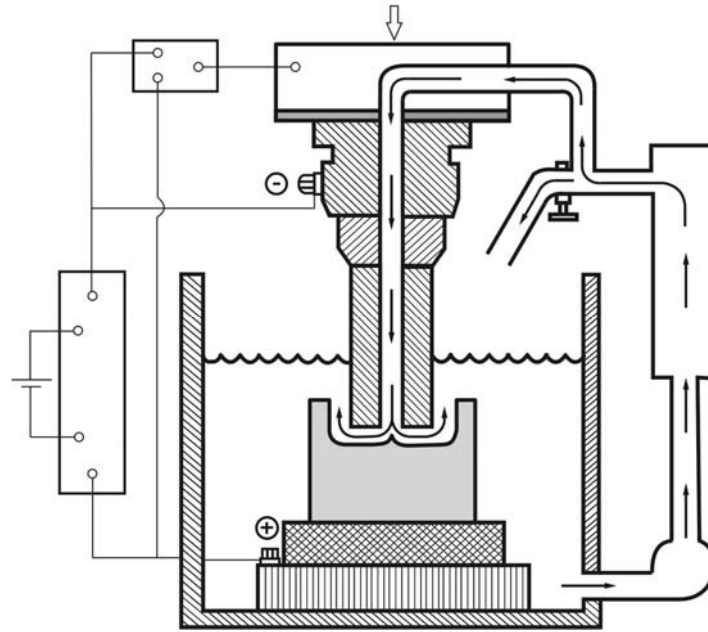


ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ



2012


<http://www.m3.tuc.gr>


Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

Ανεπάρκεια Συμβατικών Μεθόδων

- Σκληρά & Ψαθυρά υλικά
- Υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας και φινιρίσματος
- Αδυναμία απόδοσης πολύπλοκων μορφών
- Κόστος και χρόνος
- Πλήρης αδυναμία εφαρμογής

Αρχές μη συμβατικών μεθόδων κατεργασίας

- Ανυπαρξία γρεζιών
- Εναλλακτικές μορφές προσδιδόμενης ενέργειας, για το μηχανισμό αφαίρεσης υλικού

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση ◦ Κατεργασία κοπής με σύρμα ◦ Ηλεκτροχημική λείανση με ηλεκτροδιάβρωση ◦ Κατεργασία δέσμη ηλεκτρονίων ◦ Κατεργασία με ακτίνα πλάσματος ◦ Κατεργασία με ακτίνα λέιζερ
ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Χημικό φραιζάρισμα ◦ Φωτοχημική κατεργασία
ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Ηλεκτροχημική κατεργασία ◦ Ηλεκτροχημική λείανση ◦ Ηλεκτροχημική λείανση με ηλεκτροδιάβρωση
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Κοπή με υπερήχους
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΥΨ. ΠΙΕΣΗΣ	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Κατεργασία με νερό υψ. Πίεσης ◦ Κατεργασία με νερό υψ. Πίεσης & λειαντικούς κόκκους

2012



Προηγμένες μέθοδοι κατεργασίας

<http://www.m3.tuc.gr>


Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

Ιστορική αναδρομή

- 1768: Διάβρωση μετάλλων με ηλεκτρικούς σπινθήρες (Joseph Priestley).
- 1930: Αφαίρεση σπασμένων κοπτικών από τρυπάνια.
- 1943: Φθορά ηλεκτρικών διακοπών (Lazarekko).
- 1950: Πρώτη βρετανική πατέντα κυκλώματος Ηλεκτροδιάβρωσης (Rudoff).
- 1952: Πρώτη εργαλειομηχανή Ηλεκτροδιάβρωσης (Charmilles).
- 1960: Ανάπτυξη ημιαγωγών

Αρχή λειτουργίας Ηλεκτροδιάβρωσης

- Ηλεκτρόδιο – εργαλείο, ηλεκτρόδιο – τεμάχιο βυθισμένα σε διηλεκτρικό υγρό.
- Πρόωση του εργαλείου προς το τεμάχιο και εφαρμογή τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων.
- Ελαχιστοποίηση διάκενου, ιονισμός και διάσπαση διηλεκτρικού.
- Διαμόρφωση αγωγού εκκένωσης στο σημείο του ελάχιστου διάκενου και δημιουργία σπινθήρα.
- Αύξηση θερμοκρασίας, τήξη των υλικών στην περιοχή της εκκένωσης.
- Διακοπή τάσης, απιονισμός και έκπλυση του διάκενου. Προώθηση εργαλείου στη θέση νέας εκκένωσης.

