

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΗΝΙΑΣ

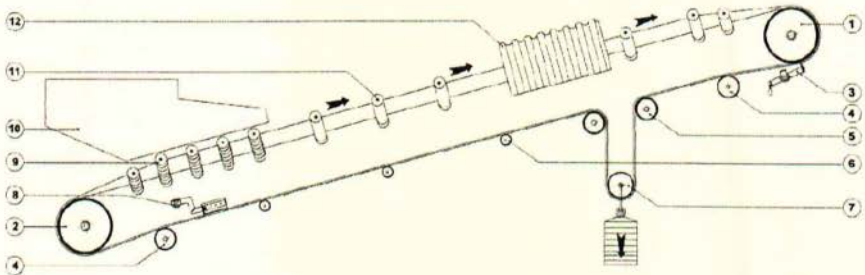
734
41X



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολογίας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η Συμβολή του Τεχνολόγου Μηχανολόγου Μηχανικού στην Εφαρμογή –
Επίλογη Μεθόδου Συντήρησης στη Βιομηχανία



Μελέτη

Σταμάτης Παναγιώτης (ΑΜ 28203)

Κορδώνης Εμμανουήλ (ΑΜ 27491)

Επίβλεψη

Μαρτζούκος Σπυρίδων

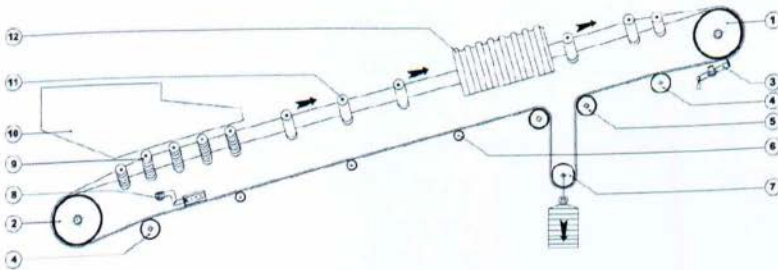
Πειραιάς, Απρίλιος 2013



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολογίας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η Συμβολή του Τεχνολόγου Μηχανολόγου Μηχανικού στην Εφαρμογή –
Επιλογή Μεθόδου Συντήρησης στη Βιομηχανία



Μελέτη

Σταμάτης Παναγιώτης (AM 28203)

Κορδώνης Εμμανουήλ (AM 27491)

Επίβλεψη

Μαρτζούκος Σπυρίδων

Πειραιάς, Απρίλιος 2013

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Περίληψη

Η μελέτη εστίασε στην ανάλυση δύο συστημάτων ελέγχου και των στρατηγικών υλοποίησης αυτών. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν τα συστήματα Διασφάλισης Ολικής Ποιότητας και Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης.

Τα δύο συστήματα παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες στην εφαρμογή τους και στα πλαίσια εμβάθυνσης της εργασίας αναλύθηκαν κάποιες από τις πλέον διαδομένες εφαρμογές ανάλυσης προϊόντων, (FAST, SOP, FSMP). Η μελέτη συμπληρώνεται και από πρωτογενή στοιχεία που προέκυψαν από την ανάλυση ενός ταινιόδρομου μεταφορά χύμα υλικού με τις τρεις εφαρμογές. Από τα αποτελέσματα της μελέτης προέκυψε ότι η εφαρμογή των συστημάτων ΣΔΟΠ και ΟΠΣ είναι επιτακτική για μεγάλες εταιρείες που προσπαθούν να είναι ανταγωνιστικές. Όσον αφορά τις εφαρμογές FAST, SOP, FSMP προέκυψε πως η συνδυασμένη εφαρμογή τους στην ανάλυση ενός προϊόντος, έχει ως αποτέλεσμα των προσδιορισμό όλων των χαρακτηριστικών του προϊόντος και συνεπώς των προβλημάτων που φέρουν. Τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να φανούν πολύ χρήσιμα σε εταιρείες παραγωγής μηχανολογικού εξοπλισμού

Abstract

The study focused on the analysis of two control systems and strategies for their implementation. Specifically examined Systems Total Quality Management and Total Productive Maintenance.

The two systems are quite similar in their implementation and in depth work analyzed some of the most widespread applications of analytical products, (FAST, SOP, FSMP).

The study is supplemented by primary data obtained from analysis of a bulk material conveyor belt with three applications. The results of the study showed that the application of systems TQM and TPM is imperative for large companies trying to compete. Regarding apps FAST, SOP, FSMP showed that the combined application to the analysis of a product as a result of identifying all the features of the product and therefore the problems of flying. These results can be very useful in production machinery companies

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
i. Αντικείμενο Μελέτης	9
ii. Μεθοδολογία Έρευνας	10
1. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ	12
Εισαγωγή	12
1.1 Ορισμός της Συντήρησης.....	12
1.2 Στόχος της Συντήρησης	12
1.3 Ο Ρόλος της Διαδικασίας της Συντήρησης.....	13
1.4 Η Αναγκαιότητα της Συντήρησης.....	13
1.5 Κύρια Συστήματα Συντήρησης.....	15
1.5.1 Επισκευαστική Συντήρηση.....	15
1.5.2 Βελτιωτική Συντήρηση.....	15
1.5.3 Προληπτική Συντήρηση	16
1.6 Εφαρμοσμένες Μέθοδοι Συντήρησης.....	18
1.6.1 Συντήρηση Βασισμένη σε Βλάβη.....	19
1.6.2 Περιοδική Συντήρηση	20
1.6.3 Συντήρηση Ανάλογα με την Κατάσταση του Εξοπλισμού	20
1.6.4 Οριακό Σημείο σε Συντήρηση Βασισμένη σε Δείκτες Απόδοσης	21
ΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ.....	22

Εισαγωγή	22
2.1 Ορισμός.....	22
2.2 Αρχές Υλοποίησης Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης.....	23
2.3 Πλεονεκτήματα Εφαρμογής ΟΠΣ	25
2.4 Στάδια Εφαρμογής και Βασικές Δομές της ΟΠΣ	26
2.4.1 Προπαρασκευαστικό Στάδιο	26
2.4.2 Εισαγωγικό Στάδιο	28
2.4.3 Εφαρμογή	28
2.4.4 Στάδιο Θεσμοποίησης	28
2.5 Εμπόδια Επιτυχίας Εφαρμογής Μεθόδου.....	29
3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΟΛΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ.....	30
Εισαγωγή	30
3.1 Η Διαχείριση της Ποιότητας.....	30
3.1.1 Ορισμοί.....	30
3.2 Γενικές Αρχές της Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας	32
3.3 Αντικειμενικοί Σκοποί της Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας.....	32
3.4 Εργαλεία Εφαρμογής της Δ.Ο.Π.	34
3.4.1 Φύλλα Ελέγχου (check sheet/list)	35
3.4.2 Διάγραμμα Ροής (flow chart)	35
3.4.3 Ιστόγραμμα.....	36
3.4.4 Διάγραμμα Αιτίων-Αποτελεσμάτων	37

3.4.5	Διάγραμμα/Ανάλυση PARETO	39
3.5	Παράμετροι Επιτυχίας Δ.Ο.Π.....	41
3.5.1	Φιλοσοφία Ποιότητας	41
3.5.2	Στρατηγικό Μάνατζμεντ Ποιότητας	42
3.5.3	Διαχείριση Ποιότητας στη Διαδικασία του Σχεδιασμού.....	42
3.5.4	Διοίκηση Λειτουργιών και Διαδικασιών.....	43
3.5.5	Διαχείριση Προμηθευτικής Αλυσίδας.....	43
3.5.6	Εκπαίδευση και Κατάρτιση.....	43
3.5.7	Ενδυνάμωση και Συμμετοχή	44
3.5.8	Πληροφορίες και Ανάλυση	44
3.5.9	Ικανοποίηση Πελατών.....	45
3.6	Δυσχέρειες στην Εφαρμογή της Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας.....	46
4.	ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ	49
	Εισαγωγή	49
4.2	Function Analysis System Technique.....	51
4.2.1	Χαρακτηριστικά Μεθόδου	52
4.2.2	Μεθοδολογία Εργασιών	53
4.3	Subtract and Operate Procedure.....	57
4.3.1	Χαρακτηριστικά Μεθόδου	58
4.3.2	Μεθοδολογία Εργασιών	59

4.4	Function Structure Modelling Process.....	61
4.4.1	Χαρακτηριστικά Μεθόδου	61
4.4.2	Μεθοδολογία Εργασιών	62
4.5	Μελέτη Περίπτωσης – Ταινιόδρομος Μεταφοράς Χύμα Υλικού	66
4.5.1	Χαρακτηριστικά Προϊόντος.....	68
4.5.2	Στόχος – Καλυπτόμενη Ανάγκη	70
4.5.3	Εξαρτήματα	69
4.5.4	Εφαρμογή Μεθόδου FAST.....	70
4.5.5	Εφαρμογή Μεθόδου SOP	74
4.5.6	Εφαρμογή Μεθόδου FSMP	80
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ	83

Στα πλαίσια απόκτησης του τίτλου σπουδών Μηχανολόγος Μηχανικός από το Τ.Ε.Ι. Πειραιά, καλούμαστε στο τελευταίο εξάμηνο φοίτησης μας να εκπονήσουμε τη Πτυχιακή μας Εργασία. Η Πτυχιακή Εργασία αποτελεί πόνημα εννέα μηνών μέσα στο οποίο οι σπουδαστές καλούνται να εμβυθύνουν τις γνώσεις τους σχετικά με το θέμα που πραγματεύεται η μελέτη τους. Η επιλογή του θέματος, λοιπόν, αποτελεί τη βάση μιας ορθής μελέτης που στόχο έχει να μας προετοιμάσει και να μας δώσει γνώσεις για αυτό που θα συναντήσουμε ως μηχανολόγοι μηχανικοί. Αντικείμενο μελέτης της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της συμβολής των μηχανολόγων μηχανικών στην εφαρμογή και επιλογή μεθόδων συντήρησης του βιομηχανικού εξοπλισμού.

i. Αντικείμενο Μελέτης

Σε παγκόσμιο επίπεδο χαρακτηριστικό στοιχείο της παρούσας κατάστασης σε όλους τους τομείς της οικονομίας αποτελεί ο ανταγωνισμός καθώς η κυριαρχία των επιχειρήσεων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ευελιξία τους να καινοτομούν ταχύτερα από τους ανταγωνιστές τους σε όλο το φάσμα των εργασιών τους, η συντήρηση και βιώσιμη διαχείριση του εξοπλισμού αποτελεί μια εκ των βασικών δραστηριοτήτων που καθορίζουν το μέλλον των επιχειρήσεων. Η σπουδαιότητα της διαδικασίας της συντήρησης έγκειται το γεγονός ότι αποτελεί σημαντικό κομμάτι του συνολικού κόστους λειτουργίας.

Αναλόγως, στο κλάδο της βιομηχανίας το κόστος του παραγόμενου προϊόντος εξαρτάται σημαντικά από τη διαδικασία συντήρησης και κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος τιμών, για παράδειγμα στις ελαφρές βιομηχανίες το κόστος κυμαίνεται ως 15%, ενώ για τις βαριές βιομηχανικές εγκαταστάσεις ως και 40%.

Οι υψηλές προδιαγραφές που θέτουν οι παγκόσμιοι οργανισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την αυτοματοποίηση των λειτουργιών μηχανημάτων αποτελούν νέα δεδομένα στον βιομηχανικό κλάδο. Για να καταστεί εφικτό για μια βιομηχανία να η εναρμονιστεί με αυτές τις προδιαγραφές και τα υψηλά στάνταρ απαιτούνται επιπρόσθετα να εφαρμοστούν συστήματα διαχείρισης ολικής ποιότητας. Η συντήρηση επιδρά θετικά σε τομείς της επιχείρησης όπως η παραγωγικότητα και η κερδοφορία. Η χαμένη παραγωγή μιας ημέρας εξαιτίας μιας απρόσμενης διακοπής δεν πρόκειται ποτέ να ανακτηθεί χωρίς επιπρόσθετο κόστος, όπως υπερωρίες, ενώ το γεγονός επιδρά αρνητικά και στην πελατεία.

Η σημασία της λειτουργίας της συντήρησης έχει αυξηθεί καθώς έχει αποδειχτεί εμπειρικά πως βελτιώνει την διαθεσιμότητα και την απόδοση του εξοπλισμού. Παλαιότερα η διαδικασία της συντήρησης θεωρείτο αναγκαίο κακό, σήμερα όμως αποτελεί ένα σημείο κέρδους παρά ένα αναπόφευκτο κόστος. Με την εφαρμογή αποδοτικής συντήρησης οι αστοχίες είναι δυνατό να περιοριστούν στο ελάχιστο. Η μελέτη θα εμβαθύνει και θα αναλύσει το συγκεκριμένο ζήτημα.

ii. Μεθοδολογία Έρευνας

Στο πρώτο κεφάλαιο εισάγονται βασικές έννοιες της διαδικασίας συντήρησης βιομηχανικού εξοπλισμού. Στόχος του κεφαλαίου είναι η αποσαφήνιση εννοιών και ορισμών ώστε να μην υπάρξουν ασάφειες στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας αναλύεται η μέθοδος Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης η οποία αποτελεί σημαντικό εργαλείο διαχείρισης έκτακτων καταστάσεων στο τομέα της βιομηχανικής παραγωγής.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται παρουσίαση της φιλοσοφίας της Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας, έχοντας ως στόχο την κατανόησή της καθώς και τα βήματα τα οποία είναι απαραίτητα για την δημιουργία αλλά

και την βελτίωση της διαχείρισης της. Το τέταρτο κεφάλαιο επικεντρώνεται σε μεθόδους ανάλυσης των εξαρτημάτων των εργαλείων. Στο τομέα αναπαράστασης σχέσεων λειτουργικών δομών κατά το σχεδιασμό προϊόντων, τρεις είναι οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι (Function Analysis System Technique, Subtract and Operate Procedure, Function Structure Modeling Process).

Κάθε μια από τις τρεις μεθόδους, ενδείκνυται για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων ζητημάτων κατά τη σχεδίαση ενός προϊόντος, χωρίς να αποκλείεται και η συνδυασμένη εφαρμογή τους. Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την σύγκριση των μεθόδων.

1. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο εισάγονται βασικές έννοιες της διαδικασίας συντήρησης βιομηχανικού εξοπλισμού. Στόχος του κεφαλαίου είναι η αποσαφήνιση εννοιών και ορισμών ώστε να μην υπάρξουν ασάφειες στα κεφάλαια που ακολουθούν.

1.1 Ορισμός της Συντήρησης

Η συντήρηση είναι ένα σύνολο δραστηριοτήτων που έχουν ως στόχο τη διατήρηση μιας παραγωγικής μονάδας σε λειτουργία. Περιλαμβάνει δραστηριότητες όπως ο έλεγχος, οι δοκιμές, οι μετρήσεις, οι αντικαταστάσεις, οι ρυθμίσεις εξαρτημάτων, οι επισκευές και σε μερικές περιπτώσεις διοικητικές ενέργειες.

Η συντήρηση περιλαμβάνει το σύνολο των μέτρων για τη διατήρηση και την αποκατάσταση του τεχνικού εξοπλισμού ενός συστήματος στη κατάσταση που αρχικά είχε σχεδιαστεί να λειτουργεί, καθώς και τον προσδιορισμό και την αποτίμηση της πραγματικής κατάστασης αυτού. Σύμφωνα με (Καλαμπόκα Ευτυχία, 2007) η λειτουργία της συντήρησης ορίζεται λοιπόν ως :

«οτιδήποτε είναι απαραίτητο να επιτρέψει στον εξοπλισμό να διατηρηθεί ή να αποκατασταθεί σε ένα προκαθορισμένο σύνολο συνθηκών έτσι ώστε να μπορεί να εκτελέσει μια δεδομένη λειτουργία» με (Καλαμπόκα Ευτυχία, 2007)

1.2 Στόχος της Συντήρησης

Σύμφωνα με τον (Dr.Kremer, 2009), ο αντικειμενικός σκοπός της συντήρησης μπορεί να συνοψιστεί σε τέσσερα σημεία:

- Εξασφάλιση της λειτουργίας του συστήματος (διαθεσιμότητα, αποδοτικότητα και ποιότητα παραγόμενου προϊόντος)
- Εξασφάλιση της διάρκειας ζωής του συστήματος
- Εξασφάλιση της ασφάλειας

1.3 Ο Ρόλος της Διαδικασίας της Συντήρησης

Όσο τεχνολογικά εξελιγμένα και να είναι τα μηχανήματα παραγωγής, είναι αδύνατο να λειτουργούν και να αποδίδουν, τουλάχιστον στο επίπεδο που είναι σχεδιασμένα να το κάνουν, χωρίς την απαραίτητη επίβλεψη και συντήρηση. Η συντήρηση σε μια βιομηχανική επιχείρηση έχει στόχο να υποστηρίξει την παραγωγή έτσι ώστε να παράγονται προϊόντα συνεχώς, με το μικρότερο δυνατό κόστος και την καλύτερη ποιότητα σύμφωνα με τα πρότυπα της εταιρείας. Η συντήρηση πρέπει να εξασφαλίζει :

- Απρόσκοπτη λειτουργία – Μείωση χαμένου χρόνου
- Οικονομική λειτουργία – Μέγιστη παραγωγικότητα
- Βέλτιστο αποτέλεσμα από πλευράς ποιότητας
- Πληροφορίες για παραπέρα βελτίωση του εξοπλισμού και της οργάνωσης

1.4 Η Αναγκαιότητα της Συντήρησης

Ο ορισμός που δόθηκε στο κεφάλαιο 1.1 εμπεριέχει τις κάτωθι έννοιες :

- Τεχνικό και χρονικό σχεδιασμό εργασιών
- Διαχείριση υλικών και ανταλλακτικών
- Διαχείριση ανθρώπινου δυναμικού
- Διαχείριση εργαλείων και μέσων γενικότερα
- Προληπτικούς, προγνωστικούς και διαγνωστικούς ελέγχους

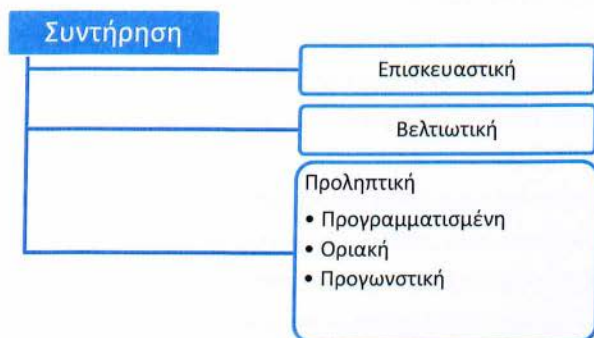
- Προληπτικές ενέργειες και αντικαταστάσεις
- Προγραμματισμό και εκτέλεση προγράμματος λίπανσης
- Επισκευές, βελτιώσεις, κατασκευές
- Γενικές ετήσιες συντηρήσεις

Σύμφωνα με τα ως άνω γίνεται αντιληπτό ότι η διαδικασία της συντήρησης δεν σκοπεύει μόνο στο να επισκευάσει όπως γενικά θεωρείται αλλά αποτελεί ένα κρίσιμης σημασίας παράγοντα στη ζωή της επιχείρησης που σχετίζεται με το σύνολο της απόδοσης της. Η διατήρηση του εξοπλισμού και των στοιχείων του σε ικανοποιητική κατάσταση λειτουργίας μέσω της συντήρησης αποδεικνύει ότι :

- Μειώνει το επενδύόμενο κεφάλαιο και τα ασφάλιστρα
- Μειώνει την ποιοτική υποβάθμιση του εξοπλισμού
- Μειώνει τις βλάβες του εξοπλισμού και τις υπερωρίες εργασίας
- Αυξάνει την παραγωγικότητα του προσωπικού της συντήρησης
- Ελαττώνει την απώλεια πελατείας
- Βελτιώνει τη συμμόρφωση σε νόμους και κανονισμούς
- Μειώνει τις επισκευές μηχανών και αυξάνει την διάρκεια ζωής των μηχανών
- Μειώνει την επανάληψη δραστηριοτήτων συντήρησης
- Μειώνει την απόρριψη ελαττωματικών προϊόντων
- Αυξάνει την αξιοπιστία και την ασφάλεια και μειώνει τους τραυματισμούς
- Μειώνει την κατανάλωση ενέργειας
- Μειώνει την ποσότητα των απαραίτητων διαθέσιμων ανταλλακτικών
- Μειώνει τα ελαττώματα σε καινούριες μηχανές
- Μειώνει τις λανθασμένες ενέργειες συντήρησης

1.5 Κύρια Συστήματα Συντήρησης

Τα κύρια είδη συστήματα συντήρησης ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, την βελτιωτική την προληπτική και την επισκευαστική.



Εικόνα 1 Είδη συντήρησης

1.5.1 Επισκευαστική Συντήρηση

Η επισκευαστική συντήρηση δεν αποτελεί σύστημα αλλά καταλαμβάνει σε πολλές περιπτώσεις ένα μεγάλο μέρος της συντήρησης. Βεβαίως επισκευές πάντα χρειάζονται, θα πρέπει όμως αυτές να είναι αποτέλεσμα ενός ευρύτερου προγραμματισμού και όχι απλά αντιμετώπιση ζημιών και αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών.

Η μετάβαση σε βελτιωμένα προγράμματα συντήρησης μειώνει δραστικά το κόστος και τον χρόνο επισκευών των βλαβών και δίνει μεγαλύτερη δυνατότητα ελέγχου και μελέτης φαινομένων και αιτιών. (Γ. Μαρκογιαννάκη, 2003)

1.5.2 Βελτιωτική Συντήρηση

Στόχος της βελτιωτικής συντήρησης είναι η ελάττωση ή εξάλειψη των βλαβών που οφείλονται κυρίως στις συνθήκες λειτουργίας. Εφαρμόζοντας το σύστημα αυτό, η

εμπλοκή με τις εργασίες συντήρησης είναι τόσο έντονη ώστε να παραβλέπεται η έρευνα και αναζήτηση των αιτιών που τις προκαλούν. Η τάση είναι, σύμφωνα με τους κανόνες της αξιοπιστίας, να ελαττωθούν οι βλάβες που απαιτούν συντήρηση. Δηλαδή, να γίνεται πρόληψη και όχι επιδιόρθωση. (Γ. Μαρκογιαννάκη, 2003)

Ας πάρουμε για παράδειγμα τις βλάβες των κουζινέτων. Έρευνα απέδειξε πως η συχνότητα εμφάνισης βλαβών στα κουζινέτα που βρίσκονται σε δύσκολα σημεία ή έξω από τον συνηθισμένο δρόμο των λιπαντών είναι μεγαλύτερη από ότι εκείνων που βρίσκονται εύκολα. Αυτό είναι μια φυσική τάση. Η λύση είναι η χρήση αυτομάτων συστημάτων λίπανσης.

Η εφαρμογή του συστήματος βελτιωτικής συντήρησης δεν επιδρά στη λειτουργία αλλά πάνω στην αξιοπιστία του εξοπλισμού. Αντίθετα, όταν αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου προγράμματος συντήρησης, η εφαρμογή της πρέπει να νοείται σαν μία σειρά ενεργειών που έχει ως σκοπό την βελτίωση των μηχανών. Με μετατροπές, μετασκευές, σχεδιασμό και κατασκευή ανταλλακτικών, επανασχεδιασμό διατάξεων κτλ. Έχει εξάλλου αναφερθεί ότι ένας από τους στόχους της συντήρησης είναι και η διατήρηση του παραγωγικού εξοπλισμού μέσα στα αρχικά του όρια, καθώς και η τεχνολογική του βελτίωση.

1.5.3 Προληπτική Συντήρηση

Η προληπτική συντήρηση είναι πρόγραμμα συστηματικών ελέγχων λειτουργίας, εξαρτημάτων, συγκροτημάτων ή συστημάτων και μελέτες διάγνωσης, πρόβλεψης, πρόγνωσης και αποκατάστασης βασισμένες στα στοιχεία που προκύπτουν από τους ελέγχους αυτούς.

Σχεδιάζεται έτσι ώστε να διορθώνει ή να προλαμβάνει καταστάσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβες, με αποτέλεσμα την απώλεια παραγωγής, ακριβές επισκευές και αντικαταστάσεις εξαρτημάτων. Είναι πιο οικονομικό να συντηρηθεί κάτι προληπτικά, παρά να έχει ήδη προκαλέσει σταμάτημα της παραγωγής, με όσα δυσάρεστα επακόλουθα αυτό συνεπάγεται. Ακόμα και αν αυτό σημαίνει ότι ορισμένα εξαρτήματα πιθανόν θα αντικατασταθούν πριν ξαντλήσουν τα όρια αξιοπιστίας λειτουργίας τους.

Θα πρέπει να γίνει συνείδηση πως η προγραμματισμένη στάση μιας μηχανής είναι απαραίτητη όσο και αν αυτό σημαίνει απώλεια παραγωγής. Η παραγωγή που χάνεται σε

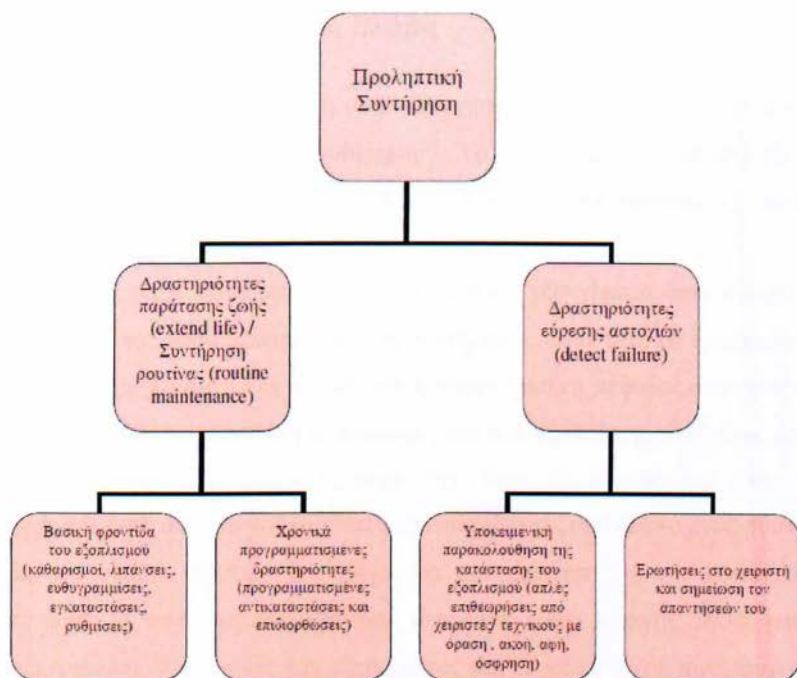
μία διακοπή λόγω βλάβης είναι, τις περισσότερες φορές, περισσότερη από αυτή που χάνεται λόγω μιας προγραμματισμένης διακοπής συντήρησης.

Με την προληπτική συντήρηση και τον έλεγχο μπορούμε να φτιάξουμε μακροχρόνια προγράμματα, να συλλέξουμε στατιστικά στοιχεία, να οδηγηθούμε από τα αποτελέσματα σε βελτιώσεις και το κυριότερο να αποκτήσουμε συνείδηση «δράσης» για αντικατάσταση εξαρτημάτων ή μηχανημάτων. (Γ. Μαρκογιαννάκη, 2003)

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή του απαραίτητου προσωπικού που θα κληθεί να εφαρμόσει ένα τέτοιο πρόγραμμα καθώς και στην εκπαίδευσή του. Τονίζεται πως δεν πρέπει να βασιζόμαστε μόνο στις τεχνικές γνώσεις, αλλά και στην τεχνική «συνείδηση». Με το τελευταίο εννοούμε την εξοικείωση του τεχνικού με τη μηχανή, την εγρήγορη της όρασης, της ακοής, ακόμη και της αφής, όσφρησης και γεύσης. Έλεγχος σημαίνει πείρα, αισθήσεις και γρήγορη αντίδραση. Η προληπτική συντήρηση διακρίνεται στην Προγραμματισμένη, στην Οριακή (on condition) και στην Προγνωστική.



Εικόνα 2 Η έννοια της προληπτικής συντήρησης υλοποιείται και στα αυτοκίνητα κατά τον περιοδικό τους έλεγχο σε ΚΤΕΟ



Εικόνα 3 Οι δραστηριότητες της προληπτικής συντήρησης

1.6 Εφαρμοσμένες Μέθοδοι Συντήρησης

Από τις διάφορες τεχνικές συντήρησης που εφαρμόζονται στην πράξη επιλεχτήκαν να παρουσιαστούν οι τέσσερις κυριότερες. Αυτές είναι :

- Συντήρηση βασισμένη σε βλάβη
- Περιοδική συντήρηση
- Συντήρηση ανάλογα με την κατάσταση του εξοπλισμού
- Οριακό σημείο σε συντήρηση βασισμένη σε δείκτες απόδοσης

1.6.1 Συντήρηση Βασισμένη σε Βλάβη

Η μέθοδος συντήρησης που βασίζεται σε βλάβη χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι δεν πραγματοποιείται προληπτική συντήρηση. Το σύστημα εγκαθίσταται χωρίς προγραμματισμένα έξοδα συντήρησης, φθείρεται και αντικαθίσταται εξ' ολοκλήρου όταν συμβεί κάποια βλάβη.

Παραδείγματος χάριν, η διάρκεια ζωής μιας τσιμούχας εξαντλείται όταν συμβεί κάποια βλάβη. Η δουλειά της βασισμένης σε βλάβη συντήρησης είναι τότε να εγκαταστήσει μία καινούρια τσιμούχα. Σε αυτή την περίπτωση η συγκεκριμένη μέθοδος συντήρησης είναι η ενδεδειγμένη, εφόσον η κανονική επιθεώρηση και συντήρηση της τσιμούχας μπορεί να κοστίζει περισσότερο από την τσιμούχα την ίδια. Η κατάσταση είναι μάλλον διαφορετική, ωστόσο, αν η τσιμούχα είναι ταξινομημένη ως συστατικό ενός συστήματος, μία βλάβη του οποίου δημιουργεί κίνδυνο για την παραγωγή ή την ασφάλεια. Στην περίπτωση αυτή η συγκεκριμένη μέθοδος δεν είναι μόνο ανόητη, αλλά μπορεί να προκαλέσει απώλεια λειτουργίας του συστήματος και το κόστος που αυτή συνεπάγεται. (E. Καλαμποκά, 2007)

Η ύπαρξη διαφορετικών προδιαγραφών απόδοσης της λειτουργίας των συστημάτων συνεπάγεται τον προσδιορισμό διαφορετικών τύπων βλαβών. Ανάλογα με την κάθε αιτία βλάβης διακρίνονται οι εξής κατηγορίες

Πίνακας 1 Τύποι βλαβών συστήματος

Ανάλογα με την αιτία της βλάβης	<ul style="list-style-type: none">• Βλάβη συνεχούς λειτουργίας• Βλάβη καταπόνησης• Βλάβη μη καλής χρησιμοποίησης• Βλάβη φθοράς• Βλάβη κακής συντήρησης
Ανάλογα με τον τρόπο εκδήλωσης της βλάβης	<ul style="list-style-type: none">• Άμεση βλάβη• Βλάβη σε στάδια
Ανάλογα με το βαθμό επίδρασης της	<ul style="list-style-type: none">• Καταστροφική βλάβη

βλάβης	<ul style="list-style-type: none"> • Διακοπή λειτουργίας • Βλάβη μερικής απόδοσης
Ανάλογα με τα αποτελέσματα της βλάβης	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύ σοβαρή (καταστροφική) βλάβη • Σοβαρή βλάβη • Απλή βλάβη

1.6.2 Περιοδική Συντήρηση

Κατά την περιοδική συντήρηση, η προληπτική συντήρηση ενός συστατικού του συστήματος πραγματοποιείται κανονικά μετά από καθορισμένη περίοδο χρήσης. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι η κανονική προληπτική συντήρηση αυξάνει τη διάρκεια ζωής ενός συστατικού του συστήματος. Σε μερικές περιπτώσεις η νομοθεσία ή οι κανονισμοί ασφαλείας απαιτούν απόδειξη της κανονικής προληπτικής συντήρησης. Ένα μειονέκτημα της περιοδικής συντήρησης είναι ότι η διάρκεια ζωής των συστατικών ενός συστήματος εξαρτάται από το βαθμό χρήσης τους. (Dr.Kremer, 2009)

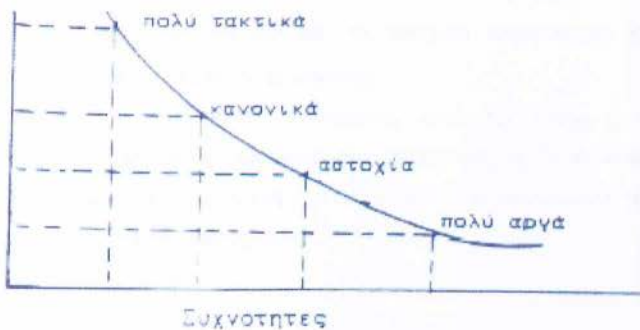
1.6.3 Συντήρηση Ανάλογα με την Κατάσταση του Εξοπλισμού

Από τις παραδοσιακές μεθόδους συντήρησης, η συντήρηση ανάλογα με την κατάσταση του εξοπλισμού είναι αυτή που επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της διάρκειας ζωής με οικονομικό τρόπο. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, εργασίες συντήρησης απαιτούνται μόνο όταν η φθορά του εξοπλισμού έχει φθάσει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο.

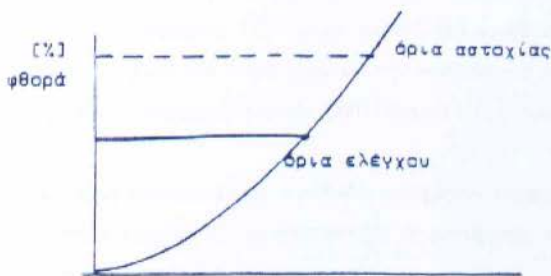
Για να είναι εφικτή αυτή η μέθοδος συντήρησης θα πρέπει η πραγματική λειτουργία του εξοπλισμού να μετράται επακριβώς μέσω κανονικών επιθεωρήσεων. Μια εταιρία μπορεί να εφαρμόζει και τις τρεις παραπάνω μεθόδους παράλληλα ή να τις συνδυάζει ανάλογα με τις απαιτήσεις. Η ειδική μέθοδος που χρησιμοποιείται εξαρτάται συχνά από τον τύπο και την ποσότητα του υπό συζήτηση εξοπλισμού.

1.6.4 Οριακό Σημείο σε Συντήρηση Βασισμένη σε Δείκτες Απόδοσης

Στη μέθοδο αυτή έχουμε τη χρήση ειδικών κριτηρίων για τον καθορισμό διαφόρων υπο-περιοχών συντήρησης και τη σύγκριση με τα πρότυπα της εταιρίας ή με αυτά άλλων εταιριών. Για να καταστεί δυνατή η βελτίωση της διοίκησης της συντήρησης, οι ειδικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται, καθορίζονται από κριτήρια. (Dr.Kremer, 2009)



Εικόνα 4 Συχνότητα ελέγχων και επιρροή των δαπανών συντήρησης



Εικόνα 5 Χρονικά όρια ελέγχου

2. ΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Εισαγωγή

Η Ολική Παραγωγική Συντήρηση (Total Productive Maintenance – TPM) εμφανίστηκε στην Ιαπωνία τη δεκαετία του '70, αλλά έγινε ευρύτερα γνωστή μόλις τη δεκαετία του '90. Το κύριο χαρακτηριστικό της TPM είναι ότι οι εργασίες που παλαιότερα σχεδιάζονταν και πραγματοποιούνταν από τα κεντρικά τμήματα της συντήρησης μεταφέρονται βαθμιαία στο χειριστή της μηχανής.

Σε αντίθεση με την παραδοσιακή συντήρηση, κατά την οποία η συντήρηση αντιμετωπιζόταν ως βοηθητική λειτουργία της παραγωγής, η TPM διεκδικεί πολύ μεγαλύτερο αντικείμενο, από τη στιγμή που όλα τα μέλη του προσωπικού εμπλέκονται στη βελτίωση της διαδικασίας συντήρησης.

2.1 Ορισμός

Η TPM μπορεί να θεωρηθεί ως ιατρική επιστήμη των μηχανών. (Καλαμπόκα Ευτυχία, 2007) Ο στόχος του προγράμματος TPM είναι να αυξηθεί εμφανώς η παραγωγή, αυξάνοντας συγχρόνως το ηθικό των υπαλλήλων και την ικανοποίηση που προσφέρει η εργασία. Σύμφωνα με την (Καλαμπόκα Ευτυχία, 2007) δίνεται ο εξής ορισμός:

«Ολική παραγωγική συντήρηση είναι η μέθοδος συντήρησης σύμφωνα με την οποία οι χειριστές είναι εξουσιοδοτημένοι να πραγματοποιούν τη συντήρηση, ώστε οι γραμμές παραγωγής να είναι συνεχώς αποτελεσματικές.»

Είναι μία δομημένη διαδικασία συνεχούς βελτίωσης με επίκεντρο τον εξοπλισμό η οποία προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την αποτελεσματικότητα της παραγωγής προσδιορίζοντας και εξαλείφοντας τις απώλειες του εξοπλισμού και της απόδοσης σε όλο τον κύκλο ζωής

των συστημάτων παραγωγής μέσω της ενεργού ομαδικής συμμετοχής των υπαλλήλων σε όλα τα επίπεδα της λειτουργικής ιεραρχίας.

Οι ρίζες της TPM εντοπίζονται στη λογική της Παραγωγικής Συντήρησης (Productive Maintenance) που δημιουργήθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες στα τέλη της δεκαετίας του 40' και στην αρχή της δεκαετίας του 50'. Η Αμερικανική Παραγωγική Συντήρηση χαρακτηρίστηκε από την ανάπτυξη των τεχνικών της προγραμματισμένης Παραγωγικής Συντήρησης με σκοπό την βελτίωση της αξιοπιστίας και της διάρκειας ζωής του παραγωγικού βιομηχανικού εξοπλισμού. (Καλαμπόκα Ευτυχία, 2007)

2.2 Αρχές Υλοποίησης Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης

Η έννοια της Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης είναι ένα σύστημα συντήρησης διαδομένο ευρέως στο εργοστάσιο το οποίο εμπλέκει τους εργαζόμενους από όλες τις λειτουργίες και τα επίπεδα μέσα στον οργανισμό. Υπάρχουν πέντε αρχές οι οποίες περιλαμβάνονται στον τυποποιημένο ορισμό του TPM, αυτές είναι:

- Καθορισμός του στόχου μεγιστοποίησης της αποτελεσματικότητας του εξοπλισμού για την βελτίωση της παραγωγικότητας.
- Υιοθέτηση ενός συνολικού συστήματος παραγωγικής συντήρησης που εστιάζει σε ολόκληρη την ζωή του εξοπλισμού
- Συντονισμός όλων των τμημάτων, συμπεριλαμβανομένων εκείνων του σχεδιασμού, της συντήρησης και της λειτουργίας του εξοπλισμού.
- Εμπλοκή όλων, από τα ανώτερα στελέχη μέχρι τους εργαζόμενους του πρώτου επιπέδου
- Διαχείριση μέσω των δραστηριοτήτων που βασίζονται στις ομάδες σε στόχους για ολόκληρο το εργοστάσιο με μηδενικές απώλειες.

Επιπρόσθετα καθώς η ελαχιστοποίηση των μηχανικών βλαβών είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του TPM, ακολουθούνται υπάρχουν πέντε στυλοβάτες οι οποίοι όταν αποδίδουν μια μηδενική – ή κοντά στο μηδέν – κατάσταση μηχανικής βλάβης πρόκειται να επιτευχθεί. Αυτές είναι:

Πίνακας 2 Αρχές υλοποίησης ολικής παραγωγικής συντήρησης

<p>Δραστηριότητες Αύξησης Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού</p>	<p>Εντοπισμός των 6 μεγάλων απωλειών οι οποίες είναι</p> <ul style="list-style-type: none"> • Μηχανική Βλάβη • Set Up και διόρθωση • Αδρανοποίηση και τα ελάχιστα σταματήματα • Ταχύτητα • Ποιοτικά ελαττώματα και ανακατεργασία • Ξεκίνημα / απόδοση (απώλειες ανάμεσα στην εκκίνηση και στην «σταθερή» παραγωγή)
<p>Αυτόνομη Συντήρηση από τους Χειριστές Εξοπλισμού</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Εξοπλισμός καθαρισμού • Βελτίωση της ευκολίας καθαρισμού & επιθεώρηση • Υιοθέτηση προτύπων καθαρισμού και γυαλίσματος
<p>Προγραμματισμένο Σύστημα Συντήρησης</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Καθημερινός και περιοδικός έλεγχος και συντήρηση • Διαγνωστική Συντήρηση • Ανάλυση των βλαβών των μηχανών • Γυάλισμα και έλεγχος των ανταλλακτικών
<p>Εκπαίδευση σε δεξιότητες Λειτουργίας & Συντήρησης</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ικανότητες επιδιόρθωσης • Αποκατάσταση βλαβών και διαγνωστικά • Τεχνολογία διάγνωσης
<p>Προληπτική Συντήρηση & Σύστημα Σχεδιασμού Εξοπλισμού</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Υιοθέτηση στόχων σχεδιασμού • Μείωση κόστους κύκλου ζωής • Βελτίωση συντηρησιμότητας, αξιοπιστίας και λειτουργικότητας

2.3 Πλεονεκτήματα Εφαρμογής ΟΠΣ

Η βιβλιογραφία παρουσιάζει μετρήσιμες λειτουργικές βελτιώσεις που προκύπτουν από την επιτυχή εφαρμογή της Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης.

«Οι εταιρείες που εφαρμόζουν την ΟΠΜ σταθερά παρουσιάζουν εκπληκτικά αποτελέσματα, συγκεκριμένα στην μείωση των διακοπών λειτουργίας του εξοπλισμού, στην ελαχιστοποίηση των δευτερευόντων σταματημάτων (αναπόφευκτα στις αυτοματοποιημένες εγκαταστάσεις), στην ελάττωση των ποιοτικών ατελειών και απαιτήσεων, στην αυξανόμενη παραγωγικότητα, στην ταξινόμηση της εργασίας και των δαπανών, στη συρρίκνωση του καταλόγου, στη μείωση των ατυχημάτων και στην προώθηση της συμμετοχής των υπαλλήλων (όπως φαίνεται από την υποβολή των προτάσεων βελτίωσης)». (Καλαμπόκα Ευτυχία, 2007)

Αναφέρονται βελτιώσεις σε τομείς όπως η Παραγωγικότητα, το Κόστος, η Διανομή, η Ασφάλεια, κλπ. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται στοιχεία βελτίωσης σε αυτούς τους τομείς

Πίνακας 3 Στοιχεία βελτίωσης σε διάφορους τομείς λειτουργίας

P – Παραγωγικότητα (Productivity)	<p>Η Καθαρή Παραγωγικότητα πολλαπλασιάζεται 1.5 με 2 φορές.</p> <p>Ο αριθμός των σταματημάτων λειτουργίας του εξοπλισμού μειώνεται από το 1/10 έως το 1/250 της βασικής γραμμής.</p> <p>Η αποτελεσματικότητα όλων των εγκαταστάσεων είναι 1.5 με 2 φορές μεγαλύτερη.</p>
Q – Ποιότητα (Quality)	<p>Ποσοστό ατέλειας διαδικασίας μειωμένο κατά 90%.</p> <p>Επιστροφές και αξιώσεις των πελατών μειωμένες κατά 75%.</p>

C – Κόστος (Cost)	Κόστη παραγωγής μειωμένα κατά 30%.
D – Διανομή (Delivery)	Τελειωμένα αγαθά και υπό εξέλιξη εργασία (Work in Progress - WIP) μειωμένα κατά 50%.
S – Ασφάλεια (Safety)	Εξάλειψη των ατυχημάτων διακοπής λειτουργίας. Εξάλειψη των ατυχημάτων μόλυνσης.
M – Ηθικό (Morale)	Προτάσεις βελτίωσης υπαλλήλων πάνω από 5 έως 10 φορές.

2.4 Στάδια Εφαρμογής και Βασικές Δομές της ΟΠΣ

Τα στάδια εφαρμογής της ΟΠΣ στο σύνολο τους είναι τα εξής τέσσερα :

- Προπαρασκευαστικό Στάδιο
- Εισαγωγικό Στάδιο
- Εφαρμογή
- Στάδιο Θεσμοποίησης

2.4.1 Προπαρασκευαστικό Στάδιο

Η Ανώτατη Διοίκηση ανακοινώνει την απόφασή της να εισάγει την ΟΠΣ. Όλοι οι υπάλληλοι πρέπει να καταλάβουν γιατί η εταιρία στην οποία εργάζονται εισάγει την ΟΠΣ και να ενημερωθούν πλήρως για την αναγκαιότητά του. Θα παρουσιαστούν τα οφέλη που μπορεί να κερδίσει η εταιρία από την εφαρμογή της ΟΠΣ καθώς επίσης και όσα άλλες εταιρίες κατάφεραν να κερδίσουν εφαρμόζοντας τη νέα αυτή φιλοσοφία.

Η Διοίκηση θα πρέπει να έχει σκεφτεί καλά όλα αυτά τα σημεία προτού να ανακοινώσει την απόφασή της να εισάγει την ΟΠΣ. Πρέπει επίσης να ξεκαθαρίσει τις προθέσεις της και να δει το πρόγραμμα της ΟΠΣ ως ένα πρόγραμμα το οποίο θα φτάσει μέχρι το τέλος.

Με αυτόν τον τρόπο η Διοίκηση ενημερώνει τους υπαλλήλους και όλους τους εξωτερικούς συνεργάτες ότι η ίδια καταλαβαίνει την αξία της ΟΠΣ και ότι θα παρέχει την φυσική και οργανωτική υποστήριξη που είναι απαραίτητη έτσι ώστε να λύσει τα ποικίλα προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν κατά την εφαρμογή του προγράμματος. Η προετοιμασία για την υλοποίηση της ΟΠΣ ξεκινάει επίσημα μόλις γίνει η ανακοίνωση. Προτού τεθεί σε εφαρμογή ένα πρόγραμμα ΟΠΣ θα πρέπει να το έχουν καταλάβει όλοι όσοι θα εμπλακούν σε αυτό. Για να επιτευχθεί αυτό γίνονται σεμινάρια και εκπαίδευση μέσα στην ίδια την εταιρία αλλά και έξω από αυτήν. Η κατάρτιση πρόκειται να είναι βασισμένη στις ανάγκες του κάθε εργαζόμενου. Ορισμένοι χρειάζονται εντατική εκπαίδευση ενώ άλλοι μόνο μία απλή ενημέρωση.

Η ΟΠΣ προωθείται μέσα από μία οργανωτική δομή η οποία αποτελείται από επικαλυπτόμενα μικρά τμήματα. Σε αυτό το σύστημα οι αρχηγοί αυτών των μικρών γκρουπ, σε κάθε οργανωτικό επίπεδο, είναι μέλη των επιτροπών του αμέσως υψηλότερου επιπέδου. Η Ανώτερη Διοίκηση από μόνη της αποτελεί μία επιτροπή. Αυτό το σύστημα είναι πολύ αποτελεσματικό για να μπορέσει η Διοίκηση να περάσει τους στόχους και την πολιτική της σε όλο τον οργανισμό. Η δημιουργία ενός γραφείου προώθησης το οποίο θα είναι υπεύθυνο για την αποτελεσματική ανάπτυξη και προώθηση των στρατηγικών της ΟΠΣ είναι απαραίτητη. (Καλαμπόκα Ευτυχία, 2007)

Η πολιτική της Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης για μια επιχείρηση πρέπει να είναι ένα ακέραιο κομμάτι από την συνολική ποιοτική της επιχείρησης και θα πρέπει να δείχνει τους στόχους και τις κατευθύνσεις των ενεργειών που πρέπει να γίνουν.

Θα πρέπει οι στόχοι της ΟΠΣ να συνδέονται με τους γενικότερους μακροπρόθεσμους και βραχυπρόθεσμους στόχους της επιχείρησης και θα πρέπει να αποφασιστούν από όλους όσους εμπλέκονται συμπεριλαμβανομένης και της Διοίκησης. Οι στόχοι είναι καλό να παρουσιάζονται με νούμερα. Η ΟΠΣ διαρκεί όσο το διάστημα που απαιτείται για να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί. (Κ. Τ. Ulrich & S. D. Eppinger, 2010)

Για να διατυπωθεί ένα βασικό πρόγραμμα για την εφαρμογή της ΟΠΣ θα πρέπει αρχικά να αποφασιστεί ποιες ενέργειες πρέπει να γίνουν για να επιτευχθούν οι στόχοι του. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στάδιο γιατί κάνει τους ανθρώπους να σκεφτούν τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους γεφύρωσης των κενών μεταξύ των βασικών γραμμών και των στόχων.

2.4.2 Εισαγωγικό Στάδιο

Σε αυτό το στάδιο οργανώνεται μια τελετή στην οποία είναι προσκεκλημένοι όλοι - ακόμα και οι προμηθευτές δεδομένου ότι πρέπει να ξέρουν ότι εταιρία θέλει τον ποιοτικό ανεφοδιασμό από αυτούς. Οι συνδεδεμένες εταιρείες και οι συμβεβλημένες επιχειρήσεις που είναι πιθανοί πελάτες, έχουν επίσης σχέση και θα πρέπει να προσκαλεστούν. Οι πελάτες επίσης κρίνεται απαραίτητο να παραβρεθούν στην συγκεκριμένη τελετή για να καταλάβουν την πρόθεση της εταιρίας να βελτιώσει την ποιότητα των προϊόντων της.

2.4.3 Εφαρμογή

Σε αυτό το στάδιο εφαρμόζονται οκτώ δραστηριότητες οι οποίες καλούνται «οκτώ στυλοβάτες» στην ανάπτυξη του προγράμματος ολικής παραγωγικής συντήρησης. Από αυτές οι τέσσερις δραστηριότητες είναι για την καθιέρωση του συστήματος για την αποδοτικότητα της παραγωγής, μία για το σύστημα ελέγχου των νέων προϊόντων και του νέου εξοπλισμού, μία για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της διοίκησης και μία για τον έλεγχο της ασφάλειας και της υγιεινής στο εργασιακό περιβάλλον.

2.4.4 Στάδιο Θεσμοποίησης

Οι ομάδες ΟΠΣ αρχίζουν έναν κύκλο συνεχούς βελτίωσης των αποτελεσμάτων του συστήματος. Οι διευθυντές σε όλα τα επίπεδα εστιάζουν στη βελτίωση των δεξιοτήτων για την καλύτερη εφαρμογή της ΟΠΣ με τη διάγνωση της απόδοσης κάθε ομάδας. Τώρα είναι η πιο κατάλληλη στιγμή να διεκδικήσει η εταιρία το βραβείο της Παραγωγικής Συντήρησης. (K. T. Ulrich & S. D. Eppinger, 2010)

2.5 Εμπόδια Επιτυχίας Εφαρμογής Μεθόδου

Ο Elliot παρουσιάζει έντεκα γενικά εμπόδια στην επίτευξη της κατασκευαστικής τελειότητας τα οποία μπορούν εύκολα να περιγράψουν συνοπτικά πολλούς από τους παράγοντες οι οποίοι αποτελούν τροχοπέδη στην επιτυχή εφαρμογή της TPM. Όπως είναι αναμενόμενο πολλά από τα εμπόδια βρίσκονται πολύ κοντά με τους παράγοντες επιτυχίας της εφαρμογής της TPM. Έτσι λοιπόν εκείνοι που το εφαρμόζουν επιτυχώς προσπαθούν να ενισχύσουν τους παράγοντες επιτυχίας για να υπερικήσουν τα εμπόδια που εμφανίζονται. Τα εμπόδια περιγράφονται στη συνέχεια της παραγράφου και είναι τα εξής:

- Υποτίμηση του καθήκοντος
- Έλλειψη συμφωνίας της διοίκησης.
- Υποτίμηση της αξίας της γνώσης.
- Αντικειμενικοί στόχοι που δημιουργούν οργανωτικές διαμάχες.
- Η πρόκληση του πάθους για υπεροχή.
- Προσωπικό το οποίο αναλαμβάνει να διεκπεραιώσει κάποιες εργασίες.
- Αμέλεια βασικών στοιχείων σχετικών με την εφαρμογή της TPM.
- Αντίσταση στην καθημερινή πειθαρχία.
- Περιορισμένη εμπειρία εμπλοκής σε διάφορες καταστάσεις.
- Ιδιαίτερη σημασία στα μέτρα παραγωγής σε αντίθεση με την εισαγωγή ποιοτικής διαδικασίας.

3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΟΛΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Εισαγωγή

Η φιλοσοφία της διαχείρισης ολικής ποιότητας βασίζεται στη συμμετοχή όλων των μελών του οργανισμού και στοχεύει στη μακροπρόθεσμη επιτυχία μέσω της ικανοποίησης του πελάτη και στην παροχή οφελών σε όλα τα μέλη του και στην κοινωνία. Αυτό γίνεται εφικτό μέσω του πηγαίου αλληλοσεβασμού των εργαζομένων και των προϊσταμένων τους, της ενίσχυσης του ομαδικού πνεύματος, της συμμετοχής στη λήψη αποφάσεων και στην δίκαιη κατανομή των αμοιβών και των ενισχύσεων. Οι εργαζόμενοι πρέπει να θεωρούνται συνεργάτες και όχι μονάδες παραγωγής. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό οι ηγέτες είναι υπεύθυνοι για τη διαμόρφωση του οράματος της εταιρείας και για την μεταλαμπάδευση των επιχειρησιακών στόχων, αξιών και ποιοτικών κριτηρίων.

3.1 Η Διαχείριση της Ποιότητας

Η Διαχείριση ποιότητας είναι το σύνολο των προγραμματισμένων ή συστηματικών ενεργειών και διαδικασιών που είναι απαραίτητες για να εξασφαλίσουν ότι ένα προϊόν ή υπηρεσία θα πληρεί ορισμένες προδιαγραφές. Με απλά λόγια η διαχείριση ποιότητας στοχεύει στη σωστή και οργανωμένη διαχείριση της εταιρείας.

3.1.1 Ορισμοί

Η διαχείριση ολικής ποιότητας δίνει έμφαση στον χαρισματικό ηγέτη, ο οποίος μπορεί συστηματικά να εκφράζει τις προσδοκίες όλης της ομάδας. Ενοποιητικό στοιχείο όλων των επιμέρους τμημάτων μιας επιχείρησης είναι οι κοινοί στόχοι. Η ποιότητα αποτελεί την κοινή επιδίωξη όλων και επιτυγχάνεται μόνο μέσα από κοινή προσπάθεια. Αυτή η

άποψη ορίζει την θεωρία της Ολικής Διαχείρισης Ποιότητας, και ακολούθως αναφέρονται ορισμοί, διεθνώς αποδεκτοί που είναι σχετικοί με την διαχείριση ποιότητας.

Πίνακας 4 Ορισμοί εργαλείων διαχείρισης ποιότητας

<p>Ποιοτικός έλεγχος (Quality control)</p>	<p>Οι λειτουργικές τεχνικές που εφαρμόζονται και οι δραστηριότητες που αναπτύσσονται για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για την ποιότητα.</p>
<p>Στατιστικός Έλεγχος διεργασίας (Statistic Process Control)</p>	<p>Μέθοδος συλλογής και ανάλυσης δεδομένων και χρησιμοποίησης τους για τον έλεγχο των διεργασιών με σκοπό την επίτευξη συνεπέστερων αποτελεσμάτων της διεργασίας.</p>
<p>Κόστος ποιότητας (Quality Cost)</p>	<p>Περιλαμβάνει τα κόστη συμμόρφωσης & μη συμμόρφωσης:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Κόστος συμμόρφωσης είναι το πραγματικό κόστος της παροχής προϊόντων ή υπηρεσιών μιας δηλωμένης στάθμης από μια συγκεκριμένη διεργασία κατά τον αποδοτικότερο τρόπο. Κόστος μη συμμόρφωσης είναι το κόστος που οφείλεται στην 2. Μεταβλητότητα της διεργασίας.
<p>Εγχειρίδιο ποιότητας (Quality Manual)</p>	<p>Έγγραφο που εκθέτει την γενική πολιτική για την ποιότητα, τις διαδικασίες και τις πρακτικές ενός οργανισμού και πρέπει να περιέχει τα παρακάτω στοιχεία:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Δήλωση της πολιτικής της εταιρίας, 2. Αρμοδιότητες και υπευθυνότητας, 3. Διάρθρωση του οργανισμού, 4. Περιγράμματα των στοιχείων του συστήματος ποιότητας, 5. Κατάλογος των διαδικασιών.
<p>Πολιτική ποιότητας (Quality Policy)</p>	<p>Οι προθέσεις και κατευθύνσεις ενός οργανισμού όσον αφορά την ποιότητα, όπως εκφράζονται επίσημα από την επιτελική διεύθυνση.</p>
<p>Διαδικασία</p>	<p>Έγγραφο που ορίζει το σκοπό και το πλαίσιο εφαρμογής μιας</p>

(Procedure)	δραστηριότητας, και που περιγράφει πώς και από ποιον θα εκτελείται σωστά η δραστηριότητα.
Υλικό (Material)	Ο εξοπλισμός, οι πρώτες ύλες, τα αποθέματα, και τα ανταλλακτικά που αποτελούν αντικείμενο μιας σύμβασης.

3.2 Γενικές Αρχές της Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας

Η αποτελεσματική εφαρμογή της Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας στηρίζεται στην αποδοχή και τήρηση ορισμένων αρχών στη διοίκηση των διάφορων λειτουργιών της επιχείρησης. Αυτές αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

- Υποστήριξη και ενεργός συμμετοχή της διοίκησης.
- Εστίαση στις ανάγκες πελατών και εργαζομένων.
- Έμφαση σε συνεχή βελτιώσεις.
- Συμμετοχή όλων σε συνεχείς βελτιώσεις.
- Λήψη αποφάσεων με πραγματικά δεδομένα

3.3 Αντικειμενικοί Σκοποί της Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας

Η πρωτοβουλία για την εφαρμογή της ΔΟΠ στηρίζεται στην πεποίθηση ότι με το νέο τρόπο διαχείρισης (management) η επιχείρηση θα γίνει πιο αποτελεσματική στην επίτευξη των στόχων. Οι αντικειμενικοί σκοποί που εξυπηρετούνται με την εφαρμογή της ΔΟΠ είναι οι ακόλουθοι:

Η αύξηση της ικανοποίησης του πελάτη. Σ' ένα έντονα ανταγωνιστικό περιβάλλον, η επιβίωση κάθε επιχείρησης εξαρτάται από την ικανότητα της να αναπτύξει και να διατηρήσει ένα σημαντικό μερίδιο της αγοράς. Η ικανότητα για την προσέλευση και ιδιαίτερα για τη διατήρηση πελατών, εξαρτάται καθοριστικά από τη ποιότητα του

πακέτου «προϊόν – εξυπηρέτηση». Για τη πληρέστερη ικανοποίηση των πελατών, η επιχείρηση θα πρέπει να επιδιώκει συστηματικές βελτιώσεις όχι μόνο στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του προϊόντος (ασφάλεια στη χρήση, οικονομία, απλότητα στη λειτουργία), αλλά και στο τρόπο εξυπηρέτησής του μετά τη πώληση. Αυτό σημαίνει ότι μ' ένα προϊόν με καλή ποιότητα στα χαρακτηριστικά που αξιολογεί ο πελάτης δε μπορεί να σταθεί για πολύ στην αγορά χωρίς υψηλής ποιότητας εξυπηρέτηση σε ότι αφορά την εγκατάσταση, συντήρηση κι επισκευή του.

Η διασφάλιση μεγάλης αποτελεσματικότητας της επιχείρησης σε σχέση με το κόστος λειτουργίας της.

- Με τη μείωση κάθε μορφής σπατάλης, αναφορικά με το ποσοστό «σκάρτων», με περιττές εσωτερικές αναφορές.
- Με το περιορισμό κάθε είδους αποθέματος σε πρώτες ύλες, ημικατεργασμένα και τελικά προϊόντα.
- Με την αξιοποίηση νέας τεχνολογίας.

Η αύξηση της ικανότητας της επιχείρησης για καινοτομίες και ευελιξία στις αναγκαίες προσαρμογές. Όσο οι ανταγωνιστές βελτιώνουν την ποιότητα των δικών τους προϊόντων προσφέροντας στην αγορά πιο ελκυστικές επιλογές, τόσο πιο επιτακτική γίνεται η ανάγκη για συνεχείς βελτιώσεις στη ποιότητα του προϊόντος και της εξυπηρέτησής του.

- Σε αλλαγές προϊόντων και διαδικασιών
- Σε αλλαγές στις τάσεις της αγοράς

Η συμπίεση του χρόνου ικανοποίησης παραγγελιών. Όσο πιο γρήγορα ικανοποιούνται οι ανάγκες των πελατών, τόσο μεγαλύτερη αξία προσφέρει η επιχείρηση. Εκτενείς χρόνοι για την εκτέλεση παραγγελιών δημιουργούν τα εξής προβλήματα.

- Αναγκάζουν τον πελάτη να διατηρεί περισσότερα αποθέματα για την ομαλή

λειτουργία του. Αυτό επιβαρύνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας και συμβάλει σε διάφορα προβλήματα ποιότητας.

- Περιορίζει την ευελιξία του πελάτη να προσαρμοστεί στις αλλαγές στη ζήτηση της αγοράς.
- Δημιουργεί ευκαιρίες για ζημιές από περιττές μετακινήσεις, αποθηκεύσεις και ενέργειες που αυξάνουν το κόστος, χωρίς να προσθέτουν αξία στο προϊόν.

Η βελτίωση της αποτελεσματικότητας του ανθρώπινου δυναμικού της επιχείρησης.

Μέχρι τώρα η κυρίαρχη αντίληψη για τη διοίκηση είναι ότι οι εργαζόμενοι απασχολούνται για να εκτελούν τις προβλεπόμενες για τη κάθε θέση δραστηριότητες, με βάση τις γνώσεις και δεξιότητες για τις οποίες επιλέχθηκαν. Η διοίκηση, δηλαδή, σκέφτεται, προγραμματίζει, ελέγχει και αξιολογεί ενώ οι εργαζόμενοι εκτελούν. Η νοοτροπία αυτή αφήνει αναξίοπιστα τη μεγάλη πείρα, την κρίση και τη δημιουργικότητα των εργαζομένων στην επίλυση των προβλημάτων που αντιμετωπίζει καθημερινά η κάθε επιχείρηση.

Ξεκινώντας με την ανάπτυξη του ανθρώπινου παράγοντα γίνεται πιο εύκολη η αποτελεσματική αξιοποίηση του εξοπλισμού που προσφέρουν οι νέες τεχνολογίες της πληροφορικής, των τηλεπικοινωνιών κ.α. και των πιο αποτελεσματικών μεθόδων οργάνωσης για την απασχόληση τους.

3.4 Εργαλεία Εφαρμογής της Δ.Ο.Π.

Τα εργαλεία της Δ.Ο.Π. βοηθούν τους οργανισμούς να εντοπίζουν, να αναλύουν και να αξιολογούν ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα που είναι σχετικά με τις επιχειρήσεις τους. Τα εργαλεία αυτά μπορούν να εντοπίσουν τις διαδικασίες, τις ιδέες, τις στατιστικές, την αιτία και το αποτέλεσμα και άλλα ζητήματα που αφορούν τους οργανισμούς. Κάθε ένα από αυτά τα εργαλεία πρέπει να εξεταστούν και να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας, της αποδοτικότητας, της τυποποίησης και της συνολικής ποιότητας των διαδικασιών, των τελικών προϊόντων ή του εργασιακού περιβάλλοντος, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 9000.

Τα εργαλεία της Δ.Ο.Π. απεικονίζουν ή και βοηθούν στην αφομοίωση και κατανόηση πολύπλοκων πληροφοριών, όπως π.χ. θετικές και αρνητικές δυνάμεις επηρεάζουν τις επιχειρήσεις, αξιολόγηση των αναγκών των πελατών, ανάλυση του ανταγωνισμού, ανάλυση της αγοράς, στατιστικά στοιχεία της παραγωγικότητας του προσωπικού και των καθηκόντων εργασίας, οικονομικές αναλύσεις, ανάλυση της εφοδιαστικής αλυσίδας κτλ.

3.4.1 Φύλλα Ελέγχου (check sheet/list)

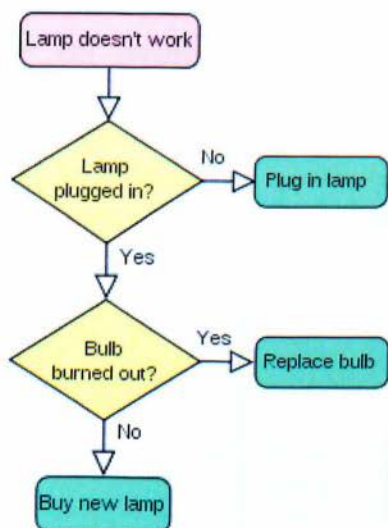
Η λίστα ή φύλλο ελέγχου είναι ένα καλά σχεδιασμένο έντυπο για την καταγραφή και ταξινόμηση δεδομένων και στοιχείων, τα οποία συλλέγονται είτε από παρατηρήσεις είτε μετρήσεις ορισμένων χαρακτηριστικών. Για την αποτελεσματική ανάλυση αυτών των στοιχείων, που αποτυπώνονται στο φύλλο ελέγχου, ο υπεύθυνος συμπλήρωσης του πρέπει να γνωρίζει εκ των προτέρων για ποιο σκοπό συλλέγονται αυτά τα στοιχεία.

- Ποιο είναι το πρόβλημα ποιότητας;
- Τι στοιχεία απαιτούνται για την αποσαφήνιση του προβλήματος;

3.4.2 Διάγραμμα Ροής (flow chart)

Είναι η πιο συνηθισμένη γραφική αναπαράσταση των σταδίων μιας διεργασίας. Αποτελείται από μια σειρά συμβόλων που συνδέονται μεταξύ τους και αντιπροσωπεύουν δραστηριότητες, αποφάσεις και πηγές δεδομένων με στόχο την περιγραφή της λειτουργίας μιας σύνθετης διεργασίας.

Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η ανάλυση των σύνθετων διαδικασιών σε τμήματα τα οποία εύκολα εξετάζονται, κατανοούνται και αν χρειαστεί επανασχεδιάζονται.



