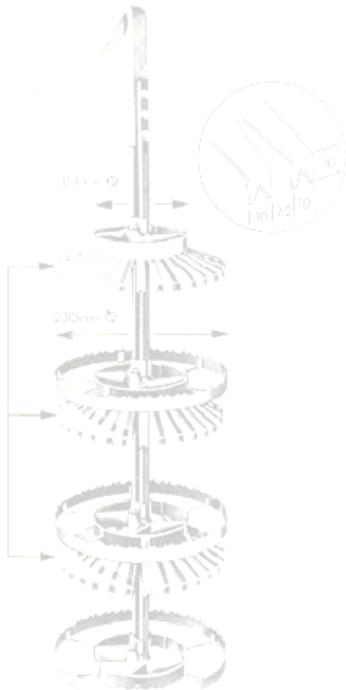
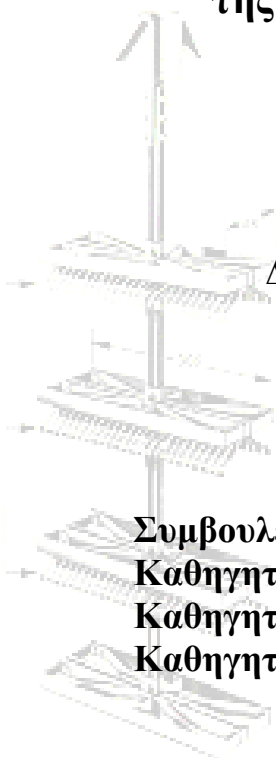




Πρόεδρος: Καθηγητής Παναγιώτης Φωτήλας



**Συμβολή στην Ανάπτυξη Πληροφοριακού Συστήματος Ελέγχου
της Βιομηχανικής Παραγωγής Ανοδιωμένου Αλουμινίου**



Διδακτορική Διατριβή
Αθανασίου Μπατζιά
Αναλυτή Συστημάτων

Διεύθυνση Πληροφορικής – Εθνική Τράπεζα της Ελλάδος

Συμβουλευτική Επιτροπή
Καθηγητής Παναγιώτης Φωτήλας (Επιβλέπων)
Καθηγητής Νικόλαος Μπλέσιος
Καθηγητής Γεώργιος Μπατής

Μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής

Καθηγητής Π. Φωτήλας^{*}, Τμ. Βιομ. Διοίκ. & Τεχνολ., ΠΑΠΕΙ

Καθηγητής Ν. Μπλέσιος^{}, Τμ. Βιομ. Διοίκ. & Τεχνολ., ΠΑΠΕΙ**

Καθηγητής Γ. Μπατής^{}, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ**

Καθηγητής Σ. Καρβούνης, Τμ. Οργάν. & Διοίκ. Επιχειρ., ΠΑΠΕΙ

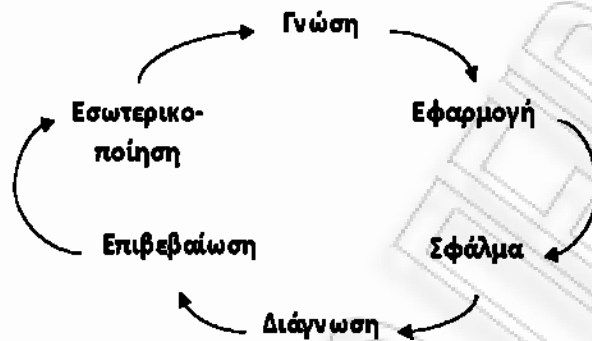
Αναπλ. Καθηγητής Μ. Βίρβου, Τμ. Πληροφορικής, ΠΑΠΕΙ

Επικ. Καθηγητής Δ. Γκιζόπουλος, Τμ. Πληροφορικής, ΠΑΠΕΙ

Επικ. Καθηγητής Δ. Σιδηράς, Τμ. Βιομ. Διοίκ. & Τεχνολ., ΠΑΠΕΙ

^{*} *Εποπτεύων*

^{**} *Μέλος της Συμβουλευτικής Επιτροπής*



"Πη παρέβην; τι δ` έρεξα; τι μοι δέον ουκ ετελέσθη;" [Τι έκανα που δεν έπρεπε; Τι έκανα που έπρεπε; Τι έπρεπε να κάνω και δεν το έκανα.]

Πυθαγόρας

Knowing is not enough; we must apply!

Goethe

Science is facts; just as houses are made of stone, so is science made of facts; but a pile of stones is not a house, and a collection of facts is not necessarily science.

Jules Henri Poincaré

I think that only daring speculation can lead us further and not accumulation of facts.

Albert Einstein

With engineering, I view this year's failure as next year's opportunity to try it again. Failures are not something to be avoided. You want to have them happen as quickly as you can so you can make progress rapidly.

Gordon Moore, Intel Founder and Chairman

Περιεχόμενα

Πρόλογος	vi
1. Εισαγωγή	
1.1 Η ηλεκτροχημική επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών	1-1
1.2 Η παραγωγή του ανοδικώς οξειδωμένου αλουμινίου	1-5
1.3 Η βαφή του ανοδικώς οξειδωμένου αλουμινίου	1-10
2. Πολυκριτηριακή επιλογή μεθόδου ανοδίωσης του αλουμινίου	
2.1 Θέση και επίλυση του προβλήματος	2-1
2.2 Διερεύνηση από τεχνολογική άποψη	2-3
2.3 Διερεύνηση από οικονομική άποψη	2-5
2.4 Διερεύνηση από ολοκληρωμένη/τεχνοοικονομική άποψη	2-6
2.5 Σύνοψη – Συμπεράσματα	2-9
3. Βελτιστοποίηση της διεργασίας με συνδυασμό νευροασαφούς προσέγγισης και πολυκριτηριακής ανάλυσης	
3.1 Εισαγωγή	3-1
3.2 Μεθοδολογία	3-2
3.3 Νευροασαφής Προσέγγιση (TM)	3-5
3.4 Πολυκριτηριακή ανάλυση	3-8
3.5 Εφαρμογή της μεθόδου	3-10
3.6 Διερεύνηση οντολογικής σχέσης παραμέτρων ελέγχου	3-13
3.7 Σύνοψη – Συμπεράσματα	3-27
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I	3-36
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II	3-43
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III	3-44
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV	3-46
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V	3-47
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI	3-48
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VII	3-56
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VIII	3-58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IX	3-61
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ X	3-66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ XI	3-68
4. Δημιουργία Βάσης Γνώσης για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων της παραγωγής	
4.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο	4-1
4.2 Βάση πληροφοριών ελαττωμάτων/σφαλμάτων	4-7
4.3 Σύνθεση/ανάλυση/αναθεώρηση δένδρου σφαλμάτων	4-45
4.4 Διερεύνηση της επίδρασης του κόστους του σφάλματος – Εφαρμογή	4-60
4.5 Συζήτηση	4-72
4.6 Σύνοψη – Συμπεράσματα	4-75
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I	4-83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II	4-86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III	4-90
5. Βοηθούμενος από H/Y νευροασαφής έλεγχος της χημικής διεργασίας του αλκαλικού καθαρισμού	
5.1 Εισαγωγή	5-1
5.2 Μεθοδολογία	5-2
5.3 Εφαρμογή στην ελαχιστοποίηση των ελαττωματικών	5-4

5.4 Εφαρμογή στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων	5-7
5.5 Σύνοψη – Συμπεράσματα	5-11
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	5-13
6. Μελέτη της ρηγμάτωσης του ηλεκτροχημικά παραγόμενου στρώματος	
6.1 Εισαγωγή	6-1
6.2 Μεθοδολογία	6-2
6.3 Ανάπτυξη/Εφαρμογή	6-5
6.4 Συζήτηση	6-8
6.5 Σύνοψη – Συμπεράσματα	6-10
7. Γενίκευση της μεθόδου ηλεκτροχημικής παραγωγής προστατευτικών στρωμάτων με μίμηση της φυσικής παθητικοποίησης	
7.1 Εισαγωγή	7-1
7.2 Μεθοδολογία	7-2
7.3 Εφαρμογή	7-4
7.4 Συζήτηση	7-10
7.5 Σύνοψη – Συμπεράσματα	7-11
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	7-15
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ	7-16
8. Ανάπτυξη πληροφοριακού συστήματος τεχνικής υποστήριξης επιμεταλλωτών/ ανοδιωτών	
8.1 Εισαγωγή	8-1
8.2 Μεθοδολογία	8-2
8.3 Εφαρμογή σε μονάδες ηλεκτροχημικής επιμετάλλωσης	8-4
8.4 Εφαρμογή σε μονάδες ανοδίωσης του αλουμινίου	8-12
8.5 Επέκταση σε μετρολογικές εφαρμογές	8-17
8.6 Σύνοψη – Συμπεράσματα	8-25
9. Επέκταση του πληροφοριακού συστήματος στην εκπαίδευση προσωπικού και τη μεταφορά τεχνογνωσίας	
9.1 Εισαγωγή	9-1
9.2 Μεθοδολογία	9-2
9.3 Εφαρμογή	9-7
9.4. Σύνοψη – Συμπεράσματα	9-8
10 Περίληψη και Γενικά Συμπεράσματα	10-1

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή είναι μια συμβολή στην ανάπτυξη ενός πληροφοριακού συστήματος ελέγχου της βιομηχανικής παραγωγής ανοδιωμένου αλουμινίου. Στηρίζεται στην αντιστοίχιση προδιαγραφών προϊόντος και συνθηκών επεξεργασίας μέσω φυσικοχημικών υποδειγμάτων και εμπειρικών σχέσεων. Μέρος των σχέσεων αυτών επιβεβαιώθηκε και εξειδικεύθηκε πειραματικά με ταυτοποίηση των αντίστοιχων παραμέτρων, κυρίως στο Εργαστήριο Προσομοίωσης Βιομηχανικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Δεδομένα αναφερόμενα στις αντίστοιχες βιομηχανικές διεργασίες συλλέχθηκαν τόσο από μεγάλες όσο και από μικρομεσαίες επιχειρήσεις.

Το γενικευμένο διάγραμμα, που παρουσιάζεται στην συνέχεια υπό μορφή αλγοριθμικής διαδικασίας με 35 στάδια δραστηριοτήτων και 11 κόμβους απόφασης (για τη διασύνδεσή τους, βλ. Σχήμα Π.1) δίνει μια εικόνα της πορείας που ακολουθήθηκε στις περισσότερες περιπτώσεις μελέτης των βιομηχανικών διεργασιών που περιλαμβάνονται στα Κεφάλαια της διατριβής. Παρόλο ότι χρησιμοποιήθηκαν προχωρημένες υπολογιστικές τεχνικές και αναπτύχθηκε πρωτογενές λογισμικό, έγινε προσπάθεια ώστε τα τελικά αποτελέσματα να συνιστούν εύχρηστες μεθόδους. Η λογική αυτή και η ανάπτυξη αντίστοιχης τεχνογνωσίας στηρίχθηκαν σε προηγούμενες δημοσιευμένες εργασίες των μελών της συμβουλευτικής επιτροπής, Καθηγητών κ.κ. Π. Φωτήλα, Ν. Μπλέσιου και Γ. Μπατή.

Περιγραφή των σταδίων δραστηριότητας και των κόμβων απόφασης:

1. Καταγραφή των προδιαγραφών του προϊόντος.
2. Προσδιορισμός των σταδίων της επιφανειακής επεξεργασίας (ανοδίωσης/επιμετάλλωσης).
3. Αντιστοίχιση προδιαγραφών προϊόντος και συνθηκών επεξεργασίας.
4. Πειραματικός σχεδιασμός (Experimental Design) απαιτούμενων νέων μετρήσεων.
5. Εκτέλεση μετρήσεων σε προσομοιωτή με κλιμάκωση μεγέθους.
6. Διαστασιακή ανάλυση και προσδιορισμός του πλέον κατάλληλου συνόλου αδιάστατων ομάδων (εφαρμογή θεωρήματος Buckingham και μεθόδου Rayleigh).
7. Επεξεργασία των μετρήσεων και εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων των χρησιμοποιούμενων υποδειγμάτων.
8. Πειραματικός σχεδιασμός απαιτούμενων νέων μετρήσεων με κλιμάκωση μεγέθους του προσομοιωτή.

9. Εκτέλεση των μετρήσεων και εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων των χρησιμοποιούμενων υποδειγμάτων.
10. Κλιμάκωση μεγέθους με υπολογιστική προσομοίωση.
11. Βελτιστοποίηση των συνθηκών.
12. Καταγραφή σφαλμάτων στην παραγωγή και εντοπισμός των αντίστοιχων συμπτωμάτων στο επεξεργαζόμενο προϊόν/αντικείμενο.
13. Προσδιορισμός των σημείων ελέγχου της παραγωγής/επεξεργασίας και του αντίστοιχου διανύσματος-οδηγού.
14. Σύνθεση (αρχική ή συμπληρωματική) δένδρου σφαλμάτων για κάθε σημαντική απόκλιση τιμών ενδιάμεσων ή τελικών μεταβλητών/παραμέτρων.
15. Εντοπισμός διαθέσιμων μέσων επιβεβαίωσης του υποδεικνυόμενου μέσω Ανάλυσης Δένδρου Σφαλμάτων (Fault Tree Analysis – FTA) ενδιάμεσου ή τελικού αιτίου κάθε υπό διερεύνηση σφάλματος.
16. Καταγραφή (αρχική ή συμπληρωματική) των μεθόδων πρόληψης και a posteriori διόρθωσης των αστοχιών που οδηγούν σε ελαττωματικό προϊόν.
17. Εντοπισμός (αρχικός ή συμπληρωματικός) των διαθέσιμων μέσων και του κόστους αξιοποίησης αυτών.
18. Ανάλυση (αρχική ή συμπληρωματική) των υπάρχοντων/σχεδιαζόμενων δομών και γραφειοκρατικών διαδικασιών της παραγωγής, περιλαμβανομένου του ανθρώπινου δυναμικού.
19. Σχεδίαση (αρχική ή συμπληρωματική) των αλγοριθμικών διαδικασιών υλοποίησης των παραπάνω ενεργειών εντός ενιαίου πληροφοριακού συστήματος.
20. Ανάπτυξη (αρχική ή συμπληρωματική) του συστήματος σε περιβάλλον φιλικό για το χρήστη, με εφαρμογή γλώσσας προγραμματισμού ανώτερου επιπέδου, συμβατή με αντίστοιχη γλώσσα που χρησιμοποιείται σε ευρύτερης κυκλοφορίας προγράμματα.
21. Σχεδίαση (αρχική ή συμπληρωματική) των πρωτοκόλλων και διεπιφανειών σύνδεσης του συστήματος με εσωτερικά σημεία ελέγχου και εξωτερικές βάσεις πληροφοριών, περιλαμβανομένης της εξόρυξης δεδομένων από ένδο-ή δια-δικτυακούς τόπους, με άμεσο ή έμμεσο (δηλ. μέσω ευφυούς πράκτορα – intelligent agent) τρόπο.
22. Δημιουργία του πυρήνα βάσης γνώσης (Knowledge Base – KB) με οντολογική προσέγγιση, στηριζόμενη σε έννοιες/σχέσεις από τη Φυσικοχημεία (κυρίως Ηλεκτροχημεία και Φαινόμενα Διεπιφανειακών Τάσεων με έμφαση στην Κινητική και Ισορροπία), την Οικονομική και την Πληροφορική.

23. Εμπλουτισμός της KB με βασικά δεδομένα από τη συγκεκριμένη Βιομηχανική Μονάδα, την τεχνογνωσία εμπειρογνομώνων και την τεχνική βιβλιογραφία.
24. Σύνδεση off-line του συστήματος με την παραγωγική διαδικασία και δοκιμαστική λειτουργία με τροφοδοσία με ποσοτικά/ποιοτικά δεδομένα μεταβλητών/παραμέτρων της ροής κατά παρτίδες και δειγματοληψία σε πραγματικό χρόνο (real-time sampling).
25. Συνέχιση λειτουργίας χωρίς αλλαγή συνθηκών, με παράλληλη (i) αποστολή πληροφοριών/δεδομένων στην KB για παρουσιαζόμενες μεταβολές δεικτών τιμών που συνδέονται με τη συχνότητα εμφάνισης σφαλμάτων/ατελειών/αποκλίσεων/αστοχιών και (ii) λήψη πληροφοριών/εκτιμήσεων για την αναμενόμενη εξέλιξη των τιμών των ελεγχόμενων μεταβλητών/παραμέτρων.
26. Εκτίμηση του δείκτη σημαντικότητας για κάθε ένα από τα τελικά αίτια.
27. Εκτίμηση των στοιχείων της πολυκριτηριακής μήτρας κατάταξης των τελικών αιτίων, λογιζομένων ως εναλλακτικών λύσεων.
28. Εκτίμηση των στοιχείων του διανύσματος των βαρών.
29. Κατάταξη των τελικών αιτίων με πολυκριτηριακή ανάλυση και ορισμός περιοχής ανοχής ευαισθησίας για την τελική πρόκριση εναλλακτικής λύσης.
30. Ανάλυση ευαισθησίας/ευρωστίας του πρώτου κατά φθίνουσα σειρά προτίμησης τελικού αιτίου.
31. Ανάλυση ευαισθησίας/ευρωστίας (sensitivity/robustness) όλων των εναλλακτικών λύσεων και επανεκτίμηση του διαστήματος αβεβαιότητας των στοιχείων της πολυκριτηριακής μήτρας και του διανύσματος των βαρών.
32. Πειραματικές μετρήσεις για την επαλήθευση του προτεινόμενου αιτίου του σφάλματος.
33. Πολυκριτηριακή κατάταξη των θεραπευτικών προτάσεων (remedial proposals).
34. Εφαρμογή της θεραπευτικής πρότασης που είναι πρώτη μεταξύ αυτών που δεν έχουν εφαρμοσθεί ακόμη.
35. Ενημέρωση/αναδόμηση της KB και πληροφοριακή αλληλεπίδραση με τα στάδια της αλγοριθμικής διαδικασίας.
 - A. Υπάρχουν επαρκή δεδομένα για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών;
 - B. Είναι εφικτή η επέκταση του σχεδιασμού των μετρήσεων με κλιμάκωση μεγέθους του προσομοιωτή;
 - C. Διαπιστώνετε σφάλμα λόγω μη συμμόρφωσης ενδιάμεσου/τελικού προϊόντος με τις προδιαγραφές;
 - D. Υπάρχει έτοιμο δένδρο σφαλμάτων στην KB;
 - E. Είναι η εκτιμώμενη ευαισθησία εκτός της περιοχής ανοχής;

- F. Είναι δυνατή η διεύρυνση της περιοχής ανοχής, ώστε να είναι αποδεκτή η προτεινόμενη λύση;
- G. Έχει γίνει επανεκτίμηση του διαστήματος αβεβαιότητας των στοιχείων της πολυκριτηριακής μήτρας και του διανύσματος των βαρών;
- H. Επαληθεύεται;
- I. Παρατηρείται εξάλειψη του σφάλματος;
- J. Υπάρχει άλλη διαθέσιμη θεραπεία;
- K. Είναι επαρκή τα νέα δεδομένα για την αναθεώρηση του σταδίου 25 με τη διεξαγωγή περισσότερων ή/και διαφοροποιημένων μετρήσεων;

Ευχαριστώ όσους με διευκόλυναν στην απόκτηση στοιχείων από την βιομηχανική πράξη, διαδικασία που αποδείχθηκε επίπονη και χρονοβόρα, στην επιτυχία της οποίας συνέβαλε αποφασιστικά η προθυμία στελεχών επιχειρήσεων και οργανισμών που είχαν διοικηθεί από τους Καθηγητές κ.κ. Π. Φωτήλα (EAB) και Ν. Μπλέσιο (EOMEX). Ακόμη, ευχαριστώ το επιστημονικό προσωπικό του παραπάνω αναφερόμενου Εργαστηρίου για τη διάθεση του απαραίτητου εξοπλισμού προκειμένου να πραγματοποιήσω τις απαιτούμενες πειραματικές δοκιμές.

Επίσης, ευχαριστώ τον Πρόεδρο της Επιτροπής Ερευνών του ΚΕΠΠ Καθηγητή κ. Λ. Λάιο που εισηγήθηκε την οικονομική υποστήριξη της συμμετοχής μου σε δύο διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια, όπου ανακοινώθηκαν (και περιλήφθηκαν στις αντίστοιχες περιοδικές εκδόσεις*) 5 εργασίες, στηριζόμενες σε υλικό της διατριβής ή/και μεθόδους τεχνικές που αναπτύχθηκαν σ' αυτήν. Τέλος, ευχαριστώ τις Διευθύνσεις Πληροφορικής και Εκπαίδευσης της Εθνικής Τράπεζας της Ελλάδος που ανταποκρίθηκαν θετικά σε σχετικό αίτημά μου και διευκόλυναν με πολλούς τρόπους τη διεξαγωγή του ερευνητικού έργου.

* P. Fotilas, A. F. Batzias, Estimating the Al anodic oxide film porosity as a function of electrochemical processing conditions at industrial level, 8th Europ. Symp. on Electrochemical Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering (Europ. Fed. Chem. Eng.), Prague, Czech Rep., 2008, pp. 245-260.

P. Fotilas, A. F. Batzias, C. G. Siontorou, Learning by doing via biomonitoring the rehabilitation of Pb-contaminated industrial sites. Symp. on Environmental Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering (Europ. Fed. Chem. Eng.), Prague, Czech Rep., 2008.

A. F. Batzias, Knowledge management in soil bioremediation by means of model based reasoning (MBR). Symp. on Environmental Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering (Europ. Fed. Chem. Eng.), Prague, Czech Rep., 2008.

P. Fotilas, A. F. Batzias, Knowledge Acquisition within a Network of Industrial Laboratories Performing Quality Specifications Testing, 8th Joint Conference on Knowledge - Based Software Engineering 2008 (JCKBSE 08, M. Virvou and T. Nakamura, Eds.) in «Frontiers in Artificial Intelligence and Applications», IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, Vol. 180, L.C. Jain and R.J. Howlett, Eds. 2008, pp. 337-346.

N. P. Blesseos, A. F. Batzias, Knowledge Acquisition/Transformation to Meet the Quality Needs of the Metallic Construction Market, 8th Joint Conference on Knowledge - Based Software Engineering 2008 (JCKBSE 08, M. Virvou and T. Nakamura, Eds.) in «Frontiers in Artificial Intelligence and Applications», IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, Vol. 180, L.C. Jain and R.J. Howlett, Eds. 2008, pp. 327-336.

1 Εισαγωγή

1.1 Η ηλεκτροχημική επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών

Η ανάπτυξη ενός συστήματος βελτιστοποίησης των ηλεκτροχημικών διεργασιών, που ακολουθούνται στην κατεργασία μεταλλικών επιφανειών από αυτοτελείς μικρομεσαίες βιομηχανικές μονάδες ή τμήματα διεργασιών ενταγμένα σε μεγάλες βιομηχανίες (π.χ. ΕΑΒ), απαιτεί κατανόηση του ρόλου της ηλεκτρικής ενέργειας τόσο από τεχνολογική/λειτουργική όσο και από οικονομική/επιχειρησιακή άποψη. Ο ρόλος αυτός αναφέρεται αφενός στη σύνδεση ενέργειας-μάζας και αφετέρου στη διαμόρφωση του λειτουργικού/μεταβλητού κόστους, του οποίου η ενεργειακή συνιστώσα είναι η πλέον σημαντική στις ηλεκτροβόρες βιομηχανικές μονάδες του είδους αυτού.

Όπως είναι γνωστό, σε ένα γραμμοϊσοδύναμο (g-eq) ιόντος περιέχονται τόσα γραμμάρια από το ιόν όσο είναι το γραμμοϊόν (mol) του διαιρεμένο με τον αριθμό φορτίων, n . Σε ένα mol, όμως, από οποιαδήποτε ιόν (M^{n+} ή A^{n-}) περιέχονται N ιόντα και αντίστοιχα σε ένα g-eq ιόντος (M^{n+} ή A^{n-}) περιέχονται N/n ιόντα ($N = 6,023 \times 10^{23}$, n =στοιχειώδη φορτία του ιόντος). Εφόσον κάθε ιόν έχει φορτίο ne (e =το φορτίο του ηλεκτρονίου), τα N/n ιόντα θα έχουν φορτίο ίσο με Ne . Δηλ. τα ιόντα που υπάρχουν σε ένα g-eq του θα έχουν συνολικά φορτίο $+Ne = 6,02214 \times 10^{23} \times 1,602177 \times 10^{-19} \text{ Cb} = 96485,3 \text{ Cb} \approx 96500 \text{ Cb}$ αν αυτά είναι κατιόντα (M^{n+}) και $-Ne = -96500 \text{ Cb}$ αν αυτά είναι ανιόντα (A^{n-}).

Επομένως, για να εξουδετερωθεί το φορτίο που υπάρχει σε ένα g-eq οποιουδήποτε ιόντος πρέπει κατά την ηλεκτρόλυση (i) αν αυτά είναι κατιόντα να πάρουν στην κάθοδο φορτίο ίσο με $-Ne = -96500 \text{ Cb}$ και (ii) αν είναι ανιόντα να αποδώσουν στην άνοδο $-Ne = -96500 \text{ Cb}$. Η ποσότητα, λοιπόν, ηλεκτρισμού που χρειάζεται για να ηλεκτρολυθεί (δηλ. για να αποθέεται ή να αποβάλλεται ή να εκλύεται) ένα γραμμοϊσοδύναμο (g-eq) από οποιοδήποτε ιόν είναι σταθερή και ίση με 96500 Cb (νόμος Faraday). Η σταθερή αυτή ποσότητα των 96500 Cb/g-eq ονομάζεται σταθερά Faraday (F).

Με βάση το νόμο του Faraday μπορούμε να προσδιορίσουμε: (α) τη μάζα ιόντος, που ηλεκτρολύεται όταν περάσει ορισμένο φορτίο, (β) το γραμμοϊσοδύναμο (g-eq) ενός ιόντος, (γ) το ακριβές ατομικό βάρος ενός στοιχείου, εφόσον γνωρίζουμε το ατομικό βάρος του με προσέγγιση, (δ) την περιεκτικότητα ή τη συγκέντρωση που είχε το διάλυμα πριν να αρχίσει η ηλεκτρόλυση, κα.

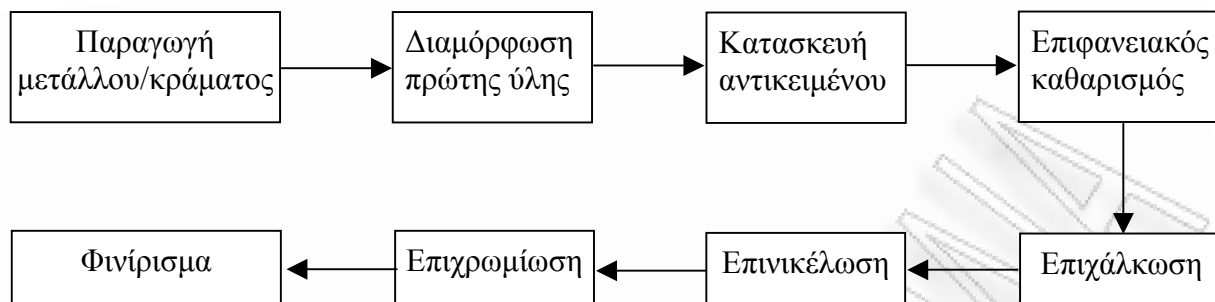
Το φορτίο που περνάει από μια συσκευή ηλεκτρόλυσης (βολτάμετρο) μπορεί να υπολογισθεί από τις σχέσεις που δίνονται στο δυναμικό ηλεκτρισμό $Q=It$, $Q=Ut/R$, όπου Q

το φορτίο (Cb), I η ένταση του ρεύματος (A), t ο χρόνος (s), U η διαφορά δυναμικού στα άκρα της συσκευής (V) και R η ολική αντίσταση που έχει το κύκλωμα (Ohm).

Πέραν αυτών, το ηλεκτρικό φορτίο που περνάει από μια συσκευή μπορεί να υπολογισθεί και από το πόσα g-eq ή g ενός ιόντος ηλεκτρολύονται ταυτόχρονα είτε στην ίδια συσκευή είτε σε άλλη συνδεδεμένη σε σειρά με αυτή. Μπορεί, επίσης, να υπολογισθεί και από τον όγκο που έχει το αέριο που εκλύεται κατά την ηλεκτρόλυση. Έτσι, όταν το ιόν είναι A^- (π.χ. Cl^-) ή H^+ , τότε όταν περάσουν 96500 Cb εκλύεται αέριο A_2 (π.χ. Cl_2 ή H_2) που έχει όγκο 11,2 L σε ΚΣ, ενώ όταν το ιόν είναι A^{2-} (π.χ. O^{2-}) τότε το αέριο που εκλύεται A_2 (π.χ. O_2) έχει όγκο 5,6 L σε ΚΣ. Σε ορισμένες περιπτώσεις το φορτίο που περνάει από μία συσκευή δίνεται έμμεσα με τον όγκο του κροτούντος αερίου που σχηματίζεται. Το κροτούν αέριο είναι μίγμα που περιέχει H_2 και O_2 σε αναλογία όγκων 2:1.

Παλαιότερα χρησιμοποιούσαν την έκφραση 'ηλεκτροχημικό ισοδύναμο' που παριστάνει τη μάζα του ιόντος που ελευθερώνεται στην κάθοδο ή στην άνοδο όταν περάσει από τη συσκευή φορτίο ίσο με 1 Cb. Δηλ. το ηλεκτροχημικό ισοδύναμο (σε g/Cb) ενός ιόντος είναι ίσο με το g-eq αυτού (σε g/g-eq) διαιρεμένο με 96500 Cb/g-eq.

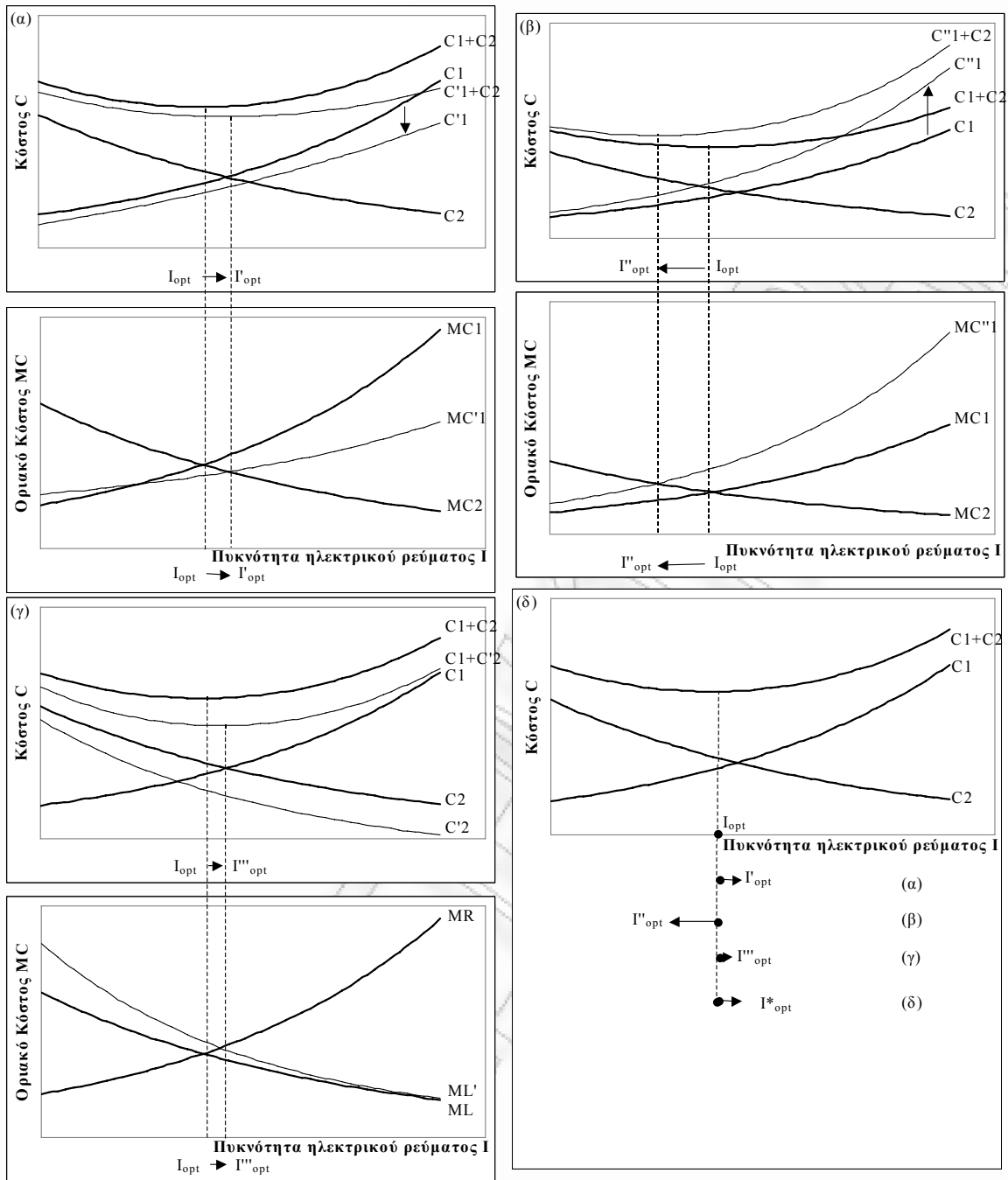
Από τεχνοοικονομική άποψη, η σταθερά Faraday, είναι εξαιρετικά χρήσιμη, επειδή συνδέει το ενεργειακό κόστος (που είναι κύριο συστατικό του λειτουργικού ή μεταβλητού κόστους) με το κεφαλαιακό ή σταθερό κόστος διαμέσου των αποσβέσεων. Η σύνδεση αυτή καθίσταται εφικτή με τον υπολογισμό του χρόνου απασχόλησης της βιομηχανικής εγκατάστασης προκειμένου να επιτευχθεί το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, αν επιδιώκεται η επιχάλκωση χάλυβα με $5,68 \text{ g Cu/dm}^2$, όταν η πυκνότητα του χρησιμοποιούμενου συνεχούς ρεύματος είναι $3,2 \text{ A/dm}^2$, τότε ο απαιτούμενος χρόνος t (s) δίνεται από τη σχέση $3,2 t/96485,38 = 5,68/(63,54/2)$ ή $t = 5390,75 \text{ s}$ ή $89,844 \text{ min}$ ή $89 \text{ min } 51 \text{ s}$, όπου 63,54 είναι το ατομικό βάρος του χαλκού. Ο συνεχής έλεγχος της διεργασίας μπορεί να γίνεται με μετρήσεις του εκλύομένου οξυγόνου στην άνοδο, το οποίο (πρέπει να) είναι $[(3,2 \text{ A/dm}^2)(5384 \text{ s})/96485,3 \text{ Cb}](22,4 \text{ L})/4 = 1,001 \text{ L/dm}^2$ σωρευτικά ή $11,14 \text{ mL}/(\text{dm}^2 \text{ min})$. Από τον τρόπο υπολογισμού φαίνεται ότι πρόκειται για μέση τιμή παροχής οξυγόνου ανά dm^2 επιφάνειας και επομένως είναι ενδεχόμενο άλλα αντικείμενα να επιχάλκωνονται λιγότερο και άλλα περισσότερο, λόγω διαφορετικής θέσης στο λουτρό της επιμετάλλωσης. Όταν οι αποκλίσεις αυτές είναι μεγαλύτερες ενός προκαθορισμένου ορίου ανοχής, χαρακτηρίζονται ως ελαττώματα (βλ. επόμενα Κεφάλαια της παρούσας εργασίας). Αλλά και όταν είναι μικρότερες του ορίου αυτού είναι δυνατόν να προκαλέσουν πρόβλημα συνάφειας, όταν η επιχάλκωση είναι απλώς ένα στάδιο της παραγωγής επιχρωμιωμένων αντικειμένων, σύμφωνα με την παρακάτω αλληλουχία διεργασιών.



Από καθαρά οικονομική άποψη, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο προσδιορισμός των τιμών των μεταβλητών ελέγχου ή παραμέτρων της ηλεκτροχημικής επεξεργασίας (επιμετάλλωσης ή ανοδίωσης), ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος ανά μονάδα επιφάνειας του ηλεκτρολυτικά επεξεργαζόμενου μετάλλου. Βασική μεταβλητή ελέγχου είναι η πυκνότητα, I (A/dm^2), του ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία μαζί με το χρόνο επιμετάλλωσης/ανοδίωσης προσδιορίζουν το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας (Cb/dm^2), άρα τη μάζα και το πάχος του στρώματος, το οποίο πρέπει να είναι σύμφωνο με προδιαγραφές που τίθενται από τον πελάτη ή την αγορά. Αυξανόμενη της I , αυξάνεται το λειτουργικό κόστος C_1 (περιλαμβανομένων του κόστους ψύξης και των απωλειών υλικών/ενέργειας), ενώ μειώνεται το κεφαλαιακό κόστος C_2 (λογιζόμενο μέσω των αποσβέσεων) αφού μειώνεται ο χρόνος απασχόλησης του πάγιου εξοπλισμού που απαιτείται για την επιμετάλλωση ή ανοδίωση συγκεκριμένης παρτίδας προϊόντων*. Η βέλτιστη πυκνότητα I_{opt} προσδιορίζεται ως σημείο ισορροπίας της διεκυστίνδας (trade-off) μεταξύ C_1 και C_2 , το οποίο συμπίπτει με την τετμημένη του ελαχίστου της καμπύλης C_1+C_2 (βλ. άνω διάγραμμα Σχήματος 11α), όπου $d(C_1 + C_2)/dI = 0$ ή $dC_1/dI = -dC_2/dI$ ή $MC_1=MC_2$ (MC = οριακό ή διαφορικό κόστος – βλ. κάτω διάγραμμα Σχήματος 1.1α).

Με την προσθήκη ορισμένων χημικών ενώσεων (οι οποίες φέρονται στο εμπόριο με τη γενική ονομασία 'πρόσθετα', πολλές φορές χωρίς να δηλώνεται η ακριβής σύστασή τους) στο ηλεκτρολυτικό λουτρό, αυξάνεται η ηλεκτροχημική απόδοση, με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος ψύξης και απωλειών υλικών/ενέργειας, οπότε η καμπύλη C_1 γίνεται λιγότερο απότομη και μετατοπίζεται στη θέση C'_1 , με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του

* Η πυκνότητα I του ρεύματος σχετίζεται και με τη χρησιμοποιούμενη συγκέντρωση ηλεκτρολύτη. Π.χ., η επιχάλκωση σε λουτρό υψηλής συγκέντρωσης σε φθοριοβορικό χαλκό και οξύ (450 g/L και 40,5 g/L, αντίστοιχα) γίνεται με $I = 12,5 - 35,0 A/dm^2$ σε $pH = 0,2 - 0,6$ έναντι της επιχάλκωσης σε λουτρό χαμηλής συγκέντρωσης σε φθοριοβορικό χαλκό και οξύ (225 g/L και 15 g/L, αντίστοιχα) γίνεται με $I = 7,5 - 12,5 A/dm^2$ σε $pH = 1,0 - 1,7$. Η διαφοράς αυτές είναι περισσότερο έντονες όταν υπάρχει κίνδυνος απώλειας πολύτιμου μετάλλου. Π.χ., η επαργύρωση σε λουτρό υψηλής συγκέντρωσης σε κυανιούχο άργυρο – κάλιο (15 – 40 g/L) γίνεται με $I = 0,5 - 4,0 A/dm^2$ έναντι της επαργύρωσης σε λουτρό χαμηλής συγκέντρωσης σε κυανιούχο άργυρο – κάλιο (5 – 20 g/L) γίνεται με $I = 0,1 - 0,7 A/dm^2$.



Σχήμα 1.1. Προσδιορισμός της βέλτιστης πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος, λαμβανόμενης ως μεταβλητής ελέγχου (control variable) της υπό μελέτη ηλεκτροχημικής διεργασίας.

συνολικού κόστους σε ένα νέο σημείο $I'_{opt} > I_{opt}$ (βλ. Σχήμα 1.1α). Παράλληλα, όμως, η αγορά/εφαρμογή των ‘προσθέτων’ συνεπάγεται αύξηση του λειτουργικού κόστους, με αποτέλεσμα η καμπύλη C_1 να γίνεται περισσότερο απότομη και να μετατοπίζεται στη θέση C''_1 με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους σε ένα νέο σημείο $I''_{opt} < I_{opt}$ (βλ. Σχήμα 1.1β). Από την άλλη πλευρά, το κεφαλαιακό κόστος επηρεάζεται έμμεσα, επειδή η αυξημένη ηλεκτροχημική απόδοση ελαττώνει το χρόνο απασχόλησης του πάγιου εξοπλισμού που απαιτείται για την ηλεκτροχημική επεξεργασία

συγκεκριμένης παρτίδας προϊόντων (χωρίς να αυξάνεται η ονομαστική πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία επηρεάζει το κόστος, δεδομένου ότι αυξάνεται η πραγματική πυκνότητα, λογιζόμενη στην επιφάνεια του προς επεξεργασία αντικειμένου, με παράλληλη μείωση των θερμικών απωλειών). Αποτέλεσμα αυτού είναι να γίνεται η καμπύλη C_2 περισσότερο απότομη και να μετατοπίζεται στη θέση C'_2 , οπότε λαμβάνεται $I''_{opt} > I_{opt}$ (βλ. Σχήμα 1.1γ).

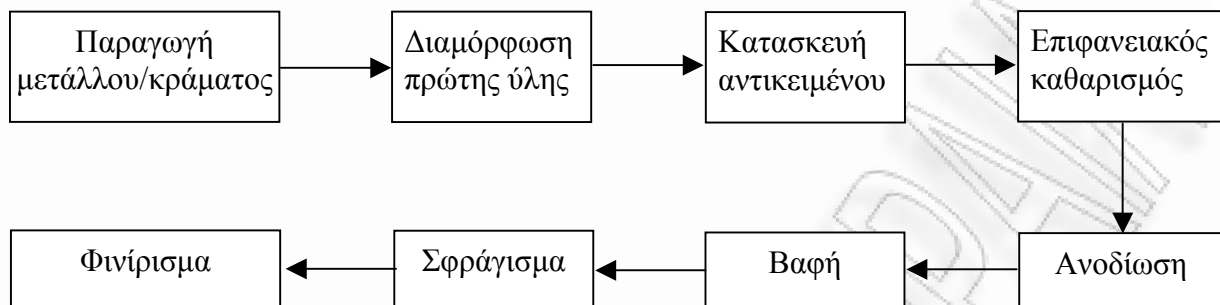
Το συνολικό αποτέλεσμα των επιμέρους επιπτώσεων στο I_{opt} φαίνεται στο Σχήμα 1.1δ, από όπου προκύπτει $I^*_{opt} > I_{opt}$, δηλ. βελτίωση της ηλεκτροχημικής διεργασίας όχι μόνο από οικονομική άποψη αλλά και από άποψη αξιοπιστίας/ποιότητας του προϊόντος, αφού σταθεροποιείται η ανταπόκριση προς τις προδιαγραφές που λαμβάνονται υπόψη στον προσδιορισμό των τιμών των μεταβλητών ελέγχου πριν την έναρξη επεξεργασίας κάθε παρτίδας προϊόντων.

1.2 Η παραγωγή του ανοδικώς οξειδωμένου αλουμινίου

Η διαδικασία της παραγωγής του ανοδικωμένου αλουμινίου περιλαμβάνει αρκετά στάδια, των οποίων το είδος και η σειρά εξαρτώνται από τις επιθυμητές ιδιότητες του παραγόμενου προϊόντος. Το κυρίαρχο στάδιο είναι η ηλεκτροχημική οξείδωση της επιφάνειας του κατεργαζόμενου αντικειμένου και για το λόγο αυτόν υπάρχουν περιγραφές στην τεχνική βιβλιογραφία όπου διακρίνονται τέσσερις ομάδες υπο-σταδίων: της παραγωγής του μετάλλου/κράματος, των διεργασιών πριν την ανοδίωση, της ανοδίωσης, των διεργασιών μετά την ανοδίωση. Είναι προφανές ότι ο όρος 'ανοδίωση του αλουμινίου' είναι δυνατόν να αναφέρεται είτε (υπό στενή έννοια) στο μεμονωμένο στάδιο της ηλεκτροχημικής οξείδωσης είτε (υπό ευρεία έννοια) σε όλα τα πριν/κατά/μετά την ηλεκτροχημική οξείδωση στάδια που γίνονται χάριν της παραγωγής του ανοδικωμένου προϊόντος.

Στην παρούσα εργασία, όπου ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος σε σχέση με τις συνθήκες παραγωγής του (με έμφαση στον εντοπισμό/ταυτοποίηση/εξάλειψη ατελειών και ελαττωμάτων), λαμβάνονται υπ' όψη όλα τα στάδια αφού ένα ελάττωμα που γίνεται φανερό σε οποιοδήποτε στάδιο (ακόμη και κατά τη χρήση του τελικού προϊόντος) είναι δυνατό να οφείλεται σε συνδυασμό συνθηκών παραγωγής, όπως αυτός εφαρμόστηκε σε ένα ή περισσότερα στάδια ανάντη. Για παράδειγμα, η ανομοιόμορφη βαφή όπως αυτή διαπιστώνεται μετά την τέλεση του αντίστοιχου σταδίου, είναι δυνατόν να οφείλεται είτε σε ανομοιόμορφο πάχος ή πορώδες του ανοδικού στρώματος (που δημιουργήθηκε ένα στάδιο πριν) είτε σε προσμίξεις στο βασικό μέταλλο/κράμα (που δημιουργήθηκε πέντε στάδια πριν), όπως φαίνεται στην παρακάτω αλληλουχία ορισμένων

κυρίων σταδίων που περιλαμβάνονται σε μία συνηθισμένη διαδικασία παραγωγής ανοδιωμένου αλουμινίου (σε λουτρό θειικού οξέως) για οικοδομική χρήση.



Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι επιθυμητές ιδιότητες/χαρακτηριστικά του προϊόντος είναι κατ'αρχήν ένα σύνολο εξαρτημένων μεταβλητών σε σχέση με τις συνθήκες παραγωγής που είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές, αφού οι ιδιότητες εξαρτώνται από τις συνθήκες από καθαρά φυσικοχημική άποψη. Ως πρακτική διαδικασία παραγωγής όμως συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο: οι συνθήκες παραγωγής εξαρτώνται/προσδιορίζονται από τις προδιαγραφές του προϊόντος. Σε κάθε περίπτωση, οι σχέσεις αιτίου-αποτελέσματος από φυσικοχημική άποψη είναι σταθερές και αποτελούν το υπόβαθρο για οποιαδήποτε παραγωγική διαδικασία. Επομένως, είναι βασικής σημασίας να διερευνήσουμε τις σχέσεις αυτές, αρχίζοντας από τη δομή του πορώδους ανοδικού στρώματος, το οποίο είναι αυτό που κυρίως ενδιαφέρει τη βιομηχανική πράξη, αφού είναι αυτό που ζητείται στην αγορά των κατασκευαστικών υλικών (π.χ. σε οικοδομικές εργασίες, οικιακές συσκευές, μέσα μεταφοράς).

Η δομή του πορώδους οξειδίου μελετήθηκε αρχικά από τους Rummel [1], Baumann [2], Edwards και Keller [3,4]. Ο Rummel [1] προσδιόρισε πυκνότητα πόρων $4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$. Η διάμετρος των πόρων υπολογίστηκε σε 10^3 \AA μέσω της ποσότητας του προσλαμβανόμενου ύδατος και με μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης. Ο Baumann αναφέρει ότι με την ανάπτυξη της στιβάδας του οξειδίου, η επιφάνεια ομαλοποιείται [2]. Παρατηρήθηκε ότι, σε λουτρό ανοδικής οξείδωσης θειικού ή οξαλικού οξέος, η διάμετρος των πόρων αυξάνει με την αύξηση της τάσης. Οι Fischer και Kurtz [5] αναφέρουν ότι η πυκνότητα των πόρων λεπτών στιβάδων παραχθεισών σε θειικό οξύ είναι περίπου 800 πόροι/m^2 (με διάμετρο $0,015 \mu\text{m}$, πορώδες 13,4%), ενώ σε οξαλικό οξύ είναι $60 \text{ πόροι/}\mu\text{m}^2$ (με διάμετρο $0,075 \mu\text{m}$, πορώδες 8-12%). Η εξέταση στιβάδων ανοδικώς οξειδωμένου αργιλίου (που κατασκευάστηκαν σε 2% οξαλικού οξέος και 48 V) με διπλή διάθλαση, ακτίνες X και περίθλαση ηλεκτρονίων [6, 7] έδειξε ότι πρόκειται για άμορφο υλικό. Ο Weiner [9], χρησιμοποιώντας μια θεωρητική σχέση, υπολόγισε πορώδες 4,3-4,4% στην περιοχή κοντά στο μεταλλικό υπόστρωμα και 15,5-16,9% πλησίον του ηλεκτρολύτη (σε λουτρό M θειικού οξέος, τάση 16 V και χρόνο 8

h). Η εξέταση δε παχέων στιβάδων (έως 0,8 mm) έδειξε ινώδη δομή προς την εξωτερική επιφάνεια και υποτυπώδη δομή προς την εσωτερική. Οι Kubaschewski και Evans [10] κατηγοριοποίησαν τους πόρους σε μακροπόρους (ορατούς με γυμνό οφθαλμό σε μεγέθυνση 30x) και μικροπόρους με μέση διάμετρο 0,04 μm .

Η δομή του πορώδους οξειδίου μελετήθηκε, επίσης, από τους Keller, Hunter και Robinson (KHR) [11], οι οποίοι διαπίστωσαν τα εξής: Το πορώδες στρώμα συνίσταται από εξαγωνικά κύτταρα (κυψελίδες) οξειδίου σε πυκνή διάταξη. Η κάθε κυψελίδα περιέχει έναν πόρο, ο οποίος εκτείνεται προς το μεταλλικό υπόστρωμα αλλά διαχωρίζεται από αυτό με μία στιβάδα συνεχούς οξειδίου. Η διάμετρος του κυττάρου είναι γραμμική συνάρτηση της τάσης ανοδικής οξείδωσης και δίνεται από τη σχέση $c = 2WE + p$, όπου c η διάμετρος του κυττάρου σε \AA , W το πάχος του τοιχώματος του κυττάρου σε $\text{\AA}/V$, E η τάση ανοδικής οξείδωσης σε V και p η διάμετρος του πόρου σε \AA . Στον Πίνακα 1.1 δίνονται τα p και W για τους συνήθως χρησιμοποιούμενους ηλεκτρολύτες. Επειδή αυξανόμενη της τάσης αυξάνεται το μέγεθος των κυττάρων, ο αριθμός αυτών (κατά συνέπεια και ο αριθμός των πόρων) ελαττώνεται για δεδομένη επιφάνεια (Πίνακας 1.2). Ομοίως μεταβάλλεται και ο όγκος του πορώδους.

Πίνακας 1.1. Η διάμετρος πόρου, p , και το πάχος του τοιχώματος του κυττάρου/κυψελίδας, W , σε συνήθως χρησιμοποιούμενους ηλεκτρολύτες

Ηλεκτρολύτης	p (\AA)	W ($\text{\AA}/V$)
4% φωσφορικό οξύ, 75 F	330	10,0
2% οξαλικό οξύ, 75 F	170	9,7
3% χρωμικό οξύ, 100 F	240	10,9
15% θειικό οξύ, 50 F	120	8,0

Πίνακας 1.2. Η πυκνότητα πόρων σε σχέση με την τάση ανοδίωσης (λουτρό 15% θειικού οξέος, 50 F)

Τάση (V)	Αριθμός πόρων/ in^2
15	498×10^9
20	334×10^9
30	179×10^9

Το πρότυπο KHR επιβεβαιώθηκε από τους Paolini et al [12] και Booker et al [13, 14], ενώ υιοθετήθηκε και από άλλους ερευνητές, όπως τους Nagayama και Tamura σε μελέτες τους για τη διαλυτοποίηση του ανοδικού οξειδίου [15, 16]. Οι Sacchi και Paolini [17],

αναφέρουν επίσης μείωση του αριθμού των πόρων ανοδικώς οξειδωμένου αργιλίου (σε θεικό οξύ 220 g/L, 21 °C) αυξανομένης της τάσης (Πίνακας 1.3).

Πίνακας 1.3. Η πυκνότητα πόρων σε σχέση με την τάση ανοδίωσης (λουτρό 220g/L θειικού οξέος, 70 F)

Πυκνότητα ρεύματος (A/dm ²)	Τάση (V)	Αριθμός πόρων/cm ²
1	11,9	12,24 x10 ¹⁰
1,5	14,1	9,88 x10 ¹⁰
2,5	16,1	8,12 x10 ¹⁰

Η διευθέτηση των πόρων, εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό των κρυστάλλων της μεταλλικής υποδομής, δεν είναι γενικά κάθετη προς την επιφάνεια [18]. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν [18] προσεγγίζουν ικανοποιητικά το πρότυπο των Keller, Hunter και Robinson [11] σε λουτρό 4% φωσφορικού οξέος (20 °C, 40 V): αναφέρουν διάμετρο πόρων 330±20 Å (από την αποτέμνουσα του διαγράμματος τάσης-διαμέτρου κυττάρων), διάμετρο κυττάρων 1260±200 Å και αριθμό πόρων 74±15 x10⁸/cm² ή 79±12 x10⁸/cm², χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού, αντίστοιχα.

Οι Paolini et al [19] εξέτασαν το πορώδες με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (αριθμός πόρων, N) ενώ με πειράματα προσρόφησης με συσκευή BET μέτρησαν τον όγκο, V_p , και την επιφάνεια, S , των πόρων προκειμένου να υπολογίσουν τη μέση ακτίνα R των πόρων από τη σχέση $V_p = N\pi R^2 h$, όπου h το ύψος του πόρου. Χρησιμοποιώντας τις τιμές της R για τον υπολογισμό της επιφάνειας από τη σχέση $S = 2\pi RNh$, οι τιμές επιφάνειας που προέκυψαν ήταν πολύ μικρότερες από αυτές που έδωσαν τα πειράματα προσρόφησης. Η απόκλιση αυτή αποδόθηκε σε παραμόρφωση της κυκλικής διατομής των πόρων, χωρίς όμως να αποδειχθεί πειραματικά.

Το σχήμα των πόρων κοντά στη διεπιφάνεια οξειδίου-ηλεκτρολύτη γίνεται κωνικό και το πορώδες αυξάνεται, καθώς, όπως είναι γενικά αποδεκτό, αυξανομένης της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη ή της θερμοκρασίας του λουτρού ανοδικής οξείδωσης αυξάνεται η διαλυτοποίηση στις παρυφές των πόρων. Το φαινόμενο αυτό επιτείνεται με την αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος λόγω της αύξησης των αταξιών. Κατά συνέπεια, σε πραγματικές συνθήκες, το σχήμα των πόρων είναι συνήθως ακανόνιστο. Επίσης, η παρουσία προσμείξεων στο αργίλιο (συνήθεις σε κράματα αυτού), τα οποία διαλυτοποιούνται στο λουτρό ανοδικής οξείδωσης κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης, συμβάλουν στο σχηματισμό μη κανονικών πόρων.

Σύμφωνα με τελευταίες μελέτες το είδος του κράματος αλουμινίου επηρεάζει το πορώδες και την κατανομή των χημικών στοιχείων συναρτήσει του πάχους [20, 21], με αποτέλεσμα η διαλυτική επίδραση του ηλεκτρολύτη να μην είναι ίδια (i) για διάφορα κράματα και (ii) για διάφορα είδη πόρων του ίδιου κράματος. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας του λουτρού της ανοδίωσης φαίνεται ότι συμβάλει στη μείωση της σκληρότητας της επιφάνειας του ανοδικού οξειδίου ακόμη και στην περιοχή των χαμηλών θερμοκρασιών, όπου όμως δεν παρατηρείται αντίστοιχη μείωση της αντίστασης στη φθορά [22]. Στη θερμοκρασιακή περιοχή άνω των 25 °C η αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά δυσμενώς τόσο στη σκληρότητα όσο και στην αντίσταση στη φθορά. Αυτά τα δυσμενή αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν στη διαλυτική επίδραση του λουτρού η οποία είναι εντονότερη πλησίον της κορυφής των πόρων.

Η επίδραση των μεταβλητών ελέγχου της ανοδίωσης στο πορώδες, όπως η ηλεκτρική τάση, οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρολυτών (π.χ. θειικού/οξαλικού) και η ταχύτητα ανάδευσης δεν είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθεί σε ένα εξηγητικό υπόδειγμα και για το λόγο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί πρόσφατα ο πολυπαραγοντικός πειραματικός σχεδιασμός [23], με περιορισμένη όμως επιτυχία, αφού δεν είναι δυνατόν να επεκταθούν/γενικευθούν τα σχετικά συμπεράσματα αλλά κάθε φορά πρέπει να διεξάγονται πειραματικές μετρήσεις ad hoc. Οι ανεξάρτητοι ανοδιωτές έχουν συνήθως τη μορφή μικρομεσαίων επιχειρήσεων (MME) οι οποίες δε διαθέτουν σχετικό know how ενώ συγχρόνως δεν μπορούν να αντέξουν το συνεπαγόμενο κόστος από τέτοιου είδους μετρήσεις. Παράλληλα, ο ανταγωνισμός στην αγορά δεν επιτρέπει αύξηση των τιμών, όταν μάλιστα είναι δυνατή η μερική υποκατάσταση του ανοδιωμένου αλουμινίου είτε με ίδιο μέταλλο που έχει υποστεί ηλεκτροστατική επικάλυψη/βαφή είτε με άλλα μη ανοδιωμένα κράματα που είναι κατάλληλα για ειδικές χρήσεις, όπου η ομοιογενής εμφάνιση και η μακροχρόνια προστασία από τη διάβρωση είναι δευτερεύουσας σημασίας [24].

Σχετικά με τα μη πορώδη οξείδια, ο Franklin [25] αναφέρει ότι έχουν κυψελιδική δομή παρόμοια με αυτή που έχουν τα πορώδη. Αναφέρει, επίσης, ότι με την αύξηση της τάσης σχηματισμού του οξειδίου, ο αριθμός των κυψελίδων ελαττώνεται και, καθώς καλύπτουν όλη την επιφάνεια, η διάμετρός τους αυξάνεται. Σε λουτρό 3% βορικού οξέος + 0,05% βόρακα (τάση 500 V, 20 °C, χρόνος οξείδωσης δεν αναφέρεται) ο αριθμός των κυττάρων/κυψελίδων ήταν $1,4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$. Σημειώνεται ότι υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής κυψελίδων τετραγωνικής διατομής με κατάλληλη διαμόρφωση της επιφάνειας του μητρικού μετάλλου πριν την ανοδίωση ενώ η διατομή των πόρων, η οποία είναι επίσης τετραγωνική στη βάση (δηλ. στη διεπιφάνεια πορώδους και μη-πορώδους οξειδίου), καθίσταται κυκλική στη

διεπιφάνεια οξειδίου-ηλεκτρολύτη [26]. Γενικότερα, η διαμόρφωση της επιφάνειας του μητρικού μετάλλου βάσει συγκεκριμένου υποδείγματος/προτύπου (pattern) συμβάλλει στην αύξηση της ομοιογένειας του ανοδικού στρώματος ενώ βελτίωση της δομής παρατηρείται και όταν υιοθετείται παροχή ηλεκτρικού φορτίου με παλμούς [27].

1.3 Η βαφή του ανοδικώς οξειδωμένου αλουμινίου

Η προσρόφηση χρωστικών σε ανοδικώς οξειδωμένο αργίλιο παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον όχι μόνο για λόγους διακοσμητικούς αλλά και στην αντιδιαβρωτική προστασία της οξειδωμένης επιφάνειας, καθ' όσον μάλιστα μετά τη βαφή ακολουθεί στεγανοποίηση.

Η καλή συγκράτηση και η αντοχή στο φως και τις καιρικές συνθήκες αποτελούν τα χαρακτηριστικά της επιτυχημένης βαφής. Πολλές από τις χρωστικές που σχηματίζουν λάκκα με το οξύδιο, όπως π.χ. η Alizarin Bordeaux R, έχουν τα χαρακτηριστικά αυτά σε ικανοποιητικό βαθμό. Ο Σκουλικίδης [28, 29] απέδειξε τη δυνατότητα βαφής του ανοδικώς οξειδωμένου αργιλίου με όλες τις γνωστές μεθόδους που χρησιμοποιούνται στη βαφή των υφάνσιμων ινών (Direct, πρόστυψη, δημιουργία επιφανειακών αζωτοχρωστικών). Έδειξε, επίσης, ότι παρ' ότου οι χρησιμοποιούμενες χρωστικές δεν σχηματίζουν πάντοτε λάκκα με το οξύδιο, μπορούν να το βάψουν και, με μη αντιστρεπτή φυσική κροκίδωση, να εισέρθουν στους πόρους του.

Οι χρησιμοποιούμενες χρωστικές ουσίες κατατάσσονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες:

- (α) Όξινες χρωστικές: Αυτές δεν ενώνονται με το οξύδιο για το σχηματισμό λάκκας, αλλά προσροφώνται με φυσικό τρόπο, όπως η όξινη χρωστική πορτοκαλλόχρουν II. Γενικά, η αντοχή των χρωστικών αυτών στο φως και στις καιρικές συνθήκες είναι μέτρια.
- (β) Χρωστικές που σχηματίζουν σύμπλοκα με μέταλλα: Αυτές ενώνονται χημικά με το οξύδιο του αργιλίου. Τυπικά παραδείγματα είναι οι χρωστικές που περιέχουν σαλικυλικές ομάδες, καθώς και η Chrome Fast Orange R και η Palatine Bordeaux RN. Όμως, δεν είναι γνωστό, εάν συμπλέκονται με το αργίλιο ή το αργίλιο ενώνεται με την υδροξυλική ή σουλφονική ομάδα των χρωστικών.
- (γ) Βασικές χρωστικές: Τυπικό παράδειγμα βασικής χρωστικής είναι η Rhodamine B. Προκειμένου να βελτιωθεί η πρόσληψή τους από το οξύδιο, χρησιμοποιούνται προστύμματα. Γενικά, η αντοχή τους στο φως είναι μικρή και συνεπώς χρησιμοποιούνται λιγότερο.

Η συνήθης θερμοκρασία βαφής είναι περίπου 65 °C. Με μείωση της θερμοκρασίας ελαττώνεται η αντοχή στο φως, ενώ σε θερμοκρασίες >70 °C υπάρχει κίνδυνος στεγανοποίησης πριν την πρόσληψη επαρκούς ποσότητας χρωστικής.

Οι χρωστικές που διαθέτουν ακόρεστες ομάδες ικανές να δημιουργήσουν σύμπλοκα με τα μέταλλα, όπως η ο-αμινοζωτοχρωστική, αφού κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τους ενωθούν με τον άργιλο, πιθανόν να διατηρούν διαθέσιμες κάποιες ακόρεστες ομάδες μετά τη βαφή με τις οποίες μπορούν να σχηματίσουν δεσμούς με μεταλλικά ιόντα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ακολουθεί σταθεροποίηση της βαφής σε λουτρό οξικού νικελίου ή αλάτων μολύβδου, χαλκού ή χρωμίου [30].

Ο Σκουλικίδης [28] μελέτησε την κινητική της προσρόφησης χρωστικών σε ανοδικώς οξειδωμένο αργίλιο, αφού προηγουμένως χρησιμοποίησε την προσρόφηση αυτή για την ταυτοποίηση ενός μη-πορώδους στρώματος οξειδίου δημιουργούμενου πάνω στην πορώδη στιβάδα (το οποίο ονόμασε $\gamma_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) και τη διάκρισή του από το πορώδες $\gamma_1\text{-Al}_2\text{O}_3$ [29]. Με τον τρόπο αυτό απέδειξε ότι η εξέλιξη της βαφής αμφοτέρων των οξειδίων με Orxanal RL ακολουθεί την κατά Wagner παραβολή εξανθήσεως και ότι η σταθερά της ταχύτητας για το $\gamma_1\text{-Al}_2\text{O}_3$ είναι ευθέως ανάλογη της πυκνότητας του ρεύματος παρασκευής. Αντίθετα, η ταχύτητα βαφής του $\gamma_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ είναι ανεξάρτητη της πυκνότητας ρεύματος παρασκευής του. Χρησιμοποιώντας διαφορετικές συγκεντρώσεις χρωστικής απεδείχθη η ισχύς της εξίσωσης Freundlich. Με βάση τα δεδομένα αυτά προέκυψε η ενέργεια ενεργοποίησης από την εξίσωση Arrhenius ίση με 21,45 kcal/mol και για τα δύο ανοδικά οξείδια του αργιλίου, ενώ προτάθηκε ο μηχανισμός της βαφής, ο οποίος επιβεβαιώθηκε ακολούθως με απ' ευθείας παρατήρηση στο μικροσκόπιο. Ο μηχανισμός που προτάθηκε θεωρεί αντίδραση αντιμετάθεσης μεταξύ της χρωστικής και του Al_2O_3 και τη δημιουργία λάκκας. Είναι πιθανόν, ότι τα πειράματα αυτά αποτέλεσαν την πρώτη δεδομένη επιβεβαίωση της θεωρίας της αταξίας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (σχετικά με χημική δράση, καθώς για την ηλεκτροχημική δράση υπήρξε προηγούμενη επιβεβαίωση).

Οι Giles et al. [31] έδειξαν ότι η προσρόφηση διαλυτοποιημένων οργανικών ουσιών σε ανοδικώς οξειδωμένο αργίλιο ακολουθεί πλήθος μηχανισμών, από τους οποίους εξακρίβωσε τους κάτωθι:

- (α) Σχηματισμός δεσμού υδρογόνου με την απόδοση πρωτονίου από τη διαλυτοποιημένη ουσία (π.χ. φαινόλη) προς το οξυγόνο του οξειδίου.
- (β) Ιοντοανταλλαγή ορισμένων ανιοντικών ουσιών, κυρίως θεικών εστέρων.
- (γ) Σχηματισμός άλατος (π.χ. από σουλφονικές αζωτοχρωστικές).
- (δ) Σχηματισμός χηλικής ένωσης (μεταξύ αργιλίου και ομάδων της διαλυτοποιημένης ουσίας με τον κατάλληλο προσανατολισμό).

Σε μια άλλη εργασία τους, οι Giles et al [32] μελέτησαν την προσρόφηση αρωματικών ενώσεων (κυρίως χρωστικών με σουλφονικές ομάδες) σε ανοδικώς οξειδωμένο αργίλιο σε

λουτρό χρωμικού οξέος. Διέκριναν τις αρωματικές ενώσεις σε αυτές που σχηματίζουν και σε αυτές που δεν σχηματίζουν χηλικά σύμπλοκα με το αργίλιο. Στην τελευταία περίπτωση, ο μηχανισμός περιλαμβάνει αντικατάσταση των σουλφονικών ομάδων των χρωστικών με υδροξύλια ή χρωστικές ομάδες προσαρτημένες στο οξείδιο και, συγχρόνως, ιοντοανταλλαγή των ανιοντικών μικκυλίων. Προτείνονται δε τα ακόλουθα στάδια προσρόφησης:

- (α) Μερική διαλυτοποίηση μίας επιφανειακής στιβάδας του οξειδίου.
- (β) Ταχεία προσάρτηση στην εξωτερική επιφάνεια στιβάδας διαλυτοποιημένης χρωστικής.
- (γ) Βραδεία διάχυση της διαλυτοποιημένης χρωστικής από τη στιβάδα που προσαρτήθηκε εξωτερικά προς την επιφάνεια του οξειδίου σχηματίζοντας μονομοριακό στρώμα.
- (δ) Διαπέραση (στην περίπτωση σουλφονικών ομάδων) και τελικά διάρρηξη της κρυσταλλικής δομής του οξειδίου.
- (ε) Βραδεία στεγανοποίηση των πόρων μέσω της ανάπτυξης κρυστάλλων βαιμίτου.

Κατά το στάδιο (α) μεταβάλλεται το εμβαδόν της διαθέσιμης επιφάνειας, ανάλογα με τον όγκο της χρησιμοποιούμενης χρωστικής. Η διαλυτοποίηση αυτή αποτελεί συνέχεια της διαλυτοποίησης που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ανοδικής οξείδωσης. Είναι ταχεία συγκριτικά με την προσρόφηση και ολοκληρώνεται εντός 5 min από της βύθισης του δοκιμίου στο λουτρό της χρωστικής. Στην εργασία αυτή αποδείχθηκε, επίσης, ότι η ταχύτητα προσρόφησης είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, ενώ η διάχυση των ανιόντων της χρωστικής στους πόρους θεωρείται το βραδύτερο στάδιο.

Βιβλιογραφία

- [1] Rummel Th. (1936). [The Growth and Structure of Electrolytically Formed Aluminum Oxide Films]. *Zeitschrift fuer Physik*, 99, 518-551.
- [2] Baumann W. (1939). [Production and Structure of Electrolytically Produced Aluminum Oxide Layers]. *Zeitschrift fuer Physik*, 111, 708-736.
- [3] Edwards JD, Keller F. (1941). Formation of Anodic Coatings on Aluminum. *Journal of Electrochemical Society*, 79, 135-144.
- [4] Edwards JD, Keller F. (1944). The Structure of Anodic Oxide Coatings. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 156, 288-300.
- [5] Fischer H., Kurtz F. (1942). Electron-Microscopic Picture of Anodic Oxide Films on Aluminium and their Growth. *Korrosion und Metallschutz*, 18, 42-49.
- [6] Huber K. (1945). Studien zur Chemie und zur Struktur anodisch erzeugter Niederschläge und Deckschichten - Die polarisationsoptische Analyse der dispersen Struktur oxydischer Deckschichten auf Aluminium. *Helvetica Chimica Acta*, 28, 1416-1420.
- [7] Huber K., Gaugler A. (1947). Über Optische Untersuchungen an Deckschichten auf Aluminium. *Experientia*, 3, 277-278.
- [8] Huber K. (1947). Pore Volume of Electrolytically Produced Protective Coatings on Aluminium. *Journal of Colloid Science*, 3, 197-206.
- [9] Wiener, O. (1912). Allgemeine Satze uber die Dielektrizitatkonstanten der Mischkorper. *Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Mathematisch-*

- Naturwissenschaftliche Klasse*. [Proceedings of the Saxony Academy of Sciences at Leipzig. Mathematical-Scientific Class] Verl. Sachs. Akad. Wiss., Leipzig 32, 509-574.
- [10] Kubaschewski O., Evans L. *Metallurgical Thermochemistry*. London: Butterworths Scientific Publications for Springer-Verlag, 1951.
- [11] Keller F., Hunter MS., Robinson DL. (1953). Structural Features of Oxide Coatings on Aluminium. *Journal of the Electrochemical Society*, 100, 411-419.
- [12] Paolini G, Masoero M., Sacchi F., Paganelli M. (1955). An Investigation of Porous Anodic Oxide Films. *Journal of the Optical Society of America*, 45, 27-29.
- [13] Booker, CJL., Wood .L., Walsh A. (1955). Electron Micrographs from Thick Oxide Layers on Aluminum. *Nature*, 176, 222-223.
- [14] Booker, CJL., Wood .L., Walsh A. (1955). Electron Micrographs from Thick Oxide Layers on Aluminum. *British Journal of Applied Physics*, 8, 347-352.
- [15] Nagayama M., Tamura K. (1967). Dissolution of the Anodic Oxide Film on Aluminum in a Sulfuric Acid Solution. *Electrochimica Acta*, 12, 1097-1107.
- [16] Nagayama M., Tamura K. (1968). On the Mechanism of Dissolution of Porous Oxide Films on Aluminium During Anodizing. *Electrochimica Acta*, 13, 1773-1783.
- [17] Sacchi F, Paolini G. (1963). *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 40, 229.
- [18] Franklin RW., Stirland DJ. (1963). Studies on the Structure of Anodic Oxide Films on Aluminum. II. *Journal of Electrochemical Society*, 110, 262-267.
- [19] Paolini G., Masoero M., Sacchi F., Paganelli M. (1965). An Investigation of Porous Anodic Oxide Films on Aluminum by Comparative Adsorption, Gravimetric and Electronoptical Measurements. *Journal of Electrochemical Society*, 112, 32-38.
- [20] Feliu Jr. S., Bartolomé M.J., González J.A., López V., Feliu S.(2008). Passivating Oxide Film and Growing Characteristics of Anodic Coatings on Aluminium Alloys. *Applied Surface Science*, 254, pp. 2755-2762.
- [21] Garcia-Vergara S.J., Skeldon P., Thompson G.E., Habazaki H. (2007). Pore Development During Anodizing of Al-3.5%w Alloy in Phosphoric Acid. *Surface and Coatings Technology*, 201, pp 9506-9511.
- [22] Aerts T., Dimogerontakis Th, de Graeve I., Fransaeer J., Terryn H. (2007). Influence of the Anodizing Temperature on the Porosity and the Mechanical Properties of the Porous Anodic Oxide Film. *Surface and Coatings Technology*, 201, pp 7310-7317.
- [23] Bai A., Hu C.-C., Yang Y.-F., Lin C.-C. (2008). Pore Diameter Control of Anodic Aluminum Oxide with Ordered Array of Nanopores. *Electrochimica Acta*, 53, pp. 2258-2264.
- [24] Bartolomé M.J., del Río J.F., Escudero E., Feliu Jr. S., López V., Otero E., González J.A. (2008). Behaviour of Different Bare and Anodised Aluminium Alloys in the Atmosphere. *Surface and Coatings Technology*, 202, pp. 2783-2793.
- [25] Franklin RW (1957). Structure of Nonporous Anodic Films on Aluminum. *Nature*, 180, 1470-1471.
- [26] Asoh H., Ono S., Hirose T., Nakao M., Masuda H. (2003). Growth of Anodic Porous Alumina with Square Cells. *Electrochimica Acta*, 48, 3171-3174.
- [27] Shih H.-H., Tzou S.-L. (2000). Study of Anodic Oxidation of Aluminium in Mixed Acid using a Pulsed Current. *Surface & Coatings Technology*, 124, 278-285.
- [28] Skoulikidis Th., Papanthanasidou Ch., Marangosis J. (1957). *Koll. Z.*, 150, 54.
- [29] Skoulikidis Th., Karalis S., Mentogiannis (1956). *Koll. Z.* 149, 6.
- [30] Speiser, C.Th. (1955). *Aluminium*, 31, 8.
- [31] Giles CH. (1958). *Compte-rendu du 31^e Congrès International de Chimie Industrielle*, Liege.
- [32] Giles CH., Mehta HV., Rahman SMK., Stewart CE. (1959). Adsorption at Inorganic Surfaces. V. Adsorption of Sulphonated Dyes by the Anodic Film on Aluminium. *Journal of Applied Chemistry*, 9, 457-466.

2 Πολυκριτηριακή επιλογή μεθόδου ανοδίωσης του αλουμινίου

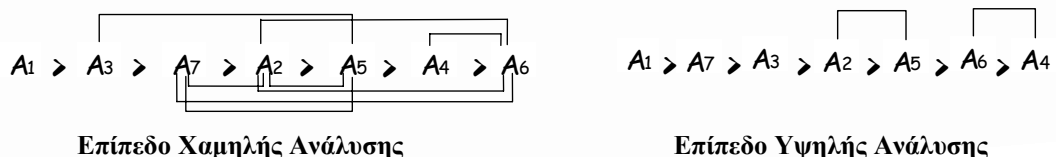
2.1 Θέση και επίλυση του προβλήματος

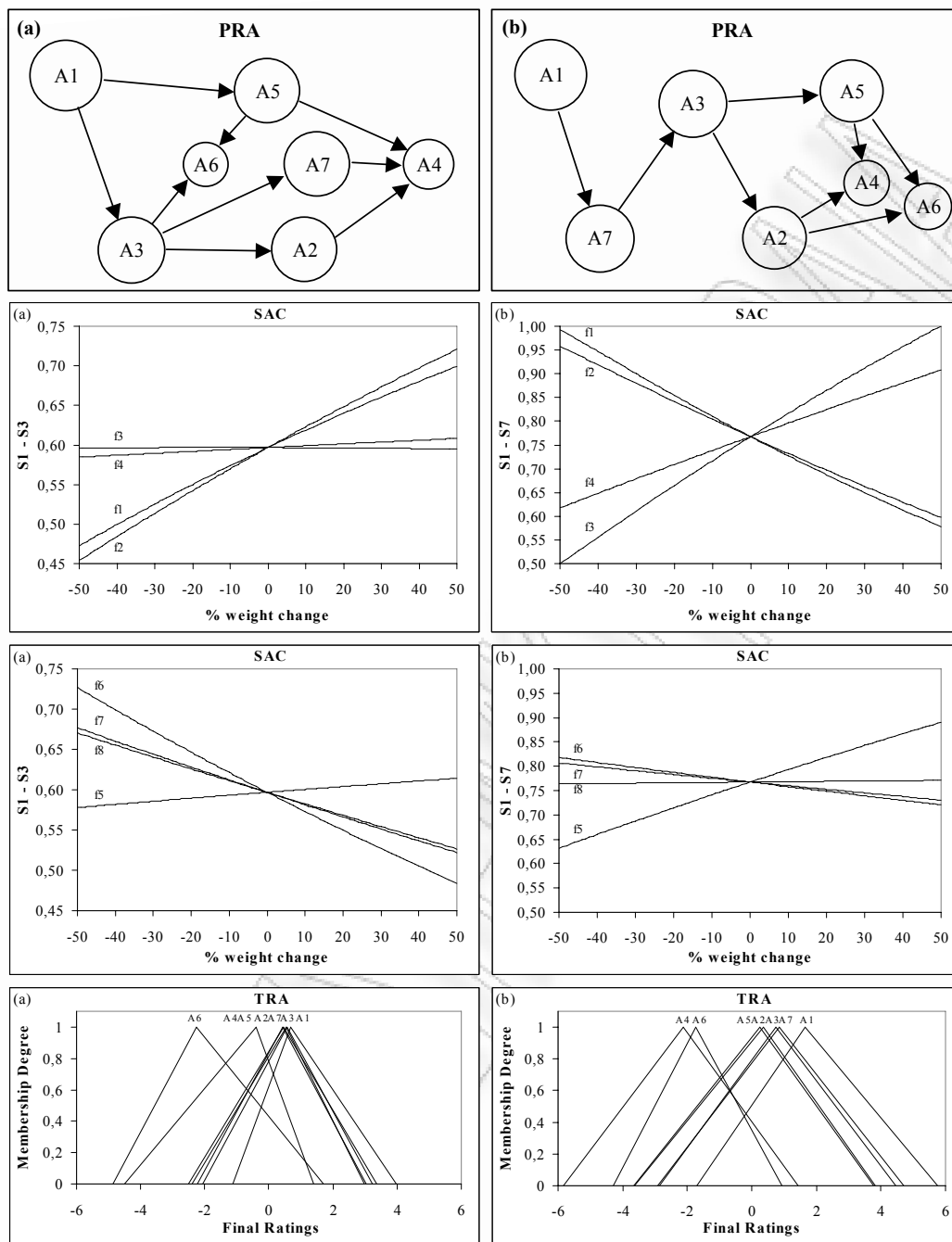
Η επιλογή μιας μεθόδου ανοδίωσης εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες που επιδιώκεται να έχει το προϊόν, το κόστος παραγωγής και την περιβαλλοντική επιβάρυνση (λογιζόμενη ως κόστος επεξεργασίας των αντίστοιχων αποβλήτων) που προκαλούν οι αντίστοιχες διεργασίες. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην ασαφή πολυκριτηριακή ανάλυση FMCA (Fuzzy Multicriteria Analysis, βλ. [1-12]) που ακολουθεί είναι:

το κόστος της παραγωγής, f_1	η ανταπόκριση/επιδεκτικότητα στη βαφή, f_5
η φιλικότητα στο περιβάλλον, f_2	η αντίσταση στην ηλεκτροχημική διάβρωση, f_6
η εμφάνιση του τελικού προϊόντος, f_3	η αντίσταση στη (μηχανική) φθορά, f_7
ο συντελεστής ανάκλασης, f_4	η αντίσταση στην κόπωση, f_8

Οι εναλλακτικές μέθοδοι που εξετάστηκαν είναι ανοδίωση με (A_1) θειικό οξύ, (A_2) οξαλικό οξύ, (A_3) χρωμικό οξύ, (A_4) φωσφορικό οξύ, (A_5) σύγχρονη βαφή, (A_6) χημική μετατροπή, ενώ έχει περιληφθεί χάριν σύγκρισης η μέθοδος A_7 της ηλεκτροστατικής επικάλυψης επειδή αποτελεί την κύρια ανταγωνιστική μη-ηλεκτρολυτική διεργασία στην πράξη. Για την εκτίμηση των τιμών στο διάνυσμα των βαρών και στην πολυκριτήρια μήτρα, χρησιμοποιήθηκε μία τροποποιημένη μέθοδος Delphi με συμμετοχή πέντε εμπειρογνομόνων και συμφωνία στην είσοδο (consensus in input) του προγράμματος H/Y που περιλαμβάνεται στα αντίστοιχα Παραρτήματα του επόμενου Κεφαλαίου της παρούσας διατριβής.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1, όπου η μερική κατάταξη των μεθόδων ανοδίωσης A_j ($j = 1, 2, \dots, 7$) εμφανίζεται ως ένα σύνολο κύκλων. Το Εμβαδόν E_j του αντίστοιχου κύκλου είναι ανάλογο της σχετικής (απασαφοποιημένης) τιμής S_j με την οποία αντιπροσωπεύεται η μέθοδος A_j στο τελικό διάνυσμα της εξόδου (output). Στο επίπεδο χαμηλής ανάλυσης ($q=1,5$ και $p=3,0$) εμφανίζεται η λύση $S_1 > S_3 > S_7 > S_2 > S_5 > S_4 > S_6$, συνεπαγόμενη $A_1 > A_3 > A_7 > A_2 > A_5 > A_4 > A_6$. Στο επίπεδο υψηλής ανάλυσης ($q=0,5$ και $p=1,0$) εμφανίζεται η λύση $S_1 > S_7 > S_3 > S_2 > S_5 > S_6 > S_4$, συνεπαγόμενη $A_1 > A_7 > A_3 > A_2 > A_5 > A_6 > A_4$. Στο επίπεδο υψηλής ανάλυσης ($q=0,5$ και $p=1,0$) εμφανίζεται η λύση $S_1 > S_7 > S_3 > S_2 > S_5 > S_6 > S_4$, συνεπαγόμενη $A_1 > A_7 > A_3 > A_2 > A_5 > A_6 > A_4$. Το σύμβολο '>' σημαίνει 'καλύτερη από', δηλ. υιοθετείται σειρά φθίνουσας προτίμησης. Στην παρακάτω απλή μη-γεωμετρική απεικόνιση της κατάταξης, οι μη-συγκρίσιμες (incomparable) μεταξύ τους εναλλακτικές μέθοδοι συνδέονται με οριζόντιες αγκύλες.





Σχήμα 2.1. Μερική κατάταξη των μεθόδων ανοδίωσης (PRA), ανάλυση ευαισθησίας ως προς κάθε ένα κριτήριο (SAC) και συνολική κατάταξη των εναλλακτικών μεθόδων (TRA), σε (a) επίπεδο χαμηλής ανάλυσης της προτίμησης (σχετικά υψηλές τιμές q, p) και (b) επίπεδο υψηλής ανάλυσης της προτίμησης (σχετικά χαμηλές τιμές q, p). Το σύμβολο '→' σημαίνει 'καλύτερη από'. Η μέθοδος A_1 (ανοδίωση σε λουτρό θεικού οξέως) κατατάσσεται πρώτη στα δύο επίπεδα ανάλυσης της προτίμησης και η λύση αυτή αποδεικνύεται εύρωστη (robust).

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι η προτεινόμενη λύση της μεθόδου A_1 , δηλ. ανοδίωση με θεικό οξύ, είναι εύρωστη (robust), αφού (i) δεν περιλαμβάνεται σε οποιοδήποτε ζεύγος μεθόδων του οποίου τα μέλη εμφανίζονται ως μη-συγκρίσιμα και (ii) η μονοπαραμετρική ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη δεύτερη καλύτερη μέθοδο, A_3 και A_7 σε

επίπεδο χαμηλής και υψηλής ανάλυσης (δηλ. ανοδίωση με χρωμικό οξύ και ηλεκτροστατική επικάλυψη, αντίστοιχα), δίνει $S_1 - S_3 > 0$ και $S_1 - S_7 > 0$ σε ολόκληρη την περιοχή $\pm 50\%$ γύρω από τη μέση απασαφοποιημένη τιμή κάθε κριτηρίου στο διάνυσμα των βαρών. Η εμπειρική έρευνα τόσο σε υποκειμενικό επίπεδο δια μέσου των εμπειρογνομών όσο και σε αντικειμενικό επίπεδο δια μέσου της εξόρυξης δεδομένων από την τεχνική βιβλιογραφία επιβεβαιώνει τα παραπάνω αποτελέσματα.

2.2 Διερεύνηση από τεχνολογική άποψη

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω μέθοδοι είναι μεν συγκρίσιμες σε επίπεδο οικονομικό/αγοράς, δεν είναι όμως συγκρίσιμες όσον αφορά σε ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι κρίσιμα για τον ποιοτικό έλεγχο και την αξιοπιστία του προϊόντος. Ως σημαντικότερο αυτών αναφέρεται ότι η ηλεκτροχημική ανοδίωση (δηλ. οι μέθοδοι 1-5) επιτρέπει την εξέταση της επιφάνειας του τελικού αντικειμένου ως προς την ομοιογένεια όχι μόνο του ανοδικού στρώματος αλλά και του μητρικού μεταλλικού υποστρώματος, αφού τυχόν ανομοιογένεια του δεύτερου προκαλεί αντίστοιχη ανομοιογένεια του πρώτου, όπως αποδείξαμε με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (βλ. Σχήμα 2.2). Αντίθετα, η μέθοδος A_7 (της ηλεκτροστατικής επικάλυψης) δεν επιτρέπει την εφαρμογή αντίστοιχων τεχνικών ποιοτικού ελέγχου με αποτέλεσμα τη δυνατότητα χρησιμοποίησης αλουμινίου κατώτερης ποιότητας ως προς τη μητρική επιφάνεια, άρα χαμηλότερου κόστους. Η εξοικονόμηση του κόστους ισούται με το κόστος ορισμένων επιφανειακών προκατεργασιών και αντίστοιχων δοκιμών ποιοτικού ελέγχου που (πρέπει να) γίνονται στο στάδιο του καθαρισμού, δηλ. πριν την ηλεκτροχημική οξειδωση ή την ηλεκτροστατική επικάλυψη. Το παραγόμενο φθηνότερο προϊόν έχει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά ποιότητας ως προς την εμφάνιση, τη βαφή, τη συνοχή και την αντίσταση στη διάβρωση βραχυχρονίως, αν δεν υπάρξει ασυνέχεια στο στρώμα της ηλεκτροστατικής επικάλυψης. Εν τούτοις, η μακροχρόνια ανάπτυξη τοπικών γαλβανικών στοιχείων που οδηγεί σε ηλεκτροχημική διάβρωση δεν αποφεύγεται, ιδιαίτερα αν συνυπάρχουν εσωτερικές τάσεις ή το τελικό προϊόν υφίσταται μηχανική ή/και θερμική κόπωση.

Γενικότερα, το κόστος της ανοδίωσης και η ποιότητα του τελικού προϊόντος εξαρτώνται σημαντικά από τις διεργασίες ανάντη του σταδίου της ηλεκτροχημικής οξειδωσης. Το αποτέλεσμα των διεργασιών αυτών διαμορφώνει και οριστικοποιεί μια 'συνάρτηση μνήμης', η οποία ακολουθεί το αντικείμενο όχι μόνο στα επόμενα στάδια της βιομηχανικής επεξεργασίας του αλλά και σε ολόκληρη τη μετέπειτα ωφέλιμη ζωή του, κατά τη διάρκεια της οποίας καλείται να ανταπεξέλθει σε λειτουργικές υποχρεώσεις που

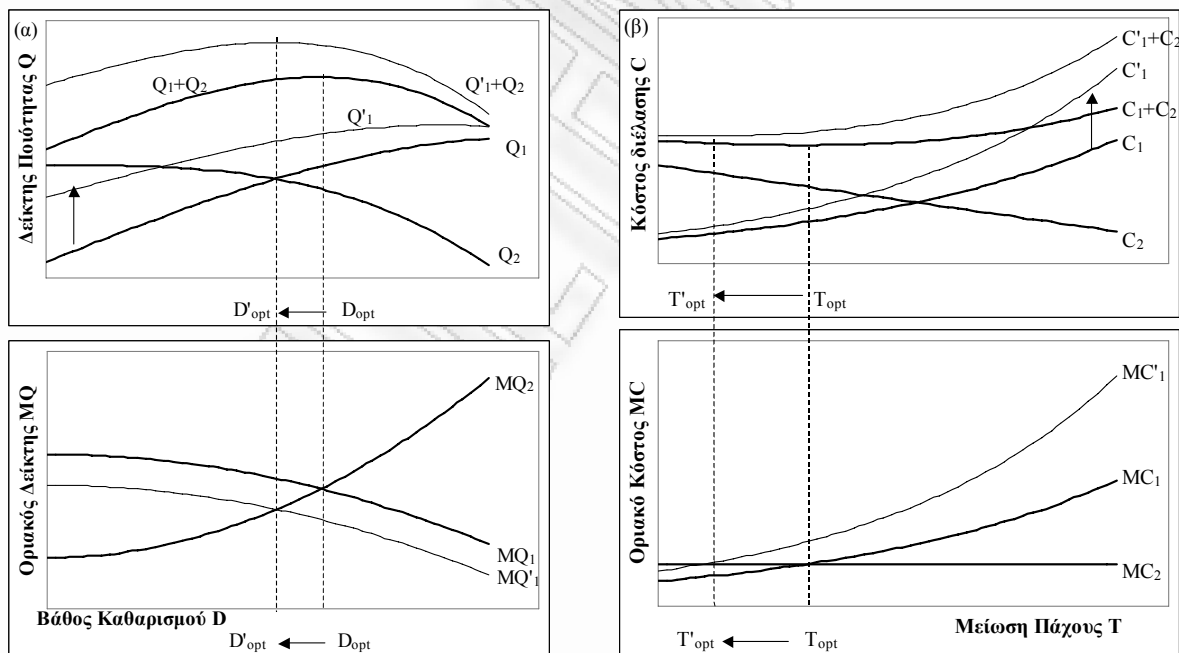
ενδεχόμενα αντανακλούν στην αξιοπιστία ενός ευρύτερου/πολύπλοκου συστήματος. Η βελτιστοποίηση των διεργασιών αυτών επηρεάζεται ουσιαστικά από εξωγενείς οικονομικούς παράγοντες, όπως είναι η τιμή της ενέργειας, δίνοντας ένα δυναμικό χαρακτήρα στην αξιολόγηση των εναλλακτικών μεθόδων ανοδίωσης/επικάλυψης και αυξάνοντας την αβεβαιότητα, αφού η εκτίμηση των τιμών των στοιχείων τόσο του διανύσματος των βαρών όσο και της πολυκριτηριακής μήτρας προτίμησης βασίζεται σε προβλέψεις που αναφέρονται σε ολόκληρη τη διάρκεια της επένδυσης.

Η διεκυστίνδα (trade off) μεταξύ αντιμαχόμενων εξαρτημένων μεταβλητών (conflict variables) που προσδιορίζει τη βέλτιστη τιμή μιας ανεξάρτητης μεταβλητής ως σημείο ισορροπίας σε ένα εσωτερικό ακρότατο (π.χ. μεγιστοποίηση οφέλους ή ελαχιστοποίηση κόστους) χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη διερεύνηση των παραπάνω αναφερόμενων. Αν η μεταβλητή ποιότητας Q του ανοδιωμένου αντικειμένου μπορεί να διακριθεί σε δύο συνιστώσες Q_1 και Q_2 , όπου η πρώτη εξαρτάται από την ομοιογένεια της προς ανοδίωση/επικάλυψη μητρικής επιφάνειας ενώ η δεύτερη εξαρτάται από τη μηχανική αντοχή ανά μονάδα εμβαδού της μητρικής επιφάνειας, τότε έχουμε: $dQ_1/dD > 0$, $d^2Q_1/dD^2 < 0$, $dQ_2/dD < 0$, $d^2Q_2/dD^2 < 0$ όπου D το βάθος της ηλεκτροχημικής λείανσης/καθαρισμού, αφού η Q_1 είναι αύξουσα συνάρτηση του D (λόγω επίτευξης περισσότερο ομοιόμορφου ανοδικού στρώματος) αλλά με μειούμενο ρυθμό ενώ η Q_2 είναι φθίνουσα συνάρτηση του D με αυξανόμενο απόλυτο (αλγεβρικά μειούμενο) ρυθμό, λόγω λέπτυνσης του φέροντος τα φορτία μητρικού μετάλλου.

Το βέλτιστο βάθος ηλεκτροχημικής λείανσης/καθαρισμού D_{opt} προσδιορίζεται ως η τετμημένη του σημείου Q_{max} ή $(Q_1 + Q_2)_{max}$ ή $d(Q_1 + Q_2)/dD = 0$ ή $dQ_1/dD = |dQ_2/dD|$ ή $MQ_1 = MQ_2$, όπου $MQ_1 = dQ_1/dD$ και $MQ_2 = |dQ_2/dD|$ είναι οι οριακές τιμές των Q_1 και Q_2 , αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 2.2α). Αν το πρωτογενές μέταλλο είναι εξαιρετικά ομοιογενές και απαλλαγμένο τοπικών ελαττωμάτων στη μάζα του, που είναι δυνατόν να δημιουργηθούν είτε κατά την ηλεκτρόλυση του τήγματος αλουμίνας/κρυολίθου είτε κατά τη χύτευση, και η ποιότητα του έλαστρου είναι πολύ καλή (δηλ. διαθέτει επιφάνειες πίεσης χωρίς τραχύτητα) τότε τα παραμένοντα επιφανειακά ελαττώματα υπό μορφή προσανατολισμένων γραμμών διέλασης δεν είναι τόσο σημαντικά. Στην περίπτωση αυτή, με ίδιο πάχος ηλεκτροχημικής λείανσης/καθαρισμού επιτυγχάνουμε υψηλότερη επιφανειακή ομοιομορφία, άρα η καμπύλη Q_1 μετατοπίζεται υψηλότερα ενώ συγχρόνως γίνεται λιγότερο απότομη, αφού η βελτίωση είναι εντονότερη σε χαμηλές τιμές του D . Ως αποτέλεσμα, λαμβάνεται η νέα βέλτιστη τιμή D'_{opt} , όπου $D'_{opt} < D_{opt}$.

2.3 Διερεύνηση από οικονομική άποψη

Με όμοια μεθοδολογία, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη βέλτιστη μείωση πάχους T_{opt} του παραγόμενου ελάσματος αλουμινίου ως τετμημένη του σημείου ελαχίστου κόστους C_{min} της καμπύλης $C = f(T)$, για $C = C_1 + C_2$, όπου C_1 η συνιστώσα του κόστους που οφείλεται στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και C_2 η συνιστώσα του κόστους που οφείλεται στη δαπάνη προμηθειών βασικού μετάλλου υπό μορφής (παχύτερου) ελάσματος τροφοδοσίας της κατεργασίας της διέλασης. Επειδή τόσο η κατανάλωση ενέργειας όσο και η εξοικονόμηση πρώτης ύλης λογίζονται ανά μονάδα επιφάνειας παραγόμενου προϊόντος, έχουμε $dC_1/dT > 0$, $d^2C_1/dT^2 > 0$, λόγω της ισχύος του οικονομικού νόμου της φθίνουσας απόδοσης, και $dC_2/dT < 0$, $d^2C/dT^2 \geq 0$. Στην περίπτωση της αύξησης της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, η καμπύλη C_1 μετατοπίζεται υψηλότερα ενώ συγχρόνως γίνεται περισσότερο απότομη, επειδή οι επιπτώσεις του νόμου της φθίνουσας απόδοσης είναι εντονότερες στην περιοχή της υψηλότερης κατανάλωσης ενέργειας (βλ. Σχήμα 2.2β). Ως αποτέλεσμα, λαμβάνεται η νέα βέλτιστη τιμή T'_{opt} , όπου $T'_{opt} < T_{opt}$.

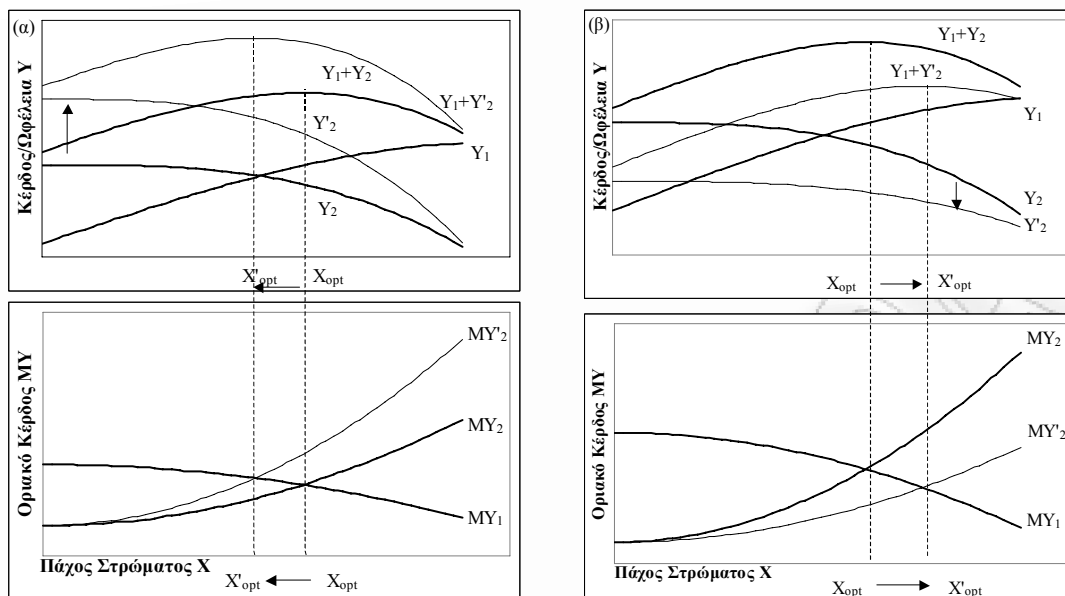


Σχήμα 2.2. (α) Εξάρτηση του δείκτη ποιότητας Q της ανοδίωσης από το βάθος D του ηλεκτροχημικού καθαρισμού της επιφάνειας του αλουμινίου και μεταβολή της βέλτιστης τιμής D_{opt} με καλύτερευση της ποιότητας του πρωτογενούς μετάλλου. (β) Εξάρτηση του κόστους διέλασης C, από τη μείωση του πάχους T, και μεταβολή της βέλτιστης τιμής T_{opt} , όταν αυξάνεται η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του κέρδους Y μπορούμε να προσδιορίσουμε το βέλτιστο πάχος X_{opt} στρώματος ανοδίωσης/επικάλυψης σε σχέση με το χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης της λειτουργίας του προς ανοδίωση αντικειμένου, ως ακολούθως. Έστω Y_1 και Y_2 οι συνιστώσες του κέρδους ή γενικότερα του καθαρού οφέλους που προέρχεται από την αντοχή στη διάβρωση/φθορά/κόπωση και τη διαφορά [(τιμή πώλησης ή παροχής υπηρεσίας) – κόστος], αντίστοιχα. Η τιμή X_{opt} αντιστοιχεί στην τετμημένη του σημείου Y_{max} , για το οποίο η συνθήκη πρώτης τάξεως για την ύπαρξη εσωτερικού ακρότατου είναι $dY/dX = 0$ ή $d(Y_1 + Y_2)/dX = 0$ ή $dY_1/dX = |dY_2/dX|$ ή $MY_1 = MY_2$, όπου $MY_1 = dY_1/dX$ και $MY_2 = |dY_2/dX|$ οι οριακές τιμές των Y_1 και Y_2 , αντίστοιχα. Αν εκτιμάται ότι η ωφέλιμη ζωή του προς ανοδίωση αντικειμένου (πρέπει να) είναι σύντομη, τότε ορισμένες προκατεργασίες κατά το στάδιο του επιφανειακού καθαρισμού είναι δυνατόν να παραληφθούν, οπότε μειώνεται το κόστος, αυξάνεται το κέρδος και η καμπύλη Y_2 μετατοπίζεται υψηλότερα στη θέση Y_2' ενώ συγχρόνως γίνεται περισσότερο απότομη αφού η διαφορά κέρδους (έναντι της προηγούμενης βασικής κατάστασης, που αντιπροσωπεύεται από την καμπύλη Y_2 είναι μεγαλύτερη στην περιοχή των χαμηλών τιμών του X , όπου το κόστος της ανοδίωσης είναι μικρό (βλ. Σχήμα 2.3α). Αποτέλεσμα αυτής της μεταβολής στη θέση και στο σχήμα της Y_2 είναι η μετατόπιση του βέλτιστου πάχους στο X'_{opt} , όπου $X'_{opt} < X_{opt}$. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να έχουμε το εκτιμώμενο ή επιδιωκόμενο αποτέλεσμα με μικρότερο πάχος, πράγμα που είναι δυνατόν να επιτευχθεί με ηλεκτροστατική επικάλυψη, επειδή σ'αυτήν την περίπτωση είναι δυσχερέστερος ο ποιοτικός έλεγχος του καθαρισμού της επιφάνειας πριν το στάδιο της επικάλυψης.

2.4 Διερεύνηση από ολοκληρωμένη/τεχνοοικονομική άποψη

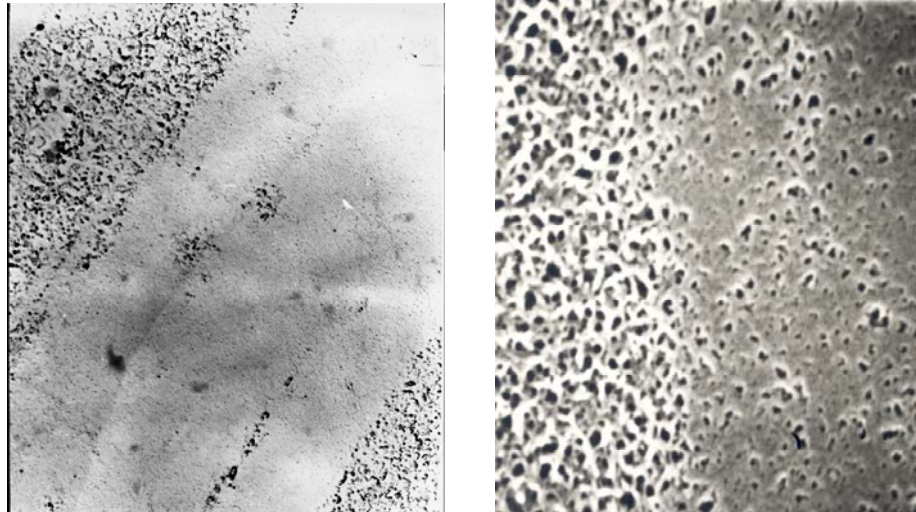
Αν εκτιμάται ότι η ωφέλιμη ζωή του προς ανοδίωση αντικειμένου (πρέπει να) είναι μακρά, τότε ορισμένες προκατεργασίες κατά το στάδιο του επιφανειακού καθαρισμού όχι μόνο δεν είναι δυνατόν να παραληφθούν, αλλά πρέπει να εντατικοποιηθούν οπότε αυξάνεται το κόστος, μειώνεται το κέρδος και η καμπύλη Y_2 μετατοπίζεται χαμηλότερα στη θέση Y_2' ενώ συγχρόνως γίνεται λιγότερο απότομη αφού η διαφορά κέρδους (έναντι της προηγούμενης βασικής κατάστασης, που αντιπροσωπεύεται από την καμπύλη Y_2) είναι μεγαλύτερη στην περιοχή των χαμηλών τιμών του X , όπου το κόστος της ανοδίωσης είναι μικρό (βλ. Σχήμα 2.3β). Αποτέλεσμα αυτής της μεταβολής στη θέση και στο σχήμα της Y_2 είναι η μετατόπιση του βέλτιστου πάχους στο X''_{opt} , όπου $X''_{opt} > X_{opt}$. Αυτό σημαίνει ότι για να έχουμε το εκτιμώμενο ή επιδιωκόμενο αποτέλεσμα απαιτείται μεγαλύτερο πάχος, πράγμα που είναι



Σχήμα 2.3. Εξάρτηση του κέρδους/ωφέλειας Y από το πάχος X της ανοδίωσης/επικάλυψης και μετατόπιση του βέλτιστου πάχους X_{opt} , όταν εκτιμάται πως η ωφέλιμη ζωή του προς ανοδίωση αντικειμένου (πρέπει να) είναι (α) σύντομη ή (β) μακρά.

δυνατόν να επιτευχθεί είτε με ηλεκτροστατική επικάλυψη είτε με ανοδική οξείδωση. Στην πρώτη περίπτωση όμως, πρέπει να παρακολουθείται στενά το στάδιο του επιφανειακού καθαρισμού από διαπιστευμένο φορέα, προκειμένου να πιστοποιείται η τήρηση των προδιαγραφών και της πιστής εκτέλεσης των δοκιμών ποιοτικού ελέγχου πριν την ηλεκτροστατική επικάλυψη των επεξεργαζόμενων αντικειμένων, ιδιαίτερα όταν το χρησιμοποιούμενο φύλλο αλουμινίου προέρχεται από διέλαση με ισχυρή συμπίεση ή/και χρήση ελαστρών με ανώμαλη επιφάνεια, οπότε παραμένουν έντονες επιφανειακές παραμορφώσεις υπό μορφή αυλακών προσανατολισμένων κατά την κατεύθυνση της κίνησης του φύλλου στη συγκεκριμένη κατεργασία (βλ. φωτογραφία Σχήματος 2.4).

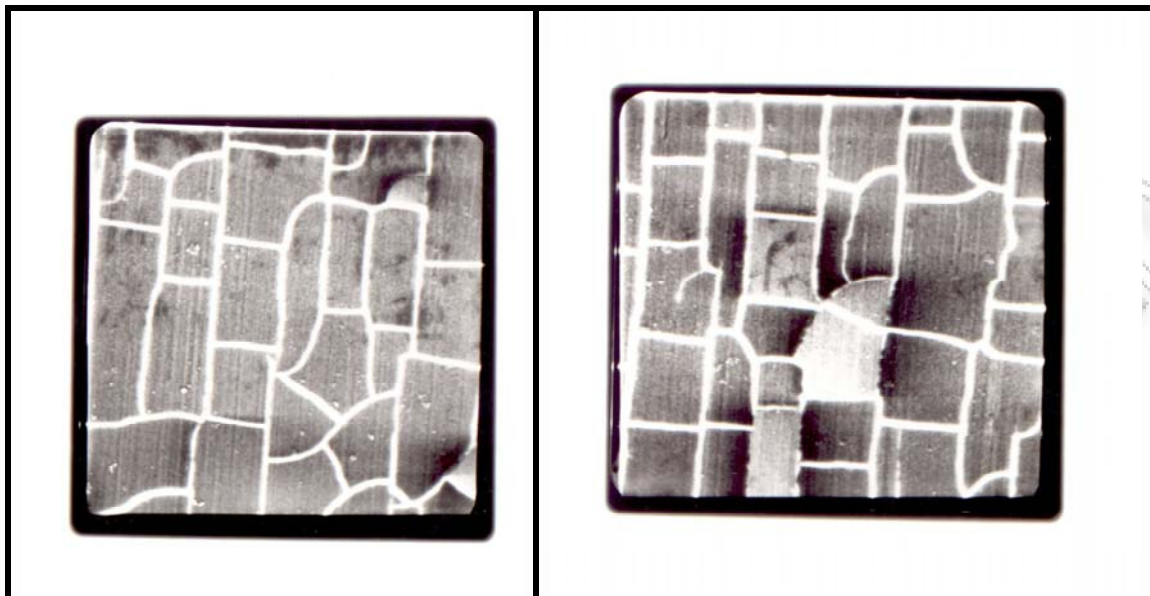
Η παραπάνω συγκριτική ανάλυση μεταξύ ηλεκτροχημικού στρώματος και ηλεκτροστατικής επικάλυψης ισχύει με την προϋπόθεση ότι τηρούνται οι προδιαγραφές παραγωγής σε όλη τη διάρκεια των ακολουθούμενων διεργασιών. Στην περίπτωση της ηλεκτροχημικής οξείδωσης, η κύρια δυσκολία εμφανίζεται στην εξασφάλιση ομοιόμορφης κατανομής των τιμών όλων των παραμέτρων στο λουτρό της ανοδίωσης. Πρόκειται για δύσκολο εγχείρημα, επειδή η ίδια η τοποθέτηση 'κρεμαστών' φορτωμένων με τα προς ανοδίωση αντικείμενα εντός της δεξαμενής προκαλεί ανομοιομορφία σε παραμέτρους που σχετίζονται με (i) την κατανομή της θερμοκρασίας του λουτρού και της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και (ii) τα διανύσματα μεταφοράς μάζας που προκαλείται από την πρωτογενή ανάδευση (με μηχανικό αναδευτήρα ή φουσαλίδες), τη δευτερογενή ανάδευση λόγω



Σχήμα 2.4. Φωτογραφίες σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο εκτύπων επιφάνειας ανοδιωμένου αλουμινίου όπου φαίνεται (α) γενική άποψη με μικρή μεγέθυνση, προκειμένου να καταδειχθεί η επίπτωση των γραμμών διέλασης στην ανάπτυξη του στρώματος κυψελίδων/πόρων και (β) λεπτομέρεια στην ίδια περιοχή, με μεγάλη μεγέθυνση, προκειμένου να καταδειχθεί η διαφοροποίηση της ανάπτυξης του οξειδίου κάθετα προς τις γραμμές διέλασης, λόγω των προσανατολισμένων αταξιών που δημιουργήθηκαν από το έλαστρο στην επιφάνεια του μητρικού μετάλλου/κράματος και λειτουργούν ως ‘συνάρτηση μνήμης’ (memory function). Συνθήκες ανοδίωσης στο φυσικό προσομοιωτή του εργαστηρίου: 15.2 V, 3.1 A/dm², 5600 Cb/dm², υδατικό διάλυμα περιεκτικότητας 15% κ.β. σε H₂SO₄, 20 °C.

δημιουργίας δινών γύρω από τις ‘κρεμάστρες’ και τη έκλυση οξυγόνου και υδρογόνου στις ανόδους και τις καθόδους, αντίστοιχα. Άλλες αιτίες δημιουργίας ανομοιόμορφου ηλεκτρολυτικού πεδίου είναι η σχετική θέση (ως προς τις καθόδους), η γεωμετρία και τα περατωτικά άκρα των αντικειμένων, οι διεπιφάνειες/τριεπιφάνειες στερεού-υγρού-αέρα, καθώς και η συγκέντρωση προσμίξεων στο διάλυμα, λόγω γήρανσης του λουτρού.

Οι ανομοιόμορφες κατανομές τιμών παραμέτρων συμβάλλουν σε μία ανισότροπη ανάπτυξη του ανοδικού οξειδίου, του οποίου ο όγκος είναι μεγαλύτερος του όγκου που κατέχει/ορίζει το πλέγμα των ατόμων αργιλίου από τα οποία προέρχεται. Αποτέλεσμα αυτών είναι η εμφάνιση εσωτερικών τάσεων που οδηγούν σε ρηγματώσεις. Όπως έχουμε αποδείξει, με τη βοήθεια ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), η διάδοση των ρηγματώσεων γίνεται κυρίως κατά μήκος των γραμμών εξέλασης (μεγαλύτερα ρήγματα) και δευτερευόντως κάθετα προς αυτές (μικρότερα ρήγματα) με αποτέλεσμα τη δημιουργία χαρακτηριστικού δικτύου (βλ. φωτογραφία Σχήματος 2.5α, όπου οι φωτεινές γραμμές αντιστοιχούν σε ρήγματα). Σε μικρές περιοχές που περιβάλλονται ή/και διασχίζονται από ρήγματα, όπου ο λόγος (ρηγματωμένη περιβάλλουσα επιφάνεια)/(μη-ρηγματωμένη περιβαλλόμενη επιφάνεια) είναι σχετικά μεγάλος και η αντίστοιχη τοπική πυκνότητα ρεύματος είναι υψηλή σε σύγκριση με τη μέση τιμή της (λόγω του παραπάνω αναφερόμενου ανισότροπου ηλεκτρολυτικού



Σχήμα 2.5. Φωτογραφίες SEM ανοδιωμένης επιφάνειας (α) με χαρακτηριστικό δίκτυο ρηγματώσεων, λόγω εσωτερικών τάσεων, (β) με περιοχή όπου εντοπίζεται μικρότερο πάχος οξειδίου, ως αποτέλεσμα έναρξης μηχανισμού μερικής κατάρρευσης ή/και τοπικής ανοδικής διάλυσης/διάβρωσης).

πεδίου), είναι δυνατή η εμφάνιση δισδιάστατης ψαθυρής θραύσης, με αποτέλεσμα μερική κατάρρευση του ανοδικού οξειδίου (βλ. Σχήμα 2.5β, όπου η φωτεινή περιοχή, που εντοπίζεται στο κέντρο, παρέχει ένδειξη μικρού πάχους οξειδίου ως αποτέλεσμα έναρξης μηχανισμού μερικής κατάρρευσης ή/και τοπικής ανοδικής διάλυσης/διάβρωσης).

2.5 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο, μελετάται σε ένα πρώτο/επιφανειακό επίπεδο η πολυκριτηριακή επιλογή μεθόδου ανοδίωσης του αλουμινίου, προκειμένου να διερευνηθούν διάφορες προσεγγίσεις/απόψεις επί του θέματος αυτού. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν είναι: το κόστος της παραγωγής, η φιλικότητα στο περιβάλλον, η εμφάνιση του τελικού προϊόντος, ο συντελεστής ανάκλασης, η ανταπόκριση/επιδεκτικότητα στη βαφή, η αντίσταση στην ηλεκτροχημική διάβρωση, η αντίσταση στη (μηχανική) φθορά, η αντίσταση στην κόπωση. Οι εναλλακτικές μέθοδοι που εξετάστηκαν είναι: ανοδίωση με (A₁) θειικό οξύ, (A₂) οξαλικό οξύ, (A₃) χρωμικό οξύ, (A₄) φωσφορικό οξύ, (A₅) σύγχρονη βαφή, (A₆) χημική μετατροπή, ενώ έχει περιληφθεί χάριν σύγκρισης η μέθοδος A₇ της ηλεκτροστατικής επικάλυψης επειδή αποτελεί την κύρια ανταγωνιστική μη-ηλεκτρολυτική διεργασία στην πράξη. Για την εκτίμηση των τιμών στο διάνυσμα των βαρών και στην πολυκριτήρια μήτρα, χρησιμοποιήθηκε μία τροποποιημένη μέθοδος Delphi με συμμετοχή πέντε εμπειρογνομόνων

και συμφωνία στην είσοδο (consensus in input) του προγράμματος H/Y που περιλαμβάνεται στα αντίστοιχα Παραρτήματα του επόμενου Κεφαλαίου της παρούσας διατριβής.

Τα αποτελέσματα έδειξαν την κατάταξη $A_1 > A_7 > A_3 > A_2 > A_5 > A_6 > A_4$, όταν χρησιμοποιείται υψηλή ανάλυση (οπότε ελαχιστοποιούνται οι μη-συγκρίσιμες μεταξύ τους μέθοδοι), όπου το σύμβολο '>' σημαίνει 'καλύτερη από'. Η προτεινόμενη λύση της μεθόδου A_1 , δηλ. ανοδίωση με θειικό οξύ, είναι εύρωστη (robust), αφού (i) δεν περιλαμβάνεται σε οποιοδήποτε ζεύγος μεθόδων του οποίου τα μέλη εμφανίζονται ως μη-συγκρίσιμα και (ii) η μονοπαραμετρική ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη δεύτερη καλύτερη μέθοδο, A_3 και A_7 σε επίπεδο χαμηλής και υψηλής ανάλυσης (δηλ. ανοδίωση με χρωμικό οξύ και ηλεκτροστατική επικάλυψη, αντίστοιχα), δίνει $S_1 - S_3 > 0$ και $S_1 - S_7 > 0$ σε ολόκληρη την περιοχή $\pm 50\%$ γύρω από τη μέση απασαφοποιημένη τιμή κάθε κριτηρίου στο διάστημα των βαρών. Η εμπειρική έρευνα τόσο σε υποκειμενικό επίπεδο δια μέσου των εμπειρογνομόνων όσο και σε αντικειμενικό επίπεδο δια μέσου της εξόρυξης δεδομένων από την τεχνική βιβλιογραφία επιβεβαιώνει τα παραπάνω αποτελέσματα.

Η διερεύνηση, από τεχνολογική άποψη, εστιάζεται στον προσδιορισμό του βέλτιστου βάθους D_{opt} της ηλεκτροχημικής λείανσης/καθαρισμού, ως σημείο ισορροπίας της διελκυστίνδας (trade off) μεταξύ ομοιογένειας $Q_1(D)$ και μηχανικής αντοχής ανά μονάδα εμβαδού $Q_2(D)$ της μητρικής επιφάνειας, όπου ο δείκτης ποιότητας $Q=Q_1+Q_2$ είναι η προς μεγιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Αποδεικνύεται ότι αυξανόμενης της ομοιογένειας μειώνεται η βέλτιστη τιμή D_{opt} της ανεξάρτητης μεταβλητής. Δηλαδή, η μείωση των τοπικών ελαττωμάτων στη μάζα του πρωτογενούς μετάλλου (που δημιουργούνται είτε κατά την ηλεκτρόλυση του τήγματος αλουμίνιας/κρυσθίου είτε κατά τη χύτευση είτε κατά τη διέλαση), άρα η αύξηση του κόστους στα πρώιμα στάδια παραγωγής μετάλλου οδηγεί σε μείωση του κόστους στο στάδιο της προετοιμασίας για την ηλεκτροχημική ανοδίωση. Επομένως, μία τεχνολογική προσέγγιση, βασιζόμενη στον ποιοτικό έλεγχο, οδηγεί σε μία διελκυστίνδα μεταξύ κόστους διαφορετικών σταδίων της παραγωγικής διαδικασίας.

Με όμοια μεθοδολογία διεξάγεται η διερεύνηση από οικονομική άποψη, η οποία εστιάζεται στον προσδιορισμό της βέλτιστης μείωσης πάχους T_{opt} του παραγόμενου ελάσματος αλουμινίου ως τετμημένη του σημείου ελαχίστου κόστους C_{min} της αντικειμενικής συνάρτησης $C = f(T)$, για $C = C_1 + C_2$, όπου C_1 η συνιστώσα του κόστους που οφείλεται στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και C_2 η συνιστώσα του κόστους που οφείλεται στη δαπάνη προμηθειών βασικού μετάλλου υπό μορφής (παχύτερου) ελάσματος τροφοδοσίας της κατεργασίας της διέλασης. Αποδεικνύεται ότι αυξανόμενης της τιμής της ηλεκτρικής

ενέργειας μειώνεται η βέλτιστη τιμή T_{opt} . Επίσης, με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του κέρδους Y μπορούμε να προσδιορίσουμε το βέλτιστο πάχος X_{opt} στρώματος ανοδίωσης/επικάλυψης σε σχέση με το χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης της λειτουργίας του προς ανοδίωση αντικειμένου, όταν $Y = Y_1 + Y_2$, όπου Y_1 και Y_2 οι συνιστώσες του κέρδους ή γενικότερα του καθαρού οφέλους που προέρχεται από την αντοχή στη διάβρωση/φθορά/κόπωση και τη διαφορά [(τιμή πώλησης ή παροχής υπηρεσίας) – κόστος], αντίστοιχα. Αποδεικνύεται ότι, αν εκτιμάται ότι η ωφέλιμη ζωή του προς ανοδίωση αντικειμένου (πρέπει να) είναι σύντομη, τότε ορισμένες προκατεργασίες κατά το στάδιο του επιφανειακού καθαρισμού είναι δυνατόν να παραληφθούν, οπότε μειώνεται το κόστος, τότε μειώνεται η τιμή X_{opt} . Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να έχουμε το εκτιμώμενο ή επιδιωκόμενο αποτέλεσμα με μικρότερο πάχος, πράγμα που είναι δυνατόν να επιτευχθεί με ηλεκτροστατική επικάλυψη, επειδή σ' αυτήν την περίπτωση είναι δυσχερέστερος ο ποιοτικός έλεγχος του καθαρισμού της επιφάνειας πριν το στάδιο της επικάλυψης.

Αντιθέτως, αν εκτιμάται ότι η ωφέλιμη ζωή του προς ανοδίωση αντικειμένου (πρέπει να) είναι μακρά, τότε ορισμένες προκατεργασίες κατά το στάδιο του επιφανειακού καθαρισμού όχι μόνο δεν είναι δυνατόν να παραληφθούν, αλλά πρέπει να εντατικοποιηθούν, οπότε αυξάνεται η τιμή X_{opt} . Αυτό σημαίνει ότι για να έχουμε το εκτιμώμενο ή επιδιωκόμενο αποτέλεσμα απαιτείται μεγαλύτερο πάχος, πράγμα που είναι δυνατόν να επιτευχθεί είτε με ηλεκτροστατική επικάλυψη είτε με ανοδική οξειδωση. Στην πρώτη περίπτωση όμως, πρέπει να παρακολουθείται στενά το στάδιο του επιφανειακού προδιαγραφών και της πιστής εκτέλεσης των δοκιμών ποιοτικού ελέγχου πριν την ηλεκτροστατική επικάλυψη των επεξεργαζόμενων αντικειμένων, ιδιαίτερα όταν το χρησιμοποιούμενο φύλλο αλουμινίου προέρχεται από διέλαση με ισχυρή συμπίεση ή/και χρήση ελάστρων με ανώμαλη επιφάνεια, οπότε παραμένουν έντονες επιφανειακές παραμορφώσεις υπό μορφή αυλακών προσανατολισμένων κατά την κατεύθυνση της κίνησης του φύλλου στη συγκεκριμένη κατεργασία, όπως έχουμε αποδείξει με τη βοήθεια ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σε δοκίμια αλουμινίου που έχουν ανοδιωθεί σε φυσικό προσομοιωτή του Εργαστηρίου Προσομοίωσης Βιομηχανικών Διεργασιών.

Οι ανομοιόμορφες κατανομές τιμών παραμέτρων συμβάλλουν σε μία ανισότροπη ανάπτυξη του ανοδικού οξειδίου, του οποίου ο όγκος είναι μεγαλύτερος του όγκου που κατέχει/ορίζει το πλέγμα των ατόμων αργιλίου από τα οποία προέρχεται. Αποτέλεσμα αυτών είναι η εμφάνιση εσωτερικών τάσεων που οδηγούν σε ρηγματώσεις. Όπως έχουμε επίσης αποδείξει, με τη βοήθεια ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), η διάδοση των ρηγματώσεων γίνεται κυρίως κατά μήκος των γραμμών εξέλασης (μεγαλύτερα ρήγματα) και

δευτερευόντως κάθετα προς αυτές (μικρότερα ρήγματα) με αποτέλεσμα τη δημιουργία χαρακτηριστικού δικτύου. Σε μικρές περιοχές που περιβάλλονται ή/και διασχίζονται από ρήγματα, όπου ο λόγος (ρηγματωμένη περιβάλλουσα επιφάνεια)/(μη-ρηγματωμένη περιβαλλόμενη επιφάνεια) είναι σχετικά μεγάλος και η αντίστοιχη τοπική πυκνότητα ρεύματος είναι υψηλή σε σύγκριση με τη μέση τιμή της (λόγω του παραπάνω αναφερόμενου ανισότροπου ηλεκτρολυτικού πεδίου), είναι δυνατή η εμφάνιση δισδιάστατης ψαθυρής θραύσης, με αποτέλεσμα μερική κατάρρευση του ανοδικού οξειδίου.

Από την παραπάνω ανάλυση, αποδεικνύεται ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των οικονομικών/περιβαλλοντικών/τεχνικών κριτηρίων, η οποία επηρεάζει το διάνυσμα των βαρών και τη βαθμολόγηση των στοιχείων της πολυκριτήριας μήτρας ενώ αυξάνει τα πλάτη (L,R) των αντίστοιχων ασαφών αριθμών. Η υποδεικνυόμενη βελτιστοποίηση αποτελεί συνθήκη αναγκαία αλλά όχι και ικανή, αφού πραγματοποιείται *per se*, χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη το διάνυσμα των βαρών, το οποίον αποτελεί τη βάση της σύγκρισης μεταξύ των εναλλακτικών προτάσεων. Μια σημαντική δυνατότητα ενίσχυσης της αξιοπιστίας της χρησιμοποιούμενης μεθόδου δίνεται από τη διερεύνηση του διαστήματος ανάλυσης ευαισθησίας της προτεινόμενης λύσης προκειμένου να διαπιστωθεί η ευρωστία της (robustness).

Βιβλιογραφία

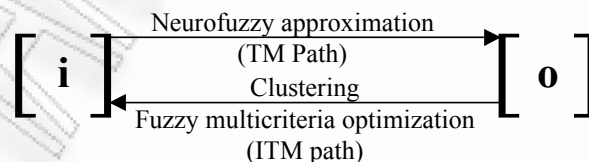
- [1] Fotilas P., Batzias A.F. (2008). A Modeling Procedure by Means of Multicriteria Analysis. Application in the Case of Specific Surface Estimation of Anodized Aluminium. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, forthcoming.
- [2] Batzias A.F. (2007). Fuzzy Multicriteria Ranking of Aluminium Coating Methods. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, 963, pp. 856-861.
- [3] Fotilas P., Batzias A.F. (2007). Synthesizing Equivalence Indices for the Comparative Evaluation of Technoeconomic Efficiency of Industrial Processes at the Design/Re-engineering Level. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, 963, pp. 884-889.
- [4] Batzias A.F., Batzias F.A. (2004). Fuzzy Multicriteria Choice of Instrumental Methods for Measuring Physical Quantities - Application in the Case of Dielectric Aluminium Anodic Oxide Films. *Proc. IEEE Instrum. & Meas. Technol. (IMTC 2004)* 3, pp. 2217-2222.
- [5] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Multicriteria Choice of Industrial Management System for a Typical Greek Tannery Operating in a Changing Environment. *4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4)* Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in *J. Chem. Eng. & Tech. (J. Wiley)*, Jan. 2004. O-2-003.
- [6] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Multicriteria Choice of Solvent in the Lithographic Printing Industry with Emphasis on Occupational Health. *4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4)* Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in *J. Chem. Eng. & Tech. (J. Wiley)*, Jan. 2004. P-4.1-025.
- [7] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Computational and Experimental Process Control by Combining Neurofuzzy Approximation with Multicriteria Optimization. *Computational Engineering*, Int. Series Comp. Eng., WIT Press Computational Mechanics Inc., Boston Massachusetts, USA, 4, pp. 107-118.

- [8] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). A System for Support and Training of Personnel Working in the Electrochemical Treatment of Metallic Surfaces. *Computer Aided Chem. Eng.* (Elsevier), 14, pp. 365-370.
- [9] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Fuzzy Fault Tree Analysis as a Mechanism for Technical Support to Small/Medium Electroplaters on a Quasi Online/Real-Time Basis. *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT03)*, Maribor, Slovenia, 1, pp. 36-41.
- [10] Batzias A.F., Sidoras D.K. (2008). Thermochemical Conversion of Waste Biomass to Obtain Activated Carbon Substitutes for Dye Adsorption – A Decision Making Approach on Kinetics. *16th European Biomass Conference*, Elsevier, Valencia, Spain, 1727-1732.
- [11] Batzias A.F., Siontorou C.G. (2008). A New Scheme for Biomonitoring Heavy Metal Concentrations in Semi-Natural Wetlands. *Journal of Hazardous Materials* (Elsevier), 158, pp. 340-358.
- [12] Fotilas P., Batzias A. F., Siontorou C.G. (2008). Learning by Doing via Biomonitoring the Rehabilitation of Pb-Contaminated Industrial Sites. *Symp. on Environmental Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering* (Europ. Fed. Chem. Eng.), Prague, Czech Rep.

3 Βελτιστοποίηση της διεργασίας με συνδυασμό νευροασαφούς προσέγγισης και πολυκριτηριακής ανάλυσης

3.1 Εισαγωγή

Οι ιδιότητες ενός προϊόντος προσδιορίζονται συναρτήσει των συνθηκών της βιομηχανικής παραγωγής του. Αυτή η συνάρτηση δεν έχει αναγκαία τη μορφή ενός ποσοτικού υποδείγματος στηριζόμενου είτε σε ένα φυσικοχημικό μηχανισμό με στέρεο θεωρητικό υπόβαθρο είτε σε μία εμπειρική σχέση. Αλλά και όταν προϋπάρχει ένα θεωρητικό ή εμπειρικό υπόδειγμα, οι παράγοντες που παρεμβάλλονται στη βιομηχανική πράξη είναι δυνατό να συμβάλλουν στην απόκλιση των μετρούμενων τιμών των ιδιοτήτων του προϊόντος από τις αντίστοιχες αναμενόμενες τιμές. Για να αποφύγουμε τις αδυναμίες ενός ντετερμινιστικού υποδείγματος ή για να αναπληρώσουμε την πλήρη έλλειψή του, μπορούμε να καταφύγουμε είτε σε στοχαστικές (πιθανοτικές) απεικονίσεις/αντιστοιχίσεις είτε στη χρήση νευροασαφών (NeuroFuzzy – NF) μεθόδων. Στη δεύτερη περίπτωση, θεωρούνται οι συνθήκες παραγωγής ως είσοδος (input) και οι ιδιότητες του προϊόντος ως έξοδος (output) σε ένα σύστημα ή μηχανισμό μετατροπής (Transformation Mechanism – TM)· στη συνέχεια, σχεδιάζεται/αναπτύσσεται ο αντίστροφος μηχανισμός (Inverse Transformation Mechanism – ITM) με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου διανύσματος εισόδου \mathbf{i} όταν το διάνυσμα εξόδου \mathbf{o} δίνεται είτε από συγκεκριμένο πελάτη είτε από την επικρατούσα τάση στην αγορά είτε από ένα θεσμικό πλαίσιο (της διάζευξης νοούμενης εγκλειστικής). Σημειώνεται ότι τα διανύσματα \mathbf{i} , \mathbf{o} αναφέρονται στην είσοδο/έξοδο του TM, που συμπίπτουν με την έξοδο/είσοδο του ITM, αντίστοιχα. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, ο ITM λειτουργεί ως συμπερασματικός/προσδιοριστικός μηχανισμός (inference engine) ώστε να επιτευχθεί πειραματικά και υπολογιστικά ο βέλτιστος έλεγχος της διεργασίας off-line. Αν μάλιστα οι πειραματικές μετρήσεις γίνονται in situ και ταχέως, τότε είναι δυνατός ο online έλεγχος σε πραγματικό χρόνο παραγωγής.



Σχήμα 3.1. Σχηματική παρουσίαση των οδεύσεων TM/ITM, με αφετηρία στην πλευρά της προσφοράς/ζήτησης, αντίστοιχα.

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν, χρησιμοποιείται η τεχνική της νευρο-ασαφούς προσέγγισης (Neurofuzzy Approximation – NFA) και της ασαφούς πολυκριτηριακής

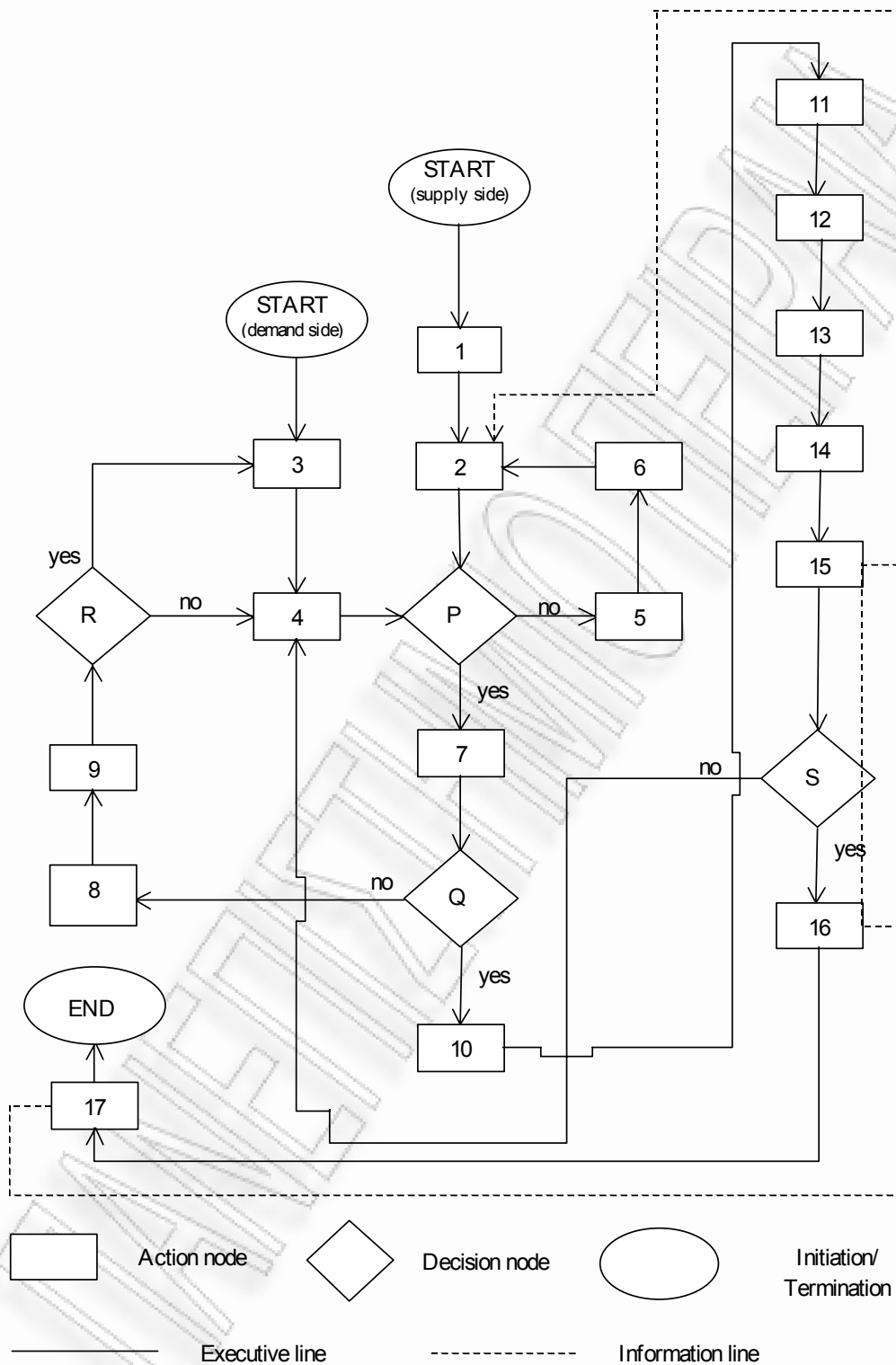
ανάλυσης – (Fuzzy Multicriteria Analysis – FMCA) για τους ΤΜ και ΙΤΜ, αντίστοιχα, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της βελτιστοποίησης του συστήματος της βιομηχανικής παραγωγής. Για τη διαδικασία ‘μάθησης’ του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιούνται κατάλληλες μετρήσεις που ελήφθησαν από προσομοιωτές εργαστηριακής κλίμακας και από συσκευές βιομηχανικής κλίμακας (που λειτουργούν σε συγκρίσιμες συνθήκες παραγωγής) που περιέχονται σε μία Βάση Δεδομένων (Database – DB), η οποία συνεχώς εμπλουτίζεται. Για τον προσδιορισμό του συνόλου των μετρήσεων μάθησης, λαμβάνουμε υπ’ όψη (α) τις προδιαγραφές του προϊόντος, (β) τις συνθήκες παραγωγής του προϊόντος με τις συγκεκριμένες προδιαγραφές στην ίδια εγκατάσταση κατά το παρελθόν, (γ) την τεχνική βιβλιογραφία, ιδιαίτερα όταν το σύνολο των μετρήσεων, που συλλέγονται με τον υποδεικνυόμενο κατά την υπό στοιχείο (β) διαδικασία, κρίνεται ως ανεπαρκής και (δ) τις πρόσφατες μετρήσεις, που απεικονίζουν την παρούσα κατάσταση. Η τελευταία κατηγορία μετρήσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή: (α) ορισμένες παράμετροι δεν μετρώνται άμεσα (π.χ. γήρανση λουτρού, χωρική κατανομή χαρακτηριστικών ανάδευσης και απαγωγής θερμότητα) και (β) κατά τη λύση του προβλήματος, επιδιώκεται η υπόδειξη εκείνων των συνθηκών παραγωγής που ευρίσκονται πλησιέστερα στην παρούσα κατάσταση, εφόσον προκύπτουν εξίσου εφικτές εναλλακτικές λύσεις. Αν ουδεμία λύση είναι ικανοποιητική, το σχεδιασθέν λογισμικό προβλέπει επικοινωνία ανθρώπου – μηχανής (δηλ. με τον πελάτη ή το τμήμα marketing) για ‘χαλάρωση’ των προδιαγραφών, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν θεσμοθετημένες δεσμεύσεις. Τέτοιου είδους δεσμεύσεις είναι ασυνήθεις στο ανοδιωμένο αλουμίνιο ή τον επιμεταλλωμένο χάλυβα ενώ είναι συνήθεις σε άλλα βιομηχανικά προϊόντα (π.χ. τρόφιμα, ποτά, φάρμακα, καλλυντικά, εκρηκτικά). Σημειώνεται ότι το ίδιο λογισμικό ενημερώνει την DB με τα νέα δεδομένα που προκύπτουν από τον ποιοτικό έλεγχο κάθε παρτίδας, ενώ είναι εφικτός και ο εμπλουτισμός με δεδομένα από άλλες εγκαταστάσεις που έχουν όμοια χαρακτηριστικά και ακολουθούν την ίδια διαδικασία. Στην περίπτωση όμως που επιδιώκεται εμπλουτισμός από την τεχνική βιβλιογραφία, πρέπει η αναζήτηση της κατάλληλης πληροφορίας να γίνει διά μέσου ενός αυτόνομου ενδιάμεσου λογισμικού (Intelligent Agent – IA) ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητα (βλ. [1, 2]).

3.2 Μεθοδολογία

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που σχεδιάστηκε/αναπτύχθηκε για τη βελτιστοποίηση της ανοδιώσης του αλουμινίου βασίζεται σε μετρήσεις παραμέτρων ελέγχου της διεργασίας και ιδιοτήτων του προϊόντος που εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο είτε επί της γραμμής

παραγωγής, είτε εκτός αυτής. Η συνολική διαδικασία περιλαμβάνει 17 στάδια δραστηριότητας και 4 κόμβους απόφασης. Η πραγματοποίηση της έναρξης είναι δυνατή τόσο από την πλευρά της προσφοράς όσο και από την πλευρά της ζήτησης, παρ'όλο ότι συνήθως υπάρχει μία χρονική υστέρηση μεταξύ αυτών: η πλευρά τη ζήτησης προηγείται όταν συγκεκριμένος πελάτης θέτει μια παραγγελία ενώ η πλευρά της προσφοράς προηγείται όταν το τμήμα marketing προβλέπει βραχυχρόνια αύξηση των πωλήσεων συγκεκριμένου είδους και το τμήμα παραγωγής προβαίνει σε αύξηση των ηλεκτροχημικά επεξεργαζόμενων αντικειμένων. Οι εναλλακτικές λύσεις που χρησιμοποιούνται για την πολυκριτηριακή επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού τιμών παραμέτρων ελέγχου (διάνυσμα εισόδου στη διαδικασία TM) σχεδιάζονται με (α) ομαδοποίηση όλων των διαθέσιμων εφικτών επί μέρους λύσεων σύμφωνα με την ακολουθούμενη διαδικασία TM και (β) προεπιλογή των ομάδων οι οποίες υποδεικνύουν λύσεις πραγματοποιήσιμες χωρίς μείζονες αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων που προσδιορίζουν τις συνθήκες παραγωγής της τρέχουσας παρτίδας. Κάθε μία προεπιλεγμένη ομάδα αντιπροσωπεύεται από το διάνυσμα κέντρου βάρους ή από το πλησιέστερο διάνυσμα προς το κεντροειδές αν η ομάδα είναι συνεκτική ή όχι, αντίστοιχα. Η αξιολόγηση των στοιχείων τόσο του διανύσματος όσο και της μήτρας προτίμησης (preference matrix) γίνεται από το τεχνικό προσωπικό σύμφωνα με μια ειδικά προσαρμοσμένη μέθοδο Delphi τριών σταδίων. Στη συνέχεια περιγράφονται τα εκτελεστικά στάδια δραστηριότητας και οι κόμβοι απόφασης της ακολουθούμενης διαδικασίας ενώ οι σχέσεις μεταξύ αυτών απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2.

1. Αρχική συλλογή αριθμητικών δεδομένων αναφερόμενων σε προεπιλεγμένες μεταβλητές ελέγχου συνθηκών παραγωγής
2. Δημιουργία / Εμπλουτισμός DB
3. Εξειδίκευση των προδιαγραφών του προϊόντος, όπως τίθενται από τον πελάτη (συγκεκριμένη παραγγελία) ή το τμήμα marketing (δηλ. την αγορά)
4. Αντιστοίχιση αριθμητικών τιμών των μεταβλητών ελέγχου της παραγωγής προς τις ζητούμενες προδιαγραφές
5. Συμπλήρωση του κανάβου των αντιστοιχίσεων με τεχνικές αριθμητικής ανάλυσης (π.χ. μη γραμμική παρεμβολή με κυβικές splines ή κατά Langrange)
6. Συμπλήρωση του κανάβου των αντιστοιχίσεων με μετρήσεις, όπου αυτό είναι απαραίτητο.
7. Εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων του νευροασαφούς δικτύου με βάση τον κανάβο των αντιστοιχίσεων (διαδικασία μάθησης) – Αξιολόγηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τη βοήθεια Δεικτών Σφάλματος – αν το σφάλμα δεν είναι αποδεκτό,



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα ροής, υπό μορφή αλγοριθμικής διαδικασίας για τη βελτιστοποίηση της ανοδίωσης μέσω ενός συνδυασμού νευροασαφούς προσέγγισης και πολυκριτηριακής ανάλυσης.

- επανάληψη της διαδικασίας μάθησης με τροποποίηση του νευροασαφούς δικτύου (αύξηση νευρώνων/κανόνων) μέχρι την επίτευξη αποδεκτού σφάλματος.
8. Χαλάρωση των προδιαγραφών με αύξηση των επιτρεπόμενων ανοχών μέχρι την επίτευξη αποδεκτών τιμών για τα στοιχεία του διανύσματος **o**.
 9. Παρουσίαση των νέων προδιαγραφών (ελάχιστης χαλάρωσης) στον πελάτη ή το τμήμα marketing.
 10. Ομαδοποίηση και προεπιλογή διανυσμάτων εισόδου για το σχηματισμό του συνόλου των εναλλακτικών λύσεων
 11. Εκτίμηση του ασαφούς διανύσματος των βαρών των κριτηρίων
 12. Εκτίμηση των τιμών των στοιχείων του ασαφούς πολυκριτηριακού πίνακα.
 13. Εκτέλεση του προγράμματος της FMCA
 14. Ανοδίωση του αλουμινίου (ή επιμετάλλωση του χάλυβα) με εφαρμογή των προτεινόμενων τιμών μεταβλητών / παραμέτρων
 15. Μέτρηση ιδιοτήτων του προϊόντος και σύγκριση με τις προδιαγραφές
 16. Δυναμική απεικόνιση των λοιπών σχέσεων λειτουργίας/ελέγχου της ανοδίωσης υπό μορφή οντολογίας
 17. Σχεδίαση/ανάπτυξη σύντομου προγράμματος H/Y (shortcut) για την ταχεία εκτίμηση των τιμών των λοιπών παραμέτρων της ανοδίωσης.
- P. Τα διαθέσιμα δεδομένα των μετρήσεων καλύπτουν ικανοποιητικά τον εξεταζόμενο χώρο του κανάβου;
- Q. Υπάρχει τουλάχιστον μια λύση διανύσματος εισόδου i στον εξεταζόμενο χώρο του κανάβου;
- R. Υπάρχει τουλάχιστον μια εναλλακτική πρόταση που έχει γίνει αποδεκτή;
- S. Είναι η σύγκριση ικανοποιητική;

3.3 Νευροασαφής Προσέγγιση (TM)

Το υπόδειγμα απεικόνισης των συνθηκών παραγωγής (**i**) στις ιδιότητες του προϊόντος (**o**) είναι μία μη γραμμική σχέση. Κατά τις δύο περασμένες δεκαετίες έχουν δημοσιευθεί αρκετές εργασίες πάνω στα νευροασαφή συστήματα, όπου έχει βρεθεί ότι η ασαφής μοντελοποίηση μπορεί να προσεγγίσει μια βιομηχανική διεργασία, σαν αυτή που μελετάμε, καλύτερα από τις συμβατικές μεθόδους, αφού η ασαφής συνεπαγωγή (ή συμπερασματικός μηχανισμός – inference engine) που χρησιμοποιεί/δέχεται και ανακριβή δεδομένα τα οποία ενυπάρχουν στη γνώση στην οποία στηρίζεται η μοντελοποίηση. Στο υβριδικό νευροασαφές σύστημα που χρησιμοποιείται εδώ, τα ασαφή σύνολα αντιμετωπίζονται ως βάρη, ενώ οι

μεταβλητές εισόδου, εξόδου και οι κανόνες ως νευρώνες. Αυτό το σύστημα κληρονομεί τη μέθοδο μάθησης (π.χ. οπίσθια διάδοση σφάλματος – backpropagation) από τα νευρωνικά δίκτυα, αλλά μπορεί να ταυτιστεί εννοιολογικά με ένα ασαφές σύστημα, και γενικά συνδυάζει τα προτερήματα των δύο συστημάτων απ' όπου προέρχεται. Από τα νευροασαφή δίκτυα που μελετήθηκαν, βρέθηκε ότι το ANFIS (Adaptive Neurofuzzy Inference System) του Jang [3] είναι το πιο κατάλληλο για την περίπτωσή μας. Το ANFIS είναι μία επέκταση του νευροασαφούς μοντέλου που αναπτύχθηκε από τους Takagi και Sugeno [4]. Η κύρια διαφορά είναι ότι το πρώτο είναι σε μορφή δικτύου και χρησιμοποιεί τη μέθοδο μείωσης της κλίσης του σφάλματος (gradient descent) ενώ το δεύτερο χρησιμοποιούσε τη μη γραμμική μέθοδο βελτιστοποίησης complex. Στην παρούσα εργασία, έχει γίνει μία ακόμη παραπέρα βελτίωση του αλγορίθμου του ANFIS, ώστε να δέχεται παραπάνω από μία μεταβλητές εξόδου. Έτσι, το υπόδειγμα ANFIS που χρησιμοποιείται στο στάδιο 7 (βλ. Σχήμα 3.2) έχει ασαφείς συνεπαγωγές με n μεταβλητές εισόδου και m μεταβλητές εξόδου της μορφής:

$$R^i : \text{Εάν } x_1 \text{ είναι } A_1^i \text{ και } x_2 \text{ είναι } A_2^i \dots \text{ και } x_n \text{ είναι } A_n^i \text{ τότε } y_1^i = c_0^{i,1} + c_1^{i,1}x_1 + \dots + c_n^{i,1}x_n \text{ και } \dots y_m^i = c_0^{i,m} + c_1^{i,m}x_1 + \dots + c_n^{i,m}x_n$$

όπου A_j^i , $j \in [1, n]$ είναι η γλωσσική τιμή της γλωσσικής μεταβλητής j με την οποία συναντάται στον i κανόνα, x_j μία μεταβλητή εισόδου, $c_j^{i,k}$, $k \in [1, m]$ είναι μία παράμετρος του επακόλουθου/συμπεράσματος του κανόνα, και πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής της μεταβλητής εισόδου j , για την k μεταβλητή εξόδου στον i κανόνα (εκτός από τον c_0 που είναι σταθερός όρος). Οι ασαφείς τιμές αντιπροσωπεύονται από ασαφή σύνολα με συναρτήσεις συμμετοχής σε σχήμα καμπάνας (bell shaped) ή καμπύλης Gauss. Για κάποιο δοσμένο διάνυσμα εισόδου, η μεταβλητή εξόδου y_k βρίσκεται παίρνοντας το σταθμισμένο μέσο όρο αυτής της μεταβλητής από όλους τους κανόνες y_k^i . Το βάρος κάθε κανόνα w_i είναι το γινόμενο των βαθμών συμμετοχής $A_1^i(x_1), \dots, A_n^i(x_n)$. Δεν είναι αναγκαίο να ευρίσκονται όλες οι μεταβλητές εισόδου στο αίτιο/υπόθεση (premise) του κανόνα, όπως και δεν είναι αναγκαίο να βρίσκονται όλες στο επακόλουθο/συμπέρασμα (consequent). Ποιες από αυτές θα πάρουν μέρος στο αίτιο/υπόθεση του κανόνα και με πόσα ασαφή σύνολα (γλωσσικούς όρους) η κάθε μία, μπορεί να προσδιορισθεί από μία διαδικασία ταυτοποίησης του ασαφούς υποδείγματος, που περιλαμβάνει από τέσσερα βήματα:

- 1) Ταυτοποίηση της δομής του αιτίου του κανόνα, όπου ένας αριθμός υποδειγμάτων αναπτύσσεται κάθε φορά είτε εισάγοντας και μια ακόμη μεταβλητή στο αίτιο (αρχίζοντας με 2 γλωσσικές τιμές) είτε διαιρώντας αυτήν σε ασαφή υποσύνολα αυξάνοντας τα ήδη υπάρχοντα, διατηρώντας πάντοτε με συνέπεια μία πορεία μείωσης του σφάλματος (εδώ λογιζόμενου ως τετραγωνικής ρίζας της μέσης τιμής του

αθροίσματος των τετραγωνικών αποκλίσεων) κάθε φορά που επαναλαμβάνεται η εκτέλεση των βημάτων II και III. Αυτή η διαδικασία οδηγεί σε έναν αποτελεσματικό διαμερισμό του χώρου των μεταβλητών εισόδου σε υπο-χώρους (ασαφή σύνολα) στους οποίους βασίζεται η διατύπωση του αιτίου/υπόθεσης (If Part) κάθε κανόνα.

- II) Ταυτοποίηση παραμέτρων στο επακόλουθο/αποτέλεσμα κάθε κανόνα, χρησιμοποιώντας μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, διατηρώντας τις παραμέτρους των ασαφών συνόλων στο αίτιο/υπόθεση κάθε κανόνα σταθερές
- III) Ταυτοποίηση παραμέτρων στις συναρτήσεις συμμετοχής στα ασαφή σύνολα των τιμών των μεταβλητών εισόδου· αυτές υπολογίζονται με τη μέθοδο μείωσης της κλίσης του σφάλματος (gradient descent) που υπολογίστηκε στο (II) ως προς τις παραμέτρους αυτές, αφού ευρεθεί για κάθε κόμβο του νευροασαφούς δικτύου η παράγωγος του σφάλματος ως προς την τιμή της εξόδου από αυτόν τον κόμβο.
- IV) Ταυτοποίηση της δομής του επακόλουθο/συμπεράσματος του κανόνα, όπου κάθε φορά βγάζουμε και μία μεταβλητή από αυτό (στο βήμα I) έχουμε όλες τις μεταβλητές του συστήματος στο επακόλουθο/συμπέρασμα), και εντοπίζουμε τη μεταβλητή για την οποία ο δείκτης του σφάλματος δεν αυξήθηκε σημαντικά, οπότε αυτή η μεταβλητή θεωρείται περιττή, και μπορεί να φύγει – το ίδιο κάνουμε για τις υπόλοιπες μεταβλητές που απομένουν.

Τα βήματα (II) και (III), που επαναλαμβάνονται μέχρι το σφάλμα να είναι μικρότερο από μία οριακή τιμή, αποτελούν τον αλγόριθμο μάθησης του ANFIS από δεδομένα εισόδου και εξόδου (εποπτευόμενη μάθηση – supervised learning). Το συνολικό αποτέλεσμα του αλγορίθμου είναι η δημιουργία ενός συναρτησιακού μοντέλου που απεικονίζει το διάνυσμα εισόδου (\mathbf{i}) σε αυτό της εξόδου (\mathbf{o}), από το οποίο μπορούμε να συμπεράνουμε εάν υπάρχουν συνδυασμοί των συνθηκών παραγωγής στο \mathbf{i} που να ικανοποιούν τις προδιαγραφές του πελάτη. Εάν δεν υπάρχουν, τότε στο στάδιο 8 γίνεται σταδιακή επέκταση του διαστήματος ανοχής των προδιαγραφών μέχρι να πάρουμε αποδεκτές τιμές στο διάνυσμα εξόδου \mathbf{o} , ακόμα και αν οι μετρήσεις στην αντίστοιχη υποπεριοχή του \mathbf{i} δεν είναι επαρκείς. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της επέκτασης αυτής μετασχηματίζονται κατάλληλα (αντίστροφη δράση από αυτή που αναφέρεται στο στάδιο 4) και παρουσιάζονται στον πελάτη, ο οποίος ερωτάται εάν συμφωνεί (στάδιο 9 και κόμβος απόφασης R στο Σχήμα 3.2). Σε περίπτωση κατάφασης, η αλγοριθμική διαδικασία συνεχίζεται με επανεργοποίηση του εκτελεστικού σταδίου δραστηριότητας 3.

