

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Μελέτη, Σχεδιασμός και Παραμετρική Ανάλυση Ευαισθησίας, Διάταξης Ανοδίωσης Αλουμινίου με Θειικό Οξύ

Γεώργιος Μ. Ποτηριάδης

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Μελέτη, Σχεδιασμός και Παραμετρική Ανάλυση Ευαισθησίας, Διάταξης Ανοδίωσης Αλουμινίου με Θειικό Οξύ

Γεώργιος Μ. Ποτηριάδης

Επιβλέπων : Βασίλειος Σπιτάς Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

••••••

Σπιτάς Βασίλειος

Προβατίδης Χριστόφορος Κουλοχέρης Δημήτριος

Αθήνα, Μάρτιος 2016

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και υποστήριξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Ευχαριστώ θερμά, τον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Βασίλειο Σπιτά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντας μου την παρούσα εργασία καθώς και για την αγαστή συνεργασία και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθόλη την διάρκεια της.

Επιπρόσθετα ευχαριστώ πολύ τον, Υποψήφιο Διδάκτορα, κ. Ευστράτιο Τσολάκη, για την πολύτιμη και καίρια υποστήριξη που μου παρείχε.

Ευχαριστώ επίσης θερμότατα τους φίλους μου, για την συμπαράσταση και υποστήριξη που μου προσέφεραν το διάστημα αυτό.

Τέλος θα ήθελα να αφιερώσω στους γονείς μου, Ξένη-Αλίκη και Μιχαήλ, την παρούσα εργασία, ως ένδειξη ευγνωμοσύνης, για την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση που μου προσφέρουν.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία, πραγματεύεται μια προκαταρκτική, αλλά ολοκληρωμένη προσέγγιση, από την κατανόηση ως το σχεδιασμό, μιας βιομηχανικής διάταξης ανοδίωσης αλουμινίου με ηλεκτρολύτη θειϊκού οξέος. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην αποτίμηση και συσχέτιση της ηλεκτρικής πεδιακής ανάλυσης με το συνολικό πολυπαραμετρικό φαινόμενο.

Αρχικά, έλαβε χώρα μια εκτενής βιβλιογραφική αναζήτηση επί των υφιστάμενων μεθόδων ανοδίωσης, της βασικής θεωρίας που διέπει την ανοδίωση, του συνόλου των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα πριν και μετά, καθώς και τυχόντων πρότερων παρόμοιων αναλύσεων. Επίσης πραγματοποιήθηκε μια αναζήτηση επί των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της ανοδίωσης θειικού οξέος και των τυχόντων ιδιαίτερων αναγκών, απαιτήσεων και περιορισμών που εκπορεύονται αυτής.

Επόμενο βήμα, ήταν η μελέτη των υφιστάμενων διατάξεων ανοδίωσης, των μηχανημάτων, υποδομών, καλών πρακτικών και γενικά της συνολικής εγκατάστασης και διαδικασίας. Απόρροια των παραπάνω, ήταν οι βασικές προδιαγραφές της διάταξης ανοδίωσης καθώς και μια βασική διαστασιολόγηση των εμπλεκόμενων μηχανημάτων και εξαρτημάτων.

Εν συνεχεία βάσει των παραπάνω προδιαγραφών, αναζητήθηκαν στη σχετική βιβλιογραφία οι πιθανές εναλλακτικές λύσεις (ιδιαίτερα όσον αφορά στα υλικά και τις πρώτες ύλες). Κατόπιν έλαβε χώρα. μια σειρά προσομοιώσεων, ώστε να διαφανούν οι βασικές συνιστώσες και ο τρόπος επίδρασης αυτών στην ομοιομορφία. Για το λόγο αυτό, έγινε ανάλυση κάποιων βασικών τοπολογιών στο υπολογιστικό περιβάλλον ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων ANSYS Maxwell, ενώ για την μετεπεξεργασία υλοποιήθηκαν κατάλληλες ρουτίνες στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

Μέσω της διεπαφής MATLAB-Maxwell, προέκυψαν μια σειρά από στατιστικά στοιχεία, τα οποία αποτιμήθηκαν μέσω κάποιων θεσπισθέντων στοχικών συναρτήσεων και στατιστικών αναλύσεων. Ως αποτέλεσμα αυτών προέκυψαν κάποιες τάσεις, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν ποικιλοτρόπως, αλλά είναι ιδιαίτερα ταιριαστές στη σχεδίαση του racking.

5

Πέραν αυτών υλοποιήθηκε μια κατάλληλη πειραματική διάταξη, για την εκτίμηση κυρίως της ποιότητας της διαδικασίας της ανοδίωσης και δευτερευόντως μιας μερικής συσχέτισης με τα συμπεράσματα των προσομοιώσεων.

Λέξεις Κλειδιά

Ανοδίωση, Θειικό οξύ, ανοδίωση τύπου ΙΙ, πεπερασμένα στοιχεία, στατιστική ανάλυση, ανάρτηση, ανάλυση ευαισθησίας, αλουμίνιο, ANSYS Maxwell, MATLAB, γεωμετρία, λουτρό ανοδίωσης.

Abstract

The present Master thesis undertakes a preliminary yet complete approach towards understanding and designing of an industrial anodizing apparatus, with sulfuric acid electrolyte. Significant attention was given in the evaluation and correlation of the electrical analysis with the total multidisciplinary phenomenon.

Initially, an extensive bibliographical research, on existing anodizing methods, its theoretical foundation, the total pre and post-processes and existing similar analysis was conducted. A research was also performed for special characteristics, demands, requirements and attributes depicting from sulfuric acid anodization.

As a next step, the existing anodizing apparatus, infrastructures, good practices and in general the total procedures facilitated were thoroughly studied. As a result, the basic process, machinery and accessories specifications, involved in anodizing were determined.

Based on the specifications, alternative anodizing configurations (especially in terms of materials) were investigated. Afterwards, a series of simulation took place, in order to reveal the belying basic parameters and their impact in terms of uniformity. For this reason, some fundamental geometries and topologies were simulated in the finite element, electromagnetic analysis software ANSYS Maxwell. Additionally, in order to post process and evaluate the finite element results, suitable scripts were implemented in MATLAB.

Via the MATLAB-Maxwell interface, a series of data were evaluated through convenient implemented objective functions and relative statistical analysis. Consequently, some basic trends and criteria arouse, that are of great importance and utilization, especially, but not limited, in the racking design.

Last but not least, an experimental apparatus setup was designed and utilized, in a first step, for the anodizing quality evaluation and validation. In a second step, the experimental data will be utilized for partially correlating with the simulation results.

Key Words

Anodizing, Sulfuric Acid, Type II anodizing, finite element analysis, statistical analysis, racking, sensitivity analysis, aluminum, ANSYS Maxwell, MATLAB, anode geometry, anodizing bath

Περιεχόμενα

Ευχαρ	ιστίες		4	
Περίλη	ιψη		5	
Abstra	ct		7	
Κατάλο	γος Εικόν	/@V	11	
Κατάλο	γος Πινά	κων	12	
Κατάλο	γος Διαγρ	σαμμάτων	13	
Κεφάλαιο 1ο. Εισαγωγή				
Κεφάλαιο 20. Ανοδίωση θειϊκού οξέος				
2.1	Ηλεκτρ	οχημική διαδικασία		
2.2	Σχηματι	ισμός αλουμίνας	20	
2.3	Ηλεκτρ	ική τροφοδοσία	22	
2.4	Ηλεκτρ	ολύτης	24	
2.5	Επιλογή	η πρώτων υλών	25	
2.6	Επιφανε	ειακές προεργασίες και μετεπεξεργασίες	26	
2.6	5.1 Απ	ολίπανση (degreasing)	26	
2.6	б.2 Пр	οσβολή (etching)	27	
2.6.3 Αποξείδωση 28				
2.6	5.4 Σφι	ɔάγιση (sealing)		
Κεφάλο	uo 30.	Διάταξη και επιλογή μηχανημάτων		
3.1	Υλικό κ	ατασκευής δεξαμενών	31	
3.2	Αντλίες	, αναδευτήρες και θερμαντικά/ψυκτικά μέσα	32	
3.3	Racking	ŗ	34	
Κεφάλο	uo 40.	Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία		
4.1	Μοντελ	οποίηση, τοποθέτηση προβλήματος και ανάλυση	37	
4.2 Καθορισμός κριτηρίων αποτίμησης ομοιομορφίας42				
4.2	2.1 Kα	θορισμός στοχικής συνάρτησης	43	

4.3 Αποτελέσματα και αποτίμηση αυτών45						
4.3.1 Απόσταση ανόδου καθόδου45						
4.3.2 Μεταβολή του λόγου επιφανειών κυλινδρικής γεωμετρίας						
4.3.3 Μεταβολή του λόγου επιφανειών πρισματικής γεωμετρίας51						
4.3.4 Μεταβολή της σχετικής απόστασης μεταξύ πολλαπλών ανόδων						
πρισματικής γεωμετρίας54						
4.3.5 Μεταβολή της σχετικής απόστασης μεταξύ πολλαπλών ανόδων						
κυλινδρικής γεωμετρίας58						
Κεφάλαιο 50. Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης61						
Κεφάλαιο 60. Συμπεράσματα68						
6.1 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση69						
References71						
Παράρτημα 1° Αποτελέσματα προσομοίωσης72						
Δεδομένα απόστασης ανόδου-καθόδου, ανόδου κυλινδρικής γεωμετρίας72						
Δεδομένα απόστασης ανόδου-καθόδου, ανόδου πρισματικής γεωμετρίας74						
Δεδομένα μεταβολής λόγου επιφανειών για κυλινδρική γεωμετρία						
Δεδομένα μεταβολής λόγου επιφανειών για πρισματική γεωμετρία						
Δεδομένα μεταβολής απόστασης μεταξύ κυλινδρικών ανόδων						
Δεδομένα μεταβολής απόστασης μεταξύ πρισματικών ανόδων						
Παράρτημα 290						

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Ενδεικτικοί τομείς χρησιμοποίησης του αλουμινίου και των κραμάτων του
Εικόνα 2 Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροχημικού μηχανισμού ανοδίωσης
Εικόνα 3 Αναπαράσταση της αλουμίνας, του διαχωριστικού στρώματος και της δομής των21
Εικόνα 4 Βιομηχανική διάταξη ανοδίωσης της Italtecno©30
Εικόνα 5 Τυπικές δεξαμενές ανοδίωσης από PVC31
Εικόνα 6 Πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας σε εφαρμογή ανοδίωσης
Εικόνα 7 Racking επί του συστήματος μεταφοράς34
Εικόνα 8 Εξαρτήματα για racking35
Εικόνα 9 Απεικόνιση των διεγέρσεων του μοντέλου για κυλινδρική και πρισματική γεωμετρία. Δύο
πηγές ρεύματος με φορά προς το εσωτερικό της σελίδας, στις άνω επιφάνειες των καθόδων και δυο
καταβόθρες ρεύματος στην άνω και κάτω επιφάνεια αμφότερων τοπολογιών
Εικόνα 10 Επισήμανση των μονωτικών συνοριακών συνθηκών
Εικόνα 11 Χαρακτηριστική εικόνα με την κατανομή των διανυσμάτων της πυκνότητας ρεύματος στον
ηλεκτρολύτη, καθώς και με την κατανομή του μέτρου της πυκνότητας ρεύματος στην επιφάνεια της
ανόδου. Επιπλέον εμφανίζεται η μια πηγή ρεύματος καθώς η δεύτερη κάθοδος παραλείπεται για
λόγους απεικόνισης41
Εικόνα 12 Πλάγια όψη τοπολογίας και απόστασης ανόδου-καθόδου
Εικόνα 13 Χαρακτηριστική χρωματική αναπαράσταση της πυκνότητας ρεύματος
Εικόνα 14 Απεικόνιση των αξόνων αναφοράς της διάταξης53
Εικόνα 15 Χαρακτηριστική απεικόνιση πεδιακής κατανομής57
Εικόνα 16 Χαρακτηριστική αποτύπωση της πυκνότητας ρεύματος (διάνυσμα και απόλυτη τιμή) σε
πολλαπλές κυλινδρικές ανόδους. Οι κύκλοι στις άνω έδρες των κυλίνδρων αντιστοιχούν στις
καταβόθρες του ρεύματος. Οι κάθοδοι και ο ηλεκτρολύτης δεν εμφανίζονται για λόγους οπτικής
ευκρίνειας60
Εικόνα 17 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης και τοπολογίας
Εικόνα 18 Μηχανολογικό σχέδιο εσωτερικού κύβου ανοδίωσης63
Εικόνα 19 Μηχανολογικό σχέδιο στραντζαριστής λαμαρίνας "U" που θα αποτελέσει τον εξωτερικό
κύβο ψύξης64
Εικόνα 20 Μηχανολογικό σχέδιο στραντζαριστών λαμαρίνων (2x), που θα αποτελούν την δεξαμενή
ψύξης καθώς επίσης θα στηρίζουν την όλη διάταξη65
Εικόνα 21 Μηχανολογικό σχέδιο δοκιμίων 6063Τ6 προς ανοδίωση
Εικόνα 22 Μηχανολογικό σχέδιο πλακών καθόδου από αλουμίνιο 6063T6
Εικόνα 23 Μηχανολογικό σχέδιο ποδιών στήριξης (αριστερά) και στομίου εκροής (δεξιά)66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Πίνακας καταλληλότητας και εφαρμογών ανοδίωσης διαφόρων σειρών αλουμινίου	25
Πίνακας 2 Αγωγιμότητες υλικών σε Siemens/meter	40
Πίνακας 3 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος ανόδου	
καθόδου	46
Πίνακας 4 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων για μεταβολή της απόστασης μεταξύ ανόδου και	
καθόδου πρισματικής γεωμετρίας	47
Πίνακας 5 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος για μεταβολι	i
λόγου επιφανειών (AR)	49
Πίνακας 6 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, για μεταβολ	ή
του λόγου AR των επιφανειών πρισματικών γεωμετριών	51
Πίνακας 7 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος πολλαπλών	
πρισματικών ανόδων	54
Πίνακας 8 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, πολλαπλών	
κυλινδρικών ανόδων συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης, σε σχέση με το benchmark	58
Πίνακας 9 Λίστα εξαρτημάτων που αποτελούν τη διάταξη	61
Πίνακας 10 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με απόσταση με κάθοδο 5mm	72
Πίνακας 11 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με απόσταση με κάθοδο 10mm	72
Πίνακας 12 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με απόσταση με κάθοδο 20mm	73
Πίνακας 13 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με απόσταση με κάθοδο 30mm	73
Πίνακας 14 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με απόσταση με κάθοδο 40mm	73
Πίνακας 15 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με απόσταση ανόδου καθόδου 5mm	74
Πίνακας 16 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με απόσταση ανόδου καθόδου 10 mm	74
Πίνακας 17 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με απόσταση ανόδου καθόδου 20 mm	75
Πίνακας 18 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με απόσταση ανόδου καθόδου 30 mm	75
Πίνακας 19 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με απόσταση ανόδου καθόδου 40 mm	76
Πίνακας 20 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με AR=2	77
Πίνακας 21 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με AR=6	77
Πίνακας 22 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με AR=10	78
Πίνακας 23 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με AR=1.25	79
Πίνακας 24 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με AR=1.875	79
Πίνακας 25 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με AR=2.5	80
Πίνακας 26 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με AR=3	80
Πίνακας 27 Πίνακας αποτελεσμάτων για benchmarking κυλινδρικών ανόδων	81
Πίνακας 28 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 5mm μεταξύ κυλινδρικών	
ανόδων	82

Πίνακας 29 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 30mm μεταξύ κυλινδρικών	
ανόδων	83
Πίνακας 30 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 70mm μεταξύ κυλινδρικών	
ανόδων	84
Πίνακας 31 Πίνακας αποτελεσμάτων για benchmarking κυλινδρικών ανόδων	85
Πίνακας 32 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 5mm μεταξύ πρισματικών	
ανόδων	86
Πίνακας 33 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 30mm μεταξύ πρισματικών	
ανόδων	87
Πίνακας 34 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 70mm μεταξύ πρισματικών	
ανόδων	88

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Στοχικές συναρτήσεις ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της απόστασης
μεταξύ ανόδου-καθόδου σε κυλινδρική γεωμετρία46
Διάγραμμα 2 Στοχικές συναρτήσεις ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της απόστασης
μεταξύ ανόδου-καθόδου σε κυλινδρική γεωμετρία48
Διάγραμμα 3 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει
της μεταβολής του λόγου της κύριας παράπλευρης επιφάνειας προς την επιφάνεια των βάσεων50
.Διάγραμμα 4 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει
της μεταβολής του λόγου AR των μετωπικών επιφανειών προς τις παράπλευρες επιφάνειες51
Διάγραμμα 5 Μεταβολή μέσων τιμών επιφανειών, συναρτήσει του μέσου και του ΑR53
Διάγραμμα 6 Στοχικές συναρτήσεις ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της απόστασης
μεταξύ ανόδων σε πρισματικές γεωμετρίες55
Διάγραμμα 7 Τετράγωνο απόδοσης των στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος,
συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των ανόδων, συγκρινόμενα με το benchmark55
Διάγραμμα 8 Στοχικές συναρτήσεις ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της απόστασης
μεταξύ ανόδων σε κυλινδρικές γεωμετρίες58
Διάγραμμα 9 Τετράγωνο απόδοσης των στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος,
συναρτήσει της απόστασης, συγκρινόμενα με το benchmark για πολλαπλές κυλινδρικές ανόδους59

Κεφάλαιο 1ο. Εισαγωγή

Το αλουμίνιο αποτελεί ένα αξιόλογο μέταλλο, καθώς διαθέτει έναν μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων, που το καθιστούν κατάλληλο για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, υπό διάφορες μορφές κράματος ή μη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι ήδη καλές μηχανικές, διαβρωτικές και διακοσμητικές του ιδιότητες βελτιώνονται όταν σχηματίζει κράμα με άλλα μέταλλα.

Πιο συγκεκριμένα έχει μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό, σε ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος, ενώ έχει και πολύ μεγάλη αντοχή στη διάβρωση. Επιπλέον, είναι ένας εξαιρετικός αγωγός τόσο της θερμότητας, όσο και του ηλεκτρικού ρεύματος, έχει εξαιρετικό λόγο ανάκλασης του φωτός, της θερμότητας, της ακτινοβολίας και των ηλεκτρικών κυμάτων, ενώ είναι και μη-μαγνητικό υλικό. Επιπρόσθετα, δεν καίγεται ή εκρήγνυται και δεν είναι τοξικό. Ένα άλλο γεγονός που το καθιστά εξαιρετικά δημοφιλές στην βιομηχανία, συνιστά και η ικανότητα μορφοποίησης και κατεργασίας του με όλες τις γνωστές μεταλλουργικές διαδικασίες, ενώ είναι σχετικά εύκολο και στην συγκόλληση, ένωση και κόλληση. Τέλος, ειδικά στην εποχή που η προστασία του περιβάλλοντος και η μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος είναι όλο και υψηλότερης σημασίας, το αλουμίνιο έχει το μεγάλο πλεονέκτημα πως διαθέτει έναν πολύ μεγάλο συντελεστή ανακύκλωσης.

Κατά σχήμα οξύμωρο, οι περισσότερες από τις θελκτικές του ιδιότητες, οφείλονται στην οξείδωση, πράγματι παρότι στα περισσότερα υλικά η οξείδωση συνιστά μια ανεπιθύμητη διαδικασία, στο αλουμίνιο μεγάλο μέρος των ιδιοτήτων του οφείλεται σε αυτήν. Εν προκειμένω, όταν εκτίθεται στον αέρα οξειδώνεται, σχηματίζοντας ένα λεπτό επιφανειακό, μη ορατό, στρώμα οξειδίου του αλουμινίου (ευρύτερα γνωστό ως αλουμίνα), που είναι ισχυρότατα προσκολλημένο στη μάζα του αλουμινίου και εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του (φαινόμενο της παθητικοποίησης). Παράλληλα, το στρώμα αυτό αναγεννάται αυτόματα όταν υποστεί οποιαδήποτε κατεργασία όπως για παράδειγμα τομή. Χάρις σε αυτό το λεπτό, αυτό-αναγεννούμενο στρώμα το αλουμίνιο θωρακίζεται –φυσικά- ενάντια στα στοιχεία της φύσης, καθιστώντας το κατάλληλο για πολλούς τομείς της βιομηχανίας.