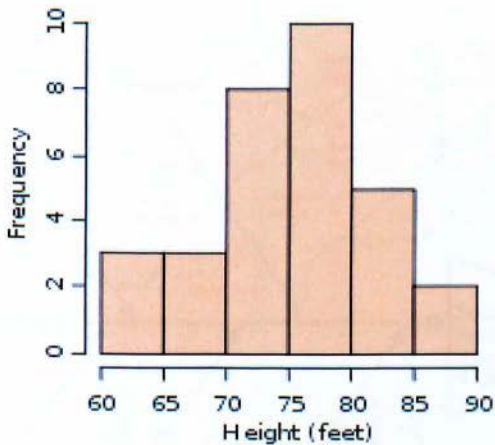
Εικόνα 6 Ένα διάγραμμα ροής που δείχνει μια διαδικασία αντιμετώπισης μιας λάμπας που δε λειτουργεί

Χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση μιας συγκεκριμένης παραγωγικής διαδικασίας και αποτελούνται από διάφορα σύμβολα που εκφράζουν διαφορετικές λειτουργίες. Συνήθως είναι τμήματα των οδηγιών εργασίας στα Συστήματα Διοίκησης Ποιότητας. Η διεργασία, που περιγράφεται από το διάγραμμα ροής, μπορεί να απεικονίζεται από ένα πολύ γενικό επίπεδο διαγράμματος μέχρι ένα επίπεδο πολύ μεγάλης λεπτομέρειας, ανάλογα με ανάγκες του δημιουργού του.

3.4.3 Ιστόγραμμα

Το ιστόγραμμα είναι ένα διάγραμμα με κάθετες στήλες (ή ιστούς) που έχουν ως βάση τα διαστήματα τάξης και ύψος ανάλογο με τον αριθμό (συχνότητα) των παρατηρήσεων που ανήκουν στα διαστήματα. Χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση της συχνότητας με την οποία με την οποία παρατηρείται ένα σύνολο τιμών κάποιου χαρακτηριστικού που μας ενδιαφέρει, με σκοπό τον εντοπισμό της κεντρικής τάσης και της μεταβλητότητας του συνόλου των πρωτογενών αριθμητικών δεδομένων του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού. Για να κατασκευάσουμε ένα ιστόγραμμα, που απεικονίζει την κατανομή συχνότητων, πρέπει να προσέξουμε τα εξής 3 στοιχεία:

- Την επιλογή του κατάλληλου αριθμού διαστημάτων, που ονομάζονται διαστήματα τάξης
- Το σωστό πλάτος (ή εύρος) των διαστημάτων τάξης
- Τον καθορισμό των ορίων των διανυσμάτων τάξης, έτσι ώστε να καλύπτονται όλες οι τιμές αλλά και να μην υπάρχουν επικαλύψεις.



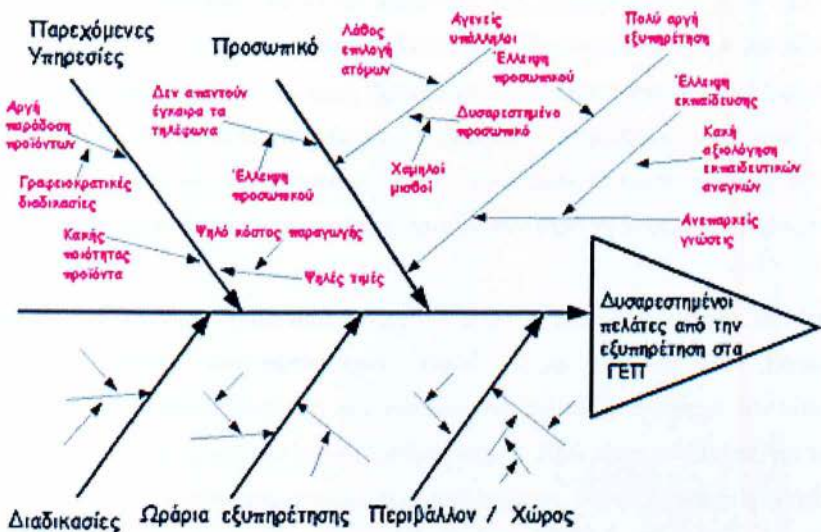
Εικόνα 7 Παράδειγμα ιστογράμματος

3.4.4 Διάγραμμα Αιτίων-Αποτελεσμάτων

Η μεταβλητότητα στο αποτέλεσμα μιας διαδικασίας και σε άλλα προβλήματα ποιότητας, οφείλεται σε διάφορες αιτίες οι οποίες αναφέρονται, συχνά, σε έναν από τους επόμενους 7Μ παράγοντες.

1. **Management (Διοίκηση):** Η διοίκηση παρέχει ικανοποιητική πληροφόρηση, υποστήριξη και μέσα για τη βελτίωση των δραστηριοτήτων
2. **Men (Εργαζόμενοι):** Οι εργαζόμενοι – άνθρωποι έχουν κατάλληλη εκπαίδευση, υποκίνηση και εμπειρία

3. **Methods (Μέθοδοι):** Είναι διαθέσιμα τα κατάλληλα "εργαλεία" - μέθοδοι. Οι παράμετροι της διαδικασίας έχουν προσδιοριστεί κατάλληλα και υπάρχει δυνατότητα ελέγχου
4. **Measurements (Μετρήσεις):** Οι συσκευές ελέγχου είναι κατάλληλες για τις μετρήσεις; Υπάρχουν παράγοντες του περιβάλλοντος που δημιουργούν αναταραχές;



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα Αιτίας & Αποτελέσματος (Cause & Effect Diagram)

Εικόνα 8 Το διάγραμμα ψαροκόκαλο

5. **Machines (Μηχανές):** Η προληπτική συντήρηση των μηχανών εκτελείται επαρκώς; Η παραγωγική δυνατότητα των μηχανών είναι ικανοποιητική με μικρή μεταβλητότητα;
6. **Materials (Πρώτες ύλες):** Ποιες είναι οι πρώτες που χρησιμοποιούνται; Η ποιότητα των πρώτων υλών από τους προμηθευτές είναι ικανοποιητική;
7. **Milieu (Περιβάλλον):** Το περιβάλλον επηρεάζει το αποτέλεσμα της παραγωγής.

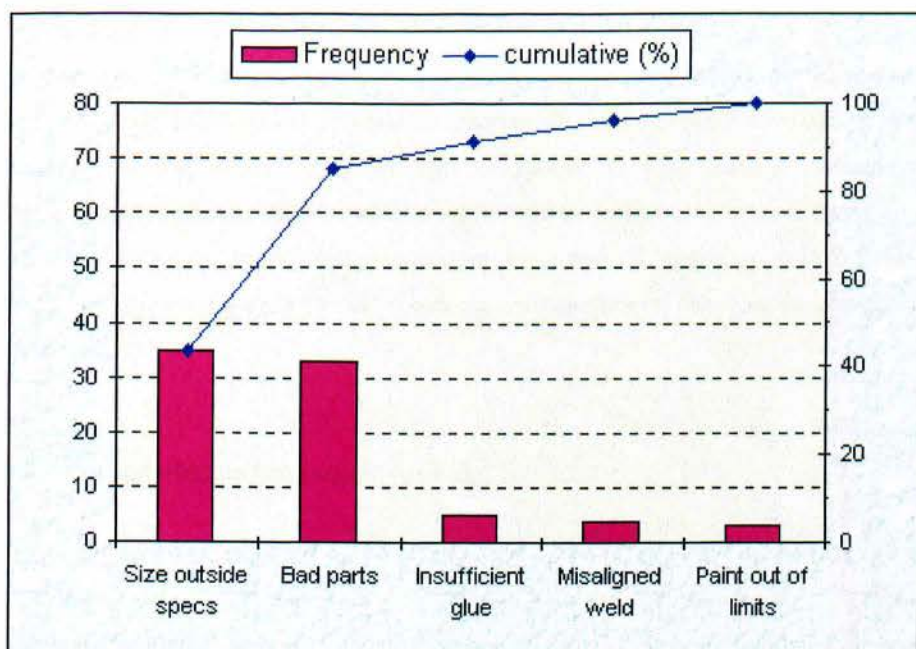
Στόχος επίλυσης ενός προβλήματος ποιότητας είναι η αναγνώριση των αιτιών του προβλήματος, ώστε να διορθωθούν. Ένα από τα πιο χρήσιμα "εργαλεία" προς το σκοπό αυτό, δηλαδή τη διερεύνηση προβλημάτων ποιότητας, είναι το Διάγραμμα Αιτιών – Αποτελεσμάτων

3.4.5 Διάγραμμα/Ανάλυση PARETO

Κατά την ανάλυση Pareto: Οι πολύτιμοι λίγοι (20%) των πελατών συμβάλλουν στη μεγαλύτερη αξία των πωλήσεων (80%) του προϊόντος, δηλ. απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό των πωλήσεων. Ενώ οι Χρήσιμοι Πολλοί (80%) των πελατών, απορροφούν μικρή αξία των πωλήσεων(20%). Την αρχή Pareto παρατήρησε ο I. Juran το 1950. Βρήκε ότι η μεγαλύτερη συμβολή στα αποτελέσματα οφείλεται μόνο σε μικρές αιτίες. Σύμφωνα με την ανάλυση Pareto τα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν κι έχουν παρατηρηθεί, κατατάσσονται σύμφωνα με τη συχνότητα που προκύπτουν (από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη).

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα από διοικητικά στελέχη και εργαζόμενους με λίγη εξοικείωση στη μέτρηση των αντιστοιχων μεγεθών. Στην ανάλυση κατά Pareto παρατηρούμε ότι η συμβολή διαφόρων παραγόντων στο τελικό αποτέλεσμα δεν είναι ομοιόμορφη. Συνήθως, ένας σχετικά μικρός αριθμός π.χ. το 20%, είναι υπεύθυνος για το μεγαλύτερο μέρος, π.χ. το 80%, του συνολικού αποτελέσματος, ενώ οι περισσότεροι από τους παράγοντες επηρεάζουν σε μικρό ή αμελητέο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα. Η ιδιότητα αυτή (αρχή του Pareto) επιτρέπει να δώσουμε προτεραιότητα στους λίγους εκείνους παράγοντες με τη μεγαλύτερη συμβολή σε κάποιο πρόβλημα.

Μια καλή εφαρμογή της αρχής του Pareto, συναντάμε στο σχεδιασμό ποιότητας όταν προσπαθούμε να προσδιορίσουμε τους πελάτες, μιας υπάρχουσας επιχείρησης, για τα προϊόντα της.



Εικόνα 9 Παράδειγμα διαγράμματος pareto

Μια συνήθης ταξινόμηση των πελατών γίνεται στις δύο κατηγορίες: *εξωτερικοί πελάτες* και *εσωτερικοί πελάτες*. Στους εξωτερικούς πελάτες περιλαμβάνονται δύο είδη πελατών: Τελικοί πελάτες χρήστες και Ενδιάμεσοι πελάτες. Στους εσωτερικούς πελάτες περιλαμβάνονται όλοι μέσα στην επιχείρηση, που άμεσα στην παραγωγική διαδικασία ή έμμεσα στις δραστηριότητες υποστήριξης, υποστηρίζουν και επηρεάζουν την ποιότητα του ίδιου του προϊόντος και του τρόπου εξυπηρέτησης του πελάτη. Μέσα στην κάθε κατηγορία των εξωτερικών και εσωτερικών πελατών μπορούμε επίσης να έχουμε μια δεύτερη ταξινόμηση σε άλλες δύο κατηγορίες, ανάλογα με τη συμβολή τους στο ποσοστό των πωλήσεων που πραγματοποιούν για την αγορά του προϊόντος μας ή ανάλογα με την επιρροή τους στη λήψη αποφάσεων. Η κάθε κατηγορία έχει διαφορετικές επιπτώσεις και επιρροές πάνω στο σχεδιασμό της ποιότητας. Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι: *Οι Πολύτιμοι Λίγοι* και *οι Χρήσιμοι Πολλοί*:

Οι Πολύτιμοι Λίγοι: Στην κατηγορία αυτή, ένας σχετικά μικρός αριθμός αγοραστών έχει μεγάλη βαρύτητα, διότι απορροφά το μεγαλύτερο ποσοστό της αξίας των πωλήσεων.

Οι Χρήσιμοι Πολλοί: Στην κατηγορία αυτή, διακρίνουμε ένα μεγάλο αριθμό πελατών, όπου καθένας μεμονωμένα έχει μικρή επιρροή και περιορισμένο συνολικά ποσοστό συμμετοχής, στις πωλήσεις. Μέσα στην επιχείρηση οι εσωτερικοί “πελάτες” που ανήκουν στους πολύτιμους λίγους, περιλαμβάνουν τα ανώτατα διοικητικά στελέχη στις βασικές λειτουργίες παραγωγής, marketing κ.α., ενώ οι χρήσιμοι πολλοί είναι οι εργαζόμενοι στην παραγωγή κι αυτοί που απασχολούνται στις διάφορες δραστηριότητες υποστήριξης.

3.5 Παράμετροι Επιτυχίας Δ.Ο.Π.

Οι βασικοί παράγοντες επιτυχίας στην εφαρμογή της Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας είναι οι εξής. (Metri, B. A. (2005), ‘TQM critical success factors for construction firms’, Management)

- Φιλοσοφία Ποιότητας
- Στρατηγικό Management Ποιότητας
- Διαχείρισης ποιότητας στη διαδικασία του σχεδιασμού
- Διαχείριση προμηθευτικής αλυσίδας
- Ενδυνάμωση και συμμετοχή

3.5.1 Φιλοσοφία Ποιότητας

Παράγοντες όπως, χρήση των πληροφοριών για βελτίωση, πεδίο αρμοδιοτήτων ισότιμο με αυτό των ευθυνών, αίσθημα ασφάλεια της εργασίας, κλίμα δικαιοσύνης, ισότιμη αμοιβή εργασίας, συλλογική εργασία, συνεργασία, εκμάθηση και συμμετοχή, συνιδιοκτησία και δυνατότητες ανάπτυξης διαμορφώνουν μια οργανωτική κουλτούρα, η οποία στη συνέχεια οδηγεί σε αύξηση της παραγωγικότητας, της ποιότητας και της ικανοποίησης πελατών και εργαζομένων. Συχνά, η αποτυχία της ΔΟΠ αποδίδεται στην

έλλειψη της ανάπτυξης και της διατήρησης μιας νοοτροπίας προσανατολισμένης στην ποιότητα ως μέρος της ευρύτερης οργανωτικής κουλτούρας. Υπό μία έννοια, η ΔΟΠ ουσιαστικά προϋποθέτει μια νέα διαφορετική κουλτούρα. Στον κλάδο των κατασκευών, η οργανωτική κουλτούρα και η σχεδιαστική κουλτούρα μιας εταιρείας, συνυπάρχουν και απαιτούν σύζευξη.

3.5.2 Στρατηγικό Μάνατζμεντ Ποιότητας

Ο στόχος του στρατηγικού μάνατζμεντ στη ποιότητα εκφράζεται μέσω της υιοθέτησης των στόχων για την επίτευξη της ποιότητας στον ευρύτερο στρατηγικό σχεδιασμό λειτουργιών και μέσω της ύπαρξης πλαισίων στρατηγικών σχεδιασμού, όπως η ανάπτυξη της ποιότητας λειτουργίας (QFD), το οποίο παρέχει συγκεκριμένες οδηγίες για την προσέγγιση, την εκτέλεση και την αξιολόγηση της ανάπτυξης των στρατηγικών πλάνων. Εσωτερικά θέματα διαμορφώνουν ένα μακροπρόθεσμο οδηγό πορείας για την εταιρεία, με την ενσωμάτωση βασικών στρατηγικών ικανοτήτων της και την έμφαση στην υιοθέτηση των νέων τεχνολογιών. Εξωτερικά θέματα αποτελούν η αντίδραση της εταιρείας στις οικονομικές διακυμάνσεις στην βιομηχανία, ο αντίκτυπος των νέων ευκαιριών της αγοράς για τις υπάρχουσες επιχειρηματικές πρακτικές αλλά και η προστασία έναντι των ανταγωνιστών της εταιρείας.

3.5.3 Διαχείριση Ποιότητας στη Διαδικασία του Σχεδιασμού

Η σχεδιαστική υπεροχή παρέχει ξεκάθαρα ανταγωνιστικές δυνατότητες, όπως η γρήγορη αποπεράτωση του έργου και η ευελιξία. Στα κατασκευαστικά έργα, τα νέα σχέδια επιθεωρούνται ενδελεχώς πριν από την κατασκευή και ο σχεδιασμός σε πειραματικό επίπεδο χρησιμοποιείτε εκτενώς ενώ επιπρόσθετα δίνεται έμφαση στη σαφήνεια των προδιαγραφών και στην αποφυγή της συχνής αναθεώρησης των σχεδίων. Ο λεπτομερής σχεδιασμός, το χρονοδιάγραμμα και η εκτίμηση του κόστους, η αξιολόγηση του σχεδιασμού, ο βαθμός δυνατότητας υλοποίησης του σχεδιαζόμενου έργου, ο έλεγχος των σχεδιαστικών δραστηριοτήτων αποτελούν αναπόσπαστα στοιχεία της διαχείρισης ποιότητας του σχεδιασμού. Κατά συνέπεια, η ορθή διαχείριση της ποιότητας της

διαδικασίας του σχεδιασμού έχει ως αποτέλεσμα την άριστη ποιότητα των κύριων υπηρεσιών που επηρεάζουν θετικά την αντίληψη του πελάτη την ποιότητα.

3.5.4 Διοίκηση Λειτουργιών και Διαδικασιών

Η διοίκηση λειτουργιών εστιάζει στη διαχείριση της διαδικασίας κατασκευής έτσι ώστε να λειτουργεί, χωρίς διακοπές και έλλειψη υλικών ή εργαλείων το έργο.. Στη διαδικασία της κατασκευής πραγματοποιούνται συγκεκριμένες δραστηριότητες όπως ο προγραμματισμός της ακολουθίας των εκτελούμενων εργασιών, της ανάλυσης του σχεδιαγράμματος, της πρόσβασης, των προσωρινών εγκαταστάσεων, της καινοτόμου χρήσης των υλικών, της καινοτόμου χρήσης του εξοπλισμού και των εργαλείων κατασκευής, και της χρήσης προκατασκευασμένων μέσων. (K. T. Ulrich & S. D. Eppinger, 2010)

3.5.5 Διαχείριση Προμηθευτικής Αλυσίδας

Η Διοίκηση ποιότητας προμηθευτών περιλαμβάνει λιγότερους αλλά αξιόπιστους υπεργολάβους, εμπιστοσύνη στον έλεγχο διαδικασιών από τους προμηθευτών, ισχυρή αλληλεξάρτηση μεταξύ του προμηθευτή και του πελάτη, πολιτική αγορών προμηθειών, έμφαση στην ποιότητα παρά στην τιμή, ποιοτικό έλεγχο των προμηθευτών και τη βοήθεια των προμηθευτών στην ανάπτυξη της ποιότητας. Τα υλικά αποτελούν συχνά μια σημαντική πηγή προβλημάτων σε θέματα ποιότητας και έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ικανοποίηση αγοραστών. Αντί να βασίζομαστε σε εργαλεία όπως η δειγματοληψία ως μέτρο αποδοχής και διαπίστωσης της ποιότητας των εισερχόμενων υλικών και των επιμέρους εξαρτημάτων, είναι προτιμότερο για τους κατασκευαστές να προμηθεύονται από έναν περιορισμένο αριθμό ικανών ή πιστοποιημένων προμηθευτών. (Ανδριανόπουλος, 2009)

3.5.6 Εκπαίδευση και Κατάρτιση

Η εκπαίδευση και την κατάρτιση των εργαζομένων όχι μόνο για να αποκτήσουν επαρκείς γνώσεις και δεξιότητες για να εκτελέσουν την εργασία τους, αλλά και για να αποκτήσουν

διαθέτουν συγκεκριμένες αξίες, γνώσεις και δεξιότητες που σχετίζονται με θέματα και δραστηριότητες της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας. Οι λόγοι που προβάλλονται για την αποτυχία πρωτοβουλιών ΔΟΠ περιλαμβάνουν συχνά την έλλειψη κατάλληλης εκπαίδευσης και την ανεπαρκή γνώση. (ΕΕΔΕ, 2004)

3.5.7 Ενδυνάμωση και Συμμετοχή

Η ενδυνάμωση και η συμμετοχή βελτιώνει την αυτοεκτίμηση του ατόμου και την ικανότητα του να επιλύει προβλήματα και να λαμβάνει αποφάσεις χαμηλού κινδύνου. Η παροχή κινήτρων στους εργαζομένους, η υπευθυνότητα και ο καταλογισμός ευθυνών αποτελούν γενικές έννοιες που μπορούν να ωφελήσουν κάθε επιχειρηματικό οργανισμό. Τα αίτια των συνεχιζόμενων προβλημάτων ποιότητας, όπως π.χ. η έλλειψη ομαδικότητας στην εργασία, οι συγκρούσεις και η έλλειψη συμμετοχής των εργαζομένων έχουν ξεπεραστεί από την προσωπική συμμετοχή σε δραστηριότητες βελτίωσης της ποιότητας, παράμετροι που οδηγούν στην επιτυχία της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας.

3.5.8 Πληροφορίες και Ανάλυση

Η παράμετρος αυτή συνίσταται στην αξιολόγηση των διαφόρων πολιτικών και στρατηγικών, στον έλεγχο της ποιότητας, στην ανάλυση του κόστους επίτευξης της ποιότητας, στην αξιολόγηση των επιδόσεων ανά υπηρεσία ή λειτουργία αλλά και προμηθευτών και εργαζομένων. Αν υπάρχει ελλιπής διάχυση των πληροφοριών που λαμβάνονται, τεχνικές ποιότητας όπως η συγκριτική αξιολόγηση (benchmarking) και τα εργαλεία για στατιστικό έλεγχο της διαδικασίας (statistical process control) θα καταστούν αναποτελεσματικά. Για να διατηρηθεί μια πραγματική εστίαση στην ικανοποίηση του πελάτη, ένας οργανισμός πρέπει να διασφαλίζει την έγκαιρη ανατροφοδότηση των αποτελεσμάτων των ερευνών αγοράς που οδηγούν στη ανάληψη αποτελεσματικών δράσεων.

3.5.9 Ικανοποίηση Πελατών

Ένας εταιρικός όμιλος μπορεί να επιτύχει υψηλότερες επιδόσεις από τον ανταγωνισμό εάν είναι σε θέση να προβλέπει και να αντιδρά γρήγορα στις απαιτήσεις των πελατών με νέες ιδέες και τεχνολογίες αλλά και με την κατασκευή έργων που πληρούν ή υπερβαίνουν τις προσδοκίες των πελατών.

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία από έρευνες σχετικά με την ικανοποίηση των πελατών από τις προσφερόμενες υπηρεσίες προκύπτουν τα εξής στοιχεία

Πίνακας 5 Τα βασικά στοιχεία αφοσίωσης του πελάτη

Οι αφοσιωμένοι καταναλωτές ανήκουν στο ενεργητικό μιας εταιρείας	Ένας πελάτης που αποφέρει κέρδος 1.000 ευρώ για έναν προμηθευτή στον πρώτο χρόνο θα αποφέρει πολλαπλάσιο κέρδος αν διατηρηθεί σαν ικανοποιημένος πελάτης για περισσότερα χρόνια.
Οι αφοσιωμένοι πελάτες είναι πιο επικερδείς	Αγοράζουν περισσότερα προϊόντα της εταιρείας, καταναλώνουν λιγότερο από το χρόνο της, είναι λιγότερο ευαίσθητοι ως προς την τιμή και φέρνουν νέους πελάτες.
Η απόκτηση νέων πελατών κοστίζει	Κοστίζει 3-5 φορές περισσότερο να βρεθεί νέος πελάτης από το να διατηρηθεί ένας παλιός. Αυτό είναι το κόστος της έρευνας, της διαφήμισης, της πώλησης και της διαπραγμάτευσης με νέες προοπτικές.
Αύξηση διατήρησης πελατών	Η μέση εταιρεία χάνει το 10 τοις εκατό των πελατών της ετησίως. Οι έρευνες δείχνουν ότι η αύξηση διατήρησης πελατών μόνο κατά 5 τοις εκατό μπορεί να αυξήσει τα κέρδη μιας εταιρείας κατά 85 τοις εκατό.
Οι 'εξαιρετικά ικανοποιημένοι' πελάτες αγοράζουν ξανά	Είναι έξι φορές πιο πιθανό να αγοράσουν ξανά σε σχέση με τους πελάτες που κατατάσσουν τους εαυτούς τους ως απλά 'ικανοποιημένους'. Οι εξαιρετικά ικανοποιημένοι πελάτες

	μιλούν σε άλλους για την εταιρεία.
Οι δυσαρεστημένοι πελάτες μιλούν σε άλλους	Κατά μέσο όρο μιλούν σε άλλους δεκατέσσερις. Έτσι, αν η απώλεια ενός πελάτη αντιπροσωπεύει την απώλεια ενός ενεργητικού με μακροχρόνια αξία π.χ. 10.000 ευρώ, αυτό μπορεί να είναι μόνο μια μικρή πτυχή του προβλήματος. Η συνολική αξία που χάνεται μπορεί να είναι 14 φορές μεγαλύτερη.
Οι περισσότεροι δυσαρεστημένοι πελάτες δεν παραπονιούνται	Ενώ μιλούν στους συνεργάτες τους, μόνο το 4% αυτών κάνουν παράπονα στην εταιρεία. Για κάθε παράπονο που γίνεται, άλλοι 26 είναι πιθανό να έχουν προβλήματα και τα 6 θα είναι σοβαρά.
Η ικανοποιητική επίλυση των παραπόνων αυξάνει την αφοσίωση	Όταν τα παράπονα επιλύονται ικανοποιητικά, οι πελάτες αυτοί έχουν την τάση να είναι πιο πιστοί από αυτούς που δεν αντιμετώπισαν εξ' αρχής κανένα πρόβλημα.
Λίγοι πελάτες 'λιποτακτούν' λόγω χαμηλής επίδοσης του προϊόντος	Μόνο το 14% 'λιποτακτεί' γι' αυτό το λόγο. Τα δύο τρίτα φεύγουν, επειδή βρίσκουν τους ανθρώπους που τους εξυπηρετούν αδιάφορους ή απρόσιτους.

3.6 Δυσχέρειες στην Εφαρμογή της Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας

Η εφαρμογή του ΔΟΠ στα πλαίσια της επιχείρησης δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί αφού πρέπει πρώτα να υπερπηδηθούν αρκετά εμπόδια όπως αυτά περιγράφονται στο πίνακα 3.

(Πηγή: Σταματιάδης Φ. (1997), *Η έννοια του Total Quality Management*)

Πίνακας 6 Καταγραφή προβλημάτων για την εφαρμογή της ΔΟΠ.

Έλλειψη χρόνου από τα στελέχη	Πολλές φορές είμαστε μάρτυρες έλλειψης χρόνου που διαθέτουν τα μεσαία αλλά και ανώτατα στελέχη έτσι ώστε να εφαρμόσουν και να διαδώσουν τα οφέλη της ποιότητας μέσα στην επιχείρησή τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν αποκλίσεις από ότι κηρύσσει το ΔΟΠ ως φιλοσοφία και μεθοδολογία και άρα η επιχείρηση να μην είναι δυνατόν να ωφεληθεί 100% από την εφαρμογή του.
Σημαντική επένδυση	Η εφαρμογή του ΔΟΠ απαιτεί σημαντικό πρόσθετο κόστος για την επιχείρηση.
Εργασιακά θέματα	Πολλοί εργαζόμενοι δεν βλέπουν με καλό μάτι την εφαρμογή του ΔΟΠ στη εταιρεία διότι φοβούνται ότι η όλη αναδιοργάνωση της εταιρείας θα έχει ως αποτέλεσμα απολύσεις και μείωση του προσωπικού (downsizing).
Ανάγκη για γρήγορα αποτελέσματα	Η εφαρμογή του ΔΟΠ δεν προσφέρει άμεσα αποτελέσματα στην επιχείρηση.
Αντίσταση στην αλλαγή	Πολλοί εργοδότες και στελέχη είναι «μέλη» της παλιάς σχολής είτε από πλευράς κουλτούρας είτε νοοτροπίας με αποτέλεσμα να είναι αρνητικά προσκείμενοι σε οτιδήποτε καινούργιο και καινοτομικό, ακόμη και στη Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας.

Για να υπερπηδηθούν τα παραπάνω εμπόδια η επιχείρηση οφείλει να ενστερνιστεί τα χαρακτηριστικά ενός ισχυρού και προσανατολισμένου στην απόδοση επιχειρηματικού κλίματος όπως:

- Στόχοι που ξεπερνούν τα εμπόδια
- Οραματική σκέψη
- Κοινά αποδεκτή αυτοπεποίθηση
- Υψηλό πνευματικό επίπεδο
- Χαμηλό επίπεδο επιχειρηματικής ανησυχίας
- Υψηλά πρότυπα
- Ενθάρρυνση θετικής σκέψης
- Καλλιέργεια νοοτροπίας συνεχούς βελτίωσης
- Συμμετοχική κουλτούρα

Τέλος, μια πολιτική ποιότητας για να είναι αποτελεσματική πρέπει ουσιαστικά να περιλαμβάνει τον ανθρώπινο παράγοντα, αλλιώς είναι σίγουρο ότι θα παραμείνει τεχνητή και επιφανειακή. (Κ. T. Ulrich & S. D. Eppinger, 2010)

4. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ

Εισαγωγή

Σήμερα υπάρχουν πλέον αρκετές σχεδιαστικές μέθοδοι ανάλυσης των μηχανημάτων, ώστε να εντοπίζονται τα προβλήματα που μπορεί να υπάρξουν οι οποίες ακολουθούν κατά βάση την ίδια αρχή, ξεκινάνε απλοποιώντας την βασική λειτουργία του προϊόντος σε επιμέρους υπολειτουργίες.

Όλες οι προσεγγίσεις της λειτουργικής ανάλυσης και δόμησης έχουν ως κοινό στοιχείο μια βάση λειτουργιών (κατάλογο βασικών λειτουργιών) και την περιγραφή των λειτουργιών με όρους λογικής ροής ενέργειας (όρος προσλαμβανόμενος με ευρύτερη έννοια έτσι ώστε να περιλαμβάνει δυνάμεις και ροπές), υλικών, και πληροφορίας. Στον τομέα του σχεδιασμού οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι ανάπτυξης λειτουργικών δομών είναι οι εξής τρεις.

- Function Analysis System Technique
- Subtract and Operate Procedure
- Function Structure Modelling Process

Οι σχεδιαστικές μέθοδοι εφαρμόζονται στα πλαίσια υλοποίησης είτε του συστήματος Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης είτε του Συστήματος Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας. Τα δύο συστήματα που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες, οι οποίες αξίζει να επισημανθούν προτού αναλυθούν οι σχεδιαστικές μέθοδοι ανάλυσης προϊόντων.

4.1 Ομοιότητες και Διαφορές μεταξύ ΟΠΣ και ΣΔΟΠ

Πολλά από τα εργαλεία που χρησιμοποιούν τα δύο συστήματα όπως η ενδυνάμωση των υπαλλήλων, η αξιολόγηση και τεκμηρίωση ταυτίζονται. Αν θελήσουμε να ταξινομήσουμε τις ομοιότητες των δύο συστημάτων προκύπτει ότι

- Η συνολική δέσμευση για την εφαρμογή του προγράμματος από την ανώτερη διοίκηση απαιτείται και στα δύο προγράμματα.
- Οι υπάλληλοι πρέπει να εξουσιοδοτηθούν για να αρχίσουν τη διορθωτική δράση.

Η εφαρμογή της ΟΠΣ μπορεί να πάρει ένα έτος ή και παραπάνω για να εφαρμοστεί και να γίνει τελικά μία τρέχουσα διαδικασία. Επίσης πρέπει να πραγματοποιηθούν αλλαγές στη νοοτροπία των υπαλλήλων για να μπορέσουν να αναλάβουν τις καινούριες ευθύνες που τους επιβάλλει η εφαρμογή του προγράμματος. (ΕΕΔΕ, 2004)

Αντίστοιχα όμως τα δύο προγράμματα παρουσιάζουν και ουσιαστικές διαφορές, όπως αυτές αναλύονται ως εξής

- Η ΟΠΣ εφαρμόζεται για την βελτιστοποίηση χειρισμού του εξοπλισμού ενώ η ΔΟΠ για την γενικότερη εφαρμογή της ποιότητας στην εταιρείας.
- Η ΟΠΣ χρησιμοποιεί ως μέσο επίτευξης του στόχου την συμμετοχή των υπαλλήλων, μέσω πρωτοβουλιών και προτάσεων τους και παράλληλα μέσω υποστήριξης ειδικού λογισμικού. Αντίστοιχα η διαχείριση ολικής ποιότητας για να εφαρμοστεί απαιτείται η χρήση ειδικού λογισμικού του οποίου τους εντολές πρέπει το προσωπικό να εκτελέσει. Δηλαδή στην περίπτωση της ΔΟΠ το προσωπικό δεν έχει τόσο ενεργό ρόλο στη λήψη αποφάσεων αλλά μόνος την εκτέλεση των προβλεπόμενων εργασιών.
- Τέλος η εφαρμογή της ΟΠΣ στοχεύει στην εξάλειψη των απωλειών ενώ η ΔΟΠ στη αναβάθμιση της παρεχόμενης ποιότητας

4.2 Function Analysis System Technique

Φιλοσοφία της μεθόδου αποτελεί η ανάλυση του τελικού προϊόντος στις πρωτεύουσες υπολειτουργίες του. Η μέθοδος FAST (Function Analysis System Technique) έχει ως πρωταρχικό στόχο την καταγραφή όλων εκείνων των λειτουργιών που πρέπει να εκτελεί το προϊόν ούτως ώστε να ικανοποιεί τον καταναλωτή. Η μέθοδος αναπτύσσεται τμηματικά (βήμα - βήμα) και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία σε κάθε ένα από τα στάδια ελέγχου.

Η μέθοδος FAST εφαρμόζεται ώστε να προσδιορίσει, να αναλύσει και να καταστήσει κατανοητή την λειτουργία του προϊόντος, πως δηλαδή οι λειτουργίες του προϊόντος συνδέονται μεταξύ τους ώστε να παραχθεί η βασική λειτουργία που επιθυμεί ο καταναλωτής.

Η μέθοδος τεχνικής ανάλυσης συστήματος είναι ένα εργαλείο το οποίο σε συνδυασμό με την μέθοδο της Value Engineering μεγιστοποιεί την ποιότητα. Αξιολογεί την σημασία κάθε σχεδιαστικού βήματος όπως κόστος, εμφάνιση, χρησιμότητα, ασφάλεια, κλπ. Η μέθοδος από μόνη της δεν μπορεί να δώσει αποτελέσματα, αλλά αποτελεί την απαρχή για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την λειτουργία του προϊόντος. Στην ουσία η μέθοδος τοποθετεί τις βάσεις για την ορθή σχεδίαση του προϊόντος.

Επιπρόσθετα, η μέθοδος είναι ένα σύστημα το οποίο δεν απαιτεί των υπολογισμό κάποιων αριθμητικών ποσοτήτων. Στόχος της εφαρμογής της είναι να προσδιορίσει τις λειτουργίες σχεδιασμού του προϊόντος σε μια λογική ακολουθία, να τονίσει τις προτεραιότητες και να ελέγξει τις αλληλεξαρτήσεις. Σε καμία περίπτωση όμως δεν θα πει ποια λειτουργία πρέπει να εφαρμοστεί τότε, από ποιόν, πόσο και πως θα εφαρμοστεί. Η μέθοδος δεν θεωρείται ολοκληρωμένη αν το μοντέλο δεν ολοκληρωθεί. Η FAST δεν θεωρείται ολοκληρωμένη μέχρι το μοντέλο να έχει τη συναίνεση των συμμετεχόντων μελών της ομάδας και αντικατοπτρίζει επαρκώς τη συμβολή τους.

4.2.1 Χαρακτηριστικά Μεθόδου

Η μέθοδος είναι σχετικά απλή στην εφαρμογή της, και συγκριτικά με τις υπόλοιπες δύο η απλούστερη. Το γεγονός αυτό αποτελεί παράλληλα πλεονέκτημα αλλά και μειονέκτημα. Η ανάπτυξή της αποτελεί απλή διαδικασία, καθώς αναλύει μόνο τα βήματα λειτουργίας του προϊόντος. Η ευκολία της κοστίζει σε έλλειψη κατανόησης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των υποσυστημάτων και εξαρτημάτων του προϊόντος.

Επίσης η μέθοδος συνιστάται να εφαρμόζεται σε προϊόντα που ήδη υπάρχουν, με σκοπό μέσω της αντίστροφης μηχανικής να καθιστά κατανοητή τη λειτουργία του προϊόντος χωρίς ενδεχομένως να τη βελτιώνει. Η μέθοδος κατατάσσεται στη κατηγορία των ιεραρχικών δομών (Hierarchic structures) τείνει δηλαδή να επικεντρώνεται και να χαρακτηρίζει τις λειτουργίες που εκτελεί ο χρήστης του προϊόντος.

Όλες οι λειτουργίες μπορούν να εκφράσουν με ένα ζευγάρι λέξεων αποτελούμενο από ένα ρήμα και ένα προσδιοριστικό ουσιαστικό. Το ρήμα απαντά στην ερώτηση «Τι κάνει αυτό;», και το ουσιαστικό απατάει στο ερώτημα «Τι το κάνει αυτό εφικτό;».

Πίνακας 7 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου FAST

Στόχος	Εφαρμόζεται ώστε να προσδιορίσει, να αναλύσει και να καταστήσει κατανοητή την λειτουργία του προϊόντος.
Δομή	Ιεραρχική Δομή.
Εφαρμογή	Η ανάλυση του τελικού προϊόντος στις πρωτεύουσες υπολειτουργίες του.
Σχεδιασμός	Ο σχεδιασμός της αποτελεί απλή διαδικασία, καθώς αναλύει μόνο τα βήματα λειτουργίας του προϊόντος.
Ταχύτητα Μεθόδου	Σχετικά απλή και γρήγορη στην εφαρμογή της.
Επαναλήψεις	Δεν απαιτούνται επαναλήψεις, η εφαρμογή της γίνεται μόνο

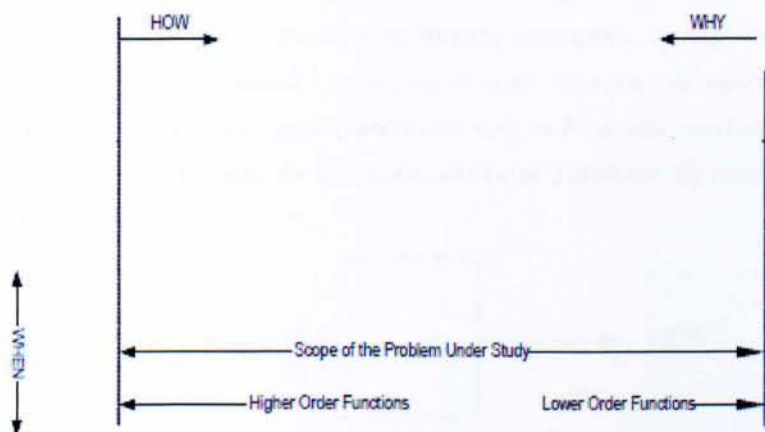
	μια φορά στο προϊόν.
Αποτελέσματα	Η μέθοδος τοποθετεί τις βάσεις για την ορθή σχεδίαση του προϊόντος.

4.2.2 Μεθοδολογία Εργασιών

Οι εργασίες εφαρμογής τη μεθόδου Function Analysis System Technique θα αναλυθούν βήμα προς βήμα, ώστε να δημιουργηθεί μια φόρμα πάνω στην οποία θα στηριχτεί το δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο της εργασίας.

4.2.2.1 Προσδιορισμός και Οριοθέτηση του Προβλήματος

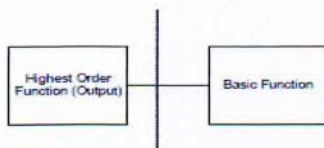
Με τη χάραξη δύο παράλληλων ευθειών επιτυγχάνεται η οριοθέτηση του υπό μελέτη προβλήματος. Η αριστερή ευθεία ορίζει το αποτέλεσμα, την βασική λειτουργία του προϊόντος ενώ η δεξιά ορίζει την έναρξη των λειτουργιών.



Εικόνα 10 Με τη χάραξη δύο παράλληλων ευθειών επιτυγχάνεται η οριοθέτηση του υπό μελέτη προβλήματος (Dr Kremer, Design Theories and Methods. 2009)

4.2.2.2 Προσδιορισμός Κύριας Λειτουργίας Προϊόντος

Σύμφωνα με τον Kremer το διάγραμμα ξεκινάει με την ερώτηση «Ποια είναι η κύρια λειτουργία του συστήματος;». Η κύρια λειτουργία τοποθετείται δεξιά της αριστερής γραμμής. Στη συνέχεια θέτουμε το ερώτημα «Για ποιό λόγο εκτελείται αυτή η λειτουργία;», και η απάντηση αποτελεί την λειτουργία που τοποθετείται αριστερά της αριστερής γραμμής.



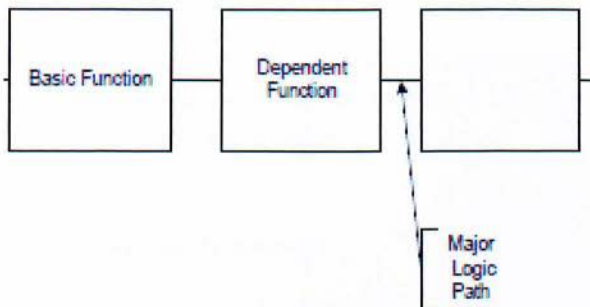
Εικόνα 11 Η κύρια λειτουργία τοποθετείται δεξιά της αριστερής γραμμής. Κάθε λειτουργία αριστερά της επόμενης θεωρείται βασικότερης σημασίας

4.2.2.3 Προσδιορισμός Δευτερευουσών λειτουργιών

Αυτές οι λειτουργίες τοποθετούνται δεξιότερα της βασικής λειτουργίας και αποτελούν την αλυσίδα εργασιών για την επίτευξη της βασικής λειτουργίας. Παράγονται, λοιπόν, λειτουργίες στα δεξιά της βασική λειτουργίας, οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούν το σχήμα “πως εκτελείται η λειτουργία” (κατεύθυνση προς τα δεξιά) και “γιατί εκτελείται η λειτουργία” (κατεύθυνση προς τα αριστερά), και αυτές αποτελούν τις δευτερεύουσες λειτουργίες.



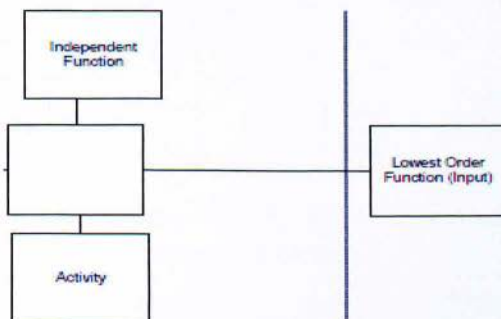
Εικόνα 12 Παράγονται λειτουργίες στα δεξιά της βασική λειτουργίας, οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούν το σχήμα “πως εκτελείται η λειτουργία



Εικόνα 13 Δημιουργείται κατά αυτό τον τρόπο η πρωτεύουσα αλυσίδα λειτουργιών

4.2.2.4 Πρωτεύουσα Διαδρομή

Η πρωτεύουσα διαδρομή θα τερματιστεί με μία λειτουργία έξω από την δεξιά γραμμή. Αυτή η λειτουργία είναι εξωτερική του προϊόντος, δεν εκτελείται από αυτό αλλά είναι απαραίτητο για την λειτουργία του.



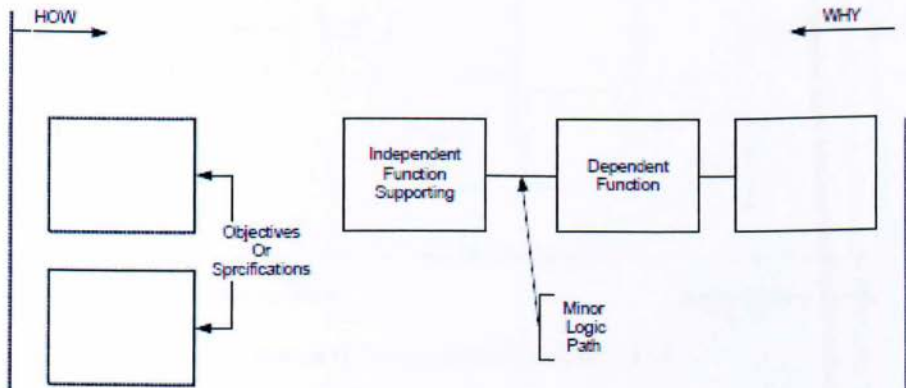
Εικόνα 14 Η πρωτεύουσα διαδρομή θα τερματιστεί με μία λειτουργία έξω από την δεξιά γραμμή

4.2.2.5 Δευτερεύουσες Λειτουργίες

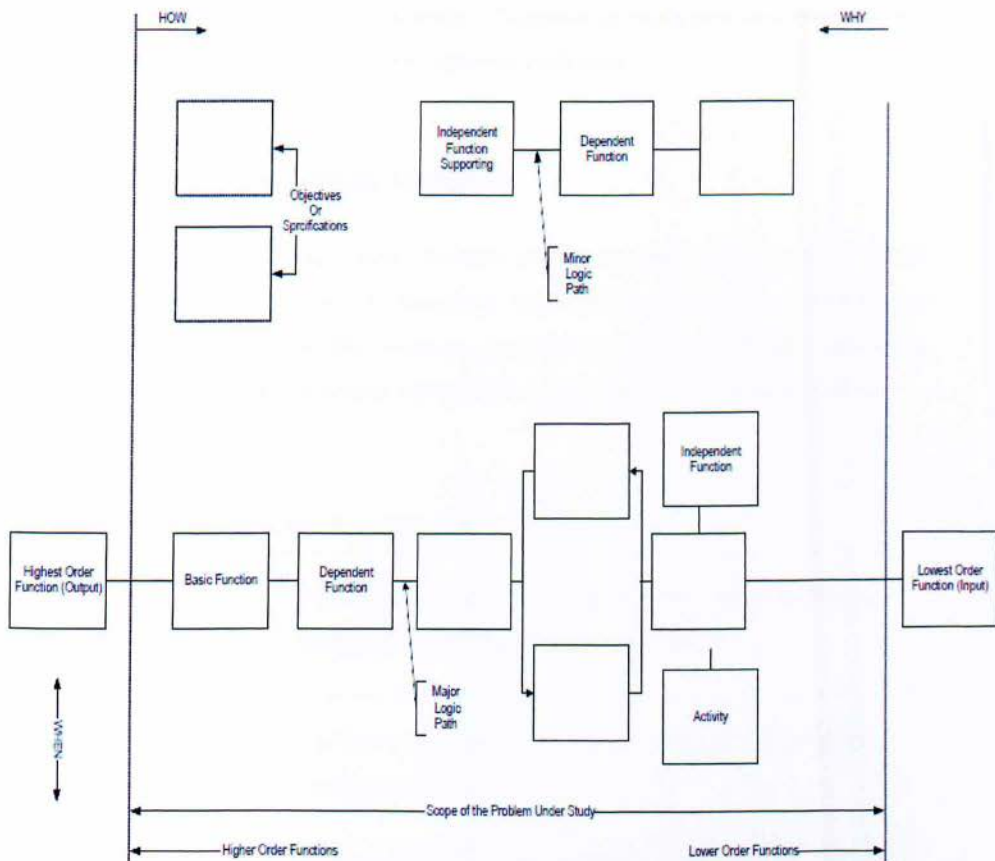
Οι δευτερεύουσες λειτουργίες τοποθετούνται κάτω από τις λειτουργίες της πρωτεύουσας διαδρομής με τις οποίες σχετίζονται. Αυτές είτε εκτελούνται την ίδια στιγμή με τις σχετιζόμενες τους, είτε προκαλούνται από αυτές.

4.2.2.6 Μεμονωμένες Λειτουργίες

Ο αντικειμενικός σκοπός της ανάπτυξης του προϊόντος τοποθετείται πάνω από την βασική λειτουργία. Επιπροσθέτως τοποθετούνται στο πάνω μέρος του διαγράμματος λειτουργίες οι οποίες εκτελούνται μόνο μια φορά ή συνέχεια.



Εικόνα 15 Στο πάνω μέρος του διαγράμματος τοποθετούνται λειτουργίες οι οποίες εκτελούνται μόνο μια φορά ή συνέχεια



Εικόνα 16 Συγκεντρωτικό διάγραμμα FAST

4.3 Subtract and Operate Procedure

Η εφαρμογή της μεθόδου αποσκοπεί στο να κατανοηθεί ποια είναι η λειτουργία του κάθε τμήματος (εξαρτήματος) του προϊόντος, ώστε να ελεγχθεί αν υπάρχουν περιττά μέρη. Η εφαρμογή της ενδείκνυται σε περιπτώσεις επανασχεδιασμού και επανελέγχου του προϊόντος ώστε να αντιμετωπιστούν τυχόν δυσλειτουργίες. Όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, η μέθοδος δεν αναλώνεται στην σχέση των εξαρτημάτων και των επιμέρους υπολειτουργιών, αλλά επικεντρώνεται στην προσφορά του κάθε εξαρτήματος μεμονωμένα. Αυτό το χαρακτηριστικό της την διαφοροποιεί συν τοις άλλοις από την

μέθοδο Function Analysis System Technique. Σύμφωνα με τα ως άνω κατατάσσεται στις μεθόδους επανασχεδιασμού και επανελέγχου του προϊόντος.

4.3.1 Χαρακτηριστικά Μεθόδου

Σε γενικές γραμμές η SOP έχει κοινά στοιχεία με την μέθοδο FAST, παρόλα αυτά θα χαρακτηριζόταν πιο πολύπλοκη η εφαρμογή της. Επίσης η μέθοδος συνιστάται να εφαρμόζεται σε προϊόντα που ήδη υπάρχουν, με σκοπό μέσω της αντίστροφης μηχανικής να καθιστά κατανοητή τη λειτουργία του προϊόντος και ενδεχομένως να τη βελτιώνει.

Πίνακας 8 Βασικά χαρακτηριστικά μεθόδου SOP

Στόχος	Η μέθοδος εστιάζει στην τεχνική ανάλυση του προϊόντος και στοχεύει στον εντοπισμό παραλήψεων
Δομή	Η μέθοδος συγκαταλέγεται στην κατηγορία των μεθόδων ιεραρχικής δομής
Εφαρμογή	Η απομάκρυνση επί μέρους εξαρτημάτων και ο προσδιορισμός της λειτουργίας τους
Σχεδιασμός	Η SOP σχεδιάζεται από κάτω προς τα πάνω για να παραχθεί η λειτουργική δομή σε μια δενδρική μορφή
Ταχύτητα Μεθόδου	Αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία
Επαναλήψεις	Η μέθοδος επαναλαμβάνεται τόσες φορές, όσα και τα εξαρτήματα που την αποτελούν
Ακρίβεια	Η μέθοδος από μόνη της μπορεί να δώσει χρήσιμα

Αποτελεσμάτων	αποτελέσματα, δεν είναι απαραίτητη η εφαρμογή και άλλων μεθόδων
Αποτελέσματα	Αφενός καθίσταται κατανοητή η λειτουργία του προϊόντος και αφετέρου εντοπίζονται τεχνικά προβλήματα και παραλήψεις

4.3.2 Μεθοδολογία Εργασιών

Οι εργασίες εφαρμογής τη μεθόδου Subtract and Operate Procedure θα αναλυθούν βήμα προς βήμα, ώστε να δημιουργηθεί μια φόρμα πάνω στην οποία θα στηριχτεί το δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο της εργασίας.

4.3.2.1 Απομάκρυνση Εξαρτήματος

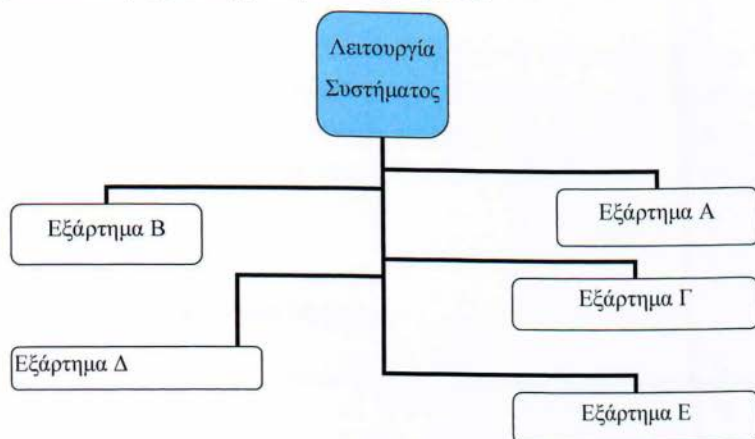
Αρχικά αφαιρείται ένα εξάρτημα από την όλη συναρμολόγηση. Αυτό μπορεί να γίνει με οποιαδήποτε σειρά αλλά ίσως χρειαστεί να αφαιρεθούν και άλλα εξαρτήματα έτσι ώστε να αφαιρεθεί το επιλεγμένο. Τα επιπλέον αφαιρεθέντα εξαρτήματα πρέπει να επανασυναρμολογηθούν, εάν αυτό δεν είναι εφικτό τότε θεωρείται ότι αποκαθίστανται οι βασικές λειτουργίες τους στο αρχικό προϊόν.

4.3.2.2 Ανάλυση Προϊόντος Κατόπιν Απομάκρυνσης Εξαρτήματος

Στόχος είναι ο έλεγχος για το αν οι απαιτήσεις πληρούνται και το προϊόν λειτουργεί κανονικά. Τίθεται, λοιπόν, σε λειτουργία το προϊόν. Σε αυτό το βήμα γίνεται έλεγχος εάν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του καταναλωτή. Για κάθε απαίτηση (δομική, εργονομική, κινηματική κτλ.) το προϊόν πρέπει να δοκιμαστεί για να επαληθευτεί η επίδραση της αφαίρεσης του εξαρτήματος από το σύνολο του συστήματος.

Αυτό το βήμα πραγματοποιείται συνήθως με έναν οπτικό έλεγχο, όμως εάν η επίδραση της αφαίρεσης του εξαρτήματος δεν είναι εμφανής τότε δοκιμάζουμε μια συσκευή ελέγχου. Συμπεραίνουμε την υπολειτουργία του εξαρτήματος που αφαιρέσαμε.

Μια αλλαγή σε οποιοδήποτε βαθμό ελευθερίας κατά τη λειτουργία του προϊόντος θα πρέπει να γίνει σημείο εστίασης της προσοχής. Αυτή η αλλαγή είναι ένα κρίσιμο ζήτημα για την διαπίστωση της λειτουργικότητα του εξαρτήματος.



Εικόνα 17 Κάθε φορά που επαναλαμβάνεται η μέθοδος δημιουργείται ένα διάγραμμα στο οποίο καταγράφεται το εξάρτημα που απομακρύνθηκε και ποιες ήταν οι επιπτώσεις τις απομάκρυνσης του

4.3.2.3 Επανάληψη Διαδικασίας

Τοποθετούμε πάλι το εξάρτημα και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία τόσες φορές όσες και ο αριθμός των εξαρτημάτων που αποτελούν το προϊόν. Κάθε φορά που επαναλαμβάνεται η μέθοδος δημιουργείται ένα διάγραμμα στο οποίο καταγράφεται το εξάρτημα που απομακρύνθηκε και ποιες ήταν οι επιπτώσεις τις απομάκρυνσης του. Τελικώς, καταγράφονται τα αποτελέσματα σε έναν πίνακα όπου για κάθε εξάρτημα αναφέρεται η επίδραση της αφαίρεσής του.

4.4 Function Structure Modelling Process

Κάθε μια από τις τρεις μεθόδους αντιμετωπίζει από διαφορετική οπτική το ζήτημα. Η μέθοδος Function Structure Modeling Process εστιάζει στην κατάσταση του προϊόντος πριν και μετά τη λειτουργία του. Συγκεκριμένα αναλύει τρεις κύριες παραμέτρους, που καθορίζουν την κατάσταση του προϊόντος. Αυτές είναι η ενέργεια, το υλικό, και η πληροφορία.

Πιο αναλυτικά, η παράμετρος ενέργεια, νοείται γενικότερα ως το είδος της ενέργειας ή ακόμα και δύναμης που παρέχεται ή εφαρμόζεται στο σύστημα κατά την λειτουργία του. Η παράμετρος υλικό, ορίζεται ως η ύλη που μεταχειρίζεται το σύστημα και τέλος η παράμετρος πληροφορία αποτελεί την εντολή που συνδυάζει την ενέργεια και το υλικό για να παραχθεί αποτέλεσμα.

4.4.1 Χαρακτηριστικά Μεθόδου

Αν μπορούσαν επιγραμματικά να δοθούν τα βασικότερα χαρακτηριστικά της μεθόδου αυτά θα ήταν:

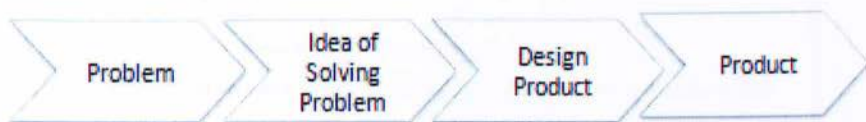
- Η μέθοδος αντιμετωπίζει το σύστημα ως μια οντότητα που είναι συνδεδεμένη με το περιβάλλον και επηρεάζεται από τις εισροές και τις εκροές μέσα στα όρια του.
- Αναλύει σε συνθετικά μέρη τις υπολειτουργίες του προϊόντος.
- Οι υπολειτουργίες διασυνδέονται σχηματικά έτσι ώστε αυτό το διάγραμμα να καθιστά σαφείς τις σχέσεις μεταξύ των λειτουργιών που να πρέπει εκτελεστούν από το προϊόν έτσι ώστε να εκπληρωθεί ο βασικό στόχος του προϊόντος με όρους ενέργειας, ύλης και πληροφορίας

4.4.2 Μεθοδολογία Εργασιών

Οι εργασίες εφαρμογής τη μεθόδου Function Structure Modeling Process θα αναλυθούν βήμα προς βήμα, ώστε να δημιουργηθεί μια φόρμα πάνω στην οποία θα στηριχτεί το δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο της εργασίας.

4.4.2.1 Ανάλυση των Επί Μέρους Υπολειτουργιών

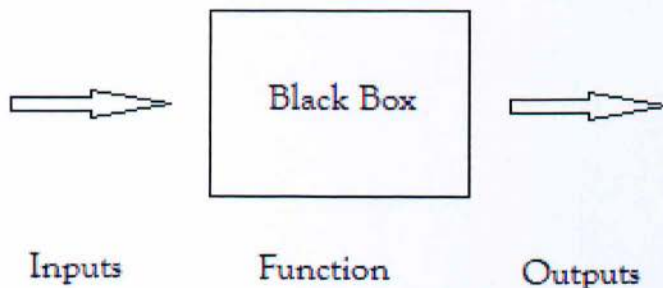
Αρχικά η μέθοδος προσεγγίζει το προϊόν διασπώντας το σε επί μέρους. Μια πρώτη προσέγγιση αποτελεί η ανάλυση σε συνθετικά μέρη της βασικής λειτουργίας του προϊόντος, δηλαδή σε υπολειτουργίες.



Εικόνα 18 Ανάλυση σε συνθετικά μέρη της βασικής λειτουργίας του προϊόντος

4.4.2.2 Δημιουργία του πλαισίου Black Box Model

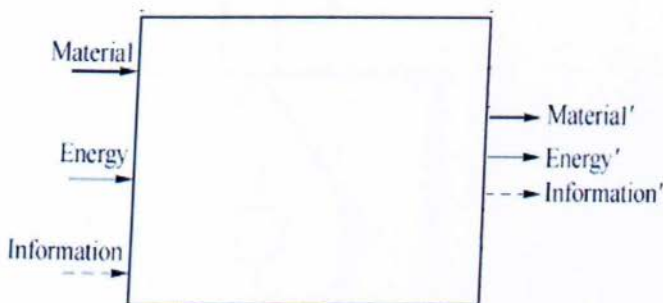
Το πλαίσιο αναπαριστά τη βασική λειτουργία του συστήματος. Σε αυτό αναπαρίστανται όλες οι εισοδοί και εξοδοί του συστήματος, με την μορφή εισόδων και εξόδων σε ένα ορθογώνιο πλαίσιο.



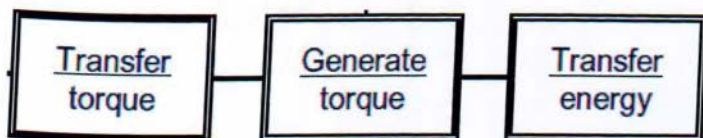
Εικόνα 19 Η λειτουργία του black box

Οι εισροές και οι εκροές στο μαύρο κουτί είναι τριών ειδών,

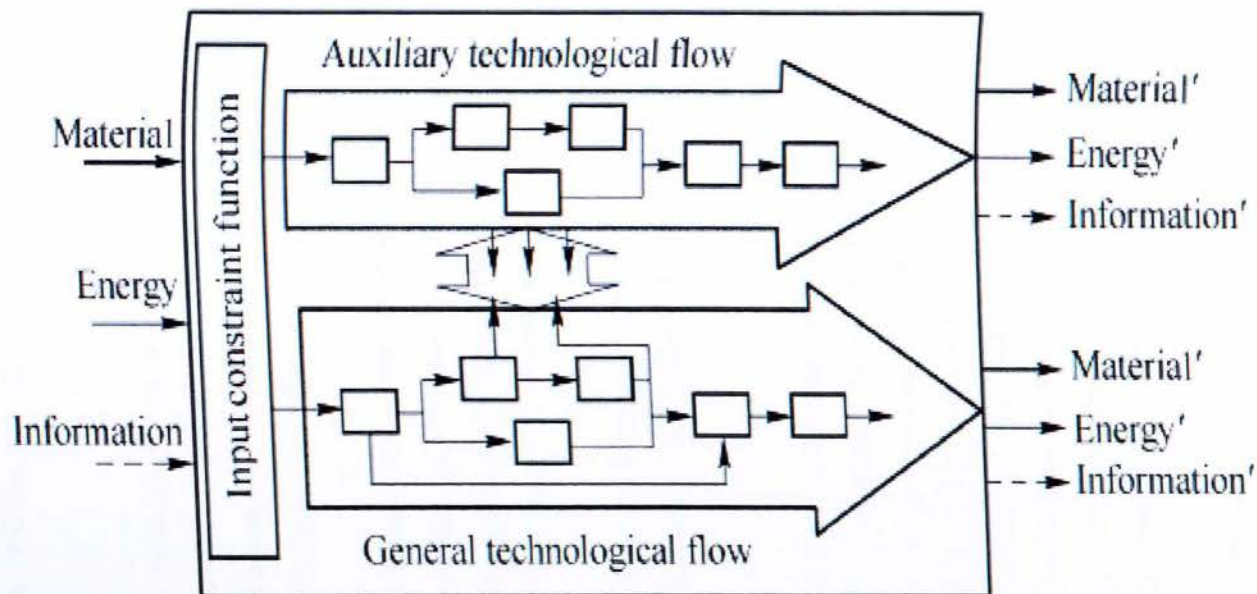
- μάζα (material) υλικά, ρευστά, αέρια κτλ.
- ενέργεια (energy) μηχανική, ηλεκτρική, θερμική, δυνάμεις κτλ.
- πληροφορία (information) σήματα ελέγχου κ.α.



Εικόνα 20 Οι εισροές και οι εκροές στο μαύρο κουτί είναι τριών ειδών



Εικόνα 21 Οι υπολειτουργίες διατυπώνονται με την μορφή ενός ζεύγους ενεργού ρήματος και ουσιαστικού. Για παράδειγμα, “αύξησε πίεση”, “μετάφερε ροπή”, “μείωσε ταχύτητα” κτλ.



Εικόνα 22 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μεθόδου FSMP (Otto N. Kevin, Wood L. Kristin, Product Evolution - A Reverse Engineering and Redesign Methodology)

4.4.2.3 Κατασκευή Γραφήματος Λειτουργικής Δομής

Οι υπολειτουργίες διασυνδέονται στη συνέχεια σε ένα γράφημα έτσι ώστε να σχηματίσουν την όλη λειτουργική δομή.

Μέσω του διαγραμματικής δομής του σχήματος γίνεται σαφής η σχέση μεταξύ των λειτουργιών, τις οποίες το προϊόν πρέπει να εκτελεί έτσι ώστε να επιτύχει τη βασική του λειτουργία με όρους ενέργειας, ύλης και πληροφορίας.

Έχοντας διατυπώσει τις ανάγκες των καταναλωτών ή και παρατηρώντας τους να μεταχειρίζονται το προϊόν, μπορούμε τώρα να αναπτύξουμε μια πρωταρχική λειτουργική δομή που να ικανοποιεί το σχεδιαστικό μας πρόβλημα. Παρακάτω παρουσιάζονται τέσσερα βασικά βήματα για να μπορέσουμε να μεταφράσουμε συστηματικά τις απαιτήσεις των καταναλωτών από το προϊόν, σε ένα ισοδύναμο γράφημα λειτουργικής δομής:

1. Αναπτύσσουμε την περιγραφή της λειτουργίας του προϊόντος με όρους ενεργειών που πρέπει να εκτελέσει ο καταναλωτής ούτως ώστε να μεταχειριστεί το προϊόν.
2. Στη συνέχεια ταυτοποιούμε τις πρωταρχικές ροές οι οποίες σχετίζονται με τις παραπάνω ενέργειες του καταναλωτή. Στο πλαίσιο της μοντελοποίησης εισόδου-εξόδου, μια ροή εισέρχεται σε μια λειτουργία ή υπολειτουργία του προϊόντος, η οποία την διαχειρίζεται και την μετατρέπει σε καινούρια κατάσταση.
3. Ομαδοποιούμε τις αλληλουχίες των υπολειτουργιών έτσι ώστε να αναπαριστούν τις λειτουργίες του όλου προϊόντος. Αυτό επιτυγχάνεται με το να συνδέσουμε τις ροές κάθε αλληλουχίας υπολειτουργιών και προσθέτοντας όπου χρειάζεται, υπολειτουργίες οι οποίες αλληλεπιδρούν με τις ροές ή παρέχουν καταστάσεις ελέγχου.
4. Τέλος επαληθεύουμε την λειτουργική ανάλυση που έχουμε επιτύχει ονοματίζοντας κάθε ροή και ελέγχοντας αν οι τελικές ροές αντιπροσωπεύουν τις ανάγκες του καταναλωτή.

