



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Ανάλυση αστοχίας στήριξης πτερυγίων ανεμιστήρα
πύργου ψύξης ατμοηλεκτρικού εργοστασίου***

Μπράβος Χαράλαμπος

A.M. 39293

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Μεντρέα Κάρμεν

ΣΥΝΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Παπαγεωργίου Δημήτριος

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ.

Περίληψη

Η πτυχιακή εργασία διερευνά την πρόωρη και συχνά επαναλαμβανόμενη αστοχία στις βάσεις στήριξης πτερυγίων των ανεμιστήρων ενός πύργου ψύξης σε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα εν λόγω στηρίγματα είναι κοχλίες σε διαμόρφωση “U” με σπείρωμα και στα δύο άκρα τους (u-bolt). Για την ανάλυση ελήφθησαν τρία δείγματα εκ των οποίων τα δύο είναι κατασκευασμένα από χάλυβα κατασκευών 4140 κατά AISI (W.Nr. 1.7225 κατά DIN (42CrMo4)), ενώ το τρίτο από ανοξείδωτο χάλυβα 304L κατά AISI (W.Nr. 1.4306 κατά DIN (X2CrNi19-11)).

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με βάση την θεωρία ανάλυσης αστοχίας και κατά συνέπεια εφαρμόστηκαν βήματα συγκεκριμένης μεθοδολογίας όπως περιγράφεται από τον οργανισμό ASM. Για την διεξαγωγή της μελέτης πραγματοποιήθηκαν τυποποιημένες δοκιμές ελέγχου, με σκοπό την εύρεση των μηχανισμών θραύσης και των αιτιών της αστοχίας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν: χημική ανάλυση, μέτρηση σκληρότητας, δοκιμή εφελκυσμού, ανάλυση μικροδομής με οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία και θραυστογραφία. Τα αποτελέσματα των δοκιμών, επεξεργάστηκαν και παρουσιάζονται μαζί με τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Τέλος, αναφέρονται τα κύρια αίτια της αστοχίας και προτείνονται διορθωτικές κινήσεις, ώστε να αποφευχθεί παρόμοιο συμβάν στο μέλλον.

Abstract

The present thesis studies the premature and frequently repeated failure of fan blade holder in a power plant cooling tower. These holders are shaped like the letter “U” with screw threads on both ends (u-bolt). For the analysis, three specimens were delivered, two of which are manufactured from construction steel AISI 4140 (DIN W.Nr. 1.7225 (42CrMo4)), while the third one from stainless steel AISI 304L (DIN W.Nr. 1.4306 (X2CrNi19-11)).

The study was conducted based on the theory of engineering failure analysis, hence the methodology according to ASM organization. To carry out the study, standardized testing methods are implemented, in order to find the failure mechanisms that took place, as well as the causes that led to the failure. Specifically, the methods are: chemical analysis, hardness test, tensile test, microstructure examination through light and electron microscopy, metallography and fractography. The results of every step of the analysis were processed and presented here along with any conclusions drawn. Finally, some practical suggestions for the design optimization of the tool are given for the prevention of similar failures.

Πρόλογος

Η πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε σύμφωνα με το άρθρο 16 του Κανονισμού σπουδών του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ (πρώην Τ.Ε.Ι Πειραιά) (Απόφαση Συνέλευσης Τ.Ε.Ι. αριθ. 5/16-12-98, ΦΕΚ 861/21-05-99, τ. Β'), με εισήγηση και επίβλεψη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Ε.Π.Τ.ΥΛ., αίθ.Β216) του Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ. Η δομή, η τεκμηρίωση 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.

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση αστοχίας στις βάσεις στήριξης ανεμιστήρων στον πύρο ψύξης μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας. Η ανάλυση αστοχίας περιλαμβάνει μια συγκεκριμένη αλληλουχία βημάτων για τον προσδιορισμό των αιτιών που προκάλεσαν τη θραύση τους. Ανάλογα με τις πληροφορίες που αναζητήθηκαν, πραγματοποιήθηκαν και ανάλογες δοκιμές. Για τις δοκιμές αυτές, δημιουργήθηκαν και προετοιμάστηκαν κατάλληλα δοκίμια. Στη συνέχεια, από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψαν συμπεράσματα, βρέθηκαν τα αίτια της αστοχίας για την αποφυγή των οποίων προτάθηκαν διορθωτικές κινήσεις. Οι διορθώσεις αποσκοπούν στην αποφυγή παρόμοιων μελλοντικών αστοχιών και συχνά οδηγούν στη βελτιστοποίηση παρόμοιων καταστάσεων.

Σε ακαδημαϊκό επίπεδο, η αποκόμιση προσλαμβανουσών παραστάσεων και γνώσεων για τον σπουδαστή αποτελούν στόχους που με την εκπλήρωσή τους θα συμβάλλουν έτσι ώστε:

- Να αναπτύξει καλύτερη αντίληψη του ως μηχανολόγος μηχανικός.
- Να κατανοήσει τα σφάλματα που μπορεί να εμφανιστούν στην παραγωγική διαδικασία μιας εταιρείας και τον αντίκτυπό τους.
- Να κατανοήσει την σημασία που έχουν οι λύσεις για τα προβλήματα της παραγωγικής διαδικασίας.
- Να αποκτήσει εμπειρία και γνώση τόσο των πρότυπων όσο και των πειραματικών διαδικασιών.
- Να αποκτήσει εμπειρία στην εξαγωγή συμπερασμάτων μελετώντας τα αποτελέσματα των ελέγχων βασιζόμενος στα πορίσματα της επιστήμης.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο που γενικά ισχύει σε μία ανάλυση αστοχίας και το δεύτερο τις πειραματικές διαδικασίες και δοκιμές, συνοδευόμενες από τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα, τις αντίστοιχες διορθωτικές προτάσεις και ό, τι άλλο αφορά συγκεκριμένα την προς μελέτη περίπτωση.

Το θεωρητικό μέρος αποτελείται από τρία κεφάλαια. Το πρώτο παρουσιάζει την θεωρία της ανάλυσης αστοχιών και τα βήματα που συνίσταται να ακολουθηθούν. Το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει τους χάλυβες ξεκινώντας από κάποιες βασικές εισαγωγικές έννοιες και καταλήγοντας στους χάλυβες που συναντήθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στη θραύση και στη μελέτη που γίνεται γύρω από αυτή, μιας και είναι επί της ουσίας το επίκεντρο της συγκεκριμένης μελέτης. Στο κεφάλαιο αυτό, επίσης, επεξηγούνται όροι και διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό μέρος κατά την ανάλυση της θραυστογραφίας. Το πειραματικό μέρος αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει την περιγραφή του περιβάλλοντος που βρίσκεται γύρω από τα εξαρτήματα που αστοχούν και τα ιστορικά δεδομένα. Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνεται η προκαταρκτική εξέταση με την οπτική επιθεώρηση και το μακροσκοπικό φωτογραφικό αρχείο. Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στις

καταστρεπτικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν (χημική ανάλυση, μέτρηση σκληρότητας, δοκιμή εφελκυσμού και μικροσκοπική ανάλυση δομής). Μη καταστρεπτικές δοκιμές στη προκειμένη περίπτωση δεν διεξήχθησαν. Το έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την γενική εξέταση, τα κύρια αίτια της αστοχίας καθώς και κάποιες προτάσεις για τις διορθωτικές κινήσεις που απαιτούνται προς αποφυγή μελλοντικών παρόμοιων αστοχιών.

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε και ελληνική και ξένη βιβλιογραφία (βιβλία, άρθρα, δημοσιεύσεις κλπ), η οποία παρατίθεται στο τέλος. Η τεχνογνωσία, που ακολουθήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές, έγινε εφαρμόζοντας πρότυπα του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης ISO (*International Organization for Standardization*), του οργανισμού ASTM (*American Society for Testing and Materials*), αλλά και από την εμπειρία προηγούμενων πτυχιακών εργασιών του εργαστηρίου Ε.Π.Τ.ΥΛ. (Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών) του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. Οι μετρήσεις και γενικά οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας έγιναν από διακριβωμένα όργανα μέτρησης διαφόρων εταιρειών καθώς και από, άτυπα, βαθμονομημένα όργανα εντός του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα και να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα. Η αξιοπιστία των μετρήσεων κρίνεται πολύ σημαντική και για εκπαιδευτικούς λόγους και για απόκτηση εμπειρίας του σπουδαστή όσο και για την αξιοπιστία των συμπερασμάτων και των προτάσεων που εξάγονται από αυτές.

Για την πειραματική διαδικασία της πτυχιακής εργασίας χρειάστηκε σημαντική βοήθεια από εταιρείες και ιδιώτες εκτός Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. Χωρίς την βοήθεια αυτή πολλά μέρη των πειραματικών διαδικασιών θα ήταν πρακτικά αδύνατον να πραγματοποιηθούν λόγω του περιορισμένου υλικοτεχνικού εξοπλισμού και δυνατοτήτων που διαθέτει το Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.

Ευχαριστίες

Οφείλονται θερμές ευχαριστίες σε όλα τα πρόσωπα, εταιρίες και εργαστήρια που αναφέρονται παρακάτω που συνεργάστηκαν για την πραγματοποίηση και ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας, όχι μόνο για την συμβολή τους στο όλο κόστος των εργασιών, αλλά και για την προσφορά τους στο γενικότερο σχεδιασμό της εργασίας.

Στον αείμνηστο Ι.Φ. Σιδέρη, Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό ΕΜΠ, τεχνικό διευθυντή της εταιρείας ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ – UDDEHOLM ΧΑΛΥΒΕΣ Α.Ε.Β.Ε., και ειδικό συνεργάτη στο εργαστήριο Ε.Π.Τ.ΥΛ. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ, για όλη αυτή τη γνώση και τη γενικότερη στήριξη που πρόσφερε κατά την διάρκεια της. Η απώλειά του αφήνει ένα μεγάλο κενό που δύσκολα θα καλυφθεί.

Στην Κα Κ. Μεντρέα Μπίχτα, Δρ. Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό UTC-N (Technical University of Cluj-Napoca), και καθηγήτρια του μαθήματος Ε.Π.Τ.ΥΛ. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ, που με εφοδίασε με τις απαιτούμενες και πλέον γνώσεις οι οποίες αποδείχθηκαν απαραίτητες στην πορεία, καθώς και για την στήριξή της στις κρίσιμες στιγμές κατά την διάρκεια αυτής της μακροχρόνιας και δύσκολης πορείας.

Στον Κο Παπαγεωργίου Δημήτρη, Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π, υπεύθυνο ποιοτικού ελέγχου της εταιρίας ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ – UDDEHOLM ΧΑΛΥΒΕΣ Α.Ε.Β.Ε και επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Ε.Π.Τ.ΥΛ. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ για την πολύτιμη βοήθειά του στην επίβλεψη της πτυχιακής εργασίας στο πειραματικό μέρος.

Στην Κα Μαριάννα Κουκούλη, Μηχανολόγο Μηχανικό Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ, μηχανικό της SPECTRUMLABS Α.Ε., για την γενικότερη στήριξη και τη πολύτιμη βοήθειά της στις δοκιμές εφελκυσμού.

Στον Dr.Prof.Ing. Ionel Chicinas καθηγητή στο Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών και πρύτανη στη Σχολή Υλικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Polytechnic University of Cluj-Napoca (U.T.C.N.), Romania, για την βοήθεια και τον χρόνο που διέθεσε στην ανάλυση θραυστογραφίας με τη χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (S.E.M).

Στη Κα Νικολέτα Μαστορίδου, φοιτήτρια Μηχανολόγο Μηχανικό Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ για τη βοήθεια που προσέφερε στη μέτρηση σκληρότητας και μικροσκληρότητας.

Στους συμφοιτητές και μελλοντικούς συναδέλφους μου, Κατσαρό Δημήτριο, Λεπτίδη Στέφανο και Γαβαλά Ευάγγελο, για την συνεργασία και την βοήθειά τους καθ' όλη την διάρκεια της συγκεκριμένης εργασίας.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	II
ABSTRACT	III
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	IV
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	VI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	VII
A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	1
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	2
1.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΤΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	2
1.2 ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	3
1.2.1 Συλλογή ιστορικού και επιλογή δειγμάτων	4
1.2.2 Προκαταρκτική εξέταση και μακροσκοπικός έλεγχος	4
1.2.3 Μη καταστροφικές δοκιμές (Nondestructive Testing, NDT)	5
1.2.4 Επιλογή και διατήρηση των δειγμάτων	6
1.2.5 Χημική αναλύση	7
1.2.6 Μικροσκοπική εξέταση	8
1.2.7 Μηχανικές δοκιμές.....	9
1.2.8 Δοκιμές σε προσομοιωμένες συνθήκες λειτουργίας.....	11
1.3 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	12
1.4 ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ	13
1.5 ΕΚΘΕΣΕΙΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	13
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΧΑΛΥΒΕΣ	15
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	15
2.1.1 Κράματα	15
2.1.2 Κρυσταλλική δομή	16
2.1.3 Αλλοτροπία	16
2.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΧΑΛΥΒΩΝ	17
2.2.1 Κοινού ή ανθρακούχοι χάλυβες	17
2.2.2 Κραματωμένοι χάλυβες	18
2.2.2.1 Επίδραση στοιχείων κραμάτωσης	18
2.2.2.2 Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες.....	20
2.2.2.3 Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες	21
2.2.2.4 Υψηλά κραματωμένοι χάλυβες	21
2.2.3 Χάλυβες Κατασκευών	22
2.2.4 Ανοξειδωτοί Χάλυβες	23
2.3 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ	27
2.3.1 Τυποποίηση κατά DIN	27
2.3.2 Τυποποίηση κατά AISI - SAE	28
2.3.3 Τυποποίηση κατά AFNOR	28
2.3.4 Τυποποίηση κατά BS	29
2.4 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	29
2.4.1 Ενδοτράχυνση	29
2.4.2 Παραμόρφωση	30

3° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΘΡΑΥΣΗ.....	31
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	31
3.2 ΤΥΠΟΙ ΘΡΑΥΣΗΣ	31
3.2.1 Όλκιμη θραύση	31
3.2.2 Ψαθυρή θραύση	32
3.3 ΘΡΑΥΣΗ ΑΠΟ ΚΟΠΩΣΗ	33
3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΡΑΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ	35
3.5 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ	36
Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	38
4° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΛΛΟΓΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	39
5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ.....	43
5.1 ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ 1 (Δ1)	45
5.2 ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ 2 (Δ2)	47
5.3 ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ 3 (Δ3)	50
6° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	52
6.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	52
6.2 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	56
6.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ	60
6.4 ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ	64
6.5 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	70
6.5.1 Οπτική μικροσκοπία, μεταλλογραφεία	70
6.5.2 Ανάλυση επιφανειών θραύσης με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM)	81
6.5.2.1 Ανάλυση θραύσης δείγματος 1.2.1 (Δ1)	81
6.5.2.2 Ανάλυση θραύσης δείγματος 2.2.1 (Δ2).....	85
6.5.2.3 Ανάλυση θραύσης δείγματος 2.2.2 (Δ2).....	89
6.5.2.4 Ανάλυση θραύσης δείγματος 3.2.1 (Δ3)	93
7° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	100

Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1^ο Κεφάλαιο: Ανάλυση αστοχίας

1.1 Καθορισμός και στόχος των ερευνών ανάλυσης αστοχίας.

Η ανάλυση αστοχιών αφορά τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται για να προσδιοριστούν τα αίτια μιας θραύσης, μίας καταστροφής ή μιας αποτυχίας [1]. Ως αστοχία δηλαδή ορίζεται η ανικανότητα ενός εξαρτήματος, μιας μηχανής ή μιας διαδικασίας να λειτουργήσει σωστά.

Στις διαδικασίες αυτές περιλαμβάνεται η συλλογή, των περισσότερων κατά το δυνατό, στοιχείων τα οποία στη συνέχεια θα εξεταστούν, θα αναλυθούν και τέλος θα ερμηνευθούν δίνοντας ως αποτέλεσμα τον λόγο που παρουσιάστηκε η αστοχία. Γνωρίζοντας πλέον τα αίτια μπορούν να δοθούν συμπεράσματα και κατ' επέκταση οδηγίες για την αποφυγή μελλοντικών, παρόμοιων, ανεπιθύμητων καταστάσεων τροποποιώντας τη κατασκευή επιλέγοντας καταλληλότερα υλικά ή τροποποιήσεις αυτών, βελτιώνοντας την χρήση και τη συντήρηση ή και εξαρχής τον σχεδιασμό τους. Όλα τα παραπάνω αποτελούν τα συχνότερα και πιο συνήθη αίτια μίας αστοχίας.

Με τη πάροδο του χρόνου η ανάλυση αστοχίας αναπτύχθηκε σε επιστήμη και πλέον θεωρείται αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης βιομηχανίας. Ο όγκος πληροφοριών και η ποικιλία των συμβάντων που πλέον υπάρχει έχει δημιουργήσει μια ισχυρή βάση δεδομένων και μία ανάλογη βιβλιογραφία. Τα διάφορα περιστατικά του παρελθόντος σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες τεχνικές αναφορές και έγγραφα έχουν συμβάλει αρκετά στο πως είναι αυτή η επιστήμη σήμερα.

Αν σε όλα αυτά συνυπολογίσουμε την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης στον ευρύτερο χώρο της μηχανικής, έχουν εμφανιστεί και συνεχίζουν να εμφανίζονται διαρκώς νέα δεδομένα, όπως για παράδειγμα νέα υλικά, τα οποία με τη σειρά τους οδηγούν σε νέα προβλήματα που θα γίνουν αντικείμενο μελέτης. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, μπορεί να απαιτείται συνεργασία με ειδικούς από άλλους κλάδους για την εξαγωγή ενός αποτελέσματος.

Για παράδειγμα οι περισσότερες αστοχίες μεταλλικών προϊόντων μπορούν να αναλυθούν επαρκώς από τους μεταλλουργούς. Οι σύνθετες αστοχίες απαιτούν και εμπειρογνώμονες εφαρμοσμένης μηχανικής. Είναι, για παράδειγμα, ευθύνη του μηχανικού να προλαμβάνει και να σχεδιάζει τρόπους αντιμετώπισης πιθανής αστοχίας και στη περίπτωση εμφάνισης της να προσδιορίζει την αιτία και στη συνέχεια να παίρνει κατάλληλα αποτρεπτικά μέτρα εναντίον πιθανών μελλοντικών συμβάντων [2].

Ο λόγος λοιπόν, για τον οποίο εκτελείται μια ανάλυση αστοχίας είναι για να χαρακτηριστούν τα αίτιά της. Ωστόσο, η ανάλυση των φυσικών αποδείξεων και μόνο μπορεί να μην είναι επαρκής για την επίτευξη αυτού του στόχου και σε αρκετές περιπτώσεις, μια ανάλυση αστοχίας τελειώνει λανθασμένα στο στάδιο προσδιορισμού του μηχανισμού αστοχίας [3]. Για να θεωρηθεί αποτελεσματικός ένας αναλυτής αστοχίας θα πρέπει το πρόβλημα που εξετάζεται να καθοριστεί με σαφήνεια.

Το πιο πιθανό και αναμενόμενο σενάριο μίας αστοχίας είναι να εμφανιστεί στην πιο αδύναμη σύνδεση της αλυσίδας που συνδέει τα βήματα του σχεδιασμού με την κατασκευή και την απόδοση. Ο ρόλος του αναλυτή αστοχίας είναι να βρει το αντίστοιχο ιστορικό από τη λειτουργία στην κατασκευή και το σχέδιο, προκειμένου να προσδιοριστεί η εν λόγω αδύνατη σύνδεση (Εικόνα 1.1). Η έρευνα εξελίσσεται με αντίστροφη πορεία από αυτή που ακολουθείται έως ότου δοθεί το προϊόν σε λειτουργία σε μία διαδρομή που καλύπτει περισσότερες από μία μηχανολογικές ειδικότητες.

Για να αναλυθεί μία αστοχία ο αναλυτής πρέπει αρχικά να έχει μία ευρεία γνώση στους δύο βασικούς τομείς των υλικών: **της επιστήμης των υλικών** και της **εφαρμοσμένης μηχανικής**. Αν και οι δύο αυτές έννοιες είναι αλληλένδετες, διαχωρίζονται ως προς τη κλίμακα μελέτης και την ευρύτερη προσέγγισή απ' την οποία ελέγχεται η συμπεριφορά των υλικών, θεωρώντας τους ξεχωριστούς τομείς.

Η επιστήμη των υλικών επικεντρώνεται στη μικροσκοπική κλίμακα των υλικών εξετάζοντας την εσωτερική τους δομή και το πώς αυτή επηρεάζει το όλο υλικό και τη συμπεριφορά του.

Η μηχανολογία των υλικών έχει μία πιο μακροσκοπική προσέγγιση για την εξέταση των υλικών και τον προσδιορισμό της συμπεριφορά τους (Εικόνα 1.2).

Επομένως, ο αναλυτής αστοχίας πρέπει να έχει επαρκή γνώση από ορισμένους επιμέρους μηχανολογικούς κλάδους κυρίως της επιστήμης των υλικών και της τεχνολογίας υλικών. Για να αναπτυχθεί αυτή η γνώση έχει γίνει μια προσπάθεια, να ισορροπηθούν οι διάφορες πτυχές αυτών των κλάδων των υλικών και το πως ενσωματώνονται στη διαδικασία σχεδιασμού, κατασκευής και απόδοσης.

Όταν το πρόβλημα είναι σαφώς καθορισμένο, ο αναλυτής πρέπει να είναι σε θέση να προσδιορίσει το τεχνικό υπόβαθρο που απαιτείται για να λυθεί το πρόβλημα και μέσω συζητήσεων με το εμπλεκόμενο προσωπικό και την οπτική επιθεώρηση, μπορούν να αποκλειστούν διάφορες πιθανές αιτίες προσεγγίζοντας την επικρατέστερη. Σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα, η αστοχία μπορεί να μοιάζει με κάποια προηγούμενη, καθιστώντας ευκολότερο το έργο του αναλυτή να προσδιορίσει την τεχνική βιβλιογραφία.

1.2 Στάδια ανάλυσης αστοχίας

Έχοντας καθορίσει πλέον το πρόβλημα και έχοντας συμβουλευτεί επαρκώς τη βιβλιογραφία, ξεκινά ένα πειραματικό πρόγραμμα για να προσδιοριστούν τα αίτια της δεδομένης αστοχίας. Τα πειράματα πρέπει να προγραμματίζονται και να συντονίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν τις συμπληρωματικές πληροφορίες που οδηγούν στον προσδιορισμό της αιτίας της αστοχίας. Τα δείγματα που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά της περίπτωσης μας, γι' αυτό πρέπει να επιλέγονται με προσοχή, για να έχουμε όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Μία έρευνα ανάλυσης αστοχίας για να είναι επιτυχής και πλήρης πρέπει να απαντά **τον τρόπο που προκλήθηκε η αστοχία, την πιο πιθανή αιτία της και το πώς αυτή μπορεί να αποτραπεί στο μέλλον.**

Για μία πλήρη αξιολόγηση, η ανάλυση αστοχίας περιλαμβάνει μια σειρά από στάδια [1]. Τα κύρια στάδια που συνθέτουν την ανάλυση αστοχίας είναι:

- Συλλογή ιστορικού και επιλογή δειγμάτων.
- Προκαταρκτική εξέταση και μακροσκοπικός έλεγχος.
- Μη καταστροφικές δοκιμές.
- Επιλογή και διατήρηση των δειγμάτων.
- Χημική ανάλυση.
- Μικροσκοπική εξέταση.
- Μηχανικές δοκιμές.
- Δοκιμές σε προσομοιωμένες συνθήκες λειτουργίας.

Απ' τα παραπάνω στάδια, υπάρχουν κάποια που είναι κοινά σε όλες τις επιτυχημένες αναλύσεις αστοχίας. Υπάρχουν όμως κάποια που μπορεί να μην αφορούν όλα κάθε έρευνα και η σειρά τους μπορεί να ποικίλλει ελαφρώς, ανάλογα με τη φύση της. Η παρακάτω λίστα περιλαμβάνει πολλά από τα στάδια που χρησιμοποιούνται συνήθως. Ωστόσο, μια βασική αρχή είναι μην διαταραχθούν άσκοπα συνθήκες που μπορεί να απαιτούν λεπτομερέστερη εξέταση σε μεταγενέστερη χρονικά περίοδο.

1.2.1 Συλλογή ιστορικού και επιλογή δειγμάτων

Ιστορικό κατασκευής και συντήρησης: Η απόκτηση ενός ολοκληρωμένου ιστορικού κατασκευής και συντήρησης μπορεί να απλοποιήσει αρκετά την αποστολή του αναλυτή. Για τον λόγο αυτό πρέπει να κρατιέται ένα όσο το δυνατό λεπτομερέστερο αρχείο ιστορικού που αφορά το κάθε στοιχείο (εξάρτημα, μηχανισμό κ.α). Όταν τα δεδομένα είναι ελάχιστα, ο αναλυτής αναγκάζεται να συμπεράνει κάποιες συνθήκες λειτουργίας. Σε αυτή τη περίπτωση το αποτέλεσμα εξαρτάται από την δεξιοτεχνία, την εμπειρία και τη κρίση του αναλυτή. Ένα λανθασμένο συμπέρασμα όμως μπορεί να είναι πιο επιβλαβές από την απουσία πληροφοριών. Τα δεδομένα γενικά αφορούν παράγοντες όπως: τις συνθήκες λειτουργίας, το είδος και το μέγεθος των φορτίων, τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, μηχανολογικές και θερμικές κατεργασίες κ.α.

Επιλογή των δειγμάτων: Τα δείγματα θα πρέπει να επιλέγονται με προσοχή πριν από την έναρξη της εξέτασης. Ο αναλυτής είναι υπεύθυνος να διασφαλίζει ότι τα δείγματα είναι κατάλληλα για τον επιδιωκόμενο σκοπό και ότι αντιπροσωπεύουν επαρκώς τα χαρακτηριστικά της αστοχίας. Καλό θα είναι να ψάξουμε για επιπλέον στοιχεία αστοχίας πέραν αυτών που είναι άμεσα εμφανείς. Συνιστάται, επίσης, ότι τα δείγματα πρέπει να λαμβάνονται και από άλλες περιοχές του υλικού, εκτός της περιοχής αστοχίας, καθώς μπορεί να εμφανιστούν δευτερεύουσες ζημιές.

Σε μια ανάλυση όπου εμπλέκονται πολλαπλά στοιχεία και δομές, πρέπει να τεκμηριώνεται η θέση του κάθε κομματιού πριν αυτά αγγιχτούν ή μετακινηθούν. Η καταγραφή αυτή συνήθως απαιτεί εκτεταμένη φωτογράφιση, προετοιμασία κατάλληλων σκίτσων, και τη λήψη και καταγραφή κατάλληλων μετρήσεων των τεμαχίων.

1.2.2 Προκαταρκτική εξέταση και μακροσκοπικός έλεγχος

Κατά την οπτική παρατήρηση του κομματιού η έρευνα ξεκινά από μικρή μεγέθυνση αυξάνοντάς την προοδευτικά, ανάλογα τη περίπτωση και τα συμπεράσματα που θέλουμε να βγάλουμε [4]. Η αρχή μπορεί να γίνει ακόμα και με γυμνό μάτι ή έναν φακό χειρός. Χρησιμοποιώντας μία όσο το δυνατό καλύτερης ποιότητας φωτογραφική μηχανή, είναι ευκαιρία να δημιουργηθεί με εύκολο τρόπο ένα πρωτογενές φωτογραφικό αρχείο του υλικού για μεγέθυνση μέχρι και $M \times 20$. Για μεγεθύνσεις από $M \times 20$ έως $M \times 50$ χρειάζεται μεταλλογραφική συσκευή με αντικειμενικούς μακροφακούς και φωτιστικά συστήματα (π.χ. στερεοσκόπιο). Στο επίπεδο αυτό, η μεγέθυνση δεν ξεπερνάει τις 100 φορές ($M \times 100$).

Το στοιχείο που αστόχησε, συμπεριλαμβανομένων όλων των τμημάτων του, υποβάλλεται σε πλήρη μακροσκοπική εξέταση πριν από οποιαδήποτε καθαρισμό, διότι οι βρωμιές και τα συντρίμια που βρέθηκαν από την πλευρά της αστοχίας μπορεί να παρέχουν χρήσιμες ενδείξεις για τον προσδιορισμό της αιτίας της αστοχίας.

Οπτική επιθεώρηση: Η προκαταρκτική εξέταση συνήθως πρέπει να ξεκινάει με την οπτική επιθεώρηση. Το μάτι έχει εξαιρετικό βάθος εστίασης και έχει τη δυνατότητα να εξετάσει τις μεγάλες περιοχές γρήγορα και να ανιχνεύσει τις λεπτές αλλαγές του χρώματος και της σύστασης. Μερικά από αυτά τα πλεονεκτήματα χάνονται όταν χρησιμοποιείται οποιαδήποτε οπτική ή ηλεκτρόνιο-οπτική συσκευή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις επιφάνειες των θραύσεων και στις πορείες των ρωγμών. Θα πρέπει να παρατηρηθεί και να αξιολογηθεί η σημασία οποιωνδήποτε ενδείξεων ανώμαλων συνθηκών ή κακομεταχείρισης κατά την λειτουργία, καθώς και να πραγματοποιηθεί μια γενική αξιολόγηση του βασικού σχεδιασμού και της κατασκευής του κομματιού. Όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα, συμπεριλαμβανομένων των διαστάσεων, θα πρέπει να καταγραφούν εγγράφως ή να υποδειχθούν από τα σχέδια ή τις φωτογραφίες.

Φωτογραφικό Αρχείο: Για μια πλήρη και λεπτομερή ανάλυση, η φωτογραφική καταγραφή έχει ήδη ξεκινήσει συλλέγοντας ιστορικά δεδομένα του αστοχούντος στοιχείου ή της κατασκευής [5]. Το επόμενο βήμα στην προκαταρκτική εξέταση πρέπει να είναι η γενική φωτογραφία του ολόκληρου σπασμένου μέρους, συμπεριλαμβανομένων των σπασμένων κομματιών, ώστε να καταγραφεί το μέγεθος και η κατάσταση τους και να καταδειχθεί πώς η θραύση συσχετίζεται με το ολόκληρο εξάρτημα. Αυτό πρέπει να ακολουθηθεί από την εξέταση της επιφάνειας θραύσης σε διάφορες γωνίες και μεγεθύνσεις. Η εξέταση πρέπει να αρχίσει με τη χρήση του κάθετου φωτισμού και πρέπει να προχωρήσει χρησιμοποιώντας τις διάφορες γωνίες του πλάγιου φωτισμού και του φωτισμού σκοτεινού πεδίου για να αξιολογηθούν τα χαρακτηριστικά της θραύσης έτσι ώστε να σκιαγραφηθούν και να αναδειχθούν καλύτερα. Αυτό πρέπει επίσης να βοηθήσει στον καθορισμό των τομέων της θραύσης που είναι πρωταρχικού ενδιαφέροντος και της μεγέθυνσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να αναδείξει τις λεπτές λεπτομέρειες. Όταν αυτή η αξιολόγηση ολοκληρωθεί, είναι αρμόζον να συνεχιστεί η φωτογράφιση της θραύσης, καταγράφοντας τι παρουσιάζει κάθε φωτογραφία, τη μεγέθυνσή της, και το πώς συνδέεται με τις άλλες φωτογραφίες. Απαραίτητο εργαλείο για τη μακροσκοπική εξέταση είναι είτε μία φωτογραφική μηχανή είτε ένα στερεοσκόπιο (με μεγεθύνσεις συνήθως από x2,5 μέχρι x50), το οποίο διαθέτει δακτύλιο λυχνιών LED (ring light) και κατευθυνόμενο φωτισμό με οπτικές ίνες (directional fiber optic lighting). Σε κάθε περίπτωση πρέπει να είναι ευδιάκριτα όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία, διότι μια λεπτομέρεια που φαίνεται σχεδόν ασήμαντη σε μια προκαταρκτική έρευνα μπορεί να βρεθεί αργότερα να έχει σοβαρές επιπτώσεις. Τέλος, στη φωτογραφία θα πρέπει να συμπεριληφθεί κάποια ένδειξη του μεγέθους, όπως κλίμακα, ένα κέρμα, το χέρι, και ούτω καθεξής.

1.2.3 Μη καταστροφικές δοκιμές (Nondestructive Testing, NDT)

Όπως μαρτυρά και ο ορισμός τους, οι μη καταστροφικές δοκιμές γίνονται χωρίς τη καταστροφή του προϊόντος και χρησιμοποιούνται για να διασφαλίσουν τη μέγιστη αξιοπιστία στις μηχανές, στον εξοπλισμό και στα εργαλεία [6]. Όλες αυτές οι δοκιμές μπορεί να βοηθήσουνε στην αποκάλυψη δυσδιάκριτων ή εσωτερικών ελαττωμάτων όπως ρωγμές και ασυνέχειες επιφάνειας. Επίσης, χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν εάν η αστοχία σχετίζεται με τη κατασκευή ή με τις συνθήκες λειτουργίας. Άλλες προσαρμόζονται με σκοπό να προσομοιώσουν τις παραπάνω συνθήκες.

Για να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη αυτή η διαδικασία, έχουν καθιερωθεί πρότυπα ελέγχου τα οποία πρέπει να τηρούνται. Οι νέες μέθοδοι παραγωγής στοχεύουν στην ανακάλυψη τυχών ελαττωμάτων όσο γίνεται πιο γρήγορα κατά την παραγωγική διαδικασία. Αυτό σημαίνει ότι κάθε τεμάχιο εξετάζεται χωριστά πριν συναρμολογηθεί σε κάποιο μηχανισμό. Κατά συνέπεια, οι έλεγχοι πρέπει να γίνονται το συντομότερο δυνατό, ώστε να διασφαλίζεται η μέγιστη αξιοπιστία με το χαμηλότερο κόστος παραγωγής.

Οι μη καταστροφικές δοκιμές είναι εξαιρετικά χρήσιμες στην ανάλυση αστοχίας και αποτελούνται από διάφορες τεχνικές. Κάποιες από αυτές είναι:

- Έλεγχος μαγνητικών σωματιδίων (Magnetic Particle Testing, MP)
- Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (Dye Penetrant Testing/Die Check, DT/DC)
- Έλεγχος με δινορρέυματα (Eddy Current Test, ET)
- Έλεγχος με υπερήχους (Ultrasonic Test, UT)
- Ραδιογραφία (Radiography Test, RT)
- Έλεγχος ακουστικής εκπομπής (Acoustic Emission Test)

1.2.4 Επιλογή και διατήρηση των δειγμάτων

Επειδή, συχνά, μια θραύση δεν μελετάται αμέσως μετά τη δημιουργία της, η προστασία της από το περιβάλλον, η συντήρηση και ο καθαρισμός των επιφανειών θραύσης αποτελούν παράγοντες υψίστης σημασίας για την ανάλυση αστοχίας [7]. Αν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα υπάρχει κίνδυνος να αλλοιωθεί η επιφάνεια θραύσης και κατ' επέκταση οι πληροφορίες που θα ληφθούν. Κάποιο χτύπημα, η διάβρωση είναι για παράδειγμα ορισμένες καταστάσεις που πρέπει με κάθε τρόπο να αποφεύγονται. Η επιφάνεια θραύσης δεν πρέπει να έρθει σε επαφή με γυμνό χέρι και επίσης, δεν πρέπει να έρθουν σε επαφή οι επιφάνειες θραύσης μεταξύ τους.

Ο καλύτερος τρόπος να διατηρηθεί μία επιφάνεια θραύσης είναι να ξηραθεί ρίχνοντάς της μια απαλή δέσμη ξηρού συμπιεσμένου αέρα και μετά να αποθηκευτεί σε δοχείο με αφυγραντική ουσία.

Γενικά, μία επιφάνεια θραύσης πρέπει να καθαρίζεται μόνο όταν είναι απολύτως απαραίτητο. Πριν από οποιαδήποτε διαδικασία καθαρισμού η επιφάνεια της ρωγμής θα πρέπει να εξεταστεί με ένα μικρής ισχύος στερεοσκόπιο και τα αποτελέσματα να καταγραφούν με κατάλληλες φωτογραφίες. Η παρατήρηση με μικροσκόπιο μικρής ισχύος θα καθарίσει το μέγεθος της δυσκολίας του καθαρισμού και χρησιμοποιείται για τη παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας των σταδίων του καθαρισμού. Τα θραύσματα και η επικαθίσσει μπορεί να περιέχουν σημαντικές πληροφορίες για την αιτία που προκάλεσε τη ρωγμή. Το πλύσιμο της επιφάνειας σπασίματος με νερό πρέπει να αποφεύγεται. Εντούτοις, δείγματα που έχουν έρθει σε επαφή με νερό της θάλασσας ή με ρευστά πυρόσβεσης απαιτούν λεπτομερή πλύση με νερό, που ακολουθείται από ξέπλυμα με ακετόνη ή οινόπνευμα πριν από την αποθήκευση σε ξηραμένη ατμόσφαιρα. Σε επόμενο στάδιο ο καθαρισμός μπορεί να απαιτηθεί για την αφαίρεση τυχών συντριμμίων ή/και ακαθαρσιών ή για να την προετοιμασία κάποιου είδους εξέτασης (π.χ. ηλεκτρονικό μικροσκόπιο).

Επειδή συχνά το μέγεθος και η γεωμετρία του δείγματος περιορίζει τη διεξαγωγή μετρήσεων και τη γενικότερη μελέτη του, είναι συχνά απαραίτητο να αφαιρεθεί από το εξάρτημα ή τον μηχανισμό που έχει αστοχήσει, ένα τμήμα που περιέχει τη θραύση ή ένα τμήμα κατάλληλου μεγέθους ώστε να μπορεί να εξεταστεί. Πρέπει όμως να υπάρχει αρχείο με σκίτσα και φωτογραφίες, που να δείχνει τις θέσεις και τον τρόπο τεμαχισμού.

1.2.5 Χημική ανάλυση

Σκοπός της χημικής ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός των στοιχείων που αποτελούν το προς μελέτη υλικό είτε ως κραματώσεις είτε ως προσμίξεις, καθώς επίσης και τη ποσότητά αυτών μέσα στο υλικό [13]. Επίσης, στις περιπτώσεις ανάλυσης αστοχίας, μέσω της χημικής ανάλυσης γίνεται ταυτοποίηση του υλικού που χρησιμοποιείται και κατά πόσο αυτό συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές που επιβάλλουν τα πρότυπα. Πρακτικά, επειδή τα περιστατικά αστοχιών που οφείλονται λόγω χημικής σύστασης σε ακατάλληλο ή ελαττωματικό υλικό δεν είναι πολλά, η ίδια η χημική ανάλυση σπάνια αποκαλύπτει τα αίτια μιας αστοχίας.

Σε ορισμένες έρευνες, όπου για παράδειγμα υπάρχει διάβρωση, είναι απαραίτητη η χημική ανάλυση και στο προϊόν που προκάλεσε τη διάβρωση ή κάποιου μέσου με το οποίο το υλικό ήρθε σε επαφή. Σε τέτοιες περιπτώσεις η χημική ανάλυση μπορεί να δώσει τα πρωτογενή αίτια μίας αστοχίας.

Διάφορα αερίωδη στοιχεία επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ορισμένων μετάλλων τα οποία όμως δεν μπορούν να αποτυπωθούν σε μια χημική ανάλυση [14]. Στο χάλυβα, για παράδειγμα, το οξυγόνο και το άζωτο είναι υπεύθυνα για την παραμόρφωση που επιταχύνει τη γήρανση. Το υδρογόνο μπορεί να προκαλέσει ευθραυστότητα, ιδιαίτερα όταν απορροφάται κατά τη διάρκεια μίας συγκόλλησης καθοδικού καθαρισμού της ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης, ή του καθαρισμού της επιφάνειας με χημικό ή ηλεκτροχημικό τρόπο. Το υδρογόνο επίσης ευθύνεται και για τις χαρακτηριστικές ασυνέχειες στις επιφάνειες θραύσης στις συγκολλήσεις στους χάλυβες, όπου η παρουσία του οφείλεται συχνά στη χρήση των υγρών ηλεκτροδίων.

Όπου η ανάλυση δείχνει ότι η περιεκτικότητα ενός ιδιαίτερου στοιχείου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται στις προδιαγραφές, δεν πρέπει να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τέτοια απόκλιση είναι αρμόδια για την αποτυχία. Είναι συχνά αμφισβητήσιμο εάν μια τέτοια απόκλιση έχει διαδραματίσει ακόμη και έναν συμβάλλοντα ρόλο στην αστοχία.

Από τις διάφορες διαθέσιμες τεχνικές που υπάρχουν για χημική ανάλυση, η πλέον διαδεδομένη και συνηθισμένη για μεταλλικά αντικείμενα είναι η **οπτική φασματοσκοπία εκπομπής**. Εξαιτίας του γρήγορου χρόνου ανάλυσης και της εξαιρετικής ακρίβειας των αποτελεσμάτων η μέθοδος αυτή αποτελεί το πιο αποτελεσματικό μέσο για τον έλεγχο των κραμάτων. Στη μέθοδο αυτή το δείγμα πρέπει να είναι σε στερεά κατάσταση και η περιοχή που δεσμεύεται για μία μέτρηση είναι περίπου μία διάμετρος 10mm. Ως προετοιμασία για τη μέτρηση, αρκεί το δείγμα να είναι σχετικά λείο και να έχει επιπεδότητα. Οι μετρήσεις χαρακτηρίζονται από μεγάλη επαναληψιμότητα, λόγω όμως του ότι το μηχάνημα είναι αρκετά ευαίσθητο, χρειάζεται συχνή συντήρηση και βαθμονόμηση. Αν και η λειτουργία του δεν είναι ιδιαίτερος δύσκολη, πρέπει να γίνεται από εκπαιδευμένο προσωπικό.

Άλλες τεχνικές που υπάρχουν είναι:

- Φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης
- Φθορισμού ακτίνων X (XRF)
- Περίθλαση ακτίνων X (XRD)
- Υπέρυθρες και υπεριώδης φασματοσκοπίες

Σε άλλες τεχνικές, ωστόσο, απαιτείται το δείγμα να πρέπει να μετατραπεί πρώτα σε υγρή κατάσταση με τη διάλυσή του σε κατάλληλο οξύ.

Υπάρχουν επίσης διάφορα είδη για **μικροχημική ανάλυση**, όπου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνδυασμό με τον χαρακτηρισμό της μικροδομής χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές. Φασματοσκοπία ενεργειακής διασποράς ακτίνων X μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το SEM, TEM και STEM, και επομένως έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογής [15].

Ανάλυση ενεργειακής διασποράς ακτίνων X (energy dispersive x-ray analysis, EDX): Όταν η δέσμη των ηλεκτρονίων προσκρούει σε ένα σημείο της επιφάνειας του δείγματος στο SEM, εκπέμπεται ακτινοβολία στο φάσμα των ακτίνων X, το είδος της οποίας είναι χαρακτηριστικό για κάθε χημικό στοιχείο. Έτσι Το SEM σε συνεργασία με έναν φασματογράφο (spectrometer) που προσαρμόζεται στο SEM μπορεί να πραγματοποιήσει χημική ανάλυση. Η διαδικασία αυτή μπορεί να διευκολύνει την έρευνα μιας αστοχίας και σε άλλες περιπτώσεις. Για παράδειγμα μπορούν να εντοπιστούν εγκλείσματα που είναι επιβλαβή για το υλικό και την ομοιογένειά του και μπορεί από αυτά να προέρχεται η έναρξη ρηγματώσεων.

1.2.6 Μικροσκοπική εξέταση.

Η μικροσκοπική εξέταση του δείγματος της αστοχίας οδηγεί την μελέτη σε μία πιο λεπτομερή ανάλυση του προβλήματος. Οι πληροφορίες που προκύπτουν πλέον αφορούν τη μικροδομή σχετικά με τη θερμική κατεργασία των συστατικών, την πορεία των ρωγμών, τις παραμορφώσεις, κλπ. που στηρίζονται στα συστατικά [8]. Η κατά το δυνατόν καταλληλότερη και προσεκτική επιλογή του δείγματος είναι απολύτως απαραίτητη όχι μόνο για να εξάγει το μέγιστο ποσό πληροφοριών αλλά και για να αποκαλύψει τον ακριβή λόγο για την αιτία της αστοχίας. Σε όλες τις πτυχές από την παρατήρηση της μικροδομής, η επιφάνεια της μελέτης πρέπει να προετοιμαστεί κατάλληλα προκειμένου να αξιολογηθούν ορισμένα ειδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως οι γραμμές ροής, συνυπολογισμός πόρων, τελείωμα επιφανείας, κλπ. κάτω από ένα οπτικό μικροσκόπιο.

Αφού, λοιπόν, εντοπιστεί η περιοχή ενδιαφέροντος αποκόπτεται από το δείγμα ένα μικρότερο κομμάτι για εγκιβωτισμό, λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή για την μικροσκοπική εξέταση. Η εικόνα που παρουσιάζει η μικροδομή των δειγμάτων μπορεί να ενισχυθεί από ένα μεγάλο εύρος μεταλλογραφιών τεχνικών όπως για παράδειγμα θερμικό χρωματισμό (heat tinting), ανοδίωση κ φωτισμό με φωτεινό πεδίο και πολωμένο φως.

Οπτική μικροσκοπία: Από το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τα οπτικά μικροσκόπια χρησιμοποιούν το τμήμα του ορατού φωτός (380-760nm) [9]. Η οριζόντια αυτή δέσμη φωτός διέρχεται από διατάξεις φακών και κατόπτρων για τη δημιουργία ενός υπό μεγέθυνση ειδώλου. Οι μεγεθύνσεις που επιτυγχάνονται ξεκινούν από 50× και φτάνουν μέχρι 1500×. Στις μεγάλες μεγεθύνσεις καλύτερα να χρησιμοποιείται φωτισμός αντίθετης διαφορικής συμβολής (differential interference contrast) το οποίο επιτρέπει θεωρητικά την ανάλυση στοιχείων μεγέθους της τάξεως του 1/3 μm. Χαρακτηριστικά που είναι σημαντικό να αναγνωριστούν είναι η ομοιομορφία και το μέγεθος των κόκκων, το σχήμα και η κατανομή του μεγέθους των ενδομεταλλικών ενώσεων και των εγκλεισμάτων. Τέλος, αν και χρησιμοποιείται εκτενώς για θραυστογραφία χαμηλής μεγέθυνσης, το οπτικό μικροσκόπιο έχει μικρή δυνατότητα εφαρμογής στη θραυστογραφία μεγάλης μεγέθυνσης. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη ανάλυση του ($\sim 10^{-6}$ m) και το βάθος πεδίου (δεν μπορεί να εστιάσει στις τραχιές επιφάνειες).

Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM): Εκεί που απαιτείται εστίαση σε πολύ μεγάλο βαθμό διεύθυνσης και υψηλή ανάλυση είναι καλύτερα να χρησιμοποιείται ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, scanning electron microscopic). Το SEM αντί για ορατό φως χρησιμοποιεί μία εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων [10]. Τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν, ανακλώνται και γενικότερα αλληλεπιδρούν με την εξεταζόμενη επιφάνεια η οποία, αναλόγως του υλικού και των ιδιοτήτων του, δημιουργεί εκπομπές. Για τη διευκόλυνση της διέλευσης της δέσμης ηλεκτρονίων, η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνεται σε κενό. Όταν συγχρονιστεί η σάρωση της δέσμης με μια εξωτερική οθόνη και ανιχνευτούν οι παραγόμενες από το υλικό εκπομπές, δημιουργείται από αυτές ένα είδωλο. Η μεγέθυνση επιτυγχάνεται προβάλλοντας μία πάρα πολύ μικρή επιφάνεια του δοκιμίου σε μία μεγάλη οθόνη. Όσο μικραίνει η επιφάνεια που σαράνεται, τόσο πιο μεγαλύτερη μεγέθυνση επιτυγχάνεται. Οι επιφάνειες θραύσης είναι πολύπλοκες και τραχείες και δύσκολο να απεικονιστούν καθώς ένα οπτικό μικροσκόπιο μπορεί να εστιάσει σε μια στενή περιοχή λόγω του μικρού βάθους διεύθυνσης του πεδίου. Για το λόγο αυτό, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα όργανα για την έρευνα της μικροδομής των μεταλλικών υλικών. Σε αντίθεση με το οπτικό μικροσκόπιο, το βάθος εστίασης είναι μεγαλύτερο, κάτι που οφείλεται στο πολύ μικρό άνοιγμα της δέσμης. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο επίσης, επεκτείνει το εύρος ανάλυσης ενώ η μεγέθυνση επεκτείνεται από $M \times 10000$ μέχρι $M \times 60000$. Εκτός των άλλων, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μπορεί να παρέχει και άλλες λειτουργίες, όπως η ανάλυση ενεργειακής διασποράς ακτινών X (energy dispersive x-ray analysis, EDX) η οποία μας προσφέρει τοπική στοιχειακή μικροανάλυση, δηλαδή εύρεση της χημικής σύστασης σε επιλεγμένες περιοχές του υλικού [11]. Η παραπάνω χημική ανάλυση χρησιμοποιείται στην ανάλυση αστοχίας για την εξακρίβωση της συμμόρφωσης μετά βιομηχανικά αποδεκτά όρια της χημικής σύστασης.

Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM): Τα δείγματα για την ηλεκτρονική μικροσκοπία διερχόμενης δέσμης πρέπει να είναι αρκετά λεπτά για να επιτρέψουν τη μετάδοση των δεσμών ηλεκτρονίων. Για τον λόγο αυτό, τις περισσότερες φορές, δεν χρησιμοποιούνται τα δείγματα απευθείας, αλλά δημιουργούνται αντίγραφα (replica) χρησιμοποιώντας υλικά κυρίως πολυεστερικής φύσεως που σκοπό έχουν να αναπαριστούν την επιφάνεια θραύσης [12]. Ο τύπος του αντίγραφου που χρησιμοποιεί τις τεχνικές απόσπασης, παραμένει σε χρήση, και το ενδιαφέρον αυξάνεται με τη διάδοση της ανάλυσης TEM. Πολλά προβλήματα που περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της σύνθεσης, τη δομή του κρυστάλλου, ή τον προσανατολισμό των μικρών μορίων δεύτερης φάσης, απλοποιούνται εάν τα μόρια εξάγονται από τη μήτρα τους και αργότερα υποστηρίζονται στο μικροσκόπιο χρησιμοποιώντας ένα αντίγραφο. Το TEM ήταν για πολλά χρόνια ένα ισχυρό εργαλείο μελέτης των επιφανειών θραύσης πετυχαίνοντας μεγάλες μεγεθύνσεις. Εντούτοις, η χρήση του περιορίστηκε λόγω των μειονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω σε συνδυασμό με την εμφάνιση του SEM.

1.2.7 Μηχανικές δοκιμές

Η επιλογή για τη χρήση ενός υλικού γίνεται με βάση τις ιδιότητές του. Κάθε υλικό έχει συγκεκριμένες ιδιότητες και με βάση αυτές δημιουργούνται προδιαγραφές και τυποποιήσεις [13]. Ανάλογα με το μέγεθος και το είδος του φορτίου υπάρχει μία βέλτιστη επιλογή ανά περίπτωση. Σκοπός των μηχανικών δοκιμών είναι ο προσδιορισμός αυτών των ιδιοτήτων.

Η δοκιμή σκληρότητας: αποτελεί την πιο απλή μηχανική δοκιμή που μπορεί να γίνει, δίνοντας μία πρώτη πληροφορία για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού που διερευνάται. Η σκληρότητα εκφράζει την αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στη διείσδυση ενός ξένου σώματος που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του υλικού με κάποια συγκεκριμένη δύναμη και χρονική διάρκεια [16]. Σε επόμενο στάδιο, η δοκιμή σκληρότητας χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση μιας θερμικής κατεργασίας, συγκρίνοντας τη σκληρότητα ενός εξαρτήματος που έχει αστοχήσει σε σχέση με αυτή που θα έπρεπε να έχει σύμφωνα με την προδιαγραφή. Η σκληρομέτρηση συνδέεται και με άλλες μηχανικές ιδιότητες του υλικού γι' αυτό και μπορεί να παρέχει μια προσέγγιση της αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό, να ανιχνεύει την σκλήρυνση με ενδοτράχυνση (εργοσκλήρυνση), την πλαστικότητα (επιμήκυνση κατά τη θραύση), τη δυσθραυστότητα, τη σκλήρυνση που μπορεί να προκαλείται από την εξανθράκωση, την ανάπτυξη άνθρακα ή αζώτου.

Γενικά, ένα σκληρό υλικό έχει μεγάλη αντοχή, όμως έτσι μειώνεται η πλαστικότητα και η δυσθραυστότητά του.

Η δοκιμή σκληρότητας θεωρείται μη καταστρεπτική δοκιμή, εκτός από περιπτώσεις όπου το κομμάτι είναι πολύ μεγάλο και πρέπει να αποκοπεί ή γενικότερα όταν για κάποιο λόγο απαιτείται προετοιμασία ειδικών δειγμάτων, καθώς επίσης και στη δοκιμή μικροσκληρότητας.

Δοκιμές εφελκυσμού: Στις περισσότερες έρευνες αστοχίας κατά τη λειτουργία, η δοκιμή εφελκυσμού δεν παρέχονται πολλές χρήσιμες πληροφορίες, επειδή σχετικά λίγες αστοχίες προκύπτουν από τη χρήση ενός υλικού που είναι ανεπαρκές στην αντοχή σε εφελκυσμό ή από ένα εφελκυστικό φορτίο που εφαρμόζεται έως ότου εμφανιστεί η ρήξη. Επιπλέον, η κοπή δειγμάτων από τα κομμάτια που έχουν αστοχήσει κατά τρόπο ψαθυρό, παρουσιάζουν γενικά επαρκή ολκιμότητα κάτω από τις συνθήκες που επιβάλλονται κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής εφελκυσμού.

Οι δοκιμές εφελκυσμού είναι ουσιαστικές κατά την διάρκεια της παραγωγής προκειμένου να εξακριβωθεί εάν το υλικό είναι καλής ποιότητας και σύμφωνα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Η προετοιμασία των δειγμάτων για τις δοκιμές εφελκυσμού κοστίζει ακριβά και είναι χρονοβόρα. Το ποσό του διαθέσιμου υλικού μπορεί επίσης να είναι ανεπαρκές ακόμα κι αν μόνο τα κάτω του μετρίου δείγματα δοκιμής πρόκειται να προετοιμαστούν. Προσοχή πρέπει να επιδειχθεί στον προσδιορισμό της θέσης από την οποία το δείγμα έχει ληφθεί. Η αλλαγή των ιδιοτήτων του δείγματος με την υπερβολική θέρμανση κατά την διάρκεια της κοπής και της κατεργασίας πρέπει να αποφευχθεί.

Είναι συνήθως επαρκές κατά την διάρκεια των αρχικών σταδίων μιας έρευνας να καθοριστεί εάν το υλικό είναι ουσιαστικά ολκιμο ή ψαθυρό, και αυτό μπορεί να εξακριβωθεί από μια απλή δοκιμή κάμψης. Η δοκιμή των χυτοσιδήρων και των περισσότερων μη σιδηρούχων κραμάτων για την αντοχή σε εφελκυσμό είναι ουσιαστική, αν και κάποια ένδειξη της αντοχής σε εφελκυσμό είναι εύκολο να αποκτηθεί από τις δοκιμές σκληρότητας.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε εφελκυσμό στα δείγματα από συστατικά που έχουν αστοχήσει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, δείχνουν μερικές φορές ότι το υλικό είναι ελαφρός κατώτερο στην αντοχή και την ολκιμότητα έναντι των αποτελεσμάτων των δοκιμών αποδοχής που έγιναν όταν κατασκευάστηκε η διάταξη. Εντούτοις, οι δοκιμές αποδοχής πραγματοποιούνται συχνά σε δείγματα δοκιμής που παρέχονται συγκεκριμένα για τον σκοπό. Συνεπώς, πρέπει να αναμένεται κάποια απόκλιση, άρα τέτοιες διαφορές στα αποτελέσματα δεν πρέπει να ερμηνευτούν

απαραιτήτως ως ένδειξη ότι οι ιδιαίτερες ιδιότητες του υλικού έχουν επιδεινωθεί στην λειτουργία.

Άλλες μηχανικές δοκιμές είναι χρήσιμες στην επιβεβαίωση ότι το εξάρτημα που έχει αστοχήσει είναι σύμφωνο με την προδιαγραφή ή στην αξιολόγηση των συνεπειών των καταστάσεων επιφάνειας στις μηχανικές ιδιότητές του. Όπου απαιτείται, δοκιμή κόπωσης, εφελκυσμού, ή δυσθραυστότητας (κρούσης) πρέπει να πραγματοποιηθούν παρέχοντας ικανοποιητικό υλικό για την επεξεργασία των δειγμάτων δοκιμής που θα είναι διαθέσιμο. Μπορεί να είναι απαραίτητο να γίνουν μερικές δοκιμές είτε στις ελαφρώς ανυψωμένες είτε στις χαμηλές θερμοκρασίες για να μιμηθούν οι συνθήκες κατά την λειτουργία. Επίσης σημαντικός μπορεί να είναι και ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας μετάβασης από όλκιμη σε ψαθυρή κατάσταση, στην μελέτη μιας ψαθυρής θραύσης ενός χάλυβα με μικρό ποσοστό άνθρακα.

Ο αναλυτής αστοχίας πρέπει να επιδείξει την προσοχή στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μηχανικών δοκιμών. Επίσης, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι οι εργαστηριακές δοκιμές στα μικρά δείγματα μπορούν να μην αντιπροσωπεύσουν επαρκώς συμπεριφορά μιας πολύ μεγαλύτερης δομής ή ενός συστατικού στην λειτουργία.

1.2.8 Δοκιμές σε προσομοιωμένες συνθήκες λειτουργίας.

Για την διεξαγωγή συμπερασμάτων κατά την έρευνα μιας αστοχίας, συχνά χρειάζεται η πραγματοποίηση δοκιμών κάτω από τις συνθήκες στις οποίες εκτίθεται, λειτουργεί και προφανώς αστόχησε το προς μελέτη αντικείμενο. Η δοκιμή προσομοιωμένων συνθηκών δεν είναι, συχνά, εφαρμόσιμη διότι απαιτείται επιμελημένος εξοπλισμός. Επίσης, είναι πιθανό να μην είναι πλήρως γνωστές ή κατανοητές όλες οι συνθήκες λειτουργίας. Έτσι, εκτός από το ότι μπορεί να ληφθούν λανθασμένα αποτελέσματα και συμπεράσματα, είναι ακόμα πιθανό να προκύψουν λάθη στη προσπάθεια να μειωθεί ο χρόνος διεκπεραίωσης μίας τέτοιας δοκιμής, αλλοιώνοντας παράγοντες όπως η θερμοκρασία λειτουργίας και το διαβρωτικό μέσο.

Όταν λαμβάνονται σωστά οι περιορισμοί της δοκιμής, η δοκιμή σε προσομοιωμένες συνθήκες, μπορεί να δώσει αποτελέσματα ορισμένων επιλεγμένων παραμέτρων που αφορούν τις συνθήκες λειτουργίας, καθώς μπορεί επίσης να είναι χρήσιμη και στον προγραμματισμό της διορθωτικής δράσης που θα αποτρέψει παρόμοια αστοχία ή, τουλάχιστον, να επεκτείνει τη ζωή λειτουργίας.

Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite element analysis (FEA)): Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων γνωρίζει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και αποτελεί μία εκ των σημαντικότερων μεθόδων υπολογιστικής μηχανικής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό διάφορων επιστημονικών πεδίων όπως των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής (energy methods), της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών (approximation theory), αλλά και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design) [17].

Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη χρήση μεγάλης υπολογιστικής ισχύος, άρα πολλών υπολογιστικών πόρων (hardware), αλλά και διαρκή εξέλιξη λογισμικών (software). Με τη πάροδο του χρόνου η μέθοδος αυτή βελτίωσε και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της και τον ενιαίο προγραμματισμό της.

Αυτό που δίνει αξία στη μέθοδο είναι η δυνατότητα που έχει να χρησιμοποιείται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική ανάλυση. Σήμερα, με τη χρήση προγραμμάτων που στηρίζονται στις αρχές του CAD, ο χρήστης είναι σε θέση να διαμορφώσει και να τροποποιήσει το προσομοίωμα του και στη συνέχεια να

καθορίσει τις επιβαλλόμενες φορτίσεις κατά τρόπο απλό και εύκολα ελέγξιμο. Μετά την επίλυση του προβλήματος, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται άμεσα και εποπτικά ενώ σε πολλά συστήματα παρέχεται η δυνατότητα αναζήτησης των αποτελεσμάτων με τη μορφή βάσεων δεδομένων (databases).

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται ευρέως στο στάδιο της μελέτης της παραγωγής, όπου πριν από την υλοποίηση, γίνεται ο προσδιορισμός της πλέον αποτελεσματικής οικονομικά επιλογής. Επίσης, οι προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπουν τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών "σχεδίων" για την εξασφάλιση και των τεχνικών απαιτούμενων προδιαγραφών, ενώ παράλληλα μπορούν να προσομοιώνονται διάφορες λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στην ανάλυση αστοχίας

Η χρήση της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων σε μηχανικές εφαρμογές έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Εκτός των άλλων, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και σε μελέτες ανάλυσης αστοχίας. Η αστοχία ενός μηχανικού στοιχείου συνήθως συνδέεται με τα υλικά, το περιβάλλον, τον σχεδιασμό ή κάποιο ανθρώπινο σφάλμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μια συμβατική προσέγγιση ανάλυσης αστοχίας δεν είναι αρκετή για να αποκαλύψει την αποτυχία και επομένως χρειάζεται μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση μέσω των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι αρκετά αποτελεσματική όταν συνδυάζεται με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών μίας ανάλυσης αστοχίας όπως η μεταλλογραφία [18]. Στη FEA είναι απαραίτητη η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί ένα στοιχείο, ώστε να υποστηρίζει τις σωστές πληροφορίες και δεδομένα. Η ποιότητα των δεδομένων αποτελεί βασικό στοιχείο για την επιτυχή έκβαση της προσομοίωσης.

Η μοντελοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει διαφορετικές γνώσεις σχετικά με την εκάστοτε ανάλυση που δεν μπορεί να επιτευχθεί με μεθόδους που μέχρι τώρα γνωρίζαμε. Οι γραφική απεικόνιση και η κινούμενη εικόνα που παράγεται από το λογισμικό συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση, απεικονίζοντας τη βασική αιτία της αστοχίας [19].

Όπως και στις άλλες περιπτώσεις έτσι και στην ανάλυση αστοχίας οι εφαρμογές της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων είναι σε συνεχή εξέλιξη καθώς λαμβάνονται υπόψη διαρκώς νέοι παράγοντες που συμβάλλουν σε μία αστοχία. Για παράδειγμα, στη περίπτωση των πτερυγίων ενός αεροστροβίλου που προκαλούν βλάβη σε έναν κινητήρα, οι μηχανικοί θα πρέπει να υπολογίσουν τη θερμική επίδραση και την επίδραση του φορτίου που δέχεται το πτερύγιο στη προσομοίωση και ίσως την επίδραση ξένων σωματιδίων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν την αποτυχία. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι στη FEA πλέον ενσωματώνονται συνδυασμοί πολλαπλών παραγόντων ακόμα και εξωτερικοί από το περιβάλλον.

Για να λάβουμε αξιόπιστα και έγκυρα αποτελέσματα από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων πρέπει το προς μελέτη σύστημα να είναι σαφές, σωστά προσδιορισμένο και να λαμβάνονται οι απαραίτητοι περιορισμοί που απαιτεί το σύστημα.

1.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.

Ο λόγος ύπαρξης της έρευνας μίας αστοχίας είναι για να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα όλων των πειραμάτων και γενικότερα των ενεργειών που έχουν γίνει κατά τη διάρκεια της έρευνας, σύμφωνα με τα οποία προκύπτουν και παραθέτονται

τα συμπεράσματα.. Βασιζόμενος σε αυτά, ο αναλυτής μπορεί να παρέχει στον ενδιαφερόμενο τις κατάλληλες συστάσεις για να λυθεί το πρόβλημα.

Στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, είναι εξίσου σημαντικό ο αναλυτής να χρησιμοποιεί την κατάλληλη τεχνική ορολογία, η οποία μπορεί να είναι ένας παράγοντας-κλειδί στην απόδοση ευθυνών. Λανθασμένη ορολογία μπορεί να οδηγήσει σε σύγχυση και παραπληροφόρηση σχετικά με τα ακριβή αίτια της αστοχίας. Επίσης, στην ερμηνεία των στοιχείων πρέπει να δίνεται η δέουσα προσοχή στην παραγωγή των δηλώσεων για την αιτία της αστοχίας. Παραδείγματος χάριν, ο τρόπος αποτυχίας σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις μπορεί να είναι ο ίδιος (π.χ. κόπωση), όμως, η αιτία της αστοχίας μπορεί να είναι τελείως διαφορετική. Οι δηλώσεις για την αιτία της αστοχίας υπονοούν την ευθύνη. Εάν η αιτία της αστοχίας είναι ανάρμοστο σχέδιο, είναι ευθύνη του σχεδιαστή, εάν έχει σχέση με την επεξεργασία, είναι ευθύνη του κατασκευαστή και ούτω καθεξής.

1.4 Συστάσεις.

Ο λόγος που γίνεται μία έρευνα ανάλυσης αστοχίας είναι γιατί πρέπει να αποδοθεί ένα σύνολο προτάσεων επίλυσης του προβλήματος, αλλά και για να αποτραπούν πιθανές μελλοντικές αστοχίες. Μπορεί οι συστάσεις που γίνονται να αφορούν μια βραχυπρόθεσμη προσωρινή λύση, αν δεν γίνεται αλλιώς, αλλά σκοπός γενικά είναι να προκύπτουν πιο μόνιμες και μακροπρόθεσμες λύσεις.

Στο σημείο αυτό οι λύσεις που δίνονται μπορεί να αφορούν την αντικατάσταση υλικού, με άλλο προφανώς καταλληλότερο, για την εκάστοτε περίπτωση αναλόγως βέβαια από τα αποτελέσματα που έχουν ληφθεί κατά τη μικροσκοπία. Σε άλλες περιπτώσεις η αστοχία μπορεί να οφείλεται σε μη προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας, ασυμβίβαστες με τις παραμέτρους το σχεδιασμού, οπότε σε τέτοιες περιπτώσεις δεν θα ευθύνεται το υλικό.

Σε κάθε περίπτωση ο αναλυτής μπορεί να συστήσει τις διάφορες εναλλακτικές λύσεις, αναφέροντας τις δυνατότητες και τους περιορισμούς, που αφορούν την εφαρμογή.

1.5 Εκθέσεις ανάλυσης αστοχίας.

Στη τεχνική έκθεση που συντάσσεται αναφέρονται όλες οι προτεινόμενες ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν για τη λύση του προβλήματος, καθώς και οποιεσδήποτε άλλες πληροφορίες είναι απαραίτητες με κάθε χρήσιμη λεπτομέρεια. Οι πληροφορίες αυτές λαμβάνονται υπόψιν από τους αρμόδιους (π.χ. σχεδιαστές), οι οποίοι με τη σειρά τους κάνουν βελτιώσεις ώστε να μειωθούν όσο το δυνατό περισσότερο, αν όχι να εξαλειφθούν, πιθανές μελλοντικές περιπτώσεις αστοχίας. Αν και η ακριβής διαδικασία σύνταξης μιας τεχνικής έκθεσης μπορεί να διαφέρει από μια περίπτωση αστοχίας σε άλλη, χρησιμοποιείται ως γενικό πλάνο ένας οδηγός, σύμφωνα με τον οποίο η τεχνική έκθεση μπορεί να περιλάβει τα παρακάτω τμήματα:

1. *Περίληψη:* συνοπτική περιγραφή του προβλήματος, της διαδικασίας ανάλυσης, των αποτελεσμάτων της έρευνας και συστάσεις
2. *Ιστορικό:* περιέχει όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σχετικές με την λειτουργία, τη συντήρηση και τυχόν απρόοπτα (π.χ βλάβες στο παρελθόν).
3. *Οπτική επιθεώρηση:* αναφέρονται και επεξηγούνται στοιχεία που προκύπτουν κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο όπως ρωγμές, διάβρωση και παραμορφώσεις οι οποίες συνοδεύονται και από ανάλογο φωτογραφικό υλικό.

4. *Πειραματική διαδικασία*: περιγράφεται η σειρά των ενεργειών που θα ακολουθήσουν, οι τεχνικές που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση, καθώς επίσης και τα ίδια τα δείγματα παραθέτοντας τα αίτια επιλογής τους.
5. *Έλεγχος υλικού*: παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης συγκριτικά με τη χημική ανάλυση βάσει προδιαγραφών. Συχνά αναφέρονται ιδιότητες του υλικού σχετικές με την εφαρμογή του.
6. *Ανάλυση θραυστομηχανικής*: παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης τάσεων και μικροδομής. Μέσω της μικροσκοπίας είτε οπτικής, είτε ηλεκτρονικής δίνονται πληροφορίες για το είδος και τον μηχανισμό της θραύσης, το μέγεθος των κόκκων, τη δομή και τη μορφολογία των ορίων των κόκκων. Όποτε είναι εφικτό γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των δοκιμίων του εξαρτήματος που αστόχησε με δοκίμια ενός υγιούς κομματιού που, ιδανικά, δεν έχει χρησιμοποιηθεί.
7. *Συμπεράσματα*: Με βάση τις πληροφορίες που έχουν προκύψει από όλες τις παραπάνω ενέργειες, προκύπτουν τα συμπεράσματα, στα οποία αναφέρονται τα αίτια και ο τρόπος της αστοχίας αναλυτικά, με κάθε λεπτομέρεια..
8. *Συστάσεις*: Παρουσιάζονται προτεινόμενες λύσεις
9. *Βιβλιογραφικές αναφορές*: χρησιμοποιούνται για να εμπλουτίσουν τις πληροφορίες της έρευνας. Δείχνει την ύπαρξη ελέγχου και την εγκυρότητα των όσων γράφονται και την αναγνώριση της δουλειάς κάποιου άλλου στην οποία στηριχτήκαμε.

2^ο Κεφάλαιο: Χάλυβες

2.1 Εισαγωγή - Βασικές έννοιες

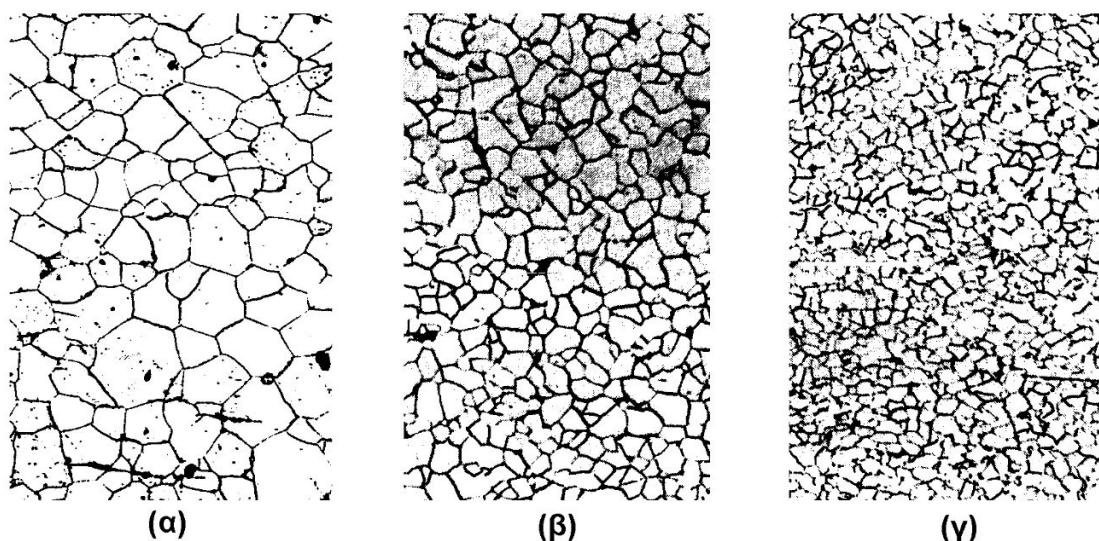
2.1.1 Κράματα

Με τον όρο **κράμα** ορίζεται ένα μείγμα δύο ή περισσότερων στοιχείων, εκ των οποίων το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο. Από την σύντηξη των συστατικών στοιχείων του κράματος, και την μετέπειτα στερεοποίησή τους, δημιουργείται εκ νέου μία νέα, κοινή, κρυσταλλική δομή [19].

Τα κράματα με τη σειρά τους χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: **τα σιδηρούχα** και **τα μη σιδηρούχα**. Στα σιδηρούχα ανήκουν κυρίως οι χάλυβες, μαζί με τους χυτοσιδήρους, ενώ στα μη σιδηρούχα ανήκουν τα κράματα αλουμινίου, χαλκού κ.λ.π.

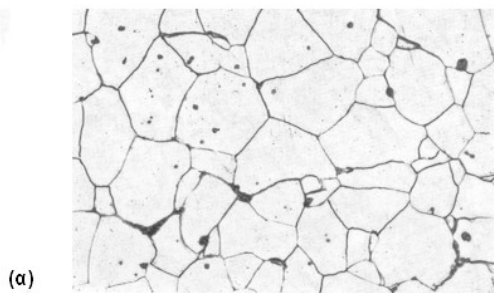
Με τη βοήθεια της μικροσκοπίας, είναι δυνατή η οπτική εμφάνιση ενός κράματος και με τη κατάλληλη προετοιμασία μπορεί να γίνει εμφανής η **μικροδομή** του. Τη μικροδομή τη συνθέτουν **οι κόκκοι** και **οι φάσεις**.

Ο **Κόκκος** αποτελεί τη δομική μονάδα των μεταλλικών υλικών και βρίσκεται σε κάθε περιοχή του υλικού, που έχει προκύψει από την επανάληψη του στοιχειώδους κυττάρου στο χώρο και με τον ίδιο προσανατολισμό. Το μέγεθος των κόκκων, εκφράζει και καθορίζει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού (Εικόνα 2.1). Ένα λεπτόκοκκο υλικό έχει μεγαλύτερη σκληρότητα και αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με ένα χονδρόκοκκο υλικό. Όσο αφορά τη δομή των κόκκων, προκύπτει από τη στερεοποίηση του υλικού μετά τη χύτευση.

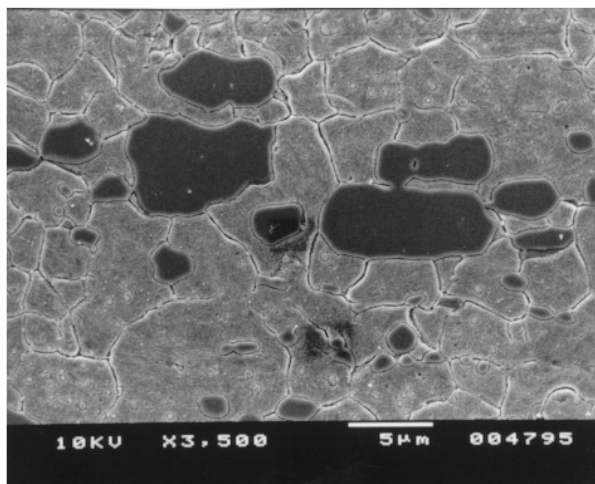


Εικόνα 2.1: Μικροδομές μαλακού χάλυβα, που διακρίνεται το διαφορετικό μέγεθος των κόκκων (Μεγέθυνση X 100). Το μέγεθος των κόκκων μειώνεται από (α) προς (γ), εικόνα 2.6, σελ. 8 [20].

Η **Φάση** είναι μία περιοχή του υλικού που χαρακτηρίζεται από *ομοιογένεια*, έχοντας δηλαδή σε όλη την έκτασή της την ίδια χημική σύσταση, την ίδια δομή και τις ίδιες ιδιότητες (Εικόνα 2.2). Ένα κράμα λοιπόν, μπορεί να αποτελείται από μία ή και παραπάνω φάσεις, ενώ μπορεί να υπάρχουν μία ή περισσότερες φάσεις σε κάθε κόκκο.



(α)



(β)

Εικόνα 2.2: (α) Μικροδομή μονοφασικού κράματος Fe, που διακρίνονται οι κόκκοι μίας μόνο φάσης (α-φάση) σε μεγέθυνση X500. (β) Μικροδομή διφασικού κράματος (χρωμιούχος χάλυβας): οι «γκρίζοι» κόκκοι είναι η α-φάση, ενώ οι «μαύροι» κόκκοι είναι η κ-φάση (καρβίδια του χρωμίου). (Φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, μεγέθυνση X3500) εικόνα 2.6, σελ. 8 [20].

2.1.2 Κρυσταλλική δομή

Η κρυσταλλική δομή είναι η διάταξη των ατόμων στο χώρο, που δημιουργούν ένα **κρυσταλλικό πλέγμα**. Τα κρυσταλλικά πλέγματα που υπάρχουν στη φύση είναι 14, τα οποία ομαδοποιούνται σε 7 κρυσταλλικά συστήματα, όπου το κάθε ένα από αυτά έχει διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα [20]. Τα κρυσταλλικά πλέγματα που συναντούμε στα περισσότερα μέταλλα και μελετώνται λίγο πιο λεπτομερώς είναι **το κυβικό χωροκεντρωμένο (κ.χ.)**, **το κυβικό έδροκεντρομένο(κ.ε.)** και **το εξαγωνικό μέγιστης πυκνότητας (ε.μ.π.)**

2.1.3 Αλλοτροπία

Υπάρχουν πολλά στοιχεία τα οποία υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, κρυσταλλώνονται σε διαφορετικές κρυσταλλικές δομές. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **αλλοτροπία** και τα μέταλλα στα οποία ισχύει αυτό λέγονται αλλοτροπικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αλλοτροπικού μετάλλου είναι ο σίδηρος, ο οποίος περίπου μέχρι τους 910°C κρυσταλλώνεται σε κυβικό χωροκεντρωμένο πλέγμα, ενώ από εκεί και μετασχηματίζεται σε κυβικό έδροκεντρωμένο πλέγμα [21].

2.2 Κατάταξη χαλύβων

Οι χάλυβες είναι κράματα σιδήρου-άνθρακα (Fe-C) με περιεκτικότητα σε άνθρακα μέχρι και 2-2,1%. Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, οι χάλυβες περιέχουν διάφορα στοιχεία κραμάτωσης με σκοπό τη προσαρμογή των διάφορων φυσικών, χημικών, μηχανικών ή/και άλλων ιδιοτήτων ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε περίπτωσης. Ο άνθρακας και τα άλλα στοιχεία επενεργούν σαν παράγοντες σκλήρυνσης των χαλύβων, αποτρέποντας την αποδιοργάνωση στα κρυσταλλικά πλέγματα των ατόμων του σιδήρου. Η ποικιλία του ποσού των κραματοποιητικών στοιχείων και η μορφή με την οποία παρουσιάζονται στους χάλυβες (διαλυμένα ή κατακρημνισμένα κλπ) προσδιορίζει τις ιδιότητές του όπως τη σκληρότητα, την ολκιμότητα και την αντοχή. Ανάλογα με τη χρήση τους, οι χάλυβες περιέχουν και άλλα στοιχεία κραμάτωσης όπως το μαγγάνιο, το χρώμιο, το βανάδιο και το βολφράμιο. Ο άνθρακας ως βασικό κραματοποιητικό στοιχείο του χάλυβα, έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πιο αποδοτικός και οικονομικός για την ενίσχυση του σιδήρου. Όμως με την αύξηση του ποσοστού του άνθρακα, μπορεί οι χάλυβες να γίνονται σκληρότεροι και ισχυρότεροι, γίνονται όμως και πιο εύθραυστοι.

Ως προς τη χημική τους σύσταση οι χάλυβες διακρίνονται σε [22]:

- Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες
- Κραματομένους χάλυβες, οι οποίοι σύμφωνα με το ποσοστό των κραματοποιητικών στοιχείων διακρίνονται σε:
 - Ελαφρά κραματομένους
 - Μέτρια κραματομένους
 - Ισχυρά κραματομένους χάλυβες

Ως προς τον προσδιορισμό τους διακρίνονται σε:

- Χάλυβες διαμόρφωσης
- Χυτοχάλυβες

Όσο αφορά τη χρήση του διακρίνονται σε:

- Χάλυβες κατασκευών
- Ανοξείδωτοι χάλυβες
- Εργαλειοχάλυβες
- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών

2.2.1 Κοινός ή ανθρακούχος χάλυβας (carbon steels)

Είναι οι χάλυβες που έχουν ως βασικό κραματοποιητικό στοιχείο τον άνθρακα. Εξαιρέση αποτελούν συνήθεις ακαθαρσίες P και S για περιεκτικότητες 0,04% και 0,05% αντίστοιχα και μικρά ποσοστά Mn. Τα όρια περιεκτικότητας κραματικών στοιχείων ώστε να μη θεωρείται ένας χάλυβας κραματομένος αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1):

Πίνακας 2.1: Στοιχεία κραμάτωσης χαλύβων

Στοιχεία	ποσοστό %
Αλουμίνιο (Al)	0,30
Βόριο (B)	0,0008
Βισμούθιο (Bi)	0,10
Κοβάλτιο (Co)	0,30
Χρώμιο (Cr)	0,30
Χαλκός (Cu)	0,40
Μαγγάνιο (Mn)	1,65
Μολυβδαίνιο (Mo)	0,08
Νιόβιο (Nb)	0,06
Νικέλιο (Ni)	0,30
Μόλυβδος (Pb)	0,40
Πυρίτιο (Si)	0,60
Τιτάνιο (Ti)	0,05
Βανάδιο (V)	0,10
Βολφράμιο (W)	0,30
Ζιρκόνιο (Zr)	0,10

2.2.2 Κραματομένοι χάλυβες

Υπάρχουν περιπτώσεις, όπου οι ιδιότητες των κοινών χαλύβων είναι ανεπαρκείς για ορισμένες εφαρμογές. Ο κοινός χάλυβας παρουσιάζει γενικά μικρή αντοχή σε μηχανική φθορά, διάβρωση, μικρή εμβαπτότητα, ανεπαρκή δυσθραυστότητα ή ολκιμότητα. Για το λόγο αυτό προστίθενται συγκεκριμένα στοιχεία στη σύσταση του χάλυβα με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, την αύξηση της αντοχής σε φθορά ή/και διάβρωση κ.λ.π. Ορισμένα στοιχεία και οι δράσεις τους αναφέρονται στη παρακάτω παράγραφο [20].

2.2.2.1 Επίδραση στοιχείων κραμάτωσης

Νικέλιο (Ni)

Κατηγορία: γ-φερρογόνο και γραφιτίζον

Επίδραση: Αυξάνει σημαντικά την εμβαπτότητα, την αντοχή σε διάβρωση και την αντοχή σε επαναφορά.

Διαλυτότητα: Στον ωστενίτη και 10% στον φερρίτη.

Χρώμιο (Cr)

Κατηγορία: α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο

Επίδραση: Μικρή αύξηση της εμβαπτότητας. Αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και μεγάλη βελτίωση αντοχής σε διάβρωση

Διαλυτότητα: στον φερρίτη και 13% στον ωστενίτη.

Μαγγάνιο (Mn)

Κατηγορία: γ- φερρογόνο και καρβιδιογόνο

Επίδραση: Μικρή αύξηση της εμβαπτότητας. Αύξηση της κατεργασιμότητας στη κοπή. Μεγάλη αντοχή σε φθορά και τριβή κυρίως για περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 12%

Διαλυτότητα: 37% στον φερρίτη και 6% στον ωστενίτη.

Μολυβδαίνιο (Mo)

Κατηγορία: α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο

Επίδραση: Μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας. Αύξηση της σκληρότητας, της αντοχής σε επαναφορά, σε φθορά και σε τριβή.

Διαλυτότητα: 37% στον φερρίτη και 5% στον ωστενίτη.

Βολφράμιο (W)

Κατηγορία: α-φερρογόνο και ισχυρά καρβιδιογόνο

Επίδραση: Μεγάλη αύξηση εμβαιπτότητας, της σκληρότητας, της αντοχής σε επαναφορά: Αυξάνει επίσης και την αντοχή σε φθορά και τριβή.

Διαλυτότητα: 33% στο φερρίτη και 6% στον ωστενίτη.

Βανάδιο (V)

Κατηγορία: α-φερρογόνο και πολύ ισχυρά καρβιδιογόνο

Επίδραση: Παρέχει πολύ μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας. Προκαλεί τη μέγιστη αύξηση της σκληρότητας μετά από δευτερογενή σκλήρυνση. Μεγάλη αύξηση της αντοχής σε φθορά.

Διαλυτότητα: στον φερρίτη και 1% στον ωστενίτη.

Κοβάλτιο (Co)

Κατηγορία: γ- φερρογόνο και καρβιδιογόνο

Επίδραση: Μείωση της εμβαιπτότητας. Προκαλεί σκλήρυνση με το σχηματισμό μεσομεταλλικών ενώσεων σε ειδικές κατηγορίες χαλύβων

Διαλυτότητα: στον ωστενίτη και 75% στον φερρίτη.

Πυρίτιο (Si)

Κατηγορία: α-φερρογόνο και γραφιτίζον

Επίδραση: Μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας. Προστασία από διάβρωση. Χρήση σε ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογες

Διαλυτότητα: 18,5% στον φερρίτη και 6% στον ωστενίτη.

Αλουμίνιο (Al)

Κατηγορία: α-φερρογόνο και γραφιτίζον

Επίδραση: Μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας και παρεμποδίζει τη μεγέθυνση κόκκων.

Διαλυτότητα: 18,5% στον φερρίτη και 6% στον ωστενίτη.

Τιτάνιο (Ti)

Κατηγορία: α-φερρογόνο και ισχυρότατα καρβιδιογόνο

Επίδραση: Μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας. Μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και παρεμποδίζει τη γήρανση.

Διαλυτότητα: 18,5% στον φερρίτη και 6% στον ωστενίτη.

Το **θείο (S)** και ο **φώσφορος (P)** θεωρούνται ακαθαρσίες και πρέπει να διατηρούνται σε όσο το δυνατό χαμηλότερες περιεκτικότητες, διότι ψαθυροποιούν τον χάλυβα.

Με βάση τα στοιχεία και τις πληροφορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, η κραμάτωση των χαλύβων με αυτά τα στοιχεία μας δίνουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Σκλήρυνση του χάλυβα με τη δημιουργία στερεού διαλύματος.
- Τάση σχηματισμού καρβιδίων (προσθήκη **καρβιδιογόνων** στοιχείων):
Co<Fe<Mn<Cr<Mo<W<V<Ti
- Διάσπαση καρβιδίων με τη μορφή γραφίτη. (**γραφιτίζοντα στοιχεία**): **Ni, Si, Al**
- Σταθεροποίηση του πλέγματος του ωστενίτη (**γ-φερρογόνα στοιχεία**): **Mn, Ni, Co**
- Σταθεροποίηση του φερρίτη (**α-φερρογόνα στοιχεία**): **Cr, Mo, W, V, Si**
- Μεταβολή της κρίσιμης ταχύτητας βαφής.
- Βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση. (**Cr, Ni, Si**)
- Τάσεις εκλέπτυνσης των κόκκων: (**V, Al**)
- Βελτίωση της κατεργασιμότητας: (**Mn**)
- Αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας: (**Si**)

Η προσθήκη κραματικών στοιχείων επιδρά, επίσης, την τροποποίηση του διαγράμματος Fe-C και στη μετατόπιση των καμπυλών των θερμικών κατεργασιών (CCT και TTT). Με βάση αυτές τις αλλαγές, οι χάλυβες χαρακτηρίζονται ως:

- Μαρτενσιτικοί ή αυτόβαπτοι χάλυβες.
Τα στοιχεία προσθήκης των χαλύβων αυτών, συντελούν ώστε η κρίσιμη ταχύτητα της μαρτενσιτικής βαφής να είναι μικρότερη της ταχύτητας απόψυξης στον αέρα, έτσι, στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι χάλυβες αυτοί έχουν δομή μαρτενσίτη.
- Ωστενιτικοί χάλυβες. Η προσθήκη γ-φερρογόνων στοιχείων στο χάλυβα, επιτρέπει την ύπαρξη ευσταθούς ωστενίτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην περίπτωση που η προσθήκη τέτοιων στοιχείων οδηγεί σε μετατόπιση του σημείου Ms. σε θερμοκρασίες μικρότερες αυτής του περιβάλλοντος σχηματίζεται, επίσης, σταθερός ωστενίτης, αλλά μετασταθούς κατάστασης.
- Φερριτικοί χάλυβες. Η προσθήκη α-φερρογόνων στοιχείων οδηγεί στην εξάλειψη της ωστενιτικής περιοχής του αντίστοιχου διαγράμματος ισορροπίας. Τόσο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όσο και σε υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζεται μόνο φερρίτης. Λόγω της μη ύπαρξης ωστενιτικής περιοχής, οι χάλυβες αυτοί δεν επιδέχονται βαφή.

2.2.2.2 Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες (*low carbon steels*)

Οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες περιέχουν μικρό ποσοστό σε άνθρακα (της τάξεως του 0,05-0,15% κατά βάρος) και είναι οι πιο συνηθισμένοι χάλυβες λόγω των αποδεκτών ιδιοτήτων τους για πολλές εφαρμογές. Οι χάλυβες που περιέχουν 0,16 - 0,29% άνθρακα δεν είναι ούτε εύθραυστοι ούτε όλκιμοι. Οι ήπιοι χάλυβες, γενικά, έχουν σχετικά μικρή αντοχή, είναι φθινοί, ελατοί και η επιφανειακή τους σκληρότητα μπορεί να αυξηθεί με ενανθράκωση ή ψυχρή διαμόρφωση (εργοσκλήρυνση). Οι εμβαπτότητά τους όμως είναι μικρή και σε περίπτωση βαφής ψύχονται σε νερό (ως το πιο δραστικό μέσο). Οι ήπιοι χάλυβες μπορούν να φτάνουν σε σκληρότητα μέχρι 60HRC αλλά είναι αρκετά εύθραυστοι έναντι άλλων χαλύβων.

Οι ήπιοι κρεατωμένοι χάλυβες χρησιμοποιούνται όταν απαιτούνται μεγάλες ποσότητες χάλυβα (για παράδειγμα δομικοί χάλυβες). Η πυκνότητα ενός τέτοιου χάλυβα είναι $7861,093\text{Kg/m}^3$ ($0,284\text{lb/in}^3$), το όριο διαρροής τους κυμαίνεται μεταξύ

400 και 650 MPa, η αντοχή σε εφελκυσμό μεταξύ 500 και 850 MPa, ενώ η επιμήκυνσή τους μέχρι τη θραύση είναι σημαντική, της τάξης του 14-27%.

Οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες αποκτούν υψηλές μηχανικές ιδιότητες με την προσθήκη κραματοποιητικών στοιχείων όπως το νικέλιο, το χρώμιο, το μολυβδαίνιο [8]. Για να θεωρείται ένας χάλυβας ελαφρά κραματωμένος η περιεκτικότητα στα κραματοποιητικά στοιχεία πρέπει να κυμαίνεται από 2 - 5%. Για πολλούς χάλυβες η αρχική λειτουργία των κραματοποιητικών στοιχείων είναι να αυξήσουν τη σκληρότητά τους, να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητές τους και την δυσθραυστότητα μετά τις θερμικές κατεργασίες. Η θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά είναι χαμηλή, λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων, γι' αυτό και η ικανότητα μορφοποίησής τους εν ψυχρώ είναι μικρή.

Οι πιο σύνηθες χρησιμοποιούμενοι ελαφρά κραματωμένοι εργαλειοχάλυβες αυτού του είδους είναι κατά AISI οι: 1115, 1118, 1120 και 1117.

2.2.2.3 Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες (*medium carbon steels*)

Οι μερικώς κραματωμένοι χάλυβες είναι παρόμοιοι με τους ελαφρά κραματωμένους εκτός απ το ότι τα επίπεδα του άνθρακα κυμαίνονται από 0,3 - 0,6% και το μαγγάνιο από 0,6% - 1,65%. Η αύξηση του άνθρακα κατά 0,5% και η συνοδευτική αύξηση του μαγγανίου, επιτρέπει στους μέσους ανθρακούχους χάλυβες να βάζονται και να επιβελτιώνονται πιο εύκολα. Οι μερικώς κραματωμένοι χάλυβες μπορεί να χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κιβωτίων ταχυτήτων, αξόνων, στροφαλοφόρων, συναρμογές και σφυρήλατων κομματιών.

2.2.2.4 Υψηλά κραματωμένοι χάλυβες (*High carbon steels*)

Οι υψηλά κραματωμένοι εργαλειοχάλυβες περιέχουν από 0,6-1% άνθρακα και το μαγγάνιο να κυμαίνεται από 0,3 – 0,9%. Οι υψηλά κραματωμένοι εργαλειοχάλυβες χρησιμοποιούνται όπου απαιτούνται υψηλές αντοχές, όπως για παράδειγμα για εργαλεία. Σε ακόμα μεγαλύτερα ποσοστά όπου η περιεκτικότητα σε άνθρακα κυμαίνεται από 1,0 -2,0%, οι χάλυβες θεωρούνται πολύ υψηλά κραματωμένοι (*Ultra-High carbon steels*), έχοντας τη δυνατότητα επιβελτίωσης για την επίτευξη της επιθυμητής σκληρότητας. Σε αυτό το επίπεδο, οι χάλυβες πλέον χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις όπως την κωνιομεταλλουργία (κυρίως με άνθρακα πάνω από 1,2%). Ακόμα, μπορούν να υποβληθούν σε θερμικές κατεργασίες και να παράγονται υλικά που να διαμορφώνονται εύκολα. Αν έχουν μεγάλη ποσότητα άνθρακα, το κράμα μπορεί να έχει μεγάλη αντοχή, αντίσταση στη φθορά και στην κρούση. Οι χάλυβες αυτοί είναι συνήθως επεξεργασμένοι με εν ψυχρώ κατεργασίες και χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του μετάλλου σε χαμηλές θερμοκρασίες.

2.2.3 Χάλυβες Κατασκευών

Κύριο χαρακτηριστικό των χάλυβων κατασκευών είναι το ότι χρησιμοποιούνται σε μεγάλο πλήθος και ήδη κατασκευών, όπως π.χ. λέβητες, μεταλλικοί σκελετοί, κ.λπ., αλλά και σε στοιχεία μηχανών, όπως άξονες, διωστήρες, βαλβίδες, ελατήρια, κ.λπ. Ως προς τη δομή τους, οι χάλυβες κατασκευών διακρίνονται σε: φερριτικούς, φερριτικούς/περλιτικούς, ωστενιτικούς και μαρτενσιτικούς. Ανάλογα με τα στοιχεία κραμάτωσης, οι ιδιότητες και οι βασικές χρήσεις των χάλυβων κατασκευών είναι οι εξής:

Νικελιούχος: Αντοχή σε κόπωση και διάβρωση. Ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές

Χρωμιούχος: Καλή εμβαπτότητα και αντοχή σε διάβρωση. Επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση.

Νικελιοχρωμιούχος: Καλή εμβαπτότητα και αντοχή σε διάβρωση. Επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση.

Μολυβδαινιούχος: Καλή εμβαπτότητα. Σκληρότητα, καλή αντίσταση σε φθορά και αντοχή σε ερπυσμό.

Νικελιοχρωμιομολυβδαινιούχος: Πολύ καλή εμβαπτότητα. Επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση.

Βολφραμιοχρωμιούχος: Πολύ καλή εμβαπτότητα. Μεγάλη σκληρότητα και αντοχή σε φθορά και τριβή.

Χρωμιοβαναδιούχος: Πολύ καλή εμβαπτότητα. Αύξηση αντοχής σε φθορά και τριβή.

Πυριτιούχος: Μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Χρησιμοποιείται για τη κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών.

