



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΜΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΤΡΑΚΤΟΥ ΜΕ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΣΦΗΝΑΥΛΑΚΑ
(FAILURE ANALYSIS OF STEPPED SHAFT WITH KEY GROOVE)

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΩΝ: ΚΑΡΔΟΥΛΙΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Α.Μ:45337

ΚΙΜΙΝΟΣ ΜΙΧΑΗΛ, Α.Μ:43809

ΥΠΕΥΘΥΝΟΙ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΤΤΙΚΗ 02/2020

Πίνακας Περιεχομένων

1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ανάλυση αστοχίας.....	2
2 Αντοχή των υλικών.....	4
2.1 Εισαγωγικές έννοιες.....	4
2.2 Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων.....	5
2.3 Πλαστική Παραμόρφωση.....	9
2.4 Όλκιμη και Ψαθυρή Θραύση.....	9
2.5 Στρέψη.....	10
2.6 Κάμψη.....	14
2.6.1 Γενική Ανάλυση της κάμψης.....	14
2.6.2 Κατανομή Ορθών Τάσεων.....	15
2.6.3 Θεμελιώδης Νόμος Της Κάμψης.....	17
2.6.4 Μέγιστες Ορθές Τάσεις-Συνθήκες Αντοχής.....	18
3 Κριτήρια αστοχίας.....	20
3.1 Εισαγωγή.....	20
3.2 Θεωρία της μέγιστης διατμητικής τάσης (Tresca).....	22
3.3 Θεωρία της οκτάεδρου διατμητικής τάσης (von Mises, 1913).....	25
3.4 Σύγκριση των δύο προηγούμενων κριτηρίων.....	26
3.5 Θεωρία της εσωτερικής τριβής (Mohr, 1900).....	27
4 Στοιχεία θεωρίας ελαστικότητας.....	31
4.1 Γενικά.....	31
4.2 Τάσεις.....	31
4.2.1 Εξίσωση ισορροπίας τάσεων.....	32
4.3 Παραμορφώσεις.....	34
4.4 Σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων.....	36
4.5 Εξισώσεις ισορροπίας εκφρασμένες προς μετατοπίσεις (NAVIER).....	38
4.5.1 Αποσύζευξη κατά HELMOLTZ.....	39
4.5.2 Ορθά και διατμητικά κύματα.....	40
4.6 Εφαρμογή της ελαστικής θεωρίας με πεπερασμένα στοιχεία.....	41
5 Προκαταρκτική ανάλυση της αστοχίας.....	43
5.1 Μεθόδευση και πορεία της έρευνας.....	43
5.2 Συλλογή δεδομένων και ιστορικού.....	44
5.3 Τεχνικές οπτικής επιθεώρησης και φωτογραφία πεδίου.....	45
5.4 Απόσπαση και αποθήκευση δειγμάτων.....	48
5.5 Επιθεώρηση με μη καταστροφικές μεθόδους.....	49
5.6 Οργάνωση ομάδων εργασίας.....	52
6 Ατέρμονας κοχλίας - τροχός.....	54
6.1 Χαρακτηριστικά.....	54
7 Πειραματική Διαδικασία Πτυχιακής.....	60

7.1 Εισαγωγή	60
7.2 Μέτρηση – Σχεδίαση του άξονα	60
7.3 Τρισδιάστατος σχεδιασμός – Μοντελοποίηση.	61
7.4 Συλλογή στοιχείων λειτουργίας του συστήματος.....	62
7.5 Υπολογισμός φορτίων.	63
7.5.1 Υπολογισμός ροπής στρέψης	63
7.5.2 Υπολογισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών ατέρμονα.....	65
7.5.3 Υπολογισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών Κορώνας	66
7.5.4 Υπολογισμός δυνάμεων μηχανισμού	67
7.6 Προετοιμασία για Χημική ανάλυση και Οπτική στερεοσκοπία.....	69
7.7 Οπτική στερεοσκοπία.	70
7.8 Χημική ανάλυση.....	74
7.9 Υπολογιστική Προσομοίωση – Πεπερασμένα στοιχεία.....	74
7.10 Αποτελέσματα.....	77
REFERENCES.....	85

1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Εισαγωγή

Πολλές φορές κατά την διάρκεια της βιομηχανικής παραγωγής ή κατά την χρήση συμβατικών μηχανημάτων είναι πιθανό να αστοχήσει ένα από τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ο εξοπλισμός παραγωγής. Αποτέλεσμα της αστοχίας είναι η απώλεια εξοπλισμού καθώς και εργατικού δυναμικού. Η αντικατάσταση του τεμαχίου που αστόχησε δεν αποτελεί λύση του προβλήματος. Ο λόγος είναι ότι δεν έχουμε εξακριβώσει εάν η αστοχία προήλθε από λάθος χειρισμό της μηχανής-εξοπλισμού από τον εκάστοτε εργαζόμενο, ή από εξωγενής παράγοντες π.χ. εάν το τεμάχιο αστόχησε επειδή συμπλήρωσε έναν συγκεκριμένο χρόνο λειτουργίας κτλ.

Η ανάλυση αστοχίας σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί μία τυποποιημένη εργασία. Προκειμένου η ανάλυση να θεωρηθεί βάσιμη πρέπει να γίνει ο συνδυασμός ορισμένων εργαλείων-μεθόδων. Τα εργαλεία αυτά μπορεί να είναι πειραματικά είτε υπολογιστικά.

Οι πειραματικές μέθοδοι αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι όλων των αναλύσεων αστοχίας ανεξάρτητα της περίπτωσης. Στις τεχνικές αυτές συμπεριλαμβάνονται: Η χρήση μαγνητικών σωματιδίων τα οποία λόγω του μεγέθους τους μπορούν και εισχωρούν σε ρηγματώσεις οι οποίες μπορεί να προκλήθηκαν από την καταπόνηση. Όμοια τεχνική ως προς το αποτέλεσμα είναι η μέθοδος των υπερήχων όπου αποκαλύπτει τυχόν ασυνέχειες στο εσωτερικό του υλικού ή ρωγμές οι οποίες ευθύνονται για την αστοχία κτλ. Υπάρχουν και αρκετές άλλες μέθοδοι στη βάση τους όλες απαιτούν έμπειρο προσωπικό, αν όχι αρκετό χρόνο ένα εύλογο χρονικό διάστημα για εκτελεστούν καθώς και σε ορισμένες μεθόδους το οικονομικό κόστος δεν είναι αμελητέο. Παρ όλα αυτά τα πλεονεκτήματά τους είναι αρκετά χρήσιμα καθώς μπορούν εντοπίσουν παράγοντες όπου σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσαμε υπολογιστικά.

Όταν αναφερόμαστε σε υπολογιστικά εργαλεία εννοούμε τα πεπερασμένα στοιχεία. Οι αναλύσεις που μπορούμε να κάνουμε με τα πεπερασμένα στοιχεία

μπορεί να είναι στατικές, ιδιοσυχνοτήτων, δυναμικές κτλ. Οι υπολογιστικές μέθοδοι μπορεί να γίνουν είτε με λογισμικό όπου είναι ανοιχτό (open source) ή επί πληρωμή. Οι υπολογιστικές τεχνικές είναι οικονομικότερες και απαιτούν λιγότερο χρόνο προκειμένου να ολοκληρωθούν, σε σχέση με τις πειραματικές. Όμως δεν μπορούν να εντοπίσουν παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη μικροδομή του υλικού καθώς και τις μηχανικές του ιδιότητες.

Η ανάλυση αστοχίας αποτελεί μία διαδικασία που σαν κύριο στόχο έχει την εξακρίβωση των αιτιών που την προκάλεσαν καθώς και την βελτιστοποίηση του μηχανισμού που αστόχησε. Με τη χρήση των κατάλληλων εργαλείων μπορούμε να εξοικονομήσουμε χρόνο καθώς και πόρους προκειμένου να γίνουν οι σωστές διορθώσεις στο σχεδιασμό. Ωστε να είμαστε σίγουροι ότι το εξάρτημα που αστόχησε δεν θα αστοχήσει ξανά, κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

1.2 Ανάλυση αστοχίας

Όλες οι σχετικές δημοσιεύσεις πάνω στην ανάλυση αστοχίας χρησιμοποιούν ένα κατάλληλο συνδυασμό υπολογιστικών και πειραματικών εργαλείων. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες το πειραματικό κομμάτι είναι πιο πλούσιο σε σχέση με άλλες.

Οι A. Göksenli *, I.B. Eryürek (2008) [1]έκαναν ανάλυση αστοχίας σε άξονα μειωτήρα, ο οποίος αστόχησε στο σημείο που λειτουργεί ο ατέρμονας με την κορώνα. Πρώτα έγινε ένας οπτικός έλεγχος της επιφάνειας θραύσης. Κατά την οποία διέκριναν γραμμές περιμετρικά της όλκιμης θραύσης οι οποίες είναι αποτέλεσμα της κόπωσης. Προκειμένου να εξακριβώσουν τη ποιότητα του χάλυβα και τις μηχανικές του ιδιότητες διενέργησαν χημική ανάλυση, οπτική μικροσκοπία και δοκιμή καθαρού εφελκυσμού και βρήκαν ότι πρόκειται για χάλυβα ποιότητας st52.0. Στη συνέχεια κάνοντας αναλυτικό υπολογισμό σε κόπωση και ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και κατέληξαν ότι η κύρια αιτία θραύσης είναι η συγκέντρωση τάσεων στο ημικόκλιο της σφηναύλακας. Τέλος σαν λύση προτείνουν την αύξηση του ραδίου εσωτερικά της σφηναύλακας

προκειμένου να μειωθεί η τιμή της τάσης στο σημείο αλλά και να αυξηθεί ο συντελεστής ασφάλειας έναντι κόπωσης.

Πάνω στο ίδιο σκεπτικό ανάλυσης οι D. Crivelli, R. Ghelichi, M. Guagliano, (2011) και οι S. Cicero, R. Cicero a, R. Lacalle, G. Di 'az, D. Ferreño,[2] με μικρές διαφοροποιήσεις ως προς την διαδικασία της ανάλυσης απέσπασαν πληροφορίες ικανές ώστε να μπορούν να ορίσουν τις αιτίες αστοχίας.

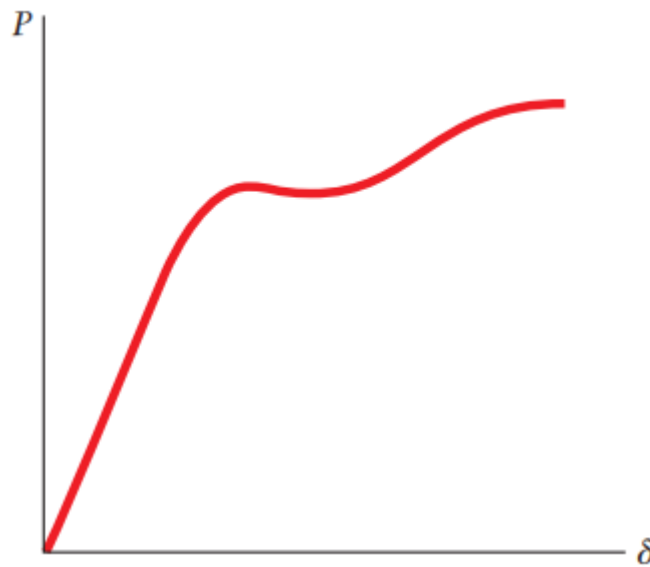
Συγκεκριμένα οι D. Crivelli, R. Ghelichi, M. Guagliano, (2011) έκαναν επιπλέον ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM), σκληρομέτρηση με συγκεκριμένο βήμα από το σημείο αστοχία, δοκιμή με μαγνητικά σωματίδια και αναλυτικό υπολογισμό τάσεων. Οι αιτίες οι οποίες οδήγησαν στη αστοχία είναι οι αυξημένες τάσεις στις αιχμές της σφηνούλακας και ορισμένα στοιχεία είχαν αυξημένη περιεκτικότητα στο υλικό που ξέφευγαν των ορίων για ck45. Επίσης παρατηρήθηκαν κάποιες ανωμαλίες οι οποίες προέρχονται από την μηχανουργική επεξεργασία.

Οι S. Cicero, R. Cicero a, R. Lacalle, G. Di 'az, D. Ferreño [3], ακολουθώντας πανομοιότυπη διαδικασία με την προηγούμενη δημοσίευση όσο αφορά τη πειραματική διαδικασία με μόνη διαφοροποίηση ότι ο αναλυτικός υπολογισμός σε κόπωση έγινε με τη μέθοδο FITNET FFS. Η τελευταία ανάλυση είναι των πεπερασμένων στοιχείων κατά την οποία υπολογίζονται οι μέγιστες τάσεις. Η αιτία που προκάλεσε την αστοχία ήταν ότι η έδραση του άξονα κοντά στο σημείο της αστοχία δεν ήταν επαρκώς στερεωμένη με αποτέλεσμα οι τάσεις κοντά στο έδρανο να αυξάνονται δραματικά.

2 Αντοχή των υλικών

2.1 Εισαγωγικές έννοιες

Θεωρούμε μια δοκό μήκους L η οποία είναι ομοιόμορφη σε όλη την διατομή της. Έστω ότι πακτώνεται στο ένα άκρο και στο άλλο εφαρμόζεται ένα φορτίο μεγέθους P με αποτέλεσμα η ράβδος να επιμηκύνεται.



Εικόνα 2:1 Γράφημα δύναμης- παραμόρφωσης[4]

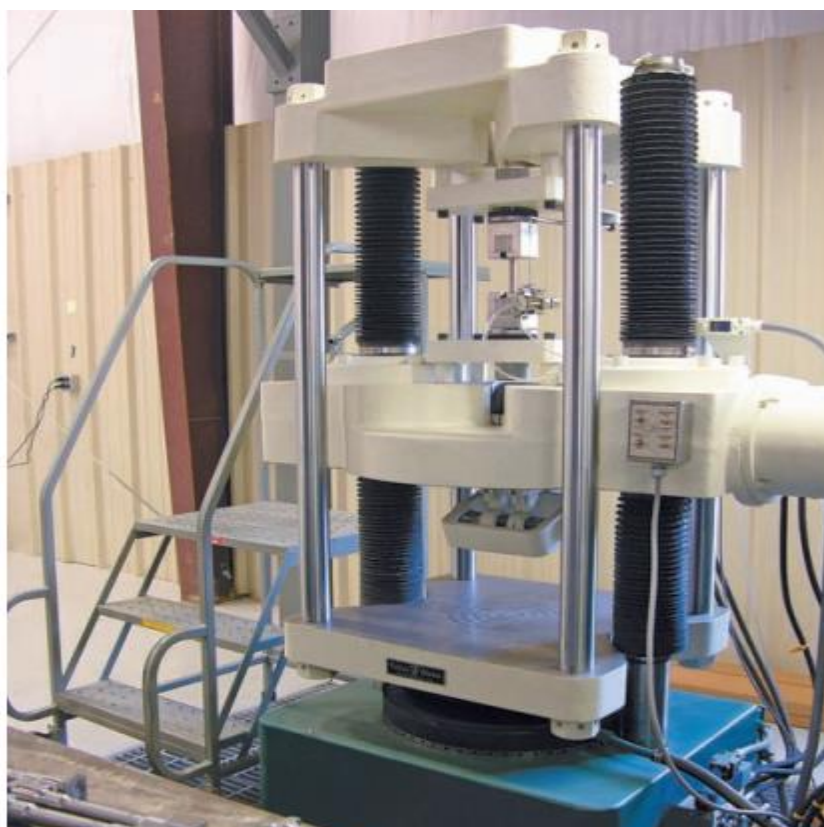
. Δημιουργώντας τη γραφική παράσταση (Εικόνα 2:1 Γράφημα δύναμης- παραμόρφωσης φορτίου-παραμόρφωσης λαμβάνουμε το εξής γράφημα. Ενώ ένα γράφημα σαν και αυτό περιέχει χρήσιμη πληροφορία για την ανάλυση, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να προβλέψουμε την παραμόρφωση του υλικού με διαφορετικές διαστάσεις. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε μεγέθη όπως η τάση $\sigma = P/A$ όπου ως A ορίζουμε τη διατομή της δοκού. Και τέλος εισάγουμε το μέγεθος της ανηγμένης παραμόρφωσης το οποίο ορίζεται $\epsilon = \delta/L$ με αυτό τον τρόπο αδιαστατοποιούμε την παραμόρφωση, με αυτό τον τρόπο θα μπορούμε να συγκρίνουμε την συμπεριφορά του υλικού σε διάφορες φορτίσεις χωρίς να αναφερόμαστε σε συγκεκριμένες διαστάσεις. Ξανακάνοντας πάλι το γράφημα αλλά αυτή τη φορά αντί για την δύναμη χρησιμοποιήσουμε την τάση και στον άξονα των x την ανηγμένη παραμόρφωση που ορίσαμε πριν.

Έχουμε ένα καινούργιο γράφημα το οποίο η πληροφορία που μας παρέχει είναι εξίσου χρήσιμη αλλά αναφέρεται αποκλειστικά στα χαρακτηριστικά του υλικού και όχι σε συνδυασμό με την γεωμετρία του.

