



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

*ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF CARBON FIBRE
REINFORCED COMPOSITES*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ



ΓΟΥΡΓΟΥΛΕΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2009



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

*ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF CARBON FIBRE
REINFORCED COMPOSITES*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΟΥΡΓΟΥΛΕΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2009

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ. 3
INTRODUCTION	5
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ	9
1.1 Γενικά	9
1.2 Ηλεκτροδιάβρωση σύρματος	12
1.3 Ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης	15
1.3.1 Περιγραφή της διάταξης και της αρχής λειτουργίας	15
1.3.2 Εργαλειομηχανή	18
1.3.3 Γεννήτρια τροφοδότησης	20
1.3.4 Διηλεκτρικό υγρό	23
1.3.5 Υλικό κατασκευής ηλεκτροδίου	23
1.3.6 Παράμετροι κατεργασίας	25
1.3.7 Μηχανισμός αποβολής υλικού	26
1.3.8 Πιστότητα κατεργασμένης επιφάνειας	28
1.3.9 Εφαρμογές	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ	35
2.1 Εισαγωγή	35
2.2 Ίνες άνθρακα	36
2.2.1 Δομή-Τρόπος κατασκευής	36
2.2.2 Ιδιότητες ινών άνθρακα	39
2.3 Μήτρες	44
2.3.1 Γενικά	44
2.3.2 Οργανικές μήτρες	45
2.3.3 Μήτρες άνθρακα	48
2.3.4 Παράμετροι σύνθετου υλικού	49
2.4 Ηλεκτροδιάβρωση και ανθρακονήματα	51
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	57
3.1 Υλικά	57
3.2 Πειραματική διάταξη	59
3.3 Σχεδιασμός του πειράματος	62
3.3.1 Αρχικός σχεδιασμός	62
3.3.2 Συνθήκες κατεργασιών και χάρτες κατεργασιμότητας	65
3.4 Υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας	72
3.4.1 Προκαταρκτικές εργασίες	72
3.4.2 Διάνοιξη των οπών	72
3.4.3 Μέτρηση των διαμέτρων	73
3.4.4 Μέτρηση των τραχυτήτων	75
3.4.5 Φωτογράφιση δοκιμίων	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗ ΦΘΟΡΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ	93
5.1 Ρυθμός αποβολής υλικού	93
5.2 Σχετική φθορά εργαλείου	103

5.3 Επίδραση της ενέργειας εκκένωσης	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	119
7.1 Τραχύτητα παράπλευρης επιφάνειας οπής	119
7.2 Τραχύτητα βάσης οπής	123
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	129
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	137
9.1 Σύνοψη	137
9.2 Συμπεράσματα	138
9.3 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες	140
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	141

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση της εφαρμογής της μη συμβατικής κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM) σε σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα (CFRC), και πιο συγκεκριμένα για τη διάρρησή τους. Εξαρτήματα από τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε προηγμένες κατασκευές (π.χ. στην αεροναυπηγική), όπου η παραγόμενη ποιότητα κατεργασίας είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια και την ορθή λειτουργία. Η ψαθυρή φύση και η σκληρότητα των CFRC δημιουργούν αρκετά προβλήματα κατά την επεξεργασία τους με συμβατικές κατεργασίες. Έτσι, εξετάζεται ως εναλλακτική μέθοδος κατεργασίας τους η ηλεκτροδιάβρωση, η αποτελεσματικότητα της οποίας αξιολογείται με βάση την ταχύτητα κατεργασίας, την παραγόμενη διαστατική ακρίβεια και την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης. Γίνεται αναφορά στην εργαλειομηχανή που λαμβάνει χώρα η κατεργασία, στην αρχή λειτουργίας, στις τεχνολογικές παραμέτρους που επιδρούν στο αποτέλεσμα της κατεργασίας και στο μηχανισμό αποβολής υλικού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα. Συγκεκριμένα, γίνεται περιγραφή της δομής τους, των υλικών κατασκευής της μήτρας (δίνεται έμφαση στις οργανικές μήτρες και τις μήτρες άνθρακα), των ιδιοτήτων τους (κυρίως ηλεκτρικές και θερμικές), καθώς και των παραμέτρων που τις επηρεάζουν. Επίσης επισημαίνονται κάποια στοιχεία της ηλεκτροδιάβρωσης σε σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα, όπως προκύπτουν από τη σχετική βιβλιογραφία.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα που διενεργήθηκαν, τα στοιχεία της εργαλειομηχανής που χρησιμοποιήθηκε και ο σχεδιασμός του πειράματος. Επίσης αναλύονται οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν στην διεξαγωγή των πειραμάτων και στις μετρήσεις που ακολούθησαν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετάται η παραγόμενη ακρίβεια διαστάσεων σε συνάρτηση με τις συνθήκες κατεργασίας και αναλύονται οι σχετικές μετρήσεις.

Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται ο ρυθμός αποβολής του υλικού κατά την κατεργασία, η σχετική φθορά του εργαλείου και η επίδραση της ενέργειας εκκένωσης στο ρυθμό αποβολής υλικού.

Στο έκτο κεφάλαιο επιχειρείται μια προσέγγιση του μηχανισμού αποβολής υλικού.

Στο έβδομο κεφάλαιο διερευνάται η επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στην παραγόμενη τραχύτητα της παράπλευρης επιφάνειας και της βάσης της οπής, για όποιες οπές ήταν δυνατή η λήψη των σχετικών μετρήσεων.

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της μεταλλογραφικής ανάλυσης των κατεργασμένων επιφανειών και παρατίθενται οι σχετικές φωτογραφίες.

Τέλος, στο ένατο κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται μια σύνοψη της διαδικασίας και καταγράφονται οι κυριότερες παρατηρήσεις και συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική εργασία. Ακόμη, γίνονται παρατηρήσεις και προτάσεις που αφορούν τη διεξαγωγή πιθανών μελλοντικών εργασιών για την περαιτέρω διερεύνηση του συγκεκριμένου θέματος.

Για την εκπόνηση της εργασίας αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τον καθηγητή Δ. Μανωλάκο για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.
- Τους συναδέλφους Ν. Γαλάνη και Ν. Βαξεβανίδη για τις ιδέες και τις συμβουλές που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της εργασίας.
- Το συνάδελφο σπουδαστή Δ. Τζαμουράνη και τον τεχνικό του εργαστηρίου Κ. Κερασιώτη.
- Τους συναδέλφους στο Μετροτεχνικό Εργαστήριο της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών για τη βοήθειά τους σε τεχνικά ζητήματα.

INTRODUCTION

The purpose of this thesis is to study and analyze the implementation of Electrical Discharge Machining (EDM) on Carbon Fibre Reinforced Composites (CFRC), especially for drilling them. Components made from these materials are used on advanced structures (e.g. aeronautic industry), where the quality of the machined products is of vital importance to the safety and the proper function. However, their intrinsic brittle behavior and hardness make conventional machining difficult and consequently of limited use. Therefore, EDM is examined here as an alternative way of machining CFRC. Its effectiveness is being evaluated in terms of the material removal rate, the produced dimensional accuracy and the quality of the machined surface.

The first chapter describes the method of EDM and its main principles. Reference is made to the technological configuration, the technological parameters that affect the outcome of the method and the mechanism of material removal rate.

The second chapter refers to CFRC. It contains a description of their structure, the materials that are used for the matrix (emphasis is given on the organic matrix and carbon matrices), their properties (including electrical and thermal) and the parameters affecting them. There are also several conclusions included from the application of EDM on CFRC during the recent years.

The third chapter describes the materials used in the experiments conducted and gives an overview of the technology platform used, as well as of the experimental design. It also analyzes the procedures which were followed during conducting the experiments and the related measurements.

Chapter four studies the dimensional accuracy that is produced, given the machining parameters.

Chapter five studies the material removal rate during the machining, the relative wear ratio and the impact of pulse energy on the material removal rate.

The sixth chapter attempts an approach to elaborate on the mechanism of material removal rate.

In the seventh chapter the effect of processing parameters on the output surface roughness and the lateral base of the hole is investigated.

The eighth chapter outlines the metallographical analysis of the produced surfaces.

Finally, the ninth chapter of this work gives a summary of the proceedings and records the main observations and conclusions drawn from the measurements and the observation of the surfaces. There are also some suggestions made, regarding the possible conduct of future work, in order to further investigate this issue.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM, electrical discharge machining) είναι μη-συμβατική κατεργασία αφαίρεσης υλικού, θερμικού/θερμοηλεκτρικού χαρακτήρα. Αν και η θεωρητική της βάση και οι τεχνολογικές της παράμετροι απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση, αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μη-συμβατική κατεργασία και εφαρμόζεται ευρύτατα λόγω των εξαιρετικών δυνατοτήτων που προσφέρει σε αγωγίμα υλικά μικρής κατεργασιμότητας. Χρησιμοποιείται κυρίως για την δημιουργία πολύπλοκων και ασυνήθιστων γεωμετρικών μορφών σε υλικά υψηλής σκληρότητας, οι οποίες θα ήταν υπερβολικά χρονοβόρο και δαπανηρό να δημιουργηθούν με χρήση συμβατικών κατεργασιών.

Η ιστορία της EDM ξεκινάει περίπου στο 1770, όταν παρατηρήθηκε από τον Άγγλο Joseph Priestly ότι κάθε φορά που πλησιάζουν μεταξύ τους τα άκρα δύο αγωγών συνδεδεμένων με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής, προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση, και από τον παραγόμενο σπινθήρα, την υψηλή θερμοκρασία και τη δράση ηλεκτρικών μοριακών δυνάμεων αποσπάζεται ποσότητα υλικού και από τους δύο αγωγούς. Παρ' όλα αυτά δεν υπήρξε καμία εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης μέχρι το 1943, όταν δύο Σοβιετικοί επιστήμονες, οι B.R. και N.I. Lazarencο κατάφεραν να εκμεταλλευτούν το φαινόμενο για την κατεργασία υλικών. Αρχικά η μέθοδος παρουσίαζε αρκετά προβλήματα και δυσκολίες, καθώς οι πρώτες μηχανές ήταν απλοϊκές και η κίνηση του ηλεκτροδίου γινόταν χειροκίνητα, συνεπώς λίγοι πίστευαν στις δυνατότητές της ηλεκτροδιάβρωσης ως κατεργασίας.

Όμως με την ανάπτυξη από τους ίδιους επιστήμονες του πρώτου σερβομηχανισμού για EDM, αυξήθηκε τόσο ο βαθμός ελέγχου της κατεργασίας, όσο και η πίστη σε αυτήν. Με το πέρασμα των χρόνων, οι μηχανές βελτιώθηκαν πολύ, εξελισσόμενες από παροχή ισχύος RC (resistor capacitance) και λυχνίες, σε τρανζίστορ με δυνατότητα παλμών της τάξης του nanosecond, ενώ από το αρχικά χειροκίνητο ηλεκτρόδιο περάσαμε σε

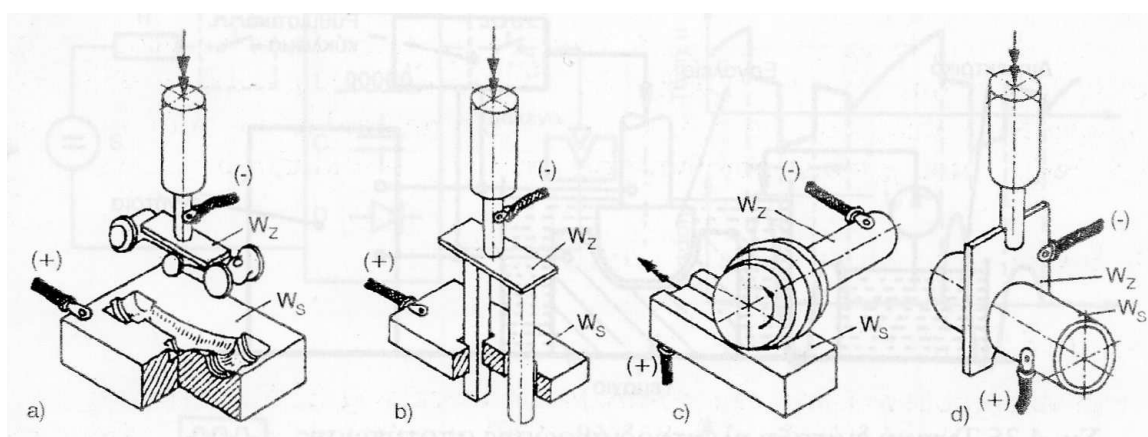
μοντέρνες CNC μηχανές με δυνατότητα ταυτόχρονης κατεργασίας έως και έξι αξόνων. Φτάνουμε έτσι στο σήμερα, όπου η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης έχει φέρει την επανάσταση σε αρκετούς τομείς της βιομηχανίας, ενώ σε πολλές περιπτώσεις έχει αντικαταστήσει κατεργασίες που δέσποζαν για πολλά χρόνια.

Η ηλεκτροδιάβρωση είναι κατεργασία κατά την οποία γίνεται αφαίρεση υλικού από κάποιο ηλεκτρικά αγώγιμο κατεργαζόμενο τεμάχιο με τη χρήση ηλεκτρισμού. Η έννοια ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό όμως πρέπει να διευκρινιστεί. Με την ηλεκτροδιάβρωση μπορούμε να κατεργαστούμε και κάποια υλικά που δεν είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, αλλά υπάγονται στους ημιαγωγούς. Σύμφωνα με τους Koenig, Dauw, Levy & Panten [25], υπάρχει μια τιμή της ειδικής αντίστασης ρ του υλικού, κάτω από την οποία η ηλεκτροδιάβρωση είναι εφικτή. Αυτό το όριο μπορούμε να το ονομάσουμε και κατώφλι αγωγιμότητας, και η τιμή του είναι $\rho=100\Omega\cdot\text{cm}$ (ειδική αγωγιμότητα $0,01\text{S}/\text{cm}$). Ορθότερα, υπάρχει μια περιοχή τιμών της ειδικής αντίστασης ρ των υλικών, με κέντρο την τιμή $100\Omega\cdot\text{cm}$, στην οποία 'μόλις' εμφανίζεται σπινθήρας. Είναι δηλαδή πιθανό κάποιο υλικό με λίγο μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από $100\Omega\cdot\text{cm}$ να ηλεκτροδιαβρώνεται, ενώ ένα υλικό με μικρότερη ειδική αντίσταση να μην ηλεκτροδιαβρώνεται. Εννοείται ότι τα περισσότερα αγώγιμα υλικά εμφανίζουν τα λιγότερα προβλήματα ηλεκτροδιάβρωσης. Η κατεργασία επιτυγχάνεται με την εφαρμογή στο κατεργαζόμενο τεμάχιο παλμών συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, υψηλής συχνότητας, μέσω ενός ηλεκτροδίου ή σύρματος. Το ηλεκτρόδιο-εργαλείο, τοποθετούμενο με υψηλή ακρίβεια πολύ κοντά στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, χωρίς όμως να έρχεται σε επαφή μαζί του, αποφορτίζει το δυναμικό του στο τεμάχιο (που συνήθως είναι το θετικό ηλεκτρόδιο), διαμέσου ενός μονωτικού διηλεκτρικού υγρού (ως διηλεκτρικά χρησιμοποιούνται συνήθως έλαια βασισμένα σε παραφινικές, ναφθενικές και αρωματικές ενώσεις), στο οποίο είναι εμβαπτισμένα και το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο.

Κατά την εκκένωση δημιουργούνται σπινθήρες στο πολύ μικρό διάκενο (σταθερό, από 25 έως 50 μm) μεταξύ των δύο επιφανειών. Η θερμοκρασία του σπινθήρα που παράγεται βρίσκεται συνήθως μέσα σε ένα εύρος από 8000 έως 12000°C, με αποτέλεσμα μετά από κάθε εκκένωση να έχουμε

επιφανειακή τήξη ή και εξάχνωση των υλικών - από την παραγόμενη κατά τη διάσπαση του διάκενου θερμική ενέργεια - και αφαίρεση υλικού και στο δύο ηλεκτρόδια.

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης είναι πλέον μια αρκετά καθιερωμένη κατεργασία, με πολλές εφαρμογές και πολύ μεγάλες δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης. Χρησιμοποιείται κυρίως για την κατεργασία τεμαχίων από πολύ σκληρά υλικά και για την επίτευξη πολύπλοκων γεωμετριών, ενώ πολλές φορές μετά την περάτωσή της δεν απαιτείται επιπλέον λείανση της παραγόμενης επιφάνειας, καθώς δημιουργεί πολύ καλή επιφανειακή ποιότητα. Χρησιμοποιείται επίσης ευρέως στην κατασκευή πολύπλοκων καλουπιών. Η ανάπτυξή της έχει κάνει πολλές εργασίες ευκολότερες από ότι ήταν στο παρελθόν, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί το μοναδικό τρόπο κατεργασίας διαφόρων τεμαχίων. Στο **σχήμα 1.1** διακρίνονται κάποιες απλές δυνατότητές της ως κατεργασίας.



Σχήμα 1.1:

Κατεργασίες αποβολής υλικού με ηλεκτροδιάβρωση

a) Κοπή, b) Διάτρηση, c) Λείανση, d) Απότημηση

Ws: κατεργαζόμενο τεμάχιο, Wz: εργαλείο, → πρόωση

Με τον γενικό όρο ηλεκτροδιάβρωση αναφερόμαστε σε δύο διαφορετικές τεχνικές:

- Την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης (die sinking EDM), όπου με σταθερό εργαλείο γίνεται η πρόσδοση της μορφής του “εργαλείου-ηλεκτρόδιου” στο “κατεργαζόμενο τεμάχιο-ηλεκτρόδιο”,

- Την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM), όπου το σταθερό ηλεκτρόδιο έχει αντικατασταθεί με μεταλλικό αγωγίμο σύρμα.

1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΡΜΑΤΟΣ

Στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, για την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο-εργαλείο ειδικό λεπτό (διαμέτρου 0,025 – 0,3 mm) αγωγίμο σύρμα από χαλκό ή ορείχαλκο και για διαμέτρους μικρότερες από 0,15 mm μολυβδαίνιο, και όχι εργαλεία-ηλεκτρόδια ειδικά κατεργασμένα σε μορφή και μέγεθος. Οι συνήθεις εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος κατεργάζονται κομμάτια μορφής πλάκας, για περιμετρική κοπή ή για την διάνοιξη οπών με ορισμένο απλό ή πολύπλοκο σχήμα.

Η κατεργασία είναι ελεγχόμενη από Η/Υ, και η κίνηση του σύρματος καθορίζεται από σύστημα NC ή CNC. Το σύρμα, με τη βοήθεια ειδικής κατάλληλης διατάξεως εκτυλίξεως, τανύσεως και περιελίξεως (σχ. 10.12) διαπερνάει κάθετα, κατά τον άξονα “Ζ”, την κατεργαζόμενη μεταλλική πλάκα-κομμάτι συνεχώς με σταθερή ταχύτητα και φορά τέτοια, που εξασφαλίζει στο διάκενο κατεργασίας άφθαρτο πάντοτε εργαλείο.

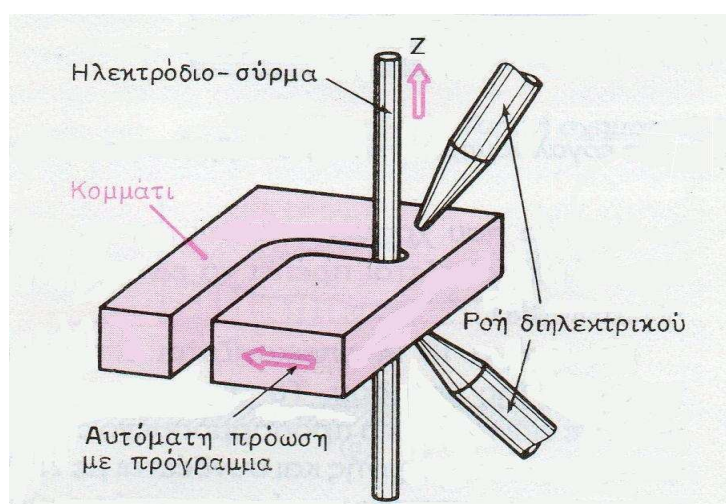
Το τραπέζι της εργαλειομηχανής, πάνω στο οποίο είναι προσδεδμεμένο το κομμάτι-πλάκα, κινείται ταυτόχρονα με το σύρμα κατά τους άξονες κατεργασίας “Χ” και “Υ” του τραπεζιού, ενώ καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το σύρμα βρίσκονται συνεχώς εμβαπτισμένα μέσα σε κατάλληλο δοχείο μη-αγωγίμου υγρού διηλεκτρικού. Οι ταυτόχρονες κινήσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, και οι οποίες γίνονται βάσει του προγράμματος κατεργασίας CNC, είναι αυτές που προκαλούν την “κοπή” ή την “αποκοπή” του επιθυμητού επιπέδου σχήματος.

Σε ορισμένους τύπους εργαλειομηχανών, η σχετική κίνηση μπορεί να γίνει και αντίθετα, δηλαδή το κομμάτι να παραμένει σταθερό και το κατακόρυφο σύρμα να κινείται κατά τους άξονες “Χ” και “Υ”. Επίσης είναι σύνηθες πολλές εργαλειομηχανές κοπής με σύρμα να διαθέτουν ειδική διάταξη για την διάνοιξη της “αρχικής οπής” (ελάχιστη διάμετρος 0,8 mm), απ' όπου θα περάσει το σύρμα για να γίνει δυνατή η έναρξη της κατεργασίας.

Στις περισσότερες εργαλειομηχανές του είδους, το διηλεκτρικό που χρησιμοποιείται στις φάσεις εκχονδρίσεως είναι καθαρό νερό, συνεχώς

ψεκαζόμενο στο διάκενο κατεργασίας, διότι δεν έχουμε ιδιαίτερες απαιτήσεις ακριβείας και θέλουμε να επιτυγχάνονται μεγάλοι ρυθμοί αφαιρέσεως υλικού. Ειδικά διηλεκτρικά χρησιμοποιούνται μόνο στις φάσεις αποπεράτωσης και γενικά όπου είναι επιθυμητή πολύ καλή ποιότητα της επιφάνειας κοπής, ενώ στη γρήγορη μεταφορά νέου διηλεκτρικού στο διάκενο κατεργασίας και στην ταχεία απομάκρυνση των προϊόντων των εκκενώσεων βοηθά η συνεχής κίνηση του σύρματος.

Στο **σχήμα 1.2** διακρίνεται η αρχή της μεθόδου της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος.

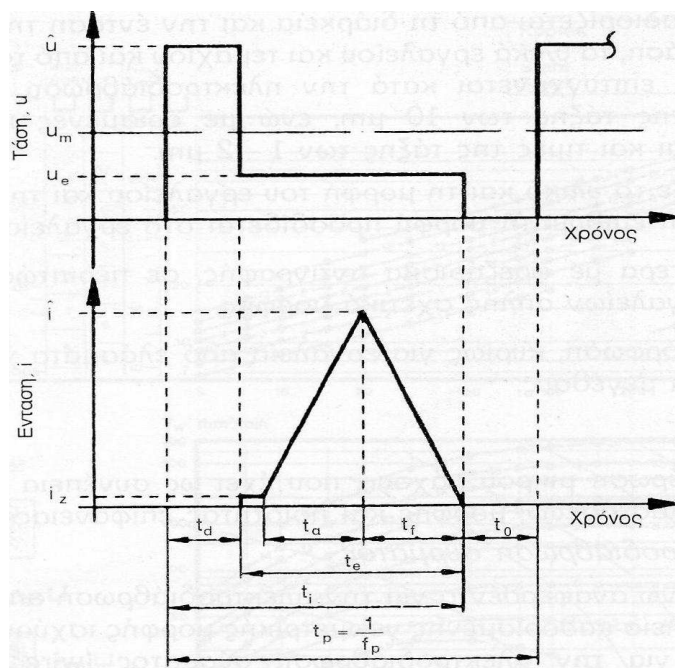


Σχήμα 1.2:
Αρχή της μεθόδου της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος

Σε αντίθεση με την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης, που θα εξετάσουμε παρακάτω, και κατά την οποία το κατεργάσιμο τεμάχιο συνδέεται συνήθως στην κάθοδο, στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος συνδέεται συνήθως στην άνοδο και επιπλέον εφαρμόζονται παλμοί μικρότερης διάρκειας, αλλά πολύ μεγαλύτερης έντασης. Τυπικές μορφές παλμών τάσης και έντασης του ρεύματος δίνονται στο **σχήμα 1.3**.

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος προσφέρουν πρακτικά μηδενική φθορά εργαλείου, άρα και μεγάλη διάρκεια ζωής, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλη εξοικονόμηση στην κατασκευή τους και μείωση

του συνολικού κόστους της κατεργασίας για μαζικότερη παραγωγή. Επίσης εξασφαλίζουν μικρούς χρόνους κατεργασίας (οι ρυθμοί αφαιρέσεως υλικού μπορούν να φτάσουν έως και 8500 mm³/min), μεγάλη διαστασιολογική ακρίβεια (της τάξεως 2 μm) και καλή επιφανειακή ποιότητα (τραχύτητα επιφάνειας ως και 1 μm). Με μικρές τροποποιήσεις το ίδιο βασικό πρόγραμμα CNC μπορεί επίσης να εκτελέσει τόσο την κοπή της μήτρας όσο και την κοπή του αντίστοιχου εμβόλου. Τέτοια παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου παρουσιάζονται στο **σχήμα 1.4**. Η μείωση του κόστους κατασκευής του καλουπιού στις περιπτώσεις αυτές, φτάνει και το 50% περίπου συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους. Ο μοναδικός ίσως άμεσος περιορισμός στη χρήση της μεθόδου, έγκειται στο ότι χρησιμοποιείται για την κοπή επιπέδων σχημάτων μέχρι ένα μέγιστο πάχος 100 mm.

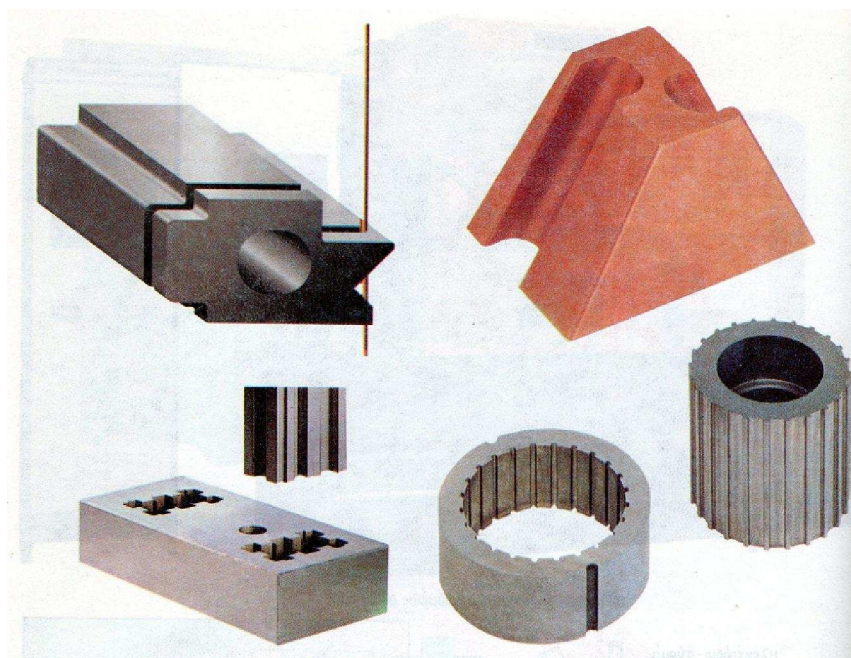


Σχήμα 1.3:

Παλμός τάσης και έντασης του ρεύματος σε ηλεκτροδιάβρωση σύρματος

Η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του 1970 ως εναλλακτική λύση στη μηχανική κοπή σωλήνων, κελυφών, κ.τ.λ.. Σήμερα, με την πρόοδο της τεχνολογίας CNC και τη χρήση επικαλυμμένων συρμάτων (coated wires), η μέθοδος βρίσκει ευρύτατες εφαρμογές στην κατασκευή

μητρών, εξαρτημάτων και γενικά τρισδιάστατων γεωμετριών με μικροκοπή ακριβείας (precision micro-machining) στην αεροναυπηγική (κομμάτια βάρους έως και 40000 kp) και σε βιοτεχνολογικά εξαρτήματα.



Σχήμα 1.4:

Κομμάτια από μήτρες και έμβολα καταργασμένα σε εργαλειομηχανή ηλεκτροδιαβρώσεως με σύρμα

1.3 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ

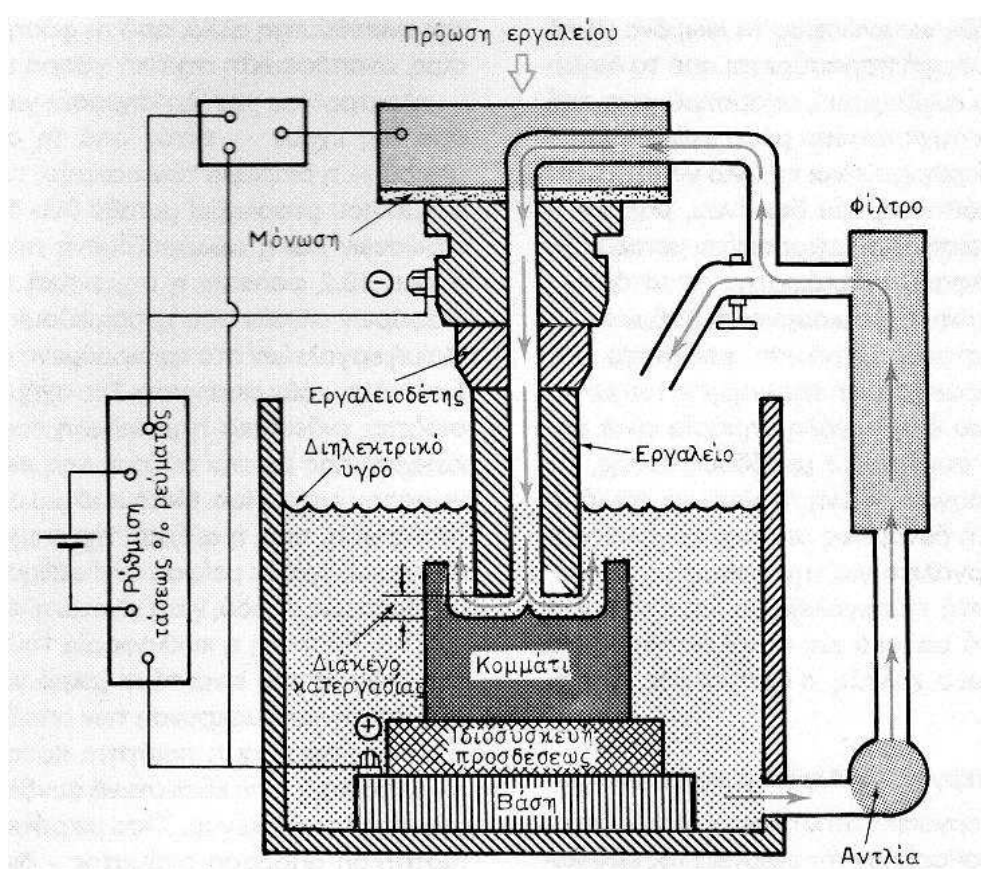
1.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Στην ηλεκτροδιάβρωση, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, γίνεται αφαίρεση υλικού από κάποιο κατεργαζόμενο αγώγιμο τεμάχιο με τη βοήθεια ελεγχόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων. Η τυπική διάταξη της ηλεκτροδιάβρωσης δίνεται στο **σχήμα 1.5**, και όπως διακρίνουμε αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά μέρη:

- 1) Την εργαλειομηχανή
- 2) Τη γεννήτρια τροφοδότησης
- 3) Το σύστημα παροχής διηλεκτρικού

Τόσο το κομμάτι όσο και το χρησιμοποιούμενο εργαλείο πρέπει να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Το εργαλείο, που συχνά είναι το αρνητικό

ηλεκτρόδιο του συστήματος, πρέπει να μπορεί να κινείται για να πλησιάζει συνεχώς και να κρατά σταθερή μια μικρή απόσταση, το “διάκενο κατεργασίας”, από την επιφάνεια του κομματιού, από την οποία και αφαιρείται υλικό. Για το λόγο αυτό προσαρμόζεται σε ειδική υποδοχή του μηχανισμού προώσεως κατά τον άξονα “Z” της εργαλειομηχανής. Το κομμάτι, που ηλεκτρικά αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο, προσδένεται πάνω στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Και τα δύο, κομμάτι και εργαλείο, είναι εμβαπτισμένα μέσα σε δοχείο γεμάτο με μονωτικό διηλεκτρικό υγρό (παραφινέλαιο, έλαιο μετασχηματιστών, ειδικά ορυκτέλαια, κηροζίνη) που ανακυκλοφορεί συνεχώς.



Σχήμα 1.5:

Τυπική διάταξη κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης με αποτύπωση

Η διάταξη ανακυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού, εκτός από την αντλία περιλαμβάνει φίλτρο καθαρισμού και ενδεχομένως, εναλλάκτη θερμότητας -διηλεκτρικού, νερού- για την απαγωγή της εκλυόμενης από τις εκκενώσεις, θερμότητας. Κομμάτι και εργαλείο συνδέονται αντίστοιχα σε ειδική ηλεκτρική τροφοδοτική μονάδα (γεννήτρια), που παρέχει την αναγκαία τάση

και ισχύ και καθορίζει ηλεκτρονικά την ένταση του ρεύματος, καθώς και τη διάρκεια και τη συχνότητα των εκκενώσεων. Το αυτόματο σύστημα ελέγχου του μηχανισμού προώσεως του εργαλείου, εξασφαλίζει συνεχώς κατά την διάρκεια τη κατεργασίας ένα σταθερό διάκενο 25 έως 50 μm μεταξύ των απέναντι επιφανειών εργαλείου - κομματιού.

Η ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων εργαλείο-κομμάτι γίνεται μόνο, όταν η εφαρμοζόμενη από την τροφοδοτική μονάδα τάση είναι ίση προς την “τάση διασπάσεως” του μεταξύ τους διακένου. Αρχικά δεν υπάρχει ροή ρεύματος ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, γιατί στο διάκενο υπάρχει διηλεκτρικό το οποίο είναι μονωτής. Ωστόσο, καθώς το διάκενο μειώνεται, μειώνεται και η αντίστασή του, με αποτέλεσμα μετά από ένα συγκεκριμένο διάκενο και κάτω να δημιουργείται ηλεκτρική εκκένωση και να έχουμε ροή ρεύματος, η οποία συντελεί στην ανάπτυξη θερμότητας. Η τάση διασπάσεως του διακένου εξαρτάται τόσο από το σχήμα και την απόσταση στην οποία βρίσκονται μεταξύ τους τα δύο ηλεκτρόδια, όσο και από τις μονωτικές ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου διηλεκτρικού υγρού, και είναι της τάξεως των 15 έως 25 Volt.

Στην πραγματικότητα μετά από κάθε εκκένωση έχουμε επιφανειακή τήξη (ή ακόμα και εξάχνωση) - από την παραγόμενη κατά την διάσπαση του διακένου θερμότητα - και αφαίρεση υλικού και στα δύο ηλεκτρόδια. Στις αντίστοιχες θέσεις των εκκενώσεων δημιουργούνται πολύ μικροί αβαθείς κρατήρες. Στο τέλος κάθε εκκενώσεως, το λιωμένο υλικό σε σφαιροειδή μορφή παρασύρεται από το διηλεκτρικό υγρό που κυκλοφορεί, απομακρύνεται από τον κρατήρα και συγκρατείται μέσα στο φίλτρο.

Όπως αναφέρθηκε, εκτός από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, έχουμε αφαίρεση υλικού και από το εργαλείο, γεγονός ανεπιθύμητο, καθώς μειώνει τη διάρκεια ζωής του και συντελεί στην αύξηση του κόστους της κατεργασίας. Το ζήτημα αυτό όμως λύνεται με τη σωστή επιλογή διαφόρων παραμέτρων, όπως είναι το κατάλληλο για την κατεργασία υλικό εργαλείου, η σωστή ρύθμιση της γεννήτριας τροφοδοτήσεως για την διάρκεια, την ένταση και τη συχνότητα των εκκενώσεων, και η πολικότητα των ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται στην πράξη πολύ σημαντική ασυμμετρία φθοράς, η οποία φτάνει στο επίπεδο 99,5% αφαίρεση υλικού από το ηλεκτρόδιο –

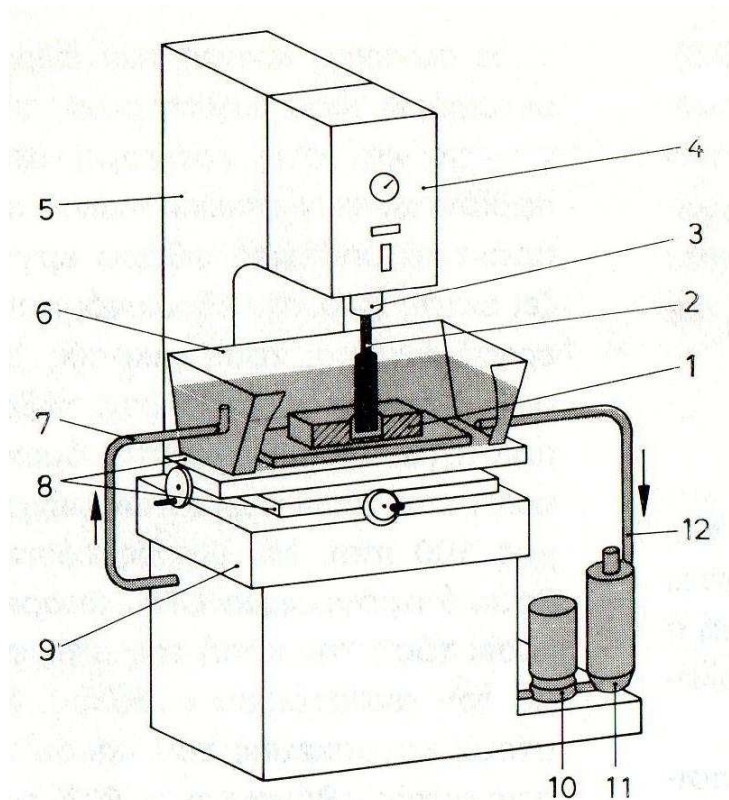
κομμάτι και μόνο 0,5% αφαίρεση υλικού από το ηλεκτρόδιο – εργαλείο.

Από τα αναφερθέντα είναι εύκολο να συναχθεί ότι επειδή η διάσπαση του διακένου, δηλαδή η ηλεκτρική εκκένωση, πραγματοποιείται μεταξύ των στοιχειωδών επιφανειών ελάχιστης αποστάσεως εργαλείου - κομματιού, δημιουργείται βαθμιαία, με συνεχή και σταθερή πρόωση, κοιλότητα στο κομμάτι ακριβώς αντίστοιχη της μορφής του εργαλείου. Εκείνο που έχει μεγάλη σημασία είναι ότι, αντίθετα με τις συμβατικές μεθόδους κοπής, δε χρειάζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση **καμιά απολύτως επιβολή μηχανικής δυνάμεως** από το εργαλείο προς το τεμάχιο για την αφαίρεση του υλικού. Έτσι, είναι δυνατό τα εργαλεία/ηλεκτρόδια να κατασκευάζονται από σχετικά μαλακά και ευκολοκατέργαστα υλικά, όπως είναι ο χαλκός, ο ορείχαλκος, ο γραφίτης και άλλα.

1.3.2 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ

Στο **σχήμα 1.6** παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια υποσυστήματα μιας εργαλειομηχανής ηλεκτροδιαβρώσεως, σύμφωνα με τη διάταξη του σχήματος 1.5.

Μια εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης πρέπει οπωσδήποτε να μπορεί να ελέγχει και να ρυθμίζει το διάκενο της κατεργασίας, ώστε αυτό να παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκειά της. Γι' αυτό και είναι εξοπλισμένη με μηχανισμό ακριβείας, για την αυτόματη πρόωση της κεφαλής προσδέσεως του εργαλείου – ηλεκτροδίου κατά τον άξονα “Z”. Ο ρόλος του είναι να ελέγχει το διάκενο, έτσι ώστε να γίνεται σωστά η αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο και να προστατεύεται το εργαλείο. Επίσης, μέσω του ελέγχου του διακένου, ελέγχεται και η τάση διάσπασής του, και έτσι αποφεύγονται λανθασμένες εκκενώσεις και βραχυκυκλώματα.



- 1) Κομμάτι για κατεργασία.
- 2) Εργαλείο - ηλεκτρόδιο.
- 3) Κεφαλή - φορέας του εργαλείου.
- 4) Κιβώτιο μηχανισμού προώσεως του εργαλείου.
- 5) Κορμός.
- 6) Λεκάνη.
- 7) Σωλήνας προσαγωγής του διηλεκτρικού υγρού.
- 8) Σεπόρτι για δύο κάθετες κινήσεις.
- 9) Τραπέζι.
- 10) Αντλία διηλεκτρικού.
- 11) Φίλτρο.
- 12) Σωλήνωση επιστροφής διηλεκτρικού.

