

Ευχαριστίες

Με αφορμή το τέλος αυτής της προσπάθειας θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Δ.Ε. Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την καθοριστική συμβολή του, τις χρήσιμες υποδείξεις και παρατηρήσεις του, οι οποίες βοήθησαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Κατρακάζα Σεβίνα,

Αθήνα, Μάρτιος 2009.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός ενός εργαλείου ηλεκτροχημικής κοπής που χρησιμοποιείται για την απόδοση τυχαίας πολύπλοκης γεωμετρικά τρισδιάστατης μορφής και η ανάπτυξη γενικευμένου θεωρητικού μοντέλου, ικανού να εφαρμόζεται στη μελέτη οποιουδήποτε συναφούς προβλήματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας και δίνεται μια περίληψη. Ακόμη αναπτύσσονται οι λόγοι και τα προβλήματα για τα οποία είναι αναγκαία η διενέργεια της παρούσας διπλωματικής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, περιγράφεται γενικά η ηλεκτροχημική κοπή σαν κατεργασία. Γίνεται περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών της, των εφαρμογών της κατεργασίας και του εξοπλισμού που απαιτείται. Ακολουθεί σύντομη αναφορά στα οικονομικά στοιχεία της κατεργασίας, στην ασφάλεια της κατεργασίας και στη διάθεση των αποβλήτων που παράγονται. Τέλος συνοψίζονται τα βασικά πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κατεργασίας για να είναι δυνατή ταχύτατη σύγκριση της κατεργασίας με κάποια άλλη.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μελέτη των μαθηματικών φαινομένων που αναπτύσσονται κατά την εκτέλεση της κατεργασίας. Περιγράφονται οι νόμοι στους οποίους βασίζεται η έννοια της ηλεκτρόλυσης, ορίζονται τα μεγέθη που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και αναφέρονται οι βασικές αρχές της ηλεκτροχημικής κοπής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, αναπτύσσεται αναλυτικά η ‘ιδανική’ ηλεκτροχημική κοπή και περιγράφονται κάποιες εφαρμογές της. Επίσης, γίνεται μία πρώτη προσπάθεια σχεδιασμού του απλού εργαλείου ηλεκτροχημικής κοπής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναπτύσσεται εξίσου αναλυτικά η ‘μη ιδανική’ κατεργασία ηλεκτροχημικής κοπής και η προσπάθεια σχεδιασμού του εργαλείου υπό αυτές τις συνθήκες. Ακολουθεί περιγραφή του προβλήματος της προσομοίωσης του μοντέλου της κατεργασίας και του τρόπου κατασκευής του λογισμικού με το οποίο επιτυγχάνεται ο σχεδιασμός σύνθετου εργαλείου ηλεκτροχημικής κοπής. Τέλος, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που εμφανίζει το λογισμικό αυτό καθώς και η χρηστικότητα του προγράμματος.

Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται μία σύντομη αναφορά στην παρούσα κατάσταση της ηλεκτροχημικής κοπής, στην τροποποίηση της κατεργασίας για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων και στη μελλοντική εξέλιξή της.

Στο έβδομο κεφάλαιο, αναφέρονται συνοπτικά τα συμπεράσματα και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο όγδοο κεφάλαιο, υπάρχει ένα σύντομο παράρτημα με εικόνες από εφαρμογές της κατεργασίας και άλλα χρήσιμα χαρακτηριστικά της.

Τέλος, στο ένατο κεφάλαιο αναφέρεται το σύνολο της βιβλιογραφίας που μελετήθηκε για τη συγγραφή της εργασίας.

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε μπορεί να εφαρμοσθεί με μικρές αλλαγές για το σχεδιασμό κάθε εργαλείου ηλεκτροχημικής κοπής ή για την πρόβλεψη του τεμαχίου που θα παραχθεί με τη χρήση συγκεκριμένου σύνθετου εργαλείου ηλεκτροχημικής κοπής.

Λέξεις Κλειδιά

Ηλεκτροχημική κοπή, ECM, Σχεδιασμός εργαλείου

Abstract

The aim of this thesis is the design of the Electrochemical Machining (ECM) tool applied in the case of shaping complicated 3-dimensional surfaces and the development of generalized theoretical model, capable to be applied in the analysis of any relevant ECM problem.

In the first chapter the introduction of the thesis is presented and a summary is given. Moreover, the reasons and the problems that made necessary the development of this present work are described.

In the second chapter of this project, electrochemical machining is described in general. There is a description of the basic characteristics, of the applications and the equipment required for this process. Then, there is a short report about the economic elements of the process, about the safety of the process and the disposal of waste that is produced. Finally, the basic advantages and disadvantages of the process are summarised in order to make it possible for the ECM process to be compared with an other.

In the third chapter, there is a study of the mathematic phenomena that are developed during the process. The basic laws and the parameters of the ECM are presented.

In the fourth chapter of this project, the ‘ideal’ ECM process is described, as well as some of its applications. Also, the first effort of designing a simple tool for ECM is made.

In the fifth chapter, not only the ‘non-ideal’ ECM process is developed but also the effort of designing a complex tool under these conditions. Furthermore, there is a description of the computer simulation problem of the process as well as the method of manufacturing the software with which the designing of a complex tool is achieved. Finally, the results are exposed and discussed

In the sixth chapter, there is a short report on the present situation and future development of the ECM process.

In the seventh chapter, the conclusions are commented.

In the eighth chapter, there is a short annex with pictures from applications of the process.

Finally, in the ninth chapter the sources of the bibliography that were studied for the writing of the present project are mentioned.

The software that was developed can be applied with small changes for the designing of any tool of electrochemical machining or for the prediction of the surface of the work piece that will be produced with the use of the specific tool.

Key Words

Electrochemical machining, ECM, complex tool design

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
2	ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ECM.....	18
2.1	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	18
2.2	Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ	19
2.3	ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ	21
2.4	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ	22
2.5	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	27
2.5.1	<i>Τυπική εγκατάσταση ηλεκτροχημικής κοπής</i>	<i>27</i>
2.5.2	<i>Εργαλειομηχανή ηλεκτροχημικής κοπής.....</i>	<i>28</i>
2.5.3	<i>Σύστημα παροχής ισχύος στην ηλεκτροχημική κοπή</i>	<i>30</i>
2.5.4	<i>Συστήματα ελέγχου/ρύθμισης της ηλεκτροχημικής κοπής.....</i>	<i>31</i>
2.5.5	<i>Ηλεκτρολύτες.....</i>	<i>33</i>
2.6	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ.....	35
2.6.1	<i>Γενικά</i>	<i>35</i>
2.6.2	<i>Σύγκριση της ηλεκτροχημικής κοπής με άλλες κατεργασίες.....</i>	<i>36</i>
2.7	ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΚΟΠΗ.....	38
2.7.1	<i>Ασφάλεια κατά την εφαρμογή της κατεργασίας</i>	<i>38</i>
2.7.2	<i>Διάθεση των αποβλήτων που παράγονται εξαιτίας της κατεργασίας.....</i>	<i>39</i>
2.8	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	40
3	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ECM.....	42
3.1	Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ	42
3.2	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΔΙΑΚΕΝΟ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	43
3.2.1	<i>Γενικά</i>	<i>43</i>
3.2.2	<i>Μελέτη της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.....</i>	<i>43</i>
3.2.3	<i>Κατανομή της πυκνότητας ρεύματος</i>	<i>44</i>
3.2.4	<i>Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.....</i>	<i>45</i>
3.2.5	<i>Απλούστευση του μοντέλου κατανομής της πυκνότητας ρεύματος ...</i>	<i>45</i>

3.2.6	Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στον ηλεκτρολύτη	46
3.2.7	Υπολογισμός του καθοδικού και ανοδικού δυναμικού.....	47
3.2.8	Η επίδραση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην κατεργασία.....	49
3.2.9	Η επίδραση της παραγωγής θερμότητας στην ηλεκτροχημική κοπή.....	49
3.2.10	Υπολογισμός της αγωγιμότητας υπό την έκλυση φυσαλίδων.....	50
3.3	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ	51
3.3.1	Ορισμός της απόδοσης του ρεύματος	51
3.3.2	Υπολογισμός της μάζας του αφαιρούμενου υλικού	52
3.3.3	Υπολογισμός του ηλεκτροχημικού ισοδύναμου του υλικού του τεμαχίου.....	53
3.3.4	Ορισμός του συντελεστή ηλεκτροχημικής κατεργασιμότητας.....	53
3.3.5	Υπολογισμός του ρυθμού αποβολής υλικού	57
3.3.6	Ορισμός της ανηγμένης κατανάλωσης ενέργειας.....	57
3.3.7	Αλληλεξάρτηση των βασικών παραμέτρων ηλεκτροχημικής κοπής.....	58
3.3.8	Εύρεση της γενικής εξίσωσης ηλεκτροχημικής διαμόρφωσης.....	59
4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΑΠΛΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ –	
	ΙΔΑΝΙΚΗ ‘ECM’	62
4.1	Η «ΙΔΑΝΙΚΗ» ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ.....	62
4.1.1	Περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου ηλεκτροχημικής κοπής	62
4.1.2	Μετατροπή της εξίσωσης ηλεκτροχημικής διαμόρφωσης για ιδανική κατεργασία.....	62
4.2	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΙΔΑΝΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ.....	64
4.2.1	Μονοδιάστατη ηλεκτροχημική κοπή με παράλληλα επίπεδα ηλεκτρόδια.....	64
4.2.2	Ηλεκτροχημική κοπή με σταθερό εργαλείο-ηλεκτρόδιο	65
4.2.3	Ηλεκτροχημική κοπή με σταθερή πρόωση εργαλείου-ηλεκτροδίου.....	67
4.2.4	Εισαγωγή αδιάστατων συντεταγμένων στη μελέτη του διακένου	69
4.2.5	Οι καταστάσεις της ηλεκτροχημικής κατεργασίας με σταθερή πρόωση εργαλείου	70
4.2.6	Ηλεκτροχημική κοπή με σταθερή πρόωση εργαλείου με κεκλιμένη επιφάνεια.....	72
4.3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	74
4.3.1	Γενικά	74

4.3.2	Διαδικασία σχεδίασης του εργαλείου.....	75
5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ – ‘ΜΗ ΙΔΑΝΙΚΗ’ ECM	78
5.1	Η ‘ΜΗ ΙΔΑΝΙΚΗ’ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ.....	78
5.1.1	Γενικά	78
5.1.2	Η ‘μη ιδανική’ ηλεκτροχημική κοπή με εργαλείο επίπεδου και παράλληλου άκρου.....	79
5.2	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	81
5.2.1	Σχηματική παρουσίαση του προβλήματος	81
5.2.2	Το πρόβλημα προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής	83
5.2.3	Παραδοχές που διέπουν το μαθηματικό μοντέλο ηλεκτροχημικής κοπής	84
5.2.4	Κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής	85
5.2.5	Κατασκευή μη γραμμικού μοντέλου προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής στον υπολογιστή	88
5.3	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ	94
5.3.1	Εφαρμογή στο σχεδιασμό κυλινδρικού εργαλείου με γνωστό το σχήμα της επιφάνειας του τεμαχίου	94
5.3.2	Εφαρμογή στην πρόβλεψη της επιφάνειας του τεμαχίου με κυλινδρικό εργαλείο.....	95
5.3.3	Εφαρμογή στην πρόβλεψη της επιφάνειας του τεμαχίου με εργαλείο-ηλεκτρόδιο σφαιρικού άκρου	96
5.3.4	Επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στο τελικό σχήμα του τεμαχίου	97
6	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ.....	105
7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	107
8	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	109
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	116

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση του κόστους εργασίας κατεργασιών	36
Πίνακας 2: Τιμές του δείκτη κατεργασιμότητας για καθαρά μέταλλα.....	56
Πίνακας 3: Τιμές του δείκτη κατεργασιμότητας για κράματα μετάλλων	57
Πίνακας 4: Τυπικές τιμές των παραμέτρων και συνθηκών της ECM	115

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ηλεκτροχημικών αντιδράσεων κατά τη διάρκεια ECM σιδήρου με ηλεκτρολύτη χλωριούχου νατρίου (NaCl).....	42
Διάγραμμα 2: Ανοδικές καμπύλες πόλωσης του Ni για διάφορες ταχύτητες ροής του ηλεκτρολύτη.....	48
Διάγραμμα 3: (α) Μεταβολή του συντελεστή κατεργασιμότητας (αριστερά) και (β) της ταχύτητας διάλυσης (δεξιά) συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος για ηλεκτρολύτες NaCl και NaNO ₃	58
Διάγραμμα 4: Επίδραση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας ροής του ηλεκτρολύτη στο συντελεστή κατεργασιμότητας K _v	59
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα για τη μαθηματική μοντελοποίηση ECM	63
Διάγραμμα 6: Επίδραση της ηλεκτροχημικής κοπής με σταθερό εργαλείο στην τραχύτητα.....	66
Διάγραμμα 7: Ηλεκτροχημική κοπή με παράλληλα επίπεδα ηλεκτρόδια και σταθερή πρόωση εργαλείου	67
Διάγραμμα 8: Μεταβολή της θέσης της ανόδου κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής κοπής με σταθερή πρόωση του εργαλείου.....	68
Διάγραμμα 9: Μεταβολή του διακένου σε αδιάστατες συντεταγμένες.....	70
Διάγραμμα 10: Προσομοίωση της ηλεκτροχημικής κατεργασίας λείανσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.....	71
Διάγραμμα 11: Μεταβολή του διακένου κατεργασίας S και της μέσης τραχύτητας Ra συναρτήσει του χρόνου.....	72
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα διασύνδεσης σχέσεων στη διαδικασία της ηλεκτροχημικής κοπής.....	82
Διάγραμμα 13: Αλγόριθμος μοντέλου προσομοίωσης ECM στον υπολογιστή	92
Διάγραμμα 14: Δομή του μενού του λογισμικού.....	93
Διάγραμμα 15: Προφίλ εργαλείου και πτερυγίου.....	95
Διάγραμμα 16: Περιγράμματα μορφής τεμαχίου για διάφορα βάθη εκσκαφής.....	96
Διάγραμμα 17: Τρισδιάστατο γράφημα της επιφάνειας του τεμαχίου για ECM με κυλινδρικό εργαλείο από την οθόνη του λογισμικού	97
Διάγραμμα 18: Κατανομή των μεγεθών p, w, T, β, S, i συναρτήσει της απόστασης κατά μήκος της ροής του ηλεκτρολύτη	98
Διάγραμμα 19: Πάχος διακένου για διάφορες παραμέτρους.....	99
Διάγραμμα 20: Κατανομή των αποκλίσεων των προφίλ από το προφίλ blp5 για διάφορες ταχύτητες ηλεκτρολύτη.....	99
Διάγραμμα 21: Κατανομή των αποκλίσεων των προφίλ για διάφορες ταχύτητες πρόωσης του ηλεκτροδίου	100
Διάγραμμα 22: Παράδειγμα προσομοίωσης ECM με σταθερή πρόωση εργαλείου..	101
Διάγραμμα 23: Παράδειγμα προσομοίωσης ECM με πρόσθετη ταλάντωση του εργαλείου	101
Διάγραμμα 24: Κατανομή της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη κατά πλάτος του διακένου (στρωτή ροή)	102
Διάγραμμα 25: Κατανομή της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη κατά πλάτος του διακένου (τυρβώδης ροή)	103
Διάγραμμα 26: Κατανομή της θερμοκρασίας κατά το πλάτος του διακένου σε διαφορετικές αποστάσεις από την έξοδο του διακένου	103
Διάγραμμα 27: Προφίλ της επιφάνειας τεμαχίου για διάφορες τιμές του αρχικού διακένου	104

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Βασικές αρχές ηλεκτροχημικής κοπής [45]	19
Εικόνα 2: Μηχανισμός αφαίρεσης υλικού κατά την ηλεκτροχημική κατεργασία [1].....	20
Εικόνα 3: Σχηματισμός διακένου κατά την ηλεκτροχημική κατεργασία	21
Εικόνα 4: Κατεργασία ηλεκτροχημικής βύθισης.....	23
Εικόνα 5: CNC κίνηση του εργαλείου.....	23
Εικόνα 6: Ηλεκτροχημική κοπή περιστρεφόμενου τεμαχίου	23
Εικόνα 7: Ηλεκτροχημική κοπή με περιστρεφόμενο εργαλείο [3].....	24
Εικόνα 8: Ηλεκτροχημική εξομάλυνση άκρων	24
Εικόνα 9: Ηλεκτροχημική αυλάκωση (broaching).....	25
Εικόνα 10: Ηλεκτροχημική κοπή με εργαλείο που δεν περιστρέφεται: 1 πλάκα πίεσης, 2 έμβολο, 3 εξολκέας, 4 πλάκα συγκράτησης, 5 ηλεκτρολύτης, 6 τεμάχιο, 7 πλάκα βάσης.	25
Εικόνα 11: Παραδείγματα κατεργασμένων τεμαχίων	26
Εικόνα 12: Τεμάχια εξομάλυνσης άκρων (deburring).....	26
Εικόνα 13 : Τυπική εγκατάσταση ηλεκτροχημικής κοπής	27
Εικόνα 14: Τυπική εγκατάσταση ηλεκτροχημικής κοπής	28
Εικόνα 15: Οριακές συνθήκες	47
Εικόνα 16: Σχηματική παράσταση της διαδικασίας ηλεκτροχημικής κοπής	52
Εικόνα 17: Σχηματική παράσταση ηλεκτροχημικής κοπής.....	60
Εικόνα 18: Ηλεκτροχημική κοπή με παράλληλα και επίπεδα ηλεκτρόδια	64
Εικόνα 19: Ηλεκτροχημική κοπή σε συνθήκες ισορροπίας	74
Εικόνα 20: Ασυμπτωτική μορφή του τεμαχίου ηλεκτροχημικής κοπής με χρήση κυκλικού εργαλείου	75
Εικόνα 21: Διάγραμμα για τη διαδικασία σχεδιασμού του εργαλείου	76
Εικόνα 22: Διάγραμμα για τον καθορισμό του περιγράμματος εργαλείου ηλεκτροχημικής κοπής στην κατασκευή αεροτομών	77
Εικόνα 23: Επίδραση του υδρογόνου και της θερμότητας στην κατανομή του μεγέθους του διακένου	79
Εικόνα 24: Σχηματικό διάγραμμα του μαθηματικού μοντέλου βύθισης για σύνθετα εργαλεία	84
Εικόνα 25: Σχηματική παράσταση αριθμητικά ελεγχόμενης ECM με εργαλείο- ηλεκτρόδιο σφαιρικού άκρου	91
Εικόνα 26: Διάνοιξη οπών με EMM και χρήση μάσκας πάνω σε λεπτό υπόστρωμα ανοξείδωτου χάλυβα	105
Εικόνα 27: Απομίμηση ροτόντας.....	106
Εικόνα 28: Βασική αρχή της ηλεκτροχημικής κοπής.....	109
Εικόνα 29: Μηχανισμός αφαίρεσης υλικού κατά την ηλεκτροχημική κατεργασία	109
Εικόνα 30: Παράδειγμα του εργαλείου-καθόδου (πάνω) και του τεμαχίου-ανόδου.....	110
Εικόνα 31: Τεμάχια πολύπλοκης γεωμετρίας.....	110
Εικόνα 32: Παραδείγματα ηλεκτροχημικής κοπής.....	111
Εικόνα 33: Ακροφύσιο τουρμπίνας	112
Εικόνα 34: Πτερύγιο τουρμπίνας	112
Εικόνα 35: Εργαλειομηχανή ηλεκτροχημικής κοπής	113
Εικόνα 36: Εγκατάσταση ηλεκτροχημικής κοπής	113
Εικόνα 37: Βέλτιστος έλεγχος στην ηλεκτροχημική κοπή.....	114
Εικόνα 38: Παράδειγμα τεμαχίου που έχει υποστεί EMM (ηλεκτροχημική μικροκοπή).....	114

Εικόνα 39: Φύλλο ανοξειδωτου ατσαλιού πάχους 50μm το οποίο έχει υποστεί EMM με διάλυμα 5-M NaNO_3 . Με λευκό αναπαρίστανται οι οπές μετά την κατεργασία. Η διάμετρος του ακροφυσίου είναι 200μm. 115

Πίνακας συμβόλων

I	Η ένταση του ρεύματος (σε A)
t	Ο χρόνος (σε s)
ε	Το ηλεκτροχημικό ισοδύναμο (σε g/As)
A	Το ατομικό βάρος του υλικού
z	Το σθένος του υλικού
ρ	Η πυκνότητα (σε g / cm^3)
i_a	Η πυκνότητα του ρεύματος (σε A/cm^2)
K_v	Ο δείκτης κατεργασιμότητας σε ηλεκτροχημική κοπή (σε $mm^3 / A \min$)
Q_v	Ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR
e	Η ανηγμένη κατανάλωση ρεύματος (J/mm^3)
α	Η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα z και το κάθετο στην επιφάνεια ανόδου διάνυσμα $\vec{n}_a$
$\vec{n}_a$	Το κάθετο στην επιφάνεια τη; ανόδου διάνυσμα
$\nabla F = grad F$	Η κλίση της συνάρτησης F(ανάδελτα)
$(\vec{V}_n, \nabla F)$	Το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων ∇F και $\vec{V}_n$
c	Συγκέντρωση
$\vec{N}_i$	Το διάνυσμα ροής
u_i	Η μέση ταχύτητα των ιόντων της ουσίας i
D_i	Ο συντελεστής διάχυσης για το i συστατικό
$\vec{W}$	Το διάνυσμα της ταχύτητας που καθορίζει την κίνηση του ρευστού
δ_δ	Το στρώμα διάχυσης
$div f = \nabla f$	Απόκλιση
$\nabla^2 f = \nabla \cdot \nabla f$	Λαπλασιανή
E_c	Η καθοδική τάση (σε A/cm^2)
E_a	Η ανοδική τάση (σε A/cm^2)
κ_0	Η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη στην είσοδο του διακένου (σε A/Vm)
a_T	Ο θερμικός συντελεστής ηλεκτρικής αγωγιμότητας
β	Το ποσοστό (%κ.ό.) των φυσαλίδων στο διάκενο
κ_e	Η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη χωρίς φυσαλίδες (σε A/Vm)
κ_g	Η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη με διασπορά φυσαλίδων (σε A/Vm)
$L(t)$	Η συνάρτηση που περιγράφει την κίνηση του εργαλείου
R_0	Η αρχική τραχύτητα της ανόδου
i_0	Η αρχική πυκνότητα ρεύματος(σε A/cm^2)
V_f	Η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου (σε mm/min)
$\xi = \frac{z_a}{S_f}$	Χωρική παράμετρος
$\tau = \frac{V_f t}{S_f}$	Χρονική παράμετρος

S_f	Διάκενο ισορροπίας για παράλληλες επιφάνειες εργαλείου-τεμαχίου(σε μm)
S	Διάκενο(σε μm)
S_0	Αρχικό διάκενο (σε μm)
S_n	Διάκενο ισορροπίας για μη παράλληλες επιφάνειες EP-TE (σε μm)
ε_H	Το ηλεκτροχημικό ισοδύναμο του υδρογόνου (σε g/As)
C_p	Η ειδική θερμότητα του ηλεκτρολύτη
T_A	Η θερμοκρασία ανόδου (σε K)
T_C	Η θερμοκρασία καθόδου (σε K)
τ_a	Διατμητικές τάσεις που ασκούνται πάνω στην επιφάνεια της ανόδου
τ_c	Διατμητικές τάσεις που ασκούνται πάνω στην επιφάνεια της ανόδου
η	Η απόδοση του ρεύματος (%)
$\overline{w_0}$	Η μέση ταχύτητα του ηλεκτρολύτη (σε m/s)
$w(\zeta)$	Η μέση ταχύτητα ροής σε τυχαία διατομή του διακένου (σε m/s)
$F=96500\text{C}$	Η σταθερά Faraday
R	Ακτίνα καμπυλότητας (mm)
$R(t)$	Η τραχύτητα της ανόδου μετά από χρόνο t
ρ_e	Η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη (σε g / cm^3)
U	Το δυναμικό (σε V)
κ	Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη
V_n	Η ταχύτητα διάλυσης
w_e	Η ταχύτητα εισόδου του ηλεκτρολύτη (σε m/s)

1 Εισαγωγή

Η ηλεκτροχημική κατεργασία (ECM) είναι μία σημαντική τεχνολογία κατασκευής στην κατεργασία υλικών υψηλής αντοχής και στη διαμόρφωση πολύπλοκης γεωμετρίας αναγλύφου, με υψηλό ρυθμό αποβολής υλικού, χωρίς να προκαλεί φθορά του εργαλείου και να δημιουργεί παραμένουσες τάσεις στο τεμάχιο. Ο μηχανισμός της κατεργασίας βασίζεται στους νόμους της ηλεκτρόλυσης, στην οποία το τεμάχιο είναι η άνοδος και το εργαλείο η κάθοδος.

Στην ηλεκτροχημική κοπή εφαρμόζεται χαμηλή τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων (8-30 V), όπου υπάρχει διάκενο μικρού μεγέθους (συνήθως 0,2-0,8mm), παράγοντας υψηλή πυκνότητα ρεύματος της τάξεως των 10-100 A/mm² και ρυθμό αποβολής υλικού 0,1-10 mm/min. Ο ηλεκτρολύτης (ο οποίος είναι υδατικό διάλυμα NaCl ή NaNO₃) τροφοδοτείται στο διάκενο με ταχύτητα 10-60m/s για να διατηρήσει την ηλεκτροχημική διάλυση σε υψηλό ρυθμό και για να απομακρύνει τα προϊόντα αντίδρασης (συνήθως αέρια και υδροξείδια) και τη θερμότητα που παράγεται από τη διέλευση του ρεύματος και των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων.

Όντας μια μη συμβατική κατεργασία αποβολής υλικού, η ηλεκτροχημική κοπή μπορεί να κατεργαστεί οποιοδήποτε ηλεκτρικά αγωγίμο υλικό, ανεξάρτητα από τις μηχανικές ιδιότητές του, όπως η σκληρότητα, η ελαστικότητα και η ευθραυστότητα. Η ηλεκτροχημική κοπή έχει εφαρμοστεί σε αρκετούς τομείς της βιομηχανίας, όπως η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ιατρική, για να κατασκευαστούν π.χ. πτερύγιο στροβίλου αεροσκάφους, βλήματα πυροβολικού, χειρουργικά μοσχεύματα κ.λ.π. [1]

Η εφαρμογή της ηλεκτροχημικής κοπής στη βιομηχανία αποκάλυψε κάποια προβλήματα τα οποία εμποδίζουν την περαιτέρω εξέλιξή της και την ευρύτερη αποδοχή της από κύκλους της βιομηχανίας. Τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι χρήστες της κατεργασίας είναι η πρόβλεψη της μορφής της επιφάνειας του τεμαχίου και ο βέλτιστος σχεδιασμός του εργαλείου-ηλεκτροδίου για την απόδοση πολύπλοκης γεωμετρικής μορφής.

Παρότι έχει γίνει σημαντική έρευνα στον ηλεκτροχημικό τομέα και αρκετά βιβλία [1-4] και δημοσιεύσεις για το θέμα αυτό είναι διαθέσιμα, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν τα ερευνητικά αποτελέσματα στην παραγωγή. Ως αποτέλεσμα, η επιλογή των παραμέτρων ηλεκτροχημικής κοπής και ο σχεδιασμός των εργαλείων

στηρίζεται ακόμα στην προσωπική γνώση και εμπειρία του χειριστή της εγκατάστασης ηλεκτροχημικής κοπής. Κατά συνέπεια, η διαδικασία της επιλογής των παραμέτρων είναι υποκειμενική και δαπανηρή, αφού στην πράξη ακολουθείται η μέθοδος δοκιμής-σφάλματος, χωρίς να οδηγεί πάντα στη βέλτιστη επιλογή.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός εργαλείου ηλεκτροχημικής κοπής που χρησιμοποιείται για την απόδοση τυχαίας πολύπλοκης τρισδιάστατης μορφής και η ανάπτυξη γενικευμένου θεωρητικού μοντέλου, το οποίο να είναι ικανό να εφαρμόζεται στη μελέτη οποιουδήποτε συναφούς προβλήματος. Αναπτύσσεται μη γραμμικό μοντέλο μελέτης/ πρόβλεψης του βέλτιστου αναγλύφου της επιφάνειας του εργαλείου με εφαρμογή προχωρημένης θεωρίας αναλυτικής γεωμετρίας και στο πλαίσιο όλων των περιορισμών που εισάγονται από την όλη λειτουργία της κατεργασίας. Το προκύπτον σύστημα διαφορικών εξισώσεων επιλύεται αριθμητικά και αποτυπώνεται σε ευέλικτο λογισμικό που μπορεί με μικρές προσαρμογές να προσαρμοστεί σε οποιοδήποτε πρόβλημα ηλεκτροχημικής κοπής.

Η ανάλυση αναφέρεται σε όλες τις πιθανές συνθήκες κατεργασίας (μεταβατική φάση, ακίνητο εργαλείο, κατάσταση ισορροπίας) στην περίπτωση της κλασικής ηλεκτροχημικής κοπής, και επιβεβαιώνεται σε υφιστάμενα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν λάβει χώρα στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των κατεργασιών.

2 Τεχνοοικονομικά στοιχεία ECM

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η ηλεκτροχημική κοπή είναι μία σχετικά παλαιά κατεργασία κοπής, η βάση της οποίας ανάγεται στο 19^ο αιώνα. Ο Michael Faraday, ο μεγαλύτερος ερευνητής όλων των εποχών (1791-1867), ανακάλυψε την αρχή της ανοδικής μεταλλικής κοπής. Η ανακάλυψη αυτή έγινε έκτοτε το θεμέλιο για την καλύτερη τεχνολογική γνώση του γαλβανισμού και της λείανσης (electro polishing), που είχαν ήδη τεθεί σε εφαρμογή στην παγκόσμια βιομηχανία.

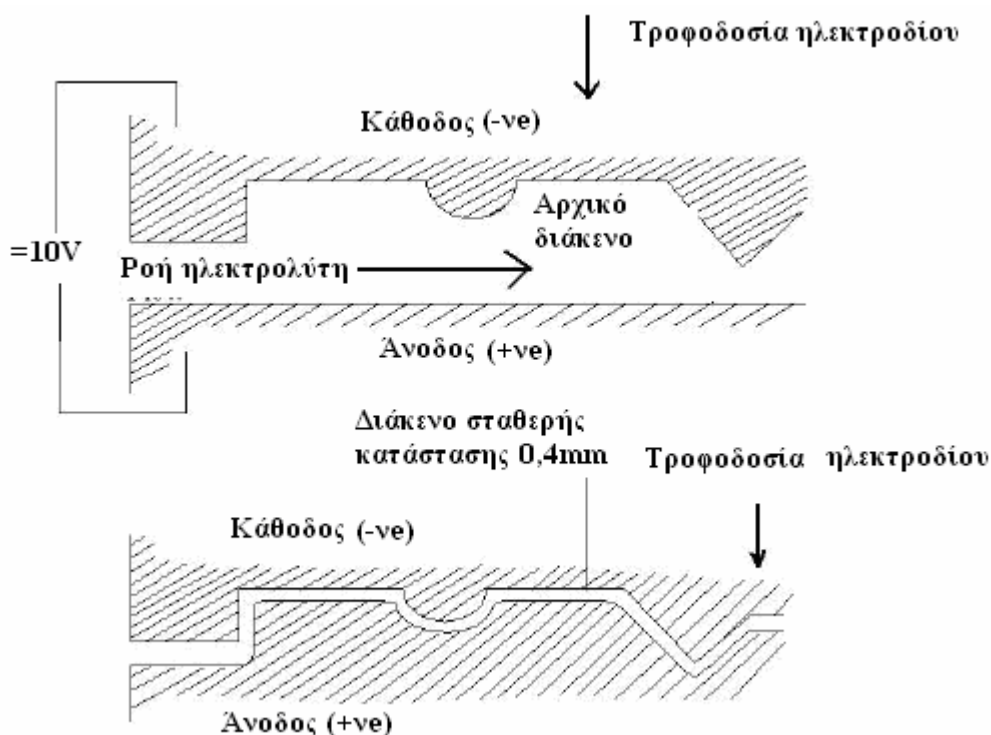
Το 1929, ο Ρώσος ερευνητής W. Gussef εφάρμοσε μία κατεργασία για μεταλλική ανοδική κοπή. Χρόνια αργότερα, το 1941, ο Burgess έκανε την εμφάνισή του με μία δημοσίευση στο επιστημονικό περιοδικό Electrochemical Society. Το φθινόπωρο του 1959, η Apocut Engineering Company καθιέρωσε την ανοδική μεταλλική κοπή ως μία εμπορικά αποδεκτή κατεργασία. Ακολούθησε ένα χρόνο αργότερα η SIFCO (Εταιρία βελτίωσης και σφυρηλάτησης χάλυβα) με εφαρμογές στον εμπορικό τομέα.

Η τεχνική εφαρμόστηκε με ποικίλους τρόπους στην κατεργασία κοπής τη δεκαετία του '60 και του '70. Συγκεκριμένα, η βιομηχανία αεροστροβίλων χρησιμοποίησε την κατεργασία σε μεγάλο βαθμό. Η ηλεκτροδιάβρωση (κοπή με σπινθήρες, EDM) ήταν επίσης σε μεγάλη ανάπτυξη κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Η κατεργασία αυτή ήταν πολύ πιο ακριβής από άλλες κατεργασίες κοπής, και είχε πλεονέκτημα σε σχέση με την ηλεκτροχημική κοπή, ως τεχνική επεξεργασίας, καθώς η ηλεκτροχημική κοπή δεν απέδιδε μεγάλη ακρίβεια εκείνη την εποχή και ήταν ιδιαίτερα βλαβερή για το περιβάλλον. Αντίθετα, όμως, η ηλεκτροχημική κοπή μπορούσε να επιτύχει πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής.

Σήμερα, πολλές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν την ηλεκτροχημική κοπή. Οι μέρες σύγκρισης της σημερινής ηλεκτροχημικής κοπής με την προηγούμενη ανοδική μεταλλική κοπή έχουν ξεπεραστεί. Ενώ η τεχνική του παρελθόντος εμφάνιζε πολλά μειονεκτήματα, όσον αφορά την ακρίβεια και την προστασία του περιβάλλοντος, η ηλεκτροχημική κοπή του παρόντος είναι εφοδιασμένη με τη στήριξη της τεχνολογικής ανάπτυξης. [51]

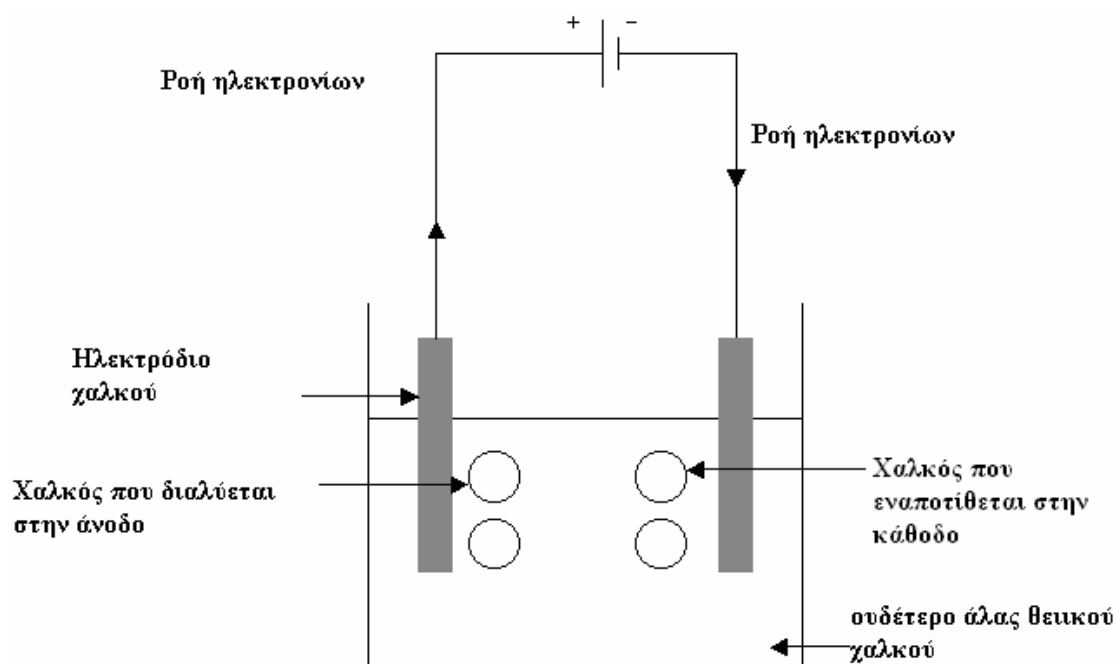
2.2 Η κατεργασία της ηλεκτροχημικής κοπής

Η αρχή της ηλεκτροχημικής κοπής φαίνεται διαγραμματικά στα ακόλουθα σχήματα. Το κατεργάσιμο τεμάχιο αποτελεί την άνοδο (θετικός πόλος μίας ηλεκτρικής πηγής συνεχούς ρεύματος) και το εργαλείο, με μορφή αντίστοιχη της προς κατασκευήν κοιλότητας στο τεμάχιο, την κάθοδο (αρνητικός πόλος).



Εικόνα 1: Βασικές αρχές ηλεκτροχημικής κοπής [45]

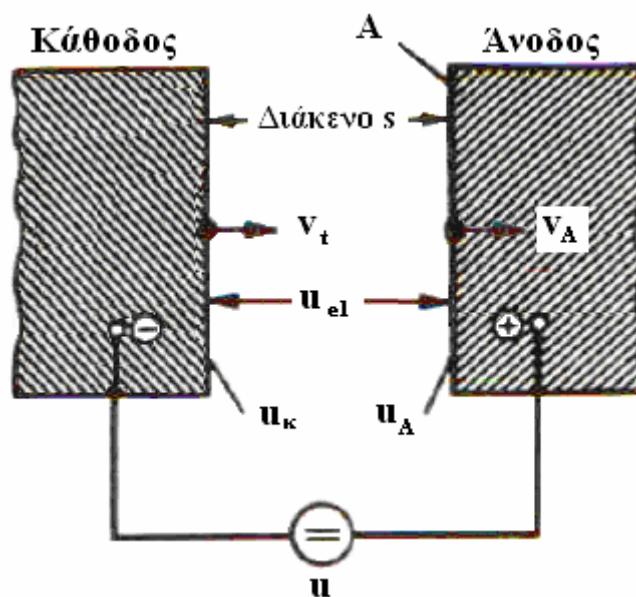
Ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού κατά την ηλεκτροχημική κατεργασία βασίζεται στην ανοδική διάλυση μεταλλικών υλικών με μηχανισμό ηλεκτρόλυσης. Το όνομα ηλεκτρόλυση έχει δοθεί από τη χημική διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα όταν ηλεκτρικό ρεύμα περνά ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια (που είναι συνδεδεμένα με μια πηγή συνεχούς ρεύματος) τα οποία είναι βυθισμένα μέσα σε ένα αγωγίμο διάλυμα. Ένα τυπικό παράδειγμα ηλεκτρόλυσης είναι αυτό των δύο χάλκινων συρμάτων τα οποία είναι βυθισμένα μέσα σε διάλυμα θεικού χαλκού (Εικ.. 2.2).