Οι χάλυβες προκειμένου να πάρουν τη τελική τους μορφή, περνούν από στάδια μορφοποίησης είτε με διάφορες κατεργασίες διαμόρφωσης, είτε με απευθείας χύτευση σε κατάλληλα καλούπια. Οι κύριες ιδιότητες και συνεπώς οι χρήσεις αυτών των χάλυβων εξαρτώνται άμεσα από την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα. Μερικές εξ αυτών είναι οι εξής:

Για $C < 0.05\%$: Ο χάλυβας έχει μεγάλη πλαστικότητα και καλή κατεργασιμότητα. Προορίζεται συνήθως για ελάσματα, σωλήνες, ράβδους, σύρματα κ.α.

Για $C = \pm 0,15\%$: Ικανοποιητική αντοχή του χάλυβα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεταλλικές κατασκευές και διάφορα εξαρτήματα μηχανών.

Για $C < 0.30\%$: Ο χάλυβας έχει καλή συγκολλησιμότητα (χάλυβες συγκολλήσεων).

Για $C = 0.45\%$: Αρκετή σκληρότητα, έχει καλή αντοχή σε φθορά και ικανοποιητική κατεργασιμότητα.

Για $C < 0.60\%$: Μεγάλη σκληρότητα κυρίως μετά από βαφή και επαναφορά

Για $C = 0.50\%$: Ο Μεγάλη σκληρότητα ακόμα και χωρίς ιδιαίτερη ανάγκη θερμικής κατεργασίας. Χρησιμοποιείται συνήθως σε άξονες, γρανάζια κ.λπ.

Για $0,7\% < C$: Αρκετά υψηλή σκληρότητα και αντοχή σε φθορά. Είναι κατάλληλοι για μαρτενσιτική βαφή και προορίζονται για κοπτικά εργαλεία, μήτρες και άλλα είδη εργαλαιοχάλυβων.

Γενικά, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άνθρακα, η αντοχή των χαλύβων αυξάνεται, ενώ η ολκιμότητά τους ελαττώνεται. Η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα προκαλεί, επίσης, αύξηση της θερμοκρασίας μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά και μειώνει την συγκολλησιμότητα του χάλυβα. Οι υποευτηκοειδείς χάλυβες, με ποσοστό άνθρακα μικρότερο του 0,5%, χρησιμοποιούνται επίσης, ως χάλυβες χύτευσης διότι μετά την στερεοποίησή τους, παρουσιάζουν περλιτική δομή, στην οποία ο προευτηκοειδής φερρίτης έχει βελονοειδή μορφή, καθιστώντας τον χάλυβα εύθραυστο. Για τον λόγο αυτό, μετά την χύτευση είναι απαραίτητη η ανόπτηση για την εξομάλυνση του χάλυβα, προκειμένου να ληφθεί ομαλή κυτταροειδής μικρογραφική μορφή [23].

2.2.4 Ανοξειδωτοι Χάλυβες

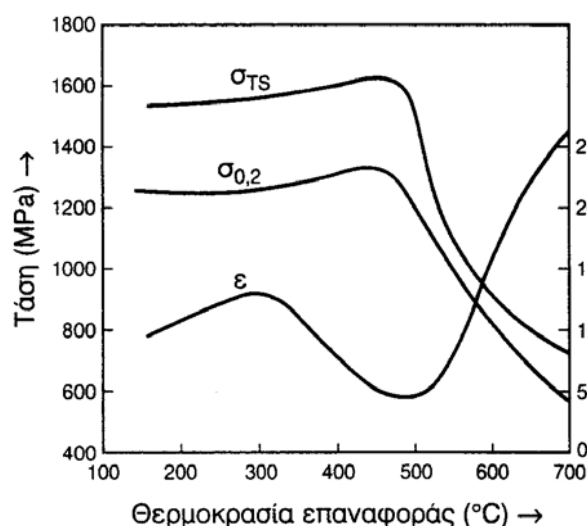
Οι ανοξειδωτοι χάλυβες φημίζονται για την εξαιρετική αντοχή τους στην οξείδωση και στη διάβρωση γενικότερα. Ανήκουν στους ισχυρά κραματωμένους χάλυβες και το χαρακτηριστικό στοιχείο κραμάτωσής τους είναι το χρώμιο (Cr), το οποίο συναντάται σε περιεκτικότητες άνω του 12% . Σε αυτήν την τόσο υψηλή περιεκτικότητά τους σε χρώμιο οφείλεται και η μεγάλη αντοχή τους σε διάβρωση, καθώς το Cr αντιδρά χημικά με το οξυγόνο του αέρα και δημιουργείται επιφανειακά το οξείδιο του χρωμίου, Cr₂O₃, που προστατεύει το μέταλλο βάσης από την οξείδωση. Το φαινόμενο αυτό προστασίας ονομάζεται **παθητικοποίηση**. Το θείο (S), ο φώσφορος (P) και το πυρίτιο (Pi) θεωρούνται ακαθαρσίες και πρέπει να βρίσκονται σε όσο το δυνατό μικρότερη περιεκτικότητα. Αποδεκτές τιμές των στοιχείων αυτών είναι για το θείο (S)<0,03%, το φώσφορο (P)<0,04% και το πυρίτιο (Pi)<1%. Τέλος, οι ανοξειδωτοι χάλυβες με μεγάλα ποσοστά σε χρώμιο ψαθυροποιούνται με παρατεταμένη θέρμανση κοντά στους 900°C, λόγω κατακρήμνισης της σ-φάσης (FeCr), η οποία είναι πολύ σκληρή και εύθραυστη [24]. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες διακρίνονται στις εξής βασικές κατηγορίες οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Βασικοί ανοξειδωτοι χάλυβες και κύριες χρήσεις, σελ. 44-45 [20].

Είδος	AISI	C	Cr	Ni	Mo	Al	Ιδιότητες-χρήσεις
Μαρτενσιτικοί	410	<0,15	12	-	-	-	Μεγάλη σκληρότητα. Κατασκευές εργαλείων, εξαρτημάτων αντλιών, ψαλιδιών, κ.λπ.
	420	>0,15	13	-	-	-	
Φερριτικοί	405	0-0,08	13	-	-	0,2	Πυρίμαχοι και οξύμαχοι χάλυβες με χρήσεις στη χημική βιομηχανία, τη βιομηχανία τροφίμων και στην αρχιτεκτονική.
	430	0-0,12	17	-	-	-	
Ωστενιτικοί	304	0-0,08	19	9	-	-	Χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία, τη βιομηχανία αυτοκινήτων και την αεροναυπηγική.
	316	0-0,08	17	12	2,5	-	
Σκλήρυνση με κατακρήμνιση	361 17- 17PH	0,09	17	7	-	1,2	Παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Χρησιμοποιούνται ως δομικά στοιχεία αεροσκαφών.

- Μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες:** Το χρώμιο, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, ανήκει στα α-φερρογόνα στοιχεία, που σημαίνει, ότι συμβάλει στη διεύρυνση της φερριτικής περιοχής. Ο μετασχηματισμός που πραγματοποιείται κατά τη θέρμανση, εξαρτάται από την περιεκτικότητα του χάλυβα σε χρώμιο, που στη προκειμένη περίπτωση δεν ξεπερνάει το 17%, ενώ ο άνθρακας δεν πρέπει να ξεπερνάει το 0,5-0,7% το πολύ. Μεγάλες περιεκτικότητες άνθρακα (κυρίως από 1% και πάνω) προκαλούν το σχηματισμό καρβιδίων, τα οποία δεσμεύουν το χρώμιο μειώνοντας το πλεονέκτημα που έχουν οι συγκεκριμένοι χάλυβες στην αντοχή σε διάβρωση.

Χαρακτηριστικό των ανοξείδωτων μαρτενσιτικών χάλυβων είναι ότι έχουν αρκετά ψηλή θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, η οποία συναντάται μεταξύ 950-1100 °C. Η βαφή, που θα τους δώσει τη μαρτενσιτική δομή, γίνεται είτε στον αέρα, είτε στο λάδι. Ακολουθεί η επαναφορά στο χάλυβα, η οποία ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις τελικές ιδιότητες που θα έχει το υλικό (Εικόνα 2.4). Η επαναφορά που συνήθως γίνεται στους 350-575 °C, αυξάνει την αντοχή του χάλυβα, γεγονός όμως που λειτουργεί εις βάρος της ολκιμότητας [25]. Αυτό οφείλεται στη δευτερογενή σκλήρυνση του χάλυβα λόγω έναρξης σχηματισμού του καρβιδίου $Cr_{23}C_6$, το οποίο αφενός μεν δεσμεύει χρώμιο, αφετέρου δε κατακρημνίζεται στα όρια των κόκκων, οδηγώντας, τελικά, στη μείωση της αντοχής του χάλυβα σε διάβρωση και την επιτάχυνση της περικρυσταλλικής του διάβρωσης.



Εικόνα 2.4: Καμπύλες μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων ανοξείδωτου μαρτενσιτικού χάλυβα (420), συναρτήσει της θερμοκρασίας επαναφοράς, μετά από ωστενιτοποίηση στους 1020°C και βαφή. εικόνα 15.4, σελ. 525 [25].

- Φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες:** Όταν η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι μικρή, περίπου μεταξύ 0,08 και 0,12%, ο χρωμιούχος χάλυβας έχει φερριτική δομή σε όλες τις θερμοκρασίες και δεν είναι δυνατό να υποστεί μαρτενσιτική βαφή, εξού και το όνομά του. Η περιεκτικότητα αυτών των χάλυβων σε χρώμιο είναι μεγάλη και κυμαίνεται από 12 έως 30% και έχουν κυβική χωροκεντρωμένη δομή, μέχρι τη θερμοκρασία τήξης τους. Το γεγονός αυτό προκαλεί την έλλειψη αλλοτροπικού μηχανισμού, που σημαίνει ότι ευνοείται η αύξηση του μεγέθους των κόκκων και κατ' επέκταση επιφέρει μείωση της μηχανικής αντοχής του υλικού. Επίσης, λόγω της μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα, υπάρχει περίπτωση να σχηματισθούν καρβίδια του χρωμίου, σε περιορισμένη όμως κλίμακα. Η φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες, όπως και οι μαρτενσιτικοί, είναι μαγνητικοί. Συγκρινόμενοι με τους μαρτενσιτικούς, οι φερριτικοί χάλυβες παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε διάβρωση, αλλά μικρότερη μηχανική αντοχή.

Ανάλογα με τη περιεκτικότητά τους κυρίως σε χρώμιο (Cr) και άνθρακα (C), οι ανοξειδωτοί φερριτικοί χάλυβες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Αυτούς που περιέχουν ~12% Cr και λιγότερο από 0,08% C.

Η προσθήκη Al ευνοεί τη σταθεροποίηση της φάσης του Φερρίτη (α -Fe), παρεμποδίζει το σχηματισμό ωστενίτη και αυξάνει τη συγκολλησιμότητά τους.

- Αυτούς που περιέχουν 17% Cr και 0,1% C.

Πρόκειται για τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους ανοξειδωτους φερριτικούς χάλυβες, είναι φθηνοί, αλλά δεν έχουν καλή συγκολλησιμότητά.

- Αυτούς που περιέχουν 20-30% Cr.

Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση, ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες. Η παρουσία Mo σε ποσοστό 2%, βελτιώνει την αντοχή σε διάβρωση, επιτρέποντας τη χρήση του χάλυβα στη θάλασσα ή σε όξινο περιβάλλον.

- **Ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες:** Χαρακτηριστικό αυτών των χαλύβων, είναι η εμφάνιση του ωστενίτη σε θερμοκρασίες χαμηλότερες ακόμα και αυτής του περιβάλλοντος. Αυτό οφείλεται στα στοιχεία που συνθέτουν τη χημική σύσταση του συγκεκριμένου χάλυβα, όπως νικέλιο (Ni), χρώμιο (Cr), και άνθρακα (C) και στις περιεκτικότητές τους, δίνοντάς του τη δομή κυβικού εδροκεντρωμένου σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες. Το πλεονέκτημα που έχουν αυτοί οι χάλυβες έναντι άλλων είναι η μεγάλη αντοχή σε οξείδωση και διάβρωση ακόμα και σε μεγάλες θερμοκρασίες (μέχρι και 900°C). Έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες και καλή κατεργασιμότητα. Άλλο ένα χαρακτηριστικό των ωστενικών χαλύβων είναι ότι δεν μαγνητίζονται. Οι χάλυβες αυτοί μπορούν να ενισχυθούν ακόμα περισσότερο με τη προσθήκη και άλλων στοιχείων, βελτιώνοντας τις ιδιότητές τους, (Πίνακας 2.3)

Πίνακας 2.3: Επίδραση κραματικών στοιχείων στους ανοξειδωτους ωστενιτικούς χάλυβες, σελ.8 [25].

Στοιχείο προσθήκης	Ποσοστό προσθήκης	Συνέπειες
Se	~0,15%	Βελτίωση κατεργασιμότητας.
S		Βελτίωση κατεργασιμότητας.
N	<0,20%	Αύξηση του σ_y χωρίς μείωση της ολκιμότητας.
Mo	2-4%	Αύξηση της αντοχής σε θαλάσσια διάβρωση.
Mn, Cr, Ni		Επιβράδυνση του μετασχηματισμού $\gamma \rightarrow \alpha$ λόγω διάχυσης. Ελάττωση σημείου M_s .
Ti, Nb		Επιβράδυνση της περικρυσταλλικής διάβρωσης. Σταθεροποίηση ωστενίτη

Στη σύγκριση μεταξύ των φερριτικών και ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων, οι φερριτικοί παρουσιάζουν υψηλότερο όριο διαρροής, αλλά μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό, μετά από ενδοτράχυνση.

Στους ανοξειδωτους ωστενιτικούς χάλυβες εμφανίζεται το φαινόμενο της **ευαισθητοποίησης** κατά τη θέρμανσή τους στους 600-870°C, συνθήκες που για παράδειγμα μπορεί να συναντήσουμε στη περίπτωση συγκολλήσεων. Τότε, κατακρημνίζονται (σχηματίζονται) καρβίδια του χρωμίου ($Cr_{23}C_6$ και Cr_7C_3) στα όρια των κόκκων του ωστενίτη. Η ζώνη γύρω από τα καρβίδια είναι ελαττωμένης περιεκτικότητας σε Cr και επομένως παρουσιάζει μειωμένη αντοχή σε διάβρωση.

Έτσι, παρουσία οξέων ή διαβρωτικού περιβάλλοντος γενικότερα, η ζώνη γύρω από τα καρβίδια ευαισθητοποιείται και διαβρώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό, με αποτέλεσμα τη χαλάρωση της συνάφειας των ορίων των κόκκων. Η χαρακτηριστική αυτή περίπτωση διάβρωσης ονομάζεται **περικρυσταλλική διάβρωση** και οδηγεί σε περικρυσταλλική

ψαθυρή θραύση του υλικού. Με αυτό το μηχανισμό εξηγείται και η φθορά και τελικά η αστοχία συγκολλήσεων ανοξειδωτων τεμαχίων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Ορισμένοι τρόποι πρόληψης της ευαισθητοποίησης είναι οι εξής:

- μείωση του ποσοστού του άνθρακα κάτω από 0.03%
- αύξηση του ποσοστού του χρωμίου πάνω από 16%
- προσθήκη Nb, Ti τα οποία είναι περισσότερο καρβιδιογόνα από το χρώμιο και έτσι ευνοείται ο σχηματισμός των καρβιδίων τους σε σχέση με τα καρβίδια του χρωμίου - θερμική κατεργασία με γρήγορη ψύξη για τη διαλυτοποίηση των καρβιδίων του χρωμίου (>900°C) και διατήρησή τους στο στερεό διάλυμα (ωστενίτη) μετά από την ψύξη.

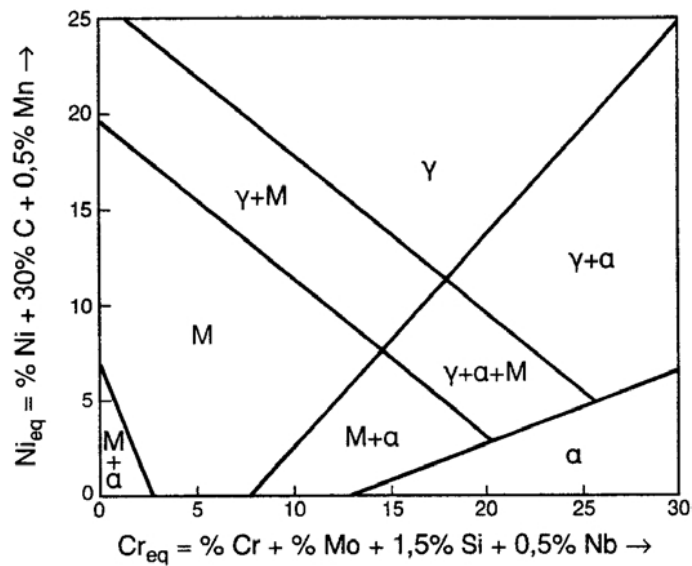
• **Ωστενιτοφερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες:** Είναι οι ανοξειδωτοι χάλυβες που παρουσιάζουν μικτή ωστενιτοφερριτική δομή. Προκύπτουν με την αύξηση της περιεκτικότητας του χάλυβα σε χρώμιο σε ποσοστά 18-28% και τη μείωση του ποσοστού του νικελίου στο 6-9%. Πρόκειται για χάλυβες που παρουσιάζουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα του υψηλού ορίου διαρροής ενός φερριτικού ανοξειδωτου χάλυβα, ενώ παράλληλα έχουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση όπως οι ωστενιτικοί και δεν είναι εύθραυστοι. Έχουν χαμηλή ευθραυστότητα, μεγάλη αντοχή σε κόπωση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Το σε ποια κατηγορία ανήκει ένας ανοξειδωτος χάλυβας μπορεί να προσδιοριστεί μέσω του διαγράμματος **Schaeffler** (Εικόνα 2.5). Το διάγραμμα αυτό έχει προκύψει πειραματικά με βάση το διαχωρισμό των κραματικών στοιχείων σε α- και γ-φερρογόνα. Έτσι είναι πλέον εφικτή με ακρίβεια η εύρεση των διαφορών φάσεων που συναντώνται στους ανοξειδωτους χάλυβες. Θεωρώντας το Ni ως τυπικό γ-φερρογόνο στοιχείο και το Cr ως τυπικό α-φερρογόνο και συγκρίνοντάς τα με άλλα στοιχεία τη δυνατότητα σχηματισμού ωστενίτη και φερρίτη, αντίστοιχα, βρέθηκε ένας εμπειρικός συντελεστής για κάθε στοιχείο, ώστε, τελικά, η χημική σύσταση να εκφράζεται με ισοδύναμες ποσότητες σε Cr και Ni σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb + \%Cb + 2\%W + 2,5\%Ti + 3\%Al$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn$$

Με την μέθοδο αυτή, έγινε δυνατή η γραφική απεικόνιση όλων των ανοξειδωτων χαλύβων τοποθετώντας στον οριζόντιο άξονα την ισοδύναμη περιεκτικότητα Cr και στον κατακόρυφο άξονα την ισοδύναμη περιεκτικότητα Ni. Έτσι, Όλοι οι ανοξειδωτοι χάλυβες απεικονίζονται ως σημεία και γίνονται διακριτές οι περιοχές του ωστενίτη (γ), του φερρίτη (α) και του μαρτενσίτη (M), καθώς και οι περιοχές όπου εμφανίζονται παραπάνω από μία φάσεις [24].

Το διάγραμμα αυτό δεν αποτελεί διάγραμμα ισορροπίας φάσεων, αλλά παριστά τις μικροδομές των ανοξειδωτων χαλύβων, μετά την απόψυξή τους.



Εικόνα 2.5: Schaeffler σελ.529 [24].

- **Ανοξειδωτοι χάλυβες με σκλήρυνση λόγω κατακρήμνισης:** Πρόκειται για χάλυβες μικρού ποσοστού σε άνθρακα C ~0,1%, χρώμιο Cr ~17%, νικέλιο Ni ~8% και Αλουμίνιο Al ~1%. Η σκλήρυνση των χάλυβων αυτών επιτυγχάνεται με μια σειρά θερμικών κατεργασιών κυρίως από μαρτενσιτικό μετασχηματισμό (βαφή) και κατακρήμνιση μεσομεταλλικών ενώσεων τύπου Ni₃Al, Ni₃Ti, Ni₃Nb.

2.3 Τυποποίηση χαλύβων

Ο λόγος που υπάρχουν συστήματα ονοματολογίας χαλύβων είναι να υπάρχει η δυνατότητα μίας διεθνούς συνεννόησης σε ό,τι αφορά τους χάλυβες. Τα χαρακτηριστικά που συνήθως εκφράζονται για τη κατηγοριοποίηση των χαλύβων στα διάφορα είδη τυποποιήσεων είναι η χημική σύσταση, η περιεκτικότητα δηλαδή του χάλυβα σε άνθρακα ή/και άλλων προσμίξεων και κραματοποιητικών στοιχείων. Υπάρχουν διάφορα συστήματα τυποποίησης όπως το γερμανικό DIN, το αμερικάνικο AISI-SAE, το γαλλικό AFNOR και το αγγλικό BS [24].

2.3.1 Τυποποίηση κατά DIN.

- Στη περίπτωση **κοινού ανθρακούχου χάλυβα**, η μορφή είναι StXX. Το πρόθεμα **St** από το γερμανικό Stahl που σημαίνει χάλυβας. Ο διψήφιος αριθμός που ακολουθεί εκφράζει την αντοχή σε εφελκυσμό σε kg/mm². Στη περίπτωση που ακολουθούν και άλλα δύο ψηφία, αυτά εκφράζουν τα τελευταία ψηφία από το συγκεκριμένο πρότυπο DIN που μελετάται. Τα τελευταία χρόνια τα δύο αυτά τελευταία ψηφία συνήθως παραλείπονται. Τέλος, υπάρχει περίπτωση μετά τον αριθμό που δηλώνει την αντοχή να ακολουθεί ένα ψηφίο που αφορά την ποιότητα (1: συνήθεις απαιτήσεις, 2: μεγαλύτερες απαιτήσεις, 3: ειδικές απαιτήσεις). Π.χ. ο χάλυβας St 4022-1 έχει αντοχή 400 N/mm² και ανήκει στην ποιότητα 1 και ικανοποιεί τις προδιαγραφές του DIN 1622.
- Στην περίπτωση **ανθρακούχων χαλύβων** καλύτερης ποιότητας ο συμβολισμός ξεκινά με το γράμμα **C** (συμβολίζοντας τον άνθρακα) και ακολουθεί η επί τοις εκατό περιεκτικότητα σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη με 100 (π.χ. C 60).

- Στην περίπτωση **χαλύβων με αρκετά χαμηλά ποσοστά ακαθαρσιών** σε θείο (S) και φώσφορο (P), μεταξύ του C και της περιεκτικότητας παρεμβάλλεται το γράμμα K (π.χ. CK 60).
- Όταν ο χάλυβας έχει υποστεί κάποια θερμική κατεργασία, προστίθενται γράμματα του λατινικού αλφαβήτου (E: για ενανθράκωση, G: για ανόπτηση, N: για εξομάλυνση και το V: για επιβελτίωση) Επίσης με GS συμβολίζονται οι χάλυβες χύτευσης (Π.χ. ο GS 45 είναι χυτοχάλυβας με αντοχή σε εφελκυσμό 45kg/mm^2 , ενώ ο GS C45 είναι κοινός χυτοχάλυβας με 0,45% C).
- Στην περίπτωση των **κραματωμένων χαλύβων** προηγείται η περιεκτικότητα του άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100 και ακολουθεί ο χημικός συμβολισμός για τα στοιχεία προσθήκης με τις ανάλογες περιεκτικότητες πολλαπλασιασμένες με κάποιο αριθμό.

2.3.2 Τυποποίηση κατά AISI – SAE.

Η τυποποίηση αυτή περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία ΧΨΖΩ. Τα δύο πρώτα, μέσω πινάκων, εκφράζουν το κύριο ή τα κύρια στοιχεία προσθήκης με τα ποσοστά τους στο χάλυβα. Τα δύο τελευταία ψηφία δείχνουν την περιεκτικότητα σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100.

Παρακάτω αναφέρονται μερικά παραδείγματα τυποποιημένων κατά AISI-SAE χαλύβων:

Ο χάλυβας AISI-1045 είναι κοινός ανθρακούχος με 0,45% C.

Ο χάλυβας AISI 1330 είναι χάλυβας με 1,60-1,90 % Mn και 0,30 % C.

Ο χάλυβας AISI-2340 είναι νικελιούχος με 3,5% Ni και 0,40% C.

Ο χάλυβας AISI-3430 είναι νικελιοχρωμιούχος με 3% Ni, 0,8% Cr και 0,30% C.

2.3.3 Τυποποίηση κατά AFNOR

Στο γαλλικό σύστημα AFNOR, **οι κοινοί χάλυβες** τυποποιούνται με τη μορφή Czz (zz η περιεκτικότητα σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100). Όταν, ακολουθεί κάποιο από τα γράμματα a, b ή m, σημαίνει ότι ικανοποιούν κάποιες προδιαγραφές περιεκτικότητας των ακαθαρσιών, οι οποίες δίνονται από πίνακα. (Π.χ. Ο χάλυβας C 40 e, είναι κοινός ανθρακούχος με 0,40% C, στον οποίο το ποσοστό των ακαθαρσιών S+P ισούται με 0,07%

Στους **ελαφρά κραματωμένους χάλυβες**, η τυποποίηση έχει τη μορφή zzK₁K₂K₃x₁x₂x₃ Όπου zz η περιεκτικότητα σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100, τα K₁, K₂, K₃ δείχνουν τα κύρια στοιχεία προσθήκης, ενώ τα x₁x₂x₃ τα αντίστοιχα ποσοστά τους στον χάλυβα πολλαπλασιασμένα επί 4 για περιεκτικότητες 1-3% και επί 10 για μικρότερες. (π.χ. ο χάλυβας 50CV4 είναι ελαφρά κραματωμένος, με άνθρακα 0,40%, χρώμιο $4/4=1\%$ και λίγο βανάδιο.

Οι **ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες**, δηλώνονται με το γράμμα Z, ενώ οι ποσότητες x₁, x₂, x₃... είναι διψήφια και δίνουν τις περιεκτικότητες των προσθηκών.

(Παράδειγμα, ο Z70WK1205 είναι ισχυρά κραματωμένος χάλυβας, με χημική σύσταση: 0,70% C, 12% W και 5% Co).

2.3.4 Τυποποίηση κατά BS.

Το αγγλικό σύστημα χρησιμοποιεί εξαψήφιους κωδικούς, καθένας από τους οποίους χωρίζεται σε τρία μέρη:

- α) Το πρώτο τριψήφιο μέρος του κωδικού αφορά τον τύπο του χάλυβα.
- β) Το δεύτερο μέρος είναι ένα γράμμα, που δίνει πληροφορίες για τον χάλυβα.
- γ) Το τρίτο διψήφιο μέρος του κωδικού δίνει το ποσοστό του χάλυβα σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένο επί 100.

2.4 Κατεργασίες χαλύβων με παραμόρφωση

Τα προϊόντα που παράγονται από κατεργασίες διαμόρφωσης, συνήθως, παράγονται κοντά στη τελική τους μορφή. Η τελική κατεργασία μπορεί να επιτευχθεί είτε με μεθόδους αφαίρεσης υλικού (π.χ. κάποιο είδος κοπής), είτε με προσθήκη του (π.χ. κοχλιοσυνδέσεις, συγκολλήσεις κ.α).

Κύριο χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι η **παραμόρφωση** στην οποία υπόκειται το υλικό κατά τη διαμόρφωση. Προκειμένου να μελετηθεί αυτή η διαδικασία, απαιτείται η ανάλυση των **τάσεων** και των **παραμορφώσεων** [26].

Η τάση, εκφράζεται ως διάνυσμα σε ένα σημείο μίας διατομής και έχει μέτρο ίσο με τη δύναμη προς την εφαρμοζόμενη επιφάνεια. Διακρίνεται σε **ορθή** και **διατμητική**. Η μέγιστη ορθή τάση αποτελεί κριτήριο ελέγχου κυρίως για τα ψαθυρά υλικά, διότι αυτά σπάνε κάθετα στη διεύθυνση της ορθής τάσης, ενώ η μέγιστη διατμητική τάση λαμβάνεται ως κριτήριο κυρίως στα όλκιμα υλικά που διαρρέουν πριν αστοχήσουν. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές τους, είναι καθοριστικές για την καταλληλότερη επιλογή του υλικού.

Παραμόρφωση είναι το σύνολο των μετατοπίσεων όλων των σημείων ενός σώματος, που οδηγούν στην αλλαγή της γεωμετρίας του. Εδώ διακρίνονται και μελετώνται οι ορθές παραμορφώσεις οι οποίες εκφράζουν την ανά μονάδα μήκους επιμήκυνση ή βράχυνση του σώματος αντίστοιχα. Επίσης, αντικείμενο μελέτης αποτελούν και οι διατμητικές παραμορφώσεις που συμβολίζονται εκφράζοντας τη στρέβλωση της γωνίας, που σχηματίζουν δύο αρχικά κάθετες μεταξύ τους ευθείες.

2.4.1 Ενδοτράχυνση

Η **ενδοτράχυνση** ή **εργοσκλήρυνση** είναι ένα χαρακτηριστικό φαινόμενο των υλικών, κατά το οποίο η συνεχής αύξηση της παραμόρφωσης απαιτεί ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση της τάσης [25]. Το υλικό, που παραμορφώνεται, αυξάνει την αντίστασή του σε κάθε προσπάθεια αύξησης του ποσού της παραμόρφωσης. Αυτό οφείλεται στο ότι οι υφιστάμενες καταπονήσεις δημιουργούν διαταραχές οι οποίες μεταφέρονται στο εσωτερικό του υλικού. Οι διαταραχές αυτές προκαλούν ολίσθηση σε διάφορα επίπεδα της κρυσταλλικής δομής του υλικού, διότι κατά τη φόρτιση τέμνονται μεταξύ τους και εμποδίζουν η μία την μετακίνηση της άλλης, με αποτέλεσμα τη συσσώρευσή τους κατά τόπους στη μάζα του υλικού.

Τα μέταλλα που έχουν υποστεί ενδοτράχυνση, μετά από εν ψυχρώ κατεργασία, παρουσιάζουν μεγαλύτερη σκληρότητα από την αρχική, αλλά μικρότερη πλαστικότητα και δυσθραυστότητα.

Όταν η ενδοτράχυνση χρησιμοποιείται ως μέθοδος σκλήρυνσης ενός υλικού (π.χ. διέλαση), η τάση διαρροής είναι πιθανό να πάρει μεγαλύτερες τιμές από τις αναμενόμενες, γεγονός που υπαγορεύει την ανάγκη ενδιάμεσης ανόπτησης.

2.4.2 Παραμόρφωση

Η παραμόρφωση γίνεται είτε εν ψυχρώ είτε εν θερμώ. Ο διαχωρισμός γίνεται σύμφωνα με τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η παραμόρφωση. Το κατώφλι που διαχωρίζει τα δύο αυτά είδη είναι η θερμοκρασία **ανακρυστάλλωσης**. Όταν λοιπόν οι παραμορφώσεις γίνονται πάνω από αυτήν την θερμοκρασία, τότε πρόκειται για διαδικασία **εν θερμώ** και όταν γίνονται κάτω από αυτήν **εν ψυχρώ**.

Πλεονεκτήματα εν θερμώ

- Όταν το υλικό είναι πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης δε σκληραίνει από την επίδραση του φορτίου.
- Στις υψηλές θερμοκρασίες, το όριο διαρροής του υλικού είναι μικρότερο, έτσι το υλικό μπορεί να παραμορφωθεί εντονότερα.
- Στην εν θερμώ διαμόρφωση απαιτείται λιγότερη δύναμη από ότι στην εν ψυχρώ.

Μειονεκτήματα εν θερμώ

- Ορισμένα υλικά παρουσιάζουν ευθραυστότητα στις υψηλές θερμοκρασίες, άρα σε αυτά δεν ενδείκνυται εν θερμώ κατεργασίες.
- Μειωμένη ακρίβεια στις διαστάσεις λόγω των διαστασιακών μεταβολών (διαστολής) που γίνονται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας.
- Η συγκράτηση του τεμαχίου που βρίσκεται στις υψηλές θερμοκρασίες είναι δυσκολότερη και απαιτεί ειδικό εξοπλισμό, αυξάνοντας το κόστος.

Πλεονεκτήματα εν ψυχρώ

- Η εν ψυχρώ παραμόρφωση αυξάνει την αντοχή και την επιφανειακή σκληρότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
- Η αποφυγή έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία βοηθάει στο να μην παρουσιάζονται οξειδία στην επιφάνεια του τεμαχίου, εξασφαλίζοντας καλύτερη ποιότητα επιφανείας.
- Η έλλειψη διαστασιακών μεταβολών, προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στις τελικές διαστάσεις.
- Ο χειρισμός και η συγκράτηση των τεμαχίων είναι πιο εύκολος.

Μειονεκτήματα εν ψυχρώ

- Το όριο διαρροής σε αυτές τις συνθήκες είναι μεγαλύτερο και απαιτεί περισσότερο φορτίο για να παραμορφωθεί.
- Όσο το υλικό παραμορφώνεται, αντιστέκεται στην περαιτέρω παραμόρφωσή του λόγω ενδοτράχυνσης.
- τα υλικά που είναι εύθραυστα δε μπορούν να διαμορφωθούν εν ψυχρώ.

3^ο Κεφάλαιο: Θραύση

3.1 Εισαγωγή

Η θραύση είναι ο διαχωρισμός ενός σώματος σε δύο ή περισσότερα τμήματα, ως επακόλουθο επιβαλλόμενων τάσεων [27]. Οι συνθήκες στις οποίες εφαρμόζονται αυτές οι τάσεις ποικίλουν ως προς το μέγεθος και το είδος των φορτίων (εφελκυστικές, θλιπτικές, στρεπτικές κλπ) που καταπονούν ένα σώμα και το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο. Πρόκειται, επίσης, για μια διαδικασία που περιγράφεται σύμφωνα με τον μηχανισμό έναρξής της ή/και με τον μηχανισμό επέκτασής της. Οι μηχανισμοί που εμφανίζονται στη έναρξη μιας θραύσης μπορεί να διαφέρουν από αυτούς που εμφανίζονται στη συνέχεια όταν αυτή επεκτείνεται. Για τον λόγο αυτό πρέπει να είναι σαφές το αν ο μηχανισμός θραύσης περιγράφει την έναρξη ή την εξέλιξη της ρηγμάτωσης, αλλιώς καθίσταται μερικές φορές δύσκολη κατηγοριοποίησή τους. Επίσης, είναι πιθανό η επέκταση μιας ρωγμής να είναι πολύτροπη με την πάροδο του χρόνου (π.χ. επέκταση ρωγμής λόγω κόπωσης ακολουθούμενη από υπερφόρτωση). Συνήθως, ο τύπος θραύσης εξαρτάται από τον μηχανισμό διάδοσης της ρωγμής.

Για να εντοπισθεί το είδος μίας θραύσης, υπάρχουν πολλές αναλυτικές διαδικασίες. Αυτό που παρατηρείται αρχικά είναι αν υπάρχει παραμόρφωση ή/και περεταίρω διαστασιακές μεταβολές στο υλικό που προφανώς επηρεάστηκαν από τη θραύση. Το να φέρουμε αρκετά κοντά τις επιφάνειες θραύσεις μπορεί να βοηθήσει στη λήψη κάποιων πληροφοριών, είναι όμως σημαντικό να αποφευχθεί η πλήρης ένωση των επιφανειών θραύσης προς αποφυγή καταστροφής μικροσκοπικών χαρακτηριστικών.

3.2 Τύποι θραύσης

Οι δύο βασικοί τύποι θραύσης που συναντάμε στα υλικά είναι δύο: *ο όλκιμός* και *ο ψαθυρός*. Η χρήση αυτών των όρων είναι σχετική και εξαρτάται από τις συνθήκες στις οποίες προκλήθηκε η θραύση και όχι μόνο από το αν το υλικό είναι όλκιμο ή ψαθυρό. Για παράδειγμα, μπορεί ένα όλκιμο υλικό, υπό κάποιες συνθήκες, να παρουσιάσει ψαθυρή θραύση. Υπάρχουν χάλυβες που κατά τη θραύση τους παρουσιάζουν χαρακτηριστικά όλκιμης θραύσης και στη πορεία μεταβαίνουν σε ψαθυρή θραύση [28]. Η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι ένας παράγοντας που ενισχύει αυτό το φαινόμενο, αλλά και γενικότερα η θερμοκρασία επηρεάζει την όλκιμότητα του υλικού.

3.2.1 Όλκιμη θραύση

Όλκιμη θραύση εμφανίζεται όταν ένα υλικό, υπό την επίδραση φορτίου, υπόκειται πλαστική παραμόρφωση. Χαρακτηριστικό γνώρισμα τέτοιων θραύσεων είναι μία προοδευτική μείωση του εμβαδού της επιφάνειας, δημιουργώντας μία στένωση (λαιμό). Σε δοκιμή εφελκυσμού, για παράδειγμα, εκτός από τη δημιουργία λαιμού εμφανίζεται μία ινώδης πτυχή και μία γεωμετρία “κούπας – κώνου” (Εικόνα 3.1).

Η διαδικασία της θραύσης ξεκινάει από το κέντρο του δοκιμίου με τη δημιουργία μικροκενών στα όρια των κόκκων ή από διεπαφές στα όρια μετάλλου βάσης και των εγκλεισμάτων. Όσο αυξάνεται η τάση που εφαρμόζεται, τα μικροκενά πολλαπλασιάζονται και ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας μία ρωγμή στο κέντρο του κομματιού. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στη ταχεία διάδοση της ρωγμής με διάτμηση του εναπομένοντα συνδέσμου της περιοχής του λαιμού, με γωνία 45° σε σχέση με την κατεύθυνση της φόρτισης.



Εικόνα 3.1: Θραύση κυπέλλου – κώνου [27].

Από μικροσκοπική άποψη, μία επιφάνεια θραύσης μελετάται συνήθως με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) στα πλαίσια μίας θραυστογραφικής εξέτασης. Ο λόγος που προτιμάται το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο είναι η υπεροχή που έχει στη διακριτική ικανότητα και το βάθος πεδίου έναντι του οπτικού μικροσκοπίου.

Τέλος, η όλκιμη θραύση έχει το πλεονέκτημα ότι λόγω της ύπαρξης πλαστικής παραμόρφωσης, “προειδοποιεί” την επερχόμενη θραύση, δίνοντας την δυνατότητα λήψης αποτρεπτικών μέσων.

3.2.2 Ψαθυρή θραύση

Η ψαθυρή θραύση εμφανίζεται με λίγη έως καθόλου πλαστική παραμόρφωση και συχνά σχετίζεται με υλικά υψηλής αντοχής, μικρής ολκιμότητας ή/και με υλικά που έχουν υποστεί μία διαδικασία η οποία εκτός των άλλων τα καθιστά ψαθυρά. Η ρωγμή που προκαλείται είναι κάθετη στη κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου, ενώ η θραύση που τελικά προκύπτει έχει σχετικά επίπεδη επιφάνεια (Εικόνα 3.2).

Εκτός από τις μηχανικές ιδιότητες, άλλοι παράγοντες που οδηγούν σε ψαθυρή συμπεριφορά είναι η θερμοκρασία, τα σημεία με αυξημένη συγκέντρωση τάσεων (high stress concentration) και ο ρυθμός φόρτισης.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες μειώνουν την ολκιμότητα ενός μετάλλου, ειδικά όσα έχουν κυβική χωροκεντρωμένη δομή. Τα σημεία που συγκεντρώνουν τάσεις ή/και έχουν μεγάλες διαστάσεις εισάγουν μία πιο πολύπλοκη κατάσταση τάσεων στους τρεις άξονες μέσα στο υλικό, αυξάνοντας τις πιθανότητες εμφάνισης ψαθυρής θραύσης. Ο υψηλός ρυθμός εφαρμοζόμενου φορτίου είναι πιθανόν να κάνει πιο δύσκολη την εμφάνιση πλαστικής παραμόρφωσης, γιατί οι διατμητικές διαδικασίες είναι ανάλογες του χρόνου, οδηγώντας σε ψαθυρή συμπεριφορά.



Εικόνα 3.2: Ψαθυρή θραύση [27].

Η διάδοση της ρωγμής από ψαθυρή θραύση μπορεί να γίνει διακρυσταλλικά ή περικρυσταλλικά. Στη πρώτη περίπτωση, η διαδικασία

της θραύσης προκύπτει με ρήγμα κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων. Στη δεύτερη περίπτωση, τα όρια των κόκκων αποτελούν αδύναμο κομμάτι για τη διάδοση της ρωγμής, γεγονός το οποίο μπορεί να προκύψει από μία μη πετυχημένη θερμική κατεργασία ή άλλους εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. περιβαλλοντολογικούς).

3.3 Θραύση από κόπωση

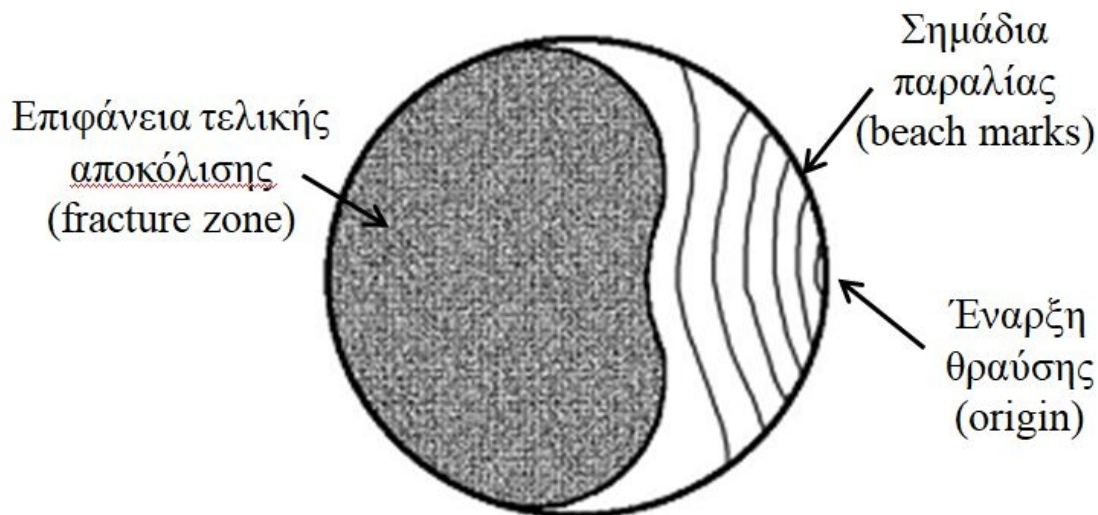
Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται από το ASTM E-1823 κόπωση είναι: "Η διαδικασία της προοδευτικής τοπικής μόνιμης δομικής αλλαγής που συμβαίνει σε ένα υλικό, που υπόκειται σε συνθήκες που παράγουν κυμαινόμενες τάσεις και παραμορφώσεις, σε κάποιο σημείο ή σημεία που μπορούν να καταλήξουν σε ρωγμές ή ολική θραύση, μετά από έναν επαρκή αριθμό διακυμάνσεων." [29]. Ένα υλικό που υπόκειται σε κόπωση μπορεί να σπάσει με εφαρμοζόμενες δυνάμεις πολύ μικρότερες απ' ό,τι θα χρειαζόταν το ίδιο υλικό κάτω από μονοτονικές συνθήκες φόρτισης.

Η έναρξη των ρωγμών κόπωσης γίνεται σε ελεύθερες επιφάνειες όπου δεν υπάρχει περιορισμός στη παραμόρφωση του υλικού. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, οι ρωγμές μπορεί να ξεκινήσουν από το εσωτερικό του υλικού όπου υπάρχουν διεπαφές (π.χ. μεταξύ ενός ενανθρακωμένου επιφανειακού στρώματος και του μετάλλου βάσης ή μεταξύ ενός εγκλείσματος και του μετάλλου βάσης ή από φυσαλίδες αερίου). Σε άλλες περιπτώσεις, εντοπίζονται επιφανειακές ρωγμές που δημιουργήθηκαν κάτω από την επιφάνεια όπου υπήρχαν μεγάλες θλιπτικές παραμένουσες τάσεις που εισήχθησαν από επιφανειακή έλαση ή από βολή της επιφάνειας με σωματίδια (shot peening).

Θραύση από κόπωση συναντάται σε υλικά τα οποία δέχονται κυκλική τάση. Στο φαινόμενο αυτό δημιουργείται αρχικά μία μικρή ρωγμή, η οποία με τη πάροδο του χρόνου μεγαλώνει και τελικά οδηγεί στη θραύση. Η αστοχία προκαλείται από μία κρίσιμη εντοπισμένη τιμή τάσης, η οποία όμως δεν μπορεί να προσδιοριστεί εκ των προτέρων, στο στάδιο της μελέτης και του σχεδιασμού.

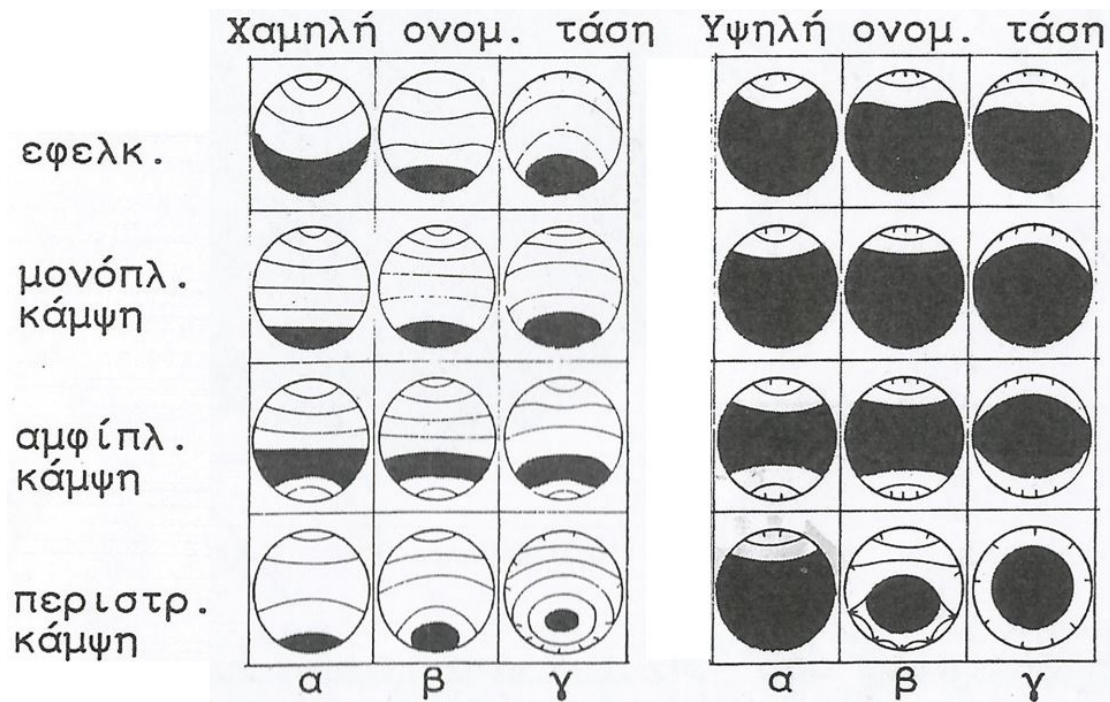
Χαρακτηριστικό αστοχίας από κόπωση είναι η εμφάνιση **σημαδιών παραλίας (beach marks)**. Από τα σημάδια αυτά μπορεί να προσδιοριστούν οι κύκλοι φόρτισης καθώς, το μέγεθος της εφαρμοζόμενης δύναμης μέχρι τη θραύση και οι διαδοχικές θέσεις του μετώπου των αναπτυσσόμενων ρωγμών. Στην εικόνα 3.3 δίνεται το σκαρίφημα μίας τυπικής θραύσης από κόπωση. Ξεκινώντας από την έναρξη της θραύσης (δεξιά), η θραύση "προχωράει" σταδιακά υπό την επήρεια του φορτίου, αφήνοντας τα λεγόμενα σημάδια παραλίας (βελάκι στην εικόνα 3.3). Στη συνέχεια, όσο πλησιάζει η τελική αποκόλληση η ταχύτητα εξέλιξης της θραύσης αυξάνεται λόγω της μείωσης της ενεργούς διατομής του υλικού.