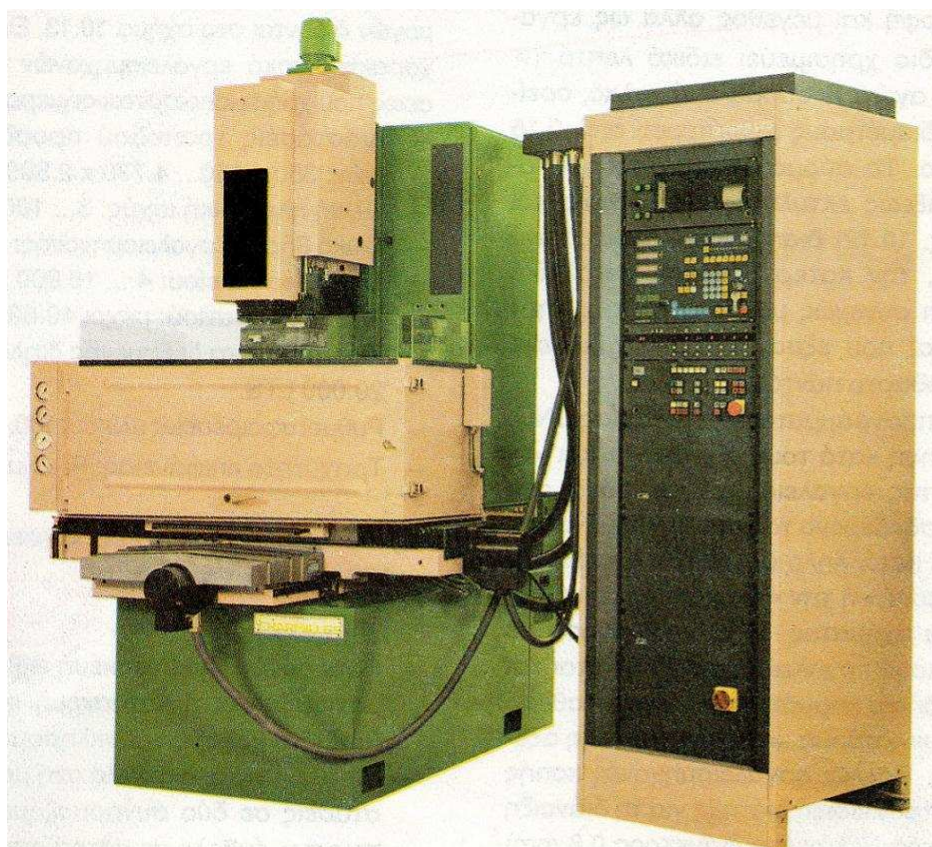
Σχήμα 1.6:

Σχηματική αναπαράσταση εργαλειομηχανής ηλεκτροδιαβρώσεως αποτύπωσης

Πολλές εργαλειομηχανές φέρουν κατάλληλη διάταξη εργαλειοθήκης και μηχανισμό που καθιστά δυνατή την αυτόματη εναλλαγή των εργαλείων – ηλεκτροδίων, προκειμένου να γίνονται ευκολότερα οι κατεργασίες που απαιτούν τη χρήση πάνω του ενός εργαλείων, αλλά και να μειώνεται ο χρόνος για την περάτωσή τους.

Οι περισσότερες εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης σήμερα, είναι εξοπλισμένες με μονάδα CNC για τον προγραμματισμό της λειτουργίας τους, καθώς η χρήση τους έχει επεκταθεί σε τομείς που απαιτούν ποσότητα και

μεγάλη ταχύτητα για μαζική παραγωγή, ακρίβεια στις διαστάσεις και χαρακτηριστικά υψηλής ποιότητας από κάθε άποψη. Τέτοιοι είναι ο τομέας της αεροναυπηγικής, όπου η EDM χρησιμοποιείται για την κατεργασία σκληρομετάλλων, για τη διάνοιξη οπών ακριβείας κ.α., και ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου χρησιμοποιείται στην κατεργασία μεγάλων καλουπιών διαμορφώσεως μερών αυτοκινήτων. Στο **σχήμα 1.7** παρουσιάζεται μια τυπική CNC εργαλειομηχανή ηλεκτροδιαβρώσεως αποτύπωσης.



Σχήμα 1.7
Εργαλειομηχανή ηλεκτροδιαβρώσεως αποτύπωσης CNC

1.3.3 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

Στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης, κομμάτι και εργαλείο συνδέονται στη γεννήτρια τροφοδότησης, η οποία αποτελεί ειδική ηλεκτρική τροφοδοτική μονάδα που παρέχει την αναγκαία τάση και ισχύ και καθορίζει ηλεκτρονικά την ένταση του ρεύματος, καθώς και τη διάρκεια και τη συχνότητα των εκκενώσεων. Οι γεννήτριες τροφοδότησης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η παραγωγή των

παλμών:

- Περιστρεφόμενες παλμογεννήτριες, οι οποίες έχουν πολύ περιορισμένη εφαρμογή.
- Γεννήτριες αποφόρτισης ή αποθήκευσης, με κυκλώματα τροφοδοσίας μέσω πυκνωτών, πηνίων ή συνδυασμών τους.
- Στατικές παλμογεννήτριες, όπου το σύστημα τροφοδοσίας της τάσης συνδέεται μέσω συστοιχίας διακοπών με τον αγωγό εκκένωσης. Η διάρκεια και η σειρά των εκκενώσεων εξαρτάται κυρίως από την διαδοχή των φάσεων λειτουργίας των διακοπών.

Ο κύριος παράγοντας καθορισμού της μορφής των παλμών της τάσης και της έντασης του ρεύματος, είναι το διάκενο μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου. Είναι προφανές ότι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, οι συνθήκες που επικρατούν στο διάκενο μεταβάλλονται συνεχώς, λόγω της αλλαγής των ιδιοτήτων του διηλεκτρικού και ανάλογα με τις συνθήκες αποβολής υλικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζονται με μια στοχαστική σειρά διάφορες μορφές παλμών. Στο **σχήμα 1.8** παρουσιάζονται οι διάφορες μορφές παλμών που παράγονται από μια στατική παλμογεννήτρια.

Για τους παλμούς ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

- Η χρονική διάρκεια του παλμού, t_i

$$t_i = t_d + t_e$$

- Η χρονική διάρκεια κατά την πρώτη φάση της εκκένωσης, t_d
- Η χρονική απόσταση μεταξύ των παλμών, t_p
- Ο λόγος χρονικής επαφής, τ

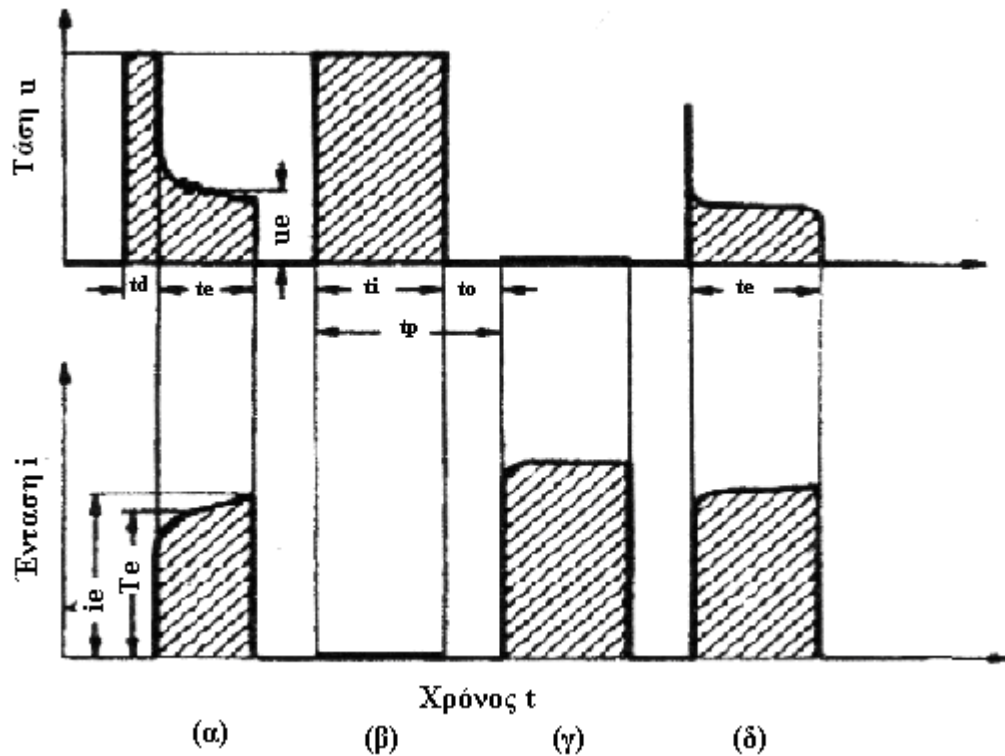
$$\tau = \frac{t_i}{t_p}$$

- Η συχνότητα εκκένωσης, f_e , ως ο αριθμός των πραγματοποιούμενων εκκενώσεων στον αγωγό εκκένωσης στη μονάδα του χρόνου,

$$f_e = \frac{1}{t_e}$$

- Η παλμική συχνότητα, f_p , ως ο αριθμός των τασικών παλμών στη μονάδα του χρόνου,

$$f_p = \frac{1}{t_p}.$$



Σχήμα 1.8: Παλμοί τάσης και έντασης του ρεύματος σε μια στατική παλμογεννήτρια

- (α) Παλμός εκκένωσης (κανονικό διάκενο)
- (β) Παλμός εν κενώ (πολύ μεγάλο διάκενο)
- (γ) Βραχυκύκλωμα (μηδενικό διάκενο)
- (δ) Εσφαλμένη εκκένωση (πολύ μικρό διάκενο)

Στην πράξη, για να επιτευχθεί σχετική συντόμευση στο χρόνο κατεργασίας, η κατασκευή πολύπλοκων τεμαχίων ή η ταυτόχρονη κατεργασία περισσότερων τεμαχίων, χρησιμοποιούνται συχνά και πολλαπλού τύπου γεννήτριες, δηλαδή γεννήτριες που μπορεί να τροφοδοτούν συγχρόνως περισσότερα του ενός εργαλεία, είτε διαδοχικά, είτε και ταυτόχρονα.

1.3.4 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης γίνεται μέσα σε ένα μέσο κατεργασίας που συνήθως είναι διηλεκτρικό υγρό. Ο κύριος ρόλος του διηλεκτρικού αυτού είναι:

- η δημιουργία διακένου ορισμένης διηλεκτρικής σταθεράς,
- η απομάκρυνση από το διάκενο των αφαιρούμενων μεταλλικών τεμαχιδίων,
- η ψύξη της περιοχής κατεργασίας για την απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμότητας από τις αλληπάλληλες διασπάσεις.

Τα κατάλληλα διηλεκτρικά υγρά είναι, συνήθως, ενώσεις υδρογονανθράκων (βενζίνη, πετρέλαιο, έλαια μετασχηματιστών, ειδικά ορυκτέλαια, κηροζίνη κλπ). Τελευταία, για τη μικροκατεργασία και για την κοπή με ηλεκτροδιάβρωση με κινούμενο σύρμα - ηλεκτρόδιο, επιτυγχάνονται καλά αποτελέσματα και με απιονισμένο νερό ως μέσο κατεργασίας.

1.3.5 ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ

Γενικά, κάθε υλικό που είναι αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ηλεκτροδίων. Η πράξη όμως έχει αποδείξει ότι για να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, επιβάλλεται να επιλέγονται υλικά ηλεκτροδίου λαμβάνοντας υπ' όψιν κάθε φορά:

- το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου
- το είδος της κατεργασίας που πρόκειται να γίνει
- τον τύπο της γεννήτριας που διαθέτει η εργαλειομηχανή
- την αντίσταση του υλικού σε φθορά
- την επιθυμητή ποιότητα παραγόμενης επιφάνειας
- το κόστος πρώτων υλών και κατασκευής

Ως υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως ο χαλκός, κράματά του με τελλούριο ή βολφράμιο, ο γραφίτης, και σε ειδικές περιπτώσεις ο ορείχαλκος, το καρβίδιο του βολφραμίου και κράματα αργύρου και βολφραμίου. Στο **σχήμα 1.9** διακρίνονται κάποια από τα υλικά ηλεκτροδίων, με την αντίστοιχη πολικότητα

που τους εφαρμόζεται και το υλικό που κατεργάζονται.

ELECTRODE	POLARITY*	WORKPIECE	CORNER WEAR	CAPACITANCE
Copper	+	Steel	2 - 10%	No
Copper	+	Inconel	2 - 10%	No
Copper	+	Aluminum	< 3%	No
Copper	-	Titanium	20 - 40%	Yes
Copper	-	Carbide	35 - 60%	Yes
Copper	-	Copper	35 - 45%	Yes
Copper	-	Copper Tungsten	40 - 60%	Yes
Copper Tungsten	+	Steel	1 - 10%	No
Copper Tungsten	-	Copper	20 - 40%	Yes
Copper Tungsten	-	Copper Tungsten	30 - 50%	Yes
Copper Tungsten	-	Titanium	15 - 25%	Yes
Copper Tungsten	-	Carbide	35 - 50%	Yes
Graphite	+	Steel	< 1%	No
Graphite	-	Steel	30 - 40%	No
Graphite	+	Inconel	< 1%	No
Graphite	-	Inconel	30 - 40%	No
Graphite	+	Aluminum	< 1%	No
Graphite	-	Aluminum	10 - 20%	No
Graphite	-	Titanium	40 - 70%	Yes

* Denotes Electrode Polarity

Σχήμα 1.9: Υλικά ηλεκτροδίων

Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται είτε με κατεργασία σε συνήθεις εργαλειομηχανές, είτε με χύτευση, είτε με ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (για την περίπτωση του χαλκού κυρίως). Για κατεργασία κομματιών πολύ μεγάλων διαστάσεων γίνεται ψυχρή διαμόρφωση ελασμάτων χαλκού, κατά την οποία το σχήμα που δίνεται στο χάλκινο έλασμα ενισχύεται εσωτερικά με μεταλλικές νευρώσεις, για να αντέχει στις μηχανικές και υδροδυναμικές (από την εξαναγκασμένη ροή του διηλεκτρικού στο διάκενο) καταπονήσεις. Για την καλύτερη κυκλοφορία διηλεκτρικού στα πολύπλοκα εργαλεία, συχνά διανοίγονται αρκετές διαμπερείς οπές μικρής διαμέτρου (~ 0,35-0,5 mm) στο σώμα τους.

1.3.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην ηλεκτροδιάβρωση, μεταξύ άλλων, οι εξής παράμετροι παίζουν ρόλο στο αποτέλεσμα της κατεργασίας:

- Η τάση που εφαρμόζεται στο διάκενο
- Η ένταση του ρεύματος
- Η πολικότητα που επιλέγεται για το εργαλείο
- Η χρονική διάρκεια των παλμών
- Η χρονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών
- Το υλικό κατασκευής του ηλεκτροδίου
- Η ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης W_e , η οποία δίνεται από τη σχέση

$$W_e = \int_{t_e} u_e(t) i_e(t) dt \approx \bar{u}_e \bar{i}_e t_e ,$$

όπου $\bar{u}_e$ και $\bar{i}_e$ είναι η μέση τάση και η μέση ένταση της εκκένωσης αντίστοιχα και t_e η χρονική διάρκεια της. Η ενέργεια προφανώς μεταβάλλεται με τη μεταβολή οποιουδήποτε εκ των τριών μεγεθών.

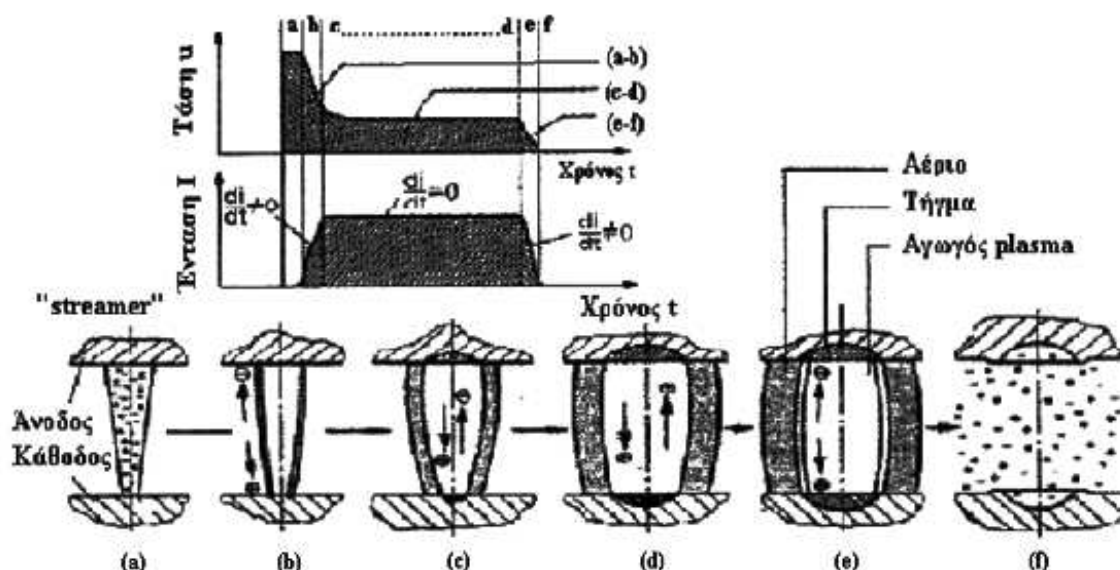
Στην ηλεκτροδιάβρωση ορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- Η αποβολή υλικού ανά εκκένωση, V_{We} , που είναι ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται από το κατεργάσιμο τεμάχιο σε μία εκκένωση.
- Η φθορά ανά εκκένωση, V_{Ee} , που είναι ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται από το ηλεκτρόδιο – εργαλείο ανά εκκένωση.
- Ο ρυθμός αποβολής υλικού, v_w , που είναι ο ανά μονάδα χρόνου όγκος αποβολής υλικού από το κατεργάσιμο τεμάχιο.
- Η ταχύτητα φθοράς, v_E , που είναι ο ανά μονάδα χρόνου όγκος αποβολής του υλικού από το ηλεκτρόδιο – εργαλείο.
- Η σχετική φθορά εργαλείου, θ , που είναι η σχέση της ταχύτητας φθοράς v_E με το ρυθμό αποβολής υλικού v_w .

$$\theta = v_E / v_w$$

1.3.7 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

Ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο πραγματοποιείται η κατεργασία έχει αποτελέσει θέμα εκτεταμένης έρευνας και αρκετές θεωρίες έχουν προταθεί, χωρίς καμία ωστόσο να είναι πλήρης και να εξηγεί στο σύνολό της τα παρατηρούμενα φαινόμενα. Οι κυριότερες απ' αυτές είναι η ηλεκτρομηχανική, η θερμομηχανική και η θερμοηλεκτρική, η οποία και αποτελεί την πλέον παραδεκτή προσέγγιση. Οι διάφορες φάσεις που πραγματοποιείται η εκκένωση και η αποβολή υλικού με βάση τη θεωρία αυτή φαίνονται διαγραμματικά στο **σχήμα 1.10**, όπου παρουσιάζεται και η μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης και της έντασης του ρεύματος εκκένωσης σε σχέση με τη χρονική διάρκειά τους.



Σχήμα 1.10:Μηχανισμός αποβολής υλικού κατά την ηλεκτροδιάβρωση

Κατά την έναρξη της εκκένωσης υπάρχει μία χρονικά ταχεία μεταβολή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και δημιουργείται ένας έντονα ιονισμένος αγωγός εκκένωσης από τη διάσπαση του διηλεκτρικού (**σχήμα 1.10-a**). Με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα του διηλεκτρικού κινούνται προς την κατεύθυνση της αντίθετης πολικότητας ηλεκτροδίων. Τα πολύ γρήγορα κινούμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με μόρια του διηλεκτρικού, επιταχύνονται, συγκρούονται και πάλι με μόρια και, από την αλυσιδωτή αυτή αντίδραση, δημιουργείται σε πολύ

σύντομο χρονικό διάστημα ο αγωγός εκκένωσης. Σύμφωνα με άλλες θεωρίες, ο μηχανισμός διάσπασης πραγματοποιείται από την αναπτυσσόμενη θερμότητα που έχει ως συνέπεια την εξάτμιση του διηλεκτρικού μέσου.

Ο έντονα ιονισμένος αγωγός εκκένωσης επιτρέπει τη δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος μεγάλης έντασης. Η εκλυόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την εκκένωση μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, που έχει ως αποτέλεσμα να αρχίζει η τήξη και η ακαριαία εξάτμιση ορισμένου όγκου υλικού στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων (**σχήμα 1.10-b**). Η ένταση του ρεύματος εκκένωσης αποκτά τότε τη μέγιστη τιμή της. Δημιουργείται στον κλάδο της εκκένωσης ένας αγωγός πλάσματος (ιονισμένο αέριο μεγάλης θερμοκρασίας 8000-12000°C), που αποτελείται από θετικά φορτισμένα ιόντα μετάλλου και αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια από την εξάτμιση των υλικών των ηλεκτροδίων και από ουδέτερα μεταλλικά άτομα.

Στις επόμενες φάσεις, η ένταση του ρεύματος εκκένωσης παραμένει χρονικά σταθερή, στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ένας ορισμένος όγκος μετάλλου τήκεται ή εξατμίζεται ακαριαία σχηματίζοντας ένα νέφος αερίου υψηλής πίεσης (της τάξης αρκετών εκατοντάδων ατμοσφαιρών) και δημιουργείται ένας κρατήρας (**σχήμα 1.10-c και d**). Ο αγωγός πλάσματος και το νέφος του αερίου αυξάνονται σταθερά.

Με τη διακοπή της ηλεκτρικής τάσης (**σχήμα 1.10-e**), η πίεση του νέφους μειώνεται απότομα, ο αγωγός πλάσματος και το νέφος διασπώνται και το, εν μέρει ρευστό εν μέρει εξαερωμένο, υλικό απομακρύνεται υπό σφαιροειδή μορφή από τον κρατήρα μέσω του διηλεκτρικού υγρού (**σχήμα 1.10-f**).

Ο όγκος του υλικού που αφαιρείται από το εργαλείο και το κατεργάσιμο τεμάχιο σε μία εκκένωση δεν είναι ο ίδιος. Εξαρτάται κυρίως από την πολικότητα και τις ιδιότητες του υλικού των ηλεκτροδίων καθώς επίσης από τη διάρκεια και το ρεύμα της εκκένωσης. Με κατάλληλη εκλογή του υλικού του εργαλείου - ηλεκτροδίου και με αλλαγή των παραμέτρων εκκένωσης μπορεί να επιτευχθεί μία σημαντική ασυμμετρία, π.χ. 99,5 % αφαίρεση του υλικού στο τεμάχιο - ηλεκτρόδιο και 0,5 % στο εργαλείο – ηλεκτρόδιο. Ο ρυθμός αποβολής υλικού εξαρτάται σημαντικά και από τον τρόπο κυκλοφορίας του

διηλεκτρικού υγρού. Η αναγκαστική ροή του διηλεκτρικού απομακρύνει τα σωματίδια φθοράς και η ταχύτητα της κατεργασίας βελτιώνεται.

Ο ρυθμός αποβολής υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, v_w , αυξάνεται στην αρχή με την αύξηση της χρονικής διάρκειας του παλμού, t_i , αποκτά μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια ελαττώνεται. Η ελάττωση αυτή του v_w οφείλεται στο ότι με την αύξηση της χρονικής διάρκειας του παλμού αυξάνεται το ποσό της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του υλικού και ο αγωγός εκκένωσης μεγαλώνει. Μετά την επίτευξη της βέλτιστης διαμέτρου του αγωγού, κατά τη χρονική στιγμή t_{opt} , αυξάνουν οι απώλειες ενέργειας λόγω απαγωγής στα ηλεκτρόδια και στο διηλεκτρικό μέσο και λόγω ακτινοβολίας και, συνεπώς, με την περαιτέρω αύξηση της διάρκειας του παλμού μειώνεται η ταχύτητα αποβολής υλικού. Επίσης, με την αύξηση του ρεύματος εκκένωσης, αυξάνεται γενικά η ταχύτητα αποβολής λόγω της αύξησης του ωφέλιμου ποσού της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του υλικού.

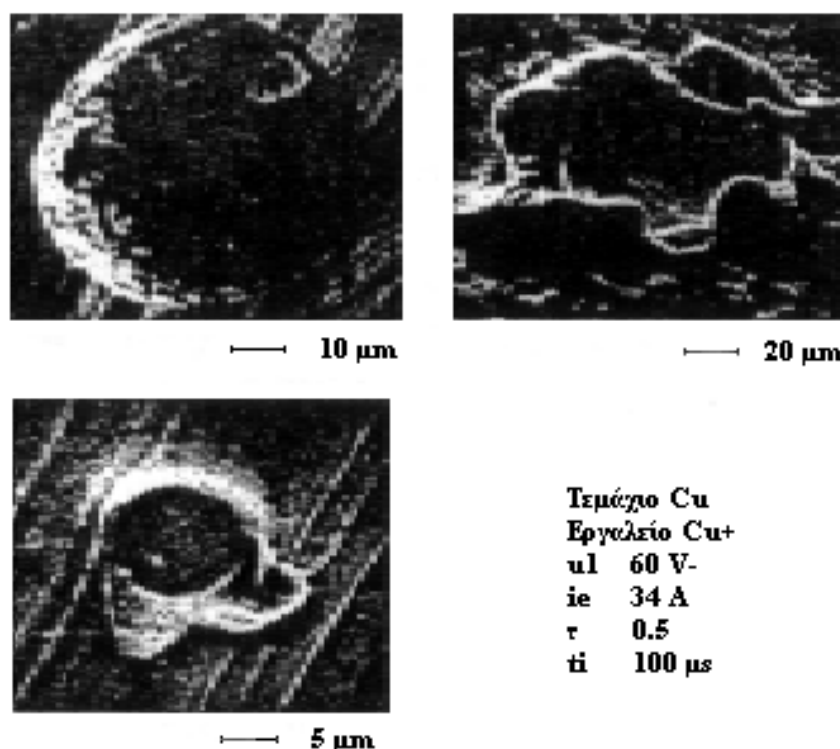
Όσον αφορά τη σχετική φθορά του εργαλείου, για το χαλκό αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος εκκένωσης, καθώς αυξάνεται το τηκόμενο υλικό του ηλεκτροδίου αλλά και το ποσό του υλικού που εξαερώνεται κατά την έναρξη της εκκένωσης. Αντίθετα, στο γραφίτη παρουσιάζεται μείωση της φθοράς με την αύξηση της μέσης έντασης της εκκένωσης (για θετική πολικότητα εργαλείου). Συνεπώς, ο γραφίτης είναι πλέον κατάλληλος για κατεργασίες εκχόνδρισης όπου χρησιμοποιούνται μεγάλες εντάσεις ρεύματος εκκένωσης, ενώ ο χαλκός είναι προτιμητέος στις τελικές κατεργασίες, όπου απαιτούνται μικρή διάρκεια εκκένωσης και μικρές εντάσεις ρεύματος εκκένωσης. Τέλος, με την αύξηση της διάρκειας του παλμού αυξάνεται η σχετική φθορά του εργαλείου.

1.3.8 ΠΙΣΤΟΤΗΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

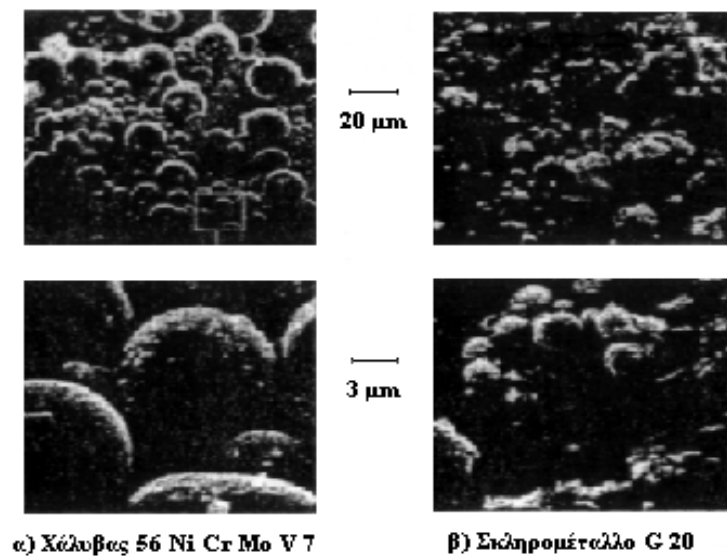
Στις εφαρμογές της ηλεκτροδιάβρωσης δίνεται μεγάλη έμφαση στις μεταλλουργικές αλλαγές, στη δημιουργία ζωνών θερμικής επίδρασης της παραγόμενης επιφάνειας, καθώς και στο συσχετισμό παραμέτρων της ηλεκτροδιάβρωσης με τις μηχανικές ιδιότητες της προκύπτουσας επιφάνειας.

Ο συσχετισμός αυτός επιτυγχάνεται με τη συστηματική προσέγγιση της ομοιομορφίας (πιστότητας) της κατεργάσιμης επιφάνειας (surface integrity) .

Ο κύριος μηχανισμός της ηλεκτροδιάβρωσης είναι το θερμικό φαινόμενο, πλην όμως υπεισέρχονται και μηχανικά φαινόμενα. Η δημιουργία κρατήρα στο κατεργάσιμο τεμάχιο (**σχήμα 1.11**), η σφαιροειδής μορφή των αποβαλλομένων τεμαχίων του υλικού κατά την κατεργασία χάλυβα (**σχήμα 1.12-α**), η αλλαγή της δομής των υλικών των ηλεκτροδίων, οι παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις και οι εμφανιζόμενες μικρορωγμές στην επιφάνεια του κατεργάσιμου τεμαχίου είναι σαφή δείγματα του θερμικού φαινομένου που λαμβάνει χώρα. Επιπλέον, η μορφή του κρατήρα (**σχήμα 1.12-α**), είναι συνέπεια όχι μόνο του θερμικού φαινομένου, αλλά και μηχανικών κρουστικών φορτίσεων. Γενικά, στην ηλεκτροδιάβρωση ψαθυρών υλικών τα οποία έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες τήξης και εξαέρωσης (**σχήμα 1.12-β**), η συμβολή του μηχανικού φαινομένου στην κατεργασία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με υλικά με μικρότερο σημείο τήξης.



Σχήμα 1.11: Διάφορες μορφές κρατήρα στο κατεργάσιμο τεμάχιο κατά την ηλεκτροδιάβρωση χαλκού με εργαλείο από χαλκό



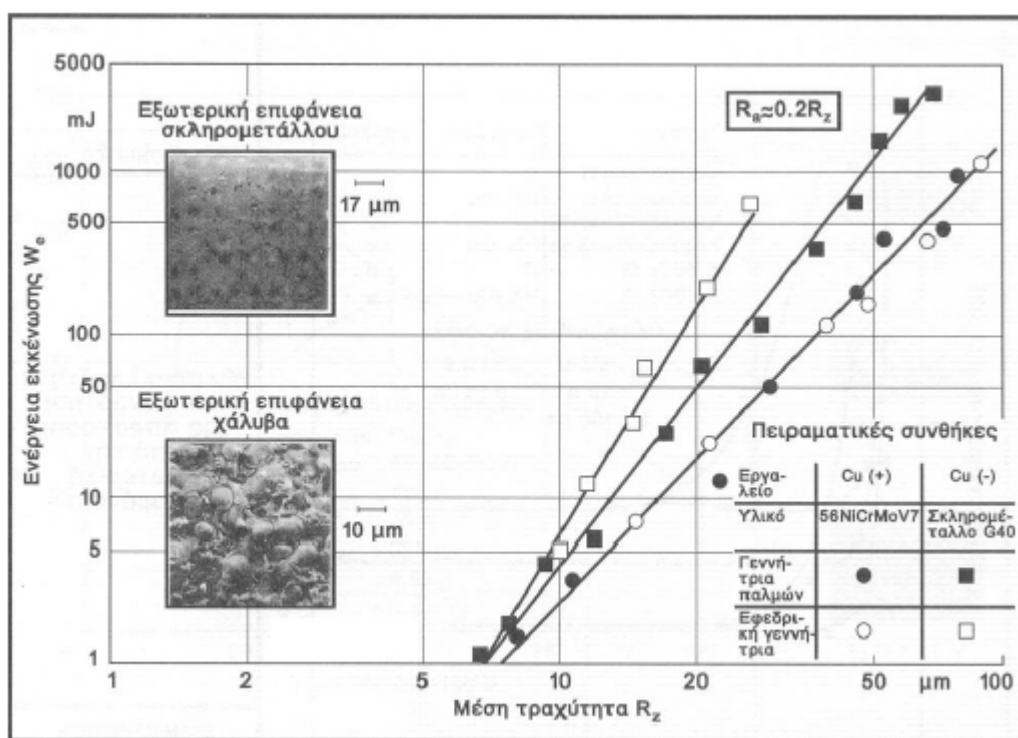
Εργαλείο γραφίτης	Δηλεκτρικό Shell - Sol - T
ie 28 A	τ 0.5
ti 100 μs	ul 150 V

Σχήμα 1.12: Μορφές αφαιρούμενων μεταλλικών τεμαχίων κατά την ηλεκτροδιάβρωση με εργαλείο από γραφίτη για υλικό: α)χάλυβα, β)σκληρομέταλλο

Τα προηγούμενα έχουν ως αποτέλεσμα η τοπογραφία της ηλεκτροδιαβρωμένης επιφάνειας να μπορεί να περιγραφεί ως μια γεωμετρία επαλληλίας κρατήρων. Η μορφή αυτή της επιφάνειας ανταποκρίνεται στη στοχαστική μορφή της κατεργασίας, που σε συνδυασμό με το θερμικό φαινόμενο, δημιουργεί επάλληλους κρατήρες με επιφανειακές σταγόνες επανατηγμένου υλικού, επιφανειακές κηλίδες και μικρορωγμές. Κατά συνέπεια, η ηλεκτροδιαβρωμένη επιφάνεια παρουσιάζει μια αρκετά τραχεία (μη στιλπνή) εμφάνιση, ενώ η επιφανειακή τραχύτητα γίνεται αντιληπτή και με την αφή.

Η μέση αριθμητική τραχύτητα R_a εξαρτάται από το μέγεθος του κρατήρα εκκένωσης. Για την επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων αποβολής υλικού, v_w απαιτούνται μεγάλες ενέργειες εκκένωσης, όπου η προκύπτουσα τραχύτητα επιφάνειας είναι μεγάλη. Για την επίτευξη μικρής τραχύτητας επακολουθεί κατεργασία με μικρότερη ενέργεια και συνεπώς επιτυγχάνεται μικρή μέση αριθμητική τραχύτητα R_a . Η καλύτερη μέση τραχύτητα επιφάνειας που επιτυγχάνεται στην κατεργασία των σκληρομετάλλων έναντι αυτής των χαλύβων, οφείλεται στη μικρότερη αποβολή υλικού ανά εκκένωση. Γενικά, η

επιφανειακή τραχύτητα αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας του παλμού εκκένωσης (σχήμα 1.13). Σήμερα, με υβριδικές τεχνικές ηλεκτροδιάβρωσης μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν απόλυτα λεία επιφάνεια, ωστόσο το κόστος της μεθόδου αυτής είναι πολύ υψηλό για κοινή εμπορική χρήση.



Σχήμα 1.13: Επίδραση ενέργειας εκκένωσης στην επιφανειακή τραχύτητα

Η θερμική επίδραση πάνω σε μια επιφάνεια έχει και μια άλλη σημαντική συνέπεια, τη δημιουργία ζώνης πλαστικής παραμόρφωσης καθώς και την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων, σε αντίθεση προς τις μηχανικές κατεργασίες. Το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων και το βάθος διείσδυσης της λεπτής ζώνης πλαστικής παραμόρφωσης στα επιφανειακά στρώματα κατά την ηλεκτροδιάβρωση εξαρτώνται από την ενέργεια εκκένωσης. Μεγάλο ποσό εκλυόμενης ενέργειας είναι δυνατό να οδηγήσει σε χαλάρωση των τάσεων, πράγμα που οφείλεται κυρίως στη δημιουργία μικρών ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια.

Η ζώνη παραμόρφωσης στην ηλεκτροδιάβρωση, αν και εκτιμάται ότι εμπεριέχει και δευτερεύοντα ίχνη μηχανικής φόρτισης, χαρακτηρίζεται κυρίως από θερμικά φαινόμενα αλλαγής της μικροδομής και τη δημιουργία ενός

επιφανειακού λευκού ψαθυρού στρώματος (white layer) που αποκαλύπτεται με μεταλλογραφική προσβολή με κατάλληλο αντιδραστήριο (Nital). Στη ζώνη θερμικής επίδρασης αναγνωρίζονται σχηματικά τρία διακριτά στρώματα:

- το εξωτερικό επανατηγμένο λευκό στρώμα (white layer),
- ένα ενδιάμεσο (μεταβατικό) στρώμα,
- το αρχικό υλικό που αποτελεί τη βάση.

Το πάχος του εξωτερικού στρώματος και η ύπαρξη και το πάχος των άλλων ζωνών εξαρτώνται από το είδος του κατεργάσιμου υλικού και τα χαρακτηριστικά των παλμών. Διαπιστώνεται ότι η επιφάνεια του λευκού στρώματος χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη σκληρότητα (τριπλάσια και πλέον) σε σχέση με το αρχικό υλικό, οι τιμές όμως μειώνονται εκθετικά συναρτήσει του βάθους από την κατεργασμένη επιφάνεια και προσεγγίζουν την αρχική σκληρότητα σε βάθος μικρότερο των 500μm.

Η πιστότητα επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου εξαρτάται από το υλικό του τεμαχίου, την τραχύτητα επιφάνειας του εργαλείου, τον τρόπο κυκλοφορίας του διηλεκτρικού μέσου στο διάκενο, από την ένταση του ρεύματος και από τη διάρκεια παλμού. Οι εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης συνοδεύονται από νομογραφήματα κατεργασιμότητας, για την επιλογή των βελτίστων συνθηκών για δεδομένη κατεργασία. Ωστόσο λόγω της στοχαστικής φύσης της ηλεκτροδιάβρωσης, στην πράξη η σημασία τους είναι σχετική.

1.3.9 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η ηλεκτροδιάβρωση χρησιμοποιείται κυρίως για την κατεργασία εξαρτημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία, η οποία θα ήταν δύσκολο και οικονομικά ασύμφορο να παραχθεί με συνδυασμό συμβατικών κατεργασιών. Χρησιμοποιείται επίσης για την κατεργασία πολύ σκληρών υλικών, που κατεργάζονται δύσκολα με συμβατικές μεθόδους, καθώς και για τη μικροκατεργασία (micro-EDM) εύθραυστων υλικών. Παρά τη δυσκολία ανάπτυξης ενός ικανοποιητικού θεωρητικού μοντέλου, ή Η/Δ βρίσκει αρκετές εφαρμογές σε μεγάλη κλίμακα στη βιομηχανική παραγωγή. Με την ανάπτυξη νέων προηγμένων υλικών, την ανάγκη για δημιουργία ολοένα και πιο πολύπλοκων γεωμετριών με οικονομικό τρόπο, την οριακή βελτίωση, πλέον,

των δυνατοτήτων των συμβατικών εργαλειομηχανών και την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας, υπάρχουν σημαντικές προοπτικές για την ανάπτυξη της τεχνολογίας της ηλεκτροδιάβρωσης και την ακόμα ευρύτερη χρήση της.

2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως σύνθετο υλικό (composite material) μπορεί να χαρακτηριστεί ένα υλικό αποτελούμενο από δύο τουλάχιστον μακροσκοπικά διακρινόμενα συστατικά, συνδυασμένα για να επιτευχθούν ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Δεν είναι δηλαδή πολυφασικά υλικά στα οποία οι διαφορετικές φάσεις σχηματίζονται φυσικά από αντιδράσεις, μετασχηματισμούς φάσεων ή άλλα φαινόμενα. Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα πρέπει να έχει προκύψει ως συνδυασμός συστατικών μερών, για τα οποία οι ιδιότητες του ενός είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός δεν είναι πολύ μικρή (πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 10%). Με άλλα λόγια, σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη, τα οποία έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Το ένα από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: 1)Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών, 2)Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων και 3)Στρωματικά σύνθετα υλικά. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών, συγκεκριμένα άνθρακα.

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης

είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών άνθρακα, ειδικά αυτά με μήτρα πολυμερούς, έχουν γίνει το κυρίαρχα εξελιγμένο σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες αεροσκαφών, αυτοκινήτων, αθλητικών κ.α. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην υψηλή τους αντοχή, στην χαμηλή τους πυκνότητα και στο προσιτό τους κόστος. Επίσης, αυτά με μήτρα άνθρακα, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή θερμοκρασιακή αντοχή (π.χ. διαστημόπλοια). Γενικότερα, η αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα που παρατηρείται στον κλάδο των σύνθετων υλικών, μας δίνει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα για ολοένα και μεγαλύτερες εφαρμογές τους.

2.2 ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

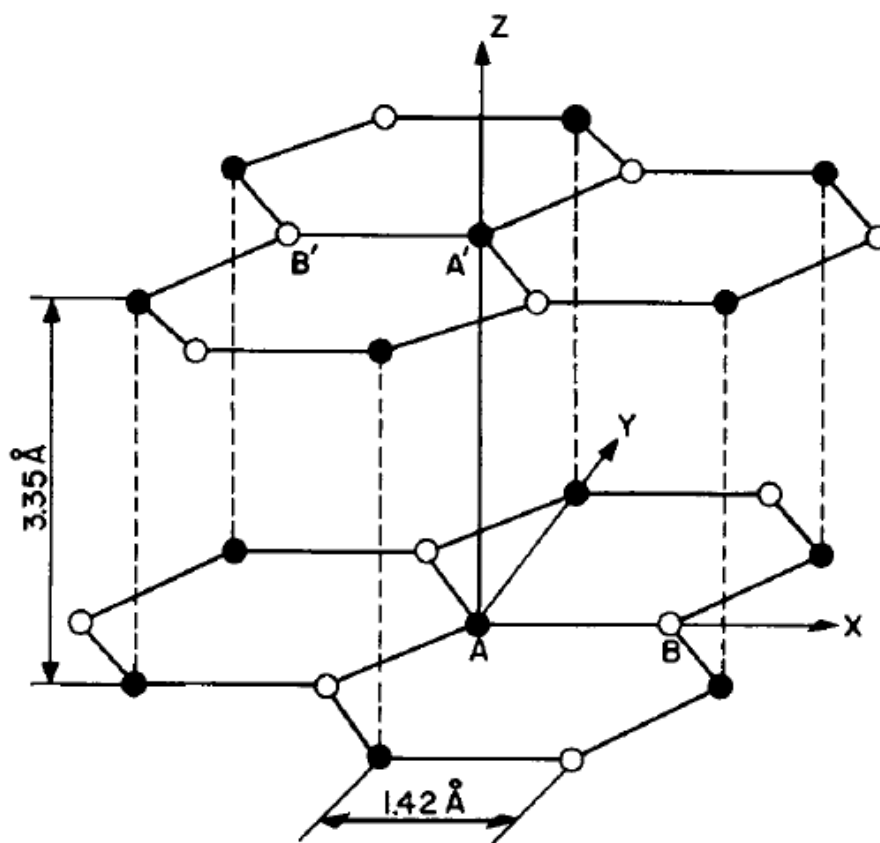
2.2.1 ΔΟΜΗ-ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Ο όρος ίνες άνθρακα αναφέρεται στις ίνες που αποτελούνται από άνθρακα σε ποσοστό τουλάχιστον 92%. Οι ίνες μπορεί να είναι κοντές ή μακριές, ενώ η δομή τους μπορεί να είναι κρυσταλλική, εν μέρει κρυσταλλική ή τελείως άμορφη. Η κρυσταλλική τους μορφή, ακολουθεί την κρυσταλλική δομή του γραφίτη, ο οποίος αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων ο βαθμός ανισοτροπίας εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Το ποσοστό του γραφίτη σε μια ίνα μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 100%. Όταν αυτό είναι υψηλό, τότε η ίνα ονομάζεται γραφιτική.