Εικόνα 2: Μηχανισμός αφαίρεσης υλικού κατά την ηλεκτροχημική κατεργασία [1]

Το στοιχείο της ηλεκτρόλυσης αποτελείται από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια και έναν ηλεκτρολύτη, που είναι διάλυμα σε νερό κατά κανόνα ουδέτερων αλάτων, συνήθως NaCl ή NaNO₃. Μετά τη σύνδεση των ηλεκτροδίων σε μία πηγή συνεχούς ρεύματος στην κάθοδο, τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου εκφορτίζονται με τη βοήθεια των ηλεκτρονίων, ενώ τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα -OH αντιδρούν στην άνοδο με το θετικά φορτισμένο μέταλλο. Η σχηματιζόμενη ένωση οξειδίου του μετάλλου είτε διαλύεται στον ηλεκτρολύτη ή κατακάθεται στον πυθμένα ως ίζημα. Στο διάκενο μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου ρέει συνεχώς και με μεγάλη ταχύτητα ο ηλεκτρολύτης, που, εκτός από την κύρια δράση του ως μέσο στο οποίο πραγματοποιείται η ηλεκτρόλυση, παρασύρει τα προϊόντα της ηλεκτρόλυσης (οξείδια του μετάλλου και αέριο υδρογόνο) και απάγει την παραγόμενη θερμότητα. Με τον τρόπο αυτό, το εργαλείο δεν υφίσταται φθορά ή αλλαγή σχήματος και διαστάσεων, ενώ ένα και μόνο εργαλείο μπορεί να κατεργασθεί έναν πολύ μεγάλο αριθμό τεμαχείων.

Με τη βοήθεια της συνεχούς ταχύτητας πρόωσης, τουλάχιστον του ενός ηλεκτροδίου (εργαλείο ή κατεργάσιμο τεμάχιο), σχηματίζεται μεταξύ του τεμαχίου και του εργαλείου διάκενο μέσα στο οποίο ρέει ο ηλεκτρολύτης. Η γεωμετρία του τεμαχίου διαφέρει από εκείνη του εργαλείου κατά το μέγεθος του διακένου της κατεργασίας. [38-40]



Εικόνα 3: Σχηματισμός διακένου κατά την ηλεκτροχημική κατεργασία

2.3 Βασικά χαρακτηριστικά ηλεκτροχημικής κοπής

Η ηλεκτροχημική κοπή είναι μια σχετικά νέα, αλλά σημαντική μέθοδος για αποβολή μετάλλου από την άνοδο, η οποία επιτυγχάνεται από ένα κατάλληλο εργαλείο με συγκεκριμένο περίγραμμα και μορφή, ώστε τα τεμάχια που παράγονται να έχουν συγκεκριμένο σχήμα και διαστάσεις. Η ηλεκτροχημική αποτύπωση πραγματοποιείται έτσι ώστε το περίγραμμα του εργαλείου να προωθείται προς το τεμάχιο πάνω στο οποίο αντιγράφεται. Για την υψηλή ακρίβεια αντιγραφής του σχήματος του εργαλείου πάνω στο τεμάχιο και για υψηλές ταχύτητες αποβολής υλικού από την άνοδο, απαιτείται μεγάλη πυκνότητα ρεύματος της τάξης των $10\text{-}100\text{ A/cm}^2$ και συγχρόνως χαμηλή τάση, συνήθως $8\text{-}30\text{ V}$, ενώ διατηρείται ένα πολύ μικρό διάκενο (περίπου $0,1\text{ mm}$) με ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου προς το τεμάχιο από $0,1\text{-}20\text{ mm/min}$. Διαλυμένα υλικά, αέρια και θερμότητα μετακινούνται από το διάκενο κατά τη ροή του ηλεκτρολύτη, η οποία επιτυγχάνεται με άντληση υψηλής ταχύτητας ($5\text{-}10\text{ m/s}$). Η ταχύτητα αποβολής υλικού δεν εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου από το οποίο αποτελείται το τεμάχιο.

Η ακρίβεια της κατεργασίας εξαρτάται από το σχήμα και τις διαστάσεις του προς κατεργασία τεμαχίου και κυμαίνεται από $0,05\text{mm}\text{-}0,3\text{mm}$ με χρήση συνεχούς ρεύματος. Η τραχύτητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας μειώνεται όσο αυξάνεται ο ρυθμός αποβολής υλικού και παίρνει τιμές μεταξύ $0,1\text{mm}\text{-}2,5\text{mm}$, ενώ η κατανάλωση ενέργειας

της ηλεκτροχημικής κοπής είναι σχετικά υψηλή, κυμαίνεται από 200-600J/mm³, και εξαρτάται από την τάση και τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες του τεμαχίου.

Η ηλεκτροχημική κοπή είναι μια μη μηχανική διαδικασία αποβολής από ένα αγωγίμο υλικό. Ο ρυθμός αποβολής του υλικού είναι ανεξάρτητος από τη σκληρότητα και άλλες ιδιότητες του τεμαχίου, το οποίο πρόκειται να τεθεί υπό κατεργασία. Με τη χρήση της ηλεκτροχημικής κοπής προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα των τελικών προϊόντων, ακόμα και αν αυτά έχουν πολύπλοκα και σύνθετα περιγράμματα, τα οποία παράγονται απλά μετακινώντας το εργαλείο. Η ηλεκτροχημική κοπή αποβάλλει τα ελαττωματικά στρώματα του υλικού και εξαλείφει τα ελαττώματα τα οποία έχουν αποδοθεί στο επιφανειακό στρώμα του υλικού από προηγούμενη μηχανική κατεργασία και συνήθως δεν παράγονται παραμένουσες τάσεις στο τεμάχιο. Επίσης, δεν είναι αναγκαίο το εργαλείο να είναι κατασκευασμένο από υλικό σκληρότερο από το υλικό του τεμαχίου, διότι πρακτικά πάνω στο εργαλείο δεν παρατηρείται φθορά.

Από τη στιγμή που δεν υπάρχει επαφή μεταξύ εργαλείου-τεμαχίου, η ηλεκτροχημική κοπή είναι η μέθοδος αποβολής υλικού που ενδείκνυται για κατεργασία λεπτότοιχων τεμαχίων που είναι εύκολο να παραμορφωθούν καθώς επίσης και για εύθραυστα ψαθυρά υλικά που είναι πιθανό να αναπτύξουν ρωγμές με κάποια άλλη κατεργασία. Όλα αυτά παράγουν ένα βέλτιστο προϊόν μετά από κατεργασία με ηλεκτροχημική κοπή. Παρόλα αυτά, δεν είναι πάντα εύκολο να αντιγραφεί το περίγραμμα του εργαλείου στο τεμάχιο με υψηλή ακρίβεια. [1-3]

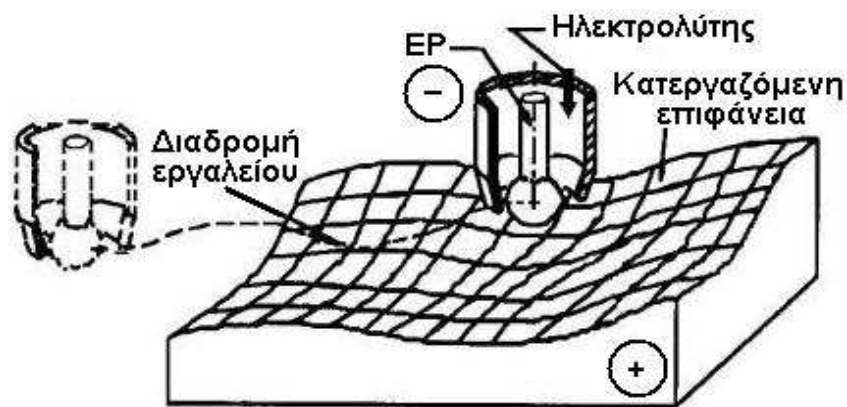
2.4 Εφαρμογές ηλεκτροχημικής κοπής

Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές για την ηλεκτροχημική κοπή είναι οι ακόλουθες:

1. Κατεργασίες αποτύπωσης, διάτρησης και βύθισης (εκσκαφής) κατά την κατασκευή καλουπιών και πτερυγώσεων στροβιλοσυμπιεστών, κατεργασίες διάνοιξης οπών, καναλιών, εγκοπών και κοιλοτήτων σε διακεκριμένα τεμάχια (Εικ. 2.4). Όλες οι εφαρμογές μπορεί να ελέγχονται από H/Y (CNC κίνηση του εργαλείου Εικ. 2.5).

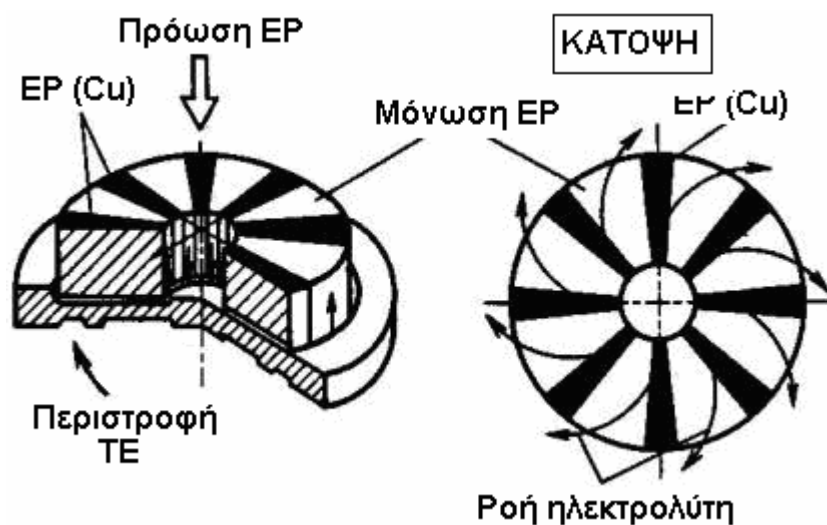


Εικόνα 4: Κατεργασία ηλεκτροχημικής βύθισης

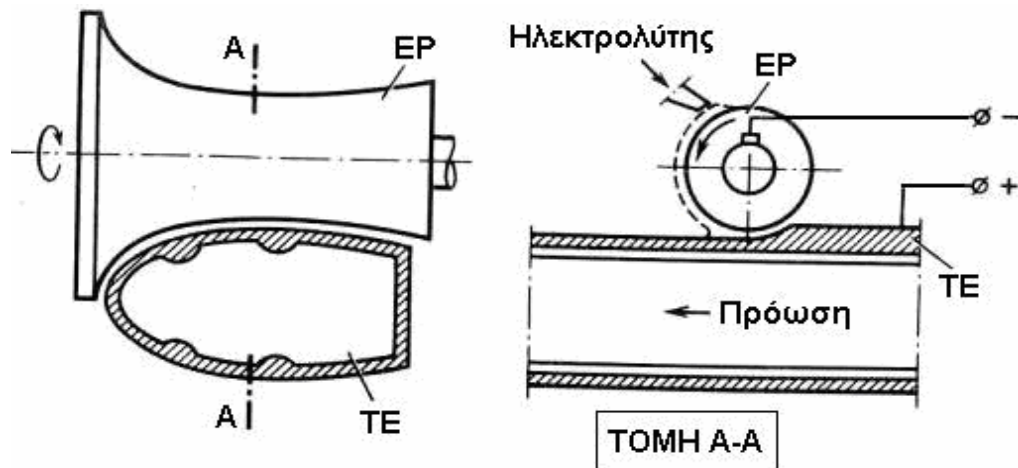


Εικόνα 5: CNC κίνηση του εργαλείου

2. Η ηλεκτροχημική διαμόρφωση με περιστροφή είτε του τεμαχίου (Εικ. 2.6) ή του εργαλείου (Εικ. 2.7)

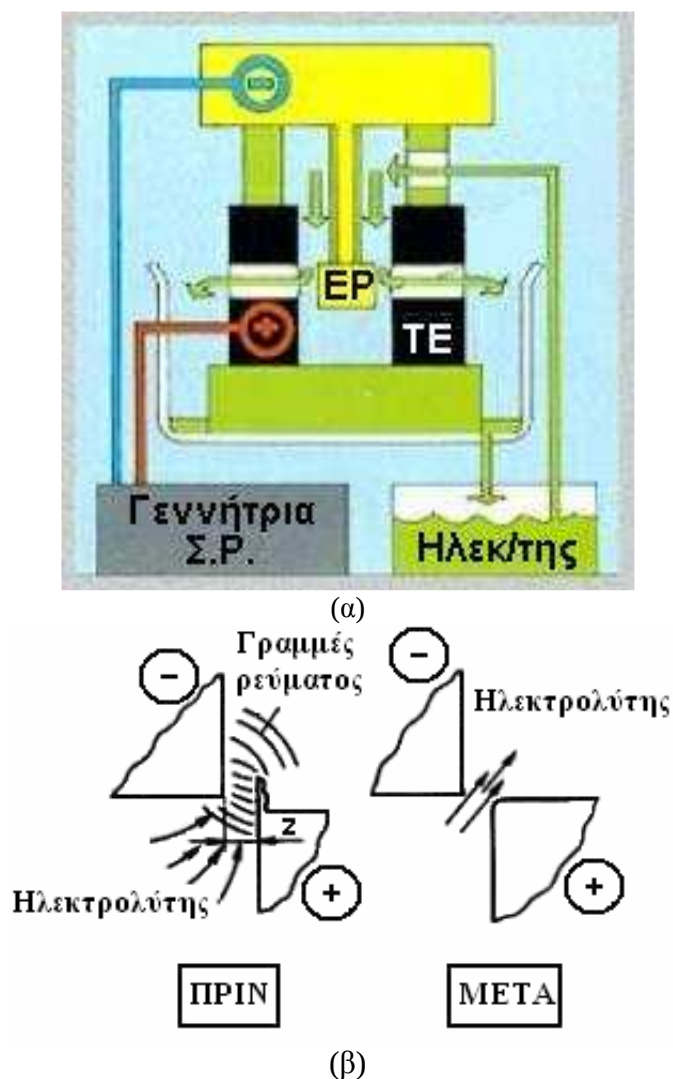


Εικόνα 6: Ηλεκτροχημική κοπή περιστρεφόμενου τεμαχίου



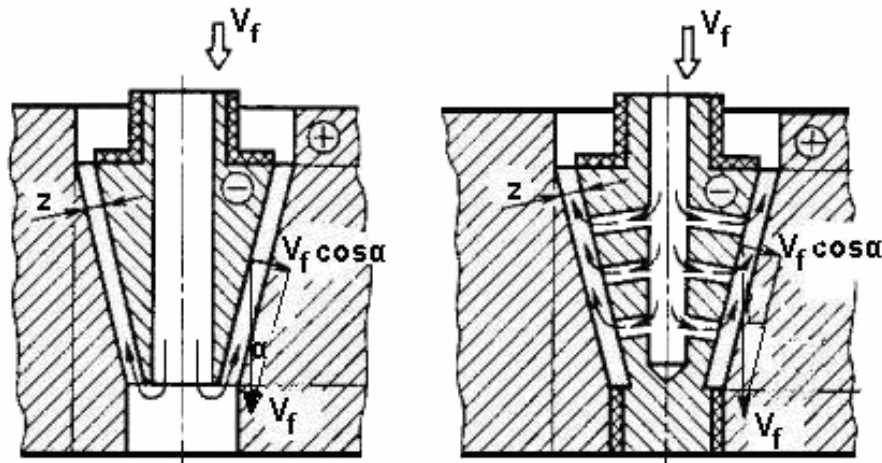
Εικόνα 7: Ηλεκτροχημική κοπή με περιστρεφόμενο εργαλείο [3]

3. Ηλεκτροχημική εξομάλυνση των άκρων από το σχηματιζόμενο γρέζι (deburring) σε τεμάχια ακριβείας (οδοντωτοί τροχοί κλπ.), Εικ. 2.8 .



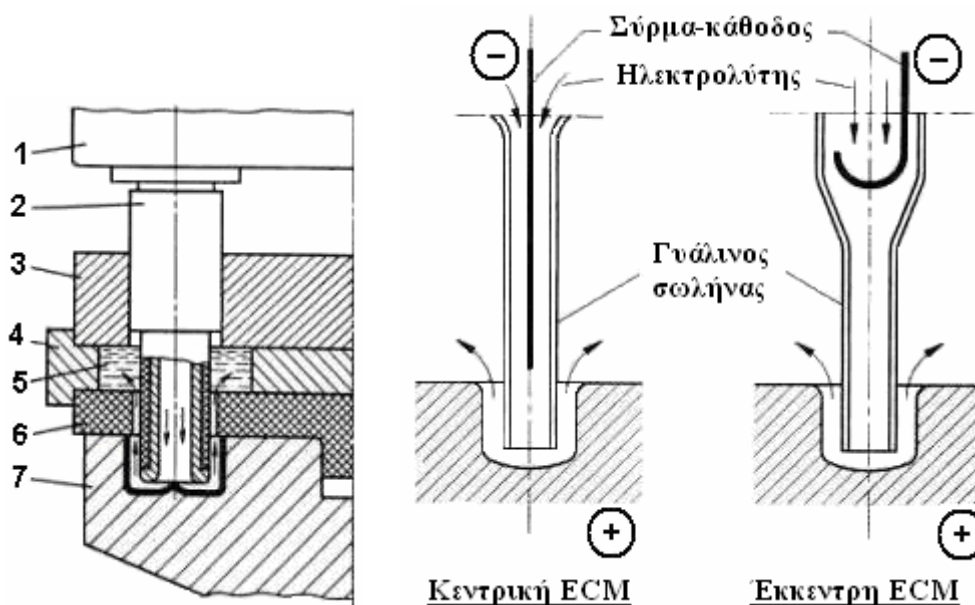
Εικόνα 8: Ηλεκτροχημική εξομάλυνση άκρων

4. Ηλεκτροχημική αυλάκωση (broaching) για την κατασκευή καμπυλοτήτων ανώτερου βαθμού (splines), μορφοποίηση οδοντώσεων, κατεργασία μορφής τεμαχίων από δύστηκτο υλικό ή κράμα Ti και τα πρώτα στάδια σπειροτόμησης (Εικ. 2.9.).



Εικόνα 9: Ηλεκτροχημική αυλάκωση (broaching)

5. Στην περίπτωση που το εργαλείο δεν περιστρέφεται, η ηλεκτροχημική κοπή προσφέρει τη δυνατότητα να ανοίγει οπές, σύνθετης μορφής ή πολλαπλών οπών σε ένα πάσο, καθώς επίσης και έκκεντρες οπές. (Εικ 2.10).



Εικόνα 10: Ηλεκτροχημική κοπή με εργαλείο που δεν περιστρέφεται: 1 πλάκα πίεσης, 2 έμβολο, 3 εξολκείας, 4 πλάκα συγκράτησης, 5 ηλεκτρολύτης, 6 τεμάχιο, 7 πλάκα βάσης.

Μερικά παραδείγματα κατεργασμένων τεμαχίων με χρήση ηλεκτροχημικής κοπής παρουσιάζονται στην Εικ. .11.



Εικόνα 11: Παραδείγματα κατεργασμένων τεμαχίων

Τεμάχια μετά τη χρήση ηλεκτροχημικής εξομάλυνσης άκρων (deburring), καμπύλωσης άκρων και λείανσης παρουσιάζονται στην Εικ. 12. [2]



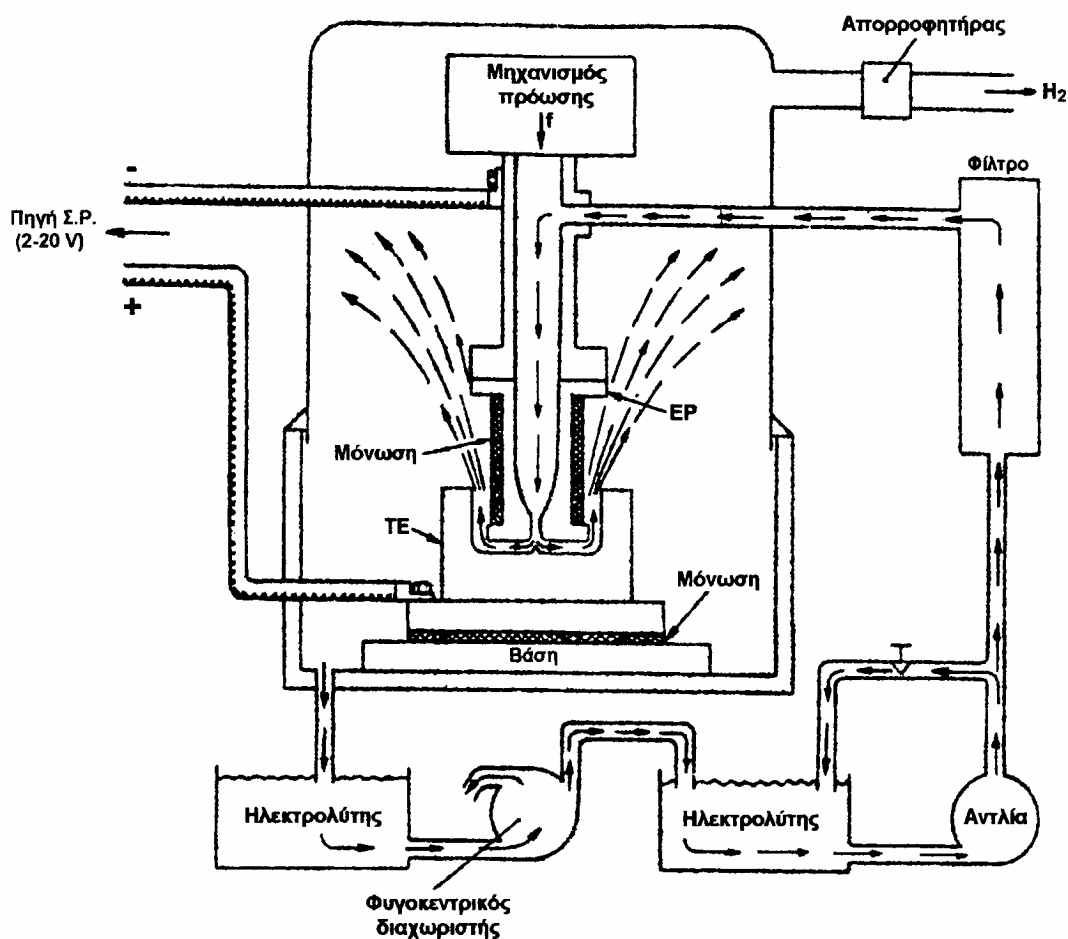
Εικόνα 12: Τεμάχια εξομάλυνσης άκρων (deburring)

2.5 Εξοπλισμός της κατεργασίας

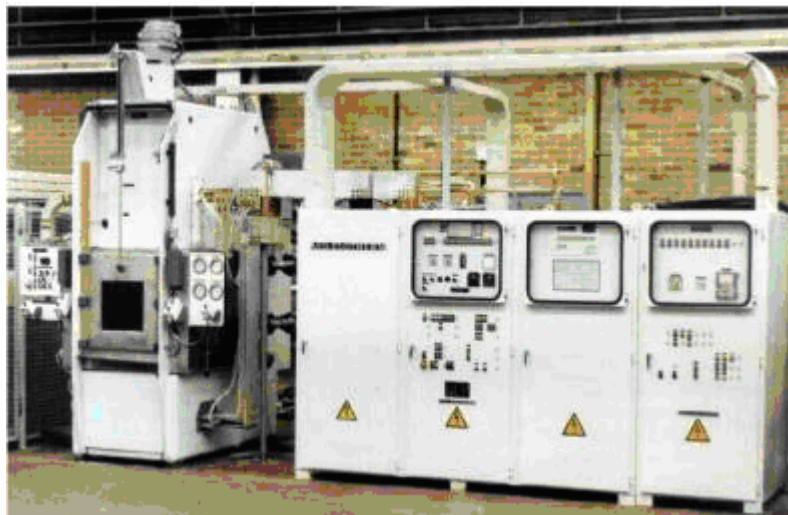
2.5.1 Τυπική εγκατάσταση ηλεκτροχημικής κοπής

Μία τυπική εγκατάσταση ηλεκτροχημικής κοπής περιλαμβάνει τέσσερα σημαντικά υποσυστήματα:

- Τη μηχανή ECM
- Το σύστημα τροφοδοσίας
- Το σύστημα ανακύκλωσης του ηλεκτρολύτη και
- Το σύστημα ελέγχου.



Εικόνα 13 : Τυπική εγκατάσταση ηλεκτροχημικής κοπής



Εικόνα 14: Τυπική εγκατάσταση ηλεκτροχημικής κοπής

2.5.2 Εργαλειομηχανή ηλεκτροχημικής κοπής

Μια εργαλειομηχανή ηλεκτροχημικής κοπής μπορεί να είναι γενικής φύσεως (universal), ειδικών εφαρμογών ή απλής λειτουργίας. Οι εργαλειομηχανές γενικής φύσεως μπορούν να φέρουν εις πέρας ευρύ φάσμα εφαρμογών. Στο σχεδιασμό τους, λαμβάνεται αρχικά υπόψη το μέγεθος του τεμαχίου, το οποίο καθορίζει τις δυνάμεις που θα αναπτυχθούν στα διάφορα τμήματα της εργαλειομηχανής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Η διάταξη του εργαλείου επιλέγεται με βάση την αντοχή και τη σταθερότητα της βάσης, τη μορφή του μηχανισμού πρόωσης και ορισμένες άλλες παραμέτρους.

Επιπροσθέτως, η εργαλειομηχανή μπορεί να είναι οριζόντια ή κατακόρυφη, με σταθερή ή πτυσσόμενη τράπεζα, ανάλογα με την ευχέρεια που απαιτείται να έχει ο χειριστής στην εγκατάσταση, πρόσδεση και απομάκρυνση του τεμαχίου. Οι παράγοντες αυτοί καθορίζουν, επίσης, τη θέση των ολισθητήρων του μηχανισμού πρόωσης του εργαλείου.

Ο βαθμός αυτοματισμού της εργαλειομηχανής ηλεκτροχημικής κοπής εξαρτάται κυρίως από το προβλεπόμενο μέγεθος της μερίδας παραγωγής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μεγάλων μερίδων και στις κατεργασίες φινιρίσματος (deburring) σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας απαιτείται πλήρης αυτοματοποίηση. Έχουν αναπτυχθεί μονάδες ηλεκτροχημικής κοπής, στις οποίες όλες οι διαδικασίες κατεργασίας είναι αυτοματοποιημένες – π.χ. από την τροφοδοσία του τεμαχίου, μέχρι την τελική

φάση αντισκωριωτικής προστασίας του τελικού αντικειμένου – οι οποίες μπορούν να παράγουν εκατοντάδες τεμάχια ανά ώρα. Σήμερα, οι περισσότερες μηχανές ηλεκτροχημικής κοπής είναι ημιαυτόματες, δηλαδή, ενώ ο κύκλος κατεργασίας είναι αυτοματοποιημένος, η διακίνηση τεμαχίων και τελικών προϊόντων και η έναρξη για τη λειτουργία της μηχανής γίνονται χειροκίνητα. Η λειτουργία της εγκατάστασης διακόπτεται αυτόματα όταν επιτυγχάνονται καθορισμένες διαστάσεις τεμαχίου ή καθορισμένο βάθος κατεργασίας.

Ο βαθμός αυτοματοποίησης της εργαλειομηχανής ηλεκτροχημικής κοπής και των υποσυστημάτων της (π.χ. μηχανισμός και οδηγοί πρόωσης), η προβλεπόμενη μέγιστη διαδρομή πρόωσης του εργαλείου και η ευθυγράμμιση εργαλείου/τεμαχίου καθορίζουν την ακρίβεια της κατεργασίας. Δευτερεύουσα επίδραση στην ακρίβεια της ηλεκτροχημικής κοπής έχουν τα αναπτυσσόμενα θερμοκρασιακά πεδία στο σημείο της κατεργασίας, αλλά και στα επιμέρους τμήματα της μηχανής. Σημαντικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας κυρίως στα κινητά τμήματα της μηχανής (μηχανισμός πρόωσης), δυσχεραίνουν την εφαρμογή κατάλληλων γεωμετρικών ανοχών στους οδηγούς ολίσθησης και στις μονώσεις του εργαλείου.

Άλλη σημαντική παράμετρος, είναι η θέση εφαρμογής του ρεύματος στο τεμάχιο. Όταν ο αγωγός προσαγωγής τοποθετείται πολύ κοντά στην επιφάνεια κατεργασίας, εξασφαλίζεται μείωση των ρευμάτων διαφυγής και των απωλειών ισχύος και αποφεύγεται ηλεκτρολυτική προσβολή σε περιοχές του τεμαχίου που δεν πρέπει να υποστούν κατεργασία. Για το λόγο αυτό, ο αγωγός προσαγωγής πρέπει να τερματίζει πάνω στο τεμάχιο ή στη διάταξη συγκράτησης του τεμαχίου και όχι στην τράπεζα της μηχανής. Οι αγωγοί προσαγωγής είναι συνεχώς σε επαφή με το διαβρωτικό μέσο και πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του υλικού κατασκευής τους. Για ρεύματα κατεργασίας της τάξης 4,5–5 kA χρησιμοποιούνται αγωγοί από εύκαμπτο υλικό, που περιβάλλονται από ελαστικό σωλήνα, διαμέσου του οποίου ρέει το μέσο ψύξης (νερό), επειδή οι αγωγοί μπορεί να αποκτήσουν θερμοκρασία μεταξύ 40°–60°C κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Οι αγωγοί προσαρμογής συναρμίζονται στο εργαλείο με μόνιμες (κόλληση) ή μη μόνιμες συνδέσεις (ήλωση). Η πίεση συναρμογής επηρεάζει και την αναπτυσσόμενη πίεση κατεργασίας που κυμαίνεται μεταξύ 6×10^5 - $1.5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ για τα διάφορα υλικά κατασκευής τους.

Τέλος, οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροχημική κοπή διαφέρουν στη χημική σύνθεση τους, γεγονός που επίσης επιδρά στο σχεδιασμό της

εργαλειομηχανής. Επειδή οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες τείνουν να προσβάλλουν τα μέταλλα, οι μηχανές ηλεκτροχημικής κοπής πρέπει, σε αντιδιαστολή με τις συμβατικές εργαλειομηχανές, να σχεδιάζονται έτσι ώστε να αντέχουν σε αυτή τη διαβρωτική προσβολή. Όπου και εφόσον είναι εφικτό, προτιμάται η χρήση μη μεταλλικών υλικών, ενώ είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την αντοχή και τη σταθερότητα της μηχανής, να εφαρμόζονται μη μεταλλικά επιστρώματα στα τμήματα της μεταλλικής κατασκευής που έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη. Ένας τρόπος μείωσης του κόστους είναι η κατασκευή της βάσης της μηχανής από μπετόν και η προσαρμογή σε αυτήν των υπολοίπων τμημάτων με μεταλλικά τμήματα (πλαίσια, ενισχύσεις) και συνδέσεις (ηλώσεις, κοχλιώσεις). [9]

2.5.3 Σύστημα παροχής ισχύος στην ηλεκτροχημική κοπή

Οι εγκαταστάσεις ηλεκτροχημικής κοπής είναι εξοπλισμένες με ημιαγωγούς ανορθωτές ρεύματος. Η επιλογή συγκεκριμένης διάταξης των τμημάτων ηλεκτρικού κυκλώματος εξαρτάται κυρίως από τη φύση του φορτίου και την εκτίμηση του μετασχηματισμού ισχύος.

Οι μονάδες παροχής ηλεκτρικής ισχύος συνήθως έχουν χαρακτηριστική καμπύλη είτε σταθερής τάσης ή σταθερής έντασης ρεύματος. Στους περισσότερους τύπους μονάδων παροχής ισχύος, το αποδιδόμενο συνεχές (ανορθωμένο) ρεύμα κυμαίνεται μεταξύ 315–25000 A, ενώ η αντίστοιχη τάση κατεργασίας ρυθμίζεται μεταξύ 5–15V. Η διακύμανση έντασης και τάσης κυμαίνεται στα όρια $\pm 1\%$ και $\pm 5\%$ αντίστοιχα.

Σε γενικές γραμμές, οι απαιτήσεις που καλείται να ικανοποιήσει μια μονάδα παροχής ισχύος στην ηλεκτροχημική κοπή συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Να υπάρχει συνεχής ρύθμιση της τάσης κατεργασίας με τη βοήθεια ειδικού ρυθμιστή (controller).
- Να διαθέτει υψηλή ταχύτητα απόκρισης στα σήματα των ρυθμιστών και να είναι δυνατή η ταχεία διακοπή ή μείωση της έντασης του ρεύματος σε περιπτώσεις ανάγκης, π.χ. σε περίπτωση βραχυκυκλώματος ή δυσλειτουργίας των ρυθμιστών.
- Η αύξηση της τάσης ή της έντασης του ρεύματος να γίνεται βαθμιαία κατά την έναρξη της κατεργασίας και ομοίως βαθμιαία η μείωση στο πέρας της κατεργασίας.

- Να είναι πολλαπλής χρήσης, δηλαδή, να λειτουργεί αποτελεσματικά, αφενός και υπό συνεχή και υπό εναλλασσόμενη τάση, και αφετέρου με διαφορετικές χαρακτηριστικές V-I.
- Να έχει υψηλό συντελεστή ισχύος, υψηλή απόδοση, μικρό μέγεθος και βάρος, και χαμηλό κόστος.

2.5.4 Συστήματα ελέγχου/ρύθμισης της ηλεκτροχημικής κοπής

Ο έλεγχος/ρύθμιση της ηλεκτροχημικής κατεργασίας γίνεται ως προς προκαθορισμένες τιμές αναφοράς των διαφόρων παραμέτρων της κατεργασίας, με σκοπό να ληφθούν λειτουργικοί δείκτες της κατεργασίας, όπως είναι η επιθυμητή ακρίβεια κατεργασίας, ο ρυθμός αποβολής υλικού, και η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.

Ο έλεγχος στην ηλεκτροχημική κοπή κρίνεται απαραίτητος επειδή η εγκατάσταση (εργαλειομηχανή, μονάδα παροχής ισχύος, εγκατάσταση κυκλοφορίας και καθαρισμού του ηλεκτρολύτη κοκ.) εκτίθεται σε μεγάλο αριθμό αιτίων απορρύθμισης του συστήματος. Στην πράξη, ο έλεγχος/ρύθμιση περιορίζεται σε ρύθμιση του διακένου, ρύθμιση της ροής του ηλεκτρολύτη και σε ρύθμιση διαφόρων παραμέτρων της κατεργασίας με πιο σημαντική την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία.

Το σύστημα ελέγχου της μηχανής ηλεκτροχημικής κοπής περιλαμβάνει ένα υποσύστημα που είναι σε θέση να εκκινήσει ή να διακόψει τη λειτουργία των διαφόρων μονάδων της μηχανής, και ρυθμίζει τη μηχανή και την παροχή ηλεκτρολύτη, τη θέση του εργαλείου και το πάχος διακένου. Το υποσύστημα ελέγχου της ροής ηλεκτρολύτη εξασφαλίζει σταθερή την παροχή στην είσοδο του διακένου μέσα σε προκαθορισμένα όρια. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της παροχής ηλεκτρολύτη μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Επειδή όμως η σταθερά χρόνου ενός τέτοιου συστήματος ελέγχου είναι πολύ μεγάλη, συνήθως κρατείται σε χαμηλές τιμές με χρήση κατάλληλων θερμοστοιχείων και θερμομέτρων ως αισθητήρων θερμοκρασίας.

Το σύστημα ρύθμισης του διακένου περιλαμβάνει τον έλεγχο της κατεργασίας με απευθείας ρύθμιση της ταχύτητας πρόωσης του εργαλείου. Το πλάτος του διακένου ελέγχεται συνεχώς ή βηματικά μέσω ειδικού προγράμματος. Το σύστημα διατήρησης του διακένου βασίζεται στον αυτορρυθμιστικό χαρακτήρα της ηλεκτροχημικής κοπής και εξασφαλίζει με ακρίβεια σταθερή ταχύτητα μετατόπισης του εργαλείου και λοιπές βασικές παραμέτρους της κατεργασίας που σχετίζονται με αυτή.

Σε ορισμένες μονάδες ηλεκτροχημικής κοπής, προβλέπεται περιοδική ρύθμιση του διακένου, εκμεταλλευόμενοι τον αυτορρυθμιστικό χαρακτήρα της κατεργασίας. Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος γίνεται αρχικά με διακοπή του κύκλου κατεργασίας, μέτρηση του πραγματικού ανοίγματος του διακένου και έπειτα αποκατάσταση της αρχικής του τιμής. Η αποκατάσταση του ανοίγματος του διακένου επιτυγχάνεται προκαλώντας επαφή του εργαλείου με το τεμάχιο και μετά απομάκρυνση από αυτό (εν κενώ). Η απόσταση απομάκρυνσης του εργαλείου από το τεμάχιο μπορεί να είναι συνάρτηση του χρόνου ή της διαδρομής του εργαλείου. Η διάρκεια του κύκλου κατεργασίας μεταξύ επαφής και επανέναρξης εξαρτάται από την ακρίβεια διατήρησης του διακένου.

Η ηλεκτροχημική κοπή τεμαχίων μεγάλων διαστάσεων μπορεί να γίνει με σταθερό εργαλείο. Στην περίπτωση αυτή, το διάκενο πρέπει να επαναρυθμίζεται συνεχώς, με διακοπή της κατεργασίας σε τακτά διαστήματα, για να επιτυγχάνεται επαναφορά του διακένου στα προβλεπόμενα όρια από το σύστημα ελέγχου.

Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να γίνει χρήση συστημάτων που υπολογίζουν το διάκενο ως συνάρτηση της έντασης ρεύματος ή της τάσης κατεργασίας. Τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα εύχρηστα, όταν τα κατεργαζόμενα τεμάχια διατηρούν σταθερή την κατεργαζόμενη επιφάνεια, καθώς επίσης και την πυκνότητα ρεύματος. Το σήμα, το οποίο προέρχεται από έναν αισθητήρα ρεύματος, συγκρίνεται με ένα σήμα αναφοράς, και η διαφορά αποστέλλεται ως σήμα σφάλματος ή ρύθμισης σε ενισχυτή συνεχούς ρεύματος. Στη συνέχεια, το ενισχυμένο σήμα διοχετεύεται σε ενισχυτή ισχύος και κινητήρα συνδεδεμένο με το κύκλωμα, με αποτέλεσμα το σήμα σφάλματος να προκαλέσει μετατόπιση του εργαλείου προς το τεμάχιο ή να σταματήσει.

Όταν η ηλεκτροχημική κοπή χρησιμοποιεί εργαλείο πολύπλοκης γεωμετρίας, η απόσταση που διανύει ο ηλεκτρολύτης δεν παραμένει σταθερή κατά την κατεργασία. Για το λόγο αυτό, η πίεση στο οπίσθιο τμήμα του διακένου δε μεταβάλλεται συνεχώς, με αποτέλεσμα η κατεργασία να απορυθμίζεται και το διάκενο αντίστοιχα να αυξομειώνεται, με κίνδυνο βραχυκυκλώματος. Στις περιπτώσεις αυτές, η κατεργασία μπορεί να επανέλθει στην κατάσταση ισορροπίας με αυτόματη ρύθμιση του διακένου ισορροπίας, μέσω αντιστάθμισης της πίεσης στο οπίσθιο τμήμα του. Ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει τον αισθητήρα, τον ενισχυτή και το ρυθμιστή με ανάδραση, όλα προσαρμοσμένα στο μηχανισμό πρόωσης του εργαλείου.

