



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση αστοχίας μήτρας διαμόρφωσης στομίου
σωληναρίου από κράμα αλουμινίου για την
παραγωγή συσκευασίας φαρμακευτικού
σκευάσματος



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: Μαστορίδου Νικολέτα Α.Μ. 37099

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. Μέντρεα Κάρμεν

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Παπαγεωργίου Δημήτριος

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αθήνα, Οκτώβριος, 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εγχώριες βιομηχανίες φαρμάκων και τροφίμων χρησιμοποιούν συσκευασίες από κράματα αλουμινίου, τα οποία παράγονται με εν ψυχρώ διαμόρφωση. Η παραγωγή σωληναρίων από αλουμίνιο πραγματοποιείται σε μεγάλης έκτασης γραμμές παραγωγής λόγω των πολλών ενδιάμεσων σταδίων αλλά και για λόγους μεταβίβασης των ημιπροϊόντων ανάμεσα στις διαδοχικές φάσεις παρασκευής. Το στάδιο της μορφοποίησής τους πραγματοποιείται μέσω πρεσών οι οποίες περιλαμβάνουν μεταλλικούς θαλάμους, μήτρες μορφοποίησης και βλήτρα και χιτώνια. Η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων συμβάλλει στην αποδοτικότητα της διαδικασίας και την ποιότητα των προϊόντων.

Εταιρεία παρασκευής σωληναρίων από αλουμίνιο χρησιμοποιεί κατά τη διαμόρφωση του ακροφυσίου τους, μήτρα συνδυαστικά με βλήτρο και χιτώνιο. Τα εξαρτήματα αυτά αστοχούν ανάλυση αστοχίας των εξαρτημάτων. Πραγματοποιήθηκε μακροσκοπική ανάλυση διά γυμνού οφθαλμού και με στερεοσκόπιο. Δημιουργήθηκε φωτογραφικό αρχείο. Μετρήθηκε η σκληρότητα και μικροσκληρότητα των εξαρτημάτων. Επιλέχθηκαν τα αντιπροσωπευτικά δοκίμια προς μελέτη από τα αστοχούντα εξαρτήματα. Εξετάστηκε η χημική σύσταση των υλικών κατασκευής και έγινε η ταυτοποίησή τους. Αναλύθηκε ο μηχανισμός της αστοχίας, παρουσιάζονται τα πιθανά αίτια της και προτείνονται παρεμβάσεις για την αποφυγή παρόμοιων αστοχιών στο μέλλον.

Λέξεις-κλειδιά: *παρασκευή σωληναρίου φαρμακευτικού προϊόντος, μορφοποίηση κραμάτων αλουμινίου, μήτρα διαμόρφωσης, βλήτρο διαμόρφωσης, χιτώνιο διαμόρφωσης, ανάλυση αστοχίας, "κορμός φοίνικα".*

ABSTRACT

Local pharmaceutical and food industries use aluminium alloy tubes for packaging manufactured by cold forming. Large-scale production lines are used as large number of intermediate manufacturing stages are involved. The formation of tubes is achieved by using press machines, consisting of metallic chambers, die holders, pressing parts contributing to the process efficiency and the production of high quality components.

In the present study, the manufacturing company during nozzle forming of the tube uses a three-part assembly consisting of a die, plug and sleeve. Repeated failure of those tool parts are the main reason of production downtimes. The scope of the thesis is to perform a failure analysis on these parts. Initially, parts' macroscopic examination was implemented by naked eye and by the use of stereoscope. Photographic file was created. Tools' hardness and micro-hardness was measured. Representative specimens of the failure parts were selected accordingly. The materials used for tools' manufacturing were identified by chemical composition analysis. The failure mechanism as well as the main possible failure cause is determined. Solutions in order to avoid similar failures in the future were presented.

Key-words: pharmaceutical packaging, aluminium alloy tube, cold forming, die, plug, sleeve, failure analysis, "palm tree failure".

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε βάσει του Άρθρου 16 του Κανονισμού Σπουδών του ΑΕΙ Πειραιά (Απόφαση Συνέλευσης ΑΕΙ αριθ. 5/16-12-98, ΦΕΚ 861/21-05-99, τ.Β'), με εισήγηση και επίβλεψη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Π.Ε.Τ.ΥΛ, αιθ. Β216) του Πα.Δ.Α. . Η δομή, η τεκμηρίωση, αλλά και η παρουσίασή της έγινε κατά το δυνατόν σύμφωνα με τους Κανόνες και τις Οδηγίες του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης, καθώς και της πρακτικής που έχει αναπτυχθεί και εξελιχθεί στο συγκεκριμένο εργαστήριο [2] ,[3].

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η εφαρμογή της μεθοδολογίας της ανάλυσης αστοχιών σε μία μήτρα διέλασης αλουμινίου σωληναρίων φαρμακευτικού προϊόντος. Η μήτρα αστόχησε κατά την δημιουργία του στομίου του σωληναρίου. Η ανάλυση αστοχίας αναζητά τα βασικά αίτια της αστοχίας και πραγματοποιείται μέσω της επεξήγησης του τρόπου λειτουργίας. Στόχος της ανάλυσης είναι η εύρεση των αιτιών που οδήγησαν στην θραύση και ο μηχανισμός που την προκάλεσε. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, επεξεργάζονται και τελικά προτείνονται διορθωτικές κινήσεις, σκοπός των οποίων είναι η αποφυγή παρόμοιων αστοχιών στο μέλλον.

Σε ακαδημαϊκό επίπεδο για τον σπουδαστή η αποκόμιση γνώσεων αποτελεί στόχο, ο οποίος θα συμβάλλει:

- Στην ανάπτυξη μεγαλύτερης αντίληψης ως μηχανολόγος μηχανικός.
- Στην κατανόηση των σφαλμάτων και το αποτέλεσμα αυτών στην παραγωγική διαδικασία μίας εταιρείας.
- Στην απόκτηση πείρας και γνώσης των προτύπων, αλλά και των πειραματικών διαδικασιών.
- Στην κατανόηση της εύρεσης λύσης για τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στην παραγωγική διαδικασία.
- Στην απόκτηση εμπειρίας έπειτα από την μελέτη αποτελεσμάτων ελέγχων, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα.

Η εργασία εμπεριέχει δύο μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό. Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τις πειραματικές διαδικασίες, τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα και τις διορθωτικές κινήσεις.

Το θεωρητικό μέρος αποτελείται από τρία κεφάλαια. Το πρώτο αναφέρεται στην θεωρία της ανάλυσης αστοχίας και τον έλεγχο που πρέπει να πραγματοποιείται. Το δεύτερο αναφέρεται στους χάλυβες και το τρίτο στις διαδικασίες διαμόρφωσης. Για την διεξαγωγή του θεωρητικού μέρους χρησιμοποιήθηκε ελληνική, αλλά και ξενόγλωσση βιβλιογραφία (δημοσιεύσεις, άρθρα, βιβλία, προδιαγραφές) που παρατίθενται στο τέλος της πτυχιακής εργασίας.

Το πειραματικό μέρος αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Το τέταρτο αναφέρεται στη συλλογή ιστορικών δεδομένων για τα εξαρτήματα που αστόχησαν, το πέμπτο στην προκαταρκτική εξέταση, το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στις μη καταστρεπτικές δοκιμές, όπως η δοκιμή σκληρότητας, το έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζει τις καταστρεπτικές δοκιμές, όπως κοπή και προετοιμασία δειγμάτων, δοκιμή μικροσκληρομέτρησης, χημική ανάλυση

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

και οπτική μικροσκοπία. Το όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζει τα συμπεράσματα και τις διορθωτικές κινήσεις για την αποφυγή παρόμοιων αστοχιών στο μέλλον.

Όλες οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με την εφαρμογή των προτύπων του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης ISO (International Organization for Standardization) του οργανισμού ASTM (American Society for Testing and Materials). Όλα τα όργανα που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ήταν διακριβωμένα και βαθμονομημένα, με σκοπό την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων. Η αξιοπιστία των μετρήσεων είναι ιδιαίτερης σημασίας τόσο για εκπαιδευτικούς σκοπούς, όσο και για την αξιοπιστία των εξαγόμενων συμπερασμάτων.

Για το πειραματικό μέρος της εργασίας χρειάστηκε η βοήθεια εταιρειών εκτός του Πα.Δ.Α. , χωρίς την οποία πολλά μέρη των πειραματικών διαδικασιών θα ήταν ανέφικτο να πραγματοποιηθούν, λόγω του περιορισμένου υλικού εξοπλισμού και δυνατοτήτων του Πα.Δ.Α. .

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες οφείλονται σε όλες τις παρακάτω εταιρείες που συνεργάστηκαν για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας, όπως και στους αναφερόμενους επιστήμονες και μηχανικούς για την συμβολή τους στην ολοκλήρωση της.

- Στην εταιρεία ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ – UDDEHOLM ΧΑΛΥΒΕΣ Α.Ε.Β.Ε και ιδιαίτερα στον Κο Ι.Φ. Σιδέρη για τις πολύτιμες συμβουλές, αλλά και την καθοδήγηση της παρούσας εργασίας.
- Στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Π.Ε.Τ.ΥΛ, Β216) του τμήματος Φυσικής Χημείας και Τεχνολογίας Υλικών (Φ.Χ.Τ.Υ.) του Πα.Δ.Α. , για τις υπηρεσίες και τον εξοπλισμό που προσέφερε για την κοπή, εγκιβωτισμό, προετοιμασία δοκιμών (λείανση – στίλβωση), μεταλλογραφικό έλεγχο και δοκιμές σκληρότητας.
- Στην εταιρεία Ν. Μπαζίγος Α.Β.Ε.Ε και ειδικότερα στον Ι. Αλβέρτη, τεχνικό διευθυντή για την προσφορά του άνευ αποδοχών για την κοπή των δειγμάτων με την μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης.
- Στην εταιρεία SPECTRUMLABS Α.Ε και ιδιαίτερα στην Μ. Κουκούλη για την προσφορά της άνευ αποδοχών για την χημική ανάλυση του βλήτρου και του χιτωνίου.
- Στον Δ.Γ. Παπαγεωργίου, Μηχανολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Β216) του Πα.Δ.Α. για την αμέριστη βοήθειά του στην διενέργεια των πειραματικών δοκιμών, αλλά και για την καθοδήγησή του για την σωστή εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους δασκάλους μου, με τους οποίους ολοκληρώθηκε η παρούσα πτυχιακή εργασία, την Κα Κ. Μέντρεα Μπίχτα, Δρ. Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό UTC-N (Technical University of Cluj-Napoca) και καθηγήτρια του μαθήματος Π.Ε.Τ.ΥΛ του Πα.Δ.Α. , Στον Κο Παπαγεωργίου Δ. και την Κα Κατσάπη Α. , για την ψυχολογική τους υποστήριξη και την στήριξη τους στην κατανόηση των βασικών αρχών του ελέγχου ποιότητας, που υπήρξε αφορμή για την ανάπτυξη ενδιαφέροντος ως προς το συγκεκριμένο αντικείμενο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	II
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	III
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	V
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	VI
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	VIII

<i>A' ΜΕΡΟΣ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ.....</i>	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°:ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	2
1.1 Καθορισμός και στόχος ανάλυσης αστοχίας.....	2
1.2 Προσέγγιση στις έρευνες ανάλυσης αστοχίας.....	4
1.3 Απαιτήσεις υπόβαθρου του αναλυτή αστοχίας.....	4
1.4 Διεξαγωγή ανάλυσης αστοχίας.....	5
1.5 Καθορισμός του προβλήματος	6
1.6 Τεχνικό υπόβαθρο.....	7
1.7 Ανάλυση Πειραματικού Προγράμματος	7
1.7.1 Διαδικασία για την ανάλυση αστοχίας.....	8
1.8 Ερμηνεία αποτελεσμάτων και ορολογία.....	24
1.9 Συστάσεις.....	24
1.10 Έκθεση της Ανάλυσης Αστοχίας	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°: ΧΑΛΥΒΕΣ	26
2.1 Χάλυβες.....	26
2.1.1 Εισαγωγή.....	26
2.1.2 Ονοματολογία χαλύβων.....	26
2.1.3 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες	27
2.1.4 Επίδραση στοιχείων κραμάτωσης	28
2.1.5 Κραματωμένοι χάλυβες	29
2.1.6 Θερμικές κατεργασίες χαλύβων	31
2.2 Χάλυβες κονιομεταλλουργίας	34
2.2.1 Εισαγωγή.....	34
2.2.2 Χαρακτηριστικά της κονιομεταλλουργίας.....	35
2.2.3 Βασικά στάδια της διαδικασίας	35
2.2.4 Σύγκριση των μεθόδων επεξεργασίας της κονιομεταλλουργίας... ..	38
2.2.5 Παρατηρήσεις σχετικά με το σχεδιασμό για τα μέρη της κονιομεταλλουργίας.....	39
2.2.6 Πλεονεκτήματα της κονιομεταλλουργίας.....	40

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

2.2.7 Περιορισμοί της κονιομεταλλουργίας.....	40
2.2.8 Εφαρμογές της κονιομεταλλουργίας	40
2.2.9 Ποιοτικός έλεγχος των προϊόντων της κονιομεταλλουργίας	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	45
3.1 Εισαγωγή	45
3.2 Διεργασίες μορφοποίησης.....	45
3.2.1 Αρχέγονες κατεργασίες (primary forming processes)	45
3.2.2 Διαμορφώσεις (forming processes).....	45
3.3 Μεταλλουργικός Εξοπλισμός.....	57
Β' ΜΕΡΟΣ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΣΥΛΛΟΓΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ.....	62
5.1 Οπτική επιθεώρηση	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Μη καταστροφικές δοκιμές.....	70
6.1 Μέτρηση σκληρότητας	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: Καταστροφικές και μη καταστροφικές δοκιμές.....	74
7.1 Επιλογή και προετοιμασία δειγμάτων	74
7.2 Χημική Ανάλυση.....	77
7.3 Μικροσκληρομέτρηση.....	80
7.4 Μικροσκοπική Εξέταση Δειγμάτων	81
7.4.1 Έλεγχος με στερεοσκόπιο.....	81
7.4.2 Έλεγχος με μεταλλογραφικό μικροσκόπιο	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ.....	90
8.1 Αποτελέσματα / Συμπεράσματα.....	90
8.2 Προτάσεις / Διορθωτικές Κινήσεις.....	94
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται μία μήτρα, η οποία συνεργάζεται μαζί με ένα βλήτρο και ένα χιτώνιο στη διαμόρφωση του στομίου σωληναρίου φαρμακευτικού προϊόντος. Το αρχικό ενδιάμεσο προϊόν είναι λεπτός επίπεδος δίσκος από κράμα αλουμινίου ο οποίος υποβάλλεται σε εφελκυσμό – θλίψη μέσω συνδυασμού βαθιάς κοίλανσης – σιδερώματος ώστε να σχηματιστεί ο κύριος κορμός του σωληναρίου. Οι επίπεδοι δίσκοι μετατρέπονται σε λεπτότοιχα, επιμήκη τεμάχια, στα οποία εν συνεχεία διαμορφώνεται το ακροφύσιο τους. Κατά το στάδιο της διαμόρφωσης του ακροφυσίου του σωληναρίου, τα βασικά εργαλεία είναι η μήτρα, το βλήτρο και το χιτώνιο. Ο μηχανισμός λειτουργίας είναι η συγκράτηση και ευθυγράμμιση του κυρίου κορμού από το χιτώνιο επάνω στην μήτρα ώστε το βλήτρο να κατέρχεται και να δημιουργεί το ακροφύσιο. Το υλικό δεν μπορεί να παρακάμψει την πίεση του χιτωνίου από καμία κατεύθυνση και αναγκάζεται να κινηθεί εντός της μήτρας, μεταξύ του κενού μήτρας – βλήτρου. Η μήτρα και το βλήτρο είναι τα εξαρτήματα που αστόχησαν κατά την λειτουργία τους, δυσχεραίνοντας την παραγωγική διαδικασία.

Με τον όρο αστοχία εννοείται η απώλεια λειτουργικότητας ενός εξαρτήματος, η οποία οδηγεί στη δυσλειτουργία του συστήματος στο οποίο ανήκει. Όταν η καταπόνηση υπερβαίνει τα όρια αντοχής του υλικού, χρησιμοποιείται ο όρος καταστροφή.

Καταπονήσεις υψηλότερες από τις αναμενόμενες εμφανίζονται συνήθως λόγω:

1. Λάθος σχεδιασμού
2. Εμφάνιση μεγαλύτερων ή πρόσθετων καταπονήσεων
3. Λανθασμένη κατασκευή εξαρτήματος

Κρίσιμος παράγοντας είναι η τοπική καταπόνηση και η βλάβη του υλικού στο σημείο εκείνο. Η υπερκαταπόνηση φανερώνεται από ίχνη πάνω στο υλικό, όπως η μεταβολή των χαρακτηριστικών της μικροδομής. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση ολικής θραύσης, εμφανίζονται οι αντίστοιχες επιφάνειες. Η κύρια αιτία που οδήγησε στη θραύση γίνεται πιο συγκεκριμένη όταν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τον τρόπο λειτουργίας. Τα σφάλματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω ομάδες:

- Σφάλματα λειτουργίας. Πρόκειται για ελαττώματα κατά την διάρκεια λειτουργίας.
- Σφάλματα παραγωγής. Πρόκειται για προ υπάρχοντα ελαττώματα πριν από την λειτουργία.
- Σφάλματα συντήρησης εξοπλισμού, αλλά και χειρισμού.

Κάθε μελέτη αστοχίας παρέχει πληροφορίες οι οποίες πρέπει να αξιολογηθούν με τον κατάλληλο τρόπο, ώστε να εξαχθούν τα σωστά συμπεράσματα.

Για την αστοχία της μήτρας θα εφαρμοστεί η ακόλουθη διαδικασία:

- i. Παρατήρηση των εξαρτημάτων που αστόχησαν
- ii. Καταγραφή χρήσιμων πληροφοριών και μελέτη του τρόπου λειτουργίας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- iii. Σχεδιασμός του τρόπου εξέτασης των αστοχούντων εξαρτημάτων που θα οδηγήσουν στα αίτια της αστοχίας
- iv. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων
- v. Καθορισμός μέτρων για την αποφυγή παρόμοιου τύπου αστοχίας

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές αναφορές ως πηγές, αλλά και πληροφορίες από πρόσωπα τα οποία είχαν εμπειρία στο συγκεκριμένο κλάδο. Κάθε αστοχία έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα, ωστόσο μπορεί να γίνει σύνδεση με προηγούμενες και να εντοπιστούν ομοιότητες.

Σε πολλά στάδια της ανάλυσης αστοχίας έχουν χρησιμοποιηθεί αμερικανικές προδιαγραφές (AISI-ASTM).

Για την διεξαγωγή του πειραματικού μέρους χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα:

- Μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης
- Στερεοσκόπιο
- Σκληρόμετρο
- Μικροσκληρόμετρο
- Συσκευές λείανσης – στίλβωσης για το μεταλλογραφικό έλεγχο
- Οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής
- Εξοπλισμός εν θερμώ εγκιβωτισμού
- Φορητός φασματογράφος μάζας

Παρελκόμενα:

- Σύρμα $\varnothing 0,25\text{mm}$ από...
- Λειαντικά χαρτιά
- Υφάσματα στίλβωσης
- Υλικά εγκιβωτισμού
- Υλικά στίλβωσης

Όλα τα παραπάνω όργανα είναι είτε διακριβωμένα με ιχνηλασιμότητα προς διεθνή πρότυπα, είτε έμμεσα επαληθευμένα με πρότυπα αναφοράς του εκάστοτε συνεργαζόμενου εργαστηρίου δοκιμών και διακριβώσεων.

Α΄ ΜΕΡΟΣ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

1.1 Καθορισμός και στόχος ανάλυσης αστοχίας

Μία αστοχία μπορεί να εμφανιστεί με ποικίλους τρόπους: σε ένα σύστημα που είναι αναξιόπιστο ή ανασφαλές κατά την λειτουργία του, σε ένα σύστημα που είναι ακατάλληλο για καθορισμένη χρήση, ή σε ένα εξάρτημα η οποία δεν επιτελεί την λειτουργία για την οποία έχει σχεδιαστεί [4]. Μία αστοχία μπορεί να προκληθεί από οποιονδήποτε από ελλιπή σχεδιασμό, ατέλειες υλικού (που οφείλονται σε ελαττωματική κατασκευή ή επεξεργασία), υπερφόρτωση ή άλλες καταχρήσεις (service abuses), ακατάλληλη συντήρηση ακατάλληλη επισκευή, επίδραση του περιβάλλοντος στο υλικό. Συνήθως οι αστοχίες εκδηλώνονται ραγδαία και είναι καταστροφικές. Σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζουν μία σταδιακή υποβάθμιση των ιδιοτήτων του συστήματος παραγωγής ή του προϊόντος που παράγεται.

Η λειτουργία ενός συστήματος/ εξαρτήματος ορίζεται από την ικανότητά του να εξυπηρετήσει την ανάγκη για την οποία έχει προορισθεί. Η διάρκεια ζωής του ορίζεται ως περίοδος κατά την οποία εξυπηρετεί με επιτυχία τη λειτουργία του. Κατά το προβλεπόμενο χρόνο ζωής διασφαλίζεται η ποιότητα του προϊόντος. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό, από κατά τον καταναλωτή, είναι πόσο καλά ένα προϊόν ή σύστημα λειτουργεί και πόσο καιρό θα εξυπηρετεί ένα προσδόκιμο όριο ζωής.

Η ανάλυση αστοχίας είναι μια τυπική διαδικασία που διεξάγεται για να προσδιορίσει τις αιτίες ή τους παράγοντες που οδήγησαν σε μία πρόωρη απώλεια λειτουργικότητας. Πρόκειται για μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία χρησιμοποιεί ποικιλία ειδικοτήτων σχετικά με την παρατήρηση, τον έλεγχο και τις εργαστηριακές τεχνικές που εφαρμόζονται.

Η επίλυση κάθε αστοχίας απαιτεί σαφή κατανόηση των σταδίων στη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος από το σχεδιασμό και την παραγωγή του μέχρι την λειτουργία, την χρήση, την επιθεώρηση και την συντήρηση. Περιλαμβάνει και μια σειρά από εργαλεία και τεχνικές οι οποίες διασφαλίζουν αποτελεσματικό σχεδιασμό και επιτυχή υλοποίηση της έρευνας.

Ο πιο σημαντικός στόχος της ανάλυσης αστοχίας είναι να μειώσει ή να αποτρέψει την εμφάνιση βλαβών των κατασκευαστικών στοιχείων μέσα από την κατανόηση της αιτίας για την αποτυχία. Ο στόχος ή ο σκοπός του έργου της ανάλυσης αστοχίας είναι η πρόληψη επανάληψης της. Η κατανόηση γιατί συνέβη η αστοχία είναι συχνά ένας βασικός στόχος της ανάλυσης. Όταν η αιτία έχει αναγνωρισθεί ως ελαττωματική και δεν έχει γίνει κατάχρηση ή κακή χρήση, η ποιότητα των προϊόντων και η αξιοπιστία βελτιώνονται. Ο αναλυτής θα πρέπει να προσπαθήσει να αποκαλύψει την αιτία της αποτυχίας. Το γεγονός ότι ένα συγκεκριμένο συστατικό φαίνεται να έχει αποτύχει με κάποιο τρόπο, δεν σημαίνει αυτομάτως ότι το ίδιο το συστατικό είναι ελαττωματικό. Το πρόβλημα μπορεί να βρίσκεται στον τρόπο που το συστατικό χρησιμοποιείται, επιθεωρείται ή διατηρείται. Εάν είναι πραγματικά ελαττωματικό, τότε η ανάλυση θα πρέπει να προσδιορίσει εάν το ελάττωμα προέρχεται από το σχεδιασμό, την κατασκευή (κατασκευή και συναρμολόγηση), το υλικό επιλογής, τον τρόπο επεξεργασίας του, ή την απροσδόκητη έκθεση στο περιβάλλον.

Δεν είναι δυνατόν να αποφευχθεί κάθε αστοχία, αλλά πρέπει να προβλέπεται και να ελέγχεται, έτσι ώστε να περιοριστούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι αρνητικές επιπτώσεις.

Κύριος παράγοντας για την σωστή μελέτη της ανάλυσης αστοχίας είναι ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζει την μελέτη ο αναλυτής και η δεκτικότητα του κατά την ανάλυση των στοιχείων, τα οποία οδηγούν στον λόγο της αποτυχίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητο ο αναλυτής να συνεργαστεί με ειδικούς από άλλους κλάδους .

Ακριβώς όπως η ανάλυση αστοχίας είναι μια δοκιμασμένη πειθαρχική μέθοδος για τον εντοπισμό των φυσικών ριζών των αποτυχιών, έτσι και οι αρχές ανάλυσης των γενεσιουργών αιτιών (root-cause analysis, RCA), μπορούν να εφαρμόζονται. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι κατανοητή η πρωταρχική αιτία και θα προτείνονται κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες ώστε να επιτευχθούν υψηλότερα επίπεδα ποιότητας και αξιοπιστίας, με στόχο την ικανοποίηση του πελάτη.

Έχει αποδεχθεί ότι, μέσα από την ανάλυση των αστοχιών και την εφαρμογή των προληπτικών μέτρων, σημαντικές βελτιώσεις έχουν υλοποιηθεί στην ποιότητα των προϊόντων και των συστημάτων. Αυτό απαιτεί όχι μόνο την κατανόηση του ρόλου της ανάλυσης αστοχίας, αλλά επίσης και μια εκτίμηση της διασφάλισης ποιότητας και τις προσδοκίες των χρηστών.

Σε γενικές γραμμές, υψηλή ποιότητα αναφέρεται σε προϊόντα και συστήματα που κατασκευάζονται με τα υψηλότερα πρότυπα, σε απάντηση της αύξησης των προσδοκιών των καταναλωτών και των χρηστών. Οι προσδοκίες αυτές περιλαμβάνουν ιδιότητες όπως:

- Μεγαλύτερη ασφάλεια
- Βελτιωμένη αξιοπιστία
- Υψηλότερη απόδοση
- Μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα
- Ευκολότερη συντήρηση
- Χαμηλότερο κόστος κύκλου ζωής
- Μείωση των επιπτώσεων στο περιβάλλον

Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να αλληλοαναιρούνται. Ωστόσο, οι απαιτήσεις των πελατών και τα νέα επιχειρηματικά συστήματα διαχείρισης έχουν παράσχει ένα μέσο μέτρησης και ποσοτικοποίησης αυτών των χαρακτηριστικών, δημιουργώντας ένα νέο πρότυπο για τις επιχειρήσεις. Με τις αλλαγές των επιχειρήσεων, έχει προκύψει νέα αντίληψη η οποία βασίζεται στην εφαρμογή ενός ή περισσότερων από τα προαναφερθέντα συστήματα βελτίωσης. Ως αποτέλεσμα, τα τελευταία χρόνια , οι χρήστες κατά έχουν βιώσει μια γενική βελτίωση η οποία μεταφράζεται σε μειωμένη βλάβη του προϊόντος και μεγαλύτερη πιθανότητα για πρόληψη αποτυχιών. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι με όλα τα οφέλη που επιτυγχάνονται στο πλαίσιο των συστημάτων διαχείρισης, η πλήρης δυναμικότητα για τη μεγιστοποίηση των χαρακτηριστικών δεν έχει ακόμη επιτευχθεί. Αν και όλα τα διάφορα συστήματα βελτίωσης είναι μοναδικά, έχουν δύο κοινά στοιχεία: είναι συγκεντρωμένα όλα γύρω από τους πελάτες και στηρίζονται στην επίλυση προβλημάτων ως μέσο βελτίωσης.

Εστιασμένοι στον πελάτη οι κατασκευαστές προσπαθούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις του σχεδιασμού, της ανάπτυξης και της παραγωγής των προϊόντων ή των συστημάτων τους. Σε μία ευρεία έννοια, η εφαρμογή, η λειτουργία και η ζωή των υπηρεσιών, αντιπροσωπεύουν τις τεχνικές ιδιότητες ενός προϊόντος. Το μέγεθος και το σχήμα περιλαμβάνονται στην μορφή ή στα φυσικά χαρακτηριστικά των συστατικών ή των προϊόντων, καθώς και τα υλικά κατασκευής και οι μέθοδοι παρασκευής τους. Ο τρόπος με τον οποίο τα μεμονωμένα συστατικά συναρμολογούνται εντός και ενσωματώνονται με το προϊόν ως σύνολο περιγράφει την τακτοποίηση των εξαρτημάτων.

1.2 Προσέγγιση στις έρευνες ανάλυσης αστοχίας

Για να έχει ένα προϊόν την καλύτερη δυνατή απόδοση για την οποία προορίζεται, θα πρέπει να έχει γίνει σωστή μελέτη των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, αλλά και του τρόπου με τον οποίο αυτό θα γίνει, από το αρχικό στάδιο που είναι ο σχεδιασμός του, μέχρι και το τελικό στάδιο που είναι η απόδοσή του. Σε αντίθετη περίπτωση η ανωτέρω διαδικασία σ θα αστοχήσει στην πιο αδύναμη σύνδεσή της. Από το σχεδιασμό μέχρι και την απόδοση μεσολαβούν κάποια στάδια τα οποία είναι αλληλένδετα μεταξύ τους. Ανάλογα με το πόσο διαφορετικά μπορεί να έχουν σχεδιαστεί αυτά τα στάδια, υπάρχουν διαφορές στην απόδοση των προϊόντων, αλλά και του χρόνου που είναι προορισμένα να επιτελέσουν μία συγκεκριμένη λειτουργία.

Ο αναλυτής αστοχίας πρέπει να γνωρίζει τη συμπεριφορά των υλικών και της μικροδομής τους, έτσι ώστε να αναγνωρίζει μέχρι ποιο σημείο είναι κατάλληλα για να επιτελέσουν τη λειτουργία για την οποία προορίζονται. Επιπροσθέτως πρέπει να έχει βασική γνώση των μηχανικών και μηχανολογικών ιδιοτήτων των υλικών.

Στόχος της ανάλυσης αστοχίας είναι η αποφυγή μελλοντικών αστοχιών και ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι ο σωστός σχεδιασμός της έρευνας. Το πρόβλημα της αστοχίας πρέπει να αντιμετωπίζεται σφαιρικά, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν σε αυτό. Δύο κύριοι λόγοι εμφάνισης αστοχίας είναι ελαττωματικό εξάρτημα είναι ελαττωματικό ή κατάχρηση. Δεν είναι οι μοναδικοί και δεν θα πρέπει να περιορίζεται ο αναλυτής μόνο σε αυτούς. Μπορεί να υπάρχουν πολλά είδη ελαττωμάτων, μερικά από αυτά είναι ο ανεπαρκής σχεδιασμός, η λανθασμένη επιλογή υλικού, ή ακατάλληλη επεξεργασία.

1.3 Απαιτήσεις υπόβαθρου του αναλυτή αστοχίας

Συνίσταται η αρχική έρευνα να ξεκινάει έχοντας μία ευρεία προοπτική ανάλυσης και όχι να επικεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο θέμα. Ο αναλυτής που θα μελετήσει την αστοχία, θα πρέπει να μην είναι προκατειλημμένος διότι κινδυνεύει να προβεί σε λανθασμένα συμπεράσματα, τα οποία δεν θα οδηγήσουν στην κατανόηση της αιτίας εμφάνισης της αστοχίας. Ο αναλυτής πρέπει να είναι σε θέση να εξετάζει τη μικροδομή του υλικού και να κρίνει εάν είναι κατάλληλο. Με την συστηματική προσέγγιση στην έρευνα αστοχίας

διασφαλίζεται ότι τα βασικά σημεία της μελέτης δεν είναι ελλιπή. Ο αναλυτής ξεκινάει την έρευνα από το δυσλειτουργικό στοιχείο και εργάζεται προς τα πίσω, μέσα από την ιστορία συλλογής αποδεικτικών στοιχείων σχετικά με το πώς σχεδιάστηκε, αναπτύχθηκε και παράχθηκε. Όταν εντοπιστεί ότι τα συστατικά του συστήματος απέτυχαν, είτε συνδέθηκαν ανεπιτυχώς, το πρώτο στάδιο είναι να συγκεντρώσει όλα τα διαθέσιμα στοιχεία για το εξάρτημα ή το σύστημα που αστόχησε.

Δεδομένου ότι ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί μία έρευνα ανάλυσης αστοχίας μπορεί να είναι πολύ σημαντικός, ο αναλυτής πρέπει να είναι ικανός να αναγνωρίζει εγκαίρως το πρόβλημα [5].

1.4 Διεξαγωγή ανάλυσης αστοχίας

Μία βασική αρχή της ανάλυσης αστοχίας είναι η διατήρηση αποδεικτικών στοιχείων. Ο αναλυτής πρέπει να βεβαιωθεί ότι κάθε αναγκαία πληροφορία από το εξάρτημα ή το σύστημα που αστόχησε, συλλαμβάνεται πριν συμβεί οτιδήποτε το οποίο θα μεταβάλλει την κατάστασή του. Ένας άλλος βασικός παράγοντας είναι ο χρόνος που θα συλλεχθεί, διότι η παραμονή στο περιβάλλον κάποιες φορές επιδρά αρνητικά και μπορεί να αλλοιωθούν κάποια σημαντικά στοιχεία. Η αρχή αυτή μπορεί να συνοψίσει τις ακόλουθες κατευθυντήριες γραμμές:

- Προστασία των αποδεικτικών στοιχείων
- Εκτέλεση δοκιμών πρώτα με μη καταστροφικές μεθόδους και ύστερα με καταστροφικές.

Για να διεξαχθεί μία ανάλυση αστοχίας, θα πρέπει να εντοπιστούν οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτή. Οι συνηθέστεροι λόγοι που συμβαίνουν αστοχίες είναι οι εξής:

- Συνθήκες λειτουργίας (χρήση και κατάχρηση)
- Ακατάλληλη συντήρηση (εκούσια ή ακούσια)
- Ακατάλληλη δοκιμή ή επιθεώρηση
- Λανθασμένη συνδεσμολογία
- Κατασκευαστικά σφάλματα
- Λάθη σχεδιασμού

Η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος περιλαμβάνει τέσσερα βήματα:

- Ποιο είναι το πρόβλημα
- Ποια είναι η αιτία του προβλήματος
- Ποιες είναι οι πιθανές λύσεις
- Ποια είναι η καλύτερη λύση

Ως εκ τούτου ένας καλός ορισμός της έρευνας μπορεί να είναι μία αξιολόγηση που πραγματοποιείται για τον εντοπισμό ή/και για τον καθορισμό των λόγων που προσδιορίζουν με σαφήνεια την αιτία της αστοχίας και συνιστά διορθωτικές κινήσεις.

Συνίστανται εννέα βήματα για την οργάνωση της ορθής διερεύνησης της αστοχίας:

1. Κατανόηση και διαπραγμάτευση των στόχων της έρευνας
2. Σαφής κατανόηση της αποτυχίας
3. Αντικειμενικό και σαφή προσδιορισμό όλων των πιθανών αιτιών που την προκαλούν

4. Να αξιολογηθεί αντικειμενικά η πιθανότητα για κάθε ρίζα της αστοχίας
5. Σύγκλιση στην πιο πιθανή αιτία
6. Να προσδιοριστούν αντικειμενικά και με σαφήνεια όλες οι πιθανές διορθωτικές ενέργειες
7. Αντικειμενική αξιολόγηση κάθε διορθωτικής ενέργειας
8. Επιλογή βέλτιστης διορθωτικής ενέργειας
9. Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των επιλεγμένων διορθωτικών μέτρων

Κατά την έναρξη της έρευνας αστοχίας θα πρέπει να καθιερωθούν τέσσερα στοιχεία:

1. Η προτεραιότητα της έρευνας
2. Οι διαθέσιμοι πόροι
3. Τυχόν περιορισμοί που επιβάλλονται
4. Ο στόχος της έρευνας

Ο τρόπος που διεξάγεται μία ανάλυση αστοχίας περιλαμβάνει τη μελέτη τριών βασικών βημάτων:

1. Πώς εμφανίστηκε η αστοχία
2. Ποια είναι η πιθανότερη αιτία πρόκλησής της
3. Με ποιον τρόπο δεν θα επαναληφθεί ξανά στο μέλλον

Η αστοχία εμφανίζεται στην πιο αδύναμη σύνδεση της αλυσίδας που ενώνει το σχέδιο με την τελική απόδοση του προϊόντος και δημιουργείται από κάποιο λάθος στη σύνδεση αυτή. Για να διαπιστωθεί αυτό πρέπει να εξεταστούν το σχέδιο, η κατασκευή και οι συνθήκες λειτουργίας. Αφού εντοπιστεί η αιτία της αστοχίας, στη συνέχεια πραγματοποιούνται διορθωτικές ενέργειες για να μην επαναληφθεί.

Η έρευνα της ανάλυσης αστοχίας πρέπει να περιλαμβάνει αρχικά τον καθορισμό του προβλήματος, στη συνέχεια την ανάπτυξη τεχνικού υπόβαθρου και τέλος τα πειράματα και τον έλεγχο, ώστε να ερευνηθεί το πρόβλημα ολοκληρωτικά. Ο σαφής προσδιορισμός του προβλήματος είναι πολύ σημαντικό στάδιο, καθώς εξαρτώνται από αυτόν τα άλλα δύο στάδια, δηλαδή τα πειράματα και η ανάπτυξη τεχνικού υπόβαθρου. Όλα τα βήματα πρέπει να επιτευχθούν σε ένα συγκεκριμένο χρόνο, διότι ο χρόνος είναι ένας επιζήμιος παράγοντας.

1.5 Καθορισμός του προβλήματος

Η κατανόηση των παραγόντων που προκάλεσαν σε μία αστοχία οδηγεί στην κατανόηση των απαιτήσεων για την πραγματική βελτίωση. Τα γεγονότα αυτά πρέπει να μετατραπούν σε γνώση και στη συνέχεια στη βελτίωση του προϊόντος ή της διαδικασίας, ώστε να αποφευχθούν παρόμοια περιστατικά. Για να ξεκινήσει μία έρευνα αστοχίας πρέπει πρωτίστως να γίνει μία σαφής δήλωση του προβλήματος. Το πρόβλημα θα τίθεται προς επίλυση και θα καθοριστούν οι απαιτήσεις, αλλά και οι εκάστοτε περιορισμοί βάσει των οποίων θα αξιολογηθούν οι προτεινόμενες λύσεις. Και τα δύο αυτά βήματα είναι απαραίτητα προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες να βρεθεί λύση σε ένα πρόβλημα το οποίο δεν υφίσταται. Μόλις το πρόβλημα οριστεί, πρέπει να καθοριστούν τα κατάλληλα κριτήρια με την μορφή των προδιαγραφών του σχεδιασμού. Ο αναλυτής πρέπει να κινήσει μία σειρά από διαδικασίες όπως:

συλλογή των μερών που αστόχησαν, φωτογραφικό υλικό, αρχεία συλλογής δεδομένων, συλλογή πληροφοριών σχετικά με τις συνθήκες λειτουργίας (πίεση, θερμοκρασία, ταχύτητα, περιβάλλον που εργαζόταν), την θέση που εργαζόταν το εξάρτημα που αστόχησε, συνεντεύξεις με το εμπλεκόμενο προσωπικό και τους αυτόπτες μάρτυρες, εάν είναι η πρώτη φορά που παρουσιάστηκε το πρόβλημα ή αν έχει επαναληφθεί στο παρελθόν παρόμοιο περιστατικό, δεδομένα σχεδιασμού, προδιαγραφές, τεχνικά δεδομένα, υλικό που χρησιμοποιήθηκε, λειτουργία, συντήρηση και επιθεώρηση, λάθη στη διαδικασία που μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένη σύνδεση ή ευθυγράμμιση των διαφόρων τμημάτων. Είναι σημαντικό τα δεδομένα να συλλεχθούν το συντομότερο δυνατό μετά την αστοχία.

