταλλουργός Alfred Wilm, ο οποίος ανακάλυψε την χρόνια σκλήρυνση (age hardening), το φαινόμενο δηλαδή σύμφωνα με το οποίο μερικά κράματα αλουμινίου αν και ακόμη χαμηλών αντοχών μετά από θερμική κατεργασία, σταδιακά σκληραίνουν αφού αφεθούν για αρκετές ημέρες σε θερμοκρασία δωματίου. Η πρώτη επίδειξη αυτής της συμπεριφοράς έγινε το 1903 με ένα κράμα το οποίο περιείχε χαλκό σε ποσοστό 4%. Περισσότερα πειράματα οδήγησαν σε ισχυρότερα κράματα και τελικά το 1909 παρήγαγε ένα κράμα το οποίο παρουσίαζε ιδιότητες αντίστοιχες με αυτές του μέτριου χάλυβα, μία σύνθεση Al-CuMgMn την οποία βάπτισε duralumin. Ήταν ο πρόγονος αυτού που τώρα ονομάζουμε 2xxx σειρά κραμάτων.

Μόλις το 1920 βρέθηκε επιστημονική εξήγηση για το φαινόμενο του age hardening, λίγο μετά την δημιουργία ενός δεύτερου κράματος, του τύπου Al-MgSi, που επίσης παρουσίαζε το φαινόμενο αυτό. Αυτή η ομάδα κραμάτων, η οποία σήμερα ονομάζεται 6xxx σειρά, έχει εφελκυστική αντοχή περί τα $300 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ και είναι άρα χαμηλότερης αντοχής από την 2xxx σειρά. Ωστόσο, παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία οδήγησαν στην καθιέρωση της σειράς 6xxx ως το «μέτριο χάλυβα» (mild steel) του αλουμινίου.

Τα κράματα που εμφανίσθηκαν στη συνέχεια ήταν του τύπου Al-Mg, τα οποία σήμερα είναι γνωστά ως 5xxx σειρά. Πρόκειται για μη θερμικά κατεργασμένα κράματα τα οποία σκληραίνονται μέσω της διαδικασίας της εξέλασης. Τα κράματα αυτά αναπτύχθηκαν στη Βρετανία στα τέλη της δεκαετίας του 1920 και βγήκαν στην αγορά με την ονομασία Birmabright. Το χαρακτηριστικό τους είναι η πολύ καλή αντίσταση στη διάβρωση γι΄αυτό και κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1930 χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή πλοίων.

2.2.2 Σύγχρονες Τεχνολογικές Εφαρμογές

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του αλουμινίου είναι το χαμηλό του βάρος, η υψηλή αντοχή του στη διάβρωση, η λειτουργικότητα και η χαμηλή του τοξικότητα, το γεγονός ότι είναι εύπλαστο και ενεργειακά αποδοτικό καθώς επίσης το ότι ανακυκλώνεται.

Λόγω των ιδιοτήτων του αυτών συχνά χρησιμοποιείται στην αεροναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη βιομηχανία αθλητικών ειδών, τη ναυπηγική, στην οικοδομική δραστηριότητα καθώς επίσης και στις συσκευασίες προϊόντων.

Η εκτεταμένη χρήση αλουμινίου στην οικοδομή και την κατασκευή κτιρίων, καθιστά τα κτίρια ενεργειακά αποδοτικά, ενώ η σχέση αντοχής και βάρους καθιστά δυνατή την υλοποίηση σχεδίων που αφορούν δομές, με εξαιρετική σταθερότητα και μοντέρνα αρχιτεκτονική. Μια πιο πρόσφατη εξέλιξη στο πεδίο των κατασκευών είναι η χρήση σε παραθαλάσσιες κατασκευές, όπου το αλουμίνιο κερδίζει έδαφος ως αξιόπιστο υλικό για την περίπτωση μονάδων οι οποίες εδράζονται σε σταθερές πλατφόρμες, όπου το κόστος εγκατάστασης εξαρτάται άμεσα από το βάρος. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι οι πλατφόρμες ελικοπτέρων και οι πλωτές μονάδες διαμονής, καθώς και κτίσματα που χρησιμοποιούνται ως ξενοδοχεία.



Σχήμα 2-2: Marina Bay Sands Casino, Singapore.



Σχήμα 2-3: Floating home made of aluminum.

Το σημαντικό αυτό υλικό οφείλει την επιτυχία του στον τομέα της δόμησης σ'ένα μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων, μεταξύ των οποίων μπορούν να αναφερθούν:

- Τα προϊόντα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στις οικοδομές έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ απαιτούν μικρή-σχεδόν αμελητέα συντήρηση.
- Η μεγάλη αντοχή του υλικού σε συνδυασμό με το μικρό του βάρος, επιτρέπει στους αρχιτέκτονες να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις ιδιαιτέρων προδιαγραφών, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούν τα φορτία στα στοιχεία του σκελετού.
- Τα προϊόντα από αλουμίνιο που προορίζονται για χρήση στην οικοδομή, κατασκευάζονται από κράματα (περιέχουν μικρές ποσότητες, μέχρι 1.5%, από άλλα στοιχεία όπως μαγγάνιο, μαγνήσιο, πυρίτιο) τα οποία έχουν υψηλή αντοχή, είναι ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες, δεν διαβρώνονται και διατηρούν όλες τις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Το υλικό προσφέρει στους μηχανικούς και αρχιτέκτονες μεγάλη ευελιξία σχεδιασμού. Η διεργασία της διέλασης (παραγωγή προφίλ) προσφέρει μια ατέλειωτη ποικιλία προφίλ σε σχήματα και τύπους. Επίσης, το αλουμίνιο μπορεί να κοπεί, να τρυπηθεί, να καμπυλωθεί, να συγκολληθεί είτε στο εργοστάσιο κατασκευής, είτε στο εργοτάξιο.
- Το αλουμίνιο μπορεί να ανοδιωθεί ή να βαφεί και έτσι αφ'ενός μεν να ικανοποιήσει τις διακοσμητικές απαιτήσεις του σχεδιαστή, αφ'ετέρου δε να αυξήσει τη φυσική αντοχή και αντιδιαβρωτική του συμπεριφορά, προσφέροντας παράλληλα μια επιφάνεια εύκολη στο να καθαρισθεί.
- Είναι καλός αγωγός της θερμότητας, που όμως σε μερικές εφαρμογές αυτό μπορεί
 να είναι μειονέκτημα. Εντούτοις, όταν απαιτείται, αυτή η ιδιότητα μπορεί να

ξεπεραστεί με το κατάλληλο σχεδιασμό του προφίλ και με την χρήση θερμομονωτικών "διακοπών", που κατασκευάζονται από ειδικά υλικά. Με τον τρόπο αυτό το αλουμίνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή, για παράδειγμα, παραθύρων που έχουν μεγάλη θερμομόνωση.

 Το αλουμίνιο, πρακτικά, δεν απαιτεί συντήρηση, εκτός από τον συνήθη καθαρισμό, στοιχείο που μεταφράζεται σ'ένα μεγάλο πλεονέκτημα από πλευράς κόστους κατά την διάρκεια ζωής του προϊόντος.

Στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας η χρήση του αλουμινίου συμβάλει στην αντικατάσταση των βαριών υλικών και στην εξοικονόμηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, το αλουμίνιο από χρόνια έχει καθιερωθεί στην αγορά ως το υλικό κατασκευής του αμαξώματος λεωφορείων και φορτηγών, των οποίων ο σκελετός είναι συνήθως χαλύβδινος. Διάφοροι τύποι διατομών είναι διαθέσιμοι διευκολύνοντας ακόμη και τους κατασκευαστές μικρής κλίμακας να παράγουν ανεξάρτητα αμαξώματα προκειμένου να ικανοποιήσουν τις διαφορετικές απαιτήσεις των πελατών. Το σύνηθες υλικό που χρησιμοποιείται είναι ο ισχυρότερος τύπος της σειράς 6xxx, ενώ η συναρμολόγηση γίνεται με χρήση πλήρως συγκολλημένων κατασκευών, από έλασμα της σειράς 5xxx συνήθως.

Εκτός από τη χρήση στο κλάδο της βιομηχανίας, διαδεδομένη είναι και η χρήση του αλουμινίου στις συσκευασίες. Συγκεκριμένα, οι συσκευασίες αλουμινίου συμβάλλουν στην αποτελεσματική παραγωγή, αποθήκευση, διανομή και χρήση των προϊόντων. Για παράδειγμα, το αλουμινόχαρτο και τα σκεύη μιας χρήσεως είναι ιδανικά για το ζέσταμα ή και το ελαφρύ μαγείρεμα, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται για να διατηρούν το φαγητό ζεστό ή κρύο αλλά και για τη μεταφορά φαγητού.

Στον κλάδο των συσκευασιών, πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι το αλουμίνιο αποτελεί ιδανικό υλικό για ανακύκλωση. Είναι εύκολο να διαχωριστεί ανάμεσα σε άλλα ανακυκλώσιμα υλικά, η διαλογή του έχει χαμηλό κόστος, ενώ δεν υπάρχει περιορισμός για το πόσες φορές μπορεί να ανακυκλωθεί, διατηρώντας πάντα την ποιότητα της πρώτης ύλης. Ένα από τα βασικότερα παραδείγματα είναι τα κουτάκια αλουμινίου τα οποία είναι διαθέσιμα στην καθημερινότητα του ανθρώπου και τα οποία αποτελούν ένα από τα βασικότερα αντικείμενα τα οποία συλλέγονται για ανακύκλωση στα νοικοκυριά.

Τέλος, το αλουμινίο χρησιμοποιείται στον τομέα της ναυσιπλοΐας, και δη στην κατασκευή υπερωκεάνιων πλοίων όπου το μειωμένο βάρος του άνω τμήματος βοηθά στην ευστάθεια. Για τον ίδιο λόγο, μερικές φορές επιλέγεται και για την κατασκευή πολεμικών πλοίων. Καθώς η ολκιμότητα είναι εξίσου σημαντική με την αντοχή, ο προτιμώμενος τύπος κράματος είναι η ανθεκτικότερη μορφή της σειράς 5xxx. Τα τελευταία χρόνια το αλουμίνιο χρησιμοποιείται και σε high-speed ferries, κατασκευές

πλήρως κατασκευασμένες από αλουμίνιο που κάνουν χρήση συνδυασμού ελάσματος της σειράς 5xxx και διατομών της σειράς 6xxx [14][15].

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η μέθοδος κατεργασίας με ηλεκτρική εκκένωση παρέχει μια αποτελεσματική τεχνική κατεργασίας ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών που επιτρέπει την παραγωγή εξαρτημάτων περίπλοκης γεωμετρίας και την κατεργασία υλικών που είναι δύσκολο να παραχθούν με συμβατικές διαδικασίες μηχανουργικής κατεργασίας. Η απαιτούμενη διαστασιολογική ακρίβεια και το φινίρισμα τοποθετούν αυτή τη λειτουργία μηχανουργικής κατεργασίας σε εξέχουσα θέση. Για το λόγο αυτό, η κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση έχει ευρείες εφαρμογές στη βιομηχανία. Το αυξημένο ενδιαφέρον της κατεργασίας αυτής, οδήγησε σε μεγάλες βελτιώσεις στην τεχνολογία EDM.

Σήμερα, η ζήτηση του αλουμινίου και των κραμάτων του, σε διάφορες βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές όπως η αεροπορία, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ναυτιλία αυξάνεται με ταχύτατους ρυθμούς.

Ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού αποτελεί βασικό δείκτη της παραγωγικότητας της διαδικασίας EDM. Όταν η τιμή της έντασης του ρεύματος που τροφοδοτείται στο ηλεκτρόδιο αυξάνεται, παρατηρείται σε γενικές γραμμές και η αύξηση του συντελεστή απομάκρυνσης υλικού (MRR).

Η επίδραση του χρόνου T_{on}, είναι παρόμοια με αυτή του ρεύματος κατεργασίας. Έτσι, όταν ο χρόνος T_{on} αυξάνεται ο MRR αυξάνεται λόγω αύξησης του ποσού της ενέργειας του σπινθήρα. Αυτό προκαλεί "μεγαλύτερους" κρατήρες και λάκκους στο τεμάχιο επεξεργασίας και η κατεργασία γίνεται γρηγορότερη (Σχήμα 2-4).

Επιπρόσθετα, ο ενδιάμεσος χρόνος απενεργοποίησης T_{off} των παλμών όσο αυξάνεται, τόσο ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR μειώνεται και κατ'έπέκταση μειώνεται και η ταχύτητα της μηχανικής κατεργασίας.



Σχήμα 2-4: Τρέχων παλμός ελέγχου της γεννήτριας.

Τέλος, η σκοπιμότητα της κατεργασίας αλουμινίου και των κραμάτων του με τη χρήση μηχανής EDM με ηλεκτρόδιο χαλκού έχει αξιολογηθεί από την άποψη του ποσού απομάκρυνσης υλικού και του λόγου φθοράς του εργαλείου και έχει αποδειχθεί ότι η κατεργασία με EDM είναι λειτουργική. Μάλιστα, το ρεύμα κατεργασίας και ο χρόνος T_{on}, που καθορίζουν την ενέργεια του σπινθήρα είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν τις αποκρίσεις εξόδου[16] [17].