**Ιστορική αναδρομή Ηλεκτροδιάβρωσης**
<http://www.m3.tuc.gr>

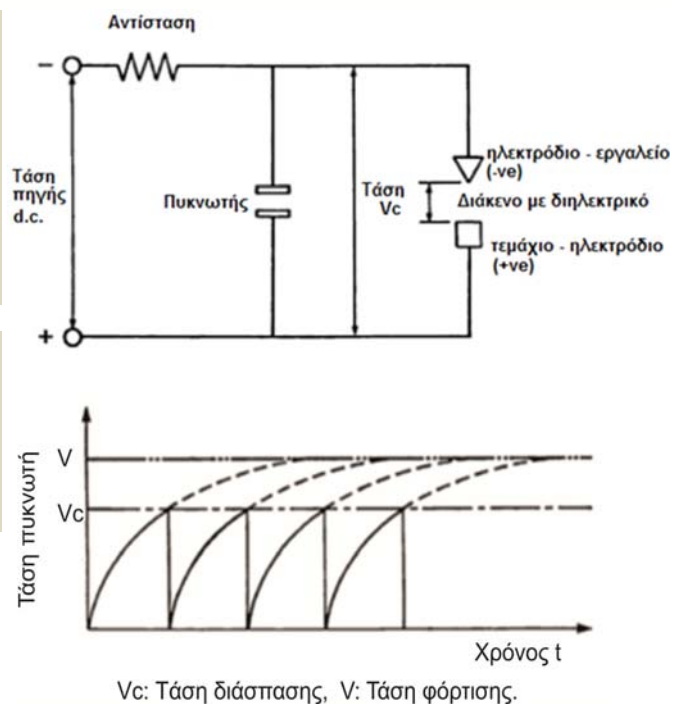

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς
Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων

- 8000° – 12000° C.
- 2.000 – 1.000.000 εκκενώσεις / sec.
- Λόγος ογκομετρικής απομάκρυνσης υλικού 2 – 400 mm³ / min.

Ηλεκτρικό Κύκλωμα

- Κυκλώματα τύπου RC
- Κυκλώματα με γεννήτριες ελεγχόμενου παλμού

**Αρχή λειτουργίας**
<http://www.m3.tuc.gr>


Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

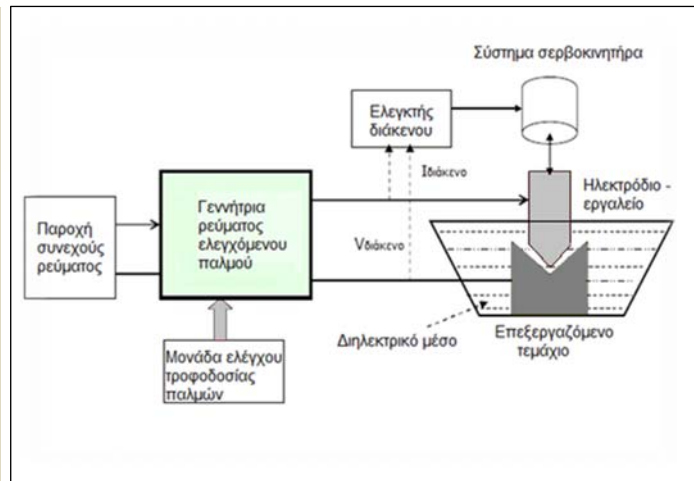
Δημήτριος Καραβάς

Ηλεκτρικές Παράμετροι κατεργασίας

- Πολικότητα
- Τάση ανοικτού κυκλώματος
- Ένταση εκκένωσης
- Χρονισμός παλμού τάσης

Μη Ηλεκτρικές Παράμετροι κατεργασίας

- Διάκενο
- Έκπλυση διακένου
- Επιλογή διηλεκτρικού
- Υλικό ηλεκτροδίου



2012

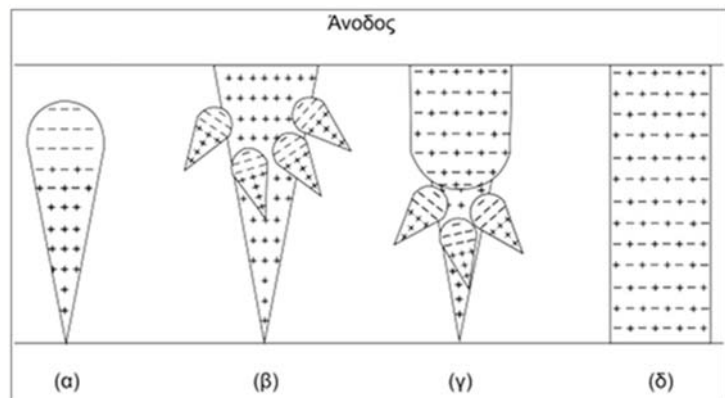
**Παράμετροι κατεργασίας**<http://www.m3.tuc.gr>