3.4 Πολυκριτηριακή ανάλυση

Η επίλυση του προβλήματος της πολυκριτηριακής ανάλυσης συνίσταται στην εύρεση του $Max\{f_1(a), \dots, f_K(a) \mid a \in A\}$, όπου A είναι το αρχικό σύνολο των T εναλλακτικών διανυσμάτων εισόδου και $f_i, i = 1, \dots, K$, είναι τα K κριτήρια αξιολόγησης αυτών των υπό μορφή διανυσμάτων εναλλακτικών λύσεων. Η διαδικασία αποτελείται από δύο βήματα: (i) διαμόρφωση της πολυκριτηριακής μήτρας ($K \times T$), όπου κάθε στοιχείο x_{kt} απεικονίζει την αξιολόγηση της εναλλακτικής λύσης a_t ως προς το κριτήριο f_k , και (ii) την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, σύμφωνα με ένα σύνολο προκαθορισμένων κανόνων. Η μέτρηση της προτίμησης της εναλλακτικής λύσης a_t δίνεται από το άθροισμα των τιμών x_{kt} , οι οποίες έχουν προηγουμένως πολλαπλασιαστεί με την αντίστοιχη τιμή w_k του διανύσματος των βαρών. Τα αθροίσματα όμως αυτά υπερκαλύπτουν επιμέρους διαφορές μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων που είναι χρήσιμες για την ανάλυση ευαισθησίας και τον προσδιορισμό της ευρωστίας (robustness) τόσο της τελικά προκρινόμενης λύσης όσο και οποιασδήποτε λύσης για την οποία θα θέλαμε να διαπιστώσουμε το εύρος των τιμών (των ανεξάρτητων/ερμηνευτικών μεταβλητών και παραμέτρων), οι οποίες δεν επηρεάζουν τη θέση της εξεταζόμενης λύσης στην τελική κατάταξη.

Μελετήθηκαν διάφορες μέθοδοι που συμβάλλουν στην επισήμανση του ρόλου των διαφορών αυτών, αποκαλύπτοντας την μη-συγκρισιμότητα (aRb) και την ασθενή προτίμηση (aQb) μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων a,b, πέραν της ισχυρής προτίμησης (aPb) και της αδιαφορίας (aIb) που έδιναν ως αποτέλεσμα οι παλαιότερες μέθοδοι. Η μέθοδος PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations, [5]) προτιμήθηκε για να αποτελέσει τη βάση στην οποία οικοδομήθηκε το λογισμικό της παρούσας διατριβής, λόγω της απλότητας, της σαφήνειας και της ευστάθειας/αξιοπιστίας που την διακρίνουν. Η έννοια του γενικευμένου κριτηρίου χρησιμοποιήθηκε για την επιδιωκόμενη κατάταξη υπό τη μορφή του δείκτη προτίμησης $\Pi(a,b) = \sum w_i P(a,b) / \sum w_i$ ως σταθμισμένη μέση τιμή της συνάρτησης προτίμησης P_i που ποσοτικοποιεί την προτίμηση της εναλλακτικής λύσης a έναντι της b , λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια. Με όρους τοπολογίας, οι τιμές του δείκτη προτίμησης μπορούν να παρασταθούν ως γράφημα, όπου οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν το σύνολο των εναλλακτικών λύσεων. Αθροίζοντας τα στοιχεία κάθε σειράς της προκύπτουσας Π-μήτρας συσχέτισης (διπλής εισόδου) λαμβάνεται η ροή εξόδου από κάθε κόμβο, η οποία είναι μέτρο της υπεροχής του. Αντιστρόφως, αθροίζοντας τα στοιχεία κάθε στήλης, λαμβάνεται η ροή εισόδου σε κάθε κόμβο, η οποία δείχνει κατά πόσον υπολείπεται έναντι των άλλων.

Θεωρώντας αμφότερες τις ροές, εξόδου και εισόδου, καθώς και το γεγονός ότι όσο υψηλότερη η πρώτη και χαμηλότερη η δεύτερη τόσο καλύτερη (δηλ. υψηλότερα στην τελική κατάταξη) η εξεταζόμενη εναλλακτική λύση, λαμβάνεται η μερική κατάταξη (Partial Preorder of Alternatives – PRA) PROMETHEE I. Αν και η PRA φέρει πληροφορία ανώτερου επιπέδου (information granularity level), υπάρχουν περιπτώσεις όπου απαιτείται μόνον η συνολική κατάταξη (Total Preorder of Alternatives – TRA) PROMETHEE II, προκειμένου να αποφευχθεί η εμφάνιση μη-συγκρίσιμων εναλλακτικών λύσεων. Η TRA λαμβάνεται θεωρώντας μόνον το διανυσματικό άθροισμα εκροών/εισροών (δηλ. την καθαρή ροή) κάθε κόμβου του γραφήματος.

Ως γενικευμένο κριτήριο, χρησιμοποιήθηκε η βαθμωτή γραμμική συνάρτηση προτίμησης $P = H(d) \in [0,1]$, όπου d είναι η διαφορά της αξιολόγησης μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων a, b , ως προς κάθε επιμέρους κριτήριο. Η παράμετροι της συνάρτησης $H(d)$ είναι αφενός μεν ένα όριο αδιαφορίας q , που ταυτίζεται με την μέγιστη τιμή της d , κάτω της οποίας υπάρχει αδιαφορία, αφετέρου δε ένα όριο προτίμησης p , που ταυτίζεται με την ελάχιστη τιμή της d , άνω της οποίας υπάρχει αυστηρή/πλήρης προτίμηση. Το διάστημα τιμών της d μεταξύ q και p θεωρείται ότι ανήκει στην περιοχή ασθενούς προτίμησης, η οποία είναι τόσο (αναλογικά) ασθενέστερη όσο πλησιέστερα είναι η τιμή της d προς την q .

Η παραπάνω μέθοδος τροποποιήθηκε με την εισαγωγή ασαφών συνόλων για την απεικόνιση ασαφών αριθμών προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα που υπεισέρχεται στην εκτίμηση των τιμών του διανύσματος των βαρών και της πολυκριτήριας μήτρας. Οι ασαφείς αριθμοί γράφονται με τη συνήθη L-R μορφή (ή m, a, b), όπου L, R, το αριστερό (a) και δεξιό (b) πλάτος τιμών ως προς την τιμή (m) της ανεξάρτητης/ερμηνευτικής μεταβλητής για την οποίαν ο βαθμός συμμετοχής (membership degree) ισούται με την μονάδα. Οι αριθμητικές πράξεις βασίστηκαν στην κλασική άλγεβρα των ασαφών αριθμών που θεμελίωσαν οι Dubois & Prade [6]. Στη συνέχεια, ενσωματώθηκε στο λογισμικό που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής (βλ. ενδεικτικά αποσπάσματα στα Παραρτήματα I – VII) αλλά διατηρήθηκε και ως αυτοτελές πρόγραμμα H/Y, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην (i) εκπόνηση διπλωματικών εργασιών και (ii) διεξαγωγή ερευνητικών έργων του Εργαστηρίου Προσομοίωσης Βιομηχανικών Διεργασιών, οι οποίες οδήγησαν στη δημοσίευση αντίστοιχων επιστημονικών εργασιών [7-16].

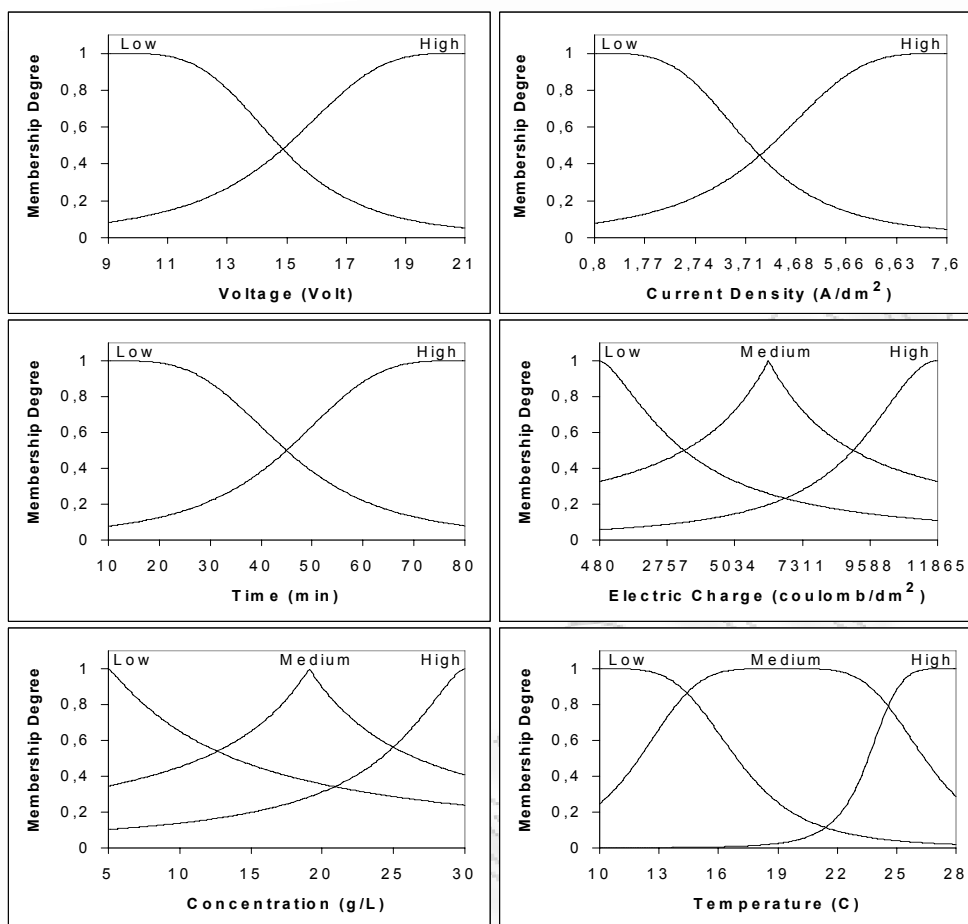
Το λογισμικό που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει τις βασικές μεθόδους απασαφοποίησης/κατάταξης ασαφών αριθμών για την εξαγωγή των τελικών PRA και TRA αποτελεσμάτων και την ανάλυση ευαισθησίας ως προς κάθε κριτήριο. Ενδεικτικά αναφέρονται οι μέθοδοι Yager, Jain, Tseng & Klein, Baas & Kuakernaak και Baldwin &

Guild (βλ. Παράρτημα II). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στις περισσότερες περιπτώσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή είναι των Tseng & Klein [17], η οποία βασίζεται στη σύγκριση της θέσης των σχημάτων που παριστούν γεωμετρικά τους ασαφείς αριθμούς ενώ η ποσοτικοποίηση επιτυγχάνεται μέσω των αντίστοιχων εμβαδών. Ειδικότερα, αφού εξαλειφθεί το κοινό εμβαδόν, συγκρίνονται τα εμβαδά υπεροχής/έλλειψης, τα οποία αθροίζονται αλγεβρικά και δίνουν τελικά έναν απλό αριθμητικό (crisp) δείκτη κανονικοποιημένο, ώστε να διατηρείται η συγκρισιμότητα. Διασαφηνίζεται ότι η μέθοδος αυτή, η οποία απεικονίζεται στο Παράρτημα VIII για τραπεζοειδείς ασαφείς αριθμούς, δεν βασίζεται σε απασαφοποίηση (defuzzification) μεμονωμένων αριθμών αλλά στην κατά ζεύγη σύγκριση κόμβων (pair-wise comparison), με αποτέλεσμα να αποδεικνύεται εξαιρετικά χρήσιμη στην FMCA, ιδιαίτερα με την μορφή που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή και στις αντίστοιχες επιστημονικές δημοσιεύσεις που έχουν προκύψει από αυτήν.

3.5 Εφαρμογή της μεθόδου

Η περιγραφόμενη στις προηγούμενες Ενότητες μεθοδολογία εφαρμόστηκε με επιτυχία στην περίπτωση της ηλεκτροχημικής επεξεργασίας του αλουμινίου για τη δημιουργία ανοδικού στρώματος πάχους $24 \pm 0,5$ μm και πορώδους $12,5 \pm 1$ % (προδιαγραφές προϊόντος), σε εργαστηριακούς προσομοιωτές που λειτουργούν κάτω από βιομηχανικές συνθήκες/προδιαγραφές. Τα στοιχεία του διανύσματος εισόδου ήταν οι ακόλουθες μεταβλητές, με τα πεδία μεταβολής σημειούμενα σε παρένθεση: ηλεκτρική τάση (9 – 21 V), πυκνότητα έντασης ηλεκτρικού ρεύματος (0,8 – 7,6 A/dm²), χρόνος ανοδίωσης (10 – 80 min), ηλεκτροχημική απόδοση (80 – 90%), συγκέντρωση ηλεκτρολύτη (5 – 30 g H₂SO₄ / L) και θερμοκρασία λουτρού (10 – 28 °C). Ο μη-καταστροφικός έλεγχος του πάχους του στρώματος έγινε με μετρήσεις ηλεκτρικής επαγωγής ενώ η βαθμονόμηση/διακρίβωση (calibration) έγινε με μέτρηση διατομής (μετά από εγκιβωτισμό σε πλαστικό και κοπή σε μικροτόμο) σε οπτικό μικροσκόπιο, σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ASTM B487/1985/97. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η καταστροφική δοκιμή της απογύμνωσης του αλουμινίου από το ανοδικό στρώμα με τη βοήθεια ζέοντος υδατικού διαλύματος χρωμικού/φωσφορικού οξέος, προκειμένου να μετρηθεί έμμεσα το πορώδες. Με τον τρόπο αυτόν, μετρήθηκαν οι τιμές του διανύσματος εξόδου (με δύο στοιχεία) που αντιστοιχούν στο δεδομένο διάνυσμα εξόδου (με έξι στοιχεία).

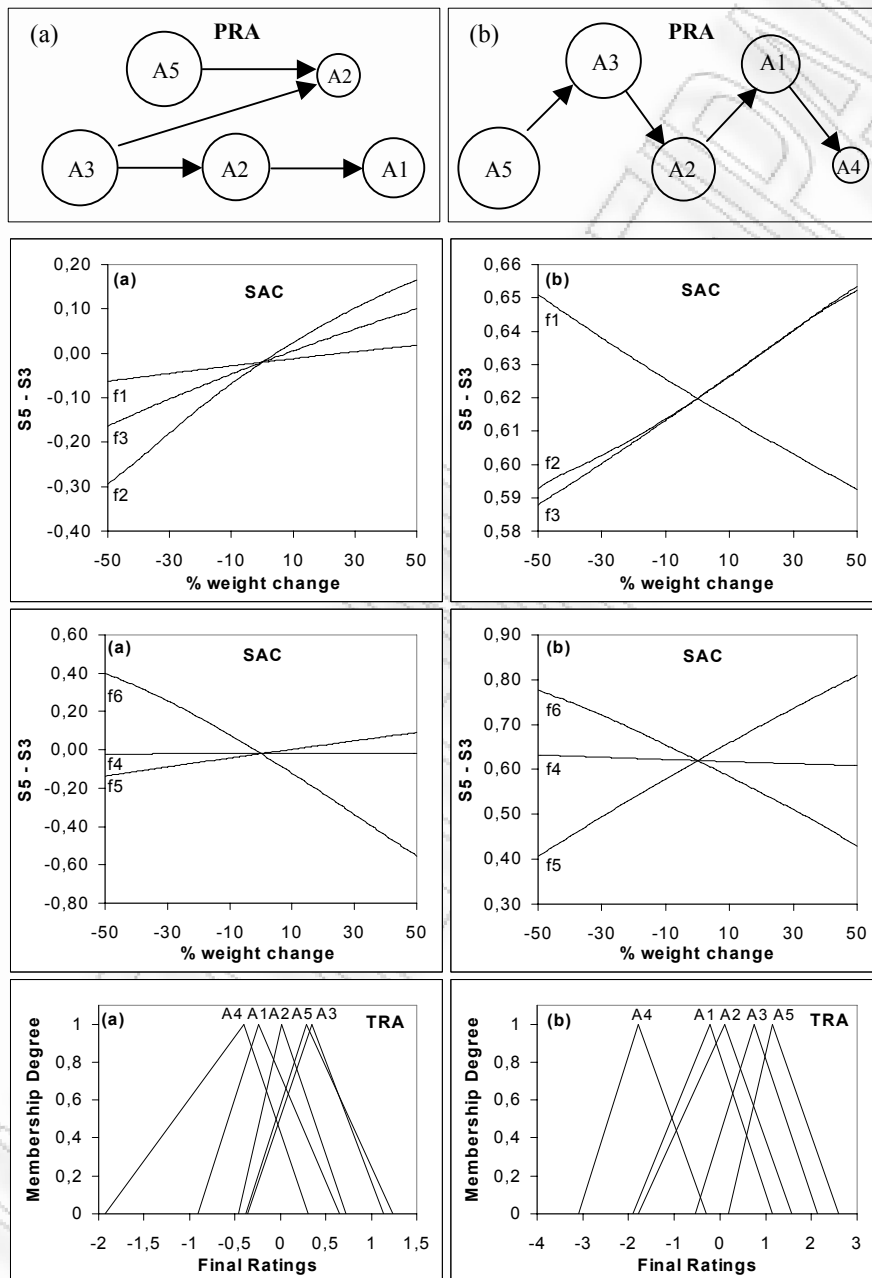
Τα αποτελέσματα της μάθησης για την όδευση TM του νευροασαφούς συστήματος έδωσαν τον διαμερισμό των παραμέτρων του αιτίου/υπόθεσης (διάνυσμα εισόδου), που απεικονίζονται στα ασαφή σύνολα του Σχήματος 3.3. Η αντιστοίχιση εισόδου-εξόδου έδωσε,



Σχήμα 3.3. Απεικόνιση των 6 μεταβλητών εισόδου υπό μορφή ασαφών συνόλων, όπως προσδιορίστηκαν στη φάση της μάθησης.

μετά την περίοδο μάθησης, 244 συνδυασμούς 6×2 , που ικανοποιούσαν τις προδιαγραφές της αγοράς. Οι συνδυασμοί αυτοί ομαδοποιήθηκαν σε 11 ομάδες που ελαττώθηκαν σε 5 μετά από φιλτράρισμα ικανοποίησης τεχνικών κριτηρίων εύρους/πυκνότητας. Τα κριτήρια f_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) εφαρμογής FMCA για την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων A_j ($j = 1, 2, \dots, 5$) είναι: Ενεργειακό κόστος για το σχηματισμό του ανοδικού στρώματος, f_1 . Κεφαλαιακό κόστος (λογιζόμενο μέσω των αποσβέσεων), f_2 . Συμβολή στην εύρυθμη λειτουργία, f_3 . Ενεργειακό κόστος για την ψύξη του λουτρού, f_4 . Ποιότητα ομάδας (χαρακτηριστική ακτίνα, μέση πυκνότητα, αποκλίσεις του κεντροειδούς), f_5 . Επιβάρυνση της ομάδας από αναμενόμενα ελαττώματα (με την προϋπόθεση ότι δεν υπερβαίνουν ένα ανώτατο όριο, πέραν του οποίου αποκλείεται η αντίστοιχη ομάδα από τη συμμετοχή της στο σύνολο των προς κατάταξη εφικτών εναλλακτικών λύσεων), f_6 . Το διάλυμα βάρους των κριτηρίων, όπως αυτό διαμορφώθηκε σύμφωνα με το στάδιο 11 (βλ. Σχήμα 3.2) είναι: f_1 (16, 1, 2), f_2 (22, 2, 1), f_3 (27, 2, 4), f_4 (5, 1, 1), f_5 (11, 2, 2), f_6 (19, 1, 3), όπου κάθε τριγωνικός ασαφής αριθμός

εμφανίζεται υπό τη συνήθη L,R μορφή. Χρησιμοποιήθηκε η γενικευμένη συνάρτηση προτίμησης, με δύο παραμέτρους: q , για τον προσδιορισμό της περιοχής αδιαφορίας (δηλ. κάτω όριο της γραμμικής εξάρτησης), και p για τον προσδιορισμό του άνω ορίου της γραμμικής εξάρτησης.



Σχήμα 3.4: Μερική κατάταξη των μεθόδων ανοδίωσης (PRA), ανάλυση ευαισθησίας ως προς κάθε ένα κριτήριο (SAC) και συνολική κατάταξη των εναλλακτικών μεθόδων (TRA), σε (a) επίπεδο χαμηλής ανάλυσης της προτίμησης (σχετικά υψηλές τιμές q, p) και (b) επίπεδο υψηλής ανάλυσης της προτίμησης (σχετικά χαμηλές τιμές q, p). Το σύμβολο ‘ \rightarrow ’ σημαίνει ‘καλύτερη από’. Η μέθοδος A_5 , αντιπροσωπευόμενη από το διάλυμα συνθηκών ανοδίωσης [14V – 2,2A – 41.8 min – 5513 Cb – 9,9% κ.β. H_2SO_4 – 24,2 °C], κατατάσσεται πρώτη στο επίπεδο υψηλής ανάλυσης της προτίμησης και η λύση αυτή αποδεικνύεται εύρωστη (robust).

3.6 Διερεύνηση οντολογικής σχέσης παραμέτρων ελέγχου

Η απεικόνιση των σχέσεων (στάδιο 16), που περιλαμβάνουν μεταβλητές/παραμέτρους των οποίων οι τιμές δεν ζητούνται a priori στο συγκεκριμένο πρόβλημα, είναι σημαντική, επειδή συμβάλει στη δόμηση ενός λειτουργικού γνωσιολογικού συνόλου, δηλ. μιας οντολογίας, που είναι δυνατόν να χρησιμεύσει ως υπόβαθρο είτε για την περαιτέρω μελέτη της ίδιας ηλεκτροχημικής διεργασίας είτε για την καλύτερη ανταπόκριση σε μία μελλοντική παραγγελία, όπου ενδεχομένως δεν θα ζητείται προϊόν με τα ίδια χαρακτηριστικά/προδιαγραφές.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η εκτίμηση των τιμών της ταχύτητας v διάλυσης μέρους του σχηματιζόμενου ανοδικού στρώματος, αφού πρόκειται για παράμετρο ελέγχου τόσο της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος (αύξηση του πορώδους και μείωση της αντίστασης στη διάβρωση) όσο και της γήρανσης του λουτρού (αύξηση των ιόντων Al στο διάλυμα, με συνέπεια τη μείωση της βιομηχανικής απόδοσης και την αυξημένη συχνότητα αντικατάστασης του λουτρού, με αποτέλεσμα απώλεια υλικών και αύξηση του όγκου των υγρών αποβλήτων). Υιοθετώντας το υπόδειγμα KHR (βλ. Κεφάλαιο 1), η πραγματική επιφάνεια S (cm²) του πορώδους ανοδικού στρώματος ανά μονάδα φαινόμενης επιφάνειας (π.χ. 1 cm², οπότε όλα τα μεγέθη που αναφέρονται παρακάτω ανάγονται σ' αυτήν τη μονάδα φαινόμενης επιφάνειας) είναι $S = 2\pi rhN + 1$ ή $S \approx 2\pi rhN$ (1)

όπου r (cm) είναι η μέση ακτίνα ενός πόρου, h (cm) είναι το πάχος του ανοδικού στρώματος και N ο αριθμός των κυλινδρικών πόρων ή των πρισματικών κυψελίδων διατομής κανονικού εξαγώνου. Λόγω της διαλυτικής επίδρασης του λουτρού της ανοδίωσης, για χρονική περίοδο t σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, οι τιμές των μεταβλητών δίνονται από τις σχέσεις

$$r = r_i + vt \text{ και } h = h_i - vt \quad (2)$$

όπου ο δείκτης i χαρακτηρίζει τις τιμές που λαμβάνονται για $t = 0$. Άρα, η (1) γίνεται

$$S \approx 2\pi(r_i + vt)(h_i - vt)N \quad (1a)$$

Η μάζα W_d (g) του αλουμινίου που διαλύεται σε χρόνο t είναι

$$W_d = kvd \int_0^t S(t) dt \text{ για } t < t_R \quad (3)$$

όπου k είναι η (αδιάστατη) αναλογία μάζας του αλουμινίου στο ανοδικό στρώμα, d (g/cm³) είναι το ειδικό βάρος του στρώματος και t_R (min) είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος ώστε $r = R$. Η αντικατάσταση της (1a) στην (3) δίνει

$$W_d = 2\pi kvdN \int_0^t [r_i h_i + (h_i - r_i)vt - v^2 t^2] dt$$

της οποίας η αναλυτική/ολοκληρωμένη μορφή είναι

$$W_d = kvdN \left\{ 2\pi r_i h_i t + \left[\pi v (h_i - r_i) t^2 - 2\pi v^2 t^3 / 3 \right] \right\} \quad (4)$$

Η συνολική μάζα W_a (g) αλουμινίου στο ανοδικό στρώμα κατά τη χρονική στιγμή $t = 0$ είναι

$$W_a = kh_i d - k\pi r_i^2 h_i N d \quad \text{ή} \quad W_a = kh_i d (1 - \pi r_i^2 N) \quad (5)$$

Στη σχέση αυτή, $kh_i d$ είναι η μάζα αλουμινίου σε ανοδικό στρώμα, πάχους h_i , αν αυτό ήταν συμπαγές, και $k\pi r_i^2 h_i N d$ είναι η μάζα του αλουμινίου που αντιστοιχεί στον όγκο των πόρων.

Ομοίως, ευρίσκεται ότι η μάζα $W_{d(t_R)}$ (g) του αλουμινίου που διαλύεται σε χρόνο t_R είναι

$$W_{d(t_R)} = k\pi R^2 h_i N d - k\pi r_i^2 h_i N d + kvdt_R \quad \text{ή} \quad W_{d(t_R)} = k\pi h_i N d (R^2 - r_i^2) \quad (6)$$

όπου ο όρος $kvdt_R$ είναι η μάζα του αλουμινίου που αντιστοιχεί στη φαινόμενη επιφάνεια του 1 cm^2 , η οποία αποτελεί και τη βάση αναγωγής των παραπάνω υπολογισμών. Ο όρος αυτός είναι αμελητέος, επειδή η φαινόμενη (σε σχέση με την πραγματική) επιφάνεια είναι αμελητέα, όπως έχει αποδειχθεί στο Κεφάλαιο 1.

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας, η οποία είναι βασική παράμετρος ελέγχου της συγκεκριμένης ηλεκτροχημικής διεργασίας, οι Nagayama και Tamura [18,19] έχουν προτείνει μία μέθοδο δοκιμής και λάθους (trial and error), στην οποία δίνουμε τη μορφή του παρακάτω αλγόριθμου πέντε-βημάτων, ώστε να είναι εφικτή η ανάπτυξη αντίστοιχου προγράμματος H/Y, προκειμένου να εξαχθούν αριθμητικά αποτελέσματα για διάφορα σύνολα τιμών εισόδου και να συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτά με εκείνα που λαμβάνονται με άλλες μεθόδους και προγράμματα που αναπτύσσουμε στη συνέχεια.

Βήμα 1: Για μία αρχική (χονδρικά/στατιστικά εκτιμώμενη από δεδομένα μετρήσεων σε όμοιες συνθήκες) τιμή $r_i(0)$ υπολογίζεται η τιμή της h_i από την (5), αφού η τιμή της W_a έχει μετρηθεί και οι τιμές των k , d , N είναι δυνατόν να ληφθούν από την τεχνική βιβλιογραφία.

Βήμα 2: Υπολογίζεται η τιμή της $W_{d(t_R)}$ από την (6) μετά από μέτρηση του χρόνου t_R .

Βήμα 3: Υπολογίζεται η τιμή της ταχύτητας διάλυσης v από την (4).

Βήμα 4: Αναθεωρείται/επανεκτιμάται η τιμή της r_i με τη βοήθεια της σχέσης $r_i = r_0 + vt_a/2$, όπου r_0 η εκτιμώμενη τιμή βάσει του υποδείγματος KHR και t_a ο χρόνος της ηλεκτροχημικής διεργασίας παραγωγής του ανοδικού στρώματος.

Βήμα 5: Η αναθεωρημένη τιμή r_i τίθεται ως input στο βήμα (1), εκτελούνται σε πρώτη επανάληψη τα βήματα 1-4, γίνεται νέα αναθεώρηση κ.ο.κ., μέχρις ότου επιτευχθεί σύγκλιση

σε επιθυμητό επίπεδο απόκλισης $a = 0.001$, δύο διαδοχικών αναθεωρημένων τιμών, δηλ.

$$\frac{|r_i(j-1) - r_i(j-2)|}{r_i(j-2)} \leq a, \quad \frac{|r_i(j) - r_i(j-1)|}{r_i(j-1)} \leq a$$

Για την υλοποίηση του παραπάνω αλγόριθμου, έχουμε αναπτύξει πρόγραμμα H/Y ενώ σε εφαρμογή του σταδίου 17 της διαδικασίας που περιγράφεται στην Ενότητα 2 του παρόντος Κεφαλαίου έχουμε σχεδιάσει/αναπτύξει εναλλακτικό πρόγραμμα ταχείας εκτίμησης της ταχύτητας διάλυσης v , χωρίς τα προαναφερόμενα 5 βήματα και χωρίς την προϋπόθεση αρχικής μέτρησης της ακτίνας r_i των πόρων. Στο εναλλακτικό πρόγραμμα ταχείας εκτίμησης (shortcut), διαμορφώνεται, με τη βοήθεια ενός ισοζύγιου υλικών για το αλουμίνιο ($W_a = W_d$, για $t = t_R$), η παραμετρική συνάρτηση συναρτήσεως

$$F_v = \pi \left(R^2 - (r_0 + t_a v / 2)^2 \right) H_v - v \left\{ 2\pi (r_0 + t_a v / 2) t_R H_v + \left[\pi v (H_v - r_0 - t_a v / 2) t_R^2 - 2\pi R^3 v^2 \right] \right\} \quad (7)$$

όπου $H_v = W_a / \{kd[1 - \pi N(r_0 + t_a v / 2)]\}$. Η τιμή της ταχύτητας διάλυσης προσδιορίζεται από την $F_v = 0$, όπως φαίνεται στο Παράρτημα ΙΧ, όπου αποδεικνύεται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν διαφέρουν από αυτά που λαμβάνονται από το πρόγραμμα που έχουμε αναπτύξει με τον αλγόριθμο των 5 βημάτων.

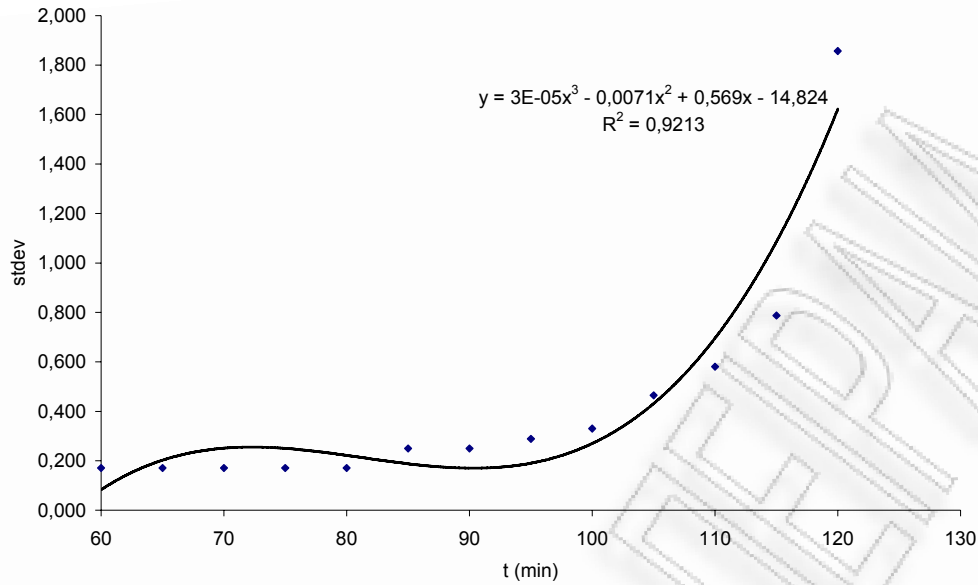
Ακολουθώντας την περιγραφόμενη στην [18] συμπλοκομετρική/φασματομετρική μέθοδο προσδιορισμού των ιόντων Al στο λουτρό της ανοδίωσης σε ανοικτό κύκλωμα, μετρήσαμε τις τιμές t_R για διάφορες συνθήκες ανοδίωσης, οπότε διαπιστώσαμε (i) σχετικά ομαλή πορεία των W_{dj} - τιμών για τιμές του t μέχρι $0,80 t_R$ και (ii) εξαιρετικά μικρή επαναληψιμότητα στον προσδιορισμό της τιμής $t = t_R$. Η επαναληψιμότητα γινόταν ακόμη μικρότερη με αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος, της τάσης της ανοδίωσης, της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και της θερμοκρασίας του λουτρού. Μετά από αυτή τη διαπίστωση, μετρήσαμε ζεύγη τιμών $[t_j, W_{dj}]$, προκειμένου να εφαρμόσουμε το υπόδειγμα 4 ως κινητική εξίσωση και να εκτιμήσουμε τις τιμές των v, h, r . Χρησιμοποιώντας μη γραμμική παλινδρόμηση (solver/excel), με αρχικές τιμές εκκίνησης της αλγοριθμικής διαδικασίας τις αναφερόμενες στην [18] εκτιμήσαμε τις τιμές των $v, (v, h), (v, r)$, διατηρώντας για την παράμετρο, της οποίας η τιμή δεν εκτιμάται, σταθερή την αρχική της τιμή. Η ταυτόχρονη εκτίμηση των τιμών όλων των παραμέτρων (v, h, r) δεν κατέστη εφικτή λόγω αστάθειας του χρησιμοποιούμενου υποδείγματος, ακόμη και όταν οι μετρήσεις δεν κάλυπταν ολόκληρη την περιοχή μέχρι $t = t_R$. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώθηκε με πολυωνυμική παλινδρόμηση του ίδιου υποδείγματος (4), δηλ. κατ'ουσίαν γραμμική παλινδρόμηση, αφού το σύστημα των κανονικών εξισώσεων που δίνει τις τιμές των συντελεστών οποιουδήποτε πολυωνύμου είναι γραμμικό ως προς του συντελεστές αυτού. Η επιβεβαίωση δεν επιδέχεται αμφισβήτηση,

επειδή (i) το σύστημα των κανονικών γραμμικών εξισώσεων δίνει ακριβή λύση, αφού χρησιμοποιείται αλγεβρική μέθοδος επίλυσης, σε αντίθεση με τη μη γραμμική παλινδρόμηση, όπου δίνει προσεγγιστική λύση, αφού χρησιμοποιούνται επαναληπτικές/αναζητητικές αλγοριθμικές μέθοδοι, χωρίς μάλιστα να υπολογίζουμε τον κίνδυνο σύγκλισης του αλγορίθμου σε τοπικό ακρότατο, (ii) δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων (ιδιαίτερα για τα πάχη ανοδικού στρώματος που επιτυγχάνονται με τόσο μικρή διάρκεια ανοδίωσης, δηλ. 6, 11, 16 min) αν αντί του φυσικού υποδείγματος του κυλινδρικού πόρου (με ακτίνα τη μέση τιμή των ακτίνων των κυκλικών διατομών πυθμένα και στομίου) χρησιμοποιηθεί φυσικό υπόδειγμα κόλουρου κώνου, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, (iii) η αστάθεια αποδεικνύεται ότι είναι εγγενής, αφού δεν αίρεται για μικρότερους χρόνους ανοδίωσης t_a , μέχρι και $t_a = 0,75 t_R$ (βλ. Παράρτημα IX). Μετά τις παραπάνω διαπιστώσεις, μελετήσαμε την εξέλιξη της τυπικής απόκλισης, προκειμένου να έχουμε ένα ποσοτικό κριτήριο/μέτρο της διασποράς τεσσάρων σειρών μετρήσεων $[t_{aj}, W_{aj}]$. Σε όλες τις σειρές παρατηρήθηκε απότομη αύξηση της διασποράς για $t_a \rightarrow t_R$, σε βαθμό που (i) απορρίπτει το προτεινόμενο (χωρίς πειραματική υποστήριξη) στην [18] κινητικό υπόδειγμα*, που προέκυψε με καθαρά γεωμετρική ανάλυση, χωρίς να λαμβάνεται υπ'όψη η στατιστική κατανομή της ακτίνας του στομίου των πόρων

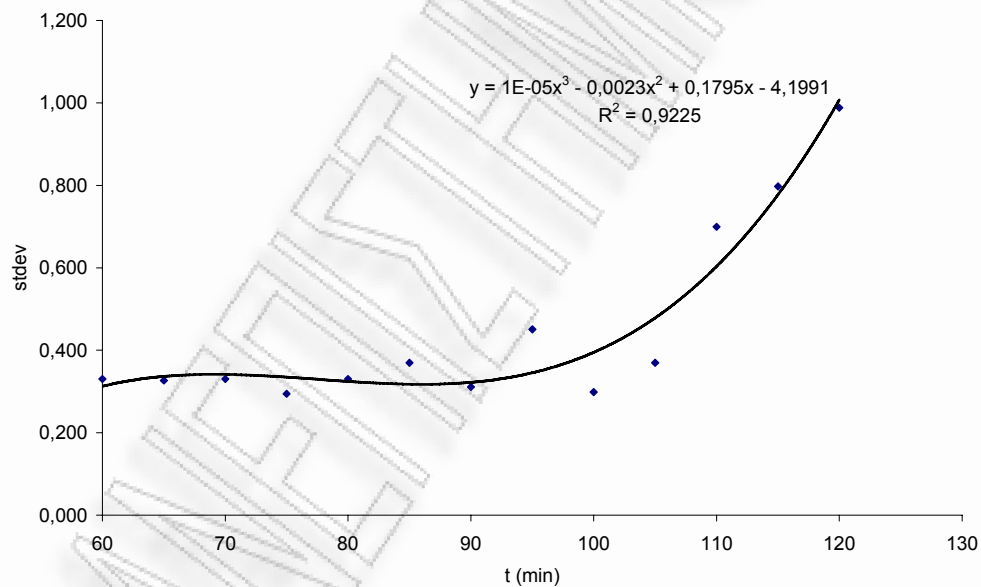
$$W_{d(t')} = W_{d(t_R)} + kvd \int_0^{t'} S_{t'} dt' = W_{d(t_R)} + kvd \int_0^{t'} \left\{ 2\pi \left(1 - \frac{12\theta}{2\pi} \right) (R + vt')(h_R - vt')N + 1 \right\} dt'$$

όπου $t' = t - t_R$ και θ η επίκεντρος γωνία (σε rad) που αντιστοιχεί στο μέρος της κυκλικής διατομής του στομίου του πόρου που εκτείνεται πέραν των ορίων της κυψελίδας (διατομής κανονικού εξαγώνου) σε χρόνο t' , δηλ. όταν αρχίζει η καταστροφή της δομής του πορώδους ανοδικού στρώματος. (ii) επιτρέπει τη διατύπωση ενός μηχανισμού καταστροφής που αρχίζει όταν η διαρκώς αυξανόμενη ακτίνα του στομίου των μικρότερων πόρων (αριστερή ουρά μιας συνεχούς, ενδεχόμενα κανονικής κατανομής) πλησιάζει την ακτίνα του εγγεγραμμένου κύκλου στο αντίστοιχο εξαγωνικής διατομής πρίσμα και ολοκληρώνεται σε μη αυστηρά προκαθορισμένο χρόνο βάσει ενός απλού γεωμετρικού υποδείγματος λόγω επιφανειακών αταξιών που δημιουργούν χαοτική συμπεριφορά στην εκτεθειμένη στο ηλεκτρολυτικό πεδίο ελάχιστη απομένουσα φαινόμενη (εκτός πόρων) επιφάνεια του οξειδίου [20].

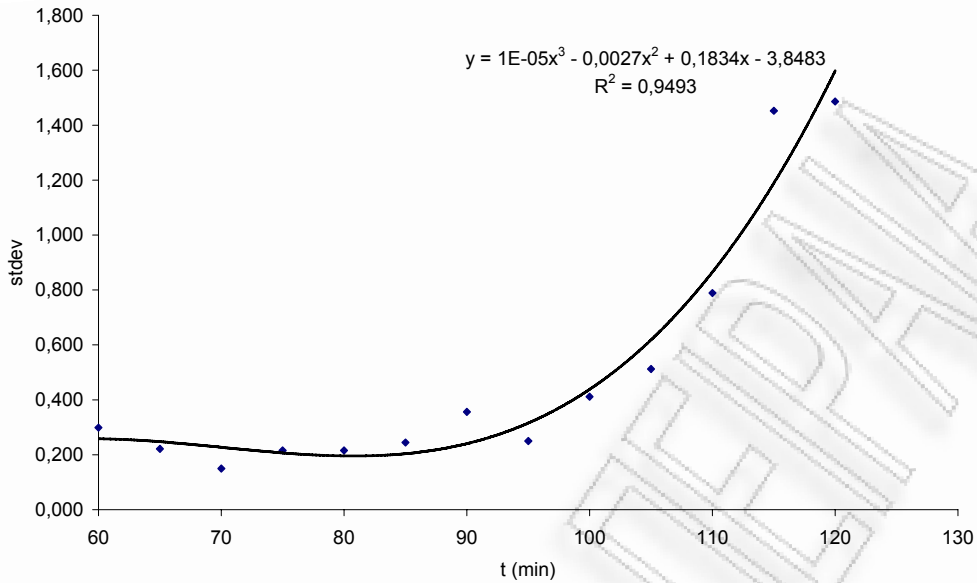
* Σημειώνεται ότι το υπόδειγμα αυτό περιέχει (προφανώς τυπογραφικό) λάθος, όπως αναφέρεται στην [18], αφού δεν περιέχει τον αριθμό των πόρων N ανά μονάδα φαινόμενης επιφάνειας. Στην ίδια πηγή, αναγράφεται λανθασμένα και η αντίστροφη τριγωνομετρική συνάρτηση $\theta = f(t')$ από την οποία προκύπτει τελικά το υπόδειγμα, χωρίς όμως οι δύο λανθασμένες εκφράσεις να συνδέονται μεταξύ τους.



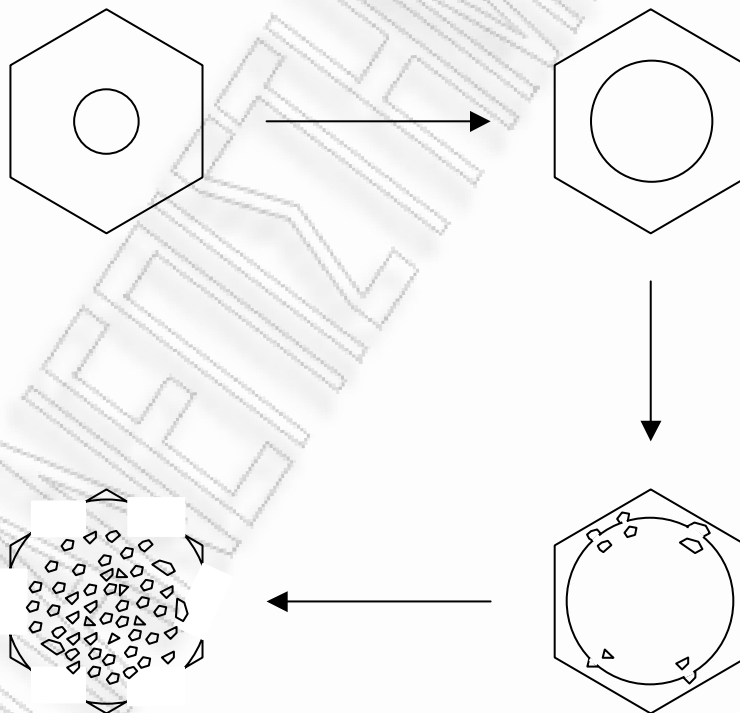
Σχήμα 4.5. Γραφική απεικόνιση της τυπικής απόκλισης των πειραματικών μετρήσεων των τεσσάρων σειρών για $t_a=4$ min, που χρησιμοποιήθηκαν στους προηγούμενους πίνακες και προσαρμογή ενός κυβικού υποδείγματος στην περιοχή $60 \leq t \leq 120$ min. Σημειώνεται η απότομη αύξηση όταν $t \rightarrow t_R$.



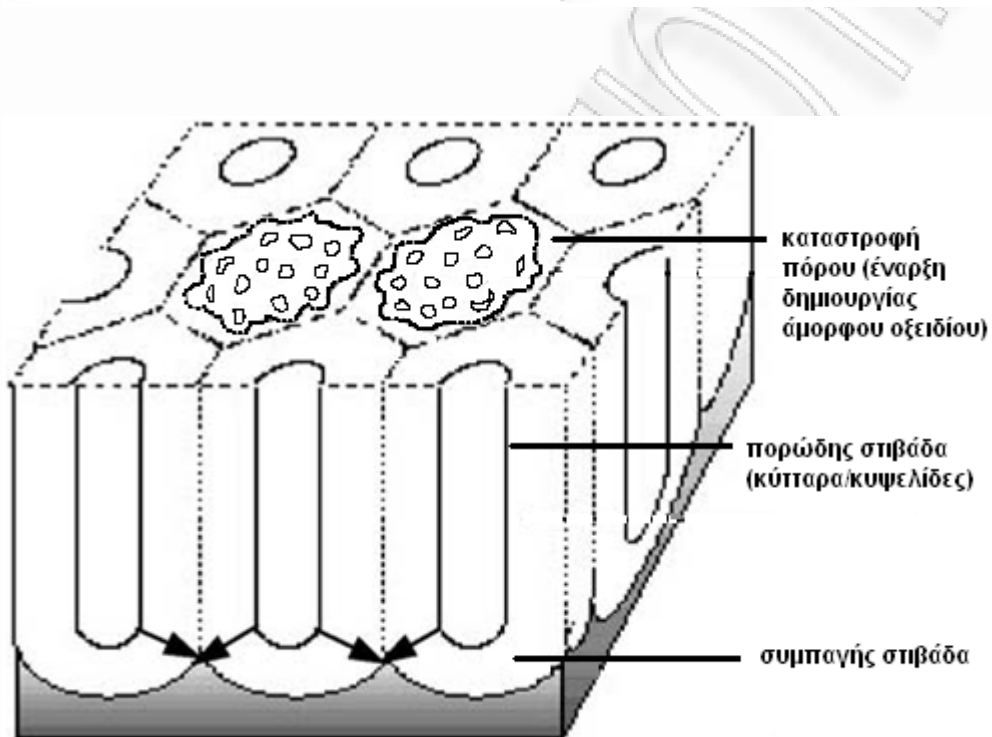
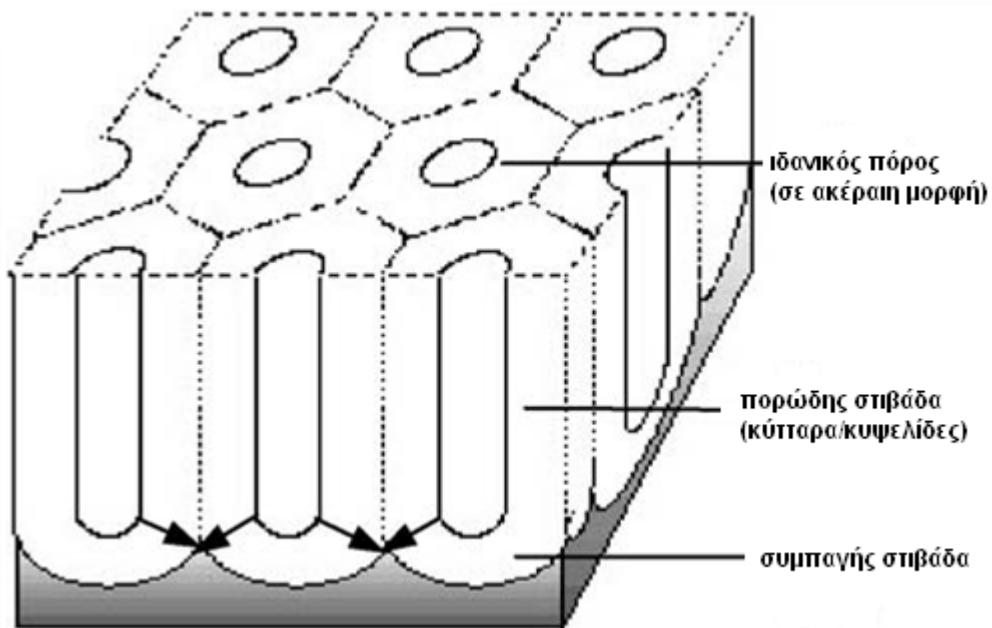
Σχήμα 4.6. Γραφική απεικόνιση της τυπικής απόκλισης των πειραματικών μετρήσεων των τεσσάρων σειρών για $t_a=11$ min, που χρησιμοποιήθηκαν στους προηγούμενους πίνακες και προσαρμογή ενός κυβικού υποδείγματος στην περιοχή $60 \leq t \leq 120$ min. Σημειώνεται η απότομη αύξηση όταν $t \rightarrow t_R$.



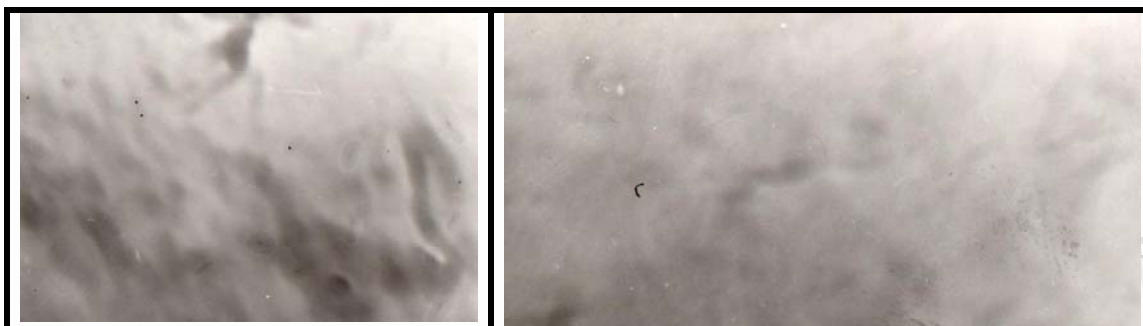
Σχήμα 4.7. Γραφική απεικόνιση της τυπικής απόκλισης των πειραματικών μετρήσεων των τεσσάρων σειρών για $t_a=11$ min, που χρησιμοποιήθηκαν στους προηγούμενους πίνακες και προσαρμογή ενός κυβικού υποδείγματος στην περιοχή $60 \leq t \leq 120$ min. Σημειώνεται η απότομη αύξηση όταν $t \rightarrow t_R$.



Σχήμα 4.8. Απεικόνιση στομίου πόρου σε κάτοψη, κατά τη μετάβαση από την τάξη στη αταξία, με καταστροφή της δομής για $t \rightarrow t_R$ και τη χαοτική συμπεριφορά (αβεβαιότητα, εκφραζόμενη ως μη αναπαραγωγιμότητα/επαναληψιμότητα της μέτρησης) του κινητικού υποδείγματος $W_d = f(t)$ στην περιοχή αυτή.



Σχήμα 4.9. Απεικόνιση στομίου πόρου υπό προοπτική γωνία (πλαγιο-κατοπτική όψη), κατά τη μετάβαση από την τάξη στη αταξία, με καταστροφή της δομής για $t \rightarrow t_R$ και τη χαοτική συμπεριφορά (αβεβαιότητα, εκφραζόμενη ως μη αναπαραγωγιμότητα/επαναληψιμότητα της μέτρησης) του κινητικού υποδείγματος $W_d = f(t)$ στην περιοχή αυτή (πρώτη και τρίτη φάση, όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 4.8).



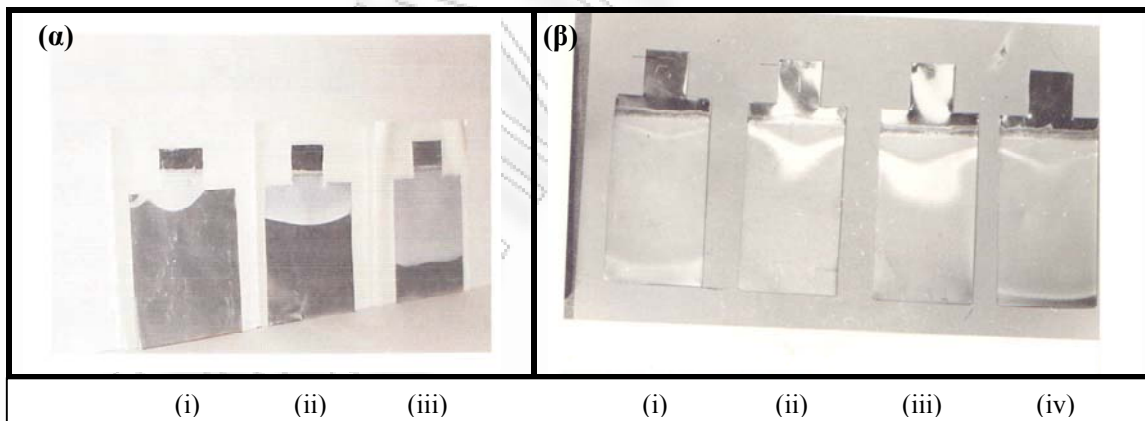
Σχήμα 4.10. Φωτογραφίες ανοδιωμένου αλουμινίου με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, κατά τη φάση της μετάβασης από την πορώδη δομή στην περιγραφόμενη στο κείμενο άτακτη κατάσταση. Στην αριστερή φωτογραφία φαίνονται ακόμη ίχνη της παλαιάς δομής σε τμήματα της επιφάνειας ενώ στη δεξιά φωτογραφία έχει συντελεστεί πλήρως η μετατροπή.

Ο μηχανισμός αυτός απεικονίζεται στο διάγραμμα τεσσάρων φάσεων του Σχήματος 4.8 (βλ. και λεπτομερέστερο διάγραμμα του Σχήματος 4.9) και η δημιουργούμενη άτακτη/κοκκώδης επιφάνεια, ως αποτέλεσμα της καταστροφής της προηγούμενης δομής, φαίνεται στις φωτογραφίες του Σχήματος 4.10. Στη συνέχεια, μελετήθηκε με τη βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου η δημιουργία/διάδοση της καταστροφής, όπου διαπιστώθηκε ότι αυτή αρχίζει πλησίον της τριεπιφάνειας στερεού-υγρού-αέρα (περιοχή μέγιστης ανισοτροπίας), όπου υπάρχει πύκνωση των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρολυτικού πεδίου και διαδίδεται ακολουθώντας την κατεύθυνση μείωσης της πυκνότητας αυτής (gradient direction), όπως φαίνεται στη φωτογραφία του Σχήματος 4.11α.

Επίσης, μελετήθηκε η επίδραση της διαλυτικής δράσης του ηλεκτρολυτικού λουτρού ως εξής: (i) καταγράφηκε η διάδοση της καταστροφής της δομής, κατά τη διάρκεια της ανοδίωσης, μετά την έναρξή της στην τριεπιφάνεια, (ii) απομονώθηκε ένα δοκίμιο, όπου συνυπάρχουν επιφάνεια με δομή και κατεστραμμένη επιφάνεια, με διακοπή της ανοδίωσης πριν γίνει άμορφη ολόκληρη η επιφάνεια, (iii) παρέμεινε το δοκίμιο στο ίδιο λουτρό σε ανοικτό κύκλωμα, (iv) συνεχίστηκε η ανοδίωση μέχρι να ολοκληρωθεί η προγραμματισμένη μετατροπή της επιφάνειας σε άμορφη κατάσταση, (v) εξήχθη το δοκίμιο, φωτογραφήθηκε και συγκρίθηκε η φωτογραφία με άλλες που ελήφθησαν στις προηγούμενες φάσεις. Η σύγκριση έδειξε ότι η γειτονική προς την επιφάνεια με δομή ζώνη, που μόλις έχει αρχίσει να γίνεται άμορφη, μεταξύ επιφάνειας με δομή και άμορφης επιφάνειας η οποία διαπιστώθηκε στη φάση (ii), διαλύθηκε και στη συνέχεια δεν ακολούθησε την πορεία διάδοσης της καταστροφής που ταυτοποιήθηκε αρχικά. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να παραμείνει η ζώνη αυτή σε ένα λεπτό στρώμα πορώδους οξειδίου, όταν ολόκληρο το υπόλοιπο δοκίμιο είχε καλυφθεί πλήρως από την άμορφη επιφάνεια. Μπορούμε να αποδώσουμε το φαινόμενο αυτό στο ότι η νεο-σχηματιζόμενη κατά τη φάση (ii) άμορφη ζώνη είχε υποστεί σε μικρή μόνον

απόσταση (βάθος) από το στόμιο των πόρων καταστροφή και επομένως ήταν εφικτή η διάλυση της άμορφης στιβάδας και η αποκάλυψη της δομής που εξακολουθούσε να υπάρχει, πλησίον του πυθμένα των πόρων. Με την επανάληψη της ανοδίωσης (αποκατάσταση του κλειστού κυκλώματος), η διάδοση της καταστροφής συνεχίστηκε ως εάν δεν είχε παρεμβληθεί το στάδιο (iii), δηλ. το στερεό φάνηκε να διαθέτει μια ‘συνάρτηση μνήμης’. Στην πραγματικότητα όμως, το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο ότι το απομένον φορτίο ηλεκτρικού ρεύματος (με βάση τον αρχικό προγραμματισμό) δεν ήταν αρκετό να δώσει τέτοιες τιμές πυκνότητας και για επαρκή χρόνο ώστε να γίνει πάλι άμορφη η επιφάνεια της συγκεκριμένης ζώνης. Αν ο μηχανισμός αυτός είναι σωστός, τότε πρέπει (i) το πλάτος της συγκεκριμένης ζώνης να μεγαλώνει συναρτήσει του χρόνου παραμονής του δοκιμίου στο λουτρό της ανοδίωσης σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος και (ii) αυτή η νέα πλατύτερη ζώνη να μην επηρεάζει την κάλυψη ολόκληρου του δοκιμίου με άμορφο οξείδιο, όταν συνεχίζεται η ανοδίωση σύμφωνα με το αρχικό πρόγραμμα, ενώ αυτή η ίδια η πλατύτερη ζώνη να μην (προλαβαίνει να) υφίσταται οποιαδήποτε εμφανή καταστροφή του δομημένου οξειδίου της.

Με επανειλημμένα πειράματα (βλ. φωτογραφία Σχήματος 4.11β) επιβεβαιώθηκε πλήρως το υποθετικό συμπέρασμα, πράγμα το οποίο αποτελεί αναγκαία (αλλά όχι και ικανή) συνθήκη για την επαλήθευση του προτεινόμενου μηχανισμού. Περαιτέρω επιβεβαίωση της



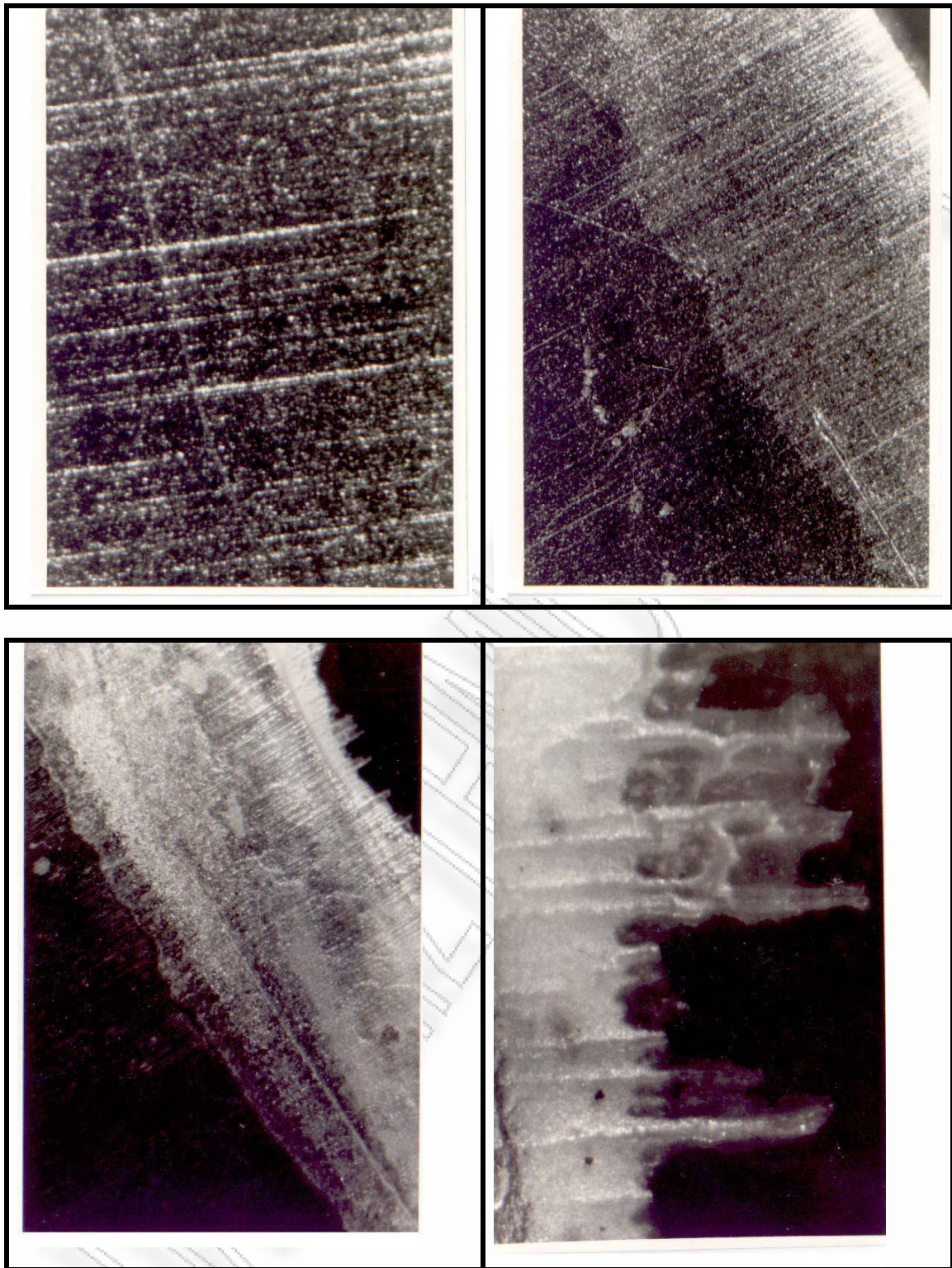
Σχήμα 4.11. (α): Διάδοση της καταστροφής της πορώδους δομής από την περιοχή πλησίον της τριεπιφάνειας στερεού-υγρού-αέρα (στο πρώτο από αριστερά δοκίμιο) προς την περιοχή μικρότερης πυκνότητας του ηλεκτρολυτικού πεδίου. (β): Αύξηση του πλάτους της ζώνης διάλυσης του νεοδημιουργούμενου άμορφου στρώματος σε χρόνους ανοικτού κυκλώματος (i) 2 min, (ii) 7 min, (iii) 12 min, (iv) 3 min και με αλλαγή της γεωμετρίας του προσομοιωτή του λουτρού της ανοδίωσης ώστε να αυξηθεί η απόσταση από τον πυθμένα του δοχείου, οπότε μειώνεται η πυκνότητα του ρεύματος που προκαλείται από την ανισοκατανομή του ηλεκτρολυτικού πεδίου λόγω γεινίασης του περατωτικού άκρου του δοκιμίου με τον πυθμένα (edge-bottom effect).

ισχύος του προτεινόμενου μηχανισμού συνιστά η παρατήρηση ότι η μορφή της ζώνης εξαρτάται από τη σχετική θέση του δοκιμίου στο λουτρό (οπότε επηρεάζεται η πυκνότητα του ηλεκτρολυτικού πεδίου) και τα χαρακτηριστικά της ανοδίωσης, η οποία επηρεάζει συστηματικά την κατανομή της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και τη θερμοκρασιακή κατανομή.

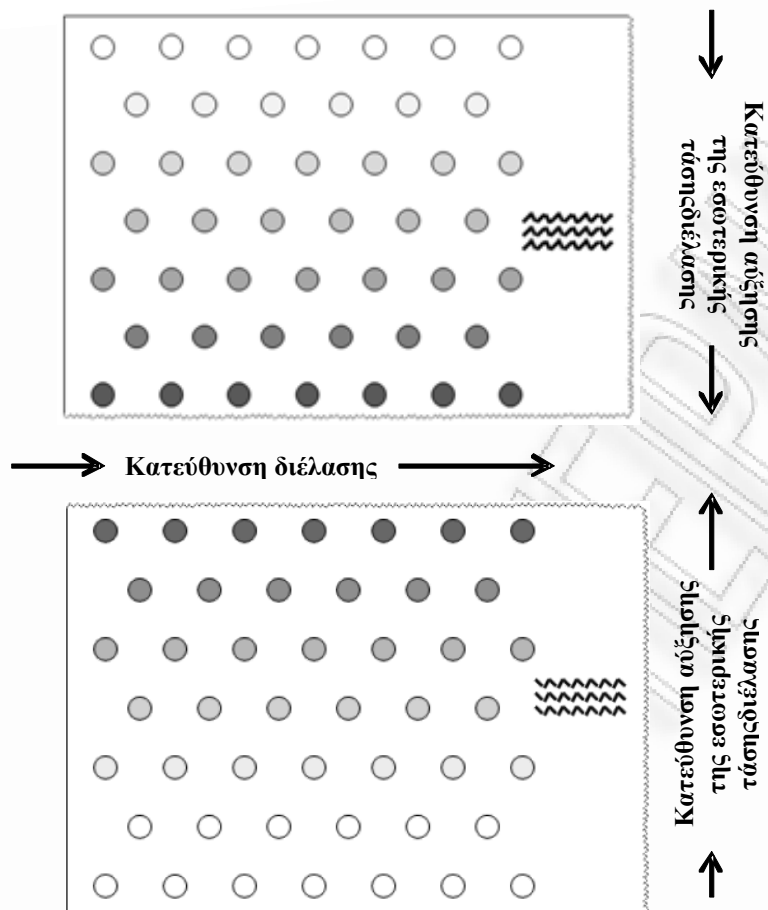
Τέλος, μελετήθηκε η ανοδική διάλυση ολόκληρου του μεταλλικού υποστρώματος, αφού αυτό έχει γίνει πρώτα πορώδες και στη συνέχεια άμορφο (ως αποτέλεσμα της καταστροφής της δομής) οξείδιο. Στις φωτογραφίες του Σχήματος 4.12 φαίνεται η ανοδική διάλυση σε περατωτικό άκρο λόγω πύκνωσης των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρολυτικού πεδίου (edge effect). Αξίζει να σημειωθεί ότι η 'συνάρτηση μνήμης' είναι σε πλήρη λειτουργία σε ολόκληρη τη μάζα του μητρικού μετάλλου/κράματος, όπως φαίνεται από την επίδραση των γραμμών διέλασης σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου, μέχρι την εξαφάνιση και της τελευταίας ποσότητας της μάζας του. Στη διαγραμματική αναπαράσταση του Σχήματος 4.13 φαίνεται σε κάτοψη η πορώδης δομή η οποία είναι προσανατολισμένη προς την κατεύθυνση των γραμμών διέλασης. Επομένως, κάθετα προς την κατεύθυνση αυτή, έχουμε μία μη αυστηρά περιοδική (αφού η τραχύτητα του ελάστρου δεν κατανέμεται ομοιόμορφα κατά πλάτος, δηλ. κάθετα προς την κατεύθυνση της κίνησης/διέλασης) αυξομείωση της κάκωσης της επιφάνειας από θλιπτική δύναμη που ασκεί πίεση σε ολόκληρο το βάθος του φύλλου και παραμένει ως εσωτερική τάση μετά τη διέλαση. Η παραμένουσα εσωτερική τάση κατανέμεται όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, όπου η αύξηση της έντασης του γκρι στους πόρους αντιστοιχεί με αύξηση της τάσης από τα χείλη της (προκληθείσας από την κάκωση του ελάστρου) αύλακος προς το κέντρο της, το οποίο συμπίπτει με το σημείο μέγιστης θλιπτικής τάσης, μη εμφανιζόμενο στο διάγραμμα, λόγω κλίμακας.

Μεγαλύτερη πίεση του ελάστρου ή/και αυξημένη τραχύτητα των επιφανειών του οδηγούν σε μεγαλύτερες ρηγματώσεις, οι οποίες συμβάλλουν στην αύξηση της ταχύτητας ανοδικής διάλυσης του στρώματος του οξειδίου τόσο σε ανοικτό όσο και (ιδιαίτερα) σε κλειστό κύκλωμα. Στην αύξηση, όμως, της ταχύτητας της ανοδικής διάλυσης συμβάλλει και η ηλεκτροχημική κατεργασία σε πολύ υψηλότερο ηλεκτρολυτικό πεδίο, οπότε δημιουργείται ενεργέστερο και περισσότερο άτακτο μικροκρυσταλλικό οξείδιο (βλ. Σχήμα 4.14).

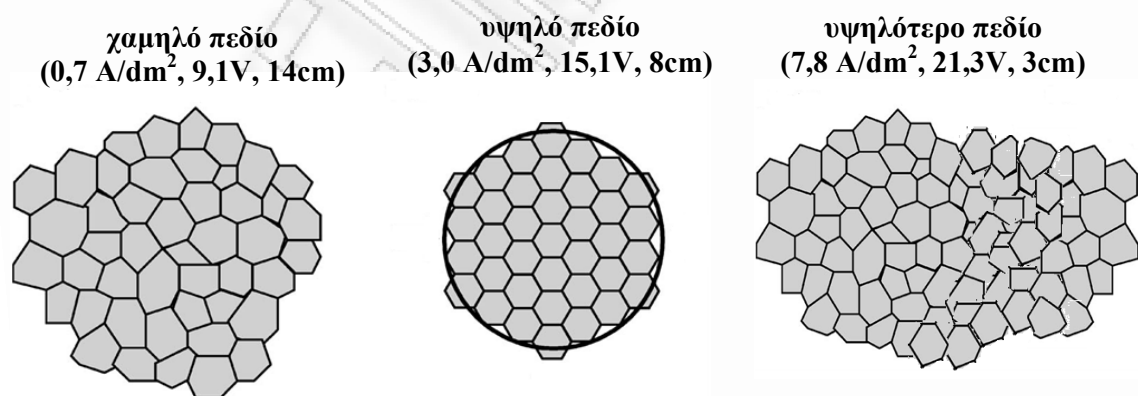
Στην επιταχυνόμενη ανοδική διάλυση συμβάλλει και το κωνικό σχήμα των πόρων. Αν θεωρήσουμε αμελητέα τη συμβολή του πυθμένα των πόρων στη συνολική ταχύτητα διάλυσης, οπότε το σχήμα μπορεί να θεωρηθεί τέλειος ορθογώνιος κώνος ακτίνας r και ύψους h , η ταχύτητα αυτή, οριζόμενη ως $\frac{du}{dt}$, είναι ανάλογη προς την αύξηση του όγκου του



Σχήμα 4.12. Φωτογραφίες σε οπτικό μικροσκόπιο για την παρακολούθηση της φυσικής διάλυσης σε φυσικό προσομοιωτή των συνθηκών της βιομηχανικής παραγωγής. (α): τοπογραφία της πορώδους δομής, με έναρξη της καταστροφής της. (β): Εμφάνιση διακριτής περιοχής καταστροφής στο περατωτικό άκρο, λόγω πύκνωσης των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρολυτικού πεδίου. (γ): ανοδική διάλυση του περατωτικού άκρου, με εμφανή τα ίχνη της κατεύθυνσης διέλασης, δηλ. αυξημένης αταξίας του μητρικού μετάλλου/κράματος. (δ): μεγέθυνση της άνω δεξιά περιοχής της (γ), όπως αυτή λαμβάνεται στο φωτεινό πεδίο του οπτικού μικροσκοπίου.



Σχήμα 4.13. Διαγραμματική αναπαράσταση της πορώδους δομής σε κάτοψη, όπου φαίνεται η έναρξη και το πέρας της κατανομής παραμένουσας τάσης (περισσότερη έντονη απόχρωση του γκρι σημαίνει μεγαλύτερη παραμένουσα τάση) που προκλήθηκε από μικρο-προεξοχή του ελαστρού λόγω αυξημένης τραχύτητας.



Σχήμα 4.14. Σχηματική αναπαράσταση κυψελίδων ανοδιωμένου αλουμινίου σε λουτρό τρυγικού/μυλωνικού οξέος, από όπου φαίνεται η περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής του υποδείγματος KHR τόσο ως προς τη δημιουργία δομής κανονικών εξαγώνων όσο και ως προς την ισχύ της μονότονα αύξουσας συνάρτησης $c=2WE+p$ (βλ. Κεφ.1).

πόρου (όπως αυτός προκύπτει από τη σχέση $V_a = \pi r^2 h/3$), με συντελεστή αναλογίας τη

σταθερή πυκνότητα του στερεού: $\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial r} \frac{dr}{dt} + \frac{\partial u}{\partial h} \frac{dh}{dt}$ ή $\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial r} U_r + \frac{\partial u}{\partial h} U_h$, όπου

$$V_a = u = \pi r^2 h/3, \quad \frac{dr}{dt} = U_r, \quad \frac{dh}{dt} = U_h$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{2}{3} \pi r h U_r - \frac{1}{3} \pi r^2 U_h \quad \text{ή} \quad \frac{du}{dt} = \frac{1}{3} \pi r (2h U_r - r U_h) > 0,$$

επειδή οι μερικές ταχύτητες U_r και U_h είναι της ίδιας τάξεως μεγέθους (αφού αναφέρονται αμφότερες στην εξωτερική διεπιφάνεια οξειδίου-ηλεκτρολύτη) ενώ $2h \gg r$ (αφού το βάθος του πόρου είναι τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο της ακτίνας). Άρα, η συνολική ταχύτητα ανοδικής διάλυσης είναι αύξουσα συνάρτηση του χρόνου παραμονής στο λουτρό της ηλεκτροχημικής κατεργασίας.

Η επιτάχυνση $\frac{d^2u}{dt^2}$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{2}{3} \pi h U_r^2 - \frac{2}{3} \pi r U_h U_r + \frac{2}{3} \pi r U_r U_h \quad \text{ή} \quad \frac{d^2u}{dt^2} = \frac{2}{3} \pi h U_r^2 > 0,$$

από όπου προκύπτει ότι η μεταβολή της ταχύτητας (δηλ. η επιτάχυνση) είναι ομοίως αύξουσα, με αποτέλεσμα την καταστροφή της δομής όταν $r + t_c U_r \rightarrow R$ σε κρίσιμο χρόνο t_c μικρότερο (αλλά σχετικά πλησίον) του t_R και μάλιστα η διαφορά ($t_R - t_c$) είναι τόσο μεγαλύτερη όσο εντονότερες οι αταξίες της μητρικής επιφάνειας.

Η ταχύτητα ανοδικής διάλυσης μπορεί να εκφραστεί και συναρτήσει του χρόνου t_R , λογιζόμενου όχι με προκαθορισμένη τιμή αλλά ως ανεξάρτητη στοχαστική μεταβλητή που παίρνει τιμές πλησίον του ορίου για το οποίο $r + t_c U_r \rightarrow R$, οπότε ο όγκος V_f του

ορθογώνιου κώνου προκύπτει από τη σχέση: $V_f = u = \frac{1}{3} \pi (r + U_r t_R)^2 (h - U_h t_R)$ και η

ταχύτητα υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{3} \pi (h - U_h t_R) 2(r + U_r t_R) U_r - \frac{1}{3} \pi (r + U_r t_R)^2 U_h$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{3} \pi r (2h U_r - r U_h) + \frac{2}{3} \pi U_r U_h t_R (U_r t_R - r) + \frac{1}{3} \pi U_r t_R (2r U_h + 2h U_r - U_r t_R U_h) > 0$$

επειδή $(2h U_r - r U_h) > 0$, όπως αποδείχθηκε προηγουμένως, $(U_r t_R - r) > 0$, αφού το πάχος του τοιχώματος της κυψελίδας πριν την ανοδική διάλυση είναι μεγαλύτερο της αρχικής ακτίνας του πόρου, $(2h U_r - U_r t_R U_h) > 0$, αφού οι μερικές ταχύτητες U_r και U_h είναι της ίδιας τάξεως μεγέθους (αναφερόμενες αμφότερες στην εξωτερική διεπιφάνεια οξειδίου-ηλεκτρολύτη) και

$2h \gg U_{rR}$, όπου το γινόμενο αυτό είναι κατά προσέγγιση ίσο προς το τοίχωμα της κυψελίδας πριν την έναρξη της ανοδικής διάλυσης. Επομένως, αποδεικνύεται πάλι ότι η συνολική ταχύτητα ανοδικής διάλυσης είναι αύξουσα συνάρτηση του χρόνου παραμονής στο λουτρό της ηλεκτροχημικής κατεργασίας.

Στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη και ο πυθμένας των πόρων, ακτίνας r_0 , έχουμε σχήμα ορθογώνιου κόλουρου κώνου, οπότε ο όγκος V_c δίνεται από τη σχέση $V_c = u = \pi h(r^2 + rr_0 + r_0^2)/3$ και επομένως η ταχύτητα μεταβολής του όγκου υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial r} U_r + \frac{\partial u}{\partial h} U_h + \frac{\partial u}{\partial r_0} U_{r_0}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{\pi h}{3} (2r + r_0) U_r - \frac{\pi}{3} (r^2 + rr_0 + r_0^2) U_h + \frac{\pi h}{3} (2r_0 + r) U_{r_0}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{3} \pi [(r + r_0)(hU_r - rU_h) + (hrU_r - r_0^2 U_h) + hU_{r_0} (2r_0 + r)] > 0$$

επειδή $U_r \cong U_h$, $h \gg r$, $r > r_0$. Άρα, αποδεικνύεται πάλι ότι η συνολική ταχύτητα ανοδικής διάλυσης είναι αύξουσα συνάρτηση του χρόνου παραμονής στο λουτρό της ηλεκτροχημικής κατεργασίας. Στην περίπτωση αυτή, η επιτάχυνση $\frac{d^2u}{dt^2}$ υπολογίζεται από τις

σχέσεις:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = \frac{\pi h}{3} (2U_r + U_{r_0}) - \frac{\pi}{3} (2r + r_0) U_h$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial h^2} = \frac{\pi}{3} [(2r + r_0) U_r + (2r_0 + r) U_{r_0}]$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r_0^2} = \frac{\pi h}{3} (U_{r_0} + U_r) - \frac{\pi}{3} (2r_0 + r) U_h$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u}{dt^2} &= \frac{\pi h}{3} (2U_r + U_{r_0}) U_r - \frac{\pi}{3} (2r + r_0) U_h U_r + \frac{\pi}{3} (2r + r_0) U_r U_h + \frac{\pi}{3} (2r_0 + r) U_{r_0} U_h + \\ &\quad \frac{\pi h}{3} (2U_{r_0} + U_r) U_{r_0} - \frac{\pi}{3} (2r_0 + r) U_h U_{r_0} \end{aligned}$$

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{\pi h}{3} (2U_r + U_{r_0}) + (2U_{r_0} + U_r) U_{r_0}$$

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{\pi h}{3} (2U_r^2 + 2U_{r_0}^2 + 2U_r U_{r_0}) > 0$$

Στις παραπάνω σχέσεις είναι δυνατόν να ενσωματωθεί η μείωση της ταχύτητας U_{r_0} συναρτήσει του βάθους h . Στην απλούστερη περίπτωση, όπου η μείωση είναι γραμμική συνάρτηση του h , η ταχύτητα ανοδικής διάλυσης εκφράζεται προσεγγιστικά ως ακολούθως:

$$\frac{du}{dt} = [(r + r_0)(hU_r - rU_h) + (hrU_r - r_0^2U_h) + h(U_{r_0}' - bh)(2r_0 + r)]$$

όπου U_{r_0}' η αρχική ταχύτητα ανοδικής διάλυσης και b ο συντελεστής γραμμικής εξάρτησης της ταχύτητας από το βάθος των πόρων. Τα θετικά πρόσημα, που αποδεικνύουν ότι η συνολική ταχύτητα και η μεταβολή της (δηλ. η επιτάχυνση) είναι αύξουσες συναρτήσεις των εξεταζόμενων ανεξάρτητων μεταβλητών, δεν επηρεάζονται, επειδή $U_{r_0}' - bh \geq 0$, $r > r_0$, για $t \leq t_R$, οπότε $r \leq R$.

3.7 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο, θεωρούνται οι 1 συνθήκες παραγωγής ως είσοδος (input) και οι ιδιότητες του προϊόντος ως έξοδος (output) σε ένα σύστημα ή μηχανισμό μετατροπής (Transformation Mechanism – TM), το οποίο έχει τη μορφή νευρο-ασαφούς δικτύου. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται/αναπτύσσεται ο αντίστροφος μηχανισμός (Inverse Transformation Mechanism – ITM) με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου διανύσματος εισόδου \mathbf{i} όταν το διάνυσμα εξόδου \mathbf{o} δίνεται είτε από συγκεκριμένο πελάτη είτε από την επικρατούσα τάση στην αγορά είτε από ένα θεσμικό πλαίσιο (της διάζευξης νοούμενης εγκλειστικής). Σημειώνεται ότι τα διανύσματα \mathbf{i} , \mathbf{o} αναφέρονται στην είσοδο/έξοδο του TM, που συμπίπτουν με την έξοδο/ είσοδο του ITM, αντίστοιχα. Όπως αποδεικνύεται, ο ITM λειτουργεί ως συμπερασματικός/προσδιοριστικός μηχανισμός (inference engine) ώστε να επιτευχθεί πειραματικά και υπολογιστικά ο βέλτιστος έλεγχος της διεργασίας off-line. Αν μάλιστα οι πειραματικές μετρήσεις γίνονται in situ και ταχέως, τότε είναι δυνατός ο online έλεγχος σε πραγματικό χρόνο παραγωγής.

Στα υποκεφάλαια 3.2 και 3.3, χρησιμοποιείται η τεχνική της νευρο-ασαφούς προσέγγισης (Neurofuzzy Approximation – NFA) και της ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης – (Fuzzy Multicriteria Analysis – FMCA) για τους TM και ITM, αντίστοιχα, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της βελτιστοποίησης του συστήματος της βιομηχανικής παραγωγής. Για τη διαδικασία ‘μάθησης’ του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιούνται κατάλληλες μετρήσεις που ελήφθησαν από προσομοιωτές εργαστηριακής κλίμακας και από συσκευές βιομηχανικής κλίμακας (που λειτουργούν σε συγκρίσιμες συνθήκες παραγωγής) που περιέχονται σε μία Βάση Δεδομένων (Database – DB), η οποία συνεχώς εμπλουτίζεται.

Για τον προσδιορισμό του συνόλου των μετρήσεων μάθησης, λαμβάνουμε υπ' όψη (α) τις προδιαγραφές του προϊόντος, (β) τις συνθήκες παραγωγής του προϊόντος με τις συγκεκριμένες προδιαγραφές στην ίδια εγκατάσταση κατά το παρελθόν, (γ) την τεχνική βιβλιογραφία, ιδιαίτερα όταν το σύνολο των μετρήσεων, που συλλέγονται με την υποδεικνυόμενη κατά την υπό στοιχείο (β) διαδικασία, κρίνεται ως ανεπαρκής και (δ) τις πρόσφατες μετρήσεις, που απεικονίζουν την παρούσα κατάσταση. Η τελευταία κατηγορία μετρήσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή: (α) ορισμένες παράμετροι δεν μετρώνται άμεσα (π.χ. γήρανση λουτρού, χωρική κατανομή χαρακτηριστικών ανάδευσης και απαγωγής θερμότητα) και (β) κατά τη λύση του προβλήματος, επιδιώκεται η υπόδειξη εκείνων των συνθηκών παραγωγής που ευρίσκονται πλησιέστερα στην παρούσα κατάσταση, εφόσον προκύπτουν εξίσου εφικτές εναλλακτικές λύσεις. Αν ουδεμία λύση είναι ικανοποιητική, το σχεδιασθέν λογισμικό προβλέπει επικοινωνία ανθρώπου – μηχανής (δηλ. με τον πελάτη ή το τμήμα marketing) για 'χαλάρωση' των προδιαγραφών, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν θεσμοθετημένες δεσμεύσεις. Τέτοιου είδους δεσμεύσεις είναι ασυνήθεις στο ανοδιωμένο αλουμίνιο ή τον επιμεταλλωμένο χάλυβα ενώ είναι συνήθεις σε άλλα βιομηχανικά προϊόντα (π.χ. τρόφιμα, ποτά, φάρμακα, καλλυντικά, εκρηκτικά). Σημειώνεται ότι το ίδιο λογισμικό ενημερώνει την DB με τα νέα δεδομένα που προκύπτουν από τον ποιοτικό έλεγχο κάθε παρτίδας, ενώ είναι εφικτός και ο εμπλουτισμός με δεδομένα από άλλες εγκαταστάσεις που έχουν όμοια χαρακτηριστικά και ακολουθούν την ίδια διαδικασία. Στην περίπτωση όμως που επιδιώκεται εμπλουτισμός από την τεχνική βιβλιογραφία, πρέπει η αναζήτηση της κατάλληλης πληροφορίας να γίνει διά μέσου ενός αυτόνομου ενδιάμεσου λογισμικού (Intelligent Agent – IA) ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητα.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που σχεδιάστηκε/αναπτύχθηκε για τη βελτιστοποίηση της ανοδιώσης του αλουμινίου βασίζεται σε μετρήσεις παραμέτρων ελέγχου της διεργασίας και ιδιοτήτων του προϊόντος που εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο είτε επί της γραμμής παραγωγής, είτε εκτός αυτής. Η συνολική διαδικασία περιλαμβάνει 17 στάδια δραστηριότητας και 4 κόμβους απόφασης. Η πραγματοποίηση της έναρξης είναι δυνατή τόσο από την πλευρά της προσφοράς όσο και από την πλευρά της ζήτησης, παρ' όλο ότι συνήθως υπάρχει μία χρονική υστέρηση μεταξύ αυτών: η πλευρά της ζήτησης προηγείται όταν συγκεκριμένος πελάτης θέτει μια παραγγελία ενώ η πλευρά της προσφοράς προηγείται όταν το τμήμα marketing προβλέπει βραχυχρόνια αύξηση των πωλήσεων συγκεκριμένου είδους και το τμήμα παραγωγής προβαίνει σε αύξηση των ηλεκτροχημικά επεξεργαζόμενων αντικειμένων. Οι εναλλακτικές λύσεις που χρησιμοποιούνται για την πολυκριτηριακή επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού τιμών παραμέτρων ελέγχου (διάνυσμα εισόδου στη

διαδικασία TM) σχεδιάζονται με (α) ομαδοποίηση όλων των διαθέσιμων εφικτών επί μέρους λύσεων σύμφωνα με την ακολουθούμενη διαδικασία TM και (β) προεπιλογή των ομάδων οι οποίες υποδεικνύουν λύσεις πραγματοποιήσιμες χωρίς μείζονες αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων που προσδιορίζουν τις συνθήκες παραγωγής της τρέχουσας παρτίδας. Κάθε μία προεπιλεγμένη ομάδα αντιπροσωπεύεται από το διάνυσμα κέντρου βάρους ή από το πλησιέστερο διάνυσμα προς το κεντροειδές αν η ομάδα είναι συνεκτική ή όχι, αντίστοιχα. Η αξιολόγηση των στοιχείων τόσο του διανύσματος βαρών όσο και της μήτρας προτίμησης (preference matrix) γίνεται από το τεχνικό προσωπικό σύμφωνα με μια ειδικά προσαρμοσμένη μέθοδο Delphi τριών σταδίων.

Στο υβριδικό νευροασαφές σύστημα που χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την TM-προσέγγιση, τα ασαφή σύνολα αντιμετωπίζονται ως βάρη, ενώ οι μεταβλητές εισόδου, εξόδου και οι κανόνες ως νευρώνες. Αυτό το σύστημα κληρονομεί τη μέθοδο μάθησης (π.χ. οπίσθια διάδοση σφάλματος – backpropagation) από τα νευρωνικά δίκτυα, αλλά ταυτίζεται εννοιολογικά με ένα ασαφές σύστημα, και γενικά συνδυάζει τα προτερήματα των δύο συστημάτων απ' όπου προέρχεται. Από τα νευροασαφή δίκτυα που μελετήθηκαν, βρέθηκε ότι το ANFIS του Jang είναι το πιο κατάλληλο για την περίπτωσή μας. Το ANFIS είναι μία επέκταση του νευροασαφούς μοντέλου που αναπτύχθηκε από τους Takagi και Sugeno. Στην παρούσα εργασία, έχει γίνει μία ακόμη παραπέρα βελτίωση του αλγορίθμου του ANFIS, ώστε να δέχεται ασαφείς συνεπαγωγές με n μεταβλητές εισόδου και m μεταβλητές. Για την ITM-όδευση τροποποιήθηκε η ντετερμινιστική μέθοδος PROMETHEE, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως βάση του συστήματος FMCA που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής. Ενδεικτικά αποσπάσματα του αντίστοιχου λογισμικού περιλαμβάνονται στα Παραρτήματα I-VII του Κεφαλαίου αυτού. Σημειώνεται ότι έχουμε αναπτύξει ένα μεγάλο αριθμό υποπρογραμμάτων γραμμένων στον ίδιο κώδικα VB (βλ. κατάλογο αυτών στο Παράρτημα X) για τη στατιστική επεξεργασία δεδομένων στην είσοδο και την έξοδο καθώς και για την ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων, προκειμένου να διαπιστωθεί η συνδυασμένη ευρωστία (combined robustness) των προτεινόμενων από το FMCA πρόγραμμα λύσεων.

Η παρουσιαζόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε με επιτυχία στην περίπτωση της ηλεκτροχημικής επεξεργασίας του αλουμινίου για τη δημιουργία ανοδικού στρώματος πάχους $h=24\pm 0,5$ μm και πορώδους $12,5\pm 1$ % (προδιαγραφές προϊόντος), σε εργαστηριακούς προσομοιωτές που λειτουργούν κάτω από βιομηχανικές συνθήκες / προδιαγραφές. Τα στοιχεία του διανύσματος εισόδου ήταν οι ακόλουθες μεταβλητές, με τα πεδία μεταβολής σημειούμενα σε παρένθεση: ηλεκτρική τάση (9 – 21 V), πυκνότητα έντασης ηλεκτρικού

ρεύματος ($0,8 - 7,6 \text{ A/dm}^2$), χρόνος ανοδίωσης ($10 - 80 \text{ min}$), ηλεκτροχημική απόδοση ($80 - 90\%$), συγκέντρωση ηλεκτρολύτη ($5 - 30 \text{ g H}_2\text{SO}_4 / \text{L}$) και θερμοκρασία λουτρού ($10 - 28 \text{ }^\circ\text{C}$). Ο μη-καταστροφικός έλεγχος του πάχους του στρώματος έγινε με μετρήσεις ηλεκτρικής επαγωγής ενώ η βαθμονόμηση/διακρίβωση (calibration) έγινε με μέτρηση διατομής (μετά από εγκιβωτισμό σε πλαστικό και κοπή σε μικροτόμο) σε οπτικό μικροσκόπιο, σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ASTM B487/1985/97. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η καταστροφική δοκιμή της απογύμνωσης του αλουμινίου από το ανοδικό στρώμα με τη βοήθεια ζέοντος υδατικού διαλύματος χρωμικού/φωσφορικού οξέος, προκειμένου να μετρηθεί έμμεσα το πορώδες. Με τον τρόπο αυτόν, μετρήθηκαν οι τιμές του διανύσματος εξόδου (με δύο στοιχεία) που αντιστοιχούν στο δεδομένο διάνυσμα εξόδου (με έξι στοιχεία).

Τα αποτελέσματα της μάθησης για την όδευση TM του νευροασαφούς συστήματος έδωσαν τον διαμερισμό των παραμέτρων του αιτίου/υπόθεσης (διάνυσμα εισόδου), που απεικονίζονται με ασαφή σύνολα. Η αντιστοίχιση εισόδου-εξόδου έδωσε, μετά την περίοδο μάθησης, 244 συνδυασμούς 6×2 , που ικανοποιούσαν τις προδιαγραφές της αγοράς. Οι συνδυασμοί αυτοί ομαδοποιήθηκαν σε 11 ομάδες που ελαττώθηκαν σε 5 μετά από φιλτράρισμα ικανοποίησης τεχνικών κριτηρίων εύρους/πυκνότητας. Τα κριτήρια f_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) εφαρμογής FMCA για την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων A_j ($j = 1, 2, \dots, 5$) είναι: Ενεργειακό κόστος για το σχηματισμό του ανοδικού στρώματος, f_1 . Κεφαλαιακό κόστος (λογιζόμενο μέσω των αποσβέσεων), f_2 . Συμβολή στην εύρυθμη λειτουργία, f_3 . Ενεργειακό κόστος για την ψύξη του λουτρού, f_4 . Ποιότητα ομάδας (χαρακτηριστική ακτίνα, μέση πυκνότητα, αποκλίσεις του κεντροειδούς), f_5 . Επιβάρυνση της ομάδας από αναμενόμενα ελαττώματα (με την προϋπόθεση ότι δεν υπερβαίνουν ένα ανώτατο όριο, πέραν του οποίου αποκλείεται η αντίστοιχη ομάδα από τη συμμετοχή της στο σύνολο των προς κατάταξη εφικτών εναλλακτικών λύσεων), f_6 .

Στη συνέχεια διερευνάται το πρόβλημα της ταυτοποίησης των παραμέτρων (parameter identification) που επηρεάζουν τις τιμές του διανύσματος εξόδου (ιδιαίτερα το πορώδες και το πάχος h του ανοδικού στρώματος). Εντοπίζεται η ταχύτητα ανοδικής διάλυσης v ως βασική παράμετρος/κόμβος της σχηματιζόμενης σε ένα βαθύτερο γνωσιολογικό επίπεδο οντολογίας και αναπτύσσεται νέο λογισμικό ταχείας εκτίμησης (shortcut) των τιμών της παραμέτρου αυτής, χωρίς τη χρησιμοποίηση του αλγόριθμου Nagayama-Tamura (NT) και χωρίς την προϋπόθεση μέτρησης της ακτίνας r των πόρων. Το νέο λογισμικό έχει διαμορφωθεί με τη βοήθεια ενός δυναμικού ισοζυγίου υλικών για το αλουμίνιο, το οποίον οδηγεί σε ένα κινητικό υπόδειγμα (kinetic model) του οποίου οι τιμές των παραμέτρων εκτιμώνται μετά από μετρήσεις των ιόντων Al στο λουτρό της ανοδίωσης σε ανοικτό

κύκλωμα, συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας. Διαπιστώθηκε εξαιρετικά μικρή επαναληψιμότητα των μετρήσεων, όταν η ακτίνα r των πόρων πλησιάζει την ακτίνα R ($r=R$ σε χρόνο $t=t_R$) της εγγεγραμμένης περιφέρειας στη διατομή των κυψελίδων (ή του κυλίνδρου στο αντίστοιχο εξαγωνικό πρίσμα, το οποίο απεικονίζει τυπική κυψελίδα στον τρισδιάστατο χώρο), της τελευταίας υπολογιζόμενης μέσω του υποδείγματος KHR.

Η επαναληψιμότητα γινόταν ακόμη μικρότερη με αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος, της τάσης της ανοδίωσης, της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και της θερμοκρασίας του λουτρού. Μετά από αυτή τη διαπίστωση, μετρήσαμε φασματοφωτομετρικά τη διαλυόμενη μάζα συναρτήσει του χρόνου, προκειμένου να εφαρμόσουμε το κινητικό υπόδειγμα και να εκτιμήσουμε τις τιμές των v , h , r . Χρησιμοποιώντας μη γραμμική παλινδρόμηση (solver/excel), με αρχικές τιμές εκκίνησης της αλγοριθμικής διαδικασίας τις αναφερόμενες στην αρχική εφαρμογή του υποδείγματος NT, εκτιμήσαμε τις τιμές των v , (v,h) , (v,r) , διατηρώντας για την παράμετρο, της οποίας η τιμή δεν εκτιμάται, σταθερή την αρχική της τιμή. Η ταυτόχρονη εκτίμηση των τιμών όλων των παραμέτρων (v , h , r) δεν κατέστη εφικτή λόγω αστάθειας του χρησιμοποιούμενου υποδείγματος, ακόμη και όταν οι μετρήσεις δεν κάλυπταν ολόκληρη την περιοχή μέχρι $t = t_R$. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώθηκε με πολυωνυμική παλινδρόμηση του ίδιου υποδείγματος, δηλ. κατ'ουσίαν γραμμική παλινδρόμηση, αφού το σύστημα των κανονικών εξισώσεων που δίνει τις τιμές των συντελεστών οποιουδήποτε πολυωνύμου είναι γραμμικό ως προς του συντελεστές αυτούς. Η επιβεβαίωση δεν επιδέχεται αμφισβήτηση, επειδή (i) το σύστημα των κανονικών γραμμικών εξισώσεων δίνει ακριβή λύση, αφού χρησιμοποιείται αλγεβρική μέθοδος επίλυσης, σε αντίθεση με τη μη γραμμική παλινδρόμηση, η οποία δίνει προσεγγιστική λύση, αφού χρησιμοποιούνται επαναληπτικές/αναζητητικές αλγοριθμικές μέθοδοι, χωρίς μάλιστα να υπολογίζουμε τον κίνδυνο σύγκλισης του αλγορίθμου σε τοπικό ακρότατο, (ii) δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων (ιδιαίτερα για τα πάχη ανοδικού στρώματος που επιτυγχάνονται με την ανοδίωση μικρής διάρκειας που χρησιμοποιήθηκε για τα δοκίμια ποιοτικού ελέγχου) αν αντί του φυσικού υποδείγματος του κυλινδρικού πόρου (με ακτίνα τη μέση τιμή των ακτίνων των κυκλικών διατομών πυθμένα και στομίου) χρησιμοποιηθεί φυσικό υπόδειγμα κόλουρου κώνου, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, (iii) η αστάθεια αποδεικνύεται ότι είναι εγγενής, αφού δεν αίρεται για μικρότερους χρόνους ανοδίωσης t_a , μέχρι και $t_a = 0,75 t_R$. Μετά τις παραπάνω διαπιστώσεις, μελετήσαμε την εξέλιξη της τυπικής απόκλισης, προκειμένου να έχουμε ένα ποσοτικό κριτήριο/μέτρο της διασποράς τεσσάρων σειρών μετρήσεων. Σε όλες τις σειρές

παρατηρήθηκε απότομη αύξηση της διασποράς για $t_a \rightarrow t_R$, σε βαθμό που (i) απορρίπτει το προτεινόμενο θεωρητικό (χωρίς πειραματική υποστήριξη) από τους NT κινητικό υπόδειγμα, που προέκυψε με καθαρά γεωμετρική ανάλυση, χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη η στατιστική κατανομή της ακτίνας του στομίου των πόρων, (ii) επιτρέπει τη διατύπωση ενός μηχανισμού καταστροφής που αρχίζει όταν η διαρκώς αυξανόμενη ακτίνα του στομίου των μικρότερων πόρων (αριστερή ουρά μιας συνεχούς, ενδεχόμενα κανονικής, κατανομής) πλησιάζει την ακτίνα του εγγεγραμμένου κύκλου στο αντίστοιχο εξαγωνικής διατομής πρίσμα και ολοκληρώνεται σε μη αυστηρά προκαθορισμένο χρόνο βάσει ενός απλού γεωμετρικού υποδείγματος λόγω επιφανειακών αταξιών που δημιουργούν χαοτική συμπεριφορά στην εκτεθειμένη στο ηλεκτρολυτικό πεδίο ελάχιστη απομένουσα φαινόμενη (εκτός πόρων) επιφάνεια του οξειδίου.

Ο μηχανισμός αυτός απεικονίζεται σε ένα διάγραμμα τεσσάρων φάσεων και η δημιουργούμενη άτακτη/κοκκώδης επιφάνεια, ως αποτέλεσμα της καταστροφής της προηγούμενης δομής, διαπιστώθηκε με τη βοήθεια ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Στη συνέχεια, μελετήθηκε με όμοιο τρόπο η δημιουργία/διάδοση της καταστροφής και διαπιστώθηκε ότι αυτή αρχίζει πλησίον της τριεπιφάνειας στερεού-υγρού-αέρα (περιοχή μέγιστης ανισοτροπίας), όπου υπάρχει πύκνωση των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρολυτικού πεδίου και διαδίδεται ακολουθώντας την κατεύθυνση μείωσης της πυκνότητας αυτής (gradient direction), όπως αποδεικνύεται με τη βοήθεια οπτικής μικροσκοπίας.

Επίσης, μελετήθηκε η επίδραση της διαλυτικής δράσης του ηλεκτρολυτικού λουτρού ως εξής: (i) καταγράφηκε η διάδοση της καταστροφής της δομής, κατά τη διάρκεια της ανοδίωσης, μετά την έναρξή της στην τριεπιφάνεια, (ii) απομονώθηκε ένα δοκίμιο, όπου συνυπάρχουν επιφάνεια με δομή και κατεστραμμένη επιφάνεια, με διακοπή της ανοδίωσης πριν γίνει άμορφη ολόκληρη η επιφάνεια, (iii) παρέμεινε το δοκίμιο στο ίδιο λουτρό σε ανοικτό κύκλωμα, (iv) συνεχίστηκε η ανοδίωση μέχρι να ολοκληρωθεί η προγραμματισμένη μετατροπή της επιφάνειας σε άμορφη κατάσταση, (v) εξήχθη το δοκίμιο, φωτογραφήθηκε και συγκρίθηκε η φωτογραφία με άλλες που ελήφθησαν στις προηγούμενες φάσεις. Η σύγκριση έδειξε ότι η γειτονική προς την επιφάνεια με δομή ζώνη, που μόλις έχει αρχίσει να γίνεται άμορφη, μεταξύ επιφάνειας με δομή και άμορφης επιφάνειας η οποία διαπιστώθηκε στη φάση (ii), διαλύθηκε και στη συνέχεια δεν ακολούθησε την πορεία διάδοσης της καταστροφής που ταυτοποιήθηκε αρχικά. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να παραμείνει η ζώνη αυτή σε ένα λεπτό στρώμα πορώδους οξειδίου, όταν ολόκληρο το υπόλοιπο δοκίμιο είχε καλυφθεί πλήρως από την άμορφη επιφάνεια. Μπορούμε να αποδώσουμε το φαινόμενο αυτό

στο ότι η νεο-σχηματιζόμενη κατά τη φάση (ii) άμορφη ζώνη είχε υποστεί σε μικρή μόνον απόσταση (βάθος) από το στόμιο των πόρων καταστροφή και επομένως ήταν εφικτή η διάλυση της άμορφης στιβάδας και η αποκάλυψη της δομής που εξακολουθούσε να υπάρχει, πλησίον του πυθμένα των πόρων. Με την επανάληψη της ανοδίωσης (αποκατάσταση του κλειστού κυκλώματος), η διάδοση της καταστροφής συνεχίστηκε ως εάν δεν είχε παρεμβληθεί το στάδιο (iii), δηλ. το στερεό φάνηκε να διαθέτει μια 'συνάρτηση μνήμης'. Στην πραγματικότητα όμως, το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο ότι το απομένον φορτίο ηλεκτρικού ρεύματος (με βάση τον αρχικό προγραμματισμό) δεν ήταν αρκετό να δώσει τέτοιες τιμές πυκνότητας και για επαρκή χρόνο ώστε να γίνει πάλι άμορφη η επιφάνεια της συγκεκριμένης ζώνης. Αν ο μηχανισμός αυτός είναι σωστός, τότε πρέπει (i) το πλάτος της συγκεκριμένης ζώνης να μεγαλώνει συναρτήσει του χρόνου παραμονής του δοκιμίου στο λουτρό της ανοδίωσης σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος και (ii) αυτή η νέα πλατύτερη ζώνη να μην επηρεάζει την κάλυψη ολόκληρου του δοκιμίου με άμορφο οξείδιο, όταν συνεχίζεται η ανοδίωση σύμφωνα με το αρχικό πρόγραμμα, ενώ αυτή η ίδια η πλατύτερη ζώνη να μην (προλαβαίνει να) υφίσταται οποιαδήποτε εμφανή καταστροφή του δομημένου οξειδίου της.

Με επανειλημμένα πειράματα επιβεβαιώθηκε πλήρως το υποθετικό συμπέρασμα, πράγμα το οποίο αποτελεί αναγκαία (αλλά όχι και ικανή) συνθήκη για την επαλήθευση του προτεινόμενου μηχανισμού. Περαιτέρω επιβεβαίωση της ισχύος του προτεινόμενου μηχανισμού συνιστά η παρατήρηση ότι η μορφή της ζώνης εξαρτάται από τη σχετική θέση του δοκιμίου στο λουτρό (οπότε επηρεάζεται η πυκνότητα του ηλεκτρολυτικού πεδίου) και τα χαρακτηριστικά της ανοδίωσης, η οποία επηρεάζει συστηματικά την κατανομή της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και τη θερμοκρασιακή κατανομή.

Τέλος, μελετήθηκε η ανοδική διάλυση ολόκληρου του μεταλλικού υποστρώματος, αφού αυτό έχει γίνει πρώτα πορώδες και στη συνέχεια άμορφο (ως αποτέλεσμα της καταστροφής της δομής) οξείδιο. Σε σχετικές φωτογραφίες, φαίνεται η ανοδική διάλυση σε περατωτικό άκρο λόγω πύκνωσης των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρολυτικού πεδίου (edge effect). Αξίζει να σημειωθεί ότι η 'συνάρτηση μνήμης' είναι σε πλήρη λειτουργία σε ολόκληρη τη μάζα του μητρικού μετάλλου/κράματος, όπως φαίνεται από την επίδραση των γραμμών διέλασης σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου, μέχρι την εξαφάνιση και της τελευταίας ποσότητας της μάζας του. Για τη συμβολή του κωνικού σχήματος των πόρων στην επιταχυνόμενη ανοδική διάλυση γίνεται πλήρης μαθηματική διερεύνηση.

Βιβλιογραφία

- [1] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Computational and Experimental Process Control by Combining Neurofuzzy Approximation with Multicriteria Optimization. *Computational Engineering*, Int. Series Comp. Eng., WIT Press Computational Mechanics Inc., Boston Massachusetts, USA, 4, pp. 107-118.
- [2] Batzias F.A., Marcoulaki E.C. (2002). Restructuring the Keywords Interface to Enhance Computer Aided Process Engineering Knowledge Acquisition via an Intelligent Agent. *Computer-Aided Chem. Engineering*, 10, pp.829-834.
- [3] Jang, J.S.R.(1993). ANFIS: Adaptive – Network – Based Fuzzy Inference System. *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics*, 23(2), pp. 665 – 685.
- [4] Takagi, T., Sugeno, M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control. *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics*, 15(1), pp. 116 – 132.
- [5] Brans, J.P., Vincke, Ph., Mareschal, B. (1986). How to Select and How to Rank Projects: The PROMETHEE Method. *European Journal of Operational Research* 24, pp. 228 – 238.
- [6] Dubois D., Prade H. (1978). Operations on Fuzzy Numbers. *Int. J. Systems Sci.*, 9(6), pp. 613-626.
- [7] Fotilas P., Batzias A.F. (2008). A Modeling Procedure by Means of Multicriteria Analysis. Application in the Case of Specific Surface Estimation of Anodized Aluminium. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, forthcoming.
- [8] Fotilas P., Batzias A.F. (2007). Synthesizing Equivalence Indices for the Comparative Evaluation of Technoeconomic Efficiency of Industrial Processes at the Design/Re-engineering Level. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, 963, pp. 884-889.
- [9] Batzias A.F. (2007). Fuzzy Multicriteria Ranking of Aluminium Coating Methods. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, 963, pp. 856-861.
- [10] Batzias A.F., Batzias F.A. (2004). Fuzzy Multicriteria Choice of Instrumental Methods for Measuring Physical Quantities - Application in the Case of Dielectric Aluminium Anodic Oxide Films. *Proc. IEEE Instrum. & Meas. Technol. (IMTC 2004)* 3, pp. 2217-2222.
- [11] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Multicriteria Choice of Industrial Management System for a Typical Greek Tannery Operating in a Changing Environment. *4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4)* Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in *J. Chem. Eng. & Tech.* (J. Wiley), Jan. 2004. O-2-003.
- [12] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Multicriteria Choice of Solvent in the Lithographic Printing Industry with Emphasis on Occupational Health. *4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4)* Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in *J. Chem. Eng. & Tech.* (J. Wiley), Jan. 2004. P-4.1-025.
- [13] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Fuzzy Fault Tree Analysis as a Mechanism for Technical Support to Small/Medium Electroplaters on a Quasi Online/Real-Time Basis. *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT03)*, Maribor, Slovenia, 1, pp. 36-41.
- [14] Batzias A.F., Sidiras D.K. (2008). Thermochemical Conversion of Waste Biomass to Obtain Activated Carbon Substitutes for Dye Adsorption – A Decision Making Approach on Kinetics. *16th European Biomass Conference*, Elsevier, Valencia, Spain, 1727-1732.
- [15] Batzias A.F., Siontorou C.G. (2008). A New Scheme for Biomonitoring Heavy Metal Concentrations in Semi-Natural Wetlands. *Journal of Hazardous Materials* (Elsevier), 158, pp. 340-358.
- [16] Fotilas P., Batzias A. F., Siontorou C.G. (2008). Learning by Doing via Biomonitoring the Rehabilitation of Pb-Contaminated Industrial Sites. *Symp. on Environmental Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering* (Europ. Fed. Chem. Eng.), Prague, Czech Rep.
- [17] Tseng, T.Y., Klein, C.M. (1989). New Algorithm for the Ranking Procedure in Fuzzy Decisionmaking. *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics*, 19(5), pp. 1289 – 1296.
- [18] Nagayama M., Tamura K. (1967). Dissolution of the Anodic Oxide Film on Aluminium in a Sulphuric Acid Solution. *Electrochimica Acta*, 12, pp. 1097-1107.
- [19] Nagayama M., Tamura K. (1968). On the Mechanism of Dissolution of Porous Oxide Films on Aluminium During Anodizing. *Electrochimica Acta*, 13, pp. 1773-1783.

- [20] Fotilas P, Batzias A.F. (2008). Estimating the Al Anodic Oxide Film Porosity as a Function of Electrochemical Processing Conditions at Industrial Level. *8th Europ. Symp. on Electrochemical Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering* (Europ. Fed. Chem. Eng.), Prague, Czech Rep., pp. 245-260.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΠΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

```
Public Sub FuzProm(PrintToFile As Boolean)
' This routine performs the PROMETHEE methods, a class of outranking
methods in
' multicriteria analysis, presented by J.P. Brans et al (European J. Oper.
Res.,
' Vol. 24 (1986), pp. 228-238).
' The notion of generalized criterion is used to construct a valued
outranking
' relation. This corresponds to each of the following preference functions:
' (I) Usual criterion:  $H(d) = 0$  if  $d = 0$ ;  $H(d) = 1$  if  $d <> 0$ .
' (II) Quasi-criterion:  $H(d) = 0$  if  $-q \leq d \leq q$ ;  $H(d) = 1$  if  $d < -q$  or  $d > q$ .
' (III) Criterion with linear preference:  $H(d) = d/p$  if  $-p \leq d \leq p$ ;
'  $H(d) = 1$  if  $d < -p$  or  $d > p$ .
' (IV) Level criterion:  $H(d) = 0$  if  $|d| \leq q$ ;
'  $H(d) = 1/2$  if  $q < |d| \leq p$ ;
'  $H(d) = 1$  if  $p < |d|$ .
' (V) Criterion with linear preference and indifference area:  $H(d) = 0$  if
 $|d| \leq q$ ;
'  $H(d) = (|d| - q)/(p - q)$  if  $q < |d| \leq p$ ;  $H(d) = 1$  if  $p < |d|$ .
' (VI) Gaussian criterion:  $H(d) = 1 - \exp(-d^2/2s^2)$ .
' The multicriteria preference index is then defined as the weighted
average of the
' preference functions. This preference index determines a valued
outranking relation
' on the set of alternatives, which is exploited by considering for each
alternative
' a leaving and an entering flow in the valued outranking graph: A partial
preorder
' (PROMETHEE I) or a complete preorder (PROMETHEE II) can be proposed to
the
' decision maker in order to solve the problem.
' In the above method, fuzzy logic has been integrated, so that the ratings
of the
' experts and the weights can be given as trapezoidal fuzzy numbers. Fuzzy
PROMETHEE
' was performed in J.Geldermann et al (Fuzzy Sets and Systems,
Vol. 115(2000), pp 45-65).
' ----- Input to the algorithm -----
' -----
' nPromExp : Number of experts.
' nPromCrit: Number of criteria.
' nPromAlters : Number of alternatives.
' PromRates() : Matrix of ratings of alternatives under each criterion, by
each
' expert, dimensioned as nPromExp x nPromCrit x
nPromAlters+1, where
' the last column of alternatives is the weight for each
criterion.
' PromGenCrit(): Matrix indicating the generalized criterion and the
direction of
' optimizing (min/max), by each expert and for each
criterion,
' dimensioned as nPromExp x nPromCrit x 2.
' PromParams(): Matrix with parameters of the preference functions
corresponding to
' the gen. criteria, dimensioned as nPromExp x nPromCrit x 2
' (each function has at most 2 parameters, e.g. (V) has q and
p).
' FinalOrderOption: Used in case of many experts, and has one of the
following values:
' 1: The alternatives are ranked, then the ranks are added over each
expert, to
' get the overall order (no consensus)
' 2: Consensus on entrance: On entering the rates, these are aggregated to
one
```



```

'   opinion for each alternative and each criterion, then Promethee is
performed
'   on the consensus matrix
'   3: Consensus on exit: Promethee is performed for each expert, then the
consensus
'   is calculated for the Leaving, Entering and Net flows of all experts.
'   PrintToFile : This is an argument of the routine that takes values True,
if
'   we want the results written to a file, or False if we
don't.
'----- Main variables used -----
'-----
'   oMatrix(): Matrix of preference index,
'               with dimensions nPromExp+1 x nPromAl ters+1 x nPromAl ters+1
'               Last expert is the consensus, last column is the leaving flow,
and
'               last row is the entering flow
'   LeavingF(): Leaving Flow, dimensioned as nPromAl ters x nPromExp+1 (last
expert is consensus)
'   EnteringF(): Entering Flow, dimensioned as nPromAl ters x nPromExp+1 (last
expert is consensus)
'   FDiff(): Net flow, i.e. difference LeavingF() - EnteringF(), dimensioned
as
'               nPromAl ters x nPromExp+1 (last expert is consensus)
'   OrderEv1(): Initial order for the set of alternatives
'   OrderEv2(): Ordered set of alternatives (by preference) for each expert
and for
'               the consensus, dimensioned as nPromAl ters x nPromExp+1,
obtained
'               by ranking FDiff().
'   Ranking(): The tied rank of each alternative, by each expert and by their
aggregated
'               opinion (consensus), dimensioned as nPromAl ters x nPromExp+1
'   RankSumsOrd() : Array of size nPromAl ters, which is the sum of the
nPromExp columns
'               of Ranking(); if FinalOrderOption = 3, it is the last column
of Ranking()
'   OrderEv(): Ordered set of alternatives (by preference), considering all
experts,
'               obtained by sorting RankSumsOrd(), i.e. the total ranks of
alternatives.
'   Prosim(): Matrix with the signs that show the outranking (+) or the
outranked (-)
'               character of one alternative with respect to another (pairwise
comparisons),
'               both for leaving and entering flow, per comparison. It is dimensioned
as:
'               nPromExp+1 x nPromAl ters x nPromAl ters x 2 (last expert is
consensus).
'----- Functions/routines called -----
'-----
'   RankFS(FMatrix(), nPromAl ters, k, pmatrix(), HasPMatrix) : routine that
defuzzi fies
'               the fuzzy numbers in FMatrix(), dimensioned as nPromAl ters x
nPromExp+1
'               (last expert is the consensus) according to a method chosen by the
user and
'               places the result in the .fncoa part of the fuzzy number structure;
then the fuzzy numbers can be ranked. k is the serial num. of
expert.
'               If the method is resolved through a preference relation matrix, then
HasPMatrix = True and the matrix is returned in pmatrix(),
dimensioned as
'               nPromAl ters x nPromAl ters+1, the last column being the sum of the
columns,
'               which is also the numbers returned in .fncoa.
'   MakeConsensus(FMatrix(), i) : Given a matrix of fuzzy number, dimensioned
as
'               nPromAl ters x nPromExp+1, it takes the ith alternative from all
experts

```

```

' and returns the consensus in the last column of the matrix.
' CompareFS(f1, f2) : Returns a number which is a measure of the strength
of
' fuzzy number f1 over f2. It is positive if f1>f2, negative
otherwise.
'----- Functions for fuzzy arithmetics -----
'-----
' FuzAdd(f1, f2) : Adds two fuzzy numbers f1 and f2.
' FuzSubtract(f1, f2): Subtracts two fuzzy numbers, f2 from f1.
' FuzMultiply(f1, f2): Multiplies two fuzzy numbers, f1 and f2.
' FuzDivide(f1, f2): Divides two fuzzy numbers, f1 with f2.
' FuzScAdd(f1, n1): Adds fuzzy number f1 to real number n1.
' FuzScSubtract(f1, n1): Subtracts real number n1 from fuzzy number f1.

Dim k1 As Integer
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim k As Integer
Dim h As Integer
Dim sp As FUZYNUM
Dim d As FUZYNUM
Dim P As FUZYNUM
Dim f1 As FUZYNUM
Dim f2 As FUZYNUM
Dim EnteringF() As FUZYNUM
Dim LeavingF() As FUZYNUM
Dim r(100) As Single
Dim r2(100) As Integer
Dim newr(100) As Double
Dim SW As FUZYNUM
Dim nj1, nj2 As Integer
Dim j1 As Integer
Dim newmean As Single
Dim kstart As Integer
Dim diff As Double
Dim HasPMatrix As Boolean

ReDim FinRateSums(nPromAIters) As Double
ReDim Ranking(nPromAIters, nPromExp + 1) As Single
ReDim RankOrd(nPromAIters, nPromExp + 1) As Single
ReDim FDiffSort1(nPromAIters, nPromExp + 1) As Double
ReDim FDiffSort2(nPromAIters, nPromExp + 1) As FUZYNUM
ReDim FDiff(nPromAIters, nPromExp + 1) As FUZYNUM
ReDim OrderEv2(nPromAIters, nPromExp + 1) As Integer
ReDim pmatrix(nPromAIters, nPromAIters + 1) As Double
ReDim EnteringF(nPromAIters, nPromExp + 1) As FUZYNUM
ReDim LeavingF(nPromAIters, nPromExp + 1) As FUZYNUM
ReDim oMatrix(nPromExp + 1, nPromAIters + 1, nPromAIters + 1) As FUZYNUM

For i = 1 To nPromAIters
    RankSums(i) = 0
Next i

' Open results output file
If PrintToFile Then Open "prom.out" For Output As #1

' If consensus on entrance, the experts loop, below, is performed only
once,
' for the consensus of input ratings
If nPromExp > 1 And FinalOrderOption = 2 Then
    kstart = nPromExp + 1
    k1 = 1
Else
    kstart = 1
    k1 = 0
End If

' Step 1: For all experts, calculate preference index matrices, Leaving,
Entering

```

```

' and net flows.
For k = kstart To nPromExp + k1
  For i = 1 To nPromAlters
    f1 = Crisp(0)
    For j = 1 To nPromAlters
      SW = Crisp(0): sp = Crisp(0)
      For h = 1 To nPromCrit
        d = FuzSubtract(PromRates(k, h, i), PromRates(k, h, j))
        If (i = j) Or (d.fmean2 <= 0 And PromGencrit(k, h, 2) =
"max") Or (d.fmean1 >= 0 And PromGencrit(k, h, 2) = "min") Then
          P = Crisp(0)
        ElseIf d.fmean1 * d.fmean2 < 0 Then
          P = Crisp(0)
          Debug.Print "The fuzzy set of difference of rating for
alternatives "; i; " and "; j; " for criterion "; h; " crosses 0 axis"
        Else
          If PromGencrit(k, h, 2) = "min" Then d = FuzOpposite(d)
          Select Case PromGencrit(k, h, 1)
            Case "I"
              If d.fmean2 = 0 Then
                P = Crisp(0)
              Else
                P = Crisp(1)
              End If
            Case "II"
              If d.fmean1 <= PromParams(k, h, 1) Then
                P = Crisp(0)
              Else
                P = Crisp(1)
              End If
            Case "III"
              If d.fmean1 <= PromParams(k, h, 2) Then
                P = FuzScDivide(d, PromParams(k, h, 2))
              Else
                P = Crisp(1)
              End If
            Case "IV"
              If d.fmean1 <= PromParams(k, h, 1) Then
                P = Crisp(0)
              ElseIf d.fmean2 <= PromParams(k, h, 2) And d.fmean1
> PromParams(k, h, 1) Then
                P = Crisp(0.5)
              Else
                P = Crisp(1)
              End If
            Case "V"
              If d.fmean2 + d.fright <= PromParams(k, h, 1) Then
                P = Crisp(0)
              ElseIf d.fmean1 - d.fleft >= PromParams(k, h, 2)
Then
                P = Crisp(1)
              Else
                P = FuzScSubtract(d, (PromParams(k, h, 1)))
                P = FuzScDivide(P, PromParams(k, h, 2) -
PromParams(k, h, 1))
              End If
            Case "VI"
              P = FuzMultiply(d, d)
              P = FuzScDivide(P, (2 * (PromParams(k, h, 1) ^ 2)))
              P = FuzOpposite(P)
              P = FuzExp(P)
              P = FuzOpposite(P)
              P = FuzScAdd(P, 1)
            End Select
          End If
          P = CorrectP(P)
          P = FuzMultiply(P, PromRates(k, h, nPromAlters + 1))
          sp = FuzAdd(sp, P)
          SW = FuzAdd(SW, PromRates(k, h, nPromAlters + 1))
        Next h
      Next j
    Next i
  Next k

```

```

        oMatrix(k, i, j) = FuzDivide(sp, SW)
        f1 = FuzAdd(f1, oMatrix(k, i, j))
    Next j
    oMatrix(k, i, nPromAlters + 1) = f1
Next i
For i = 1 To nPromAlters
    f2 = Crisp(0)
    For j = 1 To nPromAlters
        f2 = FuzAdd(f2, oMatrix(k, j, i))
    Next j
    oMatrix(k, nPromAlters + 1, i) = f2
Next i
For i = 1 To nPromAlters
    oMatrix(k, i, nPromAlters + 1).fncoa = GravityCenter(oMatrix(k, i,
nPromAlters + 1))
    LeavingF(i, k) = oMatrix(k, i, nPromAlters + 1)
    oMatrix(k, nPromAlters + 1, i).fncoa = GravityCenter(oMatrix(k,
nPromAlters + 1, i))
    EnteringF(i, k) = oMatrix(k, nPromAlters + 1, i)
    FDiff(i, k) = FuzSubtract(oMatrix(k, i, nPromAlters + 1),
oMatrix(k, nPromAlters + 1, i))
    FDiff(i, k).fncoa = GravityCenter(FDiff(i, k))
Next i
Next k

' Step 2: If expert consensus on exit is chosen, calculate consensus for
' Leaving, Entering and Net flows
If nPromExp > 1 And FinalOrderOption = 3 Then
    For i = 1 To nPromAlters
        Call MakeConsensus(LeavingF(), i)
        Call MakeConsensus(EnteringF(), i)
        Call MakeConsensus(FDiff(), i)
    Next i
    k1 = 1
    PromExpNames(nPromExp + 1) = "Consensus"
End If

' Step 3: Defuzzification of Leaving, Entering and Net flows, matrix of
partial preorder (Promethee I),
' tied ranks, and sum of them, over experts, to obtain complete preorder
(Promethee II)
ReDim Prosim(nPromExp + 1, nPromAlters, nPromAlters, 2) As String
For k = kstart To nPromExp + k1
    Call RankFS(LeavingF(), nPromAlters, k, pmatrix(), HasPMatrix)
    For i = 1 To nPromAlters
        oMatrix(k, i, nPromAlters + 1) = LeavingF(i, k)
    Next i
    Call RankFS(EnteringF(), nPromAlters, k, pmatrix(), HasPMatrix)
    For i = 1 To nPromAlters
        oMatrix(k, nPromAlters + 1, i) = EnteringF(i, k)
    Next i
    Call RankFS(FDiff(), nPromAlters, k, pmatrix(), HasPMatrix)
    For i = 1 To nPromAlters
        FDiffSort(i) = FDiff(i, k)
        FDiffSort1(i, k) = FDiff(i, k).fncoa
        OrderEv(i) = OrderEv1(i)
    Next i
    ' Sort net flows and corresponding alternatives in descending order
    (first=best)
    ' in order to rank them to obtain the complete preorder (Promethee II)
    Call bubble2(FDiffSort(), OrderEv(), nPromAlters)
    For i = 1 To nPromAlters
        FDiffSort2(i, k) = FDiffSort(i)
        OrderEv2(i, k) = OrderEv(i)
        Ranking(i, k) = i
    Next i
    ' Partial preorder (Promethee I)
    For i = 1 To nPromAlters
        For j = 1 To nPromAlters

```

```

diff = CompareFS(oMatrix(k, i, nPromAlters + 1), oMatrix(k, j,
nPromAlters + 1))
If Abs(diff) <= 0.01 Then
    Prosim(k, i, j, 1) = "0"
Else
    If diff > 0 Then
        Prosim(k, i, j, 1) = "+"
    Else
        Prosim(k, i, j, 1) = "-"
    End If
End If
diff = CompareFS(oMatrix(k, nPromAlters + 1, i), oMatrix(k,
nPromAlters + 1, j))
If Abs(diff) <= 0.01 Then
    Prosim(k, i, j, 2) = "0"
Else
    If diff < 0 Then
        Prosim(k, i, j, 2) = "+"
    Else
        Prosim(k, i, j, 2) = "-"
    End If
End If
Next j
Next i
' Calculation of tied ranks
j = 1
Do While j < nPromAlters
    j = j + 1
    If CSng(FDi ffSort(j).fncoa) = CSng(FDi ffSort(j - 1).fncoa) Then
        nj1 = j - 1: j1 = 0
        Do While j <= nPromAlters And CSng(FDi ffSort(j).fncoa) =
CSng(FDi ffSort(j - 1).fncoa)
            j1 = j1 + 1
            nj2 = nj1 + j1
            j = j + 1
        Loop
        newmean = (nj1 + nj2) / 2
        For h = nj1 To nj2
            Ranki ng(h, k) = newmean
        Next h
        j = nj2
    End If
Loop
For j = 1 To nPromAlters
    r2(j) = OrderEv(j)
    r(j) = Ranki ng(j, k)
Next j
' Sort the alternatives in ascending order together with their
rankings, to
' obtain the array of ranks for the initially ordered set of
al ternatives
Call bubble3(r2(), Ranki ng(), nPromAlters, k)
Call bubble(r(), nPromAlters)
' Store to RankSumsOrd() the sum of rankings for all experts
For i = 1 To nPromAlters
    Fi nRateSums(i) = Fi nRateSums(i) + FDi ffSort1(i, k)
    RankSums(i) = RankSums(i) + Ranki ng(i, k)
    RankSumsOrd(i) = RankSums(i)
    RankOrd(i, k) = r(i)
Next i
If PrintToFile Then Call PromToFile(k, HasPMatrix)
Next k
' If many experts and consensus on exit, correct RankSumsOrd()
' with the ranking of the consensus
If nPromExp > 1 And FinalOrderOption = 3 Then
    For i = 1 To nPromAlters
        RankSums(i) = Ranki ng(i, nPromExp + k1)
        RankSumsOrd(i) = RankSums(i)
        Fi nRateSums(i) = FDi ffSort1(i, nPromExp + k1)
    Next i

```

```
End If
' Sort the total rankings in ascending order, together with their
alternatives,
' to obtain an ordered set of alternatives, where first=best, according to
consensus.
' This is the complete preorder (Promethee II) and is stored in OrderEv().
Call bubble4(RankSumsOrd(), r2(), nPromAlters)
For i = 1 To nPromAlters
    OrderEv(i) = r2(i)
Next i
If PrintToFile Then Call TotalRec

If PrintToFile Then Close #1

End Sub
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

```
Public Function CompareFS(f1 As FUZYNUM, f2 As FUZYNUM) As Double
' CompareFS compares two fuzzy numbers f1 and f2, according to the ranking
method,
' indicated by variable RankMethod, which takes values:
' 1 for Yager's F1 index, 3 for Yager's F3 index, 4 for Jain's method,
' 10 for Tseng & Klein, 11 for Baas & Kwakernaak method and 12 for Baldwin
- Guild.
' It returns a number positive if f1>=f2, negative otherwise

Dim RAB As Double
Dim RBA As Double
Dim IAB As Double
Dim errflag As Integer
Dim FSArray(2, 1) As FUZYNUM
Dim pmatrix(1, 1) As Double
Dim HasPMatrix As Boolean
Dim d As Double
Dim g1 As Double
Dim g2 As Double

Select Case RankMethod
Case 1
    g1 = GravityCenter(f1): g2 = GravityCenter(f2)
    CompareFS = (g1 - g2) / ((g1 + g2) / 2)
Case 3, 4
    FSArray(1, 1) = f1: FSArray(2, 1) = f2
    Call RankFS(FSArray(), 2, 1, pmatrix(), HasPMatrix)
    g1 = FSArray(1, 1).fncoa: g2 = FSArray(2, 1).fncoa
    CompareFS = (g1 - g2) / ((g1 + g2) / 2)
Case 10
    CompareFS = TsengKlein(f1, f2, RAB, RBA)
Case 11
    CompareFS = BaasKwakernaak(f1, f2, RAB, RBA)
Case 12
    CompareFS = BaldwinGuild(f1, f2, RAB, RBA, errflag)
End Select
End Function
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

```

Public Sub RankFS(FSort() As FUZYNUM, n As Integer, k As Integer, pmatrix()
As Double, HasPMatrix As Boolean)
' RankFS ranks the alternative final ratings of a particular expert, given
as fuzzy numbers
' according to the ranking method, indicated by variable RankMethod, which
takes values:
' 1 for Yager's F1 index, 3 for Yager's F3 index, 4 for Jain's method,
' 10 for Tseng & Klein, 11 for Baas & Kwakernaak method and 12 for Baldwin
- Guild.
' The inputs to the subroutine are:
' FSort(): a matrix where the final ratings of alternatives (rows)
' are given for each expert (columns) as fuzzy numbers
' n: the number of rows (alternatives) of FSort()
' k: the expert (column of FSort()) for which RankFS is called
' The subroutine calculates an index of strength of the alternatives which
is returned
' in the .fncoa part of the fuzzy numbers of matrix FSort(). It also
returns:
' HasPMatrix: It is set to TRUE if the rank method has a preference matrix,
FALSE otherwise
' pmatrix(): The preference matrix of alternatives (n x n)

Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim h1 As Integer
Dim h2 As Integer
Dim RAB As Double
Dim RBA As Double
Dim IAB As Double
Dim d As Double
Dim SumRAB As Double
Dim xofs As Double
Dim f1 As FUZYNUM
Dim errflag As Integer
Dim mess1 As String
Dim resp As Integer
Dim xmax As Double
Dim MsgString(10) As String

MsgString(1) = "Error in quadratic eq. in the evaluation of gambler
ranki ng"
MsgString(2) = "Failed to evaluate the risk averse ranking (error in
Newton)"
MsgString(3) = "More than one roots found for some alternatives"
MsgString(4) = "No roots found for some alternatives"
MsgString(5) = "The Root found is outside [0, 1]"

If RankMethod < 10 Then
HasPMatrix = False
Select Case RankMethod
Case 1
For i = 1 To n
f1 = FSort(i, k)
FSort(i, k).fncoa = GravityCenter(f1)
Next i
Case 3, 4
For i = 1 To n
If i = 1 Then
xofs = FSort(i, k).fmean1 - FSort(i, k).fleft: xmax = FSort(i,
k).fmean2 + FSort(i, k).fright
Else
If FSort(i, k).fmean1 - FSort(i, k).fleft < xofs Then xofs =
FSort(i, k).fmean1 - FSort(i, k).fleft
If FSort(i, k).fmean2 + FSort(i, k).fright > xmax Then xmax =
FSort(i, k).fmean2 + FSort(i, k).fright
End If
Next i

```



```

xmax = xmax - xofs
For i = 1 To n
    f1 = FSort(i, k)
    f1.fmean1 = f1.fmean1 - xofs: f1.fmean2 = f1.fmean2 - xofs
    If RankMethod = 3 Then
        FSort(i, k).fncoa = YagerF3(f1)
    Else
        FSort(i, k).fncoa = Jain(f1, n, xmax, errflag)
        If errflag <> 0 Then
            resp = MsgBox(MsgString(errflag), vbCritical + vbOKOnly,
"Error")
                Exit Sub
            End If
        End If
    Next i
End Select
Else
    HasPMatrix = True
    For i = 1 To n
        SumRAB = 0
        For j = 1 To n
            If j > i Or (i = j And RankMethod = 12) Then
                Select Case RankMethod
                    Case 10
                        d = TsengKlein(FSort(i, k), FSort(j, k), RAB, RBA)
                    Case 11
                        d = Baaskwakernaak(FSort(i, k), FSort(j, k), RAB, RBA)
                    Case 12
                        d = BaldwinGuiId(FSort(i, k), FSort(j, k), RAB, RBA,
errflag)
                If errflag <> 0 Then
                    resp = MsgBox(MsgString(errflag), vbCritical +
vbOKOnly, "Error")
                        Exit Sub
                    End If
                End Select
                pmatrix(i, j) = RAB: pmatrix(j, i) = RBA
            ElseIf i = j Then
                Select Case RankMethod
                    Case 10
                        pmatrix(i, j) = 0.5
                    Case 11
                        pmatrix(i, j) = 1
                End Select
            End If
            SumRAB = SumRAB + pmatrix(i, j)
        Next j
        FSort(i, k).fncoa = SumRAB
        pmatrix(i, j) = SumRAB
    Next i
End If
End Sub

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

Public Function GravityCenter(f1 As FUZYNUM) As Double
' Returns the center of gravity of a fuzzy number f1

Select Case f1.fntype

Case 3

If f1.fleft + f1.fright + 2 * f1.fmean2 - 2 * f1.fmean1 = 0 Then

GravityCenter = 0: Exit Function

GravityCenter = ((f1.fmean2 ^ 2) - (f1.fmean1 ^ 2) + f1.fleft * f1.fmean1 +
f1.fright * f1.fmean2 + (1 / 3) * ((f1.fright ^ 2) - (f1.fleft ^ 2))) /

(f1.fleft + f1.fright + 2 * f1.fmean2 - 2 * f1.fmean1)

Case 2

GravityCenter = (3 * f1.fmean1 - f1.fleft + f1.fright) / 3

Case 1

GravityCenter = f1.fmean1

Case 0

GravityCenter = f1.fncoa

End Select

End Function

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V

```

Private Function Baaskwakernaak(f1 As FUZYNUM, f2 As FUZYNUM, RAB As
Double, RBA As Double) As Double
' Function Baaskwakernaak ranks two fuzzy numbers, A and B, according to
paper
' S.M. Baas & H. Kwakernaak, Rating and Ranking of multiple aspect
alternatives
' using fuzzy sets, Automatica 13 (1977) pp.47-58.
' The inputs to the function are the fuzzy numbers A and B, given as f1 and
f2
' The function returns an index which is the relative strength of A over B,
and thus
' it is positive if A>=B, negative otherwise. It also returns
' RAB: The preference of A over B
' RBA: the preference of B over A

Dim X1 As COORDDOUBLE

If f2.fmean2 + f2.fright <= f1.fmean1 - f1.fleft Then
    RAB = 1: RBA = 0
    Baaskwakernaak = 1
    Exit Function
ElseIf f1.fmean2 + f1.fright <= f2.fmean1 - f2.fleft Then
    RAB = 0: RBA = 1
    Baaskwakernaak = -1
    Exit Function
ElseIf FuzEqual(f1, f2) Then
    RAB = 1: RBA = 1
    Baaskwakernaak = 0
    Exit Function
End If
If f2.fmean2 >= f1.fmean1 And f1.fmean2 >= f2.fmean2 Then
    RAB = 1: RBA = 1
ElseIf f1.fmean2 >= f2.fmean1 And f2.fmean2 >= f1.fmean2 Then
    RAB = 1: RBA = 1
ElseIf f2.fmean2 < f1.fmean1 Then
    RAB = 1
    X1 = Lines2Intersec(f1.fmean1 - f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1, f2.fmean2,
1, f2.fmean2 + f2.fright, 0)
    RBA = X1.Pointy
ElseIf f1.fmean2 < f2.fmean1 Then
    RBA = 1
    X1 = Lines2Intersec(f2.fmean1 - f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1, f1.fmean2,
1, f1.fmean2 + f1.fright, 0)
    RAB = X1.Pointy
End If
Baaskwakernaak = (RAB - RBA) / ((RAB + RBA) / 2)
End Function

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI

Private Function TsengKlein(f1 As FUZYNUM, f2 As FUZYNUM, RAB As Double, RBA As Double) As Double

' This routine ranks two fuzzy numbers using the Tseng and Klein algorithm
' (IEEE Trans. Systems, Man, and Cyber. Vol. 19(5), 1989, 1289-1296)
' It receives as input the two fuzzy numbers A and B (f1 and f2) and returns
' RAB: the degree to which A is preferred or indifferent to B
' RBA: the degree to which B is preferred or indifferent to A
' TsengKlein: The value of the function, which is a measure of the relative position of A and B. It is positive if RAB > RBA, negative

otherwise.

