

**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΠΑΤΡΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

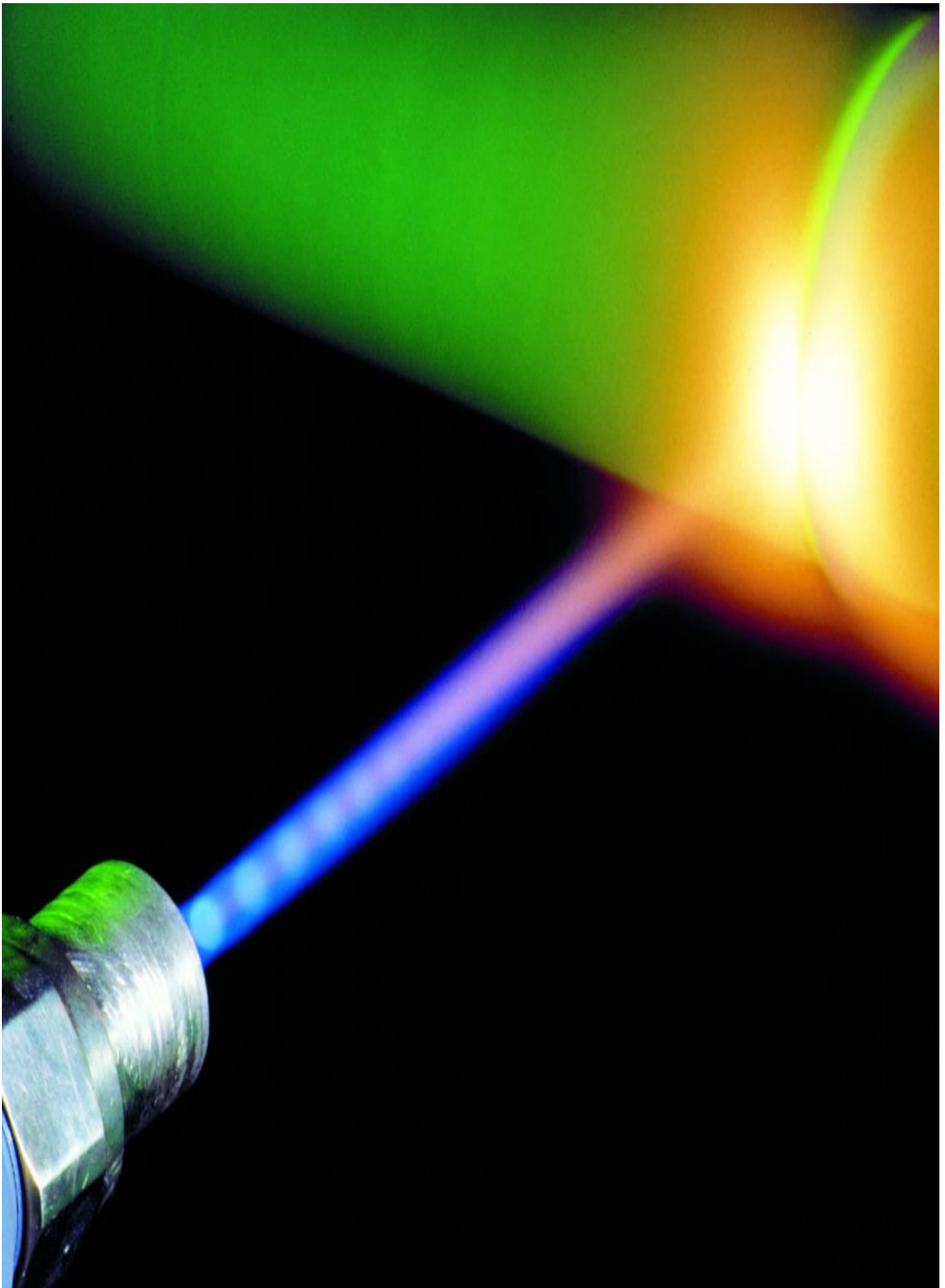
**ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:
«ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ»**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ : ΚΟΛΛΙΑΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ Α.Μ. : 3805
 ΜΑΝΩΛΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α.Μ. : 3641

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Κος ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ

ΠΑΤΡΑ 2007



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο πρώτο

Εισαγωγή στις μη συμβατικές μεθόδους κατεργασίας

	Σελ.
α. Εισαγωγή.....	12

Κεφάλαιο δεύτερο

ΟΜΑΔΑ Α

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

1. Κατεργασία με εκτόξευση αποξεστικού υλικού [ABRASIVE JET MACHINING (AJM)]

	Σελ.
α. Εισαγωγή	16
β. Μέρη συστήματος.....	17
γ. Χαρακτηριστικά της AJM	20
δ. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της AJM.....	24

2. Κατεργασία με ροή αποξεστικού υλικού
[ABRASIVE FLOW MACHINING (AFM)]

α. Εισαγωγή.....	25
β. Χαρακτηριστικά της AFM.....	25
γ. Εξοπλισμός της AFM.....	27
δ. Δυνατότητες της AFM.....	32
ε. Εφαρμογές της AFM.....	36

3. Κατεργασία με εκβολή νερού
[WATER JET MACHINING (WJM)]

α. Εισαγωγή.....	39
β. Εξοπλισμός της WJM.....	40
γ. Χαρακτηριστικά της WJM.....	44
δ. Εφαρμογές της WJM.....	49

4. Κατεργασία με εκβολή νερού το οποίο περιέχει αποξεστικό υλικό [ABRASIVE WATER JET MACHINING (AWJM)]

α. Εισαγωγή.....	54
β. Εξοπλισμός της AWJM.....	54
γ. Χαρακτηριστικά της AWJM.....	57
δ. Εφαρμογές της AWJM.....	57
ε. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων WJM και AWJM.....	60

5. Κατεργασία με υπερήχους
[ULTRASONIC MACHINING (USM)]

α. Εισαγωγή	61
β. Εξοπλισμός της USM	62
γ. Περιστροφική κατεργασία με υπερήχους (R/USM).....	63
δ. Εφαρμογές της R/USM.....	66
ε. Κρουστική λείανση με υπερήχους (IG/USM)	69
στ. Εφαρμογές της IG/USM	72
ζ. Χαρακτηριστικά της IG/USM.....	73

Κεφάλαιο τρίτο

ΟΜΑΔΑ Β

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

6. Κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση
[ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM)]

	Σελ.
α. Εισαγωγή.....	76
β. Αρχές κατεργασίας.....	77
γ. Τύποι κυκλωμάτων EDM	78
δ. Το ηλεκτρόδιο (εργαλείο).....	81
ε. Ο σερβομηχανισμός	83
στ. Διαδικασία εκκένωσης	84

ζ. Το διηλεκτρικό υγρό	85
η. Ρυθμοί αφαίρεσης μετάλλου	88
θ. Φθορά ηλεκτροδίου (εργαλείου)	89
ι. "Υπερκοπή"	90
κ. Τραχύτητα επιφανείας.....	91
λ. Πλεονεκτήματα της EDM.....	92
μ. Περιορισμοί της EDM	93
ν. Εφαρμογές της EDM.....	94
ξ. Κατακόρυφη EDM με CNC	96
ο. Ασφάλεια και υγιεινή.....	98

7. Κατεργασία ηλεκτρικής εκκένωσης με σύρμα [ELECTRICAL DISCHARGE WIRE CUTTING (EDWC)]

α. Εισαγωγή.....	99
β. Διαδικασία κατεργασίας.....	102
γ. Λειτουργικά συστήματα μηχανής EDWC	103

8. Λείανση με ηλεκτρική εκκενωση [ELECTRICAL DISCHARGE GRINDING (EDG)]

α. Εισαγωγή.....	110
β. Εξοπλισμός και λειτουργία της EDG.....	110
γ. Χαρακτηριστικά της EDG	113
δ. Εφαρμογές της EDG	115

9. Κατεργασία με δέσμη ηλεκτρονίων

[ELECTRON BEAM MACHINING (EBM)]

α. Εισαγωγή.....	118
β. Περιγραφή του εξοπλισμού της EBM.....	118
γ. Χαρακτηριστικά της EBM	123
δ. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της EBM	128
ε. Εφαρμογές της EBM.....	130

10. Κατεργασία με δέσμη λέιζερ

[LASER BEAM MACHINING (LBM)]

α. Εισαγωγή.....	131
β. Στερεά λέιζερ.....	132
γ. Αέρια λέιζερ.....	134
δ. Υγρά λέιζερ.....	135
ε. Βιομηχανικές εφαρμογές των λέιζερ.....	137
στ. Πλεονεκτήματα των λέιζερ	137

11. Κατεργασία με δέσμη πλάσματος

[PLASMA BEAM MACHINING (PBM)]

α. Εισαγωγή.....	139
β. Διαδικασία PBM.....	140

12. Μέθοδος θερμικής ενέργειας
[THERMAL ENERGY METHOD (TEM)]

α. Εισαγωγή.....	142
β. Αρχές λειτουργίας της TEM.....	142
γ. Δυνατότητες της TEM.....	144
δ. Περιορισμοί της TEM	145

Κεφάλαιο τέταρτο

ΟΜΑΔΑ Γ

ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

13. Ηλεκτροχημική κατεργασία
[ELECTROCHEMICAL MACHINING (ECM)]

	Σελ.
α. Εισαγωγή.....	147
β. Τρόπος λειτουργίας της ECM.....	148
γ. Συνθήκες κατεργασίας.....	150
δ. Ο ηλεκτρολύτης	152
ε. Υλικά και κατασκευή εργαλείων (ηλεκτροδίων)	155
στ. Ποιότητα επιφάνειας	164
ζ. Ακρίβεια κατεργασίας	165
η. Μηχανές ECM και εφαρμογές	165
θ. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ECM	170

14. Ηλεκτροχημική λείανση
[ELECTROCHEMICAL GRINDING (ECG)]

α. Εισαγωγή	172
β. Χαρακτηριστικά της ECG	172
γ. Ο λειαντικός τροχός	174
δ. Κατεργασία (τορνίρισμα) τροχού	175
ε. Το κατεργαζόμενο κομμάτι	175
στ. Το ρεύμα	175
ζ. Ο ηλεκτρολύτης	176
η. Τραχύτητα επιφανείας	178
θ. Μέθοδοι ECG	179
ι. Πλεονεκτήματα της ECG	184
κ. Μειονεκτήματα και περιορισμοί της ECG	185
λ. Εφαρμογές της ECG	186

15. Ηλεκτροχημική λείανση με εκκένωση
[ELECTROCHEMICAL DISCHARGE GRINDING (ECDG)]

α. Εισαγωγή	188
β. Εξοπλισμός της ECDG	188
γ. Ηλεκτρολύτες	189
δ. Χαρακτηριστικά της ECDG	190
ε. Σύγκριση της ECDG με την ECG και την EDG	195

16. Ηλεκτρολυτική κατεργασία με μορφοποιημένο σωλήνα
[SHAPED TUBE ELECTROLYTIC MACHINING (STEM)]

α. Εισαγωγή	197
β. Εξοπλισμός της STEM	198

γ. Δυνατότητες της STEM.....	201
δ. Παράμετροι της STEM.....	203
ε. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της STEM.....	203

**17. Διάτρηση με ηλεκτροροή και τριχοειδής διάτρηση
[ELECTROSTREAM AND CAPILLARY DRILLING (ESD
και CD)]**

α. Εισαγωγή.....	205
β. Εξοπλισμός και εργαλεία των δύο μεθόδων.....	205
γ. Παράμετροι κατεργασίας της ESD και της CD.....	209
δ. Δυνατότητες της ESD και της CD.....	210
ε. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της ESD και της CD.....	211

Κεφάλαιο πέμπτο

ΟΜΑΔΑ Δ

ΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

18. Χημικό φρεζάρισμα

[CHEMICAL MILLING (CM)]

α. Εισαγωγή.....	213
β. Εξοπλισμός και χαρακτηριστικά της CM.....	214
γ. Προδιαγραφές και έλεγχος των παραμέτρων της CM.....	221
δ. Μηχανικές ιδιότητες των τεμαχίων που είναι κατεργασμένα με τη CM.....	229
ε. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της CM.....	231
στ. Εφαρμογές της CM.....	232

19. Φωτοχημική κατεργασία
[PHOTOCHEMICAL MACHINING (PCM)]

α. Εισαγωγή	236
β. Περιγραφή της PCM.....	236
γ. Προδιαγραφές μελέτης και σχεδίασης.....	247
δ. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της PCM	250
ε. Εφαρμογές της PCM.....	252

20. Θερμοχημική κατεργασία
[THERMOCHEMICAL MACHINING (PCM)]

α. Θερμοχημική κατεργασία	253
---------------------------------	-----

Συμπεράσματα

α. Συμπεράσματα	255
-----------------------	-----

Βιβλιογραφία

α. Παράρτημα	265
--------------------	-----

Κεφάλαιο Πρώτο

Μη Συμβατικές Μέθοδοι Κατεργασίας

α. Εισαγωγή

Οι μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας (NTM: **Non Traditional Machining processes**) προέκυψαν από τις αυξανόμενες και περίπλοκες ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας. Η ικανοποίηση των αναγκών αυτών απαίτησε εφευρετικότητα και δημιουργικότητα καθώς και την επινοήση νέων εργαλείων που θα είχαν τη δυνατότητα να ικανοποιήσουν τη τελειοποίηση αυτών των εφευρέσεων. Μια εφεύρεση η οποία δημιούργησε νέες προκλήσεις στο τομέα των κατεργασιών είναι το αεροσκάφος. Κατά τη προσπάθεια να αυξηθεί η απόδοση των αεροσκαφών, καθώς αυτά εξελίχθησαν σε διαταμοσφαιρικά οχήματα, προέκυψε η ανάγκη για συνεχή καλυτέρευση των υλικών κατασκευής ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες βελτίωσης της θερμοκρασίας λειτουργίας των κινητήρων καθώς και της ατράκτου. Τα τελευταία 60 χρόνια, οι θερμοκρασίες λειτουργίας του κινητήρα έχουν αυξηθεί πλέον του 1100% και οι αντίστοιχες απαιτήσεις για τη θερμοκρασία λειτουργίας της ατράκτου έχουν επίσης αυξηθεί κατά 2500% ώστε να αντέχουν στην αυξημένη τριβή που προκύπτει από τις υπερβολικά υψηλές ταχύτητες πτήσης. Οι νέες μέθοδοι αναπτύχθηκαν, άλλες περισσότερο, άλλες λιγότερο και άλλες ακόμα βρίσκονται σε στάδιο εξέλιξης, για να αντιμετωπίσουν προβλήματα κατεργασίας νέων πολύ σκληρών και εύθραυστων υλικών, καθώς και υλικών εξαιρετικά πυρίμαχων με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που συμβαίνει να αντιδρούν χημικά με το κοπτικό εργαλείο και τέλος να παρουσιάζουν ομοιογενή μικροδομή. Επίσης με τις νέες μεθόδους αντιμετωπίζονται επιτυχώς προβλήματα σύνθετων τεμαχίων από τα προαναφερόμενα υλικά με μεγάλες απαιτήσεις ακρίβειας και ποιότητας και τέλος προβλήματα υψηλού κόστους ή χρόνου κατεργασίας ή και πλήρους αδυναμίας εφαρμογής των γνωστών «συμβατικών» μεθόδων.

Οι συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας που περιλαμβάνουν το σχηματισμό αποβλίτων με εφαρμογή θλιπτικών και διατμητικών δυνάμεων έχουν ένα αριθμό ενγγενών μειονεκτημάτων και περιορισμών. Συχνά ο σχηματισμός αποβλιττων είναι μια δαπανηρή και δύσκολη διαδικασία. Μεγάλα ποσά ενέργειας χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή ενός ανεπιθύμητου προϊόντος, τα αποβλιττα. Επιπλέον δαπάνη ενέργειας και χρημάτων απαιτείται για την απομάκρυνση αυτών των αποβλιτων καθώς επίσης και για τη διάθεση τους ή για την ανακύκλωση τους. Ένα μεγάλο ποσό ενέργειας καταλήγει σαν ανεπιθύμητη

θερμότητα η οποία δημιουργεί συχνά προβλήματα παραμόρφωσης και ρηγμάτωσης στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου υλικού. Οι δυνάμεις κοπής δημιουργούν προβλήματα στη συγκράτηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου και συχνά προκαλούν τη παραμόρφωση αυτού. Η ανεπιθύμητη παραμόρφωση και οι παραμένουσες τάσεις μέσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι συχνά απαιτούν περαιτέρω κατεργασία (ανόπτηση) για την αφαίρεση αυτών των αποτελεσμάτων. Τελικά, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί όσον αφορά την ευαισθησία του κατεργαζόμενου τεμαχίου και τις απορρέουσες δυνατότητες του για κατεργασία. Εξετάζοντας αυτά τα αρνητικά χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς, δεν αποτελεί έκπληξη ότι τα τελευταία χρόνια μια σημαντική προσπάθεια έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη και στη τελειοποίηση των NTM.

Οι NTM είναι ένας όρος που αφορά αυτή τη μεγάλη οικογένεια των μεθόδων κατεργασίας οι οποίες γενικά είναι μη μηχανικές, δεν παράγουν απόβλιττα (γρέζια), δεν αφήνουν ίχνη στην επιφάνεια και συχνά περιλαμβάνουν νέες ενεργειακές μεθόδους.

Ένας συνοπτικός ορισμός των μη συμβατικών μεθόδων κατεργασίας είναι δύσκολος να διατυπωθεί εξ'αιτίας του μεγάλου εύρους των κατεργασιών που ανήκουν σ'αυτή τη κατηγορία. Γενικά, οι μη συμβατικές μέθοδοι είναι μέθοδοι κατεργασίας που υιοθετήθηκαν τα τελευταία 50 χρόνια, χρησιμοποιούν συνήθεις μορφές ενέργειας με νέους τρόπους ή εφαρμόζουν μορφές ενέργειας οι οποίες δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ποτέ πριν. Οι NTM υποδιαιρούνται σε κατηγορίες σύμφωνα με τη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούν. Οι γενικά αποδεκτές κατηγορίες είναι:

- Οι μηχανικές μέθοδοι.
- Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι.
- Οι θερμικές μέθοδοι και.
- Οι χημικές μέθοδοι.

Ο πίνακας 1.1 παρακάτω περιλαμβάνει τις μεθόδους που συμπεριλαμβάνονται σε κάθε κατηγορία.

Μηχανικές μέθοδοι. Οι μηχανικές NTM χρησιμοποιούν άμεσα τη μηχανική δράση του αποξεστικού υλικού για την αφαίρεση υλικού. Οι μηχανικές μέθοδοι συνήθως εφαρμόζονται στη κατεργασία υλικών που είναι δύσκολο να κατεργαστούν με τις συμβατικές μεθόδους λόγω της σκληρότητας, της δυσθραυστότητας, ή της ευθραυστότητας τους. Τα κεραμικά, τα σύνθετα και τα οργανικά υλικά είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για μηχανική κατεργασία επειδή τα περισσότερα από αυτά δεν είναι ηλεκτρικώς αγωγίμα (απαραίτητη προϋπόθεση για κατεργασία με τις ηλεκτρικές μεθόδους) και επειδή αυτά υφίστανται ζημιά από κάψιμο, απανθράκωση, ή ρηγμάτωση όταν εφαρμόζουμε θερμικές κατεργασίες.

Πίνακας 1.1 Κατηγορίες των μη συμβατικών μεθόδων κατεργασίας.

<i>Ομάδα Α</i> <i>Μηχανικές μέθοδοι</i>	<i>Ομάδα Β</i> <i>Θερμικές μέθοδοι</i>	<i>Ομάδα Γ</i> <i>Ηλεκτροχημικές μέθοδοι</i>	<i>Ομάδα Δ</i> <i>Χημικές μέθοδοι</i>
1) Κατεργασία με αποξεστικό υλικού	6) Κατεργασία με ηλεκτροική (EDM).	13) Κατεργασία	18) Χημικό πορεύρισμα (CM).
2) Κατεργασία με ροή αποξεστικού υλικού	7) Κατεργασία εκκένωσης με (EDWC).	14) λείανση	19) Φωτοχημική κατεργασία (PCM).
3) Κατεργασία με νερού (WJM).	8) Λείανση με εκκένωση (EDG).	15) λείανση με εκκένωση (ECD)	20) Θερμοχημική κατεργασία (TCM).
4) Κατεργασία με νερού που αποξεστικό υλικό (AWJM).	9) Κατεργασία με ηλεκτρονίων	16) κατεργασία με μορφοποιημένο σωλήνα	
5) Κατεργασία με (USM).	10) Κατεργασία με λέιζερ (LBM). 11) Κατεργασία με δέσμη πλάσματος (PBM). 12) Μέθοδος θερμικής ενέργειας (TEM).	17) Λιάτρωση με ηλεκτροροή (ES) και τριχοειδής διάτρηση (CD).	

Θερμικές μέθοδοι. Πρώτιστα λόγω της ταχείας αύξησης των πωλήσεων της κατεργασίας ηλεκτρικής εκκένωσης με σύρμα και του εξοπλισμού Laser, οι θερμικές μέθοδοι έχουν καταστεί το ταχύτερα αυξανόμενο τμήμα στην αγορά των NTM. Με δεδομένη την ευρύτητα των πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη κατηγορία (ηλεκτρόνια, φωτόνια, ηλεκτρικοί σπινθήρες κ.α.) γενικεύσεις είναι δύσκολο να γίνουν όσον αφορά τις εφαρμογές αυτών των μεθόδων. Επειδή οι θερμικές μέθοδοι είναι γενικά ανεπηρέαστες από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών που έχουν τη δυνατότητα να κατεργαστούν, συχνά εφαρμόζονται στη κατεργασία εξαρτημάτων από εξαιρετικά σκληρά ή χαμηλής κατεργαστικότητας υλικά. Επειδή ο μηχανισμός για την αφαίρεση υλικού είναι θερμικός, στα κατεργαζόμενα τεμάχια που θα χρησιμοποιηθούν σε κρίσιμες εφαρμογές είναι δυνατόν να απαιτείται η αφαίρεση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ: Heat Affected Zone).

Ηλεκτροχημικές μέθοδοι. Οι ηλεκτροχημικές NTM περιορίζονται στη κατεργασία εξαρτημάτων που είναι κατασκευασμένα από υλικά ηλεκτρικώς αγωγά. Τα υλικά του κατεργαζόμενου τεμαχίου που είναι δυσκολοκατέργαστα με συμβατικά μέσα, αποτελούν ένα μεγάλο ποσοστό εφαρμογών σ'αυτή τη κατηγορία. Ωστόσο, διάφορες εφαρμογές επιλέγονται λόγω της δυνατότητας των ηλεκτροχημικών μεθόδων να παράγουν περίπλοκα σχήματα με ένα απλό πέρασμα του εργαλείου (με εξαίρεση τις παραλλαγές της ηλεκτροχημικής λείανσης) και να κατεργάζονται εξαρτήματα χωρίς φθορά του εργαλείου.

Χημικές μέθοδοι. Μεγάλου όγκου και υψηλής παραγωγής κατασκευές συχνά εκτελούνται από τις χημικές NTM. Αν και μερικές φορές εφαρμόζονται για χαμηλές ποσότητες ή και για ένα μεμονωμένο εξάρτημα λόγω του χαμηλού αρχικού κόστους εργαλείων, η χημική κατεργασία έχει επιτύχει αυξημένη αποδοχή για την οικονομική κατεργασία μεγάλου όγκου προϊόντων όπως είναι τα ελατήρια για παράδειγμα. Επειδή το υλικό αφαιρείται μέσω χημικής δράσης, δεν υπάρχουν δυνάμεις που να ενεργούν πάνω στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Αυτό δίνει τη δυνατότητα για τη κατεργασία εξαρτημάτων χωρίς ανησυχία για παραμόρφωση ή ζημία. Επιπρόσθετα, επειδή η κατεργασία πραγματοποιείται ταυτόχρονα σε όλες τις επιφάνειες του κατεργαζόμενου τεμαχίου, ο ρυθμός παραγωγής είναι εξαιρετικά υψηλός, ακόμα και σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους υψηλής παραγωγικότητας όπως είναι η μηχανική εκτομή.

Οι παραπάνω μέθοδοι είναι οι βασικές μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας. Άλλες μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας που μπορούν να πραγματοποιηθούν στο τομέα διαμόρφωσης των υλικών είναι:

ΟΜΑΔΑ Ε
Μέθοδοι διαμόρφωσης
21) Εκρηκτική διαμόρφωση.
22) Διαμόρφωση με εκκένωση ηλεκτρικού σπινθήρα.
23) Ηλεκτρομαγνητική διαμόρφωση

Κεφάλαιο Δεύτερο

ΟΜΑΔΑ Α

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

1. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

[ABRASIVE JET MACHINING (AJM)]

α. Εισαγωγή

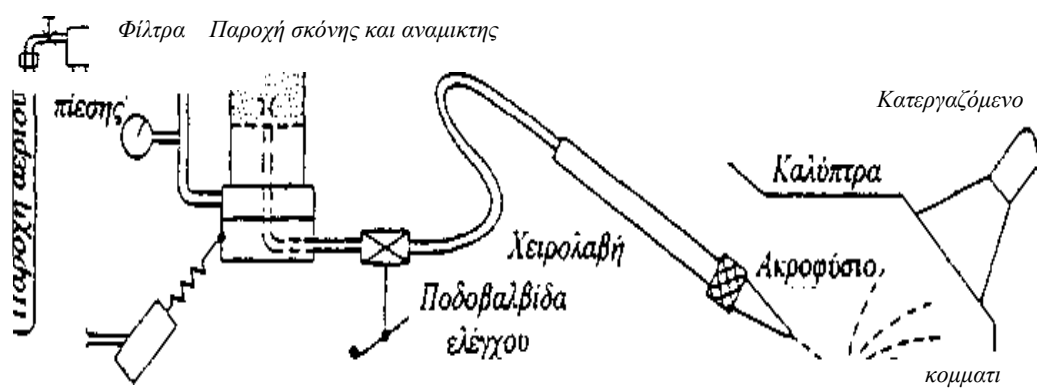
Η κατεργασία με εκτόξευση αποξεστικού υλικού (AJM) είναι μια μέθοδος που αφαιρεί υλικό από το κατεργαζόμενο κομμάτι με τη χρήση αποξεστικών σωματιδίων τα οποία εμπεριέχονται "εν αιωρήσει" σε μια ροή αερίου η οποία εξέρχεται με υψηλή ταχύτητα. Η μέθοδος AJM αφαιρεί υλικό με πρόσκρουση των αποξεστικών σωματιδίων πάνω στην επιφάνεια κατεργασίας. Αυτή η μέθοδος διαφέρει από τη συμβατική αμμοβολή στο ότι χρησιμοποιεί μικρότερης διαμέτρου αποξεστικά σωματίδια (από 10 έως 50 μm) και επιπλέον ένα σύστημα παροχής πιο επακριβώς ελεγχόμενο. Η AJM χρησιμοποιείται κυρίως για κοπή, καθαρισμό, ψηγματοβολή, απογρέζωση, καθαρισμό χυτών τεμαχίων, ή για εγχαραξη υάλου, κεραμικών, ή σκληρών μετάλλων. Οι εφαρμογές της AJM περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Διάτρηση και κοπή μικρών διατομών από γυαλί, κεραμικά, ή σκληρυνμένα μέταλλα.
- Εγχαραξη αριθμών πάνω σε μεταλλικά και πλαστικά εξαρτήματα.
- Απογρέζωση.
- Έγχυση σωματιδίων σε γυαλί.

- Κοπή πολύπλοκων προτύπων σε σκληρά και εύθραυστα υλικά.
- Καθάρισμα των οξειδίων από τις μεταλλικές επιφάνειες.
- Καθάρισμα των μεταλλικών κηλίδων από τα κεραμικά.
- Λοξοτόμηση και καθάρισμα ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.
- Αφαίρεση κηλίδων και μεμβρανών από έγγραφα και τεχνουργήματα μουσείου.

β. Μέρη συστήματος

Στο σχήμα 1.α εικονίζονται τα κύρια μέρη ενός συστήματος AJM. Μια παροχή αερίου σε πίεση 690 έως 860 KPa (100 έως 125 psi) είναι απαραίτητη για να θέσει το σύστημα υπό πίεση. Η τελική πίεση μετά το ρυθμιστή ανέρχεται στα 520 έως 830 KPa (75 έως 120 psi). Η παροχή αερίου, το οποίο μπορεί να είναι πεπιεσμένος αέρας, άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα, ή ένα κατάλληλο βιομηχανικό αδρανές αέριο, πρέπει να είναι απαλλαγμένη από ξένα σωματίδια όπως είναι το λάδι και το νερό. Επομένως, στη παροχή του αερίου πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα φιλτραρισμένο αέριο και μια συσκευή διαχωρισμού του νερού.



Εξάτμιση για την απομάκρυνση της σκόνης

Σχήμα 1.α. Τα εξαρτήματα ενός συστήματος AJM

- Η αποξεστική σκόνη συγκρατείται μέσα σε μια δεξαμενή με σύστημα εξαγωγής και τροφοδοτείται σε ένα δονούμενο θάλαμο, όπου η σκόνη μετριέται και αναμιγνύεται ομοιόμορφα με το αέριο. Τότε δημιουργείται ένα ρεύμα αερίου με αποξεστικά σωματίδια και καθώς το υπό πίεση μίγμα εξέρχεται από το στόμιο του ακροφυσίου έχει ταχύτητα 150 έως 300 m/s. Ο ρυθμός της ροής του ρεύματος του αερίου ελέγχεται από μια πνευματική βαλβίδα η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από μια ποδοβαλβίδα για παλμική λειτουργία ή από μια χειρωνακτική βαλβίδα για συνεχή λειτουργία. Πρέπει να σημειωθεί ότι απαιτείται καλή γείωση του συστήματος λόγω του στατικού ηλεκτρικού φορτίου που δημιουργείται από την υψηλή ταχύτητα του ρεύματος. Μια καλύπτρα συλλογής της σκόνης ή ένας θάλαμος συλλογής χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα συλλεκτήρα σκόνης κενού ώστε να περιορίσει την έκθεση του χειριστή στη σκόνη. Εάν κατεργαζόμαστε κομμάτια με τοξικές ουσίες, τότε η συλλογή της σκόνης απαιτεί ειδική μελέτη σύμφωνα με τους κρατικούς κανονισμούς.

Οι άκρες του ακροφυσίου για την AJM κατασκευάζονται από καρβίδιο του βολφραμίου καθώς επίσης και από ζάφειρο. Τα ακροφύσια από ζάφειρο διαρκούν περισσότερο από τα ακροφύσια που είναι από καρβίδιο του βολφραμίου, αλλά είναι πιο ακριβά και διατίθενται μόνο με κυκλικές οπές. Τα ακροφύσια από καρβίδιο του βολφραμίου μπορεί να έχουν είτε κυκλικές είτε ορθωνικές οπές. Τα ακροφύσια με κυκλική οπή διατίθενται σε διαμέτρους από 0,13 μέχρι 1,25 mm, ενώ τα ακροφύσια με ορθογωνική οπή κυμαίνονται από 0,08 χ 0,50 μέχρι 0,18 χ 3,8 mm. Τα ακροφύσια λοιπόν με ορθογωνική οπή περιορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη σποραδική κοπή.

Η διάρκεια ζωής ενός ακροφυσίου εξαρτάται από το τύπο του αποξεστικού υλικού που χρησιμοποιείται και από τη πίεση λειτουργίας. Η ωφέλιμη ζωή ενός ακροφυσίου από καρβίδιο του βολφραμίου είναι περίπου 8 έως 15 ώρες με υλικό εκτριβής καρβίδιο πυριτίου και 20 έως 35 ώρες περίπου για οξειδίο του αλουμινίου. Με σφαιρίδια υάλου ή με δισανθρακικό νάτριο, η διάρκεια ζωής του ακροφυσίου είναι άπειρη. Τα ακροφύσια ζαφείρου έχουν ένα μέσο χρόνο ζωής 300 ώρες.

γ. Χαρακτηριστικά της AJM

Η μέθοδος AJM είναι κυρίως μια κατεργασία καθαρισμού και αποπεράτωσης με χαμηλούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού. Ένας τυπικός ρυθμός αφαίρεσης υλικού για το γυαλί είναι $16 \text{ mm}^3/\text{min}$. Οι ρυθμοί κοπής για τα μέταλλα ποικίλλουν από 1,6 μέχρι $4,1 \text{ mm}^3/\text{min}$. Για σκληρότερα κεραμικά υλικά οι ρυθμοί κοπής είναι περίπου 50% υψηλότεροι από αυτούς για το γυαλί.

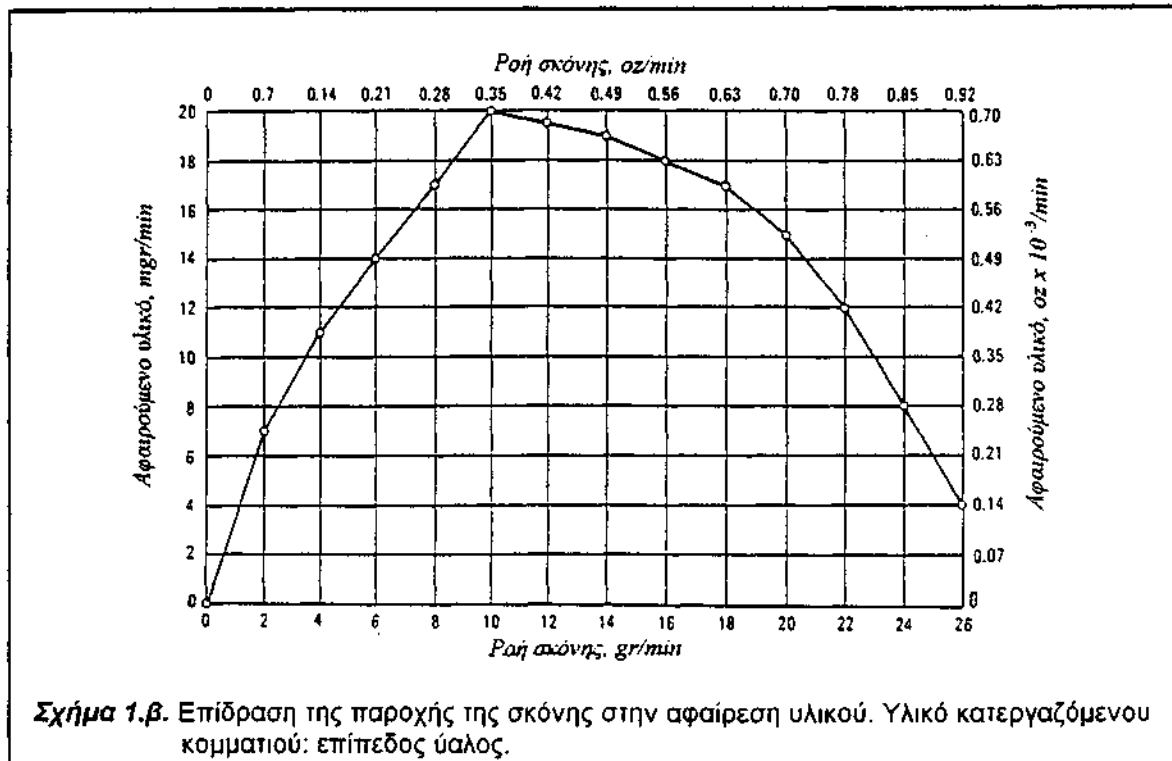
Αφαίρεση υλικού. Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου AJM καθορίζονται από διάφορους παράγοντες. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι:

- Το υλικό που κατεργαζόμαστε.
- Η παροχή του ρεύματος αερίου.
- Ο τύπος και το μέγεθος των αποξεστικών σωματιδίων.
- Η απόσταση μεταξύ του κατεργαζόμενου κομματιού και του ακροφυσίου.

Γενικά, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού είναι υψηλότερος όταν το υλικό που αφαιρείται είναι σκληρότερο ή όταν τα αποξεστικά σωματίδια είναι μεγαλύτερα και έχουν υψηλότερη ταχύτητα κατά τη πρόσκρουση.

Παροχές. Για την εξασφάλιση υψηλών ρυθμών αφαίρεσης υλικού, το αποξεστικό υλικό που χρησιμοποιείται παρέχεται συνήθως από 10 έως $20 \text{ gr}/\text{min}$. Για αποπεράτωση, οι παροχές που χρησιμοποιούνται επιτυχώς είναι από 3 μέχρι $5 \text{ gr}/\text{min}$.

Υπάρχει ακόμη μια βέλτιστη παροχή μάζας αποξεστικού για να έχουμε μέγιστη αφαίρεση υλικού (βλέπε σχήμα 1.β). Μεγαλύτερες παροχές από τη βέλτιστη μειώνουν το ρυθμό αφαίρεσης υλικού.

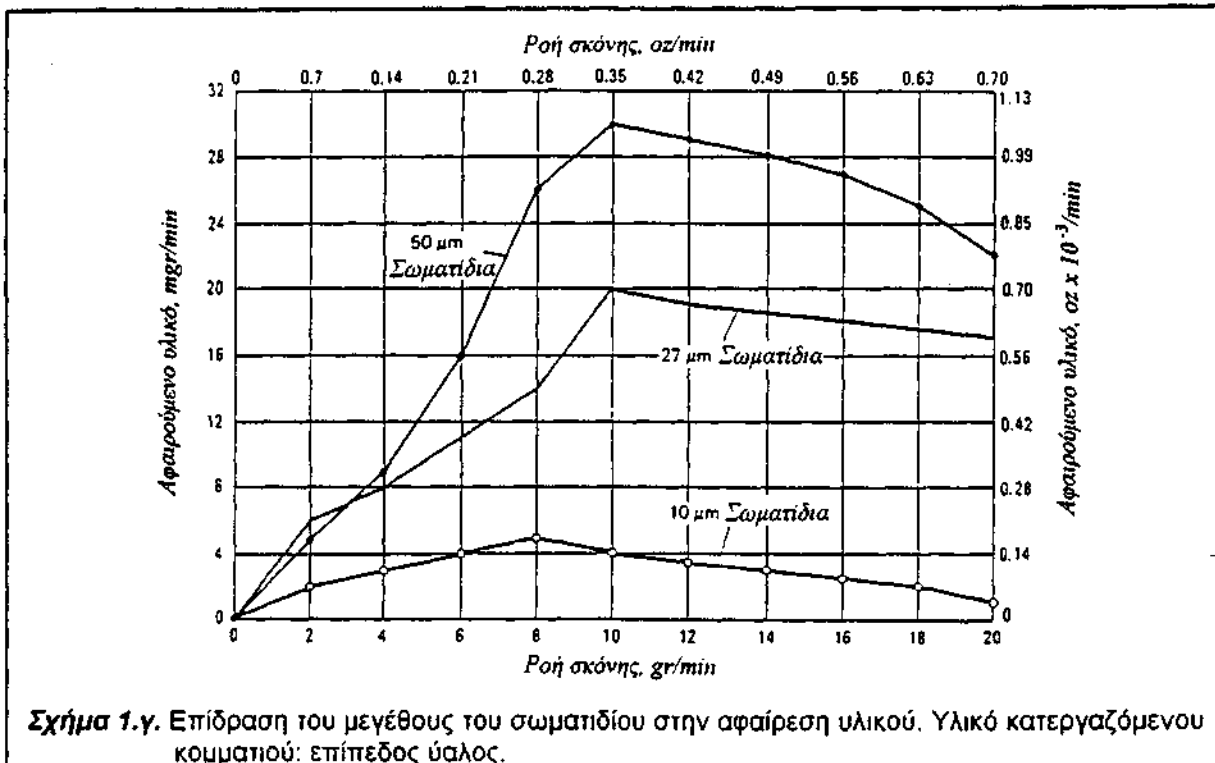


Αποξεστικές σκόνες. Η συγκεκριμένη εφαρμογή καθορίζει το μέγεθος και το τύπο της χρησιμοποιούμενης αποξεστικής σκόνης. Οι σκόνες από οξείδιο του αλουμινίου και καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιούνται για βαρύ καθάρισμα, κοπή, και απογρέζωση. Το ανθρακικό μαγνήσιο συνιστάται για χρήση στο ελαφρύ καθάρισμα και την εγχάραξη, ενώ το δισανθρακικό νάτριο χρησιμοποιείται για τελικό καθάρισμα και για τη κοπή μαλακών υλικών. Για λείανση και τελικό καθαρισμό των χυτών τεμαχίων, συνιστώνται σφαιρίδια ή τρίματα υάλου.

Τα αποξεστικά σωματίδια διατίθενται σε διάφορα μεγέθη από 10 έως 50 μm. Το μέγεθος του αποξεστικού σωματιδίου επηρεάζει το ρυθμό αφαίρεσης του μετάλλου (βλέπε σχήμα 1.γ). Τα μεγαλύτερα μεγέθη παρέχουν μεγαλύτερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού και είναι καλύτερα για κοπή και ψηγματοβολή. Τα μικρότερα μεγέθη χρησιμοποιούνται για λείανση και καθάρισμα.

Οι σκόνες του εμπορίου δεν είναι κατάλληλες για τη μέθοδο AJM επειδή τα μεγέθη τους δεν είναι καλά ταξινομημένα. Οι εμπορικές σκόνες πολλές φορές

περιέχουν σκόνη διοξειδίου του πυριτίου, η οποία μπορεί να είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία. Οι σκόνες δεν πρέπει να επαναχρησιμοποιούνται, επειδή η μολυσμένη σκόνη φράζει το ακροφύσιο. Οι χρησιμοποιούμενες σκόνες πρέπει να διατίθενται σύμφωνα με τη κρατική νομοθεσία.

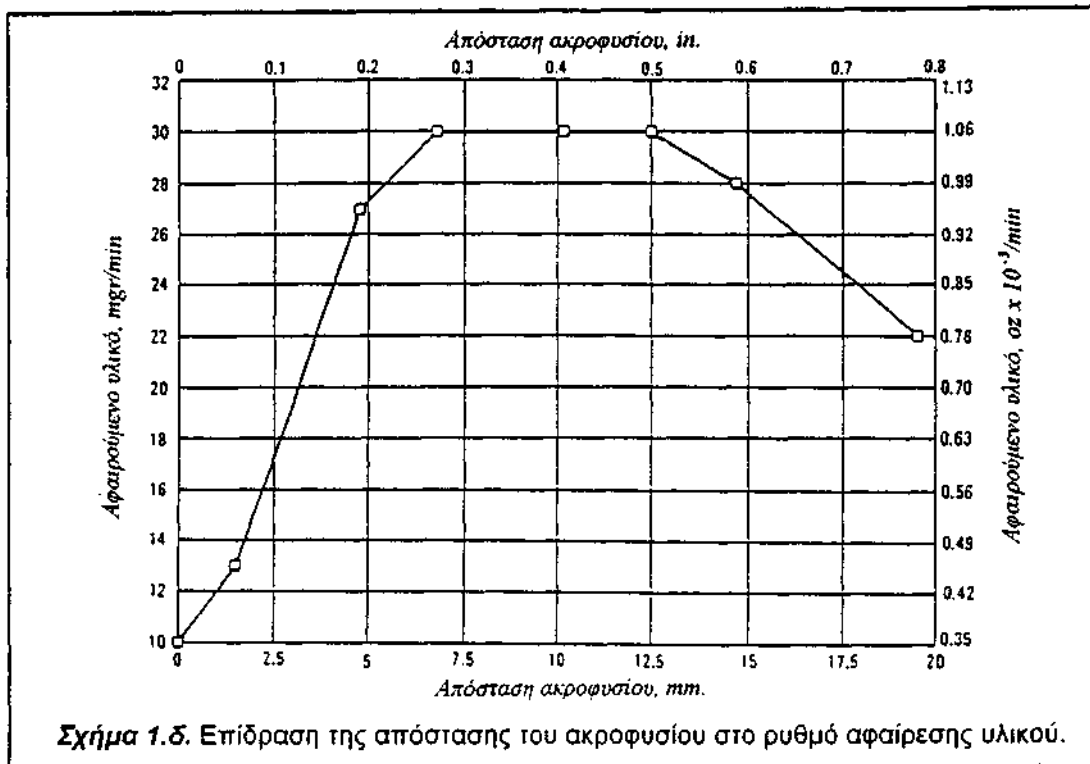


Απόσταση ακροφυσίου. Η απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου και του κατεργαζόμενου κομματιού επηρεάζει την απόδοση της μεθόδου AJM. Το ρεύμα του αερίου παραμένει κυλινδρικό μόνο για μικρή απόσταση 1,6 mm μετά την έξοδο από το ακροφύσιο. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, το ρεύμα του αερίου αρχίζει να αποκλίνει σε ένα κωνικό σχήμα με γωνία περίπου 7°. Η απόκλιση αυτή πιθανά εξαρτάται από τη πίεση του συστήματος. Η απόσταση του ακροφυσίου ποικίλλει ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Μια απόσταση από 5 έως 13 mm χρησιμοποιείται για καθάρισμα και ψηγματοβολή, ενώ μια απόσταση από 13 έως 75 mm είναι κατάλληλη για ελαφρές εφαρμογές. Για εξαρτήματα που απαιτούν ακρίβεια και εξάλειψη της κωνικότητας, το ακροφύσιο τοποθετείται σε απόσταση περίπου 0,8 mm πάνω από το κατεργαζόμενο κομμάτι.

Η απόσταση του ακροφυσίου επίσης επιδρά στο ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Για ένα δεδομένο αποξεστικό υλικό, παροχή και κατεργαζόμενο υλικό, η πιο αποτελεσματική κοπή συμβαίνει σε μια απόσταση του ακροφυσίου μεταξύ 7

έως 13 mm. Στο σχήμα 1.5 παρακάτω φαίνεται αυτή η σχέση μεταξύ της απόστασης του ακροφυσίου και του ρυθμού αφαίρεσης υλικού.

Ανοχές και τραχύτητα επιφάνειας. Η μέθοδος AJM παράγει επιφάνειες με κοκκώδη, ματ υφή. Οι τραχύτητες της επιφάνειας κυμαίνονται από 0,15 έως 1,5 μm , και εξαρτώνται από το μέγεθος των σωματιδίων. Στο πίνακα 1.1 διακρίνονται μερικές τραχύτητες επιφάνειας που έχουν επιτευχθεί με τη μέθοδο ΑϋΜ. Οι ανοχές της μεθόδου AJM κυμαίνονται από - 0,13 έως - 0,05 mm.



Πίνακας 1.1. Τραχύτητες επιφάνειας για σκληρυνμένο ανοξειδωτό χάλυβα 316 με διαφορετικά αποξεστικά AJM.

Τύπος αποξεστικού	Μέγεθος κόκκου (μm)	Τραχύτητα επιφάνειας (μm)
Οξείδιο αλουμινίου	10	0,20-0,50
	25	0,25 -0,53
	50	0,38 -0,96
Καρβίδιο πυριτίου	20	0,30 - 0,50
	50	0,43 - 0,86
Σφαρίδια υάλου	50	0,30- 0,96

δ. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της AJM.

Η μέθοδος AJM έχει αρκετά πλεονεκτήματα παρότι έχει χαμηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Έτσι τα **πλεονεκτήματα** αυτής της μεθόδου κατεργασίας είναι:

1. Η ροή του αερίου απορροφά και διασκορπίζει τη παραγόμενη θερμότητα όταν έχουμε κοπή θερμοευαίσθητων υλικών.
2. Τα μικρά φορτία που μεταβιβάζονται στο κατεργαζόμενο κομμάτι επιτρέπουν τη κοπή εύθραυστων κομματιών.
3. Η δράση των ρινισμάτων αυτής της μεθόδου είναι αποτελεσματική στα σκληρά υλικά.
4. Τα ακροφύσια μπορούν να κατευθύνουν το αποξεστικό υλικό σε δυσπρόσιτες περιοχές.

Τα **μειονεκτήματα** της μεθόδου AJM εκτός του χαμηλού ρυθμού αφαίρεσης υλικού είναι η σποραδική κοπή και η πιθανότητα να προσκολληθούν τα αποξεστικά σωματίδια στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Η υπερβολική κωνικότητα σε μεγάλα βάθη κοπής είναι επίσης ένα μειονέκτημα, αν και ο βαθμός κωνικότητας μπορεί να μειωθεί με τη τοποθέτηση του ακροφυσίου υπό κλίση.

2. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΡΟΗ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ [ABRASIVE FLOW MACHINING (AFM)]

α. Εισαγωγή

Η κατεργασία με ροή αποξεστικού υλικού (AFM) χρησιμοποιείται για την αποπεράτωση επιφανειών και ακμών με την εξέλαση παχύρευστου αποξεστικού μέσου δια μέσου ή εγκάρσια του κατεργαζόμενου κομματιού. Η απόξεση πραγματοποιείται μόνο εκεί όπου περιορίζεται η ροή του μέσου, ενώ οι άλλες επιφάνειες παραμένουν απρόσβλητες. Με την AFM μπορούμε να κατεργαστούμε πολλές δυσπρόσιτες διόδους πάνω στο κατεργαζόμενο κομμάτι ταυτόχρονα, και μπορούν να τοποθετηθούν αρκετές δωδεκάδες κομματιών σε μια συσκευή. Τα μέσα παραγωγής (εργαλεία) μπορούν επίσης να μελετηθούν και να σχεδιαστούν έτσι ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν ορισμένες αλλαγές ανάλογα με την εφαρμοζόμενη παραγωγή.

Η μέθοδος AFM χρησιμοποιείται για απογρέζωση, λείανση; ή για αποστρογγύλευση επιφανειών και ακμών. Μια ποικιλία από τραχύτητες μπορούν να επιτευχθούν με τη μεταβολή των παραμέτρων της μεθόδου. Η μέθοδος συμπεριλαμβάνει μια ευρεία κλίμακα εφαρμογών, από κρίσιμα αεροδιαστημικά και ιατρικά εξαρτήματα μέχρι υψηλής ποσότητας παραγωγή κομματιών. Η AFM έχει την ικανότητα παραγωγής εκατοντάδων ή και χιλιάδων κομματιών ανά ώρα.

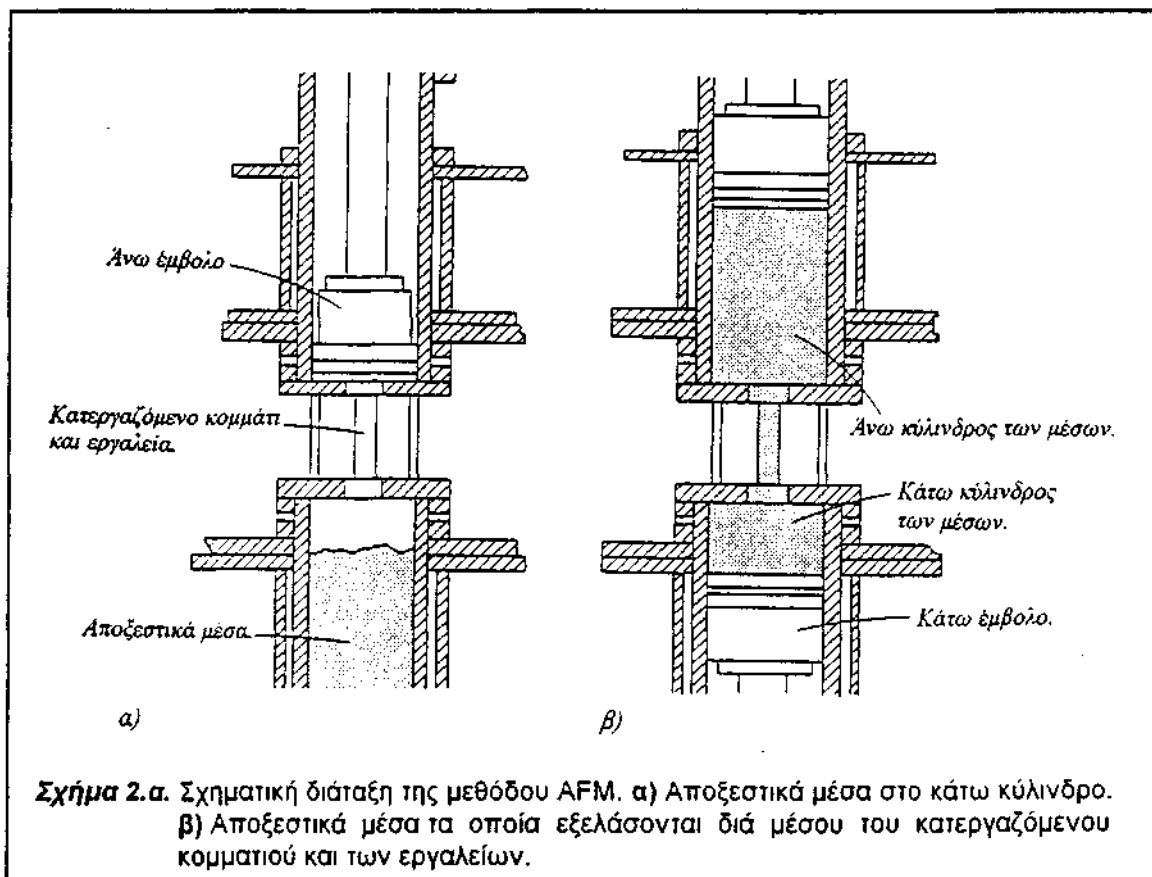
β. Χαρακτηριστικά της AFM

Η μέθοδος AFM χρησιμοποιεί δυο αντιτιθέμενους κυλίνδρους για την εξέλαση του ημιστερεού αποξεστικού μέσου μπρος και πίσω δια μέσου των διόδων που διαμορφώνονται από το κατεργαζόμενο κομμάτι και τα εργαλεία (μέσα παραγωγής) (βλέπε σχήμα 2.α). Από την επανηλημένη εξέλαση των μέσων, από τον ένα κύλινδρο στον άλλον, παράγεται μια αποξεστική δράση καθώς τα μέσα

εισέρχονται σε μια περιορισμένη δίοδο και ταξιδεύουν δια μέσου ή εγκάρσια του κατεργαζόμενου κομματιού. Η κατεργασία αυτή είναι παρεμφερής με τη λείανση ή τη λειτουργία Λάπινγκ καθώς τα αποξεστικά μέσα λειαινούν τις επιφάνειες ή τις ακμές.

Η μέθοδος είναι αποξεστική μόνο στη περιοχή της εξέλασης όπου η ροή είναι περιορισμένη.

Όταν συμπιέζεται στη περιορισμένη δίοδο, ο πολυμερής φορέας των μέσων αυξάνει προσωρινά το ιξώδες του, αυτό συγκρατεί τους αποξεστικούς κόκκους αυστηρά στη περιοχή κατεργασίας. Οι κόκκοι εκτριβούν τις διόδους μόνο όταν το διάλυμα εβρίσκεται **σ'αυτή τη παχύρευστη κατάσταση**. Το ιξώδες επιστρέφει σε φυσιολογική τιμή όταν το **παχύρευστο** τμήμα του μέσου εξέλθει από τη περιοριστική δίοδο.



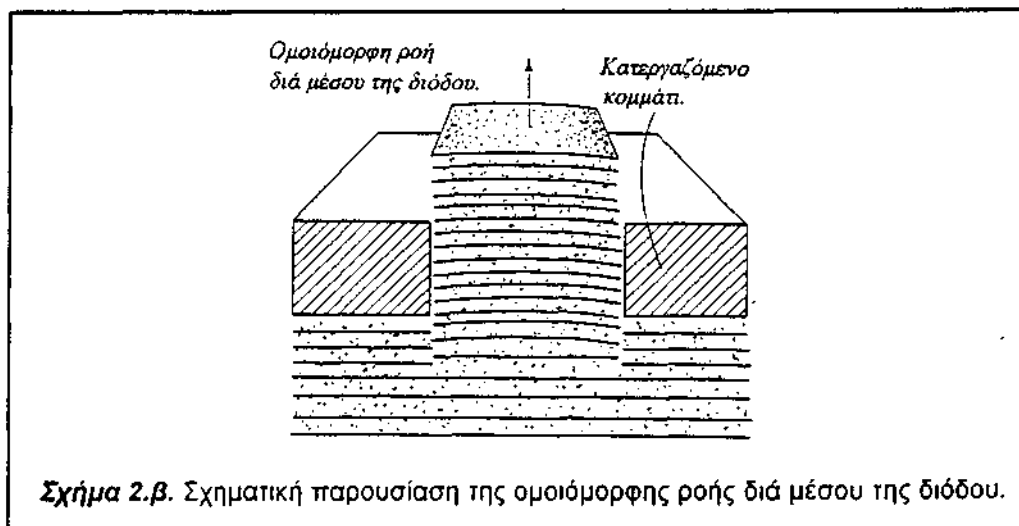
Το ιξώδες και η παροχή του μέσου επηρεάζουν την ομοιομορφία αφαίρεσης υλικού και το μέγεθος της ακτίνας αποστρογγύλευσης της ακμής. Εάν ο αντικειμενικός σκοπός της AFM συμπεριλαμβάνει ομοιόμορφη λείανση των τοιχωμάτων εντός των περιοριστικών διόδων, όπως στη λείανση ενός καλουπιού, για παράδειγμα, το επιλεγμένο μέσο θα πρέπει να διατηρεί μια ομοιόμορφη ροή καθώς αυτό ρέει διά μέσου της δίοδου (βλέπε σχήμα 2.β). Οι χαμηλοί ρυθμοί ροής είναι καλύτεροι για ομοιόμορφη αφαίρεση υλικού. Για

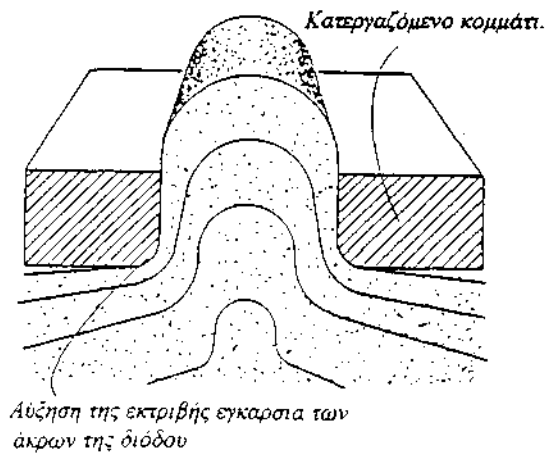
απογρέζωση ή αποστρογγύλευση των ακμών μιας διόδου, μια υψηλότερη παροχή του μέσου με χαμηλότερο ιξώδες εντός της διόδου προκαλεί περισσότερη εκτριβή στις ακμές απ'ότι στα τοιχώματα της διόδου (βλέπε σχήμα 2.γ). Η παροχή εξαρτάται από τις ρυθμίσεις του μηχανήματος, τη σύσταση του μέσου, το κατεργαζόμενο κομμάτι και τη διαμόρφωση των εργαλείων (μέσων παραγωγής).

γ. Εξοπλισμός της AFM

Τα κύρια στοιχεία ενός συστήματος AFM συμπεριλαμβάνουν το μηχάνημα, τα εργαλεία, και το αποξεστικό μέσο. Καθένα από αυτά αναλύεται παρακάτω:

Τα μηχανήματα για τη κατεργασία με ροή αποξεστικού υλικού είναι διαθέσιμα με πιέσεις εξελάσεως που κυμαίνονται από 700 έως 22.000 KPa (100 έως 3200 psi), με ρυθμούς ροής πάνω από 380 lt/min (ένας συνήθης ρυθμός ροής κυμαίνεται από 1 μέχρι 50 lt/min). Η παροχή του μέσου εξαρτάται από τη πίεση εξελάσεως, το ιξώδες του μέσου, το κατεργαζόμενο κομμάτι καθώς και από τη γεωμετρία των εργαλείων. Η πίεση εξελάσεως και η παροχή (το εκτόπισμα κάθε κυλίνδρου του μέσου πολλαπλασιαζόμενο επί το συνολικό αριθμό των κύκλων) είναι και τα δύο προρυθμισμένα στο μηχάνημα.



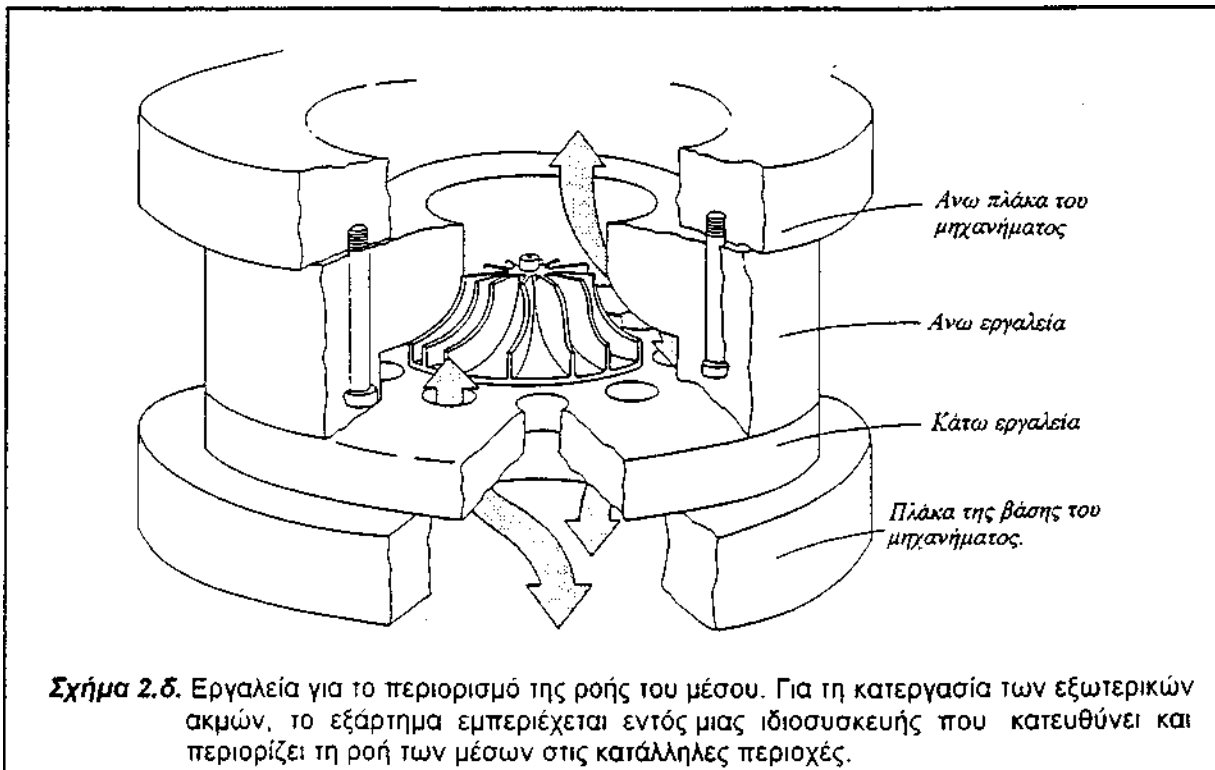


Σχήμα 2.γ

Συστήματα ελέγχου μπορούν να προστεθούν για να καταγράψουμε και να ελέγχουμε επιπρόσθετες παραμέτρους της κατεργασίας όπως είναι η θερμοκρασία, το ιξώδες, η φθορά και η ταχύτητα ροής του μέσου. Τα συστήματα AFM μελετώνται και σχεδιάζονται για εφαρμογές παραγωγής συμπεριλαμβανοντας συχνά το καθάρισμα των κομματιών, και σταθμούς φόρτωσης/εκφόρτωσης καθώς και συντήρηση των μέσων και των ψυκτικών μονάδων. Τα αυτόματα συστήματα μπορούν να κατεργαστούν χιλιάδες κομμάτια ανά ημέρα, με χρόνους κατεργασίας που κυμαίνονται από 1 μέχρι 3 λεπτά για κάθε παλέτα φορτωμένη με κατεργαζόμενα κομμάτια.

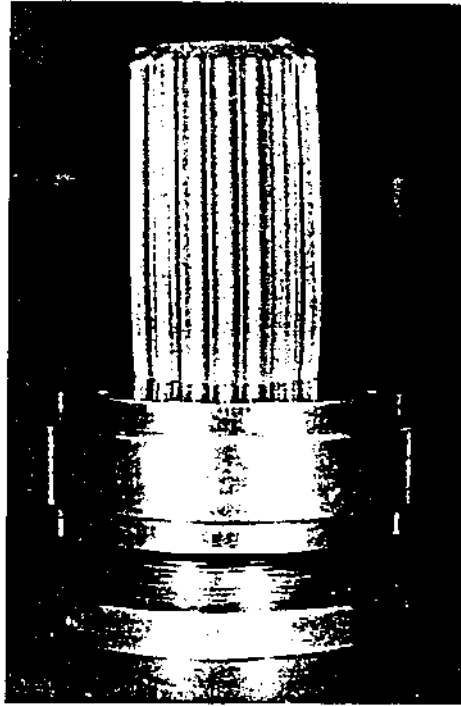
Τα μέσα κατεργασίας (εργαλεία) συγκρατούν το κατεργαζόμενο κομμάτι σε μια σταθερή θέση και κατευθύνουν το αποξεστικό μέσο στις κατάλληλες περιοχές. Πολλές εφαρμογές της AFM απαιτούν μόνο μια απλή ιδιοσυσκευή συγκράτησης. Τα καλούπια, για παράδειγμα, συνήθως δεν χρειάζονται ιδιαίτερα εργαλεία, επειδή η διόδος του καλουπιού εξασφαλίζει από μόνη της το περιορισμό της κατεύθυνσης της ροής.

Για εξωτερικές ακμές ή επιφάνειες, χρησιμοποιούνται ειδικά εργαλεία για να περιορίσουν τη ροή μεταξύ της εξωτερικής πλευράς του κομματιού και του εσωτερικού μέρους της ιδιοσυσκευής (βλέπε σχήμα 2.δ). Τα εργαλεία περιορίζουν τη ροή στις περιοχές όπου απαιτείται εκτριβή. Τα εργαλεία μπορούν επίσης να σταματήσουν τη ροή από τις περιοχές οι οποίες πρέπει να παραμείνουν ακατέργαστες.



Οι ιδιοσυσκευές υψηλής παραγωγής μελετώνται και σχεδιάζονται για να διευκολύνουν τη φόρτωση του κομματιού, την εκφόρτωση, και το καθάρισμα. Συχνά προσδένονται και τοποθετούνται σε τράπεζες με αριθμημένες θέσεις, και αυτές οι ιδιοσυσκευές μπορούν να συγκρατήσουν πολλαπλά εξαρτήματα για κατεργασία σε μια φάση.

Το μέσο αποτελείται από έναν ελαστικό πολυμερή φορέα και μια συγκέντρωση αποξεστικών κόκκων. Το ιξώδες του φορέα και ο τύπος, η συγκέντρωση και το μέγεθος των αποξεστικών κόκκων ποικίλλουν για την επίτευξη ειδικών αποτελεσμάτων. **Τα μέσα υψηλότερου ιξώδους** (βλέπε σχήμα 2.ε) είναι σχεδόν **σε στερεά κατάσταση και χρησιμοποιούνται για ομοιόμορφη λείανση ή για την εκτριβή των τοιχωμάτων μεγάλων διόδων**. Τα μέσα χαμηλότερου ιξώδους είναι γενικά κατάλληλα για την αποστρογγύλευση ακμών και για τη κατεργασία μικρών διόδων.



Σχήμα 2.ε. Κατακόρυφη στήλη αποξεστικών μέσων της AFM μετά την εξέλαση.

Ο φορέας είναι ένα μίγμα που προσομοιάζει με πολυμερές ελαστικό και ενός λιπαντικού υγρού. Με μεταβολή της αναλογίας του πολυμερούς ελαστικού και του λιπαντικού υγρού, ο φορέας μπορεί να έχει ιξώδη που να κυμαίνονται συνεχώς από πολύ υψηλές έως πολύ χαμηλές τιμές.

Ο πίνακας 2.1 δείχνει μερικές γενικές κατευθύνσεις για την επιλογή του ιξώδους του μέσου για διόδους, με αναλογία μήκους - πλάτους 2:1. Εάν το μήκος της διόδου είναι ουσιαστικά μικρότερο των δύο φορές του πλάτους της, θα χρησιμοποιήσουμε μέσο υψηλότερου ιξώδους ή χαμηλότερη πίεση εξέλασης. Αντίστροφα, εάν το μήκος της διόδου είναι ουσιαστικά μεγαλύτερο από δύο φορές του πλάτους της, θα χρησιμοποιήσουμε μέσο χαμηλότερου ιξώδους ή υψηλότερη πίεση εξέλασης.

Πίνακας 2.1. Επιλογή μέσου AFM για διόδους με αναλογία μήκους προς πλάτος 2:1.

Μέγεθος διόδου	ΤΥΠΟΣ ΜΕΣΩΝ				
	Χαμηλής πυκνότητας mm	Χαμηλής προς μέσης πυκνότητας mm	Μέσης πυκνότητας mm	Μέσης προς υψηλής πυκνότητας mm	Υψηλής πυκνότητας mm
Ελάχιστο	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4
Μέγιστο	3,2	6,4	13	25	50

Η περιοχή μεγέθους των διόδων για ένα δεδομένο μέσο μπορεί να διευρυνθεί με αύξηση της θερμοκρασίας του μέσου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Μια αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το ιξώδες του μέσου και η μείωση του ιξώδους επιτρέπει την εξέλαση διά μέσου μιας μικρής διόδου με δεδομένο μήκος.

Οι αποξεστικοί κόκκοι που χρησιμοποιούνται στην AFM κατασκευάζονται συνήθως από καρβίδιο του πυριτίου, καθώς επίσης και από καρβίδιο του βορίου, οξείδιο του αλουμινίου και διαμάντι. Τα μεγέθη των σωματιδίων κυμαίνονται από 0,005 μέχρι 1,5 mm. Για καλύτερη τραχύτητα επιφανείας χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας κόκκοι μικρότερου μεγέθους. Οι μεγαλύτεροι αποξεστικοί κόκκοι κόβουν με ένα γρηγορότερο ρυθμό απ'ότι οι κόκκοι μικρότερου μεγέθους. Το βάθος κοπής επιφανείας που επιτυγχάνεται από τους αποξεστικούς κόκκους εξαρτάται από την αιχμηρότητα και το μέγεθος των αποξεστικών κόκκων, την εφαρμοζόμενη πίεση εξέλασης και την ακαμπτότητα του μέσου.

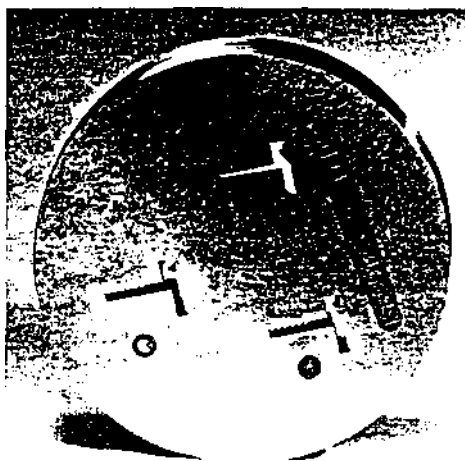
Στη μέθοδο AFM, τα αποξεστικά σωματίδια κοπής θραύονται και αμβλύνονται (χάνουν την αιχμηρότητα τους) και το εκτριβόμενο υλικό γίνεται μέρος του αποξεστικού μέσου. Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής του μέσου εξαρτάται από ένα αριθμό παραγόντων, συμπεριλαμβάνοντας την αρχική ποσότητα του μέσου, το μέγεθος και το τύπο του αποξεστικού υλικού, τη ταχύτητα ροής και τη γεωμετρία του κατεργαζόμενου εξαρτήματος. Συνήθως, το μίγμα του πολυμερούς φορέα και του υλικού εκτριβής που έχουμε φορτώσει στο μηχάνημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εβδομάδες στη κατεργασία χιλιάδων κομματιών πριν την αντικατάσταση του. Αέρας ή κενό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση του μέσου από τις περιοχές όπου έχει εισχωρήσει. Τα τελευταία υπολείμματα μπορούν να αποσπαστούν μέσα σε ένα λουτρό με διαλύτη.

δ. Δυνατότητες της AFM

Η μέθοδος AFM είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη λείανση, στην αποστρογγύλευση ακμών και στην αποπεράτωση δυσπρόσιτων εσωτερικών διόδων. Τραχύτητες επιφανείας της τάξεως των 0,05 μm μπορούν να επιτευχθούν και υλικά από μαλακό αλουμίνιο έως δύσθραυστα κεραμικά, καρβίδια και κράματα νικελίου μπορούν να μικροκατεργαστούν με επιτυχία μ'αυτή τη μέθοδο.

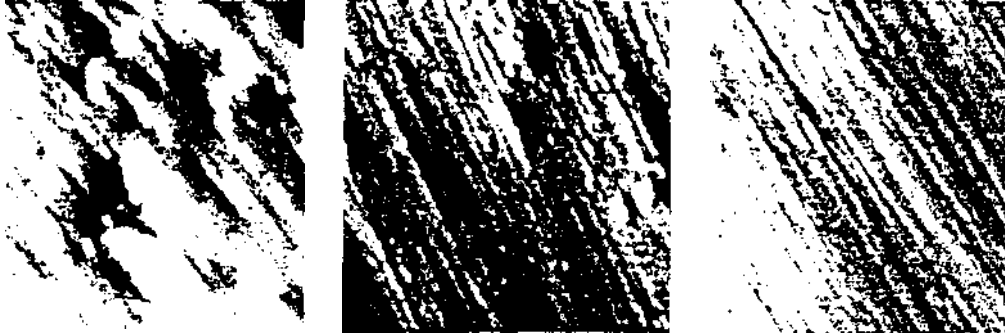
Παράδειγμα: Αποπεράτωση ενός αλουμινένιου καλουπιού. Για τη βελτίωση της τραχύτητας επιφανείας μιας αλουμινένιας μήτρας εξέλασης πολλαπλών θυρίδων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος APM όπως διακρίνουμε στο σχήμα 2.στ. Το αποτέλεσμα ήταν ότι η τραχύτητα επιφανείας βελτιώθηκε από 1,9 μm σε 0,18 μm σε ένα κύκλο των 5 λεπτών. Το σχήμα 2.η δείχνει τα δόντια πριν και μετά τη κατεργασία.

Στο σχήμα 2.ζ εικονίζεται η προοδευτική δράση λείανσης μιας επιφάνειας ενός τριβέα (εδράνου) στη μήτρα εξέλασης που φαίνεται στο σχήμα 2.στ, όπου ο χρόνος κατεργασίας μεταξύ κάθε διαδοχικού σταδίου είναι 80 sec. Η χειρωνακτική λείανση εξαλείφει τις κορυφές των επιφανειών, προκαλώντας έλαση των ακμών και μια συνεχή επιφάνεια, ενώ η μέθοδος APM λειαίνει και απομακρύνει τα υψηλά σημεία της επιφάνειας, αποδίδοντας μια περισσότερο ομοιόμορφη μιας κατεύθυνσης επιφάνεια. Σε πολλές περιπτώσεις, η κατεργασία αυτή παράγει ένα πιο αξιόπιστο και μακροβιότερο εξάρτημα.



Σχήμα 2.στ. Εξάρτημα πολλαπλών θυρίδων επεξεργασμένο με την AFM.

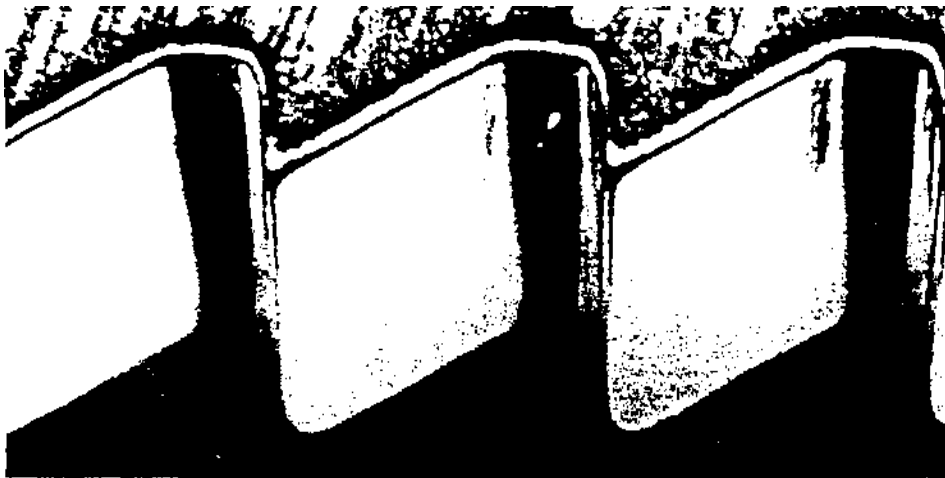
Σχήμα 2.ζ. Προοδευτικά βήματα λείανσης στην AFM από 1,9 μm τραχύτητα (αριστερά) σε 0,2 μm (δεξιά).



Σχήμα 2.η. Τα δόντια της μήτρας εξέλασης του σχήματος 2.στ. σε μεγέθυνση: α) Πριν την AFM, β) Μετά την AFM.



α)

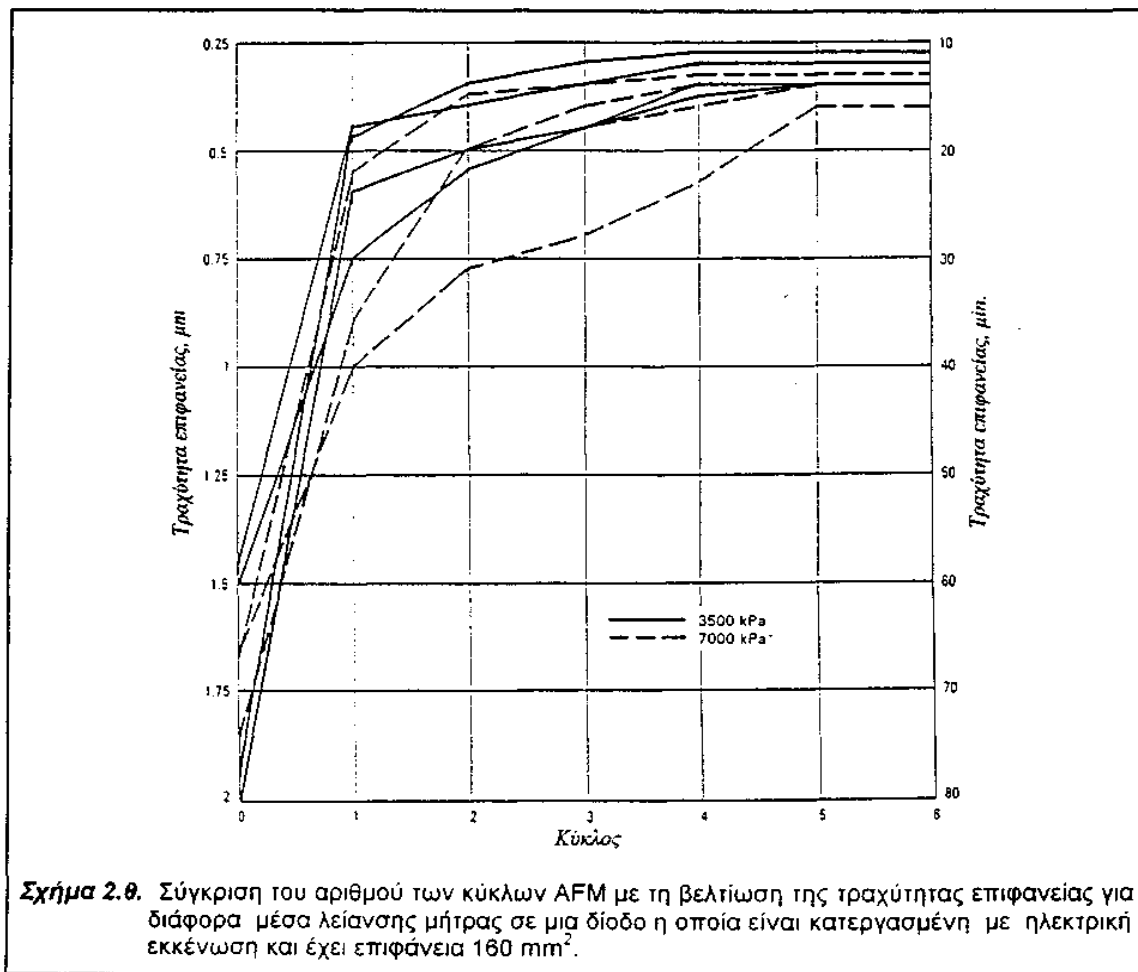


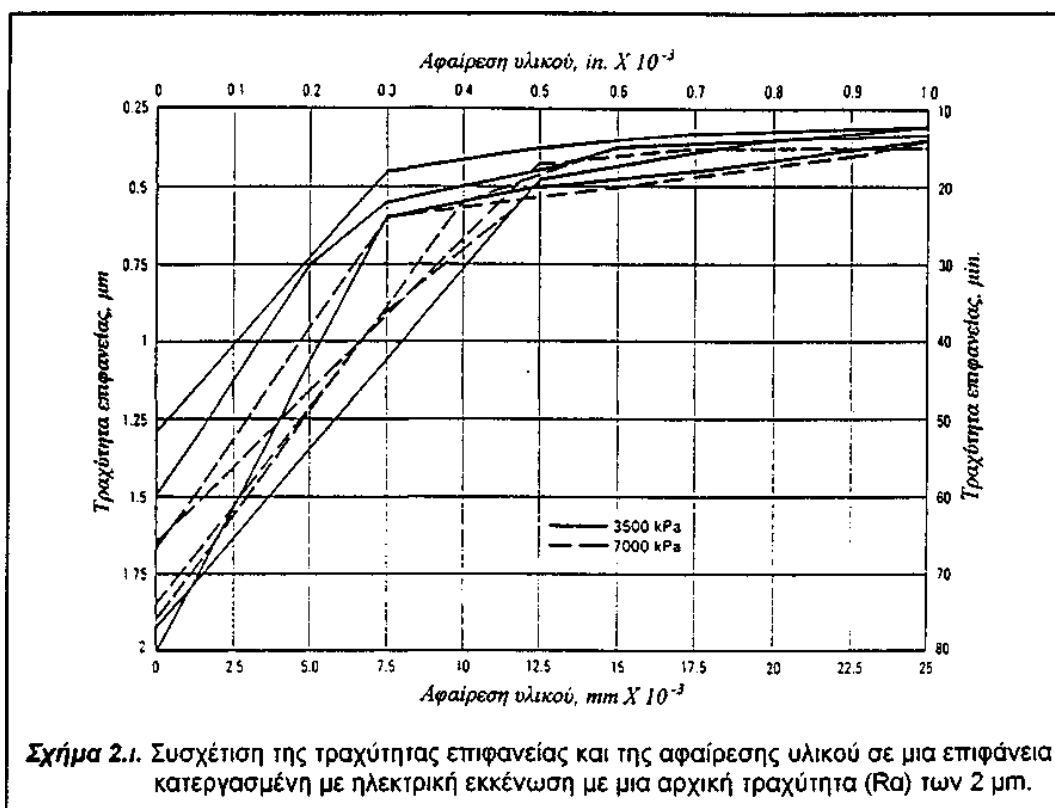
β)

Τραχύτητα επιφάνειας και αφαίρεση υλικού. Το σχήμα 2.θ συγκρίνει τον αριθμό των κύκλων της APM με τη τελική τραχύτητα επιφάνειας σε μια δίοδο η οποία έχει επιφάνεια 160mm και με μια αρχική τραχύτητα επιφανείας προερχόμενη από κατεργασία με ηλεκτρική εκκενωση με ένα μεσο

όρο τραχύτητας (Ra) των 2 μm . Η δίοδος αυτή κατεργάστηκε με ένα μέσο μεταβλητού ιξώδους όπου οι αττοξεστικοί κόκκοι ποικίλλουν σε μέγεθος. Παρά τη μεταβλητότητα των παραμέτρων του μέσου μετά από ένα μόνο κύκλο η βελτίωση της επιφάνειας κυμαίνεται από 60 έως 75 %.

Στο σχήμα 2.ι εικονίζεται η σχέση μεταξύ της τραχύτητας επιφάνειας και αφαίρεσης υλικού. Δοθέντος ότι οι αρχικές τραχύτητες κυμαίνονται από 1,3 έως 2 μm , η βελτίωση της επιφάνειας κυμαίνεται από 50 μέχρι 70 % για αφαίρεση υλικού 7,5 μm . Η αφαίρεση υλικού βάθους 0,0125 mm ανά πλευρά έχει σαν αποτέλεσμα μια βελτίωση της τραχύτητας της επιφάνειας κατά 70 έως 80 %, και αφαίρεση βάθους 0,0125 mm επιπρόσθετου υλικού απέδωσε περαιτέρω βελτίωση της τάξεως 5 έως 10 %. Επομένως, παρά τη μεγάλη ποικιλία των ιξωδών και του μεγέθους των αποξεστικών κόκκων μέσα στο μέσο, για μια ποσότητα αφαίρεσης υλικού περίπου 0,025 mm, το αποτέλεσμα ήταν βελτίωση της τάξεως 85 έως 90 % σε σχέση με την αρχική τραχύτητα επιφανείας που προείρχετο από κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση.





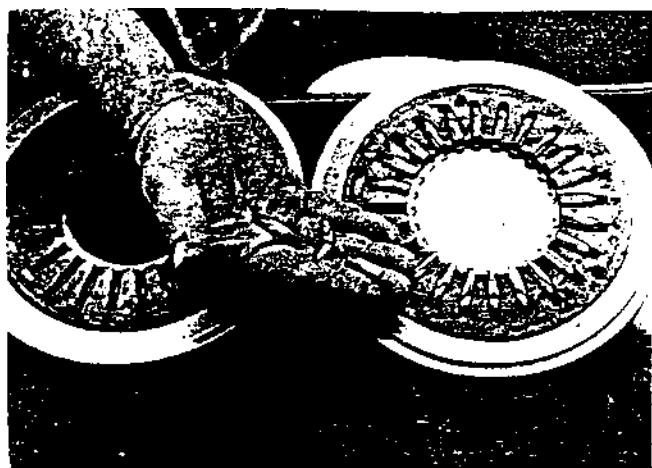
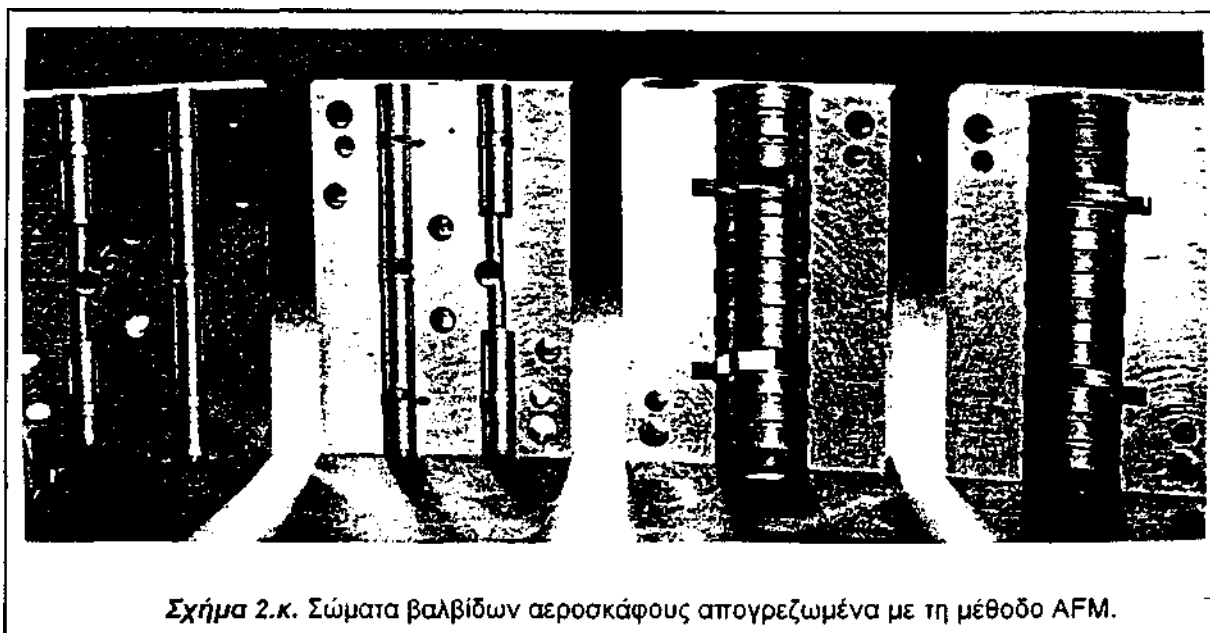
ε. Εφαρμογές της AFM

Η AFM είναι μια ευέλικτη μέθοδος για την επίτευξη ακρίβειας και ομοιομορφίας της τραχύτητας της επιφάνειας με μια ποικιλία κατεργασιών αποπεράτωσης. Η μέθοδος AFM χρησιμοποιείται για απογρέζωση, αποστρογγύλευση γωνιών, λείανση και για την επίτευξη σφικτών ανοχών και μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα εξαρτημάτων και μεγέθους δίοδων από γρανάζια με διάμετρο 1,5 mm ή οπές των 0,15 mm ή τέλος σε δίσκους στροβίλου με διάμετρο κοντά **στα** 1,2 m

Η AFM αρχικά αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε για τη κρίσιμη απογρέζωση των σωμάτων των βαλβίδων αεροσκάφους (βλέπε σχήμα 2.κ). Η μέθοδος παράγει εσωτερικές ακμές χωρίς γρέζι. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- Απογρέζωση, αποστρογγύλευση ακμών, και λείανση κοιλοτήτων τριβέων σε μια απλή φάση.

- Απογρέζωση και λείανση των σωμάτων εγχυτήρων καυσίμου με ένα ρυθμό 30.000 τεμαχίων ανά ημέρα με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα AFM
- Αποπεράτωση σωληνοειδών αγωγών για χειρουργική εμφύτευση (βλέπε σχήμα 2.λ).
- Αφαίρεση των επανατηκόμενων στρωμάτων από εύθραυστα κατεργαζόμενα κομμάτια (βλέπε σχήμα 2.μ).
- Απονρέζωση ακροουσιών καυσίμου.



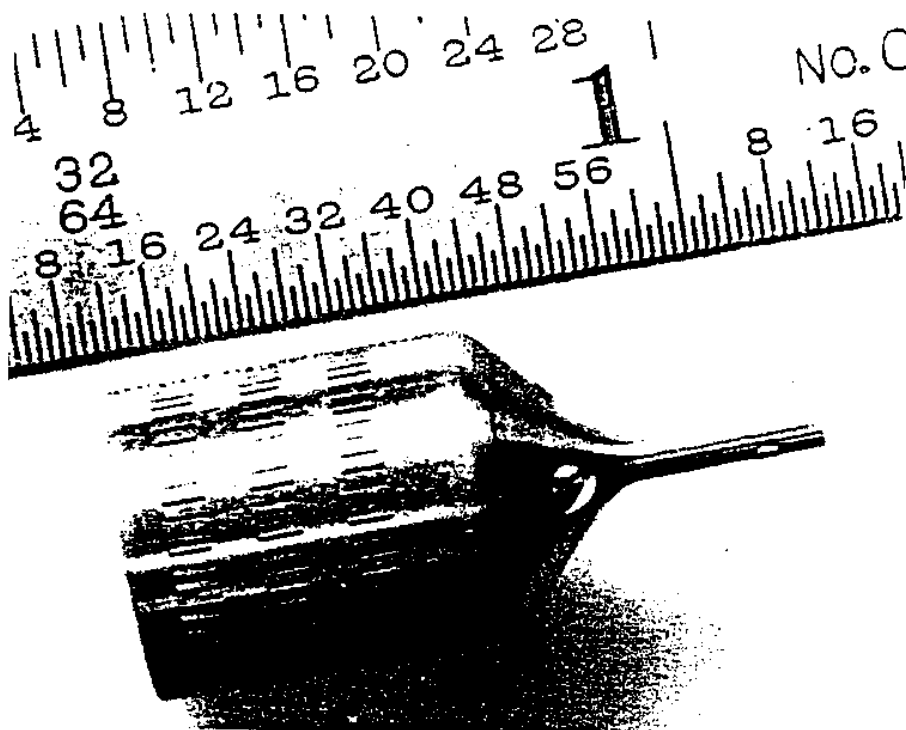
α)



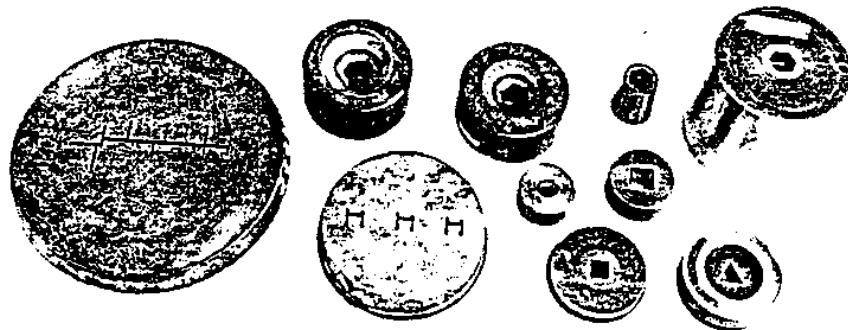
β)

Σχήμα 2.λ. Σωληνοειδής αγωγοί που χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές και έχουν αποπερατωθεί με την AFM. α) 24 κομμάτια τα οποία έχουν κατεργαστεί σε μια ιδιοσυσκευή, β) Λεπτομέρεια του σχήματος α.

- Αποπεράτωση μητρών για εξέλαση, σφυρηλάτηση, και άλλων εν'ψυχρω διαμορφώσεων (βλέπε σχήμα 2.ν).
- Αποπεράτωση στροφείων, φτερωτών, τροχών συμπιεστών, δίσκων στροβίλων και γραναζιών (βλέπε σχήμα 2.ξ).



Σχήμα 2.μ. Ένα επιταχυνσιόμετρο κατεργασμένο με τη μέθοδο AFM. Μια ποικιλία πιέσεων εξέλασης επιτρέπουν την αποπεράτωση αυτού του κομματιού που έχει πάχος 0,25 mm.



Σχήμα 2.ν. Διάφοροι τύποι μητρών.



Σχήμα 2.ξ. Εξάρτημα από κινητήρα αεροσκάφους κατεργασμένο με την μέθοδο AFM.

2. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΕΚΒΟΛΗ ΝΕΡΟΥ [WATER JET MACHINING (WJM)]

α. Εισαγωγή

Η κατεργασία με εκβολή νερού (WJM), αποκαλούμενη και ως **υδροδυναμική κατεργασία**, χρησιμοποιεί μιας υψηλής ταχύτητας ροή νερού η οποία δρά σαν κοπτικό εργαλείο. Αυτή η μέθοδος περιορίζεται στη κοπή μη μεταλλικών υλικών όταν η εκτοξευόμενη ροή αποτελείται μόνο από νερό.