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

Πολικότητα

- Εξαρτάται από τα υλικά των ηλεκτροδίων.
- Σωστή επιλογή ελαχιστοποιεί τη φθορά του εργαλείου.
- Επιλέγεται εργαλείο – άνοδος.
- Φθορά καθόδου 99.5 %.
- Σύγχρονες γεννήτριες – Swing pulse



(α) Ηλεκτρονιακή χιονοστιβάδα.

(β) Θετικά ιονισμένα αέρια στο διακένου.

(γ) Δευτερεύουσες χιονοστιβάδες.

(δ) Ανάπτυξη διαλύου.

2012

**Πολικότητα**<http://www.m3.tuc.gr>

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

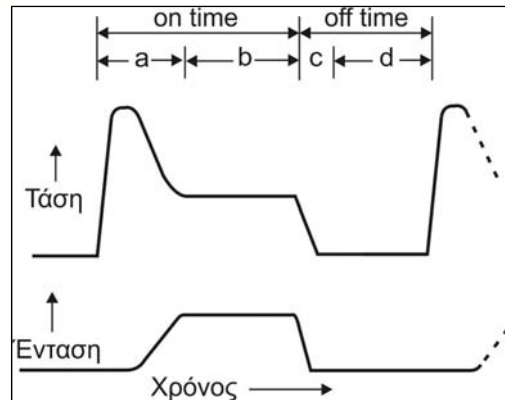
Δημήτριος Καραβάς

Τάση Ανοικτού Κυκλώματος

- Εφαρμόζεται στα άκρα των ηλεκτροδίων (100 V). Διακόπτεται με τη διάσπαση του διηλεκτρικού (35 V).
- Τετραγωνικός παλμός ή τραπεζοειδής (Brugg 1968).
- Αύξηση τάσης → Αύξηση διάκενου, αφαίρεσης υλικού, φθοράς κοπτικού, τραχύτητας.

Ένταση Εκκένωσης

- Μέγιστο πλάτος έντασης
- Αύξηση έντασης → Αυξημένη αφαίρεση υλικού, τραχύτητα, φθορά εργαλείου.

**Χρονισμός Παλμού Τάσης**

- Χρόνος ιονισμού
- Χρόνος εκκένωσης
- Χρόνος απιονισμού
- Νεκρός χρόνος

2012



Τάση – Ένταση – Χρονισμός Παλμού

<http://www.m3.tuc.gr>

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

Χρονισμός Παλμού Τάσης

- Τυπική διάρκεια χρόνων 2 – 1000 μs.
- Αύξηση On time → Αυξημένο βάθος κρατήρα, βάθος ΘΕΖ. Κατάσταση μη φθοράς.
- Αύξηση Off time → Καλύτερη έκπλυση.

Παράγοντας Εργασίας (Duty Factor)

DF (%) = (διάρκεια παλμού / συνολική διάρκεια κύκλου) × 100

Μέση Ένταση

Μέση ένταση (A) = Παράγοντας εργασίας (%) × Μέγιστη ένταση.