1.6 Τεχνικό υπόβαθρο

Η έρευνα για Κάθε ανάλυση αστοχίας έχει μια μοναδική έρευνα. Πολλές φορές το αντιληπτό πρόβλημα οριοθετείται πολύ νωρίς και ολόκληρη η έρευνα επικεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο θέμα ή περιοχή. Μία σωστή μελέτη απαιτεί μία διεπιστημονική προσέγγιση, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα είναι σωστά και μπορούν προτείνονται κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες. Οι περισσότερες αστοχίες περιλαμβάνουν παράγοντες που εξαπλώνονται σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους (όπως η μηχανολογία, η μεταλλουργία, η ηλεκτρολογία κ.λπ.). Μία αστοχία μπορεί να οφείλεται και σε ανθρώπινο παράγοντα. Ένας σωστός αναλυτής θα πρέπει να είναι σε θέση να ενσωματώσει όλους τους πιθανούς παράγοντες και να επιλέξει την πιθανότερη αιτία εμφάνισης αστοχίας.

1.7 Ανάλυση Πειραματικού Προγράμματος

Από την στιγμή που το πρόβλημα είναι επαρκώς ορισμένο, αναπτύσσεται το πειραματικό πρόγραμμα. Η πειραματική διαδικασία θα επικεντρώνεται στον εντοπισμό της αιτίας που οδήγησε στην αστοχία. Η επιλογή των δειγμάτων είναι καθοριστικής σημασίας για την σωστή μελέτη του στοιχείου το οποίο αστόχησε. Δεδομένου ότι μία ανάλυση αστοχίας έχει κάποιο κόστος για να υλοποιηθεί, η κατάλληλη επιλογή των δειγμάτων είναι μείζονος σημασίας, έτσι ώστε ούτε να είναι δαπανηρή η μελέτη, αλλά ούτε και να χάνεται πολύτιμος χρόνος. Από την άλλη πλευρά, ο αριθμός των δειγμάτων δεν πρέπει να είναι ελλιπής διότι μπορεί να χαθούν σημαντικά στοιχεία και να μην είναι κατανοητή η αιτία που οδήγησε στην αστοχία. Επιπροσθέτως, πολλές φορές χρήσιμες πληροφορίες παρέχονται στα κομμάτια τα οποία έχουν αποκολληθεί από το σύστημα ή το εξάρτημα που αστόχησε. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο είναι η μελέτη των τάσεων και των μηχανισμών που οδήγησαν στην θραύση.

1.7.1 Διαδικασία για την ανάλυση αστοχίας

Για να διεξαχθεί σωστά μία ανάλυση αστοχίας πρέπει να τηρηθούν κάποια βήματα στον τρόπο προσέγγισης της εκάστοτε μελέτης. Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών σχετικά με το κομμάτι που αστόχησε, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευαστικών σχεδίων, των προδιαγραφών που συνοδεύουν το προϊόν, το ιστορικό κατασκευής, συντήρησης, λειτουργίας του κ.λπ.

- Προκαταρκτική εξέταση του τμήματος που αστόχησε. Προσδιορισμός των τρόπων της προκαταρκτικής μελέτης: σημειώνονται οι αριθμοί των μερών, οι σειριακοί αριθμοί, ο προμηθευτής ή ο κατασκευαστής, φωτογραφίες των τμημάτων, με ιδιαίτερη προσοχή στις ανωμαλίες (κατάγματα, γρατζουνιές, ασυνήθιστα σημάδια, κ.λπ.). Η προκαταρκτική εξέταση πιθανόν να περιλαμβάνει την επιλογή δειγμάτων, την σημείωση της τοποθεσίας των τεμαχίων που διαχωρίστηκαν από το στοιχείο που αστόχησε, ερωτήσεις με το εμπλεκόμενο προσωπικό και τους αυτόπτες μάρτυρες.

- Εκτέλεση μη καταστροφικών δοκιμών, όπως: έλεγχος για ρωγμές και εσωτερικά ελαττώματα (ραγίσματα), ακτινογραφία, μαγνητικά σωματίδια, δεισδυτικά υγρά φθορισμού, μαγνητικά σωματίδια, υπέρηχος, δινορρεύματα [6].

Η ανωτέρω διαδικασία μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάζονται. Γίνεται διαφορετική προσέγγιση της έρευνας όταν το εξάρτημα έχει αστοχήσει λόγω θραύσης και διαφορετική προσέγγιση όταν έχει αστοχήσει λόγω φθοράς ή διάβρωσης. Ο αναλυτής θα πρέπει να γνωρίζει την πιθανή αιτία της αστοχίας και στη συνέχεια ανάλογα με την περίπτωση, να προβεί στον κατάλληλο τρόπο μελέτης.

Όταν η αστοχία έχει προέλθει λόγω θραύσης του εξαρτήματος, συνήθως ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Επιλογή, καθαρισμός και συντήρηση των στοιχείων που αστόχησαν και διατήρηση των δειγμάτων που αποκολλήθηκαν από το στοιχείο, εάν αυτό κρίνεται απαραίτητο ή όποιας άλλης όποιας επιφάνειας που παρουσιάζει ενδιαφέρον.

- Προετοιμασία δειγμάτων με την κατάλληλη ταυτοποίηση για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων, των χημικών (ταυτοποίηση υλικού), μακροσκοπική ανάλυση δομής, σκληρότητα, αγωγιμότητα, κ.λπ. Εξασφάλιση κατάλληλης διεξαγωγής των δοκιμών αυτών των δειγμάτων καθώς και εκείνων που πιθανόν να συλλεχθούν κατά την διάρκεια της μελέτης. Σύγκριση πραγματικών τιμών με τις τυπικές τιμές που απαιτούνται.

- Μικροσκοπική εξέταση δομής και ανάλυση των επιφανειών θραύσης.

- Προετοιμασία δειγμάτων για μεταλλογραφική εξέταση και επανεξέταση μικροδομής. Σύγκριση, αν υπάρχει ομοιότητα αποτελεσμάτων.

- Ανάλυση τάσεων και προσδιορισμός των πραγματικών μηχανισμών που οδήγησαν στην αστοχία.

- Θραυστομηχανική.

- Καθορισμός του τρόπου θραύσης.

- Μηχανικές δοκιμές.

- Χημικές αναλύσεις.
- Εκτέλεση δοκιμών για πανομοιότυπα δείγματα και σε προσομοιωμένες συνθήκες λειτουργίας.
- Ανάλυση όλων των αποδεικτικών στοιχείων, διατύπωση συμπερασμάτων και προετοιμασία της έκθεσης με συστάσεις.

Τα ανωτέρω βήματα δεν είναι απαραίτητο να τηρηθούν με την σειρά που παρατίθενται. Ίσως να υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις. Παρόλα αυτά για μία ολοκληρωμένη μελέτη πραγματοποιούνται τα ανωτέρω βήματα. Είναι επίσης σημαντικό να μην χαθούν οι πληροφορίες που φέρουν τα διάφορα στοιχεία που συμμετέχουν στην ανάλυση αστοχίας, διότι είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για μία εκτενέστερη μελέτη.

1.7.1.1 Συλλογή Ιστορικών Δεδομένων και Δείγματα

Στόχος του κάθε αναλυτή είναι να καθορίσει τον τρόπο της μελέτης και την αιτία που την προκάλεσε, καθώς και να διατηρήσει αποδεικτικά στοιχεία. Η έρευνα πρέπει να προσεγγίζεται με τα κατάλληλα βήματα.

Συλλογή ιστορικών δεδομένων: Η έρευνα θα περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία σχετικά με την αποτυχία, συλλέγοντας όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες όσον αφορά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την συντήρηση του δυσλειτουργικού στοιχείου. Οι πληροφορίες που σχετίζονται με την δομή του υλικού είναι ιδιαίτερα χρήσιμες, αλλά και η αλληλουχία των γεγονότων τα οποία προηγήθηκαν και οδήγησαν στην αστοχία. Επίσης πρέπει να γίνει συλλογή στοιχείων σχετικά με τον σχεδιασμό και την κατασκευή του εξαρτήματος που αστόχησε, όπως κατεργασία, συγκόλληση, θερμική επεξεργασία κλπ.

Συλλογή δεδομένων και δείγματα: Πριν ξεκινήσει η έρευνα, είναι επιθυμητό ο αναλυτής να επισκέπτεται τον τόπο και να πραγματοποιήσει επιτόπια έρευνα, ώστε να αναλύσει ορισμένα στοιχεία. Στην περίπτωση που αυτό είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, τα δεδομένα είναι δυνατόν να συγκεντρώνονται από τον μηχανικό που εργάζεται στον χώρο που πραγματοποιήθηκε η αστοχία ή από άλλους υπαλλήλους, υπό την καθοδήγηση όμως του αναλυτή αστοχίας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η γραπτή έκθεση της αστοχίας, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι οποιαδήποτε πληροφορία χρειαστεί, θα είναι καταγεγραμμένη εκεί. Συνιστάται να γίνει εξέταση σε ένα εργαστήριο, παρόλα αυτά, αν γίνει εξέταση και στον χώρο της αστοχίας, χρειάζεται φορητός εξοπλισμός. Μικρά δείγματα είναι δυνατόν να αποκοπούν από ένα τμήμα για την προετοιμασία, την εξέταση και την φωτογράφιση ή αμέσως μετά την επιστροφή στο εργαστήριο. Είναι απαραίτητη η φωτογράφιση των εξαρτημάτων που αστόχησαν και των στοιχείων που συνδέονται με το εξάρτημα. Το φωτογραφικό υλικό θα πρέπει να συγκεντρώνεται από τον αναλυτή ή ίσως και από έναν επαγγελματία φωτογράφο (στην περίπτωση που η αστοχία είναι σε μεγάλη κλίμακα). Είναι συχνά επιθυμητό να γίνουν αντίγραφα ακετονικής ταινίας στην περιοχή του κατάγματος, που θα επικαλυφθούν με χρυσό, αφότου τα δείγματα φτάσουν στο εργαστήριο. Άλλα στοιχεία τα οποία έχουν αποκολληθεί από την επιφάνεια της θραύσης ενδέχεται να ερευνηθούν. Συχνά επιβάλλεται να λαμβάνονται στο τόπο της αστοχίας με αντίγραφα των επιφανειών θραύσης. Σε αυτήν την περίπτωση θα εφαρμόζεται η κατάλληλη μέθοδο. Τα αντίγραφα συνήθως

υφίστανται επικάλυψη και εξετάζονται με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Ξένα σωματίδια τα οποία απομακρύνονται από την επιφάνεια θραύσης μπορούν επίσης να αναλυθούν και η προστιθέμενη περιοχή μπορεί να αποδεικνύεται πολύ σημαντική σε μια έρευνα.

Ιστορικό συντήρησης: Η διαθεσιμότητα του ιστορικού συντήρησης εξαρτάται από το πόσο λεπτομερής ήταν η τήρηση αρχείων πριν την αστοχία. Μία πλήρης καταγραφή του ιστορικού συντήρησης διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό την μελέτη του αναλυτή. Στην διάρκεια της συλλογής του ιστορικού συντήρησης, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις συνθήκες κάτω από τις οποίες εργαζόταν το στοιχείο (όπως τυχαία υπερφόρτωση, κυκλικά φορτία, μεταβολές της θερμοκρασίας, κλίσεις της θερμοκρασίας, λειτουργία σε διαβρωτικό περιβάλλον κ.λπ.). Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχουν πλήρη αρχεία διαθέσιμα και ο αναλυτής αναγκάζεται να εργαστεί με όποιες πληροφορίες μπορεί να αποσπάσει ο ίδιος. Όταν τα δεδομένα είναι ελάχιστα, πρέπει ο αναλυτής να υποθέσει και να καταγράψει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες. Σημαντικό ρόλο παίζει η ικανότητα, αλλά και η κρίση του αναλυτή, διότι μία παραπλανητική πληροφορία είναι περισσότερο επιβλαβής από την έλλειψη πληροφοριών.

Φωτογραφικά αρχεία: Φωτογραφίες από το προβληματικό στοιχείο ή από την δομή του είναι σημαντική διαδικασία για μία λεπτομερή ανάλυση. Μία λεπτομέρεια που αρχικά δείχνει άνευ σημασίας, μπορεί στην πορεία να παρουσιαστεί ότι είχε σημαντικές συνέπειες. Ωστόσο είναι απαραίτητη και μία φωτογραφική καταγραφή του χώρου που απέτυχε το στοιχείο. Η ποιότητα των φωτογραφιών πρέπει να είναι επαγγελματικού επιπέδου, όμως αυτό συνήθως είναι ανέφικτο. Είναι σημαντικό ο φωτισμός να είναι ο κατάλληλος, αλλά και οι συνθήκες λήψης των φωτογραφιών να είναι οι σωστές, έτσι ώστε να υπάρχει κάποια ένδειξη του μεγέθους (όπως κάποια κλίμακα ή κάποιο αντικείμενο του οποίου το μέγεθος είναι γνωστό σε ένα ευρύ κοινό, π.χ. κάποιο κέρμα, κ.λπ.).

Επιλογή δειγμάτων: Τα δείγματα πρέπει να λαμβάνονται προσεκτικά. Και σε αυτή την περίπτωση είναι ευθύνη του αναλυτή να επιλέξει τα κατάλληλα δείγματα τα οποία θα είναι αντιπροσωπευτικά για την μελέτη. Είναι σκόπιμο να γίνει έρευνα και για πρόσθετα αποδεικτικά στοιχεία πέρα από αυτά τα οποία είναι προφανή. Επίσης συνίσταται λήψη δειγμάτων από άλλα μέρη του εξοπλισμού που απέτυχε, καθώς μπορεί να εμφανιστεί δευτερεύουσα βλάβη. Είναι ακόμα απαραίτητο να εξετασθεί εάν η αποτυχία ήταν ένα μεμονωμένο γεγονός, ή αν έχουν συμβεί άλλα παρόμοια, είτε στο προς εξέταση στοιχείο ή σε κάποιο άλλο παρόμοιο. Σε μία ανάλυση όπου εμπλέκονται πολλά στοιχεία και δομές, είναι απαραίτητο να καταγράφεται η θέση του εκάστοτε τεμαχίου πριν προηγηθεί οποιαδήποτε ενέργεια μετακίνησης. Η καταγραφή αυτή απαιτεί συνήθως εκτεταμένη φωτογράφιση ή δημιουργία σχεδίου που παρουσιάζονται οι κατάλληλες θέσεις, αλλά και διάφορες μετρήσεις. Στη συνέχεια ίσως χρειαστεί να γίνει μία καταγραφή αν όλα τα τεμάχια ή θραύσματα ήταν στην παρούσα θέση μετά την αστοχία.

1.7.1.2 Προκαταρκτική Εξέταση

Τα αποτυχημένα μέρη θα υποβάλλονται σε πλήρη μακροσκοπική εξέταση πριν επέλθει οποιαδήποτε διαδικασία καθαρισμού. Τις περισσότερες φορές το μέρος που εντοπίστηκαν τα στοιχεία που αστόχησαν, ή θραύσματα αυτών, παρέχουν χρήσιμα στοιχεία για τον καθορισμό της αιτίας της αποτυχίας ή τον προσδιορισμό μιας αλληλουχίας γεγονότων που προηγήθηκαν και οδήγησαν πιθανόν σε αυτήν. Είναι σκόπιμο να πραγματοποιείται φωτογραφική απεικόνιση των στοιχείων αυτών.

Οπτική επιθεώρηση: Η προκαταρκτική εξέταση πρέπει να ξεκινά με οπτική επιθεώρηση. Τα μάτια έχουν εξαιρετικό βάθος εστίασης και μεγάλη δυνατότητα να εξετάζουν ταχέως μεγάλες περιοχές και να ανιχνεύουν μεταβολή του χρώματος και της υφής. Κάποια από αυτά τα προτερήματα εξαφανίζονται όταν πραγματοποιείται εξέταση με οπτική ή ηλεκτρονική οπτική συσκευή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιφάνεια των καταγμάτων και στη διαδρομή των ρωγμών. Η σημασία των ενδείξεων για τυχόν μη κανονικές συνθήκες ή κατάχρηση θα πρέπει να εντοπίζεται και να καταγράφεται για να συμβάλει στη γενική αξιολόγηση του βασικού σχεδιασμού και κατασκευής του στοιχείου. Κάθε χαρακτηριστικό ιδιαίτερης σημασίας, αλλά και οι διαστάσεις του δοκιμίου, θα πρέπει να σημειώνονται, είτε γραπτώς, είτε με σκίτσα ή φωτογραφίες. Η εξέταση πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πιο προσεκτικά, γιατί μπορεί να χαθούν σημαντικές ενδείξεις που προκάλεσαν την βλάβη. Η επιθεώρηση των τοπογραφικών χαρακτηριστικών του δυσλειτουργικού στοιχείου θα πρέπει να ξεκινάει με γυμνό μάτι και να προβεί σε όλο και πιο μεγάλη μεγέθυνση.

Εξέταση και Φωτογραφία του μέρους ή δείγματος που αστόχησε: Στη συνέχεια, η διαδικασία που θα ακολουθήσει είναι η προκαταρκτική εξέταση και η γενική φωτογράφιση ολόκληρου του μέρους και κατεστραμμένων ή περιοχών που αστόχησαν. Όπου εμπλέκονται κατάγματα, ολόκληρο ή σπασμένο μέρος, καθώς και τα σπασμένα κομμάτια, θα πρέπει να εξετάζονται και να φωτογραφηθούν για να καταγραφεί το μέγεθος και η κατάστασή τους και να δείχνουν πως το κάταγμα έχει σχέση με τα συστατικά. Αυτό θα πρέπει να ακολουθείται από προσεκτική εξέταση του κατάγματος. Η εξέταση πρέπει να ξεκινήσει με τον άμεσο φωτισμό και να συνεχίσει σε διάφορες γωνίες λοξού φωτισμού που να οριοθετούν και να τονίζουν τα χαρακτηριστικά του κατάγματος. Αυτό πρέπει επίσης να συμβάλει στον προσδιορισμό περιοχών του κατάγματος που είναι ιδιαίτερης σημασίας και η μεγέθυνση να είναι η κατάλληλη ώστε να αναδείξει μικρές λεπτομέρειες.

1.7.1.3 Μη καταστροφικές δοκιμές

Οι μη καταστροφικές δοκιμές χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση επιφανειακών και εσωτερικών ρωγμών ή ασυνεχειών. Ένα φωτογραφικό αρχείο με τα αποτελέσματα των μη καταστροφικών δοκιμών είναι απαραίτητο κομμάτι στο αρχείο της έρευνας.

Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια: Η επιθεώρηση με μαγνητικά σωματίδια χρησιμοποιεί μαγνητικά πεδία για να αποκαλύψει επιφανειακές, αλλά και εσωτερικές ασυνέχειες σε σιδηρομαγνητικά υλικά. Όταν το υλικό που πρόκειται

να ελεγχθεί είναι μαγνητισμένο, ασυνέχειες που υπάρχουν εγκάρσια προς την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, θα δημιουργήσουν ένα πεδίο διαρροής που θα σχηματιστεί κάτω και πάνω από την επιφάνεια του. Αυτή η διαρροή στο πεδίο (και ως εκ τούτου η ασυνέχεια) ανιχνεύεται μέσω λεπτών σιδηρομαγνητικών σωματιδίων που τοποθετούνται πάνω στην επιφάνεια, μερικά από τα οποία συλλέγονται και συγκρατούνται από το πεδίο διαρροής. Η μαγνητική συλλογή των σωματιδίων, διαγράφει ένα περίγραμμα της ασυνέχειας και κάνει ορατό το μέγεθος, το σχήμα και η τοποθεσία της. Συνήθως ένα φθορίζον υλικό συνδυάζεται με τα σωματίδια, έτσι ώστε να μπορούν να ανιχνευθούν οπτικά οι ασυνέχειες με την χρήση υπεριώδους φωτός. Αυτή η μέθοδος αποκαλύπτει επιφανειακές ρωγμές που δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι. Πλεονεκτήματα της μεθόδου: Μπορεί να ανιχνεύσει τόσο τα επιφανειακά ελαττώματα, όσο και τα ελαττώματα που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια, αλλά πολύ κοντά σε αυτή, μπορεί να επιθεωρήσει εύκολα μέρη με ακανόνιστο σχήμα και μεγάλου μεγέθους, είναι μία γρήγορη μέθοδος επιθεώρησης και οι ενδείξεις είναι άμεσα ορατές στην επιφάνεια του δείγματος. Το κόστος της θεωρείται αμελητέο σε σύγκριση με άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου και τέλος, δεν παρεμποδίζεται η ανίχνευση ρωγμών, ακόμα και αν είναι επικαλυμμένες με ξένο στοιχείο.

Μειονεκτήματα της μεθόδου: Δεν μπορεί να επιθεωρήσει μη σιδηρούχα υλικά ή τους περισσότερους ανοξειδωτους χάλυβες, είναι περιορισμένες οι ικανότητες ανίχνευσης ασυνέχειας κάτω από την επιφάνεια (το μέγιστο βάθος είναι περίπου 15,24 mm κάτω από ιδανικές συνθήκες), είναι σημαντικό να γίνει ευθυγράμμιση μεταξύ της μαγνητικής ροής και της ασυνέχειας του στοιχείου. Κάποιες φορές πρέπει να γίνεται καθαρισμός και μετά απομαγνήτιση της επιφάνειας. [7]

Έλεγχος με δεισδυτικά υγρά: Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ελαττωμάτων στην επιφάνεια των υλικών. Κατά κύριο λόγο εφαρμόζεται σε μη μαγνητικά υλικά, στα οποία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί επιθεώρηση μαγνητικών σωματιδίων. Η τεχνική περιλαμβάνει την εξάπλωση ενός δεισδυτικού υγρού επί του δείγματος. Τα δεισδυτικά υγρά μπορούν να εισέλθουν σε μικρές ρωγμές και ελαττώματα (μεγέθους 1μm) στην επιφάνεια του στοιχείου με το τριχοειδές φαινόμενο. Η περίσσεια υγρού καθαρίζεται από την επιφάνεια και ένα αντιδραστήριο που εφαρμόζεται και προκαλεί την συλλογή του υγρού από τις ρωγμές ή τις ατέλειες που είναι ανοικτές προς την επιφάνεια. Το υγρό είναι συνήθως έντονου χρώματος ή περιέχει φθορίζοντα σωματίδια (που κάτω από υπεριώδες φως, κάνουν διακριτές τις ασυνέχειες του υλικού).

Πλεονεκτήματα της μεθόδου: Μπορεί να εφαρμοστεί σε μη μαγνητικά υλικά, χαμηλό κόστος, η φορητότητα της μεθόδου και η εύκολη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Περιορισμοί της μεθόδου: Οι ασυνέχειες πρέπει να οδηγούν στην επιφάνεια, τα κομμάτια ελέγχου πρέπει να καθαρίζονται πριν και μετά την δοκιμή (διότι η δεισδυση των υγρών μπορεί να διαβρώσει το μέταλλο), διάφορα στρώματα στην επιφάνεια μπορεί να αποτρέψουν την ανίχνευση των συνεχιών, η διαδικασία δεν είναι γενικά κατάλληλη για την επιθεώρηση χαμηλής πυκνότητας μετάλλων, μετάλλων κονιομεταλλουργίας ή σε άλλα πορώδη υλικά.

Έλεγχος με υπερήχους: Η μέθοδος ελέγχου με υπερήχους εξαρτάται από τα ηχητικά κύματα πολύ υψηλών συχνοτήτων που μεταδίδονται μέσω του

μετάλλου. Όταν εντοπιστεί κάποια ρωγμή ή ασυνέχεια, ένα κομμάτι του κύματος ανακλάται. Από την ενέργεια που ανακλάται είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η θέση των σφαλμάτων, το πάχος του υλικού ή το βάθος της αστοχίας. Ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας μπορούν να ανιχνεύσουν μικρές ατέλειες, όμως απορροφώνται εύκολα (ιδιαίτερα όταν η δομή του υλικού είναι χονδρόκοκη).

Πλεονεκτήματα της μεθόδου: Μεγάλη ευαισθησία η οποία εντοπίζει μικρές ατέλειες, μπορούν να εξεταστούν υλικά με μεγάλο πάχος, ακριβής προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος και του μεγέθους του.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου: Η χειροκίνητη λειτουργία απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή από έμπειρους τεχνικούς, εκτεταμένες τεχνικές γνώσεις απαιτούνται για την ανάπτυξη των διαδικασιών ελέγχου, μέρη τα οποία έχουν ακανόνιστο σχήμα, είναι μικρά ή λεπτά, δεν είναι ομοιογενής ή είναι τραχιάς επιφάνειας, είναι δύσκολο να επιθεωρηθούν, ασυνέχειες που βρίσκονται σε ένα μικρό βάθος, κάτω από την επιφάνεια μπορεί να μην ανιχνεύονται, απαιτούνται πρότυπα αναφοράς, τόσο για την βαθμονόμηση, όσο και για τον χαρακτηρισμό των ατελειών.

Ραδιογραφία: Η μέθοδος χρησιμοποιεί ακτίνες Χ ή Γ, οι οποίες κατευθύνονται μέσω του δείγματος σε ένα φωτογραφικό φιλμ. Αφού έχουν αποτυπωθεί σε ταινία, μπορούν να εξεταστούν μπροστά από μία πηγή φωτός. Η ένταση του φωτός που διέρχεται μέσω της ταινίας, θα είναι ανάλογη με την πυκνότητα του δείγματος και το μήκος της διαδρομής που ακολουθεί η ακτινοβολία. Έτσι φωτεινότερες περιοχές στην πλάκα αντιστοιχούν στις πυκνότερες περιοχές του δείγματος, ενώ σκοτεινότερες περιοχές δηλώνουν ρωγμή ή ελάττωμα του στοιχείου προς την κατεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης.

Τα πλεονεκτήματα της ραδιογραφίας: η ικανότητα να ανιχνεύσει εσωτερικές ατέλειες και να αποτυπωθούν στο φωτογραφικό αρχείο.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου: Κάποιες ατέλειες ανιχνεύονται δύσκολα. Ελαττώματα όπως ρωγμές παρουσιάζουν προβλήματα, εκτός αν είναι παράλληλα προς τη δέσμη της ακτινοβολίας. Λεπτές ασυνέχειες, όπως εγκλείσματα σε σφυρήλατο υλικό, μικροπόροι και μικρορωγμές εκτός αν είναι επαρκώς διαχωρισμένες για να δώσουν ένα ανιχνεύσιμο αποτέλεσμα. Ακόμα όμως και ρωγμές σε μεγάλα εξαρτήματα, είναι δύσκολο να ανιχνευθούν αν δεν είναι σωστά προσανατολισμένες. Ρωγμές σε ελάσματα δεν είναι συνήθως ανιχνεύσιμες με ραδιογραφία, λόγω του δυσμενούς προσανατολισμού τους, που είναι συνήθως παράλληλος προς την επιφάνεια.

Δινορεύματα: Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε υλικό που άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Εάν από ένα πηνίο παράγεται εναλλασσόμενο ρεύμα και αυτό τοποθετηθεί γύρω από, ή κοντά στην επιφάνεια του προς εξέταση στοιχείου, αυτό θα δημιουργήσει δινορεύματα εντός του υλικού με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Τα δινορεύματα επηρεάζουν την αντίσταση του πηνίου διέγερσης ή οποιοδήποτε άλλου πηνίου βρίσκεται σε κοντινή απόσταση. Ρωγμές ή ατέλειες του στοιχείου θα προκαλέσουν παραμορφώσεις στα δινορεύματα, τα οποία εν συνεχεία θα προκαλέσουν παραμόρφωση στην αντίσταση του πηνίου. Ατέλειες ή ρωγμές θα εμφανίζονται ως κάποια παραμόρφωση στη διακύμανση του μετρητή.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου: Τόσο επιφανειακά, όσο και υπόγεια ελαττώματα είναι ανιχνεύσιμα, δεν απαιτούνται ειδικές δεξιότητες για τον

χειρισμό τους, η διαδικασία είναι προσαρμόσιμη σε συνεχή παρακολούθηση, η διαδικασία μπορεί να αυτοματοποιηθεί σημαντικά και να χρησιμοποιηθεί για υψηλές ταχύτητες παραγωγής, δεν απαιτείται επαφή παραγωγής.

Οι περιορισμοί της μεθόδου: Το βάθος διείσδυσης είναι μικρό, τα στοιχεία που υπόκεινται σε ανάλυση πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγίμα, περισσότερες από μία μεταβλητές υπεισέρχονται στον επηρεασμό των ενδείξεων, είναι απαραίτητα πρότυπα (σημεία) αναφοράς.

Έλεγχος ακουστικής εκπομπής: Ανιχνεύει και αναλύει τα υψηλής συχνότητας κρουστικά κύματα που δημιουργούνται από μία ταχύτερη εκτόνωση εσωτερικής ενέργειας που προκαλείται μέσα στο υλικό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάπτυξης ρωγμών, πλαστικής παραμόρφωσης και μετασχηματισμού φάσεων. Η σωστή ανάλυση αυτών των σημάτων μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη θέση και τη διαρθρωτική σημασία των ασυνεχειών που έχουν εντοπιστεί. Η χρήση είναι εργαλείο μελέτης για τη διερεύνηση των μηχανισμών του κατάγματος και της συμπεριφοράς των υλικών. Αυτό το είδος των δεδομένων μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες σε μία ανάλυση αστοχίας, ή οι τεχνικές που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της επίδρασης των τάσεων. Οι πηγές της ακουστικής εκπομπής που παράγουν κρουστικά κύματα στο υλικό περιλαμβάνουν τοπικές δυναμικές κινήσεις, όπως η έναρξη και η διάδοση των διαταραχών, διδυμίες, κατακρήμνιση, ξαφνικός επαναπροσδιορισμός των ορίων των κόκκων και από φάσεις μετασχηματισμού.

1.7.1.4 Επιλογή, διατήρηση ή/και καθαρισμό των κατάλληλων δειγμάτων

Η σωστή επιλογή, η συντήρηση και ο καθαρισμός των επιφανειών θραύσης έχει τεράστια σημασία για την πρόληψη καταστροφής ή απόκρυψης σημαντικών στοιχείων. Οι επιφάνειες αυτές μπορεί να υποστούν είτε μηχανική, είτε χημική φθορά. Μηχανικές βλάβες μπορεί να προκληθούν με ποικίλους τρόπους (όπως το χτύπημα της επιφάνειας θραύσης από άλλα αντικείμενα) κατά τη διάρκεια πραγματικής θραύσης, κατά τη λειτουργία ή κατά την αφαίρεση ή μεταφορά του αστοχούντος στοιχείου για ανάλυση. Συνίσταται η προστασία της επιφάνειας του κατάγματος κατά την μεταφορά της, από ένα ύφασμα ή ένα βαμβάκι, αλλά αυτό μπορεί να αφαιρέσει κάποιο κομμάτι, το οποίο δεν ήταν προσκολλημένο πάνω στο υλικό και το οποίο θα ήταν πιθανό να περιέχει την αρχική ένδειξη για την αιτία του κατάγματος. Θα αποφεύγεται το άγγιγμα ή το τρίψιμο με τα χέρια της επιφάνειας θραύσης. Επίσης δεν πρέπει να γίνει καμία προσπάθεια ένωσης των δύο τμημάτων που έσπασαν, φέρνοντάς τα σε επαφή (για να διαπιστωθεί αν ταιριάζουν μεταξύ τους) διότι σχεδόν πάντα προκαλείται ζημιά στην επιφάνεια θραύσης. Θα πρέπει επίσης να εξεταστεί η αναστολή παρουσίας διάβρωσης στα δείγματα.

Η χημική διάβρωση σε ένα δείγμα θραύσης μπορεί να προληφθεί με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, επειδή η ταυτοποίηση των ξένων υλικών που είναι παρόντα σε μία επιφάνεια θραύσης, μπορεί να είναι σημαντική πληροφορία στο συνολικό προσδιορισμό της αιτίας του κατάγματος, πολλά εργαστήρια προτιμούν να μην χρησιμοποιούν προληπτικές επιστρώσεις σε ένα δείγμα θραύσης. Όταν είναι δυνατόν, είναι καλύτερα να στεγνώσει το δείγμα, κατά

προτίμηση χρησιμοποιώντας έναν πίδακα ξηρού, συμπιεσμένου αέρα, ο οποίος θα απομακρύνει ξένα υλικά από την επιφάνεια και στη συνέχεια να τοποθετηθεί σε ένα ξηραντήριο ή να αποθηκευτεί με ένα κατάλληλο ξηραντικό.

Καθαρισμός επιφανειών θραύσης πρέπει να αποφεύγεται γενικά, εκτός αν προορίζεται για εξέταση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο ή πρέπει να αφαιρεθούν συντρίμμια ή ακαθαρσίες. Ο καθαρισμός πρέπει να ξεκινήσει χρησιμοποιώντας τη λιγότερο επιθετική διαδικασία και μόνο εάν κρίνεται απαραίτητο προβαίνοντας σε πιο επιθετικές διαδικασίες. Το πλύσιμο της επιφάνειας με νερό, θα πρέπει να αποφεύγεται. Τα δείγματα μολυσμένα με θαλασσινό νερό ή πυροσβεστικά υγρά απαιτούν ενδελεχή πλύσιμο (συνήθως με νερό), και μία έκλυση με ακετόνη, ή αλκοόλη, πριν από την αποθήκευση σε έναν ξηραντήριο ή την επικάλυψη με ένα ξηραντικό. Άλλες αποδεκτές διαδικασίες καθαρισμού περιλαμβάνουν τη χρήση ρίψης ξηρού αέρα ή με απαλή τρίχα, κατεργασία με ανόργανους διαλύτες, επεξεργασία με ήπια οξέα ή αλκαλικά διαλύματα ήπια, ανάλογα με το μέταλλο. Ο καθαρισμός με αντίγραφο οξικού άλατος είναι από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους, ιδιαίτερα όταν η επιφάνεια του κατάγματος έχει επηρεαστεί από τη διάβρωση.

Λόγω του ότι τα εργαλεία εξέτασης, συμπεριλαμβανομένων ελεγκτών σκληρότητας και μικροδομής περιορίζουν το μέγεθος του την συγκεκριμένη εξέταση. Αυτή είναι μία καταστρεπτική διαδικασία η οποία πιθανόν να αλλοιώσει κάποιες αποδείξεις. Πριν την κοπή ή τον τεμαχισμό, η περιοχή που έχει υποστεί το κάταγμα, θα πρέπει να φυλάσσεται επιμελώς. Όλα τα δείγματα πρέπει να κοπούν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι επιφάνειες της θραύσης και οι περιοχές που γειτνιάζουν με αυτές να μην αλλοιωθούν ή καταστραφούν. Αυτό προϋποθέτει τη διατήρηση της επιφάνειας στεγνή, όπου αυτό είναι δυνατό. Για μεγάλα μέρη, η κοινή μέθοδος αφαίρεσης δειγμάτων είναι η κοπή με φλόγα. Ο τεμαχισμός πρέπει να γίνεται σε επαρκή απόσταση από το σημείο του κατάγματος, έτσι ώστε να μην υποστεί αλλαγή η μικροδομή του μετάλλου, που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια θραύσης και για να αποφευχθεί η εναπόθεση τηγμένου μετάλλου στην επιφάνεια του κατάγματος. Η θερμότητα μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες του μετάλλου και τις μικροδομές, κατά την κοπή. Η ξηρά κοπή συνίσταται, διότι τα ψυκτικά που χρησιμοποιούνται για λίπανση, μπορεί να διαβρώσουν την περιοχή του κατάγματος ή να απομακρύνουν ξένο υλικό από αυτό. Ως εκ τούτου, η μέθοδος αυτή δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται κοντά επιφάνειες οι οποίες θα εξεταστούν στο μικροσκόπιο.

Όταν το κυρίως κάταγμα έχει υποστεί φθορά ή διάβρωση σε τόσο που το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας σχετικά με την αιτία της αποτυχίας, έχει διαγραφεί, είναι σκόπιμο να ανοιχτεί οποιαδήποτε δευτερεύουσα ρωγμή για να εκτεθεί η επιφάνεια θραύσης προς εξέταση και μελέτη. Είναι πιθανόν αυτές οι ρωγμές να παρέχουν περισσότερες πληροφορίες από την θραύση. Κατά το άνοιγμα ρωγμών, θα δίνεται προσοχή για την αποφυγή φθορών (κυρίως μηχανικών) στην επιφάνεια του κατάγματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εάν το άνοιγμα γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε οι δύο επιφάνειες του κατάγματος, να κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις και κάθετα προς το επίπεδο του κατάγματος. Γενικά θα δίδεται μεγάλη προσοχή κατά την κοπή, κοντά στην επιφάνεια της θραύσης, έτσι ώστε να μην φτάσει το κοπτικό εργαλείο σε αυτήν. Συνίσταται η μέτρηση του ορατού μήκους των ρωγμών, αλλά και του μήκους διαχωρισμού τους πριν από την έναρξη οποιαδήποτε διαδικασίας. Από τα μήκη

των ρωγμών, είναι πιθανόν να καταγραφούν χρήσιμες πληροφορίες για την ανάλυση θραύσεων από κόπωση ή για την μελέτη της θραυστομηχανικής.

1.7.1.5 Μακροσκοπική εξέταση και ανάλυση των επιφανειών θραύσης

Μία προσεκτική ανάλυση μακροδομής του υλικού που αστόχησε, προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες. Η μακροσκοπική εξέταση σε μικρές μεγεθύνσεις μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το πώς προκλήθηκε το κάταγμα και την θέση έναρξης.

Ένα πολύ σημαντικό στάδιο της ανάλυσης αστοχίας είναι η μακροσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης. Πραγματοποιείται σε μεγεθύνσεις από MX1 μέχρι MX100 και μπορεί να επιτευχθεί με το μάτι, με έναν φακό ή με ένα χαμηλής ισχύος οπτικό μικροσκόπιο. Για μία μακροσκοπική φωτογραφία μέχρι X20 μεγέθυνση, χρειάζεται υψηλής ποιότητας φωτογραφική μηχανή. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος μεγεθυντικός φακός για να επιτευχθεί η μεγέθυνση συγκεκριμένης περιοχής στη φωτογραφία για να αναδείξει μία ρωγμή ή κάποια άλλη σημαντική λεπτομέρεια. Για υψηλότερες μεγεθύνσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μεταλλογραφικό μικροσκόπιο με αντικειμενικούς μακροφακούς και συστήματα φωτισμού. Ωστόσο το βάθος του (οπτικού) πεδίου περιορίζεται με το οπτικό φως. Για πολύ μεγαλύτερο βάθος πεδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα SEM για χαμηλές (αλλά και υψηλότερες) μεγεθύνσεις. Μπορούν επίσης να γίνουν τρισδιάστατες φωτογραφίες για να αποκαλυφθούν χαρακτηριστικά ενός κατάγματος ή κάποιας άλλης επιφάνειας. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου το μέγεθος ή το βάρος του δείγματος εμποδίζει την μεταλλογραφική ανάλυση και ο τεμαχισμός του δεν είναι αποδεκτό να συμβεί. Σε τέτοια περίπτωση, εξαιρετικά αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν με την εξέταση και ενδεχομένως φωτογράφιση αντιγράφων που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο καθαρισμού των επιφανειών θραύσεων. Η ποσότητα των στοιχείων που καταγράφονται κατά την εξέταση της επιφάνειας θραύσης σε μεγέθυνση χαμηλής ισχύος είναι εκτεταμένη. Μετά από προσεκτική εξέταση της επιφάνειας στην περιοχή δίπλα στην θραύση είναι πιθανόν να προσδιορισθεί το σύστημα τάσης που δημιούργησε την αστοχία. Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να γίνεται πιο προσεκτικός χειρισμός και καλύτερη επιθεώρηση. Το σχήμα, το μέγεθος και η διατομή ενός δείγματος μπορεί να έχουν μεγάλη επίδραση τόσο στη μακροσκοπική, όσο και στη μικροσκοπική εξέταση της επιφάνειας θραύσης. Ασυνέχειες, γωνίες, εγκοπές και πάνω απ' όλα προ υπάρχουσες ρωγμές επηρεάζουν ενεργά την εμφάνιση κατάγματος. Η μακροσκοπική εξέταση προσδιορίζει την κατεύθυνση της ανάπτυξης των ρωγμών και ως εκ τούτου την προέλευση της αποτυχίας. Η κλίση των 45° συνήθως καλείται «χείλη διάτμησης». Σε πολλές περιπτώσεις η θραύση αυτή είναι επίπεδη στο κέντρο και περιβάλλεται από μία «κορνίζα» της κεκλιμένης επιφάνειας. Συνήθως οι διατμητικές τάσεις δεν είναι ο λόγος της κύριας αιτίας της διάτμησης. Επιπροσθέτως η γωνία του κύριου άξονα και της επιφάνειας θραύσης μπορεί να μην είναι ακριβώς 45°.