Η κατεργασία EDM αποτελεί μια «πολύπλοκη» και δύσκολη διαδικασία, καθώς περιλαμβάνει πολλαπλά φυσικά φαινόμενα (multi physics), τα οποία μάλιστα λαμβάνουν χώρα και εξελίσσονται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα (multi time scales). Στην μελέτη ενός παλμού συμμετέχουν οι καταστάσεις της ύλης: στερεή, υγρή, αέρια και πλάσμα που εντοπίζονται σε επιφάνειες μερικών εκατοντάδων μικρομέτρων και σε χρόνους από microsecond έως και nanosecond. Η μέθοδος αυτή, έγινε γνωστή για την κατεργασία σκληρών και εύθραυστων αγώγιμων υλικών, καθώς μπορεί να διαχειριστεί οποιοδήποτε ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό ανεξάρτητα από τη σκληρότητα του. Το χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τη μηχανική κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης από τις υπόλοιπες, είναι η μη επαφή ηλεκτροδίου-τεμαχίου κατεργασίας, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται τάσεις λόγω των δυνάμεων κοπής όπως στις συμβατικές κοπές. Ένεκα, της φύσεως της μηχανικής κατεργασίας EDM που προαναφέρθηκε, οι μηχανικές καταπονήσεις και τα προβλήματα κραδασμών κατά τη μηχανική κατεργασία μπορούν να εξαλειφθούν. Στην κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατεργασίας (MRR, TWR, SR) καθώς και στις σχηματιζόμενες περιοχές-γεωμετρίες επαναστερεοποιημένου υλικού (WL). Η αφετηρία της EDM βρίσκεται στις αρχές του 1770, όταν ο Άγγλος χημικός Joseph Priestly ανακάλυψε τη διαβρωτική επίδραση των ηλεκτρικών εκκενώσεων ή σπινθήρων [18].

Η «ηλεκτρική εκκένωση» και ο σχηματισμός πλάσματος (discharge plasma), έχει τρεις διακριτές φάσεις: έναυση/ανάφλεξη (ignition), διάδοση (propagation) και κατάρρευση (extinction). Η φάση της ανάφλεξης είναι η πιο ενδιαφέρουσα για τη μελέτη και τον ορισμό του διάκενου, του χρόνου καθυστέρησης (delay time), και την ανάπτυξη και εξέλιξη των διηλεκτρικών μέσων. Η φάση της έναυσης σε αέριο μέσο, κυρίως για διάκενα μεγαλύτερα του ενός χιλιοστού και σε συνδυασμό με τα φυσικά φαινόμενα που τη «συνοδεύουν», έχει μελετηθεί διεξοδικά, με βάση την ευρέως αποδεκτή "theory of streamers" [19] [20]. Ο μηχανισμός έναυσης σε υγρό διηλεκτρικό μέσο αμφισβητείται . Ο μηχανισμός μελετήθηκε από τον Schoenbach et al. για μικρο-διάκενα με υγρό διηλεκτρικό μέσο [21]. Ο χρόνος λίγο πριν την ανάφλεξη (pre ignition stage) στην κατεργασία EDM μελετήθηκε από τον Schulze et al. με χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας [22]. Η ύπαρξη αποβλήτων στο διάκενο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μήκους του, με τη διαδικασία να είναι στοχαστική. Ο ρόλος των αποβλήτων και της σχηματιζόμενης «φυσαλίδας» (gas bubble), μελετήθηκε περαιτέρω από τον Schumacher [23]. Οι Gatto et al. μέσω των πειραμάτων τους απέδειξαν τη λειτουργία των αποβλήτων ως «γέφυρες» κατά τη διάτρηση μικρών οπών και την επίδρασή τους στην έναυση του σπινθήρα [24]. Ανάλογες παρατηρήσεις-μελέτες έχουν γίνει και από άλλους ερευνητές.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Δεδομένου ότι το WL είναι το ανώτατο στρώμα που εκτίθεται στο περιβάλλον, ασκεί μεγάλη επίδραση στις επιφανειακές ιδιότητες του τεμαχίου. Αρκετοί συγγραφείς ανακάλυψαν την παρουσία μικρο-ρωγμών και υψηλές υπολειμματικές τάσεις στην επιφάνεια, που προκαλούνται από τον τρόπο κατανομής της θερνότητας [25]. Η δυσμενή επίδραση της ενέργειας εκκένωσης παρείχε επίσης κάποια στοιχεία σχετικά με την αντοχή στην κόπωση του τεμαχίου εργασίας, το οποίο διαδίδεται από τις πολλαπλές επιφανειακές ατέλειες εντός του στρώματος ανασύνταξης [26].

Ο Milan Kumar Das (2014) μελέτησε το συνδυασμό παραμέτρων κατεργασίας για τη βέλτιστη τραχύτητα επιφανείας (SR) και ρυθμό αποβολής υλικού (MRR) στην κατεργασία EDM σε δοκίμιο χάλυβα EN31 χρησιμοποιώντας αλγόριθμο ABC. Για τις πειραματικές παραμέτρους κατεργασίας ο χρόνος παλμού Ton και ο χρόνος αδράνειας Toff, η ένταση του ρεύματος κατεργασίας καθώς και η τάση, ποικίλλουν με βάση κεντρικό σύνθετο σχέδιο (CCD).

Επιπλέον, η επιφάνεια έχει σχετικά υψηλή μικρο-σκληρότητα, η οποία μπορεί να εξηγηθεί από την απομάκρυνση του άνθρακα από τα διηλεκτρικά πετρελαίου στην επιφάνεια του τεμαχίου που σχηματίζει καρβίδια σιδήρου στο λευκό στρώμα [27]. Η συγκέντρωση καρβιδίων, τόσο ως επιφανειακό στρώμα πάνω στο τεμάχιο όσο και ως λεπτόκοκκους σκόνεως, εξαρτάται από τη συχνότητα και την πολικότητα του εφαρμοζόμενου ρεύματος μαζί με άλλες παραμέτρους επεξεργασίας όπως το σχήμα των παλμών, η απόσταση διακένου και η θερμοκρασία διηλεκτρικών [28]. Ωστόσο, η Thomson υποστήριξε ότι η διάρκεια παλμού και ο τύπος του υλικού ηλεκτροδίων σε διηλεκτρικό παραφίνης έχει μικρή επίδραση στην ποσότητα επικάθισης άνθρακα στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Η Thomson πρότεινε επίσης ότι ο αριθμός και το μέγεθος των μικρο-ρωγμών αυξάνεται με τη διάρκεια των παλμών κατά την κατεργασία με ηλεκτρόδιο χαλκού.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΩΝ & ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

3.2.1 Τοπογραφία Επιφάνειας

Οι επιφάνειες που έχουν υποστεί κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης είναι γενικά «θαμπές» (dull appearance), εξαιτίας της «άτακτης» κατανομής των κρατήρων (arbitrary distribution). Στην επιφάνεια υπάρχουν «κορυφογραμμές» (ridges) οι οποίες σχηματίζονται από τη ροή τηγμένου υλικού, και σφαιρίδια–θύλακες (globules and pockmarks) σχηματιζόμενοι από εγκλωβισμένα αέρια που απελευθερώνονται από το τηγμένο υλικό, προτού αυτό στερεοποιηθεί απότομα.

Οι παράγοντες, που επηρεάζουν το μέγεθος των κρατήρων και κατ'επέκταση και τη μορφολογία της επιφάνειας είναι: η διάρκεια παλμού, η ένταση ρεύματος, οι θερμικές ιδιότητες υλικού και η σύσταση διηλεκτρικού μέσου. Ο όγκος του κρατήρα εξαρτάται από την ενέργεια ανά παλμό, με τον χρόνο παλμού και την ένταση ρεύματος να έχουν διακριτές επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά του κρατήρα (βάθος και διάμετρο). Ως γενικός κανόνας μπορεί να ειπωθεί ότι ο χρόνος παλμού επιτρέπει στη στήλη πλάσματος να «επεκταθεί», σχηματίζοντας κρατήρες μεγάλης διαμέτρου, ενώ η ένταση ρεύματος επηρεάζει σημαντικά το βάθος του κρατήρα. Με αυτά υπ'όψιν, μπορεί να αποκτηθεί μια «αίσθηση» για το πώς σχετίζεται η τραχύτητα επιφανείας με τις συνθήκες κατεργασίας, με το ακριβές πάντως σχήμα των κρατήρων να μην είναι συνήθως κυκλικό. Η απόκλιση αυτή εξαρτάται κυρίως από την ενέργεια του παλμού, με παλμούς μικρότερους των 50 [μ] να διατηρούν κυκλικό σχήμα και να έχουν πιο «καλοσχηματισμένα» όρια.

Η «ποικιλία» σε τοπολογικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού διηλεκτρικού μέσου και υλικού ηλεκτροδίου, καθώς ανάλογα με τη «διαθεσιμότητα» σε άνθρακα κατά την κατεργασία, λαμβάνουν χώρα διαφορετικά φαινόμενα. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό ως διηλεκτρικό μέσο και ηλεκτρόδιο χαλκού παρατηρούνται ελάχιστες και σπάνιες επικαθήσεις στα όρια των κρατήρων. Αντίθετα, όταν το υλικό του ηλεκτροδίου είναι γραφίτης παρατηρούνται εξίσου τέτοιες επικαθήσεις, με το φαινόμενο να γίνεται εντονότερο όταν χρησιμοποιείται κάποιο έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο. Οι εξαιρετικά έντονες μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας τοπικά κατά την κατεργασία είναι η αιτία για επιφανειακές ατέλειες (όπως για παράδειγμα ανάπτυξη ρωγμών), οι οποίες μειώνουν σημαντικά την αντοχή του υλικό κατεργασίας, η δυνατότητα για επιφάνειες άνευ ρωγμών.

Η διάρκεια παλμών, η ένταση ρεύματος, το υλικό τεμαχίου και οι ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου, είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την πιθανότητα σχηματισμού ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η ταχεία στερεοποίηση του τηγμένου υλικού δημιουργεί ισχυρές τάσεις συστολής (contraction stress), σε ορισμένες περιπτώσεις υψηλότερες του ορίου θραύσης του υλικού. Η πιθανότητα για ρηγμάτωση αυξάνεται για τους μεγάλους χρόνους παλμών, οι οποίοι δημιουργούν μεγάλους κρατήρες και για χαμηλή ένταση ρεύματος, όπου το «στρώμα» τηγμένου και επαναστερεοποιημένου υλικού είναι πολύ λεπτό με αποτέλεσμα την έντονη μεταβολή των αναπτυσσόμενων τάσεων. Τέλος, η αλληλεπίδραση της κατεργαζόμενης επιφάνειας με το διηλεκτρικό μέσο και το υλικό του ηλεκτροδίου αποτελεί σημαντική παράμετρο στην δημιουργία ρωγμών [31].

3.2.2 Μικροδομή Υποστρώματος (Subsurface Microstructure)

Μελέτες σε χάλυβα έχουν δείξει υψηλή αντοχή σε οξέα της «θερμικά επηρεασμένη ζώνης» (heat affected zone). Η περιοχή αυτή αλληλοεπιδρά έντονα με τα υλικά του ηλεκτροδίου και του διηλεκτρικού μέσου, και ως εκ τούτου, εντός της συγκεκριμένης ζώνης «συναντώνται» διάφορα κραματικά στοιχεία (Σχήμα 3-1) [32].



Σχήμα 3-1: Θερμοκρασιακές ζώνες στην κοιλότητα σπινθηρισμού.

Τα διάφορα στρώματα που επηρεάζονται από τη διαδικασία EDM, συχνά αναφέρονται ως μεταβληθείσες μεταλλικές ζώνες. Η διαδικασία επαναστερεοποίησης του τηγμένου υλικού δεν είναι πάντως απλή, καθώς η άνω επιφάνεια ψύχεται λόγω συναγωγής, ενώ η κάτω λόγω αγωγής, δημιουργώντας έτσι έντονες θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις. Ανάλογες μελέτες μικροδομής έχουν γίνει και για μη σιδηρούχα υλικά. Το Σχήμα 3-2 δείχνει ότι η αλλοιωμένη μεταλλική ζώνη αποτελείται από δύο θερμικά επηρεασμένες υποστρώσεις υλικού: το στρώμα ανασχηματισμού ή το λευκό στρώμα και τη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα.



Σχήμα 3-2: Θερμικώς επηρεασμένες υποστρώσεις και ζώνη επαναστερεομένου υλικού.

3.2.3 Μικρο-Ρωγμές (Micro-Cracks)

Η επαναστερεοποιημένη ζώνη αποτελείται από διάφορες μικροσκοπικές υπο-ζώνες ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας. Το τηγμένο υλικό κατά τη στερεοποίησή του συρρικνώνεται, συστέλλεται περισσότερο από το υπόλοιπο αναπτύσσοντας έτσι τοπικά τάσεις, οι οποίες όταν ξεπεράσουν το όριο αντοχής του υλικού εξελίσσονται σε ρωγμές. Μελέτες έχουν δείξει ότι αυξάνοντας την ενέργεια ανά παλμό αυξάνεται και η πιθανότητα να ανάπτυξης ρωγμών, χωρίς όμως να αποτελεί η συγκεκριμένη συσχέτιση ντετερμινιστικό και καθολικό κανόνα. Ρεύματα υψηλής έντασης, όπως έχει προαναφερθεί, σχηματίζουν βαθύτερους κρατήρες με παχύτερες επαναστερεοποιημένες περιοχές (resolidified segments) ως αποτέλεσμα της «εκτίναξης» (ejection) τηγμένου υλικού στα όρια των κρατήρων κατά το πέρας του παλμού. Στις περιοχές αυτές αναπτύσσονται ισχυρές «τάσεις μετασχηματισμού» (transformational stress). Αντίθετα, μεγάλης χρονικής διάρκειας παλμοί δημιουργούν μεγαλύτερους σε διάμετρο κρατήρες, μικρού βάθους, με το ρυθμό «εκτίναξης» υλικού στα όριά τους να είναι περιορισμένος. Το τηγμένο υλικό στο κέντρο του κρατήρα σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα, το οποίο ψύχεται, στερεοποιείται και συρρικνώνεται ταχύτατα και «γρηγορότερα» από το υπόλοιπο υλικό. Οι παραπάνω μηχανισμοί περιγράφουν συνοπτικά τα αίτια δημιουργίας ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια, τόσο για υψηλής έντασης ρεύματα, όσο και για μεγάλους χρόνους παλμού. Τέλος, υψηλή πιθανότητα ρηγμάτωσης έχουν υλικά με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Οι επιφανειακές ρωγμές συνήθως ξεκινούν από την επιφάνεια, «διατρέχουν» την επαναστερεοποιημένη περιοχή, και καταλήγουν στην άνω πλευρά της «θερμικά επηρεασμένης ζώνης». Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να διαπεράσουν και τα επόμενα στρώματα υλικού και να φτάσουν έως και το υλικό της βάσης. Παρατηρούνται επίσης μικρορωγμές (miniature cracks) στα όρια των κρατήρων ή/και σε σφαιρικούς ή άμορφους σχηματισμός από επικαθήσεις (spherical or formlessly shaped add-ons). Τέτοιες ρωγμές έχουν τυχαία επιφανειακή κατανομή και εξαιρετικά χαμηλό βάθος. Με βάση τα προαναφερθέντα μπορούν οι ρωγμές να διαχωριστούν σε επιφανειακές, σε αυτές με βάθος και σε μικρορωγμές (surface, penetrating, miniature). Οι ρωγμές με βάθος πολλαπλασιάζονται για κατεργασία υλικών που έχουν υποστεί προηγουμένως βαφή (pre quenched) σε απιονισμένο νερό ως διηλεκτρικό μέσο. Οι ρωγμές αυτές ακολουθούν τα όρια των κρατήρων, σχηματίζοντας κλειστούς βρόγχους (closed loops), διατηρώντας έτσι σχετικά σταθερά μεταξύ τους διαστήματα. Ανάλογης μορφής ρωγμές μπορούν πάντως να παρατηρηθούν και σε κατεργασίες με έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο. Παράλληλα με τις παραπάνω ρωγμές υπάρχουν και ορισμένες ακτινικές (radial cracks), με σχετικά περιορισμένο πλάτος ανοίγματος (width of openings) και συνήθως σταματούν στην διεπιφάνεια του επαναστερεοποιημένου υλικού και αυτού που έχει επηρεαστεί θερμικά.