Εικόνα 1 Ενδεικτικοί τομείς χρησιμοποίησης του αλουμινίου και των κραμάτων του

Σε αρκετές εφαρμογές η φυσική προστασία και εμφάνιση που προσδίδει το οξείδιο του αλουμινίου, είναι επαρκής. Όμως, σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές, οι απαιτήσεις προστασίας της επιφάνειας, της αντοχής στη διάβρωση και συχνά τις αισθητικής επιβάλλουν την επιφανειακή επεξεργασία του αλουμινίου. Χαρακτηριστικότερες από τις επιφανειακές επεξεργασίες είναι η ανοδίωση, η βαφή πούδρας και η κοινή βαφή.

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αναλύεται η διαδικασία της ανοδίωσης. Η ανοδίωση είναι, κατά βάση, μια σύνθετη ηλεκτροχημική (και όχι μόνο) διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται πάχυνση και σκλήρυνση του φυσικού προστατευτικού στρώματος της αλουμίνας. Η προκύπτουσα επιφάνεια, αναλόγως της μεθόδου ανοδίωσης που θα ακολουθηθεί, μπορεί να μεταβληθεί στη δεύτερη σκληρότερη φυσική ουσία γνωστή στον άνθρωπο, υπολειπόμενη μόνο του διαμαντιού. Εύκολα λοιπόν γίνονται αντιληπτά, τόσο η σημασία, όσο και τα οφέλη της ανοδίωσης, καθώς και γιατί τυγχάνει ευρείας εφαρμογής σε εφαρμογές διαστημικής, αεροναυπηγικής, αυτοκινητοβιομηχανίας, ναυτιλίας και άλλων. Επίσης, η ανοδίωση

αποτελεί όχι μόνο μια από τις καλύτερες επιφανειακές κατεργασίες μετάλλων, αλλά ταυτόγχρονα και μια περιβαλλοντικά φιλική κατεργασία. Επιπροσθέτως, καθώς η ανοδική επίστρωση σχηματίζει μια πορώδη δομή, διευκολύνεται και η πρόσφυση οργανικών και μη-οργανικών χρωμάτων και λοιπών χημικών ουσιών, προσδίδοντας μια αισθητικά ανώτερη επιφάνεια, κατάλληλη για πλήθος αρχιτεκτονικών, και όχι μόνο, εφαρμογών.

Η ανοδίωση είναι εμπορικά έντονα συσχετισμένη με το αλουμίνιο -και τα κράματα αυτού. Συνοπτικά οι βασικότεροι λόγοι ανοδίωσης είναι οι ακόλουθοι:

- Για προστασία ενάντια στα στοιχεία της φύσης
- Για αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας
- Για αύξηση της αντοχής στην καταπόνηση και στην φθορά
- Για μείωση της τριβής
- Για μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων (αύξηση της μονωτικής ικανότητας)
- Για αύξηση της πρόσφυσης χημικών επικαλύψεων
- Για μεταβολή της ανακλαστικής ικανότητας
- Για διακοσμητικούς λόγους
- Για την απόδοση μιας ανθεκτικής στο χρόνο επιφάνειας

Για να ικανοποιηθούν οι παραπάνω λόγοι, όπως θα ανέμενε κανείς, υφίστανται παραπάνω από μια μέθοδοι ανοδίωσης. Οι συνηθέστερες και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες είναι:

- Σχηματισμού φράγματος οξειδίου (barrier-type), που χρησιμοποιείται κυρίως για ηλεκτρικές εφαρμογές.
- Τype Ι: Ανοδίωση με χρωμικό οξύ, που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές αεροναυπηγικής
- Τype II: Ανοδίωση με θειικό οξύ, σε θερμοκρασία δωματίου. Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μέθοδο όλων.
- Τype III: Ανοδίωση σκληρής επικάλυψης (Hardcoat) με θειικό οξύ, κοντά στη θερμοκρασία πήξης του νερού. Όπως φανερώνει και το όνομα της, αυξάνει την σκληρότητα της επιφάνειας.

 Ανοδίωση φωσφορικού οξέος, που χρησιμοποιείται κυρίως για προετοιμασία των επιφανειών για χημική συγκόλληση.

Πέραν των αναφερόμενων, υφίστανται και αρκετές υποκατηγορίες αυτών για πιο εξειδικευμένες χρήσεις.

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, θα μελετηθεί η Type II, ανοδίωση με χρήση θειικού οξέος. Αφενός λόγω του εύρους των εφαρμογών της, αφετέρου γιατί μπορεί εύκολα να αποτελέσει μια στέρεα βάση για την επέκταση σε hardcoat ανοδίωση, καλύπτοντας έτσι τις περισσότερες απαιτήσεις της βιομηχανίας. Φυσικά, καθώς η ηλεκτροχημική και όχι μόνο, μελέτη και ανάλυση, είναι κοινή σε όλες τις μεθόδους, με μικρές μόνο μεταβολές μπορεί να προσαρμοστεί και στις υπόλοιπες.

Κεφάλαιο 20. Ανοδίωση θειϊκού οξέος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επιλεχθείσα μέθοδος ανοδίωσης είναι αυτή με ηλεκτρολύτη θειϊκού οξέος, σε θερμοκρασία δωματίου, ευρύτερα γνωστή και ως Type II anodizing. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια εκτενής ανάλυση της συνολικής διαδικασίας και μια περιγραφή των διάφορων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την ανοδίωση. Συνακόλουθα, θα προκύψουν και οι βασικές σχεδιαστικές παράμετροι που πρέπει να μελετηθούν και να ληφθούν υπόψιν, ώστε να προκύψει μια διάταξη υψηλής ποιότητας. Καθώς πρόκειται για ένα αρκετά πολύπλοκο φαινόμενο στο οποίο εμπλέκονται αρκετές επιστήμες, θα γίνει διαίρεση του προβλήματος σε αρκετά επιμέρους, ώστε να διευκολυνθεί η κατανόηση.

2.1 Ηλεκτροχημική διαδικασία

Από ηλεκτροχημικής σκοπιάς, η ανοδίωση δεν είναι τίποτα άλλο παρά οξείδωση, της οποίας το αποτέλεσμα είναι επιθυμητό να ελέγχεται κατά το δοκούν. Πιο συγκεκριμένα σε μια διάταξη ανοδίωσης υπάρχουν:

- Η/οι άνοδος/οι δηλαδή το/τα αντικείμενο/α προς ανοδίωση στην οποία λαμβάνει χώρα η οξείδωση.
- Η/οι κάθοδος/οι όπου λαμβάνει χώρα αναγωγή.
- Ο ηλεκτρολύτης, που βελτιώνει την αγωγιμότητα της διάταξης

Όταν λοιπόν η διάταξη διαρρέεται από ρεύμα, λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης και συμβαίνουν τα εξής:

Ο ηλεκτρολύτης, το θεϊκό οξύ αρχίζει να διαλύεται εκλύοντας κατιόντα υδρογόνου (θετικά φορτισμένα ιόντα) που μετακινούνται προς την κάθοδο όπου λαμβάνει χώρα η αναγωγή παράγοντας υδρογόνο:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \uparrow$$

Ταυτόγχρονα, αρνητικά φορτισμένα ιόντα (ανιόντα) και συγκεκριμένα υδροξείδιο (OH⁻) και θειικό άλας (SO₄⁻²) μετακινούνται προς την άνοδο. Το θειικό άλας όντας μια σταθερή ένωση, δεν συμμετέχει δραστικά σε κάποια αντίδραση, σε αντίθεση με το υδροξείδιο που αποτελεί βασικό παράγοντα σχηματισμού της αλουμίνας. Επιπλέον στην άνοδο, παράγονται θετικά φορτισμένα ιόντα αλουμινίου (Al⁺³), τα οποία στην επιφάνεια της ανόδου, αντιδρούν με τα ιόντα υδροξυλίου και οξειδώνονται σχηματίζοντας την αλουμίνα.

$$Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^{-1}$$
$$2Al^{+3} + 3O^{-2} \rightarrow Al_2O_3$$
$$2Al^{+3} + 3OH^{-1} \rightarrow Al_2O_3 + 3H^{+1}$$

Έτσι η συνολική αντίδραση που λαμβάνει χώρα στην διάταξη είναι:

$$2Al+3H_2O \rightarrow Al_2O_3+6H^++6e^-$$



Εικόνα 2 Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροχημικού μηχανισμού ανοδίωσης

Ο παραπάνω, αποτελεί το βασικό μηχανισμό, που πιστεύεται, πως λαμβάνει χώρα κατά τη διαδικασία της ανοδίωσης. Αυτό που είναι καθοριστικής όμως σημασίας τόσο για την κατανόηση της ανοδίωσης, όσο και για την μετέπειτα ανάλυση, είναι το γεγονός πως στη διαδικασία αυτή υφίσταται:

Από τη μια στο κύκλωμα τροφοδοσίας, στην άνοδο και στην κάθοδο μια ροή ηλεκτρονίων και από την άλλη στον ηλεκτρολύτη μια ροή ιόντων. Επιπλέον στην κάθοδο λαμβάνει χώρα πάντα αναγωγή που έλκει τα κατιόντα και οξείδωση στην άνοδο που έλκει τα ανιόντα. Συνεπώς, η αποφόρτιση των ιόντων είναι υπεύθυνη για τον σχηματισμό της αλουμίνας, ενώ το ρεύμα είναι υπεύθυνο για το σχηματισμό των ιόντων μέσω της οξείδωσης και της αναγωγής.

Όσον αφορά στο θειικό άλας, γενικά θεωρείται πως ευνοεί την μετακίνηση των ιόντων υδρογόνου μειώνοντας έτσι την απαιτούμενη τάση ηλεκτρολυτικού κελιού. Επίσης, παρότι θεωρείται αδρανές ως προς την όλη διαδικασία, εμφανίζεται στο προκύπτον στρώμα οξειδίου και συνεπώς η συνδρομή του δεν μπορεί να παραβλεφθεί τελείως.

2.2 Σχηματισμός αλουμίνας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το αλουμίνιο παθητικοποιείται από μόνο του, παρουσία αέρα. Το πρόβλημα είναι πως παρότι το προκύπτον στρώμα αλουμίνας είναι ισχυρά προσκολλημένο στην επιφάνεια του αλουμινίου και έχει ισχυρές μηχανικές ιδιότητες, έχει εξαιρετικά μικρό πάχος (της τάξης των 10 nm) καθιστώντας το ευάλωτο σε φθορά και χημική διάβρωση. Για αυτό το λόγο, το αλουμίνιο υποβάλλεται σε ανοδίωση ούτως ώστε να σχηματιστούν στρώματα αλουμίνας που φτάνουν τα 30μm για Type II και 150 και πλέον για hardcoat.

Έχοντας κατανοήσει την ηλεκτροχημική διαδικασία σχηματισμού της αλουμίνας σε μικροσκοπικό επίπεδο, θα αναλυθεί στη συνέχεια ο μηχανισμός σχηματισμού σε μακροσκοπικό επίπεδο, για ανοδίωση θειϊκού οξέος. Ο σχηματισμός της ανοδίωσης μπορεί να διαχωριστεί σε δύο τμήματα. Στο σχηματισμό του διαχωριστικού φράγματος και στο σχηματισμό του κυρίως στρώματος ανοδίωσης.

Στα αρχικά στάδια της ανοδίωσης σχηματίζεται ένα πυκνό, πορώδες, εξαιρετικά ομοιόμορφο με τη μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά και στην διάβρωση στρώμα αλουμίνας. Το στρώμα αυτό καλείται διαχωριστικό (barrier layer). Η αλουμίνα όμως είναι εξαιρετικός ηλεκτρικός μονωτής. Συνακόλουθα ο σχηματισμός αυτού του στρώματος έχει ως αποτέλεσμα την εξαιρετικά μεγάλη αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης του αντικειμένου προς ανοδίωση. Επιπρόσθετα, ο σχηματισμός του

εξαρτάται από την ταχύτητα έκλυσης κατιόντων αλουμινιού στον ηλεκτρολύτη. Έτσι για χαμηλές επιβαλλόμενες τάσεις η ανοδίωση περιορίζεται στο σχηματισμό μόνο του barrier layer, το πάχος του οποίου είναι της τάξης των δεκάδων νανόμετρων.

Για υψηλότερες τάσεις, ο σχηματισμός αλουμίνας συνεχίζεται πέραν του διαχωριστικού στρώματος. Η αύξηση του πάχους δίνεται από δύο αντιφατικά φαινόμενα. Από τη μια η θεωρητικά γραμμική αύξηση του πάχους όπως προσδιορίζεται από τον νόμο του Faraday, και από την άλλη η διάλυση του υπάρχοντος στρώματος λόγω χημικής προσβολής από τον ηλεκτρολύτη, οδηγούν σε μια ασυμπτωτική συμπεριφορά στο σχηματισμό της αλουμίνας.



Εικόνα 3 Αναπαράσταση της αλουμίνας, του διαχωριστικού στρώματος και της δομής των

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως αν και το διαχωριστικό και το υπόλοιπο στρώμα της αλουμίνας έχουν ίδια χημική σύσταση, το εξωτερικό στρώμα είναι έντονα πορώδες σε αντίθεση με το λείο διαχωριστικό στρώμα, κάτι που οφείλεται στην ανταγωνιστική δράση του ηλεκτρολύτη και του σχηματισμού της αλουμίνας.

Από τα προηγούμενα προκύπτουν τα εξής σημαντικά πορίσματα. Για τον σχηματισμό αλουμίνας πέραν του διαχωριστικού στρώματος πρέπει να ξεπεραστεί ένα επίπεδο εφαρμοζόμενης τάσης. Όσο αυξάνεται η τάση τόσο αυξάνεται το μέγιστο πάχος ανοδίωσης. Αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η ποσότητα του ηλεκτρολύτη, τόσο μειώνεται το μέγιστο πάχος ανοδίωσης, ενώ βελτιώνεται η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη. Από τη μέχρι τώρα ανάλυση, διαφαίνεται ήδη η έντονα αντικρουόμενη φύση των παραγόντων που επιδρούν στην ανοδίωση. Στη συνέχεια αυτό θα καταστεί ακόμα σαφέστερο και εντονότερο.

2.3 Ηλεκτρική τροφοδοσία

Προχωρώντας στην ανάλυση, θα γίνει εστίαση στην μελέτη της ηλεκτρικής τροφοδοσίας της διάταξης. Ήδη δείχθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, πως η τάση πρέπει να ξεπεράσει ένα κατώφλι προκειμένου να μπορέσει να σχηματιστεί το δευτερεύον στρώμα αλουμίνας. Όμως ως τώρα δεν έχει εμπλακεί κάπου η δεύτερη ηλεκτρική συνιστώσα, δηλαδή η ένταση του ρεύματος. Η ένταση εμπλέκεται στην ανοδίωση μέσω του νόμου του Faraday που διατυπώνεται ως εξής:

«Η μάζα της ουσίας που αποτίθεται σε κάθε ηλεκτρόδιο είναι ανάλογη της ποσότητας του ηλεκτρικού φορτίου που διέρχεται από τον ηλεκτρολυτικό αγωγό».

Όμως το ηλεκτρικό φορτίο καθορίζεται από την ένταση του φορτίου και από το χρόνο που διαρρέεται το κύκλωμα από αυτήν. Φαίνεται λοιπόν πως η ένταση του ρεύματος είναι αυτή που καθορίζει την μάζα οξειδίου που παράγεται στην άνοδο –υπό αναφορά σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, ή τον ρυθμό παραγωγής της και συνεπώς ταυτίζεται με το πάχος και την ταχύτητα σχηματισμού του στρώματος.

Πιο συγκεκριμένα ισχύει πως:

$$m = \left(\frac{ltM}{Fz}\right) \tag{1}$$

Όπου:

m: η μάζα που εκλύεται στην άνοδο/κάθοδο σε gr
I: η ένταση του ρεύματος σε A
t: ο χρόνος που διαρρέεται από ρεύμα η διάταξη σε s
F: η σταθερά του Faraday=96485 Cb/mol
z: ο αριθμός οξείδωσης ή σθένος του στοιχείου
M: το μοριακό βάρος του στοιχείου σε gr/mol

Ο νόμος του Faraday αποτελεί τον συνδετικό κρίκο, μεταξύ της έντασης του ρεύματος και της ταχύτητας εναπόθεσης του στρώματος της αλουμίνας. Όμως πέραν του μακροσκοπικού επιπέδου, το ρεύμα και πιο συγκεκριμένα η πυκνότητα του ρεύματος είναι υπεύθυνη για τις ιδιότητες σε μικροσκοπικό επίπεδο. Έτσι χαμηλές πυκνότητες ρεύματος, οδηγούν σε μαλακά, πορώδη και λεπτά στρώματα. Όσο η πυκνότητα ρεύματος αυξάνει, τόσο το φιλμ της αλουμίνας εναποτίθεται με γρηγορότερο ρυθμό, διαλύεται λιγότερο από τον ηλεκτρολύτη και συνακόλουθα προκύπτει λιγότερο πορώδες και σκληρότερο στρώμα. Τέλος σε πολύ υψηλές πυκνότητες ρεύματος, προκαλείται το φαινόμενο του «καψίματος» («burning»), δηλαδή του ανεπιθύμητου φαινομένου της έντονα ανομοιόμορφης οξείδωσης σε τέτοιο βαθμό που όχι μόνο καταστρέφει την επίστρωση της αλουμίνας, αλλά διαβρώνει και το αλουμίνιο αυτό καθαυτό.

Στην προηγούμενη παράγραφο, χρησιμοποιήθηκε η έννοια της πυκνότητας ρεύματος. Η πυκνότητα ρεύματος ορίζεται ως η ένταση του ρεύματος προς την συνολική επιφάνεια της ανόδου (των προς ανοδίωση αντικειμένων), και για λόγους ευχρηστίας και άμεσης σύγκρισης, έχει επικρατήσει έναντι του ρεύματος. Σε κάθε περίπτωση πάντως, αποτελεί τη βασικότερη συνιστώσα καθορισμού του ρυθμού και της ποιότητας της ανοδίωσης.

Όσον αφορά στην τροφοδοσία, στα πλαίσια της εργασίας θεωρείται αποκλειστικά DC ρεύμα. Όμως στη βιομηχανία εμφανίζονται και οι λύσεις της επαλληλίας AC σε DC, της AC και διάφορων συνδυασμών των. Μια άλλη σχεδιαστική παράμετρος, αφορά στον τρόπο ελέγχου της τροφοδοσίας. Οι κυριότερες εναλλακτικές είναι: σταθερού ρεύματος (δηλαδή σταθερής πυκνότητας ρεύματος) και σταθερής τάσης. Και οι δύο βρίσκουν εφαρμογή και με διάφορους συνδυασμούς χημικών, συνθηκών κλπ. δύνανται να αποδώσουν εξαιρετικά. Σε εφαρμογές όμως θειϊκού οξέος, προτιμάται η ανοδίωση σταθερής πυκνότητας ρεύματος, με τη τάση να αυξάνει όσο αυξάνει το πάχος της λόγω της αύξησης της αντίστασης λόγω της εναπόθεσης της αλουμίνας.

Συνοπτικά όμως, μετά από αρκετά χρόνια ερευνών και δοκιμών έχουν καθιερωθεί οι ακόλουθες καλές πρακτικές στην επιλογή των ηλεκτρικών παραμέτρων της τροφοδοσίας, για ανοδίωση θειικού οξέος.