Οι στρεπτικές τάσεις είναι πιθανόν να δημιουργήσουν θραύσεις που έχουν σπειροειδείς επιφάνειες, ειδικά από κόπωση. Στις επίπεδες ψαθυρές θραύσεις, ο η επιφάνεια θραύσης θα παρουσιάζει σημάδια τύπου V. Η κατεύθυνση που

αναπτύσσονται οι ρωγμές είναι σχεδόν πάντα μακριά από τις άκρες που εμφανίζονται τα σημάδια αυτά. Τα σημάδια τύπου V εμφανίζονται λόγω του ότι όλες σχεδόν οι ρωγμές επεκτείνονται ταχέως στην αρχή και καθώς επεκτείνονται, αφήνουν τα ίχνη της επιτάχυνσης. Τα ίχνη αυτά πρέπει να εντοπιστούν, καθώς είναι καίριας σημασίας για τον τρόπο που αναπτύχθηκαν οι ρωγμές. Στην περίπτωση που στην επιφάνεια υπάρχει ένα συνονθύλευμα επίπεδων και διατμητικών τάσεων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι παρουσιάστηκε έπειτα η διατμητική θραύση. Η εξέταση χαμηλής ισχύος των επιφανειών θραύσης συχνά εμφανίζει περιοχές που έχουν διαφορετική σύσταση από την περιοχή που παρουσιάστηκε η θραύση. Αυτές οι διαφορές μπορεί να εμφανιστούν από κόπωση, από διάβρωση υπό τάση, η λόγω της ψαθυρότητας υδρογόνου. Σε αυτές τις περιπτώσεις η τελική αστοχία οφείλεται σε υπερφόρτωση η οποία προκαλεί την μείωση της διατομής και στην συνέχεια εμφάνιση ρωγμής.

1.7.1.6 Μικροσκοπική εξέταση και ανάλυση των επιφανειών θραύσης

Η μικροσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης μπορεί να υλοποιηθεί με ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM) ή ένα οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Η επιλογή της τεχνικής εξαρτάται από το σύνολο των πληροφοριών που είναι απαραίτητες για την εκάστοτε ανάλυση.

Συνήθως η μικροσκοπική εξέταση στην επιφάνεια θραύσης γίνεται με ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Έχει το πλεονέκτημα των μεγάλων μεγεθύνσεων που είναι εφικτό να επιτύχει (τυπικά από X10000 έως X60000) και επιπροσθέτως το βάθος εστίασης το οποίο επιτυγχάνεται λόγω του ελάχιστου ανοίγματος της διερχόμενης δέσμης. Ο περιορισμός της ανάλυσης SEM είναι το μέγεθος του δείγματος.

Η ηλεκτρονική μικροσκοπία διερχόμενης δέσμης (TEM), δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά. Λόγω της περιορισμένης δύναμης διείσδυσης των ηλεκτρονίων μέσω στερεών αντικειμένων, τα δείγματα που εξετάζονται πρέπει να έχουν την μορφή λεπτών μεμβρανών. Μπορούν να προσδιοριστούν διάφοροι τύποι προβλημάτων που σχετίζονται με την κρυσταλλική δομή ενός μετάλλου ή τον μετασχηματισμό φάσεων.

Η οπτική μικροσκοπία είναι μία χρήσιμη τεχνική για τον χαρακτηρισμό του υλικού ή της μικροδομής του, όπως το μέγεθος κόκκου, το σχήμα και ο προσανατολισμός του. Τα προς εξέταση δείγματα πρέπει να προετοιμαστούν κατάλληλα (λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή). Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τις μικρές μεγεθύνσεις κυρίως λόγω του περιορισμένου βάθους του πεδίου, αλλά και της ανάλυσης του, που φτάνει περίπου τα 10^{-6} m.

1.7.1.7 Ανάλυση Τάσεων

Η ανάλυση των τάσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους και σκοπός της είναι ο καθορισμός φορτίων και τάσεων που οδηγούν στην αστοχία. Είναι δυσκολότερο να προβλεφθεί σε δυναμικές καταπονήσεις από ότι στις

στατικές. Αν και συχνά εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο κύριος λόγος εμφάνισης της αστοχίας είναι η υπερβολική καταπόνηση ή η άσκηση μεγάλου φορτίου, παρόλα αυτά κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μία ακριβής ανάλυση τάσεων ώστε να προσδιοριστεί το μέγεθος, αλλά και το είδος της (στρεπτική, καμπτική, αξονική). Τα εφαρμοζόμενα φορτία, οι συνθήκες λειτουργίας, η γεωμετρία και το μέγεθος του στοιχείου είναι οι κύριοι παράγοντες που συντελούν στον υπολογισμό των τάσεων. Η μέγιστη κύρια τάση, συναρτήσει της αντοχής του υλικού παρέχει σημαντικά στοιχεία για την καταλληλότητά του ως προς την συγκεκριμένη εφαρμογή, αλλά και για το αν τηρήθηκαν οι παράμετροι του σχεδιασμού. Αν ένα εξάρτημα δεν έχει σχεδιαστεί για να αντέχει σε κόπωση, ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί το πιο ανθεκτικό υλικό σε κόπωση, το εξάρτημα πιθανόν θα αστοχήσει.

1.7.1.8 Καθορισμός του τρόπου θραύσης

Η ανάλυση προέλευσης μίας θραύσης είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του τρόπου αστοχίας. Υπάρχουν χαρακτηριστικά στην επιφάνεια του κατάγματος που δείχνουν την κατεύθυνση των ρωγμών. Οι πρώτες παρατηρήσεις πρέπει να βασίζονται στην οπτική και μικροσκοπική παρατήρηση. Η πιο απλή παρατήρηση είναι η ύπαρξη παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση σχετίζεται άμεσα με το είδος της τάσης που προκάλεσε την θραύση. Μπορεί να είναι εφελκυστική, καμπτική, στρεπτική, θλιπτική ή ένας συνδυασμός αυτών. Δεν υπάρχει μία κατηγοριοποίηση των αστοχιών ανάλογα με τον μηχανισμό ανάπτυξης ρωγμών.

Όλκιμη θραύση: Σε ορισμένα μέταλλα και κράματα είναι πιθανόν να εμφανιστεί όλκιμη θραύση. Η πιο απλή αιτία είναι τα μεγάλα φορτία, παρόλο που παρόμοιες διαδικασίες επιτελούνται στην στρέψη, στην κάμψη, αλλά και κάτω από πολύπλοκες τάσεις που οδηγούν στην αστοχία κατά την λειτουργία. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα από όλκιμη θραύση είναι η δοκιμή εφελκυσμού, κατά την οποία το δείγμα παραμορφώνεται και να εμφανίζει λαιμός, πριν οδηγηθεί στην θραύση. Ακόμα και μετά την θραύση είναι ορατό ο λαιμός και η παραμόρφωση γύρω από την περιοχή θραύσης.

Η θραύση χαρακτηρίζεται ανάλογα με τη μορφή που έχουν τα άκρα των δύο επιφανειών της θραύσης, ως «κώνος-κρατήρας» ή ως «διπλός κρατήρας».

Ψαθυρή θραύση: Υπάρχουν δύο κατηγορίες ψαθυρής θραύσης, η διακρυσταλλική και η περικρυσταλλική. Διακρυσταλλική θραύση είναι πιθανόν να συμβεί στα BCC μέταλλα και τα κράματά τους (φερριτικοί χάλυβες, σίδηρος, βολφράμιο, χρώμιο) και σε κάποια HCD μέταλλα (μαγνήσιο, ψευδάργυρος, βηρύλλιο). Τα FCC μέταλλα και τα κράματά τους είναι κατά βάση ανεπηρέαστα από την διακρυσταλλική θραύση. Ο σίδηρος και οι χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα χάλυβες, με την μείωση της θερμοκρασίας τους μεταβαίνουν από την όλκιμη στην ψαθυρή κατάσταση. Η ψαθυρή θραύση των όλκιμων μετάλλων εξαρτάται στην πραγματικότητα από διάφορους φυσικούς παράγοντες, όπως το σχήμα και το μέγεθος του δείγματος, την θερμοκρασία, τον ρυθμό που καταπονείται.

Η θραύση διάσπασης είναι δύσκολο να διαγνωσθεί, διότι σε πολυκρυσταλλικά υλικά παράγει ένα μοτίβο φωτεινών αντανακλώμενων κρυσταλλικών εδρών και

τέτοια κατάγματα αναφέρονται σαν κρυσταλλικές θραύσεις. Το κάταγμα παρουσιάζεται στο σημείο της μέγιστης εφελκυστικής τάσης και στις περισσότερες φορές υπάρχει χείλος διάτμησης γύρω από το κάταγμα. Όταν δεν εμφανίζεται χείλος διάτμησης είναι πιθανόν από εκείνο το σημείο να ξεκίνησε η θραύση.

Η θραυστογραφία διακρυσταλλικών ψαθυρών θραύσεων σε χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, στον ψευδάργυρο, στον σίδηρο και σε άλλα μονοφασικά μέταλλα και σε χωροκεντρομένο κυβικά συστήματα, είναι αρκετά διαδεδομένη. Δείγματα πολυκρυσταλλικά παρουσιάζουν πολλά όρη ρωγμών. Το ιδιαίτερο γνώρισμά τους είναι η τα σήματα ποταμού, τα οποία αποτελούνται από βήματα αποκόλλησης και αποκαλύπτουν την κατεύθυνση διάδοσης των ρωγμών. Ο γενικός ορισμός αναφέρει ότι αν οι παραπόταμοι θεωρούνται καθώς εισρέουν στο κύριο ρεύμα, τότε η κατεύθυνση ανάπτυξης των ρωγμών είναι ίδια με του κυρίου ρεύματος. Όμως ο κανόνας αυτός αντιτίθεται με τα μακροσκοπικά σημάδια V , όπου η κατεύθυνση ανάπτυξης των ρωγμών θα είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Άλλα θραυστογραφικά στοιχεία εμπεριέχουν την παρουσία διάσπασης σε κεκλιμένα επίπεδα, όλκιμα κατάγματα ανάμεσα στα επίπεδα αποκοπής σε ξεχωριστά επίπεδα τα οποία δημιουργούνται λόγω μηχανικών διδυμιών. Η θραύση κατάγματος σε χάλυβες με περλίτη ή μαρτενσίτη είναι δύσκολο να ερμηνευτεί, διότι η μικροδομή τείνει να διαφοροποιήσει την επιφάνεια θραύσης.

Περικρυσταλλική ψαθυρή θραύση: Η αναγνώριση της περικρυσταλλικής θραύσης, είναι σχετικά απλή αλλά η αιτία που την προκάλεσε είναι δύσκολο να καθοριστεί. Η θραυστογραφική, αλλά και η μικροσκοπική εξέταση μπορεί να καθορίσει την δεύτερη φάση σωματιδίων στα όρια των κόκκων, όμως δεν είναι εύκολο να γίνει αντιληπτή η περικρυσταλλική θραύση μέσω της θραυστογραφίας, σε ένα στρώμα πάχους μερικών ατόμων ενός στοιχείου. Η περικρυσταλλική θραύση μπορεί να εμφανίζεται σε ένα όριο κόκκου λόγω υψηλής συγκέντρωσης μορίων δεύτερης φάσης (καρβίδια Fe, Cr, Ni), ή στο διαχωρισμός κάποιου ειδικού στοιχείου ή ένωσης στα όρια του κόκκου, στα οποία ένα στρώμα που έχει πάχος λίγων ατόμων είναι επαρκές να δημιουργήσει ευθραυστότητα.

Ευθραυστότητα μπορεί να παρουσιάζεται λόγω ύπαρξης οξυγόνου σε σίδηρο υψηλής καθαρότητας και στο νικέλιο, από παρουσία αμέταλλου στον χαλκό, αλλά και κατά την επαναφορά κάποιων χαλύβων. Στις παραπάνω περιπτώσεις δεν είναι εύκολο να εντοπιστεί η δεύτερη φάση στα όρια των κόκκων.

Θραύση από κόπωση: Εμφανίζεται λόγω των συνεχόμενων τάσεων οι οποίες είναι πιθανόν να μην ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού. Υπάρχουν ποικίλες μεταβλητές που επιδρούν στην συμπεριφορά της κόπωσης, όπως η θερμοκρασία, το μέγεθος, το περιβάλλον, οι παραμένουσες τάσεις, η συχνότητα που εφαρμόζεται, η κυμαινόμενη τάση, η μέση τάση, η μικροδομή και η μορφή του εξαρτήματος.

Η θραύση από κόπωση είναι ένα άλλο παράδειγμα ψαθυρής θραύσης. Μια επιφάνεια θραύσης από κόπωση αποτελείται από τρεις περιοχές που συνδέονται με την έναρξη της ρωγμής, την ανάπτυξη της και την τελική αποκόλληση.

Τα κατάγματα από κόπωση είναι κυρίως διακρυσταλλικά, όμως είναι πιθανόν να εμφανιστούν και περικρυσταλλικά. Τα τμήματα της επιφάνειας θραύσης από την διάδοση ρωγμών κόπωσης και η τελική περιοχή μέγιστης φόρτωσης

εξαρτάται από το επίπεδο της εφαρμοσμένης τάσης σε σχέση με την ονομαστική ισχύ του υλικού και την γεωμετρία της επιφάνειας. Η περιοχή της μέγιστης φόρτωσης είναι συνήθως πιο τραχιά και η περιοχή της κόπωσης είναι πιο θαμπή. Η συμπεριφορά των ρωγμών της κόπωσης χαρακτηρίζονται από την θραυστομηχανική, ανάλογα με τον τρόπο που αναπτύσσονται και το εύρος εφαρμογής της τάσης. Ραβδώσεις από κόπωση συνήθως παρατηρούνται όταν η μικροδομή είναι ενιαία ή υπάρχει μόνο ένα μικρό ποσοστό δεύτερης φάσης ή συστατικών. Είναι πιθανόν να επέλθει θραύση από κόπωση, χωρίς την παρουσία ραβδώσεων. Ο όρος ραβδώσεις χρησιμοποιείται για να περιγράψει άλλα θραυστογραφικά στοιχεία που δεν σχετίζονται με την κόπωση.

1.7.1.9 Θραυστομηχανική στην ανάλυση αστοχίας

Οι ρωγμές μπορεί να εμφανιστούν λόγω συνδυαζόμενων διαδικασιών όπως κόπωση, διάβρωση υπό τάση, ερπυσμός, μέχρι την ολική θραύση. Σε αυτό το πλαίσιο, η θραυστομηχανική είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την αξιολόγηση της θραύσης και μπορεί να βοηθήσει στο να απαντηθούν πολλές ερωτήσεις κατά τη διάρκεια μίας αστοχίας. Στόχος της είναι η ανάπτυξη μέσων τα οποία θα οδηγήσουν στην ελάττωση εμφάνισης αστοχιών. Υπάρχει άμεση συσχέτιση της εμφάνισης θραύσης με κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες των υλικών, όπως για παράδειγμα το όριο διαρροής. Η εφαρμογή της θραυστομηχανικής είναι πιθανόν να παρέχει έναν μεγάλο αριθμό πληροφοριών που αποσαφηνίζει την αιτία της αστοχίας.

Η γραμμική ελαστική θραυστομηχανική (LEFM) στηρίζεται στην θεωρία της ελαστικότητας. Μπορεί να εφαρμοστεί όταν στο μέτωπο της ρωγμής υπάρχει ένα συγκεκριμένο όριο πλαστικής παραμόρφωσης. Η γραμμική ελαστική θραυστομηχανική παύει να ισχύει εάν αυξηθεί η πλαστική παραμόρφωση. Τότε εφαρμόζεται η ελαστική-πλαστική θραυστομηχανική (EPFM), η οποία στηρίζεται στην θεωρία της ελαστικότητας, θεωρώντας όμως την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ως μη γραμμική.

1.7.1.10 Ανάλυση μικροδομής

Η μεταλλογραφική εξέταση των προς εξέταση επιφανειών, είναι μία διαδικασία μείζονος σημασίας για την ανάλυση αστοχίας, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες για την δομή του υλικού. Εάν εμφανίζονται ανομοιομορφίες ή ανωμαλίες στη μικροδομή, πιθανόν να επέλθει αστοχία πριν από το προσδόκιμο διάστημα λειτουργίας του υλικού.

Με την ανάλυση μικροδομής μπορεί να παρατηρηθεί πως κατασκευάστηκε το εξάρτημα και η θερμική κατεργασία που επήλθε είτε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα που είχε τεθεί το εξάρτημα σε λειτουργία, είτε λόγω σχεδιασμού ή ακόμα και ελλείψεις κατά την θερμική επεξεργασία. Επιπλέον μπορεί να γίνει αντιληπτή πιθανή υπερθέρμανση της επιφάνειας ή ακόμα να εντοπιστούν οξειδωση, διάβρωση, εργοσκληρύνηση και να μελετηθούν οι επιπτώσεις τους στην λειτουργία του εξαρτήματος. Ακόμα φανερώνονται οι ρωγμές που βρίσκονται στην επιφάνεια και ο τρόπος διάδοσής τους (περικρυσταλλικός ή

διακρυσταλλικός). Αυτό παρέχει πληροφορίες που κάνουν διακριτό τον μηχανισμό διαφόρων αστοχιών.

Κάθε ανάλυση αστοχίας είναι ξεχωριστή και δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος τρόπος προσέγγισης για την επιλογή της θέσης όπου μπορούν να επιλεχθούν τα δείγματα προς μελέτη. Ωστόσο πρέπει να ελεγχθεί αν η δομή του δείγματος η οποία θα εξεταστεί αντιπροσωπεύει το εξάρτημα στο σύνολό του. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να εξεταστούν όχι μόνο τα δείγματα που είναι κοντά στην περιοχή της θραύσης, αλλά και σε διάφορες περιοχές του εξαρτήματος. Τα δείγματα που υπόκεινται μεταλλογραφική ανάλυση, πρέπει να ληφθούν κάθετα προς την επιφάνεια θραύσης, έτσι ώστε να είναι διακριτή η επιφάνεια σε όλο της το σύνολο. Γενικώς η λήψη δειγμάτων ποικίλει ανάλογα με τον τρόπο που έχει προέλθει η αστοχία.

Η μεταλλογραφική εξέταση των δειγμάτων είναι μία διαδικασία που έχει καθιερωθεί στις περισσότερες αναλύσεις αστοχίας, καθώς το μικροσκόπιο έχει την δυνατότητα να κάνει ορατές τις ατέλειες που προκλήθηκαν κατά την επεξεργασία των δοκιμίων, αλλά και δίνει την δυνατότητα μέτρησης παραμέτρων όπως το μέγεθος του κόκκου, το βάθος εναζώτωσης, τη ζώνη θερμικής επιρροής, το πάχος των επιφανειακών επικαλύψεων. Επίσης κάνει εμφανή τα αποτελέσματα των συνθηκών λειτουργίας και του περιβάλλοντος που είναι πιθανόν να έχουν γίνει η αιτία εμφάνισης της αστοχίας.

1.7.1.11 Μηχανικές δοκιμές

Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών καθορίζουν την αντίδραση του υλικού στις εξωτερικά εφαρμοζόμενες μηχανικές δυνάμεις. Οι κύριες μηχανικές ιδιότητες των υλικών είναι: εφελκυσμός, θλίψη, κάμψη, κόπωση, δυσθραυστότητα, θραύση ερπυσμού.

Δοκιμή σκληρότητας: Είναι η πιο απλή μεταξύ των μηχανικών δοκιμών και πρόκειται για μία μη καταστροφική μέθοδο. Πέραν από τις άλλες εφαρμογές της, προσφέρει πληροφορίες σχετικά με τις θερμικές επεξεργασίες, καθώς μπορεί να γίνει σύγκριση της αναμενόμενης σκληρότητας του δοκιμίου, η οποία καθορίζεται από τις προδιαγραφές, με την πραγματική. Υψηλή σκληρότητα μεταφράζεται με υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη και με όρους χαμηλότερη ολκιμότητα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξαχθούν συμπεράσματα για την αντοχή σε εφελκυσμό του εξαρτήματος, για τον εντοπισμό σκλήρυνσης που δημιουργείται από υπερθέρμανση, την ανάπτυξη αζώτου ή άνθρακα, την εξανθράκωση και την σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Το μειονέκτημά της είναι ότι δεν ορίζεται τόσο καλά, όσο οι άλλες ιδιότητες, λόγω της εξάρτησής της από την μέθοδο, αλλά και από τις συνθήκες μέτρησης.

Οι μηχανικές δοκιμές που θα εφαρμοστούν εξαρτώνται από τον τρόπο που αστόχησε το εξάρτημα, αλλά και από τις απαιτήσεις για την εκάστοτε μελέτη. Δεν είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν όλες οι μηχανικές δοκιμές, διότι η διαδικασία είναι χρονοβόρα, έχει υψηλό κόστος και σε κάποιες περιπτώσεις δεν εξαγεται κανένα χρήσιμο συμπέρασμα για την αιτία της αστοχίας. Στις περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητη η δοκιμή εφελκυσμού, κόπωσης και κρούσης, πρέπει να εφαρμοστεί σε επαρκές δείγματα, έτσι ώστε να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα. Σε κάθε δοκιμή πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή

κατά την επιλογή των δειγμάτων. Η θέση από την οποία θα ληφθούν τα δείγματα είναι κρίσιμης σημασίας και καθοριστική για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η ανταπόκριση ενός υλικού σε μία εφαρμοζόμενη δύναμη ή σε ένα φορτίο μπορεί να περιγράφει από τρία διαφορετικά φαινόμενα: (i) την ελαστική παραμόρφωση, (ii) την πλαστική παραμόρφωση και (iii) την θραύση. Ένα ποσοστό ελαστικής παραμόρφωσης είναι ανεκτό.

Δοκιμή εφελκυσμού: Τα εφελκυστικά φορτία τείνουν να επιμηκύνουν το υλικό. Υπό την επήρεια ενός στατικού εφελκυστικού φορτίου, ένα δεδομένο υλικό επιμηκύνεται και μειώνεται συγχρόνως η διατομή του. Οι εφελκυστικές ιδιότητες καθορίζουν την αντίδραση ενός υλικού σε ένα σταδιακά αυξανόμενο εφελκυστικό φορτίο έως ότου εμφανιστεί η θραύση.

Δοκιμή κάμψης: Η δύναμη κάμψης ορίζεται ως το φορτίο ανά μονάδα διατμητικής περιοχής που απαιτείται για να αρχίσει η πλαστική παραμόρφωση σε μακροσκοπική κλίμακα. Είναι μέτρο της χρήσιμης δυνατότητας φόρτισης του υλικού. Τα δυναμικά φορτία είναι ταξινομημένα σε δύο τύπους: κρουστικά φορτία και φορτία κόπωσης.

Δοκιμή κρούσης: Τα κρουστικά φορτία μοιάζουν με στατικά φορτία, δεδομένου ότι μπορεί η εφαρμογή της δύναμης να είναι ενιαία. Σε αντίθεση με ένα στατικό φορτίο, το ποσοστό παραμόρφωσης είναι αρκετά υψηλό και μπορεί να συγκεντρώσει τις τάσεις στα αδύνατα τμήματα του στοιχείου προκαλώντας την θραύση.

Δοκιμή κόπωσης: Τα φορτία κόπωσης είναι τα πιο κοινά δυναμικά φορτία. Ένα φορτίο πολύ μικρότερο από το στατικό που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής εφαρμόζεται στο στοιχείο επαναλαμβανόμενα. Παρόλο που το φορτίο δεν είναι μεγάλο, οδηγεί στη θραύση μετά από κάποιους κύκλους λειτουργίας. Η δύναμη κόπωσης εκφράζεται με τον αριθμό των κύκλων που απαιτούνται για να επέλθει η θραύση, κάτω από ορισμένη τάση.

Δοκιμή δυσθραυστότητας: Η αντίσταση ενός υλικού στη θραύση καλείται δυσθραυστότητα. Υπάρχει άμεσος συσχετισμός της τάσης που απαιτείται για να διαδοθεί μία ρωγμή, με το αρχικό μήκος της ρωγμής.

1.7.1.12 Χημική Ανάλυση

Οι χημικές αναλύσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, την στοιχειακή ανάλυση (elemental analysis) και την ανάλυση φάσης (phase analysis). Η στοιχειακή ανάλυση αναφέρεται στον προσδιορισμό της ανάλυσης των συστατικών των στοιχείων ενός δεδομένου υλικού και στις συγκεντρώσεις τους. Ένα υλικό μπορεί να αποτελείται από μία ή από περισσότερες φάσεις. Ένα υλικό μπορεί να αλλάξει φάση και να επέλθει ο διαχωρισμός του σε δύο φάσεις, καθεμία από τις οποίες διαθέτει μία δεδομένη σύσταση και κρυσταλλική δομή (όπως ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε φερρίτη και σεμεντίτη). Ωστόσο η συνολική στοιχειακή σύνθεση παραμένει αμετάβλητη. Είναι προφανές ότι η στοιχειακή ανάλυση δεν παρέχει οποιαδήποτε πληροφορία σχετικά με την κατάσταση της παρουσίας των στοιχειωδών συστατικών του υλικού. Αυτές οι πληροφορίες παρέχονται από την ανάλυση φάσης, δηλαδή τον εντοπισμό των

φάσεων που παρουσιάζονται στο υλικό. Αρκετές μελέτες ανάλυσης αστοχίας κάνουν χρήση χημικής ανάλυσης συμπεριλαμβανομένης της στοιχειακής ανάλυσης και ανάλυσης φάσης, έτσι ώστε να γίνει επαλήθευση του υλικού, ταυτοποίηση δευτερογενών φάσεων και ανάλυση ιζημάτων προϊόντων διάβρωσης. Το επίπεδο της ακρίβειας ποικίλει ανάλογα με τις περιστάσεις. Ανάλογα με το μέγεθος του προς μελέτη δείγματος, υπάρχουν δύο τεχνικές χημικών αναλύσεων. Η τεχνική για χύμα χημική ανάλυση εξετάζει το σύνολο του όγκου του δείγματος και η τεχνική μικροχημικής ανάλυσης, εξετάζει μόνο ένα μικρό χαρακτηριστικό του δείγματος. Η τελευταία συνδυάζεται με την οπτική μικροσκοπία. Όλες οι τεχνικές χημικής ανάλυσης βασίζονται στην ανάλυση των επιπέδων ενέργειας των ηλεκτρονίων εντός του ατόμου με την διέγερσή τους.

Τεχνικές Μαζικής Ανάλυσης Στοιχείων: Διάφορες τεχνικές εφαρμόζονται για την ανάλυση της συνολικής χημικής σύστασης ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος. Κάποιες επιτρέπουν την άμεση ανάλυση του δείγματος σε στερεά κατάσταση, ενώ άλλες χρειάζονται την μετατροπή του σε υγρή με την διάλυση από κατάλληλο οξύ. Οι τεχνικές μαζικής χημικής ανάλυσης περιλαμβάνουν:

- Οπτική Φασματοσκοπία εκπομπής
- Φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης
- Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD)
- Φθορισμού ακτίνων Χ (XRF)
- Υπέρυθρες και υπεριώδεις φασματοσκοπίες

Βασικές αρχές ανάλυσης φάσης: Η στοιχειακή ανάλυση αποκαλύπτει μόνο τα στοιχειώδη συστατικά και τις συγκεντρώσεις τους και δεν παρέχει καμία πληροφορία σχετικά με την κατάσταση της παρουσίας αυτών των στοιχείων ή των μικροσυστατικών τους. Δευτερεύουσες φάσεις που έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στις ιδιότητες του υλικού, μπορούν να επισπεύσουν την εμφάνιση αστοχίας. Σε αντίθεση με την στοιχειακή ανάλυση, η ανάλυση φάσης αποκαλύπτει την συγκέντρωση των διάφορων στοιχείων.

Τεχνικές Ανάλυσης Μαζικής Φάσης: Η ανάλυση φάσης με περίθλαση ακτίνων Χ παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον μέσο όρο της κρυσταλλικής δομής του δείγματος. Ωστόσο, για να προσδιορίσει μία συγκεκριμένη φάση, θα πρέπει η ποσότητα που θα επιλεχθεί να ισοδυναμεί με τουλάχιστον το 10% του δείγματος του συνολικού όγκου. Επιπλέον μπορεί να είναι δύσκολη η ταυτοποίηση μίας μοναδικής φάσης, διότι είναι πιθανόν να υπάρχουν περισσότερες από δύο φάσεις οι οποίες είναι ισόμορφες. Για την εξάλειψη δυσκολιών συνίσταται ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων από την διάθλαση με ακτίνες Χ με αυτά που προέρχονται από την μικροχημική ανάλυση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Τεχνικές για Μικροχημική Ανάλυση: Η μικροχημική ανάλυση μπορεί να συνδυαστεί με την ανάλυση μικροδομής, εφαρμόζοντας ποικίλες τεχνικές. Μπορεί να εφαρμοστεί συνδυασμός φασματοσκοπίας ενεργειακής διασποράς ακτίνων Χ με μικροσκόπιο σάρωσης, διερχόμενης δέσμης, αλλά και σάρωσης διερχόμενης δέσμης. Τα δείγματα και των δύο ειδών μπορεί να εξεταστούν μέσω του ηλεκτρονικού οπτικού συστήματος. Η Φασματοσκοπία ακτίνων Χ είναι η συνηθέστερη μέθοδος για την ανάλυση χύμα δειγμάτων, αλλά και τα συμβατικά SEM. Μαζικά δείγματα μπορούν να εξεταστούν με το SEM, αλλά και

με ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Τα δείγματα από λεπτά φύλλα είναι δυνατόν να εξεταστούν από STEM ή TEM.

1.7.1.13 Δοκιμές σε προσομοιωμένες συνθήκες λειτουργίας

Για την σύναψη μίας έρευνας ενδέχεται να χρειαστούν δοκιμές που προσπαθούν να προσομοιώσουν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες επήλθε η αστοχία. Αυτό δεν είναι πάντα πρακτικό, αφενός γιατί δεν είναι γνωστές οι ακριβείς συνθήκες λειτουργίας και αφετέρου λόγω του εξειδικευμένου εξοπλισμού που απαιτείται. Επιπροσθέτως αν δεν τηρηθούν με ακρίβεια οι διάφοροι παράγοντες και κυρίως ο χρόνος, είναι πολύ πιθανόν να παρουσιαστούν σημαντικά λάθη.

Η ανάλυση των επιπτώσεων κάποιων συγκεκριμένων μεταβλητών που υπεισέρχονται στη λειτουργία, είναι πιθανόν να συμβάλλει στον προγραμματισμό διορθωτικών ενεργειών ή να παρατείνει τη διάρκεια λειτουργίας.

1.8 Ερμηνεία αποτελεσμάτων και ορολογία

Μία επιτυχημένη ανάλυση αστοχίας προϋποθέτει την σαφή και λεπτομερή ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προήλθαν από την πειραματική διαδικασία. Έχοντας αυτό ως βασική αρχή, ο αναλυτής μπορεί να συμβάλλει στην επίλυση του προβλήματος, παρέχοντας τις απαραίτητες συστάσεις.

Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων ο αναλυτής θα χρησιμοποιεί την σωστή τεχνική ορολογία, η οποία μπορεί να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα για τον προσδιορισμό ευθυνών.

Η μη κατάλληλη ορολογία μπορεί να αποπροσανατολίσει σχετικά με την κύρια αιτία της αστοχίας. Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων θα δίνεται μεγάλη προσοχή στις δηλώσεις σχετικά με τον τρόπο της αστοχίας. Για παράδειγμα ο τρόπος εμφάνισης αστοχίας σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις είναι πιθανόν να είναι όμοιος, όπως λόγου χάρη κάμψη, ωστόσο η αιτία εμφάνισης μπορεί να είναι τελείως διαφορετική. Δηλώσεις σχετικά με την αιτία της αστοχίας συνεπάγονται ευθύνη.

1.9 Συστάσεις

Μία ολοκληρωμένη μελέτη ανάλυσης αστοχίας πρέπει να εμπεριέχει μία σειρά προτάσεων για την πρόληψη παρόμοιων αστοχιών στο μέλλον. Ενδέχεται να καταγραφούν προτάσεις για επίλυση του προβλήματος όχι μόνο βραχυπρόθεσμα, αλλά και μακροπρόθεσμα. Κάθε σύσταση που παρατίθεται από τον αναλυτή πρέπει να συμφωνεί με τα αποτελέσματα της έρευνας. Ο αναλυτής πρέπει να αναγνωρίσει εάν η κύρια αιτία εμφάνισης αστοχίας είναι η λανθασμένη επιλογή υλικού ή οι μη κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να είναι σε θέση να παραθέσει εναλλακτικές επιλογές, επικαλούμενος τις δυνατότητες, αλλά και τους περιορισμούς που σχετίζονται με την εκάστοτε εφαρμογή.

1.10 Έκθεση της Ανάλυσης Αστοχίας

Οι πληροφορίες που παρέχονται από μία μελέτη ανάλυσης αστοχίας είναι ένα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των σχεδιαστών, καθώς μέσα από αυτές οδηγούνται στην διόρθωση του προβλήματος και στην αποτροπή παρόμοιων αστοχιών. Για τον λόγο αυτόν θα εκπονηθεί μία έκθεση υψηλής ποιότητας. Η σύνταξη της έκθεσης μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με την περίπτωση της εκάστοτε αστοχίας, γενικώς μπορεί να εμπεριέχει τις ακόλουθες ενότητες:

1. Περίληψη: Σύντομη περιγραφή του ιστορικού του προβλήματος, διαδικασία ανάλυσης, αποτελέσματα και συστάσεις.

2. Ιστορικό: Συλλογή πληροφοριών σχετικά με τις διαδικασίες, την εφαρμογή, το υλικό, την συντήρηση, αλλά και η αλληλουχία γεγονότων που προηγήθηκαν της αστοχίας.

3. Πειραματική διαδικασία: Περιγραφή τεχνικών που εφαρμόστηκαν στην ανάλυση των δειγμάτων η προέλευση και η προετοιμασία των δοκιμών.

4. Μακροσκοπική Εξέταση: Συλλογή φωτογραφιών που απεικονίζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως διάβρωση, εκκρίση, ρωγμές και διάφορα άλλα. Είναι σκόπιμο να παρουσιαστούν οι θέσεις από τις οποίες συλλέχθηκαν τα δείγματα.

5. Έλεγχος υλικού: Σύγκριση των αποτελεσμάτων που προήλθαν από την χημική ανάλυση του υπό μελέτη δείγματος, με αυτά βάσει προδιαγραφών. Με αυτόν τον τρόπο αποσαφηνίζεται εάν το υλικό είναι το ίδιο με αυτό που ορίστηκε και αν είναι κατάλληλο για την συγκεκριμένη χρήση.

6. Ανάλυση μηχανισμών θραύσης και τάσεων: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλυσης τάσεων.

7. Ανάλυση μικροδομής: Σύγκριση μικροδομής του εξαρτήματος που αστόχησε με εκείνου που δεν τέθηκε ποτέ σε λειτουργία. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται σε χαρακτηριστικά όπως η δομή και το μέγεθος του κόκκου, η μορφολογία στα όρια των κόκκων και στην κατακρήμνιση δευτερογενών φάσεων. Κατά περίπτωση, εάν είναι δυνατόν, μπορεί να συμπεριληφθούν αποτελέσματα για τον χαρακτηρισμό των επιφανειών θραύσης, αλλά και τα αποτελέσματα αξιολόγησης ιδιοτήτων, όπως η δοκιμή σκληρότητας.

8. Τρόπος αστοχίας: Βάσει των αποτελεσμάτων. Καθορίζεται με ακρίβεια, για παράδειγμα κόπωση, εξανθράκωση και λοιπά.

9. Αίτια της αστοχίας: Συνοψίζει τα ανωτέρω και αναλύεται η πιθανότερη αιτία.

10. Συμπεράσματα: Αναφορά στον τρόπο και την αιτία της αστοχίας.

11. Συστάσεις: Παρουσίαση πιθανών λύσεων.

12. Αναφορές: Εφαρμόζονται για την λήψη πληροφοριών κατά την διάρκεια της έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°: ΧΑΛΥΒΕΣ

2.1 Χάλυβες

2.1.1 Εισαγωγή

Χάλυβες ονομάζονται τα κράματα σιδήρου-άνθρακα με περιεκτικότητα σε άνθρακα μέχρι 1,5% κ.β. Επίσης μπορεί να περιέχουν και κάποια στοιχεία κραμάτωσης ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται. Αυτά τα στοιχεία επηρεάζουν τις μηχανικές, φυσικές, αλλά και χημικές ιδιότητες του χάλυβα [8].

Οι χάλυβες ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την χημική τους σύσταση, τις χρήσεις τους και τον προορισμό τους.

a) Με βάση την χημική τους σύσταση, χωρίζονται σε:

- Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες
- Κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες

Οι κραματωμένοι χάλυβες με την σειρά τους διακρίνονται σε:

- Ελαφρά κραματωμένους
- Μέτρια κραματωμένους
- Ισχυρά κραματωμένους

b) Με βάση τις χρήσεις τους χωρίζονται στους:

- Εργαλειοχάλυβες
- Χάλυβες κατασκευών
- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών
- Χάλυβες ανοξειδώτους, πυρίμαχους

2.1.2 Ονοματολογία χαλύβων

Η ονοματολογία των χαλύβων στηρίζεται σε διάφορα συστήματα όπως,

- AISI-SAE, το οποίο είναι αμερικάνικο σύστημα
- DIN ή DNA, το οποίο είναι γερμανικό
- AFNOR, το οποίο είναι γαλλικό
- BS, το οποίο είναι αγγλικό

Η ονομασία κατά το αμερικάνικο σύστημα AISI-SAE γίνεται χρησιμοποιώντας έναν αριθμό με τέσσερα ψηφία. Τα δύο αρχικά αφορούν το ή τα κύρια στοιχεία προσθήκης και το ποσοστό που λαμβάνουν στην δομή του χάλυβα. Τα δύο επόμενα αναφέρονται στην επί τοις εκατό.

Βάση του γερμανικού συστήματος DIN ή DNA η ονοματολογία των κοινών ανθρακούχων χαλύβων γίνεται χρησιμοποιώντας αρχικά δύο γράμματα, το St που δηλώνει τον κοινό ανθρακούχο χάλυβα και ακολουθείται από δύο αριθμούς που δηλώνουν την αντοχή του σε εφελκυσμό, σε kg/mm^2 . Συχνά υπάρχουν

δύο ψηφία επιπρόσθετα τα οποία αντιστοιχούν στον πίνακα DIN ορισμένων προδιαγραφών.

Οι κοινοί χάλυβες που υπόκεινται σε επιβελτίωση ή ενανθράκωση, εμφανίζονται με το γράμμα C, το οποίο ακολουθείται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη με το 100. Στην περίπτωση που οι περιεκτικότητες σε ακαθαρσίες είναι ιδιαίτερα χαμηλές, εμφανίζεται και το γράμμα K. Σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχουν γράμματα του λατινικού αλφαβήτου, τα οποία αναφέρονται στην θερμική κατεργασία που έχει πραγματοποιηθεί. Για παράδειγμα το V δηλώνει επιβελτίωση, το G ανόπτηση, το E ενανθράκωση, το N εξομάλυνση κ.ο.κ. Τέλος οι χάλυβες που έχουν χυτευτεί δηλώνονται με GS. Σύμφωνα με το γαλλικό σύστημα AFNOR, οι κωδικοποίηση των κοινών ανθρακούχων χαλύβων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας αρχικά το γράμμα C, το οποίο ακολουθείται από δύο ψηφία, τα οποία δηλώνουν την περιεκτικότητα σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένη επί 100. Κάποιες φορές ακολουθείται από τα γράμματα a,b,m που φανερώνουν την περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες, οι οποίες δίνονται από πίνακα. Στην περίπτωση που το γράμμα C ακολουθείται από το X, η ποιότητα του χάλυβα είναι πολύ καλή και ο χάλυβας ενδείκνυται για θερμικές κατεργασίες. Βάση του γαλλικού συστήματος οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες δηλώνονται αρχικά με δύο αριθμούς που εκφράζουν την περιεκτικότητα σε άνθρακα επί τοις εκατό, συνοδευόμενοι από γράμματα του λατινικού αλφαβήτου, τα οποία δηλώνουν τα τρία κυριότερα στοιχεία προσθήκης. Τα κύρια στοιχεία προσθήκης ακολουθούνται από αριθμούς, οι οποίοι αναλογούν στα αντίστοιχα ποσοστά τους στο χάλυβα, πολλαπλασιασμένα επί 4 όταν η περιεκτικότητα κυμαίνεται από 1 έως 3%, ή επί 10 για περιεκτικότητες πιο μικρές. Οι ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες εμφανίζονται με το γράμμα Z και οι περιεκτικότητες των προσθηκών είναι διψήφιας.