' The calculations are performed on each of 24 cases, denoted by "Fig A" to "Fig X",

' which are derived by the relative positions of the two fuzzy numbers

----- Function Variables -----

' AreaA: Area under fuzzy number A

' AreaB: Area under fuzzy number B

' DAB: Area where A dominates B

' DBA: Area where B dominates A

' IAB: Area of indifference (overlap area)

' xyarray([number of points], [number of dimensions]):

' Two-dimensional array of points of each dimension X, Y

' X1, X2, X3: coordinates (X, Y)

----- Function Calls -----

' PolygonArea(xyarray(), n):

' The function takes as input an array of points on 2 dimensions and the

' number of points, n and returns the convex area defined by these points

' Lines2Intersec(x11, y11, x12, y12, x21, y21, x22, y22) :

' By giving the coordinates (start/end) of two lines, it returns the coordinates of their intersection

Dim xyarray(10, 2) As Double

Dim n3 As Integer

Dim i As Integer

Dim AreaA As Double

Dim AreaB As Double

Dim IAB As Double

Dim DAB As Double

Dim DBA As Double

Dim X1 As COORDDOUBLE

Dim X2 As COORDDOUBLE

Dim X3 As COORDDOUBLE

If FuzEqual(f1, f2) Or (FuzEqual(f1, Crisp(0)) And FuzEqual(f2, Crisp(0)))

Then

RAB = 0.5: RBA = 0.5

TsengKlein = 0

Exit Function

ElseIf f2.fmean2 + f2.fright <= f1.fmean1 - f1.fl left Then

RAB = 1: RBA = 0

TsengKlein = 1

Exit Function

ElseIf f1.fmean2 + f1.fright <= f2.fmean1 - f2.fl left Then

RAB = 0: RBA = 1

TsengKlein = -1

Exit Function

End If

AreaA = (f1.fmean2 + f1.fright - (f1.fmean1 - f1.fl left) + f1.fmean2 - f1.fmean1) / 2

AreaB = (f2.fmean2 + f2.fright - (f2.fmean1 - f2.fleft) + f2.fmean2 - f2.fmean1) / 2

' Fig A

If f2.fmean1 - f2.fleft <= f1.fmean1 - f1.fleft And f1.fmean1 >= f2.fmean2 And f2.fmean2 + f2.fright <= f1.fmean2 + f1.fright Then

X1 = Lines2Intersec(f1.fmean1 - f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1, f2.fmean2, 1, f2.fmean2 + f2.fright, 0)

IAB = (f2.fmean2 + f2.fright - (f1.fmean1 - f1.fleft)) * X1.Pointy * 0.5

DAB = AreaA + AreaB - 2 * IAB

DBA = 0

' Fig B

ElseIf f1.fmean1 - f1.fleft <= f2.fmean1 - f2.fleft And f2.fmean1 >= f1.fmean2 And f1.fmean2 + f1.fright <= f2.fmean2 + f2.fright Then

X1 = Lines2Intersec(f2.fmean1 - f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1, f1.fmean2, 1, f1.fmean2 + f1.fright, 0)

IAB = (f1.fmean2 + f1.fright - (f2.fmean1 - f2.fleft)) * X1.Pointy * 0.5

DBA = AreaA + AreaB - 2 * IAB

DAB = 0

' Fig C

ElseIf f1.fmean1 - f1.fleft <= f2.fmean1 - f2.fleft And f1.fmean1 <= f2.fmean1 And f2.fmean2 <= f1.fmean2 And f1.fmean2 + f1.fright >= f2.fmean2 + f2.fright Then

IAB = AreaB

xyarray(1, 1) = f2.fmean2: xyarray(1, 2) = 1

xyarray(2, 1) = f1.fmean2: xyarray(2, 2) = 1

xyarray(3, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(3, 2) = 0

xyarray(4, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(4, 2) = 0

xyarray(5, 1) = f2.fmean2: xyarray(5, 2) = 1

DAB = PolygonArea(xyarray(), 5)

DBA = AreaA - DAB - IAB

' Fig D

ElseIf f2.fmean1 - f2.fleft <= f1.fmean1 - f1.fleft And f2.fmean1 <= f1.fmean1 And f1.fmean2 <= f2.fmean2 And f2.fmean2 + f2.fright >= f1.fmean2 + f1.fright Then

IAB = AreaA

xyarray(1, 1) = f1.fmean2: xyarray(1, 2) = 1

xyarray(2, 1) = f2.fmean2: xyarray(2, 2) = 1

xyarray(3, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(3, 2) = 0

xyarray(4, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(4, 2) = 0

xyarray(5, 1) = f1.fmean2: xyarray(5, 2) = 1

DBA = PolygonArea(xyarray(), 5)

DAB = AreaB - DBA - IAB

' Fig E

ElseIf f2.fmean1 - f2.fleft < f1.fmean1 - f1.fleft And f2.fmean1 >= f1.fmean2 And f2.fmean2 + f2.fright >= f1.fmean2 + f1.fright Then

X1 = Lines2Intersec(f2.fmean1 - f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1, f1.fmean1 - f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1)

X2 = Lines2Intersec(f2.fmean1 - f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1, f1.fmean2, 1, f1.fmean2 + f1.fright, 0)

xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0

xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy

xyarray(3, 1) = X2.Pointx: xyarray(3, 2) = X2.Pointy

xyarray(4, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(4, 2) = 0

xyarray(5, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(5, 2) = 0

IAB = PolygonArea(xyarray(), 5)

xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0

xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy

xyarray(3, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(3, 2) = 0

xyarray(4, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(4, 2) = 0

DAB = PolygonArea(xyarray(), 4)

DBA = AreaA - IAB + AreaB - IAB - DAB

' Fig F

ElseIf f1.fmean1 - f1.fleft < f2.fmean1 - f2.fleft And f1.fmean1 >= f2.fmean2 And f1.fmean2 + f1.fright >= f2.fmean2 + f2.fright Then

X1 = Lines2Intersec(f1.fmean1 - f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1, f2.fmean1 - f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1)

```

    x2 = Lines2Intersec(f1.fmean1 - f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1, f2.fmean2,
1, f2.fmean2 + f2.fright, 0)
xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
xyarray(3, 1) = x2.Pointx: xyarray(3, 2) = x2.Pointy
xyarray(4, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(4, 2) = 0
xyarray(5, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(5, 2) = 0
IAB = PolygonArea(xyarray(), 5)
xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
xyarray(3, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(3, 2) = 0
xyarray(4, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(4, 2) = 0
DBA = PolygonArea(xyarray(), 4)
DAB = AreaB - IAB + AreaA - IAB - DBA
' Fig G
Elseif f1.fmean1 - f1.fleft <= f2.fmean1 - f2.fleft And f2.fmean1 >=
f1.fmean2 And f1.fmean2 + f1.fright > f2.fmean2 + f2.fright Then
    X1 = Lines2Intersec(f1.fmean2, 1, f1.fmean2 + f1.fright, 0, f2.fmean1 -
f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1)
    x2 = Lines2Intersec(f1.fmean2, 1, f1.fmean2 + f1.fright, 0, f2.fmean2,
1, f2.fmean2 + f2.fright, 0)
xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
xyarray(3, 1) = x2.Pointx: xyarray(3, 2) = x2.Pointy
xyarray(4, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(4, 2) = 0
xyarray(5, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(5, 2) = 0
IAB = PolygonArea(xyarray(), 5)
xyarray(1, 1) = x2.Pointx: xyarray(1, 2) = x2.Pointy
xyarray(2, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(2, 2) = 0
xyarray(3, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(3, 2) = 0
xyarray(4, 1) = x2.Pointx: xyarray(4, 2) = x2.Pointy
DBA = PolygonArea(xyarray(), 4)
DAB = AreaB - IAB + AreaA - IAB - DAB
' Fig H
Elseif f2.fmean1 - f2.fleft <= f1.fmean1 - f1.fleft And f1.fmean1 >=
f2.fmean2 And f2.fmean2 + f2.fright > f1.fmean2 + f1.fright Then
    X1 = Lines2Intersec(f2.fmean2, 1, f2.fmean2 + f2.fright, 0, f1.fmean1 -
f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1)
    x2 = Lines2Intersec(f2.fmean2, 1, f2.fmean2 + f2.fright, 0, f1.fmean2,
1, f1.fmean2 + f1.fright, 0)
xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
xyarray(3, 1) = x2.Pointx: xyarray(3, 2) = x2.Pointy
xyarray(4, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(4, 2) = 0
xyarray(5, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(5, 2) = 0
IAB = PolygonArea(xyarray(), 5)
xyarray(1, 1) = x2.Pointx: xyarray(1, 2) = x2.Pointy
xyarray(2, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(2, 2) = 0
xyarray(3, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(3, 2) = 0
xyarray(4, 1) = x2.Pointx: xyarray(4, 2) = x2.Pointy
DBA = PolygonArea(xyarray(), 4)
DAB = AreaA - IAB + AreaB - IAB - DBA
' Fig I
Elseif f1.fmean1 - f1.fleft <= f2.fmean1 - f2.fleft And f1.fmean1 <=
f2.fmean1 And f1.fmean2 >= f2.fmean1 And f2.fmean2 >= f1.fmean2 And
f2.fmean2 + f2.fright >= f1.fmean2 + f1.fright Then
    IAB = (f1.fmean2 + f1.fright - (f2.fmean1 - f2.fleft) + f1.fmean2 -
f2.fmean1) * 0.5
xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = f1.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
xyarray(3, 1) = f2.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
xyarray(4, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(4, 2) = 0
xyarray(5, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(5, 2) = 0
DBA = PolygonArea(xyarray(), 5)
DBA = DBA + AreaB - IAB
DAB = 0
' Fig J
Elseif f2.fmean1 - f2.fleft <= f1.fmean1 - f1.fleft And f2.fmean1 <=
f1.fmean1 And f2.fmean2 >= f1.fmean1 And f1.fmean2 >= f2.fmean2 And
f1.fmean2 + f1.fright >= f2.fmean2 + f2.fright Then

```

```

    IAB = (f2.fmean2 + f2.fright - (f1.fmean1 - f1.fleft) + f2.fmean2 -
f1.fmean1) * 0.5
    xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
    xyarray(2, 1) = f2.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
    xyarray(3, 1) = f1.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
    xyarray(4, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(4, 2) = 0
    xyarray(5, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(5, 2) = 0
    DAB = PolygonArea(xyarray(), 5)
    DAB = DAB + AreaA - IAB
    DBA = 0
' Fig K
Elseif f1.fmean1 - f1.fleft < f2.fmean1 - f2.fleft And f2.fmean1 <=
f1.fmean1 And f2.fmean2 >= f1.fmean2 And f2.fmean2 + f2.fright >= f1.fmean2
+ f1.fright Then
    X1 = Lines2Intersec(f1.fmean1 - f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1, f2.fmean1 -
f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1)
    xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
    xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
    xyarray(3, 1) = f1.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
    xyarray(4, 1) = f1.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
    xyarray(5, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(5, 2) = 0
    xyarray(6, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(6, 2) = 0
    IAB = PolygonArea(xyarray(), 6)
    xyarray(1, 1) = X1.Pointx: xyarray(1, 2) = X1.Pointy
    xyarray(2, 1) = f2.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
    xyarray(3, 1) = f1.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
    xyarray(4, 1) = X1.Pointx: xyarray(4, 2) = X1.Pointy
    DAB = PolygonArea(xyarray(), 4)
    DBA = AreaB - DAB - IAB
    DBA = DBA + AreaA - IAB
' Fig L
Elseif f2.fmean1 - f2.fleft < f1.fmean1 - f1.fleft And f1.fmean1 <=
f2.fmean1 And f1.fmean2 >= f2.fmean2 And f1.fmean2 + f1.fright >= f2.fmean2
+ f2.fright Then
    X1 = Lines2Intersec(f2.fmean1 - f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1, f1.fmean1 -
f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1)
    xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
    xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
    xyarray(3, 1) = f2.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
    xyarray(4, 1) = f2.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
    xyarray(5, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(5, 2) = 0
    xyarray(6, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(6, 2) = 0
    IAB = PolygonArea(xyarray(), 6)
    xyarray(1, 1) = X1.Pointx: xyarray(1, 2) = X1.Pointy
    xyarray(2, 1) = f1.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
    xyarray(3, 1) = f2.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
    xyarray(4, 1) = X1.Pointx: xyarray(4, 2) = X1.Pointy
    DBA = PolygonArea(xyarray(), 4)
    DAB = AreaA - DBA - IAB
    DAB = DAB + AreaB - IAB
' Fig M
Elseif f2.fmean1 - f2.fleft <= f1.fmean1 - f1.fleft And f2.fmean1 <=
f1.fmean1 And f1.fmean2 <= f2.fmean2 And f2.fmean2 + f2.fright < f1.fmean2
+ f1.fright Then
    X1 = Lines2Intersec(f2.fmean2, 1, f2.fmean2 + f2.fright, 0, f1.fmean2,
1, f1.fmean2 + f1.fright, 0)
    xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
    xyarray(2, 1) = f1.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
    xyarray(3, 1) = f1.fmean2: xyarray(3, 2) = 1
    xyarray(4, 1) = X1.Pointx: xyarray(4, 2) = X1.Pointy
    xyarray(5, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(5, 2) = 0
    xyarray(6, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(6, 2) = 0
    IAB = PolygonArea(xyarray(), 6)
    xyarray(1, 1) = f1.fmean2: xyarray(1, 2) = 1
    xyarray(2, 1) = f2.fmean2: xyarray(2, 2) = 1
    xyarray(3, 1) = X1.Pointx: xyarray(3, 2) = X1.Pointy
    xyarray(4, 1) = f1.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
    DBA = PolygonArea(xyarray(), 4)
    DAB = AreaA - IAB
    DAB = DAB + AreaB - IAB - DBA

```

' Fig N

```
ElseIf f1.fmean1 - f1.fleft <= f2.fmean1 - f2.fleft And f1.fmean1 <=
f2.fmean1 And f2.fmean2 <= f1.fmean2 And f1.fmean2 + f1.fright < f2.fmean2
+ f2.fright Then
```

```
    X1 = Lines2Intersec(f1.fmean2, 1, f1.fmean2 + f1.fright, 0, f2.fmean2,
1, f2.fmean2 + f2.fright, 0)
```

```
    xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
```

```
    xyarray(2, 1) = f2.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
```

```
    xyarray(3, 1) = f2.fmean2: xyarray(3, 2) = 1
```

```
    xyarray(4, 1) = X1.Pointx: xyarray(4, 2) = X1.Pointy
```

```
    xyarray(5, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(5, 2) = 0
```

```
    xyarray(6, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(6, 2) = 0
```

```
    IAB = PolygonArea(xyarray(), 6)
```

```
    xyarray(1, 1) = f2.fmean2: xyarray(1, 2) = 1
```

```
    xyarray(2, 1) = f1.fmean2: xyarray(2, 2) = 1
```

```
    xyarray(3, 1) = X1.Pointx: xyarray(3, 2) = X1.Pointy
```

```
    xyarray(4, 1) = f2.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
```

```
    DAB = PolygonArea(xyarray(), 4)
```

```
    DBA = AreaB - IAB
```

```
    DBA = DBA + AreaA - IAB - DAB
```

' Fig O

```
ElseIf f1.fmean1 - f1.fleft < f2.fmean1 - f2.fleft And f1.fmean1 >=
f2.fmean1 And f1.fmean1 < f2.fmean2 And f1.fmean2 >= f2.fmean2 And
f1.fmean2 + f1.fright >= f2.fmean2 + f2.fright Then
```

```
    X1 = Lines2Intersec(f1.fmean1 - f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1, f2.fmean1 -
f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1)
```

```
    xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
```

```
    xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
```

```
    xyarray(3, 1) = f1.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
```

```
    xyarray(4, 1) = f2.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
```

```
    xyarray(5, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(5, 2) = 0
```

```
    xyarray(6, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(6, 2) = 0
```

```
    IAB = PolygonArea(xyarray(), 6)
```

```
    xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
```

```
    xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
```

```
    xyarray(3, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(3, 2) = 0
```

```
    xyarray(4, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(4, 2) = 0
```

```
    DBA = PolygonArea(xyarray(), 4)
```

```
    DAB = AreaB - IAB
```

```
    DAB = DAB + AreaA - IAB - DBA
```

' Fig P

```
ElseIf f2.fmean1 - f2.fleft < f1.fmean1 - f1.fleft And f2.fmean1 >=
f1.fmean1 And f2.fmean1 < f1.fmean2 And f2.fmean2 >= f1.fmean2 And
f2.fmean2 + f2.fright >= f1.fmean2 + f1.fright Then
```

```
    X1 = Lines2Intersec(f2.fmean1 - f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1, f1.fmean1 -
f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1)
```

```
    xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
```

```
    xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
```

```
    xyarray(3, 1) = f2.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
```

```
    xyarray(4, 1) = f1.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
```

```
    xyarray(5, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(5, 2) = 0
```

```
    xyarray(6, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(6, 2) = 0
```

```
    IAB = PolygonArea(xyarray(), 6)
```

```
    xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
```

```
    xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
```

```
    xyarray(3, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(3, 2) = 0
```

```
    xyarray(4, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(4, 2) = 0
```

```
    DAB = PolygonArea(xyarray(), 4)
```

```
    DBA = AreaA - IAB
```

```
    DBA = DBA + AreaB - IAB - DAB
```

' Fig Q

```
ElseIf f2.fmean1 - f2.fleft < f1.fmean1 - f1.fleft And f2.fmean1 >=
f1.fmean2 And f2.fmean2 + f2.fright < f1.fmean2 + f1.fright Then
```

```
    X1 = Lines2Intersec(f2.fmean1 - f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1, f1.fmean1 -
f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1)
```

```
    X2 = Lines2Intersec(f2.fmean1 - f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1, f1.fmean2,
1, f1.fmean2 + f1.fright, 0)
```

```
    X3 = Lines2Intersec(f1.fmean2, 1, f1.fmean2 + f1.fright, 0, f2.fmean2,
1, f2.fmean2 + f2.fright, 0)
```

```
    xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
```



```

xyarray(2, 1) = X1. Pointx: xyarray(2, 2) = X1. Pointy
xyarray(3, 1) = x2. Pointx: xyarray(3, 2) = x2. Pointy
xyarray(4, 1) = X3. Pointx: xyarray(4, 2) = X3. Pointy
xyarray(5, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(5, 2) = 0
xyarray(6, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(6, 2) = 0
IAB = PolygonArea(xyarray(), 6)
xyarray(1, 1) = X1. Pointx: xyarray(1, 2) = X1. Pointy
xyarray(2, 1) = f1.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
xyarray(3, 1) = f1.fmean2: xyarray(3, 2) = 1
xyarray(4, 1) = x2. Pointx: xyarray(4, 2) = x2. Pointy
xyarray(5, 1) = X1. Pointx: xyarray(5, 2) = X1. Pointy
DBA = PolygonArea(xyarray(), 5)
DAB = AreaA - DBA - IAB
xyarray(1, 1) = x2. Pointx: xyarray(1, 2) = x2. Pointy
xyarray(2, 1) = f2.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
xyarray(3, 1) = f2.fmean2: xyarray(3, 2) = 1
xyarray(4, 1) = X3. Pointx: xyarray(4, 2) = X3. Pointy
xyarray(5, 1) = x2. Pointx: xyarray(5, 2) = x2. Pointy
DBA = DBA + PolygonArea(xyarray(), 5)
DAB = AreaA + AreaB - DBA - 2 * IAB
' Fig R
Elseif f1.fmean1 - f1.fleft < f2.fmean1 - f2.fleft And f1.fmean1 >=
f2.fmean2 And f1.fmean2 + f1.fright < f2.fmean2 + f2.fright Then
    X1 = Lines2Intersec(f1.fmean1 - f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1, f2.fmean1 -
f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1)
    x2 = Lines2Intersec(f1.fmean1 - f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1, f2.fmean2,
1, f2.fmean2 + f2.fright, 0)
    X3 = Lines2Intersec(f2.fmean2, 1, f2.fmean2 + f2.fright, 0, f1.fmean2,
1, f1.fmean2 + f1.fright, 0)
xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = X1. Pointx: xyarray(2, 2) = X1. Pointy
xyarray(3, 1) = x2. Pointx: xyarray(3, 2) = x2. Pointy
xyarray(4, 1) = X3. Pointx: xyarray(4, 2) = X3. Pointy
xyarray(5, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(5, 2) = 0
xyarray(6, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(6, 2) = 0
IAB = PolygonArea(xyarray(), 6)
xyarray(1, 1) = X1. Pointx: xyarray(1, 2) = X1. Pointy
xyarray(2, 1) = f2.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
xyarray(3, 1) = f2.fmean2: xyarray(3, 2) = 1
xyarray(4, 1) = x2. Pointx: xyarray(4, 2) = x2. Pointy
xyarray(5, 1) = X1. Pointx: xyarray(5, 2) = X1. Pointy
DAB = PolygonArea(xyarray(), 5)
DBA = AreaB - DAB - IAB
xyarray(1, 1) = x2. Pointx: xyarray(1, 2) = x2. Pointy
xyarray(2, 1) = f1.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
xyarray(3, 1) = f1.fmean2: xyarray(3, 2) = 1
xyarray(4, 1) = X3. Pointx: xyarray(4, 2) = X3. Pointy
xyarray(5, 1) = x2. Pointx: xyarray(5, 2) = x2. Pointy
DAB = DAB + PolygonArea(xyarray(), 5)
DBA = AreaA + AreaB - DAB - 2 * IAB
' Fig S
Elseif f1.fmean1 - f1.fleft <= f2.fmean1 - f2.fleft And f2.fmean1 >=
f1.fmean1 And f2.fmean1 < f1.fmean2 And f1.fmean2 <= f2.fmean2 And
f1.fmean2 + f1.fright > f2.fmean2 + f2.fright Then
    X1 = Lines2Intersec(f1.fmean2, 1, f1.fmean2 + f1.fright, 0, f2.fmean2,
1, f2.fmean2 + f2.fright, 0)
xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = f2.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
xyarray(3, 1) = f1.fmean2: xyarray(3, 2) = 1
xyarray(4, 1) = X1. Pointx: xyarray(4, 2) = X1. Pointy
xyarray(5, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(5, 2) = 0
xyarray(6, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(6, 2) = 0
IAB = PolygonArea(xyarray(), 6)
xyarray(1, 1) = X1. Pointx: xyarray(1, 2) = X1. Pointy
xyarray(2, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(2, 2) = 0
xyarray(3, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(3, 2) = 0
xyarray(4, 1) = X1. Pointx: xyarray(4, 2) = X1. Pointy
DAB = PolygonArea(xyarray(), 4)
DBA = AreaB - IAB
DBA = DBA + AreaA - IAB - DAB

```

' Fig T

```
Elseif f2.fmean1 - f2.fleft <= f1.fmean1 - f1.fleft And f1.fmean1 >=
f2.fmean1 And f1.fmean1 < f2.fmean2 And f2.fmean2 <= f1.fmean2 And
f2.fmean2 + f2.fright > f1.fmean2 + f1.fright Then
    X1 = Lines2Intersec(f2.fmean2, 1, f2.fmean2 + f2.fright, 0, f1.fmean2,
1, f1.fmean2 + f1.fright, 0)
    xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
    xyarray(2, 1) = f1.fmean1: xyarray(2, 2) = 1
    xyarray(3, 1) = f2.fmean2: xyarray(3, 2) = 1
    xyarray(4, 1) = X1.Pointx: xyarray(4, 2) = X1.Pointy
    xyarray(5, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(5, 2) = 0
    xyarray(6, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(6, 2) = 0
    IAB = PolygonArea(xyarray(), 6)
    xyarray(1, 1) = X1.Pointx: xyarray(1, 2) = X1.Pointy
    xyarray(2, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(2, 2) = 0
    xyarray(3, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(3, 2) = 0
    xyarray(4, 1) = X1.Pointx: xyarray(4, 2) = X1.Pointy
    DBA = PolygonArea(xyarray(), 4)
    DAB = AreaA - IAB
    DAB = DAB + AreaB - IAB - DBA
```

' Fig U

```
Elseif f2.fmean1 - f2.fleft < f1.fmean1 - f1.fleft And f2.fmean1 >=
f1.fmean1 And f2.fmean1 < f1.fmean2 And f2.fmean2 >= f1.fmean2 And
f1.fmean2 + f1.fright > f2.fmean2 + f2.fright Then
    X1 = Lines2Intersec(f2.fmean1 - f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1, f1.fmean1 -
f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1)
    x2 = Lines2Intersec(f1.fmean2, 1, f1.fmean2 + f1.fright, 0, f2.fmean2,
1, f2.fmean2 + f2.fright, 0)
    xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
    xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
    xyarray(3, 1) = f2.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
    xyarray(4, 1) = f1.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
    xyarray(5, 1) = x2.Pointx: xyarray(5, 2) = x2.Pointy
    xyarray(6, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(6, 2) = 0
    xyarray(7, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(7, 2) = 0
    IAB = PolygonArea(xyarray(), 7)
    xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
    xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
    xyarray(3, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(3, 2) = 0
    xyarray(4, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(4, 2) = 0
    DAB = PolygonArea(xyarray(), 4)
    DBA = AreaB - IAB - DAB
    xyarray(1, 1) = x2.Pointx: xyarray(1, 2) = x2.Pointy
    xyarray(2, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(2, 2) = 0
    xyarray(3, 1) = f2.fmean2 + f2.fright: xyarray(3, 2) = 0
    xyarray(4, 1) = x2.Pointx: xyarray(4, 2) = x2.Pointy
    DAB = DAB + PolygonArea(xyarray(), 4)
    DBA = AreaA + AreaB - 2 * IAB - DAB
```

' Fig V

```
Elseif f1.fmean1 - f1.fleft < f2.fmean1 - f2.fleft And f1.fmean1 >=
f2.fmean1 And f1.fmean1 < f2.fmean2 And f1.fmean2 >= f2.fmean2 And
f2.fmean2 + f2.fright > f1.fmean2 + f1.fright Then
    X1 = Lines2Intersec(f1.fmean1 - f1.fleft, 0, f1.fmean1, 1, f2.fmean1 -
f2.fleft, 0, f2.fmean1, 1)
    x2 = Lines2Intersec(f2.fmean2, 1, f2.fmean2 + f2.fright, 0, f1.fmean2,
1, f1.fmean2 + f1.fright, 0)
    xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(1, 2) = 0
    xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
    xyarray(3, 1) = f1.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
    xyarray(4, 1) = f2.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
    xyarray(5, 1) = x2.Pointx: xyarray(5, 2) = x2.Pointy
    xyarray(6, 1) = f1.fmean2 + f1.fright: xyarray(6, 2) = 0
    xyarray(7, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(7, 2) = 0
    IAB = PolygonArea(xyarray(), 7)
    xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(1, 2) = 0
    xyarray(2, 1) = X1.Pointx: xyarray(2, 2) = X1.Pointy
    xyarray(3, 1) = f2.fmean1 - f2.fleft: xyarray(3, 2) = 0
    xyarray(4, 1) = f1.fmean1 - f1.fleft: xyarray(4, 2) = 0
    DBA = PolygonArea(xyarray(), 4)
    DAB = AreaA - IAB - DBA
```

```

xyarray(1, 1) = x2.Poi ntx: xyarray(1, 2) = x2.Poi nty
xyarray(2, 1) = f2.fmean2 + f2.fri ght: xyarray(2, 2) = 0
xyarray(3, 1) = f1.fmean2 + f1.fri ght: xyarray(3, 2) = 0
xyarray(4, 1) = x2.Poi ntx: xyarray(4, 2) = x2.Poi nty
DBA = DBA + Pol ygonArea(xyarray(), 4)
DAB = AreaA + AreaB - 2 * IAB - DBA
' Fig W
Elsef f1.fmean1 - f1.fl eeft < f2.fmean1 - f2.fl eeft And f2.fmean1 <=
f1.fmean1 And f1.fmean2 <= f2.fmean2 And f1.fmean2 + f1.fri ght > f2.fmean2
+ f2.fri ght Then
X1 = Lines2Intersec(f1.fmean1 - f1.fl eeft, 0, f1.fmean1, 1, f2.fmean1 -
f2.fl eeft, 0, f2.fmean1, 1)
x2 = Lines2Intersec(f1.fmean2, 1, f1.fmean2 + f1.fri ght, 0, f2.fmean2,
1, f2.fmean2 + f2.fri ght, 0)
xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fl eeft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = X1.Poi ntx: xyarray(2, 2) = X1.Poi nty
xyarray(3, 1) = f1.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
xyarray(4, 1) = f1.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
xyarray(5, 1) = x2.Poi ntx: xyarray(5, 2) = x2.Poi nty
xyarray(6, 1) = f2.fmean2 + f2.fri ght: xyarray(6, 2) = 0
xyarray(7, 1) = f2.fmean1 - f2.fl eeft: xyarray(7, 2) = 0
IAB = Pol ygonArea(xyarray(), 7)
xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fl eeft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = X1.Poi ntx: xyarray(2, 2) = X1.Poi nty
xyarray(3, 1) = f2.fmean1 - f2.fl eeft: xyarray(3, 2) = 0
xyarray(4, 1) = f1.fmean1 - f1.fl eeft: xyarray(4, 2) = 0
DBA = Pol ygonArea(xyarray(), 4)
DAB = AreaA - IAB - DBA
xyarray(1, 1) = f1.fmean2: xyarray(1, 2) = 1
xyarray(2, 1) = f2.fmean2: xyarray(2, 2) = 1
xyarray(3, 1) = x2.Poi ntx: xyarray(3, 2) = x2.Poi nty
xyarray(4, 1) = f1.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
DBA = DBA + Pol ygonArea(xyarray(), 4)
DAB = AreaA + AreaB - 2 * IAB - DBA
' Fig X
Elsef f2.fmean1 - f2.fl eeft < f1.fmean1 - f1.fl eeft And f1.fmean1 <=
f2.fmean1 And f2.fmean2 <= f1.fmean2 And f2.fmean2 + f2.fri ght > f1.fmean2
+ f1.fri ght Then
X1 = Lines2Intersec(f2.fmean1 - f2.fl eeft, 0, f2.fmean1, 1, f1.fmean1 -
f1.fl eeft, 0, f1.fmean1, 1)
x2 = Lines2Intersec(f2.fmean2, 1, f2.fmean2 + f2.fri ght, 0, f1.fmean2,
1, f1.fmean2 + f1.fri ght, 0)
xyarray(1, 1) = f1.fmean1 - f1.fl eeft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = X1.Poi ntx: xyarray(2, 2) = X1.Poi nty
xyarray(3, 1) = f2.fmean1: xyarray(3, 2) = 1
xyarray(4, 1) = f2.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
xyarray(5, 1) = x2.Poi ntx: xyarray(5, 2) = x2.Poi nty
xyarray(6, 1) = f1.fmean2 + f1.fri ght: xyarray(6, 2) = 0
xyarray(7, 1) = f1.fmean1 - f1.fl eeft: xyarray(7, 2) = 0
IAB = Pol ygonArea(xyarray(), 7)
xyarray(1, 1) = f2.fmean1 - f2.fl eeft: xyarray(1, 2) = 0
xyarray(2, 1) = X1.Poi ntx: xyarray(2, 2) = X1.Poi nty
xyarray(3, 1) = f1.fmean1 - f1.fl eeft: xyarray(3, 2) = 0
xyarray(4, 1) = f2.fmean1 - f2.fl eeft: xyarray(4, 2) = 0
DAB = Pol ygonArea(xyarray(), 4)
DBA = AreaB - IAB - DAB
xyarray(1, 1) = f2.fmean2: xyarray(1, 2) = 1
xyarray(2, 1) = f1.fmean2: xyarray(2, 2) = 1
xyarray(3, 1) = x2.Poi ntx: xyarray(3, 2) = x2.Poi nty
xyarray(4, 1) = f2.fmean2: xyarray(4, 2) = 1
DAB = DAB + Pol ygonArea(xyarray(), 4)
DBA = AreaA + AreaB - 2 * IAB - DAB
End If

RAB = (DAB + IAB) / (AreaA + AreaB)
RBA = (DBA + IAB) / (AreaA + AreaB)
TsengKl ei n = Sgn(RAB - RBA) * 1.01 * 0.01 * 0.99 * 0.5 * (AreaA + AreaB) /
(IAB + 0.01 * 0.99 * 0.5 * (AreaA + AreaB))
End Functi on

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VII

```

Private Function BaldwinGuild(f1 As FUZYNUM, f2 As FUZYNUM, RAB As Double,
RBA As Double, errflag As Integer) As Double
' Function BaldwinGuild returns an index of strength of a fuzzy set A over
a fuzzy set B,
' the average weighted difference of preference of A over B, and the
opposite, based on:
' J. F. Baldwin & N. C. F. Guild, Comparison of fuzzy sets in the same decision
space,
' Fuzzy Sets and Systems, 2 (1979), pp. 213-231. The function takes input:
' a) The fuzzy set A, as f1
' b) The fuzzy set B, as f2
' The utility function the method uses, depends on the value of variable
DefExpertRisk:
' 0 : Linear utility, u(x)=x
' 1 : Square root function, for risk aversion, u(x)=sqr(x)
' 2 : Quadratic function, for risk taker, u(x) = x^2
' The preference of A over B and the opposite are returned in variables RAB
& RBA

Dim Root1 As Double
Dim Root2 As Double
Dim a As Double
Dim b As Double
Dim c As Double

Select Case DefExpertRisk
Case 0
RAB = (f1.fmean2 + f1.fright - (f2.fmean1 - f2.fleft)) / (1 + f1.fright
+ f2.fleft)
If RAB < 0 Or RAB > 1 Then errflag = 5: Exit Function
RBA = (f2.fmean2 + f2.fright - (f1.fmean1 - f1.fleft)) / (1 + f2.fright
+ f1.fleft)
If RBA < 0 Or RBA > 1 Then errflag = 5: Exit Function
Case 1
RAB = NewtonForRiskAv(f1, f2, errflag)
If errflag <> 0 Then Exit Function
RBA = NewtonForRiskAv(f2, f1, errflag)
If errflag <> 0 Then Exit Function
Case 2
a = (f2.fleft ^ 2) - (f1.fright ^ 2)
b = 1 + 2 * (f1.fmean2 + f1.fright) * f1.fright + 2 * (f2.fmean1 -
f2.fleft) * f2.fleft
c = ((f2.fmean1 - f2.fleft) ^ 2) - ((f1.fmean2 + f1.fright) ^ 2)
Call QuadraticEq(a, b, c, Root1, Root2, errflag)
If errflag <> 0 Then Exit Function
If (Root1 < 0 Or Root1 > 1) And (Root2 < 0 Or Root2 > 1) Then errflag =
5: Exit Function
If Root1 >= 0 And Root1 <= 1 Then RAB = Root1
If Root2 >= 0 And Root2 <= 1 Then RAB = Root2
a = (f1.fleft ^ 2) - (f2.fright ^ 2)
b = 1 + 2 * (f2.fmean2 + f2.fright) * f2.fright + 2 * (f1.fmean1 -
f1.fleft) * f1.fleft
c = ((f1.fmean1 - f1.fleft) ^ 2) - ((f2.fmean2 + f2.fright) ^ 2)
Call QuadraticEq(a, b, c, Root1, Root2, errflag)
If errflag <> 0 Then Exit Function
If (Root1 < 0 Or Root1 > 1) And (Root2 < 0 Or Root2 > 1) Then errflag =
5: Exit Function
If Root1 >= 0 And Root1 <= 1 Then RBA = Root1
If Root2 >= 0 And Root2 <= 1 Then RBA = Root2
End Select
BaldwinGuild = (RAB - RBA) / ((RAB + RBA) / 2)
End Function

Private Function NewtonForRiskAv(f1 As FUZYNUM, f2 As FUZYNUM, errflag As
Integer) As Double
' Function NewtonForRiskAv finds the root of the risk aversion utility in
BaldwinGuild

```

' by applying the Newton method. It takes input the fuzzy sets to be ranked, f1 & f2.

```

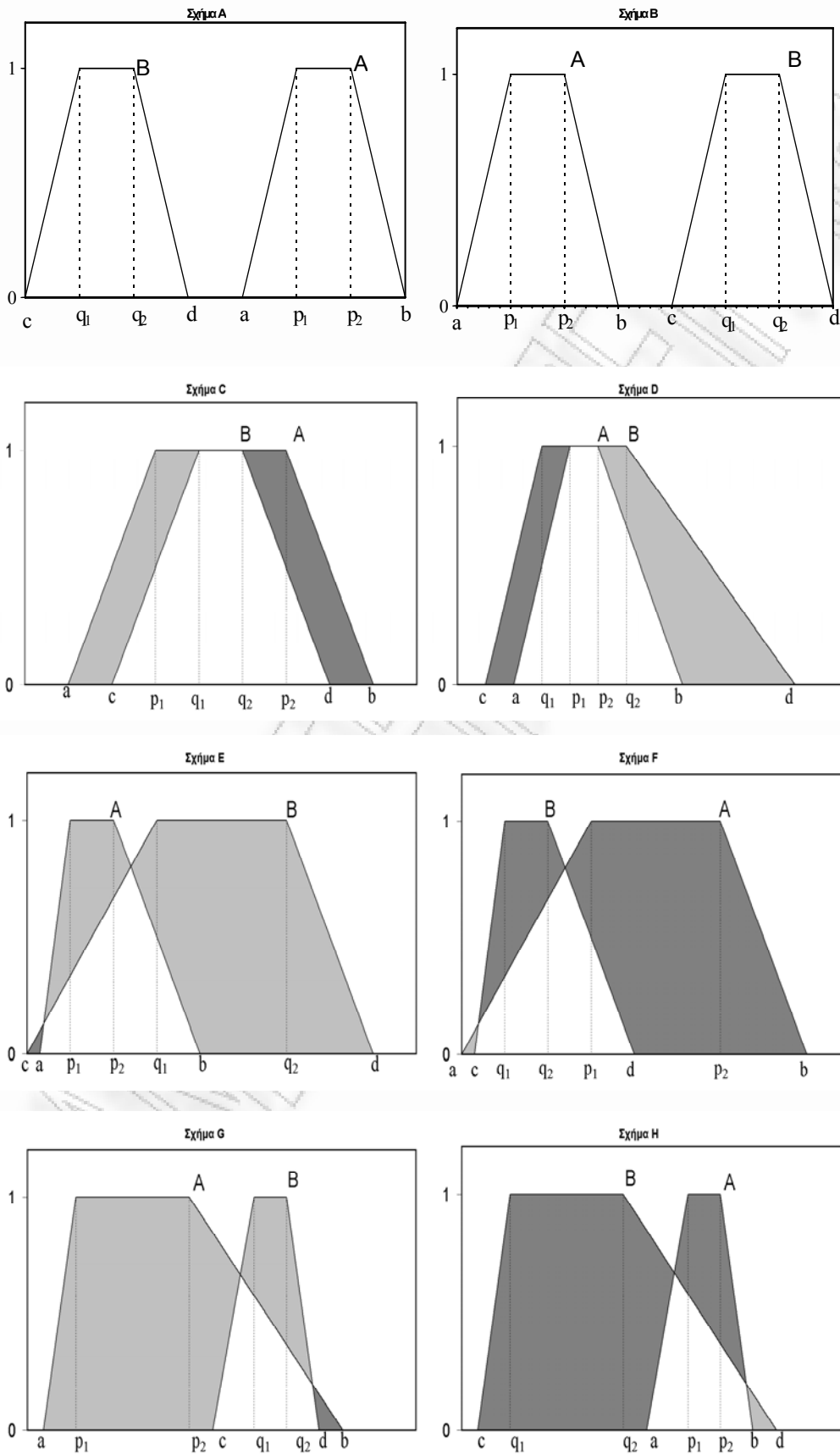
Dim Tol As Double
Dim f As Double
Dim dFdx As Double
Dim dx As Double
Dim x As Double
Dim X1 As Double
Dim x0 As Double
Dim s1 As Integer
Dim s2 As Integer
Dim i As Integer
Dim chsgn As Integer
Dim xstart As Double
Dim xend As Double
Dim xstep As Double

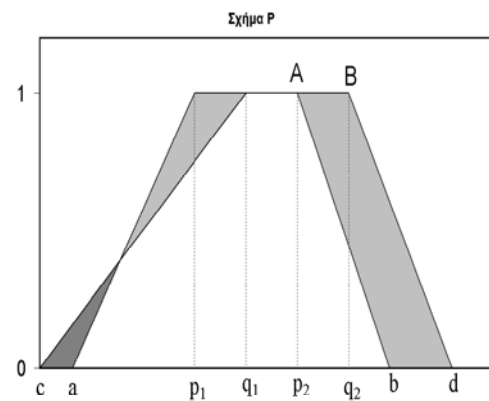
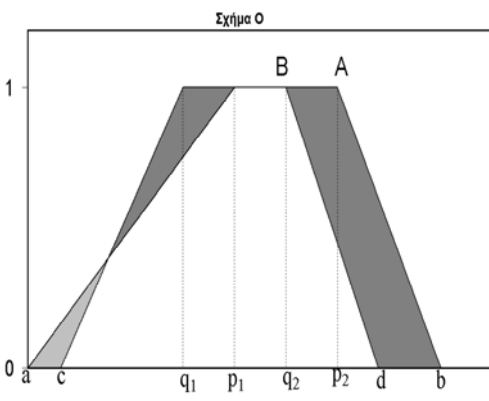
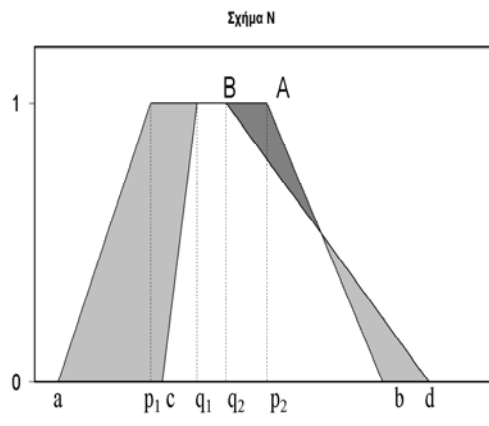
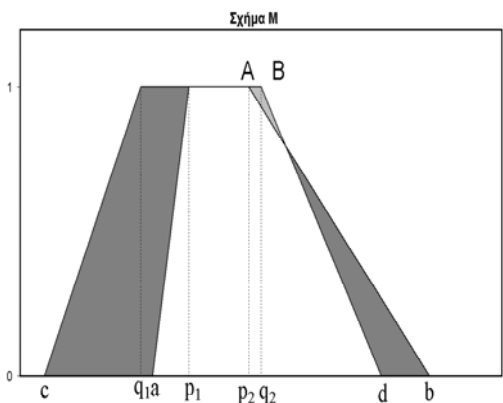
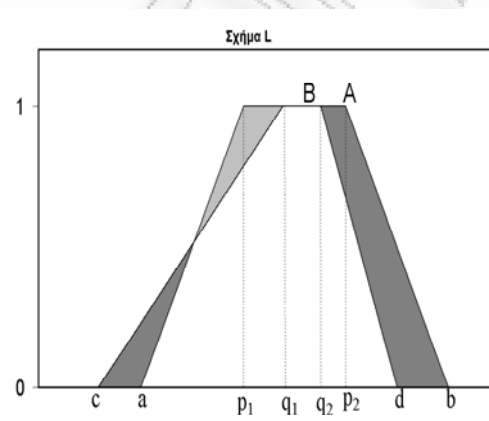
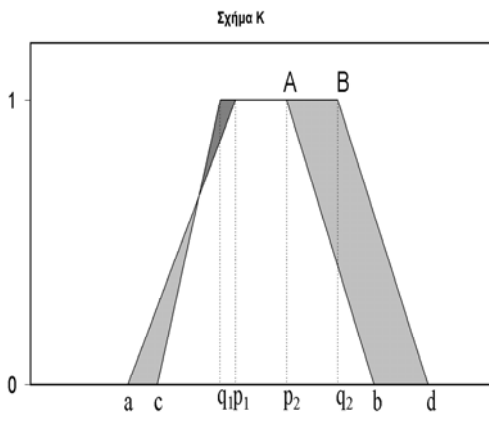
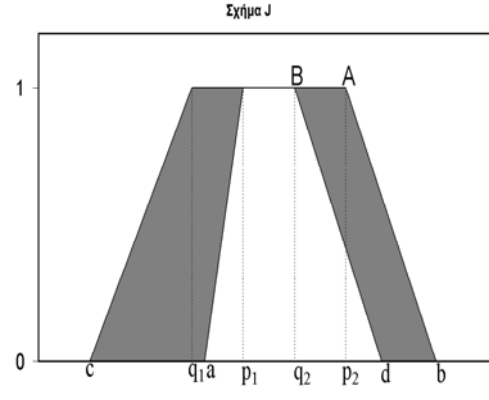
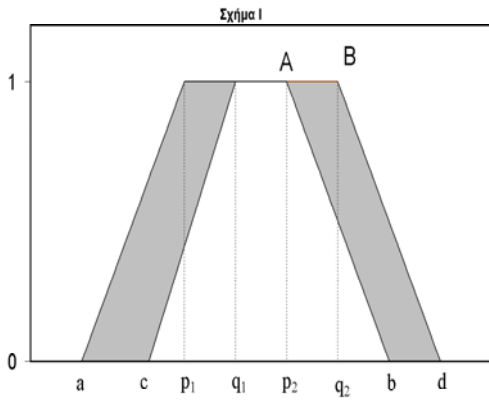
xstart = -0.005: xend = 1.01: xstep = 0.01: i = 0: chsgn = 0
For X1 = xstart To xend Step xstep
    If f1.fmean2 + f1.fright - X1 * f1.fright >= 0 And X1 * f2.fleft +
(f2.fmean1 - f2.fleft) >= 0 Then
        i = i + 1
        f = Sqr(f1.fmean2 + f1.fright - X1 * f1.fright) - Sqr(X1 * f2.fleft
+ (f2.fmean1 - f2.fleft))
        Debug.Print X1, f
        s2 = Sgn(f)
        If i > 1 Then
            If s2 <> s1 Then chsgn = chsgn + 1: x0 = X1
        End If
        s1 = s2
    Else
        Debug.Print "negative amount under sqr. root"
    End If
Next X1
If chsgn = 0 Then
    errflag = 4
    Exit Function
ElseIf chsgn > 1 Then
    errflag = 3
    Exit Function
End If
Tol = 0.000001
x = x0
Do
    x0 = x
    If f1.fmean2 + f1.fright - x * f1.fright <= 0 Or x * f2.fleft +
(f2.fmean1 - f2.fleft) < 0 Then
        errflag = 2
        Exit Function
    End If
    f = Sqr(f1.fmean2 + f1.fright - x * f1.fright) - Sqr(x * f2.fleft +
(f2.fmean1 - f2.fleft))
    dFdx = -f1.fright / (2 * Sqr(f1.fmean2 + f1.fright - x * f1.fright)) -
f2.fleft / (2 * Sqr(x * f2.fleft + (f2.fmean1 - f2.fleft)))
    dx = f / dFdx
    x = x0 - dx
Loop Until Abs(dx) <= Abs(Tol * x)
If x < 0 Or x > 1 Then
    errflag = 5
    Exit Function
End If
errflag = 0
NewtonForRiskAv = x

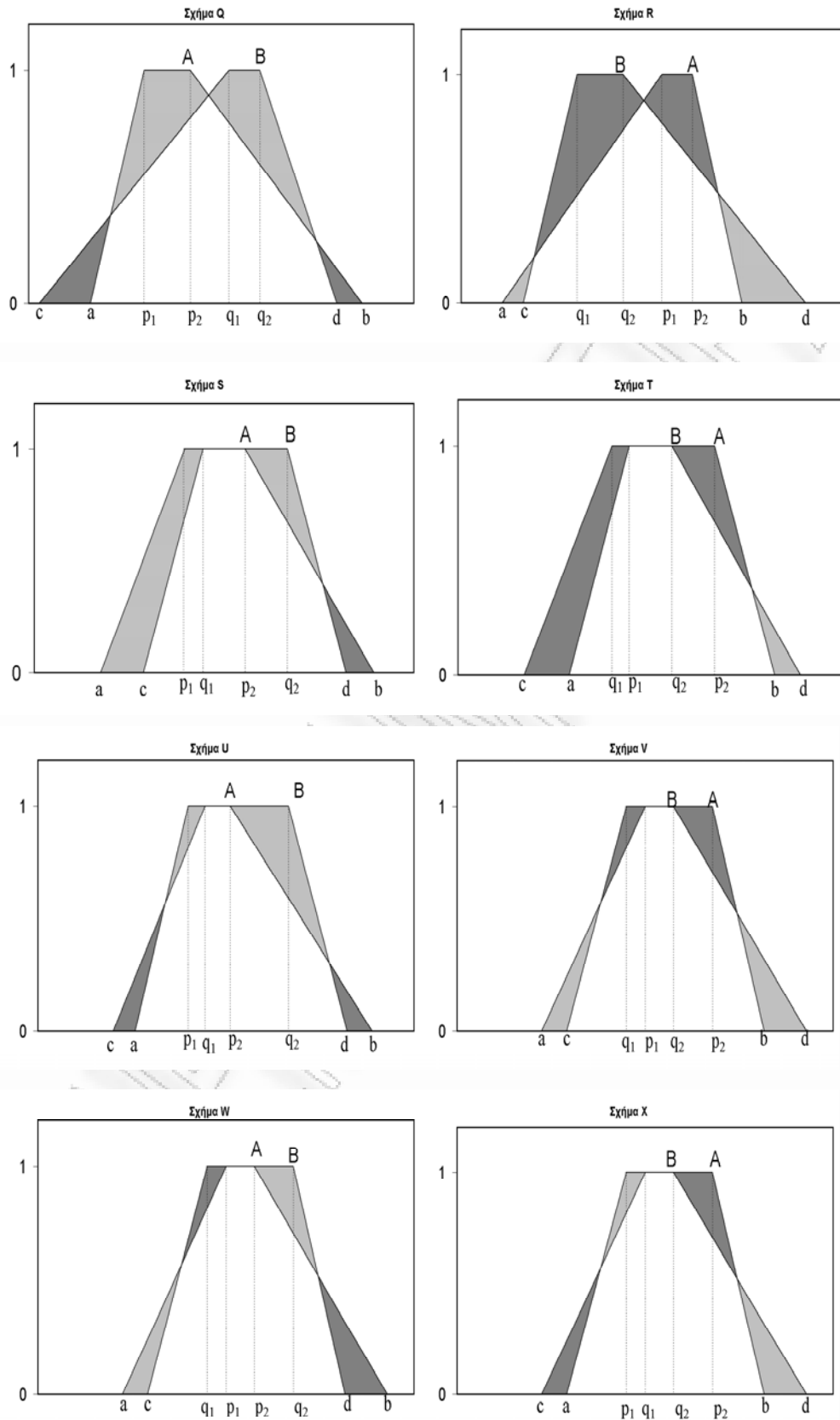
End Function

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VIII







Σχήμα VIII-1. Σχετικές θέσεις τραπεζίων, που αντιπροσωπεύουν ασαφείς αριθμούς, για την ανάπτυξη του αντίστοιχου λογισμικού κατάταξης με την μέθοδο της ανά ζεύγος σύγκρισης (pair-wise comparison): η τοπική υπεροχή του ασαφούς αριθμού $A(a, b, p_1, p_2)$ εμφανίζεται με έντονο γκρι ενώ του $B(c, d, q_1, q_2)$ με ασθενές γκρι.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΧ

Πίνακας 1. Εκτίμηση των τιμών των v , (v, h) , (v, r) , χρησιμοποιώντας μη-γραμμική παλινδρόμηση (solver/excel), διατηρώντας για την παράμετρο, της οποίας η τιμή δεν εκτιμάται σταθερή την αρχική της τιμή. Π.χ. για χρόνο ανοδίωσης $t_a = 6 \text{ min}$, η πρώτη σειρά μετρήσεων δίνει $v = 7,497\text{E-}09$, με τιμές των r, h σταθερές και ίσες με $6,220\text{E-}07 \text{ cm}$ και $1,870\text{E-}04 \text{ cm}$, αντίστοιχα. Η στατιστική παράμετρος Q δίνει το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων ενώ η στατιστική παράμετρος S δίνει το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης (standard error of estimate).

$$Q = \sum_{j=1}^n (W_{dj} - \hat{W}_{dj})^2, \quad S = \sqrt{Q/(n-p)}$$

όπου W_{dj} η πειραματική μέτρηση και \hat{W}_{dj} η εκτιμώμενη τιμή όπου $t = t_j$, n ο αριθμός των μετρήσεων ($n=25$, από $t_1=0$ $t_{25}=120 \text{ min}$ ανά 5 min) και p ο αριθμός των εκτιμώμενων παραμέτρων, δηλ. $p=1$ όταν εκτιμάται μόνο η τιμή της v και $p=2$ όταν εκτιμώνται οι τιμές των v, h με r σταθερή ή v, r με h σταθερή. Οι εκτιμώμενες τιμές των v, h, r είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες τιμές που αναφέρονται στην [???] αποδεικνύοντας ότι η χρήση του κινητικού υποδείγματος μπορεί να υποκαταστήσει την αλγοριθμική διαδικασία, δίνοντας αποτελέσματα που δεν εξαρτώνται από την τιμή του χρόνου t_R , της οποίας η μέτρηση χαρακτηρίζεται από υψηλή αβεβαιότητα, ιδιαίτερα σε υψηλές τιμές του χρόνου ανοδίωσης t_a , δηλ. υψηλές τιμές πάχους και πορώδους του τελικού προϊόντος.

$t_a = 6 \text{ min}$

	1η σειρά μετρήσεων			2η σειρά μετρήσεων			3η σειρά μετρήσεων		
	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r
v	7,497E-09	7,431E-09	7,476E-09	7,230E-09	6,682E-09	7,048E-09	7,745E-09	8,155E-09	7,868E-09
r	6,220E-07	6,220E-07	6,257E-07	6,220E-07	6,220E-07	6,554E-07	6,220E-07	6,220E-07	6,007E-07
h	1,870E-04	1,892E-04	1,870E-04	1,870E-04	2,079E-04	1,870E-04	1,870E-04	1,742E-04	1,870E-04
Q	3,770E-12	3,717E-12	3,717E-12	6,406E-11	6,032E-11	6,030E-11	4,121E-11	3,914E-11	3,913E-11
S	3,964E-07	4,020E-07	4,020E-07	1,634E-06	1,619E-06	1,619E-06	1,310E-06	1,304E-06	1,304E-06

	4η σειρά μετρήσεων			Σειρά μέσης τιμής μετρήσεων			Όλες οι τιμές των μετρήσεων		
	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r
v	7,549E-09	8,143E-09	7,728E-09	7,506E-09	7,603E-09	7,536E-09	7,506E-09	7,603E-09	7,536E-09
r	6,220E-07	6,220E-07	5,909E-07	6,220E-07	6,220E-07	6,167E-07	6,220E-07	6,220E-07	6,166E-07
h	1,870E-04	1,686E-04	1,870E-04	1,870E-04	1,838E-04	1,870E-04	1,870E-04	1,838E-04	1,870E-04
Q	3,166E-11	2,751E-11	2,747E-11	1,983E-12	1,867E-12	1,867E-12	1,073E-09	1,072E-09	1,072E-09
S	1,149E-06	1,094E-06	1,093E-06	2,874E-07	2,849E-07	2,849E-07	3,292E-06	3,308E-06	3,308E-06

$t_a = 11 \text{ min}$

	1η σειρά μετρήσεων			2η σειρά μετρήσεων			3η σειρά μετρήσεων		
	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r
v	7,499E-09	7,594E-09	7,529E-09	7,553E-09	7,243E-09	7,452E-09	7,430E-09	7,525E-09	7,460E-09
r	6,410E-07	6,410E-07	6,356E-07	6,410E-07	6,410E-07	6,593E-07	6,410E-07	6,410E-07	6,356E-07
h	3,380E-04	3,323E-04	3,380E-04	3,380E-04	3,577E-04	3,380E-04	3,380E-04	3,323E-04	3,380E-04
Q	1,759E-12	1,386E-12	1,386E-12	4,158E-10	4,116E-10	4,116E-10	6,365E-10	6,362E-10	6,362E-10
S	2,707E-07	2,455E-07	2,455E-07	4,162E-06	4,230E-06	4,230E-06	5,150E-06	5,259E-06	5,259E-06

	4η σειρά μετρήσεων			Σειρά μέσης τιμής μετρήσεων			Όλες οι τιμές των μετρήσεων		
	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r
v	7,580E-09	8,537E-09	7,866E-09	7,516E-09	7,716E-09	7,579E-09	7,516E-09	7,716E-09	7,579E-09
r	6,410E-07	6,410E-07	5,912E-07	6,410E-07	6,410E-07	6,297E-07	6,410E-07	6,410E-07	6,297E-07
h	3,380E-04	2,872E-04	3,380E-04	3,380E-04	3,261E-04	3,380E-04	3,380E-04	3,262E-04	3,380E-04
Q	2,578E-10	2,221E-10	2,220E-10	8,800E-12	7,141E-12	7,135E-12	1,619E-09	1,613E-09	1,613E-09
S	3,277E-06	3,108E-06	3,106E-06	6,055E-07	5,572E-07	5,570E-07	4,044E-06	4,056E-06	4,056E-06

$t_a = 16 \text{ min}$

	1η σειρά μετρήσεων			2η σειρά μετρήσεων			3η σειρά μετρήσεων		
	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r
v	7,601E-09	6,892E-09	7,259E-09	7,478E-09	7,386E-09	7,448E-09	7,460E-09	6,734E-09	7,212E-09
r	6,600E-07	6,600E-07	6,949E-07	6,600E-07	6,600E-07	6,655E-07	6,600E-07	6,600E-07	7,065E-07
h	4,990E-04	5,534E-04	4,990E-04	4,990E-04	5,074E-04	4,990E-04	4,990E-04	5,721E-04	4,990E-04
Q	1,424E-09	1,216E-10	1,216E-10	1,408E-10	1,400E-10	1,400E-10	1,972E-10	1,442E-10	1,442E-10
S	7,702E-06	2,299E-06	2,299E-06	2,422E-06	2,467E-06	2,467E-06	2,866E-06	2,504E-06	2,503E-06

	4η σειρά μετρήσεων			Σειρά μέσης τιμής μετρήσεων			Όλες οι τιμές των μετρήσεων		
	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r	v	v, h	v, r
v	7,601E-09	9,187E-09	8,061E-09	7,496E-09	7,516E-09	7,503E-09	7,496E-09	7,517E-09	7,503E-09
r	6,600E-07	6,600E-07	5,799E-07	6,600E-07	6,600E-07	6,588E-07	6,600E-07	6,600E-07	6,588E-07
h	4,990E-04	3,847E-04	4,990E-04	4,990E-04	4,972E-04	4,990E-04	4,990E-04	4,972E-04	4,990E-04
Q	5,904E-10	3,816E-10	3,811E-10	1,198E-11	1,194E-11	1,194E-11	1,882E-09	1,882E-09	1,882E-09
S	4,960E-06	4,073E-06	4,071E-06	7,064E-07	7,205E-07	7,204E-07	4,360E-06	4,382E-06	4,382E-06

Πίνακας 2. Ταυτόχρονη εκτίμηση των τιμών όλων των παραμέτρων v, h, r με πολυωνυμική (δηλ. με γραμμικό σύστημα κανονικών εξισώσεων) παλινδρόμηση, όταν χρησιμοποιείται κυβικό υποδείγμα χωρίς σταθερό όρο. Η μεγάλη απόκλιση των τιμών αυτών σε σχέση με τις τιμές που έχουν προκύψει με μη-γραμμική παλινδρόμηση, όταν διατηρείται σταθερή η τιμή μίας τουλάχιστον παραμέτρου, καθώς και η μη-ύπαρξη αποδεκτής λύσης (σημειώνεται με ‘-’ η εμφάνιση αρνητικών τιμών σε φυσικά μεγέθη), αποδεικνύουν την αστάθεια του υποδείγματος.

$t_a = 6 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$	$t = 115 \text{ min}$	$t = 110 \text{ min}$	$t = 105 \text{ min}$	$t = 100 \text{ min}$	$t = 95 \text{ min}$
1η σειρά μετρ.	v	2,212E-08	2,242E-08	2,244E-08	1,895E-08	1,914E-08	2,496E-08
	h	2,513E-05	2,461E-05	2,456E-05	3,263E-05	3,207E-05	2,071E-05
	r	1,536E-06	1,547E-06	1,548E-06	1,388E-06	1,398E-06	1,644E-06
2η σειρά μετρ.	v	3,406E-08	2,083E-08	-	-	-	-
	h	1,338E-05	2,626E-05	-	-	-	-
	r	1,725E-06	1,513E-06	-	-	-	-
3η σειρά μετρ.	v	-	-	2,711E-08	3,935E-08	4,385E-08	4,415E-08
	h	-	-	1,938E-05	1,232E-05	1,116E-05	1,109E-05
	r	-	-	1,650E-06	1,691E-06	1,626E-06	1,621E-06
4η σειρά μετρ.	v	-	-	-	-	-	-
	h	-	-	-	-	-	-
	r	-	-	-	-	-	-

Σειρά μέσης τιμής	v	-	-	-	-	1,774E-08	1,608E-08
	h	-	-	-	-	3,596E-05	4,293E-05
	r	-	-	-	-	1,360E-06	1,258E-06

$t_a = 11 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$	$t = 115 \text{ min}$	$t = 110 \text{ min}$	$t = 105 \text{ min}$	$t = 100 \text{ min}$	$t = 95 \text{ min}$
1η σειρά μετρ.	v	-	1,427E-08	1,572E-08	1,949E-08	1,958E-08	2,212E-08
	h	-	9,615E-05	7,988E-05	5,345E-05	5,303E-05	4,256E-05
	r	-	1,177E-06	1,285E-06	1,545E-06	1,550E-06	1,707E-06
2η σειρά μετρ.	v	-	5,087E-08	4,442E-08	-	1,321E-08	2,138E-08
	h	-	1,392E-05	1,574E-05	-	1,132E-04	4,570E-05
	r	-	2,100E-06	2,204E-06	-	1,097E-06	1,672E-06
3η σειρά μετρ.	v	3,397E-08	-	-	2,507E-08	-	-
	h	2,198E-05	-	-	3,351E-05	-	-
	r	2,044E-06	-	-	1,887E-06	-	-
4η σειρά μετρ.	v	-	-	-	-	1,064E-08	1,656E-08
	h	-	-	-	-	1,662E-04	7,052E-05
	r	-	-	-	-	9,334E-07	1,410E-06
Σειρά μέσης τιμής	v	-	-	-	1,310E-08	7,183E-09	7,437E-09
	h	-	-	-	1,124E-04	3,682E-04	3,435E-04
	r	-	-	-	1,104E-06	6,153E-07	6,369E-07

$t_a = 16 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$	$t = 115 \text{ min}$	$t = 110 \text{ min}$	$t = 105 \text{ min}$	$t = 100 \text{ min}$	$t = 95 \text{ min}$
1η σειρά μετρ.	v	-	3,014E-08	-	-	-	-
	h	-	3,343E-05	-	-	-	-
	r	-	2,482E-06	-	-	-	-
2η σειρά μετρ.	v	3,997E-08	2,219E-08	1,871E-08	-	-	-
	h	2,405E-05	6,210E-05	8,528E-05	-	-	-
	r	2,441E-06	1,755E-06	1,519E-06	-	-	-
3η σειρά μετρ.	v	4,445E-08	4,215E-08	3,866E-08	-	-	-
	h	2,052E-05	2,186E-05	2,446E-05	-	-	-
	r	2,595E-06	2,588E-06	2,546E-06	-	-	-
4η σειρά μετρ.	v	-	-	-	-	-	-
	h	-	-	-	-	-	-
	r	-	-	-	-	-	-
Σειρά μέσης τιμής	v	-	-	-	-	-	-
	h	-	-	-	-	-	-
	r	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 3. Ταυτόχρονη εκτίμηση των τιμών όλων των παραμέτρων v , h , r με πολυωνυμική (δηλ. με γραμμικό σύστημα κανονικών εξισώσεων) παλινδρόμηση, όταν χρησιμοποιείται κυβικό υπόδειγμα με σταθερό όρο. Η μεγάλη απόκλιση των τιμών αυτών σε σχέση με τις τιμές που έχουν προκύψει με μη γραμμική παλινδρόμηση, όταν διατηρείται σταθερή η τιμή μίας τουλάχιστον παραμέτρου, καθώς και η μη-ύπαρξη αποδεκτής λύσης (σημειώνεται με ‘-’ η εμφάνιση αρνητικών τιμών σε φυσικά μεγέθη), αποδεικνύουν την αστάθεια του υποδείγματος.

$t_a = 6 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$	$t = 115 \text{ min}$	$t = 110 \text{ min}$	$t = 105 \text{ min}$	$t = 100 \text{ min}$	$t = 95 \text{ min}$
1η σειρά μετρ.	v	2,264E-08	2,306E-08	2,319E-08	1,919E-08	1,946E-08	2,624E-08
	r	1,547E-06	1,560E-06	1,565E-06	1,399E-06	1,412E-06	1,663E-06
	h	2,428E-05	2,361E-05	2,339E-05	3,196E-05	3,118E-05	1,932E-05
	Q	3,576E-12	3,570E-12	3,570E-12	3,397E-12	3,396E-12	3,077E-12
	S	4,127E-07	4,225E-07	4,335E-07	4,334E-07	4,470E-07	4,385E-07

2η σειρά μετρ.	<i>v</i>	3,812E-08	2,703E-08	-	-	-	-
	<i>r</i>	1,524E-06	1,591E-06	-	-	-	-
	<i>h</i>	1,236E-05	1,825E-05	-	-	-	-
	<i>Q</i>	4,965E-11	3,654E-11	-	-	-	-
	<i>S</i>	1,538E-06	1,352E-06	-	-	-	-
3η σειρά μετρ.	<i>v</i>	-	-	2,187E-08	3,915E-08	4,463E-08	4,514E-08
	<i>r</i>	-	-	1,568E-06	1,700E-06	1,584E-06	1,572E-06
	<i>h</i>	-	-	2,628E-05	1,236E-05	1,105E-05	1,095E-05
	<i>Q</i>	-	-	5,367E-11	1,814E-11	1,514E-11	1,512E-11
	<i>S</i>	-	-	1,681E-06	1,004E-06	9,437E-07	9,721E-07
4η σειρά μετρ.	<i>v</i>	-	-	-	-	-	-
	<i>r</i>	-	-	-	-	-	-
	<i>h</i>	-	-	-	-	-	-
	<i>Q</i>	-	-	-	-	-	-
	<i>S</i>	-	-	-	-	-	-
Σειρά μέσης τιμής	<i>v</i>	-	-	-	-	1,881E-08	1,725E-08
	<i>r</i>	-	-	-	-	1,412E-06	1,324E-06
	<i>h</i>	-	-	-	-	3,253E-05	3,790E-05
	<i>Q</i>	-	-	-	-	9,350E-13	9,293E-13
	<i>S</i>	-	-	-	-	2,345E-07	2,410E-07

$t_a = 11 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$	$t = 115 \text{ min}$	$t = 110 \text{ min}$	$t = 105 \text{ min}$	$t = 100 \text{ min}$	$t = 95 \text{ min}$
1η σειρά μετρ.	<i>v</i>	-	-	-	1,525E-08	1,430E-08	1,830E-08
	<i>r</i>	-	-	-	1,265E-06	1,194E-06	1,485E-06
	<i>h</i>	-	-	-	8,409E-05	9,504E-05	5,958E-05
	<i>Q</i>	-	-	-	2,919E-23	3,591E-22	2,289E-22
	<i>S</i>	-	-	-	1,273E-12	4,596E-12	3,782E-12
2η σειρά μετρ.	<i>v</i>	-	5,300E-08	4,590E-08	-	-	-
	<i>r</i>	-	1,959E-06	2,138E-06	-	-	-
	<i>h</i>	-	1,366E-05	1,537E-05	-	-	-
	<i>Q</i>	-	1,032E-10	8,324E-11	-	-	-
	<i>S</i>	-	2,272E-06	2,093E-06	-	-	-
3η σειρά μετρ.	<i>v</i>	4,058E-08	-	-	3,374E-08	2,240E-08	-
	<i>r</i>	1,903E-06	-	-	2,040E-06	1,643E-06	-
	<i>h</i>	1,822E-05	-	-	2,195E-05	4,210E-05	-
	<i>Q</i>	6,208E-10	-	-	1,540E-11	1,275E-11	-
	<i>S</i>	5,437E-06	-	-	9,250E-07	8,660E-07	-
4η σειρά μετρ.	<i>v</i>	-	-	-	-	-	1,410E-08
	<i>r</i>	-	-	-	-	-	1,225E-06
	<i>h</i>	-	-	-	-	-	9,568E-05
	<i>Q</i>	-	-	-	-	-	1,098E-12
	<i>S</i>	-	-	-	-	-	2,620E-07
Σειρά μέσης	<i>v</i>	-	-	-	-	8,677E-09	9,072E-09
	<i>r</i>	-	-	-	-	7,411E-07	7,740E-07

τιμής	h	-	-	-	-	2,530E-04	2,317E-04
	Q	-	-	-	-	6,112E-13	6,112E-13
	S	-	-	-	-	1,896E-07	1,954E-07

$t_a = 16 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$	$t = 115 \text{ min}$	$t = 110 \text{ min}$	$t = 105 \text{ min}$	$t = 100 \text{ min}$	$t = 95 \text{ min}$
1η σειρά μετρ.	v	-	3,169E-08	-	-	-	-
	r	-	2,519E-06	-	-	-	-
	h	-	3,111E-05	-	-	-	-
	Q	-	7,507E-20	-	-	-	-
	S	-	6,127E-11	-	-	-	-
2η σειρά μετρ.	v	4,377E-08	2,745E-08	2,566E-08	2,149E-08	-	-
	r	2,364E-06	2,008E-06	1,919E-06	1,674E-06	-	-
	h	2,185E-05	4,317E-05	4,849E-05	6,666E-05	-	-
	Q	1,145E-10	7,336E-11	7,325E-11	7,301E-11	-	-
	S	2,335E-06	1,915E-06	1,963E-06	2,014E-06	-	-
3η Σειρά μετρ.	v	4,895E-08	4,732E-08	4,480E-08	1,460E-08	-	-
	r	2,419E-06	2,440E-06	2,454E-06	1,213E-06	-	-
	h	1,893E-05	1,960E-05	2,083E-05	1,371E-04	-	-
	Q	9,476E-11	9,343E-11	9,154E-11	5,243E-11	-	-
	S	2,124E-06	2,161E-06	2,195E-06	1,707E-06	-	-
4η σειρά μετρ.	v	-	-	-	-	3,963E-09	-
	r	-	-	-	-	3,507E-07	-
	h	-	-	-	-	1,783E-03	-
	Q	-	-	-	-	9,075E-11	-
	S	-	-	-	-	2,310E-06	-
Σειρά μέσης τιμής	v	-	-	-	-	-	-
	r	-	-	-	-	-	-
	h	-	-	-	-	-	-
	Q	-	-	-	-	-	-
	S	-	-	-	-	-	-

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Χ

Control on Input

View Experts Input Matrix

Matrix with Differences in Experts Input

Matrix with Ranking of Experts assignment

Matrix with Differences of Ranks of Experts Input

Matrix with ranking of alternatives

Correlation Matrix of Experts Assignment for each criterion

Total Correlation of Experts Input

Input Matrix: Alternatives x Experts

Multiple Linear Regression

Input Matrix: Criteria x Experts

Multiple Linear Regression

Correlation of Experts Input, in couples

Pearson Correlation

Real Data – Between Experts, for each criterion

Real data – Between Experts, for each alternative

Real Data – between each Expert and the mean value of the data of the others,
for each criterion

Real Data – between each Expert and the mean value of the data of the others,
for each alternative

Correlation of ranked data for each criterion

Total correlation of ranked input

Total Correlation with Kendalls' W

Top-Down Concordance

Correlation of ranked input in couples

Kendall's τ

Spearman's Correlation Coefficient

Between couples of experts

Between each experts and the common ranked order of the others

Correlation of ranked data for each alternative

Total correlation of ranked input

Total correlation with Kendall's W

Friedman's Test

Rank Transformation

Correlation of ranked input in couples

Kendall's τ

Spearman's Correlation Coefficient

Between couples of experts

Between each experts and the common ranked order of the others

One way total analysis of Variance

Analysis of Variance for each Criterion – Groups of Experts

1-Way ANOVA

Bartlett Test of homoscedasticity

Bartlett test, coefficient of variation

Analysis of Variance for each Criterion – Groups of Alternatives

1-Way ANOVA

Bartlett Test of homoscedasticity

Bartlett test, coefficient of variation

One way analysis of variance, in couples

Analysis of Variance for each Criterion – Groups of Experts

Least Significant Differences

Tukey Test

F test for variance (data follow normal distribution)

- F test for coefficient of variation (logs follow normal distribution)
- Z test for coefficient of variation (data follow normal distribution)
- Analysis of Variance for each Criterion – Groups of alternatives
 - Least Significant Differences
 - Tukey Test
 - F test for variance (data follow normal distribution)
 - F test for coefficient of variation (logs follow normal distribution)
 - Z test for coefficient of variation (data follow normal distribution)

Control on Output

- View Promethee II Output
- Matrix with Differences in Promethee II Output
- Matrix with Ranking of Promethee II Output among experts
- Matrix with differences of Ranks among Experts in output
- Matrix with Ranking of Promethee II Output within experts
- Correlation Matrix of Experts Output from Promethee II
 - Total Correlation of Experts Output
 - Multiple Linear Regression
 - Correlation of Experts Output, in Couples
 - Pearson Correlation
 - Real Data – Between Experts
 - Real Data – Between each Expert and the mean value of the data of others
- Correlation of ranked output
 - Total Correlation of Ranked Output
 - Total Correlation with Kendall's W
 - Top-Down Concordance
 - Correlation of Ranked Output in couples
 - Kendall's τ
 - Spearman's Correlation Coefficient
 - Between Couples of Experts
 - Between each Expert and the common ranked order of the others
 - Between each Expert and the mean value of the ranked data of the others
- One way total analysis of Variance
 - Analysis of Variance for each Criterion – Groups of Experts
 - 1-Way ANOVA
 - Bartlett Test of homoscedasticity
 - Bartlett test, coefficient of variation
 - Analysis of Variance for each Criterion – Groups of Alternatives
 - 1-Way ANOVA
 - Bartlett Test of homoscedasticity
 - Bartlett test, coefficient of variation
- One way analysis of variance, in couples
 - Analysis of Variance for each Criterion – Groups of Experts
 - Least Significant Differences
 - Tukey Test
 - F test for variance (data follow normal distribution)
 - F test for coefficient of variation (logs follow normal distribution)
 - Z test for coefficient of variation (data follow normal distribution)
 - Analysis of Variance for each Criterion – Groups of alternatives
 - Least Significant Differences
 - Tukey Test
 - F test for variance (data follow normal distribution)
 - F test for coefficient of variation (logs follow normal distribution)
 - Z test for coefficient of variation (data follow normal distribution)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ XI

Public Sub MakeConsensus(FinalRatesFS() As FUZYNUM, Alt1 As Integer)

' This algorithm, based on H.S. Lee (Fuzzy sets and systems, acc. Feb. 2002),
' calculates through an iterative process the aggregated opinion of experts about
' a particular fuzzy alternative, denoted by the index Alt1 in the matrix of the
' alternatives FinalRatesFS(), dimensioned as [num of altern.] x [num of experts]+1.
' The result is returned in the last column of this matrix. The extended algorithm
' employing the degree of importance of participants, is not implemented herein.
' Parameters, input to the algorithm are:
' the exponential weight m, the dissimilarity constant c, and the metric exponent p.

Dim i As Integer
Dim k As Integer
Dim m As Single
Dim c As Single
Dim P As Integer
Dim xofs As Double
Dim epoch As Integer
Dim w() As Double
Dim W0() As Double
Dim r As FUZYNUM
Dim sumw As Double
Dim sumrw As FUZYNUM
Dim normw As Double
Dim mess1 As String
Dim errflag As Integer
Dim Tol As Double
Dim Dissim() As Double
ReDim Dissim(nPromExp) As Double
ReDim w(nPromExp) As Double
ReDim W0(nPromExp) As Double

errflag = 0: Tol = 0.000001

mess1 = "Consensus could not converge for alternatives"

m = ConsOpinion.ExpWeight: c = ConsOpinion.DissimConst: P = ConsOpinion.DistPower

```

For k = 1 To nPromExp
    If k = 1 Then
        xofs = FinalRatesFS(Alt1, k).fmean1 - FinalRatesFS(Alt1, k).fleft
    Else
        If FinalRatesFS(Alt1, k).fmean1 - FinalRatesFS(Alt1, k).fleft < xofs Then xofs =
FinalRatesFS(Alt1, k).fmean1 - FinalRatesFS(Alt1, k).fleft
    End If
Next k
If xofs > 0 Then
    xofs = 0
Else
    xofs = xofs - 1
End If
For k = 1 To nPromExp

```



```

    FinalRatesFS(Alt1, k).fmean1 = FinalRatesFS(Alt1, k).fmean1 - xofs: FinalRatesFS(Alt1,
k).fmean2 = FinalRatesFS(Alt1, k).fmean2 - xofs
    Next k
    w(1) = 1
    For k = 2 To nPromExp
        w(k) = 0
    Next k
    epoch = 0
    Do
        epoch = epoch + 1
        sumw = 0: sumrw = Crisp(0)
        For k = 1 To nPromExp
            sumrw = FuzAdd(sumrw, FuzScMultiply(FinalRatesFS(Alt1, k), (w(k) ^ m)))
            sumw = sumw + (w(k) ^ m)
        Next k
        r = FuzScDivide(sumrw, sumw)
        For k = 1 To nPromExp
            W0(k) = w(k)
        Next k
        For k = 1 To nPromExp
            Dissim(k) = (1 / (c - SimilarityFS(FinalRatesFS(Alt1, k), r, P))) ^ (1 / (m - 1))
        Next k
        sumw = 0
        For k = 1 To nPromExp
            sumw = sumw + Dissim(k)
        Next k
        For k = 1 To nPromExp
            w(k) = Dissim(k) / sumw
        Next k
        sumw = 0: normw = 0
        For k = 1 To nPromExp
            normw = normw + ((w(k) - W0(k)) ^ 2)
        Next k
        normw = Sqr(normw)
    Loop Until normw <= Tol Or epoch = 1000

    FinalRatesFS(Alt1, nPromExp + 1) = r
    For k = 1 To nPromExp + 1
        FinalRatesFS(Alt1, k).fmean1 = FinalRatesFS(Alt1, k).fmean1 + xofs: FinalRatesFS(Alt1,
k).fmean2 = FinalRatesFS(Alt1, k).fmean2 + xofs
    Next k
    FinalRatesFS(Alt1, nPromExp + 1).fncoa = GravityCenter(FinalRatesFS(Alt1, nPromExp + 1))
    If epoch = 1000 And normw > Tol Then
        errflag = 1
        mess1 = mess1 & " " & PromAltNames(Alt1)
    End If

    If errflag <> 0 Then
        MsgBox mess1, vbCritical + vbOKOnly, "Error"
    End If

End Sub

Private Function SimilarityFS(f1 As FUZYNUM, f2 As FUZYNUM, P As Integer) As Double
' Calculates the similarity Sp(A,B) of two fuzzy sets A and B (given as f1 and f2)

```

' based on a distance metric $dp(A,B)$, used by Tong, which is the p-rooted sum of the
 ' differences of the edges of the fuzzy sets raised to the power p; then
 ' $Sp(A,B) = 1 - (dp(A,B)^p)/(4*u^p)$
 ' where u is the universe of discourse

```
Dim i As Integer
Dim nPoints As Integer
Dim d As Double
Dim u As Double
```

```
If f1.fntype > f2.fntype Then
    nPoints = f1.fntype + 1
Else
    nPoints = f2.fntype + 1
End If
If f1.fmean1 = f1.fmean2 And f2.fmean1 = f2.fmean2 Then nPoints = 3
u = Max2(f1.fmean2 + f1.fright, f2.fmean2 + f2.fright) - Min2(f1.fmean1 - f1.fleft, f2.fmean1 - f2.fleft)
If u = 0 Then SimilarityFS = 1: Exit Function
If nPoints = 4 Then
    d = (f1.fmean1 - f1.fleft - (f2.fmean1 - f2.fleft)) ^ P
    d = d + ((f1.fmean1 - f2.fmean1) ^ P)
    d = d + ((f1.fmean2 - f2.fmean2) ^ P)
    d = d + ((f1.fmean2 + f1.fright - (f2.fmean2 + f2.fright)) ^ P)
ElseIf nPoints = 3 Then
    d = (f1.fmean1 - f1.fleft - (f2.fmean1 - f2.fleft)) ^ P
    d = d + ((f1.fmean1 - f2.fmean1) ^ P)
    d = d + ((f1.fmean2 + f1.fright - (f2.fmean2 + f2.fright)) ^ P)
End If
SimilarityFS = 1 - d / (nPoints * (u ^ P))
End Function
```

4 Δημιουργία Βάσης Γνώσης για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων της παραγωγής

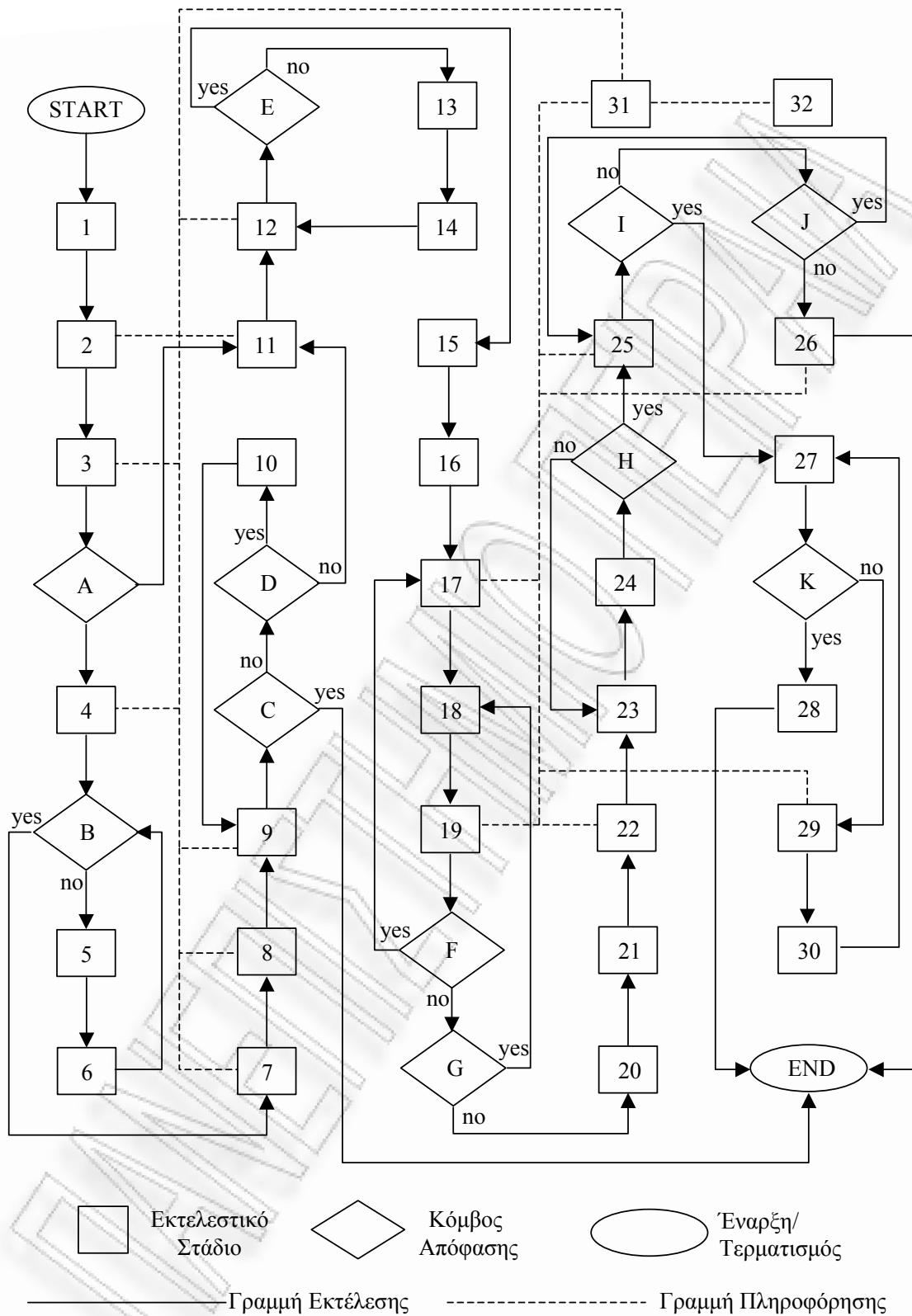
4.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο

Το μεθοδολογικό πλαίσιο δημιουργίας Βάσης Γνώσης (Knowledge Base – KB) για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων στην καθετοποιημένη παραγωγή ανοδιωμένου αλουμινίου παρουσιάζεται στην παρούσα Ενότητα υπό τη μορφή αλγοριθμικής διαδικασίας 32 εκτελεστικών σταδίων και 11 κόμβων απόφασης, συνδεδεμένων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Μία σύντομη περιγραφή σταδίων και κόμβων δίνεται στη συνέχεια ενώ περισσότερες τεχνικές λεπτομέρειες περιλαμβάνονται σε αντίστοιχες δημοσιεύσεις [1-12] και στις εφαρμογές που υπάρχουν σε άλλα Κεφάλαια.

1. Μετατροπή του διανύσματος των επιθυμητών χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του προϊόντος σε διάνυσμα τιμών των μεταβλητών εξόδου (output variables) της παραγωγικής διαδικασίας.
2. Συλλογή δεδομένων/πληροφοριών για τις συνθήκες κατεργασίας σε σχέση με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου ως πρώτη ύλη μετάλλου/κράματος.
3. Σχεδίαση/ανάπτυξη/εμπλουτισμός βάσης δεδομένων/πληροφοριών αναφερόμενων στα ελαττώματα/σφάλματα/αστοχίες πρώτων υλών και ενδιάμεσων/τελικών προϊόντων.
4. Συλλογή στοιχείων στατιστικής συσχέτισης συνθηκών παραγωγής/κατεργασίας και δημιουργίας/εμφάνισης ελαττωμάτων/αστοχιών.
5. Μετρήσεις σε φυσικό προσομοιωτή, μετά από κλιμάκωση μεγέθους (scale up/down) και πειραματικό σχεδιασμό (experimental design).
6. Στατιστική συσχέτιση με βάση τα εμπλουτισμένα/αναθεωρημένα δεδομένα/αποτελέσματα.
7. Νευροασαφής ταξινόμηση ελαττωμάτων/αστοχιών στο διανυσματικό χώρο των συνθηκών κατεργασίας.
8. Προσδιορισμός επιθυμητών ορίων συγκέντρωσης ελαττωμάτων/σφαλμάτων για κάθε τύπο μεμονωμένου ελαττώματος και κάθε στατιστικά σημαντικό συνδυασμό ελαττωμάτων.
9. Προσδιορισμός ορίων εφικτών υπο-χώρων ‘καθαρής’ παραγωγής.
10. Μονοπαραμετρική βηματική επέκταση/ελαστικοποίηση προς την πλευρά που συνεπάγεται το μικρότερο κόστος.

11. Αναζήτηση/σύνθεση των σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος που συνδέουν γεγονότα, τα οποία είναι δυνατόν να παρατηρηθούν κατά την παραγωγική διαδικασία και να οδηγήσουν προοδευτικά στην εμφάνιση ελαττώματος/σφάλματος/αστοχίας.
12. Σύνθεση των δένδρων σφαλμάτων (fault trees) που προκύπτουν από τις σχέσεις του προηγούμενου σταδίου και αντιστοιχούν στα εξεταζόμενα/αναλυόμενα σημαντικά ελαττώματα/σφάλματα (top events).
13. Εντοπισμός ελλিপών οδεύσεων
14. Συμπλήρωση των ελλিপών οδεύσεων με μετρήσεις σε φυσικό προσομοιωτή, μετά από κλιμάκωση μεγέθους και πειραματικό σχεδιασμό, μέχρι να επιτευχθεί/αποκτηθεί η απαιτούμενη λεπτή υφή της πληροφορίας (information granularity).
15. Εντοπισμός των τελικών (μη επιδεχομένων περαιτέρω ανάλυση) αιτίων, δηλ. των φύλλων (leaves) του αντεστραμμένου δένδρου του οποίου ρίζα είναι το αναλυόμενο σφάλμα/ελάττωμα (γεγονός κορυφής).
16. Υπολογισμός των τιμών ενός συνολικού Ασαφούς δείκτη σημαντικότητας (Fuzzy Significance Index – FSI) που χρησιμοποιείται ως μέτρο της έντασης της συνολικής αιτιώδους σχέσης που συνδέει το γεγονός κορυφής (αποτέλεσμα) με κάθε φύλλο (αιτία).
17. Διαμόρφωση του διανύσματος των κριτηρίων κατάταξης των τελικών αιτίων κατά σειρά φθίνουσας προτίμησης για παρέμβαση μέσω μηχανισμού πειραματικής επιβεβαίωσης/διερεύνησης/διόρθωσης (προληπτικής και θεραπευτικής) σε φυσικό προσομοιωτή.
18. Εκτίμηση των βαρών του διανύσματος των κριτηρίων και των βαθμών της πολυκριτήριας μήτρας προτίμησης από εμπειρογνώμονες που παίρνουν μέρος σε μία τροποποιημένη διαδικασία μεθόδου Delphi.
19. Στατιστική επεξεργασία των δεδομένων εισροής (input data) και αξιολόγηση των απαντήσεων που έχουν δώσει οι εμπειρογνώμονες στο μετα-Delphi ερωτηματολόγιο, όπου εκφράζονται απόψεις επί της ίδιας τη σχέσης μεταξύ διαδικασίας/μεθόδου που ακολουθήθηκε και ενδιάμεσων/τελικών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν (δηλ. επί της διαλεκτικής σχέσης μεταξύ a priori υιοθετηθείσας φόρμας και προκύπτοντος περιεχομένου).
20. Εκτέλεση του προγράμματος FMCA.
21. Ανάλυση ευαισθησίας.
22. Στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων εξόδου και αξιολόγηση της συνολικής λύσης.

23. Τελική κατάταξη των τελικών αιτίων κατά σειρά φθίνουσας προτίμησης για παρέμβαση μέσω μηχανισμού πειραματικής επιβεβαίωσης/διερεύνησης/διόρθωσης (προληπτικής και θεραπευτικής) σε φυσικό προσομοιωτή.
 24. Πειραματική επιβεβαίωση/διερεύνηση της επίδρασης του πρώτου αιτίου στο αναλυόμενο γεγονός της κορυφής.
 25. Εφαρμογή της πρώτης κατά σειράς προτίμησης (σύμφωνα με κατάταξη που έχει γίνει κατά την εφαρμογή του υποδεικνυόμενου στο στάδιο 17 μηχανισμού) διορθωτικής ενέργειας σε φυσικό προσομοιωτή.
 26. Κατάστρωση ερευνητικού σχεδίου για τον προσδιορισμό αποτελεσματικής διορθωτικής ενέργειας, με βάση την αποκτηθείσα γνώση από τη μη-επιτυχή εφαρμογή των προηγούμενων ενεργειών.
 27. Εφαρμογή της προληπτικής/διορθωτικής ενέργειας σε βιομηχανική κλίμακα με πειραματικό σχεδιασμό ως προς τη σχετική θέση των 'κρεμαστών', των αντικειμένων επ'αυτών και του προσανατολισμού των κατεργαζόμενων επιφανειών ως προς τις καθόδους στην περίπτωση της ανοδίσωσης ή τις ανόδους στην περίπτωση της επιμετάλλωσης.
 28. Αυτόματη αναθεώρησης των FSI's όλων των επιμέρους/ενδιάμεσων σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος που συνδέουν θυγατρικά-μητρικά γεγονότα στο δένδρο, βάσει της αναφερόμενης στο Παράρτημα αλγοριθμικής διαδικασίας.
 29. Μεταφορά του προβλήματος σε μικρή κλίμακα, με σκοπό την επίλυσή του σε εργαστηριακό φυσικό προσομοιωτή με τρόπο ώστε να είναι εφικτή η μεταφορά της λύσης σε μεγάλη/βιομηχανική κλίμακα (scale down/up).
 30. Επαναπροσδιορισμός των συνθηκών λειτουργίας της ηλεκτροχημικής διεργασίας με συνδυασμό νευροασαφούς προσέγγισης και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, σύμφωνα με την υποδεικνυόμενη στο Κεφάλαιο 3 μεθοδολογία υπό μορφή αλγοριθμικής διαδικασίας.
 31. Δημιουργία/εμπλουτισμός μετα-Βάσης Γνώσης (meta-Knowledge Base – MKB) για την υποστήριξη της όλης διαδικασίας.
 32. Σχεδίαση/λειτουργία αυτόνομου/ευέλικτου ευφυούς μηχανισμού αναζήτησης (Intelligent Agent – IA) πληροφορίας και εξόρυξης δεδομένων από εξωτερικές Βάσεις, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που υποδεικνύεται στην [13].
- A. Υπάρχουν δεδομένα που επιτρέπουν άμεση ποσοτική συσχέτιση συνθηκών κατεργασίας και δημιουργίας/εμφάνισης ελαττωμάτων/αστοχιών;



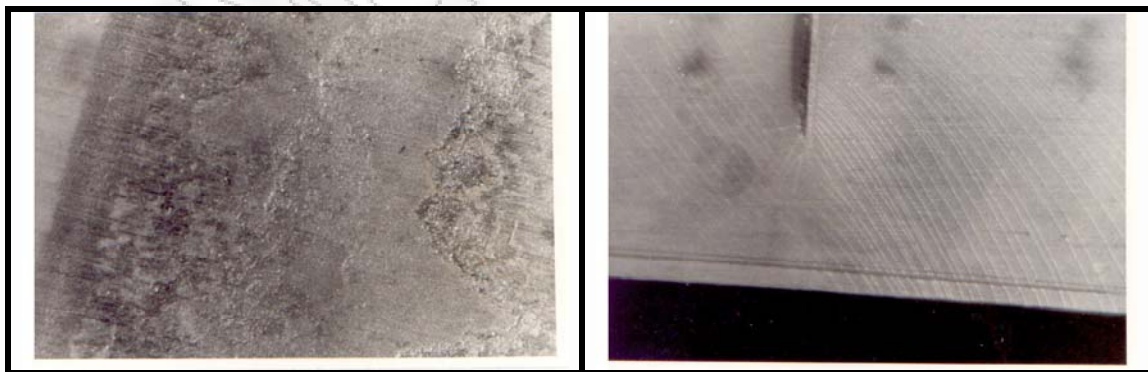
Σχήμα 4.1. Μεθοδολογικό πλαίσιο υπό μορφή αλγοριθμικής διαδικασίας για τη δημιουργία/ λειτουργία/αναθεώρηση KB (για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων της παραγωγής), υποστηριζόμενη από MKB.

- B. Είναι τα στοιχεία επαρκή για στατιστική συσχέτιση σε προκαθορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης;
- C. Είναι η επίτευξη/έλεγχος/συντήρηση τιμών μεταβλητών/παραμέτρων πραγματοποιήσιμη σε βιομηχανικό περιβάλλον λαμβανομένων υπόψη των δεσμεύσεων που οφείλονται στην περιορισμένη απόκριση (περιλαμβανομένων των αναμενόμενων λανθασμένων χειρισμών) του ανθρώπινου παράγοντα;
- D. Είναι εφικτή η (βηματική) επέκταση/ελαστικοποίηση των επιθυμητών ορίων συγκέντρωσης ελαττωμάτων/σφαλμάτων για κάθε τύπο μεμονωμένου ελαττώματος και κάθε στατιστικά σημαντικό συνδυασμό ελαττωμάτων;
- E. Είναι το δένδρο που κατασκευάστηκε πλήρες δηλ. περιλαμβάνει όλες τις δυνατές οδεύσεις από το αναλυόμενο γεγονός κορυφής μέχρι τα βασικά γεγονότα (φύλλα του δένδρου) που δεν επιδέχονται περαιτέρω ανάλυση;
- F. Προκύπτει αναγκαιότητα, ως αποτέλεσμα της επεξεργασίας/αξιολόγησης του σταδίου 19, αναθεώρησης του διανύσματος των κριτηρίων;
- G. Προκύπτει αναγκαιότητα, ως αποτέλεσμα της επεξεργασίας/αξιολόγησης του σταδίου 19, αναθεώρησης της πολυκριτηριακής μήτρας προτίμησης;
- H. Επιβεβαιώνεται η επίδραση;
- I. Η διορθωτική ενέργεια κρίνεται αποτελεσματική;
- J. Υπάρχει άλλη διορθωτική ενέργεια;
- K. Η εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα κρίνεται αποτελεσματική;

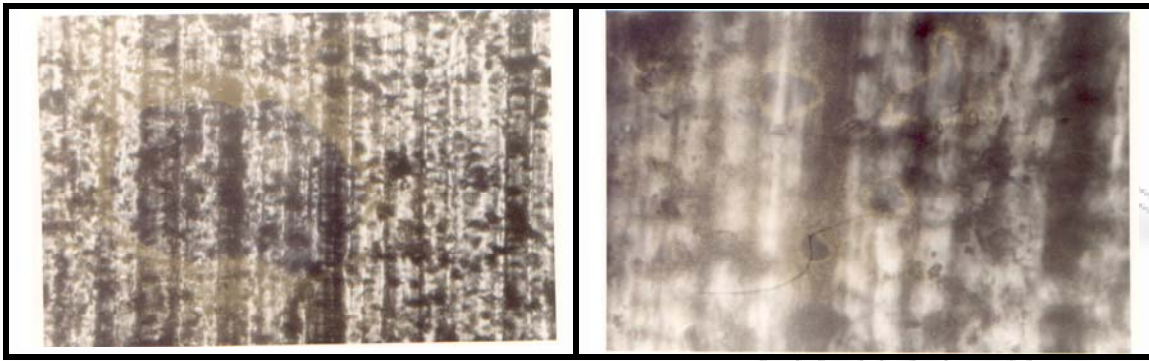
Τα στοιχεία που συλλέγονται στο στάδιο 4 μπορεί να προέρχονται από (i) όργανα μέτρησης in situ μεταβλητών/παραμέτρων είτε ανεξάρτητα είτε ενσωματωμένα σε συστήματα ελέγχου on line, (ii) εργαστηριακές μετρήσεις ποιοτικού ελέγχου είτε των χρησιμοποιούμενων μέσων κατεργασίας είτε του παραγόμενου προϊόντος (π.χ., συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη/προσθέτων/προσμίξεων στο λουτρό της ανοδίωσης ή πάχους/πορώδους του ανοδικού στρώματος, αντίστοιχα). Οι εργαστηριακές μετρήσεις γίνονται σε δείγματα, άρα πρόκειται για έλεγχο off line, ο οποίος όμως μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, αφού ο χρόνος λήψης/μεταφοράς/ετοιμασίας/μέτρησης του δείγματος είναι συγκρίσιμος με το χρόνο επεξεργασίας μίας παρτίδας σε οποιοδήποτε στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας. Τα αποτελέσματα του off line ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για τη θεραπεία διαπιστωμένου σφάλματος στην ίδια παρτίδα είτε για την πρόληψη σφάλματος σε επόμενη παρτίδα ενώ η πρόληψη στην ίδια παρτίδα είναι εφικτή μόνον όταν ο χρόνος κατεργασίας είναι σχετικά μεγάλος και η διάγνωση έχει γίνει αρκετά νωρίς, δηλ. με την έναρξη της συγκεκριμένης διαδικασίας. Οι περισσότεροι αξιόπιστες

πρακτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον off line έλεγχο είναι (i) της πειραματικής προσομοίωσης σε εργαστηριακή κλίμακα και (ii) της διαφορικής διάγνωσης σε βιομηχανική κλίμακα. Στην πρώτη, προσομοιάζονται οι πραγματικές συνθήκες της μελετώμενης διεργασίας σε μικρή κλίμακα ενώ χρησιμοποιούνται αντικείμενα που καλύπτουν ολόκληρο το φάσμα της ομοιογένειας της επιφάνειας, δηλ. από πλήρως ομοιογενή μέχρι περιέχοντα ανομοιογένεια του τύπου που προκαλεί το υπό διερεύνηση ελάττωμα. Σημαντικό μέρος των αντικειμένων αυτών προέρχεται από πραγματική παρτίδα και έχει ληφθεί μετά το πέρας της αμέσως προηγούμενης (σε σχέση με τη μελετώμενη) διεργασίας, ώστε το επεξεργαζόμενο στο φυσικό προσομοιωτή αντικείμενο να μη διαφέρει από εκείνα που συνεχίζουν την επεξεργασία σε βιομηχανική κλίμακα. Στη συνέχεια, συγκρίνονται αντικείμενα που επεξεργάστηκαν στο φυσικό προσομοιωτή με αντικείμενα που επεξεργάστηκαν στην αντίστοιχη διεργασία σε βιομηχανική κλίμακα. Αυτό είναι ένα είδος διαφορικής διάγνωσης (ίδιο αντικείμενο αλλά διαφορετικές συνθήκες διεργασίας), το οποίο όμως υπάγεται στις τεχνικές της προσομοίωσης. Αμιγώς διαφορετική διάγνωση έχουμε όταν τοποθετούμε προσημειωμένα/‘μαρκαρισμένα’ διαφοροποιημένα (ως προς τις παραμέτρους της ‘συνάρτησης μνήμης’) αντικείμενα στις ίδιες ‘κρεμάστρες’ στο ίδιο λουτρό και στη συνέχεια συγκρίνουμε τα αντικείμενα αυτά με τα διπλανά τους με τεχνικές (μη-καταστροφικού και καταστροφικού) ποιοτικού ελέγχου.

Σημειώνεται ότι τα μαρκαρισμένα αντικείμενα δεν πρέπει να διαφοροποιούνται πριν ή μετά την κατεργασία, έστω εάν η διαφοροποίηση είναι μακράν της εξεταζόμενης περιοχής της κατεργαζόμενης επιφάνειας, επειδή οποιαδήποτε καταπόνηση είναι δυνατόν να διαδοθεί με φυσικοχημικό ή μηχανικό τρόπο/μηχανισμό και να επηρεάσει την αμέσως ενδιαφέροντος περιοχή (βλ. φωτογραφίες Σχήματος 4.2).



Σχήμα 4.2. Διαφοροποίηση επιφάνειας λόγω διάβρωσης μετά τον καθαρισμό και πριν την ανοδίωση, (αριστερά) και λόγω μηχανικής καταπόνησης μετά την ανοδίωση, με άσκηση διατμητικής τάσης από ψαλίδι κοπής, οπότε εμφανίστηκε ρηγμάτωση του ψαθυρού οξειδίου (δεξιά).



Σχήμα 4.3. Φωτογραφίες ανοδιωμένου αλουμινίου σε οπτικό μικροσκόπιο για τη μελέτη της επίπτωσης των γραμμών διέλασης στην κατεργασμένη επιφάνεια, πριν και μετά (αριστερά και δεξιά, αντίστοιχα) την αύξηση της μεγέθυνσης (συνεπαγόμενη μείωση της διακριτικής ικανότητας) με τη βοήθεια προγράμματος H/Y.

Τέλος, διευκρινίζεται ότι η διαθεσιμότητα των μέσων μέτρησης είναι δυνατόν να επηρεάσει τη σειρά προτίμησης εξέτασης (testing) των τελικών αιτίων (στάδιο 23), αφού λαμβάνεται υπόψη στη διαμόρφωση του διανύσματος των κριτηρίων και στην εκτίμηση των βαρών του διανύσματος αυτού (στάδια 17 και 18, αντίστοιχα). Η διαθεσιμότητα αυτή πρέπει να αναφέρεται σε όργανα μέτρησης με την επιθυμητή ακρίβεια, επειδή η βοηθούμενη από H/Y ανάλυση δεν μπορεί να υπερβεί τους περιορισμούς που τίθενται από το όργανο μέτρησης, πέραν ενός προκαθορισμένου σημείου (βλ. φωτογραφίες Σχήματος 4.3).

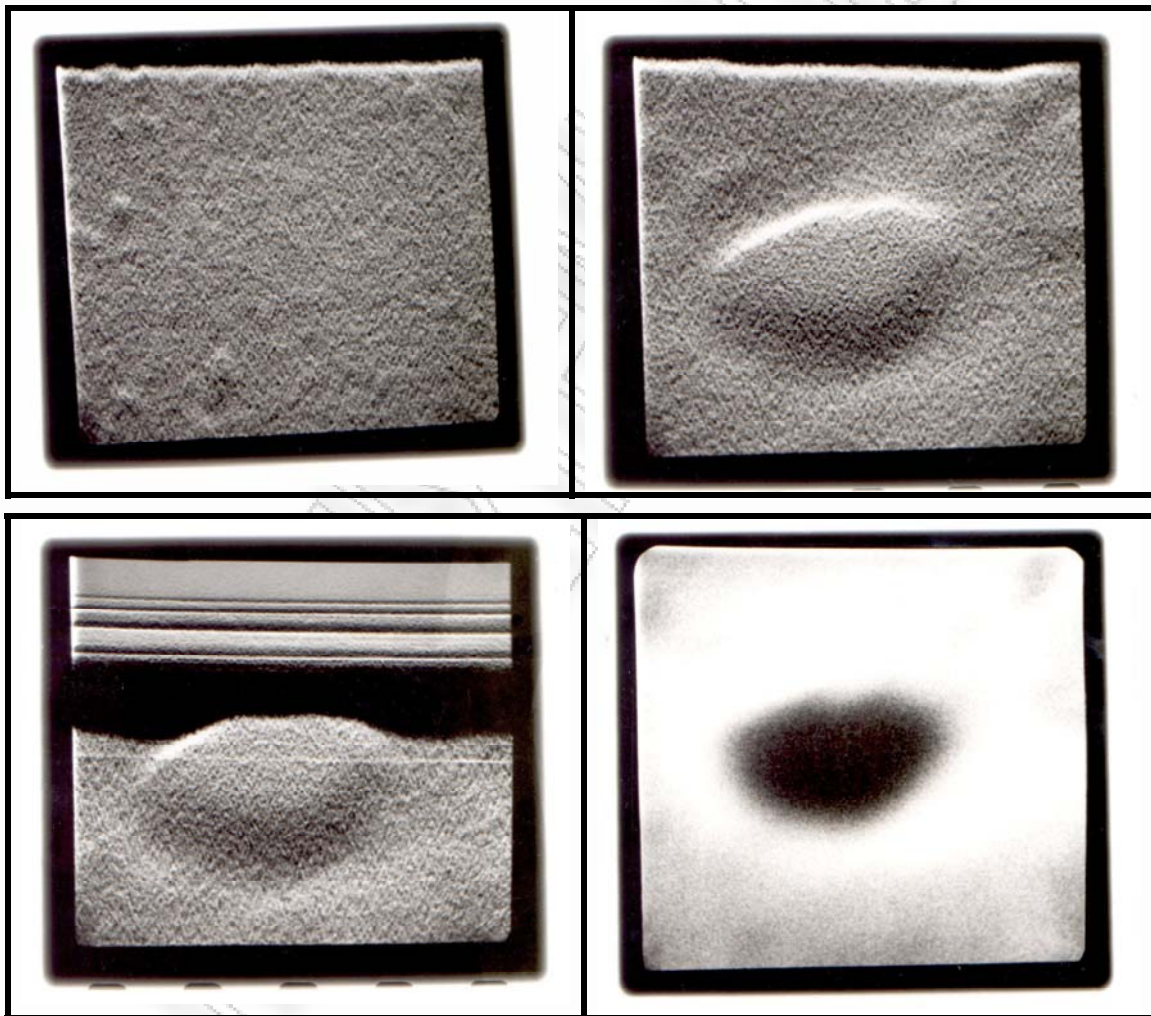
4.2 Βάση πληροφοριών ελαττωμάτων/σφαλμάτων

Πολλά από τα ελαττώματα/σφάλματα, που (πρέπει να) περιλαμβάνονται στην υπό σχεδίαση/ανάπτυξη Βάση δεδομένων/πληροφοριών, σύμφωνα με το στάδιο 3 της περιγραφόμενης στο Σχήμα 4.1 αλγοριθμικής διαδικασίας οφείλονται στη ‘συνάρτηση μνήμης’ της επιφάνειας του κατεργαζόμενου μετάλλου/κράματος. Η τυποποίηση των σφαλμάτων αυτών και η σύνδεσή τους με το γενεσιουργό αίτιο στη φάση της μεταλλουργικής διαμόρφωσης της πρώτης ύλης μπορεί να γίνει, όπως έχουμε δείξει, με την πρόκληση μίας σειράς τεχνητών/ελεγχόμενων διαταραχών σε μία εντελώς ομοιόμορφη μητρική επιφάνεια και την παρατήρηση/συλλογή/ταξινόμηση των εμφανιζόμενων ελαττωμάτων σε μία ή περισσότερες φάσεις της κατάντη κατεργασίας.

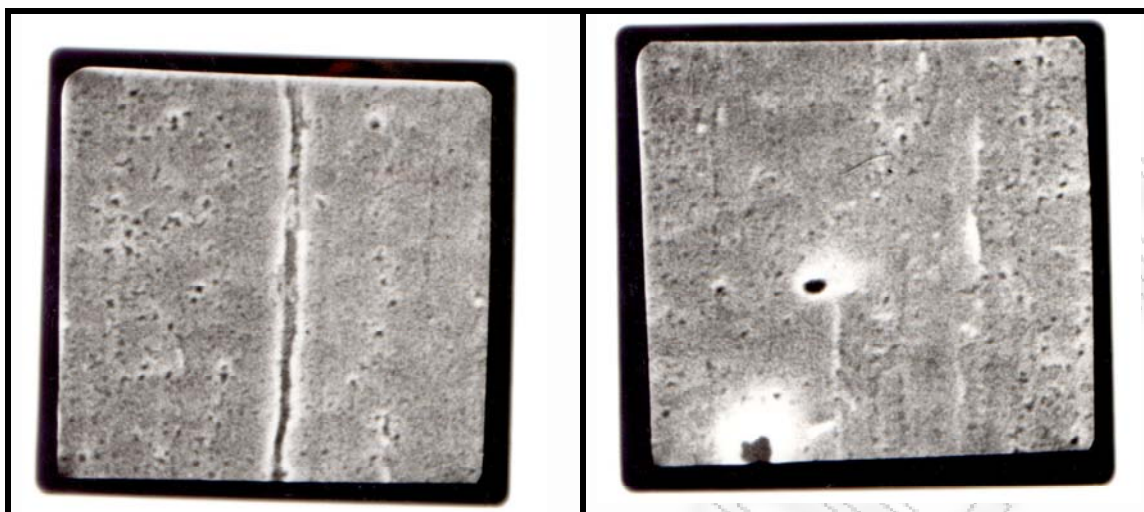
Ενδεικτικό παράδειγμα της μεθόδου αυτής φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες SEM ανοδικώς οξειδωμένου αλουμινίου που έχει παραχθεί σε επιφάνεια στην οποία είχε δημιουργηθεί επιφανειακή διαταραχή ωοειδούς σχήματος κατά τη μεταλλουργική φάση της διαμόρφωσης του φύλλου αλουμινίου, το οποίο αποτέλεσε στη συνέχεια (χωρίς εξάλειψη της διαταραχής κατά τη φάση του ηλεκτροχημικού καθαρισμού) το υλικό της ανοδίωσης (βλ.

φωτογραφίες Σχήματος 4.4). Με όμοια μέθοδο, αποδεικνύεται η διαφορά μεταξύ μηχανικής και ηλεκτροχημικής προ-κατεργασίας όσον αφορά στην αντοχή δοκιμών Al σε SCC [14, 15].

Στην πράξη, περισσότερα από ένα σφάλματα μπορούν να συνυπάρχουν στην ίδια επιφανειακή περιοχή οπότε η επίδραση στην τελική διαμόρφωση της ανοδιωμένης επιφάνειας αναμένεται να είναι σύνθετη. Αν, για παράδειγμα, συνυπάρχουν γραμμές διέλασης και σημειακή ανωμαλία, τότε αναμένεται ανισοκατανομή κυψελίδων οξειδίου και πόρων (i) κάθετα προς την κατεύθυνση της γραμμικής διαταραχής και (ii) ακτινωτά γύρω από τη σημειακή διαταραχή (βλ. φωτογραφίες Σχήματος 4.5). Τέτοιες σύνθετες επιδράσεις έχουμε παραγάγει σε φυσικούς προσομοιωτές, προκειμένου να μελετήσουμε (i) την αντιστοιχία διαταραχής στο μητρικό μέταλλο/κράμα και αποτελέσματος στην ανοδιωμένη/βαμμένη /



Σχήμα 4.4. Φωτογραφίες SEM ανοδικώς οξειδωμένο αλουμινίου, όπου φαίνεται μία περιοχή με διαταραχές της επιφάνειας (άνω αριστερά) και λεπτομέρεια (σε ηλεκτρονική μεγέθυνση) μίας διαταραχής σε κατοπτική, προοπτική και αρνητική εμφάνιση (οποιαδήποτε φωτογραφική μεγέθυνση δεν εισφέρει περισσότερη πληροφορία).



Σχήμα 4.5. Φωτογραφίες SEM ανοδικού αλουμινίου, όπου φαίνεται ανισοκατανομή κυψελίδων οξειδίου, με συνύπαρξη γραμμικών και σημειακών διαταραχών που δεν εξαλείφθηκαν στη φάση της ηλεκτροχημικής λείανσης/καθαρισμού.

σφραγισμένη τελική επιφάνεια καθώς και (ii) το ρόλο των συνθηκών κατεργασίας τόσο στη μείωση/εξάλειψη (π.χ. στη φάση του ηλεκτροχημικού καθαρισμού) της επίδρασης όσο και στην αύξηση αυτής (π.χ. στη φάση της βαφής, μετά την ανοδίωση).

Επειδή οι αυξομειώσεις αυτές μεταβάλλουν την τοπογραφική απεικόνιση οποιασδήποτε ανωμαλίας της κατεργαζόμενης επιφάνειας μεταξύ των διαδοχικών φάσεων της κατεργασίας του μετάλλου/κράματος, πρέπει να γίνεται ποιοτικός έλεγχος στο τέλος κάθε φάσης σε προκαθορισμένη περιοχή με πλήρως καταγεγραμμένη την αρχική ανωμαλία, ώστε να αποτυπώνονται οι διαδοχικές αντιστοιχίες.

Η δημιουργία ενός τέτοιου αρχείου μπορεί να γίνει τόσο με φυσικό προσομοιωτή μικρής κλίμακας όσο και με δοκίμια που εισέρχονται (μετά την πρόκληση τεχνητής διαταραχής στο βασικό μέταλλο/κράμα) στις διαδοχικές κατεργασίες σε λουτρά καθαρισμού/ανοδίωσης/βαφής/σφραγίσματος βιομηχανικές κλίμακας στις ίδιες ‘κρεμάστρες’ με τα αντικείμενα της αντίστοιχης παρτίδας παραγωγής. Όταν το αρχείο αυτό αποκτήσει την απαιτούμενη πληρότητα, μπορεί να χρησιμεύσει για την αντίστροφη διαδικασία, δηλ. την αναγνώριση (ενδεχόμενου) αρχικού σφάλματος, μέσω της παρατήρησης/μέτρησης του συμπτώματος/αποτελέσματος/ελαττώματος στην τελική/κατεργασμένη επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή, εμπλουτιζόμενη με τεχνικές αναγνώρισης προτύπου (pattern recognition), έχει τη δυνατότητα να συμβάλει στην ιχνηλασιμότητα (traceability) του υλικού και στην υλοποίηση των σταδίων 1-15 της αλγοριθμικής διαδικασίας δημιουργίας/λειτουργίας ΚΒ, όπως αυτά περιγράφονται στην Ενότητα 4.1 και απεικονίζονται στο Σχήμα 4.1.

Στη συνέχεια, καταγράφονται τα βασικά ελαττώματα/σφάλματα κατά στάδιο κατεργασίας, όπως αυτά αναφέρονται στην τεχνική βιβλιογραφία [16-18], για τα οποία έχουμε δημιουργήσει αντίστοιχα αρχεία στην ΚΒ, μετά από μελέτη σε φυσικό προσομοιωτή (i) της αντιστοίχισης [διαταραχή σε προηγούμενο στάδιο] → [ελάττωμα σε επόμενο στάδιο] και (ii) της επίδρασης των συνθηκών της ίδιας μεμονωμένης διεργασίας στις ιδιότητες (περιλαμβανομένης της απόκλισης από τις επιθυμητές προδιαγραφές καθώς και της εμφάνισης ελαττωμάτων) του επεξεργαζόμενου αντικειμένου.

Ελαττώματα που παρουσιάζονται στην παραγωγή του ανοδιωμένου αλουμινίου (κατά στάδιο)

Μηχανική Προεργασία

MP01. Κακώσεις στην Επιφάνεια κατά τη Μηχανική Λείανση

Εναλλακτική Περιγραφή: Ανομοιόμορφη επιφάνεια από μηχανική λείανση

Όταν πάνω στο αντικείμενο εκτοξεύεται λειαντικό ή ατμός, το αποτέλεσμα μπορεί να είναι μία ανομοιογενής εμφάνιση (μπαλώματα) από τις μεταβολές της απόστασης του αντικειμένου από το ακροφύσιο, της πίεσης εκτόξευσης ή του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο βάλλεται η επιφάνεια. Αυτό θα οδηγήσει σε διαφοροποιημένες περιοχές, πιο ανοιχτές ή πιο σκοτεινές από τις διπλάνες περιοχές. Αυτά μπορεί να μην είναι πάντα φανερά μετά από τη μηχανική λείανση, αλλά θα παρουσιαστούν μετά από τον επιφανειακό καθαρισμό, το χημικό και ηλεκτροχημικό καθαρισμό σε βάθος, και τη διάλυση επιφανειακού οξειδίου πριν από την ανοδίωση. Η ανάμιξη της λειαντικής άμμου με σίδηρο από τα σιδερένια εξαρτήματα της επεξεργασίας μπορούν επίσης να δώσουν τοπικά κρατήρες.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Έλεγχος των συνθηκών λειτουργίας ώστε να επιβεβαιωθεί ότι η πίεση λειτουργίας είναι σωστή. Εάν είναι σωστή, είτε αυξήστε την απόσταση του δείγματος από το ακροφύσιο, ή μειώστε το χρόνο της μηχανικής λείανσης. Απομακρύνεται το σίδηρο από την άμμο.

MP02. Ελαττώματα κατά τη Στίλβωση σε Περιστρεφόμενο Κάδο

Εναλλακτική Περιγραφή: Στίγματα

Όταν το αντικείμενο στιλβώνεται σε περιστρεφόμενο κάδο, είναι δυνατόν στο τελικό στάδιο της στιλβωσης να εξομαλυνθεί μερικώς η επιφάνεια και να μην είναι τόσο φανερά οι επιφανειακές κακώσεις που προκλήθηκαν στα αρχικά στάδια της μηχανικής κατεργασίας. Όταν το αντικείμενο θα καθαρίζεται χημικά ή ηλεκτροχημικά, θα παρατηρηθεί ένας φόντος από ρηχούς κρατήρες ή στίγματα στο στάδιο της τελικής επεξεργασίας πριν την ανοδίωση.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Βελτιώστε τα ενδιάμεσα στάδια, χρησιμοποιώντας πιο λεπτόκοκκο μέσο, ή μακρύτερο χρόνο επεξεργασίας.

MP03. Κακώσεις στο Τρίψιμο

Εναλλακτική Περιγραφή: Κακώσεις από τον Ιμάντα Λείανσης

Αυτές οι κακώσεις συμβαίνουν όταν το αντικείμενο τρίβεται και στη συνέχεια στιλβώνεται. Εμφανίζονται στην κατεύθυνση του τριψίματος ή της ταινίας λείανσης. Τα σωματίδια μετάλλου που απομακρύνονται κατά την κατεργασία, έχουν την τάση να συσσωρεύονται στον ιμάντα τριψίματος εάν η λίπανση είναι ανεπαρκής, ή η πίεση είναι πολύ υψηλή. Εάν γίνεται τρίψιμο δύο ή

τριών σταδίων οι πιο αδρές γραμμές μπορεί να καλυφθούν μέχρι να εξομαλυνθεί η επιφάνεια στο χημικό / ηλεκτροχημικό καθαρισμό ή στην ανοδίωση. Αυτές οι κακώσεις μπορούν επίσης να παρουσιαστούν κάτω από τη στιλβωμένη επιφάνεια, μέχρι να αποκαλυφθούν μετά από επιφανειακό καθαρισμό, χημικό / ηλεκτροχημικό καθαρισμό ή ανοδίωση.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Εάν η επιφάνεια έχει ανομοιόμορφη ριγωτή εμφάνιση, θα έχει συνήθως και βαθιές γραμμές, κατά περιοχές, με κηλίδες και θραύσματα από τη διεργασία τριψίματος, συνήθως λόγω της διατήρησης χονδρών σωματιδίων στον ιμάντα, που μεταφέρονται στην επιφάνεια του αντικειμένου. Ελέγξτε τον ιμάντα για σημάδια συσσώρευσης τέτοιων σωματιδίων. Εάν δεν υπάρχουν, ελέγξτε ότι η λίπανση είναι επαρκής και ότι χρησιμοποιείται η σωστή λειαντική άμμος. Βεβαιωθείτε ότι οι ιμάντες αποθηκεύονται σε καλές συνθήκες. Εάν αυτά τα βήματα δεν λύσουν το πρόβλημα, συμβουλευτείτε έναν ειδικό.

MP04. Κακώσεις λόγω ελκυσμού στην κατεύθυνση της στίλβωσης

Εναλλακτική ονομασία: Ουρά κομήτη

Αυτές οι κακώσεις φανερώνονται μετά από στίλβωση, αλλά μπορούν επίσης να αποκαλυφθούν μετά από χημικό / ηλεκτροχημικό καθαρισμό και ανοδίωση. Είναι ευθυγραμμισμένες με την κατεύθυνση της στίλβωσης, παρ'όλο που μπορεί να είναι σε μία συγκεκριμένη περιοχή εάν το αντικείμενο έχει στίλβωθεί με το χέρι. Σε αυτή την περίπτωση προκαλούνται συχνά κακώσεις από ελκυσμό από τις δυνατές πιέσεις που αναπτύσσονται τοπικά από τις επενδύσεις των τροχών στίλβωσης, πάνω στο αντικείμενο, σχηματίζοντας ένα είδος “ροής” στην επιφάνεια, στην οποία παραμένουν μικρά ξένα σωματίδια που υπήρχαν στην ένωση της στίλβωσης. Αυτά τα σωματίδια έχουν την τάση να χαράσσουν βαθύτερα την επιφάνεια, και εμφανίζουν μία χαρακτηριστική “ουρά κομήτη”. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί κάποιες φορές να κρύβεται από τον τελικό χρωματισμό του τελειώματος, και παραμένει κρυφό μέχρι την κατεργασία. Κακώσεις από την τριβή μπορούν να παρατηρηθούν εάν υπάρχουν στα καλούπια κατάλοιπα σκληρού οξειδίου.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Ελέγξτε την κατάσταση των εξωτερικών των τροχών στίλβωσης και καλύψτε τους με το υλικό που πρέπει. Επιβεβαιώστε ότι δεν υπάρχουν σωματίδια ενσωματωμένα στο αντικείμενο πριν από τη στίλβωση. Εάν εφαρμόζεται λιπαντικό στίλβωσης με ψέκασμα, σιγουρευτείτε ότι δεν εμποδίζεται, και ότι δουλεύει σωστά.

MP05. Κάψιμο από το κάλυμμα τροχού στίλβωσης

Εναλλακτική ονομασία: Άσπρες περιοχές - Κάψιμο στίλβωσης

Αυτό το ελάττωμα παράγει διαφοροποιημένο κατά τόπους χημικό / ηλεκτροχημικό καθαρισμό, με αποτέλεσμα τη δημιουργία περιοχών διαφορετικής εμφάνισης. Σαν συνέπεια, κατά την ηλεκτρολυτική στίλβωση του αντικειμένου, εμφανίζεται ένα θαμπό μάλωμα σε μία στίλβνη (γενικά) επιφάνεια. Οφείλεται στην πίεση της επενδυσμένης επιφάνειας του τροχού στίλβωσης, ιδιαίτερα όταν η στίλβωση γίνεται με ανθρώπινη παρέμβαση. Συνήθως, είναι το αποτέλεσμα βαριάς τοπικής πίεσης, όταν εφαρμόζεται για να απομακρύνει μία τοπική αμυχή ή δόντι στο μέταλλο, κι έτσι το αντικείμενο υπερθερμαίνεται. Αυτό μπορεί επίσης να προκαλέσει “εγκλεισμό” της στίλβωτικής ένωσης στην εξομαλούμενη επιφάνεια, καθιστώντας το επιφανειακό καθαρίσμα δυσκολότερο.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Αυτό το πρόβλημα συμβαίνει κυρίως σε φύλλα που έχουν στίλβωθεί με το χέρι στην προσπάθεια να εξαλειφθούν οι επιμήκεις κακώσεις (γδαρσίματα) κλπ. Όταν παρατηρηθούν αυτές οι κατά τόπους διαφοροποιημένες λευκές περιοχές στην επιφάνεια μπορούν να εξαλειφθούν με ελαφρύ χημικό / ηλεκτροχημικό καθαρισμό με κάποιο παράγωγο της καυστικής σόδας. Καθαρισμός με ισχυρότερα μέσα θα προκαλέσει σκλήρυνση, οπότε μπορεί να είναι απαραίτητο να επαναληφθεί η διαδικασία δύο ή τρεις φορές. Στην επαναστίλβωση πρέπει να φροντίσουμε να γίνει απλώς μία ομοιογενής ελαφρά στίλβωση.

MP06. Αποτύπωση χαρακτηριστική της απορύθμισης του άξονα του τροχού στίλβωσης

Εναλλακτική Περιγραφή: Κακώσεις από ασταθή κίνηση

Η ταλάντευση του τροχού είναι συνήθως το αποτέλεσμα της καταπόνησης στην αντοχή του άξονα του επενδυμένου με ύφασμα τροχού, κυρίως στις μηχανές αυτόματης στίλβωσης. Το αποτέλεσμα είναι τακτικές κατά τόπους διαφοροποιήσεις στην εμφάνιση στις οποίες τα κατάλοιπα του συστατικού του στίλβωτικού μέσου είναι βαρύτερα από ότι στις ενδιάμεσες περιοχές εξ' αιτίας της έλκυσης του τροχού. Κάποιες φορές το χαρακτηριστικό αυτό δεν παρατηρείται, παρά μόνο στο τέλος της επεξεργασίας, οπότε και ενδέχεται να συσχετισθεί με ελλιπή επιφανειακό καθαρισμό. Συνήθως, το αποτέλεσμα είναι μία ανομοιόμορφη επιφάνεια μετά την ανοδίωση, που θα μπορούσε να οφείλεται και σε κατάλοιπα του συστατικού στίλβωσης που παραμένουν στην επιφάνεια, ή είναι δύσκολο να απομακρυνθούν.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Αφού το βασικό πρόβλημα είναι στα φέροντα τμήματα, ή άξονες του εξοπλισμού, η αντικατάσταση είναι αναγκαία. Σε μηχανή με πολλαπλές κεφαλές, η αντικατάσταση περιορίζεται σε ένα μόνο άξονα.

MP07. Κακώσεις από ελκυσμό συρμάτινης ψήκτρας (βούρτσας)

Εναλλακτική Περιγραφή: Σχισίματα επιφάνειας

Μπορούν να παρατηρηθούν σε αντικείμενα που έχουν επεξεργαστεί με συρμάτινες ψήκτρες και έχουν συνήθως τη μορφή προσανατολισμένων επιφανειακών ανωμαλιών, σαν κακώσεις βαθύτερες από το μέσο όρο, που παρουσιάζονται σε αυτή την επεξεργασία. Συνήθως, είναι το αποτέλεσμα της υψηλής πίεσης της συρμάτινης ψήκτρας στην περιοχή αυτή, συνήθως σε συνδυασμό με την έλλειψη λιπαντικού. Η πίεση αυτή προκαλεί συγκόλληση των αποκολλούμενων (από την επιφάνεια) σωματιδίων του αλουμινίου με τα σύρματα της ψήκτρας, με αποτέλεσμα τοπικά σημάδια, όπου το βάθος και το πλάτος των κακώσεων από την ψήκτρα είναι μεγαλύτερα από το μέσο όρο του αντικειμένου.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Όταν το αλουμίνιο επεξεργάζεται με συρμάτινη ψήκτρα, είναι σημαντικό να βεβαιωθεί ότι χρησιμοποιείται αρκετό λιπαντικό, όπως μίγμα χοιρινού / ζωικού λίπους. Εναλλακτικά, η ομοιομορφία μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ψήκτρας με λεπτότερο σύρμα, και/ή μικρότερη πίεση.

MP08. Ανάμιξη με μέταλλα προσκολλημένα στην ψήκτρα

Εναλλακτική Περιγραφή: Κρατήρες

Οι κρατήρες μπορεί να προκύψουν από πολλές αιτίες, συμπεριλαμβανομένης μίας που οφείλεται στη μηχανική προεργασία. Στην περίπτωση αντικειμένων που έχουν επεξεργαστεί με συρμάτινες ψήκτρες, μία συνηθισμένη αιτία είναι η μόλυνση των συρμάτων με άλλο μέταλλο, όπως ο χάλυβας ή ο ορείχαλκος. Αυτά ενσωματώνονται στην επιφάνεια του αλουμινίου και σχηματίζουν γαλβανικό στοιχείο, και λόγω αυτού, κρατήρες σε επόμενη επεξεργασία. Χρήση ψηκτρών με σύρματα από ανθρακούχο χάλυβα ή ορείχαλκο προφανώς θα έχει το ίδιο αποτέλεσμα, αλλά σε αρκετά μειωμένο βαθμό. Η επικάλυψη σωματιδίων άλλων μετάλλων στους ιμάντες τριψίματος ή των επενδυμένων με ύφασμα τροχών στίλβωσης, επίσης θα έχει ένα παρόμοιο αποτέλεσμα. Η μόλυνση της εκτοξευόμενης λειαντικής άμμου με σίδηρο από τα επεξεργαζόμενα σιδερένια εξαρτήματα, μπορεί επίσης να δώσει γαλβανικούς κρατήρες.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Οι συρμάτινες ψήκτρες, οι ιμάντες τριψίματος, κλπ. πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο για αλουμίνιο και να φυλάγονται ξεχωριστά από αυτούς που χρησιμοποιούνται για άλλα μέταλλα. Οι συρμάτινες ψήκτρες θα πρέπει να είναι από ανοξείδωτο χάλυβα, εάν χρησιμοποιούνται στο αλουμίνιο. Χρήση λιπαντικού στη λειτουργία επίσης θα βοηθήσει να αποφευχθεί η συλλογή σωματιδίων μετάλλων από την ψήκτρα.

MP09. Ατμοσφαιρική διάβρωση

Εναλλακτική Περιγραφή: Διάβρωση, πριν το διαβρωτικό καθαρισμό

Κάποιες φορές, συνήθως λόγω της έκθεσης σε υγρασία, κατά τη μεταφορά, ή την αποθήκευση, εμφανίζεται στο αλουμίνιο ατμοσφαιρική διάβρωση, συχνά παίρνοντας τη μορφή ελάχιστα ορατών άσπρων κηλίδων διάβρωσης. Στην περίπτωση των ελασμάτων, η διάβρωση είναι συνήθως συγκεντρωμένη κατά μήκος των γραμμών βαφής, ή στα αυλάκια, και δίνει έντονη τοπική προσβολή κατά το διαβρωτικό καθαρισμό. Κάποιες φορές, η προσβολή είναι αρκετά γενική, αλλά μπορεί να περιοριστεί σε συγκεκριμένες όψεις ή περιοχές στις οποίες μπορεί να έχει συμβεί επιλεκτική συμπίκνωση, ή όπου υπάρχουν αναμειγμένα στρώματα οξειδίου αλουμινίου-μαγνησίου.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Εάν βρεθεί διάβρωση στα προϊόντα όταν φθάσουν στη βιομηχανική μονάδα, είναι πιθανό να οφείλεται στον προμηθευτή. Εάν εμφανιστεί στη βιομηχανική μονάδα ανοδιώσης, τότε πρέπει να ελεγχθούν οι συνθήκες παραγωγής. Μερικές φορές, θα δημιουργηθεί αρκτική διάβρωση σε προϊόντα που είναι αποθηκευμένα σε μέρος ψυχρότερο από το υπόλοιπο εργοστάσιο. Αυτό, συνήθως, θα οδηγήσει σε συμπίκνωση, που θα πρέπει να αποφευχθεί, αφού θα έχει σαν αποτέλεσμα τη διάβρωση. Τα προϊόντα θα πρέπει να αποθηκεύονται σε ξηρές συνθήκες και συμβουλευεται να υπάρχει παντού ίδια θερμοκρασία.

MP10. Διάβρωση από επαφή με το χαρτί

Εναλλακτική Περιγραφή: Εμφάνιση σαν μπαλώματα στην επιφάνεια, από διάβρωση

Μερικές φορές, τα προϊόντα της εργασίας μεταφέρονται σε χαρτόνια ή χάρτινες συσκευασίες, ή μπορεί να υπάρχουν χωρίσματα από χαρτί μεταξύ των ελασμάτων, κλπ. Εάν αυτά έχουν υγρασία, αναπτύσσεται ένα μοτίβο από στίγματα διάβρωσης, στα σημεία που τα προϊόντα έχουν έρθει σε επαφή με το υγρό χαρτόνι, που περιέχει θειικά και χλωρικά ιόντα. Η διάβρωση, που έρχεται σαν αποτέλεσμα, εμφανίζεται σε αυτή την περίπτωση πιο εκτεταμένη, αλλά λιγότερο έντονη τοπικά.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Είναι σημαντικό να διασφαλισθεί ότι τα προϊόντα είναι στεγνά κατά τη μεταφορά. Εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν χαρτοσυσκευασίες, το χαρτί δεν θα πρέπει να περιέχει θειικά και χλωρικά ιόντα. Πάντως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη και με πλαστικές συσκευασίες ή διαχωριστές, οποιαδήποτε συμπίκνωση υγρασίας θα παράγει διάβρωση σε μορφή κηλίδων νερού.

MP11. Σημάδια από νερό

Εναλλακτική περιγραφή: Σημάδια από νερό

Εάν το μέταλλο μεταφέρεται ή φυλάσσεται σε συνθήκες όπου το νερό μπορεί να εισχωρήσει ανάμεσα σε γειτονικές όψεις (δύο παρακείμενων μετάλλων), ή όπου μπορεί να γίνει συμπίκνωση, θα δημιουργηθεί μία άσπρη κηλίδα. Αυτή δεν μπορεί να απομακρυνθεί με συνήθεις μεθόδους καθαρισμού, και θα δώσει, επίσης, μία διαφοροποιημένη, άνιση απόκριση στις διεργασίες του διαβρωτικού καθαρισμού και της στίλβωσης. Αυτό το ελάττωμα, συνήθως συμβαίνει σε ελάσματα, αλλά μπορεί και να συμβεί σε προϊόντα εξόγκωσης, κατεργασμένα προϊόντα, και επεξεργασμένα προϊόντα χύτευσης που φυλάγονται σε άσχημες συνθήκες.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η θεραπεία έγκειται στο βελτιωμένο πακετάρισμα, και τις μεθόδους μεταφοράς και φύλαξης. Πρώτα απ' όλα, το ζητούμενο είναι το υλικό να μεταφέρεται σε όχημα όπου η βροχή δε μπορεί να εισέλθει. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι τα σημάδια από νερό μπορούν επίσης να συμβούν εάν το υλικό παίρνεται από ένα ζεστό εργοστάσιο, ή αποθήκη, και εκτίθεται στη συνέχεια σε συνθήκες φύλαξης όπου υπάρχει υψηλή υγρασία και πτώση της θερμοκρασίας μέσα στη νύχτα, που θα συντείνει στη συμπίκνωση και στη δημιουργία αυτού του ελαττώματος στη μεταλλική επιφάνεια.

Ελαττώματα από Ανεπάρκεια στον Επιφανειακό Καθαρισμό

SC01. Προσβολή με οξύ

Εναλλακτική Περιγραφή: Λευκοί Κρατήρες

Υπάρχει κάποιες φορές το ενδεχόμενο να εκτιναχθεί στο αντικείμενο ένα οξύ καθαρισμού, ή να προσβληθεί το αντικείμενο από οξύ που ψεκάζεται στην ατμόσφαιρα, πριν από την επεξεργασία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κατά τόπους προσβολή του αλουμινίου. Η εξακρίβωση με οπτικό τρόπο δεν είναι πάντοτε δυνατή, ειδικά από τη στιγμή που προσβολή με αλκάλια από το διάλυμα χημικού (ή ηλεκτροχημικού) καθαρισμού μπορεί επίσης να συμβεί και να έχει μία παρόμοια εμφάνιση. Εάν εξεταστεί κάτω από μικροσκόπιο, οι παραγόμενοι από την αλκαλική προσβολή κρατήρες είναι ρηχοί και εξομαλισμένοι. Η προσβολή με οξέα έχει σαν αποτέλεσμα από βαθιές ρηγματώσεις της επιφάνειας σε μακρο-κλίμακα μέχρι περικρυσταλλική διάβρωση σε μικροκλίμακα.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Δεν υπάρχει τρόπος να εξαλειφθούν τα λευκά στίγματα όπου έχει γίνει η προσβολή. Χρειάζεται μεγαλύτερη προσοχή στο χειρισμό της εργασίας ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο της εκτίναξης. Εάν η προσβολή οφείλεται στο ψέκασμα οξέως στην ατμόσφαιρα, θα πρέπει να ελεγχθεί το σύστημα εξαερισμού, για τυχόν σταδιακή αύξηση των εναποθέσεων στους αγωγούς, και να καθαριστεί. Μπορεί επίσης να κριθεί αναγκαία η βελτίωση της αποτελεσματικότητας του εξαερισμού.

SC02. Προσβολή με Άλκαλι

Εναλλακτική Περιγραφή: Λευκοί Πυρήνες

Προσβολή με άλκαλι μπορεί να συμβεί τυχαία από εκτινάξεις του αλκαλικού καθαριστικού στην επιφάνεια του αντικειμένου, ή από τη συμπύκνωση αλκάλεως από σωματίδια στον αέρα, πάνω στην επιφάνεια. Η τελευταία παίρνει τη μορφή μιας επιφάνειας με άσπρους κρατήρες, οι οποίοι μπορεί να γίνουν τραχείς, εάν το αντικείμενο ακολούθως καθαριστεί με χημικά / ηλεκτροχημικά μέσα.

Με κάποια εμπειρία είναι δυνατόν να διακριθούν αυτού του τύπου οι κρατήρες από αυτούς με το οξύ (βλ. προηγούμενο ελάττωμα). Όταν εξετάζονται σε διατομή, κάτω από το μεταλλουργικό μικροσκόπιο, οι κρατήρες φαίνονται να είναι ουσιαστικά ομαλοί, και χωρίς περικρυσταλλική διάβρωση.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η θεραπεία, βασικά, μοιάζει με αυτή που δόθηκε προηγούμενα, στην αντίστοιχη περίπτωση του οξέως. Πάντως, το σύστημα αγωγών εξάτμισης στο λουτρό του αλκαλικού καθαριστικού ρέπει πολύ περισσότερο στη συσσώρευση στερεών σωματιδίων, που εξάγονται σαν σπρί από το σύστημα εξάτμισης. Έλλειψη επαρκούς συντήρησης του συστήματος είναι συνηθισμένη αιτία αλκαλικής προσβολής από σωματίδια στον αέρα.

SC03. Διάβρωση από χλωριωμένο διαλύτη

Εναλλακτική Περιγραφή: Διάβρωση απολίπαντή

Οι χλωριωμένοι διαλύτες απολίπανσης (degreasers) χρησιμοποιούνται σαν πρώτο στάδιο απολίπανσης. Τότε, το αντικείμενο μπορεί να διαβρωθεί ειδικά όταν η επιφάνεια εργασίας είναι υγρή, ή όταν έχει μπει νερό στη συσκευή απολίπανσης. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό εδώ και αρκετά χρόνια, κυρίως με το τριχλωροαιθυλένιο, και υπάρχουν ειδικές οδηγίες στις οποίες προτείνεται η χρήση προσθετικών με παρεμποδιστές αμινικής βάσης¹. Οι περισσότεροι προμηθευτές στο εμπόριο χρησιμοποιούν αυτά τα προσθετικά σε σταθερή βάση.

¹ Τέτοιες οργανικές ενώσεις, όπως π.χ. η τριαιθυλαμίνη, χρησιμοποιούνται στον παρεμπόδιση της προσβολής από οξύ, και προστίθενται στις δεξαμενές απολίπανσης όπου εξουδετερώνουν το υδροχλωρικό οξύ που σχηματίζεται από υδρόλυση του τριχλωροαιθυλενίου (λόγω της παρουσίας νερού) και άλλων χλωριωμένων

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

1. Αποφεύγετε να εισάγετε υγρά ή βρεγμένα αντικείμενα σε απολιπαντή με χλωριωμένο διαλύτη. Βεβαιωθείτε, επίσης, ότι δε μπορεί να μπει νερό από κάποια είσοδο.
2. Ελέγξτε με τον προμηθευτή ότι υπάρχει η σωστή ποσότητα παρεμποδιστή στον αρχικό διαλύτη.

SC04. Χάραξη από το χημικό καθαριστικό

Εναλλακτική περιγραφή: Θαμπή (ματ) εμφάνιση

Υπάρχουν πολλοί τύποι χημικών καθαριστικών στο εμπόριο, αλλά για το αλουμίνιο προτιμώνται αυτά που δεν προκαλούν εγχάραξη. Η σύσταση αυτών των καθαριστικών μπορεί να είναι πολυσύνθετη, αλλά βασικά περιέχουν ένα συστατικό που προκαλεί μόνο ελαφριά εγχάραξη του μετάλλου, και έναν παρεμποδιστή (μπορούν επίσης να περιέχουν διάφορα προσθετικά, όπως τασηνεργά και απομονωτικά αντιδραστήρια. Μία χαραγμένη επιφάνεια μπορεί να είναι το αποτέλεσμα χρήσης ενός καθαριστικού που δεν περιέχει καθόλου παρεμποδιστές. Πάντως, ο μηχανισμός της παρεμπόδισης είναι πολύπλοκος, αφού υπάρχει μία αρχική περίοδος εισαγωγής πριν από την οποία ο παρεμποδιστής ενεργεί. Η περίοδος αυτή κανονικά είναι σχετικά μικρή, έτσι ώστε η χάραξη που λαμβάνει χώρα δεν είναι σημαντική. Από την άλλη μεριά έχει βρεθεί ότι με περίσσεια παρεμποδιστή, η περίοδος εισαγωγής μπορεί να επεκταθεί σημαντικά, και τότε προκαλείται ορατή χάραξη. Αυτό το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία του καθαριστικού.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

1. Ελέγξτε τη συγκέντρωση του καθαριστικού για να βεβαιωθείτε ότι είναι σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή. Εάν δεν σωστή, διορθώστε τη.
2. Ελέγξτε ότι η θερμοκρασία είναι μέσα στη συνιστώμενη περιοχή λειτουργίας.
3. Χρησιμοποιώντας δοκίμια και βέλτιστες συνθήκες καθαρισμού, ελέγξτε την κατάσταση της επιφάνειας μετά τον καθαρισμό μόνο. Εάν το πρόβλημα παραμένει, καλέστε τους προμηθευτές.

SC05. Σημάδια από δάχτυλα

Εναλλακτική περιγραφή: Διάβρωση προσομοιάζουσα δακτυλικά αποτυπώματα

Όταν το αντικείμενο έχει αυτό το ελάττωμα, θα υπάρχουν κηλίδες που είναι συνήθως λίγο μικρότερες από τα δάχτυλα ενός ανθρώπινου χεριού, αλλά στην απόσταση που θα βρίσκονταν εάν κρατούσαν το αντικείμενο. Είναι επειδή οι χειριστές δούλευαν το αντικείμενο πριν την ανοδίωση χωρίς καθαρά προστατευτικά γάντια, μεταφέροντας, έτσι, ιδρώτα στην επιφάνεια του αντικειμένου. Ο ανθρώπινος ιδρώτας περιέχει χλωριούχο νάτριο, καθώς και λίπος, οπότε υπάρχει μια επιφανειακή διάβρωση που αποδίδεται στα σημάδια των δαχτύλων. Εάν το αντικείμενο ήταν σε επαφή με την παλάμη, τότε θα παρατηρηθούν μεγαλύτερες κηλίδες.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Όπου είναι δυνατό, τα εξαρτήματα από αλουμίνιο θα πρέπει να δουλεύονται από τους χειριστές μόνο φορώντας γάντια τα οποία θα πρέπει να αλλάζονται συχνά. Όταν έχουν γίνει σημάδια από δάχτυλα στο στιλβωμένο αντικείμενο, αυτό θα πρέπει πρώτα να βαπτισθεί σε καθαριστή από οξύ, ή σε οξύ για απομάκρυνση επιφανειακών οξειδίων, π.χ. 20% κ.ο. νιτρικό οξύ, ή χρωμικό - φωσφορικό ή χρωμικό - θειικό, όπου αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Όπου έχει γίνει άμεση επαφή με τον ανθρώπινο ιδρώτα, το οξύ θα διαλύσει τα οξείδια, αφήνοντας μία ενεργή επιφάνεια που διαβρώνεται. Ο σχηματισμός κρατήρων στην επιφάνεια που γίνεται με αυτόν τον τρόπο δεν είναι πάντα άμεσα ορατός, γιατί οι κρατήρες είναι μικροί και σε σχήμα ανάποδου μανιταριού. Φανερώνονται όταν το αντικείμενο υπόκειται σε χημικό καθαρισμό με άλκαλι, και δεν υπάρχει τρόπος να διορθωθεί αυτό το ελάττωμα.

SC06. Εμφάνιση διαφοροποιημένων περιοχών λόγω σχηματισμού μίγματος οξειδίων

υδρογονανθράκων. Η ακριδίνη και η φαινυλοκινίνη, μία σχετιζόμενη ένωση, παρεμποδίζουν την προσβολή από πυκνό υδροχλωρικό οξύ, 3M.

Εναλλακτική περιγραφή: Διαφοροποιημένες λευκές περιοχές

Τα κράματα αλουμινίου που περιέχουν μαγνήσιο δίνουν μία λεπτή στοιβάδα από οξειδία που σχηματίζουν διαφοροποιημένες περιοχές από μίγματα οξειδίων Al_2O_3 και MgO . Αυτό το οξείδιο του μαγνησίου είναι ανθεκτικό στην προσβολή από διάφορα καθαριστικά. Όμοια συμπεριφορά έχουν τα κράματα του αλουμινίου που περιέχουν ψευδάργυρο. Το αποτέλεσμα είναι ότι το καθαριστικό δεν μπορεί να διαλύσει τη στοιβάδα του οξειδίου, και παράγεται ένα διαφοροποιημένο μοτίβο.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Οι στοιβάδες του μίγματος των οξειδίων διαλύονται από τα οξέα, οπότε ένα πρώτο στάδιο καθαρισμού θα διαλύσει αυτές τις στοιβάδες, όπως π.χ. ένα καθαριστικό από οξύ, ή ένα 20% κ.ο. νιτρικό οξύ για τουλάχιστον 5 λεπτά (ή περισσότερο, εάν δεν έχει αποτέλεσμα). Το καυτό θειικό οξύ που είναι π.χ. 15% κ.ο., για 2 - 3 λεπτά στους 50°C είναι μία καλή λύση. Η χρήση ενός καθαριστικού με παρεμποδιστή πριν από την κατεργασία με οξύ είναι κάτι που προτείνεται.

SC07. Ανομοιόμορφη εμφάνιση

Εναλλακτική περιγραφή: Αμβλύνοσες (θαμπές) διαφοροποιημένες περιοχές

Κάποιες φορές, μετά από το φινίρισμα, θα παρατηρηθεί μία κατά τόπους διαφοροποίηση στην εμφάνιση. Εάν τα εξαρτήματα έχουν καθαριστεί επιφανειακά, και στη συνέχεια σε βάθος (με χημικά) αυτή η ανομοιομορφία θα φαίνεται σαν περιοχές όπου η εμφάνιση της επιφάνειας διαφέρει από αυτή των διπλανών περιοχών. Στην περίπτωση που έχει πραγματοποιηθεί το στάδιο του χρωματισμού, θα παρατηρηθούν διαφορές στο χρώμα. Σε αντικείμενα που έχουν υποστεί περαιτέρω χημικό καθαρισμό, θα παρατηρηθεί μία τραχιά εγχάραξη στα όρια των διαφορετικών περιοχών.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

1. Ελέγξτε τον κύκλο καθαρισμού και βεβαιωθείτε ότι η δεξαμενή καθαρισμού έχει τη σωστή θερμοκρασία και τη σωστή συγκέντρωση σε καθαριστικό.
2. Επίσης, ελέγξτε εάν το πρόβλημα επαναλαμβάνεται όταν εφαρμόζονται σωστές συνθήκες και χρόνος παραμονής στη δεξαμενή. Εάν επαναλαμβάνεται, δοκιμάστε να αυξήσετε τους χρόνους καθαρίσματος. Εάν αυτό δεν θεραπεύσει το πρόβλημα, κάνετε έναν διασταυρωτικό έλεγχο για την απόδοση του καθαριστικού με το τεστ “ραγισμάτων του νερού”
3. Υπάρχει περίπτωση το αντικείμενο να είναι τόσο μολυσμένο ώστε το καθαριστικό να μη μπορεί να το καθαρίσει. Σε αυτήν την περίπτωση, είτε αλλάζετε καθαριστικό, ή εισάγετε επιπλέον στάδιο καθαρισμού.

SC08. Υπολείμματα στίλβωσης

Εναλλακτική περιγραφή: Επιφανειακή συσσωμάτωση με έψηση

Τα κατάλοιπα της στίλβωσης είναι συνήθως σκοτεινού χρώματος, αλλά μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα. Μερικές φορές συσσωρεύονται στις γωνίες και τις χαραμάδες του αντικειμένου, ή μπορεί να εμφανιστούν σαν ακανόνιστες, διαφοροποιημένες στην εμφάνιση περιοχές, όπου έχουν εφαρμοστεί υψηλές πιέσεις από τους επενδυμένους τροχούς στίλβωσης. Η παρουσία τους οφείλεται στην αδυναμία του κύκλου των διεργασιών καθαρισμού να τα απομακρύνει. Εάν το αντικείμενο μείνει όλη τη νύχτα με τα συστατικά του στίλβωτικού μέσου προσκολλημένα πάνω του, τότε συνήθως αυξάνεται η δυσκολία απομάκρυνσής τους. Η απολίπανση με ατμό συχνά έχει σαν αποτέλεσμα το “ψήσιμο” των συστατικών αυτών πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου, αποτυγχάνοντας, έτσι, να το απομακρύνει.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Εάν ενδείκνυται η απολίπανση με ατμό, τότε η χρήση της δεν θα πρέπει να είναι υποχρεωτική στη στίλβωμένο αντικείμενο. Γενικά, το καθαρίσμα με ατμούς διαλύτη δεν είναι αποτελεσματικός τρόπος καθαρισμού του αλουμινίου. Όπου τα υπολείμματα έχουν ψηθεί από μια τέτοια διεργασία, θα χρειαστούν βάπτιση με εμβύθιση σε ένα κατάλληλο διαποτιστικό καθαριστικό. Σε κάποιες

περιπτώσεις ένα σπρέι καθαριστικό θα αποδειχθεί αποτελεσματικότερο, ειδικά σε ένα εργοστάσιο που λειτουργεί χειροκίνητα.

SC09. Υπολείμματα Πυριτιακής Ιλύος

Εναλλακτική περιγραφή: Υπολείμματα καθαριστικού

Το αντικείμενο, μετά από το ξέπλυμα, μπορεί να έχει κάποιο υπόλειμμα, το οποίο παραμένει μετά από τη διάλυση επιφανειακών οξειδίων. Αυτό το υπόλειμμα μπορεί να παραμείνει στο αντικείμενο ακόμη και μετά το σφράγισμα. Σε αυτό το στάδιο μπορεί να έχει μία υπόλευκη εμφάνιση. Εάν το αντικείμενο έχει βαφτεί, μπορεί να εμφανίζει κατά τόπους διαφοροποίηση στην εμφάνιση, με μερικές περιοχές να μην είναι βαμμένες.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η αιτία του προβλήματος πιθανόν να είναι η χρήση ενός πυριτιούχου καθαριστικού σε μία περιοχή με “σκληρό” νερό. Το πυριτιακό άλας στο καθαριστικό αντιδρά με τα διαλυμένα άλατα ασβεστίου, στο νερό πλύσης, και δίνει ένα σχετικά αδιάλυτο στρώμα πυριτιακού ασβεστίου. Η προτιμώμενη λύση είναι η χρήση ενός καθαριστικού χωρίς πυρίτιο. Πάντως, το ξέπλυμα με κρύο νερό για αρκετή ώρα και ένας αυξημένος χρόνος κατεργασίας για διάλυση επιφανειακών οξειδίων, συνήθως θα ξεπεράσουν το πρόβλημα.

Ελαττώματα κατά τη Στίλβωση με Χημικά

CP01. Πεταλίδες

Εναλλακτική περιγραφή: Άσπρα ροζίδια

Αυτό το ελάττωμα έχει τη μορφή ομάδας από άσπρα ροζίδια ή εξογκώματα συγκεντρωμένα γύρω από τα σημεία έντονης προσβολής από το στίλβωτικό μέσο. Αυτές οι εναποθέσεις παίρνουν τη μορφή άσπρου πυραμιδοειδούς ιζήματος στην επιφάνεια. Μπορούν επίσης να απαντηθούν σε μία λιγότερο συνηθισμένη ραβδοειδή μορφή. Τέτοια ιζήματα δείχνουν να είναι, κυρίως, αυτά του ορθοφωσφορικού αλουμινίου.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Έχει βρεθεί ότι αυτά τα ιζήματα εμφανίζονται όταν το λουτρό της χημικής στίλβωσης έχει υψηλό περιεχόμενο σε αλουμίνιο και η πυκνότητά του είναι μεγαλύτερη των 1.80 g/cm^3 . Συνήθως, η προσθήκη μιας περιορισμένης ποσότητας νερού, αρκετού για να μειώσει την πυκνότητα κάτω από 1.80 g/cm^3 , είναι αποτελεσματική. Εάν αυτό αποτύχει να μειώσει τις “πεταλίδες”, συμβουλευτείτε τον προμηθευτή του στίλβωτικού διαλύματος.

CP02. Μόλυνση του λουτρού

Εναλλακτική περιγραφή: Οργανική Μόλυνση

Εάν το λουτρό της στίλβωσης με χημικά έχει μολυνθεί με οργανικές ενώσεις, όπως αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στη μηχανική στίλβωση (εάν το απολιπαντικό δεν έχει καταφέρει να τις απομακρύνει), τότε παράγεται ολική στιγματώση της επιφάνειας, μαζί με απώλεια της λάμψης, και κατά τόπους προσβολή της επιφάνειας. Η προσβολή αυξάνεται όταν υπάρχουν τασιενεργά αντιδραστήρια, και παράγονται κρατήρες όμοιοι με αυτούς που παράγονται με υψηλή περιεκτικότητα διαλύματος σε νιτρικό οξύ.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η ελλιπής απολίπανση του αντικειμένου, πριν από τη χημική στίλβωση είναι κάτι που πρέπει να αποφεύγεται, αφού το λίπος μολύνει το λουτρό στίλβωσης και μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω διάλυση της επιφάνειας. Το αλουμίνιο όπως έρχεται σε φύλλα, πολλές φορές φαίνεται καθαρό, ενώ έχει υπολείμματα από λιπαντικό ή επιφανειακά στρώματα από άλλα υλικά. Είναι, λοιπόν βασικό να έχει καθαριστεί όλη η επιφάνεια, πριν από τη χημική στίλβωση.

CP03. Τραχύ γυάλισμα

Εναλλακτική περιγραφή: Τραχείς κρατήσεις

Η όψη του αντικειμένου μετά από τη χημική στίλβωση επηρεάζεται από τη σύσταση του λουτρού κατεργασίας. Πρακτικά, το νιτρικό οξύ είναι το συστατικό του οποίου η συγκέντρωση μεταβάλλεται περισσότερο. Η βέλτιστη συγκέντρωσή του εξαρτάται από τη χημική σύσταση του λουτρού, και σε μικρότερο βαθμό από τη συγκέντρωση του αλουμινίου. Μία μεγαλύτερη συγκέντρωση νιτρικού οξέως από τη βέλτιστη δίνει έναν τραχύ, αλλά στιλπνό φόντο από στρογγυλοποιημένους κρατήσεις. Η τραχύτητα αυτή αυξάνει με το χρόνο στίλβωσης.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Ελέγξτε τη συγκέντρωση του νιτρικού οξέως και διορθώστε την, εάν αυτό απαιτείται. Επιβεβαιώστε ότι το αντικείμενο μένει βυθισμένο στο λουτρό μόνο για τον απαιτούμενο χρόνο. Ένας χρόνος στίλβωσης μεγαλύτερος των 2 λεπτών δίνει, συνήθως, ένα τραχύτερο φινίρισμα, με μικρότερη ανακλαστικότητα.

CP04. Θαμπή εμφάνιση

Εναλλακτική περιγραφή: Αδύνατη λάμψη

Μία θαμπή, μη ανακλαστική τελειωμένη επιφάνεια, δηλ. μια επιφάνεια που δίνει μια χαμηλή μη ανακλαστική λάμψη, μπορεί να οφείλεται στις ακόλουθες αιτίες:

- α) Σημειακή διάβρωση λόγω του νιτρικού οξέως.
- β) Χαμηλή θερμοκρασία του λουτρού χημικής στίλβωσης.
- γ) Ατελής διάλυση επιφανειακών οξειδίων και απομάκρυνση του επιφανειακού στρώματος.
- δ) Σταδιακή αύξηση του διαλύματος της χημικής στίλβωσης στο νερό ξεπλύματος.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

1. Ελέγξτε τη θερμοκρασία του λουτρού, και ρυθμίστε την, εάν είναι ανάγκη.
2. Ελέγξτε τη διαδικασία διάλυσης επιφανειακών οξειδίων και βεβαιωθείτε ότι το διάλυμα αυτό έχει τη σωστή συγκέντρωση, και ο χρόνος παραμονής του αντικειμένου στο διάλυμα είναι επαρκής.
3. Βεβαιωθείτε ότι οι πλύσεις που ακολουθούν δεν έχουν μολυνθεί
4. Ελέγξτε την πυκνότητα του ανοδικού φιλμ, και εάν είναι υψηλή, μειώστε την πυκνότητα του ρεύματος (δηλ. την τάση) και ρυθμίστε το χρόνο ανοδίωσης.
5. Ελέγξτε εάν υπάρχει πρόβλημα στο υλικό του αντικειμένου, δοκιμάζοντας ένα αντικείμενο παρόμοιου υλικού από άλλη πηγή.

CP05. Λεπτομερής σημειακή διάβρωση

Εναλλακτική περιγραφή: Ελαττώματα εμφανιζόμενα συνοδεία φυσαλίδων - Στίγματα

Το χαρακτηριστικό αυτού του ελαττώματος είναι ότι παρατηρείται ένα υπόβαθρο με λεπτά στίγματα πάνω στη στιλπνή επιφάνεια, μετά από τη χημική στίλβωση, και πριν την ανοδίωση. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία λεπτομερών φυσαλίδων όταν η συγκέντρωση νιτρικού οξέως είναι χαμηλότερη από τη βέλτιστη για μία επιφάνεια με υψηλό συντελεστή ανακλασιμότητας. Αυτό το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο όταν ο χαλκός απουσιάζει εντελώς από το διάλυμα στίλβωσης.

Επίδραση της συγκέντρωσης νιτρικού οξέως

Για δεδομένο λουτρό στίλβωσης, υπάρχει μία βέλτιστη συγκέντρωση νιτρικού οξέως. Η ακριβής συγκέντρωση ποικίλλει με τη χημική σύσταση του λουτρού, αλλά συνήθως δίνονται οδηγίες από τους προμηθευτές. Η βέλτιστη συγκέντρωση νιτρικού οξέως που απαιτείται για μεγαλύτερη στιλπνότητα τείνει να γίνεται ελαφρώς μικρότερη, καθώς η συγκέντρωση του αλουμινίου αυξάνεται προς το ανώτατο όριο. Πιο υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας οδηγούν σε μεγαλύτερη απώλεια νιτρικού οξέως.

Επίδραση του Χαλκού

Ο χαλκός προστίθεται σε μικρές ποσότητες για να αυξήσει τη στιλπνότητα και να μειώσει το χρόνο στίλβωσης. Στα διαλύματα του εμπορίου είναι κανονικά στο διάλυμα του λουτρού σε ένα βέλτιστο επίπεδο. Συνήθως, δεν υπάρχει ανάγκη να ρυθμίσουμε τη συγκέντρωση, αλλά μερικές φορές το αντικείμενο μπορεί να περιέχει αρκετό χαλκό, ώστε να σχηματίσει περίσσεια. Η υψηλή συγκέντρωση σε χαλκό, σε συνδυασμό με τη χαμηλή συγκέντρωση σε νιτρικό οξύ, τείνει να δώσει μια μη ομοιόμορφη κατανομή του χαλκού στο διάλυμα με τραχείς κρατήσεις, παράγοντας χαμηλή ανακλασιμότητα. Η υψηλή συγκέντρωση σε χαλκό σε συνδυασμό με την υψηλή συγκέντρωση σε νιτρικό οξύ παράγει μια τραχιά και στιλπνή επιφάνεια ξεφλουδισμένου πορτοκαλιού. Η χαμηλή συγκέντρωση νιτρικού οξέως σε συνδυασμό με χαμηλή συγκέντρωση χαλκού δίνει ένα φόντο με λεπτά στίγματα, με απώλεια της διαύγειας.

CP06. Διάβρωση κατά τη μεταφορά

Εναλλακτική περιγραφή: Μπλε Λάμψη

Εάν υπάρχει καθυστέρηση στη μεταφορά του αντικειμένου από το λουτρό χημικής στίλβωσης στο ξέπλυμα, μπορεί να συμβεί διάβρωση της επιφάνειας, δίνοντας μία πιο θαμπή εμφάνιση από την κανονική, με μία μπλε χροιά. Αυτή η ‘μπλε λάμψη’ απομακρύνεται με την κατεργασία διάλυσης επιφανειακών οξειδίων, χρησιμοποιώντας νιτρικό οξύ, αλλά το αποτέλεσμα είναι λιγότερη στιλπνότητα της επιφάνειας από το κανονικό. Σε μερικές φόρμουλες στίλβωσης, αυτό μπορεί να είναι συνέπεια της υψηλής συγκέντρωσης σε θειικό οξύ, που οδηγεί στην καθίζηση του προσκολλημένου θειικού αλουμινίου στη μεταλλική επιφάνεια, και σε ελαφρά προσβολή, προκαλώντας απώλεια της λάμψης.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Ελαχιστοποιήστε την καθυστέρηση στη μεταφορά του αντικειμένου μεταξύ του λουτρού χημικής στίλβωσης και τη δεξαμενή ξεπλύματος. Εάν πρόκειται για διάλυμα του εμπορίου, συμβουλευτείτε τον αντιπρόσωπο, εφ’ όσον το πρόβλημα παραμένει.

CP07. Ασπρη διάβρωση

Εναλλακτική περιγραφή: Θαμπή εμφάνιση

Εάν το αντικείμενο εμφανίζεται να έχει μία συνολικά θαμπή, ελαφρώς διαβρωμένη εμφάνιση μετά από τη χημική στίλβωση, η πιο πιθανή αιτία είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, που μπορεί να είναι το αποτέλεσμα διαρροής από τους σωλήνες (σπείρες) θέρμανσης του ατμού. Μερικές φορές το νερό προστίθεται για να χαμηλώσει το ειδικό βάρος του λουτρού και να εμποδίσει την καθίζηση των αλάτων όταν η συγκέντρωση του αλουμινίου είναι υψηλή. Εάν προστίθεται περίσσεια νερού, τότε αυτό θα προκαλέσει το πρόβλημα.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Ελέγξτε την περιεκτικότητα σε νερό του στιλπνωτικού διαλύματος βάπτισης, ή πείτε στον προμηθευτή να το κάνει. Εάν η περιεκτικότητα σε νερό είναι μεγάλη, τότε η μόνη λύση είναι να αφήσετε το νερό να εξατμιστεί με βρασμό, διατηρώντας το λουτρό στους 100 - 105°C.

Ελαττώματα κατά το Χημικό/Ηλεκτροχημικό Καθαρισμό

EP01. “Καμένη” επιφάνεια

Εναλλακτική περιγραφή: Έντονη σημειακή διάβρωση στην επιφάνεια

Αυτό το ελάττωμα μπορεί να συμβεί με ένα βαριά χρησιμοποιημένο διάλυμα καθαρισμού, με υψηλή συγκέντρωση σε αλουμίνιο. Αυτό οδηγεί σε καθίζηση υδροξειδίου του αλουμινίου στην επιφάνεια του αντικειμένου κατά τον καθαρισμό, οπότε λαμβάνει χώρα έντονη (κατά τόπους ή ολική) σημειακή διάβρωση ή “κάψιμο” της επιφάνειας, που συνοδεύεται από αύξηση της ταχύτητας διάλυσης 2 - 3 φορές της κανονικής. Η τελευταία, προκαλεί μία τοπική αύξηση της θερμοκρασίας, που μερικές φορές συνοδεύεται από προσβολή στα όρια των κόκκων που μοιάζει με αυτή του καθαρισμού σε βάθος με οξύ.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Το πρώτο βήμα είναι να μειωθεί η θερμοκρασία του λουτρού καθαρισμού. Το δεύτερο είναι ή να προστεθεί νερό ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση αλουμινίου, ή να απομακρυνθεί μέρος από το καθαριστικό, και να αναπληρωθεί με νέο πυκνό διάλυμα και να αραιωθεί μέχρι την επιθυμητή συγκέντρωση. Θα ήταν προτιμότερο να συμβουλευτείτε τον προμηθευτή του καθαριστικού, αφού η βέλτιστη λύση (θεραπεία) εξαρτάται από τη χημεία του καθαριστικού.

EP02. Αδρομερώς διαβρωμένη επιφάνεια

Εναλλακτική περιγραφή: Αδρομερής χημικός καθαρισμός

Εάν το καθαρισμένο σε βάθος αντικείμενο έχει τραχύ εμφάνιση, αυτό μπορεί να οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία του καθαριστικού. Εάν η τραχύς διάβρωση παρατηρείται μόνο σε μερικά αντικείμενα, τότε αυτή μπορεί να οφείλεται σε τοπική αύξηση της θερμοκρασίας, σαν αποτέλεσμα της εξώθερμης αντίδρασης διάλυσης. Με μερικά καθαριστικά, η υψηλή συγκέντρωση σε αλουμίνιο μπορεί να συμβάλει σ' αυτή τη διάβρωση, ή μπορεί το καθαριστικό να έχει μολυνθεί. Προκειμένου να βελτιωθεί η ικανότητα εξομάλυνσης, και να αυξηθεί η ταχύτητα διάλυσης, σε κάποια καθαριστικά, προστίθεται νιτρικό νάτριο σε καυστικό νάτριο. Πάντως, η υψηλή συγκέντρωση νιτρικού νατρίου μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την τραχύ διάβρωση, εάν η περιεκτικότητα σε ελεύθερο NaOH πέσει κάτω από 2%.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Ελέγξτε εάν το πρόβλημα δημιουργείται όταν μόνο ένας μικρός αριθμός δειγμάτων επεξεργάζονται και η θερμοκρασία είναι σωστή. Εάν το πρόβλημα δεν επανεμφανίζεται σε μικρές παρτίδες, να γίνει αραιότερη διάταξη των προς ανοδίωση αντικειμένων. Εάν το καθαριστικό περιέχει νιτρικά ιόντα, ελέγξτε τη συγκέντρωση νιτρικού ιόντος και του ελεύθερου NaOH. Αλλιώς, συμβουλευτείτε τον προμηθευτή του καθαριστικού.

EP03. Κηλίδες Διάβρωσης

Εναλλακτική περιγραφή: Κακώσεις κατά την ξήρανση

Αντικείμενα που έχουν καθαριστεί (επιφανειακά και σε βάθος), και στη συνέχεια ανοδιωθεί, μπορεί να εμφανίσουν κακώσεις σαν κηλίδες, συγκεντρωμένες εκεί όπου τα αντικείμενα αυτά συγκρατούνται στο πλαίσιο στήριξης. Οι κακώσεις είναι στην κατεύθυνση της ξήρανσης. Οι κηλίδες οφείλονται στο χημικό καθαριστικό που έχει στεγνώσει κατά τη μεταφορά από τη δεξαμενή καθαρισμού στη δεξαμενή ξεπλύματος. Οι κηλίδες αυτές ευρίσκονται συγκεντρωμένες σε ορισμένες περιοχές δημιουργώντας τοπογραφία σαφώς εντονότερης διάβρωσης σε σχέση με τις λοιπές γειτονικές περιοχές. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε συνέχιση μιας τοπικής δράσης (λόγω αυξημένης τοπικής συγκέντρωσης) του διαβρωτικού μέσου κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του επεξεργαζόμενου αντικειμένου.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Οι κηλίδες από διάβρωση γίνονται συνήθως όταν η θερμοκρασία του καθαριστικού είναι πολύ υψηλή. Αυτό μπορεί να είναι λόγω της χαμηλότερης συγκέντρωσης και υψηλότερης θερμοκρασίας απ' ό,τι είναι το βέλτιστο, που εγγυάται ομοιόμορφο, χωρίς κηλίδες καθαρίσμα. Μπορεί, ακόμη, να οφείλεται στην υψηλή κατά τόπους θερμοκρασία του αντικειμένου, λόγω της εξώθερμης αντίδρασης που λαμβάνει χώρα κατά τον καθαρισμό.