- Τάση: 12-20V
- Πυκνότητα ρεύματος: 100-200 A/m²

Βέβαια καθώς οι ηλεκτρολύτες και τα διάφορα διαλύματα και μηχανήματα που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως κατοχυρωμένα, συχνά εμφανίζονται και λύσεις με αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά.

2.4 Ηλεκτρολύτης

Η επιλογή του ηλεκτρολύτη ή ορθότερα του μίγματος ηλεκτρολύτη αποτελεί ένα τεράστιο κεφάλαιο στο τομέα της ηλεκτροχημείας. Η βιβλιογραφία βρίθει πιθανών λύσεων και εφαρμογών. Σε κάθε περίπτωση όμως αποτελείται από κάποιο οξύ, διαλυμένο σε νερό και τυχούσες προσμίξεις. Ο ηλεκτρολύτης έχει ως βασικό στόχο, την αύξηση της αγωγιμότητας του διαλύματος, την δημιουργία ενός μέσου κίνησης των ιόντων και την παροχή των απαραίτητων συστατικών για τις διαδικασίες της οξείδωσης και της αναγωγής. Επιπρόσθετα, οι προσμίξεις συμμετέχουν στη βελτίωση των χαρακτηριστικών της προκύπτουσας αλουμίνας, ιδιαίτερα όσον αφορά στη σκληρότητα της.

Από την άλλη μεριά, ο ηλεκτρολύτης πέραν των θετικών χαρακτηριστικών του, έχει και κάποια ανταγωνιστικά ως προς την εναπόθεση στοιχεία. Το πρώτο αφορά στο γεγονός πως το οξύ του ηλεκτρολύτη, ταυτόγχρονα με την εναπόθεση, διαλύει την αλουμίνα μειώνοντας έτσι την ταχύτητα και περιορίζοντας το πάχος εναπόθεσης σε σχέση με τα θεωρητικώς αναμενόμενα από τον νόμο του Faraday αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, ακριβώς λόγω της διαβρωτικής του φύσης, προσδίδει πορώδη υφή στην αλουμίνα. Η υφή αυτή που συχνά, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές που θα ακολουθήσει βαφή, είναι επιθυμητή, πρέπει να είναι ελέγξιμη ώστε να επιτυγχάνονται και οι μηχανικές ιδιότητες που είναι συνυφασμένες με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πορώδους δομής.

Είναι προφανές λοιπόν, πως όπως και στα προηγούμενα έτσι και όσον αφορά στον ηλεκτρολύτη, η επιλογή πρέπει να είναι προσαρμοσμένη στις μηχανικές, αισθητικές και λοιπές ιδιότητες που επιθυμείται να προκύψουν. Εν προκειμένω, για εφαρμογές θειικού οξέος έχει βρεθεί πως το βέλτιστο κείται συνήθως μεταξύ 150-200gr/l.

Ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στην ανοδίωση, είναι η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη. Αν και σε μια πρώτη ανάλυση, θα περίμενε κανείς η διαφοροποίηση να

24

έγκειται στην αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη, παρόλα αυτά αυτό που μεταβάλλεται είναι η διαβρωτική ικανότητα του ηλεκτρολύτη όσον αφορά στην αλουμίνα. Έτσι, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται αντίστοιχα και η διάλυση της αλουμίνας οδηγώντας σε λεπτότερα και πιο πορώδη φιλμ. Κατ` αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιούνται χαμηλές θερμοκρασίες για σκληρές ανοδιώσεις και όσο μειώνεται το απαιτούμενο πάχος τόσο μπορεί να αυξηθεί η θερμοκρασία, με τη νόρμα να θέλει τη θερμοκρασία στη περιοχή των 15-25 °C, για ανοδίωση θειικού οξέος.

2.5 Επιλογή πρώτων υλών

Έχοντας αναφερθεί αρκετά σε παραμέτρους και παράγοντες που επιδρούν στην διαδικασία της ανοδίωσης, δεν θα μπορούσε να μη γίνει αναφορά και στην βάση της πυραμίδας όλων αυτών, που δεν είναι άλλη από την επιλογή των πρώτων υλών τόσο για την άνοδο όσο και για την κάθοδο.

Σειρά Κράματος	Χαρακτηριστικά	Καταλληλότητα για ανοδίωση	Εφαρμογές
Καθαρό Αλουμίνιο	Μαλακό, Μη- εμπορικό	Τέλεια	
Σειρά 1000	Ανοδίωση Θειϊκού οξέος	Καλή,	Διακοσμητικά, Οπτικοί ανακλαστήρες
Σειρά 2000	Ανοδίωση χρωμικού οξέος	Περιορισμένη	Αεροναυπηγική, Μηχανολογικές Εφαρμογές
Σειρά 3000	Ανοδίωση θειικού οξέος ή σκληρή ανοδίωση	Καλή	Δοχεία, κτιριακές εφαρμογές, μηχανολογικές εφαρμογές (με σκληρή ανοδίωση)
Σειρά 5000	Ανοδίωση θειϊκού οξέος	Καλή	Αρχιτεκτονικές και δομικές
Σειρά 6000	Ανοδίωση θειϊκού οξέος	Καλή	Εξαρτήματα, κτιριακές εφαρμογές, ναυτιλιακές και πολλές άλλες.
Σειρά 7000	Ανοδίωση θειϊκού και χρωμικού οξέος καθώς και σκληρή ανοδίωση	Καλή	Αεροναυπηγικές, μηχανολογικές και αθλητικά είδη.

Πίνακας 1 Πίνακας καταλληλότητας και εφαρμογών ανοδίωσης διαφόρων σειρών αλουμινίου

Είναι προφανές πως ιδανικά θα χρησιμοποιούνταν απόλυτα καθαρό αλουμίνιο, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι δευτερογενείς αντιδράσεις που μπορεί να λαμβάνουν χώρα, η παραγωγή μη διαλυτών ουσιών και διάφορων άλλων λόγων που προκαλούν αλλοιώσεις στη δομή της αλουμίνας. Παρόλα αυτά, για διάφορους λόγους (μεταλλουργικούς, μηχανικούς κλπ.) είναι σχεδόν αδύνατο να χρησιμοποιηθεί 100% αλουμίνιο, αλλά συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο κράμα του.

Γενικά λοιπόν, οι σειρές 5000 και 6000 του αλουμινίου παράγουν τις καλύτερες διακοσμητικές και προστατευτικές επιστρώσεις, η σειρά 7000 έχει καλή συμπεριφορά και παράγει διαφανείς επιστρώσεις, ενώ σειρές όπως η 2000 συνήθως δεν έχουν καλά αποτελέσματα.

Από τον παραπάνω πίνακα, γίνεται κατανοητό γιατί τα κράματα αλουμινίου της σειράς 6000 τυγχάνουν ευρείας αποδοχής ως πρώτης ύλης για υλικό καθόδου αλλά και ανόδου. Στη παρούσα εργασία το κράμα που θα χρησιμοποιηθεί στην άνοδο και στις καθόδους θα είναι κράμα 6063.

2.6 Επιφανειακές προεργασίες και μετεπεξεργασίες

Πέραν της ανοδίωσης αυτής καθαυτής, λαμβάνουν χώρα και κάποιες προπαρασκευαστικές αλλά και μετεπεξεργαστικές διαδικασίες. Αυτές είναι η απολίπανση (degreasing), η προσβολή (etching), η αποξείδωση/καθαρισμός (deoxidize/desmut) και τέλος το σφράγισμα (sealing). Καθώς η ανοδίωση είναι μια αρκετά λεπτή και ευαίσθητη διαδικασία, το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από την όσο το δυνατόν υψηλότερη καθαρότητα του αλουμινίου κατά το στάδιο της ανοδίωσης.

2.6.1 Απολίπανση (degreasing)

Όπως τα περισσότερα μέταλλα, έτσι και το αλουμίνιο κατά την παρασκευή του υφίσταται αρκετές μηχανικές και όχι μόνο κατεργασίες, αρκετές από τις οποίες αφήνουν πάνω του υπολείμματα από ουσίες όπως λάδια κατεργασιών, λίπη κλπ. Επίσης κατά την μεταφορά, στοίβαξη και λοιπές εργασίες, διάφορες ουσίες δύναται να

προσκολληθούν στο αλουμίνιο. Είναι αυταπόδεικτο πως αυτές οι ουσίες πρέπει να απομακρυνθούν πριν από οποιαδήποτε περαιτέρω ενέργεια. Συνεπώς η απολίπανση είναι σε πρώτο στάδιο μηχανική ή πνευματική, όπου απομακρύνονται στερεές ουσίες, ατέλειες κοκ. Στη συνέχεια, ακολουθεί συνήθως ένα μούλιασμα σε ζεστό απεσταγμένο νερό και μετά ακολουθεί μια χημική συνήθως διαδικασία, με ουσίες όπως ακετόνη, ισοπροπυλική αλκοόλη ή άλλες ουσίες που προστατεύονται από διπλώματα ευρεσιτεχνίας για να φύγουν οργανικές κυρίως επικαθίσεις. Τέλος, λαμβάνει χώρα ένα ξέπλυμα για να απομακρυνθούν τυχόντα υπόλοιπα από τις ουσίες τις απολίπανσης.

2.6.2 Προσβολή (etching)

Η διαδικασία προσβολής είναι σημαντική για την παραγωγή της απαιτούμενης εμφάνισης του ανοδιωμένου προϊόντος. Κατά την διάρκεια της προσβολής συμβαίνουν τα εξής: Λειαίνονται τυχούσες γρατζουνιές, σημάδια επεξεργασίας και γενικά ατέλειες. Επιπλέον, το αλουμίνιο υφίσταται απώλεια μάζας με σταθερό ρυθμό και η στιλπνότητα πέφτει με ένα φθίνων ρυθμό, προσδίδοντας στο αλουμίνιο αφενός ματ φινίρισμα, αφετέρου μια επιφάνεια τραχύτερη που διευκολύνει την ανοδίωση. Μετά από κάποιο χρόνο που εξαρτάται από τις συνθήκες προσβολής, επιτυγχάνεται ένα περίπου σταθερό επίπεδο στιλπνότητας. Το βασικότερο όλων, έγκειται στο γεγονός πως με την προσβολή διαβρώνεται το διαχωριστικό στρώμα που έχει αναπτυχθεί λόγω της παθητικοποίησης του αλουμινίου.

Η προσβολή γίνεται συνήθως με καυστική σόδα-υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) σε περιεκτικότητα περί τα 5-10%. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την προσβολή είναι οι ακόλουθες:

Η εξίσωση της προσβολής:

$$2Al + 2NaOH + 2H_2O \rightarrow 2NaAlO_2 + 4H_2$$

Διάλυση μετα-αργιλικού νατρίου:

$$NaAlO_2 + H_2O \rightarrow NaOH + Al(OH)_3$$

Αφυδάτωση του υδροξειδίου του αργιλίου:

$$2Al(OH)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O$$

2.6.3 Αποξείδωση

Η αποξείδωση ακολουθεί, το στάδιο της προσβολής. Στόχος της είναι η απομάκρυνση των επικαθίσεων και των κηλίδων που εμφανίστηκαν κατά την προσβολή, ως αποτέλεσμα της ελευθέρωσης κάποιων εκ των συστατικών του κράματος που χρησιμοποιείται. Η αποξείδωση, γίνεται με χρήση κάποιου οξέος όπως το νιτρικό, κιτρικό και το χρωμικό, αν και το τελευταίο για λόγους υγείας τείνει προς αντικατάσταση. Το στάδιο αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς οποιαδήποτε ατέλεια δεν έχει εξαλειφθεί ως τώρα, θα παραμείνει. Συνοπτικά κατά το στάδιο αυτό, διαλύονται και απομακρύνονται όσα μέταλλα συμμετείχαν στο χρησιμοποιούμενο κράμα και ήρθαν στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια της προσβολής, χωρίς όμως να διαλύεται το αλουμίνιο.

2.6.4 Σφράγιση (sealing)

Η διαδικασία της σφράγισης αποτελεί το τελευταίο στάδιο στη διαδικασία της ανοδίωσης. Η σφράγιση, όπως προδίδει και το όνομα της, σφραγίζει τους πόρους της αλουμίνας, ούτως ώστε αυτοί να μην είναι ευάλωτοι σε επικαθίσεις ξένων σωματιδίων. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η παρατεταμένη διατήρηση της εμφάνισης της ανοδίωσης. Η σφράγιση γίνεται με αρκετούς τρόπους. Οι βασικότεροι είναι:

Η υδροθερμική σφράγιση, δηλαδή η σφράγιση με νερό κοντά στη θερμοκρασία βρασμού. Κατά την υδροθερμική σφράγιση, σχηματίζονται κρύσταλλοι ενυδατωμένου οξειδίου του αλουμινίου οι οποίοι σφραγίζουν τους πόρους της αλουμίνας.

Σφράγιση σε ενδιάμεση θερμοκρασία (περί τους 85°C), οπού λαμβάνουν χώρα τόσο ο μηχανισμός της υδροθερμικής σφράγισης, όσο και η σφράγιση με επικάθιση μεταλλικών αλάτων.

28

Τέλος ψυχρή σφράγιση σε θερμοκρασία της τάξης των 30°C, κατά την οποία σχηματίζονται άτομα αποτελούμενα από αλουμίνα, μεταλλικά άλατα και φθόριο και φράζουν τους πόρους.

Κεφάλαιο 30. Διάταξη και επιλογή μηχανημάτων

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε μια συνοπτική περιγραφή της θεωρίας που διέπει την ανοδίωση, προκειμένου να διαφανούν οι επιμέρους διαδικασίες, η σημασία αυτών και οι κυρίαρχες συνιστώσες. Όμως, όλες αυτές οι εξιδανικευμένες διαδικασίες, στην πραγματικότητα λαμβάνουν χώρα σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, αποτελούν κομμάτι μιας γραμμής παραγωγής, συχνά απαιτείται πλήρης αυτοματισμός, ενώ, βεβαίως, δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός πως κάποιες από τις διαδικασίες αυτές είναι επικίνδυνες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Συνακόλουθα, προκύπτουν κάποιες απαραίτητες προδιαγραφές ώστε να ικανοποιούν τους παραπάνω περιορισμούς, ανάγκες και απαιτήσεις.



Εικόνα 4 Βιομηχανική διάταξη ανοδίωσης της Italtecno©

Για τους παραπάνω λόγους, έχει επικρατήσει κάθε μια από τις παραπάνω επιμέρους διαδικασίες να λαμβάνει χώρα σε ένα από τα μπάνια, όπως έχει επικρατήσει ο όρος για τις δεξαμενές, που χρησιμοποιούνται. Τα μπάνια, έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ανάλογα με το ποια διαδικασία φιλοξενούν. Με δεδομένη λοιπόν την ηλεκτροχημική διαδικασία καθίσταται πλέον αναγκαία η απαίτηση θέρμανσης ή ψύξης,

ανακυκλοφορίας και εμπλουτισμού του περιεχόμενου τους σε χημικά, στήριξης και φυσικά αντοχής της κατασκευής σε όξινο περιβάλλον.

3.1 Υλικό κατασκευής δεξαμενών

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, οι περισσότερες από τις διαδικασίες λαμβάνουν χώρα είτε σε όξινο, είτε σε βασικό περιβάλλον, ενώ ακόμα και οι εκπλύσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των διάφορων διαδικασιών, οδηγούν με το πέρασμα του χρόνου, στην απόκτηση όξινου ή βασικού χαρακτήρα στο χρησιμοποιούμενο νερό ή διάλυμα. Επιπλέον, σε μια βιομηχανική διάταξη πρέπει να ληφθεί υπόψιν τόσο η δυνατότητα συντήρησης, όσο και μελλοντικής μεταβολής των διαφόρων σταδίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, συνήθως τα μπάνια να κατασκευάζονται με όμοια ή τουλάχιστον παρεμφερή χαρακτηριστικά ως προς την δυσμενέστερη περίπτωση.



Εικόνα 5 Τυπικές δεξαμενές ανοδίωσης από PVC

Το παραπάνω αν και ίσως φαίνεται προφανές είναι αρκετά δύσκολο, αν αναλογιστεί κανείς την πληθώρα των υπάρχουσων λύσεων σε κάθε στάδιο. Στην προκειμένη περίπτωση, οι δεξαμενές θα είναι όμοιων χαρακτηριστικών και η βασική απαίτηση είναι οι δεξαμενές να είναι ανθεκτικές σε όξινο και βασικό περιβάλλον και να είναι αδρανείς ως προς τις χημικές αντιδράσεις.

Τα συνηθισμένα υλικά κατασκευής των δεξαμενών είναι συνήθως ανοξείδωτο ατσάλι, χάλυβας με επίστρωση κάποιου πλαστικού όπως το PVC ή το πολυαιθυλένιο, γυάλινες και αμιγώς πλαστικές δεξαμενές. Δεδομένου πως τα συγκεκριμένα πλαστικά, είναι και καλοί μονωτές αυτό μπορεί να επηρεάσει θετικά ή αρνητικά την ικανότητα θέρμανσης και ψύξης. Επιπλέον, η αντοχή στο χρόνο είναι άλλος ένα παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν καθώς οι μεταλλικές δεξαμενές φθείρονται με τη πάροδο του χρόνου. Τέλος ειδικά σε εφαρμογές μεγάλου όγκου, θα πρέπει να συνυπολογίζονται και τα μηχανικά φορτία.

Στην πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε, χρησιμοποιήθηκε ανοξείδωτο ατσάλι 304, λόγω της ευκολίας κατασκευής, του χαμηλού κόστους και της αδιαφορίας ως προς την αντοχή στο χρόνο.

3.2 Αντλίες, αναδευτήρες και θερμαντικά/ψυκτικά μέσα

Για την αποτελεσματικότερη ανοδίωση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, καθοριστική σημασία παίζει η διατήρηση της θερμοκρασίας και του pH εντός κάποιων ορίων. Η ανοδίωση είναι μια εξώθερμη διαδικασία κατά την οποία αναπτύσσονται θερμικά φορτία τα οποία κατά πάσα πιθανότητα θα απαιτούν ψύξη. Για τον υπολογισμό του θερμικού φορτίου γίνεται η σύμβαση πως η θερμικής ισχύς ισούται με την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ που μπορεί να τροφοδοτήσει την διάταξη, αυξημένη με κάποιο συντελεστή ασφαλείας.

Έτσι λοιπόν, το μέγιστο θερμικό φορτίου που θα πρέπει να διαχειριστεί το σύστημα ψύξης εξαρτάται από την μέγιστη πυκνότητα ρεύματος, την μέγιστη επιφάνεια προς ανοδίωση και τη μέγιστη τάση που φτάνει. Και πιο συγκεκριμένα ισχύει πως:

$$P_{ther} \propto V_{max} J_{max} A_{max} C \tag{2}$$

Όπου:

P_{max}: η απαιτούμενη ισχύς του ψυκτικού μέσου.
V_{max}: η μέγιστη τάση που δύναται να αναπτυχθεί
J_{max}: η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος
A_{max}: η μέγιστη επιφάνεια προς ανοδίωσης
C: ένας συντελεστής ασφαλείας εφόσον κρίνεται απαραίτητο

Ομοίως θα πρέπει να υπολογιστεί για τη θέρμανση, η απαιτούμενη ισχύς συναρτήσει της θερμοχωρητικότητας, της μάζας του θερμαινόμενου μέσου και της θερμοκρασιακής διαφοράς, καθώς και των απωλειών που είναι συνάρτηση του υλικού κατασκευής, της επιθυμητής θερμοκρασίας και της γεωμετρίας της δεξαμενής.

Οι συνηθέστερες επιλογές για την ψύξη είναι εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι όμως θα πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από υλικά ανθεκτικά στην διάβρωση. Για τη θέρμανση χρησιμοποιούνται είτε ηλεκτρικές αντιστάσεις, είτε πάλι εναλλάκτες θερμότητας.