Οι επιφάνειες θραύσης έχουν γενικά ομαλή υφή κοντά στο σημείο έναρξης και παρουσιάζουν γενικά μία αύξηση της τραχύτητας καθώς η ρωγμή εξελίσσεται. Η ολκιμότητα συνδέεται με τη θραύση από κόπωση και μπορεί να υπάρξουν στοιχεία ότι η ρωγμή έχει ακολουθήσει συγκεκριμένα κρυσταλλικά επίπεδα κατά τη διάρκεια της πρόωρης ανάπτυξης. Δυστυχώς όμως, πολλές θραύσεις από κόπωση δεν παρουσιάζουν τα κλασικά σημάδια προόδου.



Εικόνα 3.3: Στάδια εξέλιξης θραύσης από κόπωση [30].

Τα κυκλικά φορτία που προκαλούν την κόπωση ποικίλουν είτε ως προς το μέγεθός τους είτε και ως προς το είδος τους. Κάθε ένα από αυτά μπορεί να είναι ουσιαστικά κάτω από το όριο διαρροής του υλικού, υπάρχουν όμως πολλές μεταβλητές που επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους στη κόπωση. Το μέγεθος, η συχνότητα της εφαρμογής της κυμαινόμενης τάσης, η παρουσία μέσης τάσης, η θερμοκρασία, το περιβάλλον, το μέγεθος και η μορφή δειγμάτων, η κατάσταση της τάσης, η παρουσία παραμενουσών τάσεων, το φινίρισμα επιφάνειας, η μικροδομή και η παρουσία καταστροφής από φθορά δόνησης είναι μερικές από τις μεταβλητές αυτές. Αυτός ο κατάλογος δεν είναι περιεκτικός, και ένα πρόσθετο πρόβλημα είναι ότι μία μεταβλητή μπορεί να είναι σημαντικότερη όσον αφορά το ένα υλικό από ένα άλλο. Όσο αφορά τις τάσεις, ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνονται οι επιφάνειες θραύσης, είναι εφικτό να εντοπισθεί το μέγεθος (υψηλή ή χαμηλή ονομαστική τάση) και το είδος των φορτίων (εφελκυστικό, καμπτικό, στρεπτικό κλπ.). Για παράδειγμα, στην εικόνα 3.4 οι μαύρες περιοχές που συμβολίζουν την τελική αποκόλληση (θραύση), δείχνουν το πόσο μεγάλη ή μικρή είναι η εφαρμοζόμενη τάση. Όταν η επιφάνεια τελικής αποκόλλησης είναι μεγάλη (μεγάλη μαύρη περιοχή στην εικόνα 3.4) τότε πρόκειται για υψηλή εφαρμοζόμενη τάση που οδήγησε σε γρήγορη αποκόλληση με προφανώς λίγους κύκλους φόρτισης (ολιγοκυκλική κόπωση).



Εικόνα 3.4: Σχηματική παράσταση επιφανειών θραύσης από κόπωση (α): χωρίς συγκέντρωση τάσεων (no stress concentration), (β): μέτρια συγκέντρωση τάσεων (mild stress concentration) και (γ): υψηλή συγκέντρωση τάσεων (high stress concentration) [30].

3.4 Ανάλυση θραυστομηχανικής

Οι ιδιαίτερες περιπτώσεις θραύσεων έκαναν φανερή την ανάγκη για βαθύτερη διερεύνηση και κατανόηση των μηχανισμών θραύσης. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη του πεδίου της θραυστομηχανικής. Ο τομέας αυτός συμβάλει στην ποσοτικοποίηση των διάφορων παραγόντων που επηρεάζουν ένα υλικό μεταξύ των ιδιοτήτων τους, των τάσεών τους, τις ατέλειες από τη δημιουργία ρωγμών και τη διάδοσή τους.

Μία τέτοια μελέτη ξεκινάει μακροσκοπικά, καθώς οι πληροφορίες που μπορούν να ληφθούν από την εξέταση μιας επιφάνειας θραύσης σε μικρές μεγεθύνσεις είναι αρκετά εκτενείς. Ο τρόπος που διαμορφώνονται οι επιφάνειες θραύσης μπορούν να δώσουν ενδεικτικά την τάση που προκάλεσε την αστοχία. Σε μακροσκοπικό επίπεδο μπορεί να φανεί και η κατεύθυνση της αύξησης των ρωγμών και κατ' επέκταση η προέλευση της αστοχίας. Στις επίπεδες ψαθυρές θραύσεις, κυρίως, ο προσδιορισμός εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από την επιφάνεια θραύσης που εκθέτει σημάδια τύπου V (chevron marks). Τα σημάδια αυτά εμφανίζονται διότι, σχεδόν όλες οι ρωγμές επιταχύνονται σε ένα αρχικό στάδιο στην εξέλιξή τους και καθώς το μέτωπο ρωγμών επεκτείνεται, τα ίχνη αυτής της επιτάχυνσης σχηματίζουν τα "V" (chevron marks).

Αφού ληφθούν οι απαραίτητες πληροφορίες που είναι δυνατό μακροσκοπικά, **ακολουθεί η μικροσκοπική μελέτη** η οποία μπορεί να είναι είτε στο εύρος της οπτικής μικροσκοπίας είτε στην ηλεκτρονική. Η χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM) είναι αρκετά δημοφιλής στη θραυστογραφία. Το μεγάλο βάθος εστίασης σε συνδυασμό με τη δυνατότητα της μεταβαλλόμενης μεγέθυνσης πέρα από ένα μεγάλο

εύρος, η πολύ απλή μη καταστρεπτική προετοιμασία δειγμάτων με άμεσο έλεγχο και η τρισδιάστατη εμφάνιση των θραυστογραφιών SEM καθιστούν το (SEM) ένα αναπόσπαστο εργαλείο μελέτης και ειδικά την έρευνα θραύσης.

Η θραυστομηχανική μπορεί να προσφέρει πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες οι οποίες προκάλεσαν την αστοχία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιδείξει μέτρα τα οποία εμποδίζουν την επανεμφάνιση αστοχιών σε παρόμοια εξαρτήματα. Στα πλαίσια εξέλιξής της, η θραυστομηχανική αποτελεί μία μαθηματική ανάλυση των μηχανικών διεργασιών που οδηγούν στην αστοχία. Περιλαμβάνει επίσης, την διεργασία της ανάπτυξης ρωγμής από μηχανισμούς όπως η κόπωση και η διάβρωση υπό τάση, καθώς και το γεγονός της τελικής θραύσης από σχίσσιμο ή κυψελωτή θραύση. Η ανάλυση βασίζεται σε στερεότυπες διεργασίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται γενικά στην μηχανική των στερεών σωμάτων, όπως για παράδειγμα η θεωρία της ελαστικότητας.

Η θραυστομηχανική μελέτη που βασίζεται στη θεωρία της ελαστικότητας ονομάζεται γραμμική-ελαστική θραυστομηχανική (LEFM) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσο υπάρχει ένα περιορισμένο ποσό πλαστικής παραμόρφωσης στο μέτωπο ρωγμής. Όταν η πλαστική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη, τα σφάλματα λόγω ελαστικής συμπεριφοράς, αυξάνονται και κρίνονται ως μη αποδεκτά. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται η ελαστική-πλαστική θραυστομηχανική (EPFM) όπου εξακολουθεί να βασίζεται στις έννοιες της ελαστικότητας, αλλά υποθέτει ότι η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού είναι μη γραμμική. Για το λόγο αυτό ένας σωστότερος χαρακτηρισμός θα ήταν η μη γραμμική-ελαστική θραυστομηχανική (NLEFM).

Η θραυστομηχανική έχει διάφορες εφαρμογές στην ανάλυση αστοχίας, ξεκινώντας από τον υπολογισμό του μεγέθους μιας ρωγμής με τη είτε LEFM είτε EPFM. Ο έλεγχος της θραύσης μπορεί να ολοκληρωθεί μόνο όταν είναι συγχρόνως γνωστή η καμπύλη των εσωτερικών τάσεων και ο ρυθμός ανάπτυξης των ρωγμών. Επίσης, λαμβάνει χώρα η ποσοτική θραυστογραφία, η οποία μπορεί να παράσχει πληροφορίες για την χρονική στιγμή της αστοχίας αλλά και για τις εφαρμοζόμενες τάσεις. Σημαντικά επίσης στοιχεία αποτελούν το μέγεθος της τελικής ρωγμής και ο ρυθμός εξέλιξης του ρήγματος.

3.5 Μεταλλογραφική ανάλυση μικροδομής.

Η μεταλλογραφική εξέταση των στιλβωμένων και χημικά προσβεβλημένων δοκιμίων, με οπτική μικροσκοπία ή/και των ηλεκτρόνιο-οπτικών τεχνικών, είναι ένα άκρως σημαντικό μέρος της ανάλυσης μίας αστοχίας και πρέπει να πραγματοποιείται ως αυτοματοποιημένη διαδικασία.

Η μεταλλογραφική ανάλυση παρέχει στον μελετητή τη δομή του προς μελέτη υλικού, δίνοντάς του τη δυνατότητα να τη συγκρίνει με αυτή που πραγματικά θα έπρεπε να έχει σύμφωνα με τα πρότυπα, τις προδιαγραφές, τη βιβλιογραφία, ακόμα και με την εμπειρία. Μη αναμενόμενα πράγματα μπορεί να εντοπιστούν, ωστόσο μπορεί να μη συνδέονται με τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά που προδιάθεσαν την πρόωρη αστοχία. Το μικροσκόπιο παρέχει επίσης πληροφορίες σχετικά με τη μέθοδο κατασκευής του εξαρτήματος και το κατά πόσο πετυχημένη είναι μία θερμική

κατεργασία στην οποία μπορεί να έχει υποβληθεί το υλικό. Αν για παράδειγμα έχει τη δομή που αναμενόταν. Άλλα αποτελέσματα λειτουργίας που μπορούν να φανούν είναι, η διάβρωση, η οξειδωση και η εργοσκλήρυνση των επιφανειών. Επίσης, τα χαρακτηριστικά οποιωνδήποτε ρωγμών που μπορεί να είναι εμφανή, ιδιαίτερα ο τρόπος διάδοσής τους, μπορεί να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τους παράγοντες που είναι αρμόδιοι για την έναρξη και ανάπτυξή τους.

Επειδή σχεδόν κάθε αστοχία αποτελεί μεμονωμένο γεγονός μόνο γενικές κατευθυντήριες γραμμές μπορούν να δοθούν ως προς την καλύτερη λήψη των δειγμάτων κατά τη μικροσκοπική εξέταση. Παρόλα αυτά, στις περισσότερες μελέτες πρέπει να καθοριστεί εάν η δομή ενός δείγματος, που λαμβάνεται δίπλα από μια επιφάνεια θραύσης ή μια περιοχή στην οποία μια ατέλεια λειτουργίας έχει αναπτυχθεί, είναι αντιπροσωπευτική καθ' όλη την έκταση του εξαρτήματος. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο από την εξέταση των δειγμάτων που λαμβάνονται από άλλες θέσεις και γι' αυτό συνιστάται να υπάρχει ικανοποιητικά μεγάλος αριθμός δοκιμίων για την εξέταση.

Όταν εξετάζονται μικροσκοπικά οι ρωγμές, παρουσιάζονται συχνά πολύτιμες πληροφορίες από τη μελέτη δειγμάτων που περιλαμβάνουν τα ακραία σημεία των ρωγμών. Γενικά, τα μέρη των ρωγμών που είναι ορατά με γυμνό μάτι είναι αρκετά κομματιασμένα ή διαβρωμένα έτσι ώστε να αποκαλύψουν τις διαδρομές τους με βεβαιότητα στο μικροσκόπιο. Ωστόσο, στα άκρα τους, οι ρωγμές είναι λεπτότερες, και η εξέταση των δειγμάτων από αυτές τις περιοχές επιτρέπει τον προσδιορισμό των διαδρομών ως περικρυσταλλικών ή διακρυσταλλικών.

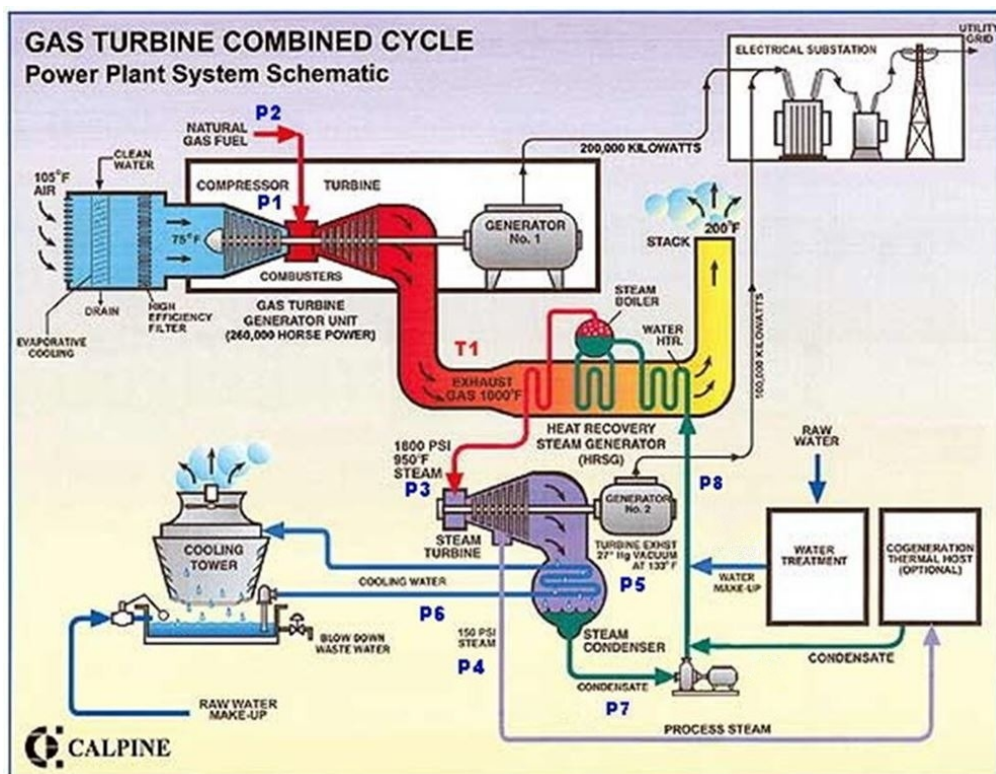
Στην έρευνα για τις θραύσεις λόγω κόπωσης, προτείνεται η λήψη δείγματος από την περιοχή όπου η θραύση δημιουργήθηκε για να εξακριβώσουμε εάν η αρχική ανάπτυξη συνδέεται με μία ανωμαλία (π.χ. ατέλεια συγκόλλησης, εξανθρακωμένη επιφάνεια, παρουσία εγκλεισμάτων κλπ). Όταν όμως υπάρχουν ρωγμές πολλαπλάσιας προέλευσης, μια τέτοια διαδικασία δεν είναι εφαρμόσιμη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι απίθανο οι ρωγμές να οφείλονται σε τοπικές ανομοιογένειες. Η πολλαπλάσια έναρξη ρωγμών από κόπωση είναι πολύ χαρακτηριστική της κόπωσης λόγω διάβρωσης και της κόπωσης λόγω φθοράς από δόνηση. Για τα σημάδια επιφάνειας, όπου η προέλευσή τους είναι αδύνατη να προσδιοριστεί με βεβαιότητα από τα εξωτερικά χαρακτηριστικά, μια μικροσκοπική εξέταση παρουσιάζει εάν εμφανίστηκαν κατά την κατεργασία ή προέκυψαν από ατέλειες πλινθωμάτων, όπως τα εξογκώματα ή οι επιφανειακές ατέλειες.

Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4^ο Κεφάλαιο: Συλλογή ιστορικών δεδομένων

Εταιρία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επιθυμεί να διατηρήσει την ανωνυμία της και για αυτό, στα πλαίσια της εργασίας, θα αναφέρεται ως “Εταιρία”. Πρόκειται για μονάδα συνδυασμένου κύκλου με εγκατεστημένη ισχύ περίπου 437 MW, το 75% της οποίας παράγεται από έναν αεριοστρόβιλο, ενώ το υπόλοιπο 25% από έναν ατμοστρόβιλο. Παρακάτω με τη βοήθεια της εικόνας 4.1 περιγράφεται εν συντομία, γενικά, η αρχή λειτουργίας μίας τέτοιας μονάδας [31].

Ο ατμοσφαιρικός αέρας αναρροφάται, συμπιέζεται (Σημείο P1 στην Εικόνα 4.1) και αναμειγνύεται με το καύσιμο (φυσικό αέριο) που εισέρχεται (Σημείο P2 στην Εικόνα 4.1) στον θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου. Εκεί το μείγμα φλέγεται, ενώ τα καυσαέρια που παράγονται εκτονώνονται στον στρόβιλο και οδηγούνται στον λέβητα (*steam boiler*) (Σημείο T1 στην Εικόνα 4.1). Διερχόμενα τα καυσαέρια από τον λέβητα, απάγεται μέρος της θερμότητάς τους για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού, ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτεί τον ατμοστρόβιλο (Σημείο P3 στην Εικόνα 4.1). Στην έξοδο του ατμοστροβίλου ο εκτονωμένος πλέον ατμός οδηγείται στο δοχείο συμπυκνωμάτων (*steam condenser*) (Σημείο P5 στην Εικόνα 4.1) όπου και συμπυκνώνεται με τη βοήθεια εναλλακτών και πύργου ψύξης (*cooling tower*) (Σημείο P6 στην Εικόνα 4.1). Το συμπύκνωμα επιστρέφει στον λέβητα, με τη βοήθεια αντλίας, κλείνοντας τον κύκλο (Σημεία P7&P8 στην Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Σκαρίφημα λειτουργίας μονάδας παραγωγής ρεύματος, συνδυασμένου κύκλου [31].

Ο πύργος ψύξης απορροφά ποσά θερμότητας από τον ατμό που εξέρχεται από τον ατμοστρόβιλο, συμβάλλοντας στη ψύξη του και κατ' επέκταση στην συμπύκνωσή του. Αυτό επιτυγχάνεται με την έκθεση του δικτύου του ατμού σε ένα ρεύμα αέρα περιβάλλοντος, σαφώς ψυχρότερο, δημιουργώντας φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας.

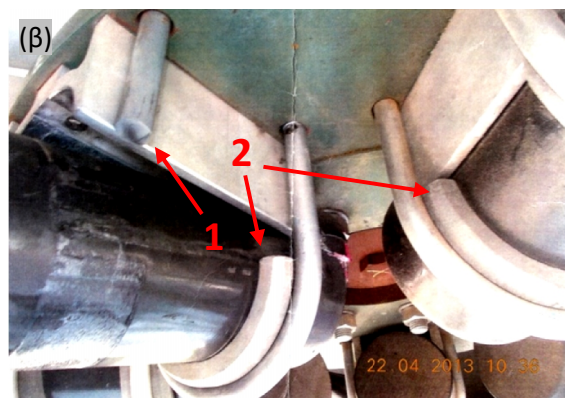
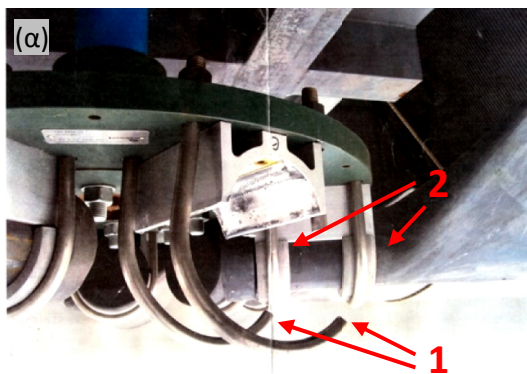
Στη συγκεκριμένη μονάδα ο πύργος ψύξης είναι μηχανικής κυκλοφορίας λόγω της χρήσης ανεμιστήρων. Υπάρχει μία συστοιχία είκοσι ανεμιστήρων αξονικής ροής σε διάταξη 4x5 (Εικόνα 4.2). Κάθε ανεμιστήρας διαθέτει επτά πτερύγια που καταλήγουν σε κυκλική διατομή, στο σημείο στήριξής τους πάνω στη πλήμνη (Εικόνα 4.3). Ως βάσεις στήριξης χρησιμοποιούνται δύο U-bolt σε απόσταση 110mm μεταξύ τους και το κάθε ένα έρχεται σε επαφή με το πτερύγιο μέσω ενός αλουμινένιου υποστηρίγματος (Σημείο 2, Εικόνα 4.4 α&β). Οι βάσεις στήριξης των ανεμιστήρων σπάνε επανειλημμένως (Σημείο 1 Εικόνα 4.4 α & β) με τυχαίο τρόπο, σε τυχαίους ανεμιστήρες του πύργου ψύξης. Δηλαδή ενώ εμφανίζεται θραύση σε διαφορετικούς, παρατηρούνται αστοχίες και σε βάσεις ανεμιστήρων που είχαν σπάσει πάλι στο παρελθόν και είχαν αντικατασταθεί. Οι διαρκώς επαναλαμβανόμενες αστοχίες, σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα αποτελούν παράγοντα αστάθειας στην ομαλή λειτουργία της μονάδας. Το αντικείμενο μελέτης της εργασίας είναι η διερεύνηση της αστοχίας των U-bolt ως βάσεις στήριξης.



Εικόνα 4.2: Γενική άποψη της διάταξης ανεμιστήρων πύργου ψύξης



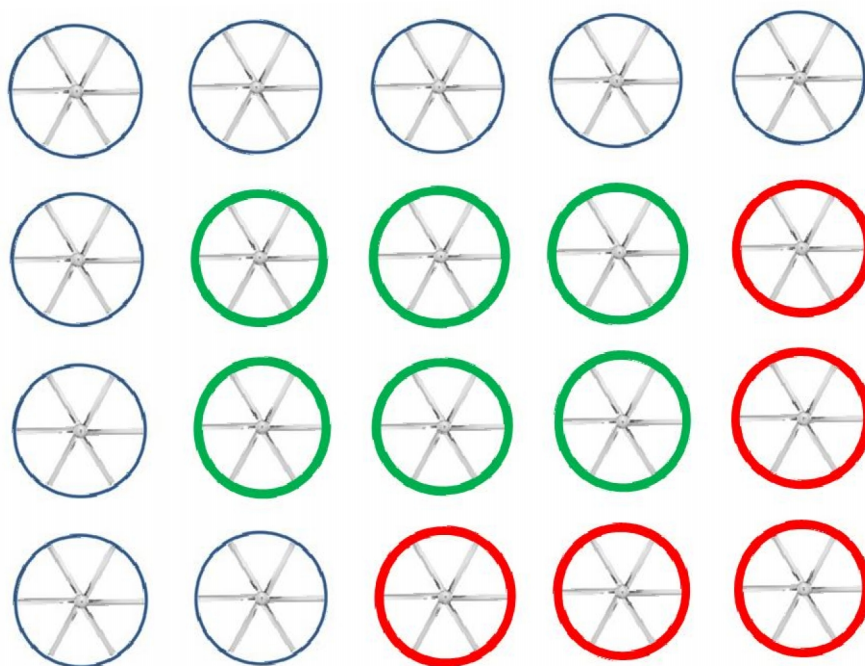
Εικόνα 4.3: Γενική άποψη ενός ανεμιστήρα



Εικόνα 4.4. (α) Γενική άποψη της σύνδεσης του πτερυγίου με τη πλήμνη, με τη χρήση u-bolt, (β) Λεπτομέρεια της σύνδεσης του u-bolt και του πτερυγίου με τη χρήση αλουμινένιου υποστηρίγματος

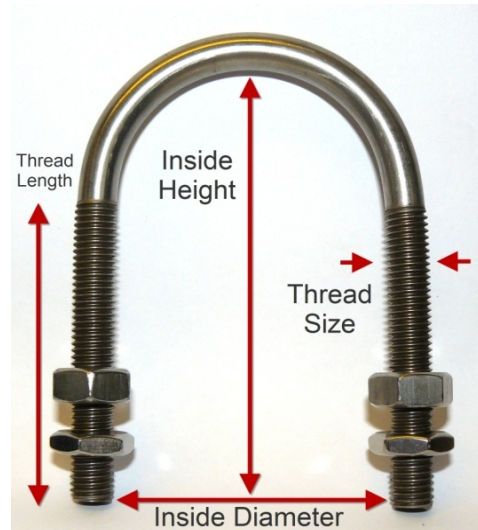
Κατά τη λειτουργία του πύργου ψύξης δουλεύουν όλοι οι ανεμιστήρες, ειδικά όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλή (π.χ. τους καλοκαιρινούς μήνες). Καθοριστική σημασία για τη λειτουργία της μονάδας έχουν οι έξι ανεμιστήρες που βρίσκονται στο κέντρο της συστοιχίας (Εικόνα 4.5). Κάποιος από τους περιφερικούς μπορεί να παραμείνει κλειστός εφόσον υπάρχει κάποιος λόγος (π.χ. βλάβη, συντήρηση κλπ.). Αυτό που έχει παρατηρηθεί είναι ότι οι γωνιακοί (νότιοι) ανεμιστήρες, που βρίσκονται από τη μεριά της θάλασσας και συνορεύουν με διπλανό διωλιστήριο έχουν το μεγαλύτερο πρόβλημα, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερες ρηγματώσεις και σε συχνότερο ρυθμό απ' ό,τι είχαν οι κεντρικοί οι οποίοι φαίνεται να είναι κατά τι πιο προστατευμένοι. Μία πιθανή εξήγηση που έχει δοθεί είναι λόγω ενός ιδιαίτερου μικροκλίματος που έχει η γύρω περιοχή, καθώς ο καπνός από τη καμινάδα του δίπλα εργοστάσιου έρχεται προς τον πύργο ψύξης, όπως και όλη η κάπνα από την αποθείωση του διωλιστηρίου. Έτσι δημιουργούνται στροβιλισμοί στον αέρα με αποτέλεσμα να προκαλούνται ταλαντώσεις στα πτερύγια. Αυτό αποτελεί πιθανή αιτία ρωγμών και σε επόμενο στάδιο θραύση.

Η διαδικασία της επισκευής ή της συντήρησης που γίνεται σε μηνιαία βάση περιλαμβάνει την εύρεση των ρωγμών και την παρακολούθησή τους για το αν υπάρχει περαιτέρω εξέλιξη της ρωγμής και στη συνέχεια γίνεται αντικατάσταση αν κριθεί απαραίτητο. Είναι σαφές ότι σε αυτή τη περίπτωση δίνεται ιδιαίτερη βάση στην πρόληψη (προληπτική αντικατάσταση) για λόγους ασφαλείας, χρειάζεται όμως παρακολούθηση ώστε να λαμβάνονται πληροφορίες και να καταγράφεται ανάλογο ιστορικό για τη διερεύνηση της υπόθεσης των θραύσεων.



Εικόνα 4.5: Σκαρίφηματική απεικόνιση της συστοιχίας των ανεμιστήρων του πύργου ψύξης: οι κεντρικοί ανεμιστήρες (πράσινο χρώμα) είναι οι σημαντικότεροι, οι περιφερειακοί (κόκκινο χρώμα) εμφανίζουν συχνότερα αστοχίες.

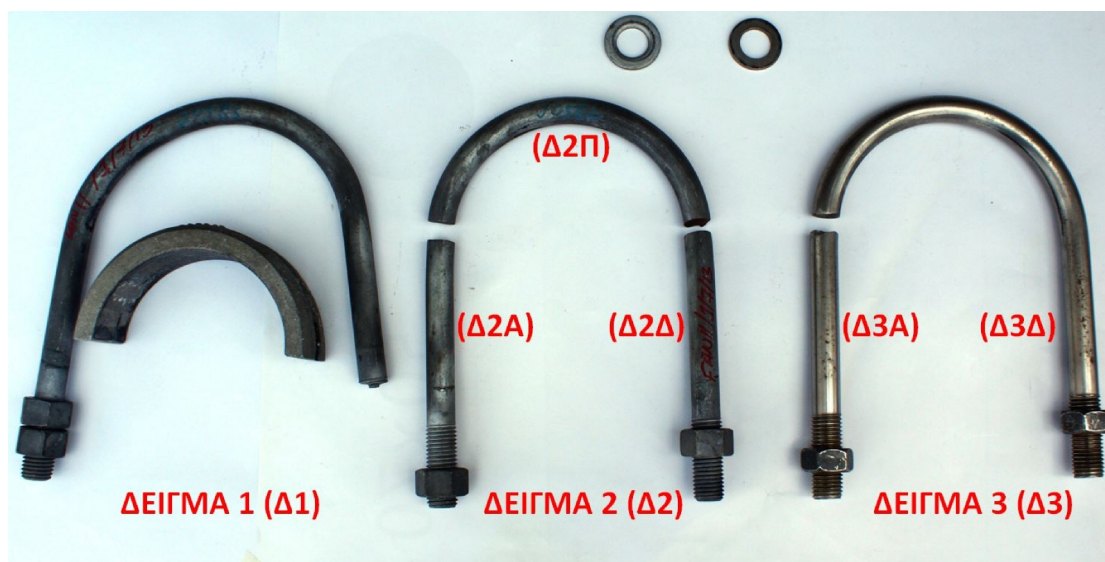
Για την κατασκευή των u-bolt, δεν υπάρχει καταγεγραμμένο ιστορικό όμως, βάση γενικών πληροφοριών, τα U-bolt κατασκευάζονται από ράβδους χάλυβα κυκλικής διατομής διαμέτρου 22mm (Ø22). Οι ράβδοι κόβονται αρχικά στον τόρνο, σε μπάρες μήκους περίπου 725mm. Στη συνέχεια η κάθε ράβδος διαμορφώνεται σε κουρμαδόρο με ράουλο διαμέτρου 180mm.. Εν συνεχεία, το εξάρτημα πλέον σε μορφή “U” τοποθετείται σε ειδική πρέσα διαμόρφωσης σπειρώματος όπου δημιουργούνται τα σπειρώματα στους δύο άξονες πρόσδεσης. Η “εν ψυχρώ” κατεργασία των υποστηριγμάτων προκαλεί συγκέντρωση τάσεων, τόσο στην περιοχή της ημικυκλικής διαμόρφωσης, όσο και στις εγκοπές των σπειρωμάτων [33]. Έχει αποδειχθεί ότι υψηλές παραμένουσες τάσεις επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του εξαρτήματος, μειώνοντας ειδικά την αντοχή του σε κόπωση και αυξάνοντας την ευαισθησία στην εργοδιάβρωση. Στην εικόνα 4.6 απεικονίζονται οι διαστάσεις με τις οποίες τυποποιούνται τα U-bolt.



Εικόνα 4.6 Γενική άποψη καινούργιου U-bolt [32].

5^ο Κεφάλαιο: Προκαταρκτική εξέταση

Για την ανάλυση αστοχίας ελήφθησαν τρία δείγματα (Εικόνα 5.1). Αμέσως μετά τη παραλαβή τους πραγματοποιήθηκε οπτική επιθεώρηση αρχικά με γυμνό μάτι. Τα δοκίμια εξετάστηκαν προσεκτικά και συλλέχτηκαν πληροφορίες σχετικά με τα γενικά τους χαρακτηριστικά. Τέτοιες πληροφορίες αφορούν κυρίως το σχήμα, το μέγεθος και γενικότερα τη γεωμετρία των εξαρτημάτων, την ποιότητα επιφάνειάς τους, τυχών παραμορφώσεις, την ύπαρξη ρωγμών και τυχών διάδοσή τους και γενικά οτιδήποτε φαινομενικά χρήζει ανάλυσης.



Εικόνα 5.1. Τα υπό εξέταση δείγματα.

Παράλληλα δημιουργήθηκε ένα φωτογραφικό αρχείο το οποίο αποτυπώνει τις σημαντικότερες παρατηρήσεις της έρευνας. Ένα πρωτογενές φωτογραφικό αρχείο δημιουργήθηκε σχεδόν αμέσως μετά τη παραλαβή των u-bolt με τη χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής Sony DSLR-A350X και κυρίως σε συνθήκες εξωτερικού χώρου χωρίς τεχνητό φωτισμό ενώ παράλληλα προσδιορίστηκαν οι διαστάσεις των εξαρτημάτων με παχύμετρο και συγκρίθηκαν με αυτές ενός καινούργιου. Εν συνεχεία, κυρίως οι επιφάνειες θραύσεις αλλά και άλλα τμήματα των υποστηριγμάτων εξετάστηκαν στο στερεοσκόπιο Dino - Lite Digital. Σε επόμενη φάση έγινε λήψη μίας νέας σειράς φωτογραφιών, όμοια με τη προηγούμενη, καθώς φωτογραφήθηκαν τα κομμάτια εκ νέου με τη φωτογραφική μηχανή και με ιδιαίτερη έμφαση ξανά στο στερεοσκόπιο, αφού πρώτα πέρασαν από καθαρισμό με αμμοβολή στην εταιρεία ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ-UDDEHOLM ΧΑΛΥΒΕΣ Α.Ε.Β.Ε στο μηχάνημα GUYSON (blast cleaning cabinet model 6SL S.N.:A17462) και άμμος GUYSON Grade 13 (Εικόνα 5.2). Χειριστής ήταν ο κ. Καλαντζής Κ.

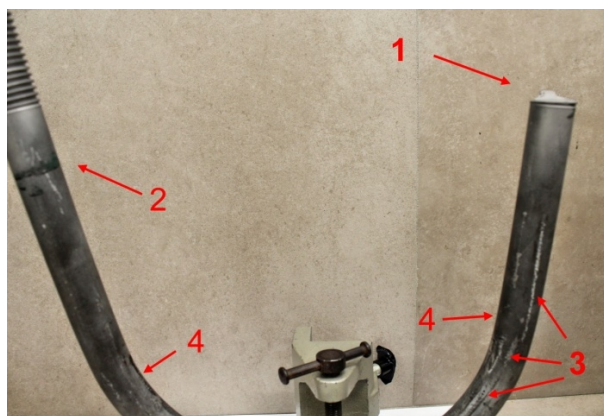


Εικόνα 5.2. Μηχάνημα αμμοβολής.

Οι πρώτες παρατηρήσεις που προκύπτουν από τον μακροσκοπικό έλεγχο είναι ότι τα τρία δείγματα που έχουμε έχουν σπάσει σε διαφορετικά σημεία το κάθε ένα. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.1, το πρώτο δείγμα έχει σπάσει χαμηλά στη βάση στην αρχή του σπειρώματος. Το δεύτερο δείγμα έχει σπάσει σε δύο σημεία που βρίσκονται στην αρχή της καμπύλης διαμόρφωσης και το τρίτο δείγμα έχει σπάσει σε ένα σημείο στην αρχή της καμπύλης διαμόρφωσης.

Ορισμένα απ' τα σημεία που χρίζουν μελέτης και αφορούν όλα τα δείγματα είναι η περιοχή της διαμόρφωσης της καμπύλης του U-bolt και ο τρόπος με τον οποίο έχει πραγματοποιηθεί, καθώς επίσης και ο τρόπος που έχει γίνει το σπείρωμα κυρίως στη περίπτωση του πρώτου δείγματος όπου και έγινε η αστοχία.

5.1. Οπτική επισκόπηση του δείγματος 1 (Δ1)



Εικόνα 5.3. Δείγμα 1 (Δ1)



Εικόνα 5.4. Αλουμινένιο υποστήριγμα

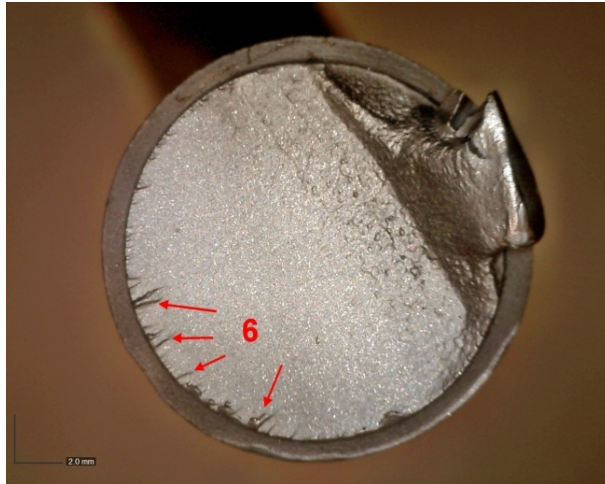


Εικόνα 5.5. Σπείρωμα δείγματος 1

Το πρώτο δείγμα έχει αστοχήσει χαμηλά στη βάση και την αρχή του σπειρώματος στο επίπεδο επαφής με την πλήμνη του ανεμιστήρα (Σημείο 1 στην Εικόνα 5.3). Η πλαστική παραμόρφωση που υπέστη είναι διακριτή και με γυμνό μάτι. Παρατηρείται ότι η επιφάνειά είναι μηχανουργικά ακατέργαστη, και φέρει δύο διαφορετικά ίχνη τριβής. Το πρώτο εμφανίζει πράσινο ίχνος (Σημείο 2 στην Εικόνα 5.3) το οποίο είναι αποτύπωμα από το χρώμα της πλήμνης του ανεμιστήρα (Εικόνα 4.4). Στο δεύτερο παρατηρούνται ίχνη μεταλλικού (ανοιχτού) χρώματος που ενδεχομένως οφείλονται στην διαμόρφωση της καμπύλης (Σημείο 3 στην Εικόνα 5.3). Στα Σημεία 4 της εικόνας 5.3 παρατηρούνται ίχνη από σκούρο (μαύρο) χρώμα. Αυτά οφείλονται στην τριβή του U-bolt με το αλουμινένιο υποστήριγμα, δεδομένου ότι το αλουμινένιο υποστήριγμα με το οποίο έρχεται σε επαφή φέρει παρόμοια ίχνη (Σημείο 5 στην Εικόνα 5.4).

Σαν συμπέρασμα προκύπτει ότι η διαμόρφωση της καμπύλης έχει γίνει εν ψυχρώ, λόγω έλλειψης χρωματισμού του υλικού απ' τη θερμοκρασία, αλλά και λόγω των προαναφερθέντων σημαδιών.

Λόγω έλλειψης κάποιου επίσημου ιστορικού κατασκευής του u-bolt, θα χρειαστεί διερεύνηση για αυτά τα συμπεράσματα που προέκυψαν.



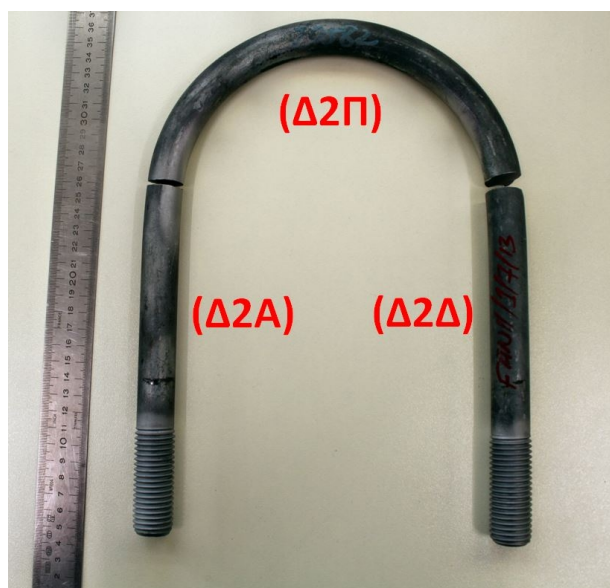
Εικόνα 5.6. Επιφάνεια θραύσης του δείγματος I από στερεοσκόπιο (Mx20)

που είναι χαρακτηριστικές για θραύση από κόπωση (Εικόνα 5.6). Απουσιάζουν τα σημάδια παραλίας (*beach marks*) δηλώνοντας ολιγοκυκλική κόπωση. Η θραύση ξεκίνησε από την περιφερειακή εγκοπή μίας εκ των σπειρών με χαρακτηριστικά “*Ratchet marks*” (Σημεία 6 στην Εικόνα 5.6), τα οποία εμφανίζονται στα σημεία εφαρμογής των αναπτυσσόμενων δυνάμεων και είναι ενδεικτικά όταν υπάρχει υψηλή συγκέντρωση τάσεων (*high stress concentration*). Στην συνέχεια, η θραύση εξελίχθηκε προς το εσωτερικό δημιουργώντας μια ενδιάμεση επιφάνεια. Αρχικά αναπτύχθηκε αργά αφήνοντας μια λεία επιφάνεια και όσο η ενεργός διατομή μειωνόταν, η ταχύτητα διάδοσης αυξήθηκε, δημιουργώντας μια περιοχή με προοδευτικά αυξανόμενη τραχύτητα. Στο τέλος μια μικρή, σε σχέση με τη διατομή, περιοχή αποκολλήθηκε βίαια, δηλώνοντας φόρτιση χαμηλής ονομαστικής τάσης (*low nominal stress*). Τέλος, η επιφάνεια τελικής αποκόλλησης (*overload zone*) βρίσκεται ακριβώς απέναντι από το μέτωπο έναρξης της θραύσης, γεγονός που δείχνει ότι δεν υπάρχει στρεπτικό φορτίο ή αν υπάρχει δεν έλαβε μέρος στη θραύση. Πρόκειται για χαρακτηριστική θραύση ενός άξονα με σπείρωμα, από χαμηλή εφελκυστική καταπόνηση [34].

Μία άλλη παρατήρηση που προέκυψε κατά την οπτική επισκόπηση είναι ότι η επιφάνεια θραύσης ακολουθεί την πορεία μιας σπείρας στο σύνολο της περιφέρειάς της. Όμως η ύπαρξη σπειρώματος δημιουργεί εγκοπή τύπου “v” που αποτελεί σημείο υψηλής συγκέντρωσης τάσεων (*high stress concentration*) (Εικόνα 5.5) [30]. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπ’ όψιν κατά τον σχεδιασμό εξαρτήματος με τον ανάλογο συντελεστή εγκοπής.

Η επιφάνεια θραύσης του (Δ1) εμφανίζει τρεις διακριτές περιοχές,

5.2. Οπτική επισκόπηση του δείγματος 2 ($\Delta 2$)



Εικόνα 5.7. Δείγμα 2 ($\Delta 2$)

Το δεύτερο δείγμα έσπασε σε δύο αντικριστά σημεία στην αρχή της καμπύλης διαμόρφωσης (Εικόνα 5.7). Κατασκευαστικά, παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με το πρώτο, καθώς επίσης παρατηρείται ότι και τα δύο U-bolt φέρουν χαραγμένο το ίδιο υλικό κατασκευής: 42CrMo4 (Εικόνα 5.9). Αν και το δείγμα 2 δεν παρουσιάζει τόσο έντονη πλαστική παραμόρφωση, όπως το δείγμα 1, έχει και αυτό ακατέργαστη μηχανουργικά επιφάνεια και την ίδια όψη (χρώμα, λάμψη). Φέρει επίσης εκδορές στην επιφάνεια που οφείλονται στην τριβή είτε με το υποστήριγμα, είτε με την πλήμνη του ανεμιστήρα. Ίχνη μεταλλικού

χρώματος και απουσία τοπικού χαρακτηριστικού χρωματισμού στην καμπύλη, αποδεικνύουν ότι μετά την μορφοποίηση οι βάσεις δεν έχουν υποβληθεί σε αποτατική ανόπτηση.

Οι επιφάνειες θραύσης παρουσιάζουν ομοιότητες με το πρώτο δείγμα. Η θραύση στο ($\Delta 2A$) ξεκίνησε από την αριστερή πλευρά ακριβώς στη διεπιφάνεια μεταξύ του εξαρτήματος και του αλουμινένιου υποστηρίγματος. Από ένα χαρακτηριστικό σημείο “V” αναπτύχθηκαν “chevron marks”, (Εικόνα 5.10 α&β). Στην συνέχεια η θραύση εξελίχθηκε προοδευτικά προς τα δεξιά, αυξάνοντας σταδιακά την τραχύτητα της επιφάνειας. Η έκταση της επιφάνειας τελικής αποκόλλησης είναι μικρή που είναι χαρακτηριστικό χαμηλής ονομαστικής τάσης. Το στήριγμα συγκράτησε τις επιφάνειες θραύσης υποβάλλοντας στην συνέχεια την βάση σε στρεπτική καταπόνηση. Κατά συνέπεια δημιουργήθηκε μια ρωγμή στο ίδιο μέτωπο στην δεξιά πλευρά (Εικόνα 5.10β). Η ρωγμή αναπτύχθηκε ραγδαία και κατέληξε σε βίαια αποκόλληση. Τέλος, παρατηρείται και εδώ ότι η έναρξη θραύσης και η περιοχή αποκόλλησης βρίσκονται απολύτως αντιδιαμετρικά επί της κυκλικής διατομής γεγονός που δείχνει την απουσία στρέψης ως κύρια δύναμη φόρτισης. Λαμβάνοντας υπ’ όψιν όλα τα παραπάνω και σε συνδυασμό με τη μορφολογία της επιφάνειας θραύσης, συμπεραίνεται ότι οι κύριες δυνάμεις που συνετέλεσαν στην αστοχία ήταν εφελκυστικές με μικρή συγκέντρωση τάσεων (low stress concentration) [30].

Η δεύτερη επιφάνεια θραύσης ($\Delta 2\Delta$) παρατηρήθηκε και αυτή υψομετρικά περίπου στην ίδια περιοχή με τη προηγούμενη θραύση. Χαρακτηριστικό αυτής της θραύσης είναι η ύπαρξη σχετικής γωνίας μεταξύ του σημείου έναρξης θραύσης και της περιοχής τελικής αποκόλλησης, γεγονός το οποίο αποδεικνύει την ύπαρξη στρεπτικών δυνάμεων (Εικόνα 5.8).

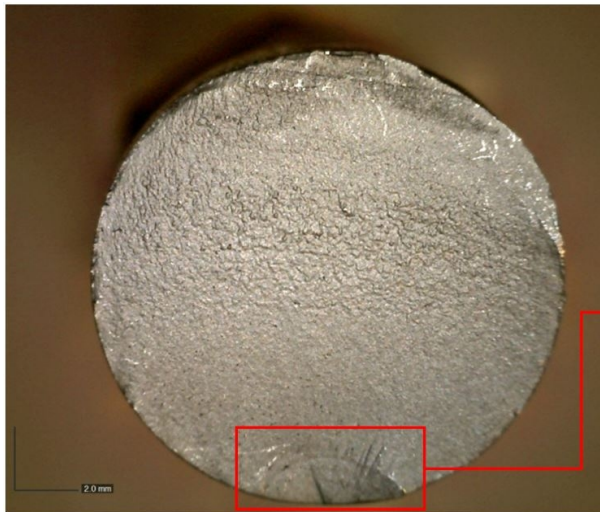
Τέλος, αυτό που παρατηρείται είναι ότι το ($\Delta 2A$) έχει αρκετά λεία επιφάνεια θραύσης, που συνεπάγεται και μια πιο προοδευτική καταπόνηση μέχρι τη τελική θραύση. Αντιθέτως το ($\Delta 2\Delta$) εξελίχθηκε σε αισθητά πιο σύντομο χρονικό διάστημα, παρουσιάζοντας πιο απότομη θραύση. Από αυτό προκύπτει το συμπέρασμα ότι η θραύση από τη μεριά του ($\Delta 2A$) να προηγήθηκε χρονικά και στη συνέχεια παρέσυρε σε θραύση και το ($\Delta 2\Delta$).



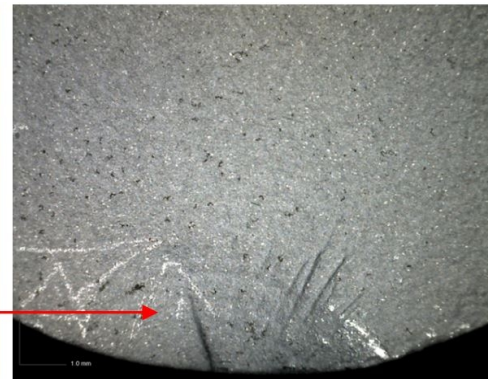
Εικόνα 5.8. Δείγμα 2 (Δ2Δ)



Εικόνα 5.9. Αναφορά τυπικής χημικής σύστασης πάνω στο δείγμα



Εικόνα 5.10. (α) Δείγμα 2 (Δ2A)



Εικόνα 5.10. (β) Λεπτομέρεια Chevron Marks στο (Δ2A) σε μεγέθυνση

Παρακάτω στην εικόνα 5.11 (α) και (β) παρατηρούμε τα δοκίμια (Δ2A) και (Δ2Δ) πως ήταν πριν την αμμοβολή.