Συχνότητα Παλμού

$$f_{\text{παλμού}} = \frac{1000}{\text{διάρκεια}_\text{κύκλου}}$$

Ενέργεια Ηλεκτροδιάβρωσης

$$E = V \times I \times T$$

Ενέργεια Παλμού

$$E_p = V_p I_p t_{on} \frac{1}{t_{on} + t_{off}}$$

2012



Ενέργεια – Χρονισμός Παλμού

<http://www.m3.tuc.gr>

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

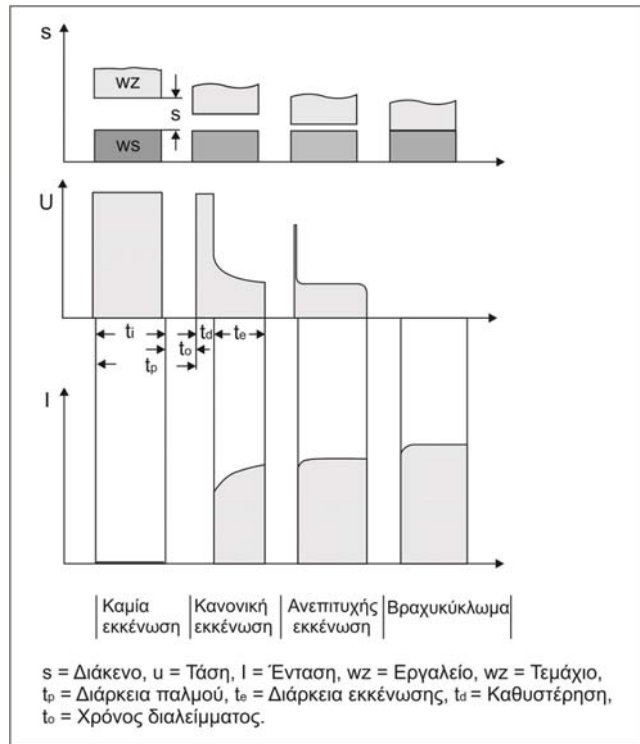
Δημήτριος Καραβάς

Διάκενο

- Ελεγχόμενο Διάκενο → Σταθερή κατεργασία (Numerical Position Control, CNC).
- Arc Damage, Βραχυκύκλωμα.

Έκπλυση Διάκενου (Flushing)

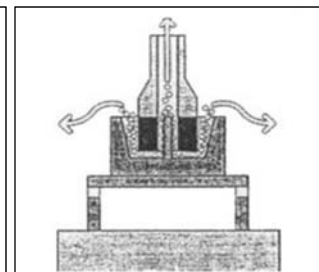
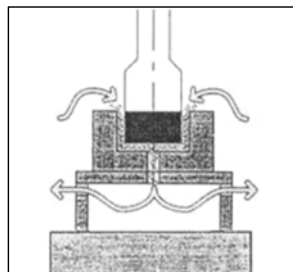
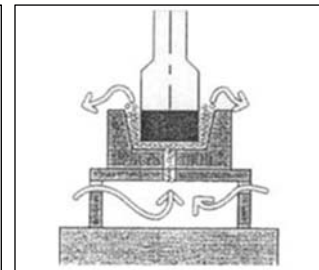
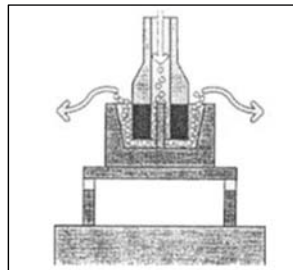
- Εξαναγκασμένη ροή διηλεκτρικού
- Ταχύτητα ροής μέχρι 1 ms^{-1}
- Τεχνικές Έκπλυσης:
 - Σάρωση
 - Έγχυση
 - Απώθηση
 - Πλάγια Σάρωση
 - Παλμική Έγχυση
 - Συνδυασμός Μεθόδων

**Διάκενο – Έκπλυση Διάκενου**
<http://www.m3.tuc.gr>


Dept. of Production Eng. & Management
 Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
 Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς
Τεχνικές Έκπλυσης

- Έκπλυση με Σάρωση
- Έκπλυση με Έγχυση
- Έκπλυση με Απώθηση
- Έκπλυση με Πλάγια Σάρωση
- Έκπλυση με Παλμική Έγχυση
- Συνδυασμένη Έκπλυση

**Τεχνικές Έκπλυσης**
<http://www.m3.tuc.gr>


Dept. of Production Eng. & Management
 Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
 Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

Επιλογή Διηλεκτρικού

- Υψηλή διηλεκτρική δύναμη, Ταχύς αποιονισμός, Χαμηλό ιξώδες, Χημική ουδετερότητα, Μη τοξικότητα ατμών, Υψηλό σημείο ανάφλεξης, Καλές θερμικές ιδιότητες, Χαμηλό κόστος.

Υλικά Διηλεκτρικού

- Κηροζίνη, Παραφίνη (φινίρισμα)
- Αποιονισμένο νερό (σκληρότητα)
- Πρόσθετα: Αλουμίνιο, αλουμίνα, Νικέλιο, Πυρίτιο (αύξηση αγωγιμότητας)

Ηλεκτρόδια Κονιομεταλλουργίας

- Πρεσάρισμα σε θερμοκρασίες ανόπτησης, υψηλής καθαρότητας σκόνης (Αλουμίνιο, Χρώμιο, Νικέλιο, Βολφράμιο, Τιτάνιο, Πυρίτιο).
- Ευαισθησία στις αλλαγές τάσης – έντασης (Philip & Samuel 1997). Προσθήκη υλικού αντί αφαίρεσης (Li 2001).

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

**Επιλογή Διηλεκτρικού – Υλικά Ηλεκτροδίων**
<http://www.m3.tuc.gr>

 Dept. of Production Eng. & Management
 Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
 Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (MRR)

- Δείκτης πρόβλεψης και κριτήριο επιτυχίας.