Εικόνα 6 Πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας σε εφαρμογή ανοδίωσης

Όσον αφορά στις αντλίες, αυτές έχουν διττό ρόλο. Αφενός συνεισφέρουν στη ψύξη ή θέρμανση εφόσον απαιτείται, αφετέρου προκαλούν μια ροή στη δεξαμενή η οποία ομογενοποιεί την θερμοκρασία και τις χημικές ιδιότητες του ηλεκτρολύτη. Η ανακυκλοφορία λοιπόν είναι πολύ σημαντική για την ομοιομορφία του τελικού αποτελέσματος, για αυτό και συνιστάται μια ελάχιστη ροή της τάξης των 5m³/h ανά τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας του μπάνιου.

Η ανακυκλοφορία, συχνά λαμβάνει χώρα με παραπάνω από ένα μέσα και ανεξάρτητα από την ψύξη και την θέρμανση για λόγους ακριβέστερου ελέγχου. Συνήθεις λύσεις είναι η παροχή πεπιεσμένου αέρα μεγάλο όγκου και χαμηλής πίεσης (HVLP), ή με μηχανικά μέσα. Είναι προφανές, πως ό,τι ίσχυε για τις δεξαμενές ισχύει και για τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται, ώστε να αντέχουν στα χημικά περιβάλλοντα.

3.3 Racking

Στο εδάφιο αυτό θα αναλυθεί ο βασικότερος ίσως παράγοντας στην ποιότητα της ανοδίωσης, που αποτελεί και ένα από τα μεγαλύτερα κομμάτια της παρούσας μελέτης. Το racking (στοίβαξη ή μπάρες κρεμάσματος στα ελληνικά), έχει πολλαπλό ρόλο. Πρώτον και κυριότερο αποτελεί τον αγώγιμο δρόμο, μέσω του οποίου διέρχεται το ρεύμα για να λάβει χώρα η ανοδίωση. Έχουν δηλαδή ενεργό ηλεκτρικό ρόλο.

Δεύτερον είναι υπεύθυνα για τη γεωμετρική διάταξη και παράταξη των προς ανοδίωση αντικειμένων. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, καθώς όπως θα φανεί στη συνεχεία η ανοδίωση είναι μια έντονα geometry oriented διαδικασία. Το χαρακτηριστικότερο και πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα προς κατανόηση αυτού, είναι το γεγονός πως αν το προς ανοδίωση αντικείμενο δεν βρίσκεται ακριβώς στο μέσο της απόστασης μεταξύ ανόδου και καθόδου θα εμφανιστεί ασυμμετρία και στο πάχος της εναπόθεσης της αλουμίνας, με αυξημένο πάχος στην εγγύτερη μεριά και μειωμένο στην απώτερη.

Τρίτον επειδή είναι αναγκαία η ύπαρξη αγώγιμης επαφής μεταξύ ανόδου και racking, το racking καθορίζει σε ποια σημεία θα υπάρχουν σημάδια επαφής (τα οποία πρέπει να είναι καθορισμένα εξαρχής), ή πόσες φορές θα πρέπει να ανοδιωθεί μασκαρισμένο τοπικά ένα αντικείμενο μέχρι να προκύψει το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα.

Τέταρτον, το racking χρησιμοποιείται και ως μεταφορικό μέσον, ιδιαίτερα στις αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής οπού το racking μεταφέρει τα αντικείμενα, με χρήση γερανών από μπάνιο σε μπάνιο.



Εικόνα 7 Racking επί του συστήματος μεταφοράς

Από τα παραπάνω, πέραν της σημαντικότητας του racking, προκύπτουν και κάποια άλλα σημαντικά συμπεράσματα. Το πρώτο και κυριότερο πως το racking είναι αναλώσιμο καθώς υπόκειται στις χημικές διαδικασίες που υπόκειται και το προς ανοδίωση αλουμίνιο, και δεύτερον προκειμένου να μην λαμβάνουν χώρα ανεπιθύμητες δευτερογενείς αντιδράσεις το racking πρέπει να είναι φτιαγμένο από το ίδιο ή κάποιο αλουμίνιο όσο το δυνατόν εγγύτερο προς τη χημική σύνθεση της ανόδου και/ή της καθόδου.

Τέλος στο racking πέραν των κλασσικών στοιχείων (δοκών, κοιλοδοκών κοκ), ανήκουν και συμπληρωματικά αντικείμενα όπως γκριπ, βίδες, ελάσματα κοκ. τα οποία έχουν ως στόχο την μηχανική στερέωση και την αγώγιμη σύνδεση των ανόδων.



Εικόνα 8 Εξαρτήματα για racking

Κεφάλαιο 40. Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Στην ανοδίωση, πέραν από την επίτευξη του επιθυμητού πάχους της αλουμίνας, μείζονος σημασία είναι και η ομοιομορφία της εναπόθεσης. Μολονότι οι ακριβείς προδιαγραφές της ποιότητας καθορίζονται κατόπιν συμφωνίας, είναι αρκετά συνηθισμένο ένα σύστημα όπου, το πάχος καθορίζεται υπό τον μέσο όρο σημειακών μετρήσεων, υπό την προϋπόθεση καμία μέτρηση να μην βρίσκεται κάτω από ένα ορισμένο ποσοστό ως προς το ονομαστικό. Σε αντίθετη περίπτωση το αντικείμενο ή πρέπει να υποβληθεί σε μια εκτενή διαδικασία κατεργασίας και εκ νέου ανοδίωσης ή σε εφαρμογές υψηλότερης ακριβείας μπορεί να καταστεί ακόμα και άχρηστο. Εύκολα λοιπόν αντιλαμβάνεται κανείς τη σημασία της ομοιομορφίας στις πρακτικές και εμπορικές εφαρμογές.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα καταβληθεί προσπάθεια εντοπισμού των διάφορων παραγόντων που επιδρούν στην ομοιομορφία. Πιο συγκεκριμένα η ανάλυση θα επικεντρωθεί στην απόσταση μεταξύ ανόδου-καθόδου, στην απόσταση μεταξύ των ανόδων και στην μεταβολή του λόγου μετωπικής προς υπόλοιπων επιφανειών κάποιων συνηθισμένων γεωμετρικών τοπολογιών. Από τα παραπάνω, θα προκύψουν κάποιες χαρακτηριστικές τάσεις και κάποια όρια, τα οποία με τη σειρά τους επιδρούν σε παραμέτρους όπως η δυναμικότητα των μπάνιων, στη τοπολογική διάταξη κοκ.

Για την διαδικασία αυτή έχουν χρησιμοποιηθεί κάποιες εύλογες παραδοχές. Πιο συγκεκριμένα, έχει ήδη διαφανεί από τα προηγούμενα, πως η ανοδίωση εξαρτάται από τη ροή των ιόντων. Συνεπώς, θεωρώντας πως τα ιόντα παράγονται ομοιογενώς στην άνοδο και στην κάθοδο και αμελώντας τυχούσες ρευστοδυναμικές διαταραχές και χημικές επιρροές, η εναπόθεση μπορεί να σχετιστεί ποιοτικά (σε πρώτο βήμα) με την κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος στην επιφάνεια της ανόδου. Βάσει των παραπάνω, η μελέτη βασίζεται στην εφαρμογή ενός σταθερού ρεύματος συναρτήσει της επιφάνειας της ανόδου (όπως είθισται) και στην μελέτη της ομοιομορφίας της πυκνότητας στην επιφάνεια της ανόδου.
Επιπλέον, καθώς δεν υπάρχουν πρότερες αντίστοιχες μελέτες, και πολύ περισσότερο πρότερα δεδομένα, η επεξεργασία έχει καθοριστικό ρόλο, για τους ακόλουθους λόγους:

- Ωστε να διαφανούν οι κυρίαρχες συνιστώσες και παράμετροι που επιδρούν στο πρόβλημα.
- Να βρεθούν τυχούσες συσχετίσεις μεταξύ παραμέτρων.
- Να εντοπιστούν σφάλματα και αδυναμίες του μοντέλου ή του τρόπου επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.
- Να δημιουργηθεί μια εύρωστη, προσαρμόσιμη και σταθερή μέθοδος αποτίμησης των αποτελεσμάτων.
- Να φανεί αν είναι δυνατόν με μια σχετικά απλή ανάλυση να προκύψουν εύλογες εκτιμήσεις, βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων (π.χ. του racking).

Όπως φαίνεται λοιπόν στο κομμάτι αυτό, δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας οι αριθμητικές αποτιμήσεις σε απόλυτα νούμερα, όσο οι ποιοτικές που θα αναδείξουν τις κυρίαρχες συνιστώσες που επιδρούν στο αποσυζευγμένο ηλεκτροχημικό κομμάτι.

Όλες οι αναλύσεις έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων φαινομένων ηλεκτρομαγνητισμού, Ansys Maxwell. Στη συνέχεια, η μετεπεξεργασία των δεδομένων λάμβανε χώρα στο υπολογιστικό περιβάλλον της γλώσσας Matlab.

4.1 Μοντελοποίηση, τοποθέτηση προβλήματος και ανάλυση

Στο εδάφιο αυτό θα αναλυθεί εκτενέστερα, η μοντελοποίηση και η παραμετροποίηση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, όπως αυτό χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Η ανάλυση έγινε με χρήση 3διάστατων πεπερασμένων στοιχείων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων και εν προκειμένω ηλεκτρικών φαινομένων, αγωγής DC ρεύματος, μόνιμης κατάστασης. Η επίλυση αυτών βασίζεται στις εξισώσεις του Maxwell, οπού υπολογίζεται το βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό Φ και μέσω αυτού η ένταση του πεδίου Ε και η πυκνότητα ρεύματος J. Η πυκνότητα ρεύματος όπως έχει ήδη αναφερθεί αποτελεί τη βασική παράμετρο ενδιαφέροντος στην παρούσα εργασία, καθώς είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το πάχος της ανοδίωσης.

Για την επίλυση του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων αρχικά απαιτείται ο καθορισμός της γεωμετρίας του προβλήματος. Η γεωμετρία στην προκειμένη περίπτωση αφορά στην γεωμετρία της ανόδου, των καθόδων που στην περίπτωση αυτή είναι πλάκες καθώς και στη γεωμετρία του ηλεκτρολύτη που καταλαμβάνει το χώρο μεταξύ ανόδου και καθόδων. Η διαδικασία αυτή, αφορά κυρίως τη διαστασιολόγηση και την τοπολογία στο χώρο των επιμέρους στοιχείων, παρόλα αυτά χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς ακόμα και ελάχιστες αποκλίσεις θα οδηγήσουν σε έντονες μεταβολές στην ομοιογένεια. Για τον λόγο αυτό, η διάταξη σχεδιάστηκε με συμμετρία ως προς την αρχή των αξόνων, ενώ χρησιμοποιήθηκε όπου ήταν εφικτό παραμετρική σχεδίαση με χρήση κατάλληλων μεταβλητών στο πρόγραμμα π.χ. ως προς το ύψος, το πάχος, τις μεταξύ των αποστάσεις κοκ. Στο στάδιο αυτό καθορίζονταν τα ύψη, πάχη, μήκη, ακτίνες και πλάτη των ανόδων και καθόδων, ενώ ο ηλεκτρολύτης καθοριζόταν ως ο χώρος μεταξύ των καθόδων, αφαιρούμενου του όγκου της/των ανόδου/ων.

Εν συνεχεία, καθορίζονται οι διεγέρσεις (πηγές του προβλήματος). Στη παρούσα διάταξη χρησιμοποιούνται δύο πηγές DC ρεύματος που είχαν ληφθεί ως οι άνω επιφάνειες των καθόδων, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα. Η επιλογή αυτή είναι εύλογη, καθώς είθισται η τροφοδότηση των καθόδων να γίνεται με αγώγιμες μπάρες, που είτε στηρίζουν τις καθόδους και βρίσκονται σε αγώγιμη σύνδεση σχηματίζοντας μια διεπιφάνεια αντίστοιχη με την παρούσα, είτε είναι κομμάτι των. Το ρεύμα που εφαρμοζόταν σε κάθε κάθοδο ήταν ίσο με το μισό του γινομένου του εμβαδού της επιφάνειας της ανόδου επί μιας σταθερής πυκνότητας ρεύματος που απαντάται στην βιβλιογραφία ως βέλτιστη και εν προκειμένω 150 A/m². Πέραν της πηγής ρεύματος, χρησιμοποιούνται και δυο κυκλικές καταβόθρες ρεύματος (sink), που αντιστοιχούν στους αγωγούς που εξασφαλίζουν την απαραίτητη για λόγους συνέχειας του κυκλώματος, αγώγιμη σύνδεση μεταξύ ανόδου και τροφοδοτικού, καθώς και την απαραίτητη για υπολογιστικούς λόγους ολοκλήρωση της αγώγιμης διαδρομής. Η διατομή των sink είναι τέτοια που να αντιστοιχεί στο ρεύμα που διέρχεται δια μέσω αυτών, όπως θα συνέβαινε και στην πραγματικότητα.



Εικόνα 9 Απεικόνιση των διεγέρσεων του μοντέλου για κυλινδρική και πρισματική γεωμετρία. Δύο πηγές ρεύματος με φορά προς το εσωτερικό της σελίδας, στις άνω επιφάνειες των καθόδων και δυο καταβόθρες ρεύματος στην άνω και κάτω επιφάνεια αμφότερων τοπολογιών.

Ακολούθως, λαμβάνει χώρα ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών, οι οποίες είναι απαραίτητες τόσο για τον καθορισμό της συμπεριφοράς του μοντέλου στις διεπιφάνειες (και κατ` επέκταση τη ρεαλιστική συμπεριφορά του), όσο και για την εξασφάλιση της μοναδικότητας της λύσης σε συνδυασμό με τις διεγέρσεις. Στην παρούσα περίπτωση ορίστηκαν οι μονωτικές συνθήκες, στην παράπλευρη επιφάνεια του ηλεκτρολύτη, καθώς και σε όλες τις υπόλοιπες επιφάνειες των καθόδων πλην των διεπαφών με τον ηλεκτρολύτη. Οι μονωτικές συνοριακές συνθήκες, φαίνονται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10 Επισήμανση των μονωτικών συνοριακών συνθηκών

Για την επίλυση του παρόντος προβλήματος αγωγής, από πλευράς ιδιοτήτων υλικών είναι απαραίτητη μόνο η γνώση της αγωγιμότητας σ των υλικών. Για τον προσδιορισμό αυτών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την ASM για το αλουμίνιο, και από πίνακες χημικών ιδιοτήτων για το θειικό οξύ συναρτήσει της πυκνότητας του. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν:

Υλικό	Αγωγιμότητα [S/m]
Αλουμίνιο 6063	30,1*10^6
Ηλεκτρολύτης Η2SO4 15%	58,0

Πίνακας 2 Αγωγιμότητες υλικών σε Siemens/meter

Με τη χρήση των παραπάνω διεγέρσεων, συνοριακών συνθηκών και ιδιοτήτων προκύπτει τόσο από μαθηματικής όσο και από φυσικής σκοπιάς ένα καλώς τεθειμένο πρόβλημα. Εν συνεχεία, έλαβαν χώρα κάποιες αναλύσεις ευαισθησίας, στις οποίες για σταθερές ιδιότητες υλικού και διέγερση έλαβαν χώρα τα ακόλουθα σετ αναλύσεων:

- Σταθερές διαστάσεις ανόδου και μεταβολή της απόστασης ανόδου-καθόδου για κυλινδρική και πρισματική γεωμετρία.
- Σταθερή απόσταση μεταξύ ανόδου και καθόδου και μεταβολή του λόγου των μετωπικών επιφανειών- κυλινδρικής επιφάνειας προς τις παράπλευρες επιφάνειες- τις βάσεις του κυλίνδρου για πρισματική και κυλινδρική γεωμετρία αντίστοιχα.
- Σταθερή απόσταση μεταξύ ανόδου και καθόδου, τρεις ανόδους και συμμετρική μεταβολή της σχετικής τους απόστασης.

Έχοντας καθορίσει πλήρως το πρόβλημα, επόμενο βήμα ήταν η ανάλυση και η εξαγωγή των ζητούμενων. Το βασικό ζητούμενο ήταν η πυκνότητα ρεύματος J στην επιφάνεια της ανόδου. Για τον λόγο αυτό, αρχικά γίνεται μια πλεγματοποίηση με τετράεδρα στις ανόδους, καθόδους και στον ηλεκτρολύτη και μετά λαμβάνει χώρα η ανάλυση, στην οποία για λόγους σύγκλισης συνήθως προκύπτει τοπική πύκνωση του πλέγματος. Ο αριθμός των στοιχείων όπως προκύπτει από την πλεγματοποίηση είναι άρρηκτα συνδεδεμένος τόσο με την ακρίβεια, όσο και με τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο και ισχύ.



Εικόνα 11 Χαρακτηριστική εικόνα με την κατανομή των διανυσμάτων της πυκνότητας ρεύματος στον ηλεκτρολύτη, καθώς και με την κατανομή του μέτρου της πυκνότητας ρεύματος στην επιφάνεια της ανόδου. Επιπλέον εμφανίζεται η μια πηγή ρεύματος καθώς η δεύτερη κάθοδος παραλείπεται για λόγους απεικόνισης.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 11, εμφανίζονται κάποια έντονα τοπικά φαινόμενα στις ακμές καθώς και κοντά στη καταβόθρα. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς στις μεν ακμές υφίσταται πολύ μικρή επιφάνεια και αδυναμία παραγώγισης, κοντά στις δε καταβόθρες αναμενόταν η ύπαρξη υψηλών τιμών καθώς είναι μια διαδρομή ελάχιστης αντίστασης.

Για τον λόγο αυτό καταβλήθηκε προσπάθεια με χρήση chamfer να μειωθούν τα artifacts στις ακμές. Αυτό όμως δεν στάθηκε δυνατό, τουναντίον τα αποτελέσματα χειροτέρεψαν, καθώς αυξήθηκαν τα artifacts σημαντικά, γιατί δημιουργούνταν περισσότερες ακμές. Επιπρόσθετα, τοπικά πυκνώθηκε το πλέγμα στις καταβόθρες. Τέλος, αν και καταβλήθηκε προσπάθεια για συνολική πύκνωση του πλέγματος, αυτό καθυστερούσε σημαντικά τις εκτελέσεις (ή συχνά τις καθιστούσε αδύνατες) και έτσι τελικά επιλέχθηκε μια υλοποίηση με ένα trade-off μεταξύ ακρίβειας και χρόνου εκτέλεσης. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε εκτέλεση σχηματίζονταν τουλάχιστον 130000 στοιχεία, ενώ κάποιες εκτελέσεις έφτασαν ως τα 300000.

Εν συνεχεία καθώς δεν υφίσταται τέτοια δυνατότητα μέσω του Maxwell, εξάγονταν τα δεδομένα της ανάλυσης της ανόδου στο Matlab και μέσω κατάλληλης επεξεργασίας, χρησιμοποιούνταν μόνο τα δεδομένα που αντιστοιχούσαν στην επιφάνεια της ανόδου.

4.2 Καθορισμός κριτηρίων αποτίμησης ομοιομορφίας

Μια πολύ βασική εργασία, για την αντικειμενικότερη αποτίμηση των αποτελεσμάτων είναι αυτή της θέσπισης των κριτηρίων αποτίμησης της ομοιομορφίας. Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα αποτελέσματα της πεδιακής ανάλυσης, εξάγονταν από το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και εισάγονταν στο Matlab για περαιτέρω στατιστική ανάλυση και αποτίμηση.

Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα εξάγονταν σε πίνακες που περιείχαν τις συντεταγμένες του πεπερασμένου στοιχείου και την τιμή της πυκνότητας ρεύματος που λάμβανε αυτό. Ιδιαίτερη προσοχή λήφθηκε ώστε τα αποτελέσματα που εξάγονται να αντιστοιχούν σε πεπερασμένα στοιχεία ίσης επιφάνειας. Συνεπώς, σε κάθε πίνακα υπήρχε ο κατακερματισμός της ανόδου, όχι στα αποτελέσματα όπως προέκυπταν με βάση το πλέγμα που σχηματίζονταν σε κάθε ανάλυση και το οποίο σε κάθε μορφολογία ήταν διαφορετικό, αλλά σε ισοκατανεμημένα στοιχεία.

Με τον τρόπο αυτό, επετεύχθη μια όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αποσύζευξη των αποτελεσμάτων από τη στοχαστικότητα του σχηματισμού του πλέγματος και επιπλέον την ισοκατανομή των αποτελεσμάτων σε ισεμβαδικά στοιχεία. Στη συνέχεια μέσω κατάλληλων ρουτίνων που αναπτύχθηκαν στο Matlab, λάμβανε χώρα ο διαχωρισμός των δεδομένων σε επιφάνειες ενδιαφέροντος (μετωπικές, περιμετρικές κοκ). Ακολούθως, γινόταν μια στατιστική αποτίμηση (τυπική απόκλιση, εύρος, μέση αριθμητική/γεωμετρική/αρμονική τιμή, και ενεργός τιμή) και τέλος λάμβανε χώρα ο υπολογισμός των στοχικών συναρτήσεων για την αποτίμηση των λύσεων.

Αναπόφευκτα, όπως σε όλα τα προβλήματα πεπερασμένων στοιχείων, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και εν προκειμένω η εντοπισμένη στο σύνολο των επιφανειών ακρίβεια, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των στοιχείων ή ισοδύναμα την πυκνότητα στοιχείων ανά μονάδα επιφάνειας. Όμως μαζί με τον αριθμό των στοιχείων, αυξάνεται κατά μη-γραμμικό τρόπο τόσο ο χρόνος επίλυσης, όσο και ο χρόνος μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Για αυτό το λόγο, καταβλήθηκε προσπάθεια, ώστε μέσα από την διαδικασία της μετεπεξεργασίας, να προκύπτουν όχι μόνο οι αποτιμήσεις των στοχικών συναρτήσεων όσον αφορά την ομοιομορφία, αλλά μέσω κατάλληλων κριτηρίων, να εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά στην ποιότητα και εγκυρότητα του μοντέλου και των αποτελεσμάτων αυτού.

4.2.1 Καθορισμός στοχικής συνάρτησης

Εν συνεχεία, θα αναλυθεί εκτενέστερα ο καθορισμός της στοχικής ή αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς αποτελεί βασικό πυλώνα τόσο της αποτίμησης όσο και της βελτιστοποίησης. Η συνάρτηση αυτή, αποτελεί έναν δείκτη ποιότητας της λύσης ως προς την ομοιομορφία. Ως τέτοιες συναρτήσεις χρησιμοποιήθηκαν τα επιμέρους αθροίσματα των λόγων των μέσων τιμών της εκάστοτε επιφάνειας προς την κύρια επιφάνεια ενδιαφέροντος, με την προϋπόθεση, ο λόγος να είναι πάντοτε μεγαλύτερος της μονάδας. Σε αντίθετη περίπτωση, λαμβανόταν ο αντίστροφος λόγος, ώστε να έχουν πάντα την ίδια βαρύτητα επιφάνειες με μεγαλύτερη ή μικρότερη μέση τιμή. Η μαθηματική περιγραφή της στοχικής συνάρτησης, ακολουθεί.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\# of faces - 1} \sum_{i=1}^{\# of faces} \frac{Jmean_i}{Jmean_{int}}, \ Jmean_i > Jmean_{int} \\ \frac{1}{\# of faces - 1} \sum_{i=1}^{\# of faces} \frac{Jmean_{int}}{Jmean_i}, \ Jmean_i < Jmean_{int} \end{cases}$$
(3)

Όπου:

Jmean: ο αριθμητικός, γεωμετρικός, αρμονικός μέσος ή η ενεργός τιμή της πυκνότητας ρεύματος της εκάστοτε επιφάνειας.

int: ο δείκτης που ανταποκρίνεται στην ορισμένη ως επιφάνεια αναφοράς
i: ο δείκτης που ανταποκρίνεται σε κάθε επιφάνεια πλην της επιφάνειας
ενδιαφέροντος, δηλαδή i≠int.

f(x) ορίζεται ως Harmonic, Geometric, Mean και Rms ανάλογα ποιος μέσος χρησιμοποιείται στην εκάστοτε στοχική συνάρτηση ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος.

Η χρήση όλων των μέσων μπορεί, σε μια πρώτη ανάγνωση να δείχνει περιττή, ή υπερβολική, αλλά όπως θα αποδειχτεί και στη συνέχεια είναι πάρα πολύ χρήσιμη για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Αυτό οφείλεται στον ορισμό των ανωτέρω μέσων και στην μεταξύ των σχέση, που υπάρχει στο παράρτημα 1. Υπενθυμίζεται εν συντομία πως:

 $Ενεργός τιμή \ge Aριθμητικού μέσου \ge Γεωμετρικού Μέσου \ge Aρμονικού Μέσου$ (4)

Με την ισότητα να ισχύει μόνο όταν όλα τα δείγματα ταυτίζονται. Προφανώς, λοιπόν, με βάση τη δοσμένη στοχική συνάρτηση, η απόλυτη ομοιομορφία θα προκύψει, όταν και μόνο όταν, και οι τέσσερις επιμέρους δείκτες ταυτιστούν με τη μονάδα. Επιπλέον, εξορισμού οι τέσσερις αυτοί δείκτες έχουν διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, η ενεργός τιμή επηρεάζεται έντονα από ακραίες τιμές, ενώ ο αρμονικός μέσος επηρεάζεται λιγότερο. Εν γένει, η επιρροή των ακραίων τιμών βαίνει μειούμενη από την ενεργό τιμή προς τον αρμονικό μέσο, διαμέσου της παραπάνω ανισότητας.

Καθώς αναμένεται η εμφάνιση πολύ υψηλών τιμών, λόγω τοπικών φαινομένων σε ακμές και άλλα ιδιάζοντα μορφολογικά σημεία, σε περιοχές όπως η διεπαφή με τα ηλεκτρόδια, αλλά και λόγω υπολογιστικών σφαλμάτων, δύναται με τη σύγκριση των επιμέρους συμπεριφορών των διάφορων μέσων να λάβει χώρα μια αποτίμηση της ποιότητας της λύσης, της καταλληλότητας του πλέγματος και την εξαγωγή άλλων χρήσιμων συμπερασμάτων.

Στην παρούσα συνάρτηση κόστους, λόγω αδιαφορίας ή ίσου ενδιαφέροντος για την ομοιομορφία οποιασδήποτε επιφάνειας δεν έχει επιλεχθεί κάποιος συντελεστής στάθμισης της συνεισφοράς στη στοχική συνάρτηση κάθε επιφάνειας. Επίσης, καθώς πρόκειται για πρωτόλεια προσπάθεια αποτίμησης, το ίδιο συμβαίνει και με την στάθμιση των διάφορων μέσων.

Τέλος, είναι σαφές πως οι αντικειμενικές συναρτήσεις που μπορούν να σχηματιστούν είναι πραγματικά άπειρες. Επιπρόσθετα, παρότι καλούνται αντικειμενικές συναρτήσεις, με μια προσεκτικότερη ματιά, εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς πως είναι έντονα υποκειμενικές καθώς η οποιαδήποτε επιλογή γίνεται με τον υποκειμενισμό που διέπει τον μελετητή και για αυτό το λόγο η επιλογή της στοχικής συνάρτησης ως έκφραση κρίνεται πιο δόκιμη. Σε κάθε περίπτωση όμως, έχει καταβληθεί η μέγιστη δυνατή προσπάθεια, ώστε οι δείκτες να είναι όσο πιο συμβατοί και να αποτυπώνουν πιστότερα και αβίαστα τις προκύπτουσες αλλαγές.

4.3 Αποτελέσματα και αποτίμηση αυτών

Στο εδάφιο αυτό, θα λάβει χώρα μια όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωμένη ανάλυση, των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Τα πλήρη αποτελέσματα, παρατίθενται στα αντίστοιχα παραρτήματα, και στα επόμενα εδάφια η μελέτη θα επικεντρωθεί, στα αποτελέσματα και στον σχολιασμό αυτών.

4.3.1 Απόσταση ανόδου καθόδου

Η πρώτη μελέτη που έγινε αφορούσε την απόσταση, μεταξύ ανόδου και καθόδου και την επίδραση της στην ομοιομορφία.



Εικόνα 12 Πλάγια όψη τοπολογίας και απόστασης ανόδου-καθόδου

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επισυνάπτονται στον ακόλουθο πίνακα και στο σχετικό διάγραμμα.

Απόσταση [mm]	Harmonic	Geometric	Mean	Rms
5	7,74	3,77	4,55	15,43
10	8,12	4,09	4,88	15,82
20	8,60	4,39	5,19	16,70
30	8,58	4,53	5,31	16,13
40	8,78	4,57	5,36	16,86

Πίνακας 3 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος ανόδου καθόδου



Διάγραμμα 1 Στοχικές συναρτήσεις ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της απόστασης μεταξύ ανόδου-καθόδου σε κυλινδρική γεωμετρία.

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, αλλά και από τις τιμές των στοχικών συναρτήσεων συναρτήσει της μεταβολής της απόστασης μεταξύ ανόδου-καθόδου, προκύπτει μια ξεκάθαρη ασυμπτωτική συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται πως η ανομοιομορφία αυξάνει με διαρκώς μειούμενο ρυθμό, συναρτήσει της αύξησης της απόστασης. Με μια προσεκτικότερη ματιά φαίνεται πως εμφανίζεται μια ελαφρώς μειούμενη τιμή στη κυλινδρική επιφάνεια και μια ελαφρώς αυξανόμενη τιμή στις άνω και κάτω επιφάνειες, όπου βρίσκονται οι ακροδέκτες τροφοδοσίας.

Επιπλέον, παρατηρείται καλή ταύτιση όλων των μέσων τιμών, γεγονός που αυξάνει την εγκυρότητα του αποτελέσματος. Η συμπεριφορά αυτή ήταν αναμενόμενη, καθώς όσο μακρύτερα βρίσκεται η άνοδος από τις καθόδους, τόσο πιο προτιμητέα καθίσταται η αγώγιμη διαδρομή απευθείας από τις βάσεις του κυλίνδρου, που βρίσκονται εγγύτερα στους ακροδέκτες, σε σχέση με την κυλινδρική περιμετρική επιφάνεια. Επίσης, παρατηρείται η πιο ευμετάβλητη συμπεριφορά που έχει η ενεργός τιμή, καθώς επηρεάζεται από ακραίες τιμές που εμφανίζονται είτε από πραγματικά εντοπισμένα φαινόμενα στις ακμές και γωνίες, είτε από υπολογιστικά τεχνουργήματα. Για πρώτη φορά λοιπόν, ανακύπτει η σημασία των διάφορων μέσω τιμών, όσον αφορά τόσο στην ποιοτική αποτίμηση, όσο και στην εκτίμηση της ποιότητας του πλέγματος.

Ακολούθως, επαναλήφθηκε η ίδια ανάλυση, αυτή τη φορά όμως για πρισματική γεωμετρία. Με σταθερά χαρακτηριστικά: 50 mm x 20 mm x 50mm.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επισυνάπτονται στον ακόλουθο πίνακα και στο σχετικό διάγραμμα.

Απόσταση [mm]	Harmonic	Geometric	Mean	Rms
5	1,871	1,912	2,422	4,208
10	1,836	1,879	2,319	3,831
20	1,816	1,854	2,295	3,967
30	1,813	1,845	2,276	4,012
40	1,811	1,844	2,243	3,792

Πίνακας 4 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων για μεταβολή της απόστασης μεταξύ ανόδου και καθόδου πρισματικής γεωμετρίας



Διάγραμμα 2 Στοχικές συναρτήσεις ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της απόστασης μεταξύ ανόδου-καθόδου σε κυλινδρική γεωμετρία.

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα, αλλά και από τις τιμές των στοχικών συναρτήσεων συναρτήσει της μεταβολής της απόστασης μεταξύ ανόδου-καθόδου, προκύπτει μια σχετικά σταθερή συμπεριφορά με πολύ μικρή μεταβολή της ομοιομορφίας συναρτήσει της απόστασης ανόδου-καθόδου. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται πως η ομοιομορφία αυξάνει ελαφρώς και πολύ γρήγορα σταθεροποιείται. Με μια προσεκτικότερη ματιά προκύπτει πως υφίσταται μια σταθερή ομοιομορφία στις μετωπικές επιφάνειες και μια αντιφατική, όσον αφορά στην ομοιομορφία, συμπεριφορά στις παράπλευρες. Αν και στη πραγματικότητα όλες οι παράπλευρες επιφάνειες τείνουν να αυξήσουν σε απόλυτα μεγέθη την πυκνότητα ρεύματος, καθώς οι δύο παράπλευρες επιφάνειες υπολείπονται των μετωπικών, ενώ οι άλλες δύο

Επιπλέον, παρατηρείται απόλυτη ταύτιση, στη συμπεριφορά όλων των μέσων τιμών, γεγονός που αυξάνει την εγκυρότητα του αποτελέσματος. Η συμπεριφορά αυτή ήταν αναμενόμενη, καθώς όσο απομακρύνεται η άνοδος τόσο μεγαλύτερο τμήμα από την πλεονάζουσα επιφάνεια της ανόδου «ενεργοποιείται». Ενώ αντίστοιχα η επιφάνεια της καθόδου που αντιστοιχεί στην προβολή της ανόδου είναι σταθερή, οπότε δεν δύναται να μεταβληθεί όπως φαίνεται.

4.3.2 Μεταβολή του λόγου επιφανειών κυλινδρικής γεωμετρίας

Στο κομμάτι αυτό, μελετηθεί η επίδραση, της μεταβολής του λόγου της κύριας κυλινδρικής επιφάνειας, προς την επιφάνεια των άνω και κάτω βάσεων. Η απόσταση μεταξύ ανόδου και καθόδου διατηρείται σταθερή στα 30 mm.

Ύψος	Ακτίνα	AR	Mean	Harmonic	Geometric	Rms
20 mm	10 mm	2	6,890	4,635	5,350	8,342
60 mm	10 mm	6	8,759	4,777	5,857	12,365
100 mm	10 mm	10	7,201	4,077	4,829	10,305

Πίνακας 5 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος για μεταβολή λόγου επιφανειών (AR)



Εικόνα 13 Χαρακτηριστική χρωματική αναπαράσταση της πυκνότητας ρεύματος

Η γραφική αποτύπωση των παραπάνω αριθμητικών δεδομένων, εμφανίζεται στο Διάγραμμα 3. Για άλλη μια φορά παρατηρείται ταύτιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των αποτιμήσεων, με τις προκύπτουσες χαρακτηριστικές να έχουν την ίδια συμπεριφορά. Φυσικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εξαιτίας τις διαφορετικής επίπτωσης των ακραίων τιμών για τους διάφορους μέσους, λαμβάνουν χώρα εντονότερα τα φαινόμενα στην ενεργό τιμή, αλλά ποιοτικά συμπεριφέρνονται με τον ίδιο τρόπο.



Διάγραμμα 3 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της μεταβολής του λόγου της κύριας παράπλευρης επιφάνειας προς την επιφάνεια των βάσεων

Τα αποτελέσματα και πάλι είναι διαισθητικά αναμενόμενα, καθώς για μικρό λόγο επιφανειών, οι αποστάσεις διαμέσου των περιμετρικών επιφανειών είναι συγκρίσιμες με αυτές μέσω των βάσεων. Συνεπώς, όμοια με πριν είναι εξίσου προτιμητέες από το ρεύμα. Στη συνέχεια αυξάνοντας το ύψος, γίνονται έντονα προτιμώμενες οι βάσεις, αυξάνοντας την ανομοιομορφία και τέλος για το μέγιστο ύψος φαίνεται μια μείωση της ανομοιομορφίας που σχετίζεται με δύο παράγοντες. Πρώτον, πως πλέον η κύρια επιφάνεια είναι πολύ μεγαλύτερη των βάσεων και έτσι για τη δοσμένη απόσταση ανόδου-καθόδου, αυξάνεται σημαντικά η αγωγή διαμέσου αυτής. Και δεύτερον, καθώς η κάθοδος δεν έχει άπειρο ύψος, αλλά πλέον συγκρίσιμο με αυτό της ανόδου, έχει μειωθεί η συνεισφορά στις βάσεις του τμήματος που υπερβαίνει και υπολείπεται της άνω και κάτω βάσης αντίστοιχα.

Είναι εμφανές λοιπόν, πως οι παράγοντες της γεωμετρίας αρχίζουν και αποσαφηνίζονται και πλέον εισάγεται και η παράμετρος της σχετικής επιφάνειας ανόδου-καθόδου, καθώς και της πλεονάζουσας επιφάνειας στις καθόδους σε σχέση με την προβολή της επιφάνειας ανόδου σε αυτές.

4.3.3 Μεταβολή του λόγου επιφανειών πρισματικής γεωμετρίας

Στο κομμάτι αυτό, θα μελετηθεί η επίδραση, της μεταβολής του λόγου της κύριας μετωπικής επιφάνειας, προς τις παράπλευρες επιφάνειες σε πρισματικές γεωμετρίες. Η απόσταση μεταξύ ανόδου και καθόδου διατηρείται σταθερή στα 30 mm, όπως επίσης και το πάχος όλων των ανόδων στα 20 mm. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των αποτιμήσεων των στοχικών συναρτήσεων, περιέχονται στον ακόλουθο πίνακα.

Ύψος και Πλάτος	Πάχος	AR	Harmonic	Geometric	Mean	Rms
50 mm	20 mm	1,25	1,814	1,849	2,316	4,264
75 mm	20 mm	1,875	1,906	1,973	3,085	7,919
100 mm	20 mm	2,5	2,014	2,105	3,291	8,093
120 mm	20 mm	3	2,150	2,245	3,097	5,959

Πίνακας 6 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, για μεταβολή του λόγου AR των επιφανειών πρισματικών γεωμετριών



Στο ακόλουθο γράφημα, αποτυπώνονται γραφικά τα αριθμητικά δεδομένα.

Διάγραμμα 4 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της μεταβολής του λόγου AR των μετωπικών επιφανειών προς τις παράπλευρες επιφάνειες.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αντίστοιχα με αυτά που λήφθηκαν για τις κυλινδρικές γεωμετρίες. Όμως, σε αυτή την περίπτωση, λαμβάνει χώρα μια ποιοτική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Εν προκειμένω, εμφανίζεται μια οριακή αύξηση της ανομοιομορφίας, όσο αυξάνει το AR των επιφανειών για τον αρμονικό και τον γεωμετρικό μέσο, ενώ ανακύπτει μια μεικτή συμπεριφορά για τον αριθμητικό μέσο και την ενεργό τιμή.

Στην περίπτωση αυτή και κοιτώντας τόσο το Διάγραμμα 5, όσο και τις μέγιστες τιμές από το παράρτημα, φαίνεται εύλογο πως η υπερακόντιση των τιμών για τα 75 και 100 mm, οφείλεται σε artifacts και γενικά σε θέματα που άπτονται της υπολογιστικής διαδικασίας του προγράμματος, συναρτήσει πάντα της πυκνότητας πλέγματος. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψιν την οπτική πληροφόρηση που μας δίνουν τα πεπερασμένα στοιχεία, αλλά και τις τυπικές αποκλίσεις των επιφανειών συναρτήσει των μέσων τιμών, φαίνεται πως υποφώσκει μια ελαφρά αυξητική τάση της ανομοιομορφίας, που οφείλεται κυρίως στις παράπλευρες επιφάνειες, στις οποίες εμφανίζεται συνεχής μείωση της πυκνότητας ρεύματος.