*Εικόνα 5.11.(α) Δείγμα 2 (Δ2Α) πριν την αμμοβολή,
(β) Δείγμα 2 (Δ2Δ) πριν την αμμοβολή*

5.3. Οπτική επισκόπηση του δείγματος 3 (Δ3)



Εικόνα 5.12. Δείγμα 3 (Δ3)



Εικόνα 5.13. Το U-bolt (Δ3) σε εφαρμογή με το αλουμινένιο υποστήριγμα



Εικόνα 5.14. Δείγμα 3

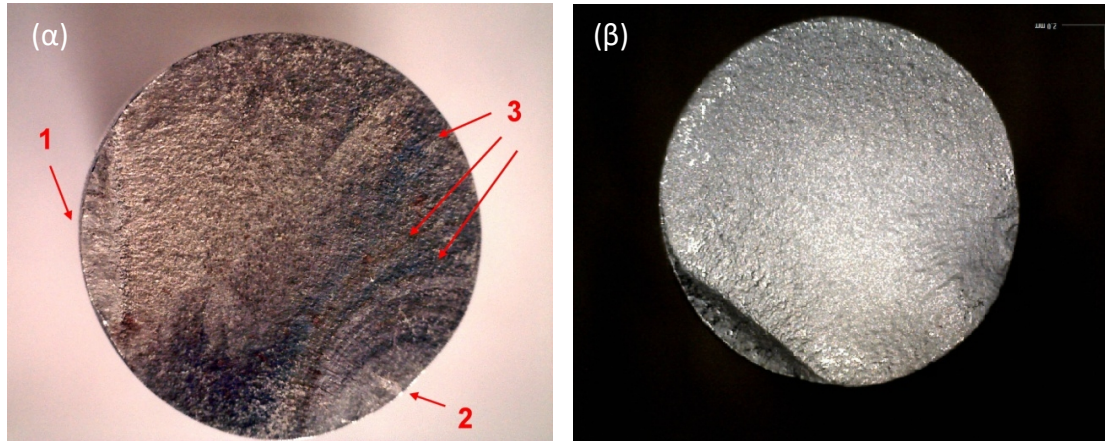
Το δείγμα 3 (Δ3) (Εικόνα 5.12) διαθέτει έντονο μεταλλικό χρώμα, που διαφέρει από τα άλλα δύο. Καθ' όμοιο τρόπο όμως με τα άλλα u-bolt έχει ακατέργαστη μηχανουργικά επιφάνεια, δεν φέρει όμως τα ίχνη και τις εκδορές που είχαν τα άλλα u-bolt. Δεν έχει διακριτή παραμένουσα παραμόρφωση και έχει μία μόνο επιφάνεια θραύσης στην αρχή της καμπύλης διαμόρφωσης η οποία, επιπλέον, συμπίπτει με το ύψος του αλουμινένιου υποστηρίγματος (Εικόνα 5.13).

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην αρχή της θραύσης υπάρχει χρωματισμός του υλικού, πράγμα που υποδηλώνει αύξηση θερμοκρασίας. (Σημείο 3 στην Εικόνα 5.15α). Κατά τη φωτογράφιση ήταν δύσκολο να αποτυπωθούν κάποια στοιχεία διότι το υλικό γυάλιζε και λαμβάναμε λιγότερες πληροφορίες (Εικόνα 5.14). Για τον λόγο αυτό η επιφάνεια θραύσης αμμοβολήθηκε (Εικόνα 5.15β), ώστε να φανεί κάτι που προηγουμένως ίσως ήταν αδύνατο. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι η αμμοβολή κάλυψε τα σημάδια χρωματισμού που αναφέραμε προηγουμένως.

Τέλος, παρατηρείται ότι η έναρξη της θραύσης και η τελική αποκόλληση δεν βρίσκονται στην ίδια ευθεία (Σημείο 2 (έναρξη), σημείο 1 (αποκόλληση) στην Εικόνα 5.15α). Η έκταση τελικής αποκόλλησης είναι μικρή γεγονός που δείχνει χαμηλή ονομαστική τάση. Ωστόσο, η απουσία μετώπου εξέλιξης θραύσης δίνει ως συμπέρασμα ότι πρόκειται για μία σχετικά υψηλού ρυθμού εξέλιξη θραύσης. Η γωνία μεταξύ του σημείου έναρξης θραύσης και της περιοχής τελικής αποκόλλησης και

μάλιστα αισθητά μεγαλύτερη συγκριτικά με τα άλλα δείγματα που έχουμε. Άρα, τα στρεπτικά φορτία σε αυτή τη περίπτωση είχαν μεγαλύτερη επίδραση.

Το γεγονός της ύπαρξης μη επίπεδης θραύσης είναι ενδεικτικό όλκιμου υλικού. Στη προκειμένη περίπτωση συνδυάζεται με μία πλαστική παραμόρφωση στην εξωτερική πλευρά της διατομής.



Εικόνα 5.15 (α) Δείγμα 3 (Δ3) επιφάνεια θραύσης πριν την αμμοβολή,
(β) Επιφάνεια θραύσης μετά την αμμοβολή

6^ο Κεφάλαιο: Καταστρεπτικές δοκιμές

Τα τρία δείγματα τεμαχίστηκαν δημιουργώντας επιμέρους δοκίμια. Το καθένα από αυτά προορίζεται για περαιτέρω έλεγχο και δοκιμές.

Ο έλεγχος περιλαμβάνει:

- Χημική ανάλυση
- Μέτρηση σκληρότητας
- Δοκιμή εφελκυσμού
- Μεταλλογραφική ανάλυση δομής με οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία

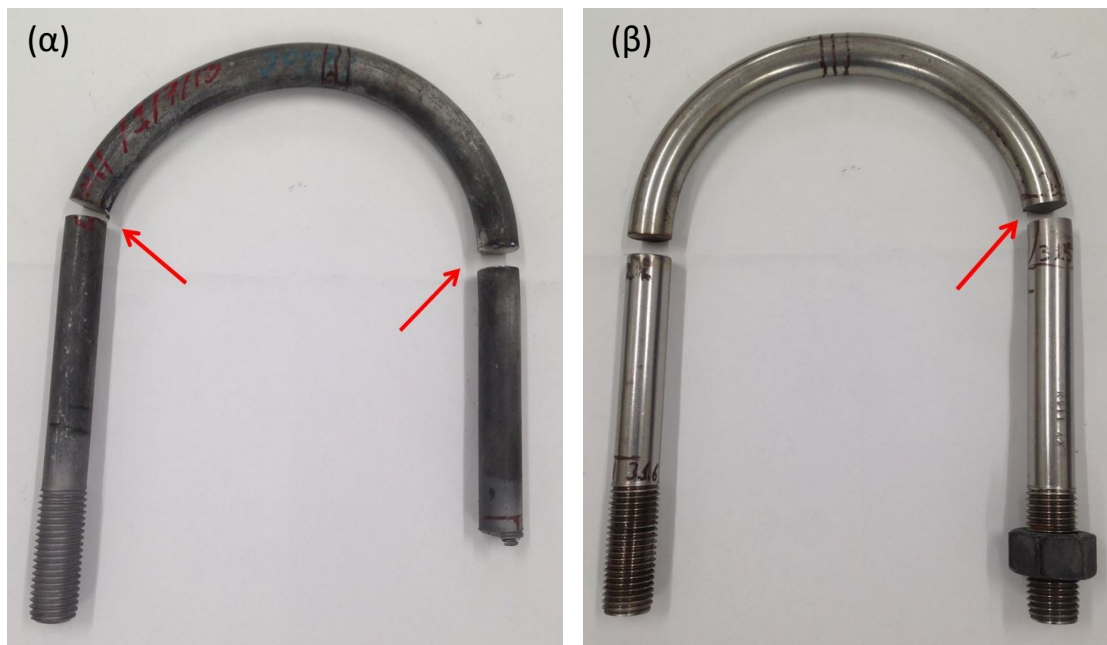
6.1 Προετοιμασία δειγμάτων

Η κοπή των τριών δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Α.Ε.Ι Πειραιά ΤΤ σύμφωνα με το πρότυπο ASTM [35]. Αρχικά, τα εξαρτήματα τεμαχίστηκαν σε εργαστηριακό μηχάνημα κοπής Struers Labotom-3 (Type: 05326146/Serial No: 5321698) (Εικόνα 6.1) με μοτέρ μικροτόμου: ABB MOTORS (No: 80709 893/6, Classification: F), με τροχό κοπής Struers 40A25 κατασκευασμένος κατά EN 12413. Για την ψύξη χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού με ψυκτικό μέσο.



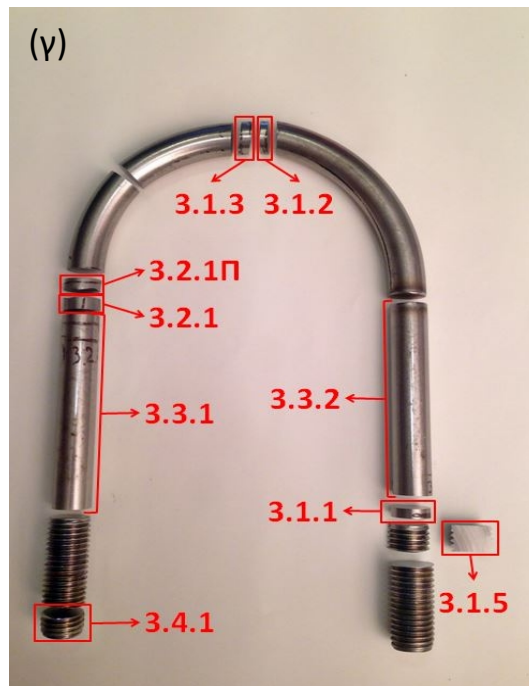
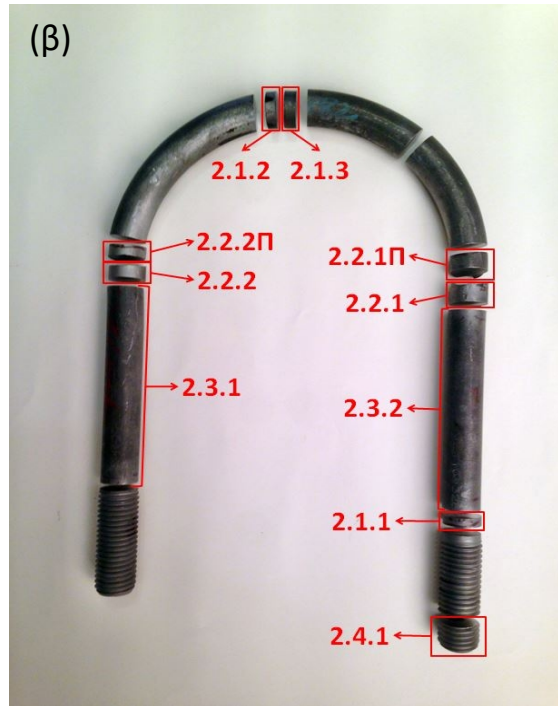
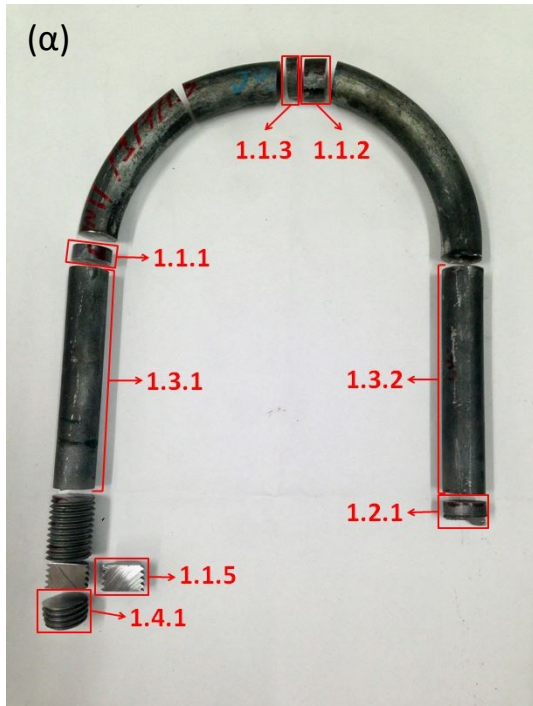
Εικόνα 6.1. Μηχάνημα κοπής Struers Labotom-3

Τα δείγματα 1 και 3 δεν μπορούν να προσαρμοστούν στη συγκράτηση (μέγγενη) του μηχανήματος κοπής του εργαστηρίου και κόπηκαν αρχικά με εξωτερικό τροχό μηχανουργείου. Το δείγμα 1 κόπηκε σε δύο σημεία (Βελάκι στην Εικόνα 6.2α), ενώ το δείγμα 3 σε ένα (Βελάκι στην Εικόνα 7.2β). Το δείγμα 2 λόγω του ότι έχει θραύση σε δύο σημεία είναι ήδη διαιρεμένο σε τρία επιμέρους κομμάτια, που το καθένα μπορεί να δεθεί στη μέγγενη του εργαστηριακού τροχού χωρίς περαιτέρω επέμβαση.



Εικόνα 6.2. (α) Σημεία κοπής δείγματος 1, (β) Σημείο κοπής δείγματος 3

Στη συνέχεια τα δείγματα κόπηκαν σε επιμέρους δοκίμια με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες μελέτες και δοκιμές (Εικόνα 6.3). Για αυτό, η επιλογή τους έγινε με ιδιαίτερη προσοχή και με τέτοιον τρόπο, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά, συγκεντρώνοντας όσο το δυνατόν περισσότερες και αξιόπιστες πληροφορίες. Στη συνέχεια τα δοκίμια καταγράφηκαν με τριψήφιο σύμβολο στο οποίο ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει τον αριθμό δείγματος από το οποίο προέρχεται (1 από Δ1, 2 από Δ2 και 3 από Δ3). Το δεύτερο ψηφίο υποδηλώνει το είδος της μελέτης (π.χ μέτρηση σκληρότητας, οπτική μικροσκοπία κλπ) και το τρίτο ψηφίο είναι ο αύξων αριθμός δοκιμίου. Στον πίνακα 7.1 αναφέρονται αναλυτικά τα δοκίμια που προέκυψαν, ο αντίστοιχος συμβολισμός τους και η μελέτη στην οποία προορίζονται.



Εικόνα 6.3. Τεμαχισμός και επιλογή δειγμάτων:
 (α) Δείγμα 1, (β) Δείγμα 2, (γ) Δείγμα 3.

Πίνακας 6.1. Συμβολισμός δοκιμών για καταστρεπτικές δοκιμές

Καταστροφικοί έλεγχοι		Δείγμα 1	Δείγμα 2	Δείγμα 3
Μέτρηση σκληρότητας	Μητρική σκληρότητα και δομή	1.1.1	2.1.1	3.1.1
	στη περιοχή κάμψης	1.1.2	2.1.2	3.1.2
Οπτική μικροσκοπία	στη περιοχή κάμψης (σε τομή καταμήκος του άξονα)	1.1.3	2.1.3	3.1.3
	στη περιοχή κάμψης (σε εγκάρσια τομή)	1.1.4	2.1.4	3.1.4
	στην περιοχή του σπειρώματος	1.1.5		3.1.5
Ηλεκτρονική μικροσκοπία	Επιφάνεια θραύσης	1.2.1	2.2.1	3.2.1
			2.2.1Π	3.2.1Π
			2.2.2	
			2.2.2Π	
Δοκιμή Εφελκυσμού		1.3.1	2.3.1	3.3.1
		1.3.2	2.3.2	3.3.2
Χημική ανάλυση		1.4.1	2.4.1	3.4.1

6.2 Χημική ανάλυση

Στα δείγματα 1 και 2 αναγράφεται το υλικό κατασκευής (42CrMo4), ενώ για το τρίτο δοκίμιο δεν υπάρχει κανένα στοιχείο σχετικά με το υλικό κατασκευής. Για την ταυτοποίησή τους πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Α.Ε.Ι Πειραιά ΤΤ. Χρησιμοποιήθηκε φασματογράφος οπτικής εκπομπής (*Optical emission spectroscopy, OES*), τύπου Oxford Instruments (Model: FOUNDRY –MASTER, S/N: 59T0143) (Εικόνα 6.4).

Πριν την ανάλυση τα δοκίμια υπέστησαν καθαρισμό επιφάνειας με λειαντικά



Εικόνα 6.4. Φασματογράφος οπτικής εκπομπής (OES)

χαρτιά P60 και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στον φασματογράφο. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή. Στους πίνακες 6.2, 6.3 και 6.4 παρουσιάζεται η πραγματική χημική ανάλυση των τριών δειγμάτων μέσω των δοκιμίων 1.4.1, 2.4.1 και 3.4.1 (Εικόνα 6.5). Στους πίνακες 6.5 και 6.6 διατυπώνονται η πραγματική χημική ανάλυση των δοκιμίων 1.4.1, 2.4.1 και 3.4.1 αντίστοιχα σε σύγκριση με την τυπική χημική ανάλυση βάσει κατασκευαστών [36], [37] και πρότυπων [38]. Στις εικόνες 6.6 και 6.7 αναπαριστώνται γραφικά τα αποτελέσματα των πινάκων 6.5 και 6.6.



Εικόνα 6.5. Από τα αριστερά προς τα δεξιά έχουμε τα δοκίμια 1.4.1, 2.4.1 και 3.4.1 που χρησιμοποιήθηκαν για την χημική ανάλυση.

Πίνακας 6.2. Πραγματική χημική σύσταση Δ 1.4.1

Δείγμα 1	
	%
Fe	97,4
C	0,436
Si	0,226
Mn	0,615
P	0,0164
S	0,0089
Cr	1,11
Mo	0,146
Ni	0,0094
Al	0,0066
Co	0,0044
Cu	0,029
Nb	0,002
Ti	0,001
V	0,0042
W	0,025
Pb	0,005
Sn	0,0014
B	0,0005
Ca	0,0008
Zr	0,002
Zn	0,0019
Bi	0,0075
As	0,005
Se	0,0173
	100,081

Πίνακας 6.3. Πραγματική χημική σύσταση Δ 2.4.1

Δείγμα 2	
	%
Fe	97,3
C	0,417
Si	0,236
Mn	0,618
P	0,0152
S	0,0086
Cr	1,12
Mo	0,151
Ni	0,0083
Al	0,0079
Co	0,0043
Cu	0,32
Nb	0,002
Ti	0,001
V	0,002
W	0,025
Pb	0,005
Sn	0,0012
B	0,0005
Ca	0,0013
Zr	0,002
Zn	0,0027
Bi	0,0075
As	0,005
Se	0,0177
	100,279

Πίνακας 6.4. Πραγματική χημική σύσταση Δ 3.4.1

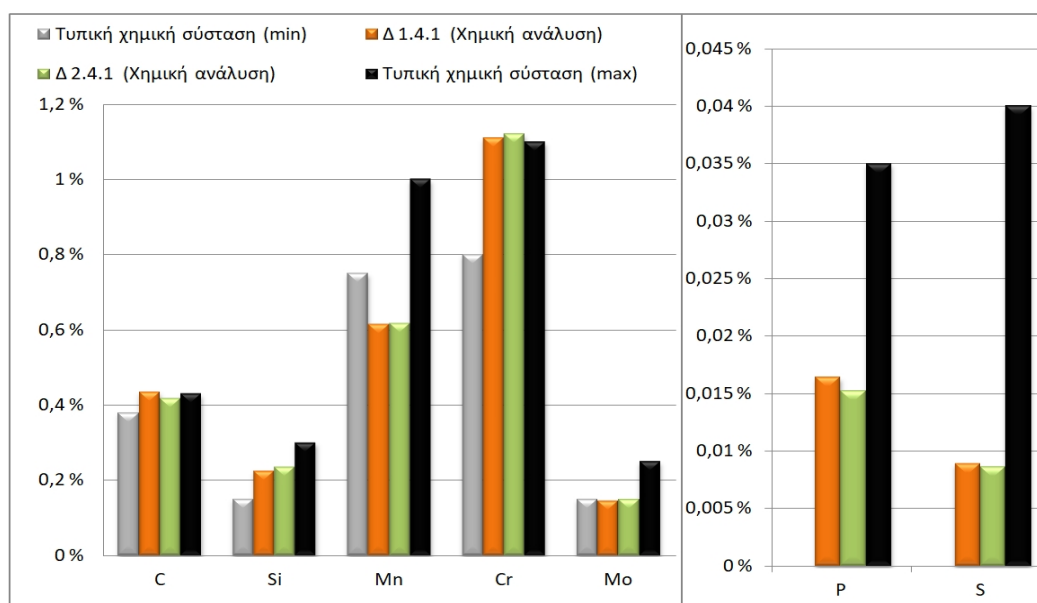
Δείγμα 3	
	%
Fe	70,1
C	0,0185
Si	0,596
Mn	1,82
P	0,0237
S	0,0325
Cr	17,9
Mo	0,416
Ni	8,34
Al	0,0133
Co	0,0927
Cu	0,545
Nb	0,0067
Ti	0,0021
V	0,0748
W	0,0191
Pb	0,005
Sn	0,0028
B	0,0011
Ca	0,0005
Zr	
Zn	
Bi	
As	
Se	0,005
	100,015

Πίνακας 6.5. Χημική σύσταση δοκιμίων 1 και 2 σε σύγκριση με την τυπική τους χημική σύσταση σύμφωνα με το πρότυπο [38]

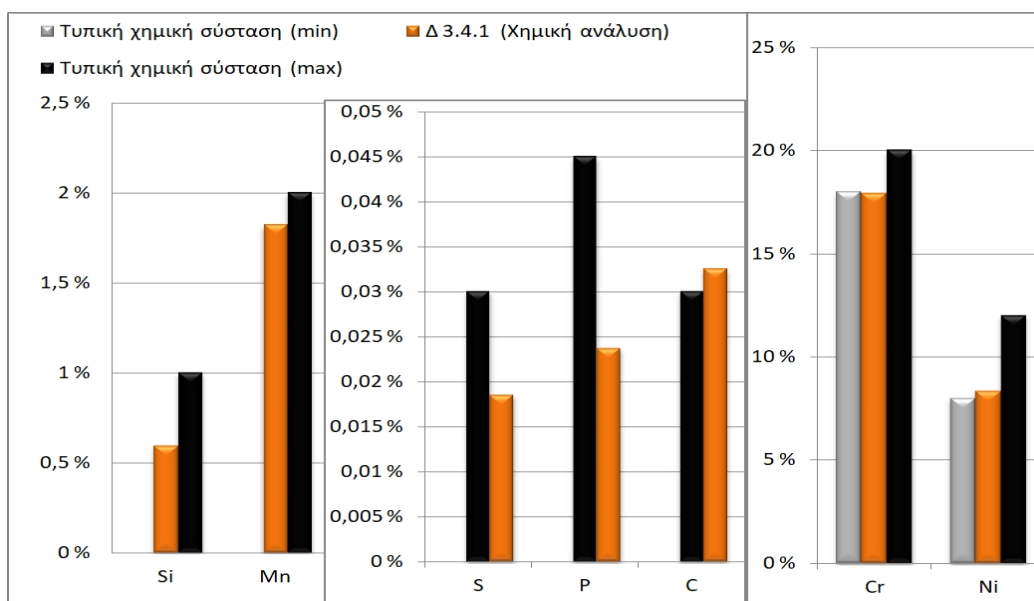
	Χημικά στοιχεία (%)				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
Δ 1.4.1	0,44	0,23	0,62	1,11	0,15
Δ 2.4.1	0,42	0,24	0,62	1,12	0,15
BOHLER V320	0,41	0,30	0,70	1,10	0,20
DIN 1.7225 (42CrMo4)	0.38-0.45	≤0.40	0.60-0.90	0.90-1.20	0.15-0.30

Πίνακας 6.6. Χημική σύσταση του τρίτου δοκιμίου σε σύγκριση με την τυπική του χημική σύσταση σύμφωνα με το πρότυπο [38]

	Χημικά στοιχεία (%)						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Δ 3.4.1	0,02	1,82	0,024	0,033	0,6	17,9	8,34
304L Product data sheet	≤0,03	≤2,00	≤0,045	≤0,030	≤0,75	18,0 - 20,0	8,0 - 12,0
DIN 1.4306 (X2CrNi19-11)	≤0,03	≤2,00	≤0,045	≤0,015	≤1	18,0 - 20,0	10,0 - 12,0



Εικόνα 6.6. Χημική σύσταση των υλικών κατασκευής και τα όρια της τυπικής χημικής σύστασης: Δ 1.4.1 και Δ 2.4.1



Εικόνα 6.7. Χημική σύσταση των υλικών κατασκευής των υποστηριγμάτων της βάσης και τα όρια της τυπικής χημικής σύστασης για το Δ 3.4.1

Τα πρώτα δύο υποστηρίγματα (Δ 1.4.1 και Δ 2.4.1) κατασκευάστηκαν από χάλυβα υψηλής αντοχής 4140 κατά ASTM [38]. Πρόκειται για ελαφρά κραματωμένο χάλυβα σε χρώμιο και μολυβδαίνιο κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και μεγάλη δυσθραυστότητα, ειδικά σε μεσαίες και μεγάλες διατομές. Η προσθήκη μολυβδαινίου αποτρέπει το χάλυβα από το να είναι ευαίσθητος στην ψαθυροποίηση προερχόμενη από επαναφορά [38]. Συνίσταται για την κατασκευή μηχανολογικών εξαρτημάτων στην αυτοκινητοβιομηχανία, ειδικότερα στην κατασκευή μερών του κινητήρα όπως ο στροφαλοφόρος και ο εκκεντροφόρος άξονας, αρθρώσεις του συστήματος οδήγησης, ράβδους σύνδεσης, ατράκτους, γρανάζια, τμήματα αντλιών.

Με δεδομένο το συγκεκριμένο τρόπο πρόσδεσης, δεν θεωρείται επαρκής η επιλογή του συγκεκριμένου υλικού για την κατασκευή στηριγμάτων των πτερυγίων.

Το τρίτο εξάρτημα (Δ 3.4.1) κατασκευάστηκε από ανοξείδωτο χάλυβα ASTM 304L [38]. Πρόκειται για ένα από τους πιο διαδεδομένους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες. Υψηλά κραματωμένος μόνο με χρώμιο και νικέλιο έχει υψηλή αντοχή σε διάβρωση, εξαιρετική συγκολλησιμότητα και εξαιρετική δυσθραυστότητα [37].

Η απουσία τιτανίου του προσδίδει καλύτερη επιφανειακή λειαντικότητα. Επιπλέον, η εύκολη μορφοποίηση του τον καθιστά κατάλληλο για μεγάλη ποικιλία εφαρμογών αλλά και στην επιλογή του για εφαρμογές που σχετίζονται με τρόφιμα. Χρησιμοποιείται ευρέως για μορφοποίηση εν ψυχρώ όπως κάμψη, κοίλανση, έκταση. Οι εν ψυχρώ κατεργασίες αυξάνουν την μηχανική αντοχή και τη σκληρότητα του και είναι πιθανό να το καταστήσουν ελαφρώς μαγνητικό. Η εργοσκληρυνση του συγκεκριμένου υλικού οφείλεται στον μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη ή φερρίτη.

Σε κάθε περίπτωση το υλικό θεωρείται ακατάλληλο για τη συγκεκριμένη χρήση, λόγω της περιορισμένης αντοχής σε κόπωση.

Η επιλογή και των δύο υλικών για την κατασκευή των εξαρτημάτων θεωρείται άκρως λανθασμένη και αποδεικνύει ότι είτε δεν δόθηκαν από τον σχεδιαστή σαφείς τεχνικές προδιαγραφές σχετικά με την επιλογή υλικού, είτε δεν εφαρμόστηκαν οι συγκεκριμένες απαιτήσεις.

6.3 Μέτρηση σκληρότητας

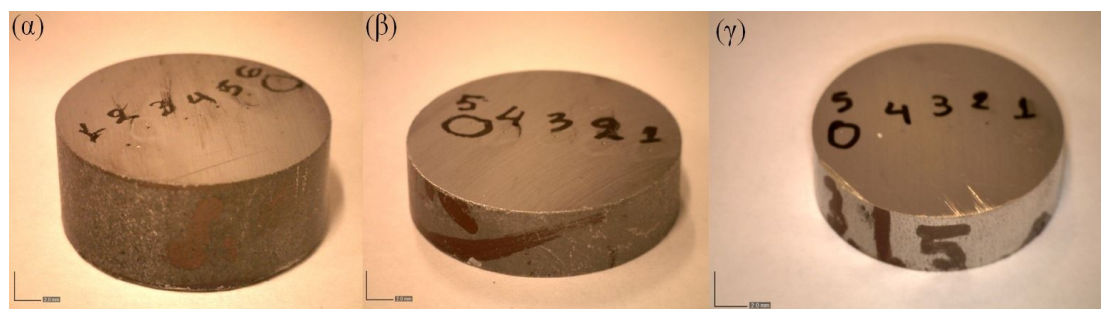
Η μέτρηση σκληρότητας των δοκιμίων διεξήχθη στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Α.Ε.Ι Πειραιά ΤΤ. Χρησιμοποιήθηκε σκληρόμετρο τύπου ALPHA DUROMATIC με στοιχεία: MODEL 25850 SN/ 2221 και μικροσκληρόμετρο τύπου Shimadzu (S/N: 341-64278). Για τις μετρήσεις εφαρμόστηκε το πρότυπο ASTM E18-07 [39]. Αρχικά έγιναν κάποιες “γρήγορες” μετρήσεις των τριών τεμαχίων, ώστε να βρεθεί προσεγγιστικά η σκληρότητά τους και να προσδιοριστεί ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την περαιτέρω πειραματική διαδικασία.

Η μέτρηση σκληρότητας μπορεί, γενικά, να μην ενταχθεί στους καταστροφικούς ελέγχους, αλλά λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας του δείγματος, πραγματοποιήθηκε αφού το κομμάτι κόπηκε.

Η σκληρομέτρηση έγινε και στα τρία δοκίμια σε δύο διαφορετικές περιοχές στο καθένα. Στην διατομή των εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκε σκληρομέτρηση (HV30) και στην περίμετρο στη περιοχή κάμψης πραγματοποιήθηκε μικροσκληρομέτρηση (HV1). Αρχικά μετρήθηκε η σκληρότητα στα δοκίμια 1.1.1, 2.1.1 και 3.1.1. Τα δείγματα είναι κυκλικής διατομής και έχουν διάμετρο περίπου 22mm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πέντε σημεία, κατά μήκος μιας διαμέτρου της διατομής, εκτός των περιοχών μορφοποίησης, ώστε να μην υπάρξει το ενδεχόμενο επηρεασμού λόγω εργοσκλήρυνσης (Εικόνα 6.8). Τα αποτυπώματα απέχουν 3mm από την άκρη και 4mm μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.7 και σε γραφική απεικόνιση στην εικόνα 6.9.

Δεύτερον πάρθηκαν μετρήσεις σκληρότητας (μικροσκληρομέτρηση) στα δοκίμια 1.1.2, 2.1.2 και 3.1.2 (Εικόνα 6.10), τα οποία κόπηκαν πάνω στη καμπύλη διαμόρφωσης, ώστε να προσδιοριστεί η σκλήρυνση που υπέστη το υλικό από ενδοτράχυνση κατά τη διαμόρφωση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 12 σημεία στη περιφέρεια των δοκιμίων (Εικόνα 6.11). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.8.

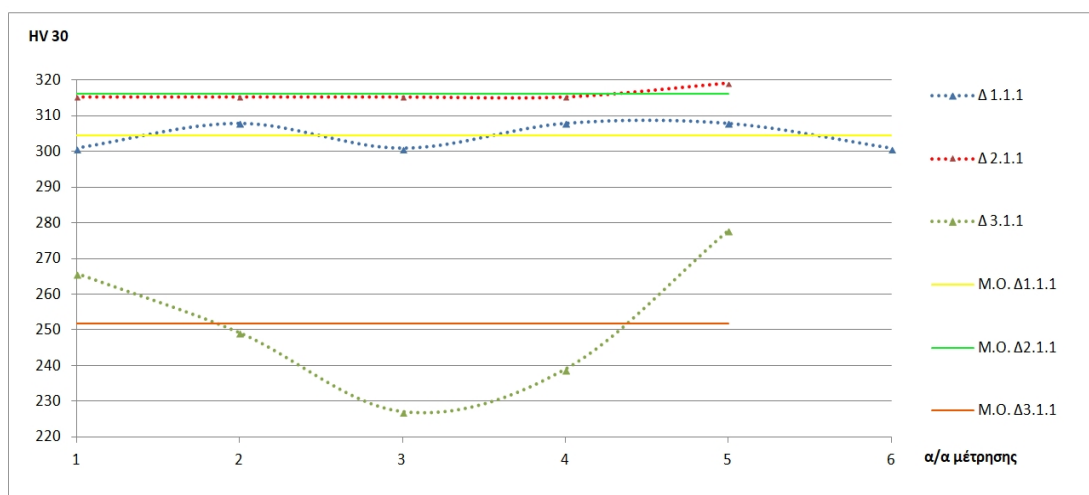
Για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων η σκληρότητα μετατράπηκε και αναφέρεται επίσης και σε Rockwell βάσει προτύπου [40].



Εικόνα 6.8. Τα σημεία σκληρομέτρησης κατά μήκος της διαμέτρου:
(α) Δοκίμιο 1.1.1, (β) Δοκίμιο 2.1.1 και (γ) Δοκίμιο 3.1.1

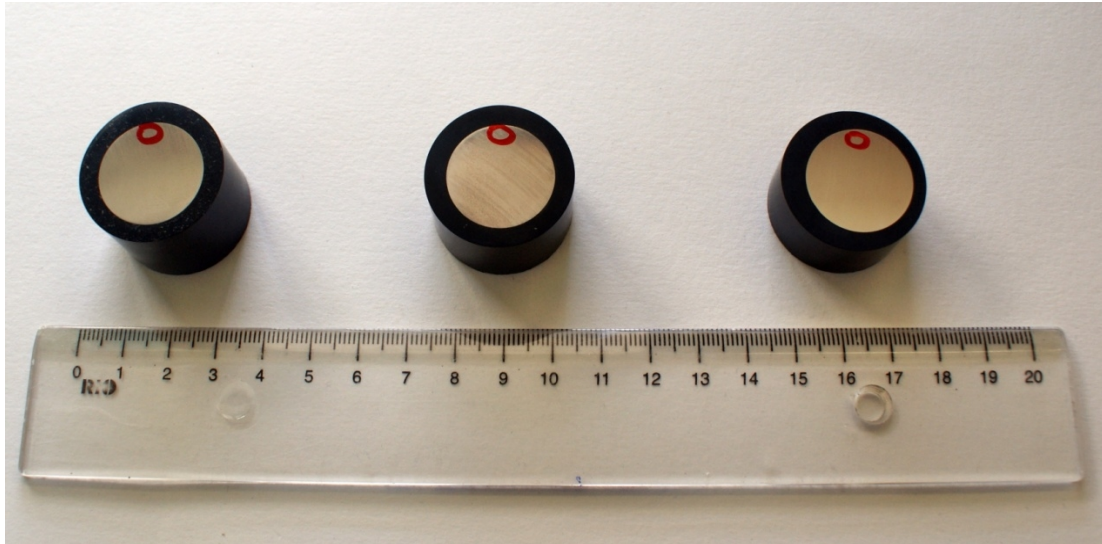
Πίνακας 6.7. Τιμές σκληρότητας των δοκιμίων 1.1.1, 2.1.1 και 3.1.1

Δοκίμιο	1.1.1		2.1.1		3.1.1	
Διαστάσεις	21,44 mm		21,78 mm		21,96 mm	
Μεγέθυνση	X200		X200		X200	
Μέτρηση	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC
1	300,876	31	315,374	33	265,792	27
2	307,997	32	315,374	33	249,185	23
3	300,876	31	315,374	33	227,046	20
4	307,997	32	315,374	33	238,963	21
5	307,997	32	319,162	33	277,804	29
6	300,876	31				



Εικόνα 6.9. Κατανομή σκληρότητας κατά την εγκάρσια διατομή των ραβδών και ο μέσος όρος της

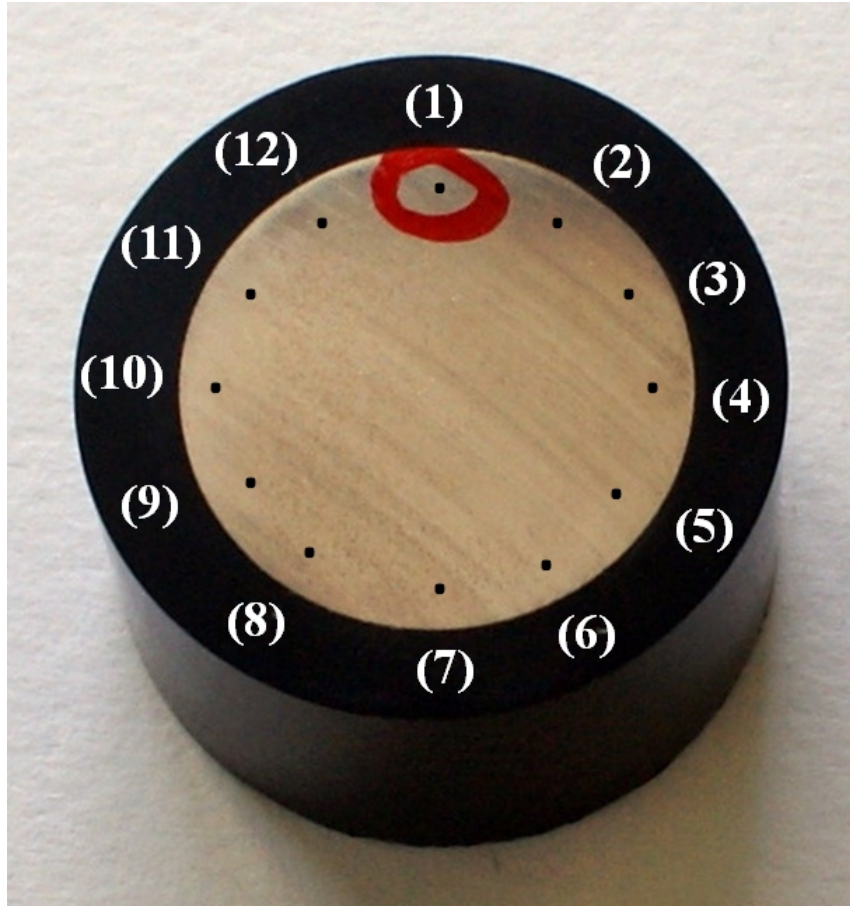
Τα πρώτα δυο εξαρτήματα έχουν σκληρότητα 300-320 HV30. Δεδομένου ότι το συγκεκριμένο υλικό διατίθεται σε επιβελτιωμένη κατάσταση (μετά από βαφή και επαναφορά) με σκληρότητα από 270 έως 320 HV (28-32 HRC), οι τιμές βρίσκονται εντός των ορίων των μηχανικών αντοχών. Το τρίτο εξάρτημα παρουσιάζει σκληρότητα 250 HV30, που είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή της συνήθους κατάστασης παράδοσής του. Η διαφοροποίηση μεταξύ της σκληρότητας της επιφάνειας και καρδίας πιθανώς προέρχεται από εργοσκλήρυνση [37]. Ωστόσο, από τα μέχρι τώρα συγκεντρωμένα δεδομένα η σκληρότητά του δεν επαρκεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.



Εικόνα 6.10. Από τα αριστερά προς τα δεξιά έχουμε τα δοκίμια 1.1.2, 2.1.2 και 3.1.2 που χρησιμοποιήθηκαν στη μικροσκληρομέτρηση.

Πίνακας 6.8. Τιμές μικροσκληρομέτρησης των δοκιμίων 1.1.1, 2.1.1 και 3.1.1

Αριθμός μέτρησης	1.1.2		2.1.2		3.1.2	
	HV1	HRC	HV1	HRC	HV1	HRC
(1)	297,9	31	311,2	33	276,5	28
(2)	301,7	31	314,4	33	302,5	32
(3)	309,6	32	312	33	308	32
(4)	314,4	33	313,6	33	299,4	31
(5)	310,4	32	318,6	33	285,5	30
(6)	314,4	33	314,4	33	299,4	31
(7)	312,8	33	308	33	271,2	28
(8)	304	32	317,7	33	313,6	33
(9)	304	32	313,6	33	312,8	33
(10)	310,4	32	327,7	34	306,4	32
(11)	307,2	32	319,4	33	304	32
(12)	316,1	33	311,2	33	290,5	30



Εικόνα 6.11. Τα σημεία που έγιναν οι μικροσκληρομέτρησεις στη περιφέρεια των δοκιμίων

Η μικροσκληρομέτρηση έδωσε σχετικά μη αναμενόμενα αποτελέσματα, καθώς παρουσιάζεται μία σταθερότητα στις τιμές που μετρήθηκαν (πίνακας 6.8). Από τη στιγμή που τα δοκίμια βρίσκονται πάνω στην καμπύλη διαμόρφωσης “U”, δικαιολογείται μία διακύμανση στη σκληρότητα με το συγκεκριμένο προφίλ μετρήσεων, που επιλέχτηκε να γίνει περιφερειακά, ώστε να παρατηρηθεί αύξηση στα σημεία που υπάρχουν εφελκυστικές τάσεις πάνω και θλιπτικές κάτω, ενώ προς τη μέση αναμένεται σκληρότητα πιο κοντά στην μητρική, στα επίπεδα που κυμαίνεται και στον Πίνακα 6.7, καθώς οι τάσεις μειώνονται.

6.4 Δοκιμή εφελκυσμού

Γνωρίζοντας πλέον και την χημική σύσταση των υλικών και τις αντίστοιχες σκληρότητες, με τη δοκιμή εφελκυσμού μπορεί να διαπιστωθεί αν τα εν λόγω υλικά έχουν και τις αναμενόμενες αντοχές. Παρακάτω στην εικόνα 6.12 φαίνονται τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή εφελκυσμού με τα ονόματά τους, όπως έχουν δοθεί σύμφωνα με τον πίνακα 6.1 και στην εικόνα 6.13 παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την δοκιμή εφελκυσμού. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας 6.9 με τα αποτελέσματα της δοκιμής όλων των δοκιμίων και στις εικόνες 6.13 έως 6.18 τα αντίστοιχα διαγράμματα.



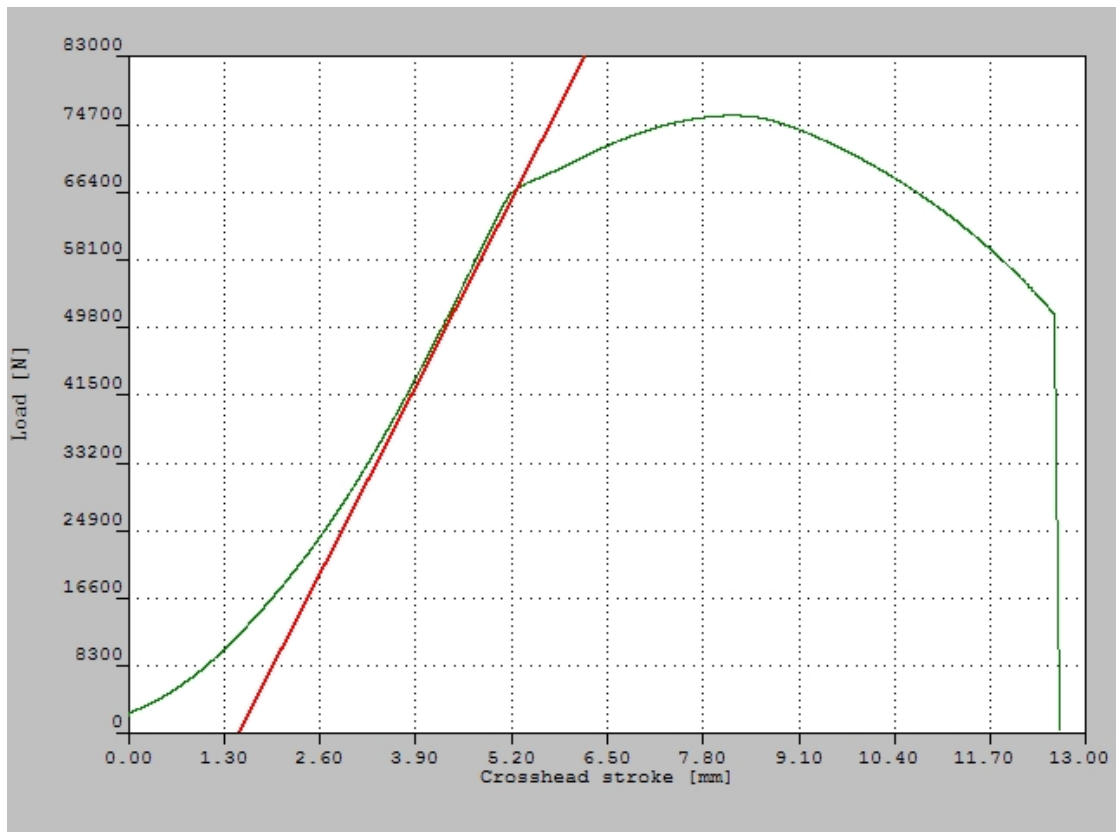
Εικόνα 6.12. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή εφελκυσμού (πριν τη δοκιμή).



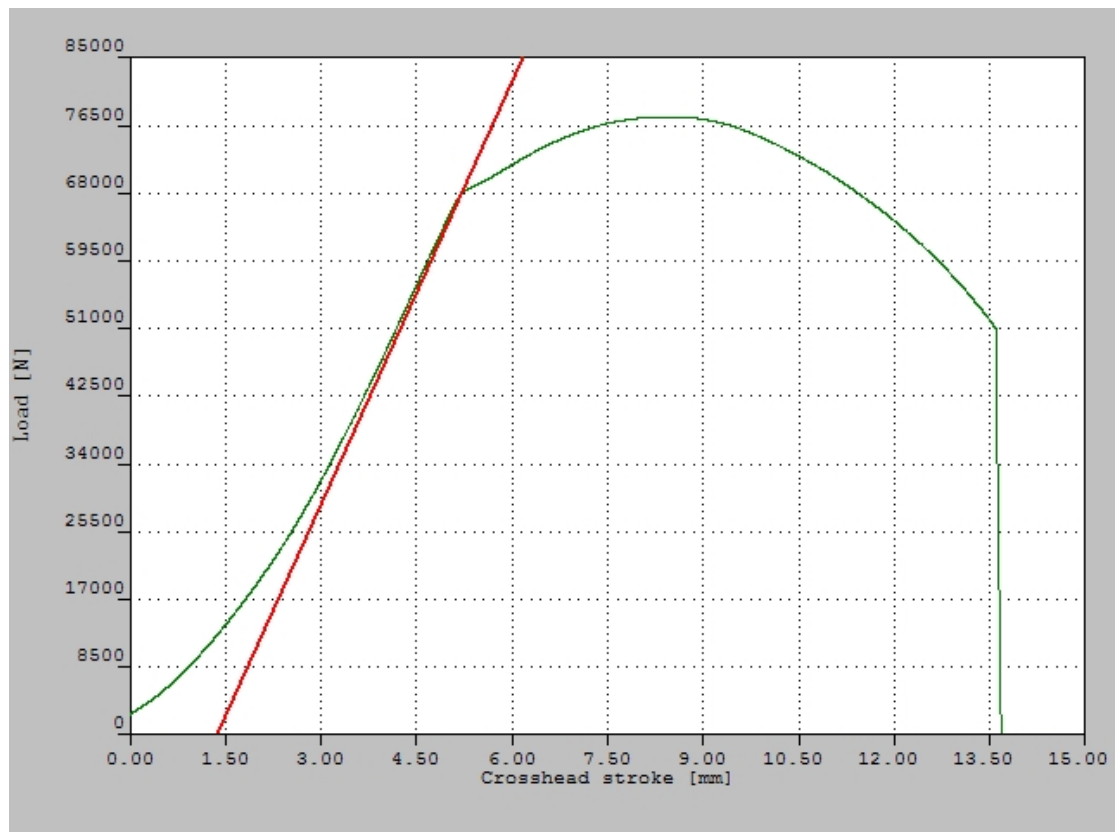
Εικόνα 6.13. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή εφελκυσμού (μετά τη δοκιμή, τα κόκκινα βελιάκια δείχνουν τα σημεία που έγινε η θραύση).