β. Εξοπλισμός της WJM

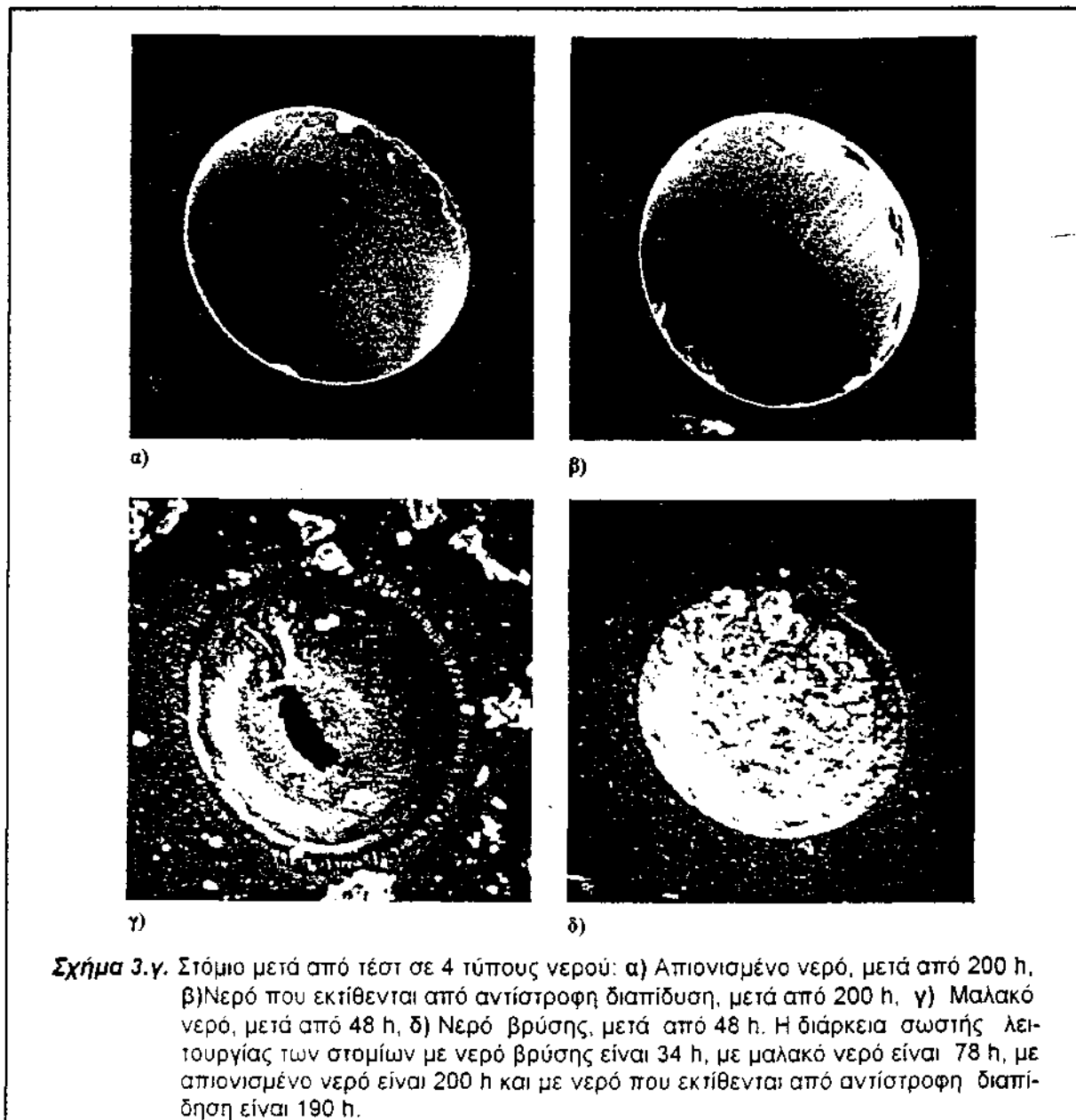
Στο σχήμα 3.α εικονίζονται τα κύρια εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα WJM τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- Η υδραυλική μονάδα.
- Ο ενισχυτής.
- Ο συσσωρευτής.
- Τα φίλτρα.
- Οι γραμμές μεταφοράς του νερού.
- Η βαλβίδα ON/OFF.
- Τα ακροφύσια εκτόξευσης του νερού.
- Οι συλλέκτες νερού.
- Οι προσθήκες ρευστού.

Η υδραυλική μονάδα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό κινητήρα ο οποίος συνδέεται με μια υδραυλική αντλία μεταβλητού εκτοπίσματος με αντιστάθμιση της πίεσης. Οι συνήθεις υδραυλικές πιέσεις είναι ρυθμισμένες περίπου στα 20 MPa (3Kpsi).

Ο **ενισχυτής** (βλέπε σχήμα 3.β) χρησιμοποιείται για την αύξηση της πίεσης του νερού στα 380 MPa (55Kpsi). Όταν εφαρμόζεται υδραυλική πίεση στο κύλινδρο χαμηλής πίεσης του ενισχυτή, η πίεση του νερού αυξάνεται στο κύλινδρο υψηλής πίεσης. Η αύξηση της πίεσης καθορίζεται από το λόγο των επιφανειών εργασίας προς τους δυο κυλίνδρους.

Τα φίλτρα προστατεύουν το στόμιο του ακροφυσίου από πιθανή ζημιά από ξένο υλικό. Στις περισσότερες εφαρμογές, το σημείο εισαγωγής του νερού είναι μηχανικά φιλτραρισμένο στα 0,45 μm. Το σχήμα 3.γ δείχνει τη κατάσταση του στομίου του ακροφυσίου μετά από λειτουργία κάτω από ποίκιλλες συνθήκες νερού.

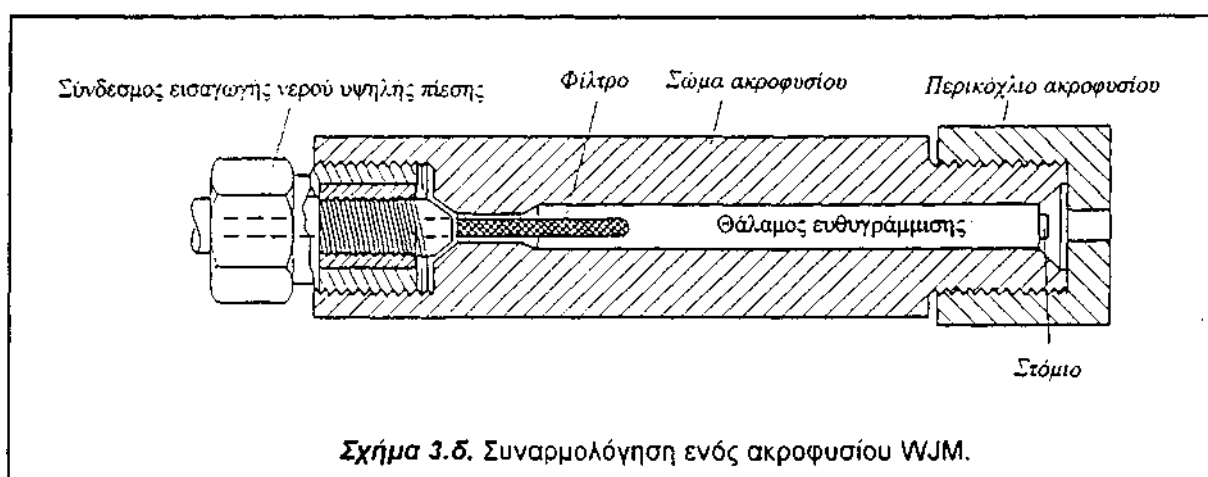


Οι γραμμές μεταφοράς του νερού αποτελούνται από εύκαμπτο και άκαμπτο σωλήνα, μεταβλητές καμπύλες και εύκαμπτους συνδέσμους των αρθρώσεων. Ο εύκαμπτος σωλήνας είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε λειτουργία με πίεση 380 MPa (55 Kpsi) και απλοποιεί σημαντικά το υδραυλικό σύστημα.

Εάν ο σωλήνας δεν μπορεί να λειτουργήσει στην επιθυμητή πίεση νερού, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν σωληνώσεις από άκαμπτο υλικό, μεταβλητές καμπύλες και εύκαμπτοι σύνδεσμοι. Η άκαμπτη σωλήνωση συνήθως κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα με αναλογία διαμέτρων εσωτερικής προς εξωτερικής της τάξεως του 1:3. Οι ελαστικοί σύνδεσμοι είναι πιο αξιόπιστοι από τις μεταβλητές καμπύλες αλλά δεν έχουν το εύρος των γωνιών κίνησης των μεταβλητών καμπυλών.

Η βαλβίδα ON/OFF είναι αμφίδρομη, διπλής θέσης, γρήγορης δράσης βαλβίδα η οποία χρησιμοποιείται για να επιτρέψει ή να διακόψει τη ροή του νερού. Η στεγανότητα της βαλβίδας είναι πολύ σημαντική στις εφαρμογές στις οποίες δεν επιτρέπεται η έξοδος νερού πάνω στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Ο χρόνος απόκρισης της βαλβίδας είναι επίσης ένας εξίσου πολύ σημαντικός παράγοντας.

Ακροφύσια εκβολής νερού. Στο σχήμα 3.δ εικονίζονται τα βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα ακροφύσιο εκτόξευσης νερού. Ο θάλαμος ευθυγράμμισης βοηθά με το να μειώνει την απόκλιση της εκβολής του νερού όταν αυτό εξέρχεται από το στόμιο. Η ποιότητα της ακμής του στομίου είναι επίσης κρίσιμη στη παραγωγή μιας συνεκτικής εκβολής νερού. Συνεπώς, το στόμιο πρέπει να προστατεύεται από ξένα σωματίδια που εμπεριέχονται μέσα στο νερό.



Το ίδιο το στόμιο συχνά παράγεται από τους κατασκευαστές από ζάφειρο. Υπάρχουν διαθέσιμα στόμια της τάξεως των 0,075 mm. Τα τελευταία χρόνια τα ζαφειρένια στόμια έχουν αντικατασταθεί με στόμια από διαμάντι. Ένα αδαμάντινο στόμιο έχει ωφέλιμη διάρκεια ζωής

δεκαπλάσια από εκείνη του ζαφειρένιου στομίου, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των διακοπών της εργασίας για συντήρηση. Επιπρόσθετα, ένα αδαμάντινο στόμιο μπορεί να καθαριστεί πολλές φορές και να συνεχίσει να παράγει μια συνεκτική εκβολή υψηλής πίεσης. Ωστόσο, το κόστος ενός αδαμάντινου στομίου είναι 7 έως 10 φορές μεγαλύτερο από το κόστος του ζαφειρένιου.

Συλλέκτες εκτοξευόμενου νερού. Η εκβολή του νερού πρέπει να παγιδεύεται και να συλλέγεται καθώς εξέρχεται από το υπό κοπή υλικό. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δοχεία τα οποία συνήθως αποκαλούνται συλλέκτες. Οι συλλέκτες επίσης μειώνουν το θόρυβο που σχετίζεται με τη θραύση και τη διασπορά της εκβολής αφού αυτή περάσει διά μέσου του κατεργαζόμενου υλικού. Η περιβάλλουσα λεπτή ομίχλη καθώς και τα ανακλώμενα σταγονίδια μπορεί να αποτελέσουν πρόβλημα εάν δεν χρησιμοποιηθεί ο κατάλληλος συλλέκτης.

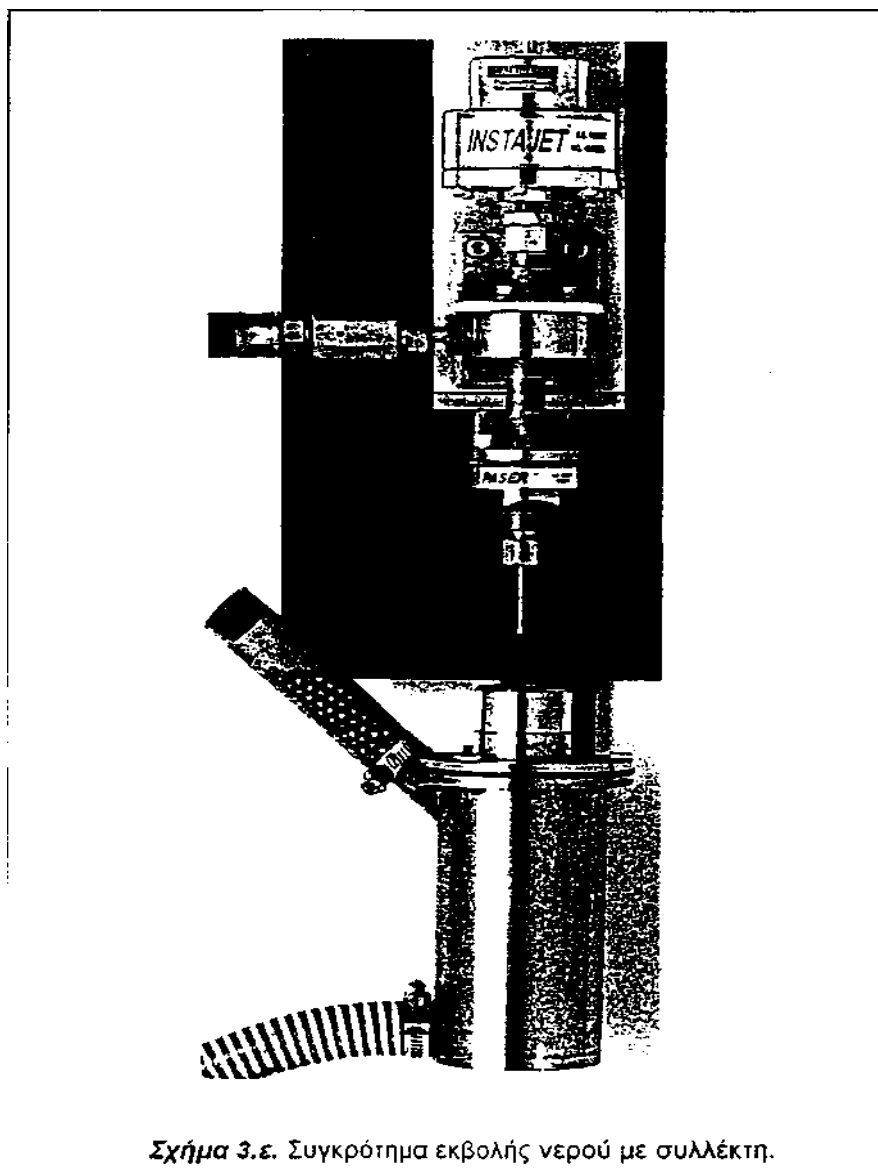
Το σχήμα 3.ε δείχνει ένα συλλέκτη του εκτοξευόμενου νερού. Ο συλλέκτης πρέπει να είναι αρκετά βαθύς έτσι ώστε να συμβεί θραύση και διασπορά της εκβολής του νερού πριν φτάσει στο πυθμένα. Ο συλλέκτης συνήθως απαιτεί ένα βάθος από 300 mm μέχρι 600 mm, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πιο ρηχές δεξαμενές με ατσάλινες σφαίρες ή αντικαθιστώμενα σκληρυμένα φύλλα στο πυθμένα.

Οι προσθήκες ρευστού χρησιμοποιούνται μερικές φορές για να βοηθήσουν στη συνεκτικότητα της υδάτινης εκβολής. Σαν πρόσθετα χρησιμοποιούνται τα μακροπολυμερή. Ωστόσο, λιγότερο από το 1% των εγκαταστάσεων παγκοσμίως χρησιμοποιούν πρόσθετα.

γ. Χαρακτηριστικά της WJM

Διάφορες μεταβλητές επηρεάζουν τη μέθοδο WJM, και ο εμπειρικός έλεγχος είναι ο καλύτερος τρόπος για το προσδιορισμό των αποτελεσμάτων της WJM σε ένα δεδομένο κατεργαζόμενο κομμάτι. Οι σημαντικότεροι παράμετροι της μεθόδου είναι:

- Η πίεση, η ροή και η διάμετρος του ακροφυσίου.
- Η αντιστάθμιση της απόστασης.
- Ο ρυθμός διείδυσης.



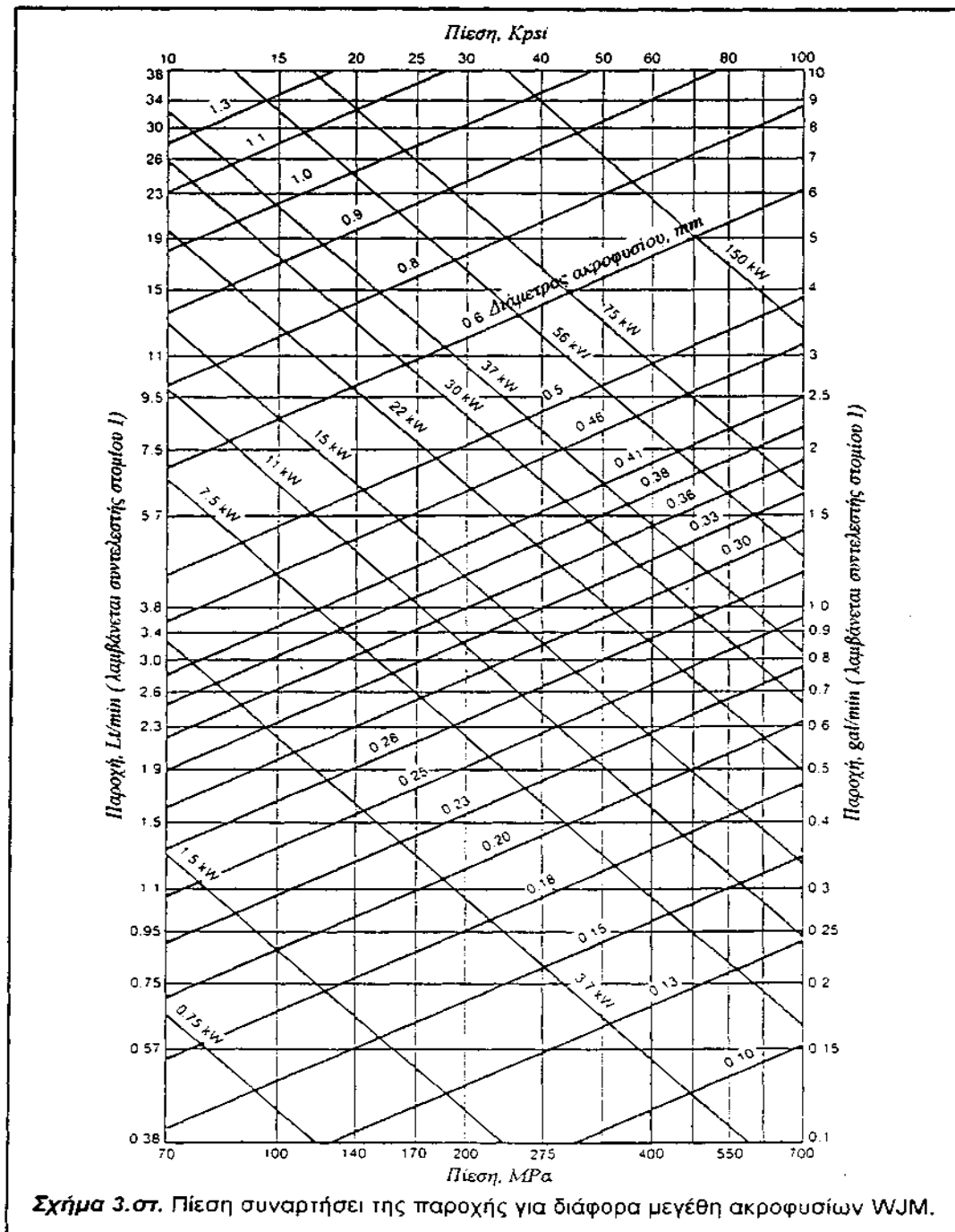
Σχήμα 3.ε. Συγκρότημα εκβολής νερού με συλλέκτη.

Η πίεση, η ροή και η διάμετρος του ακροφυσίου είναι οι κύριοι παράμετροι της ροής του ρευστού στη WJM. Έχοντας σαν βάση την εξίσωση του bernoulli για ασυμπίεστη ροή ρευστού (σχέση 2), η παροχή Q στο σύστημα της WJM είναι:

$$Q = 24 \cdot C_d \cdot D^2 \cdot \sqrt{0.22 \cdot P / \rho} \quad (\text{σχέση 1})$$

όπου C_d είναι ο συντελεστής του στομίου του ακροφυσίου, D είναι η διάμετρος του στομίου, P είναι η πίεση του ρευστού, και ρ είναι η μέση πυκνότητα του ρευστού. Στο σχήμα 3.στ διευκρινίζεται η σχέση μεταξύ της πίεσης και της ροής για διάφορες διαμέτρους ακροφυσίου

με ένα συντελεστή στομίου 1. Ένας τυπικός συντελεστής για στόμια από ζάφειρο ή διαμάντι είναι 0,7. Ο πίνακας 3.1 αναγράφει τις συνήθειες πιέσεις και τους ρυθμούς ροής με ένα συντελεστή στομίου 0,7. Η πίεση της ροής που αναγράφεται στο πίνακα 3.1 μπορεί να καθοριστεί πολλαπλασιάζοντας τους διάφορους ρυθμούς ροής που δίδονται στο σχήμα 3.στ επί το συντελεστή 0,7. Το σχήμα 3.στ παρέχει επίσης το αναγκαίο μέγεθος της αντλίας για ένα δεδομένο ρυθμό ροής και πίεσης.



Σχήμα 3.στ. Πίεση συναρτήσει της παροχής για διάφορα μεγέθη ακροφυσίων WJM.

Πίνακας 3.1. Παροχές με συντελεστή στομίου 0,7.

Πίεση νερού MPa	Κpsi	Διάμετρος στομίου mm	Ρυθμός ροής (παροχή) Lt/min
380	55	0,15	0,64
		0,20	0,79
		0,30	2,6
		0,35	3,6
275	40	0,15	0,57
		0,20	0,98
		0,30	2,2
		0,35	3,1
200	30	0,15	0,49
		0,20	0,87
		0,30	2,0
		0,35	2,6

Αποτελέσματα κοπής. Ο ρυθμός της ροής και η πίεση εκτόξευσης του νερού έχουν διαφορετικές επιδράσεις στη κοπή. Ο ρυθμός της ροής επηρεάζει το ρυθμό αφαίρεσης υλικού, ενώ η πίεση επηρεάζει όχι μόνο το ρυθμό αφαίρεσης υλικού αλλά επίσης και το μηχανισμό της κοπής, ο οποίος αποκόπτει διατρητικά το υλικό από το κατεργαζόμενο κομμάτι. Αυτό είναι εμφανές επειδή σε υψηλούς ρυθμούς ροής και σε χαμηλή πίεση δεν συντηρείται κοπή. Ωστόσο, εάν η πίεση αυξάνεται ενώ η διάμετρος του στομίου μειώνεται για να διατηρείται ο ρυθμός ροής σταθερός, η ποσότητα της κοπής θα αυξηθεί. Αυτό υποδηλώνει τη σχέση μεταξύ της πίεσης και του μηχανισμού κοπής.

Ο ρόλος της πίεσης εκτόξευσης του νερού στη μέθοδο WJM μπορεί να αποδειχθεί λαμβάνοντας υπ'όψιν την εξίσωση του ΒβιτιουΠί για ασυμπίεστη ροή ρευστού:

$$U^2=2*P/\rho$$

(σχέση 2)

όπου u είναι η ταχύτητα εκβολής του νερού. Η πίεση (P) είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας (U^2) το οποίο είναι επίσης ανάλογο της κινητικής ενέργειας ($1/2*m*U^2$) ενός σωματιδίου με μάζα m . Συνεπώς, η πίεση εκβολής του νερού καθορίζει τη μέση κινητική ενέργεια του σωματιδίου στην εκβολή του νερού. Σε υψηλότερες πιέσεις, η μέση κινητική ενέργεια των μορίων του νερού είναι υψηλότερη και είναι περισσότερο πιθανό να υπερνικηθούν οι δυνάμεις των μοριακών δεσμών του υλικού του κατεργαζόμενου κομματιού. Επομένως, η απαιτούμενη

πίεση εκβολής του νερού για τη κοπή πρέπει να αυξάνεται όταν η αντοχή του κατεργαζόμενου κομματιού αυξάνει.

Εάν η πίεση εκβολής του νερού είναι επαρκής για τη κοπή ενός δεδομένου υλικού, και διατηρείται σταθερή, τότε ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού καθορίζεται από το ρυθμό της ροής.

Ο πίνακας 3.2 αναγράφει τυπικούς ρυθμούς κοπής με εκτόξευση νερού για διάφορα υλικά. Σε κάθε αύξηση της πίεσης ή της διαμέτρου του στομίου του ακροφυσίου παράγεται ένας μεγαλύτερος ρυθμός ροής, ο οποίος αυξάνει το ρυθμό κοπής ή τη δυνατότητα να κόβει παχύτερα κατεργαζόμενα κομμάτια αυξάνοντας τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια στο ακροφύσιο. Μεγαλύτερες πιέσεις αυξάνουν επίσης την ενέργεια πυκνότητας της εκβολής του νερού.

Πίνακας 3.2. Ρυθμοί κοπής της WJM για διάφορα υλικά.

Υλικό	Πάχος	Ρυθμός κοπής	Διάμετρος ακροφυσίου	Πίεση εκβολής	
	mm	mm/sec	mm	MPa	Kpsi
Κυματοειδής πλακέτα	7	3300	0,25	385	56
Σμυριδόπανο με μέγεθος κόκκων 120.	1 στρώμα	2030	0,13	275	40
Δέρμα	1	1270	0,13	275	40
Πλακέτα αμιάντου	18	1520	0,20	190	28
Μονωτική πλακέτα	50	1650	0,20	190	28
Ελαστικό	3	150	0,13	380	55
Ουρεθάνη	2	100	0,10	380	55
Μονωτική ύαλος	300	420	0,15	350	50
Πολυπροπυλένιο	2	60	0,10	380	55
Πολυεστέρας	12	600	0,15	380	55
Χλωριούχο πολυβινύλιο	0,75	300	0,10	380	55
Πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων.	1,5	50	0,15	380	55
Γρανίτης	12	100	0,10	275	40
Φορμάκια	1	600	0,13	350	50

Πτώση πίεσης. Στις περισσότερες εγκαταστάσεις κοπής με εκβολή νερού, η πτώση πίεσης έχει μικρή επίδραση στη λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, σε υλικά όπως είναι τα τυπωμένα κυκλώματα που πρέπει να κοπούν, η πτώση πίεσης είναι κρίσιμη επειδή η πίεση στο ακροφύσιο πρέπει να παραμένει μεταξύ των 360 και 380 MPa (52 μέχρι 55 Kpsi).

Διάκενο απόστασης. Η απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου και του κατεργαζόμενου, κομματιού (ή διάκενο) είναι γενικά 2,5 έως 6,35 mm. Επειδή η αλλαγή η οποία συμβαίνει στο σχήμα ή στη διάμετρο της εκβολής του νερού σε απόσταση μέχρι 25 mm, είναι μικρή, το διάκενο

μπορεί να αυξηθεί μέχρι τα 25 mm χωρίς να έχει σημαντική επίδραση στην αφαίρεση υλικού. Τα διάκενα πρέπει να αυξάνονται (μέχρι 50 mm) για υλικά που παρουσιάζουν κραδασμούς και θρυμματίζονται ή διαχωρίζονται σε στρώματα (όπως τα τυπωμένα κυκλώματα) ή για εφαρμογές που απαιτούν μια ομαλότερη κοπή.

Ρυθμός εγκάρσιας πρόωσης. Τα υλικά εκείνα που έχουν μεγαλύτερο πάχος και πυκνότητα μπορούν να κοπούν μειώνοντας τη ταχύτητα της εγκάρσιας πρόωσης. Υλικά τα

οποία έχουν πολύ μεγάλο πάχος ώστε να μπορούν να κοπούν σε ένα απλό πάσο, κόβονται με πολλαπλά πάσα αρκεί το πρώτο πάσο να παράγει μια καλοκατεργασμένη σχισμή.

δ. Εφαρμογές της WJM

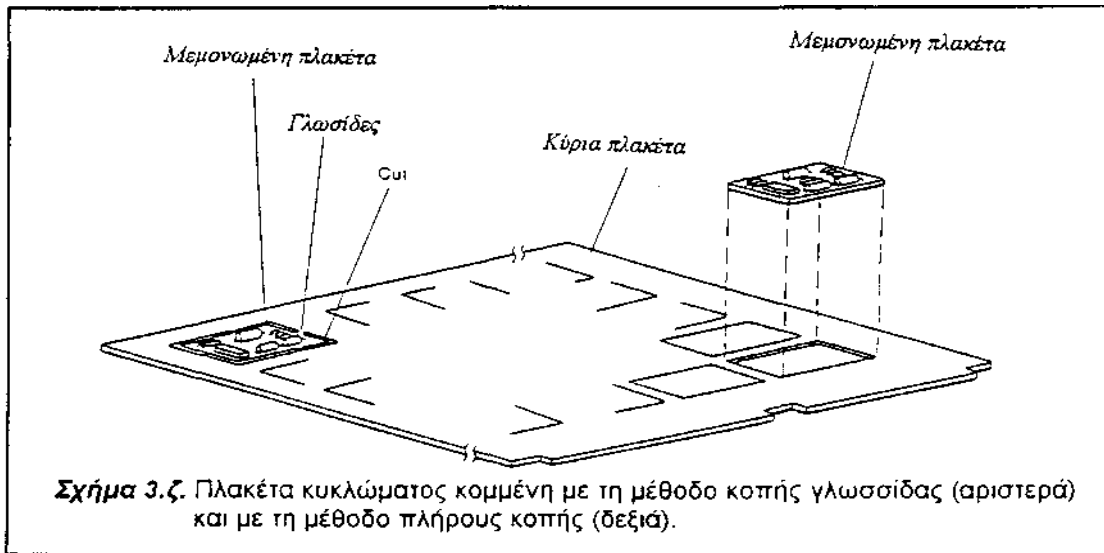
Η WJM έχει μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών όταν συμπεριλαμβάνονται υλικά χαμηλότερης αντοχής. Οι συμπεριλαμβανόμενες εφαρμογές είναι οι παρακάτω:

1. Κοπή πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων.
2. Κοπή υλικών υπό μορφή φύλλων (πλακών).
3. Κοπή πλαστικών με μικρό βάρος και ενισχυμένα με ίνες (οπλισμός).
4. Ενσωμάτωση σε ρομποτικά συστήματα.
5. Απογύμνωση σύρματος.
6. Σταυροειδής κοπή.
7. Κοπή τροφίμων.
8. Κοπή υλικών αραχνοειδούς υφής.

Παρακάτω αναλύονται λεπτομερώς οι παραπάνω αναφερόμενες εφαρμογές:

1. **Η κοπή πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων** παρουσιάζει πολλά από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου WJM. Η μέθοδος συμπεριλαμβάνει συνήθως την αφαίρεση διαφόρων μεμονομένων πλακετών από μια κύρια πλακέτα είτε με τη μέθοδο κοπής γλωσσίδας (βλέπε σχήμα 3.ζ αριστερά) είτε με τη μέθοδο πλήρους κοπής (βλέπε σχήμα 3.ζ δεξιά). Αυτές οι μέθοδοι είχαν επινοηθεί αρχικά για να αυξήσουν τη

δυνατότητα των κατασκευαστών τυπωμένων κυκλωμάτων για αυτοματοποίηση της παραγωγής.



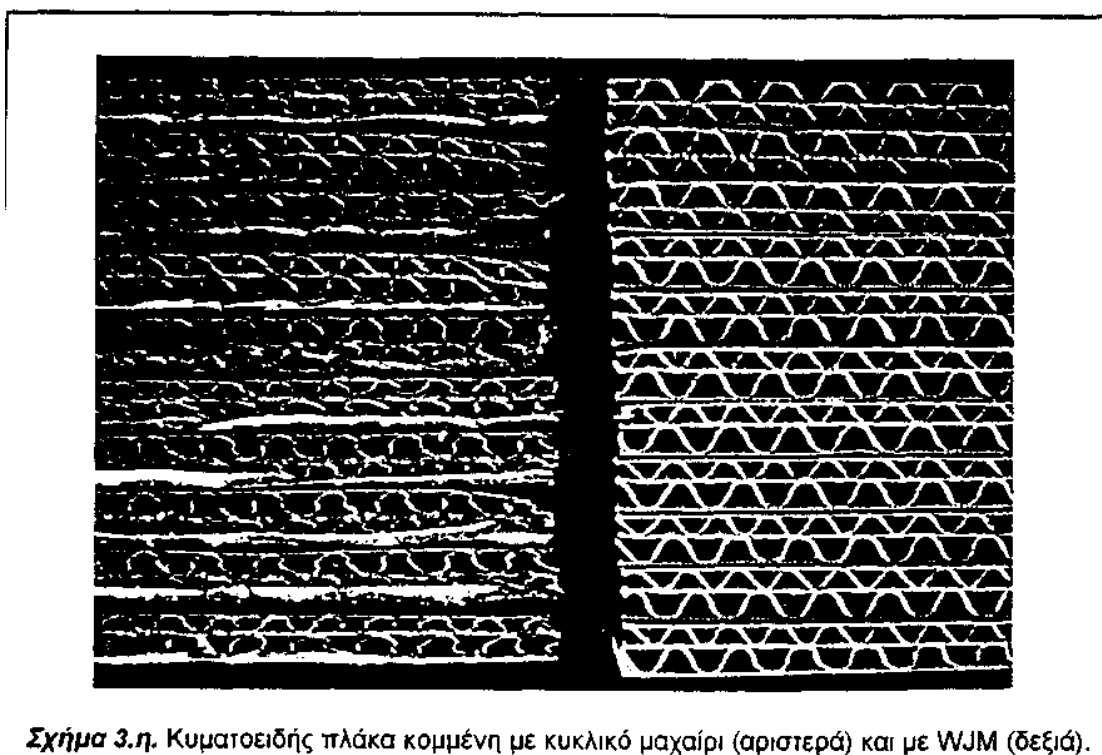
Σχήμα 3.ζ. Πλακέτα κυκλώματος κομμένη με τη μέθοδο κοπής γλωσσίδας (αριστερά) και με τη μέθοδο πλήρους κοπής (δεξιά).

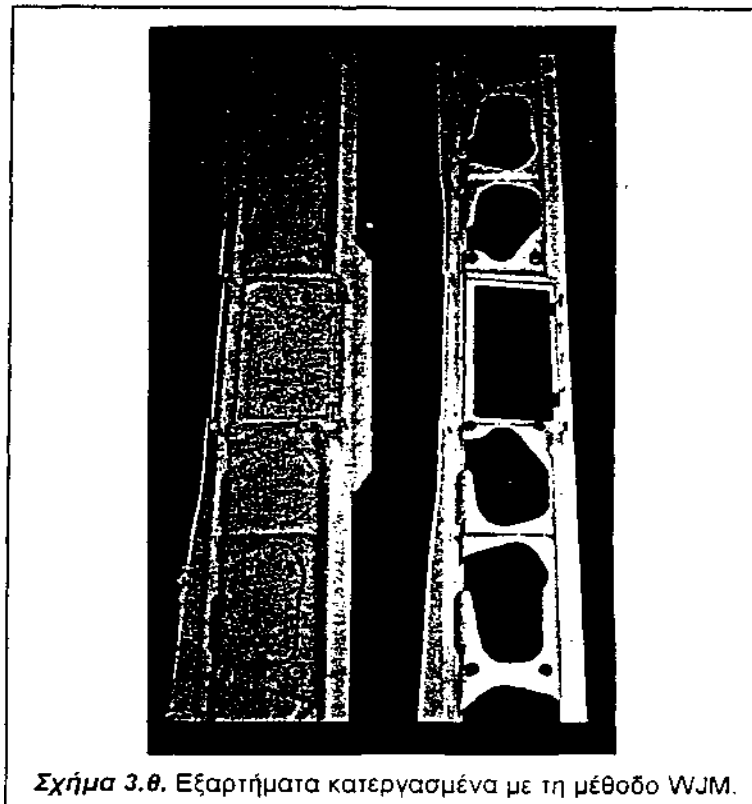
Τα συστήματα WJM παρουσιάζουν ευχέρεια στην αυτοματοποίηση τους, και συνεπώς μπορούν να κόψουν πυκνά τυπωμένα κυκλώματα σε πλακέτες διαφόρων σχημάτων και μεγεθών. Η μικρή διάμετρος της δέσμης εκβολής νερού καθιστά δυνατή τη παρακείμενη διέλευση σε κάθε εξάρτημα που είναι στερεωμένο κοντά στην ακμή της πλακέτας. Επιπρόσθετα, η WJM εισάγει μικρές διαμήκης ή εγκάρσιες δυνάμεις κοπής όσον αφορά τη δέσμη νερού κατά τη κοπή τυπωμένων κυκλωμάτων. Αυτό επιτρέπει στους κατασκευαστές να αναρτούν τη κύρια πλακέτα από τη περίμετρο της και χρησιμοποιώντας ένα μικρό αριθμό εσωτερικών στηριγμάτων να αποτρέψουν τη δημιουργία κραδασμών κατά τη διάρκεια της κοπής. Σ'αυτή την εφαρμογή, οι ταχύτητες κοπής κυμαίνονται από 1 μέχρι 8 m/min, με τα χαρακτηριστικά του υλικού της πλακέτας να καθορίζουν τη μέγιστη ταχύτητα κοπής. Εάν το κατεργαζόμενο κομμάτι συγκρατείται σε τράπεζα στο επίπεδο των αξόνων X-Y τότε η ταχύτητα κοπής φτάνει τα 25 m/min και ακρίβεια $\pm 0,13$ mm.

Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας είναι ο θόρυβος. Έτσι λοιπόν για την εξάλειψη των ενοχλητικών επιπέδων θορύβου έχουν κατασκευαστεί κατάλληλοι συλλέκτες. Σε μερικές περιπτώσεις ολόκληρο το μηχάνημα τοποθετείται μέσα σε ένα περίβλημα όταν δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ένας ανοικτός συλλέκτης ικανός να ελαχιστοποιήσει το θόρυβο.

2. Κοπή υλικών υπό μορφή φύλλων (πλακών). Η εκβολή του νερού ασκεί μικρές δυνάμεις στα υλικά υπό μορφή φύλλων κατά τη διάρκεια της κοπής. Σαν συνέπεια αυτού παράγεται μια υψηλότερης ποιότητας ακμή. Το σχήμα 3.η δείχνει τη διαφορά στη ποιότητα της ακμής κατά τη κοπή διπλού τοιχώματος κυματοειδούς πλάκας: α) με κυκλικό μαχαίρι αριστερά της φωτογραφίας και β) με WJM δεξιά. Ο ρυθμός κοπής μπορεί συχνά να διπλασιαστεί ενώ διατηρείται μια καθαρή, χωρίς ραγίσματα ακμή στο τελικό προϊόν.

3. Ρομποτική. Η WJM μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε ρομποτικά συστήματα. Τα απαιτούμενα εργαλεία ελαχιστοποιούνται κατά τη κοπή ελαφρού πλαστικού που είναι ενισχυμένο με ίνες. Εάν χρησιμοποιούνταν οι συνηθισμένες μέθοδοι κατεργασίας, η ακμή θα χρειαζόνταν πολλή στέρεη υποστήριξη μέχρι τη γραμμή κοπής για την αποφυγή ραγίσματος του κομματιού και σπασίματος του κοπτικού εργαλείου. Αυτά τα προβλήματα εξαλείφονται με την WJM λόγω των χαμηλών δυνάμεων που ασκούνται πάνω στο υλικό κατά τη διάρκεια της κοπής. Ένα κομμένο κομμάτι εικονίζεται στο σχήμα 3.θ που φαίνεται παρακάτω.





4. Απογύμνωση σύρματος. Η δυνατότητα της WJM να κόβει μονωτικά υλικά αλλά όχι μεταλλικά τη κάνει χρήσιμη στην απογύμνωση συρμάτων. Η δέσμη του νερού κόβει

εξαιρετικά γρήγορα και υπάρχει λιγότερο άχρηστο υλικό λόγω ζημιάς του σύρματος. Με τη WJM οι 40 εργατώρες που είναι αναγκαίες για τη απογύμνωση ορισμένων συρμάτων μειώνονται στις 8 εργατώρες. Η δέσμη του νερού επίσης κόβει τη μόνωση του σύρματος χωρίς να φθείρει την επικασιτέρωση του χάλκινου σύρματος.

5. Η σταυροειδής κοπή ενός συνεχόμενου υλικού αραχνοειδούς υφής η οποία δεν είναι δυνατόν να σταματήσει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της κοπής, εκτελείται εύκολα με τη WJM. Με τη σταυροειδή κοπή μειώνεται σημαντικά η συμπίεση του υλικού και οι θραύσεις οι οποίες συμβαίνουν όταν χρησιμοποιούνται αντίστοιχα μηχανικά μέσα όπως μαχαίρια, ψαλίδια, και πριονόλαμες.

6. Κοπή τροφίμων. Οι συμβατικές μηχανικές μέθοδοι κοπής τείνουν να ραγίσουν ή και να σπάσουν τα τρόφιμα κατά τη διάρκεια της κοπής. Οι χαμηλές δυνάμεις που εφαρμόζονται στο υλικό με τη δέσμη νερού μπορούν να μειώσουν τη θραύση από 40 έως 60% σε

ποσοστό κάτω του 2%.

7. Κοπή υλικών αραχνοειδούς υφής. Οι κατασκευαστές που παράγουν πάνες βρεφών είναι ταυτόχρονα οι μεγαλύτεροι χρήστες των συστημάτων WJM σαν μέσα για τη κοπή του περιγράμματος του αραχνοειδούς υλικού. Το αραχνοειδές υλικό προωθείται συνεχώς στο σύστημα σε μεγάλες ταχύτητες. Το ακροφύσιο εκβολής του νερού μετακινείται εγκάρσια του υλικού, κόβοντας έτσι το υλικό στο επιθυμητό σχήμα. Το ακροφύσιο εκτόξευσης του νερού ελέγχεται συνήθως με μια σύνδεση μέσω έκκεντρου, η οποία συνδέεται από τη ταινία μεταφοράς.

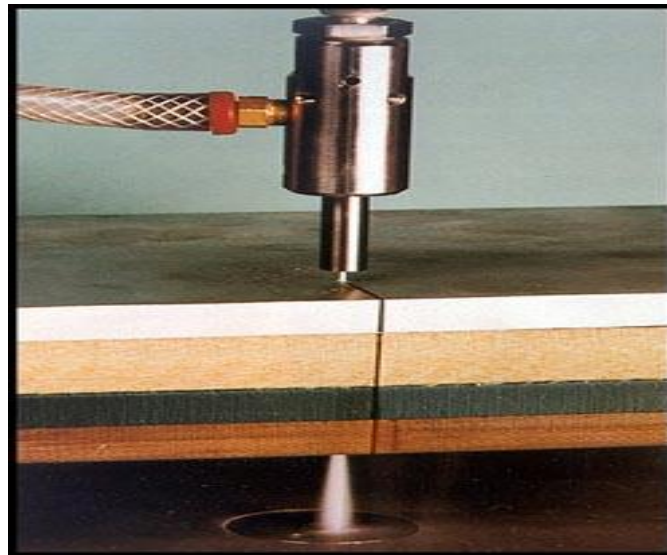
4. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΕΚΒΟΛΗ ΝΕΡΟΥ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΠΕΡΙΕΧΕΙ

ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ.

[ABRASIVE WATER JET MACHINING (AWJM)]

α. Εισαγωγή

Όπως είναι γνωστό η μέθοδος WJM χρησιμοποιείται για τη κοπή μόνο μη μεταλλικών υλικών. Ωστόσο, όταν μικρά αποξεστικά σωματίδια εγχύονται στη ροή του νερού, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη κοπή σκληρότερων και πυκνότερων υλικών. Η AWJM έχει επεκτείνει το φάσμα εφαρμογών της WJM και έτσι χρησιμοποιείται στη κοπή μετάλλων, υάλου και κεραμικών.



β. Εξοπλισμός της AWJM

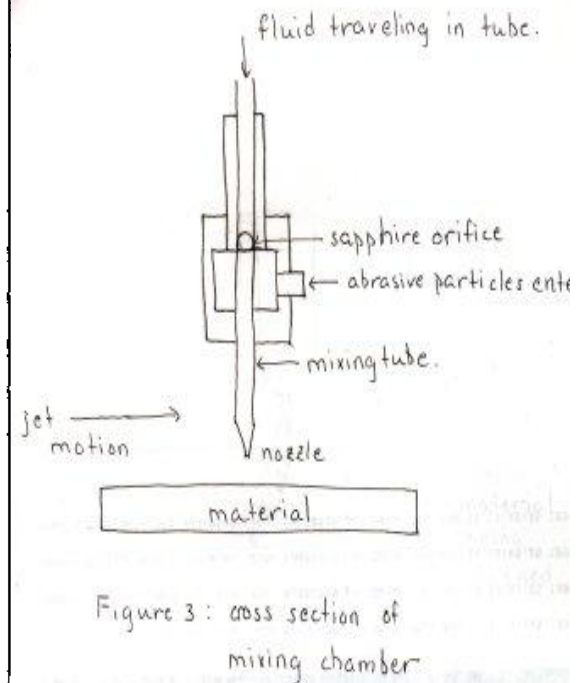
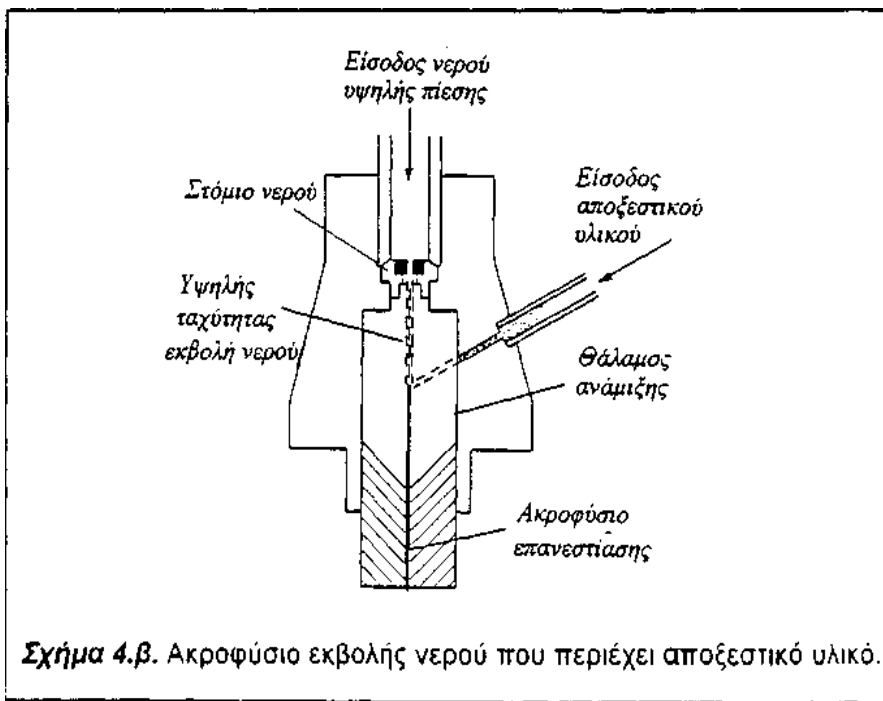
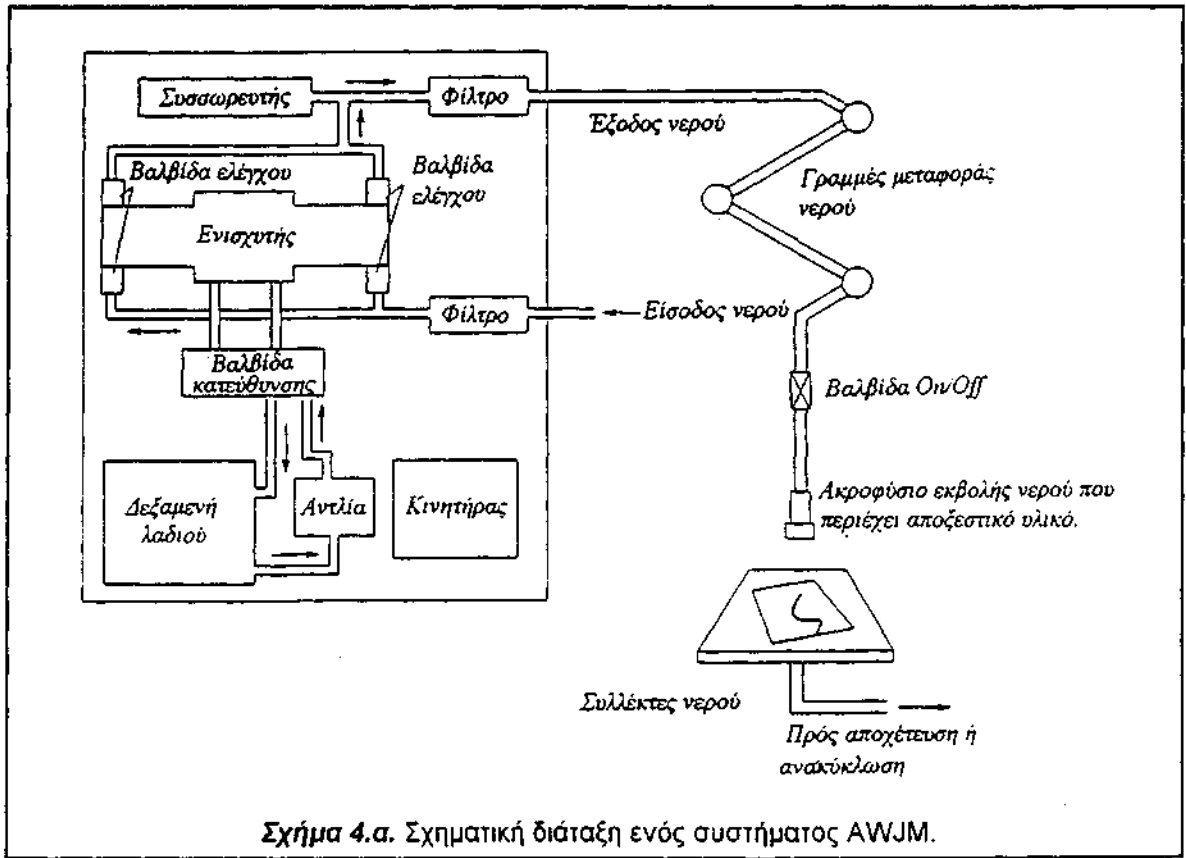
Οι μοναδικές διαφορές μεταξύ ενός συστήματος AWJM και του συνηθισμένου συστήματος WJM είναι η πρόσθεση ενός ακροφυσίου εκβολής αποξεστικού υλικού και ενός μηχανισμού τροφοδότησης του αποξεστικού υλικού. Όλα τ'άλλα εξαρτήματα παραμένουν τα ίδια. Στο

σχήμα 4.α παρακάτω εικονίζονται τα κύρια εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα AWJM.

Η λειτουργία του κάθε εξαρτήματος που υπάρχει στο σύστημα AWJM είναι ακριβώς η ίδια όπως και στο σύστημα WJM εκτός από το ακροφύσιο η λειτουργία του οποίου περιγράφεται αμέσως παρακάτω.

Ακροφύσιο εκβολής νερού που περιέχει αποξεστικό υλικό. Όπως αναφέραμε και παραπάνω οι μοναδικές διαφορές μεταξύ της AWJM και της WJM είναι η πρόσθεση ενός ακροφυσίου εκβολής αποξεστικού υλικού και ενός μηχανισμού τροφοδότησης αυτού. Στο σχήμα 4.β εικονίζεται ένα ακροφύσιο για την AWJM. Το αποξεστικό υλικό προστίθεται σε ένα θάλαμο ανάμιξης που βρίσκεται μέσα στο ακροφύσιο. Όταν η εκβολή νερού υψηλής ταχύτητας περάσει μέσα από το θάλαμο ανάμιξης, η υψηλή ροή δημιουργεί μια περιοχή υποπίεσης, η οποία παρασύρει το αποξεστικό υλικό μέσω μιας γραμμής παροχής. Η ροή του αποξεστικού υλικού ελέγχεται με τη βοήθεια ενός μετρητικού μηχανισμού.

Στο θάλαμο ανάμιξης, το αποξεστικό υλικό αναμιγνύεται τυχαία με την υψηλής πίεσης ροή νερού, η οποία μετά επανεστιάζεται περνώντας μέσα από ένα δευτερεύων ακροφύσιο. Τα μεγέθη των στομιών του δευτερεύοντος ακροφυσίου κυμαίνονται συνήθως από 0,75 έως 2,5 mm.



Η ισχύς εκβολής του νερού από το ακροφύσιο κυμαίνεται από 7 μέχρι 45 KW. Τα αποξεστικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως σ'αυτή τη μέθοδο είναι ο γρανάτης, άμμος πυριτίου του σιδήρου και του μαγνησίου και σε μερικές περιπτώσεις (ειδικά σε εφαρμογές καθαρισμού) πυριτική άμμος.

γ. Χαρακτηριστικά της AWJM

Διάφορες μεταβλητές επηρεάζουν τη μέθοδο AWJM, και ο εμπειρικός έλεγχος είναι ο καλύτερος τρόπος για το προσδιορισμό των αποτελεσμάτων της κατεργασίας με εκβολή νερού που περιέχει αποξεστικό υλικό σε ένα δεδομένο κατεργαζόμενο κομμάτι. Η σημαντικότερη παράμετρος εκτός από τη πίεση, τη ροή, τη διάμετρο του ακροφυσίου, το διάκενο της απόστασης και την εγκάρσια ταχύτητα πρόωσης που αναφέρθηκαν στη μέθοδο WJM, είναι ο τύπος και το μέγεθος του αποξεστικού υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Όλοι οι παράμετροι που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν αναλυθεί εκτός από το τελευταίο που εξηγείται παρακάτω.

Τα αποξεστικά που χρησιμοποιούνται επιδρούν επίσης στις δυνατότητες κοπής της AWJM. Έτσι, ανάλογα με το μέγεθος των αποξεστικών κόκκων που χρησιμοποιούνται επηρεάζεται ο ρυθμός κοπής, και μάλιστα όσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος των κόκκων τόσο πιο υψηλός είναι ο ρυθμός κοπής και μπορούν να κοπούν υλικά με μεγαλύτερο πάχος.

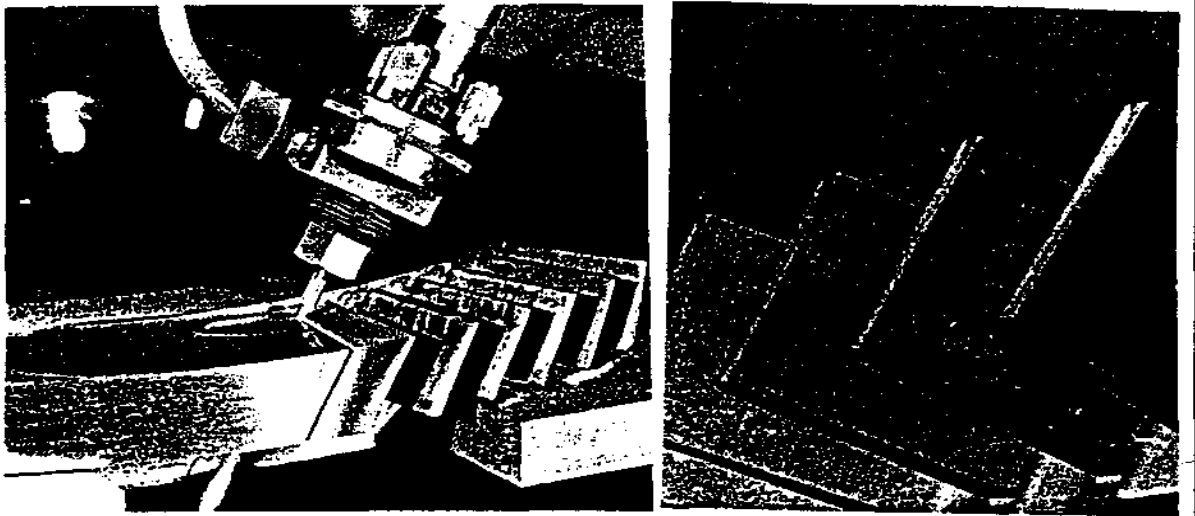
δ. Εφαρμογές της AWJM

Η κοπή με τη μέθοδο AWJM δεν χαρακτηρίζεται μόνο από την ευελιξία της WJM αλλά επίσης εκτείνει τις εφαρμογές της σε σκληρότερα και μεγαλύτερης πυκνότητας υλικά. Η προσθήκη των αποξεστικών σωματιδίων επιτρέπει τη κοπή μετάλλων, υάλου, και κεραμικών.

1. Κοπή εργαλειοχαλυβα. Η κοπή με την AWJM συγκρίνεται ευνοϊκά με τις συμβατικές κατεργασίες και με τη κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση στη παραγωγή μιας οπής 100 mm σε κομμάτι

από εργαλαιοχαλυβα με πάχος 50 mm. Και οι δύο, δηλαδή, η κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση και η AWJM μπορούν να κατεργαστούν αυτό το ιδιόμορφο υλικό μετά από θερμική κατεργασία.

2. Κοπή κράματος incenet. Τροχός στροβίλου διαμέτρου 760 mm είναι δυνατόν να κατεργαστεί με την AWJM από ακατέργαστη πρώτη ύλη δισκοειδούς σχήματος πάχους 45 mm από incenet (βλέπε σχήμα 4.γ). Ο αντικειμενικός σκοπός ήταν η αφαίρεση του υλικού μεταξύ των πτερυγίων του στροβίλου. Η τελική διαμόρφωση πραγματοποιείται με την ηλεκτροχημική κατεργασία. Ο μέσος χρόνος κοπής ήταν 48 ώρες.



Σχήμα 4.γ α) Κατεργασία ενός δίσκου από incenet με την AWJM για τη παραγωγή πτερυγίων στο τροχό του στροβίλου. **β)** Μεγέθυνση των πτερυγίων.

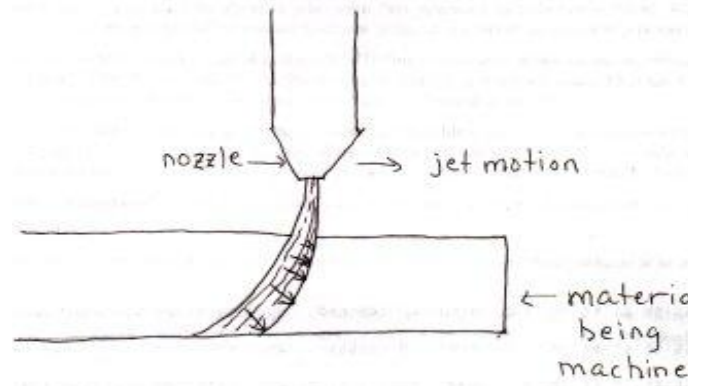
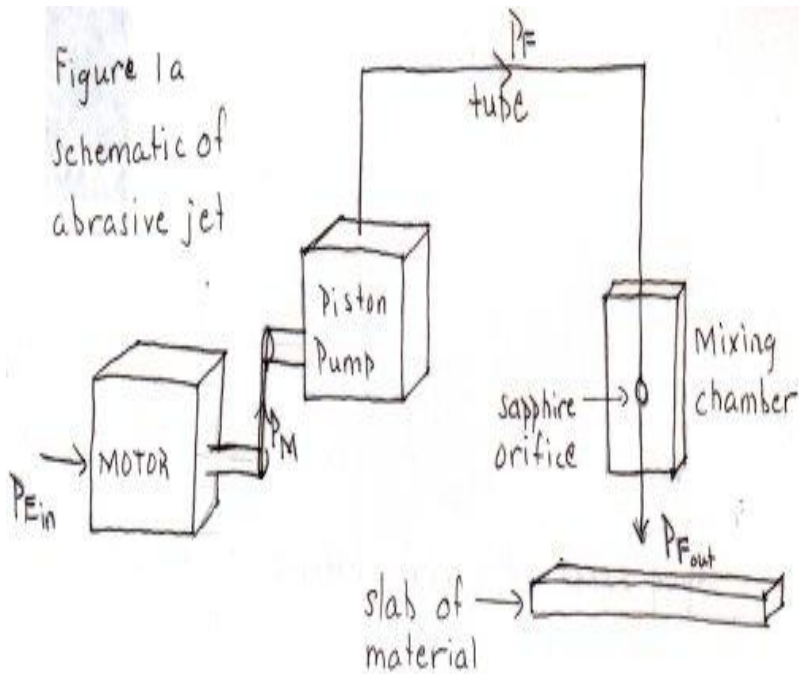


Figure 4: garnet particles in fluid follow a curved path through the material.

3. Δοκίμια ελέγχου κόπωσης κατασκευασμένα από τιτάνιο και inconel, κόβονται με ταχύτητα 250 mm/min. Το μέγεθος της ανοχής για περισσότερα από 45 κομμάτια ήταν $\pm 0,025$ mm.

4. Οι ίνες άνθρακα, λόγω της υψηλής τους αντοχής και του υψηλού περιεχομένου σε αποξεοτικό υλικό, είναι εξαιρετικά δύσκολο να κοπούν με τα συμβατικά εργαλεία κατεργασίας. Ωστόσο, με την AWJM η κοπή είναι σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια της κατεργασίας. Η AWJM επίσης εξαλείφει την ανάγκη για λείανση με σμυριδόπανο, λιμάρισμα, και άλλες λειτουργίες που ακολουθούν οι συμβατικές κατεργασίες σ' αυτό το τύπο υλικού.

ε. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων WJM ΚΑΙ AWJM.

Τα **πλεονεκτήματα** της WJM και της AWJM συμπεριλαμβάνουν τα παρακάτω:

1. Δυνατότητα κοπής προς κάθε διεύθυνση με μηδενική ακτίνα για εξωτερικές γωνίες και μια ακτίνα ίση με την ακτίνα της δέσμης νερού για εσωτερικές γωνίες.
2. Μείωση του κόστους των εργαλείων λόγω της ελάχιστης δύναμης (5 έως 130 Nt) που μεταδίδεται στο κατεργαζόμενο κομμάτι.
3. Το γεγονός ότι δεν απαιτείται προτρύπνισμα όταν γίνεται κοπή ενός σχήματος.
4. Δεν συμβαίνει καμμία σκλήρυνση του υλικού ούτε θερμικές επιδράσεις.
5. Επιτυγχάνεται μείωση ή και εξάλειψη της αιωρούμενης σκόνης λόγω της κοπής.
6. Παρέχεται η δυνατότητα κοπής διαφόρων υλικών χωρίς σημαντικές αλλαγές στα εξαρτήματα του συστήματος.
7. Επιτυγχάνεται εύκολη ενσωμάτωση με συστήματα αυτομάτου ελέγχου.
8. Είναι δυνατή η κοπή πολυστρωματικών υλικών διατηρώντας ταυτόχρονα τη ποιότητα των στρωμάτων του υλικού.
9. Μικρό πλάτος εγκοπής.

Το κύριο **μειονέκτημα** είναι ότι μόνο μη μεταλλικά υλικά κόβονται αποτελεσματικά με τη μέθοδο WJM. Αυτό το μειονέκτημα διορθώνεται μερικώς από τη μέθοδο AWJM, η οποία μπορεί να κόψει σκληρότερα και πυκνότερα υλικά.

5.ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ **[ULTRASONIC MACHINING (USM)]**

α. Εισαγωγή

Η κατεργασία με υπερήχους (USM) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί την υπερηχητική δόνηση (20 KHZ) ενός εργαλείου για τη κατεργασία σκληρών, εύθραυστων και μη μεταλλικών υλικών. Η μέθοδος USM αποτελείται από 2 μεθόδους:

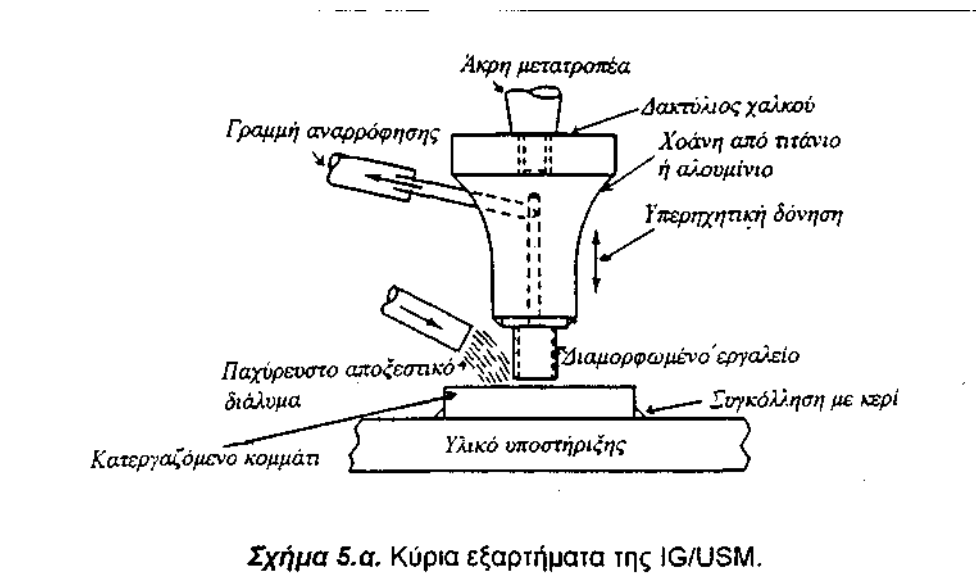
- **Τη κρουστική λείανση με υπερήχους (Impact grinding USM)** η οποία συμπεριλαμβάνει ένα παχύρευστο αποξεστικό διάλυμα και την υπερηχητική δόνηση ενός μη περιστρεφόμενου εργαλείου.
- **Τη περιστροφική κατεργασία με υπερήχους (Rotary USM)** η οποία συμπεριλαμβάνει την υπερηχητική δόνηση ενός περιστρεφόμενου τρυπανιού με αδαμάντινο πυρήνα ή εργαλείου φρέζας.

Στην IG/USM, ένα παχύρευστο αποξεστικό διάλυμα ρέει διά μέσου ενός διακένου μεταξύ του κατεργαζόμενου κομματιού και του δονούμενου εργαλείου (βλέπε σχήμα 5.α). Η αφαίρεση υλικού πραγματοποιείται όταν τα αποξεστικά σωματίδια που αιωρούνται μέσα στο παχύρευστο διάλυμα, κτυπηθούν από το δονούμενο εργαλείο κατά τη προς τα κάτω διαδρομή του. Η ταχύτητα που μεταδίδεται στα αποξεστικά σωματίδια προκαλεί μικρορινίσματα και μηχανική διάβρωση όταν τα σωματίδια αυτά προσκρούσουν πάνω στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Το πλάτος της δόνησης στην IG/USM ποικίλλει από 0,025 μέχρι 0,09 mm. Η μέθοδος διαμορφώνει μια κοιλότητα που έχει το ίδιο σχήμα με αυτό του εργαλείου. Η R/USM είναι όμοια με το συμβατικό τρυπάνισμα ύαλου και κεραμικού με τρυπάνια τα οποία έχουν αδαμάντινο πυρήνα, με εξαίρεση ότι το περιστρεφόμενο τρυπάνι δονείται με μια υπερηχητική συχνότητα της τάξεως των 20 KHZ. Η R/USM δεν συμπεριλαμβάνει τη ροή ενός αποξεστικού παχύρευστου διαλύματος διά μέσου του διακένου μεταξύ του

κάτεργα-
ζόμενου κομματιού και του εργαλείου. Αντί για αυτό, το εργαλείο έρχεται σε επαφή και κόβει το κατεργαζόμενο κομμάτι, και ένα ψυκτικό υγρό, συνήθως νερό, εξαναγκάζεται να διέλθει μέσα από την οπή ενός σωλήνα

για να ψύξει και να απομακρύνει το αφαιρούμενο υλικό. Το πλάτος της δόνησης στην R/USM είναι συνήθως περίπου 0,025 έως 0,05 mm, και η διαμήκης κίνηση μπρος και πίσω της κορυφής του τρυπανιού βελτιώνει την απόδοση της διάτρησης λόγω:

- Της μείωσης της τριβής μεταξύ του εργαλείου και του υλικού στο σημείο της κοπής.
- Της εξάλειψης της ζημιάς στο κομμάτι του πυρήνα με το να επιτρέπεται μεγαλύτερη ροή ψυκτικού υγρού στο πυρήνα του εργαλείου.
- Λόγω της αποτροπής του αδαμάντινου εργαλείου από τη προσκόλληση με το αφαιρούμενο υλικό.
- Λόγω της αύξησης της ταχύτητας διάτρησης με λιγότερη πίεση στο εργαλείο και με μείωση της φθοράς του εργαλείου.



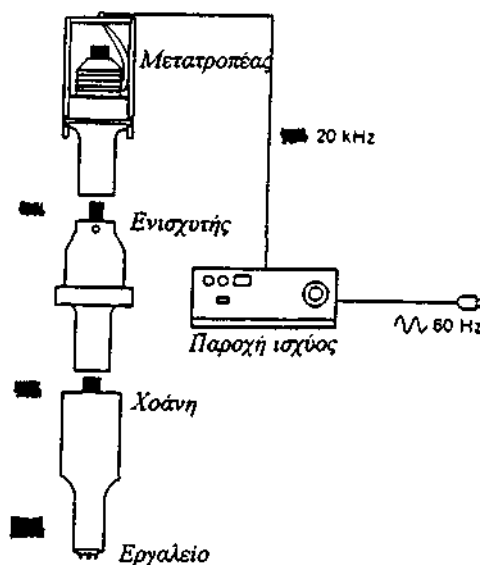
β. Εξοπλισμός της USM

Η R/USM και η IG/USM χρησιμοποιούν παρόμοια εξαρτήματα όπως φαίνεται και στο

σχήμα 5.β. Τα κυριότερα εξαρτήματα είναι:

- Μια παροχή ισχύος που εξασφαλίζει μια ηλεκτρική έξοδο σε υπερηχητική συχνότητα των 20 KHZ. Μια παροχή ισχύος της τάξεως των 450 Watt χρησιμοποιείται για τη περιστροφική κατεργασία. Η κρουστική κατεργασία χρησιμοποιεί μια παροχή ισχύος από 150 έως 2500 Watt επειδή τα εργαλεία με μεγάλη επιφάνεια απαιτούν υψηλότερη ισχύ από αυτά με μικρή επιφάνεια.

- Ένας μετατροπέας μεταβάλλει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανικές δονήσεις.
- Μια χοάνη για να εστιάζει τη παλμική ενέργεια στο εργαλείο. Οι χοάνες που χρησιμοποιούνται έχουν διάμετρο μέχρι 130 mm, και η κάθε χοάνη πρέπει να είναι κατεργασμένη με πολύ μεγάλη ακρίβεια για να είναι αξονικά συντονισμένη στα 20 KHZ έτσι ώστε να αναπτύσσει το μέγιστο πλάτος δόνησης στο εργαλείο.



Σχήμα 5.β. Σχηματική διάταξη των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στη USM.

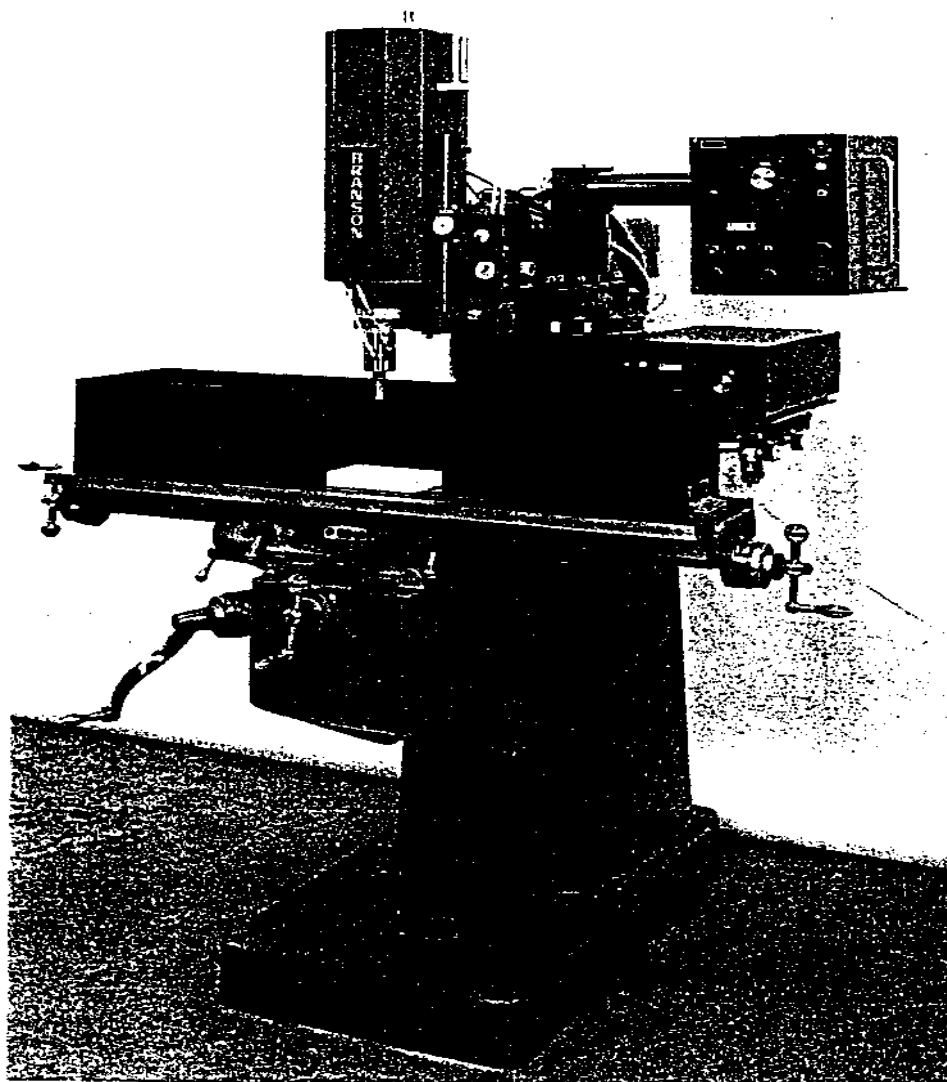
- Ένας ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεταξύ του μετατροπέα και της χοάνης για να αυξήσει το πλάτος της υπερηχητικής δόνησης.

γ. Περιστροφική κατεργασία με υπερήχους (R/USM).

Μια περιστροφική μηχανή με υπερήχους είναι παρόμοια με μια συνηθισμένη κατακόρυφη φρέζα (βλέπε σχήμα 5.γ). Η παροχή ισχύος στη περιστρεφόμενη κεφαλή κατεργασίας και στο κοπτικό εργαλείο αποτελούν το βασικό σύστημα, και αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια συμβατική φρέζα ή μπορεί να προσαρμοστεί σε

ειδικές εργαλειομηχανές. Εάν είναι απαραίτητο, η περιστρεφόμενη άτρακτος υπερήχων μπορεί να αυτοματοποιηθεί και να ελέγχεται εξ'αποστάσεως.

Η άτρακτος υπερήχων αποτελείται από ένα κινητήρα ο οποίος δίδει κίνηση στην άτρακτο με ένα υπερηχητικό μετατροπέα (βλέπε σχήμα 5.δ). Το μηχάνημα έχει επίσης ένα πνευματικό σύστημα για ανύψωση και κατέβασμα της άτρακτου και ένα ελεγκτήρα ταχύτητας συνδεδεμένο με όργανα μέτρησης. Η "καρδιά" της άτρακτου αποτελείται από 2 κύριους πιεζοηλεκτρικούς δίσκους, οι οποίοι μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια από τη παροχή ισχύος σε μηχανική ταλάντωση. Αυτοί οι δίσκοι διαστέλλονται και συστέλλονται σύμφωνα με τη πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης και συνδέονται με μια χοάνη από κράμα τιτανίου. Στη πράξη, το συγκρότημα είναι συντονισμένο σε μια συχνότητα ελαφρά μεγαλύτερη από 20 KHZ για να καθιστά δυνατή τη προσαρμογή του αδαμάντινου εργαλείου στην άκρη του.

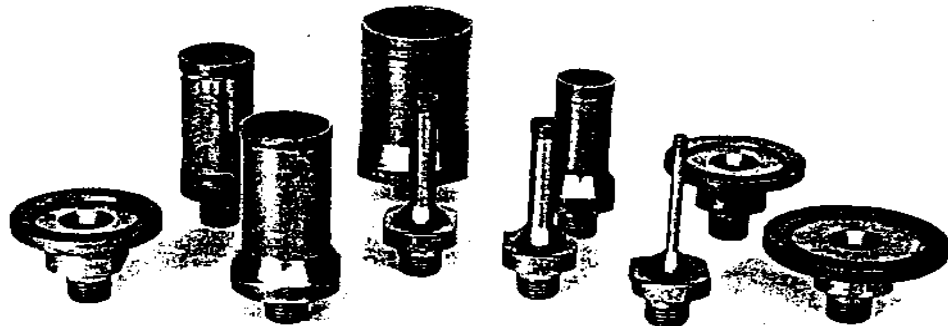


Σχήμα 5.γ. Μηχανή περιστροφικής κατεργασίας με υπερήχους.

Στα μηχανήματα αυτά χρησιμοποιούνται τυποποιημένα τρυπάνια με αδαμάντινο πυρήνα και στελέχη, αλλά για την επίτευξη της επιθυμητής ακουστικής σύζευξης, συγκολλούνται με ένα κοχλιοτομημένο εξάρτημα το οποίο βιδώνει σταθερά στο άκρο της ατράκτου. Οι ιδιοσυσκευές μηχανικής σύζευξης τα chucks και τα collets τα οποία είναι ακουστικά ανεπαρκής περιορίζουν τη μεταφορά ενέργειας. Επειδή το συγκρότημα χοάνης και εργαλείου πρέπει να είναι συντονισμένο στα 20 KHZ ώστε να λειτουργεί αποτελεσματικά, το μέγεθος των χρησιμοποιούμενων εργαλείων είναι περιορισμένο. Η μέγιστη διάμετρος του εργαλείου είναι περίπου 38 έως 50 mm, ανάλογα με το πάχος του τοιχώματος και το μήκος. Τροχοί λείανσης και κοπής σπειρωμάτων με διάμετρο μέχρι 32 mm έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία. Συνήθεις πυρήνες τρυπανιών και τροχοί φαίνονται στο σχήμα 5.ε.



Σχήμα 5.δ. Περιστρεφόμενη άτράκτος υπερήχων.



Σχήμα 5.ε. Αδαμάντινα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην R/USM.

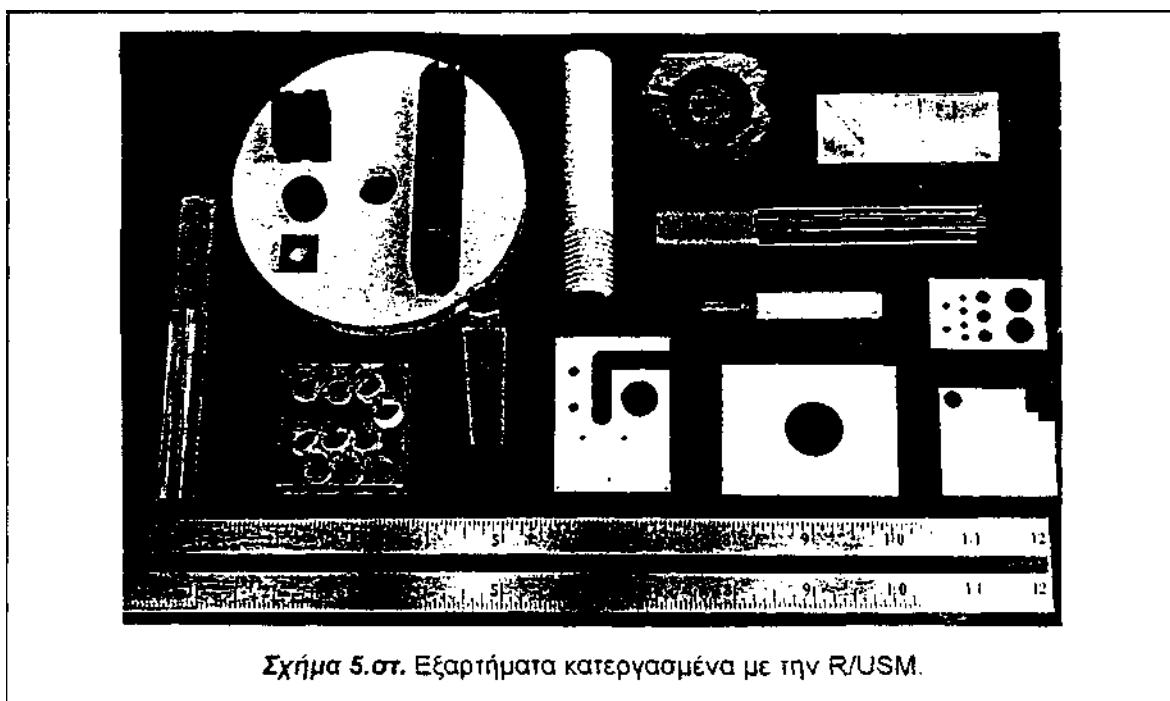
Ένας μανδύας από νερό τοποθετείται στο κάτω μέρος της ατράκτου και άμεσα πάνω από το εργαλείο. Το νερό τροφοδοτείται μέσω του μανδύα ψύξης (με χρήση ανοιχτού ή κλειστού κυκλώματος) στο κέντρο της περιστρεφόμενης ατράκτου, και από εκεί προς τα κάτω διά μέσου της οπής που υπάρχει στο πυρήνα του τρυπανιού. Όταν χρησιμοποιούνται συμπαγή εργαλεία, το νερό οδηγείται απευθείας στην εσωεπιφάνεια τρυπανιού / τεμαχίου.

δ. Εφαρμογές της R/USM

Η R/USM (ROTARY USM) εφαρμόζεται μόνο σε μη μεταλλικά υλικά, όπως είναι η ύαλος, η αλουμίνα, το κεραμικό, ο φερρίτης, ο χαλαζίας, το οξείδιο του ζirkονίου, το ρουμπίνι, το ζαφείρι, το οξείδιο του βηρυλλίου και σε μερικά σύνθετα υλικά. Τα μαλακότερα υλικά στομώνουν το αδαμάντινο εργαλείο στο σημείο στο οποίο σταματά η κοπή.

Τα πλεονεκτήματα της R/USM είναι ότι έχουμε γρηγορότερη αφαίρεση υλικού, χαμηλότερη πίεση του εργαλείου για τα ευπαθή εξαρτήματα, βελτιωμένο τρυπάνισμα μεγάλου βάθους και λιγότερη ζημία στο κάτω μέρος

διαμπερών οπών. Στο σχήμα 5.στ διακρίνονται ορισμένα εξαρτήματα τα οποία έχουν υποστεί διάτρηση, φρεζάρισμα, και κοχλιοτόμηση.



Σχήμα 5.στ. Εξαρτήματα κατεργασμένα με την R/USM.

Το τρυπάνισμα είναι η κύρια εφαρμογή της R/USM επειδή αυτή τρυπάει ταχύτερα από ένα συμβατικό μηχάνημα διάτρησης για μια δεδομένη πίεση του εργαλείου και ταχύτητας περιστροφής. Για παράδειγμα, ένα τρυπάνι με πυρήνα διαμέτρου 13 mm που περιστρέφεται με 3000 rpm με μια σταθερή πίεση των 83 KPa (12 psi), σε μια μονάδα με υπερήχους θα διατρήσει (διαμπερώς) ένα εξάρτημα από οξείδιο του αλουμινίου (99,5%); πάχους 12,7 mm

σε μέσο χρόνο 27 sec Κατά την ίδια κατεργασία διάτρησης και κάτω από τις ίδιες συνθήκες χωρίς υπέρηχους, το τρυπάνι έφτασε σε βάθος των 6 mm σε 80 sec και έπειτα σταμάτησε να κόβει. Όταν οι υπέρηχοι ενεργοποιήθηκαν, το εργαλείο άρχισε πάλι να κόβει και γρήγορα έφτασε το προηγούμενο ρυθμό κοπής με υπερήχους. Η επιταχυνόμενη κοπή κατά το τρυπάνισμα με υπερήχους είναι μεγαλύτερη σε χαμηλές πιέσεις εργαλείου απ'ότι σε υψηλότερες πιέσεις.

Η R/USM επίσης επιτρέπει το τρυπάνισμα σε χαμηλότερες πιέσεις, και αυτό είναι ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα όταν πραγματοποιείται τρυπάνισμα ή κατεργασία ευπαθών υλικών. Η χαμηλή πίεση του εργαλείου καθιστά δυνατή τη διάτρηση οπών χωρίς θρυμματισμό του κάτω μέρους και με

δυνατότητα απόστασης μεταξύ των οπών μόνο μερικά εκατοστά του χιλιοστού. Οπές μπορούν επίσης να διατηρηθούν πλησίον της ακμής ή της γωνίας χωρίς σπάσιμο.

Η χρήση των υπερήχων μειώνει το πρόβλημα του σπασίματος της ακμής του κομματιού κατά τη διάτρηση διαμερών οπών σε εύθραυστα υλικά. Η ελαφρύτερη πίεση στο εργαλείο επιτρέπει τη διατήρηση της κοπτικής δράσης σε ένα μεγαλύτερο βάθος πριν αυτό διαπεράσει το τεμάχιο. Μια καλή, στέρεη σύσφιξη ή υποστήριξη του κατεργαζόμενου κομματιού θα ελαχιστοποιήσει ή θα εξαλείψει το θρυμματισμό στην έξοδο.

Το τρύπημα ευθειών οπών μικρής διαμέτρου και μεγάλου βάθους με τις συμβατικές μεθόδους διάτρησης μπορεί να γίνει δύσκολο όταν μια υπερβολική πίεση προκαλεί στο τρυπάνι περιφερειακή εκτροπή από τη κάθετη διαδρομή του. Ένα υπερηχητικά δονούμενο τρυπάνι μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το βαθμό ακρίβειας μιας τέτοιας κατεργασίας. Για παράδειγμα, δύο οπές διαμέτρου 1 mm μπορούν να διατηρηθούν σε ύαλο βάθους 65 mm και η περιφερειακή τους απόσταση να είναι μόνο 0,5 mm. Ένα άλλο παράδειγμα διάτρησης οπών μεγάλου βάθους με τη τεχνική της περιστροφικής κατεργασίας με υπερήχους, ήταν το τρυπάνισμα οπής με διάμετρο 1 mm διά μέσου οξειδίου του βηρυλλίου πάχους 90 mm. Όταν ολοκληρώθηκε η κατεργασία διάτρησης, ένας πυρήνας (καρότο) διαμέτρου 0,43 mm και μήκους 90 mm εξήχθη από το εσωτερικό της οπής.

Η R/USM επιτρέπει επίσης το μη διακοπτόμενο τρυπάνισμα οπών μικρής διαμέτρου, ενώ το τρυπάνισμα χωρίς υπερήχους σε αρκετές περιπτώσεις απαιτεί τη συχνή απόσυρση του εργαλείου για την απομάκρυνση των αποβλίτων και τη χαλάρωση των αναπτυσσόμενων κοπτικών δυνάμεων. Αυτή η συχνή απόσυρση αυξάνει το χρόνο του τρυπανίσματος.

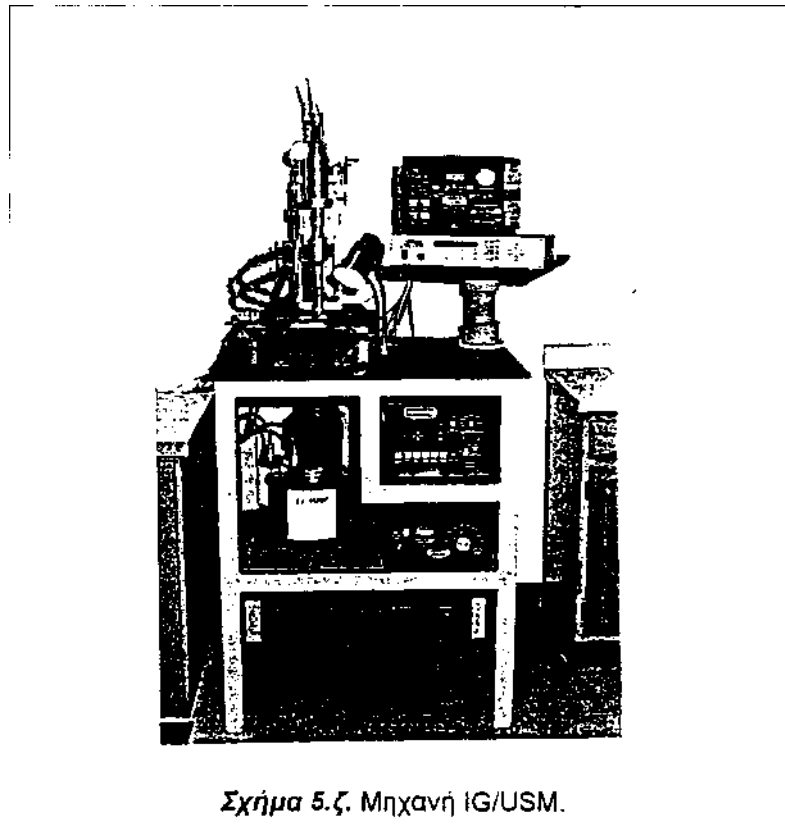
Μια άλλη εφαρμογή συνδέεται με το τρυπάνισμα 4 οπών διαμέτρου 2,4 mm διά μέσου των πλευρών κυβικού χαλαζία με διάσταση 190 mm. Απαιτείτο ακριβής διασταύρωση των οπών σε βάθος 165 mm με ακρίβεια 0,1 mm. Το αποτέλεσμα των δοκιμών ήταν επιτυχές με απόκλιση ευθυγράμμισης μόνο 0,02 mm .

Επίσης είναι δυνατό το **φρεζάριμα** και η **λείανση** επιφανείας υλικών με τη προαναφερόμενη μέθοδο και τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα.

ε. Κρουστική λείανση με υπερήχους (IG/USM)

Τα μηχανήματα κρουστικής λείανσης με υπερήχους διατίθενται σε διάφορα μεγέθη τα οποία ποικίλλουν από βαρέως τύπου για μεγάλα εξαρτήματα, μέχρι ελαφρού τύπου για τη κατεργασία μικρών εξαρτημάτων (βλέπε σχήμα 5.ζ). Η μηχανή επίσης συμπεριλαμβάνει ένα σύστημα αντλίας ανακυκλοφορίας για το αποξεστικό διάλυμα και συστήματα ελέγχου για τη πρόωση του κατακόρυφου άξονα. Πολλά υπερσύγχρονα μηχανήματα ενσωματώνουν μερικά χαρακτηριστικά όπως είναι:

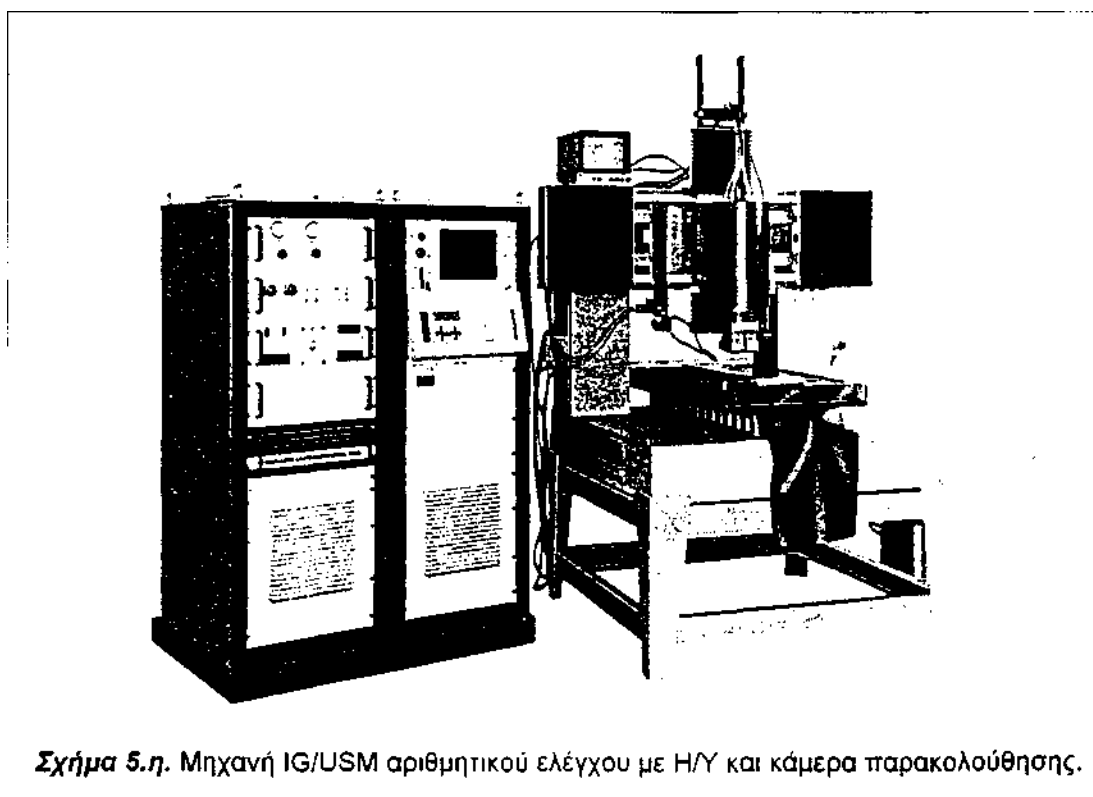
- Έναν προγραμματιζόμενο ελεγκτή για την οριζόντια τράπεζα (αξόνων X -Y).
- Αυτόματη αντιστάθμιση της φθοράς του εργαλείου έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η επαναληπτικότητα του βάθους κοπής.



Σχήμα 5.ζ. Μηχανή IG/USM.

- Πλήρης αριθμητικός έλεγχος με H/Y (CNC) όλων των αξόνων, και παρακολούθηση μέσω κάμερας (βλέπε σχήμα 5.η).
- Πλήρης αυτόματος έλεγχος του κύκλου κατεργασίας.
- Μια οπτική απεικόνιση της συχνότητας των υπερήχων, ώστε να καταγράφεται οποιαδήποτε απόκλιση από τη συχνότητα των 20 KHZ λόγω της υπερβολικής φθοράς του εργαλείου ή θραύσης αυτού.

Το κοπτικό εργαλείο, διαμορφωμένο σύμφωνα με την απαιτούμενη οπή ή κοιλότητα, συνήθως κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα τύπου 304 για μεγαλύτερη διάρκεια. Για μικρής ποσότητας παραγωγή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ορείχαλκος για τη κατασκευή του κοπτικού εργαλείου. Ο ορείχαλκος διαμορφώνεται ευκολότερα από τον ανοξείδωτο χάλυβα, αλλά είναι λιγότερο ανθεκτικός στη φθορά. Τα εργαλεία προσαρμόζονται στη χοάνη με μια από τις 2 μεθόδους. Εάν το εργαλείο είναι μικρό, μπορεί να κατεργαστεί ή να συγκολληθεί σε ένα κοχλιοτομημένο άκρο, το οποίο θα βιδώσει στο άκρο της χοάνης. Τα μεγαλύτερα εργαλεία είναι ασημοκολλημένα απευθείας στο πρόσωπο της χοάνης.