EP04. Διάβρωση προσομοιάζουσα δακτυλικά αποτυπώματα

Εναλλακτική περιγραφή: Σημάδια από δάχτυλα

Αυτό συνδέεται στενά με το ελάττωμα των δακτυλικών αποτυπωμάτων που περιγράφηκε στα ελαττώματα του επιφανειακού καθαρισμού. Εμφανίζεται από επαφή του αντικειμένου με τον ανθρώπινο ιδρώτα στα δάχτυλα και στα χέρια. Εάν έχει συμβεί διάβρωση που οφείλεται σε αυτήν

την αιτία, πριν από την επεξεργασία, ή εάν ο επιφανειακός καθαρισμός δεν έχει θεραπεύσει το πρόβλημα, θα υπάρχει διαφοροποίηση στο χημικό καθαρισμό, σαν αποτέλεσμα της διάβρωσης.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η πρώτη πρόληψη είναι οι χειριστές να μη δουλεύουν το αντικείμενο με γυμνά χέρια. Εάν δεν ληφθεί αυτή η πρόληψη, υπάρχει ένας συνεχής και αναπόφευκτος κίνδυνος για διάβρωση με σημάδια δακτυλικών αποτυπωμάτων που δεν μπορεί να θεραπευτεί παρά μόνο με δυνατό τρίνιμο.

EP05. Ατελής αφαίρεση ανοδικού στρώματος

Εναλλακτική περιγραφή: Τραχείς κηλίδες

Όταν το αντικείμενο για κάποιο λόγο πρέπει, για κάποιο λόγο, να επανεπεξεργαστεί, το ανοδικό στρώμα συνήθως αφαιρείται στη δεξαμενή χημικού καθαρισμού. Εάν η επιφάνεια δεν έχει εντελώς απογυμνωθεί από το ανοδικό στρώμα, μετά την επανεπεξεργασία, θα έχει κατά τόπους τραχείς διαφοροποιημένες περιοχές, και συχνά θα περιέχει σκοτεινότερες περιοχές, λόγω του διαφοροποιημένου χημικού καθαρισμού, σαν αποτέλεσμα της ατελούς απομάκρυνσης του ανοδικού στρώματος, στο χημικό καθαρισμό.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Υπάρχει πάντα ο κίνδυνος της μη ομοιόμορφης και ατελούς απομάκρυνσης των ανοδικών στρωμάτων όταν χρησιμοποιείται κάποιο καθαριστικό διάλυμα γι' αυτό το σκοπό. Η αφαίρεση του στρώματος στο πρότυπο μίγμα που αποτελείται από 35 ml/l φωσφορικό οξύ + 20 g/l χρωμικό οξύ αποθηκευμένο στους 95° - 100°C είναι ο μόνος σίγουρος τρόπος για να απομακρυνθεί εντελώς το ανοδικό στρώμα χωρίς χημικό καθαρισμό. Διαφορετικά, ελέγξτε προσεκτικά ότι το ανοδικό στρώμα έχει απομακρυνθεί, κρίνοντας από την ομοιομορφία της προσβολής στην επιφάνεια. Εάν το αντικείμενο βυθισθεί για μία ώρα σε 25% Κ.Ο. νιτρικό οξύ, θα επιτευχθεί πιο ομοιογενής απογύμνωση.

EP06. Διάβρωση προ του χημικού καθαρισμού

Εναλλακτική περιγραφή: Ατμοσφαιρική διάβρωση

Εάν το αντικείμενο έχει υποστεί διάβρωση πριν από το χημικό καθαρισμό, τότε έχει υπάρξει μία ανομοιόμορφη, μερικώς αδιάβρωτη, λεπτή στιβάδα οξειδίου πάνω στην επιφάνεια. Το αποτέλεσμα είναι ασθενή στίγματα, κατά τόπους, που διαβρώνονται αρχικά πρώτα, και η δημιουργία μίας τραχέως επιφάνειας με άσπρα στίγματα. Συχνά, η έκταση της αρχικής ατμοσφαιρικής διάβρωσης του αντικειμένου μπορεί να είναι ασήμαντη, και ακόμα, να μην είναι φανερή σε κάποιον χωρίς πείρα, αλλά το αποτέλεσμα του καθαρισμού είναι δραματικό, αφού συνήθως ανοίγει τους κρατήρες με το σχήμα αντίστροφων μανιταριών κάτω από τη διάβρωση.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Είναι προφανές, ότι η πρώτη αρχή που πρέπει να εφαρμοσθεί είναι η προσπάθεια να αποφευχθεί μία τέτοια διάβρωση, με σωστή πρακτική στο πακετάρισμα, χειρισμό, μεταφορά και αποθήκευση, έτσι ώστε να μην συμβεί συμπίκνωση της υγρασίας στα αντικείμενα. Εκεί, όπου το ενυδατωμένο οξείδιο του αλουμινίου υπάρχει μόνο επιφανειακά, αυτό μπορεί να απομακρυνθεί με διάλυμα αφαίρεσης οξειδίων, όπως χρωμικό-φωσφορικό, ή χρωμικό-θειικό. Αλλά ακόμη και αυτό δεν θα θεραπεύσει τη στιγματισμένη επιφάνεια.

EP07. Διάβρωση από το νερό ξεπλύματος

Εναλλακτική περιγραφή: Κρατήρες

Όταν το αντικείμενο έχει μείνει στη δεξαμενή ξεπλύματος μετά τον καθαρισμό σε βάθος, ή τον καθαρισμό επιφανειακών οξειδίων, μπορεί να συμβεί διάβρωση τύπου κρατήρων. Συνήθως, συμβαίνει όταν το νερό ξεπλύματος είναι πολύ μολυσμένο, ειδικά όταν η παροχή του νερού ξεπλύματος είναι χαμηλή. Η εμφάνιση αυτού του ελαττώματος συχνά υποβοηθείται από το ρεύμα

λόγω γαλβανικού στοιχείου, που μπορεί να παράγεται όταν η ράγα πάνω στην οποία κινείται το αντικείμενο είναι σε άμεση επαφή με το χείλος της δεξαμενής ξεπλύματος, αφού υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ της δεξαμενής και του αλουμινίου. Μπορεί, επίσης, να συμβεί εάν υπάρχουν σποραδικά ρεύματα στο εργοστάσιο.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Οι ράβδοι στις οποίες κινούνται τα αντικείμενα πρέπει να είναι μονωμένες από τις δεξαμενές ξεπλύματος, για να αποφευχθεί το φαινόμενο γαλβανικού στοιχείου. Μία καλή πρακτική λύση είναι να γειωθούν όλες οι δεξαμενές επεξεργασίας στη γραμμή ανοδίωσης. Η παρουσία τουλάχιστον 0.1% νιτρικού οξέως στο ξέπλυμα που ακολουθεί τη διάλυση επιφανειακών οξειδίων, θα λύσει το πρόβλημα, που συνήθως συμβαίνει με υψηλής συγκέντρωσης θεικών / θειούχων διαλυμάτων καθαρισμού επιφανειακών οξειδίων.

EP08. Εμφάνιση πλήθος μικρών δισκοειδών περιοχών με έντονη ανακλαστικότητα

Εναλλακτική περιγραφή: Γαλβανισμός

Αυτό το ελάττωμα κυρίως παρατηρείται με τα ελάσματα αλουμινίου τύπου '6063', που εμφανίζουν μία τοπογραφία έντονης διάβρωσης μετά το χημικό καθαρισμό, με κάποιους κόκκους του μετάλλου να προεξέχουν. Όταν εξετάζεται η επιφάνεια μερικών κόκκων κάτω από το μικροσκόπιο, βρίσκεται ότι οι κόκκοι αυτοί έχουν προσβληθεί σε μεγαλύτερη έκταση από άλλους. Αυτό φαίνεται να συνδέεται με την ύπαρξη ψευδαργύρου στο κράμα, αφού οι γυαλιστερές κηλίδες εμφανίζονται με περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο από 0.05% και πάνω. Ένα παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται όταν έχει χρησιμοποιηθεί διαβρωτικό μέσο, βασισμένο στην καυστική σόδα, που έχει μολυνθεί με ψευδάργυρο.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η κύρια αιτία αυτού του ελαττώματος είναι η σύσταση του κράματος και όχι η διεργασία χημικού καθαρισμού, παρ'ότι ο βαθμός στον οποίο εμφανίζεται αυτό το ελάττωμα ποικίλλει (σε μικρό βαθμό) ανάμεσα σε διαφορετικά διαβρωτικά μέσα. Μερικές φορές μπορεί να οφείλεται στην παρουσία ψευδαργύρου στο διαβρωτικό μέσο. Σε αυτή την περίπτωση, εάν η περιεκτικότητά του είναι μόνο λίγα γραμμάρια στο λίτρο, η προσθήκη διπλάσιας ποσότητας θειώδους νατρίου από αυτή που απαιτείται για να μετατρέψει τον ψευδάργυρο σε θειώδη ψευδάργυρο, κανονικά θα πρέπει να λύσει το πρόβλημα.

EP09. Μεταβλητός χημικός / ηλεκτροχημικός καθαρισμός σε βάθος

Εναλλακτική περιγραφή: Ανομοιόμορφος χημικός / ηλεκτροχημικός καθαρισμός σε βάθος

Η συνέπεια στην εμφάνιση είναι ένα από τα πρώτα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία αξιολογείται η ανοδίωση, από τη βιομηχανία, και από τον πελάτη. Εάν υπάρχει μεταβλητότητα στην εμφάνιση, όπως μεταβολές στο βαθμό γυαλάδας, ελέγξτε τα παρακάτω:

1. Η ανομοιομορφία εμφανίζεται σε κάποια συγκεκριμένη παρτίδα, ή ανάμεσα σε παρτίδες;
2. Υπάρχει μεταβλητότητα ανάμεσα σε παρτίδες, αλλά με την εμφάνιση ομοιόμορφη σε όλο το αντικείμενο σε δεδομένη παρτίδα;
3. Εάν η μεταβλητότητα εμφανίζεται σε μία παρτίδα, ελέγξτε την πυκνότητα διάταξης των αντικειμένων, αφού η αντίδραση της διάβρωσης είναι εξώθερμη και μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την τοπική υπερθέρμανση σε πυκνά διατεταγμένα αντικείμενα που έχουν μεγάλη επιφάνεια.
4. Εάν η μεταβλητότητα είναι μεταξύ μίας παρτίδας και της επόμενης, ή μεταξύ μίας παρτίδας και μίας άλλης, ελέγξτε: (α) το ελεύθερο NaOH ή τη συγκέντρωση του διαβρωτικού μέσου, (β) τη συγκέντρωση του αλουμινίου και (γ) τη θερμοκρασία του διαβρωτικού μέσου. Η ταχύτητα της διάβρωσης επηρεάζεται από τη συγκέντρωση του αλουμινίου, και ελαττώνεται, καθώς η συγκέντρωση αυτή αυξάνει.
5. Ελέγξτε τις καταγραφές της θερμοκρασίας της δεξαμενής χημικού καθαρισμού σε διάφορες χρονικές στιγμές, για να διαπιστώσετε εάν η θερμοκρασία ελέγχεται επαρκώς. Η τάση του

διαβρωτικού μέσου να θερμαίνεται, σημαίνει ότι μπορεί να χρειάζεται το λουτρό να κρυώσει, εάν είναι βαριά χρησιμοποιημένο.

- Εάν δεν συμβαίνει τίποτε από τα παραπάνω, ελέγξτε το κράμα από άλλη πηγή, μαζί με αυτό που επεξεργάζεστε, αφού η ταχύτητα διάβρωσης μπορεί να επηρεασθεί από μεταβλητές σχετιζόμενες με τη μεταλλουργία του κράματος.

EP10. Εμφάνιση λευκών ‘ανθέων’ στην καθαρισμένη σε βάθος επιφάνεια

Εναλλακτική περιγραφή: Διαφοροποιημένες περιοχές από αναμειγμένα οξείδια

Αυτό το ελάττωμα έχει τη μορφή ανομοιομορφων λευκών περιοχών στις οποίες η συνήθης τοπογραφία της ελεγχόμενης διάβρωσης απουσιάζει. Μερικές τέτοιες περιοχές μπορούν να είναι τραχείς και να υπόκεινται περισσότερο σε χημική προσβολή, και οι υπόλοιπες να υπόκεινται λιγότερο. Εάν το αντικείμενο δεν έχει καθαρισθεί επιφανειακά πριν από το χημικό καθαρισμό σε βάθος, προκύπτει μία διαφοροποίηση, κατά τόπους, στην εμφάνιση, αλλά η αιτία της διαφοροποιημένης διάβρωσης είναι η παρουσία του μίγματος οξειδίων αλουμινίου και μαγνησίου στην επιφάνεια. Αυτά τα οξείδια δημιουργούνται με θέρμανση, και παρουσιάζουν σχετική αντίσταση σε αλκαλικά διαβρωτικά μέσα, παρόλο που σε ευθετώτερο χρόνο θα λάβουν μέρος σε αντίδραση, της οποίας αποτέλεσμα θα είναι η διαφοροποιημένη διάβρωση. Αυτό συνήθως συμβαίνει στα ελάσματα τύπου ‘6063’, αλλά μπορεί να συμβεί και σε άλλα κράματα που περιέχουν μαγνήσιο. Με τον ψευδάργυρο συμβαίνει πολλές φορές το ίδιο φαινόμενο, αλλά σε μικρότερη ένταση.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Τα μίγματα οξειδίων, ειδικά αυτά που περιέχουν μαγνήσιο, εμφανίζουν σχετική αντίσταση σε αλκαλικά καθαριστικά και διαβρωτικά μέσα (στον επιφανειακό, και χημικό καθαρισμό σε βάθος, αντίστοιχα), αλλά προσβάλλονται άμεσα από οξέα. Το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με βάπτιση σε οξύ ή σε καθαριστικό από οξύ, ώστε να απομακρυνθεί αυτό το οξείδιο, πριν από τον καυστικό καθαρισμό, π.χ. 20% κ.ο. νιτρικό οξύ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή 15% κ.β. θειικό οξύ στους 60°C.

EP11. Προσβολή με οξύ

Εναλλακτική Περιγραφή: Λευκοί Κρατήρες

Αυτός ο τύπος διάβρωσης έχει περιγραφεί προηγουμένως. Μία ακριβής οπτική αναγνώριση δεν είναι πάντα δυνατή, ειδικά από τη στιγμή που μπορούμε να έχουμε προσβολή από άλκαλι, από το διάλυμα χημικού καθαρισμού, και αυτό να έχει την ίδια εμφάνιση. Εάν εξετασθεί στο μικροσκόπιο, φαίνεται μία περικρυσταλλική προσβολή που είναι αρκετά χαρακτηριστική και που μπορεί αμέσως να διακριθεί από τους στρογγυλούς κρατήρες που παράγονται στη διάβρωση από άλκαλι. Στα ανεπεξέργαστα προϊόντα εργασίας, τα στίγματα διάβρωσης θα δώσουν αντίδραση οξέως, που μπορεί να επιβεβαιωθεί χρησιμοποιώντας pHμετρο από χαρτί. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις, μία σοβαρή ατμοσφαιρική διάβρωση μπορεί επίσης να προκαλέσει περικρυσταλλική διάβρωση

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Δεν υπάρχει τρόπος να απομακρυνθούν τα άσπρα στίγματα όπου έχει γίνει προσβολή. Χρειάζεται προσοχή στο χειρισμό των αντικειμένων, ώστε να αποφύγουμε το ενδεχόμενο να πιτσιλιστούν, ειδικά φυλάγοντας τα αντικείμενα μακριά από τις δεξαμενές επεξεργασίας με οξύ και άλκαλι.

EP12. Διάβρωση από Άλκαλι

Εναλλακτική Περιγραφή: Διάβρωση, στο διαβρωτικό καθαρισμό

Εάν τα αντικείμενα πιτσιλιστούν με αλκαλικό καθαριστικό, πριν την επεξεργασία, το αποτέλεσμα μπορεί να είναι ταχεία διάβρωση, με μορφή κρατήρων. Εκτός από ακραίες καταστάσεις, οι κρατήρες εμφανίζονται τυχαία και απομονωμένα, σε μια χαρακτηριστική μορφή προσβολής. Η προσβολή από άλκαλι, κανονικά δίνει στρογγυλούς κρατήρες. Εάν παρατηρηθεί πριν την

επεξεργασία, θα λάβει χώρα μία ισχυρή αλκαλική αντίδραση, που μπορεί να επιβεβαιωθεί έχοντας ένα υγρό pHμετρο χαρτιού σε επαφή με τους κρατήρες. Αντιθέτως, η διάβρωση από οξύ, συνήθως προκαλεί μία χαρακτηριστική περικρυσταλλική προσβολή παρόλο που μετά από παρατεταμένη βύθιση σε οξύ, η προσβολή μπορεί να ομοιάζει αυτής του αλκάλειου.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Τα προϊόντα της εργασίας δεν θα πρέπει να αφήνονται σε κανένα μέρος όπου μπορούν να πιτσιλιστούν με διαλύματα επεξεργασίας.

EP13. Διάβρωση από το νερό ξεπλύματος

Εναλλακτική περιγραφή: Δημιουργία κρατήρων

Όταν τα αντικείμενα αφήνονται στη δεξαμενή πλυσίματος μετά το διαβρωτικό καθαρισμό, μπορεί να εμφανιστεί ένας τύπος διάβρωσης με δημιουργία κρατήρων. Συνήθως εκδηλώνεται σε ξεπλύματα με πολλές προσμίξεις, ειδικά εάν η παροχή του νερού ξεπλύματος είναι χαμηλή. Η εκδήλωσή του, επίσης, ενισχύεται από γαλβανικό ρεύμα που μπορεί να παράγεται όταν η βέργα με τα αντικείμενα είναι σε απευθείας επαφή με το υγρό χείλος της δεξαμενής πλυσίματος, αφού υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ της δεξαμενής και του αλουμινίου. Μπορεί επίσης να συμβεί εάν υπάρχουν σκόρπια ρεύματα στο εργοστάσιο.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Οι μπάρες με τα αντικείμενα θα πρέπει πάντα να είναι μονωμένες από τις δεξαμενές ξεπλύματος ώστε να αποφευχθούν τα ηλεκτρικά φαινόμενα. Η παρουσία μικρής ποσότητας νιτρικού οξέως (περίπου 0.5% κ.ο.) στο νερό πλύσης συχνά ελαχιστοποιεί ή εξαφανίζει το φαινόμενο.

Ελαττώματα του Ανοδικού Στρώματος

AA01. 'Καμένη' επιφάνεια

Εναλλακτική περιγραφή: Μεγάλοι αδρομερείς κρατήρες

Βασικά, το 'κάψιμο' είναι η καταστροφική τοπική ή γενική διάλυση του ανοδικού στρώματος, συνοδευόμενη από μερική, ή ολική διάλυση του κάτωθεν μετάλλου. Είναι μία σοβαρή περίπτωση υπερθέρμανσης, όπου το 'κάψιμο' είναι αποτέλεσμα των συνθηκών ανοδίωσης, κατά τις οποίες δεν απομακρύνεται επαρκής θερμότητα, ώστε η ταχύτητα διάλυσης να μην είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα σχηματισμού του οξειδίου. Αρχικά, το 'κάψιμο' είναι τοπικό, αφού αρχίζει σε ένα αδύνατο σημείο του ανοδικού στρώματος. Αλλά, αυτή η τοπική προσβολή συχνά ακολουθείται από διάλυση μιας περιοχής γύρω από αυτό το αρχικό σημείο 'καψίματος'. Αυτό έχει την τάση να συμβαίνει κυρίως στα κράματα με υψηλή περιεκτικότητα σε χαλκό, όταν υπάρχουν μεγάλα διαμεταλλικά σωματίδια, που μπορούν γρήγορα να προσβληθούν και να διαλυθούν. 'Κάψιμο', επίσης, μπορεί να γίνει όταν υπάρχει μια μη ανιχνεύσιμη προσθήκη βαρέως μετάλλου στο προς ανοδίωση αντικείμενο. Μπορεί, επίσης, να συμβεί κατά την παραγωγή ανοδικών στρωμάτων μεγάλου πάχους, αν κατά τη διάρκεια της διεργασίας αποκαλυφθεί μέρος της επιφάνειας που είχε μονωθεί (με λάκα ή ταινία επικάλυψης) προκειμένου να μην ανοδιωθεί.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

1. Βεβαιωθείτε ότι υπάρχει επαρκής και ομοιογενής ανάδευση στο λουτρό, και ότι τα ακροφύσια αέρα δεν εμποδίζονται.
2. Βεβαιωθείτε ότι δεν υπάρχουν προσμίξεις άλλου μετάλλου.
3. Ελέγξτε ότι η θερμοκρασία του λουτρού είναι σωστή με κάποιο όργανο διαφορετικό αυτού που χρησιμοποιείτε για τον έλεγχο/ρύθμιση των συνθηκών του λουτρού.
4. Βεβαιωθείτε ότι κάθε αντικείμενο έχει επιφάνεια επαφής με το πλαίσιο διευθέτησης αρκετά μεγάλη, ώστε να μπορεί να περνάει το ρεύμα που απαιτείται, για να μπορέσει το αντικείμενο να ανοδιωθεί, Αυτό μπορεί να είναι μία αιτία προβλημάτων, όταν το πλαίσιο είναι από τιτάνιο.

5. Ελέγξτε εάν κάποια ταινία ή λάκα επικάλυψης δεν είναι καλά προσκολλημένη, και ότι δεν υπάρχουν αδύνατα σημεία πρόσφυσης.
6. Ρυθμίστε την παροχή ρεύματος. Μην τοποθετείτε αντικείμενα στη δεξαμενή με πραγματική τάση μεγαλύτερη των 6 volt.
7. Όταν ανοδιώνονται κράματα αλουμινίου με υψηλή περιεκτικότητα σε χαλκό, με στόχο την παραγωγή ανοδικού στρώματος μεγάλου πάχους, μπορεί να είναι επιθυμητό να δημιουργηθεί πρώτα μία λεπτή στοιβάδα πάνω στα αντικείμενα, αυξάνοντας την πυκνότητα του ρεύματος περίπου στα 10 - 15 A/ft², για μία περίοδο μέχρι 5 λεπτών, και μετά κρατώντας σταθερή αυτή την πυκνότητα ρεύματος για 5 - 10 λεπτά, πριν αυξηθεί στην τιμή που απαιτείται. Έχει βρεθεί ότι η χρήση παλμικού ρεύματος βοηθάει στην αποφυγή “καψίματος” σε κράματα με υψηλή περιεκτικότητα σε χαλκό.

AA02. Τελική επιφάνεια καλυμμένη με πολύ μικρούς κρατήρες

Εναλλακτική περιγραφή: Στίγματα μορφής ακίδων

Αυτό το ελάττωμα έχει τη μορφή λεπτομερών κρατήρων κατανεμημένων σε όλη την επιφάνεια του αντικειμένου, παρόλο που θα έχουν την τάση να είναι πιο εμφανής στις άκρες και σε άλλες περιοχές υψηλής πυκνότητας ρεύματος. Αυτού του τύπου οι κρατήρες παρουσιάζονται κυρίως λόγω της ύπαρξης μικρών ποσών χλωρίου στον ηλεκτρολύτη. Είναι πιθανό να εμφανιστούν εκεί όπου το νερό ύδρευσης είναι σκληρό, δηλ. περιέχει άλατα, όπως χλωριούχο νάτριο, καθώς και υψηλό ποσοστό άλλων διαλυμένων ουσιών. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι το αποτέλεσμα τυχαίας ρύπανσης του λουτρού από ιόντα χλωρίου, ή από υδροχλωρικό οξύ.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Το χλώριο είναι ιδιαίτερα δύσκολο να απομακρυνθεί από τους ηλεκτρολύτες, αφού τα μόνα αδιάλυτα άλατα χλωρίου είναι αυτά του μολύβδου και του αργύρου. Συνήθως, η πιο συμφέρουσα λύση από άποψη κόστους είναι να εκκενωθεί ο ηλεκτρολύτης στη μονάδα κατεργασίας εκροής, και να αναπληρωθεί με νέο διάλυμα. Πάντως, μπορεί να είναι σημαντικό να βρεθεί η προέλευση των ιόντων χλωρίου, π.χ. τυχαία μόλυνση, ή χρήση νερού, για αραίωση, με υψηλή συγκέντρωση σε χλώριο.

AA03. Διαφανής μεμβράνη χρωμίου

Εναλλακτική περιγραφή: Η μεμβράνη χρωμίου δεν είναι γκρι.

Αυτό δεν είναι ελάττωμα με την αυστηρή έννοια, αλλά αποτελεί, μερικές φορές, αφορμή έντονων αντιπαραθέσεων με το προσωπικό Ασφάλειας Ποιότητας (Quality Assurance) του πελάτη. Τα ανοδικά στρώματα που παράγονται με ηλεκτρολύτες χρωμικού οξέως ποικίλλουν στο χρώμα, ανάλογα με το κράμα που χρησιμοποιείται, αλλά συνήθως είναι αδιαφανή, χρώματος γκρι, αλλά μπορούν να είναι είτε σκοτεινά, είτε φωτεινά, ή ακόμη να έχουν κιτρινωπή, ή πρασινωπή χροιά, ανάλογα με το κράμα. Πάντως, η αδιαφάνεια του στρώματος μπορεί να ποικίλλει από σχεδόν διαφανής, μέχρι σχετικά αδιαφανής.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Εάν η συγκέντρωση θειικών ανιόντων είναι κάτω από 0.10 g/l ή πάνω από 0.30 g/l, το παραγόμενο ανοδικό στρώμα μπορεί να είναι μόνο διαφανές. Ελέγξτε τη συγκέντρωση θειικών ανιόντων στον ηλεκτρολύτη, και ρυθμίστε την ώστε να είναι στην παραπάνω περιοχή. Εάν η συγκέντρωση σε θειικά ανιόντα είναι πολύ υψηλή, προσθέστε υδροξείδιο του βαρίου, τόσο όσο απαιτείται θεωρητικά για να μειώσει τα θειικά ανιόντα σε 0.15 - 0.20 g/l.

AA04. Σπασίματα στο ανοδικό στρώμα

Εναλλακτική περιγραφή: Ρωγμές στο ανοδικό στρώμα

Η εμφάνιση των σπασιμάτων (ρωγμών) στο ανοδιωμένο αντικείμενο φαίνονται άμεσα, ειδικά εάν κάποιος τις κοιτάξει με το προσπίπτον φως να πέφτει πάνω στην ανοδιωμένη επιφάνεια από

χαμηλή γωνία. Οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμική διαστολή και η ελαστικότητα του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερες αυτών του ανοδικού στρώματος.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Δεν υπάρχει τρόπος να αποφευχθεί εντελώς αυτό το ελάττωμα, αλλά τα επόμενα δίνονται σαν κατευθυντήριες γραμμές, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το πρόβλημα.

1. Τα λεπτά στρώματα έχουν μικρότερη τάση να σπάζουν απ'ότι τα παχιά. Για τους ανακλαστές υπέρυθρης ακτινοβολίας, το πάχος του στρώματος θα πρέπει να είναι της τάξεως 2 - 3 μm .
2. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία ανοδίωσης, τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα εμφάνισης σπασιμάτων.
3. Όσο υψηλότερη είναι η πυκνότητα ρεύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα εμφάνισης σπασιμάτων.
4. Κατά την παραγωγή ανοδικών στρωμάτων μεγάλου πάχους σε εξαρτήματα, οι αιχμηρές γωνίες και οι εσοχές είναι πολύ πιθανόν να οδηγήσουν στη δημιουργία σπασιμάτων. Ο όγκος του ανοδικού στρώματος είναι μεγαλύτερος από αυτόν του μετάλλου από το οποίο δημιουργείται το οξειδίο.
5. Τα ανοδικά στρώματα που έχουν σφραγιστεί σε κερί, λανολίνη, ή κατάλληλα πολυμερή έχουν μικρότερη προδιάθεση για σπασίματα από αυτά που έχουν σφραγιστεί με νερό.
6. Ένα τελικό σύντομο ξέπλυμα σε ζεστό νερό (περίπου 40°C) επίσης βοηθάει στην ελαχιστοποίηση δημιουργίας σπασιμάτων.

AA05. Θαμπή εμφάνιση

Εναλλακτική περιγραφή: Θαμπό στρώμα

Απώλεια στιλπνότητας μετά την ανοδίωση, ειδικά όταν το αντικείμενο έχει βυθισθεί σε γυαλιστικό, μπορεί να συμβεί από διάφορες αιτίες. Μία από αυτές είναι η παρουσία βαρέων μετάλλων στον ηλεκτρολύτη, σε αρκετά χαμηλά επίπεδα. Το πρώτο βήμα είναι να ελεγχθεί ότι το πάχος του στρώματος είναι το σωστό και ότι το υλικό είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Επί προσθέτως, εάν έχει συμβεί μόλυνση με σίδηρο, θα παράγει μία μαλακή μεμβράνη, ακόμα και με τις σωστές συνθήκες ανοδίωσης. Άλλα βαρέα μέταλλα, όπως Cu, Mn και Ni, φαίνεται ότι έχουν παρόμοια επίδραση. Υπάρχει πάντα μία απώλεια στιλπνότητας στην ανοδίωση, αλλά καθώς η πυκνότητα ρεύματος αυξάνει πάνω από περίπου 1.0 A/dm² (9 A/ft²), το φαινόμενο γίνεται πολύ πιο αισθητό.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Εάν υπάρχει υποψία μόλυνσης του ηλεκτρολύτη σαν αιτία της απώλειας λάμψης στην ανοδίωση, το πρώτο βήμα είναι η ανάλυση του ηλεκτρολύτη για τον εντοπισμό βαρέων μετάλλων, όπως Cu, Fe, Mn, Ni. Εάν αυτά είναι παρόντα σε ποσοστά που ξεπερνούν τα 50 p.p.m. τότε είναι πιθανόν η παρουσία τους να είναι η αιτία της απώλειας λάμψης στην ανοδίωση. Η άμεση αποτελεσματική θεραπεία είναι να ετοιμαστεί αμέσως νέο διάλυμα ηλεκτρολύτη θεικού οξέως. Πάντως, η πηγή προέλευσης των βαρέων μετάλλων πρέπει να εντοπισθεί. Μερικά διαβαθμισμένα διαλύματα θεικού οξέως είναι μολυσμένα με σίδηρο, οπότε πρέπει να ορίζεται περιεκτικότητα σε σίδηρο < 20 p.p.m. στο οξύ.

Εάν η μόλυνση προκύπτει κατά την επεξεργασία του αντικειμένου, π.χ. διάλυση του χαλκού στη σειρά κραμάτων 2000 τότε ο χαλκός θα πρέπει να απομακρύνεται με ένα σύστημα χημικού καθαρισμού, ή με ανοδική διάλυση. Σημειώστε ότι η θαμπή επιφάνεια μπορεί να οφείλεται στο εσφαλμένο πάχος του στρώματος, ή σε λάθος μεταλλουργική επεξεργασία του υλικού.

AA06. Απώλεια λάμψης

Εναλλακτική περιγραφή: Μερική απώλεια στιλπνότητας

Μπορεί να βρεθεί ότι κάποια αντικείμενα δείχνουν μία διακριτή απώλεια λάμψης κατά την ανοδίωση, μεγαλύτερη από αυτή την ελαφρά απώλεια που πάντα παρατηρείται σαν συνέπεια της ανοδίωσης. Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν η πυκνότητα ρεύματος κατά την ανοδίωση είναι σημαντικά υψηλότερη από το κανονικό, δηλ. υψηλότερη περίπου από 1.0 A/dm². Αυτό μπορεί,

επίσης, να συντελέσει σε στρώματα παχύτερα από το κανονικό, που μειώνουν ακόμη περισσότερο τη λάμψη. Συνήθως, συμβαίνει σε μονάδες που χρησιμοποιούν σταθερή τάση ανοδίωσης. Εάν επιλεχθεί λάθος τάση, αυτό μπορεί να συντελέσει σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος, που έχει σαν αποτέλεσμα την ανίσχυρη λάμψη, ακόμα και όταν λαμβάνεται το σωστό πάχος ανοδικού στρώματος. Συνήθως, παράγει ένα στρώμα παχύτερο από αυτό που απαιτείται, που συντελεί στην περαιτέρω απώλεια λάμψης.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Μετρήστε το εμβαδό της επιφάνειας που ανοδιώνεται, και διαβάστε την ένδειξη του αμπερόμετρου. Με βάση αυτά, υπολογίστε την πυκνότητα του ρεύματος, και ελέγξτε εάν είναι η σωστή. Εάν το εμβαδόν δεν είναι γνωστό ή δεν μπορεί να μετρηθεί ακριβώς, χαμηλώστε την τάση. Ακόμη, βεβαιωθείτε ότι τα προς ανοδίωση αντικείμενα δεν έχουν φορτωθεί σε λουτρό με το κύκλωμα σε λειτουργία. Γενικά, οι χαμηλές πυκνότητες ρεύματος ευνοούν τη δημιουργία στίλπνου ανοδικού στρώματος, όπως επίσης και οι υψηλές θερμοκρασίες ηλεκτρολύτη (μέσα σε κάποια όρια), αλλά σε αυτή την περίπτωση, το στρώμα γίνεται πιο μαλακό, εκτός κι αν χρησιμοποιηθεί μικρότερη συγκέντρωση ηλεκτρολύτη.

ΑΑ07. ‘Αλατισμένη’ επιφάνεια

Εναλλακτική περιγραφή: Καθίζηση αλάτων αλουμινίου

Η επεξεργασία της ανοδίωσης περιλαμβάνει τη μετατροπή του μετάλλου σε οξείδιο με πέρασμα συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος. Το ένα τρίτο των ατόμων αλουμινίου που κινούνται από την άνοδο προς την κάθοδο δεν μετατρέπονται σε οξείδιο, και διαλύονται στον ηλεκτρολύτη. Υπάρχει, επίσης, και μία μικρή ποσότητα οξειδίου που επαναδιαλύεται στον ηλεκτρολύτη κατά την επεξεργασία. Οι περισσότερες μονάδες, είτε διατηρούν τη συγκέντρωση αλουμινίου σταθερή, και μέσα σε μία σταθερή περιοχή, ή απορρίπτουν μέρος, ή ολόκληρο τον ηλεκτρολύτη, όταν έχει φθάσει μία μέγιστη ποσότητα, π.χ. ένα όριο των 15 g/l για 165 g/l θεικού οξέως.

ΑΑ08. Κρατήρες λόγω γαλβανικού στοιχείου

Εναλλακτική περιγραφή: Φινίρισμα με σημειακούς κρατήρες

Το αντικείμενο μπορεί να κρατείται στη δεξαμενή ξεπλύματος μετά την ανοδίωση και πριν τη βαφή και το σφράγισμα. Εάν η δεξαμενή είναι κατασκευασμένη από μαλακό χάλυβα, υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ αυτής και του αλουμινίου του αντικειμένου. Το αραιό θεικό οξύ που υπάρχει στο νερό ξεπλύματος μετά την ανοδίωση είναι καλός αγωγός του ρεύματος. Εάν η ράβδος στην οποία μεταφέρονται τα ανοδιωμένα αντικείμενα είναι σε απ'ευθείας επαφή με το βρεγμένο χείλος της δεξαμενής ξεπλύματος, μπορούν να σχηματιστούν κρατήρες στο ανοδιωμένο στρώμα.

Η πρόελευση του ελαττώματος αυτού μπορεί να είναι δύσκολο να αναγνωρισθεί, αφού θα έχει κάποιες ομοιότητες με τη διάβρωση από το νερό ξεπλύματος, μετά το χημικό καθαρισμό, ειδικά επειδή οι κρατήρες εισχωρούν μέσα στο μέταλλο. Οι πρόελευση των κρατήρων του ανοδικού στρώματος θα πρέπει να επαληθευθεί παρατηρώντας εάν οι κρατήρες απουσιάζουν μετά το πλύσιμο και πριν την ανοδίωση, και παρουσιάζονται μετά την ανοδίωση.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η βασική θεραπεία είναι να βεβαιωθεί ότι οι ράβδοι των αντικειμένων και τα κρεμαστάρια είναι ηλεκτρικά μονωμένα από τη δεξαμενή. Αυτό επιτυγχάνεται κανονικά, βάζοντας πλαστική μονωτική ταινία στην κορυφή του αντικειμένου, ή στις δεξαμενές ξεπλύματος, στην περιοχή όπου εφάπτονται οι ράβδοι κίνησης των αντικειμένων.

ΑΑ09. Κατά τόπους/περιοχές διαφοροποιημένη εμφάνιση της επιφάνειας

Εναλλακτική περιγραφή: Χαρακτηριστικά σημάδια ανεπαρκούς έκπλυσης

Όταν το αντικείμενο ξεπλένεται ανεπαρκώς, μπορεί να παρουσιάσει κατά τόπους ανομοιομορφία στην εμφάνιση μετά το σφράγισμα. Η ανομοιομορφία αυτή έχει συνήθως μία τοπογραφία που δείχνει την πιθανή κατεύθυνση της ξήρανσης στο αντικείμενο, από τη στιγμή που θα απομακρυνθεί από τη δεξαμενή ξεπλύματος. Όταν το αντικείμενο περάσει το στάδιο της βαφής, η

βαφή μπορεί να απουσιάζει ή το χρώμα να είναι αγνό γύρω από μικρές τρύπες ή άλλα σημεία όπου μπορεί να έχει μείνει οξύ. Το πρώτο ξέπλυμα μετά την ανοδίωση θα πρέπει να έχει pH γύρω στο 2.0, αλλιώς αποτίθεται στους πόρους υδροξείδιο του αλουμινίου, με αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη βαφή.

Η ανομοιόμορφη εμφάνιση μπορεί επίσης να είναι αποτέλεσμα αδύνατης στίλβωσης, ανεπαρκούς επιφανειακού καθαρισμού, ή κακώσεων από ξήρανση κατά τον χημικό καθαρισμό.

AA10. Εμφάνιση λεπτόκοκκου επιφανειακού στρώματος

Εναλλακτική περιγραφή: Διαφοροποιημένες λευκές περιοχές

Αυτό το ελάττωμα εμφανίζεται συνήθως κατά τόπους, και μπορεί να βρεθεί μόνο σε αντικείμενα που κρατούνται από 1-2 διατάξεις στήριξης. Σε πιο προχωρημένες περιπτώσεις, η λεπτόκοκκη εμφάνιση θα είναι γενική, αλλά σε κάποιες περιοχές θα έχει την τάση να είναι εντονότερη από άλλες. Μπορεί να απομακρυνθεί (μερικώς ή ολικώς) τρίβοντάς το ελαφρά με ένα υγρό ρούχο, αλλά στην περίπτωση που το αντικείμενο εκτεθεί στην ατμόσφαιρα (εξωτερική χρήση) η λεπτόκοκκη εμφάνιση επιστρέφει. Το λεπτόκοκκο ανοδικό στρώμα προκύπτει κυρίως από τοπική υπερθέρμανση και την προσβολή του στρώματος από τον ηλεκτρολύτη, συχνά σαν αποτέλεσμα της ανεπαρκούς ανάδευσης και/ή την υψηλή θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη [19]. Σε αυτό συντελεί και το γεγονός ότι όλο το ρεύμα που περνάει μετατρέπεται σε θέρμανση, στη διεπιφάνεια μεταξύ του οξειδίου και του ηλεκτρολύτη.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Εάν παράγονται λεπτόκοκκα ανοδικά στρώματα είναι απαραίτητο πρώτα να ελεγχθεί ποια από τα παρακάτω συμβαίνουν. Έχοντας κάνει αυτό, λαμβάνεται μέριμνα και για την προτεινόμενη διόρθωση.

1. Εάν παρατηρούνται μόνο μετά από συγκεκριμένες εργασίες, μπορεί να οφείλονται στην ενδεχόμενα πυκνή διάταξη των αντικειμένων στο πλαίσιο στήριξης, και η θερμότητα που παράγεται από το ηλεκτρικό ρεύμα δεν μπορεί άμεσα να διασκορπισθεί.
2. Εάν το λεπτόκοκκο ανοδικό στρώμα παρατηρείται μόνο σε μία από τις δύο διατάξεις στήριξης, ή εάν περιορίζεται μόνο σε λίγα εξαρτήματα, η αιτία μπορεί να είναι η ανεπαρκής ή ανομοιογενής ανάδευση του ηλεκτρολύτη.
3. Εάν το λεπτόκοκκο ανοδικό στρώμα είναι γενικό φαινόμενο, η αιτία είναι συνήθως η πολύ υψηλή θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη, οπότε η θερμοκρασία του λουτρού θα πρέπει να ελέγχεται χρησιμοποιώντας ένα όργανο ακριβείας, και όχι αυτό που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του λουτρού, που μπορεί να μην λειτουργεί σωστά.

AA11. Μαλακό ανοδικό στρώμα

Εναλλακτική περιγραφή: Χαμηλή σκληρότητα ή αντίσταση στην τριβή

Όταν τα ανοδικά στρώματα δοκιμάζονται για φθορά / αντίσταση στην τριβή, μπορεί οι τιμές που προκύπτουν σε αυτές τις ιδιότητες να είναι χαμηλές. Περαιτέρω έρευνα μπορεί να αποκαλύψει ότι η μαλακότητα περιορίζεται στα εξώτερα 5 - 10 μm, ειδικά με ανοδικά στρώματα πάχους > 20 μm.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Σκληρή Ανοδίωση: Προβλήματα λόγω χαμηλής σκληρότητας / αντίστασης στην τριβή προκύπτουν κυρίως στην σκληρή ανοδίωση. Στις Η.Π.Α. ανιχνεύεται σαν υψηλές απώλειες βάρους με το Taber Abraser Test, ενώ σε άλλες χώρες βρίσκεται με βάση τις χαμηλές τιμές (σε επίπεδο micron) της σκληρότητας, ή με βάση άλλα κριτήρια, που σε αυτή την περίπτωση δεν θα ικανοποιούνται. Η κύρια αιτία της χαμηλής σκληρότητας και αντίσταση στην τριβή / φθορά είναι η έλλειψη επαρκούς ανάδευσης κατά την ανοδίωση, κυρίως σε συνδυασμό με την πολύ υψηλή θερμοκρασία ή συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη [19]. Η πυκνή διάταξη των αντικειμένων στο φορέα στήριξης μπορεί επίσης να αποτελέσει αιτία για αυτό το ελάττωμα.

Ανοδίωση Αλουμινίου Οικοδομικής Χρήσης: Το πρόβλημα, πάντως, δεν περιορίζεται στη σκληρή ανοδίωση, αφού έχει βρεθεί ότι ακόμη και σε πάχος ανοδικού στρώματος 20 μm, στα οικοδομικά υλικά από αλουμίνιο, καθώς το πάχος ξεπερνάει τα 15 μm, αναπτύσσεται σταδιακά ένα εξωτερικό

στρώμα, καθώς το πάχος αυξάνει. Αυτό μπορεί να συντελέσει στην ανάπτυξη μίας άσχημης λεπτόκοκκης εμφάνισης όταν το αντικείμενο εκτίθεται στις καιρικές συνθήκες. Αυτό έχει βρεθεί ότι συμβαίνει σε θερμοκρασία ηλεκτρολύτη 21°C. Η κύρια διόρθωση που πρέπει να γίνει είναι πρώτα να μειωθεί η θερμοκρασία κατά 5°C, και να επιβεβαιωθεί ότι γίνεται ομοιογενής και δυνατή ανάδευση σε ολόκληρο το λουτρό.

AA12. Ανεπιθύμητο πάχος ανοδικού στρώματος

Εναλλακτική περιγραφή: Ανοδικό στρώμα πολύ λεπτό / πολύ παχύ

Το κείμενο που ακολουθεί εξετάζει τις αιτίες για τις οποίες δεν επιτεύχθηκε το σωστό πάχος στο ανοδικό στρώμα. Ο πιο συνηθισμένος λόγος απόρριψης είναι η δημιουργία ανοδικού στρώματος μικρότερου του αναμενόμενου, αν και μπορεί να υπάρχει άνω όριο, για τα μηχανικά εξαρτήματα κυρίως, το οποίο δεν θα πρέπει να υπερβαίνεται. Έτσι, ένα μεγάλο πάχος μπορεί επίσης να οδηγήσει στην απόρριψη.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Οι αιτίες για το ανεπιθύμητο πάχος του ανοδικού στρώματος είναι:

1. Αδύνατες επαφές με τη διάταξη στήριξης από έλλειψη σφιξίματος στα σημεία επαφής, έχοντας σαν αποτέλεσμα το μικρότερο πάχος, λόγω της ανεπαρκούς παροχής ρεύματος. Ελέγξτε ότι οι σφιγκτήρες και γενικά οι συνδέσεις των αντικειμένων πάνω στο φορέα στήριξης δεν έχουν χάσει την ελαστικότητά τους.
2. Οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη (τοπικές ή γενικές), μπορούν να προκαλέσουν μερική επαναδιάλυση της ανοδικής στιβάδας [20] και να δώσουν διακυμάνσεις στο πάχος της στιβάδας, ανάμεσα σε διαφορετικές παρτίδες, ή ανάμεσα σε ένα φορτίο (δηλ. αντικείμενα στο ίδιο πλαίσιο στήριξης) και στο επόμενο [21], [22]. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη και η ανάδευση θα πρέπει να ελέγχονται ώστε να καθίσταται σίγουρο ότι είναι σωστές. Ακόμη, ελέγξτε μήπως τα αντικείμενα είναι πυκνά διατεταγμένα μεταξύ τους, μην επιτρέποντας έτσι την αποτελεσματική ανάδευση.
3. Η ατελής απογύμνωση των πλαισίων στήριξης μετά από κάθε κύκλο ανοδίωσης, ειδικά μετά από *σκληρή* ανοδίωση και όταν τα πλαίσια είναι από τιτάνιο, θα αφήσει ένα υπόλοιπο στοιβάδας οξειδίου, με σχετικά υψηλό συντελεστή ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μικρή παροχή ρεύματος σε επόμενες ανοδιώσεις και επομένως την παραγωγή λεπτότερης στοιβάδας οξειδίου στο αντικείμενο. Τα σημεία του μεταλλικού πλαισίου που εφάπτονται με το αντικείμενο θα πρέπει να ελέγχονται μετά την αφαίρεση του οξειδίου, προκειμένου να διαπιστωθεί ότι η απογύμνωσή τους από το οξύ έχει ολοκληρωθεί.
4. Το αντικείμενο δεν έχει ανοδιωθεί για το χρόνο που απαιτείται, με βάση το προδιαγεγραμμένο πάχος. Εάν υποπτεύεστε ότι συμβαίνει αυτό, ελέγξτε το πάχος του ανοδικού στρώματος που λαμβάνεται μετά από το συγκεκριμένο χρόνο, και μεταβάλετε το χρόνο ανοδίωσης όπως πρέπει.
5. Το αντικείμενο δεν έχει ανοδιωθεί με τη σωστή πυκνότητα ρεύματος, δηλ. ο χρόνος είναι σωστός, αλλά όχι και το πάχος του ανοδιωμένου στρώματος. Το τελευταίο, είναι ανάλογο της πυκνότητας ρεύματος και του χρόνου της ανοδίωσης, οπότε και τα δύο μαζί μπορεί να συντελούν στην παραγωγή ανεπιθύμητου πάχους οξειδίου.
6. Το ανοδιωμένο κράμα δεν είναι αυτό που προβλέπεται στην παραγγελία ή το σχεδιασμό.
7. Η θωράκιση του αντικειμένου λόγω της πυκνής διάταξης των αντικειμένων μπορεί να οδηγήσει σε μεταβλητό πάχος ανοδικού στρώματος στο αντικείμενο, όταν προσδιορίζεται πάχος στιβάδας > 15μm. Με καλύτερη τοποθέτηση των αντικειμένων στα πλαίσια διάταξης, και με αποφυγή χρήσης πολλαπλών σειρών στο πλαίσιο, το πρόβλημα, πιθανότατα, θα διορθωθεί.

AA13. Ανομοιόμορφο στρώμα λόγω μη καθαρισμού δακτυλικών αποτυπωμάτων

Εναλλακτική περιγραφή: Σημάδια από δάχτυλα

Αυτό σχετίζεται στενά με το αντίστοιχο ελάττωμα που περιγράφηκε στο κεφάλαιο του χημικού / ηλεκτροχημικού καθαρισμού. Προέρχεται από επαφή των αντικειμένων με τον ανθρώπινο ιδρώτα, στα δάχτυλα και τις παλάμες, λόγω του γλωρίου στην εφίδρωση. Όταν η ανομοιομορφία

προέρχεται από αυτή την αιτία, θα υπάρχει μία διαφοροποιημένη απόκριση στο ηλεκτρικό πεδίο, λόγω του ανεπαρκούς καθαρισμού της επιφάνειας.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η κύρια θεραπεία είναι να διασφαλιστεί ότι οι χειριστές δεν μεταχειρίζονται τα αντικείμενα με γυμνά χέρια. Εάν γίνεται αυτό, τότε πάντα υπάρχει κίνδυνος για σημάδια από δάκτυλα. Δεν υπάρχει τρόπος να απομακρυνθούν τα σημάδια από αυτή τη διάβρωση αφού συμβούν.

Αστοχίες κατά τη Βαφή

ED01. Οξινή Εκχύλιση

Εναλλακτική περιγραφή: Αποχρωματισμένες (λευκές) Περιοχές

Αφού τα αντικείμενα έχουν βαφεί και σφραγιστεί (στεγανοποιηθεί), μπορεί να παρατηρηθούν μικρές περιοχές που δεν έχουν βαφτεί, ή υπάρχουν σκιές αποχρωματισμένες. Αυτές οι περιοχές είναι συνήθως το αποτέλεσμα από την τοπική παγίδευση του ηλεκτρολύτη. Συνηθισμένα παραδείγματα είναι μικρές, θαμπές τρύπες σαν μπάλωμα, αυλακώσεις, κοίλες περιοχές, γερμένες άκρες, καρφωτές ενώσεις, κλπ, από τις οποίες ο ηλεκτρολύτης είναι δύσκολο να φύγει με κανονικό πλύσιμο. Το κρατημένο οξύ δίνει ένα χαμηλό pH που εμποδίζει τη βαφή.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η πιο αποτελεσματική θεραπεία είναι καλυφθούν οι θαμπές τρύπες με τη χρήση καλυπτικών μέσων (βουλωμάτων). Με τις αυλακώσεις, τις εσοχές, κλπ, η καλύτερη λύση είναι να πείσει κάποιος τον πελάτη να αλλάξει το σχέδιο, εάν αυτό είναι δυνατό, ώστε να υπάρχουν τρύπες (οπές) αποχέτευσης. Διαφορετικά, η μόνη δράση που απομένει είναι να αυξηθεί ο χρόνος και η αποτελεσματικότητα του πλυσίματος, με δυνατή ανάδευση. Η διάχυση του παγιδευμένου ηλεκτρολύτη στο νερό πλυσίματος μπορεί να βοηθηθεί σε κάποιες περιπτώσεις με προσθήκη 0.01 έως 0.1% ανθρακικού αμμώνιου.

ED02. Χρώμα πολύ ασθενές ή πολύ σκοτεινό

Εναλλακτική περιγραφή:

Όταν το αντικείμενο βάφεται, υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο ότι το χρώμα που παράγεται είναι είτε σκοτεινότερο είτε ωχρότερο από την απόχρωση που έχει ζητηθεί, δηλ. το χρώμα είναι είτε πολύ ασθενές, είτε πολύ σκοτεινό. Αυτό απλά σημαίνει ότι υπάρχει διαφοροποίηση (ποικιλομορφία) στο ίδιο βασικό χρώμα.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Οι διαφοροποιήσεις στο χρώμα υποδιαιρούνται σε (i) διαφοροποιήσεις στο χρώμα ανάμεσα σε αντικείμενα ενός συγκεκριμένου φορέα στήριξης, ή (ii) διαφοροποιήσεις στο χρώμα ανάμεσα στη μία παρτίδα και στην επόμενη.

1. Εάν υπάρχουν μόνο ένα ή δύο αντικείμενα ανοιχτού χρώματος, αυτό οφείλεται κυρίως σε χαλαρά σημεία κράτησης.
2. Εάν υπάρχουν διακυμάνσεις στο χρώμα μέσα στην παρτίδα, αυτό οφείλεται κυρίως στο άνισο πάχος του φιλμ σαν αποτέλεσμα της ανάπτυξης του φιλμ σε περιοχές υψηλής πυκνότητας έντασης ρεύματος. Αυτό το χαρακτηριστικό, συχνά συνδέεται με τη χρήση δεξαμενών με επένδυση μολύβδου, όπου η επένδυση είναι η κάθοδος. Αυτό μπορεί να ελαχιστοποιηθεί εμφράττωντας τη μολύβδινη επένδυση με πλαστικό προστατευτικό κάλυμμα και προσαρμόζοντας ξεχωριστές καθόδους.
3. Διαφοροποιήσεις στο χρώμα μεταξύ των παρτίδων ανέρχονται όταν υπάρχουν διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη, είτε τοπικά, είτε μεταξύ μιας παρτίδας και της επόμενης. Η θερμοκρασία του λουτρού πρέπει να ελέγχεται, λαμβάνοντας υπ' όψη τις καταγραμμένες θερμοκρασίες από προηγούμενες παρτίδες βαφής.
4. Η διαφοροποίηση στο χρώμα μπορεί να ανέρχεται όταν ο βαθμός ανάδευσης με αέρα δεν είναι σταθερός κατά την ανοδίαση, αφού η χαμηλή ανάδευση δίνει ένα μαλακότερο και πιο πορώδες στρώμα.

- Εάν οι συνθήκες βαφής, δηλ. ο χρόνος βαφής, το pH του λουτρού, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση της βαφικής ύλης δεν ελέγχονται, ώστε να είναι σε μία περιορισμένη περιοχή, τότε θα συμβούν διαφοροποιήσεις στο χρώμα.

ED03. Διάβρωση Γαλβανικού Στοιχείου υπό Μορφή Μικρών Κρατήρων

Εναλλακτική περιγραφή: Λευκές Κηλίδες

Μετά τη βαφή, τα αντικείμενα μπορεί να εμφανίσουν άσπρες κηλίδες, που συνήθως είναι πιο σαφή στις άκρες και τις γωνίες. Είναι πιθανότερο να συμβεί στη μαύρη βαφή, αλλά μπορεί επίσης να συμβεί με τις περισσότερες οργανικές βαφικές ύλες.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η πρωταρχική αιτία για αυτό το ελάττωμα είναι το χλώριο που υπάρχει στο λουτρό βαφής σαν ακαθαρσία της βαφικής ύλης. Πάντως το χλώριο από μόνο του δεν είναι η πρωτογενής αιτία των άσπρων κηλίδων. Αυτό το ελάττωμα μπορεί να προέρχεται από τις ακόλουθες πηγές:

- Από ρεύμα γαλβανικού στοιχείου που παράγεται από άμεση επαφή μίας μπάρας στήριξης και του υγρού χείλους της δεξαμενής βαφής από ανοξείδωτο ατσάλι.
- Από ρεύμα γαλβανικού στοιχείου που παράγεται μεταξύ του φορέα στήριξης από τιτάνιο, και των ανοδιωμένων εξαρτημάτων από αλουμίνιο.
- Από ρεύματα διασποράς στο εργοστάσιο, εάν η δεξαμενή βαφής δεν έχει κατάλληλα γειωθεί. Οι μπάρες στήριξης δεν θα πρέπει να κάνουν επαφή με το μεταλλικό χείλος της δεξαμενής βαφής, αλλά θα πρέπει να τοποθετηθεί ένα μονωτικό στρώμα μεταξύ της μπάρας στήριξης και της δεξαμενής.

Όταν χρησιμοποιούνται στηρικτικά πλαίσια από τιτάνιο, το πρόβλημα είναι πολύ πιθανότερο να συμβεί από το γαλβανικό ζευγάρι Τιτανίου / Αλουμινίου, οπότε η εφαρμογή ενός μικρού καθοδικού δυναμικού ανάμεσα στο πλαίσιο και στη δεξαμενή βαφής θα το εμποδίσει αυτό.

Το πρόβλημα είναι πάντα πιο οξύ στη μαύρη βαφή γιατί στη συγκέντρωση των 10 g/l υπάρχει πιο πολύ χλώριο, και οι προσθήκες που γίνονται αυξάνουν παραπάνω το περιεχόμενο χλωρίου. Εάν τίποτα από τα παραπάνω δε φέρει αποτέλεσμα, τότε ίσως να πρέπει να προετοιμαστεί καινούργιο λουτρό βαφής ώστε να διασφαλίσουμε χαμηλή συγκέντρωση χλωρίου.

ED04. Κακοχρωμία

Εναλλακτική περιγραφή: Λάθος Χρώμα

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του λουτρού βαφής, μπορεί να βρεθεί ότι το χρώμα που λαμβάνεται έχει αλλάξει. Δηλαδή, έχει γίνει πιο μπλε, πιο κόκκινο ή πιο πράσινο από το αρχικό χρώμα.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Εάν υπάρχει αλλαγή στα βασικά χρώματα που παράγονται, τότε ο ανοδιωτής είναι αναγκασμένος να ετοιμάσει ένα καινούργιο λουτρό βαφής. Ωστόσο, είναι σημαντικό να βρεθεί η αιτία αλλαγής χρώματος, γιατί εάν μείνει ανεξιχνίαστη, μπορεί να επανεμφανιστεί.

Αυτή η αιτία μπορεί να είναι μία από τις παρακάτω:

- Αντίδραση της χρωστικής με διαλυμένα άλατα που υπάρχουν όταν χρησιμοποιείται το νερό του δικτύου για το λουτρό βαφής. Η χρήση απιονισμένου νερού για το λουτρό προτιμάται για να αποφύγουμε αυτή την πιθανή πηγή ρύπανσης.
- Αποσύνθεση της χρωστικής από ζέστη και οξείδωση. Η πιο συνηθισμένη αιτία είναι η δυνατή ανάδευση με αέρα στο λουτρό.
- Παραγωγή αλάτων αλουμινίου στο λουτρό βαφής που δίνουν προϊόντα αντιδράσεων που αλλάζουν το χρώμα. Αυτή η αλλαγή μπορεί να συμβεί αργά και σταδιακά με λουτρά βαφής που χρησιμοποιούνται για μεγάλες περιόδους χωρίς να ανανεώνονται, καθώς το αλουμίνιο συσσωρεύεται σαν αποτέλεσμα της αντίδρασης βαφής.
- Τυχαίες προσμίξεις από τυχαίες πηγές ειδικά από άλατα βαρέων μετάλλων, π.χ. σίδηρος από σκουριά ή μεταφορά σιδηρούχου οξαλικού αμμωνίου.
- Μπορεί να έχει χρησιμοποιηθεί λάθος υλικό βαφής στην ετοιμασία στο λουτρό.

ED05. Ανομοιόμορφη Εμφάνιση

Εναλλακτική περιγραφή: Ανόμοιο χρώμα

Η ανομοιογένεια στο χρώμα είναι μία ένδειξη της μεταβλητότητας και είναι απαραίτητο να εξακριβωθεί εάν η ανομοιογένεια κάτω από το ανοδικό στρώμα, μέσα στο ανοδικό στρώμα, ή στην επιφάνειά του.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

1. Εάν βρεθεί ανομοιογένεια σε διαφορετικά μέρη του αντικειμένου ή σε μερικά αντικείμενα και όχι άλλα, είναι πιθανό ότι η αιτία είναι η έλλειψη επαρκούς καθαρισμού (βλ. Επιφανειακός Καθαρισμός - SC07. Ανομοιόμορφη εμφάνιση).
2. Εάν η διαδικασία καθαρισμού φαίνεται ικανοποιητική, εξετάζεται το ενδεχόμενο να οφείλεται σε κάψιμο από τις βούρτσες στίλβωσης, σε στρώματα οξειδίου του σπινελλίου, ή άλλα ελαττώματα που προέρχονται από προηγούμενα στάδια επεξεργασίας.
3. Εάν τα στάδια καθαρισμού και προεργασίας εμφανίζονται ικανοποιητικά, το πρόβλημα μάλλον προέρχεται από την ανοδίωση (βλ. Ελαττώματα Ανοδικού Στρώματος - Άνισο Πάχος).
4. Εάν το πρόβλημα είναι οι αποχρώσεις ενός χρώματος σε ένα αντικείμενο, αυτό μπορεί να είναι λόγω της άνισης κατανομής ρεύματος. Αυτό είναι πιθανό, ιδιαίτερα σε δεξαμενές με μολύβδινα τοιχώματα όπου θα υπάρχουν αποχρώσεις - συνήθως βαθύτερου χρώματος προς τα κάτω και προς τις άκρες του αντικειμένου.
5. Εάν χρησιμοποιείται ηλεκτρολυτικός χρωματισμός, τότε ανάγεται στην παρακάτω περίπτωση.

ED06. Φαινόμενο 'Ασπίδας' (Shielding) στον ηλεκτρολυτικό χρωματισμό

Εναλλακτική περιγραφή: Ανόμοιος χρωματισμός

Στον ηλεκτρολυτικό χρωματισμό 2 σταδίων, μπορεί κάποιες φορές να δημιουργηθεί φαινόμενο 'Ασπίδας'. Τυπικά, αυτό είναι όταν διάφορες σειρές αντικειμένων ή τα πλάγια των πλαισίων στήριξης και οι εξωτερικές σειρές παρεμποδίζουν μερικώς τις εσωτερικές σειρές από το χρωματισμό. Σε κατασκευασμένα εξαρτήματα, μπορεί να συμβεί το αντίστροφο, δηλαδή, μέρη του αντικειμένου κοντά στα ηλεκτρόδια μπορεί να χρωματίζονται με πιο βαθύ χρώμα, από αυτά που βρίσκονται μακρύτερα.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Αν και η τεχνολογία του ηλεκτρολυτικού χρωματισμού συνεχώς βελτιώνεται, δεν υπάρχει απλή θεραπεία σε αυτό. Το πρόβλημα της 'ασπίδας' έχει ελαχιστοποιηθεί από την ικανότητα δημιουργίας ανοδικού στρώματος του ηλεκτρολύτη και τη μεγαλύτερη ομοιογένεια χρώματος σαν αποτέλεσμα των αλλαγών στον τύπο και τη μορφή του ρεύματος που χρησιμοποιείται, ειδικά στην προεργασία στο λουτρό πριν το χρωματισμό. Αφού αυτά διαφέρουν από επεξεργασία και εξοπλισμό εταιρίας σε εταιρία, καλό είναι να συμβουλευτείται ο προμηθευτής.

Ωστόσο, οι βασικές αρχές που πρέπει να πληρούνται ώστε να διασφαλίζεται η ομοιογένεια του ανοδικού στρώματος στο πάχος και σε άλλες ιδιότητες, εφαρμόζουν επίσης στον ηλεκτρολυτικό χρωματισμό. Όπου υπάρχουν διάφορες σειρές από ελάσματα ή εξαρτήματα κατά μήκος της δεξαμενής, είναι πάντα δυνατή η παρεμπόδιση στο χρωματισμό λόγω θωράκισης ('ασπίδα') αυτών που βρίσκονται στις εσωτερικές σειρές από αυτά που βρίσκονται στις εξώτερες. Η εναλλαγή των σειρών με κατάλληλη στήριξη/συγκράτηση πάνω στα πλαίσια θα βοηθήσει στη μείωση του προβλήματος. Η θωράκιση παρατηρείται λιγότερο συχνά σε λεπτά στρώματα (δηλ. 15 μm ή λιγότερο) απ' ό,τι σε παχύτερα.

ED07. Θρύψαλα (spalling)

Εναλλακτική περιγραφή: Νιφάδες

Αυτό το ελάττωμα περιορίζεται στον ηλεκτρολυτικό χρωματισμό (2 σταδίων). Το χαρακτηριστικό του είναι ότι μικρές επιφάνειες από το ανοδικό στρώμα απολεπίζονται σε μορφή νιφάδων μετά τον ηλεκτρολυτικό χρωματισμό. Σε μερικές περιπτώσεις, αυτές οι νιφάδες μπορεί να μην είναι φανερές

αμέσως μετά το χρωματισμό, αλλά μπορούν να εμφανιστούν μετά μερικές μέρες, ή ακόμα και μήνες. Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι τα κράματα αλουμινίου - μαγνησίου (δηλ. τα κράματα της σειράς 5000) είναι πιο ευάλωτα σε αυτό το ελάττωμα απ' ό,τι τα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου-πυριτίου, της σειράς 6000.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η προέλευση αυτού του φαινομένου συνδέεται με την ταχύτητα ανάπτυξης δυναμικού, όταν αρχίζει η λειτουργία του χρωματισμού. Εάν παρατηρηθούν θρύψαλα, η ταχύτητα αύξησης του δυναμικού στο χρωματισμό, θα πρέπει να μειωθεί. Υπάρχουν διαθέσιμοι προγραμματιζόμενοι ανορθωτές που έχουν τη δυνατότητα να προγραμματίζουν την ταχύτητα αύξησης του δυναμικού σε οποιοδήποτε επιθυμητό επίπεδο, όπως επίσης να ελέγχουν το επίπεδο του δυναμικού, και το χρόνο χρωματισμού.

ED08. Εναπόθεση στην Επιφάνεια

Εναλλακτική περιγραφή: Διεσπαρμένο Ίζημα

Εάν τα αντικείμενα έχουν χρωματιστεί με ηλεκτρόλυση (2 σταδίων) και το pH είναι χαμηλό, το αποτιθέμενο μέταλλο (συνήθως κασσίτερος) θα αποτίθεται με μία ασαφή δομή στη επιφάνεια του ανοδικού στρώματος, αν και θα υπάρχει κάποιος χρωματισμός μέσα στο ανοδικό στρώμα. Αυτό το πρόβλημα συναντάται κυρίως με ηλεκτρολύτες κασσιτέρου, εξαιτίας του εσωτερικά χαμηλού pH (περίπου 1,5) και την υψηλή ικανότητα δημιουργίας ανοδικού στρώματος. Βασικά, το ίζημα στην επιφάνεια είναι αποτέλεσμα της απόθεσης του κασσίτερου στην επιφάνεια του ανοδικού στρώματος. Οι ηλεκτρολύτες Κοβαλτίου και Νικελίου δεν έχουν ιδιαίτερη τάση σε αυτό το ελάττωμα, αλλά μπορεί να συμβεί και με αυτούς, εάν το pH είναι χαμηλότερο από το κανονικό.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η κύρια αιτία είναι συνήθως πολύ υψηλό δυναμικό χρωματισμού ή πολύ παρατεταμένος χρόνος χρωματισμού. Αυτό το ελάττωμα μπορεί επίσης να συμβεί σε λουτρό που είναι εκτός ισορροπίας, στο ότι το περιεχόμενο θεικού οξέως ενός κασσιτερούχου ηλεκτρολύτη ξεπερνάει το όριο που συνίσταται από τον προμηθευτή. Αυτό μπορεί να χαμηλώσει, προσθέτοντας την ποσότητα υδροξειδίου του Βαρίου που χρειάζεται θεωρητικά για να σχηματιστεί θειικό βάριο.

ED09. Άβαφτα Στίγματα

Εναλλακτική περιγραφή: Καθαρά (χωρίς βαφή) μπαλώματα στην επιφάνεια

Τα αντικείμενα που παράγονται μερικές φορές έχουν γυμνές ή άβαφτες περιοχές σαν μπαλώματα. Αυτές είναι συνήθως κυκλικού ή ελλειψοειδούς σχήματος, και συμβαίνουν όταν παγιδεύεται αέρας κατά το χρωματισμό. Μπορούν να συμβούν στη συμβατική βαφή με οργανικές ενώσεις, αλλά είναι πιο πιθανό να συμβούν μετά την ηλεκτρολυτική βαφή (2 σταδίων). Σε αντίθεση με τα αχρωμάτιστα μπαλώματα που είναι αποτέλεσμα παγιδευμένου ηλεκτρολύτη, οι κατά τόπους άβαφτες περιοχές συνήθως βρίσκονται μακριά από τα μέρη όπου έχει παγιδευτεί ηλεκτρολύτης, και βρίσκονται συγκεκριμένα, πάνω ή κάτω από επιφάνειες, ή άλλες όψεις όπου μπορούν να σχηματιστούν θύλακες αερίου.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Αφού το βασικό πρόβλημα είναι η έγκλιση αέρα ή αερίων, η θεραπεία έγκειται στη διάταξη των αντικειμένων, ώστε να είναι προσαρτημένα στους φορείς στήριξης κατά τέτοιο τρόπο που να επιτρέπουν στο αέριο να φεύγει, συνήθως διατάσσοντας τα αντικείμενα σε κλίση, αλλά μπορεί να χρειαστεί να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις στα πλαίσια στήριξης. Εάν το πρόβλημα παραμένει, τότε καλό είναι να εξετάζεται εάν το πρόβλημα προέρχεται από τους θύλακες αερίου που σχηματίζονται κατά την ανοδίωση, που θα έχει παρόμοιο επακόλουθο. Το πάχος του στρώματος θα είναι μικρό εάν έχουν σχηματιστεί θύλακες αερίου.

ED10. Διάβρωση, λόγω αποκατάστασης γαλβανικού στοιχείου, κατά τη βαφή

Εναλλακτική περιγραφή: Άσπρες κηλίδες

Μετά τη βαφή, τα αντικείμενα μπορεί να βρεθεί ότι έχουν άσπρες κηλίδες, που είναι, συνήθως, πιο τονισμένες στις άκρες, τις γωνίες, ή τις ατέλειες της επιφάνειας. Είναι πιο πιθανό να εμφανιστούν στις μαύρες βαφές, αλλά μπορούν επίσης να εμφανιστούν και με τα περισσότερα οργανικά υλικά βαφής.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η κύρια αιτία αυτού του ελαττώματος είναι το χλώριο που υπάρχει στο λουτρό βαφής σαν πρόσμιξη στο υλικό βαφής. Πάντως, δεν είναι μόνο το χλώριο που αποτελεί αιτία για τις λευκές κηλίδες, αλλά ακόμα τα ηλεκτροχημικά ζεύγη που μπορεί να δημιουργούνται όταν τα αντικείμενα είναι στο λουτρό βαφής.

Τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για αυτό το ελάττωμα εξετάζονται λεπτομερώς στο κεφάλαιο “Αστοχίες κατά τη Βαφή”.

ED11. Ανομοιόμορφη βαφή λόγω μη καθαρισμού δακτυλικών αποτυπωμάτων

Εναλλακτική περιγραφή: Σημάδια από δάχτυλα

Αυτό σχετίζεται στενά με το αντίστοιχο ελάττωμα που περιγράφηκε στο κεφάλαιο του χημικού / ηλεκτροχημικού καθαρισμού. Προέρχεται από επαφή των αντικειμένων με τον ανθρώπινο ιδρώτα, στα δάχτυλα και τις παλάμες, λόγω του χλωρίου στην εφίδρωση. Όταν η ανομοιομορφία προέρχεται από αυτή την αιτία, θα υπάρχει μία διαφοροποιημένη απόκριση στη βαφή, λόγω του ανεπαρκούς καθαρισμού της επιφάνειας.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η κύρια θεραπεία είναι να διασφαλιστεί ότι οι χειριστές δεν μεταχειρίζονται τα αντικείμενα με γυμνά χέρια. Εάν γίνεται αυτό, τότε πάντα υπάρχει κίνδυνος για σημάδια από δάχτυλα. Δεν υπάρχει τρόπος να απομακρυνθούν τα σημάδια από αυτή τη διάβρωση αφού συμβούν.

Ελαττώματα στο Σφράγισμα ή στην Επιφάνεια

SF01. Επιφάνεια με κιμωλίες

Εναλλακτική περιγραφή: Άσπρη σκόνη

Αυτό είναι ένα ελάττωμα που συμβαίνει σε εργοστάσια όπου η επεξεργασία γίνεται με νερό πόλης, με υψηλό περιεχόμενο σε διαλυμένα στερεά (δηλ. >100 p.p.m.). Βασικά, αυτό οφείλεται στο πολύ λεπτό απόθεμα στην επιφάνεια από αδιάλυτα άλατα μαγνησίου και ασβεστίου, που σχηματίζονται. Αυτό έχει προδιάθεση να συμβεί κυρίως στη διεργασία του σφραγίσματος, όταν χρησιμοποιείται τέτοιο νερό δικτύου. Η συνεχής προσθήκη νερού για να αναπληρωθούν οι απώλειες από εξάτμιση, αυξάνει, συνολικά, τα διαλυμένα στερεά, και άρα την εμφάνιση κιμωλιών στην επιφάνεια. Οι κιμωλίες μπορούν εύκολα να απομακρυνθούν με τρίψιμο με ένα υγρό πανί. Όπου χρησιμοποιείται αποιονισμένο νερό, αυτό το απόθεμα αλάτων σκληρού νερού, που μοιάζει με κιμωλία, δεν συμβαίνει. Πάντως, συχνά εμφανίζεται ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα, που αναφέρεται σαν ‘Λεκές Σφραγίσματος’ - βλ. παρακάτω.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η πρόληψη στην περίπτωση αυτή συνίσταται στη χρήση αποσταγμένου νερού για το σφράγισμα, αλλά ορισμένες βιομηχανικές μονάδες είτε χρησιμοποιούν εμπορικά διαλύματα (χωρίς να γνωρίζουν τη σύστασή τους) που παρεμποδίζουν το φαινόμενο είτε προσθέτουν 0.5% οξικό αμμώνιο.

SF02. Απόρριψη προϊόντος στη δοκιμή σφραγίσματος

Εάν τα δείγματα αποτύχουν στα κανονικά τεστ, ελέγξτε αυτή τη φορά ότι η θερμοκρασία και η συγκέντρωση είναι σωστές. Με τα περισσότερα διαλύματα, οι χρόνοι σφραγίσματος είναι συνήθως, 1 min / micron. Εάν αυτοί οι παράμετροι λειτουργίας είναι σωστοί, ελέγξτε εάν το λουτρό σφραγίσματος είναι διαυγές. Ένα θολό διάλυμα είναι ένδειξη μεταφοράς κρωκιδωτικού μέσου, υδροξειδίου του αλουμινίου, από ακάθαρτα ξεπλύματα.

SF03. Εμφάνιση χρωματισμένης επιφάνειας (λόγω εμποτισμού με ξένα στοιχεία)

3α. Δημιουργία πράσινου χρώματος

Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η συγκέντρωση νικελίου είναι υψηλή και η αναλογία νικελίου:φθόριο είναι μεγαλύτερη από αυτή που συνίσταται από τους προμηθευτές. Ελέγξτε την ανάλυση του λουτρού στα συστατικά, και ρυθμίστε στις σωστές τιμές. Σε κάποια διαλύματα σφραγίσματος, σε χαμηλές θερμοκρασίες, το νικέλιο αντικαθίσταται μερικώς από κοβάλτιο, ώστε να περιοριστεί το ελάττωμα.

3β. Δημιουργία επιφανειακού ελαττώματος υπό μορφή ανθού λευκής απόχρωσης

Αυτό μπορεί να προκληθεί από την παραγωγή ιόντων καλίου ή νατρίου, εάν τα φθοριούχα άλατά τους χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν το επίπεδο του φθορίου και η συγκέντρωση ξεπερνάει τα 7 g/l. Η θεραπεία είναι να πεταχτεί μέρος, ή ολόκληρο το λουτρό. Ρύθμιση της συγκέντρωσης φθορίου γίνεται συνήθως με χρήση φθοριούχο αμμώνιου.

3γ. Δημιουργία επιφανειακού ελαττώματος υπό μορφή ανθού κίτρινης απόχρωσης

Αυτό σπανίως συναντάται, αλλά εάν το λουτρό έχει τυχαία μολυνθεί με προσμίξεις 50 p.p.m., ή περισσότερο, σιδήρου ή χαλκού, αναπτύσσεται στην επιφάνεια ένα κίτρινωπό ‘άνθος’ και η αντίσταση στη διάβρωση θα μειωθεί. Εάν υπάρχει μόλυνση, το διάλυμα πρέπει να πεταχτεί, και να ετοιμαστεί καινούργιο.

SF04. Σπασίματα στο ανοδικό στρώμα κατά το σφράγισμα

Εναλλακτική περιγραφή: Σπασίματα στο σφράγισμα

Όταν ένα ανοδικό στρώμα μεταφέρεται από τη δεξαμενή πλυσίματος στο βραστό νερό σφραγίσματος, παράγεται τάση στο ανοδικό στρώμα, λόγω του χαμηλού συντελεστή διαστολής. Στρώματα που έχουν παραχθεί κάτω από σκληρές συνθήκες ανοδίωσης, και παχιά στρώματα που έχουν παραχθεί σε κανονικές συνθήκες, αλλά σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος, είναι περισσότερο επιρρεπή στο σπάσιμο. Οι στιλβωμένες επιφάνειες έχουν την τάση να σπάζουν πιο εύκολα από τις καθαρισμένες επιφάνειες. Τα ανοδικά στρώματα που υπόκεινται σε υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος και δυνατό φως ήλιου, είναι πιο πιθανό να εμφανίσουν σπασίματα, απ’ότι αυτά που εκτίθενται σε πιο ήπια κλίματα.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Όπως είναι φανερό από τις περιγραφές, το σπάσιμο μπορεί να αποφευχθεί εάν ελαχιστοποιηθούν οι παράγοντες που το δίνουν, δηλαδή, χαμηλές θερμοκρασίες ηλεκτρολύτη, και υψηλή πυκνότητα ρεύματος. Σε κάποιες περιπτώσεις, ένα σύντομο χλιαρό ξέπλυμα μπορεί να μειώσει το πρόβλημα.

SF05. Απόρριψη προϊόντος στη δοκιμή σφραγίσματος (σφράγισμα σε νερό)

Εναλλακτική περιγραφή: Ανεπαρκές σφράγισμα

Υπάρχουν κάποια τεστ σφραγίσματος που είναι διεθνώς αναγνωρισμένα. Αυτά είναι:

ISO 2143-1981 “Ανοδίωση Αλουμινίου και κραμάτων του - Υπολογισμός της απορροφητικής ικανότητας του στρώματος ανοδικού οξειδίου μετά το σφράγισμα - Τεστ βαμμένου στίγματος (Dye spot test) με προηγούμενη επεξεργασία σε οξύ”.

ISO 2931-1983 “Ανοδίωση του αλουμινίου και των κραμάτων του - εκτίμηση ποιότητας των σφραγισμένων στρωμάτων ανοδικού οξειδίου με μέτρηση της σύνθετης αγωγιμότητας, ή της σύνθετης αντίστασης (εμπέδηση).

ISO 2932-1981 “Ανοδίωση του Αλουμινίου και των κραμάτων του - εκτίμηση της ποιότητας με μέτρηση της απώλειας μάζας μετά από βύθιση σε διάλυμα οξέως”.

ISO 3210-1974 “Ανοδίωση του Αλουμινίου και των κραμάτων του - εκτίμηση της ποιότητας με μέτρηση της απώλειας μάζας μετά από βύθιση σε διάλυμα φωσφορικού οξέως”.

Στις περισσότερες χώρες υπάρχουν ισοδύναμα διεθνή πρότυπα, για τα παραπάνω πρότυπα ISO. Αποτυχία σε κάποιο από τα παραπάνω τεστ σφραγίσματος μπορεί να αποδοθεί: (1) στην πολύ χαμηλή θερμοκρασία στο λουτρό σφραγίσματος, (2) στην πολύ χαμηλή τιμή του pH στο λουτρό σφραγίσματος, (3) στο σύντομο χρόνο σφραγίσματος, (4) στην παρουσία πυριτίου και φωσφόρου σε περίσσεια σε σχέση με το επίπεδο αυτό που προκαλεί αστοχία.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

- (i) Ελέγξτε τις καταγραφές της θερμοκρασίας στο λουτρό σφραγίσματος. Η θερμοκρασία στο λουτρό σφραγίσματος θα πρέπει πάντα να ξεπερνάει τους 95°C. Εάν η θερμοκρασία βρεθεί σωστή, ξαναελέγξτε με κάποιο πιο ακριβές όργανο, ώστε να βεβαιωθείτε ότι η καταγεγραμμένη θερμοκρασία είναι σωστή.
- (ii) Ελέγξτε τις καταγραφές του pH στο λουτρό σφραγίσματος και επίσης επανελέγξτε το pH εκείνης της στιγμής. Το σωστό pH θα πρέπει να είναι στην περιοχή 5,5 - 6,5. Η μεταφορά του ηλεκτρολύτη στη δεξαμενή σφραγίσματος έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερο pH. Το pH μπορεί να διορθωθεί με προσθήκη ασθενούς διαλύματος καυστικής σόδας. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ρυθμιστικό διάλυμα οξικού αμμωνίου. Εάν, ωστόσο, το πρόβλημα παραμένει, η διεργασία του πλυσίματος θα πρέπει να ελεγχθεί, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι η ροή είναι επαρκής. Η καλή ανάδευση κατά το ξέπλυμα είναι ζωτικής σημασίας για την όσο το δυνατό μεγαλύτερη απομάκρυνση του κρατημένου οξέως - ηλεκτρολύτη.
- (iii) Ο πολύ σύντομος χρόνος σφραγίσματος μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την αποτυχία στα τεστ σφραγίσματος. Ο χρόνος σφραγίσματος θα πρέπει να είναι τέτοιος που να εξασφαλίζει πάντα το πέρασμα από το τεστ. Ο παραδοσιακός μνημονικός κανόνας ότι ο χρόνος σφραγίσματος πρέπει να είναι ίσος με το χρόνο ανοδίωσης δεν ισχύει. Τα παχύτερα στρώματα απαιτούν μακρύτερους χρόνους σφραγίσματος από ότι τα λεπτά.
- (iv) Η παρουσία ανεπιθύμητων προσμίξεων που καταστρέφουν το σφράγισμα παραμένει μία συνήθης αιτία αποτυχίας του τεστ. Κάποια δίκτυα ύδρευσης μπορεί να έχουν πολύ λίγα διαλυμένα στερεά π.χ. περίπου 20 p.p.m., αλλά τέτοια νερά συνήθως περιέχουν σχετικά ψηλά επίπεδα διαλυμένου διοξειδίου του πυριτίου, < 5 p.p.m. Επίπεδα διοξειδίου του πυριτίου 10 p.p.m., θα έχουν σαν αποτέλεσμα την αποτυχία των τεστ σφραγίσματος.

Το υψηλό διοξείδιο του πυριτίου (πυριτία) μπορεί να είναι αποτέλεσμα εισχώρησης της ένωσης σε εργοστάσιο απιονισμού του νερού. Καθώς η ιονοανταλλακτική ρητίνη παλιώνει, φθάνει ένα σημείο που είναι λιγότερο αποτελεσματική. Σε κάποιο σημείο η ρητίνη έχει παλιώσει αρκετά, ώστε να συμβαίνουν φαινόμενα γνωστά σαν 'ξαφνική προσπέλαση πυριτίας', και αρκετή πυριτία κρατημένη από τη ρητίνη ελευθερώνεται, ώστε ξεπερνάει το κρίσιμο όριο των 10 p.p.m. Είναι, λοιπόν, καλή πρακτική να ελέγχεται το περιεχόμενο της πυριτίας στο απιονισμένο νερό της δεξαμενής αποθήκευσης που χρησιμοποιείται για αναπλήρωση του λουτρού. Τα φωσφορικά άλατα, που συναντώνται κυρίως στις βιομηχανικές μονάδες γυαλίσματος με εμβάπτιση, είναι ακόμη πιο κρίσιμα, στο ότι τα 5 p.p.m. θα κάνουν το τεστ να αποτύχει. Και στις δυο περιπτώσεις, η θεραπεία είναι να αντικατασταθεί το νερό στη δεξαμενή σφραγίσματος.

SF06. Σημειακή διάβρωση λόγω αποκατάστασης γαλβανικού στοιχείου

Εναλλακτική περιγραφή: Βελονοειδής διάβρωση

Σημειακή διάβρωση ενός λεπτού ανοδικού στρώματος μπορεί να συμβεί κατά το σφράγισμα, όταν σχηματίζεται γαλβανικό ζευγάρι μεταξύ του ανοδιωμένου αντικειμένου και της δεξαμενής σφραγίσματος ή των φορέων στήριξης από τιτάνιο. Αυτό μπορεί να συμβεί στο απιονισμένο νερό με μικρές ποσότητες θεικών αλάτων. Φαίνεται ότι συμβαίνει πιο εύκολα, όταν υπάρχουν πρόσθετα που παρεμποδίζουν το λέκιασμα κατά το σφράγισμα και μπορεί να απαντηθεί και σε στρώματα θεικού, και χρωμικού οξέως.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Ένα παρόμοιο πρόβλημα έχει αναφερθεί σε σχέση με τα βαμμένα στρώματα (βλ. ED03), οπότε τα διορθωτικά μέτρα είναι παρόμοια. Οι μπάρες εργασίας θα πρέπει να μην κάνουν επαφή με τη δεξαμενή σφραγίσματος (να είναι μονωμένες), και η δεξαμενή να είναι γειωμένη. Συνήθως, αυτή η διάβρωση συμβαίνει μόνο όταν υπάρχει περίσσεια πρόσθετων σφραγίσματος, οπότε η συγκέντρωσή τους θα πρέπει να ελέγχεται. Η εφαρμογή ενός μικρού καθοδικού ρεύματος στα αντικείμενα είναι μία ακόμη θεραπεία.

SF07. Πράσινο στρώμα

Εναλλακτική περιγραφή: Χρωματισμός νικελίου

Το αντικείμενο μπορεί να εμφανίσει μία πράσινη χροιά είτε αμέσως μετά το σφράγισμα, είτε μετά από παρατεταμένη παραμονή στο ύπαιθρο. Είναι σχεδόν σταθερά συνδεδεμένο με την προσθήκη αλάτων νικελίου στο νερό της δεξαμενής σφραγίσματος. Εάν το ποσό είναι σε περίσσεια, το στρώμα θα χρωματιστεί πράσινο. Εάν, επίσης, το ανοδικό στρώμα δεν είναι καλά σφραγισμένο, ένα τονισμένο πράσινο χρώμα, υπό μορφή ανθού θα αναπτυχθεί στην επιφάνεια, όταν το αντικείμενο αφηθεί σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Με τέτοια προσθετικά που χρησιμοποιούνται, είναι δυνατό να καθιζάνει ίζημα υδροξειδίου του νικελίου στην επιφάνεια των αντικειμένων, εάν το pH είναι υψηλό.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

- (i) Ελέγξτε το περιεχόμενο νικελίου στο διάλυμα σφράγισης - που πιθανότατα θα βρεθεί να είναι υψηλό.
- (ii) Αραιώστε το διάλυμα σφραγίσματος ώστε να πετύχετε το περιεχόμενο σε νικέλιο που συνίσταται από τον προμηθευτή.
- (iii) Επανελέγξτε την ποιότητα του σφραγίσματος χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα τεστ και εάν οι συνθήκες σφραγίσματος είναι οι σωστές. Εάν αποτύχουν τα τεστ, επικοινωνήστε με τον προμηθευτή των προσθετικών σφραγίσματος.
- (iv) Ένα λάθος pH στη δεξαμενή σφραγίσματος μπορεί επίσης να ευθύνεται για αυτόν το χρωματισμό. Ελέγξτε το pH και ρυθμίστε το εάν δεν είναι μέσα στα προτεινόμενα όρια.

SF08. Ιριδισμός

Εναλλακτική περιγραφή: Στοιβάδες παρεμβολής

Τα ανοδικά στρώματα μπορεί να ιριδιάζουν μετά την ανοδίωση, στην οποία περίπτωση οφείλεται σε ουσιαστική αστοχία στην ανοδίωση, επειδή το ύψος του ανοδικού στρώματος θα είναι μικρότερο από αυτό του μήκους κύματος του ορατού.

Η εμφάνιση ιριδισμού στα ανοδικά στρώματα όταν αυτά αφηθούν στο φυσικό (εξωτερικό) περιβάλλον, έχει παρατηρηθεί από τους ερευνητές. Θεωρείται ότι οφείλεται, αρχικά, στην παρουσία λεκέ στην επιφάνεια, από το σφράγισμα. Αυτός δημιουργεί μία πολύ λεπτή επίστρωση στην επιφάνεια του ανοδικού στρώματος, που δίνει τις στοιβάδες παρεμβολής. Πάντως, μπορεί ακόμη να δημιουργηθεί σαν αποτέλεσμα του ανεπαρκούς σφραγίσματος όταν υπάρχει πυριτία ή φωσφορικά άλατα. Ο ιριδισμός σύντομα καλύπτεται από την ανάπτυξη ενός άσπρου αποχρωματισμού μέσα στο ανοδικό στρώμα.

SF09. Λεκές στο σφράγισμα

Εναλλακτική περιγραφή: Επιφάνεια με κιμωλίες

Όταν τα αντικείμενα απομακρύνονται από τη δεξαμενή σφραγίσματος και επεξεργάζονται, μπορεί να βρεθεί ότι υπάρχει ένα επιφανειακό στρώμα που μπορεί να απομακρυνθεί τρίβοντας ελαφρά με ένα βρεγμένο ρούχο. Φαίνεται καλύτερα κοιτάζοντας την επιφάνεια υπό γωνία 45°. Μπορεί να ξεχωριστεί από μία επιφάνεια μαλακής σκόνης που προέρχεται από ανεπαρκείς συνθήκες ανοδίωσης, από το γεγονός ότι απομακρύνεται εύκολα, χρησιμοποιώντας καθαριστικά λεκέδων σφραγίσματος. Εάν τα αντικείμενα έχουν βαφτεί, το σφράγισμα δεν αντιδρά με τη χρωστική, ενώ παρατηρείται αντίδραση μεταξύ του κιμωλώδους ανοδικού στρώματος και της χρωστικής βαφής. Ακόμη και κάτω από καλές συνθήκες ανοδίωσης, με απιονισμένο νερό, θα βρεθεί συχνά στην επιφάνεια των σφραγισμένων αντικειμένων αυτό το νέφος άσπρης σκόνης, σαν ανθός. Είναι προφανώς συνδεδεμένο με την υδάτωση των επιφανειακών επιστρώσεων του ανοδικού στρώματος, και είναι αποτέλεσμα της προσβολής από τον ηλεκτρολύτη.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Σε κάποιες περιπτώσεις, ο ανθός αυτός από το σφράγισμα μπορεί να απομακρυνθεί με εμβάπτιση των αντικειμένων σε 20% κ.ο. νιτρικό οξύ, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ακολουθούμενη με ξέπλυμα σε νερό. Ωστόσο, αυτή η θεραπεία δεν είναι πάντα εντελώς αποτελεσματική, οπότε πολλές βιομηχανικές μονάδες χρησιμοποιούν καθαριστικά λεκέδων σφραγίσματος του εμπορίου.

Αυτά τα πρόσθετα περιέχουν ένα άλας νικελίου και οργανικά πρόσθετα που θα απομακρύνουν ή θα αφαιρέσουν τον ανθό αυτό χωρίς να προσβάλουν το ανοδικό στρώμα.

SF10. Λεκές στην επιφάνεια

Εναλλακτική περιγραφή: Γκριζός λεκές

Κάποιες φορές, μπορεί να παρατηρηθεί στα αντικείμενα ένας σκοτεινός γκριζός ή καφέ λεκές, μετά την εξαγωγή τους από τη δεξαμενή σφραγίσματος. Αυτό οφείλεται, συνήθως, στην παρουσία λεκέδων μετά τον επιφανειακό ή/και χημικό καθαρισμό, που αποτελείται από ίζημα διαμεταλλικών ενώσεων στην επιφάνεια, που δεν έχουν απομακρυνθεί από το νιτρικό οξύ ή άλλα καθαριστικά διαλύματα πριν την ανοδίωση. Κράματα που παράγονται με χύσιμο μετάλλου, με υψηλά επίπεδα πυριτίου, και σε λιγότερη έκταση κράματα με υψηλή περιεκτικότητα σε χαλκό, είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε αυτό το χαρακτηριστικό.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Το πρόβλημα δεν συνδέεται βασικά με τη διεργασία του σφραγίσματος, αλλά με το καθαριστικό διάλυμα. Εάν χρησιμοποιείτε καθαριστικό εμπορίου, συμβουλευτείτε τον προμηθευτή σας. Εάν χρησιμοποιείτε καθαριστικό νιτρικού οξέως, ελέγξτε ότι η συγκέντρωση είναι από 20 ως 25% κ.ο. Εάν το πρόβλημα παραμένει, η προσθήκη 10 - 50% διφθοριούχου αμμωνίου ή άλλης ένωσης φθορίου, όπως φθοριούχο κάλιο, συνήθως βρίσκεται ότι απομακρύνει τους επίμονους λεκέδες από κράματα υψηλής περιεκτικότητας σε χαλκό ή πυρίτιο.

SF11. Δημιουργία επιφανειακού ελαττώματος υπό μορφή ανθού, λευκού χρώματος

Εναλλακτική περιγραφή: Άσπρο μάλωμα

Όταν ένα ανεπαρκώς σφραγισμένο ανοδικό στρώμα εκτίθεται στο ύπαιθρο, αναπτύσσει επιφανειακό ελάττωμα σαν άσπρο άνθος μέσα στο ανοδικό στρώμα. Σε αντίθεση με το ίδιο ελάττωμα που μπορεί κάποιες φορές να υπάρχει στο εξωτερικό της επιφάνειας, όταν το αντικείμενο σφραγίζεται σε απιονισμένο νερό, που μπορεί να απομακρυνθεί με ελαφρύ σκούπισμα, αυτό που εξετάζεται εδώ αναπτύσσεται μέσα στο στρώμα και δεν φεύγει. Μπορεί, επίσης, να υπάρχει ένα άσπρο κιμωλώδες στρώμα σαν αποτέλεσμα των ανεπαρκών συνθηκών ανοδίωσης, αλλά αυτό φεύγει εύκολα με σκούπισμα, αν και μπορεί να επανεμφανιστεί μετά από παρατεταμένη έκθεση στις καιρικές συνθήκες.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Δεν υπάρχει θεραπεία, όταν αυτός ο άσπρος ανθός έχει αναπτυχθεί. Οι αιτίες του κακού σφραγίσματος δίνονται κάτω από τον τίτλο “Απόρριψη προϊόντος στη δοκιμή σφραγίσματος”, μαζί με τα κατάλληλα διορθωτικά μέτρα.

SF12. Διάβρωση, λόγω αποκατάστασης γαλβανικού στοιχείου, κατά το σφράγισμα

Εναλλακτική περιγραφή: Βελονοειδής διάβρωση

Το παραπάνω φαινόμενο είναι δυνατό να εμφανιστεί σε λεπτά ανοδικά στρώματα, στο σφράγισμα, σαν αποτέλεσμα του ηλεκτροχημικού ζεύγους μεταξύ των ανοδιωμένων προϊόντων και της δεξαμενής σφραγίσματος, ή των μερών ανάρτησης στα πλαίσια/φορείς στήριξης. Αυτό μπορεί να συμβεί σε απεσταγμένο νερό, με μικρές ποσότητες θεικών ιόντων. Εμφανίζεται πιο άμεσα όταν υπάρχουν ουσίες που παρεμποδίζουν τους λεκέδες κατά το σφράγισμα. Μπορεί να συμβεί και σε στρώματα θεικού και χρωμικού οξέως.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Ένα παρόμοιο πρόβλημα έχει αναφερθεί από την πλευρά των βαμμένων ανοδιωμένων στρωμάτων, έτσι τα διορθωτικά μέτρα είναι παρόμοια. Οι μπάρες εργασίας πρέπει να είναι μονωμένες από επαφή με τη δεξαμενή σφραγίσματος, και η δεξαμενή να είναι σφραγισμένη. Συνήθως, διάβρωση συμβαίνει μόνο όταν υπάρχει περίσσεια από προσθετικό σφραγίσματος, οπότε η συγκέντρωσή του

θα πρέπει να ελέγχεται. Η εφαρμογή ενός μικρού καθοδικού ρεύματος στα αντικείμενα είναι μία κόμη θεραπεία.

SF13. Ανομοιόμορφη στεγανοποίηση λόγω μη καθαρισμού δακτυλικών αποτυπωμάτων

Εναλλακτική περιγραφή: Σημάδια από δάχτυλα

Αυτό σχετίζεται στενά με το αντίστοιχο ελάττωμα που περιγράφηκε στο κεφάλαιο του χημικού / ηλεκτροχημικού καθαρισμού. Προέρχεται από επαφή των αντικειμένων με τον ανθρώπινο ιδρώτα, στα δάχτυλα και τις παλάμες, λόγω του χλωρίου στην εφίδρωση. Όταν η ανομοιομορφία προέρχεται από αυτή την αιτία, θα υπάρχει μία διαφοροποιημένη απόκριση στο σφράγισμα, λόγω του ανεπαρκούς καθαρισμού της επιφάνειας.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η κύρια θεραπεία είναι να διασφαλιστεί ότι οι χειριστές δεν μεταχειρίζονται τα αντικείμενα με γυμνά χέρια. Εάν γίνεται αυτό, τότε πάντα υπάρχει κίνδυνος για σημάδια από δάχτυλα. Δεν υπάρχει τρόπος να απομακρυνθούν τα σημάδια από αυτή τη διάβρωση αφού συμβούν.

Ελαττώματα κατά τη Χύτευση

DC01. Εσωτερικές πτυχές λόγω κακής χύτευσης

Εναλλακτική περιγραφή: Ψυχρές αναδιπλώσεις λόγω κακής χύτευσης

Κατά τη χύτευση αλουμινίου για πρώτη ύλη (υπό μορφή 'χελώνας') ή τη διαμόρφωση ειδικού αντικειμένου, είναι δυνατό να δημιουργηθούν εσωτερικές πτυχές λόγω ταχείας χύτευσης, χαμηλής θερμοκρασίας του τήγματος ή κακού σχεδιασμού της μήτρας και ιδιαίτερα του στομίου πλήρωσης αυτής.

DC02. Γραμμές ή σημάδια ή ίχνη ροής (Flow lines / Patterns)

Εναλλακτική περιγραφή:

Κατά την έγχυση του τηγμένου μετάλλου στη μήτρα υπό πίεση έχουμε ροή, της οποίας η μορφή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το σχήμα της μήτρας, το μέγεθος των στομίων πλήρωσης και η τοπογραφία/σχήμα/μέγεθος των αεραγωγών. Αν ο σχεδιασμός της μήτρας δεν είναι κατάλληλος και ο ρυθμός χύτευσης είναι υψηλός, τότε είναι ενδεχόμενος ο εγκλεισμός αέρα ή η έναρξη σχηματισμών οξειδίων στα σημεία όπου συναντώνται τα ρεύματα του τήγματος. Ακόμη και τα αποτυπώματα των ιδίων των ρευμάτων είναι δυνατό να παραμείνουν εμφανή σαν ελαφρές σκούρες γραμμές στα επόμενα στάδια της μεταλλουργικής επεξεργασίας.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Για την πρόληψη του ελαττώματος συνίσταται ανασχεδιασμός της μήτρας με έμφαση στη διεύθυνση των στομίων πλήρωσης και των αεραγωγών με τρόπο που να διασφαλίζεται η ομαλή / στρωτή ροή με χαμηλή τύρβη στα σημεία που κατ'ανάγκη θα εμφανιστεί όταν η χύτευση γίνεται σε μήτρα πολύπλοκου αντικειμένου.

DC03. Ρωγμές από εσωτερικές τάσεις

Εναλλακτική περιγραφή:

Η χύτευση γίνεται σε μήτρες από άμμο ή κράμα. Στην τελευταία περίπτωση, είναι ενδεχόμενη η δημιουργία εσωτερικών τάσεων λόγω διαφορετικής κατά περιοχές ταχύτητας στερεοποίησης του τήγματος, ιδιαίτερα όταν οι περιοχές αυτές είναι γειτονικές και έχουν διαφορετικό πάχος (μετρούμενο ως απόσταση μεταξύ των πλησιέστερων απέναντι τοιχωμάτων της μήτρας για κάθε περιοχή). Αποτέλεσμα των εσωτερικών τάσεων είναι η δημιουργία προϋποθέσεων έναρξης / διάδοσης ρηγματώσεων είτε στο ίδιο είτε σε επόμενα στάδια επεξεργασίας του αντικειμένου. Λαμβανομένου, μάλιστα, υπ'όψη ότι η μέση ταχύτητα στερεοποίησης στα τμήματα του αντικειμένου που έχουν πολύ μικρό πάχος είναι πολύ μεγάλη, στο παραπάνω φαινόμενο

προστίθεται η παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος επειδή ορισμένα άτομα Al δεν προλαβαίνουν να καταλάβουν τις θερμοδυναμικά ευσταθείς θέσεις τους αλλά παραμένουν σε μια παρακρυσταλλική διευθέτηση που συμβάλλει στη διάδοση της ρηγμάτωσης, μόλις αυτή εκκινήσει.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Για την πρόληψη του ελαττώματος συνίσταται η αποφυγή επίτευξης μεγάλων διαφορών θερμοκρασιών και στο σχεδιασμό αντικειμένων με κατά το δυνατό μικρές διαφορές πάχους μεταξύ γειτονικών περιοχών, πράγμα εφικτό για αντικείμενα ομοιόμορφα που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη στη μεταλλουργία (π.χ. χελώνες), όχι όμως τόσο εύκολα πραγματοποιήσιμο όταν πρόκειται για αγαθά διάθεσης στην τελική κατανάλωση, των οποίων το σχήμα εξαρτάται κυρίως από τη χρήση τους.

DC04. Προσμίξεις οξειδίων

Εναλλακτική περιγραφή:

Κατά τη διεργασία της χύτευσης δημιουργούνται μικρές ποσότητες οξειδίων ή εμφανίζονται συσσωματώματα από προϋπάρχοντα οξείδια. Οι μικρές περιοχές συγκέντρωσης των οξειδίων αυτών εντοπίζονται εύκολα κατά τις μηχανουργικές κατεργασίες, που ακολουθούν συνήθως τη χύτευση λόγω αυξημένης σκληρότητας και ιδιόμορφης εμφάνισης, προκαλώντας μάλιστα ‘γρατζουνιές’ κατά το στάδιο της μηχανικής λείανσης που προηγείται της ανοδίωσης. Το χρώμα των ελαττωμάτων αυτών ποικίλει από λευκό, στην περίπτωση οξειδίου καθαρού αλουμινίου, μέχρι χρυσοκόκκινο ή γκρι ή καφέ, ενώ αρκετές φορές συνυπάρχει πορώδες στην περιοχή του ελαττώματος.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Για την πρόληψη του ελαττώματος, συνίσταται (α) ο ανασχεδιασμός της μήτρας ώστε να αποφεύγονται σημεία εμφάνισης τυρβώδους ροής, (β) η απομάκρυνση των υπαρχόντων οξειδίων από το τήγμα και (γ) η συγκέντρωση των οξειδίων κ.α. προσμίξεων σε ορισμένη μικρή περιοχή, η οποία αποκόπτεται (αποτελεσματική πρακτική στην περίπτωση συνεχούς χύτευσης προς παραγωγή πρώτης ύλης υπό μορφή κυλινδρικής ράβδου)

DC05. Διάχυτο μικροπορώδες

Εναλλακτική περιγραφή:

Το ελάττωμα αυτό παρουσιάζεται όταν περιέχεται διάχυτο υδρογόνο στο τήγμα του μετάλλου, προερχόμενο από εγκλωβισμένο υδρογόνο στη μάζα του μητρικού υλικού που δεν απομακρύνθηκε πριν τη χύτευση. Το πορώδες αυτό έχει τη μορφή διάχυτων μικροσκοπικών πόρων (pin-hole porosity) και είναι ιδιαίτερα εμφανές σε περιοχή μεγάλου πάχους. Κατά τη διάρκεια της ανοδίωσης, στα σημεία των πόρων παρατηρούνται λευκές κηλίδες οφειλόμενες στον εγκλωβισμό οξέως από το λουτρό της ηλεκτρόλυσης με αποτέλεσμα να παράγονται άλατα του αργιλίου που συμβάλλουν στην ταχεία χειροτέρευση (γήρανση) του λουτρού.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Για την πρόληψη του φαινομένου αυτού, είναι απαραίτητη η απομάκρυνση του υδρογόνου πριν τη διεργασία της χύτευσης ή τουλάχιστον πριν τη στερεοποίηση του τήγματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας αυτής.

DC06. Στίγματα λόγω διαχωρισμού συστατικών (segregation / mottling)

Εναλλακτική περιγραφή:

Τα περισσότερα κράματα περιέχουν άλλα στοιχεία σε ποσοστό τουλάχιστον 4% ενώ είναι αναπόφευκτη η παρουσία μικρού ποσοστού προσμίξεων. Η διαφορά διατομών (δηλ. πάχους) σε γειτονικά μέρη του χυτεύμενου αντικειμένου συνεπαγόμενη αντίστοιχη διαφορά ταχύτητας στερεοποίησης δημιουργεί και διαφορά μεγέθους κόκκων. Τα τμήματα που κρυσταλλώνουν αργότερα συνίστανται από κόκκους μεγαλύτερου μεγέθους στους οποίους εκλεκτικά περιέχεται μεγαλύτερο

ποσοστό διαχωρισμένων στοιχείων του κράματος. Η επιφάνεια των τμημάτων αυτών (όπως φαίνεται σε διατομές που λαμβάνονται με μικροτόμο) είναι ανομοιόμορφα αδρομερής και γεμάτη με στίγματα διαφόρων μεγεθών. Σημειώνεται ότι η τοπογραφία της επιφάνειας αυτής είναι διαφορετική από τη σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένη διάστικτη εμφάνιση που οφείλεται στην παρουσία πυριτίου και σε αδιάλυτες διαμεταλλικές ενώσεις. Στην περίπτωση όμως της συνύπαρξης των δύο αυτών ελαττωμάτων επιτείνεται η ανομοιομορφία της αδρομερούς εμφάνισης και τα στίγματα γίνονται μεγαλύτερα.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Για την πρόληψη αυτού του σύνθετου ελαττώματος συνίσταται ο ανασχεδιασμός της μήτρας και η χρησιμοποίηση κραμάτων αλουμινίου χωρίς πυρίτιο.

DC07. Εντοπισμένο μακροπορώδες ή διάκενα λόγω συρρίκνωσης (shrinkage porosity ή voids)

Εναλλακτική περιγραφή:

Κατά τη χύτευση, λόγω συστολής του υλικού κατά τη μετάβαση από την υγρή στη στερεή φάση, δημιουργούνται διάκενα σε τμήματα του αντικειμένου όπου απαιτείται σχετικά μεγάλη ποσότητα τήγατος ώστε να πληρωθεί ο αντίστοιχος όγκος. Βασικές αιτίες είναι η έλλειψη επαρκούς πίεσης για την πλήρωση αυτή και ταχύτερη ψύξη/τήξη σε γειτονικό τμήμα μεγάλης διατομής, άρα και μεγάλων απαιτήσεων σε μάζα τήγατος. Το δημιουργούμενο μακροπορώδες λόγω συρρίκνωσης της μάζας είναι εντοπισμένο, σε αντιδιαστολή με το διάχυτο μικροπορώδες που οφείλεται στο περιεχόμενο υδρογόνου.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Για την πρόληψη αυτού του σημαντικού ελαττώματος πρέπει να εξαιρεθούν και οι δύο βασικές αιτίες δημιουργίας του, δηλ. πρέπει να αυξηθεί η πίεση τροφοδοσίας σε τήγμα και να ανασχεδιασθεί (όταν είναι δυνατό) η μήτρα, ώστε να μην υπάρχουν τμήματα με μικρή διατομή που στερεοποιούνται πολύ ταχύτερα σε σχέση με τα γειτονικά τους. Σημειώνεται όμως ότι η πίεση δεν πρέπει να αυξηθεί υπέρμετρα επειδή οδηγεί σε αύξηση των εσωτερικών τάσεων και τυρβώδους ροής με αποτέλεσμα την εμφάνιση άλλων ελαττωμάτων.

Ελαττώματα που δημιουργούνται κατά την εξόλκυση με συμπίεση (extrusion)

DE01. Alloy Contamination streaks

Εναλλακτική περιγραφή:

Αν το πίσω μέρος του θαλάμου εξόλκυσης δεν έχει καθαριστεί επαρκώς από τα υπολείμματα προηγούμενης κατεργασίας με διαφορετικό κράμα αλουμινίου τότε είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα εμφανιστούν σκοτεινές ραβδώσεις (dark streaks) στα πρώτα κατεργασμένα τεμάχια. Οι ραβδώσεις αυτές οφείλονται στη διαφορετική σύσταση λόγω της πρόσμιξης με τα υπολείμματα του προηγούμενου κράματος (alloy contamination streaks) και αποσβένονται προοδευτικά, με την εξάντληση των υπολειμμάτων, σχηματίζοντας μορφή αντίστοιχη του γράμματος ν.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η πρακτική πρόληψη είναι προφανής και συνίσταται στον καλό καθαρισμό του θαλάμου εξόλκυσης όταν αλλάξει το χρησιμοποιούμενο ως πρώτη ύλη κράμα αλουμινίου.

DE02. Ραβδώσεις από άνθρακα

Εναλλακτική περιγραφή:

Όταν χρησιμοποιείται άνθρακας στην εξόλκυση είναι ενδεχόμενη η εμφάνιση μαύρων γραμμών στην επιφάνεια του κατεργασμένου αντικειμένου λόγω πρόσληψης του στοιχείου αυτού. Οι γραμμές μάλιστα, αυτές δεν απομακρύνονται πλήρως κατά τη μηχανική λείανση ενώ κατά τη

διαβρωτική λείανση (χημική ή ηλεκτροχημική) υφίστανται εκλεκτική προσβολή από το διαβρωτικό μέσο με αποτέλεσμα να δημιουργείται ανάγλυφη επιφάνεια στη θέση των γραμμών.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η θεραπεία συνίσταται σε διαβρωτικό καθαρισμό σε βάθος χωρίς όμως αυτό να αποτελεί ικανοποιητική λύση επειδή αφ' ενός χάνεται υλικό και άλλοι πόροι (ηλεκτρική ενέργεια και αναλώσιμα υλικά, πρόσθετη εργασία ανθρώπων και μηχανών) και αφ' ετέρου η αρχική εκλεκτική προσβολή δημιουργεί δευτερογενώς κέντρα αταξιών κατά μήκος των γραμμών από άνθρακα, τα οποία είναι ενεργειακά αναβαθμισμένα, άρα προτιμώνται από το διαλυτικό μέσο ή τον ηλεκτρολύτη με αποτέλεσμα να συνεχίζεται η εκλεκτική προσβολή σε βάθος. Η πρόληψη συνίσταται στην αποφυγή χρήσης άνθρακα ή όταν η χρήση αυτή είναι αναπόφευκτη να λαμβάνονται προφυλακτικά μέτρα αποφυγής της πρόσφυσης του άνθρακα πάνω στο επεξεργαζόμενο κράμα.

DE03. Χονδρόκοκες Ταινίες (Coarse grain bands)

Εναλλακτική περιγραφή:

Κατά την έξοδο από την κεφαλή του εξολκέα, το κράμα του αλουμινίου ευρίσκεται σε πλαστική κατάσταση. Αν η ροή δεν είναι σταθερή στις διάφορες περιοχές της διατομής του σχήματος που προσλαμβάνει το υλικό, τότε το μέγεθος, το σχήμα και ο προσανατολισμός των κόκκων που προκύπτουν τελικά με αυθόρμητη ανακρυστάλλωση, προκειμένου να επιτευχθεί θερμοδυναμική ισορροπία σε σχετικά ευσταθή κατάσταση, δεν έχουν την απαιτούμενη ομοιογένεια. Το παρουσιαζόμενο ελάττωμα έχει τη μορφή διακριτών ταινιών κατά μήκος της κατεύθυνσης εξόγκυσης (die banding) ενώ περισσότερο εμφανής είναι οι ταινίες με το χονδρόκοκκο υλικό. Κατά τη διάρκεια των επομένων σταδίων του διαβρωτικού καθαρισμού, της ανοδίωσης, της βαφής και του σφραγίσματος (sealing), το ελάττωμα αυτό γίνεται εμφανέστερο λόγω εκλεκτικής διάβρωσης, ανοδίωσης, βαφής και σφραγίσματος, αντίστοιχα.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η πρόληψη συνίσταται στον ανασχεδιασμό της κεφαλής (μήτρας) του εξολκέα με τρόπο που να διασφαλίζεται η σύγχρονη ροή, ιδιαίτερα στα στενά τμήματα της διατομής (π.χ. αύξηση του πάχους ή/και της ακτίνας καμπυλότητας).

DE04. Γραμμώσεις / Χαραγές από την κεφαλή / μήτρα του εξολκέα (die lines / grooves)

Εναλλακτική περιγραφή:

Κατά την έξοδο από την κεφαλή/μήτρα του εξολκέα, το υλικό ευρίσκεται υπό έντονη καταπόνηση, ωθούμενο από την υδραυλική πίεση του εμβόλου. Αν η επιφάνεια της μήτρας που έρχεται σε επαφή με το υλικό δεν έχει τέλειο φινίρισμα (εντελώς λεία), τότε οι οποιεσδήποτε ατέλειες θα αποτυπωθούν στο διαμορφούμενο υλικό ως γραμμώσεις/χαραγές κατά μήκος της κατεύθυνσης εξόγκυσης. Στη συνηθισμένη περίπτωση που το φινίρισμα δεν έχει συγκεκριμένο ελάττωμα αλλά είναι απλώς δεύτερης ποιότητας, οι γραμμώσεις/χαραγές είναι σχετικά ρηχές και ομοιόμορφα κατανεμημένες, έχοντας σαφής ομοιότητες με τις αντίστοιχες χαραγές της διέλασης, όταν τα έλαστρα έχουν ατελές φινίρισμα, ή έχει αρχίσει να φθείρεται το καλό αρχικό φινίρισμά τους. Για τη θεραπεία συνίσταται πρακτική παρόμοια με αυτή που ακολουθείται κατά τη διαδικασία 'ρεκτιφιέ' μηχανής αυτοκινήτου: αποσυναρμολογείται η κεφαλή του εξολκέα και δίνεται η μήτρα για λείανση (μηχανική, χημική, ηλεκτροχημική) της επιφάνειας με την προϋπόθεση ότι τα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά παραμένουν εντός των προδιαγραφών του τελικού αντικειμένου. Σε αντίθετη περίπτωση είτε προστίθεται υλικό είτε αντικαθίσταται η μήτρα.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Για την πρόληψη του ελαττώματος, πρέπει να ελέγχεται σχολαστικά η επιφάνεια της μήτρας, κατά προτίμηση με πειραματική προσομοίωση χρησιμοποιούμενου ενός δυσκολοεπεξεργάσιμου (π.χ. δύστηκτου) κράματος αλουμινίου σε όμοιο εξολκέα μικρής κλίμακας σύμφωνα με τις αρχές της θεωρίας ομοιότητας και της κλιμάκωσης του μεγέθους (similarity theory - scale up/down).

DE05. Σχισίματα προκαλούμενα από τη μήτρα (die tirs) λόγω πρόσκτησης υλικού (die pick-up)

Εναλλακτική περιγραφή:

Το αλουμίνιο, ιδιαίτερα ορισμένα κράματα αυτού με μέταλλα σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας τήξεως έχει την τάση να προσκολλάται στα χαλύβδινα τοιχώματα της μήτρας υπό την επίδραση υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Όταν η συγκόλληση αυτή συμβαίνει, τότε η συγκαλούμενη μικρή ποσότητα μάζας κράματος αλουμινίου πάνω στο χάλυβα οξειδώνεται εύκολα προς οξείδιο του αργιλίου (αλουμίνα - Al_2O_3) το οποίο είναι ένα από τα σκληρότερα σώματα που υπάρχουν στη φύση. Η δημιουργούμενη προεξοχή του σκληρού οξειδίου πάνω στη μήτρα προκαλεί βαθιά ρηγμάτωση / σχίσσιμο στο σχετικά μαλακό κράμα αλουμινίου που διέρχεται από το σημείο αυτό ενώ υπάρχει η πιθανότητα επιταξιακής αύξησης της προεξοχής με νέα μάζα αλουμινίου που θα οξειδωθεί με τη σειρά του κ.ο.κ. Αυτό σημαίνει ότι το προκαλούμενο σχίσσιμο κατά μήκος της κατεύθυνσης εξόγκωσης θα βαθαινει μέχρις ότου η διατμηματική τάση στη διεπιφάνεια οξειδίου/χάλυβα υπερβεί μία κρίσιμη οριακή τιμή με αποτέλεσμα να σπάσει (προφανώς ακανόνιστα) η προεξοχή. Αλλά και στην περίπτωση αυτή, το σχίσσιμο εξακολουθεί σε μικρότερο βάθος, τουλάχιστον μέχρις ότου αρχίσει πάλι η αύξηση του υπολείμματος της προεξοχής, δημιουργούμενου ενός νέου κύκλου. Σημειώνεται ότι ακόμη και αν εξαλειφθεί πλήρως κατά τη θραύση η προεξοχή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρής κοιλότητας στη βάση της υπό μορφή κρατήρα, πάλι θα υπάρχει ατέλεια στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου αντικειμένου λόγω ακριβώς της ύπαρξης του κρατήρα. Η απομάκρυνση του οξειδίου από τη μήτρα μπορεί να επιτευχθεί με την αποσυναρμολόγησή της και την εμβάπτιση σε διάλυμα καυστικού νατρίου, οπότε το οξείδιο διαλύεται προς $Al_2O_3 + 2NaOH \rightarrow 2NaAlO_3 + H_2O$ αργιλικό νάτριο, το οποίο είναι ευδιάλυτο στο νερό.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Η μείωση της πιθανότητας εμφάνισης του ελαττώματος αυτού επιτυγχάνεται με χρησιμοποίηση κραμάτων αλουμινίου που έχουν μικρότερη τάση συγκόλλησης με τον ανοξειδωτο χάλυβα.

DE06. Συσσωματώματα βαριούχου τιτανίου (titanium boride clusters)

Εναλλακτική περιγραφή:

Μερικές φορές προστίθεται στην προς εξόγκωση ή προς διέλαση πρώτη ύλη βοριούχο τιτάνιο (TiB_2) ως αντιδραστήριο εξευγενισμού προκειμένου να επιτευχθεί λεπτόκοκκο προϊόν ομοιόμορφης εμφάνισης. Όταν όμως δεν διασφαλίζεται καλή διασπορά του, προστιθέμενου υπό μορφή σύρματος υλικού, δημιουργούνται συσσωματώματα TiB_2 τα οποία αποτελούν καθοδικές περιοχές κατά τις διεργασίες του διαβρωτικού καθαρισμού, της χημικής λείανσης και της ανοδίωσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροσκοπικών κρατήρων στην επιφάνεια του τελικού προϊόντος. Όσο μεγαλύτερα τα συσσωματώματα, τόσο μεγαλύτεροι οι κρατήρες.

Προτεινόμενη Διορθωτική Παρέμβαση

Για την πρόληψη του φαινομένου αυτού συνίσταται η προσθήκη TiB_2 στη μήτρα υπό μορφή κόκκων και όχι σύρματος ώστε να διασφαλίζεται κατά το δυνατό η καλή διασπορά. Εν τούτοις, αν το ελάττωμα δεν εξαλείφεται είναι προτιμότερη η διακοπή της συγκεκριμένης προσθήκης, ιδιαίτερα σε κράματα αλουμινίου που περιέχουν φάσεις οι οποίες ευνοούν τη συσσωμάτωση του TiB_2 .

DE07. Αποκάλυψη γραμμών συγκόλλησης (weld lines)

Εναλλακτική περιγραφή:

Κατά την παραγωγή κοίλων προϊόντων, η ροή δια μέσου της μήτρας/κεφαλής του εξογκέα διακόπτεται προκειμένου να διατηρηθεί το σχήμα του προϊόντος με ένα πείρο ή μια 'γέφυρα'. Αν η ροή στη βάση του πείρου ή της οποιασδήποτε άλλης σύνδεσης δεν είναι ομοιόμορφη και τόσο η θερμοκρασία όσο και η πίεση δεν έχουν κατάλληλες ενδεικνυόμενες υψηλές τιμές, η επιχειρούμενη συγκόλληση θα αφήσει ένα βαθύ ίχνος και ενδεχόμενα δεν θα είναι

ισχυρή/σταθερή. Κατά τα στάδια του διαβρωτικού καθαρισμού και της ανοδίωσης που ακολουθούν, η γραμμή ή ζώνη ή ραφή συγκόλλησης θα γίνει περισσότερο εμφανής. Για την πρόληψη του ελαττώματος συνίσταται η ρύθμιση των συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης στην περιοχή λίγο πριν την κεφαλή του εξολκέα.

Δείγμα ελεγχόμενου λεξιλογίου για τον εμπλουτισμό της ΚΒ του Πληροφοριακού Συστήματος, μέσω αυτόνομου/ευφυούς μηχανισμού αναζήτησης (Intelligent Agent)

MP01. Abrasive blasting marks (patchy blasting)	EP13. Rinse water corrosion (pitting)
MP02. Barrel polishing defects (speckles)	AA01. Burnt surface (large rough pits)
MP03. Linishing marks (abrasive belt marks)	AA02. Pitted finish (pin spotting)
MP04. Polishing drag marks (comet's tail)	AA03. Clear chromic film (chromic film not grey)
MP05. Polishing mop burns (white patches/polishing burns)	AA04. Crazed anodic film (cracked anodic film)
MP06. Polishing mop chatter (wobble marks)	AA05. Opaque appearance (dull coating)
MP07. Wire brush drag marks (surface tears)	AA06. Lacking brilliance/luster (partial loss of brightness)
MP08. Wire brush pick-up (pitting marks)	AA07. 'Salted' surface (aluminium salts precipitation)
MP09. Atmospheric corrosion (pre-etch corrosion)	AA08. Galvanic pitting (pitted finish)
MP10. Cardboard (or paper) corrosion (corrosion patches)	AA09. Patchiness (characteristic marks due to poor rinsing)
MP11. Water stains (white stains)	AA10. Powdery surface (white patches)
SC01. Acid attack (white pitting)	AA11. Soft coating (low hardness or abrasion resistance)
SC02. Alkali attack (white pits)	AA12. Wrong film thickness (too thin/too thick film)
SC03. Chlorinated solvent corrosion (degreaser corrosion)	AA13. Finger marking (fingerprint corrosion)
SC04. Cleaner etches (matt appearance)	ED01. Acid leaching (bleached areas)
SC05. Finger marking (fingerprint corrosion)	ED02. Color too light or too dark (off-shade)
SC06. Mixed oxide patches (white patches)	ED03. Galvanic pitting (white spots)
SC07. Patchiness (dull patches)	ED04. Off-color (wrong color)
SC08. Polishing residues (baked-on compo)	ED05. Patchiness (uneven color)
SC09. Silicate slime residues (cleaner residues)	ED06. Shielding in electrolytic coloring (uneven coloring)
CP01. Barnacling (white nodules)	ED07. Spalling (flaking)
CP02. Bath contamination (organic contamination)	ED08. Surface deposit (loose deposit)
CP03. Coarse brightness (coarse pitting)	ED09. Undyed spots (clear patches)
CP04. Dull appearance (poor brightness)	ED10. Galvanic pitting (white spots)
CP05. Fine pitting (gassing defects/speckling)	ED11. Finger marking (fingerprint corrosion)
CP06. Transfer etch (blue flash)	SF01. Chalky surface (white powder)
CP07. White etch (dull appearance)	SF02. Cold (impregnation) sealing defects (fails sealing test)
EP01. "Burnt" surface (pitted etched surface)	SF03. Coloration (green coloration/ yellowish bloom/whitish bloom)
EP02. Coarse etching (rough etching)	SF04. Cracking of film in sealing (sealing cracks)
EP03. Etch staining (drain marks)	SF05. Fails sealing test (water sealing/poor sealing)
EP04. Fingerprint corrosion (finger marking)	SF06. Galvanic pitting (pin spotting)
EP05. Incomplete stripping (rough spots)	SF07. Greenish film (nickel coloration)
EP06. Pre-etch corrosion (atmospheric corrosion)	SF08. Iridescence (interference films)
EP07. Rinse water corrosion (pitting)	SF09. Sealing smut (chalky surface)
EP08. Spangle (galvanization)	
EP09. Variable etching (non-uniform etch)	
EP10. White etch bloom (mixed oxide patches)	
EP11. Acid attack (white pitting)	
EP12. Alkali attack (white pits)	

SF10. Surface smut (grey smut)
SF11. White bloom (white patches)
SF12. Galvanic pitting (pin spotting)
SF13. Finger marking (fingerprint corrosion)
DC01. Casting folds (cold laps)
DC02. Flow lines/diecastings (flow patterns)
DC03. Hot cracks (cracks)
DC04. Oxide inclusions (hard spots)
DC05. Pin-hole porosity (pin-hole spotting)
DC06. Segregation (mottling)

MP = Mechanical Pretreatment
SC = Surface Cleaning
CP = Chemical Polishing
EP = Etching Process
AA = Aluminium Anodization

DC07. Shrinkage porosity (voids)
DE01. Alloy contamination streaks (dark streaks)
DE02. Carbon streaks (black streaks)
DE03. Coarse grain bands (die banding)
DE04. Die lines (grooves)
DE05. Die tears (die pick-up)
DE06. Titanium boride inclusions (grain refiner pits)
DE07. extrusion weld lines (weld lines)

ED = Error observed after Dyeing
SF = Sealing Faults
DC = Defects due to Corrosion
DE = Defects (arising) from Extrusion

Σε παρένθεση, σημειώνεται η δευτερεύουσα ονομασία του ελαττώματος.

4.3 Σύνθεση/ανάλυση/αναθεώρηση δένδρου σφαλμάτων

Από την καταγραφή των βασικών ελαττωμάτων/σφαλμάτων κατά στάδιο κατεργασίας, της οποίας καταγραφής εκτενές δείγμα παρατίθεται στην προηγούμενη Ενότητα, έχουν δημιουργηθεί αντίστοιχα αρχεία στην KB, μετά από μελέτη σε φυσικό προσομοιωτή (i) της αντιστοίχησης [διαταραχή σε προηγούμενο στάδιο] → [ελάττωμα σε επόμενο στάδιο] και (ii) της επίδρασης των συνθηκών της ίδιας μεμονωμένης διεργασίας στις ιδιότητες (περιλαμβανομένης της απόκλισης από τις επιθυμητές προδιαγραφές καθώς και της εμφάνισης ελαττωμάτων) του επεξεργαζόμενου αντικειμένου. Με βάση τις καταγεγραμμένες σχέσεις αιτίου-αποτελέσματος έχουν δημιουργηθεί γενικευμένα δένδρα σφαλμάτων βασισμένα σε γεγονότα κορυφής, που έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: (i) αντιστοιχούν σε ελαττώματα που εμφανίζονται στα τελευταία στάδια της παραγωγής, άρα τα περιλαμβανόμενα αποτελέσματα οποιουδήποτε ενδιάμεσου ή τελικού γεγονότος έχουν (δυναμική) αιτία τόσο στην τρέχουσα όσο και σε όλες τις ανάντη (upstream) διεργασίες και (ii) προκύπτουν ως αποτέλεσμα πλήθους διαφορετικών αιτιών και επομένως τα αντίστοιχα μεγάλα δένδρα μπορεί να θεωρηθεί ότι συντίθεται από επιμέρους μικρότερα δένδρα, με γεγονότα κορυφής συνυφασμένα με ενδιάμεσα γεγονότα ενός τουλάχιστον μεγάλου δένδρου.

Περαιτέρω εμπλουτισμός των δομών αυτών είναι δυνατόν να επιτευχθεί με επέκταση των δένδρων, ώστε να περιληφθούν ανθρώπινα σφάλματα που είναι ενδεχόμενο να συμβούν λόγω (i) αλληλεπίδρασης μεταξύ του βιομηχανικού χειριστή (operator) και των συσκευών ελέγχου των μελετώμενων διεργασιών, κατ' αναλογία με την αλληλεπίδραση μεταξύ χρήστη H/Y και πληροφοριακού συστήματος (βλ. [23]), και (ii) διαφορετικού χαρακτηρισμού ελαττωμάτων, οφειλόμενου σε διαφορετική λεκτική απόδοση/διατύπωση, ιδιαίτερα όταν ο

χαρακτηρισμός γίνεται με τη βοήθεια συμβουλευτικού φορέα εκτός της βιομηχανικής επιχείρησης όπου πραγματοποιείται η παραγωγική διαδικασία. Η τελευταία περίπτωση απαντάται συχνά, όταν εξωτερικός φορέας ποιοτικού ελέγχου παρέχει τεχνική υποστήριξη σε μικρομεσαίους ανοδιωτές/επιμεταλλωτές [24]. Για την αποφυγή σφαλμάτων του τύπου αυτού (i) έχει αναπτυχθεί η περιγραφόμενη στο παρόν Κεφάλαιο KB υπό μορφή δένδρου σφαλμάτων και (ii) έχει υιοθετηθεί ελεγχόμενο λεξιλόγιο ως μέρος μιας οντολογίας εννοιών-σχέσεων για την μετάβαση από μία θετικοαναλυτική (positive/analytic) σε μία κανονιστική (normative) προσέγγιση.

Ο προσδιορισμός των ασαφών δεικτών σημαντικότητας (FSIs) που χρησιμοποιούνται ως μέτρο της έντασης της συνολικής αιτιώδους σχέσης, η οποία συνδέει το γεγονός κορυφής (αποτέλεσμα) με κάθε φύλλο (αιτία) του δένδρου, γίνεται ως εξής:

Έστω το ενδιάμεσο ή τελικό γεγονός e , A το σύνολο των γεγονότων κάτω από το πατρικό γεγονός του e , συμβολιζόμενο με $p(e)$, p_e^N η κανονικοποιημένη τιμή του FSI που αναφέρεται στο γεγονός e , $p_{p(e)}$ η τιμή του FSI του πατρικού γεγονότος, p_e^0 η αρχική τιμή του FSI που αναφέρεται στο γεγονός e .

α) αν e κάτω από πύλη OR, τότε:
$$p_e^N = \frac{p_e^0}{\sum_{i \in A} p_i^0}$$

β) αν e κάτω από πύλη AND, τότε:
$$p_e^N = \frac{1 - p_e^0}{\sum_{i \in A} (1 - p_i^0)}$$

Η νέα τιμή του FSI, p_e υπολογίζεται από τη σχέση $p_e = p_e^N p_{p(e)}$.

Η αυτόματη αναθεώρηση των FSIs όλων των επιμέρους/ενδιάμεσων σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος, που συνδέουν θυγατρικά-μητρικά γεγονότα στο δένδρο ανάλυσης σφαλμάτων (βλ. στάδιο 28 στο Σχήμα 4.1), πραγματοποιείται με τη βοήθεια της παρακάτω αναφερόμενης αλγοριθμικής διαδικασίας.

α) Όταν απορρίπτεται η λύση/τελικό αίτιο A_k που βγήκε πρώτη στο FMCA:

Έστω m οι φορές που εμφανίζεται η A_k που απορρίπτεται και n ο αριθμός των υπολοίπων λύσεων, δηλ. $m + n$ το σύνολο. Τότε, το νέο FSI του A_k είναι: $p'_k = p_k - ap_k$, $k \leq m$, όπου a το εξωγενώς οριζόμενο ποσοστό κατά το οποίο μειώνεται το FSI που αντιστοιχεί στο τελικό αίτιο λόγω της μη επιβεβαίωσης. Η νέα τιμή του FSI των υπολοίπων τελικών αιτίων είναι:

$$p'_l = p_l + \frac{\sum_{j=1}^m ap_j}{\sum_{i=1}^n ap_i} p_l, l \leq n$$

Το ποσό κατά το οποίο αυξάνει το p_k και το p_l αθροίζεται αλγεβρικά στο FSI του από πάνω ενδιάμεσου αιτίου και έτσι έχουμε την προς τα πάνω ενημέρωση των FSIs (βλ. Παράρτημα Ι).

β) Όταν επιβεβαιώνεται η λύση/τελικό αίτιο A_l που βγήκε πρώτη στο FMCA:

Για όλα τα αίτια στο δένδρο (ενδιάμεσα/τελικά), $FSI = \text{rel.freq.}$ και γίνεται επανυπολογισμός των κανονικοποιημένων και τελικών FSIs (βλ. Παράρτημα ΙΙ).

Η σχετική συχνότητα (rel.freq.) προσδιορίζεται γενικώς ως ο λόγος 'αριθμός φορών (s) που επιβεβαιώθηκε το εξεταζόμενο αίτιο ως υπεύθυνο του αναλυόμενου σφάλματος (top event)' προς τον 'αριθμό φορών (a) που επιχειρήθηκε μία τέτοια επιβεβαίωση'. Όταν εκτελείται FMCA μεταξύ εναλλακτικών αιτιών που έχουν ως πατρικό ένα ενδιάμεσο γεγονός e (περιλαμβανομένου του αναλυόμενου αρχικού σφάλματος), τότε ισχύει ότι

$$s'_e = s_e + 1, a'_e = a_e + 1$$

όπου οι δείκτες s και a αναφέρονται στο γεγονός e .

Έστω A το σύνολο των γεγονότων του δρόμου που οδηγεί προς τα κάτω (downstream) σε τελικό γεγονός που έχει επιβεβαιωθεί και B το συμπληρωματικό σύνολο των αδελφών γεγονότων που έχουν ως πατέρα το ίδιο ενδιάμεσο ή αρχικό γεγονός (επομένως έχουν ίσο πλήθος αριθμών στον κωδικό τους). Έστω C το σύνολο των εικονιζόμενων στο δένδρο γεγονότων που αντιστοιχούν στο ίδιο επιβεβαιωμένο τελικό γεγονός αλλά διαφέρουν ως προς την τοπολογία τους (δηλ. τη θέση τους στο δένδρο, με συνέπεια να έχουν διαφορετικό κωδικό). Τότε, οι νέες τιμές s'_e και a'_e ενός γεγονότος $e \in A$ είναι:

(A1) Εάν το e ευρίσκεται κάτω από πύλη OR:

$$s'_e = s_e + \frac{s_e}{\sum_{i \in C} s_i} x, a'_e = a_e + x$$

όπου x η ποσότητα κατά την οποία αυξήθηκε η τιμή του s του πατρικού γεγονότος

(A2) Εάν το e ευρίσκεται κάτω από πύλη AND:

$$s'_e = s_e + x, a'_e = a_{p(e)}$$

όπου $a_{p(e)}$ η τιμή του a του πατέρα του e .