Υπολογισμός

$$MRR = \frac{1000 \times w_w}{\rho_w \times T}$$

Εργαλείο πρόβλεψης

- Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) Δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης (RBFN)
- Συνδυασμός ANN – Γενετικών Αλγορίθμων με σφάλμα 5.6 % (Wang)
Feed Forward ANN – Back Propagation (Panda & Bhoi)

Αλληλεπιδράσεις MRR – Λοιπών παραμέτρων

- Άυξηση τάσης, έντασης εκκένωσης → Αύξηση MRR
- Αύξηση off time → Μείωση MRR
- Αύξηση διάρκειας παλμού → Αυξομείωση MRR

Λόγος φθοράς εργαλείου (EWR)

$$EWR = 100 \times \frac{VEW}{MRR}$$

όπου

$$VEW = \frac{1000 \times w_e}{\rho_e \times T}$$

η ογκομετρική φθορά του εργαλείου

**Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού**
<http://www.m3.tuc.gr>

 Dept. of Production Eng. & Management
 Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
 Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

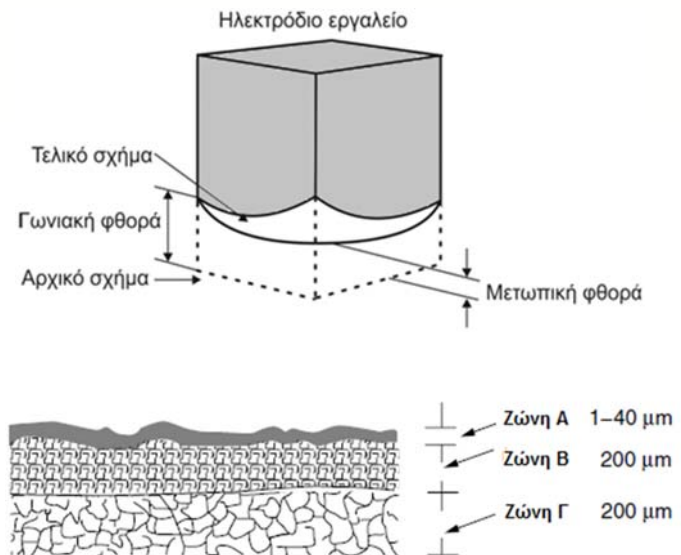
Δημήτριος Καραβάς

Αλληλεπιδράσεις EWR – Λοιπών παραμέτρων

- Αύξηση έντασης ρεύματος : ↑
- Μείωση Διάρκειας Παλμών : ↑
- Μείωση χρόνου διαλείμματος : ↓
- Αύξηση τυρβώδους χαρακτήρα ροής : ↑
- Διαβρωτικά απόβλιττα : ↑
- Υψηλό σ. β. εργαλείου : ↓

Ποιότητα Επιφάνειας Τεμαχίου

- Επιμεταλλωμένο Στρώμα (λευκό)
- Στρώμα ΘΕΖ
- Ανοπτημένο Στρώμα



2012



Λόγος Φθοράς Εργαλείου – Επιφανειακά Στρώματα

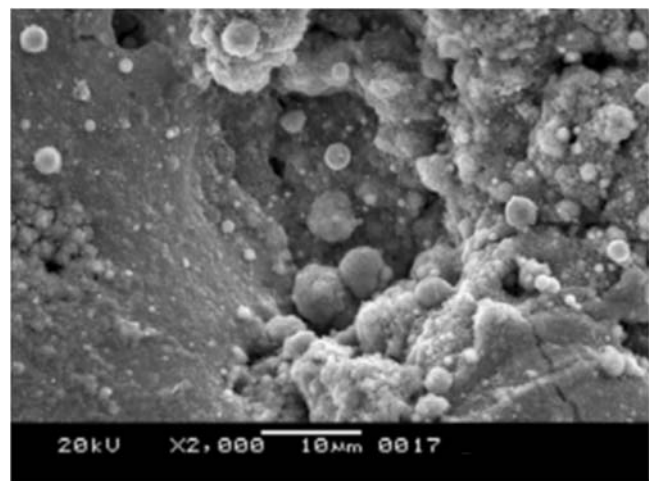
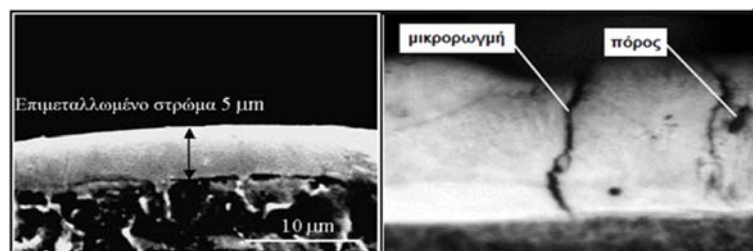
<http://www.m3.tuc.gr>