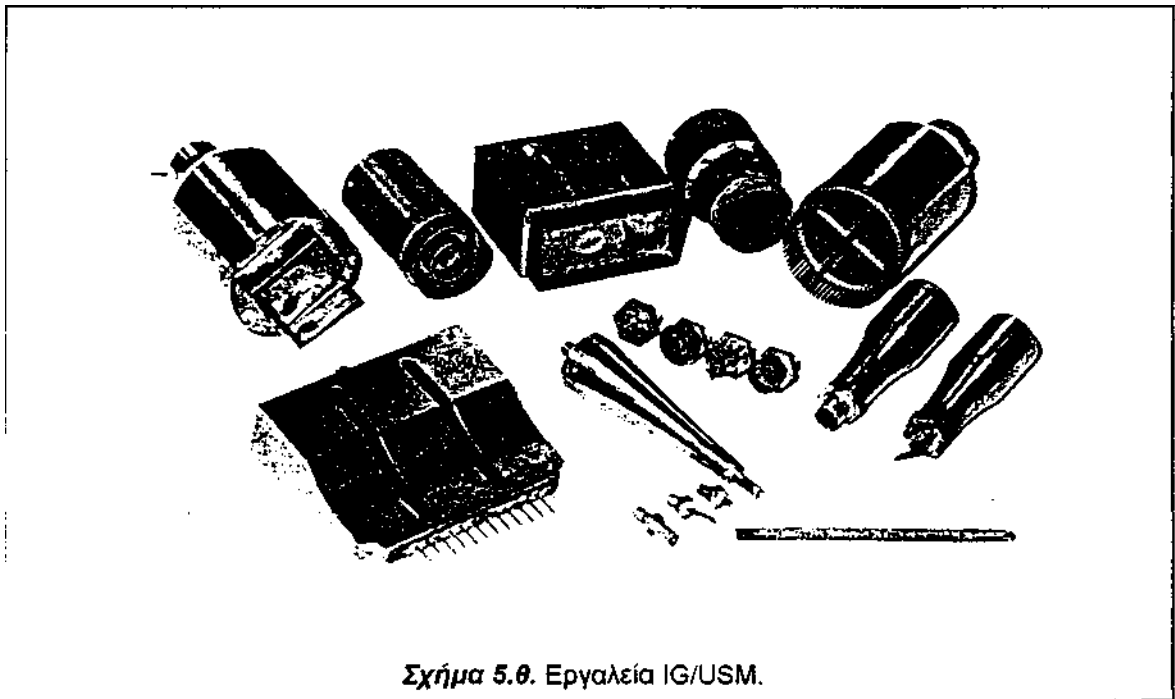


Σχήμα 5.η. Μηχανή IG/USM αριθμητικού ελέγχου με Η/Υ και κάμερα παρακολούθησης.

Τα εργαλεία της IG/USM κοστίζουν λιγότερο σε σχέση με ένα ισοδύναμο αδαμάντινο τρυπάνι και μπορούν να αγοραστούν από τους προμηθευτές αυτών των μηχανημάτων ή μπορούν να κατασκευαστούν από το χρήστη (με τη προϋπόθεση ότι υπάρχει κατανόηση των περιορισμών του βάρους και των μεθόδων σύνδεσης). Στο σχήμα 5.θ στην φαίνεται μια επιλογή κοπτικών εργαλείων.

Οι χοάνες που δέχονται εργαλεία με κοχλιοτομημένη άκρη συνήθως κατασκευάζονται από τιτάνιο. Οι μεγαλύτερες χοάνες κατασκευάζονται

από αλουμίνιο. Και τα δύο, δηλαδή και το αλουμίνιο και το τιτάνιο έχουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό.



Αττοξεστικό διάλυμα. Τρεις τύποι αποξεστικών υλικών χρησιμοποιούνται συνήθως μέσα στο παχύρευστο διάλυμα: Οξειδίο του αλουμινίου, καρβίδιο πυριτίου και καρβίδιο του βορίου. Αυτά είναι διαθέσιμα στα ακόλουθα μεγέθη κόκκων:

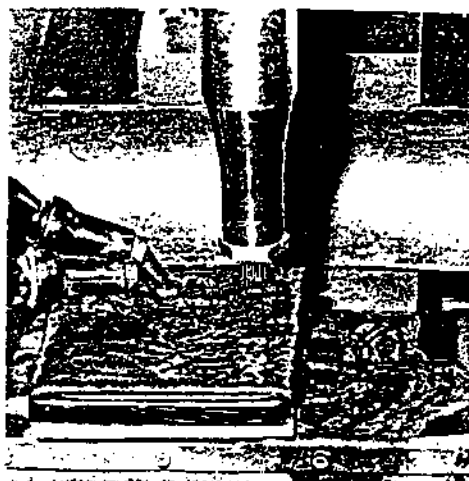
Αριθμός	Μέγεθος κόκκου μm
240	0,05
320	0,04
400	0,03
600	0,014
800	0,009

Το αποξεστικό υλικό και το μέγεθος των κόκκων που χρησιμοποιούνται σχετίζονται με τη συγκεκριμένη εφαρμογή, δηλαδή, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων, τόσο ταχύτερη θα είναι η κοπή, αλλά και τραχύτερη η επιφάνεια που θα προκύψει. Μικρότερα μεγέθη κόκκων κόβουν πιο αργά αλλά παράγουν μια καλύτερη τραχύτητα επιφανείας. Μια τραχύτητα επιφανείας από 0,38 μέχρι 0,25 μm μπορεί να επιτευχθεί από κόκκο αποξεστικού αριθμού 240 και 800, αντίστοιχα, αλλά ορισμένοι παράγοντες όπως η επιφάνεια του εργαλείου, το πλάτος της δόνησης του εργαλείου και το υλικό που κατεργαζόμαστε επηρεάζουν επίσης τη

τραχύτητα επιφανείας. Το αποξεστικό υλικό που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι σκληρότερο από το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού.

Το οξείδιο του αλουμινίου, για παράδειγμα, είναι κατάλληλο για τη κατεργασία υάλου και πιο εύθραυστων υλικών, ενώ σκληρότερα υλικά, όπως είναι το ζαφείρι απαιτούν καρβίδιο του βορίου που είναι το σκληρότερο από τα αποξεστικά υλικά.

Το διάλυμα αποτελείται από 50% αποξεστικά σωματίδια κ.ο. και 50% νερό. Το παχύρευτο διάλυμα εξέρχεται υπό πίεση διά μέσου ενός ακροφυσίου της εσωεπιφάνειας τεμαχίου/εργαλείου (βλέπε σχήμα 5.1) με παροχή περίπου 25 lt/min. Επιπρόσθετα της κοπτικής του δράσης, το παχύρευτο διάλυμα παρέχει ψύξη τόσο στο εργαλείο όσο και στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Το παχύρευτο διάλυμα τελικά γίνεται λιγότερο αποτελεσματικό όταν τα αποξεστικά σωματίδια φθείρονται και θρυμματίζονται. Η αναμενόμενη ωφέλιμη διάρκεια ζωής του κυμαίνεται μεταξύ 150 και 200 ωρών έκθεσης σε υπερήχους.

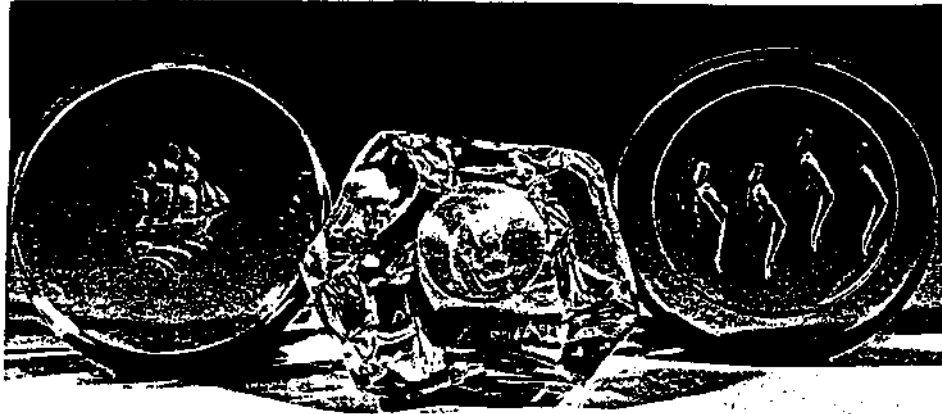


Σχήμα 5.1. Παχύρευστο αποξεστικό διάλυμα το οποίο ρέει μεταξύ του εργαλείου και του εξαρτήματος.

στ. Εφαρμογές της IG/USM

Οι δυνατότητες της IG/USM (in-pact grinding USM) είναι διαφορετικές από εκείνες της R/USM (Rotary USM). Επειδή το κοπτικό εργαλείο δεν εκτελεί καμμία περιστροφική κίνηση, η IO/ΠιδΜ μπορεί να κόψει ακανόνιστα σχήματα (βλέπε σχήμα 5.κ) ή να διατρήσει μικρές οπές.

Αν και οι μεμονωμένες οπές μπορούν να διατρηθούν ταχύτερα με την R/USM, η IG/USM μπορεί να διατρήσει μικρότερες οπές (μέχρι 0,1 mm σε διάμετρο). Η IG/USM έχει επίσης τη δυνατότητα της διάτρησης πολλαπλών μικρών οπών διατεταγμένων σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Ένα εργαλείο για μια τέτοια εφαρμογή φαίνεται στο σχήμα 5.λ.



Σχήμα 5.κ. Διακοσμητικά αντικείμενα κατεργασμένα με την IG/USM.



Σχήμα 5.λ. Εργαλείο για τη διάνοιξη πολλαπλών οπών συνδεδεμένο με τη χοάνη.

ζ. Χαρακτηριστικά της IG/USM

Η κοπή πραγματοποιείται από πολύ μικρά αποξεστικά σωματίδια τα οποία αιωρούνται μέσα σε ένα υγρό μέσο το οποίο ρέει μεταξύ του δονούμενου εργαλείου και του κατεργαζόμενου κομματιού. Ο ρυθμός της

κοπής εξαρτάται από το πλάτος της παλμικής κίνησης του εργαλείου. Το πλάτος αυτό για μια δεδομένη χοάνη καθορίζεται από τον επιλεγμένο ενισχυτή και από ένα ρυθμιζόμενο σύστημα ελέγχου της παροχής ισχύος της συσκευής υπερήχων. Στις περισσότερες εφαρμογές το πλάτος ποικίλλει από **0,025 μέχρι** 0.09 mm. Τα βέλτιστα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν το πλάτος της δόνησης υπερβεί το μέγεθος των κόκκων.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, το εργαλείο δεν έρχεται σε επαφή με το κατεργαζόμενο κομμάτι, αλλά διατηρείται σε ένα διάκενο 0,025 μέχρι 0,075 mm πάνω από την επιφάνεια.

Ο ρυθμός πρόωσης (η προς τα κάτω ταχύτητα του άξονα Z) σχετίζεται με το ρυθμό κοπής και ποικίλλει από 0,0025 έως 0,1 mm/min. Μερικές προσεγγιστικές ταχύτητες εισχώρησης σε συνάρτηση με τα αντίστοιχα υλικά που κατεργαζόμαστε με την IG/USM, αναγράφονται στο πίνακα 5.1 παρακάτω:

Πίνακας 5.1. Ρυθμοί εισχώρησης σε συνάρτηση με τα αντίστοιχα κατεργαζόμενα υλικά.

<i>Υλικό</i>	<i>Ρυθμός εισχώρησης mm/min</i>
Υαλος	3,8
Φερρίτης	3,2
Άνθρακας - Γραφίτης	2,0
Κεραμικό	1,5
Χαλαζίας	1,7
Καρβίδιο του βολφραμίου	0,25
Καρβίδιο του βορίου	0,20

Άλλα υλικά που είναι δυνατόν να κατεργαστούν είναι η αλουμίνα, ο γρανίτης, το ρουμπίνι, ο ζάφειρος, το πυρίτιο, σύνθετα πολυοτρωματικά ινώδη υλικά και μερικά πλαστικά.

Η κοπή ή ρυθμός διείδυσης ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος και το βάθος της κοιλότητας. Οι μικρότερες οπές απαιτούν περισσότερο χρόνο και ο ρυθμός κοπής ελαττώνεται με το βάθος εισχώρησης λόγω της δυσκολίας διατήρησης μιας συνεχούς παροχής νέου παχύρρευστου διαλύματος στο πρόσωπο του εργαλείου.

Η ακρίβεια επίσης μειώνεται με το αυξανόμενο βάθος κοπής. Καθώς το παχύρρευστο διάλυμα ρέει πλευρικά στο εργαλείο προς το πρόσωπο του κοπτικού, μερική κοπή επίσης συμβαίνει στις πλευρές της οπής, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια κωνικότητα με αυξανόμενη διάμετρο

στο σημείο της εισόδου. Μια αναλογία βάθους προς διάμετρο της τάξεως του 2,5 θεωρείται σαν όριο δυνατότητας κατεργασίας. Η κωνικότητα μπορεί να ελαχιστοποιηθεί εφαρμόζοντας μια κατεργασία δύο σταδίων. Μ'αυτή τη τεχνική, ένα εργαλείο ελαφρώς μικρότερου μεγέθους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη προκαταρκτική κοπή, και η τελική κοπή πραγματοποιείται με εργαλείο το οποίο έχει το απαιτούμενο μέγεθος. Επειδή το τελευταίο έχει να αφαιρέσει λιγότερο υλικό, κόβει ταχύτερα και συνεπώς . ελαχιστοποιεί τη κωνικότητα.

ΟΜΑΔΑ Β

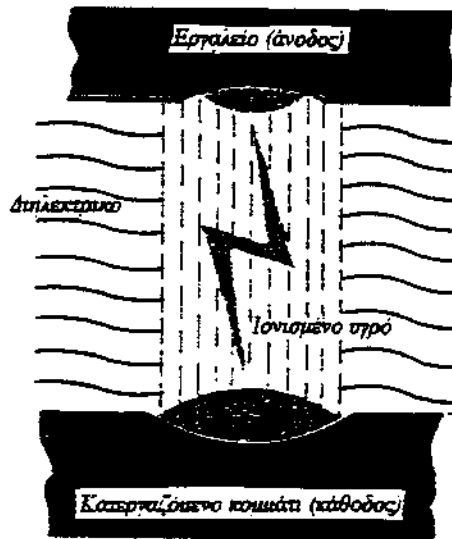
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

6.ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΚΚΕΝΩΣΗ [ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM)]

α. Εισαγωγή

Η μηχανουργική κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση, που είναι γνωστή σαν EDM

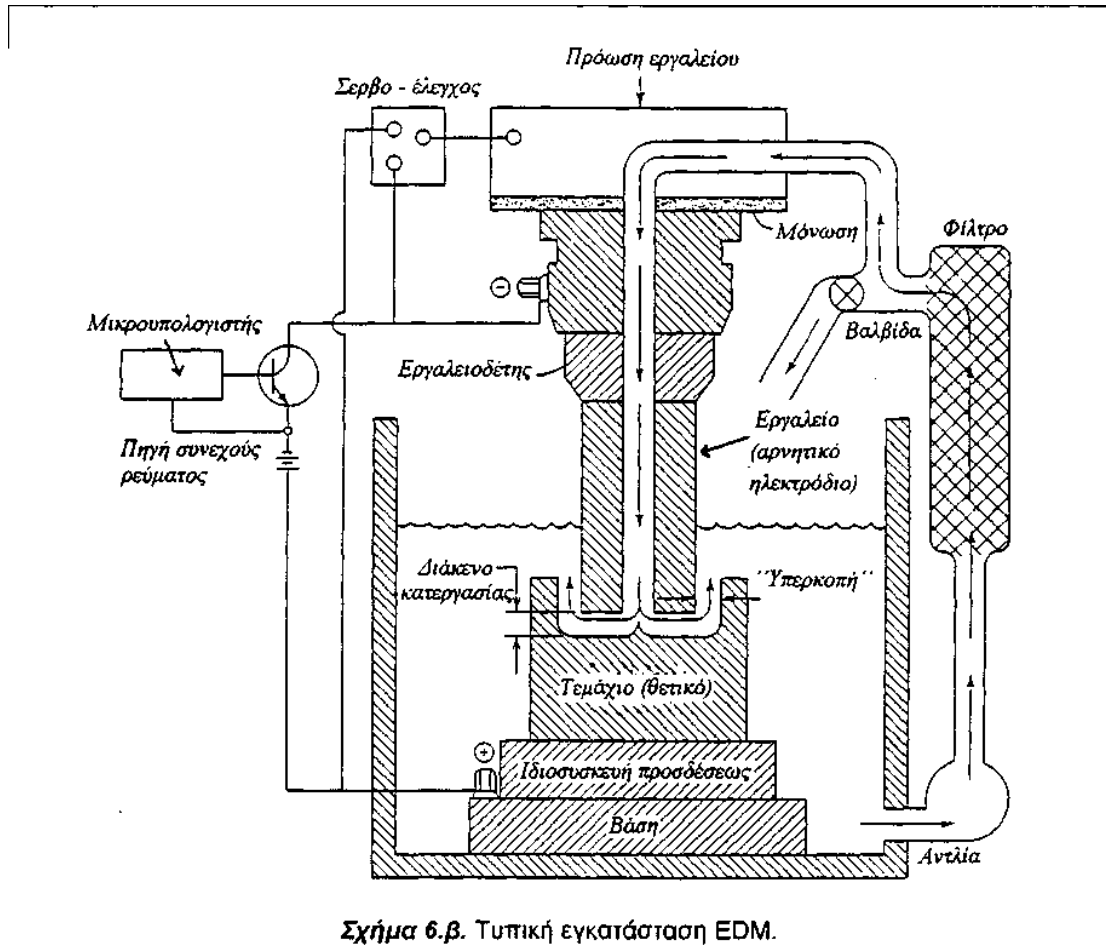
(electric discharge machining), είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση μετάλλου με μια ηλεκτρική εκκένωση μικρής διάρκειας και μεγάλης πυκνότητας ρεύματος μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του εξαρτήματος (βλέπε σχήμα 6.α). Η αρχή αυτή της απομάκρυνσης μετάλλου με ηλεκτρικό σπινθήρα είναι γνωστή από αρκετό χρόνο. Το 1989, ο Friedrich Paschen, Γερμανός Φυσικός, εξήγησε το φαινόμενο και επενόησε ένα τύπο που προέβλεπε τη δυνατότητα δημιουργίας τόξου σε διάφορα υλικά. Η διαδικασία EDM μπορεί να συγκριθεί με μικροσκοπική έκδοση του κεραυνού που χτυπά μια επιφάνεια, με δημιουργία μιας περιοχής υπερβολικής θερμότητας και τήξης και απομάκρυνσης της επιφάνειας εργασίας. Η μέθοδος αυτή είναι ευρύτερα γνωστή στη χώρα μας σαν **ηλεκτροδιάβρωση**, αλλά ορθότερος είναι ο όρος **κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση** και αυτός θα χρησιμοποιείται στο εξής.



Σχήμα 6.α. Ένας ελεγχόμενος σπινθήρας απομακρύνει μέταλλο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας με ηλεκτρική εκκένωση.

β. Αρχές κατεργασίας

Η EDM είναι μια διαδικασία ελεγχόμενης απομάκρυνσης μετάλλου στην οποία χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρικός σπινθήρας για να κόψει (διαβρώνει) το κατεργαζόμενο κομμάτι, το οποίο παίρνει σχήμα αντίθετο με το σχήμα του κοπτικού εργαλείου ή ηλεκτροδίου (βλέπε σχήμα 6.β). Το ηλεκτρόδιο και το εξάρτημα είναι και τα δύο βυθισμένα σε ένα **διηλεκτρικό υγρό**, που είναι ένα ελαφρύ λιπαντικό λάδι. Αυτό το διηλεκτρικό υγρό πρέπει να είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού. Ένας **σερβομηχανισμός** διατηρεί ένα διάκενο περίπου 0,01 μέχρι 0,02 mm μεταξύ του ηλεκτροδίου και του εξαρτήματος, μη επιτρέποντας σ'αυτά να έλθουν σε επαφή μεταξύ τους. Στο ηλεκτρόδιο παρέχεται συνεχές ρεύμα μικρής τάσης και μεγάλης έντασης με συχνότητα περίπου 20.000 hertz (HZ). Αυτοί οι παλμοί ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται σπινθήρες που "πηδούν" το διάκενο μεταξύ του ηλεκτροδίου και του εξαρτήματος μέσα από το διηλεκτρικό υγρό. Στη στενή περιοχή όπου πέφτει ο σπινθήρας δημιουργείται έντονη θερμότητα, το μέταλλο λιώνει και από το εξάρτημα αποβάλλεται ένα μικρό σωματίδιο τηγμένου μετάλλου. Το διηλεκτρικό υγρό, που κυκλοφορεί διαρκώς, απομακρύνει τα διαβρωμένα σωματίδια μετάλλου και επίσης βοηθά στην απαγωγή της θερμότητας που προκαλείται από το σπινθήρα.



γ. Τύποι κυκλωμάτων EDM

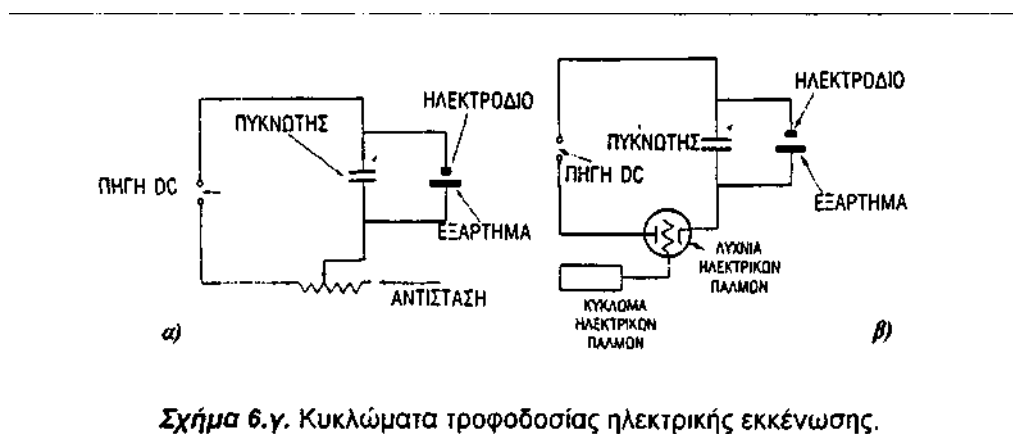
Διάφοροι τύποι παροχής ισχύος για ηλεκτρική εκκένωση έχουν χρησιμοποιηθεί στην EDM. Αν και υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ αυτών, κάθε τύπος χρησιμοποιείται για τον ίδιο βασικό σκοπό, που είναι η ακριβής και η οικονομική αφαίρεση μετάλλου από τη θερμική διάβρωση του ηλεκτρικού σπινθήρα.

Οι δύο πιο συνήθεις τύποι από τις παροχές ισχύος είναι:

1. Αντιστάτης - πυκνωτής.
2. Παλμικού τύπου παροχή ισχύος.

Ο τύπος αντιστάτη - πυκνωτή [βλέπε σχήμα 6.γ(α)] χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα στα πρώτα μηχανήματα EDM. Αυτός ο τύπος παροχής ισχύος χρησιμοποιείται ακόμη σε πολλά από τα μηχανήματα μη Αμερικανικής προέλευσης.

Όπως εικονίζεται στο σχήμα 6.γ (α), ο πυκνωτής φορτίζεται διά μέσου μιας αντίστασης από μια πηγή συνεχούς ρεύματος που είναι γενικά σταθερό. Μόλις η τάση διά μέσου του πυκνωτή φθάσει στη τιμή διάσπασης του διακένου του διηλεκτρικού υγρού, συμβαίνει ένας σπινθήρας. Η σχετικά υψηλή τάση (125 volt), η υψηλή χωρητικότητα πάνω από 100 μF για κοπές εκχόνδρισης, η χαμηλή συχνότητα σπινθήρα και η υψηλή ένταση του ρεύματος είναι τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού του τύπου παροχής ισχύος.



Στα κυκλώματα αντιστάτη - πυκνωτή, η αύξηση των ρυθμών αφαίρεσης μετάλλου εξαρτάται περισσότερο από τη μεγαλύτερη ένταση του ρεύματος και χωρητικότητας παρά από την αύξηση του αριθμού των εκκενώσεων ανά δευτερόλεπτο. Ο συνδυασμός χαμηλής συχνότητας, υψηλής τάσης, υψηλής χωρητικότητας και υψηλής έντασης ρεύματος έχει σαν αποτέλεσμα τα εξής:

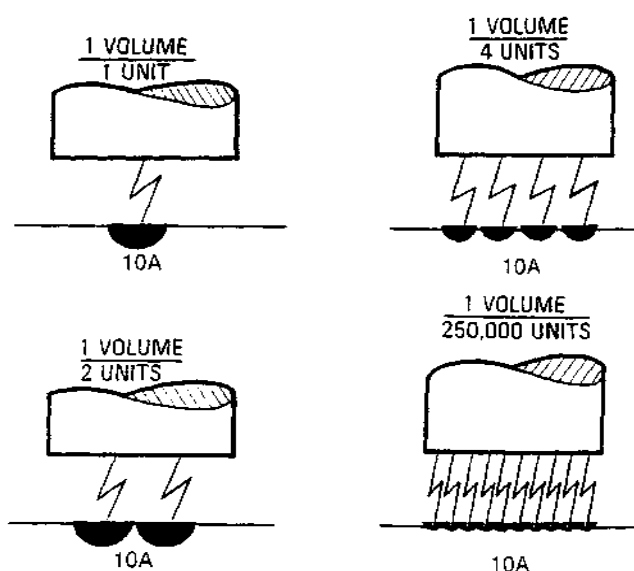
1. Μια σχετικά υψηλή τραχύτητα επιφανείας.
2. Μεγάλη "υπερκοπή" γύρω από το ηλεκτρόδιο (εργαλείο).
3. Αφαιρούνται μεγαλύτερα μεταλλικά σωματίδια.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου παροχής ισχύος είναι:

- Το κύκλωμα είναι απλό και αξιόπιστο.
- Εργάζεται καλά στις χαμηλές εντάσεις ρεύματος, ειδικά με ρεύματα της τάξεως των μιλλιαμπερ που απαιτούνται για οπές με διάμετρο κάτω από 0,12 mm.

Η παροχή ισχύος παλμικού τύπου [βλέπε σχήμα 6.γ (β)] χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά από τους Αμερικανούς κατασκευαστές. Είναι όμοια με τη παροχή ισχύος τύπου αντιστάτη - πυκνωτή, ωστόσο λυχνίες κενού ή συσκευές στερεάς κατάστασης χρησιμοποιούνται για να επιτύχουν ένα εξαιρετικά γρήγορο αποτέλεσμα διακόπτη. Το πλάτος του παλμού και τα διαστήματα μπορούν επίσης να ελεγχθούν επακριβώς με χειρισμό κατάλληλων διακοπών. Η εναλλαγή (που προκύπτει από το χειρισμό των διακοπών) είναι εξαιρετικά γρήγορη και οι εκκενώσεις ανά δευτερόλεπτο είναι δεκαπλάσιες

ή και περισσότερες απ'ότι στη παροχή ισχύος αντιστάτη - πυκνωτή στις χαμηλές συχνότητες. Τα αποτελέσματα των περισσότερων εκκενώσεων ανά δευτερόλεπτο εικονογραφούνται στο σχήμα 6.δ. Με περισσότερες εκκενώσεις ανά δευτερόλεπτο, και χρησιμοποιώντας το ίδιο ρεύμα (10Α), δημιουργούνται μικρότεροι κρατήρες, παράγοντας έτσι μια λεπτότερη τραχύτητα επιφανείας ενώ ακόμη διατηρείται ο ίδιος ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου.



Σχήμα 6.δ. Επιδράσεις στη δημιουργία κρατήρων και στη τραχύτητα επιφανείας χρησιμοποιώντας ποικίλλες συχνότητες εκκένωσης σπινθήρα.

Τα κυκλώματα παροχής ισχύος παλμικού τύπου συνήθως λειτουργούν σε χαμηλές τάσεις (70 μέχρι 80 V), υψηλή συχνότητα (συνήθως 20.000 μέχρι 30.000 Hz αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις 260.000 Hz), χαμηλή

χωρητικότητα (50 μP ή μικρότερη) και σε χαμηλά επίπεδα ενέργειας σπινθήρα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του κυκλώματος παλμικού τύπου είναι:

- Είναι εξαιρετικά ευπροσάρμοστο και μπορεί να ελέγχεται με ακρίβεια σε κοπές ξεχονδρίσματος και αποπεράτωσης.
- Καλύτερη τραχύτητα επιφανείας προκύπτει όσο λιγότερο μέταλλο αφαιρείται ανά σπινθήρα επειδή υπάρχουν πολλοί σπινθήρες στη μονάδα του χρόνου.
- Υπάρχει μικρότερη "υπερκοπή" γύρω από το ηλεκτρόδιο (εργαλείο).

δ. Το ηλεκτρόδιο (εργαλείο)

Το ηλεκτρόδιο στην EDM είναι διαμορφωμένο στο σχήμα της επιθυμητής κοιλότητας. Όπως στις συμβατικές κατεργασίες, μερικά υλικά έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά κοπής και φθοράς από άλλα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή του ηλεκτροδίου πρέπει, επομένως, να έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και της θερμότητας.
2. Να κατεργάζονται εύκολα στο επιθυμητό σχήμα σε λογικό κόστος.
3. Να προκαλούν ικανοποιητική αφαίρεση υλικού από το κατεργαζόμενο κομμάτι.
4. Να αντέχουν στη παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της θερμικής διάβρωσης.
5. Να παρουσιάζουν χαμηλούς ρυθμούς φθοράς ηλεκτροδίου.

Γενικά, κάθε υλικό που είναι αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη κατασκευή εργαλείων EDM. Η πράξη όμως έχει αποδείξει ότι, για να έχουμε τα

καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, επιβάλλεται να χρησιμοποιείται πάντοτε υλικό εργαλείου

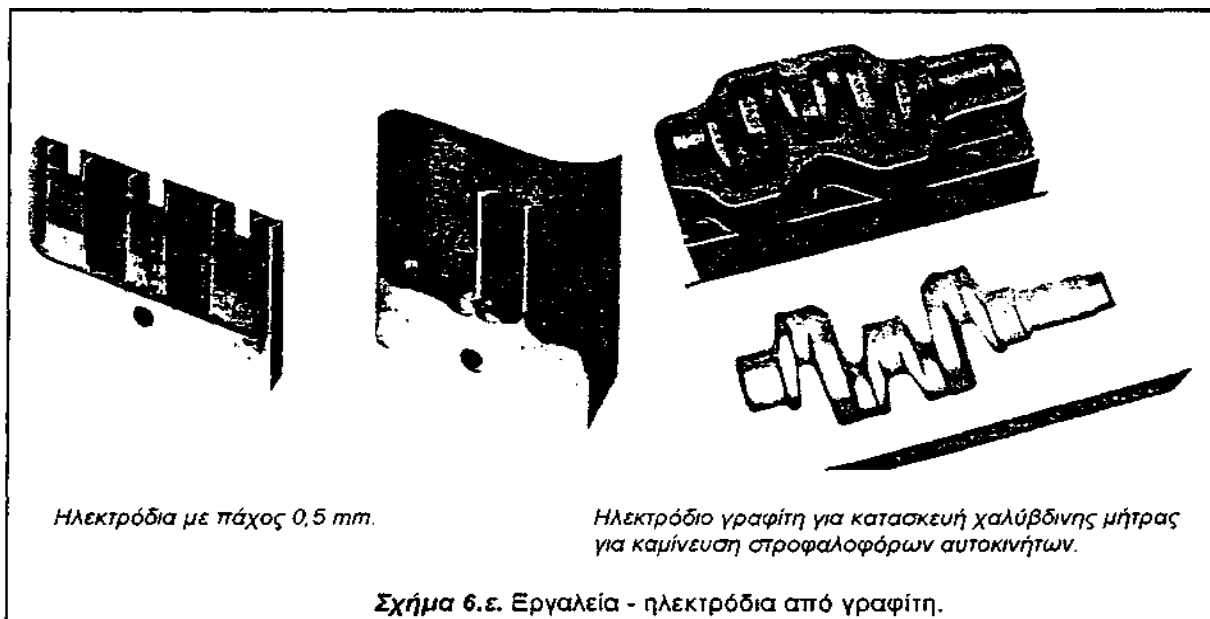
κατάλληλο για το υλικό του κομματιού που θα κατεργασθεί και για το είδος της κατεργασίας που πρόκειται να γίνει.

Τα πιο κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή των ηλεκτροδίων είναι ο γραφίτης, ο χαλκός, ο ορείχαλκος, ο χάλυβας, ενώ προϊόντα της κονιομεταλλουργίας, όπως ο χαλκός - γραφίτης, χαλκός - βολφράμιο, βολφράμιο - άργυρος, βρίσκουν εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις. Για εργασίες διάτρησης μικρών οπών χρησιμοποιούνται

επίσης σωληνίσκοι από σκληρομέταλλο με διάμετρο από 0,38 μέχρι 6,35 mm ή σύρματα βολφραμίου με διάμετρο από 0,125 μέχρι 1,5 mm.

Ο γραφίτης προσφέρει έναντι του χαλκού, για τις περισσότερες εφαρμογές, σημαντικά πλεονεκτήματα: διαθέτει μεγάλη αντοχή στο ηλεκτρικό τόξο και στη θερμική καταπόνηση, έχει επαρκή μηχανικά χαρακτηριστικά, κατεργάζεται εύκολα σε δύσκολες μορφές (βλέπε σχήμα 6.ε) και κρατά το σχήμα και τις διαστάσεις του κατά τη διάρκεια της κατεργασίας (συντελεστής διαστολής του γραφίτη το 1/4 περίπου του χαλκού. Επειδή το ειδικό βάρος του γραφίτη είναι το 1/5 του χαλκού, ενδείκνυται για μεγάλα εργαλεία - ηλεκτρόδια. Παράλληλα εξασφαλίζει μεγαλύτερη απόδοση στην αφαίρεση υλικού, μικρότερη φθορά εργαλείου και συγκρίσιμη με το χαλκό ποιότητα επιφανείας. Χρησιμοποιείται συνεπώς τόσο για τη κατασκευή εργαλείων ξεχονδρίσματος όσο και εργαλείων αποπερατώσεως. Στα κυκλώματα παλμικού τύπου σαν υλικό ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται ο κίτρινος μπρούντζος επειδή έχει καλή κατεργαστικότητα, ηλεκτρική αγωγιμότητα και σχετικά μικρό κόστος. Ο χαλκός παράγει καλύτερα αποτελέσματα στα κυκλώματα αντίστασης - πυκνωτή όπου εφαρμόζονται υψηλότερες τάσεις.

Τα εργαλεία ηλεκτρόδια κατασκευάζονται κυρίως με κοπή, σε συνήθεις εργαλειομηχανές, ενώ για κατεργασία κομματιών πολύ μεγάλων διαστάσεων γίνεται ψυχρή διαμόρφωση ελασμάτων χαλκού. Στη τελευταία περίπτωση το σχήμα που δίνεται στο χάλκινο έλασμα ενισχύεται εσωτερικά με μεταλλική κατασκευή, για να αντέχει στις μηχανικές και υδροδυναμικές (από την εξαναγκασμένη ροή του διηλεκτρικού στο διάκενο) καταπονήσεις.



Χρησιμοποιούνται επίσης, για τη κατασκευή εργαλείων EDM, οι εποξειδικές ρητίνες με επιμετάλλωση και σπανιότερα εργαλεία χάλκινα προερχόμενα από χύτευση χαλκού.

Έχει μεγάλη πρακτική σημασία να επιδιώκεται να ανοίγονται πολλές διαμπερείς οπές μικρής διαμέτρου (Φ 0,35 - 0,5 mm) στο σώμα του εργαλείου - ηλεκτροδίου για την αποτελεσματικότερη κυκλοφορία του διηλεκτρικού στις θέσεις κατεργασίας, ιδίως στα πολύπλοκα εργαλεία. Για το σκοπό αυτό περισσότερο από το χαλκό προσφέρεται ο γραφίτης, που άνετα επιτρέπει τη διάνοιξη οπών διαμέτρου 0,4 mm και μήκους μέχρι 150mm.

ε. Ο σερβομηχανισμός

Είναι σημαντικό να μην υπάρχει φυσική επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου (εργαλείου) και του κατεργαζόμενου κομματιού, διαφορετικά θα δημιουργηθούν τόξα τα οποία θα προκαλέσουν ζημιά και στο ηλεκτρόδιο και στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Οι μηχανές EDM είναι εφοδιασμένες με ένα σερβομηχανισμό ελέγχου ο οποίος διατηρεί αυτόματα ένα σταθερό διάκενο περίπου 0,01 μέχρι 0,02 mm μεταξύ του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου κομματιού. Ο σερβομηχανισμός επίσης προωθεί το ηλεκτρόδιο (εργαλείο) μέσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι καθώς η λειτουργία προχωρά, και ασθάνεται και διορθώνει οποιαδήποτε συνθήκη βραχυκυκλώματος με γρήγορη απόσυρση και επιστροφή του εργαλείου. Ο ακριβής έλεγχος του διακένου είναι απαραίτητος για μια επιτυχημένη

λειτουργία κατεργασίας. Εάν το διάκενο είναι πολύ μεγάλο, δεν επέρχεται ιονισμός του διηλεκτρικού υγρού και δεν μπορεί να λάβει χώρα η κατεργασία. Εάν το διάκενο είναι πολύ μικρό, υπάρχει περίπτωση το εργαλείο και το κατεργαζόμενο κομμάτι να συγκολληθούν μεταξύ τους.

Ο επακριβής έλεγχος του διακένου επιτυγχάνεται από ένα κύκλωμα στη παροχή ισχύος, το οποίο συγκρίνει τη μέση τάση διακένου με τη προεπιλεγμένη τάση αναφοράς. Η διαφορά μεταξύ των δύο τάσεων είναι το σήμα εισόδου, το οποίο δίνει εντολή στο σερβομηχανισμό σε ποια απόσταση και με ποια ταχύτητα να προωθήσει το ηλεκτρόδιο και τότε να το αποσύρει από το κατεργαζόμενο κομμάτι.

Όταν τα ρινίσματα στο διάκενο του σπινθήρα μειώσουν τη τάση κάτω από μια κρίσιμη τιμή, ο σερβομηχανισμός δίνει εντολή στο εργαλείο να αποτραβηχτεί έως ότου να απομακρυνθούν τα ρινίσματα από το διηλεκτρικό υγρό.

Ο σερβομηχανισμός δεν πρέπει να είναι υπερβολικά ευαίσθητος στις "μικρής διάρκειας" τάσεις που προκαλούνται από τα ρινίσματα κατά τη διάρκεια της απομάκρυνσης τους, διαφορετικά, το εργαλείο θα αποσύρεται σταθερά, με σοβαρές επιδράσεις στους ρυθμούς κατεργασίας.

Οι σερβομηχανισμοί ελέγχου της πρόωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της κατακόρυφης κίνησης του ηλεκτροδίου (εργαλείου) για τη δημιουργία κοιλοτήτων με εμπύθιση. Μπορούν να εφαρμοστούν ακόμη στη τράπεζα της μηχανής όταν η κατεργασία απαιτεί οριζόντια κίνηση του ηλεκτροδίου (εργαλείου).

στ. Διαδικασία εκκένωσης

Όταν εφαρμόζεται επαρκής ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ του ηλεκτροδίου (κάθοδος) και του τεμαχίου (άνοδος), το διηλεκτρικό υγρό μετατρέπεται σε αέριο, επιτρέποντας τη ροή μιας βαριάς εκκένωσης ρεύματος διά μέσου της ιονισμένης οδού που προσκρούει στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Η ενέργεια αυτής της εκκένωσης εξατμίζει και αποσυνθέτει το διηλεκτρικό υγρό περιβάλλοντας την ηλεκτρικά αγωγίμη στήλη. Καθώς η αγωγιμότητα συνεχίζει, η διάμετρος της στήλης εκκένωσης διαστέλλεται και το ρεύμα αυξάνει. Η θερμότητα μεταξύ του ηλεκτροδίου και της επιφάνειας εργασίας προκαλεί μια

μικρή λιμούλα από τηγμένο μέταλλο που σχηματίζεται πάνω στην επιφάνεια εργασίας. Όταν το ρεύμα διακόπτεται, συνήθως μόνο για μερικά εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου (μsec), τα σωματίδια τηγμένου μετάλλου στερεοποιούνται και απομακρύνονται από το διηλεκτρικό υγρό.

Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις συμβαίνουν σε ρυθμό 20.000 μέχρι 30.000 Hz μεταξύ του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου κομματιού. Κάθε εκκένωση αφαιρεί μια μικρή ποσότητα μετάλλου. Εφ'όσον η τάση κατά τη διάρκεια της εκκένωσης είναι σταθερή, η ποσότητα του αφαιρούμενου μετάλλου θα είναι ανάλογη της ποσότητας του ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ του ηλεκτροδίου και του εξαρτήματος. Για γρήγορη αφαίρεση μετάλλου, πρέπει να διοχετευτούν υψηλής έντασης ρεύματα όσο το δυνατόν πιο γρήγορα για να τήξουν τη μέγιστη ποσότητα μετάλλου. Αυτό, ωστόσο, προκαλεί μεγάλους κρατήρες στο κατεργαζόμενο κομμάτι, με αποτέλεσμα τη δημιουργία τραχύτερης ποιότητας επιφανείας. Για την επίτευξη μικρότερων κρατήρων και επομένως λεπτότερης τραχύτητας επιφανείας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρότερα φορτία ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού. Εάν το ρεύμα διατηρείται σταθερό αλλά η συχνότητα αυξάνεται, αυτό επίσης έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρότερων κρατήρων και καλύτερη τραχύτητα επιφανείας. Η τραχύτητα επιφανείας είναι ανάλογη του αριθμού των ηλεκτρικών εκκενώσεων (κύκλων) ανά δευτερόλεπτο (βλέπε σχήμα 6.δ).

ζ. Το διηλεκτρικό υγρό

Το διηλεκτρικό υγρό που χρησιμοποιείται στην EDM παρέχει τους παρακάτω λειτουργικούς σκοπούς:

1. Ενεργεί σαν μονωτής μεταξύ του εργαλείου και του κατεργαζόμενου κομματιού έως ότου η τάση να φθάσει στην απαιτούμενη τιμή.
2. Εξατμίζεται (ιονίζεται) για να ξεκινήσει ο σπινθήρας μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου.
3. Περιορίζει την οδό του σπινθήρα σε ένα στενό κανάλι.
4. Απομακρύνει τα μεταλλικά σωματίδια για την αποφυγή βραχυκυκλώματος.
5. Ενεργεί σαν ψυκτικό και για το ηλεκτρόδιο και για το κατεργαζόμενο κομμάτι.

ΤΥΠΟΙ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ

Πολλοί τύποι ρευστών έχουν χρησιμοποιηθεί σαν διηλεκτρικά, με αποτέλεσμα διαφορετικούς ρυθμούς αφαίρεσης μετάλλου. Πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να ιονίζονται (εξατμίζονται) και να απιονίζονται τάχιστα και να έχουν επίσης χαμηλό ιξώδες που θα επιτρέψει σ'αυτά να αντλούνται διά μέσου του στενού διακένου κατεργασίας. Τα πιο συνήθη υγρά που χρησιμοποιούνται σαν διηλεκτρικά στην EDM είναι τα προϊόντα πετρελαίου, όπως

ελαφριά λάδια λίπανσης, λάδια μετασχηματιστών, λάδια με κύρια βάση το πυρίτιο και η κηροζίνη. Όλα αυτά αποδίδουν αρκετά καλά, ειδικά με ηλεκτρόδια από γραφίτη, και το κόστος τους είναι λογικό. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν διηλεκτρικά όπως είναι ο τετραχλωριούχος άνθρακας και ορισμένα συμπιεσμένα αέρια.

Η επιλογή του διηλεκτρικού είναι σημαντική στην EDM επειδή αυτό επιδρά στο ρυθμό αφαίρεσης μετάλλου και στη φθορά του ηλεκτροδίου. Η βιομηχανία ερευνά συνεχώς για νέα και καλύτερα διηλεκτρικά υγρά γι'αυτή τη μέθοδο. Είναι πολύ πιθανόν ότι πολλά καινούργια διηλεκτρικά υγρά θα αναπτυχθούν για να βελτιώσουν τη μέθοδο EDM.

ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΤΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ

Το διηλεκτρικό υγρό πρέπει να κυκλοφορεί υπό σταθερή πίεση για να απομακρύνει ικανοποιητικά τα μεταλλικά σωματίδια και για να βοηθά τη διαδικασία κατεργασίας. Η πίεση που εφαρμόζεται αρχίζει γενικά από 34 ΚΡα (5 psi) και αυξάνεται μέχρι να επιτευχθεί η βέλτιστη κοπή. Πολύ μεγάλη ποσότητα διηλεκτρικού υγρού θα αφαιρέσει τα ρινίσματα πριν- - αυτά μπορέσουν να βοηθήσουν στη δράση κοπής και επομένως θα προκαλέσει πιο αργούς ρυθμούς κατεργασίας. Πολύ μικρή πίεση δεν θα αφαιρέσει τα ρινίσματα αρκετά γρήγορα και επομένως θα προκληθεί βραχυκύκλωμα.

Για τη κυκλοφορία του διηλεκτρικού υγρού χρησιμοποιούνται γενικά 4 μέθοδοι. Όλες οι μέθοδοι πρέπει να χρησιμοποιούν λεπτά φίλτρα στο σύστημα τους για να κατακρατούν τα μεταλλικά σωματίδια έτσι ώστε να μην ανακυκλοφορούν. Οι τέσσερις μέθοδοι κυκλοφορίας του διηλεκτρικού διακρίνονται αμέσως παρακάτω:

ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΩ ΔΙΑ ΜΕΣΟΥ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ

Μια οπή (ή οπές) έχει διατηρηθεί μέσα στο ηλεκτρόδιο, και το διηλεκτρικό υγρό εξαναγκάζεται να διέλθει διά μέσου του ηλεκτροδίου και μεταξύ αυτού και του κατεργαζόμενου κομματιού [βλέπε σχήμα 6.στ (α)]. Μ'αυτό το τρόπο απομακρύνονται γρήγορα τα μεταλλικά σωματίδια από τη περιοχή κατεργασίας. Στις κοιλότητες, ένας μικρός · προεξέχων πυρήνας, που αντιστοιχεί στην οπή του ηλεκτροδίου, παραμένει και πρέπει να απομακρυνθεί με λείανση μετά την ολοκλήρωση της κατεργασίας.

ΠΡΟΣ ΤΑ ΠΑΝΩ ΔΙΑ ΜΕΣΟΥ ΤΟΥ ΚΑΤΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ

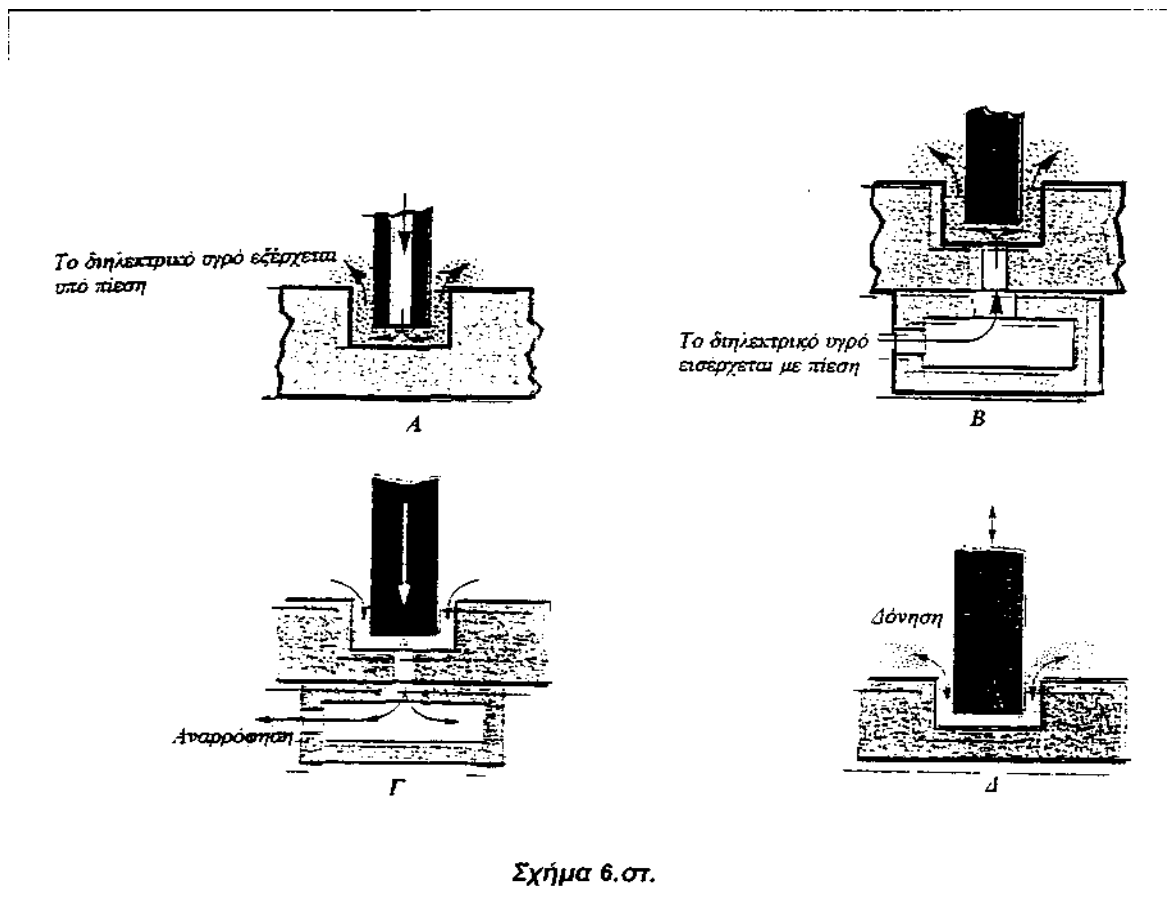
Μια άλλη συνήθης μέθοδος είναι να εξαναγκαστεί το ρευστό να κυκλοφορήσει προς τα πάνω διά μέσου του κατεργαζόμενου κομματιού [βλέπε σχήμα 6.στ (β)]. Αυτός ο τύπος κυκλοφορίας του διηλεκτρικού περιορίζεται σε εφαρμογές κοπής διαμπερών οπών και σε κοιλότητες που έχουν οπές για πυρήνα ή για πείρους εξαγωγής.

ΡΟΗ ΣΕ ΚΕΝΟ

Με τη μέθοδο αυτή δημιουργείται μια αρνητική πίεση (κενό) στο διάκενο, η οποία προκαλεί τη ροή του διηλεκτρικού διά μέσου του συγκεκριμένου διακένου που υπάρχει μεταξύ του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου κομματιού [βλέπε σχήμα 6.στ (γ)]. Η ροή μπορεί να κατευθυνθεί είτε προς τα πάνω διά μέσου μιας οπής μέσα από το ηλεκτρόδιο είτε προς τα κάτω διά μέσου μιας οπής μέσα από το κατεργαζόμενο κομμάτι. Η ροή σε κενό έχει αρκετά **πλεονεκτήματα** σε σχέση με τις άλλες μεθόδους:

- βελτιώνει την απόδοση της κατεργασίας.
- μειώνει το καπνό και τις αναθυμιάσεις.
- βοηθά στη μείωση ή εξάλειψη της κωνικότητας μέσα στο

κατεργαζόμενο κομμάτι.



ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ

Μια δράση κατάθλιψης και αναρρόφησης χρησιμοποιείται έτσι ώστε το διηλεκτρικό να προκαλέσει τη διασκόρπιση των ρινισμάτων από το διάκενο του σπινθήρα [βλέπε σχήμα 6.στ (δ)]. Η μέθοδος της ταλάντωσης είναι πολύτιμη ειδικά για πολύ μικρές οπές, για οπές με μεγάλο βάθος, ή για τυφλές κοιλότητες όπου δεν θα ήταν πρακτική η χρήση άλλων μεθόδων.

η. Ρυθμοί αφαίρεσης μετάλλου

Οι ρυθμοί αφαίρεσης μετάλλου στην EDM είναι κάπως χαμηλότεροι σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας. Ο ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

1. Την ένταση του ρεύματος σε κάθε εκκένωση.

2. Τη συχνότητα της εκκένωσης.
3. Το υλικό του ηλεκτροδίου.
4. Το υλικό του κατεργαζομένου κομματιού.
5. Από τις συνθήκες ανακυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού.

Ένας συνήθης ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου είναι περίπου 16 cm^3 υλικού κατεργαζομένου τεμαχίου ανά ώρα για κάθε 20 A ρεύματος κατεργασίας. Ωστόσο, ρυθμοί αφαίρεσης μετάλλου μέχρι $245 \text{ cm}^3/\text{h}$ είναι δυνατόν να επιτευχθούν για κοπές εκχόνδρισης και με ειδικές παροχές ισχύος.

θ. Φθορά του ηλεκτροδίου (εργαλείου)

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της εκκένωσης, το ηλεκτρόδιο (εργαλείο) καθώς επίσης και το κατεργαζόμενο κομμάτι υφίστανται φθορά ή θερμική διάβρωση. Σαν αποτέλεσμα, είναι δύσκολο να επιτύχουμε σφικτές ανοχές καθώς το εργαλείο χάνει βαθμιαία το σχήμα του κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Μερικές φορές είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν μέχρι 5 ηλεκτρόδια για να παραχθεί μια κοιλότητα με το επιθυμητό σχήμα και ανοχή. Για εφαρμογές διαμπερών οπών, χρησιμοποιούνται βαθμωτά ηλεκτρόδια για τη πραγματοποίηση κοπών εκχόνδρισης και κοπών αποπεράτωσης σε ένα πάσο.

Ευτυχώς, ο ρυθμός με τον οποίο το εργαλείο φθείρεται είναι σημαντικά μικρότερος απ'αυτόν του κατεργαζομένου κομματιού. Μια μέση αναλογία φθοράς του κατεργαζομένου κομματιού σε σχέση με το ηλεκτρόδιο είναι 3:1 για μεταλλικά εργαλεία, όπως είναι ο χαλκός, ο ορείχαλκος, τα κράματα ψευδαργύρου, κτλ. Με τα ηλεκτρόδια από γραφίτη, αυτή η αναλογία φθοράς μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά σε 10:1.

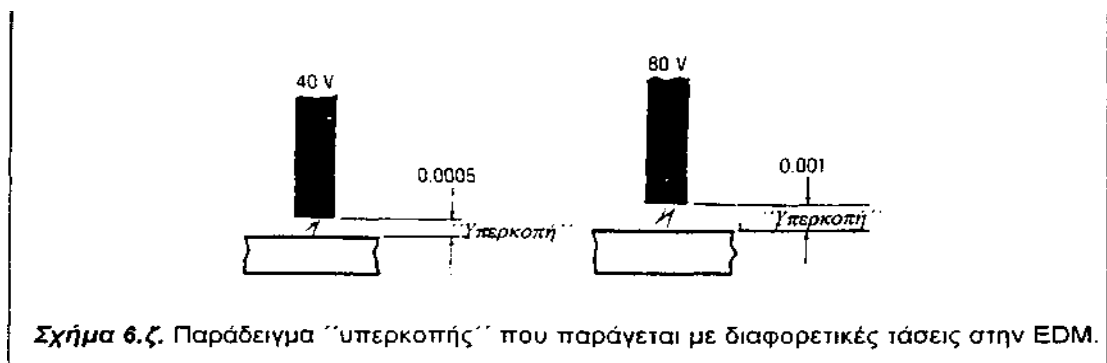
Εκτεταμένη έρευνα και ανάπτυξη πρέπει να γίνει ακόμη προκειμένου να μειωθεί η αναλογία φθοράς του ηλεκτροδίου. Η κατεργασία με αντίστροφη πολικότητα, μια σχετικά νέα εξέλιξη, υπόσχεται να ξεπεράσει αυτό το σημαντικό εμπόδιο της μειώνοντας τη φθορά του ηλεκτροδίου. Με αυτή τη μέθοδο, το τηγμένο μέταλλο από το κατεργαζόμενο κομμάτι εναποτίθεται στο ηλεκτρόδιο από γραφίτη περίπου τόσο γρήγορα όσο φθείρεται το ηλεκτρόδιο. Συνεπώς η ελάχιστη φθορά του ηλεκτροδίου αντικαθίστανται συνεχώς με την εναπόθεση υλικού από το κατεργαζόμενο

εξάρτημα. Η κατεργασία με αντίστροφη πολικότητα λειτουργεί καλύτερα σε χαμηλές συχνότητες εκκένωσης του σπινθήρα και σε υψηλή ένταση ρεύματος. Αυτό βελτιώνει το ρυθμό αφαίρεσης του μετάλλου και μειώνει σημαντικά τη φθορά του ηλεκτροδίου.

/. "Υπερκοπή"

"Υπερκοπή" είναι το μέγεθος εκείνο κατά το οποίο η κοιλότητα στο κατεργαζόμενο κομμάτι κόβεται (παράγεται) μεγαλύτερη απ'ότι μέγεθος του χρησιμοποιούμενου ηλεκτροδίου στη συγκεκριμένη κατεργασία. Η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας εργασίας και της επιφάνειας του ηλεκτροδίου (υπερκοπή) είναι ίση με το μήκος των σπινθήρων των εκκενώσεων, το οποίο είναι σταθερό σε όλες τις περιοχές του ηλεκτροδίου.

Το μέγεθος της "υπερκοπής" στην EDM κυμαίνεται από 0,005 μέχρι 0,1 mm και εξαρτάται από τη τάση διακένου. Όπως εικονίζεται στο σχήμα 6.ζ, η απόσταση της "υπερκοπής" αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τάση στο διάκενο. Επομένως, το μέγεθος της "υπερκοπής" μπορεί να ελεγχθεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Το μέγεθος της "υπερκοπής" γενικά ποικίλλει έτσι ώστε να αρμόζει με το ρυθμό αφαίρεσης μετάλλου και την απαιτούμενη τραχύτητα επιφανείας, η οποία με τη σειρά της καθορίζει το μέγεθος του αφαιρούμενου αποβλήτου.



Σχήμα 6.ζ. Παράδειγμα "υπερκοπής" που παράγεται με διαφορετικές τάσεις στην EDM.

Οι περισσότεροι κατασκευαστές μηχανημάτων EDM παρέχουν διαγράμματα "υπερκοπής" για να δείξουν το μέγεθος του ελεύθερου περιθωρίου που προκύπτει για διαφορετικές εντάσεις ρεύματος. Τα διαγράμματα παρέχουν τη δυνατότητα επακριβούς προσδιορισμού του

απαιτούμενου μεγέθους του ηλεκτροδίου προκειμένου να κατεργαστούμε μια κοιλότητα με ανοχή 0,002 mm.

Το μέγεθος των αφαιρούμενων ρινισμάτων είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη ρύθμιση του μεγέθους της "υπερκοπής" επειδή:

1. Τα ρινίσματα στο διάστημα μεταξύ του ηλεκτροδίου και του εξαρτήματος δρουν σαν αγωγοί για τις ηλεκτρικές εκκενώσεις.
2. Τα μεγάλα ρινίσματα που παράγονται με υψηλότερες εντάσεις ρεύματος απαιτούν μεγαλύτερο διάκενο έτσι ώστε να είναι δυνατό να απομακρυνθούν αποτελεσματικά.

Επομένως, το μέγεθος της "υπερκοπής" εξαρτάται από τη τάση διακένου και το μέγεθος των ρινισμάτων, το οποίο ποικίλλει ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη ένταση του ρεύματος.

κ. Τραχύτητα επιφανείας

Τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει σημαντικές πρόοδοι όσον αφορά τη ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας (βλέπε σχήμα 6.η). Με χαμηλούς ρυθμούς αφαίρεσης μετάλλου, η τραχύτητα επιφανείας που είναι δυνατόν να επιτευχθεί κυμαίνεται από 0,05 μέχρι 0,10 μπα. Με υψηλούς ρυθμούς αφαίρεσης μετάλλου (όπως 245 cm³/h), η τραχύτητα επιφανείας που προκύπτει είναι 24 μm.



α) - -



β)

Σχήμα 6.η. Επιφάνεια κατεργασμένη με την EDM, α) Μεγεθυμένη X 100, β) Μεγεθυμένη X 1000.

Η απαιτούμενη τραχύτητα καθορίζει τον αριθμό των Αμπέρ καθώς και τη χωρητικότητα, τη συχνότητα και τη τάση που θα εφαρμοστεί. Για γρήγορη αφαίρεση μετάλλου (κοπές εκχόνδρισης), απαιτούνται υψηλή ένταση ρεύματος, χαμηλή συχνότητα, υψηλή χωρητικότητα και ελάχιστη τάση διακένου. Για αργή αφαίρεση μετάλλου (κοπή αποπεράτωσης) και καλή

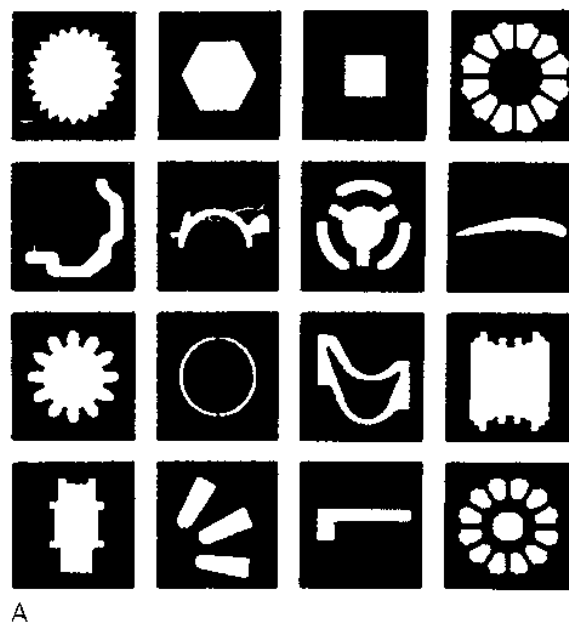
ποιότητα επιφάνειας, απαιτείται χαμηλή ένταση ρεύματος, υψηλή συχνότητα, χαμηλή χωρητικότητα και η υψηλότερη τάση διακένου.

λ. Πλεονεκτήματα της EDM

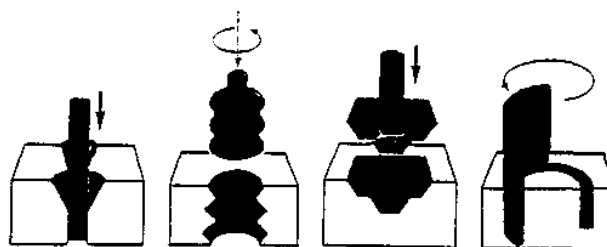
Η EDM έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, που περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1. Μπορεί να κοπεί οποιοδήποτε υλικό που είναι ηλεκτρικά αγωγίμο, ανεξάρτητα από τη σκληρότητα του. Η EDM είναι εξαιρετικά χρήσιμη στη κατεργασία καρβιδίων και νέων κραμάτων της αεροδιαστημικής υψηλής δυθραυστότητας τα οποία είναι ιδιαίτερα δύσκολο να κοπούν με συμβατικά μέσα.
2. Η μέθοδος αυτή παράγει εξαρτήματα απηλαγμένα από γρέζια στις ακμές τους (κόγχες).
3. Σπασμένοι σπειροτόμοι ή τρυπάνια μπορούν εύκολα να αφαιρεθούν από τα κατεργαζόμενα κομμάτια.
4. Λεπτά και εύθραυστα εξαρτήματα μπορούν να κατεργαστούν χωρίς καμμία παραμόρφωση.
5. Είναι δυνατή η κατεργασία εξαρτημάτων σε κατάσταση σκλήρυνσης, με συνέπεια να ξεπεραστεί το πρόβλημα της παραμόρφωσης που αλλιώς δημιουργείται από τις διαδοχικές κατεργασίες της αποτατικής ανόπτισης, συμβατικής αφαίρεσης υλικού και επανασκλήρυνσης (βαφής).
6. Δεν δημιουργεί τάσεις στο κατεργαζόμενο υλικό αφού το ηλεκτρόδιο (εργαλείο) δεν έρχεται ποτέ σε επαφή με το εξάρτημα.
7. Εξαλείφεται η ανάγκη για περαιτέρω κατεργασίες αποπεράτωσης.
8. Η μέθοδος αυτοματοποιείται στο ότι ο σερβομηχανισμός προωθεί το ηλεκτρόδιο μέσα στο τεμάχιο καθώς το μέταλλο αφαιρείται.
9. Υπάρχει δυνατότητα χρησιμοποίησης εμβόλου (ζουμπά) σαν ηλεκτρόδιο με σκοπό να αναπαράγει το σχήμα του στο συνεργαζόμενο κατεργαζόμενο κομμάτι (μήτρα αποτμήσεως), ολοκληρωμένα με το απαιτούμενο περιθώριο ελευθερίας.
10. Μπορούν να παραχθούν καλύτερες μήτρες και καλούπια με χαμηλότερο κόστος. 11. Ένα τεχνίτης μπορεί να χειριστεί ταυτόχρονα διάφορες μηχανές EDM. 12. Πολύπλοκα σχήματα που είναι αδύνατον να

παραχθούν με συμβατικά μέσα, μπορούν να κοπούν από συμπαγή πρώτη ύλη με σχετική ευκολία (βλέπε σχήμα 6.θ).



A



B

Σχήμα 6.θ. α) Παραδείγματα παραγόμενων εξαρτημάτων με την EDM, β) Απαιτούμενη κίνηση εργαλείου για τη παραγωγή κοιλιοτήτων διαφόρων σχημάτων.

μ. Περιορισμοί της EDM

Η EDM έχει βρεί πολλές εφαρμογές στην αγορά εργαλειομηχανών. Ωστόσο, έχει και μερικούς περιορισμούς:

1. Οι ρυθμοί αφαίρεσης μετάλλου είναι χαμηλοί.
2. Το υλικό που πρόκειται να κατεργαστεί πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγώγιμο.
3. Οι παραγόμενες κοιλότητες είναι ελαφρώς κωνικές, αλλά στις περισσότερες εφαρμογές η κωνικότητα είναι ελεγχόμενη της τάξεως των 0,002 mm για κάθε 6 mm.
4. Η γρήγορη φθορά του ηλεκτροδίου μπορεί να ανεβάσει το κόστος σε μερικές μηχανές EDM.
5. Ηλεκτρόδια με διάμετρο μικρότερη από 0,07 mm είναι μη εφαρμόσιμα.
6. Η επιφάνεια κατεργασίας υφίστανται ζημιά σε βάθος 0,005 mm, αλλά

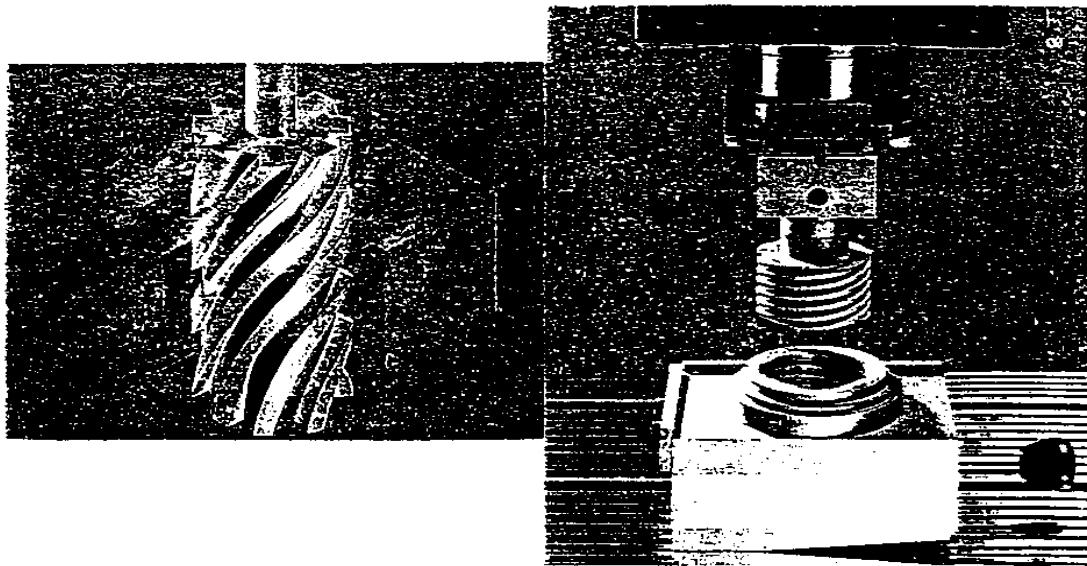
αφαιρείται εύκολα.

7. Προκύπτει ένα λεπτό σκληρυνμένο περίβλημα. Αυτό, ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί σαν πλεονέκτημα.

v. Εφαρμογές της EDM

Παρόλο που η εφαρμογή της EDM περιορίζεται στη κατεργασία εξαρτημάτων που είναι ηλεκτρικά αγωγίμα, η μέθοδος έχει τη δυνατότητα κοπής αυτών των υλικών ανεξάρτητα από τη σκληρότητα ή τη δυσθραυστότητα τους. Κακοί αγωγοί όπως είναι η ύαλος, τα κεραμικά, ή τα πλαστικά, δεν μπορούν να κατεργαστούν με αυτή τη μέθοδο. Η κατεργασία όμως του σκληρυνμένου χάλυβα με την EDM εξαλείφει την ανάγκη για ακόλουθη θερμική κατεργασία με πιθανή παραμόρφωση. Πολύπλοκα σχήματα μπορούν να κοπούν σε υλικό σκληρυνμένου χάλυβα ή καρβιδίων χωρίς να απαιτείται υψηλότερη δαπάνη για τμηματική κατασκευή και συναρμολόγηση.

Η EDM χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη κατασκευή καλουπιών, εργαλείων και μητρών, αλλά εφαρμόζεται επίσης όλο και περισσότερο στη κατασκευή πρωτοτύπων και στη παραγωγή κομματιών, ειδικά στην αεροδιαστημική και στις βιομηχανίες ηλεκτρονικών, στις οποίες οι απαιτήσεις παραγωγής είναι σχετικά χαμηλές. Η παραγωγή μητρών αποτυπώσεως είναι μια από τις κύριες εφαρμογές αυτής της μεθόδου λόγω του χαμηλού κόστους παραγωγής για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Μήτρες εξέλασης, σφυρηλάτησης και χύτευσης καθώς και καλούπια για πλαστικά, μπορούν επίσης να παραχθούν με τη μέθοδο αυτή (βλέπε σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1. Παραδείγματα κατεργασιών με ηλεκτροδιάβρωση.

Η μέθοδος EDM είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για εξαρτήματα που είναι κατασκευασμένα από υλικά που είναι δύσκολο να κατεργαστούν ή/και περιέχουν μικρές ή ακανόνιστου σχήματος οπές, μεγάλο αριθμό οπών, πολύπλοκες κοιλότητες, ή πολύπλοκα περιγράμματα. Εξαρτήματα μικρού μεγέθους και εξαρτήματα που είναι κατασκευασμένα από υλικό πολύ λεπτό ή εύθραυστο, τόσο ώστε να είναι σχεδόν ανέφικτη η κατεργασία με τις συμβατικές μεθόδους κοπής (λόγω των υψηλών δυνάμεων που αναπτύσσονται), μπορούν επίσης να κατεργαστούν με την EDM.

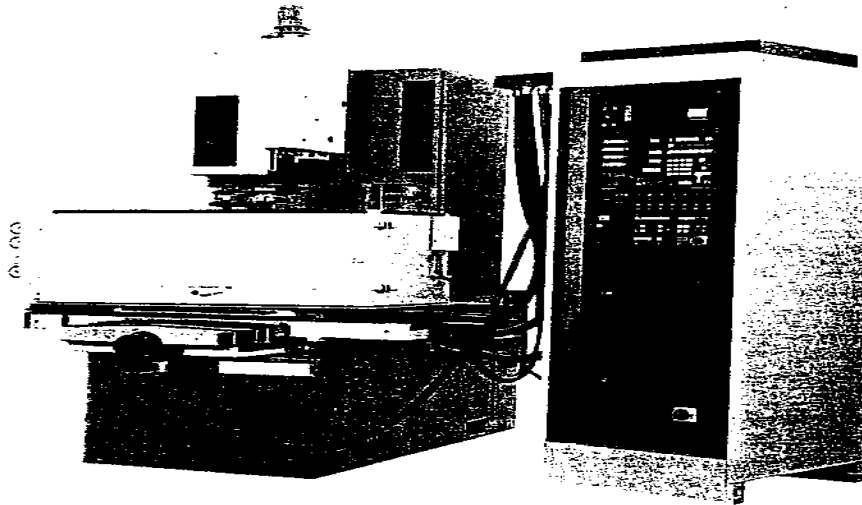
Στρογγυλές ή ακανόνιστου σχήματος οπές πολύ μικρές σε διάμετρο (0,05 mm) μπορούν να παραχθούν με αναλογία μήκους προς διάμετρο περίπου 20:1. Ακόμη μπορούν να κοπούν με αρκετά μεγάλη ευκολία στενές σχισμές από 0,05 μέχρι 0,30 mm.

Το κύριο χαρακτηριστικό της EDM είναι ότι η επιφάνεια που κόβεται είναι απηλαγμένη από γρέζια στις ακμές. Πολλά από τα χαρακτηριστικά της EDM, όπως είναι τα πολλαπλά ηλεκτρόδια και η αυτοματοποιημένη κατεργασία ψηφιακού ελέγχου, συμβάλλουν στην ευρύτητα της εφαρμοσιμότητας της μεθόδου. Το πεδίο εφαρμογών της EDM εκτείνεται από τη κατασκευή εργαλείων, καλουπιών και κοιλοτήτων μέχρι και σε γραμμές αυτοματοποιημένης παραγωγής εφαρμογές.

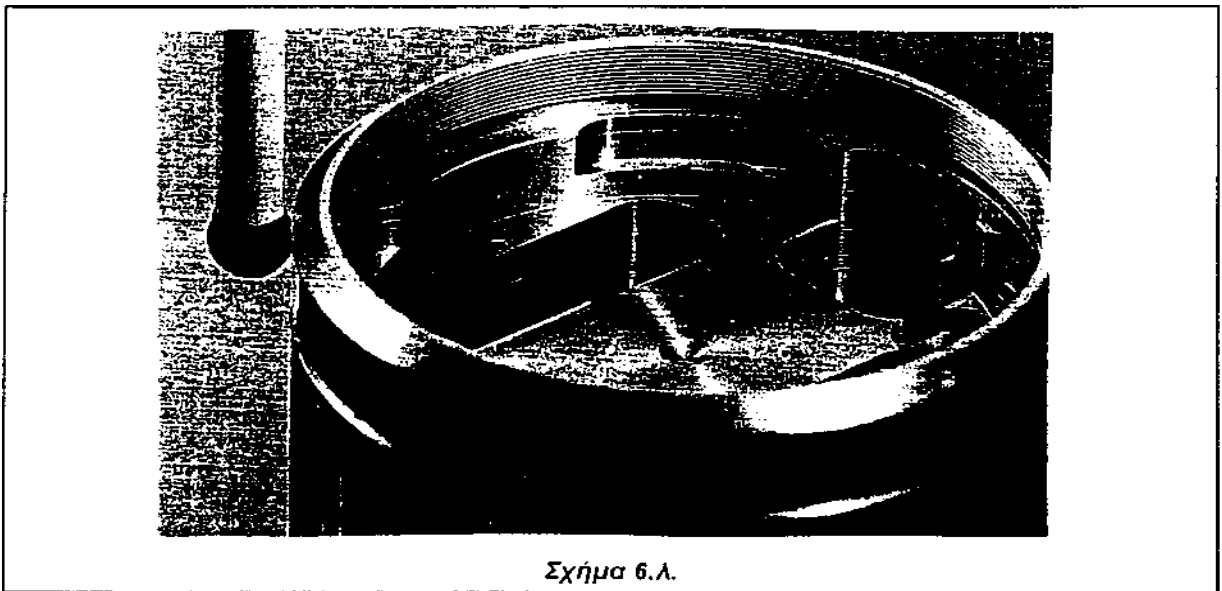
ξ. Κατακόρυφη EDM με CNC

Τα μηχανήματα αριθμητικού ελέγχου με H/Y (CNC) παρέχουν μια επιπρόσθετη δυνατότητα στη σερβοελεγχόμενη κίνηση και στη θερμική διάβρωση (βλέπε σχήμα 6.κ). Σχεδόν όλα τα μηχανήματα έχουν 3 ελεγχόμενους άξονες, αλλά υπάρχουν και μηχανές που έχουν μέχρι διαθέσιμους 6 άξονες. Αυτά έχουν τη δυνατότητα να παράγουν περιγράμματα με ηλεκτρόδια που έχουν σφαιρική άκρη με όμοιο τρόπο με εκείνο της ΟΝΟ φρέζας. Ωστόσο, πιο συνήθης είναι η χρήση μορφοποιημένων ηλεκτροδίων με τον ίδιο τρόπο όπως στις συνήθεις μηχανές EDM. Οι μηχανές EDM με CNC παρέχουν τα ακόλουθα **πλεονεκτήματα**:

1. Τα ηλεκτρόδια μπορούν να τοποθετηθούν σχετικά με κάποια σημεία αναφοράς, οπές αναφοράς, ή και επίπεδα αναφοράς.
2. Αντιστάθμιση της φθοράς του ηλεκτροδίου με τη χρησιμοποίηση επιφανειών αναφοράς.
3. Είναι δυνατή η κατασκευή πολλαπλών κοιλοτήτων με τις ίδιες παραμέτρους σπινθήρα.
4. Είναι δυνατή η χρήση μεταβλητών αντισταθμίσεων ανάλογα με το είδος της κοπής. Μεγάλες αντισταθμίσεις για κοπές εκχόνδρισης και μικρές για αποπεράτωσης.
5. Γρήγορη επανάκτηση των παραμέτρων ρύθμισης του σπινθήρα για ένα δεδομένο συνδυασμό ηλεκτροδίου (εργαλείου) - κατεργαζόμενου κομματιού. Η επιλογή μπορεί να βασίζεται στο ρυθμό αφαίρεσης υλικού ή στη τραχύτητα επιφανείας.
6. Είναι δυνατή η χρήση συστημάτων πολλαπλών συντεταγμένων για εξαρτήματα σε διαφορετικές θέσεις και προσανατολισμούς.
7. Ποιοτικός έλεγχος κατά τη διάρκεια της παραγωγής με τη χρησιμοποίηση στηλίσκου (probe) (βλέπε σχήμα 6.λ).



Σχήμα 6.κ. Εργαλειομηχανή κατεργασίας με ηλεκτρική εκκένωση CNC (προγραμματιζόμενη με ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου).



Σχήμα 6.λ.

Τα προαναφερόμενα πλεονεκτήματα παρουσιάζουν το πλούτο των δυνατοτήτων που είναι διαθέσιμες με τη χρήση CNC μηχανών EDM. Ο απώτερος σκοπός είναι να παραχθούν πολλαπλές κοιλότητες χωρίς επίβλεψη. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι χωρίς τη προσαρμογή κατάλληλης διάταξης και εργαλειοθήκης για αυτόματη εναλλαγή των εργαλείων - ηλεκτροδίων (βλέπε σχήμα 6.μ) οι CNC μηχανές EDM χάνουν πολλά από τα πλεονεκτήματα τους. Για λειτουργία χωρίς επίβλεψη, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ρυθμίσεις σπινθήρος για εκχόνδριση διότι τυχόν δημιουργία τόξου θα προξενήσει ζημιά στο εξάρτημα προτού εντοπιστεί το πρόβλημα.



Σχήμα 6.μ. Εργαλειομηχανή EDM με CNC με εργαλειοθήκες και αυτόματη αλλαγή 16 εργαλείων. α) κεφαλή με την εργαλειοθήκη, β) Συλλογή 15 εργαλείων ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκκοίλωση του κομματιού χωρίς την επέμβαση του τεχνίτη.

ο. Ασφάλεια και υγιεινή

Η κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση είναι μια από τις πιο ασφαλής μεθόδους κατεργασίας. Οι κίνδυνοι που υπάρχουν στις συμβατικές μεθόδους λόγω της περιστροφής των chucks σε υψηλές ταχύτητες, των αιχμηρών αποβλίττων και των μεγάλων φρεζοκεφαλών δεν υφίστανται στη προκειμένη μέθοδο. Η χαμηλή τάση που χρησιμοποιείται είναι πολύ μικρή πηγή κινδύνου. Ωστόσο, η διαδικασία EDM δεν είναι τελείως ακίνδυνη. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος είναι η φωτιά, η οποία μπορεί να προκληθεί λόγω πτώσης της της στάθμης του διηλεκτρικού κάτω από το επίπεδο όπου συμβαίνει ο σπινθήρας. Αν συμβεί αυτό, το διηλεκτρικό υγρό θερμαίνεται πάνω από το σημείο ανάφλεξης και οι σπινθήρες της EDM παρέχουν μια έτοιμη πηγή για να αναφλέγει. Τα μεγάλα ηλεκτρόδια αυξάνουν το πρόβλημα. Σαν μέτρο ασφαλείας, θεωρείται ότι η μηχανή πρέπει να κλείνει αυτόματα όταν το επίπεδο στάθμης του ρευστού πέσει κάτω από το προκαθορισμένο επίπεδο, δηλαδή το υψηλότερο σημείο προσαυξημένο κατά ένα συντελεστή ασφαλείας. Επίσης, σε κάθε μηχανή, που δεν απαιτεί τη παρουσία χειριστού, πρέπει να είναι τοποθετημένος ένας αυτόματα ενεργοποιημένος πυροσβεστήρας. Ο ερεθισμός του δέρματος και ο καπνός είναι άλλοι δύο παράγοντες που δημιουργούν προβλήματα στην υγεία. Ακόμη υπάρχουν ειδικής σύστασης κρέμες χεριών που χρησιμοποιούν οι χειριστές της EDM. Τέλος εάν το κατεργαζόμενο τεμάχιο είναι μεγάλο πρέπει να υπάρχει εγκατάσταση αερισμού.

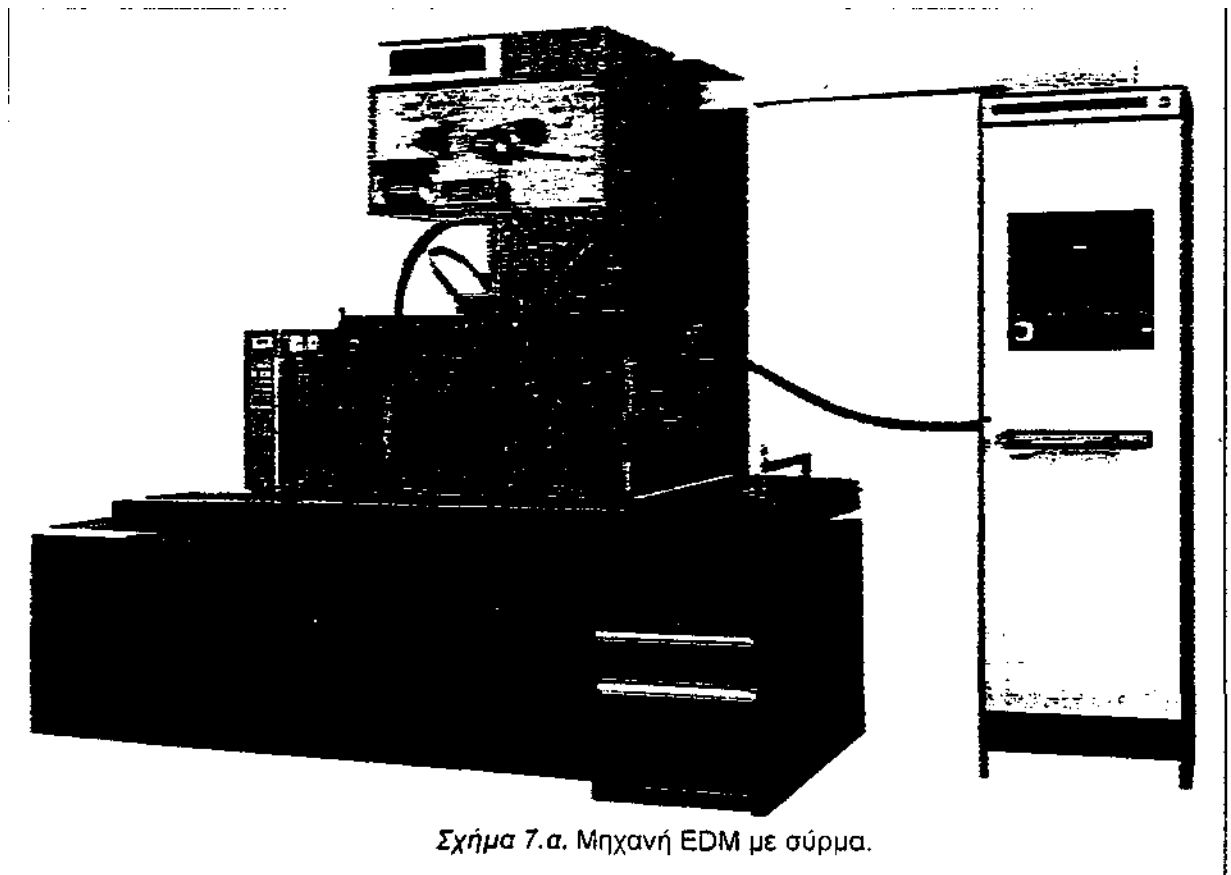
7. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΜΕ ΣΥΡΜΑ [ELECTRICAL DISCHARGE WIRE CUTTING (EDWC)]



α. Εισαγωγή

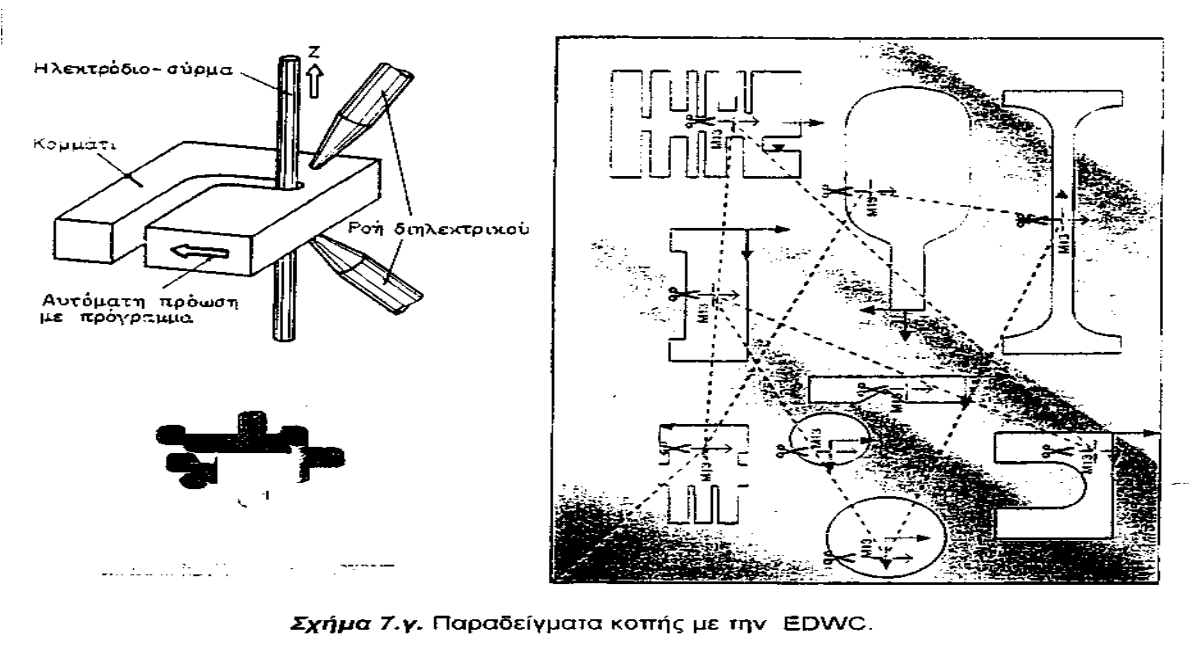
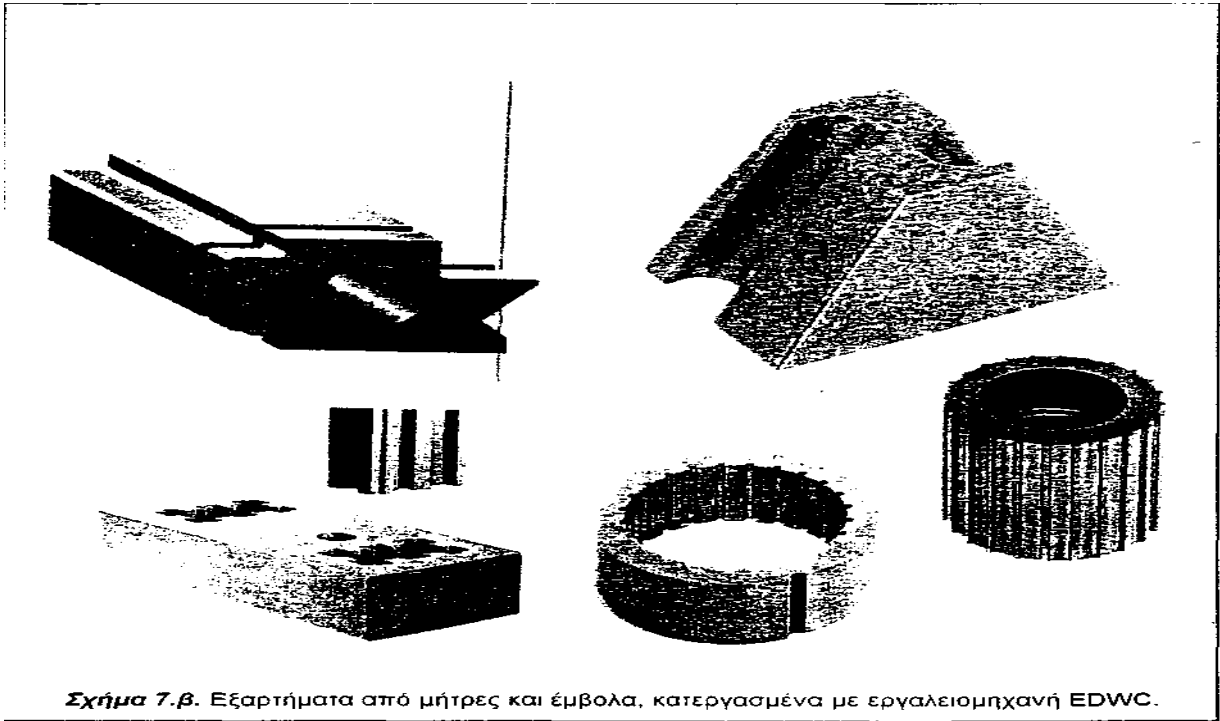
Η EDM αναπτύσσεται γρήγορα με τη προσθήκη του αριθμητικού ελέγχου (CNC). Σήμερα η EDM χρησιμοποιείται σε ευρείας ποικιλίας μεταλλοτεχνικές εφαρμογές ακριβείας οι οποίες ήταν σχεδόν αδύνατον να πραγματοποιηθούν πριν από μερικά χρόνια. Οι ανοχές κοπής, οι ταχύτητες κοπής και η ποιότητα επιφανείας έχουν βελτιωθεί σημαντικά.

Μια άλλη εφαρμογή της EDM είναι η κοπή με σύρμα σε μηχανή EDM (βλέπε σχήμα 7.α). Αντίθετα με τις άλλες εφαρμογές της EDM οι οποίες χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρόδιο στο σχήμα και στο μέγεθος της απαιτούμενης κοιλότητας ή οπής, αυτή η μηχανή χρησιμοποιεί γενικά ένα λεπτό σύρμα από ορείχαλκο ή χαλκό σαν ηλεκτρόδιο, καθιστώντας δυνατή τη κοπή πολλών σχημάτων και περιγραμμάτων από επίπεδου σχήματος υλικά.



Σχήμα 7.α. Μηχανή EDM με σύρμα.

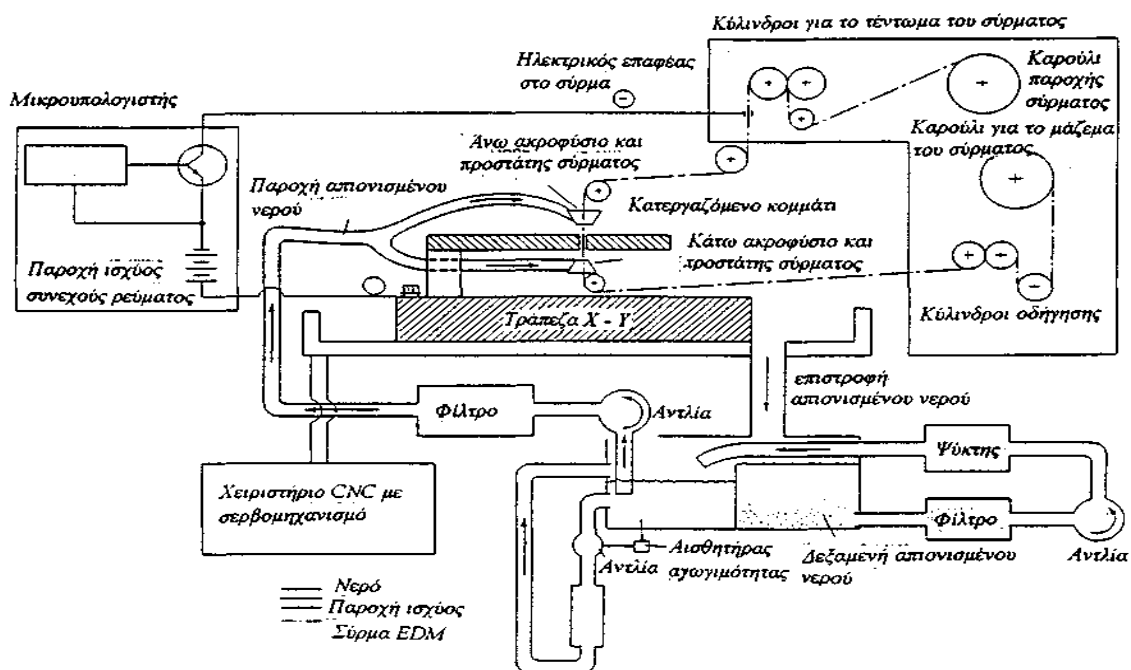
Η EDWC μπορεί να κάνει εργασίες που παλαιότερες τεχνολογίες δεν μπορούσαν να κάνουν τόσο καλά, τόσο γρήγορα, τόσο φθηνά και με τόσο μεγάλη ακρίβεια. Τα περισσότερα εξαρτήματα μπορούν τώρα να προγραμματιστούν και να παραχθούν σαν ατόφιο προϊόν, ενώ παλαιότερα ήταν αναγκαίο να παραχθούν σαν επιμέρους εξαρτήματα και μετά να συναρμολογηθούν μεταξύ τους σε ένα σύνολο. Η EDWC είναι δυνατόν να παράγει πολύπλοκα σχήματα όπως κωνικά, ελικοειδή, παραβολικά, ελλειπτικά και άλλα... (βλέπε σχήματα 7.β και 7.γ). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σήμερα ευρύτατα για τη κατεργασία καρβιδίου του βολφραμίου, δύσκολοκατέργαστων υλικών, πολυκρυσταλλικού αδάμαντος, CBN και τέλος καθαρού μολυβδαινίου.



β. Διαδικασία κατεργασίας

Η μηχανή EDWC είναι μια μηχανή εκκένωσης που χρησιμοποιεί τη κίνηση NC για τη δημιουργία του επιθυμητού περιγράμματος ή σχήματος του εξαρτήματος. Δεν χρειάζεται ηλεκτρόδιο με ειδικό σχήμα αλλά χρησιμοποιεί σαν ηλεκτρόδιο ένα τεντωμένο σύρμα που κινείται συνεχώς (βλέπε σχήμα 7.δ).