2.2 Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων

Προκειμένου να σχεδιαστεί η γραφική τάσεων-ανηγμένης παραμόρφωσης πρέπει να διενεργηθεί πρώτα δοκιμή σε εφελκυσμό. Για να γίνει αυτό κατασκευάζονται ειδικά δοκίμια τα οποία είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να φορτίζονται αξονικά και όχι έκκεντρα αλλά και τα άκρα του είναι ειδικά διαμορφωμένα προκειμένου να εισέρχονται στις αρπάγες της μηχανής Εικόνα 2:2. Πάνω σε κάθε δοκίμιο πριν γίνει η δοκιμή υπάρχουν δύο γραμμές οι οποίες ορίζουν ένα συγκεκριμένο αρχικό μήκος.[4]

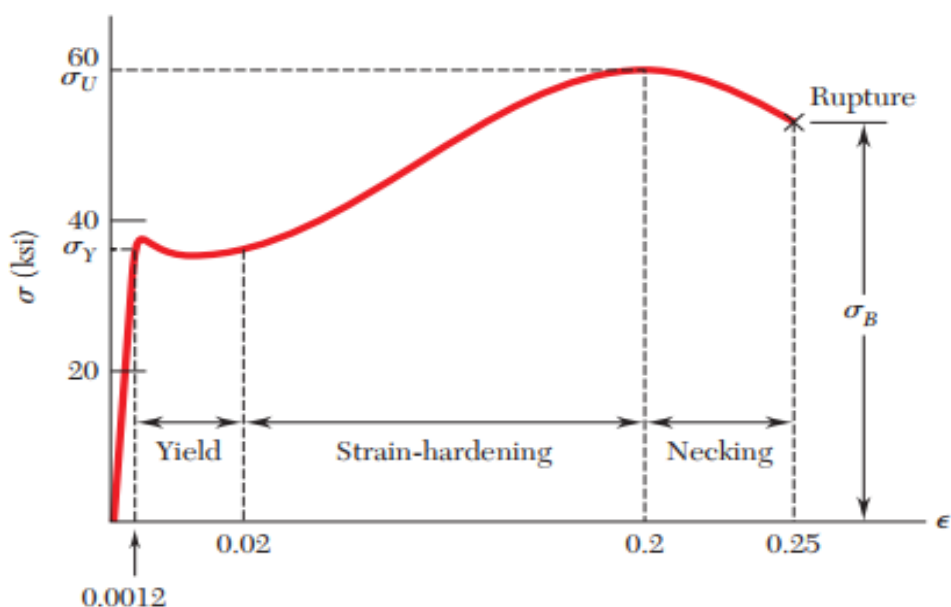
Αφού τοποθετηθεί το δοκίμιο στη μηχανή ξεκινά η φόρτιση του δοκιμίου. Το νέο μήκος του δοκιμίου πρέπει να μετράται από την μηχανή και να υπολογίζει την παραμόρφωση $\delta=L-L_0$ για κάθε φορτίο. Σχεδόν όλες οι μηχανές δοκιμών εφελκυσμού πάντα μετράνε και την στένωση που δημιουργείται στη διατομή του υλικού.



Εικόνα 2:2 Μηχανή δοκιμής εφελκυσμού [4]

Οι γραφικές τάσεων-ανηγμένης παραμόρφωσης των υλικών διαφέρουν ανάλογα με το υλικό και τις ιδιότητες του. Οι γραφικές αυτές μπορούν να διαφέρουν ακόμα και για το ίδιο υλικό καθώς κάθε γραφική αναφέρεται σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία αλλά και σε συγκεκριμένο ρυθμό φόρτισης. Πάρα ταύτα μπορούν να εξαχθούν αρκετά χρήσιμες πληροφορίες από τις γραφικές αυτές, μία από αυτές είναι αν το υπό εξέταση υλικό είναι ψαθυρό ή όλκιμο.

Στα όλκιμα υλικά συμπεριλαμβάνεται ο κατασκευαστικό χάλυβας αλλά και κράματα από διάφορα άλλα υλικά. Το κυριότερο χαρακτηριστικό των όλκιμων υλικών είναι ότι έχουν την ιδιότητα να παραμορφώνονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 2:3 Διάγραμμα Τάσεων -Ανηγμένης παραμόρφωσης [4]

Πάρα ταύτα στο παραπάνω διάγραμμα (βλ. εικόνα 2.3) παρατηρούμε ότι πριν από μία κρίσιμη τιμή τάσης σ_y παρατηρείται μία γραμμική σχέση τάσης παραμόρφωσης. Η σχέση που συνδέει τις τάσεις και τις παραμορφώσεις είναι $\sigma = E \cdot \epsilon$, δηλαδή ο νόμος του Hooke. Ο συντελεστής αναλογίας E είναι το μέτρο ελαστικότητας. Πειραματικά με το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται από το πηλίκο σ/ϵ , που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο όπου η σχέση τάσης παραμόρφωσης είναι γραμμική. Το σημείο σ_y ονομάζεται όριο αναλογίας του υλικού, δηλαδή αποτελεί το όριο μέχρι το οποίο υπάρχει γραμμική εξάρτηση των μεγεθών του γραφήματος.

Συνεχίζοντας τη φόρτιση πέρα από το σημείο σ_y ενώ η σχέση τάσης παραμόρφωσης πλέον δεν είναι γραμμική, το υλικό εξακολουθεί μέχρι ένα σημείο ελάχιστα παραπέρα να συμπεριφέρεται ελαστικά. Το σημείο αυτού του διαγράμματος ονομάζεται περιοχή μη γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς υλικού και το σημείο που βρίσκεται ελάχιστα πιο πάνω από το σ_y όριο ελαστικότητας.

Ύστερα από εκεί ακολουθεί μία ασταθής περιοχή που χαρακτηρίζεται από την αύξηση της παραμόρφωσης χωρίς την αντίστοιχη αύξηση της τάσης. Στο σημείο αυτό το δοκίμιο είναι δυνατό να αυξηθεί έως και δέκα φορές την επιμήκυνση από την αύξηση του ορίου ελαστικότητας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διαρροή του υλικού. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται ότι με την αύξηση των επιμηκύνσεων οι ορθές τάσεις αυξάνουν και αυτές δυσανάλογα μέχρι την τάση που ορίζεται ως το άνω όριο διαρροής.

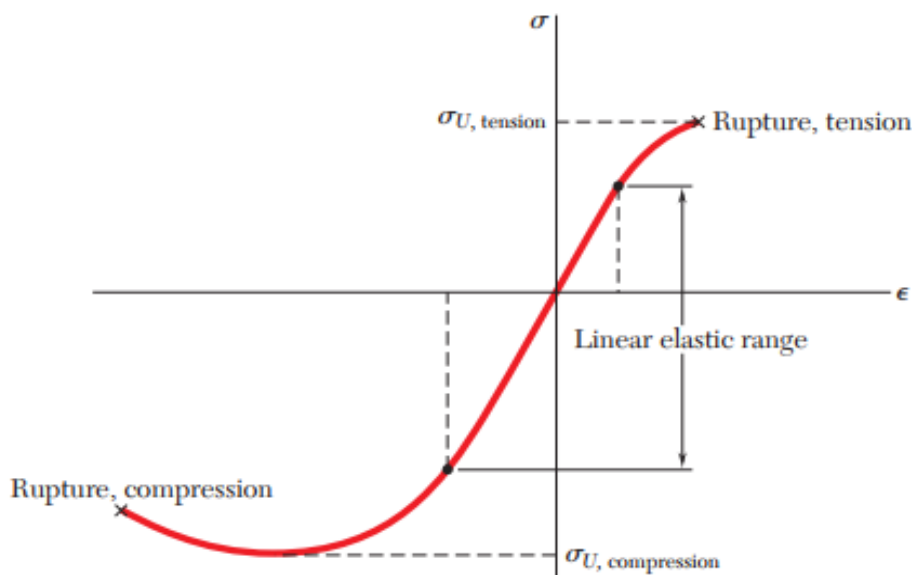
Ένα άλλο χαρακτηριστικό της περιοχής αλλά και αιτία της διαρροής είναι η εμφάνιση στην επιφάνεια του δοκιμίου ορατών λωρίδων που είναι κεκλιμένες με μία γωνία 45° ως προς τον άξονα. Αυτές οι λωρίδες ονομάζονται γραμμές Luders και η εμφάνιση του αποδεικνύει ότι η αστοχία του υλικού οφείλεται σε διάτμηση του υλικού.

Διατηρώντας την σταθερά αυξανόμενη φόρτιση εισερχόμαστε στη περιοχή κράτησης που αρχίζει από το κατώτερο όρο διαρροής και φτάνει μέχρι το όριο θραύσης σ_u στο Εικόνα 2:3.

Πέρα και από αυτό το σημείο παρατηρείται μία πτώση της τάσης ενώ η παραμόρφωση εξακολουθεί να αυξάνει μέχρι το σημείο σ_B όπου το υλικό σπάει αυτόματα. Η τάση που αντιστοιχεί στο σημείο σ_B ονομάζεται τάση θραύσης σε εφελκυσμό. Λίγο πριν το όρο θραύσης το δοκίμιο εμφανίζει μία στένωση που ονομάζεται λαιμός.

Επισημαίνεται ότι στο γράφημα της εικόνας 2.3 έχει σχεδιαστεί η συμβατική τάση δηλαδή δεν έχει ληφθεί καθόλου υπόψη η μεταβολή της διατομής του δοκιμίου. Αν λάβουμε υπόψη τη μεταβολή της διατομής του υλικού τότε προκύπτει η πραγματική τάση. Συνηθίζεται ο υπολογισμός της συμβατικής τάσης.

Αντίστοιχα όπως ασχοληθήκαμε με την δοκιμή εφελκυσμού υπάρχει και η δοκιμή σε θλίψη.



Εικόνα 2:4 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων περιλαμβάνοντας και την δοκιμή της θλίψης. [4]

Στην Εικόνα 2:4 παρατηρούμε ότι η καμπύλη στο αρνητικό κομμάτι των αξόνων είναι αντίστοιχη με εκείνη του εφελκυσμού. Το δοκίμιο όμως σε αυτή την περίπτωση δεν εμφανίζει λαιμό αλλά αύξηση της διατομής του.

Έτσι το όριο θραύσης για θλίψη ενός όλκιμου υλικού ορίζεται συμβατικά ότι, είναι η τιμή της τάσης εκείνης που προκαλεί επιβράχυνση του του ύψους του δοκιμίου κατά 33% του αρχικού μήκους.[5]

2.3 Πλαστική Παραμόρφωση

Μία άλλη περίπτωση είναι εκείνη που παρουσιάζονται όμοια όρια διαρροής σε εφελκυσμό και θλίψη. Ύστερα από την φόρτιση σε εφελκυσμό μέχρι ενός σημείου πέρα από το όριο διαρροής και το αποφορτίσουμε. Αν ύστερα από την αφαίρεση του φορτίου αν εφαρμόσουμε ένα αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο μέχρι το όριο διαρροής, στη συνέχεια η τάση θα παραμένει σταθερή και η παραμόρφωση θα αυξομειώνεται.

Αν στη συνέχεια του δοκίμιο αποφορτιστεί και από το θλιπτικό φορτίο θα υπάρξει μία παραμένουσα παραμόρφωση η οποία μπορεί να είναι θετική η αρνητική ή μηδέν.

Το είδος της παραμένουσας παραμόρφωσης εξαρτάται από το σημείου που ξεκίνησε η αποφόρτιση. Αν το δοκίμιο επανέλθει στο μηδέν μετά την αποφόρτιση, αυτό δεν σημαίνει ότι δεν επήλθαν εσωτερικές μεταβολές στη δομή του υλικού. Αντίθετα οι μεταβολές αυτές υπάρχουν και επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υλικού σε μία πιθανή επαναφόρτιση του.

2.4 Όλκιμη και Ψαθυρή Θραύση

Η όλκιμη θραύση διακρίνεται από τις έντονες πλαστικές παραμορφώσεις κοντά στη περιοχή της θραύσης και η επιφάνεια θραύσης είναι ανομοιόμορφη. Κατά τη θραύση, το υλικό σπάει κυρίως από την επίδραση των διατμητικών τάσεων. Τα υλικά που αστοχούν με αυτό τον τρόπο ονομάζονται όλκιμα. Η θραύση αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας και με μείωση του ρυθμού φόρτισης.

Στα όλκιμα υλικά, σαν κριτήριο διαστασιολόγησης χρησιμοποιείται η μέγιστη διατμητική τάση. Τα όλκιμα υλικά διαρρέουν πριν αστοχήσουν. Η διαρροή αυτή είναι αποτέλεσμα κρίσιμων διατμητικών τάσεων σε επίπεδο 45° . [5]

Ψαθυρή είναι η θραύση κατά την οποία το υλικό σπάει κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης του, χωρίς έντονες πλαστικές παραμορφώσεις. Τα υλικά που έχουν την ιδιότητα να αστοχούν με αυτό τον τρόπο ονομάζονται ψαθυρά. Στο πείραμα του εφελκυσμού η ψαθυρή θραύση γίνεται αντιληπτή από τη μη δημιουργία λαιμού στο δοκίμιο. Η τάση ενός υλικού να αστοχήσει ως ψαθυρό εξαρτάται από την θερμοκρασία και αύξηση του ρυθμού φόρτισης.

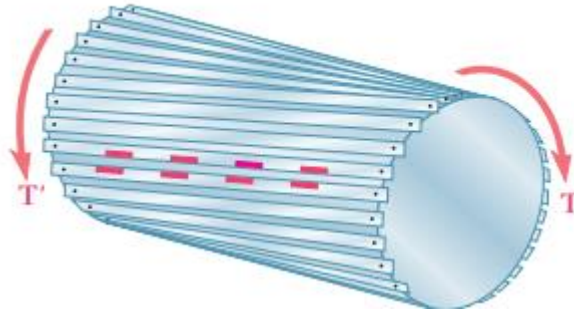
Στα ψαθυρά υλικά, σαν κριτήριο διαστασιολόγησης ή ελέγχου χρησιμοποιείται η μέγιστη ορθή τάση γιατί αυτά αστοχούν κάθετα στη διεύθυνση της. [5]

Τόσο η ολκιμότητα και η ψαθυρότητα δεν αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες των υλικών όπως το όριο διαρροής, αλλά μεταβάλλονται από εξωτερικούς παράγοντες. Όπως είναι η θερμοκρασία ο ρυθμός φόρτισης και το είδος της φόρτισης.

2.5 Στρέψη

Η στρέψη ανήκει στη κατηγορία των απλών καταπονήσεων γενικά θεωρούμε ότι ένα δοκίμιο καταπονείται σε στρέψη όταν, πάνω σε αυτό επενρεγούν ζεύγη δυνάμεων ίσων μέτρων και αντίθετων φορών, που τα επίπεδα τους είναι κάθετα στον κεντροβαρικό άξονα.

Τα ζεύγη των δυνάμεων αυτών προκαλούν σε κάθε διατομή της ράβδου ροπή, που ονομάζεται ροπή στρέψης. Αυτή η ροπή στρέψης M_t προκαλεί στο καταπονούμενο υλικό μόνο διατμητικές τάσεις δημιουργώντας έτσι μια στροφή μεταξύ των διατομών που ονομάζεται γωνία στροφής(όπως φαίνεται στην Εικόνα 2:5).



Εικόνα 2:5 Παράδειγμα γωνίας στροφής σε μία ελαστική ράβδο [4]

Προκειμένου να μελετήσουμε αναλυτικά το φαινόμενο της κάμψης πρέπει να κάνουμε ορισμένες παραδοχές. Ο λόγος που κάνουμε αυτές τις παραδοχές είναι για να επιλύσουμε δύο προβλήματα που προκύπτουν, τον υπολογισμό των διατμητικών τάσεων και της γωνία στροφής .

Παραδοχές στρέψης:

1. Όλες οι διατομές της ράβδου παραμένουν επίπεδες και μετά την παραμόρφωση από την επενέργεια του ζεύγους δυνάμεων. Επίσης διατηρούν το σχήμα το μέγεθος τους και την μεταξύ τους απόσταση.
2. Κάθε διατομή περιστρέφεται σαν απόλυτα στερεός δίσκος, δηλαδή σαν σύνολο, επομένως οι ακτίνες παραμένουν ευθείες.
3. Το υλικό της ράβδου είναι ομογενές και ισότροπο, ώστε οι ιδιότητες του υλικού να είναι ομοιόμορφες σε κάθε σημείο και διεύθυνση.

Η διατμητική τάση συνδέεται με τη γωνία διάτμησης και το μέτρο ολίσθησης με το νόμο του Hooke:

$$\tau = G \cdot \gamma$$

Το μέτρο ολίσθησης (ή και δεύτερο μέτρο ελαστικότητας) G , συνδέεται με το E και με το λόγο του Poisson ν , με τη σχέση:

$$G = E/2(1 + \nu)$$

Αρκετά παραδείγματα καταπόνησης σε στρέψη έχουμε αρκετά, όπως σε άξονες ατράκτους. Η καταπόνηση σε στρέψη εμφανίζεται όταν το ζεύγος δυνάμεων δεν διέρχεται από τον κεντροβαρικό άξονα της ράβδου όπως π.χ. συμβαίνει σε μία έκκεντρα φορτισμένη δοκό. Πολλές φορές επίσης συνυπάρχει και με άλλες καταπονήσεις όπως με κάμψη και εφελκυσμό.

Η καταπόνηση της στρέψης είναι αρκετά σύνθετη και πολύπλοκη. Την εντατική κατάσταση ράβδου τυχαίας διατομής που καταπονείται σε στρέψη την πρωτομελέτησε ο Saint Venant (1853).

Γενικά η διατμητική τάση τ , καθώς και η παραμόρφωση σε ράβδο κυκλικής διατομής τυχαίας ακτίνας r και εξωτερικής R λόγω στρεπτικής ροπής είναι:

$$\tau = \frac{M\tau}{I_p} \cdot r, \quad \gamma = \frac{\varphi}{l} \cdot r, \quad 0 \leq r \leq R$$

Όπου I_p η πολική ροπή αδράνειας της κυκλικής διατομής.