Βάση του αγγλικού συστήματος ονοματολογία των χαλύβων γίνεται χρησιμοποιώντας εξαψήφιο κωδικό που χωρίζεται σε τρία μέρη:

- Το πρώτο μέρος το οποίο αποτελείται από τρία ψηφία αφορά τον τύπο του χάλυβα
- Το δεύτερο μέρος αποτελείται από ένα γράμμα που δίνει τις βασικές πληροφορίες για τον χάλυβα
- Το τρίτο μέρος αποτελείται από δύο ψηφία και δίνει το ποσοστό του χάλυβα επί τοις εκατό.

2.1.3 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες

Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες ονομάζονται τα κράματα Fe-C, τα οποία περιέχουν συνήθεις ακαθαρσίες (έως 0.05% S και 0.04% P) και μικρά ποσοστά σε Mn, αλλά δεν περιέχουν άλλα στοιχεία κραμάτωσης.

Ανάλογα με το ποσοστό του χάλυβα που εμπεριέχεται, ταξινομούνται σε:

- Υποευτηκτοειδείς: το ποσοστό του άνθρακα είναι κάτω από 0.8% κ.β. Όταν το ποσοστό του άνθρακα είναι από 0.10% έως 0.25% κ.β. καλούνται μαλακοί χάλυβες, όταν κυμαίνεται από 0.2% έως 0.5% καλούνται χάλυβες μετρίου άνθρακα, ενώ για πάνω από 0.5% καλούνται χάλυβες υψηλού άνθρακα.

- Ευτηκτοειδείς στους οποίους η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι 0.8% κ.β.
- Υπερευτηκτοειδείς με ποσοστό σε άνθρακα 0.8-2% κ.β.

Ανάλογα για την χρήση την οποία προορίζονται οι χάλυβες, διακρίνονται σε χάλυβες διαμόρφωσης (οι οποίοι έχουν μορφοποιηθεί με κατεργασία διαμόρφωσης) είτε με χύτευση και ονομάζονται χυτοχάλυβες ή χάλυβες χύτευσης. Οι βασικές χρήσεις των χαλύβων διαμόρφωσης ορίζονται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα. Με την αύξηση περιεκτικότητας σε άνθρακα, επέρχεται αύξηση και της μηχανικής αντοχής και μείωση της ολκιμότητας. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή περιοχή και ο χάλυβας γίνεται δύσκολα συγκολλησίμος.

Οι υποευτηκτοειδείς χάλυβες με χαμηλότερο ποσοστό από 0.5% άνθρακα χρησιμοποιούνται σαν χάλυβες χύτευσης. Αφού οι χάλυβες στερεοποιηθούν, η μικροδομή τους αποτελείται από περλίτη, όπου ο προευτηκτοειδής φερρίτης έχει βελονοειδή μορφή, με αποτέλεσμα ο χάλυβας να είναι εύθραυστος. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ανόπτηση για την εξομάλυνση του χάλυβα έτσι ώστε να δημιουργηθεί ομαλή κυτταροειδής μορφή.

2.1.4 Επίδραση στοιχείων κραμάτωσης

Ο κοινός χάλυβας έχει μικρή αντοχή σε διάβρωση, μηχανική φθορά, εμβαιπότητα και ανεπαρκή δυσθραυστότητα ή ολκιμότητα.

Για να βελτιωθούν οι ανωτέρω ιδιότητες των κοινών χαλύβων πραγματοποιούνται προσθήκες, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα:

- Βελτίωση της κατεργασιμότητας
- Βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση
- Αλλαγή στην ανάπτυξη των κόκκων
- Αλλαγή στην κρίσιμη ταχύτητα βαφής
- Σχηματισμό καρβιδίων
- Την σκλήρυνση του χάλυβα με δημιουργία στερεού διαλύματος
- Αποβολή του άνθρακα από το πλέγμα του σιδήρου με μορφή γραφίτη
- Σταθεροποίηση του πλέγματος του ωστενίτη ή του φερρίτη

Με την προσθήκη των κραματικών στοιχείων μετατοπίζονται οι καμπύλες των θερμικών κατεργασιών CCT και TTT και τροποποιείται το διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου-άνθρακα. Σύμφωνα με τις ανωτέρω αλλαγές που πραγματοποιούνται λόγω των κραματικών στοιχείων, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Μαρτενσιτικοί ή αυτόβαπτους χάλυβες

Με την προσθήκη στοιχείων, η κρίσιμη ταχύτητα βαφής γίνεται μικρότερη της ταχύτητας απόψυξης στον αέρα, με αποτέλεσμα οι χάλυβες να έχουν μαρτενσιτική δομή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

- Ωστενιτικοί χάλυβες

Με την προσθήκη γ-φερρογόνων στοιχείων επιτρέπεται η παρουσία ευσταθούς ωστενίτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, εξαιτίας της μετατόπισης του σημείου A_3 σε θερμοκρασία κάτω των 20 °C. Αν μετατοπιστεί η M_s σε θερμοκρασίες

μικρότερες από το περιβάλλον, χωρίς η A_3 να είναι κάτω των 20 °C, δημιουργείται σταθερός ωστενίτης μετασταθούς κατάστασης. Οι χάλυβες αυτοί καλούνται ωστενιτικοί.

- Φερριτικοί χάλυβες

Με την προσθήκη α-φερρογόνων στοιχείων εξαλείφεται η ωστενιτική περιοχή του διαγράμματος ισορροπίας. Η φάση που δημιουργείται είναι ο φερρίτης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά και σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Οι χάλυβες αυτοί καλούνται φερριτικοί και δεδομένου ότι δεν υπάρχει ωστενιτική περιοχή, δεν επιδέχονται βαφή.

2.1.5 Κραματωμένοι χάλυβες

Οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες έχουν άνθρακα μέχρι 1%. Τα κύρια στοιχεία προσθήκης είναι Cr, Mn, Si, Ni και Mo και τα δευτερεύοντα στοιχεία προσθήκης είναι: Ti, V, Cu, N, Pb, Al, Nb και B.

Οι κραματωμένοι χάλυβες ταξινομούνται στους:

- Ελαφρά κραματωμένους με ποσοστό στοιχείων κραμάτωσης κάτω από 2%
- Μέτρια κραματωμένους με ποσοστό στοιχείων κραμάτωσης από 2% έως 10%
- Ισχυρά κραματωμένους με ποσοστό στοιχείων κραμάτωσης πάνω από 10%

2.1.5.1 Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες

Οι ελαφρά κραματωμένους χάλυβες έχουν Mn μέχρι 1.5% και V, Ti ή Nb μέχρι 0.1%. Έχουν όριο διαρροής από 400 MPa έως 650 MPa, αντοχή σε εφελκυσμό από 500 έως 850 MPa και επιμήκυνση μέχρι την θραύση 14% έως 27%. Έχουν μικρή ικανότητα μορφοποίησης εν ψυχρώ, λόγω του μεγάλου κόστους παραγωγής, παρόλο που οι ιδιότητές τους είναι καλύτερες από τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες.

2.1.5.2 Ανοξειδωτοι χάλυβες

Ανοξειδωτοι χάλυβες καλούνται οι χάλυβες που περιέχουν χρώμιο σε ποσοστά μεγαλύτερα του 12%, το οποίο συντελεί στην υψηλή αντοχή στην διάβρωση. Το χρώμιο δημιουργεί ένα στρώμα οξειδίων στην επιφάνεια του χάλυβα, το οποίο την προστατεύει. Συχνά εμφανίζονται και μικρά ποσοστά ακαθαρσιών: μέχρι 0.04% P, 0.03% S, 1% Si. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες ανάλογα με την δομή τους ταξινομούνται σε:

- Ανοξειδωτοι μαρτενσιτικοί χάλυβες, οι οποίοι κατά την ωστενιτοποίηση σε υψηλές θερμοκρασίες αποκτούν μαρτρενσιτική δομή. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα κυμαίνεται έως 0.5% και σε χρώμιο έως 17%.
- Ανοξειδωτοι φερριτικοί χάλυβες, οι οποίοι έχουν φερριτική δομή. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα κυμαίνεται από 0.08% έως 0.12% και σε χρώμιο από 12% έως 30%. Οι φερριτικοί χάλυβες είναι μαγνητικοί, έχουν υψηλότερη αντοχή στην διάβρωση, αλλά χαμηλότερη μηχανική αντοχή.

- Ανοξειδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες. Η δομή τους αποτελείται από ωστενίτη σε θερμοκρασίες μικρότερες του περιβάλλοντος. Έχουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση και οξείδωση, καλή κατεργασιμότητα και καλές μηχανικές ιδιότητες. Δεν είναι μαγνητικοί.
- Ανοξειδωτοι ωστενιτοφερριτικοί χάλυβες. Η δομή τους αποτελείται από ωστενίτη και φερρίτη. Έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες, υψηλή αντοχή στην διάβρωση, δεν είναι εύθραυστοι.
- Ανοξειδωτοι χάλυβες με σκλήρυνση λόγω κατακρήμνισης. Είναι χάλυβες με ποσοστό άνθρακα περίπου 0.1%, 17% Cr, 8% Ni και 1% Al. Η σκλήρυνση πραγματοποιείται με μία ακολουθία θερμικών κατεργασιών (γήρανση).

2.1.5.3 Χάλυβες μαρτενγήρανσης ή *maraging* χάλυβες

Πρόκειται για ισχυρά κραματωμένους χάλυβες με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα έως 0.03%, υψηλή περιεκτικότητα σε Ni έως 25% και μικρότερες περιεκτικότητες σε Ti, Al, Co και Mo και έχουν υψηλή αντοχή. Η ονομασία τους οφείλεται στην κατακρήμνιση μεσομεταλλικών ενώσεων λόγω γήρανσης στην δομή του μαρτενσίτη. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του Ni, ο άνθρακας διατηρείται σε χαμηλά ποσοστά για την αποφυγή σχηματισμού γραφίτη, το οποίο θα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του χάλυβα και της σκληρότητάς του.

2.1.5.4 Διφασικοί φερριτομαρτενσιτικοί ή *dual-phase* χάλυβες

Η περιεκτικότητα σε άνθρακα κυμαίνεται από 0.08% έως 0.15% και 1-1.5% Mn. Η δομή τους αποτελείται από κόκκους φερρίτη, στα όρια των οποίων υπάρχει μαρτενσίτη σε ποσοστό 10 έως 20%. Η δομή αυτή προκύπτει με θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασίες εντός των περιοχών A_1 και A_3 . Ο φερρίτης παραμένει σταθερός, ενώ ο περλίτης μετασχηματίζεται σε ωστενίτη, πλούσιο σε άνθρακα, ο οποίος εν συνεχεία μετατρέπεται σε μαρτενσίτη, μετά την βαφή. Το όριο διαρροής είναι 300-350 MPa, ενώ η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει και 700 MPa και η επιμήκυνση θραύσης μεταξύ 25-30%.

2.1.5.5 Εργαλειοχάλυβες

Οι εργαλειοχάλυβες περιέχουν άνθρακα σε ποσοστά 0.6% μέχρι 1.4% και στοιχεία προσθήκης όπως Mn, V, W, Cr, Mo, Ni, Si και Co, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Τα περισσότερα στοιχεία προσθήκης είναι καρβιδιογόνα, και εμποδίζουν την αύξηση του μεγέθους των κόκκων, κατά την ωστενιτοποίηση, με αποτέλεσμα η σκληρότητα να είναι υψηλή. Οι σημαντικότερες ιδιότητες των ανωτέρω χαλύβων είναι: η καλή δυσθραυστότητα, η αντοχή εν θερμώ, η αντοχή σε τριβή, φθορά και σε θερμικούς αιφνιδιασμούς, η αυξημένη σκληρότητα μέχρι και την θερμοκρασία 600°C και η μεγάλη εμβαπτότητα. Έχουν υψηλή θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, πραγματοποιείται ελεγχόμενη θέρμανση σταδιακά και η παραμονή στην θερμοκρασία ωστενιτοποίησης είναι η απαιτούμενη, ώστε να

μην υπάρξει αύξηση του μεγέθους των κόκκων και μείωση του ποσοστού του άνθρακα. Η ύπαρξη υπολειπόμενου ωστενίτη είναι αποτέλεσμα της βαφής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ο οποίος είναι η αιτία της μείωσης της σκληρότητας. Με βαφή σε χαμηλές θερμοκρασίες ολοκληρώνεται ο μαρτενιτικός μετασχηματισμός (-196 έως -50°C).

2.1.6 Θερμικές κατεργασίες χαλύβων

Με τις θερμικές κατεργασίες οι χάλυβες αποκτούν διαφορετικές ιδιότητες, οι οποίες είναι χρήσιμες στην παραγωγική διαδικασία. Οι θερμικές κατεργασίες διαχωρίζονται σε:

- Θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας των χαλύβων, με σκοπό την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα. Αυτές περιλαμβάνουν:

1. Ανόπτηση

Η ανόπτηση η διαχωρίζεται σε: ανόπτηση εξομάλυνσης, πλήρης ανόπτηση, αποτατική ανόπτηση, ανόπτηση κατεργασίας, ανόπτηση ανακρυστάλλωσης, ανόπτηση σφαιροποίησης, ανόπτηση αποκατάστασης και ταλαντευτική ανόπτηση.

2. Βαφή

Το αποτέλεσμα των θερμικών αυτών κατεργασιών είναι η αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα, η εξάλειψη σε μεγάλο βαθμό των εσωτερικών τάσεων και η μεταβολή του μεγέθους των κόκκων. Όλα τα ανωτέρω επιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα.

- Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες οι οποίες επιδρούν μόνο στα επιφανειακά στρώματα του χάλυβα. Περιλαμβάνουν:

1. Θερμοφυσικές κατεργασίες όπως η επιφανειακή βαφή.

Ανάλογα με την θέρμανση για ωστενιτοποίηση διακρίνονται σε: φλογοβαφή, επαγωγική επιφανειακή θέρμανση, κατεργασία με δέσμες υψηλής πυκνότητας ενέργειας [9].

2. Θερμοχημικές κατεργασίες, όπως ενανθράκωση, εναζώτωση, κλπ.

2.1.6.1 Ανοπτήση χαλύβων

Στους χάλυβες πραγματοποιούνται διάφορες ανοπτήσεις για συγκεκριμένο σκοπό.

2.1.6.1.1 Ανόπτηση για εξομάλυνση δομής

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με σκοπό την δημιουργία ομοιόμορφης, κυτταροειδούς και λεπτοκρυσταλλικής δομής φερρίτη και περλίτη. Πραγματοποιείται θέρμανση του χάλυβα 55-85°C υψηλότερα από την άνω κρίσιμη θερμοκρασία για μία ώρα περίπου, μέχρι να γίνει πλήρης ωστενιτοποίηση. Στη συνέχεια γίνεται ψύξη στον αέρα, μέχρι η θερμοκρασία του χάλυβα να γίνει ίδια με αυτή του περιβάλλοντος. Έτσι βελτιώνονται οι ιδιότητες του χάλυβα. Η βασική εφαρμογή για την οποία απαιτείται εξομάλυνση δομής στους χάλυβες, είναι η εκλέπτυνση των κόκκων.

2.1.6.1.2 Πλήρης ανόπτηση

Η πλήρης ανόπτηση είναι παρεμφερής με την ανόπτηση εξομάλυνσης δομής. Πραγματοποιείται κυρίως για χάλυβες μέσης και χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα, οι οποίοι κατά την κατεργασία μορφοποίησης υπόκεινται σε πλαστική παραμόρφωση.

Το κράμα θερμαίνεται μέχρι την πλήρη ωστενιτοποίησή του, παραμένει για πολλές ώρες εντός του φούρνου μέσω του οποίου ψύχεται κατά 20°C περίπου την ώρα, μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο χάλυβας έχει γίνει πλέον μαλακός και όλκιμος, έχει αποκτήσει καλή κατεργασιμότητα, ομοιογένεια δομής, αύξηση αντοχής και δυσθραυστότητα και εξάλειψη εσωτερικών τάσεων.

2.1.6.1.3 Αποτατική ανόπτηση

Το κράμα θερμαίνεται στους 580°C-650°C και στην συνέχεια ψύχεται αργά. Λόγω της αργής απόψυξης υπάρχει διάχυση ατόμων και συνεπώς σημαντική μείωση των εσωτερικών τάσεων. Η δομή του χάλυβα μένει αμετάβλητη.

2.1.6.1.4 Ανόπτηση κατεργασίας

Εφαρμόζεται με σκοπό την αύξηση της όλκιμότητας του χάλυβα, ο οποίος έχει υποστεί σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, ώστε να είναι δυνατή η συνέχιση της πλαστικής παραμόρφωσης.

2.1.6.1.5 Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης

Το κράμα θερμαίνεται πάνω από μια χαρακτηριστική θερμοκρασία (η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης), συνήθως στους 650°C-750°C και αποψύχεται αργά στον αέρα. Σκοπός της είναι η εξάλειψη της ενδοτράχυνσης.

2.1.6.1.6 Ανόπτηση σφαιροποίησης

Πραγματοποιείται περίπου στους 700°C και στην συνέχεια γίνεται αργή απόψυξη μέσα στον φούρνο μέχρι 25 ώρες. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η σφαιροποίηση του σεμεντίτη που έχει ως αποτέλεσμα ο χάλυβας και όλκιμος, χωρίς να υπάρχει μετασχηματισμός φάσης. Η ταλαντευτική ανόπτηση είναι μία διαδικασία η οποία πραγματοποιείται για την σφαιροποίηση του σεμεντίτη. Εδώ ο χάλυβας θερμαίνεται σε μεταβαλλόμενη θερμοκρασία η οποία κυμαίνεται -50°C από την κάτω κρίσιμη και +50°C από την άνω κρίσιμη.

2.1.6.1.7 Ανόπτηση αποκατάστασης

Πραγματοποιείται θέρμανση στους 450°C-600°C και οι αιτίες είναι οι ίδιες με την ανόπτηση ανακρυστάλλωσης.

2.1.6.2 Βαφή των χαλύβων

2.1.6.2.1 Ωστενιτοποίηση

Επιτυγχάνεται με θέρμανση του χάλυβα 50°C πάνω από την άνω κρίσιμη θερμοκρασία για τους υποευτηκτοειδούς χάλυβες και 50°C πάνω από την κάτω κρίσιμη θερμοκρασία για τους υπερευτηκτοειδούς.

Σημαντικός παράγοντας είναι ο χρόνος, καθώς ο χάλυβας πρέπει να παραμείνει στην θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, τόσο όσο η δομή του να αποτελείται εξ ολοκλήρου από ωστενίτη, χωρίς όμως να αυξηθεί ιδιαίτερα το μέγεθος των κόκκων. Η διάρκεια της θέρμανσης πρέπει να γίνεται αργά, ώστε να μην υπάρξει διαφορά θερμοκρασίας της εξωτερικής και της εσωτερικής επιφάνειας του χάλυβα, γιατί τότε είναι πιθανόν να υπάρξει πλαστική παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος του ωστενίτη.

2.1.6.2.2 Βαφή

Η διαδικασία της ταχύτατης απόψυξης του χάλυβα, η οποία δίνει φάσεις φερριτή και σεμεντίτη εκτός ισορροπίας καλείται βαφή. Η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται από το ψυκτικό μέσο, την θερμοκρασία στην οποία αυτό βρίσκεται, την ανάδευση, την γεωμετρία, το μέγεθος αλλά και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η επιφάνεια του μετάλλου.

2.1.6.2.3 Μέσα βαφής- Δραστικότητα μέσω βαφής

Η δραστικότητα του μέσου βαφής (H) δίνεται από έναν αριθμητικό συντελεστή και αφορά την ικανότητα του ως προς την ταχύτητα απόψυξης για συγκεκριμένο μέσο βαφής. Η ιδανική βαφή του χάλυβα ορίζεται για ένα μέσο βαφής που το H να τείνει στο άπειρο, δηλαδή πραγματοποιείται ακαριαία ψύξη του χάλυβα. Τα συνήθη μέσα βαφής είναι ο αέρας, το λάδι, το νερό και τα υδατικά διαλύματα αλάτων. Σημαντική παράμετρος για τον χρόνο βαφής είναι η μάζα του αντικειμένου.

2.1.6.2.4 Εμβαπτότητα

Πρόκειται για την ικανότητα σκλήρυνσης ενός χάλυβα μέσω της βαφής. Η ταχύτητα που πρέπει να επιτευχθεί για την βαφή είναι πάνω από την κρίσιμη ταχύτητα απόψυξης με σκοπό την απόκτηση 100% μαρτενιτικής δομής.

Όσο υψηλότερη η περιεκτικότητα του άνθρακα στον χάλυβα, δυσχεραίνει την διάχυση, με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας μετασχηματισμού. Σε ένα λεπτόκοκκο χάλυβα γίνεται ταχύτερος μετασχηματισμός απ' ό,τι σε έναν χοντρόκοκκο. Η εμβαπτότητα εξαρτάται από το είδος του χάλυβα. Χάλυβες με μικρή κρίσιμη ταχύτητα βαφής έχουν μεγαλύτερη εμβαπτότητα. Με αύξηση των κόκκων του ωστενίτη, αυξάνεται η εμβαπτότητα.

2.1.6.2.5 Τεχνικές βαφής χαλύβων

Όταν ο ωστενίτης αποψύχεται, πραγματοποιούνται μεταβολές στον όγκο των δοκιμίων. Αιτίες αυτών των μεταβολών είναι:

- Συστολή λόγω μείωσης της θερμοκρασίας
- Συστολή λόγω κατακρήμνισης καρβιδίων Fe_3C
- Διαστολή οφειλόμενη στην μετατροπή φερρίτη σε ωστενίτη και φερρίτη σε μαρτενσίτη.

Οι μεταβολές αυτές δημιουργούν τάσεις, οι οποίες πρέπει να έχουν προβλεφθεί κατά τον αρχικό σχεδιασμό των δοκιμίων με σκοπό την αποφυγή ρηγματώσεων.

Η διαδικασία της βαφής πραγματοποιείται ως εξής:

- Θέρμανση του χάλυβα μέχρι την ωστενιτοποίησή του
- Βαφή σε λάδι ή αλάτι με συνεχή απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή κλιμακωτά (με πρώτη ψύξη σε θερμοκρασία κοντά στην M_s , παραμονή έως ότου η θερμοκρασία γίνει ομοιόμορφη και πριν ξεκινήσει ο μετασχηματισμός σε μπαινίτη και απόψυξη στον αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος).
- Επαναφορά ανάλογα με την κατεργασία

Αν η βαφή γίνεται κλιμακωτά, ανάλογα με την αποκτωμένη μικροδομή διακρίνεται σε: κλιμακωτή μαρτενσιτική, κλιμακωτή μπαινιτική και κλιμακωτή μπαινιτομαρτενσιτική βαφή.

2.1.6.3 Επαναφορά χαλύβων

Οι βαμμένοι χάλυβες έχουν μικροδομή εκτός ισορροπίας με υψηλές εσωτερικές τάσεις. Ως αποτέλεσμα να είναι εύθραυστοι και δύσχρηστοι, γι' αυτόν τον λόγο υπόκεινται σε επαναφορά. Αυτό πραγματοποιείται με θέρμανση σε μία θερμοκρασία ενδιάμεσα της M_s και της A_1 για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μέχρι ο μαρτενσίτης να βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Έτσι επιτυγχάνεται αύξηση της δυσθραυστότητας και της ολκιμότητας του χάλυβα.

2.2 Χάλυβες κονιομεταλλουργίας

2.2.1 Εισαγωγή

Κονιομεταλλουργία καλείται το σύνολο των διεργασιών με τις οποίες μορφοποιούνται δοκίμια, χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη σκόνες, οι οποίες δεν τήκονται κατά την κατεργασία [10]. Κόκκοι από σκόνη συγκολλούνται προσωρινά με συμπίεση και παίρνουν το σχήμα της μήτρας [11]. Το εξάρτημα θερμαίνεται μέχρι την μόνιμη συγκόλληση των κόκκων.

Ο τρόπος παραγωγής της πρώτης ύλης ποικίλει. Οι πιο συνήθεις τρόποι είναι:

- Εναπόθεση υπό μορφή σκόνης μετάλλων στα ηλεκτρόδια συσκευών ηλεκτρόλυσης.
- Καταιονισμός υγρού μετάλλου μέσα από κατάλληλο κόσκινο από μεγάλο ύψος.
- Ψεκασμός υγρού μετάλλου.

- Θραυστήρες όπου τα υπολείμματα των μηχανουργικών κατεργασιών κονιοποιούνται.
- Αντικαθίστανται το νικέλιο, ο σίδηρος, ο χαλκός κ.λπ., από τα σουλφίδια τους από αλουμίνιο.

Σημαντική παράμετρος είναι το μέγεθος του κόκκου και το σχήμα του, καθώς επίσης και η πίεση που εφαρμόζεται, η οποία είναι ανάλογη με το μέγεθος του αντικειμένου.

Μετά την συμπίεση, τα εξαρτήματα μεταφέρονται στην κάμινο, όπου με την κατάλληλη θερμοκρασία και ατμόσφαιρα πραγματοποιείται συγκόλληση στα όρια των κόκκων.

Η κονιομεταλλουργία χρησιμοποιείται για ιδιαίτερα σκληρά υλικά ή για υλικά που είναι δύσκολο να κατεργαστούν.

2.2.2 Χαρακτηριστικά της κονιομεταλλουργίας

Οι ιδιότητες της κονιομεταλλουργίας και η απόδοση των μεταλλικών κόνεων κατά την επεξεργασία, εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των μεταλλικών κόνεων που χρησιμοποιούνται [12]. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά είναι:

- Μέγεθος σωματιδίων : εξαρτάται άμεσα από τον έλεγχο του πορώδους, το βαθμό συρρίκνωσης και τη συμπιεστότητα.
- Σχήμα σωματιδίων: εξαρτάται από τον τρόπο που παρασκευάζεται ο κόνεος και επηρεάζει τα χαρακτηριστικά ροής του.
- Κατανομή μεγέθους σωματιδίων: επηρεάζεται η επιστοίβαξη των κόκκων της σκόνης και η συμπεριφορά κατά την διαδικασία του καλουπώματος.
- Καθαρότητα: δεν πρέπει να υπάρχουν προσμίξεις στις σκόνες των μετάλλων, διότι οι ακαθαρσίες μειώνουν την διάρκεια ζωής της μήτρας. Με χρήση αναγωγικής ατμόσφαιρας, είναι δυνατόν να αφαιρεθούν οι προσμίξεις και τα οξειδία από τα αέρια.
- Συμπιεστότητα: είναι το πηλίκιο του όγκου της αρχικής σκόνης προ τον όγκο των συμπαγών τμημάτων.
- Φαινόμενη πυκνότητα: είναι ο λόγος του όγκου προς το βάρος της μη συμπιεσμένης κόνεος.
- Ρυθμός ροής : η ικανότητα ροής της σκόνης, ώστε να καλύπτει ολοκληρωτικά τις κοιλότητες των τοιχωμάτων της μήτρας.

2.2.3 Βασικά στάδια της διαδικασίας

Τα βασικά στάδια για την κατασκευή τμημάτων με την μέθοδο μεταλλουργικής πούδρας είναι: κατασκευή μεταλλικών κόνεων, ανάδευση και ανάμειξη κόνεων, συμπύκνωση, πυροσσωμάτωση και αποπεράτωση-φινίρισμα [13].

2.2.3.1 Κατασκευή μεταλλικών κόνεων

Οι κυριότερες διαδικασίες για την παραγωγή κόνεων είναι: μηχανουργική κατεργασία, αναγωγή, συμπύκνωση, ηλεκτρολυτική εναπόθεση, ατμοποίηση, εκτόξευση σταγονιδίων, σύνθλιψη και άλεση.

- Η μηχανουργική κατεργασία είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιείται για ειδικές περιπτώσεις. Παράγονται χονδροειδείς κόνεις σε μέγεθος και σχήμα τους είναι ακανόνιστο. Τα πρώτα τσιπ παράγονται με μηχανουργική κατεργασία και έπειτα κονιορτοποιούνται με σύνθλιψη και άλεση.
- Αναγωγή: με κατάλληλο αναγωγικό αέριο σε ελεγχόμενο κλίβανο σε αυξημένη θερμοκρασία με αναγωγή του οξειδίου του μετάλλου λαμβάνεται το καθαρό μέταλλο. Έπειτα συνθλίβεται και αλέθεται σε σκόνη.
- Συμπύκνωση: με βρασμό των μετάλλων παράγονται ατμοί οι οποίοι συμπυκνώνονται για να δημιουργηθούν κόνεις μετάλλων.
- Ηλεκτρολυτική εναπόθεση: η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή κόνεων χαλκού και σιδήρου. Οι πλάκες χαλκού τοποθετούνται ως άνοδοι στην δεξαμενή του ηλεκτρολύτη και οι πλάκες αλουμινίου τοποθετούνται σε ηλεκτρολύτη ως κάθοδος.
- Ατμοποίηση: Το τηγμένο μέταλλο μέσω ενός μικρού στομίου αποσυντίθεται από μία ισχυρή δέσμη πεπιεσμένου αέρα, αδρανούς αερίου ή νερού.
- Εκτόξευση σταγονιδίων: Το τηγμένο μέταλλο μέσα από ένα στόμιο πέφτει σε νερό και ψύχεται
- Σύνθλιψη και άλεση: στην μέθοδο αυτή πραγματοποιείται σύνθλιψη και θρυμματισμός μέσω μύλων αποτύπωσης, θραυστήρων και σφαιρόμυλων.

2.2.3.2 Ανάδευση και ανάμειξη των κόνεων

Η διαδικασία αυτή είναι σημαντική για την ομοιομορφία του εξαρτήματος. Πριν την ανάμειξη προστίθενται λιπαντικά για την μείωση της φθοράς και της τριβής.

2.2.3.3 Συμπίεση

Η συμπίεση πραγματοποιείται με σκοπό η σκόνη να μετατραπεί σε προ συμπιεσμένο προϊόν που θα έχει ακριβές σχήμα και μέγεθος. Κύριες μέθοδοι συμπίεσης είναι: συμπίεση, φυγοκεντρική συμπίεση, διέλαση, έλαση, εκρηκτική συμπίεση, πυροσσωμάτωση βαρύτητας, χύτευση ολίσθησης και ισοστατική συμπίεση.

- Συμπίεση: Σε μία μεταλλική κοιλότητα καλουπιού συμπιέζονται μεταλλικές σκόνες με σκοπό να διαμορφωθεί ένα στοιχείο στο περίγραμμα της μήτρας.
- Φυγοκεντρική συμπίεση: Η μήτρα γεμίζει με σκόνη και γίνεται φυγόκεντρη ώστε να εξαχθεί ένα συμπαγές ομοιόμορφης πυκνότητας εξάρτημα.
- Διέλαση: Χρησιμοποιείται για συστατικά υψηλής πυκνότητας. Πραγματοποιείται για συμπίεση συγκεκριμένων υλικών και διαχωρίζεται σε ψυχρή διέλαση και θερμή εξέλαση. Στην πρώτη πραγματοποιείται ανάμειξη με συνδετικό υλικό και στη συνέχεια γίνεται συμπίεση σε μπιγιέτα. Κατά την διαδικασία πυροσσωμάτωσης ή πριν, απομακρύνεται το συνδετικό υλικό. Στην θερμή εξέλαση η σκόνη συμπιέζεται σε μπιγιέτες, θερμαίνεται και οι μπιγιέτες τοποθετούνται εντός του δοχείου και εξωθούνται μέσω της μήτρας.
- Έλαση: Πραγματοποιείται για συνεχόμενες λωρίδες και ράβδους με συγκεκριμένο πορώδες και ομοιόμορφες μηχανικές ιδιότητες. Η μεταλλική σκόνη περνά μεταξύ δύο ελάστρων όπου συμπιέζεται για να σχηματιστεί ένα

φύλλο με επαρκή αντοχή. Έπειτα πραγματοποιείται νέα έλαση και υποβάλλεται σε θερμική επεξεργασία αν χρειαστεί.

- **Εκρηκτική συμπίεση:** Δημιουργείται πίεση από ένα εκρηκτικό και χρησιμοποιείται για να γίνει συμπαγής η πούδρα του μετάλλου. Μέσα σε ένα κυλινδρικό δοχείο νερού με παχύ τοίχωμα βυθίζονται αδιάβροχοι σάκοι. Η πίεση στον κύλινδρο αυξάνεται εξαιτίας της αιφνίδιας επιδείνωσης του φορτίου και πιέζει τη σκόνη του μετάλλου για τον σχηματισμό πρώτης συμπίεσης.
- **Πυροσυσσωμάτωση βαρύτητας:** Είναι μία διαδικασία κατασκευής λαμαρινών ελεγχόμενου πορώδους. Η σκόνη χύνεται σε έναν κεραμικό δίσκο με σκοπό τον σχηματισμό ενός ομοιόμορφου στρώματος και έπειτα συντήκεται μέχρι 48 ώρες σε αέριο αμμωνίας σε υψηλή θερμοκρασία.
- **Χύτευση ολίσθησης:** Πούδρα αναμειγνύεται με νερό και χύνεται στο καλούπι που είναι κατασκευασμένο από γύψο. Το υγρό στον πολτό απορροφάται από το καλούπι.
- **Ισοστατική συμπίεση:** Σε ελαστικό καλούπι εισέρχεται μεταλλική σκόνη και εφαρμόζεται πίεση από 65 έως 650MPa σε όλα τα τοιχώματα. Στη συνέχεια το σώμα που έχει γίνει συμπαγές βγαίνει από τον θάλαμο με το αέριο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ίδια αντοχή προς όλες τις κατευθύνσεις, χαμηλό κόστος εξοπλισμού κι μεγαλύτερη αντοχή προ συμπίεσης.

2.2.3.4 Πυροσυσσωμάτωση

Πυροσυσσωμάτωση είναι η ανόπτηση προ συμπιεσμένων μεταλλικών κόνεων που με διάχυση και ανακρυστάλλωση δημιουργείται κρυσταλλικός ιστός. Η πυροσυσσωμάτωση πραγματοποιείται με την θέρμανση προ συμπιεσμένου υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες. Με την πυροσυσσωμάτωση το υλικό είναι πιο συμπαγές. Καθοριστικοί παράγοντες στη διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης είναι ο χρόνος, η θερμοκρασία και η ατμόσφαιρα.

2.2.3.5 Επιφανειακές κατεργασίες-φινίρισμα

Συγκαταλέγονται στις δευτερεύουσες διεργασίες με τις οποίες επιτυγχάνονται ανοχές ως προς τις διαστάσεις και καλύτερη ποιότητα επιφάνειας.

Περιλαμβάνονται: διαστασιολόγηση, μηχανουργική κατεργασία, θερμική επεξεργασία, επιμετάλλωση, εμποτισμός, διήθηση-διαρροή, κοπή νομισμάτων.

- Διαστασιολόγηση: Πρόκειται για την επίτευξη της απαιτούμενης ακρίβειας του πυροσσωματωμένου στοιχείου στην μήτρα
- Μηχανουργική κατεργασία: πρόκειται για τον σχηματισμό οπών, αυλακώσεων κ.λπ., τα οποία δεν μπορούν να δημιουργηθούν στην διαδικασία της κονιομεταλλουργίας.
- Θερμική επεξεργασία: αφορά την θέρμανση και την ψύξη των πυροσσωμάτων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση στην αντίσταση σε φθορά, στην δομή των κόκκων και στην αντοχή. Μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας με τις οποίες πραγματοποιούνται τα άνωθεν είναι: απόταση, ενανθράκωση, εναζώτωση, επαγωγική βαφή.
- Επιμετάλλωση: πραγματοποιείται για προστασία από διαβρωτικό περιβάλλον (Ni plating), για βελτίωση ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Cu και Ag plating) και για λόγους αισθητικής (Cr plating).
- Εμποτισμός: πρόκειται για την πλήρωση λιπαντικού στοιχείου σε ένα πυροσσωμάτωμα όπως γράσο, λάδι, κ.λπ.
- Διήθηση- διαρροή: πρόκειται για την σφυρηλάτηση με τηγμένο μέταλλο στο πυροσσωμάτωμα για την κάλυψη των πόρων με σκοπό την βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων.
- Κοπή νομισμάτων: πρόκειται για την καταστολή των πυροσσωματωμένων συστατικών στη μήτρα με σκοπό την αύξηση της πυκνότητας για περαιτέρω αντοχή.

2.2.4 Σύγκριση των μεθόδων επεξεργασίας της κονιομεταλλουργίας

Η αποτελεσματική σύγκριση των μεθόδων επεξεργασίας της κονιομεταλλουργίας ως προς τα κύρια χαρακτηριστικά του σχεδιασμού, έγκειται στον εντοπισμό των μειονεκτημάτων και των πλεονεκτημάτων κάθε μεθόδου [14]. Τα κύρια χαρακτηριστικά για κάθε μέθοδο επεξεργασίας:

- Συμβατικές μέθοδοι συμπίεσης καλουπιών:
 - Συχνότερα εμφανιζόμενα υλικά εφαρμοσμένης μηχανικής όπως χάλυβας, ανοξείδωτος χάλυβας, σίδηρος, χαλκός, μπρούντζος, αλουμίνιο, ορείχαλκος
 - Συχνότερα εφαρμοζόμενο σε μεσαίους ή υψηλούς όγκους παραγωγής μικρού και μεσαίου μεγέθους μερών, όπως μοχλούς, έκκεντρα, γρανάζια, τροχαλίες, οδοντωτούς τροχούς κ.α.
 - Πιο μεγάλο φάσμα πυκνότητας μαζί με το υψηλό πορώδες φίλτρων και υψηλών αποδόσεων δομικών μερών
 - Περιορισμένες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες λόγω του υπολειπόμενου πορώδους
 - Ανταγωνιστικότερη οικονομικά από τις μεθόδους κονιομεταλλουργίας
 - Μεγάλο εύρος εφαρμογών, από χαμηλή σε υψηλή πίεση

- Σφυρηλάτηση κόνεων:
 - Δυνατότητα εφαρμογής σε κάθε υλικό μηχανικής προερχόμενο από εν θερμώ σφυρηλάτηση, ωστόσο μέχρι στιγμής εφαρμόζονται σε χαμηλής κραμάτωσης χάλυβα
 - Εφαρμογή σε μεγάλου όγκου προϊόντα όπως τμήματα εργαλείων, εξαρτήματα μετάδοσης κίνησης
 - Παρεμφερής μηχανικές ιδιότητες με σφυρήλατο ατσάλι.
 - Οικονομικότερη από κατεργασίες που χρησιμοποιούν ενδιάμεσα μεγάλα εξαρτήματα από κράματα

- Χύτευση υπό πίεση:
 - Μικρό φάσμα υλικών
 - Μικρό και σύνθετο σχήμα προϊόντων μεσαίου και υψηλού όγκου παραγωγής
 - Δυνατότητα πολύπλοκων σχημάτων
 - Μη οικονομική συγκριτικά με άλλες μεθόδους συμπίεσης καλουπιών
 - Λόγω υψηλής πυκνότητας παρέχει πολύ υψηλές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, έναντι των συμβατικών μεθόδων

- Θερμοϊσοστατική συμπίεση:

Πρόκειται για ταυτόχρονη εφαρμογή θερμοκρασίας και πίεσης, ώστε η συμπίεση της σκόνης να πραγματοποιείται στιγμιαία σε μία μήτρα.

 - Εφαρμόζεται μόνο σε ακριβά υλικά, ωστόσο ο περιορισμός των υλικών έγκειται μόνο στο κόστος της μεθόδου.
 - Καταλληλότερο για μικρό και μεσαίο όγκο παραγωγής
 - Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες υπερτερούν έναντι των προϊόντων χύτευσης ή των προϊόντων που προήλθαν από μηχανουργική κατεργασία.