Το ηλεκτρόδιο ή σύρμα κοπής είναι από ορείχαλκο, χαλκό ή από οποιοδήποτε άλλο ηλεκτρικά αγωγίμο υλικό με διάμετρο που κυμαίνεται από 0,05 μέχρι 0,30 mm. Η διαδρομή που ακολουθεί το σύρμα ελέγχεται κατά μήκος ενός περιγράμματος δύο αξόνων (XY), διαβρώνοντας (κόβοντας) θερμικά μια στενή εγκοπή στο εξάρτημα. Αυτή η ελεγχόμενη κίνηση είναι συνεχής και ταυτόχρονη σε βήματα 0,001 mm. Μπορεί να κοπεί οποιοδήποτε περίγραμμα με μεγάλη ακρίβεια και να επαναληφθεί οσοδήποτε διαδοχικές φορές. Ένα διηλεκτρικό υγρό, συνήθως απιονισμένο νερό που κυκλοφορεί συνεχώς, απομακρύνει τα θερμικώς διαβρωμένα σωματίδια μετάλλου. Το διηλεκτρικό υγρό διατηρεί τη κατάλληλη αγωγιμότητα μεταξύ του σύρματος και του εξαρτήματος και βοηθά στη μείωση της θερμότητας που προκαλείται από το σπινθήρα.



Σχήμα 7.δ. Διάταξη μιας τυπικής μηχανής EDWC.

γ. Λειτουργικά συστήματα μηχανής EDWC

Διάφορα συστήματα σε μηχανές EDWC παίζουν σημαντικό ρόλο στην αποδοτική λειτουργία της εργαλειομηχανής. Τα κύρια λειτουργικά συστήματα των μηχανών EDWC είναι ο σερβομηχανισμός, το διηλεκτρικό υγρό, το ηλεκτρόδιο και η μονάδα ελέγχου MCU (Machine control unit).

Ο ΣΕΡΒΟΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ

Ο σερβομηχανισμός της EDWC ελέγχει τη στάθμη του ρεύματος κοπής, τη ταχύτητα τροφοδοσίας των κινητήρων οδήγησης και τη ταχύτητα κίνησης του σύρματος. Οι μηχανές EDWC είναι εφοδιασμένες με σερβομηχανισμό ελέγχου που διατηρεί αυτόματα σταθερή απόσταση περίπου 0,02 μέχρι 0,05 mm μεταξύ του σύρματος και του εξαρτήματος.

Είναι

σημαντικό να μην υπάρχει φυσική επαφή μεταξύ του σύρματος (ηλεκτροδίου) και του εξαρτήματος. Σε αντίθετη περίπτωση η δημιουργία τόξου θα προκαλούσε ζημιά στο εξάρτημα και θα έσπαζε το σύρμα. Ακόμη, ο σερβομηχανισμός προωθεί το σύρμα μέσα στο εξάρτημα καθώς η εργασία προχωρά και ανιχνεύει την απόσταση εξαρτήματος - σύρματος και επιβραδύνει ή επιταχύνει τους κινητήρες οδήγησης όσο χρειάζεται για να διατηρηθεί το κατάλληλο διάκενο για σπινθήρα. Ο ακριβής έλεγχος του διακένου είναι βασικός για μια επιτυχημένη μηχανουργική κατεργασία. Αν το διάκενο είναι πολύ μεγάλο, δεν γίνεται ιονισμός του διηλεκτρικού υγρού και δεν μπορεί να γίνει η μηχανουργική κατεργασία. Αν το διάκενο είναι πολύ μικρό, το σύρμα θα ακουμπήσει το εξάρτημα, με αποτέλεσμα τη τήξη και σπάσιμο του.

Ο ακριβής έλεγχος του διακένου επιτυγχάνεται με ένα κύκλωμα στο τροφοδοτικό που συγκρίνει τη μέση τιμή της τάσης στο διάκενο με μια προεπιλεγμένη τάση αναφοράς. Η διαφορά μεταξύ των δύο τάσεων είναι το σήμα εισόδου, που πληροφορεί το σερβομηχανισμό σε πόση απόσταση και πόσο γρήγορα να τροφοδοτήσει το σύρμα και τότε να αποσυρθεί από το εξάρτημα. Γι' αυτό δίνεται συνήθως φωτεινή ένδειξη αναστροφής κίνησης.

Όταν στο διάκενο του σπινθήρα υπάρχουν μικρά κομμάτια που ελλατώνουν τη τάση κάτω από μια κρίσιμη τιμή, ο σερβομηχανισμός

αναγκάζει το σύρμα να αποσυρθεί μέχρι να παρασυρθούν τα κομμάτια από το διηλεκτρικό υγρό. Το σύστημα του σερβομηχανισμού δεν πρέπει να είναι πολύ ευαίσθητο σε τάσεις μικρής διάρκειας που προκαλούνται από τα μικρά κομμάτια που παρασύρονται. Σε αντίθετη περίπτωση το σύρμα θα αποσυρόταν συνέχεια, επηρεάζοντας σοβαρά με το τρόπο αυτό τις ταχύτητες μηχανουργικής κατεργασίας:

ΤΟ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για μια επιτυχημένη λειτουργία EDWC είναι η απομάκρυνση των σωματιδίων (μικρών κομματιών) από το διάκενο εργασίας. Η απομάκρυνση αυτών των σωματιδίων από το διάκενο με το διηλεκτρικό υγρό δημιουργεί καλές συνθήκες κοπής, ενώ η μη απομάκρυνση προκαλεί λανθασμένες κοπές και κακές συνθήκες κατεργασίας.

Το διηλεκτρικό υγρό στη διαδικασία EDWC είναι συνήθως απιονισμένο νερό. Πρόκειται για νερό βρύσης που κυκλοφορεί μέσα από μια ιοντοανταλλακτική ρητίνη. Το απιονισμένο νερό είναι καλός μονωτής, ενώ το νερό χωρίς επεξεργασία είναι καλός αγωγός και όχι κατάλληλο για την διεργασία EDWC. Ο ανταλλάκτης ιόντων είναι ένα μίγμα ρητίνης ανταλλαγής θετικών ιόντων (κατιόντων) και ρητίνης ανταλλαγής αρνητικών ιόντων (ανιόντων). Όταν το μίγμα αυτό έλθει σε επαφή με νερό, αρχίζει η αντίδραση ανταλλαγής ιόντων που επαναλαμβάνεται συνεχώς μέχρι να απομακρυνθούν εντελώς από το νερό όλες οι ακαθαρσίες, δίνοντας έτσι καθαρό νερό.

Το μέγεθος απιονισμού μετρείται με την ειδική αντίσταση. Για τις περισσότερες εργασίες, όσο μικρότερη είναι η αντίσταση τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα κοπής. Η αντίσταση, όμως, του διηλεκτρικού υγρού πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη όταν κόβονται καρβίδια και γραφίτες μεγάλης πυκνότητας.

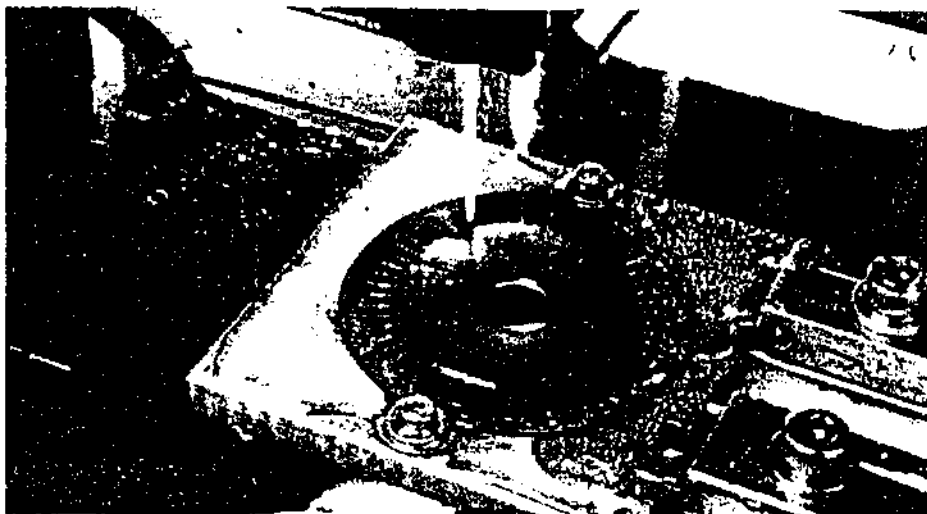
Το διηλεκτρικό υγρό που χρησιμοποιείται στην διαδικασία EDWC εξυπηρετεί αρκετές λειτουργίες:

1. Βοηθά στο ξεκίνημα του σπινθήρα μεταξύ του σύρματος

(ηλεκτροδίου) και του εξαρτήματος.

2. Λειτουργεί σαν μονωτής μεταξύ του σύρματος και του εξαρτήματος.
3. Απομακρύνει τα σωματίδια διαβρωμένου σύρματος και εξαρτήματος έτσι ώστε να αποφεύγεται το βραχυκύκλωμα.
4. Λειτουργεί σαν ψυκτικό για το σύρμα και το εξάρτημα.

Το διηλεκτρικό υγρό πρέπει να κυκλοφορεί υπό σταθερή πίεση για να απομακρύνει τα σωματίδια και να βοηθά στη διαδικασία κατεργασίας. Η ροή του νερού ελέγχεται από δύο βαλβίδες ελέγχου: μια που ελέγχει το νερό που ρέει πάνω από το εξάρτημα και μια που ελέγχει τη ροή κάτω από το εξάρτημα. Όταν αρχίζει η παροχή νερού για τη διαδικασία κοπής, εφαρμόζεται μια σταθερή ροή και σιγά σιγά εφαρμόζεται το νερό στο κάτω μέρος του εξαρτήματος μέχρι να εμφανιστεί η λάμψη στην επάνω επιφάνεια του εξαρτήματος (βλέπε σχήμα 7.ε).



Σχήμα 7.ε. Για την εργασία κοπής πρέπει να παρέχεται στο εξάρτημα μια σταθερή ροή διηλεκτρικού υγρού.

Αν κατά τη διάρκεια της εργασίας κοπής εμφανισθούν κόκκινοι σπινθήρες, τότε δεν είναι αρκετή η παροχή νερού. Για να ξεπεράσουμε το πρόβλημα αυτό, αυξάνουμε τη ροή του νερού μέχρι να εμφανιστούν μπλε σπινθήρες. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπερβολική ροή νερού μπορεί να προκαλέσει στράβωμα του σύρματος, πράγμα που θα προκαλέσει λανθασμένη κοπή και απώλεια της ακρίβειας της κατεργασίας.

ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ

Το ηλεκτρόδιο στις μηχανές EDWC είναι ένα τύμπανο σύρματος διαμέτρου από 0,05 μέχρι 0,30 mm και βάρους από 0,90 μέχρι 45,36 Kg (βλέπε σχήμα 7.δ). Το μήκος του σύρματος στο τύμπανο είναι αρκετό για πάνω από 500 ώρες μηχανουργικής κατεργασίας. Το ηλεκτρόδιο της μηχανής σύρματος κινείται συνεχώς από ένα τύμπανο τροφοδοσίας σε ένα τύμπανο τυλίγματος έτσι ώστε να ανανεώνεται συνεχώς. Όταν χρησιμοποιείται αυτό το είδος ηλεκτροδίου, η φθορά του σύρματος δεν επηρεάζει την ακρίβεια κοπής επειδή κοντά στο εξάρτημα τροφοδοτείται συνεχώς νέο σύρμα με ταχύτητες από ένα κλάσμα της ίντσας μέχρι αρκετές ίντσες ανά λεπτό. Η φθορά του σύρματος και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού από το εξάρτημα εξαρτώνται από πράγματα όπως είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, το σημείο τήξεως του και η τέλος η διάρκεια και η ένταση των ηλεκτρικών παλμών. Όπως στη συμβατική κατεργασία, μερικά υλικά έχουν καλύτερες ιδιότητες κοπής και φθοράς από άλλα. Έτσι, τα υλικά των ηλεκτροδίων πρέπει να έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού.
2. Να έχουν υψηλό σημείο τήξεως.
3. Να έχουν μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό.
4. Να έχουν καλή θερμική αγωγιμότητα.
5. Να έχουν καλή ικανότητα αφαίρεσης μετάλλου από το εξάρτημα.

Η έρευνα και τα πειράματα αυξάνουν συνεχώς τους ρυθμούς αφαίρεσης μετάλλου και βρίσκουν καλά, οικονομικά υλικά για τη κατασκευή συρμάτων EDM. Μερικά από τα υλικά που έχουν βρεί σίγουρες εφαρμογές σαν υλικά ηλεκτροδίων είναι ο ορείχαλκος, ο χαλκός, το βολφράμιο, το μολυβδαίνιο και ο ψευδάργυρος. Το περισσότερο χρησιμοποιούμενο υλικό είναι το σύρμα ορείχαλκου με διάμετρο 0,20 mm. Μια κανονική κοπή περίπου 0,02 mm ανά πλευρά παράγει μια εσωτερική γωνία με ακτίνα περίπου 0,12 mm. Σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούνται και μικρότερες διαμέτροι σύρματος ορείχαλκου. Τα σύρματα από βολφράμιο και μολυβδαίνιο, που έχουν πολύ υψηλό σημείο τήξης και μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό, επιτρέπουν τη χρήση σύρματος πολύ μικρής διαμέτρου 0,05mm για κοπή μικρών ακτινών και πολύπλοκων σχημάτων.

Το σύρμα στρωμάτων, που αποτελείται από πυρήνα από χαλκό με ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα ψευδαργύρου, έχει τη μεγάλη αγωγιμότητα

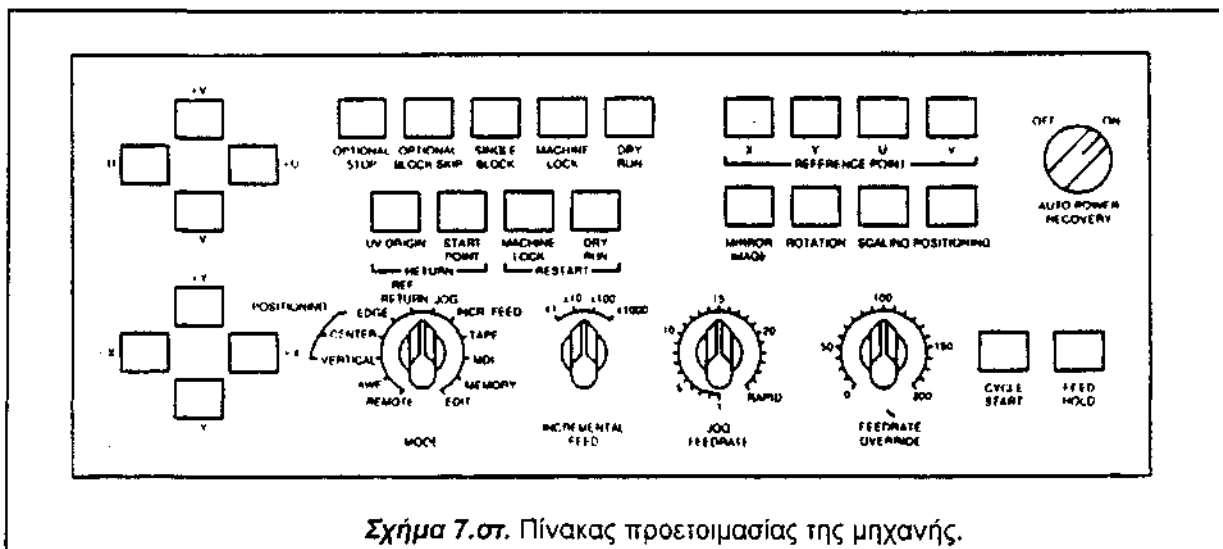
του χαλκού σε συνδυασμό με τις ψυκτικές ιδιότητες του ψευδαργύρου. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερης έντασης ρεύματος, πράγμα που αυξάνει την ενεργειακή ισχύ του σπινθήρα EDM και, κατά συνέπεια, το ρυθμό αφαίρεσης μετάλλου.

Η ΜΟΝΑΔΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΤΟΣ (MCU)

Η MCU της μηχανής EDWC μπορεί να χωριστεί σε 3 ξεχωριστούς πίνακες χειρισμού:

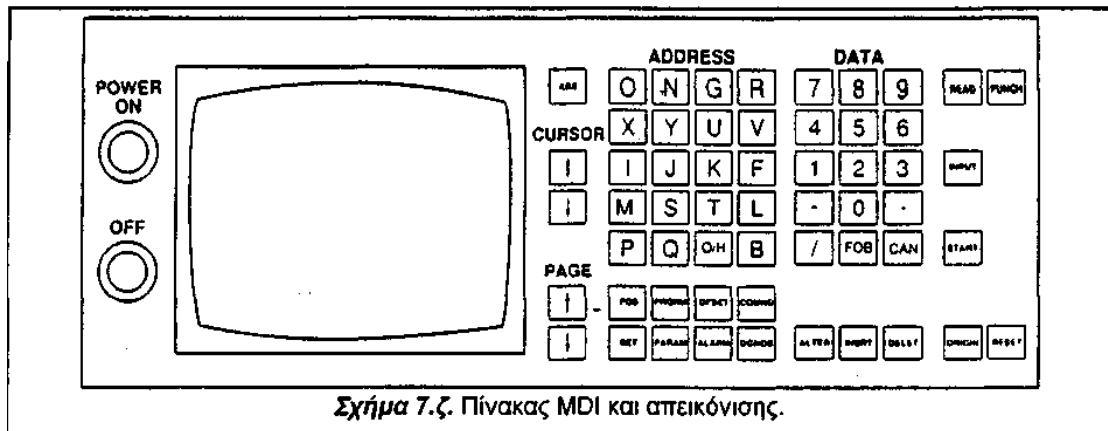
- Πίνακας ελέγχου προετοιμασίας της μηχανής.
- Πίνακας MDI και απεικόνισης.
- Πίνακας ελέγχου των συνθηκών κοπής.

Πίνακας ελέγχου προετοιμασίας της μηχανής. Ο πίνακας ελέγχου προετοιμασίας της μηχανής χρησιμοποιείται για να εντοπίζει την ακριβή θέση του σύρματος (ηλεκτροδίου) σε σχέση με το εξάρτημα, και απομνημονεύει αυτές τις θέσεις συντεταγμένων. Ο χειριστής, ακόμη, τοποθετεί τις συνθήκες και λειτουργίες που χρειάζονται για ακριβή ανάγνωση του προγράμματος και κοπής του εξαρτήματος. Αυτός ο πίνακας ελέγχου μπορεί να διαιρεθεί σε γενικές περιοχές λειτουργίας και ελέγχου: ελέγχους κίνησης των αξόνων, έλεγχο τρόπου υπολογισμού θέσης, ελέγχους τροφοδοσίας, λειτουργικούς ελέγχους, αναφορές και ενδείξεις και αυτόματη ανατροφοδοσία του σύρματος (βλέπε σχήμα 7.στ).



Σχήμα 7.στ. Πίνακας προετοιμασίας της μηχανής.

Πίνακας MDI και απεικόνιση. Ο πίνακας MDI και απεικόνιση (βλέπε σχήμα 7.ζ) χρησιμοποιείται από το χειριστή για να βάζει με το χέρι πληροφορίες ή το πρόγραμμα στη μνήμη της MCUI.



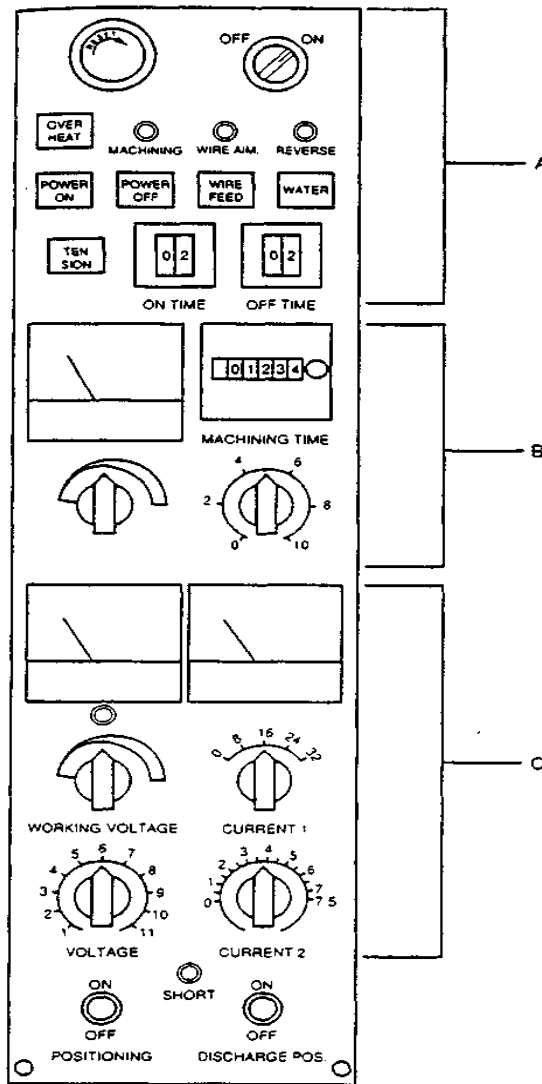
Σχήμα 7.ζ. Πίνακας MDI και απεικόνιση.

Η οθόνη μπορεί να εμφανίζει τις παραμέτρους της μηχανής (θέσεις XYUV), διαγνωστικά μηνύματα συντήρησης, συναγερμούς, όλο το πρόγραμμα για λόγους διόρθωσης ή το πρόγραμμα ενώ γίνεται η κατεργασία του εξαρτήματος. Αυτός ο πίνακας ελέγχου μπορεί να - διααιρεθεί σε γενικές περιοχές λειτουργίας: την οθόνη, τα πλήκτρα δείκτη και σελίδας, τα πλήκτρα διευθύνσεων και στοιχείων και τα λειτουργικά πλήκτρα.

Πίνακας ελέγχου συνθηκών κοπής. Ο πίνακας ελέγχου των συνθηκών κοπής χρησιμοποιείται από το χειριστή για να καθορίζει τις συνθήκες κοπής της μηχανής EDWC. Ο πίνακας ελέγχου διαιρείται σε γενικές περιοχές λειτουργίες: ελέγχους και ενδείξεις της μηχανουργικής κατεργασίας, τη τάση του σύρματος και τις συνθήκες ισχύος (βλέπε σχήμα 7.η).

Οι έλεγχοι αυτοί χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση των λειτουργικών συστημάτων της μηχανής πριν πιεσθεί το πλήκτρο εκκίνησης του κύκλου για να αρχίσει η λειτουργία κοπής. Όταν εξελίσσεται ο κύκλος κοπής, αυτοί οι έλεγχοι θα χρησιμοποιηθούν από το χειριστή για εποπτεία και ρύθμιση των συνθηκών κοπής στη μηχανή, αν χρειάζεται.

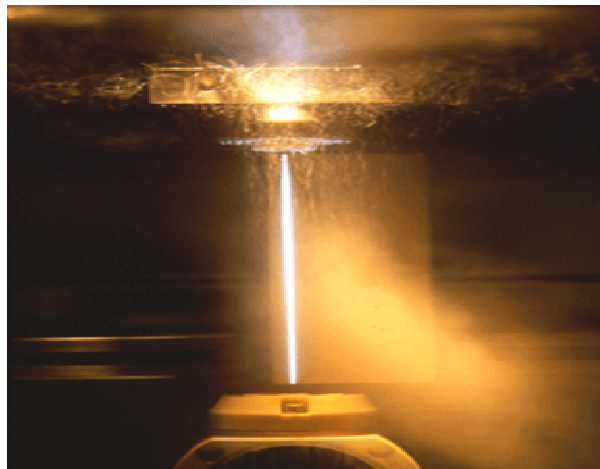
Αν και μερικές από τις νεότερες μηχανές EDWC δεν έχουν μερικούς από αυτούς τους ελέγχους και τους έχουν ενσωματωμένους σαν τμήμα του αυτόματου κύκλου κοπής της μηχανής, η γνώση των πραγμάτων που μπορούν να ελεγχθούν κατά τη διάρκεια του κύκλου κοπής θα δώσει στο



Σχήμα 7.η. Πίνακας ελέγχου των συνθηκών κοπής. (Α) Έλεγχοι και ενδείξεις κοπής. (Β) Έλεγχοι και ενδείξεις της τάσης του σύρματος, (C) Έλεγχοι και ενδείξεις ισχύος.

χειριστή καλύτερη συνολική κατανόηση των διαδικασιών κοπής στη μηχανή σύρματος.

8. ΛΕΙΑΝΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΚΚΕΝΩΣΗ [ELECTRICAL DISCHARGE GRINDING (EDG)]



α. Εισαγωγή

Η λείανση με ηλεκτρική εκκένωση (EDG) προσομοιάζει πολύ με την EDM με εξαίρεση ότι το ηλεκτρόδιο (εργαλείο) είναι ένας περιστρεφόμενος τροχός από γραφίτη. Το κατεργαζόμενο κομμάτι προωθείται προς το τροχό μέσω μιας σερβοελεγχόμενης τράπεζας εργασίας. Το κατεργαζόμενο κομμάτι κόβεται με τη δράση μιας ροής ηλεκτρικών σπινθήρων μεταξύ του αρνητικά φορτισμένου τροχού και του θετικά φορτισμένου κατεργαζόμενου κομματιού που είναι εμβυθισμένο μέσα σε διηλεκτρικό υγρό. Η εκκένωση κάθε σπινθήρα τήκει ή εξατμίζει μια μικρή ποσότητα μετάλλου από την επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού, παράγοντας έτσι ένα μικρό κρατήρα στη θέση της εκκένωσης, όπως στην EDM.

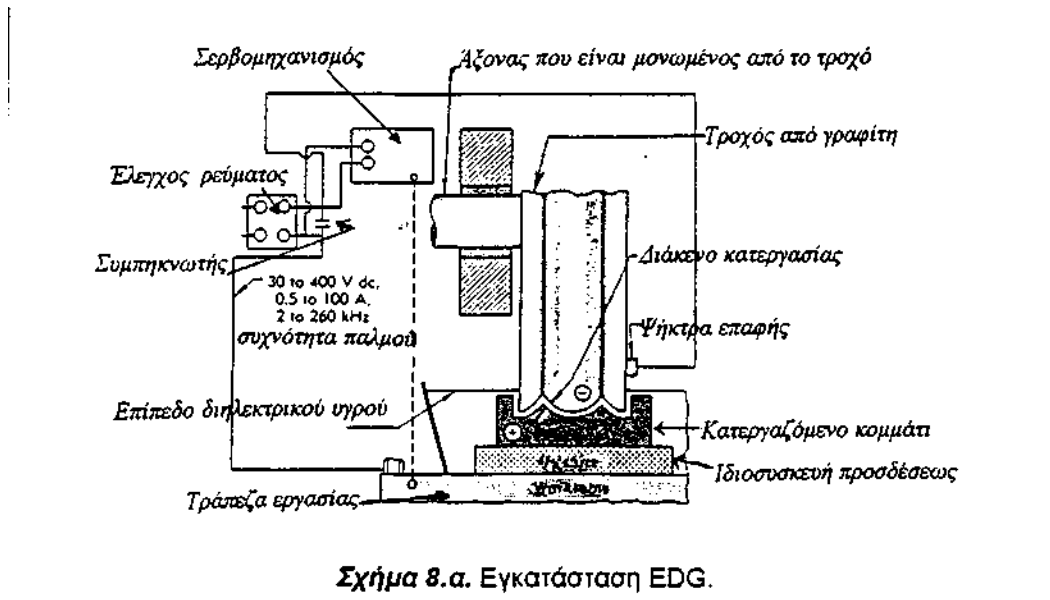
β. Εξοπλισμός και λειτουργία της EDG

Η ροή των σπινθήρων παράγεται από υψηλής συχνότητας παλμούς συνεχούς ρεύματος όπως διακρίνουμε και στο σχήμα 8.α. Η παροχή ισχύος και το διηλεκτρικό υγρό είναι όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στην EDM, αλλά στις περισσότερες εφαρμογές της

EDG χρησιμοποιείται χαμηλότερης έντασης ρεύμα επειδή η μέθοδος συνήθως περιλαμβάνει μια μικρότερη περιοχή κοπής και χρησιμοποιείται πρωταρχικά για την επίτευξη υψηλότερης διαστασιακής ακρίβειας και καλύτερης ποιότητας επιφανείας.

Η παροχή ισχύος κυμαίνεται από 30 μέχρι 400 Volt, 0,5 μέχρι 100 A, με συχνότητα παλμού από 0,2 μέχρι 260 KHz. Το ρεύμα κατεργασίας στις περισσότερες εφαρμογές κυμαίνεται από 0,5 μέχρι 15 A με δυναμικό από 40 μέχρι 80 volt.

Όταν τα φορτία κατεργασίας στη λείανση δεν αιτιολογούν τη χρήση μιας μηχανής EDG, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση μηχανών EDM αριθμητικού ελέγχου στην οποία ο τροχός EDG τοποθετείται και περιστρέφεται πάνω σε μια κατακόρυφη άτρακτο. Η τράπεζα τότε μπορεί να προωθείται αυτόματα προς τον περιστρεφόμενο τροχό με τη βοήθεια ενός σερβομηχανισμού (αντί της πρόωσης του εργαλείου).

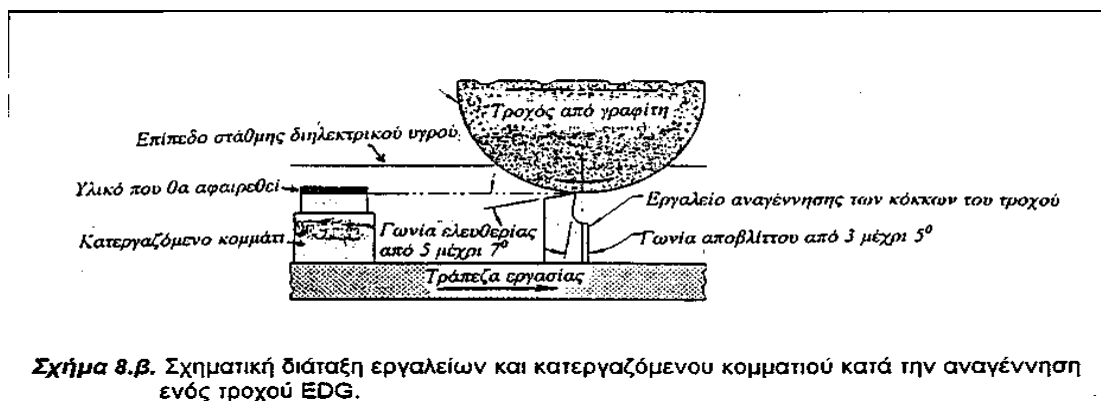


Τροχοί. Οι τροχοί στην EDG είναι κατασκευασμένοι από πορώδη χαμηλής ποιότητας γραφίτη. Ορειχάλκινοι τροχοί χρησιμοποιούνται μερικές φορές όταν οι τομές που πρέπει να κοπούν είναι λεπτότερες από 0,375 mm ή όταν η κυκλοφορία του διηλεκτρικού υγρού είναι δύσκολη. Λόγω της σύνθεσης τους, οι τροχοί EDG μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα και να κατεργαστούν με φθηνά εργαλεία ταχυχάλυβα.

Ο τροχός από γραφίτη περιστρέφεται με ταχύτητα από 30 μέχρι 180 m/min και η άτρακτος είναι μονωμένη από το τροχό για να απομονώνεται ηλεκτρικά. Υψηλή ταχύτητα τροχού προκαλεί εκτόξευση του λαδιού, ενώ μια υπερβολικά χαμηλή ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα τη μη ομοιόμορφη φθορά του τροχού και απόκλιση από τη κυκλικότητα του.

Ένας λειαντικός τροχός όταν πρόκειται να αναγεννηθεί τότε περιστρέφεται περίπου με ταχύτητα 450 m/min και υφίστανται αναγέννηση από ένα εργαλείο το οποίο τοποθετείται στη τράπεζα του μηχανήματος όπως φαίνεται στο σχήμα 8.β. Κατά τη κατεργασία αναγέννησης των κόκκων ο λειαντικός τροχός υφίστανται αρχικά εκχόνδριση με τη χρήση εργαλείου από σκληρυνμένο χάλυβα και βάθος κατεργασίας 1,25 mm ανά πάσο, ενώ στη συνέχεια υφίστανται αποπεράτωση με αφαίρεση υλικού σε βάθος 0,125 mm.

Έλεγχος. Το διάκενο σπινθήρα κυμαίνεται συνήθως από 0,0125 μέχρι 0,075 mm και διατηρείται σταθερό με τη βοήθεια ενός σερβομηχανισμού που ελέγχει τη κίνηση της τράπεζας εργασίας. Το διάκενο αυτό είναι εμβυθισμένο μέσα σ'ένα διηλεκτρικό υγρό παρόμοιο με εκείνο που χρησιμοποιείται στην EDM, συνήθως λάδι το οποίο έχει ιξώδες 40 SUS στους 38 °C.



Υψηλότερη τάση επιτρέπει μεγαλύτερα διάκενα σπινθήρα, πράγμα που διευκολύνει την έκπλυση με διηλεκτρικό υγρό. Ένα μέσο διάκενο σπινθήρα είναι περίπου 0,025mm. Με την εφαρμογή υψηλότερου ηλεκτρικού ρεύματος έχουμε ταχύτερη κοπή αλλά η παραγόμενη επιφάνεια είναι τραχύτερη και υφίστανται πιο εκτεταμένη ζημία. Το μέγεθος του κρατήρα είναι ανάλογο της ενέργειας του σπινθήρα. Λιγότερο

ρεύμα χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να επιτύχουμε επιφάνειες πιο λείες, με λιγότερη ζημία, όπως στη λείανση καρβιδίων. Υψηλότερη παλμική συχνότητα δημιουργεί μια πιο λεία επιφάνεια. Μεγαλύτερη χωρητικότητα γενικά χρησιμοποιείται για ταχύτερη κοπή.

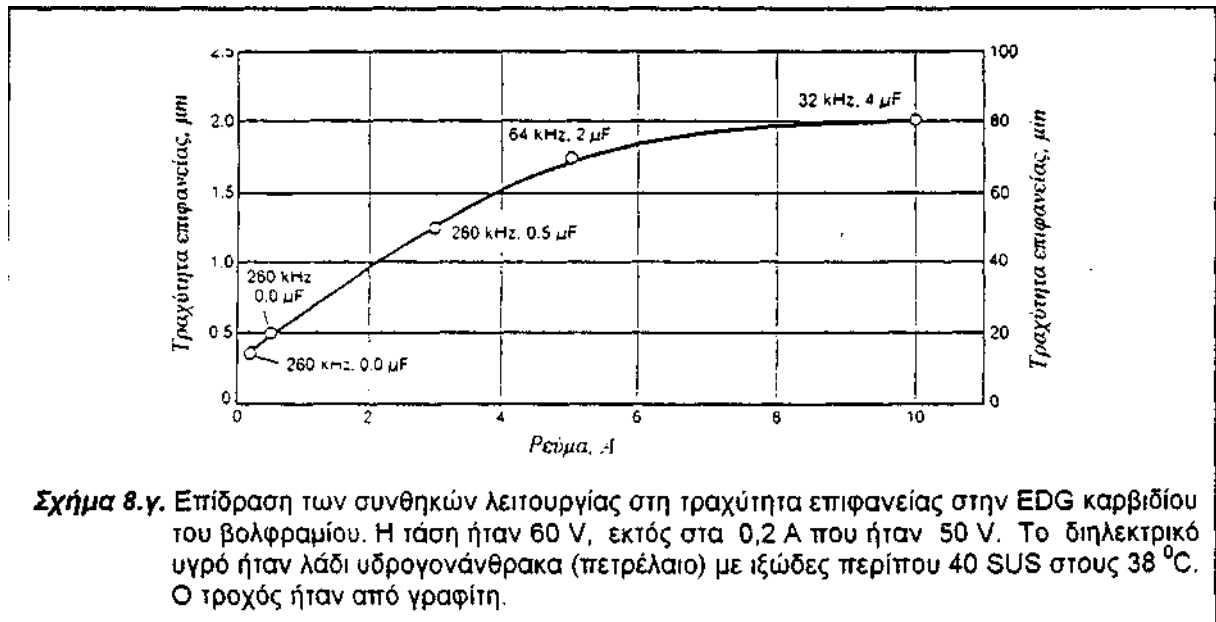
Μετά την έναρξη ενός κύκλου κατεργασίας, δεν απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή από το χειριστή στις αυτόματες μηχανές EDG. Ο σερβομηχανισμός της τράπεζας ελέγχεται με τη τάση που υπάρχει μεταξύ του λειαντικού τροχού και του κατεργαζόμενου κομματιού. Όταν η τάση είναι υψηλή (περίπου 80 Volt), το κατεργαζόμενο κομμάτι κινείται γρήγορα και εγκάρσια προς το λειαντικό τροχό έως ότου να συμβεί ο πρώτος σπινθήρας. Σ' αυτό το σημείο, η τάση πέφτει σε φυσιολογικές τιμές κατεργασίας (40 μέχρι 60 V), και ο σερβομηχανισμός διατηρεί ένα σταθερό διάκενο μεταξύ του λειαντικού τροχού και του κατεργαζόμενου κομματιού (κυμαίνεται από 0,0125 μέχρι 0,075 mm και εξαρτάται από τις ρυθμίσεις της παροχής ισχύος). Εάν η τάση πέσει για οποιοδήποτε λόγο, ο σερβομηχανισμός αποσύρει αυτόματα το κατεργαζόμενο κομμάτι από το λειαντικό τροχό.

γ. Χαρακτηριστικά της EDG

Η EDG χρησιμοποιείται σε κατεργαζόμενο κομμάτια που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, όπως είναι η διαμόρφωση εργαλείων από καρβίδιο. Η πιο συνήθης ανοχή είναι $\pm 0,005$ mm και σε μερικές εφαρμογές η ανοχή που μπορεί να επιτευχθεί είναι $\pm 0,001$ mm. Η EDG είναι μια αργή μέθοδος, η οποία αφαιρεί μόνο 160 μέχρι 2500 mm³ υλικού ανά ώρα. Υψηλότεροι ρυθμοί αφαίρεσης μετάλλου έχουν σαν αποτέλεσμα τραχύτερη επιφάνεια που είναι συνήθως αποδεκτή μόνο σε ορισμένες εφαρμογές εκχόνδρισης.

Τραχύτητα επιφανείας. Η τραχύτητα επιφανείας που μπορεί να επιτευχθεί με την EDG είναι στη πράξη 0,25 μm . Η τραχύτητα επιφανείας εξαρτάται κυρίως από το ρυθμό αφαίρεσης μετάλλου. Στη λείανση καρβιδίου, για παράδειγμα, ένας ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου 200 mm³/h αποδίδει μια τραχύτητα επιφανείας 0,38 μm , ενώ ένας ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου 2500 mm³/h αποδίδει τραχύτητα 3,2 μm .

Η επίδραση των συνθηκών λειτουργίας στη λείανση καρβιδίου του βολφραμίου φαίνεται στο σχήμα 8.γ. Περεταίρω μειώσεις στη συχνότητα και αυξήσεις στη χωρητικότητα πέρα των τιμών που αναγράφονται στο σχήμα 8.γ, συγκρατώντας το ρεύμα στα 10 A, θα αυξήσει σημαντικά τη τραχύτητα επιφανείας. Για παράδειγμα, στα 16 KHz και στα 10 μF η τραχύτητα ήταν 2,8 μm , ενώ στα 8 KHz και 14 μF η τραχύτητα ήταν 3,8 μm . Τα αποτελέσματα ποικίλλουν για άλλα μέταλλα και διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας.



Η **ακτίνα** καμπυλότητας των γωνιών εξαρτάται από το μέγεθος της "υπερκοπής". Η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας των γωνιών στις συνήθειες εφαρμογές της EDG κυμαίνεται από 0,0125 μέχρι 0,125 mm.

Φθορά τροχού. Η λόγος φθοράς στην EDG εξαρτάται από τη πυκνότητα του ρεύματος, το υλικό του εργαλείου (τροχού), το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού και το διηλεκτρικό υγρό. Ο λόγος φθοράς όγκου (αναλογία αφαιρούμενης ποσότητας υλικού αυτό το κατεργαζόμενο κομμάτι προς την αφαιρούμενη ποσότητα του τροχού) κυμαίνεται από 100:1 μέχρι και 0,1:1. Η μέση αναλογία φθοράς όγκου είναι 3:1.

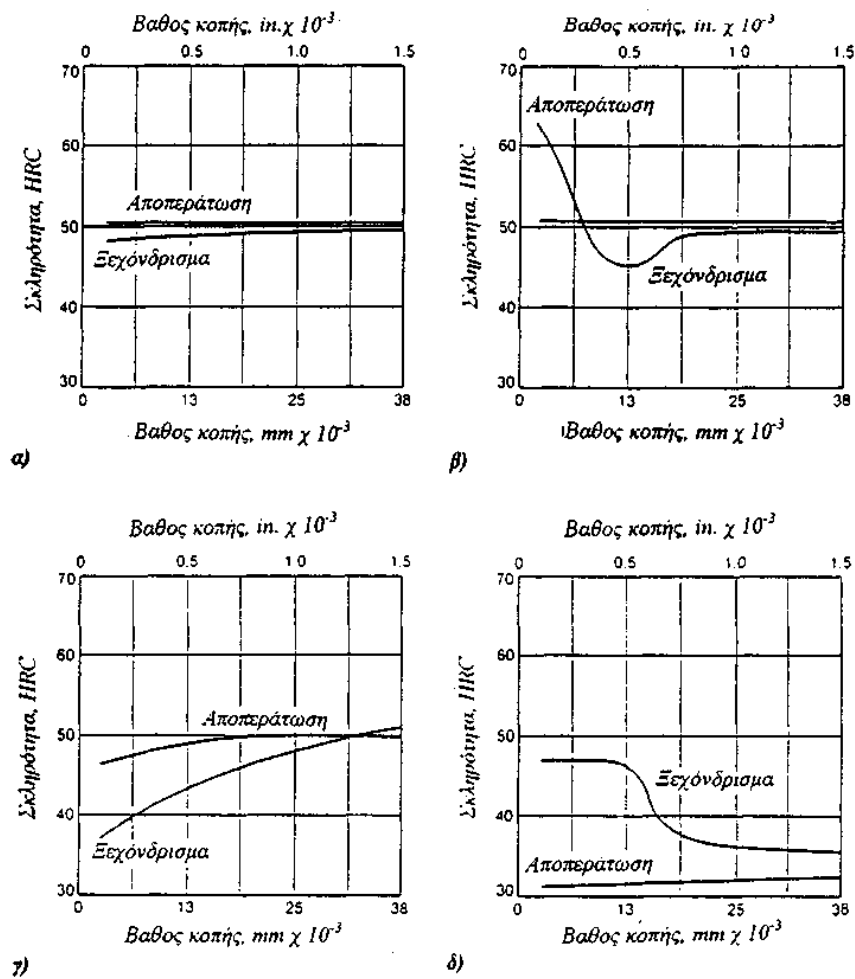
Η φθορά του τροχού, ωστόσο, εκτείνεται σε ολόκληρη τη περιφέρεια του τροχού. Επομένως, υποθέτοντας μια ομοιόμορφη κατανομή της φθοράς, η γραμμική αναλογία φθοράς (αναλογία του βάθους κοπής προς το βάθος φθοράς του τροχού) είναι πολύ υψηλότερη. Για ένα μήκος κοπής 25 mm, η μέση γραμμική αναλογία φθοράς είναι 75:1 για τροχό με

διάμετρο 200 mm ή 110:1 για τροχό με διάμετρο 300 mm. Στη λείανση ακανόνιστων περιγραμμάτων μεγαλύτερη φθορά του τροχού συγκεντρώνεται στα υψηλά σημεία και στις αιχμηρές ακμές του προφίλ και απαιτείται συχνότερη αναγέννηση απ'ότι σε περίπτωση ομοιόμορφης φθοράς.

Επίδραση στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Όπως στην EDM οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται κατά τη τήξη και ατμοποίηση του μετάλλου από το κατεργαζόμενο κομμάτι επηρεάζουν προσβάλλοντας ένα λεπτό στρώμα (2,5 μέχρι 3,5 μm) της κατεργαζόμενης επιφάνειας, με τον ίδιο τρόπο και στην EDG επηρεάζεται ένα αντίστοιχο στρώμα. Το σχήμα 8.δ δείχνει μερικές τυπικές μεταβολές που προκαλούνται από την EDG στη σκληρότητα τεσσάρων υλικών από κοπές εκχόνδρισης και αποπεράτωσης. Τα καρβίδια όπως και τα άλλα υλικά επηρεάζονται επίσης. Γι' αυτό το λόγο, η μέθοδος EDG έχει ευρύτερη χρήση στη διαμόρφωση εργαλείων από καρβίδιο απ'ότι στο τρύχιση τους. Παρόλο που μερικά καρβίδια παθαίνουν ζημιά από την EDG και παρόλο που η εγκάρσια αντοχή είναι μειωμένη, τα εργαλεία μορφής διαμορφώνονται ικανοποιητικά από αυτή τη μέθοδο. Σε περιπτώσεις που εφαρμόζονται υψηλές τάσεις, το στρώμα εκείνο της επιφάνειας που έχει επηρεαστεί από την EDG πιθανόν να πρέπει να αφαιρεθεί.

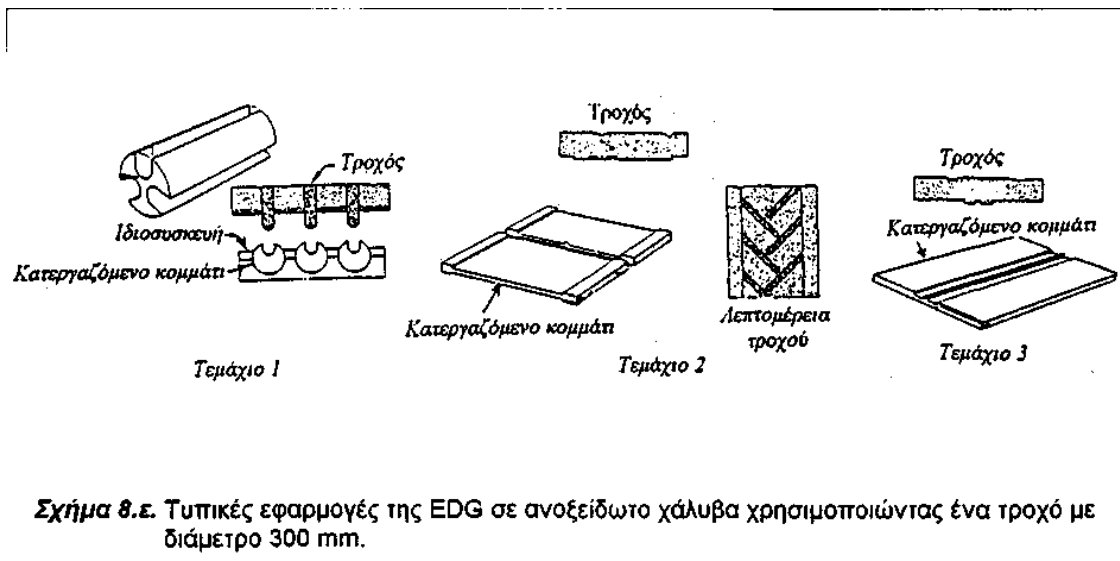
δ. Εφαρμογές της EDG

Επιπρόσθετα στη διαμόρφωση εργαλείων από καρβίδιο, η EDG χρησιμοποιείται για τη λείανση καρβιδίου σε σχήματα όπως είναι οι μήτρες ελασματοποίησης, τα έλαστρα και διαφόρων ειδών εργαλεία. Επίσης χρησιμοποιείται για τη λείανση και άλλων σκληρών υλικών όπως είναι οι βάσεις για τη στήριξη διαφόρων μηχανισμών, για τη κατασκευή λεπτών σχισμών που απέχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους, για τη λείανση ψαθυρών ή ευπαθών εξαρτημάτων και για τη παραγωγή με λείανση πολύπλοκων σχημάτων.



Σχήμα 8.δ. Επίδραση της θερμότητας που αναπτύσσεται στην EDG στη σκληρότητα της επιφάνειας για διάφορα μέταλλα κατεργαζόμενων κομματιών. α) Χαλύβας 4340 με σκληρότητα 50 HRC, β) Χαλύβας D-6, σκληρότητας 50 HRC, γ) Νικελιούχος χάλυβας θερμικά κατεργασμένος, σκληρότητας 50 HRC, δ) Ti-8Al-1Mo-1V, σκληρότητας 50 HRC.

Στο σχήμα 8.ε εικονίζεται η λείανση 4 τεμαχίων από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο χυτοσίδηρος δεν κατεργάζεται κανονικά με την EDG, επειδή αυτός μπορεί να κατεργαστεί πολύ εύκολα με τις συμβατικές μεθόδους και επειδή οι μη αγωγίμες ακαθαρσίες (όπως οι σκωρίες και άμμος) δεν μπορούν να αφαιρεθούν από την εκκένωση του σπινθήρα και επιπλέον υπάρχει κίνδυνος να προκληθεί ζημιά στο τροχό. Παρακάτω λοιπόν στο σχήμα 8.ε διακρίνουμε ορισμένες τυπικές εφαρμογές EDG σε ανοξείδωτο χάλυβα χρησιμοποιώντας τροχό με διάμετρο 300 mm.



9. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

[ELECTRON BEAM MACHINING(EBM)]

α. Εισαγωγή

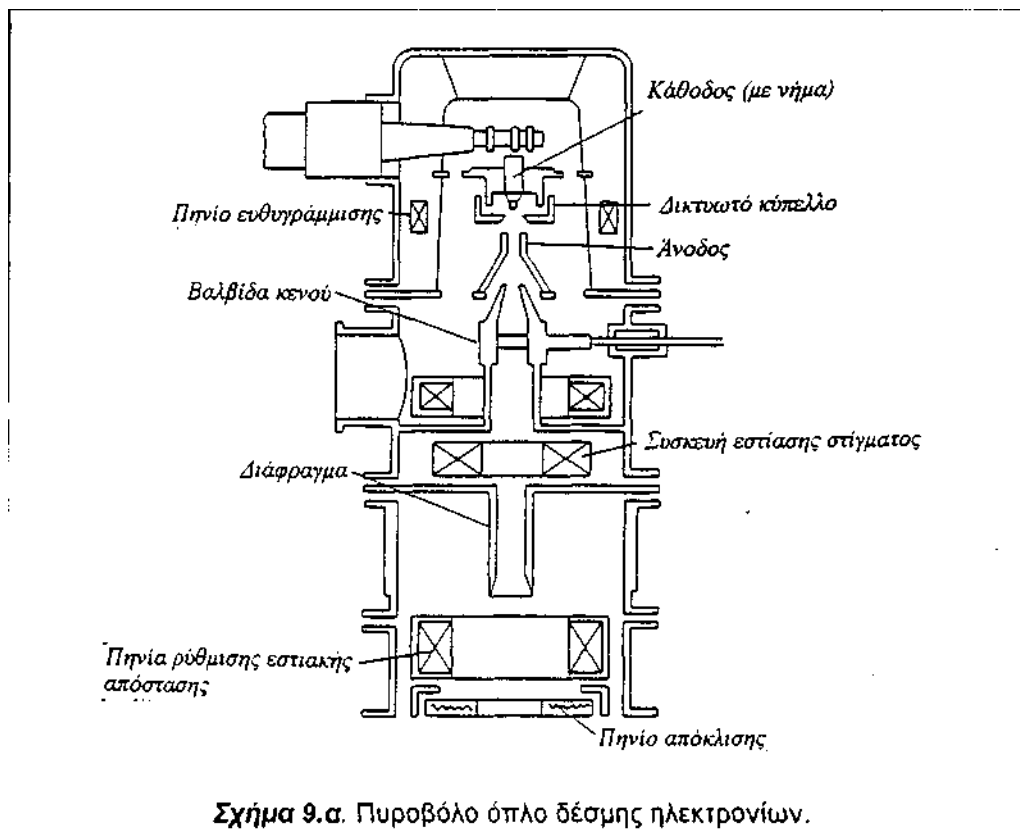
Η κατεργασία με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM) χρησιμοποιεί μια εστιασμένη δέσμη, υψηλής ταχύτητας ηλεκτρονίων για την αφαίρεση υλικού. Σ'αυτή τη μέθοδο, μια συνεχή ροή ηλεκτρονίων προσκρούει πάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού και προκαλεί ταχεία τήξη και ατμοποίηση του υλικού. Για εφαρμογές διάτρησης, ένα υλικό ανάκρουσης τοποθετείται πίσω από το κατεργαζόμενο κομμάτι. Όταν η δέσμη διεισδύσει μέσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και έρθει σε επαφή με το υλικό ανάκρουσης, παράγεται ατμός υψηλής πίεσης από το εξατμιζόμενο υλικό ανάκρουσης που απομακρύνει το τηγμένο υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού, αφήνοντας μια οπή σ'αυτό.

Η μέθοδος EBM μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη κατεργασία διαφόρων υλικών, και ιδιότητες υλικών όπως είναι η σκληρότητα, η ολκιμότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θερμική αγωγιμότητα και το σημείο τήξης είναι συνήθως μη περιοριστικοί παράγοντες. Η μεγαλύτερη βιομηχανική χρήση της EBM είναι η ακριβής διάτρηση μικρών οπών (0,1 μέχρι 1mm) σε μέταλλα. Παρόλο που η EBM έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές κοπής μη μεταλλικών και καμπυλόγραμμων εξαρτημάτων, αυτή η βιομηχανική εφαρμογή είναι πολύ περιορισμένη. Επομένως, εκτός αν αναγράφεται διαφορετικά, οι αναφορές σ'αυτή τη μέθοδο κατεργασίας ισχύουν μόνο στη διάτρηση οπών σε μεταλλικά υλικά.

β. Περιγραφή εξοπλισμού της EBM

Η υψηλής ταχύτητας δέσμη ηλεκτρονίων παράγεται σε ένα πυροβόλο όπλο δέσμης ηλεκτρονίων (βλέπε σχήμα 9.α) που επιταχύνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε ταχύτητες που υπερβαίνουν κατά 60% τη ταχύτητα του φωτός. Τα ηλεκτρόνια δημιουργούνται όταν το βολφραμιούχο νήμα της καθόδου θερμανθεί από το πέρασμα ηλεκτρικού ρεύματος διά μέσου αυτού. Ένα υψηλό δυναμικό τάσης (συνήθως 120 Kvolt) μεταξύ του νήματος

(καθόδου) και της ανόδου επιταχύνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια προς την άνοδο. Επειδή η άνοδος περιέχει μια οπή, τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια περνούν διά μέσου της ανόδου και συνεχίζουν τη κίνηση τους προς το κατεργαζόμενο κομμάτι. Ένα δικτυωτό κύπελλο ρύθμισης της δέσμης τοποθετείται μεταξύ της καθόδου και της ανόδου και ενεργεί σαν πλέγμα που ελέγχει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που επιταχύνονται (ρεύμα δέσμης). Το δικτυωτό κύπελλο ρύθμισης της δέσμης ενεργεί επίσης σαν διακόπτης για το παλλόμενο ρεύμα της δέσμης. Το ρεύμα της δέσμης ρυθμίζεται από 1 μέχρι 80 mA και η ισχύς του κάθε παλμού είναι δυνατόν να φθάσει μέχρι 12 Kw. Σε εφαρμογές διάτρησης, η δέσμη πάλλεται μια φορά ανά οπή. Η διάτρηση απαιτεί πολύ αυστηρό έλεγχο της υψηλής τάσης, του ρεύματος της δέσμης και του μήκους του παλμού.

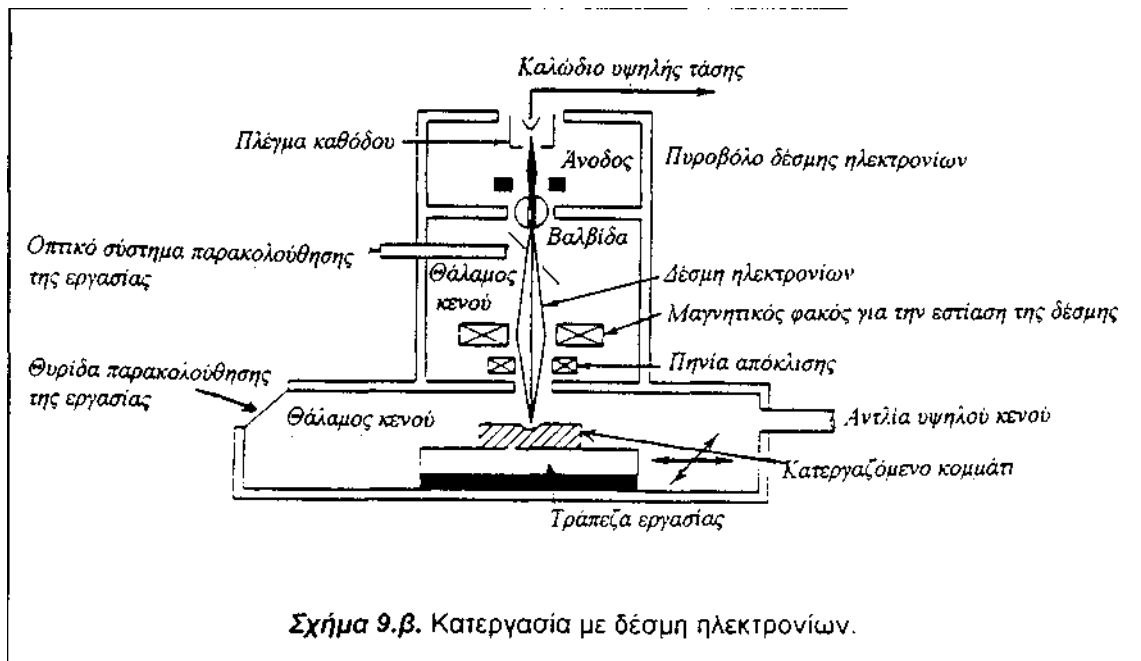


Το πυροβόλο όπλο της δέσμης ηλεκτρονίων εστιάζει επίσης τη δέσμη σε μια πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος (τουλάχιστον 10^6 W/mm^2). Τα μαγνητικά πηνία χρησιμοποιούνται σαν φακοί για να εστιάσουν τη δέσμη

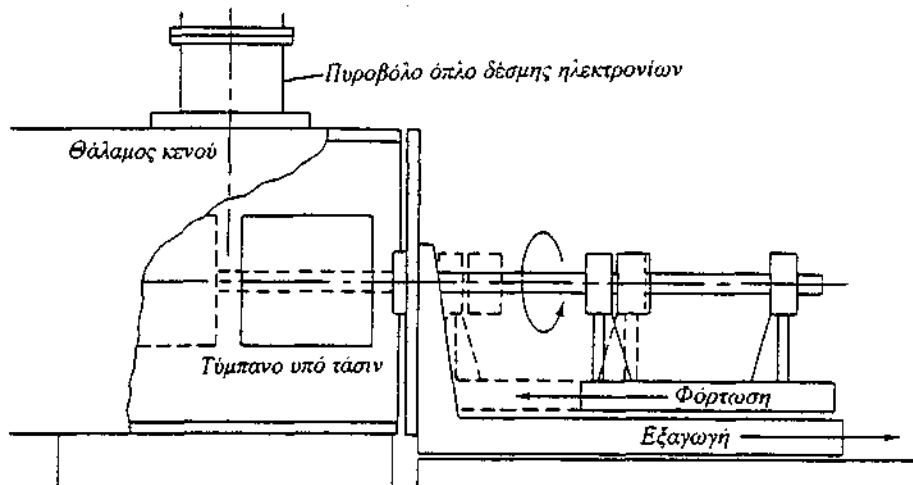
(βλέπε σχήμα 9.α). Μεταξύ αυτών των 2 φακών υπάρχει ένα διάφραγμα, το οποίο αφαιρεί ηλεκτρόνια από τη περιοχή της παρυφής της δέσμης. Αυτό περαιτέρω μειώνει τη διάμετρο του στίγματος και βοηθά στη κατάλληλη διανομή της πυκνότητας ισχύος. Τελικά, ένα πηνίο εστίασης του στίγματος χρησιμοποιείται για να διορθώσει τις μικρές αποκλίσεις της δέσμης και να εξασφαλίσει μια κυκλική δέσμη στο κατεργαζόμενο κομμάτι.

Ακόμη πρέπει να υπάρχουν μέσα που να παρέχουν τη δυνατότητα απόκλισης της δέσμης. Και πάλι, ηλεκτρομαγνητικά πηνία χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αυτής της λειτουργίας. Κατ'αρχήν, ένα πηνίο χρησιμοποιείται για να κάμψει τη δέσμη γύρω από μια γωνία έτσι ώστε η πηγή ηλεκτρονίων να είναι κατά κάποιο τρόπο απομονωμένη και προστατευμένη από μια απευθείας οπτική έκθεση σε ατμούς και στο απωθούμενο υλικό. Ένα σύστημα εκτροπής χρησιμοποιείται επίσης για να παρεκκλίνει τη δέσμη έτσι ώστε να μετακινείται αυτή διαδοχικά με το εξάρτημα, επιτρέποντας έτσι τη διάτρηση ενώ το εξάρτημα μετακινείται (διάτρηση κατά τη κίνηση).

Θάλαμος κενού. Η EBM πραγματοποιείται μαζί με το κατεργαζόμενο κομμάτι μέσα σ'ένα θάλαμο κενού (βλέπε σχήμα 9.β). Η διάτρηση συνήθως πραγματοποιείται σε πίεση 1 Pa (10^{-2} mbar). Η διάτρηση πραγματοποιείται σε κενό για την αποφυγή διασποράς της δέσμης επειδή τα ηλεκτρόνια έχουν μάζα και παρεκκλίνουν από τα μόρια του αέρα. Περίπου 3 min/m^3 όγκου θαλάμου είναι απαραίτητα για την εκκένωση σε πίεση 1 Pa (10^{-2} mbar). Οι θάλαμοι κενού συνήθως πρέπει να έχουν ελάχιστο όγκο τουλάχιστον 1 m^3 έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα των θραυσμάτων κατεργασίας που προσκολλούνται στα τοιχώματα από τη διάτρηση. Τα θραύσματα που παρεκκλίνουν προς τα πάνω κατά τη διάρκεια της διάτρησης συγκρατούνται από επικαλυπτόμενους, περιστρεφόμενους με αντίθετη φορά δίσκους που είναι τοποθετημένοι στην οροφή του θαλάμου. Τα θραύσματα, τα οποία προσκολλούνται πάνω σ'αυτούς τους δίσκους, καθαρίζονται καθώς οι δίσκοι περιστρέφονται πάνω από δοχεία απόξεσης. Οι δίσκοι επίσης ελαχιστοποιούν την είσοδο θραυσμάτων μέσα στο πυροβόλο όπλο της δέσμης ηλεκτρονίων.

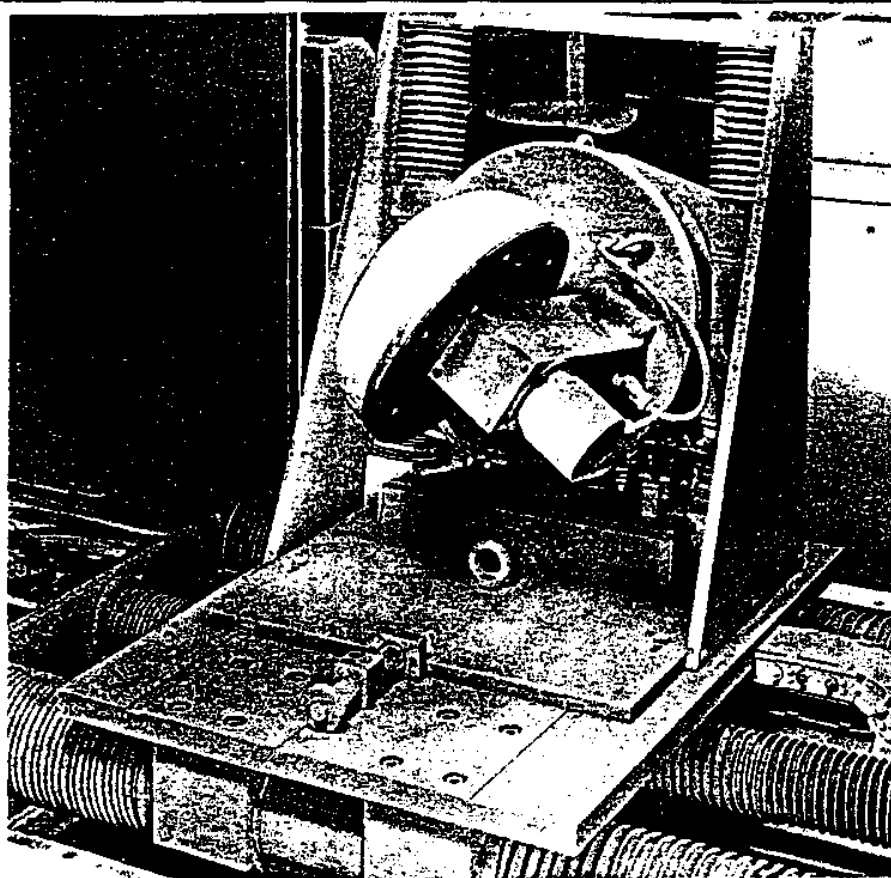


Χειριστήριο κατεργαζόμενου κομματιού. Το επόμενο κύριο μηχανικό εξάρτημα είναι το χειριστήριο του κατεργαζόμενου κομματιού. Το πιο στοιχειώδες χειριστήριο (αποκαλούμενο ως "τύμπανο υπό τάσιν") περιλαμβάνει ένα περιστρεφόμενο άξονα ο οποίος έχει τη δυνατότητα μετάθεσης της κίνησης (βλέπε σχήμα 9.γ). Σ' αυτή τη περίπτωση, το κατεργαζόμενο κομμάτι διαμορφώνεται από φύλλο μετάλλου σε ένα κύλινδρο και ενώνεται έτσι ώστε να διατηρήσει το σχήμα του. Το υλικό ανάκρουσης τοποθετείται εντός του κυλινδρικού κατεργαζόμενου κομματιού, και το κατεργαζόμενο κομμάτι τοποθετείται πάνω από το "τύμπανο υπό τάσιν". Μια φουσκωτή μεμβράνη συγκρατεί το υλικό ανάκρουσης στο κέντρο του κατεργαζόμενου κομματιού. Ουσιαστικά μια κατεργασία διάτρησης κατά τη κίνηση εφαρμόζεται μ' αυτό το χειριστήριο. Με άλλα λόγια, το τύμπανο και το κατεργαζόμενο κομμάτι περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα, σε κάθε παλμό της δέσμης αρχίζει η διάτρηση της οπής, και η δέσμη αποκλίνει καθώς το τύμπανο περιστρέφεται. Όταν ολοκληρωθεί η διάτρηση της οπής, ο παλμός διακόπτεται και η δέσμη επιστρέφει πίσω ακαριαία στην αρχική θέση έτσι ώστε να αρχίσει η διάτρηση της επόμενης οπής. Αυτή η διαδικασία διάτρησης κατά τη κίνηση επαναλαμβάνεται συνεχώς. Επίσης, ο μετατοπιζόμενος άξονας του χειριστηρίου κινείται σε συγχρονισμό με τη δέσμη για τη προώθηση του τύμπανου και του κατεργαζόμενου κομματιού κάτω από τη δέσμη. Σ' αυτή τη μελέτη και σχεδίαση, η πόρτα του θαλάμου είναι συνήθως κομμάτι του χειριστηρίου του κατεργαζόμενου κομματιού.



Σχήμα 9.γ. Μονάδα διάτρησης με δέσμη ηλεκτρονίων με " τύμπανο υπό τάσιν ".

Ένα πιο πολύπλοκο πολλαπλών αξόνων χειριστήριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολύπλοκα σχήματα ή για διάτρηση οπών σε διαφορετικές κατευθύνσεις όπως εικονίζεται στο σχήμα 9.δ.



Σχήμα 9.δ. Χειριστήριο πολλαπλών αξόνων με το συνδεδεμένο κατεργαζόμενο κομμάτι.

Μ'αυτό το χειριστήριο μπορούν να εξασφαλιστούν μέχρι 5 μετατοπιζόμενοι και περιστρεφόμενοι άξονες. Το κατεργαζόμενο κομμάτι

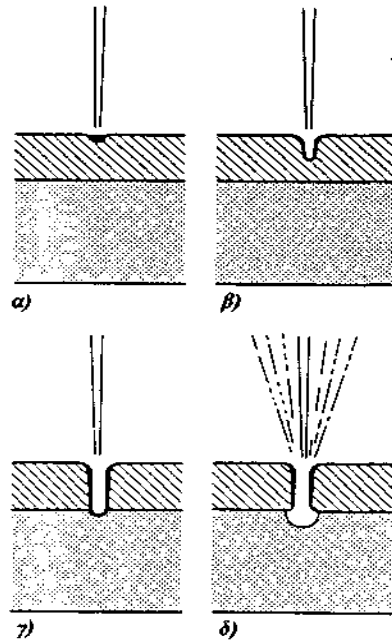
συνήθως συγκρατείται μ'ένα chuck ή μεταξύ ενός chuck και ενός κέντρου. Η κίνηση των αξόνων ελέγχεται ψηφιακά με Η/Υ. Είναι άξιο αναφοράς ότι οι τριβείς (έδρανα) πρέπει να είναι προσεχτικά στεγανοποιημένοι για να προστατεύονται έναντι της ζημίας από τα απόβλητα της διάτρησης. Επίσης, η πόρτα, συνήθως κομμάτι του θαλάμου, είναι μια αυτόματη συρόμενη πόρτα. Τελικά, για ειδικές εφαρμογές παρέχονται ειδικές ιδιοσυσκευές και εργαλεία.

Σύστημα ελέγχου. Γενικά, ένα σύστημα ψηφιακού ελέγχου με Η/Υ απαιτείται για ακριβή έλεγχο και ενσωμάτωση όλων των παραμέτρων της μεθόδου. Υψηλές ταχύτητες διάτρησης καθώς και υψηλές ακρίβειες, μπορούν τώρα να επιτευχθούν μόνο με τη χρήση ενός γρήγορου και αποτελεσματικού Η/Υ. Ακόμη απαιτούνται ειδικές συσκευές "hardware" και προγράμματα "software".

γ. Χαρακτηριστικά της EBM

Η διαδικασία διάτρησης με τη μέθοδο EBM μπορεί να **εξεταστεί χωρίζοντας αυτή στα** παρακάτω στάδια (βλέπε σχήμα 9.ε):

- Μια αιχμηρή εστιασμένη δέσμη προκαλεί τοπική θέρμανση **και τήξη, αλλά μόνο ένα μικρό ποσό ατμοποίησης συμβαίνει** [βλέπε σχήμα 9.ε (α)].

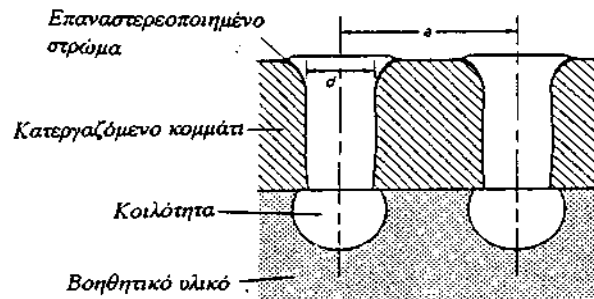


Σχήμα 9.ε. Σχηματική διάταξη διάτρησης με δέσμη ηλεκτρονίων.

- Η πίεση του ατμού που διαφεύγει διαμορφώνει και διατηρεί ένα μικρό τριχοειδές κανάλι και ωθεί το τηγμένο μέταλλο πίσω ενάντια στα τοιχώματα του τριχοειδούς καναλιού [βλέπε σχήμα 9.ε (β)].
- Η δέσμη εισχωρεί στο υλικό μέσω αυτής της μεθόδου της εξάτμισης και της τήξης, και αναπτύσσεται ένας υψηλής πίεσης ατμός καθώς η δέσμη αρχίζει να εισχωρεί στο υλικό ανάκρουσης [βλέπε σχήμα 9.ε (γ)].
- Ο υψηλής πίεσης ατμός απωθεί το τηγμένο μέταλλο πάνω στα τοιχώματα, αφήνοντας μια οπή στο κατεργαζόμενο κομμάτι και μια μικρή κοιλότητα στο υλικό ανάκρουσης [βλέπε σχήμα 9.ε (δ)].

Στο σχήμα 9.στ φαίνεται μια τυπική εγκάρσια τομή. Στη πλευρά εισόδου της οπής παραμένει ένα μικρό χείλος μετά τη διάτρηση, αλλά το χείλος αυτό μπορεί να αφαιρεθεί χρησιμοποιώντας τις συνήθεις διαδικασίες αποπεράτωσης εάν απαιτείται μια αιχμηρή ακμή.

Επίσης υπάρχουν μερικές θερμικές επιδράσεις. Η διάτρηση με δέσμη ηλεκτρονίων παράγει ένα επανατηκόμενο στρώμα και μια μικρή ζώνη επηρεασμένη από τη θερμότητα της τάξεως των 0,025 mm.



Σχήμα 9.στ. Διαμόρφωση οπής που έχει διατρηθεί με δέσμη ηλεκτρονίων. Η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση a μεταξύ των οπών, είναι γενικά κατά προσέγγιση ίση με $2d$.

Το υλικό ανάκρουσης στη διάτρηση με δέσμη ηλεκτρονίων απαιτείται για να παρέχει υψηλής πίεσης ατμό για την απόθεση του τηγμένου υλικού και τη δημιουργία μιας οπής. Το υλικό ανάκρουσης προστατεύει επίσης τα εσωτερικά μέρη του θαλάμου από τις επιδράσεις της διατρητικής δέσμης. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την ανάκρουση εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού και τη γεωμετρία αυτού. Ένα τυπικό υλικό που χρησιμοποιείται καλείται HM/S και περιέχει 3 μέρη σκόνης ορείχαλκου προς 1 μέρος σιλικονούχο ελαστικού. Το σιλικονούχο ελαστικό περιέχει 5% σκληρυντική ουσία T. Αυτό το υλικό έχει μικρή συστολή, αλλά δεν είναι επαναχρησιμοποιήσιμο. Άλλα υλικά ανάκρουσης περιλαμβάνουν εποξικό ορείχαλκο και επαναχρησιμοποιήσιμο κερί το οποίο χρησιμοποιείται όταν οι προς διάτρηση επιφάνειες περικλείουν τυφλές κοιλότητες. Όλα τα υλικά ανάκρουσης μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν από το χρήστη.

Οι παράμετροι της EBM περιλαμβάνουν τα εξής:

- Τη τάση (συνήθως διατηρείται σταθερή στα 120 kV).
- Το ρεύμα της δέσμης.
- Τη διάρκεια του παλμού.
- Το φακό ή την εστία του ρεύματος.
- Την απόκλιση της δέσμης.

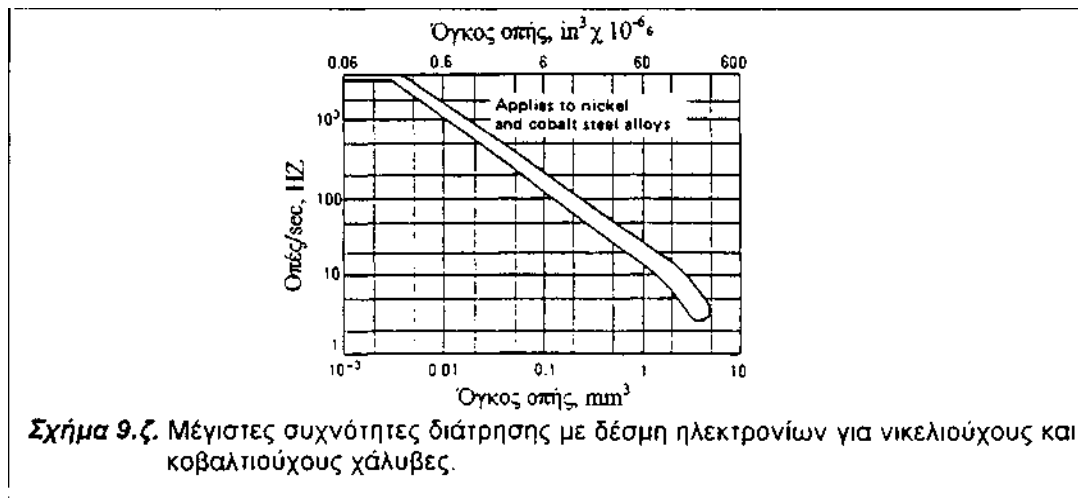
- Τη θέση περιστροφής και μετατόπισης των αξόνων.
- Τη ταχύτητα περιστροφής και μετατόπισης των αξόνων.

Γενικά, αυτοί οι παράμετροι βελτιστοποιούνται με τη μέθοδο "δοκιμής και σφάλματος" για κάθε ιδιαίτερη εφαρμογή. Η διάρκεια και το ρεύμα του τταλμού (ρεύμα της οέσμης) επηρεάζουν το βάθος και τη διάμετρο της οπής. Η διάρκεια του παλμού κυμαίνεται από 0,05 μέχρι 100 μsec . Ο φακός ή η εστία του ρεύματος επηρεάζει τη κωνικότητα της οπής, επειδή η θέση του εστιακού σημείου στη κάθετη διεύθυνση καθορίζει το πραγματικό σχήμα της οπής (κωνικό, ευθύγραμμο, ή άλλο).

Τα πηνία παρεκτροπής χρησιμοποιούνται για να κάνουν δυνατή τη διάτρηση κατά τη κίνηση. Σ'αυτή την εφαρμογή, η δέσμη παρεκκλίνει κατά τη διάρκεια της περιόδου του παλμού έτσι ώστε η δέσμη και το κατεργαζόμενο κομμάτι να μετακινούνται μαζί κατά τη διάρκεια της διάτρησης μιας οπής. Όταν ο παλμός τελειώσει, η δέσμη αναπηδά στην αρχική της θέση για τη διάτρηση της επόμενης οπής.

Η ταχύτητα διάτρησης στην EBM καθορίζεται από τον όγκο της οπής, τη γεωμετρία του" κατεργαζόμενου κομματιού και από τους περιορισμούς του κύκλου κατεργασίας. Το σχήμα 9.ζ δείχνει τη μέγιστη συχνότητα διάτρησης συναρτήσει του όγκου της οπής. Οι ταχύτητες διάτρησης που φαίνονται στο σχήμα 9.ζ βασίζονται σε μια βέλτιστη απόσταση μεταξύ των οπών της τάξεως των δύο διαμέτρων. Οι ταχύτητες για μεγαλύτερα διαστήματα μπορούν να υπολογιστούν υποθέτοντας ότι η δέσμη μπορεί να κινηθεί με ρυθμό 100 mm/sec. Επίσης η ισχύς της δέσμης καθορίζει με τη σειρά της τις ταχύτητες διάτρησης. Οι σχετικές απαιτήσεις ισχύος για την αφαίρεση ίσων ποσοτήτων από διάφορα μέταλλα στον ίδιο χρόνο, με βάση το αλουμίνιο που ορίζεται σαν δείκτης 1.0, είναι:

<u>Υλικό</u>	<u>Σχετική ισχύς</u>
Αλουμίνιο	1,0
Τιτάνιο	1,5
Σίδηρος/Χάλυβας	1,8
Μολυβδαίνιο	2,2
Βολφράμιο	2,9



Εξαρτήματα που έχουν διατρηθεί με την EBM. Σήμερα, ένα πάχος υλικού μέχρι 8 mm σε χάλυβα μπορεί να διατρηθεί για γενική βιομηχανική εφαρμογή. Η δυνατότητα διάτρησης σε υλικό κυμαίνεται από 0,05 μέχρι 8mm.

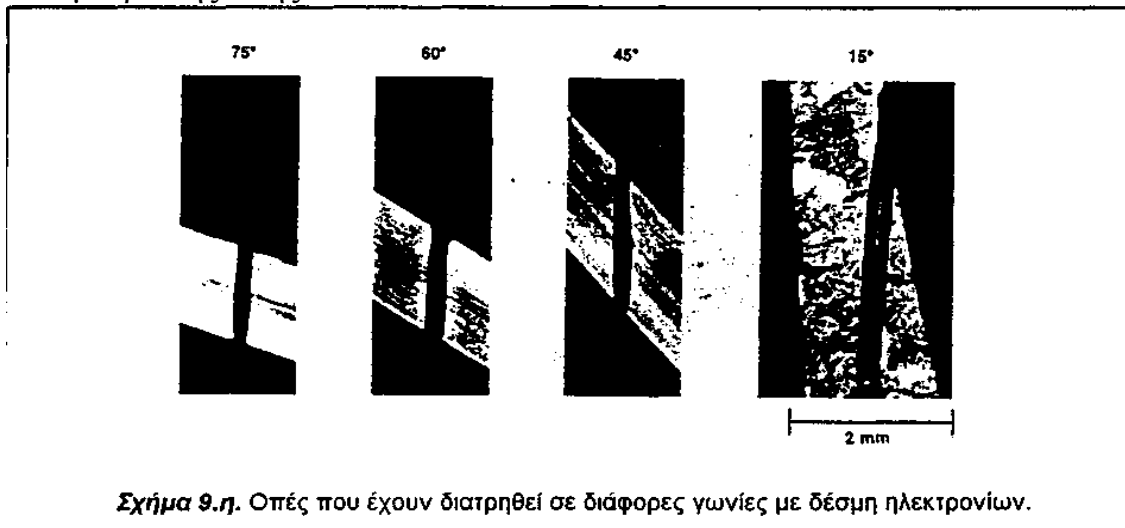
Ο πίνακας 9.1 δείχνει μερικά αποτελέσματα από τη διάτρηση διαφόρων μετάλλων. Η διάτρηση με δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη ποικιλία υλικών, αλλά οι περισσότερες κατεργασίες στη σημερινή εποχή έχουν γίνει με μέταλλα, όπως είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας, τα κράματα νικελιούχου χάλυβα και χάλυβα με κοβάλτιο, ο χαλκός, το αλουμίνιο και τέλος το τιτάνιο. Ακόμη υπάρχει μικρή εμπειρία με τα κεραμικά και το τεχνητό δέρμα, και θεωρητικά, είναι δυνατή η διάτρηση πλαστικών με την EBM. Η σκληρότητα, η ολκιμότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θερμική αγωγιμότητα και το σημείο τήξης του υλικού είναι μη περιοριστικοί παράγοντες όταν γίνεται διάτρηση με τη μέθοδο EBM.

Πίνακας 9.1. Τυπικά αποτελέσματα διάτρησης με δέσμη ηλεκτρονίων.

Κατεργαζόμενο υλικό	Πάχος mm	Διάμετρος οπής mm	Συνολικός αριθμός οπών	Χρόνος κύκλου min
Φύλλο χαλκού	5	0,2	254.364	720
Inconel 100 (δοκίμιο)	1,5 - 2,5	0,46	162	3,5
Κοβαλτιούχος χάλυβας (παράδειγμα 2).	4,3 - 6,3	0,81	11.766	40
CrNiCoMoW χάλυβας (παράδειγμα 1).	1,1	0,9	3.748	60

Προδιαγραφές ανοιγόμενης οπής. Οι οπές που έχουν επιτευχθεί μέχρι σήμερα κυμαίνονται από 0,1 μέχρι 1 mm σε διάμετρο, και ακόμη διεξάγεται έρευνα για να παραχθούν οπές με διάμετρο μέχρι 0,05 mm. Ποίκιλλα σχήματα οπών μπορούν να διατρηθούν. Στη διαμήκη διεύθυνση μπορούν να παραχθούν κυλινδρικές, κωνικές, σχήματος καμπάνας και βαρελοειδούς σχήματος οπές. Στην εγκάρσια διεύθυνση, μπορούν να παραχθούν κυκλικές οπές. Η διάτρηση με δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να επιτύχει αναλογίες βάθους οπής προς διάμετρο 10:1 ή και 15:1 σε ειδικές περιπτώσεις. Μια άλλη μοναδική δυνατότητα που προσφέρει η διάτρηση με δέσμη ηλεκτρονίων είναι ότι η γωνία ως προς την επιφάνεια μπορεί να είναι οξεία, με τιμή μέχρι 20° (βλέπε σχήμα 9.η).

Οι ανοχές της οπής στη διάτρηση με δέσμη ηλεκτρονίων είναι αρκετά καλές. Μια οπή μπορεί να διατρηθεί με ανοχή -0,1 mm ως προς τη θέση της και η διάμετρος της οπής στο στενότερο σημείο μπορεί να έχει ανοχή $\pm 5\%$, αλλά όχι λιγότερο από $\pm 0,03$ mm. Τυπικά, τα κέντρα των οπών πρέπει να απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον δύο φορές τη διάμετρο της οπής.



Σχήμα 9.η. Οπές που έχουν διατρηθεί σε διάφορες γωνίες με δέσμη ηλεκτρονίων.

δ. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της EBM

Τα πλεονεκτήματα της διάτρησης με δέσμη ηλεκτρονίων είναι:

1. Οι ρυθμοί διάτρησης φτάνουν τις 4000 οπές/sec.
2. Είναι δυνατές διατρήσεις σε πολλές και διαφορετικές μορφές.
3. Δεν επιβάλλονται περιορισμοί λόγω της σκληρότητας, της θερμικής χωρητικότητας, της ολκιμότητας, των ηλεκτρικών ιδιοτήτων ή των

- ιδιοτήτων της επιφάνειας (ανακλαστικότητα) του κατεργαζόμενου κομματιού.
4. Δεν υφίστανται καμία δυσκολία κατά τη κατεργασία οξείων γωνιών.
 5. Δεν συμβαίνει μηχανική παραμόρφωση επειδή καμμία δύναμη δεν μεταδίδεται στο εξάρτημα κατά τη διάρκεια της διάτρησης.
 6. Οι θερμικές επιδράσεις που συμβαίνουν είναι περιορισμένες επειδή απαιτείται μόνο ένας παλμός για τη παραγωγή κάθε οπής και οι διάρκειες των παλμών είναι βραχείες.
 7. Οι παράμετροι της διάτρησης είναι δυνατόν να μεταβληθούν εύκολα κατά τη διάρκεια της διάτρησης ενός απλού εξαρτήματος, ακόμη και από σειρά σε σειρά οπών.
 8. Υφίστανται η δυνατότητα διατήρησης επαναληψιμότητας και υψηλής ακρίβειας $\pm 0,1$ mm για τη θέση της οπής και $\pm 5\%$ για τη διάμετρο της οπής.
 9. Δεν υπάρχει φθορά του εργαλείου.
 10. Η καλύτερη επιτυγχανόμενη ποιότητα επιφανείας είναι συγκρίσιμη με αυτή των άλλων μεθόδων (πιθανόν να απαιτηθεί αποπεράτωση σε κάποιο βαθμό για την απομάκρυνση μιας ελαφράς αποστρογγύλευσης στη πλευρά εισόδου).
 11. Έχει σχετικά χαμηλό κόστος λειτουργίας συγκρινόμενη με το κόστος των άλλων μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη πολύ μικρών οπών.

Τα **μειονεκτήματα** της διάτρησης με δέσμη ηλεκτρονίων είναι:

1. Έχει υψηλό κεφαλαιουχικό κόστος εξοπλισμού.
2. Επί του παρόντος βρίσκει περιορισμένη βιομηχανική εφαρμογή.
3. Πρέπει να ληφθεί υπόψη η παρουσία ενός λεπτού επανατηκόμενου στρώματος επειδή η EBM είναι μια θερμική μέθοδος, το οποίο πιθανόν να δημιουργήσει προβληματισμό σε μερικές εφαρμογές.
4. Υπάρχει ανάγκη χρησιμοποίησης βοηθητικού υλικού ανάκρουσης.
5. Υπάρχει απαίτηση για έμπειρο χειριστή για τη λειτουργία των μηχανημάτων EBM, αν και η χρήση ενός συστήματος ψηφιακού ελέγχου με H/Y διευκολύνει το χειρισμό.

ε. Εφαρμογές της EBM

Η EBM χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για διάτρηση. Η διάτρηση με δέσμη ηλεκτρονίων είναι χρήσιμη όταν πρέπει να διατρηθούν πολλές μικρές οπές, ή όταν η διάτρηση των οπών είναι δύσκολη λόγω της γεωμετρίας τους ή της σκληρότητας του υλικού. Οι χημικές βιομηχανίες και οι βιομηχανίες ρευστών χρησιμοποιούν την EBM σαν μέθοδο διάτρησης για να παράγουν ένα μεγάλο αριθμό οπών για φίλτρα και για κόσκινα.

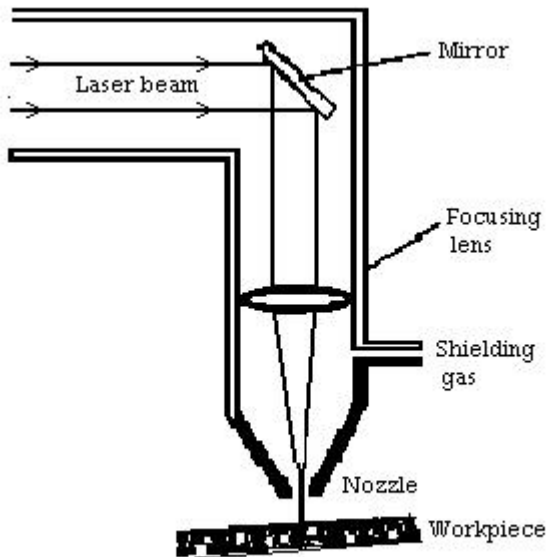
Παράδειγμα 1: Εφαρμογή διάτρησης οπής με δέσμη ηλεκτρονίων. Ένας κυψελοειδής θολωτός θάλαμος καύσης ενός κινητήρα jet κατασκευάζεται από χρωμιονικελιούχο χάλυβα εμπλουτισμένο με προσθήκες κοβαλτίου, μολυβδαινίου και βολφραμίου (βλέπε σχήμα 9.θ). Αυτός ο θάλαμος έχει πάχος τοιχώματος 1,1 mm και απαιτεί διάμετρο οπών $0,9 \text{ mm} \pm 0,05$ πιπί για σκοπούς ψύξης. Η μηχανή EBM χρησιμοποιείται για να παράγει σχεδόν 3800 οπές σε 60min.



Παράδειγμα 2: Διάτρηση οπών σε μια περιστρεφόμενη κεφαλή. Στη βιομηχανία μονωτικών υλικών, απαιτούνται περιστρεφόμενες κεφαλές για τη κατασκευή ινών υάλου (fiber glass). Αυτές οι κεφαλές κατασκευάζονται από κοβαλτιούχο χάλυβα και φέρουν πολλαπλές οπές. Το σχήμα 9.1 δείχνει μια περιστρεφόμενη κεφαλή όπου το πάχος της κυμαίνεται από 4,3 μέχρι 6,3 mm και απαιτεί διάμετρο οπών $0,81 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$. Σ' αυτό το υλικό μπορούν να διατρηθούν 11.766 οπές σε 40 min. Η επίδοση αυτή της EBM είναι 100 φορές ταχύτερη από την EDM και 20 έως 100 φορές ταχύτερη από τη διάτρηση με λέιζερ.

10.ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΛΕΙΖΕΡ

[LASER BEAM MACHINING (LBM)]



α. Εισαγωγή

Επειδή το πρώτο λειτουργικό λέιζερ δημιουργήθηκε το 1690, η τεχνολογία του λέιζερ έχει προοδεύσει με γρήγορο ρυθμό και είναι μία από τις πιο ευπροσάρμοστες **αναπτυσσόμενες** παραγωγικές μεθόδους διαθέσιμες σήμερα. Η ονομασία LASER προέρχεται **από τα αρχικά** των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, που σημαίνει, **φως που** ενισχύεται από συμπαρασυρόμενη εκπομπή ακτινοβολίας. Η κατεργασία με δέσμη λέιζερ (LBM) αφαιρεί, τήκει, ή τροποποιεί θερμικά ένα υλικό με μια εστιασμένη συνεκτική δέσμη μονοχρωματικού φωτός πάνω στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Η LBM δεν χρησιμοποιείται για μαζική αφαίρεση υλικού αλλά παρέχει ταχεία αφαίρεση υλικού με ένα εύκολα ελεγχόμενο μη φθειρόμενο εργαλείο (δεν έρχεται σε επαφή με το κατεργαζόμενο εξάρτημα). Η LBM επίσης θέτει ελάχιστες απαιτήσεις όσον αφορά τις ιδιοσκευές κατά τη κατεργασία κοπής και εκτελεί μια ποικιλία άλλων κατεργασιών όπως είναι η διάτρηση, η συγκόλληση, το σημάδεμα και η θερμική κατεργασία. Η αποτελεσματικότητα της LBM σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από το παλμό και την εστίαση της δέσμης και από την ανακλαστικότητα,

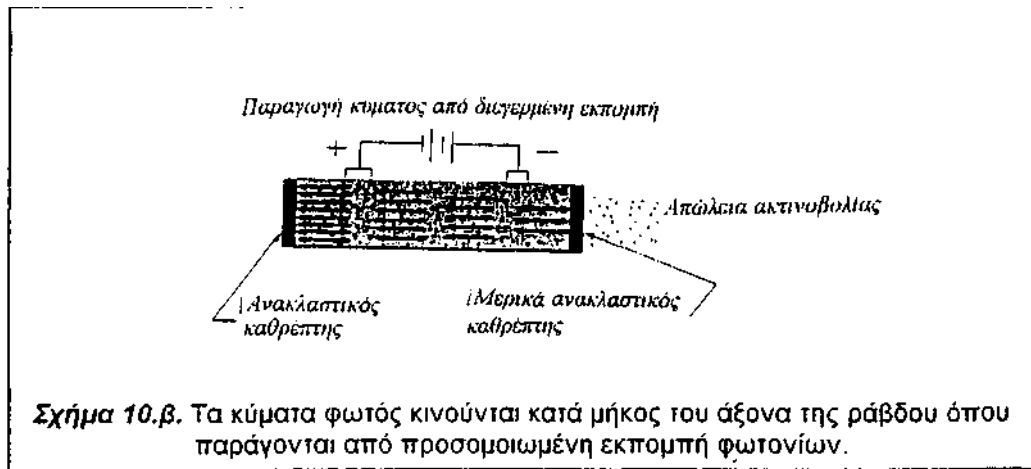
το συντελεστή απορροφητικότητας, τη θερμική αγωγιμότητα, την ειδική θερμότητα και τη θερμότητα ατμοποίησης του κατεργαζόμενου κομματιού.

Η μεγαλύτερη εφαρμογή των λέιζερ αφορά τη κοπή μετάλλου, πρώτιστα τη δημιουργία περιγράμματος δύο αξόνων με κοπή χαλυβδοελάσματος, κατεργασία η οποία εάν εκτελείτο διαφορετικά σε πρέσσα διάτρησης θα δημιουργούσε διαστασιακά προβλήματα. Μπορεί να πραγματοποιηθεί κοπή μετάλλου με πάχος 9,5 mm και λεπτότερο, αν και σήμερα η κοπή με λέιζερ CO₂ είναι ανταγωνιστική της κοπής με τόξο πλάσματος, όπου μπορεί να κοπεί μέταλλο πάχους 13 mm ή και μεγαλύτερο. Η κοπή με λέιζερ είναι ιδανική για παραγωγή τύπου παρτίδας, just in time (jit), ή για χαμηλή έως μεσαίας ποσότητας παραγωγή.