Η κατεργασία σε έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο και το υλικό του ηλεκτροδίου, όπως έχει διατυπωθεί και προηγουμένως, επηρεάζουν ιδιαίτερα τη μικροδομή της επαναστερεοποιημένης περιοχής και τις φάσεις που συναντώνται σε αυτή. Οι ρωγμές εσωτερικά της ζώνης είναι ένδειξη υψηλών εφελκυστικών τάσεων μετασχηματισμού, οι οποίες εξελίσσονται λόγω της παρουσίας άνθρακα (elevated transformational tensile stresses). Επομένως, η ύπαρξη εγκλεισμάτων σε ρωγμές με βάθος οφείλεται στο ότι οι συγκεκριμένες ρωγμές, κατά πάσα πιθανότητα, σχηματίστηκαν κατά τα πρώτα στάδια στερεοποίησης ου τηγμένου υλικού.

Κλείνοντας μπορούμε να συνοψίσουμε ότι τα αίτια εμφάνισης των ρωγμών είναι οι πολύπλοκοι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα στην ζώνη του επαναστερεοποιημένου υλικού πρωτίστως, αλλά και στη θερμικά επηρεασμένη περιοχή δευτερευόντως. Περιλαμβάνουν την ανάπτυξη τάσεων κυρίως λόγω: της συρρίκνωσης του υλικού κατά την στερεοποίησή του, της ύπαρξης έντονης θερμοκρασιακής μεταβολής καθώς υπάρχει ταυτόχρονη ψύξη με αγωγή και συναγωγή, και τέλος λόγω των μετασχηματισμών φάσεων που εξελίσσονται με την παρουσία άνθρακα [33].

3.2.4 Ζώνη Επαναστερεομένου Υλικού (White Layer Zone)

Η διαδικασία EDM έχει μεταβάλλει τη μεταλλουργική δομή και τα χαρακτηριστικά σε αυτό το στρώμα καθώς σχηματίζεται από τετηγμένο μέταλλο που ψύχεται ταχέως από το διηλεκτρικό ρευστό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας έκπλυσης και επανεγκαθίσταται στην κοιλότητα. Αυτό το στρώμα περιλαμβάνει ορισμένα αποβαλλόμενα σωματίδια τα οποία έχουν στερεοποιηθεί και έχουν επανατοποθετηθεί στην επιφάνεια προτού αφαιρεθούν από το διάκενο. Το λευκό στρώμα είναι πυκνά διηθημένο με άνθρακα στο σημείο που η δομή του είναι σαφώς διαφορετική από εκείνη του βασικού υλικού. Αυτός ο εμπλουτισμός άνθρακα συμβαίνει όταν οι υδρογονάνθρακες του ηλεκτροδίου και του διηλεκτρικού ρευστού διασπώνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας EDM και εμποδίζουν τη λευκή στιβάδα ενώ το υλικό είναι ουσιαστικά σε τετηγμένη κατάσταση. Κάτω από το λευκό στρώμα βρίσκεται η ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα. Αυτό το στρώμα επηρεάζεται ελάχιστα από τον εμπλουτισμό με άνθρακα του λευκού στρώματος, αφού έχει υποστεί θερμική επεξεργασία, αλλά όχι μέχρι το σημείο που φθάνει η θερμοκρασία τήξης. Σε αυτό το σημείο, η ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα διατηρεί τη μεταλλουργική δομή του μητρικού υλικού καθώς η απορροφούμενη θερμοκρασία δεν είναι στο επίπεδο για να αλλάξει η δομή. Κάτω από τη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα είναι το μητρικό υλικό και αυτή η περιοχή δεν επηρεάζεται από τη διαδικασία EDM.

Η τραχύτητα της επιφάνειας μειώνεται ελαφρώς καθώς η περιεκτικότητα σε άνθρακα τόσο του ηλεκτροδίου όσο και του διηλεκτρικού υγρού μειώνεται. Η επιφάνεια των κατεργασμένων δοκιμίων καλύπτεται με ρηχούς κρατήρες και σφαιρίδια με εγκλωβισμένο στο εσωτερικό τους αέρα, λόγω της υψηλής θερμικής ενέργειας που απελευθερώνεται από τις εκκενώσεις, ακολουθούμενη από ταχεία ψύξη (Σχήμα 3-3) [34] [35].



Σχήμα 3-3: Τυπική εικόνα ζώνης επαναστερεομένου υλικού (Μεγένθυνση x100).

Η γεωμερία των κρατήρων καθώς και των σφαιριδίων, φανερώνει μια εξάρτηση από τον τύπο του διηλεκτρικού υγρού και του υλικού του ηλεκτροδίου. Μερικές μικρές ρωγμές, οι οποίες είναι τυχαία κατανεμημένες γύρω από τους κρατήρες και σφαιρικά παρατηρήθηκαν στην επιφάνεια των δειγμάτων KC (Kerosene=Dielectric liquid, Copper=Electrode material).

Με παρατηρήσεις σε εγκάρσια τομή γυαλισμένων δειγμάτων με τη χρήση όξινου αντιδραστηρίου, το οποίο είναι γνωστό ότι κηλιδώνει τα καρβίδια σε κράματα αλουμινίου, αποκαλύφθηκαν τα εξωτερικότερα τμήματα του λευκού στρώματος που προσβλήθηκαν από τον παράγοντα χάραξης σε δείγματα ΚC (Σχήμα 3-3). Ένα λεπτό επηρεασμένο στρώμα θα μπορούσε να είναι ορατό κάτω από αυτό το επαναστερεομένο στρώμα [36].

Το πάχος του λευκού στρώματος βρέθηκε να είναι περίπου 20 mm για όλα τα δείγματα. Το μέσο πάχος του λευκού στρώματος για το δείγμα WC (Water=Dielectric liquid, Copper=Electrode material) βρέθηκε να είναι μικρότερο από (15 mm) συγκριτικά με το προηγούμενο δείγμα. Το πάχος λευκού στρώματος ήταν λιγότερο ομοιόμορφο για δείγματα KG και KC. Το πάχος αυτών των συσσωρευμένων δομών έφτασε ακόμη και τα περίπου 50 mm. Σκοτεινότερη εμφάνιση της δομής του δείγματος KG σε σχέση με το δείγμα KC υποδηλώνει την εντονότερη διείσδυση καρβιδίων στο WL για δείγμα KG(Kerosene=Dielectric liquid, Graphite=Electrode material).



Σκοπός αυτής της μελέτης, είναι η πειραματική διερεύνηση της επιδράσης των παραμέτρων κατεργασίας (ένταση ρεύματος, διάρκεια παλμών) στην ποιότητα και στα χαρακτηριστικά της κατεργασμένης επιφάνειας. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως τεμάχια εργασίας είναι δύο τύποι Αλουμινίου(**AI5052**, **AI6063**) και ως ηλεκτρόδιο Χαλκός.

ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ

Η μηχανή στην οποία διεξήχθησαν τα περάματα είναι η AGIETRON EMT 1.10. Η συγκεκριμένη εργαλειομηχανή αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες μονάδες (κύρια μηχανή, μονάδα παροχής διηλεκτρικού μέσου, μονάδα παροχής ισχύος) συνδεδεμένες μεταξύ τους, με αγωγούς ρεύματος και διηλεκτρικού μέσου. Οι συνθήκες κατεργασίας που επιλέχθηκαν να μεταβάλλονται στη σειρά πειραμάτων είναι: η ένταση ρεύματος, και η διάρκεια παλμού.

Η ένταση ρεύματος ελέγχεται έμμεσα μέσω «μονάδων ρεύματος 'J_T'» από τους αντίστοιχους περιστροφικούς διακόπτες στη μονάδα ισχύος. Σε κάθε μονάδα ρεύματος, όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο χρήσης, αντιστοιχούν περίπου 3Α ένταση ρεύματος. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί η ένταση του ρεύματος κατεργασίας $I_P[A]$. Παράλληλα υπάρχει συνδεδεμένο αμπερόμετρο με ένδειξη της μέσης έντασης ρεύματος κατεργασίας ("indicates average working currents"), η ένδειξη του οποίου θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του duty Υπάρχει επίσης ένδειξη ratio «η». αποδοτικότητας (efficiency), που ουσιαστικά εκφράζει το ποσοστό των παλμών που οδηγούν σε εκδήλωση σπινθήρα ("ratio of sparks to pulses supplied").



Σχήμα 4-1: Εργαλειομηχανή AGIETRON EMT 1.10.

Ανά τακτά χρονικά διαστήματα, η εργαλειομηχανή κατά τη διάρκεια της κατεργασίας προκειμένου να διατηρήσει τη σταθερότητα και αποδοτικότητα λειτουργίας, διακόπτει την παροχή παλμών, αποσύρει ελαφρά το ηλεκτρόδιο, ώστε να γίνει αποτελεσματική απόπλυση, και αφού επανέλθει η κεφαλή στην αρχική της θέση συνεχίζεται η κατεργασία. Το διάστημα αυτό δεν είναι «ενεργός χρόνος κατεργασίας», καθώς δεν υπάρχει παροχή ισχύος προς το τεμάχιο και πρέπει να διαχωρίζεται από το συνολικό χρόνο κατεργασίας.

Τέλος, ως μέθοδο απόπλυσης χρησιμοποιείται δέσμη jet διηλεκτρικού μέσου χαμηλής πίεσης πλευρικά του τεμαχίου [29].

ΤΕΜΑΧΙΟ-ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ

Για κάθε τύπο αλουμινίου (Al5052, Al6063) πραγματοποιούνται 16 πειράματα με διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας. Το ηλεκτρόδιο είναι χαλκός, ορθογώνιας γεωμετρίας, διαστάσεων 38X23mm (Σχήμα 4-2). Σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιούνται τέσσερα πειράματα σε διαδοχικές θέσεις, με διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας και ονομαστικό βάθος κοπής κατεργασίας 1mm (Σχήμα 4-2).



Σχήμα 4-2: 1) Ηλεκτρόδιο εργασίας 2) Κατεργασμένο δοκίμιο ΑΙ5052 3) Κατεργασμένο δοκίμιο ΑΙ6063 4) Εγκυβωτισμένο δοκίμιο.



Σχήμα 4-3: Τυπική διάταξη ηλεκτροδίου-τεμαχίου κατεργασίας.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Κύριος στόχος είναι να υπολογιστεί ο ρυθμός αποβολής υλικού $MRR\left[\frac{mm^3}{min}\right]$, ο λόγος φθοράς εργαλείου (TWR), και η τραχύτητα επιφανείας. Τα μεγέθη που καταγράφονται και θα χρησιμοποιηθούν είναι:

- Διαφορά δυναμικού $V_P[V]$
- Μονάδες ρεύματος
- Ένδειξη αμπερομέτρου $\overline{I_P}[A]$
- Χρόνος Παλμού [μsec]
- Αρχικό βάρος τεμαχίου $W_{st.}[gr]$
- · Βάρος τεμαχίου μετά τη κατεργασίας $W_{fin}[gr]$
- · Χρόνος κατεργασίας [min]
- Ενεργός χρόνος κατεργασίας tm[min] (κατά τη διάρκεια της απόσυρσης της κεφαλής, προκειμένου να γίνει απόπλυση των αποβλήτων κατεργασίας, η ένδειξη στο αμπερόμετρο μηδενίζεται και, έτσι, μπορεί να μετρηθεί ο «ενεργός χρόνος κατεργασίας», ο οποίος διαφοροποιείται από το συνολικό χρόνο κατεργασίας).
- Ονομαστικό βάθος κοπής [mm] Αποδοτικότητα κατεργασίας $f_{eff.}$ [%]
- Αρχικό βάρος ηλεκτροδίου $W^{electr.}_{st.}[gr]$
- · Βάρος ηλεκτροδίου μετά τη κατεργασία $W^{electr.}_{fin.}[gr]$
- Τραχύτητα κατεργασμένης επιφάνειας $R_a[\mu m]$ και $R_t[\mu m]$. Γίνονται μετρήσεις σε πέντε σημεία (για κάθε πείραμα) και υπολογίζεται ο μέσος όρος ως πιο αντιπροσωπευτικός.
- Κοπή σε κατάλληλο μέγεθος και εγκιβωτισμός δοκιμίων σε εποξειδική ρητίνη
- Λείανση και στη συνέχεια στίλβωση με αλουμινόπαστα

Χημική προσβολή για 20s με διάλυμα:

92ml Απιονισμένου νερού 6ml Νιτρικού οξέος 2ml Υδροφλωρικού οξέος

 Μελέτη σε οπτικό μικροσκόπιο. Ελήφθησαν εικόνες σε μεγέθυνση x100, x500 για κάθε δοκίμιο.