Πράγματι, αν εφαρμοζόταν ένα φιλτράρισμα των σημείων μέγιστης πυκνότητας ρεύματος τα οποία εν προκειμένω είναι μια τάξη ανώτερα, τότε θα προέκυπτε μια συμπεριφορά αντίστοιχη με την προηγούμενη, δηλαδή γενικά αύξηση της ανομοιομορφίας όσο αυξάνει το AR και δεν υφίσταται μείωση της πλεονάζουσας επιφάνειας.

Παρόλα αυτά επειδή η διαφορά μεταξύ χειραγώγησης των δεδομένων (data manipulation) και ανάλυσης δεδομένων είναι πολύ λεπτή, στη παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθούν αυτούσια τα πρωτότυπα δεδομένα, λαμβάνοντας όμως υπόψιν τα όσο παρατηρήθηκαν. Επιπρόσθετα, καθώς τα φαινόμενα αυτά είναι εντοπισμένα σε ακμές και διεπιφάνειες π.χ. στο σύνορο μεταξύ ακροδέκτη και ανόδου, ή σε ακμές, όπου πράγματι αναμένεται πολύ μεγάλη πυκνότητα ρεύματος, θα ήταν αρκετά επιπόλαιο, να φιλτραριστούν τα δεδομένα, αποκόπτοντας με αυτόν τον τρόπο εντοπισμένα φαινόμενα, που αναμενόταν a priori η εμφάνισή τους.

52



Διάγραμμα 5 Μεταβολή μέσων τιμών επιφανειών, συναρτήσει του μέσου και του AR



Εικόνα 14 Απεικόνιση των αξόνων αναφοράς της διάταξης

4.3.4 Μεταβολή της σχετικής απόστασης μεταξύ πολλαπλών ανόδων πρισματικής γεωμετρίας

Στο παρόν εδάφιο θα μελετηθεί η μεταβολή της ομοιομορφίας συναρτήσει της σχετικής απόστασης τριών πρισματικών ανόδων, σταθερών διαστάσεων 50mm x 20 mm x 50mm, και σταθερής απόστασης από τις καθόδους. Τόσο σε αυτό το χωρίο όσο και στο επόμενο χρησιμοποιήθηκε μια ελαφρώς παραλλαγμένη συνάρτηση κόστους και συγκεκριμένα η:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\# \ of \ faces - 1} \sum_{i=1}^{\# \ of \ faces} \frac{Jmean_{i,j}}{Jmean_{int,j}}, & Jmean_{i,j} > Jmean_{int,j} \\ \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\# \ of \ faces - 1} \sum_{i=1}^{\# \ of \ faces} \frac{Jmean_{int,j}}{Jmean_{i,j}}, & Jmean_{i,j} < Jmean_{int,j} \end{cases}$$
(5)

Με f(x) να ορίζεται ως Harmonic, Geometric, Mean και Rms ανάλογα του ποιος μέσος χρησιμοποιείται στην εκάστοτε στοχική συνάρτηση ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος.

Πρόκειται για την ίδια συνάρτηση, με την μόνο διαφορά πως έχει σταθμιστεί ισοβαρώς η συμμετοχή κάθε ανόδου, ώστε να υπάρχει και πάλι απόλυτη ομοιομορφία στην μονάδα. Τα αποτελέσματα των αποτιμήσεων των συναρτήσεων κόστους, παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Απόσταση	Harmonic	Geometric	Mean	Rms
Benchmark	1,794	1,832	2,289	4,202
5 mm	2,180	2,294	2,663	3,796
30 mm	1,890	1,961	2,397	3,434
70 mm	1,840	1,915	2,373	3,417

Πίνακας 7 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος πολλαπλών πρισματικών ανόδων



Διάγραμμα 6 Στοχικές συναρτήσεις ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της απόστασης μεταξύ ανόδων σε πρισματικές γεωμετρίες



Διάγραμμα 7 Τετράγωνο απόδοσης των στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των ανόδων, συγκρινόμενα με το benchmark.

Τα αποτελέσματα σε αυτή την ανάλυση ήταν αναμενόμενα, με την εξαίρεση της ενεργού τιμής. Η πρώτη παρατήρηση, βασίζεται στο γεγονός πως υπάρχει άμεση επιρροή της απόστασης μεταξύ των ανόδων και της ομοιομορφίας, κάτι που βασίζεται κατά κύριο λόγο στις παράπλευρες επιφάνειες και εν προκειμένω στα ζεύγη επιφανειών μεσαίας και αριστερής και δεξιάς αντίστοιχα ανόδου. Όσο μικραίνει η απόσταση, τόσο μειώνεται η μέση πυκνότητα ρεύματος (κατά αντίστοιχο τρόπο και στις τέσσερις επιφάνειες) και τόσο και η συνολική ομοιομορφία. Το παραπάνω εξηγείται όπως και τα προηγούμενα λαμβάνοντας υπόψιν πως η πλεονάζουσα επιφάνεια στο χώρο ανάμεσα στις ανόδους μειώνεται σημαντικά. Επιπρόσθετα, η θέση αυτή ενισχύεται και από την μείωση της πυκνότητας ρεύματος που παρατηρείται στις επιφάνειες των ακροδεκτών της μεσαίας ανόδου, σε αντίθεση με τις δυο ακραίες ανόδους. Τα παραπάνω φαίνονται πιο καθαρά και στις χρωματικές απεικονίσεις.

Ένα εξίσου σημαντικό πόρισμα, είναι πως τα επίπεδα ομοιομορφίας (τουλάχιστον σε σχέση με το benchmark), επανέρχονται σε ικανοποιητικά επίπεδα μετά από περίπου 30mm (ή 60% του πλάτους του δοκιμίου). Με αυστηρότερα κριτήρια τα αρχικά επίπεδα δεν έχουν επιτευχθεί, αλλά είναι εμφανές πως σε μια απόσταση συγκρίσιμη με το πλάτος του δοκιμίου θα υπάρχει πρακτικά αποσύζευξη των πεδίων των δοκιμίων.

Επιπλέον, η προσομοίωση αυτή καθώς είναι αδιάφορη του προσανατολισμού, είναι έγκυρη σε κάθε διεύθυνση, υπό την προϋπόθεση βέβαια να μην υπάρχουν οι ακροδέκτες τροφοδοσίας γιατί θα υπάρχουν ποσοτικές μεταβολές. Συνεπώς, όσον αφορά στο racking, μπορεί να εκτιμηθεί μια τάξη μεγέθους ώστε να υφίσταται πρακτικά απεμπλοκή των πεδίων που δρουν σε κάθε άνοδο.

Τέλος για άλλη μια φορά θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στην ενεργό τιμή και στα υπολογιστικά ζητήματα που οδηγούν σε διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Όπως λοιπόν, φαίνεται με βάση τόσο το υπάρχον πλέγμα, όσο και τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων, υπάρχει μια ευαισθησία της ενεργού τιμής στα αποτελέσματα. Συνακόλουθα, θα ήταν εύλογη κάποια βελτιστοποίηση του πλέγματος εστιασμένα ή συνολικά, στο βαθμό του εφικτού, για πιο ευσταθή αποτελέσματα. Παρόλα αυτά η τάση και η συμπεριφορά είναι ξεκάθαρη.



Εικόνα 15 Χαρακτηριστική απεικόνιση πεδιακής κατανομής

4.3.5 Μεταβολή της σχετικής απόστασης μεταξύ πολλαπλών ανόδων κυλινδρικής γεωμετρίας

Στο παρόν εδάφιο θα μελετηθεί η μεταβολή της ομοιομορφίας συναρτήσει της μεταβολής της σχετικής απόστασης τριών κυλινδρικών ανόδων, σταθερών διαστάσεων ύψους 50 mm, ακτίνας 10 mm, και σταθερής απόστασης από τις καθόδους.

Τα αποτελέσματα των αποτιμήσεων των συναρτήσεων κόστους, παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Απόσταση	Harmonic	Geometric	Mean	Rms
Benchmark	3,538	4,0163	4,912	5,760
5 mm	3,992	4,161	4,893	5,428
30 mm	3,597	4,067	4,957	5,755
70 mm	3,525	4,040	5,043	6,003

Πίνακας 8 Αποτιμήσεις στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, πολλαπλών κυλινδρικών ανόδων συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης, σε σχέση με το benchmark.



Διάγραμμα 8 Στοχικές συναρτήσεις ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της απόστασης μεταξύ ανόδων σε κυλινδρικές γεωμετρίες



Διάγραμμα 9 Τετράγωνο απόδοσης των στοχικών συναρτήσεων ομοιομορφίας πυκνότητας ρεύματος, συναρτήσει της απόστασης, συγκρινόμενα με το benchmark για πολλαπλές κυλινδρικές ανόδους.

Τα αποτελέσματα σε αυτή την ανάλυση ήταν ελαφρώς πιο αντικρουόμενα σε σχέση με της προηγούμενης ενότητας, καθώς τώρα και ο αριθμητικός μέσος, πέραν της ενεργού τιμή ακολούθησε μια λίγο διαφορετική τάση. Βέβαια, συνυπολογίζοντας και τις αμιγώς αριθμητικές αποτιμήσεις κάθε επιφάνειας, όπως και προηγουμένως, κρίνεται εύλογο το συμπέρασμα πως οφείλονται περισσότερο σε υπολογιστικά ζητήματα.

Πλην της ανωτέρω διαφοροποίησης τα υπόλοιπα συμπεράσματα είναι όμοια με τα προηγούμενα. Δηλαδή, υφίσταται άμεση επιρροή της απόστασης μεταξύ των ανόδων και της ομοιομορφίας, τα επίπεδα ομοιομορφίας (τουλάχιστον σε σχέση με το benchmark), επανέρχονται σε ικανοποιητικά επίπεδα μετά από περίπου 30mm (ή 150% του πλάτους του δοκιμίου) και ισχύει πως τα αποτελέσματα μπορούν να επεκταθούν και στις υπόλοιπους άξονες.



Εικόνα 16 Χαρακτηριστική αποτύπωση της πυκνότητας ρεύματος (διάνυσμα και απόλυτη τιμή) σε πολλαπλές κυλινδρικές ανόδους. Οι κύκλοι στις άνω έδρες των κυλίνδρων αντιστοιχούν στις καταβόθρες του ρεύματος. Οι κάθοδοι και ο ηλεκτρολύτης δεν εμφανίζονται για λόγους οπτικής ευκρίνειας.

Κεφάλαιο 50. Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης.

Στο πλαίσιο της εργασίας, σχεδιάστηκε μια πρότυπη διάταξη για την πειραματική μελέτη της ανοδίωσης. Η τρισδιάστατη απεικόνιση της διάταξης καθώς και τα μηχανολογικά σχέδια των επιμέρους εξαρτημάτων φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα και στον ακόλουθο πίνακα.



Εικόνα 17 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης και τοπολογίας

Περιγραφή	Ποσότητα	Διαστάσεις (mm)	Υλικό
Δοκίμιο-Άνοδος	5	60X50X20	Al 6063-T6
Πλάκες καθόδου	2	200X150X3	Al 6063-T6
Δεξαμενή ανοδίωσης	1	200x200x200	SS-304
Πόδια στήριξης	4	60 mm ύψος	Χάλυβας Κοινός
Λαμαρίνα "U"	1	-	Χάλυβας Κοινός
Λαμαρίνα ''L''	2	-	Χάλυβας Κοινός
Σωλήνας 1/2'	1	-	Χάλυβας Κοινός

Πίνακας 9 Λίστα εξαρτημάτων που αποτελούν τη διάταξη

Για την ορθή διαστασιολόγηση έλαβαν χώρα οι εξής υπολογισμοί.

Αρχικά αποφασίστηκε πως το δοκίμιο προς ανοδίωση θα είναι πρισματικό με ωφέλιμες διαστάσεις 50x20x50 mm, καθώς και 10mm όπου θα τοποθετούνται οι ακροδέκτες σύνδεσης και κατόπιν θα μασκαριστούν με μονωτικό και απρόσβλητο από το οξύ υλικό, ώστε να μην υπόκεινται ανοδίωση.

Συνεπώς η συνολική επιφάνεια προς ανοδίωση είναι:

$$A=0,009 \text{ m}^2$$

Για χρησιμοποιούμενη πυκνότητα ρεύματος J=150 A/m2 προκύπτει πως απαιτούνται:

$$I = JA = 1,35A \tag{6}$$

Για μέγιστη τάση ανοδίωσης 24V, θεωρώντας πως όλη η ηλεκτρική ενέργεια θα μεταβληθεί σε θερμότητα και δεν υφίσταται ψύξη προκύπτει πως:

$$P = V_{max}I = 32.4 Watt \tag{7}$$

Μέσω της θερμοχωρητικότητας που για ηλεκτρολύτη θειικού οξέος 15 % κατά μάζα, με C_p=0.96W/kg, για μέγιστη άνοδο θερμοκρασίας ΔT=2°C και μέγιστο χρόνο ανοδίωσης περί τα 30min, προκύπτει πως απαιτούνται 8,4kg ηλεκτρολύτη.

Έτσι λοιπόν, επιλέχθηκε η διάταξη να έχει χωρητικότητα 8 λίτρα με διαστάσεις 200x200x200 mm εσωτερικές, με λαμαρίνα SS-304 πάχους 3mm. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο γεγονός πως δεν πρόκειται για μόνιμη βιομηχανική εγκατάσταση που υπόκειται σε διάβρωση συνεχώς, συνεπώς η φθορά λόγω διάβρωσης δεν είναι κρίσιμος παράγοντας, ειδικά αν αναλογιστεί κανείς το οικονομικό όφελος καθώς και την ευκολία ψύξης σε σχέση με ανταγωνιστικές λύσεις με υλικά όπως το PVC.

Η βασική δεξαμενή που λαμβάνει χώρα η ανοδίωση έχει κυβικό σχήμα. Για λόγους όμως περαιτέρω εξέλιξης και χρήσης ανοδίωσης με μεγαλύτερα θερμικά φορτία επιλέχθηκε, η διάταξη να είναι εγκιβωτισμένη σε δεύτερο μεταλλικό κύβο διαστάσεων 300x300x300 mm, ο οποίος θα είναι γεμάτος με νερό (με δυνατότητα ανακυκλοφορίας), παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα ψύξης δια αγωγής στον εσωτερικό κύβο. Ο εξωτερικός κύβος θα προκύψει με συγκόλληση μιας στραντζαρισμένης λαμαρίνας σχήματος "U" και δύο στραντζαρισμένων λαμαρίνων σχήματος "L", οι οποίες θα αναλαμβάνουν και τη στήριξη της όλης διάταξης. Επιπρόσθετα προκειμένου να λαμβάνει χώρα κυκλοφορία του νερού κάτω από τη δεξαμενή ανοδίωσης, χρησιμοποιούνται και τέσσερα πόδια στήριξης.

Τα μηχανολογικά σχέδια των επιμέρους εξαρτημάτων της διάταξης επισυνάπτονται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 18 Μηχανολογικό σχέδιο εσωτερικού κύβου ανοδίωσης



Εικόνα 19 Μηχανολογικό σχέδιο στραντζαριστής λαμαρίνας "U" που θα αποτελέσει τον εξωτερικό κύβο ψύξης



Εικόνα 20 Μηχανολογικό σχέδιο στραντζαριστών λαμαρίνων (2x), που θα αποτελούν την δεξαμενή ψύξης καθώς επίσης θα στηρίζουν την όλη διάταξη.



Εικόνα 21 Μηχανολογικό σχέδιο δοκιμίων 6063Τ6 προς ανοδίωση



Εικόνα 22 Μηχανολογικό σχέδιο πλακών καθόδου από αλουμίνιο 6063Τ6



Εικόνα 23 Μηχανολογικό σχέδιο ποδιών στήριξης (αριστερά) και στομίου εκροής (δεξιά)

Πέραν της κατασκευής αυτής καθαυτής, βάσει της πρότερης ανάλυσης, επιλέχθηκε και το σύνολο των διαδικασιών καθώς και των ουσιών που θα χρησιμοποιηθούν. Αναλυτικότερα η διαδικασία είναι η εξής:

- 1. Καθαρισμός με καταιονισμό ύδατος.
- 2. Εμβάπτιση σε ακετόνη.
- 3. Εμβάπτιση σε απεσταγμένο νερό υψηλής θερμοκρασίας.
- 4. Χημική προσβολή σε διάλυμα απεσταγμένου νερού και καυστικής σόδας.
- 5. Έκπλυση με απεσταγμένο νερό.
- 6. Αποξείδωση και καθαρισμός με διάλυμα νιτρικού οξέος.
- 7. Έκπλυση με απεσταγμένο νερό.
- 8. Ανοδίωση με ηλεκτρολύτη θειικού οξέος σε θερμοκρασία δωματίου.
- 9. Διπλή έκπλυση με απεσταγμένο νερό και καταιονισμό.
- Υδροθερμική σφράγιση με απεσταγμένο νερό σε θερμοκρασία κοντά στο βρασμό.
- 11. Έκπλυση με απεσταγμένο νερό.

Η διαδικασία αυτή θα επαναληφθεί για διαφορετικούς χρόνους ανοδίωσης ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά και η ταχύτητα ανοδίωσης.

Όσον αφορά στη ηλεκτρική τροφοδοσία, αυτή θα γίνει με πηγή σταθερού ρεύματος με το ρεύμα σταθερό στη τιμή που υπολογίστηκε προηγουμένως I=1.35A.

Επιπρόσθετα, οι περισσότερες παράμετροι (ρεύμα, τάση, pH, θερμοκρασία) θα διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο σταθερές προκειμένου να μειωθούν οι επιδράσεις αυτών στο τελικό αποτέλεσμα. Ειδικά για τη διάλυση του ηλεκτρολύτη έχει αναλυθεί πως στα πλαίσια της αναμενόμενης ανοδίωσης, δεν θα υπάρχει αξιόλογη μεταβολή της περιεκτικότητας, ενώ η θερμοκρασία όπως αναφέρθηκε έχει σχεδιαστεί ώστε να μην ξεπεράσει στη χειρότερη περίπτωση και χωρίς ψύξη τους +2 °C από την αρχική θερμοκρασία.

Τέλος τα αποτελέσματα του πειράματος όσον αφορά στο πάχος και στην ομοιομορφία, θα τεθούν σε αντιπαραβολή με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για να βρεθούν οι μεταξύ τους συσχετίσεις και να αποτιμηθεί η συμβατότητα και καταλληλότητα των μοντέλων.

Κεφάλαιο 60. Συμπεράσματα

Περατώνοντας την ανάλυση και την παράθεση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύνοψη των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων που εκπορεύονται αυτής.

Αρχικά μέσα από τη παρούσα εργασία, ανέκυψαν τα κυρίαρχα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της ανοδίωσης καθώς και αρκετές σχεδιαστικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τη σχεδίαση του συνόλου των διεργασιών και διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα καθώς και των μηχανημάτων που συμμετέχουν σε αυτές. Επιπλέον, μέσα από την ανάλυση με τα πεπερασμένα στοιχεία αναδείχτηκαν κάποιες ισχυρές και συνάμα χρήσιμες συσχετίσεις.

Πιο συγκεκριμένα, προκύπτει έντονη εξάρτηση της ομοιογένειας από τις γεωμετρικές παραμέτρους. Συνεπώς, πρόκειται για ένα εγγενώς geometry oriented πρόβλημα και κατ` επέκταση πρέπει να τυγχάνει της δέουσας προσοχής και ανάλυσης. Επιπλέον, απόρροια των παραπάνω είναι πως η ηλεκτρική πεδιακή ανάλυση είναι κατάλληλη για ταχεία εκτίμηση του τρόπου κρέμασης των αντικειμένων προς ανοδίωση, καθώς με λίγα δεδομένα μπορεί να προκύψει μια ικανοποιητική προσέγγιση. Αν επαληθευτεί και από τα πειραματικά δεδομένα με εύλογες αποκλίσεις, θα δύναται να αποτελέσει μια σημαντική διευκόλυνση στη σχεδίαση τέτοιων διατάξεων.

Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα μπορούν να επεκταθούν σε όλους τους άξονες, επιτρέποντας έτσι μια συνολική εκτίμηση, με λιγότερες επαναλήψεις. Το γεγονός αυτό, είναι ιδιαίτερα χρήσιμο αν αυξηθεί ο αριθμός των στοιχείων για λόγους ακρίβειας, αφού υπό προϋποθέσεις θα επαρκούν στοχευμένες αναλύσεις ευαισθησίας σε έναν άξονα, καθώς το πρόβλημα απεμπλέκεται πλήρως από τις υπόλοιπες ανόδους και αγωγούς από κάποια απόσταση και άνω.

Οι επιλεχθείσες στοχικές συναρτήσεις αποτίμησης της ομοιομορφίας επιτρέπουν την ποιοτική εκτίμηση του μοντέλου. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, καθώς μέσω αυτών φάνηκαν οι αδυναμίες των μοντέλων, επιτρέποντας όμως με προσεκτική παρατήρηση και επεξεργασία την εξήγηση των αποκλίσεων.

68

Συνοψίζοντας όσον αφορά στη διαδικασία της ανοδίωσης ισχύουν τα ακόλουθα:

- Πρόκειται για ένα πολυκριτηριακό και διεπιστημονικό πρόβλημα, εγγενώς geometry-oriented.
- Η ηλεκτρική πεδιακή ανάλυση μπορεί να συσχετιστεί ισχυρά με το racking.
- Είναι ξεκάθαρη η απαίτηση για υψηλή χωρική ακρίβεια στη τοποθέτηση των ανόδων και των καθόδων.
- Ο ορθός σχεδιασμός μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ομοιογένεια, αλλά και την δυναμικότητα της παραγωγής.
- Υπάρχει η απαίτηση για υψηλή καθαριότητα του συνόλου των διαδικασιών.
- Χρειάζεται προσεκτική επιλογή και ταίριασμα υλικών, μηχανημάτων και εξαρτημάτων κατά τη διαδικασία σχεδίασης, όπου πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν το προσδόκιμο ζωής και φυσικά οικονομοτεχνικοί παράγοντες.

6.1 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Ολοκληρώνοντας την παρούσα εργασία, είναι χρήσιμο να αναφερθούν και κάποιες προτάσεις βελτίωσης και περαιτέρω διερεύνησης.

- Η βασικότερη πρόταση εστιάζει στην επαλήθευση τόσο της ποιότητας των αποτελεσμάτων της σχεδιασθείσας διάταξης, όσο και της πεδιακής ανάλυσης όσον αφορά στην ομοιομορφία, μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων.
- Ανάλυση της επίδρασης και της καταλληλότητας των μεθόδων ελέγχου της τροφοδοσίας.
- Δημιουργία μεταβατικού ηλεκτρικού μοντέλου που λαμβάνει υπόψιν την μεταβολή στις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών.
- Εμπλουτισμός του μοντέλου με χημικά και ρευστοδυναμικά φαινόμενα, ώστε πλέον να συνιστά μια ολιστική προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψιν τα βασικότερα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα.

- Διερεύνηση δυνατότητας αποτίμησης των ποιοτικών μηχανικών και μικροσκοπικών ιδιοτήτων της προκύπτουσας ανοδίωσης, μέσω του ολικού μοντέλου.
- Προσθήκη οικονομοτεχνικών κριτηρίων για την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού.
- Δημιουργία κατάλληλου αλγόριθμου βέλτιστου ελέγχου της διάταξης.

References

- Anodizeusa.com, (2016). *Anodize USA : Anodizing Equipment & Anodizing Technology*. [online] Available at: http://anodizeusa.com/.
- Ase4anodising.co.uk, (2016). *Almumium Surface Engineering Hard Anodising Specialists*. [online] Available at: http://www.ase4anodising.co.uk/.
- Asm.matweb.com, (2016). *ASM Material Data Sheet*. [online] Available at: http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6063T6.
- Brenner, A. (1963). Electrodeposition of alloys. New York: Academic Press.
- Danford, M. (1994). The corrosion protection of several aluminum alloys by chromic acid and sulfuric acid anodizing. Hampton, Va.: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center.
- European-aluminium.eu, (2016). *Talat Home page*. [online] Available at: http://www.european-aluminium.eu/talat/.
- Italtecno.com, (2016). *Italtecno Srl. | Tecnologie Avanzate per l'Alluminio*. [online] Available at: http://www.italtecno.com/.
- Kawai, S. (2002). Anodizing and coloring of aluminum alloys. Stevenage, Herts.: Finishing Publications.
- Nzic.org.nz, (2016). New Zealand Institute of Chemistry. [online] Available at: http://nzic.org.nz/.
- Paunovic, M. and Schlesinger, M. (1998). Fundamentals of electrochemical deposition. New York: Wiley.
- Pfonline.com, (2016). Suppliers, Technical Resources, News and Events for the Finishing Industries : Products Finishing. [online] Available at: http://www.pfonline.com/.
- Qualanod.net, (2016). *Start Qualanod*. [online] Available at: http://www.qualanod.net/.

Παράρτημα 1° Αποτελέσματα προσομοίωσης

Δεδομένα απόστασης ανόδου-καθόδου, ανόδου κυλινδρικής γεωμετρίας Για κυλινδρική γεωμετρία ανόδου, με ύψος 50mm και ακτίνα 20mm, λήφθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

5 mm distance					
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face		
Standard Deviation	135	4815	4879		
Harmonic Mean	272	1028	1028		
Geometric Mean	300	1363	1365		
Arithmetic Mean	327	2522	2537		
RMS	354	5427	5490		
Range	977	27503	28513		
Minimum	90	436	458		
Maximum	1067	27939	28971		
Harmonic ratio	3,773	3,774			
Geometric ratio	4,544	4,549			
Arithmetic ratio	7,713	7,760			
Rms ratio	15,344	15,523			

Πίνακας 10 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με απόσταση με κάθοδο 5mm

10 mm distance					
	Cylindrical Face Upper Face				
Standard Deviation	148	4876	4859		
Harmonic Mean	258	1057	1054		
Geometric Mean	284	1390	1383		
Arithmetic Mean	313	2553	2535		
RMS	347	5495	5471		
Range	1268	30002	29501		
Minimum	103	517	505		
Maximum	1371	30520	30005		
Harmonic ratio	4,097	4,084			
Geometric ratio	4,890	4,865			
Arithmetic ratio	8,151	8,095			
Rms ratio	15,855	15,787			

Πίνακας 11 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με απόσταση με κάθοδο 10mm
20 mm distance									
	Cylindrical Face Upper Face								
Standard Deviation	158	5070	5057						
Harmonic Mean	245	1074	1076						
Geometric Mean	271	1402	1408						
Arithmetic Mean	301	2591	2598						
RMS	340	5684	5676						
Range	1206	30254	31559						
Minimum	109	565	556						
Maximum	1315	30819	32115						
Harmonic ratio	4,384	4,393							
Geometric ratio	5,180	5,200							
Arithmetic ratio	8,594	8,616							
Rms ratio	16,708	16,684							

Πίνακας 12 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με απόσταση με κάθοδο 20mm

30 mm distance								
Cylindrical Face Upper Face Lower								
Standard Deviation	160	4729	4920					
Harmonic Mean	240	1089	1083					
Geometric Mean	266	1415	1410					
Arithmetic Mean	298	2538	2567					
RMS	338	5358	5541					
Range	1180	29264	29615					
Minimum	110	554	556					
Maximum	1290	29818	30171					
Harmonic ratio	4,539	4,517						
Geometric ratio	5,319	5,303						
Arithmetic ratio	8,526	8,626						
Rms ratio	15,861	16,401						

Πίνακας 13 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με απόσταση με κάθοδο 30mm

40 mm distance							
	Lower Face						
Standard Deviation	160	5066	5016				
Harmonic Mean	238	1085	1087				
Geometric Mean	264	1412	1415				
Arithmetic Mean	295	2589	2592				
RMS	336	5680	5637				
Range	1178	31663	30115				
Minimum	110	579	581				
Maximum	1288	32242	30696				
Harmonic ratio	4,564	4,572					
Geometric ratio	5,354	5,367					
Arithmetic ratio	8,770	8,783					
Rms ratio	16,927	16,799					

Πίνακας 14 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με απόσταση με κάθοδο 40mm

	Distance= 5 mm, 50mm x20 mm x 50mm						
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface
Standard Deviation	340	339	225	221	4292	4109	2324
Harmonic Mean	170	170	382	382	737	738	297
Geometric Mean	219	219	420	419	991	992	428
Arithmetic Mean	305	306	466	464	1886	1867	803
RMS	456	457	517	514	4684	4509	2458
Range	3620	3463	1142	1056	46791	42593	46979
Minimum	61	61	175	175	249	260	61
Maximum	3681	3523	1316	1230	47040	42853	47040
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total	
Harmonic ratio	2,248	2,247	1,002	1,927	1,930	1,287	
Geometric ratio	1,918	1,916	1,003	2,360	2,364	1,019	
Arithmetic ratio	1,527	1,522	1,004	4,048	4,007	1,724	
Rms ratio	1,134	1,133	1,007	9,052	8,713	4,751	

Δεδομένα απόστασης ανόδου-καθόδου, ανόδου πρισματικής γεωμετρίας

Πίνακας 15 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με απόσταση ανόδου καθόδου 5mm

	Distance= 10 mm, 50mm x20 mm x 50mm						
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface
Standard Deviation	436	441	234	245	4033	3529	2119
Harmonic Mean	194	195	381	382	809	813	324
Geometric Mean	246	248	422	424	1049	1052	455
Arithmetic Mean	348	353	471	477	1883	1839	818
RMS	557	564	526	536	4447	3976	2271
Range	5441	6115	1366	1364	45997	32336	46238
Minimum	81	81	144	143	322	342	81
Maximum	5522	6196	1509	1507	46319	32678	46319
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total	
Harmonic ratio	1,962	1,956	1,002	2,126	2,135	1,175	
Geometric ratio	1,713	1,699	1,005	2,485	2,493	1,077	
Arithmetic ratio	1,355	1,337	1,011	3,994	3,900	1,734	
Rms ratio	1,059	1,072	1,018	8,450	7,554	4,315	

Πίνακας 16 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με απόσταση ανόδου καθόδου 10 mm

Distance= 20 mm, 50mm x20 mm x 50mm							
	YZ	YZ	XZ	XZ	Top face	Lower	Total
	face 1	face 2	face 1	face 2	T op Tace	Face	Surface
Standard Deviation	409	476	253	249	3926	4333	2297
Harmonic Mean	218	218	381	381	872	876	348
Geometric Mean	276	275	428	428	1102	1109	480
Arithmetic Mean	384	386	484	483	1893	1959	851
RMS	561	613	546	544	4355	4751	2449
Range	3893	7432	1704	1255	53405	45814	53705
Minimum	97	97	113	113	397	393	97
Maximum	3991	7530	1817	1368	53802	46207	53802
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total	
Harmonic ratio	1,742	1,744	1,000	2,293	2,302	1,093	
Geometric ratio	1,553	1,557	1,000	2,573	2,589	1,121	
Arithmetic ratio	1,262	1,253	1,001	3,911	4,047	1,758	
Rms ratio	1,027	1,123	1,004	7,977	8,702	4,487	

Πίνακας 17 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με απόσταση ανόδου καθόδου 20 mm

Distance= 30 mm, 50mm x20 mm x 50mm							
	YZYZXZXZTop faceLowerface 1face 2face 1face 2Top faceFace						Total Surface
Standard Deviation	462	474	258	259	3842	4614	2355
Harmonic Mean	228	228	380	380	896	901	357
Geometric Mean	286	288	431	432	1122	1130	491
Arithmetic Mean	401	409	489	490	1906	1988	866
RMS	611	625	553	554	4285	5019	2509
Range	5072	4413	1404	1365	40185	51759	52068
Minimum	103	103	100	100	432	409	100
Maximum	5175	4517	1504	1465	40616	52168	52168
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total	
Harmonic ratio	1,668	1,666	1,001	2,359	2,373	1,064	
Geometric ratio	1,507	1,495	1,001	2,602	2,620	1,139	
Arithmetic ratio	1,221	1,197	1,002	3,896	4,062	1,770	
Rms ratio	1,105	1,131	1,002	7,748	9,074	4,537	

Πίνακας 18 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με απόσταση ανόδου καθόδου 30 mm

	$Distance = 40 \text{ mm}, 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$						
	YZ	YZ	XZ	XZ	Top food	Lower	Total
	face 1	face 2	face 1	face 2	1 op lace	Face	Surface
Standard Deviation	535	499	264	261	4204	3606	2191
Harmonic Mean	232	231	380	379	910	903	360
Geometric Mean	290	289	432	432	1137	1126	493
Arithmetic Mean	413	407	492	491	1957	1884	861
RMS	675	643	558	555	4633	4065	2354
Range	5684	5935	1784	1464	45694	34460	46042
Minimum	106	106	95	95	443	418	95
Maximum	5789	6040	1878	1558	46137	34878	46137
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total	
Harmonic ratio	1,638	1,641	1,001	2,397	2,379	1,054	
Geometric ratio	1,488	1,493	1,001	2,631	2,605	1,142	
Arithmetic ratio	1,191	1,209	1,002	3,980	3,832	1,751	
Rms ratio	1.211	1.153	1.004	8.306	7.288	4.221	

Πίνακας 19 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με απόσταση ανόδου καθόδου 40 mm

AR=2, Height=20 mm, Radius=10mm								
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface				
Standard Deviation	216	2137	2075	1754				
Harmonic Mean	163	755	754	302				
Geometric Mean	184	984	981	492				
Arithmetic Mean	231	1600	1580	1030				
RMS	316	2669	2607	2034				
Range	1399	9592	9110	9883				
Minimum	121	412	415	121				
Maximum	1520	10004	9525	10004				
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical					
Harmonic ratio	4,635	4,635	1,856					
Geometric ratio	5,359	5,341	2,682					
Arithmetic ratio	6,934	6,846	4,465					
Rms ratio	8,439	8,244	6,430					

Δεδομένα μεταβολής λόγου επιφανειών για κυλινδρική γεωμετρία

Πίνακας 20 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με AR=2

AR=6, Height=60 mm, Radius=10mm								
	Cylindrical Face	Upper Face	Upper Face Lower Face					
Standard Deviation	263	4651	4682	3868				
Harmonic Mean	278	1326	1330	520				
Geometric Mean	322	1883	1890	911				
Arithmetic Mean	383	3343	3360	2129				
RMS	464	5725	5761	4415				
Range	2240	22946	24045	24519				
Minimum	119	576	594	119				
Maximum	2359	23522	24638	24638				
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical					
Harmonic ratio	4,770	4,784	1,869					
Geometric ratio	5,846	5,867	2,829					
Arithmetic ratio	8,737	8,781	5,564					
Rms ratio	12,327	12,403	9,505					

Πίνακας 21 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με AR=6

AR=10, Height=100 mm, Radius=10mm								
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface				
Standard Deviation	351	6260	5868	5074				
Harmonic Mean	437	1781	1779	785				
Geometric Mean	553	2676	2663	1396				
Arithmetic Mean	660	4804	4697	3066				
RMS	747	7888	7513	5927				
Range	2465	32049	27544	32637				
Minimum	123	712	693	123				
Maximum	2588	32761	28238	32761				
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical					
Harmonic ratio	4,079	4,074	1,798					
Geometric ratio	4,841	4,818	2,525					
Arithmetic ratio	7,282	7,120	4,648					
Rms ratio	10,555	10,054	7,932					

Πίνακας 22 Αποτελέσματα για κυλινδρική άνοδο με AR=10

	AR=1.25, 50mm x20 mm x 50mm						
	YZ	YZ	XZ	XZ	Top face	Lower	Total
	face 1	face 2	face 1	face 2	Top face	Face	Surface
Standard Deviation	464	450	256	260	4531	4616	2523
Harmonic Mean	227	227	378	383	893	894	356
Geometric Mean	285	284	429	433	1121	1121	489
Arithmetic Mean	400	396	487	491	1981	1976	872
RMS	612	599	550	556	4940	5016	2669
Range	5390	4573	1440	1582	44989	46677	46993
Minimum	103	103	100	105	409	417	100
Maximum	5493	4676	1540	1688	45398	47093	47093
Polotions	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	
Relations	YZ1	YZ1	XZ2	Тор	Lower	Total	
Harmonic ratio	1,669	1,671	1,011	2,360	2,361	1,064	
Geometric ratio	1,505	1,510	1,009	2,612	2,611	1,139	
Arithmetic ratio	1,218	1,228	1,008	4,067	4,057	1,791	
Rms ratio	1,113	1,090	1,010	8,985	9,123	4,855	

Δεδομένα μεταβολής λόγου επιφανειών για πρισματική γεωμετρία

Πίνακας 23 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με AR=1.25

AR=1.875, 75mm x20 mm x 75mm									
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface		
Standard Deviation	542	627	433	419	13708	14222	7539		
Harmonic Mean	236	237	461	464	1062	1070	398		
Geometric Mean	301	302	550	550	1425	1441	587		
Arithmetic Mean	438	447	666	660	3731	3865	1467		
RMS	696	770	794	782	14192	14723	7679		
Range	5262	7077	2555	2002	134995	141523	141882		
Minimum	108	108	110	116	462	466	108		
Maximum	5370	7185	2665	2118	135457	141990	141990		
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total			
Harmonic ratio	1,950	1,948	1,006	2,305	2,323	1,159			
Geometric ratio	1,830	1,824	1,001	2,591	2,619	1,068			
Arithmetic ratio	1,521	1,488	1,008	5,602	5,804	2,203			
Rms ratio	1,141	1,032	1,015	17,871	18,539	9,669			

Πίνακας 24 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με AR=1.875

AR=2.5, 100mm x20mm x 100mm									
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface		
Standard Deviation	633	733	617	615	18168	18380	9866		
Harmonic Mean	234	234	520	523	1203	1203	416		
Geometric Mean	300	301	640	642	1682	1681	651		
Arithmetic Mean	446	456	815	816	4822	4825	1817		
RMS	774	863	1022	1022	18778	18983	10030		
Range	8077	9291	2833	2928	189901	189300	190283		
Minimum	103	103	126	132	486	483	103		
Maximum	8180	9394	2959	3060	190386	189783	190386		
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total			
Harmonic ratio	2,219	2,216	1,007	2,314	2,315	1,248			
Geometric ratio	2,136	2,128	1,004	2,628	2,628	1,018			
Arithmetic ratio	1,828	1,786	1,001	5,918	5,922	2,230			
Rms ratio	1,321	1,184	1,000	18,380	18,581	9,817			

Πίνακας 25 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με AR=2.5

AR=3, 120mm x 20mm x 120mm									
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface		
Standard Deviation	769	607	794	796	15684	14380	8192		
Harmonic Mean	216	216	550	554	1280	1272	404		
Geometric Mean	281	282	696	699	1841	1826	674		
Arithmetic Mean	439	427	929	932	4832	4641	1831		
RMS	885	742	1222	1225	16395	15096	8393		
Range	9223	7091	3843	3881	176954	153571	177350		
Minimum	84	84	136	140	480	479	84		
Maximum	9307	7175	3979	4022	177434	154050	177434		
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total			
Harmonic ratio	2,551	2,550	1,007	2,327	2,314	1,360			
Geometric ratio	2,479	2,473	1,004	2,645	2,622	1,033			
Arithmetic ratio	2,115	2,177	1,003	5,198	4,993	1,970			
Rms ratio	1,380	1,647	1,002	13,414	12,351	6,867			

Πίνακας 26 Αποτελέσματα για πρισματική άνοδο με AR=3

Δεδομένα μεταβολής απόστασης μεταξύ κυλινδρικών ανόδων

Τα ακόλουθα αποτελέσματα λήφθηκαν μεταβάλλοντας τη σχετική απόσταση μεταξύ των ανόδων, καθώς και τα αποτελέσματα, με μια μόνο άνοδο ως benchmark.