Το παραμορφωσιακό αποτέλεσμα της στρέψης είναι η συστροφή των διατομών μεταξύ τους κατά γωνία φ . Έτσι η σχετική γωνία στροφής φ μεταξύ δύο τυχαίων σημείων που απέχουν μεταξύ σε απόσταση L είναι:

$$\varphi = \frac{Mt \cdot L}{G \cdot I_p}$$

Επίσης ορίζουμε ανηγμένη γωνία στροφής θ :

$$\theta = \frac{d\varphi}{dx} = \frac{\varphi}{L} = \frac{Mt}{G \cdot I_p}$$

Η μέγιστη διατμητική τάση παρατηρείται στη μεγαλύτερη ακτίνα R , δηλαδή στα σημεία της περιφέρειας, και επειδή $W_p = I_p/R$ είναι η πολική ροπή αντίστασης της διατομής, σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε:

$$\tau_{max} = Mt/W_p$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις συμπεραίνουμε αρχικά ότι η διατμητική τάση είναι γραμμική με $t=0$ στο κέντρο της διατομής και τη μέγιστη τιμή $r=R$ δηλαδή στα σημεία της περιφέρειας.

Όσο αφορά τη γωνία στροφής φ , δεχόμαστε τη σύμβαση που ισχύει για τις στρεπτικές ροπές, ότι η θετική ροπή στρέψης προκαλεί θετική γωνία στροφής, ενώ η αρνητική δημιουργεί αρνητική.

Παρατηρώντας τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατό μικρότερες ροπές στρέψης πρέπει το γινόμενο $G \cdot I_p$ πρέπει να λαμβάνει μεγάλες τιμές. Για να προκύπτουν μεγάλες τιμές I_p , πρέπει η κατανομή της επιφάνειας να είναι όσο γίνεται πληρέστερα στην περιφέρεια της, παρά στο κέντρο της. Για το λόγο αυτό οι κοίλες διατομές είναι αισθητά οικονομικότερες έναντι των συμπαγών.

Το G εκφράζει την ποιοτική αντίσταση του υλικού αφού εξαρτάται μόνο από αυτό η δε I_p την ποσοτική αντίσταση. Το γινόμενο $G \cdot I_p$ και εκφράζει τη συνολική αντίσταση της συγκεκριμένης ράβδου.

Το γινόμενο $G \cdot I_p$ ονομάζεται μέτρο δυστρεψιάς ενώ το $Mt/\varphi = G \cdot I_p/L$ ονομάζεται δυστρεψιά. Το μέτρο δυστρεψιάς δηλαδή, είναι η ανηγμένη δυστρεψιά για μήκος $L=1m$.

Το αποτέλεσμα επιβολής στρεπτικής ροπής σε ράβδο κυκλικής διατομής, είναι σίγουρα η εμφάνιση διατμητικών τάσεων και ύστερα δημιουργία γωνίας στροφής φ μεταξύ των δύο άκρων της, που είναι το ουσιαστικά το αποτέλεσμα της παραμόρφωσης από στρέψη. Να τονιστεί ότι ορθές τάσεις δεν εμφανίζονται στη στρέψη.

Τέλος για να μην αστοχήσει μία ράβδος λόγω στρέψης, θα πρέπει η t_{max} η οποία εμφανίζεται πάντα στη περιφέρεια να μην υπερβαίνει μία μέγιστη τιμή $t_{επ}$ που εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό, δηλαδή $t_{max} < t_{επ}$. Όμοια θα πρέπει και η γωνία στροφής να μην υπερβαίνει μία μέγιστη επιτρεπτή γωνία.

2.6 Κάμψη

Κάμψη λέγεται η εντατική κατάσταση κατά την οποία, ένα (δομικό) στοιχείο υποβάλλεται σε εγκάρσια φόρτιση. Η κάμψη παρατηρείται σε πολλές τεχνικές κατασκευές που συναντώνται στην πράξη. Κατά την εντατική κατάσταση της κάμψης αναπτύσσονται καμπτικές ροπές, οι οποίες προκαλούν την καμπύλωση του (δομικού) στοιχείου και την δημιουργία τάσεων εντός του υλικού του. Με την έννοια κάμψη εννοούμε τόσο τις αναπτυσσόμενες τάσεις όσο και τις προκαλούμενες παραμορφώσεις που ονομάζονται «βέλη κάμψης».

Ουσιαστικό αίτιο της κάμψης, είναι η ροπή κάμψης, η οποία είναι μεταβλητό μέγεθος και εξαρτάται από την απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης από το σημείο εφαρμογής της δύναμης ροπής.

2.6.1 Γενική Ανάλυση της κάμψης

Η κάμψη, σαν είδος καταπόνησης, διακρίνεται σε δύο είδη:

A) Την **καθαρή κάμψη**, κατά την οποία εμφανίζεται μόνο καμπτική ροπή το (δομικό) στοιχείο ή σε τμήμα αυτού.

B) Την **γενική κάμψη**, κατά την οποία εμφανίζεται και τέμνουσα δύναμη πέραν της καμπτικής ροπής.

Κατά το φαινόμενο της κάμψης δεχόμαστε ότι το (δομικό) στοιχείο αποτελείται από μία δέσμη αλληλένδετων ινών που είναι διατεταγμένες οριζόντια κατά μήκος του στοιχείου και παράλληλα μεταξύ τους, σαν σε στρώματα. Κατά την κάμψη λοιπόν, παρατηρούμε ότι οι ίνες των ανώτερων στρωμάτων βραχύνονται ενώ ταυτόχρονα των κατώτερων στρωμάτων επιμηκύνονται. Έτσι, οι ίνες των ανωτέρων στρωμάτων του (δομικού) στοιχείου καταπονούνται σε **θλίψη**, ενώ οι ίνες των κατώτερων στρωμάτων καταπονούνται σε **εφελκυσμό**.

Επειδή όμως το υλικό του (δομικού) στοιχείου δεν παρουσιάζει κενά εντός της μάζας του, η παραμόρφωση είναι συνεχής και επομένως η μετάβαση από το φαινόμενο της θλίψης στο φαινόμενο του εφελκυσμού γίνεται βαθμιαία και όχι απότομα. Δηλαδή, σε ενδιάμεσες θέσεις της διατομής, υπάρχουν ίνες που δεν υφίστανται καμία μεταβολή στο μήκος τους. Αυτές καταπονούνται σε **διάτμηση**,

η οποία πραγματοποιείται κατά την ολίσθηση κάθε οριζόντιου στρώματος σε σχέση με τα εκατέρωθεν του.

Έτσι, η κάμψη αναλύεται σε **εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση**.

Οι ίνες που δεν καταπονούνται σε θλίψη ή εφελκυσμό, αλλά μόνον σε διάτμηση, ονομάζονται **ουδέτερες ίνες** και το επίπεδο που αποτελούν ονομάζεται **ουδέτερο επίπεδο** ή **ουδέτερη στρώση**. Η τομή του ουδέτερου επιπέδου με το επίπεδο συμμετρίας xy ονομάζεται **ουδέτερος άξονας**. Το ίχνος του ουδέτερου επιπέδου σε μία διατομή του (δομικού) στοιχείου ονομάζεται **ουδέτερη γραμμή**.

Η ροπή κάμψης σχεδιάζεται, είτε με το **καμπύλο διάνυσμα** κατά μήκος του (δομικού) στοιχείου, είτε με το **χαρακτηριστικό διάνυσμα** στη διατομή, το οποίο είναι πάντα κάθετο στο επίπεδο φόρτισης.

Κανόνας δεξιού χεριού: Η φορά του χαρακτηριστικού διανύσματος προκύπτει από την κατεύθυνση του αντίχειρα, όταν τα δάκτυλα του δεξιού χεριού δείχνουν κατά την φορά του καμπύλου διανύσματος (και αντίστροφα).

Παραδοχές κάμψης:

1. Ισχύει η υπόθεση των Bernoulli-Navier: Κάθε διατομή επίπεδη και κάθετη στον άξονα της δοκού προ της κάμψης, παραμένει έτσι και μετά από αυτήν.
2. Η διατομή της δοκού έχει έναν τουλάχιστον άξονα συμμετρίας (άρα αυτός είναι και κύριος), που περιέχεται στο επίπεδο φόρτισης.
3. Ισχύει ο νόμος του Hooke, δηλαδή ότι το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά.
4. Η ροπή κάμψης θεωρείται θετική όταν τείνει να εφελκύσει την ίνα αναφοράς, που λαμβάνεται η κατώτερη (δηλαδή στα θετικά y).

2.6.2 Κατανομή Ορθών Τάσεων

Με σύστημα αξόνων το κεντροβαρικό $Kxyz$, θεωρούμε αμφιέριστη δοκό μήκους L , στα άκρα της οποίας ενεργούν δύο ροπές M , ίσου μέτρου αλλά αντίρροπες. Η δοκός καταπονείται σε καθαρή κάμψη, επειδή σε κάθε διατομή της εμφανίζεται μόνον η σταθερή (και μάλιστα θετική) ροπή M . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κυκλική παραμόρφωση της δοκού κατά ακτίνα R .

Στο υλικό της αναπτύσσεται ορθή τάση σ_x (δηλαδή έχει διεύθυνση παράλληλη στο διαμήκη άξονα x), που σε τυχαίο σημείο της διατομής το οποίο απέχει y από την ουδέτερη γραμμή (δηλαδή από τον άξονα z) είναι:

$$\sigma_x = \frac{E}{R} \cdot y, y_a \leq y \leq y_u$$

Όπου: R η ακτίνα καμπυλότητας, E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

$y_u > 0$, η απόσταση της κατώτατης ίνας από τον άξονα z (που είναι θετική διότι ο άξονας y κατευθύνεται προς τα κάτω, ώστε τα βέλη κάμψης να προκύπτουν θετικά).

$y_a < 0$, η απόσταση της ανώτατης ίνας από τον άξονα z .

Η σχέση εκφράζει την γραμμικότητα μεταβολής των ορθών τάσεων, συναρτήσει της απόστασης y από την ουδέτερη γραμμή.

Το διάγραμμα μεταβολής της ορθής τάσης κατά το ύψος της διατομής είναι τριγωνικό.

Ουδέτερη γραμμή ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων της διατομής που έχουν μηδενική τάση.

Για κατακόρυφο επίπεδο φόρτισης xy , η ουδέτερη γραμμή διέρχεται από το κέντρο βάρους της διατομής και συμπίπτει με τον άξονα z .

Η ουδέτερη γραμμή:

- Διέρχεται από το κέντρο βάρους της διατομής και τη διαχωρίζει σε εφελκυσόμενη και θλιβόμενη περιοχή.
- Είναι πάντα κάθετη στο ίχνος του επιπέδου φόρτισης. Αν αυτό είναι το xy , ουδέτερη γραμμή είναι το τμήμα του άξονα z που τέμνει η διατομή.
- Οι μέγιστες τάσεις παρατηρούνται στα δύο πιο απομακρυσμένα σημεία εκατέρωθεν της ουδέτερης γραμμής.
- Τα σημεία που ισαπέχουν εκατέρωθεν της ουδέτερης γραμμής έχουν κατά μέτρο ίδια ορθή τάση αλλά αντίθετο πρόσημο.
- Με βάση τα παραπάνω, στις διπλά συμμετρικές διατομές (π.χ. ορθογωνική), οι μέγιστες τάσεις έχουν ίσα μέτρα αλλά αντίθετο πρόσημο.
- Στις μονά συμμετρικές (π.χ. ισοσκελές τρίγωνο), οι μέγιστες τάσεις είναι και κατά μέτρο άνισες, με μεγαλύτερη αυτήν που απέχει περισσότερο από την ουδέτερη γραμμή.

2.6.3 Θεμελιώδης Νόμος Της Κάμψης

Η ορθή τάση σ_x σε τυχαίο σημείο της διατομής, συναρτήσει της ροπής κάμψης M_z , είναι:

$$\sigma_x = \frac{M_z}{I_z} y, y_a \leq y \leq y_u$$

Όπου: y , η απόσταση της εξεταζόμενης ίνας από την ουδέτερη γραμμή.

y_u , (όπου $y_u > 0$) η απόσταση της κατώτατης ίνας από τον άξονα z .

y_a , (όπου $y_a < 0$) η απόσταση της ανώτατης ίνας από τον άξονα z .

I_z , η ροπή αδρανείας ως προς τον z (ουδέτερη γραμμή).

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τον **θεμελιώδη νόμο της κάμψης** και διατυπώνεται ως εξής:

Η αναπτυσσόμενη σ_x (ορθή τάση) είναι ανάλογη της ροπής κάμψης, της απόστασης της εξεταζόμενης ίνας από την ουδέτερη γραμμή και αντιστρόφως ανάλογη της ροπής αδρανείας της διατομής. Στην ουδέτερη γραμμή η σ_x είναι μηδέν.

Οι ακρότατες ίνες ενός καμπτόμενου (δοκιμίου) στοιχείου υφίστανται τις μέγιστες καταπονήσεις.

Εξισώνοντας τις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$\frac{E_y}{R} = \frac{M_z y}{I_z} \rightarrow \kappa = \frac{1}{R} = \frac{M_z}{EI_z}$$

Η σχέση αποτελεί τη θεμελιώδη σχέση της θεωρίας της ελαστικής παραμόρφωσης της δοκού.

Η δε σχετική γωνία στροφής $d\varphi$ μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών της δοκού που απέχουν μεταξύ τους στοιχειώδη απόσταση ds , όπου το στοιχειώδες τόξο είναι $ds=Rd\varphi$, σύμφωνα με τη σχέση (3) είναι:

$$\frac{1}{R} = \frac{d\varphi}{ds} = \frac{M_z}{EI_z} \rightarrow$$

$$d\varphi = \frac{M_z}{EI_z} ds$$

$$\varphi = \frac{M_z l}{EI_z}$$

Από την σχέση , δίνεται η ολική γωνία στροφής και προέκυψε από την αμέσως επόμενη σχέση ολοκληρώνοντας για ολόκληρο το μήκος l της δοκού (για σταθερό M_z).

Το γινόμενο EI_z ονομάζεται «**δυσκαμψία**», το δε E εκφράζει την ποιοτική συνιστώσα της, η δε I_z την ποσοτική.

2.6.4 Μέγιστες Ορθές Τάσεις-Συνθήκες Αντοχής

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η κατανομή των ορθών τάσεων είναι τριγωνικής μορφής, με μέγιστες τιμές στις ακρότατες ίνες.

Στην κάμψη απλά συμμετρικής διατομής, οι μέγιστες ορθές τάσεις, είναι:

$$\sigma_x^u = \frac{M_{max}}{I_z} y_w, \sigma_x^a = \frac{M_{max}}{I_z} y_a$$

Οι παραπάνω σχέσεις διατυπώνονται με την φράση:

Στην γενική κάμψη, οι μέγιστες ορθές τάσεις παρατηρούνται στη διατομή εκείνη στην οποία η ροπή κάμψης παίρνει τη μέγιστη τιμή της M_{max} και μάλιστα στις ίνες εκείνες (της διατομής αυτής) που απέχουν περισσότερο εκατέρωθεν της ουδέτερης γραμμής.

Η μία είναι μέγιστη εφελκυστική, ενώ η άλλη είναι η μέγιστη θλιπτική.

Συνθήκες αντοχής:

Σε καμπόμενη δοκό, θα πρέπει τόσο η μέγιστη εφελκυστική τάση $\sigma_{\max}^{\varepsilon\varphi}$, όσο και το μέτρο της μέγιστης θλιπτικής $\sigma_{\max}^{\theta\lambda}$, να μην υπερβαίνουν τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες τάσεις του υλικού σε εφελκυσμό και θλίψη.

Δηλαδή, πρέπει να ικανοποιούνται συγχρόνως και οι δύο συνθήκες αντοχής:

$$\sigma_{\max}^{\varepsilon\varphi} \leq \sigma_{\varepsilon\pi}^{\varepsilon\varphi} \text{ και } |\sigma_{\max}^{\theta\lambda}| \leq |\sigma_{\varepsilon\pi}^{\theta\lambda}|$$

Από την παραπάνω σχέση προσδιορίζεται ένα μόνον μέγεθος, π.χ. μία διάσταση της διατομής (διαστασιολόγηση), ή η M_{\max} και βάση αυτής η φορτοϊκανότητα.

3 Κριτήρια αστοχίας

3.1 Εισαγωγή

Σε πρακτικές εφαρμογές η οριακή καταπόνηση του υλικού είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παραμόρφωση του και για αυτό ορίζουμε ως οριακή κατάσταση όταν το υλικό ξεπεράσει το όριο διαρροής. Τα παραπάνω ισχύουν σε απλές καταπονήσεις, στις οποίες κατά κύριο λόγο η διατομή δέχεται ορθές τάσεις ή μόνο διατμητικές. Οι τιμές αυτών των ορίων βρίσκονται με την εκτέλεση απλών πειραμάτων εφελκυσμού, θλίψης ή στρέψης.

Στη περίπτωση σύνθετων καταπονήσεων, δηλαδή στη πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν ισχύουν τα παραπάνω. Για το λόγο αυτό λοιπόν αναζητούμε συνδυασμό τάσεων ή συντελεστές οι οποίοι να καθορίζουν την οριακή κατάσταση κατά τη σύνθετη καταπόνηση, μια και υφίστανται ποικιλία εντατικών καταστάσεων όπου μπορούν να οδηγήσουν στη θραύση.