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

Μεταλλουργικές Αλλαγές – Τροποποίηση Επιφάνειας

- Παρατηρήθηκε το 1965 (Barash & Kahlon).
- Αλλαγή σύστασης, Σκληρότητα, αντίσταση σε φθορά (Parasnis & Venkatesh 1972).
- Επικάθιση υλικού εργαλείου (Basu & Jeswani 1976).
- Βάθος λευκού στρώματος – ενέργεια παλμού (Lee).
- Αφαίρεση πόρων, ρωγμών (Yan 2002).
- Ηλεκτρόδια κονιομεταλλουργίας – Επιλεκτική τροποποίηση.



2012



Τροποποίηση Κατεργασμένης Επιφάνειας

<http://www.m3.tuc.gr>

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

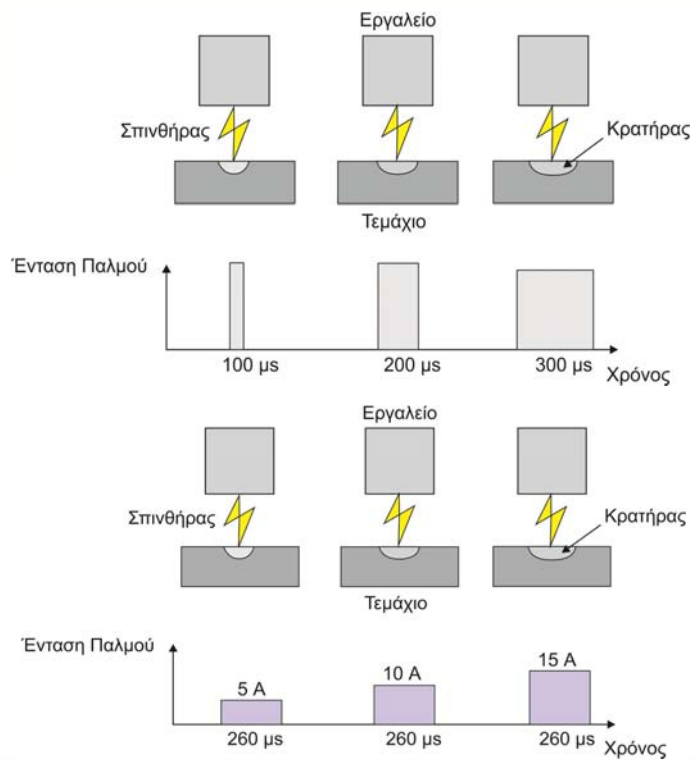
Δημήτριος Καραβάς

Τοπογραφικές Επιφάνειες **Αλλαγές**

- Τραχύτητα R_a
 $R_a = 0.0225 i_p^{0.29} t_p^{0.38}$
- Μέτρηση όρεων και κοιλάδων.
- Μέγιστο Πλάτος όρους – κοιλάδας = $10 \cdot R_a$.

Αλληλεπιδράσεις Τραχύτητας - Λοιπών Παραμέτρων

- Αύξηση on time : \uparrow
- Ένταση εκκένωσης : \uparrow
- Υψηλό Σημείο τήξης : \downarrow



2012



Τοπογραφικές Αλλαγές Επιφάνειας

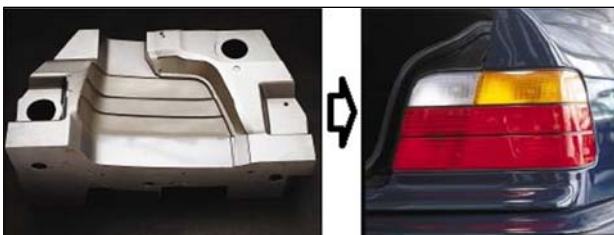
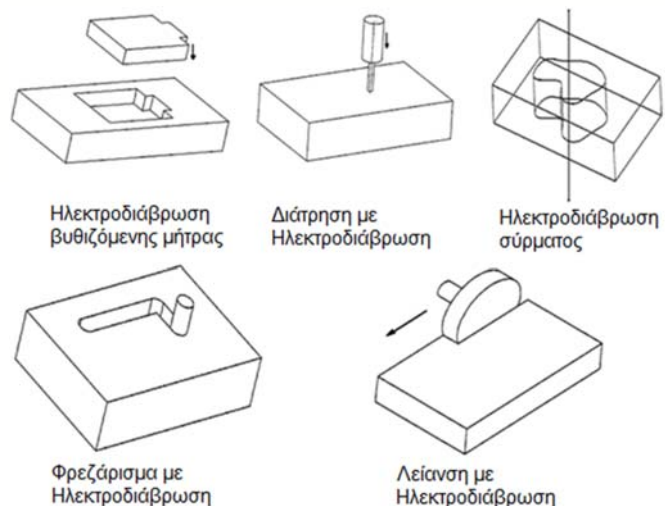
<http://www.m3.tuc.gr>