2.2.5 Παρατηρήσεις σχετικά με το σχεδιασμό για τα μέρη της κονιομεταλλουργίας

Σημαντικοί παράγοντες κατά τον σχεδιασμό των τμημάτων της κονιομεταλλουργίας είναι ο τρόπος συμπίεσης και ο διαθέσιμος εξοπλισμός.

- Είναι ιδιαίτερα σύνθετο κατά την συμπίεση να δημιουργηθούν οπές πλευρικές ή αυλακώσεις. Αυτές απαιτούν δευτερεύουσες κατεργασίες.
- Σπειρώματα, βίδες και παρεμφερή σχήματα πρέπει να γίνονται με μηχανική κατεργασία και όχι μέσω συμπίεσης.
- Αποφυγή μεταβολών στο πάχος του εξαρτήματος και ιδιαίτερα σε λεπτότοιχα μέρη, όσο αυτό είναι εφικτό.
- Αποφυγή αιχμηρών γωνιών, επιλογή μεγάλων ραδίων.
- Αδυναμία ανοιγμάτων και οπών κάθετων στην κατεύθυνση πίεσης, διότι παρεμποδίζεται η εξόλκευση των μερών.

2.2.6 Πλεονεκτήματα της κονιομεταλλουργίας

Η μέθοδος της κονιομεταλλουργίας έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- Παρόλο το υψηλό κόστος κατασκευής των κόνεων, δεν υπάρχει απώλεια υλικού. Βρίσκει εφαρμογή στην μορφοποίηση δύστηκτων μετάλλων και δεν καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας, διότι δεν πραγματοποιείται τήξη του υλικού.
- Κατά τη σύνθεση του προϊόντος δεν υπάρχει διάλυση αερίων ή εισαγωγή ακαθαρσιών όπως γίνεται στην χύτευση.
- Μπορούν να παραχθούν προϊόντα με στενές ανοχές και καλή ποιότητα επιφάνειας.
- Υψηλό ποσοστό παραγωγικής διαδικασίας.
- Πολυπλοκότητα εξαρτημάτων.
- Μεγάλο φάσμα στις ιδιότητες όπως μέγεθος σωματιδίων, πυκνότητα, πορώδες.
- Δεν υπάρχουν μεταβολές στον όγκο καθώς διαμορφώνονται για την τελική γεωμετρία.
- Καλή ποιότητα επιφάνειας.
- Κατά την διαδικασία αυτή πραγματοποιείται ανάμειξη μεταλλικών και μη μεταλλικών κόνεων για την παραγωγή προϊόντων με ειδικά χαρακτηριστικά.
- Παραγωγή πορώδων μερών που ήταν αδύνατο να παραχθούν με άλλο τρόπο.

2.2.7 Περιορισμοί της κονιομεταλλουργίας

Οι περιορισμοί της κονιομεταλλουργίας είναι οι κάτωθι:

- Υψηλό κόστος εξοπλισμού και πρώτης ύλης.
- Επικινδυνότητα αποθήκευσης λόγω δυνατότητας έκρηξης ή πυρκαγιάς.
- Καλούπια επιμέρους εξαρτήματα καλουπιών υψηλών απαιτήσεων και λόγω υψηλών πιέσεων.
- Η ύπαρξη πορώδους στα προϊόντα κονιομεταλλουργίας το οποίο επιδρά αρνητικά στην αντοχή του υλικού.
- Κακή ολκιμότητα των προϊόντων.
- Η πυροσυσσωμάτωση μπορεί να είναι μία διαδικασία που χρειάζεται χρόνο.

2.2.8 Εφαρμογές της κονιομεταλλουργίας

- Αυτολιπαινόμενα έδρανα και φίλτρα.
- Υλικά τριβής.
- Γρανάζια και στροφεία αντλίας.
- Πυρίμαχα υλικά.
- Ηλεκτρικές επαφές και ηλεκτρόδια.
- Μαγνητικά υλικά.
- Κεραμικά υλικά.
- Συνθετικά εργαλεία μεταλλικής μήτρας με διαμάντι.
- Εξαρτήματα με πολύπλοκη γεωμετρία.

2.2.9 Ποιοτικός έλεγχος των προϊόντων της κονιομεταλλουργίας

Βασικό μέρος της προδιαγραφής και της αξιοπιστίας κάθε προϊόντος είναι η ποιότητα του, η οποία μπορεί να εκφραστεί με μετρήσιμους όρους [15]. Η ποιότητα μπορεί να οριστεί στα τρία στάδια ζωής του προϊόντος: στον σχεδιασμό, στην κατασκευή και στην φάση της λειτουργίας του. Η ποιότητα και η αξιοπιστία των προϊόντων ελέγχεται σύμφωνα με τα πρότυπα. Κατά τον σχεδιασμό, παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα του προϊόντος είναι:

- Σωστή επιλογή διαδικασίας, εργαλείων και μηχανών με σκοπό την επίτευξη των απαιτούμενων ανοχών.
- Επιλογή κατάλληλου εξοπλισμού για τον έλεγχο των διαδικασιών.
- Ορισμός κριτηρίων ελέγχου.
- Προγραμματισμός ελέγχων.

Ο έλεγχος ποιότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί ώστε να διασφαλίσει ότι οι πρώτες ύλες είναι οι κατάλληλες, εν συνεχεία να πραγματοποιηθεί έλεγχος των υπό κατασκευή εξαρτημάτων και τέλος κατά την λειτουργία των παραχθέντων εξαρτημάτων.

2.2.9.1 Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει την ποιότητα αλλά και να υπολογίζει το κόστος. Ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία είναι ο ορισμός των φυσικών ιδιοτήτων που πρέπει να ελεγχθούν και οι ανοχές τους, ο τρόπος ελέγχου για κάθε μία από αυτές και ο τρόπος δειγματοληψίας και η αποδοχή ή μη της παρτίδας.

2.2.9.2 Πυκνότητα

Στα υλικά κονιομεταλλουργίας τα οποία προέρχονται από πυροσυσσωμάτωση η πυκνότητα κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 70 έως 95% της πυκνότητας του υλικού που προέρχεται από συμβατικές μεθόδους. Υπάρχουν δύο ειδών πόροι, αυτοί που συνδέονται κατά μήκος των ορίων των κόκκων και ονομάζονται διασυνδεδεμένοι και οι κλειστοί, οι οποίοι υπάρχουν όταν το ολικό πορώδες είναι κάτω του 5% και είναι τις περισσότερες φορές έχουν σφαιρικό σχήμα. Η πυκνότητα καθορίζεται μέσω διαδικασιών που ορίζει το πρότυπο ISO2738.

2.2.9.3 Μηχανικές ιδιότητες

Στις βιομηχανικές εφαρμογές για τα υλικά κονιομεταλλουργίας έχει υιοθετηθεί η έννοια των ελαχίστων τιμών αντοχής από την συνομοσπονδία βιομηχανικής παραγωγής υλικών κονιομεταλλουργίας. Σε ένα ευρύ φάσμα υλικών οι ελάχιστες τιμές αντοχής είναι ισοδύναμες, αλλάζοντας την χημική σύνθεση, τις τεχνικές επεξεργασίας και το μέγεθος των σωματιδίων.

2.2.9.3.1 Δοκιμή σκληρότητας

Πρόκειται για μία δοκιμή η οποία χαρακτηρίζει την μηχανική συμπεριφορά των πορώδων υλικών. Η ενδεικτική σκληρότητα ενός πυροσσωματωμένου υλικού, λόγω των κενών στην δομή του επηρεάζεται από την πυκνότητα του. Το πρότυπο ISO συνιστά τη μέθοδο Vickers, ωστόσο προτείνει και εναλλακτικές λύσεις. Ένα πρόβλημα στην δοκιμή σκληρότητας των πορώδων υλικών είναι ότι το πορώδες μπορεί να γεμίσει από ένα υλικό με διαφορετική σκληρότητα από το κυρίως υλικό, με αποτέλεσμα η ένδειξη να μην είναι αντιπροσωπευτική των παραμέτρων λειτουργίας. Για να αποφευχθούν λανθασμένα συμπεράσματα συνιστανται δοκιμές μικροσκληρότητας.

2.2.9.3.2 Αντοχή σε εφελκυσμό

Οι ιδιότητες εφελκυσμού των πυροσσωματωμένων υλικών είναι χαμηλότερες από των συμβατικών και επηρεάζονται από το πορώδες του υλικού. Τα δοκίμια για την δοκιμή εφελκυσμού προέρχονται από συμπίεση. Το πορώδες επιδρά εντονότερα στην ολκιμότητα παρά στην αντοχή. Επίδραση επίσης υπάρχει και κατά την μεταβολή της παραγωγικής διαδικασίας.

2.2.9.3.3 Αντοχή σε κάμψη

Μεγάλη προσοχή δίνεται στο πάχος και στο πλάτος των δειγμάτων. Η δοκιμή ισχύει όταν τα υλικά έχουν αμελητέα ολκιμότητα. Καταγράφεται το φορτίο θραύσεως για τουλάχιστον πέντε δοκιμές.

2.2.9.3.4 Δυσθραυστότητα

Η δοκιμή δυσθραυστότητας εφαρμόζεται σπανίως και πραγματοποιείται με δύο τρόπους: μετρώντας την απορροφόμενη ενέργεια ενός δοκιμίου που υπόκειται σε θραύση λόγω εφαρμογής μίας δύναμης κρούσεως, ή μετρώντας την αντίσταση διάδοσης ρωγμών κάτω από στατικές συνθήκες καταπόνησης.

2.2.9.3.5 Αντοχή σε κρούση

Είναι σημαντικό να εφαρμόζονται δοκιμές κόπωσης σε περιπτώσεις όπου έχει υποστεί επεξεργασία η επιφάνεια του δοκιμίου. Όταν το δοκίμιο καταπονηθεί στην κρίσιμη τιμή αντοχής, εμφανίζονται μικρές ρωγμές σε εγκλείσματα και πόρους που ενώνονται και σχηματίζουν την τελική ρωγμή, η οποία δημιουργεί περικρυσταλλική ή ενδοκρυσταλλική θραύση.

2.2.9.4 Θραύση

Η θραύση διευκολύνεται σημαντικά από πόρους και εγκλείσματα. Το μέγεθος και η συγκέντρωση τους επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα καθώς και ο τρόπος που έχουν συμπεριστεί και έχουν κατεργαστεί στην πορεία.

2.2.9.5 Τραχύτητα επιφάνειας

Κρίσιμος παράγοντας για την ποιότητα της επιφάνειας είναι η σειρά των κατεργασιών που έχει υποστεί το υλικό. Η φθορά της μήτρας επηρεάζει το στάδιο της συμπίεσης, η καύση του λιπαντικού και η εξάλειψη οξειδίων στην επιφάνεια τη μεταλλικής σκόνης επηρεάζει το στάδιο της πυροσσωμάτωσης. Κατά το στάδιο της διαστασιολόγησης καθοριστική είναι η επιφάνεια των εργαλείων. Οι συμβατικές ερμηνείες για την τραχύτητα εξετάζουν τις κορυφές και τις κοιλάδες των κατεργασμένων επιφανειών.

2.2.9.6 Ηλεκτρική αντίσταση

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι σημαντική παράμετρος για τα ηλεκτρικής επαφής υλικά και επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες, όπως το λιπαντικό, τα χαρακτηριστικά της σκόνης, τη συμπαγοποίηση υπό πίεση.

2.2.9.7 Μαγνητικές ιδιότητες

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι πρόκειται για ένα μη καταστροφικό έλεγχο. Η ύπαρξη των πόρων επιδρά στις μαγνητικές ιδιότητες, διότι αλλάζει ο τρόπος που κατανέμεται η μαγνητική ροή και υπάρχει κατώτερη ποσότητα μαγνητικά ενεργού υλικού. Επίσης το σχήμα, το μέγεθος και η κατανομή των πόρων κατά μήκος της διαδρομής, επιδρούν στις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών.

2.2.9.8 Μεταλλογραφική ανάλυση

Η μεταλλογραφική ανάλυση δύναται να παρουσιάσει το είδος και την μορφολογία των πόρων, τα οποία επιδρούν στις ιδιότητες του υλικού. Κατά την μεταλλογραφία είναι δυνατόν να αλλάξει η επιφάνεια του δείγματος με αποτέλεσμα τα λανθασμένα συμπεράσματα ως προς την μικροδομή. Τέτοιου είδους συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν στην περίπτωση που οι πόροι του υλικού έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση, ή όταν έχει αφαιρεθεί υλικό κατά την διαδικασία της λείανσης ή και στρογγυλοποίηση των άκρων των πόρων. Τα στάδια προετοιμασίας των προς εξέταση δειγμάτων για την μεταλλογραφική ανάλυση, μπορεί να είναι:

- Κοπή δείγματος: μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν λειαντικό τροχό και χρήση νερού ως ψυκτικού μέσου.
- Λείανση: χρησιμοποιώντας λειαντικό χαρτί Sic220 grit και νερό για ψύξη, με ταχύτητα 300 στροφές/λεπτό, μπορεί να πραγματοποιηθεί η λείανση για τρία βήματα.
- Εμποτισμός: με αυτό σφραγίζεται το ανοιχτό πορώδες του δείγματος, ώστε να μην εγκλωβίζονται υπολείμματα στους πόρους, τα οποία είναι πιθανό να προκαλέσουν αλλοιώσεις κατά την μεταλλογραφική ανάλυση.
- Στίλβωση: πραγματοποιείται με διαμανταλοιφή 6 μm, 3 μm και 1μm διαδοχικά. Εναλλακτικά χρησιμοποιείται πανί με εναιώρημα αλουμίνιας.

- Χημική προσβολή: γίνεται με εμβάπτιση καθώς βοηθάει στην εξέταση της ομοιογένειας της φασματοποίησης του μεγέθους των κόκκων και της παρουσίας διαφόρων φάσεων.

2.2.9.9 Αντοχή στη διάβρωση

Η διάβρωση οφείλεται στην αντίδραση μίας στερεάς φάσης με το περιβάλλον. Μπορεί να εφαρμοστεί η δοκιμή απώλειας βάρους κατά την οποία μετράται το βάρος του δείγματος κατά την διάβρωσή του σε διάλυμα δοκιμής. Στην περίπτωση παθητικών κραμάτων δεν εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος.

Άλλος τρόπος μέτρησης είναι η ερμηνεία καμπύλης πόλωσης. Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα με ηλεκτρόδια πλατίνας, συνδέεται το δείγμα ως ηλεκτρόδιο. Καταγράφεται το δυναμικό του ηλεκτροδίου και οι τιμές πυκνότητας και κατασκευάζεται η καμπύλη πόλωσης, η οποία περιγράφει την ηλεκτροχημική δραστηριότητα συναρτήσει του δυναμικού.

2.2.9.10 Ποιοτικός έλεγχος πορωδών προϊόντων

Οι τυποποιημένες μηχανικές δοκιμές προσφέρουν πληροφορίες για τις ιδιότητες του υλικού σχετικά με τις κατάλληλες εφαρμογές του. Ωστόσο υπάρχουν παράγοντες που μπορεί να παρεμποδίσουν την ποιότητα των πορωδών προϊόντων, όπως:

- Τρόπος και διαδικασίες ελέγχου.
- Αναθεώρηση του αρχικού σχεδιασμού και προσθήκη νέων στοιχείων.
- Αδυναμία πρόβλεψης κατάλληλης χρήσης προϊόντος.
- Υποκαταστάσεις υλικών.
- Αστοχία κατά τον έλεγχο της μεταλλικής σκόνης.

Η μείωση του κόστους παραγωγής συναρτήσει της αύξησης της παραγωγικότητας είναι ένα μειονέκτημα για τον σωστό ποιοτικό έλεγχο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Η κατεργασία μεταλλικών υλικών προϋποθέτει μια σειρά από διαδικασίες οι οποίες μετατρέπουν την πρώτη ύλη σε τελικό προϊόν. Συνίσταται από κατεργασίες μορφοποίησης, μηχανουργικές κατεργασίες, θερμικές κατεργασίες, και διαδικασίες συναρμολόγησης. Οι διεργασίες διαμόρφωσης (ή μορφοποίησης) μετάλλων αποτελούνται από μια σειρά τεχνικών κατά την οποία το σχήμα του επεξεργασμένου υλικού μεταβάλλεται χωρίς την αλλαγή της μάζας ή της σύνθεσης του. Κατά τη διάρκεια της μορφοποίησης το μεταλλικό υλικό παραμορφώνεται πλαστικά.

3.2 Διεργασίες μορφοποίησης

Κατά την κατεργασία μεταλλικών υλικών ένα αρχικό απλό τεμάχιο (π.χ. μια χαλύβδινη μπιγιέτα) παραμορφώνεται πλαστικά, ανάμεσα σε κατάλληλα εργαλεία, ώστε να ληφθεί μία διαφορετική επιθυμητή γεωμετρία (π.χ. ένα έλασμα). Οι κατεργασίες ταξινομούνται με βάση διάφορα κριτήρια, όπως η αρχική μορφή του επεξεργασμένου υλικού, ο τρόπος παραμόρφωσής του, η θερμοκρασία κατεργασίας του, κλπ. [16].

3.2.1 Αρχέγονες κατεργασίες (primary forming processes)

Κατά τις αρχέγονες κατεργασίες ένα υλικό χωρίς συγκεκριμένο σχήμα, μορφοποιείται ώστε να αποκτήσει καθορισμένη γεωμετρία (π.χ. χύτευση, κονιομεταλλουργία).

3.2.2 Διαμορφώσεις (forming processes)

Κατά τις διαμορφώσεις ένα υλικό με συγκεκριμένο σχήμα παραμορφώνεται πλαστικά ώστε να αποκτήσει διαφορετικό σχήμα και διατηρεί την μάζα του. Οι διαμορφώσεις διακρίνονται σε κατεργασίες διαμόρφωσης του συμπαγούς υλικού (bulk forming) και κατεργασίες διαμόρφωσης ελάσματος (sheet metal forming). Και στις δύο περιπτώσεις, οι επιφάνειες του μετάλλου που παραμορφώνεται και των εργαλείων διαμόρφωσης έρχονται σε επαφή. Η μεταξύ τους τριβή μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ροή του επεξεργασμένου υλικού.

3.2.2.1 Διεργασίες μορφοποίησης συμπαγούς υλικού

Στην μορφοποίηση συμπαγούς υλικού, το υλικό έχει μορφή ράβδου ή πλάκας και ο λόγος της επιφάνειας προς τον όγκο στο προς διαμόρφωση τμήμα αυξάνεται σημαντικά κάτω από την επίδραση φορτίσεως μεγάλης δύναμης συμπίεσης. Το τεμάχιο το οποίο παραμορφώνεται υφίσταται μεγάλη πλαστική παραμόρφωση καταλήγοντας σε ένα τελικό προϊόν του οποίου το σχήμα και το μέγεθος της διατομής του έχει αλλάξει αισθητά. Επίσης, η πλαστική παραμόρφωση που υφίσταται το προς διαμόρφωση τεμάχιο είναι πολύ μεγαλύτερη από την ελαστική παραμόρφωση, επομένως η ελαστική ανάκτηση μετά την παραμόρφωση είναι αμελητέα. Στις τεχνικές μορφοποίησης συμπαγούς υλικού ανήκουν: η σφυρηλάτηση, η έλαση, η διέλαση, η ολκή κλπ.

Ένα λεπτό επίπεδο έλασμα παραμορφώνεται πλαστικά υπό την επίδραση εφελκυστικών φορτίων, σε ένα τρισδιάστατο σχήμα, συχνά χωρίς να υπάρχει κάποια σημαντική αλλαγή στο πάχος του φύλλου ή στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Στις τεχνικές διαμόρφωσης επιπέδου ελάσματος όπου ανήκουν: η απότμηση, η κάμψη, η βαθειά κοίλανση κλπ.

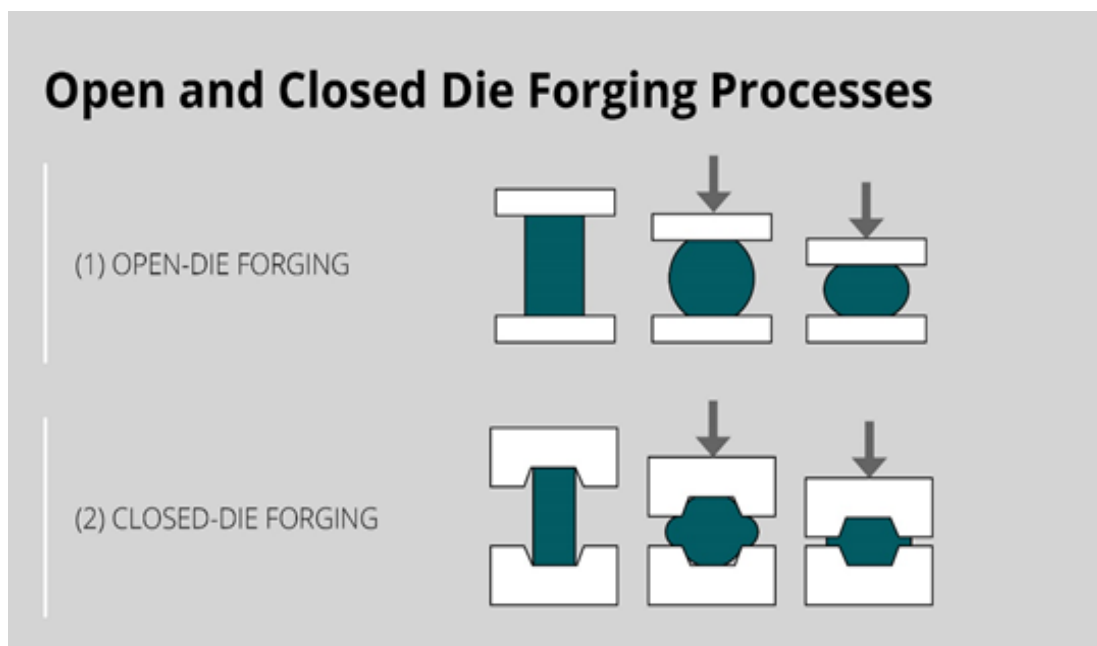
3.2.2.2 Σφυρηλάτηση (FORGING)

Η σφυρηλάτηση είναι μια τεχνική μορφοποίησης όπου η πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου υλικού επιτυγχάνεται με άσκηση θλιπτικών φορτίων. Εφαρμόζεται σε μεγάλη ποικιλία υλικών και σε μεγάλη γκάμα μεγέθους και σχήματος (π.χ. εκκεντροφόροι άξονες, διωστήρες, χειροτροχοί, οδοντωτοί τροχοί, ήλοι, εργαλεία χειρός, πτερύγια ελίκων κλπ.). Μπορεί να εκτελούνται εν ψυχρώ, εν θερμώ και εν ημιθερμώ (Εικόνα 3.1). Η ικανότητα ενός υλικού να παραμορφώνεται με σφυρηλάτηση σε ορισμένη θερμοκρασία και ταχύτητα παραμόρφωσης δείχνει την κατεργασιμότητά του σε σφυρηλάτηση (forgeability). Η κατεργασιμότητα σε σφυρηλάτηση ενός υλικού ορίζεται από μια σειρά ιδιοτήτων: ολκιμότητα, αντοχή, συνιστάμενη θερμοκρασία κατεργασίας, αντοχή σε τριβή, και ποιότητα του τελικού προϊόντος. Τα υλικά κατάλληλα για σφυρηλάτηση ταξινομούνται κατά φθίνουσα τάξη κατεργασιμότητας σε: κράματα Al, κράματα Mg, κράματα Cu, ελαφρά κραματωμένοι ανθρακούχοι χάλυβες, ανοξειδωτοί χάλυβες, κράματα Ti, υπερκράματα Fe, υπερκράματα Co, κράματα Ta, κράματα Mo, υπερκράματα Ni, κράματα Ni και κράματα W.

Εφαρμόζονται ποικίλες τεχνικές σφυρηλάτησης (Εικόνα 3.2): σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με απότμηση, σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας χωρίς απότμηση, κερματοποίηση, σφυρηλάτηση με χρήση υψισύχνων, άμεση σφυρηλάτηση, έμμεση σφυρηλάτηση, κοπή οδόντων σε γρανάζια, ισόθερμη σφυρηλάτηση, κοπή άκρων, σφυρηλάτηση ανοιχτής μήτρας, περιστροφική σφυρηλάτηση, σφυρηλάτηση ακριβείας, σφυρηλάτηση μεταλλικής σκόνης, ακτινική σφυρηλάτηση, και μερική σφυρηλάτηση ανοιχτής μήτρας [17].



Εικόνα 3.1 Απεικόνιση Σφυρηλάτησης [18]



Εικόνα 3.2 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας σφυρηλάτησης: με ανοιχτή μήτρα (1) και με κλειστή μήτρα (2) [19]

3.2.2.3 Έλαση(rolling)

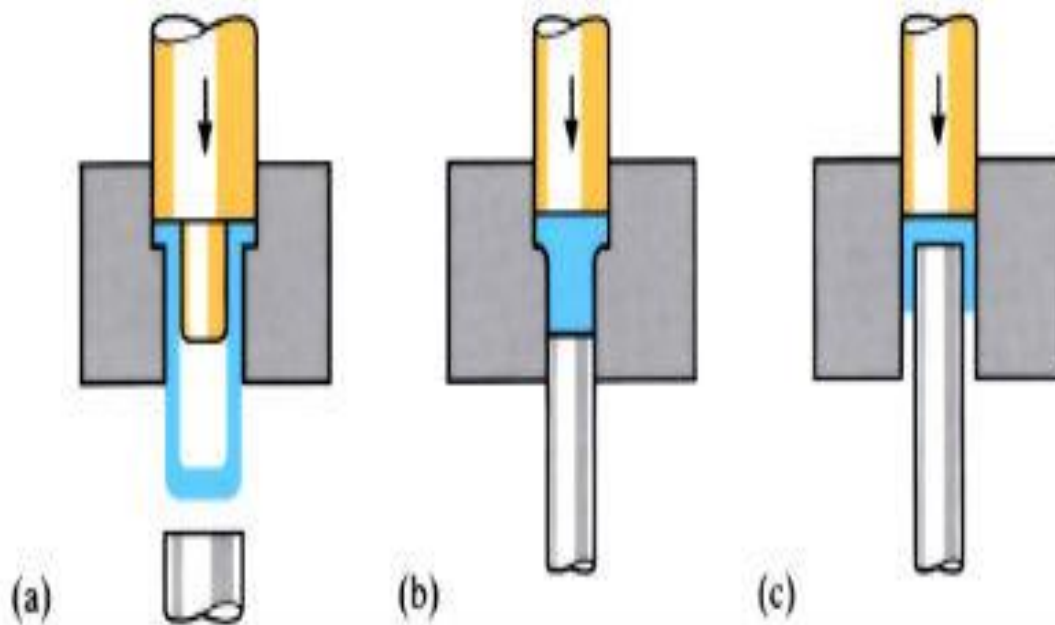
Η έλαση είναι μια τεχνική μορφοποίησης όπου ένα τεμάχιο υπό μορφή ράβδου ή πλάκας υφίσταται πλαστική παραμόρφωση διερχόμενο μέσα από το άνοιγμα μεταξύ δύο αντίθετα περιστρεφόμενων ράουλων (τυμπάνων). Ως αποτέλεσμα προκύπτει ένα προϊόν με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος. Η έλαση εκτελείται σε διάφορες φάσεις (πάσα). Το πρωτογενές υλικό είναι πλίνθωμα (ingot), προϊόν χύτευσης, ενώ τα προϊόντα των επόμενων φάσεων διακρίνονται σε επιμήκη (ράβδοι, μπιγέτες, μορφοδοκοί) και σε πλατιά προϊόντα (πλάκες, ελάσματα, ταινίες). Ανάλογα με τη φάση της έλασης και τη μορφή του προϊόντος, ακολουθείται τυποποιημένη παραγωγική διαδικασία. Στο πρώτο στάδιο προκύπτουν ημι-κατεργασμένα προϊόντα (semi-finished products), μπιγέτα πρώτης έλασης (bloom). Στα περαιτέρω στάδια με την μείωση του πάχους μπορεί να προκύπτουν μπιγέτες (billet) τετραγωνικής διατομής με μικρότερο εμβαδόν ή πλάκες (slab) ορθογωνικής διατομής. Τα τελικά προϊόντα (finished products) λαμβάνονται με την περαιτέρω διαμόρφωση των ημι-κατεργασμένων προϊόντων. Μπορεί να προκύπτουν: επιμήκη προϊόντα (μορφοδοκοί, ήλοι με σπείρωμα, δακτύλιοι κλπ.) και πλατιά προϊόντα, ελάσματα (plates), φύλλα (sheets) και λεπτές λωρίδες (strips). Η έλαση μπορεί να πραγματοποιηθεί εν θερμώ και εν ψυχρώ και διακρίνεται σε πολλές τεχνικές: έλαση μπιγέτας, έλαση πλάκας, έλαση λεπτού ελάσματος, έλαση διαμόρφωσης, έλαση σωλήνα, έλαση δακτυλίου, περιστροφική απότμηση σωλήνα, έλαση γραναζιού, σφυρηλάτηση με έλαστρα, διαμήκης έλαση, επιφανειακή έλαση, έλαση διατμητικής διαμόρφωσης και έλαση μείωσης πάχους σωλήνων (Εικόνα 3.3).



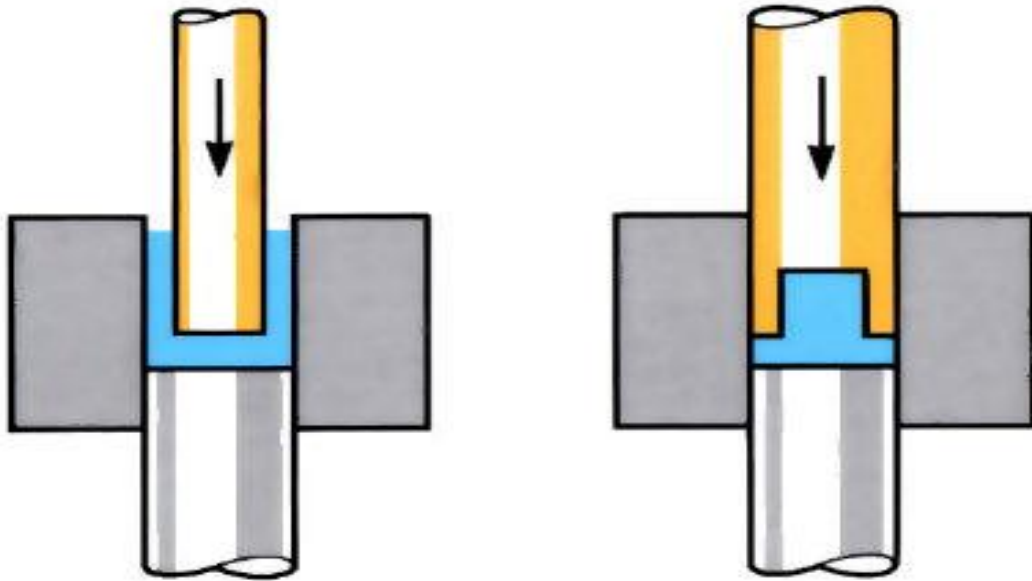
Εικόνα 3.3 Απεικόνιση Έλασης [20]

3.2.2.4 Διέλαση (extrusion)

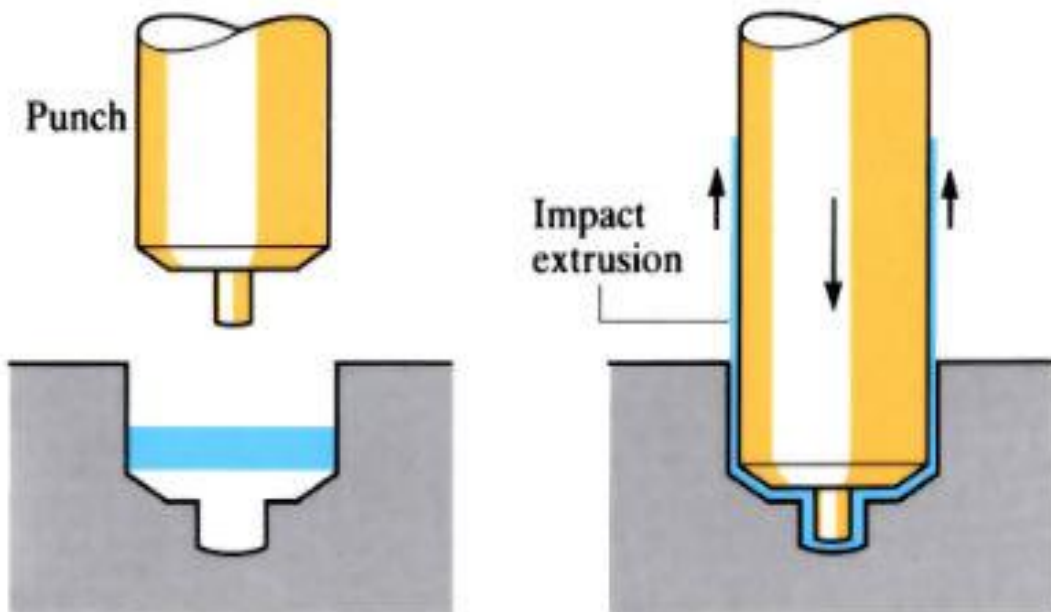
Η διέλαση είναι μια τεχνική μορφοποίησης όπου το τεμάχιο συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου μέσα σε ένα μεταλλικό θάλαμο. Στο άλλο άκρο του θαλάμου βρίσκεται κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα. Ένα έμβολο αναγκάζει το υλικό να εξέλθει από το άνοιγμα της μήτρας αποδίδοντας προϊόν με συγκεκριμένη γεωμετρία (μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος). Η διέλαση μπορεί να εκτελείται εν θερμώ και εν ψυχρώ. Χρησιμοποιείται μία πρέσα (συνήθως υδραυλική) οριζόντια στην θερμή διέλαση και κατακόρυφη στην ψυχρή διέλαση. Οι ταχύτητες εμβόλου εξαρτώνται από το υλικό διαμόρφωσης. Οι μικρότερες ταχύτητες προτιμώνται για την κατεργασία μαλακών υλικών (κράματα Al, κράματα Mg, κράματα Cu), για τα σκληρότερα υλικά (χάλυβες, πυρίμαχα κράματα) συνίστανται μεγαλύτερες. Οι μέθοδοι διέλασης ταξινομούνται σε: άμεση διέλαση (Direct extrusion), έμμεση διέλαση (Indirect extrusion), υδροστατική διέλαση (Hydrostatic extrusion), και κρουστική διέλαση (Impact extrusion). Οι εικόνες 3.4-3.7 απεικονίζουν τις πιο κοινές μεθόδους διέλασης.



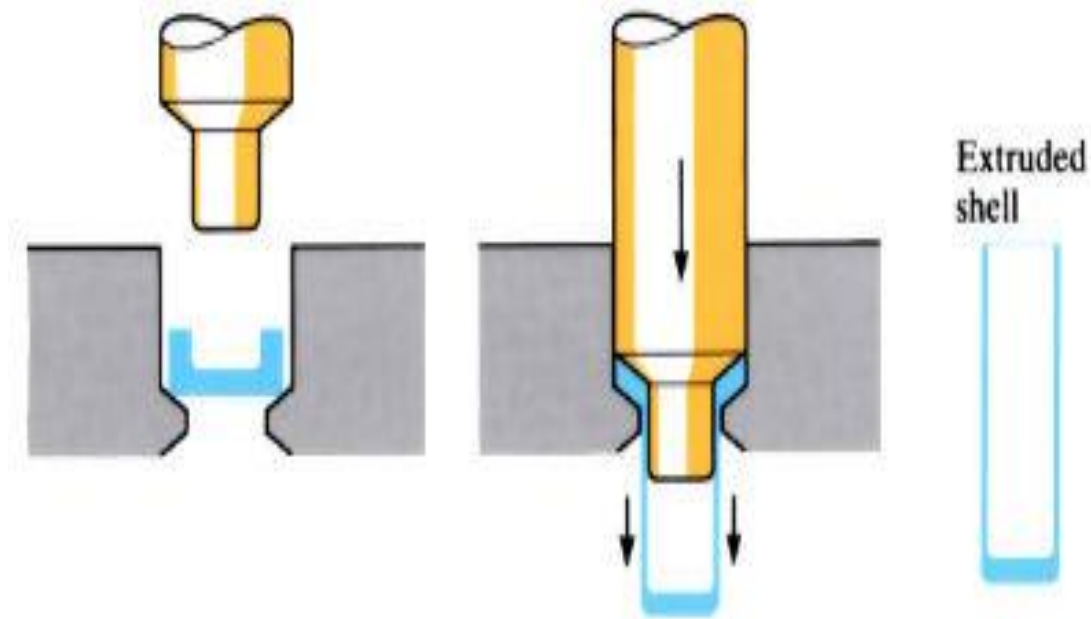
Εικόνα 3.4 : Σχηματική απεικόνιση Άμεσης Διέλασης [21]



Εικόνα 3.5 : Σχηματική απεικόνιση Έμμεσης Διέλασης [21]



Εικόνα 3.6: Σχηματική απεικόνιση Κρουστικής Διέλασης σε σωληνάριο [21]



Εικόνα 3.7 : Σχηματική απεικόνιση Κρουστικής Διέλασης με την μέθοδο Hooker [21]

3.2.2.4.1 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την ψυχρή διέλαση αποτελείται από : υδραυλικές πρέσες, μηχανικές πρέσες, ειδικές μηχανές σφυρηλασίας ψυχρού τύπου. Οι περισσότερες διεργασίες διέλασης εκτελούνται με μηχανικό τρόπο. Συχνότερα συναντώνται οι μηχανικές πρέσες λόγω της προσαρμοστικότητάς τους στην βιομηχανία. Οι μηχανικές πρέσες υπερτερούν σε σχέση με τις υδραυλικές ως προς την ταχύτητά τους, όμως είναι πιο δαπανηρές και έχουν περιορισμένο μήκος διαδρομής [17].

3.2.2.4.2 Πρέσες διέλασης

Στην διέλαση αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι υδραυλικές και οι μηχανικές πρέσες. Οι πρέσες για την διέλαση αλουμινίου δεν είναι απαραίτητα διαφορετικές από εκείνες που χρησιμοποιούνται για τον χάλυβα. Υπάρχουν ωστόσο δύο αποφάσεις που εμπλέκονται στην επιλογή της πρέσας για την διέλαση αλουμινίου.

Το αλουμίνιο μπορεί εύκολα να εξελαστεί. Η διαδικασία συχνά περιλαμβάνει το σχηματισμό βαθιών κυαθίων ή σωληνοειδών τμημάτων και για αυτή την εφαρμογή η πρέσα θα πρέπει να κάνει μακριά διαδρομή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μαζική παραγωγή, η οποία απαιτεί πρέσα υψηλών ταχυτήτων. Λόγω των υψηλών ταχυτήτων τους, οι μηχανικές στροφαλοφόρες πρέσες προτιμώνται για την παραγωγή εξαρτημάτων που απαιτούν μέχρι και 12 τόνους δύναμη. Η παραγωγή 70 διελάσεων το λεπτό είναι ένα σύνθητος

νούμερο και συχνά επιτυγχάνεται ακόμα μεγαλύτερο. Ο βοηθητικός εξοπλισμός είναι συνήθως σχεδιασμένος για υψηλό βαθμό αυτοματισμού για την διαδικασία διέλασης αλουμινίου. Μηχανές εν ψυχρώ κορύφωσης κοχλιών χρησιμοποιούνται επίσης για την διέλαση εξαρτημάτων αλουμινίου εν ψυχρώ.