Αυτή η εκδοχή, δηλαδή οι ίνες γραφίτη, είναι και η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων και ελαττωμένου βάρους σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών.

Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και στους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλινών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η

υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων, βλ. **σχήμα 2.1**. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση.

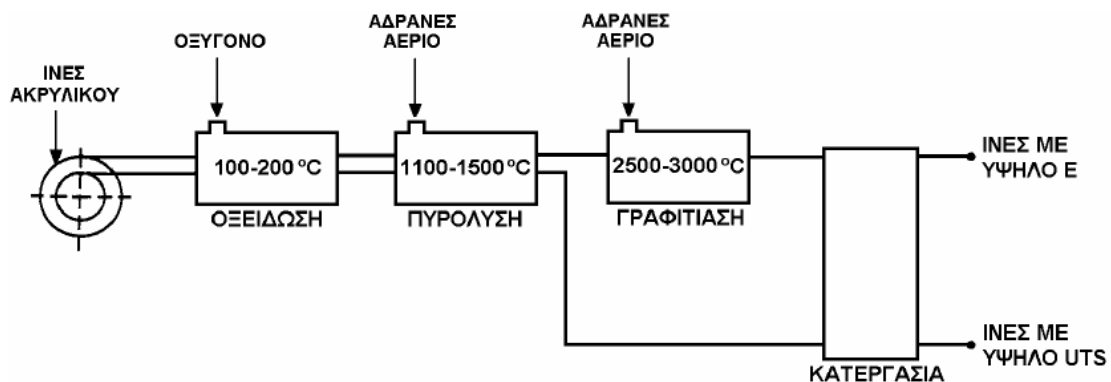


Σχήμα 2.1: Η κρυσταλλική δομή του γραφίτη

Στην παραγωγή των ανθρακονημάτων, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ίνες του πολυμερούς πολυακρυλονιτρίλιου (PAN). Η παραγωγή ινών άνθρακα από ίνες PAN πραγματοποιείται σε τρία στάδια (**σχήμα 2.2**):

- Οξείδωση των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200°C), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.

- Πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100-1500°C. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000MPa.
- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000°C), οπότε πραγματοποιείται γραφίτιωση, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus carbon fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400GPa, η δε διάμετρός τους είναι περίπου 10μm.



Σχήμα 2.2: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα

Στο **σχήμα 2.3** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ανθρακονημάτων που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (**ίνες υψηλής αντοχής-ΗΤ ίνες**) και σε τρία στάδια (**ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας-ΗΜ ίνες**).

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΗΤ-ΙΝΕΣ	ΗΜ-ΙΝΕΣ
Μέτρο ελαστικότητας (Gpa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (Mpa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα σε άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500
Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα		

Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500°C και για τους δύο τύπους ινών. Κατά το σχεδιασμό του συνθέτου πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της μήτρας.

Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την αρχιτεκτονική των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές ίνες, δισδιάστατο πλέγμα, τρισδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος διευθέτησης των ινών αυτών καθορίζει και το βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλλει από την πλήρη ισοτροπία ως την πλήρη ανισοτροπία. Η δυνατότητα επιλογής, από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων, δίνει την ευχέρεια παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφίτισης και διαφορετικών ιδιοτήτων (οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφίτισης και το βαθμό ανισοτροπίας). Γενικά, όσο καλύτερα προσανατολισμένες είναι οι ίνες και όσο υψηλότερη περιεκτικότητα σε γραφίτη διαθέτουν τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιδεικνύουν.

2.2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

ΓΕΝΙΚΑ

Οι ιδιότητες των ανθρακονημάτων μπορεί να ποικίλουν σε μεγάλο βαθμό, ανάλογα με τη δομή τους. Στα **πλεονεκτήματά** τους περιλαμβάνονται:

- χαμηλή πυκνότητα
- υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό
- χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής
- θερμική σταθερότητα σε περιβάλλον χωρίς οξυγόνο, πέραν των 3000°C
- εξαίρετη αντίσταση σε ερπυσμό
- χημική σταθερότητα, ιδιαίτερα απέναντι σε ισχυρά οξέα
- βιοσυμβατότητα
- υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση
- φθίνον κόστος σε σχέση με το χρόνο

Στα **μειονεκτήματά** τους περιλαμβάνονται:

- ανισοτροπία (στο διαμήκη σε σχέση με τον εγκάρσιο άξονα)
- χαμηλή παραμόρφωση έως τη θραύση
- μικρή αντοχή σε θλίψη σε σχέση με τον εφελκυσμό
- τάση οξειδωσης και μετατροπής σε αέριο (π.χ. CO) όταν θερμαίνονται με αέρα άνω των 400°C
- τα αλκαλικά περιβάλλοντα δρουν καταλυτικά στην τάση οξειδωσής τους

Εφ' όσον οι ιδιότητες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή, οι διαφορετικές ιδιότητες είναι αλληλοσχετιζόμενες. **Τα παρακάτω συνήθως συνοδεύουν το ένα το άλλο:**

- αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό
- μείωση της παραμόρφωσης ως την αστοχία
- μείωση της αντοχής σε θλίψη
- αύξηση της αντοχής σε διάτμηση
- αύξηση του βαθμού ανισοτροπίας
- μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης
- αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας
- μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής
- αύξηση πυκνότητας
- αύξηση της αντοχής σε οξείδωση
- αύξηση της χημικής σταθερότητας
- αύξηση του κόστους

Στα παρακάτω εδάφια θα δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στις ηλεκτρικές και στις θερμικές ιδιότητες, απ' ότι στις αντίστοιχες μηχανικές, καθώς αυτές είναι που μας απασχολούν κυρίως στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης (όπου δεν έχουμε επαφή εργαλείου-τεμαχίου).

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε εφελκυσμό των ανθρακονημάτων, είναι αισθητά χαμηλότερα από αυτά ενός κρυστάλλου

γραφίτη. Το μέτρο ελαστικότητας των HM ινών προσεγγίζει το μέτρο του κρυστάλλου γραφίτη, σε αντίθεση με αυτό των HT ινών που είναι πολύ χαμηλότερο. Η αντοχή σε εφελκυσμό και των δύο τύπων ινών είναι πολύ χαμηλότερο από του γραφίτη, με τις HT ίνες προφανώς να έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τις HM. Υπάρχουν πολλές προοπτικές για βελτίωση της αντοχής σε εφελκυσμό των ανθρακονημάτων, σε αντίθεση με το μέτρο ελαστικότητας που έχει φτάσει στα όρια ανάπτυξής του. Στο **σχήμα 2.4** διακρίνονται οι εφελκυστικές ιδιότητες κάποιων ανθρακονημάτων του εμπορίου.

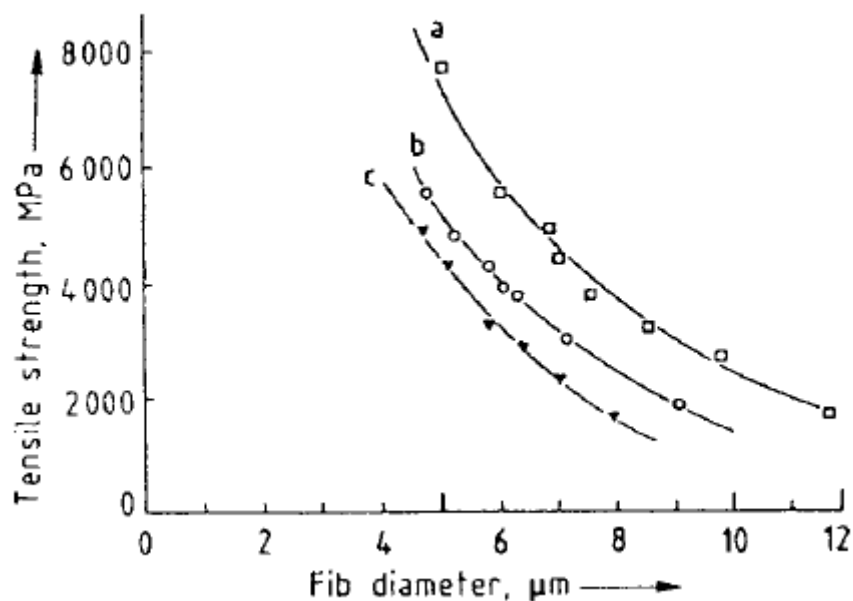
<i>Manufacturer</i>	<i>Fiber</i>	<i>Modulus (GPa)</i>	<i>Strength (GPa)</i>	<i>Strain to failure (%)</i>
<i>PAN-based, high modulus (low strain to failure)</i>				
Celanese	Celion GY-70	517	1.86	0.4
Hercules	HM-S Magnamite	345	2.21	0.6
Hysol Grafil	Grafil HM	370	2.75	0.7
Toray	M50	500	2.50	0.5
<i>PAN-based, intermediate modulus (intermediate strain to failure)</i>				
Celanese	Celion 1000	234	3.24	1.4
Hercules	IM-6	276	4.40	1.4
Hysol Grafil	Apollo IM 43-600	300	4.00	1.3
Toho Beslon	Sta-grade Besfight	240	3.73	1.6
Amoco	Thornel 300	230	3.10	1.3
<i>PAN-based, high strain to failure</i>				
Celanese	Celion ST	235	4.34	1.8
Hercules	AS-6	241	4.14	1.7
Hysol Grafil	Apollo HS 38-750	260	5.00	1.9
Toray	T 800	300	5.70	1.9

Σχήμα 2.4: Εφελκυστικές ιδιότητες ινών άνθρακα

Γενικά, η αντοχή σε εφελκυσμό επηρεάζεται πολύ από τυχόν ατέλειες στην κατασκευή (επιφανειακές ή εσωτερικές ατέλειες). Επίσης μεγαλώνει με τη μείωση του μήκους και τη μείωση της διαμέτρου της ίνας. Στο **σχήμα 2.5** διακρίνεται η εξάρτηση της αντοχής από την διάμετρο της ίνας, για τρεις τύπους ινών από PAN.

Η αντοχή σε θλίψη είναι αρκετά μικρότερη από αυτή σε εφελκυσμό, ενώ μειώνεται σε συνάρτηση με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Επίσης, ο λόγος της αντοχής θλίψης προς την αντοχή εφελκυσμού είναι μικρότερος στις γραφιτικές ίνες απ' ότι στις ανθρακικές ίνες. Τυχόν πτώση της

αντοχής σε θλίψη συνοδεύεται από μείωση και της αντοχής σε διάτμηση. Τέλος, όσον αφορά την αντοχή σε κάμψη, αυτή των ινών από PAN είναι αρκετά μεγάλη, σε αντίθεση με αυτή των ινών από πίσσα.



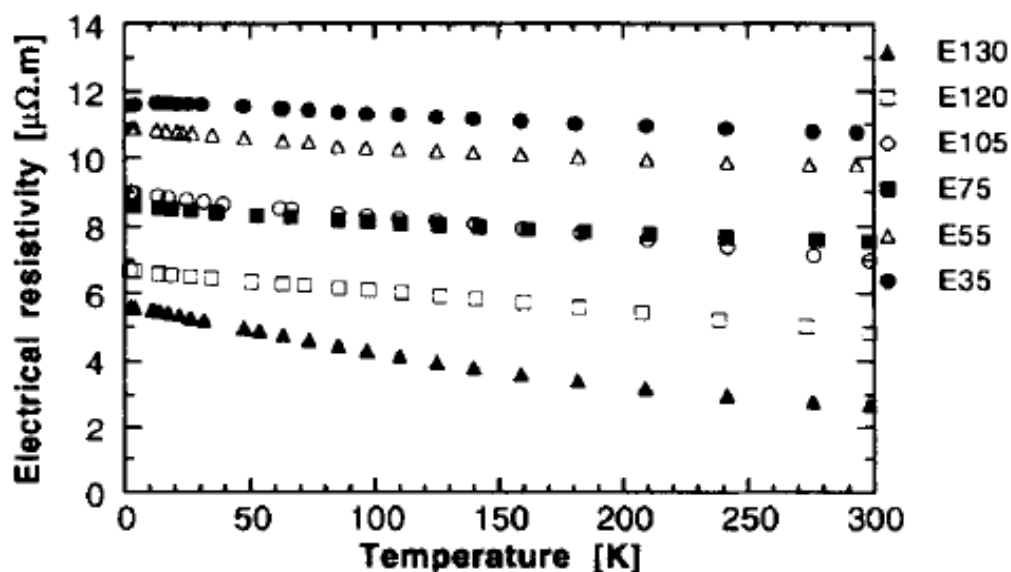
Σχήμα 2.5: Εξάρτηση αντοχής σε εφελκυσμό από τη διάμετρο ίνας (a)Hercules AS-4 (HT) (b)Torayca T-300 (HT) (c)Torayca M40 (HM)

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η ηλεκτρική αντίσταση για τους περισσότερους τύπους των ανθρακονημάτων, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στο **σχήμα 2.6** διακρίνεται αυτού του είδους η εξάρτηση. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της πυκνότητάς τους με αύξηση της θερμοκρασίας, όπως συμβαίνει και με τον άνθρακα και το γραφίτη. Επίσης, σε μια δοσμένη θερμοκρασία, η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας.

Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να μειώσουμε την αντίσταση των ανθρακονημάτων έως και 10 φορές, είναι η **παρεμβολή**. Παρεμβολή είναι η διαδικασία κατά την οποία ξένα άτομα (παρεμβολείς), εισέρχονται ανάμεσα στα στρώματα του άνθρακα. Οι παρεμβολείς δρουν είτε ως αποδέκτες, είτε ως δότες ηλεκτρονίων, «ντοπάροντας» έτσι τα ανθρακονήματα. Η διαδικασία αυτή συντελεί στην αύξηση της συγκέντρωσης του φορέα και συνεπώς σε πτώση της ηλεκτρικής του αντίστασης. Η παρεμβολή είναι δυνατή μόνο στις

γραφιτικές ίνες και μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της αντίστασης έως και 80%. Η αντίστοιχη αύξηση του βάρους των ινών μπορεί να φτάσει το 20% σε κάποιες περιπτώσεις. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η πιθανή πρόκληση φυσικών καταστροφών στις ίνες, τέτοιων που επηρεάζουν αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες και την αντίσταση σε οξείδωση.



Σχήμα 2.6: Εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης ινών άνθρακα από τη θερμοκρασία

Ένας άλλος τρόπος για να μειώσουμε την ηλεκτρική αντίσταση και να αυξήσουμε τη θερμική αγωγιμότητα των ανθρακονημάτων, είναι η εξωτερική επένδυσή τους με κάποιο μέταλλο περισσότερο αγωγίμο από τις ίνες. Όλοι οι τύποι ινών άνθρακα έχουν μεγαλύτερη αντίσταση από τα μέταλλα, κι έτσι όλα τα επενδυμένα με μέταλλο ανθρακονήματα είναι περισσότερο ηλεκτρικά αγωγίμα από τα αντίστοιχα «γυμνά». Ωστόσο, επειδή η θερμική αγωγιμότητα των γραφιτικών ινών είναι μεγαλύτερη ακόμη και από του χαλκού, η μεταλλική επένδυση αποδίδει τα αναμενόμενα μόνο στην περίπτωση ινών με χαμηλό ποσοστό γραφίτη (οι οποίες αποτελούν και τη συντριπτική πλειοψηφία των χρησιμοποιούμενων ινών). Άλλα αποτελέσματα που συνοδεύουν τη μεταλλική επένδυση, είναι αύξηση της πυκνότητας, αύξηση του συντελεστή θερμικής διαστολής και μείωση του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής σε εφελκυσμό.

ΛΟΙΠΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η ειδική θερμική αγωγιμότητα των ινών άνθρακα είναι εξαιρετικά μεγάλη, πολλές φορές μεγαλύτερη από αυτή του χαλκού. Γενικά, ο συντελεστής θερμικής διαστολής τους μειώνεται με αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Ειπώθηκε ότι οι ίνες άνθρακα έχουν εξαιρετική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Αυτό τις καθιστά εκτός από μέσο ενίσχυσης και μέσο βελτίωσης της ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας του σύνθετου υλικού, όταν χρησιμοποιούνται σε μήτρες μη-αγώγιμης φύσεως, όπως οι οργανικές και οι κεραμικές. Όσον αφορά την αντίσταση σε οξείδωση, αυτή μεγαλώνει όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του γραφίτη μέσα στην ίνα. Τέλος, επειδή ο άνθρακας είναι περισσότερο βιοσυμβατός ακόμη κι από το χρυσό ή το λευκόχρυσο, όλο και συχνότερα χρησιμοποιούνται ίνες άνθρακα στη βιοϊατρική τεχνολογία ως εμφυτεύματα.

2.3 ΜΗΤΡΕΣ

2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Αν οι ίνες συνεισφέρουν στην υψηλή μηχανική αντοχή του σύνθετου υλικού, η μήτρα την εξασφαλίζει. Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται στη συγκράτηση των ινών μεταξύ τους, στην προστασία τους από φθορές και εξωτερικές προσβολές, στη μεταφορά των μηχανικών τάσεων που ασκούνται στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες και στην ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών που ξεκινούν από σπασμένες ίνες.

Για να ικανοποιεί το ρόλο της, πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα και σχετική ευκαμψία, ενώ το σημείο τήξης της πρέπει προφανώς να είναι υψηλότερο της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας του σύνθετου υλικού. Για τη σωστή λειτουργία του σύνθετου υλικού, οι ιδιότητες της μήτρας θα πρέπει να είναι συμβατές με τις αντίστοιχες των ινών, ενώ η πρόσφυση ίνας-μήτρας πρέπει να είναι καλή, ιδιαίτερα αν οι ίνες είναι κοντές. Όσον αφορά τις ιδιότητές της μήτρας, αυτή συνήθως παρουσιάζει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες.

Διακρίνουμε τις ακόλουθες ομάδες υλικών μήτρας για σύνθετα υλικά:

- Οργανικές

- Μεταλλικές
- Από άνθρακα
- Κεραμικές

Τέλος, ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο, καθώς στις οικοδομικές κατασκευές συχνά ενισχύεται με χάλυβα, ίνες αμιάντου, και ίνες γυαλιού. Η επιλογή του υλικού της μήτρας γίνεται με βάση τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του σύνθετου, με το γενικό κανόνα να υπαγορεύει οργανικές μήτρες στις χαμηλές θερμοκρασίες και κεραμικές μήτρες στις υψηλότερες.

Στο παρόν κεφάλαιο, θα ασχοληθούμε μόνο με τις οργανικές μήτρες και τις μήτρες άνθρακα, καθώς αυτές χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα υλικά που εξετάστηκαν στην εργασία.

2.3.2 ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

ΕΙΔΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΜΗΤΡΩΝ

Οι οργανικές μήτρες είναι πολύ πιο εύκολο να κατασκευαστούν από οποιαδήποτε άλλο είδος μήτρας. Αυτό οφείλεται κυρίως στις χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για την επεξεργασία τους. Διακρίνονται σε:

(α) **Θερμοπλαστικές.** Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές μοριακές αλυσίδες, οι οποίες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμιάντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής. Διακρίνονται από μεγαλύτερη ολκιμότητα και ταχύτητα επεξεργασίας σε σχέση με τα θερμοσκληρυνόμενα, ενώ τελευταία έχουν αναπτυχθεί θερμοπλαστικά που αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Η έρευνα στον τομέα των θερμοπλαστικών εξελίσσεται διαρκώς και υπάρχει ραγδαία ανάπτυξη.

(β) **Θερμοσκληρυνόμενες.** Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι:

(i) **Πολυεστερικές ρητίνες,** που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.

(ii) **Φαινολικές ρητίνες,** οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400°C.

(iii) **Εποξυδικές ρητίνες,** με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200°C, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική. Αποτελούν τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες οργανικές μήτρες για ίνες άνθρακα. Κάποιες από τις εμπορικές ονομασίες είναι οι Epon, Epi-Rez και Araldite. Οι εποξυδικές ρητίνες συνδυάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και αντίσταση σε διάβρωση, είναι σταθερά όσον αφορά τις διαστάσεις τους, επιδεικνύουν καλή πρόσφυση και είναι σχετικά φθηνές.

Τα θερμοπλαστικά συγκεντρώνουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τα θερμοσκληρυνόμενα, όπως πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής, δυνατότητα ανακύκλωσης και ευκολότερη διαμόρφωση του σχήματός τους κατά την επεξεργασία. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται οι περιορισμοί στις μεθόδους παραγωγής και οι υψηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας τους.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα και οργανική μήτρα συγκεντρώνουν τις εξής ελκυστικές ιδιότητες:

- χαμηλή πυκνότητα (40% μικρότερη από του αλουμινίου)
- υψηλή αντοχή (όση και των χαλύβων υψηλής αντοχής)
- υψηλή δυσκαμψία (όση και του τιτάνιου, αλλά με χαμηλότερη πυκνότητα)

- πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς συμπτώματα κόπωσης
- καλή αντίσταση σε ερπυσμό
- είναι σκληρά και ανθεκτικά
- ανθεκτικότητα στη διάβρωση
- σταθερότητα διαστάσεων (μπορούν να σχεδιαστούν για μηδενική τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής)
- χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση
- υψηλή θερμική αγωγιμότητα

Στο **σχήμα 2.7** διακρίνονται οι μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών μήτρας εποξειδικής ρητίνης σε σύγκριση με αυτές άλλων υλικών.

<i>Material</i>	<i>Strength^a (MPa)</i>		<i>Tensile modulus (GPa)</i>	<i>Density (g/cm³)</i>
	<i>Tension</i>	<i>Compression</i>		
Epoxy/carbon fibers AS-4	1 482	1 227	145	1.55
Epoxy/carbon fibers HMS	1 276	1 020	207	1.63
Epoxy/S-2 glass fibers	1 751	496	59	1.99
Epoxy/E-glass fibers	1 103	490	52	1.99
Epoxy/Aramid Kevlar 49	1 310	290	83	1.39
Aluminum (7075-T6)	572	–	69	2.76
Titanium (6Al-4V)	1 103	–	114	4.43
Steel (4130)	1 241–1 379	–	207	8.01

^aUnidirectional.

Σχήμα 2.7: Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα και οργανική μήτρα χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία αεροδιαστημικής, όμως η πτωτική τάση στις τιμές διευρύνει τις εφαρμογές τους στην αυτοκινητοβιομηχανία για ελάττωση του βάρους των οχημάτων, στη βιοϊατρική τεχνολογία ως εμφυτεύματα, στις κατασκευές, στα ηλεκτρονικά λόγω των καλών τους θερμικών ιδιοτήτων, σε κινητήρες αεροσκαφών κ.α.

2.3.3 ΜΗΤΡΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

ΓΕΝΙΚΑ

Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα σε μήτρα άνθρακα (carbon-carbon composites), είναι από τις πιο αναπτυγμένες μορφές άνθρακα, αφού οι ενισχυτικές ίνες τα κάνουν ισχυρότερα, σκληρότερα και ανθεκτικότερα στη θερμική καταπόνηση απ' ό,τι ο συμβατικός γραφίτης. Λόγω της χαμηλής πυκνότητας του άνθρακα, η ειδική αντοχή (αντοχή/ πυκνότητα), το ειδικό μέτρο ελαστικότητας (μέτρο ελαστικότητας/ πυκνότητα) και η ειδική θερμική αγωγιμότητα (θερμική αγωγιμότητα/ πυκνότητα) αυτών των υλικών, είναι τα υψηλότερα μεταξύ των σύνθετων υλικών. Επίσης, ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι σχεδόν μηδενικός.

Οι ανθρακικές μήτρες παρασκευάζονται από πίσσα ή από ανθρακούχα αέρια. Ανάλογα με τη θερμοκρασία παρασκευής τους, η δομή τους μπορεί να ποικίλει από άμορφη ως γραφιτική, ενώ όσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό του γραφίτη, τόσο πιο μεγάλη είναι η αντίσταση σε οξείδωση και η θερμική αγωγιμότητα, αλλά και πιο ψαθυρό το υλικό.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των ανθρακικών μητρών, είναι το υψηλό κόστος παρασκευής, η χαμηλή αντίσταση σε οξείδωση και η ανεπαρκής ανάπτυξη της έρευνας στο πεδίο αυτό.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, τα σύνθετα υλικά με μήτρα άνθρακα υπερέχουν του συμβατικού γραφίτη στο μέτρο ελαστικότητας, στην αντοχή σε κάμψη, στην αντοχή σε εφελκυσμό, στην αντοχή σε θερμική καταπόνηση και στην ανακοπή της διάδοσης ρωγμών.

Τα υλικά αυτά, λόγω της υψηλής τους θερμικής αγωγιμότητας, χρησιμοποιούνται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, υπερηχητικά αεροσκάφη, διαστημόπλοια και ηλεκτρονικές συσκευές. Η θερμική τους αγωγιμότητα αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία επεξεργασίας τους, ειδικά όταν αυτή είναι μεγαλύτερη από 2800°C, διότι έχουμε μεγαλύτερα ποσοστά γραφίτη. Η θερμική αγωγιμότητα και η ηλεκτρική αντίσταση, σε διεύθυνση παράλληλη και κάθετη στη διεύθυνση των ινών, διακρίνεται στο **σχήμα 2.8**. Παρατηρούμε

πως στην παράλληλη διεύθυνση η θερμική αγωγιμότητα είναι υψηλή και η ηλεκτρική αντίσταση χαμηλή, ενώ στην κάθετη διεύθυνση συμβαίνει το αντίθετο. Επίσης, όπως στην περίπτωση του γραφίτη, τα υλικά αυτά έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασίες μικρότερες των 10K.

Heat treatment temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m/K)		Electrical resistivity (μΩ.m)	
		⊥		⊥
1 200	36–43	4–7	33–37	98–114
2 800	127–134	39–46	8–12	68–81

Σχήμα 2.8: Θερμική αγωγιμότητα και ηλεκτρική αντίσταση σύνθετων υλικών με μήτρα άνθρακα

Τέλος, λόγω της χαμηλής πυκνότητας του άνθρακα, η ειδική θερμική αγωγιμότητα των σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα σε ανθρακική μήτρα είναι εξαιρετικά υψηλή σε σύγκριση με άλλα υλικά.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα σε μήτρα άνθρακα περιλαμβάνουν φρένα αεροσκαφών, σωλήνες θέρμανσης, βιοϊατρικά εμφυτεύματα, εργαλεία, καλούπια και πιστόνια σε μηχανές.

2.3.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΙΝΩΝ

Βασική παράμετρος είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας (s – aspect ratio) που είναι ο λόγος του μήκους (l) προς την ακτίνα (r) των ινών και αποτελεί κριτήριο για το χαρακτηρισμό των ινών ως μακριών-συνεχών ή κοντών-ασυνεχών. Οι πρώτες προσδίδουν στο σύνθετο μεγαλύτερη αντοχή από τις δεύτερες.

Γενικά, η αντοχή των ινών αυξάνεται με αύξηση του μήκους και μείωση της διαμέτρου τους. Στις ασυνεχείς ίνες υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος (l_c), για δεδομένη διάμετρο ίνας (d), που ορίζεται από τη σχέση

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_i},$$

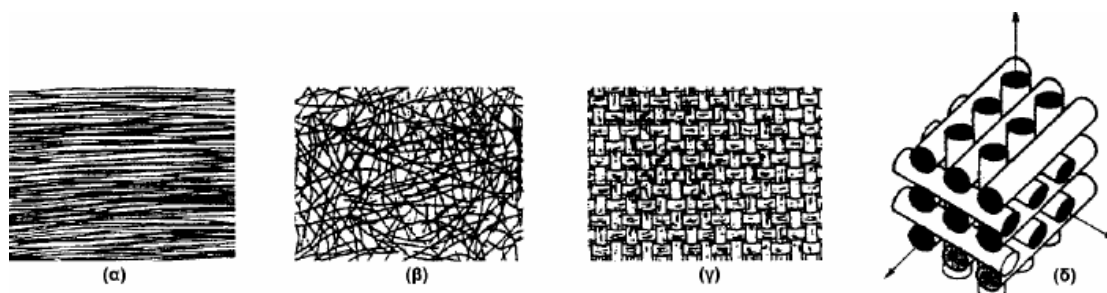
όπου σ_f η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και τ_i η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας. Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο του κρίσιμου μήκους l_c , η ενίσχυση που προσφέρει στο σύνθετο είναι πολύ μικρή. Αν είναι μεγαλύτερο από $15l_c$, η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχής.

ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ

Η αντοχή και η στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού, αυξάνονται, με την αύξηση της κατ' όγκον αναλογίας των περιεχόμενων ινών. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα στην κατασκευή του σύνθετου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΙΝΩΝ

Οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία και η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Ίνες διαφόρων προσανατολισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, ώστε η προσφερόμενη ενίσχυση του σύνθετου να είναι όσο το δυνατόν ισότροπη.



Σχήμα 2.9: Τύποι διάταξης των ινών: (α)μονοδιευθυντικές ίνες, (β)ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ)ίνες με πλέξη ύφανσης, (δ)ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.

Για σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα (μέτρο της οποίας είναι το μέτρο ελαστικότητας, E) και η βέλτιστη αντοχή, επιτυγχάνονται εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών.

Συνήθως, ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Όταν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό,

το σύνθετο συμπεριφέρεται ως ανισότροπο, ενώ, όταν η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού, το σύνθετο αποκτά ισότροπη συμπεριφορά. Στην ονομασία πολυστρωματικού υλικού θα πρέπει να αναφέρεται η διαδοχή προσανατολισμών. Για παράδειγμα, ένα σύνθετο [30/90₂/0/-45]_T αποτελείται από 5 στρώσεις, καθεμιά από τις οποίες σχηματίζει γωνία με τον διαμήκη άξονα του σύνθετου ίση με τον αριθμό που αναγράφεται στην αγκύλη.

ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΙΝΩΝ-ΜΗΤΡΑΣ

Η καλή συνάφεια ινών-μήτρας είναι πολύ σημαντική για την καλή λειτουργία του συνθέτου. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου. Ως διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, ορίζεται η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Η κακή συνάφεια έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση (pull-out) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού. Γι' αυτό το λόγο, κατά το σχεδιασμό του σύνθετου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές θερμικής διαστολής μήτρας και ίνας και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό. Οι ίνες άνθρακα επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες, για αύξηση της συνάφειάς τους με τη μήτρα, ή με Ni, όταν χρησιμοποιούνται με μεταλλικές μήτρες (Ag, Al).

2.4 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ

Όπως ειπώθηκε στα προηγούμενα εδάφια, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, τα σύνθετα υλικά με ενισχυτικές μήτρες άνθρακα βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή σε βιομηχανίες και τεχνολογίες αιχμής, όπως η αεροδιαστημική, οι πυρηνικές εφαρμογές κ.α. Φυσικά, ο τρόπος κατεργασίας τους είναι από τους πιο σπουδαίους παράγοντες για την ποιότητα κατασκευής των εξαρτημάτων που απαιτούνται. Η κατεργασία προφανώς πρέπει να οδηγεί σε προϊόντα ποιοτικά και αξιόπιστα, τα οποία παρασκευάζονται με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Γενικά, τα υλικά αυτά, λόγω της σκληρότητάς και της ψαθυρής φύσης τους, είναι αρκετά ευαίσθητα στις μεθόδους συμβατικών κατεργασιών και στις

μηχανικές μεθόδους κοπής. Αυτό δε που είναι ιδιαίτερα δύσκολο είναι η διάνοιξη διαμπερών αλλά και τυφλών οπών. Τα πιο συχνά ελαττώματα που αναπτύσσονται περιλαμβάνουν αποκολλήσεις στρωμάτων, ρωγμές στη μήτρα και κατεστραμμένες ίνες που προεξέχουν, ενώ η διάρκεια ζωής του εργαλείου είναι πολύ μικρή.

Γι' αυτό το λόγο έχει διερευνηθεί η δυνατότητα κατεργασίας των σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες άνθρακα με μη-συμβατικές μεθόδους. Η έρευνα που βρίσκεται σε εξέλιξη έχει δώσει αποτελέσματα που υπόσχονται πολλά, όμως βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Έτσι πρέπει να υπάρξει αρκετή εξέλιξη ακόμη σε αυτόν τον τομέα. Μεταξύ άλλων έχουν δοκιμαστεί η κοπή με δέσμη laser, η υδροκοπή και η ηλεκτροδιάβρωση. Ειδικά η ηλεκτροδιάβρωση, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο αυτής της εργασίας, αποτελεί μια κατεργασία αρκετά κατάλληλη για εφαρμογή σε σκληρά υλικά που είναι δύσκολο να κατεργαστούν (όπως θερμικά επεξεργασμένοι χάλυβες, καρβίδια σκληρομετάλλων και διάφορα κεραμικά), και είναι απολύτως εφαρμόσιμη στα σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα.

Εκτός από τη δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων γεωμετριών, κατά την ηλεκτροδιάβρωση έχουμε ανάπτυξη αμελητέων μηχανικών δυνάμεων. Αυτό θεωρητικά επιτρέπει τη δημιουργία κατεργασμένων επιφανειών με ακρίβεια, χωρίς πολλές παραμορφώσεις και παραμένουσες τάσεις. Επίσης δεν έχουμε προβλήματα κραδασμών και μπορούμε να κατεργαστούμε μικρά και περίπλοκα αντικείμενα.

Αν και μέχρι στιγμής έχουν γίνει κάποιες μελέτες πάνω στο αντικείμενο, δεν έχουμε ολοκληρωμένα συμπεράσματα, ούτε σαφή εικόνα της εξάρτησης των αποτελεσμάτων της ηλεκτροδιάβρωσης των σύνθετων υλικών από τις παραμέτρους της κατεργασίας. Από τα συμπεράσματα αυτών των μελετών προκύπτει ότι:

- Η θετική πολικότητα εργαλείου αποδίδει καλύτερα από την αρνητική, όσον αφορά τη σχετική φθορά του εργαλείου και το ρυθμό αποβολής υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, κάτω από τις ίδιες συνθήκες.
- Τα χάλκινα ηλεκτρόδια πετυχαίνουν καλύτερες τιμές για την τραχύτητα της παραγόμενης επιφάνειας και τη σχετική φθορά εργαλείου απ' ό,τι τα ηλεκτρόδια από γραφίτη.

- Πρέπει να χρησιμοποιούνται μικρές εντάσεις ρεύματος για να αποφύγουμε αυξημένα επίπεδα τήξης στην επιφάνεια του σύνθετου υλικού. Σε μεγάλες εντάσεις ρεύματος, έχουμε σημαντικές καταστροφές του υλικού, οι οποίες περιλαμβάνουν τήξη της επιφάνειας, θερμική διαστολή των ινών, αποκολλήσεις στρωμάτων και αποσύνδεση των ινών από τη μήτρα. Οι λεπτομέρειες του μηχανισμού καταστροφής του υλικού, καθώς και των συνεπειών που έχουν στην απόδοσή του κατά τη χρήση του δεν έχουν διερευνηθεί λεπτομερώς.
- Μεταξύ των διαφόρων ερευνητών, υπάρχουν διαφωνίες όσον αφορά τις τιμές που προκύπτουν για τις παραμέτρους που ελέγχονται. Για παράδειγμα, οι Lau, Wang & Lee [20] στα πειράματά τους υπολογίζουν τραχύτητα R_a που κυμαίνεται από 10 έως 40 μm , ενώ οι Hocheng, Guu, Tai & Liu [21] υπολογίζουν ότι κυμαίνεται από 3 έως 8 μm . Παρόμοια διαφωνία παρατηρείται και στο ρυθμό αποβολής υλικού, όπου οι μεν υπολογίζουν τιμές που κυμαίνονται από 2 έως 12 mm^3/min , ενώ οι δε από 0,1 έως 0,9 mm^3/min . Προφανώς οι διαφορές αυτές έχουν να κάνουν και με τη φύση των διαφορετικών υλικών, αλλά και με ένα πλήθος παραμέτρων των οποίων η επίδραση στην κατεργασία δεν έχει διερευνηθεί ακόμη. Παρ' όλα αυτά, καταδεικνύουν πως πρέπει να διανυθεί αρκετός δρόμος ακόμη, για να έχουμε λεπτομερέστερη εικόνα των συνεπειών της κατεργασίας στα σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα και για να υπάρξει πρακτική εφαρμογή της σε βιομηχανικούς χώρους.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 ΥΛΙΚΑ

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών έγινε χρήση τριών υλικών, με διαφορές τόσο στη σύστασή τους, όσο και στις διαστάσεις και στο σχήμα τους. Πρέπει να τονιστεί ότι αρχικά διαθέσιμα ήταν τα υλικά #1 και #2 και για αυτά έγινε ο αρχικός πειραματικός σχεδιασμός, ενώ στην πορεία προέκυψε και το υλικό #3. Παρακάτω δίνεται μια σύντομη περιγραφή αυτών των υλικών.

Υλικό #1:

Τα κατεργαζόμενα δοκίμια που αποτελούνται από αυτό το υλικό, προήλθαν από τον τεμαχισμό ενός κυλίνδρου σε τέσσερα ίδια κομμάτια. Ο τεμαχισμός έγινε με χρήση δισκοτόμου, χωρίζοντας τον κύκλο του κυλίνδρου σε τέσσερα τεταρτοκύκλια. Ο κύλινδρος ήταν αρχικά τμήμα σκελετού ποδηλάτου και το υλικό του εμπορικό σύνθετο υλικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα, τύπου T400H της Toray, με ειδική αντίσταση $1,6 \div 1,9 \Omega \cdot \text{cm}$. Το σύνθετο υλικό αποτελείται από πολυακρυλονιτριλικές (PAN) ίνες σε ποσοστό 60% κατ' όγκο, και από εποξιδική ρητίνη που παίζει το ρόλο του συνδετικού υλικού. Η διάμετρος της ίνας είναι $7 \mu\text{m}$, η πυκνότητά τους είναι $1,8 \text{g/cm}^3$ και ο προσανατολισμός των ινών είναι [0/90]. Λοιπά σχετικά με το αντικείμενο του πειράματος στοιχεία δεν παρέχονται από την κατασκευάστρια εταιρία. Τα τεμάχια έχουν μήκος παράπλευρης επιφάνειας 26,88mm, πάχος 2,38mm και εξωτερική ακτίνα 15mm.

Υλικό #2:

Τα τεμάχια του υλικού #2 είναι επίπεδα, σχήματος ορθογωνικού, προερχόμενα από τον τεμαχισμό σωλήνα τετραγωνικής διατομής με χρήση δισκοτόμου. Οι διαστάσεις κάθε τεμαχίου φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Ως πάχος ελήφθη το μέσο πάχος των τεμαχίων, γιατί τα τεμάχια έφεραν ελαφρές παραμορφώσεις και υπήρχαν κάποιες μικρές διαφορές στο πάχος τους.):

# Τεμαχίου	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)
1	67,75	38,82	4,3
2	69,78	25,32	4,3
3	68,52	27,78	4,3
4	71,94	28,52	4,3
5	75,14	38,68	4,3
6	68,43	40,12	4,3

Το σύνθετο υλικό αποτελείται από ίνες άνθρακα σε μορφή υποθέματος ενίσχυσης, μέσα σε μήτρα εποξιδικής ρητίνης. Το υπόθεμα που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου «satin carbon fabric G939D» της εταιρίας Hexcel με επιφανειακή πυκνότητα 220g/m², και η εποξιδική ρητίνη είναι Rutarox LB20 με σκληρυντική ουσία Rutadur SL. Το ποσοστό των ινών άνθρακα στον όγκο του σύνθετου υλικού είναι 50,1% και ο αριθμός των στρώσεων είναι 18, με προσανατολισμό $[(\pm 0)_{18}]_T$. Η ειδική αντίσταση των τεμαχίων κυμαίνεται από $1,2 \div 1,4 \Omega \cdot \text{cm}$.

Υλικό #3:

Τα τεμάχια του υλικού #3 είναι επίπεδα, σχήματος ορθογωνικού, με μέσες διαστάσεις: μήκος 90mm, πλάτος 58mm και πάχος 3,25mm. Μετά από εξέταση που έγινε βρέθηκε πως αποτελούνται από ίνες άνθρακα διαμέτρου 7μm σε ποσοστό περίπου 70% στον όγκο του σύνθετου υλικού, και από μήτρα άνθρακα που παίζει το ρόλο του συνδετικού υλικού. Ο αριθμός των στρώσεων είναι 9 με προσανατολισμό $[(0/90)_2/0]_S$. Η ειδική αντίσταση του σύνθετου υλικού είναι περίπου $2,4 \Omega \cdot \text{cm}$.

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ

Η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε στη βιομηχανική μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης που διαθέτει το εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Η μηχανή είναι τύπου EMT110/AGIE, της εταιρίας AGIEPULS, έτους κατασκευής 1979, με τη γεννήτρια τροφοδότησης σαν ξεχωριστή μονάδα. Η γεννήτρια τροφοδότησης είναι στατική παλμογεννήτρια με ορθογώνιο παλμό, μεγίστου ρεύματος 30 A και μέγιστης τάσης 100V. Η άτρακτος της μηχανής έχει δυνατότητα κίνησης στον κατακόρυφο άξονα (άξονας “Z”) και διαθέτει σύστημα αυτόματης πρόωσης για τη διατήρηση σταθερού διακένου κατά την κατεργασία. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο στερεώνεται στο τραπέζι της εργαλειομηχανής, το οποίο έχει δυνατότητα κίνησης στους άξονες “X” και “Y”.



Σχήμα 3.1: Εργαλειομηχανή EMT110/AGIE

Τέλος, η εργαλειομηχανή είναι συνδεδεμένη με ειδική ψηφιακή μονάδα της R.S.F. Elektronik, μέσω της οποίας καθορίζεται το επιθυμητό βάθος κοπής και ελέγχεται σε τι βάθος έχει προχωρήσει σε κάθε χρονική στιγμή η άτρακτος.