Ακόμη τα λέιζερ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη κοπή οπών σε οποιοδήποτε υλικό, συμπεριλαμβανομένου και του αδάμαντος, ή για τη πραγματοποίηση μικροσκοπικής εγχείρισης στο μάτι ή σε άλλα μέρη του ανθρώπινου σώματος. Τα λέιζερ μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν για τη καθοδήγηση πυραύλων και δορυφόρων, για την εκκίνηση θερμό

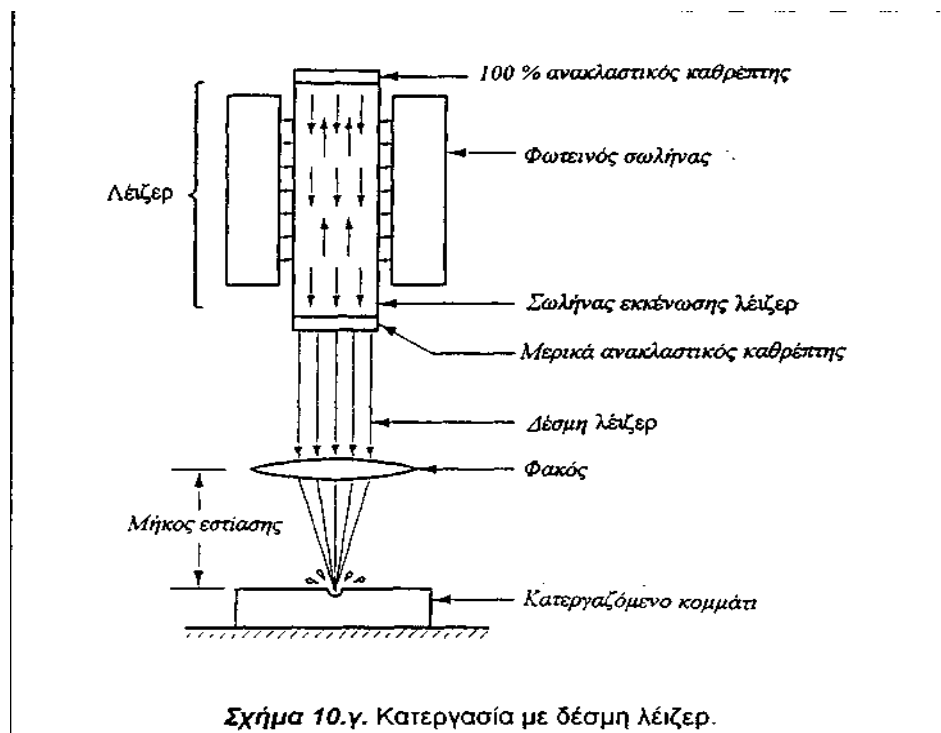
β. Στερεά λέιζερ

Το φορτίο της πηγής ισχύος του στερεού λέιζερ αναφλέγει το σπειροειδή σωλήνα που περιέχει μια παλλόμενη πηγή φωτός μ'ένα τρόπο όμοιο με ένα φωτογραφικό ηλεκτρονικό "flash". Ο σπειροειδής σωλήνας εκπέμπει μια έκρηξη φωτός που στέλνει ενέργεια στο φορέα δημιουργίας του λέιζερ, ο οποίος μπορεί να είναι μια ράβδος από ρουμπίνι. Αυτό το γεγονός διεγείρει τα άτομα χρωμίου μέσα στη ρουμπινένια ράβδο σε υψηλό ενεργειακό επίπεδο. Όταν αυτά τα άτομα ξαναγυρίσουν στην αρχική τους κατάσταση, εκπέμπουν θερμότητα και δέσμες ενεργειακού φωτός αποκαλούμενες ως φωτόνια. Τα παραγόμενα φωτόνια θα συγκρουστούν με άλλα άτομα προκαλώντας άλλα φωτόνια του ίδιου ακριβώς μήκους κύματος (βλέπε σχήμα 10.β).



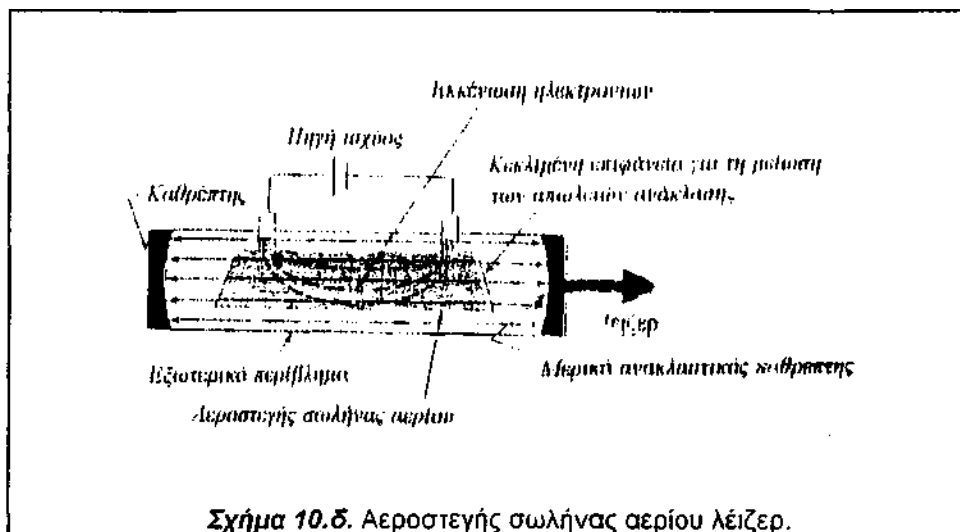
Αυτά τα φωτόνια ανακλώνται πίσω και εμπρός (παλινδρομούν) κατά μήκος της ράβδου από τα δύο κάτοπτρα, τετραγωνικής επιφάνειας σε κάθε άκρο της ράβδου. Συνεπώς, ο αριθμός των φωτονίων αυξάνει και παράγει περισσότερη ενέργεια έως ότου μερικά απ'αυτά διαπεράσουν το μερικά ανακλαστικό καθρέπτη παράγοντας μια δέσμη λέιζερ, η οποία μετά διέρχεται διά μέσου ενός φακού που εστιάζει τη δέσμη πάνω στο κατεργαζόμενο εξάρτημα (βλέπε σχήμα 10.γ).

Τα στερεά λέιζερ έχουν αποδειχθεί πολύ χρήσιμα στα πεδία της χειρουργικής, της ατομικής τηξης, της διάτρησης αδαμάντινων μητρών, των μετρήσεων και της σημειακής συγκόλλησης.



γ. Αέρια λέιζερ

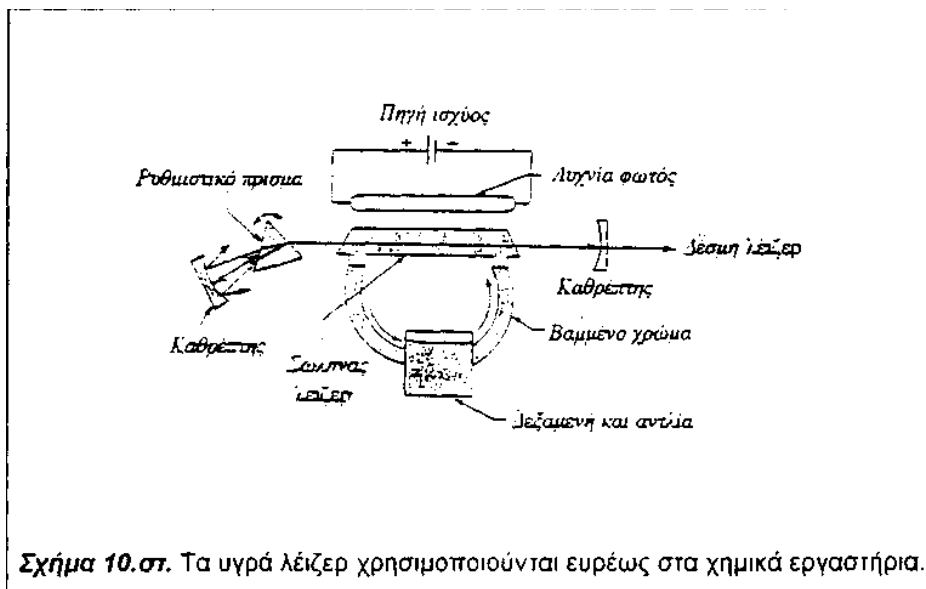
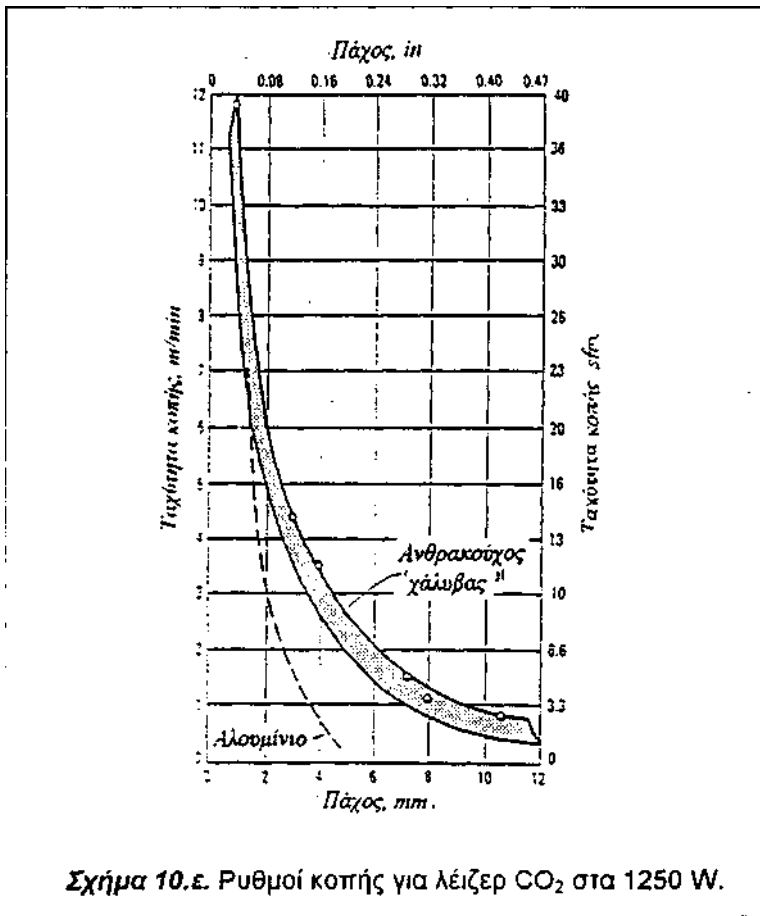
Πιθανόν το πιο διαδεδομένο αέριο λέιζερ είναι το ήλιου - νέου (HeNe). Το αέριο, μίγμα από 10 μέρη ηλίου προς 1 μέρος νέον, εμπυριέχεται μέσα σε μια αεροστεγή σωλήνα από ύαλο με κεκλιμένα άκρα για να μειώσουν τις απώλειες από ανάκλαση. Καθώς το κύκλωμα παλμικής ισχύος κλείνει, μια εκκένωση ηλεκτρονίων λαμβάνει χώρα εντός του σωλήνα, διεγείροντας τα άτομα ηλίου σε υψηλότερα επίπεδα ενέργειας. Αυτά τα άτομα συγκρούονται με τα άτομα του νέου ανεβάζοντας αυτά επάνω (στο ίδιο ενεργειακό επίπεδο). Όταν τα άτομα του νέου πέσουν πίσω στο προγενέστερο χαμηλότερο επίπεδο, εκπέμπουν θερμότητα και κόκκινα φωτόνια ακτίνας λέιζερ. Η δράση αυτή συνεχίζει να πολλαπλασιάζεται και τα άτομα παλινδρομούν μέσα στο σωλήνα μέχρις ότου μια ποσότητα φωτός να διαφύγει διά μέσου του μερικού καθρέπτη με τη μορφή κόκκινης δέσμης λέιζερ (βλέπε σχήμα 10.5). Τα λέιζερ HeNe είναι μικρά, σχετικά φθηνά και σχετικά ασφαλή. Συνεπώς, χρησιμοποιούνται σε εργαστήρια και σε σχολεία για πειράματα με λέιζερ.



Άλλη μορφή αερίου λέιζερ είναι το λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) το οποίο χρησιμοποιεί CO_2 μέσα στον αεροστεγή σωλήνα. Με αυτή τη διάταξη είναι δυνατόν να επιτευχθεί πολύ υψηλή απόδοση και είναι περισσότερο αποτελεσματική από το λέιζερ $\text{H}\Theta\text{N}\Theta$ (βλέπε σχήμα 10.ε). Στο σχήμα 10.ε βλέπουμε ότι με το CO_2 μπορούμε να επιτύχουμε υψηλές ταχύτητες κοπής ανάλογα με το πάχος του υλικού. Εάν το αέριο CO_2 αντλείται διά μέσου της κοιλότητας ή της σωλήνας λέιζερ και ψύχεται σε ένα εναλλάκτη θερμότητας, μπορεί να λειτουργεί συνεχώς σε πολύ υψηλή ισχύ. Μεγάλες μονάδες αυτού του τύπου είναι δυνατόν να ατμοποιήσουν οποιοδήποτε υλικό. Τα λέιζερ CO_2 χρησιμοποιούνται για τη κοπή οργανικών υλικών όπως είναι το καουτσούκ και το δέρμα, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για χρήση διατρητικών πρεσσών. Επίσης χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή οπών, για διάτρηση, για συγκόλληση και για κοπή μετάλλου με τη βοήθεια οξυγόνου.

δ. Υγρά λέιζερ

Τα υγρά λέιζερ χρησιμοποιούν σαν μέσο παραγωγής της δέσμης οργανικά χρώματα μέσα σε ένα διαλυτικό (βλέπε σχήμα 10.στ). Το υγρό κυκλοφορεί και ο φωτεινός σωλήνας αντλεί τα μόρια των χρωμάτων σε υψηλά επίπεδα ενέργειας και παράγονται φωτόνια. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται καθώς οι ρυθμιζόμενοι εξωτερικοί καθρέπτες δημιουργούν μια ανάδραση και τα άτομα παλινδρομούν μέσα στο σωλήνα έως ότου να περάσει μια ποσότητα φωτός διά μέσου του μερικού καθρέπτη σαν μια δέσμη λέιζερ. Τα υγρά λέιζερ είναι ιδιαίτερα κατάλληλα στις χημικές αναλύσεις λόγω του ρυθμιστικού πρίσματος το οποίο έχει δυνατότητα περιστροφής κατά την οποία παράγεται μια ποικιλία διαφορετικών χρωμάτων αντίστοιχου μήκους κύματος από τα οποία έχει κάποιος τη δυνατότητα συγκεκριμένης επιλογής.



ε. Βιομηχανικές εφαρμογές των λέιζερ

Τα λέιζερ χρησιμοποιούνται για:

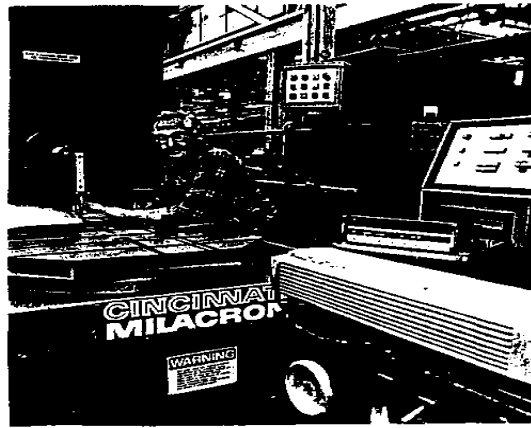
1. Κοπή οπών σε οποιοδήποτε γνωστό υλικό. Τα λέιζερ από ρουμπίνι χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή οπών με ακρίβεια σε αδάμαντα για τη κατασκευή μητρών για τη παραγωγή σύρματος με διέγκυση (wire drawing).
2. Παραγωγή οπών σε χαρτί, πλαστικό, ελαστικό, κ.λ.π. όπου όταν χρησιμοποιούνται συμβατικές μέθοδοι η ποιότητα επιφανείας είναι χαμηλή. Τα λέιζερ CO₂ χρησιμοποιούνται στη διάτρηση οπών σε πλαστικούς σωλήνες, σε μπιμπερό για τα μωρά και σε κεφαλές δοχείων αεροζόλ (spray tips).
3. Κοπή ρηχών αυλακών και εγχάραξη οργάνων μέτρησης και χαλύβδινων εξαρτημάτων.
4. Κοπή μετάλλων. Η κοπή με δέσμη λέιζερ δεν παράγει μια ακανόνιστη (δαντελωτή) τομή όπως η κοπή με πριονόλαμα.
5. Κοπή σκληρού χαλαζιακού κρυστάλλου. Μια δέσμη λέιζερ θα κόψει 100 φορές ταχύτερα από ένα αδαμάντινο τροχό.
6. Έχει τη δυνατότητα να κάνει λεπτές τομές σε περιπτώσεις που δεν είναι επιθυμητή η αφαίρεση περισσότερου υλικού όπως στα τυπωμένα κυκλώματα.
7. Κατεργασία μικροσκοπικών εξαρτημάτων.
8. Θερμική κατεργασία, όπως είναι η σκλήρυνση των επιφανειών των γραναζιών ή των κυλίνδρων. Η έντονη θερμότητα που απαιτείται γι'αυτό παράγεται σχεδόν ακαριαία.
9. Η δέσμη στοχεύει στη σκλήρυνση συγκεκριμένων επιφανειών και δεν χρειάζεται το εξάρτημα περεταίρω λείανση.
10. Μέτρηση με υψηλού βαθμού ακρίβεια της τάξεως των 0,00015 mm ανά μέτρο μήκους (βλέπε σχήμα 10.ζ).

στ. Πλεονεκτήματα των λέιζερ

1. Είναι δυνατόν να παραχθούν οπές σε οποιοδήποτε γνωστό υλικό.
2. Είναι δυνατόν να παραχθούν εξαιρετικά μικρές οπές με μεγάλη ακρίβεια.
3. Με υψηλής ισχύος λέιζερ νεοδυμίου υτρίου (Nd:YAG) μπορούν να κοπούν σκληρά εξαρτήματα με χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα,

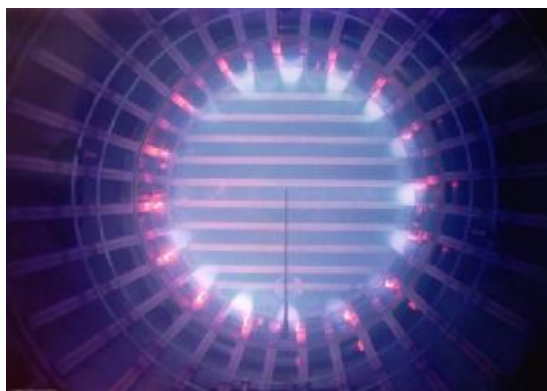
τα οποία δεν είναι δυνατόν να κοπούν με την EDM. Παράδειγμα, στερεό CBN (cubic boron nitride) είναι δυνατόν να κοπεί με λέιζερ αντί για την EDM. Επίσης με τον ίδιο τύπο λέιζερ μπορούν να κοπούν βελτιωμένα κράματα νικελίου, σε διατομές πάχους μέχρι 50 mm με ταχύτητες μεγαλύτερες από εκείνες της EDM.

4. Δεν υφίστανται συγκράτηση του κατεργαζόμενου εξαρτήματος στη θέση του αφού δεν υπεισέρχεται στρεπτική ροπή όπως στη συμβατική διάτρηση.



Σχήμα 10.ζ. Το λέιζερ χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ευθυγράμμισης των μερών των μηχανών.

10.ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ [PLASMA BEAM MACHINING (PBM)]



α. Εισαγωγή

Η εντατική ανάπτυξη της τεχνολογίας του τόξου πλάσματος τα τελευταία 20 χρόνια οδήγησε στην εξέλιξη μιας σειράς μεθόδων, για συγκόλληση, κοπή, και κατεργασία μετάλλων, σημαντικών ιδίως για τις βιομηχανίες σιδηρών κατασκευών.

Κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των μεθόδων αποτελεί η χρήση ενός εντατικά ψυχόμενου και μηχανικά περιορισμένου ηλεκτρικού τόξου. Με τον όρο «πλάσμα» ορίζουμε ένα αέριο που έχει θερμανθεί μέχρι αποσύνθεσης των μορίων του σε άτομα ιονισμένα, ικανά να άγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Η ιονισμένη ζώνη συνίσταται από θετικά φορτισμένα ιόντα, αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια καθώς από ουδέτερα άτομα και μόρια. Όσο υψηλότερη και πιο συγκεντρωμένη παρέχεται η ενέργεια τόσο περισσότερο ιονισμένα άτομα δημιουργούνται. Το γεγονός ότι το έντονα ιονισμένο αυτό ρεύμα αερίου ή αερίων (μίγμα) ελέγχεται κυρίως από την, με μηχανικά μέσα, «στένωση» ενός ηλεκτρικού τόξου οδήγησε σε διάφορες εφαρμογές της PBM.

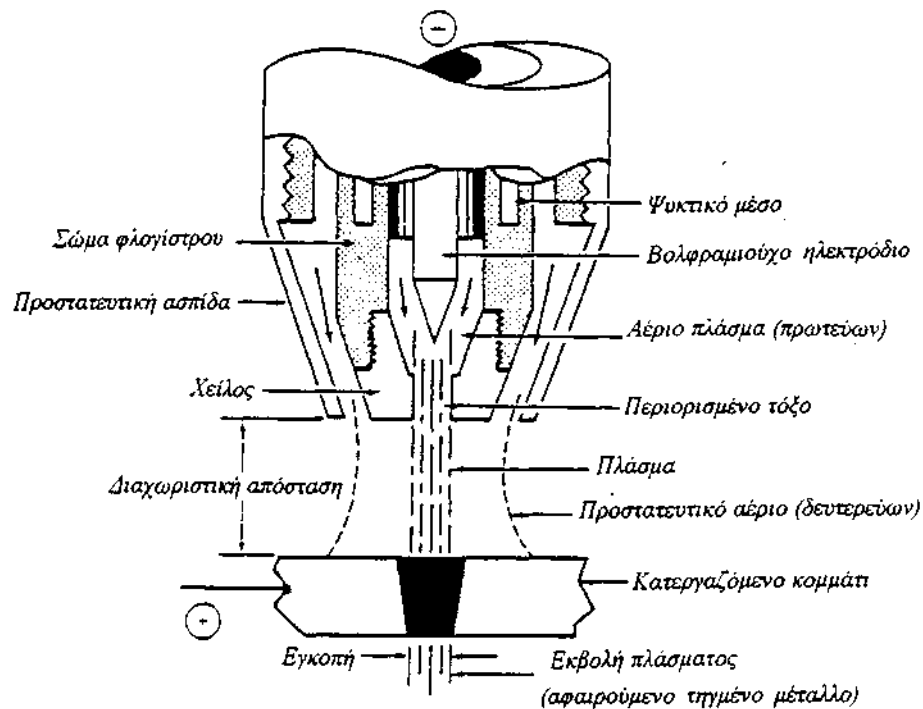
β. Διαδικασία PBM

Η κατεργασία με δέσμη πλάσματος (PBM) ή αλλιώς κοπή με τόξο πλάσματος

[plasma arc cutting (PAC)] χρησιμοποιεί ένα υπέρθερμο ρεύμα ενός ηλεκτρικά ιονισμένου αερίου για να τήξει και να αφαιρέσει υλικό (βλέπε σχήμα 11.α). Το πλάσμα δημιουργείται σε θερμοκρασία από 10.000 μέχρι 14.000 °C μέσα σ'ένα υδρόψυκτο ακροφύσιο ιονίζοντας ηλεκτρικά ένα κατάλληλο αέριο όπως είναι το άζωτο, το υδρογόνο, το αργόν, ή μίγματα αυτών των αερίων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα περισσότερα αγωγά μεταλλά. Το τόξο πλάσματος είναι ένα μίγμα ελεύθερων ηλεκτρονίων, θετικών φορτισμένων ιόντων και ουδέτερων ατόμων. Το τόξο εισάγεται μέσα σ'ένα περιορισμένο γεμάτο με αέριο θάλαμο από ένα σπινθήρα υψηλής συχνότητας. Η υψηλή τάση και η συνεχώς

ρεύματος ισχύ διατηρούν το τόξο, το οποίο εξέρχεται από το ακροφύσιο με ταχύτητα που πλησιάζει αυτή του ήχου. Το κατεργαζόμενο κομμάτι συνδέεται με το θετικό πόλο της πηγής ισχύος, ενώ το ηλεκτρόδιο με τον αρνητικό πόλο. Τα αέρια υψηλής ταχύτητας τήκουν και απομακρύνουν το λιωμένο μέταλλο (ρινίσματα) από το κατεργαζόμενο κομμάτι. Τα διπλής ροής φλόγιοτρα χρησιμοποιούν ένα δευτερεύον αέριο ή μια ασπίδα νερού για να βοηθήσουν στην απομάκρυνση του λιωμένου μετάλλου από την εγκοπή, δίνοντας μια καθαρότερη κοπή. Η ασπίδα ή έγχυση νερού χρησιμοποιείται μερικές φορές για να βοηθήσει στο περιορισμό του τόξου, απομακρύνοντας τη μαύρη σκωρία από τη θέρμανση και ελαττώνοντας το καπνό. Το κύριο πλεονέκτημα της PBM είναι η ταχύτητα. Μαλακός χάλυβας με πάχος 6,5 mm μπορεί να κοπεί με ρυθμό περίπου 3000 mm/min. Η ταχύτητα ελαττώνεται με το πάχος. Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του ακροφυσίου και μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής συνδέονται με τη χρήση φλόγιστρων τύπου έγχυσης νερού. Ο έλεγχος της απόστασης του ακροφυσίου από το κατεργαζόμενο κομμάτι είναι πολύ σημαντικός. Με τη χρήση ενός βολφραμιούχου ηλεκτροδίου είναι δυνατή η κατεργασία μεγάλης ποικιλίας υλικών με διάφορα πάχη μέσω κατάλληλων

ρυθμίσεων του επιπέδου ισχύος, του τύπου του αερίου, της παροχής του αερίου, της εγκάρσιας ταχύτητας και της γωνίας της φλόγας.



Σχήμα 11.α. Κατεργασία με δέσμη πλάσματος.

Η PBM μπορεί να κατεργαστεί εξωτικά μέταλλα σε υψηλούς ρυθμούς. Η κοπή περιγράμματος (profil) σε μέταλλα, ιδιαίτερα σε ανοξείδωτο χάλυβα και αλουμίνιο, έχει τη μεγαλύτερη εμπορική εφαρμογή. Ωστόσο, ο μαλακός χάλυβας, τα κράματα του χάλυβα, το τιτάνιο, ο μπρούντζος και άλλα πολλά μέταλλα μπορούν να κοπούν καθαρά και γρήγορα. Οι κοπές με πολλαπλά φλόγια είναι δυνατόν να προγραμματιστούν με CNC ή με φωτοκύτταρο παρακολούθησης ίχνους σε τράπεζες κοπής και να κόψουν ανοξείδωτο χάλυβα με πάχος 150mm. Ομαλές κοπές χωρίς επιμόλυνση από επιβλαβή αέρια είναι ένα χαρακτηριστικό πλεονέκτημα της μεθόδου. Ένα πρόβλημα που είναι πιθανό να εμφανιστεί είναι η προσκόλληση σκωρίας στο κάτω μέρος της κοπής όπου εκεί υπάρχει μια ζώνη επηρεασμένη από τη θερμότητα [heat affected zone (HAZ)]. Το βάθος της HAZ είναι συνάρτηση του κατεργαζόμενου μετάλλου, του πάχους του και της ταχύτητας κοπής. Για τη θερμική κατεργασία μιας επιφάνειας και τη συγκόλληση μετάλλων έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται φλόγιστρο πλάσματος.

12. ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [THERMAL ENERGY METHOD (TEM)]

α. Εισαγωγή

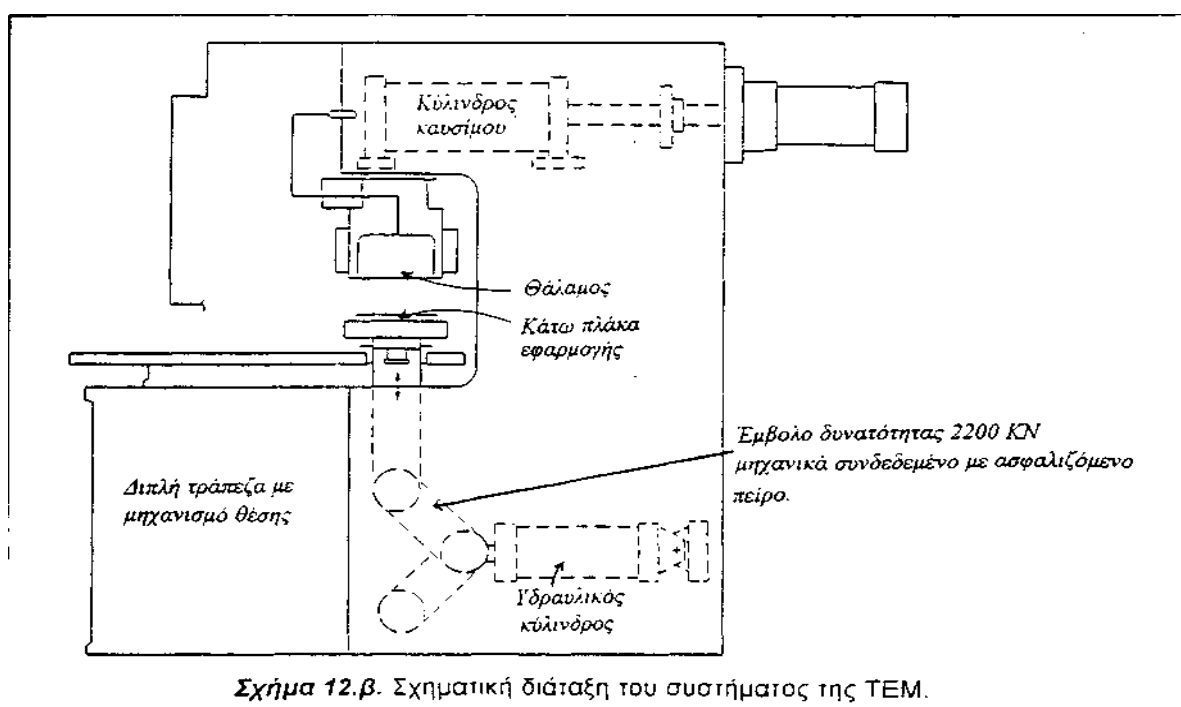
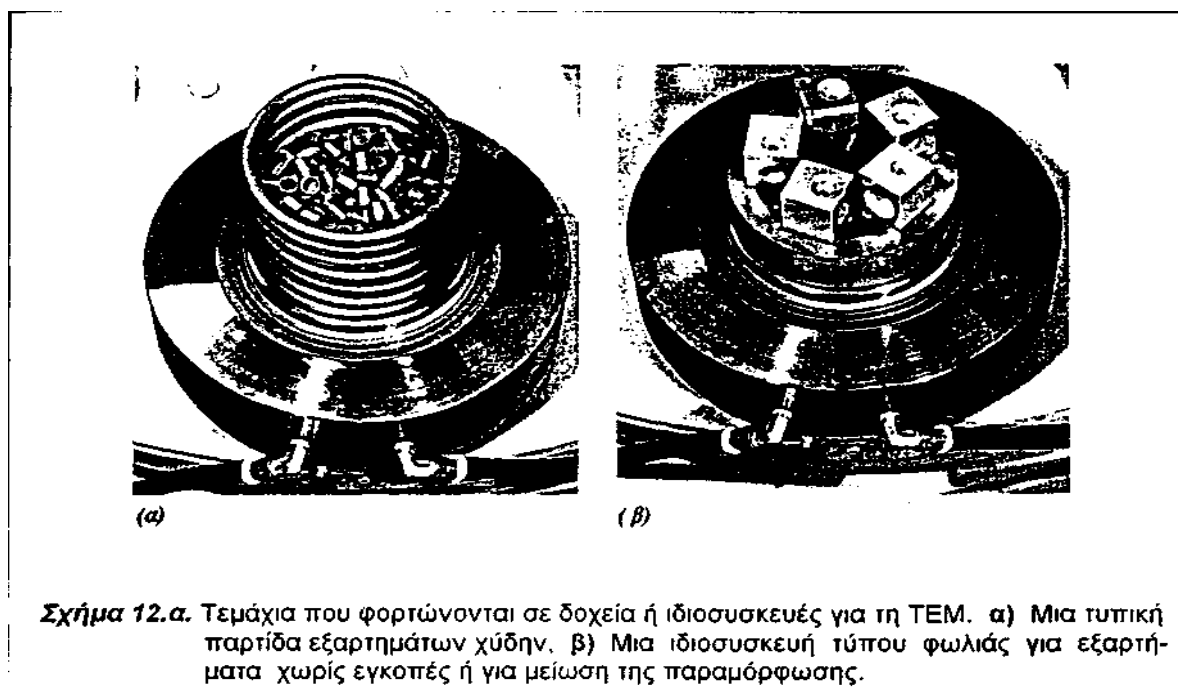
Η μέθοδος θερμικής ενέργειας (TEM) παρουσιάστηκε το 1970 σαν μέθοδος ατμογρέζωσης και απομάκρυνσης του "flash" των εξαρτημάτων με την εφαρμογή έντονης θερμότητας. Η TEM μπορεί να αφαιρέσει ακόμη και τα μεγαλύτερα γρέζια σε διάστημα μικρότερο των 20 ms, και μάλιστα τα αφαιρεί όλα ταυτοχρόνως. Αυτή η μέθοδος παρέχει επαναληψιμότητα και υπάρχει δυνατότητα αυτοματοποίησης αυτής.

β. Αρχές λειτουργίας της TEM

Τα εξαρτήματα που πρόκειται να κατεργαστούν φορτώνονται χύδην είτε τοποθετούνται σε ιδιοσυσκευές (βλέπε σχήμα 12.α), και το δοχείο ή η ιδιοσυσκευή που περιλαμβάνει τα εξαρτήματα εκτίθενται σε μια θέση εν σειρά με το θάλαμο (βλέπε σχήμα 12.β). Η κάτω πλάκα εφαρμογής πάνω στην οποία τοποθετούνται τα εξαρτήματα ανυψώνεται με τη βοήθεια ενός εμβόλου και ενός πείρου που πιέζει αυτή με δύναμη 2200 KNt μέχρι τον άνω θάλαμο στεγανοποιώντας έτσι την εφαρμογή. Ένα καύσιμο μίγμα από φυσικό αέριο και οξυγόνο εγχύεται μετά στο θάλαμο υπό πίεση. Η αρχική φωτιά ή θερμότητα παρέχεται από ένα σύστημα ανάφλεξης σε μορφή σπινθήρα από ένα αναφλεκτήρα. Ο σπινθήρας προκαλεί την ανάφλεξη του καύσιμου μίγματος, και όλο το αέριο καύσιμο καταναλώνεται περίπου σε 2 ms για να σχηματίσει ένα κύμα θερμότητας 3300 °C.

Το κύμα θερμότητας πλήττει οτιδήποτε υπάρχει μέσα στο θάλαμο. Αυτό πλήττει τα υδρόψυκτα τοιχώματα του θαλάμου, το μέταλλο του εξαρτήματος ή των εξαρτημάτων, τα γρέζια που υπάρχουν εντός των τυφλών οπών, στις εξωτερικές ακμές και στις διατεμνόμενες οπές (μικρές ή μεγάλες) όπου δεν μπορούν να αφαιρεθούν με το χέρι. Το κύριο σώμα του εξαρτήματος θερμαίνεται (συνήθως κάτω από 150 °C), ενώ τα γρέζια ή το "flash" (έχοντας λιγότερη μάζα ανά επιφάνεια) θερμαίνονται αμέσως

και εκρήγνυται μέσα σε φλόγες. Η θερμότητα που δημιουργείται από την ανάφλεξη του αερίου καυσίμου προκαλεί την έναρξη μιας δεύτερης ανάφλεξης του υλικού των γραζιών. Επειδή υπάρχει αφθονία οξυγόνου μέσα στο αρχικό καύσιμο μίγμα, τα απόβλιττα συνεχίζουν να καίγονται μέχρι να διασκορπιστεί η θερμότητα σε κάθε σημείο του κυρίως σώματος του εξαρτήματος.



Σε κάθε περίπτωση, το μέταλλο αντιδρά με το οξυγόνο για να σχηματιστεί το οξείδιο του μετάλλου. Αυτό το οξείδιο του μετάλλου επικάθεται στα τοιχώματα του θαλάμου, στις ιδιοσυσκευές ή στα δοχεία και στην επιφάνεια του εξαρτήματος. Τα οξείδια αυτά μπορούν να αφαιρεθούν από τα εξαρτήματα με τη βοήθεια υδάτινου διαλύματος. Στη περίπτωση των χαλύβων όπου αργότερα μπορεί να υποστούν θερμική κατεργασία, το καθάρισμα μπορεί να παραληφθεί όπως και στη περίπτωση μετάλλων που θα υποστούν ανάλογες επιφανειακές κατεργασίες.

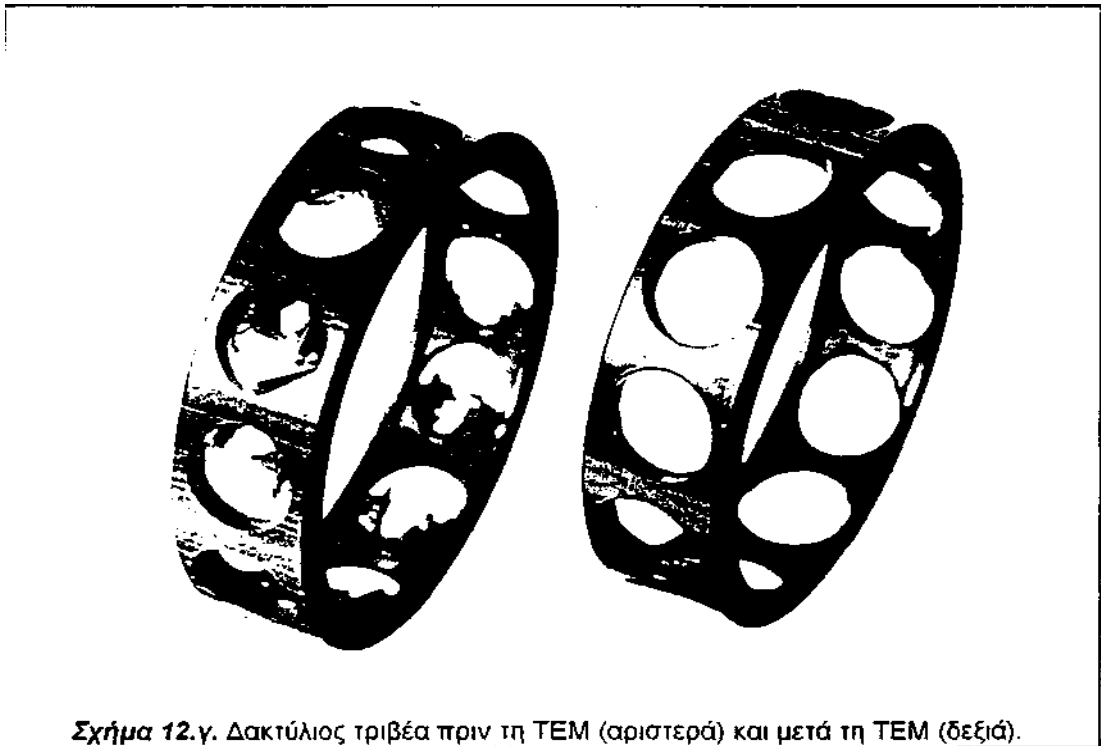
γ. Δυνατότητες της TEM

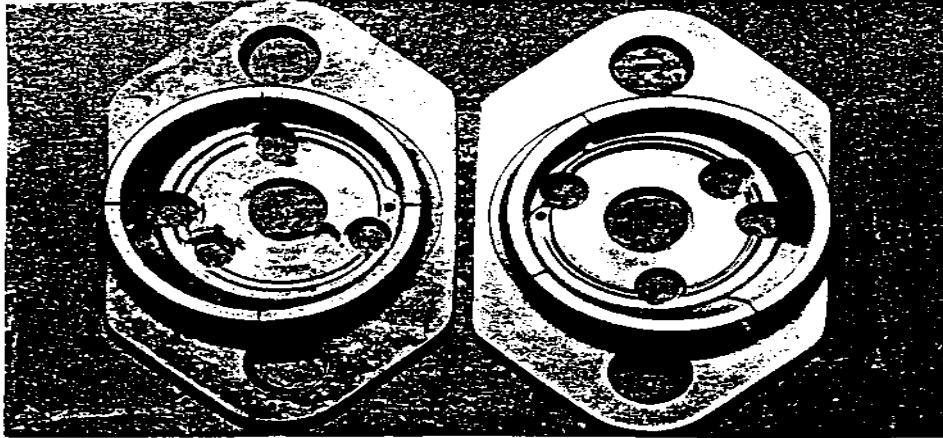
Η TEM είναι αποτελεσματική σε πολλά μη καύσιμα υλικά, όπως είναι τα σιδηρούχα και τα μη σιδηρούχα μέταλλα, τα πλαστικά και τα λαστιχένια υλικά. Η μέθοδος απαιτεί περισσότερη ενέργεια για την απογρέζωση μετάλλων ανθεκτικών στη διάβρωση απ'ότι μετάλλων μη κραματούχων. Το δεύτερο κύμα φωτιάς σβήνει λόγω της ροής της θερμότητας εντός του εξαρτήματος. Επομένως, τα υλικά εκείνα που έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα προκαλούν ταχύτερη κατάσβεση της φωτιάς απ'ότι τα υλικά που έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Σαν αποτέλεσμα αυτού, σε υλικά όπως είναι ο χάλυβας ή ο χυτοσίδηρος που έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα, είναι ευκολότερο να επιτευχθεί γωνιότμηση ή αποστρογγύλευση της ακμής απ'ότι στους σχετικά καλύτερους αγωγούς της θερμότητας, όπως είναι ο ορείχαλκος.

Η TEM μπορεί να αφαιρέσει αμέσως γρέζια που έχουν μέγεθος όσο το νύχι του δακτύλου και πάχος μέχρι 0,5 mm κάτω από ιδανικές συνθήκες. Το σχήμα 12.γ εικονίζει της δυνατότητες της TEM στο δακτύλιο ενός τριβέα. Αυτή η μέθοδος είναι εξίσου αποτελεσματική τόσο στα μικρά όσο και στα μεγάλα εξαρτήματα. Το σχήμα 12.δ δείχνει ένα προστατευτικό κάλυμμα (κέλυφος) από χυτοσίδηρο πριν και μετά την εφαρμογή της TEM.

δ. Περιορισμοί της TEM

Πολλές μέθοδοι απογρέζωσης αφαιρούν το "flash" που σχηματίζεται σε χυτά αντικείμενα στο επίπεδο της διαχωριστικής γραμμής του διαιρούμενου καλουπιού. Η TEM χρησιμοποιείται επίσης για την αφαίρεση του συγκεκριμένου "flash" αν και δεν έχει τη δυνατότητα της ολικής αφαίρεσης επειδή το δεύτερο κύμα φωτιάς σβήνει καθώς το "flash" ευρύνεται από την άκρη (κορυφή) προς τη βάση του (χυτό εξάρτημα). Σε αντίθεση με ένα γρέζι το "flash" είναι πιο πλατύ στη βάση του απ'ότι στη κορυφή του. Η κορυφή του "flash" αναφλέγεται με τη TEM αλλά η ροή θερμότητας προς το κορμό του εξαρτήματος είναι διαφορετική στο "flash" απ'ότι στο γρέζι. Συνεπώς, η TEM μπορεί να αφήσει μια αποστρογγυλεμένη διόγκωση στη βάση του "flash".





Σχήμα 12.δ. Προστατευτικό κάλυμμα (κέλυφος) από χυτοσίδηρο πριν την εφαρμογή της TEM (αριστερά) και μετά την εφαρμογή της TEM (δεξιά).

Η TEM δεν χρησιμοποιείται για τη λείανση επιφανειών. Ένας άλλος περιορισμός της TEM είναι η κρουστική επίδραση των κυμάτων θερμότητας. Το κύμα θερμότητας μπορεί να προκαλέσει τη παραμόρφωση των λεπτών ή εύθραυστων εξαρτημάτων, ή μερών αυτών, αλλά σε μερικές περιπτώσεις το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με τη χρησιμοποίηση κατάλληλης ιδιοσυσκευής. Το σχήμα 12.α δείχνει μια ιδιοσυσκευή τύπου φωλιάς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λύσει το πρόβλημα της παραμόρφωσης ή για να συγκρατήσει τα εξαρτήματα έτσι ώστε να μην αναπηδήσουν και χτυπήσουν μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της TEM.

ΟΜΑΔΑ Γ

ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

13. ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

[ELECTROCHEMICAL MACHINING (ECM)]

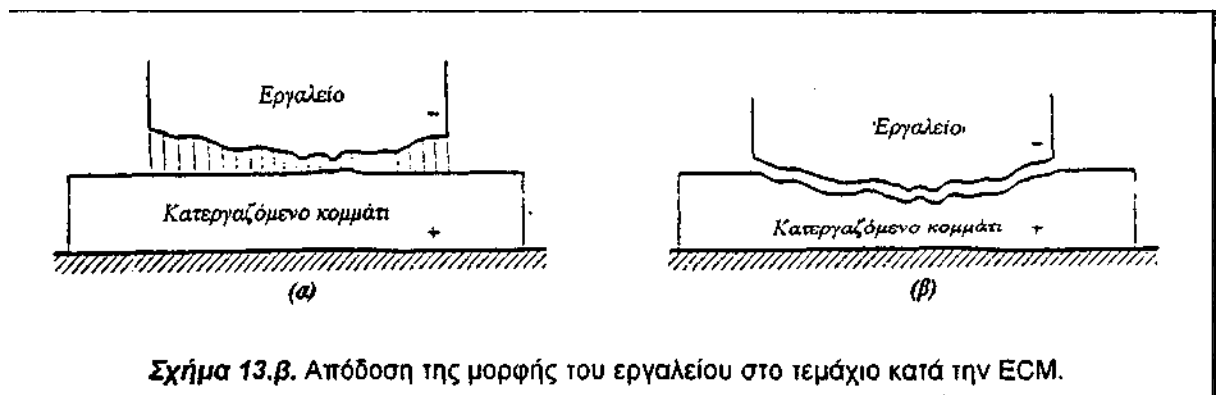
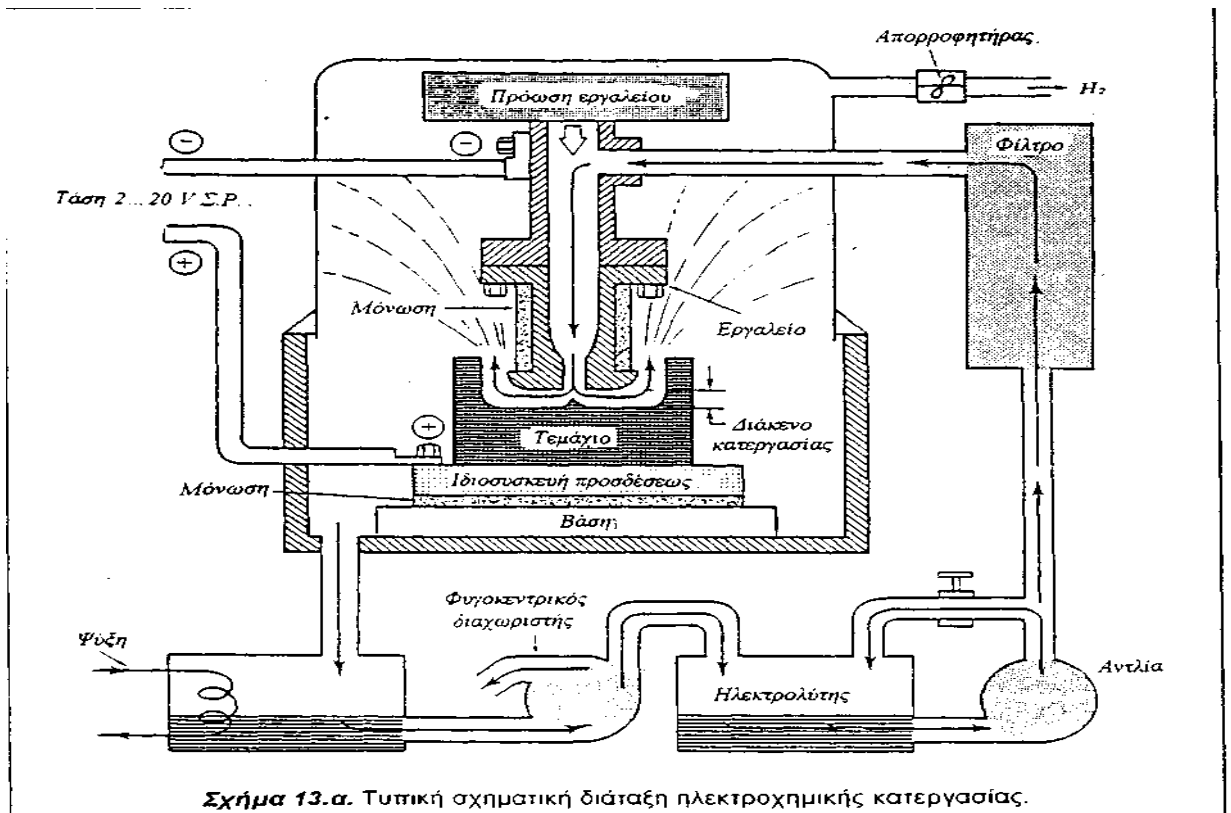
α. Εισαγωγή

Η ηλεκτροχημική κατεργασία, αποκαλούμενη στο εξής ECM, διαφέρει από τις συμβατικές τεχνικές κοπής μετάλλου στο ότι ο συνδυασμός ηλεκτρικής και χημικής ενέργειας χρησιμοποιείται σαν κοπτικό εργαλείο. Η ECM μπορεί να κατεργαστεί το μέταλλο εύκολα, ανεξάρτητα από τη σκληρότητα του κατεργαζόμενου κομματιού και χαρακτηρίζεται σαν μια παραγωγή 'χωρίς γρέζια'. Ένα μη περιστρεφόμενο εργαλείο που έχει το σχήμα της απαιτούμενης κοιλότητας είναι το κοπτικό εργαλείο, επομένως, τετράγωνα ή δύσκολα να παραχθούν σχήματα μπορούν εύκολα να κοπούν σε ένα εξάρτημα. Η φθορά του κοπτικού εργαλείου είναι ελάχιστη αφού το εργαλείο δεν έρχεται ποτέ σε επαφή με το κατεργαζόμενο κομμάτι. Η ECM είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη παραγωγή κυκλικών διαμπερών οπών, τετραγωνικής διατομής διαμπερών οπών, κυκλικών ή τετραγωνικών τυφλών οπών και απλών κοιλοτήτων που έχουν ευθείες παράλληλες πλευρές και κατεργασίες πλάνης. Η ECM είναι εξαιρετικά πολύτιμη στη κατεργασία μετάλλων όταν η σκληρότητα τους υπερβαίνει τα 42 Rockwell C (400 BHN). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της ECM είναι ότι οι επιφάνειες και οι ακμές των κατεργαζόμενων κομματιών δεν παραμορφώνονται και είναι απηλαγμένες από γρέζια.

β. Τρόπος λειτουργίας της ECM

Η ηλεκτροχημική κατεργασία βασίζεται στην αφαίρεση μετάλλου με ηλεκτρολυτική δράση. Είναι, πρακτικά, η αντίστροφη εργασία της επιμεταλλώσεως με ουσιαστική διαφορά την επιδίωξη για την αποφυγή κάθε επικαθήσεως μετάλλου στη κάθοδο. Όπως και στην EDM, το τεμάχιο που χρησιμοποιείται και το εργαλείο που το κατεργάζεται πρέπει να είναι κατασκευασμένα από ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό.

Στο σχήμα 13.α απεικονίζεται ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου. Το τεμάχιο προσδένεται μέσα σ'ένα ειδικό δοχείο που είναι προσαρμοσμένο στη τράπεζα της μηχανής και συνδέεται με το θετικό πόλο μιας ηλεκτρικής πηγής συνεχούς ρεύματος. Το εργαλείο - ηλεκτρόδιο φέρεται από τη κεφαλή της μηχανής και είναι συνδεδεμένο με τον αρνητικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής. Η κεφαλή κινείται με ελεγχόμενη ταχύτητα προώσεως. Στο διάκενο που υπάρχει μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου διοχετεύεται συνέχεια με πίεση μέσω αντλίας διάλυμα ηλεκτρολύτη. Η διοχέτευση αυτή, ανάλογα με την εφαρμογή, γίνεται είτε εξωτερικά, είτε και εσωτερικά με τη βοήθεια καταλλήλων διόδων που υπάρχουν στο εργαλείο από τη κατασκευή του. Το σχήμα του εργαλείου είναι αντίστοιχο προς τη κοιλότητα που πρόκειται να δημιουργηθεί στο τεμάχιο.



Από την ηλεκτροχημεία είναι γνωστό ότι η δράση του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος που κυκλοφορεί μεταξύ θετικού ηλεκτροδίου (άνοδος) - ηλεκτρολύτη - αρνητικού ηλεκτροδίου (κάθοδος) διαλύει το υλικό του θετικού ηλεκτροδίου, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση του τεμαχίου. Η ηλεκτρική αντίσταση διαβάσεως, από την άλλη πλευρά, είναι ελάχιστη (και συνεπώς το ηλεκτρικό ρεύμα και η συναφής ηλεκτροχημική δράση μέγιστη) στις περιοχές ελάχιστης αποστάσεως των επιφανειών εργαλείου, κομματιού. Επειδή ακριβώς το υλικό του κομματιού αφαιρείται με υψηλότερο ρυθμό στις θέσεις αυτές, η μορφή του εργαλείου αποδίδεται σταδιακά, με τη συνεχή πρόωση του, στο κομμάτι [βλέπε σχήμα 13.β (α)

και (β)]. Η ομοιότητα με την EDM ως προς τη διαδικασία της εκσκαφής είναι φανερή. Η επιμετάλλωση του εργαλείου - καθόδου από το υλικό της ανόδου εξουδετερώνεται από την εξαναγκασμένη και με σημαντική πίεση ροή του ηλεκτρολύτη που απομακρύνει από τη περιοχή εργασίας τα προϊόντα της ηλεκτρολύσεως. Με το τρόπο αυτό το εργαλείο, σε αντιδιαστολή με την EDM, δεν υφίστανται καμία φθορά ή αλλαγή σχήματος και διαστάσεων. Συνεπώς, ένα και μόνο εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολύ μεγάλο αριθμό τεμαχίων.

γ. Συνθήκες κατεργασίας

Η ECM περιγράφεται από τους νόμους του Faraday. Σύμφωνα με αυτούς, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού είναι απευθείας ανάλογος προς την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ένταση του ρεύματος είναι οι παρακάτω:

- Η τάση της τροφοδοτούσας πηγής ρεύματος.
 - Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη.
 - Ο ρυθμός πρόωσης.
 - Η σύνθεση του ηλεκτρολύτη.
 - Η ροή του ηλεκτρολύτη.
-
- Το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού.

Η τάση διά μέσου του διακένου κοπής επηρεάζει την ένταση του ρεύματος και το ρυθμό αφαίρεσης υλικού και ελέγχεται στις περισσότερες εφαρμογές της ECM. Ωστόσο, για μια σταθερή τάση, η ένταση του ρεύματος εξαρτάται επίσης από την ηλεκτρική αντίσταση του διακένου κοπής. Η αντίσταση αυτή είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθεί επειδή εξαρτάται από την αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη και την εγκάρσια απόσταση του διακένου. Η τάση τροφοδοσίας κυμαίνεται από 3 μέχρι 30 Volt, ενώ οι χαμηλότερες τιμές χρησιμοποιούνται για τις τελικές φάσεις αποπεράτωσης.

Ο ρυθμός πρόωσης, ή ρυθμός διείδυσης, ελέγχεται επίσης στις περισσότερες εφαρμογές της ECM. Σε μια σταθερή τάση, τόσο το μετωπικό διάκενο όσο και το πλευρικό διάκενο (βλέπε σχήμα 13.α) είναι

αντιστρόφως ανάλογα με το ρυθμό πρόωσης. Η επίδραση στο πλευρικό διάκενο είναι περίπου το 60% από αυτή στο μετωπικό διάκενο. Η εγκάρσια απόσταση του μετωπικού διακένου είναι συνάρτηση του ρυθμού πρόωσης επειδή, καθώς η κάθοδος (ηλεκτρόδιο) προωθείται μέσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι με υψηλότερο ρυθμό, το διάκενο μικραίνει, προκαλώντας πτώση της αντίστασης. Καθώς πέφτει η αντίσταση, η ένταση του ρεύματος αυξάνει, επομένως ο ρυθμός κατεργασίας επίσης αυξάνει μέχρι να υπάρξει κάποια ισορροπία. Σε χαμηλότερους ρυθμούς πρόωσης, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού μειώνεται καθώς το διάκενο αυξάνει επειδή η κάθοδος δεν διατηρεί την απόσταση της σταθερή από την επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού. Καθώς το διάκενο αυξάνει, η αντίσταση αυξάνει και μειώνεται η ένταση του ρεύματος. Το πλευρικό διάκενο είναι και αυτό επίσης συνάρτηση του ρυθμού πρόωσης. Τα μετωπικά διάκενα κυμαίνονται συνήθως από 0,1 μέχρι 0,8 mm και τα πλευρικά διάκενα κυμαίνονται περίπου από 0,5 μέχρι 1,3 mm.

Ο ρυθμός πρόωσης επίσης είναι απευθείας ανάλογος με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Για παράδειγμα, κατά τη κατεργασία μιας οπής με ρυθμό πρόωσης 2,5 mm/min στα 10 volt απαιτούνται 1000 A, ενώ εάν ο ρυθμός πρόωσης διπλασιαστεί και γίνει 5 mm/min απαιτούνται 2000 A. Αυτό επίσης απαιτεί ένα δυναμικό των 20 Volt και η κατανάλωση ισχύος ($V * I$) θα αυξηθεί από 10 στα 40 Kwatt.

Η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη επηρεάζει και αυτή την αντίσταση του διακένου κοπής. Αύξηση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη θα προκαλέσει αύξηση της αγωγιμότητας, η οποία με τη σειρά της θα προκαλέσει μείωση της αντίστασης. Αύξηση της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη αυξάνει επίσης την αγωγιμότητα του. Συνεπώς, η συγκέντρωση και η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη πρέπει να ελέγχονται.

Η σύνθεση του ηλεκτρολύτη επηρεάζει απευθείας την αγωγιμότητα, τους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Οι παράμετροι που αναλύθηκαν παραπάνω για μια δεδομένη εφαρμογή δεν αποδίδουν τα ίδια αποτελέσματα στην ECM εάν χρησιμοποιηθεί ένας διαφορετικός τύπος ηλεκτρολύτη. Συνήθως τα στάδια εξέλιξης της κατεργασίας αρχίζουν με την επιλογή του σωστού ηλεκτρολύτη. Οι άλλοι

παράμετροι και η κάθοδος ρυθμίζονται μεταγενέστερα έτσι ώστε να εξασφαλιστεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Ο ρυθμός ροής του ηλεκτρολύτη είναι επίσης ένας παράγοντας που ελέγχεται στη μέθοδο ECM. Η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη αυξάνει καθώς αυτός περνά από το διάκενο και εξαρτάται από τη παροχή. Επιπρόσθετα, ο ρυθμός με τον οποίο οι φυσαλίδες υδρογόνου απομακρύνονται θεωρείται ότι επιδρά στην αγωγιμότητα. Ο έλεγχος της πίεσης είναι η μέθοδος ελέγχου της παροχής (ειδικά όταν χρησιμοποιείται φυγοκεντρική αντλία). Ο ρυθμός ροής επηρεάζει επίσης το επίπεδο στροβιλισμού του ηλεκτρολύτη καθώς αυτός περνά από το διάκενο και αυτό με τη σειρά του επηρεάζει τη τραχύτητα επιφανείας του" κατεργαζόμενου κομματιού. Ο ρυθμός ροής πρέπει να είναι υψηλός έτσι ώστε να είναι αρκετός να απομακρύνει τα παραπροϊόντα της κατεργασίας (ιλύς).

Το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού επηρεάζει επίσης τους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού και την ένταση του ρεύματος. Οι θεωρητικοί ρυθμοί αφαίρεσης υλικού για διάφορα μέταλλα αναγράφονται στο πίνακα 13.1. Αυτοί οι ρυθμοί αφαίρεσης υλικού απορρέουν από το κανόνα του Faraday.

δ. Ο ηλεκτρολύτης

Ο ηλεκτρολύτης παρέχει τρεις κύριες λειτουργίες στη περιγραφόμενη μέθοδο: Μεταφέρει το ρεύμα μεταξύ του εργαλείου και του κατεργαζόμενου κομματιού, απομακρύνει τα προϊόντα της αντίδρασης από τη περιοχή της κοπής και παραλαμβάνει τη παραγόμενη στη ζώνη εργασίας θερμότητα. Η τελευταία οφείλεται στη ροή ρεύματος αρκετών εκατοντάδων ή χιλιάδων Ampere. Πρέπει να είναι χημικά δραστικός, για να προκαλεί ικανοποιητική αφαίρεση μετάλλου, αλλά και ανεκτά διαβρωτικός, ώστε κατά το δυνατό να περιορίζεται η φθορά των μερών της μηχανής που έρχεται σε επαφή μαζί του. Ακόμη οι ηλεκτρολύτες πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, χαμηλή τοξικότητα καθώς και χημική και ηλεκτροχημική σταθερότητα. Στη πράξη, για να ικανοποιηθούν αυτές οι απαιτήσεις, γίνεται πάντοτε κάποιος

κατάλληλος συμβιβασμός, ενώ τα βρεχόμενα μέρη των εργαλειομηχανών ECM κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα ή προστατεύονται με αντιδιαβρωτικά μέσα.

Πίνακας 13.1. Θεωρητικοί ρυθμοί αφαίρεσης υλικού στην ECM (1000 A, 100% απόδοση).

Μέταλλο	Σθένος	Πυκνότητα gr./cm ³	Αφαιρούμενη μάζα kg/h	Αφαιρούμενος όγκος mm x 10 ³ /min
Αλουμίνιο	3	2,7	0,34	2,1
Βηρύλλιο	2	1,9	0,17	1,5
Χαλκός	1	9,0	2,37	4,4
	2	9,0	1,18	2,1
Σίδηρος	2	7,9	1,04	2,3
	3	7,9	0,69	1,5
Μαγνήσιο	2	1,7	0,45	4,4
Μολυβδαίνιο	3	10,2	1,19	2,0
	4	10,2	0,89	1,5
	6	10,2	0,60	1,0
Νικέλιο	2	8,9	1,09	2,1
	3	8,9	0,73	1,3
Νιόβιο	3	8,6	1,16	2,3
	4	8,6	0,87	1,6
	5	8,6	0,69	1,3
Ταντάλιο	5	16,6	1,35	1,3
Τιτάνιο	3	4,5	0,59	2,1
	4	4,5	0,45	1,6
Βολφράμιο	6	19,3	1,14	1,0
	8	19,3	0,86	0,8

Η παροχή του ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι επαρκής, για να αποφεύγεται η ανύψωση της θερμοκρασίας του στο σημείο βρασμού καθώς και για να απομακρύνει αποτελεσματικά από το διάκενο κατεργασίας τα προϊόντα και αέρια (κυρίως υδρογόνο) της ηλεκτρολύσεως. Ωστόσο, θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι με την ECM δεν υφίστανται περίπτωση ψαθυροποίησης του κατεργαζόμενου τεμαχίου λόγω του υδρογόνου επειδή το υδρογόνο αποδίδεται (παράγεται) στη κάθοδο και όχι στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Οι συνήθως χρησιμοποιούμενοι ηλεκτρολύτες έχουν ως βάση άλατα NaCl, NaNO₂, NaNO₃ και KCl. Στη βιομηχανία υπάρχει μεγάλος αριθμός ηλεκτρολυτών που φέρουν εμπορικές ονομασίες των παρασκευαστών τους και προορίζονται για τις διάφορες ειδικές εφαρμογές. Αποτελούνται από σύνολα αλάτων ή και άλλων πρόσθετων σε διάφορες αναλογίες μεταξύ τους. Η κατά βάρος συγκέντρωση των παραπάνω στο νερό, είναι συνήθως 10 μέχρι 15%. Ένα διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης έχει τα πλεονεκτήματα της χαμηλότερης τάσης και ισχύος λόγω της καλύτερης αγωγιμότητας. Ταχύτεροι ρυθμοί εισχώρησης και μεγαλύτερη ακρίβεια είναι επίσης δυνατές επειδή η αγωγιμότητα του διαλύματος υψηλής συγκέντρωσης παρουσιάζει μικρότερες διακυμάνσεις με τις αλλαγές της

θερμοκρασίας. Απ'την άλλη πλευρά, ένα αραιότερο, χαμηλής συγκέντρωσης διάλυμα κοστίζει λιγότερο, διαλύεται ευκολότερα και αποδίδει καλύτερη ποιότητα επιφανείας σε ορισμένα υλικά. Οι ηλεκτρολύτες αποδίδουν καλύτερα όταν η κρυσταλλική δομή του κατεργαζόμενου κομματιού είναι λεπτόκοκκη και όταν τα συστατικά του χαρακτηρίζονται από μια επαρκώς ομοιόμορφη συμπεριφορά όσον αφορά το ρυθμό αφαίρεσης υλικού.

ΠΡΟΦΥΛΑΞΕΙΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Το χλωριούχο νάτριο και το χλωριούχο κάλιο που χρησιμοποιούνται σαν ηλεκτρολύτες δεν παρουσιάζουν μεγάλη επικινδυνότητα. Τα οξειδωτικά άλατα όπως είναι το νιτρικό νάτριο και ιδιαίτερα το χλωριούχο νάτριο είναι μεγαλύτερης επικινδυνότητας. Αυτά δεν πρέπει να επιτρέπεται να εμποτίζουν και να ξηραίνονται σε οργανικά ή καύσιμα υλικά. Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες (ξηροί ή υγροί) είναι επικίνδυνοι για το σωματικό ιστό. Οι ομίχλες, οι καπνοί και οι σκόνες των αλκαλικών ηλεκτρολυτών πρέπει να αποφεύγονται. Ο εξαερισμός πρέπει να παρέχεται μαζί με τον εξοπλισμό για το χειρισμό των χημικών. Προστατευτικά γάντια και προστατευτικό κάλυμμα προσώπου ή μάσκες απαιτούνται για το χειρισμό των περισσοτέρων χημικών. Το υδρογόνο, που απελευθερώνεται στη κάθοδο (ηλεκτρόδιο) της ECM, πρέπει να εξαερώνεται από το υψηλότερο σημείο του μηχανήματος για να αποτραπούν μ'αυτό το τρόπο οι εκρήξεις υδρογόνου.

Οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται για τη κατεργασία κραμάτων που περιέχουν

χρώμιο ή άλλα βαριά μέταλλα μπορεί να αποβούν αυξημένης επικινδυνότητας για το περιβάλλον. Η κατάλληλη αποθήκευση, ο χειρισμός και η διάθεση κάνουν απαραίτητη τη ανακύκλωση αυτών των ηλεκτρολυτών. Τα μέταλλα μπορούν να ανακτηθούν ή να μετατραπούν κατάλληλα για να ελαχιστοποιήσουν τα περιβαλλοντολογικά προβλήματα.

Η σωστή σχεδίαση του εξοπλισμού και των εργαλείων μαζί με σωστές διαδικασίες λειτουργίας, ελαχιστοποιούν τη πιθανότητα βραχυκυκλώματος, το οποίο μπορεί να προκαλέσει τήξη του εργαλείου ή του κατεργαζόμενου κομματιού. Τα οξέα και τα άλατα χλωρίου είναι

άκρως διαβρωτικά, επομένως η χρήση τους επιβάλλει την επιλογή κατάλληλων κατασκευαστικών υλικών και συμμόρφωση με τους κανόνες ασφαλούς λειτουργίας.

ε. Υλικά και κατασκευή εργαλείων (ηλεκτροδίων)

Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή των εργαλείων της ECM πρέπει να έχουν την απαραίτητη ακαμπτότητα και κατεργαστικότητα, να έχουν ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα καθώς επίσης και χημική αντοχή στον ηλεκτρολύτη. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως ο χαλκός, ο ορείχαλκος, ο γραφίτης, ο μπρούντζος, ο ανοξείδωτος χάλυβας και το τιτάνιο. Ο μπρούντζος ή ο ορείχαλκος είναι συνήθως η βέλτιστη επιλογή, εκτός εάν είναι αναγκαία μεγαλύτερη ακαμπτότητα. Πρόσθετα πλεονεκτήματα του γραφίτη έναντι του χαλκού και του ορείχαλκου είναι ότι η επιφάνεια του δεν αλλοιώνεται σε περίπτωση βραχύλκλωματος (επαφή εργαλείου και τεμαχίου), είναι χημικά αδρανής και έχει μικρότερο ειδικό βάρος.

Οι προστατευτικές συσκευές που υπάρχουν στον εξοπλισμό της ECM περιορίζουν την ένταση του ρεύματος που μεταφέρεται στη περίπτωση βραχυκυκλώματος. Ο χαλκός και ο ορείχαλκος έχουν λιγότερες πιθανότητες σε σχέση με τα άλλα μέταλλα να υποστούν σοβαρή ζημία από βραχυκύκλωμα επειδή αυτά τα υψηλώς αγωγιμα μέταλλα διαχέουν γρήγορα τη θερμότητα. Στον ίδιο τύπο βραχυκυκλώματος, όταν χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα ή τιτάνιο λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας τους, μπορούν να συγκεντρώσουν μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας στο προσβαλλόμενο σημείο και έτσι προκαλείται σοβαρή τοπική ζημία. Ο βολφραμιούχος χαλκός είναι πολύ ανθεκτικός στη ζημία από βραχυκύκλωμα επειδή έχει υψηλό σημείο τήξης. Τα εργαλεία (ηλεκτρόδια) ή τα τεμάχια που έχουν υποστεί ζημία από βραχυκύκλωμα επισκευάζονται ή αντικαθίστανται με καινούργια. Στο πίνακα 13.2 συγκρίνονται οι ιδιότητες τεσσάρων μετάλλων που χρησιμοποιούνται για εργαλεία στην ECM.

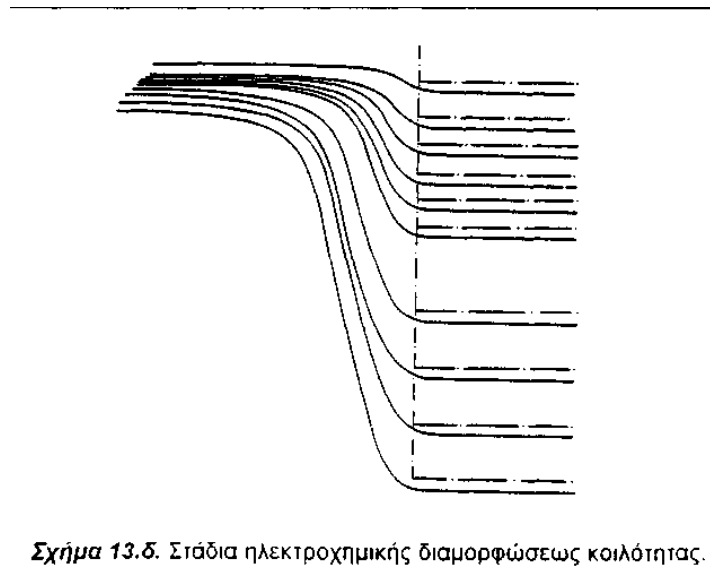
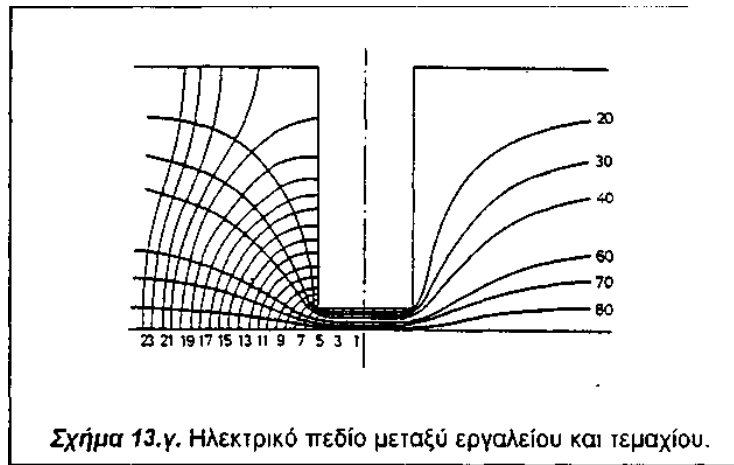
Πίνακας 13.2. Σύγκριση ιδιοτήτων 4 μετάλλων που χρησιμοποιούνται για εργαλεία στην ECM.

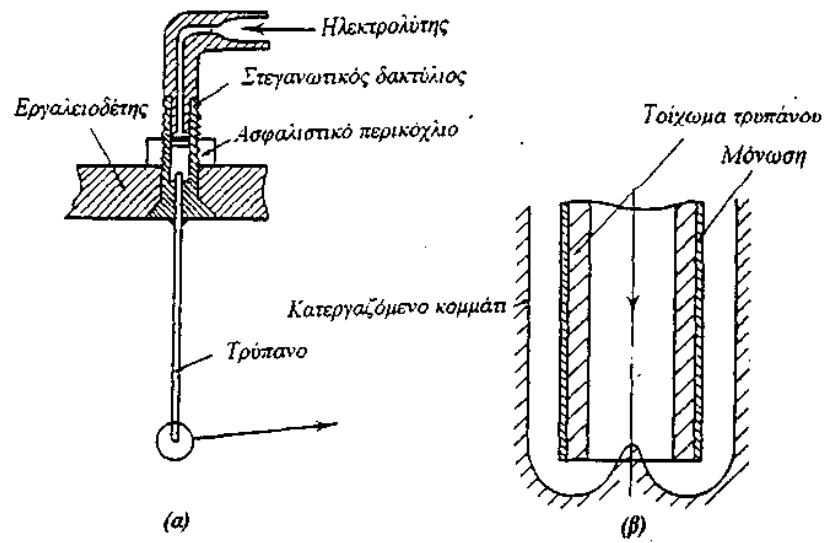
Ιδιότητα	Χαλκός	Ορείχαλκος	Ανοξείδωτος χάλυβας	Τιτάνιο
Ηλεκτρική αντοχή	1,0	4,0	53	48
Ακαμψιότητα	1,1	1,0	1,9	1,1
Κατεργαστικότητα	6,0	8,0	2,5	1,0
Θερμική αγωγιμότητα	25	7,5	1,0	2,6

Αν χρησιμοποιηθεί ένα κατακόρυφο κυλινδρικό εργαλείο - ηλεκτρόδιο για να σχηματίσει μια κυλινδρική κοιλότητα, τότε οι πλευρές της κοιλότητας αυτής δεν θα είναι τελικά παράλληλες προς τη κατεύθυνση της προώσεως. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται μεταξύ εργαλείου - τεμαχίου (βλέπε σχήμα 13.γ) και στη ροή ρεύματος μεταξύ των πλευρών του εργαλείου και των πλευρικών τοιχωμάτων της δημιουργούμενης κοιλότητας (βλέπε σχήμα 13.δ). Για την εξουδετέρωση της ανεπιθύμητης παράπλευρης αυτής ηλεκτροχημικής δράσεως οι πλευρικές επιφάνειες του εργαλείου καλύπτονται με μονωτικό υλικό, όπως π.χ. στο ηλεκτροχημικό τρυπάνισμα του σχήματος 13.ε. Όταν όμως οι πλευρές της κοιλότητας που κατασκευάζεται δεν είναι παράλληλες με τη κατεύθυνση της προώσεως του εργαλείου, μια αντίστοιχη μόνωση μπορεί να μην είναι αναγκαία. Η επιδιωκόμενη τότε μορφή της κοιλότητας δημιουργείται με κατάλληλη διόρθωση και προσαρμογή του εργαλείου. Μια τέτοια εργασία γίνεται, στις περισσότερες περιπτώσεις, πειραματικά με τη δοκιμαστική εφαρμογή της μεθόδου κατά βήματα και τη παράλληλη τήρηση μιας σειράς εμπειρικών κανόνων. Έχει αποδειχθεί στη πράξη ότι θεωρητικός υπολογισμός και σχεδίαση της μορφής του εργαλείου έχουν συμβουλευτική μόνο αξία. για όσες κατασκευές βέβαια μπορούν να εφαρμοστούν. Η κατασκευή του εργαλείου πρέπει να είναι στιβαρή για να μην παραμορφώνεται από τις υδραυλικές δυνάμεις, και πρέπει να διευκολύνει τον ηλεκτρολύτη να φθάνει στη ζώνη εργασίας (κεντρικές δίοδοι, παράπλευρες οπές κ.λ.π).

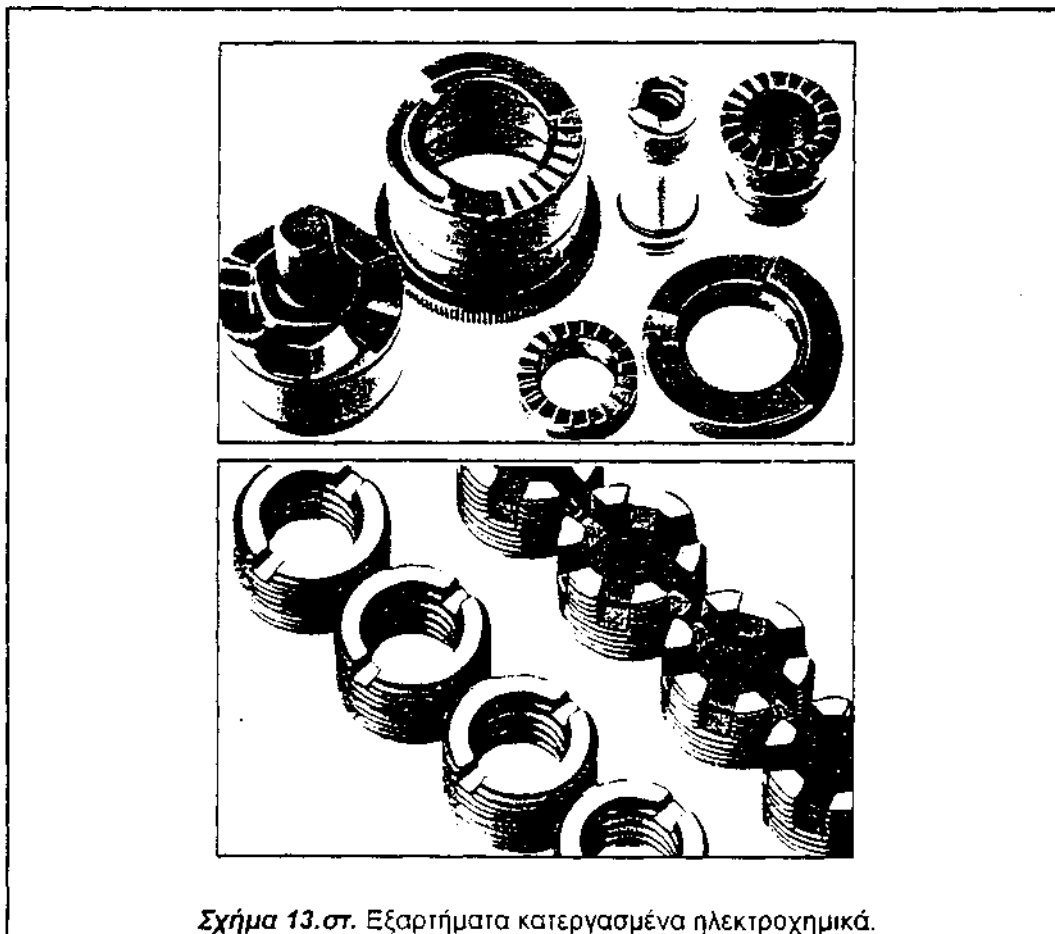
Οποσδήποτε, κεντρικό πρόβλημα για την επιτυχή εκμετάλλευση της ECM αποτελεί η μελέτη και η κατασκευή των εργαλείων, πράγμα που απαιτεί μεγάλη εξειδίκευση. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους, που η μέθοδος δεν έχει βρει την εξάπλωση π.χ της EDM και το κύριο πεδίο εφαρμογών της εξακολουθεί να βρίσκεται στις περισσότερο τεχνολογικά εξελιγμένες

βιομηχανίες, όπως είναι η αεροναυπηγική, η πυρηνική κ.α. Τα τελευταία πάντως χρόνια η χρησιμοποίηση της επεκτείνεται και σε απλούστερες κατασκευές (βλέπε σχήμα 13.στ).





Σχήμα 13.ε. Ηλεκτροχημικό τρυπάνισμα. α) Εργαλείο - τρύπανο. β) Τομή κατ'άξονα της οπής (μεγέθυνση).



Σχήμα 13.στ. Εξαρτήματα κατεργασμένα ηλεκτροχημικά.

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Το εργαλείο ή κάθοδος είναι διαμορφωμένο σαν αντεστραμμένο είδωλο της κατεργαζόμενης επιφάνειας του κομματιού. Η λειτουργία του είναι να παρέχει μια καθορισμένη οδό για το ρεύμα της ECM. Ο μελετητής καθορίζει τη φύση και το μέγεθος της απαιτούμενης απόκλισης ή διακένου που επιτρέπεται από το εργαλείο, ενώ ακόμη πρέπει να υπάρχει σταθερός και ικανοποιητικός υψηλός ρυθμός ροής ηλεκτρολύτη στο διάκενο έτσι ώστε να επιτρέπεται ένας ικανοποιητικός ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου.

Οι διαστάσεις του εργαλείου πρέπει να είναι ελαφρώς διαφορετικές από τις ονομαστικές διαστάσεις της κοιλότητας στο κατεργαζόμενο κομμάτι έτσι ώστε να επιτρέπεται αυτό που ονομάζουμε στην ECM "υπερκοπή", η οποία κυμαίνεται από 0,025 μέχρι 1,3 mm και εξαρτάται από τη ροή του ηλεκτρολύτη και την απαιτούμενη διαστασιακή ακρίβεια. Τόσο το κατεργαζόμενο εξάρτημα όσο και η κάθοδος πρέπει να έχουν επαρκή

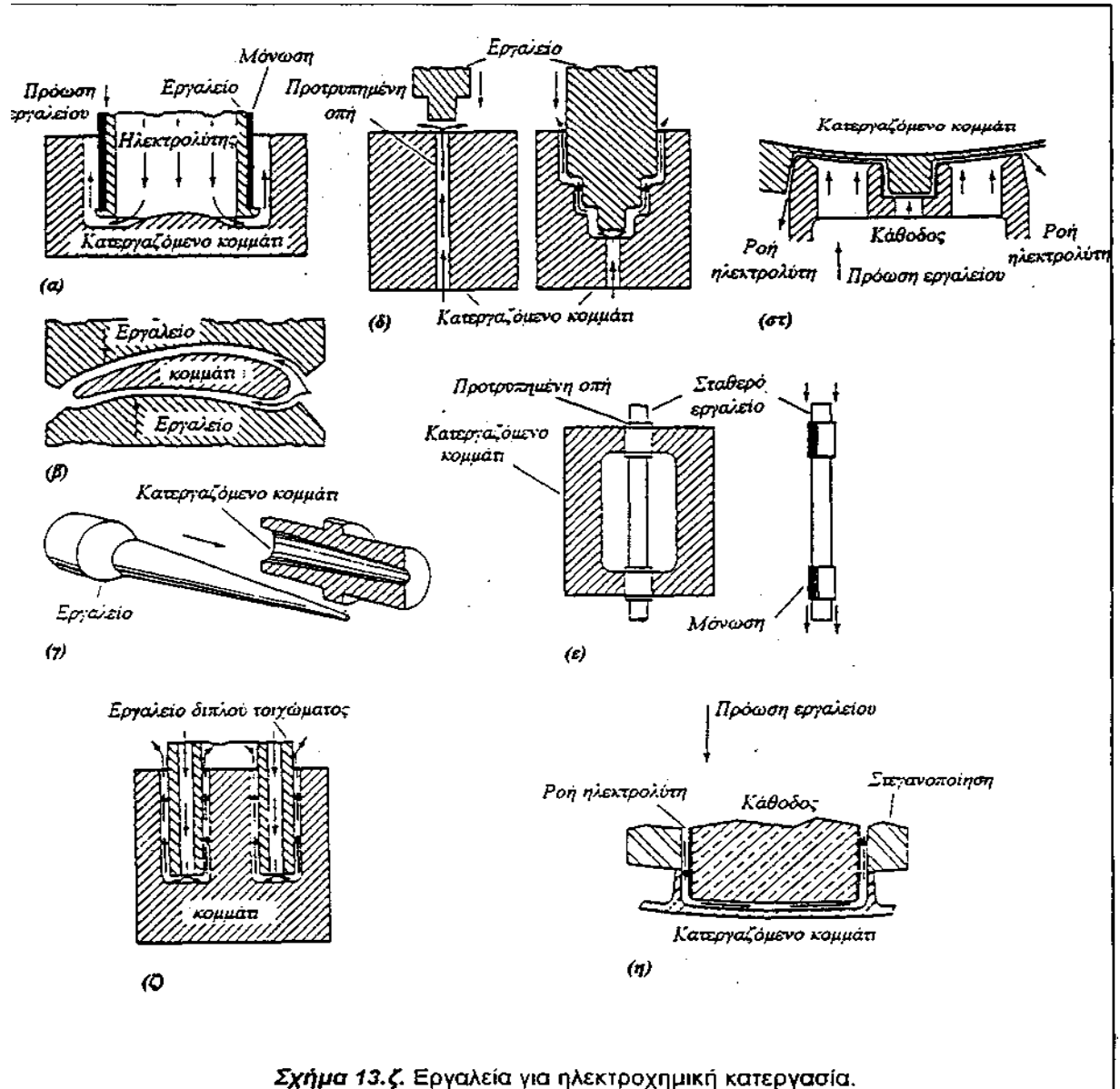
ηλεκτρική χωρητικότητα. Η μηχανή ECM πρέπει να έχει αντοχή και στιβαρότητα για την αποφυγή δονήσεων και τη δημιουργία τόξων.

ΤΥΠΟΙ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Στο σχήμα 13.ζ φαίνονται ορισμένοι γενικοί τύποι κατασκευής εργαλείων ECM για διαφορετικές εφαρμογές. Η πιο κοινή σχεδίαση εργαλείου είναι ο τύπος ανοιχτής ροής [βλέπε σχήμα 13.ζ (α)], στον οποίο ο ηλεκτρολύτης εισάγεται στο διάκενο διά μέσου ενός καναλιού που βρίσκεται στο κέντρο του εργαλείου και εξέρχεται γύρω από την εξωτερική πλευρά του εργαλείου στην ατμόσφαιρα.

Στα εργαλεία για εξωτερική κατεργασία τύπου διασταυρούμενης ροής [βλέπε σχήμα 13.ζ (β)], ο ηλεκτρολύτης εισέρχεται στο διάκενο από τη μια πλευρά του κατεργαζόμενου κομματιού και εξέρχεται απ'την απέναντι πλευρά. Αυτό απαιτεί τη χρήση ειδικών εξαρτημάτων για το περιορισμό της ροής του ηλεκτρολύτη στο διάστημα μεταξύ του κατεργαζόμενου κομματιού και του εργαλείου. Με τα εργαλεία αντίστροφης ροής, ο ηλεκτρολύτης αντλείται διά μέσου του διακένου και εξάγεται διά μέσου του εργαλείου χρησιμοποιώντας ειδικές ιδιοσυσκευές για το περιορισμό του ρευστού. Αυτός ο τύπος εργαλείου χρειάζεται μερικές φορές για να παρέχει πιο ομοιόμορφη ροή για κοπές με μεγάλο μήκος ή βάθος ή για την επίτευξη αυστηρών ανοχών ή για υψηλές απαιτήσεις στη τραχύτητα επιφανείας.

Στα σχήματα 13.ζ (γ) μέχρι 13.ζ (θ) απεικονίζονται διάφορα εργαλεία για μια ποικιλία εφαρμογών της ECM. Παρόλο που η κατασκευή του εργαλείου είναι δύσκολη και χρονοβόρα και πιθανά απαιτεί δοκιμές του εργαλείου για πολύπλοκα σχήματα ή για εφαρμογές αυστηρών ανοχών, το κόστος για πρόσθετα ή αναπληρωματικά εργαλεία είναι συνήθως πολύ μικρότερο απ'αυτό για συμβατικές κατεργασίες.



Σχήμα 13.ζ. Εργαλεία για ηλεκτροχημική κατεργασία.

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Το υπό σχεδίαση εργαλείο πρέπει να επιτρέπει τη ροή του ηλεκτρολύτη προς και από όλες τις περιοχές κατεργασίας με ικανοποιητικό ρυθμό έτσι ώστε να διατηρείται μια μεμβράνη από ανανεούμενο ρευστό στη περιοχή κατεργασίας και να διασκορπίζει τη παραγόμενη θερμότητα. Το εργαλείο πρέπει να επιτρέπει επίσης όπως αναφέραμε παραπάνω ένα ομοιόμορφο ρυθμό ροής μέσα στο διάκενο.

Το κύριο χαρακτηριστικό της ECM είναι η εμφάνιση ραβδώσεων, τοπικών ανυψώσεων ή προεξοχών στην επιφάνεια εργασίας του τεμαχίου. Τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται απέναντι ή κοντά στα κανάλια ροής του ηλεκτρολύτη που περνά μέσα από το εργαλείο ή σε άλλα σημεία που

υπάρχουν απότομες αλλαγές στη κατεύθυνση της ροής και προκαλείται στασιμότητα. Ο τύπος της ροής μπορεί να βελτιωθεί και οι ανωμαλίες της επιφάνειας μειώνονται σε αριθμό και σε μέγεθος με τη χρήση ενός μεγαλύτερου αριθμού μικρότερων οπών ή σχισμών μέσα στο εργαλείο, αλλά είναι μερικές φορές αναγκαίο να διεξαχθεί μια πρόσθετη κατεργασία για την αφαίρεση αυτών των ανωμαλιών.

Οι επιφάνειες του εργαλείου πρέπει να είναι λείες. Οποιοδήποτε ελάττωμα στην επιφάνεια του εργαλείου επιδρά στη κατεργασία αφήνοντας σημάδια πάνω στη κατεργαζόμενη επιφάνεια. Εγκοπές, χαραγιές, εντομές και γραμμές στην επιφάνεια του εργαλείου μπορούν να προκαλέσουν αντίστοιχες ανωμαλίες στη κατεργαζόμενη επιφάνεια. Οποιοδήποτε ελάττωμα στο εργαλείο που διαταράσσει τη ροή του ηλεκτρολύτη είναι δυνατόν να προκαλέσει ένα σχέδιο ροής που θα προκαλέσει αντίστοιχη κατεργασία στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Ο Η/Υ ΒΟΗΘΑ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΣΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ (CAD/CAM).

Με την ενσωμάτωση του Η/Υ στη κατασκευή, τα εργαλεία (ηλεκτρόδια) μπορούν να παραχθούν με χαμηλότερο κόστος και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα συστήματα με Η/Υ χρησιμοποιούνται πρώτα για τη σχεδίαση του εργαλείου με τις κατάλληλες αντισταθμίσεις από το κατεργαζόμενο κομμάτι. Τα σχέδια του Η/Υ προγραμματίζονται για τις εργαλειομηχανές CNC οι οποίες παράγουν τα ηλεκτρόδια. Έπειτα, πραγματοποιείται η παραγωγή και η φόρτωση προγραμμάτων για έλεγχο μέσω CMM (CORDINATE MEASURING MACHINING). Αυτό το μηχάνημα (CMM) επιθεωρεί το κατεργαζόμενο κομμάτι ή το ηλεκτρόδιο και στέλνει στοιχεία πίσω στη μονάδα CAD/CAM για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία αυτών των εντολών επαναλαμβάνεται έτσι ώστε να παραχθούν οι βέλτιστες δυνατές γεωμετρίες του εργαλείου.

Στο παρελθόν, η εξέλιξη των εργαλείων και των παραμέτρων της EOM ήταν στην ουσία μια τέχνη. Τα εργαλεία/κάθοδοι παράγονταν από έναν επιδέξιο και έμπειρο εργαλειοκατασκευαστή χρησιμοποιώντας περισσότερο τα χέρια. Σήμερα, με την εμφάνιση των συστημάτων Η/Υ, τα εργαλεία μπορούν να κατεργαστούν ολοκληρωτικά με CNC. Αυτό εισάγει νέα επίπεδα ακρίβειας και επιπλέον μειώνει σημαντικά το χρόνο και το

κόστος κατασκευής αυτών. Επιπρόσθετα, με τις μηχανές CNC-ECM οι κινητήρες και τα περιφερειακά συστήματα είναι δυνατό να παρέχουν περισσότερη ευελιξία, παραγωγικότητα και ακρίβεια κατεργασίας.

Η ΜΟΝΩΣΗ

Η **μόνωση** όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι σημαντική στον έλεγχο του ηλεκτρικού ρεύματος. Το εργαλείο μπορεί να μονωθεί με διάφορους τρόπους οι οποίοι εξαρτώνται από το σχήμα του εργαλείου. Το ψέκασμα ή η εμβάπτιση είναι γενικά η απλούστερη μέθοδος εφαρμογής της μόνωσης. Ωστόσο, συχνά χρειάζεται μια μόνωση μεγαλύτερης διάρκειας. Οι παρακάτω ιδιότητες της μόνωσης είναι βασικές:

- Πρέπει να είναι καλά προσκολλημένη στο εργαλείο (ηλεκτρόδιο).
- Πρέπει να κάνει καλή στεγανοποίηση χωρίς πόρους ή διαρροές που μπορούν να προκαλέσουν σποραδική κατεργασία από διαρροή ρεύματος.
- Να έχει ικανοποιητικό πάχος (το ελάχιστο είναι 0,05 mm).
- Να είναι λεία για την αποφυγή διαταραχής της ροής του ηλεκτρολύτη.
- Να είναι ανθεκτική στη θερμότητα για συνεχή λειτουργία στους 200 °C χωρίς να διαραγεί.
- Η θερμοκρασία σκλήρυνσης πρέπει να είναι στους 230 °C ή χαμηλότερη για την αποτροπή ζημίας στο εργαλείο.
- Να έχει αντοχή για να αντιστέκεται στη φθορά στους οδηγούς και στα εξαρτήματα.
- Να έχει χημική αντίσταση στον ηλεκτρολύτη.
- Να έχει υψηλή ηλεκτρική αντίσταση.
- Πρέπει να έχει ομοιόμορφη εφαρμογή για την ελαχιστοποίηση της διαταραχής της ροής του ηλεκτρολύτη καθώς επίσης και για την αποτροπή ανάμιξης αυτών των δύο.
- Πρέπει να αποτρέπει τις παρεμβολές στη ροή του ηλεκτρολύτη.
- Να έχει χαμηλή απορροφητικότητα νερού.