Εάν $e \in B$:

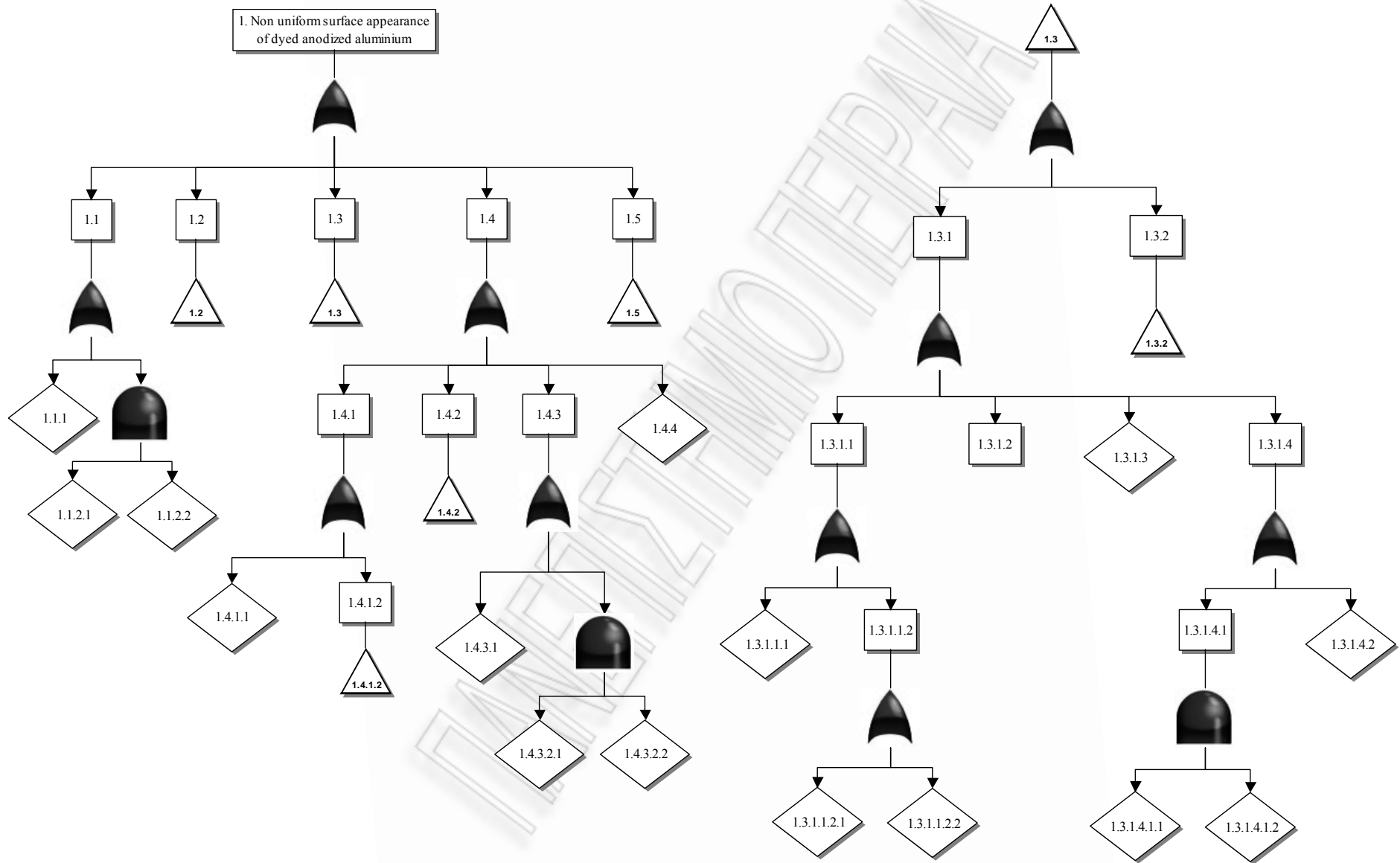
(B1) Εάν το e ευρίσκεται κάτω από πύλη OR:

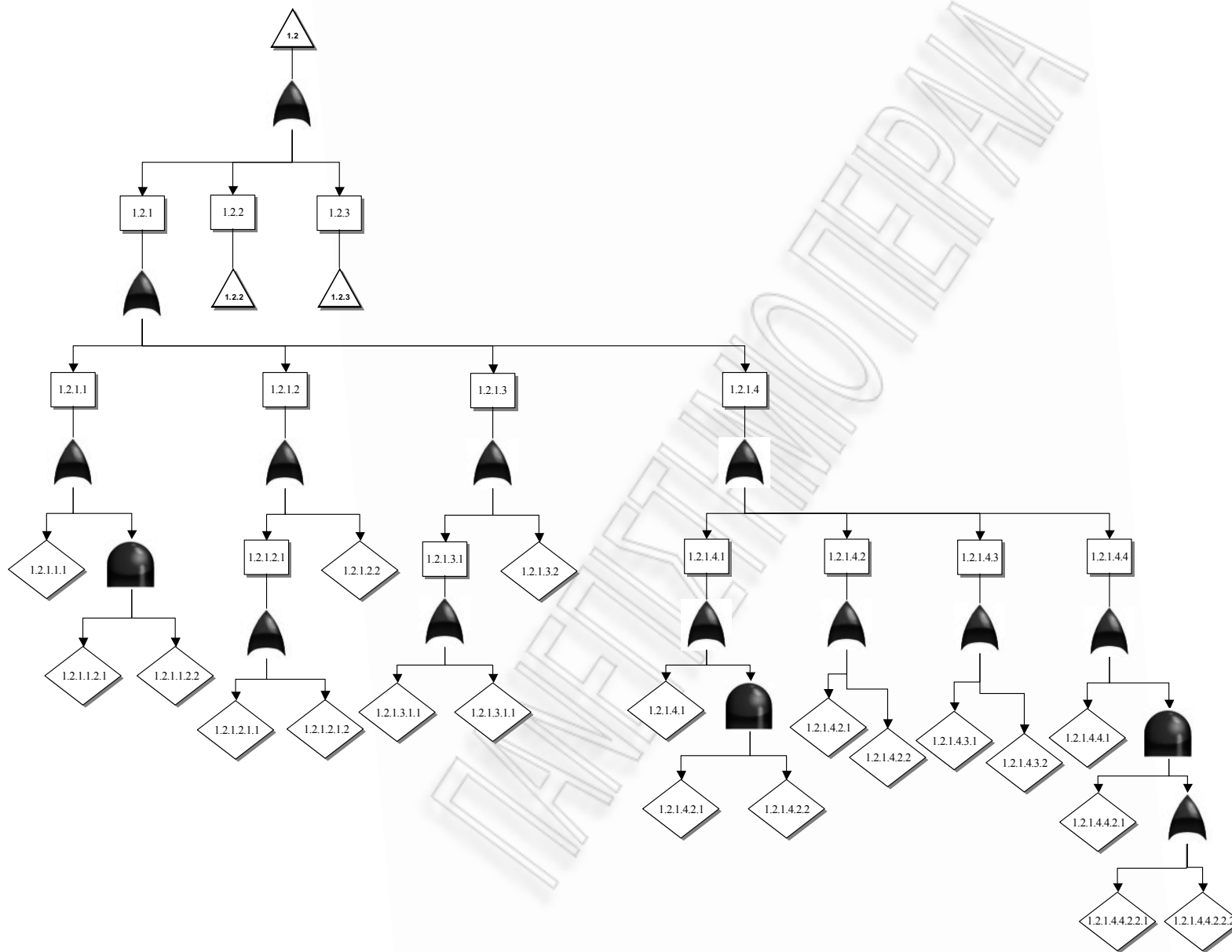
$$a'_e = a_e + x$$

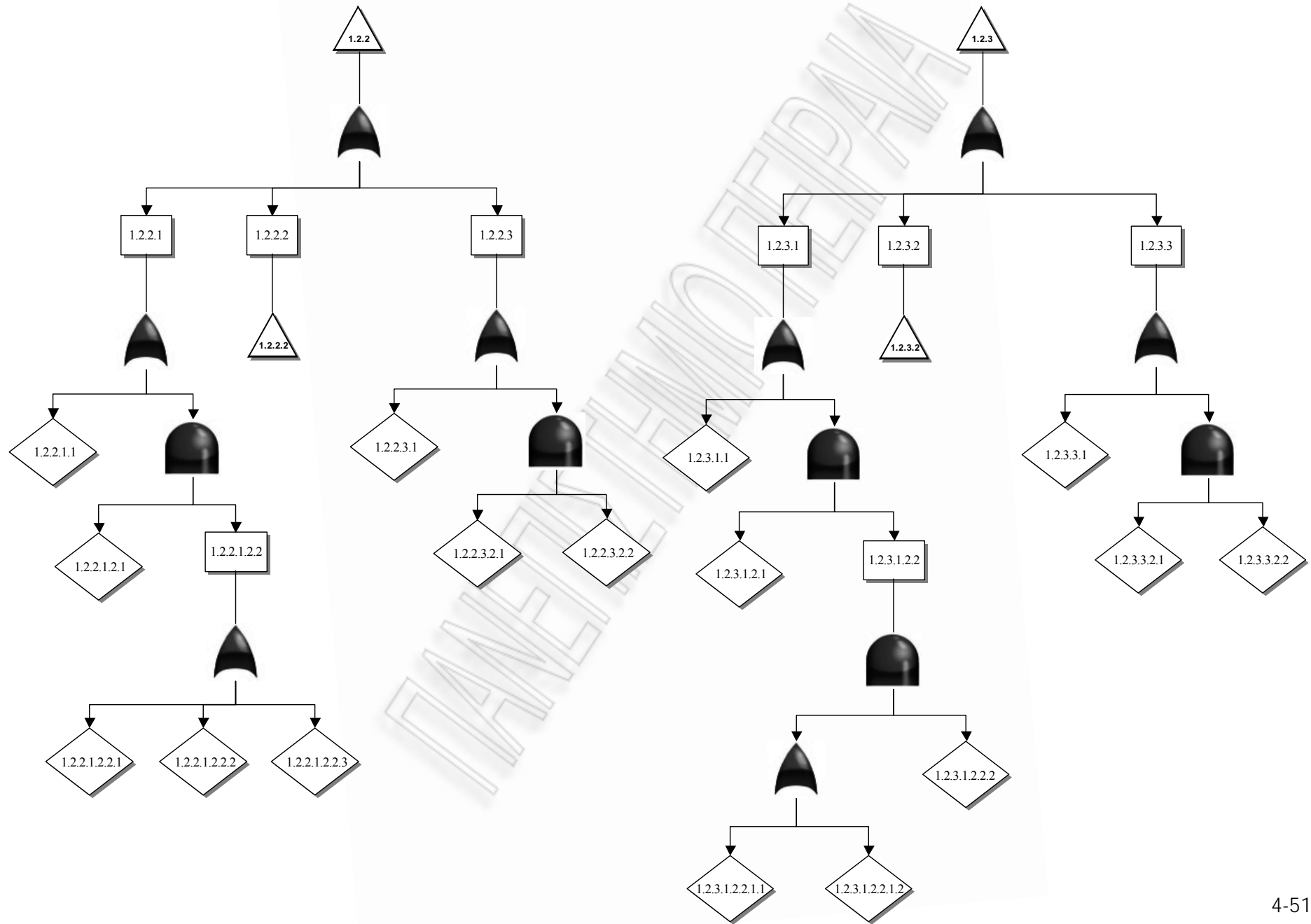
(B2) Εάν το e ευρίσκεται κάτω από πύλη AND:

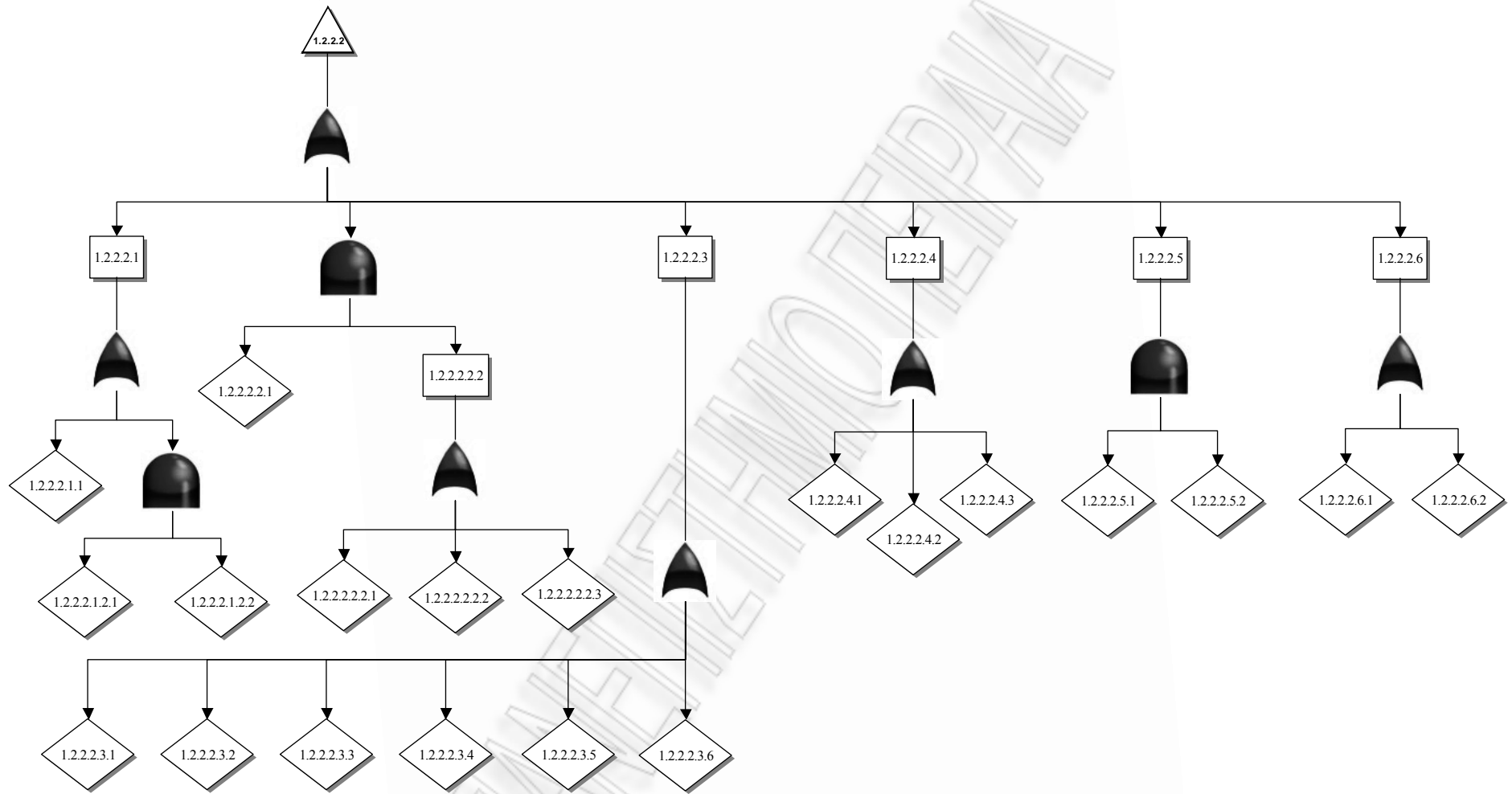
$$a'_e = a_{p(e)}$$

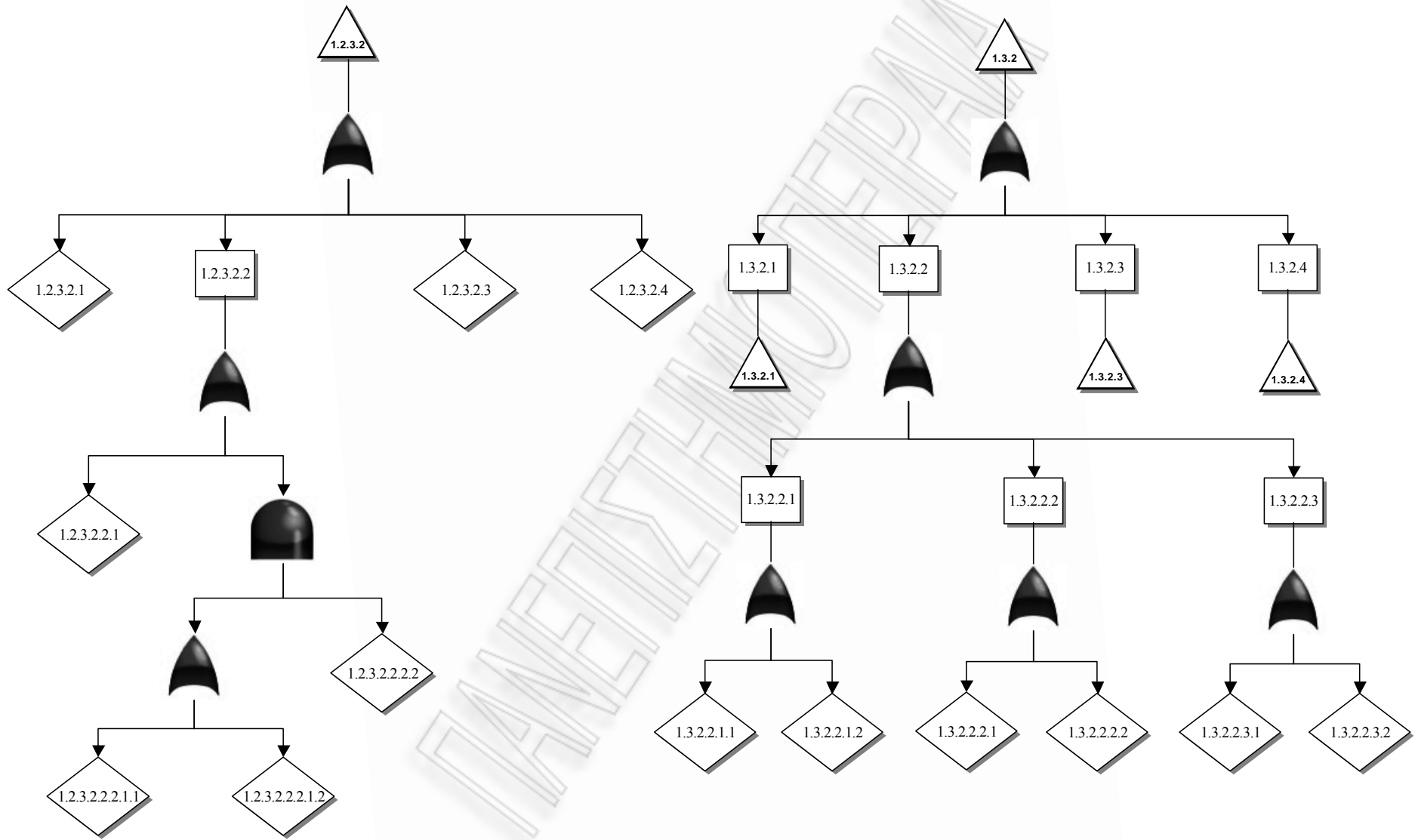
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΠΛΙΑ

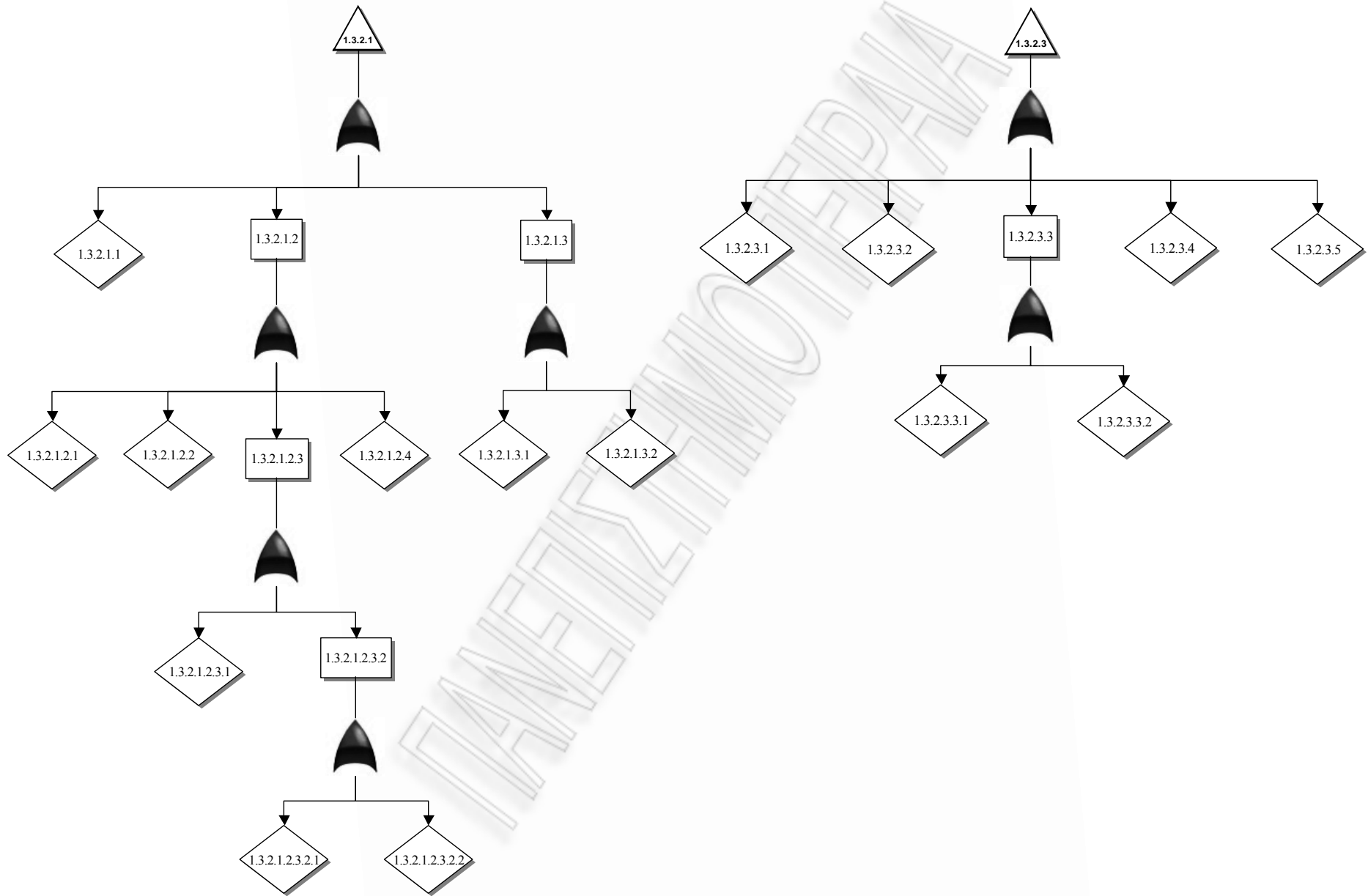


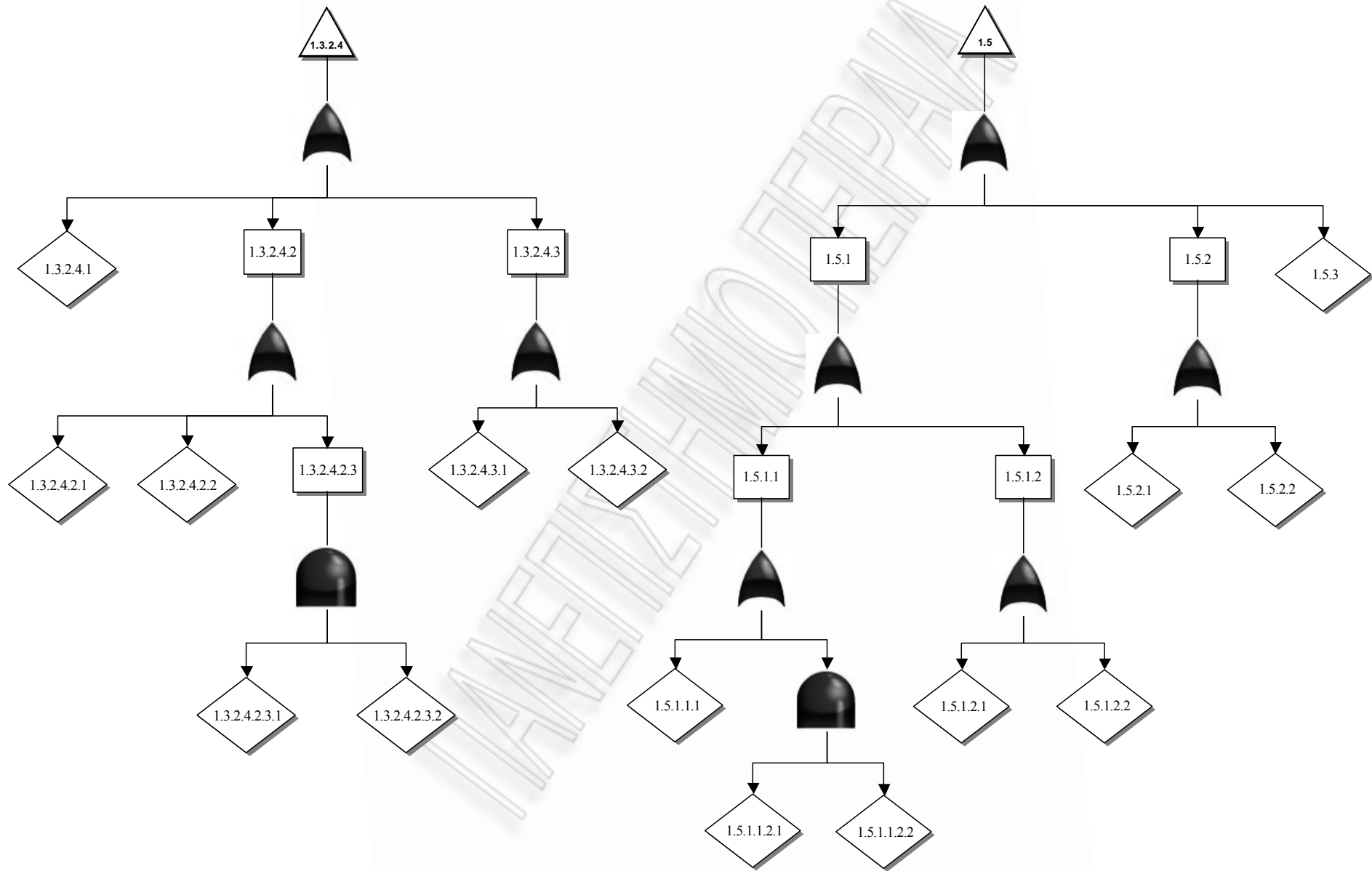


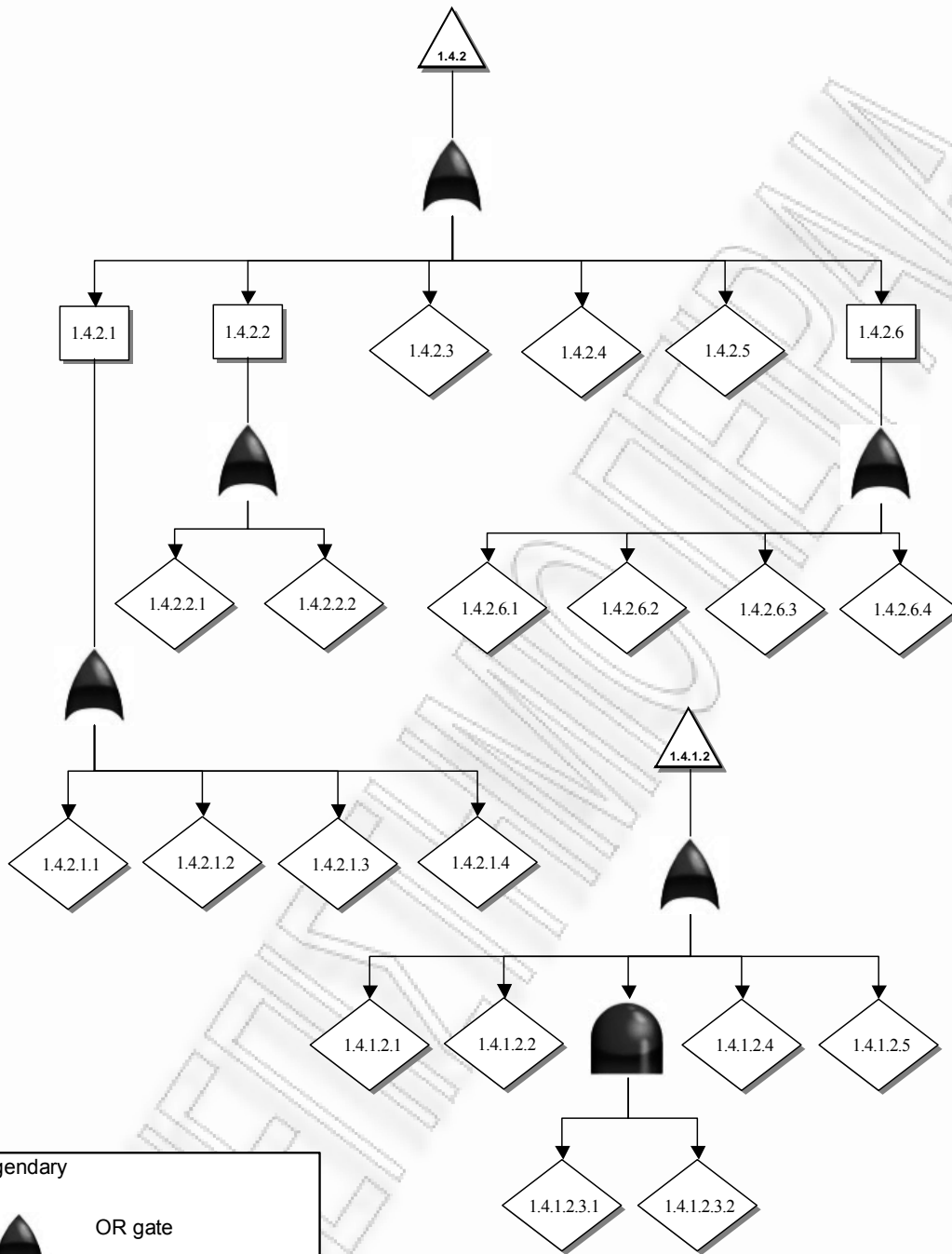




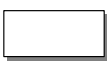












Legendary	
	OR gate
	AND gate
	intermediate or top event
	final event or ultimate cause
	outgate to another part of the tree

- 1.1 Metallurgy
 - 1.1.1 Near-surface structural disorder appeared in FS1 or FS2
 - 1.1.2.1 Appearance of surface disorder
 - 1.1.2.2 Production of thin stressed sheet components
- 1.2 Preparation
 - 1.2.1 Mechanical polishing
 - 1.2.1.1 Grouping of the surface
 - 1.2.1.1.1 Particles of metal have been built up on the polishing wheel
 - 1.2.1.1.2.1 Embodying of abrasive
 - 1.2.1.1.2.2 Dissolving out of embedded particles in the dilute sodium hydroxide solution
 - 1.2.1.2 Rough uniform surface
 - 1.2.1.2.1 Intensive sand-blasting
 - 1.2.1.2.1.1 Increased air pressure
 - 1.2.1.2.1.2 Large nozzle size
 - 1.2.1.2.2 Finishing abrasive grain size greater than necessary
 - 1.2.1.3 Surface deformation
 - 1.2.1.3.1 Increased local temperature
 - 1.2.1.3.1.1 High polishing wheel speed
 - 1.2.1.3.1.2 High/uneven buff pressure
 - 1.2.1.3.2 High/uneven buff pressure
 - 1.2.1.4 Rough non uniform surface
 - 1.2.1.4.1 Local electrochemical corrosion
 - 1.2.1.4.1.1 Improper bath creating local galvanic cells of dissolution/deposition
 - 1.2.1.4.1.2.1 Contamination with brass or iron oxide
 - 1.2.1.4.1.2.2 Long storing of unprotected metal after scratchbrushing or sandblasting
 - 1.2.1.4.2 Patches of lattice distortion
 - 1.2.1.4.2.1 Contamination in crystal lattice scale
 - 1.2.1.4.2.2 Increased local temperature
 - 1.2.1.4.3 Cuttings
 - 1.2.1.4.3.1 High polishing wheel speed
 - 1.2.1.4.3.2 High buff pressure
 - 1.2.1.4.4 Dragging
 - 1.2.1.4.4.1 Usage of uncleaned brushes holding metal oxide particles
 - 1.2.1.4.4.2.1 Inadequate grinding for elimination of pores
 - 1.2.1.4.4.2.2.1 High buff pressure
 - 1.2.1.4.4.2.2.2 High polishing wheel speed
 - 1.2.2 Chemical etching
 - 1.2.2.1 Acid etching
 - 1.2.2.1.1 Occlusion of hydrogen in aluminium cavities
 - 1.2.2.1.2.1 Near-surface structural disorder
 - 1.2.2.1.2.2 Extended chemical attack
 - 1.2.2.1.2.2.1 High bath
 - 1.2.2.1.2.2.2 High bath acidity
 - 1.2.2.1.2.2.3 High retention time
 - 1.2.2.2 Alkaline etching
 - 1.2.2.2.1 Formation of rock-like deposits of aluminium hydroxide on the coils and tank walls
 - 1.2.2.2.1.1 Depletion of additives
 - 1.2.2.2.1.2.1 Low bath alkalinity
 - 1.2.2.2.1.2.2 Bath ageing
 - 1.2.2.2.2.1 Near surface structural disorder
 - 1.2.2.2.2.2 Extended chemical attack
 - 1.2.2.2.2.2.1 High bath temperature
 - 1.2.2.2.2.2.2 High bath alkalinity

- 1.2.2.2.2.3 High retention time
- 1.2.2.3 Desmut process
- 1.2.2.3.1 Workpiece left less than necessary in the acid desmut solution
- 1.2.2.3.2 Workpiece left more than necessary in the acid desmut solution
- 1.2.2.3.3 Appearance of surface defect
- 1.2.3 Electropolishing
- 1.2.3.1 Chemical pretreatment
- 1.2.3.1.1 Occlusion of hydrogen in aluminium cavities
- 1.2.3.1.2.1 Near-surface structural disorder
- 1.2.3.1.2.2 Extended chemical attack
- 1.2.3.1.2.2.1.1 High bath acidity
- 1.2.3.1.2.2.1.2 High retention time
- 1.2.3.1.2.2.2 Appearance of surface defect
- 1.2.3.2 Electrolytic etching
- 1.2.3.2.1 Insufficient agitation
- 1.2.3.2.2 Bad relative movement of bath liquid
- 1.2.3.2.2.1 Improper moving of oscillating anode bar
- 1.2.3.2.2.2.1.1 Wrong arrangement of baffle plates
- 1.2.3.2.2.2.1.2 Non existence of baffle plates
- 1.2.3.2.2.1.2 Strong hydrogen evolution at the cathodes
- 1.3 Anodizing
- 1.3.1 Problem in current supply
- 1.3.1.1 Problem in main line of AC supply
- 1.3.1.2 Problem in rectifying
- 1.3.1.2.1 Excessive ripple
- 1.3.1.2.2 One phase of the three-phase circuit fails
- 1.3.1.3 Small cross sections of rack stems and wires
- 1.3.1.4 Loss of electrical contact
- 1.3.1.4.1 Loose mechanical contact
- 1.3.1.4.1.1 Not firmly tight before starting the process
- 1.3.1.4.1.2 Strong agitation in the vicinity of particle
- 1.3.1.4.2 Oxidation of jig holding the workpiece
- 1.3.2 Uneven anodic coating
- 1.3.2.1 Uneven distribution of electrolytic field
- 1.3.2.1.1 Too big a cathode area
- 1.3.2.1.2 Wrong arrangement of articles in the bath
- 1.3.2.1.2.1 Articles very close to electrodes
- 1.3.2.1.2.2 Articles very close to liquid/air
- 1.3.2.1.2.3 Wrong direction of critical faces of articles in racking
- 1.3.2.1.2.3.1 Wrong initial arrangement
- 1.3.2.1.2.3.2 Change of critical faces during anodizing
- 1.3.2.1.2.3.2.1 Strong agitation
- 1.3.2.1.2.3.2.2 Inadequate holding on suspended hooks
- 1.3.2.1.2.4 Insufficient space between articles
- 1.3.2.1.3 High resistance at busbar and cathode rail joints
- 1.3.2.1.3.1 Local corrosion deposits
- 1.3.2.1.3.2 Inadequate electrical contact
- 1.3.2.2 Inhomogeneity of bath
- 1.3.2.2.1 Non-uniform distribution of electrolyte concentration
- 1.3.2.2.1.1 Insufficient agitation
- 1.3.2.2.1.2 Bath ageing
- 1.3.2.2.2 Non uniform distribution of additives concentration
- 1.3.2.2.2.1 Insufficient agitation
- 1.3.2.2.2.2 Bath depletion of additives
- 1.3.2.2.3 Non uniform distribution of temperature

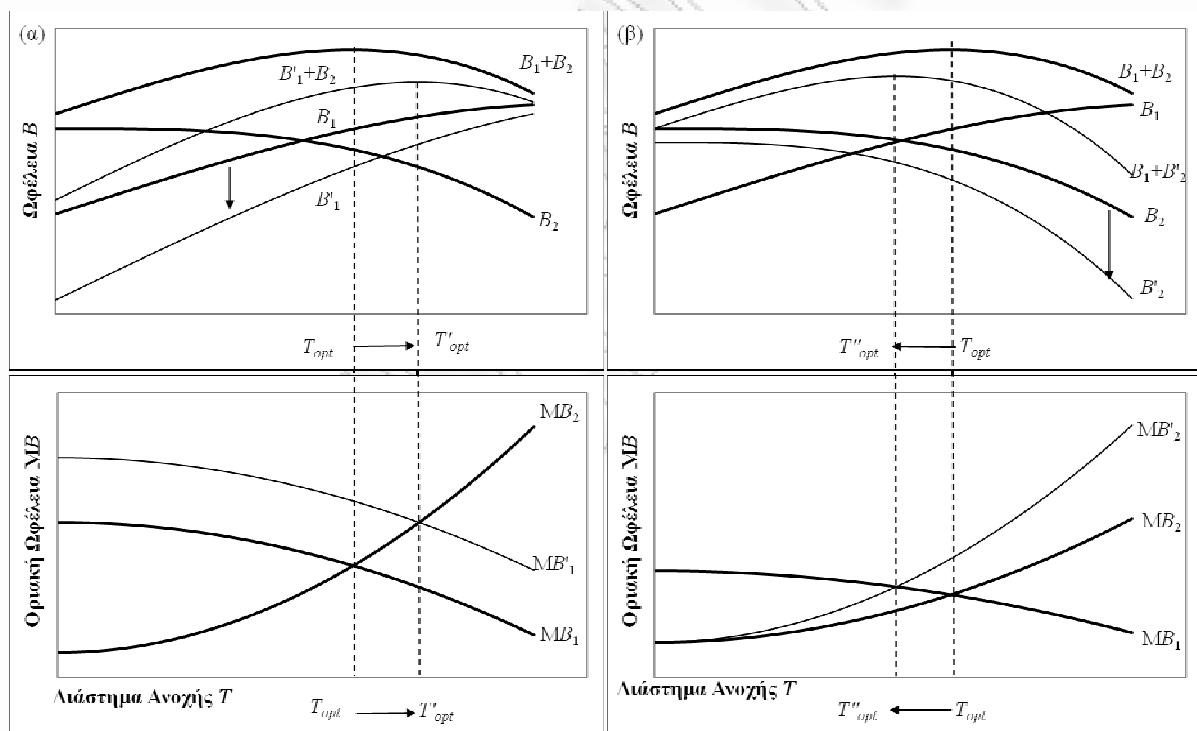
- 1.3.2.2.3.1 Insufficient agitation
- 1.3.2.2.3.2 Uneven cooling
- 1.3.2.3 Inhomogeneity of metallic surface
- 1.3.2.3.1 Insufficient etching
- 1.3.2.3.2 Insufficient desmudging
- 1.3.2.3.3 Appearance of new oxides
- 1.3.2.3.3.1 Formation of natural aluminium oxide
- 1.3.2.3.3.2 Oxide deposits as result of local corrosion
- 1.3.2.3.4 Insufficient rinsing
- 1.3.2.3.5 Dirt, grease and finger-marks caused during handling before anodizing
- 1.3.2.4 Inhomogeneity of compact film
- 1.3.2.4.1 Mechanical stress
- 1.3.2.4.2 Inhomogeneity of chemical composition
- 1.3.2.4.2.1 Appearance of new oxides
- 1.3.2.4.2.2 Outward diffusion of cations
- 1.3.2.4.2.3 Inward diffusion of anions
- 1.3.2.4.2.3.1 High concentration of anions in the bath
- 1.3.2.4.2.3.2 Active centres on solid surface for anion adsorption
- 1.3.2.4.3 Dislocations
- 1.3.2.4.3.1 Electronic
- 1.3.2.4.3.2 Structural
- 1.4 Dyeing
- 1.4.1 Parts of the anodic film with decreased sorptive capacity
- 1.4.1.1 Dirt, grease and finger-marks on anodic surface before dyeing
- 1.4.1.2 Partial ageing/sealing
- 1.4.1.2.1 Incomplete drying before temporary storing items waiting for further dyeing
- 1.4.1.2.2 Delay between rinsing after anodizing and subsequent dyeing
- 1.4.1.2.3.1 Existence of reactants responsible for complex formation
- 1.4.1.2.3.2 Proper conditions for complex formation
- 1.4.1.2.4 Use of hot water for rinsing after anodizing
- 1.4.1.2.5 Use of a dyeing solution with temperature higher than the upper limit of the recommended range
- 1.4.2 Improper dyebath
- 1.4.2.1 Unsuitable type of dyestuff
- 1.4.2.1.1 Sensitive to light
- 1.4.2.1.2 Sensitive to pH change
- 1.4.2.1.3 High propensity to form dimers or polymers
- 1.4.2.1.4 High tendency to decompose
- 1.4.2.2 Deviation from the recommended dyebath concentration/pH/temperature values in the vicinity of certain areas of the anodic surface
- 1.4.2.2.1 Improper motion of article in the bath
- 1.4.2.2.2 Insufficient agitation
- 1.4.2.3 Unequal dyeing time when many articles are treated in successive batches
- 1.4.2.4 Contamination of the dye-solution with other substances
- 1.4.2.5 Use of hard water
- 1.4.2.6 Existence of particles of undissolved dyestuff in suspension in dyebath
- 1.4.2.6.1 Inadequate time to dissolve
- 1.4.2.6.2 High concentration
- 1.4.2.6.3 Low temperature
- 1.4.2.6.4 Bath ageing
- 1.4.3 Set up of local electrolytic cells during dyeing
- 1.4.3.1 Article composed of anodized aluminium in contact with another metal
- 1.4.3.2.1 Contact of article with walls of dye tank
- 1.4.3.2.2 Use of a dye tank made of stainless steel or another conducting material
- 1.5 Sealing

- 1.5.1 Improper bath
- 1.5.1.1 Non uniform distribution of salt concentration
- 1.5.1.1.1 Inadequate agitation
- 1.5.1.1.2.1 Salt depletion
- 1.5.1.1.2.2 Inadequate rinsing after dyeing
- 1.5.1.2 Non uniform distribution of bath temperature
- 1.5.1.2.1 Inadequate agitation
- 1.5.1.2.2 Non uniform distribution of temperature
- 1.5.2 Improper salt
- 1.5.2.1 Undesired reaction of salt with the anodic surface
- 1.5.2.2 Undesired reaction of additives with the anodic surface
- 1.5.3 Use of hard water

4.4. Διερεύνηση της επίδρασης του κόστους του σφάλματος – Εφαρμογή

Μπορούμε να μελετήσουμε την επίδραση του κόστους του σφάλματος στη βελτιστοποίηση τιμών κρίσιμων παραμέτρων σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, όπως αυτά αποτυπώνονται στο δέντρο σφαλμάτων, ακολουθώντας την αναφερόμενη στις [12, 25-27] μεθοδολογία. Με τον τρόπο αυτό, αναδεικνύεται η λογική της μεθόδου της απομόνωσης ενός τελικού αιτίου και της διαδικασίας ελαχιστοποίησης της έντασής του, κάτω από ορισμένες τεχνικές δεσμεύσεις. Ως κατάλληλο υπόδειγμα, αναλύεται η περίπτωση 1.1.2.2, επειδή είναι το πλέον ανάντη σφάλμα και επομένως επηρεάζει όλα τα στάδια της παραγωγής των ανοδιωμένων αντικειμένων, ανεξάρτητα του εάν η καθετοποίηση ολοκληρώνεται σε μία ή περισσότερες βιομηχανικές επιχειρήσεις. Το συγκεκριμένο σφάλμα αναφέρεται στην παραγωγή πολύ λεπτών ελασμάτων αλουμινίου, στα οποία αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης περιοχών με αταξίες δομής, όπου η ανοδίωση και η βαφή διαφοροποιούνται με αποτέλεσμα το τελικό σφάλμα της 'ετερογενούς επιφάνειας του ανοδιωμένου αλουμινίου'. Ως ανεξάρτητη/ερμηνευτική μεταβλητή λαμβάνεται το διάστημα ανοχής T (tolerance interval) και ως εξαρτημένη μεταβλητή (αντικειμενική συνάρτηση – objective function) η προκύπτουσα ωφέλεια B (benefit), όπως αυτή προσδιορίζεται από την ανταπόκριση στην ποιότητα του προϊόντος και τη ζήτηση στην αντίστοιχη αγορά. Διακρίνουμε τις μερικές αντιμαχόμενες εξαρτημένες μεταβλητές (conflict variables) B_1 , B_2 ($B_1+B_2=B$), όπου $B_1(T)$ η ωφέλεια από την αποφυγή σφάλματος και $B_2(T)$ η ωφέλεια που σχετίζεται με τη διασπορά των τιμών μιας προκαθορισμένης κρίσιμης παραμέτρου. Αναμένεται ότι η $B_1(T)$ είναι αύξουσα συνάρτηση του T αλλά με φθίνοντα ρυθμό αύξησης, αφού αυξανόμενη της τιμής του T μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος (δηλ. $dB_1/dT > 0$ και $d^2B_1/dT^2 < 0$). Επίσης, αναμένεται ότι η $B_2(T)$ είναι φθίνουσα συνάρτηση του T αλλά με αύξοντα απόλυτο ρυθμό αύξησης, λόγω μεγαλύτερης διασποράς των τιμών της κρίσιμης παραμέτρου στην περιοχή των υψηλότερων τιμών του T (δηλ. $dB_2/dT < 0$ και $d|dB_2/dT|/dT > 0$).

Η βέλτιστη τιμή του T λαμβάνεται με μεγιστοποίηση της ωφέλειας, ως η τεταμένη του σημείου $B_{\max}=(B_1+B_2)_{\max}$, όπου $d(B_1+B_2)/dT=0$ ή $dB_1/dT=|dB_2/dT|$ ή $MB_1=MB_2$ (όπου MB η οριακή ή διαφορική ωφέλεια). Όταν αυξάνεται το κόστος του σφάλματος, σε σχέση με την απομάκρυνση της μέσης τιμής της κρίσιμης παραμέτρου από την κεντρική τιμή \bar{T} του διαστήματος ανοχής, η καμπύλη B_1 μετατοπίζεται προς τα κάτω και γίνεται περισσότερο απότομη αφού το κόστος είναι μεγαλύτερο (άρα η ωφέλεια μικρότερη) στις μικρότερες τιμές του T . Ως αποτέλεσμα, η βέλτιστη τιμή T_{opt} μετατοπίζεται στην νέα τιμή T'_{opt} ($T'_{opt} > T_{opt}$), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6α. Όταν αυξάνεται το κόστος του σφάλματος σε σχέση με τη διασπορά των τιμών της κρίσιμης παραμέτρου, η καμπύλη B_2 μετατοπίζεται επίσης προς τα κάτω και γίνεται περισσότερο απότομη, αφού το κόστος είναι μεγαλύτερο (άρα η ωφέλεια μικρότερη) στις μεγαλύτερες τιμές του T . Ως αποτέλεσμα, η βέλτιστη τιμή T_{opt} μετατοπίζεται στην νέα τιμή T''_{opt} ($T''_{opt} > T_{opt}$), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6β.



Σχήμα 4.6. Εξάρτηση των μερικών μεταβλητών B_1 , B_2 και των αντίστοιχων οριακών μεγεθών MB_1 , MB_2 , από το διάστημα ανοχής T και απεικόνιση της μετατόπισης του T_{opt} , όταν αυξάνεται το κόστος του σφάλματος σε σχέση με (α) την απομάκρυνση της μέσης τιμής της κρίσιμης παραμέτρου από την κεντρική τιμή \bar{T} ή/και (β) τη διασπορά των τιμών της κρίσιμης παραμέτρου.

Στη βιομηχανική πράξη, ως κρίσιμη παράμετρο μπορούμε να θεωρήσουμε το μέσο πάχος \bar{x} των ελασμάτων, που συμπίπτει (κατά προσέγγιση) με το άνοιγμα/διάκενο των ελαστρών. Αν οι προδιαγραφές ορίζουν ότι $x_I \leq \bar{x} \leq x_{II}$, τότε τα παραγόμενα φύλλα, των

οποίων το πάχος υπερβαίνει το άνω όριο x_H , επιστρέφουν (ανακυκλώνονται ή ανακυκλοφορούν) για ελασματοποίηση στην ίδια γραμμή αναμονής που ευρίσκονται και εκείνα που θα υποστούν επεξεργασία για πρώτη φορά. Είναι προφανές ότι αυτή η διαδικασία μειώνει τον αριθμό των εκτός προδιαγραφών παραγόμενων προϊόντων αλλά αυξάνει την τελική δαπάνη κατεργασίας. Τα παραγόμενα φύλλα, των οποίων το πάχος είναι μικρότερο του κάτω ορίου x_L , πωλούνται σαν ελάσματα β' ποιότητας σε τιμή μικρότερη της κανονικής κατά C_2 νομισματικές μονάδες (ν.μ.), οπότε το ποσό αυτό είναι δυνατόν να ληφθεί ως κόστος σφάλματος. Αν το κόστος κάθε «περάσματος» ενός φύλλου από το έλαστρο είναι C_1 και από το σταθμό ποιοτικού ελέγχου QC είναι C_e , τότε είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το βέλτιστο «άνοιγμα» \bar{x}_{opt} των κυλίνδρων του ελάστρου (που συμπίπτει με το μέσο πάχος \bar{x}), με τις παρακάτω προϋποθέσεις (που οδηγούν διαζευκτικά σε τρεις λύσεις).

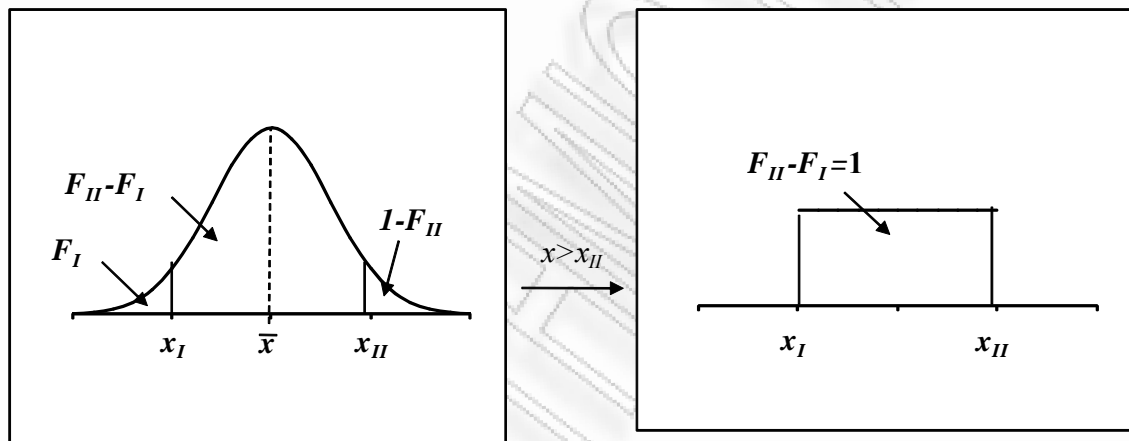
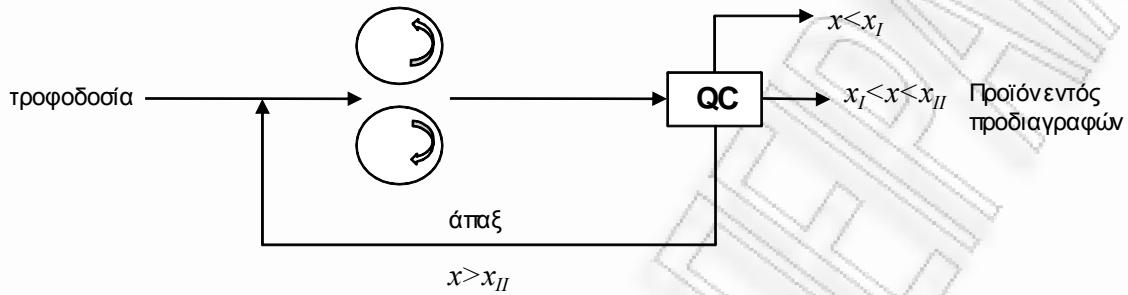
- (Α) Μετά την πρώτη επανακατεργασία, δεχόμαστε ότι όλα τα φύλλα της αρχικής παρτίδας είναι εντός των προδιαγραφών χωρίς να υποστούν πάλι ποιοτικό έλεγχο (Σχήμα 4.7, με μία μόνο ανακύκλωση για κάθε παρτίδα φύλλων).
- (Β) Μετά την πρώτη επανακατεργασία ακολουθεί ποιοτικός έλεγχος και ευρίσκεται ότι η κατανομή του πάχους είναι ίδια με αυτή της πρώτης κατεργασίας (Σχήμα 4.11, με άπειρες ανακυκλώσεις για κάθε παρτίδα φύλλων).
- (Γ) Προστίθεται και δεύτερο έλαστρο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14 με τις προϋποθέσεις της παραπάνω περίπτωσης (Β). Στην περίπτωση αυτή εξάγεται η σχέση με την οποία προσδιορίζονται οι τιμές των ανοιγμάτων των ελάστρων (ή του πάχους των φύλλων αντίστοιχα) \bar{x}_1, \bar{x}_2 , ως βέλτιστες τιμές της στοχαστικής μεταβλητής \bar{x} .

Δεχόμαστε ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, ακολουθείται η κανονική κατανομή (Gauss) και δεν απορρυθμίζονται τα έλαστρα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ενώ ως μοναδικό κριτήριο βελτιστοποίησης υιοθετείται η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους C . Η εύρεση του \bar{x}_{opt} σε κάθε περίπτωση γίνεται με γραφική επίλυση (ή υπολογιστικά, με μία επαναληπτική διαδικασία) των σχέσεων που προκύπτουν όταν θέσουμε $dC/d\bar{x} = 0$, στην περίπτωση ενός ελάστρου, ή $\partial C/\partial \bar{x}_j = 0$ στην περίπτωση J ελάστρων στη σειρά ($j=1,2,\dots,J$).

Περίπτωση (Α)

Αν τα εξερχόμενα από το έλαστρο φύλλα πάχους μεγαλύτερου του άνω ορίου εμπίπτουν όλα μέσα στις προδιαγραφές μετά από μία μόνο επανακατεργασία τους, τότε το συνολικό κόστος ελασματοποίησης είναι (ν.μ. ανά φύλλο) :

- $C =$ C_1 κόστος ελασματοποίησης πριν τον ποιοτικό έλεγχο
 $+ C_1(1-F_{II})$ κόστος επανακατεργασίας
 $+ C_2F_I$ απώλεια ν.μ. λόγω πώλησης προϊόντων β' ποιότητας
 $+ C_e$ κόστος ποιοτικού ελέγχου



Σχήμα 4.7. Περιγραφή της διαδικασίας στην περίπτωση (Α), με απεικόνιση των αντίστοιχων στατιστικών παραμέτρων.

Για την ελαχιστοποίηση του κόστους πρέπει

$$\frac{dC}{d\bar{x}} = 0 \quad \text{ή} \quad C_2 \frac{dF_I}{d\bar{x}} - C_1 \frac{dF_{II}}{d\bar{x}} = 0, \quad F_I, F_{II}, C_1, C_2, \bar{x} > 0 \quad (1)$$

Γνωρίζουμε ότι $Z_I = \frac{x_I - \bar{x}}{s}$, $Z_{II} = \frac{x_{II} - \bar{x}}{s}$, άρα $\frac{dZ_I}{d\bar{x}} = \frac{dZ_{II}}{d\bar{x}} = -\frac{1}{s}$.

Θέτουμε $\frac{dF_j}{dZ_j} = \phi_j$, οπότε η (1) γράφεται, με τη βοήθεια των μετασχηματισμών,

$$\frac{dF_I}{d\bar{x}} = \frac{dF_I}{dZ_I} \frac{dZ_I}{d\bar{x}} = -\frac{\phi_I}{s} \quad \text{και} \quad \frac{dF_{II}}{d\bar{x}} = \frac{dF_{II}}{dZ_{II}} \frac{dZ_{II}}{d\bar{x}} = -\frac{\phi_{II}}{s},$$

$$\text{ως εξής:} \quad -\frac{C_2\phi_I}{s} + \frac{C_1\phi_{II}}{s} = 0 \quad \text{ή} \quad C_2\phi_I = C_1\phi_{II} \quad \text{ή} \quad \frac{\phi_I}{\phi_{II}} = \frac{C_1}{C_2} \quad (2)$$

$$\text{ή } \exp(-\frac{1}{2}Z_1^2) / \exp(-\frac{1}{2}Z_2^2) = \frac{C_1}{C_2} \text{ ή } \exp[(Z_2^2 - Z_1^2)/2] = \frac{C_1}{C_2} \text{ ή } Z_2^2 - Z_1^2 = 2 \ln \frac{C_1}{C_2} \text{ ή}$$

$$\left(\frac{x_2 - \bar{x}}{s}\right)^2 - \left(\frac{x_1 - \bar{x}}{s}\right)^2 = 2 \ln \frac{C_1}{C_2} \text{ ή } (x_2 - \bar{x})^2 - (x_1 - \bar{x})^2 = 2s^2 \ln \frac{C_1}{C_2} \text{ ή}$$

$$[(x_2 - \bar{x}) + (x_1 - \bar{x})][(x_2 - \bar{x}) - (x_1 - \bar{x})] = 2s^2 \ln \frac{C_1}{C_2} \text{ ή } [(x_2 + x_1) - 2\bar{x}](x_2 - x_1) = 2s^2 \ln \frac{C_1}{C_2} \text{ ή}$$

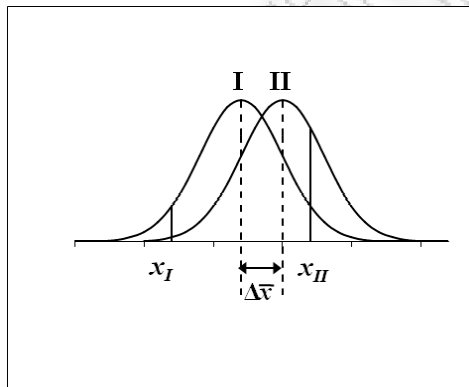
$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{s^2}{x_2 - x_1} \ln \frac{C_2}{C_1}, \text{ όπου } (x_1 + x_2)/2 \text{ η κεντρική τιμή } \bar{T} \text{ και } (x_2 - x_1) \text{ το πλάτος του}$$

διαστήματος ανοχής, C_2/C_1 το σχετικό κόστος σφάλματος και \bar{x} η βέλτιστη τιμή \bar{x}_{opt} , με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους C . Η συνθήκη δευτέρας τάξεως $d^2C/d\bar{x}^2 > 0$ ικανοποιείται, επειδή η συνάρτηση κόστους

$$C = C_1 + C_1(1 - F_{II}) + C_2F_I + C_\varepsilon \text{ δίνει } \frac{dC}{d\bar{x}} = -\frac{C_2}{s}\phi_I + \frac{C_1}{s}\phi_{II}, \text{ η οποία με τη σειρά της δίνει}$$

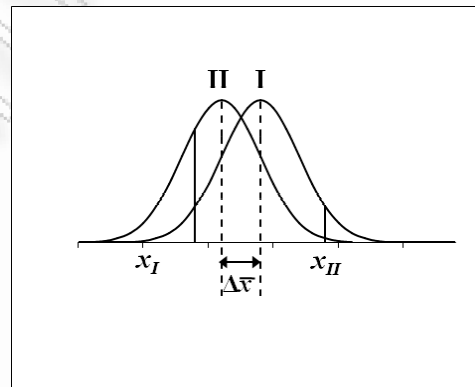
$$\frac{d^2C}{d\bar{x}^2} = -\frac{C_2}{s} \frac{d\phi_I}{d\bar{x}} + \frac{C_1}{s} \frac{d\phi_{II}}{d\bar{x}} > 0, \text{ επειδή } \frac{d\phi_I}{d\bar{x}} < 0, \frac{d\phi_{II}}{d\bar{x}} > 0 \text{ ή, κατά προσέγγιση,}$$

$$\frac{\Delta\phi_I}{\Delta\bar{x}} < 0, \frac{\Delta\phi_{II}}{\Delta\bar{x}} > 0, \text{ όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.8.}$$



$$\Delta\phi_I < 0, \Delta\phi_{II} > 0, \Delta\bar{x} > 0$$

$$\frac{\Delta\phi_I}{\Delta\bar{x}} < 0, \frac{\Delta\phi_{II}}{\Delta\bar{x}} > 0$$



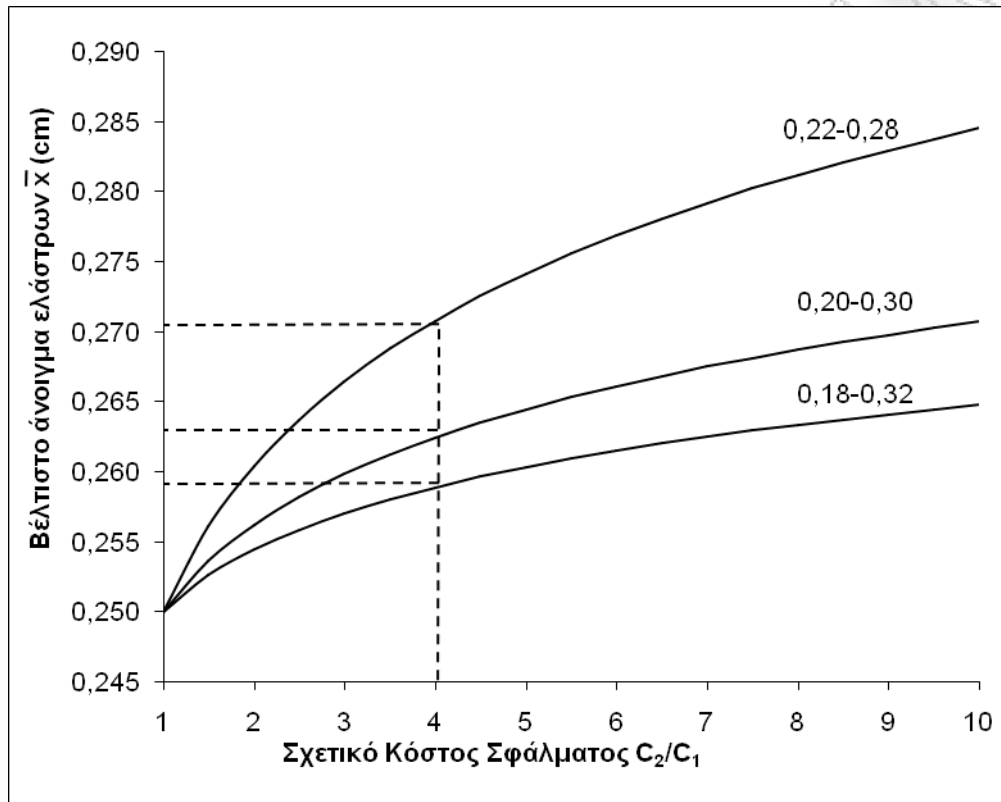
$$\Delta\phi_I > 0, \Delta\phi_{II} < 0, \Delta\bar{x} < 0$$

$$\frac{\Delta\phi_I}{\Delta\bar{x}} < 0, \frac{\Delta\phi_{II}}{\Delta\bar{x}} > 0$$

Σχήμα 4.8. Σχηματική απεικόνιση των ανισώσεων, υπό μορφή πεπερασμένων διαφορών, όπως αυτές χρησιμοποιούνται για την απόδειξη της ύπαρξης C_{min} .

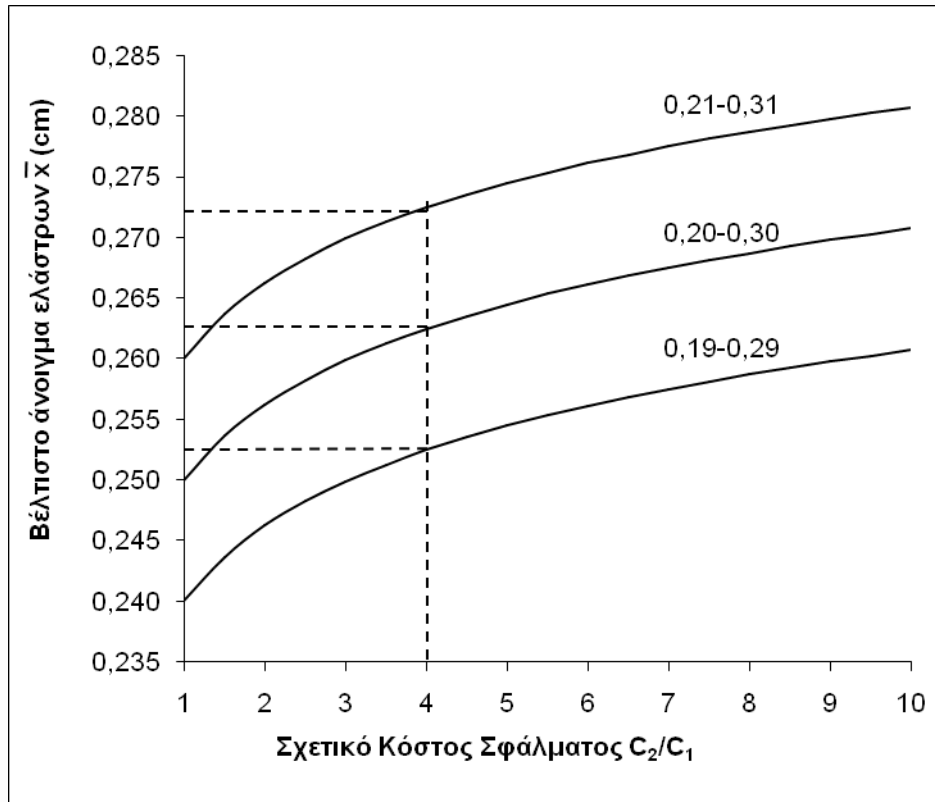
Στο Σχήμα 4.9, φαίνεται η εξάρτηση του βέλτιστου ανοίγματος ελαστρών \bar{x}_{opt} από το σχετικό κόστος σφάλματος C_2/C_1 , σύμφωνα με τις παραδοχές της περίπτωσης αυτής, για τρία διαστήματα ανοχής, που έχουν ίδια κεντρική τιμή ($\bar{T} = 0,25$) και όρια ισαπέχοντα (κατά 0,02

cm) μεταξύ τους: (0,22-0,28 cm), (0,20-0,30 cm), (0,18-0,32 cm). Οι βέλτιστες τιμές \bar{x}_{opt} είναι (0,2708 cm), (0,2625 cm), (0,2589 cm), αντίστοιχα, για $C_2 / C_1 = 4$ και $s = 0,03$ cm.



Σχήμα 4.9. Εξάρτηση του βέλτιστου ανοίγματος ελαστρων \bar{x}_{opt} από το σχετικό κόστος σφάλματος C_2/C_1 , όπου C_2 το κόστος σφάλματος και C_1 το κόστος επεξεργασίας, σύμφωνα με τις παραδοχές της περίπτωσης (A), για τρία διαστήματα ανοχής, που έχουν ίδια κεντρική τιμή ($\bar{T} = 0,25$) και όρια ισαπέχοντα (κατά 0,02 cm) μεταξύ τους: (0,22-0,28 cm), (0,20-0,30 cm), (0,18-0,32 cm). Οι βέλτιστες τιμές \bar{x}_{opt} είναι (0,2708 cm), (0,2625 cm), (0,2589 cm), αντίστοιχα, για $C_2 / C_1 = 4$ και $s = 0,03$ cm.

Στο Σχήμα 4.10, φαίνεται η εξάρτηση του βέλτιστου ανοίγματος ελαστρων \bar{x}_{opt} από το σχετικό κόστος σφάλματος C_2/C_1 , σύμφωνα με τις παραδοχές της περίπτωσης αυτής, για τρία διαστήματα ανοχής, πλάτους 0,10 cm, με κεντρικές τιμές ισαπέχουσες (κατά 0,01 cm) μεταξύ τους: (0,19-0,29 cm), (0,20-0,30 cm), (0,21-0,31 cm). Οι βέλτιστες τιμές \bar{x}_{opt} είναι (0,2525 cm), (0,2625 cm), (0,2725 cm), αντίστοιχα, για $C_2 / C_1 = 4$ και $s = 0,03$ cm.



Σχήμα 4.10. Εξάρτηση του βέλτιστου ανοίγματος ελαστρών \bar{x}_{opt} από το σχετικό κόστος σφάλματος C_2/C_1 , όπου C_2 το κόστος σφάλματος και C_1 το κόστος επεξεργασίας, σύμφωνα με τις παραδοχές της περίπτωσης (Α), για τρία διαστήματα ανοχής, πλάτους 0,10 cm, με κεντρικές τιμές ισαπέχουσες (κατά 0,01 cm) μεταξύ τους: (0,19-0,29 cm), (0,20-0,30 cm), (0,21-0,31 cm). Οι βέλτιστες τιμές \bar{x}_{opt} είναι (0,2525 cm), (0,2625 cm), (0,2725 cm), αντίστοιχα, για $C_2 / C_1 = 4$ και $s = 0,03$ cm.

Περίπτωση (B)

Η παραπάνω λύση είναι απλουστευμένη, επειδή ενδεχομένως δεν αρκεί μία μόνο επανακατεργασία, αφού τα ανακυκλούμενα φύλλα εντάσσονται στη ροή των ελασμάτων που θα υποστούν επεξεργασία για πρώτη φορά. Αν συμβολίσουμε με N το ποσοστό των επανακατεργαζομένων (σωρευτικά) φύλλων και με S τον συνολικό ποσοστό των φύλλων που έχουν πάχος μικρότερο του κάτω ορίου, η συνάρτηση κόστους γίνεται

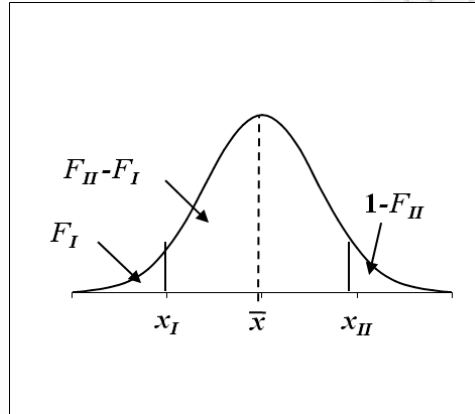
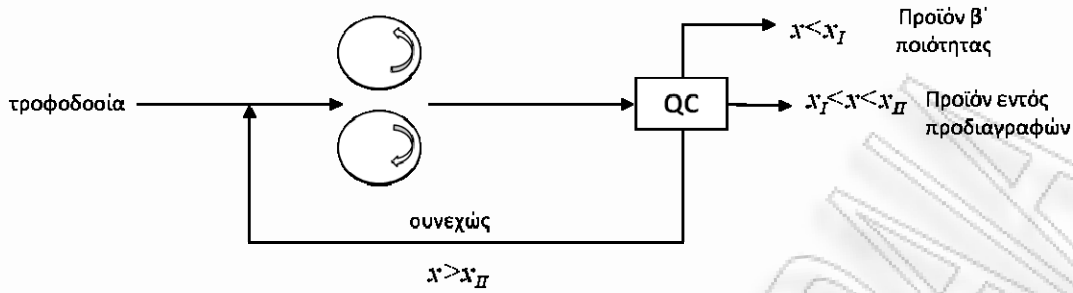
$$C = C_1 + C_\varepsilon + N(C_1 + C_\varepsilon) + SC_2 \quad (3)$$

Μετά την πρώτη επανακατεργασία, η αρχική παρτίδα θα έχει ποσοστά (λογιζόμενα ως κλάσματα της μονάδας, δηλ. 100%=1) φύλλων,

$(1-F_{II}) F_I$ με πάχος μικρότερο του κάτω ορίου,

$(1-F_{II}) (F_{II}-F_I)$ με πάχος εντός των προδιαγραφών,

$(1-F_{II}) (1-F_{II})$ με πάχος μεγαλύτερο του άνω ορίου.



Σχήμα 4.11. Περιγραφή της διαδικασίας στην περίπτωση (B), με απεικόνιση των αντίστοιχων στατιστικών παραμέτρων.

Τα φύλλα της τελευταίας κατηγορίας θα σταλούν για δεύτερη επανακατεργασία κ.ο.κ. Επομένως, το ποσοστό των συσσωρευτικά επανακατεργαζόμενων φύλλων (με επαναλήψεις) είναι:

$$N = (1 - F_{II}) + (1 - F_{II})^2 + \dots = \frac{1 - F_{II}}{F_{II}} \quad (4)$$

όπου το δεύτερο μέλος της σχέσης (4) είναι το όριο του αθροίσματος E_v των v πρώτων όρων γεωμετρικής προόδου όταν $v \rightarrow \infty$, σύμφωνα με την έκφραση:

$$E_v = \frac{\tau\omega - \alpha}{\omega - 1} = \frac{\alpha\omega^v - \alpha}{\omega - 1} \rightarrow \lim_{v \rightarrow \infty} \frac{\alpha\omega^v - \alpha}{\omega - 1} = \frac{-\alpha}{\omega - 1} = \frac{\alpha}{1 - \omega} \quad (\omega < 1)$$

(ω , α , τ είναι ο λόγος, ο πρώτος και ο τελευταίος όρος της γεωμετρικής προόδου, αντίστοιχα).

Το συνολικό ποσοστό των παραγόμενων φύλλων που έχουν πάχος μικρότερο του κάτω ορίου και πωλούνται σε μειωμένη τιμή είναι:

$$S = F_I + (1 - F_{II})F_I + (1 - F_{II})^2 F_I + \dots = F_I [1 + (1 - F_{II}) + (1 - F_{II})^2 + \dots] = F_I \frac{1}{F_{II}} \quad (5)$$

Άρα η (3) γίνεται

$$C = (C_1 + C_\varepsilon)\left(1 + \frac{1 - F_{II}}{F_{II}}\right) + C_2 \frac{F_I}{F_{II}} \quad \text{ή} \quad C = \frac{C_1 + C_\varepsilon}{F_{II}} + C_2 \frac{F_I}{F_{II}} \quad (6)$$

Για να έχουμε ελάχιστο κόστος πρέπει

$$\frac{dC}{d\bar{x}} = (C_1 + C_\varepsilon) \frac{d(1/F_{II})}{d\bar{x}} + C_2 \frac{d(F_I/F_{II})}{d\bar{x}} = 0 \quad (7)$$

Επειδή $\frac{d(1/F_{II})}{d\bar{x}} = \frac{dF_{II}^{-1}}{dZ} \frac{dZ}{d\bar{x}} = -\frac{1}{F_{II}^2} \frac{dF_{II}}{dZ} \left(\frac{dZ}{d\bar{x}}\right)$ ή $\frac{d(1/F_{II})}{d\bar{x}} = -\frac{1}{F_{II}^2} \phi_{II} \left(-\frac{1}{s}\right) = \frac{\phi_{II}}{sF_{II}^2}$ και

$$\frac{d(F_I/F_{II})}{d\bar{x}} = \frac{F_{II} \frac{dF_I}{d\bar{x}} - F_I \frac{dF_{II}}{d\bar{x}}}{F_{II}^2} \quad \text{ή} \quad \frac{d(F_I/F_{II})}{d\bar{x}} = \frac{F_{II} \frac{dF_I}{dZ} \frac{dZ}{d\bar{x}} - F_I \frac{dF_{II}}{dZ} \frac{dZ}{d\bar{x}}}{F_{II}^2} \quad \text{ή}$$

$$\frac{d(F_I/F_{II})}{d\bar{x}} = \frac{F_{II} \phi_I \left(-\frac{1}{s}\right) - F_I \phi_{II} \left(-\frac{1}{s}\right)}{F_{II}^2} = \frac{-\phi_I F_{II} + \phi_{II} F_I}{sF_{II}^2},$$

$$\text{η (7) γίνεται } (C_1 + C_\varepsilon)\phi_{II} + C_2(\phi_{II}F_I - \phi_I F_{II}) = 0 \quad \text{ή} \quad (\phi_I/\phi_{II})F_{II} - F_I = (C_1 + C_\varepsilon)/C_2 \quad (8)$$

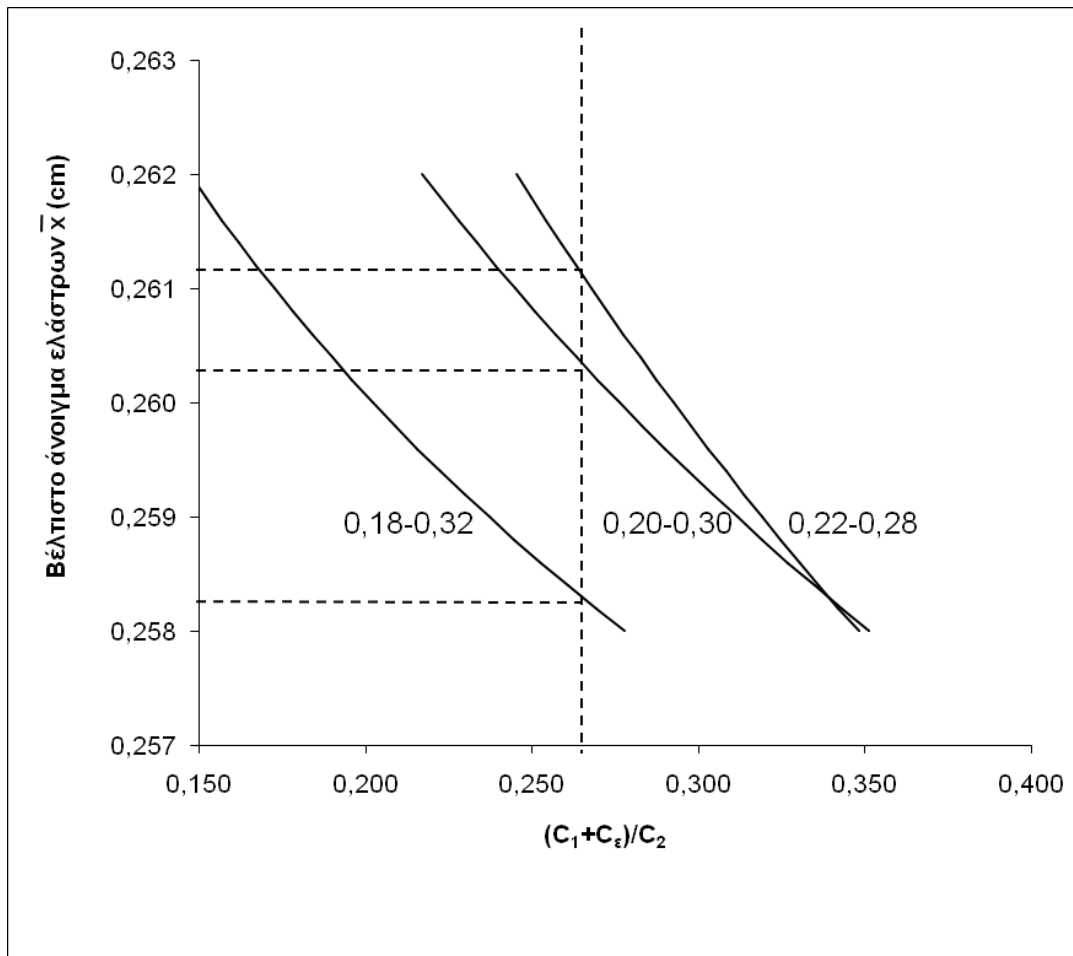
Από τις εξισώσεις (8) και (6) εκτιμώνται η βέλτιστη τιμή \bar{x}_{opt} και το ελάχιστο συνολικό κόστος C_{min} , με τη βοήθεια του προγράμματος που έχουμε αναπτύξει (βλ. Παράρτημα III, όπου υπάρχει πλήρης διερεύνηση των περιπτώσεων (A) και (B), με αριθμητικό παράδειγμα και ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση), στο οποίο οι τιμές $1-F(Z)$ για δεδομένο Z υπολογίζονται προσεγγιστικά με ολοκλήρωση της σειράς Maclaurin στην οποία αναλύεται η έκφραση $[\exp(-Z^2/2)]/(2\pi)^{1/2}$ της τυποποιημένης κανονικής κατανομής:

$$1 - F(Z) = 0,5 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(Z - \frac{Z^3}{3} + \frac{Z^5}{(5)2^2 2!} - \frac{Z^7}{(7)2^3 3!} + \frac{Z^9}{(9)2^4 4!} - \dots \right).$$

Όταν ισχύουν οι παραδοχές της περίπτωσης (A), τότε $F_I = 0$, $F_{II} = 1$, $C_\varepsilon = 0$, οπότε η (8) ταυτίζεται με την (2).

Στο Σχήμα 4.12, φαίνεται η εξάρτηση του βέλτιστου ανοίγματος ελαστρών \bar{x}_{opt} από το άθροισμα των σχετικών κοστών του σφάλματος (ως προς το κόστος επεξεργασίας C_1 και το κόστος ποιοτικού ελέγχου C_ε): $\frac{C_1 + C_\varepsilon}{C_2} \equiv \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{-1} + \left(\frac{C_2}{C_\varepsilon}\right)^{-1}$, σύμφωνα με τις παραδοχές

της περίπτωσης αυτής, για τρία διαστήματα ανοχής, που έχουν ίδια κεντρική τιμή ($\bar{T} = 0,25$) και όρια ισαπέχοντα (κατά 0,02 cm) μεταξύ τους: (0,22-0,28 cm), (0,20-0,30 cm), (0,18-0,32

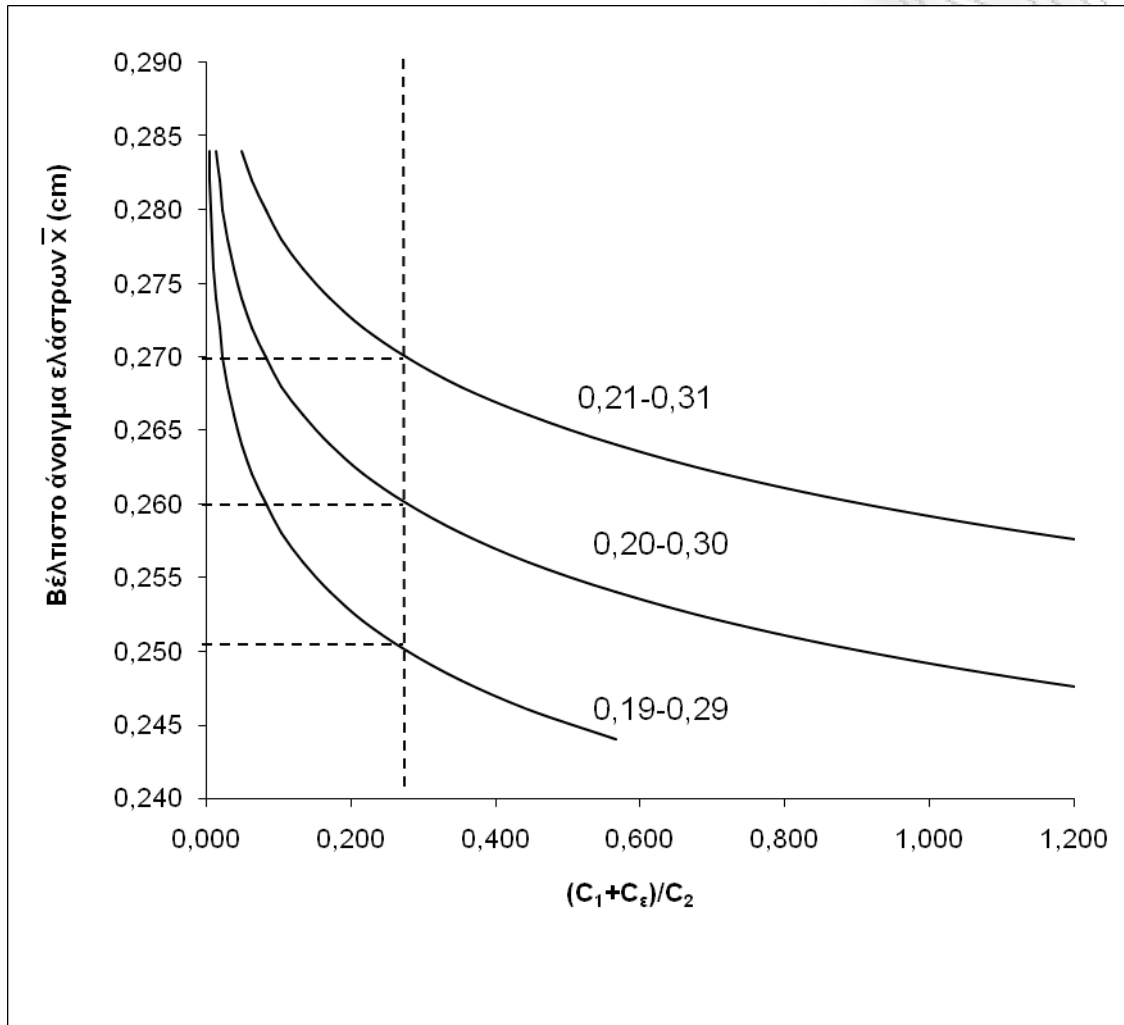


Σχήμα 4.12. Εξάρτηση του βέλτιστου ανοίγματος ελαστρών \bar{x}_{opt} από το άθροισμα των σχετικών κοστών του σφάλματος (ως προς το κόστος επεξεργασίας C_1 και το κόστος ποιοτικού ελέγχου C_ϵ): $\frac{C_1 + C_\epsilon}{C_2} \equiv \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{-1} + \left(\frac{C_2}{C_\epsilon}\right)^{-1}$, σύμφωνα με τις παραδοχές της περίπτωσης (B), για τρία διαστήματα ανοχής, που έχουν ίδια κεντρική τιμή ($\bar{T} = 0,25$) και όρια ισαπέχοντα (κατά 0,02 cm) μεταξύ τους: (0,22-0,28 cm), (0,20-0,30 cm), (0,18-0,32 cm). Οι βέλτιστες τιμές \bar{x}_{opt} είναι (0,2612 cm), (0,2604 cm), (0,2584 cm), αντίστοιχα, για $C_2 / C_1 = 4$, $C_2 / C_\epsilon = 80$ και $s = 0,03$ cm.

cm). Οι βέλτιστες τιμές \bar{x}_{opt} είναι (0,2612 cm), (0,2604 cm), (0,2584 cm), αντίστοιχα, για $C_2 / C_1 = 4$, $C_2 / C_\epsilon = 80$ και $s = 0,03$ cm.

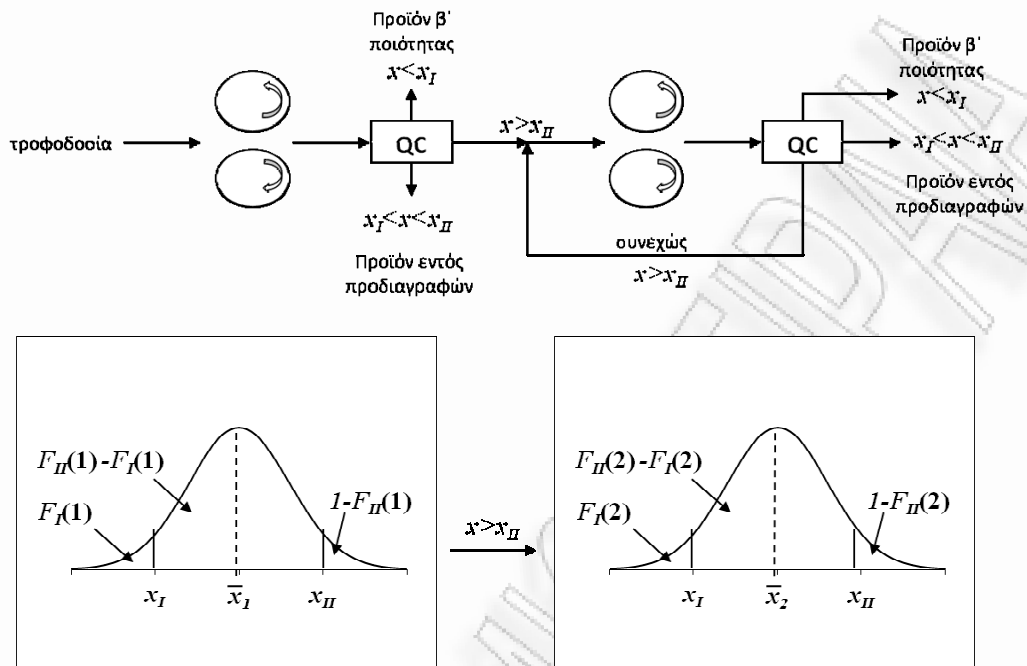
Στο Σχήμα 4.13, φαίνεται η εξάρτηση του βέλτιστου ανοίγματος ελαστρών \bar{x}_{opt} από το άθροισμα των σχετικών κοστών του σφάλματος (ως προς το κόστος επεξεργασίας C_1 και το κόστος ποιοτικού ελέγχου C_ϵ): $\frac{C_1 + C_\epsilon}{C_2} \equiv \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{-1} + \left(\frac{C_2}{C_\epsilon}\right)^{-1}$, σύμφωνα με τις παραδοχές

της περίπτωσης αυτής, για τρία διαστήματα ανοχής, πλάτους 0,10 cm, με κεντρικές τιμές ισαπέχουσες (κατά 0,01 cm) μεταξύ τους: (0,19-0,29 cm), (0,20-0,30 cm), (0,21-0,31 cm). Οι βέλτιστες τιμές \bar{x}_{opt} είναι (0,2504 cm), (0,2604 cm), (0,2704 cm), αντίστοιχα, για $C_2 / C_1 = 4$, $C_2 / C_\varepsilon = 80$ και $s = 0,03$ cm.



Σχήμα 4.13. Εξάρτηση του βέλτιστου ανοίγματος ελαστρών \bar{x}_{opt} από το άθροισμα των σχετικών κοστών του σφάλματος (ως προς το κόστος επεξεργασίας C_1 και το κόστος ποιοτικού ελέγχου C_ε): $\frac{C_1 + C_\varepsilon}{C_2} \equiv \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{-1} + \left(\frac{C_2}{C_\varepsilon}\right)^{-1}$, σύμφωνα με τις παραδοχές της περίπτωσης (B), για τρία διαστήματα ανοχής, πλάτους 0,10 cm, με κεντρικές τιμές ισαπέχουσες (κατά 0,01 cm) μεταξύ τους: (0,19-0,29 cm), (0,20-0,30 cm), (0,21-0,31 cm). Οι βέλτιστες τιμές \bar{x}_{opt} είναι (0,2504 cm), (0,2604 cm), (0,2704 cm), αντίστοιχα, για $C_2 / C_1 = 4$, $C_2 / C_\varepsilon = 80$ και $s = 0,03$ cm.

Περίπτωση (Γ)



Σχήμα 4.14. Περιγραφή της διαδικασίας στην περίπτωση (Γ), με απεικόνιση των αντίστοιχων στατιστικών παραμέτρων.

$$C = C_1 + C_\varepsilon + C_2 F_I(1) + [1 - F_{II}(1)][C_1 + C_\varepsilon + (C_1 + C_\varepsilon)N + C_2 S]$$

$$C = C_1 + C_\varepsilon + C_2 F_I(1) + [1 + F_{II}(1)][(C_1 + C_\varepsilon)(N + 1) + C_2 S]$$

$$C = C_1 + C_\varepsilon + C_2 F_I(1) + [1 - F_{II}(1)] \left[(C_1 + C_\varepsilon) \frac{1}{F_{II}(2)} + C_2 \frac{F_I(2)}{F_{II}(2)} \right]$$

$$C = \frac{C_1 + C_\varepsilon}{F_{II}(2)} [1 - F_{II}(1) + F_{II}(2)] + \frac{C_2}{F_{II}(2)} [F_I(2) - F_I(2)F_{II}(1) + F_{II}(2)F_I(1)] \quad (9)$$

Οπότε το βέλτιστο άνοιγμα των ελαστρών δίνεται από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων:

$$\frac{\partial C}{\partial \bar{x}_1} = 0 \quad \frac{\partial C}{\partial \bar{x}_2} = 0$$

Η συνθήκη δευτέρας τάξεως για την ελαχιστοποίηση του κόστους είναι:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}_1^2} & \frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}_1 \partial \bar{x}_2} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}_2 \partial \bar{x}_1} & \frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}_2^2} \end{vmatrix} > 0 \quad \text{ή} \quad \frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}_1^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}_2^2} - \left[\frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}_1 \partial \bar{x}_2} \right]^2 > 0$$

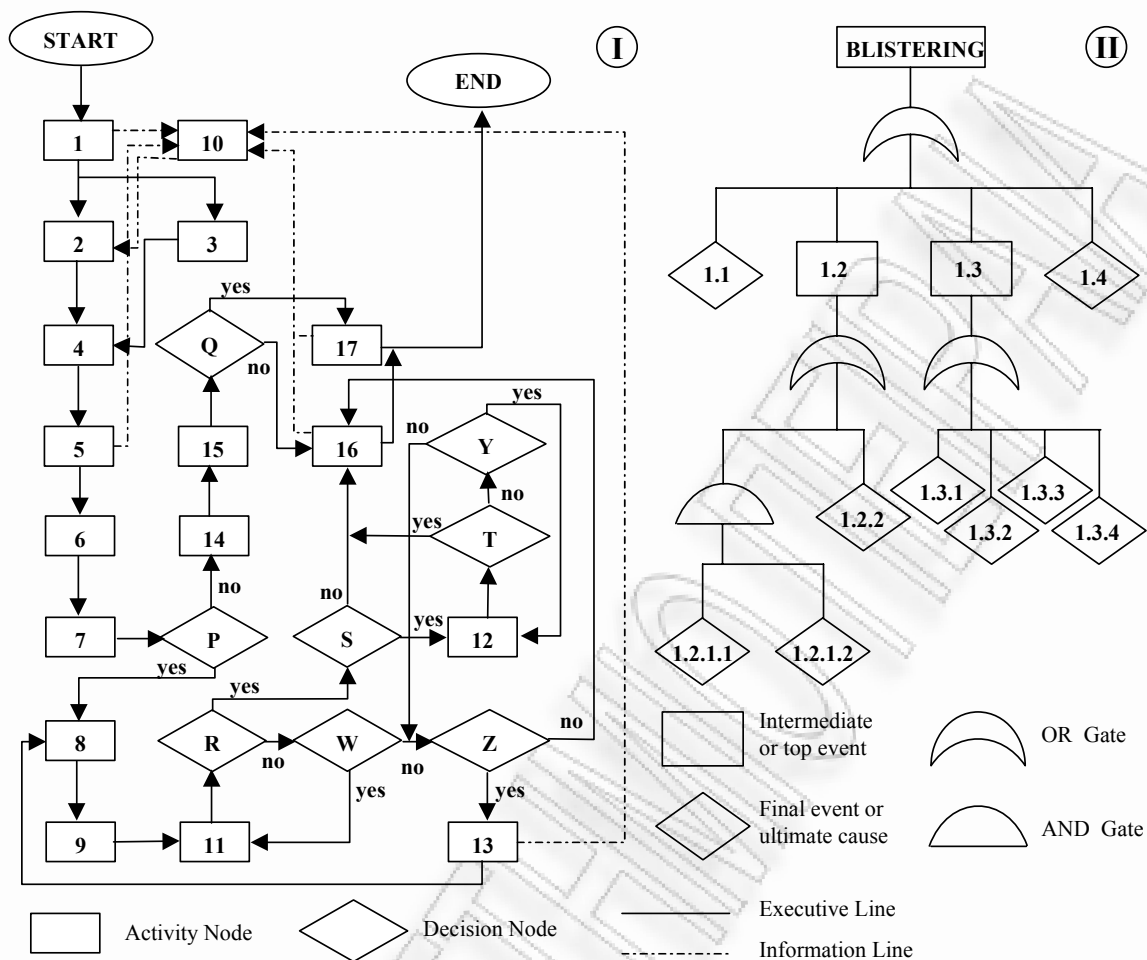
Όταν ισχύουν οι παραδοχές της περίπτωσης (B), τότε $F_I(1) \equiv F_I(2) \equiv F_I$ και $F_{II}(1) \equiv F_{II}(2) \equiv F_{II}$, οπότε η (9) ταυτίζεται με την (6).

4.5 Συζήτηση

Ο βοηθούμενος από H/Y εντοπισμός, μέσω του πληροφοριακού συστήματος, του βασικού αιτίου ή του συνδυασμού αυτού που προκαλούν την εμφάνιση του αναλυόμενου γεγονότος (ελαττώματος), είναι εξαιρετικά χρήσιμος όταν το γεγονός αυτό είναι γενικής υφής και η εμφάνισή του μπορεί να προκαλείται από εντελώς διαφορετικές αιτίες, οι οποίες δημιουργούνται σε ανάντη διεργασίες. Η χρησιμοποιούμενη αλγοριθμική διαδικασία επιτυγχάνει, με την πρώτη εκτέλεσή της, τον εντοπισμό με ένα μέτριο ποσοστό, π.χ. 55%. Αν στο επίπεδο της δοκιμής (testing) δεν επιβεβαιωθεί το αίτιο, που εντοπίστηκε ως ενδεχόμενο (να έχει συμβεί), τότε επαναλαμβάνεται η εκτέλεση της αλγοριθμικής διαδικασίας, λαμβανόμενης υπ' όψη της αρνητικής έκβασης της δοκιμής επιβεβαίωσης, οπότε εντοπίζεται ως πλέον πιθανή μία νέα αιτία, κ.ο.κ. Με τη χρησιμοποίηση του πληροφοριακού συστήματος που περιγράφεται στις δύο τελευταίες Ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου, έχουμε αποδείξει ότι τέσσερις επαναλήψεις για να δώσουν με βεβαιότητα (δηλ. σχεδόν 100% a posteriori πιθανότητα) το βασικό αίτιο ή το συνδυασμό αυτών.

Αντίθετα, όταν το αναλυόμενο γεγονός κορυφής είναι σχετικά εξειδικευμένο τόσο ως προς τα εξωτερικά/μετρήσιμα χαρακτηριστικά του όσο και ως προς τη μοναδικότητα της όδευσης/αλληλουχίας των γεγονότων από τα οποία έχει προκύψει, τότε ο εντοπισμός είναι εύκολος και είναι ενδεχόμενο ένας εμπειρογνώμονας να αποδείξει την αιτία χωρίς τη βοήθεια του H/Y. Εντούτοις, η χρησιμότητα της αλγοριθμικής διαδικασίας παραμένει, έστω ως βοηθητικό εργαλείο για τη λήψη απόφασης από τον εμπειρογνώμονα επειδή συμβάλει στην αντικειμενική έκφραση (με όρους αποδεκτούς από τους εμπλεκόμενους, ακόμη και όταν δεν υπάρχει αντίστοιχη τυποποιημένη ορολογία) της υποκειμενικής γνώσης*. Πέραν αυτού, η τήρηση της αλγοριθμικής διαδικασίας είναι υποχρεωτική και για τις 'εύκολες' περιπτώσεις ανίχνευσης του αιτίου, επειδή μέσω αυτής γίνεται αυτομάτως η επικαιροποίηση της γνώσης στην KB του πληροφοριακού συστήματος. Η ίδια λογική ισχύει και για τις επιμεταλλώσεις, όπως αποδεικνύεται στο παρακάτω παράδειγμα (βλ. Σχήμα 4.15 και εξήγηση των περιεχομένων συμβόλων ακολούθως), όπου, παρόλο ότι το αναλυόμενο

* Η εξωτερίκευση (externalization) της υποκειμενικής γνώσης και ο μετασχηματισμός της σε αντικειμενική, με όρους γενικότερης αποδοχής, γνώση (tacit/implicit-to-explicit) είναι ίσως η βασικότερη συνειδητή γνωσιολογική λειτουργία, τόσο σε ατομικό όσο και σε συλλογικό επίπεδο, όπως φαίνεται σε αντίστοιχα κυκλικά υποδείγματα διαχείρισης της γνώσης (π.χ. φάση E στο υπόδειγμα SECI του Nonaka []).



Σχήμα 4.15. (I) Συνοπτικό διάγραμμα ροής διαδικασιών που συνιστούν ένα πλήρη κύκλο διάγνωσης σφάλματος / δοκιμής επιβεβαίωσης/πρότασης θεραπείας, όταν παράγεται ελαττωματικό αντικείμενο κατά τη διεργασία της ηλεκτροχημικής επιμετάλλωσης. **(II)** Μερική απεικόνιση κλάδου δένδρου σφαλμάτων, ως αποτέλεσμα της εκτέλεσης του σταδίου δραστηριότητας 4 κατά την ηλεκτροχημική επιμετάλλωση χάλυβα με κάδμιο (επικαδμίωση), όταν το παρατηρούμενο ελάττωμα είναι η εμφάνιση ατελειών υπό μορφή φλυκταινών (blistering) στην τελική επιφάνεια.

ελάττωμα ('blistering', δηλ. εμφάνιση 'φλυκταινών') έχει περιορισμένο αριθμό αιτίων, ακολουθείται η γενική αλγοριθμική διαδικασία, η οποία παρουσιάζεται συνοπτικά στο ίδιο Σχήμα.

1. Περιγραφή του ελαττώματος, του οποίου πρέπει να βρεθούν τα αίτια, σε μία εσωτερική τεχνική έκθεση.
2. Ταυτοποίηση του ελαττώματος μέσω της DKB όταν υπάρχει ένα ελεγχόμενο λεξικό (οντολογία).
3. Καταγραφή των συνθηκών παραγωγής όπου αναφέρεται η παρτίδα όπου παρατηρήθηκε το ελαττωματικό κομμάτι.

4. Αυτόματος εντοπισμός του αντίστοιχου δέντρου σφαλμάτων όπου το ελάττωμα είναι το βασικό σφάλμα.
5. Εκτίμηση των ασαφών δεικτών σημαντικότητας, σαν υποκειμενικό μέτρο της δύναμης της αιτιατής σχέσης από ειδικούς που παίρνουν μέρος σε μία τροποποιημένη εκδοχή της μεθόδου Delphi τριών σταδίων.
6. Εκτέλεση του προγράμματος H/Y για ασαφές FTA, με δεδομένα βασισμένα στα αθροιστικά FSI των ειδικών.
7. Διαχωρισμός των προτεινόμενων τελικών αιτιών ώστε να σχηματίσουν το σετ των εναλλακτικών για το ασαφές MCA.
8. Δίνονται ασαφείς εκτιμητές στα στοιχεία (α) του ανύσματος των βαρών και (β) του πολυκριτηριακού πίνακα όπου τα στοιχεία αυτά αντιστοιχούν στις εναλλακτικές τελικές αιτίες, και προκύπτουν από τη μέθοδο Delphi που αναφέρεται στο στάδιο 5.
9. Εκτέλεση της ασαφούς MCA (τροποποίηση του γράφοντος των PROMETHEE I & II) προγράμματος H/Y, με δεδομένα που αντιστοιχούν σε κάθε ειδικό, μετασχηματισμός των αποτελεσμάτων σε ένα αθροιστικό ασαφές διάνυσμα (consensus), ταξινόμηση των ασαφών εναλλακτικών ώστε να καταλήξουμε σε μία μερική και ολική κατάταξη (PROMETHEE I και II, αντίστοιχα).
10. Δημιουργία/εμπλουτισμός της DKB, παίρνοντας πληροφορία εσωτερικά (βλ. Σχήμα 4.15) και εξωτερικά μέσω ευφών μηχανισμών αναζήτησης [13].
11. Πειραματική δοκιμή της προτεινόμενης εναλλακτικής, σαν πιθανότερο τελικό αίτιο.
12. Πειραματική δοκιμή της προτεινόμενης λύσης
13. Ενημέρωση των FSI για να ετοιμαστεί το σύστημα να ξανατρέξει τη ρουτίνα ασαφούς MCA.
14. Ταξινόμηση των εναλλακτικών τελικών αιτιών σε ασαφή μορφή.
15. Ανάλυση ευαισθησίας για να βρεθούν οι συνθήκες στις οποίες η δεύτερη καλύτερη εναλλακτική θα μπορούσε να έρθει πρώτη.
16. Πρόταση χωρίς προϋπόθεση για διορθωτική ενέργεια στο τμήμα παραγωγής.
17. Πρόταση υπό συνθήκη για διορθωτική ενέργεια στο τμήμα παραγωγής.
- P. Υπάρχουν μέσα και χρόνος διαθέσιμα για τεστ;
- Q. Είναι η προτεινόμενη λύση ευαίσθητη;
- R. Το τεστ επιβεβαιώνει την προτεινόμενη λύση;
- S. Είναι εφικτό το τεστ της προτεινόμενης λύσης;
- T. Έχει επιτευχθεί η επιθυμητή διόρθωση;
- Y. Υπάρχει άλλη προτεινόμενη λύση;

- W. Υπάρχει άλλο πειραματικό τεστ;
- Z. Υπάρχουν δύο εναλλακτικές που να μην έχουν εξετασθεί ακόμη;

- 1.1 Παρουσία οξέος στο υπόστρωμα του μετάλλου πριν την επιμετάλλωση.
- 1.2 Εγκλεισμός οξέος στο υπόστρωμα του μετάλλου, πριν την επιμετάλλωση.
 - 1.2.1.1 Αντικείμενα κατασκευασμένα από σκληρό χάλυβα.
 - 1.2.1.2 Καθοδικός καθαρισμός των αντικειμένων
- 1.2.2 Πορώδες που προϋπάρχει στο μεταλλικό υπόστρωμα.
- 1.3 Γράσο, οξείδια, ή σημάδια στο υπόστρωμα του μετάλλου.
 - 1.3.1 Λουτρό καθαρισμού με αδιάλυτο φιλμ λαδιού στην επιφάνειά του.
 - 1.3.2 Ανεπαρκής δράση του διαλύματος καθαρισμού.
 - 1.3.3 Ραγάδες ή οπές εκροής στο αντικείμενο
 - 1.3.4 Επανοξείδωση ή επανεμφάνιση σημαδιών λόγω κακού καθαρισμού
- 1.4 Έλλειψη ελεύθερου κυανίου στο λουτρό επιμετάλλωσης.

4.6 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο, περιγράφεται η δημιουργία ενός μεθοδολογικού πλαισίου Βάσης Γνώσης (Knowledge Base – KB) για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων στην καθετοποιημένη παραγωγή ανοδιωμένου αλουμινίου, υπό τη μορφή αλγοριθμικής διαδικασίας 32 εκτελεστικών σταδίων και 11 κόμβων απόφαση. Τα στοιχεία που συλλέγονται στο στάδιο της στατιστικής συσχέτισης συνθηκών παραγωγής/κατεργασίας και εμφάνισης ελαττωμάτων/αστοχιών μπορεί να προέρχονται από (i) όργανα μέτρησης in situ μεταβλητών/παραμέτρων είτε ανεξάρτητα είτε ενσωματωμένα σε συστήματα ελέγχου on line, (ii) εργαστηριακές μετρήσεις ποιοτικού ελέγχου είτε των χρησιμοποιούμενων μέσων κατεργασίας είτε του παραγόμενου προϊόντος (π.χ., συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη/προσθέτων/προσμίξεων στο λουτρό της ανοδίωσης ή πάχους/πορώδους του ανοδικού στρώματος, αντίστοιχα). Οι εργαστηριακές μετρήσεις γίνονται σε δείγματα, άρα πρόκειται για έλεγχο off line, ο οποίος όμως μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, αφού ο χρόνος λήψης/μεταφοράς/ετοιμασίας/μέτρησης του δείγματος είναι συγκρίσιμος με το χρόνο επεξεργασίας μίας παρτίδας σε οποιοδήποτε στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας. Τα αποτελέσματα του off line ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για τη θεραπεία διαπιστωμένου σφάλματος στην ίδια παρτίδα είτε για την πρόληψη σφάλματος σε επόμενη παρτίδα ενώ η πρόληψη στην ίδια παρτίδα είναι εφικτή μόνον όταν ο χρόνος κατεργασίας είναι σχετικά μεγάλος και η διάγνωση έχει γίνει αρκετά νωρίς, δηλ. με την έναρξη της

συγκεκριμένης διαδικασίας. Οι περισσότερο αξιόπιστες πρακτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον off line έλεγχο είναι (i) της πειραματικής προσομοίωσης σε εργαστηριακή κλίμακα και (ii) της διαφορικής διάγνωσης σε βιομηχανική κλίμακα. Στην πρώτη, προσομοιάζονται οι πραγματικές συνθήκες της μελετώμενης διεργασίας σε μικρή κλίμακα ενώ χρησιμοποιούνται αντικείμενα με επιφάνειες διαφορετικού βαθμού ομοιογένειας, δηλ. από πλήρως ομοιογενή μέχρι περιέχοντα ανομοιογένεια του τύπου που προκαλεί το υπό διερεύνηση ελάττωμα. Σημαντικό μέρος των αντικειμένων αυτών προέρχεται από πραγματική παρτίδα και έχει ληφθεί μετά το πέρας της αμέσως προηγούμενης (σε σχέση με τη μελετώμενη) διεργασίας, ώστε το επεξεργαζόμενο στο φυσικό προσομοιωτή αντικείμενο να μη διαφέρει από εκείνα που συνεχίζουν την επεξεργασία σε βιομηχανική κλίμακα. Στη συνέχεια, συγκρίνονται αντικείμενα που επεξεργάστηκαν στο φυσικό προσομοιωτή με αντικείμενα που επεξεργάστηκαν στην αντίστοιχη διεργασία σε βιομηχανική κλίμακα. Αυτό είναι ένα είδος διαφορικής διάγνωσης (ίδιο αντικείμενο αλλά διαφορετικές συνθήκες διεργασίας), το οποίο όμως υπάγεται στις τεχνικές της προσομοίωσης. Αμιγώς διαφορετική διάγνωση έχουμε όταν τοποθετούμε προσημειωμένα/‘μαρκαρισμένα’ διαφοροποιημένα (ως προς τις παραμέτρους της ‘συνάρτησης μνήμης’) αντικείμενα στις ίδιες ‘κρεμάστρες’ στο ίδιο λουτρό και στη συνέχεια συγκρίνουμε τα αντικείμενα αυτά με τα διπλανά τους με τεχνικές (μη-καταστροφικού και καταστροφικού) ποιοτικού ελέγχου.

Εισάγεται ως δεσμευτικός κανόνας ότι ‘τα μαρκαρισμένα αντικείμενα δεν πρέπει να διαφοροποιούνται πριν ή μετά την κατεργασία, έστω εάν η διαφοροποίηση είναι μακράν της εξεταζόμενης περιοχής της κατεργαζόμενης επιφάνειας’, επειδή οποιαδήποτε καταπόνηση είναι δυνατόν να διαδοθεί με φυσικοχημικό ή μηχανικό τρόπο/μηχανισμό και να επηρεάσει την άμεσου ενδιαφέροντος περιοχή. Η ισχύς του κανόνα αυτού αποδεικνύεται με παρουσίαση φωτογραφιών (οπτικής μικροσκοπίας) διαφοροποίησης της επιφάνειας εξεταζόμενου δοκιμίου αλουμινίου (i) λόγω διάβρωσης μετά τον καθαρισμό και πριν την ανοδίωση και (ii) λόγω μηχανικής καταπόνησης μετά την ανοδίωση, μετά από άσκηση διατμητικής τάσης κατά την κοπή, οπότε εμφανίζεται ρηγμάτωση του ψαθυρού οξειδίου. Επίσης, αποδεικνύεται ότι η διαθεσιμότητα των μέσων μέτρησης είναι δυνατόν να επηρεάσει τη σειρά προτίμησης εξέτασης (testing) των τελικών αιτίων, αφού λαμβάνεται υπόψη στη διαμόρφωση του διανύσματος των κριτηρίων και στην εκτίμηση των βαρών του διανύσματος αυτού. Η διαθεσιμότητα αυτή πρέπει να αναφέρεται σε όργανα μέτρησης με την επιθυμητή ακρίβεια, επειδή η βοηθούμενη από H/Y ψηφιακή ανάλυση (εκόνων/σημάτων) δεν μπορεί να υπερβεί τους περιορισμούς που τίθενται από το όργανο μέτρησης, πέραν ενός

προκαθορισμένου σημείου, όπως έχουμε αποδείξει με φωτογραφίες ανοδιωμένου αλουμινίου σε οπτικό μικροσκόπιο για τη μελέτη της επίπτωσης των γραμμών διέλασης στην κατεργασμένη επιφάνεια, πριν και μετά την αύξηση της μεγέθυνσης (συνεπαγόμενη μείωση της διακριτικής ικανότητας) με τη βοήθεια προγράμματος H/Y.

Πολλά από τα ελαττώματα/σφάλματα, που (πρέπει να) περιλαμβάνονται στην υπό σχεδίαση/ανάπτυξη Βάση δεδομένων/πληροφοριών, σύμφωνα με την αλγοριθμική διαδικασία που έχουμε παρουσιάσει, οφείλονται στη 'συνάρτηση μνήμης' της επιφάνειας του κατεργαζόμενου μετάλλου/κράματος. Η τυποποίηση των σφαλμάτων αυτών και η σύνδεσή τους με το γενεσιουργό αίτιο στη φάση της μεταλλουργικής διαμόρφωσης της πρώτης ύλης μπορεί να γίνει, όπως έχουμε δείξει, με την πρόκληση μίας σειράς τεχνητών/ελεγχόμενων διαταραχών σε μία εντελώς ομοιόμορφη μητρική επιφάνεια και την παρατήρηση/συλλογή/ταξινόμηση των εμφανιζόμενων ελαττωμάτων σε μία ή περισσότερες φάσεις της κατάντη κατεργασίας.

Μία εφαρμογή της μεθόδου αυτής παρουσιάζεται με υλικό αναφοράς SEM ανοδικώς οξειδωμένου αλουμινίου που έχει παραχθεί σε επιφάνεια στην οποία είχε δημιουργηθεί επιφανειακή διαταραχή ωειδούς σχήματος κατά τη μεταλλουργική φάση της διαμόρφωσης του φύλλου αλουμινίου, το οποίο αποτέλεσε στη συνέχεια (χωρίς εξάλειψη της διαταραχής κατά τη φάση του ηλεκτροχημικού καθαρισμού) το υλικό της ανοδίωσης.

Στην πράξη, περισσότερα από ένα σφάλματα μπορούν να συνυπάρχουν στην ίδια επιφανειακή περιοχή οπότε η επίδραση στην τελική διαμόρφωση της ανοδιωμένης επιφάνειας αναμένεται να είναι σύνθετη. Αν, για παράδειγμα, συνυπάρχουν γραμμές διέλασης και σημειακή ανωμαλία, τότε αναμένεται ανισοκατανομή κυψελίδων οξειδίου και πόρων (i) κάθετα προς την κατεύθυνση της γραμμικής διαταραχής και (ii) ακτινωτά γύρω από τη σημειακή διαταραχή, όπως έχουμε αποδείξει με αντίστοιχες φωτογραφίες SEM. Τέτοιες σύνθετες επιδράσεις έχουμε παραγάγει σε φυσικούς προσομοιωτές, προκειμένου να μελετήσουμε (i) την αντιστοιχία διαταραχής στο μητρικό μέταλλο/κράμα και αποτελέσματος στην ανοδιωμένη/βαμμένη/σφραγισμένη τελική επιφάνεια καθώς και (ii) το ρόλο των συνθηκών κατεργασίας τόσο στη μείωση/εξάλειψη (π.χ. στη φάση του ηλεκτροχημικού καθαρισμού) της επίδρασης όσο και στην αύξηση αυτής (π.χ. στη φάση της βαφής, μετά την ανοδίωση).

Επειδή οι αυξομειώσεις αυτές μεταβάλλουν την τοπογραφική απεικόνιση οποιασδήποτε ανωμαλίας της κατεργαζόμενης επιφάνειας μεταξύ των διαδοχικών φάσεων της κατεργασίας του μετάλλου/κράματος, πρέπει να γίνεται ποιοτικός έλεγχος στο τέλος

κάθε φάσης σε προκαθορισμένη περιοχή με πλήρως καταγεγραμμένη την αρχική ανωμαλία, ώστε να αποτυπώνονται οι διαδοχικές αντιστοιχίες.

Η δημιουργία ενός τέτοιου αρχείου μπορεί να γίνει τόσο με φυσικό προσομοιωτή μικρής κλίμακας όσο και με δοκίμια που εισέρχονται (μετά την πρόκληση τεχνητής διαταραχής στο βασικό μέταλλο/κράμα) στις διαδοχικές κατεργασίες σε λουτρά καθαρισμού/ανοδίωσης/βαφής/σφραγίσματος βιομηχανικές κλίμακας στις ίδιες ‘κρεμάστρες’ με τα αντικείμενα της αντίστοιχης παρτίδας παραγωγής. Όταν το αρχείο αυτό αποκτήσει την απαιτούμενη πληρότητα, μπορεί να χρησιμεύσει για την αντίστροφη διαδικασία, δηλ. την αναγνώριση (ενδεχόμενου) αρχικού σφάλματος, μέσω της παρατήρησης/μέτρησης του συμπτώματος/αποτελέσματος/ελαττώματος στην τελική/κατεργασμένη επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή, εμπλουτιζόμενη με τεχνικές αναγνώρισης προτύπου (pattern recognition), έχει τη δυνατότητα να συμβάλει στην ιχνηλασιμότητα (traceability) του υλικού και στην υλοποίηση των σταδίων της αλγοριθμικής διαδικασίας δημιουργίας/λειτουργίας KB.

Στη συνέχεια, καταγράφονται τα βασικά ελαττώματα/σφάλματα κατά στάδιο κατεργασίας, όπως αυτά αναφέρονται στην τεχνική βιβλιογραφία, για τα οποία έχουμε δημιουργήσει αντίστοιχα αρχεία στην KB, μετά από μελέτη σε φυσικό προσομοιωτή (i) της αντιστοίχισης [διαταραχή σε προηγούμενο στάδιο] → [ελάττωμα σε επόμενο στάδιο] και (ii) της επίδρασης των συνθηκών της ίδιας μεμονωμένης διεργασίας στις ιδιότητες (περιλαμβανομένης της απόκλισης από τις επιθυμητές προδιαγραφές καθώς και της εμφάνισης ελαττωμάτων) του επεξεργαζόμενου αντικειμένου.

Με βάση τις καταγεγραμμένες σχέσεις αιτίου-αποτελέσματος έχουν δημιουργηθεί γενικευμένα δένδρα σφαλμάτων βασισμένα σε γεγονότα κορυφής που έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: (i) αντιστοιχούν σε ελαττώματα που εμφανίζονται στα τελευταία στάδια της παραγωγής, άρα τα περιλαμβανόμενα αποτελέσματα οποιουδήποτε ενδιάμεσου ή τελικού γεγονότος έχουν (δυνητική) αιτία τόσο στην τρέχουσα όσο και σε όλες τις ανάντη (upstream) διεργασίες και (ii) προκύπτουν ως αποτέλεσμα πλήθους διαφορετικών αιτιών και επομένως τα αντίστοιχα μεγάλα δένδρα μπορεί να θεωρηθεί ότι συντίθεται από επιμέρους μικρότερα δένδρα, με γεγονότα κορυφής συνυφασμένα με ενδιάμεσα γεγονότα ενός τουλάχιστον μεγάλου δένδρου.

Επίσης, παρουσιάζεται η τεχνική της εκτίμησης των ασαφών δεικτών σημαντικότητας (FSIs), που χρησιμοποιούνται ως μέτρο της έντασης της συνολικής αιτιώδους σχέσης, η οποία συνδέει το γεγονός κορυφής (αποτέλεσμα) με κάθε φύλλο (αιτία) του δένδρου. Τέλος, διερευνάται η επίδραση του κόστους του σφάλματος στη βελτιστοποίηση τιμών κρίσιμων παραμέτρων σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, όπως αυτά αποτυπώνονται στο

δέντρο σφαλμάτων. Με τον τρόπο αυτό, αναδεικνύεται η λογική της μεθόδου της απομόνωσης ενός τελικού αιτίου και της διαδικασίας ελαχιστοποίησης της έντασής του, κάτω από ορισμένες τεχνικές δεσμεύσεις. Ως κατάλληλο υπόδειγμα, αναλύεται η περίπτωση της παραγωγής πολύ λεπτών ελασμάτων αλουμινίου, στα οποία αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης περιοχών με αταξίες δομής, όπου η ανοδίωση και η βαφή διαφοροποιούνται με αποτέλεσμα το τελικό σφάλμα της 'ετερογενούς επιφάνειας του ανοδιωμένου αλουμινίου'. Ως ανεξάρτητη/ερμηνευτική μεταβλητή λαμβάνεται το διάστημα ανοχής T (tolerance interval) και ως εξαρτημένη μεταβλητή (αντικειμενική συνάρτηση – objective function) η προκύπτουσα ωφέλεια (benefit) $B=B_1+B_2$, όπως αυτή προσδιορίζεται από την ανταπόκριση στην ποιότητα του προϊόντος και τη ζήτηση στην αντίστοιχη αγορά, όπου $B_1(T)$ η ωφέλεια από την αποφυγή σφάλματος και $B_2(T)$ η ωφέλεια που σχετίζεται με τη διασπορά των τιμών μιας προκαθορισμένης κρίσιμης παραμέτρου. Αποδεικνύεται ότι, όταν αυξάνεται το κόστος του σφάλματος, σε σχέση με την απομάκρυνση της μέσης τιμής της κρίσιμης παραμέτρου από την κεντρική τιμή \bar{T} του διαστήματος ανοχής, τότε αυξάνεται η βέλτιστη τιμή T_{opt} . Αντιθέτως, όταν αυξάνεται το κόστος του σφάλματος σε σχέση με τη διασπορά των τιμών της κρίσιμης παραμέτρου, τότε μειώνεται η βέλτιστη τιμή T_{opt} .

Επειδή στη βιομηχανική πράξη χρησιμοποιείται ως κρίσιμη παράμετρος εκείνη που ελέγχεται ευκολότερα σε πραγματικό χρόνο παραγωγής, έχουμε λάβει ως τέτοια το μέσο πάχος \bar{x} των φύλλων αλουμινίου μετά τη διέλαση, που συμπίπτει (κατά προσέγγιση) με το άνοιγμα/διάκενο των ελάστρων, προκειμένου να γίνει μία μαθηματική διερεύνηση και να παρουσιασθεί μία αντίστοιχη ποσοστική εφαρμογή. Διερευνώνται τρεις περιπτώσεις: (Α) Μετά την πρώτη επανακατεργασία, δεχόμαστε ότι όλα τα φύλλα της αρχικής παρτίδας είναι εντός των προδιαγραφών χωρίς να υποστούν πάλι ποιοτικό έλεγχο. (Β) Μετά την πρώτη επανακατεργασία ακολουθεί ποιοτικός έλεγχος και ευρίσκεται ότι η κατανομή του πάχους είναι ίδια με αυτή της πρώτης κατεργασίας. (Γ) Προστίθεται και δεύτερο έλαστρο με τις προϋποθέσεις της προηγούμενης περίπτωσης. Σχεδιάζεται και αναπτύσσεται το αντίστοιχο λογισμικό και παρουσιάζεται πλήρης μονο-παραμετρική ανάλυση ευαισθησίας της βέλτιστης τιμής \bar{x}_{opt} και του ελάχιστου κόστους C_{min} ως προς όλες τις ανεξάρτητες/ερμηνευτικές μεταβλητές (κόστος σφάλματος, κόστος ποιοτικού ελέγχου, μέγιστο πάχος ελάσματος, κόστος ελασματοποίησης, μέση τιμή πάχους ελάσματος, τυπική απόκλιση πάχους ελάσματος).

Στη Συζήτηση που ακολουθεί, γίνεται διάκριση μεταξύ της χρήσης του πληροφοριακού συστήματος για διάγνωση σφάλματος γενικής και ειδικής υφής. Στην πρώτη περίπτωση, το

αναλυόμενο σφάλμα μπορεί να προκαλείται από εντελώς διαφορετικές αιτίες, οι οποίες δημιουργούνται σε ανάντη διεργασίες και είναι απαραίτητη η χρήση του προτεινόμενου λογισμικού. Αντίθετα, όταν το αναλυόμενο γεγονός κορυφής είναι σχετικά εξειδικευμένο τόσο ως προς τα εξωτερικά/μετρήσιμα χαρακτηριστικά του όσο και ως προς τη μοναδικότητα της όδευσης/αλληλουχίας των γεγονότων από τα οποία έχει προκύψει, τότε ο εντοπισμός είναι εύκολος και είναι ενδεχόμενο ένας εμπειρογνώμονας να αποδείξει την αιτία χωρίς τη βοήθεια του H/Y. Εντούτοις, η χρησιμότητα της αλγοριθμικής διαδικασίας παραμένει, έστω ως βοηθητικό εργαλείο για τη λήψη απόφασης από τον εμπειρογνώμονα επειδή συμβάλει στην αντικειμενική έκφραση (με όρους αποδεκτούς από τους εμπλεκόμενους, ακόμη και όταν δεν υπάρχει αντίστοιχη τυποποιημένη ορολογία) της υποκειμενικής γνώσης. Πέραν αυτού, η τήρηση της αλγοριθμικής διαδικασίας είναι υποχρεωτική και για τις 'εύκολες' περιπτώσεις ανίχνευσης του αιτίου, επειδή μέσω αυτής γίνεται αυτομάτως η επικαιροποίηση της γνώσης στην KB του πληροφοριακού συστήματος. Η ίδια λογική ισχύει και για τις επιμεταλλώσεις, όπως αποδεικνύεται με την ανάλυση παραδείγματος ηλεκτροχημικής επιμετάλλωσης χάλυβα με κάδμιο (επικαδμίωση).

Βιβλιογραφία

- [1] Fotilas P., Batzias A.F. (2008). A Modeling Procedure by Means of Multicriteria Analysis. Application in the Case of Specific Surface Estimation of Anodized Aluminium. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, forthcoming.
- [2] Fotilas P., Batzias A.F. (2007). Synthesizing Equivalence Indices for the Comparative Evaluation of Technoeconomic Efficiency of Industrial Processes at the Design/Re-engineering Level. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, 963, pp. 884-889.
- [3] Batzias A.F. (2007). Fuzzy Multicriteria Ranking of Aluminium Coating Methods. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, 963, pp. 856-861.
- [4] Batzias A.F., Batzias F.A. (2004). Fuzzy Multicriteria Choice of Instrumental Methods for Measuring Physical Quantities - Application in the Case of Dielectric Aluminium Anodic Oxide Films. *Proc. IEEE Instrum. & Meas. Technol. (IMTC 2004)* 3, pp. 2217-2222.
- [5] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Multicriteria Choice of Industrial Management System for a Typical Greek Tannery Operating in a Changing Environment. *4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4)* Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in *J. Chem. Eng. & Tech.* (J. Wiley), Jan. 2004. O-2-003.
- [6] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Multicriteria Choice of Solvent in the Lithographic Printing Industry with Emphasis on Occupational Health. *4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4)* Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in *J. Chem. Eng. & Tech.* (J. Wiley), Jan. 2004. P-4.1-025.
- [7] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Computational and Experimental Process Control by Combining Neurofuzzy Approximation with Multicriteria Optimization. *Computational Engineering*, Int. Series Comp. Eng., WIT Press Computational Mechanics Inc., Boston Massachusetts, USA, 4, pp. 107-118.
- [8] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). A System for Support and Training of Personnel Working in the Electrochemical Treatment of Metallic Surfaces. *Computer Aided Chem. Eng.* (Elsevier), 14, pp. 365-370.

- [9] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Fuzzy Fault Tree Analysis as a Mechanism for Technical Support to Small/Medium Electroplaters on a Quasi Online/Real-Time Basis. *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT03)*, Maribor, Slovenia, 1, pp. 36-41.
- [10] Batzias A.F., Sidoras D.K. (2008). Thermochemical Conversion of Waste Biomass to Obtain Activated Carbon Substitutes for Dye Adsorption – A Decision Making Approach on Kinetics. *16th European Biomass Conference*, Elsevier, Valencia, Spain, 1727-1732.
- [11] Batzias A.F., Siontorou C.G. (2008). A New Scheme for Biomonitoring Heavy Metal Concentrations in Semi-Natural Wetlands. *Journal of Hazardous Materials* (Elsevier), 158, pp. 340-358.
- [12] Fotilas P., Batzias A. F., Siontorou C.G. (2008). Learning by Doing via Biomonitoring the Rehabilitation of Pb-Contaminated Industrial Sites. *Symp. on Environmental Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering* (Europ. Fed. Chem. Eng.), Prague, Czech Rep.
- [13] Batzias F.A., Marcoulaki E.C. (2002). Restructuring the Keywords Interface to Enhance Computer Aided Process Engineering Knowledge Acquisition via an Intelligent Agent. *Computer-Aided Chem. Engineering*, 10, pp.829-834.
- [14] Skoulikidis Th., Karageorgos A., Batis G. (1976). Contribution to the Interpretation of the Formation of the Active Path in Stress Corrosion Cracking of Aluminium Alloys. I. Indirect Evidence from Electrolytically Matched Specimens. *British Corrosion Journal*, 11, 143-148.
- [15] Skoulikidis Th., Batis G., Kouloumbi N. (1980). Contribution to the Interpretation of the Formation of the Active Path in Stress Corrosion Cracking of Aluminium Alloys in NaCl Solution. III. Colorimetric Indicators; Laser Interferometry. *British Corrosion Journal*, 15, 179-183.
- [16] Henley V.F. *Anodic Oxidation of Aluminium & Its Alloys*. Pergamon Press, 1982.
- [17] Brace A.W. *The Technology of Anodizing Aluminium*. Robert Draper Ltd, Teddington, 1968.
- [18] Wernick S., Pinner R. *The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and Its Alloys*. Robert Draper Ltd, Teddington, 1959.
- [19] Aerts T., Dimogerontakis Th., de Graeve I., Fransaeer J., Terryn H. (2007). Influence of the Anodizing Temperature on the Porosity and the Mechanical Properties of the Porous Anodic Oxide Film. *Surface and Coatings Technology*, 201, pp. 7310-7317.
- [20] Diggle J.W., Downie T.C., Golding C.W. (1970). The Dissolution of Porous Oxide Films on Aluminium. *Electrochimica Acta*, 15, pp. 1079-1093.
- [21] de Graeve I., Terryn H., Thompson G.E. (2003). Influence of Local Heat Development on Film Thickness for Anodizing Aluminum in Sulfuric Acid. *J. Electrochem. Soc.*, 150, pp. B158-B165.
- [22] Kim Y.-C., Quint B., Kessler R.W., Oelkrug D. (1999). Structural Properties of Electrochemically Designed Porous Oxide films on AlMg1. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 468, pp. 121-126.
- [23] Virvou M. (1999). Automatic Reasoning and Help about Human Errors in Using an Operating System. *Interacting with Computers*, 11, pp. 545-573.
- [24] Blesseos N.P., Batzias A.F. (2008). Knowledge Acquisition/Transformation to Meet the Quality Needs of the Metallic Constructions Market. *8th Joint Conference on Knowledge - Based Software Engineering 2008 (JCKBSE 08)*, M. Virvou and T. Nakamura (Eds.) in «*Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*», IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, Vol. 180, L.C. Jain and R.J. Howlett, Eds. pp. 327-336.
- [25] Fotilas P., Batzias A.F. (2008). Knowledge Acquisition within a Network of Industrial Laboratories Performing Quality Specifications Testing. *8th Joint Conference on Knowledge - Based Software Engineering 2008 (JCKBSE 08)*, M. Virvou and T. Nakamura (Eds.) in «*Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*», IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, Vol. 180, L.C. Jain and R.J. Howlett, Eds. pp. 337-346.
- [26] Batzias A.F., Batzias F.A. (2004). Fuzzy Fault Tree Analysis as a Means for Computer Aided Technology Transfer to Small/Medium Anodizers. *Computer Aided Chem. Eng.*, Elsevier, 16, pp. 577-582.

- [27] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Creating/Maintaining a Diagnostic Knowledge Base for Electroplating. *4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4)* Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in *J. Chem. Eng. & Tech.* (J. Wiley), Jan. 2004.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΠΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

```

Public Sub FutureProb(UpdSign As Integer)
' This routine updates the event probabilities (Prob) of the tree (bottom-
up update),
' starting from the event-alternatives of Promethee up to the intermediate
event,
' selected for Promethee. The events corresponding to the first-ranked
alternative
' gain or loose probability IncProb %, depending on UpdSign passed as
argument here,
' which is 1 in the case the first-ranked alternative was confirmed, -1 if
disconfirmed;
' the rest of the final events of Promethee, loose or gain probability,
respectively.
' This change is propagated upwards. Then a top-down recalculation of
normalized prob.
' (ProbN) of those events takes place.

```

```

Dim Parent As TREEOBJECT
Dim fraction1 As Single
Dim denom As Single
Dim i1 As Integer
Dim i2 As Integer
Dim i, j, j1 As Integer
Dim flag1 As Integer
Dim h As Integer
Dim Brothers(26) As String
Dim nb As Integer
Dim Shared1 As FUZYNUM
Dim SumProb As FUZYNUM
Dim t As Boolean
Dim Gate1 As TREEOBJECT
Dim Prob1 As FUZYNUM
Dim Count1 As Integer
Dim FirstBrother As Boolean
Dim GateAr(1000) As TREEOBJECT
Dim FathersProb(1000) As FUZYNUM
Dim Count2 As Integer
Dim FromNextOne As Integer
Dim s1, id1 As String
Dim n1 As Integer
Dim CurBro As Integer
Dim t1 As Boolean

Count2 = nPromEvents
For i = 1 To Count2
    GateAr(i) = LogGates(GateFromCopy(PromEventList(i)))
Next i
h = OrderEv(1)
Gate1 = LogGates(h)
If UpdSign = 1 Then
    fraction1 = Form1.IncProb / 100
Elseif UpdSign = -1 Then
    fraction1 = -Form1.DecProb / 100
End If
Shared1 = Crisp(0)
For i = 1 To nPromEvents
    If Left(PromEventList(i), 6) = Gate1.GateID Then
        i1 = GateFromCopy(PromEventList(i))
        Shared1 = FuzAdd(Shared1, FuzScMultiply(LogGates(i1).Prob,
(fracti on1)))
    End If
Next i
SumProb = Crisp(0)
For i = 1 To nPromEvents
    i1 = GateFromCopy(PromEventList(i))
    If LogGates(i1).GateID <> LogGates(OrderEv(1)).GateID Then

```

```

        SumProb = FuzAdd(SumProb, LogGates(i 1). Prob)
    End If
Next i
Count1 = 1
Do
    Gate1 = GateAr(Count1)
    If Gate1.iType = 6 Then
        If Gate1.GateID = LogGates(OrderEv(1)). GateID Then
            Prob1 = FuzScMul ti pl y(Gate1. Prob, (fracti on1))
            Gate1. Prob = FuzAdd(Gate1. Prob, Prob1)
        Else
            Prob1 = FuzDi vi de(FuzMul ti pl y(Gate1. Prob, Shared1), SumProb)
            Prob1 = FuzOpposi te(Prob1)
            Gate1. Prob = FuzAdd(Gate1. Prob, Prob1)
        End If
    ElseIf Gate1.iType = 3 Then
        For i = 1 To Count2
            If GateAr(i). GateID = Gate1. GateID And GateAr(i). iCopy =
Gate1. iCopy Then
                Prob1 = FathersProb(i)
            End If
        Next i
        Gate1. Prob = FuzAdd(Gate1. Prob, Prob1)
    End If
    If Gate1. GateID <> PromSel Process Then
        LogGates(GateFromCopy(GateAr(Count1). GateID &
Format(GateAr(Count1). iCopy, "0000"))) = Gate1
        Parent = Gate1
        Do
            Parent = FatherOf(Parent)
            If Parent.iType = 4 And NumOfParents(Parent) = 0 Then
                Parent = LogGates(GateFromID(Parent. TransferTo))
            End If
        Loop Until Parent.iType = 3
        flag1 = 0
        For i = 1 To Count2
            If GateAr(i). GateID = Parent. GateID And GateAr(i). iCopy =
Parent. iCopy Then
                FathersProb(i) = FuzAdd(FathersProb(i), Prob1)
                flag1 = 1
            Exit For
        End If
    Next i
    If flag1 = 0 Then
        Count2 = Count2 + 1
        GateAr(Count2) = Parent
        FathersProb(Count2) = Prob1
    End If
End If
Count1 = Count1 + 1
Loop Until Count1 > Count2
For i = 1 To Count2
    If GateAr(i). GateID = PromSel Process Then
        Debug. Print "****"
        Debug. Print Di spFuzzy(FathersProb(i), 4, "")
    Exit For
End If
Next i
j1 = 0: i1 = 0
FromNextOne = 1
GateAr(j 1) = LogGates(GateFromID(PromSel Process))
Do
    Gate1 = GateAr(j 1)
    If NumOfParents(Gate1) > 0 And FromNextOne = 0 Then
        Parent = FatherOf(Gate1)
        If (Gate1.iType = 3 Or Gate1.iType = 2 Or Gate1.iType = 6) And
(Parent.iType = 1 Or Parent.iType = 2) Then
            CurBro = CurBro + 1
            t1 = HasSi bling(Gate1, Brothers(), nb)

```

```

    If CurBro = 1 Then
        SumProb = Crisp(0)
        For i = 1 To nb
            SumProb = FuzAdd(SumProb,
LogGates(GateFromCopy(Brothers(i))). Prob)
        Next i
    End If
    If CurBro = nb Then CurBro = 0
    Gate1.ProbN = FuzDivide(Gate1.Prob, SumProb)
Elseif Gate1.iType = 4 Then
    If NumOfParents(Gate1) > 0 Then
        i1 = i1 + 1
        i = GateFromID(Gate1.TransferTo)
        GateAr(i1) = LogGates(i)
    End If
End If
Else
    If FromNextOne = 0 Then
        If Gate1.iType = 3 Then Gate1.ProbN = Gate1.Prob0
    Else
        FromNextOne = 0
    End If
End If
For i = 1 To nGates
    If Gate1.GateID = LogGates(i).GateID And Gate1.iCopy =
LogGates(i).iCopy Then LogGates(i).ProbN = Gate1.ProbN: LogGates(i).Prob0
= Gate1.Prob0: Exit For
Next i
    If Gate1.iType <> 6 Then
        s1 = Gate1.RelatesTo
        n1 = Len(s1) / 10
        If n1 > 0 Then
            For i = 1 To n1
                i1 = i1 + 1
                id1 = Mid(s1, (i - 1) * 10 + 1, 10)
                GateAr(i1) = LogGates(GateFromCopy(id1))
            Next i
        End If
    End If
    j1 = j1 + 1
Loop Until j1 > i1
Call ProbIndexFile("prob.dat")
End Sub

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

```
Public Sub FutureRel Freq()  
' This routine updates the Score and the Attempts of the events of the  
tree after an  
' alternative has been confirmed. Then if flag AfterConfirmUpdateProb is  
set to TRUE,  
' the initial probabilities of the events (Prob0) are updated to the rel.  
frequency  
' (=score/attempts) and the norm.prob., prob.index and final prob. (ProbN,  
Prob, ProbT)  
' are recalculated.
```

```
Dim GateAr(1000) As TREEOBJECT  
Dim GateAr2(1000) As TREEOBJECT  
Dim rfarray(1000) As Integer  
Dim sharedar(1000) As Double  
Dim Gate1 As TREEOBJECT  
Dim Gate2 As TREEOBJECT  
Dim Parent As TREEOBJECT  
Dim nextstop(1000) As Integer  
Dim k1 As Integer  
Dim k2 As Integer  
Dim i1 As Integer  
Dim i2 As Integer  
Dim j1 As Integer  
Dim j2 As Integer  
Dim s1 As String  
Dim s2 As String  
Dim n1 As Integer  
Dim n2 As Integer  
Dim i As Integer  
Dim j As Integer  
Dim x As Double  
Dim h As Integer  
Dim h1 As Integer  
Dim h2 As Integer  
Dim id1 As String  
Dim id2 As String  
Dim Sum1 As Double  
Dim Brothers(24) As String  
Dim TopEvent As String
```

```
Gate1 = LogGates(GateFromID(PromSel Process))  
Do  
    Gate1.Attempts = Gate1.Attempts + 1  
    Gate1.Score = Gate1.Score + 1  
    i = GateFromCopy(Gate1.GateID & Format(Gate1.i Copy, "0000"))  
    LogGates(i) = Gate1  
    If HasSibling(Gate1, Brothers(), n1) Then  
        For i = 1 To n1  
            i1 = GateFromCopy(Brothers(i))  
            If LogGates(i1).GateID <> Gate1.GateID Then  
                LogGates(i1).Attempts = LogGates(i1).Attempts + 1  
            End If  
        Next i  
    End If  
    If NumOfParents(Gate1) > 0 Then  
        Gate1 = FatherOf(Gate1)  
    ElseIf Gate1.iType = 4 Then  
        Gate1 = FatherOf(LogGates(GateFromID(Gate1.TransferTo)))  
    Else  
        TopEvent = Gate1.GateID  
        Exit Do  
    End If  
Loop  
i1 = 0  
Gate1 = LogGates(GateFromID(PromSel Process))
```



```

Gate1 = LogGates(GateFromCopy(Gate1.RelatesTo))
If Gate1.iType = 4 Then
    Gate1 = LogGates(GateFromID(Gate1.TransferTo))
    Gate1 = LogGates(GateFromCopy(Gate1.RelatesTo))
End If
s1 = Gate1.RelatesTo
n1 = Len(s1) / 10
If n1 > 0 Then
    For i = 1 To n1
        i1 = i1 + 1
        id1 = Mid(s1, (i - 1) * 10 + 1, 10)
        GateAr(i1) = LogGates(GateFromCopy(id1))
        Debug.Print "1 " & GateAr(i1).GateID & Format(GateAr(i1).iCopy,
"0000")
        sharedar(i1) = 1
    Next i
End If
j1 = 1: h1 = 1: h2 = i1: Sum1 = 0: k1 = 0: k2 = 0
Do
    Gate1 = GateAr(j1): j2 = 1: i2 = 1: rfarray(j1) = 0
    GateAr2(i2) = Gate1
    Do
        Gate2 = GateAr2(j2)
        If Gate2.GateID = LogGates(OrderEv(1)).GateID Then
            Sum1 = Sum1 + Gate1.Score
            rfarray(j1) = -1
            Exit Do
        End If
        If Gate2.iType = 4 Then Gate2 =
LogGates(GateFromID(Gate2.TransferTo))
        s2 = Gate2.RelatesTo
        n2 = Len(s2) / 10
        If n2 > 0 Then
            For i = 1 To n2
                i2 = i2 + 1
                id2 = Mid(s2, (i - 1) * 10 + 1, 10)
                GateAr2(i2) = LogGates(GateFromCopy(id2))
            Next i
        End If
        j2 = j2 + 1
    Loop Until j2 > i2
    If j1 = h2 Then
        For h = h1 To h2
            Gate1 = GateAr(h)
            Parent = FatherOf(Gate1)
            If Parent.iType = 1 Then
                Gate1.Attempts = Gate1.Attempts + sharedar(h)
            ElseIf Parent.iType = 2 Then
                Gate1.Attempts = Parent.Attempts
            End If
            If rfarray(h) < 0 Then
                If Parent.iType = 1 Then
                    x = (Gate1.Score / Sum1) * sharedar(h)
                    Gate1.Score = Gate1.Score + x
                ElseIf Parent.iType = 2 Then
                    Gate1.Score = Gate1.Score + sharedar(h)
                    x = sharedar(h)
                End If
                If Gate1.iType <> 6 Then
                    If Gate1.iType = 3 Then
                        Gate2 = LogGates(GateFromCopy(Gate1.RelatesTo))
                    If Gate2.iType = 4 Then
                        Gate2 = LogGates(GateFromID(Gate2.TransferTo))
                        Gate2 =
LogGates(GateFromCopy(Gate2.RelatesTo))
                    End If
                    Gate2.Score = Gate1.Score: Gate2.Attempts =
Gate1.Attempts
                End If
            End If
        Next h
    End If
End Do

```

```

        LogGates(GateFromCopy(Gate2. GateID &
Format(Gate2. i Copy, "0000"))) = Gate2
        s1 = Gate2. RelatesTo
    Else If Gate1. iType = 2 Then
        s1 = Gate1. RelatesTo
    End If
    n1 = Len(s1) / 10
    If n1 > 0 Then
        For i = 1 To n1
            i1 = i1 + 1
            id1 = Mid(s1, (i - 1) * 10 + 1, 10)
            GateAr(i 1) = LogGates(GateFromCopy(id1))
            Debug. Print "2 " & GateAr(i 1). GateID &
Format(GateAr(i 1). i Copy, "0000")
            sharedar(i 1) = x
        Next i
        k1 = k1 + 1
        nextstop(k1) = n1
    End If
End If
Else
    If Gate1. iType = 2 Then
        s1 = Gate1. RelatesTo
        n1 = Len(s1) / 10
        If n1 > 0 Then
            For i = 1 To n1
                i1 = i1 + 1
                id1 = Mid(s1, (i - 1) * 10 + 1, 10)
                GateAr(i 1) = LogGates(GateFromCopy(id1))
                Debug. Print "3 " & GateAr(i 1). GateID &
Format(GateAr(i 1). i Copy, "0000")
                sharedar(i 1) = 0
            Next i
            k1 = k1 + 1
            nextstop(k1) = n1
        End If
    Else If Gate1. iType = 3 Then
        Gate2 = LogGates(GateFromCopy(Gate1. RelatesTo))
        If Gate2. iType = 4 Then
            Gate2 = LogGates(GateFromID(Gate2. TransferTo))
            Gate2 = LogGates(GateFromCopy(Gate2. RelatesTo))
        End If
        If Gate2. iType = 2 Then
            Gate2. Score = Gate1. Score: Gate2. Attempts =
Gate1. Attempts
            LogGates(GateFromCopy(Gate2. GateID &
Format(Gate2. i Copy, "0000"))) = Gate2
            s1 = Gate2. RelatesTo
            n1 = Len(s1) / 10
            If n1 > 0 Then
                For i = 1 To n1
                    i1 = i1 + 1
                    id1 = Mid(s1, (i - 1) * 10 + 1, 10)
                    GateAr(i 1) = LogGates(GateFromCopy(id1))
                    Debug. Print "4 " & GateAr(i 1). GateID &
Format(GateAr(i 1). i Copy, "0000")
                    sharedar(i 1) = 0
                Next i
                k1 = k1 + 1
                nextstop(k1) = n1
            End If
        End If
    End If
End If
    LogGates(GateFromCopy(GateAr(h). GateID &
Format(GateAr(h). i Copy, "0000"))) = Gate1
    Next h
    h1 = h2 + 1
    k2 = k2 + 1

```

```

        h2 = nextstop(k2) + h1 - 1
        Sum1 = 0
    End If
    j1 = j1 + 1
Loop Until j1 > i1
If AfterConfirmUpdateProb Then
    For i = 1 To nGates
        If LogGates(i).Attempts <> 0 Then LogGates(i).Prob0 =
Crisp(LogGates(i).Score / LogGates(i).Attempts)
        Next i
        i = GateFromID(TopEvent)
        Call UpdateProb(i, 0)
        For i = 1 To nPromEvents
            i1 = GateFromCopy(PromEventList(i))
            LogGates(i1).ProbT = Crisp(0)
            For j = 1 To nPromEvents
                If Left(PromEventList(i), 6) = Left(PromEventList(j), 6) Then
                    i2 = GateFromCopy(PromEventList(j))
                    LogGates(i1).ProbT = FuzAdd(LogGates(i1).ProbT,
LogGates(i2).Prob)
                End If
            Next j
        Next i
    End If
    Call ProbIndexFile("prob.dat")
End Sub

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

Δεδομένα Προβλήματος

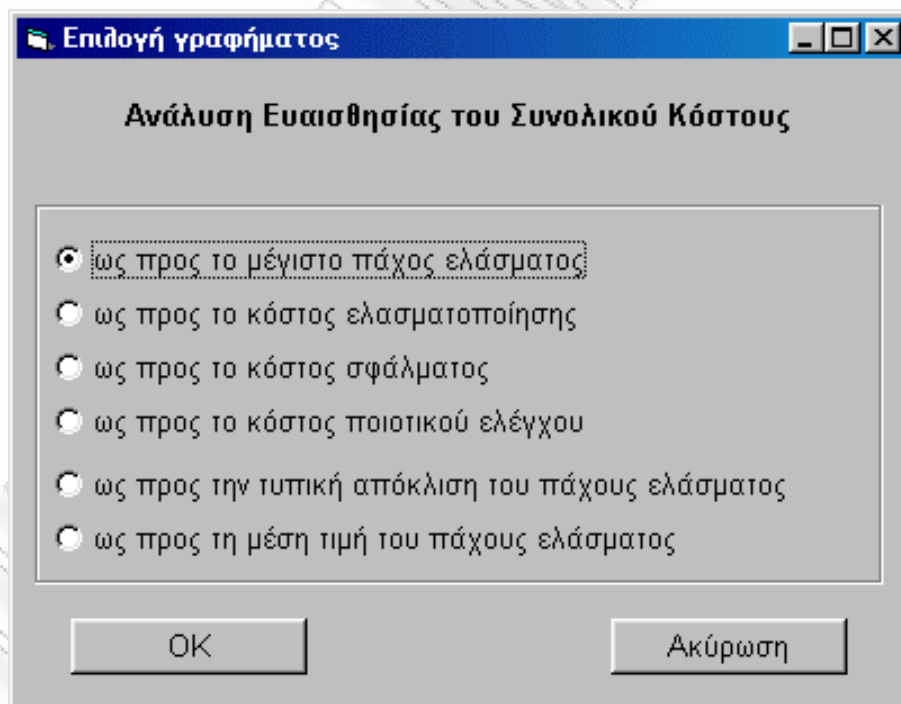
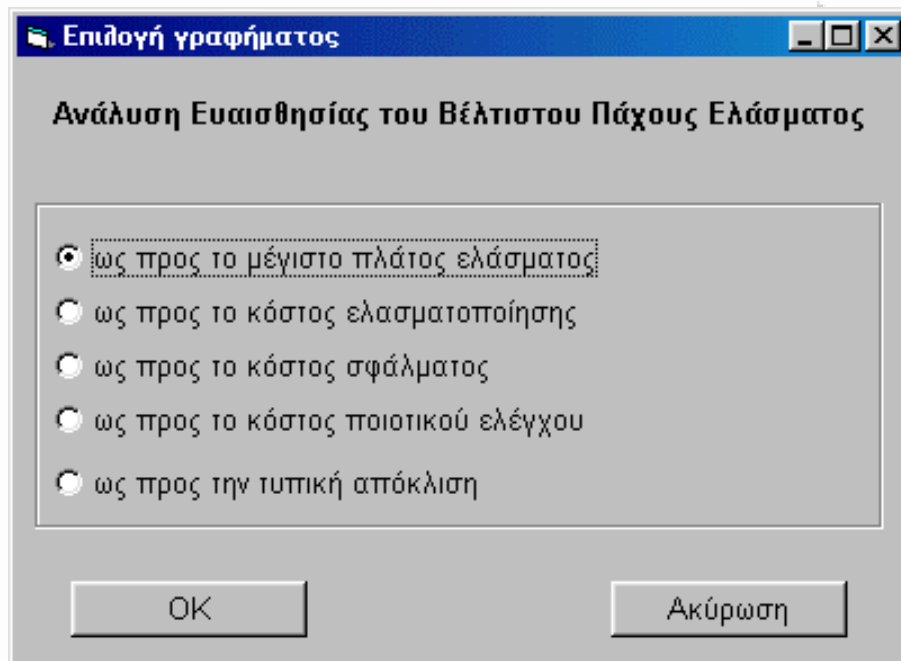
| | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| Κεντρική τιμή διαστήματος ανοχής | <input type="text" value="0.25"/> |
| (Πλάτος διαστήματος ανοχής) / 2 | <input type="text" value="0.05"/> |
| Κόστος ελασματοποίησης | <input type="text" value="1"/> |
| Κόστος σφάλματος | <input type="text" value="4"/> |
| Κόστος ποιοτικού ελέγχου | <input type="text" value="0.05"/> |
| Τυπική απόκλιση πάχους ελάσματος | <input type="text" value="0.03"/> |

Αποτελέσματα

| | |
|---|-----------|
| Βέλτιστη τιμή μέσου ανοίγματος ελάστρου | 0,2624765 |
| Ελάχιστο συνολικό κόστος | 1,230075 |

Αποτελέσματα

| | |
|---|-----------|
| Βέλτιστη τιμή μέσου ανοίγματος ελάστρου | 0,2604292 |
| Ελάχιστο συνολικό κόστος | 1,255427 |



Σχήμα III-1. Στιγμιότυπα οθόνης (screenshots) με δεδομένα/αποτελέσματα (input/output, αντίστοιχα) και μενού επιλογών γραφήματος μονοπαραμετρικής ανάλυσης ευαισθησίας. Το πρώτο σύνολο αποτελεσμάτων αναφέρεται στην περίπτωση (A) ενώ το δεύτερο στην (B).

```

Option Explicit
Dim PString As String
Dim TX, j As Integer

Private Sub Form_Load()
Dim i As Integer
cDirectory = CurDir
LoadFlag = 0
Call DisableMenus
End Sub

Private Sub Form_Resize()
StatusText.Width = Me.Width
End Sub

Private Sub mnuEditData_Click()
Select Case ProblemIndex
Case 1 To 2
    frmElasmaIn.Show
End Select
End Sub

Private Sub mnuExit_Click()
Unload Me
End Sub

Private Sub mnuGraphCost_Click()
Load frmGraphOption2
frmGraphOption2.Show
End Sub

Private Sub mnuGraphXm_Click()
Load frmGraphOption
frmGraphOption.Show
End Sub

Private Sub mnuNew_Click()
LoadFlag = 0
Select Case ProblemIndex
Case 1 To 2
    Load frmElasmaIn
    frmElasmaIn.Show
    FileExt = ".dat"
End Select
End Sub

Private Sub mnuOpen_Click()
Dim resp As Integer
Dim sMessage1 As String
sMessage1 = "Πρώτα πρέπει να επιλέξετε κάποιο πρόβλημα" & Chr(13) & Chr(10) & "προς επίλυση από το μενού"
If ProblemSelected = False Then
    resp = MsgBox(sMessage1, vbExclamation + vbOKOnly, "Αποτυχία στο Άνοιγμα Αρχείου")
Exit Sub
End If
Select Case ProblemIndex
Case 1 To 2

```

```

FileExt = "*.dat"
ComDlg1.DialogTitle = "Άνοιγμα Αρχείου"
ComDlg1.Filter = FileExt
ComDlg1.filename = FileExt
ComDlg1.CancelError = True
On Error Resume Next
ComDlg1.ShowOpen
If Err.Number = cdlCancel Then Err.Clear: Exit Sub
sFileName = ComDlg1.filename
Call LoadData
End Select
FileOpenError:
End Sub

Private Sub mnuOutput_Click()
Select Case ProblemIndex
Case 1 To 2
    Load frmElasmaOut
    frmElasmaOut.Show
End Select
End Sub

Private Sub mnuPrint_Click()
Dim P As Integer
Dim CharHeight, CharWidth As Integer
Dim LMarg, RMarg, UMarg, DMarg As Single
Dim sfile As String
Dim i As Integer
Dim printer1 As Long
Dim printervar As PrintDlg
ComDlg3.DialogTitle = "Εκτύπωση Αρχείου"
ComDlg3.PrinterDefault = True
ComDlg3.CancelError = True
On Error Resume Next
ComDlg3.ShowPrinter
If Err.Number = cdlCancel Then Err.Clear: Exit Sub
If ComDlg3.flags = cdlPDPrintToFile Then
    FileExt = "*.txt"
    ComDlg2.DialogTitle = "Σώσιμο Αρχείου"
    ComDlg2.Filter = FileExt
    ComDlg2.filename = FileExt
    ComDlg2.CancelError = True
    ComDlg2.ShowSave
    On Error Resume Next
    If Err.Number = cdlCancel Then Err.Clear: Exit Sub
    sfile = ComDlg2.filename
    Open sfile For Output As #1
    Print #1, "ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ"
    Select Case ProblemIndex
    Case 1
        Print #1, "Περίπτωση μίας μόνο επανεκατεργασίας"
    Case 2
        Print #1, "Περίπτωση πολλαπλών επανεκατεργασιών"
    End Select
    Print #1,
    Print #1, Tab(20); "Δεδομένα Προβλήματος"
    For i = 1 To 6
        Print #1, frmElasmaIn.Label5(i - 1).Caption; Tab(60); inVars(i)
    
```

```

Next i
Print #1,
Print #1, Tab(20); "Αποτελέσματα Προβλήματος"
Print #1, frmElasmaOut.Label1(0).Caption; Tab(60); frmElasmaIn.xm
Print #1, frmElasmaOut.Label1(1).Caption; Tab(60); frmElasmaIn.LeastCost
Close #1
Else
Printer.Font = "Courier New Greek"
Printer.ScaleMode = vbTwips
Printer.Font.Size = 10
CharHeight = Printer.TextHeight("X")
CharWidth = Printer.TextWidth("X")
LMarg = 5 * CharWidth: RMarg = 5 * CharWidth: UMarg = 5 * CharHeight: DMarg = 5
* CharHeight
Printer.CurrentY = UMarg
Printer.Print Tab(10); "ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ
BIOMHXANIA"
Select Case ProblemIndex
Case 1
Printer.Print Tab(20); "Περίπτωση μίας μόνο επανεκατεργασίας"
Case 2
Printer.Print Tab(20); "Περίπτωση πολλαπλών επανεκατεργασιών"
End Select
Printer.Print
Printer.Print Tab(30); "Δεδομένα Προβλήματος"
For i = 1 To 6
Printer.Print Tab(10); frmElasmaIn.Label5(i - 1).Caption; Tab(60);
inVars(i)
Next i
Printer.Print
Printer.Print Tab(30); "Αποτελέσματα Προβλήματος"
Printer.Print Tab(10); frmElasmaOut.Label1(0).Caption; Tab(60);
Str(frmElasmaIn.xm)
Printer.Print Tab(10); frmElasmaOut.Label1(1).Caption; Tab(60);
Str(frmElasmaIn.LeastCost)
Printer.EndDoc
End If
End Sub

Private Sub mnuProblemClose_Click()
Dim resp As Integer
Dim sClose As String
sClose = "Το πρόβλημα `" & ProblemString(ProblemIndex) & "` έκλεισε"
resp = MsgBox(sClose, vbInformation + vbOKOnly, "Κλείσιμο Προβλήματος")
Call DisableMenus
Call Update_StatusText
LoadFlag = 0
Unload frmElasmaIn
End Sub

Private Sub mnuProblems_Click()
Dim resp As Integer
Dim msg As String
msg = "Για να επιλέξετε ένα νέο πρόβλημα, πρέπει " & Chr(10) & Chr(13) & "πρώτα να
κλείσετε το τρέχων πρόβλημα"
If ProblemSelected = True Then
resp = MsgBox(msg, vbExclamation + vbOKOnly, "Άνοιγμα Προβλήματος")
Exit Sub

```


GeneralForm

```
End If
Load GeneralList
GeneralList.Show vbModal
End Sub

Private Sub mnuSave_Click()
Select Case ProblemIndex
Case 1 To 2
    ComDlg1.DialogTitle = "Σώσιμο Αρχείου"
    ComDlg1.Filter = FileExt
    ComDlg1.filename = FileExt
    ComDlg1.CancelError = True
    On Error Resume Next
    ComDlg1.ShowSave
    If Err.Number = cdlCancel Then Err.Clear: Exit Sub
    sFileName = ComDlg1.filename
    Call SaveData
End Select
End Sub
```

GeneralList

```
' In this form the user selects the kind of problem to solve:  
' 1) Unique recycle condition, or  
' 2) Continuous recycling condition  
' The selection is stored in variable ProblemIndex
```

```
Option Explicit
```

```
Private Sub cmdCancel_Click()  
Unload Me  
End Sub
```

```
Private Sub CmdOK_Click()  
Call EnableMenus  
ProblemIndex = ListExerc.ListIndex + 1  
Call Update_StatusText  
Unload Me  
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()  
Dim i As Integer  
Dim NumProblems As Integer  
NumProblems = 2  
ProblemString(1) = "P1. Τεχνοοικονομική Βελτιστοποίηση I"  
ProblemString(2) = "P2. Τεχνοοικονομική Βελτιστοποίηση II"  
For i = 1 To NumProblems  
ListExerc.AddItem ProblemString(i)  
Next i  
ListExerc.Selected(0) = True  
End Sub
```

```
Private Sub ListExerc_DblClick()  
Call CmdOK_Click  
End Sub
```

```
' In this form the user enters the input data:
' d : Central value of plate thickness
' a : Acceptable deviation of plate thickness in relation to central value
' C1 : processing cost,
' C2 : Cost due to economic loss corresponding to lower price of thinner plates
'       since they are out of standard specifications set a priori
' CE : Quality inspection cost each time the lot under consideration is examined
' sd : standard deviation of normal distribution of plate thickness values
' The output variables calculated by those inputs are:
' xm : The optimal value of mean plate thickness
' LeastCost : The least total cost
' x1, x2 : the lower and upper value of plate thickness
```

```
Option Explicit
```

```
Public d As Single
Public a As Single
Public C1 As Single
Public C2 As Single
Public CE As Single
Public sd As Single
Public xm As Single
Public LeastCost As Single
Public x1 As Single
Public x2 As Single
```

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
' This routine, executed upon pressing the OK button on the form, takes the input
data
' and calculates the output, presented in form frmElasmaOut. It places the input
data
' in array inVars with the order given in the form. xm is estimated with bisection
```

```
Dim pars(10) As Single
Dim ErrorFlag As Integer
Dim resp As Integer
Dim ErrMess As String
Dim i As Integer
ErrMess = "Δώστε αριθμητική τιμή"
For i = 1 To 6
    If Not IsNumeric(Text1(i - 1).Text) Then
        resp = MsgBox(ErrMess, vbExclamation + vbOKOnly, "Λάθος στα δεδομένα")
        Text1(i - 1).SetFocus
        Exit Sub
    End If
Next i
d = Val(Text1(0).Text)
a = Val(Text1(1).Text)
C1 = Val(Text1(2).Text)
C2 = Val(Text1(3).Text)
CE = Val(Text1(4).Text)
sd = Val(Text1(5).Text)
x1 = d - a
x2 = d + a
pars(1) = x1
pars(2) = x2
pars(3) = C1
pars(4) = C2
pars(5) = CE
```

```
pars(6) = sd
xm = bisection(x1, x2, 0.0001, 999, pars(), ErrorFlag)
If ErrorFlag = 1 Then
    ErrMess = "Η μέθοδος της διχοτόμησης απέτυχε να δώσει αποτέλεσμα." & Chr(10) &
    Chr(13) & _
        "Θα πρέπει να δώσετε διαφορετικές τιμές παραμέτρων."
    resp = MsgBox(ErrMess, vbExclamation + vbOKOnly, "Λάθος υπολογισμών")
    Exit Sub
End If
LeastCost = TotalCost(pars(), xm)
Call EnableMenus
Call EnableMenus2
For i = 1 To 6
    inVars(i) = Text1(i - 1).Text
Next i
Me.Hide
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Unload Me
End Sub

Private Sub Form_Load()
' Then the form is loaded it presents the input data, stored in array inVars()

Dim i As Integer
If LoadFlag = 1 Then
    For i = 1 To 6
        Text1(i - 1).Text = inVars(i)
    Next i
End If
End Sub
```

```
Option Explicit
Private Sub Command1_Click()
Unload Me
End Sub

Private Sub Form_Load()

Dim LeastCost, xm As Single

xm = frmElasmaIn.xm
LeastCost = frmElasmaIn.LeastCost
Label3(0).Caption = xm
Label3(1).Caption = LeastCost
End Sub
```

```

Option Explicit
Private Sub Command1_Click()
Dim pars(10) As Single
Dim i As Integer
Dim C1 As Single, C2 As Single, CE As Single
Dim x1 As Single, x2 As Single
Dim sd As Single, d As Single
Dim dd As Single, dmin As Single, dmax As Single, dstep As Single
Dim XL As Single, XU As Single, ES As Single
Dim IM As Integer
Dim ErrorFlag As Integer
Dim biserror As Integer
Dim ErrMess As String
Dim resp As Integer
If Option1.Value = True Then f = 1
If Option2.Value = True Then f = 2
If Option3.Value = True Then f = 3
If Option4.Value = True Then f = 4
If Option5.Value = True Then f = 5
ErrorFlag = 0
biserror = 0
x1 = frmElasmaIn.x1
x2 = frmElasmaIn.x2
d = frmElasmaIn.d
C1 = frmElasmaIn.C1
C2 = frmElasmaIn.C2
CE = frmElasmaIn.CE
sd = frmElasmaIn.sd
XL = x1: XU = x2: ES = 0.0001: IM = 999
Select Case f
Case 1
' Ανάλυση Ευαισθησίας του Βέλτιστου Πάχους Ελάσματος
' ως προς το μέγιστο πλάτος ελάσματος
i = 0
dmin = 0.005: dmax = 0.05: dstep = (dmax - dmin) / 200
For dd = dmin To dmax Step dstep
i = i + 1
x1 = d - dd
x2 = d + dd
pars(1) = x1
pars(2) = x2
pars(3) = C1
pars(4) = C2
pars(5) = CE
pars(6) = sd
X(i) = x2
Y(i) = bisection(XL, XU, ES, IM, pars(), ErrorFlag)
If ErrorFlag = 1 Then biserror = 1: i = i - 1
Next dd
n = i
Case 2
' Ανάλυση Ευαισθησίας του Βέλτιστου Πάχους Ελάσματος
' ως προς το κόστος ελασματοποίησης
i = 0
dmin = 0.6 * C1: dmax = 1.4 * C1: dstep = (dmax - dmin) / 200
For dd = dmin To dmax Step dstep
i = i + 1
pars(1) = x1

```

```

    pars(2) = x2
    pars(3) = dd
    pars(4) = C2
    pars(5) = CE
    pars(6) = sd
    X(i) = dd
    Y(i) = bisection(XL, XU, ES, IM, pars(), ErrorFlag)
    If ErrorFlag = 1 Then biserror = 1: i = i - 1
Next dd
n = i
Case 3
' Ανάλυση Ευαισθησίας του Βέλτιστου Πάχους Ελάσματος
' ως προς το κόστος σφάλματος
i = 0
dmin = 0.6 * C2: dmax = 1.4 * C2: dstep = (dmax - dmin) / 200
For dd = dmin To dmax Step dstep
    i = i + 1
    pars(1) = x1
    pars(2) = x2
    pars(3) = C1
    pars(4) = dd
    pars(5) = CE
    pars(6) = sd
    X(i) = dd
    Y(i) = bisection(XL, XU, ES, IM, pars(), ErrorFlag)
    If ErrorFlag = 1 Then biserror = 1: i = i - 1
Next dd
n = i
Case 4
' Ανάλυση Ευαισθησίας του Βέλτιστου Πάχους Ελάσματος
' ως προς το κόστος ποιοτικού ελέγχου
i = 0
dmin = 0.6 * CE: dmax = 1.4 * CE: dstep = (dmax - dmin) / 200
For dd = dmin To dmax Step dstep
    i = i + 1
    pars(1) = x1
    pars(2) = x2
    pars(3) = C1
    pars(4) = C2
    pars(5) = dd
    pars(6) = sd
    X(i) = dd
    Y(i) = bisection(XL, XU, ES, IM, pars(), ErrorFlag)
    If ErrorFlag = 1 Then biserror = 1: i = i - 1
Next dd
n = i
Case 5
' Ανάλυση Ευαισθησίας του Βέλτιστου Πάχους Ελάσματος
' ως προς την τυπική απόκλιση
i = 0
dmin = 0.6 * sd: dmax = 1.4 * sd: dstep = (dmax - dmin) / 200
For dd = dmin To dmax Step dstep
    i = i + 1
    pars(1) = x1
    pars(2) = x2
    pars(3) = C1
    pars(4) = C2
    pars(5) = CE

```

frmGraphOption

```

    pars(6) = dd
    X(i) = dd
    Y(i) = bisection(XL, XU, ES, IM, pars(), ErrorFlag)
    If ErrorFlag = 1 Then biserror = 1: i = i - 1
Next dd
n = i
End Select
If biserror = 0 Then
    Load frmGraph1
    frmGraph1.Show
Else
    If n > 10 Then
        ErrMess = "Η μέθοδος της διχοτόμησης απέτυχε για μία ή περισσότερες" &
Chr(10) & Chr(13) & _
        "περιοχές σημείων της καμπύλης. Θέλετε να δείτε την καμπύλη" &
Chr(10) & Chr(13) & _
        "έτσι όπως υπολογίστηκε για " & n & " (από 200) σημεία; "

        resp = MsgBox(ErrMess, vbExclamation + vbYesNo, "Λάθος υπολογισμού
καμπύλης")
        If resp = vbYes Then
            Load frmGraph1
            frmGraph1.Show
        Else
            Exit Sub
        End If
    Else
        ErrMess = "Η μέθοδος της διχοτόμησης απέτυχε για μεγάλη περιοχή της
καμπύλης." & Chr(10) & Chr(13) & _
        "Θα πρέπει να δώσετε στη φόρμα δεδομένων διαφορετικές τιμές
παραμέτρων."
        resp = MsgBox(ErrMess, vbExclamation + vbOKOnly, "Λάθος υπολογισμών")
        Exit Sub
    End If
End If
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Unload Me
End Sub

Private Sub Form_Load()
If ProblemIndex = 1 Then
    Option4.Enabled = False
Else
    Option4.Enabled = True
End If
End Sub

```



```

Option Explicit
Private Sub Command1_Click()
Dim pars(10) As Single
Dim i As Integer
Dim C1, C2, x1, x2, sd, d, CE As Single
Dim z1, z2 As Single
Dim xm As Single
Dim dd, dmin, dmax, dstep As Single
Dim XL, XU, ES As Single
Dim IM, ErrorFlag As Integer
If Option1.Value = True Then f = 6
If Option2.Value = True Then f = 7
If Option3.Value = True Then f = 8
If Option4.Value = True Then f = 9
If Option5.Value = True Then f = 10
If Option6.Value = True Then f = 11
ErrorFlag = 0
x1 = frmElasmaIn.x1
x2 = frmElasmaIn.x2
d = frmElasmaIn.d
C1 = frmElasmaIn.C1
C2 = frmElasmaIn.C2
CE = frmElasmaIn.CE
sd = frmElasmaIn.sd
xm = frmElasmaIn.xm
Select Case f
Case 6
' Ανάλυση Ευαισθησίας του Συνολικού Κόστους
' ως προς το μέγιστο πάχος ελάσματος
i = 0
dmin = 0.005: dmax = 0.05: dstep = (dmax - dmin) / 200
For dd = dmin To dmax Step dstep
i = i + 1
x1 = d - dd
x2 = d + dd
pars(1) = x1
pars(2) = x2
pars(3) = C1
pars(4) = C2
pars(5) = CE
pars(6) = sd
X(i) = x2
Y(i) = TotalCost(pars(), xm)
Next dd
n = i
Case 7
' Ανάλυση Ευαισθησίας του Συνολικού Κόστους
' ως προς το κόστος ελασματοποίησης
i = 0
dmin = 0.6 * C1: dmax = 1.4 * C1: dstep = (dmax - dmin) / 200
For dd = dmin To dmax Step dstep
i = i + 1
pars(1) = x1
pars(2) = x2
pars(3) = dd
pars(4) = C2
pars(5) = CE
pars(6) = sd

```