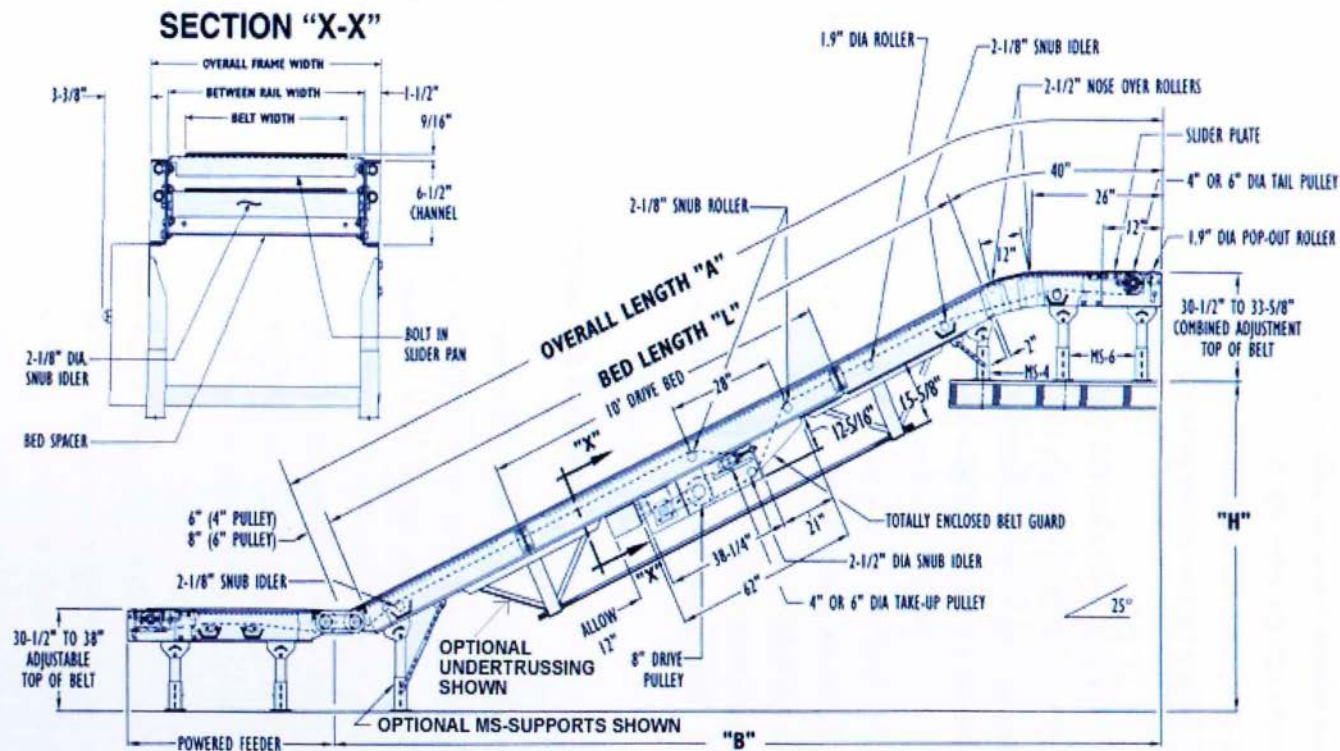
4.5 Μελέτη Περίπτωσης – Ταινιόδρομος Μεταφοράς Χύμα Υλικού

Καθώς έχουν αναπτυχθεί θεωρητικά οι τρεις μεθοδολογίες και έχουν κατασκευαστεί φύλλα εργασιών στο προηγούμενο κεφάλαιο για κάθε μια από τις μεθόδους, στο παρόν θα εφαρμοστούν σε ένα μοντέλο ταινιόδρομου μεταφοράς χύμα υλικού.

Ο ταινιόδρομος χρησιμοποιείται για τη μεταφορά προϊόντων και είναι κατάλληλος για βιομηχανικούς χώρους. Οι λειτουργίες που εκτελεί ένας ταινιόδρομος πρέπει να χαρακτηρίζονται από :

- τη γρήγορη διακίνηση
- την ασφαλή διακίνηση
- την επιτυχή διακίνηση

Όλες οι λειτουργίες εκτελούνται με ελάχιστο κόστος, ώστε το κέντρο διανομής να θεωρείται επιτυχημένο.



Εικόνα 23 Τεχνικό Σχέδιο ταινιόδρομου μεταφοράς χύμα υλικού (Δ. Βασιβαλής, Δ. Γενικός Εξοπλισμός - Ταινιόδρομοι Μεταφοράς Προϊόντων.

Σκοπός των συστημάτων μεταφοράς είναι η μεταφορά διαφόρων ειδών υλικού σε μικρές ή μεγάλες αποστάσεις. Το μέγεθος και το είδος του υλικού ποικίλει και μπορεί να είναι ομογενές ή ετερογενές. Το μήκος μεταφοράς έχει εύρος από λίγα μέτρα έως και αρκετά χιλιόμετρα. Σήμερα απαντώνται ταινιόδρομος μήκους έως 8 km ενιαίοι ενώ στην Αφρική έχει κατασκευαστεί ταινιόδρομος συνολικού μήκους 100 km ο οποίος απαρτίζεται από μεμονωμένα τμήματα. (Α. Ρωμαίος, 2007)

Οι ταινιόδρομοι κατασκευάζονται πλέον έτσι ώστε να ανταπεξέρχονται στη μεταφορά υλικού με μεγάλες υψομετρικές διαφορές μέχρι και σχέση μήκους - ύψους έως και 2:1 για τους μικρού μήκους και 10:1 για τους μεγάλου μήκους ταινιόδρομους. Η τεχνολογία των τελευταίων ετών επιτρέπει μεταφορά μεγάλων φορτίων που μπορεί να φτάσει και τα 40.000 ή και 50.000 m³/h και ταχύτητες που ξεπερνούν τα 5m/s.

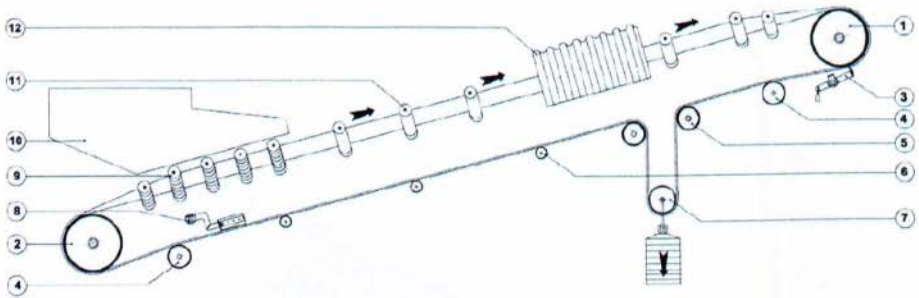
Όσον αφορά το οικονομικό όφελος που προκύπτει σε σχέση με τους παραδοσιακούς τρόπους μεταφοράς, σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να ξεπεράσει το 1:2,2 δηλαδή κέρδος > του 120%. Στο ανώτερο ποσοστό έχει συνυπολογιστεί η φθορά των κινούμενων μερών (ραούλων - ιμάντα - εδράνων - τυμπάνων ταινιόδρομου) στα προδιαγραφόμενα χρονικά διαστήματα που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία. (Α. Ρωμαίος, 2007)

4.5.1 Χαρακτηριστικά Προϊόντος

Κύριο χαρακτηριστικό των μεταφορικών ταινιών αποτελεί η συνεχής ροή του υλικού, που έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης. Παραδείγματος χάρη σε συγκρότημα σπαστηροτριβείου, παρατηρούμε ένα πλήθος ταινιόδρομων που συνδυάζονται μεταξύ τους και οδηγούν το υλικό μέσα από διάφορες διαδρομές, σε πολλαπλές κατεργασίες. Ανάλογα με τις ανάγκες στην παροχή υλικού, τις υψομετρικές διαφορές, τις αποστάσεις, την σύσταση και τους κόκκους του υλικού, το μέγεθος των μεγαλύτερων τεμαχίων του υλικού, την ύπαρξη υγρασίας κ.α., επιλέγονται τα ανάλογα χαρακτηριστικά του ταινιόδρομου και η μορφή του. (Α. Ρωμαίος, 2007)

Σημαντικός παράγοντας στην τελική μορφή του συστήματος ταινιόδρομου είναι το ανάγλυφο του εδάφους στην περιοχή των εγκαταστάσεων. Η ύπαρξη ομαλού κατηφορικού πρανούς, συντελεί σε ταινιόδρομους με μικρότερες κλίσεις και μήκη. Τα απαιτούμενα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μεταφορικών ταινιών μαζί με τον σωστό

σχεδιασμό αυτών, καθορίζουν την απαιτούμενη επιφάνεια μιας μονάδας σπαστηροτριβείου, την εργονομία και την οικονομικότητα της.



Εικόνα 24 1. Τύμπανο Κίνησης, 2. Τύμπανο Επιστροφής, 3. Ξύστρα Καθαρισμού Ι, 4. Τύμπανο Πιέσεως, 5. Τύμπανο Αλλαγής Κατεύθυνσης, 6. Ράουλο Επιστροφής, 7. Τύμπανο Τανύσεως, 8. Ξύστρα Καθαρισμού V, 9. Ράουλα Φόρτωσης, 10. Χοάνη Φόρτωσης, 11. Ράουλα Κύλισης, 12. Καλύμματα (Ρωμιάος, Α. Μελέτη Συστήματος Αυτόματης Διαλογής Δεμάτων για Εφαρμογή Express Logistics Center . Αθήνα : Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2007)

4.5.2 Εξαρτήματα

Τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν έναν ταινιοδρόμο

- Ελαστικός Ιμάντας
- Τύμπανο κίνησης
- Τύμπανο επιστροφής
- Ράουλα (Επιστροφής, Φόρτωσης, Κύλισης)
- Βοηθητικά τύμπανα (Τύμπανο Πιέσεως, Τύμπανο Αλλαγής Κατεύθυνσης, Τύμπανο Τανύσεως)
- Χοάνη Φόρτωσης
- Ηλεκτροκινητήρας & μειωτήρας μετάδοσης κίνησης

4.5.3 Στόχος – Καλυπτόμενη Ανάγκη

Οι μεταφορικές ταινίες αναπτύχθηκαν και καθιερώθηκαν με την ανάπτυξη των λιγνιτωρυχείων, με την παρουσία της ανάγκης εκμετάλλευσης πολύ μεγάλων ποσοτήτων. Η ασφαλής μεταφορά χύμα προϊόντων. Ο τ.μ.χ.υ. λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα. (11)

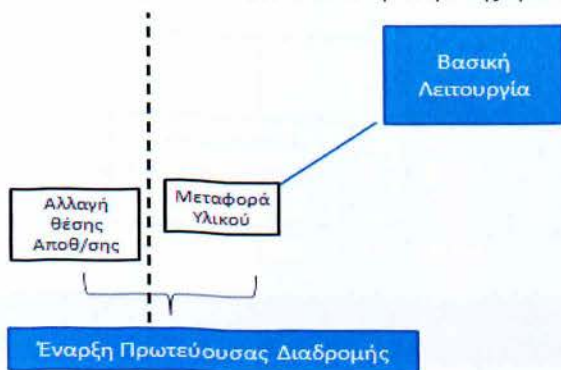


Εικόνα 25 Σημαντικός παράγοντας στην τελική μορφή του συστήματος μεταφορικών ταινιών είναι το ανάγλυφο του εδάφους στην περιοχή των εγκαταστάσεων (Δ. Βασιβαλής, Δ. Γενικός Εξοπλισμός - Ταινιόδρομοι Μεταφοράς Προϊόντων. www.texnika-inox.gr)

4.5.4 Εφαρμογή Μεθόδου FAST

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1.1 επιχειρείται η ανάλυση ενός πρότυπου ταινιόδρομου μεταφοράς με την μέθοδο FAST. Σε κάθε στάδιο της μεθοδολογίας, παρουσιάζονται τα απαραίτητα στοιχεία ώστε να γίνει κατανοητή η ανάπτυξη της. Στο τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας προκύπτει το συγκεντρωτικό διάγραμμα FAST. Σε πρώτο στάδιο θα πρέπει να δημιουργηθεί το πλαίσιο μέσα στο οποίο θα αναλυθεί το πρόβλημα. Μέσα στα όρια του πλαισίου θα πρέπει να απαντώνται ερωτήματα όπως ποια ανάγκη εξυπηρετεί, και ποια είναι η σειρά εργασιών.

Το διάγραμμα, ξεκινάει με την ερώτηση «Ποια είναι η κύρια λειτουργία του συστήματος;». Η κύρια λειτουργία τοποθετείται δεξιά της αριστερής γραμμής. Στη συνέχεια θέτουμε το ερώτημα “Για ποιό λόγο εκτελείται αυτή η λειτουργία;”. και η απάντηση αποτελεί την λειτουργία που τοποθετείται αριστερά της αριστερής γραμμής.



Εικόνα 26 Η κύρια λειτουργία τοποθετείται δεξιά της αριστερής γραμμής

Η λογική που ακολουθήθηκε στο προσδιορισμό της κύριας λειτουργίας, επαναλαμβάνεται για το σύνολο των υπολειτουργιών της αλυσίδας. Συνεχώς θέτονται τα ερωτήματα, για ποιο λόγο να γίνει αυτή η ενέργεια, ώστε να δικαιολογηθεί η προηγούμενη εργασία, και πώς για να μπορέσει να συνεχιστεί η αλυσίδα μέχρι την τελική ενέργεια.

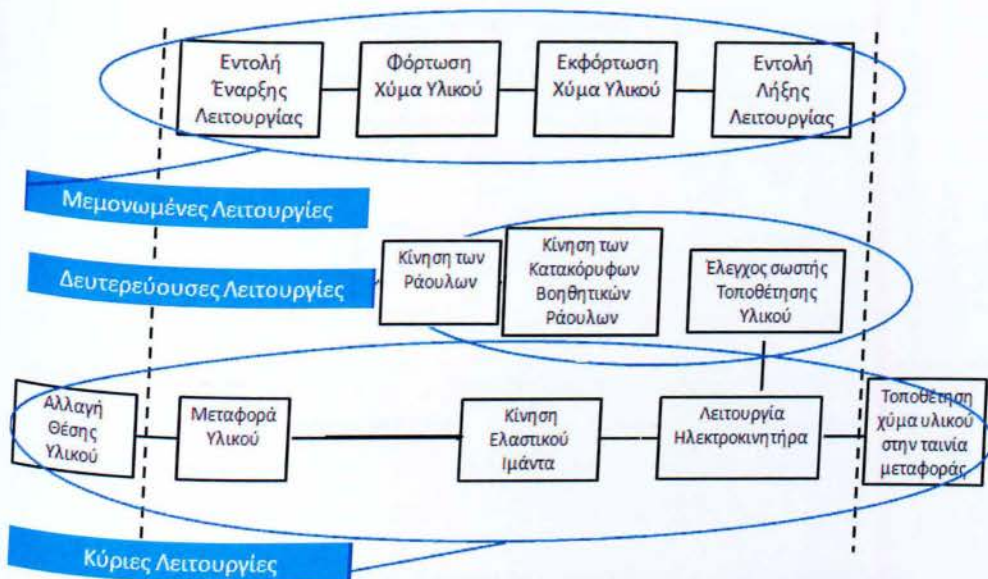


Εικόνα 27 Συνεχώς θέτονται τα ερωτήματα πως και για ποιο λόγο, ώστε να ολοκληρωθεί η αλυσίδα

Η πρωτεύουσα διαδρομή θα τερματιστεί με μία λειτουργία έξω από την δεξιά γραμμή. Αυτή η λειτουργία είναι εξωτερική του προϊόντος, δεν εκτελείται από αυτό αλλά είναι απαραίτητο για την λειτουργία του

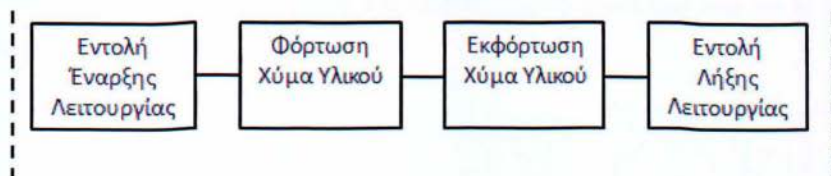


Εικόνα 28 Το τελικό στάδιο της πρωτεύουσας διαδρομής



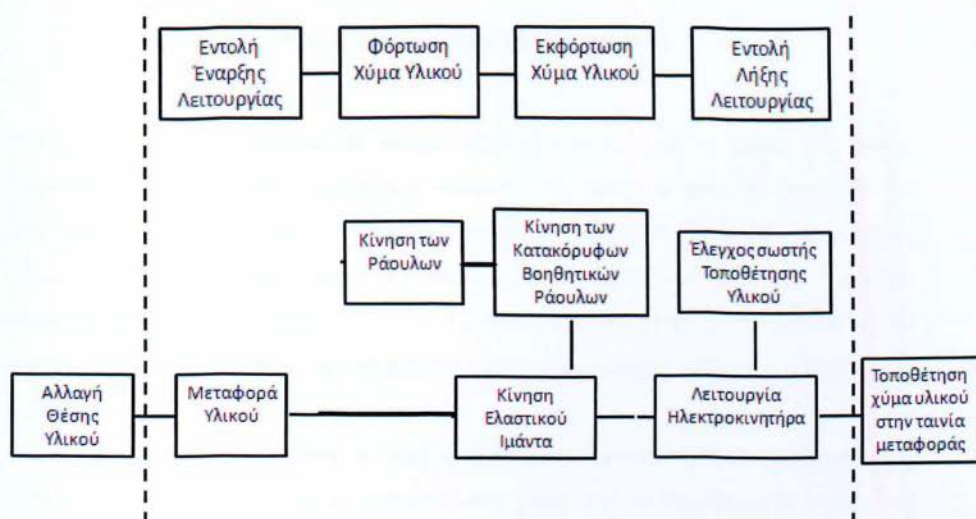
Εικόνα 29 Σχέδιο FAST για τον ταινιόδromo μεταφοράς χύμα υλικού

Στις μεμονωμένες λειτουργίες χρήσης του προϊόντος, υπάγονται Η εντολή έναρξης και λήξης της μεταφοράς, καθώς και η φόρτωση και η εκφόρτωση του ταινιόδρομου με υλικό. Όλες αυτές οι εργασίες εφαρμόζονται μόνο μια φορά κατά τη λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 30 Όλες αυτές οι εργασίες εφαρμόζονται μόνο μια φορά κατά τη λειτουργία του συστήματος

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν ως άνω προκύπτει το τελικό διάγραμμα για το ταινιόδρομο μεταφοράς χύμα υλικού σύμφωνα με την μέθοδο FAST



Εικόνα 31 Το τελικό διάγραμμα στο οποίο διακρίνονται οι πρωτεύουσες οι δευτερεύουσες και οι μεμονωμένες λειτουργίες του συστήματος

4.5.5 Εφαρμογή Μεθόδου SOP

Με την εφαρμογή της μεθόδου Αφαίρεσης και Λειτουργίας επιχειρείται η μελέτη της λειτουργίας των εξαρτημάτων και η ανάδειξη τυχόν άχρηστων εξαρτημάτων.

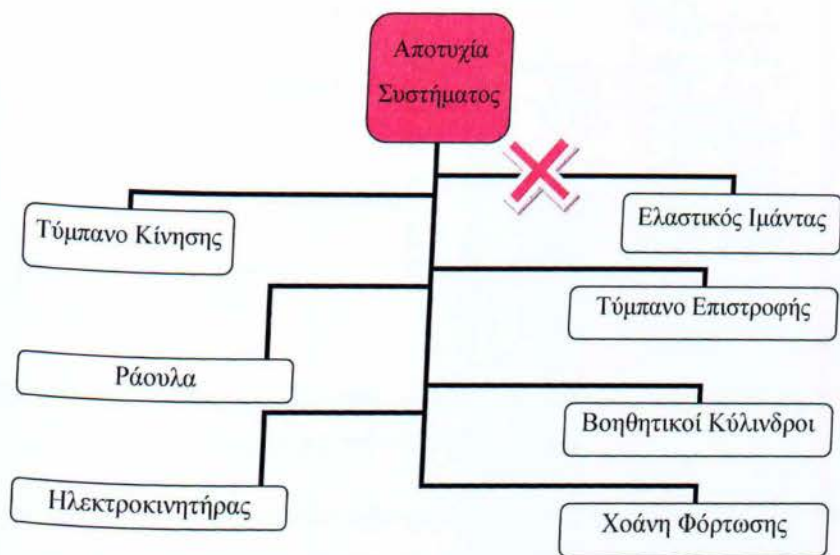
Αρχικά θα αφαιρεθεί ένα εξάρτημα από την όλη συναρμολόγηση. Αυτό μπορεί να γίνει με οποιαδήποτε σειρά. Η μεθοδολογία θα επαναληφθεί έξι φορές, όσα είναι και τα κύρια εξαρτήματα του τ.μ.χ.υ..

- Ελαστικός Ιμάντας
- Τύμπανο κίνησης
- Τύμπανο επιστροφής
- Ράουλα (Επιστροφής, Φόρτωσης, Κύλισης)
- Βοηθητικοί κύλινδροι (Τύμπανο Πιέσεως, Τύμπανο Αλλαγής Κατεύθυνσης, Τύμπανο Τανύσεως)
- Χοάνη Φόρτωσης
- Ηλεκτροκινητήρας & μειωτήρας μετάδοσης κίνησης

Μέσα από αυτή την διαδικασία στόχος είναι ο έλεγχος για το αν οι απαιτήσεις πληρούνται και το προϊόν λειτουργεί κανονικά. Σε πρώτο στάδιο θα θεωρηθεί ότι αφαιρείται ο ελαστικός ιμάντας. Θέτεται, λοιπόν, σε λειτουργία το προϊόν. Σε αυτό το βήμα γίνεται έλεγχος εάν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του καταναλωτή. Για κάθε απαίτηση (δομική, εργονομική, κινηματική κτλ.) το προϊόν πρέπει να δοκιμαστεί για να επαληθευτεί η επίδραση της αφαίρεσης του εξαρτήματος από το σύνολο του συστήματος.

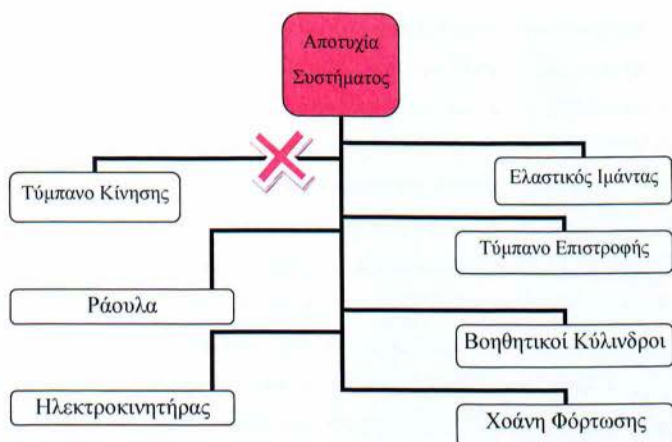
Ο ελαστικός ιμάντας είναι μέσο μεταφοράς υλικού κατά μήκος του Τ/Δ. Απαντώνται σε διάφορες μορφές ανάλογα με το μεταφερόμενο υλικό και τη θερμοκρασία αυτού, την κλίση του Τ/Δ, την ταχύτητα κύλισης κ.α. έτσι, βρίσκουμε ιμάντες πυρίμαχους, chevron, αντλιοσθητικούς, αντιδιαβρωτικούς κατασκευασμένους από φυσικό καουτσούκ, με χημικά πρόσθετα ή πολυεστερικούς με διάφορων ειδών λινά, από πολυεστερικά με υφάδι και στημόνι μέχρι και συρματοσχοίνα για μεγάλες αποστάσεις και φορτία. Ως

αποτέλεσμα της αφαίρεσης του ελαστικού ιμάντα προκύπτει πως είναι αδύνατη η λειτουργία του συστήματος, διότι δεν υπάρχει επαρκής και ασφαλής επιφάνεια πάνω στην οποία θα αποτεθεί το υλικό. (10)



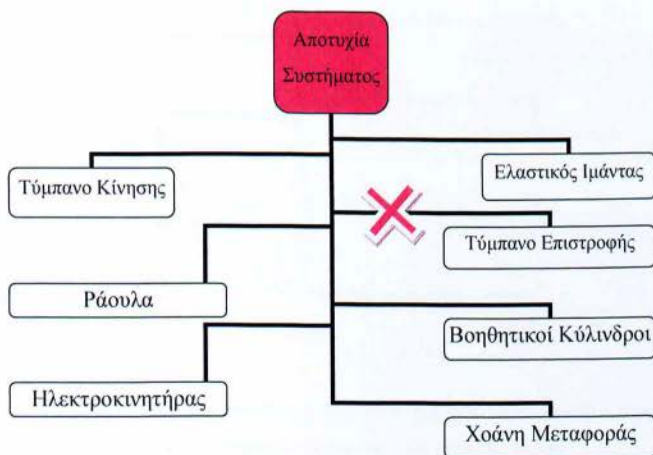
Εικόνα 32 Περίπτωση απομάκρυνσης του ελαστικού ιμάντα από τον τ.μ.χ.υ., έχει ως αποτέλεσμα την αποτυχία ορθής λειτουργίας στον συστήματος

Η διαδικασία θα επαναληφθεί πέντε φορές ακόμα ώστε να διαπιστωθούν οι μεταβολές που δημιουργούνται στο σύστημα σε κάθε αφαίρεση κάποιου εξαρτήματος. Στο σημεία φόρτωσης του υλικού βρίσκεται το τύμπανο κίνησης. Βρίσκεται στο ανώτατο σημείο του ταινιόδρομου. Στο σημείο πτώσης του υλικού η υποστήριξη του ιμάντα γίνεται με ράουλα φόρτωσης (επενδυσμένα με ελαστικούς δακτυλίους για απόσβεση κραδασμών) ή με γιρλάντες. Στη περίπτωση απομάκρυνσης του εξαρτήματος, αμφισβητείται η ομαλή λειτουργία του ταινιόδρομου, ως εκ τούτου επέρχεται η αποτυχία λειτουργίας του συστήματος.



Εικόνα 33 Στη περίπτωση απομάκρυνσης του εξαρτήματος, ο ελαστικός ιμάντας δεν θα κινείται προς την κατεύθυνση μεταφοράς

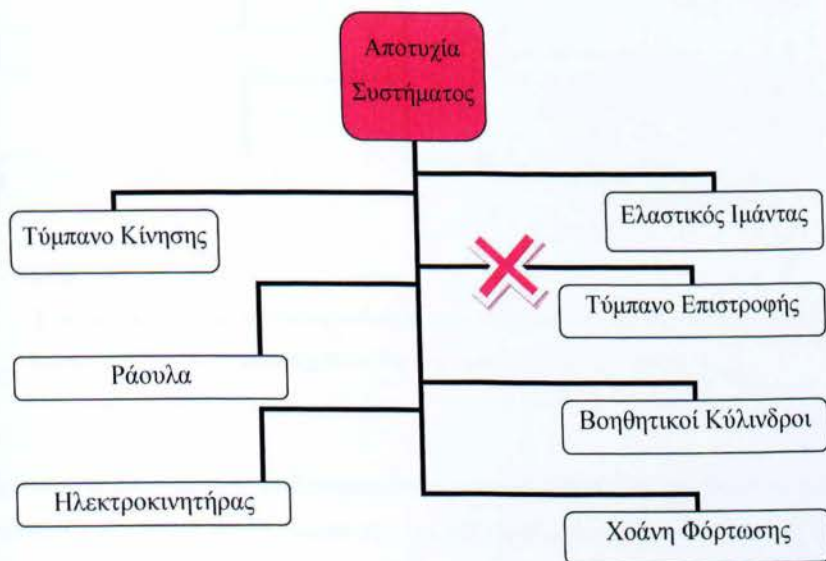
Το τύμπανο επιστροφής αποτελεί εξάρτημα της μονάδας επιστροφής. Η μονάδα αποτελείται από το τύμπανο επιστροφής με την απαραίτητη έδραση του. Σκοπός της μονάδας είναι η επιστροφή του άνω κλάδου του ιμάντα με ομαλό τρόπο, χωρίς εκφυγή του ιμάντα.



Εικόνα 34 Σκοπός της μονάδας είναι η επιστροφή του άνω κλάδου του ιμάντα με ομαλό τρόπο, χωρίς εκφυγή του ιμάντα

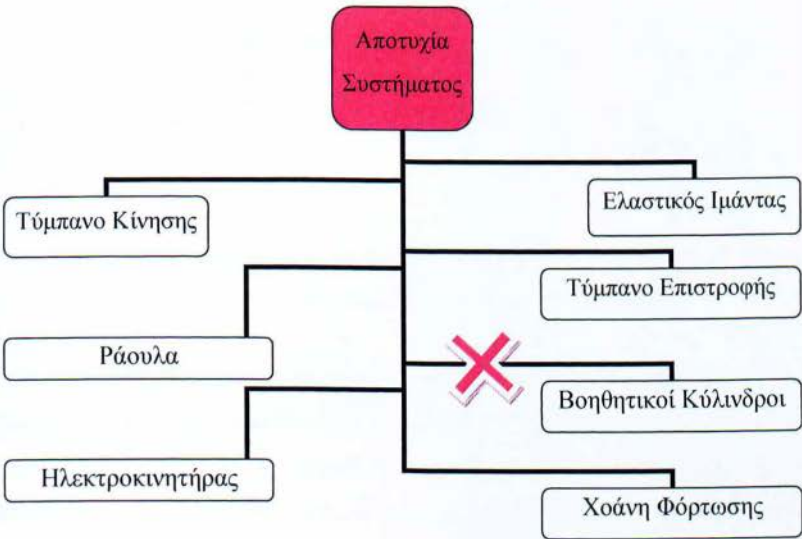
Η υποστήριξη του άνω και του κάτω κλάδου επιτυγχάνεται με τα ράουλα κύλισης για τον άνω κλάδο και από ράουλα επιστροφής για τον κάτω κλάδο. Ειδικά στα σημεία φόρτωσης επιτυγχάνεται με τα ανάλογα ράουλα φόρτωσης. Τα ράουλα του άνω κλάδου εδράζονται σε κατάλληλες βάσεις οι οποίες καλούνται σταθμοί ραούλων και συνήθως απαντώνται σε τρεις μορφές διάταξης, (Μονομερής, Διμερής, Τριμερής).

Σε ιδιαίτερες συνθήκες οι σταθμοί ραούλων μπορούν να αντικατασταθούν από γιρλάντες ραούλων. Ανάλογοι με τους σταθμούς ραούλων του άνω κλάδου είναι και οι σταθμοί ραούλων του κάτω κλάδου. Σε αυτήν την περίπτωση συνθηθέστερα έχουμε μονομερή διάταξη ραούλων επιστροφής και σε ιδιαίτερες περιπτώσεις (μεγάλου μήκους ταινιόδρομοι και μεγάλα φορτία) σε διμερή διάταξη ή και γιρλάντες ραούλων. Τα ράουλα του άνω κλάδου ποικίλουν σε διατάξεις και τεχνικά χαρακτηριστικά και εξαρτώνται κυρίως από τις απαιτήσεις λειτουργίας του ταινιόδρομου αλλά και από δευτερεύοντες παράγοντες όπως οι συνθήκες περιβάλλοντος χώρου, το μεταφερόμενο υλικό, η ταχύτητα κύλισης του ταινιόδρομου.



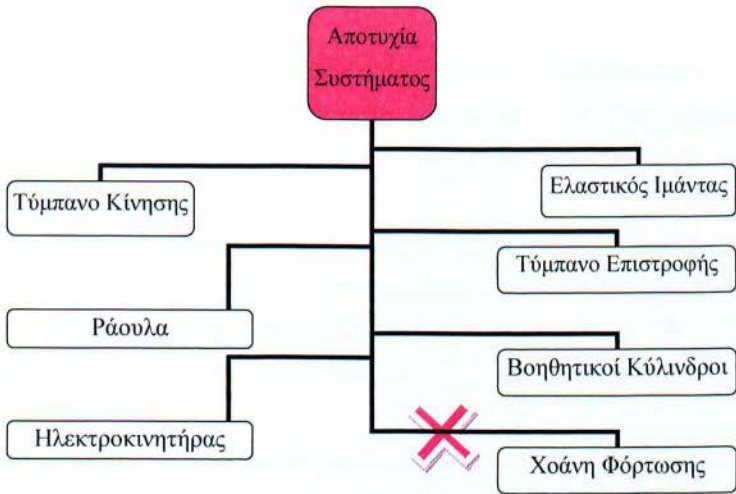
Εικόνα 35 Η υποστήριξη του άνω και του κάτω κλάδου επιτυγχάνεται με τα ράουλα κύλισης για τον άνω κλάδο και από ράουλα επιστροφής για τον κάτω κλάδο

Στους βοηθητικούς κυλίνδρους εντάσσονται το Τύμπανο Πιέσεως, το Τύμπανο Αλλαγής Κατεύθυνσης και το Τύμπανο Τανύσεως. Η μονάδα τάνυσης για παράδειγμα αποτελείται από το τύμπανο τάνυσης και από τύμπανα ποδός και είναι τύπου «U» Το τύμπανο τάνυσης εδράζεται σε κατάλληλη διάταξη με ανάρτηση βάρους και τη συνεχή τάνυση του ιμάντα σε όλες τις συνθήκες φόρτωσης του ταινιόδρομου. Σε μικρού μήκους ταινιόδρομοι συχνά η μονάδα επιστροφής και τάνυσης είναι μια ενιαία μονάδα και η τάνυση σε αυτή την περίπτωση γίνεται με ρυθμιστικούς κοχλίες. (10)



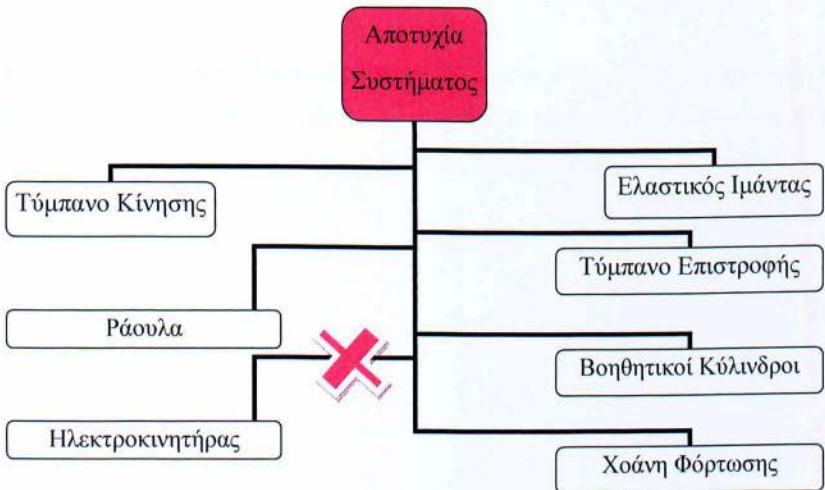
Εικόνα 36 Στους βοηθητικούς κυλίνδρους εντάσσονται το Τύμπανο Πιέσεως, το Τύμπανο Αλλαγής Κατεύθυνσης και το Τύμπανο Τανύσεως

Στο σημείο φόρτωσης υλικού τοποθετείται η χοάνη φόρτωσης κατάλληλου σχεδιασμού με σκοπό τη μεταφόρτωση υλικού στο σημείο εισόδου στον ταινιόδρομο και την ομαλή μετάβαση αυτού στον ιμάντα κίνησης. Η χοάνη είναι μεταλλικός ολισθητήρας, ο οποίος αποσκοπεί στην ασφαλή καθοδήγηση του υλικού στον ταινιόδρομο αποτρέποντας την διασπορά του στη γύρω περιοχή.



Εικόνα 37 Η χοάνη είναι μεταλλικός ολισθητήρας, ο οποίος αποσκοπεί στην ασφαλή καθοδήγηση του υλικού στον ταινιόδρομο

Ο ηλεκτροκινητήρας εντάσσεται στην μονάδα κίνησης του ταινιόδρομου. Παραδοσιακά η μονάδα κίνησης αποτελείται από το τύμπανο κίνησης και τους απαραίτητους Η/Μ (ηλεκτρομειωτήρες) για τη δημιουργία κίνησης. Ως ηλεκτροκινητήρας ορίζεται η διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική.



Εικόνα 38 Ο ηλεκτροκινητήρας εντάσσεται στην μονάδα κίνησης του ταινιόδρομου

4.5.6 Εφαρμογή Μεθόδου FSMP

Η μέθοδος Function Structure Modeling Process εστιάζει στην κατάσταση του προϊόντος πριν και μετά τη λειτουργία του. Συγκεκριμένα αναλύει τρεις κύριες παραμέτρους, που καθορίζουν την κατάσταση του αγαθού. Αυτές είναι η ενέργεια, το υλικό, και η πληροφορία.

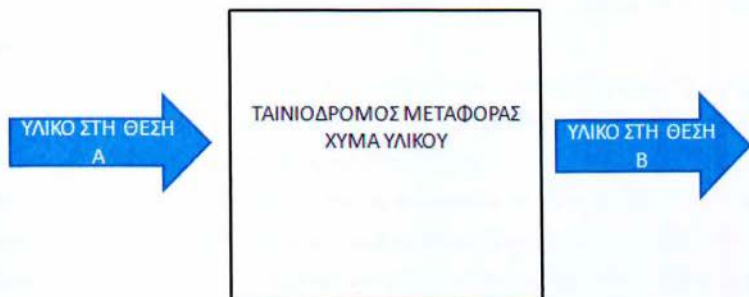
Πιο αναλυτικά, η παράμετρος ενέργεια, νοείται ως την πηγή της παράσχουσας ενέργειας ώστε να εκτελεστεί η εντολή. Η παράμετρος υλικό, ορίζεται ως το επιμέρους εξάρτημα, που θέτεται σε λειτουργία, ώστε να εκτελεστεί κάποια ενέργεια και τέλος η παράμετρος πληροφορία αποτελεί την εντολή που συνδυάζει την ενέργεια και το υλικό για να παραχθεί αποτέλεσμα.

Αρχικά η μέθοδος προσεγγίζει το προϊόν διασπώντας το σε επί μέρους λειτουργίες και στάδια. Μια πρώτη προσέγγιση αποτελεί η ανάλυση σε συνθετικά μέρη τη βασική λειτουργία του προϊόντος, δηλαδή σε υπολειτουργίες.



Εικόνα 39 Ανάλυση σε συνθετικά μέρη της βασικής λειτουργίας του προϊόντος

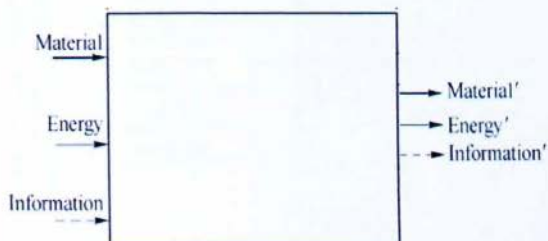
Το πλαίσιο αναπαριστά τη βασική λειτουργία του συστήματος. Σε αυτό αναπαρίστανται όλες οι είσοδοι και έξοδοι που μπορεί να προσδώσει ο μελετητής του συστήματος σε αυτό, με την μορφή εισόδων και εξόδων σε ένα ορθογώνιο πλαίσιο



Εικόνα 40 Η λειτουργία του black box

Οι εισροές και οι εκροές στο μαύρο κουτί είναι τριών ειδών,

- μάζα (υλικά, ρευστά, αέρια κτλ)
- ενέργεια (μηχανική, ηλεκτρική, θερμική, δυνάμεις κτλ)
- πληροφορία (σήματα ελέγχου κ.α.)

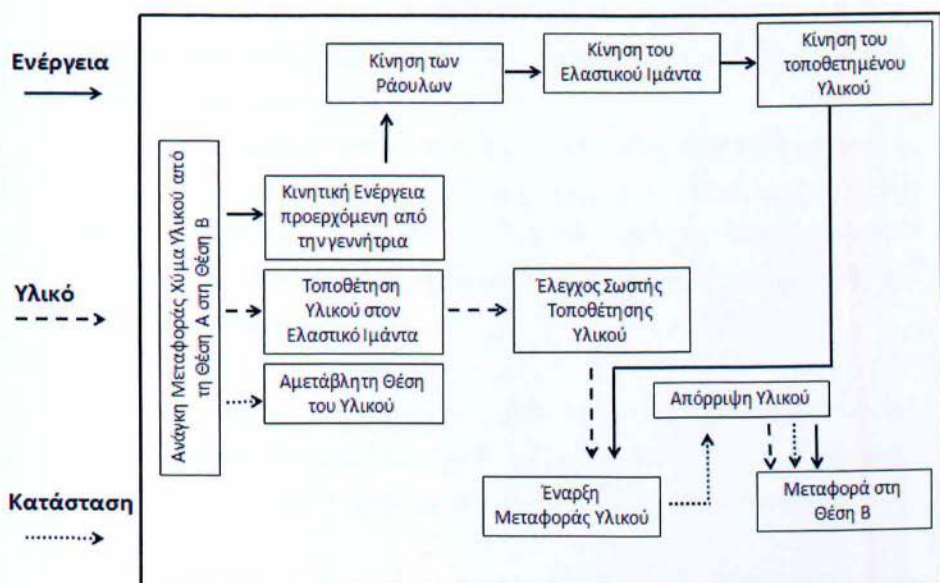


Εικόνα 41 Οι εισροές και οι εκροές στο μαύρο κουτί είναι τριών ειδών

Οι υπολειτουργίες διασυνδέονται στη συνέχεια σε ένα γράφημα έτσι ώστε να σχηματίσουν την όλη λειτουργική δομή.

Μέσω του δικτυακής δομής σχήματος γίνεται σαφής η σχέση αναμεταξύ ενός συνόλου λειτουργιών, τις οποίες το προϊόν πρέπει να εκτελεί έτσι ώστε να επιτύχει τη βασική του λειτουργία με όρους ενέργειας, ύλης και πληροφορίας.

Έχοντας διατυπώσει τις ανάγκες των καταναλωτών ή και παρατηρώντας τους να μεταχειρίζονται το προϊόν, μπορούμε τώρα να αναπτύξουμε μια πρωταρχική λειτουργική δομή που να ικανοποιεί το σχεδιαστικό μας πρόβλημα. Παρακάτω παρουσιάζονται τέσσερα βασικά βήματα για να μπορέσουμε να μεταφράσουμε συστηματικά τις απαιτήσεις των καταναλωτών από το προϊόν, σε ένα ισοδύναμο γράφημα λειτουργικής δομής



Εικόνα 42 Τελικό διάγραμμα της μεθόδου Function Structure Modeling Process

Όσον αφορά την μέθοδο της Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης (ΟΠΣ) στόχος της αποτελεί η αύξηση της διαθεσιμότητας του υπάρχοντος εξοπλισμού σε μία δεδομένη κατάσταση, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για περαιτέρω επένδυση κεφαλαίου. Έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα πρόγραμμα που λειτουργεί. Μπορεί να προσαρμοστεί στην εργασία όχι μόνο στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, αλλά στην κατασκευή, στη συντήρηση οικοδομημάτων, στη μεταφορά, και σε ποικίλες άλλες καταστάσεις. Οι υπάλληλοι πρέπει να εκπαιδευτούν και να πειστούν ότι η ΟΠΣ δεν είναι μόνο ένα ακόμη «πρόγραμμα του μήνα» αλλά ένα πρόγραμμα το οποίο χρειάζεται αρκετό χρονικό διάστημα για να τεθεί πλήρως σε εφαρμογή και να γίνουν αντιληπτά τα πρώτα αποτελέσματα. Η διαχείριση είναι συνολικά δεσμευμένη στο πρόγραμμα σε όλο το χρονικό πλαίσιο που είναι απαραίτητο για την πλήρη εφαρμογή.

Καθοριστικό ρόλο στην επιτυχία του παίζει η επένδυση σε ανθρωπίνους πόρους η οποία στη συνέχεια οδηγεί σε καλύτερη χρήση του υλικού, σε υψηλότερη ποιότητα προϊόντος και σε μειωμένες δαπάνες εργασίας. Σύμφωνα με τον Takahashi μερικά συγκεκριμένα κίνητρα για την υποστήριξη της εφαρμογής της ΟΠΣ είναι κυρίως τα εξής:

- Βελτιωμένη παραγωγικότητα μέσω ενός ιδιαίτερα παρακινημένου εργατικού δυναμικού. Στην ΟΠΣ οι χειριστές αναπτύσσουν τις δεξιότητές τους και μειώνουν έτσι τη μονότονη και επαναλαμβανόμενη εργασία
- Η κατανόηση και η αποδοχή της προσέγγισης του κύκλου ζωής για τη βελτίωση της γενικής απόδοσης του εξοπλισμού. Οι τεχνικές πτυχές της ΟΠΣ θέτουν μέτρα για την αξιολόγηση της απόδοσης του εξοπλισμού. Δίνει επίσης έμφαση στον σχεδιασμό ιδιαίτερα αξιόπιστου και εύκολου στη συντήρηση υλικού, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ασφάλεια και η πρακτικότητα. Η εξοικείωση των χειριστών με τον

εξοπλισμό μαζί με την προώθηση μιας νοοτροπίας προστασίας του εξοπλισμού εξασφαλίζουν καλή και γρήγορη ανατροφοδότηση πληροφοριών.

- Οι εθελοντικές, μικρές δραστηριότητες ομάδας, γνωστές και ως ομάδες μηδενικών ατελειών, αξιοποιούν πλήρως τις δεξιότητες του καθενός. Αναφορές επιστημόνων που ασχολήθηκαν με την εφαρμογή της ΟΠΣ παρατίθενται στην ιστοσελίδα του Ινστιτούτου Marsall το οποίο παρουσιάζει έντονη δραστηριότητα στον εμπορικό χώρο και ιδιαίτερα στον τομέα της εφαρμογής μεθόδων βελτίωσης της αποδοτικότητας μίας επιχείρησης, όπως η ΟΠΣ. Μέσα λοιπόν από την αντιμετώπιση πολλών διαφορετικών περιπτώσεων οι ειδικοί επιστήμονες καταφέρνουν να συγκεντρώσουν κάποιες μαρτυρίες ανθρώπων που ασχολήθηκαν με την εφαρμογή της TPM οι οποίες καταγράφονται στη βιβλιογραφία αλλά και στην ιστοσελίδα του Ινστιτούτου.

Σχετικά με την ΔΟΠ καθοριστικός παράγοντας στην εφαρμογή και επιτυχία της πολιτικής ποιότητας αποτελεί η εκπαίδευση και η κατάρτιση των εργαζομένων και των μάνατζερ όλων των ιεραρχικών βαθμίδων για την εδραίωση της κουλτούρας ποιότητας στις καθημερινές δράσεις και λειτουργίες της εταιρείας. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η ύπαρξη εξειδικευμένου προσωπικού αλλά και η προσέλκυση του κατάλληλου ανθρώπινου δυναμικού για την εξυπηρέτηση μιας πολιτικής ποιότητας εντός της εταιρείας.

Όπως προκύπτει από την παρούσα εργασία, το καινούριο που εισάγεται με την εφαρμογή της διασφάλισης ποιότητας είναι η διαρκής, οργανωμένη και κωδικοποιημένη προσπάθεια για την επίτευξη του τελικού σκοπού, με συνεχείς ελέγχους, και διορθωτικές ενέργειες, διακρίβωση οργάνων μέτρησης, διαρκή εκπαίδευση προσωπικού κλπ. Οι λόγοι που οδηγούν στην εφαρμογή της διασφάλισης ποιότητας σε όλα τα επίπεδα ολοκλήρωσης ενός τεχνικού έργου είναι οι εξής:

- Η σωστή διαχείριση της ποιότητας εξασφαλίζει την έγκαιρη και

συστηματική λήψη των αναγκαίων μέτρων για να αποφευχθούν τα σφάλματα.

- Παράλληλα, εξοικονομείται χρόνος και αποφεύγεται η σπατάλη υλικών, δηλαδή περιορίζεται το κόστος.
- Παραδίδεται ένα προϊόν με την απαιτούμενη ποιότητα, τεκμηριωμένα.
- Εν τέλει, σε κάθε περίπτωση εξασφαλίζεται η απαίτηση του ΚτΕ να έχει στη διάθεσή του τα στοιχεία που τεκμηριώνουν την ικανότητα του Αναδόχου να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την ποιότητα, στα πλαίσια των συμβατικών του υποχρεώσεων.

Τελικά συμπεραίνουμε ότι στο Πρόγραμμα Ποιότητας Έργου, δεν αναφερόμαστε στον ποιοτικό έλεγχο, αλλά στον κωδικοποιημένο έλεγχο ποιότητας. Δηλαδή, δεν μας αφορούν τα αποτελέσματα και μόνον των ελέγχων. Μας ενδιαφέρει κυρίως να υπάρχει διαρκής και οργανωμένη διαδικασία ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι έχουν προβλεφθεί διεργασίες στο έργο που πρόκειται να κατασκευαστεί, ώστε να ελέγχεται συνεχώς η ποιότητα, με απώτερο σκοπό το τελικό αποτέλεσμα να πληροί τις απαιτήσεις των Κανονισμών, Προδιαγραφών κλπ. Ένα επιτυχημένο Πρόγραμμα Ποιότητας πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε να προλαμβάνει παρά να θεραπεύει.

Όσον αφορά τις 3 μεθόδους ανάλυσης των προϊόντων έχουν να αναφερθούν τα εξής. Σχετικά με την μέθοδο Function Analysis System Technique κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι πως κατά την εφαρμογή της δεν χρειάζεται να γίνει αναλυτική καταγραφή των εξαρτημάτων που συστήνουν το προϊόν. Επιπρόσθετα, η αλυσιδωτή μορφή του διαγράμματος, βοηθάει, ώστε να γίνει απολύτως κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του προϊόντος. Στη μέθοδο παρατηρείται το φαινόμενο της αντίστροφης μηχανικής καθώς η αλυσίδα ξεκινά

με την τελική ανάγκη που καλύπτει το προϊόν και σταδιακά ολοκληρώνει με την πρωτεύουσα πηγή παροχής ενέργειας.

Η διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου δεν είναι χρονοβόρα διαδικασία, κυρίως διότι δεν χρειάζεται να επαναληφθεί πολλές φορές κάποια μεθοδολογία. Η δυσκολία της μεθόδου έγκειται στην αποσαφήνιση των επιμέρους εργασιών και της σύνδεσης τους για την δημιουργία της αλυσίδας εργασιών. Τέλος η μέθοδος Function Analysis System Technique, αποτελεί επί της ουσίας το εγχειρίδιο λειτουργίας του προϊόντος, μέσα από το οποίο ο χρήστης μπορεί να κατανοήσει τον τρόπο λειτουργίας του προϊόντος. Αφενός η μη αναφορά όλων των εξαρτημάτων του προϊόντος αποτελεί βασικό μειονέκτημα για την χρήση της μεθόδου ως εγχειρίδιο λειτουργίας, αφετέρου η ατέλεια αυτή της μεθόδου δύναται να αντιμετωπιστεί, αν εφαρμοστούν συνδυαστικά τα αποτελέσματα της μεθόδου FAST και SOP.

Σχετικά με την μέθοδο Subtract and Operate τα συμπεράσματα που προέκυψαν την κατατάσσουν σε μια σύνθετη μεθοδολογία, η οποία δεν επικεντρώνεται στην σχέση μεταξύ των υπολειτουργιών αλλά στην σημασία των επί μέρους λειτουργιών του κάθε εξαρτήματος του προϊόντος. Ουσιαστικά η τεχνική της SOP λειτουργεί σαν ένας μετά – έλεγχος ώστε να διαπιστωθούν οι όποιες πιθανές δυσλειτουργίες του συστήματος.

Σαν τελικό συμπέρασμα προκύπτει πως οι τρεις μέθοδοι, αλληλοϋποστηρίζονται, στα σημεία που υστερεί η μια, υπερτερεί η άλλη. Μια συνδυαστική εφαρμογή, λοιπόν, των τριών μεθόδων θα έδινε μια πλήρης εικόνα της κατάστασης του προϊόντος. Έτσι με τα δεδομένα που έχουν συλλεχτεί από τα δύο παραδείγματα προκύπτει πως ο συνδυασμός των τριών μεθόδων δίνει τις εξής πληροφορίες

- Γνώση της διαδικασίας λειτουργίας του υλικού (για τον καταναλωτή)
- Γνώση των εξαρτημάτων που χρειάζονται για να κατασκευαστεί το προϊόν
- Γνώση των λειτουργιών των επί μέρους εξαρτημάτων

- Διάκριση των υλικών κατασκευής, της παρασχόμενης ενέργειας και της απαιτούμενης εντολής που χρειάζεται το προϊόν για να λειτουργήσει
- Γνώση της κατάστασης του υλικού σε κάθε φάση λειτουργίας του
- Γνώση των άμεσων και των έμμεσων δυσλειτουργιών που προκαλούνται κατά την αφαίρεση/ καταστροφή κάποιου εξαρτήματος
- Διάκριση των λειτουργιών σε βασικές, δευτερεύουσες και μεμονωμένες
- Διάκριση των εργασιών λειτουργίας του προϊόντος βάση της σπουδαιότητάς τους

Πίνακας 9 Αποτελέσματα ανάλυσης που προκύπτουν από τον συνδυασμό των τριών μεθόδων

α/α	Δυνατότητες	Χρησιμότητα	Μέθοδος
1	Γνώση της διαδικασίας λειτουργίας του υλικού	Λειτουργεί σαν εγχειρίδιο για τον καταναλωτή	FAST
2	Γνώση των εξαρτημάτων που χρειάζονται για να κατασκευαστεί το προϊόν	Λειτουργεί σαν εγχειρίδιο για τον κατασκευαστή συντηρητή	SOP
3	Γνώση των λειτουργιών των επί μέρους εξαρτημάτων	Σε περίπτωση παρουσίασης προβλήματος, μπορεί να εντοπιστεί η πηγή του προβλήματος	SOP
4	Διάκριση των υλικών κατασκευής, της παρασχόμενης ενέργειας και της απαιτούμενης εντολής που χρειάζεται το προϊόν για να λειτουργήσει	Μπορεί να διακρίνει ο τεχνικός σε ποιο στάδιο βρίσκεται η λειτουργία του προϊόντος, ή σε ποιο στάδιο διαπιστώθηκε πρόβλημα	FSMP
5	Γνώση της κατάστασης του υλικού σε κάθε φάση λειτουργίας του	Με βάση την κατάσταση του προϊόντος μπορεί να εντοπιστεί σε ποια φάση της λειτουργίας του βρίσκεται, και σε ενδεχόμενο πρόβλημα, ποιο εξάρτημα ανταποκρίνεται στην αντίστοιχη λειτουργία	FSMP

6	Γνώση των άμεσων και των έμμεσων δυσλειτουργιών που προκαλούνται κατά την αφαίρεση/ καταστροφή κάποιου εξαρτήματος	Σε περίπτωση κάποιας βλάβης μπορεί να κρίνει ο καταναλωτής αν το προϊόν θα συνεχίσει να λειτουργεί και για πόσο χρονικό διάστημα	SOP
7	Διάκριση των λειτουργιών σε βασικές, δευτερεύουσες και μεμονωμένες	Ο διαχωρισμός, βοηθάει τον καταναλωτή, χρήστη, ώστε να κατανοήσει τη λειτουργία του συστήματος	FAST
8	Διάκριση των εργασιών λειτουργίας του προϊόντος βάση της σπουδαιότητας τους	Επιτυγχάνεται η κατανόηση από τον χρήστη για το τι μπορεί να κάνει το προϊόν και τι δεν μπορεί	FAST

1. Μπίμης Αθανάσιος, Διπλωματική εργασία του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ» της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ του Ε.Μ.Π. «Διασφάλιση Ποιότητας σε Δημόσια Έργα και στον Σχεδιασμό Αστικής Κατοικίας» Αθήνα 2007
2. Σ. Ζαφείρης, Κύριος του Έργου – Μάρτιος 2005 (Συνέδριο ΤΕΕ για την παραγωγή των ΔΕ).
3. ΕΕΔΕ, Παρουσιάσεις για την ημερίδα για την Διαχείριση Ποιότητας στο Κατασκευαστικό Κλάδο. Διοργανωτής ΕΕΔΕ 2004.
4. Ποιότητα Δημοσίων και Ιδιωτικών Έργων Τ.Ε.Ε.(Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας) Μόνιμη Επιτροπή Έργων Υποδομής και Περιφερειακής Ανάπτυξης.
5. Ποιότητα Δημοσίων και Ιδιωτικών Έργων – παράρτημα Ισχυουσών Διατάξεων. ΤΕΕ (Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας) Μόνιμη Επιτροπή Έργων Υποδομής και Περιφερειακής Ανάπτυξης Ιούλιος 2002.
6. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΡΓΑ ΤΕΕ - Ομάδα Εργασίας – Αθήνα 1996.
7. Σ. Ανδιανόπουλος Ποιοτικός έλεγχος –Εκδόσεις Ν.Σ. Γαλαίος & Σια Ο.Ε. Εκδ. 1989.
8. Γ. Μαρκογιαννάκη «Δυτική και Ιαπωνική Προσέγγιση στην Επιχειρηματική Τελειότητα», Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2003.
9. Abed M. and B. Dale, “An attempt to identify quality related costs in textile manufacturing”, *Quality Assurance*, 13, pp. 41- 45, 1987

10. Asher J., "Cost of quality in service industries", *International Journal of Quality and Reliability Management*, September, 14, pp. 38- 46, 1987
11. ASQC, *Quality Costs, What and How, 2nd ed*, Milwaukee, WI, ASQC Quality Press, 1971
12. Bamford D. R. and N. Land, "The application and use of the PAF quality costing model within a footwear company", *International Journal of Quality & Reliability Management*,
13. Bata D., E.H. Drosinos, P. Athanasopoulos and P. Spathis, "Cost of GHP improvement and HACCP adoption of an airline catering company", *Food Control*, vol. 17, 5, 2006
14. Besterfield D.H., *Quality Control 4th ed.*, New Jersey, Prentice-Hall International, 1994
15. Brennan L., Cullinane H., O'Connor C., Punch D. and J. Shell, "Quality costs determination on a production line", *International Journal of Quality and Reliability Management*, 7, 1990
16. British Standards Institute, *BS 6143: Guide to the Economics of Quality, Part 2, Prevention, Appraisal, Failure Model* (London, BSI), 1990
17. Dr.Kremer. Design Theories and Methods. 2009.
18. Otto N. Kevin, Wood L. Kristin,. Product Evolution - A Reverse Engineering and Redesign Methodology.
19. C.Nigel. Engineering Design Methods, Strategies for Product Design. UK : Wiley, 2000.
20. Pulm U. & Lindemann U. Enhanced Systematics for Functional Product Structuring. 2005.

21. J.J.Kaufman. Function Analysis Systems Technique - The Basics. 1990.
22. www.me.utexas.edu. [Online] University of Texas at Austin, January 2001.
23. K. T. Ulrich & S. D. Eppinger. Product Design and Developments. 2010.
24. Δ. Βασιβαλής, Δ. Γενικός Εξοπλισμός - Ταινιόδρομοι Μεταφοράς Προϊόντων.
www.texnika-inox.gr. [Online] 2011.
25. Α. Ρωμαίος, Μελέτη Συστήματος Αυτόματης Διαλογής Δεμάτων για Εφαρμογή
Express Logistics Center . Αθήνα : Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών,
2007.