Όταν θα έχει γίνει η επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων κατεργασίας, της διάταξης του εξοπλισμού και των συστημάτων ελέγχου, όλοι οι παράγοντες που

αναφέρθηκαν προηγουμένως θα πρέπει να αξιολογηθούν συνολικά, ώστε να γίνει εκτίμηση της αξιοπιστίας, της οικονομίας και της επαναληψιμότητας της τελικής διαμόρφωσης του τεμαχίου, των διαστάσεων και της τελικής επιφάνειας.[31]

2.5.5 Ηλεκτρολύτες

Οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροχημική κοπή ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Υδατικοί ή μη υδατικοί.
- Οργανικοί ή μη οργανικοί (ανάλογα με το διαλύτη: όξινοι, βασικοί, ουδέτεροι).
- Αδρανείς ή ενεργοί.

Σε βιομηχανικές εφαρμογές της ηλεκτροχημικής κοπής, χρησιμοποιείται συνήθως μίγμα ηλεκτρολυτών, ώστε να ικανοποιείται μεγαλύτερο εύρος απαιτήσεων. Η επιλογή του ηλεκτρολύτη βασίζεται:

- Στο υλικό του τεμαχίου
- Στις επιδιωκόμενες γεωμετρικές ανοχές
- Στην επιθυμητή ποιότητας επιφάνειας και
- Στο επίπεδο παραγωγικότητας που απαιτείται.

Οι κυριότερες λειτουργίες του ηλεκτρολύτη στην ηλεκτροχημική κοπή είναι η δημιουργία συνθηκών ηλεκτρόλυσης για ανοδική διάλυση του τεμαχίου, η μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος, η απομάκρυνση των αποβλήτων που δημιουργούνται από την ηλεκτροχημική δράση μέσα στο διάκενο, η απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται από την αποβολή υλικού και η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στην περιοχή κατεργασίας.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι ηλεκτρολύτες έχουν βάση τα NaCl και NaNO_3 . Ο ηλεκτρολύτης παίζει σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση των διαστάσεων στην την ηλεκτροχημική κοπή. Σημαντικό χαρακτηριστικό του ηλεκτρολύτη είναι η σχέση μεταξύ της απόδοσης και της πυκνότητας ρεύματος στο διάκενο κατεργασίας. Το διάλυμα NaNO_3 είναι προτιμητέο ως ηλεκτρολύτης, διότι σε περιοχές με μικρό διάκενο, όπου η πυκνότητα ρεύματος και η απόδοση ρεύματος λαμβάνουν υψηλές τιμές, εξασφαλίζει υψηλό τοπικό ρυθμό αποβολής υλικού, ενώ, αντίθετα, σε περιοχές με μεγάλο διάκενο,

όπου η πυκνότητα και η απόδοση του ρεύματος είναι χαμηλές, ο ρυθμός αποβολής υλικού κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα. Αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι η διαμόρφωση διακένου με ομοιόμορφο πάχος.

Οι βασικές απαιτήσεις από τον ηλεκτρολύτη είναι οι εξής:

- Τα ανιόντα που σχηματίζονται κατά την ηλεκτρολυτική δράση πρέπει να επιτρέπουν τη διάλυση της ανόδου με ομοιόμορφη και μεγάλη ταχύτητα. Τα ανιόντα δεν πρέπει να αντιδρούν με το ανοδικό μέταλλο προς σχηματισμό παθητικού υμενίου στην επιφάνεια του. Στη πράξη, χρησιμοποιούνται ηλεκτρολύτες που περιέχουν ανιόντα: Cl^- , SO_4^{--} , NO_3^- , ClO_3^- και OH^- .
- Τα παραγόμενα κατιόντα δεν πρέπει να επικάθονται στην καθοδική επιφάνεια, ώστε το σχήμα της καθόδου να παραμένει αμετάβλητο. Για να ικανοποιηθεί η απαίτηση αυτή, χρησιμοποιούνται ηλεκτρολύτες με αλκαλικά μεταλλικά κατιόντα (K^+ , Na^+).
- Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και χαμηλό ιξώδες, για να περιορίζονται οι απώλειες ισχύος από την αντίσταση του ηλεκτρολύτη και την παραγωγή θερμότητας, και να εξασφαλίζονται καλές συνθήκες ροής στο εξαιρετικά μικρό πάχος του διακένου.
- Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να είναι ασφαλής, μη τοξικός και όσο το δυνατόν λιγότερο διαβρωτικός. Για το λόγο αυτόν, προτιμώνται ουδέτερα άλατα. Όξινοι ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται μόνο σε κατεργασίες διάτρησης μικρών οπών, όπου τα προϊόντα της αντίδρασης πρέπει να διαλύονται στον ηλεκτρολύτη.
- Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να διατηρεί σταθερά τα χαρακτηριστικά του κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, όπως είναι τα συστατικά και το pH του, ενώ η αγωγιμότητα και το ιξώδες του πρέπει να μεταβάλλονται ελάχιστα λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας τοπικά.
- Το κόστος του ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι μικρό και η διαθεσιμότητά του επαρκής. [8-10]

2.6 Οικονομικά στοιχεία ηλεκτροχημικής κοπής

2.6.1 Γενικά

Οι βιομηχανικοί τομείς που κάνουν χρήση της ηλεκτροχημικής κοπής χωρίζονται σε πέντε βασικές κατηγορίες: βιομηχανία εργαλείων και καλουπιών, αυτοκινητοβιομηχανία, αεροπορική βιομηχανία, παραγωγή ενέργειας και βιομηχανίες πετρελαίου και αερίων καυσίμων. Τη δεκαετία του 1980, η χώρα που προπορευόταν στην παραγωγή και εξαγωγή εργαλείων, σύμφωνα με την παγκόσμια αρχή κατασκευής εργαλειομηχανών ήταν η Ιαπωνία, ακολουθούμενη από την πρώην Δ. Γερμανία. Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής προηγούντο στις εισαγωγές και την κατανάλωση. Η κατανάλωση ήταν επίσης μεγάλη για την Ιαπωνία και για την πρώην Δ. Γερμανία. Οι μη συμβατικές εργαλειομηχανές συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτροχημικής κοπής εκτιμώνται ότι έφταναν μόνο το 1% της ολικής παραγωγής. Η ηλεκτροδιάβρωση κατείχε το υψηλότερο ποσοστό, πιθανώς να έφτανε μέχρι το 50% και η ηλεκτροχημική κοπή υστερούσε περίπου 15% από τις κατεργασίες με laser, οι οποίες έφταναν το 20%.

Οι μηχανικοί-κατασκευαστές που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν την ηλεκτροχημική κοπή στη βιομηχανία πρέπει να αντιμετωπίσουν την πρόκληση του σχεδιασμού του κατάλληλου εργαλείου. Το κόστος του σχεδιασμού μπορεί να φτάσει το 20% του συνολικού κόστους μίας ηλεκτροχημικής διάταξης για σύνθετα εξαρτήματα. Πρέπει, επίσης, να προβλεφθούν μεγαλύτερα διάκενα που λαμβάνονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές και ειδικοί τύποι ηλεκτρολυτών που χρησιμοποιούνται σε κράματα μετάλλων προς επεξεργασία, παράλληλα με ειδικούς ελέγχους και όρια που απαιτεί ο εξοπλισμός της ηλεκτροχημικής κοπής.

Σήμερα, ο εξοπλισμός της ηλεκτροχημικής κοπής είναι ελεγχόμενος από ηλεκτρονικό υπολογιστή, ενώ είναι διαθέσιμοι και αισθητήρες για την κατεργασία. Παρόλα αυτά, από τη δεκαετία του 1990, πρακτικές μέθοδοι ελέγχου της ηλεκτροχημικής κοπής προτιμώνται, καθώς το σύνολο των ελέγχων με χειριστήρια και/ή οθόνες χειρισμού που απαιτούνται είναι πολύ λιγότεροι από αυτούς που ήταν επιβεβλημένοι τη δεκαετία του 1970. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται επιτυχώς μηχανές στις οποίες η ανίχνευση ηλεκτρικών σπινθήρων έχει μειωθεί στο ελάχιστο και ο έλεγχος για τα κατεργαζόμενα προϊόντα, για παράδειγμα έλεγχος του pH, δεν υπάρχει καθόλου. [45]

2.6.2 Σύγκριση της ηλεκτροχημικής κοπής με άλλες κατεργασίες

Η επιτυχία ή αποτυχία της ηλεκτροχημικής κοπής σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατάλληλη επιλογή των τεμαχίων που πρόκειται να υποβληθούν σε κατεργασία. Σε μια ανάλυση οφέλους-κόστους, η σύγκριση των υποψήφιων κατεργασιών (συμβατικών και μη συμβατικών) πρέπει να αναφέρεται στην ίδια κατηγορία τεμαχίων που μπορούν να παραχθούν με αυτές. Στον ακόλουθο Πίνακα 1 γίνεται σύγκριση της ηλεκτροχημικής κοπής με άλλες ισοδύναμες κατεργασίες από την άποψη κόστους εργασίας για την κατασκευή ενός καλουπιού σφυρηλάτησης.

Κατεργασία	Κόστος εργασίας (%)
Φρεζάρισμα	2000
Εκχόνδριση με φρεζάρισμα και αποπεράτωση με EDM	175
Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)	150-250
Ηλεκτροχημική κοπή (ECM)	100

Πίνακας 1: Σύγκριση του κόστους εργασίας κατεργασιών

Ανεξάρτητα από το αν είναι ή όχι πιο οικονομική μια κατεργασία, η τελική επιλογή εξαρτάται ακόμη από την κλίμακα παραγωγής, την πολυπλοκότητα των τεμαχίων, το κόστος της εγκατάστασης και των εργαλείων, και τον αριθμό του απασχολούμενου προσωπικού.

Πολλές φορές, σε περιπτώσεις που οι συμβατικές κατεργασίες αδυνατούν να εφαρμοσθούν (απορρίπτονται), η ηλεκτροχημική κοπή μπορεί να είναι η μοναδική λύση. Πρέπει συνεπώς, να ληφθούν υπόψη τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν –από τεχνολογικής απόψεως– με την επιλογή νέων δυσκατέργαστων υλικών. Τυπικό παράδειγμα είναι η ηλεκτροχημική διάτρηση σύνθετης μορφής ή η διάνοιξη οπών μικρής διαμέτρου και μεγάλου βάθους για την ψύξη πτερυγώσεων στροβίλων, όπου δεν υπάρχει άλλος τρόπος κατασκευής τους. Από τεχνολογικής πλευράς, τέτοιες οπές ψύξης οδηγούν σε μεγάλη οικονομία καυσίμου στον αεροστρόβιλο.

Τα πλεονεκτήματα που προβλέπονται από την εφαρμογή της ηλεκτροχημικής κοπής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε όλα τα στάδια παραγωγής ενός τεμαχίου και να ενσωματώνονται στο σχεδιασμό του. Σε μια «συμβατικά» σχεδιασμένη πετρωτή στροβίλου, τα πτερύγια κατασκευάζονται χωριστά το καθένα και στη συνέχεια συναρμολογούνται πάνω στην πλήμνη (κεντρικό τμήμα) της πετρωτής. Εναλλακτικά, είναι δυνατή η άμεση κατασκευή με ηλεκτροχημική κοπή ολόκληρης της πετρωτής από συμπαγές υλικό. Η λύση αυτή παρουσιάζεται πιο ελκυστική οικονομικά και ήδη έχει

επιχειρηθεί ο σχεδιασμός της κατεργασίας –μέσω υπολογιστή– σε 10 περίπου τύπους περωτής αεροστροβίλων. Τα στοιχεία (δεδομένα) εισόδου στο πρόγραμμα είναι η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου, η ταχύτητα ροής του ηλεκτρολύτη, η κατανάλωση ισχύος, η φθορά του εργαλείου, το μέγεθος της παρτίδας και το κόστος εξοπλισμού και εργαλείων. Έχει εκτιμηθεί ότι το συνολικό κόστος κατασκευής της περωτής είναι 50-70% χαμηλότερο.

Τέλος, όταν συγκρίνουμε την ηλεκτροχημική με τη μηχανική κοπή, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη ότι το κόστος της κατεργασίας στη δεύτερη περίπτωση αυξάνεται ευθέως ανάλογα με την αφαιρούμενη μάζα υλικού (απαιτείται κατανάλωση περισσότερης ισχύος). [10,20]

2.7 Ασφάλεια και διάθεση αποβλήτων στην ηλεκτροχημική κοπή

2.7.1 Ασφάλεια κατά την εφαρμογή της κατεργασίας

Κατά την εφαρμογή της ηλεκτροχημικής κοπής ελλοχεύουν κίνδυνοι οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη και να αποφευχθούν με κατάλληλα μέτρα πρόληψης για τη προστασία των εργαζομένων και τη μείωση της πιθανότητας εκδήλωσης ατυχημάτων.

Αρχικά, η εγκατάσταση των μηχανών ηλεκτροχημικής κοπής πρέπει να γίνεται σε ειδικούς μονωμένους χώρους και όλα τα τμήματα της εγκατάστασης να τοποθετούνται σε ασφαλείς και σταθερές βάσεις. Για την αποφυγή του κινδύνου ηλεκτροπληξίας, το πάτωμα εργασίας του χειριστή πρέπει να φέρει ξύλινη εσχάρα, καλυμμένη με μονωτική ελαστική επένδυση. Επίσης, στη μηχανή ηλεκτροχημικής κοπής πρέπει να υπάρχουν συμπλέκτες οι οποίοι να είναι σε θέση να διακόπτουν αυτόματα την παροχή ισχύος και την προσαγωγή ηλεκτρολύτη σε κατάσταση ανάγκης, ώστε να αποφευχθεί τυχόν βραχυκύκλωμα. Οι μονάδες παροχής ισχύος πρέπει να είναι εφοδιασμένες με σύστημα προστασίας έναντι υπερφόρτωσης (αυτόματο σύστημα διακοπών).

Στη συνέχεια, για την προστασία του προσωπικού από τις επιδράσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, οι αγωγοί ρεύματος πρέπει να φέρουν προστατευτικό μεταλλικό κάλυμμα ή στην έσχατη περίπτωση να χρησιμοποιείται ομοαξονικό καλώδιο αντί στερεάς ράβδου.

Ακόμα, για την αποφυγή έκρηξης από εύφλεκτα αέρια, η εκκίνηση των διαφόρων τμημάτων της εγκατάστασης πρέπει να ακολουθεί την εξής σειρά: Ανεμιστήρας απομάκρυνσης του υδρογόνου από το θάλαμο της ηλεκτροχημικής κοπής → αντλία κυκλοφορίας ηλεκτρολύτη στο διάκενο → μονάδα παροχής ισχύος → μηχανισμός πρόωσης εργαλείου. Η εγκατάσταση ανιχνευτών υδρογόνου σε στρατηγικά σημεία στους χώρους ηλεκτροχημικής κοπής είναι απαραίτητη, για να υπάρχει ασφαλής και έγκαιρη προειδοποίηση για τυχόν παρουσία αυξημένης συγκέντρωσης υδρογόνου που μπορεί να οδηγήσει σε έκρηξη. Για το λόγο αυτό πρέπει να γίνονται και συστηματικοί έλεγχοι της ομαλής λειτουργίας των ανιχνευτών αερίων, του συστήματος εξαερισμού, των προσαγωγών αέρα και των συμπλεκτών.

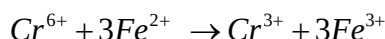
Τα αέρια και τα σταγονίδια που παράγονται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής κοπής, όταν εισπνέονται, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες σε εσωτερικά όργανα ζωτικής σημασίας, ενώ μπορούν επίσης να προκαλέσουν ολική

δηλητηρίαση και τοπικούς ερεθισμούς. Συνεπώς, στο χώρο που πραγματοποιείται η ηλεκτροχημική κοπή πρέπει να πραγματοποιούνται τουλάχιστον πέντε ανανεώσεις του αέρα ανά ώρα και ο στάσιμος (ρυπαρός) αέρας να εκδιώκεται άμεσα από εστίες απαράδεκτων εκπομπών. Περίπου το 98% του αέρα που απομακρύνεται με τοπικό ή γενικό εξαερισμό πρέπει να καθαρίζεται χημικά από τα απόβλητα που μεταφέρει. Τέλος, ο ηλεκτρολύτης θα πρέπει να ετοιμάζεται και να φιλτράρεται σε ειδικό χώρο εξοπλισμένο με πολύ καλό εξαερισμό, για την αποφυγή χημικής προσβολής. [7]

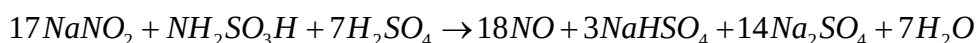
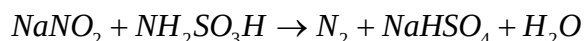
2.7.2 Διάθεση των αποβλήτων που παράγονται εξαιτίας της κατεργασίας

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, η ηλεκτροχημική κοπή παράγει μεγάλο αριθμό υγρών και στερεών αποβλήτων, που αποτελούνται από μίγματα οξειδίων και υδροξειδίων μετάλλων και είναι πολύ σημαντικό η επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων και η ουδετεροποίηση του ηλεκτρολύτη να γίνεται με όσο το δυνατό μικρότερη απώλεια και κόστος.

Τα περισσότερα κράματα που υπόκεινται σε ηλεκτροχημική κοπή περιέχουν χρώμιο, το οποίο αποβάλλεται στον ηλεκτρολύτη κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής κοπής ως εξασθενές χρώμιο. Η αδρανοποίηση του ηλεκτρολύτη περιλαμβάνει αναγωγή του εξασθενούς χρωμίου σε τρισθενές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με φυγοκεντρική διεργασία που λαμβάνει χώρα στη μονάδα προσαγωγής του ηλεκτρολύτη και προβλέπει προσθήκη στον ηλεκτρολύτη διαλύματος FeSO_4 με $\text{pH}=8-9$:



Σε ηλεκτρολύτες νιτρικών αλάτων η απομάκρυνση του υδρογόνου μπορεί να συνοδεύεται από αναγωγή των νιτρικών αλάτων σε νιτρώδη, τα οποία αντιδρούν με σουλφαμινικό οξύ και δίνουν όξινο θειικό νάτριο:



Τα απόβλητα που απομένουν από την ηλεκτροχημική κοπή κραμάτων Ni μπορούν να χρησιμοποιηθούν αφενός στην πυρομεταλλουργία, κυρίως για νέα κραμάτωση με προσθήκη Ni και αφετέρου στην υδρομεταλλουργία, όπου πρώτα απομακρύνονται με διήθηση τα βολφράμιο και μολυβδαίνιο και στη συνέχεια τα παραμένοντα νικέλιο και κοβάλτιο διοχετεύονται σε εφαρμογές πυρομεταλλουργίας.

Το απόβλητο που παράγεται από την ηλεκτροχημική κοπή κράματος τιτανίου

μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά από κατάλληλη διεργασία σαν βασικό υλικό για την παραγωγή βερνικιών, χρωμάτων και τεχνητού κορουνδίου.

Μέχρι τώρα η πιο συνηθισμένη χρήση των αποβλήτων της ηλεκτροχημικής κοπής είναι στη παραγωγή καταλυτών και υλικών προσρόφησης, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή αμμωνίας, στην αποθείωση του φυσικού αερίου και στην πετροχημική βιομηχανία.

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα νικέλιο, μολυβδαίνιο, κοβάλτιο, βολφράμιο και χρώμιο συναντώνται σε πολύ μικρές ποσότητες στη φύση, η ανάκτηση τους –άμεσα ή έμμεσα– από τα απόβλητα της ηλεκτροχημικής κοπής αποτελεί πολύτιμο βασικό υλικό για τη χημική βιομηχανία. [10]

2.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κατεργασίας

Στην παράγραφο αυτήν συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κατεργασίας, σε σχέση με τις κατεργασίες αποβολής υλικού, τα οποία θα οδηγήσουν στην επιλογή ή μη της κατεργασίας. Συγκεκριμένα, η ταχύτατη ανάπτυξη της μεθόδου οφείλεται στα εξής πλεονεκτήματα:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κατεργασία αφαίρεσης μετάλλου σε οποιοδήποτε υλικό, ανεξαρτήτως σκληρότητας, καθώς δεν υπάρχει επαφή τεμαχίου-εργαλείου
- Χαμηλό κόστος εργασίας και χαμηλό κόστος εξοπλισμού εργαλείων
 - Μικρός όγκος αποβλήτου
 - Μικρή φθορά εργαλείου
 - Πλήρης αυτοματοποίηση της κατεργασίας
 - Καλή ποιότητα επιφάνειας (το επιφανειακό φινίρισμα μπορεί να είναι λιγότερο από 10 C.L.A. για κάποια τεμάχια)
 - Δε μεταδίδει καμία φυσική ή θερμική τάση στο τεμάχιο
 - Είναι απλή στο χειρισμό (δεν απαιτεί ιδιαίτερη εξειδίκευση στη χρήση)
 - Είναι ταχεία στην παραγωγή
 - Μπορεί να επεξεργαστεί τρισδιάστατες μορφές σε ένα πέραςμα
 - Τα τεμάχια μπορούν να υποβληθούν σε ηλεκτροχημική κοπή με ή χωρίς θέρμανση
 - Δεν υπάρχει φθορά του ηλεκτροδίου

- Εμπεριέχει εξαιρετική αντοχή, έλεγχο και επαναληψιμότητα
- Έχει μεγάλο ρυθμό αποβολής υλικού, ο οποίος φτάνει τα $1,5\text{cm}^3/\text{min}$ με 1000A συνεχούς ρεύματος, και είναι σχεδόν ανεξάρτητος από το υλικό του τεμαχίου.

Εκτός από τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα, η ηλεκτροχημική κοπή έχει και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή της κατεργασίας:

- Ο ηλεκτρολύτης έχει διαβρωτική δράση
- Ο σχεδιασμός του ηλεκτροδίου είναι πολύπλοκος και δαπανηρός αρχικά, αλλά έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Έχει υψηλή κατανάλωση ισχύος, αλλά αρκετά χαμηλότερη από ότι άλλες μη συμβατικές κατεργασίες
- Έχει υψηλό αρχικό κόστος απόκτησης του εξοπλισμού
- Υπάρχει δυσκολία στην κατασκευή των εργαλείων, καθώς κάθε προϊόν και κάθε υλικό απαιτούν νέα έρευνα
- Είναι απαραίτητη η παραγωγή μεγάλου αριθμού τεμαχίων, η οποία όμως δυσχεραίνεται από το γεγονός ότι για κάθε προϊόν πρέπει να κατασκευαστεί συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο. Η βέλτιστη λύση εξαρτάται από την πολυπλοκότητα και το υλικό.
- Η ηλεκτροχημική κοπή ήταν παλαιότερα γνωστή σαν μία κατεργασία που ήταν ιδιαίτερα βλαβερή για το περιβάλλον. Με την εξέλιξη της μεθόδου και της χρήσης των ηλεκτρολυτών, η κατεργασία έγινε λιγότερο βλαβερή για το περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας ένα κλειστό λειτουργικό σύστημα ηλεκτρολύτη, το άνοιγμα του οχετού περιορίζεται. Το ίζημα που προκύπτει μπορεί σήμερα να ενσωματωθεί ως ακατέργαστη ύλη, η οποία μπορεί είτε να κατεργασθεί περαιτέρω ή και όχι. Αυτό εξαρτάται από το κατεργαζόμενο υλικό. [43-50]

3 Μαθηματική ανάλυση των φαινομένων που εμφανίζονται στην ECM

3.1 Η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης

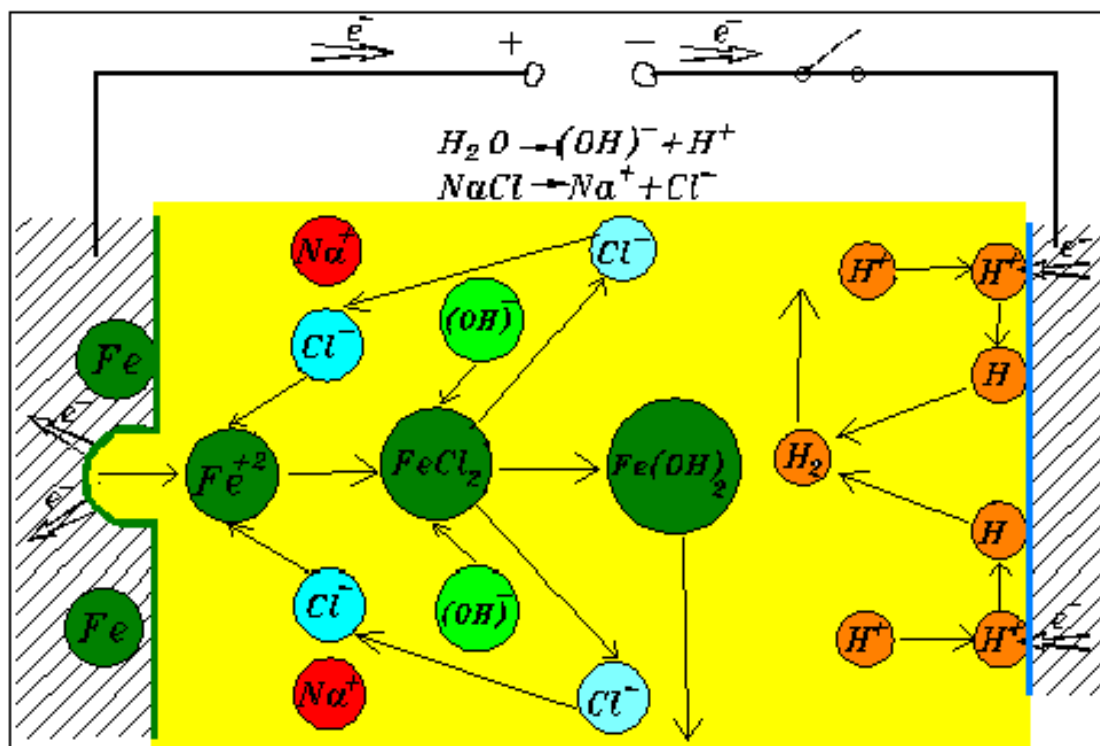
Το διάγραμμα 1 παριστάνει την αντίδραση διάλυσης του Fe σε υδατικό διάλυμα NaCl. Το αποτέλεσμα της ηλεκτρολυτικής διάσπασης $H_2O \rightarrow H^+ + (OH)^-$ και $NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$ είναι αρνητικά φορτισμένα ιόντα (ανιόντα) $(OH)^-$ και Cl^- τα οποία κατευθύνονται στην άνοδο, και θετικά φορτισμένα ιόντα (κατιόντα) H^+ και Na^+ τα οποία κατευθύνονται στην κάθοδο.

Στην άνοδο λαμβάνει χώρα η αντίδραση: $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$.

Και στην κάθοδο λαμβάνει χώρα η αντίδραση: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2(OH)^-$.

Το συνολικό αποτέλεσμα των δύο αυτών αντιδράσεων (ανοδικής και καθοδικής) είναι: $Fe^{++} + 2(OH)^- \rightarrow Fe(OH)_2$.

Το $Fe(OH)_2$ μπορεί να αντιδράσει με νερό και οξυγόνο και να δώσει $Fe(OH)_3$ κατά την αντίδραση: $4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3$.



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ηλεκτροχημικών αντιδράσεων κατά τη διάρκεια ECM σιδήρου με ηλεκτρολύτη χλωριούχου νατρίου (NaCl)

Η παραπάνω αντίδραση αποτελεί μέρος της ηλεκτρόλυσης. Το NaCl δεν απορροφάται εξ ολοκλήρου στην ηλεκτροχημική διαδικασία, με αποτέλεσμα, λόγω της κατανάλωσης του H_2O , η συγκέντρωση του NaCl στο διάλυμα να αυξάνεται και μερικές φορές να είναι απαραίτητη η προσθήκη H_2O στο διάλυμα. [1,3]

Με αυτό το συνδυασμό μετάλλου-ηλεκτρολύτη, η ηλεκτρόλυση περιλαμβάνει την ανοδική διάλυση του Fe και την παραγωγή αερίου H_2 στην κάθοδο. Καμία άλλη δράση δεν λαμβάνει χώρα στα ηλεκτρόδια.

3.2 Μελέτη της κατανομής της πυκνότητας ρεύματος στο διάκενο κατεργασίας

3.2.1 Γενικά

Κατά την ηλεκτρόλυση, το ηλεκτρικό πεδίο και η διακίνηση μάζας μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων καθορίζουν την πυκνότητα ρεύματος, ενώ το ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο διαρρέει τον ηλεκτρολύτη, οφείλεται στην κίνηση των φορτισμένων μορίων-ιόντων. Η διακίνηση μάζας, σε ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα, απαιτεί για την ανάλυση του λεπτομερή μελέτη της κίνησης των ιόντων, των ισοζυγίων μάζας του κατεργαζόμενου υλικού, της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος, της ηλεκτροουδετερότητας και της ροής του ηλεκτρολύτη. Το μέσο όπου λαμβάνει χώρα η ηλεκτροχημική κοπή αποτελείται από ένα διαλύτη μη διασπώμενο ηλεκτρολυτικά και η διαλυμένα συστατικά κάποιου είδους ιόντων, των οποίων οι συγκεντρώσεις ($c_1, c_2, \dots, c_n$) είναι μικρότερες από τη συγκέντρωση c_0 του διαλύτη.

3.2.2 Μελέτη της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος

Η ροή N_i , κάθε διαλυμένης ουσίας i , ορίζεται ως ο αριθμός γραμμοϊόντων που κινούνται προς δεδομένη κατεύθυνση ανά μονάδα χρόνου και οφείλεται στο συνδυασμένο μηχανισμό ηλεκτρικής αγωγιμότητας, διάχυσης και μετάδοσης θερμότητας. Το διάνυσμα ροής N_i μπορεί γενικότερα να εκφραστεί ως διανυσματικό άθροισμα τριών όρων:

$$\vec{N}_i = -z_i u_i F c_i \nabla u - D_i \nabla c_i + c_i \vec{W} \quad (3.1)$$

Ο πρώτος όρος του διανύσματος $\vec{N}_i$ δηλώνει τη διακίνηση μάζας που οφείλεται στις ηλεκτρικές δυνάμεις που ασκούνται στα ιόντα. Το μέγεθος u_i είναι η ηλεκτροχημική κινητικότητα των ιόντων του υλικού i , υπό την επίδραση μοναδιαίας έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ το μέγεθος u είναι το ηλεκτρικό δυναμικό στο διάλυμα. Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης περιγράφει τη διάχυση του υλικού i που λαμβάνει χώρα, όταν σημειώνεται μεταβολή στη συγκέντρωση του υλικού. Τα ιόντα μετακινούνται από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης προς περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης. Η ροή κατά τη διάχυση περιγράφεται από το νόμο του Fick:

$$N_i^{\text{diff}} = D_i \nabla c_i$$

όπου D_i είναι ο συντελεστής διάχυσης για το συγκεκριμένο υλικό. Ο τελευταίος όρος περιγράφει την κίνηση ενός σωματιδίου μαζί με το ρευστό προκαλώντας μετάδοση θερμότητας με μεταγωγή. Το διάνυσμα της ταχύτητας $\vec{W}$ καθορίζει την κίνηση του ρευστού.[8,9]

3.2.3 Κατανομή της πυκνότητας ρεύματος

Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τον ηλεκτρολύτη είναι αποτέλεσμα της κίνησης φορτισμένων σωματιδίων, δηλαδή των ιόντων. Εφόσον η έκφραση για τη ροή κάθε ιόντος είναι γνωστή, η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνεται ίση με το διανυσματικό άθροισμα του γινομένου των συνιστωσών ροών επί το αντίστοιχο ηλεκτρικό φορτίο ανά γραμμομόριο, $z_i F$:

$$\vec{i} = F \sum_{i=1}^n z_i \vec{N}_i \quad (3.2)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3.1) στην εξίσωση (3.2) προκύπτει:

$$\vec{i} = -F \sum_{i=1}^n c_i u_i z_i \nabla u - F \sum_{i=1}^n D_i z_i \nabla c_i + F \vec{W} \sum_{i=1}^n z_i c_i \quad (3.3)$$

Ο τελευταίος όρος ισούται με το μηδέν λόγω της συνθήκης της ηλεκτροουδετερότητας:

$$\sum_{i=1}^n z_i c_i = 0 \quad (3.4)$$

Η συνθήκη αυτή ισχύει σε όλο τον κύριο όγκο του διαλύματος, εκτός από κάποιες οριακές περιοχές του, όπως είναι ένα λεπτό στρώμα ηλεκτρικά φορτισμένο κοντά στα ηλεκτρόδια. Το πάχος του λεπτού αυτού στρώματος κυμαίνεται συνήθως από 1 έως 10 nm και τα φαινόμενα που σχετίζονται με αυτό μπορούν να ληφθούν υπόψη μέσω των οριακών συνθηκών. [8,9]

3.2.4 Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Εισάγεται η ποσότητα:

$$\kappa = F \cdot \sum_{i=1}^n c_i z_i u_i \quad (3.5)$$

η οποία ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη, οπότε η πυκνότητα ρεύματος γράφεται:

$$\vec{i} = -\kappa \nabla u - F \sum_{i=1}^n D_i z_i \nabla c_i \quad (3.6)$$

Η σχέση αυτή υποδηλώνει ότι η πυκνότητα ρεύματος εξαρτάται από την κλίση του ηλεκτρικού δυναμικού u και των συγκεντρώσεων c_i .

Στην περιοχή που η κλίση της συγκέντρωσης μπορεί να αγνοηθεί, η πυκνότητα ρεύματος περιγράφεται από το νόμο του Ohm σε διαφορική μορφή:

$$\vec{i} = -\kappa \nabla u \quad (3.7)$$

Αντίθετα, στην περιοχή που σημειώνονται σημαντικές μεταβολές στη κλίση της συγκέντρωσης, δεν μπορεί να εφαρμοσθεί ο νόμος του Ohm με την παραπάνω μορφή.

3.2.5 Απλούστευση του μοντέλου κατανομής της πυκνότητας ρεύματος

Οι συγκεντρώσεις τείνουν ασυμπτωτικά προς την τιμή c_b . Για να απλουστευθεί το μοντέλο, το προφίλ της συγκέντρωσης θεωρείται ότι έχει γραμμική μορφή και ο χώρος διαιρείται σε δύο μέρη:

- Ένα λεπτό στρώμα το οποίο ονομάζεται στρώμα διάχυσης με πάχος δ_s .
- Την περιοχή του κυρίου μέρους του διαλύματος όπου η συγκέντρωση είναι σταθερή.

Το πάχος του στρώματος διάχυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες ροής του ηλεκτρολύτη και μόνο σε σχετικά απλές περιπτώσεις το δ_s μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει των υδροδυναμικών παραμέτρων. Στη στρωτή ροή, το πάχος δ_s είναι περίπου ίσο με το 1/10 του πάχους του οριακού στρώματος, ενώ στην τυρβώδη ροή η μέση τιμή του δ_s είναι πολύ μικρότερη και το πρόβλημα υπολογισμού του πάχους δ_s γίνεται πιο πολύπλοκο.

Επειδή το στρώμα διάχυσης είναι πολύ μικρό συγκρινόμενο με το μέγεθος του διακένου κατεργασίας στην ηλεκτροχημική κοπή, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το στρώμα διάχυσης ανήκει στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων και να αθροιστούν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα μέσα στο στρώμα στο σύνολο των φαινόμενων που συναντώνται γύρω από τα δύο ηλεκτρόδια. Λόγω της υπόθεσης αυτής, ο νόμος του Ohm εφαρμόζεται σε περιοχές γειτονικές προς τα ηλεκτρόδια, και η επίδραση των διεργασιών στα ηλεκτρόδια (π.χ. διάχυση) λαμβάνεται υπόψη εισάγοντας στις οριακές συνθήκες την ενδεχόμενη πτώση τάσης που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας αυτής. Εάν σε αυτούς τους υπολογισμούς λάβουμε υπόψη την πραγματική σχέση μεταξύ της πτώσης τάσης στα ηλεκτρόδια και της πυκνότητας ρεύματος (για παράδειγμα τον προσδιορισμό των καμπύλων πόλωσης), τότε κάθε εισαγόμενο σφάλμα από αυτή την προσέγγιση καθίσταται αμελητέο. Κατά συνέπεια, για τον προσδιορισμό της κατανομής της πυκνότητας ρεύματος στο διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (3.7).

3.2.6 Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στον ηλεκτρολύτη

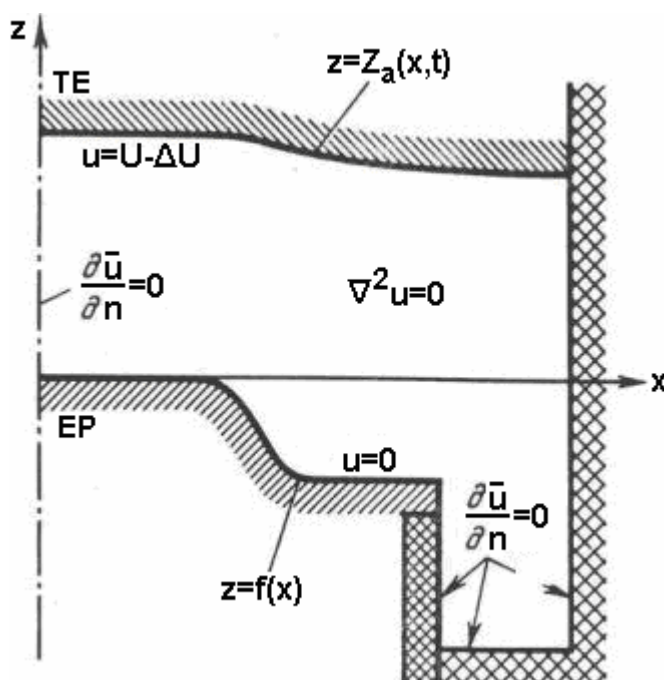
Από τη σχέση (3.7) και σε συνδυασμό με την υπόθεση της ηλεκτροουδετερότητας του διαλύματος, προκύπτει ότι στο ηλεκτρικό πεδίο ο χρόνος παίζει το ρόλο της παραμέτρου. Συνεπώς, η εξίσωση κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού στον ηλεκτρολύτη προκύπτει:

$$\text{div}(\kappa \nabla u) = 0 \quad (3.8)$$

$$\text{ή } \kappa \nabla^2 u + (\nabla \kappa, \nabla u) = 0 \quad (3.9)$$

Στην τελευταία μορφή της εξίσωσης αυτής, λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές της αγωγιμότητας του ηλεκτρολύτη μέσα στο διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων λόγω της αναπτυσσόμενης θερμότητας και της παραγωγής αερίων. Οι οριακές συνθήκες για τις

εξισώσεις (3.8) και (3.9) προκύπτουν από τις συνθήκες που επικρατούν στα ηλεκτρόδια και στα μονωμένα τοιχώματα (Εικ. 15)



Εικόνα 15: Οριακές συνθήκες

Με την υπόθεση ότι τα ηλεκτρόδια, τα οποία συνδέονται με εξωτερική πηγή τάσης U , είναι απολύτως αγωγά, οι οριακές συνθήκες γράφονται:

- $u = -E_c$ στην κάθοδο-εργαλείο
- $u = U - E_a$ στην άνοδο-τεμάχιο
- $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ στα μονωμένα τοιχώματα.