Το τεφλόν, η ουρεθάνη, το φαινολικό υλικό, το εποξικό υλικό, το επικαλυπτικό στρώμα σκόνης και άλλα υλικά χρησιμοποιούνται για μόνωση. Σε χαμηλούς ρυθμούς ροής και χαμηλής έντασης ρεύματος, τα περισσότερα από αυτά τα υλικά είναι ικανοποιητικοί μονωτές και εξασφαλίζουν μεγάλη διάρκεια ζωής όταν το εργαλείο έχει ένα χείλος για

να προστατεύεται το άκρο της μόνωσης από τη δύναμη της ροής του ηλεκτρολύτη.

Τα ψεκασμένα ή εμβαπτισμένα επικαλυπτικά στρώματα από εποξικές ρητίνες είναι ένα από τα πιο αποτελεσματικά μονωτικά υλικά. Για βέλτιστα αποτελέσματα, αυτά τα επικαλυπτικά στρώματα πρέπει να χρησιμοποιούνται μαζί με ένα προστατευτικό χείλος στο εργαλείο. Το νάιλον, η ακετάλη και η εποξική ύαλος ενισχυμένη με ίνες είναι τα καλύτερα υλικά για μόνωση.

στ. Ποιότητα επιφανείας

Η τραχύτητα επιφανείας των τεμαχίων που είναι κατεργασμένα ηλεκτροχημικά κυμαίνεται συνήθως από 0,30 μέχρι 1,9 μm για τη περιοχή του μετωπικού διακένου και 5 μm ή και περισσότερο για τη περιοχή του πλευρικού διακένου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη τραχύτητα επιφανείας είναι:

- Η ένταση του ρεύματος.
- Ο ρυθμός πρόωσης.
- Οι διαστάσεις του διακένου.
- Η σύνθεση του ηλεκτρολύτη.
- Το ιξώδες του ηλεκτρολύτη.
- Ο ρυθμός ροής του ηλεκτρολύτη.
- Η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη και τέλος
- Η μικροδομή του κατεργαζόμενου κομματιού.

Μερικά μέταλλα μπορούν να λειανθούν σε απλά διαλύματα άλατος εάν η ένταση του ρεύματος είναι αρκετά μεγάλη. Η λειαντική δράση είναι πιο αποτελεσματική σε μεγαλύτερες εντάσεις ρεύματος και επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η ροή και η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη. Το κατώτατο σημείο μιας οπής η οποία έχει κατασκευαστεί με την ECM συχνά λειαίνεται, ενώ οι πλευρές έχουν μια θαμπή επιφάνεια. Αυτό εν μέρει εξηγείται λόγω των τοπικών διακυμάνσεων της έντασης του ρεύματος. Το περισσότερο από το ρεύμα ρέει διά μέσου του προσώπου κοπής του εργαλείου. Ένα μέρος του ρεύματος παρουσιάζει διασπορά προς τις πλευρές, πίσω από την εμπρόσθια ακμή. Οι πλευρές της οπής κατεργάζονται σε κάποιο βαθμό από το ρεύμα διασποράς σε χαμηλότερη ένταση ρεύματος, παράγοντας έτσι μια θαμπή επιφάνεια. Μεγαλύτερη

ένταση ρεύματος στο πρόσωπο κοπής αποδίδει μια εξαιρετικά λεία επιφάνεια.

Οι επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με την ECM έχουν λίγες ή καθόλου εναπομένουσες τάσεις.

ζ. Ακρίβεια κατεργασίας

Οι συνήθεις διαστασιακές ανοχές για την ECM είναι $\pm 0,13$ mm για το μετωπικό διάκενο και $\pm 0,25$ mm για το πλευρικό διάκενο. Ωστόσο, είναι δυνατόν η μέθοδος να ελεγχθεί στα $\pm 0,025$ mm. Είναι δύσκολη η κατεργασία εσωτερικών αποστρογγυλεύσεων ακτίνας μικρότερης των 0,8mm, ενώ οι εξωτερικές ακτίνες είναι δυνατό να παραχθούν 0,5mm ή μεγαλύτερες. Η "υπερκοπή", η κωνικότητα και οι από στρογγυλεύσεις των ακμών εξαρτώνται από τη διαμόρφωση του εργαλείου. Συνήθη αποτελέσματα ακρίβειας είναι 1mm/mm σε κωνικότητα, 0,5mm σε "υπερκοπή" και 2,5mm σε ακτίνα αποστρογγύλευσης γωνίας.

η. Μηχανές ECM και εφαρμογές

Από τα προηγούμενα προκύπτει σαφώς ότι το κόστος αναπτύξεως και κατασκευής εργαλείων ECM είναι υψηλό και οπωσδήποτε υψηλότερο από αντίστοιχα εργαλεία ECM. Το ίδιο συμβαίνει και με τις αντίστοιχες μηχανές. Η ανάγκη κατασκευής τους από ακριβά υλικά (ανοξειδωτους χάλυβες, ειδικά κράματα κ.λ.π) για να προστατεύονται από τη διαβρωτική δράση των ηλεκτρολυτών, ο ηλεκτρικός εξοπλισμός τους παραγωγής και αντοχής για πολύ υψηλά φορτία ρεύματος, οι εγκαταστάσεις ετοιμασίας, ελέγχου, καθαρισμού, κυκλοφορίας και ψύξεως του ηλεκτρολύτη (εναλλάκτες θερμότητας, πύργοι ψύξεως κ.λ.π.) καθιστούν τις μηχανές αυτές εξαιρετικά δαπανηρές. Χρειάζεται επομένως πολύ προσεχτική και πλήρως δικαιολογημένη τεχνοοικονομική μελέτη σκοπιμότητας για τη προμήθεια και εγκατάσταση τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως για κατεργασία τεμαχίων από ανοξειδωτους χάλυβες, σκληρομέταλλα, θερμοανθεκτικά κράματα νικελίου, τιτανίου, βαμμένους χάλυβες κ.λ.π.

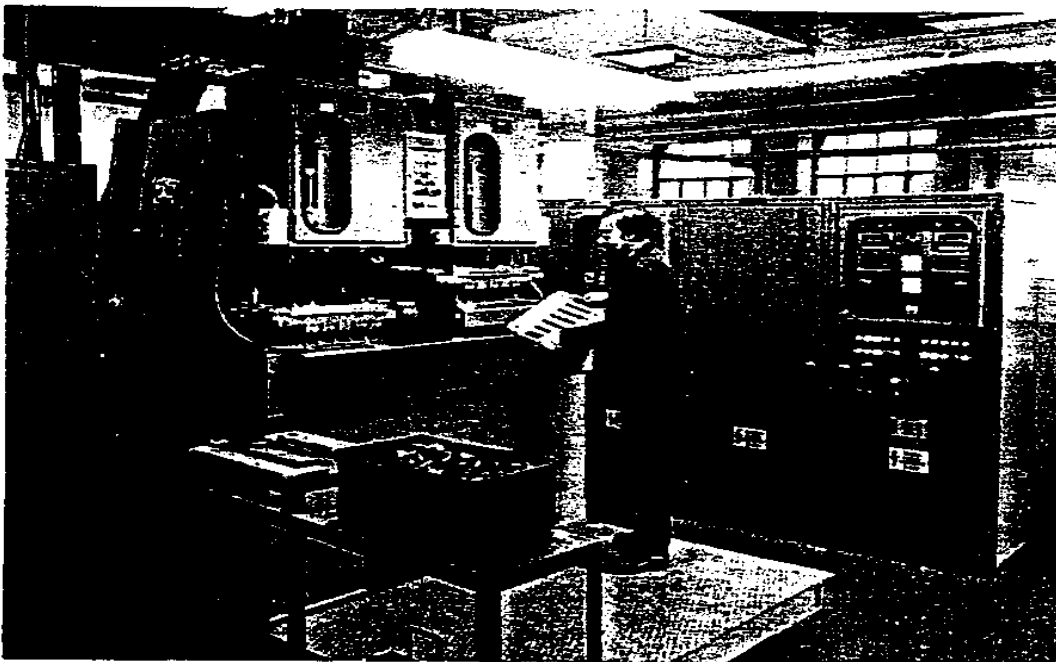
Στο σχήμα 13.η φαίνονται δύο μηχανές ECM. Η πρώτη, σχήμα 13.η (α) είναι μεγάλη εγκατάσταση των 20.000 Ampere με κεφαλή που έχει κατακόρυφη πρόωση. Παραδείγματα τεμαχίων που κατεργάζονται στη

μηχανή αυτή δίδονται στο σχήμα 13.θ. Η μηχανή του σχήματος 13.η (β) είναι μεσσαίου μεγέθους με δύο ανεξάρτητες κεφαλές εργαλείων που έχουν κατακόρυφη επίσης πρόωση. Οι διαστάσεις του καθενός τραπεζιού προσδέσεως είναι $500 \times 300 \text{ mm}^2$ και η μέγιστη διαδρομή κεφαλής 300 mm. Η δύναμη προώσεως φθάνει μέχρι 5000 Kp. Τυπικές εφαρμογές μηχανών του τύπου αυτού περιέχονται στο σχήμα 13.στ. Στη συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για εξαρτήματα ηλεκτρικών εργαλείων χειρός. Για την αύξηση της παραγωγικότητας χρησιμοποιούνται παλέτες 6 - 8 τεμαχίων που εργάζονται ταυτόχρονα. Η ταχύτητα προώσεως είναι 2 - 3 mm/min και ο χρόνος κατεργασίας 6-15 sec.

Σε ειδική μηχανή ECM κατασκευάζονται πτερύγια συμπιεστών αεροπορικών κινητήρων, όπως αυτό του σχήματος 13.ι που δείχνει το ακατέργαστο και το έτοιμο τεμάχιο.

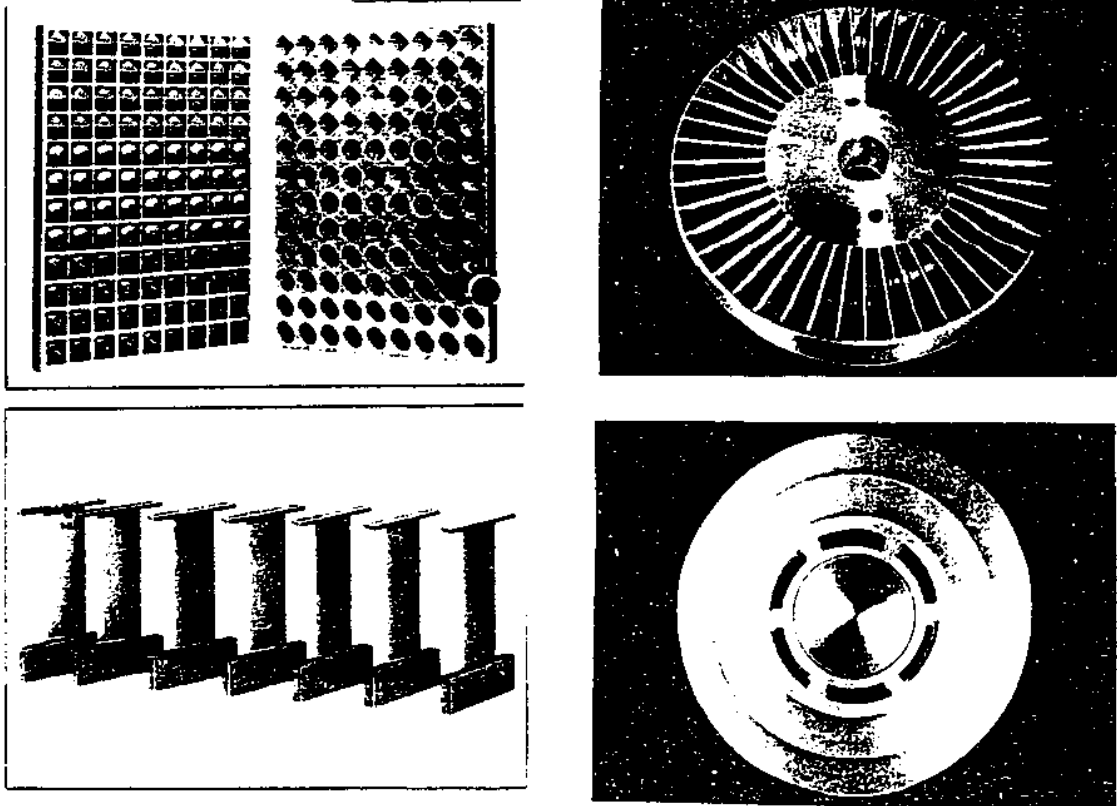


α) Μηχανή ECM των 20.000 Ampere.

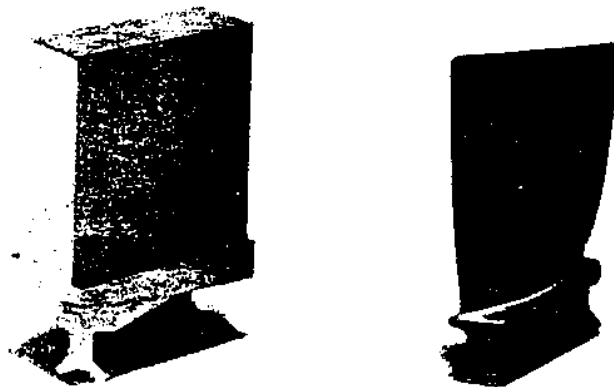


β). Μηχανή με δύο θέσεις ηλεκτροχημικής κατεργασίας.

Σχήμα 13.η



Σχήμα 13.θ. Εξαρτήματα που είναι ηλεκτροχημικά κατεργασμένα.

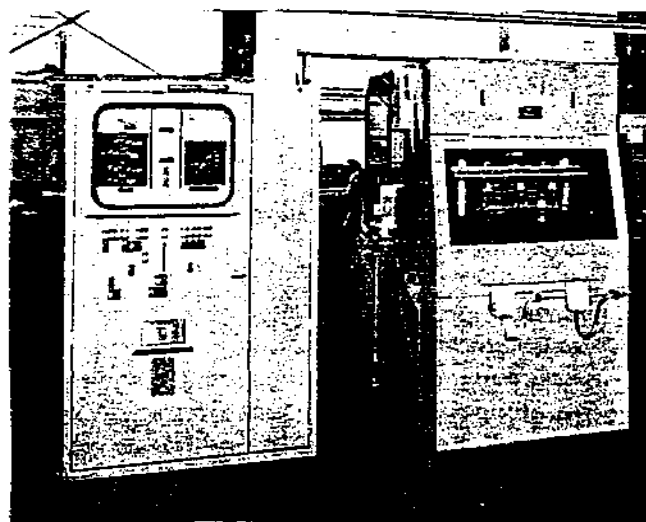
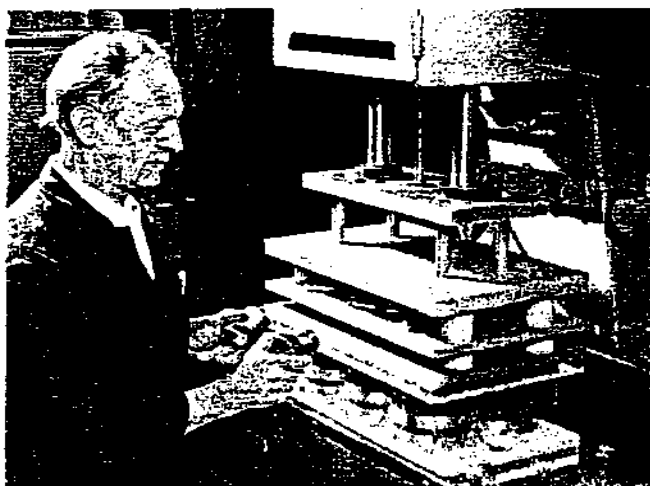


Σχήμα 13.ι. Πτερύγιο συμπιεστή αεροπορικού κινητήρα πριν και μετά την ECM.

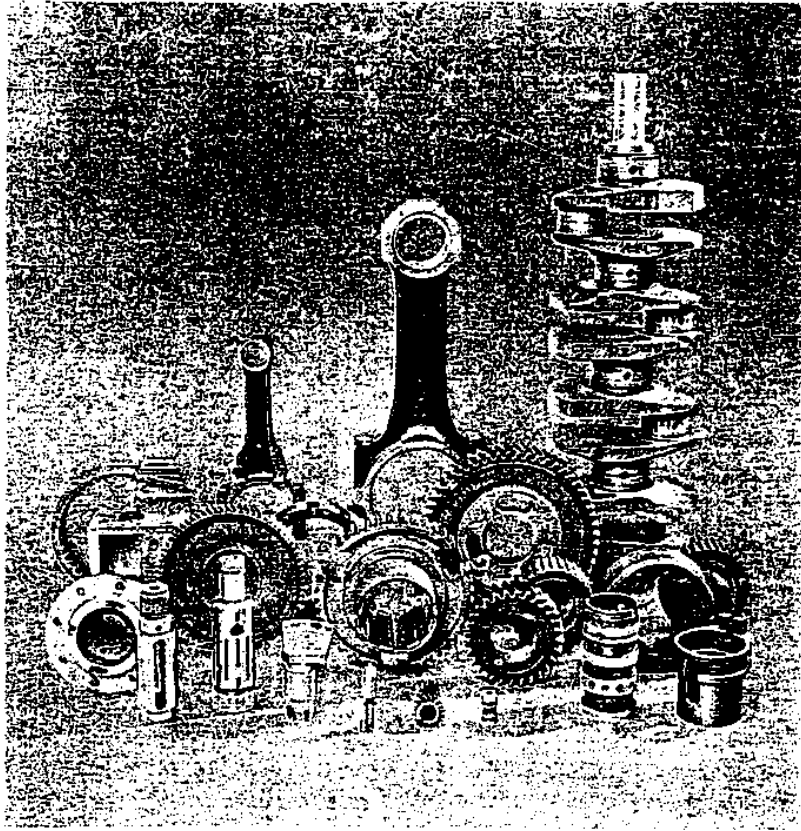
ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΡΕΖΙΩΝ

Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα που προσφέρει η ECM είναι ότι τα τελειωμένα τεμάχια είναι απηλλαγμένα από κάθε είδους υπόλοιπα γρεζιών στις άκρες και στις κόγχες των επιφανειών κοπής. Έτσι οι κόγχες και οι άκρες των τεμαχίων είναι ελαφρά στρογγυλεμένες και δεν «κόβουν». Στις συμβατικές κατεργασίες κοπής, ιδίως για παραγωγές σειράς

μεγάλου αριθμού τεμαχίων, η ανεπιθύμητη αυτή ύπαρξη γρεζιών, και μάλιστα σε δύσκολες θέσεις, αποτελεί σοβαρό πρόβλημα και η αφαίρεση τους με άλλο τρόπο κοστίζει πάντοτε δυσανάλογα ακριβά σε χρόνο και δαπάνες. Το σχήμα 13.κ παρουσιάζει μια μηχανή ECM, ειδικά μελετημένη για την αφαίρεση των γρεζιών της συμβατικής κοπής σε κομμάτια σειράς όπως π.χ. αυτά του σχήματος 13.λ. Οι καθαροί χρόνοι κατεργασίας δεν ξεπερνούν τα 10 έως 40 sec, ενώ τα εργαλεία - ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται είναι κατά κανόνα απλά.



Σχήμα 13.κ. Αφαίρεση γρεζιών με την ECM.



Σχήμα 13.λ. Κομμάτια σειράς με ηλεκτροχημική αφαίρεση γρεζιών έπειτα από τη κατασκευή τους με συμβατικές κατεργασίες κοπής.

θ. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ECM

Τα πλεονεκτήματα της ECM είναι:

1. Υψηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού ακόμα και σε σκληρά υλικά δύσκολα για κατεργασίες κοπής.
2. Καμμία επίδραση στη κατάσταση της κρυσταλλικής δομής του κατεργαζόμενου υλικού.
3. Το εργαλείο - ηλεκτρόδιο δεν υφίστανται καμμία φθορά.
4. Δυνατή η απόδοση πολύ καλής ποιότητας επιφάνειας. Εξαφάνιση των υπολειμμάτων γρεζιών από τις άκρες και τις ακμές (κόγχες) συναντήσεως των κατεργαζόμενων με συμβατική κοπή επιφανειών.
5. Πολύπλοκες μορφές, δύσκολες να τις κατεργαστούμε με άλλες μεθόδους, μπορούν να παραχθούν εύκολα.

6. Επειδή το εργαλείο δεν ακουμπά ποτέ την επιφάνεια εργασίας, λεπτά και εύθραυστα τεμάχια μπορούν να κατεργαστούν χωρίς καμμία παραμόρφωση.
7. Θεωρείται ανταγωνιστική μέθοδος της διάτρησης, ειδικά όταν η σκληρότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου υπερβαίνει τα 42 ROCKWELL C.
8. Δεν παράγεται θερμότητα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και συνεπώς δεν υφίστανται περίπτωσης στρέβλωσης λόγω θέρμανσης.
9. Δεν υφίστανται περιστροφή του εργαλείου (ηλεκτροδίου) κατά τη κατεργασία.
10. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για τη μαζική παραγωγή εξαρτημάτων με πολλαπλές οπές ή κοιλότητες. Παρέχει τη δυνατότητα της ταυτόχρονης κατεργασίας όλων των οπών των κοιλοτήτων.

Τα **μειονεκτήματα** αυτής της μεθόδου είναι:

1. Διαβρωτική δράση του ηλεκτρολύτη σε όλα τα μέρη των μηχανών όπου έρχεται σε επαφή.
2. Δεν μπορούν να αποδοθούν (όταν χρειάζεται) αιχμηρές ακμές (κόγχες) συναντήσεως επιφανειών των κομματιών, γιατί κατά κάποιο ποσοστό ελαφρώς στρογγυλεύονται.
3. Δαπανηρή και χρονοβόρα η μελέτη, κατασκευή και πρόσδοση της κατάλληλης μορφής στα αναγκαία ηλεκτρόδια - εργαλεία.
4. Υψηλό κόστος μηχανών.
5. Ο καθαρισμός του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι σχεδόν πάντοτε μια αναγκαιότητα μετά την ECM και πραγματοποιείται συνήθως με νερό.

14. ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΛΕΙΑΝΣΗ

[ELECTROCHEMICAL GRINDING (ECG)]

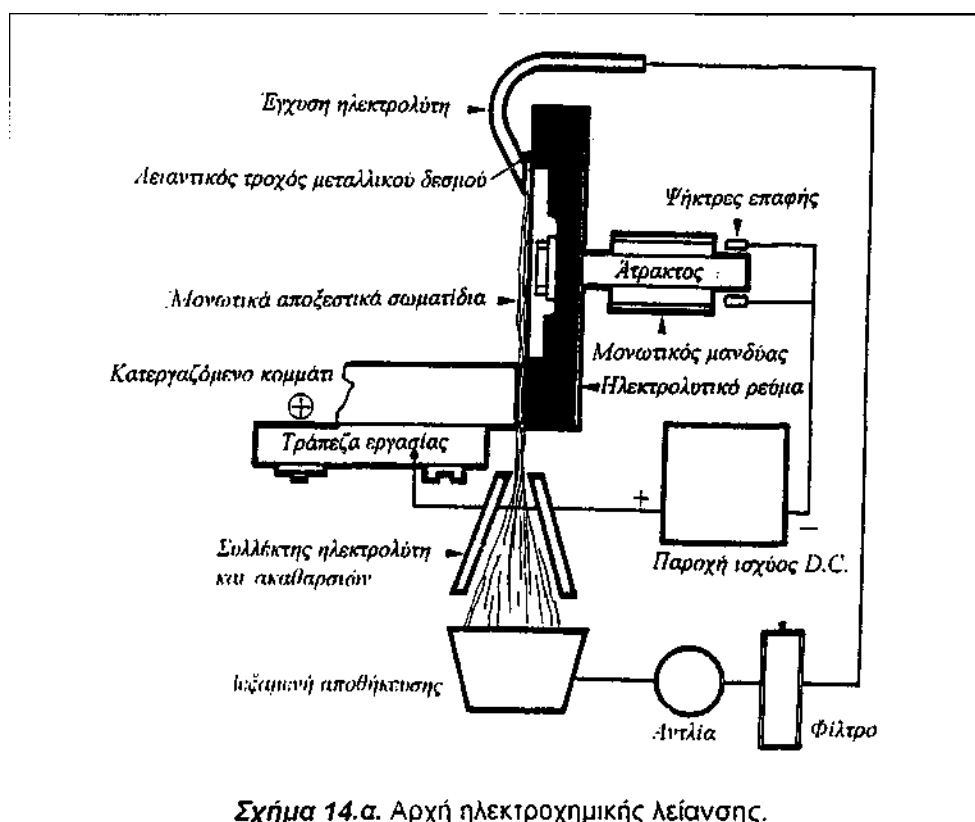
α. Εισαγωγή

Η ηλεκτροχημική λείανση (ECG), αποκαλούμενη επίσης και ως **ηλεκτρολυτική λείανση**, είναι όμοια με την ECM, με εξαίρεση ότι η κάθοδος είναι ένας ηλεκτρικά αγωγίμος αποξεστικός λειαντικός τροχός αντί του εργαλείου (ηλεκτροδίου) που ήταν διαμορφωμένο όμοια με το περίγραμμα που κατεργαζόμασταν. Η ECG χρησιμοποιείται κυρίως για τη κατεργασία δυσκολοκατέργαστων κραμάτων (όπως είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας, το Inconel, το καρβίδιο του βολφραμίου, το Hastelloy και το Monel), για εξαρτήματα που είναι θερμικά κατεργασμένα (60 μέχρι 65 HRM και σκληρότερα), για εύθραυστα ή θερμοευαίσθητα εξαρτήματα και τέλος χρησιμοποιείται για τη κατεργασία εξαρτημάτων που απαιτείται να είναι απαλλαγμένα από τάσεις και γρέζια. Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε το 1950 και αναπτύχθηκε σαν απόρροια των εξελίξεων της EDM στη Σοβιετική ένωση. Και οι δύο κατεργασίες, δηλαδή η ηλεκτροχημική κατεργασία (ECM) και η κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση (ECM), χρησιμοποιούν απευθείας την ηλεκτρική ενέργεια για την αφαίρεση μετάλλου. Ωστόσο, η ECM και η ECG δεν πρέπει να συγχέονται με την EDM επειδή η ECM και η ECG περιλαμβάνουν ηλεκτροχημικές κατεργασίες και όχι κατεργασίες εκκένωσης.

β. Χαρακτηριστικά της ECG

Η ECG αφαιρεί μέταλλο με συνδυασμό ηλεκτροχημικής και λειαντικής δράσης. Η ηλεκτροχημική δράση είναι η αντίστροφη επιμετάλλωση ή διαδικασία οξειδωσης που συμβαίνει όταν από ένα μεταλλικό κατεργαζόμενο κομμάτι περάσει ηλεκτρικό ρεύμα με τη παρουσία ενός ηλεκτρολύτη. Αυτή η ηλεκτροχημική δράση είναι υπεύθυνη για περισσότερο από το 90% του αφαιρούμενου υλικού, αλλά η λειαντική δράση του τροχού (κάθοδος) αφαιρεί το στρώμα οξειδίου από την επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού επειδή αυτό δεν είναι ηλεκτρικά αγωγίμο.

Στην ECG (βλέπε σχήμα 14.α), το κατεργαζόμενο κομμάτι είναι το θετικό ηλεκτρόδιο (η άνοδος) και ο τροχός είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο (η κάθοδος).



Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα τα δύο ηλεκτρόδια συνδέονται απευθείας με μια πηγή συνεχούς ρεύματος και είναι βυθισμένα μέσα σ'ένα αγώγιμο ιωνικό διάλυμα (ο ηλεκτρολύτης) το οποίο περιέχει θετικά και αρνητικά φορτισμένα ιόντα. Κάτω από την επιρροή του ηλεκτρικού δυναμικού, τα θετικά ιόντα μετακινούνται στη κάθοδο και τα αρνητικά ιόντα μετακινούνται στην άνοδο. Στη κάθοδο, τα θετικά ιόντα του ηλεκτρολύτη παίρνουν ηλεκτρόνια (αναγωγή) και αποφορτίζονται όπως τα ουδέτερα άτομα ή μόρια. Στην άνοδο, τα αρνητικά ιόντα αφήνουν ηλεκτρόνια (οξείδωση) και αποφορτίζονται όπως τα ουδέτερα άτομα ή μόρια. Καθώς συμβαίνει ηλεκτρόλυση, πάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού (άνοδος) σχηματίζεται ένα στρώμα οξειδίου. Αυτό το λεπτό στρώμα οξειδίου είναι ένας διηλεκτρικός ηλεκτρικά μονωτής και, εάν αυτός παραμείνει, η διαδικασία ECG θα σταματήσει ή

θα προχωρήσει με πολύ αργό ρυθμό και αυτό εξαρτάται από το πορώδες του στρώματος αυτού. Το αποξεστικό υλικό του τροχού (κάθοδος) απομακρύνει αυτό το οξείδιο, αποκαλύπτοντας το μέταλλο για τη συνέχιση της οξειδωσης.

Στην ECG χρειαζόμαστε λιγότερη ισχύ σε σύγκριση με την ECM επειδή η περιοχή κατεργασίας είναι μικρότερη και το αποξεστικό υλικό του τροχού αφαιρεί το οξείδιο. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου και με ταχύτητα τροχού από 1100 μέχρι 1800 m/min. Το διάκενο του ηλεκτρολύτη είναι της τάξεως των 0,025 mm ή μικρότερο.

Ορισμένοι υψηλής ταχύτητας αδαμαντοτροχοί αυλάκωσης λειτουργούν με ταχύτητες που κυμαίνονται από 2500 μέχρι 3000 m/min.

Η πίεση που αναπτύσσεται μεταξύ του τροχού και του κατεργαζόμενου κομματιού θεωρείται γενικά ότι είναι χαμηλή. Αυτή εξαρτάται από τη επιφάνεια επαφής μεταξύ του τροχού και του κατεργαζόμενου κομματιού, και συχνά φτάνει τα 140 KPa (20 psi).

γ. Ο λειαντικός τροχός

Στη διαδικασία ECG χρησιμοποιούνται μεταλλικού δεσμού, ηλεκτρικά αγωγίμοι, αποξεστικοί λειαντικοί τροχοί. Οι τροχοί αυτοί χρησιμοποιούν σαν συνδετικό υλικό ορείχαλκο, μπρούντζο και χαλκό και μπορούν να κατεργαστούν σε διάφορες μορφές. Ο λειαντικός τροχός είναι η κάθοδος (-) του ηλεκτρικού κυκλώματος. Η άτρακτος του τροχού συνδέεται απευθείας με τη παροχή ισχύος συνεχούς ρεύματος διά μέσου ενός σετ ψηκτρών και είναι απομονωμένη από το υπόλοιπο μηχάνημα από ένα μονωτικό μανδύα (βλέπε σχήμα 14.α). Για τη λείανση καρβιδίων του βολφραμίου συνιστώνται αδαμάντινοι τροχοί μεταλλικού δεσμού. Για τη λείανση όλων των άλλων ηλεκτρικά αγωγίμων υλικών χρησιμοποιούνται τροχοί οξειδίου του αλουμινίου μεταλλικού δεσμού.

Ο λειαντικός τροχός εκτελεί μια σημαντική λειτουργία στη διαδικασία της ECG. Τα αποξεστικά σωματίδια, προεξέχοντας περίπου 0,01 μέχρι 0,02 mm πέρα από το τροχό μεταλλικού δεσμού, ενεργούν σαν μη αγωγίμα διαχωριστικά, διατηρώντας το αναγκαίο διάκενο μεταξύ του τροχού και του κατεργαζόμενου κομματιού. Επίσης εξασφαλίζουν

χιλιάδες μικρές κοιλότητες οι οποίες γεμίζουν με ηλεκτρολυτικό διάλυμα το οποίο συμπληρώνει το ηλεκτρικό κύκλωμα. Η ακρίβεια του διακένου εργασίας (η απόσταση μεταξύ του τροχού μεταλλικού δεσμού και του κατεργαζόμενου κομματιού) καθορίζεται από το πόσο τα λειαντικά αυτά σωματίδια προεξέχουν από το τροχό (κάθοδο).

δ. Κατεργασία (τορνίρισμα) τροχού

Είναι σημαντικό ότι ο λειαντικός τροχός πρέπει να περιστρέφεται μέσα σε πεδίο ανοχών της τάξεως του 0,01 mm για να διατηρήσει τη λειαντική ακρίβεια και επίσης για να παρέχει τη μέγιστη δίοδο για το ηλεκτρολυτικό διάλυμα επιτυγχάνοντας μ'αυτό το τρόπο τη μέγιστη αφαίρεση υλικού. Οι τροχοί οξειδίου του αλουμινίου μεταλλικού δεσμού μπορούν να κατεργαστούν (τορνιριστούν) με μια αδαμάντινη ακίδα. Οι αδαμαντοτροχοί κατεργάζονται με τη χρήση ενός ενδεικτικού οργάνου. Μετά από κάθε κατεργασία, η διαδικασία ECG αντιστρέφεται αλλάζοντας τα καλώδια στη παροχή ισχύος, προκαλώντας μ'αυτό το τρόπο την αφαίρεση υλικού από το λειαντικό τροχό. Αυτό αφαιρεί μια μικρή ποσότητα από το μεταλλικό συνδετικό υλικό του τροχού προκαλώντας έτσι τη προεξοχή των αποξεστικών σωματιδίων.

ε. Το κατεργαζόμενο κομμάτι

Το κατεργαζόμενο κομμάτι, το οποίο πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγίμο, είναι η άνοδος (+) του κυκλώματος. Αυτό συνδέεται ηλεκτρικά με τη παροχή ισχύος συνεχούς ρεύματος διά μέσου της τράπεζας της μηχανής. Οποιοδήποτε υλικό, ακόμη και το καρβίδιο του βολφραμίου και τα δύσκολοκατέργαστα κράματα της αεροδιαστημικής, μπορούν εύκολα να κατεργαστούν με αυτή τη μέθοδο, με τη προϋπόθεση ότι το υλικό είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού.

στ. Το ρεύμα

Στη διαδικασία ECG χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα χαμηλής σχετικά τάσης (περίπου 4 μέχρι 16 Volt) και υψηλής έντασης (300 μέχρι 1000 A).

Η παροχή του ρεύματος εξαρτάται από το μέγεθος της επιφάνειας στην οποία συμβαίνει η κοπή. Σε γενικές γραμμές, οι ρυθμοί αφαίρεσης υλικού είναι $0,16 \text{ cm}^3/\text{min}$ για κάθε 100 A ρεύματος. Στο πίνακα 14.1 αναγράφονται οι θεωρητικοί ρυθμοί αφαίρεσης μετάλλου σε ροή ρεύματος 1000 A για διάφορα μέταλλα. Κάθε κατεργαζόμενο υλικό έχει ένα σημείο κορεσμού (όριο) το οποίο περιορίζει το ρεύμα που μπορεί να δεχθεί. Οι κατασκευαστές μηχανών ECG παρέχουν διαγράμματα μαζί με τις μηχανές τους δείχνοντας τους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού για διαφορετικά υλικά.

ζ. Ο ηλεκτρολύτης

Οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο ECG είναι όμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται στην ECM στο ότι είναι ηλεκτρικά αγωγά υδάτινα διαλύματα τα οποία περιέχουν κυρίως ανόργανα άλατα. Πολλά από τα χημικά που χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρολύτες της ECM εμφανίζονται επίσης και στους ηλεκτρολύτες της ECG. Ωστόσο, οι χημικές συνθέσεις για τη μέθοδο ECG είναι σαφώς διαφορετικές. Οι ηλεκτρολύτες σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να καθιστούν δυνατό το γρήγορο σχηματισμό του στρώματος του οξειδίου στο θετικά φορτισμένο κατεργαζόμενο κομμάτι, ενώ στην ECM πολλά οξείδια που σχηματίζονται στο κατεργαζόμενο κομμάτι πρέπει να διαλύονται αμέσως μέσα στον ηλεκτρολύτη. Επειδή η δράση εκτριβής του τροχού είναι συνεχής αποκαλύπτοντας νέο μέταλλο, οι ταχύτερα σχηματιζόμενες εναποθέσεις οξειδίου προστατεύουν το γειτονικό μέταλλο, που δεν είναι επιθυμητή η κατεργασία, από την αποσύνθεση.

Πίνακας 14.1. Θεωρητικά όρια αφαίρεσης υλικού στα 1000 A.

Μέταλλο	Σθένος	Πυκνότητα gr./cm ³	Ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου στα 1000 A cm ³ /min
Αλουμίνιο	3	2,67	2,06
Βηρύλλιο	2	1,85	1,50
Χρώμιο	2	7,19	2,25
	3	7,19	1,51
	6	7,19	0,75
Κοβάλτιο	2	8,85	2,05
	3	8,85	1,38
Νιόβιο	3	8,57	2,16
	4	8,57	1,69
	5	8,57	1,34
Χαλκός	1	8,96	4,39
	2	8,96	2,20
Σίδηρος	2	7,86	2,21
	3	7,86	1,47
Μαγνήσιο	2	1,74	4,34
Μαγγάνιο	2	7,43	2,28
	4	7,43	1,15
	6	7,43	0,77
	7	7,43	0,66
Μολυβδαίνιο	3	10,22	1,95
	4	10,22	1,47
	6	10,22	0,98
Νικέλιο	2	8,90	2,11
	3	8,90	1,36
Πυρίτιο	4	2,33	1,87
Άργυρος	1	10,49	6,39
Κασσίτερος	2	7,30	5,05
	4	7,30	2,52
Ψευδάργυρος	2	7,13	2,85

Οι ηλεκτρολύτες πρέπει να επιλέγονται για συγκεκριμένες εφαρμογές και κατά προτίμηση πρέπει να σχηματίζονται με προσθήκες έτσι ώστε να παρέχουν προστασία από διάβρωση. Οι χημικές συνθέσεις σχηματίζονται διαφορετικά για κάθε εφαρμογή.

Ένας ηλεκτρολύτης στην ECG πρέπει να εξασφαλίζει υψηλή αγωγιμότητα, υψηλή αποδοτικότητα αφαίρεσης υλικού, καλή τραχύτητα επιφανείας, παθητικότητα για το περιορισμό των σποραδικών ρευμάτων και τέλος πρέπει να παρέχει προστασία από διάβρωση. Ωστόσο, κανένας ηλεκτρολύτης δεν εξασφαλίζει όλες αυτές τις ιδιότητες για όλα τα μέταλλα. Το χλωριούχο νάτριο, για παράδειγμα, εξασφαλίζει υψηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού, αλλά δεν βοηθά στο περιορισμό των σποραδικών ρευμάτων όπως βοηθά το νιτρικό νάτριο ή το χλωρικό νάτριο. Το νιτρικό νάτριο και το χλωρικό νάτριο δεν μπορούν να κατεργαστούν ικανοποιητικά το τιτάνιο. Το χλωριούχο νάτριο, το χλωρικό νάτριο και το νιτρικό νάτριο δεν μπορούν να κατεργαστούν το βολφράμιο. Για τη κατεργασία του βολφραμίου χρησιμοποιούνται αλκαλικοί ηλεκτρολύτες όπως είναι το ανθρακικό

νάτριο και το καυστικό νάτριο. Το χλωριούχο νάτριο είναι επίσης ένας εξαιρετικά διαβρωτικός ηλεκτρολύτης και μπορεί να προκαλέσει μεγάλη ζημία στα τμήματα της μηχανής ή στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Οι επιφάνειες της μηχανής ECG που έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι επιχρωμιωμένες για να ανθίστανται στη διαβρωτική δράση του ηλεκτρολύτη.

Τα άλατα ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην μέθοδο ECG είναι το νιτρικό νάτριο και τα άλατα καλίου. Κύρια συστατικά όπως είναι τα νιτρίδια ή το αλκαλικό νάτριο ή μίγματα καλίου (βορικό άλας, ανθρακικό άλας και φωσφορικό άλας) μειώνουν τη διαβρωτική επίδραση στον εξοπλισμό. Η επιλογή των ηλεκτρολυτών ποικίλλει με τα υλικά που πρόκειται να κατεργαστούμε. Η προδιαγραφή των αλάτων ποικίλλει μεταξύ των προμηθευτών. Υπάρχουν περισσότερες από μια πηγές για τους ηλεκτρολύτες και ο κάθε προμηθευτής έχει τους δικούς του λόγους για τη προδιαγραφή ιδιαίτερων αλάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα απλό άλας είναι ικανοποιητικό για τη πλειοψηφία των μετάλλων που κατεργαζόμαστε. Αυτό δεν ισχύει μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις όπου απαιτούνται ειδικοί ηλεκτρολύτες.

η. Τραχύτητα επιφανείας

Η ECG περιλαμβάνει μια χημική αντίδραση με μια ελάχιστη μηχανική εκτριβή. Επομένως, η παραγόμενη τραχύτητα επιφανείας εξαρτάται από τη μεταλλουργική κρυσταλλική δομή του κατεργαζόμενου κομματιού. Όσο πιο λεπτή είναι η κρυσταλλική δομή, τόσο καλύτερη θα είναι και η τραχύτητα. Με γυμνό μάτι το χρώμα της επιφανείας μοιάζει με γκριζόμαυρο μάτ. Το χρώμα που παράγεται είναι το χρώμα του οξειδίου της επιφανείας, αλλά σε μερικά κράματα η παραγόμενη επιφάνεια είναι γυαλιστερή.

Η τραχύτητα επιφανείας κυμαίνεται γενικά από 10 μέχρι 40 μm και εξαρτάται από το υλικό που κατεργαζόμαστε. Εάν απαιτείται καλύτερη τραχύτητα, ενσωματώνεται στη διαδικασία ένα τελευταίο πάσο αποπεράτωσης. Το τελευταίο πάσο πραγματοποιείται σε χαμηλή τάση που κυμαίνεται από 3 μέχρι 5 Volt και με σχετικά υψηλό ρυθμό πρόωσης που κυμαίνεται και αυτός από 250 μέχρι 500 mm/min. Η επιφάνεια του μετάλλου είναι στιλβωμένη, με τις κορυφές των λόφων να ωθούνται μέσα

στις κοιλάδες της κρυσταλλικής δομής, παράγοντας συνεπώς μια καλύτερη ποιότητα επιφανείας. Η χρήση ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ εκτελείται αυτό το χωρίς σπινθήρα πάσο, παρότι είναι σε χαμηλή τάση είναι πολύ αποτελεσματική

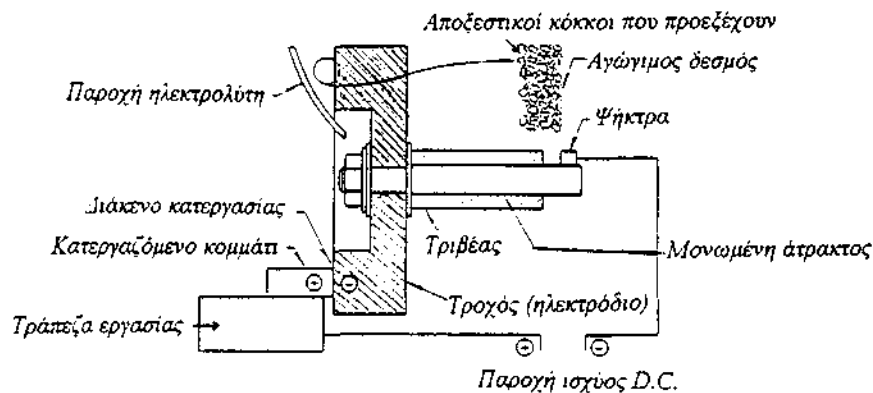
στην ελαχιστοποίηση των τάσεων και πιέσεων στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Η επιλογή του κατάλληλου τροχού στην ECG είναι πολύ σημαντική. Επειδή η λειαντική δράση του τροχού είναι η κύρια συνιστώσα της κατεργασίας κατά τη διάρκεια της χωρίς σπινθήρα λειτουργίας, η επιλογή του μεγέθους των κόκκων καθορίζει τη τελική ποιότητα επιφανείας. Για παράδειγμα, η χρήση λεπτόκκοκκων τροχών μεγέθους κόκκωσης 220 μέχρι 320 έχει αποβεί επιτυχής για τη λείανση χειρουργικών οργάνων και βιομηχανικών μαχαιριών. Το μέγεθος των κόκκων του τροχού καθορίζει τη ποιότητα της επιφάνειας στο τέλος της διαδικασίας.

θ. Μέθοδοι ECG

Με τον εξοπλισμό της ECG μπορούν να πραγματοποιηθούν 5 διαφορετικές μέθοδοι λείανσης. Οι μέθοδοι είναι η λείανση προσώπου ή λείανση εμβύθισης, η λείανση επιφάνειας, η εσωτερική λείανση, η λείανση μορφής και η κυλινδρική λείανση.

ΛΕΙΑΝΣΗ ΠΡΟΣΩΠΟΥ

Η λείανση προσώπου ή λείανση εμβύθισης όπως ονομάζεται είναι μια μέθοδος στην οποία ολόκληρη η επιφάνεια που πρόκειται να λειανθεί προωθείται ενάντια στο πρόσωπο του τροχού (βλέπε σχήμα 14.β). Για να εμποδίσουμε την ανομοιόμορφη φθορά του τροχού, η επιφάνεια εργασίας ταλαντεύεται κάθετα στο πρόσωπο του τροχού ή ο τροχός μετακινείται με ταλαντευόμενο τρόπο. Συνήθως προτιμάται η ταλάντωση του κατεργαζόμενου κομματιού.



Σχήμα 14.β. Λείανση προσώπου.

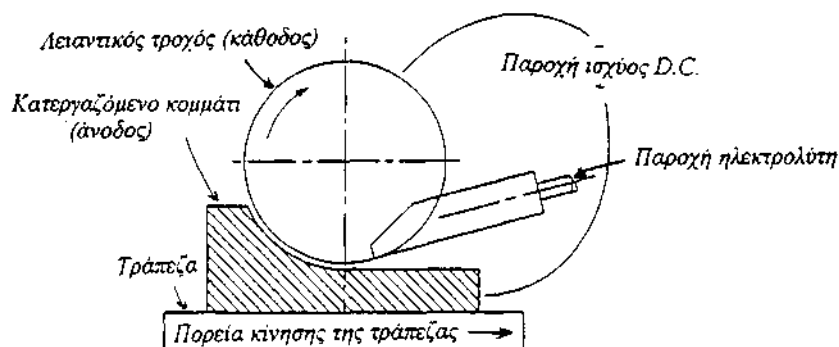
Για να αποτρέψουμε μια ανομοιογενή φθορά του τροχού η οποία θα προκαλέσει υπερβολικό τορνίρισμα αυτού, είτε το κατεργαζόμενο κομμάτι ταλαντούται μπροστά στο πρόσωπο του τροχού είτε ο τροχός ταλαντούται. Συνήθως προτιμάται η ταλάντωση του κατεργαζόμενου κομματιού.

Με αυτή τη μέθοδο μπορούμε να επιτύχουμε καλύτερη τραχύτητα επιφάνειας. Οι άλλες μέθοδοι παράγουν ένα σπειροειδές ίχνος πάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού λόγω της παλινδρομικής δράσης του τροχού. Η λείανση προσώπου είναι επίσης η ταχύτερη μέθοδος. Εκθέτοντας ολόκληρη την επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού στο τροχό, μπορεί να επιτευχθεί ο μέγιστος ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου και το μέγιστο ρεύμα. Όταν πραγματοποιείται λείανση του προσώπου μιας κυλινδρικής επιφάνειας με διάμετρο μεγαλύτερη από αυτή του τροχού, είναι γενικά πιο οικονομικό να γίνει βηματικά η λείανση του προσώπου με εμβύθιση με μια τελική κατεργασία αποπεράτωσης για να επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος.

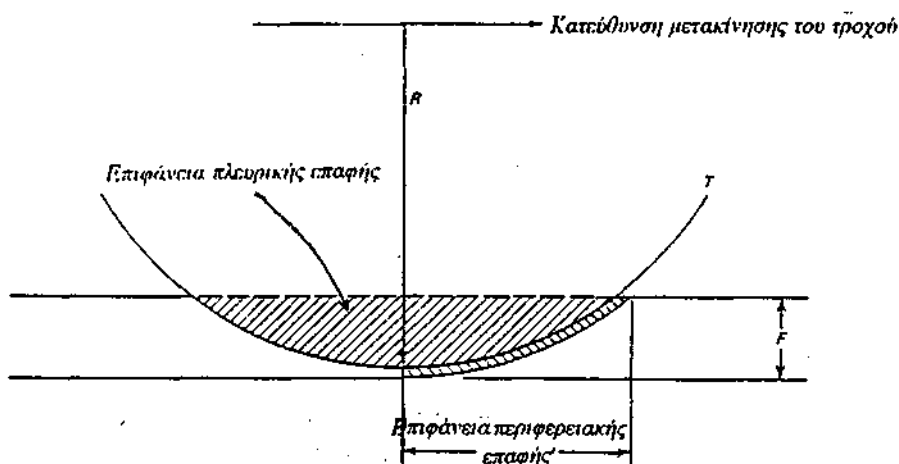
ΛΕΙΑΝΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Η λείανση επιφάνειας επιτυγχάνεται με παλινδρόμηση του κατεργαζόμενου κομματιού κάτω από το τροχό (βλέπε σχήμα 14.γ). Η βασική διαφορά μεταξύ της συμβατικής και της ηλεκτροχημικής λείανσης μιας επιφάνειας είναι ότι το βάθος κοπής σε κάθε πάσο του τροχού είναι πολύ βαθύτερο στην ECG. Το μέγιστο βάθος κοπής σε ένα απλό πάσο του τροχού ECG είναι περίπου 2,5 mm. Στη λείανση επιφάνειας, η επιφάνεια

του διακένου του ηλεκτροδίου ποικίλλει ανάλογα με τη διάμετρο του τροχού και το βάθος κοπής (βλέπε σχήμα 14.δ). Επομένως, η μέγιστη ένταση ρεύματος και ο μέγιστος ρυθμός αφαίρεσης υλικού επιτυγχάνεται στο μέγιστο βάθος κοπής. Στο σχήμα 14.ε φαίνονται οι τυπικοί ρυθμοί πρόωσης για την ECG επιφάνειας.



Σχήμα 14.γ. Σχηματική διάταξη της ECG επιφάνειας.



Ολική επιφάνεια επαφής = Επιφάνεια επαφής της περιφέρειας + Επιφάνεια πλευρικής επαφής

$$\text{Area} = \frac{T \cdot \pi R}{180} \arccos\left(\frac{R-F}{R}\right) + 2 \left[\frac{\pi R^2}{180} \arccos\left(\frac{R-F}{R}\right) - (R-F) \sqrt{2RF - F^2} \right]$$

[το τόξο συνημιτόνου (arccos) είναι σε μοίρες και όχι σε ακτίνια]

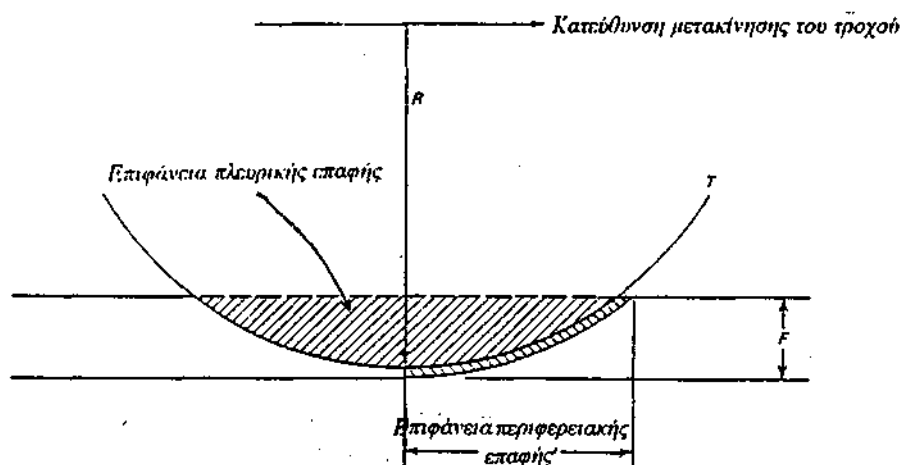
Σχήμα 14.δ. Υπολογισμός της επιφάνειας επαφής του τροχού και του κατεργαζόμενου κομματιού για την ECG επιφάνειας. R: ακτίνα τροχού, T: πάχος τροχού, F: κατακόρυφη πρόωση.

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΛΕΙΑΝΣΗ

Η εσωτερική λείανση μπορεί να επιτευχθεί και αυτή επίσης με την ECG. Είναι όμοια με τη συμβατική εσωτερική λείανση, αν και εδώ η μέγιστη διάμετρος του τροχού επιλέγεται για τη μέγιστη ένταση ρεύματος και τους μέγιστους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού.

ΛΕΙΑΝΣΗ ΜΟΡΦΗΣ

Στη λείανση μορφής χρησιμοποιούνται τροχοί από οξείδιο του αλουμινίου με μεταλλικό δεσμό (μαλακοί τροχοί). Αυτοί οι τροχοί μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα στο επιθυμητό σχήμα με τη χρήση ενός συμβατικού αδαμάντινου εργαλείου τόννευσης. Λόγω της χρήσης τροχών με συγκεκριμένη μορφή, αυτή είναι η πιο δαπανηρή μέθοδος. Το κόστος για την αλλαγή της μορφής ενός αδαμάντινου τροχού που προορίζεται για λείανση καρβιδίων είναι υψηλό και είναι δύσκολη η τόννευση του. Επομένως, οι αποξεστικοί τροχοί μεταλλικού δεσμού χρησιμοποιούνται γενικά για τη λείανση καρβιδίων.



Ολική επιφάνεια επαφής = Επιφάνεια επαφής της περιφέρειας + Επιφάνεια πλευρικής επαφής

$$Area = \frac{T\pi R}{180} \arccos\left(\frac{R-F}{R}\right) + 2 \left[\frac{\pi R^2}{180} \arccos\left(\frac{R-F}{R}\right) - (R-F) \sqrt{2RF - F^2} \right]$$

[το τόξο συνημιτόνου (arccos) είναι σε μοίρες και όχι σε ακτίνια]

Σχήμα 14.δ. Υπολογισμός της επιφάνειας επαφής του τροχού και του κατεργαζόμενου κομματιού για την ECG επιφάνειας. R: ακτίνα τροχού, T: πάχος τροχού, F: κατακόρυφη πρόωση.

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΛΕΙΑΝΣΗ

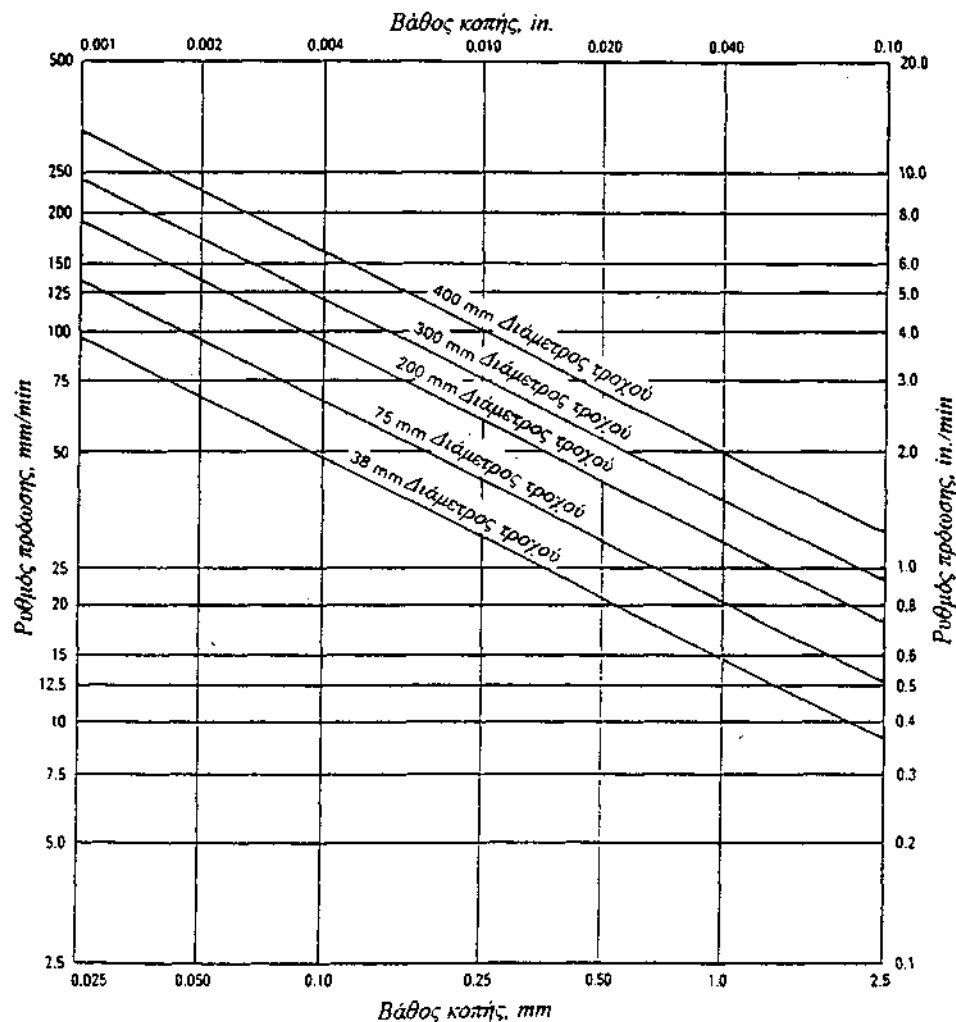
Η εσωτερική λείανση μπορεί να επιτευχθεί και αυτή επίσης με την ECG. Είναι όμοια με τη συμβατική εσωτερική λείανση, αν και εδώ η μέγιστη διάμετρος του τροχού επιλέγεται για τη μέγιστη ένταση ρεύματος και τους μέγιστους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού.

ΛΕΙΑΝΣΗ ΜΟΡΦΗΣ

Στη λείανση μορφής χρησιμοποιούνται τροχοί από οξείδιο του αλουμινίου με μεταλλικό δεσμό (μαλακοί τροχοί). Αυτοί οι τροχοί μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα στο επιθυμητό σχήμα με τη χρήση ενός συμβατικού αδαμάντινου εργαλείου τόννευσης. Λόγω της χρήσης τροχών με συγκεκριμένη μορφή, αυτή είναι η πιο δαπανηρή μέθοδος. Το κόστος για την αλλαγή της μορφής ενός αδαμάντινου τροχού που προορίζεται για λείανση καρβιδίων είναι υψηλό και είναι δύσκολη η τόννευση του. Επομένως, οι αποξεστικοί τροχοί μεταλλικού δεσμού χρησιμοποιούνται γενικά για τη λείανση καρβιδίων.

ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗ ΛΕΙΑΝΣΗ

Όλα τα πλεονεκτήματα της ECG εφαρμόζονται στη κυλινδρική λείανση, εκτός από τους υψηλούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού. Ο λόγος για τον οποίο υπάρχει χαμηλότερος ρυθμός αφαίρεσης υλικού είναι ότι η επιφάνεια επαφής μεταξύ της επιφάνειας εργασίας και του τροχού είναι μικρή, επιτρέποντας μικρή ροή ρεύματος.



Σχήμα 14.ε. Τυπικοί ρυθμοί πρόωσης για την ECG επιφάνειας που καθορίζονται από μια πυκνότητα ρεύματος $1,5 \text{ A/mm}^2$ και ταχύτητες τροχού από 1200 μέχρι 2100 m/min.

1. Πλεονεκτήματα της ECG

Η ECG προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους αφαίρεσης μετάλλου:

1. Μειώνει το κόστος του τροχού, ειδικά σε αδαμάντινους τροχούς μεταλλικού δεσμού, αφού μόνο το 10% του αφαιρούμενου μετάλλου αφαιρείται από την αποξεστική δράση.

2. Υπάρχει υψηλή αναλογία αφαίρεσης υλικού σε σχέση με τη φθορά του εργαλείου.
3. Μπορούν να επιτευχθούν υψηλότεροι ρυθμοί παραγωγής επειδή η ωφέλιμη ζωή του τροχού μεταξύ δύο διαδοχικών τορνιρισμάτων είναι μεγαλύτερη.
4. Δεν παράγεται θερμότητα κατά τη διάρκεια της λείανσης, επομένως δεν υπάρχει κανένα "κάψιμο" ή θερμική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου κομματιού.
5. Τα παραγόμενα εξαρτήματα είναι απαλλαγμένα από γρέζια, επομένως εξαλείφονται οι διαδικασίες απογρέζωσης.
6. Λεπτά και εύθραυστα εξαρτήματα μπορούν να κατεργαστούν χωρίς καμμία παραμόρφωση αφού ο τροχός δεν αγγίζει ποτέ την επιφάνεια εργασίας.
7. Το καρβίδιο του βολφραμίου καθώς και ορισμένα εξαιρετικά ανθεκτικά κράματα μπορούν να κατεργαστούν γρήγορα και εύκολα.
8. Εξωτικά υλικά, όπως το ζirkόνιο και το βηρύλλιο μπορούν να κατεργαστούν ανεξάρτητα από τη σκληρότητα, την ευθραυστότητα και τη θερμική ευαισθησία αυτών των υλικών.
9. Μπορούν να κατεργαστούν ανόμοια μέταλλα, με τη προϋπόθεση ότι είναι ηλεκτρικά αγωγά.
10. Μπορούν να επαναλειανθούν κοπτήρες σε ένα πάσο, εξαλείφοντας την ανάγκη κοπών αποπεράτωσης.
11. Δεν δημιουργούνται τάσεις στο κατεργαζόμενο υλικό.
12. Δεν λαμβάνει χώρα ενδοτράχυνση (σκληρύνση).
13. Μπορούν να επιτευχθούν ανοχές της τάξεως των $\pm 0,025$ mm υπό φυσιολογικές συνθήκες και $\pm 0,0025$ mm υπό ειδικές συνθήκες.

κ. Μειονεκτήματα και περιορισμοί της ECG

Ενώ η ECG έχει πολλά πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα ή περιορισμοί αυτής της μεθόδου κατεργασίας αναφέρονται ακολούθως:

1. Μπορούν να κατεργαστούν εξαρτήματα μόνο από ηλεκτρικά αγωγά υλικά.
2. Οι λειαντικοί τροχοί, ειδικά οι αδαμάντινοι τροχοί μεταλλικού δεσμού, κοστίζουν περισσότερο από τους συνηθισμένους λειαντικούς τροχούς.
3. Η ακρίβεια που είναι δυνατόν να επιτευχθεί είναι 0,01 mm.

4. Το ηλεκτρολυτικό διάλυμα είναι διαβρωτικό, επομένως τα εξαρτήματα της εργαλειομηχανής που έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι επιχρωμιωμένα.
5. Η επαφή του τροχού με το εξάρτημα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 20 mm.
6. Υψηλότερο κεφαλαιουχικό κόστος απ'ότι οι συμβατικές εργαλειομηχανές.
7. Απαιτείται διάθεση και διήθησις (φιλτράρισμα) του ηλεκτρολύτη.
8. Για ευκολοκατέργαστα υλικά η μέθοδος δεν είναι ανταγωνιστική των συμβατικών μεθόδων κατεργασίας. Ο πίνακας 14.2 συγκρίνει την ECG με το φρεζάρισμα και τη συμβατική λείανση για διάφορα υλικά κατεργασίας. Όπως προκύπτει από την ανάγνωση του πίνακα η ανωτερότης της ECG αυξάνει με τη σκληρότητα ή τη δυσθραυστότητα του κατεργαζόμενου υλικού.

λ. Εφαρμογές της ECG

Η μεγαλύτερη χρήση της ECG σήμερα είναι στη κατασκευή και επανακατασκευή πτερυγίων στροβίλου για τους κινητήρες των αεροσκαφών. Η μέθοδος είναι γρήγορη και πολύ αποτελεσματική για τη κατεργασία δυσκολοκατέργαστων υλικών ιδιαίτερα δε του στελλίτη. Άλλες εφαρμογές στη βιομηχανία στροβιλομηχανών περιλαμβάνουν τη κατεργασία κυψελοειδών στεγανοποιητικών εξαρτημάτων τα οποία θεωρείται κρίσιμο να είναι απαλλαγμένα από γρέζια και τάσεις.

Η βιομηχανία ιατρικών οργάνων είναι η νεότερη περιοχή ανάπτυξης. Η μέθοδος ECG χρησιμοποιείται σήμερα για τη κατεργασία χειρουργικών οργάνων, υποδερμικών βελόνων καθώς επίσης και στη κατεργασία διαφόρων άλλων ιατρικών οργάνων.

Πίνακας 14.2. Σύγκριση της ηλεκτροχημικής διάλυσης με τη συμβατική διάλυση και φρεζάρισμα.

Υλικό	Αφαιρούμενο υλικό (φρεζάρισμα)	Αφαιρούμενο υλικό (διάλυση)	Κόστος εργαλείων και αντικατάστασης.	Έλεγχος μεγέθους	Παραγωγή τετραγώνων	Δυνατότητα βερμικής ζήλιας.	Ποιότητα επιφανείας
Χάλυβας	Καλύτερη	Περίπου ίση	Καλύτερη	Καλύτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση	Περίπου ίση
Μαλακός επαναεργαλειοχάλυβας	Καλύτερη	Περίπου ίση	Καλύτερη	Καλύτερη	Ανώτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση
Σκληρός επαναεργαλειοχάλυβας	Ανώτερη	Ανώτερη	Καλύτερη	Καλύτερη	Ανώτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση
Χυτοσίδηρος	Καλύτερη	Καλύτερη	Καλύτερη	Καλύτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση	Καλύτερη
Χαλκός	Καλύτερη	Ανώτερη	Καλύτερη	Περίπου ίση	Ανώτερη	Περίπου ίση	Ανώτερη
Ορείχαλκος	Καλύτερη	Ανώτερη	Καλύτερη	Περίπου ίση	Ανώτερη	Περίπου ίση	Περίπου ίση
Αλουμίνιο	Καλύτερη	Καλύτερη	Καλύτερη	Καλύτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση	Καλύτερη
Βολφράμιο	Καλύτερη	Ανώτερη	Καλύτερη	Περίπου ίση	Ανώτερη	Ανώτερη	Ανώτερη
Καρβίδιο του βολφραμίου	Ανώτερη	Ανώτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση	Ανώτερη	Ανώτερη	Ανώτερη
Βηρύλλιο	Καλύτερη	Περίπου ίση	Καλύτερη	Καλύτερη	Περίπου ίση	Περίπου ίση	Καλύτερη
Ανοξείδωτος χάλυβας 309	Καλύτερη	Ανώτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση	Ανώτερη	Ανώτερη	Ανώτερη
Ανοξείδωτος χάλυβας 409	Καλύτερη	Ανώτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση	Ανώτερη	Ανώτερη	Ανώτερη
Τίτανο	Καλύτερη	Περίπου ίση	Περίπου ίση	Περίπου ίση	Ανώτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση
Inconel 718	Ανώτερη	Ανώτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση	Ανώτερη	Ανώτερη	Ανώτερη
Hastelloy	Ανώτερη	Ανώτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση	Ανώτερη	Ανώτερη	Περίπου ίση

15. ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΛΕΙΑΝΣΗ ΜΕ ΕΚΚΕΝΩΣΗ [ELECTROCHEMICAL DISCHARGE GRINDING (ECDG)]

α. Εισαγωγή

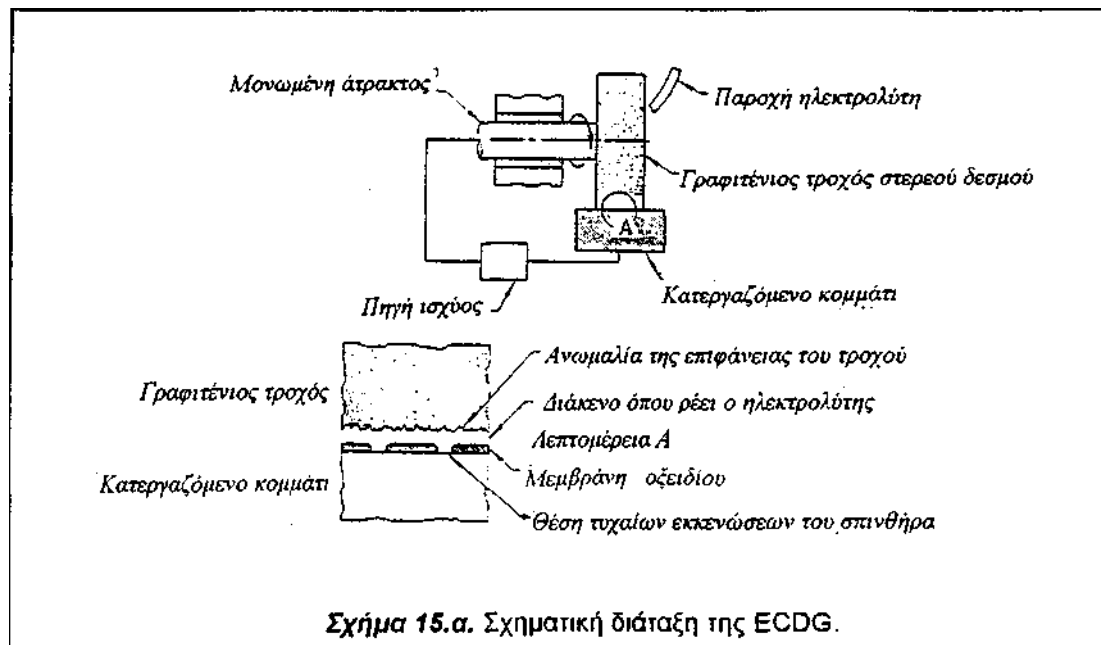
Η ηλεκτροχημική λείανση με εκκένωση (ECDG), είναι ένας συνδυασμός ηλεκτροχημικής λείανσης (ECG) και λείανσης με ηλεκτρική εκκένωση (EDG), με μερικές τροποποιήσεις στη κάθε μια. Η μέθοδος προσομοιάζει με την ECG στον ηλεκτροχημικό σχηματισμό οξειδίων στο θετικά φορτισμένο κατεργαζόμενο κομμάτι (άνοδος). Ωστόσο, χρησιμοποιεί εναλασσόμενο ρεύμα ή συνεχές παλμικό ρεύμα και δεν χρησιμοποιεί αποξεστικό επενδεδυμένο τροχό. Επίσης η ECDG προσομοιάζει με την EDG στη χρήση ενός γραφιτένιου τροχού που δεν εκτελεί μηχανική λείανση και στη χρήση διακοπτόμενων εκκενώσεων για την αφαίρεση υλικού από την επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού, αλλά διαφέρει από την EDG στη χρήση ενός ηλεκτρολύτη υψηλής αγωγιμότητας αντί ενός διηλεκτρικού υγρού και στη χρήση χαμηλής τάσης, παλμικού συνεχούς ρεύματος. Παρόμοια με την ECG, η ECDG είναι περισσότερο χρήσιμη στη λείανση εργαλείων από καρβίδιο, σκληρυνμένου εργαλειοχάλυβα, κραμάτων με βάση το νικέλιο και εξαρτημάτων που είναι εύθραυστα ή ευαίσθητα στη θερμότητα.

β. Εξοπλισμός της ECDG

Το σχήμα 15.α δείχνει την εγκατάσταση της ECDG η οποία χρησιμοποιεί ένα γραφιτένιο τροχό στερεού δεσμού. Επίσης διακρίνεται μια τομή σε μεγέθυνση με την αλληλεπίδραση που υπάρχει κατά τη διάρκεια της λείανσης. Ο τροχός είναι κατασκευασμένος από γραφίτη και από ένα συνδετικό μέσο. Οι περισσότεροι εμπορικοί τροχοί που έχουν μέγεθος σωματιδίου 300 ή λεπτότερο είναι ικανοποιητικοί για χρήση. Όμοια με το τροχό της EDG, ο

τροχός της ECDG δεν περιέχει αποξεστικό υλικό, δίνει μια τραχύτητα περίπου 6,4 μm ή μικρότερη και συνήθως παράγει το τελικό σχήμα σε ένα μόνο πάσο. Η άτρακτος είναι ηλεκτρικά μονωμένη για να απομονώνει το ηλεκτρικό κύκλωμα. Στη μέθοδο υπάρχει μια ευπροσάρμοστη τράπεζα

εργασίας καθώς και κατάλληλος μηχανισμός πρόωσης. Κατά τη λείανση εργαλείων μιας κοπτικής ακμής το κατεργαζόμενο κομμάτι συγκρατείται απέναντι από την επίπεδη επιφάνεια του γραφιτένιου τροχού. Στη λείανση προφίλ, το κατεργαζόμενο κομμάτι περνά από την περιφέρεια ενός προδιαμορφωμένου γραφιτένιου τροχού.



Σχήμα 15.α. Σχηματική διάταξη της ECDG.

Ο εξοπλισμός της ECDG περιλαμβάνει ένα συλλέκτη του ηλεκτρολύτη καθώς επίσης και μια δεξαμενή παροχής στην οποία επιστρέφει και αποθηκεύεται μετά τη χρήση του ο ηλεκτρολύτης. Ο ηλεκτρολύτης αντλείται διά μέσου ενός φίλτρου πριν φτάσει στην επιφάνεια εργασίας και στο τροχό. Στον εξοπλισμό συμπεριλαμβάνονται ορισμένα πρόσθετα εξαρτήματα για τη διαμόρφωση, τόννευση και κατεργασία του τροχού χωρίς τη μετακίνηση αυτού από το μηχάνημα. Κατά τη διάρκεια της λείανσης ενός προφίλ χρησιμοποιούνται συσκευές απόξεσης ή διαμορφωμένο πλαστικό για να παρέχουν ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρολύτη.

γ. Οι ηλεκτρολύτες

Όπως στην ECG, έτσι και στην ECDG οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται είναι αγωγίμα ρευστά (αραιά υδάτινα διαλύματα ανόργανων αλάτων). Ένα διάλυμα που περιέχει 110 gr/lit KNO_3 σύν 55

gr/lit Na_2CO_3 (άνυδρο) είναι κατάλληλο σαν ηλεκτρολύτης στη λείανση καρβιδίου και των περισσοτέρων μετάλλων. Η συγκέντρωση του διαλύματος κυμαίνεται από 0,18 μέχρι 0,24 Kg/lit.

δ. Χαρακτηριστικά της ECDG

Ο μηχανισμός της ECDG μπορεί να κατανοηθεί στη σχέση που υπάρχει με τις μεθόδους ECM, ECG και EDG. Στη μέθοδο EDG, το μέταλλο αφαιρείται αποκλειστικά με εκκενώσεις σπινθήρων υψηλής τάσεως διά μέσου ενός διηλεκτρικού υγρού, ενώ στην ECM, ECG και ECDG ο κύριος μηχανισμός αφαίρεσης μετάλλου είναι η ανοδική οξειδωση μέσα σ'ένα αγώγιμο ηλεκτρολύτη. Σ'αυτές τις 3 ηλεκτροχημικές μεθόδους, το μέταλλο του κατεργαζόμενου κομματιού συνεχίζει να διαλύεται ανοδικά με πρακτικό ρυθμό μόνο εάν οποιοδήποτε συνεχές και προσκολλημένο στρώμα οξειδίου που έχει σχηματιστεί ηλεκτροχημικά πάνω στην επιφάνεια εργασίας αφαιρείται συνεχώς με ικανοποιητικά γρήγορο ρυθμό.

Στην ECM και στην ECG εφαρμόζεται συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης και υψηλής έντασης για τη διάλυση του μετάλλου από το κατεργαζόμενο κομμάτι. Στην ECM, η σύνθεση του ηλεκτρολύτη και η πυκνότητα του ρεύματος ρυθμίζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην παράγεται το στρώμα οξειδίου. Οποιοδήποτε στρώμα οξειδίου που σχηματίζεται διαλύεται χημικά μέσα στον ηλεκτρολύτη τόσο γρήγορα όσο σχηματίζεται. Στην ECG, η μηχανική αποξεστική δράση των κόκκων του τροχού που προεξέχουν αφαιρεί τα στρώματα αυτά και τα σωματίδια που δεν αντιδρούν, εκθέτοντας κατ'αυτό το τρόπο νέο μέταλλο για την ηλεκτροχημική αντίδραση.

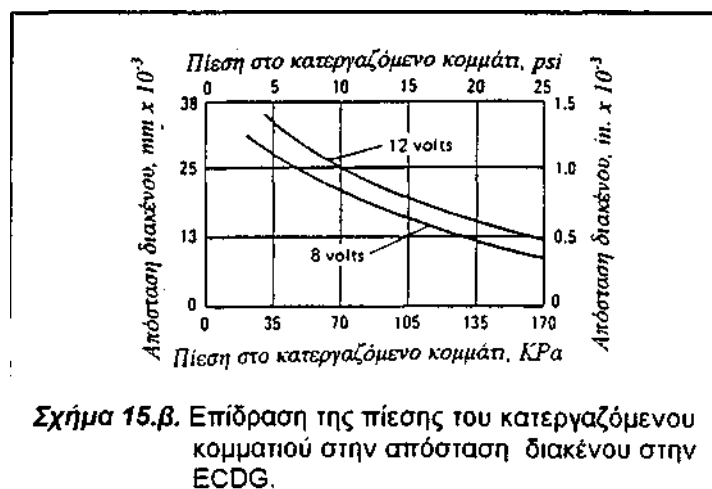
Στην ECDG, το μέταλλο αφαιρείται με τον κατ'αρχήν μετασχηματισμό του σε μια συνεχή, προσκολλημένη και φτωχής αγωγιμότητας μεμβράνη οξειδίου πάχους από 0,25 μέχρι 1,25 μm . Όταν χρησιμοποιείται εναλασσόμενο ρεύμα, η μεμβράνη οξειδίου που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια ενός θετικού παλμικού ρεύματος (θετικά φορτισμένο κατεργαζόμενο κομμάτι) αφαιρείται στις θέσεις όπου πραγματοποιείται η εκκένωση όταν υπερβαίνεται η τάση διάσπασης της μεμβράνης κατά τη διάρκεια του αρνητικού παλμού που ακολουθεί. Ο κύκλος μετά επαναλαμβάνεται. Όταν χρησιμοποιείται παλμικό συνεχές ρεύμα, η

μεμβράνη οξειδίου σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της χαμηλής τάσης του παλμού, και αφαιρείται στις θέσεις όπου πραγματοποιείται η εκκένωση όταν υπερβαίνεται η τάση διάσπασης της μεμβράνης. Σε μια περίοδο μερικών δευτερολέπτων, οι θέσεις της εκκένωσης διανέμονται τυχαία στη περιοχή της κοπής.

Ο κάθε σπινθήρας ανάλογα από το ενεργειακό του επίπεδο μπορεί να αφαιρέσει μια μικρή ποσότητα μετάλλου από το κατεργαζόμενο κομμάτι, αφήνοντας ένα μικρό κρατήρα στην επιφάνεια. Κρατήρες δημιουργούνται στις θέσεις εκκένωσης στο γραφιτένιο τροχό και είναι μια πηγή φθοράς του τροχού.

Η πυκνότητα του ρεύματος ελέγχεται συνήθως με ρύθμιση της τάσεως στη πηγή του ρεύματος. Η πυκνότητα του ρεύματος μπορεί επίσης να ρυθμιστεί με ρύθμιση της

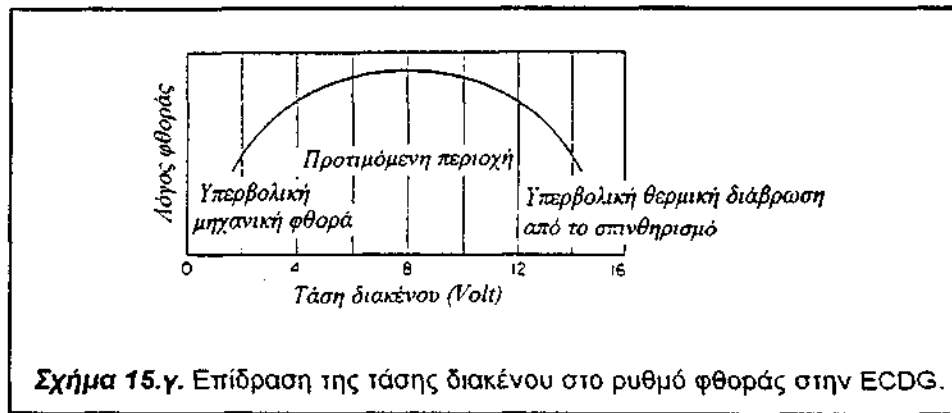
απόστασης του διακένου. Σε μια συσκευή τροχίσσεως εργαλείων, αυτή η ρύθμιση επιτυγχάνεται αλλάζοντας το φορτίο του ελατηρίου που συγκρατεί το κατεργαζόμενο κομμάτι απέναντι από το τροχό. Στη λείανση των προφίλ, μεταβάλλεται ο ρυθμός πρόωσης. Στο σχήμα 15.β φαίνεται η σχέση μεταξύ της πίεσης και του διακένου για δύο διαφορετικές τάσεις διακένου. Μια μεγαλύτερη πίεση (για μια δεδομένη ταχύτητα τροχού και παροχή ηλεκτρολύτη) απαιτείται σε υψηλότερη τάση για τη διατήρηση του διακένου λόγω της αύξησης της ποσότητας των αερίων. Η ταχύτητα του τροχού και η ροή του ηλεκτρολύτη επιδρά επίσης στη δημιουργία αερίων. Η πίεση πάνω στο κατεργαζόμενο κομμάτι κυμαίνεται από 35 μέχρι 140 KPa (5 μέχρι 20 psi) για να διατηρηθεί μια απόσταση διακένου μεταξύ 0,0125 και 0,030 mm.



Το συνολικό ρεύμα στις τυπικές εφαρμογές της ECDG κυμαίνεται από 200 μέχρι 2000 A και η τάση κυμαίνεται από 4 μέχρι 12 V. Το μέταλλο μπορεί να αφαιρεθεί ταχύτερα με αύξηση του ρεύματος, αλλά όταν χρησιμοποιείται εναλασσόμενο ρεύμα η πυκνότητα του ρεύματος είναι περιορισμένη περίπου στα 0,9 A/mm² για καρβίδια και στα 1,2 A/mm² για τα άλλα μέταλλα. Όταν χρησιμοποιείται πηγή παλμικού συνεχούς ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πυκνότητα ρεύματος περίπου 1,9 A/mm² στη λείανση χάλυβα. Ενδιάμεσες πυκνότητες ρεύματος χρησιμοποιούνται για τα άλλα μέταλλα. Σε μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος έχουμε μεγαλύτερη φθορά του τροχού και μπορεί να υποστεί θερμική ζημιά η επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού.

Η ταχύτητα του τροχού για τις περισσότερες εφαρμογές κυμαίνεται από 1200 μέχρι 1800 m/min. Χαμηλότερη ταχύτητα δεν επιτρέπει την ομαλή ροή του φρέσκου ηλεκτρολύτη μέσα στο διάκενο λείανσης. Ακόμη η χαμηλότερη ταχύτητα αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση εγκάρσια του διακένου επιτρέποντας το σχηματισμό μεγαλύτερων φυσαλίδων αερίου μέσα στο διάκενο. Η μέγιστη λειτουργική πυκνότητα του ρεύματος μειώνεται απότομα για ταχύτητες τροχών κάτω από 600 m/min.

Λόγος φθοράς είναι ο όγκος του αφαιρούμενου μετάλλου από το κατεργαζόμενο κομμάτι προς τον όγκο του φθαρμένου γραφίτη από το τροχό και επηρεάζεται από τη τάση διακένου, όπως φαίνεται στο σχήμα 15.γ. Λειτουργία με τάση διακένου 8 V δίνει τη μέγιστη διάρκεια ζωής του τροχού ή αναλογία φθοράς. Κάτω από τα 4 V, η φθορά του τροχού από μηχανική εκτριβή αυξάνει και πάνω από τα 12 V έχουμε τη δημιουργία κρατήρων στην επιφάνεια του τροχού που είναι αποτέλεσμα της υψηλής ενέργειας των εκκενώσεων του σπινθήρα. Σε οποιαδήποτε από τις δύο περιπτώσεις, ο τροχός φθείρεται υπερβολικά. Όταν χρησιμοποιείται εναλασσόμενο ρεύμα για τη λείανση καρβιδίων ή εργαλειοχάλυβα, η αναλογία φθοράς είναι περίπου 7:1. Ενώ όταν χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα σε άλλα σιδηρούχα κατεργαζόμενα κομμάτια, η αναλογία φθοράς είναι περίπου 40:1.



Οι ρυθμοί πρόωσης της τράπεζας ταξινομούνται παρακάτω υπό μορφή πίνακα για τυπικές εφαρμογές με πυκνότητα ρεύματος 0,8 μέχρι 0,9 A/mm²:

Κατεργαζόμενο μέταλλο	Λείανση εμβύθισης mm/min	Λείανση επιφάνειας (α) mm/min
Καρβίδιο	0,5	3,8
Χάλυβας	1,5	12,7

(α) Για 2,5 mm βάθος κοπής και 200 mm διάμετρο τροχού.

Τυπικοί ρυθμοί αφαίρεσης μετάλλου για καρβίδιο είναι 100 mm³/min και για χάλυβα 250 mm³/min, με ρεύμα λειτουργίας 200 A. Ένα τυπικό βάθος κοπής σε ένα μονό πάσο είναι περίπου 6,4 mm.

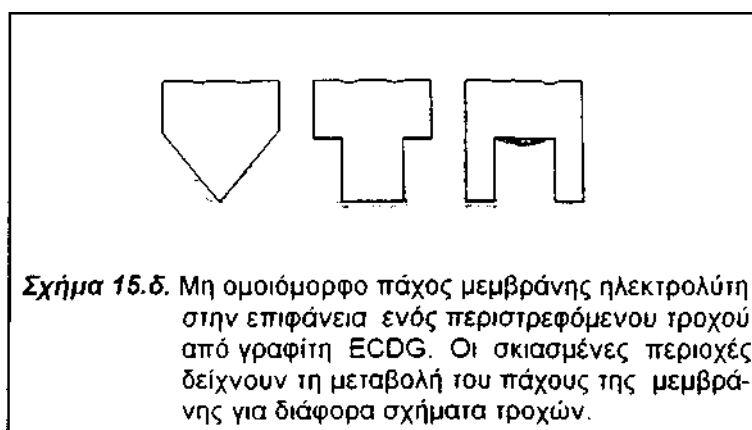
Ακρίβεια και τραχύτητα. Η διαστασιακή ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί στη λείανση εμβύθισης ή επιφάνειας με την ECDG κάτω από προσεχτικά ελεγχόμενες συνθήκες είναι $\pm 0,0125$ mm. Παρόμοιες ανοχές μπορούν να επιτευχθούν στη λείανση προφίλ με τη χρήση βοηθητικών εξαρτημάτων απόξεσης από γραφίτη ή πλαστικό για να ελέγχεται η κατανομή του ηλεκτρολύτη στην επιφάνεια του τροχού. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται σε συνήθεις εφαρμογές παραγωγής είναι $\pm 0,025$ mm. Η τραχύτητα επιφανείας για το καρβίδιο κυμαίνεται από 0,125 μέχρι 0,375 μm και για το χάλυβα κυμαίνεται από 0,375 μέχρι 0,75 μm .

Συντήρηση του τροχού. Οι επίπεδες επιφάνειες του γραφιτένιου τροχού μπορούν να κατεργαστούν με καρβίδιο μιας κοπτικής ακμής ή με εργαλείο από ταχυχάλυβα στη συσκευή τροχίσεως. Δεν είναι αναγκαία η συνεχής

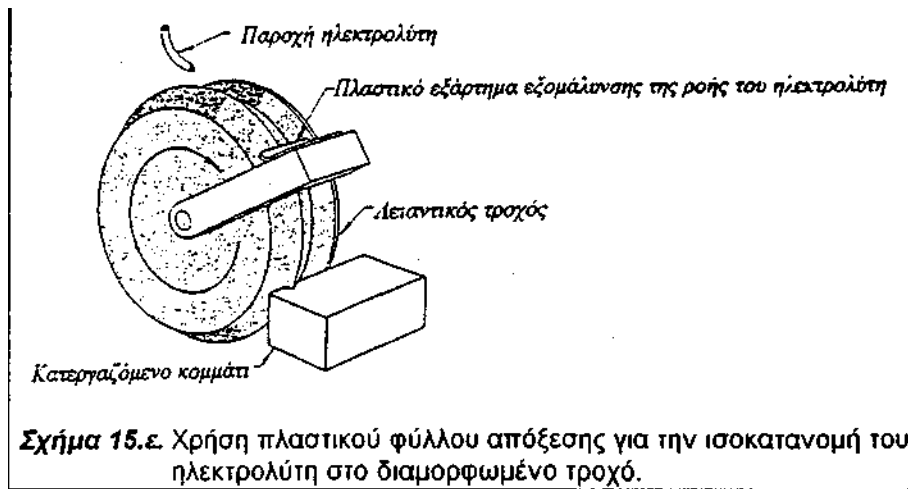
αναγέννηση του τροχού γιατί μπορούν να επιτευχθούν καλά αποτελέσματα ακόμη και με μια επιφάνεια όπου φαίνεται να έχει γδαρσίματα ή κοιλότητες. Η ωφέλιμη ζωή του τροχού εξαρτάται κυρίως από τη ποιότητα του γραφίτη, τη τάση λειτουργίας και τέλος από το είδος παροχής ισχύος (συνεχές ή εναλασσόμενο ρεύμα).

Για τη λείανση μορφής ή προφίλ, ο τροχός μπορεί να διαμορφωθεί σε μια συσκευή τροχίσσεως με κοπή εμβύθισης με τη χρήση πρότυπου από ταχυχάλυβα. Κατά τη χρήση, ο τροχός εάν είναι απαραίτητο μπορεί να αναγεννηθεί με τον ίδιο τρόπο.

Λείανση προφίλ. Η ακρίβεια με την οποία η ECDG προφίλ αναπαράγει τις διαστάσεις του προτύπου περιορίζεται κυρίως από την ομοιομορφία του πάχους της μεμβράνης του ηλεκτρολύτη πάνω στο διαμορφωμένο τροχό στην ενδοεπιφάνειά λείανσης. Το σχήμα 15.δ εικονίζει το ανομοιόμορφο μοντέλο κατανομής του ηλεκτρολύτη που επιτυγχάνεται στην ενδοεπιφάνειά λείανσης σε ένα περιστρεφόμενο διαμορφωμένο τροχό εκτός αν χρησιμοποιηθούν βοηθητικές συσκευές απόξεσης για να παρέχουν μια ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρολύτη πάνω στο προφίλ του τροχού.



Στο σχήμα 15.ε εικονίζεται μια λείανση προφίλ ενός εργαλείου μιας κοπτικής ακμής που δεν έχει επίπεδες οριζόντιες ή κάθετες επιφάνειες, ένα επίπεδο πλαστικό φύλλο φθοράνθρακα πάχους 0,15 mm συγκρατείται ενάντια στη κορυφή του τροχού. Το πλαστικό φύλλο αποξέει την υπερβολική συσσώρευση ηλεκτρολύτη από τη κορυφή του τροχού.



Για τη λείανση σύνθετων προφίλ που έχουν καμπύλο σχήμα και επίπεδες κατακόρυφες ή οριζόντιες επιφάνειες, πεπιεσμένος αέρας εμφυσάται διά μέσου μιας διάτρητης συσκευής απόξεσης για τον έλεγχο της κατανομής του ηλεκτρολύτη, ιδιαίτερα στις επίπεδες κατακόρυφες ή οριζόντιες επιφάνειες.

Σε μια καλά ελεγχόμενη λειτουργία που χρησιμοποιούνται συσκευές απόξεσης, η διαστασιακή απόκλιση από το πρότυπο είναι μικρότερη από $\pm 0,0125$ mm.

ε. Σύγκριση της ECDG με την ECG και την EDC

Η μέθοδος ECDG έχει την ίδια έκταση εφαρμογών με την ECG και την EDG και παρουσιάζει τα ίδια πλεονεκτήματα στη λείανση υλικών και σχημάτων που παρουσιάζουν προβλήματα στη συμβατική λείανση με τροχούς εκτριβής. Η ECDG απαιτεί 10 μέχρι 15 φορές περισσότερο ρεύμα από την EDG για την αφαίρεση μετάλλου με τον ίδιο ρυθμό, αλλά η ECDG έχει τη δυνατότητα να αφαιρέσει μεγαλύτερη ποσότητα μετάλλου και παράγει λείες επιφάνειες σε πολύ ταχύτερους ρυθμούς αφαίρεσης μετάλλου όπως φαίνεται στο πίνακα 15.1.

Ωστόσο, η διαστασιακή ακρίβεια της ECDG είναι μικρότερη σε σχέση με την EDG. Έτσι η διαστασιακή ανοχή στην ECDG είναι $\pm 0,0125$ mm και στην EDG είναι $\pm 0,0025$ mm.

Πίνακας 15.1. Σύγκριση της ECDG με την EDG στο ρυθμό αφαίρεσης μετάλλου για ρεύμα 200 A και βάθος κοπής 13 mm.

Κατεργαζόμενο μέταλλο	Τραχύτητα επιφανείας μm	Αφαίρεση μετάλλου mm ³ x 10 ³ /h	
		ECDG	EDG
Εργαλειοχάλυβας	0,75	0,3	6
Καρβίδιο	0,25	0,07	15

Η ECDG έχει το πλεονέκτημα σε σχέση με την ECG ότι οι τροχοί που χρησιμοποιούνται είναι φθηνότεροι σε σχέση με τους ειδικά κατασκευασμένους αποξεστικούς τροχούς που χρησιμοποιούνται στην ECG. Ωστόσο, με την ECG επιτυγχάνεται υψηλότερος ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου απότι με την ECDG. Η ECG επίσης αφήνει μια μεταλλουργικά καθαρή επιφάνεια, ενώ η ECDG αφήνει ένα επανατηκώμενο στρώμα.

Οι τροχοί από γραφίτη της ECDG διαμορφώνονται πολύ εύκολα σε πολύπλοκα σχήματα σε ειδική συσκευή τροχίσσεως και έχουν μεγάλη ωφέλιμη ζωή. Ένας μονός τροχός ECDG τύπου ποτηριού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λείανση πάνω από 35.000 σκληρομετάλλων μιας χρήσεως με βάθος 0,25 mm. Επιπλέον, είναι αναγκαίο να αποθηκεύονται τροχοί από ένα μόνο υλικό, αντί για τα διάφορα είδη που απαιτείται να αποθηκεύονται για διάφορες εφαρμογές με την ECG. Επειδή η ECDG ασκεί μικρότερη πίεση από το τροχό πάνω στο κατεργαζόμενο κομμάτι είναι δυνατή η λείανση ευπαθών τεμαχίων χωρίς τάσεις και γρέζια καθώς επίσης και τεμαχίων εύθραυστης και κυψελλοειδούς μορφής τα οποία θα ήταν πολύ δύσκολο να κατεργαστούν από άλλες μεθόδους. Μια τυπική εφαρμογή της ECDG είναι η κατεργασία σκληρομετάλλων μιας χρήσης και μιας κοπτικής ακμής σε βάθος 0,25 mm με τραχύτητα επιφανείας 0,4 μέχρι 0,6 μm με ρυθμό ένα σκληρομέταλλο το λεπτό.

16. ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΩΛΗΝΑ.

[SHAPED TUBE ELECTROLYTIC MACHINING (STEM)]

α. Εισαγωγή

Η ηλεκτρολυτική κατεργασία με μορφοποιημένο (σχηματοποιημένο) σωλήνα (STEM) αναπτύχθηκε αρχικά και βελτιώθηκε από την ομάδα αεροπορικών κινητήρων της **GENERAL ELECTRIC** για τη διάτρηση οπών με μεγάλη αναλογία βάθους προς διάμετρο η οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί με τη συμβατική διάτρηση. Αρχικά, τέτοιες οπές επιχειρήθηκε να κατασκευαστούν με την ηλεκτροχημική κατεργασία (ECM), αλλά η συνήθης ECM παράγει μη διαλυτά καθιζήματα τα οποία εμποδίζουν την εξέλιξη της μεθόδου βάζοντας εμπόδια στη πορεία της ροής του ηλεκτρολύτη. **Στην ουσία, η STEM είναι μια παραλλαγή της ECM** η οποία χρησιμοποιεί έναν όξινο ηλεκτρολύτη έτσι ώστε το αφαιρούμενο μέταλλο να διαλύεται μέσα στον ηλεκτρολύτη αντί να σχηματίζει καθιζήματα.

Επειδή αυτή η μέθοδος κατεργασίας χρησιμοποιεί έναν όξινο ηλεκτρολύτη, η χρήση της περιορίζεται στη διάτρηση οπών σε ανοξείδωτο χάλυβα ή άλλα μέταλλα που είναι ανθεκτικά στη διάβρωση. Σε τεμάχια που είναι μελετημένα και σχεδιασμένα για σύγχρονους κινητήρες αεροσκαφών (jet engines, gas turbine) και μερικές ειδικές εφαρμογές της STEM συμπεριλαμβάνουν τις ακόλουθες κατεργασίες:

1. Διάτρηση οπών ψύξης των πτερυγίων αεριοστροβίλων.
2. Διάτρηση διόδων ψύξης δίσκων αεριοστροβίλων.
3. Διάτρηση διόδων λαδιού.
4. Διάτρηση ακροφυσίων καυσίμου.
5. Τη διάτρηση κάθε οπής όπου η EDM δεν επιτρέπεται λόγω της επανάτηξης του υλικού του τεμαχίου.

Άλλες εφαρμογές της STEM επίσης περιλαμβάνουν:

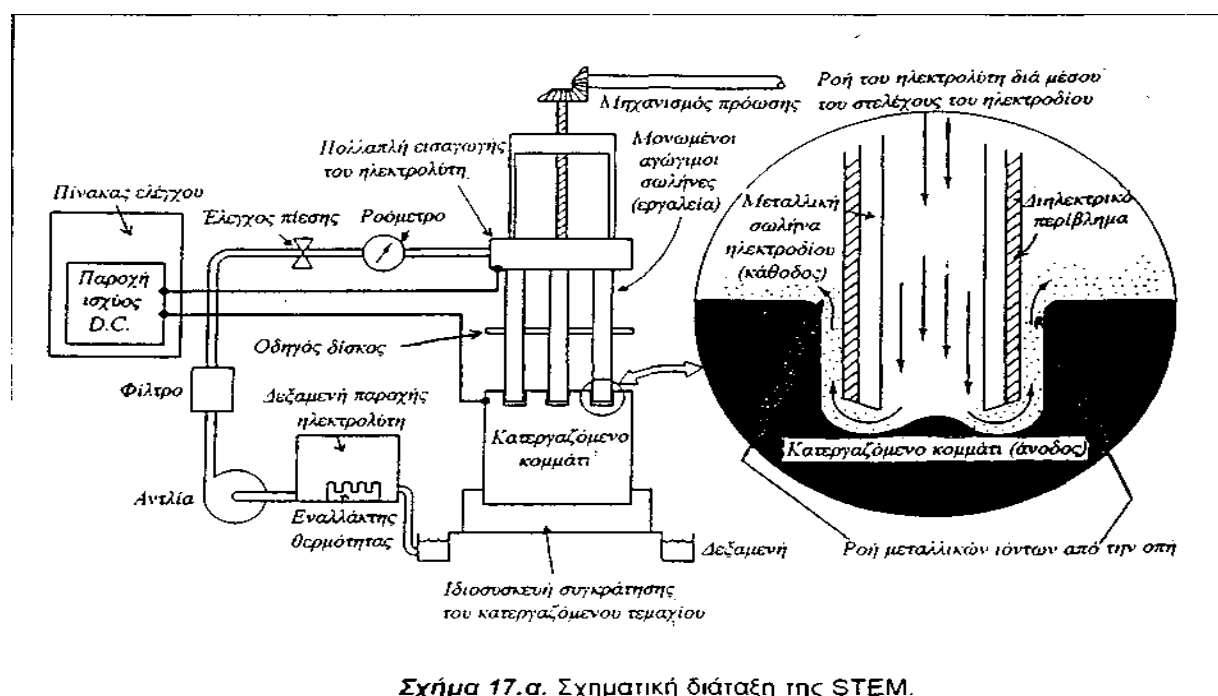
1. Διάτρηση οπών εκκίνησης για τη μέθοδο EDWC, ειδικά εκεί όπου το μήκος της κοπής υπερβαίνει τα 100 mm.

2. Διάτρηση οπών σε σειρά σε μέταλλα που είναι σε διάβρωση με χαμηλή κατεργαστικότητα (για παράδειγμα, φίλτρα και μήτρες).
3. Διάτρηση διόδων λαδιού σε τριβείς στους οποίους η μέθοδος EDM θα προκαλούσε ραγίσματα.
4. Πολλές εφαρμογές γενικά στη βιομηχανία όπου χρησιμοποιούνται υλικά υψηλής αντοχής ή εκεί όπου η κατεργαστικότητα είναι ένα σοβαρό πρόβλημα.

β. Εξοπλισμός της STEM

Το σχήμα 16.α εικονίζει τα κύρια εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται η STEM. Η STEM προσομοιάζει με την ηλεκτροχημική κατεργασία (ECM) κατά το ότι μια παροχή ισχύος συνεχούς ρεύματος και χαμηλής τάσης δημιουργεί την ηλεκτρολυτική δράση μεταξύ της ανόδου (του κατεργαζόμενου κομματιού) και της καθόδου (του εργαλείου). Ωστόσο, το σύστημα της STEM έχει μερικές διαφορές:

- Πρέπει να είναι ανθεκτικό στο οξύ.
- Απαιτείται λιγότερη ακαμψία.
- Η πολικότητα της παροχής ισχύος πρέπει να αντιστρέφεται περιοδικά επειδή ο όξινος ηλεκτρολύτης αυξάνει τη τάση των καθόδων να επιμεταλλωθούν από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Σχήμα 17.α. Σχηματική διάταξη της STEM.

Η βασική μηχανή STEM προσομοιάζει με τη μηχανή ECM και έχει έναν άξονα πρόωσης, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να διατηρεί σταθερούς ρυθμούς πρόωσης που κυμαίνονται από 25 μέχρι 0,125 mm/min καθώς και μια κίνηση ώθησης με ελαφρύ τίναγμα. Ωστόσο, οι μηχανές ECM και STEM πολλαπλών αξόνων χρησιμοποιούνται επίσης για ειδικές εφαρμογές. Η χρήση H/Y αριθμητικού ελέγχου καθιστά δυνατό το προγραμματισμό των μεταβλητών ρυθμών πρόωσης και επίσης ρυθμίζει τις παραμέτρους της διαδικασίας. Οι ρυθμοί πρόωσης σ'αυτές τις μηχανές κυμαίνονται από 0,75 μέχρι 3 mm/min.

Παρόλο που στη πράξη είναι ασύνηθες, μερικές φορές συνίσταται η ηλεκτρική μόνωση της τράπεζας εργασίας, όπου προσδένονται τα κατεργαζόμενα τεμάχια για τη κατεργασία τους, από τον υπόλοιπο σκελετό της εργαλειομηχανής. Αυτό αποτρέπει τη διάβρωση κάθε μεταλλικού εξαρτήματος που έρχεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της τάσης.

Η παροχή ισχύος για το σύστημα της STEM έχει τάση εξόδου μέχρι 20 V και η πολικότητα αντιστρέφεται κάθε 5 έως 10 sec. Η διάρκεια αυτής της αντιστροφής ελέγχεται ώστε να ποικίλλει από 75 μέχρι 250 msec.

Οι παροχές ισχύος της STEM έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς ρεύματος μέχρι 600 A στην απευθείας πολικότητα και 50 A στην αντεστραμμένη πολικότητα. Οι παροχές ισχύος μπορούν να είναι αερόψυκτες ή υδρόψυκτες και ένας τριφασικός ανορθωτής είναι επαρκής.

Τα συστήματα του ηλεκτρολύτη στη STEM περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Μια αντλία, η οποία είναι δυνατόν να δημιουργεί την απαιτούμενη ροή με πίεση μέχρι 550 KPa (80 psi) (η παροχή εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή).
- Φίλτρα (τελικό φίλτρο: 1 μm).
- Ένα εναλλάκτη θερμότητας.

- Έλεγχο θερμοκρασίας: ± 1 °C.
- Μια συσκευή ανάμιξης του οξέος.
- Μια δεξαμενή αποθήκευσης των όξινων αποβλήτων.

Η μηχανή STEM πρέπει επίσης να έχει ένα εσώκλειστο χώρο έτσι ώστε να αποτρέπεται το πιτσίλισμα από τον ηλεκτρολύτη προς τα έξω και ένα άνοιγμα για την απομάκρυνση του υδρογόνου που παράγεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Επιπρόσθετα, είναι δυνατόν να υπάρχουν συσκευές αναγραφής της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και της μόλυνσης (αποσύνθεσης) του μετάλλου αλλά δεν είναι απαραίτητες. Ωστόσο, είναι αναγκαίο να παρέχονται τα μέσα μέτρησης της συγκέντρωσης του οξέος. Η μόλυνση (αποσύνθεση) του μετάλλου καθορίζεται από τον όγκο του αφαιρούμενου μετάλλου έτσι ώστε το οξύ να απορρίπτεται από ένα προκαθορισμένο σημείο.

Στη διάτρηση πολλαπλών οπών με διαφορετικές διαμέτρους, είναι απαραίτητο να προληφθεί η έλλειψη οξέος στη μικρή διάμετρο των οπών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πολλαπλών αγωγών παροχής ηλεκτρολύτη και με έλεγχο κλειστού βρόγχου της ηλεκτρολυτικής πίεσης και ροής του ηλεκτρολύτη.

Τα μέσα κατεργασίας (εργαλεία) είναι το πλέον κρίσιμο μέρος της STEM και πρέπει να είναι σωστά μελετημένα και σχεδιασμένα για να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Τα μέσα κατεργασίας (εργαλεία) του συστήματος της STEM αποτελούνται από τα ακόλουθα:

1. Ιδιοσυσκευή συγκράτησης των τεμαχίων: είναι όμοια όπως ένα συμβατικό εργαλείο.
2. Οδηγός των καθόδων: ανάλογος με τους δακτυλίους οδηγούς της συμβατικής διάτρησης.
3. Κάθοδοι: ανάλογοι με ένα τρυπάνι.
4. Συσκευή συγκράτησης της καθόδου/πολλαπλή εισαγωγής του ηλεκτρολύτη: είναι όμοια με τις τσιμπίδες (collets) συγκράτησης των τρυπανιών κάνης των όπλων.

Γενικά, οι Ιδιοσυσκευές συγκράτησης των τεμαχίων και οι οδηγοί της καθόδου πρέπει να κατασκευάζονται εξ'ολοκλήρου από καθαρό τιτάνιο, το οποίο σχηματίζει ένα ανοδικό στρώμα για προστασία από το οξύ. Οι κάθοδοι είναι μονωμένοι σωλήνες από καθαρό τιτάνιο, ενώ οι συσκευές συγκράτησης των καθόδων καθώς και η πολλαπλή εισαγωγής του

ηλεκτρολύτη κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα και ακριλικό πλαστικό αντίστοιχα.

Οι ιδιοσυσκευές συγκράτησης των τεμαχίων πρέπει να μελετώνται και να σχεδιάζονται με τον ίδιο τρόπο όπως στις συμβατικές κατεργασίες. Τα σημεία προσδιορισμού θέσης μπορούν να κατασκευαστούν από καρβίδιο, αλλά πρέπει να αντικαθίστανται τακτικά. Οι ιδιοσυσκευές μπορούν να κατασκευαστούν σε πολλαπλά αντίγραφα και πρέπει να ευθυγραμμιστούν έτσι ώστε οι μη παράλληλες οπές να είναι περίπου με την ίδια γωνία όπως ο άξονας κίνησης της μηχανής.

Οι οδηγοί των καθόδων πρέπει να είναι προσαρμοσμένοι με την ιδιοσυσκευή συγκράτησης των τεμαχίων και πρέπει να υπάρχει ένα μικρό διάκενο μεταξύ του κάτω μέρους του οδηγού και της κορυφής του τεμαχίου. Το οδηγό μήκος πρέπει να είναι περίπου 50 φορές τη διάμετρο της μεγαλύτερης καθόδου (μέχρι 100 mm, για πολύ μεγάλες καθόδους).

Οι κάθοδοι είναι σωλήνες από καθαρό τιτάνιο, είναι επικαλυμμένοι με ειδική ρητίνη για ηλεκτρική μόνωση και το μέτωπο τους είναι επίπεδα στιλβωμένο (πρόσωπο διάτρησης). Η ευθυγράμμιση των καθόδων είναι πολύ σημαντική γι'αυτό περιοδικά θα πρέπει να γίνεται επανευθυγράμμιση και επαναστίλβωση του προσώπου.

Η συσκευή συγκράτησης των καθόδων και η πολλαπλή εισαγωγή του ηλεκτρολύτη μελετώνται και σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να οδηγούν τις καθόδους διά μέσου των οδηγών. Η συσκευή συγκράτησης των καθόδων και η πολλαπλή εισαγωγή του ηλεκτρολύτη πρέπει να άγουν τον ηλεκτρισμό στις καθόδους και να συμμετέχουν στη προώθηση του οξέος με υψηλή πίεση μέσα στις καθόδους με την ελάχιστη διαρροή.

γ. Δυνατότητες της STEM

Ρυθμοί πρόωσης. Ο ρυθμός πρόωσης στη STEM κυμαίνεται από 0,75 μέχρι 3 mm/min και εξαρτάται από το κατεργαζόμενο υλικό και όχι από τον αριθμό των οπών που πρόκειται ταυτόχρονα να διατρηθούν.

Τα συνήθη μεγέθη και βάθη των οπών είναι 0,5 mm διάμετρος σε βάθος 75 mm και 6 mm διάμετρος σε βάθος 900 mm.

Οι συνήθεις ανοχές του μεγέθους των οπών είναι:

- Για διάμετρο οπής 0,5mm, η ανοχή είναι $\pm 0,05$ mm.
- Για διάμετρο οπής 1,5 mm, η ανοχή είναι $\pm 0,075$ mm.
- Για διάμετρο οπής 6mm, η ανοχή είναι $\pm 0,10$ mm.

Αυτές οι ανοχές μπορούν να μειωθούν στο μισό με ειδικό έλεγχο της μεθόδου και με τη χρησιμοποίηση πολύ καθαρών μετάλλων.

Η συνήθης ανοχή του βάθους μιας οπής, όπου είναι εφαρμόσιμη, είναι $\pm 0,05$ mm, ανεξάρτητα από το μέγεθος της οπής (αν και οι μεγαλύτερες οπές σχηματίζουν μια καμπύλη (εξόγκωμα) στο κάτω μέρος της οπής όπως φαίνεται στο σχήμα 17.α).

Η συνήθης ανοχή θέσης των οπών είναι 0,001 mm/mm βάθους για οπές διαμέτρου 0,5 mm και 0,003 mm/mm βάθους για οπές διαμέτρου 6 mm. Και πάλι, αυτές οι τιμές μπορούν να μειωθούν στο μισό με ειδικό έλεγχο της μεθόδου και με τη χρησιμοποίηση πολύ καθαρών μετάλλων.

Ανταγωνιστικές μέθοδοι. Η STEM ανταγωνίζεται με τις παρακάτω μεθόδους: Διάτρηση κάνης των όπλων: Περιορίζεται στη διάτρηση οπών με ελάχιστη διάμετρο 1,9 mm σε ευκολοκατέργαστα μέταλλα. Είναι δυνατόν να διατρηθούν μη ανοξειδώτα μέταλλα με σφικτότερες ανοχές, αλλά συνήθως μόνο ένας μικρός αριθμός παράλληλων οπών μπορεί ταυτόχρονα να διατρηθεί.

Συμβατική διάτρηση. Εδώ υπάρχει περιορισμένη αναλογία βάθους προς διάμετρο.

Κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση (EDM). Εδώ υπάρχει περιορισμένη αναλογία βάθους προς διάμετρο, δεν είναι εύκολη η διάτρηση τυφλών οπών και τέλος σχηματίζεται ένα επανατηκόμενο στρώμα μετάλλου.

Η STEM μπορεί να ανταγωνιστεί τη μέθοδο διάτρησης κάνης όπλων επειδή αν και ουσιαστικά είναι μια αργή μέθοδος είναι δυνατή η ταυτόχρονη διάτρηση πολλών οπών (μέχρι 200). Αυτές οι οπές δεν χρειάζεται να είναι παράλληλες και μπορούν να έχουν αξονική διεύθυνση μέχρι 20° από τον άξονα κίνησης της μηχανής.

δ. Παράμετροι της STEM

Οι ηλεκτρολύτες στη STEM είναι θειικό, νιτρικό ή υδροχλωρικό οξύ με συγκέντρωση που κυμαίνεται από 10 μέχρι 25% κ.β. μέσα σε νερό. Η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη είναι 38 °C για το θειικό οξύ και 21°C για τα υπόλοιπα οξέα.

Η μέγιστη μόλυνση (αποσύνθεση) του μετάλλου από του ηλεκτρολύτες της STEM είναι περίπου 3 gr/lit και εξαρτάται από το κατεργαζόμενο μέταλλο. Μια ελάχιστη συγκέντρωση μετάλλου 0,5 gr/lit είναι επίσης επιθυμητή επειδή η μέθοδος συνήθως είναι πιο αποτελεσματική όταν μια μικρή ποσότητα μετάλλου έχει ήδη διαλυθεί μέσα στο οξύ.

Άλλοι παράμετροι που είναι πολύ σημαντικοί και επηρεάζουν τη STEM είναι:

- Απευθείας τάση: 8 μέχρι 14 V.
- Απευθείας χρόνος: 5 μέχρι 7 sec
- Αντίστροφη τάση: 0,1 μέχρι 1 φορές της αποσταλούμενης τάσης.
- Χρόνος αντιστροφής: 75 μέχρι 250 msec.
- Πίεση ηλεκτρολύτη: 275 μέχρι 500 KPa (40 μέχρι 70 psi).
- Ρυθμός πρόωσης: 0,75 μέχρι 3 mm/min.

ε. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της STEM

Οι **περιορισμοί** της STEM περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε μέταλλα που είναι ανθεκτικά στη διάβρωση και γενικά δεν είναι δυνατή η διάτρηση του καθαρού τιτανίου καθώς και των πυρίμαχων μετάλλων.
2. Απαιτείται πολύπλοκο σύστημα κατεργασίας και σύνθετα εργαλεία.
3. Η μέθοδος είναι αργή όταν πραγματοποιείται διάτρηση μονών οπών.

Κατά τη θραύση του κάτω μέρους της οπής του τεμαχίου δημιουργούνται πολλά προβλήματα.

5. Ο χειρισμός του οξέος απαιτεί ειδικούς χώρους για τη προστασία του περιβάλλοντος.
6. Παράγονται επικίνδυνα απόβλητα.
7. Είναι δύσκολη η πλάγια είσοδος (διάτρηση υπό γωνία).

Τα **πλεονεκτήματα** της STEM είναι τα ακόλουθα:

1. Η σκληρότητα (κατεργαστικότητα) του μετάλλου δεν παίζει κανένα ρόλο κατά τη κατεργασία.
2. Η αναλογία βάθους προς διάμετρο είναι πολύ υψηλή (μέχρι 300).
3. Είναι δυνατή η ταυτόχρονη διάτρηση ενός μεγάλου αριθμού οπών.
4. Είναι δυνατή η ταυτόχρονη διάτρηση μη παράλληλων οπών.
5. Είναι δυνατή η διάτρηση τυφλών οπών.
6. Δεν παράγεται επανατηκόμενο στρώμα μετάλλου ή μεταλλουργικά ελαττώματα.
7. Είναι δυνατή η κατεργασία κραμάτων της κονιομεταλλουργίας.
8. Είναι δυνατή η διάτρηση σχηματοποιημένων οπών.
9. Είναι δυνατή η διάτρηση καμπύλων οπών.
10. Είναι δυνατή η διάτρηση σχισμών.
11. Το σύστημα της STEM μπορεί να λειτουργήσει χωρίς επίβλεψη.

17. ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΡΟΗ ΚΑΙ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗΣ

ΔΙΑΤΡΗΣΗ.

[ELECTROSTREAM AND CAPILLARY DRILLING]

α. Εισαγωγή

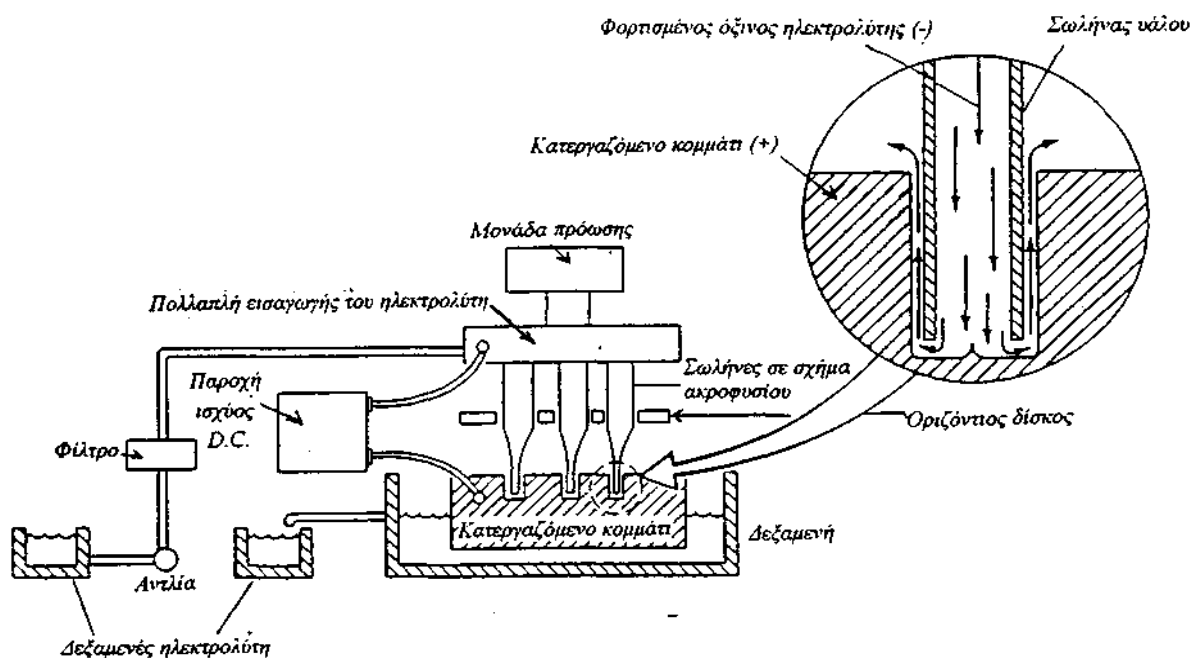
Η διάτρηση με ηλεκτροροή (ESD) και η τριχοειδής διάτρηση (CD) είναι μέθοδοι ηλεκτροχημικής κατεργασίας οι οποίες αναπτύχθηκαν από την εταιρεία **General Electric** και τη **Rolls Royce** αντίστοιχα για τη διάτρηση οπών που έχουν μεγάλο βάθος για να διατρηθούν με την EDM και είναι πολύ μικρές για να διατρηθούν με την ηλεκτρολυτική κατεργασία με μορφοποιημένο σωλήνα. Η ESD και η CD καλύπτουν το ίδιο φάσμα εφαρμογών από πλευράς μεγέθους και είναι όμοιες κατά το ότι και οι δύο χρησιμοποιούν σωλήνες υάλου που είναι οι κάθοδοι καθώς και όξινους ηλεκτρολύτες, αλλά υπάρχουν εμφανής διαφορές στη διαδικασία και στον εξοπλισμό της κάθε μεθόδου. Οι δύο μέθοδοι διάτρησης διαφέρουν από τη STEM στο ότι χρησιμοποιούν σωλήνες υάλου αντί για σωλήνες επικαλυμμένους με τιτάνιο. Οι μέθοδοι ESD και CD επίσης δεν απαιτούν περιοδικές αντιστροφές της τάσεως.

Οι εφαρμογές της ESD και της CD περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Διάτρηση μικρών σειρών ψυκτικών οπών σε πτερύγια αεριοστροβίλου.
- Διάτρηση της προτρύπας με διάμετρο μικρότερη του 0,5 mm για την εκκίνηση της μεθόδου EDWC.
- Σε κάθε εφαρμογή όπου υλικά υψηλότερης αντοχής πρέπει να αντικατασταθούν για τη βελτίωση της ποιότητας, της απόδοσης, της αξιοπιστίας και του βάρους και πού η κατεργαστικότητα αποτελεί ένα πρόβλημα.

β. Εξοπλισμός και εργαλεία των δύο μεθόδων

Η **διάτρηση με ηλεκτροροή (ESD)** είναι μια υψηλής τάσεως μέθοδος στην οποία μια τάση εφαρμόζεται μεταξύ του κατεργαζόμενου κομματιού και ενός όξινου ηλεκτρολύτη ο οποίος ρέει διά μέσου πολλαπλών σωλήνων και μορφοποιημένων υάλινων ακροφυσίων (βλέπε σχήμα 17.α). Η τάση η οποία πρέπει να κυμαίνεται από 600 μέχρι 900 V, οδηγεί το ρεύμα διά μέσου μιας στήλης ηλεκτρολύτη με μήκος 50 μέχρι 100 mm.



Σχήμα 17.α. Σχηματική διάταξη της ESD.

Η ESD απαιτεί μια επιπλέον δεξαμενή στο ηλεκτρολυτικό σύστημα. Το οξύ αντλείται από τη μια δεξαμενή και αφού οδεύσει διά μέσου της μηχανής εκρέει σε μια ξεχωριστή δεξαμενή, η οποία είναι ηλεκτρικά μονωμένη από τη πρώτη. Συνεπώς, μ'αυτό το τρόπο το ρεύμα εμποδίζεται από το να κάνει βραχυκύκλωμα γύρω από το σύστημα. Το μειονέκτημα είναι ότι περιοδικά η μία δεξαμενή πρέπει να αδειάζει και η άλλη να γεμίζει.

Η χρησιμοποιούμενη μηχανή είναι επίσης κατ'ανάγκην πολύ περισσότερο γειωμένη για να αποτραπούν ατυχήματα λόγω της υψηλής τάσεως (600Volt).

Η τριχοειδής διάτρηση (CD) χρησιμοποιεί μια σειρά βραχύτερων υάλινων σωλήνων με ευθείες πλευρές (αντί για σωλήνες που είναι μορφοποιημένοι σαν ακροφύσια στην ESD). Σε κάθε ένα από αυτούς τους σωλήνες υπάρχει ένα μικρό πλατινένιο σύρμα, το οποίο προεξέχει 1 mm κάτω από το χείλος κοπής του σωλήνα (και επιπλέον όλα τα σύρματα που είναι στη διάταξη πρέπει να έχουν την ίδια απόσταση από το χείλος του σωλήνα). Αυτό απαιτεί μια χαμηλότερη τάση (70 μέχρι 150 V) και έτσι μερικά από τα μέτρα προστασίας που είναι αναγκαία με την ESD εδώ δεν είναι απαραίτητα.

Οι μηχανές ESD και CD έχουν έναν άξονα πρόωσης ο οποίος έχει τη δυνατότητα να παράγει σταθερούς ρυθμούς πρόωσης που κυμαίνονται από 25 μέχρι 0,125 mm/min καθώς και μια κίνηση ώθησης με ελαφρύ τίναγμα. Ακόμη διατίθενται και μηχανές πολλαπλών αξόνων που επιτρέπουν τη περιστροφή του κομματιού ή επιτρέπουν μια διάταξη σωλήνων για τη κατεργασία των τεμαχίων. Η χρήση H/Y αριθμητικού ελέγχου καθιστά δυνατό το προγραμματισμό των ρυθμών πρόωσης και των τάσεων. Ο έλεγχος των μεταβλητών γίνεται στην οθόνη του H/Y. Οι μηχανές ESD και CD πρέπει να έχουν ένα προσαρτημένο εσώκλειστο χώρο και ένα εξαερισμό για την απομάκρυνση του υδρογόνου που παράγεται κατά την ηλεκτρολυτική διαδικασία και επίσης πρέπει να είναι καλά γειωμένες για την αποφυγή ατυχημάτων.

Παροχή ισχύος. Η παροχή ισχύος στην ESD γίνεται από μια μονάδα των 900 V και 25 A. Η μονάδα αυτή μπορεί να μελετηθεί και να σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχει ένα πολλαπλό κανάλι εξόδου εάν απαιτείται και το κάθε κανάλι να τροφοδοτεί μια ξεχωριστή πολλαπλή σωλήνα. Για τη CD απαιτείται μια μονάδα των 150 V και 25 A και απαιτείται επίσης ένα πολλαπλό κανάλι εξόδου.

Το σύστημα του ηλεκτρολύτη. Στην ESD χρησιμοποιείται ένα διπλό σύστημα ηλεκτρολύτη. Η άντληση συχνά επιτυγχάνεται με πίεση αέρος μέσα σ'ένα ειδικό δοχείο. Μ'αυτό το τρόπο αποφεύγεται η ανάγκη χρήσης αντλίας και μεταλλικών εξαρτημάτων τα οποία θα μπορούσαν να επηρεαστούν δυσμενώς από την υψηλή τάση λειτουργίας.

Στο μέθοδο CD συνήθως χρησιμοποιούνται δύο ξεχωριστές δεξαμενές με μια σωλήνωση υψηλής πίεσης που έχει μήκος λίγων μέτρων. Το οξύ αντλείται από τη μια δεξαμενή στη μηχανή και μετά εκκενώνεται στην άλλη. Το οξύ έπειτα εισρέει πίσω στη δεξαμενή παροχής.

Το σύστημα του ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι περιβαλλοντολογικά ασφαλές, και οι εθνικοί κανονισμοί πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και να υπάρχει συμμόρφωση προς αυτούς. Μια θραύση σ'έναν αγωγό του συστήματος του ηλεκτρολύτη μπορεί να προκαλέσει εκτόξευση του οξέος με υψηλή πίεση. Το σύστημα, το οποίο πρέπει να είναι γειωμένο και να προφυλάσσεται από ατυχήματα, πρέπει να περιλαμβάνει τα εξής:

1. Μια αντλία.

2. Φίλτρα (τελικό φίλτρο:0,5 μm).
3. Ένα εναλλάκτη θερμότητας.
4. Ένα ελεγκτή θερμοκρασίας: ± 1 °C.
5. Μια συσκευή ανάμιξης του οξέος.
6. Ένα μέσο αποθήκευσης των όξινων αποβλήτων.

Επιπρόσθετα, η συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη καθώς και η μόλυνση (αποσύνθεση) του μετάλλου καταγράφονται από συσκευές που είναι επιθυμητές αλλά όχι ουσιώδεις. Ωστόσο, είναι αναγκαίο να υπάρχουν τα διαθέσιμα μέσα για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του οξέος. Η μόλυνση (αποσύνθεση) του μετάλλου καθορίζεται από τον όγκο του αφαιρούμενου μετάλλου από τη διάτρηση έτσι ώστε το οξύ να απομακρυνθεί από κάποιο προκαθορισμένο σημείο. Το μέγιστο όριο μόλυνσης (αποσύνθεσης) του μετάλλου είναι 3 gr/lit και εξαρτάται από το κατεργαζόμενο μέταλλο.

Οι ιδιοσυσκευές συγκράτησης των τεμαχίων πρέπει να κατασκευάζονται από καθαρό τιτάνιο. Αυτές μπορούν να έχουν ορισμένα σημεία προσδιορισμού θέσης από καρβίδιο, αλλά πρέπει να αντικαθίστανται τακτικά. Πρέπει να υπενθυμιστεί ότι το εργαλείο πρέπει να μεταφέρει το ρεύμα μέσα στο τεμάχιο και οποιοσδήποτε περιορισμός σε αυτό δεν θα πρέπει να ανατρέπει τη προϋπόθεση αυτή.

Οι συσκευές συγκράτησης των καθόδων είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε οι κάθοδοι να είναι παράλληλοι με τον άξονα πρόωσης της μηχανής (εκτός εάν χρησιμοποιείται μηχανή πολλαπλών αξόνων). Πολλές θέσεις τοποθετούνται συχνά σε μια μηχανή και η κάθε θέση χρησιμοποιείται για τη διάτρηση όλων ή μερικών οπών ανάλογα από την απόσταση των οπών και την ελάχιστη δυνατή απόσταση των σωλήνων. Εάν οι υάλινοι σωλήνες δεν μπορούν να συγκρατηθούν τόσο κοντά έτσι ώστε να γίνει ταυτόχρονα η διάτρηση όλων των οπών σε ένα τεμάχιο, τα τεμάχια περνούν από κάθε θέση μέχρι να πραγματοποιηθεί η διάτρηση όλων των οπών.

Σωλήνες καθόδου. Οι κάθοδοι στην ESD αποτελούνται από σωλήνες που είναι μορφοποιημένοι σε σχήμα ακροφυσίου με διάμετρο που κυμαίνεται από 3 μέχρι 6 mm, ενώ μπροστά στο σημείο

εξαγωγής του ηλεκτρολύτη η διάμετρος της σωλήνας κυμαίνεται από 0,5 μέχρι 0,15 mm. Το μήκος αυτού του τμήματος μικρής διαμέτρου της σωλήνας που είναι αναγκαίο καθορίζεται από το βάθος της οπής που πρόκειται να διατηρηθεί. Οι σωλήνες σε μια τοποθέτηση πρέπει να έχουν το ίδιο ολικό μήκος που κυμαίνεται από 75 μέχρι 100mm. Επειδή οι σωλήνες συγκρατούνται από τη μεγαλύτερη διάμετρο, είναι κρίσιμη η ομοκεντρικότητα των δύο διαμέτρων. Στη CD χρησιμοποιούνται βραχύς και ευθείες σωλήνες υάλου που έχουν κατάλληλο μέγεθος.

Πολύ μεγάλη έμφαση δίνεται στην ακρίβεια κατασκευής των σωλήνων. Οι κορυφές των σωλήνων πρέπει να είναι όλες επίπεδες χωρίς ρινίσματα ή ραγίσματα. Οι διαμέτροι και τα μήκη πρέπει να είναι πανομοιότυπα και η ομοκεντρικότητα των εξωτερικών και των

εσωτερικών διαμέτρων είναι πολύ σημαντική. Η εσωτερική διάμετρος πρέπει να διατηρείται συνεχώς ελεύθερη από κάθε είδους εμπόδια.

γ. Παράμετροι κατεργασίας της ESD και της CD

Οι ηλεκτρολύτες για την ESD και τη CD είναι διαλύματα από θειικό, νιτρικό ή υδροχλωρικό οξύ με συγκέντρωση οξέος σε νερό κατά βάρος (κ.β.) από 15 μέχρι 20%. Η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη είναι 40 °C για θειικό οξύ και 20 °C για τα υπόλοιπα οξέα. Η πίεση του ηλεκτρολύτη κυμαίνεται από 275 μέχρι 400 KPa (40 μέχρι 60 psi). Το μέγιστο όριο αποσύνθεσης του μετάλλου είναι 3 gr/lit και εξαρτάται από το κατεργαζόμενο μέταλλο. Το ελάχιστο επιθυμητό όριο αποσύνθεσης του μετάλλου είναι περίπου 0,5 gr/lit

Άλλοι βασικοί παράμετροι της ESD και της CD είναι οι παρακάτω:

- Τάση: 600 μέχρι 900 V για την ESD και 70 μέχρι 150 V για την CD.
- Πίεση ηλεκτρολύτη: 275 μέχρι 400 KPa (40 μέχρι 60 psi).
- Ρυθμός πρόωσης: 0,75 μέχρι 3 mm/min.

δ. Δυνατότητες της ESD και της CD

Οι ρυθμοί πρόωσης για την ESD και την CD όπως αναφέρθηκε παραπάνω κυμαίνονται από 0,75 μέχρι 3 mm/min. Οι ρυθμοί πρόωσης εξαρτώνται από το κατεργαζόμενο υλικό και όχι από τον αριθμό των οπών που πρόκειται ταυτόχρονα να διατρηθούν. Τα συνήθη μεγέθη και βάθη των οπών για τις δύο μεθόδους είναι:

- Από 0,15 mm σε διάμετρο και βάθος 6 mm μέχρι 0,5 mm σε διάμετρο σε βάθος 25 mm για την ESD.
- Από 0,25 mm σε διάμετρο και βάθος 12 mm μέχρι 0,5 mm σε διάμετρο σε βάθος 25 mm για την CD.

Οι συνήθεις ανοχές του μεγέθους των οπών για την ESD και την CD είναι:

- Για διάμετρο 0,25 mm η ανοχή είναι $\pm 0,025$ mm.
- Για διάμετρο 0,5mm, η ανοχή είναι $\pm 0,05$ mm.

Αυτές οι ανοχές μπορούν να μειωθούν στο ήμισυ με ειδικό έλεγχο της διαδικασίας και με τη χρησιμοποίηση πολύ καθαρών μετάλλων. Η ανοχή του βάθους της οπής, όπου είναι εφαρμόσιμη είναι $\pm 0,05$ mm.

Η ανοχή θέσης (παίζιμο) της οπής είναι αμελητέα εκτός αν η κάθοδος "χτυπήσει" κάποια ακαθαρσία του υλικού κατά τη διάρκεια της διάτρησης έχοντας ως αποτέλεσμα το σπάσιμο της καθόδου ή την εκτροπή της. Σε μια οπή η ανοχή θέσης που είναι δυνατόν να επιτευχθεί είναι 0,002 mm/mm.

Ανταγωνιστικές μέθοδοι. Η κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση (EDM) είναι συνήθως πολύ πιο αργή από τις ηλεκτρολυτικές μεθόδους και γενικά δεν έχει τη δυνατότητα να διατρήσει σε τέτοια μεγάλα βάθη. Η μέθοδος EDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάτρηση οπών με σημαντικό βάθος, αλλά ο ρυθμός φθοράς του ηλεκτροδίου κάνει το κόστος της απαγορευτικό.

Επιπρόσθετα, η EDM είναι λιγότερο αποτελεσματική εάν δεν υπάρχει επαρκές διάστημα κάτω από την έξοδο της οπής έτσι ώστε να είναι δυνατόν τα ηλεκτρόδια να προχωρήσουν πέρα από την έξοδο της οπής μέχρις ότου το άφθαρτο ηλεκτρόδιο να κατασκευάσει μια οπή με παράλληλες πλευρές καθ'όλο το μήκος της. Η EDM

παράγει επίσης ένα επανατηκόμενο στρώμα, το οποίο δεν είναι αποδεκτό.

Με τη συμβατική διάτρηση (τρυπάνισμα) μπορούν να παραχθούν πολύ μικρότερες οπές, αλλά η δυνατή αναλογία βάθους προς διάμετρο είναι πολύ μικρότερη από αυτή που μπορεί να επιτευχθεί με τις ηλεκτρολυτικές μεθόδους. Επίσης, η κατεργαστικότητα είναι ένας καθοριστικός παράγοντας. Η ανοχή της διαμέτρου της οπής είναι συνήθως καλύτερη σε σχέση με αυτή της συμβατικής κατεργασίας οπών.

ε. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της ESD και της CD

Η ESD και η CD μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε μέταλλα που είναι ανθεκτικά στη διάβρωση (ανοξειδωτος χάλυβας, κοβάλτιο και κράματα νικελίου για στροβιλομηχανές) και σε τεμάχια που είναι ηλεκτρικά αγωγά. Γενικά, η ESD και η CD δεν μπορούν να διατρήσουν το καθαρό τιτάνιο και τα πυρίμαχα μέταλλα. Άλλοι περιορισμοί είναι οι παρακάτω:

1. Η μέθοδος είναι αργή όταν έχουμε διάτρηση μονών οπών.
2. Όταν η οπή διαπεράσει τη βάση του τεμαχίου (ξετρύπημα) τότε δημιουργούνται πολλά προβλήματα.
3. Ο χειρισμός του οξέος απαιτεί ειδικό χώρο και περιβαλλοντολογικές προφυλάξεις.
4. Παράγονται επικίνδυνα απόβλητα.
5. Είναι δύσκολη η πλάγια είσοδος (διάτρηση υπό γωνία).

Επιπρόσθετοι περιορισμοί που έχουν σχέση με την ESD είναι οι ακόλουθοι. Η υψηλή τάση απαιτεί επιπλέον προφυλάξεις και ένα πιο πολύπλοκο σύστημα ηλεκτρολύτη, επίσης η γεωμετρία των σωλήνων περιορίζει την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των οπών. Για τη CD, οι διατάξεις της καθόδου είναι πιο πολύπλοκες.

Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων ESD και CD περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1. Η σκληρότητα (κατεργαστικότητα) του μετάλλου δεν επηρεάζει τη κατεργασία αυτού.
2. Η αναλογία βάθους προς διάμετρο είναι πολύ υψηλή.

3. Μπορεί να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονη διάτρηση πολλών οπών.
 4. Μπορούν να διατρηθούν τυφλές και διατεμνόμενες οπές.
 5. Δεν παράγεται επανατηκόμενο στρώμα μετάλλου ή μεταλλουργικά ελαττώματα.
 6. Μπορούν να κατεργαστούν κράματα της κονιομεταλλουργίας.
 7. Δεν παράγονται απόβλητα.
 8. Είναι δυνατή η διάτρηση οπών με παράλληλες πλευρές χωρίς την ανάγκη διακένου πέρα της εξόδου της οπής (όπως στην EDM).
- Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα της ESD είναι ότι μπορούν να διατρηθούν μικρότερες οπές σε σχέση με τη μέθοδο CD. Ωστόσο, η CD είναι απλούστερη μέθοδος, η μηχανή είναι πιο απλή και ακόμη δεν υπάρχουν περιορισμοί ως προς την απόσταση μεταξύ των οπών όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος.

ΟΜΑΔΑ Δ

ΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

18. ΧΗΜΙΚΟ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ

[CHEMICAL MILLING (CM)]

α. Εισαγωγή

Το χημικό φρεζάρισμα (CM) που καλείται επίσης χημική κατεργασία ή χημική εγχαράξη, είναι μια μέθοδος κατεργασίας μεταλλικών τεμαχίων με ελεγχόμενη χημική εγχαράξη. Η μέθοδος είτε αδυνατίζει τα τεμάχια σε συγκεκριμένες περιοχές είτε αφαιρεί μέταλλο από ολόκληρη την επιφάνεια. Οι περιοχές από τις οποίες δεν πρόκειται να αφαιρεθεί μέταλλο προστατεύονται από ειδικές επικαλύψεις οι οποίες καλούνται μάσκες και τα τεμάχια εγχάρασσονται με εμβύθιση σε μια δεξαμενή με υγρό εγχάραξης (χημικό αντιδραστήριο). Η μέθοδος σπανίως υποβοηθάται ηλεκτρικά. Οι περισσότερες εφαρμογές της μεθόδου αφορούν τη παραγωγή τεμαχίων με υψηλή αναλογία αντοχής - βάρους.

Η CM διαφέρει από τη χημική εκτομή (chemical blanking), η οποία περιλαμβάνει την εγχαράξη πολύ λεπτών μεταλλικών τεμαχίων σε θαλάμους ψεκασμού. Τα υγρά εγχάραξης της χημικής εκτομής είναι ελαφρά συγκρινόμενα με εκείνα που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στη CM. Το φωτοευαίσθητο υλικό επικάλυψης (μάσκας) χρησιμοποιείται συχνότατα για απόκρυψη στη χημική εκτομή διευκολύνοντας την εγχαράξη πολύπλοκων και σφικτής ανοχής προτύπων. Τα τεμάχια είναι συνήθως πλήρως διάτρητα στις περιοχές εγχάραξης, όμοια με τα παραγόμενα τεμάχια με μηχανική εκτομή, αντί για εγχαραγμένα τεμάχια σ'ένα δεδομένο τελικό πάχος όπως γίνεται στη CM. Λεπτομερής αναφορά στη χημική εκτομή γίνεται στην επόμενη μη συμβατική μέθοδο κατεργασίας που είναι η φωτοχημική κατεργασία (PCM).

Τη CM εφαρμόζουν ένας μικρός αριθμός εξειδικευμένων βιομηχανιών. Οι περισσότεροι από τους μεγάλους κατασκευαστές αεροδιαστημικής έχουν επίσης εγκαταστάσεις για CM, αν και οι περισσότεροι από αυτούς εκτελούν τη χημική εγχάραξη μόνο σε αλουμίνιο. Η γέννηση αυτής της τεχνολογίας σαν μέθοδο κατεργασίας πιστώνεται στον Manuel C.Sanz, ο οποίος, σαν μηχανικός στην αεροπορία της βορείου Αμερικής το 1953, επέλυσε ένα επείγον πρόβλημα βάρους του περιβλήματος ενός πυραύλου εφαρμόζοντας για πρώτη φορά τη CM. Σήμερα η CM είναι μια αποδεκτή και ευρέως εφαρμοζόμενη μέθοδος στην αεροδιαστημική βιομηχανία, με κύριες εφαρμογές στις ένοπλες δυνάμεις, στη πολιτική αεροπορία, στους διαστημικούς σταθμούς, στους στροβίλους, στα ελικόπτερα και τέλος στους πυραύλους. Πέραν των προαναφερομένων υπάρχουν ελάχιστες άλλες εφαρμογές.

β. Εξοπλισμός και χαρακτηριστικά της CM

Τα δύο υλικά "κλειδιά" που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο CM είναι το υγρό εγχάραξης (χημικό αντιδραστήριο) και το υλικό επικάλυψης (μάσκα). Το υγρό εγχάραξης είναι οξύ ή αλκαλικό διάλυμα με ελεγχόμενη χημική σύνθεση και θερμοκρασία. Τα υλικά επικάλυψης (μάσκες) είναι ειδικά σχεδιασμένα ελαστομερή προϊόντα που μπορούν να απομακρυνθούν με το χέρι και επιπλέον είναι χημικά ανθεκτικά στα σκληρά υγρά εγχάραξης.

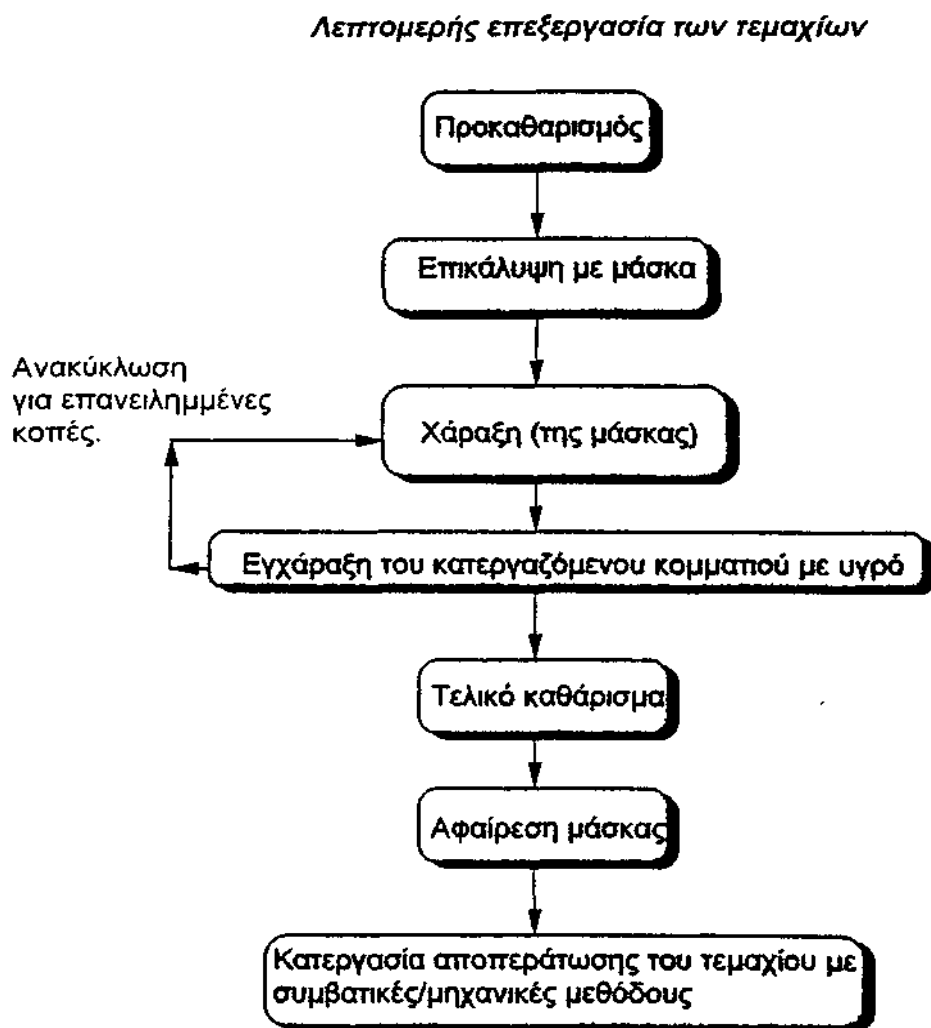
Ουσιαστικά όλα τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική και στις βιομηχανίες κατεργασίας μετάλλου είναι δυνατόν να κατεργαστούν με τη CM. Τα κράματα του αλουμινίου είναι τα απλούστερα που μπορούν να κατεργαστούν με τη CM όσον αφορά τόσο τις εγκαταστάσεις όσο και τις συσκευές ελέγχου. Τα κράματα του μαγνησίου και του τιτανίου είναι τα επόμενα σκληρότερα υλικά και έπειτα ακολουθούν τα φτωχής περιεκτικότητας κράματα και ο ανοξείδωτος χάλυβας. Τα πιο δυσκολοκατέργαστα υλικά είναι τα υπερκράματα.

Τα βήματα που ακολουθούνται στη CM για τη λεπτομερή κατεργασία ενός τεμαχίου είναι τα ακόλουθα:

1. Ένα μεταλλικό κατεργαζόμενο κομμάτι καθαρίζεται και επικαλύπτεται με μια ρευστή μάσκα.
2. Η μάσκα στεγνώνει και σκληρύνεται.

3. Το περίγραμμα του προτύπου χαράσσεται διά μέσου της μάσκας.
4. Η μάσκα αφαιρείται (αποφλοιούται) από τις περιοχές που πρόκειται να εγχαραχθούν με το υγρό.
5. Η επιθυμητή ελάττωση του πάχους γίνεται ελέγχοντας το χρόνο εμβάπτισης μέσα στο υγρό εγχάραξης.
6. Τα δύο προηγούμενα βήματα επαναλαμβάνονται εάν απαιτούνται περισσότερα από ένα βήμα αφαίρεσης υλικού.
7. Μετά τη κατεργασία αφαιρείται η υπόλοιπη μάσκα.
8. Όταν απαιτείται παραπέρα κατεργασία αποπεράτωσης του τεμαχίου το κατεργαζόμαστε συμβατικά.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής των κύριων βημάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 18.α. Το απαιτούμενο πλύσιμο, στέγνωμα και ορισμένα άλλα εξειδικευμένα στάδια δεν εμπεριέχονται στο διάγραμμα αυτό.



Σχήμα 18.α. Διάγραμμα ροής των κύριων βημάτων της CM.

Προκαθάρισμα. Εάν η επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού δεν είναι καθαρή πριν την εφαρμογή της μάσκας, οι ιδιότητες προσκόλλησης της μάσκας μειώνονται σοβαρά. Τα πιο πιθανά προβλήματα είναι η εξαιρετικά υψηλή προσκόλληση, κάνοντας πολύ δύσκολη την αφαίρεση της μάσκας μετά τη κατεργασία, ή η πολύ χαμηλή προσκόλληση που θα έχει

ως αποτέλεσμα να μην μπορούν να διαχωριστούν επακριβώς οι προς εγχάραξη περιοχές από αυτές που δεν πρέπει να κατεργαστούν. Εάν επάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού υπάρχουν λιπαρά υλικά (ακαθαρσίες) τότε αυτά μπορούν να καθαριστούν ικανοποιητικά με τη χρήση διαλυτικού ή με απολίπανση ατμού. Ωστόσο, εάν στην επιφάνεια υπάρχουν σκωρίες και οξείδια από προηγούμενους χειρισμούς ή από θερμικές κατεργασίες, αυτά πρέπει να αφαιρεθούν με πιο εκτεταμένη χημική κατεργασία.

Η αμμοβολή χρησιμοποιείται πολύ συχνά για το καθάρισμα του τιτανίου. Εάν πρέπει να χρησιμοποιηθεί χονδρόκοκκη άμμος για την αφαίρεση ενός μεγάλου στρώματος σκωρίας, το αποτέλεσμα θα είναι να έχουμε τραχύτερη ποιότητα επιφανείας και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μάσκα χαμηλής προσκόλλησης. Σε τέτοιες περιπτώσεις η αμμοβολή προσδίδει επιφανειακές τάσεις σε βάθη μέχρι 0,04 mm οι οποίες ανακουφίζονται στις περιοχές που υφίστανται χημική κατεργασία. Στις παραπλήσιες όμως περιοχές (επικαλυμμένες με τη μάσκα) οι επιφανειακές τάσεις παραμένουν. Κατ'αυτό το τρόπο δημιουργούνται διαφορικές τάσεις οι οποίες, σε υλικά λεπτού πάχους, είναι δυνατόν να προκαλέσουν στρέβλωση.

Απόκρυψη (Επικάλυψη με μάσκα). Η επικάλυψη με μάσκα συνήθως εφαρμόζεται είτε με την εμβάπτιση των κατεργαζόμενων τεμαχίων σε δεξαμενές είτε επικαλύπτοντας με ζεστό μηχανικό ψέκασμα (airless). Ο συμβατικός ψεκασμός με αέρα, η επικάλυψη με ροή, η επικάλυψη με χρωστήρα (κοινώς πινέλο) και η επικάλυψη με κυλινδρίσκο (κοινώς ρολό) εφαρμόζονται λιγότερο συχνά. Οι μάσκες πρέπει να είναι μη διαπερατές, χημικά ανθεκτικές και να δύνανται να αφαιρεθούν εύκολα με το χέρι πριν και μετά την εγχάραξη με το υγρό και τέλος πρέπει να έχουν καλή προσκόλληση στις εγχαρασόμενες ακμές κατά τη διάρκεια της κατεργασίας με το υγρό. Ειδικές επικαλύψεις συχνά ψεκάζονται ή

εφαρμόζονται δι'εμβαπτίσεως πάνω από τη συνήθη μάσκα για να βελτιωθεί η χημική της αντοχή και η αντίσταση σε φθορά λόγω τριβής.

Η σκλήρυνση της μάσκας ποικίλλει και εξαρτάται από το προϊόν και την εφαρμογή του. Η εξάτμιση του διαλύτη γίνεται συνήθως σε χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από 4 μέχρι 12 h σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C. Για την επιτάχυνση της αφαίρεσης του διαλύτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί φούρνος σκλήρυνσης της μάσκας με θερμοκρασία πάνω από 50 °C. Οι σκληρυνμένες μάσκες σε θερμοκρασία άνω των 90 °C έχουν αυξημένη προσκολλητικότητα και χημική αντοχή.

Το πάχος της επικάλυψης της μάσκας ποικίλλει από 0,2 μέχρι 0,4 mm. Για εφαρμογές όπου απαιτείται η τοποθέτηση μιας δεύτερης μάσκας πάνω από τη πρώτη, το πάχος της δεύτερης μάσκας κυμαίνεται από 0,025 μέχρι 0,075 mm. Εφαρμοζόμενη σε κατάλληλα καθαρισμένες μεταλλικές επιφάνειες, η σκληρυνμένη μεμβράνη της μάσκας αποδίδει δυνάμεις προσκόλλησης (άρα και αποκόλλησης) που κυμαίνονται από 7 μέχρι 36 gr/mm πλάτους και αντοχή σε εφελκυσμό τουλάχιστον 4000 KPa (600 psi). Υψηλότερες δυνάμεις προσκόλλησης της μάσκας απαιτούν αύξηση του πάχους της επικάλυψης και καθιστούν τη χειρωνακτική αφαίρεση της μάσκας δυσκολότερη, ενώ χαμηλότερες δυνάμεις προσκόλλησης αυξάνουν τη πιθανότητα αποτυχίας της ακμής του προτύπου κατά το χειρισμό ή κατά τη διαδικασία εγχάραξης με το υγρό. Συχνά χρησιμοποιούνται συσκευές

ενεργού άνθρακος για τη προσρόφηση και την επανάκτηση του εξατμιζόμενου διαλυτικού έτσι ώστε να υπάρχει συμμόρφωση με τις απαιτήσεις ποιότητας του αέρα. Το διαλυτικό συχνά επιστρέφεται στο προμηθευτή των μασκών για επαναχρησιμοποίηση, γεγονός που αποφέρει σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής.

Συνεχώς αναπτύσσονται νέες μάσκες χημικού φρεζαρίσματος, επιπρόσθετα στα εξαιρετικά προϊόντα που είναι ήδη διαθέσιμα. Ενημερωτικά φυλλάδια που εκδίδονται από τους κατασκευαστές αναγράφουν λεπτομερώς τις ιδιότητες, τις εφαρμογές και τη λειτουργία των μασκών που χρησιμοποιούνται σήμερα. Οι κατασκευαστές επίσης παρέχουν υποστήριξη προς τους πελάτες και τους ενημερώνουν για τις σύγχρονες εξελίξεις της CM.

Σαν υλικά επικάλυψης (μάσκας) χρησιμοποιούνται το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), το πολυαιθυλένιο, το νεοπρένιο και άλλα πολυμερή υλικά.

Χάραξη της μάσκας. Η μορφή του μοντέλου που θα κατεργαστούμε χαράσσεται με μαχαίρι διά μέσου της μάσκας καθοδηγώντας το κατά μήκος των ακμών ενός προτύπου περιγράμματος (template) που έχει τοποθετηθεί επακριβώς πάνω στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Έπειτα η μάσκα αφαιρείται (αποφλοιούται) από τις περιοχές που πρόκειται να εγχαραχθούν με το υγρό. Όταν απαιτούνται περισσότερα από ένα βήματα εγχάραξης με το υγρό (βηματική κοπή), η μάσκα αφαιρείται (αποφλοιούται) αρχικά μόνο από τη πρώτη κοπή, που είναι, η λεπτότερη τελική επιφάνεια (βλέπε σχήμα 18.β).

Μερικές φορές χρησιμοποιείται ένα θερμό μαχαίρι για την χάραξη μαλακών μετάλλων όπως είναι το Alclad*, επειδή η χρήση ενός συνήθους μαχαιριού χάραξης μπορεί να δημιουργήσει μια βαθειά κοιλότητα μέσα στο κατεργαζόμενο μέταλλο. Η θερμή λεπίδα του μαχαιριού τήκει τη μάσκα, μειώνοντας σημαντικά την απαιτούμενη πίεση που πρέπει να ασκηθεί με το χέρι για τη κοπή αυτής και επιπλέον ελαχιστοποιεί το κίνδυνο να γίνει πολύ βαθειά κοπή.

**Alclad Σύνθετα ελάσματα αποτελούμενα από ένα κράμα ντουραλουμινίου (για αύξηση της μηχανικής αντοχής) επενδεδυμένο με καθαρό αλουμίνιο (για αύξηση της αντοχής σε διάβρωση).*

Ακόμη για τη κοπή της μάσκας χρησιμοποιούνται λείζερ που καθοδηγούνται με Η/Υ. Αυτός ο τύπος χάραξης δικαιολογείται σε τεμάχια που έχουν σχετικά απλό σχήμα εάν η παραγωγή αυτού του τεμαχίου είναι μεγάλη, ή εάν η μορφή του μοντέλου που πρέπει να χαραχθεί είναι περίπλοκη.

Εγχάραξη με υγρό του κατεργαζόμενου κομματιού. Η διαδικασία εγχάραξης συνίσταται τυπικά στην εμβάπτιση σταθερών τεμαχίων μέσα σε δεξαμενή με το υγρό εγχάραξης. Τα τεμάχια συγκρατούνται με σφιγκτήρες, ελατήρια, ή σύρματα, μέσα σ'ένα καλάθι ή με το χειρισμό μιας άλλης ιδιοσυσκευής που έχει τη δυνατότητα μεταφοράς μέσα και έξω από τη δεξαμενή. Συνήθως το κατεργαζόμενο εξάρτημα εκτείθενται στο υγρό εγχάραξης μόνο για ένα μέρος του υπολογισμένου χρόνου αφαίρεσης, και έπειτα πραγματοποιείται επαναμέτρηση του τεμαχίου για να υπολογιστεί ο πραγματικός ρυθμός αφαίρεσης υλικού και τέλος

επιστρέφεται για μια επαναυπολογισμένη τελική περίοδο εγχάραξης. Το κατεργαζόμενο κομμάτι απαιτείται συχνά να κάνει μία ή περισσότερες διαδρομές μέσα και έξω από τη δεξαμενή για επαναμέτρηση έτσι ώστε να ελέγχεται το κάθε βήμα αφαίρεσης υλικού με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Τεμάχια που πρόκειται να υποστούν CM σε διαφορετικά πάχη παράγονται εύκολα με εγχάραξη σε μια σειρά βημάτων κοπής, απαιτείται όμως μια νέα περιοχή του τεμαχίου να εκτείθεται πριν από κάθε βήμα εγχάραξης (βλέπε σχήμα 18.β). Οι περιοχές που έχουν το μεγαλύτερο πάχος είναι συνήθως παρακείμενες στα σημεία εκείνα της κατασκευής που είναι συνδεδεμένα με ήλωση ή συγκόλληση.

Η αντίδραση κατά την εγχάραξη δημιουργεί μια στροβιλώδη ανέλιξη από αέρια από τις επιφάνειες του τεμαχίου. Στη συμβατική εγχάραξη με εμπύθιση, τα τεμάχια πρέπει να τοποθετούνται έτσι ώστε να εμποδίζουν τη παγίδευση αυτών των αερίων στις περιοχές κατεργασίας. Μια γρήγορη ροή του υγρού προκαλούμενη από τα ανερχόμενα αέρια είναι δυνατόν να δημιουργήσει ένα ανομοιόμορφο πρότυπο εγχάραξης στις ακμές της κοιλότητας. Αυτά τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας μπορούν να ελαχιστοποιηθούν μέσω προσεκτικού ελέγχου του υγρού εγχάραξης και με τη περιοδική μεταβολή της θέσης του κατεργαζόμενου τεμαχίου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της εγχάραξης. Καλύτερος έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί με συνεχή μεταβολή της θέσης του τεμαχίου κατά τη διάρκεια της εγχάραξης με το υγρό. Η περιστροφή του κομματιού είναι μια συνήθης πρακτική για τη CM κυλινδρικών και κωνικών τεμαχίων που είναι κατασκευασμένα από μέταλλα διαφορετικά του αλουμινίου.

Υπάρχουν και άλλες μη συμβατικές μέθοδοι εγχάραξης που χρησιμοποιούνται για ειδικές εφαρμογές. Τέτοια παραδείγματα είναι:

- Εγχάραξη με ψεκασμό του εσωτερικού ενός περιστρεφόμενου σωλήνα.
- Ψεκασμός ή κατακλυσμός της εξωτερικής επιφάνειας μιας περιστρεφόμενης σωλήνας.
- Ροή του υγρού εγχάραξης διά μέσου σωλήνων.
- Ταχεία περιστροφή (spinning) σωλήνων ή σφαιρών που επιπλέουν στην επιφάνεια του υγρού εγχάραξης.

Υγρά εγχάραξης (Etchants) ή χημικά αντιδραστήρια (Chemical reagent). τα υγρά εγχάραξης που χρησιμοποιούνται στη CM είναι συνήθως μίγματα προδιαγεγραμμένων βιομηχανικών χημικών και ειδικών προσθέτων, όπως

είναι τα μέσα διαβροχής. Παρόλο που η σύνθεση του υγρού εγχάραξης για κάθε κράμα και για κάθε κατάσταση θερμικής κατεργασίας μπορεί να ποικίλλει, οι αρχές επιλογής και ελέγχου είναι ίδιες για κάθε υγρό εγχάραξης. Οι κύριοι τεχνικοί στόχοι ανάπτυξης κατά την εξέλιξη των υγρών εγχάραξης σε συνδυασμό με ορισμένες πρακτικές θεωρήσεις, είναι:

1. Καλή τραχύτητα επιφανείας.
2. Καλή ομοιομορφία αφαίρεσης υλικού.
3. Έλεγχος της επιλεκτικής και εσωκρυσταλλικής διάβρωσης.
4. Για τα κράματα τιτανίου, πρέπει να υπάρχει έλεγχος απορρόφησης του υδρογόνου.
5. Ασφάλεια προσωπικού.
6. Κόστος και αξιοπιστία των υλικών κατασκευής που απαιτούνται για τις δεξαμενές επεξεργασίας.
7. Θέματα ποιότητας του αέρα.
8. Χαμηλό χημικό κόστος ανά μονάδα αφαιρούμενου (χημικά) βάρους.
9. Δυνατότητα αναγέννησης του διαλύματος του υγρού εγχάραξης ή/και εύκολη αδρανοποίηση και διάθεση των αποβλήτων.

Τελικό καθάρισμα και αφαίρεση της μάσκας. Μετά από κάθε βήμα εγχάραξης, το τεμάχιο ξεπλένεται πολύ καλά και με μεγάλη προσοχή. Στη περίπτωση του αλουμινίου, στην επιφάνεια προσδίδεται μια γυαλάδα με την εμβάπτιση σε νιτρικό οξύ ή σε αποξειδωτικό διάλυμα. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες συνήθως παθητικοποιούνται. Άλλες επεξεργασίες εκτελούνται ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μέταλλο και τις απαιτήσεις του πελάτη. Μετά την εγχάραξη, η εναπομένουσα μάσκα αφαιρείται (αποφλοιούται) συνήθως με το χέρι, αλλά περιστασιακά αφαιρείται με απολίπανση δι'ατμού ή με άλλη επεξεργασία με διαλύτη.

Μηχανική αποπεράτωση. Το τελικό βήμα κατεργασίας του τεμαχίου καλείται και χειροποίητη προσαρμογή. Στο στάδιο αυτό τυχόν αστοχίες συναρμογής καθώς και αιχμηρές ακμές αφαιρούνται με τη χρησιμοποίηση άμμου και εργαλείων απογρέζωσης. Επιπρόσθετα, διαστασιακές απαιτήσεις πέραν των συνήθων τις δυνατοτήτων της μεθόδου, όπως είναι οι ειδικές ακτίνες αποστρογγύλευσης και οι εξαιρετικά σφικτές ανοχές, μπορούν να επιτευχθούν σ'αυτό το στάδιο.

γ. Προδιαγραφές και έλεγχος των παραμέτρων της CM

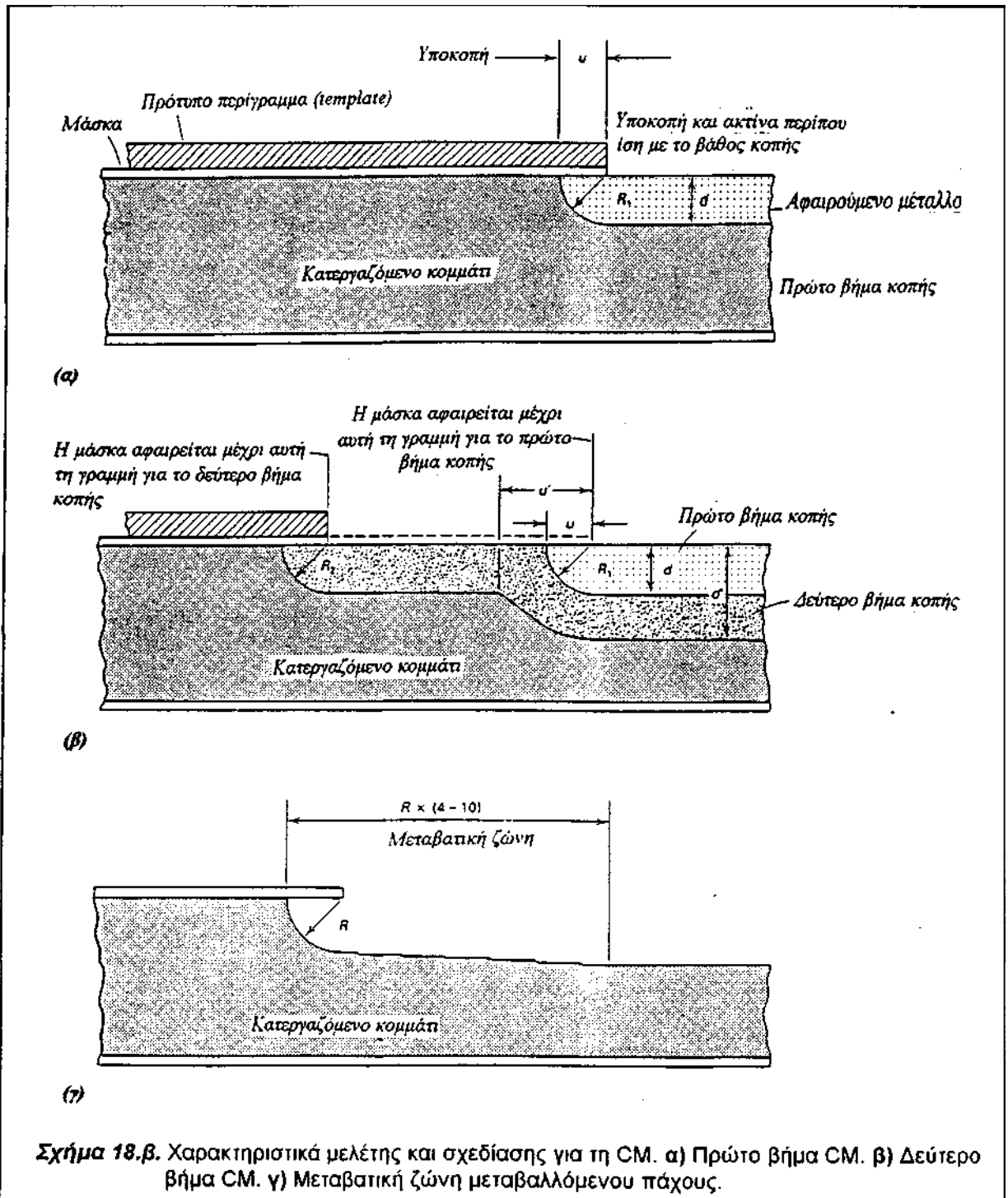
Σημαντικά χαρακτηριστικά του χημικά κατεργαζόμενου τεμαχίου, όπως είναι η υφή της επιφάνειας και η ποσότητα υδρογόνου που απορροφάται κατά τη κατεργασία, εξαρτώνται από τις ιδιότητες και του μετάλλου και του διαλύματος εγχάραξης. Το βέλτιστο υγρό εγχάραξης για διαφορετικά τεμάχια που κατασκευάζονται από το ίδιο κράμα μπορεί επομένως να ποικίλλει ουσιαστικά λόγω των παραγόντων που επηρεάζουν τη κρυσταλλική δομή, τη κατάσταση από πλευράς κατεργασίας, το βαθμό ενδοτράχυνσης και την αρχική μορφή του κράματος (σφυρήλατο, εξηλασμένο, χυτό κ.τ.λ.). Ο ακριβής έλεγχος του υγρού εγχάραξης για τις πλέον δύσκολες εφαρμογές θεωρείται συχνά εμπορικό μυστικό, όπως επίσης και κάποιες ιδιαίτερες τεχνικές κατεργασίας.

Οι περισσότεροι από τους μεγαλύτερους κατασκευαστές αεροδιαστημικής εφαρμόζουν τις σχετικές στρατιωτικές προδιαγραφές που υφίστανται και καλύπτουν όλους τους τύπους μετάλλων.

Καθορισμός των προδιαγραφών της CM. Στο σχήμα 18.β φαίνονται μερικά χαρακτηριστικά των τεμαχίων που είναι κατεργασμένα με τη CM. Η εγχάραξη προχωρά κάτω από τη μάσκα με τον ίδιο περίπου ρυθμό όπως σε όλες τις άλλες διευθύνσεις. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μιας λωρίδας με ακτίνα αποστρογγύλευσης περίπου ίση με το βάθος κοπής, d . Η υποκοπή, u , είναι επίσης περίπου ίση με το βάθος κοπής. **Σαν συντελεστής εγχάραξης ορίζεται ο λόγος u/d , δηλαδή είναι ο λόγος της υποκοπής προς το βάθος κοπής**, ενώ στη χημική εκτομή ισχύει ο ακριβώς αντίθετος ορισμός.

Βάθος εγχάραξης. Δεν υπάρχουν βασικοί περιορισμοί στο βάθος εγχάραξης. Οποιοδήποτε περιορισμοί βασίζονται στο ανταγωνιστικό κόστος με εναλλακτικές μεθόδους κατασκευής και στην αξία που θα επιβαρυνθεί ο πελάτης ως προς το αφαιρούμενο βάρος. Το κόστος της εγχάραξης με το υγρό μπορεί να είναι πολύ σημαντικό όταν παράγουμε κοπές μεγάλου βάθους. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος κοπής τόσο μεγαλύτερη είναι η διακύμανση του πάχους του κατεργαζόμενου τεμαχίου μέσα στη μεταβατική ζώνη όπως φαίνεται στο σχήμα 18.β (γ).

Ανοχή πάχους. Η ανοχή που μπορεί να επιτευχθεί με τη μέθοδο CM κυμαίνεται από $\pm 0,025$ μέχρι $\pm 0,05$ mm.



Προδιαγραφές κατεργαζόμενης πρώτης ύλης. Θα πρέπει να δοθεί εξαιρετική προσοχή στις προδιαγραφές του ελάσματος που θα χρησιμοποιηθεί σαν ακατέργαστη πρώτη ύλη για τη CM. Σε αντίθεση με τις συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, στη CM, η διακύμανση του πάχους και η ποιότητα της επιφάνειας της πρώτης ύλης επηρεάζουν δυναμικά τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του κατεργασμένου εξαρτήματος.

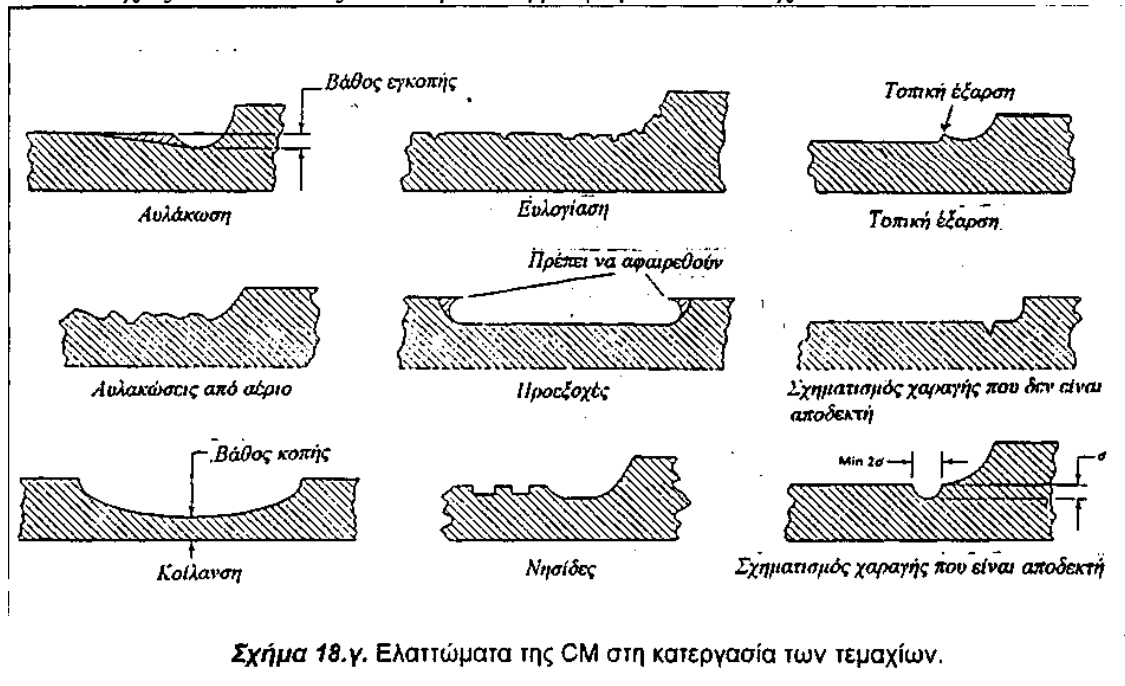
Θα πρέπει επίσης να είναι γνωστή η κατάσταση της πρώτης ύλης από πλευράς εναπομένουσων τάσεων.

Ελαττώματα επεξεργασίας. Στο σχήμα 18.γ εικονίζονται ορισμένα ελαττώματα που παρουσιάζει η CM στη κατασκευή των τεμαχίων καθώς αναφέρονται στη στρατιωτική προδιαγραφή MIL - C - 81769:

- **Αυλάκωση:** Είναι ο σχηματισμός μιας εγκοπής στη βάση της ακτίνας αποστρογγύλευσης του νεύρου. Αυτή είναι αποδεκτή εάν επιδιορθωθεί μηχανικά και σύμφωνα με τις προδιαγραφόμενες ανοχές.
- **Αυλακώσεις από αέριο:** Κάθετες εγκοπές στη κατεργασμένη επιφάνεια λόγω ανόδου φυσαλίδων αερίου από την επιφάνεια. Αυτές είναι αποδεκτές εάν επιδιορθωθούν μηχανικά, διατηρώντας τις προδιαγραφόμενες ανοχές.
- **Κοίλανση:** Βαθμιαία εκλέπτυνση μιας κατεργασμένης κοιλότητας από όλες τις ακμές προς το κέντρο. Αυτή είναι αποδεκτή εάν όλες οι διαστάσεις ευρίσκονται εντός των προδιαγραφόμενων ανοχών.
- **Ευλογίαση:** Τα τοπικά κοιλώματα (εσοχές) στην εγχαραγμένη επιφάνεια είναι μια μη αποδεκτή κατάσταση εκτός αν αυτά μπορούν να στυλβωθούν μηχανικά σύμφωνα με τις προδιαγραφόμενες ανοχές.
- **Προεξοχές:** Η παρουσία προεξοχών στην ακμή της κορυφής της καμπυλότητας του νεύρου. Γενικά, στα μαχητικά αεροσκάφη απαιτείται στην άκρη της κορυφής μια καμπυλότητα 0,05 mm. Στα πολιτικά αεροσκάφη απαιτούνται μεγαλύτερες καμπυλότητες.
- **Νησίδες:** Τοπικές υπερυψωμένες περιοχές που προκύπτουν από τη μάσκα ή άλλο υλικό που έχει παραμείνει πάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού, εμποδίζοντας έτσι την εγγάραξη της. Αυτές μπορούν να επιδιορθωθούν μηχανικά διατηρώντας τις προδιαγραφόμενες ανοχές.

Τοπική έξαρση: Είναι ο σχηματισμός μιας τοπικής ράχης στη βάση του νεύρου, η οποία πρέπει να αφαιρεθεί μηχανικά, διατηρώντας όλες τις προδιαγραφόμενες διαστάσεις.

- Σχηματισμός χαραγής: Οι εγκοπές στη βάση της αποστρογγύλευσης του νεύρου, προέρχονται από υπερβολική σε βάθος χάραξη της μάσκας μέσα στο μέταλλο. Αυτές είναι αποδεκτές εάν η εγκοπή, με πλάτος μεγαλύτερο απ' το διπλάσιο του βάθους και εάν το πάχος είναι εντός των προδιαγραφόμενων ανοχών.



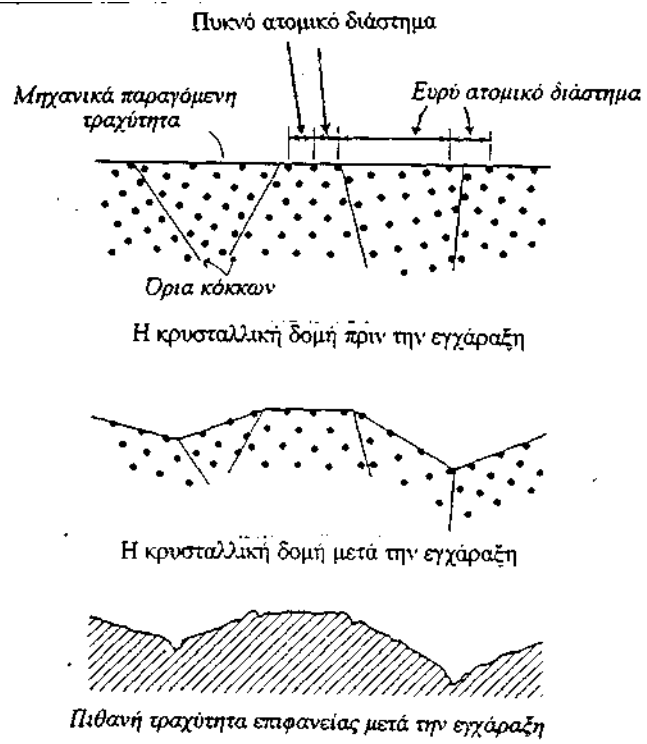
Τραχύτητα επιφανείας. Στη CM, το εκτεθειμένο μέταλλο διαλύεται από ένα αλκαλικό ή όξινο υγρό εγχάραξης. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η χημική προσβολή λαμβάνει χώρα και στην επιφάνεια καθενός κόκκου (κρυστάλλου) και στα όρια των κόκκων, συνήθως με διαφορετικούς ρυθμούς αντίδρασης. Ο μηχανισμός της εγχάραξης φαίνεται στο σχήμα 18.δ.

Τα τεμάχια που είναι κατεργασμένα με τη CM για να έχουν καλή τραχύτητα επιφανείας και ομοιόμορφη εμφάνιση πρέπει να έχουν λεπτόκκοκη κρυσταλλική δομή και ομοιόμορφη υφή. Το τιτάνιο και το μαγνήσιο, χημικά κατεργασμένα σε συνήθη υγρά εγχάραξης τα οποία αφαιρούν ομοιόμορφα υλικό, παράγουν πολύ καλή ποιότητα επιφανείας. Τα περισσότερα χυτά τεμάχια και το εξηλασμένο αλουμίνιο σειράς 2000 είναι παραδείγματα μετάλλων με εξαιρετικά ασυνήθιστα μεγάλη και μη ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή και συνεπώς είναι δύσκολο να επιτευχθούν καλές τραχύτητες επιφανείας με αυτά τα υλικά. Τα τυπικά δεδομένα της CM για τα πλέον συνήθη υλικά αναγράφονται στο πίνακα 18.1.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ειδικά υγρά εγχάραξης για την επίτευξη εξαιρετικά λείων επιφανειών για ειδικές εφαρμογές.

Η προσθήκη τριαιθυνολαμίνης (TEA) σε σύνηθες καυστικό αλουμίνιο (υγρό εγχάραξης) παράγει μια αξιοπρόσεχτη βελτίωση στη τραχύτητα επιφανείας για τα περισσότερα κράματα αλουμινίου. Αυτή η ανακάλυψη δημοσιοποιήθηκε σε μια ευρεσιτεχνία το 1959. Στα σχήματα 18.ε και 18.στ δίδονται τα διαγράμματα της δραματικής επίδρασης της TEA στη τραχύτητα επιφανείας εξαρτημάτων αλουμινίου. Το σχήμα 18.ε δείχνει τη βελτίωση της τραχύτητας

επιφανείας σε δείγματα αλουμινίου 2024 -T3 και 7075 -T6 τα οποία είχαν προηγουμένως υποστεί CM με σύνηθες υγρό εγχάραξης. Η τραχύτητα των 3 μm (R_3) του δείγματος 2024 -T3 μειώθηκε σε 1,25 μm με την αφαίρεση υλικού πάχους 0,5 mm. Στο δείγμα αλουμινίου 7075 - T6 η αρχική τραχύτητα επιφανείας ήταν 3,3 μm και μειώθηκε στα 1,25 μm με αφαίρεση υλικού πάχους 0,75 mm. Το σχήμα 18.στ δείχνει τα αποτελέσματα της αφαίρεσης με τη CM υλικού πάχους 1 mm στο δείγμα 7075 -T6 σε συνήθη υγρό εγχάραξης και σε υγρό εγχάραξης με TEA. Στο σχήμα 18.ζ φαίνονται μικρογραφίες της περιοχής του νεύρου στο υλικό 7075 - T6, το οποίο είναι χημικά κατεργασμένο σε δύο υγρά εγχάραξης, σε ένα σύνηθες και σε ένα με TEA. Το υγρό εγχάραξης με TEA δεν βελτιώνει μόνο τη τραχύτητα επιφανείας, αλλά επίσης μειώνει σημαντικά το βαθμό προσβολής στα όρια των κόκκων.

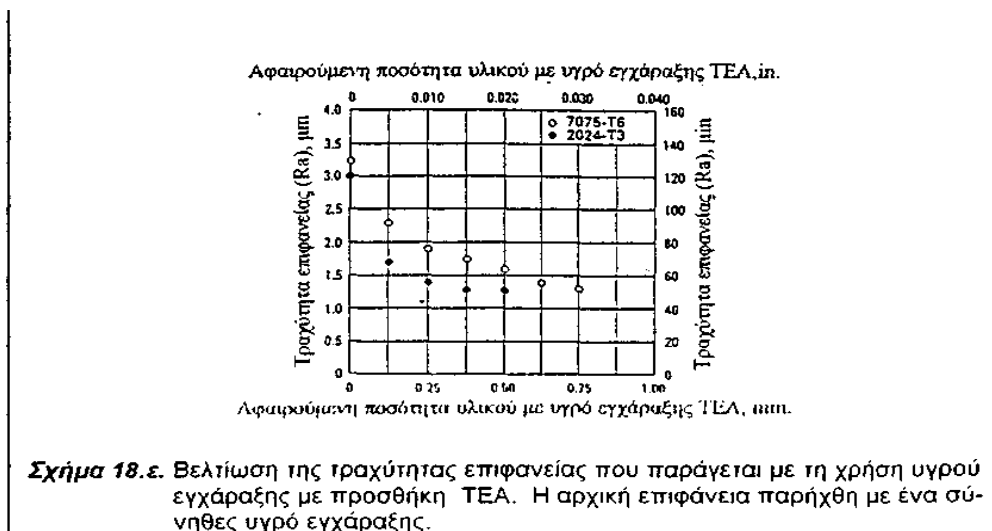


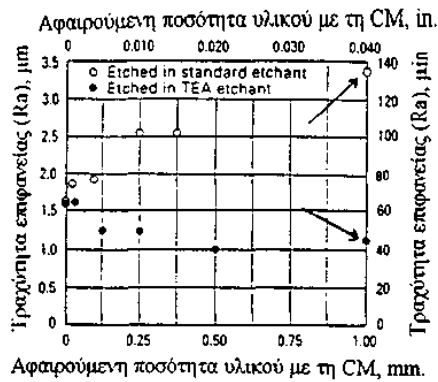
Σχήμα 18.5. Μικρόεπίδραση της δράσης εγχάραξης στην επιφάνεια ενός υλικού.

Πίνακας 18.1. Τραχύτητες επιφανείας και ρυθμοί διείδυσης που μπορούν να επιτευχθούν με τη CM.

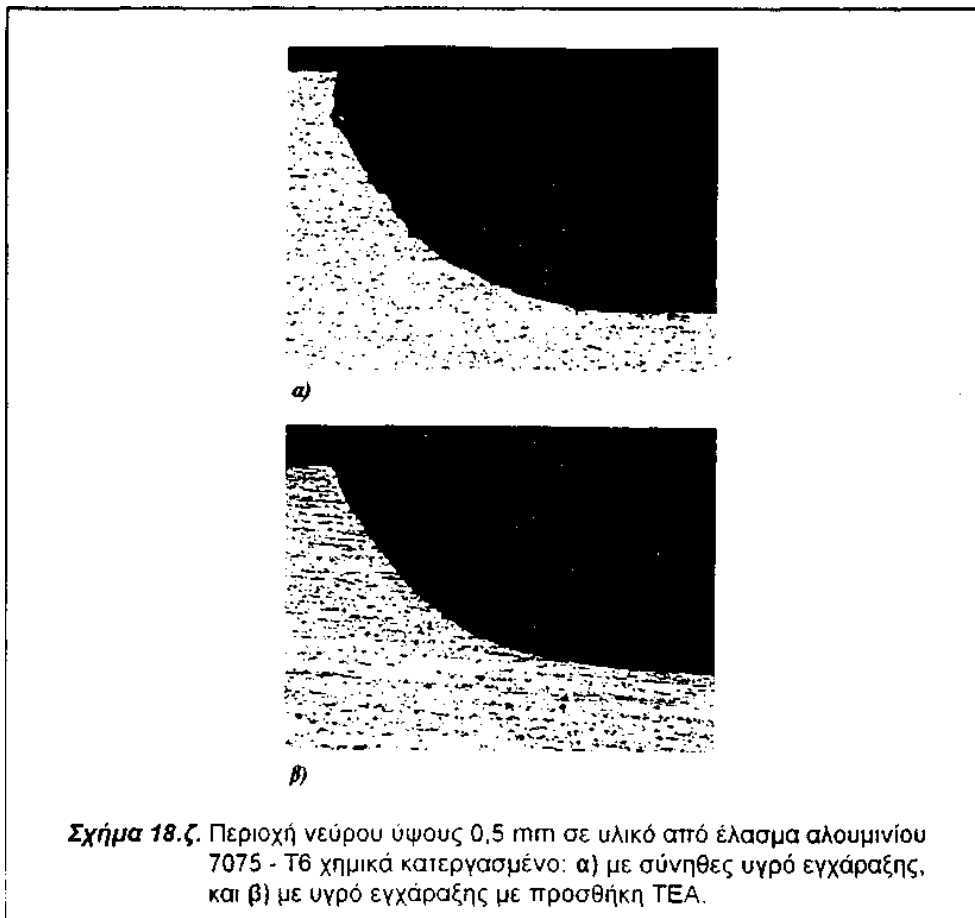
Κατεργασόμενο υλικό	Υγρό εγχάραξης (Αντιδραστήριο)	Τραχύτητα επιφανείας	Ρυθμός διείδυσης mm/min	Συντελεστής εγχάραξης
Αλουμίνιο				
2024-T3	NaOH+Na ₂ S	2,5 - 4	0,020	1,75
2024-T3	NaOH+TEA	1 - 1,5	0,020	1,75
7075-T6	NaOH+Na ₂ S	2,5 - 4	0,020	1,75
7075-T6	NaOH+TEA	1 - 1,5	0,020	1,75
Μαλακός χάλυβας				
1010, 1020	HNO ₃	3,2 - 5	0,025	2
Ανοξειδωτος χάλυβας				
301,304	HNO ₃	0,75 - 1,5	NA	NA
Hastelloy				
	HNO ₃ , HCl, HF	1,5 - 2,3	NA	NA
Inconel				
	HNO ₃ , HCl, HF	1,5 - 2,3	NA	NA
Κράματα τιτανίου	HF, HNO ₃	0,25 - 1	0,025	1
Κράματα μαγνησίου				
	H ₂ SO ₄	1 - 1,5	0,038	1
Πυρίτιο	HNO ₃ , HF	NA	Πολύ αργός	NA
Κράματα χαλκού	HNO ₃ , HF	NA	0,050	2,75

NA: Δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία (data not available).





Σχήμα 18.σ. Σύγκριση των τραχυτήτων επιφανείας που παράγονται: α) με σύνηθες υγρό εγχάραξης αλουμινίου και β) με τη προσθήκη TEA στο υγρό εγχάραξης. Το εξεταζόμενο υλικό είναι 7075 - T6.



Σχήμα 18.ζ. Περιοχή νεύρου ύψους 0,5 mm σε υλικό από έλασμα αλουμινίου 7075 - T6 χημικά κατεργασμένο: α) με σύνηθες υγρό εγχάραξης, και β) με υγρό εγχάραξης με προσθήκη TEA.

Τα υγρά εγχάραξης με βάση τη TEA διατίθενται στο εμπόριο από το 1970. Το 1975 υπήρξε μια ξαφνική αύξηση της χρήσης των υγρών εγχάραξης με TEA, όταν μια ομάδα αεροσκαφών τύπου **Boeing 747** τα οποία κατασκευάζονταν με συγκόλληση ελασμάτων, επανασχεδιάστηκαν για κατεργασία με τη CM. Ακόμη και σήμερα, υπάρχει τεράστια αύξηση

του αριθμού εφαρμογών σε αεροσκάφη που προδιαγράφουν τη χρήση υγρού εγχάραξης με TEA.

Η τερικρυσταλλική και η επιλεκτική προσβολή είναι ενγενή προβλήματα που υπάρχουν στην εγχάραξη με χημικό υγρό των μετάλλων, αλλά μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με το σωστό έλεγχο του υγρού εγχάραξης.

δ. Μηχανικές ιδιότητες των τεμαχίων που είναι κατεργασμένα με τη CM

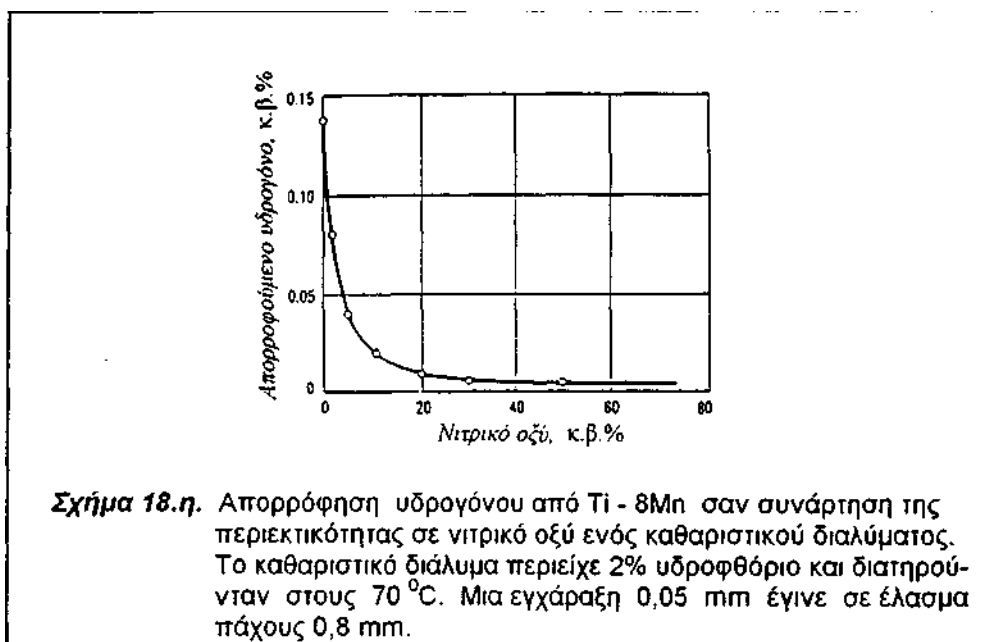
Με την εξαίρεση (α) των πιθανών μεταβολών της αντοχής σε κόπωση (που οφείλονται στη μεταβολή της υφής της επιφάνειας) και (β) της επίδρασης λόγω της απορρόφησης υδρογόνου σε ορισμένα κράματα, οι μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων δεν επηρεάζονται από τη CM. Αυτή η μέθοδος κατεργασίας δεν εισάγει τάσεις στο υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, καθώς ούτε μηχανική παραμόρφωση ούτε έκθεση του κατεργαζόμενου τεμαχίου σε υψηλές θερμοκρασίες συμβαίνουν κατά τη κατεργασία.