Η τάση στο κενό μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι 100Volt χωρίς δυνατότητα αλλαγής, ενώ η τάση λειτουργίας ποικίλει ανάλογα με την περίπτωση όπως θα δούμε παρακάτω. Η ένταση του ρεύματος εκκένωσης μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0 και 27A, ενώ η χρονική διάρκεια του παλμού (t) μπορεί να επιλεγεί από ένα εύρος μεταξύ του 1μsec και των 1000μsec. Ο διακόπτης που ελέγχει τη χρονική απόσταση μεταξύ των παλμών (τ) δεν παρέχει τη δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της, αλλά της δίνει τιμές συναρτήσει της χρονικής διάρκειας του παλμού. Το manual της εργαλειομηχανής δίνει μόνο το εξής παράδειγμα για τον έλεγχο των παλμών:

Για $\tau=25$ και $t=1000\mu\text{sec}$ η χρονική απόσταση μεταξύ των παλμών είναι 30μsec, ενώ για $\tau=25$ και $t=1\mu\text{sec}$ η χρονική απόσταση μεταξύ των παλμών είναι 1μsec.

Με άλλα λόγια, η χρονική απόσταση μεταξύ των παλμών μεταβαλλόταν από κατεργασία σε κατεργασία, ανάλογα με τη χρονική διάρκεια του παλμού που επιλέγαμε, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα υπολογισμού της. Ο διακόπτης ρυθμίστηκε στην τιμή 16 (το εύρος επιλογής ήταν από 2 έως 25).

Για τους υπόλοιπους διακόπτες της γεννήτριας, οι οποίοι ελέγχουν με παραμετρικό τρόπο τα μεγέθη που αναγράφονται στη συνέχεια, διατηρήθηκαν σε όλα τα πειράματα σταθερές οι εξής ρυθμίσεις: Διαδρομή σηκώματος κεφαλής: 5,25 , Servo: 8 , Sensitivity: 8 , Χρόνος λειτουργίας: 7,25 , Μέγεθος διακένου: 6. Τέλος, ο τρόπος κίνησης της ατράκτου ρυθμίστηκε να είναι παλινδρομικός, με τις εκκενώσεις προφανώς να πραγματοποιούνται όταν το ηλεκτρόδιο βρίσκεται στο κατώτατο σημείο της κίνησης. Η παλινδρομική κίνηση της ατράκτου εξυπηρετεί τη διευκόλυνση της κυκλοφορίας του διηλεκτρικού πάνω από την κατεργασμένη επιφάνεια και συντελεί στην αποτελεσματικότερη απομάκρυνση των αποβλήτων της κατεργασίας, με το κόστος βέβαια της σχετικής χρονικής καθυστέρησης.

ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟ

Το χρησιμοποιούμενο διηλεκτρικό ήταν το Honilo 401 της Castrol, με τα ακόλουθα φυσικά χαρακτηριστικά, όπως δίνονται στο φύλλο τεχνικών δεδομένων της εταιρίας:

HONILO 401 (Neat Honing Oil)	
Εμφάνιση	Διαφανές Υγρό Κεχριμπαρένιου Χρώματος
Συνεκτικότητα στους 40 °C	3,5 Pa·sec
Σημείο Ανάφλεξης	123 °C
Σχετική Πυκνότητα	0,865

ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ

Για την διάνοιξη των οπών χρησιμοποιήθηκαν ως εργαλεία δύο διαφορετικά ηλεκτρόδια από ηλεκτρολυτικό χαλκό (99,9%). Οι ιδιότητες του ηλεκτρολυτικού χαλκού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΟΥ ΧΑΛΚΟΥ	
Πυκνότητα	8,93g/cm ³
Σημείο Τήξης	1083°C
Ειδική Αντίσταση	$0,009 \div 0,07 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot cm$

Στο υλικό #1 χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο κυλινδρικού σχήματος, διαμέτρου 4,42mm, ενώ στα υλικά #2 και #3 χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο κυλινδρικού σχήματος, διαμέτρου 8,02mm. Οι διάμετροι των ηλεκτροδίων μετρήθηκαν με χρήση ηλεκτρονικού παχύμετρου για μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε για το ηλεκτρόδιο τόσο θετική όσο και αρνητική πολικότητα.



Σχήμα 3.2: Χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια

3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

3.3.1 ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Μετά από μελέτη της αντίστοιχης βιβλιογραφίας και λαμβάνοντας υπ' όψιν τις δυνατότητες της εργαλειομηχανής (για παράδειγμα η μηχανή δεν παρέχει δυνατότητα αλλαγής της τάσης, της οποίας η τιμή στο κενό είναι πάντα 100Volt), ως ανεξάρτητες παράμετροι επιλέχθηκαν:

- η πολικότητα του ηλεκτροδίου-εργαλείου (θετική ή αρνητική)
- η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος εκκένωσης
- η χρονική διάρκεια του παλμού

Πριν καταστρωθεί το σχέδιο εκτέλεσης των πειραμάτων, έγιναν κάποιες δοκιμαστικές κατεργασίες με ηλεκτρόδια ορθογωνικής και κυκλικής διατομής σε τεμάχια των υλικών #1 και #2. Σκοπός ήταν τόσο η εξακρίβωση από πρώτο χέρι της δυνατότητας κατεργασίας των σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες άνθρακα με τη μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης, όσο και ο εντοπισμός των πιθανών σημείων που πρέπει να δειχθεί προσοχή κατά την κατεργασία (π.χ. παρατηρήθηκε ότι το τεμάχιο λόγω του μικρού του βάρους μπορεί να παρασυρθεί εύκολα από τη ροή του διηλεκτρικού, οπότε πρέπει να γίνει προσεχτική στερέωσή του). Τα σημεία αυτά περιγράφονται αναλυτικότερα στην περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Κατά τον αρχικό σχεδιασμό (με διαθέσιμα τα υλικά #1 και #2), αποφασίστηκε να γίνουν δοκιμές τόσο με θετική όσο και με αρνητική πολικότητα στο εργαλείο, σε εντάσεις ρευμάτων από 1,5A έως 4,5A και διάρκειες παλμών στην περιοχή από 10μsec έως 1000μsec. Αναλυτικά για κάθε υλικό:

Για το υλικό #1, λόγω της περιορισμένης διαθέσιμης επιφάνειας προς κατεργασία, επιλέχθηκε το ηλεκτρόδιο με τη διάμετρο των 4,42mm και αποφασίστηκε ότι θα γίνουν πειράματα μόνο με θετική πολικότητα εργαλείου, σε εντάσεις ρεύματος 1,5A και 3A, στην περιοχή παλμών από 10μsec έως 200μsec, όπως διακρίνεται και στον πίνακα, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της διάρκειας παλμού στο αποτέλεσμα της κατεργασίας, αλλά και να συγκριθούν τα αποτελέσματα για δύο διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος. Κατά την εκτέλεση του πειράματος, παρατηρήθηκε ότι δεν ήταν

δυνατή η κατεργασία και στις δύο τιμές έντασης του ρεύματος, και έτσι το αρχικό σχέδιο που παρουσιάζεται τροποποιήθηκε.

ΥΛΙΚΟ #1	
ΘΕΤΙΚΗ (+) ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	
ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)
1,5	10
1,5	20
1,5	50
1,5	100
1,5	150
1,5	200
3	10
3	20
3	50
3	100
3	150
3	200

Για το υλικό #2, το οποίο προέκυψε κατά τη διάρκεια των δοκιμών στο υλικό #1, επιλέχθηκε το ηλεκτρόδιο με τη διάμετρο των 8,02mm και αποφασίστηκε ότι θα γίνουν πειράματα τόσο με θετική, όσο και με αρνητική πολικότητα εργαλείου, σε διάφορες εντάσεις ρευμάτων και διάρκειες παλμού, όπως διακρίνεται και στους πίνακες. Ο σχεδιασμός έγινε με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το υλικό #1. Σκοπός ήταν τόσο να διερευνηθεί η επίδραση της διάρκειας παλμών, της έντασης του ρεύματος, αλλά και της πολικότητας στην κατεργασία, όσο και να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα για το υλικό #1 όπου αυτό είναι δυνατό. Στην πορεία βέβαια παρατηρήθηκε ότι δεν ήταν δυνατή η κατεργασία σε όλες τις επιλεγμένες συνθήκες και το αρχικό σχέδιο άλλαξε σχεδόν ριζικά.

ΥΛΙΚΟ #2	
ΘΕΤΙΚΗ (+) ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	
ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)
1,5	200
1,5	300
1,5	500
1,5	750
1,5	1000
3	200

3	300
3	500
3	750
3	1000
4,5	200
4,5	300
4,5	500
4,5	750
4,5	1000

ΥΛΙΚΟ #2	
ΑΡΝΗΤΙΚΗ (-) ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	
ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (Α)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)
1,5	200
1,5	300
1,5	500
1,5	750
1,5	1000

Το υλικό #3 προέκυψε κατά τη φάση εκτέλεσης των πειραμάτων και έτσι κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν δοκιμές σε διάφορες εντάσεις ρεύματος και τιμές διάρκειας παλμού, με αρνητική πολικότητα εργαλείου, για να διερευνηθεί κάτω από ποιες συνθήκες είναι δυνατό να κατεργαστεί.

Η πολικότητα και το εύρος των ρευμάτων και των διαρκειών του παλμού στα οποία έγιναν δοκιμές τελικά διακρίνονται στους χάρτες κατεργασιμότητας των υλικών. Στους ίδιους χάρτες φαίνεται και σε ποιους συνδυασμούς ρεύματος και διάρκειας παλμών ήταν εφικτή η κατεργασία και σε ποιες όχι. **Η αποτελεσματικότητα της κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης αποφασίστηκε να αξιολογηθεί σε σχέση με τον υπολογιζόμενο ρυθμό αποβολής υλικού, την παραγόμενη ακρίβεια των διαστάσεων, την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας και τη σχετική φθορά του εργαλείου.**

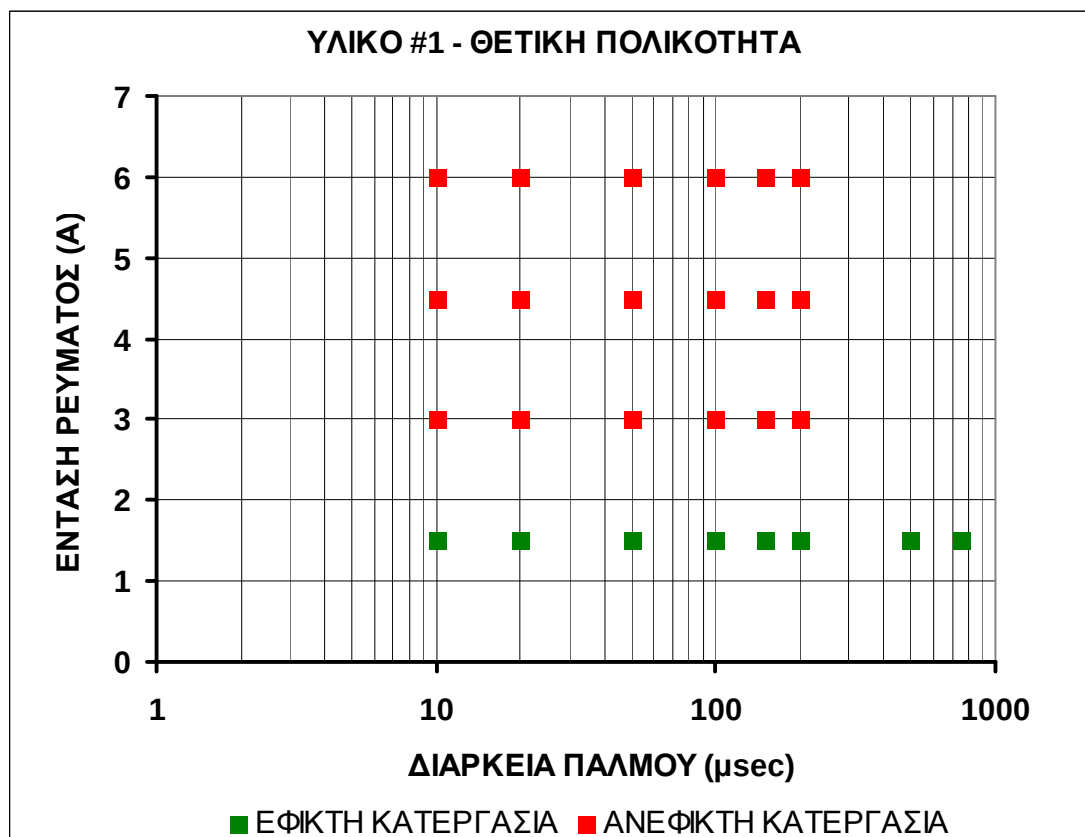
3.3.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, ο αρχικός σχεδιασμός του πειράματος δεν στάθηκε δυνατό να υλοποιηθεί, λόγω αποτυχιών της κατεργασίας σε κάποιους συνδυασμούς συνθηκών. Έτσι, στην ουσία έγινε διερεύνηση των συνθηκών κάτω από τις οποίες είναι δυνατή η κατεργασία κάθε υλικού και καταγραφή των αποτελεσμάτων, όπου είχαμε τέτοια. Έγιναν επιτυχώς συνολικά 22 οπές, εκ των οποίων οι 2 διαμπερείς και οι 20 τυφλές. Αναλυτικά:

Για το υλικό #1, διαπιστώθηκε πως είναι αδύνατη η κατεργασία του με ένταση ρεύματος 3A. Έτσι έγιναν δοκιμές και στα 4,5A και στα 6A, όπου επίσης διαπιστώθηκε αδυναμία κατεργασίας. Τέλος έγιναν επιτυχείς δοκιμές με 1,5A στα 500 και στα 750μsec. Οι συνθήκες των δοκιμών φαίνονται στον πίνακα (με πράσινο οι επιτυχείς-με κόκκινο οι αποτυχημένες). Στον παρακάτω χάρτη κατεργασιμότητας φαίνεται σε ποιους συνδυασμούς ρεύματος και διάρκειας παλμών ήταν εφικτή η κατεργασία και σε ποιες όχι.

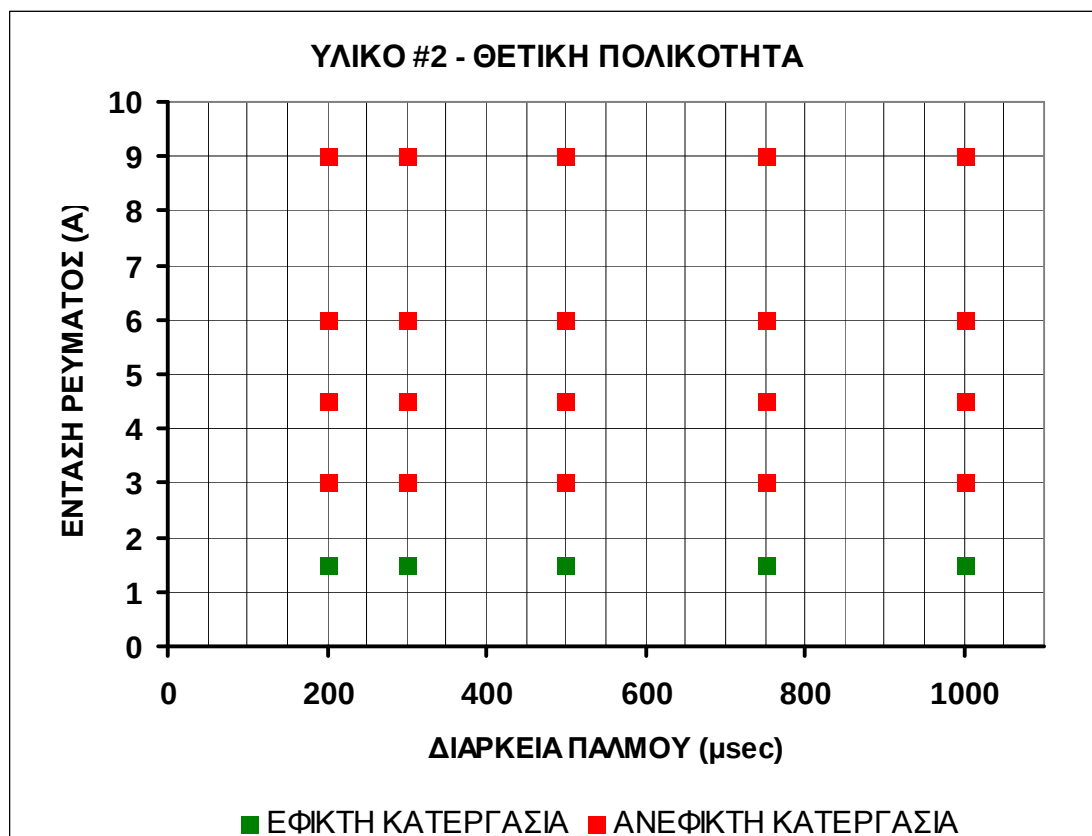
ΥΛΙΚΟ #1	
ΘΕΤΙΚΗ (+) ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)
10	1,5
20	1,5
50	1,5
100	1,5
150	1,5
200	1,5
500	1,5
750	1,5
10	3
20	3
50	3
100	3
150	3
200	3
10	4,5
20	4,5
50	4,5
100	4,5
150	4,5
200	4,5

10	6
20	6
50	6
100	6
150	6
200	6



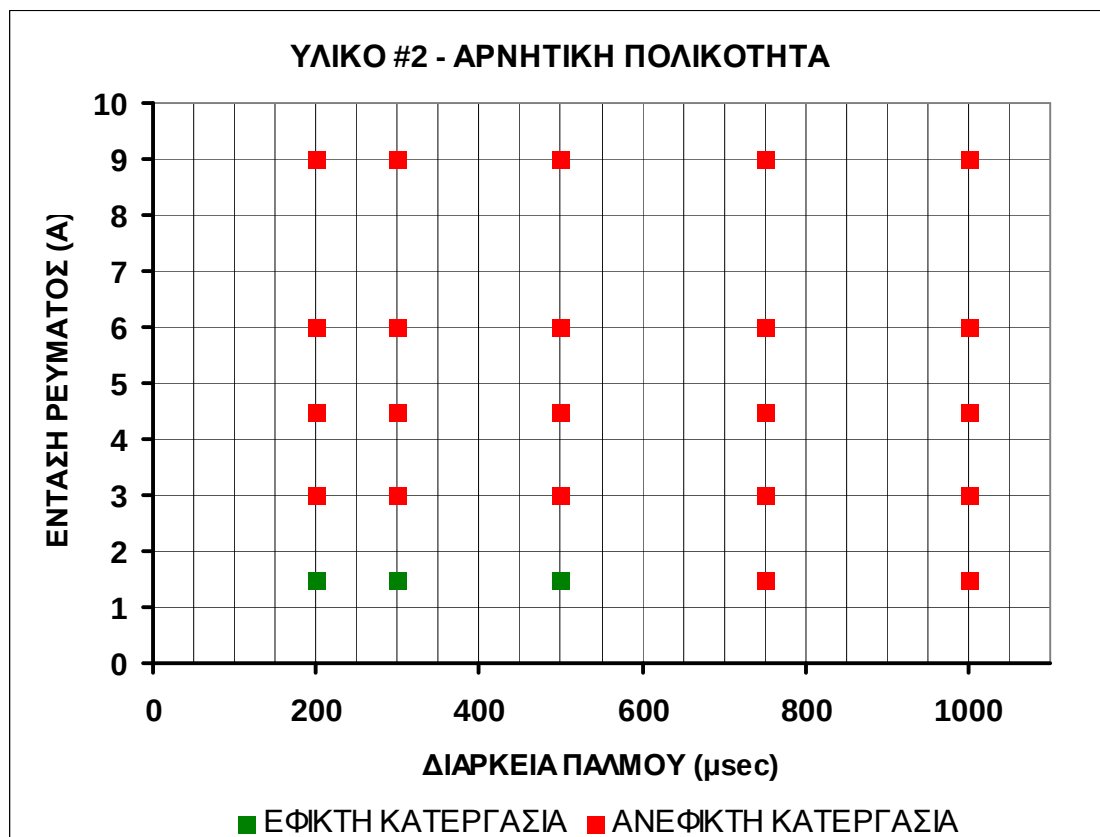
Για το υλικό #2, με θετική πολικότητα εργαλείου, δεν ήταν δυνατή η κατεργασία σε καμιά άλλη ένταση ρεύματος πέρα του 1,5A. Για αρνητική πολικότητα εργαλείου, η κατεργασία ήταν δυνατή μόνο στο 1,5A και για διάρκειες παλμού 200, 300 και 500μsec (τόσο για τη θετική, όσο και για την αρνητική πολικότητα, έγιναν δοκιμές στα 1,5 , στα 3 , στα 4,5, στα 6 και στα 9A). Παρατίθεται ο αντίστοιχος χάρτης κατεργασιμότητας.

ΥΛΙΚΟ #2	
ΘΕΤΙΚΗ (+) ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)
200	1,5
300	1,5
500	1,5
750	1,5
1000	1,5
200	3
300	3
500	3
750	3
1000	3
200	4,5
300	4,5
500	4,5
750	4,5
1000	4,5
200	6
300	6
500	6
750	6
1000	6
200	9
300	9
500	9
750	9
1000	9



ΥΛΙΚΟ #2	
ΑΡΝΗΤΙΚΗ (+) ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (Α)
200	1,5
300	1,5
500	1,5
750	1,5
1000	1,5
200	3
300	3
500	3
750	3
1000	3
200	4,5
300	4,5
500	4,5
750	4,5
1000	4,5
200	6
300	6

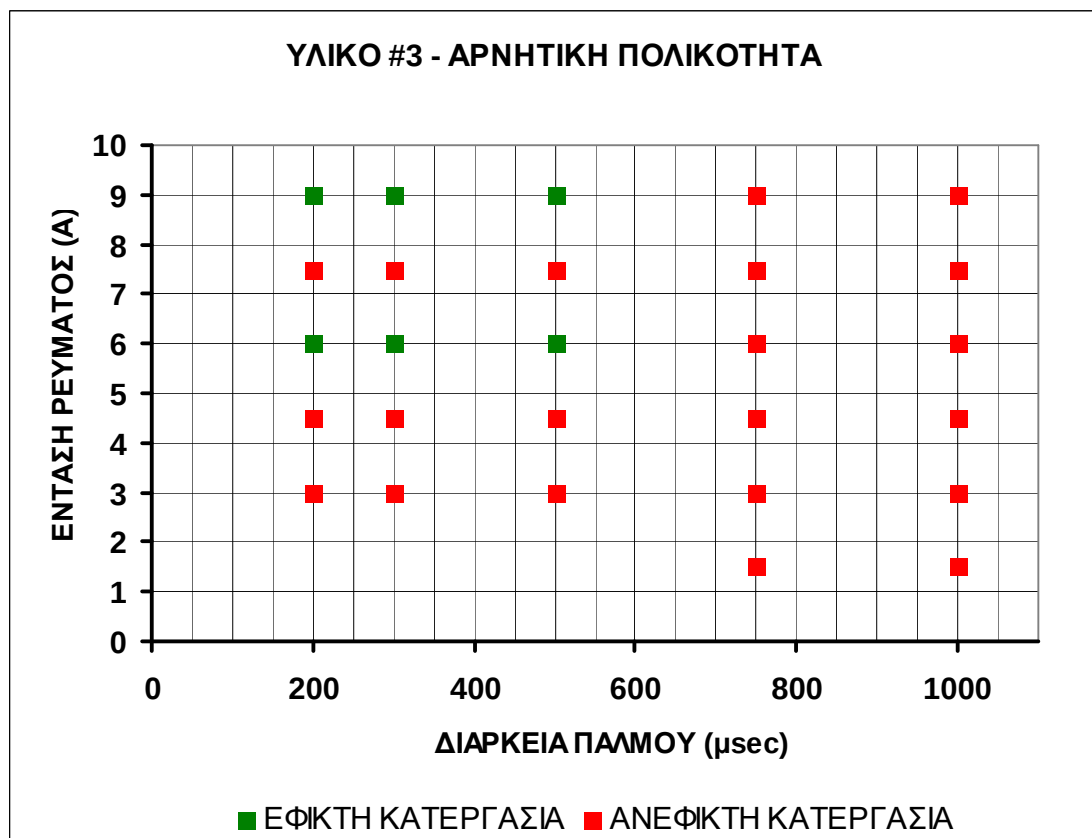
500	6
750	6
1000	6
200	9
300	9
500	9
750	9
1000	9



Για το υλικό #3, στάθηκε δυνατή η κατεργασία στα 6 και στα 9Α, όπως φαίνεται και στο χάρτη κατεργασιμότητας του.

ΥΛΙΚΟ #3	
ΑΡΝΗΤΙΚΗ (+) ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)
750	1,5
1000	1,5
200	3
300	3
500	3
750	3

1000	3
200	4,5
300	4,5
500	4,5
750	4,5
1000	4,5
200	6
300	6
500	6
750	6
1000	6
200	7,5
300	7,5
500	7,5
750	7,5
1000	7,5
200	9
300	9
500	9
750	9
1000	9



Παρατηρήσεις: Όσον αφορά τη θετική πολικότητα εργαλείου, βλέπουμε ότι είναι δυνατή η κατεργασία μόνο σε ένταση ρεύματος 1,5A. Σε μεγαλύτερες εντάσεις έχουμε μεγαλύτερες τιμές ρυθμού πρόσδωσης ενέργειας παλμού, με αποτέλεσμα το υλικό της μήτρας να καίγεται, και αντί να απομακρυνθεί να συγκεντρώνεται μαζί με προϊόντα της καύσης του διηλεκτρικού και να σχηματίζει ψαθυρά συσσωματώματα στο σημείο της κατεργασίας. Όσον αφορά την αρνητική πολικότητα, βλέπουμε ότι έχουμε επιτυχείς κατεργασίες στα 1,5A, 6A και 9A, αλλά όχι και στις ενδιάμεσες τιμές των 3A, 4,5A και 7,5A. Σίγουρα η αδυναμία κατεργασίας δεν οφείλεται στο μέγεθος της ενέργειας παλμού, καθώς τη μεγαλύτερη ενέργεια παλμού την έχουμε στα 9A, όπου και γίνεται κατεργασία. Το γεγονός ότι στα 6A και στα 9A χρειάστηκε να γίνουν αρκετές δοκιμές για να κυλήσει η κατεργασία απρόσκοπτα, αλλά και η συμπεριφορά του υλικού ήταν σε μεγάλο βαθμό απρόβλεπτη, μας οδηγεί ίσως στο συμπέρασμα πως η επιτυχία ή μη της κατεργασίας σε μεγάλες εντάσεις ρεύματος στην αρνητική πολικότητα, είναι σε κάποιο βαθμό στοχαστικό φαινόμενο. Κατά συνέπεια ίσως εκεί να οφείλεται και αυτή η ιδιομορφία στις περιοχές κατεργασιμότητας του υλικού. Τέλος, ο λόγος που στο υλικό #3 επιτυγχάνουμε κατεργασία σε ρεύματα υψηλότερα του 1,5A, είναι πως τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα σε μήτρα άνθρακα επιδεικνύουν μεγαλύτερη αντοχή σε θερμικό σοκ από τα σύνθετα με οργανική μήτρα.

3.4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

3.4.1 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Αρχικά τα υλικά τεμαχίστηκαν με χρήση δισκοτόμου με τον τρόπο που περιγράφηκε στο σχετικό εδάφιο και στην συνέχεια μετρήθηκαν με χρήση ηλεκτρονικού παχύμετρου οι διαστάσεις τους. Επίσης κρίθηκε σκόπιμο να λειανθούν με γυαλόχαρτο προκειμένου να εξομαλυνθούν κατά το δυνατό οι υπάρχουσες ανομοιομορφίες στην επιφάνειά τους. Αυτό το κάνουμε διότι στην αρχή της κατεργασίας μπορεί να έχουμε καθυστέρηση, λόγω του ότι δεν χρησιμοποιείται όλη η διατομή του ηλεκτροδίου για την κοπή, αλλά τα σημεία εκείνα που βρίσκονται απέναντι από τα υψηλότερα σημεία της επιφάνειας του τεμαχίου. Λειαινόντάς τα τεμάχια, ευθυγραμμίζουμε την επιφάνειά τους και έτσι χρησιμοποιούμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα της διατομής του ηλεκτροδίου για την κοπή. Επίσης, επειδή τα τεμάχια του υλικού #2 είχαν χρησιμοποιηθεί παλαιότερα σε μηχανικές δοκιμές και είχαν καμφθεί ελαφρά, έπρεπε να γίνουν επίπεδα για να πατάνε σωστά στη βάση στήριξης και να μην ταλαντεύονται. Τέλος, μετά το πέρας κάθε κατεργασίας, το ηλεκτρόδιο καθαριζόταν με γυαλόχαρτο, για να απομακρυνθούν κομμάτια της ρητίνης που είχαν επικαθήσει πάνω του και θα μπορούσαν να παρεμποδίσουν την ομαλότητα της επόμενης κατεργασίας, αλλάζοντας την αγωγιμότητα του ηλεκτροδίου. Τα υπολείμματα αυτά της ρητίνης (διακρίνονται στο **σχήμα 3.2**), είναι κομμάτια που τήκονται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά την κοπή, τα οποία δεν προλαβαίνουν να διαφύγουν και στερεοποιούνται πάνω στο εργαλείο. Τέλος, μετά από κάθε αποτυχημένη διάτρηση, απομακρυνόταν το υλικό που είχε επικαθήσει στο σημείο της κατεργασίας, προκειμένου να γίνει αν ήταν δυνατό άλλη δοκιμή στο συγκεκριμένο σημείο.

3.4.2 ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΩΝ ΟΠΩΝ

Το τεμάχιο προφανώς πρέπει να είναι σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας, Έτσι, συγκρατείται στη βάση της λεκάνης με τη βοήθεια ορθογωνίων παραλληλεπιπέδων τεμαχίων από χάλυβα, για να μην παρασυρθεί από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από το ρέον διηλεκτρικό. Ακολούθως, μετακινώντας κατά τους άξονες “X” και “Y” το τραπέζι της εργαλειομηχανής, γίνεται το κεντράρισμα του ηλεκτροδίου στο σημείο που

θέλουμε να γίνει η οπή. Έπειτα, γεμίζουμε τη λεκάνη με διηλεκτρικό, κάνουμε την αρχική επαφή του ηλεκτροδίου με το τεμάχιο για να κλείσει το κύκλωμα, ρυθμίζουμε το τελικό βάθος κοπής του τεμαχίου στην ειδική ψηφιακή μονάδα και ξεκινάμε την κατεργασία.

Για κάθε κατεργασία καταγράφηκε με χρήση ηλεκτρονικού χρονομέτρου ο χρόνος περάτωσης της, ενώ κατά τη διάρκειά της λαμβάνονταν κάθε τέσσερα λεπτά από την ψηφιακή μονάδα οι τιμές του βάθους στο οποίο είχε εισχωρήσει το εργαλείο μέσα στο τεμάχιο. Σκοπός ήταν ο υπολογισμός του ρυθμού αποβολής υλικού, η μελέτη του μηχανισμού του, καθώς και ο εντοπισμός των πιθανών παραμέτρων από τις οποίες επηρεάζεται. Καταγράφονταν επίσης η ένταση του ρεύματος και η τάση των εκκενώσεων για κάθε κατεργασία με τη χρήση του βολτόμετρου και του αμπερόμετρου, τα οποία είναι ενσωματωμένα στη γεννήτρια της εργαλειομηχανής, προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός της ενέργειας παλμού.

3.4.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΜΕΤΡΩΝ

Στην διάνοιξη οπών με την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης δεν γίνεται να υπάρξει απόλυτη διαστασιολογική ακρίβεια, για λόγους που θα εξηγηθούν αργότερα. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη για την μέτρηση της πραγματικής διαμέτρου κάθε οπής, προκειμένου να προσδιοριστεί ο όγκος του υλικού που αφαιρέθηκε και συνεπώς ο ρυθμός αποβολής υλικού. Επίσης μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσοστιαία απόκλιση της διαμέτρου της οπής από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου. Η μέτρηση της διαμέτρου των οπών έγινε με τρεις συνολικά τρόπους. Για τις οπές που βρίσκονται στα τεμάχια των υλικών #2 και #3 και έγιναν με το ηλεκτρόδιο διαμέτρου 8,02mm χρησιμοποιήθηκε τόσο το οπτικό μικροσκόπιο DMR της Leika που υπάρχει στο εργαστήριο, όσο και μικρόμετρο μέτρησης εσωτερικών διαστάσεων. Για τις οπές που βρίσκονται στα τεμάχια του υλικού #1 και έγιναν με το ηλεκτρόδιο διαμέτρου 4,42mm χρησιμοποιήθηκε το οπτικό μικροσκόπιο, και το οπτικό μετρητικό μηχανήμα άνευ επαφής Tesavisio-300 της Hexagon Metrology, το οποίο βρίσκεται στο Μετροτεχνικό εργαστήριο της σχολής. Με μικρόμετρο δεν έγιναν μετρήσεις, αφού δεν ήταν διαθέσιμο μικρόμετρο που να προσδιορίζει εσωτερικές διαστάσεις μικρότερες από 5mm.



Σχήμα 3.3: Tesavisio-300

Κατά τη μέτρηση με το μικρόμετρο, ελήφθησαν για μεγαλύτερη ακρίβεια 5 τιμές διαμέτρου από 5 διαφορετικές θέσεις για κάθε οπή και ο μέσος όρος τους θεωρήθηκε ότι είναι η διάμετρος της οπής. Αντίστοιχα, ελήφθησαν 5 τιμές διαμέτρου για κάθε οπή κατά τη μέτρηση με το οπτικό μικροσκόπιο και υπολογίστηκε ο μέσος όρος τους. Η μέθοδος της μέτρησης διαμέτρου με το μικροσκόπιο έχει ως εξής:

Στο οπτικό μικροσκόπιο υπάρχει δυνατότητα μετακίνησης του τραπέζιου κατά τους άξονες "X" και "Y" με ακρίβεια 0,1mm, συνεπώς την ίδια ακρίβεια είχαν και οι μετρήσεις που έγιναν με αυτό. Αρχικά τοποθετείται στο τραπέζι το προς εξέταση τεμάχιο, γίνεται η εστίαση του φακού και εντοπίζεται η οπή. Στη συνέχεια η μια από τις δύο γραμμές του σταυρονήματος που φαίνεται στο φακό τοποθετείται σε θέση επαπτόμενη στον κύκλο (προφανώς καθεμιά από τις δύο γραμμές είναι παράλληλη σε έναν άξονα) και καταγράφεται η ένδειξη του βερνιέρου. Έπειτα μετακινείται το τραπέζι μέχρι ο σταυρός να φτάσει στην αντιδιαμετρική θέση και καταγράφεται η καινούρια ένδειξη. Η διάμετρος της οπής προκύπτει ως η διαφορά των δύο τιμών.

Κατά τις μετρήσεις των διαμέτρων με το Tesavisio-300 ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Γίνεται αρχικά η εστίαση του φακού στην προς μέτρηση οπή, παρακολουθώντας την εικόνα σε οθόνη υπολογιστή εφοδιασμένη με το κατάλληλο λογισμικό. Στη συνέχεια, με τη χρήση του κινούμενου σταυρονήματος, σημειώνουμε 16 σημεία στην περιφέρεια του κύκλου της οπής και την χωρίζουμε σε 16 περίπου ίσα τόξα. Το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα τις συντεταγμένες κάθε σημείου και δημιουργεί ένα κύκλο ως αποτέλεσμα παρεμβολής μεταξύ αυτών των σημείων. Η διάμετρος του κύκλου υπολογίζεται και παρέχεται στο χρήστη αυτόματα, ενώ το λογισμικό παρέχει επίσης τόσο τη φωτογραφία των οπών, όσο και τα στοιχεία των σημείων που σημειώθηκαν.

3.4.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΩΝ

Με χρήση του τραχύμετρου Surtronic 3+ επωνυμίας Taylor & Hobson, μετρήθηκε η τραχύτητα της βάσης των οπών που η επιφάνειά τους το επέτρεπε, καθώς και της παράπλευρης επιφάνειας κατά μήκος της γενέτειρας όπου αυτό ήταν εφικτό. Έχει δυνατότητα ακρίβειας δεκάτων και εκατοστών του μικρόμετρου στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Το όργανο λειτουργεί ως εξής: Ειδική ακίδα κινείται κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος, με τη βοήθεια σερβομηχανισμού, πάνω στην επιφάνεια που θέλουμε να τραχυμετρήσουμε. Η ακίδα καταγράφει τις ανωμαλίες στην επιφάνεια και στέλνει σήμα διαφοράς δυναμικού (V) ανάλογο της κατακόρυφης μετατόπισης μιας βελόνας διαμαντιού η οποία ακολουθεί το προφίλ. Ο επεξεργαστής του οργάνου αξιοποιεί τα δεδομένα, και παρέχει στο χρήστη τα τελικά αποτελέσματα μέσω της οθόνης που διαθέτει η συσκευή. Για να είναι δυνατή η μέτρηση της τραχύτητας της βάσης μιας οπής, δεν πρέπει το βάθος της να ξεπερνά τα 200μm, διότι η ακίδα δε μπορεί να φτάσει σε μεγαλύτερο βάθος. Η διαδρομή της ακίδας κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος εξαρτάται από την επιλογή του μήκους κύματος αποκοπής. Το μήκος κύματος αποκοπής είναι το μέγιστο μήκος κύματος που περιλαμβάνεται στο αποτέλεσμα μέτρησης της τραχύτητας και προτυποποιείται στα ισχύοντα πρότυπα. Με την κατάλληλη επιλογή του εξαιρούνται από το τελικό αποτέλεσμα αποκλίσεις πρώτης και δεύτερης τάξης. Γενικά λείες επιφάνειες απαιτούν μικρό μήκος αποκοπής και τραχείες επιφάνειες μεγαλύτερο. Επίσης, κάθε σύγκριση

τραχυτήτων πρέπει να αναφέρεται στο ίδιο μήκος κύματος αποκοπής. Το συγκεκριμένο όργανο παρέχει τρεις επιλογές για το μήκος κύματος αποκοπής, 0,25mm, 0,8mm και 2,5mm.

Το όργανο καταγράφει σε κάθε μέτρηση τα εξής μεγέθη:

- Ra, η οποία είναι η μέση τραχύτητα της επιφάνειας.
- Rq, η ενδεικνυόμενη τραχύτητα (RMS), που δίνεται από τη σχέση
$$RMS = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + \dots}{N}}$$
, όπου a, b, c είναι οι τεταγμένες σημείων που ανήκουν στο προφίλ της επιφάνειας και οι προβολές τους στο επίπεδο της επιφάνειας ισαπέχουν μεταξύ τους. N είναι ο αριθμός αυτών των σημείων.
- RzDIN. Για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους ανιχνεύονται οι 5 μέγιστου ύψους κορυφές και οι 5 μέγιστου βάθους κοιλάδες σε ένα μήκος αναφοράς και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους.
- Rt, η οποία είναι η μέγιστη τραχύτητα της επιφάνειας (απόσταση μεταξύ μέγιστης κορυφής-βαθύτερης κοιλάδας)
- Ry. Κατά την τραχυμέτρηση, το ευθύγραμμο τμήμα στο οποίο κινείται η ακίδα διαιρείται σε 5 ίσα τμήματα. Η τιμή του Ry προκύπτει ως ο μέσος όρος των αποστάσεων μεταξύ μέγιστης κορυφής-βαθύτερης κοιλάδας των 5 αυτών τμημάτων.
- Sm, η οποία είναι η μέση απόσταση των ανωμαλιών τραχύτητας. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο καλύτερη και η ποιότητα της επιφάνειας.

Η διακριτική ικανότητα του οργάνου ορίζεται ίση με 0.2μm, το μήκος αποκοπής Lc=0,25mm και το μήκος δειγματοληψίας Ln=0,75mm.

Επειδή η επιφάνεια του υλικού παρουσιάζει τοπικά διάφορες ανωμαλίες, παίρνουμε για την παράπλευρη επιφάνεια κάθε οπής 7 μετρήσεις τραχύτητας και για την βάση κάθε οπής 6 μετρήσεις. Όλες οι μετρήσεις λαμβάνονται κατά το δυνατό σε διαφορετικές διευθύνσεις, προκειμένου να έχουμε όσο γίνεται

αντιπροσωπευτικότερη και συνολικότερη εικόνα της τραχύτητας της επιφάνειας που μελετάμε. Τέλος υπολογίζουμε το μέσο όρο για κάθε μέγεθος που έχει καταγραφεί.



Σχήμα 3.4: Μικρόμετρο, τραχύμετρο, βαθύμετρο

3.4.5 ΦΩΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Μετά το πέρας των δοκιμών στα προς εξέταση υλικά, ελήφθησαν φωτογραφίες των οπών, τόσο μακροσκοπικά, όσο και μικροσκοπικά. Για τις μακροσκοπικές φωτογραφίες χρησιμοποιήθηκε φωτογραφική μηχανή σε συνδυασμό με μεγεθυντικό φακό για να είναι πιο εύκολη η εστίαση στην οπή και η παρατήρησή της. Η λήψη φωτογραφιών μικροσκοπικά έγινε με το Tesavisio-300 για το υλικό #1 και με το οπτικό μικροσκόπιο Leika για τα υλικά #2 και #3. Μέσω της παρατήρησης των φωτογραφιών κατέστη δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα για τη μορφολογία των οπών, τα οποία παρουσιάζονται στο αντίστοιχο εδάφιο.

4. ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Στα εξαρτήματα των μηχανολογικών κατασκευών απαιτείται όπως είναι γνωστό μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων, ειδικά αν πρόκειται για διαστάσεις που εξασφαλίζουν τη σωστή και ομαλή λειτουργία της κατασκευής. Πρέπει επομένως να γνωρίζουμε τι ακρίβεια διαστάσεων μπορούμε να επιτύχουμε με κάθε κατεργασία που εφαρμόζουμε σε ένα υλικό. Εν προκειμένω, στη διάτρηση με ηλεκτροδιάβρωση, πρέπει να γνωρίζουμε την απόκλιση της διαμέτρου της οπής που δημιουργείται στο τεμάχιο από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται.

Στην παρούσα μελέτη, ως μέτρο της ακρίβειας έχει ληφθεί η **ποσοστιαία απόκλιση των δύο διαμέτρων**, η οποία έχει υπολογιστεί από την σχέση:

$$[(\text{Δοπής-Δηλεκτροδίου}) / \text{Δηλεκτροδίου}] \times 100\%$$

Αυτό που επιχειρείται να βρεθεί είναι το πώς επηρεάζεται η ακρίβεια της διάστασης από τις παραμέτρους της κατεργασίας και να εξαχθούν τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Οι μεθοδολογίες των μετρήσεων με τα διάφορα όργανα έχουν ήδη περιγραφεί. Στις επόμενες σελίδες ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις διαμέτρους των οπών που διανοίχθηκαν.