Ενδιάμεσα των πειραμάτων το ηλεκτρόδιο «καθαρίζεται» και απομακρύνονται οι επικαθήσεις.

Επιλέχθηκαν συνθήκες κατεργασίας: ένταση ρεύματος κατεργασίας I_P =15÷24 [A] και χρόνος παλμού T_{on} =100÷500 [μsec]. Στον Πίνακα 4-1, 4-2 παρουσιάζονται αναλυτικά οι πειραματικές συνθήκες και οι αντίστοιχές μετρήσεις.

Ο υπολογισμός του ρυθμού αποβολής υλικού MRR $\left[\frac{mm^3}{min}\right]$ γίνεται βάσει του τύπου:

$$MRR_{exp.}\left[\frac{mm^{3}}{min}\right] = \frac{W_{st.}[gr] - W_{fin.}[gr]}{\rho[\frac{gr}{mm^{3}}] \cdot t_{m}[min]}.$$

Ο προμηθευτής των δοκιμίων ορίζει πυκνότητα του Αλουμινίου ΑΙ5052:

$$\rho = 0.0026 \ \frac{gr}{mm^3}.$$

Προκειμένου να υπολογιστεί ο "duty factor" χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\overline{I_p} = \frac{1}{T_{on} + T_{off}} \cdot \int_0^{T_{on} + T_{off}} I(t) dt.$$

Σε μελέτες που έχουν διεξαχθεί, και όπως φαίνεται στα αντίστοιχα διαγράμματα, η κυματομορφή της έντασης ρεύματος για εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούν τρανζίστορ, έχει τραπεζοειδές σχήμα (Σχήμα 4-4).



Σχήμα 4-4: Μορφή κυματομορφής της έντασης ρεύματος για εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούν τρανζίστορ. Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε μια ασυμμετρία ανάμεσα στην «αρχή» και το «τέλος» του παλμού, ο οποίος όμως μπορεί να μοντελοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια ως τραπέζιο. Με βάση τα προαναφερθέντα, υποθέτουμε ότι η κυματομορφή της έντασης ρεύματος είναι τραπέζιο, με την αύξουσα περιοχή να ολοκληρώνεται στο 10% του χρόνου του παλμού Τ_{on}, ενώ η φθίνουσα να είναι το τελευταίο 5% του χρονικού διαστήματος (Σχήμα 4-5).



Σχήμα 4-5: Θεωρητική κυματομορφή έντασης ρεύματος.

Η σχέση υπολογισμού της μέσης έντασης ρεύματος μπορεί να γραφεί πλέον ως:

$$\overline{I_p} = \frac{I_p \cdot \frac{T_{on} + 0.85 \cdot T_{on}}{2}}{T_{on} + T_{off}} = I_p \cdot \frac{1.85 \cdot T_{on}}{2 \cdot (T_{on} + T_{off})} = I_p \cdot \eta \cdot \frac{1.85}{2}$$

Επιλύοντας την παραπάνω σχέση ως προς τον συντελεστή " η " προκύπτει:

$$\eta = \frac{2 \cdot \overline{I_p}}{1.85 \cdot I_p}.$$

Η ονομαστική ισχύς της κατεργασίας ορίζεται ως εξής:

$$P_{nom}[W] = V_P[V] \cdot I_P[A].$$

Ως μέση ισχύς ορίζεται:

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

Τέλος, η ενέργεια ανά παλμό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_P[mJ] = V_P[V] \cdot I_P[A] \cdot T_{on}[\mu sec] \cdot 10^3.$$

Πίνακας 4-1. Π	Τειραματικά δεδομ	ένα για ΑΙ5052.
----------------	-------------------	-----------------

AI5052	ΔΙΑΦΟΡΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ [V]	ΟΝΟΜ. ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ J _T	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ Ι _Ρ [Α]	ΜΕΣΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ $\overline{I_P}$ [A]	ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΛΜΟΥ Τ₀ҧ[μsec]	ΟΝΟΜΑΣΤ. ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ [mm]	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ [min]	ΩΦΕΛΙΜΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ t _m [min]	APXIKO BAPOΣ TEMAXIOY Wst.[gr]	BAPOΣ TEMAXIOY META THN KATEPΓΑΣΙΑ Wfin.[gr]	APXIKO BAPOZ HAEKTPOΔIOY $W^{electr.}_{st.}$ [gr]	ΒΑΡΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ W ^{electr.} [gr]	f _{eff.}
1	100	5	15	9.0	100	1	5.4	5.4	335.0	332.5	302.2	302.2	1.0
2	100	6	18	10.9	100	1	4.5	4.5	332.5	330.0	302.2	302.2	1.0
3	100	7	21	11.0	100	1	5.6	4.5	329.6	327.1	302.2	302.2	0.9
4	100	8	24	13.0	100	1	3.6	2.9	325.5	323.5	302.2	302.2	1.0
5	100	5	15	10.0	200	1	5.4	5.4	323.5	320.9	302.2	302.2	1.0
6	100	6	18	11.9	200	1	4.2	4.2	320.9	318.5	302.2	302.2	1.0
7	100	7	21	12.1	200	1	3.7	3.7	318.5	316.0	302.2	302.2	1.0
8	100	8	24	13.0	200	1	4.3	3.4	316.0	313.5	302.2	302.2	0.9
9	100	5	15	9.8	300	1	4.8	4.8	340.2	338.2	302.2	302.2	1.0
10	100	6	18	11.5	300	1	4.3	4.3	338.2	335.7	302.2	302.2	1.0
11	100	7	21	12.0	300	1	4.0	4.0	335.7	333.3	302.2	302.2	1.0
12	100	8	24	14.0	300	1	3.6	3.6	333.3	330.8	302.2	302.2	1.0
13	100	5	15	11.0	500	1	5.7	5.7	330.8	328.1	302.2	302.2	1.0
14	100	6	18	13.0	500	1	4.5	4.5	328.1	325.4	302.2	302.2	1.0
15	100	7	21	13.0	500	1	4.3	4.3	325.4	322.7	302.2	302.2	1.0
16	100	8	24	15.2	500	1	3.6	3.6	322.7	320.0	302.2	302.2	1.0

Πίνακας 4-2. Συμβολισμοί χυτών κραμάτων μηχανικής πλαστικής παραμόρφωσης ΑΙ5052.

Al5052			ΜΕΣΗ	I TPAXYTHTA Ra	[µm]			MEΓΙΣΤΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rt [μm]						
Lc=0.8mm	ΣΗΜΕΙΟ 1	ΣΗΜΕΙΟ 2	ΣΗΜΕΙΟ 3	ΣΗΜΕΙΟ 4	ΣΗΜΕΙΟ 5	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΟ	ΣHMEIO 1	ΣΗΜΕΙΟ 2	ΣHMEIO 3	ΣΗΜΕΙΟ 4	ΣΗΜΕΙΟ 5	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΟ
1	13.4	9.6	10.8	9.4	10.6	10.8	13.4	90	71	87	57	81	77.2	90
2	10.2	9.0	11.6	11.8	10.8	10.7	11.8	83	58	85	80	77	76.6	85
3	8.4	12.6	11.2	11.6	12.0	11.2	12.6	68	78	71	82	82	76.2	82
4	12.0	12.0	11.6	9.0	14.6	11.8	14.6	97	76	72	76	111	86.4	111
5	15.4	15.8	12.0	15.6	16.6	15.1	16.6	109	107	81	90	91	95.6	109
6	12.0	17.4	13.8	15.2	14.2	14.5	17.4	90	113	98	99	90	98.0	113
7	10.4	15.4	17.8	12.2	16.0	14.4	17.8	71	106	100	102	105	96.8	106
8	13.4	12.8	15.2	16.2	14.8	14.5	16.2	105	109	89	106	99	101.6	109
9	16.8	14.0	14.4	14.4	11.0	14.1	16.8	105	97	95	103	69	93.8	105
10	15.4	16.6	14.4	16.4	17.0	16.0	17.0	102	111	92	138	123	113.2	138
11	14.4	13.4	16.0	17.2	15.0	15.2	17.2	107	77	119	123	95	104.2	123
12	14.0	13.2	13.4	15.6	15.8	14.4	15.8	92	101	122	116	91	104.4	122
13	16.2	12.8	13.6	14.2	14.4	14.2	16.2	85	103	101	89	94	94.4	103
14	18.4	19.6	12.2	18.2	17.0	17.1	19.6	118	138	99	108	111	114.8	138
15	17.0	13.2	17.2	15.8	20.4	16.7	20.4	98	111	97	106	113	105.0	113
16	21.2	17.6	16.8	21.0	20.6	19.4	21.2	141	153	134	142	133	140.6	153

AI6063	ΔΙΑΦΟΡΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ [V]	ΟΝΟΜ. ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ J _T	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ Ι _Ρ [Α]	ΜΕΣΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ $\overline{I_P}$ [A]	ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΛΜΟΥ Τ₀n[μsec]	ONOMAΣT. BAΘOΣ KOΠHΣ [mm]	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ [min]	ΩΦΕΛΙΜΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ t _m [min]	APXIKO BAPOΣ TEMAXIOY Wst.[gr]	BAΡΟΣ TEMAXIOY META THN KATEPΓΑΣΙΑ Wfin.[gr]	APXIKO BAPOΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ $W^{electr.}_{st.}[gr]$	ΒΑΡΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ W ^{electr.} [gr]	f _{eff.}
1	100	5	15	8.0	100	1	7.0	5.6	111.4	109.5	302.2	302.2	0.9
2	100	6	18	10.5	100	1	4.3	4.3	109.5	107.3	302.2	302.2	1.0
3	100	7	21	11.0	100	1	6.3	5.0	105.9	103.9	302.2	302.2	1.0
4	100	8	24	13.0	100	1	5.2	4.2	103.1	100.7	302.2	302.2	1.0
5	100	5	15	9.9	200	1	6.1	6.1	100.7	98.4	302.2	302.2	1.0
6	100	6	18	11.0	200	1	4.5	4.5	98.4	96.1	302.2	302.2	1.0
7	100	7	21	12.0	200	1	4.2	4.2	96.1	93.9	302.2	302.2	1.0
8	100	8	24	13.0	200	1	4.7	3.8	93.9	91.5	302.2	302.2	1.0
9	100	5	15	10.0	300	1	6.0	6.0	126.8	124.7	302.2	302.2	1.0
10	100	6	18	11.0	300	1	6.9	5.5	124.7	122.3	302.2	302.2	1.0
11	100	7	21	12.0	300	1	4.5	4.5	122.3	120.0	302.2	302.2	1.0
12	100	8	24	13.0	300	1	3.2	3.2	120.0	118.1	302.2	302.2	1.0
13	100	5	15	11.0	500	1	6.4	6.4	188.1	115.8	302.2	302.2	1.0
14	100	6	18	13.0	500	1	4.6	4.6	115.8	113.6	302.2	302.2	1.0
15	100	7	21	13.0	500	1	6.2	5.0	113.6	111.3	302.2	302.2	1.0
16	100	8	24	15.0	500	1	4.2	4.2	111.3	109.0	302.2	302.2	1.0

Πίνακας 4-4. Πειραματικά δεδομένα για Αl6063.

Πίνακας 4-5. Συμβολισμοί χυτών κραμάτων μηχανικής πλαστικής παραμόρφωσης Al6063.

Al6063			ΜΕΣΙ	H TPAXYTHTA Ra	[µm]			MEΓIΣΤΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rt [μm]						
Lc=0.8mm	ΣHMEIO 1	ΣΗΜΕΙΟ 2	ΣΗΜΕΙΟ 3	ΣΗΜΕΙΟ 4	ΣΗΜΕΙΟ 5	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΟ	ΣHMEIO 1	ΣHMEIO 2	ΣHMEIO 3	ΣΗΜΕΙΟ 4	ΣΗΜΕΙΟ 5	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΟ
1	9.2	7.8	6.8	9.0	7.8	8.1	9.2	58	48	43	62	56	53.4	62
2	8.0	9.6	10.2	9.2	9.4	9.3	10.2	53	70	75	52	62	62.4	75
3	9.6	9.0	8.2	9.8	9.0	9.1	9.8	71	54	67	73	59	64.8	73
4	9.4	11.2	9.2	12.2	9.6	10.3	12.2	66	70	62	104	86	77.6	104
5	13.0	11.0	10.4	10.8	10.8	11.2	13.0	71	67	70	57	74	67.8	74
6	11.8	14.0	11.6	12.4	12.2	12.4	14.0	78	89	77	93	106	88.6	106
7	12.2	12.2	11.2	12.2	11.2	11.8	12.2	76	88	81	92	80	83.4	92
8	13.4	13.6	15.4	11.4	13.0	13.4	15.4	92	80	105	72	80	85.8	105
9	16.2	12.4	12.8	13.2	16.4	14.2	16.4	85	90	84	87	100	89.2	100
10	13.0	14.0	15.6	14.0	14.6	14.2	15.6	102	101	89	84	106	96.4	106
11	15.2	13.2	17.8	11.2	11.8	13.8	17.8	106	91	123	107	78	101.0	123
12	14.4	14.6	14.4	16.4	15.0	15.0	16.4	98	97	90	100	85	94.0	100
13	10.4	15.6	12.6	14.6	15.2	13.7	15.6	76	97	85	115	101	94.8	115
14	17.4	15.6	17.6	14.6	14.6	16.0	17.6	118	98	92	101	98	101.4	118
15	11.4	16.6	13.0	14.0	13.0	13.6	16.6	80	97	91	92	69	85.8	97
16	16.6	19.6	16.2	13.2	17.8	16.7	19.6	99	119	114	98	121	110.2	121

5

Στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης λαμβάνουν χώρα εξαιρετικά πολύπλοκοι μηχανισμοί και στην προσπάθεια μοντελοποίησης της προκύπτει η ανάγκη για ορισμένες απλοποιήσεις—υποθέσεις προκειμένου να είναι εφικτή η συνέχεια της ανάλυσης. Καθώς η κατεργασία είναι σε μεγάλο βαθμό άγνωστη για κάποιον εξωτερικό παρατηρητή, τα δεδομένα που χρειάζονται για ένα ρεαλιστικό, και κατά το δυνατόν ακριβές μοντέλο, υπολογίζονται έμμεσα και βάσει της βιβλιογραφίας. Καταληκτικά, σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει και ο χαρακτηρισμός των μικροδομών και των επιφανειών με τη χρήση οπτικής μικροσκοπίας.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΑΙ5052

Με βάση τις προαναφερθείσες σχέσεις και τα πειραματικά δεδομένα, προκύπτει ο Πίνακας 5-1.