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1 Είδη συντήρησης.....	15
Εικόνα 2 Η έννοια της προληπτικής συντήρησης υλοποιείται και στα αυτοκίνητα κατά τον περιοδικό τους έλεγχο σε ΚΤΕΟ.....	17
Εικόνα 3 Οι δραστηριότητες της προληπτικής συντήρησης.....	18
Εικόνα 4 Συχνότητα ελέγχων και επιρροή των δαπανών συντήρησης.....	21
Εικόνα 5 Χρονικά όρια ελέγχου.....	21
Εικόνα 6 Ένα διάγραμμα ροής που δείχνει μια διαδικασία αντιμετώπισης μιας λάμπας που δε λειτουργεί.....	36
Εικόνα 7 Παράδειγμα ιστογράμματος.....	37
Εικόνα 8 Το διάγραμμα ψαροκόκαλο.....	38
Εικόνα 9 Παράδειγμα διαγράμματος pareto.....	40
Εικόνα 10 Με τη χάραξη δύο παράλληλων ευθειών επιτυγχάνεται η οριοθέτηση του υπό μελέτη προβλήματος (Dr Kremer, Design Theories and Methods. 2009).....	53
Εικόνα 11 Η κύρια λειτουργία τοποθετείται δεξιά της αριστερής γραμμής. Κάθε λειτουργία αριστερά της επόμενης θεωρείται βασικότερης σημασίας.....	54
Εικόνα 12 Παράγονται λειτουργίες στα δεξιά της βασική λειτουργίας, οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούν το σχήμα “πως εκτελείται η λειτουργία.....	54
Εικόνα 13 Δημιουργείται κατά αυτό τον τρόπο η πρωτεύουσα αλυσίδα λειτουργιών.....	55
Εικόνα 14 Η πρωτεύουσα διαδρομή θα τερματιστεί με μία λειτουργία έξω από την δεξιά γραμμή.....	55
Εικόνα 15 Στο πάνω μέρος του διαγράμματος τοποθετούνται λειτουργίες οι οποίες εκτελούνται μόνο μια φορά ή συνέχεια.....	56
Εικόνα 16 Συγκεντρωτικό διάγραμμα FAST.....	57

Εικόνα 17 Κάθε φορά που επαναλαμβάνεται η μέθοδος δημιουργείται ένα διάγραμμα στο οποίο καταγράφεται το εξάρτημα που απομακρύνθηκε και ποιες ήταν οι επιπτώσεις τις απομάκρυνσης του.....	60
Εικόνα 19 Η λειτουργία του black box.....	62
Εικόνα 20 Οι εισροές και οι εκροές στο μαύρο κουτί είναι τριών ειδών.....	63
Εικόνα 21 Οι υπολειτουργίες διατυπώνονται με την μορφή ενός ζεύγους ενεργού ρήματος και ουσιαστικού. Για παράδειγμα, “αύξησε πίεση”, “μετάφερε ροπή”, “μείωσε ταχύτητα” κτλ.....	63
Εικόνα 22 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μεθόδου FSMP (Otto N. Kevin, Wood L. Kristin., Product Evolution - A Reverse Engineering and Redesign Methodology)...	64
Εικόνα 23 Τεχνικό Σχέδιο ταινιόδρομου μεταφοράς χύμα υλικού (Δ. Βασιβαλής, Δ. Γενικός Εξοπλισμός - Ταινιόδρομοι Μεταφοράς Προϊόντων. www.texnika-inox.gr)	67
Εικόνα 24 1. Τύμπανο Κίνησης, 2. Τύμπανο Επιστροφής, 3. Ξύστρα Καθαρισμού I, 4. Τύμπανο Πιέσεως, 5. Τύμπανο Αλλαγής Κατεύθυνσης, 6. Ράουλο Επιστροφής, 7. Τύμπανο Τανύσεως, 8. Ξύστρα Καθαρισμού V, 9. Ράουλα Φόρτωσης, 10. Χοάνη Φόρτωσης, 11. Ράουλα Κύλισης, 12. Καλύμματα (Ρωμαιοσ, Α. Μελέτη Συστήματος Αυτόματης Διαλογής Δεμάτων για Εφαρμογή Express Logistics Center . Αθήνα : Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2007).....	69
Εικόνα 25 Σημαντικός παράγοντας στην τελική μορφή του συστήματος μεταφορικών ταινιών είναι το ανάγλυφο του εδάφους στην περιοχή των εγκαταστάσεων (Δ. Βασιβαλής, Δ. Γενικός Εξοπλισμός - Ταινιόδρομοι Μεταφοράς Προϊόντων. www.texnika-inox.gr).....	70
Εικόνα 26 Η κύρια λειτουργία τοποθετείται δεξιά της αριστερής γραμμής.....	71
Εικόνα 27 Συνεχώς θέτονται τα ερωτήματα πως και για ποιο λόγο, ώστε να ολοκληρωθεί η αλυσίδα.....	71

Εικόνα 28 Το τελικό στάδιο της πρωτεύουσας διαδρομής	72
Εικόνα 29 Σχέδιο FAST για τον ταινιόδρομο μεταφοράς χύμα υλικού.....	72
Εικόνα 30 Όλες αυτές οι εργασίες εφαρμόζονται μόνο μια φορά κατά τη λειτουργία του συστήματος	73
Εικόνα 31 Το τελικό διάγραμμα στο οποίο διακρίνονται οι πρωτεύουσες οι δευτερεύουσες και οι μεμονωμένες λειτουργίες του συστήματος	73
Εικόνα 32 Περίπτωση απομάκρυνσης του ελαστικού ιμάντα από τον τ.μ.χ.υ., έχει ως αποτέλεσμα την αποτυχία ορθής λειτουργίας στου συστήματος	75
Εικόνα 33 Στη περίπτωση απομάκρυνσης του εξαρτήματος, ο ελαστικός ιμάντας δεν θα κινείται προς την κατεύθυνση μεταφοράς.....	76
Εικόνα 34 Σκοπός της μονάδας είναι η επιστροφή του άνω κλάδου του ιμάντα με ομαλό τρόπο, χωρίς εκφυγή του ιμάντα	76
Εικόνα 35 Η υποστήριξη του άνω και του κάτω κλάδου επιτυγχάνεται με τα ράουλα κύλισης για τον άνω κλάδο και από ράουλα επιστροφής για τον κάτω κλάδο	77
Εικόνα 36 Στους βοηθητικούς κυλίνδρους εντάσσονται το Τύμπανο Πιέσεως, το Τύμπανο Αλλαγής Κατεύθυνσης και το Τύμπανο Τανύσεως.....	78
Εικόνα 37 Η χοάνη είναι μεταλλικός ολισθητήρας, ο οποίος αποσκοπεί στην ασφαλή καθοδήγηση του υλικού στον ταινιόδρομο	79
Εικόνα 38 Ο ηλεκτροκινητήρας εντάσσεται στην μονάδα κίνησης του ταινιόδρομου	79
Εικόνα 39 Ανάλυση σε συνθετικά μέρη της βασικής λειτουργίας του προϊόντος.....	80
Εικόνα 40 Η λειτουργία του black box.....	81
Εικόνα 41 Οι εισροές και οι εκροές στο μαύρο κουτί είναι τριών ειδών	81
Εικόνα 42 Τελικό διάγραμμα της μεθόδου Function Structure Modeling Process.....	82

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 Τύποι βλαβών συστήματος	19
Πίνακας 2 Αρχές υλοποίησης ολικής παραγωγικής συντήρησης	24
Πίνακας 3 Στοιχεία βελτίωσης σε διάφορους τομείς λειτουργίας.....	25
Πίνακας 4 Ορισμοί εργαλείων διαχείρισης ποιότητας	31
Πίνακας 5 Τα βασικά στοιχεία αφοσίωσης του πελάτη	45
Πίνακας 6 Καταγραφή προβλημάτων για την εφαρμογή της ΔΟΠ.	47
Πίνακας 7 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου FAST	52
Πίνακας 8 Βασικά χαρακτηριστικά μεθόδου SOP	58
Πίνακας 9 Αποτελέσματα ανάλυσης που προκύπτουν από τον συνδυασμό των τριών μεθόδων	88
Πίνακας 10 Νομοθετικές διατάξεις που καθορίζουν το νομικό πλαίσιο για την ποιότητα στον ελληνικό χώρο	97

Νομικό Πλαίσιο σχετικά με την Ποιότητα στον Ελληνικό Χώρο

Πίνακας 10 Νομοθετικές διατάξεις που καθορίζουν το νομικό πλαίσιο για την ποιότητα στον ελληνικό χώρο

N.372/76	Περί συστάσεως και λειτουργίας Ελληνικού Οργανισμού Τυποποιήσεως (ΕΛΟΤ)
N.2231/ 31/ 8/ 1994	<p>Σύσταση και λειτουργία Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας Εθνικού Συμβουλίου Διαπίστευσης και άλλες διατάξεις. Υπάγεται στο Υπουργείο Βιομηχανίας Ενέργειας και Τεχνολογίας (ΥΒΕΤ) (Ν.Π.Ι._). Σύσταση του Εθνικού Συμβουλίου Διαπίστευσης (ΕΣΥ_) με σκοπό την καθιέρωση και λειτουργία Εθνικού Συστήματος Διαπίστευσης</p> <p>(Χορήγηση πιστοποιητικών σε φορείς πιστοποίησης, επιθεώρησης και ελέγχου σε εργαστήρια δοκιμών και σε εργαστήρια μετρολογίας με βάσει τα ευρωπαϊκά πρότυπα της σειράς 45000 κλπ).</p>
N.2642/17/9/1998	Μητρώο επιχειρήσεων ναυπήγησης μετατροπής επισκευής και συντήρησης πλοίων και άλλες διατάξεις. Με το άρθρο 8 αυτού του Νόμου τροποποιείται ο Ν.2231/ 94 άρθρο 8 που αφορά το ΕΣΥ_. Επίσης με το άρθρο 10 ο φορέας

	αυτός αποφασίζει και για τη διαπίστευση φορέων παραγωγής προϊόντων έργων και υπηρεσιών φυσικών η νομικών προσώπων. Με το άρθρο 9 συγκροτείται Εθνικό Συμβούλιο Τυποποίησης (ΕΣΠ).
Π. _155/25/6/97	Σύσταση και καταστατικό της Α.Ε. «Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης Α.Ε.» (Μετατροπή του ΕΛΟΤ σε Α.Ε.). Υπάγεται στο ΥΠΕΘΟ.
Π. _81/11/5/1999	Τροποποίηση και συμπλήρωση διατάξεων του Π_428/95 Γενική Διεύθυνση Ποιότητας Α.Ε. (Διεύθυνση Διαμόρφωσης Αρχών και Κανόνων Διασφάλισης Ποιότητας _Ε και εξειδίκευσης Ανθρώπινου δυναμικού, Διεύθυνση Μητρώων και Τεχνικών επαγγελμάτων, Διεύθυνση Κεντρικού Εργαστηρίου Α.Ε., Διεύθυνση Ελέγχου και Εφαρμογής Προγραμμάτων Ποιότητας Α.Ε.)
Π. _334/21/12/2000	Προσαρμογή της Ελληνικής Νομοθεσίας για τα _Ε. προς τις διατάξεις της οδηγίας 93/87/ΕΟΚ όπως τροποποιήθηκε και συμπληρώθηκε. (άρθρο 25 περί επαγγελματικών Μητρώων)
Π. _121/6/6/2000	Επιβολή προστίμου για παράβαση διατάξεων του άρθρου 21 του Ν1418 / 84 (Προδιαγραφές και κανονισμοί έργων).
Υ.Α.1748/188/10/1/69	Καθιέρωση Εργαστηριακών Ελέγχων

Υ.Α.17/10/1977	Αναθεώρηση της 1748/188/10/1/69 και συμπλήρωση του άρθρου 7 παρ. 6 των ΓΟΕΣΥ περί εγκαταστάσεως και λειτουργίας εργοταξιακού εργαστηρίου Αναδόχων.
(Γ3γ/0/14/125-8)	
Υ.Α.122/16/2/98	Ειδικός Σύμβουλος Ποιοτικού ελέγχου (ΕΣΠΕΛ) για τα δημόσια έργα που εκτελούνται από όλους τους φορείς του ευρύτερου δημόσιου τομέα και συγχρηματοδοτούνται από πόρους της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ρύθμιση θεμάτων σχετικών με τη λειτουργία του.
(Αρ._17α/10/16/ΦΝ380)	
Υ.Α.289/24/3/1998	Διαδικασία χορήγησης άδειας λειτουργίας Ιδιωτικών Εργαστηρίων που εποπτεύονται από το ΥΠΕΧΩΔΕ (άδεια λειτουργίας από τη Διεύθυνση εποπτείας Εργαστηρίων).
(Αρ._ΕΕ036)	
Υ.Α.1176Β/22/9/2000	Καθιέρωση του Φακέλου Ασφαλείας και Υγείας (ΦΑΥ) ως απαραίτητου στοιχείου για την προσωρινή και οριστική παραλαβή κάθε Δημόσιου Έργου.
Υ.Α.1265/18/10/2000	Εφαρμογή προγράμματος Ποιότητας Έργων (Π.Π.Ε.) στα Δημόσια Έργα και μελέτες (ISO.10005:1995).
(Αρ._ΕΕΠΠ ΟΙΚ.502)	
Υ.Α.31/1/2001	Σύσταση Ειδικού Σώματος Ελεγκτών Συστημάτων και Προγραμμάτων Διασφάλισης Ποιότητας Δημόσιων Έργων. Είναι υπό την εποπτεία της Διεύθυνσης Έλεγχου και Εφαρμογής Προγράμματος Ποιότητας Α.Ε. της Γενικής Διεύθυνσης Ποιότητας Α.Ε
(Αρ._ΕΕΠΠ ΟΙΚ.4)	

Υ.Α.332/28/2001	Έγκριση Κανονισμού διενέργειας ελέγχου ποιότητας υλικών και έργων. Ο έλεγχος γίνεται από επιτροπές που συγκροτούνται από υπαλλήλους του κεντρικού εργαστηρίου _Ε. με αρμοδιότητα στο έλεγχο των υλικών και έργων σε όλη τη Χώρα. Επίσης περιλαμβάνει και τη διαδικασία Έλεγχου Μονάδος Παραγωγής Έτοιμου Σκυροδέματος.
Αρ_43309	
(Διορθωτικές	
Υ.Α.724/12/6/2001-	
Υ.Α.793/22/6/2001)	
Υ.Α.1013/2/8/2001 (Αρ.	Οδηγίες υποχρεωτικής εφαρμογής για το περιεχόμενο, τον έλεγχο και την έγκριση Προγράμματος Ποιότητας Έργου.
_ΠΠΑ_οικ611)	
Υ.Α. 686B/1/6/2001	Καθιέρωση του Σχεδίου Ασφαλείας και Υγείας (ΣΑΥ) και του φακέλου Ασφαλείας και Υγείας (ΦΑΥ), ως απαραίτητων στοιχείων για την έγκριση μελέτης στο στάδιο της οριστικής μελέτης εφαρμογής σε κάθε Δημόσιο Έργο.
(Αρ. _ΕΕΠ/οικ/85)	
Υ.Α. 108 /31/01/2002	Συγκρότηση επιτροπής για τη διενέργεια ελέγχου ποιότητας χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος.
(Αρ. ΟΙΚ _14/48756)	
Υ.Α. 108 /31/01/2002	Συγκρότηση επιτροπής για τη διενέργεια ελέγχου ποιότητας σκυροδέματος.
(Αρ. ΟΙΚ _14/48757)	
Υ.Α. 16 /14/01/2003	Πρόληψη και αντιμετώπιση του εργασιακού κινδύνου κατά την κατασκευή Δημοσίων Έργων (ΣΑΥ και ΦΑΥ).
(_ΠΠΑ_/ΟΙΚ/889)	
Υ.Α. 1539/ 17/10/2003	Ρύθμιση όλων των θεμάτων σχετικά με τους ελέγχους ποιότητας στα δημόσια έργα που διενεργούνται από
(Αρ. 64517/Ε.Υ.Σ.	

6195)

Ειδικό Σύμβουλο, των ειδικότερων θεμάτων λειτουργίας του καθώς και κάθε άλλης σχετικής λεπτομέρειας.

Προϊόντα Δομικών Κατασκευών Καθιέρωση του σήματος CE (πιστοποίηση της συμμόρφωσης του προϊόντος).

Υπεύθυνοι Οργανισμοί είναι τριών ειδικοτήτων:

- Οργανισμοί πιστοποίησης

- Οργανισμοί Επιθεώρησης

- Εργαστήρια Δοκίμων Υπεύθυνος Φορέας για τη υλοποίηση είναι ο ΕΛΟΤ.

Σύσταση Γενικής Διεύθυνσης Ποιότητας Δημοσίων Έργων. Συμπεριλαμβάνει:

Διεύθυνση Εποπτείας Εργαστηρίων Δημοσίων Έργων,

Διεύθυνση ελεγκτών και αξιολογητών Ποιότητας Έργων,

Διεύθυνση Συντονισμού Ελέγχου Ποιότητας έργων.

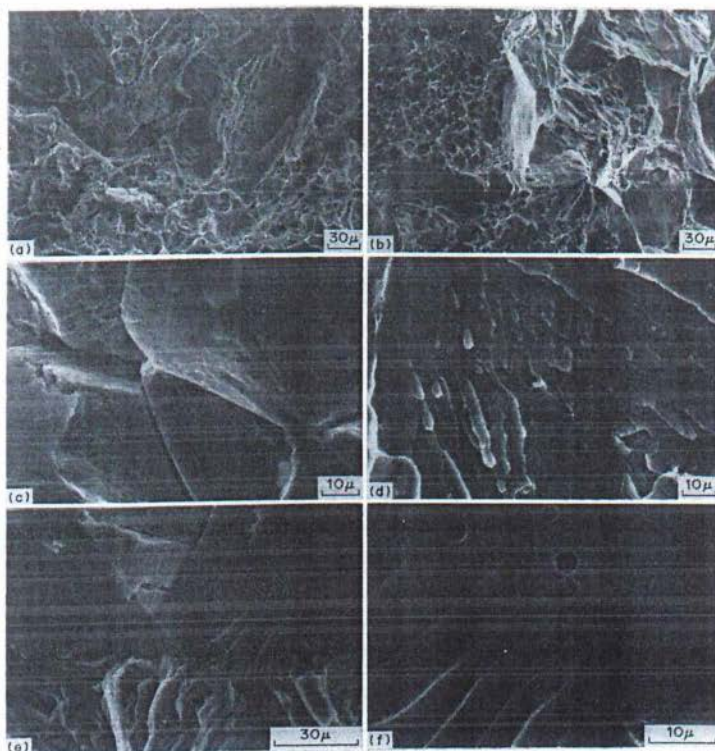
Π. _334/25/10/94





ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΙΣΔΟΧΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ
ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΦΟΙΤΗΤΩΝ:

ΜΑΡΓΟΥΔΗ ΚΩΝ/ΝΟΥ (Α.Μ: 38847)

ΧΑΝΟΥ ΣΤΕΦΑΝΙΑ (Α.Μ: 38887)

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ

Ακαδημαϊκό έτος 2012 - 2013

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

737
ΜΧ

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧ/ΤΙΑΣ.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

(1) ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
(2) ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
(3) ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ.....	7
(3.1) ΜΙΑ ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	7
(3.2) ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024.....	7
(3.3) ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024 ΚΑΙ 6013.....	7
(3.4) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΣΕ ΡΩΓΜΕΣ ΛΟΓΩ ΕΙΣΔΟΧΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	8
(3.5) ΔΙΑΧΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075.....	8
(3.6) ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΥΔΑΤΙΝΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΕΞΕΤΑΣΤΗΚΑΝ ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΝΑΝΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ..	9
(3.7) ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075 ΜΕ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	9
(3.8) ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΟΣ ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΤΟΠΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024.....	9
(3.9) Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ ΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024-T351.....	10
(3.10) ΣΤΕΡΕΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	10
(3.11) ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΡΥΘΜΟ ΕΝΤΑΣΗΣ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075.....	11
(3.12) Η ΜΕΛΕΤΗ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024 ΣΕ ΔΙΑΜΗΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ.....	11
(3.13) Η ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024-T351.....	11
(3.14) Η ΔΙΑΧΥΣΗ ΚΑΙ Η ΠΑΓΙΔΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ.....	12
(3.15) Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΦΥΡΗΛΑΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 5083.....	12
(3.16) Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΞΑΡΘΡΩΣΗΣ.....	12
(3.17) Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΗ ΣΕ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	13
(3.18) Η ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	13
(4) ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	14
ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	17

(5) ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ	18
(5.1) ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	18
(5.2) ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	19
(5.3) ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	21
(5.4) ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	21
(5.4.1) ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS)	21
(5.4.2) ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ (CASTING ALLOYS).....	31
(5.4.3) ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	34
(6) ΒΑΦΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ.....	34
(6.1) ΒΑΦΗ DURALUMIN.....	34
(6.2) ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ – ΤΕΧΝΙΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ	47
(6.2.1) ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ	48
(6.2.2) ΑΝΟΠΤΗΣΗ	51
(6.2.3) ΑΝΟΔΙΩΣΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΒΑΦΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	51
(7) ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΙΣΔΟΧΗΣ.....	54
(7.1) ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	54
(7.1.1) ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	54
(7.1.2) ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	55
(7.1.3) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	56
(7.2) ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	56
(7.2.1) ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ	57
(7.2.2) ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ.....	57
(7.2.3) ΥΒΡΙΔΙΑ ΜΕΤΑΛΛΟΥ.....	58
(7.2.4) ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	60
ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	60
(7.2.5) ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ	62
(7.2.6) ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΚΕΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ.....	64
(7.2.7) ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ	65
(7.2.8) ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΠΟΥ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ (HEDE).....	66
(7.2.9) ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ (AIDE)	67
(7.2.10) ΟΦΕΙΛΟΜΕΝΗ ΣΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΤΟΠΙΚΗ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ (HELP)	70
(7.3) ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΠΤΥΧΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	71
(7.3.1) ΦΥΣΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ: ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ	72
(7.3.2) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΩΓΜΩΝ	73
(7.3.3) ΚΟΙΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ	75
(8) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	76
(8.1) ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΑΠΟ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024.....	76
ΠΕΙΡΑΜΑ.....	76
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	77
(8.2) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	78
ΠΕΙΡΑΜΑ.....	78
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	80
(8.3) ΔΙΑΧΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075	83
ΠΕΙΡΑΜΑ.....	83
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	84

(8.4) ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	88
.....
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	88
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	88
(8.5) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΠΙΚΟΣ	
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΜΟΣ ΑΝΟΔΙΚΗΣ ΔΙΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	
ΕΝΟΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ 7075 ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	92
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	92
ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ.....	93
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	94
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΩΤΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	
ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ: Ο ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ	
ΑΠΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΕΝΗ ΑΝΟΔΙΚΗ ΔΙΑΛΥΣΗ	95
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΡΩΓΜΩΝ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	
ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ	
ΤΟΠΙΚΑ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΗΝ ΑΝΟΔΙΚΗ ΔΙΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ	
ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	96
ΤΑ ΚΡΙΣΙΜΑ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ: ΜΙΑ ΕΙΔΙΚΗ Ή ΓΕΝΙΚΗ ΕΝΝΟΙΑ?.....	97
ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ SCC ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ FCC.....	98
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	99
(8.6) Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	
ΕΝΟΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ 5083	100
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	100
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	100
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	107
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	108

(1) ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία συνιστά το αποτέλεσμα της τετραετούς φοίτησής μας στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά και αποτελεί το τελευταίο στάδιο των σπουδών μας για την απόκτηση του προπτυχιακού τίτλου σπουδών του Τμήματος Μηχανολογίας. Ωστόσο, αποτελεί παράλληλα και ένα σημαντικό εφόδιο για την μετέπειτα πορεία μας στον εργασιακό τομέα της Μηχανολογίας.

Το θέμα το οποίο πραγματεύεται η εργασία και που παρουσιάζεται λεπτομερώς στη συνέχεια είναι η επίδραση της εισδοχής υδρογόνου στη δομή και τις μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου. Πιο αναλυτικά, αρχικά δίνεται μια συνοπτική εικόνα από μελέτες που έχουν προηγηθεί πάνω στην εισδοχή υδρογόνου και στην ψαθυροποίηση λόγω αυτού. Έπειτα ακολουθεί μια εκτενής αναφορά πάνω στην ιστορία και την παραγωγή του αλουμινίου και των κραμάτων του, καθώς επίσης και στις θερμικές κατεργασίες που μπορεί να υποστούν. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι ιδιότητες του υδρογόνου, οι τρόποι μεταφοράς, εισδοχής και αποθήκευσης του. Επιπλέον, αναφέρονται οι επιδράσεις που μπορεί να έχει το υδρογόνο στο περιβάλλον και στο υλικό στο οποίο εισάγεται. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά διαδικασίες πειραμάτων που αφορούν την επίδραση στη δομή και στις μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου. Με την αναφορά των αποτελεσμάτων αυτών, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την μετέπειτα χρήση της τεχνικής.

Σημαντικό ρόλο για την εκπόνηση αυτής της εργασίας διαδραμάτισε ο επιβλέπων καθηγητής μας, Κωνσταντίνος Γιαννακόπουλος, ο οποίος μας καθοδήγησε και μας ενθάρρυνε για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

(2) ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να απευθύνουμε ιδιαίτερες ευχαριστίες στον καθηγητή μας, Κωνσταντίνο Γιαννακόπουλο, ο οποίος αρχικά δέχτηκε να συνεργαστούμε στο πλαίσιο της εκπόνησης της πτυχιακής μας εργασίας και στη συνέχεια μας βοήθησε στην εύρεση των απαραίτητων πληροφοριών και μας παρείχε τις κατάλληλες κατευθύνσεις ώστε αυτή η εργασία να αποτελέσει το σημείο συγκέντρωσης σημαντικών πληροφοριών. Επίσης, θα θέλαμε να τον ευχαριστήσουμε θερμά για τον χρόνο και την υπομονή που διέθεσε καθ' όλη την διάρκεια της συγγραφής της εργασίας μας.

Ευχαριστούμε ακόμα το Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά για την διάθεση της αίθουσας διαδικτύου, απ' όπου μας παρείχε την δυνατότητα πρόσβασης σε ειδικές επιστημονικές σελίδες, όπως επίσης και για την σύγχρονη αίθουσα του αναγνωστηρίου και την βιβλιοθήκη, που μας επέτρεψαν να δουλέψουμε πιο συγκεντρωμένα και να οργανώσουμε τη μελέτη μας.

Τέλος, ευχαριστούμε από καρδιάς τις οικογένειες μας για την συνεχή συμπαράσταση, κατανόηση και υπομονή που μας έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μας για ένα άριστο αποτέλεσμα.

(3) ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

(3.1) ΜΙΑ ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Οι μηχανισμοί του υδρογόνου περιγράφονται σύντομα. Παρουσιάζεται επίσης και σε προηγούμενες έρευνες η φυσική διαδικασία μεταφοράς και κατεργασία του υδρογόνου. Παρουσιάζεται ένα μοντέλο διάχυσης υδρογόνου βασιζόμενο στην αλληλεπίδραση της πίεσης του υδρογόνου στο δικτυακό πλέγμα με τοπικό ελαστοπλαστικό υλικό. Οι πεπερασμένες μελέτες στοιχείων πραγματοποιήθηκαν για να αναλύσουν τη διανομή υδρογόνου στην περιοχή μιας αμβλύοντας άκρης από ρωγμές και στην περιοχή μιας στρογγυλευμένης εγκοπής σε ένα δείγμα κάμψεων τεσσάρων σημείων, κάτω από τη μικρή κλίμακα που παράγει τους όρους. Χρησιμοποιούνται υπολογιζόμενα σχεδιαγράμματα συγκέντρωσης υδρογόνου και οι πειραματικές παρατηρήσεις της ψαθυροποίησης σε χάλυβες υψηλής αντοχής, για να κάνουν αξιολογικές παρατηρήσεις στην περίπτωση της πρώτης μικρορωγμής.[1]

(3.2) ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει την διάβρωση που προκλήθηκε από ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου σε κράμα αλουμινίου 2024 και προσπαθεί να απαντήσει στην ερώτηση αν η ψαθυροποίηση αυτή αποδίδεται στην λήψη και στην παγίδευση υδρογόνου στο υλικό. Το υδρογόνο κατά τη διάρκεια της διάβρωσης και παγιδεύεται σε ευδιάκριτα ενεργειακά σημεία, τα οποία αντιστοιχούν στις διαφορετικές περιοχές μικροδομής. Ο σχηματισμός μίας ζώνης, επηρεασμένης από υδρογόνο, κάτω από το στρώμα διάβρωσης υποστηρίζεται από την κλασματομετρική ανάλυση. Η αφαίρεση του στρώματος με διάβρωση οδηγεί στην πλήρη αποκατάσταση της δύναμης παραγωγής αλλά μόνο μερική αποκατάσταση ολκιμότητας. Η πρόσθετη θερμική επεξεργασία για να απελευθερώσει το παγιδευμένο υδρογόνο οδηγεί μόνο στην πλήρη αποκατάσταση της ολκιμότητας.[2]

(3.3) ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024 ΚΑΙ 6013

Η επίδραση της διάβρωσης στη μηχανική συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου 2024 και 6013 που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη έχει ερευνηθεί πειραματικά. Αποδεικνύεται ότι η έκθεση σε διάβρωση οδηγεί στη μέτρια μείωση της παραγωγής και της τελευταίας εκτατής πίεσης. Η δραματική μείωση της επιμήκυνσης της αστοχίας και της ενεργειακής πίεσης της πυκνότητας παρατηρείται ακόμα και μετά από τους σχετικά σύντομους χρόνους έκθεσης. Η μηχανική αφαίρεση των διαβρωμένων περιοχών αποκατέστησε την παραγωγή και την τελευταία εκτατή πίεση αλλά όχι την εκτατή ολκιμότητα. Το τελευταίο αποκαταστάθηκε σταδιακά

στις τιμές, για τα μη διαβρωμένα υλικά, μετά από τη θερμική επεξεργασία των κραμάτων στις θερμοκρασίες που αντιστοιχούν στη θερμική εκρόφηση ορισμένων σε περιοχές με παγιδευμένο υδρογόνο. Τα συμπεράσματα σαφώς προτείνουν ότι η διάβρωση των ανωτέρω κραμάτων συνδέεται με ογκομετρική ψαθυροποίηση υδρογόνου. Η μείωση της εκτατής ολκιμότητας που προκλήθηκε από την διάβρωση συνδέθηκε με τη μείωση της υπόλοιπης δύναμης των διαβρωμένων συστατικών. Ένα πρότυπο, βασισμένο σε μια πολύπλευρη έννοια, χρησιμοποιήθηκε για να συσχετίσει τη μείωση της ανθεκτικότητας θραύσης και τη μείωση της υπόλοιπης δύναμης της ενεργειακής πυκνότητας πίεσης που λήφθηκε από τις εκτατές δοκιμές για διαβρωμένα και μη διαβρωμένα δελτία. Έχει αποδειχθεί ότι η ενεργειακή πυκνότητα πίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει σοβαρά την υπόλοιπη δύναμη των διαβρωμένων συστατικών.[3]

(3.4) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΣΕ ΡΩΓΜΕΣ ΛΟΓΩ ΕΙΣΔΟΧΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Η μελέτη των αλληλεπιδράσεων λόγω υδρογόνου στη μικροδομή είναι δύσκολη στα κράματα αλουμινίου, επειδή η φόρτιση του υδρογόνου συνδέεται συνήθως με κάποια διάλυση της επιφάνειας σε υδάτινα μέσα. Η λήψη χ επομένως εξαρτάται από τη μικροδομή. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιείται ένας μεσάζων ηλεκτροαπωθητικού στρώματος νικελίου. Αποδεικνύεται ότι μια ενισχυμένη περικρυσταλλική πτώση λαμβάνεται με την παραμονή των δειγμάτων σε θερμοκρασία 400 °C, πριν από την θερμική επεξεργασία σκληρότητας. Έτσι αυξάνεται η αντίσταση ενός κράματος AlZnMg με την αλλαγή του μηχανισμού θραύσης από περικρυσταλλικό ψαθυρό σε όλκιμο. [4]

(3.5) ΔΙΑΧΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075

Η επίδραση του υδρογόνου στις μηχανικές ιδιότητες ενός κράματος αλουμινίου 7075 και η διάχυση του, ερευνώνται χρησιμοποιώντας ηλεκτροχημική καθοδική μέθοδο φόρτισης. Η προφανής διάχυση του υδρογόνου στο κράμα αλουμινίου 7075 είναι $4.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ σε 318 K. Η φόρτιση του υδρογόνου προκαλεί μια μείωση της εκτατής δύναμης και της επιμήκυνσης θραύσης σε σύγκριση με τις δοκιμές που εκτελούνται σε περιβάλλον ατμόσφαιρας. Και στις δυο περιπτώσεις, οι κοιλότητες και οι περικρυσταλλικές ρωγμές παρατηρήθηκαν στις επιφάνειες θραύσης. Παρατηρείται επίσης, μια ράβδωση που είναι χαρακτηριστικό των επιφανειών με θραύση στους σιδήρους και τους χάλυβες που έχουν υποστεί ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου. [5]

(3.6) ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΥΔΑΤΙΝΑ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΕΞΕΤΑΣΤΗΚΑΝ ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΝΑΝΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ

Η επίδραση του υδρογόνου στις μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου μελετήθηκε χρησιμοποιώντας μια ηλεκτροχημική νανοσκληρομέτρηση εγκοπών. Η απορρόφηση των ιόντων υδρογόνου, με δυνατότητα ανοικτών κυκλωμάτων σε μια λύση με $\text{pH}=6$ (λιγότερο από το ισοηλεκτρικό σημείο = 9.5) οδήγησε σε μια αλλαγή του φορτίου που εμφανίζεται. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε σε ένα διάλυμα με $\text{pH}=9$, κάτω από την καθοδική πολικότητα. Η αλλαγή στο εμφανιζόμενο φορτίο αποδίδεται στη μείωση της συνεκτικής ενέργειας που προκαλείται από το υδρογόνο και στο διαχωρισμό υδρογόνου στις εξαρθρώσεις. [6]

(3.7) ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075 ΜΕ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Ένα κράμα αλουμινίου 7075 με υψηλή καθαρότητα ήταν υποβαλλόμενο σε θερμοθεραπεία για να παραγάγει ποικίλα μεγέθη και πληθυσμούς ιζημάτων στο εσωτερικό του κόκκου και στα όρια του. Στη συνέχεια τα δείγματα αξιολογήθηκαν, όσον αφορά την ολίσθηση και την ευαισθησία ψαθυροποίησης λόγω υδρογόνου, μετά από καθοδική προφόρτιση ή με ταυτόχρονη καθοδική φόρτιση και ένταση. Η ευαισθησία της ψαθυροποίησης βρέθηκε για να συσχετιστεί πολύ καλά με το μέγεθος και τον τύπο των ιζημάτων στις μήτρες και σύμφωνα με τη λογική των χαρακτηριστικών ολίσθησης, να ελέγχουν την έκταση της μεταφοράς εξάρθρωσης του υδρογόνου. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ελεγχθεί η διανομή του υδρογόνου στο υλικό και ο βαθμός ψαθυροποίησής του. Τα αποτελέσματα επίσης δείχνουν ότι διαδραματίζεται ένας μικρότερος ρόλος από τα ιζήματα στα όρια των κόκκων στον έλεγχο της ευαισθησίας ψαθυροποίησης λόγω υδρογόνου. [7]

(3.8) ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΟΣ ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΤΟΠΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024

Η τρέχουσα έρευνα στοχεύει να ερευνησει εάν η επένδυση δειγμάτων του κράματος 2024 θα μπορούσε να παρέχει, εκτός από την αναμενόμενη προστασία έναντι της φθοράς λόγω διάβρωσης, αλλά και μια προστασία έναντι στη διάβρωση που προκαλείται από ψαθυροποίηση του υδρογόνου. Το τελευταίο παρατηρείται όταν υποβάλλεται το γυμνό υλικό 2024 σε διάβρωση λόγω εργαστηριακής αποφλοιώσης καθώς επίσης και σε έλλειψη της μηχανικής φόρτωσης. Επιπλέον, η μελέτη στοχεύει στην ερώτηση εάν η τοπική επένδυση Al στις μικρές περιοχές της επιφάνειας δειγμάτων αρκεί για την προστασία του δείγματος από τη φθορά διάβρωσης και ψαθυροποίησης υδρογόνου. Η εργασία περιλαμβάνει τα αποτελέσματα μιας εκτενούς πειραματικής έρευνας συμπεριλαμβανομένων των εκατών δοκιμών επάνω στα δείγματα κραμάτων αλουμινίου 2024 που προστατεύονται μέσω πλήρους και τοπικής επένδυσης αλουμινίου, των

μεταλλογραφικών και κλασματομετρικών αναλύσεων, καθώς επίσης και των μετρήσεων της λήψης υδρογόνου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διάβρωσης.[8]

(3.9) Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ ΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024-T351

Οι αντίστροφες δοκιμές κόπωσης που διεξήχθησαν στα δείγματα κραμάτων αλουμινίου 2024-T351 και εκτέθηκαν στο αργό, στο υδρογόνο και σε υγρά εναέρια περιβάλλοντα, έδειξαν ότι η απορρόφηση υδρογόνου προωθεί την έναρξη διάδοσης ρωγμών και αλλάζει τον τρόπο θραύσης. Η αλλαγή στον τρόπο θραύσης αποδόθηκε στο υδρογόνο και προκάλεσε τοπική και ενδιάμεση αποδυνάμωση κοντά στην άκρη ρωγμών. Τα υγρά εναέρια περιβάλλοντα παρήγαγαν το υδρογόνο σε υψηλή πηκτικότητα λόγω της αντίδρασης μεταξύ του υδρατμού και του αλουμινίου και προκάλεσε μεγαλύτερες επιδράσεις στη διάρκεια ζωής της κόπωσης από έκθεση σε αέριο υδρογόνο σε 1 ATM. Η τοπική αποσκλήρυνση που προέκυψε από παράταση στη διάρκεια της ζωής του προκάλεσε μεγάλες μειώσεις στη διάρκεια ζωής της κόπωσης.[9]

(3.10) ΣΤΕΡΕΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Μελετήθηκαν τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας και άλλων μεταβλητών στις κινητικές των στερεών μετάλλων που προκλήθηκαν από αύξηση της ψαθυροποίησης ενός κράματος αλουμινίου 7075-T651, και τα στοιχεία αυτά συγκρίθηκαν με τα δημοσιευμένα στοιχεία για άλλα υλικά και εύθραυστα στοιχεία. Η ανάλυση των στοιχείων αυτών έδειξε ότι τα ποσοστά των ρωγμών ελέχθησαν μεταφέροντας τα εύθραυστα στοιχεία στις άκρες ρωγμών με τη διαδικασία διάχυσης της επιφάνειας. Τα ποσοστά αυτής της διαδικασίας ήταν προσεγγιστικά για διαφορετικά εύθραυστα στοιχεία και διαφορετικά υποστρώματα στις ίδιες ομόλογες θερμοκρασίες T/T_m , όπου το T είναι η θερμοκρασία που τα ελέγχουμε και το T_m είναι η θερμοκρασία τήξης του εύθραυστου στοιχείου σε kelvin. Πραγματοποιήθηκαν μεταλλογραφικές και κλασματομετρικές παρατηρήσεις για την επαγωγική ψαθυροποίηση του κράματος αλουμινίου 7075, για υψηλής αντοχής χάλυβες και κραμάτων τιτανίου, και περιγράφεται ένας μηχανισμός ευθραυστότητας που περιλαμβάνει μια προσρόφηση που προκαλείται από τοπική ολίσθηση. Συζητούνται μερικές παρατηρήσεις που αναφέρουν ότι η ρωγμή στα κράματα αλουμινίου σχετίζονται με την επαγωγική ψαθυροποίηση λόγω των ακαθαρσιών μέσα στο κράμα.[10]

(3.11) ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΡΥΘΜΟ ΕΝΤΑΣΗΣ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075

Τρεις μικροδομές του κράματος αλουμινίου 7075 μελετήθηκαν: T6, T73 και κράμα (UT) ίση στη δύναμη με το T6. Δείγματα με αυτές τις δομές φορτίστηκαν καθοδικά με υδρογόνο και πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι εφελκυσμού που εξετάστηκαν σε θερμοκρασία δωματίου με πέρα από μια σειρά τεσσάρων μεγεθών σε ποσοστό πίεσης. Και οι τρεις μικροδομές έδειξαν μία μέγιστη ψαθυροποίηση σε ένα ενδιάμεσο ποσοστό πίεσης. Αυτή η πίεση αυξήθηκε με το βαθμό γήρανσης από περίπου 0.0005/s για UT, σε 0.01/s για T73. Η μείωση της ψαθυροποίησης σε χαμηλότερα ποσοστά πίεσης απέδειξε ότι δεν είναι ένα αποτέλεσμα της απώλειας υδρογόνου από τα δείγματα. [11]

(3.12) Η ΜΕΛΕΤΗ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024 ΣΕ ΔΙΑΜΗΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ

Πραγματοποιήθηκε μια συγκριτική μελέτη της επίδρασης υδρογόνου στην ολική ολκιμότητα σε κυλιόμενη κατεύθυνση του κράματος αλουμινίου 2024 στο T351 σε κατάσταση επαναφοράς και το κράμα αλουμινίου 2024 σε κατάσταση γήρανσης στους 190°C για 7 ώρες. Το υδρογόνο και τα ελεύθερα εκτατά δείγματα φύλλων υδρογόνου που προφορτίζονται έχουν εξεταστεί είτε σε σταθερό είτε εναλλασσόμενο ποσοστό πίεσης. Έχει διαπιστωθεί ότι η εισχώρηση υδρογόνου προκάλεσε την αυστηρή υποβάθμιση στη γενική πλαστική επιμήκυνση του κράματος αλουμινίου 2024-T351 και ότι στο τεχνητό κράμα 2024 η ψαθυροποίηση παρατηρήθηκε μόνο μετά από την αρχή λαϊμού. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η τροποποίηση της εισαγωγής του υδρογόνου εξαρτάται από το ποσοστό πίεσης της ροής του, μειώνοντας τη σκληρότητα στο 2024-T351 και της ενίσχυσης της δυναμικής χαλάρωσης. Προτείνεται ότι η ψαθυροποίηση λόγω του υδρογόνου προκαλείται από την αύξηση της εισδοχής του στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την ανομοιομορφη πλαστική παραμόρφωση. [12]

(3.13) Η ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024- T351

Η συνεργική επίδραση της διάβρωσης και της ψαθυροποίησης λόγω της ψαθυροποίησης του υδρογόνου που εμφανίζονται στην τοπική κλίμακα καταλήγουν σε μακροσκοπική εκτατή απώλεια ολκιμότητας του κράματος αλουμινίου 2024. Στην παρούσα εργασία η εκτατή συμπεριφορά διαβρωμένου δείγματος 2024-T351 έχει υπολογιστεί βάσει της FE ανάλυσης, λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές ιδιότητες του υλικού στις περιοχές που έχουν υποστεί φθορά. Πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη για την επίδραση του πάχους στα αποτελέσματα. Οι υπολογισμένες εκτατές ιδιότητες που λαμβάνονται με την ανάλυση συμφωνούν με τα πειραματικά στοιχεία. [13]

(3.14) Η ΔΙΑΧΥΣΗ ΚΑΙ Η ΠΑΓΙΔΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ

Ερευνήθηκε η διάχυση και η παγίδευση του υδρογόνου με υψηλή καθαρότητα (99.999 % σε βάρος), σε πολυκρυσταλλικό αλουμίνιο χρησιμοποιώντας ισόθερμες και σταθερές τεχνικές εκρόφησης ποσοστού θέρμανσης. Η σταθερή εκρόφηση ποσοστού θέρμανσης χρησιμοποιήθηκε για να διευκρινίσει τα αποτελέσματα στις περιοχές του αλουμινίου που υπέστησαν προφανή διάχυση υδρογόνου. Κατά τη διάχυση η ισόθερμη εκρόφηση του υδρογόνου από τα ανοπτημένα, ομοίμορφα, κυλινδρικά δείγματα ήταν ελεγχόμενη. Τα στοιχεία διάχυσης εξέθεσαν την απλή συμπεριφορά Arrhenius μεταξύ 30°C και 600°C και περιγράφονται από το διάστημα εμπιστοσύνης 95% από τη σχέση:

$$D = 1.75 \pm 0.15 \times 10^{-8} (\text{m}^2 / \text{s}) \exp\{-16.2 \pm 1.5(\text{kJ} / \text{mol}) / RT\}.$$

Τα σταθερά φάσματα εκρόφησης ποσοστού θέρμανσης αποκάλυψαν τρία διακριτά μέρη με ενέργειες εκρόφησης 15.3±4.8, 43.5±17.5 και 84.8±32.2 kJ/mol. Αυτά τα μέρη συνδέονται με τις ενδιάμεσες περιοχές δικτυωτού πλέγματος, τις εξαρθρώσεις, και τα κενά αντίστοιχα. Ο προσδιορισμός και η κατανόηση του ρόλου αυτών των μερών στα πειράματα διείσδυσης και εκρόφησης, εξηγούν τη μεγάλη διασπορά στις αναφερόμενες εκτιμήσεις της διάχυσης του υδρογόνου στο αλουμίνιο.[14]

(3.15) Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΦΥΡΗΛΑΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 5083

Παρατηρήθηκε σκλήρυνση στα στρώματα της επιφάνειας του εξεταζόμενου κράματος λόγω της απορρόφησης υδρογόνου. Οι εκατές δοκιμές αποκάλυψαν ότι η ολκιμότητα του επεξεργασμένου κράματος αλουμινίου 5083 μειώθηκε με τον αυξανόμενο χρόνο φόρτισης με υδρογόνο, καθώς επίσης για μια σταθερή τιμή φόρτισης της τρέχουσας πυκνότητας και με αυξανόμενη φόρτίσή της και για μια σταθερή τιμή φόρτισης στο χρόνο. Ωστόσο, η τελευταία εκτατή τάση του εξετασμένου κράματος επηρεάστηκε ελαφρώς από τη διαδικασία φόρτισης υδρογόνου. Το φορτισμένο κράμα 5083 παρουσίασε μία εύθραυστη περικοκκική αστοχία στα στρώματα επιφάνειας και μια όλκιμη περικρυσταλλική αστοχία στα βαθύτερα στρώματα του κράματος.[15]

(3.16) Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΞΑΡΘΡΩΣΗ

Οι μελέτες παραμόρφωσης στα πολυάριθμα υλικά έχουν διεξήχθησαν επί τόπου σε ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μετάδοσης που εξοπλίζεται με ένα περιβαλλοντικό κύτταρο, για να διευκρινίσει τους μηχανισμούς της ψαθυροποίησης λόγω υδρογόνου. Τα αρχικά αποτελέσματα από αυτές τις μελέτες είναι ότι το διάλυμα υδρογόνου μπορεί να αυξήσει την ταχύτητα των εξαρθρώσεων και το ποσοστό της

διάδοσης ρωγμών, να μειώσει την ενέργεια των συσσωρευμένων ελαττωμάτων του ανοξειδωτού χάλυβα 310s και να αυξήσει τη ροπή για τις εξαρθρώσεις των ακρών. Συζητούνται επίσης τα στοιχεία από τις μαζικές μηχανικές δοκιμές, ώστε να υποστηριχθούν αυτά τα αποτελέσματα. [16]

(3.17) Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΗ ΣΕ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Η ενισχυμένη από υδρογόνο αστοχία του κράματος αλουμινίου 7050 και 7075 Mg-Zn-Al που έχει υποστεί γήρανση και σκλήρυνση, μελετείται από μια κανονική τεχνική παραμόρφωσης TEM. Ερευνήθηκαν τα αποτελέσματα του αερίου και του στερεού υδρογόνου. Ελέγχθηκαν τα αποτελέσματα από τις υψηλές τιμές αερίου σε ατμόσφαιρες του υδρογόνου, στη συμπεριφορά των εξαρθρώσεων και στις άκρες των ρωγμών σε αυτά τα κράματα από την τηλεοπτική καταγραφή. Συνάγεται το συμπέρασμα ότι το υδρογόνο ενισχύει την κινητικότητα εξάρθρωσης και μειώνει την πίεση ροής. Η αστοχία στο υδρογόνο ήταν παρόμοιο με αυτό που παρατηρήθηκε στο κενό εκτός του ότι αυτό εμφανίστηκε στις χαμηλότερες πιέσεις λόγω της ενισχυμένης από υδρογόνο κινητικότητας της εξάρθρωσης. Το υδρογόνο συγκεντρώθηκε στην περιοχή υψηλής πίεσης και μπροστά από τη ρωγμή προωθώντας υψηλή όλκιμη αστοχία στην περιοχή. Η αστοχία των προφορτισμένων δειγμάτων οφείλεται στα ιζήματα, πλούσια σε πυρίτιο και σίδηρο, που έχουν ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση υδρογόνου στην εγγύτητά τους. [17]

(3.18) Η ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Η εκτεταμένη μοριακή τροχιακή προσέγγιση Huckel που εφαρμόζεται προηγουμένως στη μελέτη της αλληλεπίδρασης ενός ατόμου υδρογόνου, με ένα μόνο κενό σε ένα δικτυωτό πλέγμα αλουμινίου, χρησιμοποιείται για να εξετάσει την αλληλεπίδραση ενός ενιαίου ατόμου υδρογόνου με ατέλειες και διάκενα Frenkel, τη σταθερότητα ενός μορίου υδρογόνου, πολλαπλάσιων ατόμων υδρογόνου στις δομές ατέλειας, και τις ενέργειες ενεργοποίησης για τη διάχυση του υδρογόνου μέσω του δικτυωτού πλέγματος παρουσία των κενών ή των ακαθαρσιών. Η σχετικότητα των αποτελεσμάτων των διαδικασιών της ψαθυροποίησης και της δημιουργίας φυσαλίδων συζητείται. [18]

(4) ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Οι αρχαίοι Έλληνες και Ρωμαίοι γνώριζαν τη στυπτηρία (διπλό θειικό άλας αργιλίου και καλίου) και την χρησιμοποιούσαν. Επίσης, χρησιμοποιούσαν αργιλοπυριτικές ενώσεις στην κεραμική. Το 1761 ο Γκιτόν ντε Μορβό (Guyton de Morveau) πρότεινε το όνομα «αλουμίνα» για το οξειδίο του αργιλίου (Al_2O_3). Το αργίλιο ανακαλύφθηκε, ως στοιχείο, το 1808 από τον Σερ Χάμφρεϊ Ντέιβι, ο οποίος και του έδωσε το όνομα, αρχικά «αλούμιο» και αργότερα «αλουμίνιο», αφού το στοιχείο προερχόταν από το οξειδίο του, την αλουμίνα. Το 1825 ο Δανός επιστήμονας Χανς Κρίστιαν Έρστεντ (Hans Christian Ørsted) απομόνωσε πρώτη φορά το αργίλιο, όταν κατεργάστηκε άνυδρο χλωριούχο αργίλιο με αμάλγαμα καλίου. Το 1827 περιγράφηκε αναλυτικά από τον Βέλερ (Woehler) μία μέθοδος παρασκευής του αργιλίου σε σκόνη από άνυδρο χλωριούχο αργίλιο και κάλιο.

Ο Βέλερ γενικά πιστώνεται την απομόνωση του αργιλίου, αλλά επίσης και ο Έρστεντ πρέπει επίσης ν' αναφερθεί ως αυτός που το ανακάλυψε. Επιπλέον ο Pierre Berthier ανακάλυψε ότι περιέχεται αλουμίνιο στο βωξίτη και κατόρθωσε επιτυχημένα την εξόρυξη του μετάλλου από το ορυκτό. Το 1854 ο Ανρί Σεν-Κλερ Ντεβίλ (Henri St-Claire Deville), βασισμένος στις εργασίες του Βέλερ επινοεί την πρώτη εμπορική μέθοδο παραγωγής του. Αρχικά, το κόστος του αργιλίου ήταν υψηλότερο από αυτό του χρυσού και του λευκόχρυσου. Γι' αυτό το λόγο σε γεύματα του Ναπολέοντος Γ' της Γαλλίας, οι πιο σημαντικοί καλεσμένοι έτρωγαν σε πιάτα από αργίλιο!

Το 1886 ήρθε η μεγάλη επανάσταση στην παραγωγή αλουμινίου, οπότε εφευρέθηκε η μέθοδος Hall-Heroult. Σε αυτή τη μέθοδο, τήγμα μίγματος κρυολίθου (φθοριούχο άλας του νατρίου και του αργιλίου: Na_3AlF_6) αργιλίου και οξειδίου του αργιλίου (αλουμίνα: Al_2O_3) ηλεκτρολύεται με συνεχές ρεύμα. Το τηγμένο αργίλιο συγκεντρώνεται στο βυθό του ηλεκτρολυτικού λουτρού. Όλο το αλουμίνιο που παράγεται στον κόσμο παράγεται με αυτή τη μέθοδο.

Το 1889 ο Bayer επινόησε μία μέθοδο καθαρισμού του βωξίτη προς παρασκευή αλουμίνας, με τη χρήση καυστικού νατρίου. Έτσι, άνοιξε ο δρόμος για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αλουμινίου. Το 1900 η παγκόσμια παραγωγή αλουμινίου ήταν 8000 τόνοι. Έκτοτε αυξήθηκε με πολύ μεγάλους ρυθμούς, για να φτάσει το 1999 τα 24 εκατομμύρια τόνους.



Το άγαλμα του Αντέρωτα ως Αγγέλου της Χριστιανικής Χάρης (που συχνά συγχέεται με τον αρχαίο θεό και γιο της Αφροδίτης Έρωτα) στην Piccadilly Circus στο Λονδίνο, κατασκευάστηκε το 1893 και ήταν ένα από τα πρώτα αγάλματα που κατασκευάστηκαν από αλουμίνιο.

Αν και το αλουμίνιο δεν έγινε γνωστό παρά μόνο στις αρχές του 19ου αιώνα, παρόλα αυτά χρησιμοποιήθηκε από την αρχαιότητα με την μορφή του αργίλου σαν πρώτη ύλη για την κατασκευή αγγείων, άλατα περιέχοντα αλουμίνιο για βαφές και φαρμακευτικά παρασκευάσματα. Οι αρχαίοι Κινέζοι, οι Αιγύπτιοι, οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι, χρησιμοποίησαν το αλουμίνιο στις φυσικές του ενώσεις χωρίς κατά πάσα πιθανότητα να έχουν πλήρη γνώση της ύπαρξης ενός μετάλλου που έδινε τις ειδικές αυτές ιδιότητες στις δημιουργίες τους. Στον μεσαίωνα οι επιστήμονες – αλχημιστές της εποχής, υποπτεύθηκαν την ύπαρξη ενός μετάλλου στον κοινό και τόσο φτηνό άργιλο, που θα τους έδινε την πολυπόθητη λύση δημιουργίας χρυσού με την μετάλλαξή του. Έπρεπε να φτάσει το 1761 για να προταθεί πρώτη φορά στην Ιστορία το όνομα "alume" από τον de Morveau, ως η βάση του "alum", δηλαδή του μετάλλου που δεν υπήρχε ακόμη στην καθαρή του μορφή. Αργότερα, το 1807, ο Sir Humphrey Davy πρότεινε το όνομα "aluminium" για το μέταλλο, αν και λίγο αργότερα

συμφώνησε με το όνομα "aluminium", όρος που χρησιμοποιείται και σήμερα ακόμα για το αλουμίνιο στην βόρεια Αμερική. Λίγο αργότερα το όνομα "**aluminium**" (αλουμίνιο) καθιερώθηκε για να μην διαφέρει το όνομα του νέου μετάλλου από τα άλλα καθιερωμένα ονόματα των φυσικών στοιχείων που έχουν κατάληξη σε "-ium". Η διεθνής, λοιπόν, χημική ονομασία του νέου μετάλλου είναι "αλουμίνιο" μέχρι και τις μέρες μας. Το ίδιο ίσχυσε και στις ΗΠΑ μέχρι το 1925, όταν η Αμερικανική Εταιρία Χημείας αποφάσισε να αλλάξει το όνομα ξανά σε "**aluminum**", έτσι ακόμα και σήμερα οι Αμερικάνοι χρησιμοποιούν αυτή την ονομασία, σε αντίθεση με τον υπόλοιπο κόσμο. Ας επιστρέψουμε, όμως, στην ιστορική μας διαδρομή. Ο Hans Christian Oersted ήταν ο πρώτος επιστήμονας που παρήγαγε καθαρό αλουμίνιο το 1825, με την χρήση χλωριδίου του αλουμινίου (AlCl₃) και αμάλγαμα ποτάσας, ένα κράμα δηλαδή ποτάσας και ψευδαργύρου. Ο Oersted ανεβάζοντας την θερμοκρασία του μίγματος, σε κατάσταση χαμηλής πίεσης πέτυχε την απομάκρυνση του ψευδαργύρου, το εναπομείναν δε υλικό ήταν το αλουμίνιο. Έτσι γεννήθηκε το μέταλλο που άλλαξε την ιστορία και οδήγησε τον άνθρωπο στο φεγγάρι, δίνοντάς του παράλληλα την δυνατότητα να μπορεί να εκσφενδονίζει πυραύλους μαζικής καταστροφής κατά του εαυτού του. Η ανακάλυψη αυτή δεν δημιούργησε παρά "ένα πολύτιμο" μέταλλο, μια και ήταν πολύ δύσκολη και ακριβή η παραγωγή του. Όπως για αρκετά χρόνια το αλουμίνιο θεωρούνταν πολύτιμο μέταλλο, που χρησιμοποιούσαν μόνον άμπλουτοι για την κατασκευή των πιάτων τους ας πούμε, κάτι σαν πιάτα από χρυσάφι θα λέγαμε.

Ας δούμε όμως με μια γρήγορη ματιά πως εξελίχθηκε η παραγωγή του μετάλλου από

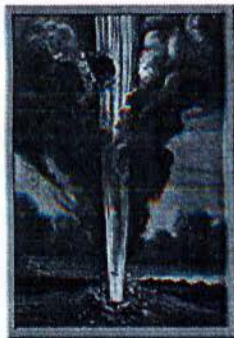
τις αρχές του 19ου αιώνα:

- **1808:** Ο Βρετανός Davy ανακαλύπτει την ύπαρξη του μετάλλου
- **1821:** Ο P. Berthier ανακαλύπτει κοντά στο χωριό Les Baux στην Γαλλία μια σκληρή, κοκκινωπή ουσία που περιέχει 52 % αλουμίνιο και την ονομάζει Βωξίτη.
- **1825:** Ο Δανός Hans Christian Oersted παράγει μια μικρή ποσότητα αλουμινίου χρησιμοποιώντας διάλυμα ποτάσας.
- **1827:** Ο Γερμανός Friedrich Wohler ανακοινώνει την ανακάλυψή του για την παραγωγή αλουμινίου μέσω της αντίδρασης ποτάσας με άνυδρο χλωρίδιο του αλουμινίου.
- **1845:** Ο Wohler ανακάλυψε και κατέγραψε την πυκνότητα του αλουμινίου και μία από τις βασικές του ιδιότητες, την ελαφρότητα.
- **1854:** Ο Γάλλος Henri Saite-Claire Deville βελτιώνει την μέθοδο του Wohler και παράγει βιομηχανικά αλουμίνιο, για πρώτη φορά στην ιστορία. Η τιμή του μετάλλου ξεπερνά αυτή του χρυσού και της πλατίνας.
- **1855:** Μία ράβδος αλουμινίου εκτίθεται στην Διεθνή Έκθεση των Παρισίων μαζί με άλλα πολύτιμα μέταλλα.
- **1886:** Δύο νέοι και άγνωστοι επιστήμονες, ο Γάλλος Paul Louis Toussaint Heroult και ο Αμερικάνος Charles Martin Hall, εφευρίσκουν την μέθοδο παραγωγής αλουμινίου μέσω της ηλεκτρόλυσης διαλύματος αλουμίνας. Οι δύο επιστήμονες εργάστηκαν ξεχωριστά, χωρίς να ξέρουν ο ένας την εργασία του άλλου.
- **1888:** Οι πρώτες εταιρίες παραγωγής αλουμινίου γεννήθηκαν στην Γαλλία, την Ελβετία και τις ΗΠΑ.
- **1889:** Ο Αυστριακός Friedrich Bayer, γιος του ιδρυτή της περίφημης εταιρίας χημικών ουσιών, εφευρίσκει την μέθοδο παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων αλουμίνας από τον βωξίτη.

· 1900: Η ετήσια παραγωγή αλουμινίου σπάει κάθε ρεκόρ, φτάνοντας τους 8 τόνους σε ετήσια βάση .[19,20]

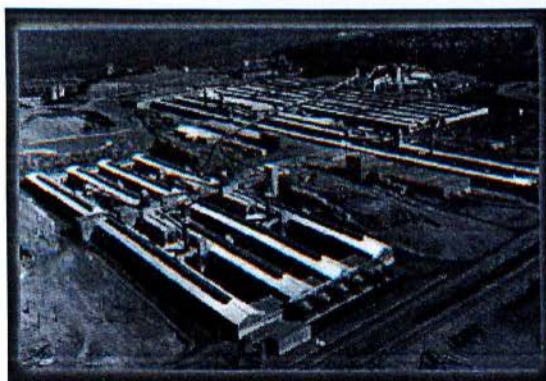
ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Το αλουμίνιο άρχισε να δημιουργεί την δική του αγορά καθώς η παραγωγή του στις αρχές του αιώνα έβγαλε το μέταλλο αυτό από τους πίνακες των πολυτίμων μετάλλων. Τότε, λοιπόν, στις αρχές του αιώνα η παραγωγή έφτασε σε μερικούς χιλιάδες τόνους, δικαιώνοντας την «προφητεία» του Ιουλίου Βερν, "Από την Γη στη Σελήνη" (φωτογραφία δεξιά).



Οι πρώτες χρήσεις του αλουμινίου σε βιομηχανικές εφαρμογές ξεκίνησαν:

- 1908, με την παραγωγή καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης
- 1910, με την παραγωγή καλωδίων για χρήση σε υπόγειες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρική ενέργειας, μονωμένες με μολύβι και χαρτί. Χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην Βοστόνη.
- 1912, με την παραγωγή κουπαστών εσωτερικών χώρων από αλουμίνιο για το επιβατικό πλοίο AQUITANA
- 1917, με την παραγωγή καλωδίου για μετασχηματιστές ηλεκτρικής ενέργειας.
- 1920, με την παραγωγή μηχανικών μερών για μηχανές.



Η πρώτη μεγάλη βιομηχανική μονάδα παραγωγής αλουμινίου που δημιουργήθηκε από την ALCAN το 1925

Η πρώτη μονάδα παραγωγής πρωτόχυτου αλουμινίου σε βιομηχανικές ποσότητες δημιουργήθηκε στον Καναδά από την Northern Aluminium Company, που αργότερα έγινε η γνωστή σε όλους Alcoa. Η μονάδα παρήγαγε έναν τόνο αλουμινίου την ημέρα από το 1901, όταν ξεκίνησε παραγωγή. Η πατρίδα της πρώτης αυτή μονάδας ήταν το Shawinigan Falls Quibec, κοντά στον ποταμό Saint Maurice, ιδανική τοποθεσία για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Το 1925, καθώς η ζήτηση για αλουμίνιο αυξάνονταν, η Alcan αύξησε την παραγωγή της κατασκευάζοντας νέα μονάδα παραγωγής αλουμινίου και ηλεκτρικής ενέργειας στην πόλη Arvida της ίδιας Καναδικής πολιτείας.[19]

(5) ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ

(5.1) ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

Γενικά Χαρακτηριστικά

Το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ αργυρόχρωμο μέταλλο. Το ατομικό του βάρος είναι 26,9815, κρυσταλλώνεται σε δομή κυβικού εδροκεντρωμένου, λιώνει σε θερμοκρασία 660°C (1.220°F), εξατμίζεται σε θερμοκρασία 2.467°C (4.473°F), και έχει ειδικό βάρος 2,7(kg/m³ ή g/cm³). Είναι ισχυρά ηλεκτροθετικό ως μέταλλο και εξαιρετικά αντιδρόν. Στην επαφή του με τον ατμοσφαιρικό αέρα οξειδώνεται ταχέως, δίνοντας ένα λεπτό συνεχές επιφανειακό στρώμα Al₂O₃ το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία. Είναι εξαιρετικός αγωγός του ηλεκτρισμού, ενώ είναι μη μαγνητικό, μη αναφλέξιμο και μη τοξικό. Επιπλέον, είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας. Μπορεί να ανακυκλωθεί, ενώ μορφοποιείται, χυτεύεται και κατεργάζεται εύκολα. Κράματα αυτού με μικρά ποσοστά χαλκού, μαγνησίου, μαγγανίου και πυριτίου αλλά και άλλων κραματικών στοιχείων, του προσδίδουν ιδιαίτερα ξεχωριστές και χρήσιμες ιδιότητες. Η αντοχή του εξαρτάται από την καθαρότητά του. Έτσι, καθαρό αλουμίνιο σε ποσοστό 99,996% έχει αντοχή σε εφελκυσμό περίπου 49 MPa, η οποία όμως μπορεί να φτάσει τα 700MPa μετά από κραμάτωση και κατάλληλη θερμική κατεργασία.

Το αλουμίνιο και η οικογένεια των κραμάτων του είναι σήμερα μετά το σίδηρο και το χάλυβα, τα σημαντικότερα βιομηχανικά μέταλλα και η χρήση τους διαρκώς επεκτείνεται. Η σημερινή διάδοση του αλουμινίου είναι εύκολο να εξηγηθεί εάν ληφθούν υπ' όψιν οι φυσικές του ιδιότητες. Πράγματι, το αλουμίνιο έχει το

μικρότερο μετά το μαγνήσιο ειδικό βάρος απ' όλα τα βιομηχανικά μέταλλα. (*) Επίσης, η μηχανική αντοχή ορισμένων κραμάτων του φθάνει το όριο θραύσεως 70kp/mm^2 .

Για τους λόγους αυτούς, η αντοχή ανά μονάδα βάρους ορισμένων κραμάτων είναι εντυπωσιακά υψηλή, κατάλληλη για εφαρμογές στις αεροπορικές και διαστημικές κατασκευές. Επίσης, η ηλεκτρική και η θερμική αγωγιμότητά του καθαρού αλουμινίου είναι πολύ υψηλή, μικρότερη από το χαλκό (Cu), τον άργυρο (Ag) και το χρυσό (Au). Πάντως η ανά μονάδα βάρους αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι η μεγαλύτερη από όλα τα βιομηχανικά μέταλλα.

(*) Το καθαρό αλουμίνιο (Al) είναι μέταλλο ελαφρύ και πολύ όλκιμο. Οι μηχανικές του ιδιότητες δεν εξαρτώνται μόνο από την καθαρότητά του, αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί κατά τη διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Η σημασία του για την κατασκευαστική βιομηχανία είναι πολύ μεγάλη διότι παρουσιάζει υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή (σ_{TS}/ρ), σε σχέση με άλλα μέταλλα και κράματα. Επίσης, παρουσιάζει καλή αντοχή σε διάβρωση.

Το αλουμίνιο και τα κράματά του, παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στην οξείδωση και στη διάβρωση, αν και αντιδρούν ισχυρά με το οξυγόνο. Αυτό οφείλεται στο οξείδιο του αλουμινίου που σχηματίζει ένα αδιαπέραστο στρώμα στην επιφάνεια του μετάλλου και δεν επιτρέπει την περαιτέρω οξείδωση του μετάλλου. Στο οξείδιο αυτό οφείλεται και το μοναδικό ίσως μειονέκτημα που παρουσιάζει το αλουμίνιο και τα κράματά του, δηλαδή τη δύσκολη συγκόλλησή τους στον ατμοσφαιρικό αέρα. Αντίθετα το αλουμίνιο και τα κράματά του προσφέρονται για όλους τους τύπους των μηχανουργικών κατεργασιών, χύτευση, κοπή, εξέλαση κλπ.

Τα πλεονεκτήματα αυτά σε συνδυασμό με τα μεγάλα αποθέματα αλουμινίου που υπάρχουν (το αλουμίνιο είναι το πιο διαδεδομένο μέταλλο στην επιφάνεια της γης), το καθιστούν ισχυρό ανταγωνιστή του σιδήρου και του χάλυβα. [22]

(5.2) ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

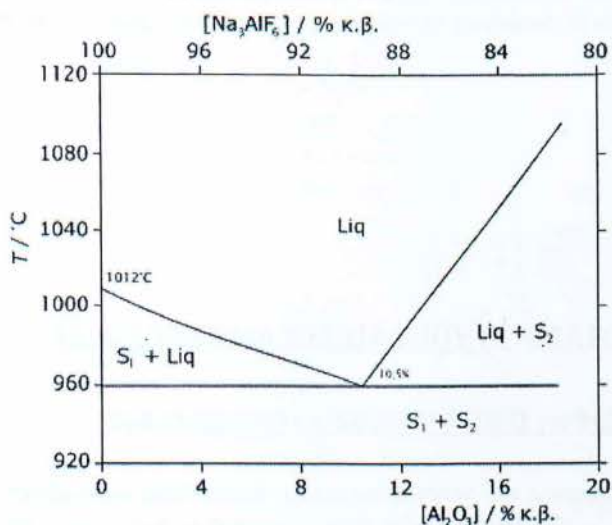
Σήμερα, η παραγωγή αλουμινίου ακολουθεί σε γενικές γραμμές την ακόλουθη διαδικασία:

Πρώτα ο βωξίτης εξορύσσεται από το κοίτασμα (συνήθως επιφανειακό). Στη συνέχεια εκπλύνεται, θρυμματίζεται και διαλύεται σε πυκνό διάλυμα καυστικού νατρίου σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Με αυτό τον τρόπο, οι προσμίξεις του βωξίτη (κυρίως οξείδια του σιδήρου και του πυριτίου) απομακρύνονται και παραμένει στο διάλυμα το καυστικό νάτριο με το οξείδιο του αργιλίου. Στη συνέχεια απομακρύνεται και το καυστικό νάτριο και παραμένει μόνο το ένυδρο οξείδιο του αργιλίου, το οποίο πυρώνεται στους 1100°C έτσι, ώστε να απομακρυνθεί το νερό.

Ακολουθεί η ηλεκτρόλυση. Το οξειδίο του αργιλίου διαλύεται σε τήγμα κρυολίθου, το οποίο βρίσκεται σε ηλεκτρολυτική λεκάνη με άνοδο ηλεκτρόδιο άνθρακα και κάθοδο την επένδυση της λεκάνης από ανθεκτικό μέταλλο. Στη συνέχεια διαβιβάζεται μέσα από αυτό συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης αλλά εξαιρετικά υψηλής έντασης (περίπου 150000 Αμπέρ). Το τηγμένο αλουμίνιο συλλέγεται από το βυθό της λεκάνης. Το παραγόμενο κατά την ηλεκτρόλυση οξυγόνο κατευθύνεται προς την άνοδο από άνθρακα, τον οποίο καίει, (γι' αυτό και τα ηλεκτρόδια της ανόδου αντικαθίστανται τακτικά) διατηρώντας έτσι την θερμοκρασία του τήγματος σε υψηλά επίπεδα. Παράλληλα, όμως, παράγεται και φθόριο (προερχόμενο από τον κρυολίθο), το οποίο συλλέγεται με ειδικό κάλυμμα της λεκάνης και, κατευθυνόμενο σε ειδική μονάδα ανακυκλώνεται, ώστε να μην καταλήξει στην ατμόσφαιρα.

Η ηλεκτρόλυση είναι μια διεργασία η οποία είναι εξαιρετικά ηλεκτροβόρα. Ένα τυπικό εργοστάσιο παραγωγής αλουμινίου καταναλώνει ρεύμα όσο μια μικρή πόλη. Ενδεχόμενη διακοπή ρεύματος για παραπάνω από 4 ώρες σημαίνει στερεοποίηση των τηγμάτων στις λεκάνες και, συνεπώς, καταστροφή τους. Γι' αυτό το λόγο, τα περισσότερα εργοστάσια είτε παράγουν επιτόπου την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν είτε συνδέονται με παραπάνω από μία πηγές ενέργειας (έχουν δηλαδή απευθείας διεθνείς συνδέσεις).

Εκτός από το βωξίτη, το αργίλιο βρίσκεται στη φύση στα ορυκτά της αργίλου και στους κρυστάλλους του ρουμπινιού, του ζαφειριού και του κορουνδίου αλλά και σε πολύ μεγάλο αριθμό πυριτικών, κυρίως, ορυκτών. Μεγάλος αριθμός βιομηχανικών ορυκτών περιέχει αργίλιο.



Το διάγραμμα φάσεων κρυολίθου-αλουμίνας παρουσιάζει ένα ευτηκτικό σημείο για 10,5% κ.β. Al_2O_3 με σημείο τήξης 960°C , γεγονός που επιτρέπει την παραγωγή αλουμινίου από τήγμα των δύο ενώσεων

Η παραγωγή αλουμινίου από Βωξίτη απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, έτσι η τιμή του αλουμινίου είναι σημαντικά ανώτερη του σιδήρου. Αντίθετα, η ανακύκλωση του σιδήρου απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη ενέργεια από την ανακύκλωση του αλουμινίου, καθόσον ο σίδηρος έχει πολύ υψηλότερο σημείο τήξεως. Έτσι, π.χ. στις Η.Π.Α. ΤΟ 1977 παρήχθησαν 4,500,000 t αλουμινίου από βωξίτη και 700,000 t από ανακύκλωση, με σημαντικότερη ενεργειακή οικονομία της τάξεως των δισεκατομμυρίων κιλοβατώραν.

(5.3) ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Όπως ακριβώς συμβαίνει και με κάθε μέταλλο, έτσι και στην περίπτωση του καθαρού αλουμινίου, η χρησιμότητά του διευρύνεται σημαντικά έπειτα από την κραμάτωσή του με άλλα στοιχεία. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται 'νέα μέταλλα' που έχουν ως βάση το αλουμίνιο και που η χρησιμότητά τους σε διάφορες εφαρμογές είναι μεγαλύτερη από αυτήν του καθαρού αλουμινίου. Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και σε κράματα χύτευσης. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί. Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματά του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Οι κύριες προσθήκες των κραμάτων αλουμινίου είναι ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το μαγνήσιο, το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος.