```

        X(i) = dd
        Y(i) = TotalCost(pars(), xm)
    Next dd
    n = i
Case 8
    ' Ανάλυση Ευαισθησίας του Συνολικού Κόστους
    ' ως προς το κόστος σφάλματος
    i = 0
    dmin = 0.6 * C2: dmax = 1.4 * C2: dstep = (dmax - dmin) / 200
    For dd = dmin To dmax Step dstep
        i = i + 1
        pars(1) = x1
        pars(2) = x2
        pars(3) = C1
        pars(4) = dd
        pars(5) = CE
        pars(6) = sd
        X(i) = dd
        Y(i) = TotalCost(pars(), xm)
    Next dd
    n = i
Case 9
    ' Ανάλυση Ευαισθησίας του Συνολικού Κόστους
    ' ως προς το κόστος ποιοτικού ελέγχου
    i = 0
    dmin = 0.6 * CE: dmax = 1.4 * CE: dstep = (dmax - dmin) / 200
    For dd = dmin To dmax Step dstep
        i = i + 1
        pars(1) = x1
        pars(2) = x2
        pars(3) = C1
        pars(4) = C2
        pars(5) = dd
        pars(6) = sd
        X(i) = dd
        Y(i) = TotalCost(pars(), xm)
    Next dd
    n = i
Case 10
    ' Ανάλυση Ευαισθησίας του Συνολικού Κόστους
    ' ως προς την τυπική απόκλιση του πάχους ελάσματος
    i = 0
    dmin = 0.6 * sd: dmax = 1.4 * sd: dstep = (dmax - dmin) / 200
    For dd = dmin To dmax Step dstep
        i = i + 1
        pars(1) = x1
        pars(2) = x2
        pars(3) = C1
        pars(4) = C2
        pars(5) = CE
        pars(6) = dd
        X(i) = dd
        Y(i) = TotalCost(pars(), xm)
    Next dd
    n = i
Case 11
    ' Ανάλυση Ευαισθησίας του Συνολικού Κόστους
    ' ως προς τη μέση τιμή του πάχους ελάσματος

```

```
i = 0
dmin = x1: dmax = x2: dstep = (dmax - dmin) / 200
For dd = dmin To dmax Step dstep
    i = i + 1
    pars(1) = x1
    pars(2) = x2
    pars(3) = C1
    pars(4) = C2
    pars(5) = CE
    pars(6) = sd
    X(i) = dd
    Y(i) = TotalCost(pars(), dd)
Next dd
n = i
End Select
Load frmGraph1
frmGraph1.Show
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Unload Me
End Sub
```

```

Option Explicit
Dim GFlag As Integer
Dim FlagPr As Integer
Dim Gykcmin(200) As Single
Dim Gykcmax(200) As Single
Dim yArray(8) As Single
Dim Gykpmin(200) As Single
Dim Gykpmax(200) As Single
Dim yk(200), xk(200) As Single
Dim j2, n1, j1, n2 As Integer
Dim xc1, xc2, yc1, yc2, xx1, yy1, xx2, yy2 As Integer
Dim xmarg, ymarg, Ax0 As Integer
Dim xmin, xmax, ymin, ymax As Single
Private Sub Command1_Click()

Dim sfile As String
ComDlg1.CancelError = True
On Error Resume Next
ComDlg1.ShowPrinter
If Err.Number = cdlCancel Then Err.Clear: Exit Sub
If ComDlg1.flags = cdlPDPrintToFile Then
FileExt = "*.bmp"
ComDlg2.DialogTitle = "Αποθήκευση Γραφήματος στο δίσκο"
ComDlg2.Filter = FileExt
ComDlg2.filename = FileExt
ComDlg2.CancelError = True
On Error Resume Next
ComDlg2.ShowSave
If Err.Number = cdlCancel Then Err.Clear: Exit Sub
sfile = ComDlg2.filename
PicBis.Picture = PicBis.Image
SavePicture PicBis, sfile
Else
Printer.Font.Name = "Courier New Greek"
Printer.Font.Size = 10
Printer.ScaleMode = vbTwips
FlagPr = 1
Call LsqGraph(Printer)
FlagPr = 0
Printer.EndDoc
End If

End Sub

Private Sub Command2_Click()
Unload Me
End Sub

Private Sub LsqGraph(hObj As Object)
Dim Xincr As Single
Dim i As Integer
Dim Yorder(201) As Single
xmax = FindScaleMax(X(1), X(n)): xmin = FindScaleMin(X(1), X(n))
For i = 1 To n
    Yorder(i) = Y(i)
Next i
Call bubble(Yorder(), n)
ymin = FindScaleMin(Yorder(1), Yorder(n))

```

```

ymax = FindScaleMax(Yorder(1), Yorder(n))
Call GraphProgram(hObj)
End Sub

Private Sub GraphProgram(hObj As Object)
hObj.ScaleMode = vbPixels
xc1 = 1500: xc2 = 5800: yc1 = 1000: yc2 = 3500
xmarg = 380: ymarg = 200: Ax0 = 10
If FlagPr = 0 Then
    xx1 = xc1 - 4 * xmarg: xx2 = xc2 + 4 * xmarg
    yy1 = yc1 - 7 * ymarg: yy2 = yc2 + 3 * ymarg
Else
    xx1 = xc1 - 4 * xmarg: xx2 = xc2 + 4 * xmarg
    yy1 = yc1 - 22 * ymarg: yy2 = yc2 + 3 * ymarg
End If
Call DrawBox(hObj)
Call Labeling(hObj)

Call DrawGraph(hObj, Y())

End Sub
Private Function ScX(xi As Single) As Single
ScX = (xi - xmin) * (xc2 - xc1) / (xmax - xmin) + xc1
End Function
Private Function ScY(yi As Single) As Single
ScY = (yi - ymin) * (yc2 - yc1) / (ymax - ymin) + yc1
End Function

Private Sub DrawBox(hObj As Object)
' Draw Box
hObj.Scale (xx1, yy2)-(xx2, yy1)

If FlagPr = 0 Then
    hObj.Line (xx1 + 3 * xmarg, yy2 - 2 * ymarg)-(xx2 - 3 * xmarg, yy1 + 6 *
ymarg), RGB(255, 0, 0), B
Else
    hObj.Line (xx1 + 3 * xmarg, yy2 - 2 * ymarg)-(xx2 - 3 * xmarg, yy1 + 21 *
ymarg), , B
End If

End Sub
Private Sub Labeling(hObj As Object)
' Labels
Dim i As Integer
Dim lx, ly As Integer
Dim Flag1 As Integer
Dim Dx, Dy As Single
Dim tempx, tempy As String
Dim labelx, labely As String
Dim valx, valy, Dvalx, Dvaly As Single
Dim ticy, ticx As Integer
Dim xHeight, yHeight As Integer
Dim xlength, ylength As Integer
Dim xtitle, ytitle As String
Dim oldfont As Long
Dim newfont As Long
Dim coord As POINTAPI
Dim Pichdc As Long

```

```

Dim roundchange As Integer
Dim xround, yround As Integer
Dim lezada1, lezada2 As String
Select Case f
Case 1, 6
xtitle = "Μέγιστο πάχος ελάσματος"
Case 2, 7
xtitle = "Κόστος ελασματοποίησης"
Case 3, 8
xtitle = "Κόστος Σφάλματος"
Case 4, 9
xtitle = "Κόστος ποιοτικού ελέγχου"
Case 5, 10
xtitle = "Τυπική απόκλιση πάχους ελάσματος"
Case 11
xtitle = "Μέση τιμή πάχους ελάσματος"
End Select
hObj.Font.Name = "Arial"
hObj.Font.Size = 8
ticy = 70
ticx = 100
valx = xmin: valy = ymin: Dvalx = (xmax - xmin) / Ax0: Dvaly = (ymax - ymin) / Ax0
xround = 0
Do While xround <= 4
roundchange = 0
For i = 1 To Ax0 + 1
labelx = Str(FRound((valx), xround))
If labelx = tempx Then roundchange = 1
tempx = labelx
valx = valx + Dvalx
Next i

If roundchange = 0 Then
Exit Do
Else
xround = xround + 1
End If
Loop
yround = 0
Do While yround <= 4
roundchange = 0
For i = 1 To Ax0 + 1
labely = Str(FRound((valy), yround))
If labely = tempy Then roundchange = 1
tempy = labely
valy = valy + Dvaly
Next i
If roundchange = 0 Then
Exit Do
Else
yround = yround + 1
End If

Loop
lx = xc1: ly = yc1: Dx = (xc2 - xc1) / Ax0: Dy = (yc2 - yc1) / Ax0
valx = xmin: valy = ymin: Dvalx = (xmax - xmin) / Ax0: Dvaly = (ymax - ymin) / Ax0:
Dy = (yc2 - yc1) / Ax0: Flag1 = 1
For i = 1 To Ax0 + 1

```

```

labelx = FindFormat(valx, xround)
labely = FindFormat(valy, yround)

xlength = Abs(hObj.TextWidth(labelx))
ylength = Abs(hObj.TextWidth(labely))
xHeight = Abs(hObj.TextHeight(labelx))
yHeight = Abs(hObj.TextHeight(labely))
hObj.PSet (lx, yc1 - ymarg): hObj.Line -(lx, yc1 - ymarg + ticx), vbRed
hObj.PSet (xc1 - xmarg, ly): hObj.Line -(xc1 - xmarg + ticy, ly), vbRed
If Flag1 <> -1 Then

    hObj.CurrentX = lx - xlength / 2: hObj.CurrentY = yc1 - ticx - ymarg:
hObj.Print labelx
    hObj.CurrentX = xc1 - ylength - ticy - 2 * ymarg: hObj.CurrentY = ly +
(yHeight / 2): hObj.Print labely
    End If
    lx = xc1 + Dx * i: ly = yc1 + Dy * i: valx = valx + Dvalx: valy = valy + Dvaly:
Flag1 = -Flag1
Next i
Select Case f
Case 1 To 5
ytitle = "Βέλτιστη τιμή ανοίγματος ελάστρων"
Case 6 To 11
ytitle = "Συνολικό Κόστος"
End Select

hObj.Font.Size = 10
hObj.CurrentX = (xx2 - xx1) / 2 - hObj.TextWidth(xtitle) / 2: hObj.CurrentY = yc1 -
ticx - 2 * ymarg: hObj.Print xtitle

Select Case f
Case 1 To 5
    lezada1 = "Ανάλυση ευαισθησίας βέλτιστης τιμής ανοίγματος"
Case 6 To 11
    lezada1 = "Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους"
End Select
Select Case f
Case 1, 6
    lezada2 = lezada1 & " ως προς το μέγιστο πλάτος ελάσματος"
Case 2, 7
    lezada2 = lezada1 & " ως προς το κόστος ελασματοποίησης"
Case 3, 8
    lezada2 = lezada1 & " ως προς το κόστος σφάλματος"
Case 4, 9
    lezada2 = lezada1 & " ως προς το κόστος ποιοτικού ελέγχου"
Case 5, 10
    lezada2 = lezada1 & " ως προς την τυπική απόκλιση του πάχους"
Case 11
    lezada2 = lezada1 & " ως προς τη μέση τιμή πάχους του ελάσματος "
End Select
hObj.CurrentX = xc1 + (xc2 - xc1) / 2 - hObj.TextWidth(lezada2) / 2: hObj.CurrentY
= yc1 - 4 * ymarg
Call WordWrap(hObj, xc1 - 2 * xmarg, (yc1 - 4 * ymarg), (xc2 + 2 * xmarg - (xc1 - 2
* xmarg)), 3 * ymarg, lezada2)

hObj.CurrentX = xc1 - 3 * xmarg - ticy
hObj.CurrentY = yc1 + (yc2 - yc1) / 2 - hObj.TextWidth(ytitle) / 2

```

```

If FlagPr = 0 Then
    newfont = CreateFont(12, 7, 900, 0, 400, False, False, _
        False, 0, 7, 16 Or 0, 2, 2 Or 16 Or 4, "Arial Greek")
Else
    newfont = CreateFont(80, 50, 900, 0, 400, False, False, _
        False, 0, 7, 16 Or 0, 2, 2 Or 16 Or 4, "Arial Greek")
End If
Pichdc = hObj.hdc
oldfont = SelectObject(Pichdc, newfont)
hObj.Print ytitle
newfont = SelectObject(Pichdc, oldfont)

End Sub
Private Sub DrawGraph(hObj As Object, GraphY() As Single)
' Draw Graph
Dim i As Integer
Dim pColor As Long
Dim xx, yy, ll As Single
i = 1
ll = 0

If FlagPr = 0 Then
    pColor = vbYellow
Else
    pColor = vbBlack
End If
For i = 1 To n
    xx = ScX((X(i))): yy = ScY((GraphY(i)))
    If ll <> 1 Then hObj.PSet (xx, yy): ll = 1
    hObj.Line -(xx, yy), pColor
Next i

End Sub

Private Function FindYMax() As Single
Dim yMaxtemp, ytemp As Single
Dim i As Integer
yMaxtemp = yArray(1)
For i = 1 To 8
    ' Call bubble(tArray(), (NoP))
    ytemp = yArray(i)
    If i > 1 Then
        If ytemp > yMaxtemp Then yMaxtemp = ytemp
    End If
Next i
FindYMax = yMaxtemp
End Function

Private Function FindYMin() As Single
Dim yMintemp, ytemp As Single
Dim i As Integer
ytemp = yArray(1)
For i = 1 To 8
    ytemp = yArray(i)
    If i > 1 Then
        If ytemp < yMintemp Then yMintemp = ytemp
    End If
Next i
FindYMin = yMintemp
End Function

```



```

    End If
Next i
FindYMin = yMintemp
End Function

```

```

Private Function ConvertToPixels(coord As POINTAPI) As POINTAPI
Dim pixelx, pixely As Single
Dim sclleft, sctop As Single
Dim pixperunitx, pixperunity As Single
pixelx = PicBis.ScaleX(coord.Pointx - PicBis.ScaleLeft, PicBis.ScaleMode, vbPixels)
pixely = PicBis.ScaleY(coord.Pointy - PicBis.ScaleTop, PicBis.ScaleMode, vbPixels)
sclleft = PicBis.ScaleX(PicBis.ScaleLeft, PicBis.ScaleMode, vbPixels)
sctop = PicBis.ScaleY(PicBis.ScaleTop, PicBis.ScaleMode, vbPixels)
pixperunitx = PicBis.ScaleX(1, PicBis.ScaleMode, 3)
pixperunity = PicBis.ScaleY(1, PicBis.ScaleMode, 3)
pixelx = coord.Pointx * pixperunitx - sclleft
pixely = coord.Pointy * pixperunity - sctop
ConvertToPixels.Pointx = pixelx
ConvertToPixels.Pointy = pixely
End Function

```

```

Private Sub Form_Load()
Call LsqGraph(PicBis)
End Sub

```

```

Private Function FindScaleMax(ByVal xxMin As Single, ByVal xxMax As Single) As Single
Dim dd As Single
Dim rfactor As Long
Dim sg As Integer
Dim range As Single
Dim pol As Long

sg = Sgn(xxMax)
range = (xxMax - xxMin) / 10

xxMax = Abs(xxMax)
pol = 0
While range < 1
    pol = pol + 1
    xxMax = xxMax * 10
    range = range * 10
Wend
rfactor = CInt(range)
If (xxMax Mod rfactor) <> 0 Then
    dd = xxMax / rfactor
    If CInt(dd) < dd Then
        FindScaleMax = CLng(sg * (CInt(dd) + 1) * rfactor) / (10 ^ pol)
    Else
        FindScaleMax = CLng(sg * CInt(dd) * rfactor) / (10 ^ pol)
    End If
Else
    If CInt(xxMax) < xxMax Then
        FindScaleMax = CLng(sg * (xxMax + 1)) / (10 ^ pol)
    Else
        FindScaleMax = CLng(sg * xxMax) / (10 ^ pol)
    End If
End Function

```

```
End If
```

```
End Function
```

```
Private Function FindScaleMin(ByVal xxMin As Single, ByVal xxMax As Single) As Single
```

```
Dim dd As Single
```

```
Dim rfactor As Long
```

```
Dim sg As Integer
```

```
Dim range As Single
```

```
Dim pol As Long
```

```
sg = Sgn(xxMin)
```

```
range = (xxMax - xxMin) / 10
```

```
xxMin = Abs(xxMin)
```

```
pol = 0
```

```
While range < 1
```

```
    pol = pol + 1
```

```
    xxMin = xxMin * 10
```

```
    range = range * 10
```

```
Wend
```

```
rfactor = CInt(range)
```

```
If (xxMin Mod rfactor) <> 0 Then
```

```
    dd = xxMin / rfactor
```

```
    If CInt(dd) > dd Then
```

```
        FindScaleMin = CLng(sg * (CInt(dd) - 1) * rfactor) / (10 ^ pol)
```

```
    Else
```

```
        FindScaleMin = CLng(sg * CInt(dd) * rfactor) / (10 ^ pol)
```

```
    End If
```

```
Else
```

```
    If CInt(xxMin) > xxMin Then
```

```
        FindScaleMin = CLng(sg * (xxMin - 1)) / (10 ^ pol)
```

```
    Else
```

```
        FindScaleMin = CLng(sg * xxMin) / (10 ^ pol)
```

```
    End If
```

```
End If
```

```
End Function
```

```
Private Function FindFormat(ByVal valx As Single, ByVal xround As Integer) As String
```

```
Dim labelx As String
```

```
If Abs(valx) < 1 Then
```

```
    Select Case xround
```

```
        Case 0
```

```
            labelx = Format(FRound((valx), xround), "#0")
```

```
        Case 1
```

```
            labelx = Format(FRound((valx), xround), "#0.00")
```

```
        Case 2
```

```
            labelx = Format(FRound((valx), xround), "#0.000")
```

```
        Case 3
```

```
            labelx = Format(FRound((valx), xround), "#0.0000")
```

```
        Case 4
```

```
            labelx = Format(FRound((valx), xround), "#0.000000")
```

```
    End Select
```

```
Else
```

```
    Select Case xround
```

```
        Case 0
```

```
    labelx = Format(FRound((valx), xround), "#####0")
Case 1
    labelx = Format(FRound((valx), xround), "#####0.00")
Case 2
    labelx = Format(FRound((valx), xround), "###0.000")
Case 3
    labelx = Format(FRound((valx), xround), "###0.0000")
Case 4
    labelx = Format(FRound((valx), xround), "#0.000000")
End Select
```

```
End If
```

```
FindFormat = labelx
```

```
End Function
```

```
Private Function FRound(ByVal valx As Single, ByVal rfactor As Integer) As Single
```

```
Select Case rfactor
```

```
Case 0
```

```
    FRound = CLng(valx + 0.5)
```

```
Case 1
```

```
    FRound = CLng(100 * valx + 0.5) / 100
```

```
Case 2
```

```
    FRound = CLng(1000 * valx + 0.5) / 1000
```

```
Case 3
```

```
    FRound = CLng(10000 * valx + 0.5) / 10000
```

```
Case 4
```

```
    FRound = CLng(1000000 * valx + 0.5) / 1000000
```

```
End Select
```

```
End Function
```

ModDeclare

```
Option Explicit
Type POINTAPI
    Pointx As Long
    Pointy As Long
End Type
Type PrintDlg
    lStructSize As Long
    hwndOwner As Long
    hDevMode As Long
    hDevNames As Long
    hdc As Long
    flags As Long
    nFromPage As Integer
    nToPage As Integer
    nMinPage As Integer
    nMaxPage As Integer
    nCopies As Integer
    hInstance As Long
    lCustData As Long
    lpfnPrintHook As Long
    lpfnSetupHook As Long
    lpPrintTemplateName As String
    lpSetupTemplateName As String
    hPrintTemplate As Long
    hSetupTemplate As Long
End Type

Declare Function DeleteObject Lib "gdi32" (ByVal hObject As Long) As Long
Declare Function CreateFont Lib "gdi32" Alias "CreateFontA" ( _
ByVal Height As Long, ByVal Width As Long, _
ByVal Escapement As Long, ByVal Orientation As Long, _
ByVal Weight As Long, ByVal Italic As Long, _
ByVal Underline As Long, ByVal StrikeOut As Long, _
ByVal CharSet As Long, OutputPrecision As Long, _
ByVal ClipPrecision As Long, ByVal Quality As Long, _
ByVal PitchAndFamily As Long, ByVal Face As String) _
As Long
Declare Function SelectObject Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long, ByVal hObject As
Long) As Long
Declare Function PrintDlg Lib "comdlg32.dll" Alias "PrintDlgA" (pPrintdlg As
PrintDlg) As Long
```

```

Option Explicit
Global Const pi = 3.14159
Public f As Integer
Public inVars(10) As String
Public cDirectory As String
Public FileNotFound As Integer
Public LoadFlag As Integer
Public sFileName As String
Public FileExt As String
Public ProblemSelected As Boolean
Public ProblemIndex As Integer
Public errFlag As Integer
Public X(201) As Single
Public Y(201) As Single
Public n As Integer
Public ProblemString(5) As String
Public TempX1, TempY1 As Integer

Public Function IsNumber(NumString As String) As Boolean
If NumString = "0" Then
    IsNumber = True
Else
    If Val(NumString) = 0 Then
        IsNumber = False
    Else
        IsNumber = True
    End If
End If
End Function

Public Sub LoadData()
Dim i As Integer
Dim ErrorMessage As String
Dim resp As Integer
On Error Resume Next
Open sFileName For Input As #1
If Err.Number <> 0 Then
    ErrorMessage = "Το αρχείο δε βρέθηκε στο δίσκο"
    resp = MsgBox(ErrorMessage, vbCritical + vbOKOnly, "Λάθος στο Άνοιγμα Αρχείου")
    Err.Clear
    Exit Sub
End If
For i = 1 To 6
    Input #1, inVars(i)
Next i
Close #1
LoadFlag = 1
Load frmElasmaIn
frmElasmaIn.Show
End Sub

Public Sub DisableMenus()
ProblemSelected = False
GeneralForm.mnuNew.Enabled = False
GeneralForm.mnuOpen.Enabled = False
GeneralForm.mnuSave.Enabled = False
GeneralForm.mnuGraph.Enabled = False
GeneralForm.mnuPrint.Enabled = False
GeneralForm.mnuProblemClose.Enabled = False

```

```

GeneralForm.mnuOutput.Enabled = False
GeneralForm.mnuEditData.Enabled = False
End Sub
Public Sub EnableMenus()
ProblemSelected = True
GeneralForm.mnuNew.Enabled = True
GeneralForm.mnuOpen.Enabled = True
GeneralForm.mnuProblemClose.Enabled = True
End Sub
Public Sub Update_StatusText()
Dim Standard_StatusText As String
Standard_StatusText = "Ενεργό Πρόβλημα: "
If ProblemSelected = True Then
    GeneralForm.StatusText.Text = Standard_StatusText & ProblemString(ProblemIndex)
Else
    GeneralForm.StatusText.Text = ""
End If
End Sub
Public Sub SaveData()
Dim i As Integer
Open sFileName For Output As #1
For i = 1 To 6
    Write #1, inVars(i)
Next i
Close #1
End Sub

Function Minimum(xx1, xx2 As Double)
Dim m As Double
If xx1 <= xx2 Then
    m = xx1
Else
    m = xx2
End If
Minimum = m
End Function

Public Sub CancelMenu()
Dim msg As String
Dim resp As Integer
msg = "Η επιλογή αυτή δεν λειτουργεί" & Chr(13) & Chr(10) & "για τη συγκεκριμένη περίπτωση"
resp = MsgBox(msg, vbExclamation + vbOKOnly, "Άκυρη Επιλογή")
End Sub

Public Sub EnableMenus2()
GeneralForm.mnuSave.Enabled = True
GeneralForm.mnuGraph.Enabled = True
GeneralForm.mnuPrint.Enabled = True
GeneralForm.mnuOutput.Enabled = True
GeneralForm.mnuEditData.Enabled = True
End Sub

Public Function IsOutLimit(xvalue As Single, lobound As Single, upbound As Single,
msg As String) As Integer
Dim resp As Integer
Dim ErrMsg As String

```

```

ErrMsg = msg & " βρίσκεται εκτός ορίων." & Chr(10) & Chr(13) & "Πρέπει να είναι
μεταξύ " & lobound & " και " & upbound
If (xvalue > upbound Or xvalue < lobound) Then
    resp = MsgBox(ErrMsg, vbExclamation + vbOKOnly, "Λάθος στην εισαγωγή δεδομένων")
    IsOutLimit = 1
Else
    IsOutLimit = 0
End If
End Function
Public Sub bubble(xi() As Single, ni As Integer)
Dim i, j As Integer
Dim h1, h2 As Single
For i = 1 To ni - 1
For j = i + 1 To ni
If (xi(i) > xi(j)) Then
h1 = xi(i)
xi(i) = xi(j)
xi(j) = h1
End If
Next j
Next i
End Sub

Public Sub Superscript(stext As String)
Printer.CurrentY = Printer.CurrentY - 20
Printer.Font.Size = 8
Printer.Print stext;
Printer.Font.Size = 10
Printer.CurrentY = Printer.CurrentY + 20

End Sub

' Calculation of total cost in cases 1 & 2 as a function of partial costs C1, C2,
CE.
' C1 = processing cost,
' C2 = Cost due to economic loss corresponding to lower price of thinner plates
' since they are out of standard specifications set a priori
' CE = Quality inspection cost each time the lot under consideration is examined
Public Function TotalCost(pars() As Single, ByVal xm As Single) As Single
Dim z1, z2 As Single
Dim sd, x1, x2, C1, C2, CE As Single
x1 = pars(1)
x2 = pars(2)
C1 = pars(3)
C2 = pars(4)
CE = pars(5)
sd = pars(6)
z1 = (x1 - xm) / sd: z2 = (x2 - xm) / sd
Select Case ProblemIndex
Case 1
TotalCost = C1 + C1 * CumProb(z2) + C2 * (1 - CumProb(z1)) + CE
Case 2
TotalCost = (C1 + CE) * (1 + (CumProb(z2) / (1 - CumProb(z2)))) + (C2 * (1 -
CumProb(z1))) / (1 - CumProb(z2))
End Select
End Function
Public Sub WordWrap(objOut As Object, LMarg, TMarg, RgWid, RgHgt As Integer, InptStr
As String)

```

```
Dim StrtPos As Integer
Dim EndPos As Integer
Dim TxtLen As Integer
Dim PrntLn As String
Dim PrntIn As String
PrntIn = InptStr
objOut.CurrentY = TMarg
Do
    EndPos = 0
    TxtLen = 0
    PrntLn = ""
    Do
        StrtPos = EndPos + 1
        EndPos = InStr(StrtPos, PrntIn, " ")
        PrntLn = Left(PrntIn, EndPos)
        TxtLen = objOut.TextWidth(PrntLn)
    Loop Until TxtLen > RgWid - 10 Or EndPos = 0
    If EndPos = 0 Then
        PrntLn = PrntIn
        PrntIn = ""
    Else
        PrntLn = Left(PrntIn, StrtPos - 1)
        PrntIn = LTrim(Mid(PrntIn, StrtPos))
    End If
    objOut.CurrentX = LMarg
    TempY1 = LMarg + objOut.TextWidth(PrntLn): TempY1 = objOut.CurrentY
    objOut.Print PrntLn

Loop While Len(PrntIn) > 0
End Sub
```



```

Option Explicit
Dim biserror As Integer

' Determination of optimal thickness xi under (I) the unique recycle condition
(Case 1)
' and (II) the continuous recycling condition (case II) by using numerical analysis
' (constrained bisection method)
Public Function bissection(ByVal XL As Single, ByVal XU As Single, ByVal ES As
Single, ByVal IM As Integer, pars() As Single, ErrorFlag As Integer)
Dim XR, XN As Single
Dim ea, aa As Single
Dim i As Integer
Dim flag As Integer
biserror = 0
Do While (bisfunc(pars(), XL) * bisfunc(pars(), XU)) < 0
  If biserror = 1 Then ErrorFlag = 1: Exit Function
  XR = (XL + XU) / 2
  For i = 1 To IM
    aa = bisfunc(pars(), XL) * bisfunc(pars(), XR)
    If aa = 0 Then
      flag = 1
      bissection = XR
      Exit Do
    End If
    If aa < 0 Then XU = XR
    If aa > 0 Then XL = XR
    XN = (XL + XU) / 2
    If XN = 0 Then
      XR = XN
    Else
      ea = Abs(((XN - XR) / XN) * 100)
      If ea < ES Then
        bissection = XN
        flag = 1
        Exit Do
      End If
      XR = XN
    End If
  Next i
  If flag = 1 Then Exit Do
Loop
If flag <> 1 Then
  ErrorFlag = 1
Else
  ErrorFlag = 0
End If
End Function

Public Function bisfunc(pars() As Single, ByVal xi As Single) As Single
' x1 = lower limit of tolerance interval of the original indepen/stochastic
variable
' x2 = upper limit of tolerance interval of the original indepen/stochastic
variable
' z1 = lower limit of tolerance interval of the z-variable, i.e. x-variable
expressed
'      in terms of standard units
' z2 = upper limit of tolerance interval of the z-variable, i.e. x-variable
expressed

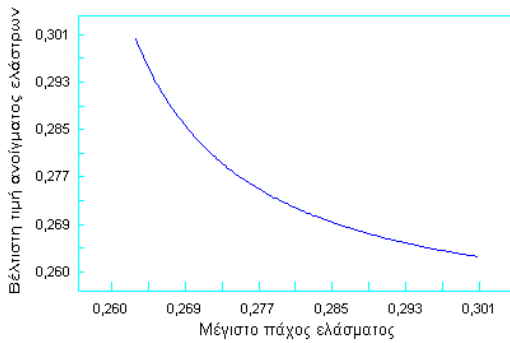
```

```

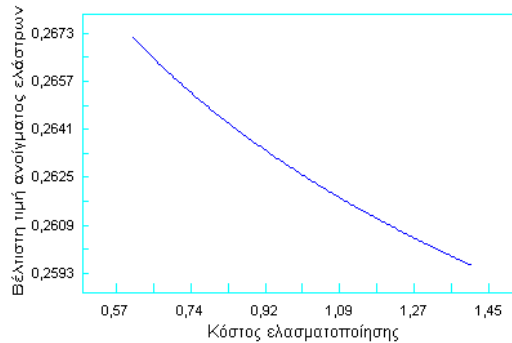
'      in terms of standard units
' C1 = extrusion cost in numerical units per sheet (mu/s)
' C2 = cost due to the production of faulty sheet (mu/s)
' CE = quality control cost (mu/s)
' sd = standard deviation of x-data
Dim z1, z2 As Single
Dim sd, x1, x2, C1, C2, CE As Single
x1 = pars(1)
x2 = pars(2)
C1 = pars(3)
C2 = pars(4)
CE = pars(5)
sd = pars(6)
Select Case ProblemIndex
Case 1
    On Error GoTo bisfuncErrorHandler
    bisfunc = Exp(-0.5 * ((x1 - xi) / sd) ^ 2) / Exp(-0.5 * ((x2 - xi) / sd) ^
2)) - (C1 / C2)
Case 2
    z1 = (x1 - xi) / sd
    z2 = (x2 - xi) / sd
    On Error GoTo bisfuncErrorHandler
    bisfunc = ((Exp(-0.5 * (z1 ^ 2))) / (Exp(-0.5 * (z2 ^ 2)))) * (1 - CumProb(z2))
- (1 - CumProb(z1)) - ((C1 + CE) / C2)
End Select
bisfuncErrorHandler:
If Err.Number = 6 Then
    Err.Clear
    biserror = 1
End If
End Function

' Estimation of area to the right of z by using the series
' z=0.5-[z-(z^3)/3+(z^5)/(5*2!*2^2)-(z^7)/(7*3!*2^3)+(z^9)/(9*4!*2^4)-...]/sqr(2pi)
' obtained by integrating the MacLaurin Series of the standard normal function
' {exp[-(z^2)/2]}/sqr(2pi) from z to infinity.
Public Function CumProb(ByVal z As Single) As Single
Dim t, s As Single
Dim r As Integer
t = z
s = z
r = 1
Do
    On Error GoTo CumProbErrorHandler
    t = (-t * z * z * (2 * r - 1))
    On Error GoTo CumProbErrorHandler
    t = t / ((2 * r + 1) * 2 * r)
    On Error GoTo CumProbErrorHandler
    s = s + t
    r = r + 1
Loop Until Abs(t) <= 0.0001
CumProb = 0.5 - (s / Sqr(8 * Atn(1)))
CumProbErrorHandler:
If Err.Number = 6 Then
    Err.Clear
    biserror = 1
End If
End Function