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

Ηλεκτροδιάβρωση Βυθιζόμενης Μήτρας (Die Sinking) ή Αποτύπωσης

- Με οδήγηση τροχιάς ή πλανητική κίνηση.
- Δυνατότητα κατασκευής τυφλών οπών με ορθογώνιες ακμές.
- Κατασκευή καλουπιών.
- Μεγάλο μερίδιο αγοράς.

**Λοιπές Παραλλαγές**

- Πριόνισμα με Ηλεκτροδιάβρωση
- ED Texturing

2012



Παραλλαγές Ηλεκτροδιάβρωσης

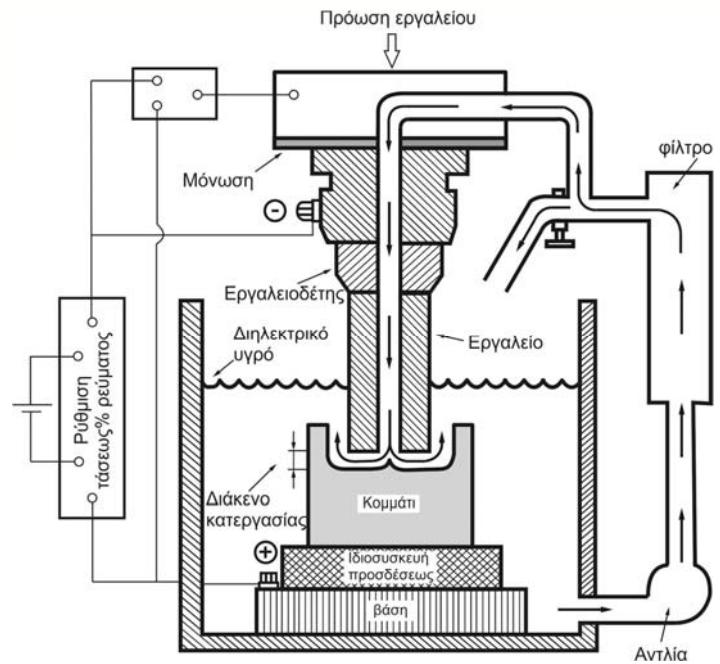
<http://www.m3.tuc.gr>

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

Τυπική διάταξη

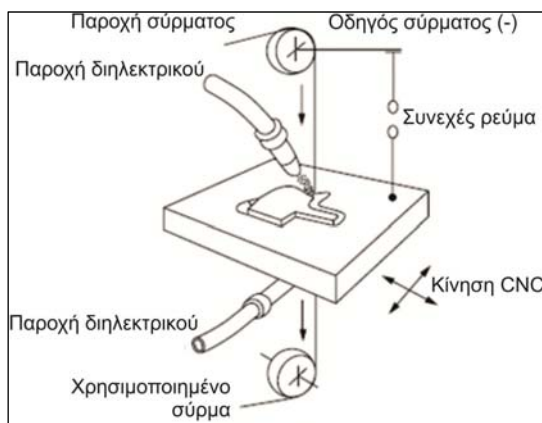
- Γεννήτρια Ελεγχόμενων παλμών
- Πρόωση με σερβοκινητήρα
- Ανακύκλωση Διηλεκτρικού
- Μόνωση

**Τυπική Διάταξη s - EDM**
<http://www.m3.tuc.gr>

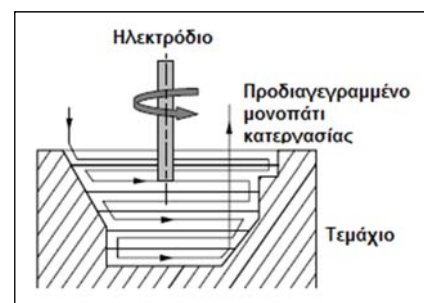

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς
Ηλεκτροδιάβρωση Σύρματος με

- Συνεχής ανανέωση του εργαλείου
- Κατασκευή ευθειογενών επιφανειών

**Φραιζάρισμα Ηλεκτροδιάβρωση με**

- Μειωμένο κόστος & χρόνος κατασκευής εργαλείου.
- Φθορά εργαλείου .
Ενιαία φθορά - προκαθορισμένο μονοπάτι.