Όταν τα επιφανειακά στρώματα έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες από αυτές του βασικού μετάλλου, η αφαίρεση τους καταλήγει σε μια μεταβολή των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων του έτοιμου τεμαχίου. Η CM χρησιμοποιείται ευρύτατα σε τέτοιες περιπτώσεις και συχνά μεταβάλλει τις μηχανικές ιδιότητες του βασικού υλικού με την αφαίρεση υλικού από την επιφάνεια. Επιβλαβής συνθήκες επιφάνειας όπως είναι το απανθρακωμένο στρώμα και το επανατηκόμενο υλικό μπορούν να αφαιρεθούν εύκολα με τη CM, καταλήγοντας σε βελτίωση των ιδιοτήτων του έτοιμου τεμαχίου.

Ιδιότητες κόπωσης. Εκτεταμένες μελέτες κόπωσης με αλουμίνιο που ήταν κατεργασμένο με υγρό εγχάραξης με TEA, πραγματοποιήθηκαν από την εταιρεία Boeing το 1975, αλλά τα αποτελέσματα αυτών των μελετών δεν έχουν ανακοινωθεί. Οι προηγούμενες μελέτες με αλουμίνιο κατεργασμένο με τη CM, γενικά παρείχαν ενδείξεις μερικής απώλειας των ιδιοτήτων κόπωσης, αλλά αυτές βασίζονταν στη χρήση υγρών εγχάραξης χωρίς TEA.

Η μειωμένη αντοχή σε κόπωση μπορεί να βελτιωθεί προσδίδοντας μια ομοιόμορφη θλιπτική τάση στη χημικά κατεργασμένη επιφάνεια με ψηγματοβολή ή άλλες κατάλληλες τεχνικές. Επιπρόσθετα, οι δυσμενείς επιφανειακές συνθήκες αφαιρούνται μερικές φορές με μια λεπτή μηχανική λείανση.

Απορρόφηση υδρογόνου. Το υδροφθόριο (HF) είναι ένα ενεργό χημικό που χρησιμοποιείται στα υγρά εγχάραξης της CM για τη διάλυση τιτανίου και σε διαλύματα καθαρισμού μετάλλων, και αυτή η αντίδραση που προκαλείται παράγει υδρογόνο στην επιφάνεια του μετάλλου. Ωστόσο, επειδή το υδρογόνο τείνει να απορροφηθεί από τη δομή του μετάλλου μέσα στο υδροφθόριο προστίθενται νιτρικό οξύ για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο. Το σχήμα 18.η επιδεικνύει την επίδραση της προσθήκης νιτρικού οξέος σε ένα διάλυμα καθαρισμού των μετάλλων.



Οι προδιαγραφές της μεθόδου CM καθορίζουν το μέγιστο επιτρεπτό τελικό περιεχόμενο σε υδρογόνο ή το μέγιστο επιτρεπτό προσλαμβανόμενο υδρογόνο. Ο έλεγχος αυτός απαιτεί μέτρηση πριν και μετά τη κατεργασία και υποθέτει ότι το αρχικό και τελικό περιεχόμενο σε υδρογόνο είναι ομοιόμορφα διασκορπισμένο σε κάθε σημείο του πάχους του δείγματος. Ωστόσο, ο μηχανισμός απορρόφησης θεωρείται πως είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο με βάθος επίδρασης που κυμαίνεται από 0,25 μέχρι 0,50 mm. Σαν αποτέλεσμα, ο έλεγχος του ' υγρού εγχάραξης μπορεί

να είναι περισσότερο κρίσιμος σε λεπτά τεμάχια, ειδικότερα για εκείνα τα λεπτά τεμάχια που πρέπει να εγχαραχθούν και από τις δύο πλευρές.

ε. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της CM

Τα πλεονεκτήματα της CM περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1. Η αφαίρεση μετάλλου πραγματοποιείται χωρίς παραμένουσες τάσεις στο υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
2. Με τη CM μπορούν να κατεργαστούν ομοιόμορφα περίπλοκα σχήματα και εσοχέο μεγάλου βάθους.
3. Το γεγονός ότι η CM μπορεί να εφαρμοστεί μετά από διαμόρφωση (σαν στάδιο αποπεράτωσης), επιτρέπει συχνά την απλοποίηση και τη μείωση του κόστους της συγκεκριμένης μεθόδου διαμόρφωσης.
4. Με τη CM μπορούν να κατεργαστούν εξαιρετικά λεπτές διατομές.
5. Η σκληρότητα ή ευθραυστότητα του μετάλλου δεν είναι περιοριστικός παράγοντας στη CM.
6. Το μέγεθος του κατεργαζόμενου τεμαχίου περιορίζεται μόνο από τις διαστάσεις της δεξαμενής που περιέχει το υγρό εγχάραξης.
7. Με τη CM μπορούν να κατεργαστούν κωνικές διατομές.
8. Με τη CM μπορούν να κατεργαστούν τα περισσότερα κράματα και μορφές.
9. Σε πολλά κράματα είναι δυνατόν να επιτευχθεί καλή τραχύτητα επιφανείας.
10. Το κόστος κατασκευής, χρήσης και συντήρησης των εργαλείων είναι χαμηλό.
11. Είναι δυνατή η επίτευξη εξαιρετικά σφικτών ανοχών ανεξάρτητα της διακύμανσης του αρχικού πάχους (ή του πάχους της πρώτης ύλης) εφαρμόζοντας σταδιακή κατεργασία.
12. Η μέθοδος προσαρμόζεται καλά σε πρότυπα τεμάχια επειδή το μοντέλο τοποθετείται απευθείας στη μάσκα του προς κατεργασία τεμαχίου, εκμηδενίζοντας τους χρόνους κατασκευής των εργαλείων κατεργασίας.

Τα μειονεκτήματα της CM περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1. Η ακτίνα καμπυλότητας του νεύρου είναι περίπου ίση με το βάθος κοπής.
2. Οι κοπές με εξαιρετικά μεγάλο βάθος είναι οικονομικά ασύμφορες.
3. Για καλά αποτελέσματα απαιτείται συνήθως ομοιογενής σύνθεση του μετάλλου.

4. Η υφή της επιφάνειας του χημικά κατεργασμένου τεμαχίου εξαρτάται πολύ από τη κρυσταλλική δομή του μετάλλου.
5. Κατά τη χημική κατεργασία συγκολλήσεων και χυτών παράγονται συχνά επιφάνειες με μικρά κοιλώματα (ευλογίαση).
6. Το κόστος της μεθόδου εξαρτάται από τη ποιότητα του αρχικού κατεργαζόμενου κομματιού (μεταβολή πάχους, παρουσία επιφανειακών χαραγών και διάβρωση).
7. Η επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού επηρεάζεται από τη CM και μερικές φορές απαιτείται μηχανική λείανση αυτής.
8. Συχνά απαιτείται η αρχική κατασκευή δοκιμίων κατεργασίας, τα οποία επιβαρύνουν το ολικό κόστος παραγωγής.
9. Σφικτότερες εγκάρσιες ανοχές από $\pm 0,8$ mm είναι δύσκολο να επιτευχθούν.
10. Στη CM χρησιμοποιούνται επικίνδυνα χημικά τα οποία παρουσιάζουν προβλήματα δύσκολης ασφάλειας, διάθεσης αποβλήτων και ατμοσφαιρικής μόλυνσης.
11. Είναι μη πρακτική η κατασκευή εγκοπών πλάτους μικρότερου του διπλασίου του βάθους.
12. Τα κράματα του τιτανίου απαιτούν ειδικά υγρά εγχάραξης για να περιοριστεί η πρόσληψη υδρογόνου.

στ. Εφαρμογές της CM

Η CM χρησιμοποιείται εκτεταμένα για την εγχάραξη προδιαμορφωμένων τεμαχίων που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική για την επίτευξη της μέγιστης αναλογίας αντοχής βάρους. Πτέρυγα αλουμινίου με ενσωματωμένες εγκάρσιες ενισχύσεις καθώς και διατομές της ατράκτου των αεροσκαφών μπορούν να κατεργαστούν με τη CM για να παραχθεί η βέλτιστη διατομή με το ελάχιστο πάχος τοιχώματος. Τα πλαίσια των πτερύγων, τα τμήματα ενίσχυσης σκελετού των αεροσκαφών καθώς και οι δοκοί του πατώματος παράγονται συχνά με τη CM. Η CM μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα στα περισσότερα υπερκράματα, και έτσι πολλές εφαρμογές έχουν πραγματοποιηθεί στη διαστασιολόγηση και στην εκλέπτυνση μεταλλικών εξαρτημάτων από έλασμα για τα θερμά τμήματα των κινητήρων τζετ.

Βελτίωση των επιφανειών. Υλικά τα οποία μετά από κάποιο στάδιο της παραγωγής παρουσιάζονται στατικά εξασθενημένα μπορούν εύκολα να αφαιρεθούν με τη CM. Για παράδειγμα υπάρχει δυνατότητα αφαίρεσης:

α) Του εξανθρακωμένου στρώματος από φτωχό σφυρήλατο κραματούχο χάλυβα και

β) Των επανατηκόμενων στρωμάτων από τη μέθοδο EDM.

Εγκοπές μεγάλου βάθους, κοιλώματα και χαραγιές μπορούν να αφαιρεθούν επίσης με τη μέθοδο CM. Το ελάττωμα γεμίζεται με το υλικό επικάλυψης (μάσκα), το τεμάχιο εγχάρασσεται σε βάθος μεγαλύτερο από αυτό του ελαττώματος, και η νησίδα που προκύπτει αφαιρείται μηχανικά.

Προετοιμασία για ποιοτικό έλεγχο με υγρό διείδυσης. Η αφαίρεση ενός λεπτού

στρώματος της επιφάνειας από χυτά, σφυρήλατα ή κατεργασμένα τεμάχια είναι συχνά

επωφελής πριν από την επιθεώρηση με υγρό διείδυσης. Λανθάνοντα ελαττώματα (μη ορατά) από μέταλλο που έχει επαλειφθεί επιφανειακά μπορούν να εντοπιστούν κάτω από την επιφάνεια και να επιδιορθωθούν.

Χημική απογρέζωση. Η CM εφαρμόζεται συχνά και αποδοτικά για την απομάκρυνση των αιχμηρών γρεζιών από κατεργασμένα μεταλλικά εξαρτήματα περίπλοκου σχήματος.

Επιλεκτική προσβολή. Τα υγρά εγχάραξης μπορούν συχνά να χρησιμοποιηθούν για τη διάλυση ενός μεταλλικού συστατικού της δομής του κράματος χωρίς να επηρεάζουν τα άλλα συστατικά.

Εκλέπτυνση μηχανικών εξαρτημάτων. Η CM εφαρμόζεται επίσης προκειμένου να επιτευχθεί η εκλέπτυνση μη αποπερατωμένων εξαρτημάτων, επεξεργασία η οποία θα ήταν αντικοινομική ή αδύνατο να εκτελεσθεί μόνο με μηχανικά (συμβατικά) μέσα. Εξαρτήματα αεροσκαφών από Alclad, όπως τα σφυρήλατα πλαίσια των καθισμάτων και οι εξηλασμένοι εγκάρσιοι δοκοί, σχεδιάζονται και παράγονται

υπερμεγέθεις (oversized) ώστε να αποπερατωθούν με την εφαρμογή της CM.

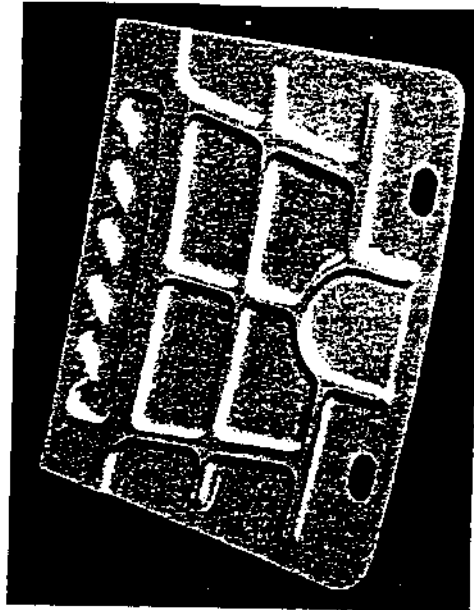
Ακολουθώς περιγράφονται δύο από τις πιο χαρακτηριστικές εφαρμογές της CM:

Εφαρμογή 1: Υποκοπή σε επενδεδυμένο αλουμίνιο. Το τεμάχιο που διακρίνουμε στο σχήμα 18.θ είναι μια εξωτερική θυρίδα πρόσβασης στο κινητήρα των αεροσκαφών **Boeing 747** και **767**. Η θύρα είναι κατασκευασμένη από Alclad 7075 πάχους 6,4 mm και κατασκευάζεται με εφελκυστική διαμόρφωση που ακολουθείται από CM μέχρι την επίτευξη των τελικών διαστάσεων πάχους 1,0, 2,0 και 3,2 ±0,1 mm.

Ο επακριβής έλεγχος της υποκοπής σ' αυτό το επενδεδυμένο εξάρτημα αλουμινίου είναι δύσκολος. Επομένως, αυτή η εξαιρετικά μεγάλου βάρους κοπή απαιτεί την αφαίρεση της επένδυσης του καθαρού αλουμινίου από την εσωτερική επιφάνεια της θυρίδας για τη διατήρηση των ανοχών στα ± 0,8 mm. Μια άλλη ειδική απαίτηση γι' αυτό το τεμάχιο είναι η λεία εξωτερική επιφάνεια.

Εφαρμογή 2: Εγγάραξη με ψεκασμό ενός περιστρεφόμενου κελύφους. Το κέλυφος του πυραύλου Cuisse διαμέτρου 530 mm και μήκους 6 πι έχει κατεργαστεί με τη μέθοδο CM. Σ' αυτή την εφαρμογή, η αφαίρεση υλικού από την εσωτερική επιφάνεια είναι απαραίτητη για λειτουργικούς σκοπούς παρά για την αφαίρεση βάρους, αν και από κάθε κέλυφος αφαιρούνται 111 kg υλικού. Το αρχικό πάχος του τοιχώματος που ήταν 5,5 mm μειώθηκε στα 4,8 mm σε μήκος 810 mm (0,8 m) και στα 4,1 mm σε μήκος 4.200 mm (4,2 m)

συνεχόμενα του προηγούμενου μήκους. Η κατεργασία με μηχανικό φρεζάρισμα είναι περισσότερο δαπανηρή εξ' αιτίας του ότι το κατεργαζόμενο υλικό (κράμα 304) παρουσιάζει ενδοτράχυνση και του ότι η πρόσβαση για την εσωτερική αφαίρεση υλικού είναι σχετικά δύσκολη.



Σχήμα 18.θ. Εξωτερική θυρίδα πρόσβασης στο κινητήρα των αεροσκαφών.

Το μέγεθος και το σχήμα του τεμαχίου έκαναν τη συνήθη εγχάραξη με εμβάπτιση μη εφαρμόσιμη. Η εσωτερική μορφή του τεμαχίου είχε ως αποτέλεσμα μια σχετικά κακή ομοιομορφία αφαίρεσης μετάλλου και δημιούργησε διαστασιακές απαιτήσεις οι οποίες ήταν δύσκολο να επιτευχθούν. Η συνήθης εμβάπτιση σε μίγμα οξέος παράγει οξειδία του αζώτου τα οποία σ'αυτή τη περίπτωση απαιτούν μια συσκευή καθαρισμού των αναθυμιάσεων. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε η εγχάραξη με ψεκασμό. Το κλειστό κέλυφος διαμόρφωσε από μόνο του ένα θάλαμο ψεκασμού μέσα στον οποίο τοποθετήθηκε ένας ταλαντευόμενος σωλήνας ψεκασμού ενώ το τεμάχιο περιστρέφονταν κατά τη διάρκεια του κύκλου ψέκασης. Το υγρό εγχάραξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν χλωριούχος σίδηρος ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως και στη μέθοδο της χημικής εκτομής. Τα **πλεονεκτήματα** αυτής της προσέγγισης ήταν η βελτίωση της ομοιομορφίας της αφαίρεσης υλικού, η εξάλειψη των αναθυμιάσεων των οξειδίων του αζώτου και η δυνατότητα ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης του χρησιμοποιούμενου υγρού εγχάραξης.

19. ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ [PHOTOCHEMICAL MACHINING (PCM)]

α. Εισαγωγή

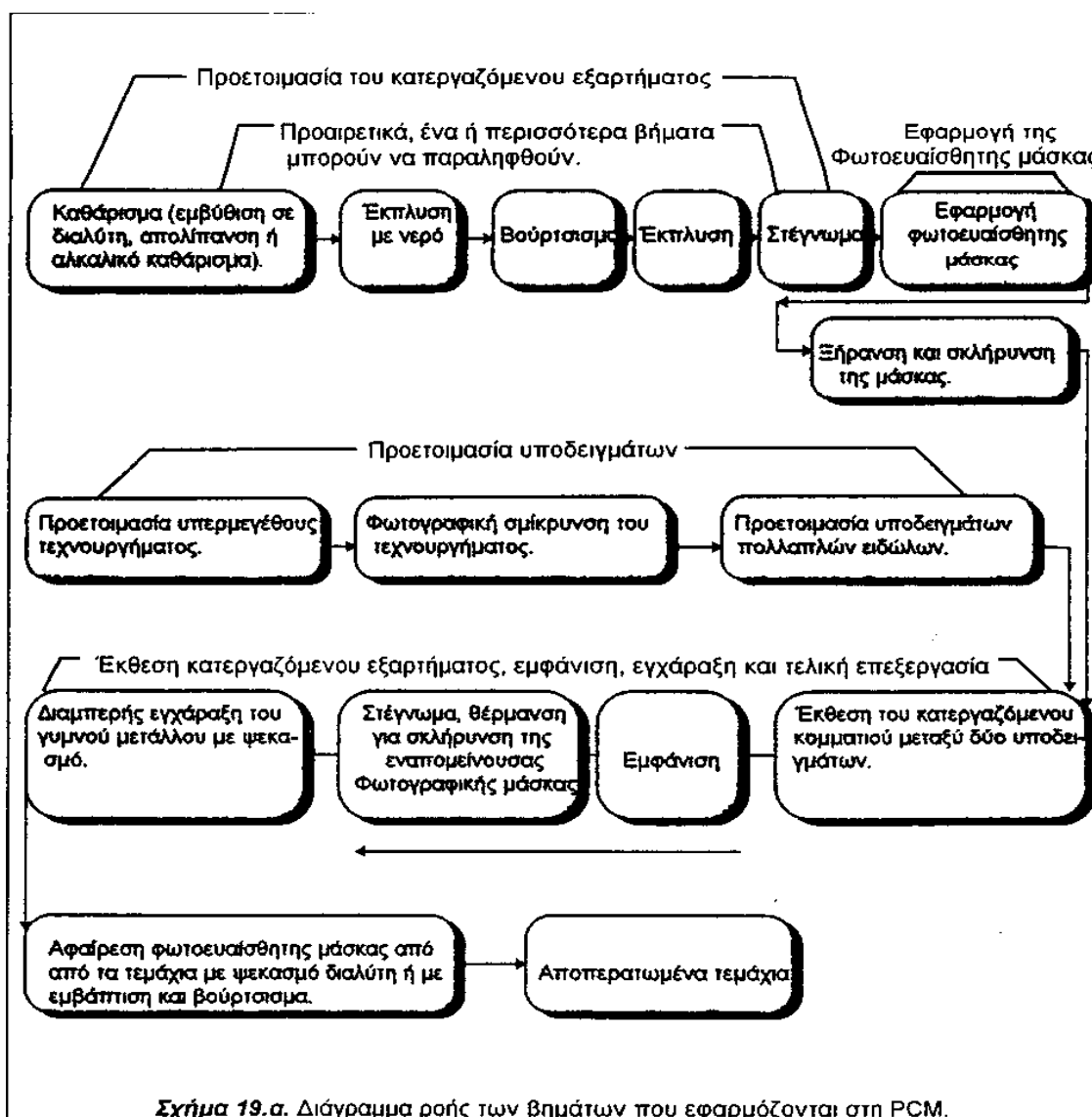
Η φωτοχημική κατεργασία (PCM), γνωστή επίσης σαν χημική εκτομή, είναι μια μέθοδος εγχάραξης μετάλλου που χρησιμοποιεί μια φωτοευαίσθητη μάσκα που προσδιορίζει τις θέσεις όπου το μέταλλο θα υποστεί εγχάραξη. Η μέθοδος PCM χρησιμοποιείται για τη παραγωγή περίπλοκων προτύπων με σφικτές ανοχές σε μια ποικιλία επίπεδων, μεταλλικών τεμαχίων με πάχος που κυμαίνεται από 0,01 μέχρι 1,6 mm.

Η PCM, η οποία χρησιμοποιείται από τα μέσα του 1950, βρίσκει εφαρμογή στη παραγωγή διαφόρων εξαρτημάτων ακριβείας, όπως είναι οι μάσκες σκιάς στις έγχρωμες τηλεοράσεις, οι ελασματοτοποιημένες μαγνητικές κεφαλές εγγραφής, οι δίσκοι κωδικοποίησης, τα κόσκινα, τα παρεμβύσματα στεγανοποίησης (φλάντζες) και τέλος τα κοσμήματα, οι διακοσμητικές αναμνηστικές πλακέτες και οι πλάκες με ονόματα. Τα περισσότερα από τα συνήθως χρησιμοποιούμενα μέταλλα και κράματα που διατίθενται σε μορφή ελάσματος μπορούν να εγχαραχθούν με τη PCM.

β. Περιγραφή της PCM

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ροής που δείχνει τα κύρια βήματα της PCM. Τα βήματα αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Προετοιμασία του φωτοεργαλείου.
- Επιλογή του μετάλλου.
- Προετοιμασία του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
- Τοποθέτηση της φωτοευαίσθητης μάσκας.
- Εγχάραξη.
- Αφαίρεση της μάσκας και επιθεώρηση.



Σχήμα 19.α. Διάγραμμα ροής των βημάτων που εφαρμόζονται στη PCM.

Επιλογή του μετάλλου. Τα περισσότερα από τα συνήθως χρησιμοποιούμενα βιομηχανικά μέταλλα μπορούν να εγχαραχθούν με τη PCM. Πολλά εξωτικά κράματα και μέταλλα μπορούν να εγχαραχθούν, αλλά απαιτούν πιο πολύπλοκη χημεία και ο χειριστής πρέπει να έχει περισσότερες γνώσεις. Εκτός από μερικές ειδικές εγκαταστάσεις PCM, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την εγχάραξη ορθογωνικών μεταλλικών φύλλων ή πλαισίων.

Μερικές από τις ιδιότητες που πρέπει να έχει το υλικό του τεμαχίου για καλά αποτελέσματα μετά τη PCM είναι:

1. Το μέγεθος των κόκκων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο λεπτό επειδή η εξομάλυνση των ακμών των τεμαχίων μειώνεται με αύξηση του μεγέθους των κόκκων.
2. Το μέταλλο πρέπει να είναι διαλυτό μέσα στο επιλεγμένο υγρό εγχάραξης.
3. Το υλικό του τεμαχίου πρέπει να είναι επίπεδο και με ομοιόμορφο πάχος.
4. Η τραχύτητα επιφανείας πρέπει να είναι ομοιόμορφη και το υλικό πρέπει να είναι απηλλαγμένο από χαραγιές, ενσωματωμένα σωματίδια και εγκλείσματα.

Ο πίνακας 19.1 παρακάτω δίνει μερικές από τις απορρέουσες επιδράσεις όταν το κατεργαζόμενο μέταλλο είναι φτωχής ποιότητας.

Πίνακας 19.1. Επιδράσεις της φτωχής ποιότητας του μετάλλου στη PCM.

Ελαττώμα μετάλλου	Επίδραση στη PCM
Καμπύλωση του μετάλλου κατά το μήκος του και ύπαρξη κοιλοτήτων.	Είναι δύσκολο να επικαλυφθούν με φωτοευαίσθητη μάσκα και να τυπωθούν έναντι του φωτοεργαλείου, έχοντας απώλεια στη καταγραφή και στη λεπτομέρεια.
Μεγάλο μέγεθος κόκκων .	Απώλεια στην ανάλυση των εγχαραγμένων χαρακτηριστικών.
Διακύμανση του πάχους του ελάσματος με αύξηση από τα άκρα προς το κέντρο.	Δυσκολία καθορισμού του βέλτιστου χρόνου εγχάραξης, καθώς ο χρόνος εξαρτάται από το πάχος του μετάλλου.
Ενσωματωμένα σωματίδια και εγκλείσματα, όπως οξειδία κ.λ.π.	Μπορεί να παράγει ελαττώματα στην εγχάραξη επειδή τα εγκλείσματα εγχαράσσονται με διαφορετικό ρυθμό απ'ότι το βασικό μέταλλο.
Χαραγιές στην επιφάνεια.	Είναι δύσκολο να επικαλυφθούν με φωτοευαίσθητη μάσκα, με αποτέλεσμα το υγρό εγχάραξης να ρέει μέσα από τις χαραγιές, παράγοντας αισθητικά ελαττώματα στις επιφάνειες του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Η δυνατότητα εγχάραξης του μετάλλου εξαρτάται από τη χημική του σύνθεση. Στο πίνακα 19.2 εμφανίζεται η βαθμονομημένη δυνατότητα εγχάραξης μερικών μετάλλων και κραμάτων που χρησιμοποιούνται στη PCM.

Πίνακας 19.2. Πίνακας βαθμονομημένης χαρακτηριστικότητας επιλεγμένων μετάλλων και κραμάτων που χρησιμοποιούνται στη PCM.

Καλή	Αρκετά καλή	Μέτρια	Φτωχή
Χαλκός (ελατός)	AISI 215 ανοξείδωτος χάλυβας	Μολυβδαίνιο	Βολφράμιο
Χαλκός (ηλεκτρολυτικός)	AISI 301 ανοξείδωτος χάλυβας	Κράμα νικελίου - χρωμίου (Ni, 20% Fe, 15% Cr)	Hastelloy C (Ni, 15% Mo, 14% Cr, 5% Fe, 3% W, 2,5% Co και 0,08 % C)
Βηρυλλιούχος χαλκός	AISI 302 ανοξείδωτος χάλυβας	Χρώμιο	Τιτάνιο
Ορείχαλκος (Cu, Zn)	AISI 304 ανοξείδωτος χάλυβας	Βανάδιο	Νιόβιο (κολόμβιο)
Φωσφορούχοςμπρούντζος (Cu, 10% Sn, < 0,5% P)	AISI 316 ανοξείδωτος χάλυβας	Χρυσός	Ταντάλιο
Ψευδάργυρος	AISI 347 ανοξείδωτος χάλυβας	Μαγγάνιο	
Ανθρακούχος χάλυβας	AISI 410 ανοξείδωτος χάλυβας	Ρένιο	
Monel	Κράματα Inconel (Ni, 15% Cr, 7% Fe)	Μόλυβδος	
Νικέλιο	Hastelloy B (Ni, 28% Mo, 5% Fe, 2,5% Co, 1% Cr, 0,5% V, 0,05 % C)	Ζιρκόνιο	
Μαγνήσιο			
Αλουμίνιο			

Προετοιμασία του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Για την επίτευξη καλής προσκόλλησης μεταξύ του μετάλλου και της φωτοευαίσθητης μάσκας, η επιφάνεια του μετάλλου πρέπει να είναι απηλλαγμένη από μολυσματικά υλικά. Οι περισσότερες φωτοευαίσθητες μάσκες (στο εξής μάσκες) έχουν αναπτυχθεί για να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία πλακετών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και αυτές έχουν καλή προσκολλητικότητα σε χαλκό και σε υλικά που έχουν σαν βάση το χαλκό. Άλλα μέταλλα, ειδικά ο ανοξείδωτος χάλυβας, απαιτούν επεξεργασία της επιφάνειας έτσι ώστε να επιτευχθεί καλή προσκόλληση της μάσκας. Προεγχάραξη και παθητικοποίηση. Σε όλες τις περιπτώσεις, μια μηχανική εκτριβή που παρέχεται από μηχανήματα με οριζόντιες, κυλινδρικές ψήκτρες (βούρτσες) βοηθά στη προετοιμασία της επιφάνειας. Η χρήση αποξεστικών υλικών πρέπει να αποφεύγεται επειδή

αυτά πρέπει να αφαιρεθούν τελείως από την επιφάνεια για την αποφυγή μόλυνσης αυτής. Εάν η επιπεδότητα είναι πρόβλημα, το υλικό πρέπει να υποστεί ειδική επεξεργασία με εφελκυσμό.

Μια καλή δοκιμή για αποτελεσματικό καθάρισμα είναι ο ψεκασμός νερού επάνω στην επιφάνεια του μετάλλου και η διαπίστωση κατά πόσο μεμονωμένα σταγονίδια εξαπλώνονται για να σχηματίσουν μια ομοιόμορφη, συνεχή και λεπτή μεμβράνη νερού. Ο σχηματισμός αυτής της λεπτής μεμβράνης αποδεικνύει την επάρκεια του καθαρισμού, δεδομένου ότι το ανεπαρκές καθάρισμα παράγει μια ανομοιόμορφη διαβροχή της επιφάνειας. Η επιλογή ενός κύκλου προκατεργασίας περιλαμβάνει τις ίδιες αρχές όπως η επιλογή ενός κύκλου προετοιμασίας για ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση ή βαφή.

Η προετοιμασία των υποδειγμάτων, τα οποία χρησιμεύουν σαν εργαλεία στη PCM, αρχίζει με τη δημιουργία ενός υπερμεγέθους τεχνουργήματος σε χαρτί, σχεδιασμός σε μεμβράνη πολυεστέρα ή σε υλικό με βάση το πολυεστέρα ή σε μεμβράνη με βάση το γυαλί. Η πιο συνήθης μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η κοπή του προτύπου σε ένα υλικό, το οποίο ονομάζεται ρουμπίλιθος με δυνατότητα κοπής και αποφλοίωσης και το οποίο συνίσταται από ένα κόκκινο στρώμα που μπορεί να απογυμνωθεί πάνω σε μια σταθερή και καθαρή βάση από πολυεστέρα. Το τεμάχιο σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη διάφορους συντελεστές εγχάραξης.

Τα τεχνουργήματα συνήθως παράγονται με κάποια μεγέθυνση έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί τυχόν διαστασιακό σφάλμα. Η μεγέθυνση του πρότυπου τεχνουργήματος κυμαίνεται από 2 μέχρι 200 φορές του πραγματικού μεγέθους και εξαρτάται από τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό, το μέγεθος του κατεργαζόμενου κομματιού και την απαιτούμενη ακρίβεια. Οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής του τεχνουργήματος είναι οι ακόλουθες:

1. Σχεδίαση με χέρι.
2. Επακριβής αποτύπωση με διάγραμμα συντεταγμένων.
3. Σχεδίαση με τη βοήθεια H/Y και μέσω Plotter δέσμης φωτός ή δέσμης λέιζερ.

Το τεχνούργημα φωτογραφίζεται με μια κάμερα επακριβούς σμίκρυνσης που επαναφέρει αυτό σε κλίμακα 1:1. Για τη παραγωγή υψηλής ποσότητας τεμαχίων, εμφανίζονται υποδείγματα πολλαπλών ειδώλων επειδή είναι συχνά οικονομικό και βολικό για την έκθεση, την εμφάνιση και την εγχάραξη ενός αριθμού τεμαχίων από μεμονωμένο μεταλλικό έλασμα. Στη προετοιμασία των υποδειγμάτων πολλαπλών ειδώλων, τα είδωλα είναι βηματικά και επαναλαμβανόμενα έτσι ώστε να γεμίσουν το υπόδειγμα με το βέλτιστο αριθμό τεμαχίων. Η βηματική μείωση και τα αντίγραφα των ειδώλων μπορούν να επιτευχθούν με μια κάμερα σμίκρυνσης. Όταν χρησιμοποιείται ένα Plotter δέσμης φωτός ή δέσμης λέιζερ, η διάταξη μειώνεται σε κλίμακα 1:1, εξαιρέτως εντελώς την ανάγκη εφαρμογής κάμερας. Οποιαδήποτε από τις παραπάνω μεθόδους καταλήγει σε ένα φιλμ υποδείγματος που περιέχει το πρότυπο που πρέπει να εγχαραχθεί. Στη παραγωγικότητα η περισσότερη εργασία γίνεται χρησιμοποιώντας ένα διαστασιακά σταθερό φιλμ το οποίο υφίστανται διάτρηση και εγγραφή έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα υπόδειγμα προς εργασία.

Κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας των υποδειγμάτων λαμβάνεται πρόνοια για την επανάκτηση των κατεργαζόμενων τεμαχίων μετά την εγχάραξη. Κάθε κατεργαζόμενο κομμάτι πρέπει να έχει μια περιβάλλουσα χαραγμένη γραμμή έτσι ώστε το τεμάχιο να μπορεί τελικά να διαχωριστεί από το υπόλοιπο μεταλλικό έλασμα. Το σύνηθες πλάτος επιλέγεται να είναι το διπλάσιο του πάχους του μετάλλου.

Σε πολλές περιπτώσεις στο τεχνούργημα προστίθενται κάποιες γλωσσίδες για την επίτευξη συνδέσεων που να συγκρατούν τα τεμάχια μαζί μετά την εγχάραξη. Αυτές οι γλωσσίδες πρέπει να αφαιρεθούν αργότερα.

Η τοποθέτηση των φωτοευαίσθητων μασκών εξασφαλίζει μια επιφάνεια η οποία είναι και αυτή φωτοευαίσθητη και αντέχει στη δράση του υγρού εγχάραξης παρέχοντας μια σφικτά προσκολλημένη προστατευτική επικάλυψη. Μετά την απεικόνιση και την εμφάνιση του φιλμ, η μάσκα καθορίζει το σχήμα του κατεργαζόμενου κομματιού και επομένως δεν πρέπει να αναδιπλωθεί κατά τη διάρκεια της εγχάραξης.

Η μάσκα μπορεί να είναι μια θετική ή αρνητική προστατευτική μάσκα. Στο θετικό σύστημα δράσης, η περιοχή που εκτίθενται σε φως απομακρύνεται κατά τη διάρκεια της εμφάνισης του φιλμ. Στο αρνητικό

σύστημα δράσης που χρησιμοποιείται περισσότερο, οι περιοχές που εκτείθενται κατασκευάζονται έτσι ώστε να είναι αδιάλυτες στο φωτοευαίσθητο διάλυμα εμφάνισης του φιλμ. Σε κάθε περίπτωση, το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα πλαίσιο στο οποίο οι περιοχές που είναι εγχαραγμένες είναι γυμνό μέταλλο και η περιοχή απεικονίζει το τεμάχιο που είναι καλυμμένη με μια προσκολλημένη προστατευτική επικάλυψη που είναι ανθεκτική στο οξύ.

Οι μάσκες μπορούν να εφαρμοστούν σε λεπτή υγρή μορφή ή σε πολυστρωματική μορφή με ένα παχύτερο, στερεό και ξηρό φιλμ. Οι υγρές μάσκες παρουσιάζουν καλύτερη φωτογραφική ανάλυση και μάλιστα όταν είναι θετικής δράσης. Ωστόσο, ο συνδυασμός της ευκολίας εφαρμογής και του μικρού χρόνου έκθεσης κατέστησε τη μάσκα ξηρού φιλμ μια πιο συνήθη επιλογή στις περισσότερες εργασίες. **Σαν γενικός κανόνας, οι συστάσεις των κατασκευαστών των μασκών πρέπει να τηρούνται πολύ αυστηρά.**

Η εφαρμογή της μάσκας στο κατεργαζόμενο κομμάτι γίνεται καλύτερα αμέσως μετά το καθάρισμα και τη προεπεξεργασία, αν και το κατεργαζόμενο κομμάτι μπορεί να σκεπασθεί και να αποθηκευτεί σ'ένα ελεγχόμενο περιβάλλον από μερικές ώρες μέχρι και μερικές ημέρες πριν την εφαρμογή της μάσκας. Η επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού δεν πρέπει να αγγιχθεί πριν την εφαρμογή της μάσκας.

Οι μάσκες εφαρμόζονται με εμβάπτιση ή με ψεκασμό. Η εμβάπτιση είναι η απλούστερη μέθοδος, αλλά ο ψεκασμός είναι πιο ευέλικτη μέθοδος. Οι μάσκες ξηραίνονται σε θερμοκρασία δωματίου και έπειτα ψήνονται για 15 λεπτά περίπου σε μέγιστη θερμοκρασία των 120 °C για την αφαίρεση του παραμένουτος διαλύτη. Η θερμοκρασία ψησίματος δεν είναι κρίσιμη αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτεροι χρόνοι ψησίματος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Η έκθεση των συμβατικών μασκών σε υπεριώδες φως πολυμερίζει εν' μέρει τις εκτειθέμενες περιοχές της φωτοευαίσθητης ρητίνης, αυξάνοντας την αντοχή αυτών των περιοχών στα χημικά που χρησιμοποιούνται σαν υγρά εμφάνισης. Ο εξοπλισμός για την έκθεση που χρησιμοποιείται στη μέθοδο PCM αποτελείται από ένα θάλαμο κενού όπου το πλαίσιο τύπωσης έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο και από μια πηγή υπεριώδους φωτός υψηλής έντασης.

Κάθε πλευρά του πλαισίου του κατεργαζόμενου κομματιού μπορεί να εκτεθεί ξεχωριστά, ή και οι δύο πλευρές μπορούν να εκτεθούν ταυτόχρονα μεταξύ ενός ζεύγους υποδειγμάτων αντεστραμμένων ειδώλων. Στο θάλαμο κενού όπου το πλαίσιο τύπωσης έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο, η γαλακτώδης πλευρά του υποδειγματικού προτύπου τοποθετείται προς το πλαίσιο εργασίας. Ένα κενό περίπου 500 mm στήλης Hg θα εξασφαλίσει καλή επαφή.

Οι πιο συνήθεις πηγές φωτός συμπεριλαμβάνουν λαμπτήρες υδραργύρου υψηλής πίεσης, λαμπτήρες με μεταλλική ένωση αλογόνου, λαμπτήρες υδραργύρου με ξένο, παλμικούς λαμπτήρες με ξένο και ακτινικούς σωλήνες φθορισμού. Οι μονάδες έκθεσης που υπάρχουν στο εμπόριο συμπεριλαμβάνουν μια υψηλότερη και μια χαμηλότερη πηγή φωτός έτσι ώστε οι δύο πλευρές του προς επικάλυψη υλικού να μπορούν να εκτείνονται ταυτόχρονα.

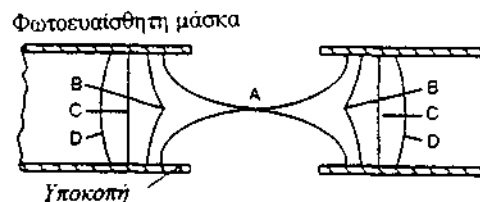
Η εμφάνιση του φιλμ των μασκών πραγματοποιείται είτε με ψεκασμό, είτε με εμβάπτιση σε ένα κατάλληλο υγρό εμφάνισης.

Τα υγρά εμφάνισης είναι διαλύματα τα οποία σχηματίζονται για συγκεκριμένες μάσκες. Η θερμοκρασία του υγρού εμφάνισης, η πίεση ψεκασμού και η θερμοκρασία του νερού έκπλυσης είναι σημαντικοί παράμετροι για τη σωστή εμφάνιση του φιλμ. Οι συνθήκες εμφάνισης του φιλμ και η διάρκεια καθορίζονται από τη φύση και το πάχος της μάσκας. Αφού το πλαίσιο αφαιρεθεί από το υγρό εμφάνισης πρέπει να ξεπλυθεί με νερό ή με ψεκασμό για την απομάκρυνση του υγρού εμφάνισης.

Σε μερικές περιπτώσεις, είναι επιθυμητό το ψήσιμο των πλαισίων μετά την εμφάνιση. Συχνά χρησιμοποιούνται υπέρυθροι κλίβανοι. Τέλος δεν πρέπει να υπερβαίνεται η συστημένη θερμοκρασία ψησίματος καθώς και ο χρόνος ψησίματος γιατί διαφορετικά η μάσκα μπορεί να γίνει εύθραυστη και να μη μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα μετά την εγχάραξη.

Εγχάραξη. Το εμφανισμένο και ψημένο σε κλίβανο πλαίσιο μετάλλου εκτείνονται σ'ένα θερμό οξύ κατά τη διάρκεια της εγχάραξης. Μια χημική αντίδραση λαμβάνει χώρα στην οποία το οξύ αντιδρά με το εκτειθέμενο μέταλλο και οξειδώνει αυτό για να σχηματιστεί έτσι ένα διαλυτό προϊόν αντιδράσεως. Η εγχάραξη στη PCM μπορεί να πραγματοποιηθεί με εμβάπτιση σε ένα μηχανικά αναδευόμενο ή αναδευόμενο με αέρα χημικό λουτρό, ή τέλος με ψεκασμό με θερμό οξύ. Η δύναμη ψεκασμού

παρασύρει μακριά τα προϊόντα της αντίδρασης έτσι ώστε μια νέα καθαρή μεταλλική επιφάνεια να είναι πάντα σε επαφή με το ανανεωμένο υγρό εγχάραξης. Όταν η εγχάραξη προχωρήσει μέχρι ένα σημείο στο οποίο η διείσδυση από κάθε επιφάνεια έχει φτάσει στο μέσον του ελάσματος, τότε συμβαίνει διάσπαση του τεμαχίου (βλέπε σχήμα 19.β). Αφού συμβεί αυτό, το υγρό εγχάραξης μπορεί να περάσει διά μέσου του ανοίγματος, προκαλώντας μια εξομάλυνση των ακμών και παράγει ένα κάθετο πλευρικό τοίχωμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ το υγρό εγχάραξης διεισδύει στο μέταλλο, το εγκάρσιο πλάτος της χαραγμένης γραμμής αυξάνει και υποσκάπτει τη μάσκα. Όσο παχύτερο είναι το μέταλλο τόσο μεγαλώνει η ποσότητα της υποκοπής. Μια κατάλληλη σχεδίαση του φωτοεργαλείου αντισταθμίζει αυτή την υποκοπή έτσι ώστε τα παραγόμενα τεμάχια να είναι μέσα στις καθορισμένες ανοχές. Αυτό το κομμάτι της μεθόδου απαιτεί καλό στατιστικό έλεγχο.



Σχήμα 19.β. Εμφάνιση ενός προφίλ που είναι εγχαραγμένο και από τις δύο πλευρές.
α) Σημείο διάσπασης του τεμαχίου, β) Αμφίκοιρτο, γ) Ευθεία, δ) Αμφίκοιλο.

Στις περισσότερες παραγωγικές λειτουργίες, η σύνθεση και η συγκέντρωση του υγρού εγχάραξης καθώς και οι άλλες συνθήκες της μεθόδου, ρυθμίζονται για ρυθμό αφαίρεσης υλικού από 0,01 μέχρι 0,05 mm/min. Μπορούν να επιτευχθούν ταχύτεροι ρυθμοί, ιδιαίτερα στην εγχάραξη με ψεκασμό, αλλά συνήθως μειώνεται η ακρίβεια κατεργασίας και υπάρχει πιο συχνή αποτυχία της μάσκας στη διείσδυση, ή αποτυχία συγκόλλησης της μάσκας στις ακμές του προτύπου, επιταχύνοντας έτσι τη διάβρωση του εξοπλισμού.

Τα υγρά εγχάραξης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη φωτοχημική κατεργασία είναι διαλύματα χλωριούχου σιδήρου για μια μεγάλη ποικιλία μετάλλων. Ο χλωριούχος σίδηρος προσβάλλει μια ευρεία κλίμακα μετάλλων και έχει γίνει το πιο συνήθως χρησιμοποιούμενο υγρό εγχάραξης στη βιομηχανία PCM. Η ποικιλία των υγρών εγχάραξης είναι

περιορισμένη στα λιγότερο επικίνδυνα υγρά, όπως ο χλωριούχος σίδηρος (συχνά τροποποιείται με προσθήκες), ο χλωριούχος χαλκός, τα διαλυμένα ορυκτά οξέα και μερικά αλκαλικά υγρά εγχάραξης επειδή βασίζονται στο καυστικό νάτριο ή σε άλατα αμμωνίου. Το καυστικό νάτριο χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στο αλουμίνιο και στα κράματα αλουμινίου.

Τα περισσότερα όξινα υγρά εγχάραξης διατηρούνται με τη προσθήκη ανανεωμένου οξέος μέχρι η χημική τους δραστηριότητα να μεταβληθεί υπερβολικά από την αναλογία διαλυμένου μετάλλου, και μετά απορρίπτεται. Τα υγρά εγχάραξης καυστικού νατρίου διατηρούνται με προσθήκες και ανανεώνονται όταν η ύλη (ποσότητα) του διαλυμένου αλουμινίου αυξηθεί υπερβολικά. Η ομοιομορφία στο ρυθμό αφαίρεσης ποικίλλει με το υγρό εγχάραξης και το κατεργαζόμενο υλικό.

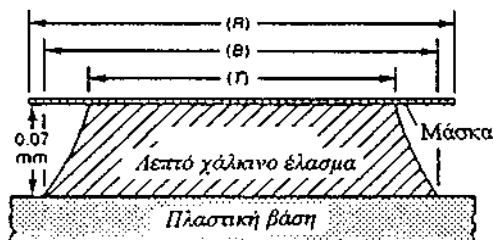
Η σύνθεση του υγρού εγχάραξης μπορεί να ρυθμιστεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις συγκεκριμένων εφαρμογών και ξεχωριστές προσθήκες μπορούν να συμπεριληφθούν για τον έλεγχο του αφρίσματος ή των χαρακτηριστικών διαβροχής, αυξάνοντας ή μειώνοντας το ρυθμό εγχάραξης, ή για να γίνει η εγχάραξη περισσότερο ομοιόμορφη. Πολλές χημικές συνθέσεις προσομοιάζουν με εκείνες που χρησιμοποιούνται στη χημική λείανση ή στην ηλεκτρολείανση. Μια σύγκριση των συστατικών των διαλυμάτων που χρησιμοποιούνται στην εγχάραξη καρτών τυπωμένων κυκλωμάτων δίδονται στο πίνακα 19.3.

Τα μηχανήματα εγχάραξης κατασκευάζονται από υλικά (όπως είναι το χλωριούχο πολυβηνύλλιο και το τιτάνιο) που μπορούν να αντέχουν στη διάβρωση από τον χλωριούχο σίδηρο και τα άλλα υγρά εγχάραξης. Η θερμοκρασία του υγρού εγχάραξης πρέπει να διατηρείται κάτω των 55 °C για την αποφυγή παραμόρφωσης των πλαστικών που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή της μηχανής.

Οι περισσότερες μηχανές εγχάραξης έχουν γενικά όμοια κατασκευή. Στη βάση της μηχανής υπάρχει μια λεκάνη που περιέχει το υγρό εγχάραξης. Ένα στοιχείο θέρμανσης από τιτάνιο και μια σερπατίνα ψύξης βοηθούν στη διατήρηση μιας σταθερής θερμοκρασίας του υγρού εγχάραξης, η οποία είναι απαραίτητη για τη πραγματοποίηση εγχάραξης με ακρίβεια. Το υγρό εγχάραξης αντλείται διά μέσου μιας πολλαπλής και οδηγείται σε ακροφύσια ψεκασμού, τα οποία κατευθύνουν το υγρό εγχάραξης και στις δύο επιφάνειες του πλαισίου που πρέπει να εγχαραχθούν.

Πίνακας 19.3. Επίδραση της σύνθεσης του υγρού εγχάραξης σε γραμμές παραγωγής λεπτού ελάσματος χαλκού πάχους 250 μm και βάρους 60 gr. το οποίο κάθεται πάνω σε μια πλαστική βάση.

Έξι συνθέσεις εγχάραξης.	υγρού	Χρόνος εγχάραξης	Υποκοπή R-T	Κωνικότητα εγχάραξης
Συνιστώσα	gr./lt	sec	mm	B - T mm
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ ...	217	88	0,091	0,066
+ HgCl ₂ ...	0,0064			
+ H ₂ SO ₄ ...	17,6			
+ Χαλκός ...	4,9 - 8,1	90	0,089	0,089
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ ...	217			
+ NH ₄ Cl ...	16,2			
+ HgCl ₂ ...	0,0064	134	0,074	0,11
+ Χαλκός ...	4,9 - 13,3			
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ ...	217			
+ NH ₄ Cl ...	16,2	182	0,053	0,10
+ Χαλκός ...	4,9 - 13,3			
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ ...	217			
+ NaCl	140	143	0,074	0,046
+ Χαλκός ...	6,5 - 9,9			
CuCl ₂ ...	270			
+ NH ₄ Cl ...	64,6	76	0,066	0,046
+ Χαλκός ...	4,9 - 7,6			
FeCl ₃ ...	380			



Απογύμνωση και επιθεώρηση. Μετά την εγχάραξη, τα πλαίσια εξακολουθούν να καλύπτονται από τη μάσκα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η απογύμνωση είναι απαραίτητη. Η τέχνη της καλής απογύμνωσης είναι η αφαίρεση της μάσκας χωρίς να αφήσει κηλίδες ή να διαβρώσει τη μεταλλική επιφάνεια. Για την αφαίρεση της μάσκας χρησιμοποιούνται μερικές χημικές συνθέσεις που μαλακώνουν και ανασηκώνουν τη μάσκα από την επιφάνεια η οποία απομένει μόνο να υποστεί ένα ελαφρό βούρτσισμα. Το χλωριούχο μεθυλένιο είναι ένας απογυμνωτής ο οποίος διαλύει τελείως τη μάσκα, αλλά απαιτεί κατάλληλο εξοπλισμό και προσοχή στο χειρισμό. Ο χειρισμός των τεμαχίων κατά τη διάρκεια της απογύμνωσης είναι ευκολότερος όταν τα τεμάχια παραμένουν προσαρτημένα στο μεταλλικό

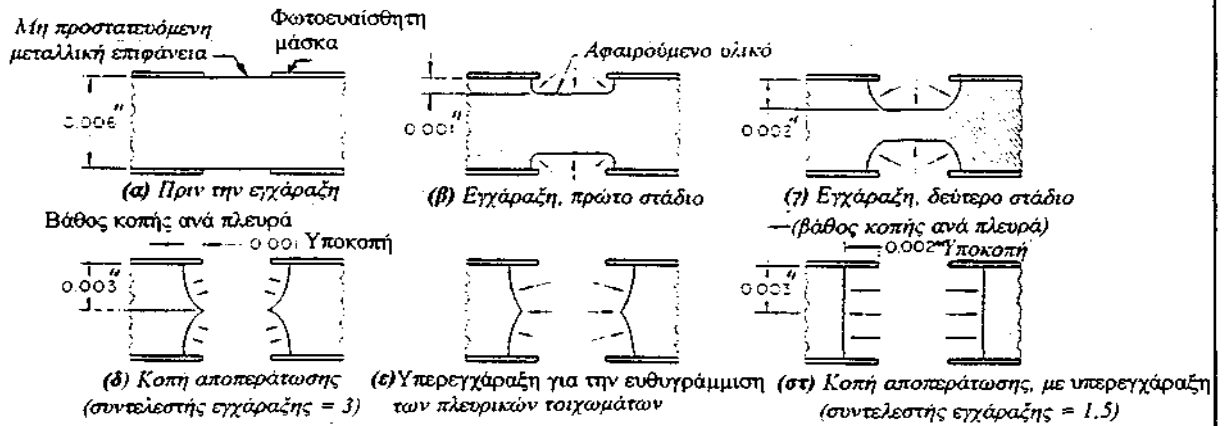
έλασμα. Γενικά, μια ή περισσότερες μικρές γλωσσίδες τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μη παρεμβαίνουν στη κατεργασία του τεμαχίου.

Μόλις ελεγχθεί το πάχος του κατεργαζόμενου κομματιού, το υπόλοιπο μέρος της επιθεώρησης είναι δισδιάστατο. Οι καλύτεροι μέθοδοι επιθεώρησης περιλαμβάνουν τη χρήση οριζόντιων οπτικών συσκευών σύγκρισης καθώς και διάφορα όργανα μέτρησης. Η χρήση στατιστικών ελέγχων της μεθόδου, ειδικά κατά τη διάρκεια της εγχάραξης, μπορεί να μειώσει τις τελικές απαιτήσεις ελέγχου.

γ. Προδιαγραφές μελέτης και σχεδίασης

Οι μηχανικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου μετάλλου επιδρούν λίγο στο ρυθμό εγχάραξης όπως και το σχήμα του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Το μέγιστο πάχος του μεταλλικού ελάσματος από το οποίο τα τεμάχια κατεργάζονται φωτοχημικά σε μια παραγωγή είναι 1,6 mm. Ωστόσο, χαλύβδινα τεμάχια με πάχος 3,2 mm έχουν εγχαραχθεί με ανοχή $\pm 0,4$ mm κάτω από ειδικές συνθήκες.

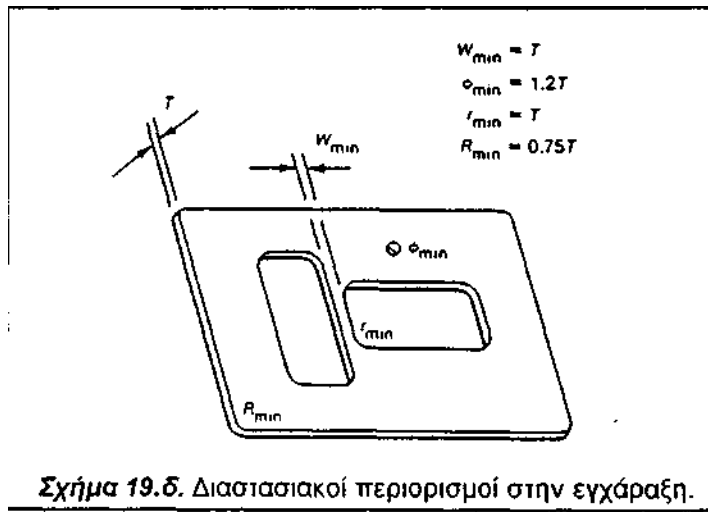
Το σχήμα 19.γ δείχνει τα προοδευτικά στάδια αφαίρεσης μετάλλου και την επίδραση της υποκοπής στη μελέτη και σχεδίαση. Σαν συντελεστής εγχάραξης ορίζεται ο λόγος του βάθους κοπής προς την υποκοπή. Στο σχήμα 19.γ.(δ) η υποκοπή φτάνει τα 12 μm και ο συντελεστής εγχάραξης είναι 3. Η ευθυγράμμιση των πλευρικών τοιχωμάτων που κόβονται μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με υπερεγχάραξη, όπως φαίνεται στο σχήμα 19.γ.(στ).



Σχήμα 19.γ. Διαδοχικά στάδια αφαίρεσης υλικού στη PCM. Το μέταλλο αφαιρείται με εγχάραξη από όλες τις επιφάνειες που δεν είναι καλυμμένες με μάσκα.

Διαστασιακοί περιορισμοί. Το σχήμα 19.δ δείχνει τη τυπική σχέση μεταξύ του πάχους του μετάλλου (T) και των διαφόρων διαστασιακών περιορισμών. Σαν γενικός κανόνας, η μικρότερη διάμετρος οπής ή πλάτος σχισμής που μπορεί να παραχθεί από τη μέθοδο PCM δεν μπορεί να είναι λιγότερο από 1,2 φορές του πάχους του μετάλλου. Εξαιρέσεις υπάρχουν όταν το πάχος του κατεργαζόμενου κομματιού μειώνεται. Πρακτικά η ελάχιστη διάμετρος οπής ή πλάτος σχισμής είναι 0,10 mm. Το ελάχιστο πλάτος της σχισμής ή διάμετρος οπής εξαρτάται επίσης από το κατεργαζόμενο κομμάτι. Οι περιορισμοί για μερικά συνήθως χρησιμοποιούμενα μέταλλα είναι:

Μέταλλο	Ελάχιστο πλάτος σχισμής ή διάμετρος οπής
Ανθρακούχοι χάλυβες και κράματα χάλυβα	1,0 T
Ανοξειδωτοι χάλυβες	1,4 T
Κράματα αλουμινίου	1,4 T
Κράματα χαλκού	0,7 T



Σαν γενικός κανόνας, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των οπών και των σχισμών είναι τουλάχιστον 0,9 φορές το πάχος του μετάλλου. Στα μέταλλα με πάχος 0,1 mm το απομένον μέταλλο πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με το πάχος του μετάλλου. Η ακρίβεια από κέντρο σε κέντρο καθορίζεται φωτογραφικά και ποικίλλει σύμφωνα με τους περιορισμούς του φωτογραφικού μέσου και του τεχνουργήματος.

Ανοχές. Δεν είναι δυνατό να καθοριστούν κανόνες χωρίς εξαιρέσεις όσον αφορά τις ανοχές εγχάραξης επειδή πολλοί παράγοντες περικλείονται, όπως είναι ο τύπος του μετάλλου, το μέγεθος του ελάσματος, ο τύπος του εξοπλισμού έκθεσης, ο τύπος του εξοπλισμού εγχάραξης, οι συνθήκες του υγρού εγχάραξης και φυσικά η εμπειρία του χειριστή. Ωστόσο, μερικές τυπικές ανοχές σε διάφορα μέταλλα φαίνονται στο πίνακα 19.4 για πάχη από 0,05 μέχρι 1,5 mm. Οι τιμές δείχνουν μια διακύμανση από -10% του πάχους του κατεργαζόμενου κομματιού για τη φωτοχημική κατεργασία χάλυβα, νικελίου, χαλκού και κραμάτων του χαλκού. Κάτω από ειδικές συνθήκες, η ακρίβεια μπορεί να διατηρηθεί στο -5% του πάχους και η δυνατότητα αναπαραγωγής είναι $\pm 2\%$ μέχρι $\pm 3\%$ του πάχους.

Ποιότητα ακμής. Η ομοιομορφία των ακμών εξαρτάται από την ομοιομορφία και τη λεπτότητα της κρυσταλλικής δομής του κατεργαζόμενου κομματιού, από τις τοπικές τάσεις, από το προσανατολισμό της ακμής, από την ομοιομορφία της ακμής της μάσκας, τη προσκόλληση της μάσκας καθώς επίσης και από τη τοπική μεταβολή της συγκέντρωσης του υγρού εγχάραξης, τη ταχύτητα πρόσκρουσης και τη διεύθυνση της ροής έναντι της επιφάνειας που

πρόκειται να κατεργαστεί. Η ποιότητα της ακμής μπορεί να βελτιωθεί με ελεγχόμενη υπερεγχάραξη (βλέπε σχήμα 19.γ) και με χημική ή ηλεκτρολυτική λείανση.

Πίνακας 19.4. Ανοχές στη φωτοχημική κατεργασία διαφόρων μετάλλων. Οι ανοχές αυτές είναι εφαρμόσιμες σε μια διάσταση 50 mm ή μικρότερη. Ανάλογες τιμές είναι εφαρμόσιμες για μεγαλύτερη διάσταση.

Πάχος υλικού mm	Ανοχή (±)				
	Κράματα αλουμινίου mm	Χαλκός και κράματα χαλκού. mm	Νικέλιο mm	Ανοξειδωτός χάλυβας mm	Φτωχός κραματ. χάλυβ. mm
		Για συνήθη παραγωγή			
0,05	0,05	0,025	0,025	0,025	0,025
0,13	0,08	0,05	0,08	0,05	0,05
0,25	0,10	0,08	0,13	0,08	0,10
0,50	0,15	0,13	0,25	0,13	0,15
1,0	0,20	0,15		0,25	0,25
1,5	0,30	0,18		0,36	0,30
		Για παραγωγή με αυστηρό έλεγχο.			
0,05	0,008	0,005	0,005	0,013	0,005
0,13	0,018	0,013	0,013	0,025	0,013
0,25	0,04	0,025	0,025	0,05	0,025
0,50	0,08	0,05	0,05	0,10	0,05
1,0	0,13	0,10	0,13	0,20	0,13
1,5	0,18	0,15	0,20	0,30	0,18

δ. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της PCM

Η PCM είναι μια εναλλακτική κατεργασία ως προς τη συμβατική εκτομή όταν υφίστανται πολύπλοκα πρότυπα ή μικρής ποσότητας παρτίδες παραγωγής. Το πλεονέκτημα υπάρχει επειδή οι αλλαγές εργαλείων στη PCM επιφέρουν αλλαγές στο τεχνούργημα, ενώ στη συμβατική εκτομή απαιτείται η κατασκευή μήτρων ακριβείας από πολύ δυσκολοκατέργαστα υλικά, όπως είναι το καρβίδιο του βαλφραμίου. Με τη PCM δίνεται η δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων προτύπων, τα οποία δεν μπορούν να αναπαραχθούν από άλλες μεθόδους. Μερικά από τα κύρια πλεονεκτήματα της PCM περιλαμβάνουν:

1. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά μπορούν να κατεργαστούν με τη PCM διατηρώντας ταυτόχρονα τη βέλτιστη διαπερατότητα.

2. Το κόστος της προρύθμισης (προετοιμασίας) και της κατεργασίας είναι εξαιρετικά χαμηλό.
3. Μπορούν να παραχθούν αρχικές ποσότητες πρόσφατα σχεδιασμένων τεμαχίων σε μικρό χρονικό διάστημα και μερικές φορές εντός μερικών ωρών μετά τη σύλληψη της σχεδίασης (μελέτη).
4. Το κόστος της αλλαγής στη μελέτη και σχεδίαση είναι χαμηλό, επειδή αλλάζει μόνο το τεχνούργημα.
5. Η PCM δεν παράγει απόβλιττα.
6. Εξαιρετικά λεπτά μέταλλα μπορούν να κατεργαστούν χωρίς παραμόρφωση. Στη πραγματικότητα η ακρίβεια αυξάνει όταν αυξάνει το πάχος του μετάλλου επειδή το μέγεθος της υποκοπής ελαττώνεται.
7. Η επαναφορά, η αντοχή και οι άλλες φυσικές ιδιότητες του μετάλλου δεν μεταβάλλονται.
8. Η σκληρότητα του μετάλλου δεν επιδρά σημαντικά στην ευκολία κατεργασίας.
9. Τα εύθραυστα μέταλλα (όπως είναι οι πυριτικοί ηλεκτρικοί χάλυβες, οι οποίοι αποτυγχάνουν κατά τη διάρκεια της συμβατικής εκτομής) μπορούν να κατεργαστούν φωτοχημικά χωρίς καμμία δυσκολία.
10. Η PCM επιτρέπει μεγάλη ευελιξία σχεδίασεως.

Τα **μειονεκτήματα** της PCM περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1. Απαιτείται σχετικά υψηλό επίπεδο εμπειρίας του χειριστή.
2. Δεν υπάρχουν πάντα διαθέσιμα κατάλληλα φωτογραφικά μέσα.
3. Το μέγιστο πάχος μετάλλου που μπορούμε να κατεργαστούμε φωτοχημικά είναι περίπου 1.6mm.
4. Δεν μπορούν να παραχθούν μικρές ακτίνες καμπυλότητας (αιχμηρές ακμές).
5. Στο χειρισμό των χημικών είναι απαραίτητο να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις ασφαλείας. Οι ατμοί του υγρού εγχάραξης επίσης είναι πολύ διαβρωτικοί. Ο εξοπλισμός της εγχάραξης πρέπει να είναι συνήθως απομονωμένος από τον υπόλοιπο εξοπλισμό της παραγωγικής μονάδος.

ε. Εφαρμογές της PCM

Μια από τις κύριες εφαρμογές της PCM είναι η κατασκευή πολύπλοκων, απαλλαγμένων από γρέζια, λεπτών "διαμορφώσεων". Η PCM συχνά είναι πιο οικονομική από τη πρέσσα εκτομής για ποσότητες μέχρι 5000 τεμάχια ανάλογα με το μέγεθος του τεμαχίου.

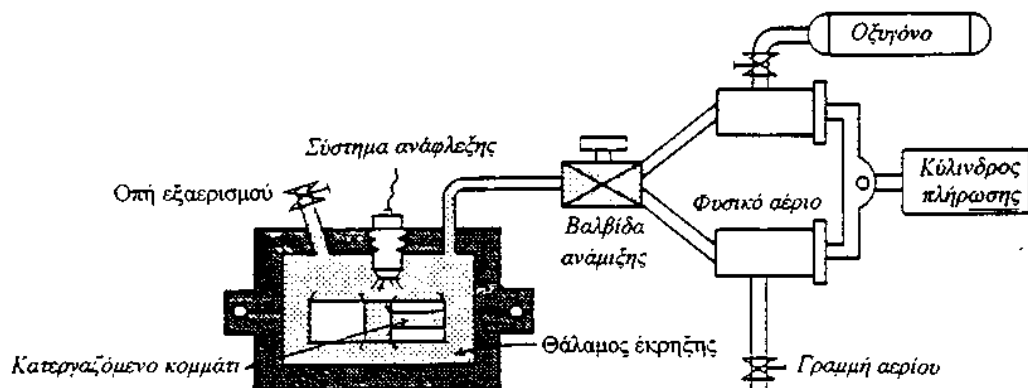
Τυπικά κατεργαζόμενα τεμάχια με τη PCM συμπεριλαμβάνουν ελασματοποιήσεις για τη χρησιμοποίησή τους σε ηλεκτρικούς κινητήρες ή σε μαγνητικές κεφαλές εγγραφής, σε στροφείς, σε παρεμβύσματα στεγανοποίησης (φλάντζες), σε όργανα μέτρησης, σε ηλεκτρικούς επαφείς και τερματικά, σε λεπτά κόσκινα και σε κάρτες τυπωμένων κυκλωμάτων. Οι προστατευτικές μάσκες σκίασης για την έγχρωμη τηλεόραση κατασκευάζονται επίσης με τη βοήθεια της PCM. Περίπου 320.000 κωνικές οπές, όπου η κάθε μια έχει ελάχιστη διάμετρο 0,28 mm, κατεργάζονται σε πάχος 0,15 mm για ένα σωλήνα έγχρωμης τηλεόρασης 530 mm (21"). Η PCM χρησιμοποιείται επίσης για τη κατασκευή αντιδιαβρωτικών πλεγμάτων ηθμών (φίλτρα) με οπές διαμέτρου 0,15 mm και απόσταση κέντρων 0,28 mm σε ανοξείδωτο χάλυβα 316 πάχους 0,1 mm.

Μερικές φορές η PCM χρησιμοποιείται για την απογρέζωση ορισμένων τεμαχίων ή για να μειώσει το χρόνο συναρμολόγησης. Έτσι λεπτά πολύπλοκα τεμάχια όπου είναι ανέφικτο να παραχθούν με μηχανική εκτομή λόγω της σκληρότητας ή της ευθραυστότητας του υλικού τους, μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα με τη PCM.

20.ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

[THERMOCHEMICAL MACHINING (TCM)]

Η θερμοχημική κατεργασία (TCM) έχει αναπτυχθεί για την αφαίρεση των ρινισμάτων (γρεζιών που έχουν αναπτυχθεί από τη συμβατική κατεργασία) και του "flash" από τα κατεργαζόμενα τεμάχια εκθέτοντας το κατεργαζόμενο κομμάτι σε θερμά διαβρωτικά αέρια για μικρό χρονικό διάστημα (βλέπε σχήμα 20.α). Το κατεργαζόμενο κομμάτι παραμένει ανεπηρέαστο και σχετικά κρύο μετά τη κατεργασία λόγω της χαμηλής αναλογίας επιφάνειας προς μάζα και του μικρού χρόνου έκθεσης.



Σχήμα 20.α. Σχηματική διάταξη της TCM.

Εναλλακτικά, λεπτά γρέζια μπορούν να αφαιρεθούν γρήγορα εκτείθοντας τα τεμάχια σ'ένα κατάλληλο χημικό ψέκασμα αντιδραστηρίου (μια παραλλαγή της CM), έχοντας σαν αποτέλεσμα μικρότερο κόστος απ'ότι αν η αφαίρεση αυτή γίνονταν με το χέρι. Φυσικά, από όλες τις εκτεθειμένες επιφάνειες αφαιρούνται μικρές ποσότητες μετάλλου και αυτό πρέπει να είναι επιτρεπτό για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος. Συνεπώς, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως μόνο για την αφαίρεση μικρών ρινισμάτων.

Τα θερμά αέρια σχηματίζονται από εκρηκτικά μίγματα που περιέχουν οξυγόνο, υδρογόνο και φυσικό αέριο μέσα σε ένα θάλαμο με τα κατεργαζόμενα τεμάχια. Ένα θερμικό εκρηκτικό κύμα ατμοποιεί τα ρινίσματα που βρίσκονται σε γρανάζια, σε χυτοτρεσσαριστά εξαρτήματα,

σε βαλβίδες κ.λ.π, σε μερικά millisecond. Η μέθοδος έχει πλήρως αυτοματοποιηθεί και ο χρόνος του κάθε κύκλου κυμαίνεται από 15 μέχρι 50 sec.

Η TCM μπορεί να αφαιρέσει τα ρινίσματα ή το "flash" από μια ποικιλία υλικών, αλλά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε υλικά που έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Μπορεί να πραγματοποιηθεί απογρέζωση θερμοσκληρυνόμενων συνθετικών υλικών, αλλά όχι θερμοπλαστικών υλικών. Εξαρτήματα μέσου μεγέθους που απαιτούν απογρέζωση με το χέρι ή απομάκρυνση του "flash" είναι δυνατόν να κατεργαστούν με αυτή τη μέθοδο. Ακόμη με τη TCM μπορεί να επιτευχθεί απογρέζωση τυφλών, εσωτερικών και διατεμνόμενων οπών σε δυσπρόσιτες θέσεις. Τα εξαρτήματα του εξαεριωτή (καρμπυρατέρ) μπορούν να κατεργαστούν σε αυτόματο εξοπλισμό TCM. Το μέγιστο πάχος του ρινίσματος πρέπει να είναι περίπου το 1/15 του πάχους της λεπτότερης διατομής του κατεργαζόμενου κομματιού. Ένα εξαιρετικό πλεονέκτημα της TCM είναι η ομοιομορφία των αποτελεσμάτων και η μεγαλύτερη διασφάλιση της ποιότητας των τεμαχίων μετά τη κατεργασία σε σχέση με την απογρέζωση με το χέρι.

Κεφάλαιο έβδομο

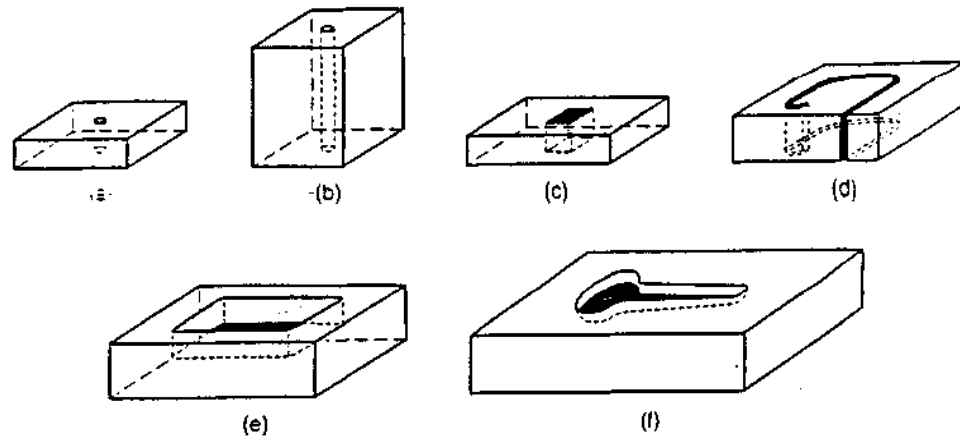
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τυπικές εφαρμογές των μη συμβατικών μεθόδων κατεργασίας (NTM) περιλαμβάνουν ειδικά τεμάχια με χαρακτηριστικές γεωμετρίες και υλικά εξαρτημάτων τα οποία δεν μπορούν να κατεργαστούν εύκολα με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας. Στο κείμενο που ακολουθεί παρατίθεται μια σύνοψη των στοιχείων όσον αφορά τις γενικές εφαρμογές και τις χαρακτηριστικές αποδόσεις των NTM.

Χαρακτηριστικά γεωμετρίας των κατεργαζόμενων τεμαχίων. Μερικά από τα εξειδικευμένα σχήματα των κατεργαζόμενων τεμαχίων για τα οποία οι NTM χρησιμοποιούνται σχεδόν ως αποκλειστικές μέθοδοι παραγωγής περιλαμβάνουν τα ακόλουθα (βλέπε επίσης σχήμα 25.α):

- **Πολύ μικρές οπές κάτω από 0,125 mm σε διάμετρο.** Αυτές οι οπές είναι γενικά μικρότερες από τη διάμετρο που μπορεί να επιτευχθεί με τη συμβατική διάτρηση των τεμαχίων. Η LBM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάτρηση οπών με διάμετρο κάτω των 0,025 mm.
- **Οπές με υψηλή αναλογία βάθους προς διάμετρο** (για παράδειγμα, $I/D > 20$). Εκτός από τη διάτρηση της κάνης των όπλων, αυτές οι οπές δεν είναι δυνατό να κατεργαστούν με τις συμβατικές μεθόδους διάτρησης. Η ECM και η EDM χρησιμοποιούνται επιτυχώς σε αυτές τις εφαρμογές.
- **Οπές οι οποίες δεν είναι κυκλικές και επομένως δεν μπορούν να διατρηθούν με ένα απλό περιστρεφόμενο τρυπάνι.** Οι μέθοδοι EDM και ECM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτές τις εφαρμογές επειδή τα εργαλεία τους δεν περιστρέφονται.

- *Κοπή στενών εγκοπών σε πλάκες και ελάσματα διαφόρων υλικών, όπου οι εγκοπές δεν είναι απαραίτητες. Οι μέθοδοι EBM, LBM, EDWC, WJM και AJM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλές εφαρμογές σ' αυτή τη κατηγορία. Μερικές από αυτές τις μεθόδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη κοπή εξαιρετικά περίπλοκων σχημάτων.*



Σχήμα 25.α. Ειδικά σχήματα για τα οποία οι μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας είναι κατάλληλες:

- α) Οπές πολύ μικρής διαμέτρου, β) Οπές με υψηλή αναλογία βάθους προς διάμετρο, γ) Μη κυκλικές οπές, δ) Στενές, μη ευθείες εγκοπές, ε) Κοιλότητες και ς) μήτρες.

- **Μικροκατεργασία.** Επιπρόσθετα στη κοπή μικρών οπών και στενών σχισμών, υπάρχουν και άλλες εφαρμογές αφαίρεσης υλικού για τις οποίες το κατεργαζόμενο τεμάχιο ή/και οι περιοχές που πρόκειται να κοπούν είναι πολύ μικρές. Ορισμένες NTM όπως είναι η PCM, η LBM και η EBM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτές τις εφαρμογές μικροκατεργασίας.

- **Κοιλότητες μικρού βάθους και επιφανειακές λεπτομέρειες σε επίπεδα τεμάχια.**

Υπάρχει ένα σημαντικό πεδίο μεγέθους των εξαρτημάτων σ' αυτή τη κατηγορία, από μικροσκοπικά πλακίδια ολοκληρωμένου κυκλώματος μέχρι μεγάλα πλαίσια αεροσκαφών. Η CM και οι παραλλαγές της χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αυτής της κατεργασίας.

- **Δημιουργία ειδικών σχημάτων περιγράμματος για εφαρμογές μήτρων και**

καλουπιών. Αυτές οι εφαρμογές αναφέρονται μερικές φορές σαν εμβύθισημήτρας. Οι μέθοδοι EDM και ECM επιλέγονται κατά προτεραιότητα για αυτές τις καταστάσεις.

Υλικά κατεργασίας. Σαν ομάδα, οι NTM μπορούν να εφαρμοστούν σχεδόν σε όλα τα υλικά, και στα μέταλλα και στα αμέταλλα. Ωστόσο, μερικές μέθοδοι δεν είναι κατάλληλες για ορισμένα κατεργαζόμενα υλικά. Ο πίνακας 25.1 συσχετίζει την εφαρμοσιμότητα των μη συμβατικών μεθόδων κατεργασίας με διάφορους τύπους υλικών.

Μερικές από τις μεθόδους εφαρμόζονται σε μέταλλα αλλά όχι σε αμέταλλα. Για παράδειγμα, η ECM, η EDM και η PAC απαιτούν υλικό τεμαχίων που να είναι ηλεκτρικά αγωγίμο. Αυτό γενικά περιορίζει την εφαρμοσιμότητα τους σε μεταλλικά τεμάχια. Η CM εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα του κατάλληλου υγρού εγχάραξης για το δεδομένο υλικό κατεργασίας. Επειδή τα μέταλλα είναι περισσότερο επιδεκτικά σε χημική προσβολή από διάφορα υγρά εγχάραξης, η CM συνήθως χρησιμοποιείται για τη κατεργασία μετάλλων.

Με μερικές εξαιρέσεις η USM, η AJM, η EBM και η LBM μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε μέταλλα όσο και σε αμέταλλα. Η WJM γενικά περιορίζεται στη κοπή πλαστικών, χαρτονιών, υφασμάτων και άλλων υλικών που δεν έχουν την αντίστοιχη αντοχή των μετάλλων.

Απόδοση των μη συμβατικών μεθόδων κατεργασίας. Οι NTM χαρακτηρίζονται γενικά από χαμηλούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού και ιδιαίτερα υψηλές ειδικές ενέργειες σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους. Οι δυνατότητες των NTM όσον αφορά το διαστασιακό έλεγχο και τη τραχύτητα επιφανείας ποικίλλουν ευρύτατα, με ορισμένες από τις μεθόδους να παρέχουν υψηλές ακρίβειες και καλές τραχύτητες επιφανείας και άλλες να αποδίδουν χαμηλές ακρίβειες και φτωχή τραχύτητα επιφανείας. Η ζημία που υφίστανται η επιφάνεια είναι επίσης ένα θέμα προς μελέτη. Ιδιαίτερα όσον αφορά την αντοχή του κατεργαζόμενου εξαρτήματος σε κόπωση. Μερικές από αυτές τις μεθόδους επιφέρουν πολύ μικρή μεταλλουργική ζημία πάνω και αμέσως κάτω από τη κατεργασμένη

επιφάνεια, ενώ άλλες (κυρίως οι θερμικές μέθοδοι) επιφέρουν αξιοσημείωτη ζημία στην επιφάνεια. Ο πίνακας 25.2 συγκρίνει αυτά τα χαρακτηριστικά των σημαντικότερων μη συμβατικών μεθόδων, χρησιμοποιώντας το συμβατικό φρεζάρισμα και τη λείανση επιφανείας για σύγκριση. Ακόμη στο πίνακα 25.3 γίνεται σύγκριση της συμβατικής τόννευσης με τις σημαντικότερες NTM. Η μελέτη των στοιχείων των πινάκων αποκαλύπτει μεγάλες διαφορές στα χαρακτηριστικά κατεργασίας. Επιπρόσθετα, στο τέλος της εργασίας παρατείνονται 4 ακόμη πίνακες με τα χαρακτηριστικά κατεργασίας των NTM σε κάθε κατηγορία.

Κατά τη σύγκριση των χαρακτηριστικών των μη συμβατικών και των συμβατικών μεθόδων κατεργασίας, πρέπει να τονιστεί ότι οι μη συμβατικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται γενικά όταν οι συμβατικές μέθοδοι δεν είναι πρακτικές ή οικονομικές. βιομηχανία, οι νεότερες μέθοδοι εξασφαλίζουν όλο και περισσότερο ένα αυξανόμενο σημαντικό ρόλο λόγω της σταθερής βελτίωσης των δυνατοτήτων που έχουν και λόγω των ευεργετικών αποτελεσμάτων από τον έλεγχο με H/Y, προσαρμοστικό έλεγχο και εκπαίδευση. Συγκρινόμενες με τις συμβατικές μεθόδους, οι NTM έχουν σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες, με μια εξαίρεση: τον κ.ο. ρυθμό αφαίρεσης υλικού (Volumetric MRR). Σήμερα οι συμβατικές μέθοδοι υπερτερούν όσον αφορά το ρυθμό αφαίρεσης υλικού σε μαζική παραγωγή. Ωστόσο, πολλές βελτιώσεις έχουν γίνει στις NTM ως προς το ρυθμό αφαίρεσης υλικού και υπάρχει κάθε λόγος να θεωρηθεί ότι αυτή η τάση θα συνεχιστεί. Αυτό θα προάγει την ανταγωνιστικότητα των NTM και θα αυξήσει το πεδίο εφαρμογών αυτών.

Οι περισσότερες NTM ελέγχονται με H/Y όσον αφορά τις παραμέτρους κατεργασίας. Η χρήση H/Y απλοποιεί και επιταχύνει την αποδοχή των μεθόδων μακροπρόθεσμα, ενώ σε άλλη περίπτωση ο ταυτόχρονος έλεγχος ενός πλήθους παραμέτρων θα προβλημάτιζε τους ενδυνάμει χρήστες. Επιπρόσθετα, η χρήση H/Y για τον έλεγχο των παραμέτρων των NTM διασφαλίζει αξιοπιστία και επαναληψιμότητα επιταχύνοντας μ'αυτό το τρόπο τη περαιτέρω αποδοχή και εφαρμοσιμότητα των μεθόδων.

Η χρήση H/Y σε συνεργασία με τη δυνατότητα προσαρμοστικού ελέγχου (adaptive control) παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης, καταγραφής, απόκρισης και διόρθωσης ανεπιθύμητων καταστάσεων αυτομάτως, διασφαλίζοντας την αυξανόμενη συμμετοχή των NTM σε μια επηνδρωμένη κυψέλη παραγωγής και σε αυτοματοποιημένες παραγωγικές μονάδες.

Κάθε χρόνο όλο και μεγαλύτερη προσοχή δίδεται προς τις NTM, όπως αποδεικνύεται από τον αυξανόμενο ρυθμό των τεχνικών εγγράφων, συμποσίων, οργάνωση σεμιναρίων, βιβλίων και δημοσιεύσεων που γίνονται πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Αυτές οι δραστηριότητες όχι μόνο εκπαιδεύουν το ανθρώπινο δυναμικό στο τομέα της παραγωγής, της μελέτης και ανάπτυξης για τις μοναδικές δυνατότητες αυτών των μεθόδων, αλλά επίσης εξασφαλίζουν ένα επιτυχημένο μέλλον για τις NTM.

Το μέλλον των μη συμβατικών μεθόδων κατεργασίας χωρίς καμιά αμφιβολία χαρακτηρίζεται από σταθερή ανάπτυξη. Αν και οι μη συμβατικές μέθοδοι πιθανόν δε θα αντικαταστήσουν ποτέ τα συμβατικά εργαλεία που σήμερα χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία, οι νεότερες μέθοδοι εξασφαλίζουν όλο και περισσότερο ένα αυξανόμενο σημαντικό ρόλο λόγω της σταθερής βελτίωσης των δυνατοτήτων που έχουν και λόγω των ευεργετικών αποτελεσμάτων από τον έλεγχο με H/Y, προσαρμοστικό έλεγχο και εκπαίδευση. Συγκρινόμενες με τις συμβατικές μεθόδους, οι NTM έχουν σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες, με μια εξαίρεση: τον κ.ο. ρυθμό αφαίρεσης υλικού (Volumetric MRR). Σήμερα οι συμβατικές μέθοδοι υπερτερούν όσον αφορά το ρυθμό αφαίρεσης υλικού σε μαζική παραγωγή. Ωστόσο, πολλές βελτιώσεις έχουν γίνει στις NTM ως προς το ρυθμό αφαίρεσης υλικού και υπάρχει κάθε λόγος να θεωρηθεί ότι αυτή η τάση θα συνεχιστεί. Αυτό θα προάγει την ανταγωνιστικότητα των NTM και θα αυξήσει το πεδίο εφαρμογών αυτών.

Οι περισσότερες NTM ελέγχονται με H/Y όσον αφορά τις παραμέτρους κατεργασίας. Η χρήση H/Y απλοποιεί και επιταχύνει την αποδοχή των μεθόδων μακροπρόθεσμα, ενώ σε άλλη περίπτωση ο ταυτόχρονος έλεγχος ενός πλήθους παραμέτρων θα προβλημάτιζε τους εν'δυνάμει χρήστες. Επιπρόσθετα, η χρήση H/Y για τον έλεγχο των παραμέτρων των NTM διασφαλίζει αξιοπιστία και επαναληψιμότητα επιταχύνοντας μ'αυτό το τρόπο τη περαιτέρω αποδοχή και εφαρμοσιμότητα των μεθόδων.

Η χρήση H/Y σε συνεργασία με τη δυνατότητα προσαρμοστικού ελέγχου (adaptive control) παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης, καταγραφής, απόκρισης και διόρθωσης ανεπιθύμητων καταστάσεων αυτομάτως, διασφαλίζοντας την αυξανόμενη συμμετοχή των NTM σε μια επηνδρωμένη κυψέλη παραγωγής και σε αυτοματοποιημένες παραγωγικές μονάδες.

Κάθε χρόνο όλο και μεγαλύτερη προσοχή δίδεται προς τις ΝΤΜ, όπως αποδεικνύεται από τον αυξανόμενο ρυθμό των τεχνικών εγγράφων, συμποσίων, οργάνωση σεμιναρίων, βιβλίων και δημοσιεύσεων που γίνονται πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Αυτές οι δραστηριότητες όχι μόνο εκπαιδεύουν το ανθρώπινο δυναμικό στο τομέα της παραγωγής, της μελέτης και ανάπτυξης για τις μοναδικές δυνατότητες αυτών των μεθόδων, αλλά επίσης εξασφαλίζουν ένα επιτυχημένο μέλλον για τις ΝΤΜ.

Πίνακας 25.2. Χαρακτηριστικά καταργασίας των μη συμβατικών μεθόδων καταργασίας.

Χαρακτηριστικό καταργασίας	Μη συμβατικές μέθοδοι καταργασίας						Συμβατικές μέθοδοι				
	Μηχανικές μέθοδοι	Ηλεκτροχημικές μέθοδοι	Θερμικές μέθοδοι	Χημικές μέθοδοι	Φρεζάρισμα	Λείανση					
Ρυθμός αφαίρεσης υλικού	USM	WJM	ECM	EDM	EBM	LBM	PBM	CM	B-D (1)	A	B
Διαστασιακός έλεγχος	A	B	B	A-D (2)	A	A	D	A-B (2)	B	B	A
Τραχύτητα επιφανείας	A	A	B	B-D (2)	B	B	D	B	B-C (2)	B-C (2)	A
Ζημία που υφίστανται η επιφάνεια (3)	B	B	A	D	D	D	D	A	B	B	B-C (2)

Κλίμακα για τη κατανόηση του πίνακα:

A: Έξοχα. B: Καλά. C: Μέτρια. D: Φτωχά.

Πίνακας 25.3. Σύγκριση της συμβατικής τόνρευσης με τις σημαντικότερες ΝΤΜ.

Μέθοδος καταργασίας	Τάση	Ένταση	Απαιτούμενη ισχύς	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού	Μέση απαιτ. ισχύς	Ρυθμός πρόωσης	Ανοχή	Τραχύτ. επιφ.
	Volts	Amp						
Συμβατική Τόνρευση	220/440	30/15	6,6	5900	0,001	76	± 0,05	1520-7620
Ηλεκτροχημική καταργασία (ECM).	12-45	10	100 - 150	820 - 1310	0,1	0,25 - 5	± 0,05	125-5080
Καταργασία με ηλεκτρική εκκένωση (EDM).	50	60	3	9,8 - 115 για ξεχόνδρωση 0,3 - 3 για αποτέριση	0,02 - 1,2	0,1 - 0,8	± 0,07-0,02	250-7620
Καταργασία με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM).	150	0,001	0,15	0,03 - 0,09	2,3	15	± 0,02	5080-2540
Καταργασία με δέσμη λέιζερ (LBM).	4500	0,001	0,0045	0,007	0,7	0,025	± 0,02	510-1270

ΟΜΑΔΑ Β

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Μέθοδος κατεργασίας	Υποχρητικότητα επιφανείας (μm)	Ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου	Ακαθάρσια κατεργασίας	Εφαρμογές
6) Κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση (EDM).	0,05 μέχρι 0,1 mm	Εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος, τη συχνότητα εκκένωσης, το υλικό του τεμαχίου κ.λ.π.	Υψηλή	Χρησιμοποιείται για τη κατεργασία αγώγιμων υλικών.
7) Κατεργασία ηλεκτρικής εκκένωσης με σύρμα (EDWC).	Εξαρτάται από το υλικό του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου κομματιού.	Εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού του τεμαχίου, το σημείο τήξεως του κ.λ.π.	Υψηλή	Χρησιμοποιείται για τη κοπή σχημάτων και περιγραμμάτων.
8) Λείανση με ηλεκτρική εκκένωση (EDG).	Εξαρτάται από το πυθμό αφαίρεσης μετάλλου.	Εξαρτάται από τις ρυθμίσεις στη συχνότητα και τη χωρητικότητα του ρεύματος.	Υψηλή	Χρησιμοποιείται στη διάμρφωση και στη λείανση διαφόρων υλικών.
9) Κατεργασία με όξινη ηλεκτρονίων (EBM).	Εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού.	Εξαρτάται από τον όγκο της στήλης και τη γεωμετρία του τεμαχίου.	± 0,1 mm για τη θέση των οπών και ±0,03 mm για τη διάμετρο.	Χρησιμοποιείται για κοπή και στη διάτρηση μεταλλικών υλικών.
10) Κατεργασία με όξινη λέιζερ (LBM).	-	Εξαρτάται από το τύπο λέιζερ και από το υλικό του τεμαχίου.	Υψηλή	Χρησιμοποιείται για τη κοπή, διάτρηση και συγκόλληση διαφόρων υλικών.
11) Κατεργασία με όξινη πλάσματος (PBM).	-	-	-	Χρησιμοποιείται στη κοπή, συγκόλληση και στη κατεργασία τεμαχίων.
12) Μέθοδος θερμικής ενόρυξης (TEM).	-	-	-	Χρησιμοποιείται για από-υπέκδοση τεμαχίων.

ΟΜΑΔΑ Γ

ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Μέθοδος κατεργασίας	Τραχύτητα επιφανείας (μm)	Ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου	Ακρίβεια κατεργασίας	Εφαρμογές
13) Ηλεκτροχημική κατεργασία (ECM).	0,30 μέχρι 1,9 μm	Εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού.	± 0,13 για 10 μετωπικό διάκενο και ± 0,25 για 10 πλευρικό διάκενο.	Χρησιμοποιείται στη κατεργασία και στην απογέζωση διαφόρων εξαρτημάτων.
14) Ηλεκτροχημική λείανση (ECG).	10 μέχρι 40 μm και εξαρτάται από το υλικό του τεμαχίου.	0,18 αμ/μίν για κάθε 100 Α ρεύματος.	Εξαρτάται από το υλικό του τεμαχίου.	Χρησιμοποιείται για τη λείανση διαφόρων τεμαχίων.
15) Ηλεκτροχημική λείανση με εκτένωση (ECDG).	Εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού.	Εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού.	± 0,0125 mm	Χρησιμοποιείται για τη λείανση σκληρών υλικών.
16) Διείληψη με ροή ηλεκτρικού ρεύματος (ES) και τριχοειδής διείληψη (CD).	Πολύ καλή	Εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού.	Εξαρτάται από τη διάμετρο της οπής.	Χρησιμοποιείται για τη διείληψη οπών σε διάφορα υλικά.
17) Ηλεκτρολυτική κατεργασία με διαμορφωμένο σωλήνα (STEM).	Πολύ καλή	Εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού.	Εξαρτάται από τη διάμετρο της οπής όπου κατεργαζόμαστε.	Χρησιμοποιείται για τη διείληψη οπών σε διάφορα υλικά.

ΟΜΑΔΑ Δ

ΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Μέθοδος κατεργασίας	Τραχύτητα επιφανείας (μm)	Ρυθμός αφαιρέσης μετάλλου	Ακρίβεια κατεργασίας	Εφαρμογές
18) Χημικό φρέζαρισμα (CM)	Εξαρτάται από τη κρυσταλλική δομή του υλικού.	Εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού.	± 0,025 έως ± 0,05	Χρησιμοποιείται για τη κατεργασία μετάλλων στην αεροδιαστημική.
19) Φωτοχημική κατεργασία (PCM).	Εξαρτάται από τη λεπτότητα της κρυσταλλικής δομής του τριμαχίου.	0,01 μέχρι 0,05 mm/min	± 2% έως ± 10% του πάχους του τριμαχίου.	Χρησιμοποιείται για τη κατεργασία τριμαχίων αεττού πάχους (έλασμα).
20) Θερμοχημική κατεργασία (TCM).	-	-	-	Χρησιμοποιείται για την απογρέωση τριμαχίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μηχανουργική τεχνολογία εργαστήριο II , Τευχος β' , Ελευθέριου Δ. Παπαδανιήλ και Μιχαήλ Μ. Σφαντζικόπουλου, Ιδρυμα Ευγενίδου , Αθήνα 1994.
2. Μηχανές αριθμητικού ελέγχου CNC (Τεχνολογία και προγραμματισμός) Steve Krar και Arthur Gill, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε. , Θεσσαλονίκη, 1993.
3. Materials and processes in manufacturing, Seventh edition, E. Paul De Garmo, J. Temple Black Kai Ronald A. Kohser, Macmillan publishing company, New York 1990.
4. Fundamentals of modern manufacturing, Mikell P. Groover, Prentice - Hall, USA 1996.
5. Jet cutting technology, 9th International Symposium on jet cutting technology, BHRA, Japan 4 - 6 October 1988.
6. Metals Handbook, Ninth edition, Volume 16 Machining. .
7. Modern manufacturing process engineering, Benjamin W. Niebel, Alan B. Draper Kai Richard A. Wysk, McGraw -Hill international editions, Singapore 1989.
8. Manufacturing processes for engineering materials, second edition, Sepore Kalpakjian, Addison - Wesley publishing company, USA 1991.

9. Computer Numerical Control, Hans B. Kief Kai Frederic T. Waters, McGraw –Hill international publishing company, USA 1992.
10. Technology of machine tools, Steve F. Krar Kai J. William Oswald, library of congress cataloging in publication data, USA 1990.
11. Introduction to engineering materials, 3rd edition, Vernon John, Mac Millan press LTD, England 1992.
12. Περιοδικό Εργαλειομηχανές (διμηνιαίο περιοδικό μηχανολογικών κατασκευών), Τευχος 2 ,εκδόσεις Σταύρου Μουσιάδη.