Η τελευταία συνθήκη εκφράζει το γεγονός ότι το ρεύμα δε διαρρέει το μονωτή. Η ανοδική τάση E_a και η καθοδική τάση E_c εξαρτώνται από την πυκνότητα του ρεύματος και καθορίζονται από το άθροισμα της συγκέντρωσης και της υπέρτασης κάθε ηλεκτροδίου. [13]

3.2.7 Υπολογισμός του καθοδικού και ανοδικού δυναμικού

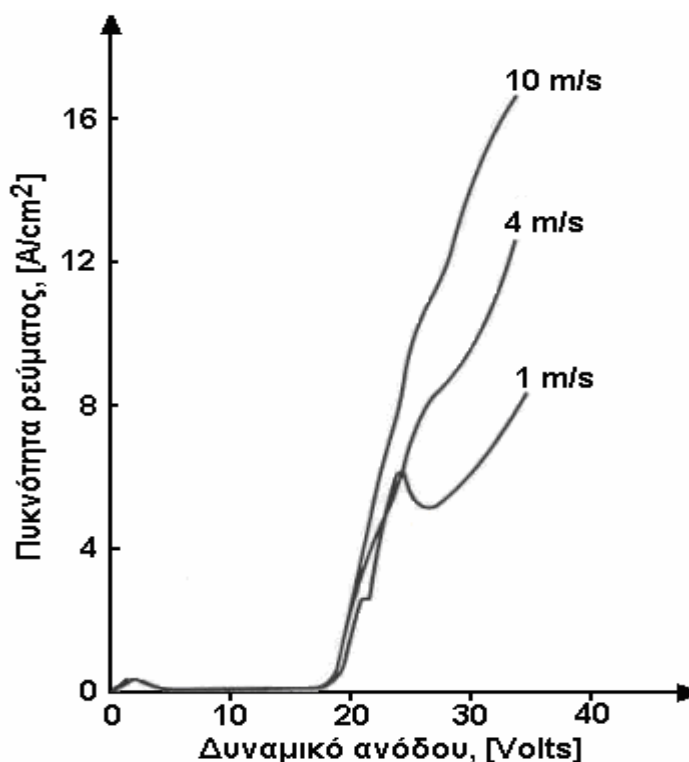
Το καθοδικό δυναμικό E_c υπολογίζεται επακριβώς από τη σχέση του Tafel:

$$E_c = a + b \cdot \ln i_c \quad (3.10)$$

για μεγάλο εύρος τιμών της πυκνότητας ρεύματος, από 10^{-5} έως 10^2 A/cm². Η τιμή του συντελεστή a εξαρτάται από το υλικό του εργαλείου-ηλεκτροδίου. Ο συντελεστής b παίρνει τιμές μεταξύ 0,11-0,14 V για ηλεκτρολύτη NaCl, ενώ για ηλεκτρολύτη NaClO₃ παίρνει την τιμή 0,24V. Η πυκνότητα ρεύματος i_c μετράται σε A/cm². Οι μεταβολές του E_c σε σύγκριση με την τάση U είναι σχετικά μικρές και, κατά συνέπεια, μπορεί να υποτεθεί στους υπολογισμούς ότι το E_c παραμένει σταθερό. Για παράδειγμα, κατά τη διαδικασία ηλεκτροχημικής κοπής με ηλεκτρολύτη NaCl η υπέρταση E_c είναι περίπου ίση με 1,5V.

Στην περίπτωση ανοδικής διάλυσης με υψηλή πυκνότητα ρεύματος, η σχέση Tafel είναι ορθή μόνο σε μικρό εύρος τιμών της πυκνότητας ρεύματος.

Η σχέση $E_a = E_a(i)$ ή ισοδύναμα $i = i(E_a)$ απεικονίζεται με πιο πολύπλοκη καμπύλη, σε όλο το εύρος τιμών της πυκνότητας ρεύματος που εφαρμόζονται στην ηλεκτροχημική κοπή. Στο διάγραμμα 2 απεικονίζονται παραδείγματα από ανοδικές καμπύλες πόλωσης νικελίου σε διάλυμα (5M) NaNO₃ + (1M) HNO₃ για διάφορες ταχύτητες ροής του ηλεκτρολύτη.



Διάγραμμα 2: Ανοδικές καμπύλες πόλωσης του Ni για διάφορες ταχύτητες ροής του ηλεκτρολύτη

3.2.8 Η επίδραση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην κατεργασία

Σε κάποιες εφαρμογές της ηλεκτροχημικής κοπής, η ηλεκτρική αντίσταση των ηλεκτροδίων δε μπορεί να αγνοηθεί, όπως π.χ. τα τεμάχια μεγάλου μήκους αλλά λεπτά σε πάχος. Κατά τη διέλευση υψηλού ρεύματος, η πτώση τάσης εμφανίζεται κατά μήκος του τεμαχίου και επιβάλλεται η επίδραση αυτή να συμπεριληφθεί στις οριακές συνθήκες του προβλήματος.

Όπως φαίνεται από τις σχέσεις (3.7) και (3.9), η ηλεκτρική αγωγιμότητα κ του μέσου στο διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων έχει σημαντική επίδραση στην πυκνότητα του ρεύματος και στην κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρικού πεδίου. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι οι μεταβολές της αγωγιμότητας είναι η κυρίαρχη αιτία για τη μείωση της ακρίβειας της κατεργασίας, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι αναγκαίο να διερευνάται σε βάθος τυχόν απόκλιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διακένου σε πραγματικές συνθήκες κατεργασίας. Παράλληλα, πρέπει να διαφοροποιηθεί η απόκλιση της αγωγιμότητας κ_0 από την είσοδο του διακένου μέχρι την περιοχή κοπής, από τη μεταβολή της αγωγιμότητας που οφείλεται στις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο διάκενο. Όπως είναι γνωστό, η τιμή της κ_0 εξαρτάται από τη συγκέντρωση των συστατικών στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα, από τη θερμοκρασία στην είσοδο του διακένου και από το ποσοστό των ακαθαρσιών που προκύπτουν από την κατεργασία του τεμαχίου μέσα στον ηλεκτρολύτη. Άρα, εάν σταθεροποιηθεί αυτός ο παράγοντας με κατάλληλη ρύθμιση του συστήματος παροχής του ηλεκτρολύτη, οι τιμές της αγωγιμότητας θα μπορούν να διατηρούνται μέσα στα επιβεβλημένα όρια ανοχών της κ_0 . Παρόλα αυτά, η σταθεροποίηση της αγωγιμότητας κ_0 στην είσοδο του διακένου δεν εξαλείφει τη μεταβολή της αγωγιμότητας μέσα στο διάκενο λόγω των φαινομένων που συνοδεύουν την κατεργασία αποβολής υλικού.

3.2.9 Η επίδραση της παραγωγής θερμότητας στην ηλεκτροχημική κοπή

Κατά τη διέλευση του ρεύματος διαμέσου του ηλεκτρολύτη παράγεται σημαντικό ποσό θερμότητας, το οποίο προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη. Η

επίδραση της θερμοκρασίας στην ηλεκτρική αγωγιμότητα περιγράφεται κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$\kappa = \kappa_o [1 + \alpha_\tau (T - T_o)] \quad (3.11)$$

όπου α_τ είναι ο θερμικός συντελεστής ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τη θερμοκρασία εισόδου στο διάκενο, με τιμές από 0.02-0.03 1/K για τους τυπικούς ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροχημική κοπή.

Επιπλέον, λόγω της εκλυόμενης θερμότητας, στις περισσότερες περιπτώσεις ηλεκτροχημικής κοπής, παράγονται φυσαλίδες αερίου στη ζώνη κατεργασίας. Ο διασκορπισμός των φυσαλίδων μέσα στον ηλεκτρολύτη έχει ως αποτέλεσμα, η ισοδύναμη ηλεκτρική αγωγιμότητα στο διάκενο να λαμβάνει τιμές σημαντικά μικρότερες από τις αναμενόμενες τιμές για ηλεκτρολύτη απαλλαγμένο από φυσαλίδες. Η αγωγιμότητα σχετίζεται άμεσα με το ποσοστό β (%κ.ό.) των φυσαλίδων στο διάκενο. Το ποσοστό β των αερίων φυσαλίδων μεταβάλλεται κατά μήκος του διακένου κατεργασίας και κατά την κύρια κατεύθυνση ροής του ηλεκτρολύτη. [2-6]

3.2.10 Υπολογισμός της αγωγιμότητας υπό την έκλυση φυσαλίδων

Το πρόβλημα της αγωγιμότητας στην περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής των φυσαλίδων, οι οποίες συμπεριφέρονται σαν μη αγωγίμα σφαιρικά σωματίδια, έχει ερευνηθεί σε βάθος για περισσότερο από 100 έτη και συνεχίζει να ερευνάται με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Υπάρχουν πολυάριθμες θεωρητικές και εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν την αγωγιμότητα κ , του ηλεκτρολύτη με διασπορά φυσαλίδων, με την αγωγιμότητα κ_e , του ηλεκτρολύτη χωρίς φυσαλίδες. Επειδή, στην πράξη, συνήθως παρατηρείται η έκλυση μεγάλου ποσοστού φυσαλίδων κατά την ηλεκτροχημική κοπή, χρησιμοποιείται η εξίσωση Bruggeman:

$$\kappa_g = \kappa_e (1 - \beta)^{3/2} \quad (3.12)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα την επίδραση των δύο παραγόντων σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.11) και (3.12), η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη σε δεδομένο σημείο του διακένου μπορεί να ληφθεί ίση προς:

$$\kappa = \kappa_o (1 + \alpha_\tau \Theta) (1 - \beta)^{3/2} \quad (3.13)$$

όπου $\Theta = T - T_0$ η αύξηση της θερμοκρασίας. Με συνδυασμό των εξισώσεων (3.13) και (3.9) προκύπτει:

$$\nabla^2 u = \frac{3}{2(1-\beta)} (\nabla \beta, \nabla u) - \frac{\alpha_\tau}{1+\alpha_\tau} (\nabla \Theta, \nabla u) \quad (3.14)$$

Και από τις σχέσεις (3.7) και (3.13) η πυκνότητα ρεύματος ισούται με:

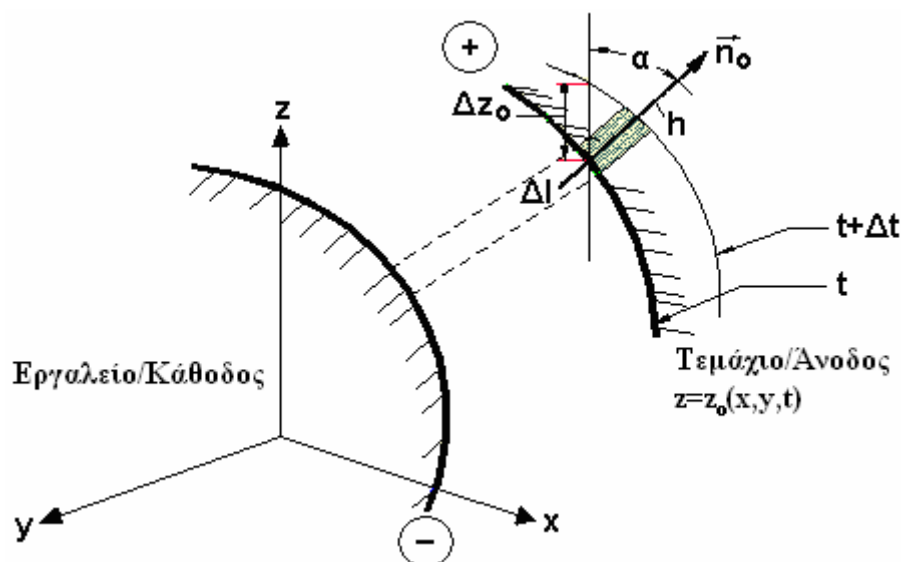
$$i = -\kappa_0 (1 + \alpha_\tau \Theta) (1 - \beta)^{3/2} \nabla u \quad (3.15)$$

Συνεπώς, υπεισέρχονται νέες παράμετροι υπό τη μορφή της κατανομής της θερμοκρασίας και της διασποράς αερίων φυσαλίδων που επηρεάζουν την κατεργασία. Οι κατανομές αυτές δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και δεν παραμένουν ανεπηρέαστες από τα διάφορα πεδία και τις φυσικές συνθήκες που επικρατούν στο διάκενο κατεργασίας. Περαιτέρω απλοποίηση περιγράφει επαρκώς πολλά πρακτικά προβλήματα.

3.3 Βασικές αρχές της ηλεκτροχημικής κοπής

3.3.1 Ορισμός της απόδοσης του ρεύματος

Έστω σύστημα αναφοράς Oxzyz πάνω στο τεμάχιο-άνοδο και απειροστό στοιχείο της ανοδικής επιφάνειας με επιφάνεια ΔA , διαμέσου του οποίου ρέει ρεύμα έντασης ΔI , όπως φαίνεται στην Εικ. 16. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, μέρος του ηλεκτρικού ρεύματος (ΔI^+) που διοχετεύεται στο σύστημα μεταφέρεται από την άνοδο προς το διάλυμα με τη μορφή ιόντων μετάλλου (κατιόντα), συμβάλλοντας έτσι στη διάλυση της ανόδου. Παράλληλα, μέρος των ανιόντων αντιδρούν στην άνοδο με το θετικά φορτισμένο μέταλλο, σχηματίζοντας οξείδια του μετάλλου, χλωριούχα ιόντα κλπ.



Εικόνα 16: Σχηματική παράσταση της διαδικασίας ηλεκτροχημικής κοπής

Ο λόγος του ρεύματος ΔI^+ , το οποίο προκαλεί τη διάλυση της ανόδου, προς το συνολικό ρεύμα ΔI , ονομάζεται απόδοση ρεύματος η :

$$\eta = \frac{\Delta I^+}{\Delta I} \quad (3.16)$$

και εκφράζεται συχνά ως ποσοστιαία αναλογία.

Η απόδοση ρεύματος (η) εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, από τον τύπο του ηλεκτρολύτη και τις συνθήκες κατεργασίας, κυρίως την πυκνότητα ρεύματος, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα ροής του ηλεκτρολύτη. Όταν υπάρχει απόδοση ρεύματος 100%, τότε τα ιόντα μεταφέρουν το σύνολο του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ για μηδενική απόδοση το ρεύμα περνάει χωρίς να έχουμε διάλυση μετάλλου.[1,3-6]

3.3.2 Υπολογισμός της μάζας του αφαιρούμενου υλικού

Όταν η αποβολή του μετάλλου γίνεται αποκλειστικά με ηλεκτροχημική δράση και δεν παρεμβάλλεται καμία μηχανουργική αποβολή υλικού, όπως είναι π.χ. η υδροδυναμική ή ηλεκτροχημική διάβρωση, η αποβολή υλικού λαμβάνεται από τον Πρώτο Νόμο του Faraday.

Σύμφωνα με τον Πρώτο Νόμο του Faraday, η μάζα Δm του αφαιρούμενου μετάλλου, που αντιστοιχεί σε ρεύμα ΔI^+ , το οποίο παρέχεται σε χρόνο Δt , μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\Delta m = \eta \cdot \varepsilon \cdot \Delta I \cdot \Delta t \quad (3.17)$$

όπου:

ΔI η ένταση του ρεύματος (σε A)

Δt ο χρόνος (σε s)

ε το ηλεκτροχημικό ισοδύναμο του υλικού του τεμαχίου, το οποίο ισούται με τη μάζα των ιόντων που μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα 1 Coulomb (1Asec).

3.3.3 Υπολογισμός του ηλεκτροχημικού ισοδύναμου του υλικού του τεμαχίου

Σύμφωνα με το Δεύτερο Νόμο του Faraday, το ηλεκτροχημικό ισοδύναμο για την αντίδραση $M \rightarrow M^{z+} + ze$ δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{A}{z \cdot F} \quad (3.18)$$

όπου A το ατομικό βάρος του μετάλλου (M), $F=96500C$ η σταθερά Faraday και z το σθένος του υλικού του τεμαχίου. Ο συνδυασμός του ατομικού βάρους των αντιδρώντων ιόντων και του σθένους z , αποτελεί το χημικό ισοδύναμο και εκφράζεται από την ποσότητα A/z . Εάν το υλικό του τεμαχίου είναι κράμα αποτελούμενο από n στοιχεία, το καθένα με ατομικό βάρος A_i , σθένος z_i και κατά βάρος περιεκτικότητα στο κράμα n_i ($1 \leq i \leq n$), το ηλεκτροχημικό ισοδύναμο προκύπτει από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{1}{F \sum_{i=1}^n \frac{n_i z_i}{A_i}} \quad (3.19)$$

3.3.4 Ορισμός του συντελεστή ηλεκτροχημικής κατεργασιμότητας

Αντικαθιστώντας το ρεύμα ΔI_+ στην εξίσωση (3.16) και εκφράζοντας την αποβαλλόμενη μάζα Δm συναρτήσει της πυκνότητας ρ και του αποβαλλόμενου όγκου, ύψους Δh και διατομής ΔA , η σχέση (3.17) γίνεται:

$$\rho_m \cdot \Delta h \cdot \Delta A = \eta \cdot \varepsilon \cdot \Delta I \cdot \Delta t \quad \text{ή} \quad \frac{\Delta h}{\Delta t} = \eta \cdot \frac{\varepsilon}{\rho_m} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta A} \quad (3.20)$$

όπου ρ_m είναι η πυκνότητα του κατεργαζόμενου υλικού.

Όλες οι διαφορικές ποσότητες τείνουν στο 0. Λαμβάνοντας συνεπώς το όριο $\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta t}$ που εκφράζει την ταχύτητα διάλυσης της ανόδου, η εξίσωση (3.20) γίνεται:

$$V_n = \eta \frac{\varepsilon}{\rho_m} i_a \quad \text{ή} \quad V_n = K_v i_a \quad (3.21)$$

όπου :

$i_a = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta A}$ η πυκνότητα ρεύματος στην άνοδο και

$K_v = \eta \frac{\varepsilon}{\rho_m}$ ο συντελεστής ηλεκτροχημικής κατεργασιμότητας, ο οποίος εκφράζει τον αφαιρούμενο όγκο υλικού από την άνοδο ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου και προσδιορίζεται πειραματικά με διάφορες μεθόδους. Τιμές του συντελεστή K_v παρέχονται στους Πίνακες 2 και 3 στη συνέχεια. [38]

Μέταλλο	Ατομικό βάρος	Σθένος	Πυκνότητα	Κν για απόδοση ρεύματος 100% (n=1)
	g		g/cm ³	mm ³ /Amin
Αλουμίνιο	26,98	3	2,71	2,06
Αντιμόνιο	121,75	3	6,62	3,77
		5		2,30
Αρσενικό	74,92	3	5,73	2,79
		5		1,64
Βιρίλιο	9,012	2	1,86	1,5
Βισμούθιο	208,98	3	9,8	4,43
		5		2,62
Κάδμιο	112,40	2	8,67	4,1
Χρώμιο	51,896	2	7,2	2,25
		3		1,51
		6		0,75
Κοβάλτιο	58,93	2	8,92	2,05
		3		1,38
Χαλκός	63,546	1	8,97	4,39
		2		2,20
Γερμάνιο	72,59	4	5,32	2,13
Χρυσός	196,967	1	19,33	6,40
		3		2,13
ΐνδιο	114,82	1	7,31	9,84
		2		4,92
		3		3,28
Ιρίδιο	192,20	3	22,52	1,80
		4		1,31
Σίδηρος	55,847	2	7,86	2,21
		3		1,47
Μαγνήσιο	24,312	2	1,75	4,43

Μολυβδένιο	95,94	3	10,22	1,95
		4		1,47
		6		0,98
Νικέλιο	58,71	2	8,92	2,11
		3		1,36
Όσμιο	109,20	2	22,58	2,62
		3		1,64
		4		1,31
		8		0,66
Παλλάδιο	106,40	2	12,02	2,79
		4		1,31
		6		0,98
Ρόδιο	102,9	3	12,38	1,80
Αργίλιο	107,9	1	10,5	6,39
Θάλλιο	204,37	1	11,86	10,66
		3		3,61
Θόριο	232,038	4	11,66	3,12
Τιτάνιο	47,90	3	4,52	2,19
		4		1,65
Ουράνιο	238,03	4	19,09	1,92
		6		1,29
Βανάδιο	50,95	3	6,09	1,74
		5		1,02
Ζιρκόνιο	91,22	4	6,48	2,13

Πίνακας 2: Τιμές του δείκτη κατεργασιμότητας για καθαρά μέταλλα

Κράμα	Κν για απόδοση ρεύματος 100% ($\eta=1$)
	mm ³ /Amin
4340 Steel	2,18
17-4 PH	2,02
A-286	1,92
M-252	1,8
Rene 41	1,77
Udimet 500	1,8
Udimet 700	1,77
L 605	1,75

Πίνακας 3: Τιμές του δείκτη κατεργασιμότητας για κράματα μετάλλων

3.3.5 Υπολογισμός του ρυθμού αποβολής υλικού

Από το Νόμο του Faraday προσδιορίζεται ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR) Q_v , ο οποίος ορίζεται ως η ανά μονάδα χρόνου αποβαλλόμενη ποσότητα υλικού:

$$Q_v = \frac{dm}{dt} \text{ ή τελικά: } Q_v = K_v I \quad (3.22)$$

Ο ρυθμός αποβολής υλικού στην ηλεκτροχημική κοπή εξαρτάται από τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες του τεμαχίου (K_v) και είναι ανάλογος του συνολικού ρεύματος της κατεργασίας. Η ανομοιόμορφη κατανομή του ρυθμού αποβολής υλικού πάνω στην κατεργαζόμενη επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του σχήματος της επιφάνειας του τεμαχίου. Στην ηλεκτροχημική κοπή ο ρυθμός αυτός ισούται με την ταχύτητα διάλυσης V_n της ανόδου, η οποία είναι κάθετη στην επιφάνεια της ανόδου, βλ. Εικ. 16.

3.3.6 Ορισμός της ανηγμένης κατανάλωσης ενέργειας

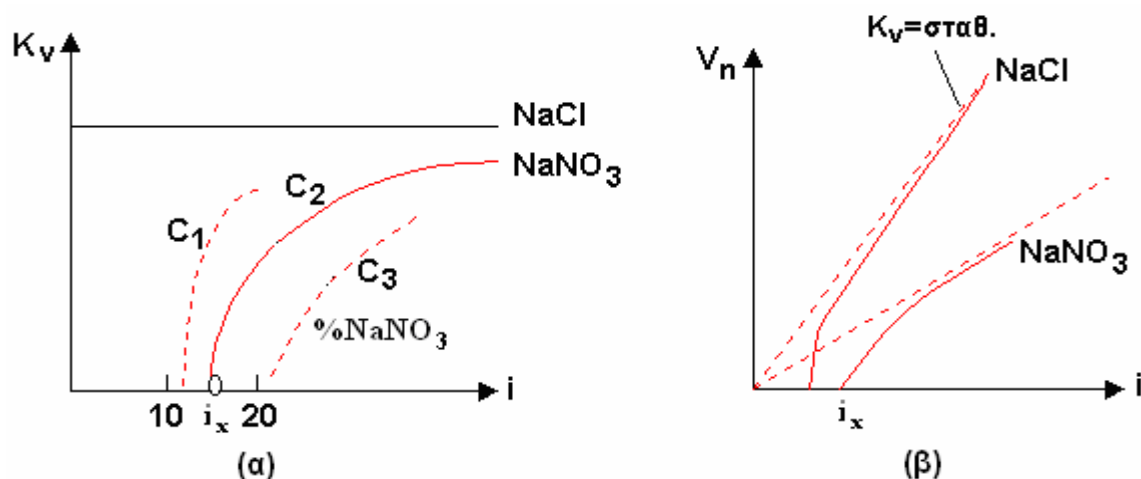
Ως ανηγμένη κατανάλωση ενέργειας κατά την ηλεκτροχημική κοπή ορίζεται η απαιτούμενη ενέργεια ανά μονάδα αποβαλλόμενου όγκου κατεργαζόμενου υλικού: $e=dE/dv$. Επειδή σε χρόνο dt η καταναλισκόμενη ενέργεια ισούται με $dE = U \cdot I \cdot dt$ και

ο αποβαλλόμενος όγκος κατεργαζόμενου υλικού είναι $dv = K_v \cdot I \cdot dt$, η ανηγμένη κατανάλωση ρεύματος θα είναι ίση με:

$$e = U / K_v. \quad (3.22)$$

3.3.7 Αλληλεξάρτηση των βασικών παραμέτρων ηλεκτροχημικής κοπής

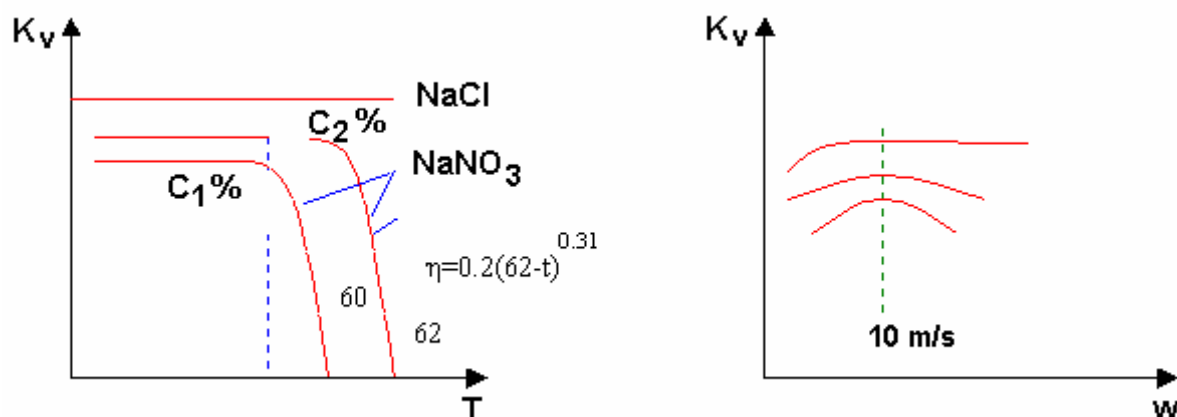
Η απόδοση ρεύματος και ο συντελεστής ηλεκτροχημικής κατεργασιμότητας εξαρτώνται από τον τύπο του ηλεκτρολύτη και την πυκνότητα ρεύματος. Στο διάγραμμα 3 παρουσιάζονται αντίστοιχα η μεταβολή του δείκτη κατεργασιμότητας και της ταχύτητας διάλυσης συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος για ηλεκτρολύτες NaCl και NaNO₃.



Διάγραμμα 3: (α) Μεταβολή του συντελεστή κατεργασιμότητας (αριστερά) και (β) της ταχύτητας διάλυσης (δεξιά) συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος για ηλεκτρολύτες NaCl και NaNO₃.

Όσον αφορά στην ακρίβεια της κατεργασίας, το βέλτιστο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται όταν ο συντελεστής κατεργασιμότητας K_v αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος και φθίνει μέχρι το μηδέν όταν η πυκνότητα ρεύματος μειώνεται κάτω από κάποια τιμή i_x . Αυτό το είδος ηλεκτρολύτη περιορίζει την ηλεκτροχημική διάλυση στην περιοχή του τεμαχίου, που βρίσκεται πολύ κοντά στο εργαλείο-ηλεκτρόδιο.

Στο Διαγρ.4 απεικονίζεται η επίδραση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας ροής του ηλεκτρολύτη, αντίστοιχα, στο συντελεστή κατεργασιμότητας K_v . [30]



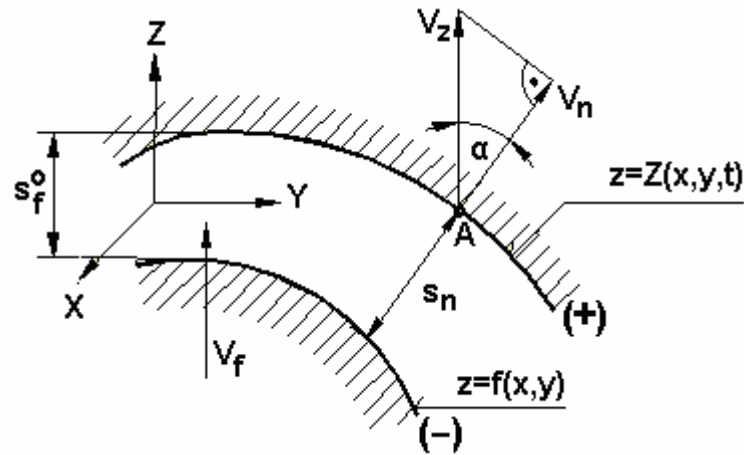
Διάγραμμα 4: Επίδραση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας ροής του ηλεκτρολύτη στο συντελεστή κατεργασιμότητας Kv.

Από τα διαγράμματα 3 και 4 προκύπτει ότι η εφαρμογή της ηλεκτροχημικής κοπής με ηλεκτρολύτη NaCl επιτρέπει μεγαλύτερο ρυθμό αποβολής υλικού (εκχόνδριση), ενώ όταν απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια κατεργασίας (φινίρισμα), ενδείκνυται η χρήση ηλεκτρολύτη NaNO₃.

3.3.8 Εύρεση της γενικής εξίσωσης ηλεκτροχημικής διαμόρφωσης

Εάν είναι γνωστή η κατανομή της ταχύτητας διάλυσης της ανόδου (V_n) συναρτήσει του χρόνου, καθίσταται δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός της γεωμετρικής μορφής του εργαλείου προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό (τρισδιάστατο) περίγραμμα της κατεργαζόμενης επιφάνειας.

Έστω ότι η επιφάνεια της ανόδου (κατεργαζόμενη επιφάνεια) περιγράφεται από μια ρητή συνάρτηση $z=z_a(x,y,z)$ ως προς καρτεσιανό σύστημα αναφοράς Oxyz το οποίο τοποθετείται στο τεμάχιο (Εικ. 17). Η επιφάνεια της ανόδου μετατοπίζεται κατά τον άξονα z με ταχύτητα $V_z = \frac{\partial z_a}{\partial t}$, και ισούται με $V_z = \frac{V_n(x_a, y_a, t)}{\cos \alpha(x_a, y_a, t)}$, όπου $[x_a, y_a, z=z_a(x_a, y_a, t)]$ είναι οι συντεταγμένες των σημείων που βρίσκονται στην επιφάνεια της ανόδου και α είναι η γωνία που σχηματίζεται από το διάνυσμα $\vec{n}_a$ που είναι κάθετο στην επιφάνεια της ανόδου και στον άξονα z .



Εικόνα 17: Σχηματική παράσταση ηλεκτροχημικής κοπής

Επειδή οι συντεταγμένες του κάθετου διανύσματος $\vec{n}_a$ είναι $\vec{n}_a = \left(\frac{\partial z_a}{\partial x}, \frac{\partial z_a}{\partial y}, -1 \right)$, ισχύει:

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial y} \right)^2}} \quad (3.24)$$

Αν αντικατασταθεί η κατανομή της ταχύτητας V_z στη σχέση (3.24) προκύπτει η εξίσωση ηλεκτροχημικής διαμόρφωσης σε καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$\frac{\partial z_a}{\partial t} = K_v \cdot i_a(x_a, y_a, t) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial y} \right)^2} \quad (3.25)$$

Έστω ότι η επιφάνεια ανόδου περιγράφεται από την εξίσωση $F(x, y, z, t) = 0$. Τότε, το ολικό διαφορικό της συνάρτησης F θα είναι:

$$\frac{DF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial F}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial F}{\partial z} \frac{dz}{dt} = 0$$

Η κλίση της συνάρτησης F : $\nabla F = \text{grad} F = \frac{\partial F}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial F}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial F}{\partial z} \vec{k}$

Και με τις συνιστώσες του διανύσματος V_n της ταχύτητας διάλυσης:

$$\frac{dx}{dt} = V_x \quad \frac{dy}{dt} = V_y \quad \frac{dz}{dt} = V_z$$

Προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{V}_n, \nabla F) = 0 \quad (3.26)$$

όπου: $(\vec{V}_n, \nabla F)$ το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων ∇F και $\vec{V}_n$.

Από την εξίσωση (3.22) έχουμε:

$$\vec{V}_n = K_v i_a \vec{n}_a \quad (3.27)$$

όπου $\vec{n}_a = \frac{\nabla F}{|\nabla F|}$. Με αντικατάσταση της εξίσωσης (3.26) στην εξίσωση (3.27) και απλοποιώντας, λαμβάνεται η γενική εξίσωση της ηλεκτροχημικής διαμόρφωσης:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + K_v i_a |\nabla F| = 0 \quad (3.28)$$

Η γενική εξίσωση περιγράφει την εξέλιξη του σχήματος της επιφάνειας του τεμαχίου για όλες τις μεθόδους ηλεκτροχημικής κατεργασίας.

Εάν στις εξισώσεις (3.25) ή (3.28) αντικατασταθεί η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος στην άνοδο, i_a , με την αντίστοιχη της καθόδου, i_c , και ο συντελεστής κατεργασιμότητας, K_v , με τη ποσότητα η/ρ για την καθοδική εναπόθεση, οι εξισώσεις που προκύπτουν περιγράφουν ομοίως την ηλεκτροχημική κατεργασία εναπόθεσης υλικού στην κάθοδο.

Για την επίλυση της γενικής εξίσωσης ηλεκτροχημικής διαμόρφωσης (3.25) ή (3.28), πρέπει να είναι γνωστή μια αρχική συνθήκη και η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος στην άνοδο, $i_a(x_a, y_a, t)$, κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Ως αρχική συνθήκη τίθεται: $z = z_0(x, y, 0)$ ή $F_0(x, y, 0) = 0$, όπου z_0 ή F_0 είναι το αρχικό σχήμα της επιφάνειας του τεμαχίου προς κατεργασία. [20-28]

4 Εφαρμογή στο σχεδιασμό απλού εργαλείου – Ιδανική ‘ECM’

4.1 Η «ιδανική» κατεργασία ηλεκτροχημικής κοπής

4.1.1 Περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου ηλεκτροχημικής κοπής

Το απλουστευμένο προσεγγιστικό μαθηματικό μοντέλο ηλεκτροχημικής κοπής στηρίζεται στις ακόλουθες βασικές υποθέσεις:

- Ο νόμος του Ohm ισχύει κατά μήκος όλου του διακένου μεταξύ των επιφανειών των δύο ηλεκτροδίων.
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη μέσα στο διάκενο κατεργασίας παραμένει σταθερή στο χώρο και το χρόνο.
- Σε κάθε ηλεκτρόδιο το δυναμικό παραμένει αμετάβλητο σε όλη του την επιφάνεια και για όλη τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Η απόδοση του ρεύματος για τη διάλυση της ανόδου είναι ίδια σε κάθε σημείο της επιφάνειας του τεμαχίου.[3,10]

Σύμφωνα με αυτές τις τέσσερις υποθέσεις, το μαθηματικό μοντέλο της ηλεκτροχημικής κοπής μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \varepsilon K_v \nabla u \nabla F = 0, \quad (4.1)$$

όπου κατά τη χρονική στιγμή $t=0$ είναι: $F = F_0$, $\nabla^2 u = 0$, $u(f) = 0$, στο εργαλείο-κάθοδος f , $u(F) = U - \Delta U$, στο τεμάχιο-άνοδος F , και $\nabla u \equiv \frac{\partial u}{\partial n} = 0$ στην επιφάνεια της μόνωσης του εργαλείου και στις γραμμές συμμετρίας.

4.1.2 Μετατροπή της εξίσωσης ηλεκτροχημικής διαμόρφωσης για ιδανική κατεργασία

Όταν η ανοδική επιφάνεια περιγράφεται από μια συνάρτηση της μορφής $z=z_a(x, y, z)$ ως προς καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $\{x, y, z\}$, σταθερά

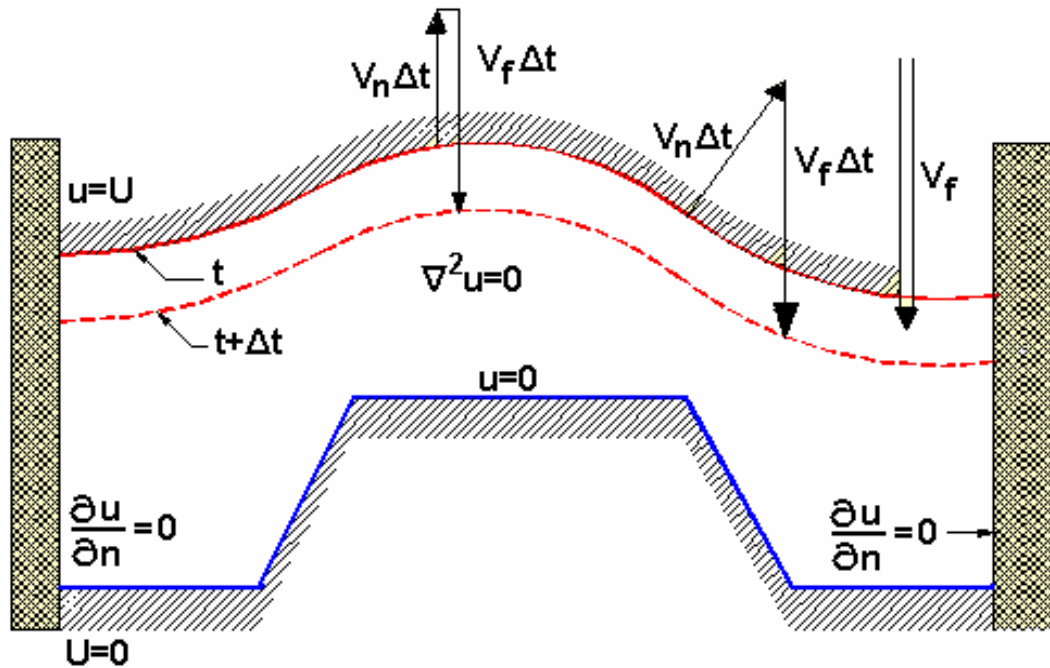
προσαρτημένο πάνω στο τεμάχιο (Εικ. 17), το μοντέλο της ηλεκτροχημικής κοπής λαμβάνει τη μορφή:

$$\frac{\partial z_a}{\partial t} = K_v i_a(x_a, y_a, t) \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial y}\right)^2} \quad (4.2)$$

όπου: $z_a(x, y, 0) = z_0(x, y)$, $\nabla^2 u = 0$, $u(f) = 0$ στην κάθοδο, $u(z_a) = U - \Delta U$ στην άνοδο και $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ στη μόνωση του εργαλείου (Διαγρ. 5).

Λόγω της τρίτης πρότασης από τις υποθέσεις για τη διαμόρφωση του μοντέλου, η άνοδος και η κάθοδος υπολογίζονται σαν ισοδυναμικές επιφάνειες και μπορεί να υποτεθεί αυθαίρετα ότι το δυναμικό της καθόδου ισούται με μηδέν. Η καθοδική υπέρταση E_c εμπεριέχεται στην ολική υπέρταση $\Delta U = E_c - E_a$.

Το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο ανήκει στα προβλήματα με κινούμενες οριακές συνθήκες (MBP).