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα μετρήσεων εφελκυσμού

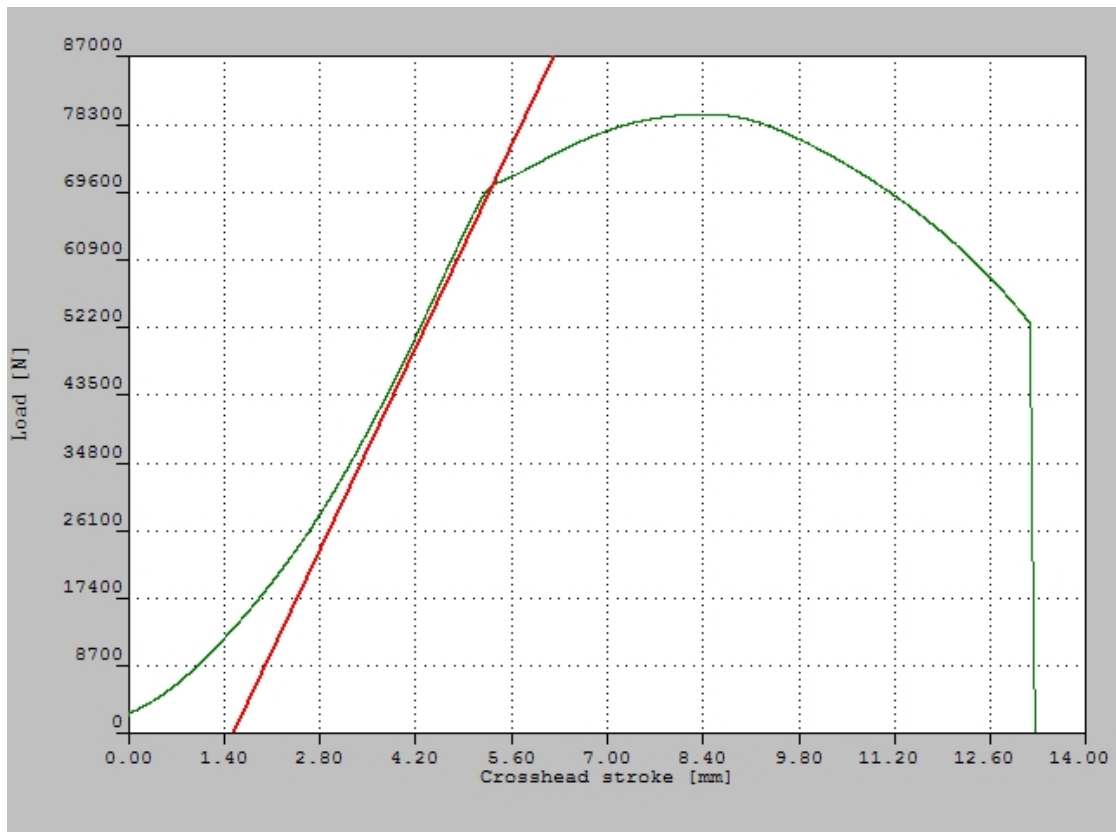
		R_m [MPa]		$R_{0.2}$ [MPa]		A_1 [%]	
		R_m	$\overline{R_m}$	$R_{m0,2i}$	$\overline{R_{0,2}}$	A_{1i}	$\overline{A_5}$
Δοκίμιο 1	1.3.1	960,79	964,435	846,99	847,215	17	18
	1.3.2	968,08		847,44		19	
Δοκίμιο 2	2.3.1	975,64	978,89	863,67	866,17	16	16,5
	2.3.2	982,14		868,67		17	
Δοκίμιο 3	3.3.1	709,48	696,66	594,11	587,95	25	25,5
	3.3.2	683,84		581,79		26	



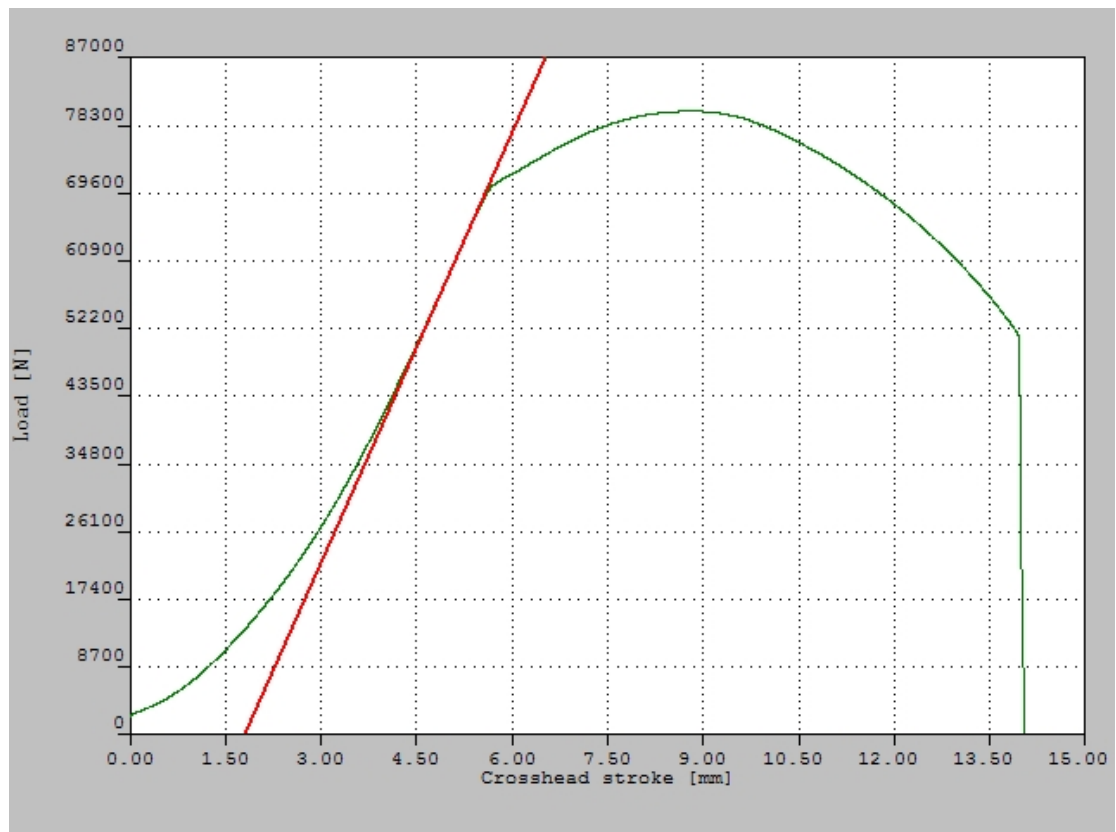
Εικόνα 6.13. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 1.3.1



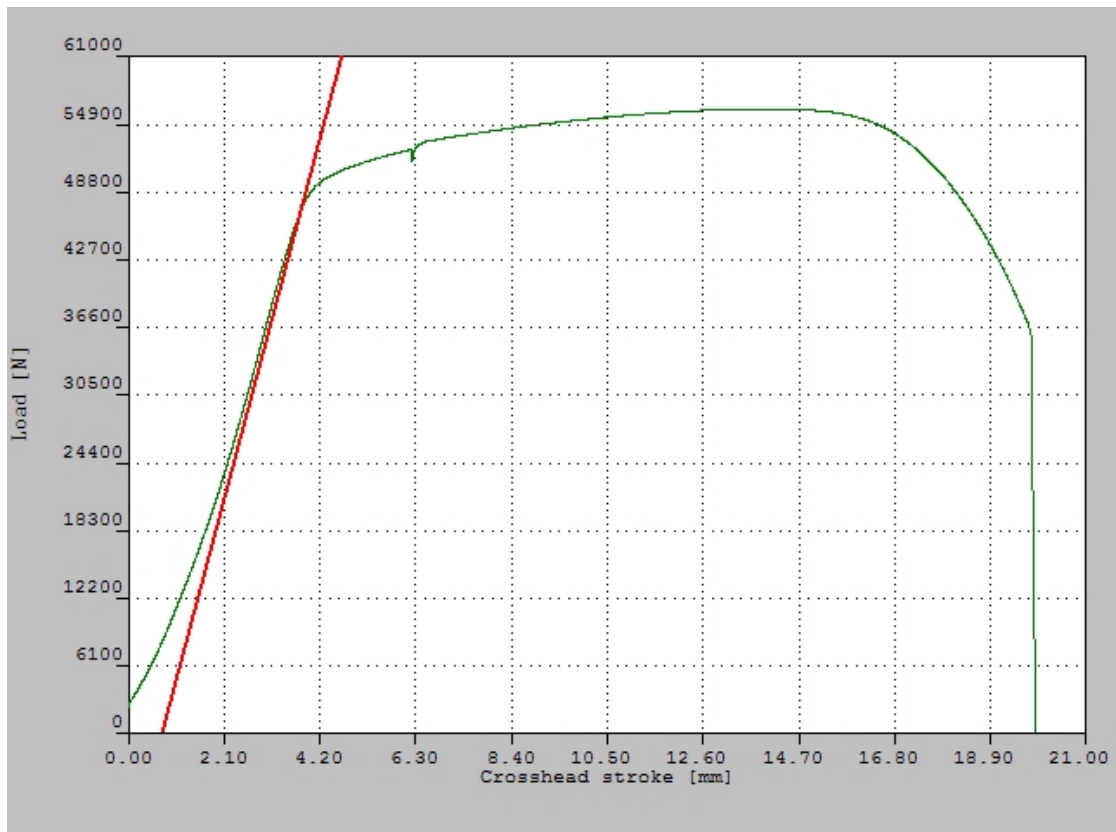
Εικόνα 6.14. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 1.3.2



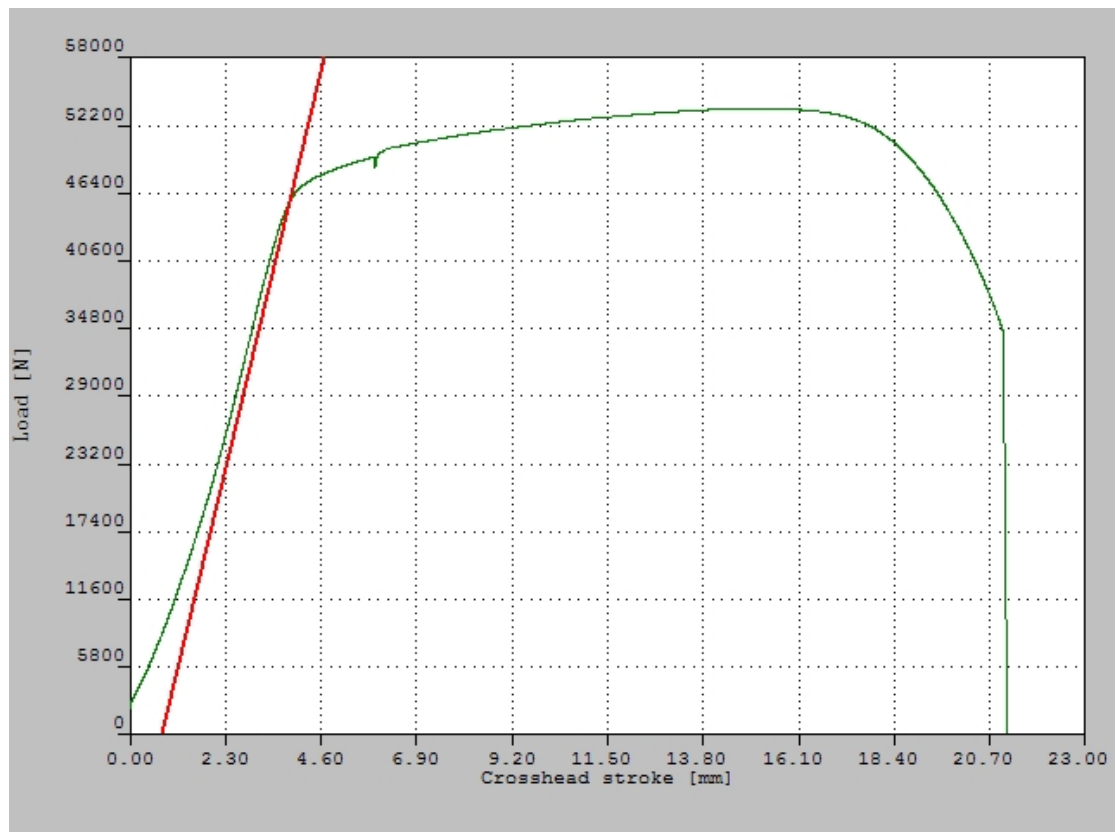
Εικόνα 6.15. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 2.3.1



Εικόνα 6.16. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 2.3.2



Εικόνα 6.17. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 3.3.1



Εικόνα 6.18. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 3.3.2

Η κατάσταση στην οποία παραδίδεται ο χάλυβας των δύο πρώτων δειγμάτων (δείγμα 1 & δείγμα 2) παρουσιάζει όριο διαρροής μέχρι 750MPa και 1000-1200 MPa εφελκυστική αντοχή, επιμήκυνση A_5 11%, εκλέπτυνση 45% και δυσθραυστότητα κατά τη φορά της έλασης 35J [36]. Αυτό που παρατηρείται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι ο χάλυβας και των δύο δειγμάτων έχει υψηλότερο όριο διαρροής, υστερεί όμως ελάχιστα σε εφελκυστική αντοχή με 970 MPa περίπου κατά μέσο όρο και για τα δύο δείγματα από το ελάχιστο όριο των 1000 MPa που δίνει ο κατασκευαστής. Τέλος, οι χάλυβες των δύο πρώτων δειγμάτων παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιμήκυνση με 18 και 16,5% αντίστοιχα, τη στιγμή που ο κατασκευαστής δίνει 11%.

Όσο αφορά τον ανοξείδωτο χάλυβα που είναι στο τρίτο δείγμα, σύμφωνα με τον κατασκευαστή ο χάλυβας έχει εφελκυστική αντοχή 600 MPa και όριο διαρροής 300MPa, ενώ επιμήκυνση έχει 45% [37]. Το τρίτο δείγμα, με τον ανοξείδωτο χάλυβα, παρουσιάζει γενικότερα μεγαλύτερη αντοχή συγκριτικά με τον κατασκευαστή, καθώς παρουσιάζει και μεγαλύτερο όριο διαρροής (588 MPa) και μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή (697 MPa). Ανάλογη διαφορά παρατηρείται στην επιμήκυνση με 25%.

7.5 Μικροσκοπική εξέταση δειγμάτων

7.5.1 Ανάλυση δομής με οπτικό μικροσκόπιο, μεταλλογραφεία

Η οπτική μικροσκοπία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. και χρησιμοποιήθηκε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ανεστραμμένων αντικειμενικών φακών τύπου Leica. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη αναφέρονται στον πίνακα 6.1 και οι μελέτες για τις οποίες προορίζονται αφορούν την εύρεση της δομής του κάθε υλικού, τη παραμόρφωση των κόκκων στις περιοχές που υπάρχουν διαμορφώσεις και ό,τι άλλη πληροφορία μπορεί να ληφθεί κατά τη διάρκεια μιας μικροσκοπικής μελέτης.

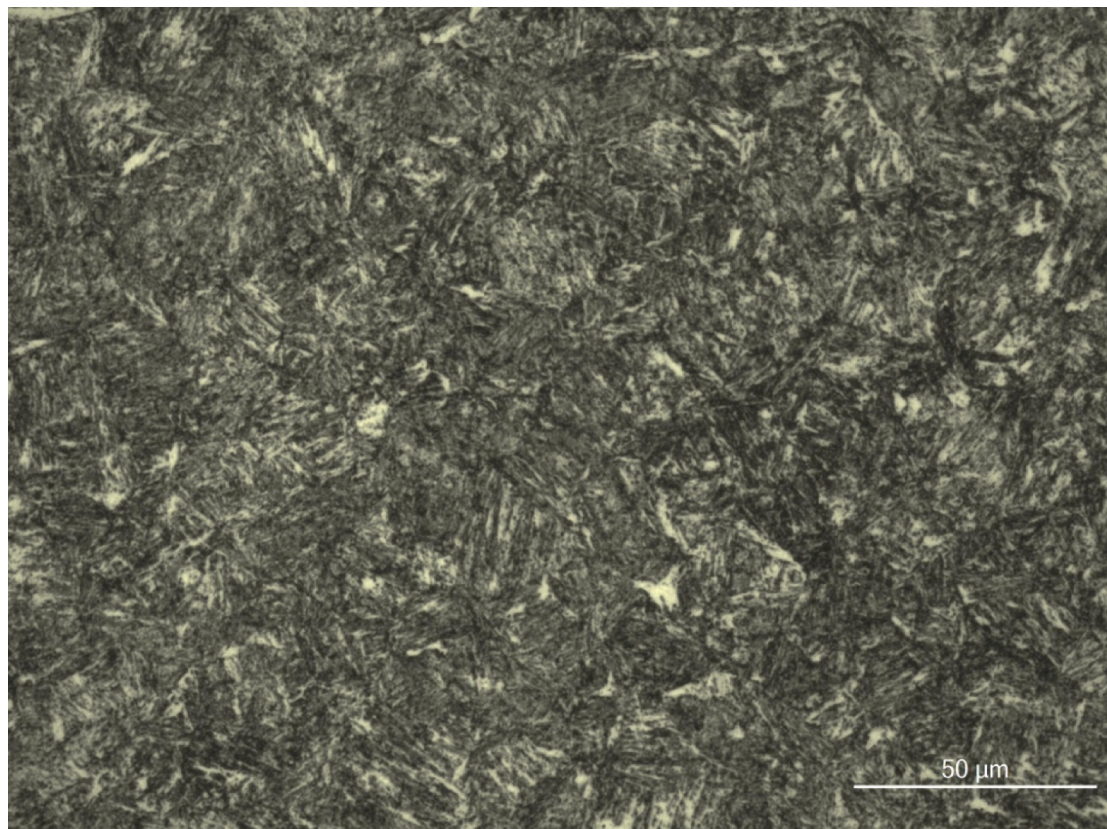
Τα δοκίμια προετοιμάστηκαν βάσει οδηγιών της εταιρείας STRUERS [41] και προτύπων ASTM [42]. Τα δείγματα αρχικά εγκιβωτίστηκαν σε μηχάνημα τύπου Struers “Citopress-1” με S/N: 5770313 (Εικόνα 7.1). Χρησιμοποιήθηκαν ρητίνες της εταιρείας Struers “DuroFast” και “Multifast”.



Εικόνα 7.1. Μηχάνημα εγκιβωτισμού Struers Citopress-1

Στη συνέχεια τα δοκίμια υπέστησαν κατάλληλη προετοιμασία λείανσης με λειαντικά χαρτιά της εταιρείας Struers, σε αυτόματο λειαντικό μηχάνημα της Buehler “Phoenix beta”(S/N: 584-VCT-60709) με κεφαλή “Vector-Power Head” (S/N: 584-PXB-11682) και στίλβωση με διαμανταλοιφές “DP-Paste M” των 6 και 3 μ m καθώς και αιώρημα αλουμίνας “AP-A Suspension” των 1 και 0.25 μ m αντίστοιχα, σε λειαντικό μηχάνημα της “PRESI” (Mecapol P262), με χρήση βελούδινων πανιών. Τέλος πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή με Nital 3% (μίγμα μεθυλικής αλκοόλης CH₃OH και 3% νιτρικού οξέος HNO₃) και τα δοκίμια που προέρχονται από το τρίτο κομμάτι ($\Delta 3$) χρησιμοποιήθηκε ως αντιδραστήριο (μίγμα υδροχλωρικού οξέως HCl, νιτρικού οξέος HNO₃ και νερό H₂O). Με την κάμερα του οπτικού μικροσκοπίου πάρθηκαν λήψεις πριν και μετά την χημική προσβολή. Οι λήψεις μετά την χημική προσβολή επέτρεψαν την ανάλυση μικροδομής του χάλυβα.

Η μεταλλογραφική ανάλυση ξεκίνησε με το δοκίμιο Δ1.1.1 που προέρχεται από το δείγμα (Δ1). Η μικροδομή δείχνει επαναφερμένο μαρτενσίτη όπου η έλειψη του έντονου βελονοειδούς μαρτυρά μαρτυρά υψηλή θερμοκρασία επαναφοράς (Εικόνα 7.2). Επίσης, εμφανίζεται υπολειπόμενος ωστενίτης, σε πολύ μικρά ποσοστά (προσεγγιστικά μικρότερα του 5%). Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, η δομή αυτή είναι η αναμενόμενη και σε μία τέτοια διάσταση ($\varnothing 22$), η ύπαρξη υπολειπόμενου ωστενίτη σε τέτοιο βαθμό είναι δικαιολογημένη.



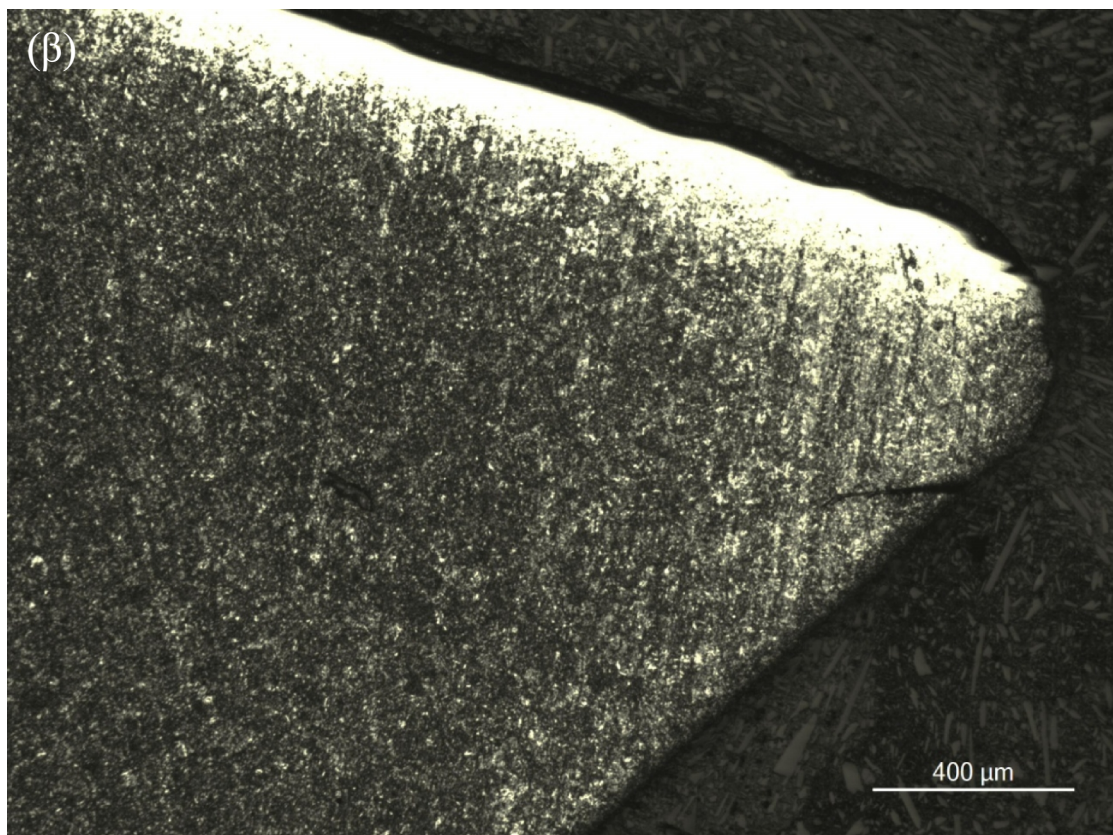
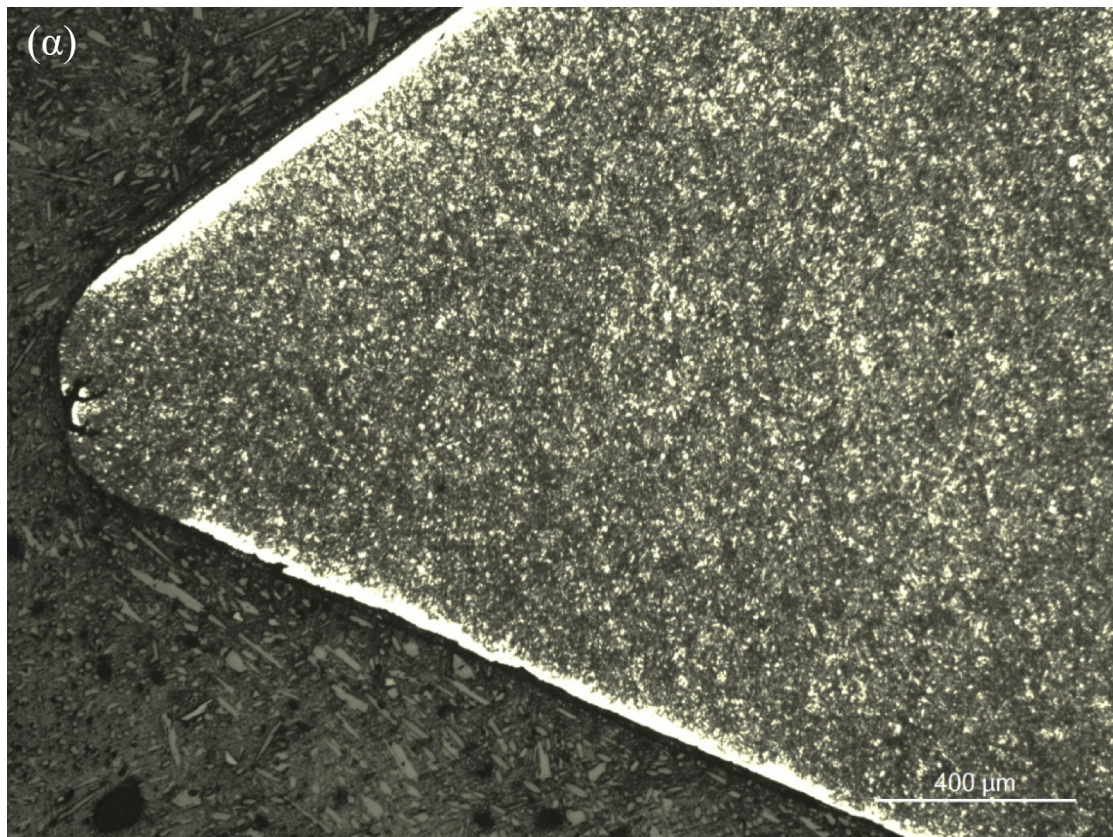
Εικόνα 7.2. Δοκίμιο 1.1.1: απεικόνιση δομής (λήψη από το μέσο της διαμέτρου)

Έντονη πλαστική παραμόρφωση παρατηρείται στις σπείρες από τα ράουλα διαμόρφωσης σπειρώματος (thread rolling). Ο συγκεκριμένος τρόπος αποτελεί μέθοδο ισχυροποίησης των αντοχών τους σπειρώματος, στη περίπτσή μας όμως φαίνεται να υπάρχει ρηγμάτωση στη κορυφή ορισμένων σπειρών, οι οποίες μπορεί αποτελέσουν σημεία έναρξης θραύσης (Εικόνα 7.3α,β). Επίσης, παρατηρείται ανομοιομορφη πλαστική παραμόρφωση από τα ράουλα που διαμόρφωσαν το σπείρωμα, ενώ παράλληλα υπάρχουν και άλλες ρηγματώσεις (Εικόνα 7.3β).

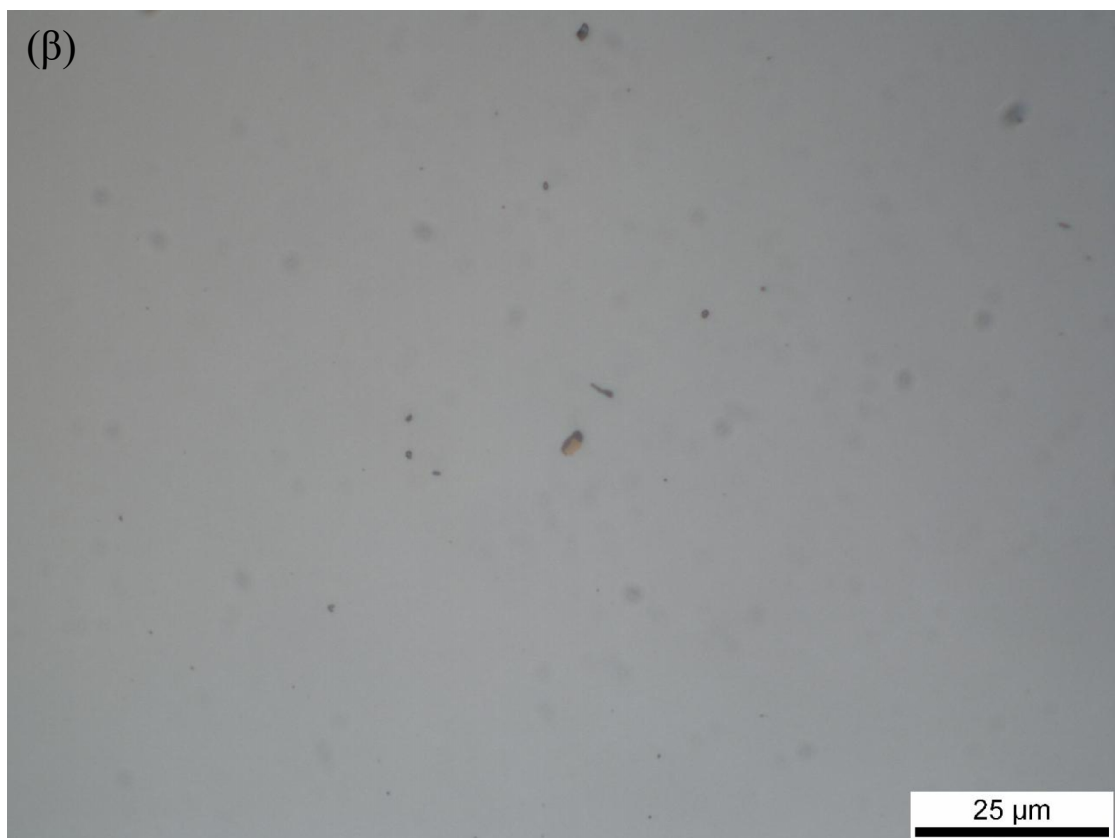
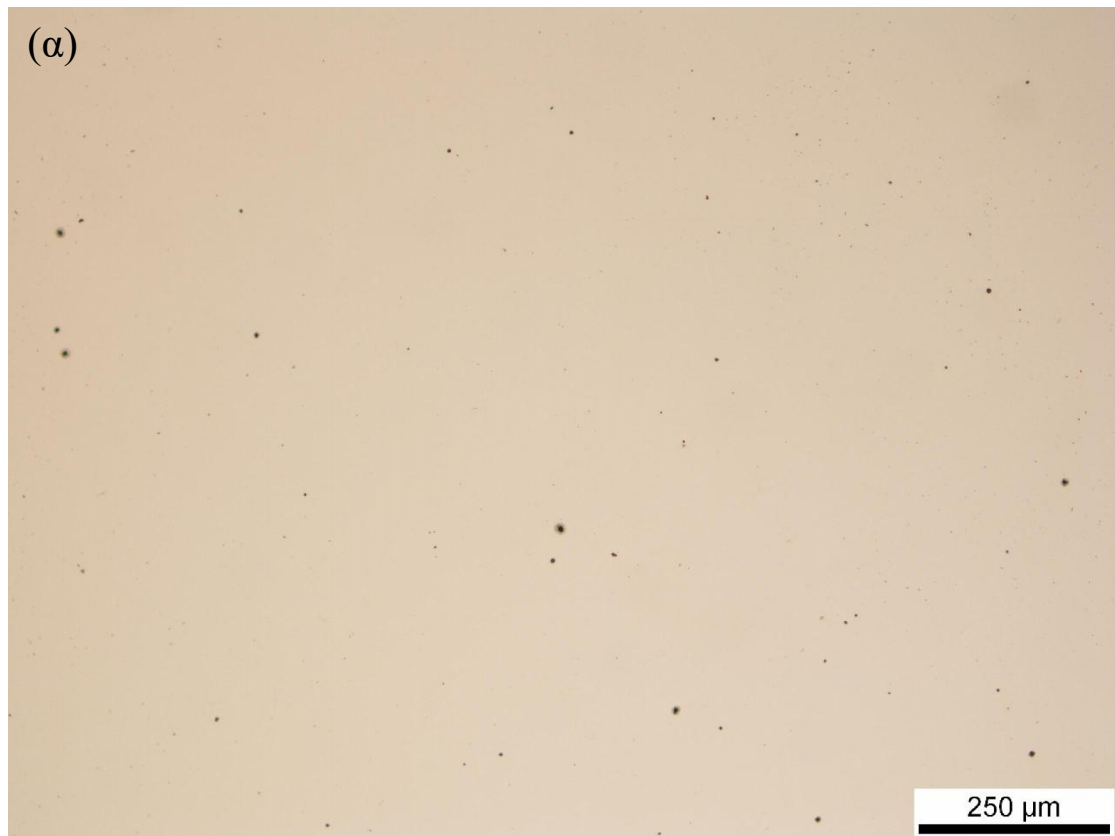
Μετά τη φάση της στίλβωσης και πριν τη χημική προσβολή, ελήφθησαν φωτογραφίες στις οποίες φαίνεται η εμφάνιση μικρών εγκλεισμάτων, η μορφολογία των οποίων παραπέμπει στη μορφή σουλφιδίων του μαγγανίου (Εικόνα 7.4α). Σε άλλα σημεία, απεικονίζεται ένα σύνολο άλλων εγκλεισμάτων ακανόνιστου σχήματος, τα οποία από τη μορφή τους προκύπτει ότι είναι ένα μείγμα από οξειδία σιδήρου και διοξείδιο του πυριτίου (Εικόνα 7.4β).

Μετά την χημική προσβολή, το ίδιο δοκίμιο (Δ1.1.2), εξετάστηκε ξανά στο μικροσκόπιο, όπου επαληθεύτηκε η ύπαρξη των εγκλεισμάτων, τα οποία βρίσκονται στα όρια των κόκκων (Εικόνα 7.5).

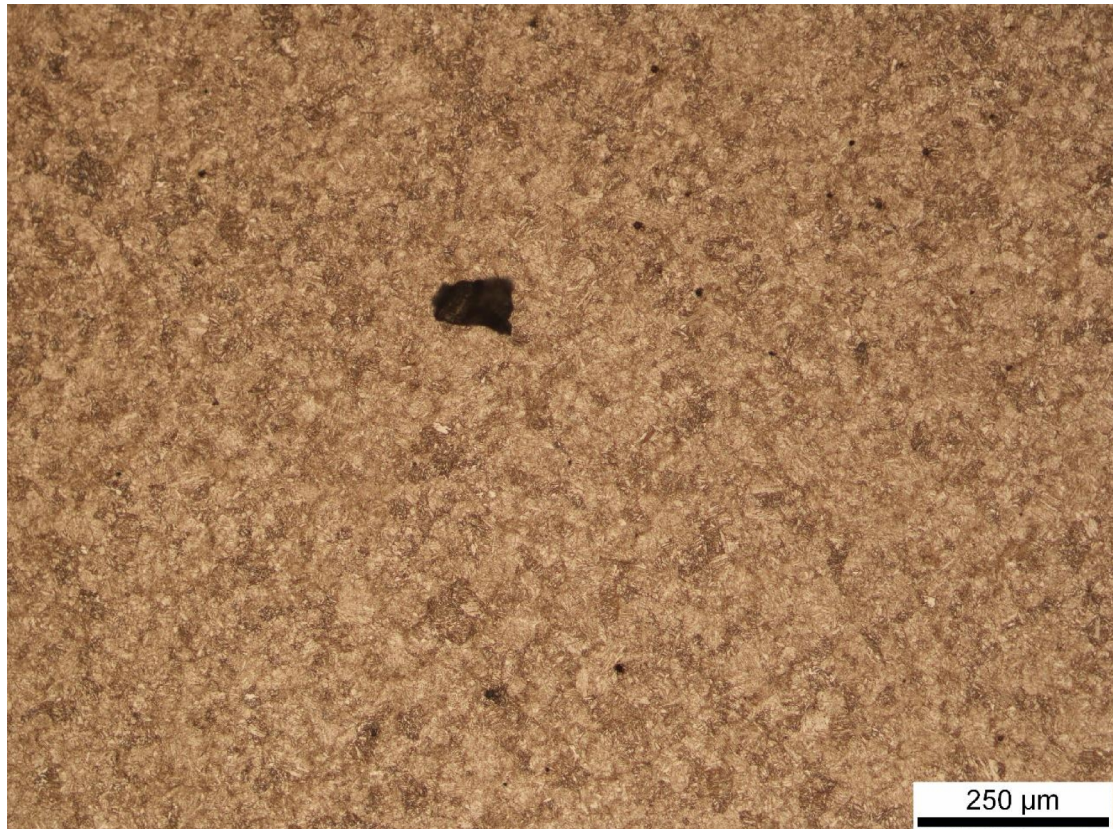
Η πυκνότητα των εγκλεισμάτων χαρακτηρίζεται ως μεγαλύτερη του κανονικού, γεγονός το οποίο έχει σαφή επίπτωση στην αντοχή του υλικού σε κόπωση.



Εικόνα 7.3. Δοκίμιο 1.1.5: ρηγματώσεις στην κορυφή σπειρών και παραμόρφωση στις πλευρές εκατέρωθεν του σπειρώματος



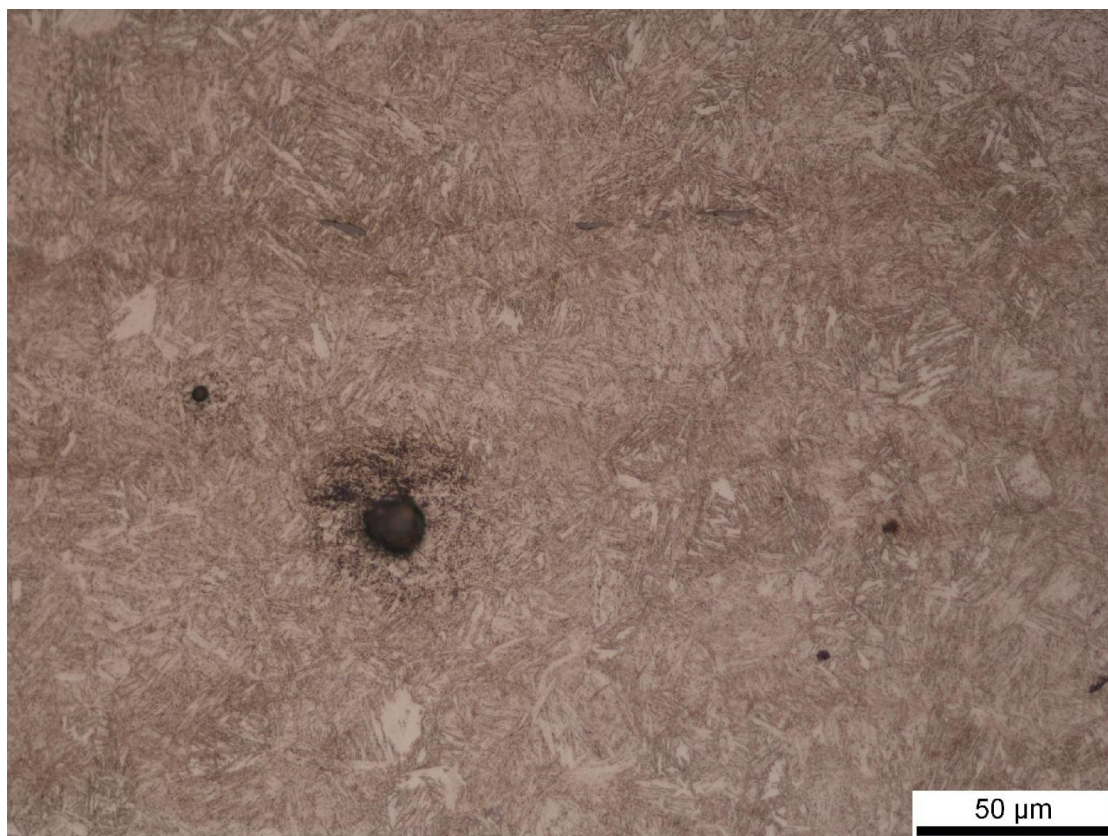
Εικόνα 7.4. Δοκίμιο 1.1.2 πριν την χημική προσβολή: (α) Εγκλείσματα σουλφιδίων του μαγγανίου, (β) Εγκλείσματα από οξείδια του σιδήρου και διοξείδιο του πυριτίου



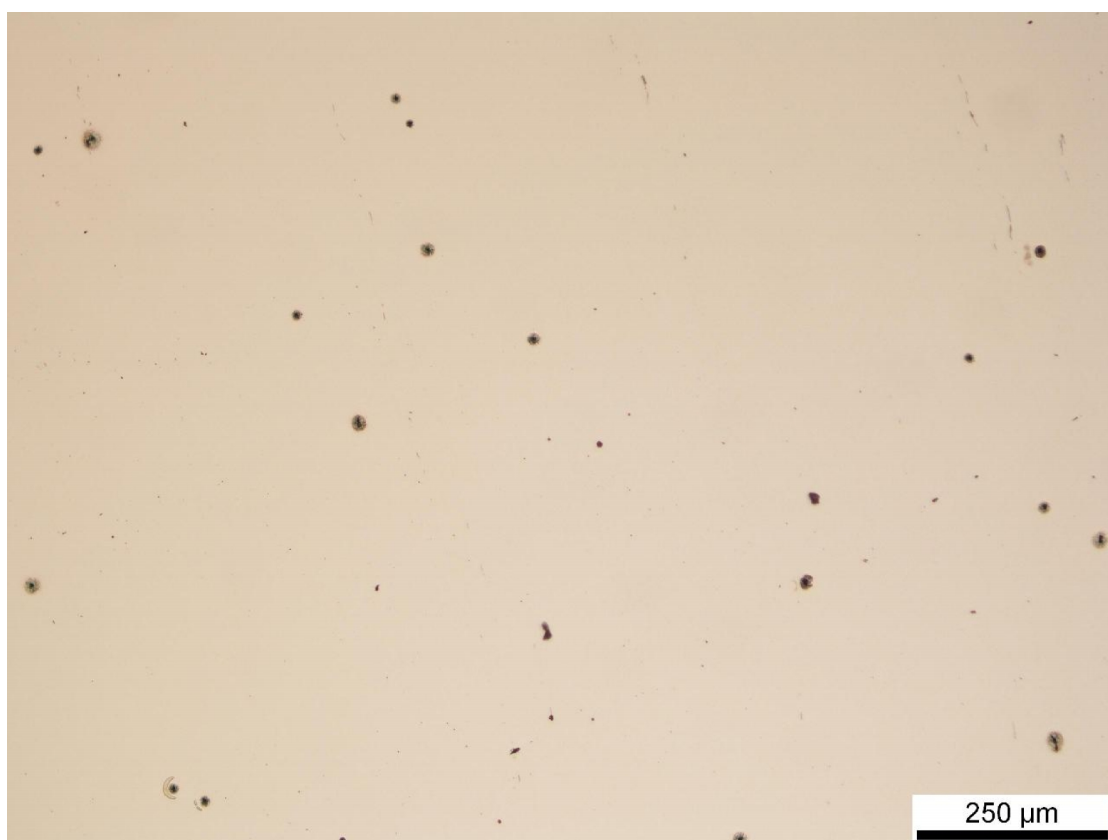
Εικόνα 7.5. Δοκίμιο 1.1.2 μετά την χημική προσβολή

Η μεταλογραφική ανάλυση του δεύτερου εξαρτήματος (Δ2) πραγματοποιήθηκε στο δοκίμιο Δ 2.1.4, το οποίο προέρχεται από περιοχή έντονης παραμόρφωσης στο σημείο που γίνεται η διαμόρφωση “U”. Δεδομένου ότι το προς εξέταση δοκίμιο προέρχεται από το ίδιο υλικό με το πρώτο, η μικροδομή δεν διαφέρει, δηλαδή πρόκειται για επαναφερμένο μαρτενσίτη (Εικόνα 7.6). Καθ’ όμοιο τρόπο με το πρώτο δείγμα, παρατηρείται ότι και σε αυτή τη περίπτωση το υλικό είναι πορώδες και μάλιστα σε μεγαλύτερο βαθμό (Εικόνα 7.6, 7.7).

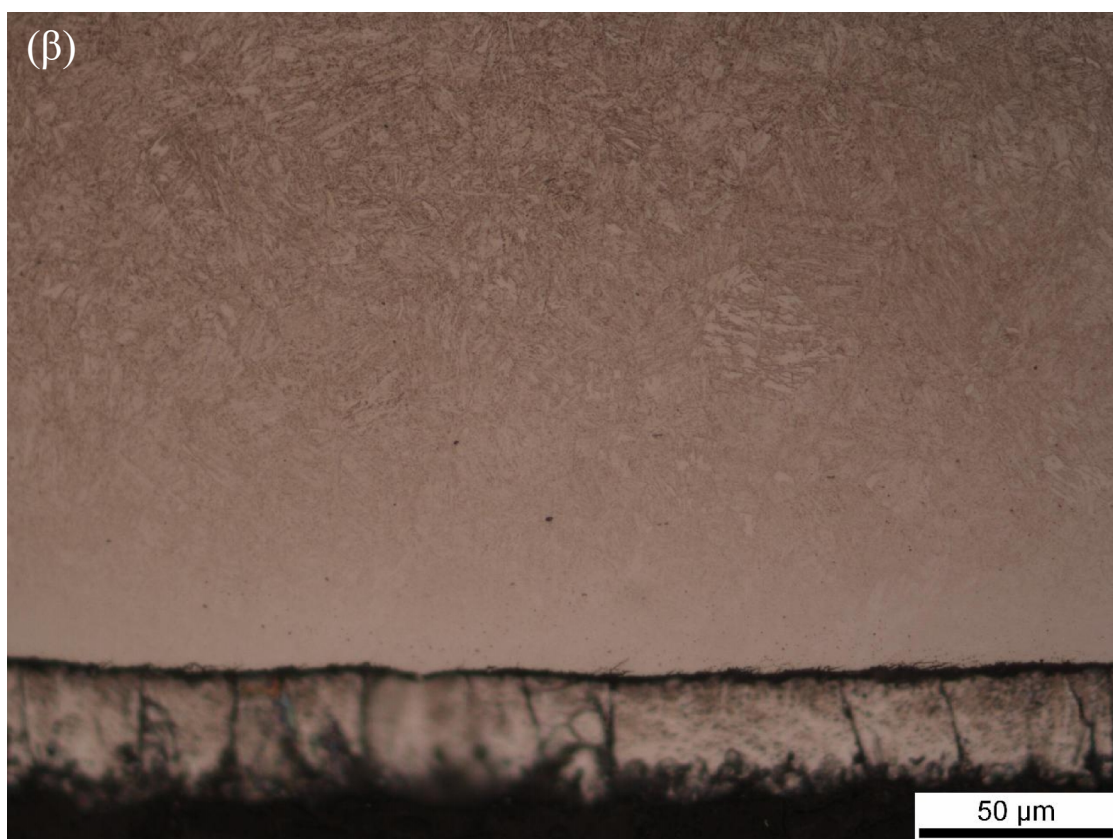
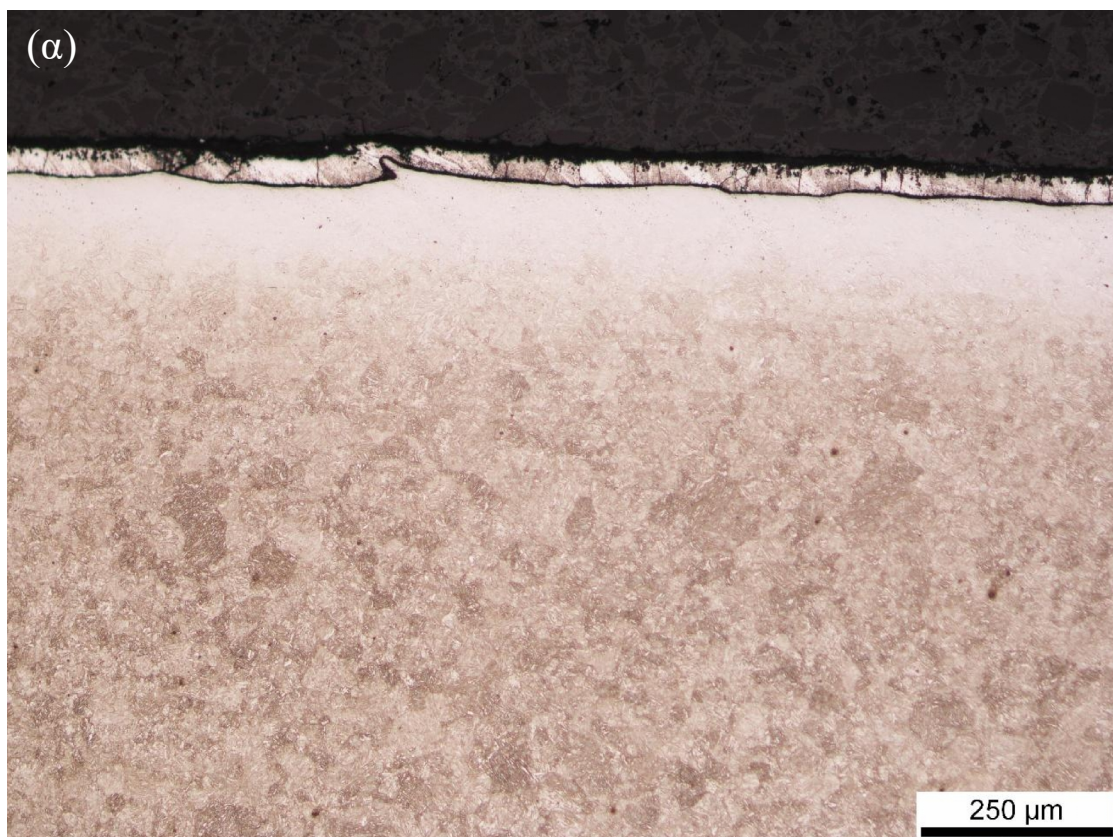
Στην εικόνα 7.8α απεικονίζεται το σημείο της ράβδου που βρίσκεται στο άνω άκρο της διαμόρφωσης που έχει έντονες εφελκυστικές τάσεις, ενώ αντίστοιχα στην εικόνα 7.8β απεικονίζεται το σημείο της ράβδου που βρίσκεται στο κάτω άκρο της διαμόρφωσης που έχει υποστεί την μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση.