Και τα δύο φαινόμενα διαρροής και θραύσης κατατάσσονται στα κριτήρια αστοχίας. Κοινώς απαιτείται η γνώση των κύριων τάσεων σ_1 , σ_2 και σ_3 οι οποίες οδηγούν στην αστοχία.

Έχουν ορισθεί αρκετά κριτήρια αστοχίας αλλά γενικά κανένα δεν μπορεί να προβλέψει ακριβώς κάθε κατάσταση και κάθε είδος υλικού. Για το λόγο αυτό αρχικά θα πρέπει να γίνει μία χονδρική εκτίμηση της συμπεριφοράς του υλικού ως όλκιμου ή ψαθυρού αναφερόμενοι πάντα σε απλές καταπονήσεις. Ύστερα γίνεται η αναζήτηση του κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας.

Γενικά υπάρχουν τρία κριτήρια:

1. Η θεωρία της μέγιστης διατμητικής τάσης/ Tresca (σε όλκιμα υλικά)
2. Η θεωρία της οκτάεδρου διατμητικής τάσης/ von mises (σε όλκιμα υλικά)
3. Η θεωρία εσωτερικής τριβής / Mohr (εν μέρει σε όλκιμα και περισσότερο σε ψαθυρά)

Σε όλες τις παραπάνω θεωρίες αυτές κύρια παραδοχή είναι ότι η αστοχία εξαρτάται πλήρως από την εντατική ή παραμορφωσιακή κατάσταση. Αγνοείται η επίδραση της θερμοκρασίας και η ταχύτητα μεταβολής της τάσης.

Επιφάνεια αστοχίας:

Συνήθως η σύνθετη εντατική κατάσταση η οποία προκαλεί την αστοχία μπορεί να παρασταθεί στο επίπεδο από τις τρεις κύριες τάσεις σ_1 , σ_2 και σ_3 . Άρα το σημείο $\Sigma(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ του επιπέδου αποτελεί παραστατικό σημείο της έντασης της αστοχίας. Το σύνολο των σημείων Σ τα οποία παριστούν διάφορες οριακές εντατικές καταστάσεις δημιουργούν τις επιφάνειες θραύσης ή αστοχίας του υλικού.

Όλα τα συμπαγή υλικά, όλκιμα ή ψαθυρά υλικά ανθίστανται σε πολύ υψηλές υδροστατικές πιέσεις χωρίς να υφίστανται μόνιμες παραμορφώσεις. Αυτό υπό την προϋπόθεση ότι η πίεση εμποδίζεται να εισέλθει στο υλικό από ενδεχόμενες ρωγμές. Καθαρή υδροστατική πίεση (όπως σε σώμα εμβαπτισμένο σε νερό) ισοδύναμη προς ισοθλιπτική τάση οποιουδήποτε μεγέθους δεν μπορεί να προκαλέσει πλαστική παραμόρφωση σε συμπαγή στερεά υλικά.

Υπό την επίδραση ανομοιόμορφου τριαξονικής θλιπτικής τάσης τα ψαθυρά υλικά χωρίς εξαίρεση παρουσιάζουν αύξηση του μεγέθους των πλαστικών παραμορφώσεων μέχρι εκδήλωσης της θραύσης.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω τα στερεά σώματα καταπονούμενα σε ομοιόμορφο εφελκυσμό θραύονται για πεπερασμένη τιμή της τάσης, χωρίς να προηγηθούν πλαστικές παραμορφώσεις. Επομένως υπάρχει το συμπέρασμα ότι τα όλκιμα υλικά υπό την επίδραση ομοιόμορφου τριαξονικού εφελκυσμού συμπεριφέρονται σαν ψαθυρά.

Σε ελαφρώς ανομοιόμορφο τριαξονικό εφελκυσμό τα όλκιμα υλικά παρουσιάζουν μία ελαφριά αύξηση των ελαστικών παραμορφώσεων τους. Άρα μέτρο του αν θα χαρακτηρίσουμε ένα υλικό όλκιμο ή ψαθυρό αποτελεί το είδος της φόρτισής του υλικού. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες όπως θερμοκρασία ή ταχύτητα επιβολής του φορτίου που μεταβάλουν την ολκιμότητα των υλικών.

3.2 Θεωρία της μέγιστης διατμητικής τάσης (Tresca)

Ένα στοιχείο από όλκιμο υλικό αρχίζει να διαρρέει υπό την επίδραση βραδέως επιβαλλόμενης σύνθετης έντασης, όταν η μέγιστη διατμητική τάση σε αυτό εξισωθεί προς αυτήν, την αναπτυσσόμενη κατά την έναρξη της διαρροής του κατά την καταπόνηση σε καθαρό εφελκυσμό. Αυτό είναι το λεγόμενο κριτήριο διαρροής του Tresca.

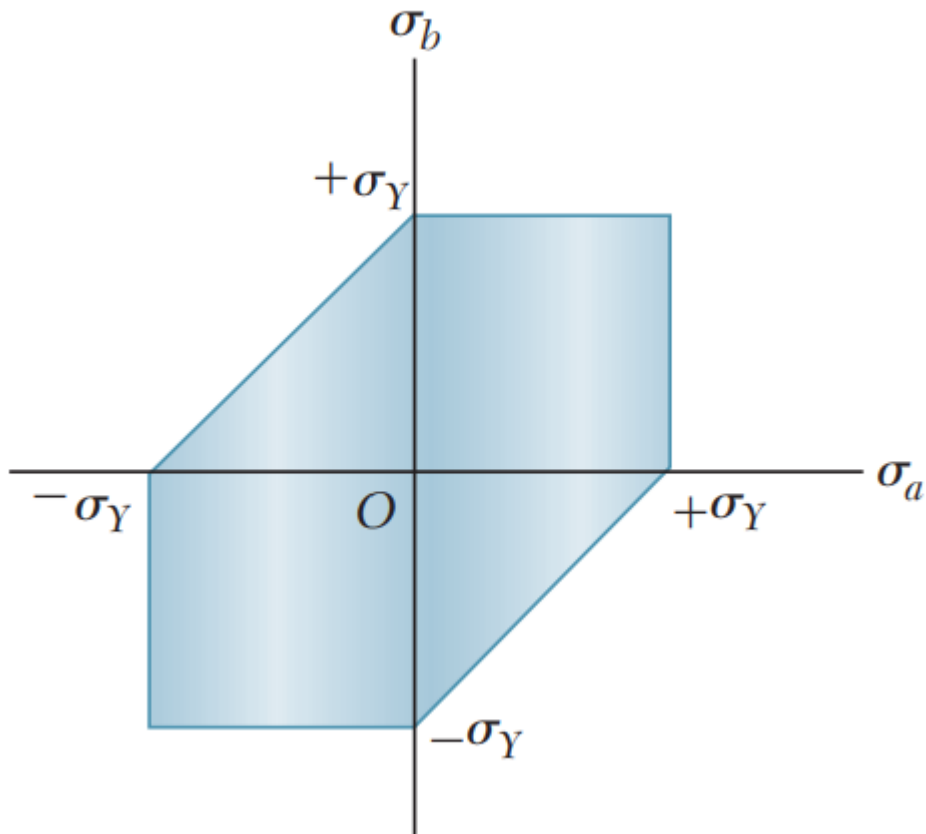
Αν λοιπόν σε ένα καλά λειασμένο δοκίμιο εφελκυσμού από χάλυβα εμφανίζεται διαρροή με τη σημειολογία των γραμμών Luders, οποίες εμφανίζονται πάντα υπό γωνία 45° ως προς τον διαμήκη άξονα της ράβδου. Πρόκειται εξ' ολοκλήρου για ολίσθηση του υλικού σε επίπεδα που συμπίπτουν κατά προσέγγιση με τα επίπεδα της μέγιστης διατμητικής τάσης. Με άλλα λόγια η κρυσταλλική δομή των μετάλλων (όλκιμων υλικών) είναι σχετικά ευαίσθητη σε διατμητικές τάσεις.

Η ολίσθηση ξεκινάει λοιπόν από τα σημεία αρχικής συγκέντρωσης τάσεων και κατά συνέπεια διαδίδεται κατά τη διεύθυνση της μέγιστης διατμητικής τάσης. Στη περίπτωση του καθαρού εφελκυσμού έχουμε $\sigma_1 \neq 0$ και $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ οπότε λοιπόν η μέγιστη διατμητική τάση στην έναρξη της διαρροής λαμβάνει την τιμή:

$$\max \tau = (\sigma_1/2) \cdot \sin(2\varphi)$$

Τα όλκιμα υλικά παρουσιάζουν ίσες απόλυτες τάσεις διαρροής σε εφελκυσμό και θλίψη. Ας εξεταστεί τώρα η συμπεριφορά του απλού χάλυβα σε συνθήκες διαξονικής έντασης. Με την έναρξη της διαρροής εμφανίζονται οι γραμμές Luders, οι οποίες σχηματίζουν γωνίες ως προς την διεύθυνση των μέγιστων διατμητικών τάσεων. Κατά την θεωρία Tresca γίνεται η παραδοχή ότι η διαρροή χάλυβα επέρχεται όταν και όπου η διατμητική τάση φτάσει την τιμή της εσωτερικής αντοχής του υλικού σε διάτμηση σε δοκιμή καθαρού εφελκυσμού.

Για τυχούσα διαξονική ένταση μέγιστες διατμητικές τάσεις εμφανίζονται σε κάθε επίπεδο το οποίο περιλαμβάνει τους άξονες συντεταγμένων.



Εικόνα 3:1 Εξάγωνο του Tresca [1]

Το παραπάνω γράφημα χαράσσεται από τις εξισώσεις των μέγιστων διατμητικών τάσεων:

$$\max |\tau| = |(\sigma_1 - \sigma_2)/2|$$

$$\max |\tau| = |(\sigma_2 - \sigma_3)/2|$$

$$\max |\tau| = |(\sigma_3 - \sigma_1)/2|$$

Διαρροή του υλικού συμβαίνει όταν μία από αυτές τις σχέσεις λάβει την τιμή της μέγιστης διατμητικής τάσης σε καθαρό εφελκυσμό.

Το εξάγωνο Tresca διαχωρίζει το επίπεδο σε δύο κύριες εντατικές καταστάσεις. Για εντατική κατάσταση η οποία βρίσκεται εντός του εξαγωνικού γραφήματος το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά. Εάν η εντατική κατάσταση συμπίσει με το περίγραμμα του εξάγωνου το υλικό διαρρέεται και κατά συνέπεια αστοχεί.

Αν η εντατική κατάσταση βρίσκεται εκτός του εξαγώνου τότε το υλικό έχει διαρρεύσει και συμπεριφέρεται πλαστικά .

Στην περίπτωση τριαξονικής έντασης τα επίπεδα ολίσθησης κλίνουν υπό γωνία 45° κατά προσέγγιση ως προς τη διεύθυνση της μεγαλύτερης και της μικρότερης κύριας τάσης. Για διάφορους συνδυασμούς των σ_1 , σ_2 , σ_3 η μέγιστη διατμητική τάση δίνεται από κάποια από τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων διαρροής στο χώρο σχηματίζεται από τρία αλληλοτεμνόμενα ζεύγη παράλληλων επιπέδων. Τα έξι επίπεδα σχηματίζουν ένα εξαγωνικό πρίσμα η παράπλευρος επιφάνεια του οποίου είναι η επιφάνεια διαρροής. Άξονας του πρίσματος είναι η ευθεία $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=0$ η οποία σχηματίζει ίσες γωνίες με τους άξονες συντεταγμένων. Η εγκάρσια διατομή του πρίσματος είναι εξαγώνο.

Εντατική κατάσταση που παριστάνεται εντός του εξαγώνου πρίσματος σημαίνει ελαστική συμπεριφορά , αν η εντατική κατάσταση συμπίπτει με τα όρια του πρίσματος το υλικό διαρρέεται. Και τέλος αν η εντατική κατάσταση παρίσταται εκτός του πρίσματος υπάρχει πλαστική παραμόρφωση .

Δύο χαρακτηριστικά σημεία της θεωρίας:

1. Η συνθήκη διαρροής εξαρτάται μόνο από τη μέγιστη διαφορά των τιμών των κύριων τάσεων και είναι ανεξάρτητη της τιμής της τρίτης ή της ενδιάμεσης κύριας τάσης.
2. Υπό ομοιόμορφη τριαξονική θλίψη ή τριαξονικό εφελκυσμό είναι αδύνατο να επέλθει διαρροή του υλικού. Σε παρόμοια εντατική κατάσταση δεν αναπτύσσεται διατμητική τάση, η παρουσία της οποίας είναι απαραίτητη κατά την θεωρία αυτή για την πρόκληση διαρροής.

3.3 Θεωρία της οκτάεδρου διατμητικής τάσης (von Mises, 1913)

Μία παράλειψη στο κριτήριο του Tresca, η ενδιάμεση κύρια τάση σ_2 παίζει κάποιο σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση πλαστικών παραμορφώσεων. Έχει αποδειχθεί ότι, όταν η ενδιάμεση τάση $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$, η διατμητική τάση διαρροής πολυκρυσταλλικών υλικών είναι κατά 10% μεγαλύτερη της αντίστοιχης τάσης διαρροής, της λαμβανόμενης $\sigma_2 = \sigma_1$ ή σ_3 . Το παραπάνω κριτήριο ισχύει για υλικά έχοντα την ίδια τάση διαρροής σε εφελκυσμό και θλίψη.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma$$

Βάση αυτού του κριτηρίου τα όλκιμα υλικά διαρρέουν υπό την επίδραση βραδέως επιβαλλόμενης σύνθετης έντασης $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \neq 0$ όταν το έργο της συνόγκου παραμόρφωσης λάβει την τιμή του αντιστοίχου έργου του αναλίσκόμενου μέχρι την έναρξη της διαρροής του υλικού κατά την καταπόνηση σε καθαρό εφελκυσμό. Το έργο της συμμόρφου παραμόρφωσης εν προκειμένω αγνοείται. Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι εντατική κατάσταση υπό μορφή υδροστατικής πίεσης δεν οδηγεί στη διαρροή του υλικού.

Το ίδιο κριτήριο διατυπώθηκε και το 1926 από τον Ros με άλλη φυσική ερμηνεία. Κατ' εκείνον όλκιμα υλικά διαρρέουν υπό την επίδραση βραδέως επιβαλλόμενης σύνθετης έντασης όταν η οκτάεδρος διατμητική τάση τ η οποία αναπτύσσεται κατά την έναρξη της διαρροής του υλικού σε καθαρό εφελκυσμό. Από την διατύπωση αυτή. Από τη διατύπωση αυτή προκύπτει η ονομασία του κριτηρίου αυτού ως κριτήριο της οκτάεδρου διατμητικής τάσης:

$$\tau_0 = 1/2 \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = 2\sigma$$

Σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων η εξίσωση του κριτηρίου παριστάνει στο χώρο έναν κύλινδρο, η παράπλευρός επιφάνεια του οποίου ονομάζεται επιφάνεια διαρροής. Στην επιφάνεια του κυλίνδρου δεν είναι δυνατόν να εμφανιστεί ισοεντατική κατάσταση το οποίο σημαίνει ότι παρόμοια ένταση δεν μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή.

Εάν η εξίσωση της αστοχίας γραφτεί υπό την μορφή συνάρτησης $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 - 2\sigma^2$, τότε για $f < 0$ το παραπάνω σημείο έντασης βρίσκεται εντός του κυλίνδρου. Εάν $f > 0$, τότε βρίσκεται εκτός του κυλίνδρου και για $f = 0$ βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου και παριστά τη συνθήκη έναρξης της διαρροής.

Υπό συνθήκες επίπεδης έντασης $\sigma_3 = 0$, σ_1 και $\sigma_2 \neq 0$ η γραφική παράσταση του κριτηρίου αστοχίας περιέχεται από την καμπύλη της τομής της επιφάνειας του κυλίνδρου με το επίπεδο που περιέχει τους άξονες σ_1 και σ_2 . Η καμπύλη αυτή είναι έλλειψη και είναι γνωστή ως έλλειψη Mises.

3.4 Σύγκριση των δύο προηγούμενων κριτηρίων

Ο κύλινδρος ο οποίος παριστά το κριτήριο του Mises περιγράφεται του εξαέδρου πρίσματος του Tresca. Η χρήση της θεωρίας του Mises οδηγεί συνεπώς σε οικονομικότερες κατασκευές από ότι η θεωρία του Tresca. Ειδικότερα στη περίπτωση της επίπεδης έντασης η έλλειψη περιγράφεται του εξαγώνου.

Η μέγιστη απόκλιση των δύο θεωρημάτων είναι περίπου 15,4%. Η συμμετρική εξίσωση του κριτηρίου Mises λύνει τα προβλήματα ασυνέχειας της θεωρίας του Tresca. οι οποίες δυσχεραίνουν αρκετά την εφαρμογή της σε πλαστικές παραμορφώσεις. Είναι γεγονός ότι η θεωρία του Tresca από μαθηματικής άποψης χρειάζεται 6 συναρτήσεις. Επίσης η θεωρία Mises προσαρμόζεται καλύτερα σε πειραματικά δεδομένα.