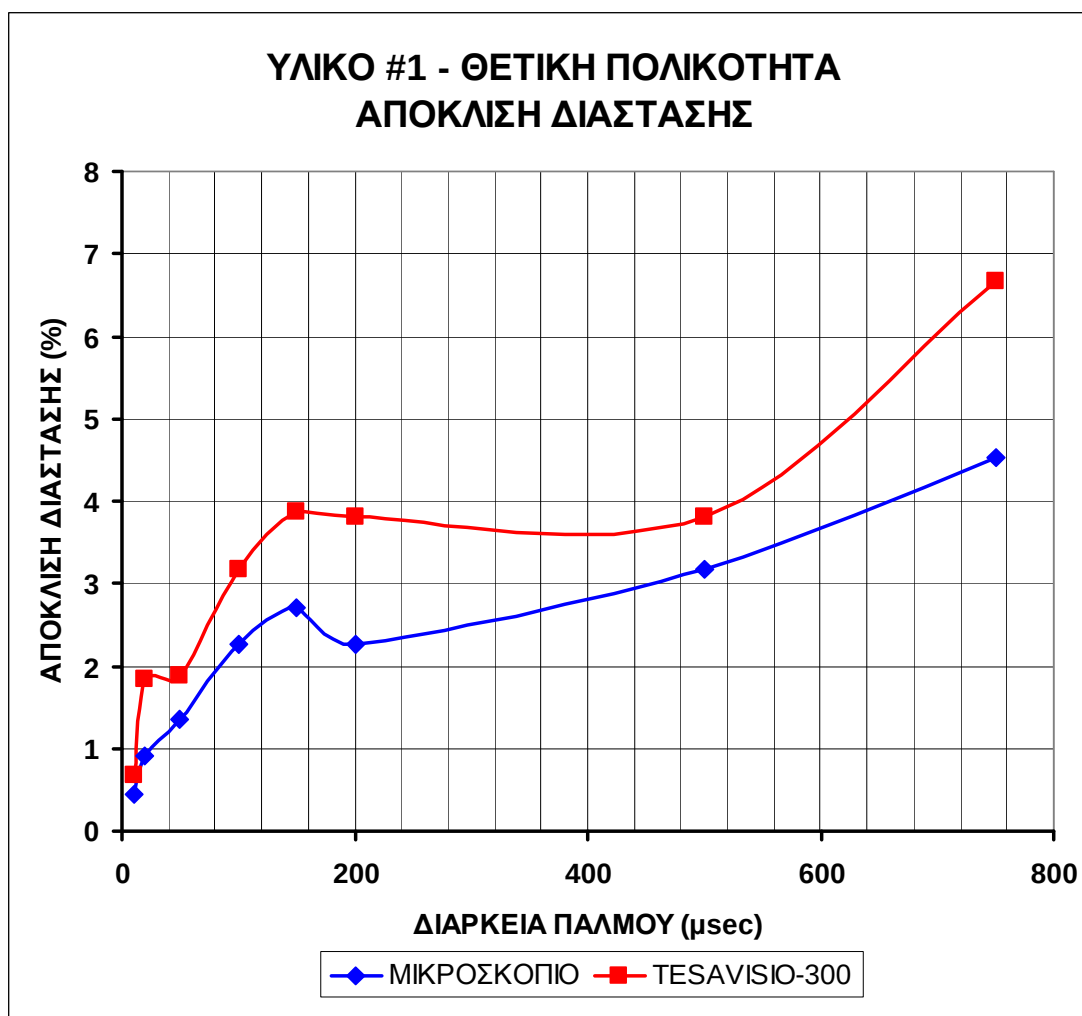
Υλικό #1

Υπενθυμίζεται πως οι οπές στα τεμάχια του υλικού #1 έγιναν **με ηλεκτρόδιο διαμέτρου 4,42mm**, και με βάση αυτή τη διάμετρο υπολογίστηκε η ποσοστιαία απόκλιση. Οι διαμέτροι των οπών του μετρήθηκαν με το οπτικό μικροσκόπιο DXR-Leika και με το μετρητικό σύστημα άνευ επαφής Tesavisio-300. Για τις μετρήσεις με το μικροσκόπιο η διάμετρος της οπής προκύπτει ως ο μέσος όρος των μετρήσεων που έγιναν. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων στους πίνακες. Παρουσιάζονται επίσης σε πίνακες τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την ποσοστιαία απόκλιση των διαμέτρων των οπών και τα διαγράμματα της ποσοστιαίας απόκλισης συναρτήσει της διάρκειας παλμού για κάθε όργανο.

ΥΛΙΚΟ #1 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ							
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΟΠΗΣ (mm) (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)
1,5	10	4,4	4,5	4,4	4,5	4,4	4,44
1,5	20	4,4	4,5	4,5	4,4	4,5	4,46
1,5	50	4,6	4,4	4,4	4,5	4,5	4,48
1,5	100	4,5	4,5	4,6	4,6	4,4	4,52
1,5	150	4,6	4,5	4,5	4,6	4,5	4,54
1,5	200	4,5	4,6	4,5	4,4	4,6	4,52
1,5	500	4,5	4,6	4,6	4,5	4,6	4,56
1,5	750	4,6	4,7	4,5	4,6	4,7	4,62

ΥΛΙΚΟ #1 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)		
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ		
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (%)
1,5	10	0,45
1,5	20	0,90
1,5	50	1,36
1,5	100	2,26
1,5	150	2,71
1,5	200	2,26
1,5	500	3,17
1,5	750	4,52

ΥΛΙΚΟ #1 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)			
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΕΣΑΝΙΣΙΟ-300			
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΟΠΗΣ (mm)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (%)
1,5	10	4,45	0,68
1,5	20	4,501	1,83
1,5	50	4,503	1,88
1,5	100	4,56	3,17
1,5	150	4,591	3,87
1,5	200	4,588	3,8
1,5	500	4,588	3,8
1,5	750	4,715	6,67



Σχήμα 4.1: Εξάρτηση της απόκλισης διάστασης από τη διάρκεια παλμού για το υλικό #1

Επίδραση της διάρκειας του παλμού στην ακρίβεια διαστάσεων:

- Από τις μετρήσεις και με τα δύο όργανα, η απόκλιση της διαμέτρου της οπής από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου φαίνεται γενικά να μεγαλώνει όσο αυξάνει η διάρκεια του παλμού, δηλαδή όσο η κατεργασία γίνεται πιο έντονη. Από τις μετρήσεις με το Tesavisio-300 φαίνεται ότι μεταξύ των 200 και των 500μsec δεν υπάρχει αύξηση της απόκλισης. Το γεγονός αυτό μπορεί ίσως να θεωρηθεί τυχαίο, καθώς αποτελεί τη μοναδική εξαίρεση στο διάγραμμα και δεν επαληθεύεται από τις αντίστοιχες μετρήσεις του μικροσκοπίου.

- Οι αποκλίσεις στην περιοχή 10 έως 100μsec, θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως ανεκτές, εφ' όσον αντιστοιχούν σε διαφορά διάστασης που κυμαίνεται από 2 έως 14μm (περίπου 0,68-3%). Από τα 150μsec και για μεγαλύτερη διάρκεια παλμού έχουμε αρκετά μεγάλες διαφορές, που φτάνουν έως και τα 30μm (προσεγγίζει απόκλιση της τάξης του 7%).
- Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας είναι πολύ πιθανό να έχουμε ηλεκτρικές εκκενώσεις όχι μόνο από το κάτω μέρος του ηλεκτροδίου, αλλά και από την παράπλευρη επιφάνειά του, λόγω της μικρής απόστασής τους. Αυτό μάλιστα γίνεται πιο έντονο όσο πιο βαθιά στο τεμάχιο έχει εισχωρήσει το ηλεκτρόδιο, διότι μεγαλώνει το εμβαδόν των δύο επιφανειών. Έτσι, είναι λογικό όσο πιο μεγάλη διάρκεια παλμού έχουμε (δηλαδή εντονότερες εκκενώσεις), τόσο πιο πολύ να αποκλίνουν οι δύο διάμετροι.
- Κατά τη διαδικασία της διάτρησης είναι πιθανό να έχουμε μια θυσανοειδή διάχυση φορτίων κοντά στα άκρα του ηλεκτροδίου (όπως συμβαίνει όταν έχουμε ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ πλακών με αντίθετα φορτία), η οποία γίνεται πιο έντονη όσο μεγαλώνει η διάρκεια παλμού, και η οποία συντελεί στην κοπή σε σημεία που δεν βρίσκονται ακριβώς κάτω από το μέτωπο του ηλεκτροδίου. Το αποτέλεσμα είναι η οπή να είναι μεγαλύτερη από το ηλεκτρόδιο.
- Οι οπές που διανοίχθηκαν δεν είχαν απόλυτα κυκλικό σχήμα, αλλά παρουσίαζαν κάποιες τοπικές αποκλίσεις στο σχήμα τους, λόγω ρωγμών και τοπικών καταστροφών του υλικού της μήτρας γύρω από αυτές. Αυτό διακρίνεται και στις φωτογραφίες που ελήφθησαν. Οι αποκλίσεις αυτές ήταν πιο έντονες όσο πιο μεγάλη ήταν η διάρκεια παλμού. Το γεγονός αυτό έκανε σχετικά επίπονη τη διαδικασία μέτρησης στο μικροσκόπιο, καθώς υπήρχε μια σχετική σύγχυση για το που ξεκινά στην πραγματικότητα η οπή. Γι' αυτό το λόγο θεωρούνται

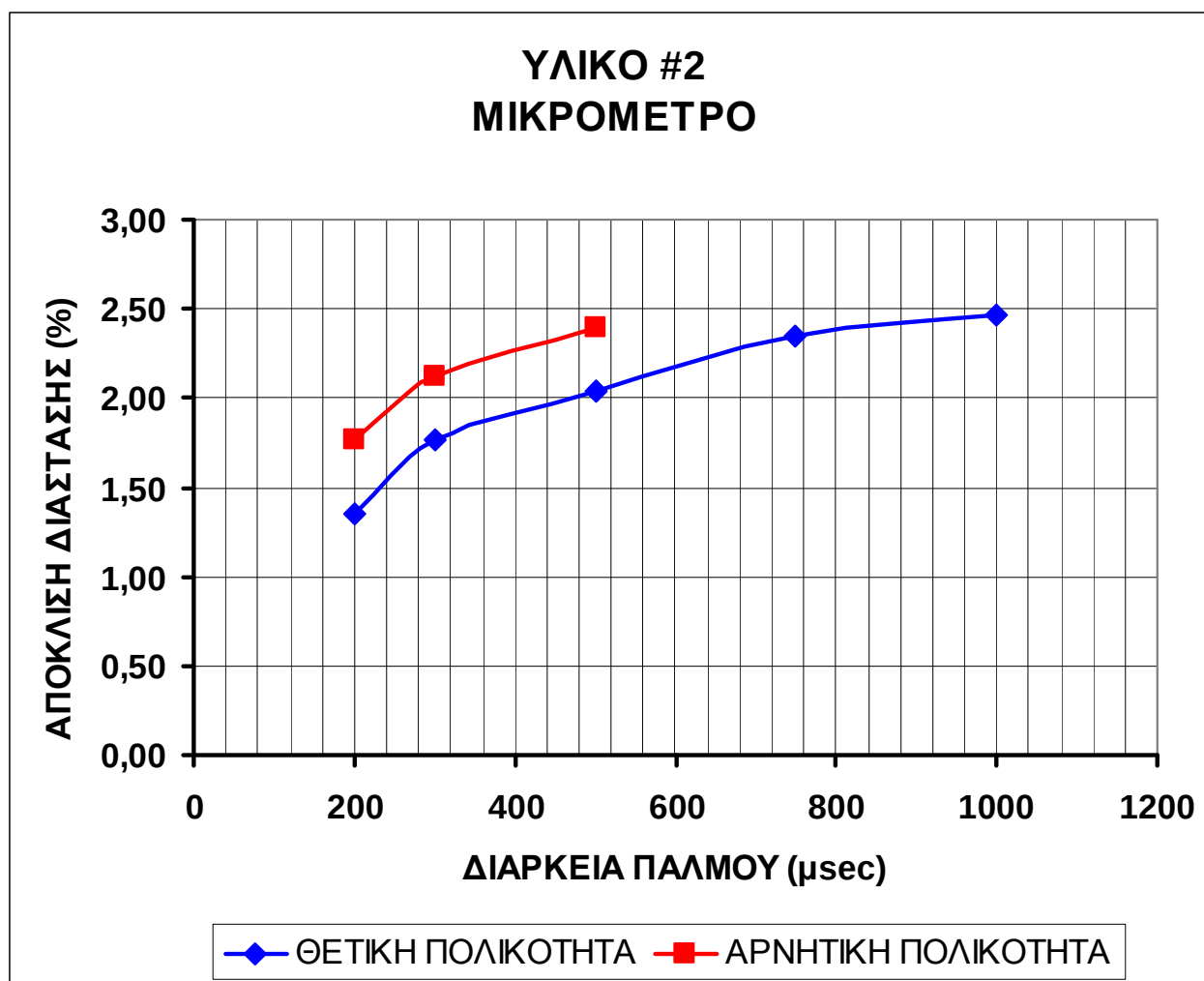
πιο αξιόπιστες οι μετρήσεις με το Tesavisio-300, κατά τις οποίες δημιουργήθηκαν κύκλοι ως αποτέλεσμα 16 σημείων.

Υλικό #2

Οι οπές στο υλικό #2 έγιναν τόσο με θετική, όσο και με αρνητική πολικότητα, ενώ **χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο διαμέτρου 8,02mm**, και με βάση αυτή τη διάμετρο υπολογίστηκε η ποσοστιαία απόκλιση. Οι διαμέτροι των οπών του μετρήθηκαν με το οπτικό μικροσκόπιο DXR-Leica και με το μικρόμετρο εσωτερικών διαστάσεων. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων στους πίνακες. Παρουσιάζονται επίσης σε πίνακες τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την ποσοστιαία απόκλιση των διαμέτρων των οπών και τα διαγράμματα της ποσοστιαίας απόκλισης συναρτήσει της διάρκειας παλμού.

ΥΛΙΚΟ #2 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΙΚΡΟΜΕΤΡΟ							
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΟΠΗΣ (mm) (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (%)
1,5A, 200μsec	8,1	8,14	8,13	8,12	8,15	8,128	1,35
1,5A, 300μsec	8,14	8,16	8,17	8,16	8,18	8,162	1,77
1,5A, 500μsec	8,17	8,18	8,18	8,2	8,19	8,184	2,04
1,5A, 750μsec	8,21	8,23	8,2	8,17	8,23	8,208	2,34
1,5A, 1000μsec	8,2	8,23	8,21	8,23	8,22	8,218	2,47

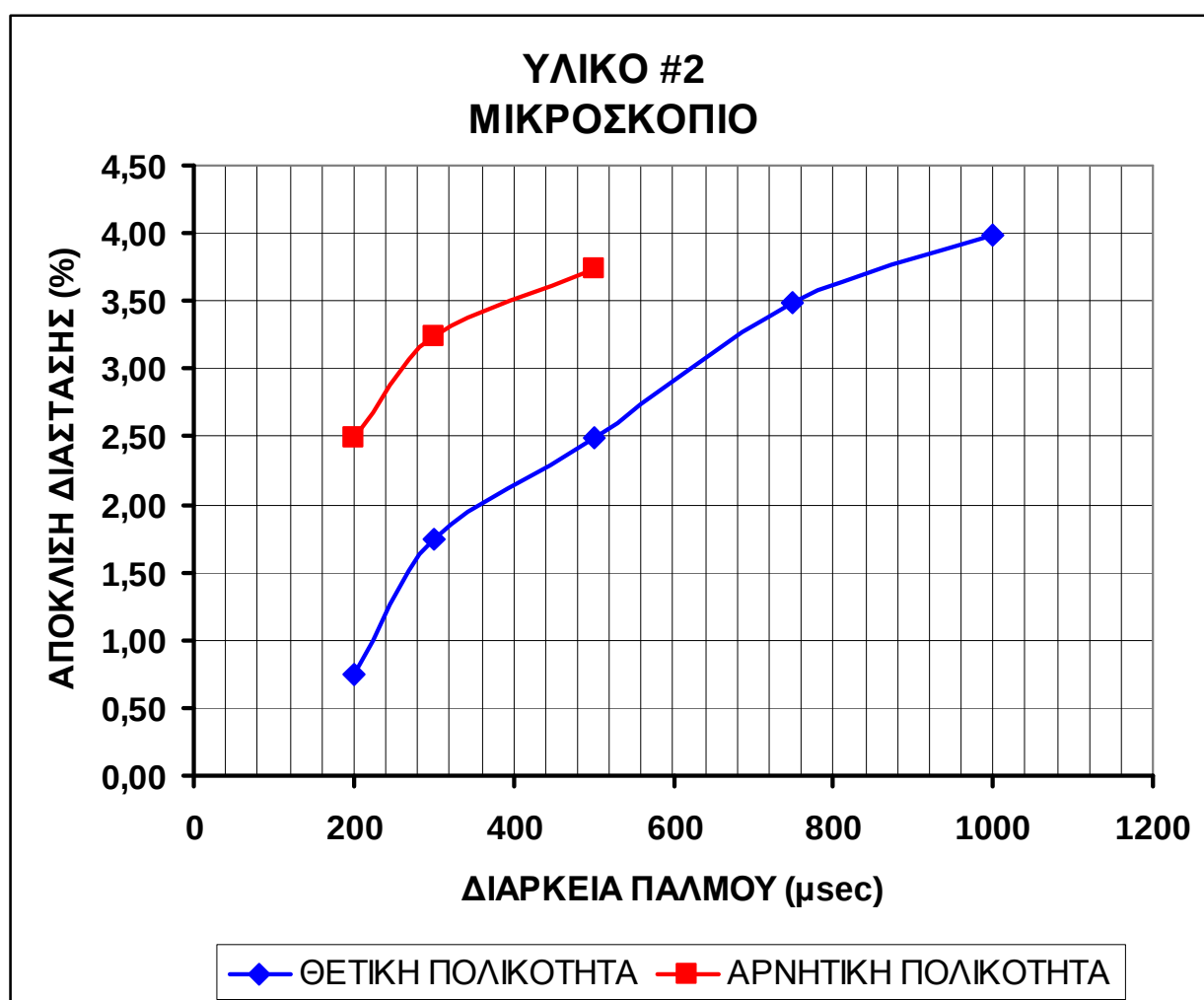
ΥΛΙΚΟ #2 (ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΙΚΡΟΜΕΤΡΟ							
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΟΠΗΣ (mm) (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (%)
1,5A, 200μsec	8,17	8,17	8,18	8,16	8,13	8,162	1,77
1,5A, 300μsec	8,17	8,19	8,2	8,18	8,21	8,19	2,12
1,5A, 500μsec	8,19	8,21	8,23	8,21	8,22	8,212	2,39



Σχήμα 4.2: Εξάρτηση της απόκλισης διάστασης από τη διάρκεια παλμού και την πολικότητα εργαλείου για το υλικό #2 (μετρήσεις με μικρόμετρο)

ΥΛΙΚΟ #2 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ							
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΟΠΗΣ (mm) (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (%)
1,5A, 200μsec	8,1	8,1	8,1	8	8,1	8,08	0,75
1,5A, 300μsec	8,2	8,2	8,1	8,2	8,1	8,16	1,75
1,5A, 500μsec	8,2	8,2	8,3	8,1	8,3	8,22	2,49
1,5A, 750μsec	8,4	8,2	8,2	8,3	8,4	8,3	3,49
1,5A, 1000μsec	8,4	8,3	8,3	8,4	8,3	8,34	3,99

ΥΛΙΚΟ #2 (ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ							
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΟΠΗΣ (mm) (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (%)
1,5A, 200μsec	8,3	8,2	8,2	8,3	8,1	8,22	2,49
1,5A, 300μsec	8,4	8,2	8,3	8,3	8,2	8,28	3,24
1,5A, 500μsec	8,3	8,4	8,4	8,3	8,2	8,32	3,74



Σχήμα 4.3: Εξάρτηση της απόκλισης διάστασης από τη διάρκεια παλμού και την πολικότητα εργαλείου για το υλικό #2 (μετρήσεις με μικροσκόπιο)

Επίδραση της διάρκειας του παλμού στην ακρίβεια διαστάσεων:

- Οι οπές που διανοίχθηκαν δεν είχαν απόλυτα κυκλικό σχήμα, αλλά παρουσίαζαν κάποιες τοπικές αποκλίσεις στο σχήμα τους, λόγω ρωγμών και τοπικών καταστροφών του υλικού της μήτρας γύρω από αυτές. Αυτό διακρίνεται και στις φωτογραφίες που ελήφθησαν. Οι αποκλίσεις αυτές ήταν πιο έντονες όσο πιο μεγάλη ήταν η διάρκεια παλμού και όταν είχαμε αρνητική πολικότητα εργαλείου. Το γεγονός αυτό έκανε σχετικά επίπονη τη διαδικασία μέτρησης στο μικροσκόπιο, καθώς υπήρχε μια σχετική σύγχυση για το που ξεκινά στην πραγματικότητα η οπή. Γι' αυτό το λόγο θεωρούνται πιο αξιόπιστες οι μετρήσεις με το μικρόμετρο εσωτερικών διαστάσεων.
- Από τις μετρήσεις και με τα δύο όργανα, η απόκλιση της διαμέτρου της οπής από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου φαίνεται γενικά να μεγαλώνει όσο αυξάνει η διάρκεια του παλμού, δηλαδή όσο η κατεργασία γίνεται πιο έντονη. Στις μετρήσεις με το μικροσκόπιο η αύξηση της απόκλισης φαίνεται να γίνεται πιο ραγδαία απ' ότι με το μικρόμετρο.
- Οι αποκλίσεις θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν από ανεκτές ως καλές, εφ' όσον αντιστοιχούν σε διαφορά διάστασης που κυμαίνεται από 10 έως 20μm (από 1,35-2,47%) όσον αφορά το μικρόμετρο. Το μικροσκόπιο δίνει λίγο χειρότερη εικόνα για την απόκλιση, αφού αυτή φτάνει ως και 4%, παρ' όλα αυτά είναι ακόμη ανεκτή.
- Οι λόγοι που έχουμε απόκλιση των διαμέτρων είναι ίδιοι με αυτούς που περιγράφηκαν και για το υλικό #1 (θυσανοειδής διάχυση φορτίου, εκκενώσεις από την παράπλευρη επιφάνεια).

Επίδραση της πολικότητας στην ακρίβεια διαστάσεων:

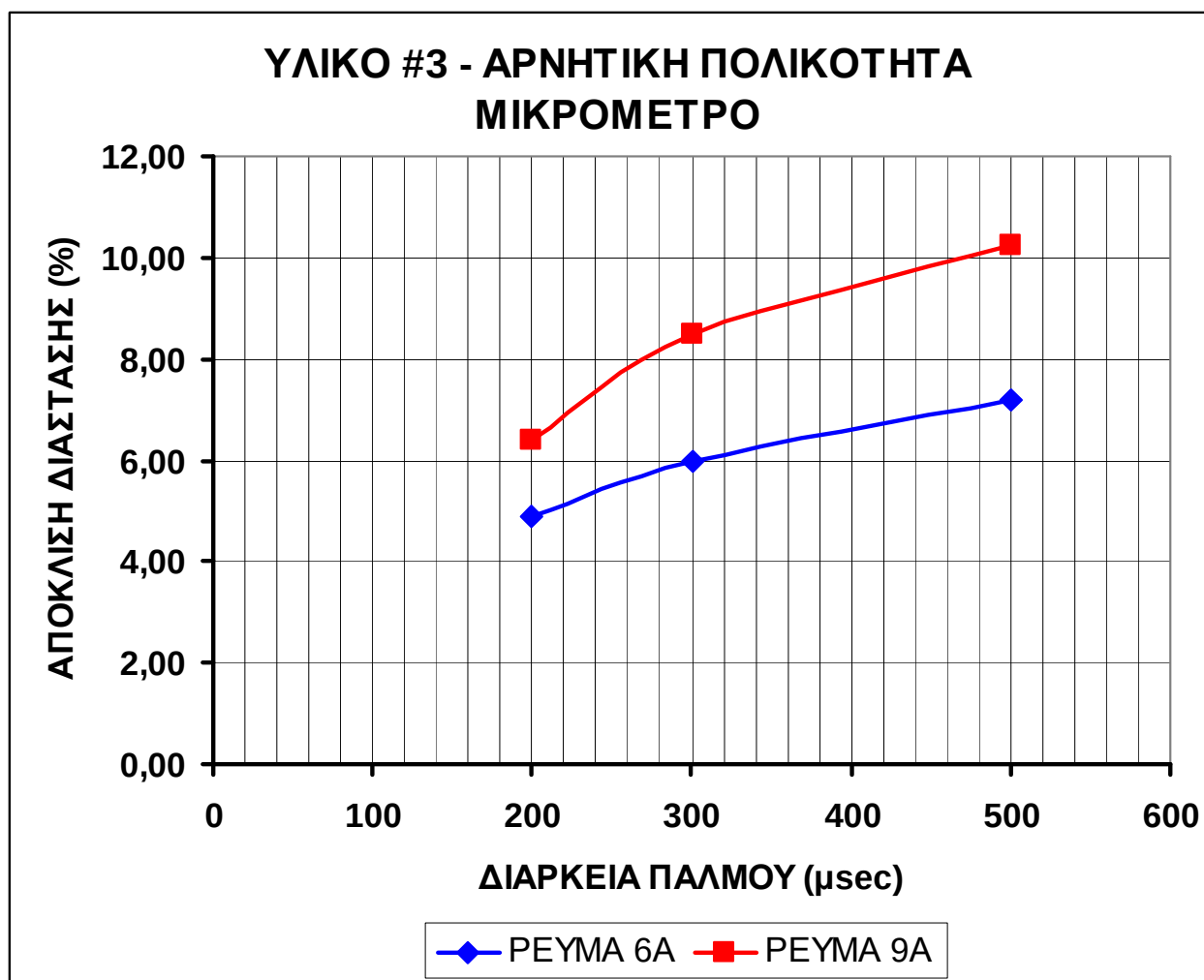
- Με αρνητική πολικότητα εργαλείου φαίνεται να έχουμε μεγαλύτερη απόκλιση διαστάσεων για τις ίδιες διάρκειες παλμών. Σε κάποιες περιπτώσεις η απόκλιση στην αρνητική πολικότητα φτάνει να είναι η διπλάσια από την αντίστοιχή της στη θετική πολικότητα.

- Η απόκλιση των οπών από το κυκλικό σχήμα και οι τοπικές καταστροφές στο χείλος τους γίνονται πιο έντονες όταν έχουμε κατεργασία με αρνητική πολικότητα.
- Ένα συμπέρασμα που προκύπτει λοιπόν άμεσα, είναι πως η θετική πολικότητα εργαλείου στην κατεργασία σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες άνθρακα επιτυγχάνει μεγαλύτερη ακρίβεια στις διαστάσεις από την αρνητική πολικότητα.

Υλικό #3

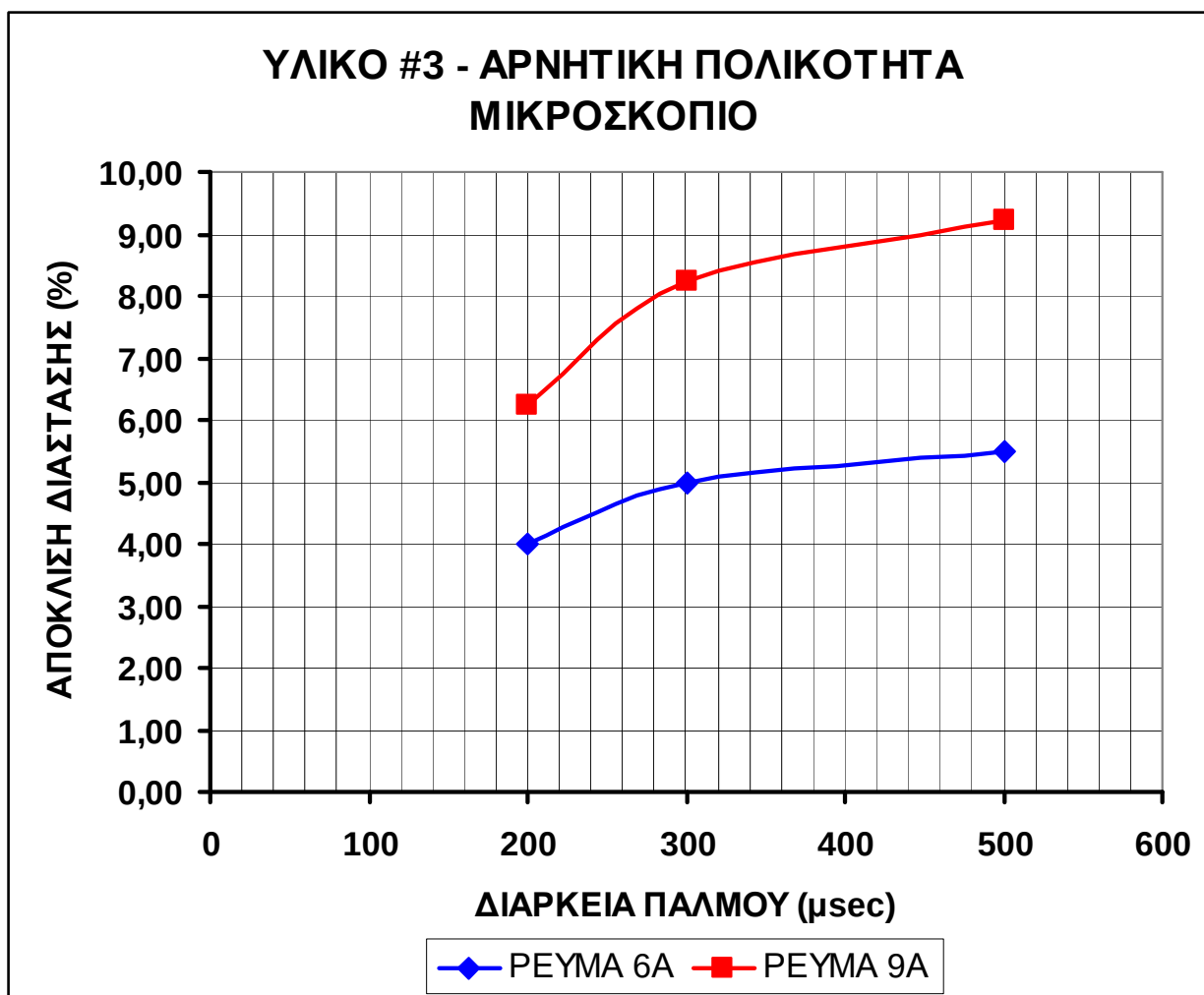
Οι οπές στο υλικό #2 έγιναν με αρνητική πολικότητα εργαλείου, ενώ **χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο διαμέτρου 8,02mm**, και με βάση αυτή τη διάμετρο υπολογίστηκε η ποσοστιαία απόκλιση. Οι διαμέτροι των οπών του μετρήθηκαν με το οπτικό μικροσκόπιο DXR-Leika και με το μικρόμετρο εσωτερικών διαστάσεων. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων στους πίνακες. Παρουσιάζονται επίσης σε πίνακες τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την ποσοστιαία απόκλιση των διαμέτρων των οπών και τα διαγράμματα της ποσοστιαίας απόκλισης συναρτήσει της διάρκειας παλμού.

ΥΛΙΚΟ #3 (ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΙΚΡΟΜΕΤΡΟ							
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΟΠΗΣ (mm) (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (%)
6A, 200μsec	8,43	8,41	8,37	8,42	8,43	8,412	4,89
6A, 300μsec	8,51	8,52	8,49	8,55	8,42	8,498	5,96
6A, 500μsec	8,57	8,59	8,63	8,61	8,59	8,598	7,21
9A, 200μsec	8,59	8,56	8,43	8,62	8,47	8,534	6,41
9A, 300μsec	8,74	8,69	8,72	8,58	8,77	8,7	8,48
9A, 500μsec	9,15	8,66	8,73	8,68	8,98	8,84	10,22



Σχήμα 4.4: Εξάρτηση της απόκλισης διάστασης από τη διάρκεια παλμού και την ένταση του ρεύματος για το υλικό #3 (μετρήσεις με μικρόμετρο)

ΥΛΙΚΟ #3 (ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ							
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΟΠΗΣ (mm) (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (%)
6Α, 200μsec	8,5	8,3	8,2	8,4	8,3	8,34	3,99
6Α, 300μsec	8,4	8,5	8,5	8,4	8,3	8,42	4,99
6Α, 500μsec	8,4	8,5	8,4	8,5	8,5	8,46	5,49
9Α, 200μsec	8,6	8,5	8,5	8,6	8,4	8,52	6,23
9Α, 300μsec	8,6	8,7	8,6	8,8	8,7	8,68	8,23
9Α, 500μsec	8,7	8,9	8,7	8,8	8,7	8,76	9,23



Σχήμα 4.5: Εξάρτηση της απόκλισης διάστασης από τη διάρκεια παλμού και την ένταση του ρεύματος για το υλικό #3 (μετρήσεις με μικροσκόπιο)

Επίδραση της διάρκειας του παλμού στην ακρίβεια διαστάσεων:

- Και εδώ οι οπές που διανοίχθηκαν δεν είχαν απόλυτα κυκλικό σχήμα, αλλά παρουσίαζαν κάποιες τοπικές αποκλίσεις στο σχήμα τους, λόγω ρωγμών και τοπικών καταστροφών του υλικού της μήτρας γύρω από αυτές, ακόμα μεγαλύτερες μάλιστα από ότι σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις. Στην περίπτωση δε της οπής που διανοίχθηκε με 9Α, 500μsec είχαμε αντί για κυκλικό σχεδόν ελλειπτικό σχήμα. Οι αποκλίσεις και εδώ ήταν πιο έντονες όσο πιο μεγάλη ήταν η διάρκεια παλμού. Το γεγονός αυτό έκανε σχετικά επίπονη τη διαδικασία μέτρησης στο μικροσκόπιο, καθώς υπήρχε μια σχετική σύγχυση για το

που ξεκινά στην πραγματικότητα η οπή. Γι' αυτό το λόγο θεωρούνται πιο αξιόπιστες οι μετρήσεις με το μικρόμετρο εσωτερικών διαστάσεων.

- Από τις μετρήσεις και με τα δύο όργανα, η απόκλιση της διαμέτρου της οπής από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου φαίνεται γενικά να μεγαλώνει όσο αυξάνει η διάρκεια του παλμού, δηλαδή όσο η κατεργασία γίνεται πιο έντονη. Μάλιστα, για τα 9A η απόκλιση αυξάνεται αρκετά πιο ραγδαία συναρτήσει της διάρκειας παλμού απ' ό τι στα 6A.
- Οι αποκλίσεις εδώ είναι αρκετά μεγάλες-ξεκινούν από 4% και αγγίζουν το 10,22%, ποσοστό που είναι πολύ μεγάλο.

Επίδραση της έντασης του ρεύματος στην ακρίβεια διαστάσεων:

- Όσο μεγαλώνει το ρεύμα φαίνεται να έχουμε μεγαλύτερη απόκλιση διαστάσεων για τις ίδιες διάρκειες παλμών. Αυτή η εντύπωση ενισχύεται αν αποτολμήσουμε μια άτυπη σύγκριση και με τις αποκλίσεις στις οπές του υλικού #2 που έγιναν με αρνητική πολικότητα και ρεύμα 1,5A. Η απόκλιση στην περίπτωση των 9A φτάνει να είναι μέχρι και 1,5 φορά μεγαλύτερη από την αντίστοιχή της στα 6A.
- Οι λόγοι που έχουμε απόκλιση των διαμέτρων είναι ίδιοι με αυτούς που περιγράφηκαν και για το υλικό #1 (θυσανοειδής διάχυση φορτίου, εκκενώσεις από την παράπλευρη επιφάνεια). Μάλιστα εδώ οι διαχύσεις του φορτίου και οι παράπλευρες εκκενώσεις γίνονται πολύ πιο έντονες, λόγω των μεγαλύτερων εντάσεων ρευμάτων
- Η απόκλιση των οπών από το κυκλικό σχήμα και οι τοπικές καταστροφές στο χείλος τους γίνονται πιο έντονες όταν έχουμε μεγαλύτερα ρεύματα.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Βλέπουμε από τα προηγούμενα αποτελέσματα πως **μεγαλύτερη ακρίβεια διάστασης** έχουμε με τρεις τρόπους:

- Διατηρώντας **μικρή διάρκεια παλμών**.
- Ρυθμίζοντας το εργαλείο να έχει **θετική πολικότητα**.
- Διατηρώντας **μικρή ένταση ρεύματος**.

Για να γίνει γενικά πιο αξιόπιστη και προβλέψιμη η συγκεκριμένη κατεργασία, θα μπορούσαν να γίνουν σειρές πειραμάτων που θα εξετάζουν και θα προσδιορίζουν τη μεταβολή της ακρίβειας διάστασης ανάλογα με τις συνθήκες της κατεργασίας και να δημιουργηθούν τα κατάλληλα διαγράμματα που θα δίνουν την ποσοστιαία απόκλιση της διάστασης, προκειμένου να μπορεί να προβλεφθεί πόσο μικρότερο πρέπει να είναι το χρησιμοποιούμενο εργαλείο για να επιτευχθεί η επιθυμητή διάσταση.

5. ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗ ΦΘΟΡΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

5.1 ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ήταν εμφανές πως κάποιες συνθήκες κατεργασίας απέδιδαν εμφανώς καλύτερα από τις υπόλοιπες όσον αφορά τη χρονική τους διάρκεια. Ως μέτρο για την ταχύτητα της κατεργασίας χρησιμοποιείται ο **ρυθμός αποβολής υλικού, V_w [mm^3/min]**, ο οποίος δείχνει τον όγκο του υλικού που απομακρύνεται στη μονάδα του χρόνου. Άρα για τον υπολογισμό του πρέπει να είναι γνωστός ο όγκος του υλικού που αφαιρέθηκε και η χρονική διάρκεια της κατεργασίας.

Για να υπολογιστεί ο όγκος, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις που έγιναν για τις διαμέτρους των οπών, συγκεκριμένα του Tesavisio-300 για το υλικό #1 και του μικρομέτρου για τα υλικά #2 και #3, διότι θεωρούνται πιο αξιόπιστες από τις υπόλοιπες. Θεωρήθηκε ότι οι οπές είναι κύλινδροι, με διάμετρο σταθερή καθ' όλο το βάθος της τρύπας και βάθος αυτό που ρυθμιζόταν στην ειδική μετρητική μονάδα της εργαλειομηχανής. Για την καταγραφή του χρόνου χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό χρονόμετρο. **Το πηλίκο του όγκου σε mm^3 ως προς τον χρόνο κατεργασίας σε min μας δίνει το ρυθμό αποβολής υλικού.**

Στις περιπτώσεις που έγινε επιτυχώς διάνοιξη οπής, η κατεργασία συνοδευόταν από μικρούς κίτρινους σπινθηρισμούς, λίγο καπνό που αναδυόταν από το διάκενο και το χαρακτηριστικό θόρυβο που κάνει η εργαλειομηχανή όταν γίνεται κοπή. Τα φαινόμενα αυτά γίνονταν πιο έντονα όσο πιο έντονες ήταν οι συνθήκες κατεργασίας. Υπήρχαν όμως και περιπτώσεις οπών που ενώ αρχικά φαινόταν να σχηματίζονται επιτυχώς, πριν ολοκληρωθεί η κατεργασία αποτύγχαναν. Η αποτυχία μιας προσπάθειας γινόταν αντιληπτή από τον έντονο θόρυβο, τους πολύ έντονους και συνεχείς κίτρινους σπινθηρισμούς (σαν να γίνεται ανάφλεξη), τον καπνό στη θέση του τεμαχίου και την έντονη μυρωδιά καμένου διηλεκτρικού. Οι αποτυχίες αυτές συνοδεύονταν από επιφάνειες οι οποίες είχαν καεί και είχαν αναπτύξει υψηλές θερμοκρασίες, ενώ πάνω τους υπήρχε ένα στρώμα ψαθυρού υλικού, που

απομακρυνόταν εύκολα. Στο **σχήμα 5.1** διακρίνονται κάποια από τα φαινόμενα που συνοδεύουν μια αποτυχημένη προσπάθεια.

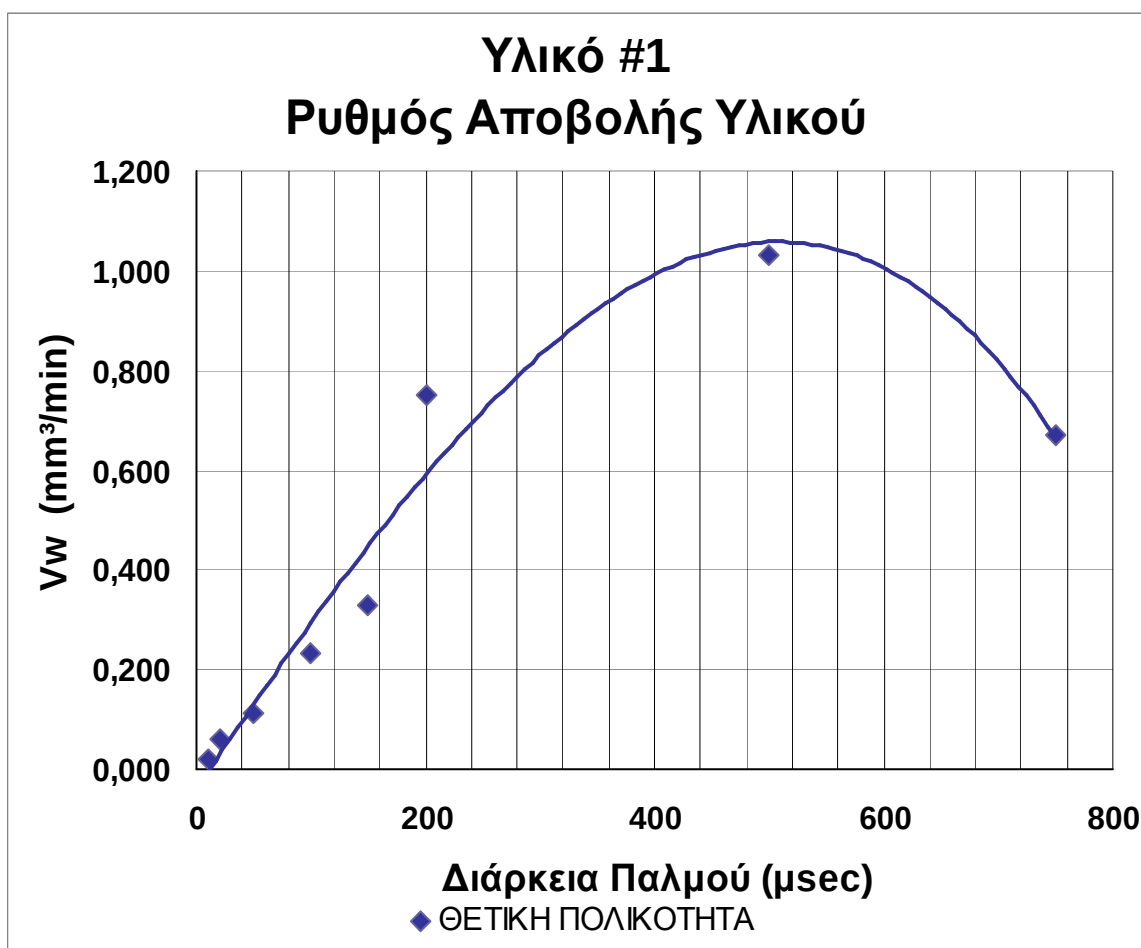


Σχήμα 5.1: Οπτικά φαινόμενα που συνοδεύουν αποτυχημένη κατεργασία

Στις περιπτώσεις που χρειάστηκε να γίνουν πάνω από μια προσπάθειες για να διανοιχθεί η οπή, σημειωνόταν για κάθε προσπάθεια ο χρόνος που είχε παρέλθει για τον τερματισμό της και το βάθος στο οποίο είχε φτάσει η οπή. Έτσι, το τελικό βάθος τους προέκυψε ως το άθροισμα των επιμέρους βαθών, ενώ το ίδιο έγινε και για το χρόνο. Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε πίνακες, καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματά τους.