**Παραλλαγές Ηλεκτροδιάβρωσης**
<http://www.m3.tuc.gr>


Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

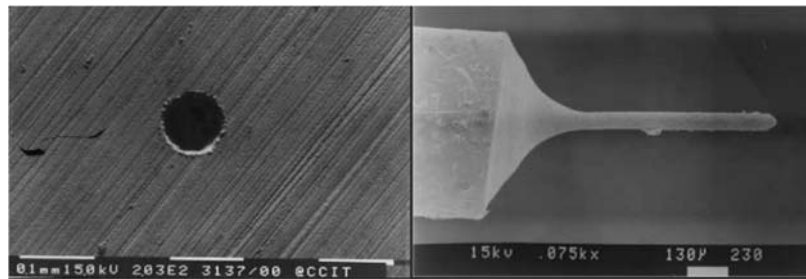
Μίκρο - Ηλεκτροδιάβρωση

- Κατεργασίες από 1 – 999 μm.
- Ευαισθησία Σερβοκίνησης

Μίκρο – Οπές

- Ανοχές 0.003 mm
- Ταχύτητα 3 mm / s
- Τραχύτητα 0.3 μm (Wansheng)

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



2012



Μίκρο - κατεργασίες

<http://www.m3.tuc.gr>

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

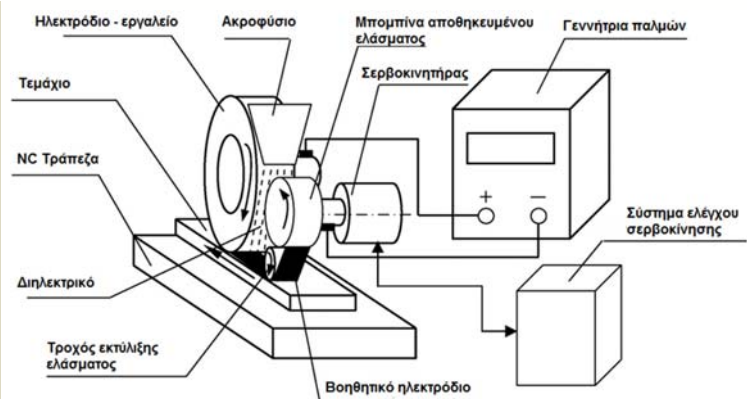
Δημήτριος Καραβάς

Νέες Τάσεις - Εφαρμογές

- Ξηρή Ηλεκτροδιάβρωση (NASA 1985)
- Με υπερηχητική Δόνηση (μέσα '80)
- Με πρόσθετα στο διηλεκτρικό
- Με βοηθητικό ηλεκτρόδιο

Με πρόσθετα στο διηλεκτρικό

- Αύξηση διάκενου (50 → 150 mm)
- Σωματίδια – αγωγοί
- Ομαλότεροι κρατήρες (Pecas & Henriques 2003)
- Αύξηση σκληρότητας, αντίστασης σε σκουριά

**Εξελίξεις στη Μοντελοποίηση του φαινομένου**

- Διαστατική Ανάλυση (πρόβλεψη φθοράς εργαλείου, MRR 1970). Μέσο σφάλμα 10 %
- Μαθηματικά Μοντέλα (Διάβρωσης ανόδου, Καθόδου)
- Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Panda & Bhoi 5.6 & 4.98%)

2012



Νέες Τάσεις - Εφαρμογές

<http://www.m3.tuc.gr>

Dept. of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Assoc. Prof. Aristomenis Antoniadis

Δημήτριος Καραβάς

Πλεονεκτήματα

- Ανυπαρξία γρεζιών
- Ακρίβεια και Φινίρισμα
- Ιδιαίτερα σχήματα, γεωμετρίες
- Ευχέρεια κατεργασίας σε περιβάλλοντα υψηλού κινδύνου
- Κατεργασία υλικών οποιασδήποτε σκληρότητας
- Λεπτότοιχα, αντικείμενα παραμορφώσεις Ψαθυρά χωρίς

Μειονεκτήματα

- Κυρίως ηλεκτρικά αγωγίμα υλικά
- Αργή ταχύτητα
- Επικινδυνότητα
- Δημιουργία ΘΕΖ
- Ανεξερεύνητες δυνατότητες και ελλιπής περιγραφή μηχανισμού.



ΤΕΛΟΣ
ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ!