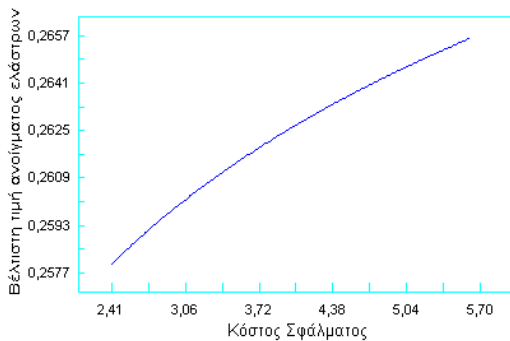
```



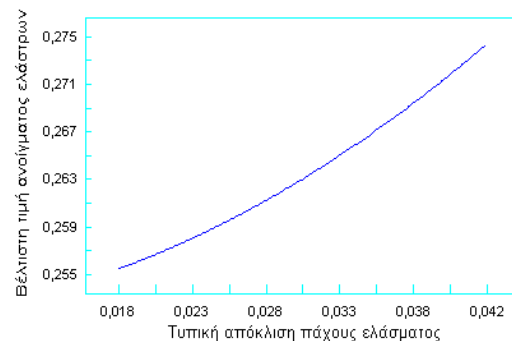
Ανάλυση ευαισθησίας βέλτιστης τιμής ανοίγματος ως προς το μέγιστο πλάτος ελάσματος



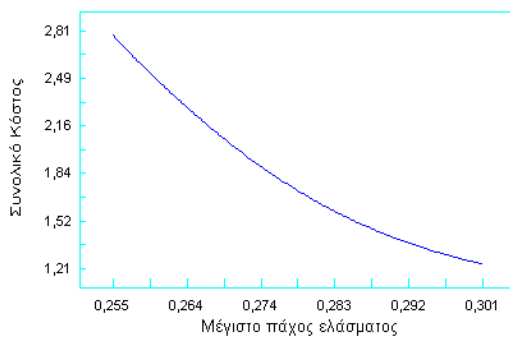
Ανάλυση ευαισθησίας βέλτιστης τιμής ανοίγματος ως προς το κόστος ελασματοποίησης



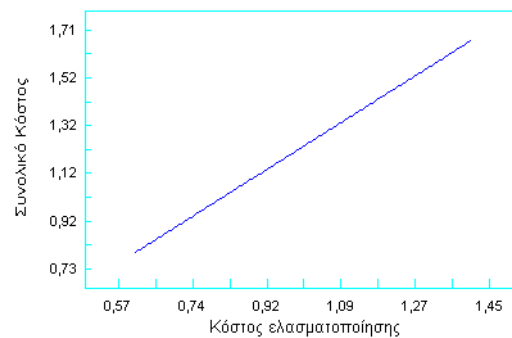
Ανάλυση ευαισθησίας βέλτιστης τιμής ανοίγματος ως προς το κόστος σφάλματος



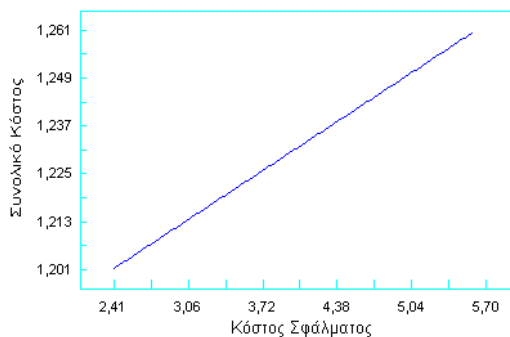
Ανάλυση ευαισθησίας βέλτιστης τιμής ανοίγματος ως προς την τυπική απόκλιση του πάχους



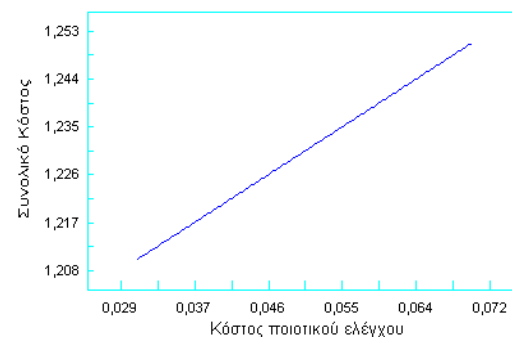
Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς το μέγιστο πλάτος ελάσματος



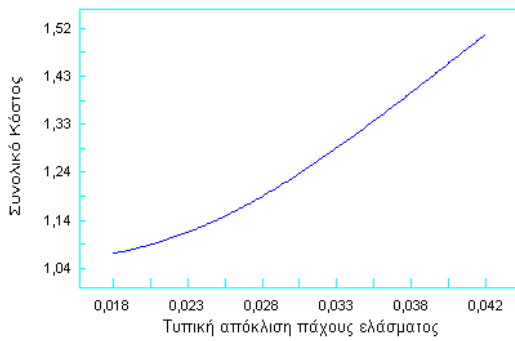
Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς το κόστος ελασματοποίησης



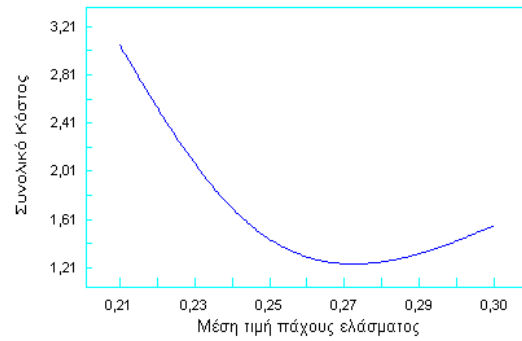
Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς το κόστος σφάλματος



Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς το κόστος ποιοτικού ελέγχου

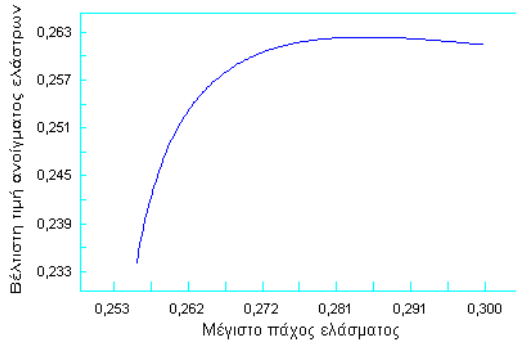


Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς την τυπική απόκλιση του πάχους

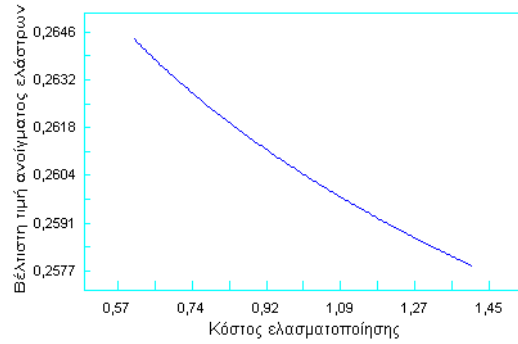


Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς τη μέση τιμή πάχους του ελάσματος

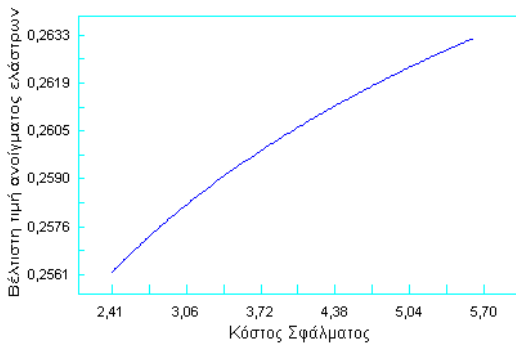
Σχήμα III-2. Γραφήματα μονοπαραμετρικής ανάλυσης ευαισθησίας για την περίπτωση (A). Σημειώνεται ότι στην απλοποιημένη περίπτωση (A) το κόστος ποιοτικού ελέγχου C_ϵ δεν επηρεάζει το βέλτιστο πάχος \bar{x}_{opt} , παρόλο ότι περιλαμβάνεται στη συνάρτηση συνολικού κόστους C , με αποτέλεσμα να μην υπάρχει το γράφημα $\bar{x}_{opt} = f(C_\epsilon)$ ενώ υπάρχει το $C = f(C_\epsilon)$.



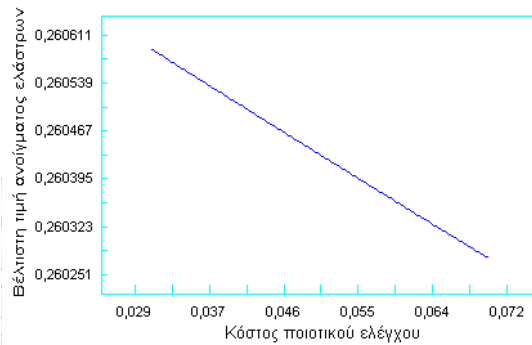
Ανάλυση ευαισθησίας βέλτιστης τιμής ανοίγματος ως προς το μέγιστο πλάτος ελάσματος



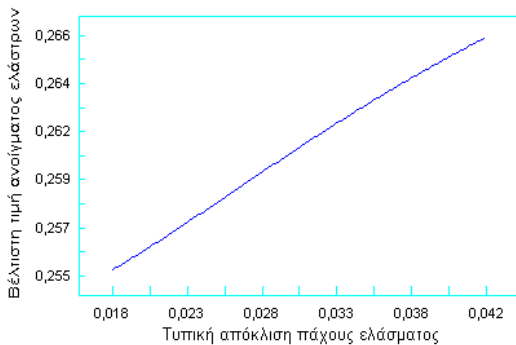
Ανάλυση ευαισθησίας βέλτιστης τιμής ανοίγματος ως προς το κόστος ελασματοποίησης



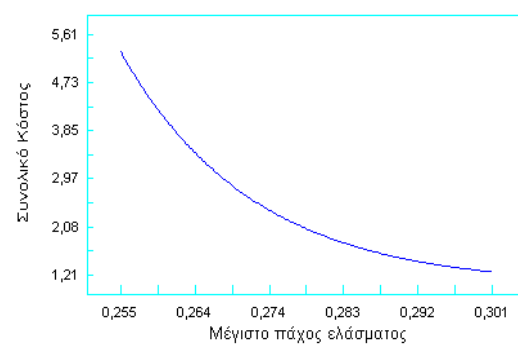
Ανάλυση ευαισθησίας βέλτιστης τιμής ανοίγματος ως προς το κόστος σφάλματος



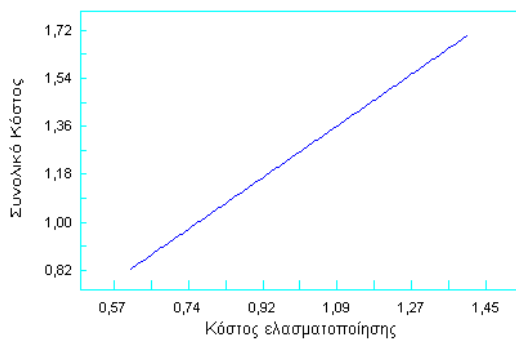
Ανάλυση ευαισθησίας βέλτιστης τιμής ανοίγματος ως προς το κόστος ποιοτικού ελέγχου



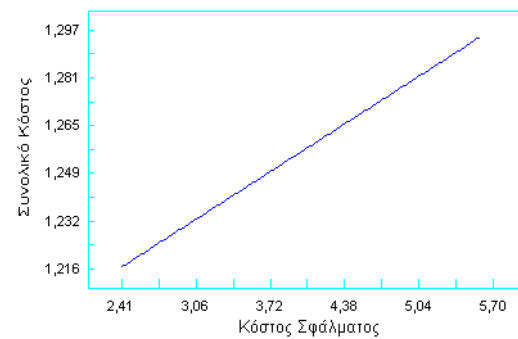
Ανάλυση ευαισθησίας βέλτιστης τιμής ανοίγματος ως προς την τυπική απόκλιση του πάχους



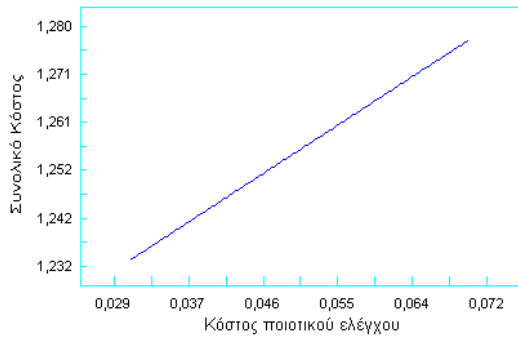
Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς το μέγιστο πλάτος ελάσματος



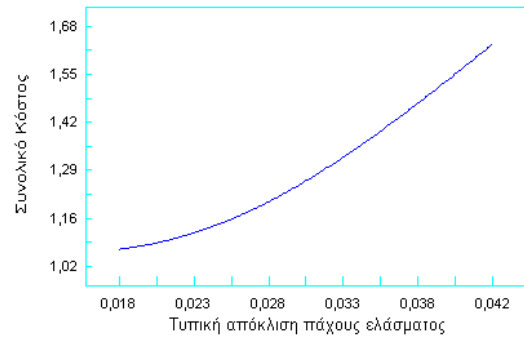
Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς το κόστος ελασματοποίησης



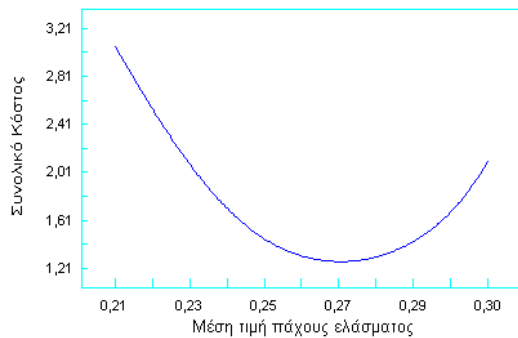
Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς το κόστος σφάλματος



Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς το κόστος ποιοτικού ελέγχου



Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς την τυπική απόκλιση του πάχους



Ανάλυση ευαισθησίας συνολικού κόστους ως προς τη μέση τιμή πάχους του ελάσματος

Σχήμα III-3. Γραφήματα μονοπαραμετρικής ανάλυσης ευαισθησίας για την περίπτωση (B). Σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτή το κόστος ποιοτικού ελέγχου C_ε επηρεάζει το βέλτιστο πάχος \bar{x}_{opt} , με αποτέλεσμα να υπάρχουν αμφότερα τα γραφήματα $\bar{x}_{opt} = f(C_\varepsilon)$ και $C = f(C_\varepsilon)$.

5 Βοηθούμενος από Η/Υ νευροασαφής έλεγχος της χημικής διεργασίας του αλκαλικού καθαρισμού

5.1 Εισαγωγή

Στην περίπτωση που έχουμε N διεργασίες στη σειρά, η αποκάλυψη ενός ελαττώματος στο επεξεργαζόμενο αντικείμενο αμέσως μετά τη διεργασία i ($i = 1, \dots, n$) είναι δυνατόν να αποκαλύψει ένα σφάλμα που έχει γίνει είτε στη συγκεκριμένη είτε σε μία τουλάχιστον εκ των $(i - 1)$ ανάντη διεργασιών. Ο εντοπισμός του αρχικού σφάλματος γίνεται ευκολότερος όταν υπάρχει ένα καλά δομημένο/λειτουργικό και διαρκώς εμπλουτιζόμενο με νέα δεδομένα πληροφοριακό σύστημα, το οποίο καθίσταται περισσότερο αποτελεσματικό αν ενσωματώνει ένα είδος τεχνητής νοημοσύνης υπό μορφή διαγνωστικής μεθόδου που ενεργοποιείται σε ένα χώρο πιθανοτήτων ή δυνατοτήτων (probabilistic/possibilistic space), κάνοντας χρήση στατιστικών κατανομών ή ασαφών συνόλων, αντίστοιχα.

Για αναλυτικούς λόγους, μπορούμε να διακρίνουμε, βασιζόμενοι στην τεχνική βιβλιογραφία, τρεις γενικές μεθόδους/προσεγγίσεις με χρήση τεχνητής νοημοσύνης στην περιοχή της βοηθούμενης από Η/Υ Μηχανικής/Τεχνολογίας των Διεργασιών (Computer Aided Process Engineering – CAPE). Η πρώτη αναφέρεται στη χρήση έμπειρων συστημάτων, μέσω της απόκτησης/επεξεργασίας/δόμησης της γνώσης σε ένα δυναμικό πλαίσιο, στο οποίο συνυφαίνονται επιφανειακή/εμπειρική και βαθιά/επιστημονική γνώση που συν-λειτουργούν σε ένα σχήμα διαλεκτικής αλληλεπίδρασης [1, 2]. Η δεύτερη αναφέρεται στην εφαρμογή τεχνητών νευρωνικών δικτύων, τα οποία ενδεχομένως ενσωματώνουν κανόνες ασαφούς λογικής [3,4]. Η τρίτη είναι μία μίξη των δύο προηγούμενων μεθόδων, καθόσον βασίζεται στην ενσωμάτωση της επιφανειακής/εμπειρικής γνώσης σε ένα νευροασαφές σύστημα, δημιουργώντας είτε ένα ολοκληρωμένο σχήμα είτε ένα μηχανισμό αλληλεπίδρασης σχετικά ανεξάρτητων υποσυστημάτων [5, 6].

Στις Ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η εφαρμογή μίας βοηθούμενης από Η/Υ διαδικασίας ελέγχου που καθοδηγεί τον βιομηχανικό χρήστη πώς να αποφύγει σφάλματα στην παραγωγική διαδικασία όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 1, που συνεπάγονται είτε ελαττώματα στο ενδιάμεσο/τελικό προϊόν είτε αυξημένα υγρά απόβλητα [7,8]. Αυτή η διαδικασία ελέγχου βασίζεται στη δημιουργία/λειτουργία (i) ενός νευροασαφούς δικτύου και (ii) ενός υποσυστήματος επεξεργασίας αποτελεσμάτων ποιοτικού ελέγχου. Οι δύο αυτές δομές λειτουργούν παράλληλα και σε στενή συνεργασία με τη βοήθεια ενός μηχανισμού ανάδρασης για την επίτευξη διορθωτικών κινήσεων θεραπείας και πρόληψης.

5.2 Μεθοδολογία

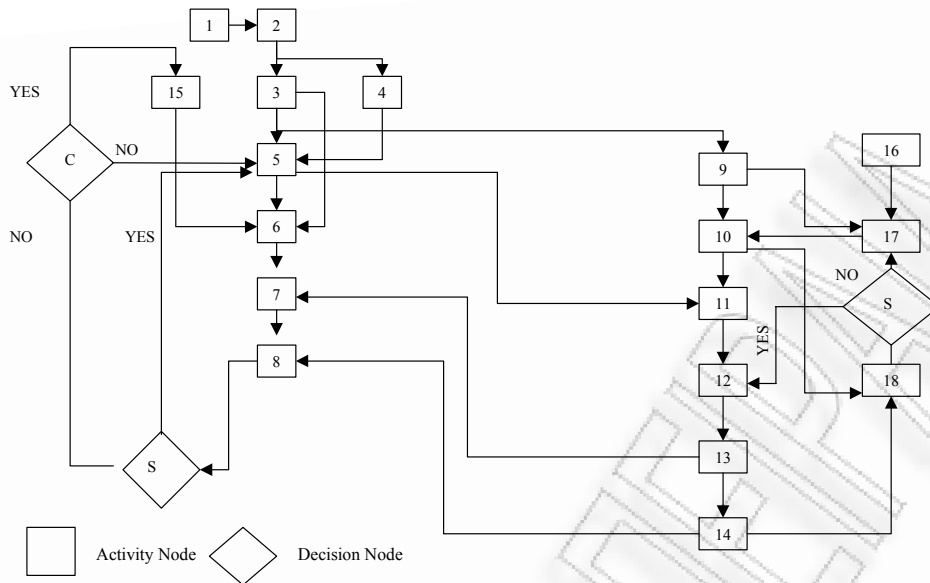
Η αλγοριθμική διαδικασία, η οποία σχεδιάστηκε/αναπτύχθηκε και τελικά εφαρμόστηκε για τον παραπάνω σκοπό, περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (για τη μεταξύ τους διασύνδεση βλ. Σχήμα 5.1, όπου οι ρόμβοι παριστάνουν κόμβους απόφασης).

1. Προσδιορισμός των μεταβλητών
2. Συλλογή δεδομένων
3. Επιλογή (εξαγωγή) δεδομένων
4. Εμπειρικός προσδιορισμός συναρτήσεων συμμετοχής
5. Εμπειρικός σχεδιασμός αρχικών ασαφών κανόνων
6. Μάθηση – παραγωγή νέων ασαφών κανόνων και προσαρμοσμένων συναρτήσεων συμμετοχής
7. Πρόγνωση των ελαττωμάτων βάσει νέων δεδομένων από τη βιομηχανική παραγωγή
8. Σύγκριση μεταξύ πρόγνωσης και πραγματικών δεδομένων
9. Ανεξάρτητη ομαδοποίηση (cluster analysis)
10. Προσδιορισμός αρχικών αποδεκτών πεδίων τιμών μεταβλητών
11. Προσδιορισμός τελικών αποδεκτών πεδίων τιμών μεταβλητών με ασαφείς δεσμεύσεις
12. Σύνθεση/διατύπωση πρακτικών κανόνων
13. Προσομοίωση βιομηχανικής παραγωγής με αυτούς τους κανόνες
14. Ποιοτικός έλεγχος για εύρεση ελαττωμάτων
15. Επιλογή/ανάπτυξη του νευροασαφούς δικτύου
16. Προδιαγραφές για το προϊόν, προσδιοριζόμενες από τον πελάτη, ή την αγορά του προϊόντος
17. Μετασχηματισμός των προδιαγραφών σε δεσμεύσεις αναφερόμενες στις τιμές των μεταβλητών
18. Σύγκριση μεταξύ πραγματικών δεδομένων και τιμών που προσδιορίζονται στο (10)

S. Είναι η σύγκριση ικανοποιητική;

C. Αλλάζει το νευροασαφές δίκτυο;

Η προσομοίωση της βιομηχανικής παραγωγής όπως αυτή προσδιορίζεται στο Στάδιο 13, προμηθεύει το σύστημα με πραγματικά αποτελέσματα που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για την προβλεπόμενη στο στάδιο 8 σύγκριση μεταξύ αυτών και των τιμών της αντίστοιχης πρόγνωσης. Εάν η σύγκριση είναι ικανοποιητική (κόμβος απόφασης S), τότε η αποτελεσματικότητα των διαδικασιών ομαδοποίησης και ανάπτυξης του νευροασαφούς δικτύου βελτιώνεται.



Σχήμα 5.1. Διάγραμμα ροής των υπορουτίνων για το συνδυασμό του νευροασαφούς δικτύου και της ανεξάρτητης ομαδοποίησης (clustering)

Οι αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής των εισαγόμενων μεταβλητών ελέγχου προκύπτουν από:

α) Το διαμερισμό του χώρου της κάθε μεταβλητής εισόδου x_i (υπερσύνολο αναφοράς) σε q_i μέρη, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλοεπικάλυψη των μερών αυτών.

β) Τον ορισμό σε κάθε περιοχή $[a, c]$ της χαρακτηριστικής τιμής b του ασαφούς συνόλου που αυτή η συνάρτηση συμμετοχής περιγράφει. Έτσι, λαμβάνονται τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής. Το σύνολο στήριξης $[a, c]$ και η χαρακτηριστική τιμή b εξάγονται από βιομηχανικά δεδομένα, που δόθηκαν κυρίως από ανεξάρτητους ανοδιωτές και το τμήμα ανοδίωσης της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας Α.Ε. ενώ δευτερευόντως ελήφθησαν υπόψη δεδομένα της τεχνικής βιβλιογραφίας που εξορύχθησαν με τη βοήθεια ευφυούς μηχανισμού αναζήτησης [9].

Η σύνθεση/διατύπωση των αρχικών ασαφών κανόνων από αριθμητικά δεδομένα γίνεται σε δύο φάσεις:

α) Διαμερισμός του χώρου των δεδομένων, ώστε να προκύπτει η επιδιωκόμενη ασαφής απεικόνιση – οι προβολές των περιοχών αυτών στους άξονες των 3 μεταβλητών σχηματίζουν τα μέρη που αναφέρονται στο (α) της προηγούμενης παραγράφου.

β) Αντιστοίχιση ενός ασαφούς κανόνα σε κάθε ασαφή υποχώρο. Ανάλογα με την πυκνότητα των σημείων των δεδομένων, και την επιδιωκόμενη ακρίβεια της στοχοθέτησης, κάθε χώρος μεγάλης πυκνότητας είναι δυνατόν να διαμερισθεί σε λεπτομερείς ασαφείς υποχώρους, ενώ οι περιοχές μικρής πυκνότητας διαμερίζονται σε περισσότερο χονδροκομμένους ασαφείς υποχώρους [10]. Οι κανόνες που αντιστοιχούν σε κάθε ασαφή υποχώρο, διατυπώνονται εμπειρικά με τη βοήθεια ενός χειριστή/επόπτη (operator/supervisor) της βιομηχανικής διεργασίας, ή ενός εμπειρογνώμονα της παραγωγής (production expert).

Για τη φάση της μάθησης του νευροασαφούς συστήματος, αναπτύχθηκε πρόγραμμα H/Y στηριζόμενο στον αλγόριθμο NEFCLASS [11]. Τα υποδείγματα μάθησης αποτελούνται από ένα διάνυσμα εισόδου \mathbf{p} (διάνυσμα με τις μεταβλητές ελέγχου) και ένα διάνυσμα στόχου \mathbf{t} (target pattern) του οποίου τα στοιχεία είναι δείκτες 1/0 που φανερώνουν την τάξη του \mathbf{p} που μπορεί να είναι χωρίς ελάττωμα, με ένα από τα ελαττώματα που εξετάζουμε ή με συνδυασμό αυτών.

α) Αλγόριθμος μάθησης κανόνων:

ι) Για κάθε υπόδειγμα εισόδου \mathbf{p} : Για κάθε μεταβλητή εισόδου X_i επιλέγεται το ασαφές σύνολο του οποίου η συνάρτηση συμμετοχής δίνει για το στοιχείο p_i το μέγιστο βαθμό συμμετοχής, και εάν δεν υπάρχουν κανόνες με αυτά τα ασαφή σύνολα, και δεν έχουμε φθάσει το μέγιστο αριθμό κανόνων k , δημιουργείται ένας κανόνας που έχει αυτά τα ασαφή σύνολα σαν κατηγορήματα των μεταβλητών του αιτίου, και σαν επακόλουθο έχει το διάνυσμα στόχου \mathbf{t} , που υποδηλώνει την τάξη στην οποία ταξινομεί ο κανόνας.

ιι) Καθορισμός της βάσης κανόνων, ακολουθώντας Απλή Μάθηση Κανόνων, Μάθηση Βέλτιστων Κανόνων, ή Μάθηση βέλτιστων κανόνων ανά τάξη.

β) Αλγόριθμος μάθησης ασαφών συνόλων: Ο αλγόριθμος επεξεργάζεται τα υποδείγματα, μέχρι να εκπληρωθεί ένα κριτήριο τερματισμού. Για κάθε υπόδειγμα (\mathbf{p} , \mathbf{t}), το ασαφές σύνολο που έδωσε την μικρότερη τιμή συνάρτησης συμμετοχής για το εκάστοτε τρέχον υπόδειγμα, και επομένως είναι υπεύθυνο για την ενεργοποίηση του τρέχοντος κανόνα, αλλάζει προς την ελαχιστοποίηση του σφάλματος του κανόνα.

Βάρη στους κανόνες που μπορούν να εφαρμοστούν ώστε να τροποποιήσουν το αποτέλεσμα του ασαφούς κανόνα, είτε αλλάζοντας το βαθμό εκπλήρωσης είτε το ασαφές σύνολο του επακόλουθου, δεν χρησιμοποιούνται ώστε να διατηρήσουμε τη σημασιολογία (semantics) του νευροασαφούς συστήματος. Όπως έχει αποδειχθεί στο [12], τα βάρη στους κανόνες εμποδίζουν τη γλωσσική εξηγησιμότητα των νευροασαφών συστημάτων τόσο στην ταξινόμηση (όπως εδώ), όσο και στον ασαφή έλεγχο.

5.3 Εφαρμογή στην ελαχιστοποίηση των ελαττωματικών

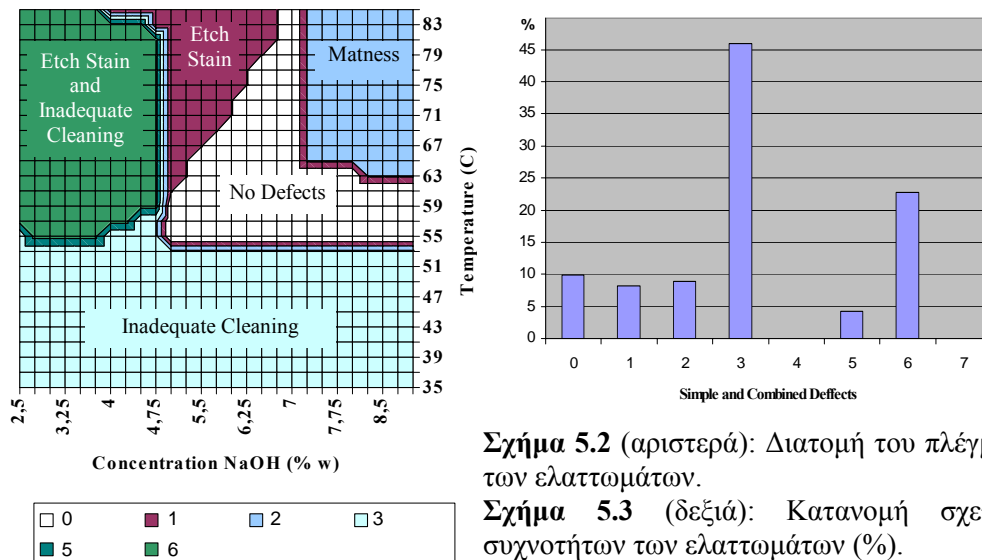
Η αλγοριθμική διαδικασία που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1 χρησιμοποιήθηκε στη σχεδίαση/ανάπτυξη προγράμματος H/Y υπό την ονομασία Aluminum Quality Control (AlQuCo). Τα δεδομένα του αλκαλικού καθαρισμού συνελέγησαν από (i) ανεξάρτητους ανοδιωτές, (ii) το Τμήμα Ανοδίωσης της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας Α.Ε. και (iii) την τεχνική βιβλιογραφία, οπότε διαμορφώθηκαν τα ακόλουθα υποδείγματα.

α) Ένα διάνυσμα εισόδου \mathbf{p} με τρεις μεταβλητές (χρόνος επεξεργασίας, θερμοκρασία λουτρού καθαρισμού, συγκέντρωση καυστικής σόδας)

β) Ένα διάνυσμα στόχου \mathbf{t} , με τις εξής οκτώ τάξεις, όπως συμβολίζονται αριθμητικά: 0 για έλλειψη ελαττωμάτων, 1 για εμφάνιση κηλίδων διάβρωσης, 2 για θαμπή (ματ) εμφάνιση, 3 για ανεπαρκή καθαρισμό, 4 για (1 & 2), 5 για (2 & 3), 6 για (1 & 3), 7 για (1 & 2 & 3). Όπως

αποδείχτηκε στην πράξη, οι τάξεις που εμφανίστηκαν στο t ήταν μόνο 6, λόγω έλλειψης υποδειγμάτων ικανών να τεκμηριώσουν την ύπαρξη των τάξεων 4 και 7.

Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η διατομή του τρισδιάστατου πλέγματος XYZ (X = συγκέντρωση, Y = θερμοκρασία, Z = χρόνος) που λαμβάνεται σε 5 min αλκαλικού καθαρισμού. Η κατανομή των τάξεων απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.2 (αριστερά): Διατομή του πλέγματος των ελαττωμάτων.

Σχήμα 5.3 (δεξιά): Κατανομή σχετικών συχνοτήτων των ελαττωμάτων (%).

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την παρουσιαζόμενη εφαρμογή δίνουν τα ακόλουθα διαστήματα συντεταγμένων του ενδεικνυόμενου χώρου ασφαλούς λειτουργίας της διεργασίας του αλκαλικού καθαρισμού της επιφάνειας του αλουμινίου πριν την ανοδίωση: X (5,25 – 7,25% κ.β.) για τη συγκέντρωση του υδατικού διαλύματος σε NaOH, Y (53 – 67°C) για τη θερμοκρασία του λουτρού, Z (4,75 – 10,00 min) για το χρόνο καθαρισμού (βλ. Σχήμα 5.4). Τα αποτελέσματα αυτά ορίζουν ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, το οποίο περιέχει όλους τους επιτρεπόμενους συνδυασμούς τιμών των τριών μεταβλητών ελέγχου κάτω από το διπλό περιορισμό ενός μέγιστου ποσοστού επιτρεπόμενων ελαττωμάτων ως προς τον όγκο και ως προς την τυχαία διατομή (δεσμεύσεις οι οποίες, από στατιστική άποψη, σχετίζονται με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση του πληθυσμού των ελαττωμάτων, αντίστοιχα). Οι συνδυασμοί των συναρτήσεων συμμετοχής (membership functions), οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 5.5, παράγουν $2 \times 4 \times 3 = 24$ κανόνες, δείγμα των οποίων αποτελούν οι ακόλουθοι:

- I) EAN ο Χρόνος είναι Μικρός ΚΑΙ η Συγκέντρωση Πολύ Χαμηλή ΚΑΙ η Θερμοκρασία Χαμηλή ΤΟΤΕ η Τάξη (σφάλματος) είναι Ανεπαρκής Καθαρισμός.
- II) EAN ο Χρόνος είναι Μικρός ΚΑΙ η Συγκέντρωση Πολύ Χαμηλή ΚΑΙ η Θερμοκρασία Μέτρια ΤΟΤΕ η Τάξη (σφάλματος) είναι Κηλίδες Διάβρωσης ΚΑΙ Ανεπαρκής Καθαρισμός.

Aluminium Quality Control

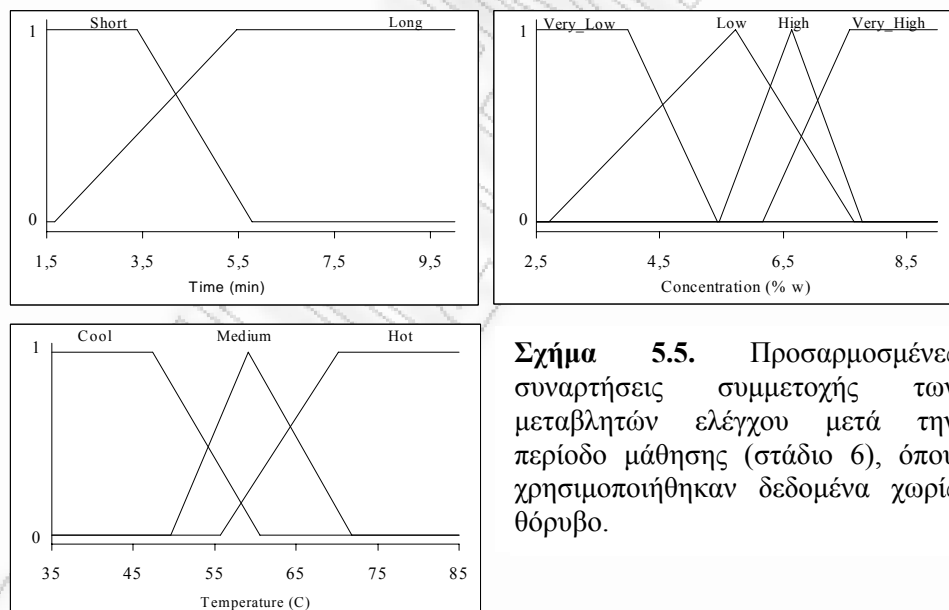
Aluminium Quality Control

| Starting Point (Cluster Center) | | Mesh Values | |
|---------------------------------|------|-----------------|------|
| Concentration: | 6,75 | DConcentration: | 0,25 |
| Time: | 7,25 | DTime: | 0,25 |
| Temperature: | 63 | DTemperature: | 2 |

| Max. No. of Defects (% in Slice) | | Search Intervals | | Desired Range | |
|----------------------------------|--------|----------------------------------|----|-----------------|-------|
| Percent in Conc. Slice: | 8,000% | 2,5 | 9 | 5 | units |
| Percent in Time Slice: | 5,000% | 1,5 | 10 | 3 | units |
| Percent in Temp. Slice: | 8,000% | 35 | 85 | 3 | units |
| % Defects in Volume: 15,000% | | Concentration, Temperature, Time | | Evaluate Bounds | |
| | | Sample Size: 24570 | | | |

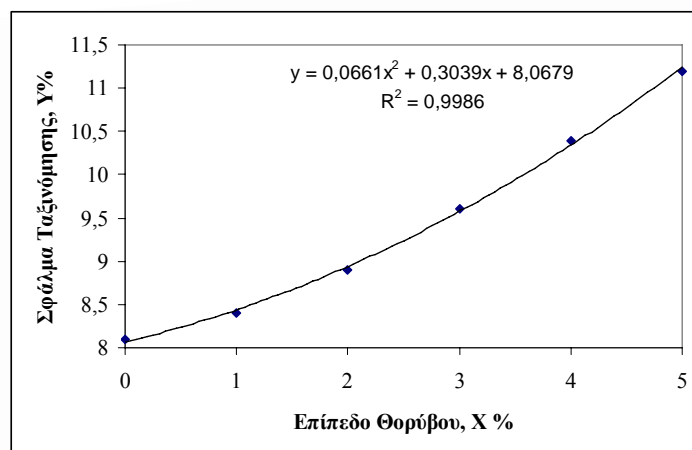
X: (5.25, 7.25)
 Y: (53, 67)
 Z: (4.75, 101) in 00:00:11 hours

Σχήμα 5.4. Παράθυρο αποτελεσμάτων της βοηθούμενης από H/Y ομαδοποίησης (clustering) στην περίπτωση της εφαρμογής για την ελαχιστοποίηση των ελαττωμάτων. Οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους της ομάδας είναι το σημείο έναρξης του αλγοριθμικού προσδιορισμού της τρισδιάστατης περιοχής των επιτρεπτών συνδυασμών. Τα ελάχιστα διαστήματα κάθε μεταβλητής ελέγχου, σε φυσικές μονάδες, δίνονται από τα γινόμενα (mesh value) x (desired range).



Σχήμα 5.5. Προσαρμοσμένες συναρτήσεις συμμετοχής των μεταβλητών ελέγχου μετά την περίοδο μάθησης (στάδιο 6), όπου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα χωρίς θόρυβο.

Η ανάλυση ευαισθησίας ως προς επίπεδα θορύβου 0%, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 3\%$, $\pm 4\%$, $\pm 5\%$ στο στάδιο της μάθησης έδωσε σφάλματα ταξινόμησης 8,1%, 8,4%, 8,9%, 9,6%, 10,4%, 11,2% (βλ. Σχήμα 5.6) με τελικό σφάλμα ελέγχου στην περιοχή $8,70 \pm 0,15\%$, το οποίο κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό για βιομηχανικές εφαρμογές.



Σχήμα 5.6. Εξάρτηση του σφάλματος ταξινόμησης από το επίπεδο θορύβου. Η χρησιμοποιούμενη παραβολική σχέση προσαρμόζεται εξαιρετικά ικανοποιητικά στα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας.

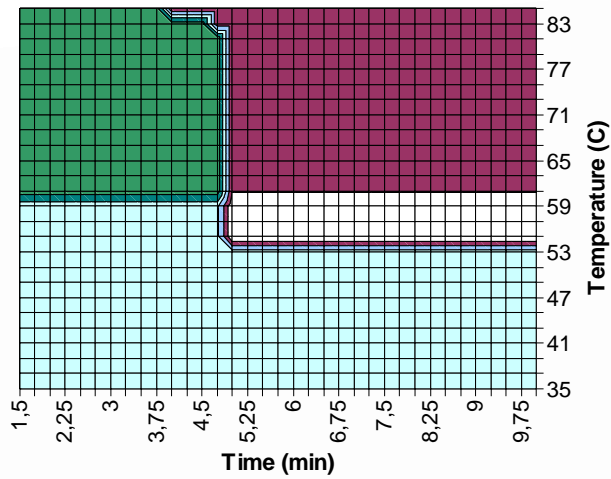
5.4 Εφαρμογή στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 5.2 χρησιμοποιήθηκε και για την ελαχιστοποίηση της αναμενόμενης ρύπανσης από διάλυμα NaOH διαμέσου της μείωσης στο ελάχιστο επιτρεπτό όριο της συγκέντρωσης στη φάση του αλκαλικού καθαρισμού. Τα ελάχιστα διαστήματα, εκφραζόμενα ως πλάτη (interval widths) του υποχώρου των εφικτών λύσεων, ώστε να διατηρείται ο απαραίτητος αριθμός βαθμών ελευθερίας (που διασφαλίζουν την αναγκαία ευελιξία/ασφάλεια) στη διεργασία του αλκαλικού καθαρισμού σε συνθήκες βιομηχανικής λειτουργίας είναι (κατ'εκτίμηση) 1,25% κ.β. σε H₂SO₄, 6,0 °C, 0,75 min, για τις μεταβλητές ελέγχου Συγκέντρωση (C), Θερμοκρασία (T), Χρόνος (Z), αντίστοιχα. Τα όρια, εντός των οποίων πρέπει να ευρίσκονται τα πλάτη αυτά, εξακολουθούν να είναι (όπως προηγουμένως) 2,5 – 9,0 % κ.β., 35 – 85 °C, 1,5 – 10,0 min. Τα βάρη που υιοθετήθηκαν για τη στάθμιση των ελαττωμάτων με κωδικούς 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ήταν 0, 1, 2, 3, 3, 5, 4, 6, αντίστοιχα. Οι συνδυασμοί ελαττωμάτων με κωδικούς 4,7 και πάλι δεν υφίστανται, αφού έχει διατηρηθεί ίδιο το εξεταζόμενο πεδίο συνθηκών παραγωγής.

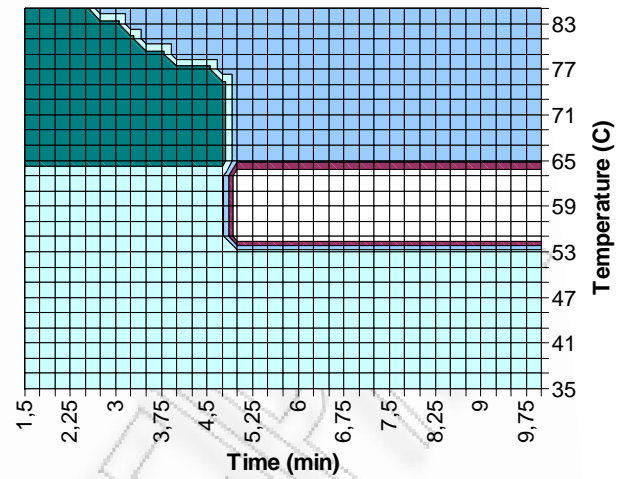
Η ευρεθείσα περιβαλλοντικά βέλτιστη λύση, με εφαρμογή του περιγραφόμενου στην [8] αλγόριθμου, δίνεται από το παραλληλεπίπεδο 5,0 – 7,5 % κ.β., 55 – 71 °C, 5,50 – 7,25 min για τις εξεταζόμενες μεταβλητές ελέγχου. Τα αντίστοιχα διαστήματα (εξαγόμενα ως διαφορά άνω και κάτω ορίου της αντίστοιχης μεταβλητής) 2,5% κ.β., 6,0 °C, 1,75 min καλύπτουν πλήρως τις προδιαγραφές ενώ το αυξημένο διάστημα/πλάτος του χρόνου (κατά 1 min ή 133%), ο οποίος αποτελεί την πλέον εύχρηστη μεταβλητή ελέγχου τόσο σε εργαστηριακές όσο και σε βιομηχανικές συνθήκες, δίνει ένα πρόσθετο πλεονέκτημα. Παρατηρείται ότι,

παρ'όλο ότι έχουμε μία μικρή μείωση του κάτω ορίου της συγκέντρωσης NaOH στο λουτρό καθαρισμού από 5,25% σε 5%), η μέση τιμή της μεταβλητής αυτής παραμένει αμετάβλητη σε 6,25%. Αυτό σημαίνει ότι ενώ περιμέναμε ουσιαστική μείωση της συγκέντρωσης με βάση το περιβαλλοντικό κριτήριο, αυτό δεν έγινε σε σημαντικό βαθμό λόγω αναμενόμενης αυξημένης συχνότητας (a priori πιθανότητας) ελαττωμάτων τύπου 3, 5, 6. Εν τούτοις, η επιτυγχανόμενη μικρή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας κατά 5% (από 60 °C σε 63 °C) συμβάλλει σε σημαντική μείωση του χρόνου παραμονής στο λουτρό κατά 14% (από 7,375 σε 6,375 min), με αποτέλεσμα την ανάλωση μικρότερης ποσότητας καυστικής σόδας ανά επεξεργαζόμενη μονάδα επιφάνειας μετάλλου/κράματος, άρα μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση ανά παρτίδα παραγωγής και καλύτερη ποιότητα λόγω μεγαλύτερης σταθερότητας (αργότερης γήρανσης – μικρότερης συχνότητας αντικατάστασης του λουτρού). Λεπτομέρειες για τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα και τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο υπάρχουν στην [8] ενώ ορισμένα χαρακτηριστικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τη διερεύνηση της λύσης εμφανίζονται στις επόμενες σελίδες.

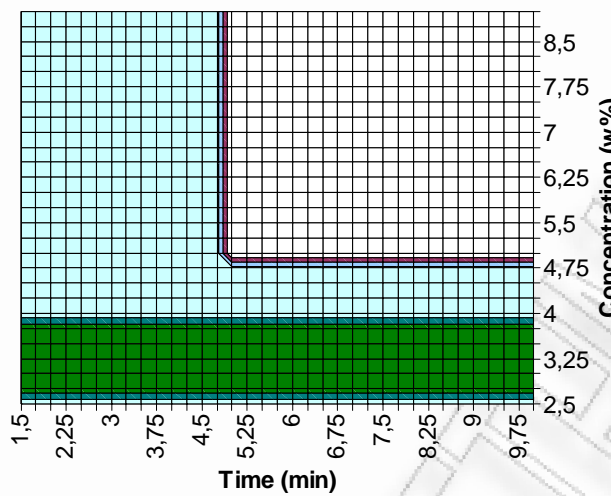
Σχήμα 5.7. Παράθυρο αποτελεσμάτων της βοηθούμενης από H/Y ομαδοποίησης (clustering) στην περίπτωση της εφαρμογής για την ελαχιστοποίηση των υγρών αποβλήτων. Οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους της ομάδας είναι το σημείο έναρξης του αλγοριθμικού προσδιορισμού της τρισδιάστατης περιοχής των επιτρεπτών συνδυασμών. Τα ελάχιστα διαστήματα κάθε μεταβλητής ελέγχου, σε φυσικές μονάδες, δίνονται από τα γινόμενα (mesh value) x (desired range) ενώ κάτω δεξιά υπάρχει η αντιστοίχιση βαρών και τάξεων ελαττωμάτων.



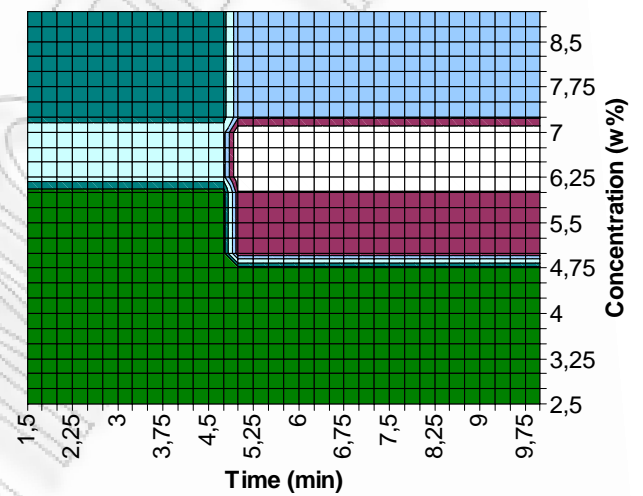
(a)



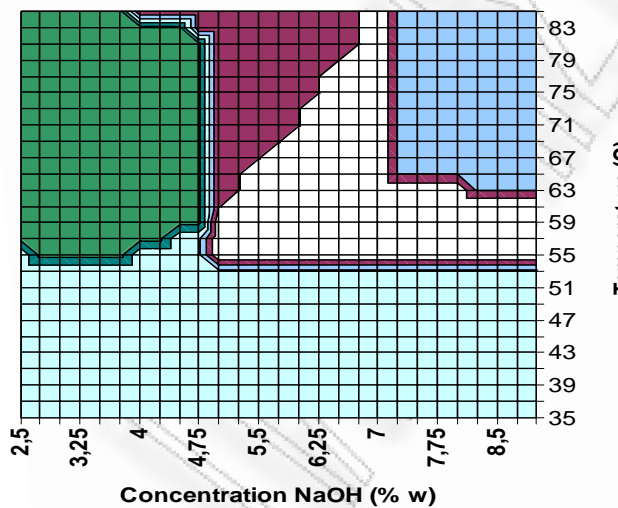
(b)



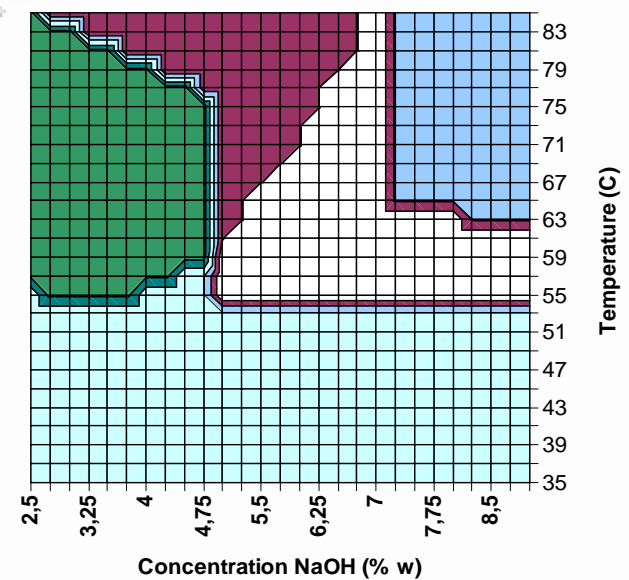
(c)



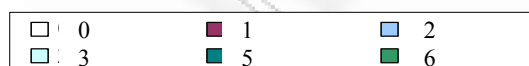
(d)



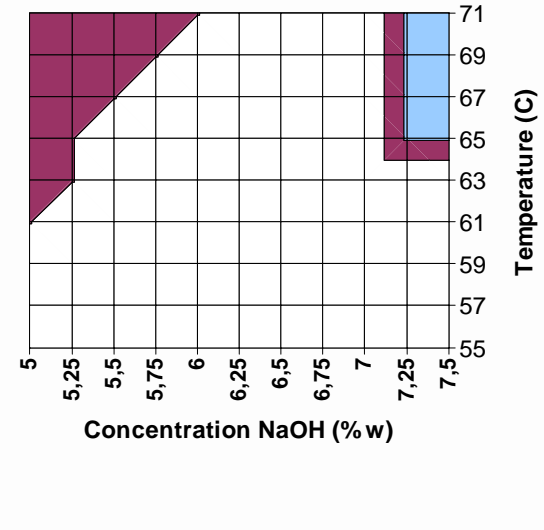
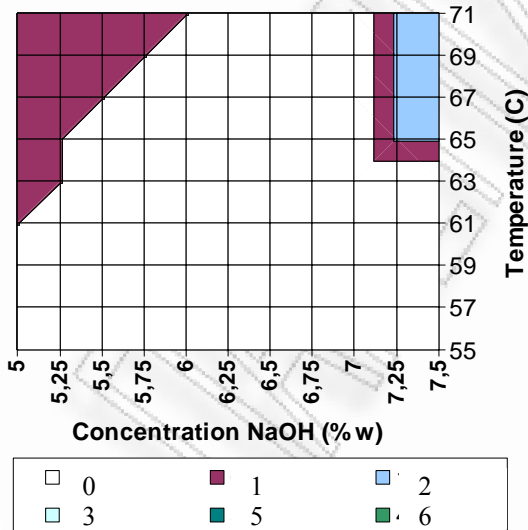
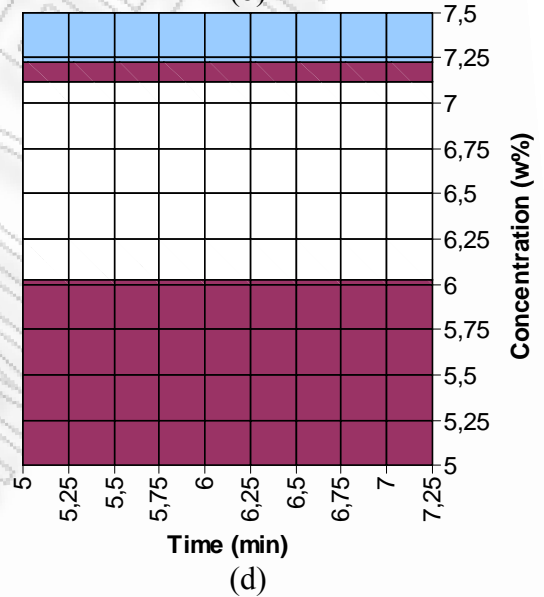
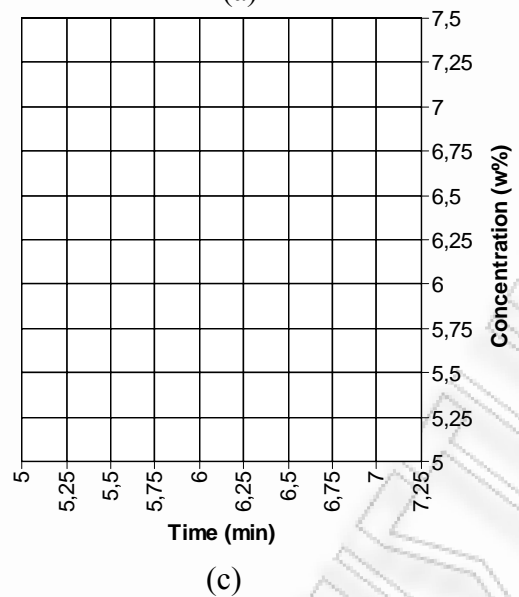
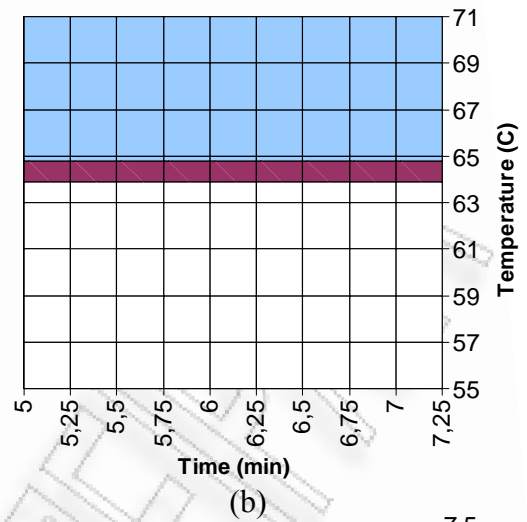
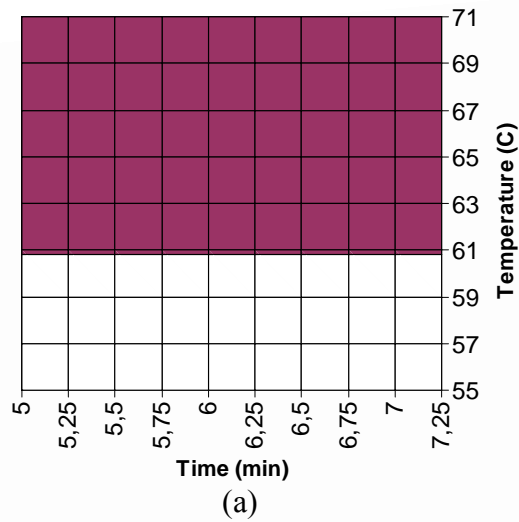
(e)



(f)



Σχήμα 5.8. Βοηθούμενη από H/Y ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από NaOH ανά μονάδα επεξεργαζόμενης επιφάνειας στο στάδιο του αλκαλικού καθαρισμού: διατομές του παραλληλεπίδου των αρχικών τιμών των μεταβλητών ελέγχου στις θέσεις ορίων του εσωτερικού πλέγματος των αποδεκτών τιμών των συνδυασμών Συγκέντρωσης – Θερμοκρασίας – Χρόνου: (a) 5,0% w, (b) 7,5% w, (c) 55°C, (d) 71°C, (e) 5,50 min, (f) 7,25 min.



(e)

(f)

Σχήμα 5.9. Βοηθούμενη από H/Y ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από NaOH ανά μονάδα επεξεργαζόμενης επιφάνειας στο στάδιο του αλκαλικού καθαρισμού: Διατομές στα όρια του πλέγματος των αποδεκτών τιμών των συνδυασμών Συγκέντρωσης – Θερμοκρασίας – Χρόνου (εμπεριέχονται/εντοπίζονται στις αντίστοιχες διατομές του προηγούμενου Σχήματος): (a) 5.0% w, (b) 7.5% w, (c) 55°C, (d) 71°C, (e) 5.50 min, (f) 7.25 min

5.5 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Για αναλυτικούς λόγους, μπορούμε να διακρίνουμε, βασιζόμενοι στην τεχνική βιβλιογραφία, τρεις γενικές μεθόδους/προσεγγίσεις με χρήση τεχνητής νοημοσύνης στην περιοχή της βοηθούμενης από Η/Υ Μηχανικής/Τεχνολογίας των Διεργασιών (Computer Aided Process Engineering – CAPE). Η πρώτη αναφέρεται στη χρήση έμπειρων συστημάτων, μέσω της απόκτησης/επεξεργασίας/δόμησης της γνώσης σε ένα δυναμικό πλαίσιο, στο οποίο συνυφαίνονται επιφανειακή/εμπειρική και βαθιά/επιστημονική γνώση που συν-λειτουργούν σε ένα σχήμα διαλεκτικής αλληλεπίδρασης. Η δεύτερη αναφέρεται στην εφαρμογή τεχνητών νευρωνικών δικτύων, τα οποία ενδεχομένως ενσωματώνουν κανόνες ασαφούς λογικής. Η τρίτη είναι μία μίξη των δύο προηγούμενων μεθόδων, καθόσον βασίζεται στην ενσωμάτωση της επιφανειακής/εμπειρικής γνώσης σε ένα νευροασαφές σύστημα, δημιουργώντας είτε ένα ολοκληρωμένο σχήμα είτε ένα μηχανισμό αλληλεπίδρασης σχετικά ανεξάρτητων υποσυστημάτων.

Στις Ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η εφαρμογή μίας βοηθούμενης από Η/Υ διαδικασίας ελέγχου που καθοδηγεί τον βιομηχανικό χρήστη πως να αποφύγει σφάλματα στην παραγωγική διαδικασία, όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 1, που συνεπάγονται είτε ελαττώματα στο ενδιάμεσο/τελικό προϊόν είτε αυξημένα υγρά απόβλητα.

Αποδείχθηκε ότι ο συνδυασμός ενός τεχνητού νευροασαφούς δικτύου και μίας ανεξάρτητης επεξεργασίας/ομαδοποίησης δεδομένων, που αποκτήθηκαν με πειραματική προσομοίωση σε εργαστηριακή κλίμακα και με αξιολόγηση πληροφοριών από εγκαταστάσεις βιομηχανικής κλίμακας, μπορεί να ελέγξει αποτελεσματικά τη διεργασία του αλκαλικού καθαρισμού του αλουμινίου πριν το στάδιο της ανοδίωσης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τόσο τα ελαττώματα στο επεξεργαζόμενο προϊόν όσο και τα παραγόμενα υγρά απόβλητα. Το πρόγραμμα ασαφούς λογικής που αναπτύχθηκε στηρίζεται σε εμπειρικούς κανόνες που είναι δυνατόν είτε να ενσωματωθούν σε μηχανισμό αυτόματου ελέγχου της συγκεκριμένης διεργασίας είτε να χρησιμοποιηθούν άμεσα για εποπτεία με ανθρώπινη παρέμβαση σε πραγματικό χρόνο. Η ίδια λογική διαδικασία (με το αντίστοιχο λογισμικό) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλες ημι-συνεχείς χημικές διεργασίες, ιδιαίτερα σ' αυτές που ανήκουν στην περιοχή της ηλεκτροχημικής κατεργασίας μετάλλων/κραμάτων, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος παρέμβασης μετά την ανίχνευση ελαττωμάτων στο προϊόν ή τη διαπίστωση έκλυσης αυξημένων υγρών αποβλήτων και να αυξηθεί η ιχνηλασιμότητα σύμφωνα με τα πρότυπα ISO της σειράς 9000.

Βιβλιογραφία

1. Kramer M.A. (1987). Malfunction Diagnosis Using Quantitative Models with Non-Boolean Reasoning in Expert Systems. *AIChE Journal* 33, 130.
2. Petti T.F., Klein J., Dhurjati P.S. (1990). Diagnostic Model Processor: Using Deep Knowledge for Process Built Diagnosis. *AIChE Journal* 36, 565.
3. Sorsa, T.H. Koivo N. (1993). Applications of Artificial Neural Networks in Process Fault Diagnosis. *Automatica* 29, 843.
4. Schmitz G.P.J., Aldrich C. (1998). Neurofuzzy Modelling of Chemical Process Systems with Ellipsoidal Radial Basis Function Neural Networks and Genetic Algorithms. *Computers & Chemical Engineering*, 22, S1001.
5. Ozyurt B., Kandel A. (1996). A Hybrid Hierarchical Neural Network-Fuzzy Expert System Approach to Chemical Process Fault Diagnosis. *Fuzzy Sets & Systems* 83, 11.
6. Ruiz, D., Nougues J.M., Puigjaner L. (2001). Fault Diagnosis Support System for Complex Chemical Plants. *Computers & Chemical Engineering* 25, 151.
7. Batzias A.F., Batzias F.A. (2002). Computer Aided Neuro-Fuzzy Control in Anodizing of Aluminium. *Computer Aided Chem. Eng.* 10, pp. 433-438.
8. Batzias A.F., Batzias F.A. (2002). Computer Aided Waste Minimization in the Industrial Anodization of Aluminium. *Proc. Intern. Conf. Protection and Restoration of the Environment (PRE VI)*, Skiathos, Greece, 2, pp. 973-980.
9. Batzias, F.A., Marcoulaki, E.C. (2002). Restructuring the Keywords Interface to Enhance Computer Aided Process Engineering Knowledge Acquisition via an Intelligent Agent. *Computer-Aided Chem. Engineering*, 10, pp.829-834
10. Ishibuchi, H., Nozaki K., Tanaka H. (1992). Distributed Representation of Fuzzy Rules and its Application to Pattern Classification. *Fuzzy Sets and Systems*, 52, 21-25.
11. Nauck, D., Klawonn F., Kruse R. *Foundations of Neuro-Fuzzy Systems*. John Willey & Sons, Chichester, England, 1997.
12. Nauck, D. (2000). Adaptive Rule Weights in Neuro-Fuzzy Systems. *Neural Comput. & Applic*, 9, 60-68.
13. Nauck D., Kruse R. (1995). NEFCLASS – A Neurofuzzy Approach for the Classification of Data. In K. George, J.H. Carrol. E. Deaton, D. Openheim and G. Hightower, eds.: *Applied Computing 1995. Proc 1995 ACM Symposium on Applied Computing*, Nashville, Feb. 26-28, pp.461-465, ACM Press, New York, 1995.
14. Nauck D., Kruse R. (1996). Neurofuzzy Classification with NEFCLASS. In P. Kleinschmidt, A. Bachem, U. Derigs, D. Fischer, U. Leopold Wildburger and R. Mohring Eds.: *Operations Research Proceedings 1995*, pp. 294-299. Springer-Verlag, Berlin, 1996.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στην παρούσα συμπληρωματική Ενότητα δίνεται η δομή του υποδείγματος NC που χρησιμοποιήθηκε στη φάση ‘μάθησης’ του νευροασαφούς συστήματος ταξινόμησης. Το συγκεκριμένο υπόδειγμα είναι του τύπου NEFCLASS (NEuro-Fuzzy CLASSification) [13, 14], βασίζεται στο γενικευμένο ασαφές perceptron και χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό της τάξης ενός δοσμένου ανύσματος. Το ασαφές perceptron έχει την αρχιτεκτονική του γνωστού πολυστρωματικού perceptron, με τρία στρώματα, μόνο που τα βάρη, η τελική είσοδος (net input) και η ενεργοποίηση των νευρώνων εξόδου παριστάνονται από ασαφή σύνολα. Ο σκοπός αυτού του μοντέλου είναι να παρέχει ένα πλαίσιο στήριξης αλγορίθμων μάθησης, να είναι ερμηνεύσιμο σε γλωσσικούς κανόνες και να μπορεί να χρησιμοποιεί προηγούμενη γνώση σε μορφή κανόνων ώστε η μάθηση να μην χρειάζεται να αρχίσει από την αρχή. Το πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα μετάφρασης της δομής στη μορφή γλωσσικών κανόνων, επειδή τα ασαφή βάρη μπορούν να συνδεθούν με γλωσσικούς όρους. Το NEFCLASS είναι μία νευροασαφής αρχιτεκτονική ειδική για προβλήματα ταξινόμησης. Ο παρακάτω ορισμός δείχνει ξεκάθαρα την προέλευσή του από το γενικευμένο ασαφές perceptron τριών στρωμάτων:

Ορισμός: Ένα υπόδειγμα NEFCLASS είναι ένα τριστρωματικό ασαφές perceptron όπου ισχύουν οι παρακάτω ορισμοί:

(i) $U_1 = \{x_1, \dots, x_n\}$, $U_2 = \{R_1, \dots, R_k\}$ και $U_3 = \{c_1, \dots, c_m\}$.

(ii) Κάθε σύνδεση μεταξύ των κόμβων $x_i \in U_1$ και $R_r \in U_2$ παίρνει ένα γλωσσικό όρο $A_{j_r}^{(i)}$ ($j_r \in \{1, \dots, q_i\}$).

(iii) Οι συνδέσεις που έρχονται από τον ίδιο κόμβο εισόδου x_i και έχουν ίδια ονόματα γλωσσικών όρων, φέρουν το ίδιο βάρος πάντοτε. Αυτές οι συνδέσεις καλούνται διασυνδεδεμένες συνδέσεις και το βάρος τους μοιραστό βάρος.

(iv) Έστω $L_{x,R}$ η ονομασία του γλωσσικού όρου στη σύνδεση μεταξύ των κόμβων $x \in U_1$ και $R \in U_2$. Για όλα τα $R, R' \in U_2$ έχουμε:

$$(\forall x \in U_1)(L_{x,R} = L_{x,R'}) \Rightarrow R = R'.$$

(v) $W(R, c) \in \{0, 1\}$ ισχύει για όλα τα $R \in U_2$, $c \in U_3$.

(vi) Για όλους τους κόμβους – κανόνες $R \in U_2$ και όλους τους κόμβους εξόδου $c, c' \in U_3$ έχουμε:

$$(W(R, c) = 1) \wedge (W(R, c') = 1) \Rightarrow c = c'.$$

(vii) Για όλους τους κόμβους εξόδου $c \in U_3$, $o_c = a_c = \text{net}_c$.

(viii) Για όλους τους κόμβους εξόδου, η τελική είσοδος (net input) net_c είναι:

$$net_c = \frac{\sum_{R \in U_2} W(R, c) \cdot o_R}{\sum_{R \in U_2} W(R, c)}$$

Το πρώτο στρώμα U_1 ενός υποδείγματος NEFCLASS περιέχει τους κόμβους εισόδου που αντιπροσωπεύουν τα χαρακτηριστικά (μεταβλητές) των υποδειγμάτων. Η ενεργοποίηση a_x ενός κόμβου $x \in U_1$ συνήθως είναι ίση με την είσοδο του κόμβου αυτού. Μπορεί, πάντως, να είναι και διαφορετική εάν αυτός ο κόμβος κάνει κάποιο είδος προ-επεξεργασίας (κανονικοποίηση, κτλ). Το μεσαίο στρώμα U_2 έχει τους κόμβους κανόνων που αντιπροσωπεύουν τους ασαφείς κανόνες και το τρίτο στρώμα U_3 αποτελείται από τους κόμβους εξόδου, έναν για κάθε τάξη. Τα βάρη στις συνδέσεις από τους κόμβους κανόνων στους κόμβους εξόδου είναι σταθερά και ίσα με 1, επειδή αυτή είναι η σημαντική (semantics) του υποδείγματος. Προφανώς, μία παραλλαγή του υποδείγματος, θα μπορούσε να υιοθετήσει μία διαφορετική *ad hoc* κατανομή βαρών.

Η βάση κανόνων είναι προσέγγιση μίας άγνωστης συνάρτησης $\varphi: \mathbb{R}^n \rightarrow \{0, 1\}^m$ που αντιπροσωπεύει το πρόβλημα της ταξινόμησης όπου $\varphi(\mathbf{x}) = (c_1, \dots, c_m)$ έτσι ώστε $c_i = 1$ και $c_j = 0$ ($j \in \{1, \dots, m\}, j \neq i$), δηλ. το άνυσμα \mathbf{x} ανήκει στην τάξη C_i . Λόγω των μαθηματικών που παίρνουν μέρος στη λύση του προβλήματος, η βάση κανόνων δεν προσεγγίζει την φ , αλλά μία άλλη συνάρτηση $\varphi': \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1]^m$. Την $\varphi(\mathbf{x})$ την παίρνουμε από την ισότητα: $\varphi(\mathbf{x}) = \psi(\varphi'(\mathbf{x}))$, όπου ψ είναι η μετάφραση του αποτελέσματος της ταξινόμησης από ένα σύστημα NEFCLASS. Στην περίπτωσή μας, δίνεται στο μεγαλύτερο στοιχείο του ανύσματος \mathbf{c} η τιμή 1, και στα υπόλοιπα η τιμή 0 (winner takes all).

Η συνθήκη (iii) διασφαλίζει ότι όμοιοι γλωσσικοί όροι μίας μεταβλητής εισόδου αντιπροσωπεύονται από το ίδιο ασαφές σύνολο (μοιραστό βάρος). Δεν γίνεται δύο ασαφή σύνολα να είναι όμοια στην αρχή της ρουτίνας μάθησης να αλλάζουν διαφορετικά σε αυτή τη ρουτίνα, οπότε τα semantics της βάσης κανόνων με τα οποία έχει κατασκευαστεί το δίκτυο δεν επηρεάζονται. Η συνθήκη (iv) λαμβάνει πρόνοια ώστε να μην υπάρχουν δύο κανόνες με ίδιους γλωσσικούς όρους στο αίτιο. Επειδή οι κανόνες είναι κανόνες ταξινόμησης, κάθε κόμβος κανόνα πρέπει να είναι συνδεδεμένος μόνο με ένα κόμβο εξόδου, και αυτό φαίνεται από τη συνθήκη (vi). Τα βάρη μεταξύ του στρώματος κανόνων και του στρώματος εξόδου είναι απλώς για να συνδέσουν τους κόμβους, δηλ. έχουν τιμή 1 εάν υπάρχει σύνδεση (ο κανόνας ταξινομεί στην τάξη που αντιπροσωπεύει ο κόμβος εξόδου), ή 0 στην αντίθετη περίπτωση, και αυτό διασφαλίζεται από τη συνθήκη (v).

Ένα υπόδειγμα NEFCLASS μπορεί να χτισθεί από μερική γνώση των υποδειγμάτων και μετά να βελτιωθεί με μάθηση, ή μπορεί να δημιουργηθεί εντελώς εξ'αρχής. Ο χρήστης του συστήματος πρέπει να ορίσει τον αριθμό των αρχικών ασαφών συνόλων, με κατάτμηση των χώρων των μεταβλητών και πρέπει να καθορίσει το μέγιστο αριθμό κανόνων k που θέλει να έχει το δίκτυο (αριθμός κόμβων μεσαίου στρώματος), ο οποίος περιορίζεται από το μέγιστο αριθμό κανόνων που επιτρέπει η μνήμη του υπολογιστή, k_{max} , δηλ. $k \leq k_{max}$.

Η βασική ιδέα του αλγόριθμου μάθησης είναι πρώτα να δημιουργηθεί μία βάση κανόνων, και ύστερα να βελτιωθεί τροποποιώντας τις αρχικά δοσμένες συναρτήσεις συμμετοχής. Η βάση κανόνων θα δημιουργηθεί βρίσκοντας για κάθε υπόδειγμα στο σετ δεδομένων μάθησης τον κανόνα που το ταξινομεί καλύτερα. Εάν δεν υπάρχει ήδη κάποιος κανόνας με ίδιο αίτιο, ο καινούργιος κανόνας προστίθεται στη βάση. Ο αλγόριθμος μάθησης των συναρτήσεων συμμετοχής χρησιμοποιεί ένα μέτρο λάθους που λέει εάν ο βαθμός εκπλήρωσης του κανόνα πρέπει να είναι υψηλότερος ή χαμηλότερος. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για να αλλάξει τα ασαφή σύνολα. Ακολουθεί ο αλγόριθμος μάθησης του NEFCLASS.

Αλγόριθμος Μάθησης NEFCLASS:

Έστω ένα υπόδειγμα NEFCLASS με n κόμβους εισόδου x_1, \dots, x_n , $k \leq k_{max}$ κόμβους κανόνων R_1, \dots, R_k και m κόμβους εξόδου c_1, \dots, c_m . Ακόμα, δίνεται ένα σετ μάθησης $\mathcal{L} = \{(p_1, t_1), \dots, (p_s, t_s)\}$ από s υποδείγματα, το καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα άνυσμα εισόδου $p \in \mathbb{R}^n$ και ένα άνυσμα στόχου $t \in \{0, 1\}^m$. Ο αλγόριθμος μάθησης που χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει τους k κόμβους κανόνων του υποδείγματος NEFCLASS αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

I. Αλγόριθμος μάθησης κανόνων

- (i) Εάν οι κόμβοι κανόνων είναι λιγότεροι από k_{max} , επιλογή επόμενου υποδείγματος (p, t) από το \mathcal{L} .
- (ii) Για κάθε κόμβο εισόδου $x_i \in U_1$ εύρεση της συνάρτησης συμμετοχής $\mu_{j_i}^{(i)}$ ώστε

$$\mu_{j_i}^{(i)}(p_i) = \max_{j \in \{1, \dots, q_i\}} \mu_j^{(i)}(p_i)$$
- (iii) Εάν δεν υπάρχει κόμβος R με $W(x_1, R) = \mu_{j_1}^{(i)}, \dots, W(x_n, R) = \mu_{j_n}^{(n)}$ τότε δημιουργείται ένας τέτοιος κόμβος και συνδέεται με τον κόμβο εξόδου c_l εάν t_l , εάν $\underline{c}_l = 1$.
- (iv) Εάν υπάρχουν ακόμη υποδείγματα στο \mathcal{L} τότε συνέχεια στο βήμα (i), αλλιώς τερματισμός.
- (v) Καθορίζεται η βάση με μία από τις ακόλουθες τρεις διαδικασίες:
 - “Απλή” μάθηση κανόνων. Διατηρούνται στη βάση μόνο οι πρώτοι k κανόνες.
 - “Βέλτιστη” μάθηση κανόνων. Το \mathcal{L} επεξεργάζεται ξανά, και αθροίζονται οι ενεργοποιήσεις κάθε κόμβου κανόνα για κάθε τάξη των επεξεργαζόμενων υποδειγμάτων. Εάν κάποιος κόμβος κανόνα R έχει μεγαλύτερη σφαιρική ενεργοποίηση για μία τάξη C_j , από την C_R που υπάρχει στο συμπέρασμα του κανόνα, τότε αλλαγή του συμπεράσματος του R σε C_j , δηλ. ο κόμβος R

συνδέεται με τον κόμβο εξόδου c_j . Το \mathcal{L} επεξεργάζεται ξανά, και υπολογίζεται για κάθε κόμβο κανόνα ένα μέτρο αξιολόγησης V_R :

$$V_R = \sum_p a_R^{(p)} \cdot e_p, \text{ όπου } e_p = \begin{cases} 1, & \text{εάν το } p \text{ έχει ταξινομηθεί σωστά} \\ -1, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

- “Βέλτιστη ανά τάξη” μάθηση κανόνων: Όπως στη “Βέλτιστη”, παραπάνω, αλλά διατηρούνται για κάθε τάξη C_j οι k/m καλύτεροι κανόνες των οποίων το συμπέρασμα αντιπροσωπεύει την τάξη C_j .

Ο επιβλεπόμενος αλγόριθμος μάθησης του NEFCLASS που προσαρμόζει τα ασαφή σύνολα, διατρέχει το σετ μάθησης \mathcal{Z} ώσπου να εκπληρωθεί κάποιο κριτήριο τέλους:

II. Αλγόριθμος μάθησης ασαφών συνόλων:

- Επιλέγεται το επόμενο υπόδειγμα (p, t) από το \mathcal{Z} και περνάει από το δίκτυο, ώστε να πάρουμε το άνυσμα εξόδου, c .
- Για κάθε κόμβο εξόδου c_i υπολογίζεται η τιμή δέλτα $\delta_{c_i} = t_i - a_{c_i}$.
- Για κάθε κόμβο κανόνα R με $a_R > 0$:
 - Προσδιορισμός της τιμής δέλτα $\delta_R = a_R(1 - a_R) \sum_{c \in U_3} W(R, c) \delta_c$.
 - Εύρεση της x' έτσι ώστε $W(x', R)(a_{x'}) = \min_{x \in U_1} W(x, R)(a_x)$.
 - Για το ασαφές σύνολο $W(x', R)$ προσδιορίζονται οι τιμές δέλτα για τις παραμέτρους a, b, c με ένα ρυθμό μάθησης $\sigma > 0$:
$$\delta_b = \sigma \cdot \delta_R \cdot (c - a) \cdot \text{sgn}(a_{x'} - b),$$

$$\delta_a = -\sigma \cdot \delta_R \cdot (c - a) + \delta_b,$$

$$\delta_c = \sigma \cdot \delta_R \cdot (c - a) + \delta_b,$$
και οι αλλαγές εφαρμόζονται στο $W(x', R)$, εάν αυτές δεν παραβιάζουν ένα δοσμένο σύνολο περιορισμών Φ .
- Εάν ο κύκλος μάθησης (epoch) έχει συμπληρωθεί και εκπληρώνεται το κριτήριο τερματισμού, τότε τέλος. Διαφορετικά, συνέχεια στο βήμα 1.

Ο Αλγόριθμος (I) υποδεικνύει τρεις τρόπους για τη δημιουργία μίας βάσης κανόνων σε ένα υπόδειγμα NEFCLASS. Η ρουτίνα του απλού τρόπου μπορεί να είναι επιτυχής μόνο όταν τα υποδείγματα επιλέγονται τυχαία από το σετ μάθησης και εάν ο αριθμός στοιχείων των τάξεων είναι περίπου ίδιος. Συνήθως ο χρήστης επιλέγει τη ‘βέλτιστη’ ή τη ‘βέλτιστη ανά τάξη’. Η τελευταία ρουτίνα επιλέγεται όταν υποθέτουμε ότι τα υποδείγματα κατανέμονται σε ίσο αριθμό ομάδων (clusters) ανά τάξη, ενώ η πρώτη κρίνεται κατάλληλη όταν υπάρχουν τάξεις που εκπροσωπούνται από μεγαλύτερο αριθμό κανόνων από άλλες τάξεις. Και στους

δύο τρόπους, η μάθηση των κανόνων ολοκληρώνεται σε τρεις κύκλους επεξεργασίας του σετ των δεδομένων.

Η ρουτίνα μάθησης των ασαφών συνόλων (Αλγόριθμος II) βασίζεται σε έναν απλό εμπειρικό κανόνα. Σαν αποτέλεσμα, η συνάρτηση συμμετοχής μετακινείται και το σύνολο στήριξης γίνεται μεγαλύτερο ή μικρότερο, ώστε ο βαθμός συμμετοχής για την τρέχουσα τιμή της μεταβλητής στο ασαφές σύνολο που εκπροσωπείται από αυτή τη συνάρτηση, να αυξάνει ή να μειώνεται. Αλλάζοντας μόνο το ασαφές σύνολο που έδωσε το μικρότερο βαθμό συμμετοχής (και άρα που είναι υπεύθυνο για το βαθμό εκπλήρωσης του ασαφούς κανόνα) για το τρέχον υπόδειγμα, οι αλλαγές διατηρούνται όσο το δυνατόν μικρότερες. Για αυτές τις αλλαγές μπορούμε να ορίσουμε ένα σύνολο περιορισμών Φ , π.χ. ότι τα ασαφή σύνολα δεν θα πρέπει να περνάνε το ένα μέσα από το άλλο, ότι πρέπει να τέμνονται στο $\mu = 0,5$. Αυτοί οι περιορισμοί βοηθούν στο να πάρουμε μία ερμηνεύσιμη βάση κανόνων, αλλά μπορεί και να έχουν σαν συνέπεια απώλεια στην απόδοση του ταξινομητή.

Το άθροισμα στο βήμα iii(α) δεν είναι απαραίτητο γιατί κάθε κόμβος κανόνα συνδέεται σε ένα μόνο κόμβο εξόδου (ο οποίος έχει βάρος $W = 1$, ενώ όλοι οι άλλοι 0), αλλά κάνει το μοντέλο πιο ευέλικτο, γιατί έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και βάρη πάνω στις συνδέσεις τα οποία θα είχαν την έννοια του 'βαθμού στήριξης του κανόνα' ή 'βαθμού εμπιστοσύνης'. Το τελευταίο το αποφεύγουμε, γιατί καταλύει τη σημασιολογία (semantics) του υποδείγματος NEFCLASS [13], καθώς δεν είναι σαφές τι σημαίνει ακριβώς ένας σταθμισμένος ασαφής κανόνας. Τα βάρη στους κανόνες είναι συνήθως περιττά, γιατί μπορούν να αντικατασταθούν από αλλαγές στις συναρτήσεις συμμετοχής. Ούτως ή άλλως, ακόμα και εάν υιοθετήσουμε βάρη στο διάστημα $[0, 1]$, δεν μπορούμε να παράγουμε τιμές εξόδου ακριβώς 0 ή 1. Για τους λόγους αυτούς και για να αποφύγουμε το ενδεχόμενο να καταστεί το υπόδειγμα μεροληπτικό (biased), αφού μία εξωγενής παρέμβαση μέσω των βαρών είναι λιγότερο ελέγξιμη από μία ενδογενή διαδικασία, δεν έχουμε εισάγει βάρη στη συγκεκριμένη διαδικασία εξειδίκευσης του νευροασαφούς συστήματος που έχουμε χρησιμοποιήσει στην [7].

6 Μελέτη της ρηγματώσης του ηλεκτροχημικά παραγόμενου στρώματος

6.1 Εισαγωγή

Η ρηγματώση είναι μία σοβαρή αστοχία που επηρεάζει δραματικά την αξιοπιστία ενός εξαρτήματος και ανάλογα με τη σημαντικότητα της λειτουργίας του εξαρτήματος ολόκληρου του συστήματος. Η αρχή αυτής της αστοχίας είναι συνήθως ένα ελάττωμα μικρής κλίμακας, το οποίο πολλές φορές είναι δυνατόν να γεννηθεί κατά την κατασκευή του εξαρτήματος. Η διάδοση του ρήγματος μπορεί να συμβεί ακόμα και μέσα στις βιομηχανικές μονάδες, όπως κατά το τελείωμα ή τη συνομολόγηση, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται φανερή κατά την πρώτη περίοδο λειτουργίας, ειδικά εάν οι συνθήκες είναι ιδιαίτερα απαιτητικές.

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την έναρξη/διάδοση/έλεγχο του ρήγματος που παρατηρείται σε λεπτές στιβάδες από οξειδίο ή μέταλλο που καλύπτουν ηλεκτροχημικά ένα μεταλλικό υπόστρωμα, σχηματίζοντας ένα θερμοδυναμικά σταθερό στρώμα για προστασία και/ή διακόσμηση [1,2]. Αυτά τα υλικά, δηλ. ανοδιωμένο αλουμίνιο και επιμεταλλωμένος χάλυβας, χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή κτιρίων/μηχανών/μεταφορικών μέσων και ελαττώματα που οδηγούν άμεσα ή έμμεσα στην έναρξη ρηγματώσης θα πρέπει να αποφεύγονται τηρώντας αυστηρά τα πρότυπα ποιότητας κατά την ηλεκτροχημική επεξεργασία της επιφάνειας του βασικού μετάλλου ή κράματος.

Παρ'όλα αυτά, υπάρχουν ειδικές περιπτώσεις όπου ένα ελεγχόμενο δίκτυο μικροσκοπικών επιφανειακών ρηγματώσεων μπορεί να ενισχύσει την αντίσταση στη διάβρωση. Τέτοια περίπτωση είναι η επιχρωμίωση του χάλυβα, όπου οι μικρορηγματώσεις δημιουργούν πλήθος τοπικών γαλβανικών στοιχείων μεταξύ της επικάλυψης του χρωμίου και του υποκείμενου στρώματος νικελίου με αποτέλεσμα τη διασπορά του συνολικού δυναμικού διάβρωσης σε μεγάλη επιφάνεια: η συνεπαγόμενη μείωση της πυκνότητας του ανοδικού ρεύματος σε όλα τα μικρορήγματα επιφέρει τη μείωση του ρυθμού διάβρωσης. Αν δεν υπήρχαν αυτές οι μικρής κλίμακας ασυνέχειες, η συγκέντρωση του δυναμικού οξειδωσης σε λίγα/μεγαλύτερα ρήγματα θα προκαλούσε έντονη και άνισα κατανεμημένη διάβρωση με αποτέλεσμα την επιτάχυνση του φαινομένου λόγω αύξησης του δυναμικού ανά θέση ανάπτυξης τοπικού γαλβανικού στοιχείου, δηλ. εντονότερη διάδοση του ρήγματος (μηχανισμός θετικής ανάδρασης). Επειδή ένας μεγάλος αριθμός μικρορηγματώσεων μπορεί να δημιουργήσει ένα μεγαλύτερο ρήγμα, όταν ενωθούν η μία με την άλλη, ή από συνεργιστικές επιδράσεις γύρω από επιφανειακές προσμίξεις/αταξίες, θα πρέπει να προσδιοριστεί μία βέλτιστη συγκέντρωση μικρορηγματώσεων ανάλογα με την ποιότητα της

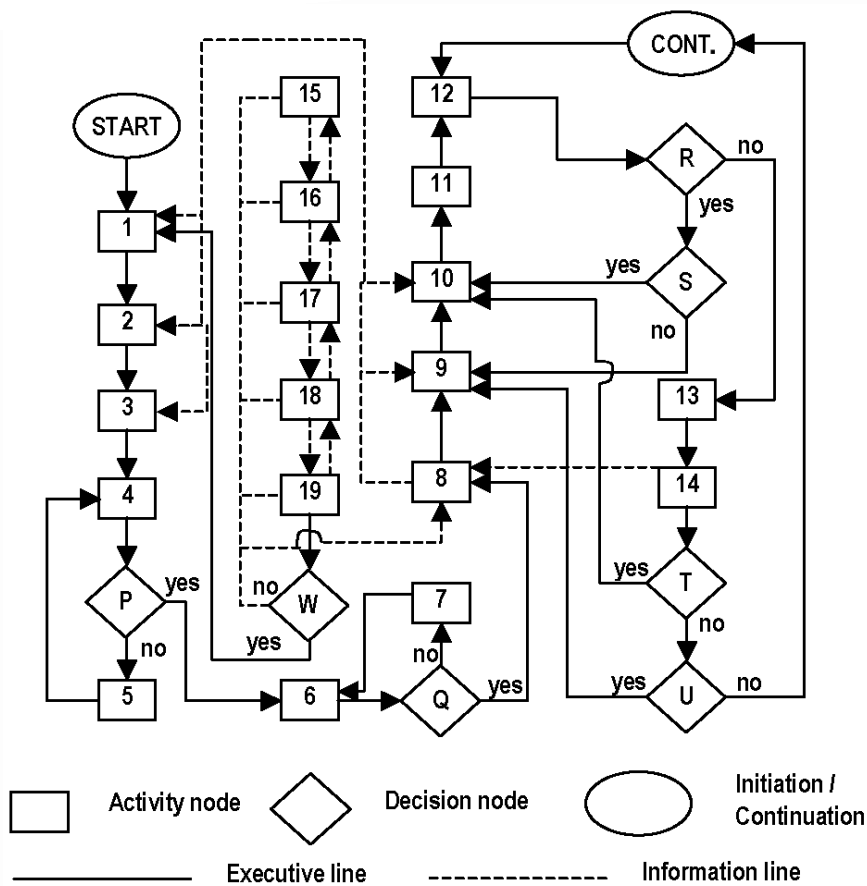
ηλεκτροχημικά επεξεργαζόμενης επιφάνειας και τις συνθήκες που αναμένεται να επικρατήσουν κατά το χρόνο ζωής αυτού του αντικειμένου (βλ. Παράρτημα).

Η Ασαφής Ανάλυση Δένδρου Σφαλμάτων (Fuzzy Fault Tree Analysis – FFTA) είναι δυνατόν να υιοθετηθεί ως η κύρια τεχνική για πρόληψη της θραύσης και για καλύτερο έλεγχο στην παραγωγή προστατευτικών λεπτών στρωμάτων στο αλουμίνιο και το χάλυβα με ανοδιώση και επιμετάλλωση, αντίστοιχα. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνεται μέσα σε ένα σύστημα ελέγχου ποιότητας βασισμένο στα πρότυπα ISO/ASTM, που χρησιμοποιείται επίσης στην αποκατάσταση ενός συνόλου όρων/εννοιών και σχέσεων κοινής αποδοχής (δηλ. μίας οντολογίας) και για να ενισχύσει την ανιχνευσιμότητα, καθώς στόχος δεν είναι μόνο να αξιολογηθεί η θραύση και οι δυνατές συνέπειες, αλλά κυρίως να ψάξει ανάντη για τις πιο πιθανές αιτίες και να εμποδίσει την εμφάνισή τους.

6.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που υιοθετείται εδώ βασίζεται κυρίως στο σχεδιασμό/ανάπτυξη μίας δομής δένδρου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για FFTA μέσα σε ένα ευρύ πλαίσιο ελέγχου ποιότητας προϊόντων και διεργασιών παραγωγής αυτών. Το γεγονός κορυφής (top event) στο δένδρο, δηλ. το αναλυόμενο ελάττωμα, είναι η ‘ρηγμάτωση’ ως ελάττωμα που παρατηρείται είτε κατά τη βιομηχανική παραγωγή του αντικειμένου/εξαρτήματος που εξετάζουμε είτε κατά τη διάρκεια της ζωής του. Μία πλήρης συστημική προσέγγιση φαίνεται στο Σχήμα 6.1 υπό μορφή διαγράμματος ροής, όπου τα αντίστοιχα στάδια εκτέλεσης και οι κόμβοι απόφασης έχουν τις ακόλουθες περιγραφές:

1. Προσδιορισμός των όρων που είναι ικανοί να χαρακτηρίσουν μία βλάβη ως ‘ρηγμάτωση’
2. Επιλογή των μεταβλητών/παραμέτρων, που επηρεάζουν την έναρξη/διάδοση της ρηγμάτωσης, όπως αυτές υποδεικνύονται από την εμπειρία και την τεχνική βιβλιογραφία
3. Προκαταρκτικό σχέδιο μιας δενδροειδούς δομής, ικανής να εκτελέσει FFTA.
4. Καταγραφή όλου του εξοπλισμού ελέγχου ποιότητας (και των αντίστοιχων δυνατοτήτων μέτρησης) που είναι διαθέσιμος στην ίδια τη βιομηχανική μονάδα ηλεκτροχημικών διεργασιών και στα συνεργαζόμενα με αυτήν εργαστήρια
5. Εξασφάλιση πρόσθετου εξοπλισμού/μεθόδων/τεχνικών ελέγχου ποιότητας
6. Συλλογή πληροφοριών/δεδομένων για την παραγωγική διαδικασία, μαζί με εμπειρικούς κανόνες
7. Εξασφάλιση πρόσθετων μηχανημάτων ελέγχου/μεθόδων/τεχνικών.
8. Σχεδιασμός/ανάπτυξη/εμπλουτισμός της Διαγνωστικής Βάσης Γνώσης (DKB)
9. Σχεδιασμός της λειτουργικής δομής του δένδρου που θα εκτελέσει FFTA.

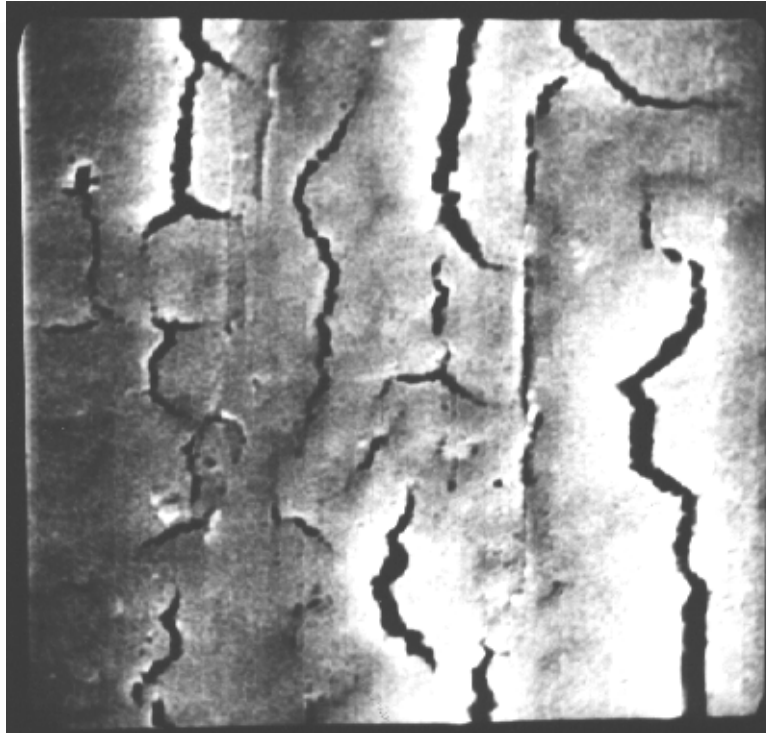


Σχήμα 6.1. Διάγραμμα ροής των σταδίων ελέγχου της ρηγμάτωσης (κατά την παραγωγή ή τη χρησιμοποίηση των ανοδιωμένων αντικειμένων), όταν η εξεταζόμενη βιομηχανική μονάδα συνεργάζεται με εξειδικευμένο εργαστήριο που εφαρμόζει τεχνικές ποιοτικού ελέγχου σε συνθήκες έντασης/επιτάχυνσης του μελετώμενου φαινομένου.

10. Μάθηση των ασαφών κανόνων
11. Μετατροπή των προδιαγραφών σε στοιχεία του διανύσματος εισόδου
12. Συνέχιση της βιομηχανικής παραγωγής και εκτίμηση της επίδρασης στην πιθανότητα εμφάνισης του αναλυόμενου σφάλματος
13. Εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων συσχέτισης συνθηκών παραγωγής και μεταβλητών ελέγχου ποιότητας που αναφέρονται στη δημιουργία και αρχική διάδοση ρωγμών ή άλλων ελαττωμάτων που είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε ρηγμάτωση (π.χ. σημειακή διάβρωση, παγίδευση αερίων σε πόρους, πρόσμιξη με μέταλλα, προσρόφηση ιόντων).
14. Περαιτέρω συγκέντρωση πρωτογενών και επεξεργασμένων δεδομένων
15. Απόκτηση γνώσης με τη βοήθεια αυτόνομου λογισμικού τεχνητής νοημοσύνης [3].
16. Εργαστηριακή εξέταση της έναρξης/διάδοσης/τερματισμού ρωγμών που δημιουργούνται κατά την παραγωγή ή χρήση των επεξεργαζόμενων αντικειμένων
17. Έρευνα στο πεδίο των εφαρμογών, περιλαμβανομένων μετρήσεων in situ και εξέτασης δοκιμών που εκτίθενται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας/χρήσης.

18. Εξέταση αντικειμένων που αποδείχθηκαν ελαττωματικά, ώστε να επιβεβαιωθούν ή να αναθεωρηθούν οι μηχανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν ως πλέον εύλογοι στο στάδιο 16.
19. Δοκιμές σε συνθήκες έντασης/επιτάχυνσης του μελετώμενου φαινομένου προκειμένου να εκτιμηθεί ο χρόνος ζωής του αντικειμένου/εξαρτήματος μέχρις ότου εμφανιστεί δυσλειτουργία λόγω ρηγμάτωσης ή θραύσης
- P. Είναι ο διαθέσιμος εξοπλισμός/τεχνικές ελέγχου ποιότητας υλικών/προϊόντων επαρκής;
- Q. Είναι ο διαθέσιμος εξοπλισμός / τεχνικές ελέγχου παραγωγής επαρκής;
- R. Υπάρχει ξαφνική χειροτέρευση της ποιότητας του προϊόντος, που να οδηγεί, ενδεχομένως, σε ρηγμάτωση στα κατάντη στάδια της παραγωγής ή κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής του αντικειμένου / εξαρτήματος;
- S. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ελέγχου ποιότητας αποτελούν ένα νέο σύνολο δεδομένων που δεν έχει ήδη ληφθεί υπόψη στην περίοδο μάθησης των ασαφών κανόνων;
- T. Είναι αυτά τα δεδομένα αρκετά για την προγραμματισμένη ανανέωση του αρχείου μάθησης που χρησιμοποιείται στο στάδιο 10;
- U. Υπάρχει κάποια ειδική ανάγκη για συγκεκριμένη μεταβολή στη δομή του δένδρου (πρόσθεση/αποκοπή κόμβων, νέος συνδυασμός κόμβων ή/και πυλών);
- W. Υπάρχει ανάγκη αναθεώρησης των μέχρι τώρα προδιαγραφών;

Οι διαδικασίες που περιγράφηκαν παραπάνω σχηματίζουν ένα έμπειρο σύστημα που συνεχώς εμπλουτίζει τη βάση δεδομένων του μαθαίνοντας από εσωτερικές/εξωτερικές πηγές. Ο συμπερασματικός μηχανισμός είναι ένα σύνολο ασαφών κανόνων που χρησιμοποιούνται στο FFTA ώστε να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα. Ο εμπλουτισμός/ανανέωση της DKB γίνεται με έναν μηχανισμό έξι βημάτων: (α) διαμερισμός των χώρων εισόδου/εξόδου των νέων δεδομένων σε ασαφείς περιοχές, (β) ορισμός ενός δείκτη χρησιμότητας σε κάθε υπόδειγμα δεδομένων, (γ) παραγωγή ασαφών κανόνων από αυτές τις σταθμισμένες δομές δεδομένων, (δ) εκτίμηση βαθμού ισχύος του κάθε νέου κανόνα και ορισμός ενός τέτοιου βαθμού σε κάθε παλιό κανόνα, με βάση τη σωρευμένη εμπειρία, (ε) διερεύνηση για ενδεχόμενη αντιφατικότητα μεταξύ των νέων και παλαιών κανόνων και επίλυση των ασυμφωνιών δια μέσου των βαθμών ισχύος, (στ) δημιουργία/ενημέρωση της DKB με νέους ανασυνδυασμούς ασαφών κανόνων [4].



Σχήμα 6.2. Φωτογραφία ανοδιωμένου αλουμινίου πάχους 24 μm (συνθήκες ηλεκτροχημικής κατεργασίας: 4.3 A/dm^2 , 17.1 V, 5800 Cb/dm^2). Ο προσανατολισμός των ρωγμών συμπίπτει με την κατεύθυνση της διέλασης κατά το στάδιο της αρχικής διαμόρφωσης της μεταλλικής επιφάνειας.

6.3 Ανάπτυξη/Εφαρμογή

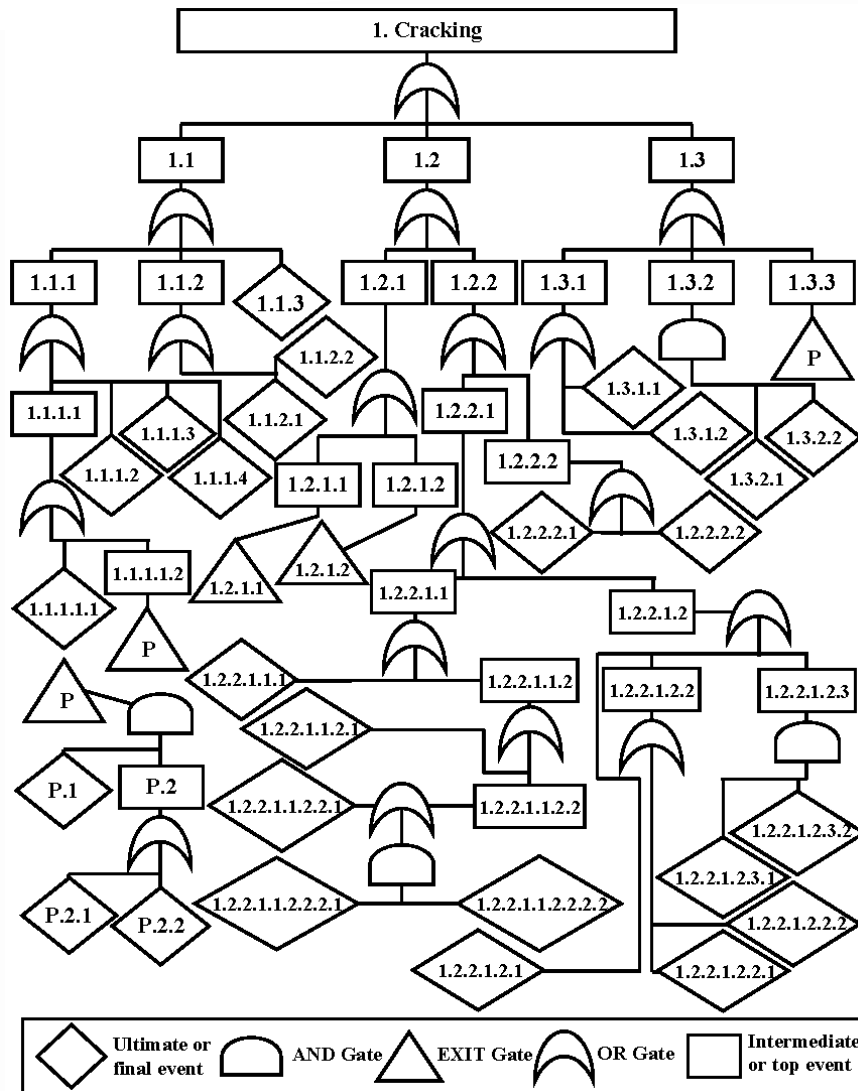
Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω έχει εφαρμοσθεί στην περίπτωση της ρηγμάτωσης του ανοδιωμένου αλουμινίου χρησιμοποιώντας προσομοιωτές ηλεκτροχημικής ανοδίωσης στο Εργαστήριο Προσομοίωσης Βιομηχανικών Διεργασιών (βλ. δείγμα στο Σχήμα 6.2).

Οι έλεγχοι για εκκίνηση/διάδοση της ρηγμάτωσης ακολουθούν τα πρότυπα ISO/ASTM για να υπάρχει ένα ομοιόμορφο υπόβαθρο. Π.χ τα πρότυπα ISO 8993-4:1989 έχουν χρησιμοποιηθεί για αξιολόγηση της σημειακής διάβρωσης σαν ελάττωμα ικανό να ξεκινήσει ρηγμάτωση, ενώ τα ISO 3211:1977 έχουν χρησιμοποιηθεί για εκτίμηση της αντίστασης στη θραύση από παραμόρφωση. Μέρος της δενδροειδούς δομής που χρησιμοποιείται για την ανοδίωση του αλουμινίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3 όπου το αναλυόμενο σφάλμα είναι η ρηγμάτωση και οι κωδικοί αριθμοί των ενδιάμεσων/τελικών γεγονότων/αιτιών έχουν την ακόλουθη σημασία:

1 Ρηγμάτωση, r

1.1 Μηχανική τάση, m

1.2 Δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων, e



Σχήμα 6.3. Δένδρο σφαλμάτων του ανοδιωμένου αλουμινίου, όταν το υπό διερεύνηση ελάττωμα είναι ‘ρηγμάτωση’ (cracking).

1.3 Ανομοιογένεια (h) στη χημική σύνθεση του στρώματος του ανοδικού οξειδίου

1.1.1 Υψηλή πίεση στρώματος, P

1.1.2 Υψηλή εσωτερική τάση, S

1.1.3 Ανάπτυξη κέντρων υψηλής τάσης (C) σε περιοχές της επιφάνειας με προσμίξεις

1.3.1 Εμφάνιση νέων οξειδίων

1.3.2 Διάχυση των κατιόντων προς τα έξω

1.3.3 / 1.1.1.1.2 Προσρόφηση ανιόντων (π.χ. χλωριόντων)

1.1.1.1 Χαμηλή επιφανειακή τάση, γ

1.1.1.2 Μεγάλο πάχος (D) του παθητικού στρώματος

1.1.1.3 Μεγάλη τιμή της διηλεκτρικής σταθερά ϵ

1.1.1.4 Υψηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου E

- 1.1.2.1 Μεγάλη αύξηση του όγκου του στρώματος, σε σχέση με το υπόστρωμα του κράματος από το οποίο το στρώμα σχηματίζεται με οξειδωση.
- 1.1.2.2 Αυξημένη μεταβολή του όγκου λόγω ενυδάτωσης/αφυδάτωσης
- 1.3.1.1 Σχηματισμός φυσικού οξειδίου του αλουμινίου
- 1.3.1.2 Επικαθίσεις οξειδίου ως αποτέλεσμα τοπικής διάβρωσης
- P.1 Ανιόντα στο μπάνιο ανοδίωσης
- P.2 Ενεργά κέντρα προσρόφησης ιόντων στην επιφάνεια του στερεού
- 1.3.2.1 Δημιουργία διακένων στη διεπιφάνεια μεταξύ Αλουμινίου (ή κράματος αυτού) και στρώματος επικάλυψης, όπου παρατηρούνται εσωτερικές επιφάνειες χωρίς οξείδιο
- 1.3.2.2 Ταχύτητα διάχυσης κατιόντων υψηλότερη από την ταχύτητα όδευσης των διακένων προς το μητρικό μεταλλικό υπόστρωμα.
- P.2.1 Αταξία δομής
- P.2.2 Αταξία ηλεκτρονίων
- 1.1.1.1.1 Στρώμα οξειδίου με υψηλή μέση τιμή συγκέντρωσης (ανεπιθύμητων) προσμίξεων
- 1.2.1 Ανομοιογένεια του μεταλλικού υποστρώματος
- 1.2.2 Στρώμα ανοδικού οξειδίου πολύ λεπτό τοπικά
- 1.2.1.1 Υψηλή τοπική συγκέντρωση συστατικών κραματοποίησης ή ανεπιθύμητων προσμίξεις
- 1.2.1.2 Εμφάνιση αταξιών στο υπόστρωμα
- 1.2.2.1 Χαμηλή τοπική πυκνότητα ρεύματος
- 1.2.2.2 Χαμηλή τοπική συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη
- 1.2.2.2.1 Ανεπαρκής ανάδευση
- 1.2.2.2.2 Χαμηλή τιμή της μέσης συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη
- 1.2.2.1.1 Χαμηλή μέση πυκνότητα ρεύματος
- 1.2.2.1.2 Ανομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας ρεύματος στο χώρο
- 1.2.2.1.2.1 Αντικείμενα μακριά από τις καθόδους
- 1.2.2.1.2.2 Λάθος αρχική τοποθέτηση των αντικειμένων στο χώρο ανοδίωσης
- 1.2.2.1.2.2.1 Λάθος προσανατολισμός των επιφανειών των αντικειμένων
- 1.2.2.1.2.2.2 Πεδιακή 'σκίαση' ενός αντικειμένου από ένα άλλο (φαινόμενο ασπίδας)
- 1.2.2.1.1.1 Εφαρμογή χαμηλού δυναμικού
- 1.2.2.1.1.2 Πολύ υψηλή μέση αναλογία ενεργής περιοχής ανόδου/καθόδου
- 1.2.2.1.1.2.1 Μείωση της περιοχής ηλεκτρικής επαφής όταν μικρά αντικείμενα είναι καλωδιωμένα και σε αρμαθιά μαζί κρεμασμένα από γάντζο.
- 1.2.2.1.1.2.2 Μερική οξειδωση των διατάξεων απ' όπου κρέμονται τα αντικείμενα

1.2.2.1.1.2.2.1 Δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων λόγω διαφορετικών συστατικών στα σημεία επαφής με τα πλαίσια στήριξης

1.2.2.1.1.2.2.2.1 Αύξηση θερμοκρασίας στα σημεία επαφής

1.2.2.1.1.2.2.2.2 Υψηλή συγκέντρωση διαβρωτικών ανιόντων στον ηλεκτρολύτη

1.2.2.1.2.3 Μεταβολή προσανατολισμού κρίσιμων επιφανειών κατά την ανοδίωση

1.2.2.1.2.3.1 Έντονη ανάδευση πλησίον των αντικειμένων

1.2.2.1.2.3.2 Ανεπαρκής συγκράτηση στους γάντζους ανάρτησης

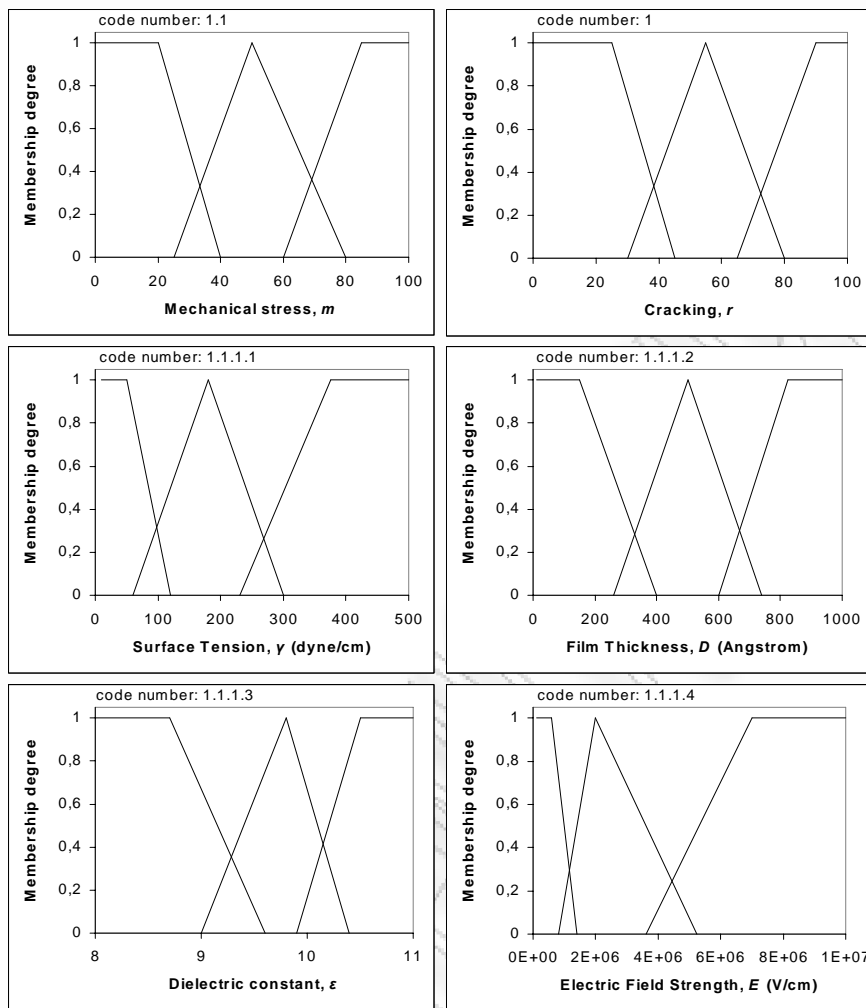
Ένα δείγμα των ασαφών κανόνων που χρησιμοποιήθηκαν και που αντιπροσωπεύουν μέρος μίας αλυσίδας, η οποία οδηγεί από τετραπήφια ενδιάμεσα/τελικά γεγονότα/αίτια στο κύριο σφάλμα της ‘ρηγμάτωσης’ διαμέσου των κόμβων της ‘πίεσης στο στρώμα’ και της ‘μηχανικής τάσης’ (τριπήφια και διπήφια αίτια, αντίστοιχα) παρουσιάζονται παρακάτω:

- EAN D Υψηλό Ή E Υψηλό Ή (D Μέτριο ΚΑΙ E Μέτριο) ΤΟΤΕ P Υψηλό
- EAN τουλάχιστον ένα από τα (P, S, C) Υψηλό Ή τουλάχιστον δύο από αυτά είναι Μέτρια ΤΟΤΕ m Υψηλό
- EAN τουλάχιστον ένα από τα (m, e, h) Υψηλό Ή τουλάχιστον δύο από αυτά είναι Μέτρια ΤΟΤΕ r Υψηλό

Ο διαμερισμός του χώρου των μεταβλητών με τους γλωσσικούς όρους Υψηλό, Μέτριο, Χαμηλό έγινε από ειδικούς, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στις [5-7]. Μία εικόνα της προσομοίωσης της προαναφερόμενης αλυσίδας ασαφών κανόνων δίνεται με το ακόλουθο παράδειγμα, που αναφέρεται στο λεπτό συμπαγές στρώμα οξειδίου του αλουμινίου, πάχους μέχρι 1000 Angstrom, που σχηματίζεται πριν την εμφάνιση της πορώδους δομής: Για τιμές εισόδου $\gamma = 155$ dyne/cm, $D = 710$ Angstrom, $\varepsilon = 10$, $E = 5 \cdot 10^6$ V/cm, $S = 46$, $C = 27$, $e = 19$, $h = 31$, η τιμή εξόδου, σαν σαφής σχετικός δείκτης (μετά από απασαφοποίηση) για τη ρηγμάτωση είναι $r = 87,59$, δηλ. Υψηλός. Οι συναρτήσεις συμμετοχής που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εφαρμογή φαίνονται στο Σχήμα 6.4.

6.4 Συζήτηση

Η εκκίνηση της ρηγμάτωσης στις λεπτές στοιβάδες οξειδίου μπορεί επίσης να εξετασθεί με ντετερμινιστικά υποδείγματα αντί με της μεθόδους FFTA που υιοθετείται εδώ. Αυτά τα υποδείγματα όμως βασίζονται/εξαρτώνται σε/από παραδοχές είτε ως προς την



Σχήμα 6.4. Οι μεταβλητές (μηχανική τάση 1.1, ρηγμάτωση 1, επιφανειακή τάση 1.1.1.1, πάχος στρώματος 1.1.1.2, διηλεκτρική σταθερά 1.1.1.3, ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.1.1.4), που χρησιμοποιούνται στην παρουσιαζόμενη εφαρμογή, υπό μορφή ασαφών συνόλων. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται: η πρώτη σε ενδιάμεση είσοδο/έξοδο, η δεύτερη μόνο στην τελική έξοδο και οι λοιπές μόνο στην είσοδο του συστήματος των ασαφών κανόνων.

εξαγωγή τους (π.χ. από αρχές θερμοδυναμικής) είτε ως προς την απαιτούμενη ακρίβεια μέτρησης, η οποία πολύ δύσκολα μπορεί να επιτευχθεί. Ως παράδειγμα, μπορούμε να πάρουμε την ακόλουθη εξάρτηση της υπερβάλλουσας πίεσης p της στιβάδας του ανοδικού οξειδίου (λογιζόμενης ως διαφορά της συνολικής πίεσης P έναντι της ατμοσφαιρικής P_0) – η οποία είναι μία πιθανή αιτία για το γεγονός 1.1 ‘μηχανική τάση’ – από τα γεγονότα 1.1.1.1 – 4, που αναφέρονται σε τιμές των γ , D , ϵ , E , αντίστοιχα:

$$p = P - P_0 = \epsilon(\epsilon - 1)E^2 / (8\pi) - \gamma / D$$

Η εξαγωγή αυτής της σχέσης από τον Sato [8] βασίστηκε στη χονδρική προσέγγιση της γραμμικής εξάρτησης της πόλωσης της στιβάδας (η οποία είναι μέτρο της αντίστοιχης

διπολικής ροπής ανά μονάδα όγκου) από την E, παρόλο ότι είναι ευρέως αποδεκτό ότι το φαινόμενο αυτό περιγράφεται πληρέστερα από μία πολυωνυμική σχέση. Επίσης, η επιφ. τάση γ δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί με ακρίβεια αντίστοιχη της ακρίβειας μέτρησης του πάχους της στιβάδας. Στην πράξη, η FFTA χρησιμοποιείται όχι μόνο για την υπέρβαση των παραπάνω δυσκολιών που εμφανίζονται κυρίως στο επιστημονικό πεδίο αλλά και για να δώσει ικανοποιητικές λύσεις σε προβλήματα της βιομηχανικής παραγωγής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η υποκειμενικότητα στη δημιουργία της συνδυασμένης DKB των ασαφών κανόνων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί αντικαθιστώντας τον εξωγενώς οριζόμενο δείκτη χρησιμότητας που δίνεται από εμπειρογνώμονες (βλέπε τη διαδικασία των 6 βημάτων που περιγράφεται στην Ενότητα 6.2) με τον αλγόριθμο μάθησης κανόνων του NEFPROX, ένα υβριδικό νευροασαφές σύστημα που περιγράφεται στην [9]. Σε αυτή την προσέγγιση, οι κόμβοι του νευρωνικού δικτύου, που αντιπροσωπεύουν τους κανόνες, δημιουργούνται με τέτοιο τρόπο που δεν υπάρχει ασυμφωνία μεταξύ τους, και έτσι ο δείκτης χρησιμότητας – που χρησιμοποιείται σαν μέσο αφαίρεσης κανόνων – είναι περιττός.

6.5 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Η εκκίνηση της ρηγμάτωσης σε πολλά μεταλλικά αντικείμενα/εξαρτήματα, που προστατεύονται από ένα επιφανειακό στρώμα που παράγεται με μία ηλεκτροχημική κατεργασία (οξειδωση ή επιμετάλλωση), μπορεί να συμβεί είτε στο στάδιο αυτής της κατεργασίας είτε στα κατόπιν στάδια (π.χ. βαφή, σφράγισμα πόρων, φινιρίσμα, συνομολόγηση) πριν αυτά τα αντικείμενα απομακρυνθούν από το εργοστάσιο παραγωγής. Η πρόληψη της ρηγμάτωσης μπορεί να επιτευχθεί (α) βρίσκοντας την αιτία του ελαττώματος που ευθύνεται για την επακόλουθη έναρξη/διάδοση της ρηγμάτωσης και (β) εφαρμόζοντας τη σωστή θεραπεία για να εξαλειφθεί η αιτία, ή, στην περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό, να ελαχιστοποιήσει την επίδραση του εξεταζόμενου ελαττώματος. Έχουμε αποδείξει ότι η FFTA, που λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα, μπορεί να συμβάλλει σε αυτό το στόχο. Το αναλυόμενο σφάλμα που τέθηκε a priori για να συλλέξει/ιεραρχήσει όλες τις δυνατές αιτίες ήταν η 'ρηγμάτωση', ενώ τα ενδιάμεσα γεγονότα/αίτια επιλέχθηκαν κατάλληλα ώστε να διευκολύνουν τη συμμετοχή όλων των παραγόντων που επηρεάζουν τις λογικές σχέσεις/κατηγοριοποιήσεις που εμφανίζονται στη δομή του δένδρου. Η αναλυόμενη περίπτωση του ανοδιωμένου αλουμινίου έδειξε ότι αυτή η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς ακόμα και όταν υπάρχουν άλλες τεχνικές ντετερμινιστικών υποδειγμάτων, επειδή οι τελευταίες αυτές συνήθως παρουσιάζουν διάφορες αδυναμίες είτε λόγω παραδοχών εξαγωγής του υποδείγματος (που γίνονται χάριν απλότητας) είτε λόγω των παρατηρούμενων

δυσκολιών στις μετρήσεις κάποιων ανεξάρτητων μεταβλητών/αιτιών στο επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας. Επίσης, υποδεικνύεται η ένταξη αυτής της τεχνικής πρόληψης ρωγμών σε ένα πλαίσιο ποιοτικού ελέγχου πρώτων-υλών/προϊόντων/διεργασιών προκειμένου να διαμορφωθεί μία ολιστική προσέγγιση.

Βιβλιογραφία

- [1] Batzias A.F., Batis G. (2005). Initiation/Propagation/Control of Cracking on Anodized Aluminium and Electroplated Steel. *Trans. Eng. Sci.*, 4, pp. 416-425.
- [2] Batzias A.F., Batis G. (2004). Imitating Nature in Building Up Thermodynamically Stable Layers on Metals for Protection Against Corrosion, *Proc. 2nd Intern. Conf. on Design and Nature 2004*, WIT Press, forthcoming.
- [3] Batzias, F.A., Marcoulaki, E.C. (2002). Restructuring the Keywords Interface to Enhance Computer Aided Process Engineering Knowledge Acquisition via an Intelligent Agent. *Computer-Aided Chem. Engineering*, 10, pp.829-834.
- [4] Wang, L.X., Mendel, J.M., Generating Fuzzy Rules by Learning from Examples, *IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics*, 22, pp.1414-1427, 1992.
- [5] Batzias A.F., Batzias F.A. (2002). Computer Aided Neuro-fuzzy Control in Anodizing of Aluminium. *Computer Aided Chem. Eng.* (Elsevier), 10, pp. 433-438.
- [6] Batzias, A.F., Batzias, F.A. (2003). Computational and Experimental Process Control by Combining Neurofuzzy Approximation with Multicriteria Optimization. *Proc. 11th Intern. Conf. on Comput. Methods and Experimental Measurements* by C.A. Brebbia, et al (Eds.), WIT Press, pp. 107-118.
- [7] Gadaras I., Mikhailov L., Batzias A. (2008). On the Development of a Hierarchical Fuzzy Classification Framework for Industrial and Environmental Applications. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, forthcoming.
- [8] Sato, N., A Theory for Breakdown of Anodic Oxide Films on Metals. *Electrochimica Acta*, 16, pp. 1683-1692.
- [9] Nauck, D., Klawonn, F., Kruse, R. *Foundations of Neuro-Fuzzy Systems*. John Wiley, Chichester, pp. 251-258, 1997.

7 Γενίκευση της μεθόδου ηλεκτροχημικής παραγωγής προστατευτικών στρωμάτων με μίμηση της φυσικής παθητικοποίησης

7.1 Εισαγωγή

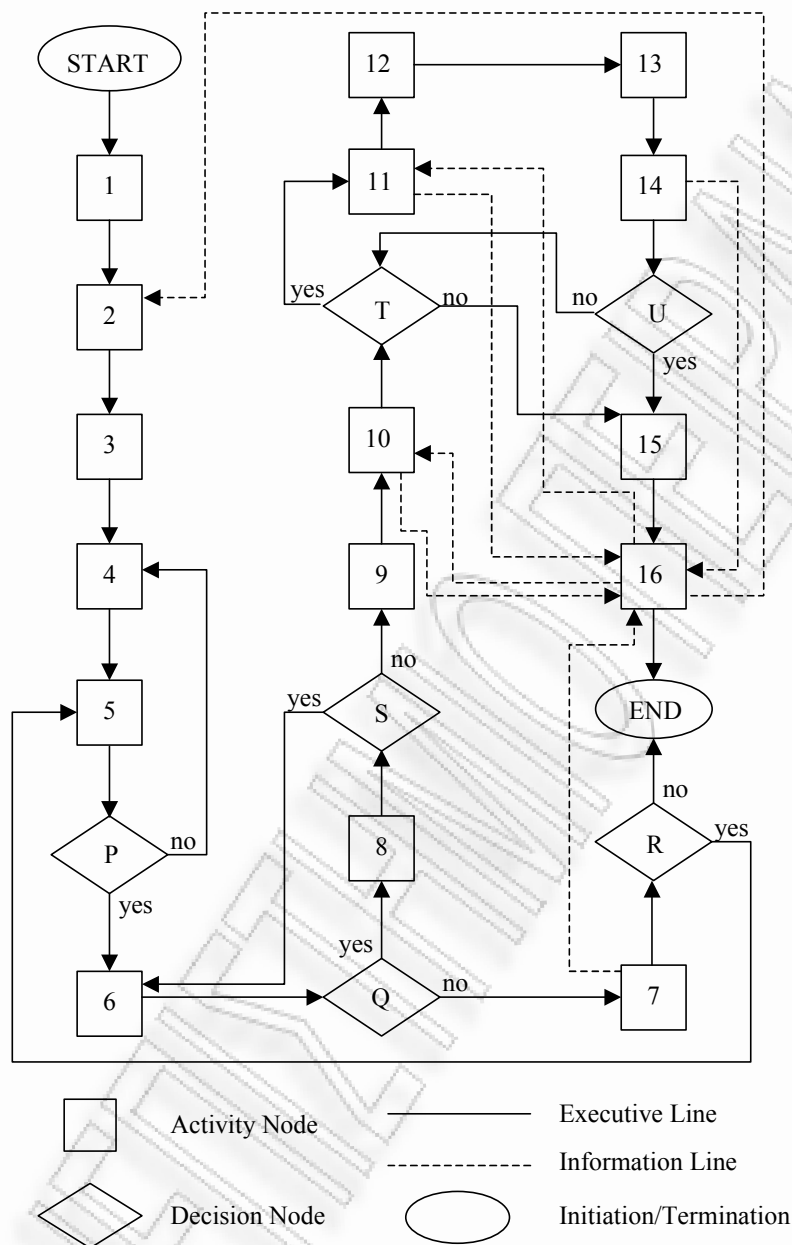
Τα περισσότερα μέταλλα ευρίσκονται στη Φύση με τη μορφή χημικών ενώσεων, επειδή αυτή είναι μία θερμοδυναμικά σταθερή κατάσταση για αυτά. Μεταξύ αυτών των ενώσεων, τα οξείδια είναι η μεγαλύτερη κατηγορία. Τα μέταλλα και τα κράματά τους είναι πολύ χρήσιμα στην καθημερινή ζωή και ο πολιτισμός του ανθρώπου έχει περάσει από περιόδους που χαρακτηρίζονται από την εισαγωγή και την ευρεία χρήση ενός μετάλλου για πρώτη φορά (εποχή χαλκού/μπρούτζου, εποχή σιδήρου). Ο διαχωρισμός ενός μετάλλου (Me) από το οξείδιό του επιτυγχάνεται με αναγωγή: π.χ. $2\text{Me}_x\text{O}_y + y\text{C} \rightarrow y\text{CO}_2 + 2x\text{Me}$ όπου ο άνθρακας έχει το ρόλο του αναγωγικού μέσου. Μέσα στο χρήσιμο χρόνο ζωής του το μέταλλο επιδεικνύει μία φυσική τάση να επιστρέψει σε μία θερμοδυναμικά σταθερή κατάσταση σαν οξείδιο, κυρίως μέσα από ένα μηχανισμό γνωστό σαν ηλεκτροχημική διάβρωση: $2x\text{Me} + y\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Me}_x\text{O}_y$. Παρ'όλα αυτά, διάφορα μέταλλα μόλις σχηματίσουν ένα σχετικά λεπτό στρώμα οξειδίου στην επιφάνεια, σταματούν την περαιτέρω φυσική οξείδωση, γιατί αυτό το στρώμα είναι θερμοδυναμικά σταθερό και ενεργεί σαν μέσο παθητικοποίησης που προστατεύει το υπόλοιπο μέταλλο από παραπάνω φθορά (διάβρωση). Ο άνθρωπος μιμείται αυτή τη 'φυσική' διεργασία της παθητικοποίησης για να δημιουργήσει παρόμοια προστατευτικά στρώματα σχεδόν με τον ίδιο μηχανισμό και σε μία πολύ ομοιόμορφη δομή ώστε να αποφύγει τις (συνήθεις σε 'φυσικές' συνθήκες) αταξίες, οι οποίες δημιουργούν τοπικά γαλβανικά στοιχεία που ευνοούν τη διάβρωση.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται (α) η μεθοδολογία μίμησης της Φύσης στη δημιουργία θερμοδυναμικά σταθερών στρωμάτων σε μία ορισμένη κατηγορία μετάλλων (Al, Ti, Zr, Ta, Bi, κλπ) και (β) η υλοποίηση αυτής της μεθοδολογίας στην παραγωγή ανοδικών στρωμάτων αλουμινίου κυψελοειδούς δομής, εδραζόμενης σε ένα 'φυσικό' συμπαγές στρώμα, κατάλληλα τροποποιημένο για νανοτεχνολογικές και ηλεκτρικές/ηλεκτρονικές εφαρμογές, περιλαμβανομένης της βιομηχανικής παραγωγής μαγνητικών μέσων αποθήκευσης, των οπτικών μέσων, των ηλεκτροδίων, και των φθορίζουσών οθονών. Επίσης, παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα μετρήσεων εργαστηριακής κλίμακας και θερμοδυναμικοί υπολογισμοί προκειμένου να αναδειχθούν τα όρια/περιορισμοί που υπάρχουν στην προσπάθεια να αντιγράψουμε/αλλάξουμε/εκμεταλλευθούμε τη Φύση.

7.2 Μεθοδολογία

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που παρουσιάζεται εδώ έχει σχεδιασθεί με βάση (α) την εξαγόμενη πληροφορία από την τεχνική βιβλιογραφία και (β) τη συσσωρευμένη εμπειρία στη διάρκεια πολλών ετών έρευνας στον έλεγχο της διάβρωσης στο Εργαστήριο Προσομοίωσης Βιομηχανικών Διεργασιών, και γενικά στον τομέα αυτόν. Το συγκεκριμένο πλαίσιο περιλαμβάνει 16 εκτελεστικά στάδια και 6 κόμβους απόφασης (βλ. Σχήμα 7.1 για τις διασυνδέσεις), χωρίς αυτό να σημαίνει ότι λαμβάνονται όλα υπόψη σε κάθε περίπτωση που εξετάζεται. Τις περισσότερες φορές, όταν ο υπεύθυνος παραγωγής παραλείπει την υλοποίηση ενός σταδίου, έχει ήδη λάβει υπόψη τη συνεισφορά του στο έργο, μέσα από έναν υποσυνείδητο μηχανισμό που χρησιμοποιεί υποκειμενική, υπονοούμενη ή 'σιωπηρή' γνώση (tacit knowledge). Παρ' όλα αυτά, υιοθετώντας ένα μεθοδολογικό πλαίσιο διευκολύνει (α) το μετασχηματισμό μέρους της υπονοούμενης σε σαφή γνώση και (β) τη δημιουργία/εμπλουτισμό μίας Βάσης Γνώσης για να υποστηρίξει/βελτιώσει την ανθρώπινη εμπειρία και να δώσει την απαραίτητη πληροφορία για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα στάδια 8, 10, 13, 14.

1. Προσδιορισμός του θεωρούμενου συστήματος (μέταλλο, λειτουργία, φυσικό περιβάλλον, συνθήκες λειτουργίας/χρήσης).
2. Έρευνα για συνθήκες περιβάλλοντος (και αποκάλυψη του αντίστοιχου μηχανισμού) που δημιουργούν/αναπτύσσουν αυθόρμητα ένα φυσικό παθητικό επιφανειακό στρώμα (κυρίως οξείδιο, υδρίδιο, χημική ένωση, προσροφημένο συστατικό) προστατεύοντας το μέταλλο από τη διάβρωση.
3. Μελέτη της επιφανειακής δομής με προχωρημένες τεχνικές ελέγχου, π.χ. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σαρώσεως με μικροαναλυτή ακτίνων Χ, Ηλεκτρονική Φασματοσκοπία Auger, Μικροσκοπία Πεδίου.
4. Προσεγγιστική αναπαραγωγή του ίδιου 'φυσικού' παθητικού επιφανειακού στρώματος στο ίδιο μέταλλο στο εργαστήριο κάτω από τεχνητές συνθήκες (όχι απαραίτητα προσομοιώνοντας τις φυσικές συνθήκες αλλά ενδεχομένως έχοντας αρχικά τον αποκαλυφθέντα φυσικοχημικό μηχανισμό ως οδηγό).
5. Μελέτη της επιφανειακής δομής (όπως στο στάδιο 3) και επεξεργασία των αποτελεσμάτων για να προσδιορισθεί η περισσότερο σταθερή κατάσταση από θερμοδυναμική άποψη.



Σχήμα 7.1. Διάγραμμα ροής της αλγοριθμικής διαδικασίας που έχουμε σχεδιάσει/αναπτύξει για τη δημιουργία θερμοδυναμικά σταθερών στοιβάδων με μίμηση της φυσικής παθητικοποίησης ορισμένων μετάλλων (Al, Ti, Zr, Ta, Bi), σύμφωνα με δεδομένες προδιαγραφές ως προς την αντοχή στη διάβρωση.

- Εργαστηριακός έλεγχος κάτω από συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης. Π.χ. σε θάλαμο εκνέφωσης διαλύματος άλατος, ή σε πειράματα διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση, όπου η συγκέντρωση του διαλύματος διάβρωσης και η πυκνότητα ανοδικού ρεύματος παίρνουν τιμές αρκετά υψηλές ώστε να αποκαλύψουν σε ένα μικρό αριθμό ημερών ή εβδομάδων τι αναμένεται να συμβεί σε μερικά έτη πραγματικής λειτουργίας/χρήσης.

7. Έρευνα για τον προσδιορισμό τεχνητών συνθηκών που παράγουν μία δομή που δεν έχει παρατηρηθεί να αναπτύσσεται σε ‘φυσικές’ συνθήκες.
 8. Έρευνα για συνδυασμούς άλλων ‘φυσικών’ συνθηκών που δίνουν κάποια παρόμοια δομή αλλά σημαντικά πιο ομοιόμορφη/ελεγχόμενη και χωρίς ελαττώματα.
 9. Επιλογή άλλων παρόμοιων δομών που συναντώνται σε άλλα πεδία στη Φύση.
 10. Προσδιορισμός συνθηκών βελτιστοποίησης της δομής
 11. Δυναμική μαθηματική μοντελοποίηση της δομής και αξιολόγηση της ευστάθειάς της ως προς τις κύριες ανεξάρτητες μεταβλητές, που προσδιορίζουν τις συνθήκες βελτιστοποίησης.
 12. Παραγωγή επιφανειακών στρωμάτων που αποκλίνουν από τη δομική ομοιομορφία, ώστε να ερευνηθούν η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά τους και η λειτουργία/συμπεριφορά τους κάτω από ειδικές συνθήκες (π.χ. ημιαγώγιμα στρώματα κάτω από ασθενές ηλεκτρικό ή ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ή ηλιακή ακτινοβολία).
 13. Σχεδιασμός εξωγενών/ενδογενών μέτρων της απόκλισης.
 14. Συσχετισμός των μέτρων ποιότητας/λειτουργικότητας με τα μέτρα απόκλισης, ώστε να βελτιστοποιηθούν τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά των εξεταζόμενων στρωμάτων.
 15. Ταυτοποίηση παραμέτρων, ενσωμάτωση στην ισχύουσα Φυσική Θεωρία, διερεύνηση του ενδεχομένου βελτίωσης της δυνατότητας επεξήγησης/πρόγνωσης της δημιουργίας και των χαρακτηριστικών των συγκεκριμένων δομών.
 16. Δημιουργία/εμπλουτισμός της Βάσης Γνώσης.
- P. Είναι η τελική επιφανειακή δομή επαρκώς ομοιογενής;
- Q. Είναι τα αποτελέσματα του ελέγχου ικανοποιητικά;
- R. Έχουν προσδιορισθεί τέτοιες τεχνητές συνθήκες;
- S. Έχει προσδιορισθεί τέτοιος συνδυασμός ‘φυσικών’ συνθηκών;
- T. Είναι εφικτός ο σχεδιασμός ενός δυναμικού μαθηματικού μοντέλου;
- U. Είναι η συσχέτιση στατιστικά σημαντική σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης;

7.3 Εφαρμογή

Η μεθοδολογία που περιγράφεται παραπάνω έχει επιτυχώς εφαρμοσθεί στην περίπτωση της δημιουργίας θερμοδυναμικά σταθερών στρωμάτων ανοδικού οξειδίου στο αλουμίνιο, κυρίως για προστασία κατά της διάβρωσης και δευτερευόντως για εφαρμογές στη νανοτεχνολογία. Η εφαρμογή των δέκα πρώτων σταδίων της μεθοδολογίας αυτής περιγράφεται παρακάτω με κάποια λεπτομέρεια, καθώς το περιεχόμενό τους είναι κοινού ενδιαφέροντος για τους περισσότερους σκοπούς/εφαρμογές του ανοδιωμένου αλουμινίου.

1. Το εξεταζόμενο σύστημα είναι το αλουμίνιο σε φυσικά ή σε τεχνητά περιβάλλοντα, τα οποία συναντώνται κατά τη διάρκεια είτε της επιφανειακής επεξεργασίας του είτε του χρόνου της ωφέλιμης ζωής του. Συνεπώς, το περιβάλλον μπορεί να είναι ξηρό, υγρό, ατμόσφαιρα με ρύπους, νερό με ρύπους ή διάφορα άλατα, παχύρρευστα υγρά και απορρυπαντικά, ηλεκτρολύτες που ενδεχομένως διαλύουν οξείδια υπό έντονη ανάδευση με μηχανική ανακίνηση ή με φυσαλίδες, προσθετικά που αυξάνουν την αγωγιμότητα, διαλύματα βαφής και σφραγίσματος σε επίπεδα θερμοκρασίας μέχρι το σημείο βρασμού. Τα τελευταία διαλύματα περιέχουν $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ni}$ ή $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (αμιγές ή με προσμίξεις $\text{Na}_2\text{CO}_3 / \text{NaOH}$).
2. Το φυσικό παθητικό στρώμα, που προστατεύει το μέταλλο από τη διάβρωση είναι ένα υδατωμένο οξείδιο αλουμινίου. Τέτοιοι υδρίτες είναι οι α- και β- μονοϋδρίτες και οι αντίστοιχοι τριϋδρίτες. Το πάχος αυτού του φυσικού στρώματος είναι συνήθως εντός του διαστήματος 5-15 nm και οπωσδήποτε δεν είναι μεγαλύτερο των 30nm, κάτω από κανονικές συνθήκες. Στην περίπτωση που έχουμε ρηγμάτωση της στιβάδας, δημιουργείται ένα γαλβανικό στοιχείο διαφορικού αερισμού, σύμφωνα με την ηλεκτροχημική θερμοδυναμική, προκειμένου να αντισταθμισθεί η παρουσιαζόμενη διαφορά δυναμικού. Οι αντίστοιχες ηλεκτροχημικές ημιαντιδράσεις είναι $3\text{O}_2 + 12\text{e} \rightarrow 6\text{O}^{2-}$ και $4\text{Al} - 12\text{e} \rightarrow 4\text{Al}^{3+}$, για την κάθοδο και την άνοδο, αντίστοιχα. Τα δύο προϊόντα ενώνονται στη συνέχεια για να ξανασχηματίσουν το φυσικό παθητικό στρώμα: $4\text{Al}^{3+} + 6\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$. Η κινητική σχηματισμού του φυσικού στρώματος ακολουθεί για μεγάλους χρόνους το εκθετικό υπόδειγμα, με φθίνοντα ρυθμό οξείδωσης. Για μικρούς χρόνους (περίπου 2 ώρες έκθεση της φρεσκοκαθαρισμένης επιφάνειας στην ατμόσφαιρα), ένα κινητικό υπόδειγμα λογαριθμικής μορφής προσαρμόζεται καλύτερα στις μετρήσεις, αλλά αυτό το υπόδειγμα συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη, καθ' όσον ο χρόνος που απαιτείται για μία σχεδόν ολική παθητικοποίηση είναι 100 ώρες, περίπου.
3. Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σαρώσεως σε συνδυασμό με μικροανάλυση ακτίνων X χρησιμοποιείται για να εξετάσει την τοπογραφία τόσο της εξωτερικής επιφάνειας όσο της εσωτερικής διεπιφάνειας μεταξύ του φυσικού οξειδίου και του μεταλλικού υποστρώματος. Στην τελευταία περίπτωση, το επικαλυπτικό στρώμα απογυμνώνεται σε διάλυμα χρωμικού και φωσφορικού οξέως σε θερμοκρασία ζέσεως. Έκτυπο άνθρακα με μεταλλική σκίαση που έχει δημιουργηθεί στην επιφάνεια σε συνθήκες υψηλού κενού αυξάνει την ανάλυση. Η απεικόνιση στο χώρο (χρησιμοποιώντας ενεργειακό φίλτρο ή μικροσκοπία σκοτεινού πεδίου) μπορεί να προσφέρει συμπληρωματική πληροφορία.

4. Αναπαραγωγή του παθητικού συμπαγούς στρώματος οξειδίου πάνω σε καθαρό αλουμίνιο, στο εργαστήριο, σε τεχνητές συνθήκες: ανοδική οξείδωση σε 3% ταρταρικό οξύ + υδροξείδιο αμμωνίου για να φέρει το pH στο 5.0 – 5.5 (πυκνότητα ρεύματος 2 A/dm², χρόνος επεξεργασίας 1 min, πάχος στρώματος μέχρι 500 nm, περίπου).
5. Εξέταση της δομής της επιφάνειας (όπως στο στάδιο 3) και επεξεργασία των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από την ανοδίωση σε διαφορετικές συνθήκες για να προσδιορισθεί το οικονομοτεχνικά βέλτιστο στρώμα. Αυτός ο στόχος μπορεί να επιτευχθεί προσδιορίζοντας το βέλτιστο πάχος είτε με τη βοήθεια της θερμοδυναμικής κάτω από οικονομικές δεσμεύσεις, είτε με οικονομικά κριτήρια κάτω από θερμοδυναμικές δεσμεύσεις. Η τελευταία μέθοδος κυριαρχεί στη βιομηχανική παραγωγή εξωτερικών και εσωτερικών κτιριακών μερών από αλουμίνιο (π.χ. παράθυρα, πλαίσια υαλοπινάκων, πόρτες εσωτερικών αίθριων, μεσοτοιχίες, τέντες, χωρίσματα, κιγκλιδώματα, βιτρίνες καταστημάτων, κ.α.) επειδή ο πελάτης ή/και η αγορά ζητούν συνήθως προϊόν το οποίο να είναι μεν σύμφωνο με τις τεχνικές προδιαγραφές αλλά να έχει τη χαμηλότερη δυνατή τιμή. Παρ'όλα αυτά, η πρώτη μέθοδος προτιμάται στις περιπτώσεις παραγωγής προϊόντων/εξαρτημάτων υψηλής προστιθέμενης αξίας (λογιζόμενης ως νομισματικές μονάδες ανά μονάδα ανοδιωμένης επιφάνειας), όπως π.χ. ηλεκτρικούς πυκνωτές, όπου ακόμη και δευτερεύουσας σημασίας ελαττώματα, πρέπει να αποφεύγονται.
6. Εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης που συσχετίζουν το χρόνο εμφάνισης ελαττωμάτων σε συνθήκες ελεγχόμενης και προτυποποιημένης έντονης διάβρωσης με τον (πολύ μεγαλύτερο) χρόνο εμφάνισης των ιδίων ή άλλων (συνεπαγόμενων) ελαττωμάτων σε συνθήκες που συνήθως επικρατούν στην πράξη. Για πολύ λεπτά συμπαγή στρώματα, που δημιουργούνται σε κράματα χαμηλής αντοχής στη διάβρωση, όπως π.χ. το ντουραλουμίνιο, η δοκιμή σε ελεγχόμενο θάλαμο εκνέφωσης διαλύματος 5-10% NaCl είναι επαρκής. Στις περιπτώσεις ελέγχου στρωμάτων μεγαλύτερου πάχους, η εμφάνιση σημειακής διάβρωσης δια βελονισμών (μικροκρατήρες), που δημιουργούν ασυνέχεια στην ανοδική επικάλυψη και χρησιμοποιούνται ως μέτρο της αντοχής στη διάβρωση (είδος, πυκνότητα λογιζόμενη ως αριθμός μικροκρατήρων ανά μονάδα επιφάνειας, χρονική κατανομή της εμφάνισης των μικροκρατήρων), μπορεί να επιταχυνθεί με την προσθήκη οξικού οξέος σε υδατικό διάλυμα 3% NaCl (δηλ. περιεκτικότητα θαλασσινού νερού) ώστε να φθάσει το pH στην περιοχή 3,2-3,5. Στις περιπτώσεις σφραγισμένων στρωμάτων μεγάλου πάχους και υψηλής αντοχής στη διάβρωση χρησιμοποιείται ισχυρότερο διάλυμα 5% NaCl,

εμπλουτισμένο με 0,026% CuCl_2 (Copper-Accelerated acetic acid Salt-Spray, CASS). Άλλες δοκιμές είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθούν, όπως π.χ. (α) η καθοδική διάλυση (η οποία αναπτύχθηκε από τη Ford Motor Co. of Detroit) με την τοποθέτηση μιας σταγόνας διαλύματος CASS σε μια μικρή περιοχή της ανοδιωμένης επιφάνειας, η οποία αποτελεί την κάθοδο, και τη διέλευση συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης μεταξύ της καθόδου και της ανόδου από Pt και (β) η μέτρηση του ηλεκτρικού φορτίου που διέρχεται από το ανοδικό στρώμα υπό τάση 40V εντός 5 min σε υδατικό λουτρό 5% HCOOH .

7. Οι τεχνητές συνθήκες που μπορούν να παράγουν μεγάλο πάχους ανοδικά στρώματα σε μικρή κλίμακα είναι μέση τάση 12-24V, μέση πυκνότητα ρεύματος $I=1,5-4,5 \text{ A/dm}^2$, ηλεκτρικό φορτίο (λογιζόμενο σωρευτικά από την έναρξη της διεργασίας) $Q=2400-5700 \text{ Cb/dm}^2$, με αποτέλεσμα τη δημιουργία στρώματος πάχους $L=12-24 \text{ }\mu\text{m}$. Θεωρητικά, το πάχος L είναι ανάλογο του φορτίου Q αλλά στην πράξη ισχύει μία παραβολική σχέση $L=f(Q)$ με $dL/dQ > 0$ και $d^2L/dQ^2 < 0$ λόγω διάλυσης μέρους του Al_2O_3 στο όξινο λουτρό (αποτελούμενο από υδατικό διάλυμα θειικού ή χρωμικού ή οξαλικού ή φωσφορικού οξέως). Στην παρασκευή της τεχνητής στιβάδας, ο όξινος ηλεκτρολύτης και το ηλεκτρικό ρεύμα είναι τα μέσα δημιουργίας του ανοδικού οξειδίου, δηλ. παίζουν το ρόλο της ατμόσφαιρας και των τοπικών γαλβανικών στοιχείων που είναι τα αντίστοιχα μέσα στην περίπτωση της φυσικής στιβάδας. Η δομή του τεχνητού πορώδους ανοδικού στρώματος έχει τη μορφή εξαγωνικών πρισματικών κυψελίδων κάθετων στη μητρική επιφάνεια του αλουμινίου με έναν κυλινδρικό πόρο κατά μήκος του άξονα συμμετρίας κάθε πρίσματος. Στα σχετικά μεγάλα πάχη, οι πόροι έχουν τη μορφή κόλουρου κώνου με τη μεγάλη βάση στην εξωτερική πλευρά του ανοδικού στρώματος, λόγω της διαλυτικής επίδρασης του ηλεκτρολύτη. Η βάση των κυψελίδων συνίσταται από συμπαγές οξείδιο, με πάχος εξαρτώμενο από την ηλεκτρική τάση σχηματισμού και το είδος του ηλεκτρολύτη (περίπου 1,05 nm/V και 13.00 nm/V, για ηλεκτρολύτη με και χωρίς διαλυτική δράση, αντίστοιχα). Σε μεγάλη (βιομηχανική) κλίμακα, η τάση σχηματισμού ανέρχεται σε 80-100 V, ενώ η θερμοκρασία πρέπει να διατηρείται πλησίον του 0°C , για την παραγωγή σκληρών στρωμάτων μεγάλου πάχους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η προσομοιάζουσα-με-φυσική συμπαγής στιβάδα μπορεί να έχει πάχος μεγαλύτερο των 100 nm. Για την επίτευξη παχύτερων τεχνητών στιβάδων που να προσομοιάζουν με τις φυσικές, πρέπει να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρολύτες χωρίς διαλυτική δράση.

8. Τέτοιοι συνδυασμοί μπορούν να επιτευχθούν με την αποκατάσταση ομοιογένειας είτε στα μέσα της ανοδίσωσης είτε στη μητρική μεταλλική επιφάνεια. Στην πρώτη περίπτωση, είναι απαραίτητος ο έλεγχος των συνθηκών της ανοδίσωσης, οι οποίες πρέπει να κυμαίνονται εντός προκαθορισμένων ορίων: για τη θερμοκρασία $\pm 1^{\circ}\text{C}$, για την πυκνότητα ρεύματος $\pm 0,15 \text{ A/dm}^2$, για τη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη $\pm 0,2\%$. Στη δεύτερη περίπτωση, οι συνθήκες για την επίτευξη ομοιογένειας στη μητρική μεταλλική επιφάνεια, με τον αλκαλικό καθαρισμό αυτής πριν την ανοδίσωση, προσδιορίζονται με νευροασαφή έλεγχο [1], επειδή δεν υπάρχουν αναλυτικές ποσοτικές σχέσεις που να συνδέουν τις αντίστοιχες μεταβλητές/παραμέτρους. Τα αριθμητικά δεδομένα και οι εμπειρικοί κανόνες που χρησιμοποιούνται για την ‘εκπαίδευση’ του νευρωνικού δικτύου πρέπει να προέρχονται από τις ίδιες δεξαμενές αλκαλικού καθαρισμού και ανοδίσωσης, επειδή η γεωμετρία τους, τα συστήματα ανάδευσης/ψύξης και η διεύθυνση ανόδων/καθόδων στο χώρο τις καθιστούν μοναδικές. Επισημαίνεται ότι σ’αυτή τη δεύτερη περίπτωση, η ομοιογένεια στη μητρική μεταλλική επιφάνεια είναι δυνατό να επιτευχθεί με την τεχνητή δημιουργία σημείων έναρξης δημιουργίας πόρων και αντίστοιχων κυψελίδων δίνοντας στην αρχική επιφάνεια προκαθορισμένο ανάγλυφο, το οποίο είναι δυνατό να αποτυπώνει στην επιφάνεια μια τάξη διαφορετική από αυτή που θα ακολουθούσε η ίδια επιφάνεια κάτω από τη ‘φυσική’ επίδραση του ίδιου ηλεκτρικού πεδίου. Για παράδειγμα, αν με κατάλληλη μήτρα αποτυπωθεί στη μητρική επιφάνεια ένα υπόδειγμα τετραγωνικών (αντί των θερμοδυναμικά ευσταθέστερων ‘φυσικών’ εξαγωνικών) κυψελίδων, παρατηρείται τετραγωνική διατομή των αντίστοιχων πόρων πλησίον του πυθμένα αυτών (δηλ. πλησίον του συμπαγούς ‘φυσικού’ στρώματος, το οποίο ευρίσκεται μεταξύ μητρικού μετάλλου και πορώδους στρώματος) η οποία όμως μετασχηματίζεται βαθμιαία σε κυκλική στο στόμιο των πόρων [2], δηλ. στην ελεύθερη επιφάνεια προς την πλευρά του ηλεκτρολύτη. Αυτό δείχνει ότι η Φύση ευρίσκει κατάλληλη όδευση προς τη θερμοδυναμική ευστάθεια σύμφωνα με το αρχικό σχέδιό της παρ’όλο ότι διατηρείται αμετάβλητο το αρχικό υπόδειγμα που κατασκευάστηκε με ανθρώπινη παρέμβαση.
9. Άλλες όμοιες δομές που βασίζονται σε ένα εξαγωνικό υπόδειγμα και προκύπτουν ως αποτέλεσμα επεξεργασίας ‘φυσικών’ δυνάμεων ή δημιουργούνται από φυσικούς οργανισμούς είναι (α) η ομοιόμορφη διάβρωση μετάλλων/κραμάτων, όπως π.χ. μαλακού χάλυβα, (β) ένα στρώμα φυσαλίδων με περίβλημα από υγρό υμένα, περιοριζόμενο μεταξύ δύο υάλινων πλακών, σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον και (γ) μια κηρύθρα. Στην τελευταία περίπτωση, αποδεικνύεται ότι το εξαγωνικό σχήμα είναι το πλέον οικονομικό

ως προς την κατανάλωση κηρού μελισσών: επειδή κάθε κυψελίδα πρέπει να έχει επαρκή χώρο για τη νύμφη, ο όγκος και το μήκος είναι προκαθορισμένα και μόνο η διατομή της κυψελίδας είναι δυνατό να βελτιστοποιηθεί με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης κηρού. Παρ'όλο ότι παρατηρήθηκε από παλιά ότι η βελτιστοποίηση αυτή συνεπάγεται εξαγωνικό σχήμα διατομής (βλ. πέμπτο βιβλίο της συλλογής υπό το όνομα «Συναγωγή» του μεγάλου έλληνα μαθηματικού Πάππου που ήκμασε στην Αλεξάνδρεια κατά τους χρόνους του Διοκλητιανού), μόλις πρόσφατα αποδείχθηκε από τον Hales [3] ότι η κάλυψη ενός επιπέδου από ψηφίδες μορφής κανονικού εξαγώνου συνεπάγεται ελαχιστοποίηση της περιμέτρου για δεδομένο εμβαδόν κάθε ψηφίδας. Ομοίως, οι φυσαλίδες (μετα)σχηματίζονται με τρόπο ώστε να εξοικονομείται ενέργεια, που συνεπάγεται ελαχιστοποίηση της επιφάνειας για δεδομένο όγκο φυσαλίδας. Η ελαχιστοποίηση αυτή επιτυγχάνεται με τη 'φυσική' επιλογή εξαγωνικού σχήματος διατομής (δηλ. ίδιο με αυτό των κυψελίδων της κηρύθρας), όταν οι φυσαλίδες διατάσσονται μεταξύ δύο κρυστάλλων με τρόπο που να καλύπτουν ολόκληρη τη διαθέσιμη επιφάνεια. Αφού η εξοικονόμηση μάζας (κηρού) και ενέργειας οδηγούν στην ίδια διευθέτηση στο χώρο, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η θερμοδυναμική είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί για τη μελέτη και μοντελοποίηση αυτών των στιβάδων (βλ. επίσης Παράρτημα II, για τις 'φυσικές' συμπαγείς στιβάδες).

10. Η βελτιστοποίηση δομικών χαρακτηριστικών, όπως το πάχος και το πορώδες του ανοδικού στρώματος, μπορεί να επιτευχθεί με την ασαφή συσχέτιση συνθηκών παραγωγής και ιδιοτήτων προϊόντος, σύμφωνα με μια αμφίδρομη εξάρτηση: τα πραγματικά χαρακτηριστικά του προϊόντος εξαρτώνται από τις πραγματικές συνθήκες παραγωγής αλλά και οι προγραμματιζόμενες συνθήκες παραγωγής εξαρτώνται από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του προϊόντος. Η απόρριψη των διανυσμάτων παραγωγής που δίνουν (με προκαθορισμένη ασαφή πιθανότητα) ελαττώματα περισσότερα κάποιας οριακής τιμής, η ομαδοποίηση των ισχυρών διανυσμάτων σε διακριτά υποσύνολα και η ασαφής πολυκριτηριακή ανάλυση προσδιορίζουν μία σύνθετη μέθοδο βελτιστοποίησης [4].

Η μοντελοποίηση του πορώδους ανοδικού οξειδίου (στάδιο 11) βασίζεται στη γραμμική εξάρτηση της διαμέτρου της κυψελίδας από την ηλεκτρική τάση σχηματισμού: $D = a_0 + a_1 V$, όπου a_0 είναι η διάμετρος του πόρου και $a_1/2$ το πάχος του τοιχώματος της κυψελίδας (σύμφωνα με την [5], $a_0=12\text{nm}$ και $a_1/2=0,8\text{nm/V}$ για ηλεκτρολύτη 15% H_2SO_4 σε θερμοκρασία 10°C). Αποκλίσεις από την ομοιογένεια (στάδιο 12) μπορούν να προκύψουν λόγω εμφάνισης κλίσης (σε σχέση με την κάθετο προς το επίπεδο της

φαινόμενης επιφάνειας του συμπαγούς οξειδίου) από υποσύνολα πόρων τα οποία αναπτύσσονται πάνω σε κρυσταλλοειδείς σχηματισμούς Al_2O_3 που έχουν διαφορετικό προσανατολισμό. Ένα μέτρο της απόκλισης (στάδιο 13) λαμβάνεται με τη μέτρηση αριθμού πόρων που εμφανίζονται όταν δημιουργείται αυξανόμενη κλίση της επιφάνειας ανοδικού στρώματος απογυμνωμένου από το μητρικό μέταλλο σε σχέση με την προσπίπτουσα δέσμη του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου που χρησιμοποιείται. Επειδή η μελέτη της μητρικής μεταλλικής επιφάνειας του αλουμινίου, από την οποία προέκυψε το παραπάνω ανοδικό στρώμα, σε οπτικό μικροσκόπιο με πολωμένο φως αποδεικνύει την ύπαρξη αντίστοιχων περιοχών όταν περιστρέφεται το εξεταζόμενο δοκίμιο [6], είναι δυνατό να γίνουν συσχετίσεις που επιτρέπουν την εξαγωγή ενός δείκτη ανισοτροπίας (στάδιο 14). Για την ταυτοποίηση των παραμέτρων και τη διερεύνηση βελτίωσης της δυνατότητας επεξήγησης/πρόγνωσης (στάδιο 15), είναι δυνατός ο συνδυασμός διαφόρων μετρήσεων (π.χ. μάζας, ηλεκτρονοπτικών ιδιοτήτων, προσρόφησης – βλ. [7]) και η αξιολόγηση αυτών με τη βοήθεια μιας Βάσης Γνώσης (στάδιο 16) η οποία μπορεί να εμπλουτίζεται ενδογενώς, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 1, και εξωγενώς δια μέσου ενός αυτόνομου/ευέλικτου προγράμματος H/Y [8]. Η δυνατότητα επεξήγησης/πρόγνωσης μπορεί επίσης να βελτιωθεί σε ένα βαθύτερο γνωσιολογικό επίπεδο, εξετάζοντας το ρόλο που παίζουν οι φυσικές δυνάμεις που επενεργούν στο εξεταζόμενο φαινόμενο που οδηγεί τελικά στη δημιουργία του ‘τεχνητού-τύπου’ στρώματος [9].

7.4 Συζήτηση

Ο συνδυασμός των σταδίων 4, 7, 8 της αλγοριθμικής διαδικασίας που έχει περιγραφεί παραπάνω μπορεί να συμβάλει στο σχεδιασμό σύνθετων στιβάδων παθητικοποίησης του μητρικού μετάλλου, με ομοιόμορφη κατανομή χαρακτηριστικών, τα οποία μπορούν εύκολα να μετρηθούν άμεσα ή έμμεσα. Το Σχήμα I.1 του Παραρτήματος I δείχνει την εξάρτηση της πυκνότητας ρεύματος I από το χρόνο ανοδίωσης t , σύμφωνα με ένα νέο υπόδειγμα του γράφοντα της μορφής $I = g/t + I_{\infty}[1 - \exp(-kt)]$, το οποίο έχει προκύψει με τη σύνθεση δύο απλών υποδειγμάτων, ενός υπερβολικού και ενός εκθετικού (οι τιμές των παραμέτρων g , k έχουν εκτιμηθεί με μη γραμμική παλινδρόμηση σε πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 30 sec από την έναρξη της ανοδίωσης). Αρχικά, παρατηρείται απότομη μείωση της I , ως αποτέλεσμα της δημιουργίας της συμπαγούς στιβάδας που αντιστοιχεί στη στιβάδα ‘φυσικής’ παθητικοποίησης, η οποία όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση παράγεται τεχνητά. Στη συνέχεια η I διέρχεται από μια ελάχιστη τιμή, η οποία υπολογίζεται προσεγγιστικά (με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης) από την

εξίσωση $dI/dt = 0$ ή $-g/t_{\min}^2 + I_{\infty} k \exp(-kt_{\min}) = 0$ ενώ οι εκτιμηθείσες τιμές των παραμέτρων g , k επιβεβαιώνουν την ισχύ της συνθήκης δευτέρας τάξεως $[d^2I/dt^2]_{\min} > 0$ ή $2g/t_{\min}^3 - I_{\infty} k^2 \exp(-kt_{\min}) > 0$, και μετά αυξάνεται με φθίνοντα ρυθμό ($dI/dt > 0$, $d^2I/dt^2 < 0$) συγκλίνουσα ασυμπτωτικά προς την πειραματικά προσδιοριζόμενη τιμή της I_{∞} , η οποία όμως θα μπορούσε να προσδιοριστεί και δια μέσου της μη-γραμμικής παλινδρόμησης δίνοντας μάλιστα μικρότερο τυποποιημένο σφάλμα της εκτίμησης. Στην περιοχή πριν το ελάχιστο υπερισχύει το υπερβολικό υπόδειγμα, στην περιοχή μετά από αυτό υπερισχύει το εκθετικό υπόδειγμα ενώ η περιοχή σύγκλισης προς την ασυμπτωτική τιμή της I_{∞} αντιπροσωπεύει την επικράτηση συνθηκών σταθεροποιημένης κατάστασης, αποτέλεσμα της οποίας είναι η παραγωγή του ‘τεχνητού’ πορώδους στρώματος, σύμφωνα με τις επιθυμητές τεχνητές προδιαγραφές. Κατά συνέπεια, το συγκεκριμένο σύνθετο κινητικό υπόδειγμα απεικονίζει τη μεταβατική κατάσταση από μια ‘φυσικού-τύπου’ σε μια ‘τεχνητού-τύπου’ παθητικοποίηση που έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ομοιόμορφου στρώματος (βλ. Σχήμα I.2) μεγάλου πάχους, με βελτιωμένες αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Αν οι προδιαγραφές απαιτούν ‘φυσικού-τύπου’ παθητικοποίηση σε ολόκληρο το πάχος L , τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρολύτης χωρίς διαλυτική δράση. Σημειώνεται ότι ενώ το πάχος L αυξάνει, η πιθανότητα διάρρηξης του στρώματος αυξάνεται, όπως αποδεικνύεται από τη θερμοδυναμική ανάλυση που περιλαμβάνεται στο Παράρτημα II, όπου παρουσιάζεται ένα γενικευμένο υπόδειγμα τη εξάρτησης της ασκούμενης πίεσης p στο στρώμα από το πάχος L (τα αναφερόμενα στις εργασίες [10-12] απλούστερα υποδείγματα προκύπτουν ως μερικές περιπτώσεις του παρουσιαζόμενου εδώ γενικευμένου υποδείγματος). Αυτό σημαίνει ότι, μιμούμενοι τη Φύση, μπορούμε να βελτιώσουμε ορισμένες ιδιότητες των υλικών μέχρι κάποιο βαθμό, μετά τον οποίο όμως πρέπει να πληρώσουμε ένα τίμημα, αναλαμβάνοντας ένα διαρκώς αυξανόμενο κίνδυνο κατάρρευσης ολόκληρης της δομής που έχουμε δημιουργήσει [13, 14].

7.5 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Διάφορα μέταλλα μόλις σχηματίσουν ένα σχετικά λεπτό στρώμα οξειδίου στην επιφάνεια, σταματούν την περαιτέρω φυσική οξείδωση, γιατί αυτό το στρώμα είναι θερμοδυναμικά σταθερό και ενεργεί σαν μέσο παθητικοποίησης που προστατεύει το υπόλοιπο μέταλλο από παραπάνω φθορά (διάβρωση). Ο άνθρωπος μιμείται αυτή τη ‘φυσική’ διεργασία της παθητικοποίησης για να δημιουργήσει παρόμοια προστατευτικά στρώματα σχεδόν με τον ίδιο μηχανισμό και σε μία πολύ ομοιόμορφη δομή ώστε να αποφύγει τις

(συνήθεις σε ‘φυσικές’ συνθήκες) αταξίες, οι οποίες δημιουργούν τοπικά γαλβανικά στοιχεία που ευνοούν τη διάβρωση.

Στο παρόν Κεφάλαιο, παρουσιάζεται (α) η μεθοδολογία μίμησης της Φύσης στη δημιουργία θερμοδυναμικά σταθερών στρωμάτων σε μία ορισμένη κατηγορία μετάλλων (Al, Ti, Zr, Ta, Bi, κλπ) και (β) η υλοποίηση αυτής της μεθοδολογίας στην παραγωγή ανοδικών στρωμάτων αλουμινίου κυψελοειδούς δομής, εδραζόμενης σε ένα ‘φυσικό’ συμπαγές στρώμα, κατάλληλα τροποποιημένο για νανοτεχνολογικές και ηλεκτρικές/ηλεκτρονικές εφαρμογές, περιλαμβανομένης της βιομηχανικής παραγωγής μαγνητικών μέσων αποθήκευσης, των οπτικών μέσων, των ηλεκτροδίων, και των φθορίζουσών οθονών. Επίσης, παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα μετρήσεων εργαστηριακής κλίμακας και θερμοδυναμικοί υπολογισμοί προκειμένου να αναδειχθούν τα όρια/περιορισμοί που υπάρχουν στην προσπάθεια να αντιγράψουμε/αλλάξουμε/εκμεταλλευθούμε τη Φύση.

Το παρουσιαζόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο έχει σχεδιασθεί με βάση (α) την εξαγόμενη πληροφορία από την τεχνική βιβλιογραφία και (β) τη συσσωρευμένη εμπειρία στη διάρκεια πολλών ετών έρευνας στον έλεγχο της διάβρωσης στο Εργαστήριο Προσομοίωσης Βιομηχανικών Διεργασιών, και γενικά στον τομέα αυτόν. Το συγκεκριμένο πλαίσιο περιλαμβάνει 16 εκτελεστικά στάδια και 6 κόμβους απόφασης, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι λαμβάνονται όλα υπόψη σε κάθε περίπτωση που εξετάζεται. Τις περισσότερες φορές, όταν ο υπεύθυνος παραγωγής παραλείπει την υλοποίηση ενός σταδίου, έχει ήδη λάβει υπόψη τη συνεισφορά του στο έργο, μέσα από έναν υποσυνείδητο μηχανισμό που χρησιμοποιεί υποκειμενική, υπονοούμενη ή ‘σιωπηρή’ γνώση (tacit knowledge). Παρ’όλα αυτά, υιοθετώντας ένα μεθοδολογικό πλαίσιο διευκολύνει (α) το μετασχηματισμό μέρους της υπονοούμενης σε σαφή γνώση και (β) τη δημιουργία/ εμπλουτισμό μίας Βάσης Γνώσης για να υποστηρίξει/βελτιώσει την ανθρώπινη εμπειρία και να δώσει την απαραίτητη πληροφορία για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένα στάδια, που αποτελούν τον πυρήνα του μεθοδολογικού πλαισίου.

Επιπλέον, ο συνδυασμός ορισμένων σταδίων της παρουσιαζόμενης αλγοριθμικής διαδικασίας μπορεί να συμβάλει στο σχεδιασμό σύνθετων στιβάδων παθητικοποίησης του μητρικού μετάλλου, με ομοιόμορφη κατανομή χαρακτηριστικών, τα οποία μπορούν εύκολα να μετρηθούν άμεσα ή έμμεσα. Με νέα πειραματικά δεδομένα, έχουμε δείξει την εξάρτηση της πυκνότητας ρεύματος I από το χρόνο ανοδίωσης t , σύμφωνα με ένα νέο υπόδειγμα της μορφής $I = g/t + I_{\infty}[1 - \exp(-kt)]$, το οποίο έχει προκύψει με τη σύνθεση δύο απλών υποδειγμάτων, ενός υπερβολικού και ενός εκθετικού (οι τιμές των παραμέτρων g , k έχουν εκτιμηθεί με μη γραμμική παλινδρόμηση σε πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν σε

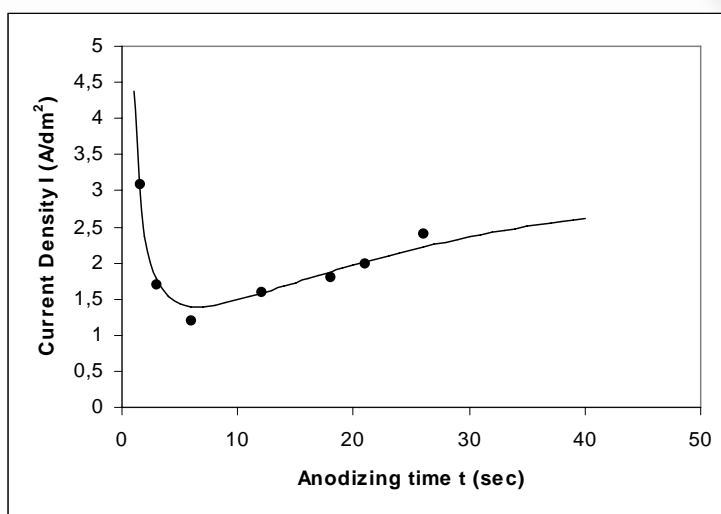
χρονικό διάστημα μικρότερο των 30 sec από την έναρξη της ανοδίωσης). Αρχικά, παρατηρείται απότομη μείωση της I , ως αποτέλεσμα της δημιουργίας της συμπαγούς στιβάδας που αντιστοιχεί στη στιβάδα ‘φυσικής’ παθητικοποίησης, η οποία όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση παράγεται τεχνητά. Στη συνέχεια η I διέρχεται από μια ελάχιστη τιμή, η οποία υπολογίζεται προσεγγιστικά (με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης) από την εξίσωση $dI/dt = 0$ ή $-g/t_{\min}^2 + I_{\infty} k \exp(-kt_{\min}) = 0$ ενώ οι εκτιμηθείσες τιμές των παραμέτρων g , k επιβεβαιώνουν την ισχύ της συνθήκης δευτέρας τάξεως $[d^2I/dt^2]_{\min} > 0$ ή $2g/t_{\min}^3 - I_{\infty} k^2 \exp(-kt_{\min}) > 0$, και μετά αυξάνεται με φθίνοντα ρυθμό ($dI/dt > 0$, $d^2I/dt^2 < 0$) συγκλίνουσα ασυμπτωτικά προς την πειραματικά προσδιοριζόμενη τιμή της I_{∞} , η οποία όμως θα μπορούσε να προσδιοριστεί και δια μέσου της μη-γραμμικής παλινδρόμησης δίνοντας μάλιστα μικρότερο τυποποιημένο σφάλμα της εκτίμησης. Στην περιοχή πριν το ελάχιστο, υπερισχύει το υπερβολικό υπόδειγμα, στην περιοχή όμως μετά από αυτό υπερισχύει το εκθετικό υπόδειγμα ενώ η περιοχή σύγκλισης προς την ασυμπτωτική τιμή της I_{∞} αντιπροσωπεύει την επικράτηση συνθηκών σταθεροποιημένης κατάστασης, αποτέλεσμα της οποίας είναι η παραγωγή του ‘τεχνητού’ πορώδους στρώματος, σύμφωνα με τις επιθυμητές τεχνικές προδιαγραφές. Κατά συνέπεια, το συγκεκριμένο σύνθετο κινητικό υπόδειγμα απεικονίζει τη μεταβατική κατάσταση από μια ‘φυσικού-τύπου’ σε μια ‘τεχνητού-τύπου’ παθητικοποίηση που έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ομοιόμορφου στρώματος (βλ. Σχήμα I.2 στο Παράρτημα I) μεγάλου πάχους, με βελτιωμένες αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Αν οι προδιαγραφές απαιτούν ‘φυσικού-τύπου’ παθητικοποίηση σε ολόκληρο το πάχος L , τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρολύτης χωρίς διαλυτική δράση. Σημειώνεται ότι ενώ το πάχος L αυξάνει, η πιθανότητα διάρρηξης του στρώματος αυξάνεται, όπως αποδεικνύεται από τη θερμοδυναμική ανάλυση που περιλαμβάνεται στο Παράρτημα II, όπου παρουσιάζεται ένα γενικευμένο υπόδειγμα της εξάρτησης της ασκούμενης πίεσης p στο στρώμα από το πάχος L (τα αναφερόμενα στη βιβλιογραφία απλούστερα υποδείγματα προκύπτουν ως μερικές περιπτώσεις του παρουσιαζόμενου εδώ γενικευμένου υποδείγματος). Αυτό σημαίνει ότι, μιμούμενοι τη Φύση, μπορούμε να βελτιώσουμε ορισμένες ιδιότητες των υλικών μέχρι κάποιο βαθμό, μετά τον οποίον όμως πρέπει να πληρώσουμε ένα τμήμα, αναλαμβάνοντας ένα διαρκώς αυξανόμενο κίνδυνο κατάρρευσης ολόκληρης της δομής που έχουμε δημιουργήσει τεχνητά.

Βιβλιογραφία

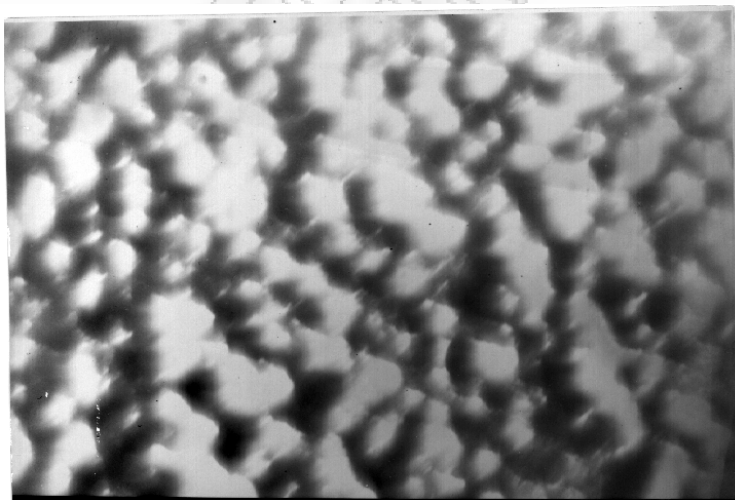
- [1] Batzias A.F., Batzias F.A. (2002). Computer Aided Neuro-Fuzzy Control in Anodizing of Aluminium. *Computer-Aided Chem. Engineering*, 10, pp. 433-438.

- [2] Hidetaka A., Sachiko O., Tomohito H., Masashi N., Hideki M. (2003). Growth of Anodic Porous Alumina with Square Cells. *Electrochimica Acta*, 48(2-22), pp. 3171-3174.
- [3] Hales T.C. (2001). The Honeycomb Conjecture. *Disc. Comp. Geom.* 25, pp. 1-22.
- [4] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Computational and Experimental Process Control by Combining Neurofuzzy Approximation with Multicriteria Optimization, *Proc. 11th Intern. Conf. on Comput. Methods and Experimental Measurements* by C.A. Brebbia, et al (Eds.), WIT Press, pp. 107-118.
- [5] Keller F., Hunter M.S., Robinson D.L. (1953). Structural Features of Oxide Coatings on Aluminium. *J. Electrochem. Soc.*, 100, pp. 411-419.
- [6] Franklin R.W., Stirland D.J. (1963). Studies on the Structure of Anodic Oxide Films on Aluminium, II. *J. Electrochem. Soc.*, 110(4), pp. 262-267.
- [7] Paolini G., Masoero M., Sacchi F., Paganelli M. (1965). An Investigation of Porous Anodic Oxide Films on Aluminium by Comparative Adsorption, Gravimetric and Electronoptical Measurements. *J. Electrochem. Soc.*, 112(1), pp. 32-38.
- [8] Batzias F.A., Marcoulaki E.C. (2002). Restructuring the Keywords Interface to Enhance Computer Aided Process Engineering Knowledge Acquisition via an Intelligent Agent. *Computer-Aided Chem. Engineering*, 10, pp.829-834.
- [9] Jessensky O., Muller F., Gosele U. (1998). Shelf-Organized Formation of Hexagonal Pore Arrays in Anodic Alumina. *Applied Physics Letters*, 72(10), pp. 1173-1175.
- [10] Sato N. (1971). A Theory for Breakdown of Anodic Oxide Films on Metals. *Electrochimica Acta*, 16, pp. 1683-1692.
- [11] Hill T.L., *An introduction to Statistical Thermodynamics*, Addison Wesley: London, p. 201, 1960.
- [12] Hoepfner D.W., Chandrasekaran V. (1998). Corrosion and Corrosion Fatigue Predictive Modelling – State of the Art Review, (Research Program “Modelling Corrosion Growth on Aircraft Structure” USAF) FASIDE Intern. Inc. Salt Lake City UT, p.35.
- [13] Batzias A.F., Batis G. (2004). Imitating Nature in Building Up Thermodynamically Stable Layers on Metals for Protection Against Corrosion, *Proc. 2nd Intern. Conf. on Design and Nature 2004*, WIT Press, forthcoming.
- [14] Batzias A.F., Batis G. (2005). Initiation/Propagation/Control of Cracking on Anodized Aluminium and Electroplated Steel. *Trans. Eng. Sci.*, 4, pp. 416-425.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι



Σχήμα Ι.1. Εξάρτηση της πυκνότητας του ρεύματος I από το χρόνο της ανοδίσωσης t , στην περιοχή μετάβασης (transition) από τη φυσική στην τεχνητή παθητικοποίηση. Εκτιμηθείσες τιμές παραμέτρων: $a = 4.243$, $k = 0.04181$ (τυπικές αποκλίσεις 0.1845, 0.002618, αντίστοιχα), $R^2 = 0.9490$, τυπικό σφάλμα = 0.1348. Η τιμή του $I_{\infty} = 3.10 \text{ A/dm}^2$, προσδιορίστηκε πειραματικά.



Σχήμα Ι.2. Αποτύπωμα της εξωτερικής επιφάνειας στιβάδας (με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – SEM) μεγάλου πάχους βασισμένης σε υπόβαθρο λεπτής φυσικής στιβάδας που δημιουργήθηκε στη μητρική επιφάνεια του αλουμινίου (έκτυπο από άνθρακα με σκίαση μεταλλικού χρυσού σε υψηλό κενό). Συνθήκες ανοδίσωσης: 15,2 V, 3,1 A/dm², 5600 Cb/dm², ηλεκτρολύτης υδατικό διάλυμα H₂SO₄ 15%, 20°C.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Με την υπέρβαση των φυσικών ορίων (300 – 500 Å), όσον αφορά στο μέγιστο πάχος της παθητικής στιβάδας του ανοδιωμένου αλουμινίου, παρατηρείται αύξηση της αντίστασης του μητρικού μετάλλου στη διάβρωση. Εντούτοις, ο ρυθμός της αύξησης αυτής μειώνεται όταν το πάχος αυξάνεται με ενδεχόμενο επακόλουθο τη θραύση της μεταλλικής στιβάδας σε πολύ υψηλό πάχος. Η ποσοτικοποίηση του φαινομένου αυτού μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια της παρακάτω θερμοδυναμικής εξίσωσης [10, 11].

$$dU' = TdS - p'dV - PVdE + \mu dN - Ad\gamma \quad (1)$$

$$\text{όπου } U' = U + 2\pi P^2 V - \gamma A \quad (2), \quad p' = p - 2\pi P^2 \quad (3)$$

U = εσωτερική ενέργεια

S = εντροπία

P = πόλωση της στιβάδας

P = πίεση της στιβάδας

V = όγκος της στιβάδας

E = ένταση ηλεκτρικού πεδίου

γ = επιφανειακή τάση της στιβάδας

μ = χημικό δυναμικό

A = επιφάνεια της στιβάδας

N = αριθμός μορίων στη στιβάδα

Λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορική μορφή της εξίσωσης Gibbs

$$G' = U' - TS + p'V = \mu N - \gamma A = \hat{\mu} N \quad (4)$$

η (1) γράφεται ως εξής:

$$dp' = (S/V)dT + PdE + (A/V)d\gamma + \rho d\hat{\mu} + (\hat{\mu} - \mu)dN/V \quad (5)$$

όπου $\hat{\mu}$ είναι το ολοκληρωμένο χημικό δυναμικό στη στιβάδα και ρ η πυκνότητα των αριθμών των μορίων στη στιβάδα, $\rho = N/V$.

Για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης, χρησιμοποιούμε την εμπειρική εξίσωση

$$P = bE^\alpha \quad (6)$$

και τις παραδοχές που αναφέρονται στη [2], ώστε να προκύψει η ολοκληρωμένη μορφή

$$p' = p'_o + bE^{\alpha+1}/(\alpha+1) - \gamma/L \quad (7)$$

όπου p'_o η σταθερά της ολοκλήρωσης και L το πάχος της στιβάδας $L = V/A$.

Με συνδυασμό των (3) και (6) λαμβάνουμε

$$p = p' + 2\pi(bE^\alpha)^2 \quad (8)$$

Με συνδυασμό των (7) και (8) λαμβάνουμε

$$p = p'_o + 2\pi(bE^\alpha)^2 + bE^{\alpha+1}/(\alpha+1) - \gamma/L \quad (9)$$

Για $\alpha=1$, η εξίσωση (9) ανάγεται στο υπόδειγμα

$$p = p'_o + bE^2(1 + 4\pi b)/2 - \gamma/L \quad (10)$$

όπου $b = (\varepsilon - 1)/(4\pi)$ είναι η ηλεκτρική χωρητικότητα και ε η διηλεκτρική σταθερά. Το απλοποιημένο υπόδειγμα έχει χρησιμοποιηθεί για πρόγνωση [12], παρόλο ότι η εξαγωγή του βασίζεται στη χονδρική προσέγγιση $P = (\varepsilon - 1)E/(4\pi)$, η οποία είναι μία ειδική περίπτωση της (4). Σε αμφότερα τα υποδείγματα, το γενικευμένο (9) και το απλοποιημένο (10), οι όροι που περιλαμβάνουν το E αντιπροσωπεύουν την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου ενώ οι τελευταίοι όροι αντιπροσωπεύουν την επίδραση της διεπιφανειακής τάσης και του πάχους της στιβάδας. Επομένως, χρησιμοποιώντας μία τεχνητή παραλλαγή της φυσικής παθητικοποίησης, μπορούμε να αυξήσουμε το πάχος της στιβάδας L προκειμένου να αυξήσουμε την αντίσταση στη γενική διάβρωση, συγχρόνως όμως αυξάνεται και η πίεση της στιβάδας p με αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης στην τοπική διάβρωση λόγω αύξησης της πιθανότητας θραύσης του ανοδικού οξειδίου σε περιοχές όπου οι αταξίες της δομής εμφανίζουν υψηλή συγκέντρωση.

8 Ανάπτυξη πληροφοριακού συστήματος τεχνικής υποστήριξης επιμεταλλωτών/ανοδιωτών

8.1 Εισαγωγή

Η επιμετάλλωση είναι μία φυσικοχημική διεργασία που χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανικής κλίμακας παραγωγή διακοσμητικών και προστατευτικών επιφανειακών στρωμάτων σε μεταλλικά αντικείμενα, που είναι κατασκευασμένα συνήθως από χάλυβα. Η μεγάλη πλειονότητα των βιομηχανικών/βιοτεχνικών μονάδων που έχουν ως αντικείμενο τη διεργασία αυτή αποτελείται από μικρομεσαίες επιχειρήσεις (ΜΜΕ) ηλεκτροχημικής επιμετάλλωσης. Η ηλεκτροχημική αντίδραση δίνει, από τη φύση της, αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας σε εργαστηριακή κλίμακα, αλλά καθώς η βιομηχανική επιμετάλλωση λαμβάνει χώρα σε μεγάλες δεξαμενές, όπου πολλά αντικείμενα επιμεταλλώνονται στον ίδιο χρόνο, δημιουργείται ένα ετερογενές ηλεκτρολυτικό πεδίο και μπορεί να προκύψουν διάφορα ελαττώματα στα επεξεργαζόμενα αντικείμενα. Κάποια από αυτά τα ελαττώματα δεν παρατηρούνται άμεσα, αλλά είναι δυνατό να επηρεάσουν τη λειτουργία του συγκεκριμένου αντικειμένου κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Οι περισσότερες ΜΜΕ δεν έχουν το σωστό εξοπλισμό ούτε την απαιτούμενη τεχνική/επιστημονική γνώση σε έλεγχο ποιότητας προχωρημένου επιπέδου, ώστε (α) να διαγνώσουν/ταυτοποιήσουν/θεραπεύσουν ένα σημαντικό αριθμό ελαττωμάτων, (β) να βελτιώσουν τις συνθήκες παραγωγής και (γ) να εγκαταστήσουν/συντηρήσουν μία Διαγνωστική Βάση Γνώσης (Diagnostic Knowledge Base - DKB), που θα διευκολύνει τη μετάδοση/προσαρμογή τεχνογνωσίας. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν τμήματα επιμετάλλωσης που λειτουργούν σε μεγάλες εταιρίες, που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με την εθνική άμυνα μιας χώρας (υπάρχουν δύο τέτοιες εταιρίες στην Ελλάδα). Αυτά τα τμήματα δεν ανταγωνίζονται τις ΜΜΕ, γιατί η παραγωγή τους εξυπηρετεί τον κύριο σκοπό της επιχείρησης που ανήκουν. Αυτά τα τμήματα, επίσης (α) ακολουθούν διεθνώς αναγνωρισμένα αυστηρά πρότυπα ποιότητας, (β) προσλαμβάνουν προσωπικό με περισσότερες γνώσεις και (γ) έχουν καλύτερα εξοπλισμένα εργαστήρια ποιοτικού ελέγχου. Παρόλα αυτά, ένα μεγάλο ποσοστό γνώσης παραμένει σιωπηρό ή διασκορπισμένο σε χιλιάδες εσωτερικές εκθέσεις ρουτίνας, χωρίς ενιαία/τυποποιημένη/αποθηκεύσιμη/ανακτήσιμη/αξιοποιήσιμη μορφή, που επιπλέον βρίσκονται δύσκολα.

Στο παρόν Κεφάλαιο αναπτύσσεται μία μεθοδολογία για τη δημιουργία/συντήρηση μίας DKB για επιμετάλλωση/ανοδίωση, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για (α) διαχείριση γνώσης στο αντίστοιχο τμήμα μίας μεγάλης επιχείρησης (ΕΜΕ) και (β) μεταφορά τεχνολογίας σε μία ΜΜΕ, υπό μορφή τακτικής συμβουλευτικής δράσης, με τη βοήθεια ενός πληροφοριακού συστήματος που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο [1,2].

8.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που υιοθετούμε εδώ βασίζεται κυρίως στην ασαφή λογική που εμπεριέχεται μέσα σε ένα δένδρο ανάλυσης σφαλμάτων (Fault Tree Analysis – FTA) και στην ασαφή πολυκριτήρια ανάλυση (Fuzzy Multicriteria Analysis – FMCA), ώστε να λάβουμε υπόψη την αβεβαιότητα, και περιέχει τα ακόλουθα στάδια (βλ. Σχήμα 8.1 για τη σύνδεσή τους).

1. Παρατήρηση ελαττώματος σε αντικείμενα που παράγονται από τη ΜΜΕ.
2. Έλεγχος των συνθηκών παραγωγής.
3. Διορθωτική δράση.
4. Λεπτομερής περιγραφή του ελαττώματος σε μία εσωτερική αναφορά (internal report).
5. Προκαταρκτική ταυτοποίηση του ελαττώματος μέσα από τη ΔΚΒ.
6. Καταγραφή σε αρχείο των συνθηκών παραγωγής, σε σχέση με την παρτίδα στην οποία παρατηρήθηκε το αντικείμενο με το ελάττωμα.
7. Κωδικοποίηση του μηνύματος σύμφωνα με το πρωτόκολλο MF1 (μεταβλητές/συνθήκες/έγγραφα (φωτογραφίες, διαγράμματα) συντασσόμενα υπό αυστηρές προδιαγραφές)· αυτή η μορφή μηνύματος είναι υποχρεωτική στην απάντηση/θεραπεία – πρόταση που στέλνεται από το σύμβουλο/υποστηρικτή ΕΜΕ στην υποστηριζόμενη ΜΜΕ.
8. Κωδικοποίηση του μηνύματος σύμφωνα με το πρωτόκολλο MF2 (μορφοποίηση μηνύματος που να επιτρέπει την περιγραφή του προβλήματος με αφηγηματικό τρόπο (συνοδευόμενη με την απαραίτητη τεκμηρίωση), γιατί μία αυστηρά προδιαγραφόμενη φόρμα δεν μπορεί να εφαρμόσει στη συγκεκριμένη κατάσταση).
9. Κωδικοποίηση του μηνύματος σύμφωνα με το πρωτόκολλο MF3 (μορφοποίηση μηνύματος που απλώς συνοδεύει ελαττωματικά αντικείμενα ή οδηγούς δειγμάτων (που μπαίνουν σε προεπιλεγμένες θέσεις στο λουτρό της ηλεκτρόλυσης) όταν φεύγουν για το σύμβουλο ΕΜΕ).
10. Ηλεκτρονική μετάδοση του μηνύματος στην ΕΜΕ, σύμφωνα με τα εγκαταστημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας.
11. Συμβατική αποστολή του μηνύματος στην ΕΜΕ (περιλαμβάνεται το ελαττωματικό αντικείμενο, ή μέρος αυτού ή αντιπροσωπευτικό δείγμα του ελαττωματικού υλικού).
12. Μετρήσεις στο Εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας σύμφωνα με τα υιοθετημένα πρότυπα και τις συνιστώμενες πρακτικές.
13. Αποκωδικοποίηση του παραλαμβανόμενου μηνύματος και εάν είναι απαραίτητο, ερμηνεία αυτού (για ορισμό συμφραζόμενου νοήματος όταν χρησιμοποιείται η περιγραφή σε μητρική γλώσσα για συμπληρωματική πληροφορία).
14. Βοηθούμενη από Η/Υ τελική ταυτοποίηση του ελαττώματος.
15. Αυτόματος εντοπισμός του αντίστοιχου δένδρου σφαλμάτων όταν το ταυτοποιημένο ελάττωμα είναι το αναλυόμενο σφάλμα.

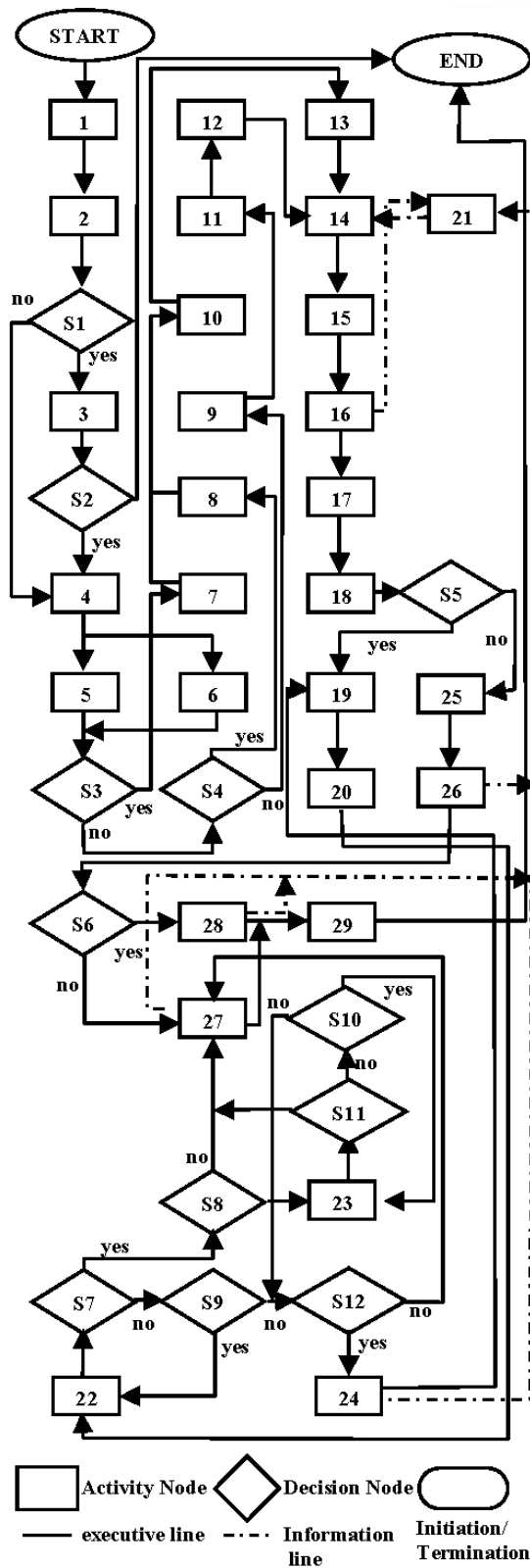
16. Υπολογισμός των Ασαφών Δεικτών Σημαντικότητας (Fuzzy Significant Indices – FSIs) που χρησιμοποιούνται ως υποκειμενικό μέτρο της έντασης μίας αιτιώδους σχέσης από ειδικούς που παίρνουν μέρος σε πρόγραμμα Delphi τριών σταδίων [3].
17. Εκτέλεση του προγράμματος fuzzy FTA με καθορισμό συναινετικών FSIs των εμπειρογνομόνων (consensus).
18. Φιλτράρισμα των προτεινόμενων τελικών αιτιών για τη διαμόρφωση του αρχικού συνόλου των εναλλακτικών λύσεων που θα χρησιμοποιηθεί ως είσοδος (input) για την εκτέλεση του προγράμματος FMCA.
19. Προσδιορισμός των ασαφών εκτιμητών στα στοιχεία (α) του ανύσματος των βαρών και (β) της πολυκριτηριακής μήτρας προτίμησης που αντιστοιχεί στις εναλλακτικές τελικές αιτίες, ακολουθώντας τη μέθοδο Delphi, όπως αναφέρεται στο στάδιο 16 και ελέγχοντας τη συνέπεια των αβέβαιων ανθρώπινων προτιμήσεων, με έναν κατάλληλο δείκτη, σύμφωνα με το [4].
20. Εκτέλεση του προγράμματος fuzzy MCA (τροποποίηση των PROMETHEE I & II) για είσοδο που αντιστοιχεί στη συναινετική γνώμη (υπό μορφή βαθμολογίας) των experts, κατάταξη σε σειρά των ασαφών εναλλακτικών λύσεων, ώστε να σχηματιστεί η μερική και η ολική διάταξη (PROMETHEE I & II, αντίστοιχα, [5], [6]).
21. Δημιουργία/εμπλουτισμός της DKB η οποία λαμβάνει πληροφορία εσωτερικά (βλ. Σχήμα 8.1) και εξωτερικά μέσω intelligent agents [7].
22. Πειραματική δοκιμή της προτεινόμενης εναλλακτική λύσης σαν κυρίαρχη τελική αιτία.
23. Πειραματική δοκιμή επιβεβαίωσης της προτεινόμενης θεραπείας.
24. Ενημέρωση των FSIs για προετοιμασία του συστήματος να επανεκτελέσει το λογισμικό FMCA.
25. Κατάταξη σε σειρά των εναλλακτικών τελικών αιτιών σε ασαφή μορφή.
26. Ανάλυση ευαισθησίας για την εύρεση των συνθηκών κάτω από τις οποίες η δεύτερη καλύτερη εναλλακτική λύση θα μπορούσε να έρθει πρώτη.
27. Υπόδειξη διορθωτικής λύσης (χωρίς προϋποθέσεις) προς το τμήμα παραγωγής.
28. Υπόδειξη διορθωτικής λύσης για τις συνθήκες που βρέθηκαν στο στάδιο 26 προς το τμήμα παραγωγής.
29. Κωδικοποίηση του απαντητικού μηνύματος (feedback) σύμφωνα με το πρωτόκολλο MF1, και ηλεκτρονική μετάδοση στη MME.
- S1. Είναι η τιμή κάποιας παραμέτρου ή μεταβλητής ελέγχου ή συνδυασμός αυτών έξω από το συνιστώμενο διάστημα ή συνδυασμό διαστημάτων;
- S2. Υπάρχει κάποιο ελαττωματικό αντικείμενο στην καινούργια παρτίδα;
- S3. Έχει ολοκληρωθεί η προκαταρκτική ταυτοποίηση;
- S4. Περιγράφεται το ταυτοποιημένο ελάττωμα με τις προδιαγραφές που απαιτούνται από τους όρους του MF2;
- S5. Υπάρχει διαθέσιμος χρόνος και μέσα/πόροι για τη δοκιμή (test);
- S6. Είναι η προτεινόμενη λύση ευαίσθητη;

- S7. Επιβεβαιώνει η δοκιμή (test) την προτεινόμενη εναλλακτική λύση;
- S8. Είναι εφικτό η δοκιμή (test) της προτεινόμενης θεραπείας;
- S9. Υπάρχει κάποιο άλλη πειραματική δοκιμή (test);
- S10. Υπάρχει κάποια άλλη υποδεικνυόμενη θεραπεία;
- S11. Έχει επιτευχθεί η επιθυμητή διόρθωση;
- S12. Υπάρχουν τουλάχιστον ακόμα δύο εναλλακτικές λύσεις που δεν έχουν εξετασθεί;

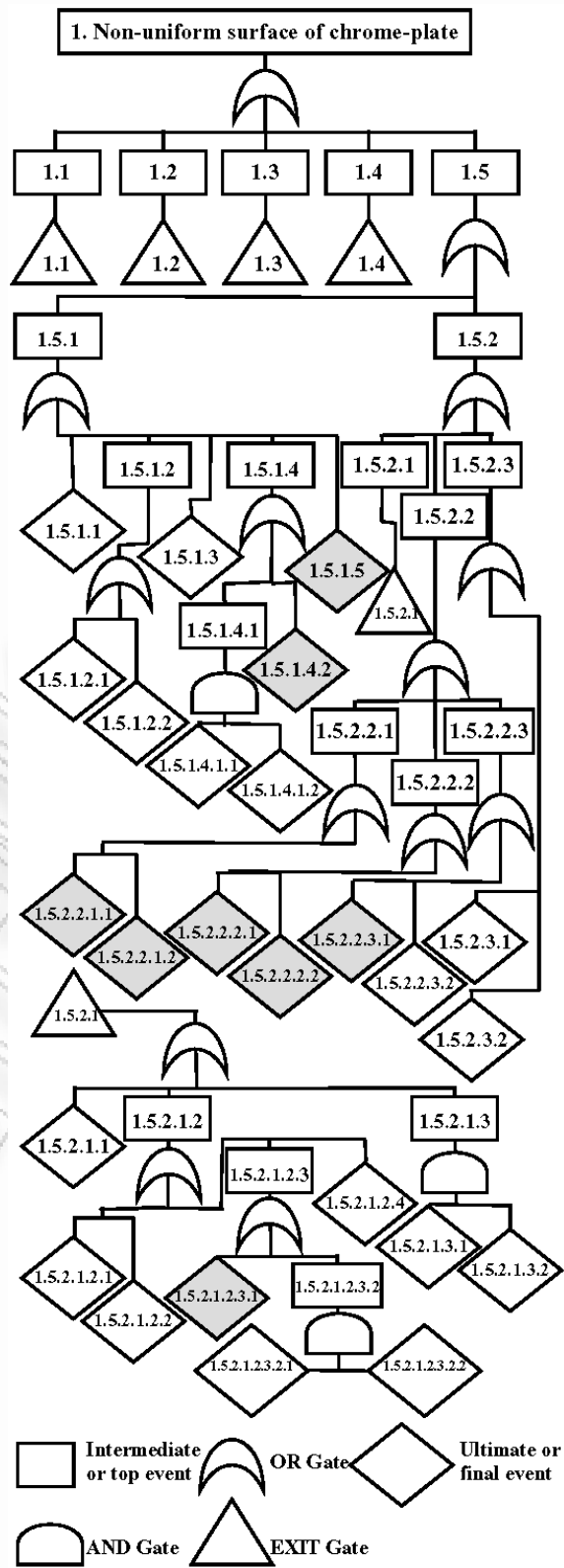
Κάθε γεγονός στο δένδρο σφαλμάτων έχει μία σχετική συχνότητα που λαμβάνεται υπόψη από τους εμπειρογνώμονες κατά την παραγωγή/αναθεώρηση των FSIs, που παίρνουν μέρος στους υπολογισμούς ως τριγωνικοί (L-R) ασαφείς αριθμοί, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα. Η αναθεώρηση των FSIs επιτυγχάνεται (α) μειώνοντας το FSI του εξεταζόμενου τελικού αιτίου (εάν το συγκεκριμένο τελικό αίτιο δεν έχει επιβεβαιωθεί) κατά ένα κλάσμα που ορίζεται από τους εμπειρογνώμονες και (β) αυξάνοντας τα FSIs των υπολοίπων τελικών αιτίων κατά μία ισοδύναμη ποσότητα. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση της επιβεβαίωσης, όπου οι σχετικές συχνότητες επίσης αλλάζουν, ώστε να απεικονίζουν την νέα πραγματικότητα. Αυτές οι αλλαγές διαδίδονται σε ολόκληρο το δένδρο, κάθε φορά που λαμβάνουν χώρα. Οι λογικές πύλες που χρησιμοποιούνται είναι μόνο η αποκλειστική διάζευξη Ή (exclusive OR) και το συνδυαστικό ΚΑΙ (AND), καθώς η πύλη ΟΧΙ (NOT) μπορεί να επιφέρει ασυνέπεια στο σύστημα [8]. Αυτός ο περιορισμός διευκολύνει την εφαρμογή μεθόδων δυαδικών διαγραμμάτων απόφασης για να εκτιμηθούν τιμές μεταβλητών επαναλαμβανόμενων εξισώσεων σύμφωνα με το [9] στην περίπτωση των αλληλεπιδρούντων κόμβων. Η πύλη OR είναι αποκλειστική διάζευξη γιατί μόνο ένα φύλλο του δένδρου σφαλμάτων (που αντιπροσωπεύεται με ρόμβο) μπορεί να θεωρηθεί σαν τελική αιτία για κάποιο ελάττωμα στον ίδιο χρόνο, στην ελεγχόμενη παραγωγή κάτω από πρότυπες συνθήκες.

8.3 Εφαρμογή σε μονάδες ηλεκτροχημικής επιμετάλλωσης

Η μεθοδολογία που περιγράφεται παραπάνω έχει υλοποιηθεί επιτυχώς σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης βασισμένο σε δεδομένα/πληροφορίες/περιπτώσεις και συνιστώμενες πρακτικές που δόθηκαν από ελληνικές βιομηχανικές επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στον εξεταζόμενο υποκλάδο. Δύο βάσεις προτύπων ποιότητας χρησιμοποιήθηκαν επίσης: ISO και ASTM (συμπληρωμένη με στρατιωτικά πρότυπα όπου ήταν απαραίτητο, όπως υποδεικνύεται από την ASTM) για να στηθεί ένα ενιαίο/αποδεκτό υπόβαθρο εννοιών/σχέσεων και μία ελεγχόμενη ορολογία (δηλ. μία οντολογία) και να προαχθεί η ιχνηλασιμότητα (traceability), με την έννοια που αναφέρεται στη σειρά ISO 9000.



Σχήμα 8.1. Διάγραμμα ροής διαδικασιών (περιλαμβανομένων των κόμβων λήψης απόφασης) που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου συμβουλευτικής δράσης.



Σχήμα 8.2. Ανάλυση δένδρου σφαλμάτων, όταν το γεγονός κορυφής (top event) είναι “Ανομοιογενής εμφάνιση επιφάνειας του στρώματος χρωμίου”. Οι σκιασμένοι ρόμβοι είναι το σύνολο των τελικών αιτιών που αποτελούν τα εισαγόμενα στοιχεία (input) στο υποπρόγραμμα FMCA (στάδια 16-20).

Επίσης αποδεικνύεται ότι το βάθος του δένδρου σφαλμάτων εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από τη δήλωση/σημασία του αναλυόμενου σφάλματος, δικαιολογώντας έτσι την ανάγκη εγκατάστασης μιας οντολογίας μέσα στη DKB, που μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για εκπαίδευση του προσωπικού που ανήκει σε διαφορετικά επίπεδα τεχνολογικής κατάρτισης και επίπεδα ιεραρχίας τόσο στην EME όσο και στη MME [10].

Ένα παράδειγμα περίπτωσης FTA παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.2 όπου το αναλυόμενο σφάλμα είναι “Ανομοιογενής εμφάνιση επιφάνειας του στρώματος χρωμίου”. Τα ενδιάμεσα/τελικά αίτια που αναφέρονται με έναν κωδικό αριθμό, δηλώνοντας τη θέση τους στη δομή του δένδρου, είναι τα ακόλουθα:

- 1.1 Κατεργασία του υποστρώματος / κράματος
- 1.2 Διαμόρφωση του προς επιμετάλλωση αντικειμένου
- 1.3 Επιχάλκωση
- 1.4 Επινικέλωση
- 1.5 Επιχρωμίωση
 - 1.5.1 Μη σταθερή παροχή ηλεκτρικού ρεύματος
 - 1.5.2 Ανομοιόμορφο πάχος ανοδικού στρώματος
 - 1.5.1.1 Πρόβλημα στη κυρίως παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος
 - 1.5.1.2 Πρόβλημα στην ανόρθωση του ηλεκτρικού ρεύματος
 - 1.5.1.3 Μικρές διατομές των αγωγών και των στελεχών που φέρουν τα προς ανοδίωση αντικείμενα
 - 1.5.1.4 Απώλεια ηλεκτρικής επαφής
 - 1.5.1.5 Διάβρωση της ανόδου
 - 1.5.2.1 Ανομοιόμορφη κατανομή ηλεκτρολυτικού πεδίου
 - 1.5.2.2 Ανομοιογένεια ηλεκτρολυτικού λουτρού
 - 1.5.2.3 Ανομοιογένεια στο στερεό σώμα του προς ανοδίωση αντικειμένου
 - 1.5.1.2.1 Υψηλή διακύμανση ηλεκτρική τάσης
 - 1.5.1.2.2 Θέση εκτός λειτουργίας μίας φάσης του τριφασικού
 - 1.5.1.4.1 Χαλαρή μηχανική επαφή
 - 1.5.1.4.2 Οξειδωση του σημείου ηλεκτρικής επαφής με το αντικείμενο
 - 1.5.2.1.1 Πολύ μεγάλο εμβαδό ανόδου
 - 1.5.2.1.2 Λανθασμένη τοποθέτηση των αντικειμένων στη δεξαμενή
 - 1.5.2.1.3 Υψηλή ηλεκτρική αντίσταση στα σημεία επαφής με τα ηλεκτρόδια
 - 1.5.2.2.1 Ανομοιόμορφη κατανομή συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη
 - 1.5.2.2.2 Ανομοιόμορφη κατανομή συγκέντρωσης χημικών πρόσθετων
 - 1.5.2.2.3 Ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας

- 1.5.2.3.1 Ανεπαρκής έκπλυση
- 1.5.2.3.2 Αποτυπώματα χεριών και υπολείμματα ρύπων πριν την επιμετάλλωση
- 1.5.1.4.1.1 Μη σταθερή επαφή από την αρχή της διεργασίας
- 1.5.1.4.1.2 Ισχυρή ανάδευση πλησίον του αντικειμένου
- 1.5.2.1.2.1 Τα αντικείμενα πολύ κοντά στα ηλεκτρόδια
- 1.5.2.1.2.2 Τα αντικείμενα πολύ κοντά στη διεπιφάνεια υγρού/αέρα
- 1.5.2.1.2.3 Οι κρίσιμες επιφάνειες των κρεμασμένων αντικειμένων δεν αντικρίζουν ορθά τις ανόδους
- 1.5.2.1.2.4 Ανεπαρκής χώρος μεταξύ των αντικειμένων
- 1.5.2.1.3.1 Τοπικές αποθέσεις προϊόντων διάβρωσης
- 1.5.2.1.3.2 Ανεπαρκής ηλεκτρική επαφή
- 1.5.2.2.1.1 Ανεπαρκής ανάδευση
- 1.5.2.2.1.2 Γήρανση λουτρού
- 1.5.2.2.2.1 Ανεπαρκής ανάδευση
- 1.5.2.2.2.2 Μείωση της συγκέντρωσης του λουτρού σε χημικά πρόσθετα
- 1.5.2.2.3.1 Ανεπαρκής ανάδευση
- 1.5.2.2.3.2 Κακός σχεδιασμός / λειτουργία του συστήματος ψύξης
- 1.5.2.1.2.3.1 Λανθασμένη αρχική τοποθέτηση
- 1.5.2.1.2.3.2 Αλλαγή της θέσης των κρίσιμων επιφανειών κατά τη διάρκεια της επιμετάλλωσης
- 1.5.2.1.2.3.2.1 Ισχυρή ανάδευση πλησίον του αντικειμένου
- 1.5.2.1.2.3.2.2 Ανεπαρκής στερέωση κατά το 'κρέμασμα' των αντικειμένων

Οι γκρίζοι ρόμβοι εισέρχονται στο υποπρόγραμμα της FMCA (στάδια 16 - 20) ως εναλλακτικές λύσεις. Οι υπόλοιπες υποψήφιες για εξέταση εναλλακτικές λύσεις έχουν αποκλειστεί με τη βοήθεια ενός απλού έμπειρου συστήματος που βασίζεται (α) στη γνώση που λαμβάνεται από σταθμούς ποιοτικού ελέγχου που λειτουργούν στο τέλος κάθε ανάντη κύριας διεργασίας (κατεργασία μεταλλικού υποστρώματος, διαμόρφωση του αντικειμένου, ηλεκτροχημική επιχάλκωση/επινικέλωση), (β) στις μη συναποδεκτές ενδιάμεσες ή τελικές αιτίες που ευρίσκονται κάτω από μια πύλη AND και (γ) στις εύκολες προς απάντηση ερωτήσεις για τις συνθήκες ή τα συμπτώματα που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της παραγωγής του ελαττωματικού αντικειμένου. Για παράδειγμα, μία αρνητική απάντηση που δίνεται από το χειριστή (με οπτική παρατήρηση ή παρακολουθώντας συγκεκριμένα όργανα παρακολούθησης/ελέγχου ή κάνοντας δοκιμές in situ) στις ακόλουθες απλές ερωτήσεις, εξαιρεί τα αίτια 1.5.1.1 και 1.5.2.3.1/2: Υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην κύρια γραμμή παροχής εναλλασσόμενου ρεύματος; Είναι το ξέπλυμα/καθάρισμα (πριν την επιχρωμίωση) ανεπαρκές;

Τα εξεταζόμενα μέσω FMCA τελικά αίτια συμβολίζονται ως εξής: A_1 για το 1.5.1.5, A_2 για το 1.5.1.4.2, A_3 για το 1.5.2.1.2.3.1, A_4 για το 1.5.2.2.1.1 (και των επαναλήψεών του 1.5.2.2.2.1 και 1.5.2.2.3.1), A_5 για το 1.5.2.2.1.2 και A_6 για το 1.5.2.2.2.2. Τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια είναι: (1) FSI του τελικού αιτίου, g_1 , (2) διαθεσιμότητα εξοπλισμού, g_2 , (3) αξιοπιστία, βασισμένη στην ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA) των πειραματικών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν κάτω από παρόμοιες συνθήκες επιμετάλλωσης στο παρελθόν, g_3 , (4) κόστος, g_4 , (5) απαιτούμενος χρόνος για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος (testing), g_5 , (6) αναμενόμενη συμβολή στην εξηγησιμότητα, δηλαδή σχέση με την αντίστοιχη επιστημονική Θεωρία, g_6 . Το διάγραμμα των (ασαφών) βαρών των κριτηρίων είναι οι τρεις πρώτες στήλες του Πίνακα 8.1, όπου ο δείκτης m δηλώνει τη μέση τιμή. Οι επόμενες έξι στήλες περιέχουν το μέσο των τριαδικών ασαφών αριθμών που ορίστηκαν στα στοιχεία της πολυκριτήριας μήτρας προτίμησης (το αριστερό και δεξί τους πλάτος φαίνονται στον Πίνακα 8.2, με δείκτες a και b). Οι τελευταίες δύο σειρές περιέχουν τις ιστορικές τοπικές σχετικές συχνότητες F_S , F_E (που τείνουν σε *a posteriori* πιθανότητες για πολύ μεγάλο δείγμα) στην αρχή και το τέλος της διαδικασίας που περιγράφεται εδώ, αντίστοιχα, δηλ. πριν και αφού βρεθεί η αιτία του σφάλματος. Η γενικευμένη συνάρτηση προτίμησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η γραμμική, με δύο παραμέτρους: q για το τέλος της περιοχής αδιαφορίας (χαμηλό όριο) και p για το τέλος της περιοχής γραμμικής αύξησης της προτίμησης (υψηλό όριο). Για την κατάταξη σε σειρά φθίνουσας προτίμησης των ασαφών αποτελεσμάτων της FMCA χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Tseng και Klein που συγκρίνει τα ασαφή σύνολα των εναλλακτικών λύσεων σε ζευγάρια, υπολογίζοντας τα εμβαδά υπεροχής καθενός από αυτά (μερική διάταξη). Στη συνέχεια, η άθροιση των στοιχείων κάθε σειράς (που αντιστοιχούν σε κάθε εναλλακτική λύση) του πίνακα υπεροχής δίνει ένα μέτρο T της υπεροχής της κάθε εναλλακτικής λύσης που οδηγεί σε μία ολική διάταξη. Αυτό το μέτρο της υπεροχής μπορεί να απεικονισθεί με το εμβαδόν ενός κύκλου, όταν οι εναλλακτικές λύσεις αναπαρίστανται στο ίδιο διάγραμμα για κατάταξη με σύγκριση, μία τεχνική που έχουμε υιοθετήσει εδώ.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με την εκτέλεση του υποπρογράμματος FMCA PROMETHEE II, για $q = 1,5$ και $p = 3,0$ δίνουν την ολική κατάταξη $A_1 > A_4 > A_6 > A_3 > A_2 > A_5$, όπου το σύμβολο ' $>$ ' σημαίνει 'καλύτερο από'. Η μερική κατάταξη που λαμβάνεται με την εκτέλεση του υποπρογράμματος FMCA PROMETHEE I, αποκαλύπτει ότι η μη-συγκρισιμότητα δεν παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς εμφανίζεται μόνο μεταξύ των A_3 & A_2 και A_3 & A_5 στις τελευταίες θέσεις της κατάταξης (βλ. Σχήμα 8.3). Επομένως, η προτεινόμενη εναλλακτική που προτιμάται να εξετασθεί είναι εάν το τελικό αίτιο για το

Πίνακας 8.1. Τιμές (i) των σχετικών συχνοτήτων F_S , F_E , στις δύο τελευταίες σειρές, (ii) του ασαφούς διανύσματος των βαρών των κριτηρίων στις τρεις πρώτες στήλες, (iii) των μέσων A_{j_m} των ασαφών τριγωνικών βαθμών a_{ij} της πολυκριτήριας μήτρας προτίμησης.

| | w_m | w_a | w_b | $A1_m$ | $A2_m$ | $A3_m$ | $A4_m$ | $A5_m$ | $A6_m$ |
|---------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| g_1 | 38.8 | 3.2 | 2.4 | 7.5 | 3.1 | 4.9 | 3.1 | 2.5 | 3.0 |
| g_2 | 14.7 | 1.8 | 2.6 | 6.1 | 2.7 | 3.0 | 7.3 | 3.9 | 5.4 |
| g_3 | 12.1 | 2.3 | 1.9 | 5.5 | 3.4 | 2.2 | 7.4 | 2.9 | 6.3 |
| g_4 | 14.2 | 2.1 | 1.4 | 6.2 | 5.6 | 2.5 | 7.0 | 5.8 | 7.5 |
| g_5 | 10.9 | 1.5 | 2.7 | 6.6 | 5.3 | 4.1 | 5.2 | 5.9 | 7.2 |
| g_6 | 9.3 | 1.2 | 4.2 | 7.4 | 2.2 | 3.9 | 2.4 | 5.1 | 4.4 |
| $F_S \cdot 10^{-1}$ | | | | 3.00 | 10.0 | 7.14 | 3.33 | 6.67 | 7.50 |
| $F_E \cdot 10^{-1}$ | | | | 3.00 | 10.0 | 7.14 | 4.00 | 6.00 | 6.75 |

Πίνακας 8.2. Τιμές αριστερού-δεξιού (L-R), επισημαινόμενες με τους δείκτες a-b, αντίστοιχα) πλάτους των ασαφών τριγωνικών βαθμών a_{ij} της πολυκριτήριας μήτρας προτίμησης.

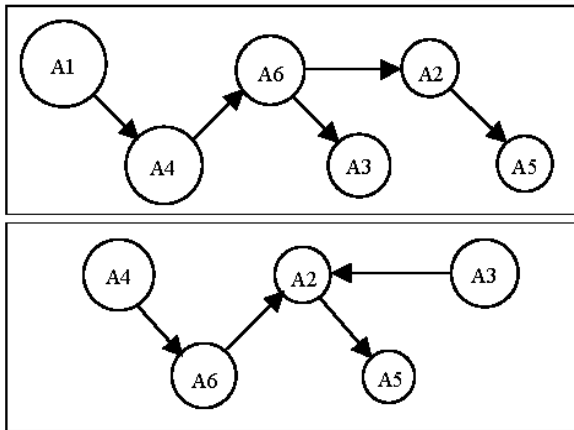
| | $A1_a$ | $A1_b$ | $A2_a$ | $A2_b$ | $A3_a$ | $A3_b$ | $A4_a$ | $A4_b$ | $A5_a$ | $A5_b$ | $A6_a$ | $A6_b$ |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| g_1 | 1.8 | 2.8 | 1.0 | 1.5 | 1.8 | 4.2 | 1.1 | 2.0 | 0.9 | 1.6 | 1.1 | 1.9 |
| g_2 | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 2.0 | 0.9 |
| g_3 | 0.8 | 1.0 | 1.6 | 1.2 | 1.6 | 0.7 | 2.1 | 0.4 | 1.3 | 0.9 | 0.9 | 1.1 |
| g_4 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 0.9 | 1.7 | 0.7 | 0.9 | 0.9 | 1.2 | 0.8 | 1.1 |
| g_5 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 1.3 | 1.2 | 1.8 | 0.7 | 0.5 | 0.8 | 0.4 | 0.7 | 0.5 |
| g_6 | 2.7 | 1.0 | 0.8 | 0.4 | 0.9 | 0.5 | 0.9 | 0.6 | 0.9 | 1.2 | 2.1 | 2.3 |

αναλυόμενο σφάλμα είναι η A_1 , δηλ. ‘διάβρωση των ανόδων’ της δεξαμενής ηλεκτρόλυσης. Σε αυτή την περίπτωση, η τελική επιφάνεια της εναπόθεσης του χρωμίου μπορεί να είναι είτε απλώς ανομοιογενής είτε τοπικά καμένη, λόγω της ασυνήθιστα υψηλής πυκνότητας ρεύματος που λαμβάνεται σε κανονική τάση, λόγω της απουσίας στρώματος υπεροξειδίου στις ανόδους. Οι πειραματικές μετρήσεις, όμως, των επιφανειών των ανόδων έδειξαν ότι το πάχος του στρώματος του οξειδίου ήταν μέσα στις απαιτούμενες προδιαγραφές. Επίσης, το λουτρό της ηλεκτρόλυσης εξετάστηκε για πιθανή μόλυνση με χλωρικά ιόντα και υδροχλωρικό οξύ που είναι δυνατόν να προκαλεί απογύμνωση των ανόδων. Αυτή η εξέταση ήταν απαραίτητη, καθώς ο χρόνος που πέρασε από την επιχρωμίωση της παρτίδας των αντικειμένων μέχρι την εξέταση των ελαττωματικών αντικειμένων ήταν αρκετός για την προοδευτική επανακάλυψη της επιφάνειας της ανόδου με ένα νέο στρώμα οξειδίου. Ωστόσο, η μόλυνση που βρέθηκε ήταν αμελητέα, οπότε η εναλλακτική λύση A_1 αποκλείστηκε (κόμβος απόφασης S7) και επαναλήφθηκαν τα στάδια 16 - 22. Η νέα λύση που προέκυψε, αφού εκτελέστηκε εκ νέου το υποπρόγραμμα FMCA (χωρίς την εναλλακτική πρόταση A_1) PROMETHEE II ήταν $A_4 > A_3 > A_6 > A_2 > A_5$. Έτσι, η προτεινόμενη νέα εναλλακτική λύση για έλεγχο τελικού αιτίου του

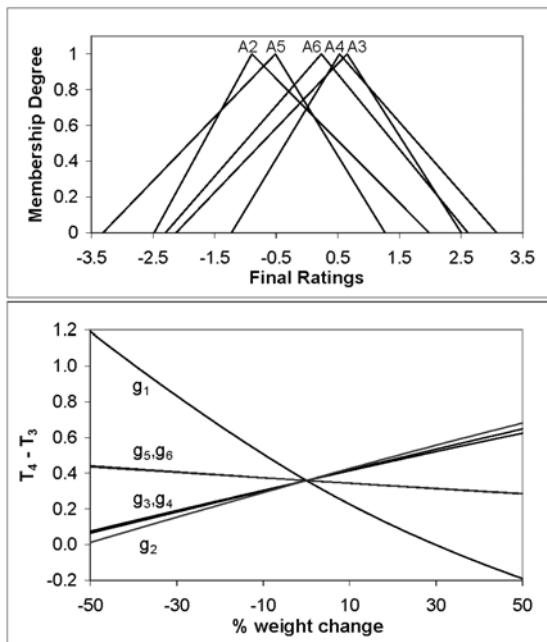
σφάλματος της κορυφής, είναι η A_4 , δηλ. ‘ανεπαρκής ανάδευση’. Εξέταση αυτής της εναλλακτικής λύσης μέσω πειράματος και προσομοίωσης με υπολογιστή (με δεδομένα που συνήθως ισχύουν στην πράξη) έδειξε ότι αυτή η αιτιώδης σχέση είναι πιο πιθανό να έχει λάβει χώρα κατά τη διάρκεια της επιμετάλλωσης της παρτίδας όπου το ελαττωματικό αντικείμενο ανήκει. Η πειραματική επιβεβαίωση αυτής της αιτιώδους σχέσης, οδήγησε στην τελική απόφαση να προταθεί η ‘αύξηση της ανάδευσης’ ως επανορθωτική λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος (όδευση μέσω των κόμβων απόφασης και δράσης S7 - S8 - 27 - 29 του Σχήματος 8.1).

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 8.3 φανερώνουν ότι εάν οι πειραματικές μετρήσεις δεν επιβεβαιώσουν την προτεινόμενη εναλλακτική λύση A_1 σαν επικρατέστερη τελική αιτία (στάδιο 22), τότε εμφανίζεται μη-συγκρισιμότητα μεταξύ της δεύτερης καλύτερης λύσης A_4 και της A_3 , όταν εκτελείται εκ νέου το υποπρόγραμμα FMCA (δεύτερη επανάληψη των σταδίων 16 - 20). Αυτή η παρατήρηση γίνεται ακόμη πιο φανερή στην ανάλυση ευαισθησίας, στο Σχήμα 4, όπου η διαφορά ($T_4 - T_3$) παίρνει αρνητικές τιμές (δηλ. $T_3 > T_4$, που σημαίνει ότι $A_3 > A_4$) για συγκεκριμένη περιοχή τιμών των βαρών. Για να αυξήσουμε το επίπεδο της ανάλυσης (resolution), θέσαμε χαμηλότερες τιμές στις παραμέτρους q και p στη γενικευμένη συνάρτηση προτίμησης. Τα αποτελέσματα για αυτή την περίπτωση ($q = 0,5$, $p = 1,0$) φαίνονται στο Σχήμα 8.5 όπου η εναλλακτική λύση A_4 υπερέχει αναμφισβήτητα και αυτή η υπεροχή ισχύει σε ολόκληρο το φάσμα των τιμών των βαρών των κριτηρίων που παίρνουν μέρος στην ανάλυση ευαισθησίας, αποδεικνύοντας τη σταθερότητα/ευρωστία (robustness) της συγκεκριμένης λύσης.

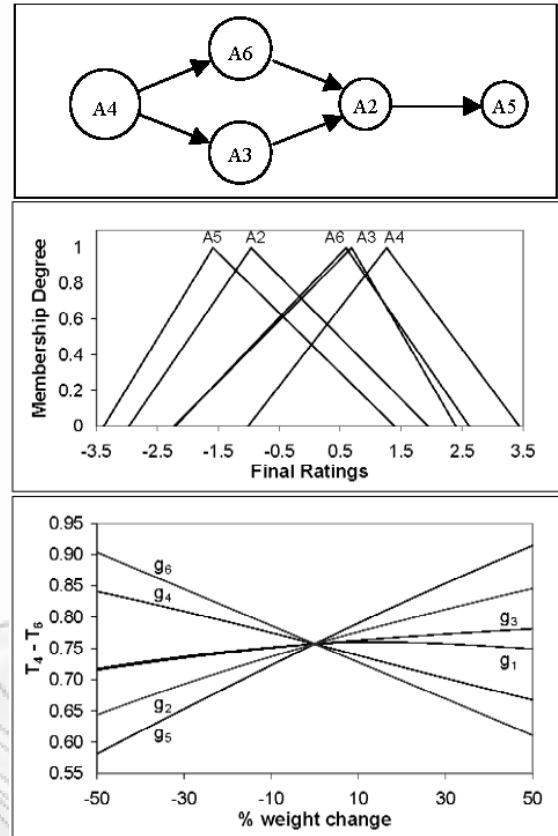
Επιπλέον, ένα ερωτηματολόγιο που κυκλοφορήσαμε μετά τη Delphi, σε έναν ευρύτερο κύκλο από εμπειρογνώμονες, απεκάλυψε ότι (α) η πλειονότητά τους θεωρεί τη ‘διαθεσιμότητα θεραπειάς’ σαν ένα πρόσθετο σημαντικό κριτήριο, καθόσον αποτελεί ένα είδος τελικής εξέτασης, και (β) κάποιοι εμπειρογνώμονες φαίνεται εκ των προτέρων να ευνοούν συγκεκριμένες εναλλακτικές λύσεις, ως προς το κριτήριο g_6 , πιστεύοντας ότι αυτές οι εναλλακτικές συνεισφέρουν πιο αποτελεσματικά στην εξηγησιμότητα, γιατί είναι στενά σχετιζόμενες με το σχετικό επιστημονικό υπόβαθρο. Το πρώτο εύρημα μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα στο άνυσμα βαρών των κριτηρίων. Το δεύτερο εύρημα, παρ’όλο ότι δίνει τη δυνατότητα έκφρασης σημαντικών σχέσεων αποδεκτών από την επιστημονική θεωρία, εισάγει κάποια μεροληπτική τάση κάθε εμπειρογνώμονα που επηρεάζεται από την ειδικότητά του.



Σχήμα 8.3. Μερική κατάταξη των εξεταζόμενων τελικών αιτίων σε χαμηλό επίπεδο ανάλυσης, σύμφωνα με τη διαδικασία εκτέλεσης FMCA, με και χωρίς το αίτιο A₁ ή 1.5.1.5, δηλ. ‘διάβρωση της ανόδου’ (άνω και κάτω διάγραμμα, αντίστοιχα).



Σχήμα 8.4. Συνολική κατάταξη (υπό μορφή ασαφών τριγωνικών αριθμών) των εξεταζόμενων τελικών αιτίων σε χαμηλό επίπεδο ανάλυσης και μονο-παραμετρική ανάλυση ευαισθησίας του τελικά προτεινόμενου για δοκιμή/πρόληψη/θεραπεία αιτίου A₄ ή 1.5.1.2.2.1.1 (‘ανεπαρκής ανάδευση’) ως προς το αίτιο A₃ ή 1.5.2.1.2.3.1 (‘Λανθασμένη αρχική τοποθέτηση’).



Σχήμα 8.5. Μερική και ολική κατάταξη των εξεταζόμενων τελικών αιτίων σε υψηλό επίπεδο ανάλυσης (δηλ. χαμηλές τιμές των παραμέτρων q, p) και μονο-παραμετρική ανάλυση ευαισθησίας, του αιτίου A₄ ως προς το A₆ ή 1.5.2.2.2.2 (‘μείωση της συγκέντρωσης του λουτρού σε χημικά πρόσθετα’)

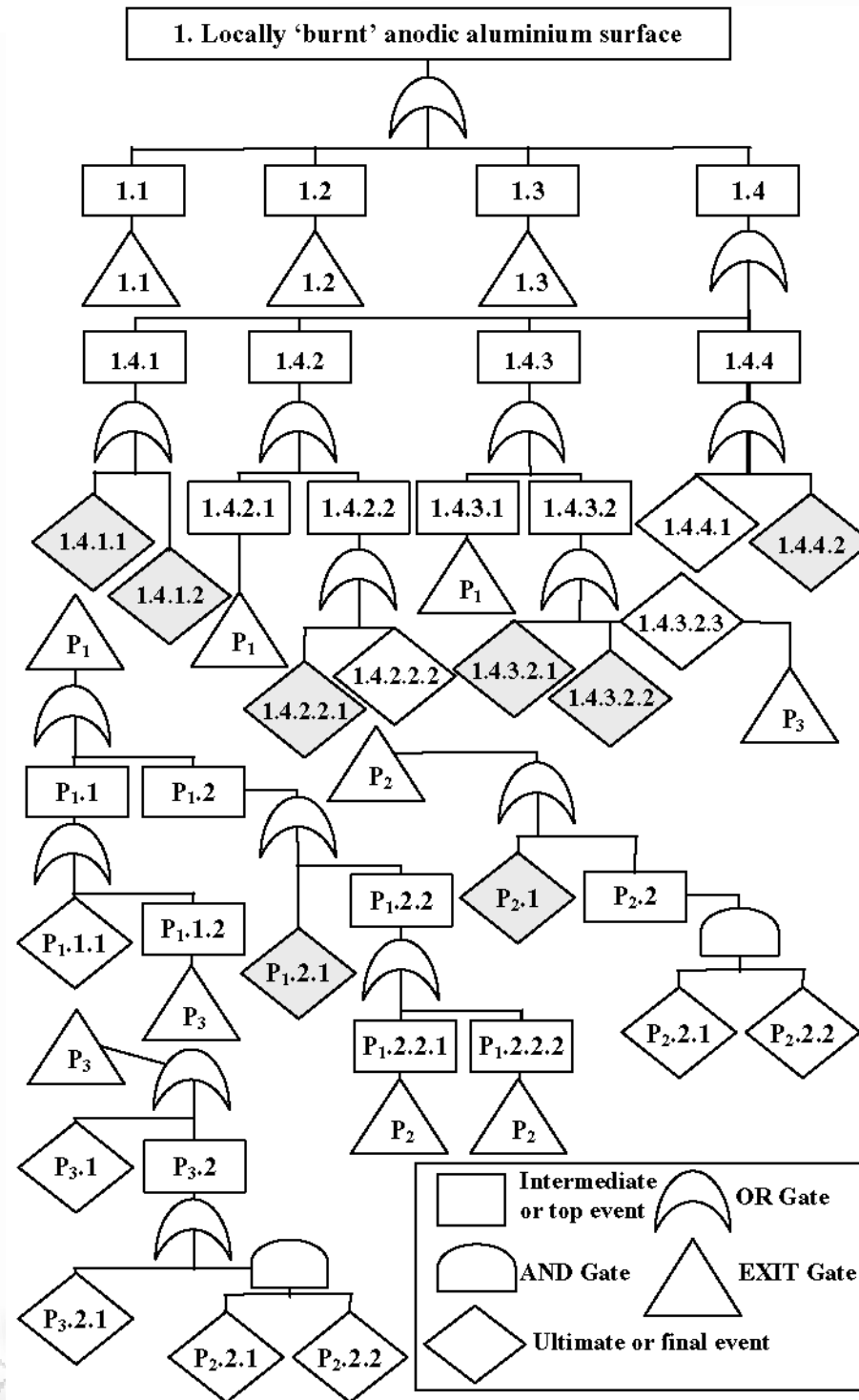
Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχει τρόπος παρεμπόδισης αυτού του επηρεασμού αλλά είναι δυνατός ο περιορισμός της υπερεκτίμησης, που εκδηλώνεται κατά τη βαθμολόγηση των στοιχείων του πολυκριτηριακού πίνακα, ζητώντας τεκμηρίωση της γνώμης κάθε εμπειρογνώμονα του οποίου η βαθμολογία αποκλίνει σημαντικά από τη μέση τιμή της βαθμολογίας των υπολοίπων. Η ίδια λογική ισχύει στην περίπτωση ενός μεγάλου αριθμού από εμπειρογνώμονες, όταν μία ομάδα από αυτούς αποκλίνει σημαντικά σε σχέση με το μέσο όρο της πλειοψηφίας.

Σε ότι αφορά στα Σχήματα 8.4 και 8.5, αξίζει να αναφερθεί ότι η σειρά των μέσων τιμών (κορυφών των τριγώνων) δεν συμπίπτει με τη σειρά των εναλλακτικών λύσεων, όπως έχουν καταταχθεί σύμφωνα με το κριτήριο Tseng & Klein.

8.4 Εφαρμογή σε μονάδες ανοδίσωσης του αλουμινίου

Για την εφαρμογή στην ανοδίσωση του αλουμινίου χρησιμοποιήθηκε ως γεγονός κορυφής η ‘τοπικά καμένη επιφάνεια’ και ως Διαγνωστική Βάση Γνώσης (DKB) το περιγραφόμενο στις [4,11] κέλυφος (όπως αναλύεται στην παρούσα διατριβή), με περιεχόμενο αντίστοιχο των αναφερόμενων στο Κεφάλαιο 4 ελαττωμάτων. Τα ενδιάμεσα/τελικά αίτια που αναφέρονται με έναν κωδικό αριθμό, δηλώνοντας τη θέση τους στη δομή του δένδρου (βλ. Σχήμα 8.6), είναι τα ακόλουθα:

- 1.1 Πρωτογενής μεταλλουργική επεξεργασία (κραματοποίηση, χύτευση, διέλαση).
- 1.2 Διαμόρφωση αντικειμένου (σφυρηλάτηση, πίεση, συγκόλληση, χύτευση σε καλούπι).
- 1.3 Μηχανική, χημική και ηλεκτροχημική επεξεργασία της επιφάνειας.
- 1.4 Ανοδίσωση του αλουμινίου σε μέτριο / υψηλό πάχος (20-30 μm) σε λουτρό H_2SO_4 .
 - 1.4.1 Ανομοιογένεια της μεταλλικής επιφάνειας.
 - 1.4.2 Πάχος/πορώδες πολύ υψηλό, τοπικά.
 - 1.4.3 Υψηλή θερμοκρασία στη στερεή επιφάνεια, τοπικά.
 - 1.4.4 Ακατάλληλα πρόσθετα στο λουτρό της ανοδίσωσης.
 - 1.4.1.1 Υψηλή τοπική συγκέντρωση των συστατικών του κράματος ή των προσμείξεων.
 - 1.4.1.2 Αταξίες δομής εντός βάθους <30 μm υπό την επιφάνεια του μητρικού μετάλλου.
 - 1.4.2.1 Υψηλή τοπική πυκνότητα ρεύματος.
 - 1.4.2.2 Υψηλή τοπική συγκέντρωση ηλεκτρολύτη.
 - 1.4.2.2.1/1.4.3.2.2 Ανεπαρκής ανάδευση.
 - 1.4.2.2.2 Υψηλή μέση συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη.



Σχήμα 8.6. Ανάλυση δένδρου σφαλμάτων, όταν το γεγονός κορυφής (top event) είναι «τοπικά καμένη επιφάνεια» του ανοδιωμένου αλουμινίου. Οι σκιασμένοι ρόμβοι είναι το σύνολο των τελικών αιτίων που αποτελούν τα εισαγόμενα στοιχεία (input) στο υποπρόγραμμα FMCA (στάδια 16-20 του Σχήματος 8.1)

- 1.4.3.1 Υψηλή τοπική πυκνότητα ρεύματος.
- 1.4.3.2 Υψηλή τιμή της μέσης θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη στο λουτρό.
 - 1.4.3.2.1 Χαμηλή απόδοση του συστήματος ψύξης.
 - 1.4.3.2.3/P₁.1.2 Πολύ χαμηλός λόγος επιφάνειας ανόδου προς επιφάνεια καθόδου (περιλαμβανομένης της αύξηση της αντίστασης στις ηλεκτρικές επαφές).
- 1.4.4.1 Ακατάλληλη ποιότητα (τύπος συστατικών).
- 1.4.4.2 Ακατάλληλη ποσότητα (συγκέντρωση εκτός ορίων).
 - P₁.1 Υψηλή μέση πυκνότητα ρεύματος.
 - P₁.2 Ανομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος στο χώρο.
 - P₁.2.1 Τοποθέτηση των προς ανοδίωση αντικειμένων πολύ κοντά στις καθόδους.
 - P₁.2.2 Λανθασμένη διεύθυνση των αντικειμένων στο χώρο της ανόδου.
 - P₁.2.2.1 Λανθασμένος προσανατολισμός των αντικειμένων (π.χ. αιχμηρές ακμές 'βλέπουν' προς την κάθοδο).
 - P₁.2.2.2 Αλληλοεπικάλυψη αντικειμένων στο ηλεκτρολυτικό πεδίο (shielding effect).
 - P₁.1.1 Υψηλή τάση.
 - P₂.1 Λανθασμένη αρχική διεύθυνση.
 - P₂.2 Μεταβολή προσανατολισμού κρίσιμων επιφανειών κατά την ανοδίωση.
 - P₂.2.1 Ανεπαρκές κράτημα στις κατανεμημένες κρεμάστρες.
 - P₂.2.2 Ισχυρή ανάδευση πλησίον των αναρτημένων αντικειμένων.
 - P₃.1 Μείωση της περιοχής ηλεκτρική επαφής, όταν μικρά αντικείμενα, συνδεδεμένα με σύρμα, αναρτώνται μαζί στις κρεμάστρες.
 - P₃.2 Μερική οξείδωση των άγκιστρων που συγκρατούν τα αντικείμενα.
 - P₃.2.1 Τοπικά γαλβανικά στοιχεία που δημιουργούνται, λόγω των διαφορετικών συστατικών (κυρίως μετάλλων) που ευρίσκονται σε επαφή στους συνδέσμους κρεμαστών/άγκιστρων.
 - P₃.2.2.1 Σημαντική συγκέντρωση διαβρωτικών στοιχείων στο λουτρό της ανοδίωσης.
 - P₃.2.2.2 Υψηλή θερμοκρασία στα σημεία επαφής των αντικειμένων με τα άγκιστρα.

Οι γκρίζοι ρόμβοι εισέρχονται στο υποπρόγραμμα της FMCA (στάδια 16 - 20) ως εναλλακτικές λύσεις. Οι υπόλοιπες υποψήφιες για εξέταση εναλλακτικές λύσεις έχουν αποκλειστεί με τη βοήθεια ενός απλού έμπειρου συστήματος που βασίζεται (α) στη γνώση που λαμβάνεται από σταθμούς ποιοτικού ελέγχου που λειτουργούν στο τέλος κάθε ανάντη κύριας διεργασίας (κατεργασία μεταλλικού υποστρώματος, διαμόρφωση του αντικειμένου, ηλεκτροχημική επιχάλκωση/επινικέλωση), (β) στις μη συναποδεκτές ενδιάμεσες ή τελικές

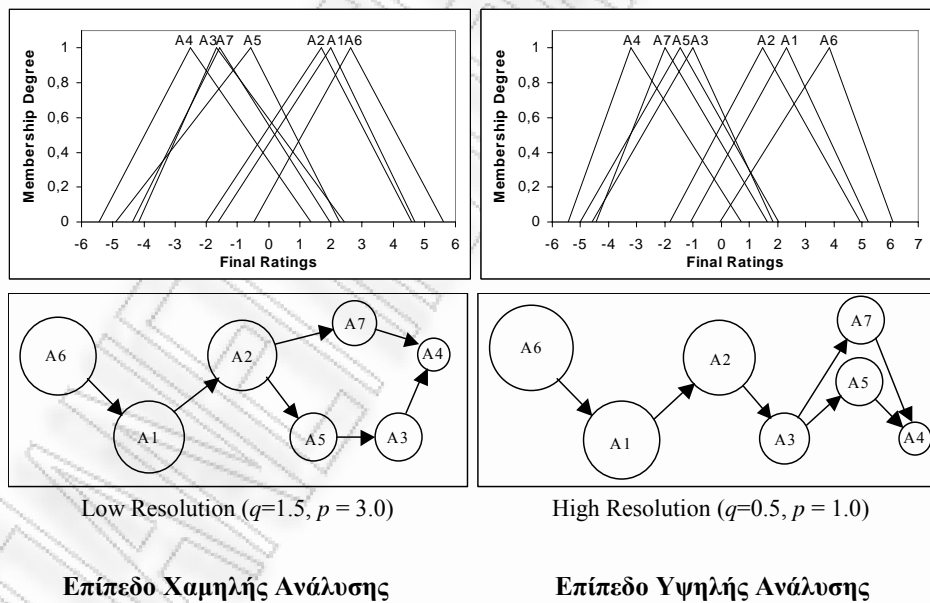
αιτίες που ευρίσκονται κάτω από μια πύλη AND και (γ) στις εύκολες προς απάντηση ερωτήσεις για τις συνθήκες ή τα συμπτώματα που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της παραγωγής του ελαττωματικού αντικειμένου. Για παράδειγμα, μία αρνητική απάντηση που δίνεται από το χειριστή (με οπτική παρατήρηση ή παρακολούθοντας συγκεκριμένα όργανα παρακολούθησης/ελέγχου ή κάνοντας δοκιμές *in situ*) στις ακόλουθες απλές ερωτήσεις, εξαιρεί τα αίτια 1.4.2.2.2 και P_{1.1.1}: Είναι η μέση συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη σημαντικά υψηλότερη από την απαιτούμενη/συνιστώμενη; Είναι η εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση σημαντικά υψηλότερη από την απαιτούμενη/συνιστώμενη;