Υλικό #1

ΥΛΙΚΟ #1 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)					
ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ					
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	ΒΑΘΟΣ (mm)	ΧΡΟΝΟΣ (min)	Vw (mm ³ /min)
1,5	10	4,45	0,5	364	0,021
1,5	20	4,501	0,5	133	0,060
1,5	50	4,503	0,5	72	0,111
1,5	100	4,56	0,5	35	0,233
1,5	150	4,591	0,5	25	0,331
1,5	200	4,588	0,5	11	0,751
1,5	500	4,588	0,5	8	1,033
1,5	750	4,715	0,5	13	0,672



Σχήμα 5.2: Εξάρτηση του ρυθμού αποβολής υλικού από τη διάρκεια παλμού για το υλικό #1

Η πραγματική καμπύλη του ρυθμού αποβολής υλικού στο **σχήμα 5.2** για το υλικό #1 έχει προσεγγιστεί με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού (παραβολή), καθώς υπάρχει μόνο ένα μέγιστο στο διάγραμμα.

Επίδραση της διάρκειας παλμού στο ρυθμό αποβολής υλικού:

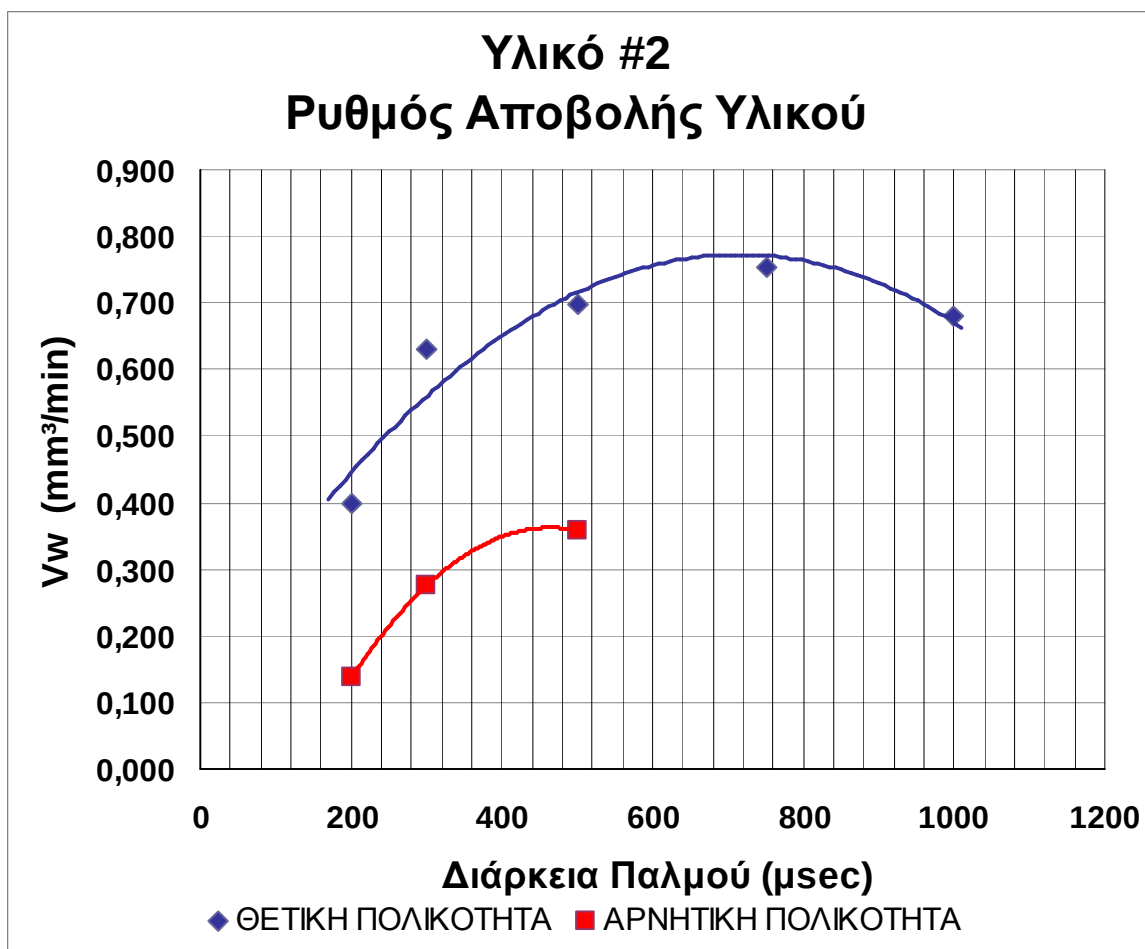
- Ο ρυθμός αποβολής υλικού στην περιοχή από 10μsec ως και 500μsec αυξάνεται αρκετά ραγδαία όσο μεγαλώνει η διάρκεια παλμού. Πιάνει μια μέγιστη τιμή ($1,033\text{mm}^3/\text{min}$) στα 500μsec και έπειτα δείχνει να μειώνεται όσο αυξάνει η διάρκεια παλμού.
- Οι τιμές ρυθμών αποβολής που υπολογίστηκαν μπορούν να χαρακτηριστούν πολύ μικρές, ιδιαίτερα στις μικρές διάρκειες παλμού και συνεπώς και η κατεργασία με τη σειρά της μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη αποδοτική όσον αφορά το χρόνο περάτωσής της. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι με τις συνθήκες που φαίνονται να είναι οι βέλτιστες (δηλ. 1,5A και 500μsec – $1,033\text{mm}^3/\text{min}$), για να διανοιχθεί μια οπή βάθους 2mm χρειάζονται περίπου 30min.
- Είναι πολύ πιθανό ότι ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται σε μια απλή εκκένωση, σε διάρκεια παλμού μεγαλύτερη από 500μsec, είναι τόσο μεγάλος που οι συνθήκες του διακένου για την επόμενη εκκένωση αλλάζουν εντελώς και παρεμποδίζεται η σωστή διεξαγωγή της. Συνεπώς έτσι εμφανίζεται μειωμένος ο ρυθμός αποβολής υλικού.

Υλικό #2

Για το υλικό #2, αφού μελετήθηκαν τα αποτελέσματα του ρυθμού αποβολής για το προηγούμενο υλικό, αποφασίστηκε ότι θα γίνουν δοκιμές στην περιοχή από 200μsec ως 1000μsec, η οποία φαίνεται να είναι και η βέλτιστη περιοχή γι' αυτού του τύπου τα υλικά, όσον αφορά την ταχύτητα κατεργασίας τους. Στις δοκιμές που έγιναν στο υλικό #2 φαίνεται η επίδραση της διάρκειας του παλμού και της πολικότητας στο ρυθμό αποβολής υλικού. Ακολουθεί ο πίνακας με τα αποτελέσματα και το αντίστοιχο του **σχήμα 5.3**.

ΥΛΙΚΟ #2 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)					
ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ					
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	ΒΑΘΟΣ (mm)	ΧΡΟΝΟΣ (min)	Vw (mm ³ /min)
1,5	200	8,128	2	260,06	0,399
1,5	300	8,162	4,46	370,34	0,630
1,5	500	8,184	4,03	303,26	0,699
1,5	750	8,208	2	140,51	0,753
1,5	1000	8,218	2	155,82	0,681

ΥΛΙΚΟ #2 (ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)					
ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ					
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	ΒΑΘΟΣ (mm)	ΧΡΟΝΟΣ (min)	Vw (mm ³ /min)
1,5	200	8,162	0,2	75,79	0,138
1,5	300	8,19	0,2	38,16	0,276
1,5	500	8,212	0,2	29,58	0,358



Σχήμα 5.3: Εξάρτηση του ρυθμού αποβολής υλικού από τη διάρκεια παλμού και την πολικότητα εργαλείου για το υλικό #2

Και στο **σχήμα 5.3**, οι πραγματικές καμπύλες του ρυθμού αποβολής υλικού για το υλικό #2 έχουν προσεγγιστεί με πολυώνυμα δευτέρου βαθμού (παραβολές).

Επίδραση της διάρκειας παλμού στο ρυθμό αποβολής υλικού:

- Ο ρυθμός αποβολής υλικού στην περιοχή από 200μsec ως και 750μsec αυξάνεται όσο μεγαλώνει η διάρκεια παλμού. Για τη θετική πολικότητα, στα 750μsec έχουμε και τη μέγιστη τιμή του (0,753mm³/min). Για την ίδια πολικότητα, ο ρυθμός αποβολής στα 1000μsec (η οποία είναι και η μέγιστη διάρκεια παλμού που μπορούμε να ρυθμίσουμε στη μηχανή), μειώνεται στα 0,681mm³/min. Για την

αρνητική πολικότητα, όπου υπάρχουν μόνο τρεις τιμές, το μέγιστο είναι στα 500μsec.

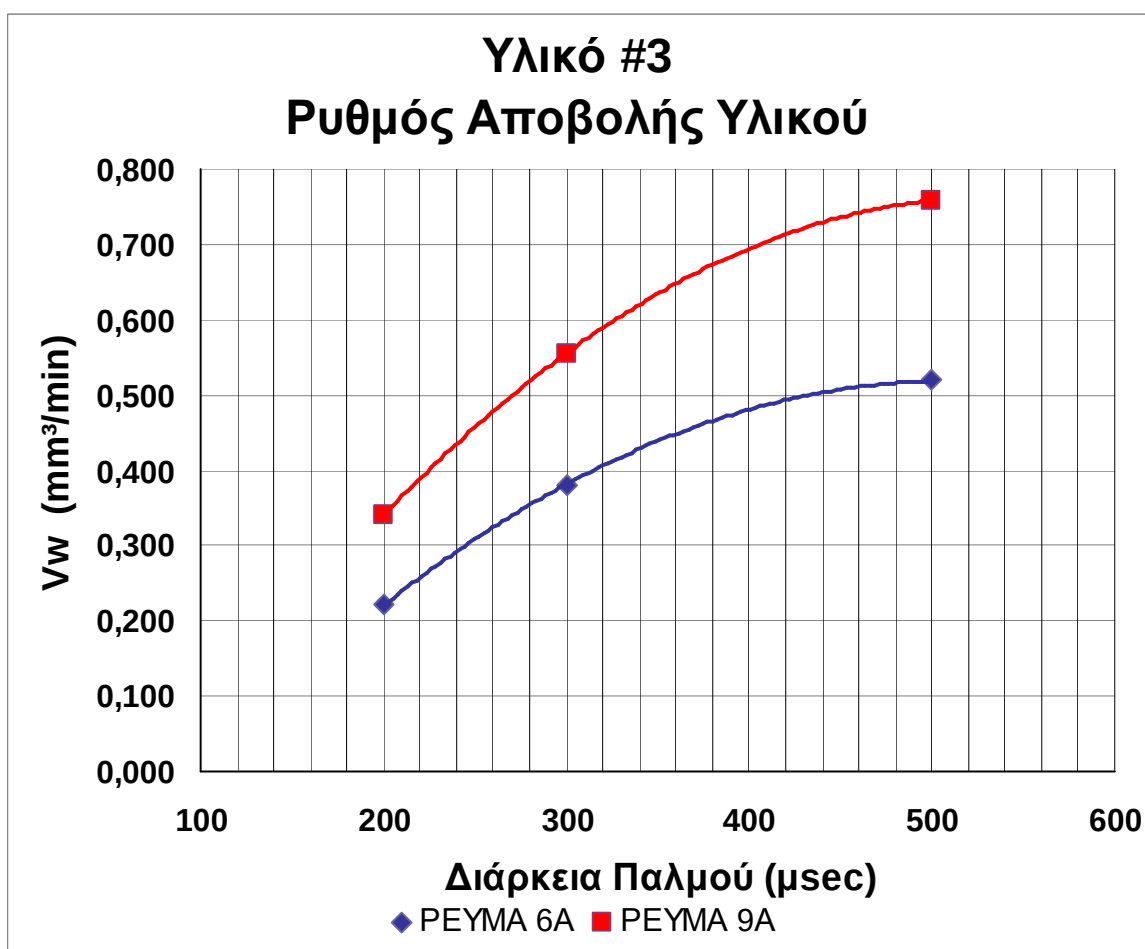
- Οι τιμές ρυθμών αποβολής που υπολογίστηκαν μπορούν να χαρακτηριστούν πολύ μικρές. Αν μάλιστα συγκρίνουμε την καμπύλη της θετικής πολικότητας με την αντίστοιχη του υλικού #1 (για όσα σημεία γίνεται αυτό), βλέπουμε πως ο ρυθμός αποβολής για το υλικό #2 είναι ακόμα μικρότερος.
- Ο λόγος που ο ρυθμός αποβολής υλικού μειώνεται μετά από κάποια διάρκεια παλμού (750μsec), πιθανότατα είναι πάλι ότι ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται σε μια απλή εκκένωση, σε διάρκεια παλμού μεγαλύτερη από 750μsec, είναι τόσο μεγάλος που οι συνθήκες του διακένου για την επόμενη εκκένωση αλλάζουν εντελώς και παρεμποδίζεται η σωστή διεξαγωγή της.

Επίδραση της πολικότητας στο ρυθμό αποβολής υλικού:

- Με χρήση θετικής πολικότητας στο εργαλείο φαίνεται να επιτυγχάνουμε καλύτερες τιμές για το ρυθμό αποβολής υλικού. Ο ρυθμός αποβολής υλικού για τη θετική πολικότητα είναι πάνω από 2 φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο για την αρνητική πολικότητα (για τις ίδιες διάρκειες παλμού).
- Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, παρατηρήθηκε πως με χρήση θετικής πολικότητας η διεξαγωγή της κατεργασίας γινόταν ομαλότερα απ' ότι με χρήση αρνητικής, και πως εμφανίζονταν γενικά λιγότερα προβλήματα κατά την αποβολή υλικού. Μπορούμε λοιπόν να πούμε πως η θετική πολικότητα είναι καταλληλότερη όσον αφορά τη βελτιστοποίηση του ρυθμού αποβολής υλικού.

Υλικό #3

ΥΛΙΚΟ #3 (ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)					
ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ					
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	ΒΑΘΟΣ (mm)	ΧΡΟΝΟΣ (min)	Vw (mm ³ /min)
6	200	8,412	0,2	50,36	0,221
6	300	8,498	0,2	29,75	0,381
6	500	8,598	0,2	22,38	0,519
9	200	8,534	0,2	33,67	0,340
9	300	8,7	0,2	21,41	0,555
9	500	8,84	0,2	16,19	0,758



Σχήμα 5.4: Εξάρτηση του ρυθμού αποβολής υλικού από τη διάρκεια παλμού και την ένταση του ρεύματος για το υλικό #3

Και στο **σχήμα 5.4**, οι πραγματικές καμπύλες του ρυθμού αποβολής υλικού για το υλικό #2 έχουν προσεγγιστεί με πολυώνυμα δευτέρου βαθμού (παραβολές).

Επίδραση της διάρκειας παλμού στο ρυθμό αποβολής υλικού:

- Ο ρυθμός αποβολής υλικού και για τα δύο ρεύματα αυξάνεται όσο μεγαλώνει η διάρκεια παλμού. Η αύξηση είναι πιο ραγδαία για την περίπτωση των 9A, όπου η καμπύλη του V_w έχει μεγαλύτερη κλίση.
- Οι τιμές ρυθμών αποβολής που υπολογίστηκαν μπορούν να χαρακτηριστούν πολύ μικρές, ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς πως με θετική πολικότητα και πολύ μικρότερη ενέργεια παλμού έχουν βρεθεί μεγαλύτερες τιμές για το V_w .

Επίδραση της έντασης του ρεύματος στο ρυθμό αποβολής υλικού:

- Με αύξηση της εντάσεως του ρεύματος, μεγαλώνει ο ρυθμός αποβολής υλικού για τις ίδιες διάρκειες παλμών. Με μια άτυπη σύγκριση και με την καμπύλη αρνητικής πολικότητας του υλικού #2, το παραπάνω επιβεβαιώνεται ακόμη περισσότερο. Οι κατεργασίες ήταν πολύ έντονες, ιδιαίτερα στα 9A, και οδηγούσαν συχνά στην ανάπτυξη προβλημάτων.
- Σε μεγάλες τιμές έντασης ρεύματος, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται εδώ, έχουμε αρκετά ανεπτυγμένο το φαινόμενο της τήξης της ρητίνης του υλικού, ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών στο τεμάχιο. Οι υψηλές θερμοκρασίες αναπτύσσονται διότι έχουμε μεγαλύτερα ποσά πρόσδωσης ενέργειας παλμού, ενώ η αντίσταση του τεμαχίου είναι μεγαλύτερη από αυτή του ηλεκτροδίου, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο τεμάχιο. Η τηγμένη ρητίνη, η οποία δεν απομακρύνεται αποτελεσματικά με το διηλεκτρικό, κυκλοφορεί στο διάκενο κατεργασίας και πήζει στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, παρεμποδίζοντας έτσι την ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και οδηγώντας σε χαμηλές τιμές ρυθμού αποβολής υλικού.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Βλέπουμε από τα προηγούμενα αποτελέσματα πως **μεγαλύτερο ρυθμό αποβολής υλικού** έχουμε με **θετική πολικότητα, ένταση ρεύματος 1,5A και διάρκεια παλμών στην περιοχή από 500μsec έως 750μsec**, ανάλογα με το υλικό.
- Οι τιμές που βρέθηκαν για τον ρυθμό αποβολής υλικού είναι γενικά πολύ μικρές, γεγονός που καθιστά την κατεργασία ασύμφορη για χρήση σε βιομηχανική κλίμακα. Δεν μας δόθηκε όμως η δυνατότητα να μελετήσουμε με σωστό τρόπο την επίδραση της έντασης του ρεύματος, καθώς στη συγκεκριμένη εργαλειομηχανή μετά το 1,5A η αμέσως επόμενη τιμή ήταν τα 3A, χωρίς καμιά δυνατότητα διερεύνησης του τι γίνεται στις ενδιάμεσες τιμές ρευμάτων. Επίσης δεν υπήρξε δυνατότητα μελέτης της επίδρασης της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών, καθώς αυτή η ρύθμιση στη μηχανή γινόταν μόνο ποιοτικά.
- Θα πρέπει να διερευνηθεί σε πιο σύγχρονες εργαλειομηχανές και με πιο ενδεδειγμένο τρόπο η συμπεριφορά των υλικών αυτής της φύσης, σε εντάσεις ρεύματος μεγαλύτερες από 1,5A και σε μικρότερες αποστάσεις ρευμάτων. Καλό θα ήταν επίσης να μελετηθεί η επίδραση της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών.

5.2 ΣΧΕΤΙΚΗ ΦΘΟΡΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Αρχικός σκοπός της μελέτης ήταν και ο προσδιορισμός της σχετικής φθοράς του εργαλείου μετά από κάθε επιτυχημένη κατεργασία. Με τον όρο **σχετική φθορά εργαλείου**, εννοούμε το ποσοστό που αποτελεί ο αφαιρούμενος όγκος από το εργαλείο σε mm³, επί του συνολικού όγκου που αφαιρέθηκε και από το εργαλείο και από το τεμάχιο μετά από μια κατεργασία σε mm³, δηλ.:

$$[V_{\text{εργ.}}/V_{\text{υλικού}}] \times 100\%$$

Επιχειρήθηκε να μετρηθεί ο αφαιρούμενος όγκος από το εργαλείο μετά από κάθε κατεργασία, έχοντας γνωστή τη διάμετρό του και μετρώντας τη διαφορά ύψους του με χρήση βαθύμετρου (σχήμα 3.4). Η μέτρηση με αυτόν τον τρόπο αποδείχτηκε πολύ δύσκολη, καθώς αφ' ενός η φθορά του εργαλείου γενικά ήταν πολύ μικρή και αφ' ετέρου υπήρχε μεγάλο συστηματικό σφάλμα κατά τη μέτρηση. Έτσι τελικά έγιναν μόνο δύο μετρήσεις του ύψους του εργαλείου, μια πριν ξεκινήσουν οι δοκιμές, μια μετά το πέρας όλων των δοκιμών. Η τιμή του αφαιρούμενου όγκου του εργαλείου, καθώς και η αντίστοιχη τιμή για τη σχετική φθορά παρουσιάζονται εδώ:

Αρχικό ύψος εργαλείου: 8,71mm, Τελικό ύψος εργαλείου: 8,13mm

Διάμετρος εργαλείου: 8,02mm

Αφαιρούμενος όγκος εργαλείου: 16,67mm³

Συνολικός αφαιρούμενος όγκος υλικού: 927,70mm³

Σχετική φθορά εργαλείου: 3,06%

(*** Ο υπολογισμός αυτός της σχετικής φθοράς εργαλείου είναι ενδεικτικός, καθώς αναφέρεται στο σύνολο των κατεργασιών. Παρατίθεται εδώ απλά για να υπάρχει μια εικόνα για τη σχετική φθορά του εργαλείου κι όχι ως αξιόπιστη μέτρηση που λαμβάνεται υπ' όψιν.)

Η τιμή που βρέθηκε για τη σχετική φθορά εργαλείου είναι πολύ μικρή, καθώς στις περισσότερες κατεργασίες υλικών με ηλεκτροδιάβρωση, η

ελάχιστη τιμή του συνήθως φτάνει έως 5%. Γενικά στην αντίστοιχη βιβλιογραφία για σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα, αναφέρεται πως ελάχιστη φθορά εργαλείου επιτυγχάνουμε με χρήση χάλκινου ηλεκτροδίου, καθώς τα ηλεκτρόδια από γραφίτη υπόκεινται σε πολύ σοβαρές φθορές, ενώ οι τιμές της κυμαίνονται από 0,2 έως και 7%, ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας. Υψηλότερες τιμές ρυθμού αποβολής υλικού και μικρή σχετική φθορά εργαλείου είναι συνδεδεμένες με θετική πολικότητα εργαλείου.

Ο λόγος που έχουμε μικρή σχετική φθορά εργαλείου είναι η μεγάλη διαφορά των αντιστάσεων του εργαλείου και του τεμαχίου, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων θερμοκρασιών στο τεμάχιο κι όχι στο ηλεκτρόδιο.

Τέλος, ένας αξιόπιστος τρόπος μέτρησης της σχετικής φθοράς εργαλείου θα ήταν ο εξής: Μετά το πέρας κάθε δοκιμής, να ζυγίζεται το εργαλείο σε ειδική ζυγαριά ακριβείας και να υπολογίζεται η διαφορά στο βάρος του. Έπειτα, με γνωστή την πυκνότητα του υλικού, να υπολογίζεται και η διαφορά στον όγκο του και συνεπώς η απώλεια υλικού.

5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ

Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος που σχετίζεται με την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης είναι η ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης, η οποία υπολογίζεται από την εξής απλοποιημένη σχέση:

$$W_e = \bar{u}_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_e$$

Η σχέση αυτή προέρχεται με τη σειρά της από την σχέση:

$$W_e = \int_{t_e} u_e(t) \cdot i_e(t) \cdot dt$$

Στην απλοποιημένη σχέση η ενέργεια εκκένωσης είναι το γινόμενο της μέσης μετρούμενης τάσης κατά την κατεργασία, της μέσης έντασης ρεύματος και της διάρκειας παλμού. Για τον υπολογισμό της, στη θέση της τάσης βάλαμε την

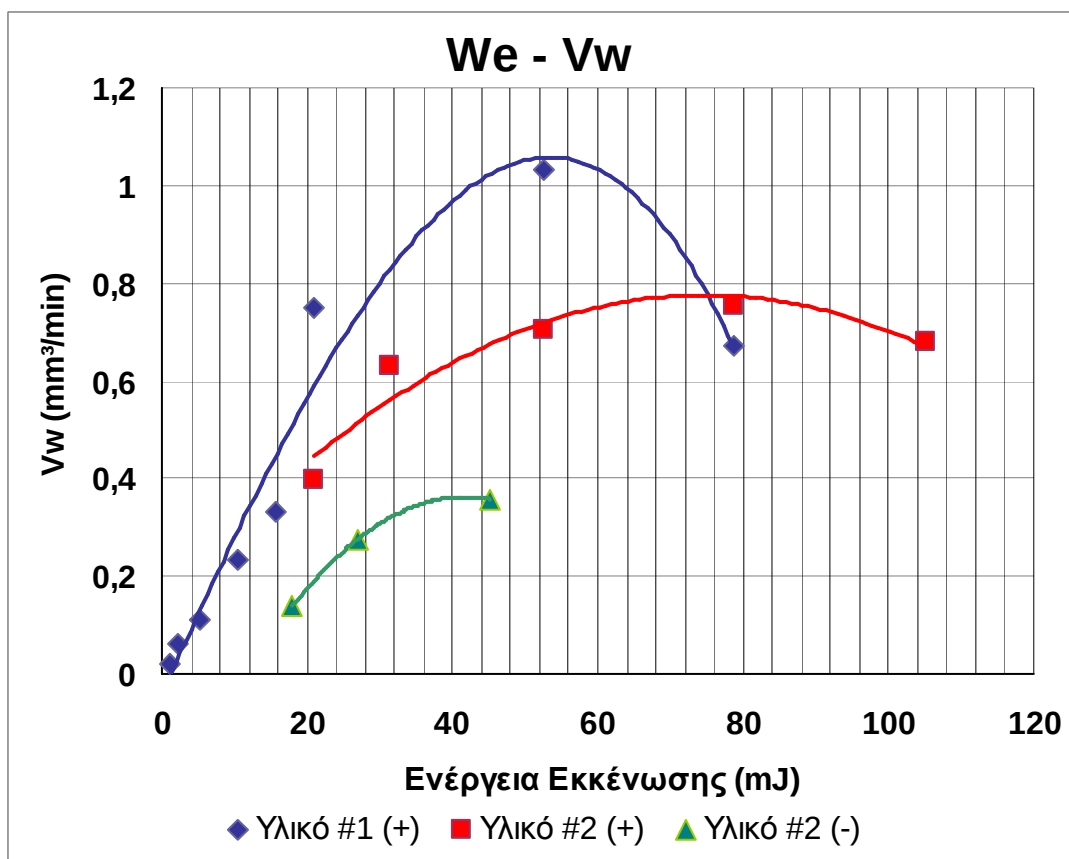
τάση που καταγράφηκε κατά την κατεργασία από το αναλογικό βολτόμετρο, στη θέση της έντασης την τιμή που επιλέχθηκε από τον πίνακα ελέγχου, καθώς και την αντίστοιχη διάρκεια παλμού. Παρατίθενται οι πίνακες με τις αντίστοιχες τιμές.

ΥΛΙΚΟ #1 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)				
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ				
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΤΑΣΗ (V)	We (mJ)	Vw (mm ³ /min)
1,5	10	70	1,05	0,021
1,5	20	70	2,1	0,06
1,5	50	70	5,25	0,111
1,5	100	70	10,5	0,233
1,5	150	70	15,75	0,331
1,5	200	70	21	0,751
1,5	500	70	52,5	1,033
1,5	750	70	78,75	0,672

ΥΛΙΚΟ #2 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)				
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ				
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΤΑΣΗ (V)	We (mJ)	Vw (mm ³ /min)
1,5	200	70	21	0,399
1,5	300	70	31,5	0,63
1,5	500	70	52,5	0,706
1,5	750	70	78,75	0,753
1,5	1000	70	105	0,681

ΥΛΙΚΟ #2 (ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)				
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ				
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΤΑΣΗ (V)	We (mJ)	Vw (mm ³ /min)
1,5	200	60	18	0,138
1,5	300	60	27	0,276
1,5	500	60	45	0,358

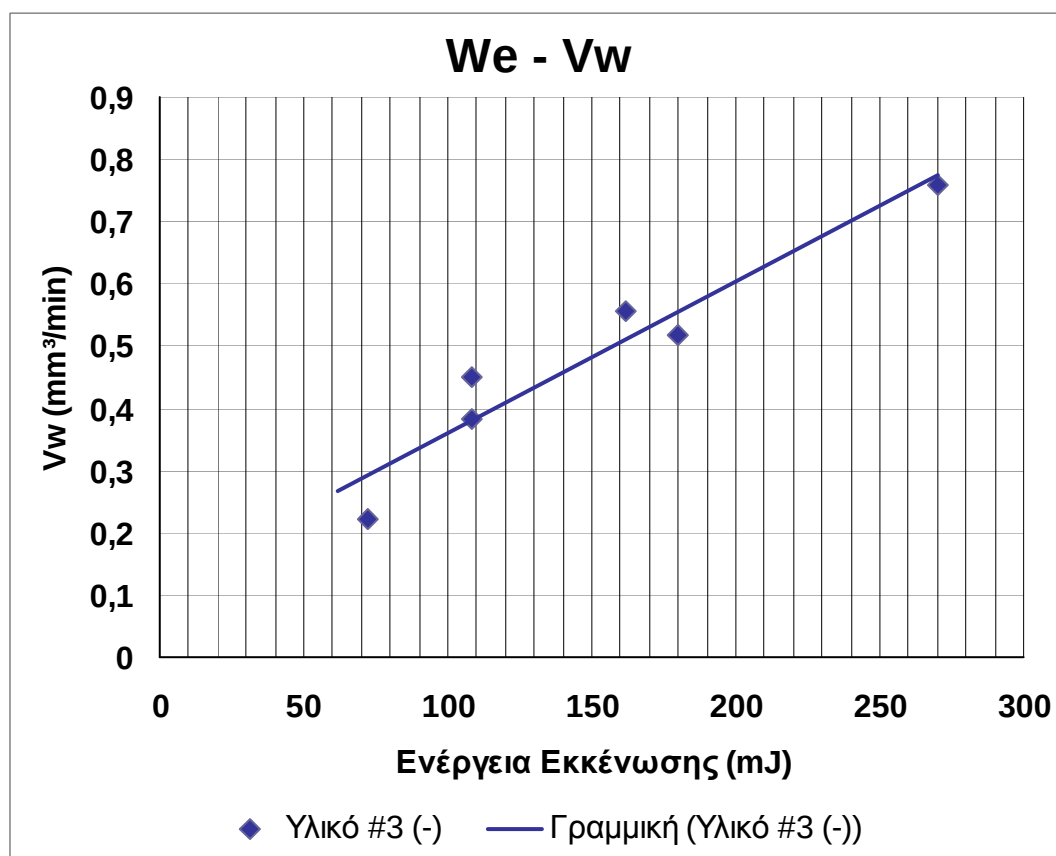
Το αντίστοιχο διάγραμμα (σχήμα 5.5) ενέργειας εκκένωσης και ρυθμού αποβολής υλικού είναι:



Σχήμα 5.5: Εξάρτηση ρυθμού αποβολής υλικού από την ενέργεια εκκένωσης για τα υλικά #1 και #2

ΥΛΙΚΟ #3 (ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)				
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ				
ΡΕΥΜΑ (A)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (μsec)	ΤΑΣΗ (V)	We (mJ)	Vw (mm ³ /min)
6	200	60	72	0,221
6	300	60	108	0,381
6	500	60	180	0,519
9	200	60	108	0,45
9	300	60	162	0,555
9	500	60	270	0,758

Το αντίστοιχο διάγραμμα (σχήμα 5.6) ενέργειας εκκένωσης και ρυθμού αποβολής υλικού είναι:



Σχήμα 5.6: Εξάρτηση ρυθμού αποβολής υλικού από την ενέργεια εκκένωσης για το υλικό #3

Παρατηρήσεις:

- Στο σχήμα 5.5 έχουν τοποθετηθεί οι καμπύλες ρυθμού αποβολής υλικού για τα υλικά #1 και #2, συναρτήσει της ενέργειας εκκένωσης. Παρατηρούμε πως έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα διαγράμματα ρυθμού αποβολής υλικού και διάρκειας παλμού. Αυτό είναι αρκετά προφανές, καθώς η ενέργεια εκκένωσης σε αυτές τις περιπτώσεις εξαρτάται μόνο από τη διάρκεια παλμού, αφού η τάση και η ένταση παραμένουν σταθερές. Έτσι δε μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα για την επίδραση της ενέργειας εκκένωσης σε αυτά τα υλικά.
- Στο σχήμα 5.6 η καμπύλη έχει προσεγγιστεί με τη γραμμή ελαχίστων τετραγώνων. Αυτό έγινε παρά το γεγονός ότι στην καμπύλη υπάρχει μια παραδοξότητα: στην ίδια ενέργεια εκκένωσης 108mJ έχουμε δύο τιμές για το ρυθμό αποβολής υλικού. Αυτό μπορεί ίσως να αποδοθεί στη στοχαστικότητα των αποτελεσμάτων. Μπορούμε λοιπόν να πούμε πως ο ρυθμός αποβολής υλικού αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με την ενέργεια παλμού για το υλικό #3. Βέβαια, στο συμπέρασμα πως ο ρυθμός αποβολής έχει αύξουσα τάση, παίζει ρόλο το ότι στην αρνητική πολικότητα δεν έχουν ληφθεί επιτυχώς μετρήσεις για μεγαλύτερες διάρκειες παλμού, όπου η ταχύτητα της κατεργασίας φαίνεται να φθίνει στα άλλα υλικά.

6. ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

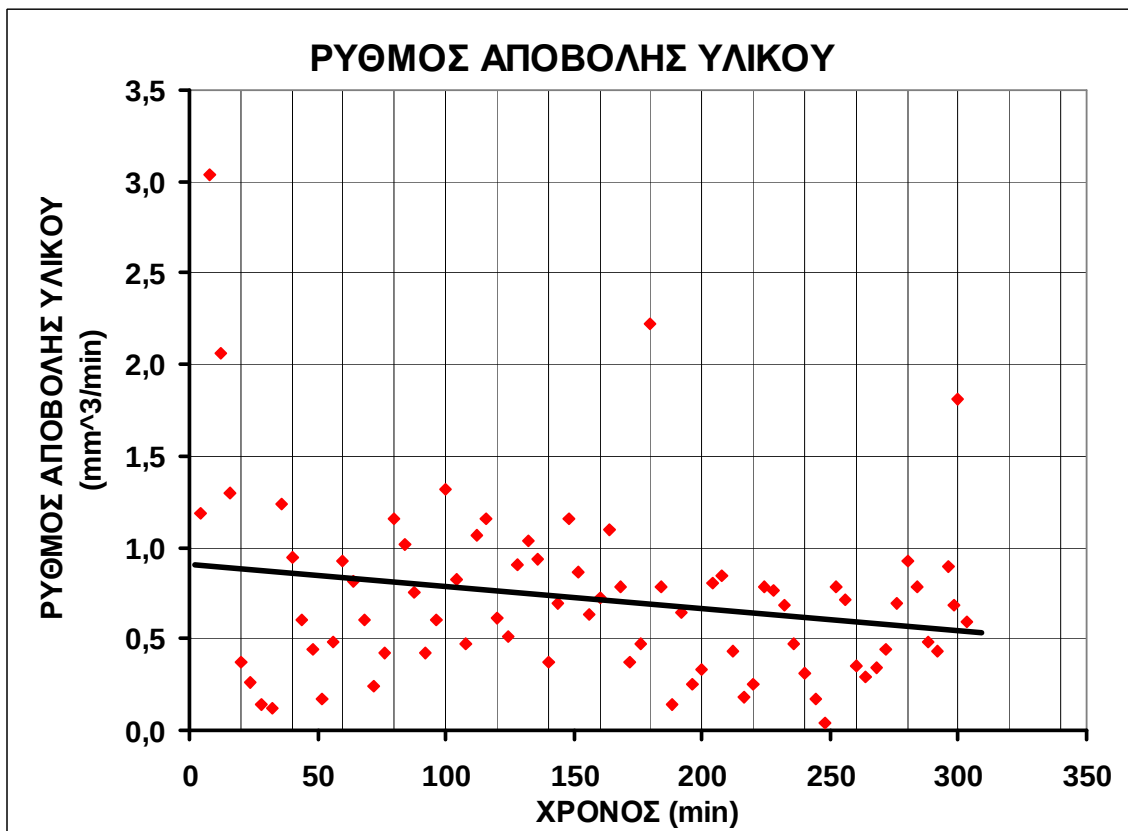
Κατά τη διάρκεια των κατεργασιών της διάτρησης των τεμαχίων, λαμβάνονταν -κάθε τέσσερα λεπτά- από την προσαρτημένη στην εργαλειομηχανή ηλεκτρονική μετρητική διάταξη οι τιμές του βάθους στο οποίο είχε εισχωρήσει το εργαλείο μέσα στο τεμάχιο. Σκοπός ήταν η μελέτη του μηχανισμού αποβολής υλικού και ο εντοπισμός των πιθανών παραμέτρων από τις οποίες επηρεάζεται.

Παρατίθενται ενδεικτικά στον πίνακα, για τη διαμπερή οπή που έγινε στο υλικό #2, με θετική πολικότητα, ένταση ρεύματος 1,5A και διάρκεια παλμού 500μsec, τα αποτελέσματα των μετρήσεων, καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα του βάθους κοπής και του ρυθμού αποβολής υλικού συναρτήσει του χρόνου κατεργασίας (για διάμετρο οπής ίση με 8,184mm, όπως αυτή μετρήθηκε με το μικρόμετρο). Στον πίνακα, ο ρυθμός αποβολής υλικού υπολογίστηκε ως ο *ρυθμός αποβολής υλικού κάθε χρονικού διαστήματος*, από τη χρονική στιγμή t_1 μέχρι την χρονική στιγμή t_2 .