Εικόνα 7.6. Δοκίμιο 2.1.4: μετά την χημική προσβολή. Εμφάνιση δομής και πόρων.



Εικόνα 7.7. Δοκίμιο 2.1.4: πριν την χημική προσβολή: εμφάνιση πόρων (porosity).

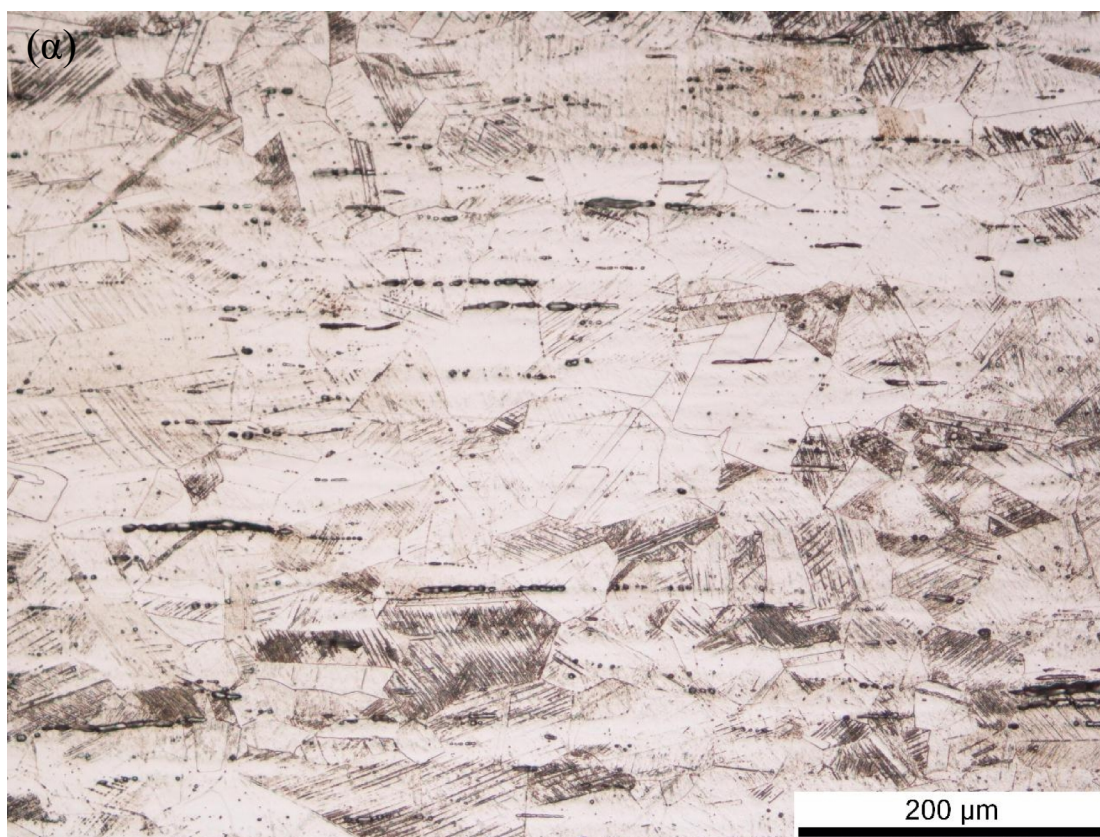


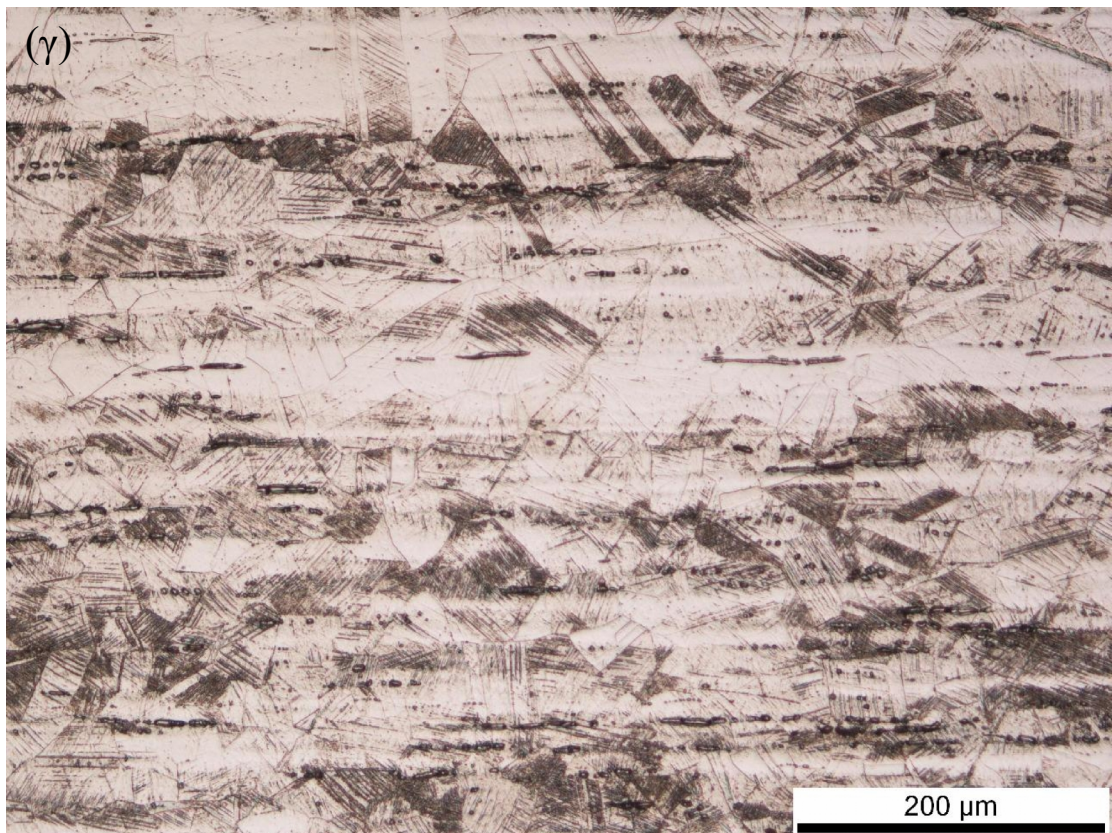
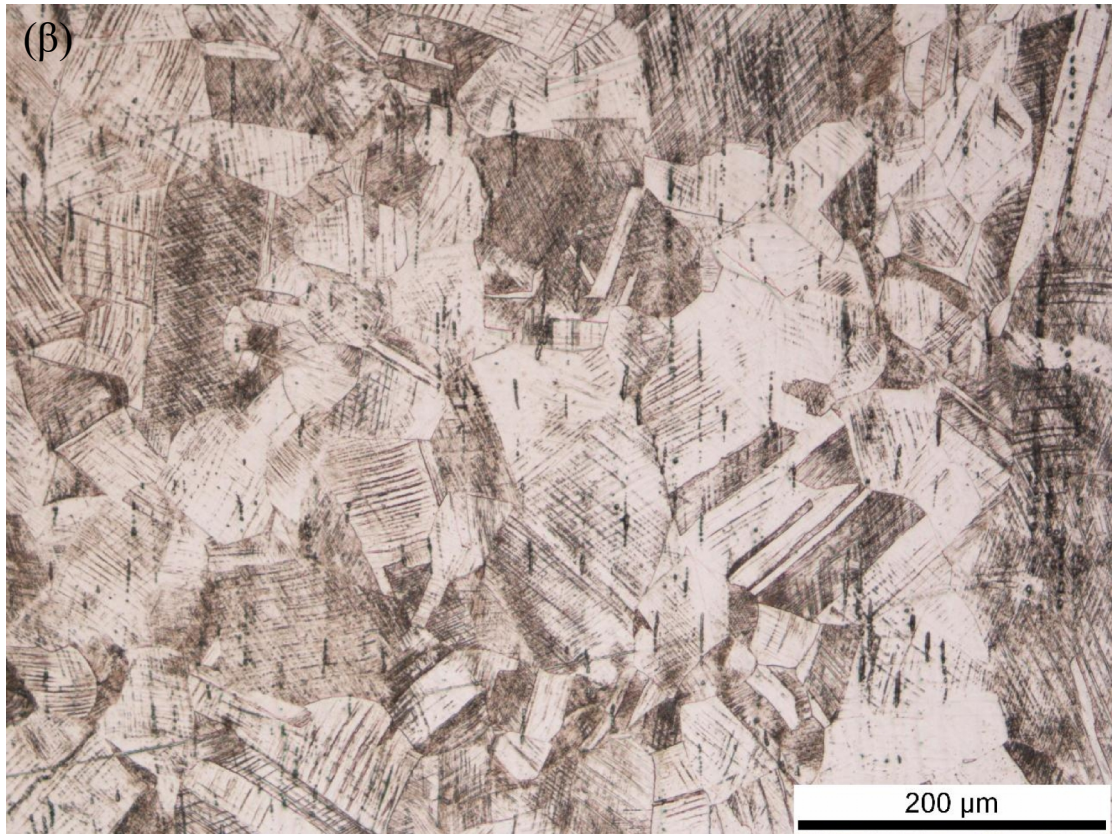
Εικόνα 7.8. Δοκίμιο 2.1.4: (α) Άνω άκρο της ράβδου στη περιοχή διαμόρφωσης (εφελκυστικές τάσεις), (β) Κάτω άκρο της ράβδου στη περιοχή διαμόρφωσης (θλιπτικές τάσεις).

Το τρίτο δοκίμιο (Δ3) εξετάστηκε μελετώντας δύο δοκίμια, από διαφορετικές περιοχές το καθένα. Το Δ3.1.4 που βρίσκεται στη περιοχή μορφοποίησης “U” και το Δ3.1.5 που βρίσκεται στην περιοχή που έχει διαμορφωθεί το σπείρωμα. Ως προς τη δομή του υλικού, παρατηρούνται ομοιόμορφοι κόκκοι ωστενίτη, όπου στο εσωτερικό τους υπάρχουν διδυμίες που αποτελούν προϊόν ανόπτυσης. Ταυτόχρονα υπάρχουν παραμορφωμένοι κόκκοι ωστενίτη οι οποίοι διακρίνονται από την πυκνότητα των γραμμών ολίσθησης. Οι μαύρες περιοχές είναι μαρτενσίτης που έχει μετασχηματιστεί εντός της ωστενιτικής μήτρας η οποία είναι σε μικρό ποσοστό (Εικόνα 7.9). Ως σύνολο η συγκεκριμένη δομή είναι πλήρως ανομοιογενής και δεν προσφέρεται για χρήσεις που χρίζουν αντοχής σε κόπωση.

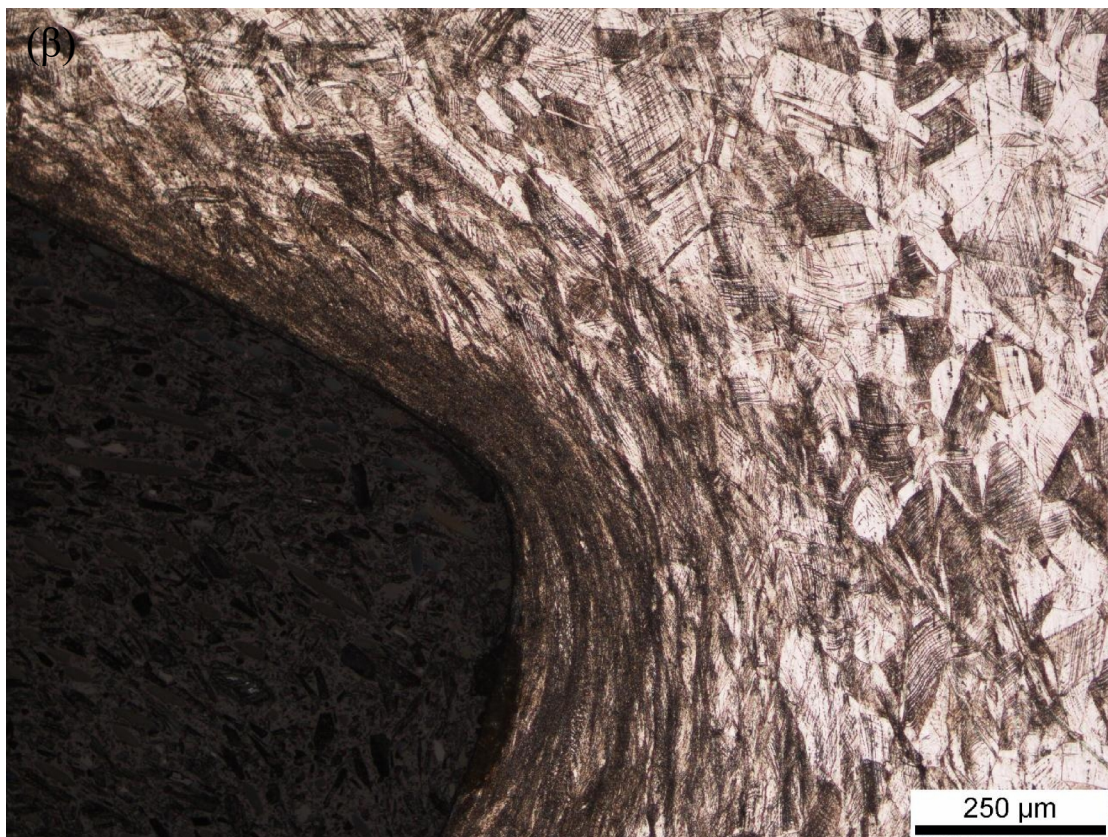
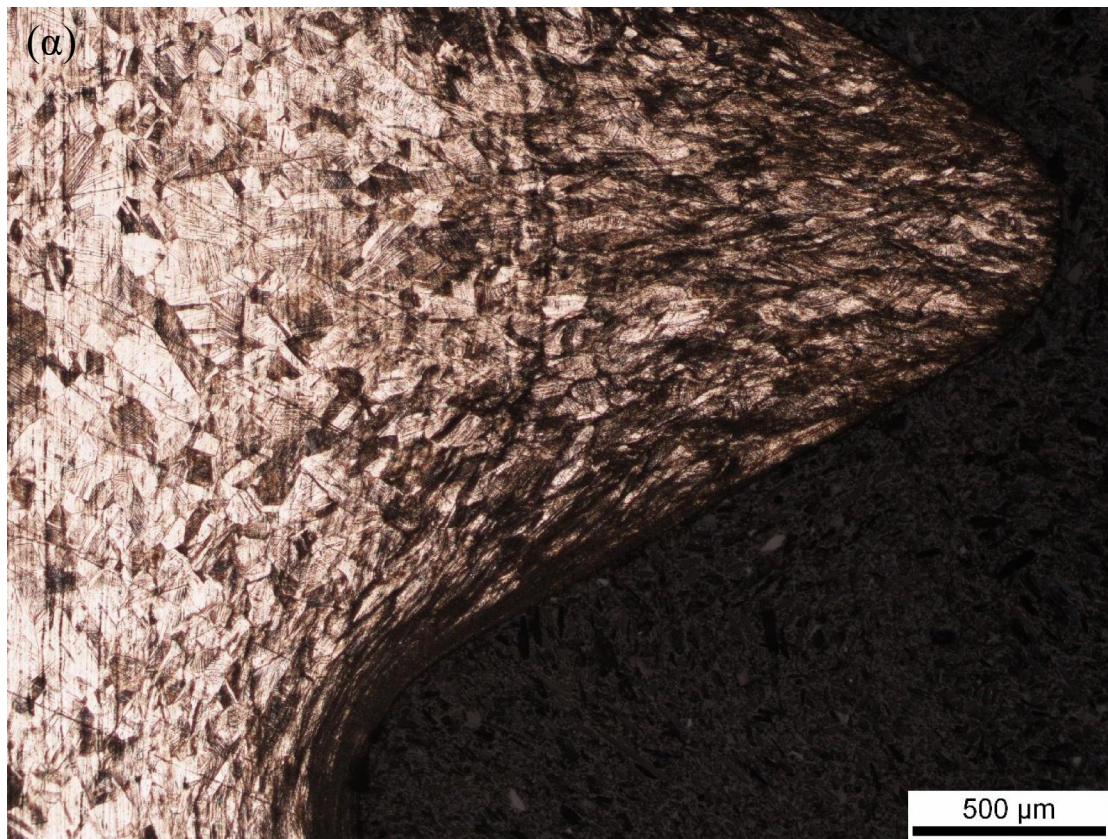
Στη περιοχή του σπειρώματος απεικονίζεται έντονη πλαστική παραμόρφωση των ωστενιτικών κόκκων η οποία οδηγεί στην δημιουργία γραμμών ολίσθησης (slip lines) στο εσωτερικό της, αλλά και τον μετασχηματισμό μαρτενσίτη ειδικά όταν η παραμόρφωση γίνεται εντονότερη (Εικόνα 7.10).

Τέλος, παρατηρούνται επιμηκυμένα εγκλείσματα (Εικόνα 7.11). Πιο συγκεκριμένα, γραμμικά εγκλείσματα σουλφιδίων του μαγγανίου και του σεληνίου. Τέτοιου είδους οξειδία συναντώνται σε ανοξείδωτους χάλυβες σαν και αυτόν, διότι το σελήνιο (Se) και το θείο (S) αποτελούν προσθήκες σε τέτοιου είδους χάλυβες με σκοπό τη βελτίωση της κατεργασιμότητάς (free cutting stainless steel).

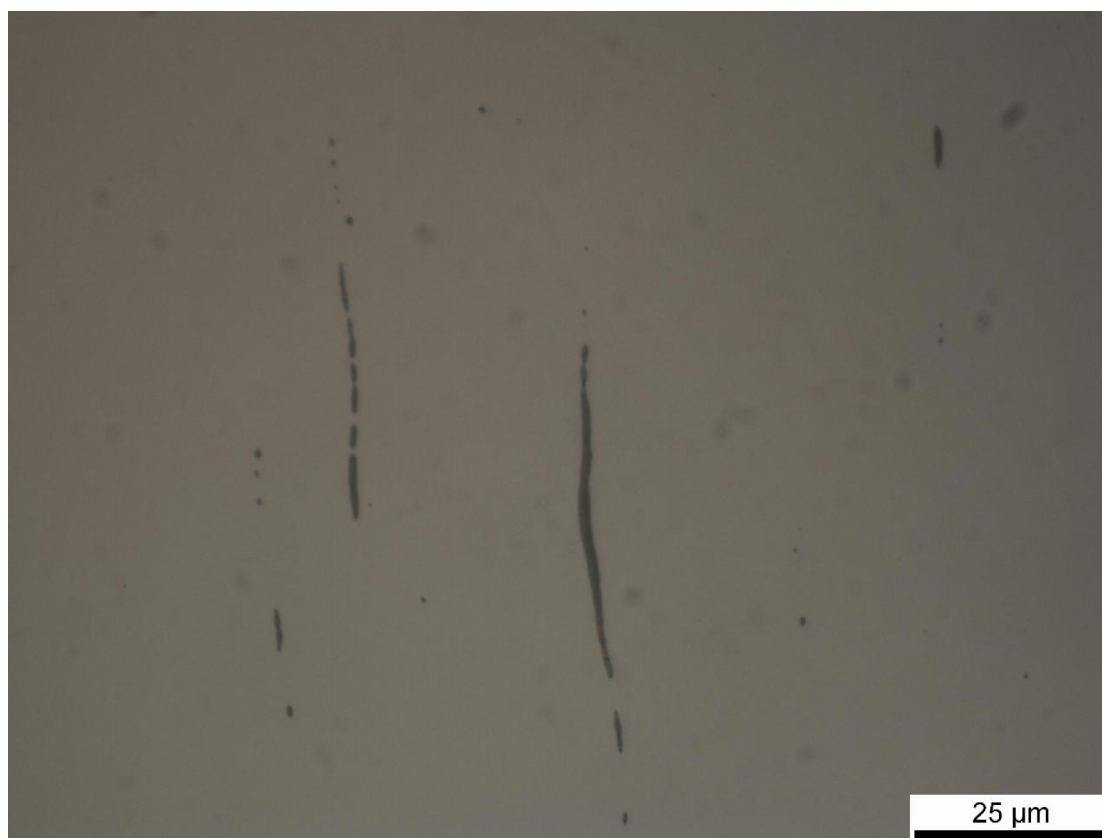




Εικόνα 7.9. Δομή τρίτου δείγματος: (α) Δοκίμιο 3.1.4,
(β) Δοκίμιο 3.1.5 και (γ) Δοκίμιο 3.1.4



Εικόνα 7.10. Δοκίμιο 3.1.5: Παραμόρφωση σπειρώματος: (α) Δοκίμιο 3.1.5 και (β) Δοκίμιο 3.1.5



Εικόνα 7.11. Δοκίμιο 3.1.4: εγκλείσματα

Τα συμπεράσματα που γενικά προκύπτουν από την οπτική μικροσκοπία είναι η ύπαρξη εγκλεισμάτων, κυρίως στα δύο πρώτα δείγματα (Δ1 και Δ2), όπου κάνουν την εμφάνισή τους στα όρια των κόκκων γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την αντοχή του υλικού σε κόπωση.

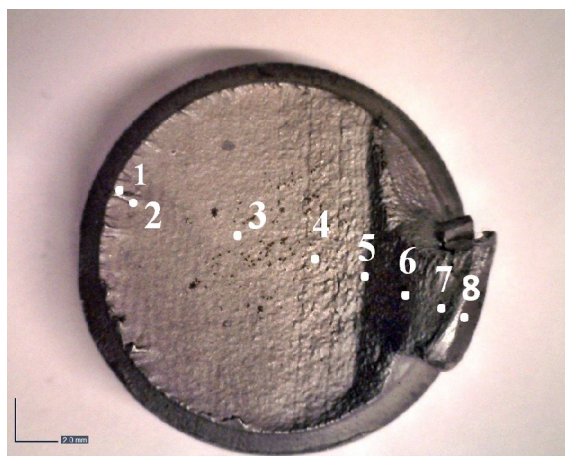
Η διαδικασία της διαμόρφωσης του σπειρώματος (thread rolling) περιλάμβανε ατέλειες, όπως για παράδειγμα η ανομοιομορφη πλαστική παραμόρφωση στις πλευρές του σπειρώματος, η οποία οδηγούσε σε περαιτέρω μείωση της αντοχής του υλικού σε κόπωση. Επίσης, οι μικρορωγμές που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης διαμόρφωσης αποτελούν εν δυνάμει σημεία έναρξης θραύσης (crack origin).

Η μικροδομή του ανοξείδωτου χάλυβα, στη προκειμένη περίπτωση, έχει επιβαρυνθεί από παράγοντες όπως η μη ορθή πλαστική παραμόρφωση, η ύπαρξη εγκλεισμάτων και ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, μειώνοντας αρκετά την αντοχή σε κόπωση.

6.5.2 Ανάλυση επιφανειών θραύσης με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM)

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο σάρωσης δέσμης ηλεκτρονίων (SEM) τύπου JEOL-JSM5600 LV. Για την ανάλυση θραύσης εξετάστηκαν τα δοκίμια που φέρουν τη θραύση (αποκόλληση), τα οποία σύμφωνα με τον πίνακα 6.1 είναι για το δείγμα 1 το 1.2.1, για το δείγμα 2, έχουμε δύο δοκίμια 2.2.2 2.2.1 Π, διότι έχουμε θραύση σε δύο σημεία και από το τρίτο δοκίμιο το 3.2.1 .

6.5.2.1. Ανάλυση θραύσης δείγματος 1.2.1 (Δ1)



Εικόνα 6.30. Περιοχές μελέτης στην ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM) στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 1.2.1

6.31α). Στη περιοχή αυτή υπάρχουν, επίσης, μικρές ρηγματώσεις, η εμφάνιση των οποίων μαρτυρά υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Το σημείο 1 βρίσκεται πάνω σε ένα από τα Ratchet marks, ενώ το 2 σε μία περιοχή μεταξύ δύο Ratchet marks (Εικόνα 6.31β). Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση και στα δύο σημεία παρατηρείται η δημιουργία “πόρων” όπου, κατόπιν παραμορφώσεως, μέρη ή ολόκληροι κόκκοι του υλικού αποκολλήθηκαν κατά την διάδοση της θραύσης δημιουργώντας αυτά τα κενά (εικόνα 6.31δ,στ).

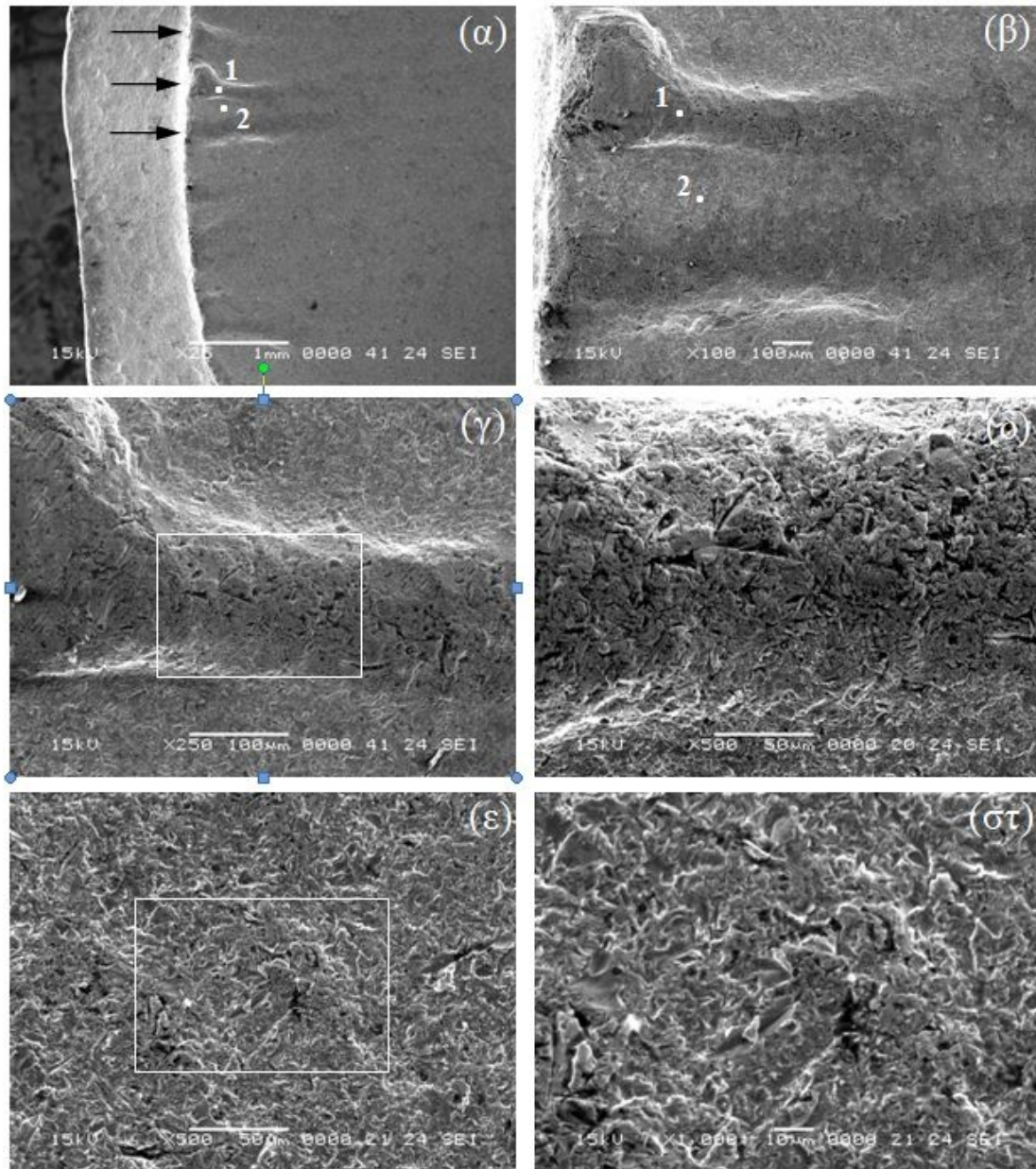
Η εικόνα 6.32 παρουσιάζει μία περιοχή από τη διάδοση της θραύσης. Συγκεκριμένα, το σημείο 3 το οποίο βρίσκεται 3mm περίπου από την άκρη και το σημείο 4 που βρίσκεται σε απόσταση 10mm. Τα Ratchet marks αναπτύχθηκαν προς το κέντρο, όπου σε συνδυασμό με την εξέλιξη της θραύσης δημιουργήθηκε μια ενδιάμεση ως προς την τραχύτητα επιφάνεια. Πρόκειται για χαρακτηριστική ενδοκρυσταλλική θραύση (εικόνα 6.32α,γ), όπου κάποιοι κόκκοι έχουν προηγουμένως παραμορφωθεί και κάποιοι άλλοι έχουν θρυμματιστεί (εικόνα 6.32 β,δ). Στο σημείο 4, υπάρχουν περιοχές που φαίνονται λείες και γυαλιστερές λόγω της τριβής των επιφανειών κατά τη διάδοση της θραύσης.

Από το σημείο 5, περίπου 11mm από το σημείο έναρξης της θραύσης, ξεκινά η περιοχή τελικής αποκόλλησης και η τραχύτητα αυξάνεται πλέον με αρκετά μεγαλύτερο ρυθμό όσο διαδίδεται προς το σημείο 6 (Εικόνα 6.33 α,β). Έτσι, καθώς μειώνεται η ενεργή επιφάνεια του στηρίγματος, η ρωγμή διαδίδεται ραγδαία και για αυτό η επιφάνεια θραύσης γίνεται τραχεία (Εικόνα 6.33 γ,δ). Παρατηρείται έντονη πλαστική παραμόρφωση, με την επιμήκυνση των θυλάκων αποδεικνύοντας και όλκιμη συμπεριφορά.

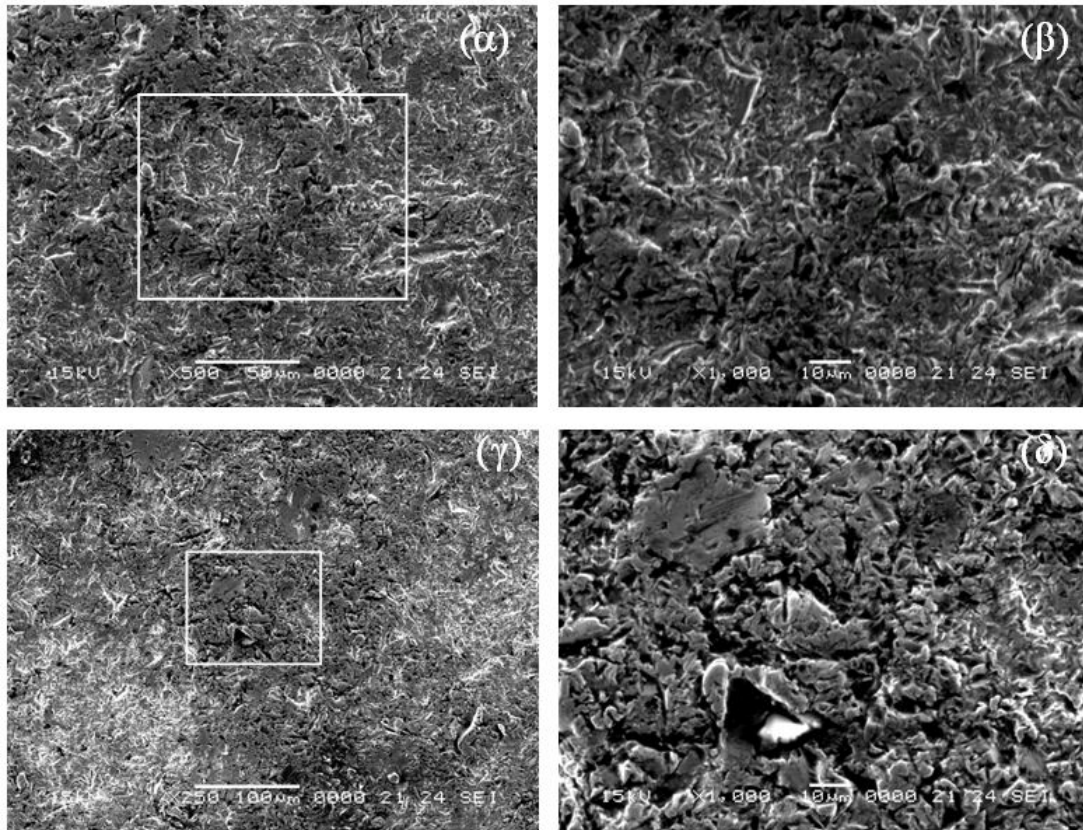
Στο πρώτο δείγμα η θραύση έγινε στην αρχή του σπειρώματος, στην εγκοπή που δημιουργείται αμέσως μετά την πρώτη σπείρα στο βάθος του σπειρώματος. Η επιφάνεια θραύσης εμφανίζει τις τρεις περιοχές, χαρακτηριστικές για θραύση από κόπωση. Η έλλειψη σημαδιών παραλίας είναι ένδειξη ολιγοκυκλικής κόπωσης. Μετά από λεπτομερή εξέταση της επιφάνειας με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM), περιγράφονται τα σημεία όπως φαίνονται στην εικόνα 6.30.

Η μελέτη ξεκίνησε από την περιφέρεια όπου γίνεται η έναρξη θραύσης με σημάδια “V” (Εικόνα

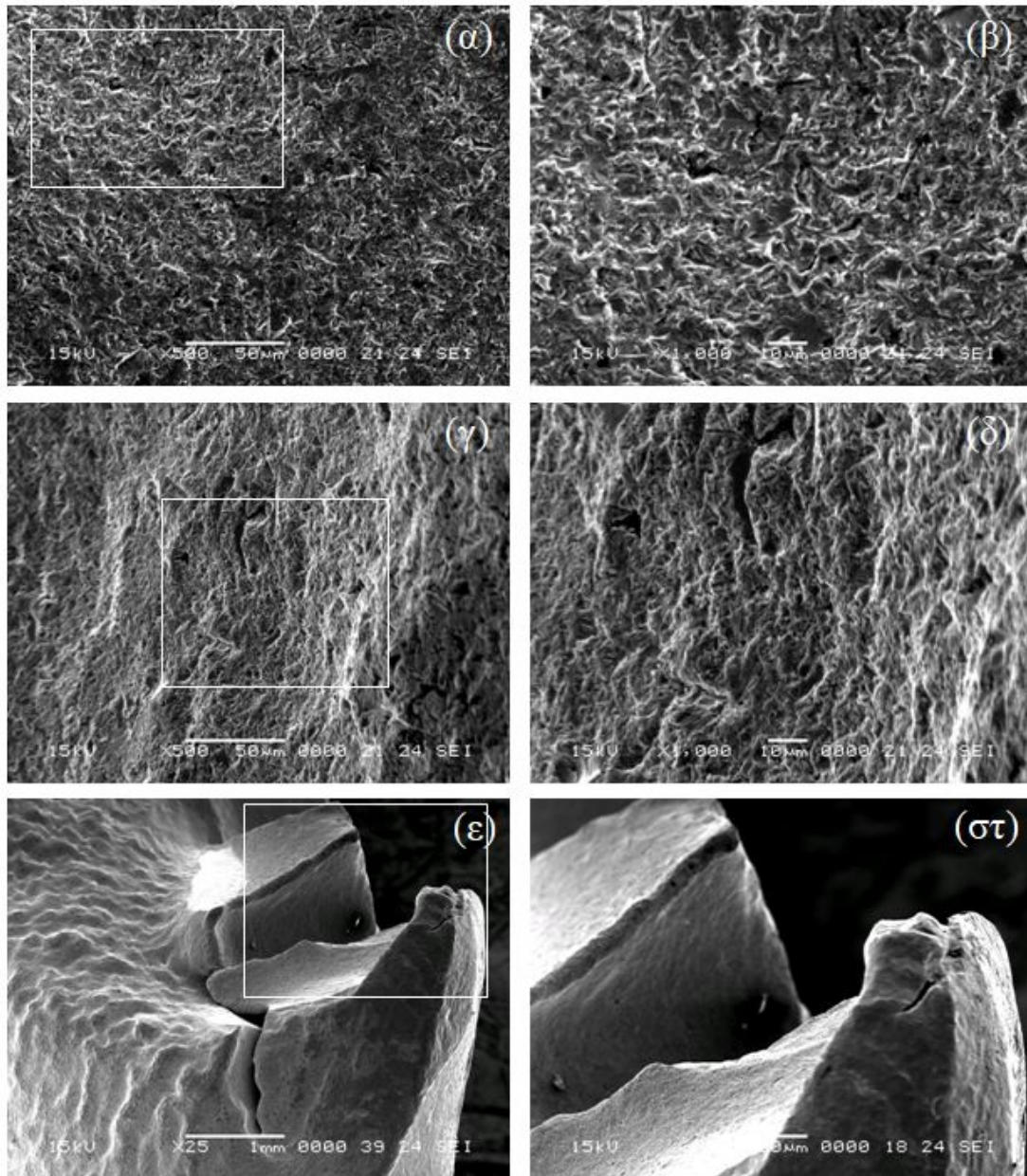
Γενικά, το πόσο ομαλή ή όχι είναι η επιφάνεια δείχνει την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής. Τέλος, κατά την τελική αποκόλληση δημιουργήθηκαν δευτερογενείς ρωγμές κάθετα στην επιφάνεια θραύσης όπως παρατηρείται στην εικόνα 6.33 ε,στ.



Εικόνα 6.31. Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 1.2.1 στην περιοχή έναρξης θραύσης: (α) Μέτωπο έναρξης θραύσης (μαύρα βελόκια), (β) Σημεία μελέτης (1) και (2) ($M \times 25$), (γ) Σημείο 1 ($M \times 250$), (δ) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 500$) ε) Σημείο 2 ($M \times 500$), στ) Λεπτομέρεια σημείο 2 ($M \times 1000$).

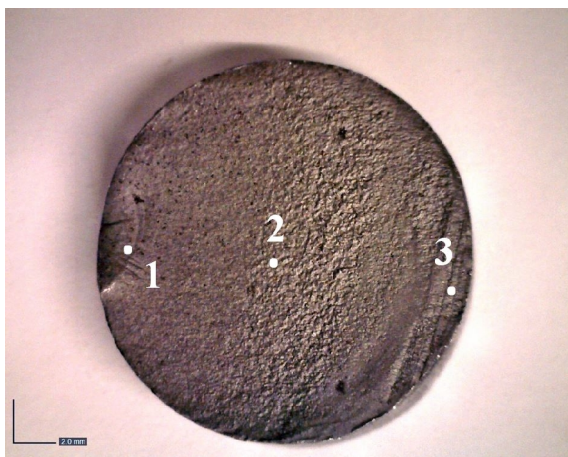


Εικόνα 6.32. Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 1.2.1 στα σημεία μελέτης (3) και (4): (α) Σημείο 3 ($M \times 500$), (β) Λεπτομέρεια σημείο 3 ($M \times 1000$) (γ) Σημείο 4 ($M \times 250$), (δ) Λεπτομέρεια σημείο 4 ($M \times 1000$).



Εικόνα 6.33. Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 1.2.1 στην περιοχή τελικής αποκόλλησης: (α) Σημείο 6 ($M \times 500$), (β) Λεπτομέρεια σημείο 6 ($M \times 1000$), (γ) Σημείο 7 ($M \times 500$), (δ) Λεπτομέρεια σημείο 7 ($M \times 1000$), ε) Τελική αποκόλληση (Σημείο 8) ($M \times 25$), στ) Λεπτομέρεια σημείο 8 ($M \times 50$).

6.5.2.2. Ανάλυση θραύσης δείγματος 2.2.1 (Δ2)



Εικόνα 6.34. Περιοχές μελέτης στην ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM) στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 2.2.1

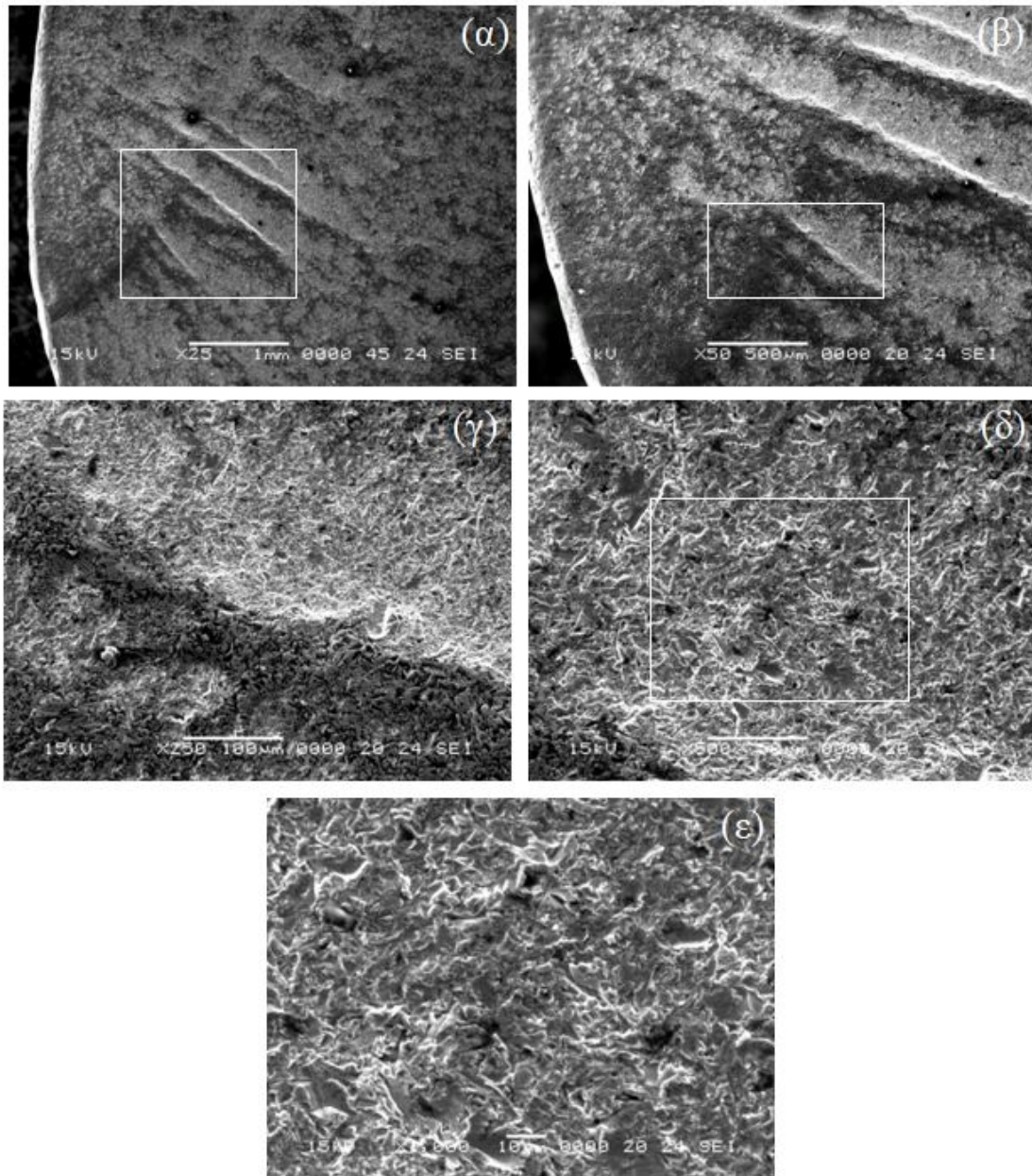
Το δεύτερο στήριγμα έσπασε σε δύο σημεία. Στην εικόνα 6.34 παρουσιάζεται η πρώτη επιφάνεια θραύσης και τα σημεία στα οποία εστίασε η ανάλυση στο SEM.