3.5 Θεωρία της εσωτερικής τριβής (Mohr, 1900)

Είναι χαρακτηριστικό των ψαθυρών υλικών να μη μπορούν να τους ασκηθούν εφελκυστικά φορτία, διότι, παρουσιάζουν μικρότερη απόλυτη τάση θραύσεως σε εφελκυσμό παρά σε θλίψη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορούν να μεταβούν σε πλαστική κατάσταση λόγω θραύσης με μικρή παραμόρφωση. Εξήγηση σε αυτό το φαινόμενο δίνει το γεγονός ότι στο εσωτερικό της δομής των ψαθυρών υλικών υπάρχουν εν δυνάμει εσωτερικές ρωγμές. Αυτές οι ρωγμές κατά τον εφελκυσμό ενισχύουν την τάση καθιστώντας τα υλικά αδύναμα σε εφελκυσμό υπερβαίνοντας την αντοχή του, διευρύνοντας τις ρωγμές και μείωση της διατομής και ικανότητας του υλικού. Στον αντίποδα κατά τη θλίψη αντί της διεύρυνσης των ρωγμών έρχεται η σύνθλιψη αυτών κάνοντας τα ψαθυρά υλικά να έχουν 10 πλάσια αντοχή σε θλίψη παρά σε εφελκυσμό.

Ο Mohr σε συνέχεια της θεωρίας του Tresca διατύπωσε μία θεωρία καθώς θεωρίες των όλκιμων υλικών δεν εφαρμόζονται στα ψαθυρά εφόσον βρίσκονται σε αντίθεση με την υπόθεση ισότητας τάσεων αστοχίας σε εφελκυσμό και θλίψη[6].

Ένα υλικό αστοχεί υπό σύνθετη καταπόνηση με πλαστική ολίσθηση ή θραύση, όταν η διατμητική τάση τ στα επίπεδα ολίσθησης λάβει κάποια τιμή εξαρτώμενη γενικά από την τιμή της κάθετης σ' αυτά τάσης σ , ή όταν η μεγαλύτερη ορθή εφελκυστική τάση λάβει οριακή τιμή, εξαρτώμενη από τις εν γένει ιδιότητες του υλικού[6].

Έχει παρατηρηθεί σε δοκίμια ψαθυρών υλικών να θραύονται υπό γωνία μικρότερη των 45° ως προς τη διεύθυνση θλίψης όταν αυτά καταπονούνται σε θλίψη. Τα ίδια δοκίμια θραύονται σε επιφάνεια κάθετη προς τη διεύθυνση της φόρτισης, και όχι κεκλιμένη, όταν τους ασκηθεί καθαρός εφελκυσμός.

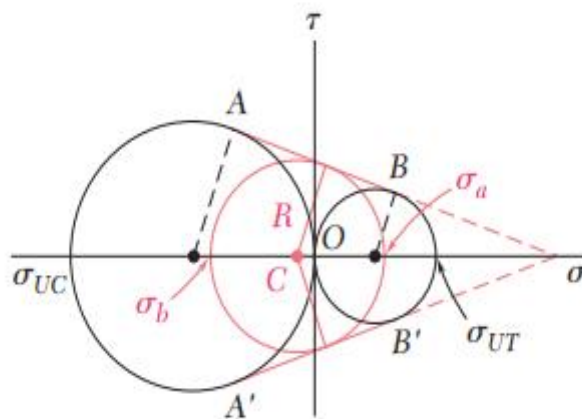
Εάν θεωρήσουμε ότι σε ένα υλικό ασκηθεί τριαξονικό φορτίο $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ανεξάρτητα από το αν είναι όλκιμο ή ψαθυρό κατά την πλαστική παραμόρφωση και πριν τη θραύση παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο. Δύο οικογένειες γραμμών που διασταυρώνονται σε σταθερή γωνία. Εάν $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, τα επίπεδα ολίσθησης αλληλοτέμνονται κατά την ενδιάμεση τάση σ_2 ενώ η αμβλεία γωνία

των επιπέδων διχοτομείται από τη διεύθυνση της μεγαλύτερης τάσης. Όλες αυτές οι παρατηρήσεις καλύφθηκαν από τον Mohr μέσω της συνάρτησης $t=f(\sigma)$ σύμφωνα με την οποία η αστοχία του υλικού επέρχεται όταν η διατμητική τάση τ λάβει κάποια οριακή τιμή.

Στην υπόθεση Mohr δεν αναφέρεται τίποτα ως προς τη μορφή της παραπάνω συνάρτησης. Η περαιτέρω μελέτη της θεωρίας γίνεται με γραφική μέθοδο των τάσεων με τους κύκλους του Mohr.

Σε διάγραμμα (σ, τ) η παραπάνω εξίσωση παρουσιάζεται σαν οριακή καμπύλη αντοχής κάθε υλικού με συμμετρία προς τον άξονα σ αφού ο άξονας τ δεν αλλάζει το αποτέλεσμα. Είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων $\Sigma(\sigma, \tau)$, έτσι καταφέρνουμε να πάρουμε τις οριακές τιμές των συνιστωσών επί των επιπέδων ολίσθησης. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν διακρίνει κανείς δύο οριακές καμπύλες. Την οριακή καμπύλη διαρροής για τα όλκιμα υλικά και για τα ψαθυρά υλικά την οριακή καμπύλη θραύσης.

Αν παρουσιαστεί σε διάγραμμα η εντατική κατάσταση $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ για κάθε ζεύγος τάσεων (σ, τ) θα αντιστοιχεί και ένας κύκλος Mohr εκ των οποίων ο μεγαλύτερος θα έχει διάμετρο τη διαφορά $(\sigma_1 - \sigma_3)$.



Εικόνα 3:2 Γραφική αναπαράσταση των κύκλων Mohr [4]

Μπορούν να αγνοηθούν οι δύο εσωτερικοί κύκλοι διαμέτρων (σ_1 - σ_2) και (σ_2 - σ_3), διότι η μεγαλύτερη διατμητική τάση (και άρα η περισσότερο επικίνδυνη) για την αυτή ορθή τάση εμφανίζεται στο επίπεδο σ_1 , σ_3 . [6]

Εάν υπήρχε κύκλος που να τέμνει την οριακή καμπύλη $\tau=f(\sigma)$ θα είχε διατμητική τάση μεγαλύτερη της οριακής τιμής που παρέχεται από την καμπύλη $\tau_1=f_1(\sigma)$ και επαρκεί να προκαλέσει ολίσθηση. Αυτό είναι αδύνατο. Συνεπώς η $\tau=f(\sigma)$ είναι περιβάλλουσα των οριακών κύκλων του Mohr. Εξ αυτού ονομάζεται περιβάλλουσα διαρροής ή θραύσεως του υλικού. [6]

Κάθε σύνθετη καταπόνηση στοιχείου σ_1 , σ_2 , σ_3 παρέχουσα παραστατικό κύκλο (σ_1, σ_2), (σ_2, σ_3) ή (σ_3, σ_1) μη εφαπτόμενο ή μη τέμνοντα την περιβάλλουσα καμπύλη δεν προκαλεί αστοχία.

Κατά τη στιγμή της αστοχίας οι τάσεις προέρχονται από το σημείο επαφής του οριακού κύκλου Mohr με την $\tau=f(\sigma)$. Η συνάρτηση έχει τη μορφή $f(\sigma_1, \sigma_3)=0$ επειδή η περιβάλλουσα καμπύλη εφάπτεται με τους μέγιστους οριακούς κύκλους που έχουν διάμετρο ($\sigma_1 - \sigma_3$). Πιο συγκεκριμένα όταν $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ η ακτίνα του μέγιστου οριακού κύκλου είναι $R = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ όπου $\tau = \max$ άρα $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 = f(\sigma_1 + \sigma_3)/2$

Η περιβάλλουσα καμπύλη επιτρέπει τη γραφική εύρεση της κλίσης των επιπέδων, στα οποία παράγεται η ολίσθηση[]. Στην περίπτωση που εξετάζεται όπου $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ αν συνδεθεί το Κ (κέντρο του κύκλου) με τα σημεία Π και Π' του κύκλου και της περιβάλλουσας, τότε οι ακτίνες ΚΠ, ΚΠ' εφόσον είναι κάθετες στην περιβάλλουσα σχηματίζουν γωνίες 2α και -2α αντίστοιχα με τον άξονα σ . Η περιβάλλουσα καμπύλη όλων των υλικών σχηματίζεται με πειραματικές πληροφορίες μέσω δοκιμών σε όμοια δοκίμια που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές τάσεων σ_1 , σ_2 , σ_3 . Ο κύκλος αστοχίας λαμβάνεται μέσω δοκιμών σε καθαρό εφελκυσμό και θλίψη εφαπτόμενο στον άξονα τ . Ο κύκλος αστοχίας που συμπίπτει με την αρχή Ο, λαμβάνεται μέσω δοκιμής σε στρέψη. Έτσι για κάθε υλικό χαράσσετε η σειρά μέγιστων κύκλων και η περιβάλλουσα αστοχίας ως κοινή εφαπτομένη των οριακών κύκλων.

Το υλικό αστοχεί όταν τεθεί υπό τάση ίση με τις ακραίες σ_1 και σ_3 , η γωνία α είναι συνάρτηση αυτών. Διαφέρει ανάλογα το υλικό και προσεγγίζει τις 45° και τις 30° για τα όλκιμα και τα ψαθυρά υλικά αντίστοιχα.

Απ' όλα τα παραπάνω συμπεραίνει κανείς ότι οι συμμετρικοί κλάδοι των περιβαλλουσών αποκλίνουν εν γένει ως προς τον άξονα των τετμημένων για αύξηση των θλιπτικών τάσεων σ . Αυτό, επειδή κανένα μη πορώδες υλικό δεν μπορεί να υποστεί διαρροή ή θραύση ως συνέπεια υδροστατικής πίεσης. Όπως αποδεικνύεται για οποιαδήποτε τιμή πίεσης ο κύκλος αντοχής εκφυλίζεται σε σημείου που πρέπει να περιέχεται μεταξύ συμμετρικών τμημάτων.

Για μεγάλες θλιπτικές τάσεις παρατηρείται ότι οι κλάδοι της περιβάλλουσας τείνουν να λάβουν διεύθυνση παράλληλη με του άξονα σ , όπως τα όλκιμα υλικά.

4 Στοιχεία θεωρίας ελαστικότητας

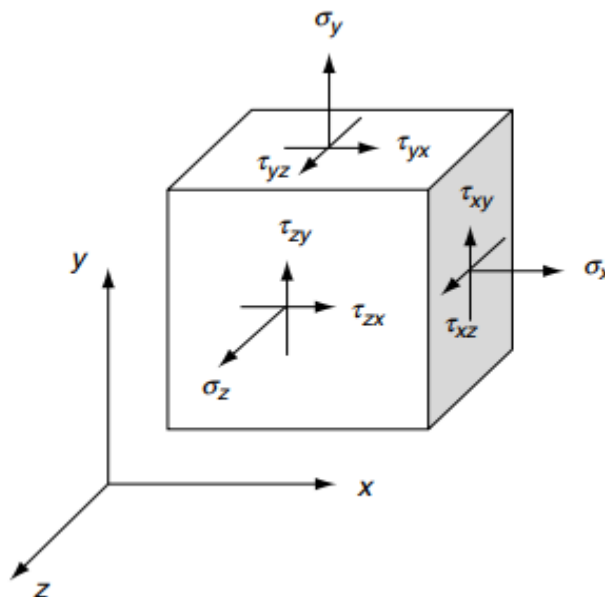
4.1 Γενικά

Το κεφάλαιο αυτό έχει σαν στόχο την παράθεση των βασικών στοιχείων από τη θεωρία ελαστικότητας εστιασμένες στα σημεία για την κατανόηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης θα δείξουμε πώς διευκολύνεται η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση διανυσμάτων αντί των μητρώων.

4.2 Τάσεις

Σε κάθε τρισδιάστατο ελαστικό σώμα που ορίζεται σε καρτεσιανό σύστημα αναφοράς $O(x,y,z)$ μπορούμε να ορίσουμε την εντατική κατάσταση σε κάθε σημείο με τη βοήθεια μεγεθών που ονομάζονται τανυστές. Τους τανυστές μπορούμε να τους παραστήσουμε με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι καθαρά μητρικός με τη βοήθεια του πίνακα T , διαστάσεων 3×3 :

$$\tau = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$



Εικόνα 4:1 Γεωμετρική αναπαράσταση του μητρώου των τάσεων

Για κάθε στοιχείο του παραπάνω μητρώου ο πρώτος δείκτης υποδηλώνει τον κάθετο άξονα στο επίπεδο αναφοράς της τάσης, ενώ ο δεύτερος τον άξονα ως προς τον οποίο η τάση είναι παράλληλη.

4.2.1 Εξίσωση ισορροπίας τάσεων

Εάν το σύμβολο σ_{ij} αντικαταστήσει το τ_{ij} τότε η συνθήκη ισορροπίας των τάσεων είναι η εξής:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i^* = \rho u$$

Ο επαναλαμβανόμενος δείκτης j δηλώνει τη συνθήκη άθροισης του Einstein. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να παρασταθεί από ένα σύστημα τριών διαφορικών εξισώσεων:[7]

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x^* = \rho u$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y^* = \rho v$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + f_z^* = \rho w$$

Όπου ρ η πυκνότητα του υλικού και οι δύο τελείες πάνω από τις μετατοπίσεις εκφράζουν τη διπλή παράγωγο ως προς το χρόνο. Εάν εισάγουμε τον διαφορικό τελεστή L :

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}^T$$

Καθώς επίσης και το διάνυσμα των καθολικών δυνάμεων:

$$\mathbf{f}^* = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}$$

Και θεωρώντας το διάνυσμα των τάσεων:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}$$

Στο σημείο αυτό κάνουμε την εξής παραδοχή ότι οι τάσεις οι οποίες δεν είναι ορθές και έχουν εναλλάξ τους όρους οι τάσεις αυτές είναι συμμετρικές.

Πλέον λοιπόν μπορούμε να γράψουμε συνοπτικά:

$$L^T \sigma + \mathbf{f}^* = \rho u$$

Μεταφέροντας τον όρο από το δεξί μέλος (δυνάμεις αδράνειας) στο αριστερό μέλος έχουμε:

$$L^T \sigma + b = 0$$

Όπου πλέον για λόγους ευκολίας στον όρο b ενώσαμε τις καθολικές δυνάμεις με τις δυνάμεις d'Alembert (δυνάμεις αδράνειας).

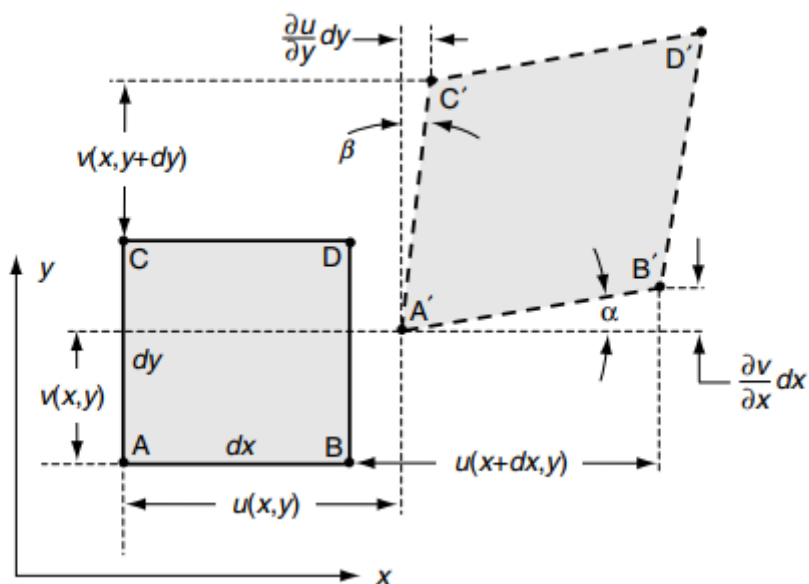
4.3 Παραμορφώσεις

Οι ορθές παραμορφώσεις ορίζονται ως εξής:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

Επίσης οι διατμητικές παραμορφώσεις, οι οποίες εκφράζουν τις παραμορφώσεις ορθών γωνιών στα τρία επίπεδα, δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$



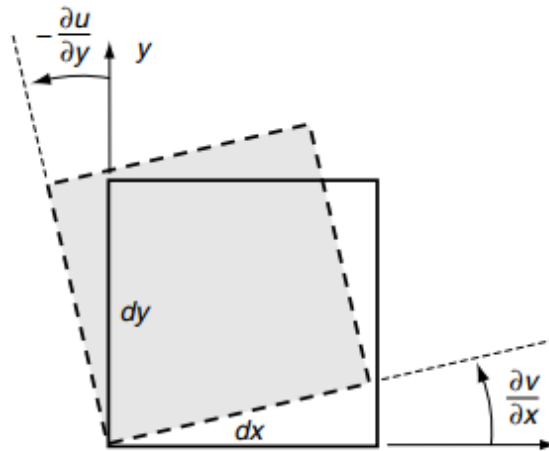
Εικόνα 4:2 Παραμόρφωση ορθής γωνίας σε δισδιάστατο επίπεδο [7]

Συνοψίζοντας μπορούμε να γράψουμε τις παραμορφώσεις σε ταυυστική μορφή:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \equiv \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad , \quad \varepsilon_{i,j} = \frac{\gamma_{i,j}}{2} \quad (i \neq j)$$

Μπορούμε πλέον να ορίσουμε και τις περιστροφές ως εξής:

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$



Εικόνα 4:3 Ορισμός περιστροφών σε καρτεσιανό σύστημα αξόνων[7]

Σε άμεση αντιστοιχία με τις τάσεις οι έξι τιμές των παραμορφώσεων μπορούν να αναπαρασταθούν σε μητρώο:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}$$

4.4 Σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων

Εισάγουμε τον συντελεστή θερμικής διαστολής α και έστω ότι $(T-T_0)$ η θερμοκρασιακή διαφορά του σώματος από τη θερμοκρασία αναφοράς. Έστω, επίσης και το μέτρο ελαστικότητας E και ν ο λόγος του Poisson:

Ο νόμος του Hooke που συνδέει τις τάσεις με τις παραμορφώσεις εκφράζεται από τις εξής εξισώσεις:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha(T - T_0)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha(T - T_0)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha(T - T_0)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

Όπου G :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Πλέον τις αρχικές σχέσεις των τάσεων μπορούμε να τις γράψουμε ως εξής:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\mu} \left[\sigma_{ij} - \frac{\sigma_v \cdot \nu}{(1+\nu)} \delta_{ij} \right] + \alpha(T - T_0) \delta_{ij}$$

Λύνοντας τη σχέση αυτή ως προς τις τάσεις έχουμε:

$$\sigma_{ij} = \lambda \Theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - \beta(T - T_0) \delta_{ij}$$

όπου

$$\Theta = \Delta = \frac{\Delta V}{V} = \nabla \cdot u$$

είναι η ανηγμένη διόγκωση, δ_{ij} το δέλτα του Kronecker και V ο στοιχειώδης όγκος, επίσης:

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$\lambda = 2\mu \frac{\nu}{1-2\nu}$$

Είναι οι σταθερές Lamé [8]. Ο νόμος του Hooke γράφεται σε μητρωική μορφή ως εξής:

$$\sigma = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \bar{\nu} & \bar{\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\nu} & 1 & \bar{\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\nu} & \bar{\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{\mu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{\mu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{\mu} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} - \beta \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

όπου:

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{(1-\nu)}$$

$$\bar{\mu} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}$$

$$\beta = \alpha(3\lambda + 2\mu)$$

Αθροίζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$E \cdot \varepsilon_v = (1-2\nu) \cdot \sigma_v$$

4.5 Εξισώσεις ισορροπίας εκφρασμένες προς μετατοπίσεις (NAVIER)

Αρχίζοντας από τις εξισώσεις ισορροπίας των τάσεων, όπου όπως δείξαμε πριν αυτές συνδέονται με τις παραμορφώσεις, καταλήγουμε στην παρακάτω έκφραση:

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot u) + \mu\nabla^2 u + f^* = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Σε τανυστική μορφή γράφεται ως εξής:

$$(\lambda + \mu)u_{i,jj} + \mu u_{i,jj} + f_i = \rho \ddot{u}_i$$

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της ανηγμένης διόγκωσης η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$(\lambda + \mu)\nabla\Theta + \mu\nabla^2 u + f^* = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Κάνοντας χρήση της ταυτότητας από το διαφορικό λογισμό:

$$\nabla^2 u = \nabla\nabla \cdot u - \nabla \times \nabla \times u$$

Καταλήγουμε στη μορφή :

$$(\lambda + 2\mu)\nabla\nabla \cdot u - \mu\nabla \times \nabla \times u + f = \rho \ddot{u}$$

Η περιστροφή γράφεται ως εξής:

$$\omega = \frac{1}{2} \nabla \times u$$

Η τελική σχέση λοιπόν που δίνει την ισορροπία των τάσεων είναι η παρακάτω:

$$(\lambda + 2\mu)\nabla\Theta - 2\mu\nabla \times \omega + f = \rho \ddot{u}$$

4.5.1 Αποσύζευξη κατά HELMOLTZ

Ως γνωστόν η μετατόπιση u μπορεί να αναπαρασταθεί σαν αποτέλεσμα ενός βαθμωτού και ενός διανυσματικού πεδίου:

$$u = \nabla\Phi + \nabla \times H = \text{grad}\Phi + \text{curl}H, \quad \nabla \cdot H = 0$$

Η συνθήκη $\nabla \cdot H$ είναι απαραίτητη προκειμένου να γίνει η αποσύζευξη της μετατόπισης u στις τέσσερις συνιστώσες των Φ και H .

Με όμοιο τρόπο η καθολική δύναμη μπορεί και αυτή να εκφραστεί συναρτήσει ενός βαθμωτού και ενός διανυσματικού πεδίου.

$$\mathbf{f} = \nabla f + \nabla \times B, \quad \nabla \cdot B = 0$$

Αντικαθιστώντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις στην εξίσωση Navier έχουμε:

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot (\nabla\Phi + \nabla \times H) + \mu\nabla^2(\nabla\Phi + \nabla H) + \nabla f + \nabla \times B = \rho(\nabla\Phi + \nabla \times H)$$

Που ανάγεται στην εξής:

$$\nabla \left\{ (\lambda + 2\mu)\nabla^2\Phi + \rho f - \rho\Phi \right\} + \nabla \times \left(\mu\nabla^2 + \rho B - \rho H \right) = 0$$

Προφανώς η παραπάνω εξίσωση ικανοποιείται ένα και οι δύο όροι μηδενιστούν:

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2\Phi + \rho f = \rho\Phi$$

$$\nabla^2 H + \rho B = \rho H$$

4.5.2 Ορθά και διατμητικά κύματα

Στην περίπτωση απουσίας καθολικών δυνάμεων, οι εξισώσεις Navier γίνονται:

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot u + \mu\nabla^2 u = \rho u \quad \square$$

I. Ορθά κύματα

Λαμβάνοντας την απόκλιση της παραπάνω εξίσωσης, προκύπτει:

$$(\lambda + \mu)\nabla \cdot (\nabla\nabla \cdot u) + \mu\nabla \cdot (\nabla^2 u) = \rho\nabla \cdot u \quad \square$$

Επειδή $\nabla \cdot \nabla \equiv \nabla^2$, $\nabla \cdot u = \theta$ έχουμε :

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2 \theta = \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να αναχθεί στη μορφή μιας κυματικής εξίσωσης:

$$\nabla^2 \theta = \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}$$

Όπου η ταχύτητα c_1 δίνεται από τη σχέση:

$$c_1 = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}\right)^{1/2}$$

Επομένως η μεταβολή του θ θα μεταδίδεται με ταχύτητα c_1 .

II. Διατμητικά κύματα

Λαμβάνοντας την περιστροφή της εξίσωσης Navier, προκύπτει:

$$(\lambda + \mu)\nabla \times (\nabla\nabla \cdot u) + \mu\nabla \times (\nabla^2 u) = \rho\nabla \times u \quad \square$$

Εφόσον όμως ο στροβιλισμός μίας απόκλισης είναι ίσος με το μηδέν έχουμε:

$$\mu \nabla^2 \omega = \rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}$$

Και αυτή η εξίσωση με τη σειρά της μπορεί να γραφτεί στη μορφή κυματικής εξίσωσης.

$$\nabla^2 \omega = \frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}$$

Όπου η αντίστοιχη ταχύτητα μετάδοσης κύματος είναι:

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

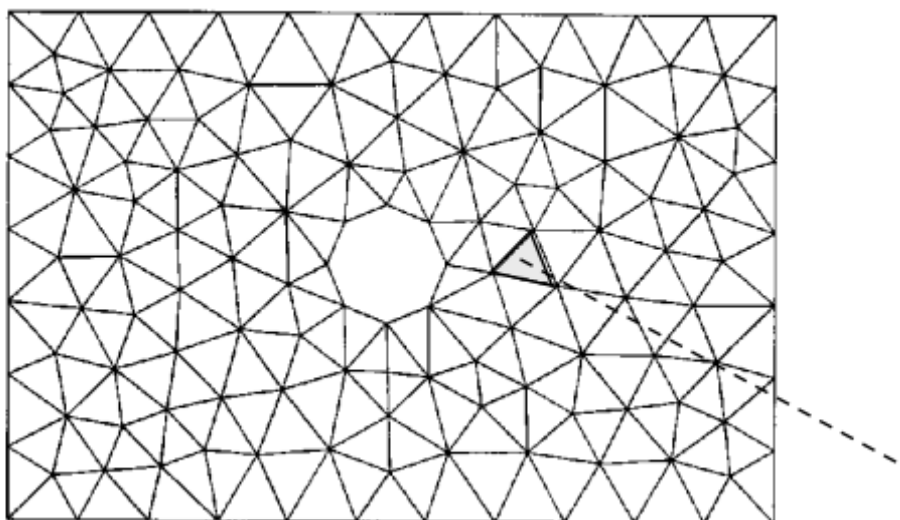
Οπότε λοιπόν τα περιστροφικά κύματα διαδίδονται με ταχύτητα c_2 .

4.6 Εφαρμογή της ελαστικής θεωρίας με πεπερασμένα στοιχεία

Παραπάνω αναπτύξαμε λεπτομερών τις εξισώσεις που περιγράφουν πλήρως την εντατική κατάσταση ενός σώματος σε κάθε σημείο του και για κάθε χρονική στιγμή. Αναπτύσσοντας τις παραπάνω εξισώσεις για ένα σώμα με πεπερασμένες διαστάσεις σε ένα αδρανειακό ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων, θα έχουμε τις τρεις χωρικές μεταβλητές x, y, z . Οι παραπάνω εξισώσεις της ελαστικής θεωρίας θα μετατραπούν σε μερικές διαφορικές εξισώσεις, καθώς κάθε χωρική μεταβλητή θα αποτελεί μία συνιστώσα της εξίσωσης που περιγράφει την εντατική κατάσταση του σώματος.

Για περιπτώσεις απλής φόρτισης και σχετικά απλών γεωμετριών μπορούμε να έχουμε αναλυτική λύση των διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους. Οι περιπτώσεις αυτές όμως είναι ιδανικές και δεν ανταποκρίνονται στα προβλήματα που καλείται ένας μηχανικός να βρει λύση.

Προκειμένου να επιλυθούν οι εξισώσεις αναπτύχθηκε η ιδέα της διακριτοποίησης της γεωμετρίας σε συγκεκριμένο αριθμό σημείων όπου για τα οποία θα υπολογίζουμε προσεγγιστικά τις τιμές των υπολογιζόμενων μεγεθών. Τα σημεία αυτά δημιουργούν ένα πεπερασμένο αριθμό στοιχείων τα οποία ανάλογα με την ακρίβεια που επιθυμούμε είτε μπορούμε να τα αυξήσουμε ή να γνωρίζουμε σε περισσότερα σημεία των στοιχείων τις τιμές των μεγεθών που επιθυμούμε.



Εικόνα 4:4 Παράδειγμα στοιχείων τα οποία διακριτοποιούν μία επίπεδη πλάκα. [7]

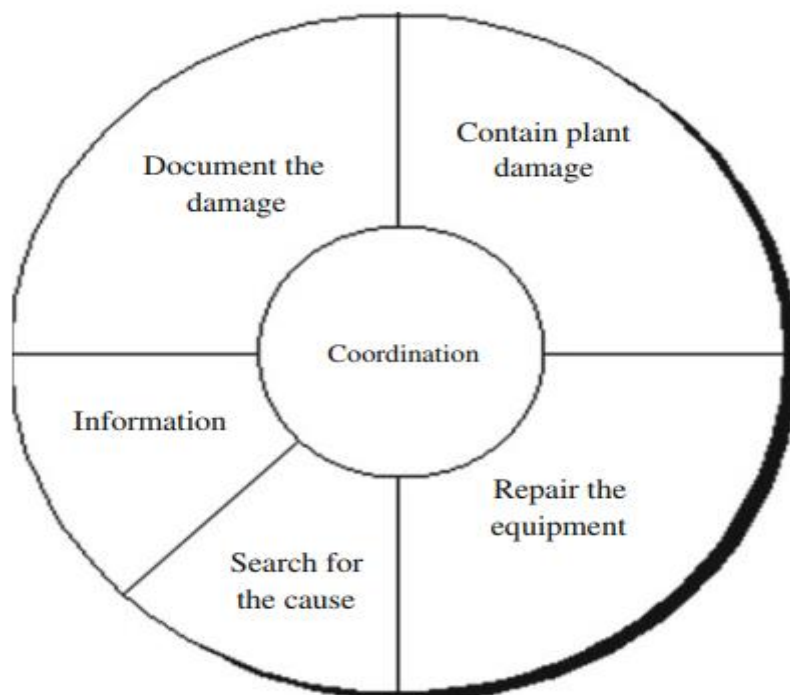
Η βασική μοντελοποίηση γίνεται ως εξής, επιλύονται τμηματικά τα μητρώα των διακριτοποιημένων διαφορικών εξισώσεων με μερικά διαφορικά. Η μέθοδος της τμηματικής επίλυσης ονομάζεται Galerkin/Ritz. Αξίζει να τονιστεί ότι προκειμένου να μπορεί να επιλυθεί το σύστημα των εξισώσεων χρειαζόμαστε τις σωστές οριακές συνθήκες. Δηλαδή εκείνες όπου κατά την εκκίνηση των υπολογισμών περιγράφουν πλήρως την εκκίνηση της παραμόρφωσης στο υλικό. Στις οριακές συνθήκες συνήθως προσδιορίζουμε τα φορτία και τα σημεία τα οποία εφαρμόζονται. Επίσης προκειμένου η μέθοδος να παράγει αποτελέσματα τα οποία έχουν φυσική έννοια γίνονται παραδοχές όσο αφορά την ενέργεια του συστήματος. Τέτοιες παραδοχές είναι εκείνη των δυνατών έργων ή ενεργειακών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση υπερστατικών φορέων.

5 Προκαταρκτική ανάλυση της αστοχίας.

5.1 Μεθόδευση και πορεία της έρευνας

Ο στόχος του εδαφίου αυτού είναι να δώσει τις κύριες αιτίες που πρέπει να ακολουθηθούν προκειμένου να οριστεί η αιτία ή οι αιτίες που οδήγησαν στην αστοχία. Επίσης θα γίνει ο ορισμός της έρευνας που πρέπει να ακολουθηθεί καθώς και της συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων. Η παραπάνω εργασία είναι αρκετά σημαντική προκειμένου να οδηγηθούμε στα σωστά συμπεράσματα.[9] Πρέπει να λάβουμε υπόψιν ότι δεν θα υπάρχει αφθονία εργατικού δυναμικού αλλά θα πρέπει να γίνει και οικονομία πόρων.

Ύστερα από την αστοχία το πρώτο μέλημα της ομάδας είναι να την αναλύσει σε βάθος. Θα πρέπει να κατανοηθεί πλήρως η λειτουργία του εξαρτήματος και πως θα έπρεπε να λειτουργεί ιδεατά. Όπως φαίνεται και στην **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** παρακάτω ορίζονται οι διαδικασίες οι οποίες πρέπει να ακολουθηθούν. Σημαντική επίσης είναι η προτεραιότητα που πρέπει να δοθεί καθώς πολλές από αυτές έχουν διαφορετικούς στόχους.



Εικόνα 5:1 Διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν προκειμένου να γίνει επιτυχημένα η ανάλυση της αστοχίας [8]

Η αναζήτηση της αιτίας της αστοχίας είναι συνήθως χρονοβόρα αλλά και δαπάνη πόρων. Προκείμενου να βρεθεί η αιτία πρέπει να συλλέξουμε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες από τους φορείς που κατασκευάστηκαν τα εξαρτήματα που συνεργάζονταν με το αστοχούμενο. Με την διαδικασία αυτή θα προσπαθήσουμε να ανακατασκευάσουμε το τρόπο λειτουργίας του μηχανισμού. Σημαντική ένδειξη ότι κινούμαστε στη σωστή κατεύθυνση είναι η επιβεβαίωση της υπόθεσης από την ιχνηλασία των κομματιών. Προκείμενου να συμβεί αυτό χρειαζόμαστε προσωπικό με καλή γνώση στο αντικείμενο.

Σε αρκετές περιπτώσεις η ανάλυση γίνεται εκ των υστέρων από την προσεκτική εξέταση των φωτογραφιών. Βέβαια για να μπορεί να συμβεί αυτό πρέπει να έχουν ληφθεί αρκετές φωτογραφίες του πεδίου γύρω από την αστοχία. Αλλά και από αρκετές οπτικές γωνίες. Καλό θα ήταν να φτιαχτεί ένα σχετικό σχέδιο με τις αρχικές θέσεις των αντικειμένων ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των θέσεων των αντικειμένων πριν και μετά. Ίσως χρήσιμο θα ήταν να δημιουργηθούν αρχικές υποθέσεις για το τι μπορεί να συνέβη. Τέλος και οι παραμορφώσεις πάνω στα κομμάτια που έχουν αστοχήσει μπορούν δείξουν το μέγεθος της ζημίας που προκλήθηκε. Αρκετές φορές τυγχάνει να έχουν καταστραφεί και άλλα τεμάχια του μηχανισμού και να μην είναι εμφανή με μια πρώτη ματιά [10].

5.2 Συλλογή δεδομένων και ιστορικού.

Η συλλογή των δεδομένων πρέπει να είναι προσεκτική και να ληφθεί ο σωστός αριθμός δειγμάτων που να αντιπροσωπεύουν την αστοχία. Ο τρόπος λήψης πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να μην καταστραφεί το πεδίο. Ύστερα είναι αναγκαίο να γίνει έρευνα σε αστοχίες από παρόμοιους μηχανισμούς αλλά και περιπτώσεις όπου η θραύση με τον τρόπο που προήλθε μοιάζει με την παρούσα. Επίσης πρέπει να διαπιστώσει εάν έχουν συμβάλει και εξωτερικοί παράγοντες όπως ακραίες καιρικές συνθήκες κτλ. Συνήθως ορίζεται ένας υπεύθυνος της ομάδας που αναλύει την αστοχία. Επίσης πρέπει να είναι σε θέση συνέχεια να αναζητά άτομα τα οποία μπορεί να εξειδικεύονται σε πεδία τα

οποία είναι χρήσιμα προκειμένου να καθοριστεί η αιτία. Ένα από τα επόμενα βήματα είναι η σύνταξη μιας προκαταρκτικής έκθεσης η οποία θα αναφέρει τις συνθήκες λειτουργίας. Καλό θα ήταν να αναφέρονται οι συνθήκες που επικράτησαν κατά την αστοχία και οποιαδήποτε ευρήματα για τα οποία ο υπεύθυνος είναι σίγουρος ότι είναι έγκυρα.