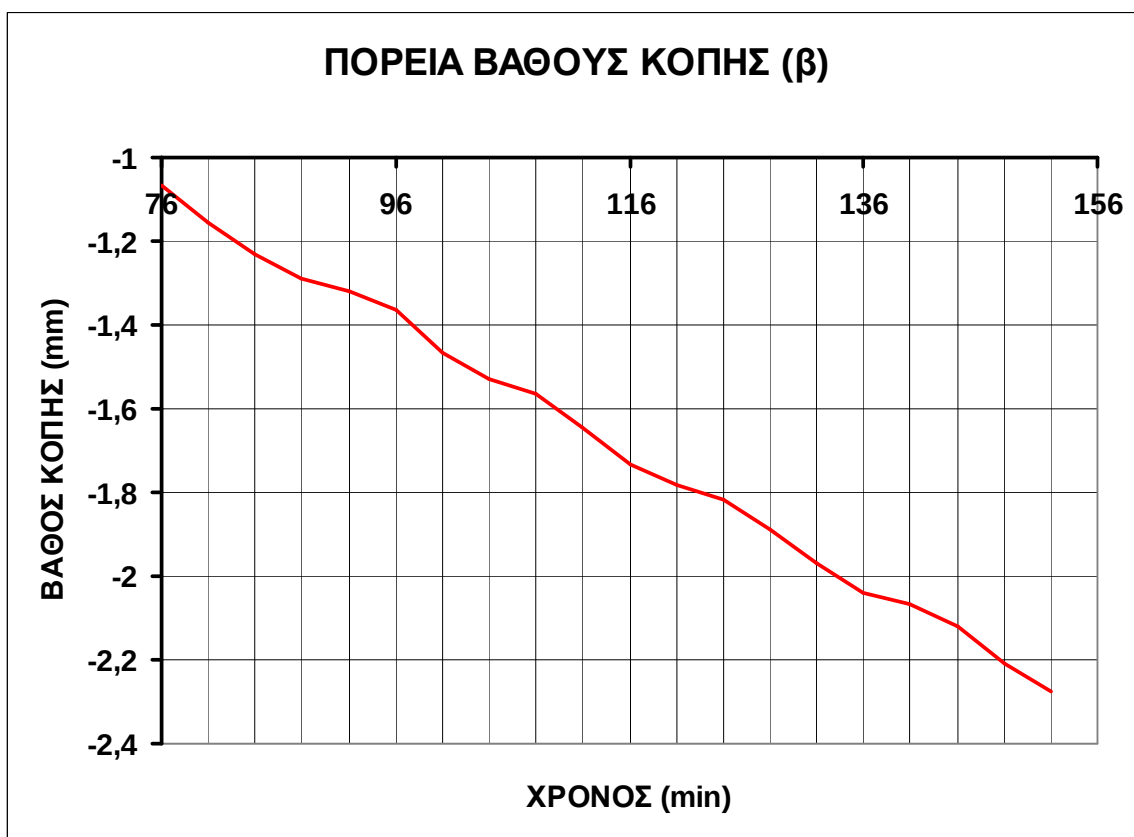
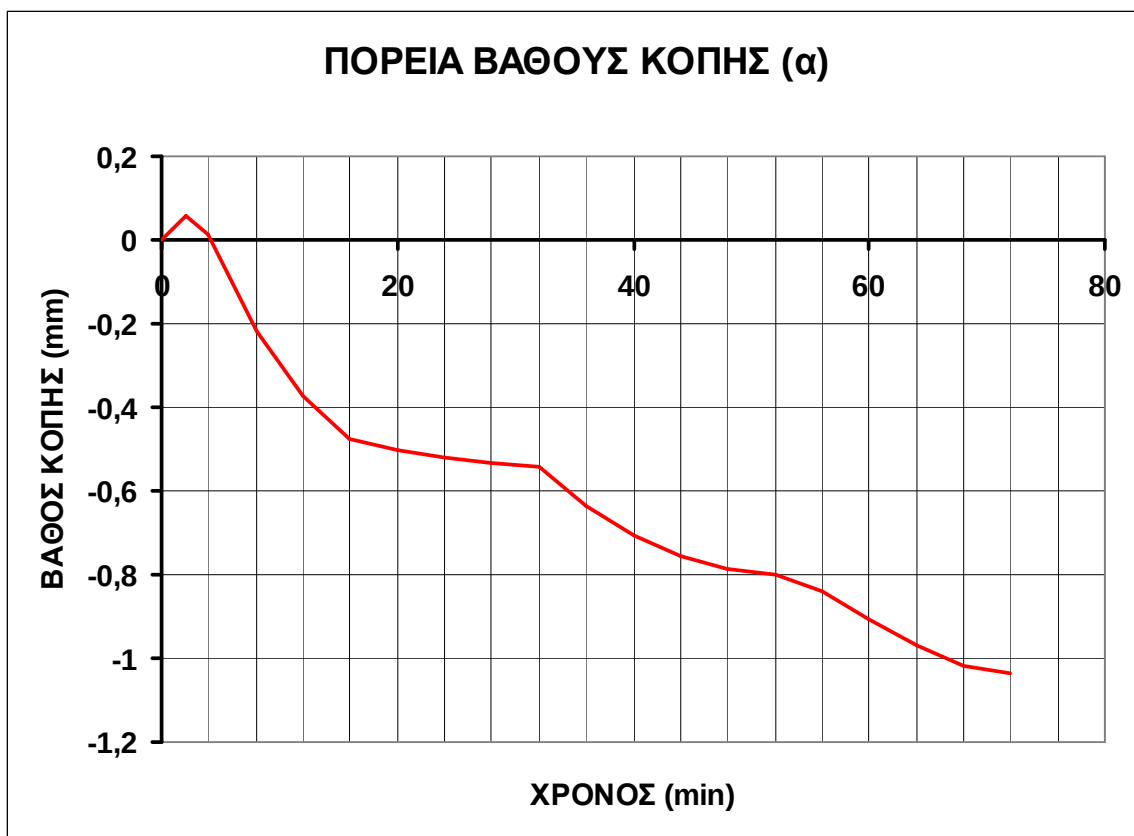
ΥΛΙΚΟ #2, ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΡΕΥΜΑ 1,5A , ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ 500μsec		
ΧΡΟΝΟΣ (min)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (μm)	ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ (mm ³ /min)
0	0	--
2	58	--
4	13	1,18360
8	-218	3,03789
12	-375	2,06472
16	-474	1,30195
20	-502	0,36823
24	-522	0,26302
28	-533	0,14466
32	-542	0,11836
36	-636	1,23620
40	-708	0,94688
44	-754	0,60495
48	-788	0,44714
52	-801	0,17096
56	-838	0,48659
60	-908	0,92057
64	-970	0,81537
68	-1016	0,60495

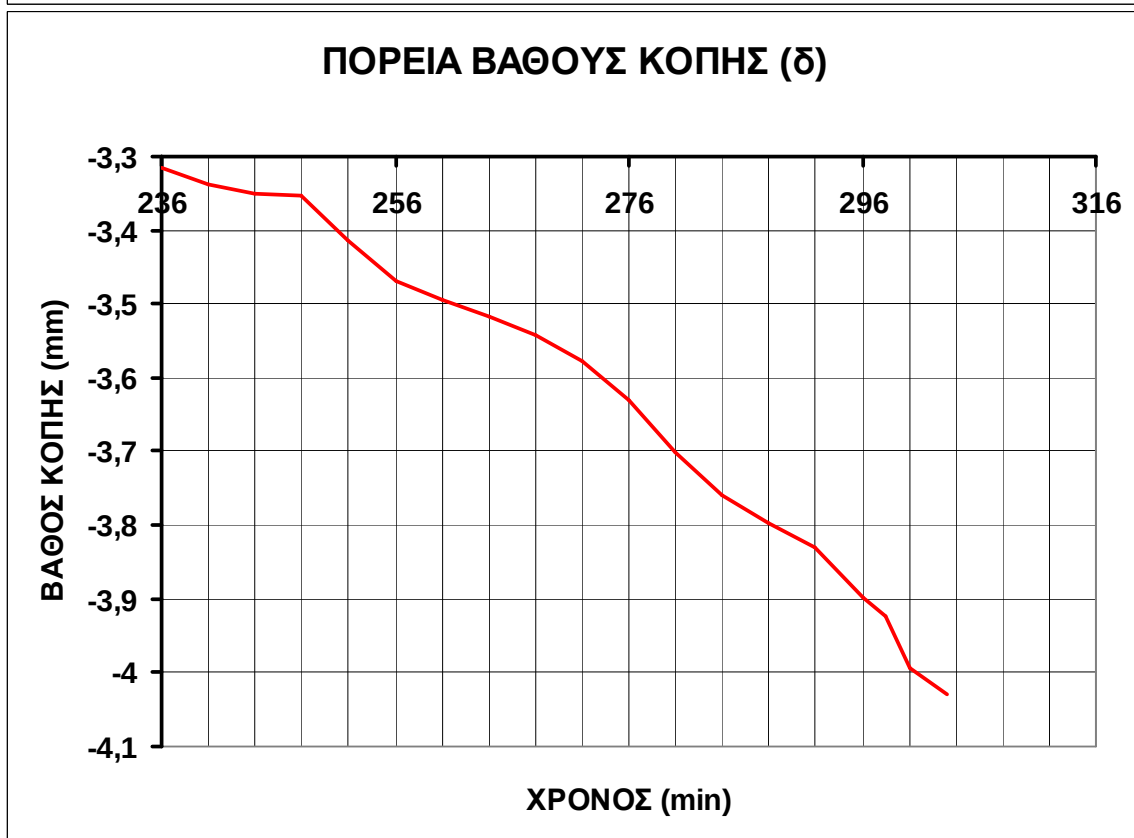
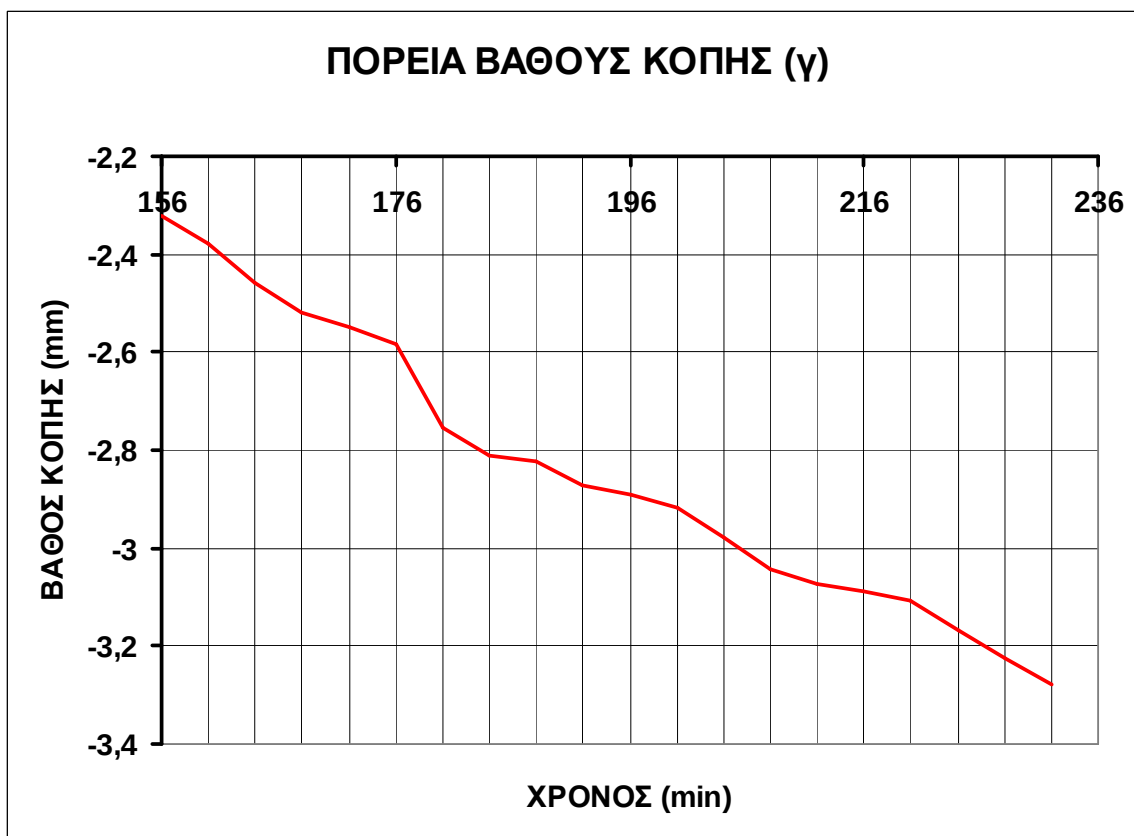
72	-1034	0,23672
76	-1066	0,42083
80	-1154	1,15729
84	-1231	1,01263
88	-1288	0,74961
92	-1320	0,42083
96	-1366	0,60495
100	-1466	1,31511
104	-1529	0,82852
108	-1565	0,47344
112	-1646	1,06524
116	-1734	1,15729
120	-1781	0,61810
124	-1820	0,51289
128	-1889	0,90742
132	-1968	1,03893
136	-2039	0,93373
140	-2067	0,36823
144	-2120	0,69701
148	-2208	1,15729
152	-2274	0,86797
156	-2322	0,63125
160	-2377	0,72331
164	-2460	1,09154
168	-2520	0,78906
172	-2548	0,36823
176	-2584	0,47344
180	-2753	2,22253
184	-2813	0,78906
188	-2824	0,14466
192	-2873	0,64440
196	-2892	0,24987
200	-2917	0,32878
204	-2978	0,80221
208	-3042	0,84167
212	-3075	0,43398
216	-3089	0,18411
220	-3108	0,24987
224	-3168	0,78906
228	-3226	0,76276
232	-3278	0,68386
236	-3314	0,47344
240	-3338	0,31563
244	-3351	0,17096
248	-3354	0,03945
252	-3414	0,78906
256	-3468	0,71016
260	-3495	0,35508

264	-3517	0,28932
268	-3543	0,34193
272	-3577	0,44714
276	-3630	0,69701
280	-3700	0,92057
284	-3760	0,78906
288	-3797	0,48659
292	-3830	0,43398
296	-3898	0,89427
298	-3924	0,68386
300	-3993	1,81485
303,26	-4030	0,59704



Σχήμα 6.1: Μεταβολή του ρυθμού αποβολής υλικού σε σχέση με το χρόνο για την οπή με 1,5A και 500μsec στο υλικό #2





Σχήματα 6.2: Πορεία του βάθους κοπής σε σχέση με το χρόνο για την οπή με 1,5A και 500μsec στο υλικό #2

Από τα παραπάνω σχήματα και ιδιαίτερα από το σχήμα 6.1, φαίνεται ότι σε μεγάλο βαθμό η κοπή των τεμαχίων που κατεργαστήκαμε δεν είναι γραμμική, δηλαδή ο ρυθμός αποβολής υλικού δεν είναι σταθερός σε σχέση με το χρόνο. Αυτό προκύπτει προφανώς από το ότι το βάθος κοπής δεν μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με το χρόνο, αν εξαιρέσει βέβαια κανείς κάποια συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Η μη-γραμμικότητα της κοπής μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, μερικοί από τους οποίους είναι οι ακόλουθοι:

- Οι ίνες του άνθρακα μέσα στη ρητίνη είναι πλεγμένες μεταξύ τους. Κατά τη διάρκεια της κοπής μπορεί να έχουμε αστοχία κάποιων πλέξεων, και κάποιες ίνες να προεξέχουν σε ύψος μεγαλύτερο από αυτό του επιπέδου που έχει φτάσει η κοπή. Το εργαλείο προφανώς στέλνει τους «κεραυνούς» στα πιο ψηλά σημεία της επιφάνειας, με αποτέλεσμα να έχουμε καθυστέρηση στην κοπή σε τέτοιες περιπτώσεις.
- Κατά τη διάρκεια της κοπής ενδέχεται να μην έχουμε σωστή απομάκρυνση των αποβλίπτων, είτε λόγω κακής ρύθμισης του συστήματος απομάκρυνσής τους (flushing), είτε επειδή παρεμποδίζεται η σωστή απομάκρυνσή τους. Αυτό έχει ως συνέπεια τη συσσώρευσή τους στην επιφάνεια κοπής και την επαναστερεοποίησή τους, με αποτέλεσμα να πρέπει να ξανακοπούν και να καθυστερεί η κατεργασία. Το τελευταίο συμβαίνει συνήθως όταν ο ρυθμός αποβολής υλικού είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από το ρυθμό απομάκρυνσης των παραπροϊόντων, δηλαδή όταν έχουμε πολύ έντονες συνθήκες κατεργασίας. Η παρεμπόδιση στην απομάκρυνση των αποβλίπτων οφείλεται εν μέρει στο ότι υπάρχει δυσκολία ροής του διηλεκτρικού υγρού όταν το ηλεκτρόδιο βρίσκεται στον πυθμένα μιας μεγάλου βάθους οπής. Το διηλεκτρικό πρέπει να ρεύσει στο χώρο ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο, σε μια διατομή δακτυλιοειδούς σχήματος με πολύ μικρό εμβαδόν, με αποτέλεσμα η ταχύτητα του υγρού και άρα η παροχή διηλεκτρικού στο διάκενο να είναι μικρή.

- Αλλάζουν οι συνθήκες στο διάκενο της κατεργασίας, δηλαδή η διηλεκτρική σταθερά του διακένου, λόγω αλλοίωσης της σύστασης και των ιδιοτήτων του διηλεκτρικού μέσου. Το διηλεκτρικό καίγεται από τους σπινθήρες που παράγονται από τις εκκενώσεις, ενώ μπορεί τα γρέζια και οι ακαθαρσίες από την κοπή να μην φιλτράρονται σωστά, με αποτέλεσμα να κυκλοφορούν μέσα στη λεκάνη της εργαλειομηχανής, και συνεπώς και στο διάκενο της κατεργασίας. Η κακή κυκλοφορία του διηλεκτρικού μπορεί επίσης να επιφέρει ανεπαρκή ψύξη και ανεπαρκή απομάκρυνση των παραπροϊόντων της ηλεκτροδιάβρωσης και αλλαγή της διηλεκτρικής σταθεράς και της διηλεκτρικής αντοχής του υγρού. Λόγω αυτών των συνθηκών στο διάκενο είναι δυνατόν να υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό παλμών εν κενώ ή βραχυκυκλωμάτων σε σχέση με τους παλμούς που επιφέρουν αποβολή υλικού λόγω εξάχνωσης.
- Στο σχήμα 6.2-(α), στην περιοχή από 0 έως 4 min παρατηρούμε ότι το βάθος κοπής είναι θετικό, δηλαδή φαινομενικά το εργαλείο κόβει σε σημεία πάνω από την επιφάνεια του τεμαχίου. Ένας πιθανός λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι η ελαστικότητα του τεμαχίου. Όταν γίνεται η αρχική επαφή EP-TE για να οριστεί στην ηλεκτρονική μετρητική διάταξη του βάθους κοπής ως μηδενική η επιφάνεια του τεμαχίου, το TE συμπιέζεται ελαφρά από την δύναμη που του ασκεί η άτρακτος. Έτσι ορίζεται ως στάθμη αναφοράς μια επιφάνεια που βρίσκεται κάποια μικρόμετρα χαμηλότερα από το πραγματικό ύψος της επιφάνειας του τεμαχίου, και όταν ξεκινάει η κοπή φαίνεται να αφαιρείται υλικό στα θετικά του κατακόρυφου άξονα.
- Ένας δεύτερος πιθανός λόγος είναι οι ανωμαλίες της επιφάνειας του τεμαχίου. Το υλικό που χρησιμοποιούμε έχει αρκετά τραχιά επιφάνεια και επιπλέον σε ορισμένα σημεία δεν είναι απόλυτα επίπεδο. Έτσι, η κοπή θα ξεκινήσει από τα σημεία αυτά που προεξέχουν από την επιφάνεια αναφοράς και βρίσκονται στα θετικά του άξονα. Αρχικά λοιπόν γίνεται εξάλειψη των ανωμαλιών της επιφάνειας του τεμαχίου πριν ξεκινήσει η κύρια φάση της κατεργασίας. Έτσι, οι εκκενώσεις

χτυπούν τα τμήματα του υλικού που βρίσκονται σε υψηλότερη θέση, λόγω του ότι η απόσταση των σημείων αυτών από το ηλεκτρόδιο, και συγκεκριμένα από το μέτωπο του ηλεκτροδίου, είναι μικρότερη και άρα το διηλεκτρικό υφίσταται διάσπαση ευκολότερα ανάμεσα στα σημεία αυτά και στο ηλεκτρόδιο. Επειδή όμως δεν υπάρχουν εκκενώσεις από όλο το μέτωπο του ηλεκτροδίου, υπάρχει μικρότερη αφαίρεση υλικού, η οποία έχει ως συνέπεια μια καθυστέρηση στην αρχή της κατεργασίας.

- Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας είναι πολύ πιθανό να έχουμε ηλεκτρικές εκκενώσεις όχι μόνο από το κάτω μέρος του ηλεκτροδίου, αλλά και από την παράπλευρη επιφάνειά του, λόγω της μικρής απόστασής τους. Αυτό μάλιστα γίνεται πιο έντονο όσο πιο βαθιά στο τεμάχιο έχει εισχωρήσει το ηλεκτρόδιο, διότι μεγαλώνει το εμβαδόν των δύο επιφανειών. Έτσι, είναι λογικό όσο πιο μεγάλη διάρκεια παλμού έχουμε (δηλαδή εντονότερες εκκενώσεις), τόσο πιο πολύ να αποκλίνουν οι δύο διάμετροι. Αυτό ίσως εξηγεί μερικές από τις καθυστερήσεις που σημειώνονται κυρίως κατά το τέλος της κατεργασίας.

Το γεγονός ότι η κοπή δεν είναι γραμμική και η ταχύτητά της σχετικά απρόβλεπτη, δημιουργεί δυσκολίες στην εκτίμηση του χρόνου κατεργασίας με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι, δεν υπάρχει δυνατότητα σφιχτού χρονικού προγραμματισμού για τη χρήση της συγκεκριμένης κατεργασίας σε βιομηχανική κλίμακα. Για μια τέτοια περίπτωση, θα έπρεπε να γίνουν αρκετές σειρές πειραμάτων κάτω από τις ίδιες συνθήκες, προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο εύρος μέσα στο οποίο μεταβάλλεται ο ρυθμός αποβολής υλικού, για να είναι δυνατή σε ικανοποιητικό βαθμό η εκτίμηση του χρόνου κατεργασίας. Αναγκαία είναι επίσης η ανάπτυξη ενός ικανοποιητικού θεωρητικού μοντέλου για τη συγκεκριμένη κατεργασία και τους μηχανισμούς που διέπουν την αποβολή του υλικού.

Σημείωση: Για τις υπόλοιπες οπές, τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη γραμμικότητα της κοπής έχουν όμοιο χαρακτήρα. Συνεπώς οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προηγήθηκαν αφορούν όλες τις οπές. Κρίθηκε

σκόπιμο να μην παρατεθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα, για λόγους οικονομίας χώρου.

7. ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

7.1 ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΠΑΡΑΠΛΕΥΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΟΠΗΣ

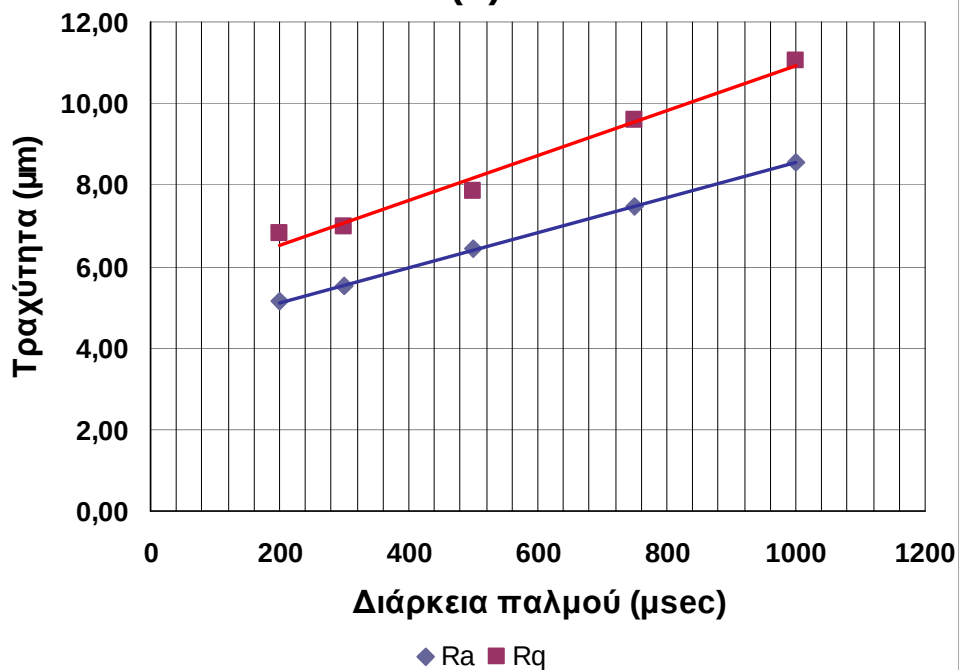
Ελήφθησαν τιμές τραχύτητας της παράπλευρης επιφάνειας της οπής, κατά μήκος της γενέτειρας του σχηματιζόμενου κυλίνδρου, από τις οπές που έγιναν με θετική πολικότητα στο υλικό #2. Δεν ελήφθησαν από άλλες οπές γιατί το βάθος που είχαν δεν επαρκούσε για να κάνει η ακίδα του τραχυμέτρου τη μέτρηση. Συνεπώς, αυτό που εξετάζεται εδώ είναι η επίδραση της διάρκειας παλμού στην τραχύτητα της παράπλευρης επιφάνειας της οπής. Ακολουθούν οι πίνακες με τα μετρούμενα μεγέθη και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

ΥΛΙΚΟ #2 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)								
ΡΕΥΜΑ 1,5A - ΠΑΛΜΟΙ 200μsec								
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	7	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	5,2	5,4	5	4,8	5,2	5	5,4	5,14
Rq (μm)	6,4	7,2	6	6,8	7	7,4	7	6,83
Rzdin (μm)	22	28	24	32	30	32	26	27,71
Rt (μm)	28	32	28	35	37	39	35	33,43
Ry (μm)	24	38	28	27	36	39	33	32,14
Sm (μm)	79	85	70	102	116	88	85	89,29
ΡΕΥΜΑ 1,5A - ΠΑΛΜΟΙ 300μsec								
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	7	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	5,2	5,8	5,6	5,6	5,2	5,4	5,8	5,51
Rq (μm)	6,8	7,4	7	7,2	6	7,2	7,2	6,97
Rzdin (μm)	26	28	29	32	22	30	26	27,57
Rt (μm)	36	38	34	38	25	35	37	34,71
Ry (μm)	35	38	31	37	25	34	30	32,86
Sm (μm)	119	113	89	98	125	98	96	105,43
ΡΕΥΜΑ 1,5A - ΠΑΛΜΟΙ 500μsec								
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	7	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	6,4	6,6	6	6,6	6,8	6,4	6,2	6,43
Rq (μm)	7,6	8	7,4	8,2	8,4	7,4	8	7,86
Rzdin (μm)	25	32	25	32	29	28	27	28,29
Rt (μm)	32	42	34	40	34	33	38	36,14
Ry (μm)	30	37	34	39	32	30	37	34,14
Sm (μm)	139	89	104	114	116	114	103	111,29

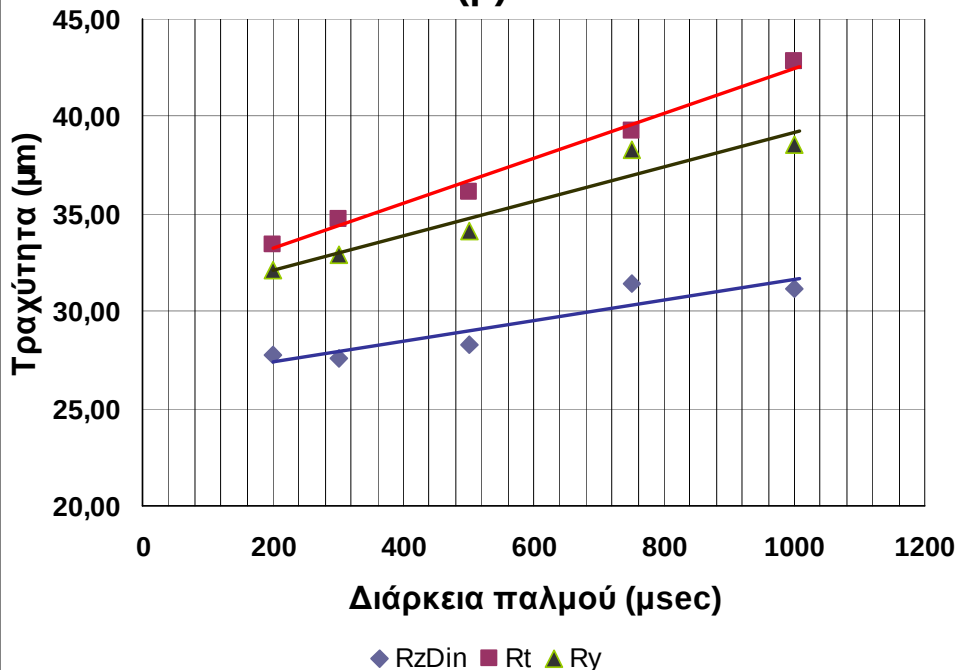
ΥΛΙΚΟ #2 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)								
ΡΕΥΜΑ 1,5Α - ΠΑΛΜΟΙ 750μsec								
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	7	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	7,4	7	7,2	7,8	7,4	7,8	7,6	7,46
Rq (μm)	9,4	8,2	9,4	9,8	9,8	10,4	10	9,57
Rzdin (μm)	30	27	31	31	32	37	32	31,43
Rt (μm)	39	28	41	36	48	46	37	39,29
Ry (μm)	38	28	39	36	44	46	37	38,29
Sm (μm)	128	120	129	138	132	147	139	133,29
ΡΕΥΜΑ 1,5Α - ΠΑΛΜΟΙ 1000μsec								
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	7	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	8,4	8,6	8,4	8,8	8,8	8,4	8,6	8,57
Rq (μm)	10,4	10,8	10,2	11	10,6	11,8	12,6	11,06
Rzdin (μm)	33	31	31	34	29	32	28	31,14
Rt (μm)	47	45	38	39	38	46	47	42,86
Ry (μm)	41	35	32	39	33	43	47	38,57
Sm (μm)	128	164	119	146	132	124	153	138,00

***Για την τραχύτητα Rt θα μπορούσαμε να έχουμε λάβει υπ' όψιν αντί για το μέσο όρο των τιμών, τη μέγιστη τιμή που μετρήθηκε σε κάθε επιφάνεια. Λόγω της διαφοράς που υπάρχει στην τάξη μεγέθους των τιμών, οι μετρήσεις παρουσιάζονται σε τρία διαγράμματα. Στο **σχήμα 7.1** είναι οι Ra και Rq, στο **σχήμα 7.2** οι RzDin, Rt και Ry, και στο **σχήμα 7.3** η Sm.

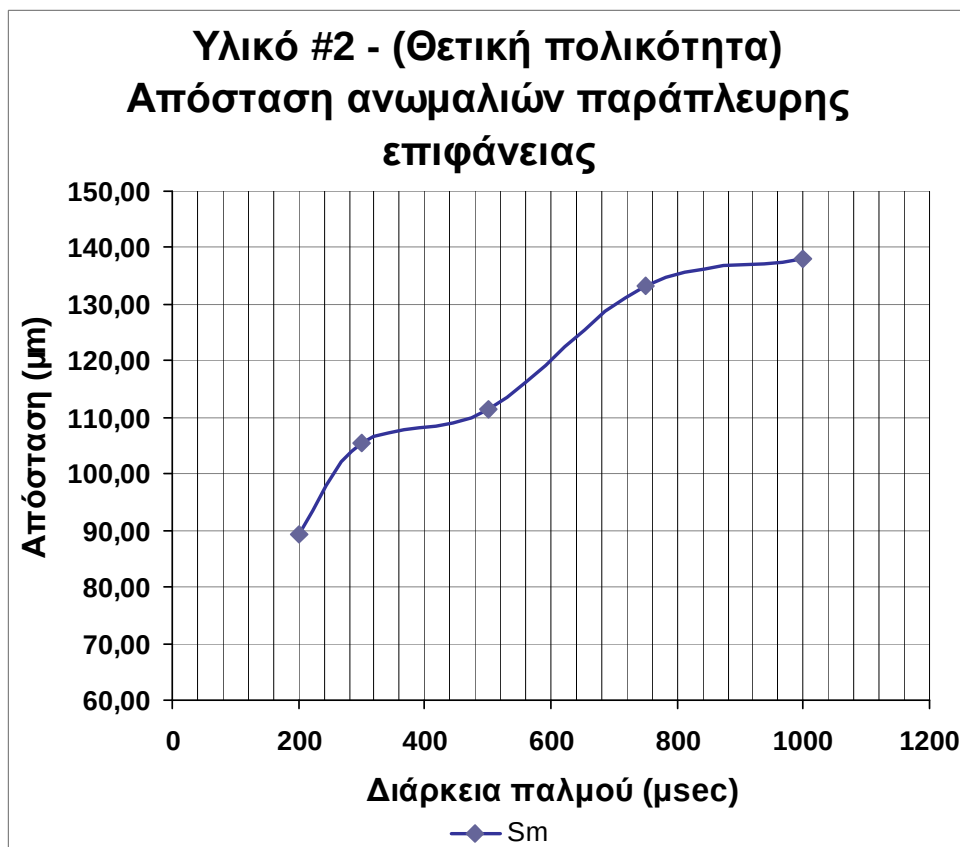
**Υλικό #2 - (Θετική πολικότητα)
Τραχύτητα παράπλευρης επιφάνειας
(α)**



**Υλικό #2 - (Θετική πολικότητα)
Τραχύτητα παράπλευρης επιφάνειας
(β)**



Σχήματα 7.1 και 7.2



Σχήμα 7.3

Επίδραση της διάρκειας παλμού στην τραχύτητα παράπλευρης επιφάνειας:

- Η μεταβολή όλων των μεγεθών, εκτός της S_m , σε σχέση με τη διάρκεια του παλμού είναι σχεδόν γραμμική και έτσι οι πραγματικές καμπύλες έχουν αντικατασταθεί με τις γραμμές ελαχίστων τετραγώνων.
- Παρατηρείται αύξηση όλων των μεγεθών της τραχύτητας σε συνάρτηση με την αύξηση του παλμού. Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα για το R_a κρίνονται ικανοποιητικά. Συγκεκριμένα, οι τιμές του R_a κυμαίνονται από 5,14μm έως 8,57μm, ενώ του R_t από 33,43μm έως 42,86μm.
- Η παραγόμενη επιφάνεια είναι επαλληλία κρατήρων, με αποτέλεσμα οι μεγάλες τραχύτητες να συνοδεύονται από μεγάλες οριζόντιες αποστάσεις κοιλάδων και κορυφών. Έτσι, η μέση απόσταση των ανωμαλιών τραχύτητας, S_m , αυξάνεται όσο αυξάνεται η διάρκεια παλμών.

- Το φαινόμενο των πιθανών εκκενώσεων από την παράπλευρη επιφάνεια κατά την κατεργασία παίζει το ρόλο του στην αύξηση της τραχύτητας, αφού όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια παλμού, τόσο πιο μεγάλη η ενέργεια εκκένωσης και πιο έντονη η κατεργασία.

7.2 ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΒΑΣΗΣ ΟΠΗΣ

Για την τραχύτητα στη βάση της οπής έγιναν έξι μετρήσεις για κάθε οπή, εκτός από αυτήν που παρήχθη με 1,5A, 500μsec και αρνητική πολικότητα, για την οποία έγιναν τέσσερις μετρήσεις. Αυτό έγινε διότι η επιφάνειά της παρουσίαζε μεγάλες ανομοιομορφίες και δεν επέτρεπε τη διεξαγωγή μέτρησης σε πολλές κατευθύνσεις. Σε αυτό το εδάφιο εξετάζεται η επίδραση της διάρκειας του παλμού και της πολικότητας στην τραχύτητα της βάσης της οπής. Ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

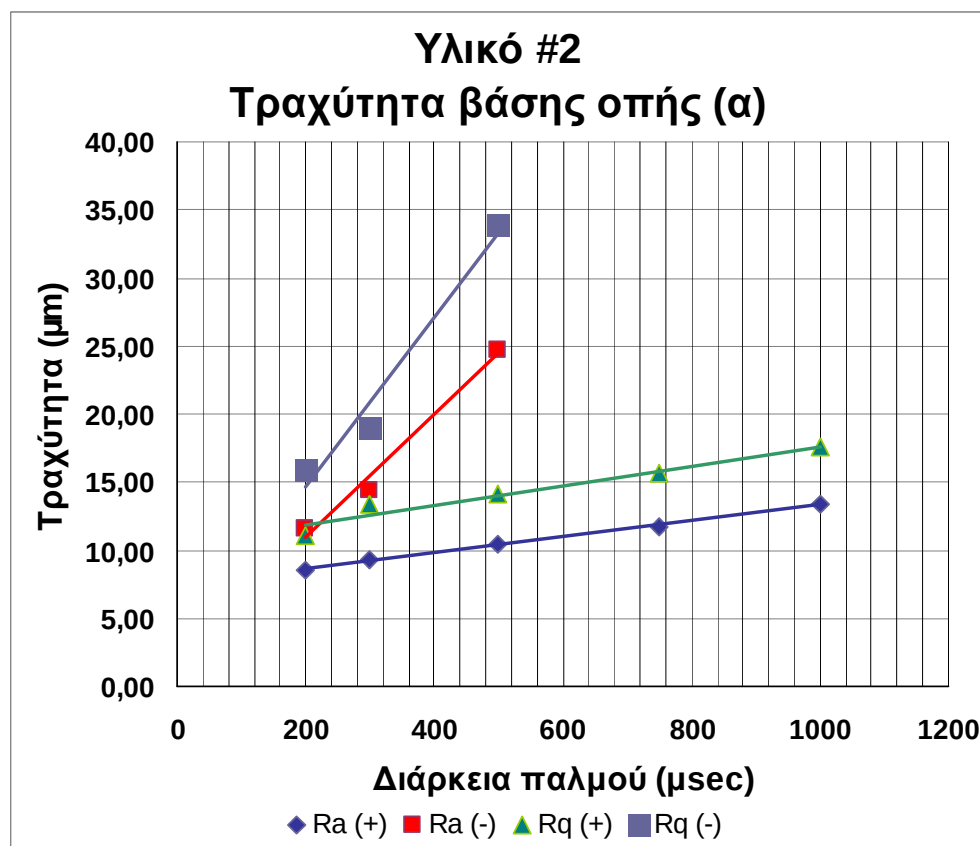
ΥΛΙΚΟ #2 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)							
ΡΕΥΜΑ 1,5A – ΠΑΛΜΟΙ 200μsec							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	8,6	8,6	8,2	8,8	8	8,8	8,50
Rq (μm)	11,6	11,6	10,6	11,2	10	11,2	11,03
Rzdin (μm)	48	35	45	49	41	44	43,67
Rt (μm)	71	62	60	65	56	59	62,17
Ry (μm)	63	50	55	57	48	58	55,17
Sm (μm)	213	284	151	196	157	170	195,17
ΡΕΥΜΑ 1,5A – ΠΑΛΜΟΙ 300μsec							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	9,8	9,2	9,8	9	8,8	9,2	9,30
Rq (μm)	13,6	13,2	13,8	12,8	12,6	14,4	13,40
Rzdin (μm)	52	51	49	49	49	50	50,00
Rt (μm)	101	109	105	109	102	95	103,50
Ry (μm)	87	109	93	109	102	94	99,00
Sm (μm)	195	214	238	260	244	170	220,17

ΥΛΙΚΟ #2 (ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)							
ΡΕΥΜΑ 1,5Α – ΠΑΛΜΟΙ 500μsec							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	10,4	10,4	10,6	10,2	10,8	10,4	10,47
Rq (μm)	14,4	14,2	14,4	13,8	14	13,8	14,10
Rzdin (μm)	53	42	42	41	52	51	46,83
Rt (μm)	94	86	84	81	70	94	84,83
Ry (μm)	89	61	61	73	68	78	71,67
Sm (μm)	227	260	283	246	208	198	237,00
ΡΕΥΜΑ 1,5Α – ΠΑΛΜΟΙ 750μsec							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	12,2	12,6	11,2	11,4	11	12,2	11,77
Rq (μm)	16	17,4	14,4	14,4	14,4	17,4	15,67
Rzdin (μm)	65	65	60	58	56	59	60,50
Rt (μm)	102	108	79	91	92	114	97,67
Ry (μm)	100	86	75	91	82	96	88,33
Sm (μm)	147	178	134	162	141	155	152,83
ΡΕΥΜΑ 1,5Α – ΠΑΛΜΟΙ 1000μsec							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	13,4	14,6	12,4	13	12,6	14,4	13,40
Rq (μm)	17	19	16,6	17,2	17,4	18,4	17,60
Rzdin (μm)	66	65	58	65	62	74	65,00
Rt (μm)	95	113	113	100	109	103	105,50
Ry (μm)	83	99	83	89	92	103	91,50
Sm (μm)	229	206	164	163	140	237	189,83

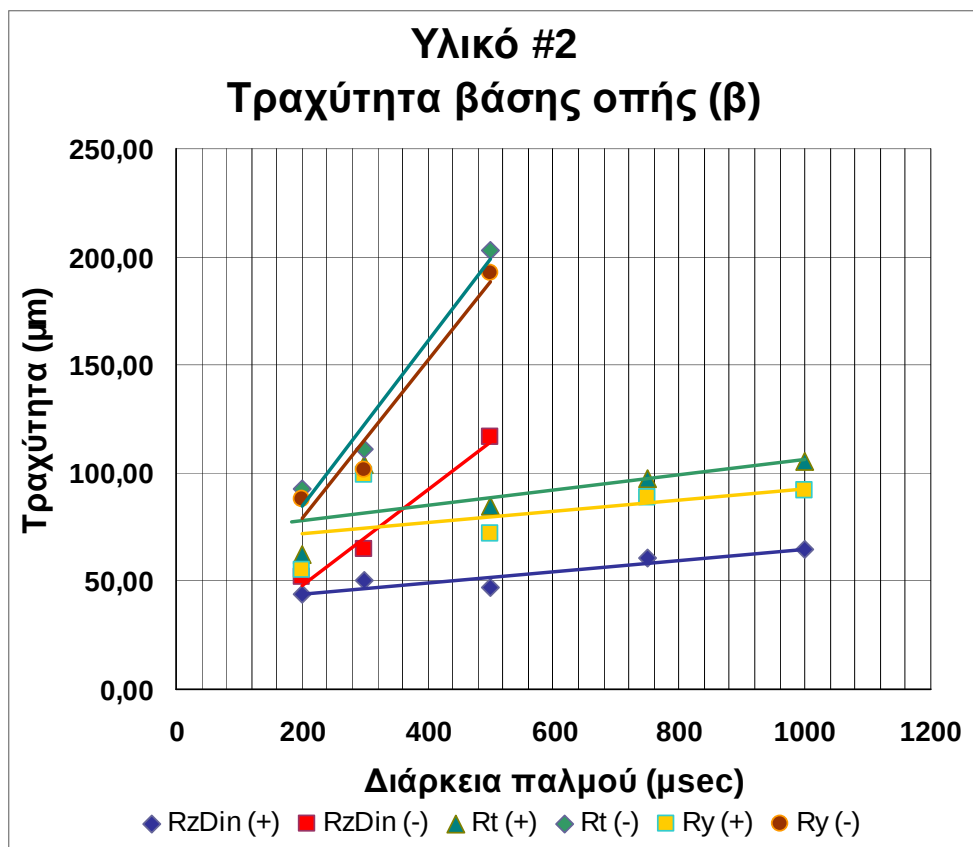
ΥΛΙΚΟ #2 (ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ)							
ΡΕΥΜΑ 1,5Α – ΠΑΛΜΟΙ 200μsec							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	11,6	11,4	11,8	11,4	12	11,4	11,60
Rq (μm)	16,2	17,2	16,8	14,8	15,6	15	15,93
Rzdin (μm)	54	53	49	54	52	50	52,00
Rt (μm)	98	121	90	91	87	69	92,67
Ry (μm)	77	121	83	91	87	68	87,83
Sm (μm)	221	224	160	227	275	170	212,83
ΡΕΥΜΑ 1,5Α – ΠΑΛΜΟΙ 300μsec							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	15,2	13,2	16,8	13	14	14,4	14,43
Rq (μm)	19,8	17	23	16,4	18,8	18,6	18,93
Rzdin (μm)	68	65	73	58	67	57	64,67
Rt (μm)	127	103	130	79	124	105	111,33
Ry (μm)	127	102	111	79	94	96	101,50

Sm (μm)	336	264	193	369	422	288	312,00
ΡΕΥΜΑ 1,5A – ΠΑΛΜΟΙ 500μsec							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ra (μm)	23,4	25,6	30,8	19,2	-	-	24,75
Rq (μm)	31,8	35,2	41,8	26,8	-	-	33,9
Rzdin (μm)	128	100	125	113	-	-	116,5
Rt (μm)	199	211	221	179	-	-	202,5
Ry (μm)	193	197	213	168	-	-	192,75
Sm (μm)	199	226	278	383	-	-	271,5

***Για την τραχύτητα Rt θα μπορούσαμε να έχουμε λάβει υπ' όψιν αντί για το μέσο όρο των τιμών, τη μέγιστη τιμή που μετρήθηκε σε κάθε επιφάνεια. Λόγω της διαφοράς που υπάρχει στην τάξη μεγέθους των τιμών, οι μετρήσεις παρουσιάζονται σε τρία διαγράμματα. Στο **σχήμα 7.4** είναι οι Ra και Rq, στο **σχήμα 7.5** οι RzDin, Rt και Ry, και στο **σχήμα 7.6** η Sm. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και για τις δύο πολικότητες, για να είναι πιο εύκολη η σύγκρισή τους.