Al5052	DUTY FACTOR "໗"	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ Β [14/]	ΜΕΣΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΠΑΛΜΟ Ε. [ml]	$MRR_{exp.}\left[\frac{mm^3}{min}\right]$
			\mathbf{r}_{av}	եթլույ	
1	0.65	450	291.89	45	178.06
2	0.65	540	353.51	54	213.68
3	0.57	630	321.08	63	213.68
4	0.59	720	421.62	72	265.25
5	0.72	450	324.32	90	185.19
6	0.71	540	385.95	108	219.78
7	0.62	630	392.43	126	259.88
8	0.59	720	379.46	144	282.81
9	0.71	450	317.84	135	160.26
10	0.69	540	372.97	162	223.61
11	0.62	630	389.19	189	230.77
12	0.63	720	454.05	216	267.09
13	0.79	450	356.76	225	182.19
14	0.78	540	421.62	270	230.77
15	0.67	630	421.62	315	241.50
16	0.68	720	492.97	360	288.46

Πίνακας	5-1.	Αποτελέσ	ματα επεξ	٤0)	νασίας	πειρα	ματικών	δεδο	μένων γ	νια Al5052)
Thrundy	, J I.	ANOLENCO	ματα επος	cpi	γάσιας	ncipu	ματικών	0200	μενων	riu AIJOJ2	- 1



Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 5-1 προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:

Σχήμα 5-1: MRR συναρτήσει της ενέργειας ανά παλμό.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 5-1, μπορούμε να σχεδιάσουμε και να αξιολογήσουμε διαγράμματα για το MRR συναρτήσει ορισμένων παραμέτρων της κατεργασίας. Η βιβλιογραφία και τα εγχειρίδια χρήσης της εργαλειομηχανής παρέχουν αντίστοιχα διαγράμματα προκειμένου να είναι εφικτός ο προγραμματισμός και σχεδιασμός της κατεργασίας. Σε εργασία του, ο Marin Gostimirovic, καταλήγει ότι αυξανόμενης της ενέργειας ανά παλμό, με αύξηση της έντασης ρεύματος για σταθερό χρόνο παλμού, υπάρχει και αύξηση του MRR. Η αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού περιορίζεται όμως από την πυκνότητα ρεύματος $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$ φτάνοντας σε μια μέγιστη οριακή τιμή. Περαιτέρω αύξηση της έντασης ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα μείωση του MRR. Επίσης, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι για συγκεκριμένη ενέργεια ανά παλμό υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του χρόνου παλμού για την οποία μεγιστοποιείται το MRR. Άρα, μπορούμε συμπερασματικά να πούμε ότι γενικά υψηλότερη ενέργεια οδηγεί σε αυξημένο MRR. Υπάρχουν όμως περιορισμοί και βέλτιστοι συνδυασμοί ένταση ρεύματος και χρόνου παλμού προκειμένου η κατεργασία να έχει τη μέγιστη αποδοτικότητα και, άρα, το μέγιστο MRR. Οι περιορισμοί αυτοί προκύπτουν από τους φυσικούς μηχανισμούς της κατεργασίας. Υψηλή ένταση ρεύματος ή μεγάλος χρόνος παλμού προκαλούν υπερβολική συγκέντρωση αποβλήτων στο διάκενο τεμαχίου-ηλεκτροδίου, ενώ ταυτόχρονα η σχηματιζόμενη φυσαλίδα αποκτά «δυσανάλογα μεγάλο μέγεθος». Μέρος της ενέργειας πλέον καταναλώνεται στη «επανατήξη» υλικού που είχε απομακρυνθεί, ενώ μεγάλο ποσοστό ενέργειας διοχετεύεται σε «αέριο περιβάλλον» (larger portion of energy takes place in a gaseous environment). Οι παραπάνω μηχανισμοί επιδρούν στην αποδοτικότητα της κατεργασίας.



Σχήμα 5-2: α) Επίδραση των παραμέτρων της πηγής θερμότητας στον ρυθμό αποβολής υλικού, β) εξάρτηση του ρυθμού αποβολής υλικού από την ενέργεια εκκένωσης.

Σε ανάλογα συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε ανατρέχοντας και στο εγχειρίδιο χρήσης της μηχανής, όπου παρουσιάζονται διαγραμματικά οι αναμενόμενες τιμές MRR για διάφορες συνθήκες κατεργασίας (Σχήμα 5-3). Οι καμπύλες έχουν τυπική μορφή, που συναντάται στα περισσότερα εγχειρίδια σχετικά με την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης. Παρατηρείται μια μέγιστη τιμή MRR για συγκεκριμένο χρόνο παλμού με σταθερό ρεύμα κατεργασίας και στη συνέχεια υπάρχει μείωση του MRR, καθώς αυξάνεται ο χρόνος t_p. Φυσικά τα πειραματικά δεδομένα, που έχουμε αναμένουμε να διαφέρουν από τα θεωρητικά, καθώς αυτά έχουν προκύψει σε πρότυπες–ιδανικές συνθήκες κατεργασίας. Ποιοτικά όμως πρέπει να συμφωνούν.



Σχήμα 5-3: Διάγραμμα του MRR συναρτήσει της έντασης ρεύματος και του χρόνου παλμού από το εγχειρίδιο χρήσης της εργαλειομηχανής AGIE για τεμάχιο χάλυβα και ηλεκτρόδιο χαλκού.

Στο Σχήμα 5-1 παρατηρούμε ότι με αύξηση της ενέργειας ανά παλμό, και αυξάνοντας το χρόνο παλμού T_{on} με παράλληλα αύξηση της ένταση του ρεύματος κατεργασίας, ο ρυθμός αποβολής υλικού αυξάνεται έως μια τιμή, ενώ στη συνέχεια εμφανίζεται η τάση προς μείωση (χαρακτηριστικά για T_{on}=300 μsec). Επίσης, παρατηρείται το προαναφερθέν φαινόμενο, δηλαδή για ίδια ενέργεια ανά παλμό διαφοροποιείται το MRR λόγω του διαφορετικού χρόνου παλμού T_{on}. Η μορφή των καμπυλών είναι η αναμενόμενη με τις τιμές του MRR να είναι χαμηλότερες από τις «ιδανικές» που αναγράφονται στο εγχειρίδιο χρήσης και που πιθανόν οφείλονται σε μη ιδανικές συνθήκες απόπλυσης, φυσικής φθοράς της εργαλειομηχανής λόγω χρήσης, και σε λοιπούς αστάθμητους παράγοντες.

Ενδιαφέρον, επίσης, παρουσιάζουν τα διαγράμματα στα Σχήμα 5-4 και Σχήμα 5-5, στα οποία φαίνεται ο ρυθμός αποβολής υλικού συναρτήσει της ισχύος της κατεργασίας. Στο Σχήμα 5-4 βλέπουμε διαφορετικές τιμές MRR για την ίδια ονομαστική ισχύ κατεργασίας. Θεωρητικά μοιάζει ότι σε ίδιο χρόνο κατεργασίας και με ίδια κατανάλωση ενέργειας έχουμε χαμηλότερο ρυθμό αποβολής υλικού. Στην πραγματικότητα υπεισέρχονται παράγοντες σταθερότητας και αποδοτικότητας κατεργασίας, που είναι ουσιαστικά η ονομαστική ισχύς πολλαπλασιασμένη με τον duty factor "η" και το συντελεστή αποδοτικότητας f_{eff}., ενώ η συσχέτιση του MRR με τη μέση ισχύ τείνει σε γραμμική, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-5.

Θα μπορούσαμε λοιπόν συμπερασματικά να πούμε ότι στον υπολογισμό του MRR σημασία δεν έχει απλά η πρόσδοση ενέργειας στο τεμάχιο αλλά και η ικανότητα να διατηρείται ένας σταθερός μηχανισμός κατεργασίας, ο οποίος όπως άλλωστε έχει προαναφερθεί, θέτει ανώτατα όρια στο MRR που μπορεί να επιτευχθεί [30].



Σχήμα 5-4: MRR συναρτήσει τηςονομαστικής ισχύος κατεργασίας.



Σχήμα 5-5: MRR συναρτήσει της μέσης ισχύος κατεργασίας.

Πριν υπολογιστούν οι ημιεμπειρικές σχέσεις συσχετισμού του MRR με το I_P και το T_{on} , γίνεται εκτίμηση για τους σημαντικούς παράγοντες κατεργασίας.

Analysis	of Var	iance				
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regressio	n 2	19915,7	9957,9	54 ,33	0,000	
lp	1	19585,0	19585,0	106,86	0,000	
Ton	1	330,7	330,7	1,80	0,202	
Error	13	2382,7	183,3			
Total	15	22298,4				
Model Si	umma _{R-sq}	ry R-sq(adj) R-sq(p	red)		
13,5382	89,31%	87,67%	6 84,	84%		
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	15,8	20,9	0,76	0,463		
lp	10,43	1,01	10,34	0,000	1,00	
Ton	0,0307	0,0229	1,34	0,202	1,00	

Regression Analysis: MRR versus Ip;	Ton
-------------------------------------	-----

Σχήμα 5-6: Regression Analysis: MRR versus I_ρ; Ton.

Παρατηρήσεις: Για τον ρυθμό αποβολής υλικού MRR, σημαντικό ρόλο έχει η ένταση ρεύματος κατεργασίας I_p , γεγονός που αποτυπώνεται τόσο στα αποτελέσματα του Σχήματος 5-6 (κόκκινο πλαίσιο), όσο και από την παραπάνω σχέση του MRR όπου η τιμή του εκθέτη του I_p είναι 22 φορές μεγαλύτερη από τον αντίστοιχο του T_{on} . Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, οι περισσότεροι ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το ο συντελεστής MRR, υπολογίζεται από εξίσωση της μορφής: MRR = $A \cdot I_p^{\ b} \cdot T_{on}^{\ c}$, με A, b, c συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται από τις ιδιαιτερότητες της κατεργασίας.

Η σχέση για τον ρυθμό αποβολής υλικού είναι:



Σχήμα 5-7: MRR συναρτήσει της έντασης ρεύματος (I_P) και του χρόνου παλμού(Ton).

Με ανάλογο τρόπογίνεται η εκτίμηση για το συσχετισμό του R_{α} και R_t με το I_P και το T_{on} . **Regression Analysis:** R_a versus I_p ; T_{on}

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Va	lue P	-Value
Regressio	n 2	60,978	30,489	16	,46	0,000
lp	1	3,570	3,570) 1	,93	0,188
Ton	1	57,408	57,408	30	,98	0,000
Error	13	24,086	1,853			
Total	15	85,064				
S R-sq (adj) R-sq(pred) 1,36117 71,68% 67,33% 52,28%						
Coefficients Term Coef SE Coef T-Value P-Value VIF						
C o nstant	8,1	1 2	,10	3,85	0,002	2
lp	0,14	1 O, 1	101	1,39	0,188	1,00
Ton	0,0128	1 0,002	230	5,57	0,000) 1,00

Σχήμα 5-8: Regression Analysis: R_α versus I_p; Ton.

Παρατηρήσεις: Για την μέση τραχύτητα R_{a} , σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο χρόνος παλμού T_{on} , γεγονός που φανερώνεται τόσο από τα αποτελέσματα του Σχήματος 5-5 (κόκκινο πλαίσιο) όπου η τιμή P-value είναι για $T_{on} < 0.05$ ενώ για $I_{P}>0.05$.

 $R_a[\mu m] = 2.0771 \cdot I_p[A]^{0.21} \cdot T_{on}[\mu sec]^{0.24}$



Σχήμα 5-9: Ra συναρτήσει της έντασης ρεύματος (Ip) και του χρόνου παλμού (Ton).

Regression Analysis: Rt versus Ip; Ton

Analysis	of Var	iance				
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regressio	n 2	2710,2	1355,12	13,66	0,001	
lp	1	478,2	478,24	4,82	0,047	
Ton	1	2232,0	2232,01	22,49	0,000	
Error	13	1290,1	99,24			
Total	15	4000,3				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(ad	dj) R-sq	(pred)		
9,96170	67,75%	62,79	% 4	4,93%		
Coefficients						
Term	Coef	SE Coe	f T-Valu	ie P-Valu	ie VIF	
Constant	44,9	15,4	4 2,9	92 0,01	12	

0,743

0,0168

lp

Ton

1,630

0,0799

2,20

4,74

0,047

0,000

1,00

1,00

Σχήμα 5-10: Regression Analysis: R_t versus I_p; T_{on}.

Παρατηρήσεις: Για την μέγιστη τραχύτητα R_t, παρόμοιας σημαντικότητας είναι η ένταση του ρεύματος κατεργασίας I_P και ο χρόνος παλμού Τ_{on}, γεγονός που φανερώνεται τόσο από τα αποτελέσματα του Σχήματος 5-6 καθώς η τιμή και των δύο μεταβλητών είναι πολύ κοντά (κόκκινα πλαίσια), όσο και από την παρακάτω σχέση της R_t, όπου οι τιμές των εκθετών των I_P και T_{on} είναι πολύ κοντά.

 $\overline{R_t[\mu m]} = 10.8514 \cdot I_p[A]^{0.34} \cdot T_{on}[\mu sec]^{0.22}$



Σχήμα 5-11: Rt συναρτήσει της έντασης ρεύματος (Ip) και του χρόνου παλμού (Ton).
<u>Al5052</u>

Πίνακας 5-2. Αποτελέσματα 2 – samples – t-test.