(5.4) ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

(5.4.1) ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS)

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία όπου [23]:

- Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία.
- Το δεύτερο ψηφίο δείχνει τις διάφορες μορφές του αρχικού κράματος
- Το τρίτο και τέταρτο ψηφίο τις διαφορετικές μορφές του κάθε κράματος.

1xxx Καθαρό Al (Al >99,00%)

2xxx Κράματα Al-Cu

- 3xxx Κράματα Al-Mn
- 4xxx Κράματα Al-Si
- 5xxx Κράματα Al-Mg
- 6xxx Κράματα Al-Mg-Si
- 7xxx Κράματα Al-Zn
- 8xxx Κράματα Al με άλλα στοιχεία
- 9xxx Μη χρησιμοποιούμενη σειρά.

1xxx Καθαρό Αλουμίνιο

- Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση
- Διαμορφώνεται πολύ εύκολα, παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Ηλεκτρικές και χημικές εφαρμογές
- Αντιπροσωπευτικές σειρές: 1100, 1350
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 69- 186 Μpa

Η σειρά 1xxx αντιπροσωπεύει το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο, από το βασικό 1100 (99,00% min. Al) μέχρι τα σχετικά καθαρότερα 1050/1350 (99,50% min. Al) και 1175 (99,75% min. Al) . Μερικοί τύποι , σαν το 1350 που χρησιμοποιείται ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές, έχουν σφιχτές ανοχές στο ποσοστό των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για τη μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Η σειρά 1xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η αντοχή είναι το βασικό στοιχείο σχεδιασμού. Περισσότερη έμφαση πρέπει να δίνεται σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, καλή ολκιμότητα και/ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως φύλλα για συσκευασία, χημικό εξοπλισμό, σασί αυτοκινήτων η φορτηγών και όπου απαιτείται χρήση λαμαρίνας.

Εικ.1.1 Εγκατάσταση ηλεκτρικών αγωγών αλουμινίου με Al 1350.

Εικ.1.2 Αλουμινόχαρτο για τρόφιμα και φάρμακα από καθαρό αλουμίνιο 1100

Εικ.1.3 Αλουμινόχαρτο με έντυπο για τρόφιμα και ποτά από 1060 ή 1100



2xxx Κράματα Al-Cu

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Έχουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Εφαρμογές σε μεταφορές (αεροπλάνα τράινα)
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 2014, 2017, 2024, 2219, 2195
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 186- 427 Μpa

Η σειρά 2xxx υφίσταται θερμική κατεργασία και συνδυάζει σε κάποια κράματα υψηλή αντοχή (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες), ακαμψία και σε μερικές περιπτώσεις καλή συγκολλησιμότητα. Δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, έτσι βάφεται ή επενδύεται κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς 2xxx κυρίως χρησιμοποιούνται για αεροσκάφη (2024) και για σασί φορτηγών (2014). Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που συνδέονται με σπειρώματα ή πριτσίνια. Κάποια ειδικά κράματα της σειράς (π.χ 2219 και 2048) συγκολλούνται, και έτσι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε αεροσκάφη όπου η μέθοδος της συγκόλλησης προτιμάται. Το κράμα 2195 είναι νέο σχετικά κράμα με Li για διαστημικές εφαρμογές, έχοντας πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και παρουσιάζοντας καλή συγκολλησιμότητα. Υπάρχουν επίσης διάφοροι τύποι κραμάτων (π.χ. 2124, 2324, 2419) με υψηλή ακαμψία και στους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για την μείωση της αντοχής, και αναπτύχθηκαν για τη βιομηχανία αεροσκαφών. Τα κράματα 2011, 2017 και 2117 χρησιμοποιούνται ευρέως για βίδες και ροδέλες.

Εικ.2.1 Η εσωτερική κατασκευή των αεροσκαφών περιλαμβάνει διατομές και φύλλα των σειρών 2xxx και 7xxx (2024, 2124 και 2618). Το εξωτερικό φύλλο μπορεί να είναι Alclad 2024 ή 2618. Επένδυση με υψηλής καθαρότητας αλουμίνιο (Alclad) προσδίδει προστασία σε διάβρωση στα κράματα Al-Cu τα οποία διαφορετικά θα μαυρίσουν με τον καιρό.



Εικ.2.2 Σε καρότσες φορτηγών και βυτίων χρησιμοποιούνται διατομές από κράματα σειράς 2xxx.

Εικ.2.3 2.4 Οι αποθήκες καυσίμου και οι πύραυλοι προώθησης του διαστημικού λεωφορείου είναι από κράματα 2xxx αρχικά 2219 και 2419 και τώρα τελευταία από κράμα Al-Li 2195.



3xxx Κράματα Al-Mn

- Διαμορφώνεται πολύ εύκολα, παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή συγκολλησιμότητα. Μέτρια αντοχή.
- Χρησιμοποιείται για αγωγούς μεταφοράς θερμότητας, συσκευασία και εφαρμογές στέγης και πλαϊνών τοιχωμάτων.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 3003, 3004, 3005.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 110-282 Μpa

Η σειρά 3xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, έχει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Έχει πολύ καλή επιδεκτικότητα σε επιχάλκωση. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται ευρέως σε σκεύη κουζίνας και για χημικό εξοπλισμό όπως και σε κτιριακές υποδομές. Το κράμα 3105 είναι ένα από τα βασικά για στέγες και πλαϊνές επικαλύψεις κτιρίων. Τα διάφορα κράματα της σειράς 3xxx χρησιμοποιούνται σε μορφή λαμαρίνας και σωλήνα για εναλλάκτες θερμότητας σε φορτηγά και ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς.

Τα κράματα 3004 και το 3104 είναι μεταξύ των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων κραμάτων λόγω της χρήσης τους στα τενεκεδάκια των αναψυκτικών.

Εικ.3.1 Εναλλάκτες θερμότητας αυτοκινήτων είναι από κράμα σαν το 3002.

Εικ.3.2 Κράμα 3003 σε εναλλάκτη θερμότητας εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρισμού.

Εικ.3.3 Το σώμα από τα τενεκεδάκια των αναψυκτικών είναι από κράμα 3004 ή 3104, το περισσότερο παραγόμενο κράμα στη βιομηχανία.

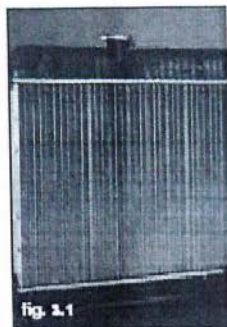


Fig. 2.1

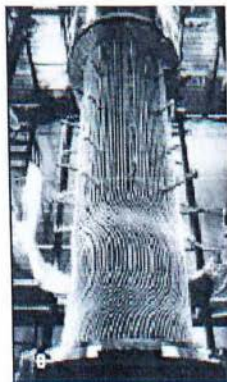


Fig. 3.2



Fig. 3.3

4xxx Κράματα Al-Si

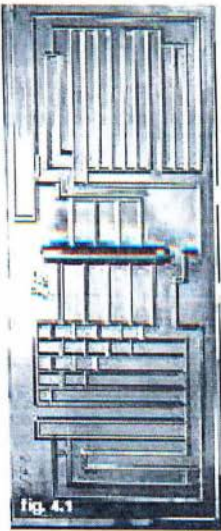
- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Καλά χαρακτηριστικά ροής, μέτρια αντοχή.
- Πιστόνια, σφυρήλατα πολύπλοκου σχήματος.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 4032 και υλικό ηλεκτροδίων 4043.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172- 380 Μpa

Από τα δυο περισσότερο χρησιμοποιούμενα κράματα της σειράς 4xxx, το 4032 είναι ένα μέτριας προς υψηλής αντοχής κράμα, θερμικά κατεργάσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως για σφυρήλατα προϊόντα και σε εφαρμογές όπως πιστόνια αεροσκαφών. Από την άλλη πλευρά το 4043 είναι ένα από τα πλέον γνωστά υλικά συγκόλλησης των κραμάτων της σειράς 6xxx για κατασκευές και εφαρμογές στα αυτοκίνητα.

Το ίδιο χαρακτηριστικό (της εύκολης σφυρηλασίας) οδηγεί στις εφαρμογές της σειράς. Πολύ καλή ολκιμότητα που οφείλεται στην ψηλή περιεκτικότητα σε Si, στη περίπτωση των σφυρήλατων προϊόντων εξασφαλίζει το γέμισμα περίπλοκων καλουπιών, στη δε περίπτωση του υλικού συγκόλλησης εξασφαλίζει πλήρωση των ρωγμών και των κενών των τεμαχίων που συγκολλούνται.

Οι σειρά 4xxx και τα κράματα της που χρησιμοποιούνται ευρέως αντιπροσωπεύονται από τις παρακάτω εφαρμογές:

- Εικ.4.1 Σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού με επιχαλκωμένο κράμα υψηλής περιεκτικότητας σε Si.
- Εικ.4.2 Κράμα 4043: Το πιο ευρέως διαδεδομένο σύρμα συγκόλλησης.



5xxx Κράματα Al-Mg

- Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση
- Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση καλή συγκολλησιμότητα και καλή δυσκαμψία. Ενδιάμεση αντοχή.
- Εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, κρυογενικά υλικά, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 5052, 5083, 5754.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172-380 Mpa

Όλα τα κράματα της σειράς 5xxx υφίστανται σκλήρυνση με ψυχρηλασία και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση ακόμη και σε θαλάσσιο περιβάλλον, και μεγάλη ακαμψία ακόμη και σε κρυογενικό περιβάλλον κοντά στο απόλυτο 0° K. Συγκολλούνται εύκολα με πολλές τεχνικές ακόμη και σε μεγάλα πάχη μέχρι 20 cm. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω η σειρά 5xxx βρίσκει μεγάλες εφαρμογές σε κτιριακά και κατασκευές, κατασκευές γεφυρών δοχεία αποθήκευσης και πιεστικά εφαρμογές συστημάτων για θερμοκρασίες -270o C και εφαρμογές κοντά στη θάλασσα.

Τα κράματα 5052, 5086 και 5083 χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατασκευές με την αντοχή να αυξάνει καθώς αυξάνει η περιεκτικότητα σε Mg. Ειδικές εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν το 5182 (ο πυθμένας από το τενεκεδάκι των αναψυκτικών) το 5754 για σωληνωτό πλαίσιο αυτοκινήτων και 5252, 5457 και 5657 για εμφανισιακές εφαρμογές (φτερά, καπό αυτοκινήτου κλπ.).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται ώστε να αποφεύγεται η χρήση κραμάτων σειράς 5xxx με Mg >3%, σε εφαρμογές συνεχούς έκθεσης σε θερμοκρασίες άνω των 100o C. Τέτοια κράματα μπορεί να ευαισθητοποιηθούν σε διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων. Σ' αυτές τις περιπτώσεις συνιστώνται κράματα σαν τα 5454 και 5754.

Παραδείγματα των εφαρμογών των ευρέως διαδεδομένων κραμάτων σειράς 5xxx:

- Εικ.5.1 Μεγάλα ταχύπλοα έχουν το κύτος επενδυμένο με κράμα 5083 όπως και το κατάστρωμα και την ανωδομή.
- Εικ.5.2 Η εσωτερική κατασκευή του ανωτέρω ταχυπλόου.
- **Εικ.5.3 Ταχύπλοα σκάφη απλών η διπλών τοιχωμάτων χρησιμοποιούν διάφορα κράματα όπως 5083 και 5454 σε φύλλα μαζί με διατομές σειράς 6xxx σε κατασκευές με συγκολλήσεις συνδεδεμένες.**
- Εικ.5.4 Το κράμα 5083 είναι το βασικό υλικό κατασκευής των σφαιρών διαμέτρου 125 ft για την θαλάσσια μεταφορά υγρού φυσικού αερίου. Η κατασκευή είναι όλη συγκολλητή και το πάχος στην οριζόντια διάμετρο είναι 200 περίπου mm.
- Εικ.5.5 Η γέφυρα Foresmo στη Βόρεια Νορβηγία είναι ένα άριστο παράδειγμα χρήσης κραμάτων Al-Mg για την κατασκευή συστημάτων δοκών. Η εικόνα δείχνει το κύριο πλεονέκτημα αντικατάστασης γεφυρών αλουμινίου. Η δυνατότητα πρόκατασκευής των ανοιγμάτων και της γρήγορης μεταφοράς και τοποθέτησης ελαχιστοποιεί την αναστάτωση στη κυκλοφορία.
- Εικ.5.6 Βαγόνια μεταφοράς κάρβουνου κατασκευασμένα από συγκολλητά φύλλα κράματος 5454.
- Εικ.5.7 Εξέδρες άντλησης πετρελαίου. Οι απαιτήσεις σε διάβρωση λόγω της υψηλής υγρασίας και έκθεσης στο νερό καλύπτονται από συγκολλητές κατασκευές με κράματα 5454, 5086 και 5083.
- Εικ.5.8 5.9 Στη βιομηχανία αυτοκινήτου η ποσότητα του 5754 κράματος σε μορφή φύλλων αυξάνει συνεχώς.
- Εικ.5.10 Ο πυθμένας από τα τενεκεδάκια των αναψυκτικών είναι από κράμα 5182 ένα από τα περισσότερο παραγόμενα κράματα της σειράς 5xxx.

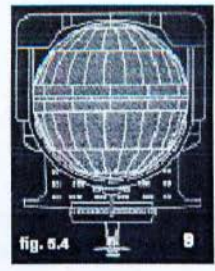




fig. 5.7



10

fig. 5.8

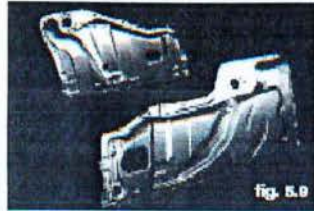


fig. 5.9



fig. 5.10

6xxx Κράματα Al-Mg-Si

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, εξαιρετική ολκιμότητα, ενδιάμεση αντοχή.
- Εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 6061, 6063, 6111
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 125- 400 Μpa

Τα κράματα της σειράς 6xxx δέχονται θερμική κατεργασία, έχουν σχετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που συνδυάζεται με άριστη αντοχή σε διάβρωση. Συγκολλούνται εύκολα. Μια μοναδική τους ιδιότητα είναι η ικανότητα για διέλαση που τα κάνει την πρώτη εκλογή για αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές λύσεις όπου επίσης απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή.

Το κράμα 6063 ίσως είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, λόγω της ικανότητας του για διέλαση. Είναι ένα από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη γέφυρα Foresmo της Νορβηγίας και είναι το κράμα που η Audi έχει επιλέξει για το πλαίσιο των αυτοκινήτων της.

Το κράμα 6061 με υψηλότερη αντοχή βρίσκει εκτεταμένη χρήση σε κατασκευές συνδεδεμένες με συγκολλήσεις όπως φορτηγά, βαγόνια τραίνου και σωληνώσεις. Μεταξύ των ειδικών κραμάτων της σειράς: 6066-T6 με υψηλή αντοχή για σφυρήλατα 6111 για panel πλαισίων αυτοκινήτου και 6101 και 6201 για υψηλής αντοχής ηλεκτρικούς αγωγούς.

Οι πιο σπουδαίες εφαρμογές για κράματα Al-Mg-Si είναι:

Εικ.6.1 Η δυνατότητα των διελάσιμων κραμάτων Al-Mg-Si να μπαίνουν όπου τα χρειάζεσαι.

Εικ.6.2 Κατασκευές οροφής για κλειστούς στίβους και γυμναστήρια είναι συνήθως σωλήνες 6063 ή 6061 καλυμμένες με φύλλα κράματος σειράς 5xxx.

Εικ.6.3 Κατασκευή στο Long beach CA, με διάμετρο 330 μέτρα και ύψος 130.

Εικ.6.4 6.5: Ειδική διατομή για προστατευτικές μπάρες με κράμα 6063 τοποθετούνται σε ελάχιστο χρόνο.

Εικ.6.6 6.7: Τα νέα τρέινα Mag-Lev που αναπτύσσονται στην Ευρώπη και Ιαπωνία χρησιμοποιούν τα κράματα 6061 και 6063 για τα σώματα των βαγονιών.

Εικ.6.8 6.9 Διατομές κραμάτων σειράς 6xxx κατασκευάζουν τον εσωτερικό σκελετό μοτοσυκλετών και αυτοκινήτων (η εικόνα είναι από το Audi A8).

Εικ.6.10 Συγκολλητές διατομές 6063 συνδυαζόμενες με σωλήνες 5083 αποτελούν το



fig. 6.4



fig. 6.5

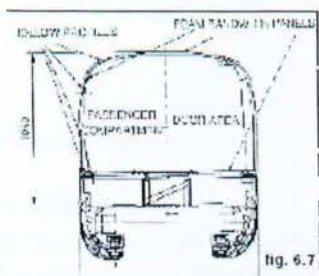


fig. 6.7



fig. 6.8

μπροστινό και πίσω σύστημα ανάρτησης των μοντέλων της BMW σειράς 5.

7xxx Κράματα Al-Zn

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Πολύ μεγάλη αντοχή, τύποι εξαιρετικής ακαμψίας.
- Εφαρμογές αυτοκινήτων και αεροδιαστημικές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 7005, 7075, 7475, 7150
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 220-605 Μpa

Τα κράματα της σειράς 7xxx υφίστανται θερμική κατεργασία και μεταξύ των διαφόρων κραμάτων οι τύποι Al-Zn-Mg-Cu έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου. Υπάρχουν διάφορα κράματα της σειράς που παράγονται για την εξαιρετική τους ακαμψία, κυρίως τα 7150 και 7475 που με πολύ καλό έλεγχο του επιπέδου των ακαθαρσιών μεγιστοποιούν τον συνδυασμό αντοχής και ακαμψίας.

Η μεγαλύτερη εφαρμογή των σειρών 7xxx ιστορικά είναι στη βιομηχανία αεροσκαφών όπου απαιτούνται μεγάλες τιμές ακαμψίας. Τα κράματα αυτά δεν

θεωρούνται συγκολλησίμα με τις κοινές μεθόδους και συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με πριτσίνια.

Η αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση της σειράς 7xxx δεν είναι τόσο υψηλή όσο των σειρών 5xxx και 6xxx, έτσι σε τέτοιες συνθήκες συνήθως επενδύονται η αν πρόκειται για φύλλα χρησιμοποιούνται επαλουμινωμένα (Alclad). Στις περιπτώσεις που υπάρχει υποψία για κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων (stress corrosion cracking) πρέπει να εφαρμόζεται θερμική T73 αντί για T6.

Εφαρμογές των κραμάτων σειράς 7xxx περιλαμβάνουν:

Εικ.7.1. Κατασκευές αεροσκαφών από φύλλα ή διατομές σειράς 7xxx: Τύποι 7075-T73 ή 7050 η 7475.

Εικ.7.2. Προφυλακτήρες αυτοκινήτων από 7029 ή 7129 μειώνουν το βάρος του αυτοκινήτου και βελτιώνουν την κατανάλωση του.



8xxx Κράματα Al-με άλλα στοιχεία

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Μεγάλη αγωγιμότητα και αντοχή, σκληρότητα.
- Ηλεκτρικές εφαρμογές και αεροδιαστημικές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 8017,8176,8081,8280,8090.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 117-241 Μpa

Η σειρά 8xxx χρησιμοποιείται για τα κράματα με τα λιγότερα χρησιμοποιούμενα κραματικά στοιχεία Fe, Ni, και Li. Το καθένα χρησιμοποιείται για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρέχει στο κράμα: Τα Fe και Ni παρέχουν αντοχή με μικρή απώλεια ηλεκτρικής αγωγιμότητας (αντιπροσωπευτικό 8017). Το Li στο 8090 παρέχει εξαιρετικά υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, έτσι χρησιμοποιείται για αεροδιαστημικές εφαρμογές. [23]

(5.4.2) ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ (CASTING ALLOYS)

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων χύτευσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία όπου:

Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία.

Το δεύτερο και τρίτο ψηφία δείχνουν τις διάφορες μορφές του κράματος.

Το τέταρτο ψηφίο δείχνει αν είναι χυτό (casting) (0) η χελώνα (ingot) (1,2)

1xx.x Καθαρό Al (Al >99,00%)

2xx.x Κράματα Al-Cu

3xx.x Κράματα Al-Si + Cu και / η Mg.

4xx.x Κράματα Al-Si

5xx.x Κράματα Al-Mg

6xx.x Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

7xx.x Κράματα Al-Zn

8xx.x Κράματα Al-Sn με άλλα στοιχεία

9xx.x Κράματα Al-με άλλα στοιχεία

Σε αντίθεση με τα κατεργάσιμα κράματα, τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες κραματικών στοιχείων όπως πυριτίου και χαλκού. Αυτό προκαλεί μια μεγάλη ετερογενή δομή π.χ. μια σημαντική ποσότητα δεύτερης φάσης. Αυτή η δεύτερη φάση απαιτεί πολύ προσεκτική μελέτη, διότι κάθε άγριο, κοφτερό και εύθραυστο συστατικό μπορεί να δημιουργήσει εσωτερικές εγκοπές και να ξεκινήσει ρωγμές όταν το χυτό τοποθετηθεί αργότερα σε συνθήκες φορτίου. Οι μεγάλες ετερογενείς δομές δεν έχουν καλές αντοχές σε κόπωση. Καλές μεταλλουργικές και χυτευτικές τεχνικές μπορούν να προλάβουν τέτοια σφάλματα. Η επιμήκυνση και η αντοχή, ειδικά στην κόπωση, των περισσότερων χυτών είναι σχετικά χαμηλότερες από αυτές των κατεργάσιμων προϊόντων. Αυτό οφείλεται στο ότι οι τεχνικές χύτευσης ακόμη δεν μπορούν να προλάβουν τα χυτευτικά σφάλματα.

2xx.x Κράματα Al-Cu

Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε «κοχύλι» (μεταλλικό καλούπι) και στο «χώμα».

Υψηλές αντοχές σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και σε υψηλές θερμοκρασίες.

Μερικά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε κάμψη.

Εφαρμογές για αεροσκάφη, αυτοκίνητα και μηχανές.

Αντιπροσωπευτικά κράματα: 201.0, 203.0

Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-450 Mpa

Το περισσότερο ανθεκτικό κράμα είναι το 201.0/AlCu4Ti (Ντουραλουμίνιο) που επιδέχεται θερμική κατεργασία. Η χυτευσιμότητα του περιορίζεται λόγω της τάσης

σχηματισμού μικροπορώδους και «θερμών σταγόνων» (hot tears) έτσι καλύτερα ταιριάζει στις μεθόδους επενδυμένων κελυφών. Η μεγάλη του αντοχή σε κάμψη το κάνει ιδιαίτερα κατάλληλο για εξαρτήματα υψηλής καταπόνησης σε εργαλειομηχανές, σε εφαρμογές ηλεκτρολογικού υλικού και στη κατασκευή αεροσκαφών.

Εκτός από τα κανονικά κράματα χύτευσης, υπάρχουν ειδικά κράματα για ιδιαίτερα εξαρτήματα π.χ. κεφαλές μηχανής, σώματα μηχανής ή κουζινέτα. Για τέτοιες εφαρμογές το επιλεγμένο κράμα απαιτεί καλή αντοχή στη φθορά και χαμηλό συντελεστή τριβής, όπως επίσης κατάλληλη αντοχή σε συνθήκες λειτουργίας υψηλών θερμοκρασιών. Ένα καλό παράδειγμα είναι το κράμα 203.0/AlCu5NiCo που σήμερα είναι το κράμα χύτευσης με την μεγαλύτερη αντοχή στους 200ο C. Εικ21c. Φτερά προσγείωσης (landing flaps) και άλλα εξαρτήματα αεροσκαφών

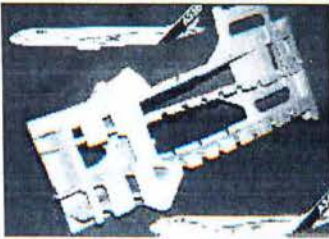


Fig. 21C

κατασκευάζονται από 201.0 η A356.0 κράματα.

3xx.x Κράματα Al-Si+Cu ή Mg

Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε «κοχύλι» (μεταλλικό καλούπι) στο «χώμα» και σε χυτόπρεσσα

Εξαιρετική χυτευσιμότητα (εύροια), υψηλή αντοχή, μερικά δε κράματα με υψηλή αντοχή σε κάμψη.

Εφαρμογές σε εξαρτήματα αυτοκινήτου, πιστόνια, αντλίες ηλεκτρολογικά εξαρτήματα.

Αντιπροσωπευτικά κράματα: 356.0, A356.0, 359.0, A360.0.

Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-275 Mpa

Η σειρά 3xx.x των χυτών είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες σειρές λόγω της ελαστικότητας που προσδίδει το υψηλό σε πυρίτιο ποσοστό, όπως και της πολύ καλής χυτευσιμότητας. Σε αυτές τις ιδιότητες πρέπει να προστεθεί και μια ποικιλία υψηλών αντοχών μετά από θερμική κατεργασία. Επιπλέον η σειρά 3xx.x μπορεί να χυτευθεί με τις περισσότερες τεχνικές, από «χώμα» και χυτόπρεσσα μέχρι πολύπλοκα «κοχύλια» και με τις μεθόδους του χαμένου κεριού και του χαμένου ομοιώματος πολυστυρενίου καθώς και τις πολύ νέες «θιξοχύτευση» και χύτευση squeeze.

Μεταξύ των περισσότερο γνωστών είναι τα 319.0 356.0/A356.0 για «χώμα» και «κοχύλι», 360.0, 380.0/A380.0 και 390.0 για χυτόπρεσσα και 357.0/A357.0 για τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Το κράμα 332.0 είναι επίσης ένα πολύ διαδεδομένο κράμα που μπορεί να παραχθεί αποκλειστικά σχεδόν από ανακύκλωση.

Εφαρμογές:

Εικ.31.c Πλαίσιο του υπερσυμπιεστή για φορτηγό Mercedes από 356.0.

Εικ.32.c Το κιβώτιο ταχυτήτων επιβατηγού αυτοκινήτου σε χυτόπρεσσα από 380.0 κράμα.

Εικ.33.c Κιβώτιο πίσω κίνησης επιβατηγού από 380.0 κράμα χυτευμένο στο «χώμα».

Εικ.34.c Εξαρτήματα αυτοκινήτου από 357.0 και A357.0 χυτευμένα σε «χώμα» και σε «κοχύλι».

Εικ.35.c Χυτά της σειράς 3xx.x με τη μέθοδο του χαμένου ομοιώματος πολυστερίνης που παρέχει ιδιαίτερες λεπτομέρειες και πολυπλοκότητα.

Εικ.36.c Ζάντες αλουμινίου από A356.0.



fig. 31C



fig. 34C



fig. 33C

4xx.x Κράματα Al-Si

Δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Χυτεύονται σε «χώμα» «κοχύλι» και χυτόπρεσσα.

Εξαιρετική χυτευσιμότητα πολύ καλή για περίπλοκα χυτά.

Πλαίσια γραφομηχανών, εξοπλισμός οδοντιατρείου, παραθαλάσσιες εφαρμογές και διακοσμητικές.

Αντιπροσωπευτικά κράματα: 413.0, 443.0

Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-275 Μpa

Το κράμα B413.0/AlSi12 είναι γνωστό για την καλή χυτευσιμότητα του και την καλή συγκολλησιμότητα που οφείλονται στην ευτηκτική του σύνθεση και το χαμηλό σημείο τήξης (570ο C). Συνδυάζει μέτρια αντοχή με μεγάλη επιμήκυνση και καλή αντοχή σε διάβρωση. Το κράμα είναι καλό για πολύπλοκες λεπτές διατομές με καλή αντοχή σε κόπωση. [23]



fig. 36C

fig. 35C



fig. 34C



17

(5.4.3) ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

F - Όπως παράγεται (χωρίς θερμική)

O - Με ανόπτηση

H - Ψυξηλατημένο (Σκληρυμένο)

W - Με θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης

T - Με θερμική κατεργασία διαφορετική από τις προηγούμενες. Συνήθως με σκλήρυνση μετά από υπερβαφή και κατακρήμνιση. Προσθήκη αριθμού δείχνει διάφορες μορφές πχ T6 θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και σκλήρυνσης με τεχνητή γήρανση. [23]

(6) ΒΑΦΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ

(6.1) ΒΑΦΗ DURALUMIN

(α) Κρίσιμα Σημεία

Μια έρευνα στα κρίσιμα σημεία των κραμάτων τύπου duralumin πραγματοποιήθηκε από τον Chevenard με τη χρήση διαφορικού διλατόμετρου (dilatometer)*.



FIG. 46.—Duralumin compared with pure Aluminium, using Dilatometer.

Η μέθοδος με το dilatometer δε δίνει ένδειξη για κρίσιμα σημεία σε αυτό το κράμα. Στην καμπύλη δεν υπάρχει σημείο παρατυπίας.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν, επομένως, στοιχεία που να δείχνουν την περιορισμένη περιοχή της θερμοκρασίας, είναι απαραίτητο να πραγματοποιήσουμε μια πλήρη σειρά από βαφές για όλες τις θερμοκρασίες.

(β) Ποικιλία Μηχανικών Ιδιοτήτων με Θερμοκρασία Βαφής

Παραλείποντας, προς το παρόν, τη λεπτομερή συζήτηση για την επίδραση του χρόνου μετά τη βαφή, υιοθετήθηκε η παρακάτω μέθοδος.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αντοχής και κλονισμού σε κομμάτια που κόπηκαν κατά μήκος από φύλλα πάχους 10mm και απέκτησαν σε κρύο περιβάλλον τις παρακάτω ιδιότητες:

- Δύναμη αντοχής - 24 kg/mm² ή 15-24 ton/in²
- Όριο ελαστικότητας - 23 kg/mm² ή 14-60 ton/in²
- % Επιμήκυνση - 5
- Αντίσταση Κλονισμού - 2 kg*m/cm²

Τα κομμάτια θερμάνθηκαν για βαφή σε ένα υγρό λουτρό νιτρώδους-άλατος σε θερμοκρασίες: 300, 350, 400C

*Για τις λεπτομέρειες της χρήσης αυτής της συσκευής, δείτε «L'Acier,» by Lt.-Col. Grard (berger-Levrault), 1919.

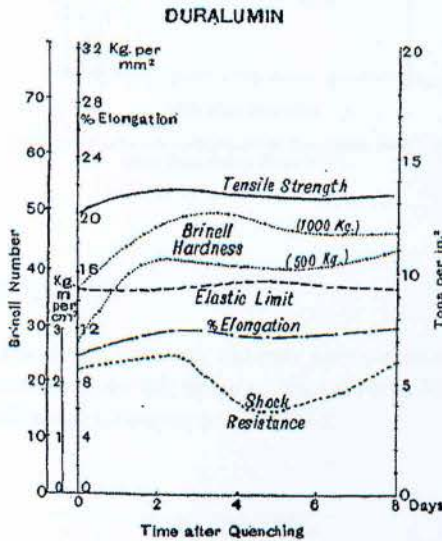


Fig. 47.—Variation in Mechanical Properties with Time after Quenching (from 300°).

Οι παραστάσεις 47-52 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα μετά από βαφή σε νερό σε 20 °C. Τα αποτελέσματα:

- Αμέσως μετά τη βαφή
- 48 hours " "
- 4 days " "

5 days " "
8 days " "

Η παράσταση 53 δείχνει την ποικιλία των μηχανικών ιδιοτήτων με τη θερμοκρασία βαφής μετά από ομοιόμορφη γήρανση οκτώ ημερών.

Σημειώσεις

(1) Επίδραση του Χρόνου

Η επίδραση του διαστήματος του χρόνου μετά τη βαφή είναι ορατή από μια θερμοκρασία 300°C και πάνω και ιδιαίτερα χαρακτηριστική από 400°C και πάνω.

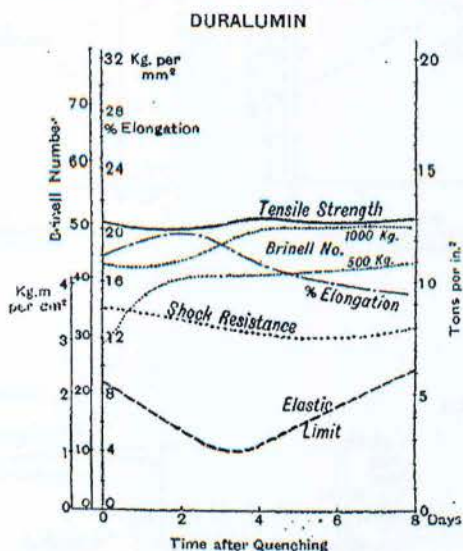


FIG. 48.—Variation in Mechanical Properties with Time after Quenching (from 350°).

(2) Επίδραση της Θερμοκρασίας

Από 200°C και πάνω ορισμένες μοριακές αλλαγές πραγματοποιούνται και το Σχ. 53 αποκαλύπτει δύο ιδιαίτερα εμφανείς θερμοκρασίες βαφής, 350 και 475°C, που παρουσιάζουν τις ακόλουθες ιδιότητες στο μέταλλο:

Βαφή από 350°C

- Δύναμη αντοχής - 20 kg/mm² ή 12-7 ton/in²
- Όριο ελαστικότητας - 9 kg/mm² ή 5-61 ton/in²
- % Επιμήκυνση - 15
- Αντίσταση Κλονισμού - 3 kg*m/cm²

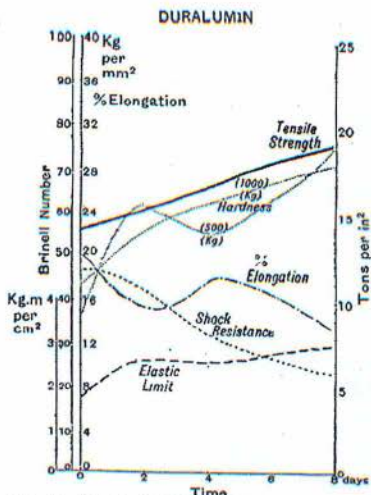


FIG. 49.—Variation in Mechanical Properties with Time after Quenching (from 400°).

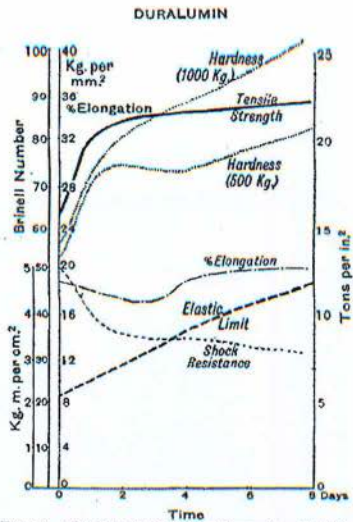


FIG. 50.—Variation in Mechanical Properties with Time after Quenching (from 450°).

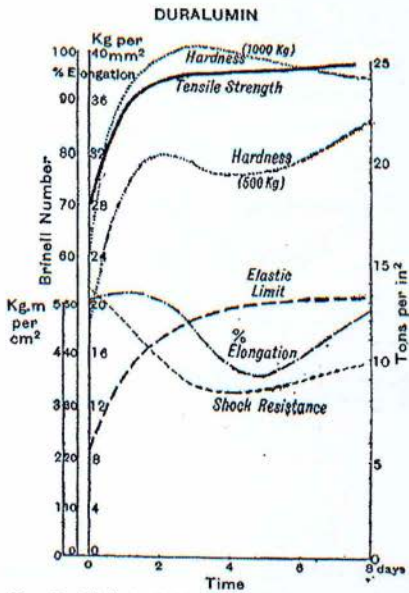


FIG. 51.—Variation in Mechanical Properties with Time after Quenching (from 500°).

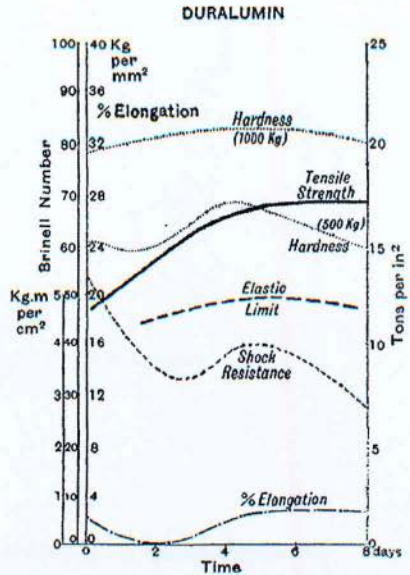


FIG. 52.—Variation in Mechanical Properties with Time after Quenching (from 550°).

- Δύναμη αντοχής - 40 kg/mm² ή 25-4 ton/in²
- Όριο ελαστικότητας - 20 kg/mm² ή 12-7 ton/in²
- % Επιμήκυνση - 20
- Αντίσταση Κλονισμού - 3-5 kg*m/cm²

Γνωρίζοντας ότι η βαφή δεν είναι τίποτε άλλο παρά θέρμανση ακολουθούμενη από πολύ γρήγορη ψύξη (βαθμού III), είναι εμφανές ότι

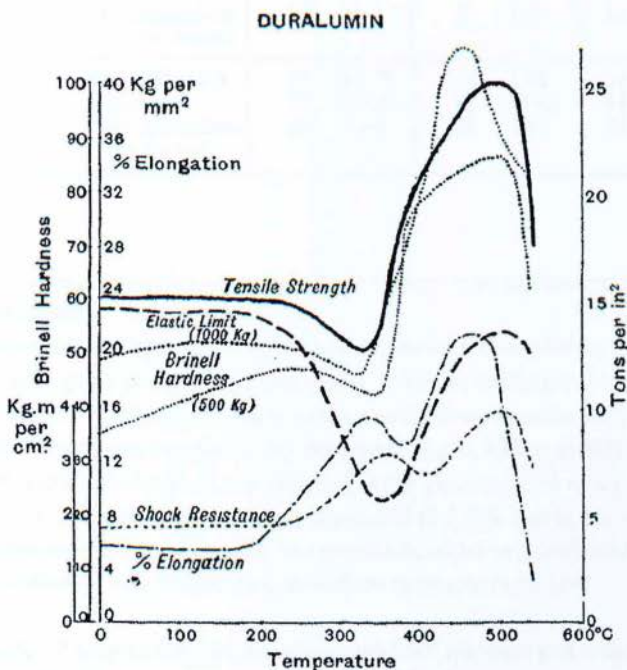


FIG. 53.—Variation in Mechanical Properties with Quenching Temperature (after 8 days).

σε αυτό το κεφάλαιο και το προηγούμενο, μελετήσαμε τις παραλλαγές ενός δουλεμένου κράματος με τη θερμοκρασία ανόπτησης μετά από κρύα εργασία, και με το ποσοστό ψύξης που ακολουθεί την ανόπτηση. Η ανόπτηση στους 350 με 475 έχει αποδειχτεί ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα για οποιοδήποτε ποσοστό ψύξης.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συνολικά τα αποτελέσματα.

Anneal		Tensile Strength		Elastic Limit		Elongation %	Shock Resistance Kg.m. cm. ²
Temperature (degrees C.)	Rate of Cooling	Kg. mm. ²	tons in. ²	Kg. mm. ²	tons in. ²		
350°	(i) (100° p.h.)	20	12.7	6	3.81	20	6
	(ii) (air)	20	12.7	7	4.45	20	4-5
	(iii) (quenched in water)	20	12.7	9	5.61	15	3
475°	(i) (100° p.h.)	28	17.78	12	7.62	16	4
	(ii) (air)	32	20.32	18	11.43	18	4
	(iii) (quenched in water)	40	25.4	20	12.7	20	4

Αυτές οι δύο θερμοκρασίες ανόπτησης αντιστοιχούν με μαλακτοποίηση και μια τελική κατεργασία.

Η διεργασία που παράγει τη μέγιστη μαλακτοποίηση αποτελείται στην ανόπτηση σε 350° και αργή ψύξη (ποσοστό (i), φούρνος). Η τελική επεξεργασία, δηλ. αυτή που δίνει στο κράμα τη μέγιστη δύναμη πραγματοποιείται σε ανόπτηση στους 475° και ψύξη αρκετά γρήγορα (ποσοστό (iii), βαφή στο νερό). Άλλες μέθοδοι ανόπτησης στους 350° ακολουθούνται με πιο γρήγορη ψύξη (ποσοστό (ii) ή (iii)), ή θερμαίνοντας στους 475° και δροσίζοντας πιο αργά (ποσοστό (i) ή (ii)). Αυτές εξυπηρετούν τη μαλακτοποίηση και τη σκλήρυνση του μετάλλου αλλά σε μικρότερο βαθμό από τις προαναφερθέντες δύο διεργασίες, που είναι προτιμότερες. [24]

Τέλος, το Σχ.53 δείχνει ότι η βαφή πάνω από 550° παράγει μια πτώση σε όλες τις ιδιότητες. Δηλαδή:

- Δύναμη αντοχής - 27 kg/mm² ή 17-14 ton/in²
- Όριο ελαστικότητας - 19 kg/mm² ή 12-06 ton/in²
- % Επιμήκυνση - 2
- Αντίσταση Κλονισμού - 2-5 kg*m/cm²

Βαφή Χυτευμένου Duralumin

Οι ιδιότητες είναι οι εξής:

Χύτευση Άμμου

- Δύναμη αντοχής - 11 kg/mm² ή 6,98 ton/in²
- % Επιμήκυνση - περ. μηδέν

- Αντίσταση Κλονισμού - περ. μηδέν

Χύτευση Άμμου μετά τη Βαφή

- Δύναμη αντοχής - 14 kg/mm² ή 8,89 ton/in²
- % Επιμήκυνση - περ. μηδέν
- Αντίσταση Κλονισμού - περ. μηδέν

Ψυχρή Χύτευση

- Δύναμη αντοχής - 10 kg/mm² or 6,35 ton/in²
- % Επιμήκυνση - περ. μηδέν
- Αντίσταση Κλονισμού - περ. μηδέν

Ψυχρή Χύτευση μετά τη Βαφή

- Δύναμη αντοχής - 15 kg/mm² ή 9,52 ton/in²
- % Επιμήκυνση - περ. μηδέν
- Αντίσταση Κλονισμού - περ. μηδέν

Μπορεί να φανεί ότι το μη-δουλεμένο, χυτό duralumin δεν επηρεάζεται από τη βαφή.

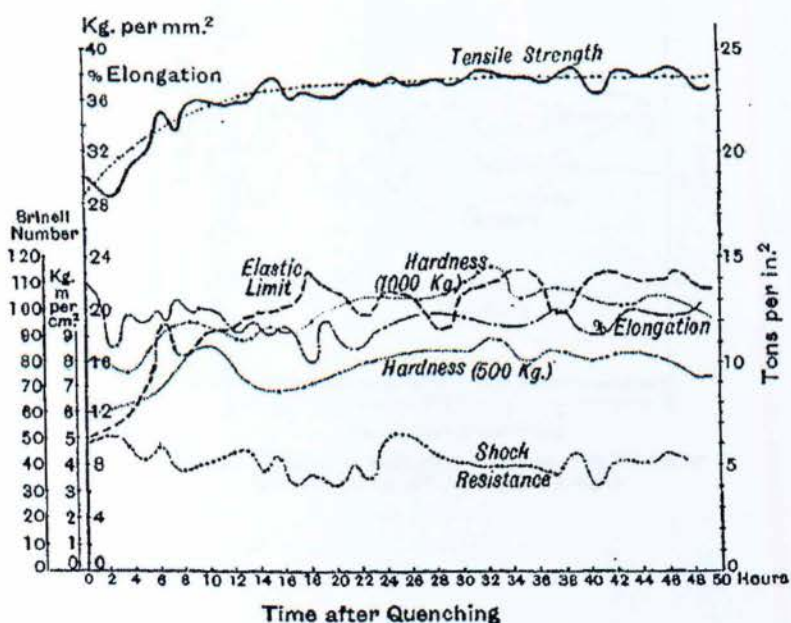


FIG. 54.—Variation in Mechanical Properties with Time after Quenching from 475° (during first 48 hours).

(γ) Παραλλαγή των Μηχανικών Ιδιοτήτων με Διάρκεια Χρόνου μετά τη Βαφή

Επιλέγεται μια σταθερή θερμοκρασία βαφής, 475°. Τετρακόσιες μπάρες duralumin υπέστησαν ταυτόχρονα δοκιμές κλονισμού δηλ. θερμάνθηκαν στους 475° στο λουτρό άλας-νιτρώδες άλας και μετά βαφή στο νερό. Δοκιμές ανθεκτικότητας, δοκιμές σκληρότητας και δοκιμές κλονισμού πραγματοποιήθηκαν κάτω από τις ακόλουθες συνθήκες:

- 1^η μέρα - 6 ανά ώρα για 24 ώρες
- 2^η μέρα - 4 ανά ώρα τις πρώτες 12 ώρες και 2 ανά ώρα τις υπόλοιπες 12 ώρες
- 3^η και 4^η μέρα - 2 ανά ώρα
- 5^η, 6^η, 7^η και 8^η μέρα - 2 κάθε 2 ώρες
- Για την επόμενη εβδομάδα - 2 κάθε πρωί
- Για το επόμενο δεκαπενθήμερο - 2 τη βδομάδα

Αυτέ οι δοκιμές μπορούν να συνεχιστούν για πολύ καιρό σε κομμάτια που κρατούνται δοκιμαστικά σε εφεδρεία.

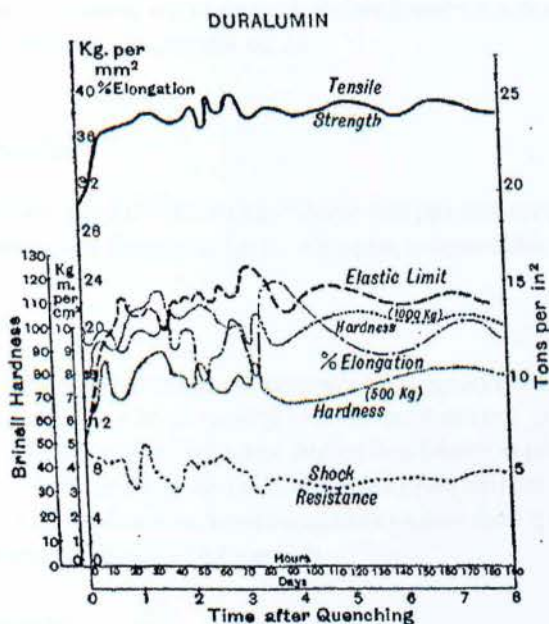


FIG. 55.—Variation in Mechanical Properties with Time after Quenching from 475° (during first 8 days).

Παραλλαγή στις Πρώτες Οκτώ Ημέρες

Τα αποτελέσματα στις πρώτες 24 ώρες φαίνονται με ακρίβεια στο Σχ.54. Το Σχ.55 δείχνει τα αποτελέσματα τις πρώτες οκτώ ημέρες. Δύο ευδιάκριτες περιόδοι είναι αξιοπρόσεχτες.

- (a) Οι πρώτες 4 ημέρες
- (b) Οι επόμενες 4 ημέρες

(a) Οι πρώτες 4 ημέρες

Οι καμπύλες αυτές τις μέρες χαρακτηρίζονται από πολύ έντονες ταλαντώσεις, που δε μπορούν να αποδοθούν σε πειραματικά λάθη, αλλά προφανώς στις ξεχωριστές μοριακές αλλαγές.

(b) Οι επόμενες 4 ημέρες

Σε αυτή την περίοδο οι ταλαντώσεις γίνονται λιγότερο έντονες και οι κυματιστές καμπύλες ισιώνουν τείνοντας σε μια ισορροπία.

Γενική Μορφή Καμπυλών

Τα ακόλουθα συμπεράσματα μπορεί να προέλθουν από μια εκτίμηση της γενικής μορφής των καμπυλών που βρίσκεται πιο ομοιόμορφα ανάμεσα στα σημεία.

(1) Δύναμη Αντοχής

Η δύναμη αυξάνεται κατά ένα τρόπο ταλαντώσεων, αλλάζοντας από 30 kg/mm² σε 38 kg/mm² (19-05 ton/in² σε 24-13 ton/in²) τις πρώτες 4 ημέρες. Οι παραλλαγές κατά τη διάρκεια των τελευταίων 4 ημερών συμπεριλαμβάνονται μεταξύ των ορίων 38 με 40 kg/mm². (24-13 με 25-40 ton/in²). Η πιο ιδιαίτερη αύξηση πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των πρώτων δέκα ωρών όταν η αξία ανέρχεται από 30 σε 36 kg/mm² (19-06 σε 22-86 ton/in²).

(2) Όριο Ελαστικότητας

Αυτή η καμπύλη είναι ίδιας γενικής μορφής, όσον αφορά τη δύναμη, και αυξάνεται κατά τον ίδιο τρόπο από 10 στα 23 kg/mm² (6-35 σε 14-61 ton/in²) τις πρώτες 4 ημέρες. Οι παραλλαγές κατά τη διάρκεια των τελευταίων τεσσάρων ημερών, βρίσκονται μεταξύ 22 και 24 kg/mm² (13-97 και 15-24 ton/in²). Η μέγιστη αύξηση πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των πρώτων 21 ωρών όταν η αξία ανέρχεται από 10 σε 22 kg/mm² (6-35 σε 13-97 ton/in²).

(3) Επιμήκυνση

Η επιμήκυνση ταλαντεύεται πολύ αρκετά κατά τη διάρκεια των πρώτων τεσσάρων ημερών αλλά στο τέλος των οκτώ ημερών η αξία δεν αλλάζει αρκετά. Ποικίλλει σε μια μέση αξία 20%.

(4) Αντοχή Κλονισμού

Ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις όπως και στην επιμήκυνση.

(5) Σκληρότητα Brinell

Οι καμπύλες της σκληρότητας κάτω από ένα φορτίο 1000 και 500 kg αντίστοιχα είναι παρόμοιες σε μορφή με εκείνους της εκατατής δύναμης και το όριο ελαστικότητας.

Brinell No. (1000kg)	κανονικά 80
" "	μετά από 24 ώρες 110
" "	μετά από 48 ώρες 100
" "	μετά από 8 μέρες 100
(500 kg)	κανονικά 61
" "	μετά από 24 ώρες 85
" "	μετά από 48 ώρες 80
" "	μετά από 8 μέρες 75

Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τα αποτελέσματα.

	Elastic Limit		Tensile Strength		Elongation %	Shock Resistance kg.m. cm. ²
	Kg. mm. ²	tons in. ²	Kg. mm. ²	tons in. ²		
Immediately after quenching	10	6.35	30	19.05	20	4.5
Four days after quenching	22	13.97	38	24.13	22	3.4
Eight days after quenching	22	13.97	38	24.13	20	3.6

Παραλλαγή Μετά από Οκτώ Ημέρες

Μία περαιτέρω έρευνα των παραλλαγών στις ιδιότητες του duralumin με το χρονικό διάστημα μετά τη βαφή μπορεί να πραγματοποιηθεί στα δοκιμαστικά κομμάτια που κρατήθηκαν σε εφεδρεία. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πρώτων τριών μηνών δεν αποκάλυψαν σημαντικές παραλλαγές εκτός από εκείνες που έχουν ήδη σημειωθεί στο τέλος οκτώ ημερών. Προτείνεται, εντούτοις, για να συνεχιστούν αυτές οι δοκιμές για μεγάλη περίοδο, και σε έναν πολύ σημαντικό αριθμό δοκιμαστικών κομματιών, να ελαχιστοποιηθούν τα μεμονωμένα πειραματικά λάθη και να δώσουμε μια αξιόπιστη αξία στα συμπεράσματα που προέρχονται από τις δοκιμές.

Ενώ αυτές οι συστηματικές δοκιμές πραγματοποιούνται, επιδιώξαμε να βρούμε ένα κράμα υψηλής αντοχής, του οποίου οι αρχικές ιδιότητες ήταν ακριβώς καθορισμένες και του οποίου η ημερομηνία κατασκευής ήταν σίγουρα γνωστή. Πλησιάσαμε την εταιρία Breguet οι οποίοι κατέχουν δείγματα παρμένα από τις αποστολές με ημερομηνίες σίγουρα γνωστές. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της κατασκευής των δοκιμαστικών κομματιών που λαμβάνονται από τα δείγματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτά τα δείγματα έχουν κρατηθεί και επομένως δεν τίθεται ερώτημα υποβολής του κράματος στην πίεση της πτήσης. Θα μπορούσαμε έτσι να δούμε πώς θα συμπεριφερόταν το κράμα κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης και να ερευνήσουμε εάν οποιαδήποτε γήρανση είχε πραγματοποιηθεί, δηλ. αλλαγή των ιδιοτήτων. [24]

Συνολικός Πίνακας

Type of Sample	Date of Original test	Properties as determined in original tests				Date of Final tests	Properties as determined in final tests					
		Elastic Limit		Tensile Strength			Elongation %	Elastic Limit		Tensile Strength		Elongation %
		Kg. tons mm. ²	in. ²	Kg. tons mm. ²	in. ²			Kg. tons mm. ²	in. ²	Kg. tons mm. ²	in. ²	
Rectangular tube of 65/35 mm., thickness 0.2 mm.	1916	22	13.97	37	23.49	15	Oct. 7 1919	25.0	15.87	44.0	27.94	17.8
		23.3	14.80	42.6	27.05	11.05	23.0	14.80	42.5	26.99	—	
		26.6	16.89	44.0	27.94	17.08	—	—	40	25.4	20	
		—	—	40	25.4	17.3	25	15.87	37.5	23.81	20	
Rectangular tube of 65/35 mm., thickness 0.25 mm.	Mar. 1918	23.5	14.92	38	24.13	15	..	25.5	16.07	37.8	24.0	20
		23.5	14.92	39	24.76	14	..	26.6	16.89	43.5	27.62	17
		26.6	16.89	43.5	27.62	15.2	26.6	16.89	43.5	27.62	15.2	
Torpedo tube of 82/35 mm.	Oct. 1917	23.5	14.92	39	24.76	14	..	25	15.87	40	25.4	17.3
Round tube of 75 mm. diam., thickness 0.2 mm.	June 1916	24	15.24	38	24.13	14	..	26	16.61	41	26.03	15.2
Round tube of 55 mm. diam., thickness 0.2 mm.	Oct. 1916	23.5	14.92	38	24.13	14	..	27	17.14	44.6	28.32	15.2
Round tube of 40 mm. diam., thickness 0.1 mm.	Oct. 1918	24	15.24	38	24.13	15	..	29	18.41	41	26.03	15.2
								28.6	18.16	42.6	27.05	15.2
								25	15.87	41	26.03	17.5
								27.5	17.46	40	25.4	17.5

Αυτός ο πίνακας δείχνει ότι όλο το μέταλλο αυτής της αποστολής έχει οι ακόλουθες ιδιότητες:

- Ελαστικό Όριο: $(23 \pm 1) \text{ kg/mm}^2$ ($(14,6 \pm 63) \text{ ton/in}^2$)
- Ανθεκτική Δύναμη: $(38 \pm 1) \text{ kg/mm}^2$ ($(24,13 \pm 63) \text{ ton/in}^2$)
- % Επιμήκυνση: $14,5 \pm 0,5$

Μετά από μια χρονική περίοδο που ποικίλλει από το ένα έως τα τρία έτη, οι ιδιότητες βρίσκονται μεταξύ των ακόλουθων ορίων:

- Ελαστικό Όριο: $(26 \pm 3) \text{ kg/mm}^2$ ($(16,51 \pm 1,9) \text{ ton/in}^2$)
- Ανθεκτική Δύναμη: $(41 \pm 3) \text{ kg/mm}^2$ ($(26,03 \pm 1,9) \text{ ton/in}^2$)
- % Επιμήκυνση: 15 – 20

Με εξαίρεση ένα δοκιμαστικό κομμάτι που δίνει επιμήκυνση 11,05%, παρατηρείται μια αύξηση στην αξία όλων των ιδιοτήτων. Αυτές οι ιδιαίτερες δοκιμές δεν αποκαλύπτουν επιδείνωση στο μέταλλο, αλλά, αντίθετα, μια μικρή γενική βελτίωση. Προκειμένου να συναχθεί ένα αξιόπιστο συμπέρασμα, πρέπει να περιμένουμε τα τελικά αποτελέσματα των μεθοδικών πειραμάτων στα οποία οι τιμές των αρχικών ιδιοτήτων είναι αξιόπιστες εξ αιτίας του αριθμού των δοκιμών και της ιδιαίτερης προσοχής που πάρθηκε για να ολοκληρωθούν. Αυτά τα πειράματα θα μας επιτρέψουν να ανακαλύψουμε σίγουρα εάν υπάρχει οποιαδήποτε βαθμιαία βελτίωση στις ιδιότητες.

Παραλλαγή ή ο Χρόνος που Απαιτείται για να Φθάσει στην Ισορροπία με τη Θερμοκρασία μετά από τη βαφή

Οι προηγούμενες δοκιμές αποτελούν μια έρευνα για τον απαιτούμενο χρόνο για να φθάσει στην ισορροπία μετά από τη βαφή, στην οποία οι αλλαγές μετά τη βαφή έχουν επιτραπεί να πραγματοποιηθούν σε κανονική θερμοκρασία. Η επίδραση της θερμοκρασίας κατόπιν της βαφής για επίτευξη της ισορροπίας έχει ερευνηθεί με τη βοήθεια συμπληρωματικών πειραμάτων.

Οι ακόλουθες θερμοκρασίες υιοθετήθηκαν:

- 20 C
- 0C
- + 20 C
- + 100C
- 150
- 200
- 250
- 300
- 350

Αμέσως μετά τη βαφή, τα δοκιμαστικά κομμάτια διατηρήθηκαν σε κάθε μια από αυτές τις θερμοκρασίες για 1, 2, 3, 4, 5, και 6 ώρες αντίστοιχα, δηλ. μερικά σε 20, άλλα σε 0, άλλα σε +20, κ.λπ.

Οι εκτατές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μετά από κάθε μια από αυτές τις χρονικές περιόδους, μετά από προθέρμανση ή να δροσίσει στη θερμοκρασία αέρα.

Τα αποτελέσματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Θερμοκρασία	-20°	Μετά από 6 ώρες δεν υπάρχει αλλαγή στις ιδιότητες.
„	0°	Δεν υπάρχει αλλαγή μετά από 6 ώρες.
„	+20°	Μετά από 6 ώρες η δύναμη αυξήθηκε από 4 kg/mm ² (2,54 ton/in ²) σε 34 kg/mm ² (21,6ton/in ²)
„	100°	Μετά από 6 ώρες η δύναμη αυξήθηκε από 4 kg/mm ² (2,54 ton/in ²) σε 34 kg/mm ² (21-6 ton/in ²).
„	150°	Όλες οι ιδιότητες έχουν πετύχει τις κανονικές τους τιμές.
„	200° και πάνω	Η διαδικασία είναι μια ανόπτηση και πάνω από το ποσοστό ψύξης έχει έντονη επίδραση.

Τα αποτελέσματα είναι αυστηρά σύμφωνα με αυτά του Σχ.57 (παραλλαγή από τις μηχανικές ιδιότητες με τη θερμοκρασία μετά τη βαφή στους 475°).

Από αυτές τις δοκιμές τα ακόλουθα συμπεράσματα μπορούν να συναχθούν:

Οι αλλαγές μετά τη βαφή καθυστερούνται από τη χαμηλή θερμοκρασία.

Επιταχύνονται καθώς η θερμοκρασία αμέσως μετά τη βαφή αυξάνεται μεταξύ των ορίων 0° και 150°. Θερμοκρασίες επάνω από 150°, μετά από την παρόμοια ψύξη στον αέρα, προκαλούν αλλαγές στις ιδιότητες.

Εάν το κράμα βυθίζεται σε βραστό νερό, παραδείγματος χάριν μια πολύ πρακτική ισορροπία επιτυγχάνεται γρηγορότερα.

Αμέσως Μετά τη Βαφή

- Δύναμη αντοχής - 30 kg/mm² ή 19,05 ton/in²
- % Επιμήκυνση - 18
- Όριο Ελαστικότητας - 10 kg/mm² (6,35 ton/in²)

Για Βύθιση σε Βραστό νερό για μια ώρα μετά τη Βαφή

- Δύναμη αντοχής - 35,5 kg/mm² ή 22,54 ton/in²
- % Επιμήκυνση - 20
- Όριο Ελαστικότητας - 17,5 kg/mm² (11,10 ton/in²)

Για Βύθιση σε Βραστό νερό για δύο ώρες μετά τη Βαφή

- Δύναμη αντοχής - 37 kg/mm² ή 23,49 ton/in²
- % Επιμήκυνση - 20
- Όριο Ελαστικότητας - 20 kg/mm² (12,7 ton/in²)

Τιμές που παραμένουν περίπου αμετάβλητες μετά από την περαιτέρω βύθιση σε βραστό νερό.

Κατά συνέπεια, μετά τη βύθιση σε βραστό νερό μετά τη βαφή, η ισορροπία επιτυγχάνεται γρηγορότερα, μια επίδραση που είναι ενδιαφέρουσα από τη βιομηχανική άποψη. [24]

(6.2) ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ - ΤΕΧΝΙΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

Τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, βιομηχανία τροφίμων) λόγω του εξαιρετικού συνδυασμού μηχανικής αντοχής, αντοχής σε οξείδωση/διάβρωση και χαμηλής πυκνότητας. Διακρίνονται κατ' αρχήν ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τους σε χυτά και σε ελατά κράματα. Περαιτέρω κατηγοριοποίησή τους αφορά τα κραματικά στοιχεία που περιέχουν καθώς και την ικανότητά τους να επιδέχονται ή όχι θερμική κατεργασία. Τα κράματα που επιδέχονται θερμική κατεργασία αποκτούν την μέγιστη αντοχή τους μέσω της διαδικασίας της τεχνητής γήρανσης (artificial ageing) και χαρακτηρίζονται από το σύμβολο T6. [25,26,27]

(6.2.1) ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ

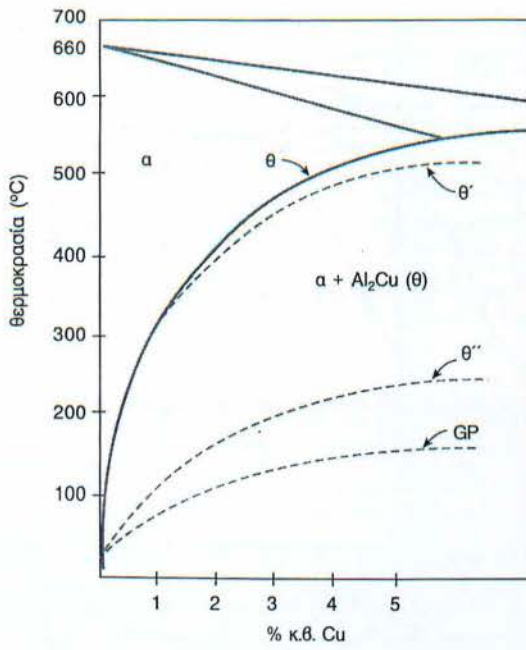
Η θερμική κατεργασία της τεχνητής γήρανσης βασίζεται στην καθίζηση (precipitation) μιας δεύτερης φάσης ισχυροποίησης από ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα. Στο εργαστήριο θα μελετήσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά της καθίζησης χρησιμοποιώντας το κράμα 2024 ως παράδειγμα. Στο σχήμα 1 φαίνεται το σχετικό τμήμα του διαγράμματος φάσεων. Η θερμική κατεργασία που εφαρμόζεται για την καθίζηση της φάσεως θ (Al_2Cu) αποτελείται από 3 βήματα:

Α) Διαλυτοποίηση: Θέρμανση πάνω από την καμπύλη στερεάς διαλυτότητας ($495^{\circ}C$) για τη διάλυση της φάσεως θ και το σχηματισμό ομογενούς στερεού διαλύματος Al-Cu (φάση α).

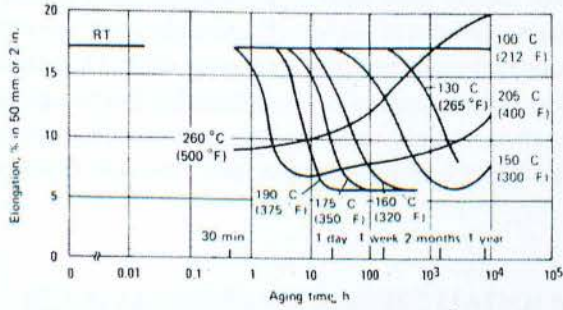
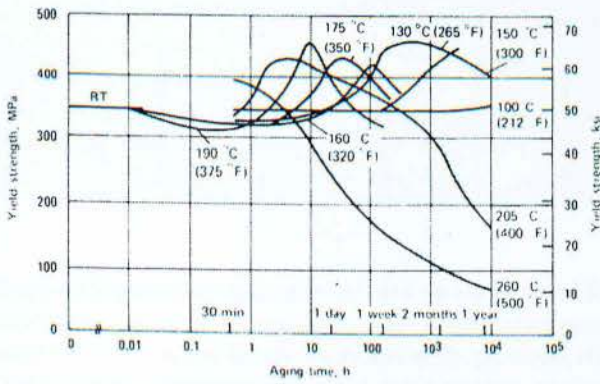
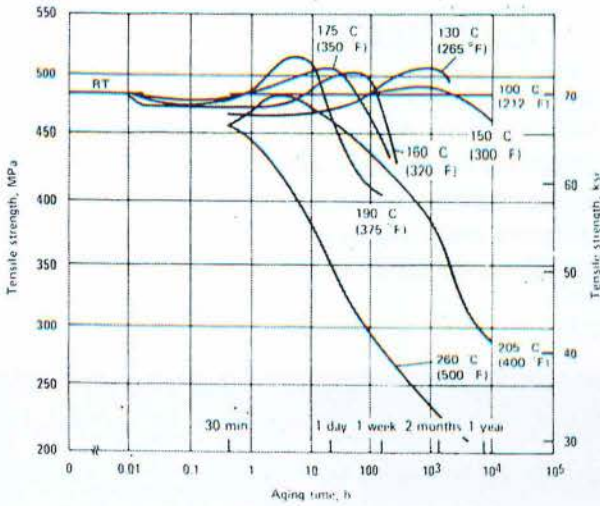
Β) Απότομη ψύξη (βαφή) στη θερμοκρασία δωματίου. Λόγω της απουσίας διαχύσεως το στερεό διάλυμα της φάσεως α παραμένει ως έχει με τη διαφορά ότι είναι υπέρκορο στη θερμοκρασία δωματίου.

Γ) Τεχνητή γήρανση μέσω θέρμανσης σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες. Η ενεργοποίηση της διαχύσεως σε συνδυασμό με τη μεγάλη κινούσα δύναμη προκαλεί την καθίζηση της φάσεως θ. Η καθίζηση της φάσεως θ σε λεπτή διασπορά αυξάνει τη σκληρότητα του κράματος. [25,26,27]

Δεδομένα από καμπύλες τεχνητής γήρανσης δίδονται στο σχήμα 2.



Σχήμα 1: Τμήμα του διαγράμματος φάσεων του συστήματος Al-Cu.