Τα εξεταζόμενα μέσω FMCA τελικά αίτια συμβολίζονται ως εξής: A₁ για το 1.4.2.2.1 (και της επανάληψής του 1.4.3.2.2), A₂ για το 1.4.3.2.1, A₃ για το 1.4.1.1, A₄ για το 1.4.1.2, A₅ για το P_{2.1}, A₆ για το P_{1.2.1} και A₇ για το 1.4.4.2. Τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια είναι: (1) FSI του τελικού αιτίου, g₁, (2) διαθεσιμότητα εξοπλισμού, g₂, (3) διαθεσιμότητα μέσων πρόληψης/θεραπείας, g₃, (4) κόστος, g₄, (5) αξιοπιστία, βασισμένη στην ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA) των πειραματικών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν κάτω από παρόμοιες συνθήκες επιμετάλλωσης στο παρελθόν, g₅, (6) απαιτούμενος χρόνος για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος (testing), g₆, (7) αναμενόμενη συμβολή στην εξηγησιμότητα, δηλαδή σχέση με την αντίστοιχη επιστημονική Θεωρία, g₇. Το κοινό διάνυσμα των βαρών των κριτηρίων στην είσοδο (consensus in input) είναι: g₁ (35,9-3,0-2,1), g₂ (13,8-1,9-2,4), g₃ (9,5-1,2-1,7), g₄ (12,8-1,3-1,6), g₅ (10,7-1,2-0,7), g₆ (9,3-1,4-2,3), g₇ (8,0-1,1-3,4), όπου σε κάθε παρένθεση εμφανίζεται το αντίστοιχο βάρος υπό μορφή L,R τριγωνικού ασαφούς αριθμού, με προσέγγιση ενός δεκαδικού ψηφίου, για εξοικονόμηση χώρου. Η γενικευμένη συνάρτηση προτίμησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η γραμμική, με δύο παραμέτρους: q για το τέλος της περιοχής αδιαφορίας (χαμηλό όριο) και p για το τέλος της περιοχής γραμμικής αύξησης της προτίμησης (υψηλό όριο). Για την κατάταξη σε σειρά φθίνουσας προτίμησης των ασαφών αποτελεσμάτων της FMCA χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του κέντρου βάρους, η οποία προσδιορίζει σαφείς (crisp) αριθμούς για εισροές/εκροές σε/από κάθε κόμβο του δικτύου σύγκρισης των A_j. Στη συνέχεια, η χωριστή θεώρηση εισροών και εκροών δίνει τη μερική κατάταξη ενώ η αλγεβρική αθροιστική θεώρηση δίνει την ολική κατάταξη όλων των εξεταζόμενων αιτίων. Η σχετική θέση των A_j παριστάνεται με συνδεδεμένους κύκλους, των οποίων το εμβαδόν είναι ανάλογο του μέτρου της ολικής κατάταξης.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με την εκτέλεση του υποπρογράμματος FMCA PROMETHEE II, για $q = 1,5$ και $p = 3,0$ δίνουν την ολική κατάταξη A₆ > A₁ > A₂ > A₅ > A₃ > A₇ > A₄, όπου το σύμβολο '>' σημαίνει 'προτιμώμενο σε σχέση με το'. Η μερική κατάταξη που λαμβάνεται με την εκτέλεση του υποπρογράμματος FMCA PROMETHEE I,

αποκαλύπτει ότι η μη-συγκρισιμότητα δεν παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς εμφανίζεται μόνο μεταξύ των A_5 & A_7 και A_3 & A_7 στις τελευταίες θέσεις της κατάταξης (βλ. Σχήμα 8.7). Επομένως, η προτεινόμενη εναλλακτική που προτιμάται να εξετασθεί εάν είναι το τελικό αίτιο για το αναλυόμενο σφάλμα είναι η A_6 , δηλ. ‘τα τεμάχια είναι πολύ κοντά στις καθόδους’ της δεξαμενής ανοδίσωσης.

Για τον έλεγχο της ευρωστίας (robustness) του αποτελέσματος, δηλ. της πρότασης A_6 , επαναλαμβάνεται η εκτέλεση του υπο-προγράμματος FMCA σε υψηλότερο επίπεδο ανάλυσης, δηλ. για χαμηλές τιμές των παραμέτρων q , p του γενικευμένου κριτηρίου, οπότε προκύπτει η σειρά $A_6 > A_1 > A_2 > A_3 > A_5 > A_7 > A_4$ ενώ μη-συγκρισιμότητα παρατηρείται μόνον μεταξύ A_5 και A_7 , δηλ. πάλι μακράν της πρώτης προτίμησης A_6 . Η πειραματική εξέταση της εύρωστης πρότασης A_6 σε φυσικό προσομοιωτή σε εργαστηριακές συνθήκες με βάση βιομηχανικά δεδομένα που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα αποστάσεων, κατευθύνσεων/προσανατολισμών αντικειμένων κρεμασμένων στις ανόδους σε σχέση με τη θέση/επιφάνεια/προσανατολισμό των καθόδων απέδειξε ότι η πρόταση/υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται στην πράξη.



Σχήμα 8.7. Ολική και μερική κατάταξη των μερικών αιτιών υπό μορφή τριγωνικών ασαφών αποτελεσμάτων και κύκλων με εμβάδα ανάλογα των σαφών (crisp) αποτελεσμάτων, αντίστοιχα. Η επικρατούσα σε αμφότερα τα επίπεδα ανάλυσης πρόταση/υπόθεση ‘τα τεμάχια είναι πολύ κοντά στις καθόδους’ επιβεβαιώθηκε πειραματικά σε φυσικό προσομοιωτή.

Επομένως, η επαναδιευθέτηση στο χώρο της δεξαμενής ανοδίωσης των σχετικών αποστάσεων/προσανατολισμών (ενδεχομένως και του λόγου των εμβαδών ανόδου/καθόδου) με βάση τα πειραματικά δεδομένα και μετά την αναγκαία για κάθε περίπτωση κλιμάκωση μεγέθους (scale up) αποτελεί την υποδεικνυόμενη χωρίς επιφύλαξη λύση, σύμφωνα με το στάδιο 27 της αλγοριθμικής διαδικασίας που έχει παρουσιασθεί στο Σχήμα 8.1.

8.5 Επέκταση σε μετρολογικές εφαρμογές

Η παραπάνω περιγραφόμενη μεθοδολογία μπορεί να επεκταθεί σε μετρολογικές εφαρμογές προκειμένου να υποστηριχθούν βιομηχανικές MME, οι οποίες στερούνται (i) των αναγκών μέσω εντοπισμού ελαττωμάτων στα παραγόμενα ενδιάμεσα/τελικά προϊόντα και (ii) εξειδικευμένου επιστημονικού προσωπικού κατάλληλου να ανιχνεύσει/επιβεβαιώσει τις αιτίες και να προτείνει μέτρα θεραπείας ή/και πρόληψης. Το προτεινόμενο πληροφοριακό σύστημα μπορεί να δώσει εφαρμόσιμες λύσεις σε μετρολογικά προβλήματα επιλογής συσκευών μέτρησης καθημερινής χρήσης και παροχής υπηρεσιών διακρίβωσης/ρύθμισης/βαθμονόμησης οργάνων και εκτέλεσης μετρήσεων υψηλής ακρίβειας ή σπανίως ζητούμενων χαρακτηριστικών/ιδιοτήτων για προϊόντα με ειδικές προδιαγραφές. Στην περίπτωση αυτή, η αξιολόγηση των εναλλακτικών προτάσεων σε σχέση με κάθε κριτήριο δίνεται από εμπειρογνώμονες που συμμετέχουν σε μία τροποποιημένη/προσαρμοσμένη μέθοδο Delphi 4-σταδίων [12]. Η σχετική διαδικασία αποτελείται από τα ακόλουθα προκαταρκτικά/ενδιάμεσα/τελικά βήματα και κύρια στάδια (PS, IS, FS και MS, αντίστοιχα):

- PS1. Επιλογή του φυσικού μεγέθους ποιοτικού ελέγχου που πρόκειται να μετρηθεί, σύμφωνα με τη γνώμη είτε του μηχανικού της βιομηχανικής παραγωγής είτε του μηχανικού ελέγχου των διαδικασιών είτε του πελάτη είτε της αγοράς.
- PS2. Προσδιορισμός των εναλλακτικών μεθόδων μέτρησης A_j , δίνοντας έμφαση σε προτυποποιημένες μεθόδους, προτεινόμενες από διεθνείς ή εθνικούς αλλά διεθνώς αναγνωρισμένους Οργανισμούς (π.χ. ISO ή ASTM, αντίστοιχα)
- PS3. Σύνταξη πλήρους καταλόγου ανεξάρτητων κριτηρίων f_i , που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των εναλλακτικών μεθόδων.
- MS1. Σύνθεση του ερωτηματολογίου 1^{ου} γύρου, με το οποίο ζητείται από κάθε εμπειρογνώμονα να εκφράσει άποψη πάνω στις αρχικές επιλογές των εναλλακτικών μεθόδων και των κριτηρίων.
- IS1. Επιλογή των εμπειρογνομόνων, σύμφωνα με τα κριτήρια που αναφέρονται/αναλύονται στις [3,13].

- IS2. Διανομή του 1^{ου} ερωτηματολογίου, συλλογή και επεξεργασία των γραπτών απαντήσεων, τελική διαμόρφωση του συνόλου των κριτηρίων και προκαταρκτική σχεδίαση της φόρμας της πολυκριτηριακής μήτρας προτίμησης.
- MS2. Σύνθεση του ερωτηματολογίου 2^{ου} γύρου, με το οποίο ζητείται από κάθε εμπειρογνώμονα (i) να ορίσει σαφώς τιμές στα στοιχεία των τριγωνικών ασαφών αριθμών (καθοδηγούμενη ασαφής αξιολόγηση) που συνθέτουν τα διάνυσμα βαρών των κριτηρίων και (ii) να εκφράσει τελική άποψη για το σχέδιο της φόρμας της πολυκριτηριακής μήτρας προτίμησης όπως αυτή διαμορφώθηκε με την επεξεργασία των απαντήσεων στο 1^{ου} ερωτηματολόγιο.
- IS3. Διανομή του 2^{ου} ερωτηματολογίου, συλλογή και επεξεργασία των γραπτών απαντήσεων, τελική εκτίμηση του διανύσματος \bar{V}_k των μέσων βαρών για τον εμπειρογνώμονα k λαμβάνοντας υπ' όψη μόνον τις τιμές που έδωσαν οι υπόλοιποι εμπειρογνώμονες.
- MS3. Σύνθεση του ερωτηματολογίου 3^{ου} γύρου, με το οποίο ζητείται από κάθε εμπειρογνώμονα (i) να συγκρίνει το αρχικό δικό του διάνυσμα V_k με το \bar{V}_k και (ενδεχομένως) να αλλάξει οποιαδήποτε τιμή που αποκλίνει σημαντικά από την αντίστοιχη μέση τιμή, όπως αυτή προκύπτει από τις τιμές που έδωσαν οι υπόλοιποι εμπειρογνώμονες και (ii) να ορίσει σαφώς τιμές στα στοιχεία των τριγωνικών ασαφών αριθμών που συνθέτουν την πολυκριτηριακή μήτρα προτίμησης.
- IS4. Διανομή του 3^{ου} ερωτηματολογίου, συλλογή και επεξεργασία των γραπτών απαντήσεων, τελική εκτίμηση (i) του ασαφούς διανύσματος V_k για κάθε εμπειρογνώμονα k και (ii) της μήτρας \bar{A}_k των μέσων τιμών για τον εμπειρογνώμονα k, λαμβάνοντας υπ' όψη μόνον τις τιμές που έδωσαν οι υπόλοιποι εμπειρογνώμονες.
- MS4. Σύνθεση του ερωτηματολογίου 4^{ου} γύρου, με το οποίο ζητείται από κάθε εμπειρογνώμονα να συγκρίνει την αρχική δική του μήτρα A_k με την \bar{A}_k και (ενδεχομένως) να αλλάξει οποιαδήποτε τιμή που αποκλίνει σημαντικά από την αντίστοιχη μέση τιμή, όπως αυτή προκύπτει από τις τιμές που έδωσαν οι υπόλοιποι εμπειρογνώμονες.
- FS1. Διανομή του 4^{ου} ερωτηματολογίου, συλλογή και επεξεργασία των γραπτών απαντήσεων, τελική εκτίμηση του ασαφούς μήτρας A_k για κάθε εμπειρογνώμονα k.
- FS2. Ανάλυση των αποτελεσμάτων προκειμένου να εκτιμηθεί η συσχέτιση των απαντήσεων και να διαπιστωθεί ο βαθμός συμφωνίας (agreement/concordance) μεταξύ τους.

FS3. Αποθήκευση των επεξεργασμένων αποτελεσμάτων σε ευκολοδιαχειρίσιμη μορφή, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως εισαγωγή (input) στο πρόγραμμα FMCA, με ή χωρίς συμφωνία/σύνθεση (consensus). Στη δεύτερη περίπτωση, αντίστοιχη στατιστική ανάλυση με την περιγραφόμενη στο βήμα FS2 μπορεί να γίνει και στην έξοδο (output), οπότε καθίστανται εφικτές και κατ'αντιστοιχία συγκρίσεις μεταξύ εισόδου και εξόδου.

Τα κριτήρια f_i ($i = 1, \dots, 8$), που τελικά υιοθετήθηκαν, είναι τα ακόλουθα:

- f_1 : Απαιτούμενος χρόνος για την προετοιμασία/εκτέλεση της μέτρησης και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.
- f_2 : Ευκολία, περιλαμβανομένης (i) της απλότητας στη συντήρηση, ρύθμιση/βαθμονόμηση, (ii) της δυνατότητας μεταφοράς για μετρήσεις πεδίου/in-situ, (iii) της διεξαγωγής της μέτρησης και της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, συνεπαγόμενων ορισμένο βαθμό ανεξαρτησίας από την πρόσληψη / απασχόληση εξειδικευμένου προσωπικού.
- f_3 : Λειτουργικό και κεφαλαιακό κόστος, περιλαμβανομένης της απόσβεσης λόγω τεχνολογικής απαξίωσης.
- f_4 : Ακρίβεια περιλαμβανομένης της προτυποποιημένης επαναληψιμότητας/αναπαραγωγισιμότητας στο ίδιο ή διαφορετικό εργαστήριο, όπως προκύπτει από αντίστοιχες τεχνικές ανάλυσης διακύμανσης (analysis of variance, one/two ways without/with interaction).
- f_5 : Ορθότητα, λογιζόμενη ως μέτρο της συμφωνίας μεταξύ μέσης τιμής αποτελεσμάτων μεγάλου αριθμού πειραματικών μετρήσεων και της τιμής αναφοράς ή αυτής που πιστεύεται ως αληθής.
- f_6 : Περιοχή μέτρησης.
- f_7 : Βαθμός οριζόντιας (από τους άλλους παραγωγούς του ίδιου βιομηχανικού υπο-κλάδου) και κάθετης (από τους αποδέκτες του προϊόντος, δηλ. κατάντη βιομηχανικές μονάδες ή καταναλωτές/χρήστες) αποδοχής.
- f_8 : Συγκρισιμότητα με αποτελέσματα λαμβανόμενα με συσκευές μέτρησης συνήθως χρησιμοποιούμενες από βιομηχανικές μονάδες MME.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μία πραγματική εφαρμογή στην περίπτωση της επιλογής μεθόδου μέτρησης του πάχους του ανοδικού στρώματος του αλουμινίου. Οι εναλλακτικές μέθοδοι, που προκρίθηκαν στο πρώτο στάδιο (MS_1 και IS_2) της παραπάνω διαδικασίας, είναι οι ακόλουθες:

A1: Μέτρηση μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης πηνίου, όταν επάγονται δινορρέυματα στη μητρική επιφάνεια του αλουμινίου (ASTM B 244 – 97, reapproved 2002, ISO 2360).

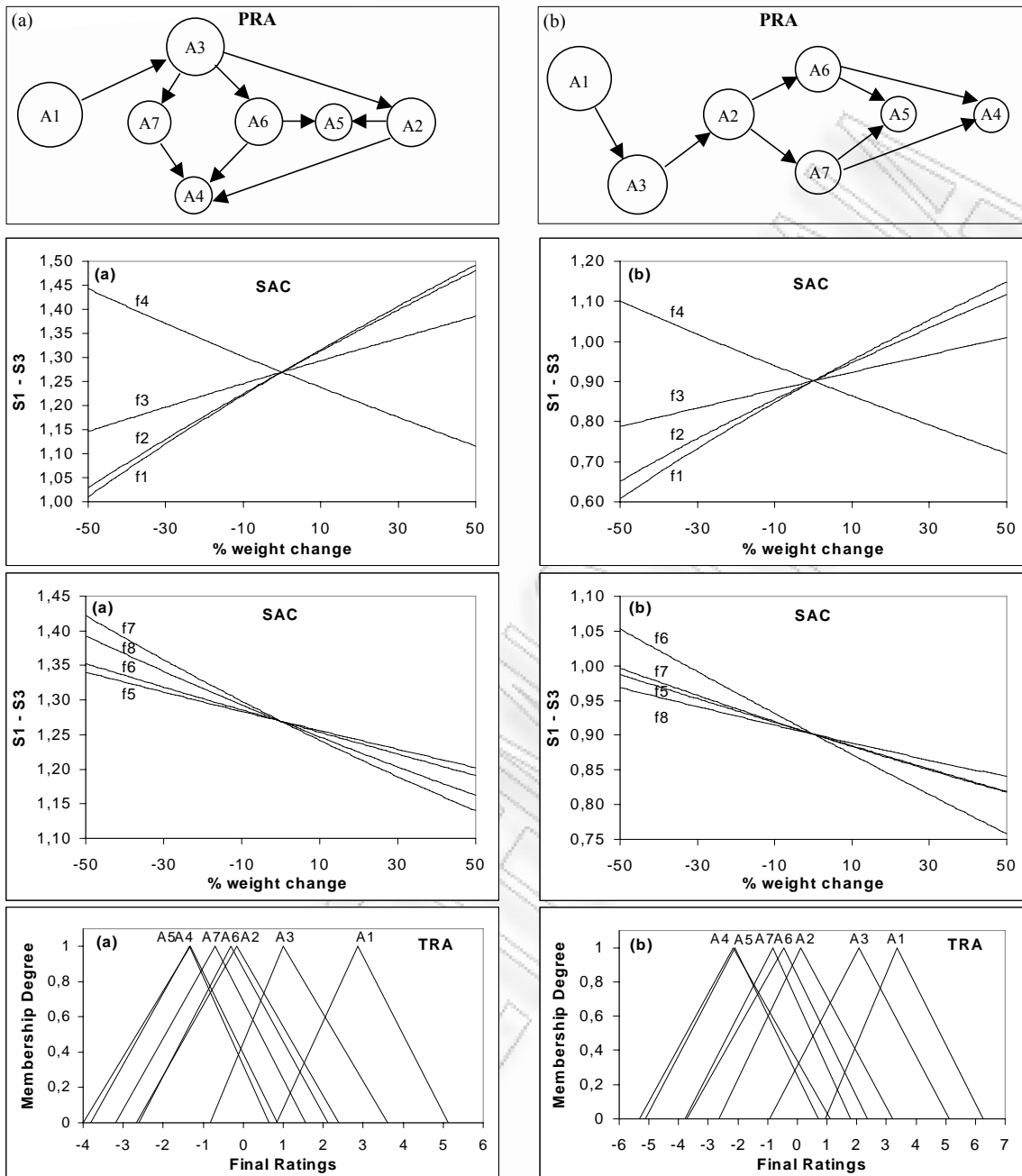
- A2: Μέτρηση της διαφοράς μάζας ανοδιωμένου δοκιμίου αλουμινίου πριν και μετά τη διάλυση του ανοδικού στρώματος (ASTM B 137 – 95, reapproved 2000).
- A3: Μέτρηση διατομής σε οπτικό μικροσκόπιο, μετά από εγκιβωτισμό του δοκιμίου σε πλαστικό, κοπή σε μικροτόμο και λείανση/καθαρισμό της εγκιβωτισμένης τομής (ASTM B 487 – 85, reapproved 2002, ISO 1463).
- A4: Μέτρηση διατομής σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (απλό ή σάρωσης), οπότε υπάρχει και η δυνατότητα προσδιορισμού της χημικής σύστασης, αν η συσκευή διαθέτει μικροαναλυτή ακτίνων X.
- A5: Μέτρηση της έντασης ακτίνας σκεδαζομένων σωματιδίων βήτα, με εφαρμογή κατάλληλης ραδιενεργού πηγής και χρησιμοποίηση του αντίστοιχου ανιχνευτή.
- A6: Μέτρηση της διαφοράς θέσης άνω και κάτω επιπέδου του ανοδικού στρώματος με πειραματικό προσδιορισμό του αριθμού των μονοχρωματικών κροσσών που εμφανίζονται, όταν χρησιμοποιείται μικροσκόπιο παρεμβολής διπλής δέσμης (ASTM B 588-88, reapproved 2001).
- A7: Μέτρηση ηλεκτρικού δυναμικού ή ηλεκτρικής αντίστασης.

Οι μέσοι A_{jm} ($j = 1, \dots, 7$) των τριγωνικών ασαφών αριθμών a_{ij} κάθε πολυκριτήριας μήτρας προτίμησης \mathbf{a}_k , που έχουν προκύψει από την εκτέλεση των βημάτων IS4 και FS1 για κάθε εμπειρογνώμονα E_k ($k = 1, \dots, 6$) καθώς και τα αντίστοιχα διανύσματα \mathbf{w}_k (με στοιχεία w_m, w_a, w_b , για το μέσο και αριστερό-δεξιό πλάτος αντίστοιχα, δίνονται στον Πίνακα 8.3. Για εξοικονόμηση χώρου, έχει γίνει προσέγγιση ενός δεκαδικού ψηφίου ενώ δεν εμφανίζονται τα αριστερά/δεξιά (L/R) πλάτη των ασαφών στοιχείων a_{ijk} .

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.8, όπου η μερική κατάταξη των μεθόδων μέτρησης του πάχους του ανοδικού στρώματος A_j ($j = 1, 2, \dots, 7$) εμφανίζεται ως ένα σύνολο κύκλων. Το Εμβαδόν E_j του αντίστοιχου κύκλου είναι ανάλογο της σχετικής (απασαφοποιημένης) τιμής S_j με την οποία αντιπροσωπεύεται η μέθοδος A_j στο τελικό διάνυσμα της εξόδου (output). Στο επίπεδο χαμηλής ανάλυσης ($q=1,5$ και $p=3,0$) εμφανίζεται η λύση $S_1 > S_3 > S_2 > S_6 > S_7 > S_4 > S_5$, συνεπαγόμενη $A_1 > A_3 > A_2 > A_6 > A_7 > A_4 > A_5$. Στο επίπεδο υψηλής ανάλυσης ($q=0,5$ και $p=1,0$) εμφανίζεται η λύση $S_1 > S_3 > S_2 > S_6 > S_7 > S_5 > S_4$, συνεπαγόμενη $A_1 > A_3 > A_2 > A_6 > A_7 > A_5 > A_4$. Το σύμβολο '>' σημαίνει 'καλύτερη από', δηλ. υιοθετείται σειρά φθίνουσας προτίμησης.

Πίνακας 8.3. Οι μέσοι A_{jm} ($j = 1, \dots, 7$) των τριγωνικών ασαφών αριθμών a_{ij} κάθε πολυκριτήριας μήτρας προτίμησης \mathbf{a}_k , που έχουν προκύψει από την εκτέλεση των βημάτων IS4 και FS1 για κάθε εμπειρογνώμονα E_k ($k = 1, \dots, 6$) καθώς και τα αντίστοιχα διανύσματα \mathbf{w}_k (με στοιχεία w_m, w_a, w_b , για το μέσο και αριστερό-δεξιό πλάτος αντίστοιχα. Για εξοικονόμηση χώρου, έχει γίνει προσέγγιση ενός δεκαδικού ψηφίου ενώ δεν εμφανίζονται τα αριστερά/δεξιά (L/R) πλάτη των ασαφών στοιχείων a_{ijk} .

| | $A1_m$ | $A2_m$ | $A3_m$ | $A4_m$ | $A5_m$ | $A6_m$ | $A7_m$ | w_m | w_a | w_b |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| $E_1 f_1$ | 7.2 | 5.7 | 4.4 | 2.5 | 3.4 | 4.0 | 6.7 | 19.1 | 1.4 | 1.7 |
| f_2 | 7.0 | 6.6 | 4.5 | 2.6 | 3.5 | 4.1 | 6.2 | 18.2 | 2.5 | 2.8 |
| f_3 | 7.1 | 5.3 | 4.0 | 2.4 | 3.2 | 3.6 | 7.5 | 8.1 | 1.8 | 2.2 |
| f_4 | 5.4 | 3.1 | 6.9 | 7.8 | 6.1 | 5.2 | 2.2 | 15.0 | 2.1 | 1.5 |
| f_5 | 5.5 | 3.0 | 7.0 | 7.9 | 6.2 | 5.3 | 2.1 | 6.4 | 1.9 | 1.9 |
| f_6 | 5.5 | 5.9 | 7.1 | 7.0 | 4.8 | 5.5 | 2.7 | 8.9 | 1.8 | 2.1 |
| f_7 | 7.5 | 4.7 | 7.4 | 3.6 | 4.5 | 6.2 | 3.7 | 14.4 | 2.8 | 3.4 |
| f_8 | 7.3 | 4.6 | 7.1 | 3.2 | 3.3 | 5.8 | 3.4 | 10.7 | 2.2 | 1.7 |
| $E_2 f_1$ | 6.8 | 5.3 | 4.0 | 2.1 | 2.9 | 4.5 | 6.1 | 17.2 | 1.9 | 2.1 |
| f_2 | 6.5 | 6.9 | 4.1 | 2.2 | 3.0 | 3.8 | 5.7 | 21.3 | 2.3 | 2.6 |
| f_3 | 6.6 | 4.7 | 4.4 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 8.1 | 6.9 | 1.5 | 2.0 |
| f_4 | 5.0 | 2.6 | 6.3 | 7.7 | 7.0 | 4.8 | 2.0 | 13.2 | 2.4 | 1.8 |
| f_5 | 5.2 | 2.5 | 6.6 | 7.8 | 5.7 | 5.0 | 2.0 | 5.1 | 1.7 | 1.8 |
| f_6 | 5.8 | 6.3 | 7.5 | 6.3 | 4.0 | 5.1 | 2.1 | 9.7 | 2.3 | 1.8 |
| f_7 | 7.2 | 4.2 | 7.0 | 3.0 | 3.8 | 5.8 | 3.9 | 13.6 | 3.1 | 2.8 |
| f_8 | 7.7 | 4.1 | 7.5 | 2.6 | 2.5 | 5.4 | 2.8 | 11.9 | 1.6 | 2.0 |
| $E_3 f_1$ | 7.5 | 6.0 | 4.9 | 2.2 | 3.9 | 3.5 | 6.0 | 21.0 | 2.2 | 1.5 |
| f_2 | 7.5 | 6.3 | 4.9 | 3.0 | 4.1 | 4.5 | 5.6 | 15.0 | 3.1 | 2.6 |
| f_3 | 7.7 | 5.9 | 3.6 | 2.9 | 4.0 | 4.1 | 6.9 | 9.0 | 2.1 | 1.9 |
| f_4 | 5.9 | 3.7 | 7.5 | 7.2 | 6.2 | 5.7 | 2.1 | 16.9 | 1.5 | 2.3 |
| f_5 | 5.9 | 3.1 | 7.4 | 7.4 | 6.9 | 4.8 | 2.3 | 5.5 | 1.5 | 1.7 |
| f_6 | 5.9 | 5.8 | 6.7 | 7.7 | 4.5 | 5.9 | 3.3 | 10.4 | 2.2 | 2.2 |
| f_7 | 8.0 | 5.1 | 7.7 | 4.2 | 4.5 | 6.1 | 3.4 | 14.8 | 3.4 | 2.9 |
| f_8 | 6.9 | 5.1 | 6.7 | 3.8 | 4.1 | 5.7 | 4.0 | 10.4 | 1.8 | 2.3 |
| $E_4 f_1$ | 6.9 | 6.1 | 4.4 | 2.9 | 4.0 | 4.0 | 7.4 | 19.2 | 2.4 | 1.8 |
| f_2 | 6.4 | 6.6 | 5.1 | 3.1 | 4.0 | 3.7 | 6.1 | 14.8 | 2.9 | 1.8 |
| f_3 | 7.0 | 5.2 | 4.1 | 3.1 | 3.1 | 3.2 | 7.4 | 7.7 | 0.8 | 1.5 |
| f_4 | 5.3 | 3.2 | 7.0 | 8.4 | 5.3 | 5.1 | 2.5 | 17.4 | 2.2 | 2.0 |
| f_5 | 5.4 | 3.6 | 7.1 | 7.9 | 5.8 | 5.3 | 2.1 | 5.7 | 2.1 | 1.6 |
| f_6 | 4.9 | 5.5 | 7.0 | 7.1 | 5.6 | 5.8 | 2.8 | 11.1 | 1.7 | 1.9 |
| f_7 | 6.9 | 4.8 | 7.5 | 4.0 | 5.2 | 6.6 | 4.4 | 15.7 | 3.3 | 3.5 |
| f_8 | 7.2 | 5.0 | 7.1 | 3.3 | 3.4 | 6.2 | 3.5 | 12.8 | 1.6 | 1.3 |
| $E_5 f_1$ | 7.5 | 5.4 | 5.0 | 3.0 | 3.5 | 4.6 | 6.7 | 18.4 | 2.2 | 1.9 |
| f_2 | 7.1 | 7.1 | 3.9 | 2.2 | 3.1 | 4.4 | 6.7 | 19.2 | 2.7 | 3.0 |
| f_3 | 7.5 | 4.8 | 4.5 | 2.1 | 3.7 | 3.6 | 8.2 | 7.4 | 2.0 | 1.4 |
| f_4 | 6.0 | 3.5 | 7.4 | 8.1 | 6.7 | 5.5 | 2.3 | 14.1 | 1.2 | 1.9 |
| f_5 | 6.0 | 3.5 | 7.5 | 8.0 | 6.7 | 5.9 | 2.0 | 6.9 | 1.6 | 1.8 |
| f_6 | 5.4 | 6.4 | 7.6 | 6.4 | 5.1 | 6.0 | 3.2 | 6.9 | 1.5 | 2.4 |
| f_7 | 7.9 | 4.3 | 7.2 | 3.2 | 4.1 | 6.5 | 3.0 | 10.9 | 2.7 | 3.0 |
| f_8 | 6.8 | 4.1 | 7.6 | 2.7 | 2.6 | 5.3 | 3.9 | 11.5 | 2.1 | 1.8 |
| $E_6 f_1$ | 7.1 | 5.8 | 3.9 | 3.1 | 3.0 | 3.4 | 7.3 | 19.7 | 1.1 | 2.0 |
| f_2 | 7.6 | 6.0 | 4.5 | 2.6 | 3.4 | 4.1 | 6.9 | 19.8 | 1.5 | 2.4 |
| f_3 | 6.7 | 5.8 | 3.7 | 2.0 | 2.8 | 4.0 | 7.8 | 8.8 | 2.0 | 1.2 |
| f_4 | 4.8 | 2.7 | 6.2 | 7.5 | 5.5 | 4.9 | 2.1 | 13.6 | 1.7 | 1.7 |
| f_5 | 5.0 | 2.4 | 6.4 | 2.0 | 6.0 | 5.5 | 2.1 | 6.4 | 1.9 | 1.3 |
| f_6 | 5.5 | 5.3 | 6.7 | 7.6 | 4.8 | 4.8 | 2.2 | 7.1 | 2.1 | 1.4 |
| f_7 | 7.5 | 5.0 | 7.6 | 3.6 | 4.9 | 5.9 | 4.1 | 14.6 | 3.4 | 2.6 |
| f_8 | 8.0 | 4.7 | 6.7 | 3.7 | 4.0 | 6.3 | 2.9 | 8.8 | 1.5 | 1.7 |

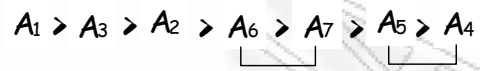


Σχήμα 8.8. Μερική κατάταξη των μεθόδων μέτρησης πάχους του ανοδικού στρώματος (PRA), ανάλυση ευαισθησίας ως προς κάθε ένα κριτήριο (SAC) και συνολική κατάταξη των εναλλακτικών μεθόδων (TRA), σε (a) επίπεδο χαμηλής ανάλυσης της προτίμησης (σχετικά υψηλές τιμές q, p) και (b) επίπεδο υψηλής ανάλυσης της προτίμησης (σχετικά χαμηλές τιμές q, p). Το σύμβολο '→' σημαίνει 'καλύτερη από'. Η μέθοδος A_1 (μέτρηση μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης πηνίου, όταν επάγονται δινορρεύματα στη μητρική επιφάνεια του αλουμινίου) κατατάσσεται πρώτη στα δύο επίπεδα ανάλυσης της προτίμησης και η λύση αυτή αποδεικνύεται εύρωστη (robust).

Στην παρακάτω απλή μη-γεωμετρική απεικόνιση της κατάταξης, οι μη-συγκρίσιμες μέθοδοι συνδέονται με οριζόντιες αγκύλες.



Επίπεδο Χαμηλής Ανάλυσης



Επίπεδο Υψηλής Ανάλυσης

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι η προτεινόμενη λύση της μεθόδου A_1 , δηλ. ‘μέτρηση μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης πηνίου, όταν επάγονται δινορρεύματα στη μητρική επιφάνεια του αλουμινίου’, είναι εύρωστη (robust), αφού (i) δεν περιλαμβάνεται σε οποιοδήποτε ζεύγος μεθόδων του οποίου τα μέλη εμφανίζονται ως μη-συγκρίσιμα και (ii) η μονοπαραμετρική ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη δεύτερη καλύτερη μέθοδο, A_3 , σε επίπεδο χαμηλής και υψηλής ανάλυσης (δηλ. ‘μέτρηση διατομής σε οπτικό μικροσκόπιο, μετά από εγκιβωτισμό του δοκιμίου σε πλαστικό, κοπή σε μικροτόμο και λείανση/καθαρισμό της εγκιβωτισμένης τομής’), δίνει $S_1 - S_3 > 0$ σε ολόκληρη την περιοχή $\pm 50\%$ γύρω από τη μέση απασαφοποιημένη τιμή κάθε κριτηρίου στο διάνυσμα των βαρών. Η εμπειρική έρευνα τόσο σε υποκειμενικό επίπεδο δια μέσου των εμπειρογνομόνων όσο και σε αντικειμενικό επίπεδο δια μέσου της εξόρυξης δεδομένων από την τεχνική βιβλιογραφία επιβεβαιώνει τα παραπάνω αποτελέσματα.

Σημειώνεται ότι στο επίπεδο υψηλής ανάλυσης επιτυγχάνεται σαφής διαχωρισμός προτιμώμενων μεθόδων, για την αποτελεσματικότητα των οποίων η σύγκριση στην πράξη εμφανίζεται να δίνει πολλές φορές αμφισβητούμενα αποτελέσματα. Π.χ., η μέτρηση ηλεκτρικού δυναμικού ή ηλεκτρικής αντίστασης (A_7), μέθοδος ευρέως χρησιμοποιούμενη από μικρούς ανοδιωτές στην πράξη, εμφανίζεται ως μη-συγκρίσιμη με τη μέθοδο μέτρησης της διαφοράς μάζας (A_2), στο επίπεδο χαμηλής ανάλυσης. Εν τούτοις, στο επίπεδο υψηλής ανάλυσης, η μέθοδος A_7 κρίνεται σαφώς υποδεέστερη της A_2 , γεγονός που πρέπει να τεθεί υπ’όψη των μικρών ανοδιωτών που χρησιμοποιούν την A_7 στη γραμμή παραγωγής, επειδή είναι φθηνή, ταχεία και απλή. Φαίνεται όμως ότι, παρόλο ότι έχουν εισαχθεί διορθωτικοί παράγοντες/συντελεστές, η μέθοδος A_7 εξακολουθεί να είναι μη επαρκώς αξιόπιστη, αφού μία σχετικά μικρή μεταβολή της ποιότητας του μητρικού μετάλλου ή/και των συνθηκών παραγωγής προκαλεί σημαντική απόκλιση στην τιμή του μετρούμενου μεγέθους, η οποία προσδιορίζεται μέσω καμπύλης αναφοράς (reference curve).

Το βάρος του κριτηρίου f_1 (απαιτούμενος χρόνος για την προετοιμασία/εκτέλεση της μέτρησης και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων) είναι το υψηλότερο όλων, πιθανότατα για

δύο πρόσθετους λόγους, οι οποίοι δεν φαίνονται εκ πρώτης όψεως: (i) υπάρχει πάντοτε μία τάση παρακολούθησης κάθε παρτίδας σε πραγματικό χρόνο, παρ'όλο ότι η διεργασία δεν ελέγχεται online ως προς το επιτυγχανόμενο πάχος του ανοδικού στρώματος και (ii) ο χρόνος αντανακλά και μέρος τόσο του μεταβλητού/λειτουργικού κόστους (μέσω των αμοιβών στο προσωπικό που ασχολείται με τον ποιοτικό έλεγχο) όσο και του σταθερού/κεφαλαιακού κόστους (μέσω των αποσβέσεων).

Κατά συνέπεια, υπάρχει κάποια αλληλεξάρτηση μεταξύ των κριτηρίων f_1 και f_3 . Μία βαθύτερη εννοιολογική εξέταση των λοιπών κριτηρίων είναι δυνατόν να αποκαλύψει και άλλες αλληλεπιδράσεις, αν και σε πολύ μικρότερο βαθμό από την παραπάνω αναφερόμενη. Αυτή η ελαφρά αλληλεξάρτηση, παρόλο ότι, από αυστηρά λογική/μαθηματική άποψη, είναι μειονέκτημα της μεθόδου, εντούτοις είναι αποδεκτή στην πράξη, επειδή είναι αναπόφευκτη, αφού χρησιμοποιούνται λεκτικοί όροι της ίδιας της πράξης. Η ελαχιστοποίηση της αλληλεξάρτησης επιτυγχάνεται με τον κατά το δυνατόν πληρέστερο ορισμό των κριτηρίων στα βήματα PS3 και IS2.

Ένα άλλο ενδιαφέρον σημείο είναι ότι ορισμένες εκ των μεθόδων A_j , πέραν της μέτρησης του πάχους του ανοδικού στρώματος του αλουμινίου μπορούν να μετρήσουν και άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη υλικών/αντικειμένων που έχουν υποστεί επιφανειακή κατεργασία (π.χ. επιμετάλλωση χάλυβα με Cu/Ni/Cr ή Cd) στις ίδιες βιομηχανικές ηλεκτροχημικές μονάδες. Με βάση το γεγονός αυτό, ορισμένοι εμπειρογνώμονες έδειξαν κατά την εκτέλεση του βήματος IS2 να ευνοούν την εισαγωγή πρόσθετου κριτηρίου με κεντρικό νόημα «Δυνατότητα μέτρησης άλλων φυσικών μεγεθών, ανεξάρτητα από ή σε συνδυασμό με τη μέτρηση του πάχους του ανοδικού στρώματος του αλουμινίου». Το συγκεκριμένο κριτήριο δεν κρίθηκε αναγκαίο να περιληφθεί στο τελικά προκρινθέν διάνυσμα, επειδή οι μετρήσεις υψηλής ακρίβειας (π.χ. ποιότητας προϊόντος ειδικών προδιαγραφών ή διακρίβωσης/βαθμονόμησης μετρητικής συσκευής) δεν αποτελούν σημαντικό μέρος του συνόλου των μετρήσεων ποιοτικού ελέγχου. Στις περιπτώσεις όπου απαιτούνται τέτοιες μετρήσεις (π.χ. ανομοιομορφία/ανισοτροπία/ανομοιογένεια στην ανοδιωμένη επιφάνεια, όπως αυτή που εμφανίζεται στο Σχήμα 8.1 να έχει χαρακτηριστικά κύμανσης με κατεύθυνση ίδια προς τις γραμμές διέλασης) σε μία πολύ στενή περιοχή, η προκρινόμενη μέθοδος A_1 δεν συνιστάται, αφού ο ακροδέκτης δημιουργίας του επαγωγικού δινορρεύματος έχει πολλαπλάσια διατομή σε σχέση με την έκταση της υπό εξέταση ανοδιωμένης περιοχής. Παράλληλα όμως δεν ενδείκνυται η αγορά ενός πολύ ακριβού οργάνου για την εκτέλεση περιορισμένου αριθμού μετρήσεων ακριβείας. Στην περίπτωση αυτή, συμφέρει η προσφυγή σε εξωτερική πηγή παροχής υπηρεσιών (outsourcing), αφού υπάρχουν εξωτερικοί φορείς

εξοπλισμένοι με τέτοιου είδους όργανα για ερευνητικούς σκοπούς οπότε είναι δυνατή και η επίτευξη χαμηλότερης δαπάνης για μετρήσεις λόγω έκπτωσης όταν ο αριθμός των μετρήσεων είναι μεγάλος (βλ. Σχήμα 8.1).

Τέλος, από τις απαντήσεις που δόθηκαν σε ένα post-Delphi ερωτηματολόγιο, που κυκλοφορήσαμε σε ένα ευρύτερο κύκλο εμπειρογνομόνων, προέκυψε ότι ορισμένοι από αυτούς διάκεινται αρτίοι ευνοϊκά υπέρ μίας μεθόδου, όταν την έχουν χρησιμοποιήσει πρόσφατα ή/και για μεγάλη χρονική περίοδο, ιδιαίτερα αν το συγκεκριμένο όργανο ήταν υψηλής τεχνολογίας και εύχρηστο. Για την αποφυγή λήψης μεροληπτικών (biased) απαντήσεων, πρέπει οι επιλεγόμενοι στο βήμα IS1 εμπειρογνώμονες να διαθέτουν, μεταξύ άλλων χαρακτηριστικών, διακριτική/αναλυτική/συνθετική/συνδυαστική ικανότητα και προοδευτική αντίληψη/συμπεριφορά. Το πρώτο χαρακτηριστικό συμβάλει στην κατανόηση της σχέσης μεταξύ μετρητικής συσκευής/μεθόδου και μετρούμενου φυσικού μεγέθους (μεταβλητής, παραμέτρου, σταθεράς). Το δεύτερο χαρακτηριστικό συμβάλλει στη χωρίς φόβο/καχυποψία προσέγγιση συσκευών καινοτομικής τεχνολογίας, η οποίες απαιτούν αυξημένη γνώση ή εξειδικευμένα μέτρα ασφάλειας, όπως αυτές που μετρούν το πάχος του ανοδικού στρώματος μέσω μέτρησης της έντασης ακτίνας σκεδαζομένων σωματιδίων βήτα, με εφαρμογή κατάλληλης ραδιενεργού πηγής και χρησιμοποίησης του αντίστοιχου ανιχνευτή (A₅).

8.6 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο αναπτύσσεται μία μεθοδολογία για τη δημιουργία/συντήρηση μίας DKB για επιμετάλλωση/ανοδίωση, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για (α) διαχείριση γνώσης στο αντίστοιχο τμήμα μίας μεγάλης επιχείρησης (EME) και (β) μεταφορά τεχνολογίας σε μία MME, υπό μορφή τακτικής συμβουλευτικής δράσης, με τη βοήθεια ενός πληροφοριακού συστήματος που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Η μεθοδολογία που υιοθετούμε βασίζεται κυρίως στην ασαφή λογική που εμπεριέχεται μέσα σε ένα δένδρο ανάλυσης σφαλμάτων (Fault Tree Analysis – FTA) και στην ασαφή πολυκριτήρια ανάλυση (Fuzzy Multicriteria Analysis – FMCA), ώστε να λάβουμε υπόψη την αβεβαιότητα.

Το βοηθούμενο από υπολογιστή ολοκληρωμένο σχήμα που παρουσιάζεται μπορεί (α) να βρει όλους τις δυνατές/υποψήφιες τελικές αιτίες (μέσω fuzzy FTA), που είναι ενδεχομένως υπεύθυνες για την παραγωγή ενός ελαττωματικού αντικειμένου, (β) να αποκλείσει τις περισσότερες από αυτές από περαιτέρω εξέταση, εφαρμόζοντας ένα φίλτρο υπό μορφή έμπειρου συστήματος, (γ) να κατατάξει τις υπόλοιπες σύμφωνα με κριτήρια, όπως σημαντικότητα, απαιτήσεις δοκιμών ελέγχου/επιβεβαίωσης (κόστος, χρόνος, εξοπλισμός/

μέθοδος/διαθεσιμότητα/αξιοπιστία), εξηγησιμότητα, (δ) να ενεργοποιήσει το λογισμικό εξέτασης/εκτίμησης θεραπείας μέχρι να αποκαλυφθεί η πραγματική αιτία, (ε) να εμπλουτίσει μία ενσωματωμένη διαγνωστική βάση γνώσης με εμπειρία που αποκτάται κατά τη συμβουλευτική διαδικασία. Οι περιοχές των δυνατών εφαρμογών είναι (α) επιμετάλλωση μετάλλων και κραμάτων (κυρίως πάνω σε μητρικό υπόστρωμα από χάλυβα), (β) ανοδίωση του αλουμινίου και άλλων μετάλλων, (γ) ηλεκτροχημική παραγωγή χημικών ενώσεων/προϊόντων και διαφόρων μετάλλων (π.χ. χλώριο - καυστική σόδα και αλουμίνιο/μαγνήσιο/νικέλιο/χαλκό, αντίστοιχα), (δ) ηλεκτροχημική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το κοινό χαρακτηριστικό αυτών των διεργασιών είναι η ηλεκτροχημική μετατροπή που δομεί μία στερεή πλατφόρμα για το συσχετισμό της ποιότητας στο ενδιάμεσο/τελικό προϊόν με την παρακολούθηση/έλεγχο της διεργασίας. Αυτή η σχέση ενισχύει την ιχνηλασιμότητα στη βιομηχανία, σύμφωνα με τα νέα πρότυπα της σειράς ISO 9000. Μία επέκταση του ολοκληρωμένου σχήματος σε μη-ηλεκτρολυτικές διεργασίες μπορεί να είναι δυνατή, εάν είναι εφικτή η κατασκευή μίας αντίστοιχης πλατφόρμας, βασισμένη σ'έναν εξίσου στέρεο σκελετό (π.χ. χημική θερμοδυναμική). Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, μπορεί να υιοθετηθεί μία πιο πολύ εμπειρική προσέγγιση, δίνοντας έναν πιο στοχαστικό προσανατολισμό στο FTA, ενισχύοντας το ρόλο του έμπειρου συστήματος σαν φίλτρο, και εισάγοντας περισσότερο πρακτικά κριτήρια όπως 'διαθεσιμότητα θεραπείας' που τελικά αντικαθιστά κριτήρια όπως 'εξηγησιμότητα' στον ασαφή πολυκριτήριο πίνακα προτίμησης.

Παρουσιάζεται μία εφαρμογή ασαφούς ανάλυσης δένδρου σφαλμάτων στην περίπτωση της επιχρωμίωσης του χάλυβα, όταν το εξεταζόμενο σφάλμα (top event) είναι 'ανομοιογενής εμφάνιση επιφάνειας του στρώματος χρωμίου'. Οι υποψήφιος για πολυκριτηριακή επιλογή εναλλακτικές αιτίες ήταν: διάβρωση της ανόδου (A_1), οξείδωση του σημείου ηλεκτρικής επαφής με το αντικείμενο (A_2), λανθασμένη αρχική τοποθέτηση (A_3), ανεπαρκής ανάδευση (A_4), γήρανση του λουτρού της επιμετάλλωσης (A_5), μείωσης της συγκέντρωσης του λουτρού σε χημικά πρόσθετα (A_6). Η εκτέλεση του προγράμματος FMCA υπέδειξε ως υπεύθυνο του εξεταζόμενου σφάλματος το αίτιο A_1 . Οι πειραματικές μετρήσεις (των δοκιμών επιβεβαίωσης), όμως, των επιφανειών των ανόδων έδειξαν ότι το πάχος του στρώματος του οξειδίου ήταν μέσα στις απαιτούμενες προδιαγραφές. Επίσης, το λουτρό της ηλεκτρόλυσης εξετάστηκε για πιθανή μόλυνση με χλωρικά ιόντα και υδροχλωρικό οξύ που είναι δυνατόν να προκαλεί απογύμνωση των ανόδων. Αυτή η εξέταση ήταν απαραίτητη, καθώς ο χρόνος που πέρασε από την επιχρωμίωση της παρτίδας των αντικειμένων μέχρι την εξέταση των ελαττωματικών αντικειμένων ήταν αρκετός για την προοδευτική επανακάλυψη της επιφάνειας της ανόδου με ένα νέο στρώμα οξειδίου. Ωστόσο, η μόλυνση που βρέθηκε ήταν

αμελητέα, οπότε η εναλλακτική λύση A_1 αποκλείστηκε και επαναλήφθηκε η διαδικασία. Η νέα λύση που προέκυψε, αφού εκτελέστηκε εκ νέου το υποπρόγραμμα FMCA (χωρίς την εναλλακτική πρόταση A_1) PROMETHEE II ήταν $A_4 > A_3 > A_6 > A_2 > A_5$. Έτσι, η προτεινόμενη νέα εναλλακτική λύση για έλεγχο τελικού αιτίου του σφάλματος της κορυφής, είναι η A_4 , δηλ. ‘ανεπαρκής ανάδευση’. Εξέταση αυτής της εναλλακτικής λύσης μέσω πειράματος και προσομοίωσης με υπολογιστή (με δεδομένα που συνήθως ισχύουν στην πράξη) έδειξε ότι αυτή η αιτιώδης σχέση είναι πιο πιθανό να έχει λάβει χώρα κατά τη διάρκεια της επιμετάλλωσης της παρτίδας όπου το ελαττωματικό αντικείμενο ανήκει. Η πειραματική επιβεβαίωση αυτής της αιτιώδους σχέσης, οδήγησε στην τελική απόφαση να προταθεί η ‘αύξηση της ανάδευσης’ ως επανορθωτική λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Επίσης, παρουσιάζεται μία εφαρμογή ανοδίωσης του αλουμινίου, όταν το εξεταζόμενο σφάλμα είναι ‘τοπικά καμένη επιφάνεια’. Οι υποψήφιες για πολυκριτηριακή επιλογή εναλλακτικές αιτίες, που προέκυψαν μετά την εκτέλεση του προγράμματος ασαφούς ανάλυσης δένδρου σφαλμάτων, ήταν: ανεπαρκής ανάδευση (A_1), χαμηλή απόδοση του συστήματος ψύξης (A_2), υψηλή τοπική συγκέντρωση των συστατικών του κράματος ή των προσμείξεων (A_3), αταξίες δομής εντός βάθους $<30\mu\text{m}$ υπό την επιφάνεια του μητρικού μετάλλου (A_4), λανθασμένη αρχική διεύθυνση των προς ανοδίωση αντικειμένων (A_5), τοποθέτηση των αντικειμένων πολύ κοντά στις καθόδους (A_6), εκτός ορίων συγκέντρωση προσθέτων στο λουτρό της ανοδίωσης (A_7). Η εκτέλεση του προγράμματος FMCA υπέδειξε ως υπεύθυνο του εξεταζόμενου σφάλματος το αίτιο A_6 ενώ η ανάλυση ευαισθησίας απέδειξε ότι η προτεινόμενη λύση είναι εύρωστη (robust). Η πειραματική εξέταση της εύρωστης πρότασης A_6 σε φυσικό προσομοιωτή σε εργαστηριακές συνθήκες με βάση βιομηχανικά δεδομένα που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα αποστάσεων, κατευθύνσεων/προσανατολισμών αντικειμένων κρεμασμένων στις ανόδους σε σχέση με τη θέση/επιφάνεια/προσανατολισμό των καθόδων απέδειξε ότι η πρόταση/υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται στην πράξη.

Η παραπάνω περιγραφόμενη μεθοδολογία μπορεί να επεκταθεί σε μετρολογικές εφαρμογές προκειμένου να υποστηριχθούν βιομηχανικές MME, οι οποίες στερούνται (i) των αναγκαίων μέσων εντοπισμού ελαττωμάτων στα παραγόμενα ενδιάμεσα/τελικά προϊόντα και (ii) εξειδικευμένου επιστημονικού προσωπικού κατάλληλου να ανιχνεύσει/επιβεβαιώσει τις αιτίες και να προτείνει μέτρα θεραπείας ή/και πρόληψης. Το προτεινόμενο πληροφοριακό σύστημα μπορεί να δώσει εφαρμόσιμες λύσεις σε μετρολογικά προβλήματα επιλογής συσκευών μέτρησης καθημερινής χρήσης και παροχής υπηρεσιών διακρίβωσης/ρύθμισης/βαθμονόμησης οργάνων και εκτέλεσης μετρήσεων υψηλής ακρίβειας ή σπανίως ζητούμενων

χαρακτηριστικών/ιδιοτήτων για προϊόντα με ειδικές προδιαγραφές. Τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια είναι: απαιτούμενος χρόνος, ευκολία, κόστος, ακρίβεια, ορθότητα, περιοχή μέτρησης, βαθμός αποδοχής, συγκρισιμότητα. Ως πραγματική εφαρμογή παρουσιάζεται η περίπτωση της επιλογής μεθόδου μέτρησης του πάχους του ανοδικού στρώματος του αλουμινίου. Οι εναλλακτικές μέθοδοι, που προκρίθηκαν είναι μέτρηση: της μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης πηνίου, όταν επάγονται δινορρεύματα στη μητρική επιφάνεια του αλουμινίου (A_1), της διαφοράς μάζας ανοδιωμένου δοκιμίου αλουμινίου πριν και μετά τη διάλυση του ανοδικού στρώματος (A_2), της διατομής σε οπτικό μικροσκόπιο, (A_3), της διατομής σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (A_4), της έντασης ακτίνας σκεδαζομένων σωματιδίων βήτα (A_5), του αριθμού των μονοχρωματικών κροσσών που εμφανίζονται όταν χρησιμοποιείται μικροσκόπιο παρεμβολής διπλής δέσμης (A_6), του ηλεκτρικού δυναμικού ή της ηλεκτρικής αντίστασης (A_7). Η εκτέλεση του προγράμματος FMCA υπέδειξε ως προτεινόμενη λύση τη μέθοδο A_1 , η οποία αποδεικνύεται εύρωστη (robust), αφού (i) δεν περιλαμβάνεται σε οποιοδήποτε ζεύγος μεθόδων του οποίου τα μέλη εμφανίζονται ως μη-συγκρίσιμα και (ii) η μονοπαραμετρική ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη δεύτερη καλύτερη μέθοδο, A_3 , σε επίπεδο χαμηλής και υψηλής ανάλυσης επιβεβαιώνει την υπεροχή της A_1 σε ολόκληρη την περιοχή $\pm 50\%$ γύρω από τη μέση απασαφοποιημένη τιμή κάθε κριτηρίου στο διάστημα των βαρών. Επί πλέον, η εμπειρική έρευνα τόσο σε υποκειμενικό επίπεδο δια μέσου των εμπειρογνομόνων όσο και σε αντικειμενικό επίπεδο δια μέσου της εξόρυξης δεδομένων από την τεχνική βιβλιογραφία επιβεβαιώνει τα παραπάνω αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

- [1] Fotilas P., Batzias A.F. (2008). Knowledge Acquisition within a Network of Industrial Laboratories Performing Quality Specifications Testing. *8th Joint Conference on Knowledge - Based Software Engineering 2008*, JCKBSE 08, M. Virvou and T. Nakamura (Eds.) in «*Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*», IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, 180, L.C. Jain and R.J. Howlett, Eds., pp. 337-346.
- [2] Blesseos N.P., Batzias A.F. (2008). Knowledge Acquisition/Transformation to Meet the Quality Needs of the Metallic Constructions Market. *8th Joint Conference on Knowledge - Based Software Engineering 2008*, JCKBSE 08, M. Virvou and T. Nakamura (Eds.) in «*Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*», IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, 180, L.C. Jain and R.J. Howlett, Eds., pp. 327-336.
- [3] Shanteau J.S., Weiss D.J., Thomas R.P., Pounds J.C. (2002). Performance-Based Assessment of Expertise: How to Decide if Someone is an Expert or Not. *European Journal of Operational Research*, 136, pp. 253 – 263.
- [4] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Fuzzy Fault Tree Analysis as a Mechanism for Technical Support to Small/Medium Electroplaters on a Quasi Online/Real-Time Basis, *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT03)*, Maribor, Slovenia, 1, pp. 36-41.
- [5] Brans J.P., Vincke Ph., Mareschal B. (1986). How to Select and How to Rank Projects: The PROMETHEE Method. *European Journal of Operational Research*, 24, pp. 228 – 238.

- [6] Tseng T.Y., Klein C.M. (1989). New Algorithm for the Ranking Procedure in Fuzzy Decisionmaking. *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics*, 19, No. 5, pp. 1289 – 1296.
- [7] Batzias F.A., Markoulaki E.C. (2002). Restructuring the Keywords Interface to Enhance CAPE Knowledge via an Intelligent Agent, *Computer Aided Chemical Engineering*, 10, 829-834.
- [8] Andrews J.D. (2001). The Use of NOT Logic in Fault Tree Analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 17, pp. 143-150.
- [9] Rauzy A. (2003). A New Methodology to Handle Boolean Models with Loop. *IEEE Transactions on Reliability*, 52, pp. 96-105.
- [10] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). A System for Support and Training of Personnel Working in the Electrochemical Treatment of Metallic Surfaces. *Computer Aided Chem. Eng.* (Elsevier), 14, pp. 365-370.
- [11] Batzias A.F., Batzias F.A. (2004). Fuzzy Fault Tree Analysis as a Means for Computer Aided Technology Transfer to Small/Medium Anodizers. *Computer Aided Chem. Eng.*, Elsevier, 16, pp. 577-582.
- [12] Batzias A.F., Batzias F.A. (2004). Fuzzy Multicriteria Choice of Instrumental Methods for Measuring Physical Quantities - Application in the Case of Dielectric Aluminium Anodic Oxide Films. *Proc. IEEE Instrum. & Meas. Technol. (IMTC 2004)* 3, pp. 2217-2222.
- [13] Hammond K.R. *Human Judgment and Social Policy*. Oxford University Press, New York, 1996.

9 Επέκταση του πληροφοριακού συστήματος στην εκπαίδευση προσωπικού και τη μεταφορά τεχνογνωσίας

9.1 Εισαγωγή

Για πολλούς λόγους, η δημιουργία/διατήρηση συνθηκών αυξημένης παραγωγικότητας, ασφάλειας, αξιοπιστίας, υπευθυνότητας και ποιότητας προϊόντος και διεργασίας προϋποθέτει την κατοχή ορισμένων δεξιοτήτων από το τεχνικό προσωπικό. Για την αντιμετώπιση έλλειψης κατάλληλης εμπειρίας, ιδιαίτερα απαραίτητης για την επίλυση προβλημάτων επείγοντα χαρακτήρα που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, έχουμε αναπτύξει τη μεθοδολογία προσομοίωσης ΣΕΤΥ (Σύστημα Εκπαίδευσης και Τεχνικής Υποστήριξης) ως επέκταση των προγραμμάτων που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενες Ενότητες. Η βασική ιδέα προέρχεται από την περιοχή των έμπειρων συστημάτων και συνίσταται στη μετατροπή του επιχειρησιακού χώρου με τη βοήθεια μίας Βάσης Γνώσης (Knowledge Base – KB) και ενός συμπερασματικού μηχανισμού (inference engine), ώστε να είναι εφικτή (α) η αλληλεπίδραση του εποπτεύοντα/χειριστή (supervisor/operator) με τη διεργασία μέσω εμπειρικών κανόνων και (β) η σχεδίαση/ανάπτυξη/εφαρμογή/ανασχεδίαση των κανόνων αυτών από το μηχανικό διεργασιών/ποιότητας/γνώσης (process/quality/ knowledge engineer) με όχημα/πιλότο τη νεύρο-ασαφή λογική, συνοδηγό τον παραπάνω αναφερόμενο εποπτεύοντα/χειριστή και οδικό χάρτη τη σωρευμένη εμπειρία από όμοιες περιπτώσεις, όπως αυτή εκφράζεται/αξιολογείται ορθολογικά από τα αντίστοιχα επιστημονικά πεδία. Η συνεργασία του είδους αυτού είναι απαραίτητη, όταν επιδιώκεται η εξαγωγή τυπικά εκφραζόμενης γνώσης (explicit/expressed knowledge) από μη τυπικά εκφραζόμενη υποκειμενική/εμπειρική γνώση (implicit/tacit knowledge) στα πλαίσια μίας βοηθούμενης από Η/Υ διαδικασίας [1,2].

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται ορισμένα βασικά σημεία της σχεδίασης/ανάπτυξης/εφαρμογής ενός βασιζόμενου στη γνώση συστήματος (Knowledge Based System – KBS), το οποίο μπορεί να εφοδιάζει με κανόνες και οδηγίες το τεχνικό προσωπικό που απασχολείται με την ηλεκτροχημική επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών, συμβάλλοντας επίσης στη δημιουργία/διατήρηση περιβάλλοντος συνεργασίας μεταξύ εργαζομένων που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα της ιεραρχίας. Το ίδιο σύστημα εμπλουτίζει/επικαιροποιεί μία τοπική KB και διεξάγει ανάλυση δένδρου σφαλμάτων (Fault Tree Analysis – FTA), όταν εντοπίζεται ένα σημαντικό ελάττωμα, αυξάνοντας την ιχνηλασιμότητα, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO της σειράς 9000. Το KBS αποτελείται από τα διακριτά υποσυστήματα CIS, EIS, TIS και το περιβάλλον - σύστημα FDS. Το CIS (Chemical

Interactive Sub-system) συνθέτει/προμηθεύει κανόνες στον εποπτεύοντα/χειριστή προκειμένου η συμμεταβολή των τιμών των μεταβλητών/παραμέτρων ελέγχου να προσδιορίζει ένα διανυσματικό χώρο λειτουργία της διεργασίας, στον οποίο διασφαλίζεται ανεκτό ποσοστό ελαττωμάτων και συμφωνία με τις λοιπές προδιαγραφές του παραγόμενου/ενδιάμεσου τελικού προϊόντος. Το CIS βασίζεται σε αλγόριθμο νευρο-ασαφούς ταξινόμησης και είναι κατάλληλο κυρίως για διεργασίες που λαμβάνουν χώρα εντός ομοιογενούς λουτρού, όπως στην περίπτωση του υπο-σταδίου του αλκαλικού καθαρισμού όπου προηγείται του ηλεκτροχημικού σταδίου της ανοδίωσης του αλουμινίου.

Το EIS (Electrochemical Interactive Sub-system) συνθέτει/προμηθεύει κανόνες στον εποπτεύοντα/χειριστή προκειμένου να διασφαλίζονται αμφότερα, ανεκτό ποσοστό ελαττωμάτων και συμφωνία με τις λοιπές προδιαγραφές (όπως τίθενται από τον πελάτη ή την αγορά ή/και επιβάλλονται από το ισχύον θεσμικό πλαίσιο) του τελικά παραγόμενου προϊόντος με το ελάχιστο κόστος. Το EIS βασίζεται σε αλγόριθμο νευρο-ασαφούς προσέγγισης, σε συνεργασία με μια εξωτερική ευρετική διαδικασία, και είναι κατάλληλο κυρίως για ηλεκτροχημικές διεργασίες, όπως είναι η ανοδίωση του αλουμινίου και η επιμετάλλωση του χάλυβα. Το TIS (Topological Interactive Sub-system), το οποίον ευρίσκεται ιεραρχικά υπό το EIS, συνθέτει/προμηθεύει απαγορευτικούς κανόνες και διατυπώνει συμβουλές για τον εποπτεύοντα/χειριστή, όσον αφορά στην τοποθέτηση/διευθέτηση ράβδων/δοκών/κρεμαστρών/γάντζων, από όπου κρέμονται τα προς ανοδίωση ή επιμετάλλωση αντικείμενα, προκειμένου ειδικά μεν να αποφευχθεί η εμφάνιση ελαττωμάτων, γενικά δε να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται δύσκολα και για τον λόγο αυτόν η σχετική προσπάθεια περιγράφεται στα τεχνικά εγχειρίδια ως εμπειρική τέχνη μάλλον παρά ως επιστημονική μεθοδολογία, με αποτέλεσμα να είναι επιτακτική η ανάγκη της ανάδρασης (σε πληροφοριακό επίπεδο) από την πλευρά του εποπτεύοντα/χειριστή και του εργαστηρίου ποιοτικού ελέγχου. Τέλος, το FDS (Fault Diagnosis System) είναι ένα περιβάλλον-σύστημα, το οποίον περιλαμβάνει τα παραπάνω υποσυστήματα και την απαιτούμενη διαδικασία για την διεξαγωγή FTA.

9.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίζεται σε ασαφή πολυκριτηριακή ανάλυση (FMCA) δύο φάσεων [βλ. [3-10]], η οποία πραγματοποιείται από το τεχνικό προσωπικό στα πλαίσια του βοηθούμενου από Η/Υ ολοκληρωμένου σχήματος διαδικασιών που περιγράφεται στη συνέχεια και απεικονίζεται στο Σχήμα 9.1 (21 εκτελεστικά στάδια συνδεδεμένα μέσω 8 κόμβων απόφασης). Στο Στάδιο 9.2, η εφαρμογή ενός νευρο-ασαφούς δικτύου προσδιορίζει

τις ιδιότητες του προϊόντος από τις συνθήκες κατεργασίας πρώτων και ενδιάμεσων υλικών [11]. Στη συνέχεια, δεδομένων των επιθυμητών προδιαγραφών του προϊόντος (όπως αυτές προσδιορίζονται από τον πελάτη ή την αγορά ή/και το υπάρχον θεσμικό πλαίσιο), άρα και του διάνυσματος εξόδου που αντιστοιχεί στις ιδιότητες του προϊόντος, προσδιορίζεται το διάνυσμα εισόδου που αντιστοιχεί στις απαιτούμενες συνθήκες κατεργασίας. Οι αντιστοιχίσεις διανυσμάτων εισόδου-εξόδου, οι οποίες λαμβάνονται από τη βιομηχανική παραγωγή ή φυσικούς προσομοιωτές, αποτελούν το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται από τον νευρο-ασαφές δίκτυο κατά την περίοδο της 'μάθησης'. Οι εφικτοί/επιθυμητοί συνδυασμοί σχηματίζουν, κάτω από αυστηρούς περιορισμούς ως προς το ανώτατο επιτρεπτό όριο εμφάνισης ελαττωμάτων, ομάδες (clusters), οι οποίες φιλτράρονται (οπότε μειώνεται ο αριθμός τους) μέσω ενός ελάχιστου πλάτους τιμών που αντιστοιχούν στις μεταβλητές εισόδου [12]. Στο χρησιμοποιούμενο λογικό σχήμα, οι μεταβλητές αυτές είναι ανεξάρτητες, αφού οι εξαρτημένες μεταβλητές συνιστούν το διάνυσμα εξόδου. Τα μέλη του τελικά προ-επιλεγόμενου συνόλου των ομάδων κατατάσσονται, με τη βοήθεια FMCA, σε σειρά φθίνουσας προτίμησης για υιοθέτηση στην παραγωγική διαδικασία. Τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια είναι: σταθερό/κεφαλαιακό κόστος f_1 , ενεργειακό κόστος f_2 , παραγωγικότητα ως προς το φυσικό προϊόν (δηλ. ρυθμός κατεργασίας, εξαρτώμενος κυρίως από την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία με τη σειρά της προσδιορίζει τη δομή του πορώδους ανοδικού στρώματος και επηρεάζει ποσοτικά και ποιοτικά την εμφάνιση ελαττωμάτων στο ενδιάμεσο/τελικό προϊόν) f_3 , λοιπό μεταβλητό/λειτουργικό κόστος f_4 , περιβαλλοντική επιβάρυνση f_5 , συμβολή στη διαδοχή των παρτίδων των προς ανοδίωση αντικειμένων f_6 , συμβολή στη διευκόλυνση ρυθμίσεων για τη βέλτιστη λειτουργία/έλεγχο της διεργασίας, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των αντικειμένων της ίδιας παρτίδας, f_7 .

Στο Στάδιο 10, ο τύπος του παρατηρηθέντος ελαττώματος τίθεται ως 'γεγονός κορυφής' στη ρίζα του αντεστραμμένου δένδρου που χρησιμοποιείται για FTA και οι δεσμοί αιτίου-αποτελέσματος ποσοτικοποιούνται δια τον FSIs, οι οποίοι εκτιμώνται από τους εμπειρογνώμονες βάσει (i) των σχετικών συχνοτήτων εμφάνισης του αποτελέσματος και (ii) της συνάφειας με την επικρατούσα στο ίδιο πεδίο επιστημονική θεωρία και της σχετικής πειραματικής υποστήριξης. Κατά συνέπεια, τα φύλλα του δένδρου (παρουσιαζόμενα υπό μορφή ρόμβων στα αντίστοιχα διαγράμματα) αποτελούν το σύνολο των υποψηφίων για περαιτέρω εξέταση τελικών αιτιών, στα οποία οφείλεται η εμφάνιση του γεγονότος της κορυφής. Η σειρά προτεραιότητας/προτίμησης που θα ακολουθηθεί στην εξέταση αυτή προσδιορίζεται με FFTA, χρησιμοποιώντας τα ακόλουθα κριτήρια: σημαντικότητα (όπως προκύπτει από τον αντίστοιχο FSI) g_1 , διαθεσιμότητα εξοπλισμού g_2 , αξιοπιστία

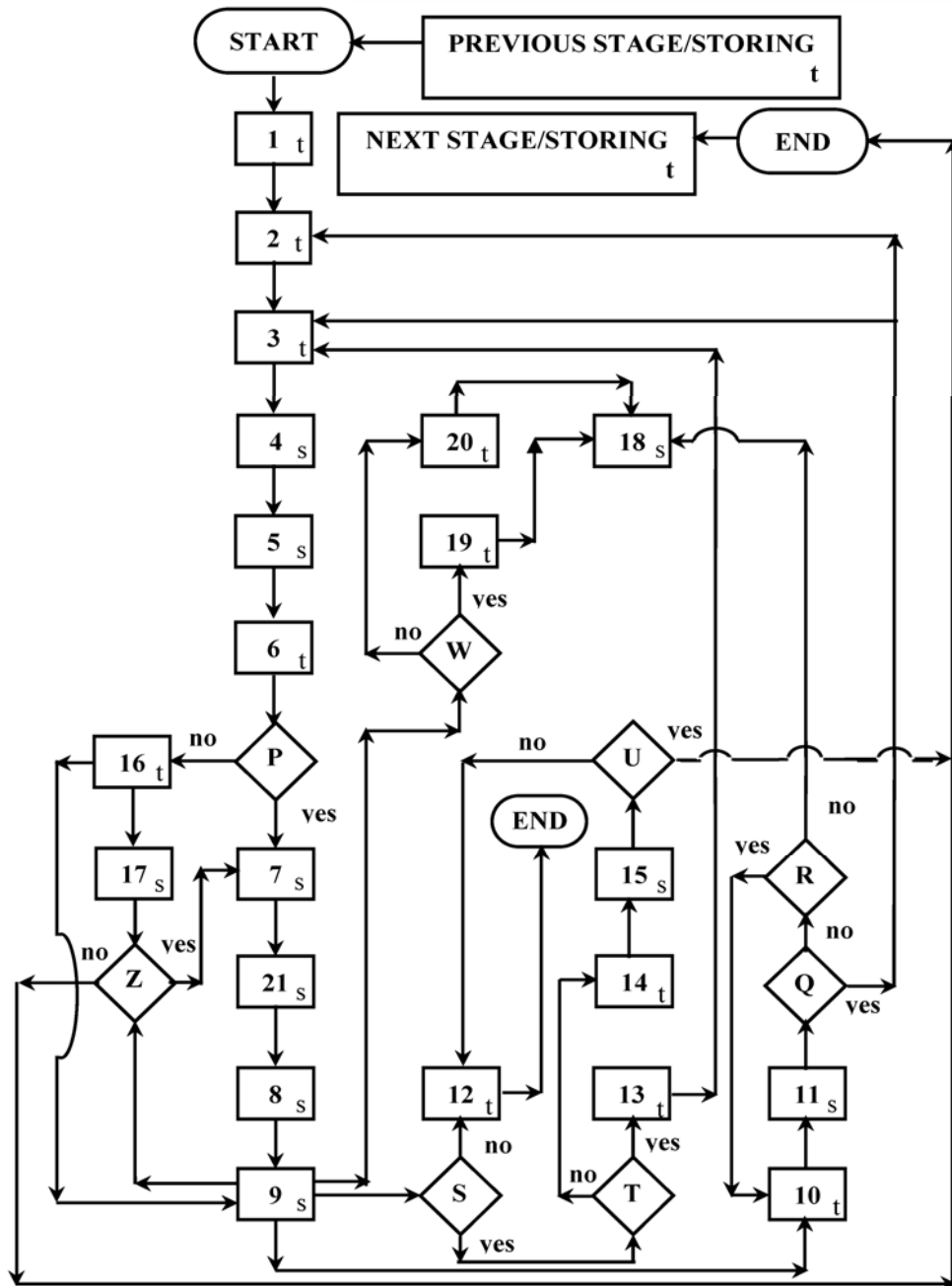
(βασιζόμενη στην ανάλυση διακύμανσης – ANOVA – των πειραματικών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν υπό όμοιες συνθήκες ηλεκτροχημικής επεξεργασίας κατά το παρελθόν) g_3 , κόστος εξέτασης g_4 , λόγος απαιτούμενου για την εξέταση χρόνου προς τον διαθέσιμο (λόγω δεσμεύσεων που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία) χρόνο g_5 , αναμενόμενη συμβολή στην εξηγησιμότητα των σχέσεων που συνδέουν το γεγονός κορυφής με το τελικό αίτιο (δηλ. σχέση με το αντίστοιχο επιστημονικό/θεωρητικό υπόβαθρο) g_6 .

Σημειώνεται ότι τα κριτήρια $f_1, f_2, f_4, g_2, g_3, g_4$ έχουν αντικειμενικά χαρακτηριστικά ενώ τα κριτήρια $f_3, f_5, f_6, f_7, g_1, g_5, g_6$ έχουν μάλλον υποκειμενικά χαρακτηριστικά, δηλ. παρέχουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας στον εμπειρογνώμονα που θα εκτιμήσει τελικά τις τιμές στα αντίστοιχα διανύσματα βαρών. Οι βαθμοί (στοιχείων εισόδου/input) της πολυκριτήριας μήτρας που αντιστοιχούν στα υποκειμενικά κριτήρια εκτιμώνται από έξι μέλη του τεχνικού προσωπικού (δύο μηχανικούς παραγωγής, δύο τεχνικούς ποιοτικού ελέγχου, δύο χειριστές/επόπτες) ειδικότερα, οι χειριστές/επόπτες δίνουν βαθμούς που αντιστοιχούν στα υποκειμενικά κριτήρια f_6, f_7, g_5 , ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα μέλη του τεχνικού προσωπικού δίνουν βαθμούς που αντιστοιχούν στα υποκειμενικά κριτήρια f_3, f_5, g_1, g_6 . Στην εκτίμηση των στοιχείων του διανύσματος των βαρών των κριτηρίων συμμετέχουν όλα τα παραπάνω μέλη.

Το παρουσιαζόμενο KBS μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και από ένα μεμονωμένο μέλος του προσωπικού τόσο για τεχνική υποστήριξη όσο και για εκπαίδευση, καθ' όσον υπάρχει η δυνατότητα να δίνονται όλες οι απαραίτητες τιμές μεταβλητών/παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Πέραν αυτών, ο εκπαιδευόμενος χρήστης μπορεί να αξιολογήσει το KBS ως εξομοιωτή, χρησιμοποιώντας είτε αποθηκευμένες στο σύστημα παλαιές περιπτώσεις προβλημάτων της παραγωγής είτε δημιουργώντας υποθετικές περιπτώσεις με δεδομένα που είναι ενδεχόμενο να προκύψουν στο μέλλον. Κατά τη διάρκεια μιας εκπαιδευτικής περιόδου (session), ο χρήστης ενεργοποιεί το KBS εισάγοντας τα επιθυμητά δεδομένα, οπότε λαμβάνει την ανάδραση του συστήματος. Στην περιγραφή των σταδίων που ακολουθεί, η παρέμβαση του χρήστη και η απόκριση του συστήματος σημειώνονται με t και s αντίστοιχα.

- 1 t. Εισαγωγή (α) απαιτήσεων/προδιαγραφών για το προϊόν που δίνονται από τον πελάτη ή την αγορά, (β) έλεγχος ποιότητας των πρώτων υλών ή του ημιτελούς προϊόντος που έγινε κατά τη διάρκεια των προηγούμενων σταδίων της παραγωγής/επεξεργασίας.
- 2 t. Εφαρμογή CIS ή EIS, εάν η διαδικασία είναι χημική ή ηλεκτροχημική, αντίστοιχα, για να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες για παραγωγή/επεξεργασία με τη βοήθεια FMCA.
- 3 t. Εφαρμογή του TIS που είναι απαραίτητο στην περίπτωση του EIS.

- 4 s. Χημική ή ηλεκτροχημική επεξεργασία, καταγραφή (α) των αλλαγών στις συνθήκες και (β) των παρατηρήσεων οποιωνδήποτε μη αναμενόμενων γεγονότων, ή αστοχιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας.
- 5 s. Οπτικός έλεγχος του προϊόντος, μαζί με απλές μετρήσεις in situ.
- 6 t. Διορθωτικές κινήσεις μετά την επεξεργασία για εξαφάνιση αναγνωρίσιμων μικρών ελαττωμάτων.
- 7 s. Διαχωρισμός των ελαττωματικών τεμαχίων.
- 8 s. Δειγματοληπτικός έλεγχος από την επιτροπή ποιοτικού ελέγχου (Quality Control Committee - QCC).
- 9 s. Ποιοτικός έλεγχος προϊόντος, εκτός γραμμής παραγωγής, στο εργαστήριο.
- 10t. Εφαρμογή (α) FTA για να προταθεί η αρχική αιτία του παρατηρούμενου ελαττώματος και (β) ασαφής πολυκριτηριακή επιλογή για την καλύτερη πειραματική οδό, μεταξύ υπονήφιων εναλλακτικών, για να επιβεβαιωθεί ή να απορριφθεί η πρόταση.
- 11s. Εκτέλεση της δοκιμής επιβεβαίωσης, δια της επιλεγμένης πειραματικής οδού.
- 12t. Απόρριψη των ελαττωματικών κομματιών από την QCC – Απόφαση για ανακύκλωση ή τελική διάθεση.
- 13t. Ειδική επεξεργασία της επιφάνειας των τεμαχίων, για να επανέλθουν στην αρχική κατάσταση τους, σύμφωνα με διορθωτική οδηγία που δίνεται από το εργαστήριο.
- 14t. Εφαρμογή της ειδικής επεξεργασίας που επιλέχθηκε μεταξύ των συνιστώμενων πρακτικών, π.χ. τοπική επιμετάλλωση/ανοδίωση, εάν αυτό είναι αποδεκτό από τον πελάτη.
- 15s. Προσωρινή αποθήκευση των πρόσθετα επεξεργασμένων ελαττωματικών κομματιών, μέχρι την έκδοση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών ελέγχων.
- 16t. Δειγματοληψία μεταξύ των φαινομενικά καλών τεμαχίων σύμφωνα με προτυποποιημένες, συνιστώμενες, ή συμφωνημένες πρακτικές, και μεταφορά στο εργαστήριο για έλεγχο εκτός γραμμής παραγωγής.
- 17s. Προσωρινή αποθήκευση των φαινομενικά καλών τεμαχίων, μέχρι τον εργαστηριακό έλεγχο.
- 18s. Επεξεργασία γνώσης για υποστήριξη και εκπαίδευση.
- 19t. Ανάλυση ευαισθησίας, αλλάζοντας τις τιμές των βαρών των κριτηρίων στα δεδομένα του πολυκριτηριακού προβλήματος.
- 20t. Ανάλυση ευαισθησίας, αλλάζοντας τις τιμές των παραμέτρων της γενικευμένης συνάρτησης της εφαρμοζόμενης πολυκριτηριακής μεθόδου.
- 21s. Αποθήκευση των ελαττωματικών τεμαχίων.



Σχήμα 9.1. Διάγραμμα ροής που απεικονίζει μία ολοκληρωμένη επεξεργασία σε ένα εργοστάσιο ανοδίωσης/επιμετάλλωσης, σύμφωνα με την αλγοριθμική διαδικασία των 21 σταδίων που περιγράφεται στο κείμενο (t: πρωτοβουλία χρήστη, s: απόκριση του συστήματος).

- P. Υπάρχουν ελαττωματικά τεμάχια μετά τη διορθωτική ενέργεια;
- Q. Η προτεινόμενη αρχική αιτία επιβεβαιώθηκε;
- R. Υπάρχει κάποια άλλη εναλλακτική πειραματική οδός;
- S. Είναι εφικτή η επιφανειακή αποκατάσταση;
- T. Είναι εφικτή η απομάκρυνση του οξειδίου;
- U. Είναι αποδεκτά τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου;

W. Το αρχικό σφάλμα προκλήθηκε από ανθρώπινο λάθος;

Z. Υπάρχουν ελαττωματικά τεμάχια;

9.3 Εφαρμογή

Η περιγραφόμενη στην προηγούμενη Ενότητα Μεθοδολογία εφαρμόστηκε επιτυχώς στη διεργασία της ηλεκτροχημικής ανοδίσωσης του αλουμινίου σε λουτρό θεικού οξέος. Το διάνυσμα εισόδου είναι ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην ενότητα 3.3. Οι τιμές πάχους και πορώδους στο διάνυσμα εξόδου είναι $12 \pm 0,5 \mu\text{m}$ και $11 \pm 1\%$, αντίστοιχα, τιμές που συνήθως ζητούνται στην αγορά δομικών υλικών. Οι συνδυασμοί στοιχείων εισόδου-εξόδου έδωσαν 252 εφικτές απεικονίσεις 6×2 . μετά από ομαδοποίηση, οι συνδυασμοί αυτοί έδωσαν 10 ομάδες που μειώθηκαν σε 5 μετά από φιλτράρισμα ικανοποίησης τεχνικών κριτηρίων εύρους/πυκνότητας. Το διάνυσμα των κριτηρίων που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση FMCA ήταν: $f_1 (18, 2, 1)$, $f_2 (10, 1, 2)$, $f_3 (15, 1, 3)$, $f_4 (8, 1, 1)$, $f_5 (6, 1, 3)$, $f_6 (16, 1, 4)$ και $f_7 (27, 2, 4)$, όπου οι τριγωνικοί ασαφείς αριθμοί εμφανίζονται με τη συνηθισμένη τριγωνική μορφή L,R.

Ορισμένα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.2 υπό μορφή συνόλων ασαφών αριθμών. Στο επίπεδο χαμηλής ανάλυσης ($q=1,0$ και $p=2,0$) εμφανίζεται η λύση $S_2 > S_1 > S_3 > S_4 > S_5$, συνεπαγόμενη $A_2 > A_1 > A_3 > A_4 > A_5$. Στο επίπεδο μέσης ανάλυσης ($q=0,5$ και $p=1,0$) εμφανίζεται η λύση $S_1 > S_2 > S_3 > S_4 > S_5$, συνεπαγόμενη $A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > A_5$. Στο επίπεδο υψηλής ανάλυσης ($q=0,25$ και $p=0,5$) εμφανίζεται η λύση $S_2 > S_1 > S_3 > S_4 > S_5$, συνεπαγόμενη $A_2 > A_1 > A_3 > A_4 > A_5$. Το σύμβολο ' $>$ ' σημαίνει 'καλύτερη από', δηλ. υιοθετείται σειρά φθίνουσας προτίμησης. Στην παρακάτω απλή μη-γεωμετρική απεικόνιση της κατάταξης, οι μη-συγκρίσιμες μέθοδοι συνδέονται με οριζόντιες αγκύλες.

$A_2 > A_1 > A_3 > A_4 > A_5$



Επίπεδο Χαμηλής Ανάλυσης
($q=1, p=2$)

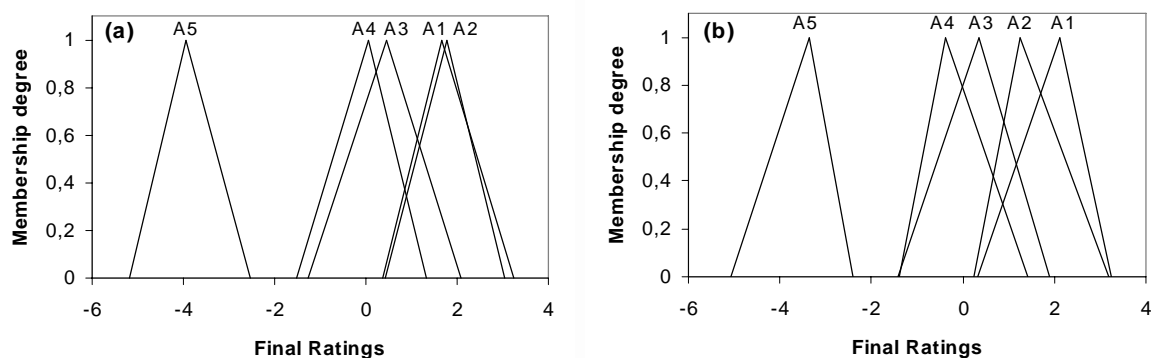
$A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > A_5$

Επίπεδο Μέσης Ανάλυσης
($q=0,5, p=1$)

$A_2 > A_1 > A_3 > A_4 > A_5$



Επίπεδο Υψηλής Ανάλυσης
($q=0,25, p=0,5$)



Σχήμα 9.2. Αποτελέσματα σε (a) μέσο επίπεδο ανάλυσης/ευαισθησίας με τιμές $q=0,5$, $p=1,0$ και (b) χαμηλό επίπεδο ανάλυσης/ευαισθησίας με τιμές $q=1,0$, $p=2,0$

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν τη δυνατότητα των χειριστών/εποπτών να επηρεάσουν την επιλογή της προτεινόμενης λύσης (σε επίπεδο υψηλής ανάλυσης), μεταβάλλοντας τις τιμές των βαρών που αντιστοιχούν στα υποκειμενικά κριτήρια f_3, f_5, f_6, f_7 . Από την άλλη πλευρά, τα λοιπά μέλη του τεχνικού προσωπικού, τα οποία συμμετέχουν στην ίδια διαδικασία και μάλιστα ανήκουν σε ιεραρχικά υψηλότερες βαθμίδες, μπορούν να επηρεάσουν περισσότερο την επιλογή της προτεινόμενης λύσης μέσω της μεταβολή των τιμών των παραμέτρων της γενικευμένης συνάρτησης προτίμησης, που προσδιορίζουν το επίπεδο ανάλυσης. Τέλος, όλα τα μέλη του τεχνικού προσωπικού που λαμβάνουν μέρος στην ίδια διαδικασία μπορούν να επηρεάσουν την προτεινόμενη λύση αφού συμμετέχουν, κατά ειδικότητα/βαθμίδα, στην εκτίμηση των βαθμών της πολυκριτήριας μήτρας. Με τον τρόπο αυτό, και δεδομένου ότι τα συγκεκριμένα μέλη εκφράζουν τις απόψεις που επικρατούν μεταξύ των εργαζομένων (τουλάχιστον) της ίδιας βαθμίδας, καλλιεργείται πνεύμα συνεργασίας, αλληλοεκτίμησης και συνυπευθυνότητας, αφού συνδιαμορφώνονται οι συνθήκες παραγωγής/ελέγχουν τόσο στην πράξη όσο και στην επιχειρούμενη εκπαιδευτική προσομοίωση [13].

9.4. Σύνοψη - Συμπεράσματα

Το παρόν Κεφάλαιο πραγματεύεται ορισμένα βασικά σημεία της σχεδίασης/ανάπτυξης/εφαρμογής ενός βασιζόμενου στη γνώση συστήματος (Knowledge Based System – KBS), το οποίο μπορεί να εφοδιάζει με κανόνες και οδηγίες το τεχνικό προσωπικό που απασχολείται με την ηλεκτροχημική επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών, συμβάλλοντας επίσης στη δημιουργία/διατήρηση περιβάλλοντος συνεργασίας μεταξύ εργαζομένων που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα της ιεραρχίας. Το ίδιο σύστημα εμπλουτίζει/επικαιροποιεί μία τοπική KB και διεξάγει ανάλυση δένδρου σφαλμάτων (Fault

Tree Analysis – FTA), όταν εντοπίζεται ένα σημαντικό ελάττωμα, αυξάνοντας την ιχνηλασιμότητα, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO της σειράς 9000. Το KBS αποτελείται από τα διακριτά υποσυστήματα CIS, EIS, TIS και το περιβάλλον - σύστημα FDS. Το CIS (Chemical Interactive Sub-system) συνθέτει/προμηθεύει κανόνες στον εποπτεύοντα/χειριστή προκειμένου η συμμεταβολή των τιμών των μεταβλητών/παραμέτρων ελέγχου να προσδιορίζει ένα διανυσματικό χώρο λειτουργία της διεργασίας, στον οποίο διασφαλίζεται ανεκτό ποσοστό ελαττωμάτων και συμφωνία με τις λοιπές προδιαγραφές του παραγόμενου/ενδιάμεσου τελικού προϊόντος. Το CIS βασίζεται σε αλγόριθμο νευρο-ασαφούς ταξινόμησης και είναι κατάλληλο κυρίως για διεργασίες που λαμβάνουν χώρα εντός ομοιογενούς λουτρού, όπως στην περίπτωση του υπο-σταδίου του αλκαλικού καθαρισμού όπου προηγείται του ηλεκτροχημικού σταδίου της ανοδίωσης του αλουμινίου.

Το EIS (Electrochemical Interactive Sub-system) συνθέτει/προμηθεύει κανόνες στον εποπτεύοντα/χειριστή προκειμένου να διασφαλίζονται αμφότερα, ανεκτό ποσοστό ελαττωμάτων και συμφωνία με τις λοιπές προδιαγραφές (όπως τίθενται από τον πελάτη ή την αγορά ή/και επιβάλλονται από το ισχύον θεσμικό πλαίσιο) του τελικά παραγόμενου προϊόντος με το ελάχιστο κόστος. Το EIS βασίζεται σε αλγόριθμο νευρο-ασαφούς προσέγγισης, σε συνεργασία με μια εξωτερική ευρετική διαδικασία, και είναι κατάλληλο κυρίως για ηλεκτροχημικές διεργασίες, όπως είναι η ανοδίωση του αλουμινίου και η επιμετάλλωση του χάλυβα. Το TIS (Topological Interactive Sub-system), το οποίον ευρίσκεται ιεραρχικά υπό το EIS, συνθέτει/προμηθεύει απαγορευτικούς κανόνες και διατυπώνει συμβουλές για τον εποπτεύοντα/χειριστή, όσον αφορά στην τοποθέτηση/διευθέτηση ράβδων/δοκών/κρεμαστών/γάντζων, από όπου κρέμονται τα προς ανοδίωση ή επιμετάλλωση αντικείμενα, προκειμένου ειδικά μεν να αποφευχθεί η εμφάνιση ελαττωμάτων, γενικά δε να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται δύσκολα και για τον λόγο αυτόν η σχετική προσπάθεια περιγράφεται στα τεχνικά εγχειρίδια ως εμπειρική τέχνη μάλλον παρά ως επιστημονική μεθοδολογία, με αποτέλεσμα να είναι επιτακτική η ανάγκη της ανάδρασης (σε πληροφοριακό επίπεδο) από την πλευρά του εποπτεύοντα/χειριστή και του εργαστηρίου ποιοτικού ελέγχου. Τέλος, το FDS (Fault Diagnosis System) είναι ένα περιβάλλον-σύστημα, το οποίον περιλαμβάνει τα παραπάνω υποσυστήματα και την απαιτούμενη διαδικασία για την διεξαγωγή FTA.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίζεται σε ασαφή πολυκριτηριακή ανάλυση (FMCA) δύο φάσεων, η οποία πραγματοποιείται από το τεχνικό προσωπικό στα πλαίσια του βοηθούμενου από H/Y ολοκληρωμένου σχήματος διαδικασιών που παρουσιάζεται υπό μορφή αλγοριθμικής διαδικασίας με 21 εκτελεστικά στάδια συνδεδεμένα μέσω 8 κόμβων

απόφασης, όπου η εφαρμογή ενός νευρο-ασαφούς δικτύου προσδιορίζει τις ιδιότητες του προϊόντος από τις συνθήκες κατεργασίας πρώτων και ενδιάμεσων υλικών. Στη συνέχεια, δεδομένων των επιθυμητών προδιαγραφών του προϊόντος (όπως αυτές προσδιορίζονται από τον πελάτη ή την αγορά ή/και το υπάρχον θεσμικό πλαίσιο), άρα και του διανύσματος εξόδου που αντιστοιχεί στις ιδιότητες του προϊόντος, προσδιορίζεται το διάνυσμα εισόδου που αντιστοιχεί στις απαιτούμενες συνθήκες κατεργασίας. Οι αντιστοιχίσεις διανυσμάτων εισόδου-εξόδου, οι οποίες λαμβάνονται από τη βιομηχανική παραγωγή ή φυσικούς προσομοιωτές, αποτελούν το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται από τον νευρο-ασαφές δίκτυο κατά την περίοδο της 'μάθησης'. Οι εφικτοί/επιθυμητοί συνδυασμοί σχηματίζουν, κάτω από αυστηρούς περιορισμούς ως προς το ανώτατο επιτρεπτό όριο εμφάνισης ελαττωμάτων, ομάδες (clusters), οι οποίες φιλτράρονται (οπότε μειώνεται ο αριθμός τους) μέσω ενός ελάχιστου πλάτους τιμών που αντιστοιχούν στις μεταβλητές εισόδου. Στο χρησιμοποιούμενο λογικό σχήμα, οι μεταβλητές αυτές είναι ανεξάρτητες, αφού οι εξαρτημένες μεταβλητές συνιστούν το διάνυσμα εξόδου. Τα μέλη του τελικά προ-επιλεγόμενου συνόλου των ομάδων κατατάσσονται, με τη βοήθεια FMCA, σε σειρά φθίνουσας προτίμησης για υιοθέτηση στην παραγωγική διαδικασία. Τα κριτήρια ομαδοποίησης και κατάταξης των συνθηκών επεξεργασίας (για αποτέλεσμα παραγωγής προκαθορισμένης ποιότητας) είναι: σταθερό/κεφαλαιακό κόστος f_1 , ενεργειακό κόστος f_2 , παραγωγικότητα ως προς το φυσικό προϊόν (δηλ. ρυθμός κατεργασίας, εξαρτώμενος κυρίως από την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία με τη σειρά της προσδιορίζει τη δομή του πορώδους ανοδικού στρώματος και επηρεάζει ποσοτικά και ποιοτικά την εμφάνιση ελαττωμάτων στο ενδιάμεσο/τελικό προϊόν) f_3 , λοιπό μεταβλητό/λειτουργικό κόστος f_4 , περιβαλλοντική επιβάρυνση f_5 , συμβολή στη διαδοχή των παρτίδων των προς ανοδίωση αντικειμένων f_6 , συμβολή στη διευκόλυνση ρυθμίσεων για τη βέλτιστη λειτουργία/έλεγχο της διεργασίας, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των αντικειμένων της ίδιας παρτίδας, f_7 .

Τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια για την κατάταξη των υποψηφίων για εξέταση τελικών αιτίων του σφάλματος είναι: σημαντικότητα (όπως προκύπτει από τον αντίστοιχο FSI) g_1 , διαθεσιμότητα εξοπλισμού g_2 , αξιοπιστία (βασισμένη στην ανάλυση διακύμανσης – ANOVA – των πειραματικών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν υπό όμοιες συνθήκες ηλεκτροχημικής επεξεργασίας κατά το παρελθόν) g_3 , κόστος εξέτασης g_4 , λόγος απαιτούμενου για την εξέταση χρόνου προς τον διαθέσιμο χρόνο g_5 , αναμενόμενη συμβολή στην εξηγησιμότητα των σχέσεων που συνδέουν το γεγονός κορυφής με το τελικό αίτιο g_6 . Τα κριτήρια $f_1, f_2, f_4, g_2, g_3, g_4$ έχουν αντικειμενικά χαρακτηριστικά ενώ τα κριτήρια $f_3, f_5, f_6, f_7, g_1, g_5, g_6$ έχουν μάλλον υποκειμενικά χαρακτηριστικά, δηλ. παρέχουν περισσότερους

βαθμούς ελευθερίας στον εμπειρογνώμονα που θα εκτιμήσει τελικά τις τιμές στα αντίστοιχα διανύσματα βαρών.

Η παρουσιαζόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε επιτυχώς στη διεργασία της ηλεκτροχημικής ανοδίωσης του αλουμινίου σε λουτρό θεικού οξέος. Τα αποτελέσματα δείχνουν τη δυνατότητα των χειριστών/εποπτών να επηρεάσουν την επιλογή της προτεινόμενης λύσης (σε επίπεδο υψηλής ανάλυσης), μεταβάλλοντας τις τιμές των βαρών που αντιστοιχούν στα υποκειμενικά κριτήρια f_3, f_5, f_6, f_7 . Από την άλλη πλευρά, τα λοιπά μέλη του τεχνικού προσωπικού, τα οποία συμμετέχουν στην ίδια διαδικασία και μάλιστα ανήκουν σε ιεραρχικά υψηλότερες βαθμίδες, μπορούν να επηρεάσουν περισσότερο την επιλογή της προτεινόμενης λύσης μέσω της μεταβολή των τιμών των παραμέτρων της γενικευμένης συνάρτησης προτίμησης, που προσδιορίζουν το επίπεδο ανάλυσης. Τέλος, όλα τα μέλη του τεχνικού προσωπικού που λαμβάνουν μέρος στην ίδια διαδικασία μπορούν να επηρεάσουν την προτεινόμενη λύση αφού συμμετέχουν, κατά ειδικότητα/βαθμίδα, στην εκτίμηση των βαθμών της πολυκριτήριας μήτρας. Με τον τρόπο αυτό, και δεδομένου ότι τα συγκεκριμένα μέλη εκφράζουν τις απόψεις που επικρατούν μεταξύ των εργαζομένων (τουλάχιστον) της ίδιας βαθμίδας, καλλιεργείται πνεύμα συνεργασίας, αλληλοεκτίμησης και συνυπευθυνότητας, αφού συνδιαμορφώνονται οι συνθήκες παραγωγής/ελέγχου τόσο στην πράξη όσο και στην επιχειρούμενη εκπαιδευτική προσομοίωση.

Βιβλιογραφία

- [1] Johannsen G. (1997). Conceptual Design of Multi-Human Machine Interfaces. *Control Engineering Practice*, 5, pp. 349-361.
- [2] Johannsen, G., Averbukh E.A. (1993). Human Performance Models in Control. *Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics*, 4, pp. 397 – 402.
- [3] Fotilas P., Batzias A.F. (2008). A Modeling Procedure by Means of Multicriteria Analysis. Application in the Case of Specific Surface Estimation of Anodized Aluminium. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, forthcoming.
- [4] Fotilas P., Batzias A.F. (2007). Synthesizing Equivalence Indices for the Comparative Evaluation of Technoeconomic Efficiency of Industrial Processes at the Design/Re-engineering Level. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, 963, pp. 884-889.
- [5] Batzias A.F. (2007). Fuzzy Multicriteria Ranking of Aluminium Coating Methods. *American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc.*, 963, pp. 856-861.
- [6] Batzias A.F., Batzias F.A. (2004). Fuzzy Multicriteria Choice of Instrumental Methods for Measuring Physical Quantities - Application in the Case of Dielectric Aluminium Anodic Oxide Films. *Proc. IEEE Instrum. & Meas. Technol. (IMTC 2004)* 3, pp. 2217-2222.
- [7] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Multicriteria Choice of Industrial Management System for a Typical Greek Tannery Operating in a Changing Environment. *4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4)* Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in *J. Chem. Eng. & Tech.* (J. Wiley), Jan. 2004. O-2-003.
- [8] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Multicriteria Choice of Solvent in the Lithographic Printing Industry with Emphasis on Occupational Health. *4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4)* Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in *J. Chem. Eng. & Tech.* (J. Wiley), Jan. 2004. P-4.1-025.

- [9] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Fuzzy Fault Tree Analysis as a Mechanism for Technical Support to Small/Medium Electroplaters on a Quasi Online/Real-Time Basis. *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT03)*, Maribor, Slovenia, 1, pp. 36-41.
- [10] Fotilas P., Batzias A. F., Siontorou C.G. (2008). Learning by Doing via Biomonitoring the Rehabilitation of Pb-Contaminated Industrial Sites. *Symp. on Environmental Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering (Europ. Fed. Chem. Eng.)*, Prague, Czech Rep.
- [11] Batzias A.F., Batzias F.A. (2002). Computer Aided Neuro-fuzzy Control in Anodizing of Aluminium. *Computer Aided Chem. Eng.* (Elsevier), 10, pp. 433-438.
- [12] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). Computational and Experimental Process Control by Combining Neurofuzzy Approximation with Multicriteria Optimization. *Computational Engineering, Int. Series Comp. Eng.*, WIT Press Computational Mechanics Inc., Boston Massachusetts, USA, 4, pp. 107-118.
- [13] Batzias A.F., Batzias F.A. (2003). A System for Support and Training of Personnel Working in the Electrochemical Treatment of Metallic Surfaces. *Computer Aided Chem. Eng.* (Elsevier), 14, pp. 365-370.

10 Περίληψη και Γενικά Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο δίνεται μία περίληψη της διατριβής ανά Κεφάλαιο (περιλαμβανομένων των επιμέρους συμπερασμάτων), με έμφαση στα σημεία που συνιστούν τον βασικό γνωσιολογικό πυρήνα και αποδεικνύουν την πρωτοτυπία της ερευνητικής εργασίας.

1^ο Κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο αυτό, γίνεται μία εισαγωγή γενικότερα στην ηλεκτροχημική επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών και ειδικότερα στην καθετοποιημένη παραγωγή του ανοδιωμένου αλουμινίου από το στάδιο της μεταλλουργίας του μητρικού υποστρώματος μέχρι το τελείωμα (finishing) της επιφανειακής επικάλυψης. Με τον τρόπο αυτόν, επιδιώκεται η δημιουργία ενός γνωσιολογικού υπόβαθρου τόσο για την κατανόηση τεχνικών εννοιών, που χρησιμοποιούνται στα επόμενα Κεφάλαια, όσο και για την επαγωγική (by induction) επέκταση των σχεδιαζόμενων/αναπτυσσόμενων πληροφοριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων από την λεπτομερώς εξεταζόμενη ανοδίωση του αλουμινίου προς όλες τις ηλεκτροχημικές διεργασίες βιομηχανικού ενδιαφέροντος και ιδιαίτερα την επιμετάλλωση του χάλυβα.

2^ο Κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο αυτό, μελετάται σε ένα πρώτο/επιφανειακό επίπεδο η ασαφής πολυκριτηριακή (Fuzzy MultiCriteria – FMC) επιλογή μεθόδου ανοδίωσης του αλουμινίου, προκειμένου να διερευνηθούν διάφορες προσεγγίσεις/απόψεις επί του θέματος αυτού. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν είναι: το κόστος της παραγωγής, η φιλικότητα στο περιβάλλον, η εμφάνιση του τελικού προϊόντος, ο συντελεστής ανάκλασης, η ανταπόκριση/επιδεκτικότητα στη βαφή, η αντίσταση στην ηλεκτροχημική διάβρωση, η αντίσταση στη (μηχανική) φθορά, η αντίσταση στην κόπωση. Οι εναλλακτικές μέθοδοι που εξετάστηκαν είναι: ανοδίωση με (A₁) θειικό οξύ, (A₂) οξαλικό οξύ, (A₃) χρωμικό οξύ, (A₄) φωσφορικό οξύ, (A₅) σύγχρονη βαφή, (A₆) χημική μετατροπή, ενώ έχει περιληφθεί χάριν σύγκρισης η μέθοδος A₇ της ηλεκτροστατικής επικάλυψης επειδή αποτελεί την κύρια ανταγωνιστική μη-ηλεκτρολυτική διεργασία στην βιομηχανική πρακτική. Για την εκτίμηση των τιμών στο διάνυσμα των βαρών και στην πολυκριτηριακή μήτρα, χρησιμοποιήθηκε μία τροποποιημένη μέθοδος Delphi με συμμετοχή

εμπειρογνομόνων και συμφωνία στην είσοδο (consensus in input) του προγράμματος H/Y του πρωτότυπου λογισμικού που αναπτύχθηκε *ad hoc* από τον συγγραφέα και περιλαμβάνεται στα αντίστοιχα Παραρτήματα του 3^{ου} Κεφαλαίου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν την κατάταξη $A_1 > A_7 > A_3 > A_2 > A_5 > A_6 > A_4$, όταν χρησιμοποιείται υψηλή ανάλυση (οπότε ελαχιστοποιούνται οι μη-συγκρίσιμες μεταξύ τους μέθοδοι), όπου το σύμβολο '>' σημαίνει 'καλύτερη από'. Η προτεινόμενη λύση της μεθόδου A_1 , δηλ. ανοδίωση με θεικό οξύ, είναι εύρωστη (robust), αφού (i) δεν περιλαμβάνεται σε οποιοδήποτε ζεύγος μεθόδων του οποίου τα μέλη εμφανίζονται ως μη-συγκρίσιμα και (ii) η μονοπαραμετρική ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη δεύτερη καλύτερη μέθοδο (A_3 και A_7 σε επίπεδο χαμηλής και υψηλής ανάλυσης, δηλ. ανοδίωση με χρωμικό οξύ και ηλεκτροστατική επικάλυψη, αντίστοιχα), δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ολόκληρη την περιοχή $\pm 50\%$ γύρω από τη μέση απασαφοποιημένη (defuzzified) τιμή κάθε κριτηρίου στο διάνυσμα των βαρών. Η εμπειρική έρευνα τόσο σε υποκειμενικό επίπεδο δια μέσου των εμπειρογνομόνων όσο και σε αντικειμενικό επίπεδο δια μέσου της εξόρυξης δεδομένων (data mining) από την τεχνική βιβλιογραφία επιβεβαιώνει τα παραπάνω αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, μελετώνται διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης από τεχνική, οικονομική και ολοκληρωμένη/τεχνοοικονομική άποψη. Η βελτιστοποίηση κάθε ανεξάρτητης/ερμηνευτικής μεταβλητής (π.χ., βάθος λείανσης/καθαρισμού και μείωση πάχους ελάσματος) επιτυγχάνεται μέσω εξισορόπησης διελκυστίνας (trade off) μεταξύ εξαρτημένων αντιμαχόμενων μερικών μεταβλητών (conflict variables) μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) ωφέλειας ή κόστους, της οποίας επιδιώκεται η μεγιστοποίηση ή η ελαχιστοποίηση, αντίστοιχα. Από τη μελέτη αυτή, αποδεικνύεται ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των οικονομικών/περιβαλλοντικών/τεχνικών κριτηρίων, η οποία επηρεάζει το διάνυσμα των βαρών και τη βαθμολόγηση των στοιχείων της πολυκριτήριας μήτρας ενώ αυξάνει τα πλάτη (L,R) των αντίστοιχων τριγωνικών ασαφών αριθμών. Η υποδεικνυόμενη βελτιστοποίηση αποτελεί συνθήκη αναγκαία αλλά όχι και ικανή, αφού πραγματοποιείται *per se*, χωρίς να λαμβάνεται υπ'όψη η διαφοροποίηση του διανύσματος των βαρών, το οποίον αποτελεί τη βάση της σύγκρισης μεταξύ των εναλλακτικών προτάσεων. Μια σημαντική δυνατότητα ενίσχυσης της αξιοπιστίας της χρησιμοποιούμενης μεθόδου δίνεται από τη διερεύνηση του διαστήματος

ανάλυσης ευαισθησίας της προτεινόμενης λύσης προκειμένου να διαπιστωθεί η ευρωστία της (robustness).

3^ο Κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο αυτό, θεωρούνται οι συνθήκες παραγωγής ως είσοδος (input) και οι ιδιότητες του προϊόντος ως έξοδος (output) σε ένα σύστημα ή μηχανισμό μετατροπής (Transformation Mechanism – TM), το οποίο έχει τη μορφή νευρο-ασαφούς δικτύου. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται/αναπτύσσεται ο αντίστροφος μηχανισμός (Inverse Transformation Mechanism – ITM) με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου διανύσματος εισόδου \mathbf{i} όταν το διάνυσμα εξόδου \mathbf{o} δίνεται είτε από συγκεκριμένο πελάτη είτε από την επικρατούσα τάση στην αγορά είτε από ένα θεσμικό πλαίσιο (της διάζευξης νοούμενης εγκλειστικής). Σημειώνεται ότι τα διανύσματα \mathbf{i} , \mathbf{o} αναφέρονται στην είσοδο/έξοδο του TM, που συμπίπτουν με την έξοδο/είσοδο του ITM, αντίστοιχα. Όπως αποδεικνύεται, ο ITM λειτουργεί ως συμπερασματικός/προσδιοριστικός μηχανισμός (inference engine) ώστε να επιτευχθεί πειραματικά και υπολογιστικά ο βέλτιστος έλεγχος της διεργασίας off-line. Αν μάλιστα οι πειραματικές μετρήσεις γίνονται in situ και ταχέως, τότε είναι δυνατός ο online έλεγχος σε πραγματικό χρόνο παραγωγής.

Στα υποκεφάλαια 3.2 και 3.3, χρησιμοποιείται η τεχνική της νευρο-ασαφούς προσέγγισης (Neurofuzzy Approximation – NFA) και της ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης – (Fuzzy Multicriteria Analysis – FMCA) για τους TM και ITM, αντίστοιχα, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της βελτιστοποίησης του συστήματος της βιομηχανικής παραγωγής. Για τη διαδικασία ‘μάθησης’ του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιούνται κατάλληλες μετρήσεις που ελήφθησαν από προσομοιωτές εργαστηριακής κλίμακας και από συσκευές βιομηχανικής κλίμακας (που λειτουργούν σε συγκρίσιμες συνθήκες παραγωγής) που περιέχονται σε μία Βάση Δεδομένων (Database – DB), η οποία συνεχώς εμπλουτίζεται. Για τον προσδιορισμό του συνόλου των μετρήσεων μάθησης, λαμβάνονται υπ’ όψη (α) οι προδιαγραφές του προϊόντος, (β) οι συνθήκες παραγωγής του προϊόντος με τις συγκεκριμένες προδιαγραφές στην ίδια εγκατάσταση κατά το παρελθόν, (γ) η τεχνική βιβλιογραφία, ιδιαίτερα όταν το σύνολο των μετρήσεων, που συλλέγονται με την υποδεικνυόμενη κατά την υπό στοιχείο (β) διαδικασία, κρίνεται ως ανεπαρκής και (δ) οι πρόσφατες μετρήσεις, που απεικονίζουν την παρούσα κατάσταση.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που σχεδιάστηκε/αναπτύχθηκε για τη βελτιστοποίηση της ανοδίωσης του αλουμινίου βασίζεται σε μετρήσεις παραμέτρων ελέγχου της διεργασίας και ιδιοτήτων του προϊόντος που εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο είτε επί της γραμμής παραγωγής, είτε εκτός αυτής. Η συνολική διαδικασία περιλαμβάνει 17 στάδια δραστηριότητας και 4 κόμβους απόφασης. Η πραγματοποίηση της έναρξης είναι δυνατή τόσο από την πλευρά της προσφοράς όσο και από την πλευρά της ζήτησης, παρ' όλο ότι συνήθως υπάρχει μία χρονική υστέρηση μεταξύ αυτών. Οι εναλλακτικές λύσεις που χρησιμοποιούνται για την πολυκριτηριακή επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού τιμών παραμέτρων ελέγχου (διάνυσμα εισόδου στη διαδικασία TM) σχεδιάζονται με (α) ομαδοποίηση όλων των διαθέσιμων εφικτών επί μέρους λύσεων σύμφωνα με την ακολουθούμενη διαδικασία TM και (β) προεπιλογή των ομάδων οι οποίες υποδεικνύουν λύσεις πραγματοποιήσιμες χωρίς μείζονες αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων που προσδιορίζουν τις συνθήκες παραγωγής της τρέχουσας παρτίδας. Κάθε μία προεπιλεγμένη ομάδα αντιπροσωπεύεται από το διάνυσμα κέντρου βάρους ή από το πλησιέστερο διάνυσμα προς το κεντροειδές αν η ομάδα είναι συνεκτική ή όχι, αντίστοιχα.

Στο υβριδικό νευροασαφές σύστημα που χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την TM-προσέγγιση, τα ασαφή σύνολα αντιμετωπίζονται ως βάρη, ενώ οι μεταβλητές εισόδου/εξόδου και οι κανόνες ως νευρώνες. Αυτό το σύστημα κληρονομεί τη μέθοδο μάθησης (π.χ. οπίσθια διάδοση σφάλματος – backpropagation) από τα νευρωνικά δίκτυα, αλλά ταυτίζεται εννοιολογικά με ένα ασαφές σύστημα, και γενικά συνδυάζει τα προτερήματα των δύο συστημάτων απ' όπου προέρχεται. Από τα νευροασαφή δίκτυα που μελετήθηκαν, βρέθηκε ότι το ANFIS του Jang είναι το πιο κατάλληλο για την εξεταζόμενη περίπτωση. Το ANFIS είναι μία επέκταση του νευροασαφούς μοντέλου που αναπτύχθηκε από τους Takagi και Sugeno. Στην παρούσα εργασία, έχει γίνει μία περαιτέρω βελτίωση του αλγορίθμου του ANFIS, ώστε να δέχεται ασαφείς συνεπαγωγές με n μεταβλητές εισόδου και m μεταβλητές εξόδου, κατάλληλα προσαρμοσμένες (ως προς τη μορφή, το περιεχόμενο και τις δεσμεύσεις), ώστε να πληρούνται οι προϋποθέσεις επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος ITM. Επίσης, για την ITM-όδευση τροποποιήθηκε η ντετερμινιστική μέθοδος PROMETHEE, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως βάση του συστήματος FMCA που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής. Ενδεικτικά αποσπάσματα του αντίστοιχου λογισμικού περιλαμβάνονται στα Παραρτήματα του Κεφαλαίου αυτού.

Η παρουσιαζόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε με επιτυχία στην περίπτωση της ηλεκτροχημικής επεξεργασίας του αλουμινίου για τη δημιουργία ανοδικού στρώματος πάχους $h=24\pm 0,5$ μm και πορώδους $12,5\pm 1$ % (προδιαγραφές προϊόντος), σε εργαστηριακούς προσομοιωτές που λειτουργούν κάτω από βιομηχανικές συνθήκες / προδιαγραφές. Τα στοιχεία του διανύσματος εισόδου ήταν οι ακόλουθες μεταβλητές, με τα πεδία μεταβολής σημειούμενα σε παρένθεση: ηλεκτρική τάση (9 – 21 V), πυκνότητα έντασης ηλεκτρικού ρεύματος (0,8 – 7,6 A/dm²), χρόνος ανοδίωσης (10 – 80 min), ηλεκτροχημική απόδοση (80 – 90%), συγκέντρωση ηλεκτρολύτη (5 – 30 g H₂SO₄ / L) και θερμοκρασία λουτρού (10 – 28 °C). Ο μη-καταστροφικός έλεγχος του πάχους του στρώματος έγινε με μετρήσεις ηλεκτρικής επαγωγής ενώ η βαθμονόμηση/διακρίβωση (calibration) έγινε με μέτρηση διατομής (μετά από εγκιβωτισμό σε πλαστικό και κοπή σε μικροτόμο) σε οπτικό μικροσκόπιο, σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ASTM B487/1985/97.

Τα αποτελέσματα της μάθησης για την όδευση TM του νευροασαφούς συστήματος έδωσαν τον διαμερισμό των παραμέτρων του αιτίου/υπόθεσης (διάνυσμα εισόδου), που απεικονίζονται με ασαφή σύνολα. Η αντιστοίχιση εισόδου-εξόδου έδωσε, μετά την περίοδο μάθησης, 244 συνδυασμούς 6×2 , που ικανοποιούσαν τις προδιαγραφές της αγοράς. Οι συνδυασμοί αυτοί ομαδοποιήθηκαν σε 11 ομάδες που ελαττώθηκαν σε 5 μετά από φιλτράρισμα ικανοποίησης τεχνικών κριτηρίων εύρους/πυκνότητας. Τα κριτήρια f_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) εφαρμογής FMCA για την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων A_j ($j = 1, 2, \dots, 5$) είναι: Ενεργειακό κόστος για το σχηματισμό του ανοδικού στρώματος, f_1 . Κεφαλαιακό κόστος (λογιζόμενο μέσω των αποσβέσεων), f_2 . Συμβολή στην εύρυθμη λειτουργία, f_3 . Ενεργειακό κόστος για την ψύξη του λουτρού, f_4 . Ποιότητα ομάδας (χαρακτηριστική ακτίνα, μέση πυκνότητα, αποκλίσεις του κεντροειδούς), f_5 . Επιβάρυνση της ομάδας από αναμενόμενα ελαττώματα (με την προϋπόθεση ότι δεν υπερβαίνουν ένα ανώτατο όριο, πέραν του οποίου αποκλείεται η αντίστοιχη ομάδα από τη συμμετοχή της στο σύνολο των προς κατάταξη εφικτών εναλλακτικών λύσεων), f_6 .

Στη συνέχεια διερευνάται το πρόβλημα της ταυτοποίησης των παραμέτρων (parameter identification) που επηρεάζουν τις τιμές του διανύσματος εξόδου (ιδιαίτερα το πορώδες και το πάχος h του ανοδικού στρώματος). Εντοπίζεται η ταχύτητα ανοδικής διάλυσης v ως βασική παράμετρος/κόμβος της σχηματιζόμενης σε ένα βαθύτερο γνωσιολογικό επίπεδο οντολογίας και αναπτύσσεται νέο λογισμικό ταχείας εκτίμησης (shortcut) των τιμών της παραμέτρου αυτής,

χωρίς τη χρησιμοποίηση του αλγόριθμου Nagayama-Tamura (NT) και χωρίς την προϋπόθεση μέτρησης της ακτίνας r των πόρων. Το νέο λογισμικό έχει διαμορφωθεί με τη βοήθεια ενός δυναμικού ισοζυγίου υλικών για το αλουμίνιο, το οποίον οδηγεί σε ένα κινητικό υπόδειγμα (kinetic model) του οποίου οι τιμές των παραμέτρων εκτιμώνται μετά από μετρήσεις των ιόντων Al στο λουτρό της ανοδίσωσης σε ανοικτό κύκλωμα, συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας. Διαπιστώθηκε εξαιρετικά μικρή επαναληψιμότητα των μετρήσεων, όταν η ακτίνα r των πόρων πλησιάζει την ακτίνα R ($r=R$ σε χρόνο $t=t_R$) της εγγεγραμμένης περιφέρειας στη διατομή των κυψελίδων.

Η επαναληψιμότητα γινόταν ακόμη μικρότερη με αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος, της τάσης της ανοδίσωσης, της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και της θερμοκρασίας του λουτρού. Μετά από αυτή τη διαπίστωση, μετρήσαμε φασματοφωτομετρικά τη διαλυόμενη μάζα συναρτήσει του χρόνου, προκειμένου να εφαρμόσουμε το κινητικό υπόδειγμα και να εκτιμήσουμε τις τιμές των v , h , r . Χρησιμοποιώντας μη γραμμική παλινδρόμηση (solver/excel), με αρχικές τιμές εκκίνησης της αλγοριθμικής διαδικασίας τις αναφερόμενες στην αρχική εφαρμογή του υποδείγματος NT, εκτιμήσαμε τις τιμές των v , (v,h) , (v,r) , διατηρώντας για την παράμετρο, της οποίας η τιμή δεν εκτιμάται, σταθερή την αρχική της τιμή. Η ταυτόχρονη εκτίμηση των τιμών όλων των παραμέτρων (v , h , r) δεν κατέστη εφικτή λόγω αστάθειας του χρησιμοποιούμενου υποδείγματος, ακόμη και όταν οι μετρήσεις δεν κάλυπταν ολόκληρη την περιοχή μέχρι $t = t_R$. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώθηκε με πολυωνυμική παλινδρόμηση του ίδιου υποδείγματος, δηλ. κατ' ουσίαν γραμμική παλινδρόμηση, αφού το σύστημα των κανονικών εξισώσεων που δίνει τις τιμές των συντελεστών οποιουδήποτε πολωνύμου είναι γραμμικό ως προς του συντελεστές αυτού. Η επιβεβαίωση δεν επιδέχεται αμφισβήτηση, επειδή (i) το σύστημα των κανονικών γραμμικών εξισώσεων δίνει ακριβή λύση, αφού χρησιμοποιείται αλγεβρική μέθοδος επίλυσης, σε αντίθεση με τη μη γραμμική παλινδρόμηση, η οποία δίνει προσεγγιστική λύση, αφού χρησιμοποιούνται επαναληπτικές/αναζητητικές αλγοριθμικές μέθοδοι, χωρίς μάλιστα να υπολογίζουμε τον κίνδυνο σύγκλισης του αλγορίθμου σε τοπικό ακρότατο, (ii) δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων (ιδιαίτερα για τα πάχη ανοδικού στρώματος που επιτυγχάνονται με την ανοδίσωση μικρής διάρκειας που χρησιμοποιήθηκε για τα δοκίμια ποιοτικού ελέγχου) αν αντί του φυσικού υποδείγματος του κυλινδρικού πόρου (με ακτίνα τη μέση τιμή των ακτίνων των κυκλικών διατομών πυθμένα και

στομίου) χρησιμοποιηθεί φυσικό υπόδειγμα κόλουρου κώνου, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, (iii) η αστάθεια αποδεικνύεται ότι είναι εγγενής, αφού δεν αίρεται για μικρότερους χρόνους ανοδίωσης t_a , μέχρι και $t_a = 0,75 t_R$. Μετά τις παραπάνω διαπιστώσεις, μελετήσαμε την εξέλιξη της τυπικής απόκλισης, προκειμένου να έχουμε ένα ποσοτικό κριτήριο/μέτρο της διασποράς τεσσάρων σειρών μετρήσεων. Σε όλες τις σειρές παρατηρήθηκε απότομη αύξηση της διασποράς για $t_a \rightarrow t_R$, σε βαθμό που (i) απορρίπτει το προτεινόμενο θεωρητικό (χωρίς πειραματική υποστήριξη) από τους NT κινητικό υπόδειγμα, που προέκυψε με καθαρά γεωμετρική ανάλυση, χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη η στατιστική κατανομή της ακτίνας του στομίου των πόρων, (ii) επιτρέπει τη διατύπωση ενός μηχανισμού καταστροφής που αρχίζει όταν η διαρκώς αυξανόμενη ακτίνα του στομίου των μικρότερων πόρων (αριστερή ουρά μιας συνεχούς, ενδεχόμενα κανονικής, κατανομής) πλησιάζει την ακτίνα του εγγεγραμμένου κύκλου στο αντίστοιχο εξαγωνικής διατομής πρίσμα και ολοκληρώνεται σε μη αυστηρά προκαθορισμένο χρόνο βάσει ενός απλού γεωμετρικού υποδείγματος λόγω επιφανειακών αταξιών που δημιουργούν χαοτική συμπεριφορά στην εκτεθειμένη στο ηλεκτρολυτικό πεδίο ελάχιστη απομένουσα φαινόμενη (εκτός πόρων) επιφάνεια του οξειδίου.

Ο μηχανισμός αυτός απεικονίζεται σε ένα διάγραμμα τεσσάρων φάσεων και η δημιουργούμενη άτακτη/κοκκώδης επιφάνεια, ως αποτέλεσμα της καταστροφής της προηγούμενης δομής, διαπιστώθηκε με τη βοήθεια ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Στη συνέχεια, μελετήθηκε με όμοιο τρόπο η δημιουργία/διάδοση της καταστροφής και διαπιστώθηκε ότι αυτή αρχίζει πλησίον της τριεπιφάνειας στερεού-υγρού-αέρα (περιοχή μέγιστης ανισοτροπίας), όπου υπάρχει πύκνωση των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρολυτικού πεδίου και διαδίδεται ακολουθώντας την κατεύθυνση μείωσης της πυκνότητας αυτής (gradient direction), όπως αποδεικνύεται με τη βοήθεια οπτικής μικροσκοπίας.

Επίσης, μελετήθηκε η επίδραση της διαλυτικής δράσης του ηλεκτρολυτικού λουτρού ως εξής: (i) καταγράφηκε η διάδοση της καταστροφής της δομής, κατά τη διάρκεια της ανοδίωσης, μετά την έναρξή της στην τριεπιφάνεια, (ii) απομονώθηκε ένα δοκίμιο, όπου συνυπάρχουν επιφάνεια με δομή και κατεστραμμένη επιφάνεια, με διακοπή της ανοδίωσης πριν γίνει άμορφη ολόκληρη η επιφάνεια, (iii) παρέμεινε το δοκίμιο στο ίδιο λουτρό σε ανοικτό κύκλωμα, (iv) συνεχίστηκε η ανοδίωση μέχρι να ολοκληρωθεί η προγραμματισμένη μετατροπή της επιφάνειας σε άμορφη κατάσταση, (v) εξήχθη το δοκίμιο, φωτογραφήθηκε και συγκρίθηκε η φωτογραφία

με άλλες που ελήφθησαν στις προηγούμενες φάσεις. Η σύγκριση έδειξε ότι η γειτονική προς την επιφάνεια με δομή ζώνη, που μόλις έχει αρχίσει να γίνεται άμορφη, μεταξύ επιφάνειας με δομή και άμορφης επιφάνειας η οποία διαπιστώθηκε στη φάση (ii), διαλύθηκε και στη συνέχεια δεν ακολούθησε την πορεία διάδοσης της καταστροφής που ταυτοποιήθηκε αρχικά. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να παραμείνει η ζώνη αυτή σε ένα λεπτό στρώμα πορώδους οξειδίου, όταν ολόκληρο το υπόλοιπο δοκίμιο είχε καλυφθεί πλήρως από την άμορφη επιφάνεια. Μπορούμε να αποδώσουμε το φαινόμενο αυτό στο ότι η νεο-σχηματιζόμενη κατά τη φάση (ii) άμορφη ζώνη είχε υποστεί σε μικρή μόνον απόσταση (βάθος) από το στόμιο των πόρων καταστροφή και επομένως ήταν εφικτή η διάλυση της άμορφης στιβάδας και η αποκάλυψη της δομής που εξακολουθούσε να υπάρχει, πλησίον του πυθμένα των πόρων. Με την επανάληψη της ανοδίωσης (αποκατάσταση του κλειστού κυκλώματος), η διάδοση της καταστροφής συνεχίστηκε ως εάν δεν είχε παρεμβληθεί το στάδιο (iii), δηλ. το στερεό φάνηκε να διαθέτει μια 'συνάρτηση μνήμης'. Στην πραγματικότητα όμως, το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο ότι το παραμένον φορτίο ηλεκτρικού ρεύματος (με βάση τον αρχικό προγραμματισμό) δεν ήταν αρκετό να δώσει τέτοιες τιμές πυκνότητας και για επαρκή χρόνο ώστε να γίνει πάλι άμορφη η επιφάνεια της συγκεκριμένης ζώνης. Αν ο μηχανισμός αυτός είναι σωστός, τότε πρέπει (i) το πλάτος της συγκεκριμένης ζώνης να μεγαλώνει συναρτήσει του χρόνου παραμονής του δοκιμίου στο λουτρό της ανοδίωσης σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος και (ii) αυτή η νέα πλατύτερη ζώνη να μην επηρεάζει την κάλυψη ολόκληρου του δοκιμίου με άμορφο οξείδιο, όταν συνεχίζεται η ανοδίωση σύμφωνα με το αρχικό πρόγραμμα, ενώ αυτή η ίδια η πλατύτερη ζώνη να μην (προλαβαίνει να) υφίσταται οποιαδήποτε εμφανή καταστροφή του δομημένου οξειδίου της.

Με επανειλημμένα πειράματα επιβεβαιώθηκε πλήρως το υποθετικό συμπέρασμα, πράγμα το οποίο αποτελεί αναγκαία (αλλά όχι και ικανή) συνθήκη για την επαλήθευση του προτεινόμενου μηχανισμού. Περαιτέρω επιβεβαίωση της ισχύος του προτεινόμενου μηχανισμού συνιστά η παρατήρηση ότι η μορφή της ζώνης εξαρτάται από τη σχετική θέση του δοκιμίου στο λουτρό (οπότε επηρεάζεται η πυκνότητα του ηλεκτρολυτικού πεδίου) και τα χαρακτηριστικά της ανοδίωσης, η οποία επηρεάζει συστηματικά την κατανομή της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και τη θερμοκρασιακή κατανομή.

Μεταξύ άλλων, μελετήθηκε η υποβάθμιση της ποιότητας (λόγω ανοδικής διάλυσης) ολόκληρου του μεταλλικού υποστρώματος, αφού αυτό γίνεται πρώτα πορώδες και στη συνέχεια

άμορφο (ως αποτέλεσμα της καταστροφής της δομής) οξειδίο. Σε σχετικές φωτογραφίες, φαίνεται η ανοδική διάλυση σε περατωτικό άκρο λόγω πύκνωσης των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρολυτικού πεδίου (edge effect). Αξίζει να σημειωθεί ότι η ‘συνάρτηση μνήμης’ των μελετώμενων δοκιμίων είναι σε πλήρη λειτουργία σε ολόκληρη τη μάζα του μητρικού μετάλλου/κράματος, όπως φαίνεται από την επίδραση των γραμμών διέλασης σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου, μέχρι την εξαφάνιση και της τελευταίας ποσότητας της μάζας του. Για τη συμβολή του κωνικού σχήματος των πόρων στην επιταχυνόμενη ανοδική διάλυση γίνεται πλήρης μαθηματική διερεύνηση.

4^ο Κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η δημιουργία ενός μεθοδολογικού πλαισίου Βάσης Γνώσης (Knowledge Base – KB) για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων στην καθετοποιημένη παραγωγή ανοδιωμένου αλουμινίου, υπό τη μορφή αλγοριθμικής διαδικασίας 32 εκτελεστικών σταδίων και 11 κόμβων απόφαση. Τα στοιχεία που συλλέγονται στο στάδιο της στατιστικής συσχέτισης συνθηκών παραγωγής/κατεργασίας και εμφάνισης ελαττωμάτων/αστοχιών προέρχονται από (i) όργανα μέτρησης *in situ* μεταβλητών/παραμέτρων είτε ανεξάρτητα είτε ενσωματωμένα σε συστήματα ελέγχου *on line*, (ii) εργαστηριακές μετρήσεις ποιοτικού ελέγχου είτε των χρησιμοποιούμενων μέσων κατεργασίας είτε του παραγόμενου προϊόντος (π.χ., συγκέντρωση ηλεκτρολύτη/προσθέτων/προσμίξεων στο λουτρό της ανοδίωσης ή πάχους/πορώδους του ανοδικού στρώματος, αντίστοιχα). Οι εργαστηριακές μετρήσεις γίνονται σε δείγματα, άρα πρόκειται για έλεγχο *off line*, ο οποίος όμως μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, αφού ο χρόνος λήψης/μεταφοράς/ετοιμασίας/μέτρησης του δείγματος είναι συγκρίσιμος με το χρόνο επεξεργασίας μίας παρτίδας σε οποιοδήποτε στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας. Τα αποτελέσματα του *off line* ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για τη θεραπεία διαπιστωμένου σφάλματος στην ίδια παρτίδα είτε για την πρόληψη σφάλματος σε επόμενη παρτίδα ενώ η πρόληψη στην ίδια παρτίδα είναι εφικτή μόνον όταν ο χρόνος κατεργασίας είναι σχετικά μεγάλος και η διάγνωση έχει γίνει αρκετά νωρίς, δηλ. με την έναρξη της συγκεκριμένης διαδικασίας.

Οι πρακτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον *off line* έλεγχο της συγκεκριμένης διεργασίας είναι (i) της πειραματικής προσομοίωσης σε εργαστηριακή κλίμακα και (ii) της

διαφορικής διάγνωσης σε βιομηχανική κλίμακα. Στην πρώτη, προσομοιάζονται οι πραγματικές συνθήκες της μελετώμενης διεργασίας σε μικρή κλίμακα ενώ χρησιμοποιούνται αντικείμενα με επιφάνειες διαφορετικού βαθμού ομοιογένειας, δηλ. από πλήρως ομοιογενή μέχρι περιέχοντα ανομοιογένεια του τύπου που προκαλεί το υπό διερεύνηση ελάττωμα. Σημαντικό μέρος των αντικειμένων αυτών προέρχεται από πραγματική παρτίδα και έχει ληφθεί μετά το πέρας της αμέσως προηγούμενης (σε σχέση με τη μελετώμενη) διεργασίας, ώστε το επεξεργαζόμενο στο φυσικό προσομοιωτή αντικείμενο να μη διαφέρει από εκείνα που συνεχίζουν την επεξεργασία σε βιομηχανική κλίμακα. Στη συνέχεια, συγκρίνονται αντικείμενα που επεξεργάστηκαν στο φυσικό προσομοιωτή με αντικείμενα που επεξεργάστηκαν στην αντίστοιχη διεργασία σε βιομηχανική κλίμακα. Αυτό είναι ένα είδος διαφορικής διάγνωσης (ίδιο αντικείμενο αλλά διαφορετικές συνθήκες διεργασίας), το οποίο όμως υπάγεται στις τεχνικές της προσομοίωσης. Πραγματοποιείται όμως και αμιγώς διαφορική διάγνωση με την τοποθέτηση προσημειωμένων/‘μαρκαρισμένων’ και διαφοροποιημένων (ως προς τις παραμέτρους της ‘συνάρτησης μνήμης’) αντικειμένων στις ίδιες ‘κρεμάστρες’ στο ίδιο λουτρό οπότε συγκρίνονται τα αντικείμενα αυτά με τα διπλανά τους χρησιμοποιώντας τεχνικές (μη-καταστροφικού και καταστροφικού) ποιοτικού ελέγχου.

Στη συνέχεια, καταγράφονται τα βασικά ελαττώματα/σφάλματα κατά στάδιο κατεργασίας και δημιουργούνται αντίστοιχα αρχεία στην KB, μετά από μελέτη σε φυσικό προσομοιωτή (i) της αντιστοίχησης [διαταραχή σε προηγούμενο στάδιο] → [ελάττωμα σε επόμενο στάδιο] και (ii) της επίδρασης των συνθηκών της ίδιας μεμονωμένης διεργασίας στις ιδιότητες (περιλαμβανομένης της απόκλισης από τις επιθυμητές προδιαγραφές καθώς και της εμφάνισης ελαττωμάτων) του επεξεργαζόμενου αντικειμένου.

Με βάση τις καταγεγραμμένες σχέσεις αιτίου-αποτελέσματος συντίθενται γενικευμένα δένδρα σφαλμάτων βασισμένα σε γεγονότα κορυφής που έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: (i) αντιστοιχούν σε ελαττώματα που εμφανίζονται στα τελευταία στάδια της παραγωγής, άρα τα περιλαμβανόμενα αποτελέσματα οποιουδήποτε ενδιάμεσου ή τελικού γεγονότος έχουν (δυναμική) αιτία τόσο στην τρέχουσα όσο και σε όλες τις ανάντη (upstream) διεργασίες και (ii) προκύπτουν ως αποτέλεσμα πλήθους διαφορετικών αιτίων και επομένως τα αντίστοιχα μεγάλα δένδρα μπορεί να θεωρηθεί ότι συντίθεται από επιμέρους μικρότερα δένδρα, με γεγονότα κορυφής συνυφασμένα με ενδιάμεσα γεγονότα ενός τουλάχιστον μεγάλου δένδρου.

Επίσης, παρουσιάζεται η τεχνική της εκτίμησης των ασαφών δεικτών σημαντικότητας (FSIs), που χρησιμοποιούνται ως μέτρο της έντασης της συνολικής αιτιώδους σχέσης, η οποία συνδέει το γεγονός κορυφής (αποτέλεσμα) με κάθε φύλλο (αιτία) του δένδρου. Τέλος, διερευνάται η επίδραση του κόστους του σφάλματος στη βελτιστοποίηση τιμών κρίσιμων παραμέτρων σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, όπως αυτά αποτυπώνονται στο δέντρο σφαλμάτων. Με τον τρόπο αυτό, αναδεικνύεται η λογική της μεθόδου της απομόνωσης ενός τελικού αιτίου και της διαδικασίας ελαχιστοποίησης της έντασής του, κάτω από ορισμένες τεχνικές δεσμεύσεις. Ως κατάλληλο υπόδειγμα, αναλύεται η περίπτωση της παραγωγής πολύ λεπτών ελασμάτων αλουμινίου, στα οποία αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης περιοχών με αταξίες δομής, όπου η ανοδίωση και η βαφή διαφοροποιούνται με αποτέλεσμα το τελικό σφάλμα της 'ετερογενούς επιφάνειας του ανοδιωμένου αλουμινίου'. Ως ανεξάρτητη/ερμηνευτική μεταβλητή λαμβάνεται το διάστημα ανοχής T (tolerance interval) και ως εξαρτημένη μεταβλητή (αντικειμενική συνάρτηση – objective function) η προκύπτουσα ωφέλεια (benefit) $B=B_1+B_2$, όπως αυτή προσδιορίζεται από την ανταπόκριση στην ποιότητα του προϊόντος και τη ζήτηση στην αντίστοιχη αγορά, όπου $B_1(T)$ η ωφέλεια από την αποφυγή σφάλματος και $B_2(T)$ η ωφέλεια που σχετίζεται με τη διασπορά των τιμών μιας προκαθορισμένης κρίσιμης παραμέτρου. Αποδεικνύεται ότι, όταν αυξάνεται το κόστος του σφάλματος, σε σχέση με την απομάκρυνση της μέσης τιμής της κρίσιμης παραμέτρου από την κεντρική τιμή \bar{T} του διαστήματος ανοχής, τότε αυξάνεται η βέλτιστη τιμή T_{opt} . Αντιθέτως, όταν αυξάνεται το κόστος του σφάλματος σε σχέση με τη διασπορά των τιμών της κρίσιμης παραμέτρου, τότε μειώνεται η βέλτιστη τιμή T_{opt} .

Επειδή στη βιομηχανική πράξη χρησιμοποιείται ως κρίσιμη παράμετρος εκείνη που ελέγχεται ευκολότερα σε πραγματικό χρόνο παραγωγής, έχει υιοθετηθεί ως τέτοια το μέσο πάχος \bar{x} των φύλλων αλουμινίου μετά τη διέλαση, που συμπίπτει (κατά προσέγγιση) με το άνοιγμα/διάκενο των ελάστρων, προκειμένου να γίνει μία μαθηματική διερεύνηση και να παρουσιασθεί μία αντίστοιχη ποσοτική εφαρμογή. Διερευνώνται τρεις περιπτώσεις: (Α) Μετά την πρώτη επανακατεργασία, όλα τα φύλλα της αρχικής παρτίδας είναι εντός των προδιαγραφών χωρίς να υποστούν πάλι ποιοτικό έλεγχο. (Β) Μετά την πρώτη επανακατεργασία ακολουθεί ποιοτικός έλεγχος και ευρίσκεται ότι η κατανομή του πάχους είναι ίδια με αυτή της πρώτης κατεργασίας. (Γ) Προστίθεται και δεύτερο έλαστρο με τις προϋποθέσεις της προηγούμενης

περίπτωσης. Σχεδιάζεται και αναπτύσσεται το αντίστοιχο λογισμικό και παρουσιάζεται πλήρης μονο-παραμετρική ανάλυση ευαισθησίας της βέλτιστης τιμής \bar{x}_{opt} και του ελάχιστου κόστους C_{min} ως προς όλες τις ανεξάρτητες/ερμηνευτικές μεταβλητές (κόστος σφάλματος, κόστος ποιοτικού ελέγχου, μέγιστο πάχος ελάσματος, κόστος ελασματοποίησης, μέση τιμή πάχους ελάσματος, τυπική απόκλιση πάχους ελάσματος).

Στη Συζήτηση που ακολουθεί, γίνεται διάκριση μεταξύ της χρήσης του πληροφοριακού συστήματος για διάγνωση σφάλματος γενικής και ειδικής υφής. Στην πρώτη περίπτωση, το αναλυόμενο σφάλμα μπορεί να προκαλείται από εντελώς διαφορετικές αιτίες, οι οποίες δημιουργούνται σε ανάντη διεργασίες και είναι απαραίτητη η χρήση του προτεινόμενου λογισμικού. Αντίθετα, όταν το αναλυόμενο γεγονός κορυφής είναι σχετικά εξειδικευμένο τόσο ως προς τα εξωτερικά/μετρήσιμα χαρακτηριστικά του όσο και ως προς τη μοναδικότητα της όδευσης/αλληλουχίας των γεγονότων από τα οποία έχει προκύψει, τότε ο εντοπισμός είναι εύκολος και είναι ενδεχόμενο ένας εμπειρογνώμονας να αποδείξει την αιτία χωρίς τη βοήθεια του Η/Υ. Εντούτοις, η χρησιμότητα της αλγοριθμικής διαδικασίας παραμένει, έστω ως βοηθητικό εργαλείο για τη λήψη απόφασης από τον εμπειρογνώμονα επειδή συμβάλλει στην αντικειμενική έκφραση (με όρους αποδεκτούς από τους εμπλεκόμενους, ακόμη και όταν δεν υπάρχει αντίστοιχη τυποποιημένη ορολογία) της υποκειμενικής γνώσης. Πέραν αυτού, η τήρηση της αλγοριθμικής διαδικασίας είναι υποχρεωτική και για τις 'εύκολες' περιπτώσεις ανίχνευσης του αιτίου, επειδή μέσω αυτής γίνεται αυτομάτως η επικαιροποίηση της γνώσης στην ΚΒ του πληροφοριακού συστήματος. Η ίδια λογική ισχύει και για τις επιμεταλλώσεις, όπως αποδεικνύεται με την ανάλυση παραδείγματος ηλεκτροχημικής επιμετάλλωσης χάλυβα με κάδμιο (επικαδμίωση).

5^ο Κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο αυτό, γίνεται κατ' αρχήν μία κατηγοριοποίηση (με βάση την τεχνική βιβλιογραφία και το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τους σκοπούς της διατριβής), αποτέλεσμα της οποίας είναι η διάκριση τριών γενικών μεθόδων/προσεγγίσεων με χρήση τεχνητής νοημοσύνης στην περιοχή της βοηθούμενης από Η/Υ Μηχανικής/Τεχνολογίας των Διεργασιών (Computer Aided Process Engineering – CAPE). Η πρώτη αναφέρεται στη χρήση έμπειρων συστημάτων, μέσω της απόκτησης/επεξεργασίας/δόμησης τις γνώσης σε ένα δυναμικό πλαίσιο,

στο οποίο συνυφαίνονται επιφανειακή/εμπειρική και βαθιά/επιστημονική γνώση που συν-λειτουργούν σε ένα σχήμα διαλεκτικής αλληλεπίδρασης. Η δεύτερη αναφέρεται στην εφαρμογή τεχνητών νευρωνικών δικτύων, τα οποία ενδεχομένως ενσωματώνουν κανόνες ασαφούς λογικής. Η τρίτη είναι μία μίξη των δύο προηγούμενων μεθόδων ,καθόσον βασίζεται στην ενσωμάτωση της επιφανειακής/εμπειρικής γνώσης σε ένα νευροασαφές σύστημα, δημιουργώντας είτε ένα ολοκληρωμένο σχήμα είτε ένα μηχανισμό αλληλεπίδρασης σχετικά ανεξάρτητων υποσυστημάτων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η εφαρμογή μίας βοηθούμενης από Η/Υ διαδικασίας ελέγχου που καθοδηγεί τον βιομηχανικό χρήστη πως να αποφύγει σφάλματα στην παραγωγική διαδικασία, όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 1, που συνεπάγονται είτε ελαττώματα στο ενδιάμεσο/τελικό προϊόν είτε αυξημένα υγρά απόβλητα.

Αποδείχθηκε ότι ο συνδυασμός ενός τεχνητού νευροασαφούς δικτύου και μίας ανεξάρτητης επεξεργασίας/ομαδοποίησης δεδομένων, που αποκτήθηκαν με πειραματική προσομοίωση σε εργαστηριακή κλίμακα και με αξιολόγηση πληροφοριών από εγκαταστάσεις βιομηχανικής κλίμακας, μπορεί να ελέγξει αποτελεσματικά τη διεργασία του αλκαλικού καθαρισμού του αλουμινίου πριν το στάδιο της ανοδίωσης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τόσο τα ελαττώματα στο επεξεργαζόμενο προϊόν όσο και τα παραγόμενα υγρά απόβλητα. Το πρόγραμμα ασαφούς λογικής που αναπτύχθηκε στηρίζεται σε εμπειρικούς κανόνες που είναι δυνατόν είτε να ενσωματωθούν σε μηχανισμό αυτόματου ελέγχου της συγκεκριμένης διεργασίας είτε να χρησιμοποιηθούν άμεσα για εποπτεία με ανθρώπινη παρέμβαση σε πραγματικό χρόνο. Η ίδια λογική διαδικασία (με το αντίστοιχο λογισμικό) να χρησιμοποιηθεί σε άλλες ημι-συνεχείς χημικές διεργασίες, ιδιαίτερα σ'αυτές που ανήκουν στην περιοχή της ηλεκτροχημικής κατεργασίας μετάλλων/κραμάτων, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος παρέμβασης μετά την ανίχνευση ελαττωμάτων στο προϊόν ή τη διαπίστωση έκλυσης αυξημένων υγρών αποβλήτων και να αυξηθεί η ιχνηλασιμότητα σύμφωνα με τα πρότυπα ISO της σειράς 9000.

6° Κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο αυτό, μελετάται (με τη βοήθεια της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα Κεφάλαια) η εκκίνηση/διάδοση της ρηγμάτωσης σε μεταλλικά αντικείμενα/εξαρτήματα, που προστατεύονται από ένα επιφανειακό στρώμα παραγόμενο με ηλεκτροχημική

κατεργασία (οξειδωση ή επιμετάλλωση). Το συγκεκριμένο σφάλμα μπορεί να συμβεί είτε στο στάδιο της κατεργασίας αυτής είτε στα κατάντη στάδια (π.χ. βαφή, σφράγισμα πόρων, φινίρισμα, συνομολόγηση) πριν τα επεξεργαζόμενα αντικείμενα απομακρυνθούν από το εργοστάσιο παραγωγής. Ο στόχος που τίθεται είναι η πρόληψη της ρηγμάτωσης, η οποία επιτυγχάνεται (α) βρίσκοντας την αιτία του ελαττώματος που ευθύνεται για την επακόλουθη έναρξη/διάδοση της ρηγμάτωσης και (β) εφαρμόζοντας τη σωστή θεραπεία για να εξαλειφθεί η αιτία, ή, στην περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό, να ελαχιστοποιήσει την επίδραση του εξεταζόμενου ελαττώματος. Αποδεικνύεται ότι η FFTA, που λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα, συμβάλλει αποτελεσματικά στην επίτευξη του στόχου αυτού. Το αναλυόμενο σφάλμα που τέθηκε a priori για να συλλέξει/ιεραρχήσει όλες τις δυνατές αιτίες ήταν η 'ρηγμάτωση' (cracking) στη γενική της περίπτωση, ενώ τα ενδιαμέσα γεγονότα/αίτια επιλέχθηκαν κατάλληλα ώστε να διευκολύνουν τη συμμετοχή όλων των παραγόντων που επηρεάζουν τις λογικές σχέσεις/κατηγοριοποιήσεις που εμφανίζονται στη δομή του δένδρου. Η αναλυόμενη περίπτωση του ανοδιωμένου αλουμινίου έδειξε ότι αυτή η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς ακόμα και όταν υπάρχουν άλλες τεχνικές ντετερμινιστικών υποδειγμάτων, επειδή οι τελευταίες αυτές συνήθως παρουσιάζουν διάφορες αδυναμίες είτε λόγω παραδοχών εξαγωγής του υποδείγματος (που γίνονται χάριν απλότητας) είτε λόγω των παρατηρούμενων δυσκολιών στις μετρήσεις κάποιων ανεξάρτητων μεταβλητών/αιτιών στο επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας. Επίσης, υποδεικνύεται η ένταξη αυτής της τεχνικής πρόληψης ρωγμών σε ένα πλαίσιο ποιοτικού ελέγχου πρώτων-υλών/προϊόντων/διεργασιών προκειμένου να διαμορφωθεί μία ολιστική προσέγγιση.

7^ο Κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται (α) η μεθοδολογία μίμησης της Φύσης στη δημιουργία θερμοδυναμικά σταθερών στρωμάτων σε μία ορισμένη κατηγορία μετάλλων (Al, Ti, Zr, Ta, Bi, κλπ) και (β) η υλοποίηση αυτής της μεθοδολογίας στην παραγωγή ανοδικών στρωμάτων αλουμινίου κυψελοειδούς δομής, εδραζόμενης σε ένα 'φυσικό' συμπαγές στρώμα, κατάλληλα τροποποιημένο για νανοτεχνολογικές και ηλεκτρικές/ηλεκτρονικές εφαρμογές, περιλαμβανομένης της βιομηχανικής παραγωγής μαγνητικών μέσων αποθήκευσης, των οπτικών μέσων, των ηλεκτροδίων, και των φθορίζουσών οθονών. Επίσης, παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα μετρήσεων εργαστηριακής κλίμακας και θερμοδυναμικοί υπολογισμοί

προκειμένου να αναδειχθούν τα όρια/περιορισμοί που υπάρχουν στην προσπάθεια αντιγραφής φυσικών δομών και εκμετάλλευσης φυσικών διεργασιών.

Το παρουσιαζόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο έχει σχεδιασθεί με βάση (α) την εξαγόμενη πληροφορία από την τεχνική βιβλιογραφία και (β) τη συσσωρευμένη εμπειρία στη διάρκεια πολλών ετών έρευνας στον έλεγχο της διάβρωσης στο Εργαστήριο Προσομοίωσης Βιομηχανικών Διεργασιών. Το συγκεκριμένο πλαίσιο περιλαμβάνει 16 εκτελεστικά στάδια και 6 κόμβους απόφασης, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι λαμβάνονται όλα υπόψη σε κάθε περίπτωση που εξετάζεται, επειδή, τις περισσότερες φορές, όταν ο υπεύθυνος παραγωγής παραλείπει την υλοποίηση ενός σταδίου, έχει ήδη λάβει υπόψη τη συνεισφορά του στο έργο, μέσα από έναν υποσυνείδητο μηχανισμό που χρησιμοποιεί υποκειμενική, υπονοούμενη ή 'σιωπηρή' γνώση (tacit knowledge). Εν τούτοις, αποδεικνύεται ότι ένα μεθοδολογικό πλαίσιο διευκολύνει (α) το μετασχηματισμό μέρους της υπονοούμενης σε σαφή γνώση και (β) τη δημιουργία/ εμπλουτισμό μίας Βάσης Γνώσης για να υποστηρίξει/βελτιώσει την ανθρώπινη εμπειρία και να δώσει την απαραίτητη πληροφορία για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένα στάδια, που αποτελούν τον πυρήνα του μεθοδολογικού πλαισίου.

Επιπλέον, ο συνδυασμός ορισμένων σταδίων της παρουσιαζόμενης αλγοριθμικής διαδικασίας μπορεί να συμβάλει στο σχεδιασμό σύνθετων στιβάδων παθητικοποίησης του μητρικού μετάλλου, με ομοιόμορφη κατανομή χαρακτηριστικών, τα οποία μπορούν εύκολα να μετρηθούν άμεσα ή έμμεσα. Με νέα πειραματικά δεδομένα, αποδεικνύεται η εξάρτηση της πυκνότητας ρεύματος I από το χρόνο ανοδίωσης t , σύμφωνα με ένα νέο υπόδειγμα της μορφής $I = g/t + I_{\infty}[1 - \exp(-kt)]$, το οποίο έχει προκύψει με τη σύνθεση δύο απλών υποδειγμάτων, ενός υπερβολικού και ενός εκθετικού (οι τιμές των παραμέτρων g , k έχουν εκτιμηθεί με μη γραμμική παλινδρόμηση σε πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 30 sec από την έναρξη της ανοδίωσης). Αρχικά, παρατηρείται απότομη μείωση της I , ως αποτέλεσμα της δημιουργίας της συμπαγούς στιβάδας που αντιστοιχεί στη στιβάδα 'φυσικής' παθητικοποίησης, η οποία όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση παράγεται τεχνητά. Στη συνέχεια η I διέρχεται από μια ελάχιστη τιμή, η οποία υπολογίζεται προσεγγιστικά (με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης) από την εξίσωση $dI/dt = 0$ ή $-g/t_{\min}^2 + I_{\infty} k \exp(-kt_{\min}) = 0$, ενώ οι εκτιμηθείσες τιμές των παραμέτρων g , k επιβεβαιώνουν την ισχύ της συνθήκης δευτέρας τάξεως $[d^2I/dt^2]_{t_{\min}} > 0$ ή $2g/t_{\min}^3 - I_{\infty} k^2 \exp(-kt_{\min}) > 0$, και μετά αυξάνεται με φθίνοντα ρυθμό ($dI/dt > 0$,

$d^2I/dt^2 < 0$) συγκλίνουσα ασυμπτωτικά προς την πειραματικά προσδιοριζόμενη τιμή της I_∞ , η οποία όμως θα μπορούσε να προσδιοριστεί και δια μέσου της μη-γραμμικής παλινδρόμησης δίνοντας μάλιστα μικρότερο τυποποιημένο σφάλμα της εκτίμησης. Στην περιοχή πριν το ελάχιστο, υπερισχύει το υπερβολικό υπόδειγμα, στην περιοχή όμως μετά από αυτό υπερισχύει το εκθετικό υπόδειγμα ενώ η περιοχή σύγκλισης προς την ασυμπτωτική τιμή της I_∞ αντιπροσωπεύει την επικράτηση συνθηκών σταθεροποιημένης κατάστασης, αποτέλεσμα της οποίας είναι η παραγωγή του ‘τεχνητού’ πορώδους στρώματος, σύμφωνα με τις επιθυμητές τεχνικές προδιαγραφές. Κατά συνέπεια, το συγκεκριμένο σύνθετο κινητικό υπόδειγμα απεικονίζει τη μεταβατική κατάσταση από μια ‘φυσικού-τύπου’ σε μια ‘τεχνητού-τύπου’ παθητικοποίηση που έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ομοιόμορφου στρώματος μεγάλου πάχους, με βελτιωμένες αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Αν οι προδιαγραφές απαιτούν ‘φυσικού-τύπου’ παθητικοποίηση σε ολόκληρο το πάχος του προστατευτικού στρώματος, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρολύτης χωρίς διαλυτική δράση. Αποδεικνύεται ότι όταν το πάχος αυξάνεται, η πιθανότητα διάρρηξης του στρώματος επίσης αυξάνεται, όπως φαίνεται από τη θερμοδυναμική ανάλυση που περιλαμβάνεται σε Παράρτημα του Κεφαλαίου, όπου παρουσιάζεται ένα γενικευμένο υπόδειγμα της εξάρτησης της ασκούμενης πίεσης p από το πάχος του στρώματος L (τα αναφερόμενα στη βιβλιογραφία απλούστερα υποδείγματα προκύπτουν ως μερικές περιπτώσεις του παρουσιαζόμενου εδώ γενικευμένου υποδείγματος). Δηλαδή, αποδεικνύεται τελικά ότι, μιμούμενοι τη Φύση, μπορούμε να βελτιώσουμε ορισμένες ιδιότητες των υλικών μέχρι κάποιο βαθμό, μετά τον οποίον όμως πρέπει να πληρώσουμε ένα τίμημα, αναλαμβάνοντας ένα διαρκώς αυξανόμενο κίνδυνο κατάρρευσης ολόκληρης της δομής που έχει δημιουργηθεί τεχνητά.

8^ο Κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται μία μεθοδολογία για τη δημιουργία/συντήρηση μίας DKB για επιμετάλλωση/ανοδίωση, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για (α) διαχείριση γνώσης στο αντίστοιχο τμήμα μίας μεγάλης επιχείρησης (EME) και (β) μεταφορά τεχνολογίας σε μία MME, υπό μορφή τακτικής συμβουλευτικής δράσης, με τη βοήθεια ενός πληροφοριακού συστήματος που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται κυρίως στην ασαφή λογική που εμπεριέχεται μέσα σε ένα δένδρο ανάλυσης σφαλμάτων (Fault Tree Analysis – FTA) και

στην ασαφή πολυκριτήρια ανάλυση (Fuzzy Multicriteria Analysis – FMCA), ώστε να λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα.

Το βοηθούμενο από υπολογιστή ολοκληρωμένο σχήμα που παρουσιάζεται μπορεί (α) να βρει όλους τις δυνατές/υποψήφιες τελικές αιτίες (μέσω fuzzy FTA), που είναι ενδεχομένως υπεύθυνες για την παραγωγή ενός ελαττωματικού αντικειμένου, (β) να αποκλείσει τις περισσότερες από αυτές από περαιτέρω εξέταση, εφαρμόζοντας ένα φίλτρο υπό μορφή έμπειρου συστήματος, (γ) να κατατάξει τις υπόλοιπες σύμφωνα με κριτήρια, όπως σημαντικότητα, απαιτήσεις δοκιμών ελέγχου/επιβεβαίωσης (κόστος, χρόνος, εξοπλισμός/μέθοδος/διαθεσιμότητα/αξιοπιστία), εξηγησιμότητα, (δ) να ενεργοποιήσει το λογισμικό εξέταση/εκτίμησης θεραπείας μέχρι να αποκαλυφθεί η πραγματική αιτία, (ε) να εμπλουτίσει μία ενσωματωμένη διαγνωστική βάση γνώσης με εμπειρία που αποκτάται κατά τη συμβουλευτική διαδικασία. Οι περιοχές των δυνατών εφαρμογών είναι (α) επιμετάλλωση μετάλλων και κραμάτων (κυρίως πάνω σε μητρικό υπόστρωμα από χάλυβα), (β) ανοδίωση του αλουμινίου και άλλων μετάλλων, (γ) ηλεκτροχημική παραγωγή χημικών ενώσεων/προϊόντων και διαφόρων μετάλλων (π.χ. χλώριο - καυστική σόδα και αλουμίνιο/μαγνήσιο/νικέλιο/χαλκό, αντίστοιχα), (δ) ηλεκτροχημική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το κοινό χαρακτηριστικό αυτών των διεργασιών είναι η ηλεκτροχημική μετατροπή που δομεί μία στερεή πλατφόρμα για το συσχέτισμό της ποιότητας στο ενδιάμεσο/τελικό προϊόν με την παρακολούθηση/έλεγχο της διεργασίας. Αυτή η σχέση ενισχύει την ιχνηλασιμότητα στη βιομηχανία, σύμφωνα με τα νέα πρότυπα της σειράς ISO 9000.

Παρουσιάζεται μία εφαρμογή ασαφούς ανάλυσης δένδρου σφαλμάτων στην περίπτωση της επιχρωμίωσης του χάλυβα, όταν το εξεταζόμενο σφάλμα (top event) είναι ‘ανομοιογενής εμφάνιση επιφάνειας του στρώματος χρωμίου’. Οι υποψήφιες για πολυκριτηριακή επιλογή εναλλακτικές αιτίες ήταν: διάβρωση της ανόδου (A_1), οξείδωση του σημείου ηλεκτρικής επαφής με το αντικείμενο (A_2), λανθασμένη αρχική τοποθέτηση (A_3), ανεπαρκής ανάδευση (A_4), γήρανση του λουτρού της επιμετάλλωσης (A_5), μείωσης της συγκέντρωσης του λουτρού σε χημικά πρόσθετα (A_6). Η εκτέλεση του προγράμματος FMCA υπέδειξε ως υπεύθυνο του εξεταζόμενου σφάλματος το αίτιο A_1 . Οι πειραματικές μετρήσεις (των δοκιμών επιβεβαίωσης), όμως, των επιφανειών των ανόδων έδειξαν ότι το πάχος του στρώματος του οξειδίου ήταν μέσα στις απαιτούμενες προδιαγραφές. Επίσης, το λουτρό της ηλεκτρόλυσης εξετάστηκε για πιθανή

μόλυνση με χλωρικά ιόντα και υδροχλωρικό οξύ που είναι δυνατόν να προκαλεί απογύμνωση των ανόδων. Αυτή η εξέταση ήταν απαραίτητη, καθώς ο χρόνος που πέρασε από την επιχρωμίωση της παρτίδας των αντικειμένων μέχρι την εξέταση των ελαττωματικών αντικειμένων ήταν αρκετός για την προοδευτική επικάλυψη της επιφάνειας της ανόδου με ένα νέο στρώμα οξειδίου. Ωστόσο, η μόλυνση που βρέθηκε ήταν αμελητέα, οπότε η εναλλακτική λύση A_1 αποκλείστηκε και επαναλήφθηκε η διαδικασία. Η νέα λύση που προέκυψε, αφού εκτελέστηκε εκ νέου το υποπρόγραμμα FMCA (χωρίς την εναλλακτική πρόταση A_1) PROMETHEE II ήταν $A_4 > A_3 > A_6 > A_2 > A_5$. Έτσι, η προτεινόμενη νέα εναλλακτική λύση για έλεγχο τελικού αιτίου του σφάλματος της κορυφής, είναι η A_4 , δηλ. ‘ανεπαρκής ανάδευση’. Εξέταση αυτής της εναλλακτικής λύσης μέσω πειράματος και προσομοίωσης με υπολογιστή (με δεδομένα που συνήθως ισχύουν στην πράξη) έδειξε ότι αυτή η αιτιώδης σχέση είναι πιο πιθανό να έχει λάβει χώρα κατά τη διάρκεια της επιμετάλλωσης της παρτίδας όπου το ελαττωματικό αντικείμενο ανήκει. Η πειραματική επιβεβαίωση αυτής της αιτιώδους σχέσης, οδήγησε στην τελική απόφαση να προταθεί η ‘αύξηση της ανάδευσης’ ως επανορθωτική λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Επίσης, παρουσιάζεται μία εφαρμογή ανοδίωσης του αλουμινίου, όταν το εξεταζόμενο σφάλμα είναι ‘τοπικά καμένη επιφάνεια’. Οι υποψήφιες για πολυκριτηριακή επιλογή εναλλακτικές αιτίες, που προέκυψαν μετά την εκτέλεση του προγράμματος ασαφούς ανάλυσης δένδρου σφαλμάτων, ήταν: ανεπαρκής ανάδευση (A_1), χαμηλή απόδοση του συστήματος ψύξης (A_2), υψηλή τοπική συγκέντρωση των συστατικών του κράματος ή των προσμείξεων (A_3), αταξίες δομής εντός βάθους $< 30\mu\text{m}$ υπό την επιφάνεια του μητρικού μετάλλου (A_4), λανθασμένη αρχική διεύθυνση των προς ανοδίωση αντικειμένων (A_5), τοποθέτηση των αντικειμένων πολύ κοντά στις καθόδους (A_6), εκτός ορίων συγκέντρωση προσθέτων στο λουτρό της ανοδίωσης (A_7). Η εκτέλεση του προγράμματος FMCA υπέδειξε ως υπεύθυνο του εξεταζόμενου σφάλματος το αίτιο A_6 ενώ η ανάλυση ευαισθησίας απέδειξε ότι η προτεινόμενη λύση είναι εύρωστη (robust). Η πειραματική εξέταση της εύρωστης πρότασης A_6 σε φυσικό προσομοιωτή σε εργαστηριακές συνθήκες με βάση βιομηχανικά δεδομένα που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα αποστάσεων, κατευθύνσεων/προσανατολισμών αντικειμένων κρεμασμένων στις ανόδους σε σχέση με τη θέση/επιφάνεια/προσανατολισμό των καθόδων απέδειξε ότι η πρόταση/υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται στην πράξη.

Αποδεικνύεται ότι η παραπάνω περιγραφόμενη μεθοδολογία μπορεί να επεκταθεί σε μετρολογικές εφαρμογές προκειμένου να υποστηριχθούν βιομηχανικές MME, οι οποίες στερούνται (i) των αναγκαίων μέσων εντοπισμού ελαττωμάτων στα παραγόμενα ενδιάμεσα/τελικά προϊόντα και (ii) εξειδικευμένου επιστημονικού προσωπικού κατάλληλου να ανιχνεύσει/επιβεβαιώσει τις αιτίες και να προτείνει μέτρα θεραπείας ή/και πρόληψης. Το προτεινόμενο πληροφοριακό σύστημα μπορεί να δώσει εφαρμόσιμες λύσεις σε μετρολογικά προβλήματα επιλογής συσκευών μέτρησης καθημερινής χρήσης και παροχής υπηρεσιών διακρίβωσης/ρύθμισης/ βαθμονόμησης οργάνων και εκτέλεσης μετρήσεων υψηλής ακρίβειας ή σπανίως ζητούμενων χαρακτηριστικών/ιδιοτήτων για προϊόντα με ειδικές προδιαγραφές. Τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια είναι: απαιτούμενος χρόνος, ευκολία, κόστος, ακρίβεια, ορθότητα, περιοχή μέτρησης, βαθμός αποδοχής, συγκρισιμότητα. Ως πραγματική εφαρμογή παρουσιάζεται η περίπτωση της επιλογής μεθόδου μέτρησης του πάχους του ανοδικού στρώματος του αλουμινίου. Οι εναλλακτικές μέθοδοι, που προκρίθηκαν είναι μέτρηση: της μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης πηνίου, όταν επάγονται δινορρέυματα στη μητρική επιφάνεια του αλουμινίου (A_1), της διαφοράς μάζας ανοδιωμένου δοκιμίου αλουμινίου πριν και μετά τη διάλυση του ανοδικού στρώματος (A_2), της διατομής σε οπτικό μικροσκόπιο, (A_3), της διατομής σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (A_4), της έντασης ακτίνας σκεδαζομένων σωματιδίων βήτα (A_5), του αριθμού των μονοχρωματικών κροσσών που εμφανίζονται όταν χρησιμοποιείται μικροσκόπιο παρεμβολής διπλής δέσμης (A_6), του ηλεκτρικού δυναμικού ή της ηλεκτρικής αντίστασης (A_7). Η εκτέλεση του προγράμματος FMCA υπέδειξε ως προτεινόμενη λύση τη μέθοδο A_1 , η οποία αποδεικνύεται εύρωστη (robust), αφού (i) δεν περιλαμβάνεται σε οποιοδήποτε ζεύγος μεθόδων του οποίου τα μέλη εμφανίζονται ως μη-συγκρίσιμα και (ii) η μονοπαραμετρική ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη δεύτερη καλύτερη μέθοδο, A_3 , σε επίπεδο χαμηλής και υψηλής ανάλυσης επιβεβαιώνει την υπεροχή της A_1 σε ολόκληρη την περιοχή $\pm 50\%$ γύρω από τη μέση απασαφοποιημένη τιμή κάθε κριτηρίου στο διάλυμα των βαρών. Επί πλέον, η εμπειρική έρευνα τόσο σε υποκειμενικό επίπεδο δια μέσου των εμπειρογνομώνων όσο και σε αντικειμενικό επίπεδο δια μέσου της εξόρυξης δεδομένων από την τεχνική βιβλιογραφία επιβεβαιώνει τα παραπάνω αποτελέσματα.

9^ο Κεφάλαιο

Το Κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται ορισμένα βασικά σημεία της σχεδίασης/ανάπτυξης/εφαρμογής ενός βασιζόμενου στη γνώση συστήματος (Knowledge Based System – KBS), το οποίο μπορεί να εφοδιάζει με κανόνες και οδηγίες το τεχνικό προσωπικό που απασχολείται με την ηλεκτροχημική επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών, συμβάλλοντας επίσης στη δημιουργία/διατήρηση περιβάλλοντος συνεργασίας μεταξύ εργαζομένων που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα της ιεραρχίας. Το ίδιο σύστημα εμπλουτίζει/επικαιροποιεί μία τοπική KB και διεξάγει ανάλυση δένδρου σφαλμάτων (Fault Tree Analysis – FTA), όταν εντοπίζεται ένα σημαντικό ελάττωμα, αυξάνοντας την ιχνηλασιμότητα, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO της σειράς 9000. Το KBS αποτελείται από τα διακριτά υποσυστήματα CIS, EIS, TIS και το περιβάλλον - σύστημα FDS. Το CIS (Chemical Interactive Sub-system) συνθέτει/προμηθεύει κανόνες στον εποπτεύοντα/χειριστή προκειμένου η συμμεταβολή των τιμών των μεταβλητών/παραμέτρων ελέγχου να προσδιορίζει ένα διανυσματικό χώρο λειτουργία της διεργασίας, στον οποίο διασφαλίζεται ανεκτό ποσοστό ελαττωμάτων και συμφωνία με τις λοιπές προδιαγραφές του παραγόμενου/ενδιάμεσου τελικού προϊόντος. Το CIS βασίζεται σε αλγόριθμο νευρο-ασαφούς ταξινόμησης και είναι κατάλληλο κυρίως για διεργασίες που λαμβάνουν χώρα εντός ομοιογενούς λουτρού, όπως στην περίπτωση του υπο-σταδίου του αλκαλικού καθαρισμού όπου προηγείται του ηλεκτροχημικού σταδίου της ανοδίωσης του αλουμινίου.

Το EIS (Electrochemical Interactive Sub-system) συνθέτει/προμηθεύει κανόνες στον εποπτεύοντα/χειριστή προκειμένου να διασφαλίζονται αμφότερα, ανεκτό ποσοστό ελαττωμάτων και συμφωνία με τις λοιπές προδιαγραφές (όπως τίθενται από τον πελάτη ή την αγορά ή/και επιβάλλονται από το ισχύον θεσμικό πλαίσιο) του τελικά παραγόμενου προϊόντος με το ελάχιστο κόστος. Το EIS βασίζεται σε αλγόριθμο νευρο-ασαφούς προσέγγισης, σε συνεργασία με μια εξωτερική ευρετική διαδικασία, και είναι κατάλληλο κυρίως για ηλεκτροχημικές διεργασίες, όπως είναι η ανοδίωση του αλουμινίου και η επιμετάλλωση του χάλυβα. Το TIS (Topological Interactive Sub-system), το οποίον ευρίσκεται ιεραρχικά υπό το EIS, συνθέτει/προμηθεύει απαγορευτικούς κανόνες και διατυπώνει συμβουλές για τον εποπτεύοντα/χειριστή, όσον αφορά στην τοποθέτηση/διευθέτηση ράβδων/δοκών/κρεμαστρών/γάντζων, από όπου κρέμονται τα προς ανοδίωση ή επιμετάλλωση αντικείμενα, προκειμένου ειδικά μεν να αποφευχθεί η εμφάνιση ελαττωμάτων, γενικά δε να επιτευχθεί η επιθυμητή

ποιότητα. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται δύσκολα και για τον λόγο αυτόν η σχετική προσπάθεια περιγράφεται στα τεχνικά εγχειρίδια ως εμπειρική τέχνη μάλλον παρά ως επιστημονική μεθοδολογία, με αποτέλεσμα να είναι επιτακτική η ανάγκη της ανάδρασης (σε πληροφοριακό επίπεδο) από την πλευρά του εποπτεύοντα/χειριστή και του εργαστηρίου ποιοτικού ελέγχου. Τέλος, το FDS (Fault Diagnosis System) είναι ένα περιβάλλον-σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει τα παραπάνω υποσυστήματα και την απαιτούμενη διαδικασία για την διεξαγωγή FTA.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε βασίζεται σε ασαφή πολυκριτηριακή ανάλυση (FMCA) δύο φάσεων, η οποία πραγματοποιείται από το τεχνικό προσωπικό στα πλαίσια του βοηθούμενου από Η/Υ ολοκληρωμένου σχήματος διαδικασιών και παρουσιάζεται υπό μορφή αλγοριθμικής διαδικασίας με 21 εκτελεστικά στάδια συνδεδεμένα μέσω 8 κόμβων απόφασης, όπου η εφαρμογή ενός νευρο-ασαφούς δικτύου προσδιορίζει τις ιδιότητες του προϊόντος από τις συνθήκες κατεργασίας πρώτων και ενδιάμεσων υλικών. Στη συνέχεια, δεδομένων των επιθυμητών προδιαγραφών του προϊόντος (όπως αυτές προσδιορίζονται από τον πελάτη ή την αγορά ή/και το υπάρχον θεσμικό πλαίσιο), άρα και του διάνυσματος εξόδου που αντιστοιχεί στις ιδιότητες του προϊόντος, προσδιορίζεται το διάνυσμα εισόδου που αντιστοιχεί στις απαιτούμενες συνθήκες κατεργασίας. Οι αντιστοιχίσεις διανυσμάτων εισόδου-εξόδου, οι οποίες λαμβάνονται από τη βιομηχανική παραγωγή ή φυσικούς προσομοιωτές, αποτελούν το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται από τον νευρο-ασαφές δίκτυο κατά την περίοδο της 'μάθησης'. Οι εφικτοί/επιθυμητοί συνδυασμοί σχηματίζουν, κάτω από αυστηρούς περιορισμούς ως προς το ανώτατο επιτρεπτό όριο εμφάνισης ελαττωμάτων, ομάδες (clusters), οι οποίες φιλτράρονται (οπότε μειώνεται ο αριθμός τους) μέσω ενός ελάχιστου πλάτους τιμών που αντιστοιχούν στις μεταβλητές εισόδου. Στο χρησιμοποιούμενο λογικό σχήμα, οι μεταβλητές αυτές είναι ανεξάρτητες, αφού οι εξαρτημένες μεταβλητές συνιστούν το διάνυσμα εξόδου.

Τα μέλη του τελικά προ-επιλεγόμενου συνόλου των ομάδων κατατάσσονται, με τη βοήθεια FMCA, σε σειρά φθίνουσας προτίμησης για υιοθέτηση στην παραγωγική διαδικασία. Τα κριτήρια ομαδοποίησης και κατάταξης των συνθηκών επεξεργασίας (για αποτέλεσμα παραγωγής προκαθορισμένης ποιότητας) είναι: σταθερό/κεφαλαιακό κόστος f_1 , ενεργειακό κόστος f_2 , παραγωγικότητα ως προς το φυσικό προϊόν (δηλ. ρυθμός κατεργασίας, εξαρτώμενος κυρίως από την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία με τη σειρά της προσδιορίζει τη δομή του πορώδους ανοδικού στρώματος και επηρεάζει ποσοτικά και ποιοτικά την εμφάνιση

ελαττωμάτων στο ενδιάμεσο/τελικό προϊόν) f_3 , λοιπό μεταβλητό/λειτουργικό κόστος f_4 , περιβαλλοντική επιβάρυνση f_5 , συμβολή στη διαδοχή των παρτίδων των προς ανοδίωση αντικειμένων f_6 , συμβολή στη διευκόλυνση ρυθμίσεων για τη βέλτιστη λειτουργία/έλεγχο της διεργασίας, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των αντικειμένων της ίδιας παρτίδας, f_7 .

Τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια για την κατάταξη των υποψηφίων για εξέταση τελικών αιτίων του σφάλματος είναι: σημαντικότητα (όπως προκύπτει από τον αντίστοιχο FSI) g_1 , διαθεσιμότητα εξοπλισμού g_2 , αξιοπιστία (βασισμένη στην ανάλυση διακύμανσης – ANOVA – των πειραματικών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν υπό όμοιες συνθήκες ηλεκτροχημικής επεξεργασίας κατά το παρελθόν) g_3 , κόστος εξέτασης g_4 , λόγος απαιτούμενου για την εξέταση χρόνου προς τον διαθέσιμο χρόνο g_5 , αναμενόμενη συμβολή στην εξηγησιμότητα των σχέσεων που συνδέουν το γεγονός κορυφής με το τελικό αίτιο g_6 . Τα κριτήρια $f_1, f_2, f_4, g_2, g_3, g_4$ έχουν αντικειμενικά χαρακτηριστικά ενώ τα κριτήρια $f_3, f_5, f_6, f_7, g_1, g_5, g_6$ έχουν μάλλον υποκειμενικά χαρακτηριστικά, δηλ. παρέχουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας στον εμπειρογνώμονα που θα εκτιμήσει τελικά τις τιμές στα αντίστοιχα διανύσματα βαρών.

Η παρουσιαζόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε επιτυχώς στη διεργασία της ηλεκτροχημικής ανοδίωσης του αλουμινίου σε λουτρό θεικού οξέος. Τα αποτελέσματα δείχνουν τη δυνατότητα των χειριστών/εποπτών να επηρεάσουν την επιλογή της προτεινόμενης λύσης (σε επίπεδο υψηλής ανάλυσης), μεταβάλλοντας τις τιμές των βαρών που αντιστοιχούν στα υποκειμενικά κριτήρια f_3, f_5, f_6, f_7 . Από την άλλη πλευρά, τα λοιπά μέλη του τεχνικού προσωπικού, τα οποία συμμετέχουν στην ίδια διαδικασία και μάλιστα ανήκουν σε ιεραρχικά υψηλότερες βαθμίδες, μπορούν να επηρεάσουν περισσότερο την επιλογή της προτεινόμενης λύσης μέσω της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων της γενικευμένης συνάρτησης προτίμησης, που προσδιορίζουν το επίπεδο ανάλυσης. Τέλος, όλα τα μέλη του τεχνικού προσωπικού που λαμβάνουν μέρος στην ίδια διαδικασία μπορούν να επηρεάσουν την προτεινόμενη λύση αφού συμμετέχουν, κατά ειδικότητα/βαθμίδα, στην εκτίμηση των βαθμών της πολυκριτήριας μήτρας. Με τον τρόπο αυτό, και δεδομένου ότι τα συγκεκριμένα μέλη εκφράζουν τις απόψεις που επικρατούν μεταξύ των εργαζομένων (τουλάχιστον) της ίδιας βαθμίδας, καλλιεργείται πνεύμα συνεργασίας, αλληλοεκτίμησης και συνυπευθυνότητας, αφού συνδιαμορφώνονται οι συνθήκες παραγωγής/ελέγχου τόσο στην πράξη όσο και στην επιχειρούμενη εκπαιδευτική προσομοίωση.

Κατάλογος Δημοσιεύσεων

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής, δημοσιεύθηκαν οι παρακάτω επιστημονικές εργασίες, αναφερόμενες κατά αντίστροφη σειρά ως προς τη χρονολογία δημοσίευσης, οι οποίες είτε αποτελούν καθ' αυτές τους πυρήνες κεφαλαίων της διατριβής είτε βασίζονται σε εργαλεία και μεθόδους που αναπτύχθηκαν σ' αυτή. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι, μαζί με πολλές άλλες που αναπτύξαμε για την εξυπηρέτηση των αναγκών του Εργαστηρίου Προσομοίωσης Βιομηχανικών Διεργασιών, όπου εκπόνησα το πειραματικό μέρος κατά σημαντικό ποσοστό, αποτέλεσαν το πληροφοριακό υπόβαθρο πάνω στο οποίο βασίστηκαν αρκετά άλλα έργα εκπαιδευτικού/ερευνητικού χαρακτήρα σε προπτυχιακό και μεταπτυχιακό επίπεδο. Πέραν αυτών, συμμετείχα στις λοιπές εκπαιδευτικές δραστηριότητες του Τμήματος και του Εργαστηρίου, όπως επιτηρήσεις εξετάσεων και διεξαγωγή μετρήσεων πεδίου (*in-situ*), αντίστοιχα.

1. P. Fotilas, A. F. Batzias, Estimating the Al Anodic Oxide Film Porosity as a Function of Electrochemical Processing Conditions at Industrial Level. 8th Europ. Symp. on Electrochemical Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering (Europ. Fed. Chem. Eng.), Prague, Czech Rep., 2008, pp. 245-260.
2. P. Fotilas, A. F. Batzias, C. G. Siontorou, Learning by Doing via Biomonitoring the Rehabilitation of Pb-Contaminated Industrial Sites. Symp. on Environmental Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering (Europ. Fed. Chem. Eng.), Prague, Czech Rep., 2008.
3. A. F. Batzias, Knowledge Management in Soil Bioremediation by Means of Model Based Reasoning (MBR). Symp. on Environmental Engineering, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering (Europ. Fed. Chem. Eng.), Prague, Czech Rep., 2008.
4. P. Fotilas, A. F. Batzias, Knowledge Acquisition within a Network of Industrial Laboratories Performing Quality Specifications Testing. 8th Joint Conference on Knowledge - Based Software Engineering 2008 (JCKBSE 08, M. Virvou and T. Nakamura (Eds.) in «Frontiers in Artificial Intelligence and Applications», IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, Vol. 180, L.C. Jain and R.J. Howlett, Eds. 2008, pp. 337-346.
5. N. P. Blesseos, A. F. Batzias, Knowledge Acquisition/Transformation to Meet the Quality Needs of the Metallic Constructions Market. 8th Joint Conference on Knowledge - Based Software Engineering 2008 (JCKBSE 08, M. Virvou and T. Nakamura (Eds.) in «Frontiers in Artificial Intelligence and Applications», IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, Vol. 180, L.C. Jain and R.J. Howlett, Eds. 2008, pp. 327-336.
6. A.F. Batzias, C.G. Siontorou, A New Scheme for Biomonitoring Heavy Metal Concentrations in Semi-Natural Wetlands. Journal of Hazardous Materials (Elsevier), Vol. 158(2-3), 2008, pp. 340-358.
7. P. Fotilas and A. F. Batzias, A Modeling Procedure by Means of Multicriteria Analysis. Application in the Case of Specific Surface Estimation of Anodized Aluminium. American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc., 2008, forthcoming.

8. I. Gadaras, L. Mikhailov and A. Batzias, On the Development of a Hierarchical Fuzzy Classification Framework for Industrial and Environmental Applications. American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc., 2008, forthcoming.
9. A.F. Batzias, D.K. Sidiras, Optimal Control of Cut Biomass Supply Inventory by Means of a Simulation Model Incorporating Deterioration of Digestible Lignocellulosics in Open Air. 16th European Biomass Conference, Elsevier 2008, Valencia, Spain, pp. 55-59.
10. A.F. Batzias, D.K. Sidiras, Thermochemical Conversion of Waste Biomass to Obtain Activated Carbon Substitutes for Dye Adsorption – A Decision Making Approach on Kinetics. 16th European Biomass Conference, Elsevier 2008, Valencia, Spain, 1727-1732.
11. A. F. Batzias, A. G. Lagodimos, A Methodology for Environmental Quality Monitoring and Knowledge Base Enrichment. International Conference on Management and Marketing Sciences (ICMMS 2008).
12. A.F. Batzias: Fuzzy Multicriteria Ranking of Aluminium Coating Methods. American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc., 2007, Vol. 963, pp. 856-861.
13. A.F. Batzias, A.P. Efthymiadou and C.G. Siontorou, A Knowledge Based System Offering Consultation for Enhancing Semi-Natural Wetland Functionality. American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc., 2007, Vol. 963, pp. 878-883.
14. P. Fotilas and A.F. Batzias, Synthesizing Equivalence Indices for the Comparative Evaluation of Technoeconomic Efficiency of Industrial Processes at the Design/Re-engineering Level. American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc., 2007, Vol. 963, pp. 884-889.
15. A.F. Batzias and G. Batis, Initiation/Propagation/Control of Cracking on Anodized Aluminium and Electroplated Steel. Trans. Eng. Sci., Vol. 4, 2005, pp. 416-425.
16. A.F. Batzias and G. Batis, Imitating Nature in Building Up Thermodynamically Stable Layers on Metals for Protection Against Corrosion. Trans. Ecol. & Environment, Vol. 73, 2004, pp. 648-658.
17. A.F. Batzias, F.A. Batzias, Fuzzy Multicriteria Choice of Instrumental Methods for Measuring Physical Quantities - Application in the Case of Dielectric Aluminium Anodic Oxide Films. Proc. IEEE Instrum. & Meas. Technol. (IMTC 2004) Vol. 3, 2004, pp. 2217-2222.
18. A.F. Batzias, F.A. Batzias, Fuzzy Fault Tree Analysis as a Means for Computer Aided Technology Transfer to Small/Medium Anodizers. Computer Aided Chem. Eng., Vol. 16, Elsevier, 2004, pp. 577-582.
19. A.F. Batzias and F.A. Batzias, Multicriteria Choice of Industrial Management System for a Typical Greek Tannery Operating in a Changing Environment. 4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4) Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in J. Chem. Eng. & Tech. (J. Wiley), Jan. 2004. O-2-003.
20. A.F. Batzias and F.A. Batzias, Multicriteria Choice of Solvent in the Lithographic Printing Industry with Emphasis on Occupational Health. 4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4) Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in J. Chem. Eng. & Tech. (J. Wiley), Jan. 2004. P-4.1-025.
21. A.F. Batzias and F.A. Batzias, Creating/Maintaining a Diagnostic Knowledge Base for Electroplating. 4th Europ. Congress Chem. Eng. (ECCE-4) Granada, Spain, Sept 2003, incl. also in J. Chem. Eng. & Tech. (J. Wiley), Jan. 2004.

22. A.F. Batzias, N. P. Nikolaou, D. K. Sidoras, GIS-Based Discrimination of Oil Pollution Source in an Archipelago –The Case of the Aegean. Lecture Series on Computer and Computational Sciences Volume 1, 2004, pp. 642-646.
23. A.F. Batzias, F.A. Batzias, Computational and Experimental Process Control by Combining Neurofuzzy Approximation with Multicriteria Optimization. Computational Engineering, Int. Series Comp. Eng., WIT Press Computational Mechanics Inc., Boston Massachusetts, USA, Vol. 4, 2003, pp. 107-118.
24. A.F. Batzias and F.A. Batzias, A System for Support and Training of Personnel Working in the Electrochemical Treatment of Metallic Surfaces. Computer Aided Chem. Eng. (Elsevier), Vol. 14, 2003, pp. 365-370.
25. A.F. Batzias and F.A. Batzias, Fuzzy Fault Tree Analysis as a Mechanism for Technical Support to Small/Medium Electroplaters on a Quasi Online/Real-Time Basis. IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT03), Maribor, Slovenia, Vol. 1 (2003) pp. 36-41.
26. A.F. Batzias and F.A. Batzias, Computer Aided Waste Minimization in the Industrial Anodization of Aluminium. Proc. Intern. Conf. Protection and Restoration of the Environment (PRE VI), Skiathos, Greece, Vol. 2, 2002, pp. 973-980.
27. A.F. Batzias and F.A. Batzias, Computer Aided Neuro-fuzzy Control in Anodizing of Aluminium. Computer Aided Chem. Eng. (Elsevier), Vol. 10, 2002, pp. 433-438.

Συμμετοχή στα ακόλουθα Ερευνητικά Προγράμματα, ως υπεύθυνος του ανά project αναπτυσσόμενου πληροφοριακού συστήματος:

- «Εισαγωγή Αδιάστατων Ομάδων σε Οικονομικές Συναρτήσεις Βιομηχανικού/Ενεργειακού/Περιβαλλοντικού Ενδιαφέροντος», Κέντρο Ερευνών Πανεπιστημίου Πειραιώς (ΚΕΠΠ) 2005.
- «Water Resources Management in the Wider Acheloos Basin Area», Project: “Impact of EU policies on a Greek catchment”, JRC/ISPRA, 2002.
- «Simulation of Oil Spill Behavior». Project: ‘Demonstration & large scale application of the new magnetic method “*CLEANMAG*” for the clean up of waterborne oil spills’. LIFE, ENV99/GR/000567, 2002.