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα για τη μαθηματική μοντελοποίηση ECM

Πολλά από τα βασικά χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους της ηλεκτροχημικής κοπής εμφανίζονται με ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς απλών συστημάτων προσομοίωσης (δυναμικά μοντέλα). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από μια τέτοια ανάλυση μπορούν να εφαρμοσθούν σε πρακτικές μελέτες που αφορούν την κατεργασία, όπως είναι η επιλογή των παραμέτρων της κατεργασίας, ο σχεδιασμός του ηλεκτροδίου,

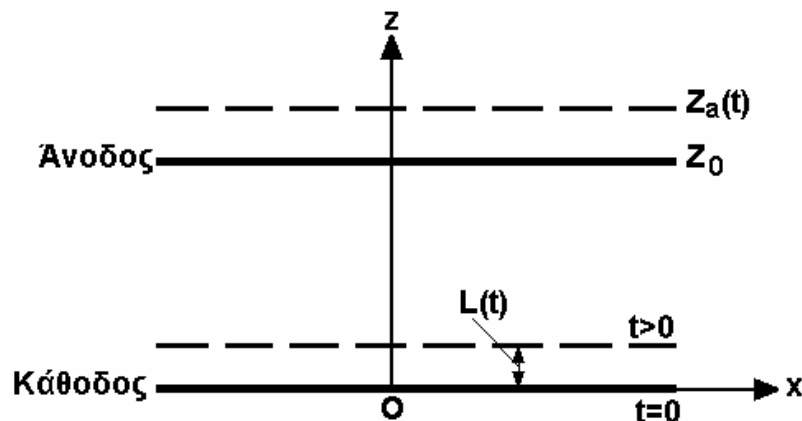
οι ανοχές της κατεργασίας και οι οριακές συνθήκες της κατεργασίας. Αν και η επίλυση του μοντέλου ιδανικής ηλεκτροχημικής κατεργασίας εφαρμόζεται σε περιορισμένες περιπτώσεις, τα συμπεράσματα που λαμβάνονται από αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για μονοδιάστατα προβλήματα τα οποία μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. [1,3,10]

4.2 Εφαρμογές της ιδανικής ηλεκτροχημικής κοπής

4.2.1 Μονοδιάστατη ηλεκτροχημική κοπή με παράλληλα επίπεδα ηλεκτρόδια

Όταν δύο άπειρες αγωγικές επιφάνειες, παράλληλες μεταξύ τους με απόσταση S , τεθούν υπό διαφορά δυναμικού U , τότε, λόγω της συμμετρίας, αναπτύσσεται μεταξύ αυτών ομογενές ηλεκτρικό πεδίο με δυναμικές γραμμές κάθετες στις δύο επιφάνειες. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και όταν οι δύο αυτές επιφάνειες είναι τα ηλεκτρόδια.

Έστω η απλή περίπτωση ηλεκτροχημικής κοπής, κατά την οποία η ηλεκτροχημική κατεργασία πραγματοποιείται με παράλληλα επίπεδα ηλεκτρόδια με μεταξύ τους απόσταση S (Εικ. 18).



Εικόνα 18: Ηλεκτροχημική κοπή με παράλληλα και επίπεδα ηλεκτρόδια

Στην πράξη, το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομογενές μόνο στις περιοχές μακριά από τα άκρα των ηλεκτροδίων. Από τη μελέτη της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου αποδεικνύεται ότι η επίδραση των άκρων του ηλεκτροδίου στη διαμόρφωση του πεδίου είναι αμελητέα σε απόσταση μεγαλύτερη από $2S$ από αυτά. Στην περίπτωση αυτή,

η κλίση του δυναμικού ισούται με:

$$|\nabla u| = \frac{U - \Delta U}{S} \quad (4.3)$$

και η πυκνότητα ρεύματος με:

$$i = \kappa \cdot \frac{U - \Delta U}{S} \quad (4.4)$$

όπου $S = Z_a(t) - L(t)$ και η συνάρτηση $L(t)$ περιγράφει την κίνηση του εργαλείου. Με

αντικατάσταση της εξίσωσης (4.4) στην εξίσωση (4.2) λαμβάνεται: $\frac{\partial z_a}{\partial x} = \frac{\partial z_a}{\partial y} = 0$, και

προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση της ανόδου:

$$\frac{\partial z_a}{\partial t} = K_v \cdot \kappa \cdot \frac{U - \Delta U}{z_a - L(t)} \quad (4.5)$$

με αρχική συνθήκη: $z_a = Z_0$ για $t=0$. Η λύση της εξίσωσης (4.5) εξαρτάται από τις συναρτήσεις της επιβαλλόμενης τάσης $U=U(t)$ και της κίνησης του εργαλείου-ηλεκτροδίου $L=L(t)$. [2,23,36]

4.2.2 Ηλεκτροχημική κοπή με σταθερό εργαλείο-ηλεκτρόδιο

Η ηλεκτροχημική κοπή με σταθερό εργαλείο εφαρμόζεται σε πολλές κατεργασίες αποπεράτωσης (φινίρισμα), για την απομάκρυνση του ακραίου αποβλήτου (deburring) και για το «στρογγύλευμα» των ακμών του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Θέτοντας $L(t)=0$ στην εξίσωση (4.5) και ολοκληρώνοντας, προκύπτει μετά την εκτέλεση των πράξεων και σύμφωνα με την αρχική συνθήκη:

$$z_a^2 - Z_0^2 = 2K_v \kappa \int_0^t (U - \Delta U) dt \quad (4.6)$$

Για σταθερή τάση $U=U_0$, η εξίσωση μεταβολής του διακένου συναρτήσει του χρόνου περιγράφεται από την εξίσωση:

$$z_a = \sqrt{Z_0^2 + 2Dt} \quad (4.7)$$

όπου: η $D = K_v \kappa (U_0 - \Delta U)$ είναι χαρακτηριστική παράμετρος της ηλεκτροχημικής κοπής με σταθερό εργαλείο κοπής. Η σχέση (4.7) έχει εφαρμοστεί προσεγγιστικά σε πολλές ανάλογες κατεργασίες αποβολής υλικού, κυρίως για την κατεργασία επίπεδων επιφανειών που βρίσκονται σε διαφορετική απόσταση από το επίπεδο μέτωπο του

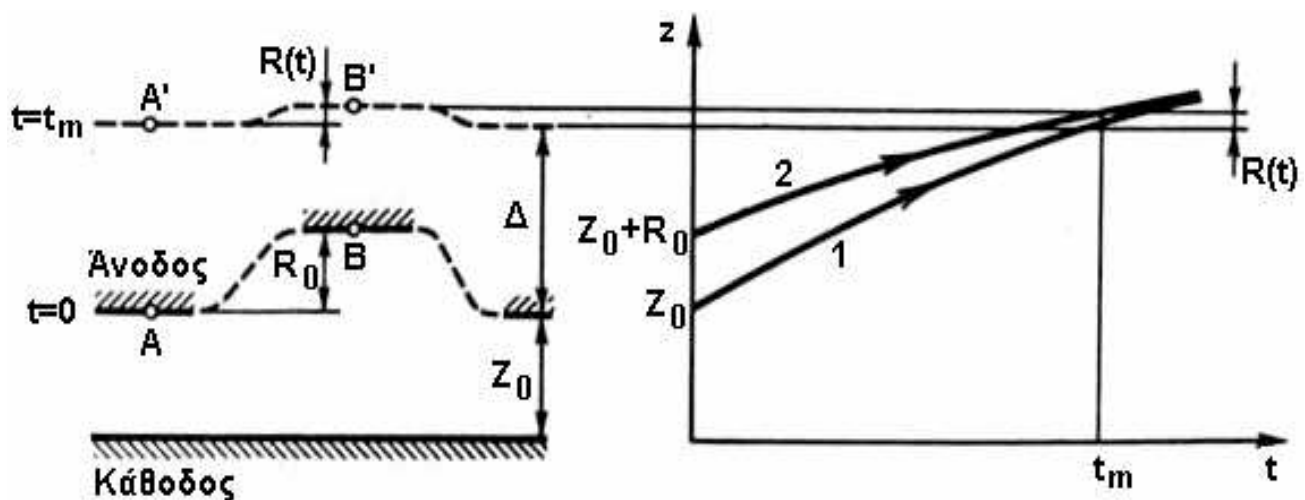
εργαλείου που χρησιμοποιείται στην ηλεκτροχημική κοπή. Η αντιμετώπιση ενός τέτοιου προβλήματος μελετάται αμέσως παρακάτω.

Στο Διαγρ. 6 φαίνονται οι μετατοπίσεις των ακρότατων σημείων Α και Β της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Υποθέτοντας ότι η διάλυση των περιοχών γύρω από τα σημεία αυτά λαμβάνει χώρα ανεξάρτητα για την καθεμιά, η σχέση (4.6) εφαρμόζεται ξεχωριστά και τελικά λαμβάνεται:

$$R(t) = \sqrt{(Z_0 + R_0)^2 + 2Dt} - \sqrt{Z_0^2 + 2Dt} \quad \text{ή}$$

$$R(t) = \frac{(2Z_0 + R_0)R_0}{\sqrt{(Z_0 + R_0)^2 + 2Dt} + \sqrt{Z_0^2 + 2Dt}} \quad (4.8)$$

όπου R_0 η αρχική τραχύτητα της ανόδου και $R(t)$ η τραχύτητα της ανόδου μετά από χρόνο κατεργασίας t .



Διάγραμμα 6: Επίδραση της ηλεκτροχημικής κοπής με σταθερό εργαλείο στην τραχύτητα

Ο χρόνος t_m που απαιτείται για την απομάκρυνση της διαφοράς τραχύτητας g με σταθερό εργαλείο ηλεκτροχημικής κοπής παρέχεται από τον τύπο:

$$t_m = \frac{g(2Z_0 + g)}{2D} \quad (4.9)$$

Η εξίσωση (4.9) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογισθεί ο χρόνος κατεργασίας συναρτήσει των παραμέτρων της ηλεκτροχημικής κοπής, κατά την κατασκευή μικρών κοιλοτήτων, εγχοπών, ορθογωνικών εκσκαφών κλπ.

Με την αύξηση του διακένου παρατηρείται μείωση της πυκνότητας του ρεύματος σύμφωνα με τη σχέση:

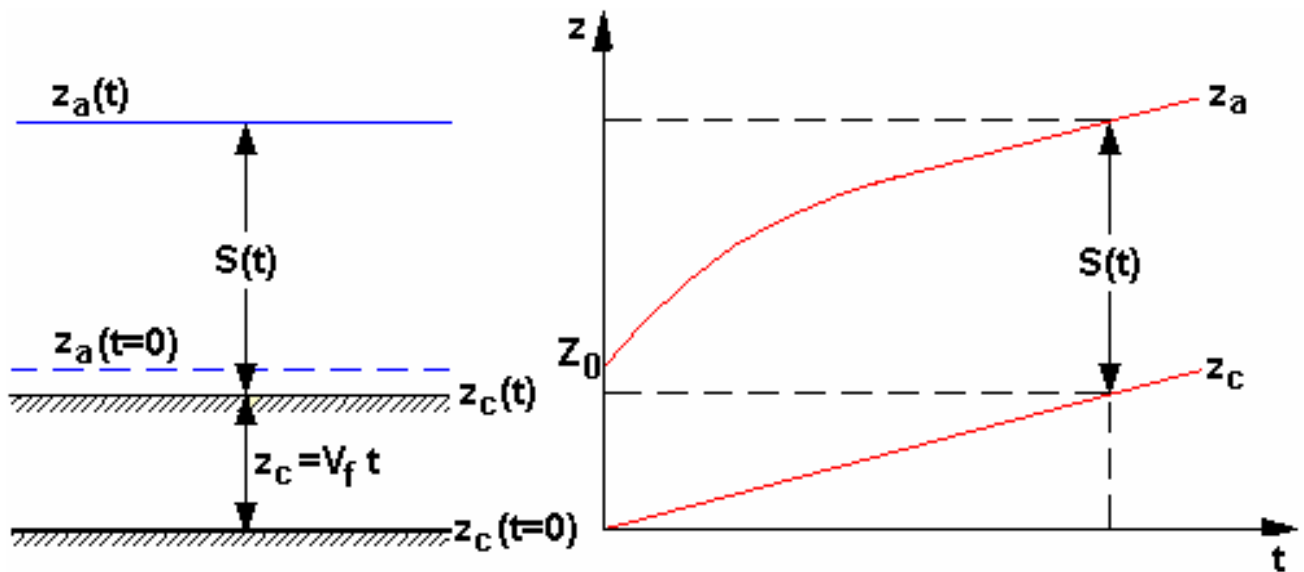
$$i = \frac{i_0}{\sqrt{1 + \frac{2D}{Z_0^2} t}} \quad (4.10)$$

όπου $i_0 = \kappa \cdot \frac{U_0 - \Delta U}{S_0}$ η αρχική πυκνότητα ρεύματος.

Αποτέλεσμα της μείωσης του ρυθμού αποβολής υλικού είναι η μείωση της πυκνότητας ρεύματος. Αν το σύστημα τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος λειτουργεί με σταθερή ένταση, τότε η τάση αυξάνεται με το χρόνο κατεργασίας και ο ρυθμός αποβολής υλικού γίνεται σχεδόν σταθερός. [2,36]

4.2.3 Ηλεκτροχημική κοπή με σταθερή πρόωση εργαλείου-ηλεκτροδίου

Η πλειονότητα των μηχανών ηλεκτροχημικής κοπής έχει σταθερή πρόωση εργαλείου (Διαγρ. 7).



Διάγραμμα 7: Ηλεκτροχημική κοπή με παράλληλα επίπεδα ηλεκτρόδια και σταθερή πρόωση εργαλείου

Η κίνηση της καθόδου με σταθερή ταχύτητα πρόωσης V_f περιγράφεται από τη σχέση $S = V_f t$. Συνεπώς, η εξίσωση (4.5) θα λάβει τη μορφή:

$$\frac{\partial z_a}{\partial t} = K_v \kappa \frac{U - \Delta U}{z_a - V_f t} \quad (4.11)$$

Με αρχική συνθήκη $t=0 \quad z_a = Z_0$, και λαμβάνοντας υπόψη τη σταθερή τροφοδοσία τάσης $U=U_0$, η εξίσωση εκφράζεται σε αδιάστατη μορφή με την εισαγωγή των αδιάστατων ποσοτήτων $\xi = \frac{z_a}{S_f}$ (χωρική παράμετρος) και $\tau = \frac{V_f t}{S_f}$ (χρονική παράμετρος), όπου:

$$S_f = K_v \kappa \frac{U_0 - \Delta U}{V_f} \quad (4.12)$$

Έτσι μετά την εκτέλεση των πράξεων, η εξίσωση (4.11) γράφεται:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{1}{\xi - \tau} \quad (4.13)$$

Και με αρχική συνθήκη $\tau=0, \xi = \xi_0$ μετασχηματίζεται στην:

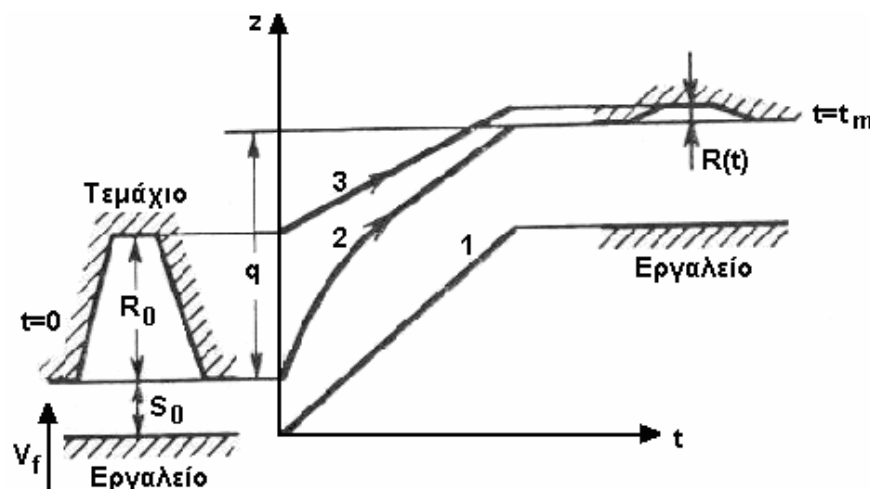
$$\tau = (\xi - 1) - (\xi_0 - 1) \cdot \exp(\xi - \xi_0) \quad (4.14)$$

Ενώ σε καρτεσιανές συντεταγμένες η εξίσωση (4.14) παίρνει τη μορφή:

$$V_f t = (z_a - S_f) - (Z_0 - S_f) \cdot \exp\left(-\frac{z_a - Z_0}{S_f}\right) \quad (4.15)$$

Στο Διαγρ. 8 παρουσιάζεται η μεταβολή της θέσης της ανόδου κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής κοπής με σταθερή πρόωση του εργαλείου-ηλεκτροδίου, σύμφωνα με τη σχέση (4.15). Η γραμμή 1 απεικονίζει τη θέση του εργαλείου συναρτήσει του χρόνου, ενώ οι καμπύλες 2 και 3 περιγράφουν τις μεταβολές της θέσης δύο σημείων με αρχικό διάκενο Z'_0 και Z''_0 αντίστοιχα, στα σύνορα της ανόδου συναρτήσει με το χρόνο. Με την αύξηση του z_a , ο εκθετικός όρος της (4.15) μειώνεται με αποτέλεσμα οι καμπύλες 2 και 3 να συγκλίνουν ασυμπτωτικά στην τιμή:

$$z_a = S_f + V_f t \quad (4.16)$$



Διάγραμμα 8: Μεταβολή της θέσης της ανόδου κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής κοπής με σταθερή πρόωση του εργαλείου

Μετά από κάποιο χρόνο κατεργασίας, η διαδικασία αποβολής υλικού πρακτικά σταθεροποιείται και οι ταχύτητες αποβολής υλικού V_n εξισώνονται με την ταχύτητα πρόωσης V_f . Αυτό σημαίνει ότι με την πάροδο του χρόνου, το διάκενο κατεργασίας τείνει προοδευτικά προς μία σταθερή τιμή S_f , η οποία ονομάζεται διάκενο ισορροπίας και υπολογίζεται από τη σχέση (4.12). Το διάκενο ισορροπίας αποτελεί τη βασική παράμετρο της ηλεκτροχημικής κοπής σταθερής πρόωσης, είτε αυτή γίνεται με επίπεδο εργαλείο είτε με εργαλείο πολύπλοκης γεωμετρίας. Από την όλη διαδικασία έπεται ότι η κατεργασία της ηλεκτροχημικής κοπής χαρακτηρίζεται από έναν αυτορρυθμιστικό μηχανισμό προς την κατάσταση ισορροπίας. [8-12]

4.2.4 Εισαγωγή αδιάστατων συντεταγμένων στη μελέτη του διακένου

Το διάκενο μεταξύ εργαλείου-τεμαχίου μπορεί να περιγραφεί με την εισαγωγή ενός κινούμενου συστήματος συντεταγμένων, το οποίο είναι προσαρτημένο πάνω στο εργαλείο. Αυτό το σύστημα συντεταγμένων θα αναφέρεται στη συνέχεια ως σύστημα αναφοράς του εργαλείου και διευκολύνει τη μαθηματική ανάλυση της ηλεκτροχημικής κοπής, ιδιαίτερα όταν απαιτείται πολύπλοκος σχεδιασμός του εργαλείου.

Η αλλαγή συντεταγμένων για κίνηση του εργαλείου παράλληλα προς τον άξονα z περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$x = \bar{x}, \quad y = \bar{y}, \quad z = \bar{z} + L(t) \quad (4.17)$$

όπου $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ είναι οι συντεταγμένες του κινούμενου συστήματος αναφοράς και η συνάρτηση $L(t)$ περιγράφει την κίνηση του εργαλείου-ηλεκτροδίου. Στην περίπτωση σταθερής πρόωσης εργαλείου, όπου η εξίσωση κίνησης του εργαλείου περιγράφεται από τη σχέση $z = \bar{z} + V_f t$, η εξίσωση (4.11) λαμβάνει στο σύστημα αναφοράς τη μορφή:

$$\frac{dS}{dt} = K_v \kappa \frac{U - \Delta U}{S} - V_f \quad (4.18)$$

με αρχική συνθήκη ($t=0$): $S = S_0$ (για λόγους διευκόλυνσης τίθεται $\bar{z}_a = S$). Με αδιάστατες συντεταγμένες η εξίσωση (4.18) γράφεται:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{1}{\xi} - 1 \quad (4.19)$$

με αρχική συνθήκη ($t=0$): $\xi = \xi_0$, όπου $\xi = \frac{S}{S_f}$ και $\tau = V_f t / S_f$. Με την ολοκλήρωση της (4.19) και με τη δεδομένη αρχική συνθήκη γίνεται:

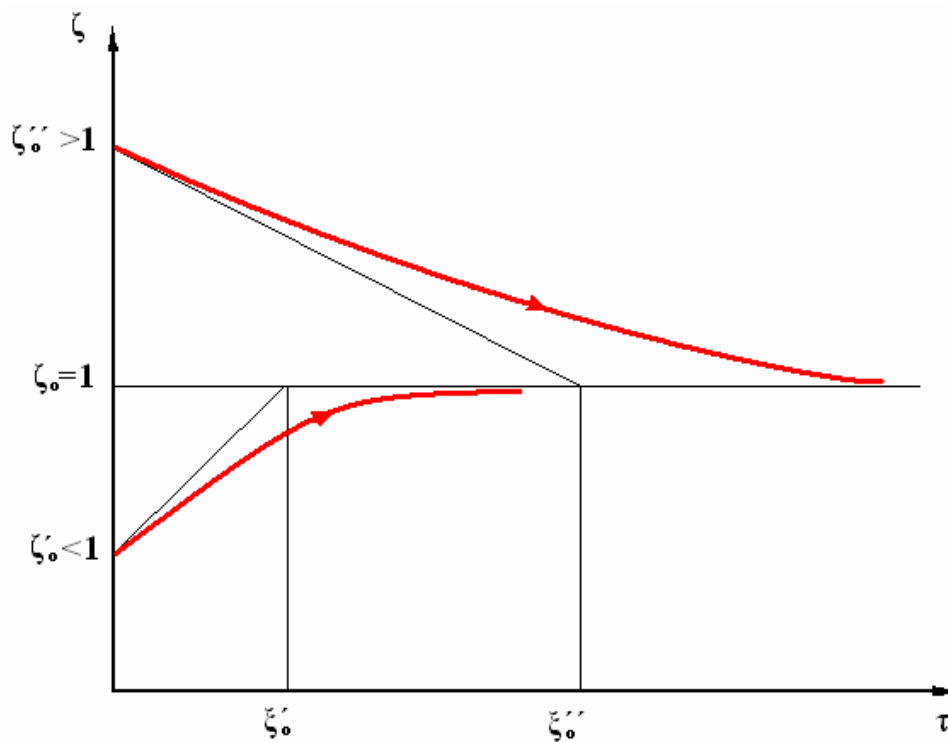
$$\tau = \xi_0 - \xi - \ln \frac{\xi_0 - 1}{\xi - 1} \quad (4.20)$$

ή σε καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$V_f t = S_0 - S_f - S_f \ln \frac{S - S_f}{S_0 - S_f} \quad (4.21)$$

Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάστηκε στην αρχική της μορφή από τον Tipton. [11]

Η μεταβολή του διακένου σε αδιάστατες συντεταγμένες για διάφορες τιμές του αρχικού διακένου απεικονίζεται στο Διαγρ. 9.



Διάγραμμα 9: Μεταβολή του διακένου σε αδιάστατες συντεταγμένες

4.2.5 Οι καταστάσεις της ηλεκτροχημικής κατεργασίας με σταθερή πρόωση εργαλείου

Με βάση τα σχήματα 4.5, 4.6 και 4.10, η κατεργασία ηλεκτροχημικής κοπής με σταθερή πρόωση του εργαλείου ή γενικότερα με σταθερές τιμές της χαρακτηριστικής παραμέτρου S_f συναρτήσει του χρόνου περιλαμβάνει δύο καταστάσεις:

- Τη μεταβατική κατάσταση (μη μόνιμη).
- Την κατάσταση ισορροπίας (μόνιμη).

Στη μεταβατική κατάσταση, η πυκνότητα ρεύματος, η ταχύτητα διάλυσης της ανόδου και το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων μεταβάλλονται σε σχέση με το χρόνο, τείνοντας στις ακόλουθες οριακές τιμές:

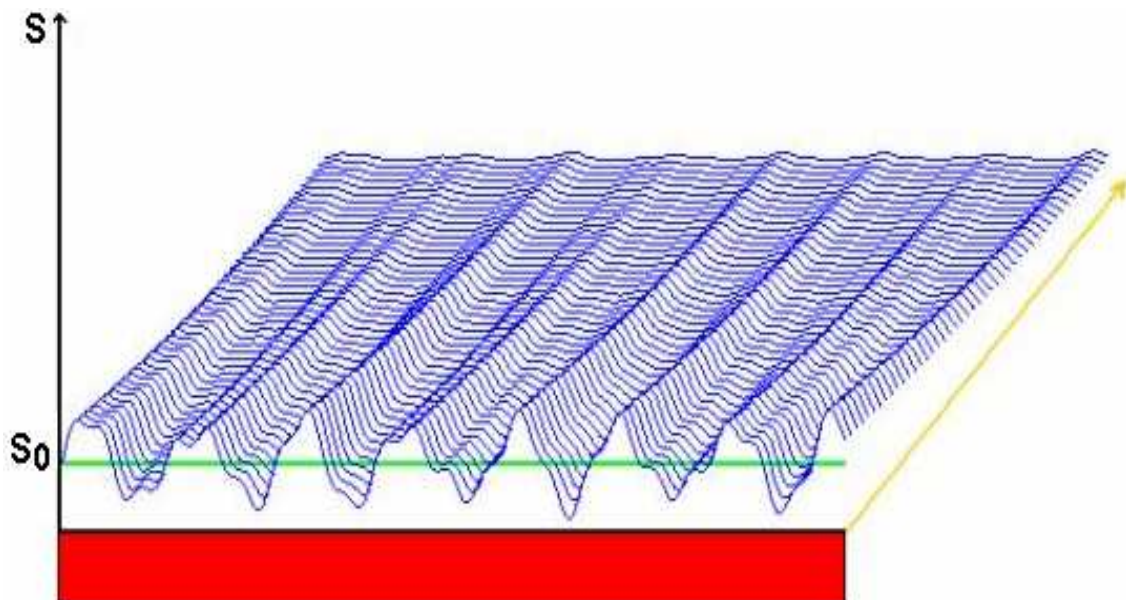
$$i \rightarrow \kappa \frac{U - \Delta U}{S_f}, \quad V_n \rightarrow V_f, \quad S \rightarrow S_f.$$

Στη σταθερή κατάσταση, όλες αυτές οι παράμετροι παραμένουν σταθερές συναρτήσει του χρόνου.

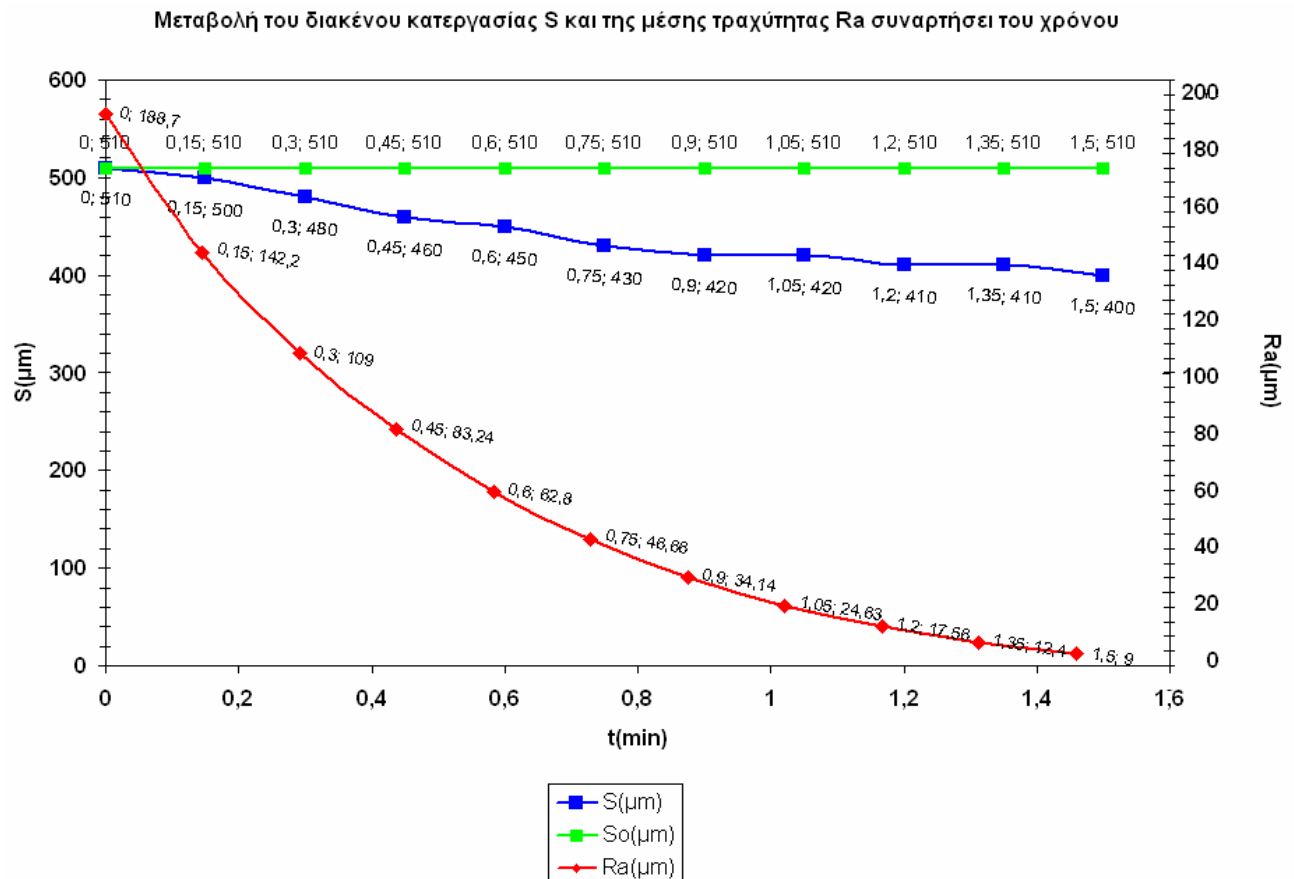
Ο χρόνος t_m που απαιτείται για τη μείωση της τραχύτητας του επεξεργαζόμενου τεμαχίου από ένα κινούμενο εργαλείο προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$t_m = \frac{S_0 + q - S_f}{V_f} - \frac{S_0 - S_f}{V_f} \cdot \exp\left(-\frac{q}{S_f}\right) \quad (4.22)$$

Στα Διαγρ. 9 και 10 απεικονίζονται οι μεταβολές του διακένου κατεργασίας S και της μέσης τραχύτητας R_a της κατεργασμένης επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου, όπως προκύπτουν από προσομοίωση ηλεκτροχημικής κατεργασίας λείανσης στον υπολογιστή, με χρήση του αναπτυχθέντος θεωρητικού μοντέλου.[2,20-23]



Διάγραμμα 10: Προσομοίωση της ηλεκτροχημικής κατεργασίας λείανσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή



Διάγραμμα 11: Μεταβολή του διακένου κατεργασίας S και της μέσης τραχύτητας Ra συναρτήσει του χρόνου

Το πάχος q του στρώματος υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί για να μειωθεί η τραχύτητα επιφάνειας από R_0 σε $R(t)$, με αρχικό διάκενο $S_0 = S_f$ (Διαγρ. 8), μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$q \cong S_f \ln \frac{R_0}{R(t)} \quad (4.23)$$

4.2.6 Ηλεκτροχημική κοπή με σταθερή πρόωση εργαλείου με κεκλιμένη επιφάνεια

Στην περίπτωση που η επιφάνεια του εργαλείου δεν είναι παράλληλη προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια, αλλά κεκλιμένη, τότε στην περιοχή αυτή δρα η συνιστώσα V_n της ταχύτητας πρόωσης V_f , που είναι κάθετη στην επιφάνεια του εργαλείου και σχηματίζει γωνία α με αυτήν (Εικ. 19):

$$V_n = V_f \cos \alpha . \quad (4.24)$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (4.24) στις εξισώσεις (4.11), (4.12) και (4.15) και μετά από εκτέλεση των πράξεων, προκύπτει η περιγραφή του διακένου για την συγκεκριμένη κατεργασία.

Συγκεκριμένα, το διάκενο ισορροπίας S_n το οποίο λαμβάνεται κάθετο στην επιφάνεια, είναι ίσο με:

$$S_n = \frac{S_f}{\cos \alpha} \quad (4.25)$$

Το διάκενο ισορροπίας S_n αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης του εργαλείου. Ο νόμος του συνημιτόνου για το διάκενο, όπως εκφράζεται από την εξίσωση (4.25) για συνθήκες σταθερής κατάστασης ηλεκτροχημικής κοπής, χρησιμοποιείται ευρύτατα για να υπολογιστεί σε πρώτη προσέγγιση το περίγραμμα εργαλείου ECM σύνθετης μορφής.

Από τη στιγμή που σταθεροποιηθεί η γεωμετρία του διακένου, η ηλεκτροχημική κοπή βρίσκεται σε συνθήκες ισορροπίας και η γεωμετρική μορφή του τεμαχίου δεν μεταβάλλεται πλέον, δεδομένου ότι όλα τα σημεία της επιφάνειας του (A_1, A_2, A_3, A_4) μετακινούνται κατά τη διεύθυνση της πρόωσης του εργαλείου με την ίδια ταχύτητα V_f (Εικ. 19).

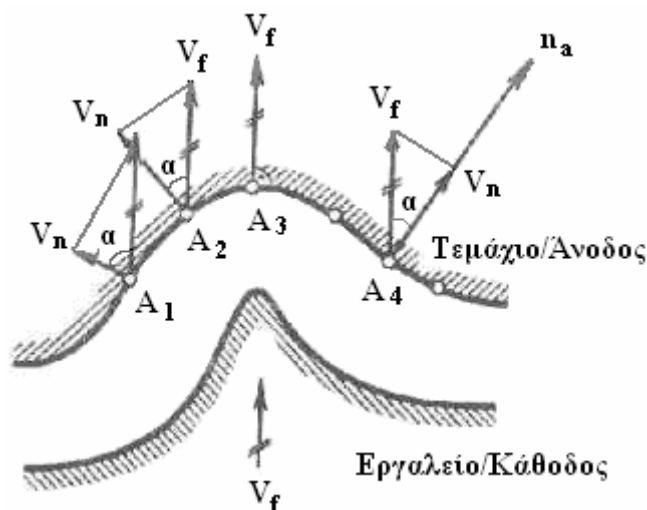
Η ταχύτητα αποβολής υλικού V_n (ταχύτητα διάλυσης της ανόδου) και η πυκνότητα ρεύματος i_a στο τεμάχιο υπολογίζονται εύκολα από τις σχέσεις:

$$V_n = V_f \cos \alpha \quad (4.26)$$

$$i_a = \frac{V_f}{K_v} \cos \alpha \quad (4.27)$$

όπου α η γωνία που σχηματίζει το κάθετο διάνυσμα n_a , στην εφαπτόμενη της ανοδικής επιφάνειας και στο διάνυσμα της ταχύτητας πρόωσης V_f .

Οι σχέσεις (4.26) και (4.27) περιγράφουν την κατάσταση ισορροπίας της ηλεκτροχημικής κοπής και χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του γεωμετρικού σχήματος της ανόδου με δεδομένο το σχήμα του εργαλείου-ηλεκτροδίου που θα αποδώσει τη ζητούμενη μορφή του τεμαχίου. [20-23]



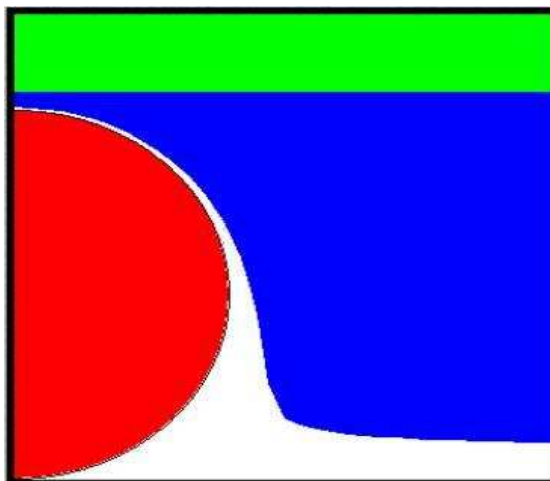
Εικόνα 19: Ηλεκτροχημική κοπή σε συνθήκες ισορροπίας

4.3 Σχεδιασμός εργαλείου κοπής

4.3.1 Γενικά

Η ακρίβεια της ηλεκτροχημικής κατεργασίας αυξάνεται σημαντικά στην σταθερή κατάσταση. Κατά συνέπεια, εάν οι συνθήκες το επιτρέπουν, η ηλεκτροχημική κοπή μπορεί να λειτουργήσει έτσι, ώστε το απαιτούμενο σχήμα του τεμαχίου να τείνει ασυμπτωτικά προς την επιφάνεια που παράγεται κάτω από σταθερές συνθήκες. Αυτό περιορίζει σημαντικά τον αριθμό των συντελεστών που επηρεάζουν την ακρίβεια της ηλεκτροχημικής κοπής (πρέπει να τονιστεί ότι το σχήμα του εργαλείου δεν επηρεάζεται από διάφορες ανωμαλίες, τον χρόνο κατεργασίας και την αρχική θέση των ηλεκτροδίων). Στην Εικ. 20 παρουσιάζεται η ασυμπτωτική μορφή του τεμαχίου που λαμβάνεται κατά την κατεργασία κοπής με χρήση κυκλικού εργαλείου στην κατάσταση ισορροπίας.