Σχήμα 2: Δεδομένα Τεχνητής γήρανσης για το κράμα 2024

(6.2.2) ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Οι θερμικές κατεργασίες του αλουμινίου έχουν σκοπό είτε να αυξήσουν την μηχανική αντοχή (τεχνητή γήρανση), είτε και να ελαττώσουν την μηχανική αντοχή (ανόπτηση), ώστε να διευκολυνθεί η μορφοποίηση. Για να είναι αποτελεσματική μια θερμική κατεργασία, σχεδιάζεται έτσι, ώστε να μετασχηματίσει τη δομή που δημιουργείται από τα κραματοποιά στοιχεία, (π.χ. χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, ψευδάργυρος) τα οποία συνδυάζονται μεταξύ τους προς σχηματισμό διμεταλλικών ενώσεων.

Θερμοκρασίες και χρόνοι ανόπτησης για κράματα μη θερμοσκληρυνόμενα

ΚΡΑΜΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΧΡΟΝΟΙ (min)
1080A, 1050, 1200, 5251, 5154A, 5454, 5083,	360	20
3103, 3105	400 - 425	20

Τα θερμοσκληρυνόμενα κράματα που δεν έχουν υποστεί διεργασίες θερμοσκλήρυνσης (π.χ. τεχνητή γήρανση), μπορούν να ανοπτηθούν με θέρμανση στους 360 ± 10 °C για μια ώρα και κατόπιν ψύξη με αέρα. Η αργή ψύξη δεν είναι αποτελεσματική, εντούτοις η γρήγορη ψύξη μπορεί να οδηγήσει σε μερική σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Σε πολλές περιπτώσεις η ανόπτηση είναι αποτελεσματική για κράματα που έχουν υποστεί θερμοσκλήρυνση, αλλά για την ολοκλήρωση της ανόπτησης πρέπει να θερμανθούν σε 400 - 425 °C για μια ώρα. Σ' αυτή την περίπτωση, ο ρυθμός ψύξης πρέπει να είναι περίπου 15 °C ανά ώρα, μέχρι τους 300 °C. Κάτω απ' αυτή τη θερμοκρασία ο ρυθμός ψύξης δεν παίζει ρόλο. [28]

(6.2.3) ΑΝΟΔΙΩΣΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΒΑΦΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Η ανοδίωση και η ηλεκτροστατική βαφή αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για το αλουμίνιο ιδιαίτερα δε, όταν αυτό χρησιμοποιείται σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Με την ανοδίωση και την ηλεκτροστατική βαφή αφ' ενός μεν βελτιώνεται η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά του αλουμινίου, αφ' ετέρου δε επιτυγχάνεται η διακοσμητική εμφάνιση που απαιτείται στις αρχιτεκτονικές εφαρμογές.

Το αλουμίνιο που προορίζεται για αρχιτεκτονικές εφαρμογές υφίσταται επιφανειακές επεξεργασίες προκειμένου, αφενός μεν να βελτιωθεί η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά του, αφ' ετέρου δε να επιτευχθεί η επιθυμητή

εμφάνιση και ο χρωματισμός για την εξυπηρέτηση των διακοσμητικών απαιτήσεων των αρχιτεκτονικών εφαρμογών και κατασκευών. Οι μέθοδοι που έχουν επικρατήσει και συνήθως χρησιμοποιούνται για την επιφανειακή επεξεργασία του αλουμινίου που προορίζεται για αρχιτεκτονικές εφαρμογές είναι η ανοδίωση και η ηλεκτροστατική βαφή.

Με την ανοδίωση, μετασχηματίζεται η επιφάνεια του αλουμινίου και δημιουργείται, τεχνητά, ένα στρώμα οξειδίου (σκουριά). Επειδή η διαδικασία γίνεται σε απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες, αυτό το στρώμα οξειδίου είναι πάρα πολύ συνεκτικό και σκληρό. Το στρώμα αυτό, επειδή είναι ήδη οξείδιο (σκουριά), όταν εκτίθεται στην ατμόσφαιρα δεν διαβρώνεται και έτσι προστατεύει το μέταλλο. Το ανοδικό επίστρωμα είναι διαφανές και η δομή του φέρει πόρους και επιτρέπει την ενσωμάτωση χρωστικών υλών για την επίτευξη του χρωματισμού. Μερικά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ανοδίωσης είναι:

- Το στρώμα ανοδίωσης δημιουργείται από το ίδιο το μέταλλο, είναι πλήρως ενσωματωμένο σ' αυτό και έτσι δεν υπάρχουν προβλήματα πρόσφυσης.
- Η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά της ανοδίωσης είναι πάρα πολύ καλή, εφόσον τηρηθούν όλοι οι κανόνες παραγωγικής διαδικασίας, εφαρμογής και χρήσης.

Τα ανοδιωμένα προϊόντα αλουμινίου έχουν μεταλλική εμφάνιση. Υπάρχει περιορισμός χρωμάτων.

Η ανοδίωση, ως επιφανειακή επεξεργασία του αλουμινίου, εφαρμόζεται πάνω από 60 χρόνια. Στο διάστημα αυτό είχαμε την ευκαιρία να δούμε τα προβλήματα που εμφανίζονταν στην πράξη και με τις κατάλληλες τεχνικές να εξαλειφθούν. Σήμερα, μετά από 60 χρόνια, θεωρείται ότι κατέχουμε πλήρως την τεχνολογία της ανοδίωσης και γνωρίζουμε την συμπεριφορά της στο χρόνο.

Με την ηλεκτροστατική βαφή, προστίθεται και επικαλύπτεται η επιφάνεια του αλουμινίου με ένα στρώμα πολυεστερικής βαφής. Η κατάλληλη προεργασία της επιφάνειας, η σύσταση της πολυεστερικής βαφής και οι συνθήκες εφαρμογής, εξασφαλίζουν την προστασία της επιφάνειας του αλουμινίου από την διάβρωση.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά της ηλεκτροστατικής βαφής είναι:

Η αντιδιαβρωτική προστασία που προσφέρει στο αλουμίνιο είναι πάρα πολύ καλή, εφόσον τηρηθούν όλες οι συνθήκες παραγωγικής διαδικασίας, εφαρμογής και χρήσης.

Η ηλεκτροστατική βαφή προσφέρει απεριόριστη επιλογή χρωμάτων.

Η βαφή είναι ένα στρώμα διαφορετικής σύστασης και υφής από το αλουμίνιο. Τα δύο υλικά παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά στις μηχανικές καταπονήσεις και καιρικές συνθήκες και έτσι υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης αποκολλήσεων.



Η ηλεκτροστατική βαφή του αλουμινίου είναι μια νέα, σχετικά, μέθοδος. Είναι φυσικό να υπάρχουν ακόμη θέματα προς διερεύνηση, ιδιαίτερα όσον αφορά την συμπεριφορά του συστήματος βαφή-μέταλλο αλουμίνιο στον χρόνο. Όμως, η συνεχής έρευνα και η καθημερινά αποκτούμενη εμπειρία, βοηθούν στην εξεύρεση των κατάλληλων λύσεων.

Μια λεπτομέρεια που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των προφίλ αλουμινίου που πρόκειται να υποστούν ανοδίωση ή βαφή, είναι η διαφορετική επίδραση των δύο μεθόδων στις τελικές διαστάσεις. Το ανοδικό επίστρωμα (ανοδίωση), που το πάχος του κυμαίνεται



από 10-25 μικρά, εισχωρεί στο μέταλλο και πρακτικά δεν αλλάζει τις τελικές διαστάσεις της επιφάνειας. Το επίστρωμα ηλεκτροστατικής βαφής, που το πάχος του είναι μεγαλύτερο από 60 μικρά και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να φθάσει και πάνω από 120 μικρά, προστίθεται στην επιφάνεια του μετάλλου και επιδρά στις διαστάσεις (εικ.1). [28]

(7) ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΙΣΔΟΧΗΣ

(7.1) ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Παρόμοια με την ηλεκτρική ενέργεια, το υδρογόνο είναι υψηλής ποιότητας ενεργειακός μεταφορέας, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί με υψηλή αποδοτικότητα και να μηδενίσει σχεδόν τις εκπομπές στο σημείο της χρήσης. Έχει καταδειχθεί τεχνικά ότι το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά, τη θέρμανση και την παραγωγή ρεύματος και θα μπορούσε να αντικαταστήσει τα τρέχοντα καύσιμα σε όλες τις παρούσες χρήσεις τους.

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας ποικίλα υλικά που προέρχονται από ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες πηγές μέσω πολλών διαδικασιών. Αυτή τη στιγμή έχουμε δύο βασικές που χρησιμοποιούνται ευρέως:

- 1) Ανασχηματισμός του φυσικού αερίου
- 2) Ηλεκτρόλυση του νερού

Πιο γενικά υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από υδρογονάνθρακες, γαιάνθρακες και μέσω της πυρηνικής, της αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Επίσης μπορεί να παραχθεί έπειτα από θερμοχημική επεξεργασία βιομάζας.

Στην οικονομία, η κύρια εστίαση της τεχνολογίας του υδρογόνου έχει στραφεί στην ασφαλή και προσιτή χρησιμοποίησή του ως εναλλακτικό καύσιμο, βασισμένο στη συνεχή ολοκλήρωση της παραγωγής, της διανομής και τον τεχνολογών αποθήκευσης.

Οι ανακρίβειες, οι ασυνέπειες και οι αντιφάσεις αφθονούν σε επιχειρήματα που χρησιμοποιούνται για τις αξίες του υδρογόνου. Αυτές οι ανακρίβειες τείνουν να σχηματίσουν μια σφαιρική αντίληψη ότι το υδρογόνο θα γίνει μια πηγή για τις ενεργειακές ανάγκες μας, αντικαθιστώντας τις σημερινές λιγότερο αποδοτικές μηχανές με καθαρές κυψέλες καυσίμου, που με τη σειρά τους θα τροφοδοτήσουν αυτοκίνητα, φορτηγά, σπίτια και επιχειρήσεις καταλήγοντας σε αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και ατμοσφαιρική ρύπανση.[29-33]

(7.1.1) ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το άτομο του υδρογόνου είναι το ελαφρύτερο στοιχείο, με το πιο κοινό ισότοπό του να αποτελείται από ένα μόνο πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Τα άτομα υδρογόνου διαμορφώνουν εύκολα μόρια H_2 που είναι μικρότερα στο μέγεθος συγκρινόμενα με τα περισσότερα άλλα μόρια. Η μοριακή μορφή που αποκαλούμε υδρογόνο είναι άχρωμη, άοσμη, άγευστη, είναι 14 φορές ελαφρύτερη του αέρα και διαχέεται γρηγορότερα από κάθε άλλο αέριο. Όταν ψύχεται, το υδρογόνο συμπυκνώνεται σε υγρό στους $-253^\circ C$ και σε στερεό στους $-259^\circ C$. Οι φυσικές ιδιότητες συνοψίζονται και στον παρακάτω πίνακα (1.2). Συνήθως το υδρογόνο έχει πυκνότητα 0.09 kg/m^3 . Ως εκ τούτου, είναι η ελαφρύτερη γνωστή ουσία με πλευστότητα στον αέρα ίση με 1.2 kg/m^3 . Το στερεό μεταλλικό υδρογόνο έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα μεγαλύτερη

από οποιοδήποτε άλλο στερεό στοιχείο. Επίσης το αέριο υδρογόνο έχει μια από τις υψηλότερες θερμοχωρητικότητες (14.4 kJ/kg*K).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	
ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΑΞΙΑ
Μοριακό Βάρος	2.01594
Πυκνότητα αερίου στους 0°C και 1 atm.	0.08987 kg/m ³
Πυκνότητα στερεού στους -259°C	858 kg/m ³
Πυκνότητα υγρού στους -253°C	708 kg/m ³
Θερμοκρασία Τήξης	-259°C
Θερμοκρασία Βρασμού στη 1 atm.	-253°C
Κρίσιμη Θερμοκρασία	-240°C
Κρίσιμη Πίεση	12.8 atm.
Κρίσιμη Πυκνότητα	31.2 kg/m ³
Θερμοκρασία τήξης στους -259°C	58 kJ/kg
Θερμοκρασία εξάτμισης στους -253°C	447 kJ/kg
Θερμική αγωγιμότητα στους 25°C	0.019 kJ/(m*s°C)
Ιξώδες στους 25°C	0.00892 centipoise
Θερμοχωρητικότητα (Cp) αερίου στους 25°C	14.3 kJ/(kg°C)
Θερμοχωρητικότητα (Cp) υγρού στους -256°C	8.1 kJ/(kg°C)
Θερμοχωρητικότητα (Cp) στερεού στους -259.8°C	2.63 kJ/(kg°C)

(7.1.2) ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Σε συνηθισμένες θερμοκρασίες, το υδρογόνο είναι συνήθως μη αντιδραστικό εκτός αν έχει ενεργοποιηθεί με κάποιο τρόπο. Αντίθετα, το άτομο του υδρογόνου είναι πολύ αντιδραστικό χημικά και γι' αυτό δε μπορεί να βρεθεί χημικά ελεύθερο στη φύση. Στην πραγματικότητα, χρειάζονται υψηλές θερμοκρασίες για να διαχωρίσουν το μοριακό υδρογόνο σε ατομικό. Για παράδειγμα, ακόμα και σε θερμοκρασία 5000K, περίπου 5% του υδρογόνου παραμένει αδιάστατο. Στη φύση συνήθως το υδρογόνο είναι συνδεδεμένο είτε σε άτομα οξυγόνου είτε άνθρακα. Ως εκ τούτου, για να λάβουμε το υδρογόνο από φυσικές ενώσεις, χρειάζεται δαπάνη ενέργειας. Επομένως, το υδρογόνο πρέπει να θεωρηθεί μεταφορέας ενέργειας, δηλαδή να αποθηκεύει και να διαβιβάζει ενέργεια που προέρχεται από μια αρχική πηγή.

Το ατομικό υδρογόνο είναι ισχυρό αναγωγικό μέσο ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου. Αντιδρά με τα οξείδια και τα χλωρίδια πολλών μετάλλων συμπεριλαμβανομένου του ασημιού, του χαλκού, του μολύβδου, του βισμούθιου και του υδραργύρου για να παράγει ελεύθερα μέταλλα. Μειώνει μερικά άλατα όπως τα νιτρικά, τα νιτρώδη και κυανίδια του νατρίου και του καλίου σε μεταλλική κατάσταση.

Οι σημαντικότερες ιδιότητες του υδρογόνου συγκρινόμενο με άλλα συμβατικά καύσιμα είναι οι εξής:

- Διάχυση
- Πλευστότητα
- Χρώμα, οσμή, γεύση και τοξικότητα
- Αναφλεξιμότητα
- Ενέργεια ανάφλεξης
- Επίπεδο εκπυρσοκρότησης
- Ταχύτητα φλόγας
- Θερμοκρασία φλόγας

(7.1.3) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Το υδρογόνο είναι αρκετά εύφλεκτο σε μία ευρεία περιοχή θερμοκρασίας και συγκέντρωσης. Αν και η απόδοση της καύσης είναι εξαιρετική και καλοδεχούμενη ως καύσιμο για το μέλλον, καθιστά αναπόφευκτα αρκετές τεχνολογικές προκλήσεις, όπως η ασφάλεια στην παραγωγή, την αποθήκευση, και τη μεταφορά. Σε αντίδραση με το οξυγόνο, το υδρογόνο ελευθερώνει ενέργεια με εκρηκτικό τρόπο σε μηχανές καύσης ή ήσυχια σε κυψέλες καυσίμου για να παράγει νερό ως μόνο του υποπροϊόν. Αντίθετα με τον άνθρακα ή τους υδρογονάνθρακες, το υδρογόνο δε βρίσκεται στη γη αλλά είναι διαθέσιμο ως χημική ένωση οξυγόνου και άνθρακα. Για παράδειγμα, το υδρογόνο είναι παρών στο νερό, σε απολιθωμένους υδρογονάνθρακες (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και σε βιομάζα όπως οι υδατάνθρακες, η πρωτεΐνη και η κυτταρίνη. Το υδρογόνο έχει τόσο ομοιότητες όσο και διαφορές συμβατικά καύσιμα όπως το μεθάνιο (φυσικό αέριο), το υγραέριο (LPG) και υγρά καύσιμα όπως η βενζίνη.

(7.2) ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Η αποθήκευση υδρογόνου υπονοεί ουσιαστικά τη μείωση ενός πολύ μεγάλου όγκου αερίου υδρογόνου. 1 kg υδρογόνου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ατμοσφαιρική πίεση καταλαμβάνει 11 m³. Για την πρακτική επομένως χρήση του πρέπει να αυξηθεί η πυκνότητά του. Αυτό γίνεται είτε αυξάνοντας την πίεση του είτε μειώνοντας τη θερμοκρασία του είτε, τέλος, μειώνοντας την άπωση μεταξύ των μορίων καθώς αυτό αντιδρά με κάποιο υλικό. Επίσης πολύ σημαντικό κριτήριο είναι κατά πόσο η διαδικασία της αποθήκευσης είναι αντιστρέψιμη.

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί με τους ακόλουθους τρόπους [35]:

1. Με υψηλής πίεσης φιάλες αερίου
2. Ως υγρό σε κρυογονικές δεξαμενές
3. Προσροφημένο σε υλικά με μεγάλη ειδική επιφάνεια
4. Ροφημένο σε ενδοπλεγματικές θέσεις σε μέταλλα
5. Με χημικούς δεσμούς (ιοντικής ή ομοιοπολικής φύσης)

(7.2.1) ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ

Το πιο κοινό σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου είναι οι φιάλες αερίου πίεσης 5000 psi (1 psi = 6.894 kPa = 0.0680 atm). Σε τέτοιες πιέσεις η ογκομετρική πυκνότητα των περίπου 36 kg m^{-3} , περίπου η μισή του υγρού υδρογόνου σε θερμοκρασία εξαμίσεως. Πολύ μεγαλύτερες πιέσεις είναι εφικτές ενώ μπορούν να φτάνουν και τα 10000 psi. Τέτοιες φιάλες αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα. Για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας τους στις υψηλές πιέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στρώματα νανοσωλήνων άνθρακα.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος μετάδοσης είναι οι σωληνώσεις με σταθερή ατμοσφαιρική πίεση και σε κρυογόνες δεξαμενές. Είναι επίσης και η πιο οικονομική λύση αλλά υπάρχει η πρόκληση την ψαθυροποίησης των χαλύβων και οι απώλειες διάχυσης. Η παραγωγή αισθητήρων για την ακέραιη διαχείριση ενός τέτοιου δικτύου σωληνώσεων θα είναι σημαντική στην ανάπτυξη του υδρογόνου.

Από τον τύπο:

$$\Delta G = RT \ln(p/p_0)$$

υπολογίζεται, υποθέτοντας ισόθερμη συμπίεση, θεωρητικά το έργο το οποίο απαιτείται για τη συμπίεση του αερίου υδρογόνου μέσα στη φιάλη. Η τελική πίεση συμβολίζεται στον παραπάνω τύπο ως p και η αρχική ως p_0 . Το υπολογιζόμενο έργο συνοδεύεται από κάποιο σφάλμα, μικρότερο ωστόσο από 6% για τις περιοχές πιέσεων από 0.1 έως 100 MPa. Για την ισόθερμη συμπίεση υδρογόνου από 0.1 MPa σε 80 MPa απαιτείται σύμφωνα με τον τύπο ενέργεια 2.21 kWh / kg. Σε πραγματικές διεργασίες το έργο είναι μεγαλύτερο καθώς η συμπίεση δεν είναι ισόθερμη. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η χαμηλή πυκνότητα του υδρογόνου καθώς και οι υψηλές πιέσεις που απαιτούνται. Επίσης, οι περισσότερες φιάλες σήμερα χρησιμοποιούν κράματα χαλκού ή αλουμινίου. Φιάλες από πιο ανοξειδωτά υλικά μετάλλων ο σίδηρος ή το τιτάνιο δεν είναι κατάλληλα καθώς το υδρογόνο μπορεί να προκαλέσει μέχρι και την ολική θραύση της φιάλης.

(7.2.2) ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ

Το υγρό υδρογόνο αποθηκεύεται σε κρυογονικές δεξαμενές. Η πυκνότητα του υγρού υδρογόνου είναι 70.8 kg m^{-3} ενώ είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή του στερεού υδρογόνου (70.6 kg m^{-3}). Η θερμική μόνωση της δεξαμενής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην πρακτικότητα αυτής της μεθόδου.

Το μόριο του υδρογόνου συνίσταται από δύο πρωτόνια και δύο ηλεκτρόνια. Λαμβάνοντας υπόψη εκτός από τα ηλεκτρονικά σπινς και τα πυρηνικά οδηγούμεστε στο διαχωρισμό των μορίων υδρογόνου σε δύο ομάδες. Ανάλογα με το ολικό πυρηνικό σπιν έχουμε και δύο διαφορετικά είδη υδρογόνου. Αν $I=0$ (αντιπαράλληλα

πυρηνικά σπινς) έχουμε το λεγόμενο παρά-υδρογόνο και για $I=1$ (παράλληλα πυρηνικά σπινς) το όρθο-υδρογόνο. Σε θερμοκρασίες δωματίου 25% του υδρογόνου βρίσκεται στην πάρα μορφή του και το υπόλοιπο 75% στην όρθο. Οι δύο αυτές μορφές διαφέρουν στην ενέργεια κι επομένως στις φυσικές ιδιότητες τους. Η θερμοκρασία τήξης και βρασμού του παρα-υδρογόνου διαφέρουν κατά 0.1 K από αυτές του όρθο-υδρογόνου. Όταν το υδρογόνο ψύχεται από τη θερμοκρασία δωματίου στη θερμοκρασία βρασμού (21.2 K) το όρθο-υδρογόνο από το αρχικό ποσοστό του 75% μειώνεται σε 50% αρχικά σε θερμοκρασία 77 K και σε 0.2% στους 21.2 K. Η μετατροπή από τη μια μορφή στην άλλη είναι εξαιρετικά αργή, με χρόνο ημιζωής της μετατροπής μεγαλύτερο από έτος για τη θερμοκρασία των 77 K. Η μετατροπή αυτή είναι εξώθερμη και η θερμότητα η οποία παράγεται εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Μέχρι τους 77 K αυξάνεται όσο η θερμοκρασία μειώνεται ενώ για ακόμα χαμηλότερες θερμοκρασίες παραμένει σταθερή.

Η συνέπεια των παραπάνω είναι ότι αν αρχικά αποθηκευτεί υγρό υδρογόνο σε κάποια δεξαμενή κατά τη μετατροπή από το ένα είδος υδρογόνου στο άλλο θα εκλυθεί θερμότητα η οποία θα προκαλέσει την εξάτμιση του υγρού υδρογόνου. Για να αποφευχθεί αυτό η μετατροπή επιταχύνεται καταλυτικά από κατάλληλες επιφάνειες παραμαγνητικών υλικών (όπως βολφράμιο, νικέλιο, οξειδίο του χρωμίου).

Η διαδικασία μπορεί να κρατήσει μέχρι και μερικά λεπτά ενώ ο δεσμός μεταξύ των ατόμων του υδρογόνου παραμένει ανεπηρέαστος.

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι τα μεγάλα ποσά ενέργειας που πρέπει να καταναλωθούν για την υγροποίηση του υδρογόνου. Για αυτό και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου δεν τίθεται θέμα κόστους ενώ παράλληλα χρειάζεται να γίνει κατανάλωση του υδρογόνου σε μικρό χρονικό διάστημα, όπως σε διαστημικές εφαρμογές.

(7.2.3) ΥΒΡΙΔΙΑ ΜΕΤΑΛΛΟΥ

Η ιδέα του να χρησιμοποιηθούν υδρίδια μετάλλου σαν αποθηκευτικό μέσο είναι γνωστή από τις αρχές της δεκαετίας του '70. Ορισμένα καθαρά μέταλλα και διαμεταλλικά συστατικά του τύπου AB, A₂B, AB₂ και AB₅ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση του υδρογόνου.

Στον ΠΙΝΑΚΑ 2.3 αναφέρονται ορισμένα από τα μέταλλα και τα κράματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό, όπου φαίνεται η αποθηκευτική τους ικανότητα, η θερμότητα της αντίδρασης και η πίεση της αποφόρτισης. Τα υδρίδια έχουν εξαιρετικά υψηλή ικανότητα στο να αποθηκεύουν μεγάλους όγκους υδρογόνου με μεγάλη πυκνότητα, πολύ μεγαλύτερη από εκείνη της αποθήκευσης σε αέρια μορφή και μεγαλύτερη από την αποθήκευση υγρής μορφής υδρογόνου. Η θερμότητα κατά την αντίδραση πρόσθεσης ή αφαίρεσης υδρογόνου κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του μεταλλικού συστήματος που χρησιμοποιείται.

Η αποθήκευση σε μορφή υδριδίων, απαιτεί χαμηλές πιέσεις και για το λόγο αυτό, είναι ένα από τα ασφαλέστερα συστήματα αποθήκευσης και μεταφοράς [37]. Το υδρογόνο σε χαμηλές πιέσεις διαχέεται μέσω των πόρων ενός στερεού και συγκεντρώνεται σε χώρους όπου υπάρχουν ατέλειες στη κρυσταλλική δομή. Τότε, αναφερόμενοι σε ανοξειδωτά υλικά, το υδρογόνο αντιδρά με τις προσμίξεις του υλικού και σχηματίζει κάποιο υδρίδιο. Το υδρίδιο αυτό παραμένει στο χώρο όπου σχηματίζεται και αυξανόμενο σε συγκέντρωση ασκεί πιέσεις στο γύρω όγκο του στερεού. Αυτές οι πιέσεις από ένα όριο και πάνω ανάλογα το υλικό μπορούν να προκαλέσουν την θραύση του. Μέχρι το σημείο της θραύσης το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό στην περίπτωση που απομακρυνθεί το υδρογόνο. Σε υψηλές πιέσεις, όπως αυτές που μας ενδιαφέρουν για την αποθήκευση του υδρογόνου, τα πράγματα αλλάζουν λίγο. Το υδρογόνο συσσωρεύεται κυρίως στα όρια των κόκκων του μετάλλου και η θραύση του υλικού ξεκινάει από αυτές τις περιοχές. Το φαινόμενο της ψαθυροποίησης λόγω του υδρογόνου (hydrogen induced embrittlement) πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στην κατασκευή φιαλών με προορισμό την αποθήκευση υδρογόνου [36].

Τα μειονεκτήματα των μεταλλικών υδριδίων είναι το κόστος τους, το βάρος της εγκατάστασης, οι μικρές ταχύτητες μεταφοράς θερμότητας και η μεταβολή του όγκου κατά το σχηματισμό υδριδίων.

Η χρήση τέτοιων συστημάτων υδριδίων είναι διπλή, τόσο σαν αποθηκευτικό μέσο το οποίο περιέχει το υδρογόνο όσο και σαν εναλλάκτης θερμότητας άρα και σαν μέσο μεταφοράς ενέργειας. Εκτός από την αποθήκευση, τα υδρίδια μπορούν να έχουν πολλές τεχνικές εφαρμογές, σαν αντλίες θερμότητας, σαν μέσο αποθήκευσης καυσίμων για χρήση στον τομέα των μεταφορών, σαν αποθηκευτικό μέσο περίσσειας ενέργειας για χρήση σε στιγμές υψηλής ζήτησης [37].

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3

Υδρίδια μετάλλων – χωρητικότητα, θερμότητα κατά την αντίδραση και πίεση κατά την αποφόρτιση

Τύπος κράματος	Αποθηκευτική ικανότητα (% κ.β.)	Εκλυόμενη θερμότητα ΔΗ (kcal/ mol H ₂)	Πίεση κατά την αποφόρτιση (bar)
FeTi	1.75	-6.7	5.3
Mg ₂ Ni	3.84	-15.4	3.2
ZrFe _{1.43} Cr _{0.5}	1.43	-5.8	1.2
LaNi ₅	1.43	-7.4	1.7

Είναι σημαντικό να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο ότι η πίεση του

υδρογόνου για το σχηματισμό του υδριδίου είναι γενικά διαφορετική από αυτή που απαιτείται για την αποσύνθεση του η οποία είναι μικρότερη της πρώτης.

Αυτό εξηγείται λαμβάνοντας υπόψη ότι η πυκνότητα του υδριδίου είναι μεγαλύτερη από αυτή του μετάλλου με αποτέλεσμα να ασκούνται μεγάλες πιέσεις από τη β φάση στο μεταλλικό πλέγμα γύρω από αυτή. Επιπλέον εξωτερική πίεση χρειάζεται ώστε να υπερκαλυφθεί η εσωτερικά δημιουργούμενη η οποία τείνει να αποβάλλει το υδρογόνο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση (hysteresis).

Όταν οι ελαστικές πιέσεις ξεπεράσουν το ελαστικό όριο του μετάλλου δημιουργούνται μόνιμες παραμορφώσεις στο πλέγμα και μπορεί να επιφέρει μέχρι και θραύση (embrittlement) του υλικού.

(7.2.4) ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

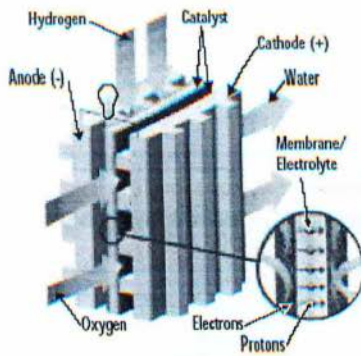
Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χαρακτηριστούν σαν κέντρα ενός συστήματος το οποίο χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως καύσιμο. Είναι αυτές οι οποίες αναλαμβάνουν τη μετατροπή του καυσίμου σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Η έννοια της κατάλυσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου, όπως θα δούμε παρακάτω και η έρευνα για τη βελτίωση της αποδόσεων της γίνεται κυρίως σε αυτόν τον τομέα, τομέας εξ ορισμού μελετώμενος στην κλίμακα του νανομέτρου.

Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος. Η πρώτη κυψελίδα φτιάχτηκε από τον Sir William Grove, το 1839. Ωστόσο η συστηματική έρευνα πάνω σε αυτές άρχισε μόλις τη δεκαετία του '60, όταν η NASA χρησιμοποίησε κυψέλες καυσίμου στο διαστημικό σκάφος Gemini και Apollo ως φθηνότερη λύση από την ηλιακή ενέργεια.

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν βάση του τύπου του ηλεκτρολύτη τον οποίο χρησιμοποιούν. Το πιο γνωστό είδος είναι η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίου (PEM).

Μία κυψέλη καυσίμου PEM αποτελείται εν συντομία από τα εξής μέρη:



Σχ.2.5 Κύρια μέρη κυψέλης καυσίμου PEM

Δύο ηλεκτρόδια, τα οποία διαχωρίζονται από μία μεμβράνη, η οποία έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Μεταξύ αυτής της πολυμερισμένης μεμβράνης και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη. Αργότερα θα μελετήσουμε τα μέρη μιας κυψέλης αναλυτικότερα. Συνοπτικά, η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού περιγράφεται από τα παρακάτω επιμέρους στάδια.

Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης, το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης είναι τέτοιας κατασκευής ώστε η διάχυση των ατόμων του υδρογόνου να γίνεται με ομογενή τρόπο. Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώθηκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την άνοδο δημιουργώντας ηλεκτρισμό αφού η μεμβράνη αποτρέπει τη διέλευση τους μέσω αυτής. Για αυτό το λόγο άνοδος και καταλύτης διαλέγονται αγώγιμα υλικά.

Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου (στην ουσία αναφερόμαστε σε μεμονωμένα πρωτόνια) διαπερνούν τη μεμβράνη και ενώνονται με το οξυγόνο το οποίο τροφοδοτεί την κάθοδο, το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, και παράγεται νερό. Όπως και πριν, την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει η κατασκευή του ηλεκτροδίου. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του.

Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας. Τα δύο στρώματα (στηριζόμενου) καταλύτη χρησιμεύουν στην αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων διάσπασης του μορίου του υδρογόνου και της ένωσης υδρογόνου οξυγόνου για τη δημιουργία νερού, στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα. Συνήθως αποτελείται από ένα πολύ λεπτό στρώμα λευκόχρυσου (Pt) πάνω σε επιφάνεια άνθρακα. Το στρώμα αυτό είναι και το μέρος του καταλύτη το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τη μεμβράνη. Ο καταλύτης είναι τραχύς και πορώδης ώστε να μεγιστοποιεί η εκτεθειμένη επιφάνεια του.

Οι χημικές αντιδράσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν τα παραπάνω βήματα,

συνοψίζονται παρακάτω [36].

Στην άνοδο $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

Στην κάθοδο $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Ολική αντίδραση $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Οι παραπάνω αντιδράσεις σε μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου στα 0.7 Volts . Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερες (και πρακτικά αξιοποιήσιμες) τάσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερες κυψέλες σε σειρά (fuel cell stack).

(7.2.5) ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ

Θέλοντας να προσεγγίσουμε αναλυτικότερα τη διαδικασία της απορρόφησης του υδρογόνου από μια καθαρή επιφάνεια μετάλλου μπορούμε να τη χωρίσουμε σε επιμέρους στάδια, έχοντας ως σημείο αναφοράς το παρακάτω διάγραμμα που εκφράζει τη σχέση δυναμικής ενέργειας του ατομικού και μοριακού υδρογόνου σε συνάρτηση με την απόσταση του από την επιφάνεια του μετάλλου.

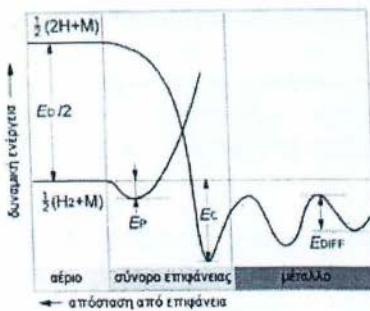
1. Η δυναμική ενέργεια του ατομικού υδρογόνου έχει μια τιμή, ενώ η ανάλογη του μοριακού βρίσκεται υψηλότερα τόσο όσο υποδεικνύει η ενέργεια διάσπασης του στα 2 άτομα που το αποτελούν.

2. Πλησιάζοντας στην επιφάνεια έχουμε τη φυσική προσρόφηση του μοριακού υδρογόνου από το μέταλλο στο ελάχιστο της καμπύλης. Αυτή η ελκτική αλληλεπίδραση στηρίζεται στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις Van Der Waals.

3. Για μικρότερες αποστάσεις το δυναμικό που βλέπει το μοριακό υδρογόνο λόγω της επιφάνειας απειρίζεται ενώ οι καμπύλες ατομικού και μοριακού τέμνονται σε κάποιο μεταβατικό σημείο αμέσως μετά το οποίο παρατηρείται η χημειορρόφηση του ατομικού. Όσο μικραίνουν οι αποστάσεις, το μόριο χάνει συνεχώς κινητική ενέργεια ενώ ο διατομικός δεσμός γίνεται όλο και πιο ασθενής λόγω της παράλληλης κίνησης των ατόμων.

4. Πάνω στην επιφάνεια τα άτομα υδρογόνου αλληλεπιδρούν και σχηματίζουν μια επιφανειακή φάση. Καθώς τα άτομα αυτά βρίσκουν κατάλληλα σημεία, εισχωρούν βαθύτερα στο μέταλλο.

5. Συνέπεια του παραπάνω βήματος είναι η διάχυση (diffusion) του υδρογόνου στο εσωτερικό του μετάλλου.



Σχ.2.6 Δυναμική ενέργεια υδρογόνου συναρτήσει της απόστασης του από καθαρή επιφάνεια μετάλλου

Οι διαδικασίες αυτές ταυτόχρονα περιγράφουν την εκρόφιση υδρογόνου ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα από το τέλος προς την αρχή. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι η ίδια ακριβώς διαδικασία χαρακτηρίζει την προσρόφιση όχι μόνο του υδρογόνου από κάποιο μέταλλο αλλά και άλλων στοιχείων όπως του οξυγόνου. Ωστόσο, μόνο το υδρογόνο απορροφάται από τα μέταλλα (ή τα κράματα τους) σε ικανοποιητικές ταχύτητες σε θερμοκρασία δωματίου. Στο αντίθετο άκρο βρίσκονται τα ευγενή αέρια, τα οποία είναι αδιάλυτα στα μέταλλα.

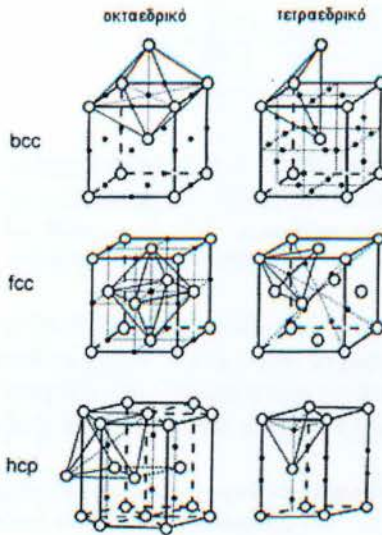
Παραπάνω θεωρήσαμε την επιφάνεια του μετάλλου καθαρή για το λόγο ότι στην αντίθετη περίπτωση όπου διάφορα οξείδια ή λοιπές προσμίξεις έχουν σχηματιστεί πάνω σε αυτήν η διαδικασία της απορρόφησης γίνεται πολυπλοκότερη. Σε μια τέτοια περίπτωση μιλάμε για ενεργοποίηση (activation) του μετάλλου, τη διάσπαση δηλαδή του στρώματος των προσμίξεων αυτών τα οποία εμποδίζουν τόσο την εισχώρηση του υδρογόνου στο μέταλλο όσο και τη διαδικασία διάσπασης του μοριακού υδρογόνου σε ατομικό στην επιφάνεια του. Το σπάσιμο του επιφανειακού αυτού στρώματος απαιτεί υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Η ταχύτητα της όλης διαδικασίας επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες, όπως τη δομή του μετάλλου (όπως θα δούμε παρακάτω μελετώντας τη βελτίωση της με χρήση νανοκρυσταλλικών μετάλλων), την καθαρότητα της επιφάνειας (όπως ήδη αναφέραμε), την παρουσία καταλυτών (εκτελώντας διάφορες λειτουργίες, όπως παράκαμψη της διαδικασίας ενεργοποίησης της επιφάνειας) κτλ.

Επίσης σημαντικό παράγοντα αποτελεί η μεταφορά θερμότητας δεδομένου του ότι ο σχηματισμός του υδριδίου είναι εξώθερμη διαδικασία. Επόμενο είναι πως σε περίπτωση που η θερμότητα αυτή δεν διοχετεύεται αρκετά γρήγορα μακριά από το υδρίδιο να μειώνεται η ταχύτητα σχηματισμού του.

(7.2.6) ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ

Το υδρογόνο στη φάση του υδριδίου στο μεταλλικό πλέγμα καταλαμβάνει το κέντρο των τετράεδρων (T) ή οκταέδρων (O) που σχηματίζονται από ένα άτομο του μεταλλικού πλέγματος και άλλων τριών ή επτά (αντίστοιχα) εγγύτατων γειτόνων του.

Σχηματική παράσταση των θέσεων αυτών σε bcc, fcc και hcp πλέγματα μετάλλων βλέπουμε παρακάτω. Με λευκές σφαίρες συμβολίζονται τα άτομα μετάλλου και με μαύρες μικρότερες το ατομικό υδρογόνο.



Σχ.2.7 Οκταεδρική και τετραεδρική κατανομή σε πλέγματα bcc, fcc και hcp

Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι στο bcc πλέγμα δεν καταλαμβάνονται όλες οι T θέσεις λόγω του ότι υπάρχει μια ελάχιστη απόσταση κατά την οποία ένα άτομο υδρογόνου μπορεί να πλησιάσει ένα άλλο. Αυτό ονομάζεται φαινόμενο παρεμπόδισης (blocking effect) και παρατηρείται συχνά στα μέταλλα και τα υδρίδια τους.

Επιπλέον, τα άτομα υδρογόνου στις θέσεις που καταλαμβάνουν δεν είναι ακίνητα αλλά εκτελούν και αυτά όπως και τα άτομα του μετάλλου θερμική κίνηση γύρω από τη θέση ισορροπίας. Οι ενέργειες που χαρακτηρίζουν αυτή την κίνηση σε μια κατανομή T είναι μεγαλύτερες από αυτές σε μία κατανομή O. Αυτό γιατί η κατανομή O χαρακτηρίζεται από μικρότερες διατομικές αποστάσεις. Στο νικέλιο, το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς για την αποθήκευση του υδρογόνου, το υδρογόνο καταλαμβάνει O θέσεις.

Καθώς το υδρογόνο καταλαμβάνει ενδοπλεγματικές θέσεις απωθεί μεταλλικά

άτομα ασκώντας πιέσεις στο πλέγμα γύρω από αυτό, διευρύνοντας. Υποθέτοντας πως η διέυρυνση είναι ιστροπική, όπως και ισχύει στα fcc πλέγματα η μεταβολή του όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\Delta V}{V} = 3 \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) = 3 \lambda \left(\frac{\Omega H}{\Omega} \right) \Delta c$$

όπου $\Delta V/V$ σχετική μεταβολή του όγκου, α η σταθερά του πλέγματος, ΩH ο ατομικός όγκος του υδρογόνου και Ω ο ατομικός όγκος του μετάλλου.

Για το λ ισχύει:

$$\lambda = \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha \Delta c} \right)$$

και δίνει τη σχετική παραμόρφωση ανά μονάδα συγκέντρωσης, που προκαλεί μεταβολή στη συγκέντρωση Δc (με $c = [H]/[M]$) μεταβάλλοντας τη σταθερά του πλέγματος κατά $\Delta \alpha$. Βλέπουμε πως η παραμόρφωση του κρυστάλλου είναι γραμμική με την συγκέντρωση του υδρογόνου.

Το πλέγμα ωστόσο δεν διευρύνεται το ίδιο προς όλες τις κατευθύνσεις για bcc πλέγματα αλλά αντιθέτως τη διέυρυνση αυτή τη χαρακτηρίζει ανισοτροπία. Στην κατανομή τύπου O τα δύο πλησιέστερα άτομα μετάλλου να απομακρύνονται από το άτομο του υδρογόνου ενώ οι επόμενοι τέσσερις εγγύτατοι γείτονες να πλησιάζουν.

Οι δύο μετατοπίσεις δεν λαμβάνουν την ίδια έκταση και υπερσχύει η πρώτη. Τότε η παράμετρος λ πρέπει να θεωρηθεί τανυστής.

Το υδρογόνο όπως είπαμε διαχέεται γρηγορότερα από οποιαδήποτε άλλο στοιχείο στα μέταλλα. Χαρακτηριστικά, στο σύστημα V - H ο συντελεστής διάχυσης του D σε θερμοκρασία δωματίου ισούται με $5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$, εφάμιλλος με αυτόν των υγρών [36].

(7.2.7) ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Εκτός από τη ρηγματώση εξαιτίας του σχηματισμού μεταλλικών υδριδίων, ο μηχανισμός σχηματισμού ατομικού υδρογόνου και η συνεπαγόμενη ψαθυροποίηση από υδρογόνο, είναι αμφιλεγόμενος, με τρεις πιθανούς μηχανισμούς να είναι κυρίαρχοι: η διάσπαση που οφείλεται στο υδρογόνο (hydrogen enhanced decohesion, HEDE), η οφειλόμενη στο υδρογόνο τοπική πλαστικοποίηση (Hydrogen enhanced localized plasticity, HELP) και η δημιουργία διαταραχών εξαιτίας προσρόφησης (Adsorption induced dislocation emission, AIDE). Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των μηχανισμών αυτών και αναφέρονται τα θεωρητικά και πειραματικά στοιχεία που υποστηρίζουν κάθε περίπτωση.

(7.2.8) ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΠΟΥ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ (HEDE)

Ο μηχανισμός αυτός αναφέρθηκε πρώτη φορά για πρώτη φορά από τον Troiano και στη αναπτύχθηκε από τον Oriani και τους συνεργάτες του με λεπτομέρεια. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό το υδρογόνο συγκεντρώνεται μέσα στη πλαστικοποιημένη ζώνη της θραύσης και εκεί χαλαρώνει τους δεσμούς μεταξύ των ατόμων του μετάλλου. Αρχικά, η συγκέντρωση του υδρογόνου σε ποσοστά μεγαλύτερα από αυτά που επιτρέπει η διαλυτότητά του σε μη φορτισμένα πλέγματα, ξεκινά από την διαστολή του πλέγματος, εξαιτίας ελαστικών, υδροστατικών πιέσεων, ενώ αργότερα, σαν δεύτερη πιθανή αιτία για το παραπάνω, κατονομάστηκε και ο εγκλωβισμός (trapping) σαν πιθανή αιτία συγκέντρωσης του υδρογόνου.

Επιπλέον, ο McMahon και οι συνεργάτες του πήγε ένα βήμα παρακάτω την άποψη ότι οι ακαθαρσίες που βρίσκονται συγκεντρωμένες στα όρια των κόκκων, μειώνουν με παρόμοιο τρόπο τη συνοχή των δεσμών του μετάλλου, ενισχύοντας την ψαθυροποίηση που προκαλεί το υδρογόνο.

Ο μηχανισμός της ψαθυροποίησης που οφείλεται στη λύση της συνοχής εξαιτίας του υδρογόνου, στηρίζεται στη θεώρηση ότι η αστοχία συμβαίνει στην πλαστικοποιημένη περιοχή της θραύσης, όταν οι εφελκυστικές τάσεις στο άκρο της ρωγμής ξεπεράσουν τη μέγιστη – τοπική συνεκτική δύναμη, η οποία έχει ήδη μειωθεί εξαιτίας της παρουσίας του υδρογόνου [40]. Στο μηχανισμό αυτό, τα σημεία αστοχίας από το υδρογόνο, βρίσκονται σε κάποια απόσταση μπροστά από την επιφάνεια του άκρου της ρωγμής, όπου και οι εφελκυστικές τάσεις μεγιστοποιούνται.

Οι εκτιμήσεις για την αστοχία προέρχονται από την γνώση της τιμής της τάσης στο άκρο της ρωγμής, από τη συγκέντρωση του υδρογόνου στα σημεία αστοχίας και από τη σχέση που έχει αυτή με την τιμή των διατομικών δεσμών σε σχέση με το νόμο εκτόπισης του ατόμου (atom displacement law). Κατά κοινή ομολογία προέκυψε ότι αυτός ο μηχανισμός αστοχίας είναι κυρίαρχος στην ρωγμάτωση υποβοηθούμενη από το εσωτερικό υδρογόνο (Internal Hydrogen Assisted Cracking, IHAC) και για τη ρωγμάτωση που οφείλεται στο υδρογόνο του περιβάλλοντος (Hydrogen Environmental Assisted Cracking, HEAC) σε κράματα υψηλής αντοχής που δεν σχηματίζουν υδρίδια [41-42]. Αυτό οφείλεται σε μια σειρά από λόγους.

Πρώτον, υψηλές συγκεντρώσεις υδρογόνου παρουσιάζονται στην πλαστικοποιημένη ζώνη της θραύσης εξαιτίας των πολύ υψηλών τιμών τάσης στην άκρη της ρωγμής και επιπλέον ενίσχυσή τους από το εγκλωβισμένο υδρογόνο κατά μήκος της ρωγμής [41].

Δεύτερον, πειράματα που έγιναν από τον Vehoff και τους συνεργάτες [22-23] του σε δοκίμια από μονοκρυσταλλικό Fe-3%Si υπό τάση, έδειξαν ότι το άκρο της ρωγμής γινόταν όλο και πιο αιχμηρό με αντίστοιχη αύξηση της πίεσης του υδρογόνου και την ελάττωση της θερμοκρασίας. Τρίτον, προσομοιώσεις ατόμων έδειξαν ότι το υδρογόνο μπορεί να ελαττώσει τις συνεκτικές δυνάμεις μεταξύ των ατόμων [41-42].

Τέλος, μια πληθώρα μοντέλων μικρομηχανικής προέκυψε από την αρχή της λύσης της συνοχής και επιβεβαίωσαν τα πειραματικά αποτελέσματα των Kth και da/dII στις περιπτώσεις της IHAC και της HEAC.

Ο μηχανισμός της οφειλόμενης στο υδρογόνο διάσπασης, αμφισβητείται εξαιτίας της αδυναμίας παρουσίασης αποδείξεων. Κυρίως δεν υπάρχει άμεση πειραματική απόδειξη ότι το διαλυμένο υδρογόνο σε ένα μέταλλο μειώνει τη σχέση ανάμεσα στην διατομική δύναμη – μετατόπιση, ή ότι αλλάζει είτε τις ελαστικές ιδιότητες είτε την επιφανειακή ενέργεια που προκύπτει από ένα τέτοιου είδους δεσμό.

Το κυρίως πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι η ποσότητα υδρογόνου που μπορεί να διαλυθεί σε ένα δοκίμιο για να μετρήσουμε τις ιδιότητες του όγκου του είναι αρκετές τάξεις μεγέθους χαμηλότερη από την ελάχιστη τιμή εκείνης που απαιτείται να συγκεντρωθεί στην πλαστικοποιημένη ζώνη της ρωγμής. Ενώ η θεωρία υποστηρίζει την επίδραση του υδρογόνου στους μεταλλικούς δεσμούς, τα αποτελέσματα είναι περιορίζονται από τα μέσα που διαθέτουμε και από τις αναπόφευκτες υποθέσεις που πρέπει να γίνουν. Η θεωρητική στήριξη των επηρεαζόμενων από το υδρογόνο δεσμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από τους τρεις μηχανισμούς ψαθυροποίησης από το υδρογόνο.

Οι άλλοι δύο μηχανισμοί ψαθυροποίησης από υδρογόνο στα μέταλλα, ανήκουν στην κατηγορία της επηρεαζόμενης από το υδρογόνο τοπικής πλαστικότητας (Hydrogen Affected Localized Plasticity, HALP). Ο Beachem πρώτος παρατήρησε ότι το υδρογόνο διεγείρει τους μηχανισμούς των διαταραχών που προσδίδουν τοπική μορφή στην πλαστική παραμόρφωση, ικανό να εκκινήσουν μηχανισμούς ρωγμάτωσης με υποκρίσιμη διάδοση της ρωγμής, με ταυτόχρονα ψαθυρά μακροσκοπικά χαρακτηριστικά [44].

(7.2.9) ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ (ΑΙΔΕ)

Σε αντίθεση με τον πρώτο μηχανισμό, ο Lynch [38-39], ισχυρίστηκε ότι η χαλάρωση των μεταλλικών δεσμών από το υδρογόνο, έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή διαταραχών από τις επιφάνειες του άκρου της ρωγμής όπου και το υδρογόνο απορροφάται. Ο μηχανισμός αυτός, αποδίδει κυρίαρχο ρόλο στην διάδοση της ρωγμής εξαιτίας της παρουσίας υδρογόνου, εξαιτίας αυτής της συγκεντρωτικής έκλυσης διαταραχών, ακριβώς μπροστά από το άκρο της ρωγμής και κατά μήκος διασταυρούμενων επιπέδων, τα οποία ευνοούν γεωμετρικά την δημιουργία και την προώθηση ρωγμών με αιχμηρά ανοίγματα, παρά την άμβλυνση του άκρου της ρωγμής, χαρακτηριστικό της απουσίας υδρογόνου.

Κατά τη φόρτιση, η πλαστική παραμόρφωση ενεργοποιείται και μέσα στη πλαστική ζώνη της κορυφής της ρωγμής και μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό μικροκενών, με ή και χωρίς τη βοήθεια του υδρογόνου. Η συνένωση των κενών ενισχύει την προχώρηση της ρωγμής και συντηρεί μια αιχμηρή κορυφή ρωγμής,

αλληλεπιδρώντας με τις έντονες ταινίες ολίσθησης από την έκλυση διαταραχής στο άκρο της ρωγμής. Η επιφάνεια της ρωγμής πρέπει να αντανακλά αυτή τη διαδικασία προχώρησης και να περιέχει χαρακτηριστικά έδρας (facet – like) παράλληλα με το επίπεδο που τέμνει τα επίπεδα ολίσθησης της κορυφής της ρωγμής, ενώ ταυτόχρονα, πρέπει να περιέχει μια υψηλή πυκνότητα από μικροκενά. Κενά θα εμφανιστούν με μέγεθος που είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με εκείνο που δημιουργείται από εγκλείσματα και μεγαλύτερα στοιχεία διασποράς ή κατακρημνίσματα κατά τη θραύση χωρίς υδρογόνο και ΑΙΔΕ.

Οι έδρες (facets) μπορεί να είναι παράλληλες με επίπεδα με μικρό δείκτη για ορισμένες διατάξεις συμμετρικών επιπέδων ολίσθησης, αλλά και κατά μήκος επιπέδων με υψηλό δείκτη, εάν η κατάσταση του άκρου της ρωγμής δεν είναι ξεκάθαρη. Η περικρυσταλλική (intergranular) μορφή ρωγμάτωσης, είναι αποτέλεσμα επιλεκτικής προσρόφησης του υδρογόνου κατά μήκος της γραμμής τομής μεταξύ στο όριο του κόκκου και του μετώπου της ρωγμής, και, ίσως, να προέρχεται και από μια υψηλότερη πυκνότητα κατακρημνισμάτων που μπορεί να έχουν διαμορφωθεί κατά μήκος των ορίων των κόκκων [38]. Ο μηχανισμός αυτός αστοχίας ευνοείται περισσότερο στην περίπτωση της HEAC, ενώ θα μπορούσε να συμβεί και από την τοπική παρουσία υδρογόνου στην κορυφή μιας ρωγμής στην IHAC.

Ο Beachem [44], πρότεινε ότι η βασική αλληλεπίδραση διαταραχών – υδρογόνου στους χάλυβες, προκαλεί την διευκόλυνση της κίνησης των διαταραχών ή δημιουργεί διαταραχές ολίσθησης ή και τα δύο, έχοντας σαν συνέπεια την χαλάρωση του πλέγματος. Μια συσώρευση ικανής συγκέντρωσης υδρογόνου στο πλέγμα ακριβώς μπροστά από την κορυφή της ρωγμής θεωρείται ότι βοηθά την υπερισχύουσα διαδικασία παραμόρφωσης.

Παρατηρώντας ομοιότητες ανάμεσα στην ρωγμάτωση από υδρογόνο (hydrogen assisted cracking, HAC), την εργοδιάβρωση (stress corrosion cracking, SCC) και την προκαλούμενη από προσρόφηση ψαθυροποίηση υγρού μετάλλου σε διάφορα κράματα, ο Lynch [38] πρότεινε ότι η HAC συμπεριλαμβάνει προσρόφηση υδρογόνου στην κορυφή της ρωγμής.

Στο μοντέλο του Lynch, το προσροφημένο υδρογόνο αναμένεται να κάνει πιο αδύναμους τους δεσμούς μεταξύ των ατόμων, διευκολύνοντας, έτσι, την δημιουργία εστιών διαταραχών στην κορυφή της ρωγμής. Το μοντέλο αυτό είναι παρόμοιο με αυτό του Beachem αλλά διαφέρει ως προς το σημείο που επιδρά το υδρογόνο.

Τα στοιχεία που αποδεικνύουν το μηχανισμό αυτό είναι κυρίως θραυσματογραφικά [38,44]. Ειδικά, η γεωμετρία της ενδοκρυσταλλικής θραύσης, κυρίως κατά μήκος επιπέδων με χαμηλούς δείκτες που τέμνουν ενεργά συστήματα ολίσθησης και της διασταύρωσής τους με το μέτωπο της ρωγμής σε μονοκρυσταλλικά κράματα Al και Fe-Si, φαίνεται ότι υποστηρίζει τον μηχανισμό αστοχίας από ΑΙΔΕ. Αντίστοιχα, στην αστοχία με μηχανισμό HEAC σε πολλά κραματικά συστήματα και σε πολυκρυσταλλικές δομές, παρατηρήθηκε υψηλή συγκέντρωση από μικρές ζάρες (dimples) στην επιφάνεια των δημιουργούμενων εδρών σε περικρυσταλλική θραύση. Τα χαρακτηριστικά αυτά του παραπάνω μηχανισμού είναι παρόμοια με εκείνα που προέρχονται από την ψαθυροποίηση υγρού μετάλλου (liquid metal embrittlement, LME), ο μηχανισμός της οποίας είναι αυστηρά περιορισμένος από τον μηχανισμό ρωγμάτωσης επιφάνειας, σε συνέπεια με το μηχανισμό ΑΙΔΕ. Καθώς

παρόμοια χαρακτηριστικά θραύσης αναφέρονται τόσο στην HEAC όσο και στην LME, προκύπτει το συμπέρασμα ότι και ο μηχανισμός της AIDE θα λειτουργεί μόνο στην επιφάνεια της ρωγμής [39].

Ο Lynch υποστηρίζει ότι ο πολύ γρήγορος ρυθμός διάδοσης της ρωγμής da/dt που αναφέρθηκε στην ρωγμάτωση κατά HEAC σε υψηλής αντοχής κράματα εξηγείται μόνο με την ψαθυροποίηση της επιφάνειας, όπως περιγράφεται στον μηχανισμό AIDE, σε αντίθεση με την HEDE, όπου οι περιοχές που έχουν πάθει ζημιά από το υδρογόνο βρίσκονται μέσα στην ζώνη πλαστικοποίησης της θραύσης μπροστά από την κορυφή της ρωγμής.

Επιπλέον υπάρχουν ατομιστικοί υπολογισμοί που δείχνουν ότι η λύση της συνοχής των ατομικών δεσμών λόγω του υδρογόνου μπορούν να υποστηρίξουν και το μηχανισμό της AIDE και τον μηχανισμό της HEDE [47]. Ο μηχανισμός της AIDE αμφισβητείται εξαιτίας της αδυναμίας των αποδεικτικών στοιχείων. Η δομή μιας ολίσθησης στην περιοχή της κορυφής της ρωγμής σε ένα μέταλλο εκτεθειμένο στο υδρογόνο, δεν έχει χαρακτηριστεί ποτέ μέχρι σήμερα ικανοποιητικά έτσι ώστε να προκύπτει εκπομπή διαταραχών οφειλόμενη στο υδρογόνο και η σχετική με αυτή επέκταση της γεωμετρίας της ρωγμής.

Τα πολυκρυσταλλικά κράματα υψηλής αντοχής ενισχύονται από ένα σύνθετο δίκτυο από πολύ πυκνά φράγματα στην κίνηση των διαταραχών, τα οποία θα πρέπει να παρέχουν ικανοποιητική αντίσταση έτσι ώστε να καταπνίξουν οποιαδήποτε εκπομπή διαταραχών από το άκρο μιας ρωγμής.

Η περικρυσταλλική θραύση είναι χαρακτηριστική της IHAC και της HEAC, όμως η AIDE δεν παρέχει μια ξεκάθαρη εξήγηση γιατί η μορφή θραύσης είναι η επικρατούσα, εκτός από την ενίσχυση των κενών σε μικρή κλίμακα.

Η παρουσία πολύ μικρών κενών σε επιφάνειες ενδοκρυσταλλικής θραύσης εξαιτίας HEAC και LME είναι αμφιλεγόμενη. Εκείνοι που υποστηρίζουν την HEDE αποσιωπούν την ύπαρξη μιας οργανωμένης δομής κενών στην επιφάνεια της θραύσης.

Το αρχικό επιχείρημα ότι η τα μικρά, ρηχά κενά θα μπορούσαν να διερευνηθούν μόνο με τη χρήση TME (transmission electron microscopy), έχει καταρριφθεί από τις σύγχρονες μεθόδους SEM.

Ρηχά μικροκενά με διάμετρο από 0.02 – 0.04 μm θα έπρεπε να ξεδιαλύνονται με τη μέθοδο αυτή. Όμως, δεν υπήρξε καμιά απόδειξη μιας οργανωμένης δομής στην επιφάνεια της θραύσης, με χαρακτηριστικό την ύπαρξη ρηχών μικροκενών. Ενώ είναι προφανές ότι χρειάζονται επιπλέον στοιχεία που να έχουν προκύψει από συστηματική παρατήρηση, δεν έχουν αναφερθεί ευρέως επιφάνειες τυπικές του μηχανισμού της AIDE. Το επιχείρημα ότι μόνο η AIDE μπορεί να εξηγήσει τους αυξημένους ρυθμούς της διάδοσης της ρωγμής καταρρίπτεται από την ανάλυση της διάχυσης του υδρογόνου, από την επιφάνεια της κορυφής της ρωγμής στα σημεία αστοχίας στη ζώνη πλαστικοποίησης της θραύσης.

(7.2.10) ΟΦΕΙΛΟΜΕΝΗ ΣΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΤΟΠΙΚΗ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ (HELP)

Ο Birnbaum και οι συνεργάτες του πρότειναν ότι το διαλυμένο υδρογόνο ενισχύει την κινητικότητα των διαταραχών, έχοντας σαν αποτέλεσμα μια ακραία τοπική συγκέντρωση των διαταραχών; οι οποίες είναι ικανές να δημιουργήσουν υποκρίσιμη μεγέθυνση της ρωγμής, που, μακροσκοπικά, μπορεί να θεωρηθεί ψαθυρή [43,48].

Το αποτέλεσμα αυτό έχει αναφερθεί σε υψηλής αντοχής κράματα αλουμινίου, σε καθαρό νικέλιο, σε καθαρό σίδηρο, σε ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες και σε μονής φάσης α-Τι. Ο μηχανισμός HELP διαφέρει από εκείνον της ΑΙΔΕ στο ότι η κινητικότητα των διαταραχών ενισχύεται λόγω της συγκέντρωσης του υδρογόνου γύρω από πυρήνες διαταραχών, έχοντας σαν αποτέλεσμα την μείωση της ελαστικής ενέργειας σε σημεία αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε κινούμενες διαταραχές και σε μια πληθώρα από εμπόδια [48-49].

Καθώς το υδρογόνο μειώνει την ενέργεια αλληλεπίδρασης, η απαιτούμενη τάση για την κίνηση των διαταραχών μειώνεται και αυτή με αποτέλεσμα να ενισχυθεί η πλαστικότητα. Σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή η παρουσία του υδρογόνου σε στερεά διαλύματα, μειώνει τα εμπόδια στην κίνηση των διαταραχών και άρα αυξάνει το ποσοστό παραμόρφωσης που συμβαίνει σε μια τοπική περιοχή ακριβώς δίπλα στην επιφάνεια της θραύσης.

Αυτή η οφειλόμενη στο υδρογόνο τοπική πλαστικότητα αποδίδεται στην παρουσία της ατμόσφαιρας υδρογόνου γύρω από τις διαταραχές, η οποία απομονώνει την περιοχή αυτή και εμποδίζει την αλληλεπίδρασή της με άλλα ελαστικά κέντρα όπως άλλες διαταραχές, μεμονωμένα άτομα, κτλ.

Αν και ο μηχανισμός αυτός υποστηρίζει ότι η διαδικασία της θραύσης ξεκινάει από μια τοπική πλαστική αστοχία σε μικροσκοπικό επίπεδο, η ψαθυροποίηση εμφανίζεται μακροσκοπικά μειώνοντας την ολκιμότητα, όπως στην περίπτωση μιας δοκιμής εφελκυσμού. Έχει αναφερθεί ο μηχανισμός αστοχίας με τον τρόπο αυτό σε μια ποικιλία από υλικά με διαφορετικά κρυσταλλικά πλέγματα και έχει επιβεβαιωθεί ότι ο μηχανισμός αυτός μπορεί να εξηγήσει γενικά την επίδραση του υδρογόνου στην παραμόρφωση (τόσο στην ελαστική όσο και στην πλαστική) και στη θραύση.

Τα πρώτα στοιχεία που ενισχύουν το μηχανισμό αυτό είναι η επί τόπου παρατήρηση δοκιμών σε υψηλής τάσης ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, τα οποία έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση κατά την έκθεσή τους είτε σε κενό είτε σε υδρογόνο [48]. Τέτοιου είδους παρατηρήσεις αποκάλυψαν ένα αυξημένο αριθμό από συσσωρευμένες διαταραχές, καθώς και έναρξη της κίνησης των διαταραχών, εξαιτίας της παρουσίας του υδρογόνου στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Παρόμοια πλαστική παραμόρφωση εμφανίζεται και στην διάδοση ρωγμής στο TEM. Όμως τέτοιου είδους διάδοση συνέβη σε μικρότερες εφαρμοζόμενες τάσεις με παρουσία του υδρογόνου.

Για παράδειγμα μια ανενεργή ρωγμή, σχηματισμένη σε περιβάλλον κενού, άρχισε να μεγαλώνει μετά από την προσθήκη υδρογόνου στο μικροσκόπιο. Αυτές οι ρωγμές διαδίδονται κατά μήκος ενός ορίου κόκκου και μέσα στον χώρο του πλέγματος που βρισκόταν δίπλα στο όριο, με το τελευταίο να υπεριοχθεί όταν ακαθαρσίες όπως S και Ni ήταν παρούσες για να ενισχύσουν την δράση του υδρογόνου. Μελέτες για την επίδραση του υδρογόνου σε δοκίμια μεγαλύτερου όγκου έδειξαν μειωμένη τάση ροής (flow-stress), αυξημένη χαλάρωση τάσεων και διαφοροποιημένη ευαισθησία στο ρυθμό επιβαλλόμενης παραμόρφωσης εξαιτίας του διαλυμένου υδρογόνου. Παρόλα αυτά, η επίδραση του υδρογόνου στην σκλήρυνση / softening είναι αντικρουόμενα, με εκ διαμέτρου αντίθετα αποτελέσματα για τα ίδια κράματα και κάτω από καθεστώς συζήτησης για τις τυχόν διαφορές στον τρόπο και στον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό διεξαγωγής των πειραμάτων.

Ενώ τα μέχρι τώρα στοιχεία μπορούν να επιβεβαιώσουν ότι το υδρογόνο επιδρά στις διαταραχές και επηρεάζει την πλαστική ροή, το θέμα παραμένει ανοιχτό καθώς η υψηλή συγκέντρωση υδρογόνου, ο υψηλός ρυθμός τριαξονικής τάσης και ο υποβαθμισμένος χαρακτήρας της ζώνης πλαστικοποίησης της κορυφής της ρωγμής, δεν μπορούν να προσομοιωθούν με ακρίβεια από πειράματα μονοαξονικής καταπόνησης.