Height=50 mm, Radius=10mm										
Benchmark										
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface						
Standard Deviation	225	2267	2452	1992						
Harmonic Mean	251	1202	1208	431						
Geometric Mean	288	1579	1601	711						
Arithmetic Mean	341	2298	2388	1400						
RMS	408	3226	3421	2435						
Range	1285	9642	9671	10154						
Minimum	120	556	602	120						
Maximum	1404	10198	10273	10273						
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical							
Harmonic ratio	4,797	4,819	1,721							
Geometric ratio	5,487	5,562	2,470							
Arithmetic ratio	6,736	7,001	4,105							
Rms ratio	7,901	8,378	5,963							

Πίνακας 27 Πίνακας αποτελεσμάτων για benchmarking κυλινδρικών ανόδων.

Distance=5 mm, Height=50 mm, Radius=10mm										
	Ce	enter Anode								
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface						
Standard Deviation	236	1649	1916	1492						
Harmonic Mean	151	924	934	263						
Geometric Mean	202	1205	1239	503						
Arithmetic Mean	264	1722	1848	1036						
RMS	354	2383	2661	1816						
Range	1481	8187	8746	9077						
Minimum	7	350	339	7						
Maximum	1488	8537	9084	9084						
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical							
Harmonic ratio	6,105	6,169	1,738							
Geometric ratio	5,968	6,136	2,493							
Arithmetic ratio	6,522	7,001	3,923							
Rms ratio	6,735	7,519	5,133							
	Distance=5 mm, He	eight=50 mm, Radius	=10mm							
	Ι	Left Anode								
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface						
Standard Deviation	279	2765	2874	2333						
Harmonic Mean	262	1340	1350	445						
Geometric Mean	320	1801	1815	773						
Arithmetic Mean	384	2692	2734	1572						
RMS	475	3857	3965	2813						
Range	2222	11907	13821	14237						
Minimum	7	408	424	7						
Maximum	2229	12315	14245	14245						
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical							
Harmonic ratio	5,107	5,142	1,696							
Geometric ratio	5,630	5,674	2,418							
Arithmetic ratio	7,002	7,111	4,087							
Rms ratio	8,117	8,344	5,919							
	Distance=5 mm, He	eight=50 mm, Radius	=10mm							
	R	ight Anode								
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface						
Standard Deviation	307	2777	2661	2268						
Harmonic Mean	258	1347	1341	442						
Geometric Mean	327	1813	1795	786						
Arithmetic Mean	400	2708	2654	1573						
RMS	504	3878	3757	2760						
Range	2500	11940	11482	12344						
Minimum	9	413	395	9						
Maximum	2508	12353	11878	12353						
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical							
Harmonic ratio	5,213	5,191	1,710	1						
Geometric ratio	5,548	5,494	2,407	1						
Arithmetic ratio	6,768	6,632	3,930	1						
Rms ratio	7.687	7,448	5,471							

Πίνακας 28 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 5mm μεταξύ κυλινδρικών ανόδων.

Distance=30 mm, Height=50 mm, Radius=10mm										
	С	enterAnode								
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface						
Standard Deviation	214	2226	2186	1837						
Harmonic Mean	221	1107	1104	374						
Geometric Mean	254	1458	1459	621						
Arithmetic Mean	303	2159	2159	1254						
RMS	371	3100	3071	2224						
Range	1561	9124	9005	9553						
Minimum	83	511	543	83						
Maximum	1643	9635	9547	9635						
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical							
Harmonic ratio	5,018	5,006	1,695							
Geometric ratio	5,746	5,749	2,449							
Arithmetic ratio	7,122	7,122	4,136							
Rms ratio	8,353	8,275	5,991							
	Distance=30 mm, H	eight=50 mm, Radiu	s=10mm							
	Ι	LeftAnode								
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface						
Standard Deviation	253	2508	2559	2130						
Harmonic Mean	262	1266	1262	452						
Geometric Mean	304	1669	1670	750						
Arithmetic Mean	365	2464	2487	1483						
RMS	444	3514	3567	2595						
Range	1413	10819	10771	11292						
Minimum	84	557	549	84						
Maximum	1497	11377	11319	11377						
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical							
Harmonic ratio	4,825	4,811	1,723							
Geometric ratio	5,490	5,493	2,465							
Arithmetic ratio	6,754	6,818	4,065							
Rms ratio	7,915	8,034	5,845							
	Distance=30 mm, H	eight=50 mm, Radiu	s=10mm							
	R	ightAnode								
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface						
Standard Deviation	249	2603	2473	2122						
Harmonic Mean	261	1272	1261	444						
Geometric Mean	301	1684	1665	735						
Arithmetic Mean	360	2513	2454	1464						
RMS	438	3617	3483	2578						
Range	1399	11337	10489	11852						
Minimum	84	600	560	84						
Maximum	1483	11937	11049	11937						
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical							
Harmonic ratio	4,878	4,833	1,703							
Geometric ratio	5,594	5,529	2,440							
Arithmetic ratio	6,978	6,815	4,065							
Rms ratio	8.261	7.954	5.887							

Πίνακας 29 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 30mm μεταξύ κυλινδρικών ανόδων.

	Distance=70 mm, Height=50 mm, Radius=10mm										
	С	enterAnode									
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface							
Standard Deviation	229	2226	2452	1972							
Harmonic Mean	248	1182	1198	427							
Geometric Mean	286	1553	1584	702							
Arithmetic Mean	340	2263	2362	1382							
RMS	410	3173	3403	2408							
Range	1576	10520	10568	11029							
Minimum	113	587	575	113							
Maximum	1689	11108	11142	11142							
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical								
Harmonic ratio	4,761	4,826	1,719								
Geometric ratio	5,440	5,547	2,460								
Arithmetic ratio	6,655	6,946	4,065								
Rms ratio	7,742	8,302	5,875								
_	Distance=30 mm, H	eight=50 mm, Radiu	s=10mm								
	Ι	LeftAnode									
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface							
Standard Deviation	234	2633	2637	2187							
Harmonic Mean	253	1218	1215	432							
Geometric Mean	291	1626	1625	715							
Arithmetic Mean	346	2475	2476	1459							
RMS	417	3612	3616	2628							
Range	1421	11246	10575	11740							
Minimum	117	611	598	117							
Maximum	1538	11857	11174	11857							
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical								
Harmonic ratio	4,809	4,794	1,706								
Geometric ratio	5,595	5,589	2,458								
Arithmetic ratio	7,160	7,162	4,219								
Rms ratio	8,654	8,662	6,297								
	Distance=70 mm, H	eight=50 mm, Radiu	s=10mm								
	R	ightAnode									
	Cylindrical Face	Upper Face	Lower Face	Total Surface							
Standard Deviation	216	2552	2580	2125							
Harmonic Mean	254	1209	1210	427							
Geometric Mean	289	1615	1618	700							
Arithmetic Mean	338	2440	2455	1423							
RMS	401	3529	3560	2557							
Range	1185	10107	10563	11040							
Minimum	101	584	578	101							
Maximum	1287	10691	11141	11141							
Relations	Upper/Cylindrical	Lower/Cylindrical	Total/Cylindrical								
Harmonic ratio	4,764	4,771	1,685								
Geometric ratio	5,590	5,601	2,425								
Arithmetic ratio	7,210	7,255	4,206								
Rms ratio	8,794	8.871	6.373								

Πίνακας 30 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 70mm μεταξύ κυλινδρικών ανόδων.

Δεδομένα μεταβολής απόστασης μεταξύ πρισματικών ανόδων

Τα ακόλουθα αποτελέσματα λήφθηκαν μεταβάλλοντας τη σχετική απόσταση μεταξύ των ανόδων, καθώς και τα αποτελέσματα, με μια άνοδο ως benchmark.

AR=3, 120mm x 20mm x 120mm									
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface		
Standard Deviation	464	508	249	250	4674	4256	2472		
Harmonic Mean	232	232	387	392	898	892	363		
Geometric Mean	291	292	437	441	1130	1120	497		
Arithmetic Mean	407	412	492	496	2010	1944	878		
RMS	617	654	551	556	5083	4674	2623		
Range	4177	6078	1334	1365	48023	43635	48345		
Minimum	107	108	104	110	426	415	104		
Maximum	4284	6186	1438	1474	48449	44051	48449		
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total			
Harmonic ratio	1,669	1,668	1,012	2,318	2,305	1,065			
Geometric ratio	1,502	1,497	1,010	2,585	2,563	1,136			
Arithmetic ratio	1,208	1,194	1,008	4,085	3,951	1,784			
Rms ratio	1,119	1,186	1,008	9,220	8,479	4,757			

Πίνακας 31 Πίνακας αποτελεσμάτων για benchmarking κυλινδρικών ανόδων.

Distance=5 mm, 50 mm x 20 mm x 50mm									
			Center A	Anode					
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface		
Standard Deviation	321	353	256	260	3560	3553	1972		
Harmonic Mean	72	70	268	274	590	594	150		
Geometric Mean	139	140	309	314	808	817	310		
Arithmetic Mean	231	237	369	375	1548	1568	655		
RMS	395	425	449	456	3878	3880	2077		
Range	3586	4595	1360	1263	37930	36052	38109		
Minimum	4	2	125	131	182	178	2		
Maximum	3590	4597	1485	1394	38111	36230	38111		
Relations	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-			
Kelations	YZ1	YZ1	XZ2	Тор	Lower	Total			
Harmonic ratio	3,741	3,847	1,022	2,198	2,216	1,786			
Geometric ratio	2,221	2,209	1,019	2,620	2,648	1,005			
Arithmetic ratio	1,599	1,559	1,016	4,194	4,248	1,774			
Rms ratio	1,136	1,058	1,015	8,635	8,640	4,626			
Right Anode									
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface		
Standard Deviation	278	309	308	303	3224	3465	1984		
Harmonic Mean	85	343	366	377	908	861	263		
Geometric Mean	141	413	442	452	1337	1252	490		
Arithmetic Mean	217	496	528	535	2378	2304	980		
RMS	353	584	611	614	4003	4158	2212		
Range	3635	1646	1485	1618	15399	19065	19253		
Minimum	5 3640	104	108	129	15612	192	5 10257		
	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	19237		
Relations	YZ1	YZ1	XZ2	Тор	Lower	Total			
Harmonic ratio	4,278	1,066	1,031	2,483	2,354	1,391			
Geometric ratio	3,137	1,071	1,022	3,022	2,830	1,107			
Arithmetic ratio	2,427	1,063	1,013	4,506	4,367	1,858			
Rms ratio	1,732	1,045	1,006	6,554	6,807	3,622			
			Left A	node					
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface		
Standard Deviation	377	239	303	323	4390	3464	2309		
Harmonic Mean	350	114	373	380	817	981	304		
Geometric Mean	431	158	448	453	1186	1506	509		
Arithmetic Mean	537	223	530	537	2382	2680	1042		
RMS	656	327	611	626	4991	4377	2533		

Πίνακας 32 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 5mm μεταξύ πρισματικών ανόδων.

Range	2080	2325	1625	2496	36469	19823	36645
Minimum	111	7	123	126	184	194	7
Maximum	2191	2333	1749	2621	36653	20017	36653
Relations	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	
	YZ1	YZ1	XZ2	Тор	Lower	Total	
Harmonic ratio	1,065	3,266	1,021	2,191	2,632	1,224	
Geometric ratio	1,039	2,832	1,012	2,648	3,362	1,136	
Arithmetic ratio	1,013	2,374	1,013	4,493	5,054	1,966	
Rms ratio	1,075	1,869	1,026	8,174	7,169	4,149	

Distance=30 mm, 50 mm x 20 mm x 50mm									
Center Anode									
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface		
Standard Deviation	440	491	259	278	3896	4022	2197		
Harmonic Mean	174	174	342	346	777	777	293		
Geometric Mean	232	232	388	392	995	995	425		
Arithmetic Mean	345	350	446	454	1769	1778	783		
RMS	559	603	516	532	4275	4394	2332		
Range	5803	5694	1461	1725	42521	42520	42795		
Minimum	61	61	112	116	335	333	61		
Maximum	5864	5755	1573	1841	42856	42853	42856		
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total			
Harmonic ratio	1,966	1,968	1,011	2,273	2,274	1,168			
Geometric ratio	1,669	1,672	1,011	2,566	2,567	1,095			
Arithmetic ratio	1,291	1,276	1,018	3,966	3,986	1,756			
Rms ratio	1,084	1,169	1,032	8,288	8,519	4,522			
			Right A	Anode					
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface		
Standard Deviation	264	283	296	344	2233	2605	1503		
Harmonic Mean	180	349	403	427	1067	975	383		
Geometric Mean	232	409	467	498	1402	1311	554		
Arithmetic Mean	307	482	537	582	2102	2134	941		
RMS	405	559	614	676	3065	3366	1774		
Range	2188	1421	2280	2427	9591	11636	11953		
Minimum	46	116	112	122	380	363	46		
Maximum	2234	1537	2392	2549	9971	11999	11999		
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total			
Harmonic ratio	2,236	1,155	1,058	2,645	2,416	1,054]		
Geometric ratio	2,012	1,142	1,067	3,004	2,809	1,188]		
Arithmetic ratio	1,752	1,116	1,084	3,911	3,971	1,751]		
Rms ratio	1,516	1,099	1,102	4,995	5,485	2,890			

Πίνακας 33 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για απόσταση 30mm μεταξύ πρισματικών ανόδων.

Left Anode								
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface	
Standard Deviation	250	259	296	239	3551	3209	1987	
Harmonic Mean	339	180	401	401	952	1029	375	
Geometric Mean	392	233	461	455	1264	1377	536	
Arithmetic Mean	453	310	530	510	2258	2339	972	
RMS	518	404	607	563	4205	3969	2212	
Range	1525	1611	2638	1229	27954	15899	28264	
Minimum	102	60	117	114	370	368	60	
Maximum	1628	1672	2755	1343	28324	16267	28324	
Relations	XZ1- YZ1	XZ1- YZ1	XZ1- XZ2	XZ1- Top	XZ1- Lower	XZ1- Total		
Harmonic ratio	1,183	2,235	1,001	2,371	2,564	1,072		
Geometric ratio	1,177	1,981	1,015	2,739	2,984	1,162		
Arithmetic ratio	1,169	1,707	1,039	4,261	4,415	1,835		
Rms ratio	1,172	1,501	1,078	6,929	6,539	3,645		

Π ' 2	45	,	,	2	,	,	70	÷,	,	18
1110000000	/1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	$\alpha \omega \tau 1 \kappa \alpha c$	π_{1}	$\sigma_{2} i_{2} \tau_{0} \pi_{0}$	$\Pi \alpha \tau \omega v v v $	α $\alpha \pi \alpha \sigma \tau \alpha \sigma n$	/IImm	$\Pi CT \alpha c \eta \gamma$	$\pi \alpha \alpha \sigma \mu \alpha \tau \mu \alpha \omega v$	avoaw
THVURUC J		DOULTO		unoicheo	ματων γι	u unoo iuon	/ UIIIIII	uciuso.	npionutikov	uvoowv.
				2						

Distance=70 mm, 50 mm x 20 mm x 50mm									
Center Anode									
	YZ face 1	YZ face 2	XZ face 1	XZ face 2	Top face	Lower Face	Total Surface		
Standard	485	543	287	276	3895	3943	2187		
Deviation									
Harmonic Mean	221	221	380	381	857	865	349		
Geometric	281	282	431	431	1079	1091	483		
Mean									
Arithmetic	408	416	494	492	1865	1885	850		
Mean									
RMS	633	683	571	563	4314	4366	2346		
Range	4760	5314	2048	1807	39234	47873	48181		
Minimum	100	100	106	108	400	407	100		
Maximum	4860	5414	2154	1916	39633	48280	48280		
Palations	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-			
Relations	YZ1	YZ1	XZ2	Тор	Lower	Total			
Harmonic ratio	1,722	1,722	1,002	2,257	2,277	1,088			
Geometric ratio	1,533	1,530	1,001	2,503	2,531	1,119			
Arithmetic ratio	1,211	1,189	1,005	3,773	3,814	1,719			
Rms ratio	1,108	1,196	1,014	7,552	7,643	4,106			
Right Anode									
	YZ face	YZ face	XZ face	XZ face	Top face	Lower	Total		
	1	2	1	2	T op Tace	Face	Surface		
Standard	252	289	269	292	2946	3013	1778		
Deviation									
Harmonic Mean	229	255	400	406	989	996	380		
Geometric	285	314	455	463	1293	1317	533		
Mean									
Arithmetic	356	395	516	529	2172	2231	944		
Mean									
RMS	436	489	582	604	3658	3746	2013		
Range	1700	1666	1874	2250	15047	15191	15574		

Minimum	65	81	102	106	417	447	65			
Maximum	1764	1748	1976	2356	15465	15638	15638			
Deletions	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-				
Relations	YZ1	YZ1	XZ2	Тор	Lower	Total				
Harmonic ratio	1,749	1,573	1,013	2,471	2,488	1,052				
Geometric ratio	1,595	1,449	1,017	2,841	2,894	1,171				
Arithmetic ratio	1,450	1,308	1,024	4,208	4,322	1,829				
Rms ratio	1,336	1,191	1,037	6,284	6,437	3,458				
Left Anode										
	YZ face	YZ face	XZ face	XZ face	Tenford	Lower	Total			
	1	2	1	2	T op Tace	Face	Surface			
Standard	302	285	243	297	2975	2937	1764			
Deviation										
Harmonic Mean	263	231	401	408	1005	1021	386			
Geometric	323	290	454	469	1323	1322	540			
Mean										
Arithmetic	407	374	508	536	2211	2176	947			
Mean										
RMS	506	470	563	613	3705	3653	2002			
Range	1622	1502	1370	2509	15193	14151	15541			
Minimum	97	75	105	95	423	440	75			
Maximum	1719	1577	1475	2604	15616	14592	15616			
Deletions	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-	XZ1-				
Relations	YZ1	YZ1	XZ2	Тор	Lower	Total				
Harmonic ratio	1,522	1,739	1,018	2,506	2,546	1,039				
Geometric ratio	1,403	1,564	1,034	2,916	2,916	1,191				
Arithmetic ratio	1,250	1,359	1,055	4,350	4,280	1,862				
Rms ratio	1,112	1,197	1,088	6,578	6,486	3,555				

Παράρτημα 2

Κρίνεται σκόπιμο η ύπαρξη μιας εκτενέστερης αναφοράς στους διάφορους μέσους, αλλά περισσότερο στη μεταξύ των σχέση. Οι βασικοί μέσοι που υφίστανται είναι ο αριθμητικός μέσος (arithmetic mean-AM), η ενεργός τιμή ή τετραγωνικός μέσος (root mean square-RMS ή quadratic mean), ο γεωμετρικός μέσος (geometric mean-GM) και ο αρμονικός μέσος (harmonic mean-HM). Οι τύποι υπολογισμού των είναι οι ακόλουθοι:

$$AM = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \tag{8}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$
(9)

$$GM = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \ldots \cdot x_n} \tag{10}$$

$$HM = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}$$
(11)

Όπου n ο αριθμός των δειγμάτων.

Από τα παραπάνω μπορεί σχετικά εύκολα να δειχθεί πως:

$$\sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \ge \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \ge \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \ge \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}$$
(12)

Δηλαδή πως:

$$\underline{RMS} \ge \underline{AM} \ge \underline{GM} \ge \underline{HM} \tag{13}$$

Με την ισότητα να ισχύει αν και μόνο αν:

$$x_1 = x_2 = \dots = x_n \tag{14}$$