Για να προσδιοριστεί η γεωμετρία του εργαλείου, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για ηλεκτροχημική κοπή με σταθερές συνθήκες, πρέπει να καθοριστούν οι ακόλουθες μεταβλητές: η προδιαμόρφωση της επιφάνειας που πρόκειται να υποστεί κατεργασία, η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου, το δυναμικό που θα εφαρμοστεί, η σταθερά ηλεκτροχημικής κοπής K_v του υλικού (μετάλλου) του τεμαχίου, η ηλεκτρική αγωγιμότητα κ του ηλεκτρολύτη και η τιμή της ανοδικής και καθοδικής πόλωσης E_a και E_c αντίστοιχα. [29-35]



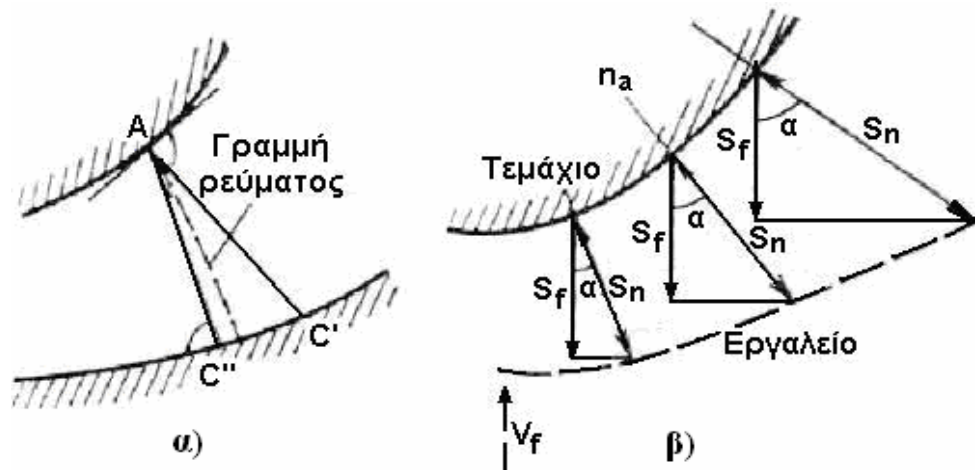
Εικόνα 20: Ασυμπτωτική μορφή του τεμαχίου ηλεκτροχημικής κοπής με χρήση κυκλικού εργαλείου

4.3.2 Διαδικασία σχεδίασης του εργαλείου

Η διαδικασία σχεδίασης της μορφής του εργαλείου μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά αν χρησιμοποιηθεί μία μέθοδος, που βασίζεται σε γραμμική κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του διακένου. Με τη μέθοδο αυτή, γίνεται η υπόθεση ότι στην άμεση περιοχή γύρω από δεδομένο σημείο το ηλεκτρικό πεδίο είναι τοπικά μονοδιάστατο, όπως π.χ. συμβαίνει με ένα σημείο που βρίσκεται σε ένα διάκενο μεταξύ παράλληλων επιπέδων. Η πραγματική γραμμή του ρεύματος (η διακεκομμένη γραμμή στην Εικ. 21α) αντικαθίσταται με ένα ευθύγραμμο τμήμα AC' ή AC'', το οποίο είναι κάθετο στην επιφάνεια του τεμαχίου ή στην επιφάνεια του εργαλείου (η συνεχής γραμμή στην Εικ. 21α), αντίστοιχα. Αυτό ισχύει προσεγγιστικά για τεμάχια με μικρή ακτίνα καμπυλότητας R, όπως για $S_f/R \leq 0,1$ και όταν η γωνία α δεν υπερβαίνει τις 75° . Η διαπίστωση αυτή οδηγεί σε μια εξίσωση που τυγχάνει ευρείας εφαρμογής σε πρακτικά προβλήματα αυτού του είδους. Σύμφωνα με την απλουστευτική παραδοχή είναι δυνατόν να προσδιοριστεί σχετικά εύκολα η μορφή του εργαλείου:

$$S_n = \frac{S_f}{\cos \alpha} \quad (4.28)$$

Η κατασκευή του προφίλ του εργαλείου γραφικά, με τη χρήση του ευθύγραμμου τμήματος AC'', όπως στη γωνία α_n φαίνεται στην εικόνα 21β.



Εικόνα 21: Διάγραμμα για τη διαδικασία σχεδιασμού του εργαλείου

Η τιμή του S_f επιλέγεται με βάση το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αποδώσει η μονάδα ηλεκτρικής ισχύος. Υπό συνθήκες ισορροπίας, το συνολικό ρεύμα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I = i_0 \cdot A_n \quad (4.29)$$

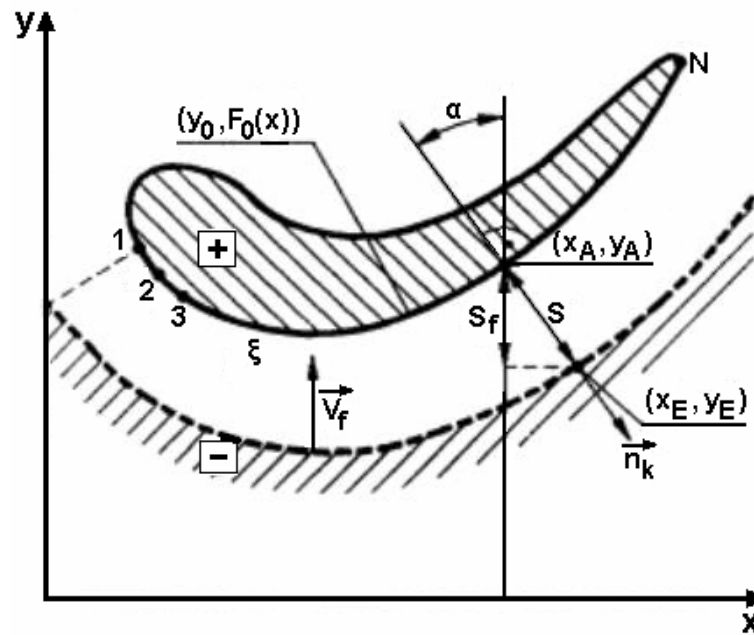
όπου: $i_0 = \kappa \frac{U_0 - \Delta U}{S_f}$ και A_n η επιφάνεια του τεμαχίου που προβάλλεται σε επίπεδο κάθετο προς το διάνυσμα της ταχύτητας πρόωσης. Επειδή το ρεύμα I δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο ρεύμα που παρέχεται από την πηγή τροφοδοσίας, ισχύει:

$$S_f = \kappa \cdot A_n \frac{U_0 - \Delta U}{I} \quad (4.30)$$

Η αγωγιμότητα κ του ηλεκτρολύτη εξαρτάται από τη μέση θερμοκρασία που αποκτά ο ηλεκτρολύτης κατά τη διάρκεια της κατεργασίας κοπής. Στην Εικ 22 παρουσιάζεται η εφαρμογή του νόμου του συνημιτόνου για τον καθορισμό του περιγράμματος του εργαλείου-ηλεκτροδίου ηλεκτροχημικής κοπής για την κατασκευή πτερυγίου (αεροτομής). Οι συντεταγμένες του περιγράμματος του εργαλείου υπολογίζονται από τις ακόλουθες γεωμετρικές σχέσεις:

$$\begin{aligned} x_E &= x_A + S_f \cdot \tan \alpha \\ y_E &= y_A - S_f = F_0(x_A) - S_f \end{aligned} \quad (4.31)$$

όπου η συνάρτηση $y = F_0(x)$ περιγράφει το ζητούμενο σχήμα του τεμαχίου. [32-36]



Εικόνα 22: Διάγραμμα για τον καθορισμό του περιγράμματος εργαλείου ηλεκτροχημικής κοπής στην κατασκευή αεροτομών

5 Εφαρμογή στο σχεδιασμό σύνθετου εργαλείου – ‘Μη ιδανική’ ECM

5.1 Η ‘μη ιδανική’ κατεργασία ηλεκτροχημικής κοπής

5.1.1 Γενικά

Στην πράξη, η ηλεκτροχημική κοπή δεν είναι ποτέ ιδανική. Το ρεύμα στην πραγματική κατεργασία ηλεκτροχημικής κοπής δεν είναι αντιστρόφως ανάλογο προς το διάκενο κατεργασίας με αποτέλεσμα ο ρυθμός αποβολής υλικού να κατανέμεται διαφορετικά από θέση σε θέση πάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου και η τελική μορφή της κατεργασμένης επιφάνειας να είναι διαφορετική από αυτή που υπολογίστηκε στο σχεδιασμό. Η διαφορά αυτή στο μέγεθος του διακένου S_n μπορεί να εκτιμηθεί και να διορθωθεί λαμβάνοντας υπόψη τις αποκλίσεις στην τιμή του διακένου ισορροπίας S_f κατά μήκος της διεύθυνσης ροής του ηλεκτρολύτη.

Όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα κ_0 του ηλεκτρολύτη αυξάνεται κατά $\Delta\kappa$, ο συντελεστής ηλεκτροχημικής κατεργασιμότητας K_v αυξάνεται κατά ΔK_v και η συνολική υπέρταση ΔU κατά ΔE , λόγω των εσωτερικών διαταραχών στο διάκενο κατεργασίας και στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Η αντίστοιχη μεταβολή του διακένου ισορροπίας σε γωνία α προκύπτει από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$\Delta S_n / S_f = (\Delta\kappa / \kappa + \Delta K_v / K_v - \Delta E / E) \cdot \frac{1}{\cos\alpha} \quad (5.1)$$

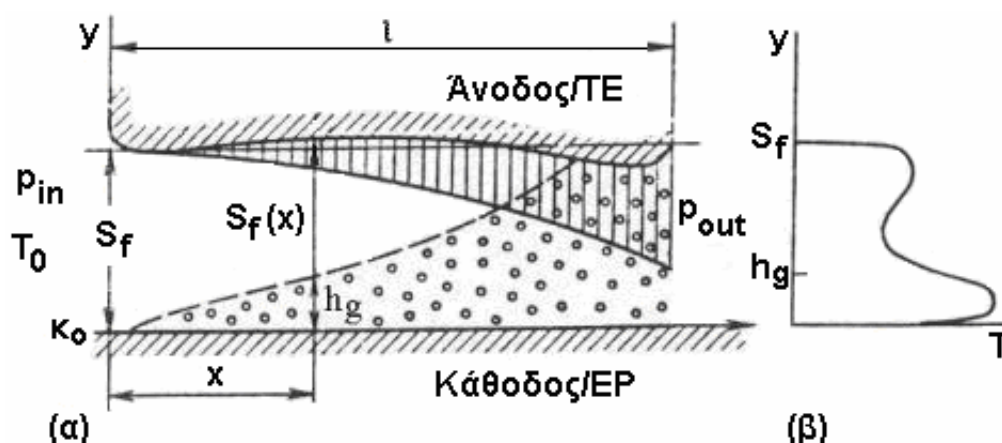
Αν ληφθούν επιπλέον υπόψη και οι εξωτερικές διαταραχές, δηλαδή οι αποκλίσεις στην εφαρμοζόμενη τάση V και στην ταχύτητα πρόωσης V_f του εργαλείου, τότε πρέπει να συμπεριληφθούν στην εξίσωση (5.1) και οι αντίστοιχες επιδράσεις.

Η εξίσωση (5.1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρώτη προσέγγιση στον υπολογισμό της ακρίβειας της κατεργασίας και της γεωμετρίας του κατάλληλου εργαλείου ηλεκτροχημικής κοπής. Οι εσωτερικές διαταραχές είναι συναρτήσεις των συντεταγμένων και ευρίσκονται πάντοτε σε μη μόνιμη κατάσταση (unsteady state). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διακένου, όταν αυτό πληρούται με το κυκλοφορούν μέσο (ηλεκτρολύτη) υπολογίζεται από την εξίσωση (3.13).

Είναι προφανές, ότι για να προσδιοριστεί η μεταβολή $\Delta\kappa/\kappa_0$, πρέπει να είναι γνωστή η κατανομή της θερμοκρασίας και η περιεκτικότητα των αερίων μέσα στο διάκενο κατεργασίας.

5.1.2 Η ‘μη ιδανική’ ηλεκτροχημική κοπή με εργαλείο επίπεδου και παράλληλου άκρου

Για να γίνει ποιοτικά αντιληπτό πώς επηρεάζεται ο τοπικός ρυθμός αποβολής υλικού από τη θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη και τα διαλυμένα σ’ αυτόν αέρια, μελετάται στη συνέχεια η απλούστερη περίπτωση της ηλεκτροχημικής κοπής με εργαλείο επίπεδου και παράλληλου άκρου, Εικ. 23.



Εικόνα 23: Επίδραση του υδρογόνου και της θερμότητας στην κατανομή του μεγέθους του διακένου

Το υδρογόνο που εκλύεται στην επιφάνεια του εργαλείου παράγει στο ηλεκτρόδιο ένα διαφασικό στρώμα, το οποίο αποτελείται από ηλεκτρολύτη και φυσαλίδες υδρογόνου και αυξάνει σε πάχος κατά τη κατεύθυνση της ροής του ηλεκτρολύτη. Υπό ορισμένες συνθήκες, αυτό το στρώμα μπορεί να καλύψει όλο το διάκενο. Για διευκόλυνση των υπολογισμών, εισάγεται η έννοια της μέσης περιεκτικότητας αερίου β σε δεδομένη διατομή του διακένου. Εάν, όμως, χρησιμοποιηθεί η ποσότητα h_g (το πάχος της διαφασικής περιοχής που αποτελείται μόνο από υδρογόνο), τότε γίνεται η παραδοχή ότι η e (ανηγμένη κατανάλωση ενέργειας) παραμένει σταθερή κατά μήκος του άξονα y και ότι $\beta = 0.5$.

Η ηλεκτροχημική κατεργασία τεμαχίων μεγάλων διαστάσεων συνεπάγεται την ύπαρξη μεγάλων διακένων, στα οποία οι φυσαλίδες αερίου που εκλύονται στο εργαλείο

μπορεί να επεκταθούν αρκετά έξω από την επιφάνεια του τεμαχίου και να συνενωθούν, προκαλώντας έτσι αύξηση του β . Μακροπρόθεσμα, αυτό μπορεί διαταράξει τη σταθερότητα της ροής του ηλεκτρολύτη στο διάκενο και να παράγει παλμούς. Εάν το φαινόμενο αυτό συνεχίσει να εξελίσσεται για μεγάλο διάστημα, η κατεργασία μπορεί να σταματήσει ολοκληρωτικά.

Η διέλευση του ρεύματος μέσα στον ηλεκτρολύτη παράγει μεγάλη ποσότητα θερμότητας Q , η οποία ισούται με:

$$Q = i^2 / \kappa \quad (5.2)$$

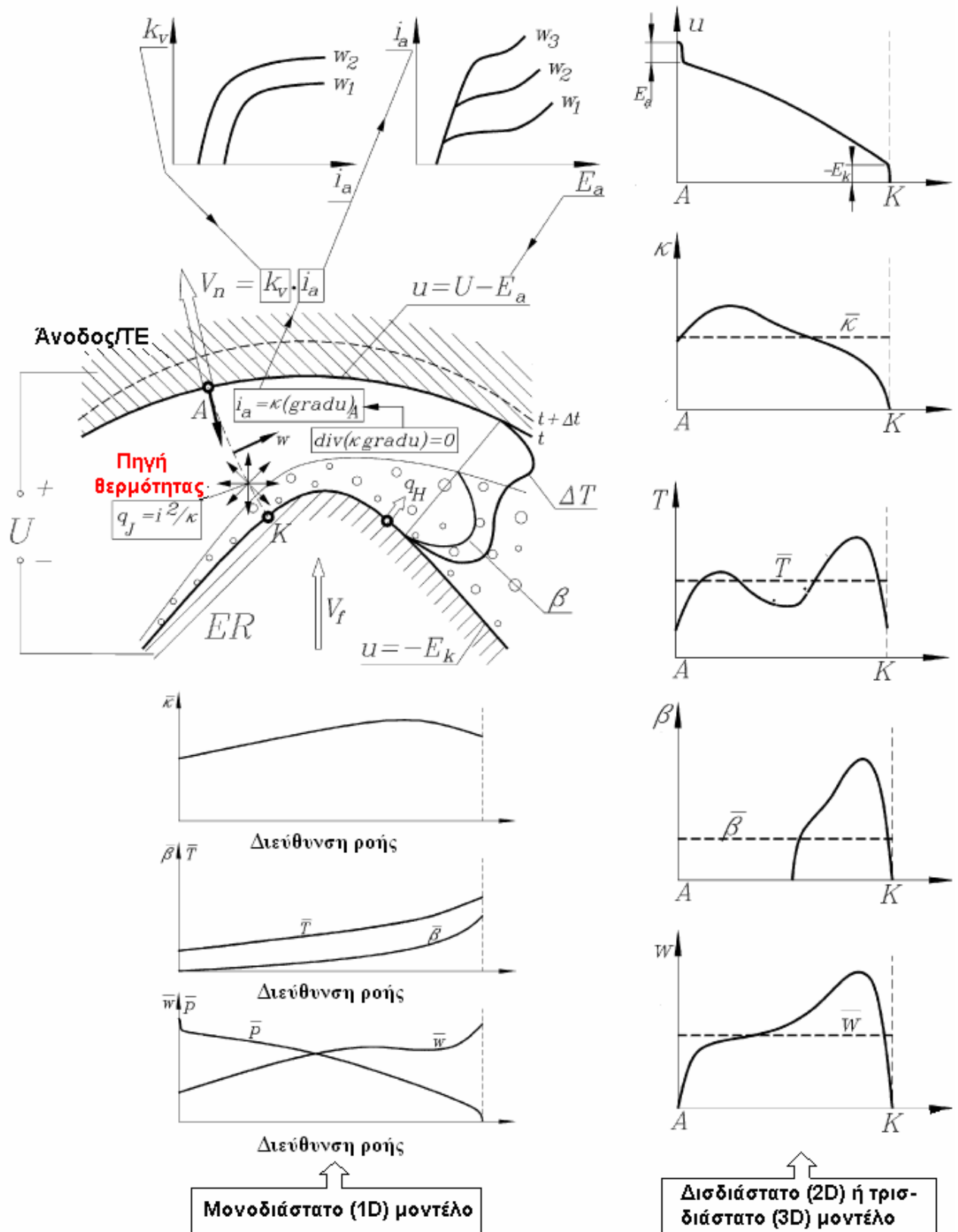
Μεταβολές στις ιδιότητες του μέσου που γεμίζει το διάκενο συνεπάγονται διακυμάνσεις στην παραγόμενη θερμότητα, όπως παρουσιάζεται στην Εικ. 23. Το κυκλοφορούν μέσο χάνει μέρος από την ηλεκτρική αγωγιμότητά του κοντά στην κάθοδο, γεγονός που προκαλεί απότομη αύξηση της παραγόμενης θερμότητας. Στις περιοχές που ο ηλεκτρολύτης παραμένει απαλλαγμένος από ακαθαρσίες, συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή η παραγόμενη θερμότητα είναι πολύ μικρή. Κανονικά, εκεί πρέπει να σημειώνονται οι μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας ηλεκτροδίων λόγω της χαμηλής ταχύτητας ροής του ηλεκτρολύτη. Λόγω της αύξησης της παραγόμενης θερμότητας, το εργαλείο μπορεί να αποκτήσει θερμοκρασία πολύ υψηλότερη από αυτήν του τεμαχίου. Η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη όμως μειώνεται βαθμιαία μέχρις ότου εξισωθεί με αυτή των ηλεκτροδίων, λόγω της αποβαλλόμενης θερμότητας μέσω αυτών.

Μεταβολές στη θερμοκρασία, τον έλεγχο των αερίων και, κατά συνέπεια, στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του σταθερού διακένου ισορροπίας S_f και την απόκλιση από τη θεωρητικά αναμενόμενη μορφή του κατεργάσιμου τεμαχίου. Ειδικότερα, η κατεργασία ενός επίπεδου τεμαχίου με επίπεδο εργαλείο μπορεί να αποδώσει καμπύλη επιφάνεια στο τελικό τεμάχιο, Εικ 23(α). Το διάκενο κατεργασίας είναι μεγαλύτερο από την τιμή S_f όταν σημειώνεται αύξηση θερμότητας, και μικρότερο από S_f όταν παρατηρείται υψηλή περιεκτικότητα αερίων. Το μέγεθος του πραγματικού διακένου ισορροπίας, $S_f(x)$ ή η μεταβολή του διακένου ισορροπίας ΔS μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την κατανομή της μέσης θερμοκρασίας T και της μέσης περιεκτικότητας αερίου, $\bar{\beta}$, που αντιστοιχούν στη μέση ταχύτητα του ηλεκτρολύτη, w . [14-20]

5.2 Σχεδιασμός σύνθετου εργαλείου κοπής

5.2.1 Σχηματική παρουσίαση του προβλήματος

Το διάγραμμα 12 απεικονίζει ποιοτικά τα φυσικά φαινόμενα, τη διασύνδεσή τους με τις συνθήκες κοπής, τις κύριες παραμέτρους της κατεργασίας και τη συνολική επίδραση στην κατεργασία της ηλεκτροχημικής κοπής. Επιπλέον, αναλύεται σχηματικά η μαθηματική πολυπλοκότητα που διέπει το πρόβλημα και οι ιδιαιτερότητες των μεθόδων προσομοίωσης, που εφαρμόζονται στο σχεδιασμό εργαλείων ηλεκτροχημικής κοπής σύνθετης γεωμετρικής μορφής



Διάγραμμα 12: Διάγραμμα διασύνδεσης σχέσεων στη διαδικασία της ηλεκτροχημικής κοπής

5.2.2 Το πρόβλημα προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής

Στην παράγραφο αυτή, μελετάται το πρόβλημα καθορισμού των μεταβολών της γεωμετρικής μορφής της κατεργαζόμενης επιφάνειας και των φυσικών ιδιοτήτων του διακένου κατεργασίας, στην περίπτωση ισορροπίας αλλά και στη μεταβατική (μη μόνιμη) φάση της κατεργασίας, όταν χρησιμοποιείται εργαλείο σύνθετης μορφής

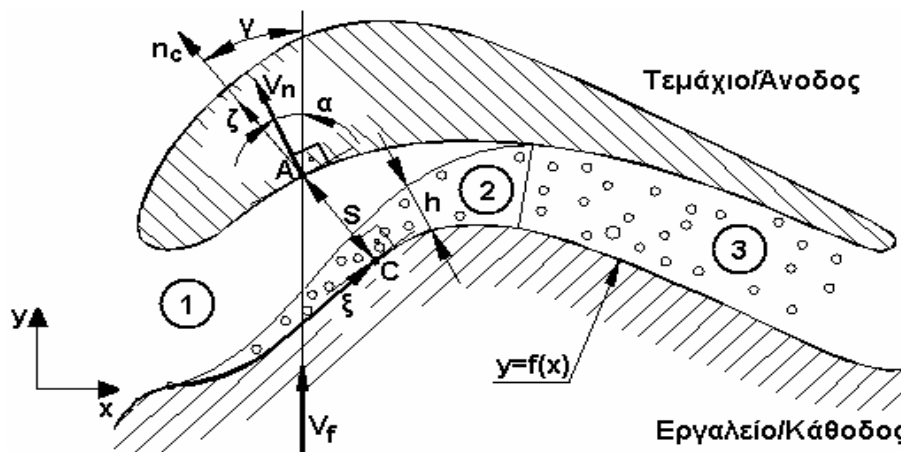
Το πρόβλημα προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής διέπεται από τις εξής παραδοχές:

- Το άκρο του εργαλείου δεν είναι επίπεδο, αλλά έχει διαμορφωθεί με κατάλληλη γεωμετρική μορφή, ώστε να αποτυπωθεί κοιλότητα επιθυμητού σχήματος στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, βλ. Εικ.24.
- Η ροή του ηλεκτρολύτη είναι από αριστερά προς τα δεξιά μέσα σε λεπτό διάκενο κατεργασίας με τοπική έκταση S και μήκος L .
- Η κάτω επιφάνεια είναι το εργαλείο/κάθοδος, που κινείται προς τα πάνω με ταχύτητα πρόωσης V_f .
- Σε τυχαία θέση απέναντι από το εργαλείο, η επιφάνεια του τεμαχίου κινείται προς τα πάνω, λόγω αφαίρεσης υλικού με ταχύτητα πρόωσης V_n .
- Στην περίπτωση ηλεκτροχημικής κοπής σταθερής κατάστασης, στην οποία χρησιμοποιείται εργαλείο με καμπυλόγραμμο άκρο, ισχύει $V_n = V_f \cos \alpha$. Η κατανομή αυτή της ταχύτητας διάλυσης της ανόδου και η μεταβολή των φυσικών συνθηκών κατά μήκος της ροής προκαλούν ανομοιομορφη κατανομή του μεγέθους S του διακένου και εισάγουν σφάλματα μορφής στο αποδιδόμενο περίγραμμα του τεμαχίου.

Το μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής, το οποίο αναφέρεται στο πρόβλημα, όπως διατυπώθηκε παραπάνω, περιλαμβάνει μια σειρά από αλληλοεπηρεαζόμενα επιμέρους φαινόμενα, τα οποία περιγράφουν τις μεταβολές που πραγματοποιούνται μέσα στο διάκενο κατεργασίας. Συγκεκριμένα:

- Κατανομή και αλλαγή του μεγέθους του τοπικού διακένου S συναρτήσει του χρόνου.
- Κατανομή των παραμέτρων ροής (στατική πίεση p και ταχύτητα ροής w).
- Κατανομή της θερμοκρασίας T .

- Κατανομή του ποσοστού κενών β (ποσοστιαία συγκέντρωση αερίου) ή του πάχους h του στρώματος που περιλαμβάνει διφασική ροή (ηλεκτρολύτη και αέριο).



Εικόνα 24: Σχηματικό διάγραμμα του μαθηματικού μοντέλου βύθισης για σύνθετα εργαλεία

5.2.3 Παραδοχές που διέπουν το μαθηματικό μοντέλο ηλεκτροχημικής κοπής

Για τη μαθηματική προσομοίωση χρησιμοποιείται φυσικό μοντέλο με τις ακόλουθες βασικές παραδοχές:

- (α) Μέσα στο διάκενο διακρίνονται τρεις περιοχές:
- Η περιοχή-1 με καθαρό ηλεκτρολύτη
 - Η περιοχή φυσαλίδων (περιοχή-2) κοντά στην κάθοδο με πάχος $h < S$ που αποτελείται από μείγμα ηλεκτρολύτη και αερίου (υδρογόνου) και έχει σταθερή ογκομετρική συγκέντρωση του υδρογόνου ίση με β^*
 - Η περιοχή-3 διφασικής ροής με μεταβλητό β .
- (β) Η πυκνότητα ρεύματος i εξαρτάται από την αγωγιμότητα του μέσου στο διάκενο κατεργασίας και από την τάση U σύμφωνα με το νόμο του Ohm σε όλο το μήκος του διακένου, ενώ η ηλεκτροχημική αντίδραση λαμβάνεται υπόψη με την εισαγωγή της ολικής υπέρτασης $E = E_a - E_c$, όπου E_a και E_c το ανοδικό και καθοδικό δυναμικό, αντίστοιχα

(γ) Η επίδραση της επιφανειακής τάσης πάνω στις αέριες φυσαλίδες αμελείται, όπως και ο χρόνος δημιουργίας των φυσαλίδων.

(δ) Επειδή δεν είναι διαθέσιμα τα αναλυτικά μοντέλα της μορφής $K_V = K_V(i)$ και $E = E(i)$, για τη θεωρητική μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία.

(ε) Η επίδραση του στρώματος φυσαλίδων στην πίεση και στην ταχύτητα ροής του ηλεκτρολύτη υπολογίζεται υποθέτοντας ότι πρόκειται για μοντέλο ομογενούς διφασικής ροής, στο οποίο ο ηλεκτρολύτης μέσα στο διάκενο συμπεριφέρεται ως ομοιόμορφο μείγμα “ψευδοσυνεχούς” μέσου, το οποίο συνίσταται από αέριο και υγρό με μέση τοπική συγκέντρωση αερίου ίση προς:

$$\beta = \beta^* \frac{h}{S} \quad \text{με } 0 < h < S \quad (5.3)$$

όπου β η ποσοστιαία συγκέντρωση του αερίου, β^* , h το πάχος του στρώματος που περιλαμβάνει διφασική ροή και S το μέγεθος του τοπικού διακένου (μm).

(στ) Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διφασικού μέσου προσδιορίζεται από την εξίσωση του Bruggeman:

$$\kappa = \kappa_0 [1 + \alpha_T \theta] (1 - \beta)^{3/2},$$

όπου: $\theta = T - T_0$, με T_0 την εσωτερική θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη, α_T το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του ηλεκτρολύτη σε θερμοκρασία T_0 και κ_0 την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη για θερμοκρασία T_0 και $b = 0$.

Τέλος, για απλοποίηση των υπολογισμών, εισάγεται καμπυλόγραμμο σύστημα αξόνων (ξ, ζ), προσαρμοσμένο πάνω στο εργαλείο-ηλεκτρόδιο, στο οποίο ο άξονας ξ βρίσκεται πάνω στο ηλεκτρόδιο με αρχή την είσοδο του ηλεκτρολύτη μέσα στο διάκενο και ο άξονας ζ συμπίπτει με την κάθετο στην επιφάνεια η_c , βλ. Εικ 24.

5.2.4 Κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής

Για τη διαμόρφωση γενικού μαθηματικού μοντέλου περιγραφής της μεταβολής της γεωμετρίας (σχήματος) της κατεργαζόμενης επιφάνειας, εισάγεται σύστημα συντεταγμένων $\{x, y\}$ προσαρμοσμένο πάνω στο τεμάχιο, το οποίο παραμένει ακίνητο

κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, βλ. Εικ.24. Η επιφάνεια του τεμαχίου για μια δεδομένη χρονική στιγμή μπορεί να περιγραφεί από μια σχέση της μορφής: $z = Z(x, y)$, ενώ η διαμόρφωση της κατεργαζόμενης επιφάνειας $F(x, y, t)$ μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση ηλεκτροχημικής διαμόρφωσης (3.25):

$$\frac{\partial z_a}{\partial t} = K_v(i_A) \cdot i_A \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial y}\right)^2}. \quad (5.4)$$

Κατά την έναρξη της κατεργασίας ($t=0$) είναι $z = z_0(x, y)$, όπου $z_0(x, y)$ η συνάρτηση που περιγράφει την αρχική γεωμετρία της επιφάνειας του τεμαχίου.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας του ρεύματος i_A πάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου, μπορεί να υποτεθεί προσεγγιστικά γραμμική κατανομή της ηλεκτρικής τάσης κατά μήκος της απόστασης d μεταξύ δύο δεδομένων σημείων, το ένα στην άνοδο (τεμάχιο) και το άλλο στην κάθοδο (εργαλείο) του συστήματος. Έτσι, η πυκνότητα του ρεύματος υπολογίζεται από το νόμο του Ohm, λαμβάνοντας συγχρόνως υπόψη τη μεταβολή της αγωγιμότητας κατά μήκος του διακένου:

$$i = \kappa_0 \phi_{\Sigma G} \frac{U - E}{S} \quad (5.5)$$

Όπου i η πυκνότητα του ρεύματος σε (A/cm^2):

$$\phi_{\Sigma G} = \frac{1}{S} \cdot \int_0^S \frac{d\zeta}{(1 + \alpha_T \theta)(1 - \beta)^{3/2}} \quad (5.6)$$

Από το ισοζύγιο μάζας για το παραγόμενο υδρογόνο, λαμβάνεται στο καμπυλόγραμμο σύστημα:

$$\rho_g \beta^* \cdot \int_0^h w(\zeta) \cdot d\zeta = \eta_H \varepsilon_H \cdot \int_0^\xi i \cdot d\xi \quad (5.7)$$

όπου: $\rho_g = \frac{P}{RT}$ η ειδική πυκνότητα του υδρογόνου (g/cm^3), R η παγκόσμια σταθερά αερίων (για 1 kg υδρογόνου), η_H η απόδοση ρεύματος από την παραγωγή υδρογόνου, ε_H το ηλεκτροχημικό ισοδύναμο του υδρογόνου (g/As) και $w(\zeta)$ η μέση ταχύτητα σε δεδομένη διατομή του διακένου (m/s)

Η μεταφορά θερμότητας στο διάκενο, λαμβάνοντας υπόψη την παραγόμενη θερμότητα Joule, περιγράφεται από τη σχέση:

$$w(\xi, \zeta) \cdot \frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[(\alpha + \alpha_T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right] + \frac{i^2}{\rho \cdot C_p \cdot \kappa} \quad (5.8)$$

όπου α ο συντελεστής θερμικής διάχυσης του ηλεκτρολύτη ($1/K$), α_T ο πρόσθετος συντελεστής θερμικής διάχυσης ($1/K$) για τυρβώδη ροή (για στρωτή ροή είναι $\alpha_T=0$), ρ η τρέχουσα πυκνότητα του μέσου στο διάκενο (στην περιοχή 1 είναι: $\rho = \rho_e$, στις περιοχές 2 και 3 $\rho = \rho_e(1-\beta)$), όπου ρ_e είναι η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη), και C_p η ειδική θερμότητα του ηλεκτρολύτη.

Οι οριακές συνθήκες έχουν ως εξής: $T(\xi=0) = T_0$, $T(\xi, 0) = T_A$, $T(\xi, S) = T_C$, όπου T_A και T_C οι θερμοκρασίες ανόδου και καθόδου, αντίστοιχα. Για να ολοκληρωθεί το σύστημα των εξισώσεων (5.4)-(5.8), πρέπει να συμπεριληφθούν και οι σχέσεις που δίνουν την πίεση και την ταχύτητα ροής.

Η εξίσωση συνέχειας έχει τη μορφή:

$$\bar{w}_0 \cdot S_0 = \int_0^S (1-\beta) \cdot w \cdot d\xi \quad (5.9)$$

όπου $\bar{w}_0$, S_0 είναι η μέση ταχύτητα του ηλεκτρολύτη (m/min) και το αρχικό μέγεθος του διακένου (μm), αντίστοιχα.

Από την εξίσωση διατήρησης της ορμής που διέπει την κίνηση του ηλεκτρολύτη προκύπτει η σχέση:

$$w \cdot \frac{d[\rho_e(1-\beta) \cdot w \cdot S]}{d\xi} = -S \cdot \frac{dp}{dx} - \tau_a - \tau_c \quad (5.10)$$

όπου τ_a και τ_c είναι οι διατμητικές τάσεις (τριβές) που ασκούνται στις επιφάνειες της ανόδου και της καθόδου, αντίστοιχα, και οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν περίπου ίσες ($\tau_a = \tau_c$). Γενικά, η διατμητική τάση που αναπτύσσεται κατά τη ροή ενός ρευστού πάνω σε μια επιφάνεια ισούται με:

$$\tau = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{8} \quad (5.11)$$

όπου $\lambda = C / Re^m$, $Re = 2wS/\nu$ είναι ο αριθμός Reynolds (για στρωτή ροή είναι $C=96$ και $m=1$, ενώ για τυρβώδη ροή $C=0.316$, $m=0.25$). Οι οριακές συνθήκες για την εξίσωση (5.11) είναι:

$$p(\xi=0) = p_{in} - \zeta_1 \frac{\rho \bar{w}_0^2}{2} \quad \text{και}$$

$$p(\xi=L) = p_{out} + \zeta_2 \frac{\rho w^2}{2}$$

όπου ζ_1, ζ_2 είναι οι υδραυλικές απώλειες στην είσοδο και στην έξοδο του διακένου, αντίστοιχα.

5.2.5 Κατασκευή μη γραμμικού μοντέλου προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής στον υπολογιστή

Ο κύριος στόχος της ηλεκτροχημικής κοπής είναι να επιτευχθεί η επιθυμητή γεωμετρική μορφή στην επιφάνεια του τεμαχίου με δεδομένες ανοχές στο σχήμα και τις διαστάσεις. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να διαιρεθεί σε δύο επιμέρους ομάδες προβλημάτων:

- Προβλήματα στα οποία είναι γνωστό το σχήμα του εργαλείου-ηλεκτροδίου και οι συνθήκες κατεργασίας και πρέπει να καθοριστεί η μορφή της επιφάνειας του τεμαχίου υπό κατεργασία
- Προβλήματα στα οποία αναζητείται το σχήμα του εργαλείου-ηλεκτροδίου που μπορεί να αποδώσει το απαιτούμενο σχήμα στην επιφάνεια του τεμαχίου

Η πρώτη κατηγορία προβλημάτων αντιμετωπίζεται με την επιλογή των αρχικών παραμέτρων και τη μελέτη της ακρίβειας της κατεργασίας, ενώ η δεύτερη κατηγορία προβλημάτων αντιμετωπίζεται με το σχεδιασμό του εργαλείου-ηλεκτροδίου και είναι αυτά που παρουσιάζονται συνήθως στην πράξη.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο αλγόριθμος για την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας και η διαδικασία σχεδιασμού του εργαλείου και της επιλογής παραμέτρων (Διαγρ. 13).

Ο σκοπός της προσομοίωσης της κατεργασίας σε υπολογιστή είναι η εύρεση του τελικού σχήματος του τεμαχίου δοσμένες συνθήκες της ηλεκτροχημικής κοπής (βλ. Εικ 25 για εργαλείο-ηλεκτρόδιο με σφαιρικό άκρο). Οι συνθήκες αυτές περιγράφονται από:

- Το αρχικό σχήμα του τεμαχίου που περιγράφεται από σχέση της μορφής $z = Z_0(x, y)$
- Το σχήμα και τις διαστάσεις του εργαλείου-ηλεκτροδίου
- Την αρχική θέση του τεμαχίου συγκριτικά με το τεμάχιο ($x_e^{(0)}, y_e^{(0)}, z_e^{(0)}$)

- Παραμετρικές εξισώσεις που περιγράφουν την τροχιά και την κίνηση του εργαλείου-ηλεκτροδίου $x_e(t), y_e(t), z_e(t)$
- Παραμέτρους σχετικές με ηλεκτρικό ρεύμα, όπως είναι το δυναμικό U
- Ηλεκτροχημικές ιδιότητες του υλικού του τεμαχίου που περιγράφονται από το συντελεστή ηλεκτροχημικής κατεργασιμότητας $K_v = K_v(i)$ και από τη συνολική υπέρταση στα ηλεκτρόδια $E=E(i)$.

Παράλληλα, με την προσομοίωση της κατεργασίας σε υπολογιστή είναι δυνατός ο υπολογισμός των παρακάτω παραμέτρων κατά μήκος και πλάτος της ροής του ηλεκτρολύτη σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή:

- Κατανομή του διακένου (S) από το οποίο εξαρτάται το σχήμα της επιφάνειας του τεμαχίου μετά την κατεργασία
- Κατανομές των εξής μεγεθών: θερμοκρασία (T), ποσοστό φυσαλίδων (β), ταχύτητα του ηλεκτρολύτη (w), στατική πίεση (p), πυκνότητα του ρεύματος (i) στο διάκενο και ταχύτητα διάλυσης (V_n).

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε στη μελέτη αυτή είναι σχετικά απλό στη χρήση και επιτρέπει την επισήμανση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων της κατεργασίας.

Οι παράμετροι εισαγωγής στο λογισμικό είναι:

- Ιδιότητες του ηλεκτρολύτη και του τεμαχίου
- Ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου-ηλεκτροδίου
- Αρχικό σχήμα του εργαλείου-ηλεκτροδίου (f) και του τεμαχίου (F_0)
- Αρχικές θέσεις των ηλεκτροδίων
- Υδροδυναμικές παράμετροι
- Άλλες παράμετροι που είναι απαραίτητες για τους υπολογισμούς, όπως είναι η απαιτούμενη ακρίβεια κλπ.

Η δομή του κεντρικού μενού με τις παραμέτρους εισόδου ακολουθεί στο Διαγρ. 14.

Ο προγραμματισμός της κινηματικής του εργαλείου-ηλεκτροδίου επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- Με την εισαγωγή των παραμετρικών εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του εργαλείου-ηλεκτροδίου, $x = x_e(t)$, $y = y_e(t)$, $z = z_e(t)$ και του συνολικού χρόνου κατεργασίας στο λογισμικό
- Με την εισαγωγή της τροχιάς του εργαλείου κατά την διεύθυνση του άξονα x , η οποία περιγράφεται με τέτοιο τρόπο ώστε η συντεταγμένη z να εξαρτάται από τις x και y συντεταγμένες του εργαλείου ηλεκτροδίου, από την ταχύτητα πρόωσης V_f του εργαλείου, από τη διαδρομή του εμβόλου της μηχανής που τροφοδοτεί το εργαλείο ανά πάσο και από τον αριθμό των πάσων.