Ο μηχανισμός HELP αμφισβητείται εξαιτίας της έλλειψης επιπλέον αποδεικτικών στοιχείων. Οι μελέτες με χρήση TEM χρησιμοποιούσαν ένα λεπτό φύλλο (<200 nm) με το πολύ δύο διαστάσεων εντατική κατάσταση και ικανοποιητική πιθανότητα επίδρασης της επιφάνειας στην κίνηση των διαταραχών. Η επίδραση από την επιφάνεια του δοκιμίου μπορεί να γίνει ακόμα μεγαλύτερη από τη μεγάλη διαφυγή του υδρογόνου, η οποία προέρχεται από τη διάσπαση του μοριακού υδρογόνου από τη δέσμη ηλεκτρονίων μέσα στο μικροσκόπιο, και που είναι ικανή να μειώσει τα οξειδία της επιφάνειας και να οξειδώσει το διάλυμα σκλήρυνσης όπως ο άνθρακας και το οξυγόνο. Οι αλλαγές αυτές, και όχι η αλληλεπίδραση μεταξύ υδρογόνου και πυρήνα των διαταραχών, μπορεί να είναι υπεύθυνες για την παρατηρούμενη πλαστικότητα και άρα να συμβαίνουν μόνο στο λεπτό δοκίμιο. Δεν έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες για σύνθετες μικροδομές με πολλαπλά εμπόδια και πολύ μικρές αποστάσεις ολίσθησης, χαρακτηριστικά τυπικά των κραμάτων υψηλής αντοχής. Η γεωμετρία της ροής σε τέτοιου είδους υψηλής αντοχής μικροδομές δεν έχει αναπτυχθεί. Η μοντελοποίηση της κινητικότητας των διαταραχών δεν συμπεριλαμβάνει την επίδραση της οπισθέλκουσας του υδρογόνου στο μέτωπο κίνησης των διαταραχών.

(7.3) ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΠΤΥΧΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Μεγάλες ποσότητες υδρογόνου έχουν χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια ως πρώτη ύλη χημικών και βιομηχανικών αερίων για πολλά χρόνια και οι κανονισμοί για τη διανομή και την αποθήκευση είναι καθιερωμένοι. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη στη διύλιση πετρελαίου, χημικών, πετροχημικών, και σε βιομηχανίες συνθετικών καυσίμων. Παραδείγματα περιλαμβάνουν την κατασκευή αμμωνίας για λίπασμα και την αφαίρεση του θείου στη διύλιση πετρελαίου για προϊόντα όπως η

<<αναδιατυπωμένη>> βενζίνη. Η χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακός μεταφορέας για τις καταναλωτικές αγορές αναμένεται να αυξηθεί κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας, και η ανάπτυξη και η δημοσίευση των κωδίκων και των προτύπων για αυτήν την χρήση είναι ουσιαστικές να καθιερώσουν μια αγορά δεκτική περιβάλλον για τα εμπορικά προϊόντα και τα συστήματα υδρογόνου.

Αν και οι περισσότερες βιομηχανικές χώρες έχουν εκδώσει τους κανονισμούς, τους κώδικες, και τα πρότυπα (RCS) για τη χρήση του υδρογόνου, πολλές από αυτές τις χώρες υποστηρίζουν επίσης την ανάπτυξη διεθνών προτύπων για να διευκολύνουν το διεθνές εμπόριο.

Το υδρογόνο είναι ευπροσάρμοστο και καθαρό, και στοχεύοντας στα περιβαλλοντικά οφέλη, η παραγωγή του υδρογόνου από τις ανανεωμένες πηγές ενέργειας και πυρηνικός είναι υπό εξέταση. Ο προσδιορισμός και ο έλεγχος των πιθανών δυσμενών συνεπειών είναι μια ηθική απαίτηση όποτε μια οποιαδήποτε νέα τεχνολογία εισάγεται, και βεβαίως στην περίπτωση υδρογόνου που μπορεί να επηρεάσει τον κόσμο.

Η βιομηχανία έχει την εμπειρία στον ασφαλή χειρισμό των επικίνδυνων υλικών στα εργοστάσια χημικής βιομηχανίας, όπου μόνο το καλά εκπαιδευμένο προσωπικό έρχεται σε επαφή με το υδρογόνο. Εντούτοις, η ευρεία χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακό μεταφορέα θα οδηγήσει σε χρήση της από τους κοινούς ανθρώπους που απαιτεί διαφορετικούς κανονισμούς για την ασφάλεια και τις τεχνολογίες που είναι τώρα υπό ανάπτυξη. Ένα από τα σημαντικά θέματα που έχουν επιπτώσεις στην αποδοχή του υδρογόνου για τη δημόσια χρήση είναι ασφάλεια των εγκαταστάσεων υδρογόνου (μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης) καθώς επίσης και των εφαρμογών του (δηλ., ως χρήση καυσίμων οχημάτων ή σπιτιών). Οι κίνδυνοι που συνδέονται με τη χρήση του υδρογόνου μπορούν να χαρακτηριστούν ως φυσιολογικοί (κρουπάγημα και ασφυξία), φυσικοί (ψαθυροποίηση και βλάβες κατασκευαστικών στοιχείων), και χημικοί (κάψιμο ή έκρηξη), με τον αρχικό κίνδυνο να είναι ακούσια παραγωγή εύφλεκτου ή εκρηκτικού μίγματος με τον αέρα. [49-53]

(7.3.1) ΦΥΣΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ: ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ

Η σταθερή έκθεση στο υδρογόνο προκαλεί ψαθυροποίηση υδρογόνου σε πολλά υλικά, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν στη διαρροή ή τις καταστροφικές αποτυχίες τόσο στο μέταλλο όσο στα μη μεταλλικά συστατικά. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το ποσοστό και τη δριμύτητα της ψαθυροποίησης του υδρογόνου περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση υδρογόνου, την αγνότητα, την πίεση, τη θερμοκρασία, τον τύπο ακαθαρσίας, το επίπεδο πίεσης, το ποσοστό πίεσης, τη σύνθεση μετάλλων, την εκτατή δύναμη μετάλλων, η φύση του μετώπου ρωγμής του υλικού, το μέγεθος του κόκκου, τη μικροδομή, και την ιστορία θερμικής επεξεργασίας. Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε υγρασία στο αέριο υδρογόνο μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυροποίηση των μετάλλων μέσω της επιτάχυνσης του σχηματισμού των ρωγμών κόπωσης.

Οι τύποι ψαθυροποίησης υδρογόνου είναι:

- 1) Περιβαλλοντική ψαθυροποίηση υδρογόνου των μετάλλων και των κραμάτων με συνέπεια τις αυξανόμενες ρωγμές επιφάνειας.
- 2) Εσωτερική ψαθυροποίηση υδρογόνου που προκαλείται από το υδρογόνο που απορροφάται με συνέπεια τις πρόωρες αποτυχίες με σχηματισμό εσωτερικών ρωγμών.
- 3) Ψαθυροποίηση αντίδρασης υδρογόνου που προκαλείται από τη χημική αντίδραση του απορροφημένου υδρογόνου με ένα ή περισσότερα από τα συστατικά του μετάλλου για να διαμορφώσει ένα εύθραυστο υδρίδιο ή μεθάνιο μετάλλων με τον άνθρακα στους χάλυβες.

Οι μελέτες της επιδείνωσης των μηχανικών ιδιοτήτων που παρατηρούνται στο υδρογόνο που ραγίζει [25-27] έχουν δείξει ότι η ευαισθησία ενός μετάλλου (ή του κράματος) οφείλεται στο ότι το υδρογόνο αυξάνεται με τη δύναμη του μετάλλου. Η εσωτερική και περιβαλλοντική ψαθυροποίηση υδρογόνου μεγιστοποιούνται στο εύρος 200-300 K (-73°C σε 27°C), ενώ η ψαθυροποίηση αντίδρασης υδρογόνου εμφανίζεται στις θερμοκρασίες επάνω από τη θερμοκρασία δωματίου. Επιπλέον, η ευαισθησία της ψαθυροποίησης αυξάνεται γενικά με την εκατη πίεση.

Οι κύριοι παράγοντες ψαθυροποίησης του υδρογόνου είναι οι μεταλλικές ταινίες στις επιφάνειες που μπορούν να περιορίσουν την απορρόφηση υδρογόνου, την επίδραση μηχανουργικών κατεργασιών μέσω ηλεκτρικής εκκενώσεως που μπορεί να εισάγει το υδρογόνο σε ένα κατεργασμένο συστατικό, και την επίδραση των παγιδευμένων περιοχών μέσα στη δομή του μετάλλου.

Ο έλεγχος της ψαθυροποίησης του υδρογόνου μπορεί να ληφθεί από τα επιστρώματα οξειδίων, εξάλειψη των συγκεντρώσεων πίεσης, πρόσθετες ουσίες στο υδρογόνο, το κατάλληλο μέγεθος κόκκου και την προσεκτική επιλογή κραμάτων.[54]

(7.3.2) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΩΓΜΩΝ

Η υποβάθμιση του υδρογόνου για την αντίσταση διάδοσης ρωγμών σε υψηλής αντοχής κράματα είναι κατηγοριοποιημένη σε εσωτερικό ράγισμα από υδρογόνο (IHAC) ή σε περιβάλλον με ράγισμα από υδρογόνο (HEAC). Αυτά τα φαινόμενα καλούνται επίσης εσωτερική ψαθυροποίηση από υδρογόνο και περιβάλλον ψαθυροποίησης από υδρογόνο αντίστοιχα. Οι προηγούμενοι προσδιορισμοί ευνουούνται μιας και το υδρογόνο μειώνει την αντίσταση σε διάδοση ρωγμών βοηθώντας μικροσκοπικές διαδικασίες οι οποίες περιλαμβάνουν την αύξηση άκρων στις ρωγμές, ενώ η ψαθυροποίηση περιορίζει την αντίληψη της ακριβής φύσης της μηχανικής καταστροφής από υδρογόνο. Σε υψηλής αντοχής κράματα, τα αποτελέσματα της εισδοχής υδρογόνου είναι αμετάβλητα τοποθετημένα στις άκρες των ρωγμών. IHAC και HEAC διακρίνονται από την πηγή με αποθέματα

υδρογόνου που προσβάλλει την ζώνη διαδικασίας της κόπωσης (FPZ) στις άκρες των ρωγμών.

A) Εσωτερική ψαθυροποίηση από υδρογόνο :

Το ατομικό υδρογόνο μπορεί να εισαχθεί διαμέσου της μικροδομής με διαδικασίες κατασκευής (όπως χύτευση, συγκόλληση, επιφανειακός χημικός καθαρισμός, ηλεκτροχημικοί μηχανισμοί, επιμετάλλωση με ηλεκτρόλυση και θερμικές επεξεργασίες) καθώς επίσης και από περιβαλλοντικές εκθέσεις (όπως καθοδικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες και αεριώδης έκθεση υδρογόνου σε υψηλές θερμοκρασίες). Η κρίσιμη αύξηση ρωγμών συμβαίνει όταν καταπονείται συνεχώς το συγκεκριμένο μέταλλο από υδρογόνο όπως φαίνεται στην εικόνα 2. Οι αιτίες φορτίων από το διαλυμένο υδρογόνο διανέμονται από την περιβάλλουσα μικροδομή στη ζώνη των άκρων των ρωγμών ώστε να προωθήσουν την αύξηση ρωγμών. Η καταπόνηση δεν είναι απαραίτητη κατά τη διάρκεια λήψης υδρογόνου, και η περιβαλλοντική παραγωγή υδρογόνου στο σημείο των ρωγμών κατά τη διάρκεια της καταπόνησης δεν είναι σημαντική καθώς το περιβάλλον της επιφόρτωσης είναι τυπικά ευνοϊκό.

B) Ψαθυροποίηση βοηθούμενη από το περιβάλλον :

Περιλαμβάνει την ενωμένη δράση των μηχανικών φορτίσεων και της χημικής αντίδρασης. Το ατομικό υδρογόνο παράγεται κυρίως στις καθαρές επιφάνειες ρωγμών που εντοπίζονται πλησίον των άκρων τους, στην συνέχεια ακολουθείται η λήψη υδρογόνου στις άκρες των ρωγμών με αποτέλεσμα την ψαθυροποίηση όπως φαίνεται και αριστερά κάτω στην εικόνα 2. Μαζική μεταφορά στοιχείων από το γύρω περιβάλλον είναι μοναδική στον αποφραγμένο όγκο ρωγμών και παρέχει τις αντιδράσεις από την επιφάνεια στις άκρες των ρωγμών όπως απεικονίζεται για τρία περιβάλλοντα. Από τα αριστερά προς τα δεξιά, το ατομικό υδρογόνο παράγεται από την διασπαστική χημική προσρόφηση για το H_2 , από τις χημικές αντιδράσεις για τα αέρια όπως ο υδρατμός ή το H_2S , ή από ηλεκτροχημικές καθοδικές αντιδράσεις για τους όξινους ή αλκαλικούς ηλεκτρολύτες. Μόλις παραχθεί, το υδρογόνο διαχέεται μπροστά στις άκρες των ρωγμών επιφέροντας φθορά. Αυτό το σενάριο παρέχει το μηχανισμό υδρογόνου για ρωγή λόγω διάβρωσης (SCC) και για ρωγή λόγω θειούχας καταπόνησης για υδάτινα κράματα όπως υδρόθειο που φέρει ηλεκτρολύτες. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις οδηγώντας στη διάλυση μετάλλων παθητικό σχηματισμό μπορούν να συμβούν στις άκρες των ρωγμών, ταυτόχρονα με την παραγωγή υδρογόνου, για να επηρεάσουν την αύξηση των ρωγμών. Ο βαθμός στον οποίο η ζημιά του υδρογόνου κυριαρχεί είναι αμφισβητούμενος, αλλά ο μηχανισμός HEAC για (SCC) είναι αποδεκτός ευρέως για υψηλής αντοχής μέταλλα.[54]

(7.3.3) ΚΟΙΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ

(α) ΚΟΙΝΑ

Τα φαινόμενα ΙΗΑC και ΗΕΑC μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά σε υψηλής αντοχής μέταλλα. Κάθε τρόπος φθοράς εμφανίζεται σε επίπεδα έντονης καταπόνησης αρκετά κάτω από το κρίσιμο σημείο. Τα ΙΗΑC και ΗΕΑC προχωρούν από παρόμοιες μικροσκοπικές πορείες ρωγμών, συνήθως είτε περικρυσταλλική, διεπιφανειακή ή κρυσταλλογραφικά επίπεδα που ορίζονται από κόκκους – σε οξεία αντίθεση με τα μικροκενά που βασίζονται στην τυπική μορφολογία όλκιμης κόπωσης σε υψηλής αντοχής κράματα. Τόσο το ΙΗΑC και ΗΕΑC επηρεάζονται κατά παρόμοιο τρόπο με μεταβλητές όπως το επίπεδο εφαρμοσμένης K , ποσοστό φόρτισης (dK/dt), σγς κραμάτων, όριο σύνθεσης ακαθαρσιών σε κόκκους, θερμοκρασία, και συγκέντρωση υδρογόνου στην (FPZ).

Ένα ή περισσότερα κοινά ατομιστικού μηχανισμού ψαθυροποίησης είναι πιθανώς υπεύθυνα και για τα δυο παραπάνω φαινόμενα. Σε κάθε περίπτωση, ισχυρές συγκεντρώσεις σε υδρογόνο και οι καταπονήσεις σχετικά με τις άκρες των ρωγμών, διέπουν την ανάπτυξη και την πρόκληση φθοράς στην μοντελοποίηση και στον χαρακτηρισμό εργασίας. Και τα δυο φαινόμενα λειτουργούν εάν ένας προφορτισμένος χάλυβας καταπονείται σε περιβάλλον με υδρογόνο.

(β) ΔΙΑΦΟΡΕΣ

Οι διαφορές μεταξύ των ΙΗΑC και ΗΕΑC σχετίζονται με την κινητική της αύξησης των ρωγμών και δεν είναι ενδογενής. Κάθε λειτουργία εξαρτάται από το χρόνο διάχυσης του κινούμενου υδρογόνου. Η κινητική της μεταφοράς της μάζας του περιβάλλοντος και τα στάδια παραγωγής του υδρογόνου που απεικονίζονται στην εικόνα 2, μπορούν εναλλάξ να ελέγχουν τα ποσοστά του ΗΕΑC ανάλογα με τις ειδικές συνθήκες ρωγμής. Οι λεπτομέρειες της φθοράς από FPZ και συγκεκριμένα η τοποθεσία των διαδικασιών φθοράς μπροστά στις άκρες των ρωγμών, διαφέρουν από ΙΗΑC. Παράγοντες που ελέγχουν την ακριβή τοποθεσία φθοράς περιλαμβάνουν την κατανομή την κατανομή τάσεων εφελκυσμού μεγιστοποιημένα σε κάποια απόσταση μπροστά από το άκρο της ρωγμής, την πλαστική παραμόρφωση, το σχετικό σχεδιάγραμμα πυκνότητας εξάρθρωσης για τις άκρες των ρωγμών, τη διανομή των περιοχών υδρογόνου και τη συγκέντρωση υδρογόνου που παράγεται περιβαλλοντικά επάνω στην επιφάνεια των ρωγμών.[54]

(8) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

(8.1) ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΑΠΟ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024

ΠΕΙΡΑΜΑ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα μελέτη ήταν κράμα 2024-T351, που παρέχεται σε πάχος 1.6-3.0 mm. Η χημική σύνθεση του κράματος είναι Al-4.35 Cu - 1.5Mg - 0.64Mn - 0.5Si - 0.5Fe: Το πείραμα της αποφλοιωμένης διάβρωσης διεξήχθη σύμφωνα με συγκεκριμένη μέθοδο κατά ASTM. Συμπεριέλαβε έκθεση σε θερμοκρασία 25 ± 0.5 °C σε ένα διάλυμα που περιέχει 234gr NaCl, 50gr KNO₃, και 6.3 ml συμπυκνωμένο HNO₃ (70%κ.β.) αραιωμένο σε 1 L νερού. Οι χρόνοι έκθεσης κυμάνθηκαν από 15 λεπτά έως 96 ώρες. Το καθαρισμένο δείγμα μετά την απομάκρυνση από την διαβρωτική λύση, περιλάμβανε την εμβάπτιση του συμπυκνωμένο HNO₃ για 5 λεπτά, ξέπλυμα σε νερό, μετά σε ασετόν και στη συνέχεια στέγνωμα σε θερμό αέρα. Η διαδικασία του καθαρισμού στόχευε στην σε μια ολοκληρωμένη αφαίρεση των προϊόντων της διάβρωσης και η διάρκεια του δεν ξεπέρασε τα 10 λεπτά.

Τα πρώτα στάδια της διάβρωσης μελετήθηκαν από την AFM (Atomic Force Microscopy) ενώ τα μετέπειτα στάδια από την SEM (*Society for Experimental Mechanics*) και από τον τομέα της μεταλλογραφίας. Χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα χρωματογραφίας με εσωτερική απορρόφηση αερίου ώστε να προσδιοριστεί η απορρόφηση του υδρογόνου απ' το κράμα αλουμινίου κατά τη διάρκεια της διάβρωσης. Τα διαβρωμένα δείγματα εισήχθησαν σε ένα φούρνο με θερμοστάτη και διατηρήθηκαν υπό αδρανή ατμόσφαιρα καθαρού αζώτου. Εφαρμόστηκε ένας σταθερός ρυθμός θέρμανσης 5 °C / min, και η ποσότητα του υδρογόνου που μετρήθηκε, εξελίχθηκε ως συνάρτηση της θερμοκρασίας δείγματος. Οι ακόλουθες μετρήσεις ελήφθησαν για να εξασφαλιστεί ότι το υδρογόνο που ανιχνεύτηκε προέρχεται από τις αναθυμιάσεις από τη μικροδομή του κράματος: Προκειμένου να αποκλειστεί πιθανή επίδραση του περιορισμού, πραγματοποιήθηκαν τυφλά πειράματα με όλη τη συγκάτηση σε ισχύ, αλλά χωρίς τα δείγματα, και δεν ανιχνεύθηκε μετρήσιμη ποσότητα υδρογόνου. Προκειμένου να αποκλειστεί κάθε πιθανή επίδραση προϊόντων διάβρωσης, χρησιμοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία καθαρισμού. Οπτική μικροσκοπία πριν και μετά τον καθαρισμό επιβεβαίωσε την απομάκρυνση όλων των ορατών προϊόντων διάβρωσης. Περαιτέρω, μετρήσεις του υδρογόνου σε δείγματα (μη διαβρωμένα ή ελαφρώς διαβρωμένα) πριν και μετά τον καθαρισμό παράγουν τα ίδια αποτελέσματα. Αυτό λαμβάνεται για να επιβεβαιώσει της έλλειψη παρεμβολής τόσο στη μέθοδο καθαρισμού όσο και στην ποσότητα προϊόντων διάβρωσης στις μετρήσεις του υδρογόνου. Τέλος, για να αποκλειστεί πιθανή επίδραση του αερίου φορέα, έχει χρησιμοποιηθεί χρωματογραφικό καθαρό N₂, και έχει επιβεβαιωθεί η απουσία του O₂ από την περιορισμένη ατμόσφαιρα. Η βαθμονόμηση των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με την χρήση τυποποιημένων μινιμάτων (1000 ppm H₂ σε N₂) πιστοποιημένη από ειδικούς πάροχους αερίων.

Η σκιαγράφιση υδρογόνου εκτελέστηκε επίσης, με τη λήψη των μετρήσεων υδρογόνου από πολλαπλά διαβρωμένα δείγματα που υποβλήθηκαν σε σταδιακή βαθύτερη αφαίρεση υλικού. Η αφαίρεση εκτελέστηκε με λείανση στους λειαντικούς τροχούς του SIC (Standard Industrial Classification) με πλέγμα 1000. Πέντε όμοια δείγματα από πλάκα πάχους 2.4mm εκτέθηκαν υπό δοκιμή διάβρωσης για 24 ώρες. Το πρώτο δείγμα μετρήθηκε κατευθείαν για υδρογόνο μετά το καθαρισμό, ενώ τα άλλα τροχίστηκαν σε όλες τις 6 πλευρές από 50μm, 100μm, 200μm και 350μm αντίστοιχα.

Δοκιμή σκληρότητας διεξήχθη σε διαβρωμένο δείγμα, το οποίο θερμάνθηκε σε διάφορες θερμοκρασίες προσομοιώνοντας τον θερμικό κύκλο εκρόφησης από τις μετρήσεις υδρογόνου. Τα στοιχεία αυτά τέθηκαν σε προοπτική μαζί με τα χαρακτηριστικά των μερών που έχει παγιδευτεί υδρογόνο. Οι μετρήσεις σκληρότητας σε διαβρωμένα δείγματα ελήφθησαν μετά από μηχανική απομάκρυνση του διαβρωμένου στρώματος. Προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε μία πιθανή επίδραση σκλήρυνσης στη διαδικασία απομάκρυνσης, χρησιμοποιήθηκε σε χαμηλή ταχύτητα και πίεση η τεχνική της στίλβωσης. Επίσης, πραγματοποιήθηκε δοκιμή εφελκυσμού στα διαβρωμένα δείγματα σύμφωνα με την προδιαγραφή κατά ASTM E8m-94a. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε η μηχανή Zwick των 200 KN και η υδραυλική μηχανή MTS των 250 KN. Το ποσοστό καταπόνησης ήταν 10^{-4} s^{-1} . Οι δοκιμές εφελκυσμού διεξήχθησαν στο πανεπιστήμιο της Πάτρας και έχουν αναφερθεί στο παρελθόν. Εκτελέστηκαν γραφήματα σπασίματος των εκτατών δειγμάτων χρησιμοποιώντας την ηλεκτρονική ανίχνευση ηλεκτρονίων προκειμένου να προσδιοριστεί ο τρόπος σπασίματος και να παρέχουν αποδείξεις για τη σχέση της πρόληψης του υδρογόνου στη επιδείνωση της ολκιμότητας. [2]

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα πειράματα που διεξήχθησαν σε αυτή την εργασία όσον αφορά την διάβρωση που προκαλείται λόγω της ψαθυροποίησης υδρογόνου σε κράματα αλουμινίου οδηγούν στα εξής:

- (1) Φθορά λόγω διάβρωσης αρχίζει με κοιλώματα και προχωρά με αλληλεπιδράσεις κοιλώμα με κοιλώμα, περικρυσταλλική επίθεση και αποφλοίωση.
- (2) Το υδρογόνο παράγεται κατά την διαδικασία διάβρωσης και παραμένει παγιδευμένο σε διακριτά σημεία στο εσωτερικό του υλικού.
- (3) Η θερμοκρασία της εξέλιξης υδρογόνου και η διακύμανση της σκληρότητας σε σχέση με τη θέρμανση παρέχουν έμμεση απόδειξη της φύσης της μικροδομής του παγιδευμένου υδρογόνου.
- (4) Το υδρογόνο μαζί με τη διάβρωση δημιουργούν μια ζώνη κάτω από το στρώμα διάβρωσης.
- (5) Η απομάκρυνση του στρώματος διάβρωσης οδηγεί στην πλήρη αποκατάσταση της διαρροής, όμως μόνο μερική αποκατάσταση της

ολκιότητας. Η απομάκρυνση του στρώματος διάβρωσης και η θέρμανση ενεργοποιεί όλες τις όλες τις παγίδες υδρογόνου, οδηγεί όχι μόνο στο να ολοκληρώσει την αποκατάσταση της αντοχής αλλά επίσης στην αποκατάσταση της ολκιμότητας.

- (6) Η λεπτομερής ανάλυση της αστοχίας δείχνει την ύπαρξη μιας μεταβατικής ζώνης μεταξύ της ζώνης με περικρυσταλλική διάβρωση και του ανεπηρέαστου υλικού από όλκιμη διάβρωση. Αυτή η ζώνη έχει ψαθυροποιηθεί από τη διάχυση υδρογόνου και της παγίδευσής του. [2]

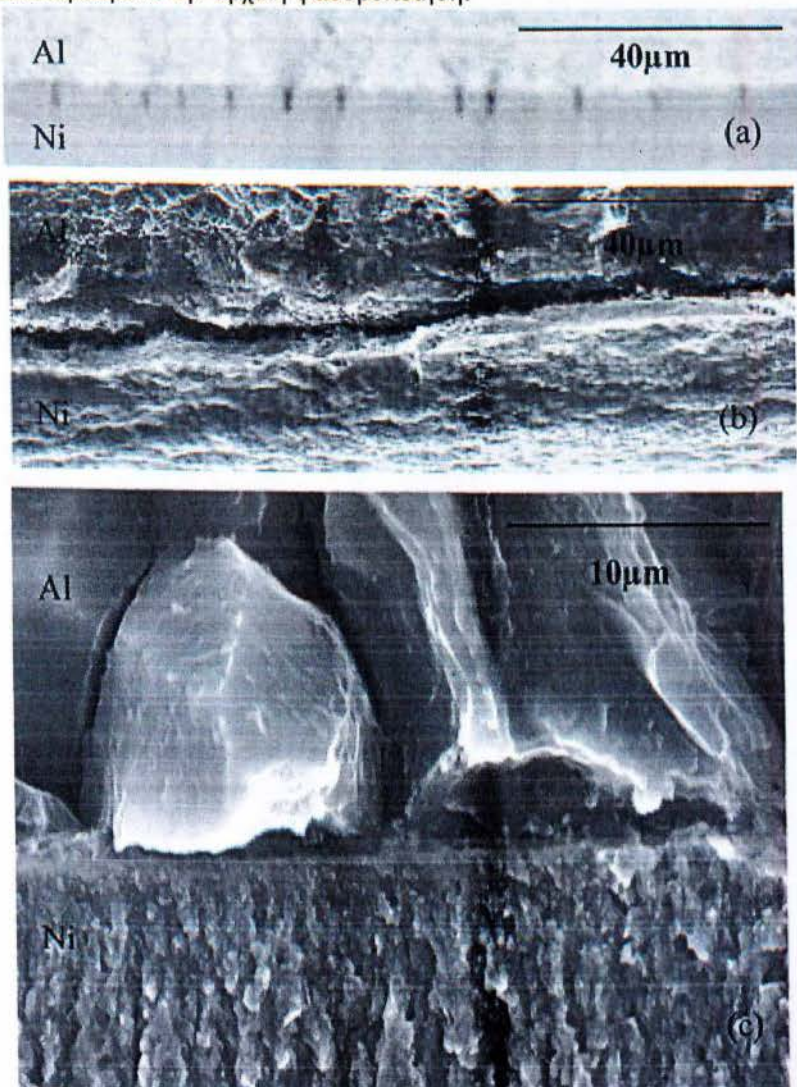
(8.2) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

ΠΕΙΡΑΜΑ

Σε αυτό το άρθρο η πειραματική διαδικασία παρουσιάζει τη μελέτη της θραύσης λόγω εισδοχής υδρογόνου και της αλληλεπίδρασή του χωρίς την διάλυση του. Το πείραμα εστιάζεται σε κράμα υψηλής αντοχής Al-Zn-Mg με χαμηλή περιεκτικότητα σε Cu για το λόγο ότι είναι ευαίσθητο σε περικρυσταλλική ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου. Η ίδια μεθοδολογία χρησιμοποιείται σε οποιοδήποτε κράμα αλουμινίου.

Προτείνεται μια εναλλακτική διαδικασία. Ένα λεπτό στρώμα Ni αποτίθεται ηλεκτρολυτικά στην επιφάνεια του αλουμινίου πριν τη φόρτισή του με υδρογόνο. Το διάλυμα δεν είναι πλέον σε άμεση επαφή με το αλουμίνιο αλλά με Ni το οποίο δεν χειροτερεύει υπό καθοδική πόλωση. Η διαδικασία έχει ως εξής. Μετά από την κατεργασία, τα δείγματα υφίστανται κατεργασία σε διάλυμα για 1 ώρα στους 450 °C (για να μειώσει τις κοιλότητες κατά την εναπόθεση Ni). Οι επιφάνειες υφίστανται μηχανική στίλβωση με ¼ μm πάστα διαμαντιού. Η εναπόθεση του Ni απαιτεί 4 φορές λουτρά. Μια αρχική χημική εναπόθεση (Zn) ψευδάργυρου πραγματοποιείται εμβαπτίζοντας το δείγμα σε διάλυμα που περιέχει NaOH 120 g 1⁻¹, ZnO 20 g 1⁻¹, KNaC₄H₄O₆·4H₂O 50 g 1⁻¹ NaNO₃ 1 g 1⁻¹ στους 35 °C για 45s, ακολουθώντας έκπλυση με αποσταγμένο νερό. Ακολούθως, σε διάρκεια 30sec και σε θερμοκρασία δωματίου το δείγμα εμβαπτίζεται σε ένα διάλυμα που περιέχει 50 % νιτρικό οξύ και στη συνέχεια ξεπλένεται ξανά. Μια δεύτερη εναπόθεση ψευδαργύρου γίνεται ξανά σε θερμοκρασία 35 °C σε διάλυμα NaOH 500 g 1⁻¹ ZnO 100 g 1⁻¹ KNaC₄H₄O₆·4H₂O 10 g 1⁻¹ FeCl₃·6H₂O 2.5 g 1⁻¹. Το δείγμα ξεπλένεται ξανά σε αποσταγμένο νερό. Στην συνέχεια, το Ni αποτίθεται ηλεκτρολυτικά. Η σύνθεση του λουτρού είναι NiSO₄ 300 g 1⁻¹, NiCl₂ 45 g 1⁻¹, H₃BO₃ 40 g 1⁻¹ που θερμαίνεται στους 45 °C με ασθενής μαγνητική διέγερση. Ένα καθοδικό ρεύμα επιβάλλεται μεταξύ του ηλεκτροδίου εργασίας (το δείγμα) και του αντίθετου ηλεκτροδίου. Ένταση των 0.1 A για μία επιφάνεια 100 mm², δίνει ένα ρυθμό ανάπτυξης του στρώματος Ni της τάξεως του 0.8μm min⁻¹. Μετά την εναπόθεση, το στρώμα είναι εύθραυστο και απαιτεί μια

Θερμική επεξεργασία. 1 ώρα στους 400 °C βρέθηκε να είναι ένας καλός συμβιβασμός (Εικόνα 1). Μια υψηλότερη θερμοκρασία θα οδηγούσε σε ένα εύθραυστο ενδιάμεσο στρώμα Ni-Al, που θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία φυσαλίδων κατά την εισδοχή του υδρογόνου, ενώ μία χαμηλότερη θερμοκρασία δεν θα απομάκρυνε την αρχική ψαθυροποίηση.



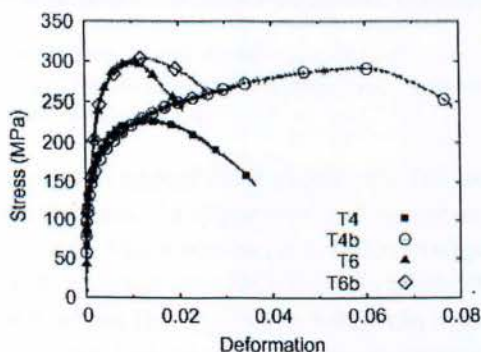
Εικόνα 1

Χρησιμοποιούνται τέσσερα μοντέλα θερμικής επεξεργασίας για το κράμα 7108 (5 κ.β. % Zn, 1.2 κ.β.% Mg, 0.16 κ.β.% Cu), με δυο σκοπούς: τον έλεγχο της διαδικασίας εισδοχής υδρογόνου και μια προσπάθεια ώστε να βρεθεί μία μικροδομή ανθεκτική σε υδρογόνο. Οι θερμικές επεξεργασίες είναι: **T4** (για 1 ώρα στους 400 °C, εμβάπτιση σε νερό και γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου για 144 ώρες), **T6** (για 1 ώρα στους 400 °C, εμβάπτιση σε νερό, 2 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου, 6 ώρες στους 100 °C, η θερμοκρασία επεκτείνεται από 20 °C h⁻¹ μέχρι τους 140 °C και στη συνέχεια το δείγμα παραμένει για 14 ώρες στους 140 °C). Οι θερμικές επεξεργασίες T6b και T4b είναι παρόμοιες, όμως ένα οροπέδιο στους 300 °C για 30min προστίθεται ακριβώς μετά την επεξεργασία διαλύματος στους 400 °C. Αυτό το οροπέδιο έχει ως αποτέλεσμα να τονίσει το αποτέλεσμα μιας αργής βαφής σε μια

παχιά πλάκα και να αυξήσει την πυκνότητα των περικρυσταλλικών ιζημάτων. Όλα τα δείγματα αποθηκεύονται σε υγρό άζωτο μέχρι την εισδοχή του υδρογόνου.

Η καθοδική εισδοχή γίνεται στα 800 mV/SCE σε H_2SO_4 48 ώρες. Σε μεγαλύτερα διαστήματα οδηγούν στη δημιουργία φυσαλίδων. Το βάθος διείσδυσης, αμελώντας μια ενδεχόμενη καθυστέρηση από την διεπαφή Ni-Al, είναι μεταξύ 130μm με έναν αποτελεσματικό συντελεστή διάχυσης $10^{-13} m^2 s^{-1}$ και 1.3mm με $D = 10^{-11} m^2 s^{-1}$. Το τελευταίο αντιπροσωπεύει διάχυση χωρίς να εγκλωβιστεί. Τα δείγματα έχουν εγκοπές (βάθους 100μm) στην αντίθετη όψη του σημείου εισδοχής. Η ρωγμή πάντα ξεκινά από την εγκοπή, η οποία εγγυάται ότι διαχέεται σε όλο το τμήμα (βάθους 1mm, πλάτους 2mm), ανεξάρτητα από το αποτέλεσμα του συντελεστή διάχυσης.

Ο μηχανισμός θραύσης υπό την παρουσία του υδρογόνου, εξαρτάται από την ταχύτητα παραμόρφωσης. Εδώ εστιάζουμε σε δοκιμές με χαμηλό ρυθμό πρόσφυσης ($\epsilon_0 = 5 \cdot 10^{-7} s^{-1}$ με σταθερή ταχύτητα μετατόπισης σε δείγματα με εγκοπές), όπου η θραύση είναι ουσιαστικά περικρυσταλλική, εκτός από την τελική θραύση η οποία είναι όλκιμη. Η **Εικόνα 2** δείχνει τις καμπύλες πρόσφυσης και για τα τέσσερα μοντέλα θερμικής επεξεργασίας. [4]



Εικόνα 2

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

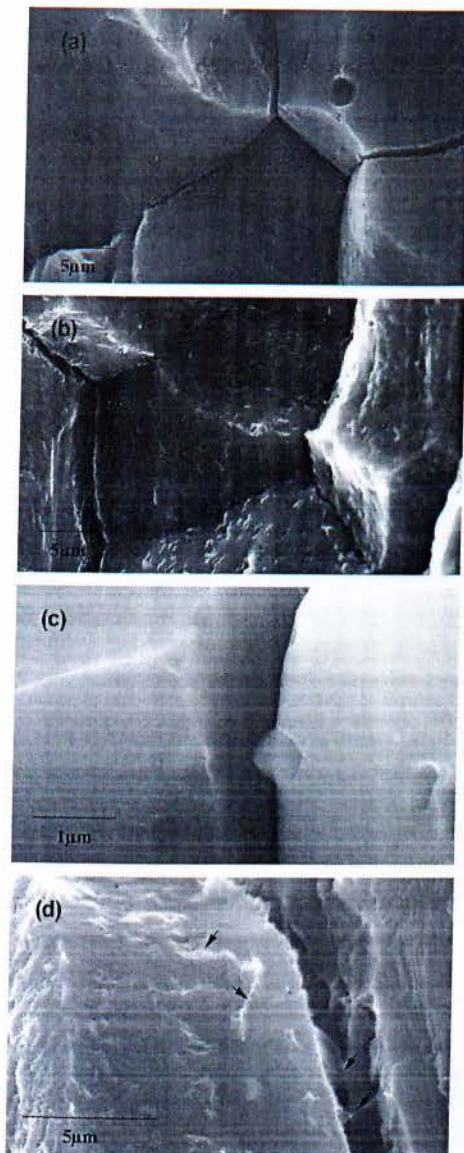
Η επίδραση του υδρογόνου στην κόπωση της θραύσης είναι μεγάλη, ($\epsilon_f \approx 0.19$ για την T4 και T4b και $\epsilon_f \approx 0.11$ για την T6 και την T6b χωρίς υδρογόνο, περιλαμβάνοντας το αποτέλεσμα της εγκοπής). Η μείωση είναι της τάξεως του 79%, 58%, 82% και 73%, αντίστοιχα για τις T4, T4b, T6 και T6b. Η επιφάνεια της θραύσης δεν δείχνει κανένα ίχνος ολκιμότητας στην T4 και στην T6 πριν από την τελική όλκιμη θραύση και καμία τραχύτητα (με ανάλυση σε 50μm). Οι όψεις των κόκκων μετά τη θραύση που παρατηρείται από υψηλή ανάλυση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM), καλύπτονται από περικρυσταλλικά ιζήματα. (Εικόνα 3, Εικόνα 4a-c).



Εικόνα 3 (Μικροκλίμακα (a) νανοκλίμακα (c) στο όριο μιας όψης κόκκου σε δείγμα έχοντας υποβληθεί σε θερμική επεξεργασία T6b μετά από ψαθυροποίηση υδρογόνου, (b) για τα σημεία των ιζημάτων που βρίσκονται στην ελεύθερη ζώνη).

Δυο πληθυσμοί είναι εμφανώς ορατοί στα δείγματα της T6 (**Εικόνα 3**): ιζήματα μικροκλίμακας και νανοκλίμακας. Τα ιζήματα νανοκλίμακας μπορεί να σχετίζεται με την τυπική μικροδομή της T6. Μια κατανομή στα 100μm η ιζημάτων κατά μήκος του ορίου του κόκκου, ένα στενό ιζήμα στην ελεύθερη ζώνη (20-100μm) και μια λεπτή κλίμακα σκλήρυνσης στη μήτρα (4μm). Αυτά τα τελευταία η' ιζήματα δεν συγχέονται με τα περικρυσταλλικά αφού είναι τόσο μικρά που δεν είναι ορατά από την SEM. Η παρουσία των ιζημάτων στην επιφάνεια της θραύσης είναι συνεπώς είναι μια ένδειξη ότι η ρωγμή διαδίδεται ή είναι πολύ κοντά στο όριο των κόκκων. Αυτή η παρατήρηση, μαζί με την παρατήρηση από TEM από την εισδοχή υδρογόνου, μετά από έκθεσή του σε υδρατμούς, υποδηλώνει ότι ή μη συνενοχή, ή κάποια μορφή συνένωση νανοκοιλότητας. Είναι ένας εύλογος μηχανισμός θραύσης στα όρια της αργής έλξης.

Κάνοντας μια ουσιαστική σύγκριση μεταξύ των θερμικών επεξεργασιών απαιτείται κάποια προσοχή. Οι αλλαγές στην περικρυσταλλική πτώση μεταξύ της T4 και T6 δίνουν διαφορετικές πλαστικές συμπεριφορές οι οποίες επηρεάζουν την διάδοση των ρωγμών, είτε εξαιτίας της μεταφοράς υδρογόνου είτε από τις παραλλαγές εξάρθρωσης του προστατευτικού της άκρης των ρωγμών. Συνεπώς, δεν είναι εύκολο να συγκρίνεις την T6 με T4 τόσο μεταξύ τους όσο και η περικρυσταλλική πτώση διαφέρουν. Αντιθέτως, κρατώντας την θερμοκρασία σε 300 °C, πάνω από την θερμοκρασία σχηματισμού για ζώνες Guinier–Preston στην μήτρα, η περικρυσταλλική πτώση μπορεί να διεγερθεί από μόνη της.



Εικόνα 4 (Αντιπροσωπευτικά δείγματα επιφανειών θραύσης μετά από 2 θερμικές επεξεργασίες : (a) και (c) T4, (b) και (d) T4b. Σημειώστε τους συνδέσμους σχετικά με την όψη του όριου του κόκκου και της plastic bridge στη δευτερογενή ρωγμή (d)).

Στην εικόνα 4a και b, δείχνει την ενισχυμένη μικρομετρική πτώση της T4 εναντίον T4b. Παρόμοιες εικόνες ελήφθησαν και για την T6b και T6. Οι όψεις των κόκκων στην T4 δείχνουν σε μεγάλη μεγέθυνση, κάποια τραχύτητα που θα μπορούσε να είναι σημάδι περικρυσταλλικής πτώσης. Συχνά, ωστόσο, οι όψεις φαίνονται απόλυτα επίπεδες (Εικόνα 4c). Η σκληρότητα της T_a και T_b, που δίνεται από τις καμπύλες έλξης, είναι ισοδύναμη (τα επίπεδα πίεσης είναι 10MPa μικρότερα από για την T_b) και έτσι οι διαφορές στην περικρυσταλλική πτώση θα έπρεπε να είναι ασήμαντες. Κατά συνέπεια, φαίνεται ότι η βελτίωση στην αντίσταση από το υδρογόνο, που είναι περισσότερο αισθητή στην T4b κατάσταση, μπορεί αλλά να αποδοθεί σε μια τροποποίηση περικρυσταλλικής πτώσης. Η διαδρομή της ρωγμής ακολουθεί τα όρια των κόκκων στην T4b, αλλά μπορούν να βρεθούν πολυάριθμες

ενδείξεις εντοπισμένης ολκιμότητας. Η διαφορά είναι σαφής, όταν την συγκρίνουμε με την T4, όπου συμβαίνει αποσυνοχή (βλ. τις επιφάνειες θραύσης που ταιριάζουν στην εικόνα 4c σε σύγκριση με το σχήμα 4d). Στην εικόνα 4d, θραύση συμβαίνει μονομερώς κατά μήκος του ορίου των κόκκων (ορισμένα μικρομετρικά ιζήματα είναι ορατά), αλλά συχνά συμβαίνει στον κόκκο, παράλληλα με τα όρια των κόκκων. Το πάχος αυτή τη τοπικής πλαστικότητας είναι σε συνοχή με τη κλίμακα μήκους των ιζημάτων. Αναφέρεται ότι η πλαστικότητα περιορίζεται στη ζώνη με την διαλυμένη ουσία γύρω από τα μικρομετρικά ιζήματα (βλ. την ζώνη με εμπλουτισμένο διάλυμα στην T6b γύρω από τα μικρομετρικά ιζήματα στην εικόνα 3). Η παρατήρηση μιας δευτερεύουσας ρωγμής αποκαλύπτει (εικόνα 4d) τον σχηματισμό των συνδέσμων μετά από ένα πλαστικό σχίσσιμο μιας γέφυρας. Φαίνεται ότι μερικές όψεις στα όρια των κόκκων αντιστέκονται στην εισδοχή του υδρογόνου.

Ο προσδιορισμός μικροσκοπικά για αυτή την βελτίωση χρειάζεται ακόμη ποσοτικοποίηση των στοιχειωδών μηχανισμών όπως: η μείωση του υδρογόνου έναντι στα όρια των κόκκων, η μείωση του μαγνησίου και του ψευδάργυρου και των επιρροών τους στην παγίδευση υδρογόνου και της ενισχυμένης τοπικής πλαστικότητας. Αυτή η τελευταία πτυχή είναι η πιο πολλά υποσχόμενη μιας και έχει παρατηρηθεί ότι τα μικροϊζήματα στη T4b και στην T6b παραμορφώνονται πλαστικά (δεν εμφανίζονται) ή ενσωματώνονται σε εύπλαστους συνδέσμους (Εικόνα 4d), που υποδηλώνει ότι εμφανίζεται πλαστικότητα. Η ψαθυροποίηση είναι μια συνάντηση μεταξύ θραύσης στα όρια των κόκκων και πλαστικού διαχωρισμού. Ένα σενάριο θα μπορούσε να είναι ότι το υδρογόνο είναι παγιδευμένο ακόμα κατά μήκος στα όρια των κόκκων αλλά η πλαστική παραμόρφωση είναι πιο εύκολη λόγω του πάχους και της συνεχής ελεύθερης ζώνης από ιζήματα. Μπορούν να παρατηρηθούν ανωμαλίες στην κρυσταλλική δομή αν τα μικροϊζήματα δρουν ως συμπυκνωτές πίεσης (η κάλυψη είναι περισσότερη από 30% στην T4b). [4]

(8.3) ΔΙΑΧΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075

ΠΕΙΡΑΜΑ

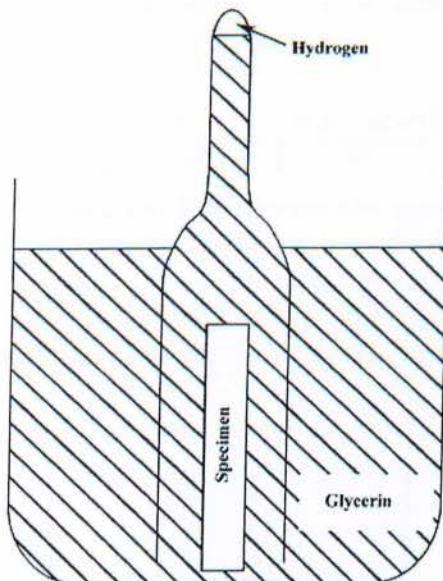
Χρησιμοποιήθηκε κράμα αλουμινίου A7075, θερμής έλασης και πάχους 4mm. Η χημική του σύσταση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Table 1
Chemical composition of the A7075 aluminum alloy in mass%

Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.03	0.10	1.55	2.50	0.15	5.54	0.01	bal.

Τα δείγματα κόπηκαν κατά μήκος της κατεύθυνσης της έλασης. Υποβλήθηκαν σε μηχανικό γυάλισμα χρησιμοποιώντας σκόνη οξειδίων αλουμινίου πάχους 0.05 μm και σε χημικό γυάλισμα σε 3% μάζα υδατικού διαλύματος NaOH.

Τα δείγματα (πάχους 4 mm, πλάτους 20 mm, μήκους 80 mm) φορτιστήκαν με υδρογόνο σε 1 N-H₂SO₄ σε μια καθοδική πυκνότητα ρεύματος 6.25 A/m² στους 318 K. Βυθίστηκαν περαιτέρω σε γλυκερίνη, που διαλύει μετά βίας το αέριο υδρογόνο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1

Το αέριο υδρογόνο που απαλλάσσεται από το δείγμα για 128 h συλλέχθηκε σε έναν κύλινδρο γυαλιού. Το αέριο υδρογόνο που συλλέχθηκε στον κύλινδρο μεταφέρθηκε σε έναν μικρο-κύλινδρο για να μετρηθεί ο όγκος του. Η μετρούμενη εξέλιξη του όγκου αερίου υδρογόνου με χρόνο φόρτισης τοποθετήθηκε σε μια θεωρητική καμπύλη με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, και ο συντελεστής διάχυσης αξιολογήθηκε.

Διεξήχθη δοκιμή εφελκυσμού με ποσοστό πίεσης 10^{-5} s^{-1} στους 318 K.

Χρησιμοποιήθηκαν επίπεδα δείγματα εφελκυσμού με μήκος διαμετρήματος 20 mm, πλάτος από 4 mm και πάχος 1 mm. Τα δείγματα είχαν προφορτιστεί με υδρογόνο για 96 h στους 318 K και φορτίζονταν συνεχώς με πυκνότητες ρεύματος 100 A/m² και 1000 A/m². Οι επιφάνειες αστοχίας των δειγμάτων παρατηρήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο ανίχνευσης (SEM). [5]

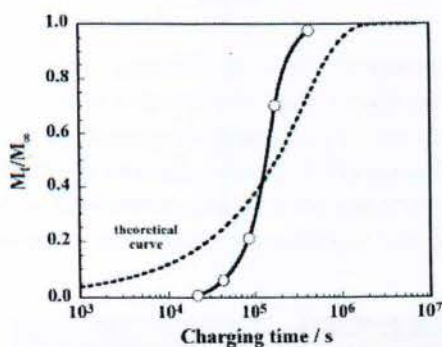
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

α) Διάχυση και συγκέντρωση του υδρογόνου

Η ικανότητα διάχυσης υδρογόνου αξιολογήθηκε από την αύξηση της μαζικής συγκέντρωσης του διαλυμένου υδρογόνου με τη φόρτιση χρόνου. Η μαζική συγκέντρωση M_t μιας διαλυμένης ουσίας που διαχέεται κατά τη διάρκεια του χρόνου t από τις πλευρικές επιφάνειες ενός φύλλου πάχους l , είναι υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον νόμο του Fick με σταθερή συγκέντρωση διαλυτών στις επιφάνειες ως οριακή συνθήκη:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left[\frac{D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right],$$

όπου D είναι η διαλυόμενη ουσία που διαχέεται και M_∞ η συγκέντρωση της μάζας στον κορεσμό. Η μάζα του απαλλαγμένου υδρογόνου υπολογίστηκε από τον όγκο του αέριου υδρογόνου. Οι τιμές των D και M_∞ , που καθορίζεται από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, είναι $4.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ και 0.2 ppm μάζα, αντίστοιχα. Η μετρούμενες και θεωρητικές καμπύλες φαίνονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2

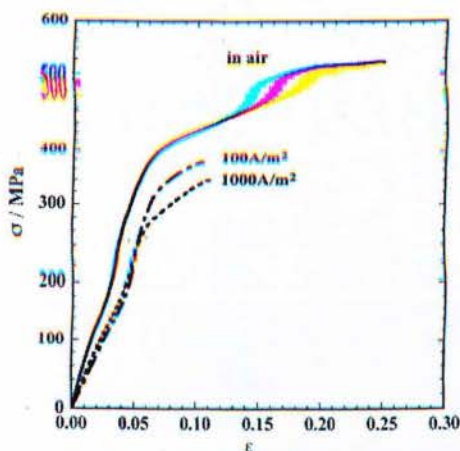
Οι αποκλίσεις αυτών των καμπυλών προκαλούνται από διάφορες υποθέσεις της παρούσας ανάλυσης, τα οποία έχουν ως εξής: η συγκέντρωση του υδρογόνου στις επιφάνειες είναι σταθερό. Το υδρογόνο δεν παγιδεύεται και η διαχυτότητά του είναι σταθερή σε όλο το δείγμα, ανεξαρτήτως της μικροδομής. Στην πραγματικότητα παρατηρήθηκε σχηματισμός ενδοκοκκικών υδριδίων, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διάχυση βραχυκυκλώματος παρουσιάζεται στα όρια των κόκκων. Οπότε, η ικανότητα διάχυσης που υπολογίζεται στην παρούσα εργασία μπορεί να είναι μόνο μια φαινομενική διαχυτότητα, η οποία θα πρέπει να είναι έντονα εξαρτώμενη από τη μικροδομή.

Η ικανότητα διάχυσης υδρογόνου $4 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ που παρατηρήθηκε από τον Ohnishi κ.α. σε ένα κράμα Al - 8%Mg είναι μεγαλύτερο από την παρούσα αξία για το κράμα A7075. Είναι γνωστό ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων του κράματος και το υδρογόνο μειώνει τη διάχυση του υδρογόνου. Το παρόν αποτέλεσμα είναι σύμφωνο με αυτή τάση.[5]

β) Δοκιμές Εφελκυσμού

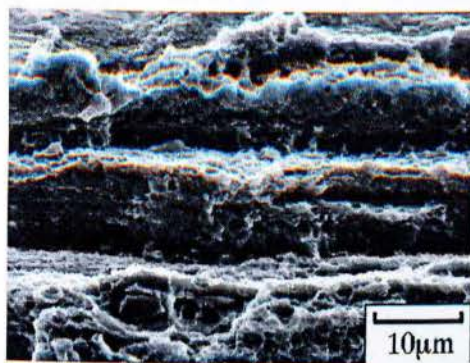
Οι καμπύλες τάσης-καταπόνησης των δειγμάτων που φορτίζονται υπό πυκνότητες ρεύματος 100 A/m^2 και 1000 A/m^2 εμφανίζονται στο Σχήμα 3 και συγκρίνονται με

εκείνες των αφόρτιστων δειγμάτων που υποβάλλονται σε δοκιμή στον αέρα. Η αντοχή στον εφελκυσμό μειώνεται με αυξανόμενη πυκνότητα καθοδικού ρεύματος.

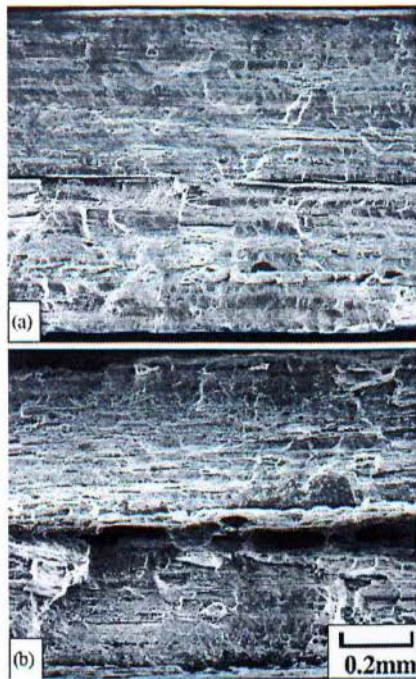


Σχήμα 3

Η επιμήκυνση σε θραύση είναι χαμηλότερη για τα δείγματα που φορτίστηκαν με υδρογόνο, αλλά δεν εξαρτάται από τις καθοδικές πυκνότητες ρεύματος. Τα μικρογραφήματα του SEM για τις επιφάνειες θραύσης φαίνονται στο Σχήμα 4. Οι επιφάνειες επί το πλείστον αποτελούνται από λακκάκια (Σχήμα 5). Υπάρχουν επίσης ενδοκοκκικές δευτερεύουσες ρωγμές κατά μήκος της μικροδομής κατεργασμένη από έλαση, τα οποία είναι μεγαλύτερα στα φορτισμένα με υδρογόνο δείγματα (Σχήμα 4).

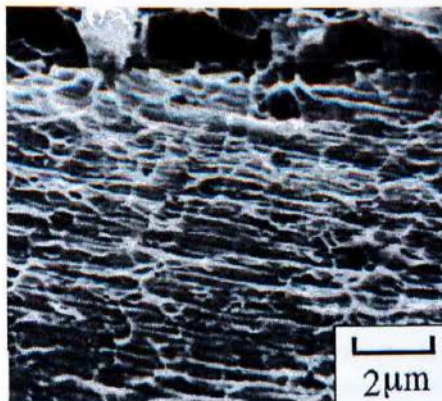


Σχήμα 5



Σχήμα 4

Τέτοιες επιφάνειες θραύσης παρατηρήθηκαν επίσης από τους Albrecht κ.α. και Ohnishi κ.α. Υποτίθεται ότι προκαλούνται από την ενδοκοκκική συσσώρευση υδρογόνου. Παρόλο που η επιφάνεια θραύσης είναι ως επί το πλείστον αποτελούμενη από λακκάκια, μια σχεδόν-διάσπαση που μοιάζει με επιφάνεια θραύσης παρατηρείται στην περίπτωση της καθοδικής φόρτισης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6**. Μοιάζει με το γραμμωτό μοτίβο που παρατηρήθηκε σε ψαθυροποιημένο λόγω υδρογόνου σίδηρο και νικέλιο, αλλά είναι αρκετά κυματιστό και έχει μικρότερο μήκος κύματος.



Σχήμα 6

Αυτό το μοτίβο μπορεί να προκύψει από την αλληλεπίδραση μεταξύ εξαρθρωμένης κυτταρικής δομής και υδρογόνου, όπως και το παρόμοιο γραμμωτό μοτίβο που προκύπτει από την ψαθυροποίηση υδρογόνου σε σίδηρο.

Συνοψίζοντας, η απώλεια ολκιμότητας είναι μεγάλη σε συνθήκες υψηλής πτητικότητας και μακράς περιόδου προ-φόρτισης, ακόμη και σε 318 K. Αυτό προκαλείται κυρίως από τη ενδοκοκκική συσσώρευση υδρογόνου. Επιπλέον, γραμμώσεις σαν πρότυπα παρατηρήθηκαν στις ψαθυροποιημένες λόγω υδρογόνου επιφάνειες θραύσης. Αυτό μπορεί να προκύψει από μια αλληλεπίδραση μεταξύ υδρογόνου και εξαρθρώσεις εσωτερικό των κόκκων του κράματος A7075.[5]

(8.4) ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Χρησιμοποιήθηκε υλικό 7075-T651 το οποίο είχε υποστεί φορτίο 560 MPa σε θερμοκρασία δωματίου. Όλα τα δείγματα ήταν κυλινδρικά δείγματα εφελκυσμού, με τον άξονα εφελκυσμού παράλληλα προς την κατεύθυνση κύλισης μιας τετραγωνική ράβδου, με ένα αρχικό τμήμα της 5cm x 5cm. Η διάμετρος των δειγμάτων ήταν 5.4mm και μήκος 25mm.

Πριν από τη φόρτιση κάθε δείγματος, είχαν υποστεί βαφή σε λουτρό με οξύ από 85% H₃PO₄ και 15% NH₃ για 2 λεπτά σε θερμοκρασία 70 °C, και στη συνέχεια ξεπλύθηκαν σε νερό και στέγνωσαν. Τα δείγματα μετά τη βαφή υπέστησαν φόρτιση για 10 ώρες κάτω από έλεγχο δυναμικού (potentiostatic control) σε διάλυμα HCl (PH=1) με ένα εφαρμοζόμενο δυναμικό -1500 Mv έναντι του καθιερωμένου ηλεκτροδίου χλωριούχου υδραργύρου (calomel). Μετά τη φόρτιση, τα δείγματα ξεπλύθηκαν με νερό, στέγνωσαν και αποθηκεύτηκαν σε υγρό άζωτο ώστε να αποφευχθεί η απώλεια υδρογόνου στο εσωτερικό τους.

Φορτισμένα και αφόρτιστα δείγματα ελέγχθηκαν σε θερμοκρασίες -98°C, -77°C, 0°C και 22°C. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας διατηρήθηκε με εμβάπτιση κάθε δείγματος εφελκυσμού και οι λαβές (grips) σε κατάλληλο λουτρό 2 φάσεων. Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν με αρχική καταπόνηση $\dot{\epsilon} = 8.3 \times 10^{-4}/\text{sec}$. Για τον υπολογισμό της μείωσης της περιοχής, μετρήθηκε η διάμετρος του λαιμού της περιοχής σε τέσσερα σημεία χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο με ανάλυση 1μm. Η επιφάνεια θραύσης κάθε δείγματος εξετάστηκε λεπτομερώς με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. [55]

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

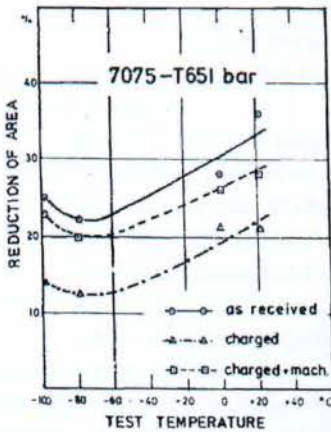
Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού φαίνονται στα **Σχήματα 1** και **2**.

Στο **Σχήμα 1** φαίνεται η μείωση περιοχής σε συνάρτηση της θερμοκρασίας δοκιμής για τα αφόρτιστα δείγματα (καμπύλη στερεού), και τα φορτισμένα με υδρογόνο δείγματα (διακεκομμένη καμπύλη). Και οι δυο οι καμπύλες δείχνουν μια ελάχιστη ολκιμότητα σε περίπου -80°C.

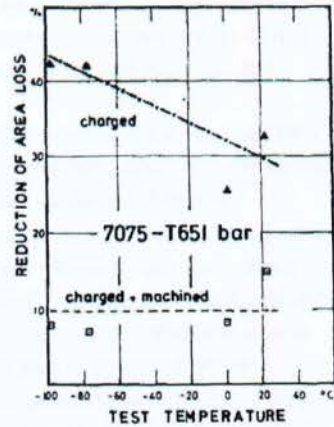
Στο **Σχήμα 2**, δείχνει την απώλεια της ολκιμότητας που οφείλεται στην εισδοχή του υδρογόνου, που εκφράζεται από την μείωση της απώλειας περιοχής (RA):

Ποσοστό απώλειας (RA): $100 \left(\frac{RA \text{ όπως λαμβάνεται} - RA \text{ φορτισμένο}}{RA \text{ όπως λαμβάνεται}} \right)$

Η διακεκομμένη καμπύλη στο Σχήμα 2, το οποίο αναφέρεται σε φορτισμένα φορτία, δείχνει μια δυνατή θερμοκρασία εξαρτώμενη από το βαθμό ψαθυροποίησης. Η απώλεια RA στους 98°C μειώθηκε από 45% σε 28% σε θερμοκρασία δωματίου. Τα αποτελέσματα των Gest και Troiano έδειξαν την ίδια τάση με απώλεια 53% στους -100°C, μειώνοντας σε 34% σε θερμοκρασία δωματίου. Λαμβάνοντας υπόψη την πειραματική διασπορά, η συμφωνία μεταξύ αυτών των αποτελεσμάτων είναι αρκετά καλή.

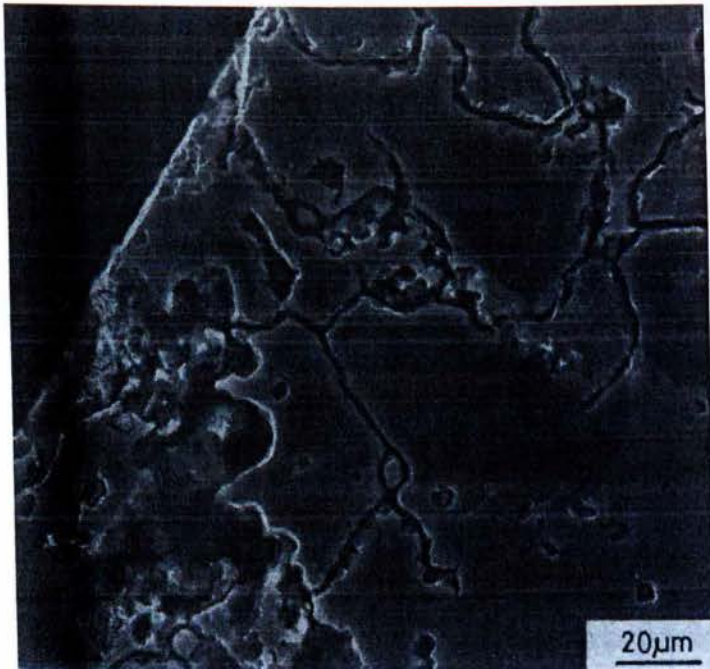


Σχήμα 1



Σχήμα 2

Η εξέταση θραύσης και η περαιτέρω μεταλλογραφική μελέτη αποκάλυψε στις επιφάνειες των φορτισμένων δειγμάτων μια σημαντική φθορά σε στρώμα πάχους 0.15 mm, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Αυτή η φθορά στην επιφάνεια προκαλείται από το διαβρωτικό περιβάλλον κατά την διάρκεια φόρτισης. Στο **Σχήμα 3** δείχνει ότι η διαβρωτική προσβολή ακολουθεί κυρίως τα όρια των κόκκων και ότι σχηματίζονται μεγάλα κενά. Για να μελετηθεί το αποτέλεσμα του διαβρωμένου στρώματος, μερικά φορτισμένα δείγματα υπέστησαν μηχανουργική κατεργασία ώστε να μειωθεί η διάμετρός τους κατά 0.5 mm. Τα αποτελέσματα αυτών των δειγμάτων δίνονται στο **Σχήμα 1** από την διακεκομμένη καμπύλη. Η ολκιμότητα αυτών των δειγμάτων είναι σημαντικά υψηλότερη από τα φορτισμένα δείγματα και δείχνει την ίδια εξάρτηση θερμοκρασίας με ελάχιστη στους -80 °C. Η διακεκομμένη καμπύλη στο **Σχήμα 2** δείχνει μια θερμοκρασία ανεξάρτητη από την απώλεια ολκιμότητας (εντός του πειραματικού σφάλματος) περίπου 10% για τα φορτισμένα και κατεργασμένα δείγματα, εξαιτίας της παρουσίας υδρογόνου.

Η εξέταση θραύσης όλων των δειγμάτων έδειξε ότι η αστοχία παρουσιάζεται κυρίως στις άκρες των κόκκων για όλες τις θερμοκρασίες των δοκιμών και είναι ανεξάρτητη από την φόρτιση υδρογόνου. Βρέθηκαν επίσης σε αυτήν την εξέταση δευτερεύουσες ρωγμές. Αυτές είναι ενδοκοκκικές ρωγμές, όπου η πυκνότητα τους εξαρτάται από την θερμοκρασία δοκιμής και την κατάσταση φόρτισης τους. Η εμφάνιση των ρωγμών στην κεντρική γραμμή του δείγματος απεικονίζεται στα **Σχήματα 4(a,c)**. Ο βαθμός της δευτερεύουσας ρωγμής είναι υψηλότερος στο φορτισμένο δείγμα (**Σχήμα 4b**), ακολουθούμενη από το φορτισμένο και κατεργασμένο δείγμα στο **Σχήμα 4c**, σε σύγκριση με το μη φορτισμένο δείγμα (**Σχήμα 4a**). Τα αποτελέσματα μιας ποσοτικής ανάλυσης από τις δευτερογενείς ρωγμές δίνονται στο **Σχήμα 5**. Η πυκνότητα των δευτερογενών ρωγμών χαράσσεται συναρτήσει της θερμοκρασίας δοκιμής για τα αφόρτιστα (συνεχής καμπύλη), φορτισμένα και κατεργασμένα (διακεκομμένη καμπύλη), και φορτισμένα δείγματα (μη διακεκομμένη καμπύλη). Για όλες τις θερμοκρασίες η πυκνότητα της δευτερεύουσας ρωγμής, είναι υψηλότερη στο φορτισμένο δείγμα και ελαφρώς χαμηλότερη στα φορτισμένα και μηχανικά δείγματα, ακολουθώντας έτσι αντιστρόφως την τάση των καμπυλών ολκιμότητας όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1**. Μειώνοντας την ολκιμότητα, είτε λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας είτε της φόρτισης με υδρογόνο, η ποσότητα της δευτερογενούς ρωγμής αυξάνεται.