Σχήμα 7.4



Σχήματα 7.5 και 7.6

Επίδραση της διάρκειας παλμού στην τραχύτητα βάσης οπής:

- Η μεταβολή όλων των μεγεθών, εκτός της S_m , σε σχέση με τη διάρκεια του παλμού είναι σχεδόν γραμμική και έτσι οι πραγματικές καμπύλες έχουν αντικατασταθεί με τις γραμμές ελαχίστων τετραγώνων.
- Παρατηρείται αύξηση όλων των μεγεθών της τραχύτητας σε συνάρτηση με την αύξηση του παλμού, ενώ τα νούμερα που καταγράφονται είναι σχετικά μεγάλα. Συγκεκριμένα, για τη θετική πολικότητα, οι τιμές του R_a κυμαίνονται από $8,50\mu m$ έως $13,40\mu m$, ενώ του R_t από $62,17\mu m$ έως $105,50\mu m$. Στην αρνητική πολικότητα η R_a φτάνει μέχρι και $24,75\mu m$, ενώ η R_t έως και $202,5\mu m$.
- Όσο μεγαλώνει η διάρκεια παλμού, μεγαλώνει και η αντίστοιχη ενέργεια εκκένωσης, με αποτέλεσμα στις μεγάλες διάρκειες να είναι πιο έντονο το φαινόμενο της επιφανειακής τήξης του υλικού. Μια ποσότητα από το τηγμένο υλικό ρέει μέσα στην οπή και στερεοποιείται άτακτα στη βάση της, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγαλύτερη τραχύτητα για μεγάλη διάρκεια παλμού.
- Παρατηρούμε ότι η μεταβολή των τιμών του S_m , δεν μπορεί να περιγραφεί με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο. Αυτό δείχνει πως οι επιφάνειες σχηματίζονται από τυχαίες επαλληλίες κρατήρων.

Επίδραση της πολικότητας στην τραχύτητα βάσης οπής:

- Οι τραχύτητες των επιφανειών που παρήχθησαν με αρνητική πολικότητα είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες με θετική πολικότητα.
- Οι καμπύλες των τραχυτήτων με αρνητική πολικότητα έχουν αρκετά μεγαλύτερη κλίση από αυτές με θετική. Αυτό μας δείχνει πως με αρνητική πολικότητα, η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται με πολύ πιο ραγδαίο τρόπο όταν αυξάνουμε τη διάρκεια παλμού.
- Στην οπή που παρήχθη με $1,5A$, $500\mu sec$ και αρνητική πολικότητα στάθηκε δυνατό να γίνουν μόνο 4 μετρήσεις τραχύτητας, καθώς η

επιφάνεια δεν επέτρεπε την ομαλή διεξαγωγή άλλων. Αυτό ενισχύει την προηγούμενη παρατήρηση και δείχνει πως ακόμα και αν σταθεί δυνατό να γίνουν οπές με ακόμα μεγαλύτερη διάρκεια παλμού στην αρνητική πολικότητα, η επιφάνεια θα είναι πολύ κακής ποιότητας.

Παρατήρηση 1: Δεν ήταν δυνατό να διερευνηθεί η επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος στην τραχύτητα, καθώς οι οπές του υλικού #3, που έγιναν με αρνητική πολικότητα και εντάσεις ρεύματος 6 και 9A, εμφάνιζαν τραχύτητα επιφάνειας που δεν μπορούσε να μετρηθεί με το τραχύμετρο. Αυτό βέβαια ήταν εμφανές και από την οπτική τους παρατήρηση, και από τις μακροσκοπικές φωτογραφίες που παρατίθενται αργότερα. Το συμπέρασμα λοιπόν, αν και επισφαλές, είναι πως η αύξηση της έντασης του ρεύματος επιφέρει ραγδαία αύξηση και στην τραχύτητα επιφάνειας.

Παρατήρηση 2: Η επίδραση της ενέργειας εκκένωσης στην τραχύτητα επιφάνειας δεν μπορεί να εκτιμηθεί, αφού σε αυτή τη σειρά μετρήσεων εξαρτάται μόνο από τη διάρκεια παλμού. Έτσι τα αντίστοιχα διαγράμματα μεταβολής της τραχύτητας σε συνάρτηση με την ενέργεια εκκένωσης θα μας δώσουν ακριβώς την ίδια εικόνα με τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται φωτογραφίες από τις κατεργασμένες επιφάνειες, μακροσκοπικές και από μικροσκόπιο, οι οποίες θα μας δώσουν περισσότερα στοιχεία για την τοπογραφία τους.

8. ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Υλικό #1

Τα τεμάχια του υλικού #1 στα οποία έγινε κατεργασία φαίνονται στο **σχήμα 8.1**.

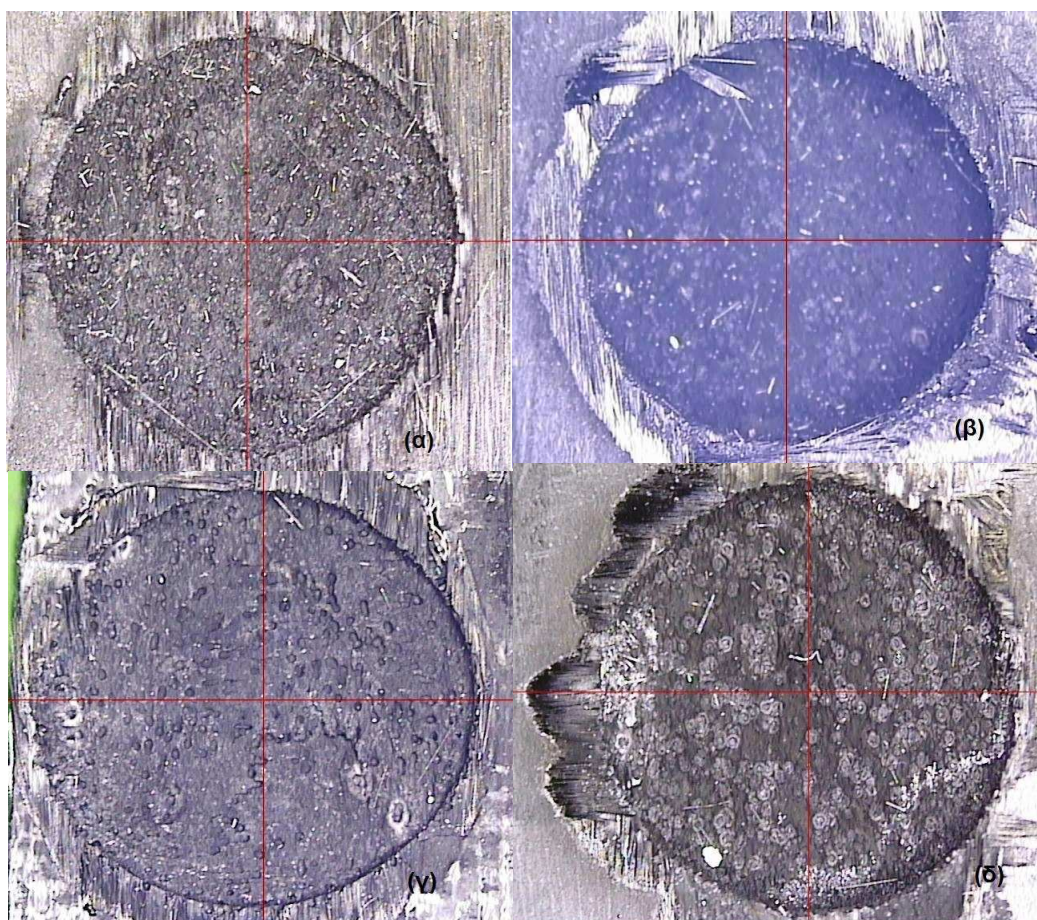


Σχήμα 8.1: Κατεργασμένα τεμάχια υλικού #1

Για τις οπές του υλικού #1 ελήφθησαν εικόνες από το οπτικό μετρητικό μηχάνημα άνευ επαφής Tesavisio-300. Δεν ήταν δυνατό να έχουμε καθαρές φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο, διότι τα τεμάχια ήταν καμπύλα και ήταν δύσκολη η καλή και ομοιόμορφη εστίαση της κατεργασμένης επιφάνειας. Στο **σχήμα 8.2** παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες από τις φωτογραφίες των οπών.

Παρατηρούμε πως η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης δημιουργεί τοπικές καταστροφές στο υλικό, οι οποίες περιλαμβάνουν κρατήρες στη βάση της οπής, ρωγμές και αποκολλήσεις στρωμάτων γύρω από το χείλος της οπής και προεξοχές από ίνες που έχουν κοπεί και έχουν αλλάξει προσανατολισμό. Στο σχήμα 8.2-α (10μsec) οι καταστροφές αυτές δεν είναι ιδιαίτερα αισθητές-αντίθετα στο 8.2-δ (500μsec) η εικόνα των καταστροφών γύρω από την οπή είναι πολύ έντονη, ακόμα και με γυμνό μάτι. Γενικά

παρατηρούμε πως όσο μεγαλώνει η διάρκεια του παλμού, τόσο πιο αξιoσημείωτες γίνονται οι φθορές του υλικού, με μια σταδιακή κλιμάκωση.

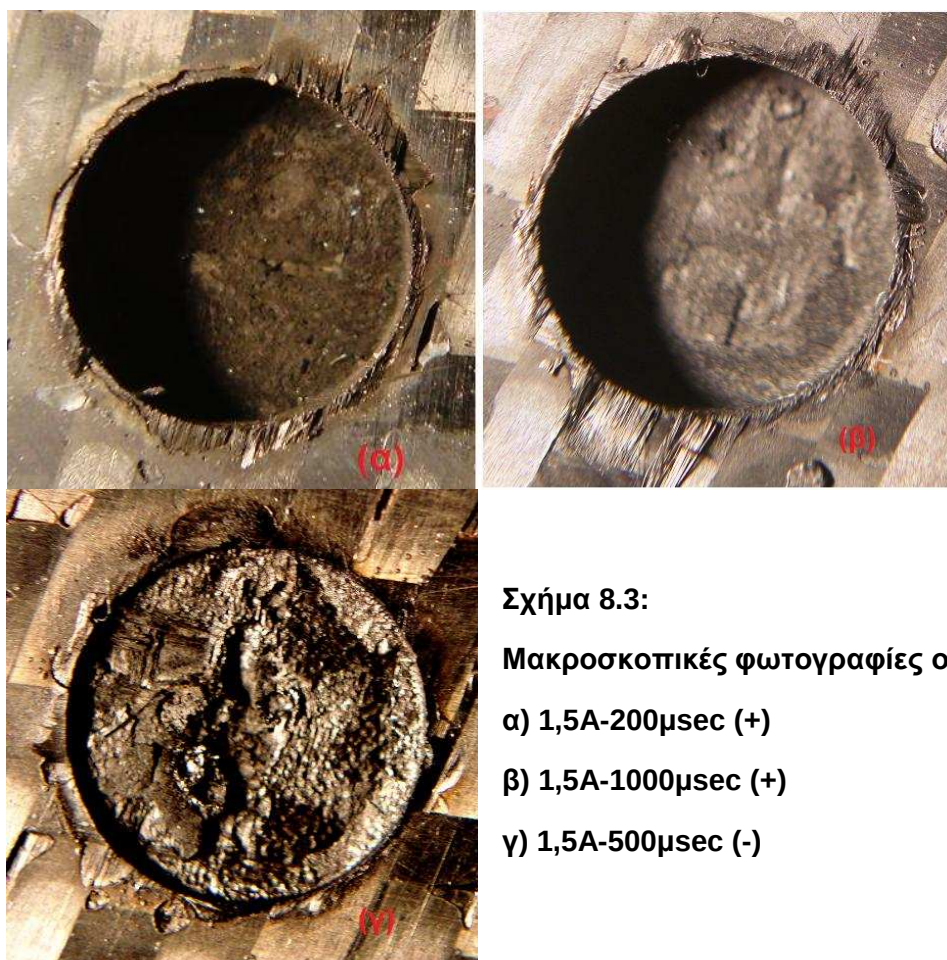


Σχήμα 8.2: α)1,5A-10μsec β)1,5A-50μsec γ)1,5A-150μsec δ)1,5,A-500μsec

Η αύξηση των φθορών σε συνάρτηση με τη διάρκεια παλμού, οφείλεται αφ' ενός στο ότι μεγαλύτερη διάρκεια εκκένωσης σημαίνει σύγκρουση περισσότερων ιόντων με την επιφάνεια του υλικού (και μεγαλύτερη ενέργεια παλμού), αφ' ετέρου στο ότι φαινόμενα όπως οι εκκενώσεις από την παράπλευρη επιφάνεια και οι διαχύσεις φορτίου είναι πιο έντονα. Παρατηρούμε επίσης πως το μέγεθος των κρατήρων παρουσιάζει διακυμάνσεις, όπως για παράδειγμα οι κρατήρες στην οπή των 150μsec Αυτό μπορεί να αποδοθεί σε διαφορές στο πλάτος του αγωγού εκκένωσης, γεγονός που καταδεικνύει μια στοχαστικότητα στις ηλεκτρικές εκκενώσεις και άρα στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης.

Υλικό #2

Στα **σχήματα 8.3, 8.4 και 8.5** παρουσιάζονται ενδεικτικά οι οπές που έγιναν στο υλικό #2 με θετική πολικότητα, 1,5A, 200μsec και 1000μsec, και η οπή που έγινε με αρνητική πολικότητα, 1,5A και 500μsec. Οι φωτογραφίες που ελήφθησαν από το μικροσκόπιο είναι σε μεγέθυνση 10x.



Σχήμα 8.3:

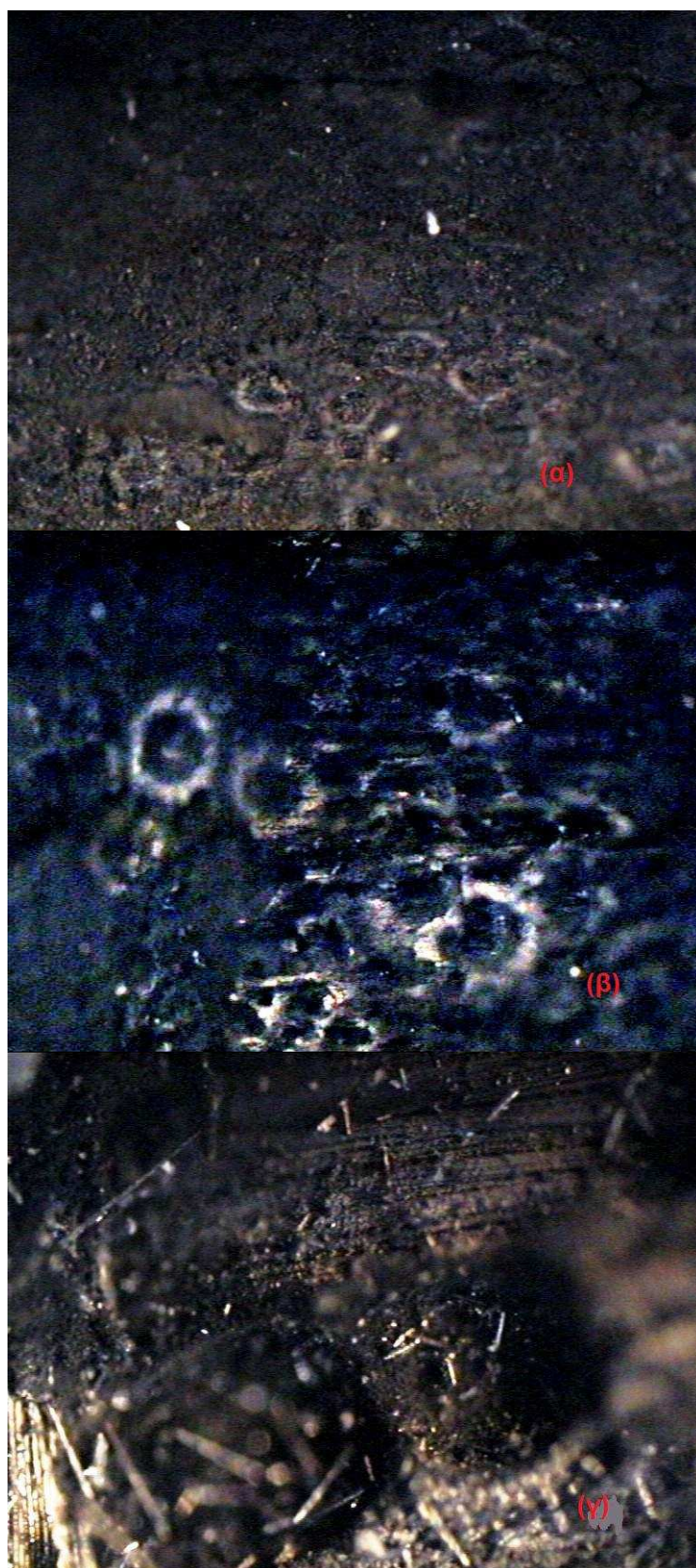
Μακροσκοπικές φωτογραφίες οπών

α) 1,5A-200μsec (+)

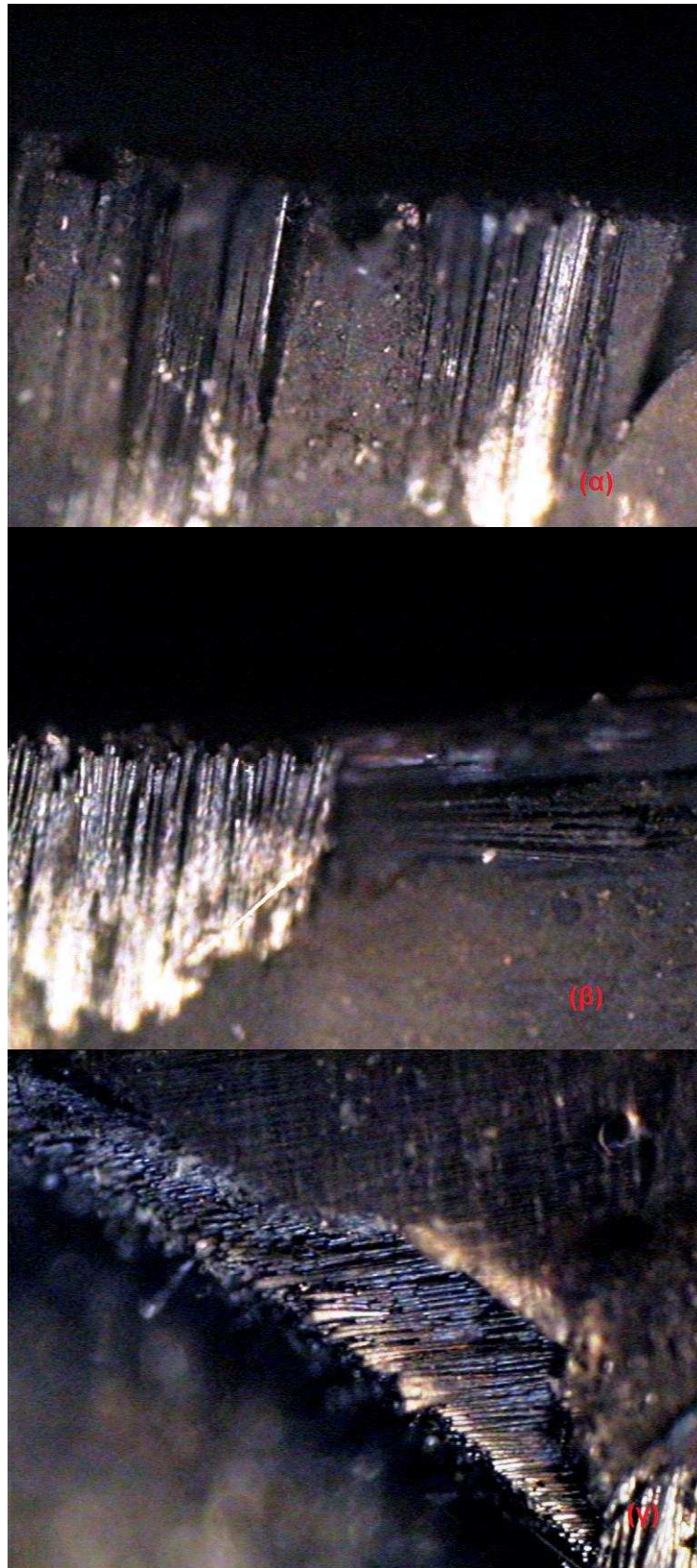
β) 1,5A-1000μsec (+)

γ) 1,5A-500μsec (-)

Από το σχήμα 8.3, παρατηρούμε πως με αρνητική πολικότητα εργαλείου τα αποτελέσματα στην επιφάνεια του τεμαχίου είναι πολύ χειρότερα. Ακόμα και με γυμνό μάτι διακρίνουμε τη μεγάλη ανομοιομορφία επιφάνειας, τους μεγάλους κρατήρες και τα ρήγματα που έχουν σχηματιστεί στην οπή του σχήματος 8.3-γ.



**Σχήμα 8.4: Λεπτομέρεια βάσης οπής α) 1,5A-200μsec (+) β) 1,5A-1000μsec (+)
γ) 1,5A-500μsec (-)**

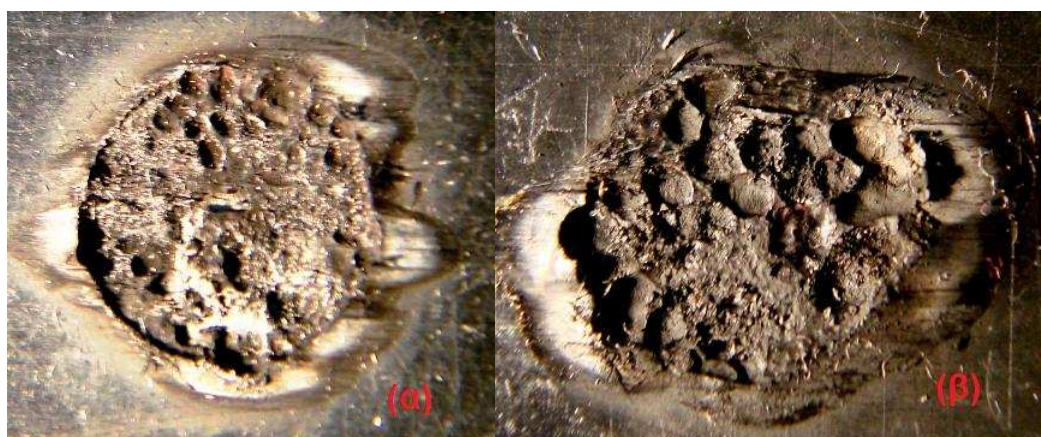


**Σχήμα 8.5: Λεπτομέρεια χείλους σπής α) 1,5A-200μsec (+) β) 1,5A-1000μsec (+)
γ) 1,5A-500μsec (-)**

Από το σχήμα 8.4 φαίνεται πως με αύξηση της διάρκειας παλμού έχουμε μεγαλύτερες καταστροφές στην επιφάνεια του τεμαχίου. Οι κρατήρες του 8.4-β είναι σαφώς μεγαλύτεροι, αλλά και περισσότεροι από αυτούς του 8.4-α. Ισχύουν λοιπόν αυτά που ειπώθηκαν και νωρίτερα για το υλικό #1. Στο σχήμα 8.4-γ παρατηρούμε πως δύο κρατήρες μεγάλης διαμέτρου έχουν σχηματιστεί στη βάση της οπής, ενώ διακρίνονται και ίνες οι οποίες έχουν σπάσει ή έχουν αλλάξει προσανατολισμό. Πρέπει επίσης να τονιστεί πως για αρνητική πολικότητα δεν μπορεί να γίνει ομοιόμορφη εστίαση του φακού στην επιφάνεια, λόγω της ανομοιογένειας που παρουσιάζει. Το γεγονός ότι δεν μπορεί να γίνει εστίαση στη βάση των κρατήρων, δείχνει πως έχουν αρκετά μεγάλο βάθος. Τα προηγούμενα μας οδηγούν στο συμπέρασμα, πως για ελαχιστοποίηση των φθορών κατάλληλη είναι η θετική πολικότητα και η μικρή διάρκεια παλμού. Τέλος, από το σχήμα 8.5, βλέπουμε πως και στις τρεις περιπτώσεις έχουμε αποκολλήσεις στρωμάτων και αλλαγή του προσανατολισμού των ινών στο χείλος της οπής.

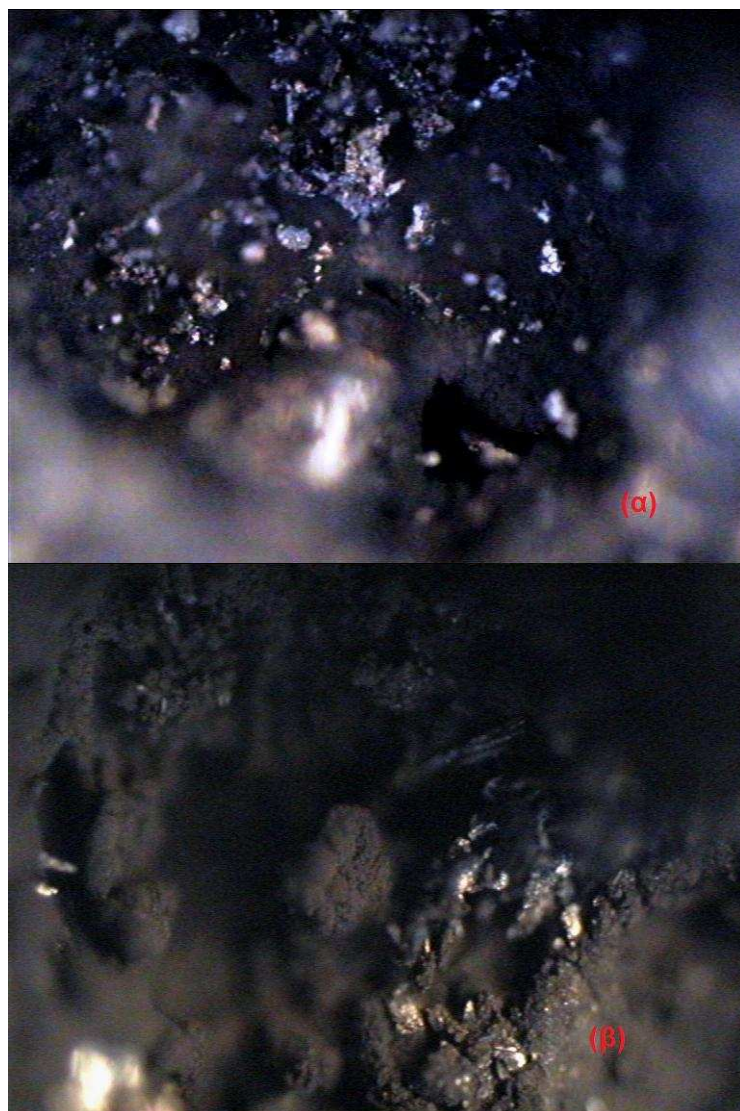
Υλικό #3

Στα **σχήματα 8.6 και 8.7** θα εξετάσουμε την επίδραση του ρεύματος στην καταστροφή της επιφάνειας σε οπές που έχουν γίνει με αρνητική πολικότητα.



Σχήμα 8.6: Μακροσκοπικές φωτογραφίες οπών

α) 6A-500μsec (-) β) 9A-500μsec (-)



Σχήμα 8.7: Λεπτομέρεια βάσης οπής α)6A-500μsec (-) β)9A-500μsec (-)

Στο σχήμα 8.6 είναι ευδιάκριτο με γυμνό μάτι πως οι οπές χαρακτηρίζονται από μεγάλα μεγέθη κρατήρων, εκτεταμένες καταστροφές σε αρκετή απόσταση από το χείλος τους και από σημεία στα οποία έχει συσσωρευτεί υλικό. Το υλικό αυτό, το οποίο είναι ψαθυρό, μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα, στη θέση του όμως θα σχηματιστούν αρκετά βαθιοί κρατήρες.

Στο σχήμα 8.7-β παρατηρούμε πως η επιφάνεια της οπής είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό ανομοιόμορφη και έχει σχηματιστεί από επαλληλίες κρατήρων και συσσωρευμένου υλικού. Παρατηρούμε επίσης πως η

ανομοιομορφία είναι πολύ μεγαλύτερη από την επιφάνεια του 8.7-α. Συνεπώς με αύξηση της έντασης του ρεύματος έχουμε πιο εκτεταμένες καταστροφές. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της ενέργειας εκκένωσης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μια πιο βίαιη κατεργασία. Η συσσώρευση του υλικού οφείλεται πιθανότατα στην καύση του υλικού και του διηλεκτρικού σε ορισμένα σημεία, ως αποτέλεσμα της υψηλής ενέργειας και των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Τέλος, στην ανομοιομορφία της επιφάνειας συντελεί και το φαινόμενο της τήξης του υλικού, το οποίο είναι πιο έντονο στα υψηλά ρεύματα. Τμήμα του τηγμένου υλικού, το οποίο δεν απομακρύνεται από το τεμάχιο, ρέει ακανόνιστα στη βάση της οπής και στερεοποιείται σε τυχαία σημεία, δημιουργώντας μεγάλη τραχύτητα. Έτσι, σε περίπτωση που συνδυάσουμε αρνητική πολικότητα και μεγάλη ένταση ρεύματος, όπως στο υλικό #3, το αποτέλεσμα είναι καταστροφικό για την ποιότητα της κατεργασίας.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα, βλέπουμε πως **μικρότερη καταστροφή στη βάση της οπής , αλλά και στο χείλος της** έχουμε:

- Διατηρώντας **μικρή διάρκεια παλμών.**
- Ρυθμίζοντας το εργαλείο να έχει **θετική πολικότητα.**
- Διατηρώντας **μικρή ένταση ρεύματος.**

Οι φθορές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του υλικού μπορούν να δημιουργήσουν συγκέντρωση τάσεων, με συνέπεια την ελάττωση της αντοχής του, την αλλαγή των ιδιοτήτων του, τη μείωση της αξιοπιστίας του και αυξημένο κίνδυνο αστοχίας του.

9. ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1 ΣΥΝΟΨΗ

Στους πίνακες 9.1 και 9.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα αποτελέσματα που ελήφθησαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων. Στην στήλη της απόκλισης διάστασης, οι τιμές για το υλικό #1 είναι από το Tesavisio-300, ενώ για τα υλικά #2 και #3 από το μικρόμετρο.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ				
ΥΛΙΚΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ	We (mJ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ (%)	Vw (mm ³ /min)
#1	1,5A, 10μsec, (+)	1,05	0,68	0,021
#1	1,5A, 20μsec, (+)	2,1	1,83	0,06
#1	1,5A, 50μsec, (+)	5,25	1,88	0,111
#1	1,5A, 100μsec, (+)	10,5	3,17	0,233
#1	1,5A, 150μsec, (+)	15,75	3,87	0,331
#1	1,5A, 200μsec, (+)	21	3,8	0,751
#1	1,5A, 500μsec, (+)	52,5	3,8	1,033
#1	1,5A, 750μsec, (+)	78,75	6,67	0,672
#2	1,5A, 200μsec, (+)	21	1,35	0,399
#2	1,5A, 300μsec, (+)	31,5	1,77	0,63
#2	1,5A, 500μsec, (+)	52,5	2,04	0,699
#2	1,5A, 750μsec, (+)	78,75	2,34	0,753
#2	1,5A, 1000μsec, (+)	105	2,47	0,681
#2	1,5A, 200μsec, (-)	18	1,77	0,138
#2	1,5A, 300μsec, (-)	27	2,12	0,276
#2	1,5A, 500μsec, (-)	45	2,39	0,358
#3	6A, 200μsec, (-)	72	4,89	0,221
#3	6A, 300μsec, (-)	108	5,96	0,381
#3	6A, 500μsec, (-)	180	7,21	0,519
#3	9A, 200μsec, (-)	108	6,41	0,34
#3	9A, 300μsec, (-)	162	8,48	0,555
#3	9A, 500μsec, (-)	270	10,22	0,758

Πίνακας 9.1

ΥΛΙΚΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ	Ra (μm) ΠΑΡΑΠΛΕΥΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	Ra (μm) ΒΑΣΗΣ ΟΠΗΣ
#1	1,5A, 10μsec, (+)	--	--
#1	1,5A, 20μsec, (+)	--	--
#1	1,5A, 50μsec, (+)	--	--
#1	1,5A, 100μsec, (+)	--	--
#1	1,5A, 150μsec, (+)	--	--
#1	1,5A, 200μsec, (+)	--	--
#1	1,5A, 500μsec, (+)	--	--
#1	1,5A, 750μsec, (+)	--	--
#2	1,5A, 200μsec, (+)	5,14	8,5
#2	1,5A, 300μsec, (+)	5,51	9,3
#2	1,5A, 500μsec, (+)	6,43	10,47
#2	1,5A, 750μsec, (+)	7,46	11,77
#2	1,5A, 1000μsec, (+)	8,57	13,4
#2	1,5A, 200μsec, (-)	--	11,6
#2	1,5A, 300μsec, (-)	--	14,43
#2	1,5A, 500μsec, (-)	--	24,75
#3	6A, 200μsec, (-)	--	--
#3	6A, 300μsec, (-)	--	--
#3	6A, 500μsec, (-)	--	--
#3	9A, 200μsec, (-)	--	--
#3	9A, 300μsec, (-)	--	--
#3	9A, 500μsec, (-)	--	--

Πίνακας 9.2

9.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατίθενται τα βασικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν:

- Η ηλεκτροδιάβρωση είναι μια κατεργασία η οποία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τη διάτρηση σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες άνθρακα. Αυτό όμως δεν συμβαίνει σε όλους τους συνδυασμούς συνθηκών, όπως φαίνεται από τους αντίστοιχους χάρτες κατεργασιμότητας, ενώ η φύση της κατεργασίας είναι αρκετά στοχαστική.
- Μεγαλύτερη ακρίβεια διάστασης πετυχαίνουμε διατηρώντας μικρή διάρκεια παλμών, ρυθμίζοντας το εργαλείο να έχει θετική πολικότητα και διατηρώντας μικρή ένταση ρεύματος. Οι αποκλίσεις θα μπορούσαν

να χαρακτηριστούν ανεκτές για τις κατεργασίες με μικρά ρεύματα και θετική πολικότητα (έως και 3%), ενώ για αρνητική πολικότητα και μεγάλες εντάσεις ρεύματος γίνονται πολύ μεγάλες (ως και 10%).

- Μεγαλύτερο ρυθμό αποβολής υλικού έχουμε με θετική πολικότητα, ένταση ρεύματος 1,5A και διάρκεια παλμών στην περιοχή από 500μsec έως 750μsec, ανάλογα με το υλικό. Ο μέγιστος ρυθμός αποβολής που παρατηρείται είναι 1,033mm³/min, γεγονός που καθιστά την κατεργασία εξαιρετικά αργή και ασύμφορη για χρήση σε βιομηχανική κλίμακα. Επίσης, η κοπή δεν είναι γραμμική, με αποτέλεσμα η ταχύτητά της να είναι απρόβλεπτη και να καθίσταται δύσκολη η εκ των προτέρων εκτίμηση του ακριβούς χρόνου κατεργασίας.
- Η τραχύτητα στην παράπλευρη επιφάνεια είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τραχύτητα της βάσης των οπών. Η μεταβολή της σε συνάρτηση με τη διάρκεια παλμού είναι σχεδόν γραμμική και έχει αύξουσα τάση. Με θετική πολικότητα η παραγόμενη τραχύτητα είναι καλύτερη απ' ό τι με αρνητική. Σε μεγάλες τιμές έντασης ρεύματος και διάρκειας παλμού η καταστροφή της παραγόμενης επιφάνειας είναι αισθητή και γίνεται αντιληπτή ακόμα και με γυμνό μάτι. Ενδεικτικά, για τη βάση της οπής, με θετική πολικότητα, 1,5A και 200μsec έχουμε Ra=8,5μm, ενώ με αρνητική πολικότητα, 1,5A και 500μsec έχουμε Ra=24,75μm.

9.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αδυνατεί προφανώς να καλύψει πλήρως το θέμα της ηλεκτροδιάβρωσης σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες άνθρακα. Παρατίθενται λοιπόν κάποιες προτάσεις που αφορούν την περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

- Προτείνεται η διεξαγωγή σειρών πειραμάτων που θα εξετάζουν και θα προσδιορίζουν τη μεταβολή της ακρίβειας διάστασης ανάλογα με τις συνθήκες της κατεργασίας, για να δημιουργηθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα που θα δίνουν την ποσοστιαία απόκλιση της διάστασης. Έτσι ίσως θα μπορεί να προβλεφθεί πόσο μικρότερο πρέπει να είναι το χρησιμοποιούμενο εργαλείο για να επιτευχθεί η επιθυμητή διάσταση.
- Θα πρέπει να διερευνηθεί σε πιο σύγχρονες εργαλειομηχανές και με πιο ενδεδειγμένο τρόπο η συμπεριφορά των υλικών αυτής της φύσης, σε εντάσεις ρεύματος μεγαλύτερες από 1,5A και με δυνατότητα επιλογής ρευμάτων σε ενδιάμεσες τιμές από τις διαθέσιμες της εργαλειομηχανής που χρησιμοποιήθηκε. Προτείνεται επίσης η διερεύνηση της επίδρασης της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών και της τάσης κατεργασίας στο τελικό αποτέλεσμα.
- Προκειμένου να μετρηθεί με αξιοπιστία η σχετική φθορά εργαλείου, προτείνεται μετά το πέρας κάθε δοκιμής, να ζυγίζεται το εργαλείο σε ειδική ζυγαριά ακριβείας και να υπολογίζεται η διαφορά στο βάρος του. Έπειτα, με γνωστή την πυκνότητα του υλικού, να υπολογίζεται και η διαφορά στον όγκο του και συνεπώς η απώλεια υλικού.
- Προτείνεται η διεξαγωγή αρκετών σειρών πειραμάτων κάτω από τις ίδιες συνθήκες, προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο εύρος μέσα στο οποίο μεταβάλλεται ο ρυθμός αποβολής υλικού. Έτσι, θα είναι δυνατή σε ικανοποιητικό βαθμό η εκτίμηση του χρόνου κατεργασίας. Αναγκαία είναι τέλος η ανάπτυξη ενός ικανοποιητικού θεωρητικού μοντέλου για την κατεργασία και τους μηχανισμούς που διέπουν την αποβολή του υλικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Συγγράμματα

- 1. Α. Γ. Μάμαλης**, «Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: Μη Συμβατικές Κατεργασίες», Αθήνα 2000.
- 2. Α. Γ. Μάμαλης**, «Κατεργασίες Των Υλικών», Αθήνα 1991.
- 3. E. Bud Guitrau**, «The Electrical Discharge Machining Handbook», Hanser Gardner Publications, Cincinnati 1997.
- 4. Ε. Παπαδανιήλ, Μ. Σφαντζικόπουλος**, «Μηχανουργική Τεχνολογία-Εργαστήριο II», Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, Αθήνα 2002.
- 5. Δ. Μανωλάκος**, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, Αθήνα 2008 (διαθέσιμες στην ηλεκτρονική διεύθυνση users.ntua.gr/manolako).
- 6. Γ. Βοσνιάκος**, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Ποιότητα Κατεργασμένης Επιφάνειας, Αθήνα 2004 (διαθέσιμες στην ηλεκτρονική διεύθυνση users.ntua.gr/vosniak).
- 7. Δ. Παντελής**, «Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά», Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.
- 8. D.D.L. Chung**, «Carbon Fiber Composites», Butterworth-Heinemann, 1994.
- 9. S.T. Peters**, «Handbook of Composites», Chapman & Hall, 1998.
- 10. Η. D. Young**, «Πανεπιστημιακή Φυσική Τόμος Β': Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική-Σύγχρονη Φυσική», Εκδόσεις Παπαζήση, 1992.
- 11. S. Kalpakjian, S.R. Schmid**, «Manufacturing Processes for Engineering Materials», Prentice Hall, 4th ed., New Jersey, 2003.
- 12. G.F. Benedict**, «Non traditional Manufacturing Processes», Marcel Dekker, New York, 1987.
- 13. Ν.Μ. Βαξεβανίδης**, «Μη συμβατικές κατεργασίες κοπής», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής, Τμήμα ΜΜΒ/Παν. Θεσσαλίας, 2005.
- 14. Κ.Δ. Μπουζάκης**, «Μορφοποιήσεις με αφαίρεση υλικού», Εκδόσεις. Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2001.
- 15. A. Ghosh, A.K. Mallik**, «Manufacturing Science», EWP, New Delhi, 1991.

Δημοσιεύσεις

- 16. K.H. Ho, S.T. Newman**, «State of the art electrical discharge machining (EDM)», International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 43, pp.1287-1300, 2003.
- 17. K.H. Ho, S.T. Newman, S. Rahimifard, R.D. Allen**, «State of the art wire electrical discharge machining (WEDM)», International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 44, pp.1247-1259, 2004.
- 18. R. Snoeys, F. Staelens, W. Dekeyser**, «Current trends in non-conventional material removal processes», CIRP Annals, vol. 35(2), pp.467-480, 1986.
- 19. H. Hocheng, Y. H. Guu, N. H. Tai**, «The Feasibility Analysis Of Electrical-Discharge Machining Of Carbon-Carbon Composites», Materials and Manufacturing Processes, Vol. 13, No. 1, pp. 117-132, 1998.
- 20. W. S. Lau, M. Wang, W. B. Lee**, «Electrical Discharge Machining Of Carbon Fibre Composite Materials», International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 30, No. 2, pp.297-308, 1990.
- 21. Y. H. Guu, H. Hocheng, N. H. Tai, S. Y. Liu**, «Effect Of Electrical Discharge Machining On The Characteristics Of Carbon Fibre Reinforced Carbon Composites», Journal of Materials Science, Vol. 36, pp.2037-2043, 2001.
- 22. W. S. Lau, T. M. Yue, T. C. Lee, W. B. Lee**, «Un-Conventional Machining Of Composite Materials», Journal of Materials Processing Technology, Vol.48, pp.199-205, 1995.
- 23. P. M. George, B. K. Raghunath, L. M. Manocha, A. M. Warriar**, «EDM Machining Of Carbon-Carbon Composite – A Taguchi Approach», Journal of Materials Processing Technology, Vol.145, pp. 66-71, 2004.
- 24. D.D.L. Chung**, «Review: Electrical Applications Of Carbon Materials», Journal Of Materials Science, Vol.39, pp. 2645-2661, 2004.
- 25. W Koenig, D. F. Dauw, G. Levy, U. Panten**, «EDM-Future Steps towards The Machining Of Ceramics», CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 37, Issue 2, pp. 623-631, 1988.

26. P.M. George, B.K. Raghunath, L.M. Manochac, Ashish M. Warriar,
«Modelling Of Machinability Parameters Of Carbon–Carbon Composite-A
Response Surface Approach», Journal of Materials Processing Technology,
vol. 153–154, pp.920–924, 2004