Ο προγραμματισμός της γεωμετρίας του τεμαχίου στην αρχή της κατεργασίας επιτυγχάνεται με τρεις τρόπους:

- Με την εισαγωγή της εξίσωσης της επιφάνειας με μορφή $z = Z_0(x, y)$ στο λογισμικό,
- Με εισαγωγή της επιφάνειας οποιουδήποτε κυλινδρικού σχήματος στο λογισμικό
- Με την εισαγωγή των συντεταγμένων μιας επιφάνειας (για παράδειγμα, μια επιφάνεια η οποία έχει μόλις υποστεί κατεργασία ηλεκτροχημικής κοπής σε εργαλειομηχανή CNC μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αρχική επιφάνεια για την επόμενη ηλεκτροχημική κοπή σε εργαλειομηχανή CNC.)

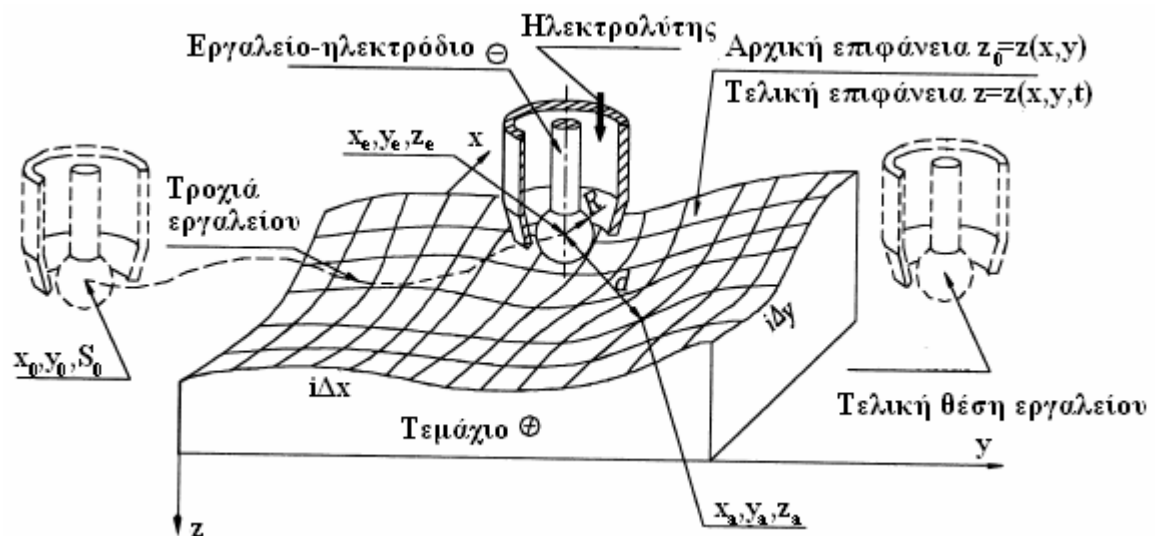
Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του λογισμικού είναι ότι έχει την ικανότητα να ορίζει την καμπύλη πόλωσης E και το συντελεστή ηλεκτροχημικής κατεργασιμότητας K_v σαν συναρτήσεις της πυκνότητας του ρεύματος, χαρακτηριστικό που είναι χρήσιμο όταν είναι διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για το συντελεστή K_v .

Στο λογισμικό επιλύεται αριθμητικά το σύστημα των εξισώσεων (5.5)-(5.11) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και την επαναληπτική διαδικασία δοκιμής-σφάλματος. Στην πρώτη επανάληψη χρησιμοποιείται μονοδιάστατη προσέγγιση για την κατανομή της θερμοκρασίας και τον υπολογισμό της μεταβολής του πάχους του στρώματος φυσαλίδων $h^{(1)}$. Στη συνέχεια, η κατανομή $h^{(1)}$ εισάγεται στο δεύτερο κύκλο και εφαρμόζεται στην πρώτη προσέγγιση του διδιάστατου υπολογισμού της κατανομής της θερμοκρασίας κ.ο.κ. Η επαναληπτική διαδικασία θεωρείται ότι

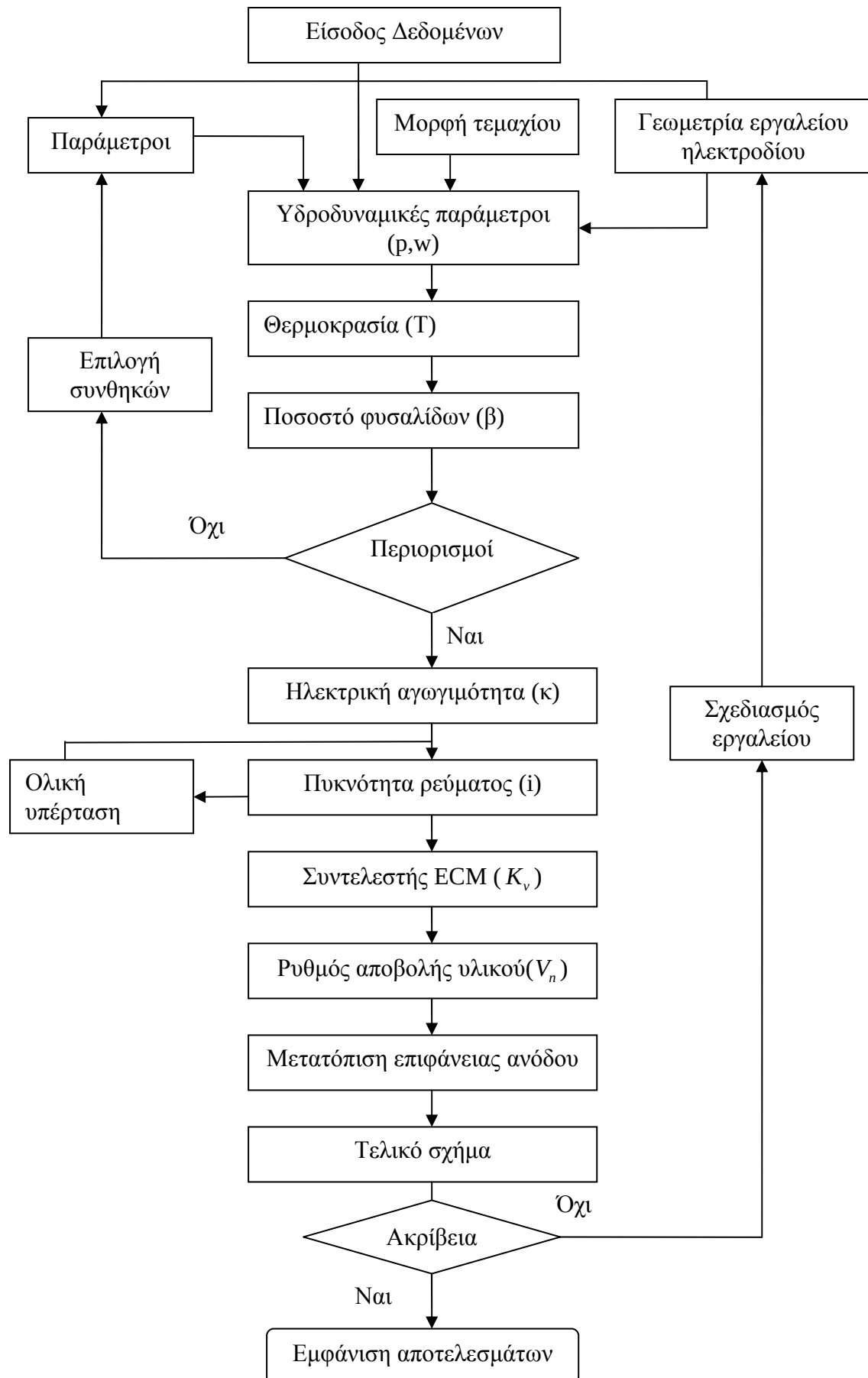
ολοκληρώνεται όταν δύο διαδοχικές λύσεις εμπίπτουν στα όρια ακριβείας που έχουν τεθεί για τη συγκεκριμένη κατεργασία ηλεκτροχημικής κοπής.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να παρουσιαστούν με δύο τρόπους:

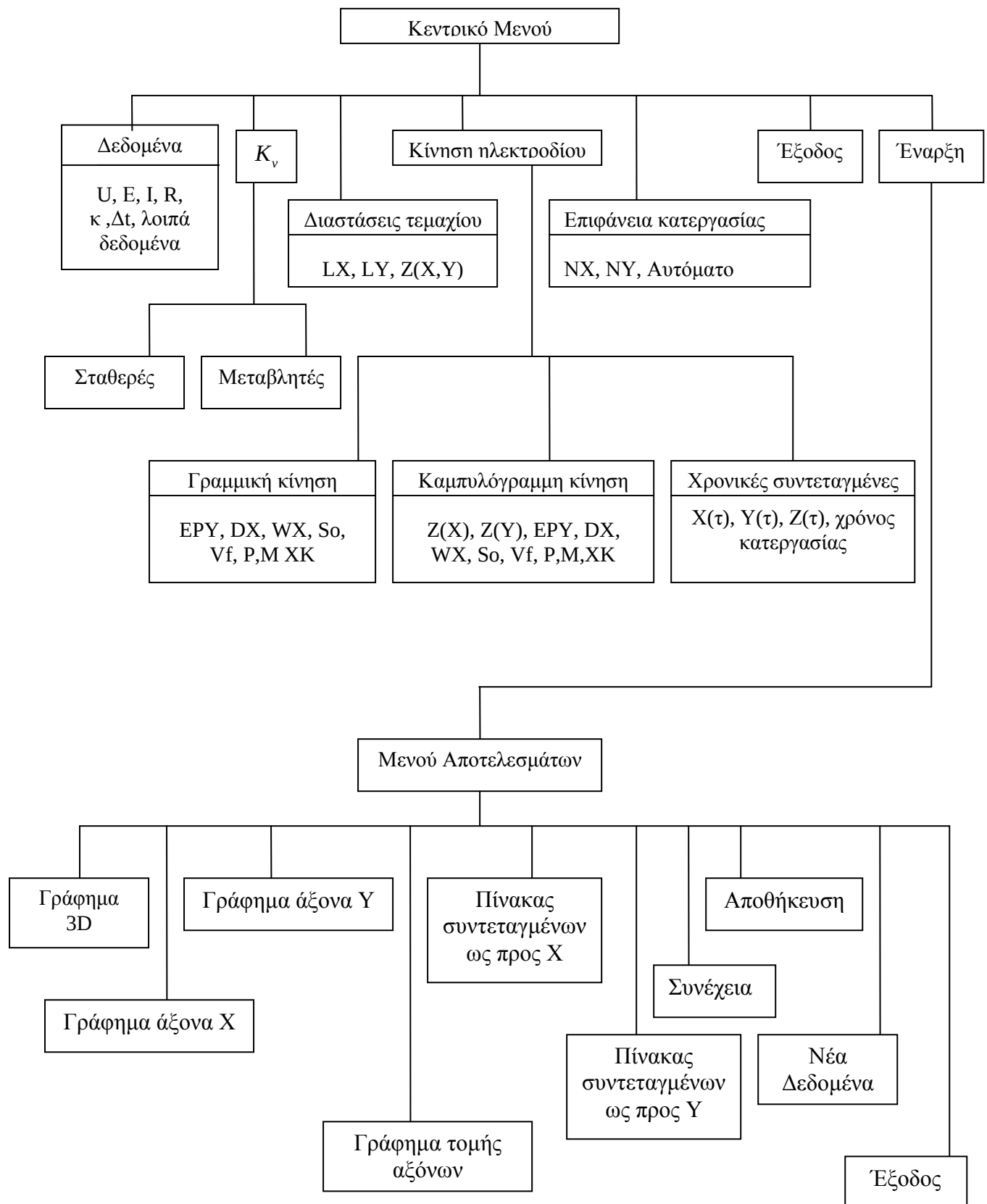
- Σαν πίνακες συντεταγμένων των σημείων της επιφάνειας του τεμαχίου για επιλεγμένη τομή κάθετη στον x ή τον y άξονα
- Σαν δυσδιάστατα ή τρισδιάστατα γραφήματα



Εικόνα 25: Σχηματική παράσταση αριθμητικά ελεγχόμενης ECM με εργαλείο-ηλεκτρόδιο σφαιρικού άκρου



Διάγραμμα 13: Αλγόριθμος μοντέλου προσομοίωσης ECM στον υπολογιστή



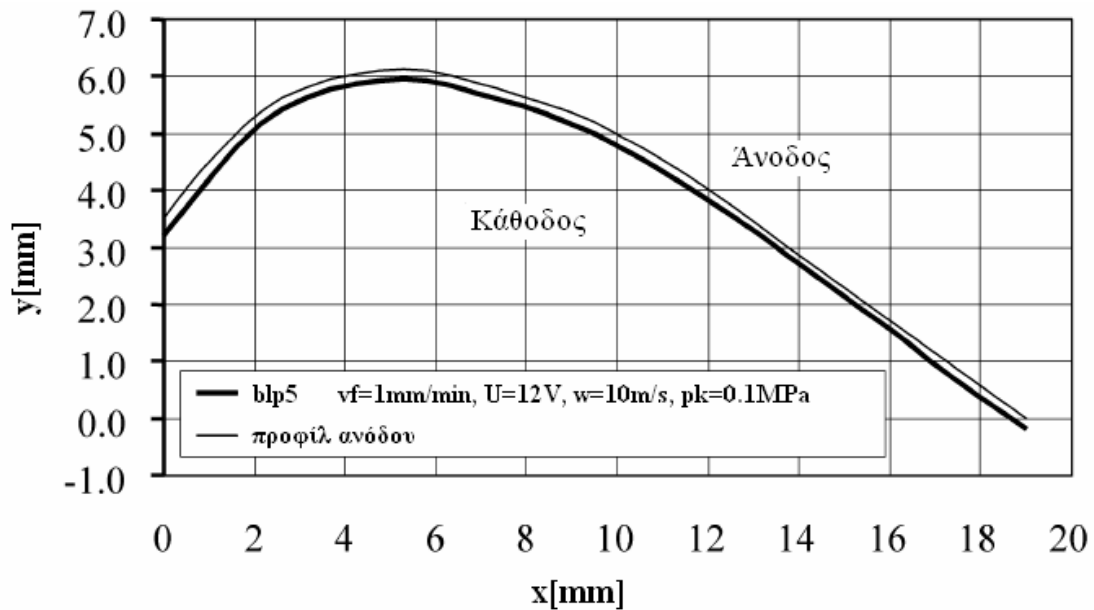
Διάγραμμα 14: Δομή του μενού του λογισμικού

5.3 Παραδείγματα εφαρμογής της προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής

5.3.1 Εφαρμογή στο σχεδιασμό κυλινδρικού εργαλείου με γνωστό το σχήμα της επιφάνειας του τεμαχίου

Για να αξιολογηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα ηλεκτροχημικής κοπής για τη διαμόρφωση περυγίου στροβιλομηχανής. Στο Διαγρ. 15 αναπαρίσταται δεδομένο προφίλ της ανόδου-τεμαχίου, με λεπτή γραμμή, ενώ το σχήμα της επιφάνειας του εργαλείου-ηλεκτροδίου με την πιο παχιά στο ίδιο σχήμα. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με την εισαγωγή των ακόλουθων παραμέτρων:

- Υλικό τεμαχίου: κράμα inconel
- Ηλεκτρολύτης: 13% υδατικό διάλυμα NaNO_3
- Συντελεστής ηλεκτροχημικής κατεργασιμότητας: $K_v = 1.64 - 2.13 \exp(-0.03i)$
 mm^3/Amin , όπου I η πυκνότητα ρεύματος σε A/cm^2
- Δυναμικό: $U=12\text{V}$
- Συνολική υπέρταση: $E=3\text{V}$
- Ταχύτητα πρόωσης εργαλείου: $V_f = 1\text{mm} / \text{min}$
- Ταχύτητα εισόδου ηλεκτρολύτη: $w=10\text{m/s}$
- Ακρίβεια υπολογισμών του σχήματος του εργαλείου-ηλεκτροδίου $\Delta F=2\mu\text{m}$

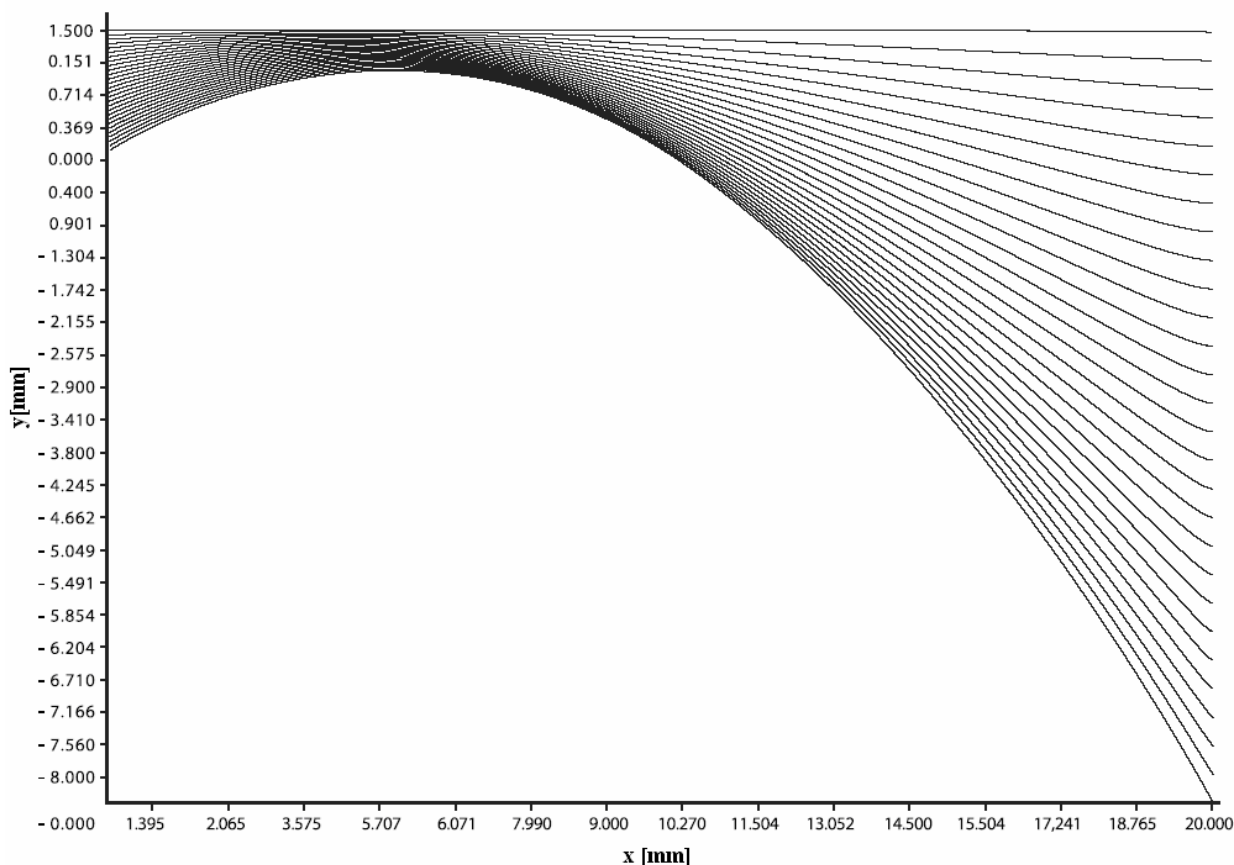


Διάγραμμα 15: Προφίλ εργαλείου και πτερυγίου

5.3.2 Εφαρμογή στην πρόβλεψη της επιφάνειας του τεμαχίου με κυλινδρικό εργαλείο

Για κυλινδρικό εργαλείο-ηλεκτρόδιο, αναπτύχθηκε το σχήμα τεμαχίου για διάφορα βάθη εκσκαφής (Διαγρ. 16) με τη χρήση του λογισμικού που παρουσιάστηκε παραπάνω. Οι αρχικές παράμετροι που εισήχθησαν στο πρόγραμμα συνοπτικά είναι οι εξής:

$$\begin{aligned}
 S_0 &= 0.015[mm], \quad K_v = 2.0[mm^3 / A \min], \quad R = 2.0[mm], \quad U = 12.0[V], \quad E = 2.00[V], \\
 V_f &= 10.00[mm / \min], \quad \kappa = 10.0[A / Vm], \quad P = 1.00[mm], \quad dt = 1.00000[s], \\
 Xk &= 0.000[mm], \quad Nx = 81, \quad Ny = 29, \quad appx = 2.00[mm], \quad outx = -8.00[mm], \quad M = 5, \\
 Lx &= 20.000[mm], \quad Ly = 7.000[mm], \quad Yp = 4.00[mm], \quad Im = 0.00[A / cm^2]
 \end{aligned}$$



Διάγραμμα 16: Περιγράμματα μορφής τεμαχίου για διάφορα βάθος εκσκαφής

5.3.3 Εφαρμογή στην πρόβλεψη της επιφάνειας του τεμαχίου με εργαλείο-ηλεκτρόδιο σφαιρικού άκρου

Στη συνέχεια παρουσιάζεται τρισδιάστατο γράφημα προσομοίωσης ηλεκτροχημικής κοπής με εργαλείο-ηλεκτρόδιο σφαιρικού άκρου με την εισαγωγή των ακόλουθων παραμέτρων (Διαγρ. 17):

$$S_0 = 0.010[mm], K_v = 2.0[mm^3 / A \min], R = 1.0[mm], U = 12.0[V], E = 2.00[V],$$

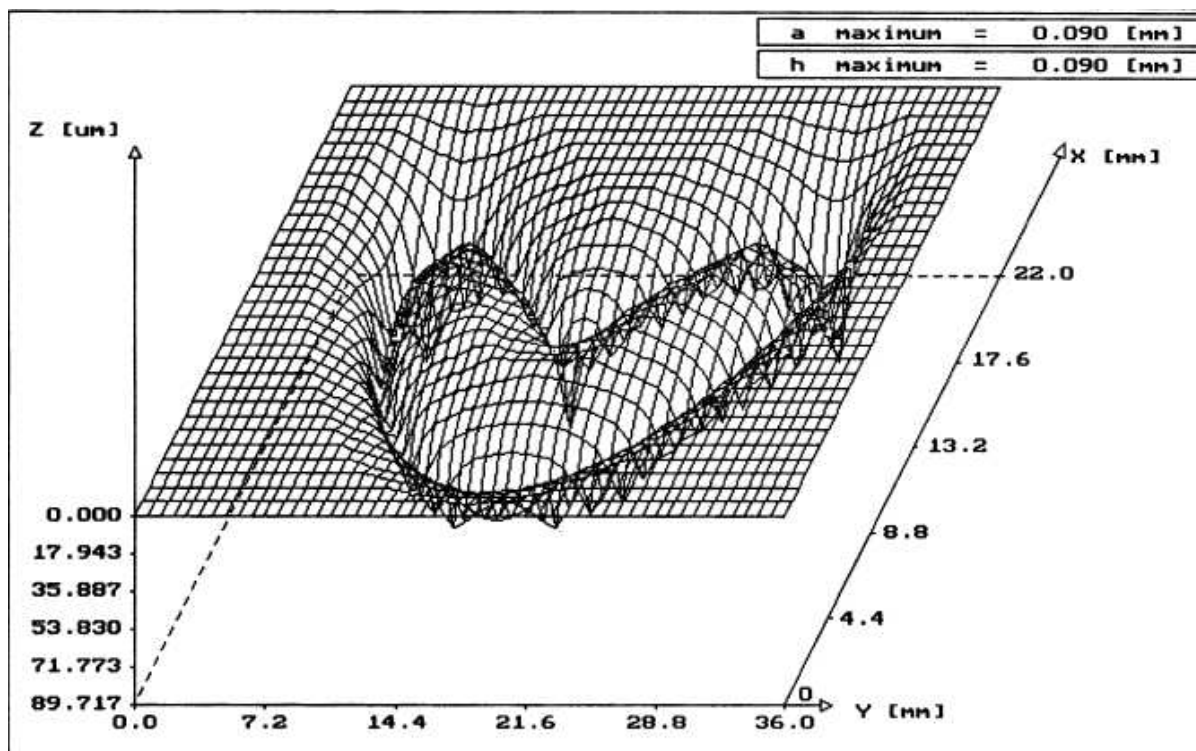
$$V_f = 5.00[mm / \min], \kappa = 10.0[A / Vm], P = 2.00[mm], dt = 0.40000[s],$$

$$Xk = 0.000[mm], Nx = 31, Ny = 51, appx = 1.00[mm], outx = -5.00[mm], M = 5,$$

$$Lx = 22.000[mm], Ly = 36.000[mm], Yp = 6.00[mm], Im = 4.00[A / cm^2]$$

Το διάγραμμα που προκύπτει είναι το αποτέλεσμα της κίνησης του εργαλείου-ηλεκτροδίου η οποία περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

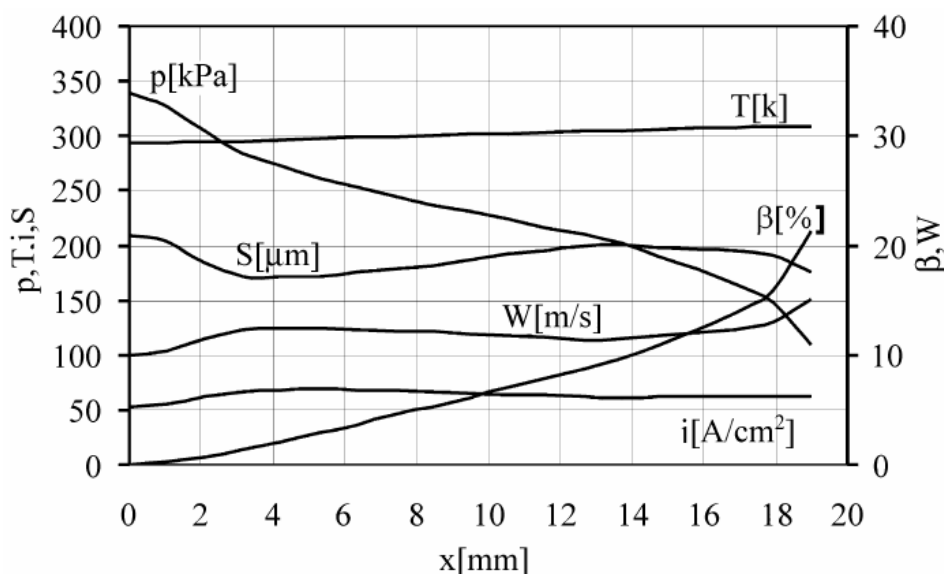
$$x_e = 11 + 7 \sin(\pi t / 20), y_e = 18 + 12 \sin(\pi t / 30), z_e = \text{σταθερό}, t \in (0, 30).$$



Διάγραμμα 17: Τρισδιάστατο γράφημα της επιφάνειας του τεμαχίου για ECM με κυλινδρικό εργαλείο από την οθόνη του λογισμικού

5.3.4 Επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στο τελικό σχήμα του τεμαχίου

Στο Διαγρ. 18 παρουσιάζονται οι κατανομές των μεγεθών S , p , w , T , β και I σε συνάρτηση με την απόσταση κατά μήκος της ροής του ηλεκτρολύτη (με $x=0$ στην είσοδο) όπως προέκυψαν από την εφαρμοσθείσα μεθοδολογία. Η μεταβολή στο πάχος του διακένου κατεργασίας S προκύπτει από τη μεταβολή στο προφίλ του πετυγίου και από τη μεταβολή στις φυσικές συνθήκες κατά μήκος της ροής του ηλεκτρολύτη

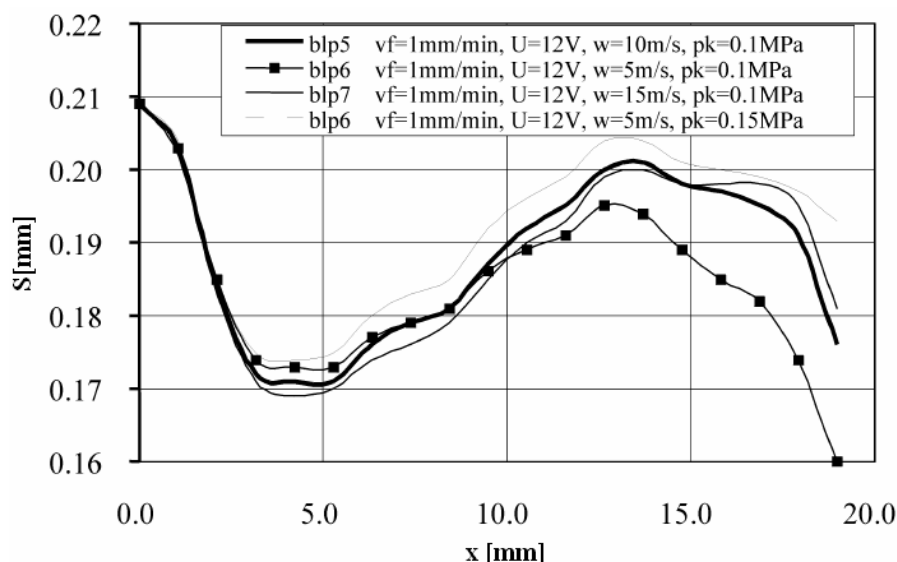


Διάγραμμα 18: Κατανομή των μεγεθών p , w , T , β , S , i συναρτήσει της απόστασης κατά μήκος της ροής του ηλεκτρολύτη

Για την αξιολόγηση της επίδρασης των παραμέτρων εισαγωγής στο διάκενο κατεργασίας (δηλαδή για την αξιολόγηση των σφαλμάτων στην κατανομή του σχήματος της επιφάνειας) έλαβε χώρα υπολογιστική προσομοίωση για διάφορες τιμές του δυναμικού, της ταχύτητας πρόωσης και της ταχύτητας εισαγωγής του ηλεκτρολύτη:

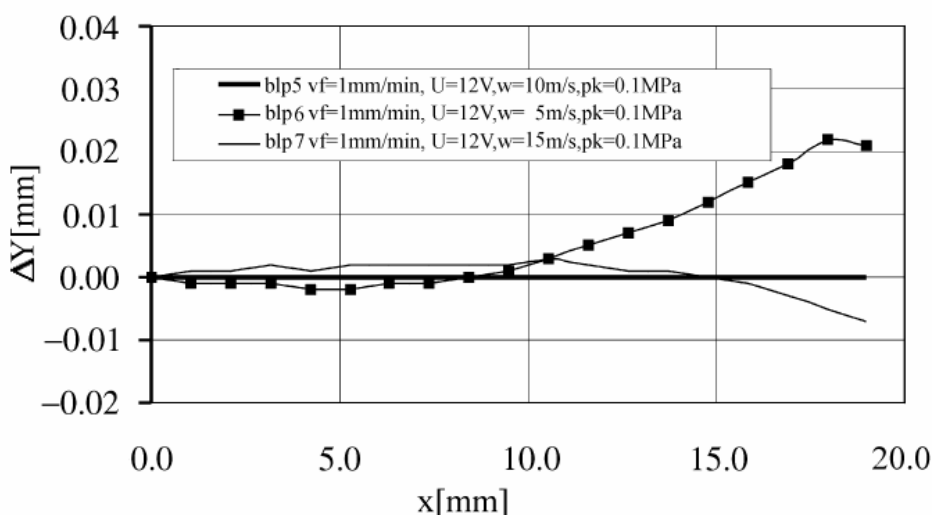
- Δυναμικό $U=8, 12, 16$ V
- Ταχύτητα πρόωσης εργαλείου $V_f = 0.75, 1.00, 1.50$ mm/min
- Ταχύτητα εισαγωγής ηλεκτρολύτη $w= 5, 10, 15$ m/s.

Κάποια από τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο Διαγρ.19. Οι μεγαλύτερες τιμές στο πάχος του διακένου $S(x)$ παρατηρούνται στο σημείο όπου ο ηλεκτρολύτης εξέρχεται από το διάκενο και οφείλονται στη μεταβολή της αγωγιμότητας του ηλεκτρολύτη που προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας και των αερίων. Η μείωση της ταχύτητας εισαγωγής του ηλεκτρολύτη προκαλεί μείωση στο πάχος του διακένου στην έξοδο του ηλεκτρολύτη. Το πάχος του διακένου εξαρτάται σημαντικά στην πίεση που υπάρχει στην έξοδο, όπως φαίνεται στο Διαγρ.19 για $p_k = 0.10$ MPa και για 0.15MPa.



Διάγραμμα 19: Πάχος διακένου για διάφορες παραμέτρους

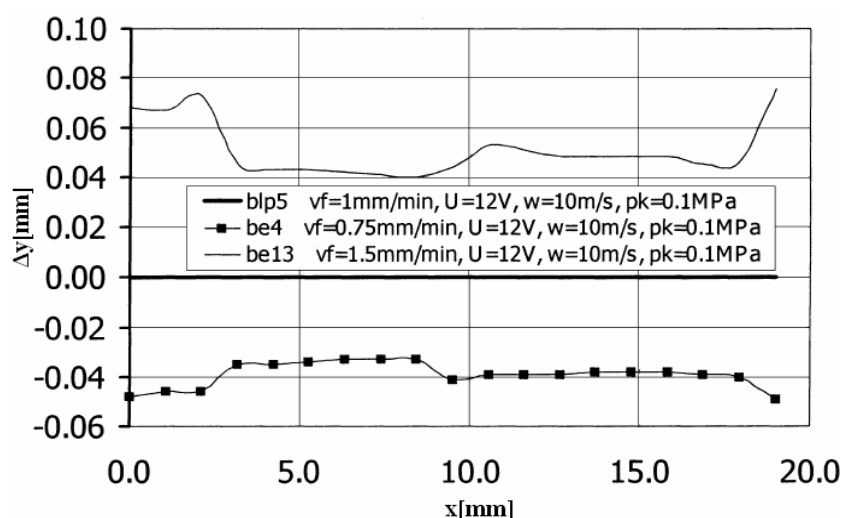
Αύξηση της πίεσης στην έξοδο του διακένου προκαλεί σημαντική αύξηση του πάχους του διακένου που μπορεί να ερμηνευτεί με τη μείωση της συγκέντρωσης του αερίου στην περιοχή. Στο Διαγρ. 20 παρουσιάζονται μεταβολές στο προφίλ της επιφάνειας του τεμαχίου κατά την κατεύθυνση y για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ηλεκτρολύτη, ως προς το προφίλ blp5. Παρά τις σημαντικές μεταβολές στην ταχύτητα εισαγωγής του ηλεκτρολύτη, η μέγιστη διαφορά μεταξύ των προφίλ είναι σχετικά μικρή ($<0.03\text{mm}$).



Διάγραμμα 20: Κατανομή των αποκλίσεων των προφίλ από το προφίλ blp5 για διάφορες ταχύτητες ηλεκτρολύτη

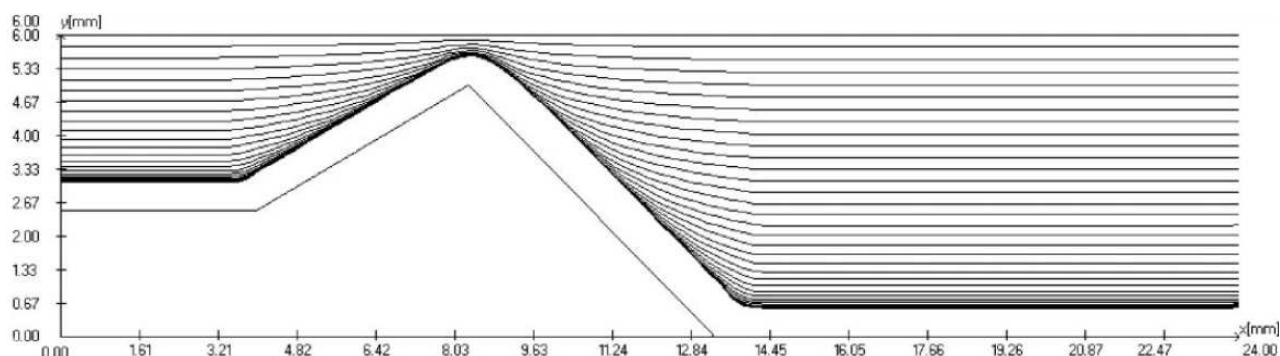
Το δυναμικό U και η ταχύτητα πρόωσης V_f έχουν πολύ μεγαλύτερη επίδραση ως προς τον y άξονα του προφίλ. Στο Διαγρ.21 παρουσιάζεται παράδειγμα της απόκλισης των προφίλ λόγω της επίδρασης της ταχύτητας πρόωσης.

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν πόσο σημαντική είναι η εξισορρόπηση των παραμέτρων αυτών στην κατεργασία. Κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής κοπής οι τιμές των παραμέτρων αυτών πρέπει να διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο κοντά στις ονομαστικές, για παράδειγμα κοντά στις τιμές που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό του εργαλείου-ηλεκτροδίου.

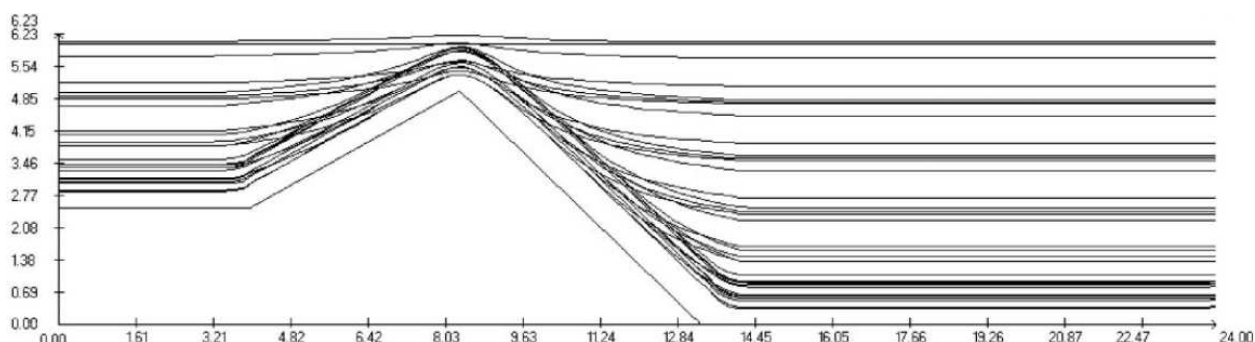


Διάγραμμα 21: Κατανομή των αποκλίσεων των προφίλ για διάφορες ταχύτητες πρόωσης του ηλεκτροδίου

Στη συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα της προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής στον υπολογιστή. Στο Διαγρ.22 παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοίωσης της ηλεκτροχημικής κοπής με σταθερή πρόωση εργαλείου. Στο Διαγρ.23 παρουσιάζονται αποτελέσματα της κατεργασίας για πρόσθετη ταλάντωση του εργαλείου-ηλεκτροδίου. Πρόσθετη αρμονική κίνηση του εργαλείου-ηλεκτροδίου βελτιώνει σημαντικά τις συνθήκες στο διάκενο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η ακρίβεια της κατεργασίας.