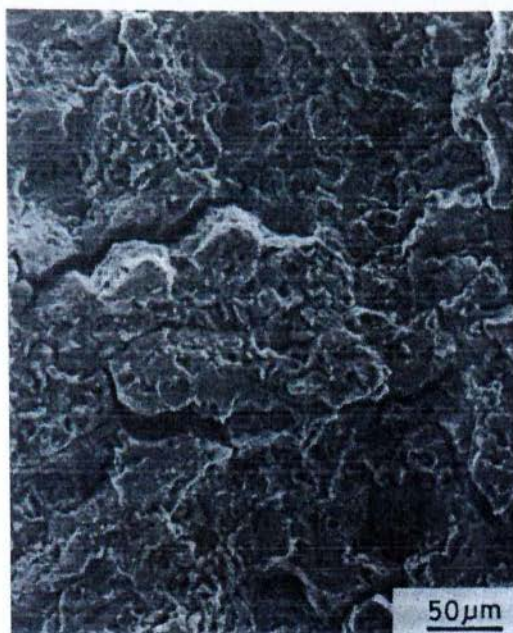


Σχήμα 4a. Όπως λαμβάνεται



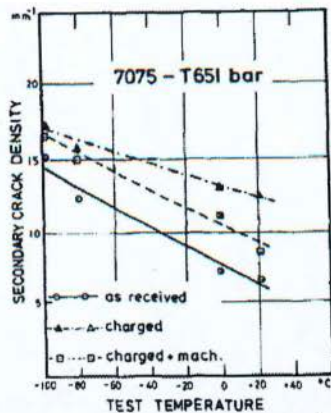
Σχήμα 4b. Φορτισμένο

Σχήμα 4. Μικρογραφία θραύσης στην επιφάνεια, θερμοκρασία δοκιμής 0 °C



Σχήμα 4c. Φορτισμένο και Κατεργασμένο

Λόγω του γεγονότος ότι η πυκνότητα της δευτερογενούς ρωγμής μετρήθηκε στο κέντρο του δείγματος, δηλαδή στο κέντρο της επιφάνειας της ρωγμής, οι τιμές που φαίνονται στο Σχήμα 5 μπορούν να θεωρηθούν ως ένα κατώτερο όριο. [55]



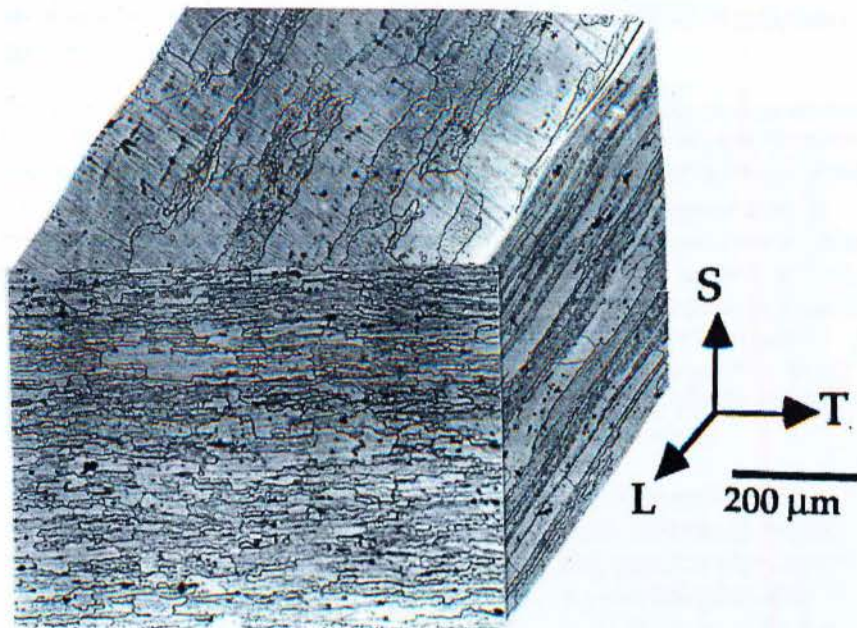
Σχήμα 5

**(8.5) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΟΠΙΚΟΣ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΜΟΣ ΑΝΟΔΙΚΗΣ ΔΙΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΕΝΟΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ 7075 ΚΑΤΑ
ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ**

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

ΥΛΙΚΟ

Δοκιμασμένο κράμα αλουμινίου υψηλής αντοχής 7050 (σύνθεση σε ποσοστό βάρους: Zn 6.07, Mg 2.35, Cu 2.12, Fe 0.07, Si 0.044, Ti 0.03, Mn 0.016, Zr 0.1, Cr 0.01, Al), παρασχέθηκε από την Pechiney CRV, με τη μορφή λείων δειγμάτων κατεργασμένα από μια πλάκα έλασης πάχους 38 mm. Έχουν μελετηθεί τρεις εργαστηριακές μετρήσεις: η T651 που αντιστοιχεί σε μέγιστη αντοχή, η T7651 και η T7451 όπου είναι σε κατάσταση υπεργήρανσης. Για τα κράματα της σειράς 7xxx, έχει αποδειχθεί ότι η υπεργήρανση έχει μειώσει την ευαισθησία της ρηγμάτωσης λόγω διάβρωσης (SCC) σε βάρος της δύναμης. Όποιο κι αν είναι το κράμα, η μικροδομή του ήταν επίπεδη σχηματισμένη με κόκκους, επιμηκυμένη στην κατεύθυνση έλασης, περιέχοντας μια μη ανακρυσταλλωμένη δομή υποκόκκων καθώς και μικρούς ανακρυσταλλωμένους κόκκους (Εικόνα 1). Αυτά τα βιομηχανικά κράματα περιέχουν επίσης συστατικά σωματίδια Al_7Cu_2Fe και Al_2CuMg .



Εικόνα 1

Για τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7xxx (συστήματα Al-Zn-Mg), η αντοχή επιτυγχάνεται κυρίως με ενδοκοκκική υγροποίηση φάσεων ($MgZn_2$) σύμφωνα με την ακόλουθη κλασική σειρά:

Υπερκορεσμένο στερεό διάλυμα \rightarrow ζώνες GP $\rightarrow \square \rightarrow \square'$

Σε κράματα πλούσια σε χαλκό όπως το 7050, αν και τα ιζήματα περιέχουν άτομα χαλκού τα οποία τροποποιούν την κινητική τους ανάπτυξη, η βασική αλληλουχία των ιζημάτων είναι αμετάβλητη.

Για το κράμα αλουμινίου 7050, οι ελεύθερες ζώνες ιζημάτων (PFZ) βρίσκονται συχνά κατά μήκος των ορίων των κόκκων όπου τα ιζήματα είναι σχηματισμένα με ζώνες απεμπλουτισμένης διαλυμένης ουσίας.[56]

ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ

Τα δείγματα χρησιμοποιούνται για δοκιμές έντονης διάβρωσης με 4mm διάμετρο και 15mm μήκος με την αξονική αντοχή παράλληλα προς τη μικρή εγκάρσια κατεύθυνση, η οποία είναι γνωστό ότι είναι ο πιο ευαίσθητος προσανατολισμός στην SCC.

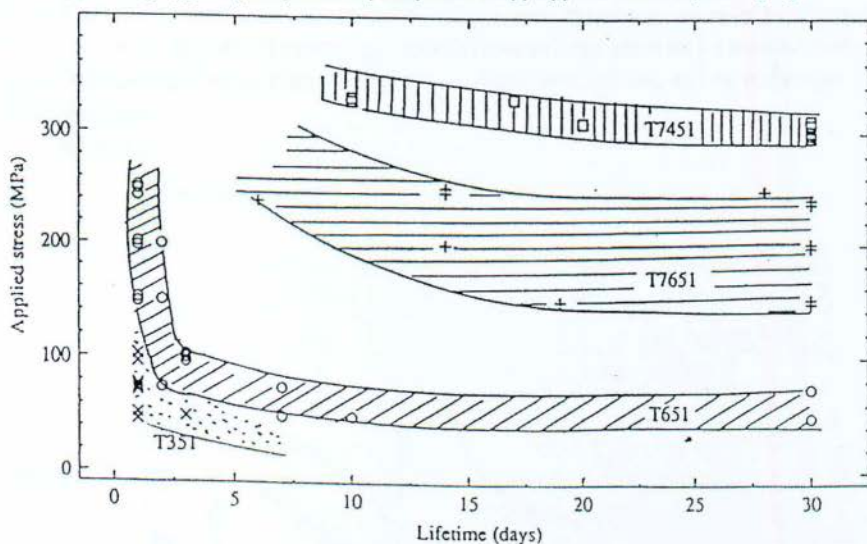
Έχουν διεξαχθεί δοκιμές με αργό ρυθμό καταπόνησης σε μια ηλεκτρομηχανολογική μηχανή με ρυθμό καταπόνησης $\dot{\epsilon} = 3.8 \times 10^{-7} s^{-1}$. Οι πρώτες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στον αέρα και σε ένα αεριούχο χλωριούχο διάλυμα 3% σε ελεύθερο δυναμικό E_0 για να συγκριθεί η σχετική μακροσκοπική αντίσταση στην αιχμή της γήρανσης (T6) και στην υπεργήρανση (T76, T74).

Για να μελετήσουμε τους αντίστοιχους ρόλους της ανοδικής διάλυσης και τα αποτελέσματα υδρογόνου κατά την διάρκεια της SCC, πραγματοποιήθηκαν

συμπληρωματικές δοκιμές σε πειραματικές συνθήκες για τα οποία οι διεργασίες ψαθυροποίησης υδρογόνου θεωρούνται να προτιμούνται.

Το απλούστερο από τα πειράματα συνίσταται στην εντυπωσιακή πιθανή καθοδική E_c σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού για να ενισχύσει την απαλλαγή του υδρογόνου σε βάρος της ανοδικής διάλυσης. Επιπλέον προτείνονται άλλες ειδικές δοκιμές για να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι λειτουργικοί μηχανισμοί είναι εγγενώς τοπικά κατά τη διάρκεια της SCC. Οι δοκιμές αυτές αφορούν δυο στάδια: πρώτον τη δημιουργία επιφανειακών ελαττωμάτων από τοπική ανοδική διάλυση σε ένα αρχικό στάδιο-δοκιμής με αργό ρυθμό καταπόνησης στο ελεύθερο δυναμικό E_0 , στην συνέχεια μετά από 0.8% πλαστική καταπόνηση το καθοδικό δυναμικό E_c κατεργάζεται με σκοπό την εκφόρτιση του υδρογόνου. Σε αυτή τη μελέτη, έχουν δημιουργηθεί επίσης επιφανειακά ελαττώματα από μηχανική προ-ρωγμάτωση (εγκοπή και κόπωση προ-ρωγμάτωσης) πριν από την εξέταση του E_c .

Οι εξετάσεις οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM) συσχετίζονται συστηματικά με τις μηχανικές δοκιμές για να αναλύσει και να κατανοήσει τους αντίστοιχους ρόλους της ανοδικής διάλυσης και τις επιδράσεις του υδρογόνου σε λειτουργικούς μηχανισμούς κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας SCC. [56]



Εικόνα 3

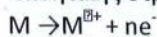
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για το κράμα αλουμινίου 7050 δοκιμασμένο σε σύντομη εγκάρσια κατεύθυνση σε χλωριούχο διάλυμα 3% με ρυθμό καταπόνησης $\dot{\epsilon} = 3.8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, ένα σημαντικό αποτέλεσμα μπορεί να εξαχθεί από μηχανικές δοκιμές και ομοιότητες μεταξύ στοιχείων από μικρογραφία θραύσης που λαμβάνονται σε διάφορες πειραματικές διαδικασίες (ελεύθερο δυναμικό, καθοδικό δυναμικό και ειδικές δοκιμές). Ο κύριος ρόλος της ανοδικής διάλυσης είναι για να παράγει κρίσιμα ελαττώματα που προωθούν συνεχώς όχι μόνο τον εντοπισμό πλαστικότητας αλλά επίσης μια τοπική απαλλαγή υδρογόνου, την είσοδο και την ψαθυροποίηση. Η σχετική επίδραση ανοδικής διάλυσης και η ψαθυροποίηση υδρογόνου εξαρτώνται από τις κύριες

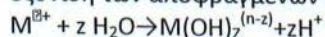
μακροσκοπικές παραμέτρους: το κράμα, το ηλεκτροχημικό δυναμικό και το ποσοστό παραμόρφωσης. [56]

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΩΤΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ: Ο ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΕΝΗ ΑΝΟΔΙΚΗ ΔΙΑΛΥΣΗ

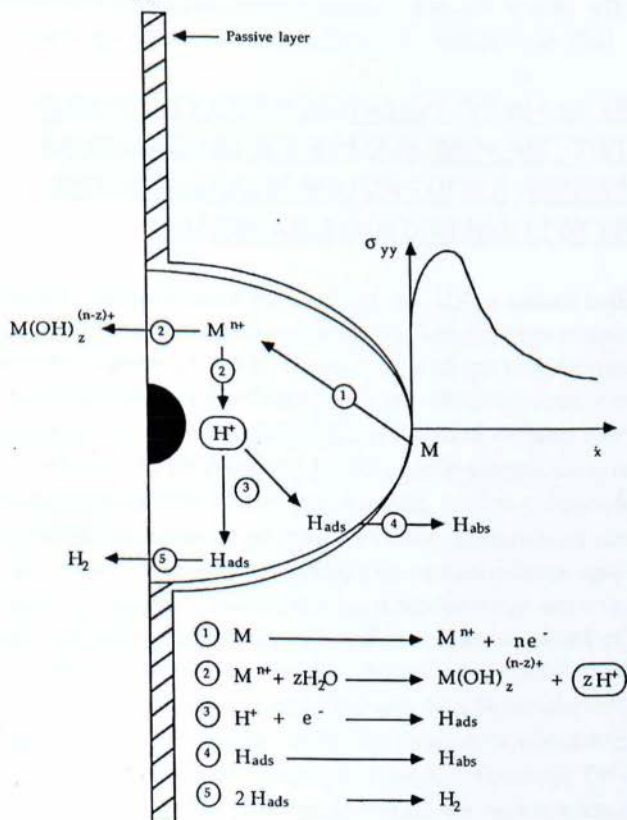
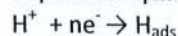
Όταν το κράμα αλουμινίου 7050 δοκιμάζεται σε ρυθμό καταπόνησης $\dot{\epsilon}=3.8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ σε αέριο διάλυμα χλωρίου 3% και ελεύθερο δυναμικό, οι βασικές μεταλλουργικές ανομοιογένειες, οι οποίες παρουσιάζονται στην επιφάνεια αυτού του κράματος προκαλούν ηλεκτροχημικές δυναμικές κλίσεις και μια επακόλουθη κατανομή παθητικής στρώσης από την τοπική διάλυση ανοδικών περιοχών:



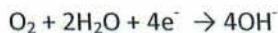
Ένα ποσοστό μεταλλικών διαλυμένων κατιόντων υδrolύθηκε με αποτέλεσμα την καθίζηση οξειδίων λευκού χρώματος στην επιφάνεια του κράματος και στην τοπική οξύνιση των αποφραγμένων κυττάρων:



Συνεπακόλουθα, αυτή η αύξηση της οξύτητας ευνοεί τη μείωση τοπικών πρωτονίων ακόμα και αν η μείωση οξυγόνου (η οποία λειτουργεί στο παθητικό στρώμα) είναι η κύρια αντίδραση η οποία εξισορροπεί τις ανοδικές αντιδράσεις σε ένα ουδέτερο αέριο διάλυμα:



Εικόνα 12



Αυτή η περιγραφή, η οποία αντιστοιχεί στον σχηματισμό των κρίσιμων ελαττωμάτων απεικονίζεται στην **Εικόνα 12** στην περίπτωση μιας εντοπισμένης διαλυτοποίησης γύρω από ένα συστατικό σωματίδιο όπως μπορεί να συμβεί στην επιφάνεια κράματος με υπεργήρανση. Για κράματα με υπεργήρανση, η περιοχή στα όρια των κόκκων φαίνεται να είναι οι περιοχές που πλήττονται περισσότερο από ηλεκτροχημικές κλίσεις δυναμικού. Έτσι, μια ισοδύναμη σχηματική εικόνα στην **Εικόνα 12** θα μπορούσε να γίνει για μια τοπική διάλυση κοντά στα όρια των κόκκων για το κράμα T6.

Ο σχηματισμός των κρίσιμων ελαττωμάτων από τοπική ανοδική διάλυση είναι το πρώτο στάδιο της διαδικασίας SCC και μπορεί να εξομοιωθεί σε καλή περίοδο επώασης. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, έχουν συσταθεί κρίσιμες τοπικές συνθήκες που ευνοούν επακόλουθη αύξηση της ρωγμής. Πράγματι, μετά την εξέλιξη των τοπικών χημικών και ηλεκτροχημικών συνθηκών (σε σχέση με τον όγκο) κοντά σε μεταλλουργικές ανομοιογένειες, τα κρίσιμα ελαττώματα που σχηματίζονται θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως συγκεκριμένες θέσεις έναρξης της SCC, όπου η ανοδική διάλυση, η απαλλαγή υδρογόνου και η πλαστικότητα είναι εντοπισμένες στην ίδια περιοχή.

Η κινηματική πτυχή του πρώτου σταδίου της διαδικασίας SCC, είναι θεμελιώδης διότι ο καθυστερημένος σχηματισμός των κρίσιμων σημείων θα μπορούσε να βελτιώσει την αντίσταση του SCC στο κράμα αλουμινίου 7050. Έτσι, είναι απαραίτητη η καλύτερη κατανόηση της τοπικής των χημικών και ηλεκτροχημικών συνθηκών κοντά στις μεταλλουργικές ανομοιογένειες για να βελτιστοποιηθεί η μεταλλουργική σύνθεση και η θερμική επεξεργασία. [56]

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΡΩΓΜΩΝ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ ΤΟΠΙΚΑ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΗΝ ΑΝΟΔΙΚΗ ΔΙΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Μετά το πρώτο στάδιο της διαδικασίας SCC, η τοπική ανοδική διάλυση και η επίδραση του υδρογόνου μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα σε αλληλεπίδραση με την πλαστικότητα από την ακραία άκρη των κρίσιμων ελαττωμάτων. Στο ελεύθερο δυναμικό, ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις υδρογόνου σε βάρος της ανοδικής διάλυσης, εκτός κατά τη θέση των κρίσιμων ελαττωμάτων. Για τα κράματα με γήρανση, η ταυτόχρονη εντοπισμένη ανοδική διάλυση επιδεινώνεται από έντονη καταπόνηση, τα άτομα υδρογόνου που παράγονται από τη μείωση πρωτονίων σε τοπικό επίπεδο, μπορούν να συνδυαστούν είτε σχηματίζοντας H_2 (**Εικόνα 12**) είτε να απορροφώνται πριν από την διάχυση τους στα όρια των κόκκων. Όπως προτείνει ο Scamans κ.α. και ο Gruhl, η κατάσταση αυτή προωθεί μια επιζήμια περικρυσταλλική θραύση ειδικά σε σύντομη εγκάρσια διεύθυνση για την οποία τα όρια των κόκκων είναι θετικά προσανατολισμένα προς την εφαρμοζόμενη τάση εφελκυσμού. Μια θεραπεία κατά της γήρανσης βελτιώνει μακροσκοπική αντίσταση σε SCC του κράματος αλουμινίου 7050 μειώνοντας καταρχάς την εμφάνιση περικρυσταλλικής θραύσης. Όπως προτείνεται από πολλούς ερευνητές, λόγω τροποποιημένων ορίων κόκκων από τη γήρανση, η υπεργήρανση πιθανώς να προκαλεί μια μείωση της τοπικής ανοδικής διάλυσης στις

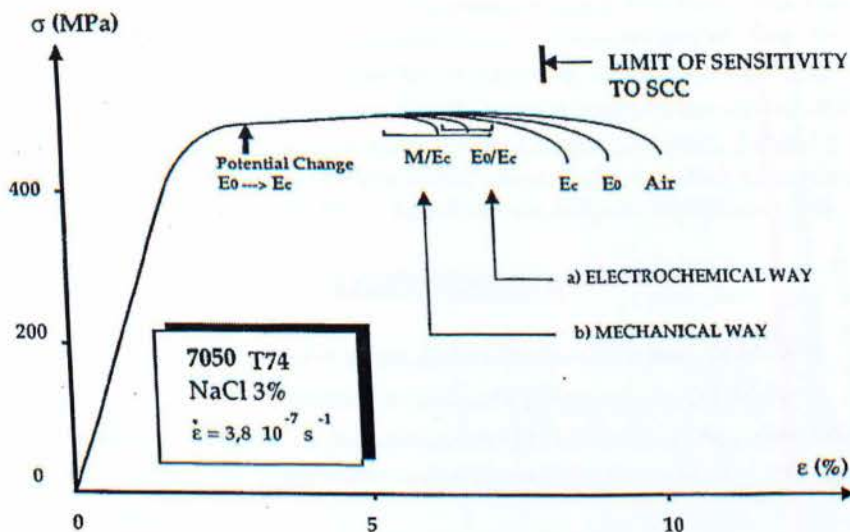
περιοχές των ορίων των κόκκων, διάχυση υδρογόνου στα όρια των κόκκων και τοπικές συγκεντρώσεις καταπόνησης μέσω της ομοιογένειας της παραμόρφωσης στα όρια των κόκκων. Αυτός είναι σίγουρα και ο λόγος που οι περιοχές στα όρια των κόκκων στις μικροδομές γήρανσης είναι λιγότερο ευαίσθητες σε SCC όπως και λιγότερη διάδοση ρωγμών λόγω διάβρωσης από μία ασυνεχής περικκοκκική σαν διάσπαση θραύση.

Αυτή η διάσπαση που είναι σαν τη θραύση και η παρατήρηση των ραβδώσεων μπορούν να συνδεθούν με την ψαθυροποίηση υδρογόνου. Πράγματι, σύμφωνα με τις πειραματικές παρατηρήσεις του Thompson κ.α., αυτό το είδος της θραύσης προωθείται σαφώς σε όλα τα κράματα, όταν οι επιδράσεις του υδρογόνου ενισχύονται (εις βάρος της ανοδικής διάλυσης) από την επίδραση του καθοδικού δυναμικού. Επειδή οι συντελεστές διάχυσης πλέγματος υδρογόνου στα υλικά FCC όπως τα κράματα αλουμινίου $7 \times \times (D \approx 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1})$ είναι πολύ χαμηλοί, ο Thompson υποστήριξε ότι τα άτομα του υδρογόνου μεταφέρονται από τις εξαρθρώσεις μέχρι μια κρίσιμη συγκέντρωση η οποία επιτυγχάνεται τοπικά για να προκαλέσει μια μακροσκοπική ψαθυροποίηση. Στα κράματα με γήρανση, η μετάβαση από την περικκοκκική διάσπαση στο ελεύθερο δυναμικό E_0 , όπως η θραύση στο καθοδικό δυναμικό E_c , υποδεικνύει ότι μια συνέχεια στη λειτουργία μικροσκοπικού μηχανισμού θα μπορούσε να υποτεθεί ανάμεσα σε δυο τρόπους θραύσης. Στη μελέτη μας, έχει αποδειχθεί ότι η επίδραση του υδρογόνου λαμβάνει χώρα μετά την έναρξη περιόδου που σχετίζεται με τον σχηματισμό των κρίσιμων ελαττωμάτων από εντοπισμένη διάλυση. Ακόμα και αν αυτές οι επιδράσεις ενισχύονται (και ανιχνεύονται στην επιφάνεια της θραύσης) όταν το καθοδικό δυναμικό επηρεάζεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού, δεν επηρεάζουν μακροσκοπικές ιδιότητες εφελκυσμού, επειδή συνδέονται με ένα καθυστερημένο σχηματισμό κρίσιμων ελαττωμάτων που επάγεται από την ταυτόχρονη μείωση της έντονης ανοδικής διάλυσης. Ωστόσο, όταν ο σχηματισμός των κρίσιμων ελαττωμάτων ευνοείται από την ανοδική διάλυση ή από την μηχανική προ-ρωγμάτωση πριν από τον επηρεασμό του καθοδικού δυναμικού (ειδικά test σε κράματα με υπεργήρανση), επιδράσεις του υδρογόνου εντοπίζονται και ενισχύονται νωρίτερα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ραγίσματος που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των μακροσκοπικών ιδιοτήτων εφελκυσμού. Ενώ οι σχέσεις μεταξύ των κυρίων μακροσκοπικών ιδιοτήτων, των κρίσιμων ελαττωμάτων και οι συνδυασμένες επιδράσεις της τοπικής ανοδικής διάλυσης και της ψαθυροποίησης υδρογόνου κατά τη διάρκεια της SCC του κράματος αλουμινίου 7050 έχουν τονισθεί σε αυτή τη μελέτη, χρειάζεται να προσδιοριστεί η δράση του υδρογόνου. Και για την περικρυσταλλική και για την περικκοκκική είναι δύσκολο από τα αποτελέσματα του πειράματός μας να καθορίσουμε την ενέργεια σε σχέση με τα μοντέλα που προτείνονται στην επιστημονική βιβλιογραφία (μη συνοχή, επαγόμενη προσρόφηση που προκαλείται από τοπική ολίσθηση, επαγόμενη προσρόφηση από εντοπισμένη ολίσθηση και σχηματισμός υβριδίων). [56]

ΤΑ ΚΡΙΣΙΜΑ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ: ΜΙΑ ΕΙΔΙΚΗ Ή ΓΕΝΙΚΗ ΕΝΝΟΙΑ?

Ο ρόλος φθοράς των κρίσιμων ελαττωμάτων είναι πρωταρχικής σημασίας κατά τη διάρκεια SCC του κράματος αλουμινίου 7050. Ωστόσο, θα πίστευε κανείς ότι τα συνδυασμένα αποτελέσματα της τοπικής διάλυσης και της ψαθυροποίησης υδρογόνου είναι μια ειδική περίπτωση εξαιτίας της καθαρότητας του κράματος αλουμινίου 7050. Όμως, αν η ίδια σειρά των πειραμάτων παρουσιάζονται στο

Σχήμα 8, που γίνεται με ένα καθαρό ανοξείδωτο χάλυβα FCC στους 153°C σε διάλυμα MgCl₂, παρατηρείται το ίδιο είδος συνδυασμένων αποτελεσμάτων.



Σχήμα 8

Σε αυτή την περίπτωση, τα κρίσιμα αποτελέσματα δεν σχετίζονται με τις μεταλλουργικές ανομοιογένειες αλλά στον σχηματισμό μικρορηγματώσεων από τοπική ανοδική διάλυση από αναδυόμενες ζώνες ολίσθησης. Χωρίς αυτή την ανοδική διάλυση, οι επιδράσεις του υδρογόνου (οι οποίες χαρακτηρίζονται από μια ασυνεχή διάσπαση όπως η θραύση σε κρυσταλλογραφικές όψεις) δεν λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια των δοκιμών.

Επειδή η έναρξη της ρωγμής και οι επιπτώσεις της στη διάδοση των ρωγμών σε SCC δεν έχουν ποτέ μελετηθεί εκτεταμένα, η μελέτη αυτή παρέχει μια πρωτότυπη συμβολή μέσω της έννοιας των κρίσιμων ελαττωμάτων που αναπτύσσεται από τα πειραματικά δεδομένα. [56]

ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ SCC ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ FCC

Τα παραπάνω αποτελέσματα που δίνουν έμφαση στο ρόλο της τοπικής ανοδικής διάλυσης κατά τη διάρκεια του σχηματισμού των κρίσιμων ελαττωμάτων, σχετίζονται με το ρόλο του υδρογόνου πάνω σε σύντομες αποστάσεις κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης ρωγμών, αυτό βοηθάει στην εξήγηση για τις διαφορές που σχετίζονται με την SCC της σειράς κραμάτων 7xxx και άλλων FCC υλικών. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μια σχετική μοντελοποίηση SCC των υλικών FCC θα λαμβάνει υπόψη λογαριασμό τοπικής ανοδικής διάλυσης και τα αποτελέσματα που επάγονται από τον σχεδιασμό κρίσιμων ελαττωμάτων.

Τέτοιος ανταγωνισμός σε αλληλεπίδραση με την τοπική πλαστικότητα, υπογραμμίζεται ιδιαίτερα στην ενισχυμένη διάβρωση του μοντέλου της πλαστικότητας από τον T. Magnin τόσο για την περικρυσταλλική SCC όσο και για την ασυνεχή διάσπαση περικοκκικής θραύσης σε όλκιμα υλικά FCC.

Σε αυτό το μοντέλο που βασίζεται στον σχηματισμό τοπικής διάβρωσης-παραμόρφωσης σε άκρες SCC, το υδρογόνο μπορεί τοπικά να ενισχύσει την πλαστικότητα και την συσσώρευση σχηματισμού μικρορωγμών στα άκρα που δημιουργήθηκαν από προηγούμενη ανοδική διάλυση. Αυτές οι μικρές ρωγμές που

αντιστοιχούν στα κρίσιμα ελαττώματα και στον σχηματισμό τους από την τοπική ανοδική διάλυση, θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως το πρώτο περιορισμένο στάδιο αυτού του μοντέλου. Όποια και αν είναι η μοντελοποίηση, η επίδραση των κύριων μακροσκοπικών παραμέτρων θα πρέπει να οριστεί ως η κινητήρια δύναμη στην άκρη της ρωγμής ανάλογα με το υλικό και τις συνθήκες περιβάλλοντος. Η χημεία των τοπικών ρωγμών πρέπει να διαμορφωθεί κατά τη διάρκεια του σχηματισμού των κρίσιμων ελαττωμάτων και την επακόλουθη ανάπτυξη ρωγμών, δηλαδή η μεταφορά των ενεργών ιδιοτήτων στις άκρες των ρωγμών, η φυσική προσρόφηση, η χημική προσρόφηση και διάσταση, η διείσδυση και διάχυση υδρογόνου. [56]

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- (1) Η τεχνική αργού ρυθμού παραμόρφωσης και οι εξετάσεις SEM είναι συμπληρωματικά εργαλεία τα οποία επιτρέπουν τη συσχέτιση των επιδράσεων SCC με τις μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού σε μακροσκοπικό επίπεδο και την αναγνώριση του μηχανισμού λειτουργίας σε μακροσκοπικό επίπεδο.
- (2) Δοκιμάστηκε κράμα αλουμινίου 7050 σε εγκάρσια κατεύθυνση σε χλωριούχο διάλυμα 3% με ρυθμό καταπόνησης $\dot{\epsilon} = 3.8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, ο μηχανισμός λειτουργίας και η αντίστοιχη μακροσκοπική αντίσταση SCC, σχετίζεται και με την τοπική ανοδική διάλυση και με την επίδραση υδρογόνου. Οι σχετικές τους επιρροές εξαρτώνται από τις κύριες μακροσκοπικές ιδιότητες: το κράμα, το ηλεκτροχημικών δυναμικό και ρυθμό καταπόνησης.
- (3) Ο κύριος ρόλος της ανοδικής διάλυσης είναι να παράγει ατέλειες κρίσιμης σημασίας τα οποία προωθούν όχι μόνο τον εντοπισμό της πλαστικότητας αλλά και τον εντοπισμό της απαλλαγής υδρογόνου, την είσοδο αλλά και την επακόλουθη αύξηση της ψαθυροποίησης. Κανένας πειστικός τρόπος δράσης του υδρογόνου δεν παρατηρήθηκε σε αυτή τη μελέτη.
- (4) Ο σχηματισμός τέτοιων κρίσιμων ατελειών (που σχετίζονται με τις μεταλλουργικές ανομοιογένειες του κράματος αλουμινίου 7050) αντιστοιχεί σε ένα μεγάλο μέρος της καλής περιόδου επώασης. Ένας καθυστερημένος σχηματισμός κρίσιμων ατελειών θα μπορούσε να βελτιώσει την αντίσταση του SCC σε αυτό το κράμα. Η μεταλλουργική σύνθεση και η θερμική επεξεργασία παίζουν βασικό ρόλο στο πλαίσιο αυτό.
- (5) Αυτή η έννοια των κρίσιμων ελαττωμάτων θα μπορούσε να επεκταθεί σε άλλα υλικά FCC και η εξέτασή τους είναι πρωταρχικής σημασίας για την κατανόηση της έναρξης του μηχανισμού SCC. [56]

(8.6) Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΟΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ 5083

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα σφυρήλατο φύλλο κράματος αλουμινίου 5083 από το εμπόριο. Η κατά βάρος % χημική του σύσταση ήταν: 95.2% Al, 3.5% Mg, 0.5% Mn, 0.3% Si, 0.26% Cr, 0.24% Fe. Από αυτό το φύλλο παρήχθησαν ένας αριθμός μικροσκληρότητας (4 cm x 2 cm x 0.3 cm) και τυποποιημένα δείγματα εφελκυσμού. Πριν από τις καθοδικές δοκιμές υδρογόνου, τα δείγματα κραμάτων αλουμινίου 5083 γυαλίστηκαν από φύλλα SiC με αυξημένο φινιρίσμα και πάστα από διαμάντι 3 μm. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι όλα τα δείγματα είχαν παρόμοια επιφανειακή τοπογραφία, πειράματα τραχύτητας διεξήχθησαν με την βοήθεια ενός τραχύμετρου Magg Perthen. Η προκύπτουσα τραχύτητα των δειγμάτων κράματος 5083 ήταν περίπου 0.05 μm. Μια διαδικασία ανακούφισης καταπόνησης πραγματοποιήθηκε επίσης, με ανόπτηση των παραγόμενων 5083 δειγμάτων αλουμινίου στους 350 C° για 2 ώρες και αργή ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου, σε ένα αυτόματο κλίβανο με ατμόσφαιρα Ag⁺.

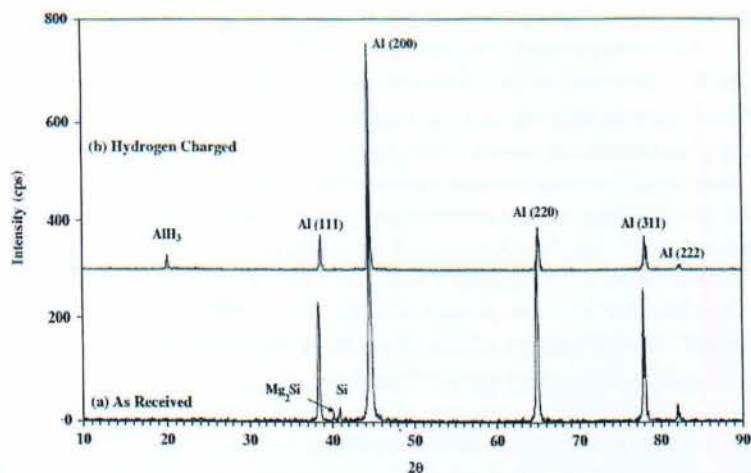
Έγινε εισαγωγή υδρογόνου στα δείγματα με ηλεκτρολυτική καθοδική φόρτιση. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε σε ένα διάλυμα που αποτελείται 75% CH₃OH, 22,4% H₂O και 2,6% H₂SO₄ δηλητηριασμένο με As₂O₃ ως αναστολέας ανασυνδυασμού του υδρογόνου, σε θερμοκρασία δωματίου. Τα ρεύματα φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στην περιοχή 15-90 mA/cm², ενώ ο χρόνος φόρτισης κυμαίνονταν από 2 έως 30 ώρες, αντιστοίχως, με τη χρήση του ανοδίων γραφίτη.

Μηχανικές δοκιμές διεξήχθη αμέσως μετά την φόρτιση, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια του υδρογόνου. Όλες οι δοκιμές τάσεως διεξήχθησαν σε ένα ρυθμό παραμόρφωσης $3,3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, σε θερμοκρασία δωματίου. Δοκιμές μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα Shimadzu Vickers σκληρόμετρο, επιβάλλοντας 0.15 N για 15 s. Οι δοθείσες τιμές των πειραματικών παραμέτρων που παρουσιάζονται είναι η μέση τιμή των πέντε ανεξάρτητων πειραμάτων. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά λάθη, αυτοί είναι υπόλογοι παρουσιάζονται ως γραμμές σφάλματος στις γραφικές παραστάσεις.

Η μεταλλογραφική μελέτη της επιφάνειας του καθοδικά φορτισμένου υδρογόνου και των ρωγματομένων δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης Jeol 6100 το οποίο ήταν συνδεδεμένο με ένα αναλυτική διασποράς ακτίνων X (EDAX). [57]

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

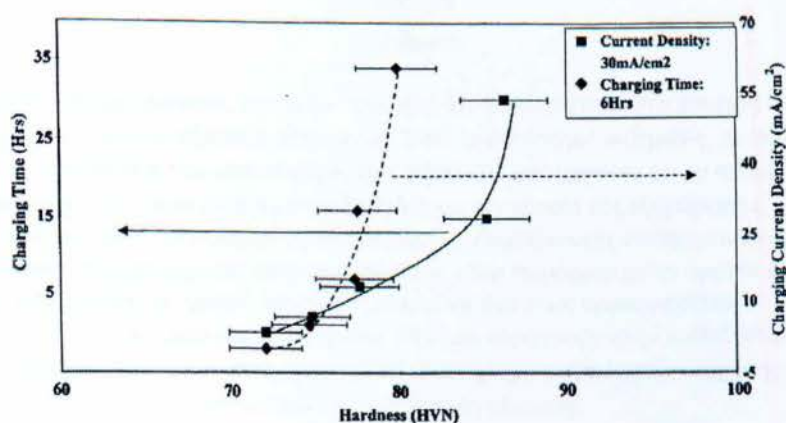
Δομικός χαρακτηρισμός στα δείγματα 5083, με τη βοήθεια των περίθλασης ακτίνων X, έδειξε την παρουσία του στερεού διαλύματος αργιλίου-μαγνησίου και διαμεταλλικό Mg₂Si (Σχήμα 1).



Σχήμα 1

Ωστόσο, μετά από καθοδική φόρτιση υδρογόνου, ανιχνεύθηκε υδρίδιο αργιλίου (AlH_3) για έντονες συνθήκες φόρτισης, **Σχήμα 1**. Η παρουσία υδριδίου του αργιλίου στα επιφανειακά στρώματα του φορτισμένου από υδρογόνο κράματος αλουμινίου ήταν ένα αποτέλεσμα της αυξημένης συγκεντρώσεως υδρογόνου, που αύξησε το όριο διαλυτότητας του υδρογόνου στο κράμα αλουμινίου.

Δοκιμές μικροσκληρότητας πάνω στα επιφανειακά στρώματα της διατομής των φορτισμένων δειγμάτων αποκάλυψαν αυξημένη επιφανειακή σκλήρυνση, λόγω φόρτισης υδρογόνου. Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζει σαφείς αποδείξεις ότι η μικροσκληρότητα των επιφανειακών στρωμάτων από σφυρήλατο κράμα αλουμινίου 5083 αυξήθηκε με την αύξηση του χρόνου φόρτισης του υδρογόνου, για μία σταθερή τιμή της πυκνότητας ρεύματος και με αυξανόμενη πυκνότητα ρεύματος φόρτισης, για μία σταθερή τιμή του χρόνου φόρτισης.

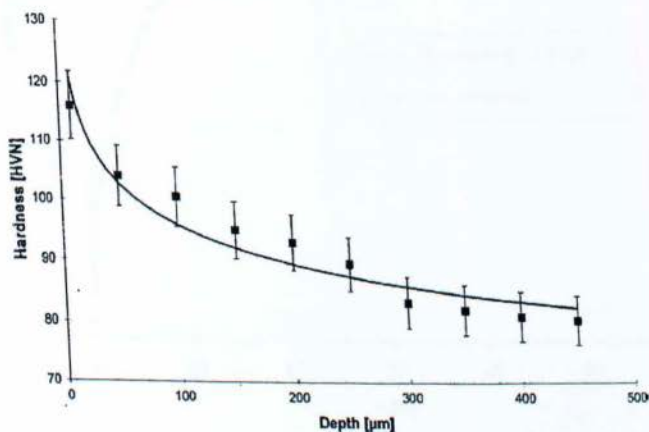


Σχήμα 2

Η αύξηση της μικροσκληρότητας των επιφανειακών στρωμάτων του εξεταζόμενου κράματος αλουμινίου λόγω της φόρτισης του υδρογόνου μπορεί να εξηγηθεί από την άποψη των μηχανισμών εξάρθρωσης που εναποθέτει. Έχει αποδειχθεί ότι τα άτομα υδρογόνου διαλυμένης ουσίας συχνά δρουν ως θέσεις εναπόθεσης

εξαρθρώσεων, τα οποία αυξάνουν την σκληρότητα της επιφάνειας του κράματος φορτισμένου με υδρογόνο. Εξαρθρώσεις μπορεί να δημιουργηθούν με συγκέντρωση υδρογόνου, αλλά με αυξανόμενη δυσκολία, λόγω της αυξημένης αντίστασης στην παραγωγή νέων εξαρθρώσεων από τις υπάρχουσες εξαρθρώσεις. Έτσι, μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος φόρτισης και υψηλότερος χρόνος φόρτισης οδηγούν σε αυξημένη πτητικότητα υδρογόνου στα επιφανειακά στρώματα του κράματος και κατά συνέπεια, σε αυξημένη επιφανειακή σκληρότητα που οφείλεται σε μειωμένη κινητικότητα εξαρθρώσεων. Εντούτοις, μετά από ένα ορισμένο σημείο (ρεύμα φόρτισης-χρόνος φόρτισης), η μικροσκληρότητα των επιφανειακών στρωμάτων έτειναν να φθάσουν σε επίπεδο κορεσμού. Αυτό το φαινόμενο πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι η μήτρα αλουμινίου κατέστη κορεσμο και δε μπορούσε να διαλυθεί περισσότερο υδρογόνο στην μήτρα αλουμινίου.

Ένα τυπικό διάγραμμα, που συνδέει τη μικροσκληρότητα των δειγμάτων με το βάθος του υδρογόνου στα επιφανειακά στρώματα του κράματος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3

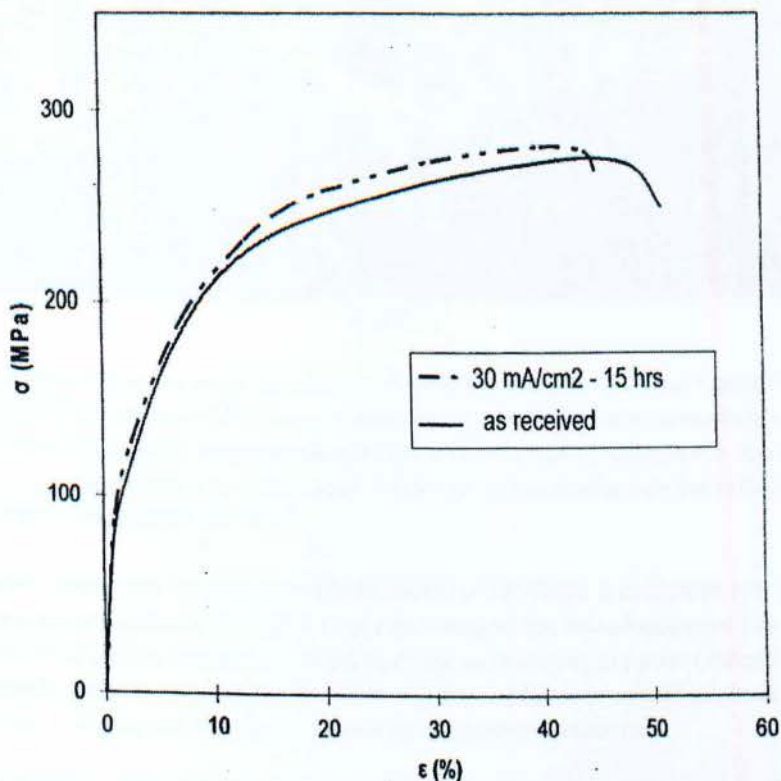
Από το τελευταίο σχήμα, μπορεί να ειπωθεί ότι η σκληρότητα στα επιφανειακά στρώματα του σφυρήλατου αλουμινίου 5083 εμφανίστηκε αυξημένη, σε σύγκριση με τη σκληρότητα του υλικού χύμα, που οφείλεται στο γεγονός ότι τα άτομα υδρογόνου που απορροφάται παρεμποδίζουν την κίνηση της εξάρθρωσης, συμβάλλοντας στην σκλήρυνση του κράματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το προφίλ διανομής της μετρημένης μικροσκληρότητας είναι παρόμοιο με το προφίλ διανομής του υδρογόνου, το προφίλ διάχυσης μπορεί να φανεί ως προσεγγιστικό αποτέλεσμα του μηχανισμού διάχυσης Pick του υδρογόνου στην καθοδική φόρτιση σφυρήλατου κράματος αλουμινίου 5083. Συνεπώς, ο συντελεστής διάχυσης μπορεί να υπολογιστεί, από την ακόλουθη μαθηματική εξίσωση:

$$D = x^2/(4t) \text{ or } D = (0.025 \text{ cm})^2/4 \times (21,600) \\ = 7 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ or } 7 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Όπου D είναι ο συντελεστής διάχυσης (m^2/s^{-1}), x είναι το μήκος διάχυσης (m) υδρογόνου στα επιφανειακά στρώματα του εξεταζόμενου δείγματος αργιλίου, που

λαμβάνεται από το Σχήμα 3, και το t είναι ο χρόνος φόρτισης (s). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής διάχυσης του 5083 κράματος αλουμινίου βρέθηκε παρόμοιος με άλλα κράματα αλουμινίου.

Τυπική καμπύλη τάσης-καταπόνησης ενός αφόρτιστου και φορτισμένου με υδρογόνο ($I = 30 \text{ mA/cm}^2$, $t = 6$ ώρες) κράματος αλουμινίου 5083, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4

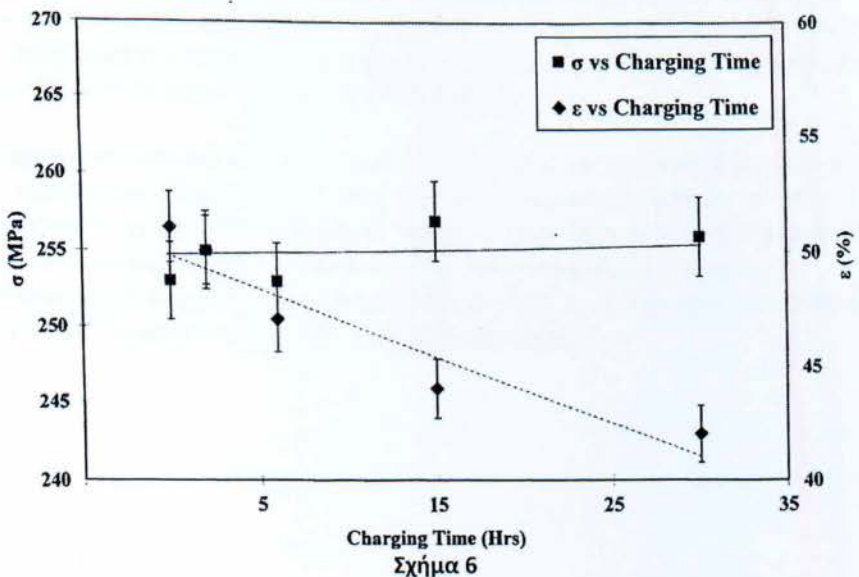
Από το Σχήμα 4, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η καθοδική φόρτιση με υδρογόνο μειώνει ελαφρά την τελική αντοχή εφελκυσμού (UTS) και σημαντικά την ολκιμότητα του κράματος που εξετάστηκε. Η παρατηρούμενη ελαφρά μείωση της αντοχής εφελκυσμού (UTS) του φορτισμένου με υδρογόνο 5083 σφυρήλατο κράμα αλουμινίου θα μπορούσε να αποδοθεί κυρίως στην παρουσία φυσαλίδων και μικρορωγμών επί της επιφάνειας του κράματος, κατά τη διάρκεια της καθοδικής φόρτισης υδρογόνου, όπως θα μπορεί να φανεί στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5

Από την άλλη πλευρά, η παρατηρηθείσα μείωση της ολκιμότητας των κραμάτων αλουμινίου 5083 θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι τα απορροφημένα άτομα υδρογόνου δρουν παρεμποδίζοντας την κίνηση των εξαθρώσεων και έτσι μειώνουν την ολκιμότητα του κράματος. Επιπλέον, η παρουσία των φυσαλίδων θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπ' όψιν.

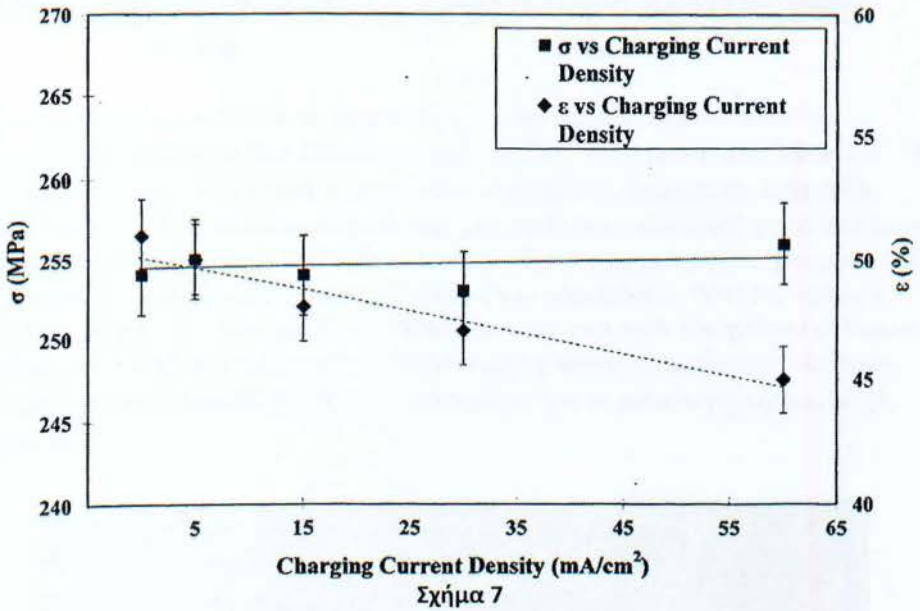
Στην πρώτη σειρά των πειραμάτων εφελκυσμού μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου φόρτισης του υδρογόνου για την αντοχή εφελκυσμού και την ολκιμότητα του 5083 κράματος αλουμινίου, για μία σταθερή τιμή της πυκνότητας ρεύματος φόρτισης. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η επίδραση του χρόνου φόρτισης του υδρογόνου για τις UTS και την ολκιμότητα του φορτισμένου με υδρογόνο κράματος.



Από το παραπάνω διάγραμμα, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η αύξηση χρόνου φόρτισης του υδρογόνου επέφερε μια ανεξαρτησία των UTS του κράματος

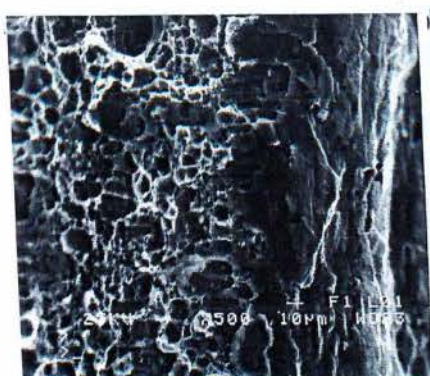
αλουμινίου, ενώ η ολκιμότητα του κράματος μειώθηκε ουσιαστικά. Η μείωση της ολκιμότητας του φορτισμένου με υδρογόνο κράματος θα μπορούσε να εξηγηθεί από τον μηχανισμό εναπόθεσης εξαρθρώσεων και δημιουργία φυσαλίδων, που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο.

Στη δεύτερη σειρά των πειραμάτων εφελκυσμού μελετήθηκε η επίδραση της πυκνότητας ρεύματος φόρτισης του υδρογόνου για τις UTS και την ολκιμότητα του 5083 κράματος αλουμινίου, για μία σταθερή τιμή του χρόνου φόρτισης. Στο Σχήμα 7, φαίνεται ότι η αύξηση της πυκνότητας ρεύματος φόρτισης υδρογόνου μείωσε την ολκιμότητα του κράματος που εξετάστηκε.

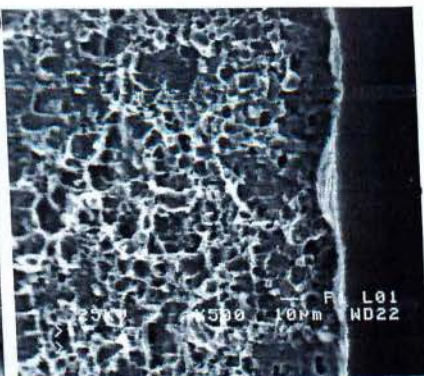


Ωστόσο, η UTS βρέθηκε να είναι ανεξάρτητη από την πυκνότητα του ρεύματος φόρτισης. Το αποτέλεσμα της εφαρμοζόμενης πυκνότητας ρεύματος για την UTS και την ολκιμότητα του κράματος φορτισμένο με υδρογόνο μειώθηκε σε σύγκριση με την επίδραση του χρόνου φόρτισης του υδρογόνου.

Ο μηχανισμός θραύσης των δειγμάτων που έμειναν όπως παραλήφθηκαν και των φορτισμένων με υδρογόνο 5083 δειγμάτων σφυρήλατου αλουμινίου, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού δοκιμών, μελετήθηκαν με τη βοήθεια ενός μικροσκοπίου σάρωσης ηλεκτρονίων. Μία τυπική μορφολογία των ρωγμών επιφανείας των δειγμάτων όπως παραλήφθηκαν και των φορτισμένων με υδρογόνο δειγμάτων αλουμινίου εμφανίζεται στα Σχήματα 8a και b.

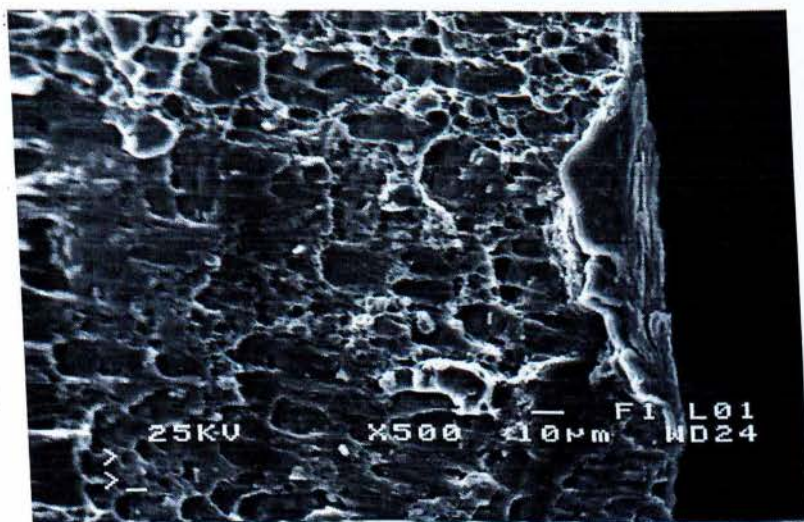


Σχήμα 8a



Σχήμα 8b

Όπως μπορεί να φανεί από το Σχήμα 8a, τα δείγματα που έμειναν όπως τα παραλάβαμε παρουσιάζουν όλκιμες ρωγμές, καθώς αποτελείται από λακκάκια. Από την άλλη πλευρά, η εξωτερική περιοχή του φορτισμένου δείγματος, Σχήμα 8b, παρουσιάζει εύθραυστα περικοκκικές ρωγμές, ενώ στον εσωτερικό χώρο παραμένει η ρωγμή όλκιμη. Το λεπτό, ψαθυρό, ενδοκοκκικό στρώμα ρωγμής θα μπορούσε να οφείλεται στις εξαρθρώσεις του συμπυκνωμένου υδρογόνου. Ωστόσο, καθώς ο χρόνος φόρτισης του υδρογόνου αυξήθηκε, για την ίδια τιμή του χρόνου ρεύματος υδρογόνου, η στιβάδα ενδοκοκκική επιφάνειας θραύσης εμφανίστηκε ελαφρώς αυξημένη, ενώ τα λακκάκια στο εσωτερικό χώρο έγιναν μικρότερα και πιο ρηχά, Σχήμα 8c.



Σχήμα 8c

Αυτό το φαινόμενο πρέπει να αποδοθεί στο γεγονός ότι η αύξηση του χρόνου της φόρτισης του σφυρήλατο κράμα αλουμινίου 5083 κατέληξε σε υψηλότερη διάχυση του υδρογόνου, και συνεπώς σε μεγαλύτερο βαθμό ευθραυστότητας στην επιφάνεια του φορτισμένου δείγματος. [57]

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- (1) Όπως φαίνεται αποτελέσματα περίθλασης των ακτινών Χ, ανιχνεύθηκε σχηματισμός AlH_3 επί των επιφανειακών στρωμάτων για συγκεκριμένες συνθήκες.
- (2) Η καθοδική φόρτιση υδρογόνου οδήγησε σε αύξηση της μικροσκληρότητας των επιφανειακών στρωμάτων του σφυρήλατου κράματος αλουμινίου 5083.
- (3) Οι δοκιμές εφελκυσμού αποκάλυψαν ότι η ολκιμότητα του κράματος 5083 μειώθηκε με την αύξηση του χρόνου φόρτισης του υδρογόνου, για μία σταθερή τιμή της πυκνότητας ρεύματος φόρτισης. Η ολκιμότητα επίσης μειώθηκε με αυξανόμενη πυκνότητα ρεύματος φόρτισης, για μία σταθερή τιμή του χρόνου φόρτισης.
- (4) Η τελική αντοχή εφελκυσμού του κράματος που εξετάστηκε ήταν σχεδόν ανεξάρτητη από τις συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τη φόρτιση του υδρογόνου.
- (5) Τα καθοδικά φορτισμένα κράματα αλουμινίου 5083 παρουσίασαν ψαθυρή περικοκκική θραύση στα επιφανειακά στρώματα, ενώ παρατηρήθηκε όλκιμο περικρυσταλλικό κάταγμα στα βαθύτερα στρώματα του ίδιου του κράματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A micromechanics approach to the study of hydrogen transport and embrittlement, , A. Taha, P. Sofronis , 1999.
- [2] Corrosion-induced hydrogen embrittlement in aluminum alloy 2024, , H. Kamoutsi, G.N. Haidemenopoulos, V. Bontozoglou, S. Pantelakis ,2005
- [3] Corrosion-induced hydrogen embrittlement of 2024 and 6013 aluminum alloys, P.V. Petroyiannis, Al.Th. Kermanidis, P. Papanikos, Sp.G. Pantelakis
- [4] Effects of microstructure on hydrogen-induced cracking in aluminum alloys, N. Ben Ali, D. Tanguya, and R. Estevez, 2011.
- [5] Hydrogen diffusion and embrittlement in 7075 aluminum alloy, N. Takano, 2006.
- [6] Hydrogen embrittlement of aluminum in aqueous environments examined by in situ electrochemical nanoindentation, Afrooz Barnoush and Horst Vehoff, 2008.
- [7] Microstructural effects on hydrogen embrittlement in a high purity 7075 aluminum alloy, D. NGUYEN, A. W. THOMPSON and I. M. BERNSTEIN, 1986.
- [8] Protective role of local Al cladding against corrosion damage and hydrogen embrittlement of 2024 aluminum alloy specimens, P.V. Petroyiannis, Sp.G. Pantelakis , G.N. Haidemenopoulos, 2005.
- [9] Role of hydrogen and humidity in the torsional fatigue of aluminum alloy 2024-T351, T. S. SUDARSHAN and M. R. LOUTHAN, JR , T.A. PLACE, H.H. MABIE, 1984.
- [10] Solid-metal-induced embrittlement of aluminium alloys and other materials, S. P. LYNCH, 1988.
- [11] Strain-rate effects on hydrogen embrittlement of 7075 aluminum
- [12] Study of hydrogen embrittlement in aluminium alloy 2024 in the longitudinal direction
- [13] Tensile behaviour of corroded and hydrogen embrittled 2024 T351 aluminum alloy specimen
- [14] The diffusion and trapping of hydrogen in high purity aluminum
- [15] The effect of hydrogen charging on the mechanical behaviour of 5083 wrought aluminum alloy
- [16] The effect of hydrogen on dislocation dynamics
- [17] The influence of hydrogen on deformation and fracture processes in high-strength aluminum alloys
- [18] The interaction of hydrogen with point defects in aluminum metal
- [19] Πηγές από Αλουμίνιο Ελλάδος, Αλουμίνιο 2003
- [20] ALUMINIUM MAGAZINE (www.aluminium.gr)
- [21] el.wikipedia.org Στοιχεία Τεχνολογίας Παραγωγής (medilab.pme.duth.gr
- [22] <http://users.uoi.gr> (users.uoi.gr/mgeorgat/alloys.pdf)
- [23] Aluminium and its alloys, their properties, the thermal treatment and industrial application. By G.Gard, σελ.118
- [24] Γ.Ν.Χαϊδεμενόπουλος «Φυσική Μεταλλουργία», Εκδόσεις Τζιόλα 2007
- [25] Aluminum and Aluminum Alloys , ASM Specialty Handbooks
- [26] I.J Polmear «Light Alloys», Arnold Publishers,1995, σελ. 1-42
- [27] www.alunet.gr
- [28] www.atem-oe.gr (αλουμίνιο ->τεχνολογίες αλουμινίου)
- [29] Hussain, M.M., I. Dincer and X. Li, A preliminary life cycle assessment of PEM fuel cell powered automobiles. Appl. Thermal Eng., 27, 2294–2299, 2007.
- [30] Hydrogen Economy, Wikipedia Encyclopedia, available at http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy, March 2007.
- [31] Air Products and Chemicals, available at <http://www.airproducts.com/Products/LiquidBulkGases/HydrogenEnergy/FuelCells/>, 2003.
- [32] Rifkin, J., The Hydrogen Economy. Penguin Putnam Inc., New York, 2002.

- [33] The Hydrogen Economy: Opportunities, Cost, Barriers and R&D Needs, in National Research Council and National Academy of Engineering, National Academies Press, Washington, 2004.
- [34] STORHY Train-IN 2006 SESSION2.1:H2 PRACTICAL EXPERIENCE J.Reijerkerk, E. Lohse (LECTURE)
- [35] <http://www.Hy2.gr>
- [36] STORAGE AND TRANSPORTATION OF MERCHANT HYDROGEN. EKLUND and O. VON KRUSENSTIERNA Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 8, No. 6, pp. 463-470, 1983. (ΥΔΡΙΔΙΑ ΜΕΤΑΛΛΩΝ)
- [37] S.P. Lynch, Environmentally assisted cracking: Overview of evidence for an adsorption-induced localized slip process. Acta Metall., 36, 1988, 2639-2661.
- [38] S.P. Lynch, Mechanisms of hydrogen assisted cracking—A review. in “Hydrogen Effects in Materials,” Eds., N.R. Moody and A.W. Thompson, The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA, 2003.
- [39] R.A. Oriani, Hydrogen embrittlement of steels. Annual Reviews in Materials Science, 1978, 8, 327-357.
- [40] R.A. Oriani, Hydrogen—the versatile embrittler. Corrosion, 43, 1987, 390-397.
- [41] R.A. Oriani, in: “Environment Induced Cracking of Metals”, Eds., R.P. Gangloff and M.B. Ives, NACE, Houston, 1990, TX, pp. 439-448.
- [42] H.K. Birnbaum, in: “Environment Induced Cracking of Metals”, Eds., R.P. Gangloff and M.B. Ives, NACE, Houston, TX, 1990, pp. 21-29.
- [43] C.D. Beachem, A new model for hydrogen-assisted cracking (hydrogen embrittlement). Metall. Trans., 3, 1972, 437-451.
- [44] H. Vehoff and W. Rothe, Gaseous hydrogen embrittlement in Fe-Si and Ni-single crystals. Acta Metall., 31, 1983, 1781-1793.
- [45] H. Vehoff and P. Neumann, in: “Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys,” Eds., R.A. Oriani, J.P. Hirth and S. Smialowska, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1985, pp. 686-711.
- [46] M.S. Daw and M.I. Baskes, in: “Chemistry and Physics of Fracture,” Eds., R.M. Latanision and R.H. Jones, Martinus Nijhoff Publishers BV, pp. 196-218.
- [47] I.M. Robertson, The effect of hydrogen on dislocation dynamics. Engr. Frac. Mech., 68, 2001, 671-692.
- [48] H.K. Birnbaum and P. Sofronis, Hydrogen-enhanced plasticity—a mechanism for hydrogen related fracture. Mater. Sci. Engr., A176, 1993, 191-202.
- [49] NASA, Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, Report NSS 1740.16, Office of Safety and Mission Assurance, Washington, 1997, Chap. 3.
- [50] Gray, H.R., Testing for hydrogen environment embrittlement: experimental variables, in Hydrogen Embrittlement Testing, American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication ASTM STP-543, Philadelphia, PA, 1974, p. 133.
- [51] Chandler, W.T. and Walter, R.J., Testing to determine the effect of high pressure hydrogen environments on the mechanical properties of metals, in Hydrogen Embrittlement Testing ASTM 543, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1974, p. 170.
- [52] Groenvald, T.D. and Elcea, A.D., Hydrogen stress cracking in natural gas transmission pipelines, in Hydrogen in Metals, Bernstein, I.M. and Thompson, A.W., Eds., ASM, 1974.
- [53] Rowe, M.D., Nelson, T.W., and Lippold, J.C., Hydrogen-induced cracking along the fusion boundary of dissimilar metal welds, Welding Res., February, 1999, p. 31.
- [54] ‘Hydrogen Fuel’, production, transport and storage, Ram B. Gupta, σελ.
- [55] Hydrogen embrittlement in a high-strength aluminum alloy, J. Albrecht, B. J. McTiernan, I. M. Bernstein, A. W. Thompson, 1977.

- [56] Influence of critical surface defects and localized competition between anodic dissolution and hydrogen effects during stress corrosion cracking of a 7050 aluminium alloy, D. Najjar , T. Magnin, T.J. Warner, 1996.
- [57] The effect of hydrogen charging on the mechanical behaviour of 5083 wrought aluminum alloy , C.N. Panagopoulos , E.P. Georgiou, 2007.