3.2.2.4.3 Μήτρες διέλασης

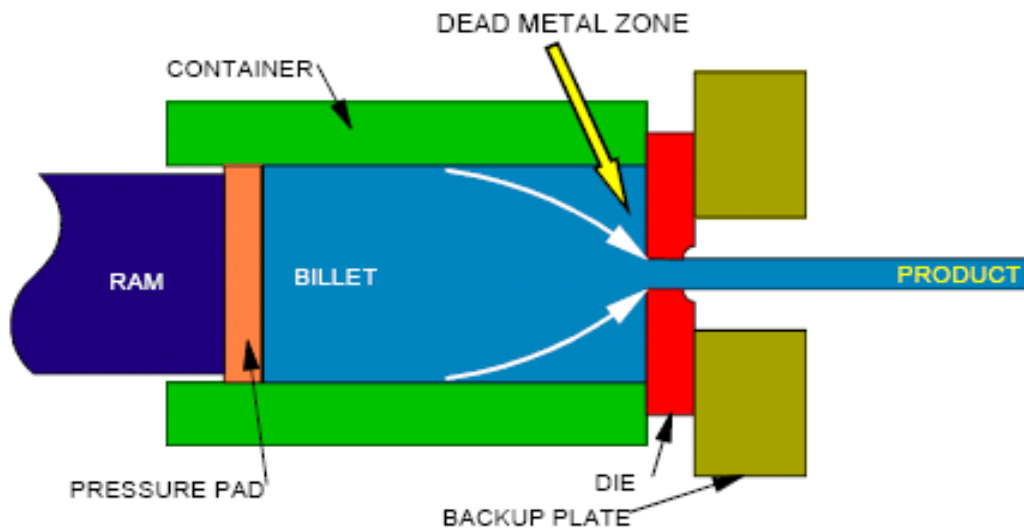
Στην διέλαση αλουμινίου χρησιμοποιούνται τρεις βασικοί τύποι μητρών:

- Οι συμπαγείς μήτρες. Γενικά παρέχεται μία κοιλότητα σε κάθε άκρο έτσι ώστε η μήτρα να μπορεί να αντιστραφεί όταν το ένα άκρο φθαρεί ή σπάσει.
- Μήτρες συγκράτησης και σωληνοειδείς, οι οποίες χρησιμοποιούνται όταν οι πιέσεις διέλασης είναι εξαιρετικά υψηλές.
- Οι οριζόντιες διαχωριστικές μήτρες που αποτελούνται από τέσσερα μέρη: έναν δακτύλιο συρρίκνωσης, ένα χιτώνιο τριβέα ένθετο κα ένα ή δύο τεμάχια βάσης.

Σε σύγκριση με τις μήτρες που χρησιμοποιούνται για την διέλαση του χάλυβα, οι μήτρες για την διέλαση αλουμινίου είναι ιδιαίτερα ήπιες. Ο χάλυβας είναι πιο δύσκολο να υποστεί διέλαση, απαιτώντας υψηλότερες πιέσεις και συνεχή υποστήριξη της μήτρας στο υπό κατεργασία τεμάχιο καθόλη την διάρκεια του κύκλου διέλασης. Αντίθετα όταν το έμβολο συμπιέζει το αλουμίνιο, το μέταλλο συγκεντρώνεται στην πλευρά του εμβόλου ακολουθώντας την γεωμετρία του, χωρίς να περιορίζεται από τον θάλαμο της μήτρας που το περιβάλλει.

3.2.1.5 Συρματοποίηση

Πρόκειται για μία εν ψυχρώ κατεργασία που στόχο έχει την διαμόρφωση ενός μετάλλου μέσω εφελκυσμού, σε σύρμα (Εικόνα 3.8). Το υπό κατεργασία τεμάχιο διαμορφώνεται περνώντας διαδοχικά μέσα από μήτρες που ολοένα μειώνεται η διατομή τους. Η τελική επιμήκυνση είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που θα μπορούσε να επιτευχθεί με εφελκυσμό. Το υλικό της μήτρας είναι συνήθως χρωμιοχάλυβες και για λεπτά σύρματα καρβίδιο του βολφραμίου. Για την ελαχιστοποίηση των τριβών σημαντικός παράγοντας είναι η λίπανση [9].

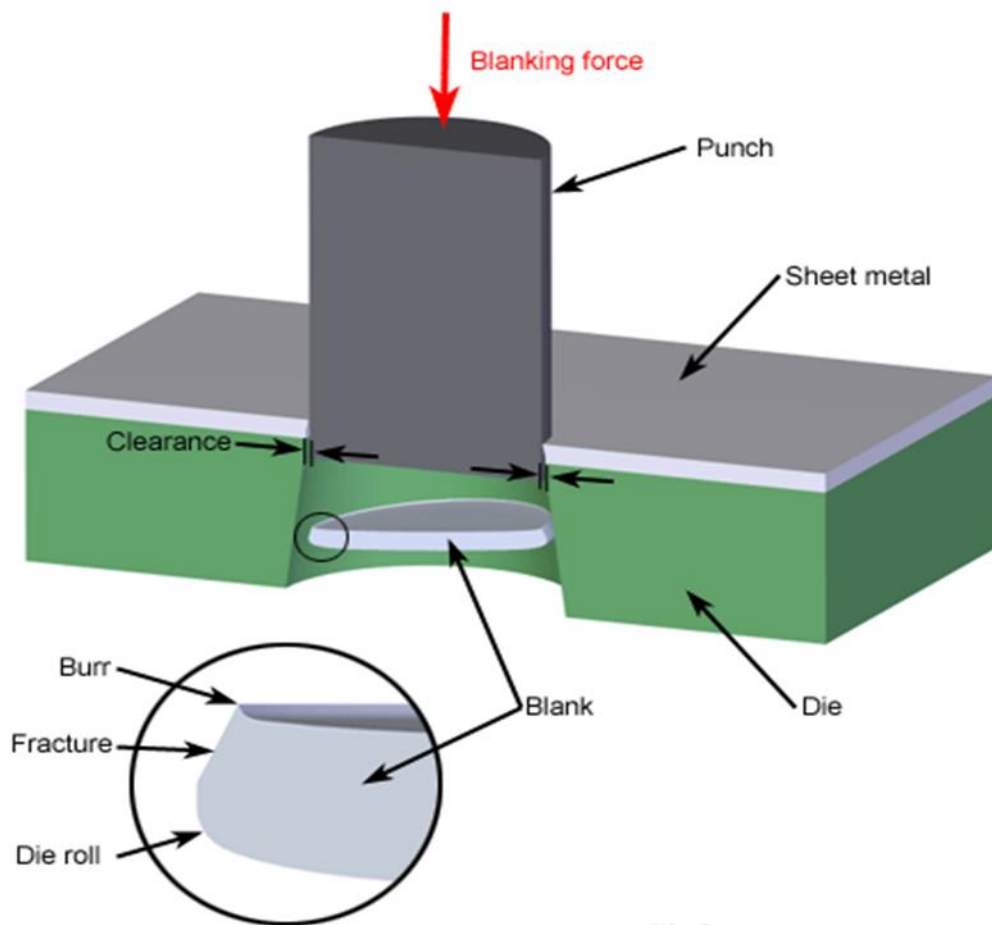


Εικόνα 3.8 Σχηματική απεικόνιση Συρματοποίησης [22]

3.2.1.6 Κατεργασίες διαμόρφωσης ελάσματος

1. Απότμηση

Η απότμηση ή διάτμηση (στην περίπτωση απόρριψης του αποκομμένου μέρους) είναι μία κατεργασία διαμόρφωσης στην οποία μέρος του υπό κατεργασία τεμαχίου απομακρύνεται με την κίνηση ενός εμβόλου, καθοδηγούμενο από μία πρέσα (Εικόνα 3.9). Το τεμάχιο το οποίο πρόκειται να διαμορφωθεί τοποθετείται πάνω σε μία μήτρα η οποία θα δώσει το τελικό σχήμα του τεμαχίου που θα αποκοπεί. Το έμβολο πιέζει το μέταλλο το οποίο διέρχεται στην μήτρα διαμόρφωσης, μέχρι αυτό να αποκοπεί. Ανάμεσα στην μήτρα και το έμβολο πρέπει να υπάρχει κενό για να μπορεί να εισέλθει το υπό κατεργασία τεμάχιο. Σημαντικός παράγοντας είναι η ταχύτητα διαμόρφωσης, από την οποία εξαρτάται η ποιότητα επιφάνειας του αποτμήματος [23].



Εικόνα 3.9 Σχηματική Απεικόνιση Απότμησης [24]

2. Βαθεία κοίλανση

Πρόκειται για την βασικότερη κατεργασία μορφοποίησης επίπεδων ελασμάτων, με σκοπό την διαμόρφωση σε κυάθια. Στην συγκεκριμένη κατεργασία το έλασμα συγκρατείται μεταξύ του δακτυλίου συγκράτησης και της μήτρας (Εικόνα 3.10). Ένα έμβολο πιέζει το υλικό εντός των τοιχωμάτων της μήτρας καθώς κατεβαίνει και δίνει το κατάλληλο σχήμα στο έλασμα. Απαραίτητη είναι η ύπαρξη λίπανσης λόγω των μεγάλων δυνάμεων τριβής [9]. Η ανοχή μεταξύ του εμβόλου και της μήτρας είναι περιορισμένη ώστε να ελαχιστοποιείται το ελεύθερο άνοιγμα, ώστε να μην υπάρχει συρρίκνωση στα πλευρικά τοιχώματα [17]. Αυτό αρκεί για να επιτευχθεί το σιδέρωμα του μετάλλου που υπόκειται σε εξέλαση στα πλευρικά τοιχώματα. Ως προς την διαδικασία του σχεδιασμού, κατάλληλα ράδια στο κάτω μέρος του εμβόλου καθώς και το άνοιγμα της μήτρας, είναι απαραίτητα ώστε να επιτρέπεται στο μεταλλικό φύλλο να σχηματίζεται χωρίς να υπάρχει ανεξέλεγκτος σχισμός. Στις περισσότερες διαδικασίες βαθιάς κοίλανσης το εξάρτημα έχει ένα συμπαγή

πυθμένα για να σχηματιστεί ένα δοχείο και μία φλάντζα που συγκρατείται, η οποία αποκόπτεται αργότερα κατά την επεξεργασία. Σε ορισμένες περιπτώσεις το σχήμα του κυαθίου εξαλάσσεται πλήρως εντός της μήτρας και δημιουργείται ένα κυάθιο με ευθύγραμμο τοίχωμα διαμέσου του ανοίγματος της μήτρας. Για να ελεγχθεί η επιφάνεια του αποτμήματος και να αποτραπούν οι πτυχώσεις, εφαρμόζεται μία δύναμη συγκράτησης στο τεμάχιο για να βρίσκεται σε επαφή με την άνω επιφάνεια της μήτρας.

Οι πρέσες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι είτε υδραυλικές, είτε μηχανικές. Προτιμώνται οι υδραυλικές πρέσες λόγω του καλύτερου ελέγχου ταχύτητας της διαδρομής του εμβόλου. Οποιοδήποτε μέταλλο μπορεί να πάρει την μορφή λεπτού φύλλου με μία διαδικασία ψυχρής έλασης, θα πρέπει όμως να είναι επαρκώς όλκιμο για να γίνει βαθιά κοίλανση.

Οι ιδιότητες που θεωρούνται σημαντικές σε λεπτού ελάσματος προϊόντα για βαθιά κοίλανση περιλαμβάνουν:

- Σύσταση με ελάχιστη ποσότητα εγκλεισμάτων και υπολειμμάτων στοιχείων που συμβάλλουν στην πλαστικότητα
- Μηχανικές ιδιότητες των οποίων η επιμήκυνση όπως μετράται σε δοκιμή εφελκυσμού, το κλάσμα πλαστικής παραμόρφωσης και ο εκθέτης εργοσκήρυνσης είναι πρωταρχικής σημασίας.
- Φυσικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων των διαστάσεων, του συντελεστή ελαστικότητας και τυχόν ειδικές απαιτήσεις για διατήρηση του σχήματος μετά την διαμόρφωση.

Μόλις ένα μέταλλο υποστεί βαθιά κοίλανση για να πάρει μία κατάλληλη μορφή, μπορεί να επεξεργαστεί περαιτέρω για να αναπτύξει πρόσθετο σχήμα. Το πρώτο σχήμα είναι συνήθως ένας στρογγυλός κύλινδρος ή μία τροποποίηση αυτού. Το πάχος του υπό κατεργασία τεμαχίου δεν μεταβάλλεται αισθητά με την βαθιά κοίλανση. Επομένως η επιφάνεια του τελικού εξαρτήματος είναι περίπου ίδια με εκείνη του αρχικού.

Με κατάλληλο συνδυασμό της δύναμης διάτρησης, της δύναμης συγκράτησης και της αντοχής του μεταλλικού εξαρτήματος που είναι υπό διαμόρφωση, μπορεί να σχηματιστεί ένα εξάρτημα του οποίου το σχήμα είναι σαν κύπελλο. Ως προς τον σχεδιασμό, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι δυνάμεις που θα εφαρμοστούν για την διαμόρφωση κατά την βαθιά κοίλανση. Αν ξεπεράσουν τις επιτρεπτές τιμές, το εξάρτημα θα σπάσει αντί να διαμορφωθεί.

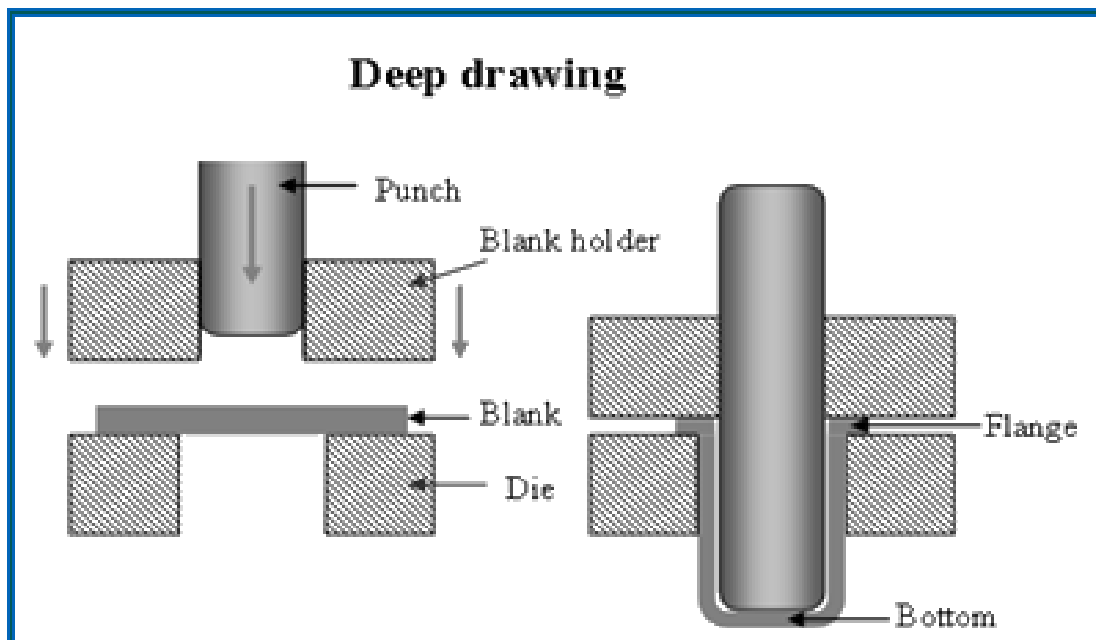
Οι μήτρες που χρησιμοποιούνται για λεπτά μεταλλικά ελάσματα είναι συνήθως ένας από τους ακόλουθους τύπους ή κάποια τροποποίηση αυτών:

- Απλής ενέργειας μήτρες, είναι η πιο απλή κατηγορία και αποτελούνται από την μήτρα και το έμβολο. Μία φωλιά ή ένα κεντραριστικό βοηθούν στο να κεντράρεται το απότμημα. Το εξάρτημα που θα υποστεί κοίλανση, ωθείται δια μέσου της μήτρας και πιέζεται από το έμβολο.
- Διπλής ενέργειας μήτρες, οι οποίες έχουν έναν συγκρατητή. Αυτός επιτρέπει μεγαλύτερη λέπτυνση του υπό διαμόρφωση τεμαχίου. Η μήτρα βρίσκεται στο κάτω μέρος, το έμβολο είναι προσαρτημένο στην εσωτερική πλευρά και ο συγκρατητής στην εξωτερική. Χρησιμοποιείται και ένα εξάρτημα το οποίο πιέζει το υπό διαμόρφωση

τεμάχιο και με αυτόν τον τρόπο το συγκρατεί, αλλά και το ανασηκώνει όταν έχει ήδη διαμορφωθεί από την μήτρα.

- Προοδευτικής ενέργειας, όπου η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη λόγω του κόστους. Ωστόσο ο συνολικός αριθμός των προς παραγωγή μερών και ο ρυθμός παραγωγής συχνά καθορίζουν το κατά πόσο θα χρησιμοποιηθεί ή όχι προοδευτική μήτρα.
- Σύνθετες μήτρες, καθώς σε κάποιες περιπτώσεις είναι πρακτικότερο να συνδυάζονται πολλές λειτουργίες σε μία ενιαία μήτρα. Η αποκοπή και η κοίλανση είναι δύο λειτουργίες που συχνά τοποθετούνται σε σύνθετες μήτρες. Ο χρόνος παραγωγής τεμαχίων από τις σύνθετες μήτρες μπορεί να είναι ίδιος με αυτόν από τις απλές.
- Πολλαπλές μήτρες με μηχανισμό μεταφοράς, χρησιμοποιούνται συχνά αντί για προοδευτικές μήτρες για μαζική παραγωγή μεγαλύτερων μερών. Το τεμάχιο εργασίας μεταφέρεται μηχανικά από την μία μήτρα στην επόμενη. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής έναντι της προοδευτικής μήτρας είναι η μεγαλύτερη ευελιξία που επιτρέπεται στην διαδικασία επεξεργασίας, κυρίως επειδή στις μήτρες με μηχανισμό μεταφοράς το τεμάχιο εργασίας δεν παραμένει συνδεδεμένο με τον κυρίως σκελετό, μέχρι την τελική διαμόρφωση [17].

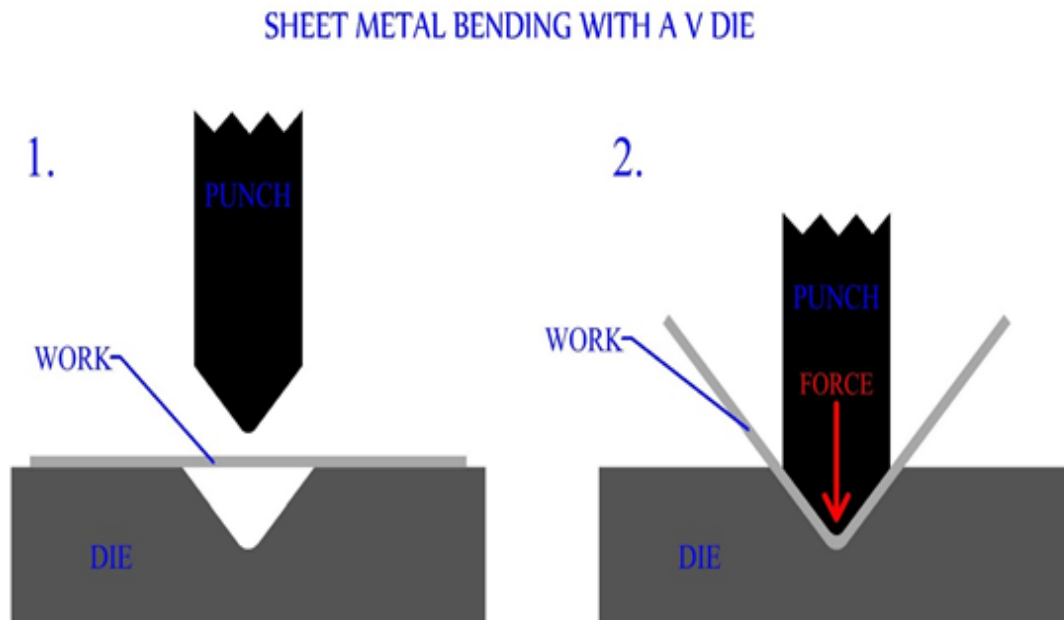
Η επιλογή της μήτρας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του εξαρτήματος και την ποσότητα των προς παραγωγή εξαρτημάτων



Εικόνα 3.10 Σχηματική απεικόνιση βαθιάς κοίλανσης [25]

3. Κάμψη

Με αυτήν την κατεργασία μορφοποίησης πραγματοποιούνται καμπυλότητες σε επίπεδα ελάσματα (Εικόνα 3.11).



Εικόνα 3.11 Σχηματική απεικόνιση κάμψης [26]

3.3 Μεταλλουργικός Εξοπλισμός

Οι διάφορες διεργασίες μορφοποίησης συνδέονται με μεγάλη ποικιλία εξοπλισμού [17]:ελασματοουργείο για πλάκες, ταινίες και σχήματα, μηχανές για έλαση προφίλ από ταινίες, μηχανές έλασης δακτυλίου, μηχανές έλασης και επιφανειακής έλασης, μηχανές μαγνητικής μορφοποίησης, βάση τραβηχτικής μηχανής για σωληνάρια και ράβδους, μηχανές συρματοποίησης και κοίλανσης μπουλονιών, μηχανές για πιεστικές λειτουργίες (πρέσες).

Μεταξύ των προαναφερθέντων οι μηχανές πιεστικής λειτουργίας είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες και εφαρμόζονται τόσο σε διαδικασίες μορφοποίησης συμπαγούς μάζας, όσο και σε διαδικασίες μορφοποίησης λεπτού ελάσματος. Αυτές οι μηχανές μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις τύπους: μηχανές περιορισμένης φόρτωσης (υδραυλικές πρέσες), έκκεντρες ή μηχανικές πρέσες, μηχανές με περιορισμένη ενεργειακή ισχύ.

Τα σημαντικά χαρακτηριστικά αυτού του τύπου των μηχανών περιλαμβάνουν: χαρακτηριστικά για το φορτίο και την ενέργεια καθώς και τον συντελεστή απόδοσης, χαρακτηριστικά των διαδρομών ανά λεπτό, χρόνος επαφής υπό πίεση και ταχύτητα υπό πίεση, χαρακτηριστικά για την ακρίβεια.

Β' ΜΕΡΟΣ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΣΥΛΛΟΓΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στην συγκεκριμένη έρευνα δεν ήταν εφικτή η συλλογή ιστορικών δεδομένων με αποτέλεσμα να εξαχθούν συμπεράσματα μόνο για τον τρόπο λειτουργίας. Πραγματοποιήθηκε συλλογή πληροφοριών σχετικά με την διαδικασία μορφοποίησης.

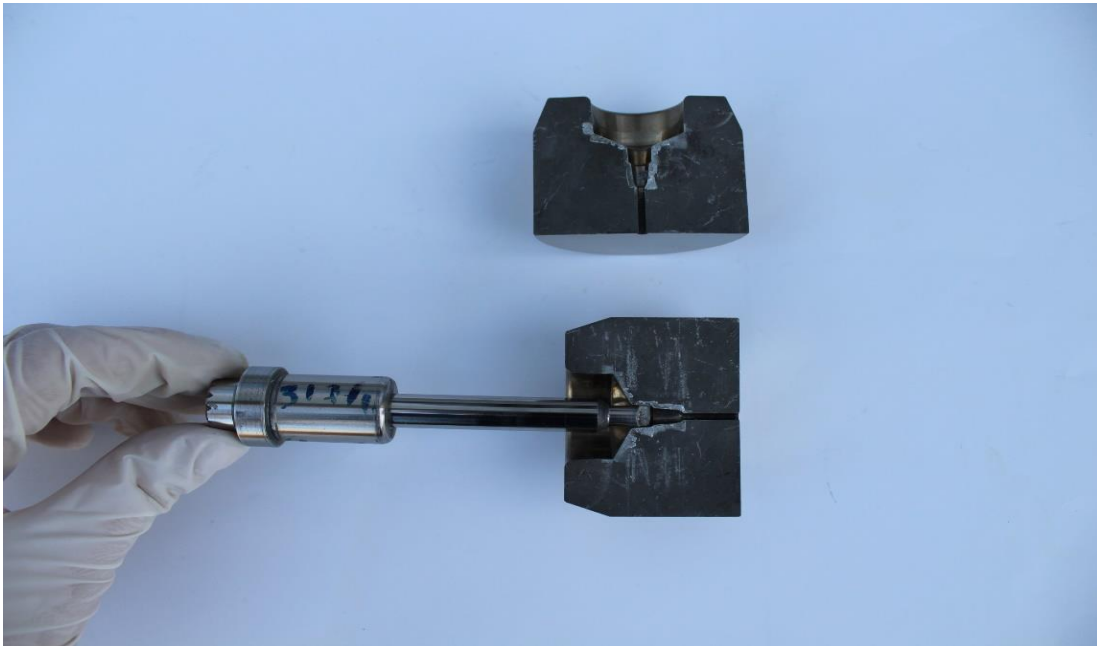
Πρώτιστα πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των μεθόδων διαμόρφωσης του αρχικού δίσκου από αλουμίνιο για την κατανόηση των σταδίων κατασκευής του σωληνάριου. Τα σωληνάκια διαμορφώνονται σε πρέσες, με εν ψυχρώ μορφοποίηση, σε πολλαπλά στάδια, όπου συμμετέχουν τα αντίστοιχα καλούπια. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η διαμόρφωση περιλαμβάνει: βαθιά κοίλανση, τράβηγμα, αποπεράτωση και μορφοποίηση του ακροφυσίου. Το αρχικό τεμάχιο είναι κυκλικός δίσκος που προκύπτει από εκτομή συγκεκριμένης λαμαρίνας (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 Στάδια μορφοποίησης του σωληνάριου από αλουμίνιο με συνδυασμό βαθιάς κοίλανσης και τραβήγματος

Αρχικά ο κυκλικός δίσκος διαμορφώνεται σε κατάλληλη μήτρα. Εν συνεχεία μεταφέρεται σε σταθμό διαμόρφωσης όπου υπόκειται σε διαδοχικά στάδια βαθιάς κοίλανσης. Σε νέα θέση διαμόρφωσης, διενεργείται η διαδικασία τραβήγματος, η οποία συνήθως πραγματοποιείται σε τρία διαδοχικά στάδια. Εφόσον ο δίσκος αποκτήσει την μορφή σωλήνα, στα τελευταία στάδια πραγματοποιείται η αποπεράτωση της επιφάνειας και η δημιουργία του ακροφυσίου. Με την αποπεράτωση επιτυγχάνεται η εκλέπτυνση των πλευρικών τοιχωμάτων και η αύξηση του ύψους σύμφωνα με τις διαστάσεις που προβλέπονται στο σχέδιο του προϊόντος.

Τα προς μελέτη εξαρτήματα χρησιμοποιούνται στην διαμόρφωση του ακροφυσίου και αποτελούνται από μήτρα, βλήτρο και χιτώνιο (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2 Απεικόνιση μήτρας, βλήτρου και χιτωνίου

Η μήτρα διαμόρφωσης τοποθετείται εντός μίας φωλιάς υποστήριξης. Το σύστημα μήτρα-φωλιά πρέπει να λειτουργεί ως ενιαίο εξάρτημα ώστε να παραλαμβάνει τις προβλεπόμενες καταπονήσεις. Κατά συνέπεια θα πρέπει να επιδέχεται έως ένα βαθμό παραμόρφωση, να διαστέλλεται ελεγχόμενα κατά την λειτουργία και να επανέρχεται ακριβώς στην αρχική του θέση κατά το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί. Οι μήτρες διαμόρφωσης τοποθετούνται στην φωλιά με δύο τεχνικές: εν θερμώ και εν ψυχρώ (με μηχανικό τρόπο). Στην πρώτη περίπτωση κατασκευάζεται μήτρα με ελαφρώς μεγαλύτερη διάμετρο από της φωλιάς. Ζεσταίνεται το καλούπι, ώστε με την διαστολή η φωλιά να δέχεται με ευκολία την συναρμολόγηση της μήτρας. Μετά την ψύξη του, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η φωλιά συστέλλεται επιτυγχάνοντας την σύσφιξη των δύο μερών. Ανεπαρκής σύσφιξη θα προκαλέσει μόνιμη παραμόρφωση στην μήτρα, η οποία θα οδηγείται σε αστοχία. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η σύσφιξη έχει γίνει με αυτόν τον τρόπο. Στην μηχανική τοποθέτηση η σύσφιξη διασφαλίζεται με εξαιρετικά μικρές ανοχές, όπου η μήτρα ουσιαστικά σφηνώνεται στην φωλιά. Μειονεκτεί διότι η φωλιά δεν έχει την δυνατότητα να απορροφήσει τις τάσεις κατά την λειτουργία του συστήματος, όπου η μήτρα υφίσταται έντονη καταπόνηση. Συνιστάται η τοποθέτηση εν θερμώ, διότι διασφαλίζει την μακροχρόνια λειτουργία του καλουπιού, την αποφυγή ατυχήματος και την ασφάλεια του προσωπικού.

Το βλήτρο και το χιτώνιο διαμορφώνουν το ακροφύσιο και δίνουν τις τελικές διαστάσεις του. Είναι απαραίτητα να είναι δύο λόγω της επιθυμητής γεωμετρίας του κατασκευαζόμενου ακροφυσίου, αλλά και για λόγους σφράγισης σε σχέση με τον αν ήταν ένα ενιαίο εξάρτημα. Το βλήτρο οδηγείται εντός του χιτωνίου,

το οποίο παρουσιάζει διαβάθμιση στην εσωτερική διάμετρό του και παραλληλότητα προς το κύριο σώμα του σωληναρίου στην εξωτερική του [4].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ

Κατά την προκαταρκτική εξέταση πραγματοποιήθηκε συλλογή πληροφοριών σχετικά με την διαδικασία μορφοποίησης. Τα εξαρτήματα που αστόχησαν υποβλήθηκαν σε οπτική επιθεώρηση και μακροσκοπική εξέταση και δημιουργήθηκε φωτογραφικό αρχείο. Οι κρίσιμες επιφάνειες εξετάστηκαν σε φυσικό μέγεθος και με στερεοσκόπιο.

5.1 Οπτική επιθεώρηση

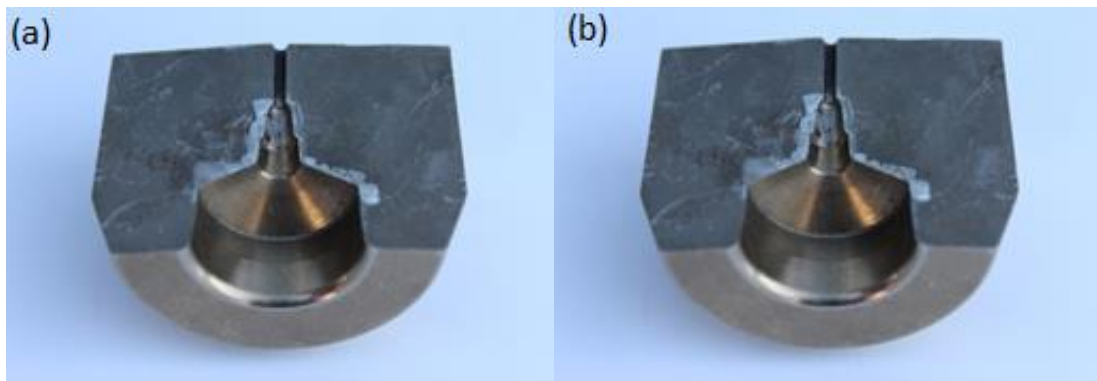
Η μήτρα που δημιουργεί το ακροφύσιο του σωλήνα, αστόχησε με ολική θραύση (Εικόνα 5.1). Έχει κυλινδρικό σχήμα με σύνθετη γεωμετρία (Εικόνες 5.2 και 5.3).



Εικόνα 5.1 Γενική άποψη της μήτρας

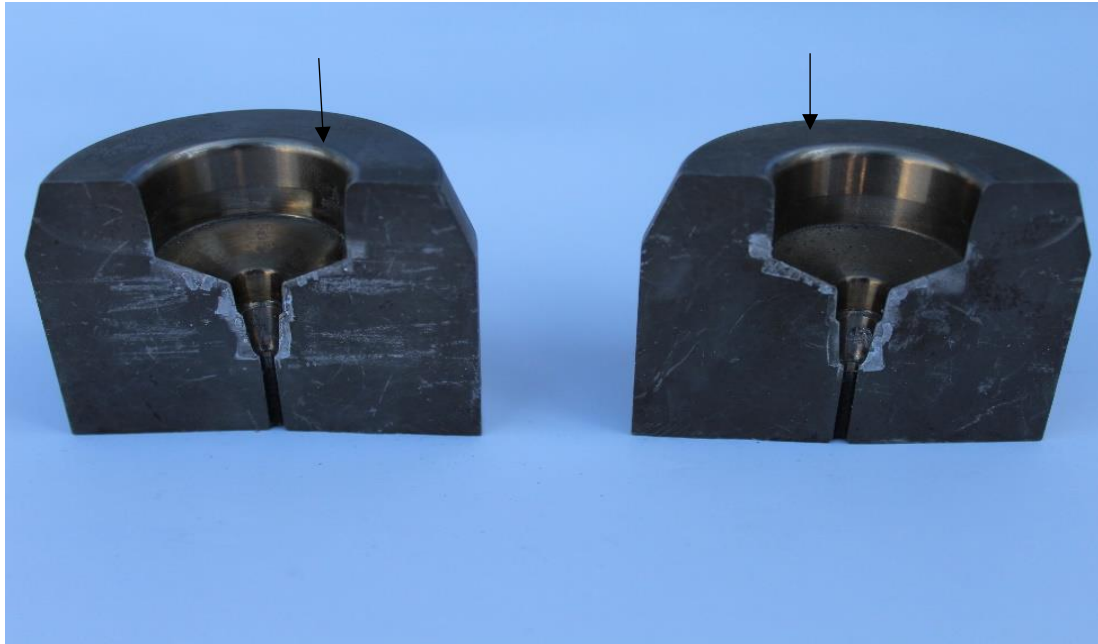


Εικόνα 5.2 Εσωτερική όψη της μήτρας



Εικόνα 5.3 Πρόσοψη των δύο αστοχούντων τμημάτων της μήτρας

Μία διαβάθμιση στην εξωτερική διάμετρό της ελέγχει την συγκράτησή της στην φωλιά, αποδεικνύοντας ότι έχει συναρμολογηθεί μηχανικά εν ψυχρώ. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται από την απουσία κάποιου σημαδιού σύσφιξης ή φθοράς στην εξωτερική επιφάνειά της. Η μηχανική σύσφιξη διασφαλίζεται μόνο με πολύ μικρές ανοχές του συστήματος. Αυτό εμποδίζει την φωλιά να απορροφήσει τις τάσεις. Παρατηρούνται ανεπαρκή ράδια με εξαίρεση το πάνω ράδιο της εισόδου (Εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4 Ράδια εισόδου στην μήτρα

Στην μορφοποίηση με βαθύ τράβηγμα, ένα κρίσιμος παράγοντας αποτελεί η διευκόλυνση της ροής του αλουμινίου. Η ροή διασφαλίζεται από την γεωμετρία της μήτρας και με τυχόν επικάλυψη της, για την μείωση του συντελεστή τριβής. Παρατηρείται χρωματισμός του υλικού ο οποίος πιθανόν οφείλεται σε επικάλυψη ή προέκυψε ως αποτέλεσμα θερμικής κατεργασίας σε φούρνο κενού (Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5 Χρωματισμός στο εξωτερικό μέρος της μήτρας

Στις επιφάνειες θραύσης της μήτρας υπάρχουν γραμμές απόσχισης και στα δύο μέρη. Στην ίδια περιοχή, στο ένα κάτω δεξιά και στο άλλο κάτω αριστερά, υπάρχουν έντονες γραμμές απόσχισης που φανερώνουν την ψαθυρότητα του υλικού και ότι πρόκειται για μία βίαιη θραύση (Εικόνα 5.6).



Εικόνα 5.6 Εσωτερική όψη της μήτρας όπου περιλαμβάνονται οι επιφάνειες θραύσης

Ποσότητα αλουμινίου έμεινε στην κωνική επιφάνεια καθώς και στο τμήμα που γίνεται η διαμόρφωση για την δημιουργία λαιμού (Εικόνες 5.7-5.9).



Εικόνα 5.7 Ποσότητα αλουμινίου στο εσωτερικό τμήμα της μήτρας



Εικόνα 5.8 Ποσότητα αλουμινίου στην εσωτερική επιφάνεια της μήτρας

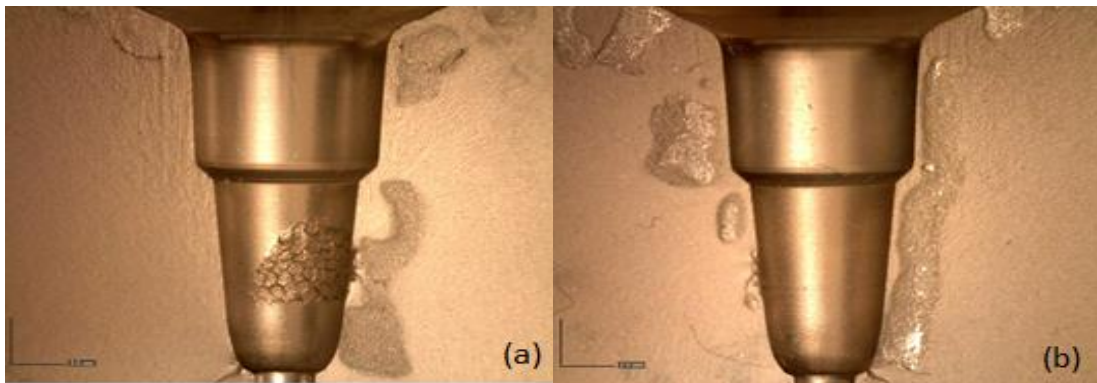


Εικόνα 5.9 Ποσότητα αλουμινίου στην εσωτερική επιφάνεια όπου πραγματοποιείται η διαμόρφωση του λαιμού

Στο κωνικό τμήμα παρατηρείται περισσότερη ποσότητα αλουμινίου η οποία έχει συσσωρευτεί και έχει δημιουργήσει στρώματα, ενώ στο άλλο τεμάχιο η ποσότητα αλουμινίου είναι μικρότερη (Εικόνες 5.10-5.11).



Εικόνα 5.10 Ποσότητα αλουμινίου που έχει συσσωρευτεί εντός της μήτρας



Εικόνα 5.11 Μέρη της μήτρας μετά από αμμοβολή: περισσότερη συσσωρευμένη ποσότητα αλουμινίου στην πλευρά (b)

Στο βλήτρο υπάρχουν ανομοιόμορφες γραμμές φθοράς στην εξωτερική διάμετρο (Εικόνα 5.12).



Εικόνα 5.12 Ανομοιόμορφες γραμμές φθοράς στο βλήτρο

Το βλήτρο αστόχησε με μερική θραύση (Εικόνες 5.13-5.14).

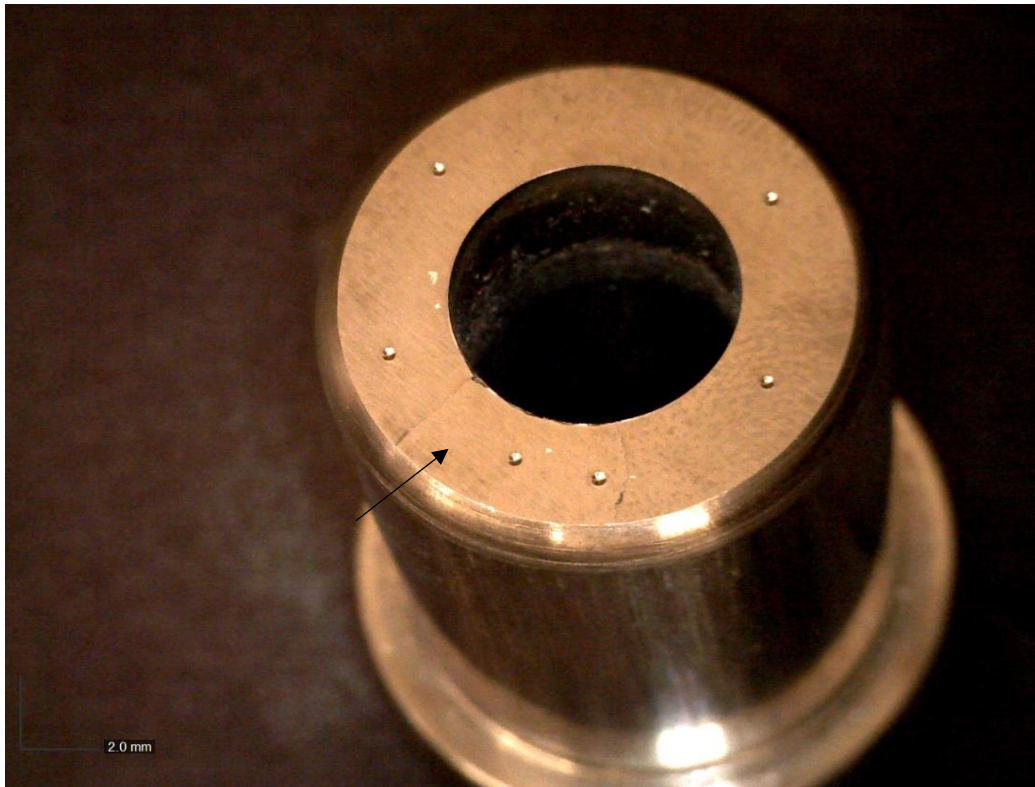


Εικόνα 5.13 Μερική θραύση στο βλήτρο



Εικόνα 5.14 Πρόσοψη του βλήτρου

Η επιφάνεια που συμμετέχει στην δημιουργία του ακροφυσίου φέρει σημάδια φθοράς. Το χιτώνιο παρουσιάζει ρηγματώδη στην επιφάνεια που χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση του σωληναρίου (Εικόνα 5.15).