R_{α} R_{t}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	-	0.930	0.706	0.375	0.005	0.013	0.056	0.006	0.024	0.001	0.003	0.005	0.006	0.005	0.005	0.000
2	0.940	-	0.605	0.300	0.003	0.009	0.050	0.002	0.017	0.000	0.001	0.002	0.002	0.006	0.005	0.000
3	0.886	0.946	-	0.572	0.008	0.022	0.081	0.010	0.040	0.001	0.004	0.009	0.012	0.007	0.007	0.000
4	0.372	0.317	0.263	-	0.030	0.070	0.168	0.045	0.119	0.006	0.019	0.050	0.063	0.012	0.013	0.001
5	0.056	0.034	0.019	0.354	-	0.653	0.661	0.570	0.457	0.378	0.911	0.504	0.418	0.235	0.238	0.009
6	0.025	0.012	0.004	0.228	0.735	-	0.924	0.971	0.764	0.201	0.557	0.912	0.799	0.146	0.176	0.006
7	0.063	0.042	0.034	0.332	0.891	0.882	-	0.938	0.887	0.323	0.598	0.979	0.937	0.187	0.225	0.017
8	0.013	0.004	0.001	0.128	0.387	0.534	0.543	-	0.757	0.098	0.449	0.925	0.782	0.128	0.140	0.004
9	0.102	0.071	0.055	0.481	0.836	0.606	0.754	0.331	-	0.136	0.372	0.803	0.915	0.104	0.124	0.005
10	0.009	0.008	0.007	0.045	0.118	0.145	0.157	0.244	0.102	-	0.377	0.068	0.052	0.451	0.571	0.020
11	0.034	0.029	0.034	0.159	0.421	0.538	0.509	0.787	0.359	0.464	-	0.380	0.303	0.250	0.298	0.007
12	0.017	0.010	0.010	0.110	0.322	0.430	0.430	0.711	0.278	0.417	0.985	-	0.844	0.114	0.131	0.003
13	0.047	0.020	0.005	0.379	0.857	0.528	0.756	0.188	0.937	0.084	0.329	0.212	-	0.099	0.113	0.003
14	0.004	0.002	0.003	0.025	0.058	0.074	0.093	0.127	0.057	0.882	0.352	0.290	0.033	-	0.842	0.181
15	0.007	0.002	0.000	0.073	0.185	0.230	0.313	0.504	0.183	0.388	0.933	0.935	0.060	0.238	-	0.110
16	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.026	0.010	0.002	0.000	0.014	0.000	-

Η τιμή *p*-value είναι η πιθανότητα, η στατιστική συνάρτηση να λάβει μια ακραία τιμή, ή και μεγαλύτερη από αυτήν, όταν η αρχική υπόθεση είναι αληθινή. Η τιμή *p*-value είναι το μικρότερο επίπεδο σημαντικότητας, α, στο οποίο η αρχική υπόθεση μπορεί να απορριφθεί. Ώς αρχική υπόθεση θεωρώ ότι:

- Έτσι, εάν η τιμή του δείγματος δεν είναι στο 5% (α=0.05) των πιο ακραίων τιμών, τότε το εύρημα θεωρείται «στατιστικά μη σημαντικό» και δεν απορρίπτουμε την Η₀.
- Εάν είναι στο 5%, τότε απορρίπτουμε την Η₀.
- P-value<0.05: απορρίπτουμε την H₀.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-2 παρατηρείται ότι στατιστικά σημαντική διαφορά της τραχύτητας επιφανείας εμφανίζεται ανάμεσα σε ακραίες συνθήκες κατεργασίας, ανάμεσα δηλαδή στις πλέον ήπιες και στις πιο έντονες. Για τις ενδιάμεσες συνθήκες η στατιστικά σημαντική μεταβολή της τραχύτητας είναι αμφίβολη.

Παρατηρήθηκαν σε μικροσκόπιο η κάθετη τομή στην κατεργασμένη επιφάνεια προκειμένου να υπολογιστεί το πάχος του επαναστερεοποιημένου υλικου (White Layer). Ελήφθη ικανός αριθμός φωτογραφιών ώστε έπειτα από την ανάλυσή τους με λογισμικό επεξεργασίας εικόνων να υπολογιστεί ένα αντιπροσωπευτικό μέσο πάχος του WL.































Σχήμα 5-12: Εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο, τομής κατεργασμένης σε EDM επιφάνειας αλουμινίου Al5052 με όλες τους συνδυασμούς των συνθηκών κατεργασίας σε μεγένθυσνη x100 & x500.



Σχήμα 5-13: Κλίμακα με βάση την οποία έγιναν οι μετρήσεις του εμβαδού και του μήκους επαναστερεομένου υλικού στο μικροσκοπίο, όπως για παράδειγμα στο παρακάτω Σχήμα 5-14.



Σχήμα 5-14: Τυπική απεικόνιση τρόπου εύρεσης του μέσου πάχους επαναστερεομένου υλικού WL [μm].

Παρατηρήσεις: Η σχέση υπολογισμού του μέσου πάχους δίνεται ως εξής:

 $WL_{ΠΑΧΟΣ} = \frac{E [Εμβαδόν WL]}{L [Μήκος WL]}$

Υπογραμμίζεται, ότι η παραπάνω διαδικασία λαμβάνει χώρα σε όλη την επιφάνεια των κατεργασμένων δοκιμίων με επίκεντρο φυσικά τις περιοχές επαναστερεωμένου υλικού, συνθέτοντας έτσι τον Πίνακα 5-3.

Al 5052	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ WL [μm]	ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ WL [μm]	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΛΥΨΗΣ
1	28.28	37.65	61%
2	29.08	38.14	75%
3	35.27	44.94	77%
4	25.86	39.71	53%
5	31.25	33.07	66%
6	35.92	51.59	70%
7	36.09	51.90	78%
8	44.14	51.44	68%
9	45.57	55.59	67%
10	45.94	62.99	75%
11	53.04	57.84	79%
12	62.96	76.06	76%
13	58.12	72.96	92%
14	71.00	87.68	85%
15	66.04	95.59	89%
16	73.98	88.54	94%

Πίνακας 5-3. Χαρακτηριστικά WL με βάση τα στοιχεία από το οπτικό μικροσκόπιο.

Regression Analysis: WL versus Ip; Ton

Analysis of	Analysis of Variance												
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value								
Regression	2	3537,6	1768,82	77,86	0,000								
lp	1	243,8	243,81	10,73	0,006								
Ton	1	3293,8	3293,83	144,99	0,000								
Error	13	2 95 ,3	22,72										
Total	15	3833,0											

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4,76629	92,30%	91,11%	87,40%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-2,96	7,37	-0,40	0,694	
lp	1,164	0,355	3,28	0,006	1,00
Ton	0,09701	0,00806	12,04	0,000	1,00

Σχήμα 5-15: Regression Analysis: WL versus Ip; Ton.

Παρατηρήσεις: Για το μέσο πάχος WL, εξίσου σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν η ένταση του ρεύματος κατεργασίας Ι_P και ο χρόνος παλμού Τοπ, γεγονός που φανερώνεται τόσο από τα αποτελέσματα του Σχήματος 5-15 καθώς η τιμή και των δύο μεταβλητών είναι πολύ κοντά (κόκκινα πλαίσια), όσο και από την παρακάτω σχέση του WL, όπου η βαρύτητα του Ι_P και Τοπ στην παρακάτω εξίσωση του WL είναι παρόμοια λόγω των εκθετών των παραμέτρων Ι_P και Τοπ.



Σχήμα 5-16: WL συναρτήσει της έντασης ρεύματος (Ip) και του χρόνου παλμού (Ton).

ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΑΙ6063

Έτσι, με βάση τις προαναφερόμενες σχέσεις και τα πειραματικά δεδομένα, προκύπτει ο Πίνακας 5-4, για $\rho = 0.00271 \ \frac{gr}{mm^3}$.

Al6063	DUTY FACTOR "η"	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ <i>P_{nom.}[W</i>]	ΜΕΣΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ $P_{av.}[W]$	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΠΑΛΜΟ Ε _Ρ [m J]	$MRR_{exp.}\left[\frac{mm^3}{min}\right]$
1	0.58	450	233.51	45	125.20
2	0.63	540	340.54	54	188.79
3	0.57	630	356.76	63	147.60
4	0.59	720	421.62	72	210.86
5	0.71	450	321.08	90	139.13
6	0.66	540	356.76	108	188.60
7	0.62	630	389.19	126	193.29
8	0.59	720	421.62	144	233.05
9	0.72	450	324.32	135	129.15
10	0.66	540	356.76	162	161.02
11	0.62	630	389.19	189	188.60
12	0.59	720	421.62	216	219.10
13	0.79	450	356.76	225	132.61
14	0.78	540	421.62	270	176.48
15	0.67	630	421.62	315	169.74
16	0.68	720	486.49	360	202.07

	Αποτελόσιματα	cmcfcourgíac	πειοαιιατικών	δεδομόνων	WA NECES
πινακάς 5-4.	Αποτελευματά	επεςεργασιας	πειραματικων	υεοομενων	YUU AIOUOS

Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 4-6 προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:



Σχήμα 5-17: MRR συναρτήσει της ενέργειας ανά παλμό.

Στο Σχήμα 5-17 παρατηρούμε ότι με αύξηση της ενέργειας ανά παλμό, και αυξάνοντας το χρόνο παλμού T_{on} με παράλληλα αύξηση της ένταση του ρεύματος κατεργασίας, ο ρυθμός αποβολής υλικού αυξάνεται έως μια τιμή, ενώ στη συνέχεια εμφανίζεται η τάση προς μείωση (χαρακτηριστικά για T_{on}=500 μsec).



Σχήμα 5-18: MRR συναρτήσει τηςονομαστικής ισχύος κατεργασίας.



Σχήμα 5-19: MRR συναρτήσει της μέσης ισχύος κατεργασίας.

Πριν υπολογιστούν οι ημιεμπειρικές σχέσεις συσχετισμού του MRR με το I_P και το T_{on}, γίνεται εκτίμηση για τους σημαντικούς παράγοντες κατεργασίας .

Analysis of Variance													
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value								
Regressio	n 2	12569,5	6284,7	19,01	0,000								
lp	1	12532,8	12532,8	37,90	0,000								
Ton	1	36,7	36,7	0,11	0,744								
Error	13	4298,6	330,7										
Total	15	16868,1											
S R-sq R-sq(adj) R-sq(pred) 18 1941 74 52% 70 60% 52 70%													
Coefficie	nts	70,00%	o 02,	7070									
Term	Coef	SE Coet	f T-Valu	e P-Value	VIE								
C o nstant	15,4	28,1	0,5	5 0,592									
lp	8,34	1,36	6,1	6 0,000) 1,00								
Ton	-0,0102	0,0307	-0,3	3 0,744	1,00								

Regression Analysis: MRR versus Ip; Ton

Σχήμα 5-20: Regression Analysis: MRR versus I_p; T_{on.}

Παρατηρήσεις: Για τον ρυθμό αποβολής υλικού MRR, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ένταση ρεύματος κατεργασίας Ιρ, γεγονός που φανερώνεται τόσο από τα αποτελέσματα του Σχήματος 5-20 (κόκκινο πλαίσιο), όσο και από την παρακάτω σχέση του MRR όπου ο εκθέτης του Ι_P είναι κατά πολύ μεγαλύτερος (τάξεις μεγέθους) από αυτόν του Ton.

Η σχέση για τον ρυθμό αποβολής υλικού είναι:



Σχήμα 5-21: MRR συναρτήσει της έντασης ρεύματος (Ip) και του χρόνου παλμού(Ton).

Με ανάλογο τρόπογίνεται η εκτίμηση για το συσχετισμό του R_{α} και R_t με το I_P και το T_{on} .

Analysis	of Vari	ance										
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Val	ue P-V	/alue						
Regressio	n 2	72,167	36,083	20,	75 (),000						
lp	1	5,513	5,513	З,	17 0),098						
Ton	1	66,654	66,654	38,	33 0),000						
Error	13	22,604	1,739									
Total	15	94,770										
Model Summary												
S R-sq R-sq(adj) R-sq(pred)												
1,31861	76,15%	72,4	3% 6	52,68%								
Coefficients												
Term	Coef	SE C	oef T-Va	alue I	P-Value	VIF						
Constant	5,47	2	,04 2	2,68	0,019							
lp	0,1750	0,09	983 -	1,78	0,098	1,00						
Ton	0,01380	0,002	23 6	5,19	0,000	1,00						

Regression Analysis: Ra versus Ip; Ton

Σχήμα 5-22: Regression Analysis: R_{α} versus I_{p} ; Ton

Παρατηρήσεις: Για την μέση τραχύτητα R_a, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι δύο παράμετροι (I_p,T_{on}), γεγονός που φανερώνεται τόσο από τα αποτελέσματα του Σχήματος 5-22 (κόκκινα πλαίσια), όσο και από την παρακάτω σχέση της Ra όπου η βαρύτητα του Ip και Ton είναι παρόμοια με τους αντίστοιχους εκθέτες να έχουν «κοντινές» τιμές.





Σχήμα 5-23: Ra συναρτήσει της έντασης ρεύματος (Ip) και του χρόνου παλμού (Ton).

Analysis	of Var	iance									
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value						
Regression	า 2	2640,7	1320,36	15,22	0,000						
lp	1	375,8	375,84	4,33	0,058						
Ton	1	2264,9 2	2264,87	26,10	0,000						
Error	13	1128,0	86,77								
Total	15	3768,7									
Model Summary S R-sq R-sq(adj) R-sq(pred)											
9,31485	70,07%	65,479	6 56	5,45%							
Coefficie	nts										
Term	Coef	SE Coef	T-Valu	e P-Value	e VIF						
Constant	34,5	14,4	2,3	9 0,032	2						
lp	1,445	0,694	2,0	8 0,058	8 1,00						

0,0157

Regression Analysis: Rt versus Ip; Ton

Ton

0,0804

Σχήμα 5-24: Regression Analysis: R_t versus I_p; T_{on}.

Παρατηρήσεις: Για την μέγιστη τραχύτητα Rt, σημαντικότερη παράμετρος, εμφανίζεται οριακά να είναι ο χρόνος Ton, με τις τιμές των εκθετών στην αντίστοιχη σχέση να είναι ίδιας τάξης μεγέθους.