Τα σημεία 1 στην εικόνα 6.34 βρίσκεται στην περιοχή έναρξης της θραύσης η οποία αποδεικνύεται από ένα χαρακτηριστικό σημάδι “V” (Εικόνα 6.35α). Αρχικά η ρωγμή αναπτύχθηκε προς όλες τις κατευθύνσεις αφήνοντας στην επιφάνεια χαρακτηριστικά chevron marks με μορφή βεντάλιας (Εικόνα 6.35β). Μια πιο λεπτομερής παρατήρηση εμφανίζει την διακρυσταλλική θραύση

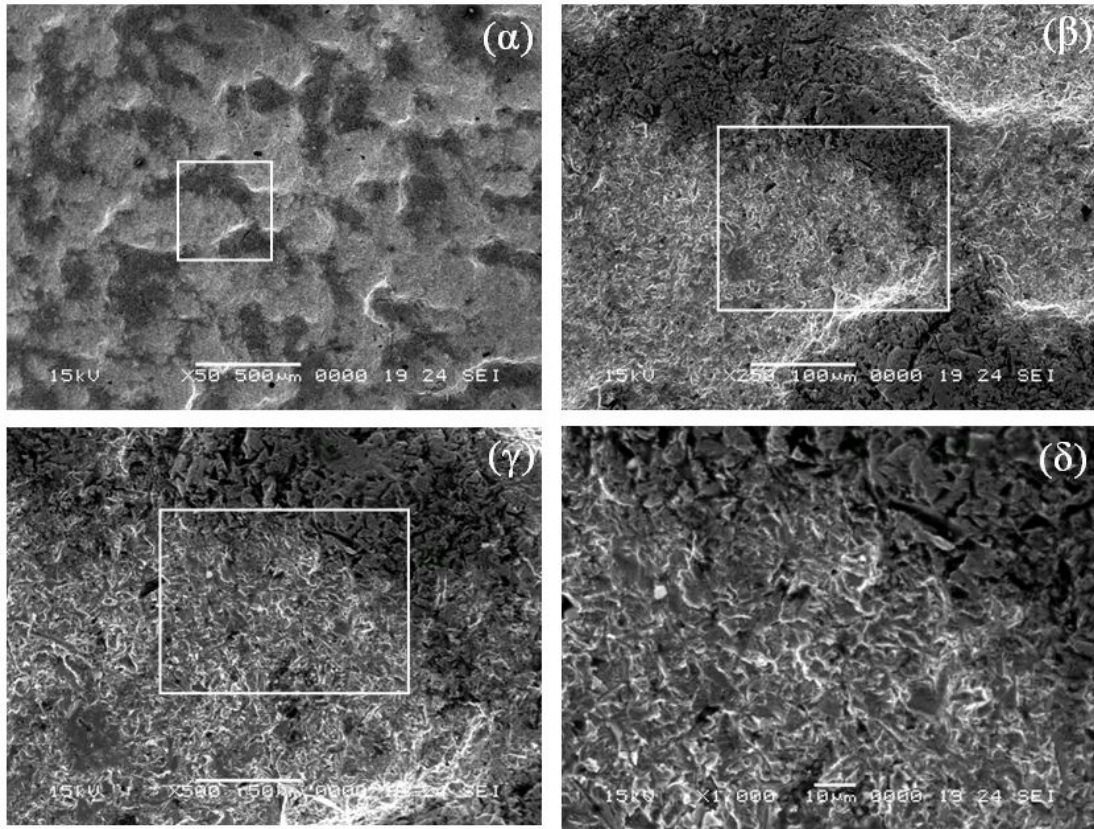
χαρακτηριστική όλκιμου υλικού (Εικόνα 6.35 γ, δ, ε).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ρωγμή διαδίδεται οριζόντια και γρήγορα, η επιφάνεια γίνεται πιο τραχεία όσο εξελίσσεται η θραύση. Στη μέση του δοκιμίου, 11mm από την άκρη, παρατηρούνται πόροι στο υλικό (Εικόνα 6.36α). Η δομή του υλικού του δεύτερου δείγματος (Δ2) φαίνεται να είναι πιο λεπτόκοκκη συγκριτικά με του πρώτου δείγματος (Δ1). Η θραύση ανατάσσεται διακρυσταλλικά (Εικόνα 6.36 β). ορισμένες περιοχές έχουν φθαρεί λόγω επαφής των δύο επιφανειών θραύσης κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος (Εικόνα 6.36 γ). Προς το κέντρο του εξαρτήματος η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται (Εικόνα 6.36 δ).

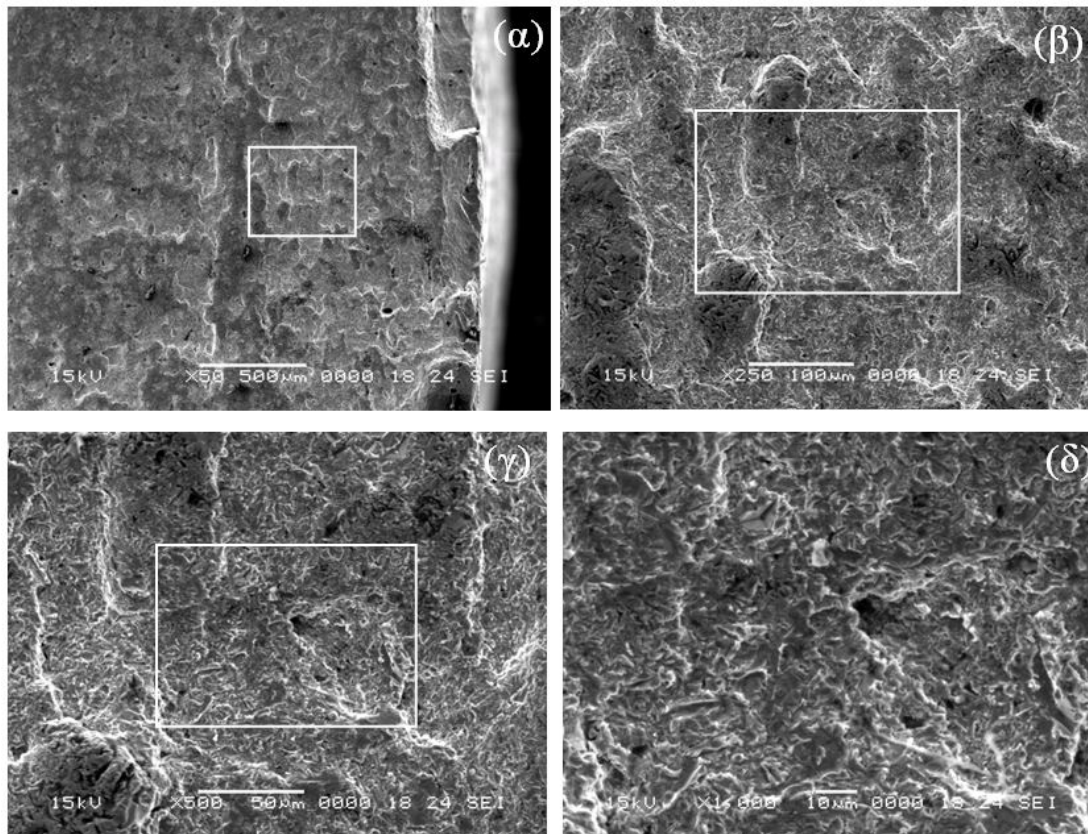
Τέλος, το σημείο 3 είναι στη περιοχή τελικής αποκόλλησης ακριβώς απέναντι απ’ την έναρξη θραύσης. Η επιφάνεια θραύσης σε αυτήν την περιοχή είναι επίπεδη και λεία δείχνοντας την εντύπωση ότι έχει κοπεί (Εικόνα 6.37 α). Σε μια πιο λεπτομερή παρατήρηση το υλικό εμφανίζει χαρακτηριστική θραύση όλκιμου υλικού, αλλά στην συγκεκριμένη περίπτωση αυξημένη καταπόνηση εκτονώθηκε ραγδαία στην περιοχή προκαλώντας το συγκεκριμένο σκίσιμο (Εικόνα 6.37 β,γ,δ).



Εικόνα 6.35. Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 2.2.1 στην περιοχή έναρξης θραύσης:
 (α) Σημείο 1 ($M \times 25$), (β) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 50$),
 (γ) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 250$) δ) Σημείο 2 ($M \times 500$),
 ε) Λεπτομέρεια σημείο 2 ($M \times 1000$).

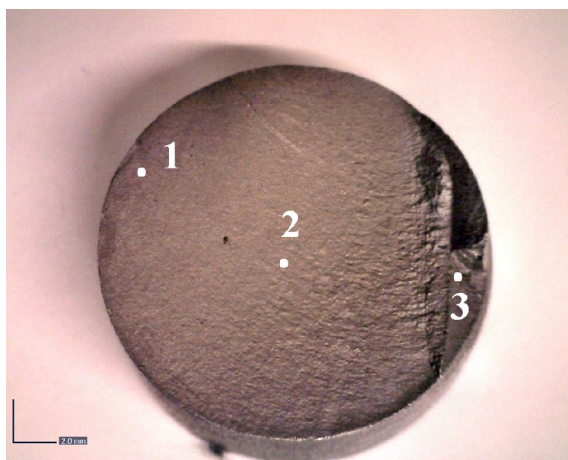


Εικόνα 6.36. Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 2.2.1 στην περιοχή διάδοσης θραύσης: (α) Σημείο 2 ($M \times 50$), (β) Λεπτομέρεια σημείο 2 ($M \times 250$), (γ) Λεπτομέρεια σημείο 2 ($M \times 500$) δ) Σημείο 2 ($M \times 1000$)



Εικόνα 6.37: Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 2.2.1 στην περιοχή τελικής αποκόλλησης: (α) Σημείο 2 ($M \times 50$), (β) Λεπτομέρεια σημείο 2 ($M \times 250$), (γ) Λεπτομέρεια σημείο 2 ($M \times 500$) δ) Λεπτομέρεια σημείο 2 ($M \times 1000$)

6.5.2.3. Ανάλυση θραύσης δείγματος 2.2.2 (Δ2)

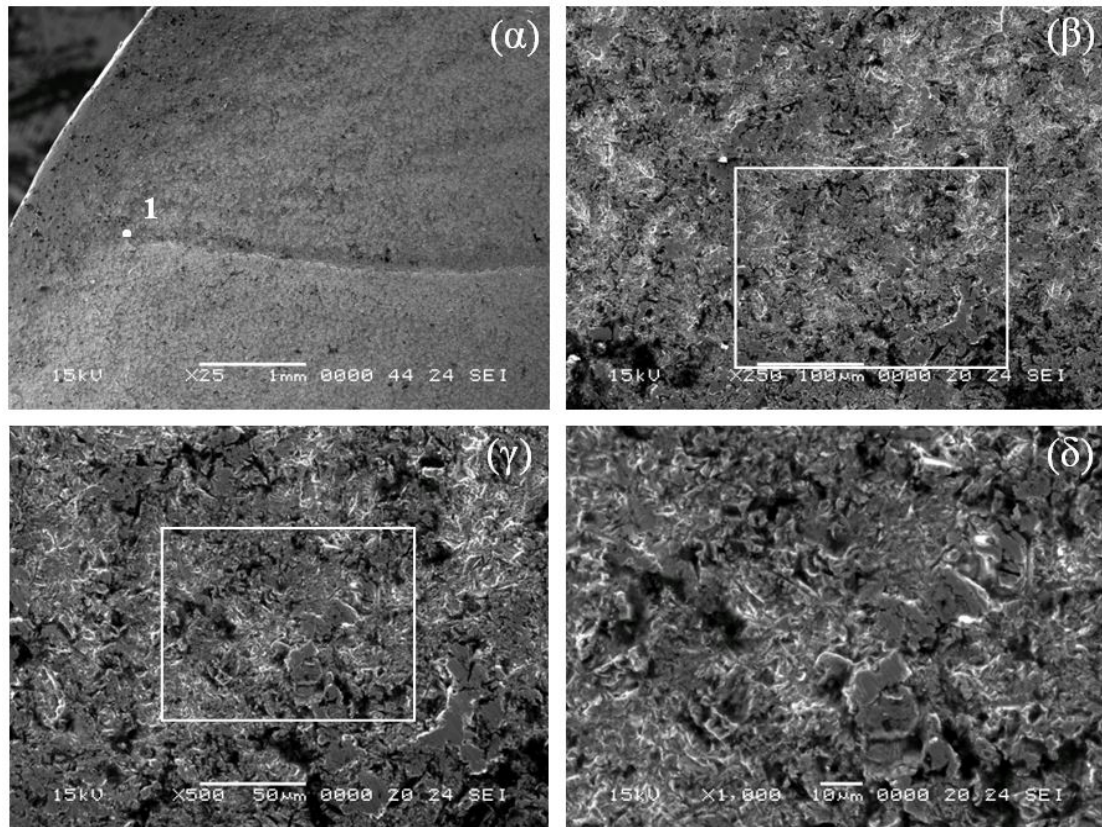


Εικόνα 6.38. Περιοχές μελέτης στην ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM) στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 2.2.2

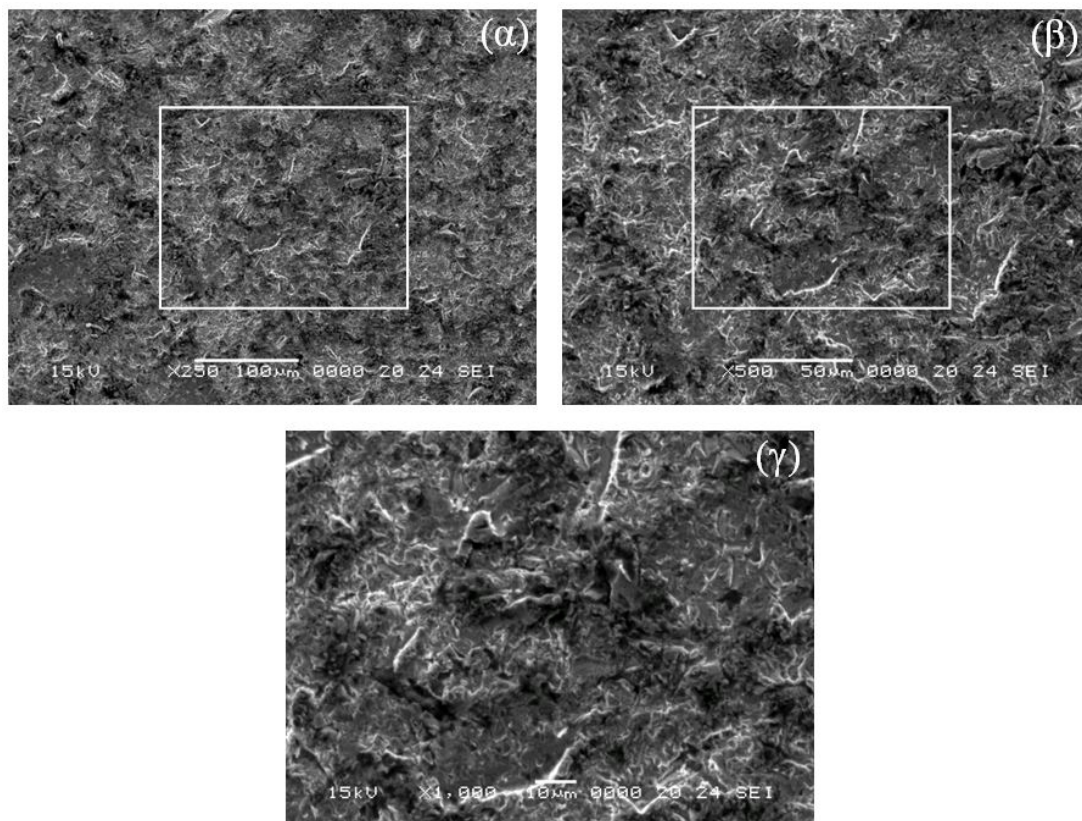
(Εικόνα 6.39β). Κατά την θραύση ορισμένοι υποκρυσταλλοί έχουν υποστεί παραμόρφωση (Εικόνα 6.40γ,δ). Το σημείο 2 της εικόνας 6.38 βρίσκεται στο περίπου κέντρο του δοκιμίου (Εικόνα 6.41α). Σε αυτή την περιοχή αυξάνεται σταδιακά η τραχύτητα της επιφάνειας θραύσης (Εικόνα 6.41 β,γ), ενώ όσο πλησιάζει η τελική θραύση γίνεται εμφανής η εναλλαγή στον προσανατολισμό της διάδοσης της θραύσης. Η κατεύθυνση κατά την ανάπτυξη της θραύσης, στην συγκεκριμένη περίπτωση, αποδεικνύει έναν συνδυασμό καταπονήσεων εφελκυστηκών, καμπτικών, στρεπτικών. Το σημείο 3 της εικόνας 6.38 βρίσκεται στην περιοχή τελικής αποκόλλησης (Εικόνα 6.42). Η διάδοση της ρωγμής έχει εξελιχθεί ομαλά καλύπτοντας 90% της διατομής του εξαρτήματος. Αυτό είναι χαρακτηριστικό ολιγοκυκλικής κόπωσης. Είναι αναμενόμενο το υπόλοιπο 10% της διατομής (Εικόνα 6.42α) να υφίσταται μία βίαια αποκόλληση η οποία προκάλεσε δευτερογενείς ρωγμές στην πλαϊνή επιφάνεια (Εικόνα 6.42 β). η βίαιη αποκόλληση έχει ξεφύγει από το επίπεδο διάδοσης θραύσης (Εικόνα 6.42 γ,δ). Η θραύση είναι ψαθυρή διακρυσταλλική χαρακτηριστική όλκιμου υλικού (Εικόνα 6.42 ε).

Το εξάρτημα κατέληξε με δεύτερη επιφάνεια θραύσης (Εικόνα 6.38). Στην προκειμένη περίπτωση το σημείο έναρξης της θραύσης με το σημείο τελικής αποκόλλησης δημιουργούν μια γωνία 100° περίπου. Αυτό δείχνει την ύπαρξη στρεπτικής καταπόνησης.

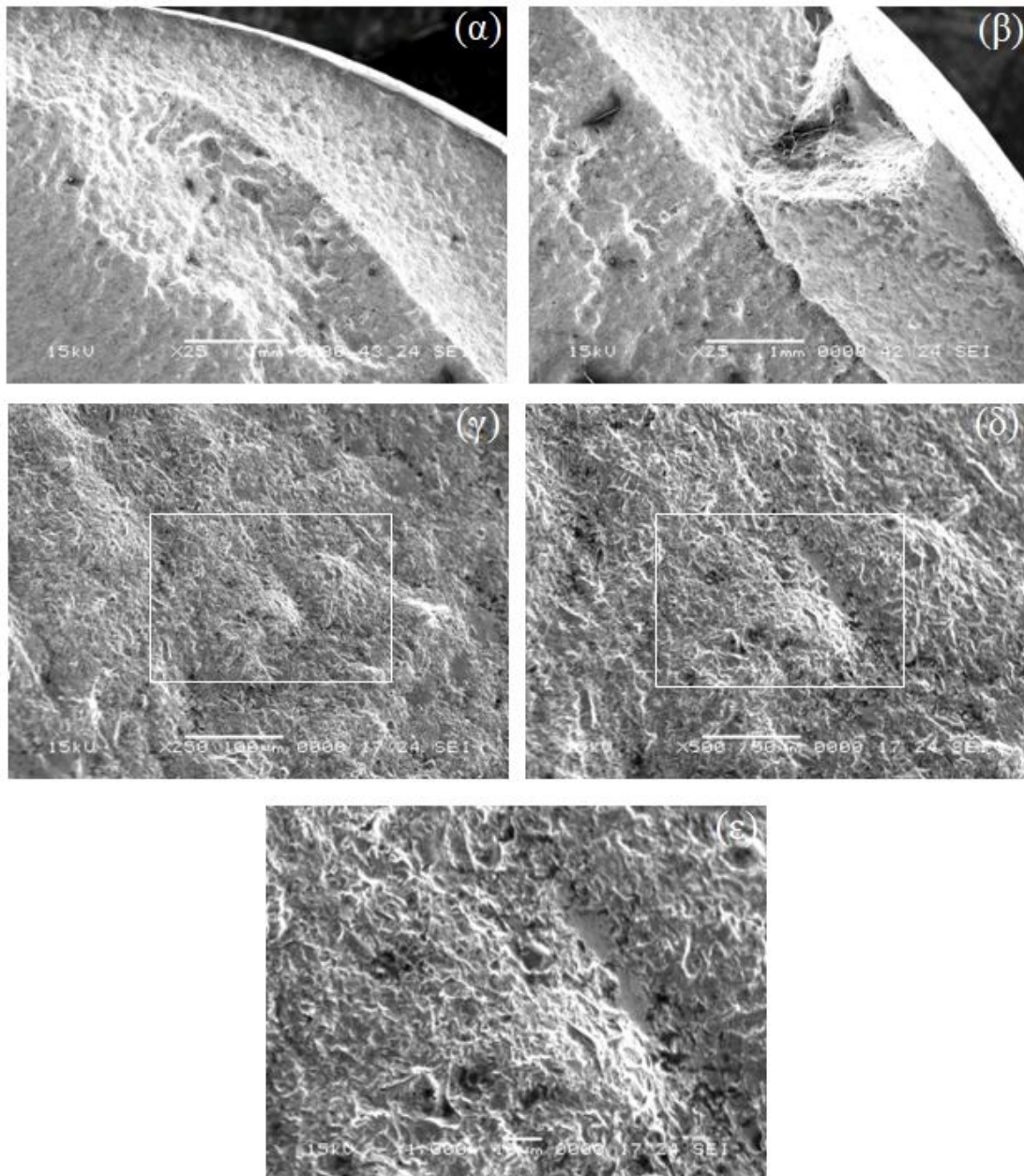
Στο σημείο 1 της εικόνας 6.38 εντοπίζεται το σημείο έναρξης της θραύσης (Εικόνα 6.39α). Κατά την έναρξη διάδοσης της ρωγμής προς το εσωτερικό το εξάρτημα καταπονείται στρεπτικά προκαλώντας λεπτές αναδιπλώσεις. Σε μία πιο λεπτομερή παρατήρηση, σε μεγαλύτερη μεγέθυνση, κάποιες επιφάνειες έχουν έρθει σε επαφή έχοντας υποστεί φθορά



*Εικόνα 6.39 Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 2.2.1 στην περιοχή έναρξης θραύσης:
(α) Σημείο 1 ($M \times 25$), (β) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 250$), (γ) Λεπτομέρεια σημείο 1
($M \times 500$), (δ) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 1000$)*

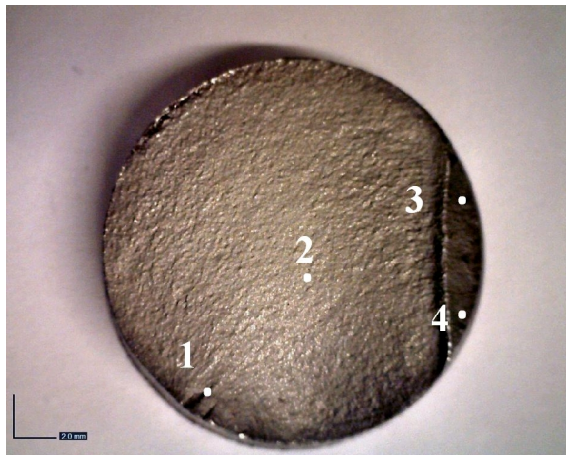


Εικόνα 6.40. Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 2.2.1 στην περιοχή διάδοσης θραύσης: (α) Σημείο 2 ($M \times 250$), (β) Λεπτομέρεια σημείο 2 ($M \times 500$), (γ) Λεπτομέρεια σημείο 2 ($M \times 1000$).



Εικόνα 6.41. Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 2.2.1 στην περιοχή τελικής αποκόλλησης: (α) Σημείο 3 ($M \times 25$), (β) Δευτερογενείς ρωγμές στην περιοχή αποκόλλησης ($M \times 25$), (γ) Λεπτομέρεια σημείο 3 ($M \times 250$), (δ) Λεπτομέρεια σημείο 3 ($M \times 500$), (ε) Λεπτομέρεια σημείο 3 ($M \times 1000$)

6.5.2.4. Ανάλυση θραύσης δείγματος 3.2.1 (Δ3)



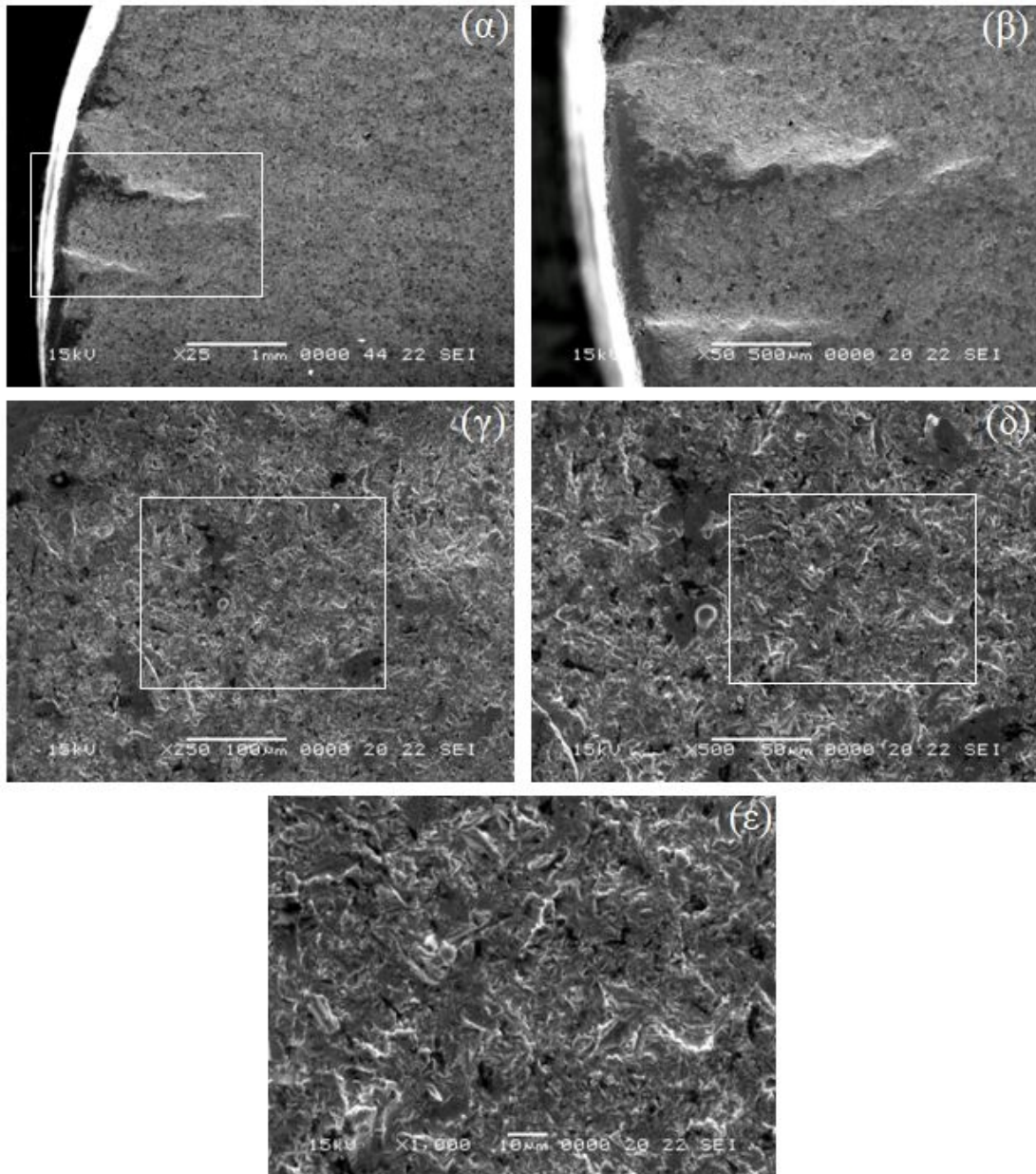
Εικόνα 6.42. Περιοχές μελέτης στην ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM) στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου 3.2.1

συνδυαζόμενα είδη φορτίων (στρεπτικά, καμπτικά κλπ) είχαν, συγκριτικά, μεγαλύτερη επίδραση στο συγκεκριμένο υλικό. Η έναρξη θραύσης βρίσκεται στο σημείο 1 της εικόνας 6.43 α. Η αρχική ανάπτυξη ρωγμής έγινε μέσω των Ratchet marks (Εικόνα 6.43 β). Η θραύση είναι διακρυσταλλική, χαρακτηριστική όλκιμου υλικού (Εικόνα 6.43 γ,δ,ε).

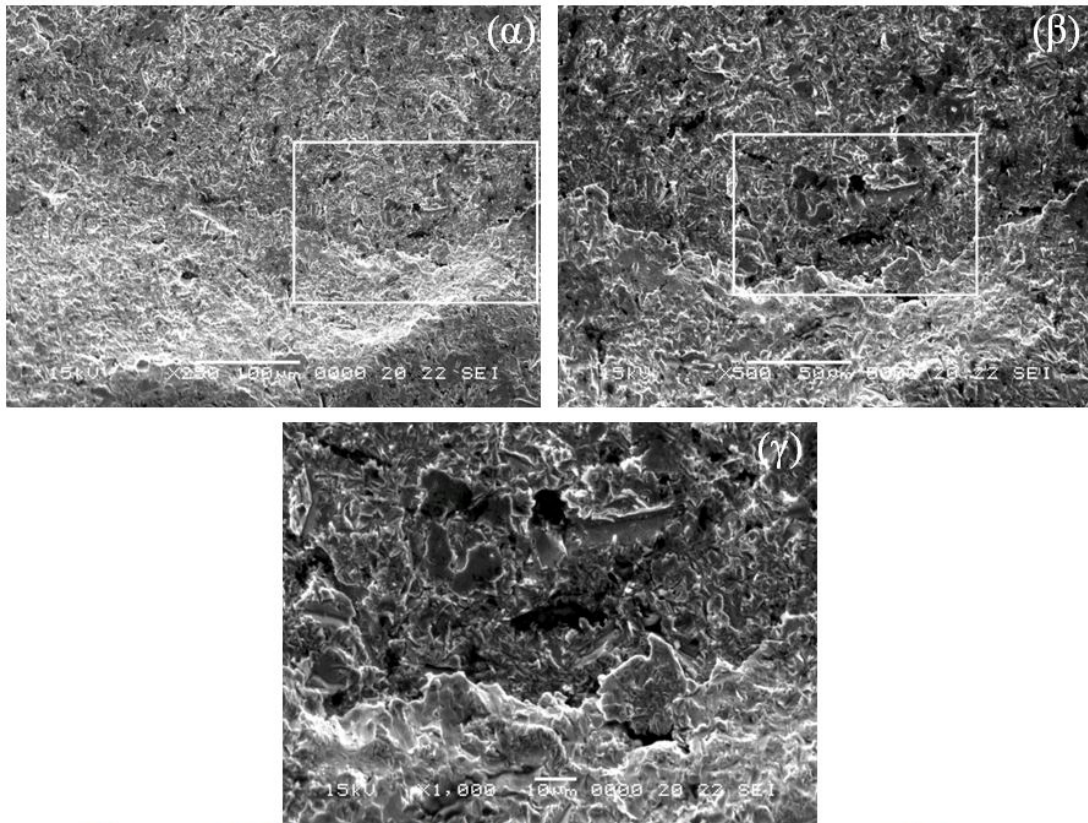
Το σημείο 2 στην εικόνα 6.42 βρίσκεται στο κέντρο του δείγματος στην περιοχή ανάπτυξης της ρωγμής (Εικόνα 6.44α). Λόγω της καλύτερης ολκιμότητας σε σχέση με το προηγούμενο υλικό, η διάδοση της ρωγμής αφήνει μια πιο τραχειά επιφάνεια με κρατήρες λόγω της τοπικής παραμόρφωσης του υλικού (Εικόνα 6.44 β,γ).

Τα σημεία 3 και 4 της εικόνας 6.42 εστιάζουν στην περιοχή της αποκόλλησης (Εικόνα 6.45). Και σε αυτή τη περίπτωση το υλικό υποχώρησε ψαθυρά αναπτύσσοντας μια ρωγμή σε άλλο επίπεδο (Εικόνα 6.46).

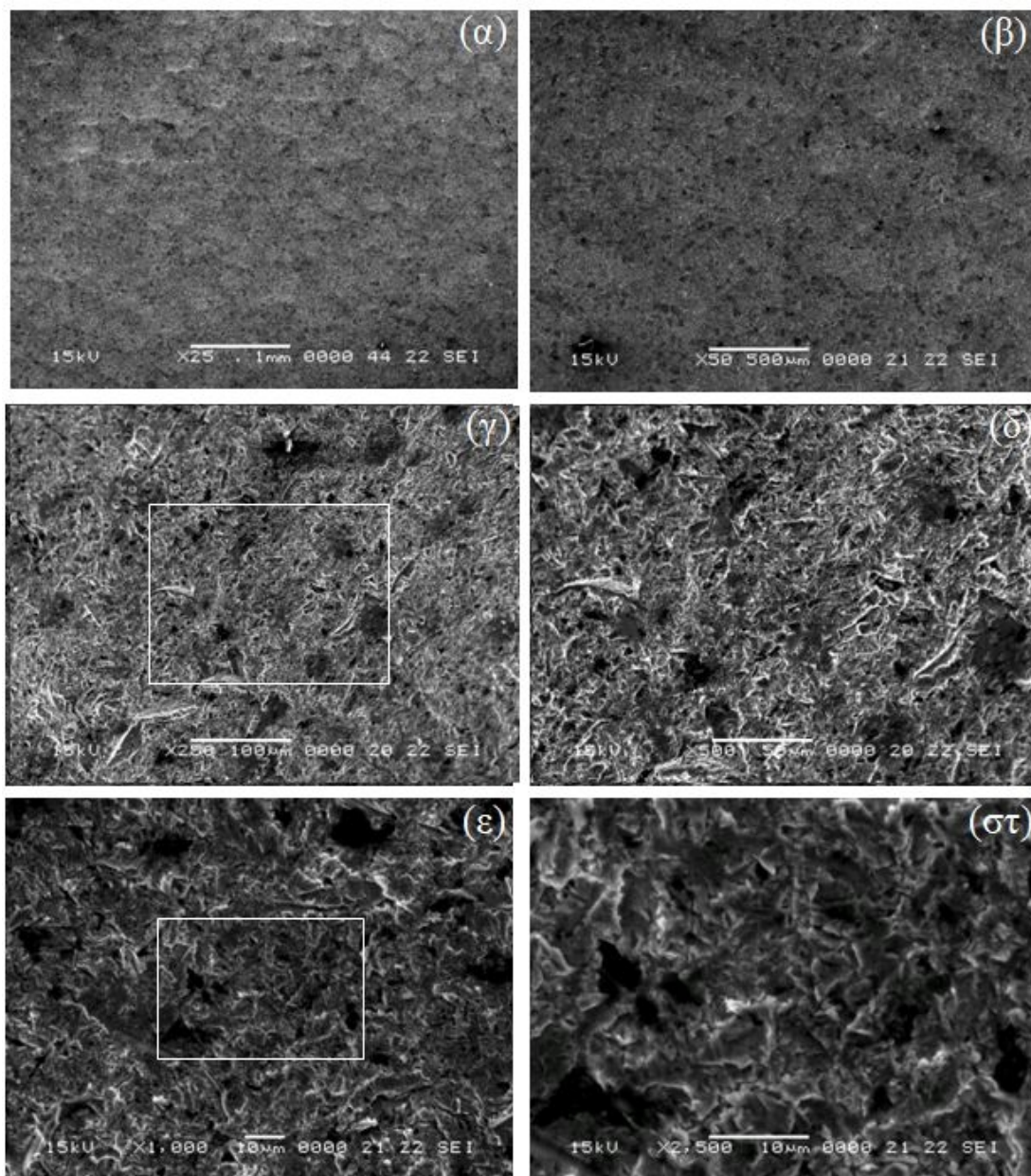
Στο τρίτο δείγμα (Δ3), παρόλο που κατασκευάστηκε από διαφορετικό υλικό, η επιφάνεια θραύσης δεν διαφέρει από τις επιφάνειες των προηγούμενων επιφανειών (Εικόνα 6.42). Κατά συνέπεια όπως και τα προηγούμενα δοκίμια, η αστοχία προκλήθηκε από τον ίδιο μηχανισμό θραύσης ο οποίος είναι η κόπωση. Η επιφάνεια παρουσιάζει τις τρεις χαρακτηριστικές περιοχές διάδοσης της ρωγμής. Όπως και στο δείγμα Δ 2.2.1 (Δ2) το σημείο έναρξης της θραύσης με το σημείο τελικής αποκόλλησης δημιουργεί μια γωνία, η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι και μεγαλύτερη. Αυτό σημαίνει ότι τα



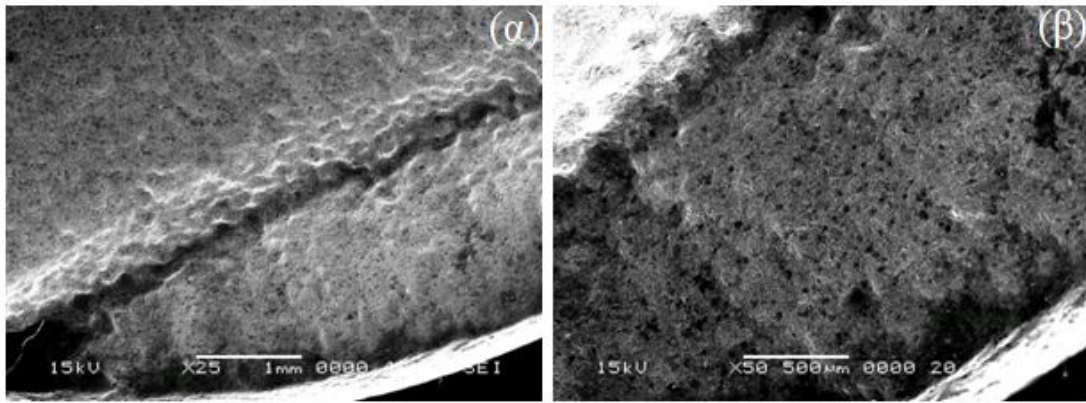
Εικόνα 6.43. Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 3.2.1 στην περιοχή έναρξης θραύσης: (α) Σημείο 1 ($M \times 25$), (β) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 50$), (γ) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 250$), (δ) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 500$), (ε) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 1000$)



Εικόνα 6.44. Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 3.2.1 στην περιοχή διάδοσης θραύσης: (α) Σημείο 2 ($M \times 250$), (β) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 500$), (γ) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 1000$).



Εικόνα 6.45. Σημάδια αποκόλλησης και πόροι του υλικού (σημείο 3, εικόνα 6.26)
 α) Σημείο 3 ($M \times 25$), β) Λεπτομέρεια σημείο 3 ($M \times 50$), γ) Λεπτομέρεια σημείο 3
 ($M \times 250$), δ) Λεπτομέρεια σημείο 3 ($M \times 500$), ε) Λεπτομέρεια σημείο 3 ($M \times 1000$),
 στ) Λεπτομέρεια σημείο 3 ($M \times 2500$)



Εικόνα 6.46. Μικρογραφίες SEM δοκιμίου 3.2.1 στην περιοχή διάδοσης θραύσης: (α) Σημείο 4 ($M \times 250$), (β) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 500$), (γ) Λεπτομέρεια σημείο 1 ($M \times 1000$).

7^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα – Διορθωτικές κινήσεις

Ο οπτικός έλεγχος έδειξε ότι και τα τρία δείγματα έχουν υποστεί εν ψυχρώ διαμόρφωση. Η διαπίστωση αποδεικνύεται από την:

- έλλειψη χρωματισμού του υλικού από την αύξηση θερμοκρασίας,
- σε συνδυασμό με τις τιμές σκληρότητας που ελήφθησαν από τα δοκίμια και λαμβάνοντας υπόψη ότι η περιοχή της διαμόρφωσης έχει εργοσκληρυνθεί.

Επίσης, “εν ψυχρώ” διαμορφώθηκαν και τα σπειρώματα. Η συγκεκριμένη μέθοδος (thread rolling) αυξάνει μηχανικά την αντοχή του σπειρώματος. Όπως παρατηρήθηκε από την οπτική μικροσκοπία, με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου, παρατηρείται ανομοιόμορφη παραμόρφωση στο σπείρωμα καθώς επίσης παρουσιάζονται ρηγματώσεις στις κορυφές ορισμένων σπειρών. Όλα τα παραπάνω αποδεικνύουν ανομοιόμορφη παραμόρφωση κατά τη διαμόρφωση του σπειρώματος. Οι ρηγματώσεις αποτελούν «εν δυνάμει» σημεία έναρξης θραύσης και αιτία αστοχίας όπως συνέβη στο δείγμα Δ 1.1.5.

Κατά τη μελέτη επιφανειών θραύσης με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM) αποδείχθηκε ότι η θραύση προήλθε από ολιγοκυκλική κόπωση με ταχεία εξέλιξη του μετώπου θραύσης. Ειδικά στη περίπτωση του τρίτου δείγματος (Δ3) που είναι από ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα, οποίος είναι ευάλωτος στην αντοχή από κόπωση.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά τις ιδιότητες των υλικών, που φάνηκε στην οπτική μικροσκοπία, είναι η παρουσία εγκλεισμάτων σουλφιδίου του μαγγανίου (MnS), οξειδίων σιδήρου (FeO) και διοξειδίου του πυριτίου (SiO₂) στα όρια των κόκκων, γεγονός το οποίο μειώνει σημαντικά την αντοχή σε κόπωση. Η πυκνότητα εμφάνισης των εν λόγω εγκλεισμάτων είναι μεγαλύτερη των επιτρεπτών ορίων, πράγμα το οποίο καθιστά τον χάλυβα ακατάλληλο προς χρήση. Εγκλείσματα εμφανίστηκαν και στα τρία δοκίμια, ιδιαίτερα στο δεύτερο (Δ2).

Σημαντικό αίτιο στις αστοχίες των U-bolt, είναι ο τρόπος σύσφιξής τους κατά τη διαδικασία εγκατάστασής τους, Υπάρχει συγκεκριμένη ροπή σύσφιξης που πρέπει να ασκηθεί και με συγκεκριμένο εργαλείο (ροπόκλειδο) με σκοπό την ομοιόμορφη εφαρμογή των τάσεων στις δύο συγκρατήσεις που υπάρχουν στην περίπτωσή μας.

Η επιλογή βελτιωμένου χάλυβα για τη στήριξη των πτερυγίων δεν είναι λανθασμένη, δεδομένου ότι σε άλλες περιπτώσεις ανεμιστήρων στον πύργο ψύξης τα εξαρτήματα καλύπτουν τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής τους. Αντίθετα, η χρήση ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα, που έχει ελάχιστες αντοχές σε κόπωση, θεωρείται λανθασμένη.

Για την αντιμετώπιση της κατάστασης, προτείνεται η χρήση στιβαρότερης κατασκευής με επέκταση του σάγματος (αλουμινένιο υποστήριγμα) και την αντικατάσταση των δύο u-bolt με τέσσερα μπουζόνια (μειώνοντας το ρίσκο της εργοσκλήρυνσης και την υψηλή συγκέντρωση τάσεων στη περιοχή της διαμόρφωσης U (Εικόνα 9.1).

Η χρήση επιβελτιωμένου χάλυβα υψηλής καθαρότητας και προφίλ χημικής σύστασης (με περιεκτικότητα σε άνθρακα μέχρι 0,40% και προσθήκη Cr, Ni, Mn, Mo) που θα ενισχύει την αντοχή σε κόπωση αποτελεί την ενδεδειγμένη επιλογή υλικού για τη δεδομένη χρήση.



*Εικόνα 9.1. Προτεινόμενος τρόπος στήριξης των περνωγίων.
(αντικατάσταση των u-bolt με “μπουζόνια”)*

Βιβλιογραφία

- [1] ASM Handbook: “Failure Analysis & Prevention”, Vol. 11, edit by ASM Handbook Committee, (2002).
- [2] William D. Callister, Jr: “Επιστήμη και Τεχνολογία υλικών” Εκδόσεις Τζιόλα, 5^η Έκδοση.
- [3] Practical Engineering Failure Analysis, Copyright © 2004 by Marcel Dekker, Inc.
- [4] Σημειώσεις Κέντρου Τεχνολογίας & Ποιοτικού Ελέγχου για Level 2 Μ. Κ. ΚΩΤΟΥΖΑΣ & ΣΙΑ, Πρότυπη Πρακτική Για Τον Έλεγχο Με Διεσδυτικά Υγρά Σύμφωνα Με Τις Προδιαγραφές ASME V Άρθρο 6, ASTM E 165, EN 571-1, EN1289 και EN 10228-2.
- [5] A.K Das, “Metallurgy of Failure Analysis”
- [6] Σημειώσεις Εργαστηριακού μαθήματος: “Έλεγχος Ποιότητας Και Τεχνολογία Υλικών” (6^η Έκδοση) Σεπτέμβριος 2015 Δρ. Κάρμεν Μέντρεα.
- [7] <http://www.metallurgist.com/>
- [8] Failure Analysis of Engineering Structures: Methodology and Case Histories, V. Ramachandran, A.C. Raghuram, R.V. Krishnan, and S.K. Bhaumik *Failure Analysis and Accident Investigation Group National Aerospace Laboratories, Bangalore With contributions from: T.A. Bhaskaran, C.R. Kannan, M.A. Parameswara, S. Radhakrishnan, K.N. Raju, R. Rangaraju, B. Dwarakanath Rao, and M.A. Venkataswamy.* © 2005 ASM International. All Rights Reserved.
- [9] Applied Engineering Failure Analysis: Theory and practice, CRC Press © 2015 by Taylor & Francis Group, LLC
- [10] A.W. Czanderna, Ed., *Methods of Surface Analysis*, Elsevier, Amsterdam, 1975
- [11] J.L. McCall and P.M. French, *Metallography in Failure Analysis*, Plenum Press, New York, 1978
- [12] I. LeMay, Use of Microscopy in Failure Analysis, *Applied Metallography*, G.F. Vander Voort, Ed., Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1986.
- [13] G.F. Pittinato, V. Kerlins, A. Phillips, and M.A. Russo, *SEM/TEM Fractography Handbook*, Metals and Ceramics Information Center, Battelle Columbus Laboratories, Columbus, 1975
- [14] Aliya, D., *Chemical Analysis of Metals in Failure Analysis*, in ASM Handbook, Vol. 11, *Failure Analysis and Prevention*, Ed., W.T. Becker and R.J. Shipley, ASM International, Ohio, 2002.
- [15] ASM Handbook, Vol. 10, *Materials Characterization*, Volume coordinator, R.E. Whan, ASM International, Ohio, 1986.

- [16] Shames I.H, Dym C.L. “Energy and Finite Element Methods in Structural Mechanics” Hemisphere Pub. Co. 1985.
- [17] Y.Prawoto, Quantitative failure analysis using a simple finite element approach. Journal of Failure Analysis and Prevention, 10 (1) 2010810
- [18] R. W. Clough, Early History Of The Finite Element Method From The View Point of a Pioneer, International Journal For Numerical Methods In Engineering, 60, 2004, pp. 283-287.
- [19] Κ. Κονοφάγου, “Μεταλλογνωσία” Τόμοι I-III, Αθήνα 1967.
- [20] Αντωνιάδης Αριστομένης, Γεώργιος Πανταζόπουλος: “Επιστήμη υλικών” Technical University of Crete Dept. Of Production Engineering & Management, Manufacturing Modeling & Micromachining Laboratory, Μάρτιος 2010
- [21] Π. Γ. Πετρόπουλου, “Μεταλλουργία”, Εκδ. Ευγενιδείου Ιδρύματος, Αθήνα 1993.
- [22] <http://www.keytosteel.com/default.aspx?ID=CheckArticle&NM=62>
- [23] Αγγελική Λεκάτου, “Βιομηχανικά κράματα”, Παπασωτηρίου, 2005
- [24] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής: «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, (2003).
- [25] https://www.papadopoulos-sa.com/pdfs_library/Industrial%20Metals-1.pdf
- [26] Αντωνιάδης Αριστομένης: “Κατασκευαστικές Τεχνολογίες” Technical University of Crete Dept. Of Production Engineering & Management, Manufacturing Modeling & Micromachining Laboratory, Χανιά 2010
- [27] William D. Callister, Jr, David G. Rethwisch: “Materials Science and Engineering, an introduction” Wiley, 9th Edition.
- [28] Γεώργιος Κ. Τριανταφυλλίδης, “Μεταλλογνωσία”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2^η Έκδοση.
- [29] ASTM, “E3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 03.01, (2006).
- [30] Stein K, Μακρής Π (1993). *Ανάλυση Μηχανολογικών Καταστροφών*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα.
- [31] https://ezmt.anl.gov/energy_resources/natural_gas
- [32] <https://en.wikipedia.org/wiki/U-bolt>
- [33] “Guidelines for U-bolt Design”, Clamps Incorporated (G4U-BD)
- [34] Peterson R.E, “Stress Concentration Factors”, New York: John Wiley & Sons.

- [35] ASTM, “E3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 03.01, (2006).
- [36] Technical Manual (1993). Böhler V320. Vergütungsstahl Heat Treatable Steel, Böhler Company. <http://www.foztrading.com/data%20sheets/V320DE.pdf>.
- [37] Technical Manual (2006). Standard Cr-Ni Stainless Steels. Outokumpu Stainless. http://www.outokumpu.com /SiteCollectionDocuments/Standard_Cr-Ni-Mo_Stainless_Steels_Datasheet.pdf.
- [38] C.W.Wegst, “Stahlschlüssel 2007”, CD-ROM, Version 5.01.0000, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, Theodor-Heuss Str.36, D-71672, Marbach, www.stahlschlüssel.de
- [39] ASTM E384 - 10e1: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials’, 03.01, Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Ohio, USA.
- [40] ASTM, “E140-05^{e1} Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness.”, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 03.01, (2006).
- [41] Metallographic guide manual for metallographic structure preparation, Struers, M.I. Πρινωτάκης AEBE. http://www.struers.com/resources/elements/12/134499/Hot_Mounting_Guide_10.10.pdf
- [42] ASTM E407-99 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.