Εικόνα 5.15 Ρηγματώση στην επιφάνεια του χιτωνίου

Σχόλια-Συμπεράσματα

Το βλήτρο είχε φθαρεί από την μία πλευρά, όπου συμπιέζε το αλουμίνιο, ενώ από την άλλη όχι. Ενώ αυξήθηκε η δύναμη για να επιτευχθεί η διαμόρφωση, το αλουμίνιο συσσωρευόταν στην μία πλευρά της μήτρας, εκεί όπου υπάρχει η φθορά του βλήτρου και δεδομένου ότι η μήτρα δεν είχε τοποθετηθεί εν θερμώ, δεν μπόρεσε να αποσβέσει τις δυνάμεις και έσπασε. Δεδομένου ότι το πάχος το αλουμινίου στην επιφάνεια της μήτρας είναι αρκετό, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το βλήτρο ενώ είχε υποστεί φθορά συνέχιζε να διαμορφώνει για αρκετό χρονικό διάστημα. Παρατηρείται ανεπίτρεπτα μεγάλη ανοχή μεταξύ του βλήτρου και του χιτωνίου. Πιθανή αιτία αυτής της ανοχής είναι η απουσία ομοκεντρότητας από την στιγμή που υπήρξε φθορά του βλήτρου, η οποία εν συνεχεία οδήγησε σε φθορά του χιτωνίου στην εσωτερική του πλευρά. Το χιτώνιο παρουσιάζει ρήγμα στην επιφάνεια που χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση του σωληναρίου, ως αποτέλεσμα ακατάλληλης αποπεράτωσης με ρεκτιφιέ κατά την κατασκευή των εξαρτημάτων [4].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Μη καταστροφικές δοκιμές

6.1 Μέτρηση σκληρότητας

Οι μετρήσεις σκληρότητας πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο HRC, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E18-07 [27]. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο του Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πα.Δ.Α. και χρησιμοποιήθηκε σκληρόμετρο INNOVATEST (Εικόνα 6.1). Η λειτουργία του οργάνου ελέγχθηκε ως προς την ακρίβεια και την ορθότητα.



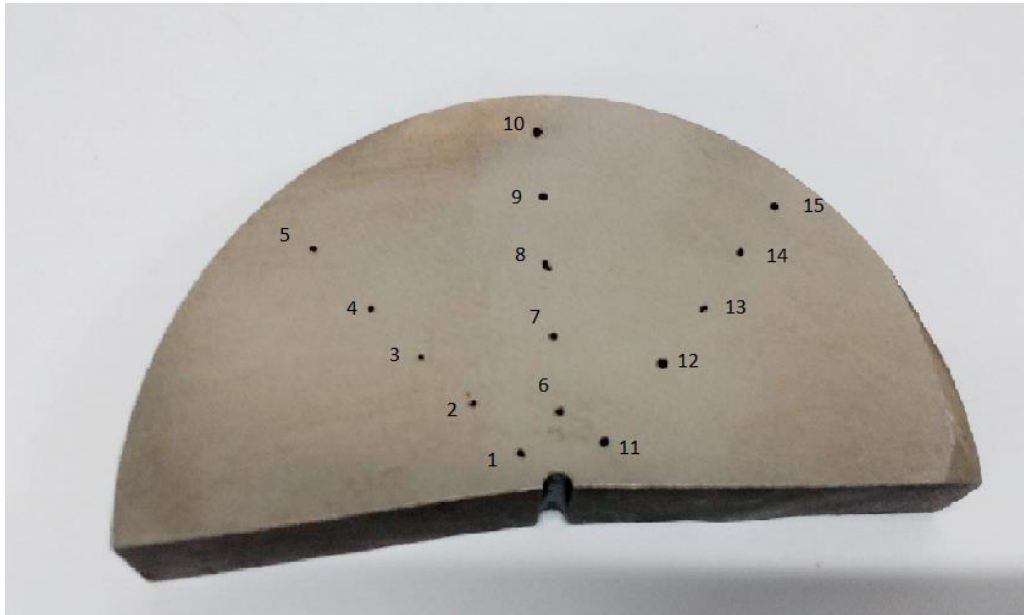
Εικόνα 6.1 Σκληρόμετρο Innovatest

Ελήφθησαν μετρήσεις σκληρότητας τόσο στην εξωτερική επιφάνεια όσο και στο εσωτερικό της μήτρας (Εικόνα 6.2), του χιτωνίου (Εικόνα 6.3) και του βλήτρου (Εικόνα 6.4).

Το εξάρτημα παρουσιάζει ομοιόμορφη σκληρότητα 66 HRC (Πίνακας 6.1). Πρόκειται για υλικό με ιδιαίτερα υψηλή σκληρότητα ώστε να διασφαλίζεται η αυξημένη αντοχή σε φθορά. Συνήθως η αυξημένη σκληρότητα προκαλεί μείωση της δυσθραυστότητας του υλικού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για ψαθυρό υλικό το οποίο αστόχησε με βίαιη θραύση.

Το βλήτρο έχει σκληρότητα 57 HRC (Πίνακας 6.2) και το χιτώνιο 61 HRC (Πίνακας 6.3). Πρόκειται για τυπικές τιμές, σχετικά με την συγκεκριμένη εφαρμογή. Λόγω της συχνότητας των αστοχιών στα συγκεκριμένα εξαρτήματα,

θα έπρεπε να επιλεγθεί υλικό για το χιτώνιο με μεγαλύτερη δυσθραυστότητα, στην ίδια τιμή σκληρότητας.



Εικόνα 6.2 Αποτύπωση μετρήσεων σκληρότητας στην εξωτερική επιφάνεια της μήτρας.

Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα μέτρησης σκληρότητας στην επιφάνεια της μήτρας.

A/A	HRC
1	65
2	66
3	66
4	66
5	66
6	66
7	66
8	66
9	66
10	66
11	65
12	66
13	66
14	66
15	65



Εικόνα 6.3 Αποτύπωση μετρήσεων σκληρότητας στην εξωτερική του βλήτρου.

Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα μέτρησης σκληρότητας στην επιφάνεια του βλήτρου.

A/A	HRC
1	57
2	57
3	57
4	57
5	57



Εικόνα 6.4 Αποτύπωση μετρήσεων σκληρότητας στην εξωτερική του χιτωνίου.

Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα μέτρησης σκληρότητας στην επιφάνεια του χιτωνίου.

A/A	HRC
1	61
2	61
3	61
4	61
5	61
6	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: Καταστροφικές και μη καταστροφικές δοκιμές

Πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω δοκιμές, αφού επιλέχθηκαν τα κατάλληλα δείγματα: χημική ανάλυση, δοκιμή μικροσκληρότητας και ανάλυση μικροδομής με οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο.

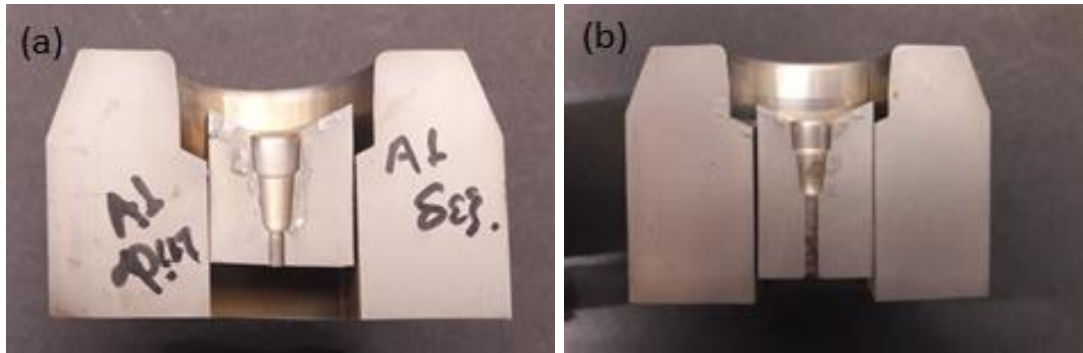
7.1 Επιλογή και προετοιμασία δειγμάτων

Τα εξαρτήματα κόπηκαν σε επιμέρους τεμάχια με την μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης, στην εταιρεία Ν. Μπαζιγος ΑΒΕΕ. Χρησιμοποιήθηκε μηχανή τύπου Makino EDM, με σύρμα $\varnothing 0.25\text{mm}$ (Εικόνα 7.1).



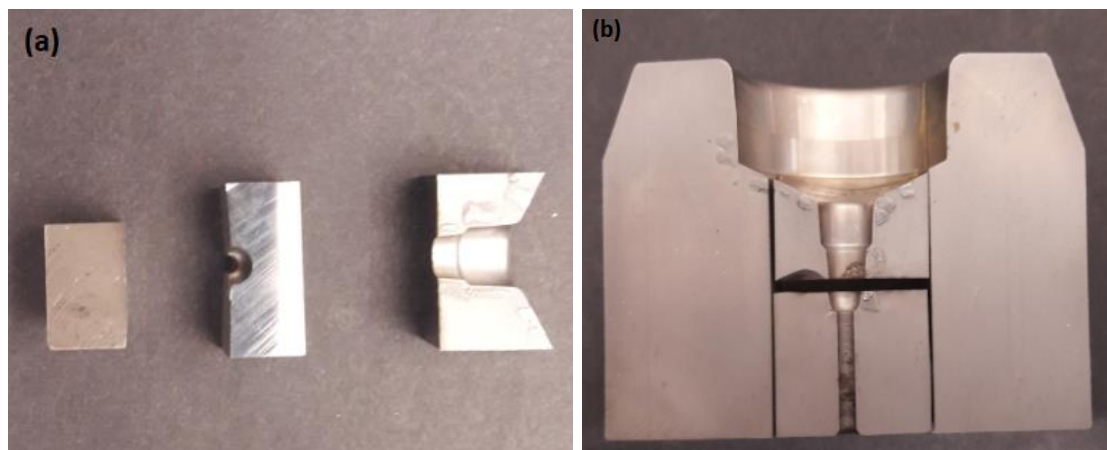
Εικόνα 7.1 Χρήσης μηχανής κοπής με ηλεκτροδιάβρωση για τον τεμαχισμό της μήτρας

Τα δείγματα επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε πληροφορία ως προς το είδος της αστοχίας, να είναι διαθέσιμη προς διερεύνηση. Αρχικά από το κάθε τμήμα της μήτρας που αστόχησε, κόπηκε ένα τεμάχιο (Εικόνα 7.2).



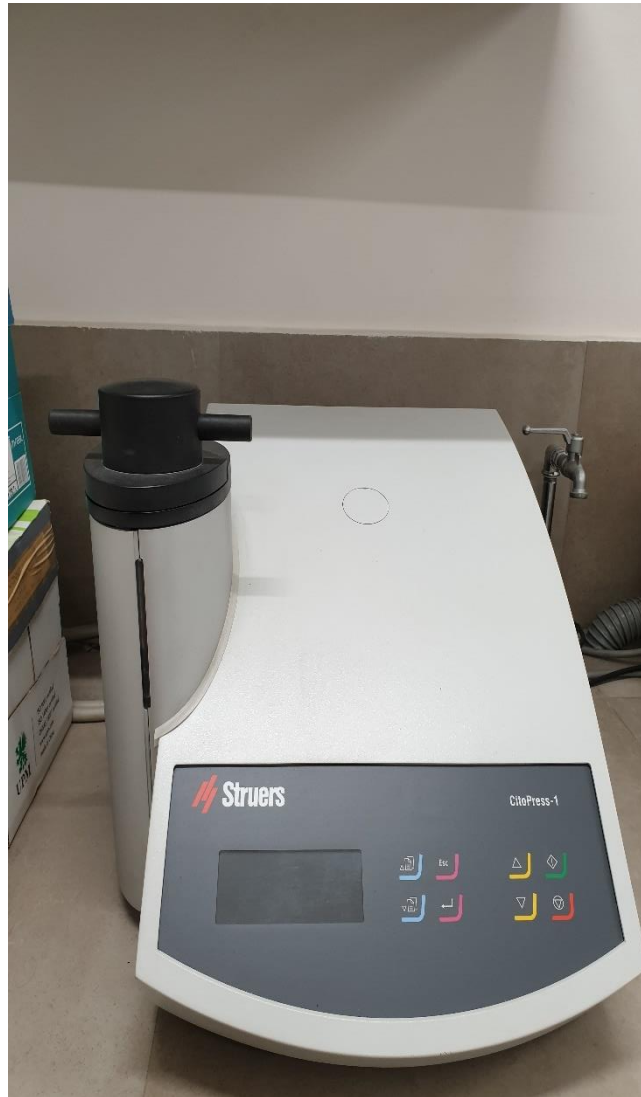
Εικόνα 7.2 Απεικόνιση πρώτης κοπής της μήτρας

Στη συνέχεια το ένα από αυτά κόπηκε σε τρία μέρη και το άλλο σε δύο (Εικόνα 7.3).



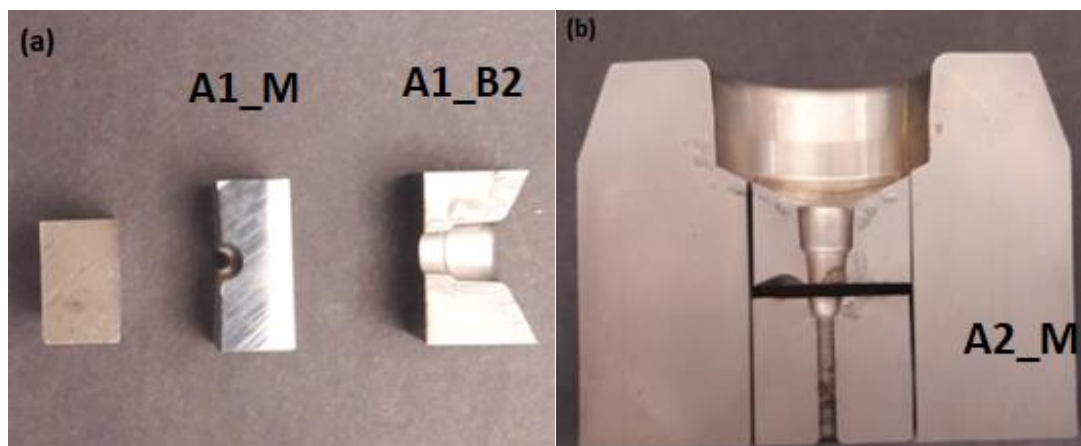
Εικόνα 7.3 Απεικόνιση δεύτερης κοπής της μήτρας

Στα επιμέρους τεμάχια, διακρίνονται οι επιφάνειες που φέρουν υπολείμματα αλουμινίου, αλλά και σημάδια φθοράς. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εγκιβωτισμός σε τρία δείγματα. Ο εγκιβωτισμός έγινε στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πα.Δ.Α.. Χρησιμοποιήθηκε μηχανή εν θερμώ εγκιβωτισμού που είναι η CitoPress 1 της εταιρείας Struers (Εικόνα 7.4).



Εικόνα 7.4 Μηχάνημα εγκιβωτισμού Struers

Κατόπιν, τα δείγματα ονομάστηκαν όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, με σκοπό την μεταλλογραφική ανάλυσή τους (Εικόνα 7.5).



Εικόνα 7.5 Δοκίμια για ανάλυση μικροδομής

Κοπή πραγματοποιήθηκε και στο βλήτρο, με σκοπό την ανάλυση της μικροδομής και την ενδεχόμενη θραυστογραφική μελέτη της επιφάνειας θραύσης, εφόσον ο μηχανισμός αστοχίας δεν έχει βρεθεί (Εικόνα 7.6) .



Εικόνα 7.6 Απεικόνιση κοπής στο βλήτρο

7.2 Χημική Ανάλυση

Εξετάσθηκε η χημική σύσταση των εξαρτημάτων που αστόχησαν και πραγματοποιήθηκε η ταυτοποίησή τους (Πίνακας 7.1), (Πίνακας 7.2). Η μήτρα κατασκευάστηκε από ταχυχάλυβα κονιομεταλλουργίας Uddeholm Vanadis 10. Πρόκειται για έναν χάλυβα εργαλείων χρωμίου – μολυβδαινίου – βαναδίου εν ψυχρώ εφαρμογών. Χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά καλό συνδυασμό αντοχής σε φθορά πρόσφυσης, αντοχή στην θλίψη και αντοχή στην εκλέπτυνση. Έχει πολύ καλή εμβαπτότητα, καλή δυσθραυστότητα, διαστασιακή σταθερότητα κατά τη βαφή και καλή αντοχή στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά. Παρασκευάζεται με κονιομεταλλουργία, διασφαλίζοντας εξαιρετικά χαμηλό ποσοστό μη μεταλλικών εγκλεισμάτων. Η επιλογή του προσφέρει πολύ καλή κατεργασιμότητα και λειαντικότητα στα εργαλεία. Είναι κατάλληλος για εργαλεία υψηλών επιδόσεων, όπου η φθορά είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας. Μετά από βαφή και επαναφορά, μπορεί να φτάσει σε σκληρότητα 60-67 HRC κάτω από συγκεκριμένη θερμική ακολουθία [28].

Χημική Σύσταση (% κ.β.)	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Μήτρα διαμόρφωσης	>2,5	0,6	0,436	7,68	1,47	>10
Uddeholm Vanadis 10	2,9	0,5	0,5	8	1,5	9,8

Πίνακας 7.1 Ταυτοποίηση υλικού της μήτρας

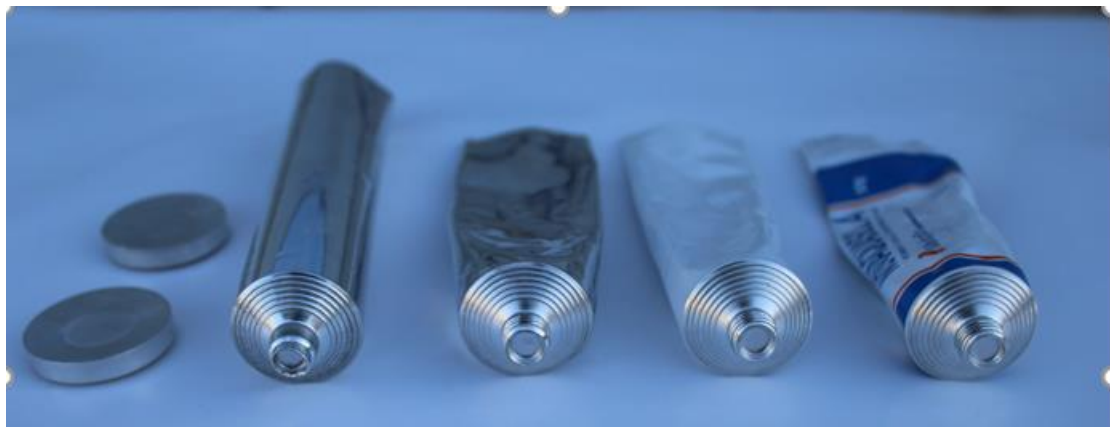
Διαπιστώνεται ότι το βλήτρο και το χιτώνιο έχουν κατασκευασθεί από το ίδιο υλικό. Πρόκειται για ένα κραματωμένο εργαλειοχάλυβα εν ψυχρώ εφαρμογών υψηλού άνθρακα, 12% χρωμίου. Έχει χαρακτηριστική χημική σύσταση που διαφοροποιείται από τους υπόλοιπους της κατηγορίας του λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας σε Μαγγάνιο. Τακτοποιείται σύμφωνα με τα Νορβηγικά πρότυπα ως NS13882 [29].

Χημική Σύσταση (% κ.β.)	C	Si	Mn	S	P	Ni	W	Mo	V
Βλήτρο		0,3	0,77	0,015	0,01	0,4	1,03	0,1	-
Χιτώνιο		0,3	0,86	0,01	0,02	0,1	0,9	0,1	0,1
NS 13882	1,9-2,2	0,2-0,4	0,6-0,9	0,02	0,03	-	1-1,5	-	-

Πίνακας 7.2 Ταυτοποίηση χημικής σύστασης βλήτρου-χιτωνίου

Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Spectrum Labs υπό τις οδηγίες της κας. Κουκούλη Μαρίας. Χρησιμοποιήθηκε φορητός φασματογράφος HP τύπου InnonXSystem. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα δεν ανιχνεύεται.

Αναζητήθηκε η χημική σύσταση δύο διαθέσιμων ενδιάμεσων προϊόντων, ενός σωληναρίου και ενός κυκλικού δίσκου (Εικόνα 7.7) ώστε να τακτοποιηθούν τα υλικά κατασκευής των σωληναρίων (Πίνακας 7.5), (Πίνακας 7.6) αντίστοιχα.



Εικόνα 7.7 Απεικόνιση σωληναρίων - κυκλικών δίσκων

Πίνακας 7.3 Ταυτοποίηση χημικής σύστασης σωληναρίου

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ποσοστό υπόλοιπων στοιχείων	Al
Χημική ανάλυση	0.483	0.594	0.013	0.014	0.34	0.067	0.008	0.028	-	0.005 Pb 0.0005 Zr	Bal.
Πρότυπη χημική σύσταση[30]	0.3 0.6	0.1 0.3	0.1 max	0.1 max	0.35 0.6	0.05 max	-	0.15 max	0.10 max	0.15	Bal.

Η χημική ανάλυση του σωληναρίου έγινε με φορητό φασματογράφο φθορισμού ακτίνων X (portable XRF) HP τύπου InnovXSystem στο εργαστήριο δοκιμών Spectrum Labs. Υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των μετρούμενων τιμών στα στοιχεία Fe, Mg, Cr και στη χημική σύσταση που ορίζεται στο σχετικό πρότυπο προδιαγραφής. Οφείλεται σε αποκλίσεις λόγω μέτρησης πάνω στο εξαιρετικά λεπτότοιχο δείγμα. Η χρήση φασματογράφου οπτικής εκπομπής (spark emission spectrometer) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ίδιο λόγο. Το κράμα αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε είναι το EN-AW-6060. Θερμικά σκληρυνόμενο ελατό κράμα, μέτριας μηχανικής αντοχής, με πολύ καλή αντοχή στη διάβρωση και συγκολλησιμότητα καθώς και καλή εν ψυχρώ διαμορφωσιμότητα ειδικά μετά από θερμική κατεργασία T4. Είναι συχνότατα χρησιμοποιούμενο σε πολύ πολύπλοκες κατατομές, έχοντας πολύ καλή απόκριση στην ανοδίσωση [31]. Με βάση τη χρήση του υλικού στην κατασκευή σωληναρίων φαρμακευτικού σκευάσματος όπου κρίσιμες ιδιότητες αποτελούν η αντοχή σε διάβρωση, η διαμορφωσιμότητα εν ψυχρώ και η δυνατότητα παθητικοποίησης, η συγκεκριμένη επιλογή υλικού αποτελεί μια ικανοποιητικότερη λύση.

Πίνακας 7.3 Ταυτοποίηση χημικής σύστασης κυκλικού δίσκου

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ποσοστό υπόλοιπων στοιχείων	Al
Χημική ανάλυση	1.032	0.388	0.079	0.691	0.79	0.049	0.004	0.071	-	0.010 Pb 0.0011 Zr	Bal.
Πρότυπη χημική σύσταση	0.7 1.3	0.5 max	0.1 max	0.4 1.0	0.6 1.2	0.25 max	-	0.2 max	0.10 max	0.15	Bal.

Η χημική ανάλυση του δίσκου έγινε χρήση φορητού φασματογράφου φθορισμού ακτίνων X αλλά και με φασματογράφο οπτικής εκπομπής βγάζοντας τα ίδια αποτελέσματα.

Το κράμα αλουμινίου που τακτοποιήθηκε είναι το EN-AW-6082. Θερμικά σκληρυνόμενο ελατό κράμα, μέτριας μηχανικής αντοχής με εξαιρετική αντοχή

στη διάβρωση. Έχει τη μεγαλύτερη μηχανική αντοχή στα κράματα της σειράς 6000 και αποτελεί χαρακτηριστικό κράμα για μηχανολογικές κατασκευές. Με τη χρήση του συγκεκριμένου κράματος είναι δύσκολο να παραχθούν λεπτότοιχα, πολύπλοκης γεωμετρίας σχήματα μέσω διέλασης. Η επιφάνεια μετά τη διέλαση δεν είναι τόσο στιλπνή σε σχέση με άλλα κράματα της κατηγορίας 6000 [32]. Η χρήση του συγκεκριμένου κράματος δεν ενδείκνυται για τη χρήση στην κατασκευή των σωληναρίων.

7.3 Μικροσκληρομέτρηση

Οι μετρήσεις σκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στο τμήμα Ελέγχου Ποιότητας της εταιρείας Ν.Μπαζιγος ΑΒΕΕ με βάση το πρότυπο ASTM E384-16. Χρησιμοποιήθηκε μικροσκληρόμετρο Automatic Turret Digital Display Micro Vickers Hardness Tester, Model HVS-1000Z (Εικόνα 7.8). Επιλέχθηκε βάρος 1kg. Λήφθηκαν μετρήσεις στη μήτρα, μέσω του δοκιμίου Α1 και το βλήτρο. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 7.5). Επίσης έχει γίνει μετατροπή των μετρήσεων από HV1 σε HRC (Πίνακας 7.6)



Εικόνα 7.8 Μικροσκληρόμετρο

Πίνακας 7.5 Απεικόνιση μετρήσεων σκληρότητας HV1

A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Μήτρα (HV1)	884,1	876,4	876,4	884,1	884,1	880,2	884,1	876,4	880,2	876,4
Βλήτρο (HV1)	647,7	633,6	647,9	636	640,7	645,5	648,8	643,1	631,3	631,3

Πίνακας 7.6 Μετατροπή σκληρότητας σε HRC

A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Μήτρα (HRC)	66,55	66,33	66,33	66,55	66,43	66,43	66,55	66,33	66,43	66,33
Βλήτρο (HRC)	57,54	57,03	57,75	57,15	57,39	57,63	57,79	57,50	56,91	56,91

Οι τιμές σκληρότητας παρουσιάζουν υψηλή ομοιογένεια στην μήτρα και στο βλήτρο και επιβεβαιώνουν τις αρχικές μετρήσεις σκληρότητας που είχαν πραγματοποιηθεί μακροσκοπικά με την μέθοδο HRC. Το χιτώνιο δεν κόπηκε ώστε να μικροσκληρομετρηθεί, αφού δεν παρουσιάζει κανενός είδους αστοχία. Λήφθηκαν μετρήσεις σκληρότητας μακροσκοπικά.

7.4 Μικροσκοπική Εξέταση Δειγμάτων

7.4.1 Έλεγχος με στερεοσκόπιο

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος με φορητό στερεοσκόπιο Dino-Lite Pro τύπου AM4000 στο Εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών, του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πα.Δ.Α. .

Εξετάσθηκαν οι επιφάνειες θραύσης της μήτρας, του βλήτρου και του χιτωνίου, οι οποίες συμμετείχαν στην διαμόρφωση του σωληναρίου. Προηγουμένως είχε πραγματοποιηθεί φωτογράφιση και αμμοβολή στην μήτρα, με σκοπό να απεικονισθούν λεπτομερέστερα οι επιφάνειες θραύσης, αλλά και τα υπολείμματα αλουμινίου που υπάρχουν πάνω σε αυτές.

Παρατηρούνται υπολείμματα αλουμινίου συσσωρευμένα στην κωνική επιφάνεια της μήτρας, τα οποία υποδηλώνουν ότι η μήτρα έσπασε και συνέχισε να δουλεύει (Εικόνα 7.9)

Τα υπολείμματα αλουμινίου έχουν αρκετά μεγάλο πάχος, σε σχέση με τις ανοχές της μήτρας. Το αλουμίνιο έχει εισέλθει στο ρήγμα, όπου έχουν αναπτυχθεί πολύ υψηλές δυνάμεις συμπίεσης. Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι τα υπολείμματα παρέμειναν στην μήτρα ακόμα και μετά την αμμοβολή της. Η συνέχιση της λειτουργίας ήταν εφικτή λόγω της ύπαρξης εξωτερικής συγκράτησης από κυκλικό υποστήριγμα.



Εικόνα 7.9 Απεικόνιση ποσότητας αλουμινίου στην κωνική επιφάνεια της μήτρας

Παρατηρούνται περιοχές εκτενούς φθοράς της επιφάνειας θραύσης (Λεπτομέρειες 1 και 2 Εικόνα 7.10) πλησίον της διεπιφάνειας του διαμορφούμενου αλουμινίου και της μήτρας, αλλά και περιοχή η οποία είναι συμπληρωματική της περιοχής της κύριας εκροής του αλουμινίου (Λεπτομέρεια 3, Εικόνα 7.10). Η φθορά, λόγω των αναπτυσσόμενων τάσεων και της φύσης του αλουμινίου, συνοδεύεται από φαινόμενα διάβρωσης (μηχανοχημική φθορά). Δευτερευόντως, στην ίδια εικόνα απεικονίζεται το σημείο έναρξης θραύσης (Λεπτομέρεια 4, Εικόνα 7.10). Θα γίνει αναφορά για την περιοχή αυτή παρακάτω.



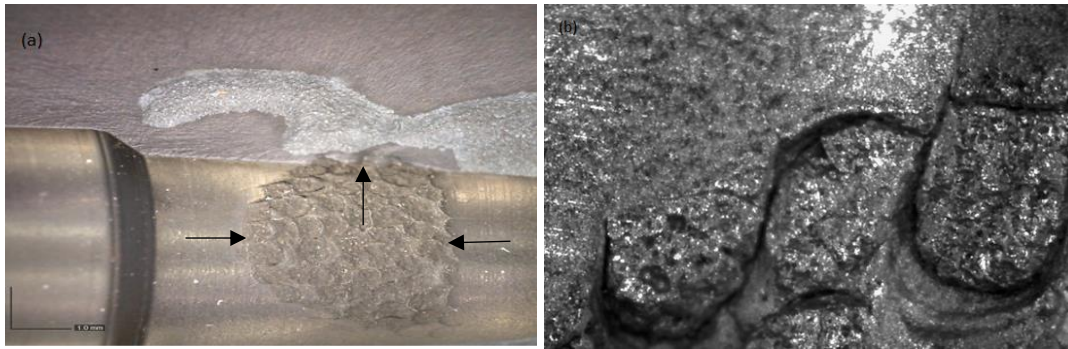
Εικόνα 7.10 Απεικόνιση περιοχών εκτενούς φθοράς στην επιφάνεια διαμόρφωσης ακροφυσίου

Στην Εικόνα 7.11 απεικονίζεται η έναρξη θραύσης της μήτρας, η οποία οροθετείται στη διαμορφούμενη έξοδο του ακροφυσίου, δίπλα στη βάση του εξολκέα. Η θραύση φαίνεται να προήλθε από συνένωση ρωγμών μέσω δευτερεύουσας ρωγμής που αναπτύχθηκε κάθετα στο κύριο επίπεδο θραύσης. Είναι σημείο πολύ υψηλής συγκέντρωσης τάσεων. Λαμβάνοντας υπόψιν τη μορφή της θραύσης του βλήτρου, η έναρξη της θραύσης πιθανότατα να οφείλεται στην εκκεντρότητα του βλήτρου κατά τη λειτουργία. Σε περίπτωση κακής συναρμογής και ανοχών των εξαρτημάτων, οι περιοχές της μήτρας πλησίον της βάσης του εξολκέα, παραλαμβάνουν κρουστικές δυνάμεις. Τέτοιου είδους περιοχές αποτελούν τα σημεία έναρξης της θραύσης, αφού είναι σημεία εφαρμογής πολύ μεγάλης πυκνότητας τάσεων.



Εικόνα 7.11 Απεικόνιση γραμμών απόσχισης στην επιφάνεια της μήτρας

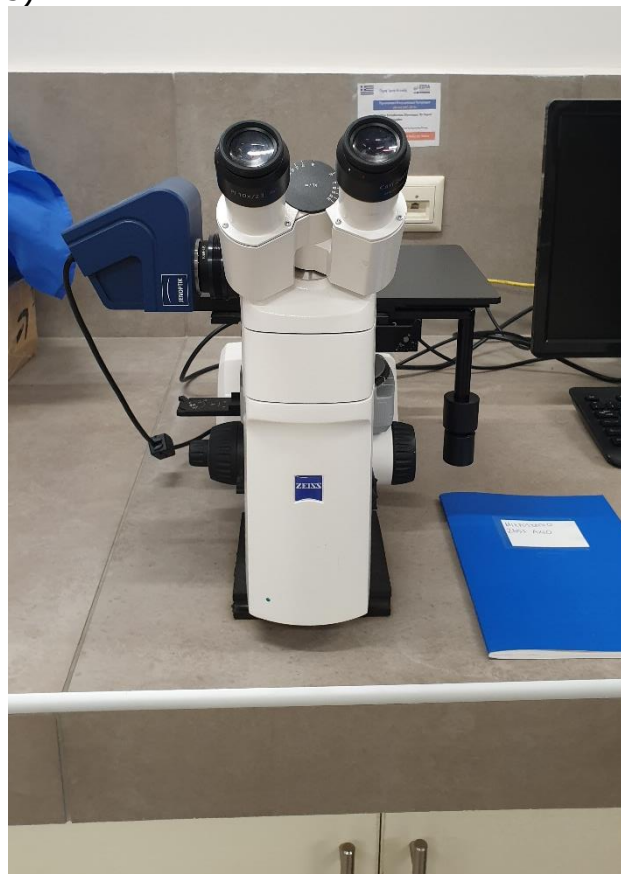
Στην Εικόνα 7.12 απεικονίζεται περιοχή πολύ μεγάλης τραχύτητας, όπου υπάρχει εναπόθεση αλουμινίου. Οι εναποθέσεις έχουν διαφορετικό προσανατολισμό (βέλη), οι οποίες όμως εκατέρωθεν καταλήγουν στο κέντρο της περιοχής όπου υπάρχει και η μεγαλύτερη διαρροή του αλουμινίου. Κατά τη λειτουργία, η ποσότητα του αλουμινίου η οποία συμπιέζοταν στην περιοχή αυτή, δημιούργησε ένα χείλος και άρχισε να εισέρχεται στο εσωτερικό της μήτρας μετά την θραύση της. Οι διαδοχικές συμπιέσεις και εκτονώσεις του αλουμινίου κατά τη λειτουργία της μήτρας, δημιούργησαν αυτή τη μορφολογία που αναφέρεται ως επιφάνεια "κορμού φοίνικα (palm tree failure)" (Εικόνα 7.12 a) σε συνδυασμό με την αύξηση της τραχύτητας στην κυλινδρική επιφάνειά της (Εικόνα 7.12 b)



Εικόνα 7.12 Απεικόνιση ποσότητας αλουμινίου στην επιφάνεια της μήτρας

7.4.2 Έλεγχος με μεταλλογραφικό μικροσκόπιο

Πραγματοποιήθηκε μελέτη με οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Πα.Δ.Α. με χρήση οπτικού μικροσκόπιο τύπου Zeiss (Εικόνα 7.13).



Εικόνα 7.13 Οπτικό μικροσκόπιο

Τα δείγματα που επιλέχθηκαν για την μελέτη είναι το A1_M, A1_B2 που είναι από το ένα τμήμα της μήτρας, το A2. Τα δοκίμια αυτά προέρχονται από τις

επιφάνειες θραύσης και εμπεριέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την επεξήγηση του μηχανισμού της θραύσης.

Τα δοκίμια προετοιμάστηκαν βάσει προτύπων ASTM [33], [34]. Ο εγκιβωτισμός έγινε στο μηχάνημα Struers Citopress-1 (Εικόνα 7.4) με συνδυασμό ρητίνων Struers DuroFast και Struers Multifast.

Κατόπιν τα δοκίμια υπέστησαν λείανση με λειαντικά χαρτιά στο μηχάνημα Presi Mecapol P262 (Εικόνα 7.14) και στίλβωση με διαμανταλοιφές των 6 και 3 μm και με αιώρημα αλουμίνας των 1 και 0,3 μm αντίστοιχα, στο λειαντικό μηχάνημα Presi Mecapol P262 με αντίστοιχα στίλβωτικά πανιά. Τέλος, έγινε χημική προσβολή με χρήση Picral 4% και διαδοχικούς χρόνους έκθεσης, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη αποτύπωση της μικροδομής. Με το οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο φωτογραφήθηκαν τα προς μελέτη δείγματα.

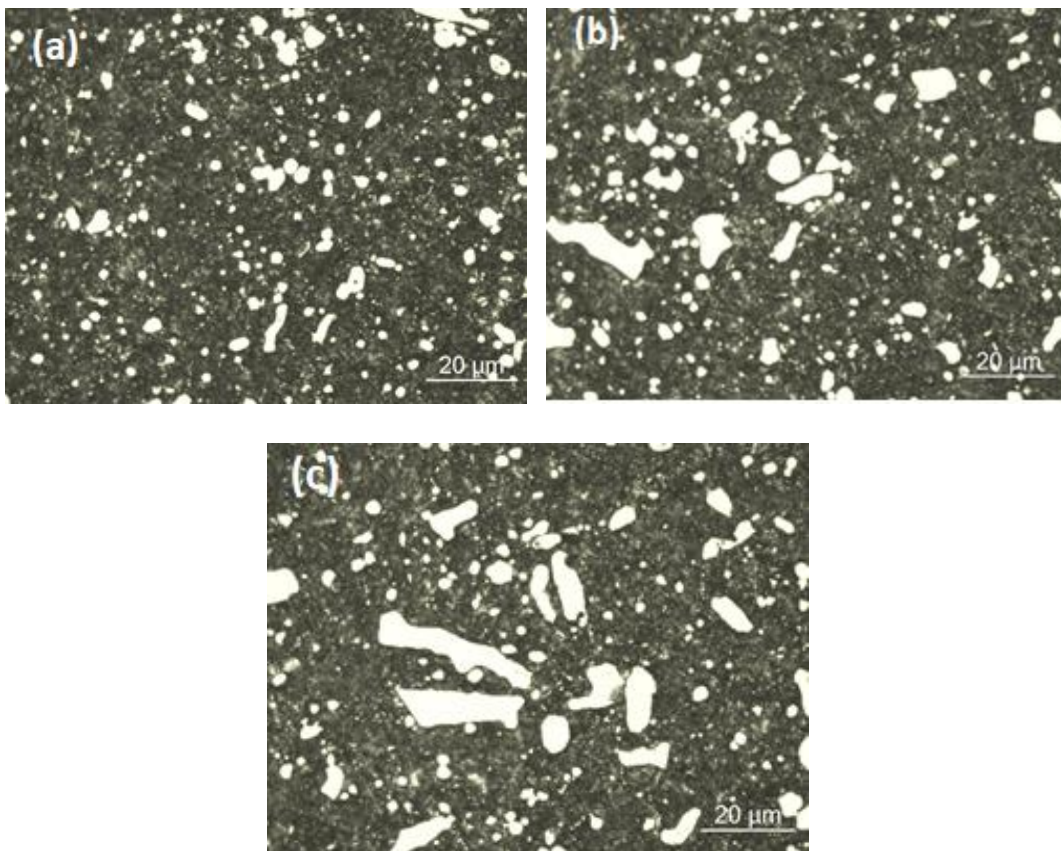


Εικόνα 7.14 Μηχάνημα Λείανσης

Το βλήτρο προσβλήθηκε με Picral 4% για 20,36 sec. Στην Εικόνα 7.15 παρουσιάζεται η μικροδομή του βλήτρου. Τυπική δομή συμβατικά παρασκευασμένου χάλυβα εργαλείων εν ψυχρώ εφαρμογών, υψηλού άνθρακα, υψηλού χρωμίου. Απεικονίζεται μήτρα επαναφερμένου μαρτενσίτη, με ομοιόμορφα κατανεμημένα καρβίδια βολφραμίου και πλατέα καρβίδια χρωμίου, σχετικά μεγάλου μεγέθους. Λόγω της γεωμετρίας τους, τα καρβίδια χρωμίου είναι πρωτογενή, τα οποία δεν διαλύθηκαν στον ωστενίτη κατά την θερμική κατεργασία σκλήρυνσης.