Συνήθως οι υπεύθυνοι αυτοί είναι έμπειροι και είναι εκείνοι που διακριβώνουν τι είδος ανάλυσης αστοχίας θα γίνει. Τέλος ο υπεύθυνος θα πρέπει να βρίσκεται σε συνεχή επικοινωνία με την εταιρία της οποίας τα εξαρτήματα-κατασκευή αστόχησε καθώς και με τα συναφή τμήματα της εταιρίας.

5.3 Τεχνικές οπτικής επιθεώρησης και φωτογραφία πεδίου

Η οπτική επιθεώρηση είναι μία μέθοδος η οποία βασίζεται στην ιχνηλασία των κομματιών που αστόχησαν. Η ιχνηλασία αυτή γίνεται με ανθρώπινη παρατήρηση και είναι από τις πρώτες διαδικασίες και ίσως η σημαντικότερη από όλες. Προκειμένου όμως να συμβεί αυτό χρειάζεται πολύ καλός φωτισμός καθώς και οπτικά εργαλεία όπως μεγεθυντικοί φακοί και μικροσκόπια. Είναι αρκετά απλή διαδικασία και φθηνή καθώς δεν χρειάζεται κάποιος εξειδικευμένος εξοπλισμός. Τα ευρήματα πρέπει να αρχειοθετηθούν προκειμένου να μην χαθούν. Ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι τα χαρακτηριστικά που μπορεί να βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια θέλουν ο παρατηρητής να είναι έμπειρος ώστε να τα αναγνωρίζει.

Η εξέταση των επιφανειών θραύσης είναι αρκετά σημαντική διότι από εκεί θα προκύψουν σημαντικά συμπεράσματα όσο αφορά τη φύση της θραύσης καθώς και του μεγέθους των φορτίσεων που δέχτηκε το εξάρτημα. Στη περίπτωση όπου χρησιμοποιηθεί μικροσκόπιο η μεγέθυνση κυμαίνεται από **X1** μέχρι **X10**. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατή η παρατήρηση της ζημίας, πιθανές παραμορφώσεις, ρωγμές και άλλες χρήσιμες πληροφορίες. Σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και άλλες μη καταστροφικές μέθοδοι.

Ο υπεύθυνος πρέπει να έχει γνώσεις φωτογραφικών τεχνικών. Οι κύριοι παράμετροι είναι το άνοιγμα του διαφράγματος αλλά και ο χρόνος που θα

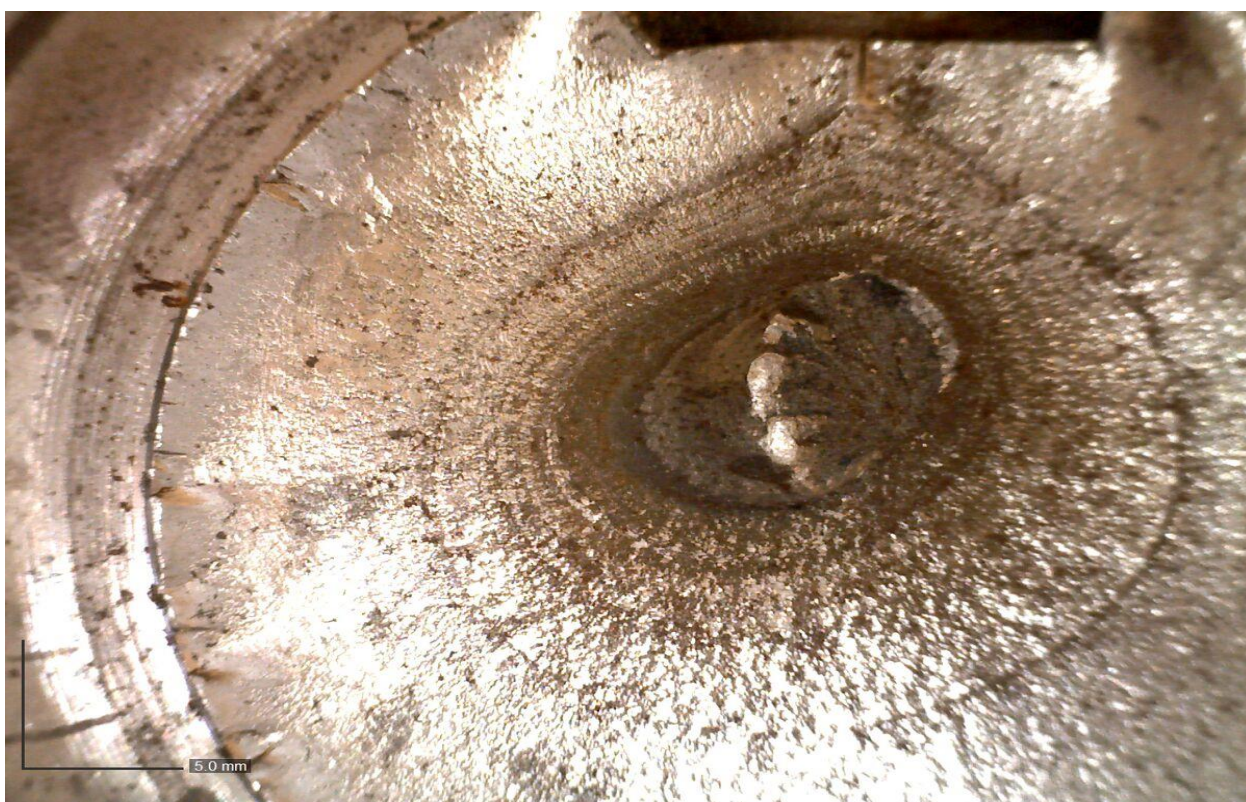
διαρκέσει η φωτογράφιση. Το διάφραγμα ουσιαστικά ορίζει το ποσό του φωτός που θα περάσει το φακό της κάμερας, η λειτουργία του είναι ακριβώς σαν και αυτή του ανθρώπινου ματιού. Όσο το άνοιγμα μειώνεται τόσο μεγαλύτερος πρέπει να είναι ο χρόνος που θα χρειαστεί προκειμένου να τραβηχτεί μια φωτογραφία με σωστή φωτεινότητα.

Το παραθυρόφυλλο είναι ο μηχανισμός ο οποίος ανοιγοκλείνει το διάφραγμα και ουσιαστικά ρυθμίζει πόση ώρα και πόσο φως θα περάσει στο διάφραγμα. Συνήθως χρόνοι κυμαίνονται από 4 second μέχρι μερικά millisecond. Αξίζει να τονιστεί ότι σε καμία περίπτωση το φλας βοηθάει καθώς θολώνει την φωτογραφία, ναι μεν θέλουμε αρκετό φως αλλά αυτό δεν πρέπει να πέφτει κάθετα πάνω στην επιφάνεια θραύσης.

Συνοψίζοντας κανείς δεν μπορεί να πει ότι η φωτογραφίες δεν αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο αλλά σε καμία περίπτωση δεν αντικαθιστούν άλλες τεχνικές στις οποίες θα αναφερθούμε παρακάτω αλλά και δεν επιλύουν ούτε οδηγούν στην εύρεση αστοχίας. Οι φωτογραφίες αυτές πρέπει να εξεταστούν από έμπειρο προσωπικό ώστε να παρατηρήσει τα στοιχεία αυτά τα οποία θα δώσουν μία κατεύθυνση στην έρευνα. Επίσης με την ύπαρξη πλέον φωτογραφιών μεγάλης ανάλυσης μπορούμε να τραβήξουμε φωτογραφίες μεγάλης ευκρινείας τις οποίες μπορούμε να μεγεθύνουμε εκ νέου με τη χρήση λογισμικού σε υπολογιστή. Παρακάτω στην Εικόνα 5:2 και στην Εικόνα 5:3 έχουμε εφαρμόσει ακριβώς την παραπάνω τεχνική φωτογράφησαμε με κάμερα υψηλής ευκρινείας τα κομμάτια. Έτσι λοιπόν μπορούμε να κάνουμε προσεκτική επισκόπηση και με λογισμικά να μεγεθύνουμε τις φωτογραφίες.



Εικόνα 5:2 Φωτογραφία μεγάλης ευκρινείας της επιφάνειας θραύσης του υπό εξέταση κομματιού.



Εικόνα 5:3 Φωτογραφία μεγάλης ευκρινείας της επιφάνειας θραύσης του υπό εξέταση κομματιού.

5.4 Απόσπαση και αποθήκευση δειγμάτων

Αρχικά θα πρέπει οι αποδείξεις να απομακρυνθούν από την περιοχή της αστοχίας χωρίς να εμποδίζουν τις εργασίες επισκευής του μηχανήματος που αστόχησε. Συλλέγουμε όλες τις δυνατές πληροφορίες και καταγράφουμε το τρόπο που το κάνουμε είτε σε βίντεο ή διαδοχικές φωτογραφίες και όσο αφορά την τοπολογία των εξαρτημάτων αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί και με τη χρήση σκαριφημάτων.

Αφού γίνει η συλλογή των κομματιών που βρέθηκαν στο χώρο της αστοχίας πρέπει από αυτά να κόψουμε κάποια τμήματα τα οποία θα αποτελέσουν τα δείγματα προκειμένου γίνουν διάφορες διεργασίες, όπως χημική ανάλυση ή φασματογραφία, ηλεκτρονική μικροσκοπία κτλ. Ανάλογα με τον διαθέσιμο υλικό μπορούμε να εφαρμόσουμε διάφορες τεχνικές κοπής προκειμένου να κάνουμε τη δειγματοληψία. Αξίζει να τονιστεί ότι η μέθοδος κοπής των δειγμάτων είναι σημαντική καθώς μπορεί να επηρεάσει ή και να αποπροσανατολίσει την έρευνα μας. Για το λόγο αυτό όταν το διαθέσιμο υλικό είναι αρκετό και μακριά από την περιοχή αστοχίας προτιμώνται τεχνικές κοπής που εκλύουν ποσά θερμότητας, σε αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιούνται τεχνικές κοπής όπου η κύρια πηγή θερμότητας δημιουργείται λόγω τριβής και χρησιμοποιούνται μέσα που παραλαμβάνουν τα ποσά αυτά.



Εικόνα 5:4 Φωτογραφία του δοκιμίου μας πριν τη δειγματοληψία

Στη παραπάνω Εικόνα 5:4 παρατηρούμε ότι στο δοκίμιο αν και υπήρχε διαθέσιμο υλικό εμείς προτιμήσαμε τη μέθοδο κοπής όπου η παραγόμενη θερμότητα αφαιρείται με ψυκτικό μέσο ώστε να αποκλείσουμε το ενδεχόμενο αλλοίωσης των δειγμάτων.

Κατά την μεταφορά των δειγμάτων θα πρέπει να είμαστε προσεκτικοί ώστε να μην έρθουν σε επαφή οι επιφάνειες θραύσης (ή συζυγείς επιφάνειες). Για το λόγο αυτό πολλές φορές μεταξύ των δειγμάτων χρησιμοποιούνται ειδικά νάιλον τα οποία αποτρέπουν αυτό ακριβώς το πράγμα. Σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει η φύλαξη και μεταφορά των δοκιμίων να υποτιμηθεί καθώς αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες που μπορούν να καταστρέψουν πιθανά στοιχεία της αστοχίας.

Αφού τα δείγματα μεταφερθούν δεν πρέπει να καθαριστούν με οποιοδήποτε τρόπο. Αν για οποιοδήποτε λόγο υπάρχει υγρασία πάνω στο κομμάτι πρέπει να ψεκάσουμε το δοκίμιο με αλκοόλη ή κηροζίνη προκειμένου να αφαιρεθεί όλη η υπάρχουσα υγρασία. Τέλος πρέπει τα δοκίμια να αποθηκευτούν σε σημεία τα οποία να μην αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά της θραύσης.

5.5 Επιθεώρηση με μη καταστροφικές μεθόδους

Μη καταστροφικές μέθοδοι ονομάζονται αυτές που ουσιαστικά επιτρέπουν τη χρήση διάφορων διατάξεων ή εξοπλισμών οι οποίες δεν καταστρέφουν ή αφήνουν κάποιο κατάλοιπο της επιθεώρησης. Οι μη καταστροφικές μέθοδοι βασίζονται σε διαφορά φυσικά φαινόμενα πχ. Όπως οι υπέρηχοι, ο ηλεκτρομαγνητισμός, ελαστικά κύματα καθώς και υποατομικά σωματίδια. Γενικά οι μη καταστροφικές μέθοδοι χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες.

Σε αυτές που επιδεικνύουν τα ελαττώματα ουσιαστικά μας επιτρέπουν να δούμε πιθανόν ρωγμές ή ασυνέχειες μπορούν να μας δείξουν τη διάβρωση που πιθανόν να οφείλεται στο εξωτερικό περιβάλλον όπου ήταν εκτεθειμένη κατασκευή.

Εκείνες οι οποίες μας δίνουν πληροφορίες όσο αφορά το υλικό που κατασκευάστηκε το τεμάχιο το οποίο αστόχησε όπως πχ χημικές, δομικές και μηχανικές ιδιότητες. Επίσης μπορούμε να λάβουμε πληροφορίες όπως η ηλεκτρική ή μαγνητική αγωγιμότητα καθώς και τη θερμική αγωγιμότητα.

Και τέλος τις μετρητικές εκείνες δηλαδή που μας φανερώνουν τοπικές διαστασιολογικές μετρήσεις ή σε περίπτωση που υπάρχει θερμική κατεργασία να μπορούμε να εκτιμήσουμε το πάχος της.

Μια ένδειξη αστοχίας συνήθως ανιχνεύεται ως διαταραχή του σήματος που ανιχνεύεται από μία συσκευή μη καταστροφικής δοκιμής. Σε αυτή την κατάσταση η πληροφορία μπορεί να είναι λανθασμένη. Μία ασυνέχεια μπορεί να οριστεί ως η έλλειψη ομοιογένειας η παρεμβολή στη συνηθισμένη κατάσταση της δομής ενός υλικού. Οι ασυνέχειες αυτές διακρίνονται σε :

- I. Σε χωρικές που κυρίως ανιχνεύονται στις επιφάνειες του υλικού που αστόχησε και είναι εμφανής με το ανθρώπινο μάτι ή και σε ορισμένες περιπτώσεις με τη χρήση μικροσκοπίων.
- II. Σε ασυνέχειές που προκαλούνται κατά την κατασκευή ή κατά τη συντήρηση του κομματιού που αστόχησε.
- III. Και τέλος σε ασυνέχειες μορφολογικές που αφορούν το σχεδιασμό σε ένα δισδιάστατο επίπεδο ή συνολικά στον όγκο του τεμαχίου.

Η χρήση μη καταστροφικών δοκιμών για την προκαταρκτική εξέταση της αστοχίας είναι αρκετά σημαντική όταν ψάχνουμε για αποδείξεις ή για ζημιά που έχει προκληθεί σε σημεία μακριά από την αστοχία. Η ανίχνευση αυτών των δευτερευόντων στοιχείων είναι αρκετά σημαντική, συνηθίζεται σε περιπτώσεις όπου η αστοχία οφείλεται σε ένα μόνο παράγοντα. Συνήθως αυτό που προκαλεί την αστοχία είναι ο κυριότερος από ένα συνδυασμό παραγόντων.

Μία από αυτές τις μεθόδους είναι με μαγνητικά σωματίδια όπου ουσιαστικά εντοπίζονται ανομοιομορφίες πάνω στις επιφάνειες. Όταν τοποθετούμε ένα

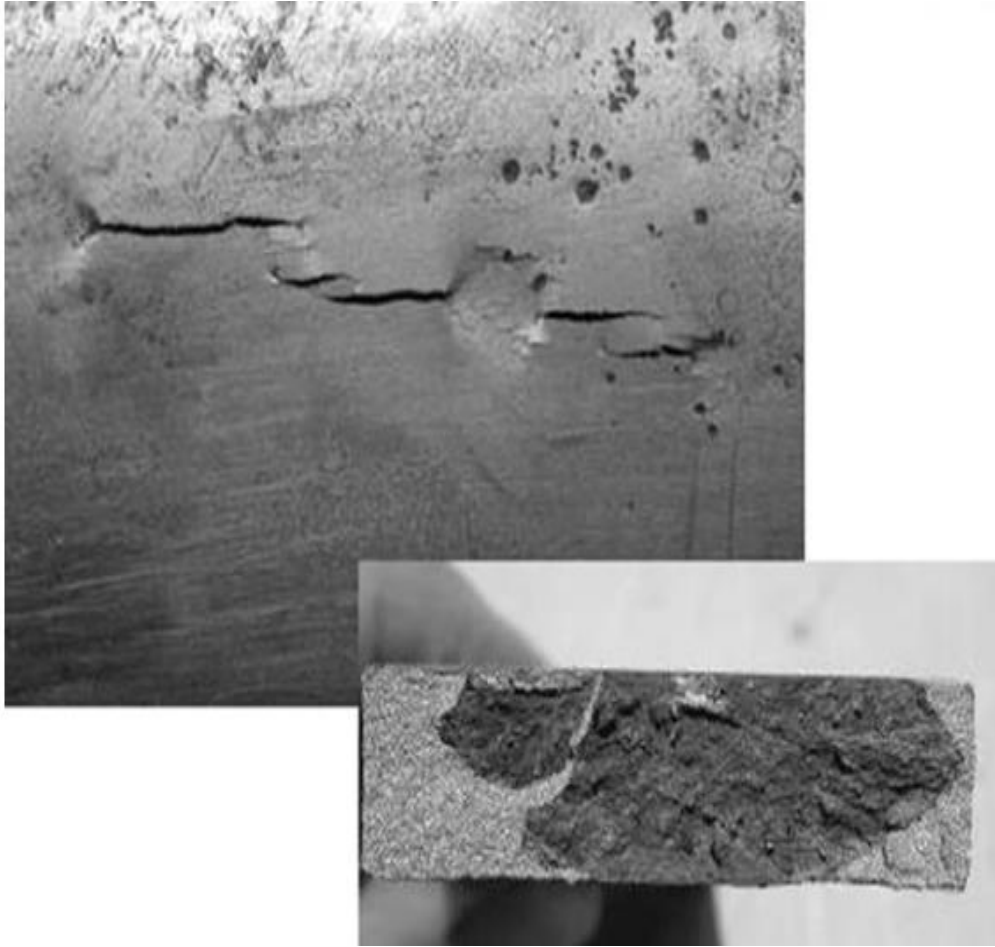
μαγνήτη κοντά σε ένα εξάρτημα αυτό δέχεται την απειροελάχιστη επίδραση του θετικού και αρνητικού πόλου του μαγνήτη. Εάν τοποθετήσουμε πάνω σε αυτό το κομμάτι ένα σιδηρομαγνητικό ρευστό αυτό κατευθείαν έλκεται από τις μαγνητικές γραμμές του μαγνήτη καλύπτοντάς την επιφάνεια του κομματιού εάν υπάρχουν ασυνέχειες τότε το ρευστό εισέρχεται εντός αυτών και τις κάνει εμφανείς. Η δοκιμή με μαγνητικά σωματίδια μπορεί να είναι ξηρή ή τα μαγνητικά σωματίδια να είναι εντός ρευστού όπως περιεγράφηκε παραπάνω.