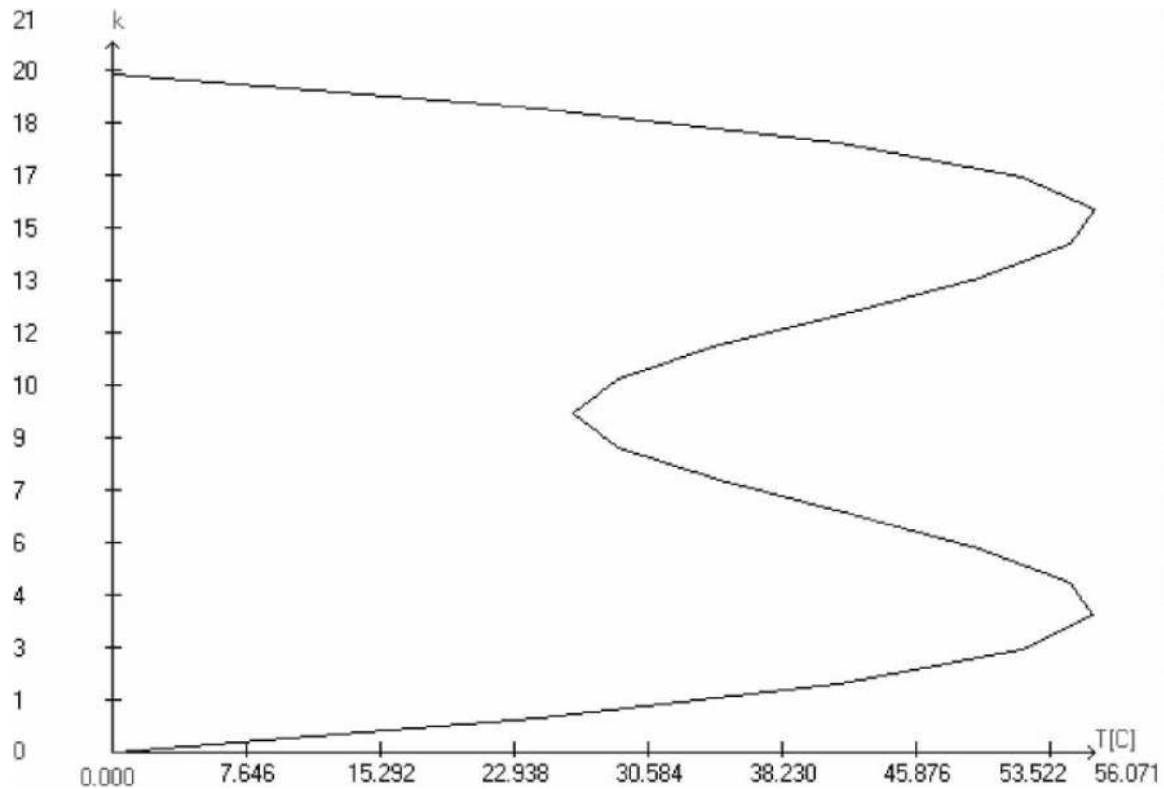
Διάγραμμα 22: Παράδειγμα προσομοίωσης ECM με σταθερή πρόωση εργαλείου



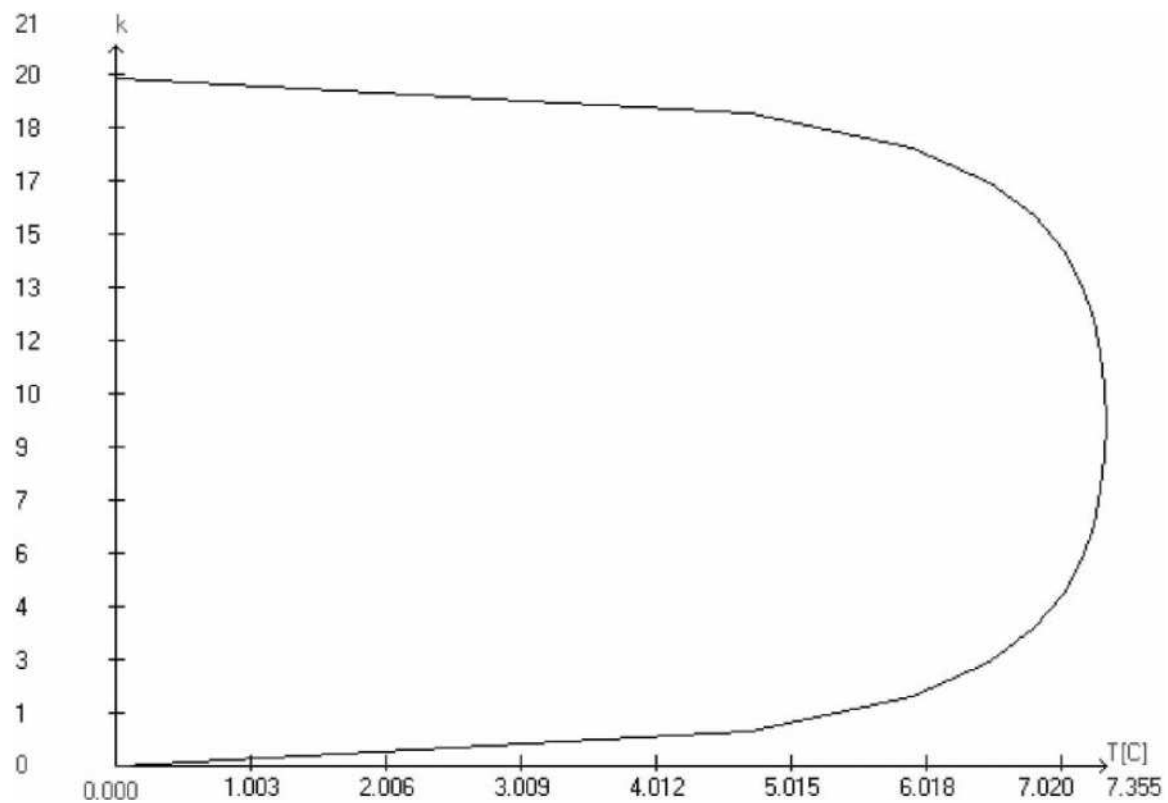
Διάγραμμα 23: Παράδειγμα προσομοίωσης ECM με πρόσθετη ταλάντωση του εργαλείου

Στο Διαγρ. 24 και 25 παρουσιάζονται οι κατανομές της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη στο σημείο που ο ηλεκτρολύτης εξέρχεται από το διάκενο (όπου ο ηλεκτρολύτης φτάνει στη μέγιστη θερμοκρασία του). Τα δύο τοπικά μέγιστα που παρατηρούνται στο Διαγρ. 24 και βρίσκονται κοντά στα ηλεκτρόδια είναι πολύ σημαντικά για την επιλογή των παραμέτρων εισόδου. Οι εισαγωγικές παράμετροι και τα ηλεκτρόδια που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει πάντα να επιλέγονται έτσι ώστε η υψηλότερη θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη να μην ξεπερνά το σημείο ζέσεως του ηλεκτρολύτη. Το μονοδιάστατο μοντέλο στο οποίο μπορούν να υπολογισθούν μόνο οι μέσες τιμές των T και β κατά μήκος του διακένου (Διαγρ.25), μπορεί να μην είναι αρκετά ακριβές για να υπολογιστεί η υψηλή θερμοκρασία. Η χρήση εισαγωγικών παραμέτρων στην προσομοίωση, στην οποία γίνεται κακή εκτίμηση της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη, σε πραγματική κατεργασία μπορεί να οδηγήσει σε βραχυκύκλωμα των ηλεκτροδίων και κατά συνέπεια σε καταστροφή του εργαλείου και του τεμαχίου. Έπειτα, στο Διαγρ. 26 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη κατά πλάτος του διακένου για διαφορετικές αποστάσεις από την έξοδο του διακένου.

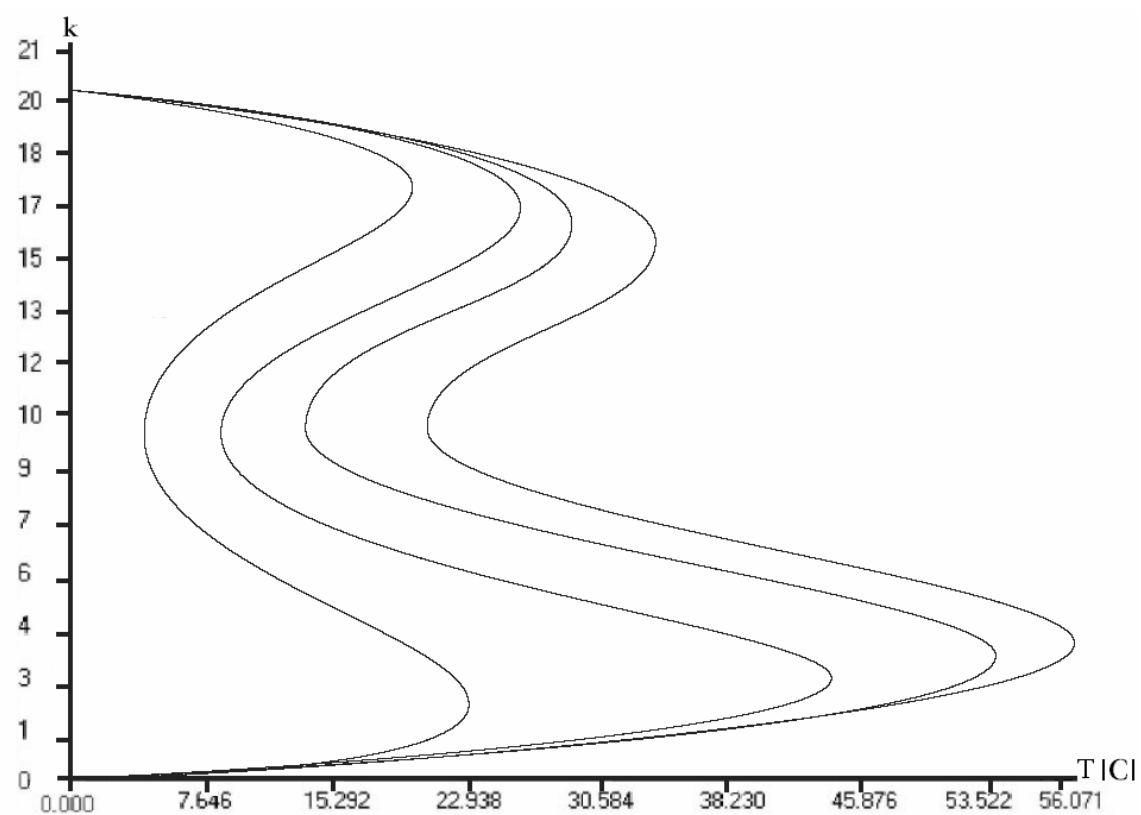
Τέλος, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κατεργασίας αποπεράτωσης με ηλεκτροχημική κοπή στο Διαγρ. 27., όπου για λαμβάνεται διαφορετικό προφίλ για διαφορετικό αρχικό διάκενο S_0 . Όπως φαίνεται, όσο αυξάνεται το βάθος εκσκαφής τόσο πιο λεία είναι η επιφάνεια του τεμαχίου.



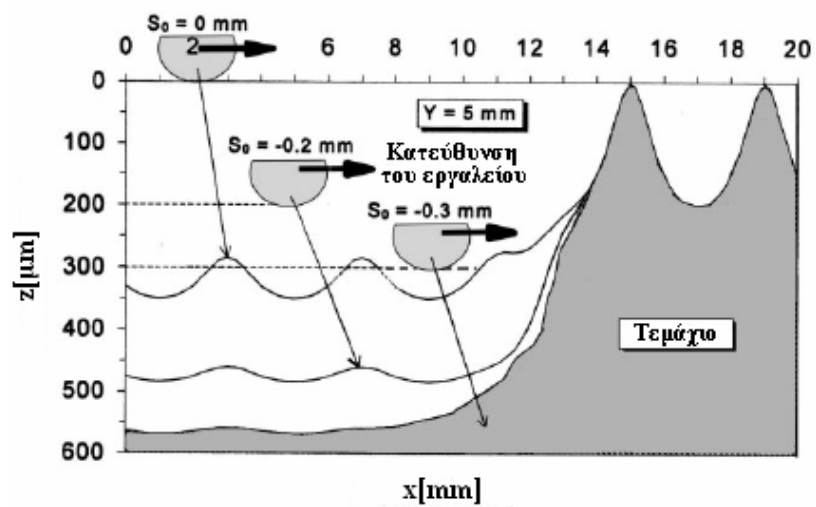
Διάγραμμα 24: Κατανομή της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη κατά πλάτος του διακένου (στρωτή ροή)



Διάγραμμα 25: Κατανομή της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη κατά πλάτος του διακένου (τυρβώδης ροή)



Διάγραμμα 26: Κατανομή της θερμοκρασίας κατά το πλάτος του διακένου σε διαφορετικές αποστάσεις από την έξοδο του διακένου



Διάγραμμα 27: Προφίλ της επιφάνειας τεμαχίου για διάφορες τιμές του αρχικού διακένου

6 Προοπτικές εξέλιξης

Πρόσφατες εξελίξεις στην εφαρμογή της ηλεκτροχημικής κοπής ενασχολούνται με την αντικατάσταση του συνεχούς ρεύματος από παλμικό ρεύμα (παλμική ηλεκτροχημική κοπή - PECM), κατεργασία κατά την οποία παρατηρήθηκε σημαντική πρόοδος στην ποιότητα της επιφάνειας. Το κλειδί για περαιτέρω εξέλιξη στην παλμική ηλεκτροχημική κοπή βρίσκεται στην ανάπτυξη παροχής ισχύος χαμηλού κόστους. Επιτυχής ανάπτυξη της μεθόδου θα επιτρέψει τον έλεγχο σε οθόνη υπολογιστή του μεγέθους του διακένου, επιτρέποντας εγγύτερο έλεγχο της διαδικασίας. Παρά τα θέλητρα, η παλμική ηλεκτροχημική κοπή θα πρέπει να θεωρείται σαν συμπληρωματική και όχι σαν υποκατάστατο της ήδη υπάρχουσας ηλεκτροχημικής κοπής, καθώς η πρώτη είναι ιδιαίτερα ακριβή, ενώ ο ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου είναι χαμηλότερος από αυτόν της δεύτερης.

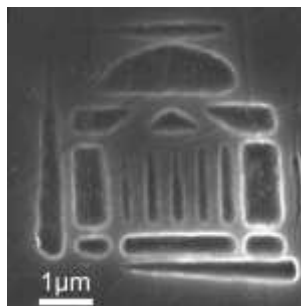
Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί και η ηλεκτροχημική μικροκοπή (EMM), η οποία αποτελεί την εφαρμογή της ηλεκτροχημικής κοπής στην κατεργασία λεπτών φιλμ και στην κατασκευή μικροδομών. Η κατεργασία αυτή έχει βρει εφαρμογή στα ηλεκτρονικά και σε άλλους κλάδους υψηλής τεχνολογίας, καθώς είναι σε θέση να παράγει προϊόντα με μεγάλη ακρίβεια, καλύτερο έλεγχο και στην περίπτωση των μετάλλων είναι λιγότερο επιβαρυντική και επικίνδυνη για το περιβάλλον, γιατί χρησιμοποιεί λιγότερο διαβρωτικά χημικά. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και σε συνδυασμό με μάσκες για την επιλεκτική κατεργασία υλικών. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η διάνοιξη οπών με ηλεκτροχημική μικροκοπή και χρήση μάσκας πάνω σε λεπτό στρώμα ανοξειδωτου χάλυβα.



Εικόνα 26: Διάνοιξη οπών με EMM και χρήση μάσκας πάνω σε λεπτό υπόστρωμα ανοξειδωτου χάλυβα

Επιπροσθέτως, επιστήμονες από το Πανεπιστήμιο της Βιρτζίνια, ΗΠΑ, και του Fritz Haber Ινστιτούτου της Γερμανίας, χρησιμοποίησαν την ηλεκτροχημική κοπή για να

δημιουργήσουν σύνθετες νανοδομές στο νικέλιο. Χρησιμοποιώντας υπερβραχείς παλμούς ρεύματος κατόρθωσαν να παράγουν δομές πλάτους 90nm. Η ηλεκτροχημική κοπή συνδυάζει χαρακτηριστικά ανάλογα της λιθογραφίας, δηλαδή υψηλή ανάλυση και παράλληλα βήματα κατεργασίας, με αποτέλεσμα να γίνεται όλο και πιο ανταγωνιστική σαν κατεργασία.[42]



Εικόνα 27: Απομίμηση ροτόντας

Επίσης, ο έλεγχος της ηλεκτροχημικής κοπής βελτιώνεται συνεχώς, με πιο εξεζητημένα σερβοσυστήματα και με καλύτερα μονωμένα επιθέματα. Παρόλα αυτά υπάρχει ακόμα η ανάγκη για βασικές πληροφορίες για τα ηλεκτρόδια σε φαινόμενα υψηλής πυκνότητας ρεύματος και υψηλής ροής ηλεκτρολυτών. Ο σχεδιασμός των εργαλείων συνεχίζει να είναι κυρίαρχης σημασίας σε κάθε εφαρμογή ηλεκτροχημικής κοπής. Η σχεδίαση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή με σκοπό να προβλεφθούν τα προφίλ του εργαλείου στην κάθοδο βελτιώνεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η έλευση της νέας τεχνολογίας για τον έλεγχο της ηλεκτροχημικής κοπής και η ανάπτυξη νέων και βελτιωμένων κραμάτων μετάλλων, που είναι δύσκολο να επεξεργαστούν με συμβατικές μεθόδους, διασφαλίζουν το μέλλον της ηλεκτροχημικής κοπής. [41]

7 Αποτελέσματα – Συζήτηση

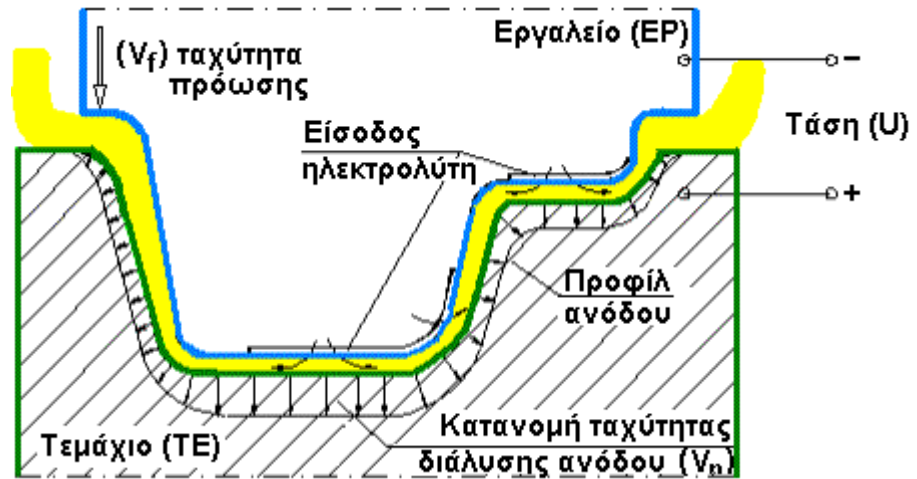
Από τη μελέτη της ηλεκτροχημικής κοπής που έγινε παραπάνω προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η απόδοση του ρεύματος εξαρτάται από το υλικό του τεμαχίου, το είδος του ηλεκτρολύτη και τις συνθήκες κατεργασίας (κυρίως από την πυκνότητα ρεύματος, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα ροής του ηλεκτρολύτη.
- Ο ρυθμός αποβολής υλικού στην ηλεκτροχημική κοπή είναι ανάλογος του συνολικού ρεύματος κατεργασίας και εξαρτάται από τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες του τεμαχίου.
- Ο δείκτης κατεργασιμότητας εξαρτάται από τη φύση του ηλεκτρολύτη και την πυκνότητα ρεύματος.
- Το βέλτιστο αποτέλεσμα, όσον αφορά στην ακρίβεια της κατεργασίας, επιτυγχάνεται όταν ο δείκτης κατεργασιμότητας K_v βαίνει αυξανόμενος με την πυκνότητα ρεύματος.
- Τυχόν μεταβολές της αγωγιμότητας προκαλούν μείωση της ακρίβειας της κατεργασίας, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι επιβεβλημένο σε πραγματικές συνθήκες κατεργασίας να διερευνάται σε βάθος το θέμα της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διακένου και η επίδραση της στο αποτέλεσμα της κοπής.
- Λόγω της εκλυόμενης θερμότητας, στις περισσότερες περιπτώσεις ηλεκτροχημικής κοπής παράγονται φυσαλίδες αερίου στη ζώνη κατεργασίας. Ο διασκορπισμός των φυσαλίδων μέσα στον ηλεκτρολύτη έχει ως αποτέλεσμα η ισοδύναμη ηλεκτρική αγωγιμότητα στο διάκενο να λαμβάνει τιμές σημαντικά μικρότερες από τις αναμενόμενες τιμές για ηλεκτρολύτη απαλλαγμένο από φυσαλίδες. Η αγωγιμότητα σχετίζεται άμεσα με το ποσοστό β (%κ.ό.) των φυσαλίδων στο διάκενο, το οποίο μεταβάλλεται κατά την έκταση και κατά το μήκος του διακένου κατεργασίας.
- Όσον αφορά στην ηλεκτροχημική κοπή με σταθερό εργαλείο, η μείωση του ρυθμού αποβολής υλικού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας ρεύματος, ενώ το σύστημα τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος σταθερής

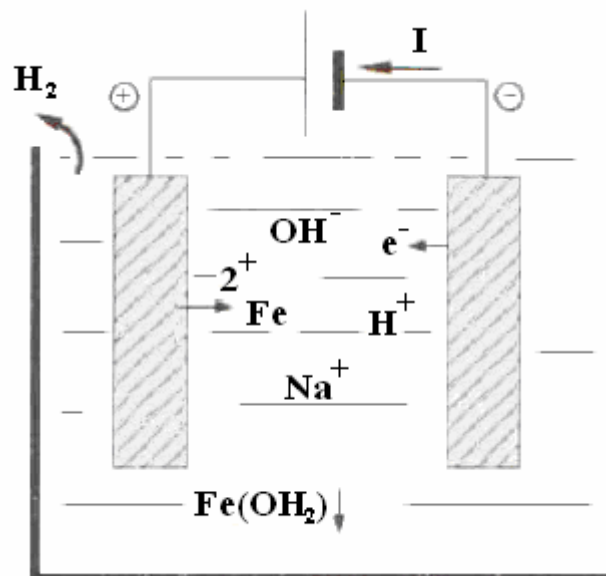
έντασης αποδίδει τάση αυξανόμενη με το χρόνο κατεργασίας και περίπου σταθερό ρυθμό αποβολής υλικού.

- Όσον αφορά στην ηλεκτροχημική κοπή με σταθερή πρόωση εργαλείου και την περίπτωση που το μέτωπο του εργαλείου δεν είναι παράλληλο προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια, αλλά κεκλιμένο, τότε στην περιοχή αυτή δρα η συνιστώσα V_n της ταχύτητας πρόωσης V_f που είναι κάθετη στην κεκλιμένη επιφάνεια του εργαλείου και σχηματίζει γωνία α με αυτή.
- Αλλαγές στη θερμοκρασία, τον έλεγχο των αερίων και κατά συνέπεια στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του σταθερού διακένου ισορροπίας S_f και την εμφάνιση απόκλισης από τη θεωρητικά αναμενόμενη μορφή του κατεργάσιμου τεμαχίου.
- Το διάκενο κατεργασίας είναι μεγαλύτερο από την τιμή S_f όταν σημειώνεται αύξηση θερμότητας, ενώ είναι μικρότερο από S_f όταν παρατηρείται υψηλή περιεκτικότητα αερίων.
- Οι εισαγωγικές παράμετροι πρέπει πάντα να επιλέγονται έτσι ώστε η υψηλότερη θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη να μην ξεπερνά το σημείο ζέσεως του ηλεκτρολύτη. Αυτό το μονοδιάστατο μοντέλο στο οποίο μόνο οι μέσες τιμές των T_a και β κατά μήκος του διακένου μπορούν να υπολογισθούν, μπορεί να μην είναι αρκετά ακριβείς για να υπολογίσουν την υψηλή θερμοκρασία. Η χρήση εσωτερικών παραμέτρων από την προσομοίωση η οποία κάνει κακή εκτίμηση της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη για πραγματική (αληθινή) κατεργασία μπορεί να οδηγήσει σε βραχυκύκλωμα των ηλεκτροδίων και κατά συνέπεια καταστροφή του εργαλείου και του τεμαχίου.
- Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των διαγραμμάτων αυτών υποστηρίζει την διαδικασία σχεδιασμού με υπολογιστική προσομοίωση κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής κοπής. Κατά τη διάρκεια των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής προσομοίωσης για διαφορετικές λειτουργικές παραμέτρους, η κριτική συνθήκη μπορεί να καθοριστεί από τους περιορισμούς που επιβάλλονται όπως είναι ο βρασμός, η φραγμένη ροή και η δημιουργία κοιλοτήτων.

8 Παράρτημα



Εικόνα 28: Βασική αρχή της ηλεκτροχημικής κοπής



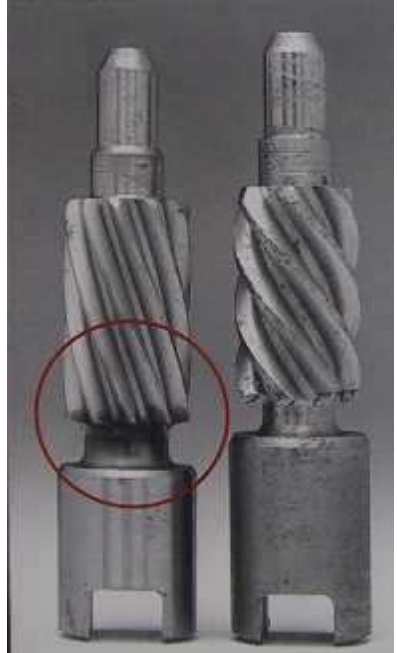
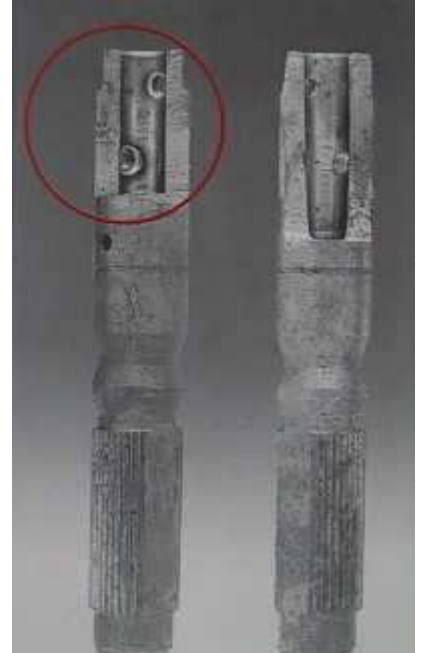
Εικόνα 29: Μηχανισμός αφαίρεσης υλικού κατά την ηλεκτροχημική κατεργασία



Εικόνα 30: Παράδειγμα του εργαλείου-καθόδου (πάνω) και του τεμαχίου-ανόδου



Εικόνα 31: Τεμάχια πολύπλοκης γεωμετρίας

Εξαρτήματα αεριοστροβίλου	
Πριν την ηλεκτροχημική κοπή	Μετά την ηλεκτροχημική κοπή
	
	
Εξομάλυνση των άκρων των δοντιών σε 40sec	Εσωτερικές οπές στον άξονα εξομαλύνθηκαν σε 20 sec
	

Εικόνα 32: Παραδείγματα ηλεκτροχημικής κοπής



Εικόνα 33: Ακροφύσιο τουρμπίνας



Εικόνα 34: Πτερύγιο τουρμπίνας



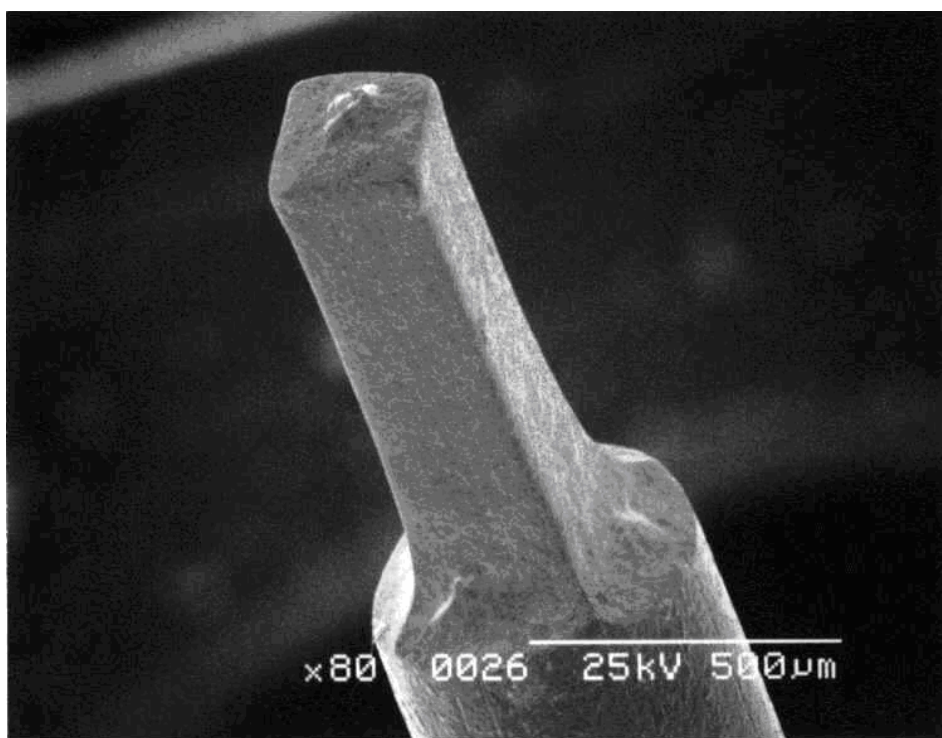
Εικόνα 35: Εργαλειομηχανή ηλεκτροχημικής κοπής



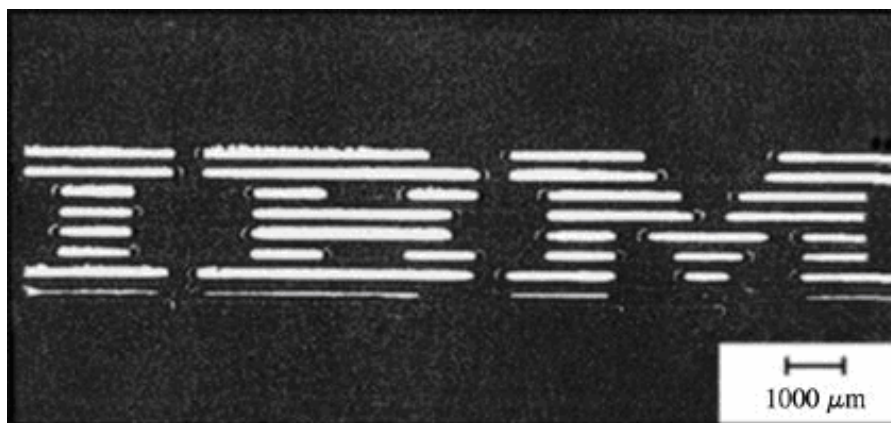
Εικόνα 36: Εγκατάσταση ηλεκτροχημικής κοπής



Εικόνα 37: Βέλτιστος έλεγχος στην ηλεκτροχημική κοπή



Εικόνα 38: Παράδειγμα τεμαχίου που έχει υποστεί EMM (ηλεκτροχημική μικροκοπή)



Εικόνα 39: Φύλλο ανοξείδωτου ατσαλιού πάχους 50μm το οποίο έχει υποστεί EMM με διάλυμα 5-M NaNO_3 . Με λευκό αναπαρίστανται οι οπές μετά την κατεργασία. Η διάμετρος του ακροφυσίου είναι 200μm.

Σύστημα τροφοδότησης	
Τύπος	Συνεχές ρεύμα
Τάση	5-30V (συνεχές ή παλμικό)
Ένταση ρεύματος	50-40000 A
Πυκνότητα ρεύματος	10-500 A/cm ²
Ηλεκτρολύτης	
Τύποι και συγκεντρώσεις	
Περισσότερη χρήση	NaCl (60-240 g/l)
Συχνότερη χρήση	NaNO ₃ (120-480 g/l)
Θερμοκρασία	20-50 °C
Ταχύτητα ροής	11/min/100A
Ταχύτητα	1500-3000 m/min
Εσωτερική πίεση	0,15-3 Mpa
Εξωτερική πίεση	0,1-0,3 Mpa
Διάκενο κατεργασίας	0,05-0,3 mm
Ταχύτητα τροφοδότησης	0,1-0,20 mm/min
Υλικά ηλεκτροδίων	ορείχαλκος, χαλκός, μπρούτζος
Ανοχή	
Σχήμα δύο διαστάσεων	0,05-0,2 mm
Σχήμα τριών διαστάσεων	0,1 mm
Επιφανειακή τραχύτητα	0,1-2,5 mm

Πίνακας 4: Τυπικές τιμές των παραμέτρων και συνθηκών της ECM

9 Βιβλιογραφία

1. McGeough J., A., Principles of Electrochemical Machining, Chapman and Hall, London, 1974
2. Risko, D. G., and Davydov A. D.: Manufacturing Applications and Productivity Limitations of Electrochemical Machining, Manufacturing Science and Engineering, ASME, 1993, PED-Vol.64:701-711
3. Davydov, A., D., and Kozak, J.: High Rate Electrochemical Shaping, Nauka, Moscow, 1990
4. Loutrel S.P., Cook N.H.: A theoretical model for high rate electrochemical machining, Trans. ASME-J.Emg.Ind. 95 (4) (1973) pp. 997-1005
5. McGeough J.: Electrochemical Machining, Institute for Integrated Micro and Nano Systems, 2005
6. Raycom and Amchem: Electrochemical Machining, 1998
7. Watkins R. D. and Granoff B., : Introduction to Environmentally Conscious Manufacturing, Inter. J. of Environmentally Conscious Manufacturing, No.1, 1992, pp.5-11
8. Newman J., S.: Electrochemical Systems, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall [1972, c1973]
9. Rousar I., Micka K., and Kimla A.: Electrochemical Engineering, Amsterdam; New York; Elsevier; New York, N.Y.: Elsevier Science Pub. Co., 1986
10. Rumyantsev, E., and Davyov, A., Electrochemical Machining of M Metals, Mir Publisher, Moscow, 1989
11. Tipton, H., Proc. of the 5th Int. Conf. MDTR, 1969, pp.295-299
12. Tipton H.: The Calculation of Tool Shapes for Electrochemical Machining, Fundamentals of Electrochemical Machining, Edited by C.L. Faust, 1971, pp.87-102
13. Datta M., and Landolt D., Surface Brightening During High Rate Nickel Dissolution in Nitrate Electrolytes, J.Electrochemical Society, vol.122, No 11,1975
14. Kozak J.: Mathematical Models for Computer Simulation of Electrochemical Machining Processes. a)Proceed 13th Int. Conference on Computer Aided of Production Engineering, Warsaw 1997, pp.311-318, b)Journal of Materials Processing Technology, vol.76, Nos1-3, 1998,pp.170-175
15. Kozak, J.:Surface Shaping by Electrochemical machining, Transaction of Warsaw University of Technology (WUT), Warszawa, 1976
16. Kozak, J., Rajurkar, K., P., and Wei, B.: Modelling and Analysis of Pulse Electrochemical Machining (PECM), Transactionof ASME- Journal of Engineering for Industry, vol.116, Nr.3,1994
17. Kozak, J., and Lubkowski, K.: The Basic Investigation of Characteristic in the Pulse ECM, Proceed. 20th M.T.D.R. Int. Conf. Birmingham, 1979, pp.625-630
18. Kozak, J., and Lubkowski, K., and Peronczyk J.: Accuracy Problems of the Pulse ECM, Proceed. 22nd MTDR Int. Conf., Manchester, 1981, pp.353-360
19. Kozak, J., and Davydov, A., D., Soviet Electrochemistry, vol.19, No.7, 1983, pp.769-775

20. Kozak, J., and Rajurkar, K., P. and Wei, B.: Proceed of the Symposium on Material issues in Machining and the Physics of the Machining Processes, Winter Ann. Meeting of the ASME, Anaheim,1992, pp.131-146
21. Rajurkar K., P., Wei.,B., and Kozak J.: Annals of the CIRP Vol.44/1, 1995, pp.177-180
22. Rajurkar K., P., Wei.,B., and Kozak J.: Annals of the CIRP Vol.42/1, 1993, pp.231-234
23. Rajurkar, K.P., Zhu, D., McGeough, J.A., Kozak, J. and De Silva, A.: New developments in electrochemical machining, CIRP, Vol.24, No.2, pp.567-589
24. Petrov Yu., N., et al., : Fundamentals .of Improvement of Accuracy of Electrochemical Shaping, Stiinca, Kishenev, 1977
25. Dikusar A., I., et al.: Electron Treatment of Metals No2, 1978
26. Saushkin B., P.: Electron Treatment of Metals, No2, 1975
27. Siedyikin F., V.: Technology and Economic Problems of ECM, Mashinostroenije, Moscow, 1980
28. Paczkowski Tomas and Sawicki Jerzy: Electrochemical Machining of Curvilinear Surfaces, 2008
29. Sandeep S. Patil and Vinod Yadava: Finite element prediction of tool shapes in electrochemical machining, Int J. Design Engineering, Vol.1, No.1, 2007
30. Debarr, A.E. and Oliver, D.A.: Electrochemical Machining, 2nd edition, London: Macdonald
31. Ghosh, A., Manufacturing Science, Ellis Horwood Ltd., Chichester, UK, 1986
32. Amalnik M.S. and McGeough J. A.: Intelligent Concurrent Manufacturability Evaluation of Design for Electrochemical Machining, Journal of Materials Processing Technology 61, pp130-139, 1996
33. Jain V.K. and Pandey P.C.: Tooling design for Ecm, 1979
34. Jain V.K. and Pandey P.C.:Design and analysis of ECM toolings,1980
35. Jain V.K. and Pandey P.C.:On some aspects of Tool Design in ECM, Mechanical Engineering Bulletin, 1977, pp66-72
36. DeBarr A.E. and Oliver D.A.: Electrochemical Machining, Macdonald and Co. Ltd., 1975
37. Alder, G.M., A.K.: Use of boundary element method for the determination of tool shape in Electrochemical Machining, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Part B, Vol.214, pp.745-750, (2000)
38. Metals Handbook Ninth Edition Vol.16 ASM Int., 1989
39. Α.Γ. Μάμαλης, Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: μη συμβατικές κατεργασίες, 2000, Αθήνα
40. Δ.Ε.Μανωλάκος, Επιφανειακές κατεργασίες υλικών, Ε.Μ.Π.: Σημειώσεις Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμης και Τεχνολογίας των Υλικών, Αθήνα 2004
41. <http://www.ecm-technologies.nl/content.php?id=81>
42. <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/17729>
43. www.electrochemical.freemove.co.uk/what_is.htm
44. www.electrochemical.freemove.co.uk/subtract.htm
45. <http://electrochem.cwru.edu/ed/encycl/>
46. http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/electrochemical-machining-ecm-machine-291755.jpg
47. www.sae.org/aeromag/techupdate_4-00/14.htm
48. www.mrsec.virginia.edu/news.htm
49. www.iitk.ac.in/infocell/announce/machining/image013.jpg
50. www.deskeng.com/articles/aaanjr.htm

51. www.aist.go.jp/MEL/soshiki/seisan/fukugo/chikamori/bisai_2.jpg
52. <http://www.research.ibm.com/journal/rd/425/datta.html>
53. http://www.barber-nichols.com/images/ecm_helical_rotor.jpg
54. http://www.barber-nichols.com/images/ecm_turbine_blades.jpg
55. [www.barber-nichols.com/capabilities/manufacturing_capabilities/electrochemical_machining_\(ECM\)](http://www.barber-nichols.com/capabilities/manufacturing_capabilities/electrochemical_machining_(ECM))
56. <http://electrochem.cwru.edu/ed/encycl/fig/m03/m03-f05b.jpg>