Η χρήση ενός τέτοιου χάλυβα στο βλήτρο είχε ως σκοπό την ικανοποίηση της κύριας απαίτησης αντοχής στην τριβή, χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η επίσης πρωτεύουσα ανάγκη της δυσθραυστότητας. Η δυσθραυστότητα χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη ιδιότητα στο συγκεκριμένο εργαλείο λόγω: 1) της πιθανότητας αδυναμίας εξόλκευσης (θλιπτικές τάσεις, "διπλοπάτημα") 2) λόγω του ενδεχόμενου εφαρμοζόμενου διατμητικού φορτίου στο κύριο στέλεχος του. Η εκκεντρότητα κατά την λειτουργία, λόγω ανοχών βλήτρου και χιτωνίου, οδήγησε στη συσσώρευση αλουμινίου λόγω του υψηλού ρυθμού των

πατημάτων της μηχανής. Η συσσώρευση του αλουμινίου προκάλεσε την περαιτέρω εκτόπιση του βλήτρου και την ανάπτυξη κρουστικών φορτίων με τη μήτρα στην περιοχή πλησίον της βάσης του εξολκέα. Συνέπεια αυτού ήταν η θραύση της μήτρας, το οποίο είναι το επικρατέστερο σενάριο. Στην κατασκευή του βλήτρου, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό που να μην είναι συμβατικά παρασκευασμένο, ώστε να έχει μεγαλύτερη δυσθραυστότητα στην ίδια σκληρότητα λειτουργίας. Θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί χάλυβας που έχει παραχθεί με κονιομεταλλουργία ή με ανάτηξη μέσω ηλεκτροαγωγίμης σκουριάς (Electroslag Remelting). Θα εξασφαλιστεί η ελαχιστοποίηση ή εξάλειψη των πλατέων καρβιδίων που έχουν σχετικά μικρή αντοχή σε λυγισμό και σε διατμητικά φορτία. Γενικά, αστοχία βλήτρων συναντάται στην πλειονότητα των περιπτώσεων λόγω λανθασμένων ανοχών στο καλούπι.



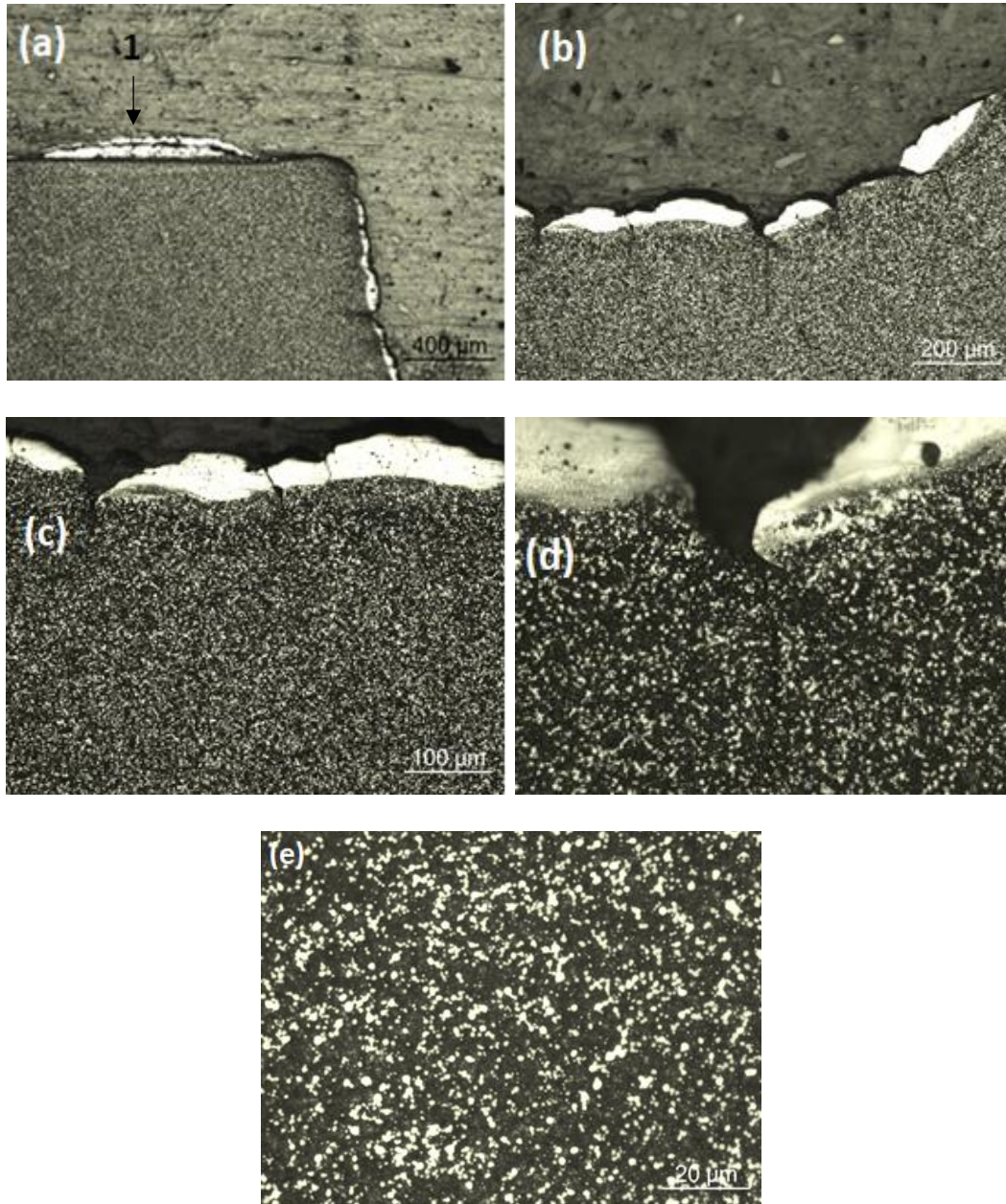
Εικόνα 7.15 Μεταλλογραφική δομή Mx1000 του βλήτρου

Το δοκίμιο που επιλέχθηκε για να μελετηθεί η διεπιφάνεια μεταξύ μήτρας και διαμορφούμενου σωληναρίου είναι το A2. Το δοκίμιο, τοπολογικά, έχει προκύψει από την τομή της μήτρας στην περιοχή της μέγιστης εκροής αλουμινίου. Προσβλήθηκε με Picral 4% για 35,36 sec. Στην Εικόνα 7.16 απεικονίζονται τα διαδοχικά στρώματα αλουμινίου που συσσωρεύονταν στο συγκεκριμένο σημείο μετά τη θραύση της μήτρας σε κάθε πάτημα (Λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.16 a).

Απεικόνιση μικρορηγματώσεων στην επιφάνεια της μήτρας με το διαμορφούμενο σωληνάριο, οφειλόμενων στις αναπτυσσόμενες θλιπτικές τάσεις της συμπίεσης του αλουμινίου (Εικόνα 7.16 b, c, d). Οι δυνάμεις αυτές

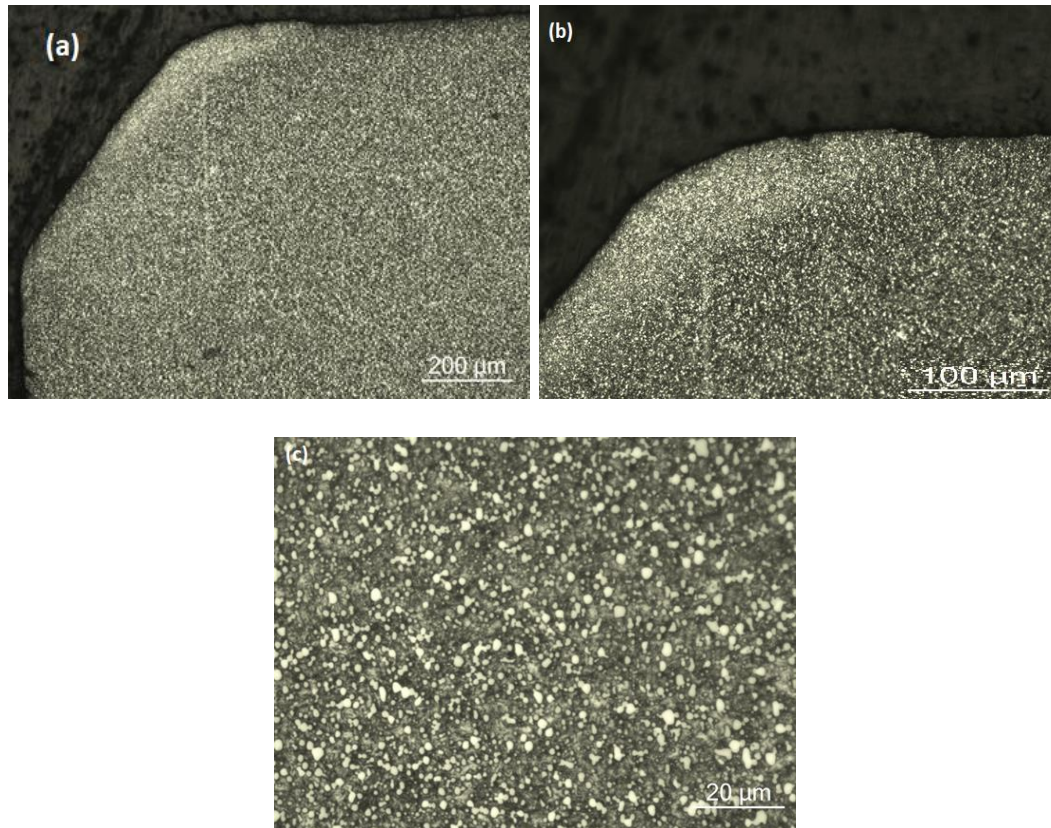
ξεπέρασαν το όριο αντοχής σε θλίψη του υλικού, με αποτέλεσμα τις μικροθραύσεις στην επιφάνεια της μήτρας.

Η μικροδομή της μήτρας αποτελείται από μήτρα επαναφερμένου μαρτενσίτη και καρβίδια χρωμίου, μολυβδαινίου, βολφραμίου, μικρού διαμετρήματος, ομοιόμορφα διασκορπισμένα όπως αναμένεται στους χάλυβες παρασκευασμένους με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας (Εικόνα 7.16 e). Είναι χαρακτηριστική μικροδομή χάλυβα αυτής της οικογένειας.



Εικόνα 7.16 Απεικόνιση των εναποθέσεων του αλουμινίου, των μικρορηγματώσεων της μήτρας και της μεταλλογραφικής δομής μετά την χημική προσβολή στο δοκίμιο A2: a) M x 50, b) M x 100, c) M x 200, d) M x 500, e) M x 1000

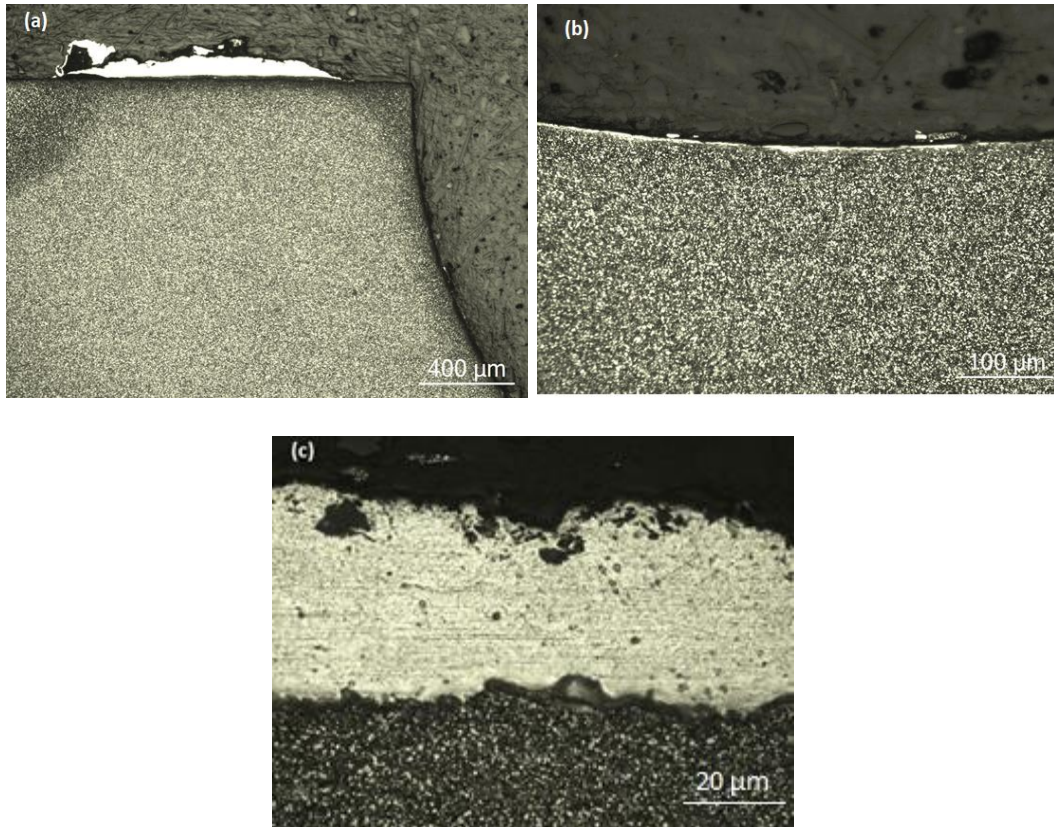
Το τμήμα A1_B2, το οποίο, τοπολογικά, αποτελεί τμήμα του άνω μέρους της μήτρας στην αρχική διαμόρφωση του σωληναρίου (Εικόνα 7.5 a), προσβλήθηκε με Picral 4% για χρόνο 8 sec. Απεικόνιση της περιοχής πρωτεύουσας μορφοποίησης του σωληναρίου, η οποία φαίνεται ομοιογενής ως προς την μικροδομή.



Εικόνα 7.17 Απεικόνιση της μεταλλογραφικής δομής μετά τη χημική προσβολή στο δοκίμιο A1_B: a) M x 100, b) M x 200, c) M x 1000

Το τμήμα A1_M, το οποίο αποτελεί μέρος του μεσαίου τμήματος της μήτρας (Εικόνα 7.5 a), προσβλήθηκε με Picral 4% για χρόνο 8 sec. Στην Εικόνα 7.18 (a) απεικονίζεται ποσότητα αλουμινίου που είναι προσκολλημένη στην επιφάνεια θραύσης της μήτρας η οποία αποτυπώθηκε και μακροσκοπικά (Εικόνα 7.8). Στην διεπιφάνεια μήτρας – διαμορφούμενου σωληναρίου υπάρχει στρώμα αλουμινίου ως αποτέλεσμα της τριβής πρόσφυσης μεταξύ των δύο υλικών (Εικόνα 7.18(b)). Επιπλέον, στη διεπιφάνεια μήτρας-διαμορφούμενου αλουμινίου, παρατηρούνται σημάδια διάβρωσης μεταξύ των δύο υλικών (Εικόνα 7.18 (c)). Λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες συμπίεσης κατά τη μορφοποίηση, τη φύση των δύο υλικών και τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις στην επιφάνεια θραύσης (Εικόνα 7.9), μελέτη μεσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου θα μπορέσει να τεκμηριώσει τη φύση των μηχανισμών στη διεπιφάνεια μήτρας-διαμορφούμενου αλουμινίου. Στο στρώμα αλουμινίου, παρατηρείται πορώδες πλησίον της επιφάνειάς διαμόρφωσής του, το οποίο είτε είναι προϊόν

αποκόλλησης κατά τη λείανση λόγω διαφορετικής σκληρότητας αλουμινίου – εργαλειοχάλυβα, είτε συσχετίζεται με τον τρόπο συσσώρευσης του αλουμινίου (πολυαξονική φόρτιση και σύνθλιψη μεταξύ μήτρας και βλήτρου) πάνω στη μήτρα. Το πάχος του εναπομείναντος αλουμινίου στην μήτρα (Εικόνα 7.18 (c)) είναι 7,5 μm . Η δυνατότητα παρατήρησης σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου θα τεκμηριώσει τις παραπάνω παρατηρήσεις. Τα αποτελέσματα της μελέτης με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο των δύο παραπάνω παρατηρήσεων δεν θα διαφοροποιήσουν την εκτίμηση της χρονικής ακολουθίας της αστοχίας ούτε τις κύριες αιτίες της.



Εικόνα 7.18 Απεικόνιση της μεταλλογραφικής δομής μετά την χημική προσβολή στο δοκίμιο A1_M: a) M x50, b) M x200, c) M x500

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ

8.1 Αποτελέσματα / Συμπεράσματα

Από την ανάλυση αστοχίας προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις, αποτελέσματα και συμπεράσματα:

1) Συλλογή ιστορικών δεδομένων

Στην παρούσα εργασία δεν ήταν εφικτή η συλλογή ιστορικών δεδομένων λόγω πολιτικής της εταιρείας παραγωγής των σωληναρίων. Η περίπτωση της μελέτης χωρίς να υπάρχουν ιστορικά δεδομένα, περιορίζεται μόνο σε συμπεράσματα που σχετίζονται με ευρήματα από τα αστοχούντα εργαλεία. Δεν μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα που σχετίζονται με τον τρόπο λειτουργίας ή τις συνθήκες λειτουργίας, τη συντήρηση κτλ..

Η εταιρεία παράγει σωληνάρια από αλουμίνιο για την συσκευασία φαρμακευτικής αλοιφής με την μέθοδο αναδιπλούμενων λεπτότοιχων σωλήνων με συνδυασμό μεθόδων βαθείας κοίλανσης και σιδερώματος του τοιχώματος (wall ironing) [35]. Ο πιο γνωστός τρόπος είναι μία ακολουθία από εν ψυχρώ διαμορφώσεις. Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι το έμβολο συμπίεσης και ο δακτύλιος συμπίεσης, γνωστός ως μήτρα. Το υλικό δεν μπορεί να παρακάμψει την πίεση του εμβόλου από καμία κατεύθυνση και κινείται μεταξύ του εμβόλου και του δακτυλίου. Κατά τη βαθεία κοίλανση τοποθετείται το κατάλληλων διαστάσεων επίπεδο έλασμα σε μία υποδοχή και κεντράρεται με αυτόν τον τρόπο. Ο συγκρατητής πιέζει τον δίσκο επάνω στην μήτρα και τον συγκρατεί εξωτερικά, ενώ κατέρχεται το έμβολο κοιλάνσεως (κλειστού τύπου καλούπι). Ο δίσκος αποκτά την μορφή λεπτότοιχου σωλήνα. Στα επόμενα στάδια γίνεται η διαμόρφωση του στομίου, χρησιμοποιώντας δύο εργαλεία, το βλήτρο και το χιτώνιο. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αποπεράτωση της εξωτερικής επιφάνειας, βερνίκωση και τύπωση. Τα συγκεκριμένα εξαρτήματα αστοχούν επανειλημμένα. Ανάλυση αστοχίας παρόμοιου εξαρτήματος έχει ως χρόνο ζωής του εργαλείου τα 200.000 σωληνάρια, ενώ ο μέσος όρος που προβλέπεται κατά τον σχεδιασμό είναι 2.500.000 σωληνάρια. Η μήτρα είχε αστοχήσει με τον ίδιο τρόπο. Τα συμπεράσματα της εταιρείας που πραγματοποίησε την ανάλυση αστοχίας ανέφεραν ότι η χημική σύσταση, η σκληρότητα καθώς και η μικροδομή της μήτρας ανταποκρίνονταν για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

2) Προκαταρκτική εξέταση – οπτική επιθεώρηση

Η διαμόρφωση του ακροφύσιου του σωληναρίου γίνεται μέσω της μήτρας, με τη βοήθεια του βλήτρου και του χιτωνίου. Η μήτρα και το βλήτρο αστόχησαν, καθώς υπέστησαν ολική θραύση. Υπάρχουν περιπτώσεις σύνθετων ακροφυσίων, όπου πραγματοποιούνται περισσότερα από ένα στάδια διαμόρφωσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχουν διαφορετικά

συναρμολογήματα βλήτρου - χιτωνίου. Οι απαιτήσεις ανοχών ταυτόχρονα είναι αυξημένες.

Παρατηρούνται γραμμές απόσχισης στα άκρα στα δύο αποτμήματα της μήτρας, καθώς και ανομοιόμορφα κατανομημένα στρώματα αλουμινίου στη διεπιφάνεια θραύσης. Επίσης, παρατηρείται ρήγμα στη μήτρα, στο σημείο που γίνεται η διαμόρφωση του ακροφύσιου, στην περιοχή της βάσης του εξολκέα όπου και αποτελεί το σημείο έναρξης θραύσης της.

Το προς μελέτη βλήτρο φέρει ανομοιόμορφα σημάδια φθοράς στην επιφάνεια επαφής εντός του χιτωνίου, ενδεικτικό έκκεντρης λειτουργίας, καθώς και θραύση στην περιοχή διαμόρφωσης του ακροφυσίου του σωληναρίου, ενδεικτικό ανάπτυξης κρουστικών φορτίων με την μήτρα.

Η μήτρα παρουσίασε ομοιόμορφο χρωματισμό σε όλη την επιφάνειά της. Το τόξο καμπυλότητας στην περιοχή διαμόρφωσης για την ελάττωση διαμέτρου, είναι ανεπαρκές, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε δυσκολία εξόλκευσης και αύξησης της πιθανότητας διπλοπατήματος.

3) Μέτρηση σκληρότητας – μικροσκληρότητας

Οι τιμές της σκληρότητας σε όλα τα εξαρτήματα παρουσιάζουν ομοιομορφία. Η μήτρα είναι 66 HRC, το βλήτρο 57 HRC και το χιτώνιο 61 HRC. Οι τιμές είναι εντός του εύρους για χρήση σε μεγάλες παραγωγές. Η σκληρότητα της μήτρας είναι στα άνω αποδεκτά όρια, διαθέτοντας πολύ υψηλή αντοχή στην τριβή, αλλά περιορισμένη δυσθραυστότητα με αποτέλεσμα ο χρόνος ζωής της να εξαρτάται κατά πολύ από την ορθή συναρμογή βλήτρου – χιτωνίου. Πιθανά να υπερεκτιμήθηκε η δυσθραυστότητα του υλικού στα 66 HRC. Υπενθυμίζεται ότι στην αντίστοιχη μελέτη αστοχίας του ίδιου εξαρτήματος, η σκληρότητα στα 62HRC θεωρήθηκε αποδεκτή για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Το βλήτρο βρίσκεται στα φυσιολογικά όρια, προβλέποντας ικανά επίπεδα δυσθραυστότητας για το συγκεκριμένο εξάρτημα. Αντίστοιχα το χιτώνιο, η τιμή σκληρότητας 61 HRC δίνει υψηλή αντοχή στην τριβή σε ένα εξάρτημα που εν γένει είναι στατικό.

4) Χημική ανάλυση

Η μήτρα κατασκευάστηκε από ταχυχάλυβα κονιομεταλλουργίας Cr-Mo-V με την εμπορική ονομασία Uddeholm Vanadis 10. Η επιλογή του συγκεκριμένου υλικού για τη μήτρα είναι αποδεκτή για το συγκεκριμένο εργαλείο, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη δυσθραυστότητα σε εύρη σκληρότητας λειτουργίας 60-66 HRC.

Το βλήτρο και το χιτώνιο έχουν κατασκευαστεί από το ίδιο υλικό, πρόκειται για έναν εργαλειοχάλυβα υψηλού άνθρακα, 12% χρωμίου, που τυποποιείται σύμφωνα με τα νορβηγικά πρότυπα ως NS13882. Η επιλογή αυτού του υλικού για το βλήτρο είναι αποδεκτή αλλά δεν είναι ικανοποιητική λόγω χαμηλής δυσθραυστότητας στη συγκεκριμένη σκληρότητα λειτουργίας. Αντίστοιχα, η επιλογή αυτού του υλικού για το χιτώνιο αποτελεί ικανοποιητική λύση.

Η χρήση του κράματος αλουμινίου που προέκυψε από την χημική ανάλυση του σωληναρίου (EN-AW-6060) ενδεικνύεται για την κατασκευή των σωληναρίων.

5) Οπτική εξέταση

α) Εξέταση με στερεοσκόπιο:

Η εξέταση με στερεοσκόπιο αποσαφήνισε την περιοχή έναρξης θραύσης της μήτρας, όπου παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Βρίσκεται πλησίον της βάσης του εξολκέα και είναι προϊόν κρούσης μεταξύ βλήτρου και μήτρας. Η μορφή της θραύσης του βλήτρου δημιούργησε εν γένει ανισοκατανομή του συμπιεζόμενου αλουμινίου, των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν διαφορετικά από πλευράς έντασης στις επιφάνειες της μήτρας.

Απεικονίστηκε λεπτομερέστερα η απόθεση αλουμινίου στην διεπιφάνεια της θραύσης, γεγονός που επαληθεύει ότι η μήτρα συνέχιζε να δουλεύει, ενώ είχε υποστεί ολική θραύση. Αυτό σημαίνει ότι η μήτρα βρισκόταν εμφωλευμένη εσωτερικά ενός δακτυλίου, ο οποίος λειτουργούσε ως υποστήριγμα. Συνήθως οι μήτρες που έχουν επικάλυψη με PVD ή CVD, έχουν σύσφιξη εν θερμώ. Κάτι τέτοιο εδώ δεν συμβαίνει, αφού ούτε σημάδια θέρμανσης υπάρχουν στην μήτρα, αλλά και η χημική σύσταση δεν παρουσίασε ενδείξεις ύπαρξης επικάλυψης. Συμπερασματικά η σύσφιξη με το εξωτερικό υποστήριγμα έχει γίνει μηχανικά.

Η απεικόνιση της απόθεσης αλουμινίου στην επιφάνεια της μήτρας, όπου παρουσιάστηκε μορφολογία " κορμού φοίνικα ", είναι ένδειξη εφαρμογής διαδοχικών συμπίεσεων και εκτονώσεων του αλουμινίου κατά τη λειτουργία της μήτρας. Χαρακτηριστικός είναι ο προσανατολισμός των συμπίεσεων που υπέστη το αλουμίνιο στο χείλος εκροής προς τη διεπιφάνεια θραύσης, ενδεικτικό ότι η μήτρα λειτουργούσε αφού είχε σπάσει. Η συσσώρευση του αλουμινίου προήλθε μετά την θραύση του βλήτρου και την λειτουργία της μήτρας. Η εκκεντρότητα λειτουργίας του βλήτρου τεκμηριώνεται από την ανομοιόμορφη φθορά και την ανοχή μεταξύ βλήτρου – χιτωνίου, οι οποίες είναι της τάξης του 0.1 mm. Τυπική ανοχή σε αυτές τις περιπτώσεις είναι 0.01 mm. Η συγκέντρωση του αλουμινίου μετατόπισε τη διαδρομή του σπασμένου βλήτρου, με αποτέλεσμα να έρθει κρουστικά σε επαφή με τη μήτρα. Σε αυτή την φάση επήλθε η θραύση της μήτρας. Η συσσώρευση του αλουμινίου στη διεπιφάνεια θραύσης της μήτρας ήταν το τελικό αποτέλεσμα.

Αποτυπώνεται η ύπαρξη περιοχών εκτενούς φθοράς στη διεπιφάνεια θραύσης που οφείλεται στη συσσώρευση αλουμινίου. Οι πολύ υψηλές τιμές συμπίεσης του αλουμινίου σε συνδυασμό με την φύση του υλικού δημιουργούν συνθήκες μηχανοχημικής διάβρωσης, οι οποίες μένει να τεκμηριωθούν μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Η συγκεκριμένη μελέτη δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

β) Εξέταση με οπτικό μικροσκόπιο

Δεν υπάρχουν ευρήματα επικάλυψης PVD ή CVD. Κάτι τέτοιο θα ήταν αναμενόμενο λόγω της εφαρμογής του συγκεκριμένου χάλυβα. Αυτό

επιβεβαιώθηκε από την χημική ανάλυση της μήτρας, αλλά και κατά την μικροσκοπική ανάλυση.

Στην επιφάνεια θραύσης μεταξύ μήτρας και σωληναρίου έχουν συσσωρευτεί διαδοχικά στρώματα αλουμινίου, το πάχος των οποίων συσχετίζεται με το κενό μεταξύ των δύο τεμαχίων της μήτρας, τα οποία περιορίζονται από το υποστήριγμα. Το γεγονός των διαδοχικών στρωμάτων τεκμηριώνει την εισροή του υλικού κατά φάσεις, ανάλογα με τον ρυθμό των πατημάτων. Στην περιοχή της εκροής αλουμινίου παρατηρήθηκαν μικρορωγμές στην επιφάνεια της μήτρας, οι οποίες οφείλονται στις αναπτυσσόμενες θλιπτικές τάσεις λόγω της συμπίεσης του αλουμινίου.

Η μήτρα παρουσιάζει τυπική δομή εργαλειοχάλυβα παρασκευασμένου με κονιομεταλλουργία. Η μικροδομή αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη με ομοιόμορφα κατανομημένα καρβίδια χρωμίου, μολυβδαινίου και βαναδίου. Όπως αναμένεται σε φυσιολογικές συνθήκες, σε αυτό το υλικό δεν παρατηρείται συσσωμάτωση καρβιδίων. Η μικροδομή του βλήτρου αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη, καρβίδια χρωμίου και μολυβδαινίου. Η δομή αυτή αφορά έναν συμβατικά παρασκευασμένο χάλυβα εργαλείων εν ψυχρώ εφαρμογών, υψηλού άνθρακα, υψηλού χρωμίου, μετά από θερμική κατεργασία σκλήρυνσης. Λόγω μεγέθους, ποσοστό των καρβιδίων είναι πρωτογενή. Η ύπαρξη τους, αδιάλυτων στη μικροδομή δικαιολογείται από τη χημική σύσταση του υλικού.

Συνοψίζοντας

Τα αίτια που οδήγησαν στην συγκεκριμένη αστοχία είναι ως προς το σχεδιασμό:

α) Μεγάλη ανοχή βλήτρου – χιτωνίου, με αποτέλεσμα το βλήτρο να δουλεύει έκκεντρα. Αυτό οδήγησε στην μερική θραύση της επιφάνειας διαμόρφωσής του. Συνέχισε να διαμορφώνει ενώ είχε υποστεί θραύση, με αποτέλεσμα να συμπιέζει το αλουμίνιο και να το μετατοπίζει στην πλευρά όπου παρουσιάστηκε η επιφάνεια " κορμού φοίνικα ". Η συσσώρευση του αλουμινίου μετατόπισε τη διαδρομή του βλήτρου με αποτέλεσμα την εφαρμογή κρουστικών φορτίων στην μήτρα, κοντά στη βάση της εξόλκευσης. Σε αυτή την περιοχή υπήρξε έναρξη της θραύσης της μήτρας. Η μήτρα συνέχισε να λειτουργεί και μετά τη θραύση της, συγκρατούμενη από το υποστήριγμα του συναρμολογήματος.

Συμπεράσματα:

- Πρόκειται για βίαιη ψαθυρή θραύση η οποία οφείλεται στην έλλειψη ομοκεντρότητας κατά τη δυσλειτουργία εμβόλου-χιτωνίου, αλλά και των διαστασιακών ανοχών μεταξύ τους.
- Η διαπίστωση της θραύσης δεν έγινε άμεσα, γεγονός που δικαιολογείται από την διείσδυση του αλουμινίου στη διεπιφάνεια των δύο αποτμημάτων. Η φωλιά στην οποία τοποθετήθηκε η μήτρα διατήρησε τη συνοχή της ώσπου να εξαχθεί ελαττωματικό προϊόν.

- Τα υλικά κατασκευής των εξαρτημάτων καλύπτουν τις απαιτήσεις της μήτρας, του χιτωνίου αλλά όχι και του βλήτρου. Λόγω της συχνότητας των αστοχιών, παρεμβάσεις στη σκληρότητα λειτουργίας και προτάσεις υλικών μεγαλύτερης δυσθραυστότητας θα μπορούσαν να επιλεγούν.

8.2 Προτάσεις / Διορθωτικές Κινήσεις

1) Σχεδιασμός

α) Μικρότερη ανοχή βλήτρου-χιτωνίου της τάξης του 0,01 mm είναι ικανοποιητική, ώστε να εξαλειφθεί η πιθανότητα έκκεντρης λειτουργίας.

β) Μεγαλύτερα τόξα καμπυλότητας, θα βοηθούσαν στην εξόλκευση του διαμορφούμενου αλουμινίου, με αποτέλεσμα να μειωθεί η πιθανότητα "διπλωπατήματος".

2) Επιλογή Υλικών

- Λόγω των συχνών αστοχιών, για το βλήτρο θα πρέπει να επιλεγθεί υλικό στην ίδια τιμή σκληρότητας, αλλά με μεγαλύτερη δυσθραυστότητα, όπως χάλυβες της οικογένειας υψηλού άνθρακα, 8% χρωμίου. Επιθυμητή η παρασκευή τους με άνατηξη και διέλευση σταγόνα-σταγόνα μέσω ηλεκτροαγώγιμης σκουριάς (Electroslag Remelting, ESR).
- Η σκληρότητα της μήτρας εξασφαλίζει τη μέγιστη αντοχή στην τριβή του υλικού, υποβιβάζοντας κατά πολύ την δυσθραυστότητά του. Μελέτη σε αστοχία του ίδιου εξαρτήματος έγκριτου οίκου κατασκευής χαλύβων ορίζει ως τυπική σκληρότητα τα 62 HRC. Σκληρότητα εύρους 62-64 HRC είναι ικανοποιητική. Σε αυτή τη σκληρότητα, φυσική εναπόθεση (PVD) επικαλύψεων με TiN, TiB₂, TaC και DLC ενδείκνυνται για την βελτίωση της αποδοτικότητας της μήτρας [36], [37].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Προκαταρκτική εξέταση αστοχίας μήτρας εν ψυχρώ διαμόρφωσης σωληναρίου για την παρασκευή συσκευασίας φαρμακευτικού προϊόντος, Ν.Μαστορίδου, Δ.Παπαγεωργίου, Κ.Μέντρεα
- [2] ΕΛΟΤ 1389/25-02-2004, «Τεκμηρίωση – Παρουσίαση διατριβών και παρόμοιων τεκμηρίων».
- [3] ΕΛΟΤ 1336/20-03-1993, «Τεκμηρίωση – Παρουσίαση επιστημονικών και τεχνικών εκθέσεων».
- [4] Volume 11 Failure analysis and prevention
- [5] Practical Engineering Failure Analysis Dekker Mechanical Engineering
- [6] <http://www.matscieng.sunysb.edu/disaster/fail-anal/>
- [7] [http://www.google.gr/url?url=http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage testing prevention and detection in aeronautics/Intro to Mag.ppt&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKewiGnLO55JXKAhUEFCwKHR7gC_0QFgg2MAg&usq=AFQjCNERm64xBmh0YFE69T7NATCDu8eXQ](http://www.google.gr/url?url=http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage%20testing%20prevention%20and%20detection%20in%20aeronautics/Intro%20to%20Mag.ppt&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKewiGnLO55JXKAhUEFCwKHR7gC_0QFgg2MAg&usq=AFQjCNERm64xBmh0YFE69T7NATCDu8eXQ)
- [8] Γ.Δ.Χρυσουλάκης, Δ.Ι.Παντελής: «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Κεφάλαιο 15, «Βιομηχανικά Κράματα», σελ.511-537, Κεφάλαιο 13, «Θερμικές Κατεργασίες Μεταλλικών Υλικών», σελ.471-493, (2003)
- [9] Γ.Δ.Χρυσουλάκης, Δ.Ι.Παντελής: «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, (2008)
- [10] <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/CNC/SHMEIWSEIS/2-CAST.pdf>
- [11] http://medilab.pme.duth.gr/book/kefalaio_6/6_2_koniometallourgia.pdf :
- [12] "Manufacturing Science and Technology", Powder Metallurgy, Vol 4.
- [13] Valery Marinov, "Manufacturing Technology", Powder Metallurgy, pdf.
- [14] ASM Handbook: "Powder metal technologies and applications", Vol. 7, edit by ASM Handbook Committee, (2002).
- [15] G.S Upadhyaya "Powder Metallurgy Technology", Cambridge International Science Publishing, August (2002).
- [16] (Ν. Μ. Βαξεβανίδης, «Κατεργασίες ΙΙ, Τμ.Εκπαιδευτικών Μηχανολογίας, Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε.Ιη Εκδ 11/2006)
- [17] Volume 14 Forming and Forging ASM International
- [18] Technical facts (2020), The Uses of Steel Forgings in Industries, NewsBox7, <https://www.newsbox7.com/the-uses-of-steel-forgings-in-industries/> [Accessed at 9-05-2020].

[19] Technical facts (2017), Open die forging VS Closed die forging, Steel Available

<https://www.steelavailable.com/en/open-die-forging-closed-die-forging-whats-difference/>

[Accessed at 9-05-2020]

[20] Technical facts, Metal Rolling Oils, Croda

<https://www.crodalubricants.com/en-gb/products-and-applications/metal-rolling-oils/> [Accessed at 9-05/2020]

[21] Open Learn (2017), Open University, Science, Maths & Technology

<https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/cold-forging> [Accessed at 9-05-2020]

[22] <https://docplayer.gr/7709229-Dielasi-to-ergaleio-dielasis-perilamvanei-to-metalliko-thalamo-ti-mitra-to-emvolo-kai-to-sympiromatiko-exoplismo-daktylioy-sygkratisis-klp.html> [Accessed at 9-05-2020]

[23] <https://maredu.gunet.gr/modules/document/file.php/MAK211/%CE%9C%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%AF%CE%BF/%CE%9C%CE%97%CE%A7%CE%91%CE%9D%CE%9F%CE%A5%CE%A1%CE%93%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3%20%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%99%CE%95%CE%A3%20%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%9C%CE%9F%CE%A1%CE%A6%CE%A9%CE%A3%CE%97%CE%A3.pdf>

Πτυχιακή εργασία Μηχανουργικές Κατεργασίες Παραμόρφωσης, Γουδέλης Σπυρίδων Κοσμάς, επιβλέπων καθηγητής Χατζηφωτίου Θωμάς, Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας, Νέα Μηχανιώνα 2012

[24] Technical facts (2020), MachineMfg

<https://www.machinemfg.com/sheet-metal-fabrication-technological-process/>

[Accessed at 9-05-2020]

[25] <https://paintingvalley.com/drawings/deep-drawing-26.png>

[26] <https://i.pinimg.com/originals/ed/3c/99/ed3c99a8dc3f8ddf5f1dc4466fc33649.jpg>

[27] ASTM, "E18-07a Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol.03.01, (2008)

[28] Τεχνικό φυλλάδιο (2013). *Vanadis 10 Superclean*. Uddeholm Company. http://www.uddeholm.com/files/PB_vanadis_10_english.pdf.

[29] Cverna F, Conti P Worldwide guide to equivalent iron and steel, 5th Ed, ASM Materials Data series, Materials Park, Ohio, USA, (2006)

[30] DIN EN 573-3:2019, Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 3: Chemical composition and form of products.

- [31] http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6060-T5--Extrusions_144.ashx (Accessed 23/9/2020).
- [32] http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_6082-T6~T651_148.ashx (Accessed 23/9/2020)
- [33] ASTM E407-99 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys
- [34] Hot_Mounting_Guide_10.10.pdf.
http://www.struers.com/resources/elements/12/134499/Hot_Mounting_Guide_10.10.pdf
- [35] Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J., *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2002.
- [36] Podgornik B., Hogmark S., Sandberg O., Hard PVD coatings and their perspectives in forming tool applications, 6th International Tooling Conference, Karlstad University, 10-13 September 2002, Karlstad, Sweden.
- [37] Uddeholms AB, Uddeholm Tool Steel for PVD Coatings, 2nd edition, 10/2019, Hagfors, Sweden.