	R_{t}	μm]	= 8.6672	$\cdot I_n[A]^0$	$0.30 \cdot T_{on}$	$[\mu sec]^{0.2}$	5
--	---------	-----------	----------	------------------	---------------------	-------------------	---

1,00

0,000

5,11



Σχήμα 5-25: Rt συναρτήσει της έντασης ρεύματος (Ip) και του χρόνου παλμού (Ton).

<u>Al6063</u>

R_{α} R_{t}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	-	0.081	0.104	0.020	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.007	0.000	0.003	0.000	0.002	0.001
2	0.159	-	0.737	0.183	0.013	0.001	0.001	0.001	0.003	0.000	0.022	0.000	0.008	0.000	0.006	0.003
3	0.057	0.692	-	0.125	0.008	0.001	0.000	0.002	0.005	0.000	0.019	0.000	0.011	0.000	0.008	0.002
4	0.036	0.142	0.195	-	0.277	0.024	0.060	0.010	0.008	0.001	0.047	0.001	0.025	0.000	0.016	0.002
5	0.015	0.356	0.539	0.290	-	0.097	0.294	0.029	0.022	0.002	0.096	0.000	0.069	0.001	0.049	0.005
6	0.001	0.007	0.008	0.281	0.014	-	0.267	0.258	0.121	0.018	0.323	0.003	0.280	0.004	0.265	0.013
7	0.000	0.008	0.005	0.515	0.007	0.424	-	0.072	0.056	0.003	0.173	0.000	0.133	0.002	0.144	0.011
8	0.003	0.015	0.021	0.424	0.039	0.732	0.725	-	0.461	0.296	0.737	0.075	0.792	0.025	0.829	0.036
9	0.000	0.003	0.001	0.220	0.001	0.924	0.199	0.621	-	0.969	0.815	0.458	0.701	0.149	0.638	0.112
10	0.000	0.001	0.001	0.077	0.001	0.288	0.038	0.181	0.201	-	0.770	0.246	0.619	0.070	0.534	0.084
11	0.002	0.005	0.008	0.069	0.010	0.226	0.084	0.157	0.209	0.617	-	0.425	0.921	0.173	0.876	0.119
12	0.000	0.001	0.000	0.104	0.000	0.405	0.034	0.257	0.272	0.652	0.430	-	0.273	0.234	0.206	0.184
13	0.003	0.005	0.008	0.137	0.014	0.493	0.179	0.343	0.478	0.847	0.562	0.917	-	0.092	0.952	0.074
14	0.000	0.000	0.000	0.037	0.001	0.107	0.014	0.069	0.060	0.438	0.965	0.206	0.442	-	0.065	0.582
15	0.001	0.001	0.012	0.409	0.021	0.714	0.694	1.000	0.579	0.150	0.148	0.205	0.319	0.052	-	0.058
16	0.000	0.000	0.000	0.012	0.000	0.021	0.003	0.015	0.010	0.070	0.351	0.029	0.107	0.224	0.010	-

Πίνακας 5-5. Αποτελέσματα 2 – samples – t-test.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-5 παρατηρείται ότι στατιστικά σημαντική διαφορά της τραχύτητας επιφανείας εμφανίζεται ανάμεσα σε ακραίες συνθήκες κατεργασίας, ανάμεσα δηλαδή στις πλέον ήπιες και στις πιο έντονες. Για τις ενδιάμεσες συνθήκες η στατιστικά σημαντική μεταβολή της τραχύτητας είναι αμφίβολη.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι φωτογραφίες που ελήφθησαν, ώστε έπειτα από την ανάλυσή τους με λογισμικό επεξεργασίας εικόνων να υπολογιστεί ένα αντιπροσωπευτικό μέσο πάχος του WL.

































Σχήμα 5-26: Εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο, τομής κατεργασμένης σε EDM επιφάνειας αλουμινίου Al6063 με όλες τους συνδυασμούς των συνθηκών κατεργασίας σε μεγένθυσνη x100 & x500.

Διευκρινίζεται ότι ο τρόπος υπολογισμού του πάχους του επαναστερεοποιημένου υλικού (White Layer) για το Al6063 είναι ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στο Al5052.

AI 6063	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ WL [μm]	ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ WL [μm]	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΛΥΨΗΣ
1	23.02	30.98	52%
2	23.81	25.89	53%
3	25.85	27.72	65%
4	34.89	69.60	60%
5	36.60	61.76	64%
6	30.20	35.71	64%
7	38.15	43.74	80%
8	47.51	67.78	58%
9	43.24	53.33	72%
10	50.25	77.13	65%
11	37.45	44.07	64%
12	53.58	77.71	69%
13	50.84	70.23	83%
14	55.15	67.03	68%
15	56.81	67.83	77%
16	59.55	62.53	77%

Πίνακας 5-6. Χαρακτηριστικά WL με βάση τα στοιχεία από το οπτικό μικροσκόπιο.



Σχήμα 5-27: WL συναρτήσει της έντασης ρεύματος (Ip) και του χρόνου παλμού (Ton).

Regression Analysis: WL versus Ip; Ton

Analysis of Variance								
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valu	e P-	Value		
Regressio	n 2	1891,8	945,92	37,7	9	0,000		
lp	1	193,3	193,26	7,7	2	0,016		
Ton	1	1698,6	1698,59	67,8	6	0,000		
Error	13	325,4	25,03					
Total	15	2217,3						
Model Summary								
S	R-sq	R-sq(a	idj) R-so	(pred)				
5,00314	85,32%	83,0	7% 7	79,89%				
Coefficients								
Term	Coe	f ISE C	oef T-Va	alue P-	Value	VIF		
Constant	2,32	? 7	,74 (0,30	0,769			
lp	1,036	i 0,3	373 2	2,78	0,016	1,00		
Ton	0.06966	5 O OO8	346 9	3 24	0 000	1.00		

Σχήμα 5-28: Regression Analysis: WL versus I_p; Ton.

Παρατηρήσεις: Για το μέσο πάχος WL, εξίσου σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν η ένταση του ρεύματος κατεργασίας Ι_p και ο χρόνος παλμού Τ_{on}, γεγονός που φανερώνεται τόσο από τα αποτελέσματα του Σχήματος 5-28 καθώς η τιμή και των δύο μεταβλητών είναι πολύ κοντά (κόκκινα πλαίσια), όσο και από την παρακάτω σχέση του WL, όπου η βαρύτητα του Ι_p και T_{on} στην παραπάνω εξίσωση του WL είναι παρόμοια.

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

α/α	R _α [Al5052-Al6063]	R _t [Al5052-Al6063]
1	0.020	0.014
2	0.060	0.070
3	0.047	0.043
4	0.204	0.443
5	0.006	0.004
6	0.084	0.209
7	0.134	0.120
8	0.247	0.058
9	0.951	0.545
10	0.030	0.113
11	0.360	0.786
12	0.427	0.191
13	0.635	0.960
14	0.473	0.140
15	0.068	0.019
16	0.090	0.002

Πίνακας 5-7. Χαρακτηριστικά WL με βάση τα στοιχεία από το οπτικό μικροσκόπιο.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5-7, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων συγκεκριμένα 9 από τις η τραχύτητα επιφανείας και στα δύο κράματα αλουμινίου είναι στατιστικά ίδια. Επομένως, η τραχύτητα εξαρτάται κυρίως από τις συνθήκες κατεργασίας και όχι από το κράμα αλουμινίου.

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Στην εργασία αυτή, παρουσιάστηκε η μη συμβατική κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης, με αναφορά στα βασικά στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης, στις παραμέτρους που επηρεάζουν ένα τέτοιο σύστημα, και στα χαρακτηριστικά που ορίζουν την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα του. Στην συνέχεια διεξήχθει μια πλήρους κλίμακας πειραματική μελέτη για κατεργασία κραμάτων αλουμινίου (Al5052, Al6063) με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση τα σημεία που εστιάζουν συνήθως οι μελέτες είναι ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR), η φθορά του ηλεκτροδίου (TWR), η τοπογραφία – η ποιότητα επιφανείας και πως τα παραπάνω μεγέθη επηρεάζονται από τις συνθήκες κατεργασίας και συγκεκριμένα από την ένταση ρεύματος κατεργασίας (I_p), την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού (V_P), το χρόνο του κάθε παλμού (T_{on}), το duty factor (η), και το υλικό τεμαχίου, ηλεκτροδίου και διηλεκτρικού μέσου.

Συγκεκριμένα στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν τα εξής:

- Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης και τα δομικά στοιχεία μιας τέτοιας μηχανής καθώς και ο τρόπος διασύνδεσης των δομικών αυτών στοιχείων. Χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης κατεργασίας EDM αποτελεί το γεγονός ότι το ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό του τεμαχίου απομακρύνεται (από το τεμάχιο) με τη βοήθεια «σύντομων» και επαναλαμβανόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων, παρουσία διηλεκτρικού μέσου. Μάλιστα, γίνεται αναφορά στις παραμέτρους που επηρεάζουν την ποιότητα επιφανείας του κατεργαζόμενου τεμαχίου, τον ρυθμό αποβολής υλικού (MRR), τη φθορά του ηλεκτροδίου (TWR), και την τοπογραφία τηνη ποιότητα επιφανείας.
- Στο Κεφάλαιο 2 αρχικά αναλύθηκαν οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου. Έπειτα έγινε αναφορά στην ευρεία χρήση του στους κλάδους της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροναυπηγικής, της ναυπηγικής κ.α. καθώς συμβάλει στην αντικατάσταση των βαρέων υλικών και στην εξοικονόμηση εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα μέσω της ανακύκλώσης του. Τέλος έγινε μια μικρή βιβλιογραφική ανασκόπηση σε ότι έχει να κάνει με την συμπεριφορά του αλουμινίου στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης.

- Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση και ορίζεται με βάση την μέχρι τώρα έρευνα και τα αποτελέσματα της, το γενικό πλαίσιο στο οποίο θα «κινηθεί» η συγκεκριμένη ερευνητική προσπάθεια. Μέσα από την μελέτη αυτή εντοπίζονται δυσκολίες και «λεπτά σημεία», τα οποία χρήζουν προσοχής, ενώ ταυτόχρονα αξιοποιούνται συμπεράσματα και αποτελέσματα των ερευνητών που έχουν προηγηθεί. Διαπιστώνεται τέλος μια πληθώρα προσεγγίσεων όσο αναφορά την προσπάθεια μοντελοποίησης της, γεγονός που αιτιολογείται από την πολυπλοκότητά της κατεργασίας, την ανάγκη απλοποιήσεων και αναγκαστικών υποθέσεων.
- Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η πειραματική διαδικασία, που ακολουθήθηκε και παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Επίσης, με βάση ορισμένα πειραματικά δεδομένα γίνονται κάποιοι βασικοί υπολογισμοί, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενο στάδιο της ανάλυσης. Τέλος, αξιολογούνται τα αποτελέσματα με βάση στοιχεία και δεδομένα της βιβλιογραφίας.
- Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Έγινε συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις παραμέτρους κατεργασίας και προτάθηκαν ημι-εμπειρικές σχέσεις.

Ένα πολύ βασικό τμήμα της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτελεί το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστούν οι ημι-εμπειρικές σχέσεις που φανερώνουν τη συσχέτηση των παραμέτρων κατεργασίας με τα αποτελέσματα αυτής. Συγκεκριμένα τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι: το Minitab[®] 18 και το ImageJ.

Κατά την χρήση των λογισμικών που προαναφέρθηκαν έλαβαν χώρα τα εξής:

- Με το Minitab[®] 18, υπολογίστηκαν όλες οι ημι-εμπειρικές σχέσεις που περιγράφουν την εξάρτηση και την συμπεριφορά των παρακάτω μεγεθών MRR(I_p,T_{on}), R_a(I_p,T_{on}), R_t(I_p,T_{on}) και WL(I_p,T_{on}), για τις διάφορες περιπτώσεις συνδυασμών I_p-T_{on}, που αποτελούν τις παραμέτρους κατεγασίας.
- Με την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν και τα 3Δ διαγράμματα που παρουσιάζονται εκτενέστερα στην ενότητα 5.3.

Επιπλέον, για τις περιπτώσεις του επαναστερεοποιημένου υλικού ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

 Με το ImageJ, με λεπτομερής χειρισμούς αποτυπώθηκε περιμετρικά η γεωμετρία του σχηματισμού του White Layer. Έτσι, έπειτα από μαθηματική επεξεργασία υπολογίστηκε το μέσο πάχος [μm] του αλουμινίου που στεροποιήθηκε πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η επακριβής διαδικασία υπολογισμού του, παρατήθεται ολοκληρωμένα στην ενότητα 5.3.

Συνολικά, μελετήθηκαν 16 δοκίμια για τις δύο παραλλαγές αλουμινίου που διατέθηκαν και οι συνθήκες με τις οποίες κατεργάστηκε το καθένα από αυτά. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, συγκεντρώθηκαν και εισήχθησαν ως δεδομένα στα παραπάνω λογισμικά που αναφέρθηκαν, με αποτέλεσμα να εξαχθούν αποτελέσματα παρόμοια με αυτά που περιγράφονται σε σχετική βιβλιογραφία.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την εκτενή ανάλυση που έγινε στην εργασία αυτή, φαίνεται ότι η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM), αν και εφαρμόζεται πολλές δεκαετίες και είναι μια από τις πρώτες μη συμβατικές κατεργασίες, με σχετικά απλή αρχή λειτουργίας, παραμένει μια πολυσύνθετη τεχνική, καθώς φαινόμενα στοχαστικής φύσεως λαμβάνουν χώρα, με τη μελέτη και μοντελοποίηση της να παραμένει ενεργό επιστημονικό και ερευνητικό πεδίο. Τα σημεία, στα οποία εστιάζουν συνήθως οι μελέτες είναι ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR), η φθορά του ηλεκτροδίου (TWR), η τοπογραφία – η ποιότητα επιφανείας και πως τα παραπάνω μεγέθη επηρεάζονται από τις συνθήκες κατεργασίας και συγκεκριμένα από την ένταση ρεύματος κατεργασίας (I_p), την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού (V_P), το χρόνο του κάθε παλμού (T_{on}), το duty factor (η), και το υλικό τεμαχίου, ηλεκτροδίου και διηλεκτρικού μέσου.

Συνοπτικά, τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση που έγινε στη διπλωματική αυτή εργασία ως προς τη χρήση και την εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης στο αλουμίνιο συγκεκριμένα, είναι τα εξής:

• Τα πειράματα έγιναν σε αλουμίνιο Al5052 & Al6063, με υλικό ηλεκτροδίου χαλκό και διηλεκτρικό μέσο έλαιο. Η ένταση ρεύματος κατεργασίας είχε το εξής εύρος τιμών, $I_p = 15 \div 24 [A]$ και ο χρόνος παλμού $T_{on} = 100 \div 500$ [μsec]. Τα αποτελέσματα του MRR είναι τα αναμενόμενα με τον ρυθμό αποβολής υλικού να έχει άμεση εξάρτηση τόσο από την ένταση ρεύματος όσο και από το χρόνο παλμού (Σχήμα 5-1 & Σχήμα 5-6). Η σχέση αυτή αποτυπώνεται στο Σχήμα 5-1 & Σχήμα 5-6, με αποτέλεσμα να είναι έκδηλη η σχεδόν γραμμική μεταβολή του MRR συναρτήσει της μέσης ισχύος της κατεργασίας ($P_m*η*f_{eff}$.). Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας έγινε και μέτρηση τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας, με υπολογισμό μέσης και μέγιστης τραχύτητας (R_a και R_t αντίστοιχα).

 Στην περίπτωση του επαναστερεοποιημένου υλικού, το μέσο πάχος του WL μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με μια μικρή υποσημείωση ότι σε ότι έχει να κάνει με το αλουμίνιο Al6060 αυτή η μεταβολή παρουσιάζει ορισμένες διακυμάνσεις.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Εν κατακλέδι, σύμφωνα με τους ερευνητές και συγγραφείς οι πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας της EDM είναι:

Βελτιστοποίηση των μεταβλητών της διαδικασίας, καθώς όπως έχει αναφερθεί η συγκεκριμένη διαδικασία είναι πολυδιάστατη, καθιστώντας έτσι τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας σπινθηρισμού εξαιρετικά δύσκολη. Σε πολλές περιπτώσεις, η αναλογία S/N (Signal to noise ratio) μαζί με την ανάλυση της διασποράς (Analysis of Variance-ANOVA) χρησιμοποιούνται για την μελέτη της κατεργασία. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι ηλεκτρικές και μη, οι οποίες έχουν αρκετά σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον. Αυτά τα ερευνητικά έργα, άνοιξαν νέους ορίζοντες για την ανεύρεση μιας σταθεροποιημένης διαδικασίας σπινθηρισμού προκειμένου ο βαθμός απόδοσης να βελτιώνεται συνεχώς. Επιπλέον, η σκοπιμότητα της κατασκευής του ηλεκτροδίου χρησιμοποιώντας την RP-Technik έχει μελετηθεί εκτενώς για τη βελτίωση της απόδοσης των εργαλείων και του σπινθήρα. Συνεπώς, η συνεχής ερευνητική προσπάθεια για την κατανόηση της διεργασίας σπινθηρισμού, θα εξακολουθήσει να αποτελεί σημαντικό τομέα περαιτέρω ανάπτυξης [38].



Σχήμα 7-1: Ταξινόμηση σημαντικών τομέων έρευνας EDM.

- Η παρακολούθηση και έλεγχος της διαδικασίας, EDM γίνεται συχνά με βάση τον προσδιορισμό και τη ρύθμιση του τόξου που εμφανίζεται κατά τη διαδικασία σπινθηρισμού. Ωστόσο, αποτελεί αξιοσημείωτο πεδίο έρευνας η κατασκευή ενός συστήματος ελέγχου των σπινθηρισμών, προκειμένου να γίνει η κατεργασία πιο ελέγξιμη,αποδοτική και αποτελεσματική [39].
- Βελτίωση της απόδοσης της διαδικασίας: όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-2, η συντριπτική πλειοψηφία των ερευνητικών εργασιών έχουν ασχοληθεί με τη βελτίωση που επιτεύχθηκε στην δείκτες απόδοσης, όπως MRR, TWR και SR.



Σχήμα 7-2: Κατανομή των δημοσιεύσεων έρευνας EDM.

Το παραδοσιακό EDM θα εξελιχθεί σταδιακά προς το micro-EDM με τον περαιτέρω χειρισμό της ικανότητας του CNC, αλλά το MRR θα παραμείνει πρωταρχική μέριμνα στον τομέα των μηχανουργικών κατεργασιών ώστε να λαμβάνει χώρα η κατεργασία στο μικρότερο δυνατό χρόνο [40] [41].

Εξελίξη της EDM, σημαίνει ταυτόχρονη εξέλιξη σε πολλούς τομείς. Η EDM έχει πολλά χρόνια που βρίσκει εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροδιαστημική, κ.ά. Έχει επίσης πραγματοποιήσει μια σημαντική εισροή στην ιατρική, την οδοντιατρική και κοσμηματολογία και στις περιοχές R&D του τομέα της αεροδιαστημικής. Στο σχήμα 7-3, διακρίνονται οι διάφοροι τύποι χαρακτηριστικών του μηχανήματος που επηρεάζουν την απόδοση, την ικανότητα κατεργασίας και τις βοηθητικές εγκαταστάσεις της μηχανής EDM [42] [43].



Σχήμα 7-3: Ταξινόμηση σημαντικών παραμέτρων της EDM βύθισης.

Μία από τις επιλογές βελτίωσης της συγκεκριμένης μηχανουργικής κατεργασίας, περιλαμβάνει το ΗΜΡ που συνδυάζει τη διαδικασία EDM με άλλες διαδικασίες αφαίρεσης υλικού. Η πιο δημοφιλής και εξαιρετικά αποτελεσματική, περιλαμβάνει το USM παρέχοντας υπερηχητική δόνηση στο ηλεκτρόδιο, το οποίο βοηθάει τις λειτουργίες σπινθηρισμού και έκπλυσης [44].

Βιβλιογραφία

[1] H.S. Payal, B.L. Sethi.: "Nonconventional Machining Process as Viable Alternatives for Production with Specific Reference to Electrical Discharge Machining", Journal of Scientific & Industrial Research, Vol. 62, pp.678 – 682, 2003.

[2] Ahmed, M.S.: "EDM Finds New Role in Manufacturing." Technical Paper MS89-433. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 1989.

[3] Benedict, Gary F.: Non-Traditional Manufacturing Processes. New York: Marcel Dekker, Inc., 1987.

[4] Jameson, E.C.: Electrical discharge machining. Society of Manufacturing Engineers, 2001.

[5] Ho, K., H., and Newman, S., T.: State of the art electrical discharge machining (EDM), International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43, pp. 1287-1300, 2003.

[6] Guitrau, E. Bud.: The EDM Handbook. Cincinnati, OH: Hanser-Gardner Publications, 1997.

[7] Ali Ozgedik and Can Cogun: "An Experimental Investigation of Tool Wear in Electric Discharge Machining", International National Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 27, pp. 488-500, 2006.

[8] A.K.M. Asif Iqbal and Ahsan Ali Khan: Influence of Process Parameters on Electrical Discharge Machined Job Surface Integrity, American J. of Engineering and Applied Sciences 3, No.2, pp. 396-402, 2010.

[9] Schulze, Lauter, Wollenberg, Storr, Rehbein: "Investigation of the pre-ignition stage in EDM", Proceedings of the 13th International Symposium for Electromachining, pp.141 – 152, 2001.

[10] Kloche, F.: The process sequence in tool and die-making. In: Proceedings of 12th International Symposium for Electromachining, Aachen, 1998.

[11] Jameson, E.C., ed. *Electrical Discharge Machining: Tooling, Methods and Applications*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 1983.

[12] Sushil Kumar Choudhary, R. S. Jadoun, "Current Advanced Research Development of Electric Discharge Machining (EDM): A Review, International Journal of Research in Advent Technology, Vol. 2, pp.273 – 297, 2014.

[13] Khan AA, Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes. Int J Adv Manuf Tech 39(5–6):482–487, 2008.

[14] Shahzad, M.; et al.: Influence of anodizing process on fatigue life of machined aluminium alloy. Procedia Eng. 2(1), 1015–1024, 2010.

[15] Machine Tools, Machinability and Electro-machining Processes Frontiers in Manufacturing Technology, Vol. III. Ann Arbor, MI: The University of Michigan, Industrial Development Division, Institute of Science and Technology, 1968.

[16] S.H.Tomadi, M.A.Hassan, Z. Hamedon, Member, IAENG R.Daud, & A.G.Khalid: Analysis of the Influence of EDM Parameters on Surface Quality, Material Removal Rate and Electrode Wear of Tungsten Carbide, Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, Vol. II, Hong Kong, 2009.

[17] J.-P. Kruth, L. Stevens, L. Froyen, B.Lauwers: Study of the white layer of a surface machined by diesinking electrodischarge machining, CIRP Annals—Manufacturing Technology, 44, pp.169–172, 1995.

[18] Goyal S. & Singh R. K.: Parametric Study of Powder Mixed EDM and Optimization of MRR & Surface Roughness, International Journal of Scientific Engineering and Technology, 3(1) pp.56-62, 2014.

[19] McGeough, J.A.: Advanced Methods of Machining. London, UK: Chapman and Hall Publishers Ltd., 1998.

[20] Debroy, A., & Chakraborty, S.: Non-conventional optimization techniques in optimizing nontraditional machining processes: a review. Management Science Letters, 3(1), 23-38, 2013.

[21] Cichosz P. and Karolczak P.: Sinker EDM of aluminium metal matrix composite. The Instit. Prod. Eng. Automatization, Vol. 26, No. 3, 2008.

[22] Dhanik, S., Joshi, S.S., Ramakrishnan, N. and Apte, P.R.: Evolution of EDM process modelling and development towards modelling of the micro-EDM process, International Journal of Manufacturing Technology and Management, Volume7, No.2/3/4, pp.157-180, 2005.

[23] Chung D.K., Kim B.H., and Chen C.N.: Micro electrical discharge milling using deionized water as a dielectric fluid. J Micromech Microeng 17(5):867–874, 2007.

[24] Loeb, L.B. Meek.: The mechanism of the electric spark, Stanford University Press, 1941.

[25] Non-Traditional Machining. Materials Park, OH: American Society for Metals, 1986.

[26] Marafona, J. and Wykes, C.A.: New Method of Optimizing Material Removal Rate using EDM with Copper-tungsten Electrodes, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 40, No.2, pp.153-164, 2000.

[27] Iuliano, L., Violante, M.G., Gatto, A. and Bassoli, E.: Study of the EDM process effects on aluminium alloys, International Journal of Manufacturing Technology and Management, Volume14, No.3/4, pp.326-341, 2008.

[28] Ekmekci, B.: Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM). Appl. Surf. Sci. 253(23):9234–9240, 2007.

[29] Kolb, Joshi, Xiao, and Schoenbach: "Steamers in water and other dielectric liquids", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 41(23), 2008.

[30] De Chiffre, L., et al.: Surfaces in Precision Engineering, Microengineering and Nanotechnology, CIRP Annals-Manufacturing Technology 52(2):561-577, 2003.

[31] K.M. Tsai, P.J. Wang: Semi-empirical model of surface finish on electrical discharge machining, Int. J. Mach. Tools Manuf. 41(10):1455–1477, 2001.

[32] G Krishna Mohana Rao et al.: Experimental Investigation of Optimal Machining Parameters in Die Sinking Electro Discharge Machining of Miraging Steels (M-250). Proc. of the National Conf. on Advances in Mechanical engineering. March 18-19, Engineering College Kota, Kota (Rajasthan) India, 2006.

[33] K. Ponappa, S. Aravindan, P.V. Rao, J. Ramkumar, M. Gupta, The effect of process parameters on machining of magnesium nano-alumina composites through EDM, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 46, pp.1035–1042, 2010.

[34] Ho, K.H.; Newman, S.T.: State of the art electrical discharge machining (EDM). Int. J. Mach. Tools Manuf. 43(13):1287–1300, 2003.

[35] M. Yoshida, M. Kunieda: Study on mechanism for minute tool electrode wear in dry EDM, Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 65, pp.689–693, 1999.

[36] Lazarenko, B.R.: About the inversion of metal erosion and methods to fight ravage of electric contacts, WEI-Institute, Moscow in Russian, 1943.

[37] Jha B., Ram K., Rao M.: An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining, Journal of Science and Technology Review 4, p. 118-130, 2011.

[38] Maradia, U., Boccadoro, M., Stirnimann, J., Beltrami, I., Kuster, F., Wegener, K.: Die-Sinking EDM in meso-micro machining, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting, Procedia Cirp 1, p. 166-177, 2012.

[39] Q.Y. Ming and L.Y. He, "Powder-suspension dielectric fluid for EDM", Journal of Material Processing Technology, 52, pp. 44-54, 1995.

[40] W. M. Wang and K. P. Rajurkar: "New servo control interface and Model Reference Adaptive Control for EDM", North American Manufacturing Research Conference (NAMRC), pp. 281 -286, 1989.

[41] Y. Zhang, Y. Liu, R. Ji, and B.Cai: "Study of the recast layer of a surface machined by sinking electrical discharge machining using water-in-oil emulsion as dielectric," Applied Surface Science, vol. 257, pp. 5989-5997, 2011.

[42] DiBitonto, Eubank, Patel, Barrufet: "Theoretical models of the electrical discharge machining process I: A simple cathode erosion model", Journal of Applied Physics, Vol. 66, pp 4095 – 4103, 1989.

[43] Lonardo P.M., Bruzzone A.A.: Effect of flushing and electrode material on die-sinking EDM. CIRP Annals—Manufac Tech 48(1):123–126, 1999.

[44] W. Konig, F.-J. Siebers: Influence of the working medium on the removal process in EDM sinking, American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division (Publication) PED 64, pp. 649–658, 1993.