Η δοκιμή των υπερήχων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο υποκατηγορίες. Η μία είναι η χρήση της μεθόδου για την μέτρηση του πάχους των ελασμάτων και στη μέτρηση σκληρότητας δοκιμίων. Και στη δεύτερη κατηγορία που χρησιμοποιείται για την εύρεση αστοχίας. Η αρχή της μεθόδου είναι σχετικά απλή στέλνοντας έναν υπέρηχο διάμεσό ενός υλικού αυτός χάνει ένα ποσό της ενέργειας του, μετρώντας αυτή την ενέργεια είμαστε σε θέση να την αξιοποιήσουμε ανάλογα.

Στη περίπτωση της αστοχίας χρησιμοποιείται η ίδια αρχή που περιγράψαμε παραπάνω η διαφορά εντοπίζεται στο μηχανισμό και στον εξοπλισμό εκπομπής των υπερήχων και παραλαβής. Με τα δεδομένα που λαμβάνει ο δέκτης γίνεται περεταίρω ανάλυση και εντοπίζονται τα σημεία της αστοχίας ή των ασυνεχειών. Συνήθως ευρήματα είναι ρωγμές, πόροι, εγκλείσματα κτλ.

Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου:

- I. Η ευαισθησία της μεθόδου την κάνει να ανιχνεύει αρκετά μικρές ασυνέχειες.
- II. Η μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί ως έγκυρη με την εξέταση μόνο ενός κομματιού.
- III. Πολύ καλή ανάλυση προκειμένου να γίνονται αντιληπτές το μέγεθος και το σημείο των ασυνεχειών.
- IV. Η μέθοδος δεν χρειάζεται μέτρα ασφαλείας του προσωπικού που την διενεργεί.



Εικόνα 5:5 Ασυνέχειές που εντοπίστηκαν από τη μέθοδο των μαγνητικών σωματιδίων[8]

5.6 Οργάνωση ομάδων εργασίας

Οι τομείς σε μία εταιρία που σχετίζονται με την αστοχία είναι οι τομείς που αναλαμβάνουν την τεχνική ευθύνη, οι τομείς αυτοί είναι των μηχανικών, της συντήρησης και της κατασκευής. Κατά την διάρκεια μιας τέτοιας εργασίας η σχέση των παραπάνω τμημάτων είναι περίεργη καθώς όλα τα μέρη προσπαθούν να εξιχνιάσουν κατά το δυνατό καλύτερα τα αίτια τα οποία πρέπει να βρίσκονται κοντά με τα άλλα τμήματα χωρίς να αποπροσανατολίζουν την γενική έρευνα. Τα τμήματα αυτά περιέχουν ειδικούς οι οποίοι προσφέρουν τις υπηρεσίες τους για την εύρεση των αιτιών που οδήγησαν στην αστοχία.

Ύστερα από την διαδικασία αυτή κάθε εταιρία έχει τουλάχιστον μία ασφαλιστική εταιρία που ασφαρίζει τις γραμμές παραγωγής της. Εφόσον λοιπόν τα τμήματα έχουν εργαστεί με επαγγελματισμό αφήνοντας εκτός προσωπικές ανασφάλειες και ενοχές καταλογίζεται στον εκάστοτε τομέα η αστοχία και από εκεί και πέρα στο άτομο ή στην ομάδα ατόμων που είναι υπεύθυνα.

Το παραπάνω σύστημα είναι αδύνατο να λειτουργήσει χωρίς κάποιον υπεύθυνο που θα οργανώνει τις εργασίες και θα επιτηρεί τους τομείς που εργάζονται πάνω στην αστοχία εξασφαλίζοντας ότι η έρευνα βρίσκεται στο σωστό σημείο. Αυτός ο υπεύθυνος μπορεί να προέρχεται από ένα από τους τομείς που περιγράψαμε και σίγουρα θα είναι ένα άτομο που η εταιρία θα εμπιστεύεται και θα το έχει υψηλά στην υπόληψη της.

6 Ατέρμονας κοχλίας - τροχός

6.1 Χαρακτηριστικά

Το σύστημα ατέρμονα κοχλία – τροχού χρησιμοποιείται για την μετάδοση της κίνησης σε διασταυρούμενους άξονες με γωνία συνήθως 90°.

Ο ατέρμονας κοχλίας είναι ένας συνηθισμένος κοχλίας κίνησης, είναι συνήθως δεξιόστροφος και κινητήριο, ενώ μπορεί να έχει μια ή περισσότερες αρχές.

Ο συνεργαζόμενος τροχός, ονομάζεται κορώνα και έχει σαν βασική μορφή τον οδοντωτό τροχό με κεκλιμένους οδόντες.

Τα πλεονεκτήματα του συστήματος ατέρμονα κοχλία – τροχού (κορώνας), έναντι των μετωπικών και κωνικών τροχών, είναι η πιο αθόρυβη λειτουργία, μικρότερο μέγεθος και ευκολότερη κατασκευή, με προϋπόθεση ότι τα συγκρινόμενα, προαναφερθέντα συστήματα έχουν την ίδια ισχύ και σχέση μετάδοσης.

Τα μειονεκτήματα του προαναφερθέντος συστήματος είναι η μεγαλύτερη φθορά και ο μικρότερος βαθμός απόδοσης λόγω της κίνησης ολίσθησης των κατατομών. Στον κοχλία αναπτύσσονται μεγάλες αξονικές δυνάμεις και για αυτό απαιτείται ισχυρή έδραση των αξόνων.

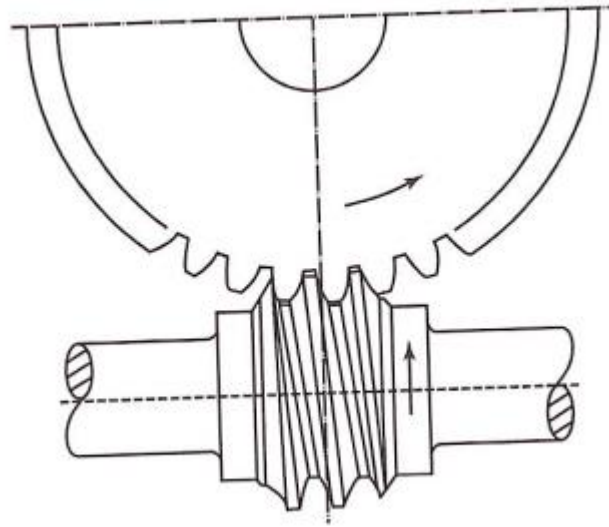
Ο ατέρμονας κοχλίας και ο τροχός μπορούν να έχουν μορφή κυλινδρική ή σφαιροειδής.

Τα συστήματα ατέρμονα κοχλία – τροχού διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- 1) Κυλινδρικός ατέρμονας – σφαιροειδής τροχός.
- 2) Σφαιροειδής ατέρμονας – κυλινδρικός τροχός.
- 3) Σφαιροειδής ατέρμονας – σφαιροειδής τροχός.

Οι οδόντες της κορώνας κατασκευάζονται συνήθως με τη μέθοδο της κύλισης, με κοπτικό εργαλείο που αντιστοιχεί στη μορφή του ατέρμονα.

Το σύστημα ατέρμονα κοχλία – τροχού χρησιμοποιείται σε μειωτήρες γενικής χρήσης με μεγάλες σχέσεις μετάδοσης και μεγάλες ισχύς και στροφές εισόδου, π.χ. σε ανελκυστήρες, γεραμούς, μεταφορικές ταινίες, κοχλιομεταφορείς και σε συστήματα οδήγησης οχημάτων.



Εικόνα 6:1 Ζεύγος ατέρμονα κοχλία και τροχού [10]

Όταν ο ατέρμονας περιστρέφεται, οι κατατομές του προχωρούν σε σχέση με την κορώνα, πιέζοντας τους οδόντες της. Μετά από μία περιστροφή ο ατέρμονας βρίσκεται στην ίδια ακριβώς θέση, αλλά εμπλέκεται με άλλο οδόντα της κορώνας.

Αν ο ατέρμονας έχει μία αρχή, τότε μετά από μία στροφή ο τροχός θα προχωρήσει κατά ένα οδόντα. Αν έχει δύο, τρεις κλπ. αρχές, ο τροχός θα περιστραφεί κατά δυο, τρεις κλπ οδόντες αντίστοιχα. Γενικά αν z_1 είναι ο αριθμός αρχών του ατέρμονα και z_2 ο αριθμός οδόντων του τροχού, η σχέση μετάδοσης του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη και τον βαθμό απόδοσης, θα είναι:

$$i = u = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{T_2}{T_1 \cdot \eta_{ολ}}$$

Z_1, Z_2 είναι ο αριθμός αρχών του ατέρμονα (Z_1) και ο αριθμός οδόντων του τροχού (Z_2).

n_1, n_2 είναι ο αριθμός των στροφών του ατέρμονα (n_1) και του τροχού (n_2).

T_1, T_2 είναι η ροπή στρέψης του ατέρμονα (T_1) και του τροχού (T_2).

$\eta_{ολ}$ είναι ο ολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος.

Με το σύστημα στέμονα κοχλία – τροχού μπορούμε να επιτύχουμε σχέσεις μετάδοσης κανονικά από $i=5$ έως $i=50...60$. Για $i > 60$ προκύπτουν δυσμενείς συνθήκες κατασκευής και μεγάλη φθορά στον ατέρμονα.

Η γωνία κλίσης γ_m λαμβάνεται περίπου ίση με 15° έως 25° και είναι:

$$\varepsilon\varphi\gamma_m = \frac{p_{z1}}{d_{m1} \cdot \pi}$$

$P_{z1}=z_1 \cdot P_x$ είναι το βήμα κοχλία πολλών αρχών σε mm.

Z_1 Είναι ο αριθμός αρχών του ατέρμονα.

P_x είναι το βήμα στην αξονική τομή.

d_{m1} είναι η διάμετρος του αρχικού κύκλου του ατέρμονα σε mm.

Διάμετρος αρχικού κύκλου του ατέρμονα:

$$d_{m1} = \frac{Z_1 \cdot m}{\varepsilon\varphi\gamma_m} = \frac{Z_1 \cdot m_n}{\eta\mu\gamma_m} \text{ σε } mm$$

Διάμετρος κύκλου κεφαλής d_{a1} με ύψος κεφαλής $h_{a1}=m$:

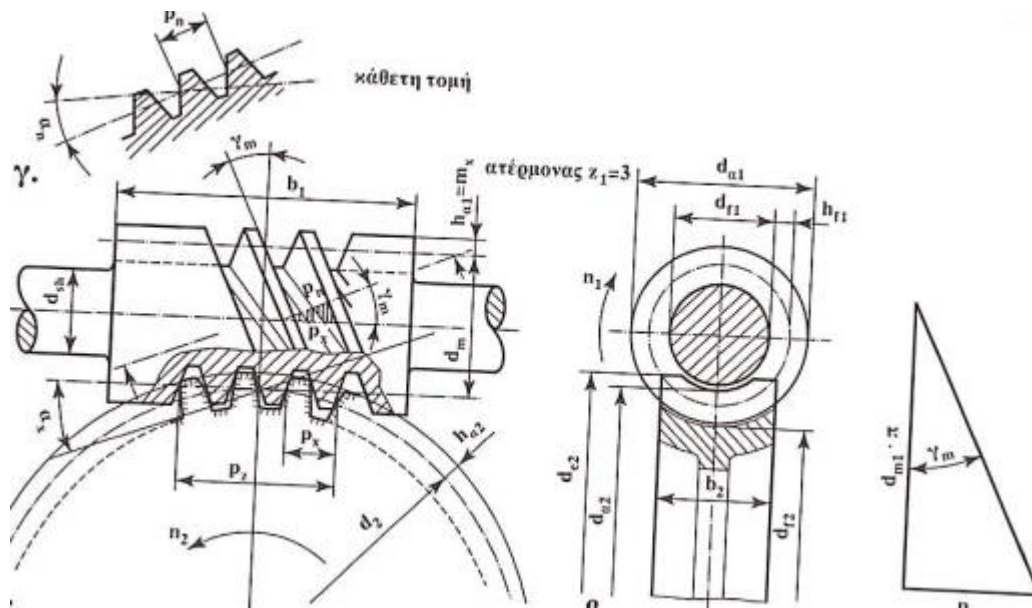
$$d_{a1} = d_{m1} + 2 \cdot m \text{ σε } mm$$

Διάμετρος κύκλου πόδα d_{f1} με ύψος κεφαλής $h_{f1}=1.25 \cdot m$:

$$d_{f1} \approx d_{m1} - 2.5 \cdot m \text{ σε } mm$$

Μήκος ατέρμονα b_1 :

$$b_1 \geq 2 \cdot m \sqrt{z_2 + 1} \text{ σε } mm$$



Εικόνα 6:2 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ατέρμονα κοχλία τροχού [10]

Επιπλέον θα πρέπει να ισχύουν οι σχέσεις

$$d_{m1} \geq 1,4 \cdot d_{sh} + 2,5 \cdot m \text{ σε mm}$$

Για ατέρμονα ολόσωμο με τον άξονα και

$$d_{m1} \geq 1,8 \cdot d_{sh} + 2,5 \cdot m \text{ σε mm}$$

Για ατέρμονα τοποθετημένο με σφήνα πάνω στον άξονα

d_{sh} είναι η διάμετρος ατέρμονα άξονα σε mm.

Διάμετρος αρχικού κύκλου κορώνας:

$$d_2 = m \cdot z_2 \text{ σε mm}$$

Διάμετρος κύκλου κεφαλής:

$$d_{a2} = d_2 + 2 \cdot m \text{ σε mm}$$

Διάμετρος κύκλου πόδα:

$$d_{f2} \approx d_2 - 2,5 \cdot m \text{ σε mm}$$

Εξωτερική διάμετρος του εξωτερικού κυλίνδρου:

$$d_{e2} \approx d_{a2} + m \text{ σε } mm$$

Το πλάτος των τροχών καθορίζεται ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται.
Για χυτοσίδηρο και ορείχαλκο λαμβάνεται:

$$b_2 \approx 0,45(d_{a1} + 4 \cdot m) \text{ σε } mm$$

Για αλουμίνιο:

$$b_2 \approx 0,45(d_{a1} + 4 \cdot m) + 1,8 \cdot m \text{ σε } mm$$

Απόσταση αξόνων:

$$a = \frac{d_{m1} + d_2}{2} \text{ σε } mm$$

Γωνία επαφής στην αξονική τομή

$$\epsilon\varphi\alpha_x = \frac{\epsilon\varphi\alpha_n}{\sigma\nu\nu\gamma_m} \text{ με } \alpha_n = 20^\circ$$

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ατέρμονα κοχλία – τροχού αντιστοιχεί προς το βαθμό απόδοσης του κοχλία, διότι τα δύο συστήματα έχουν μηχανική ομοιότητα [11]. Αν ο ατέρμονας είναι κινητήριος τότε ο βαθμός απόδοσης τη οδόντωσης θα είναι:

$$n_z = \frac{\epsilon\varphi\gamma_m}{\epsilon\varphi(\gamma_m + \rho')}$$

γ_m είναι η γωνία κλίσης του ατέρμονα.

ρ' είναι η γωνία τριβής.

μ' είναι ο συντελεστής τριβής. $\mu' = \epsilon\varphi\rho'$.

Η ταχύτητα ολίσθησης των κατατομών είναι:

$$u_g = \frac{d_{m1} \cdot \pi \cdot n_1}{60 \cdot \sigma\nu\nu\gamma_m} \text{ σε } m/sec$$

Αν η κορώνα είναι κινητήρια, τότε ο βαθμός απόδοσης της οδόντωσης θα είναι:

$$n'_z = \frac{\varepsilon\varphi(\gamma_m - \rho')}{\varepsilon\varphi\gamma_m}$$

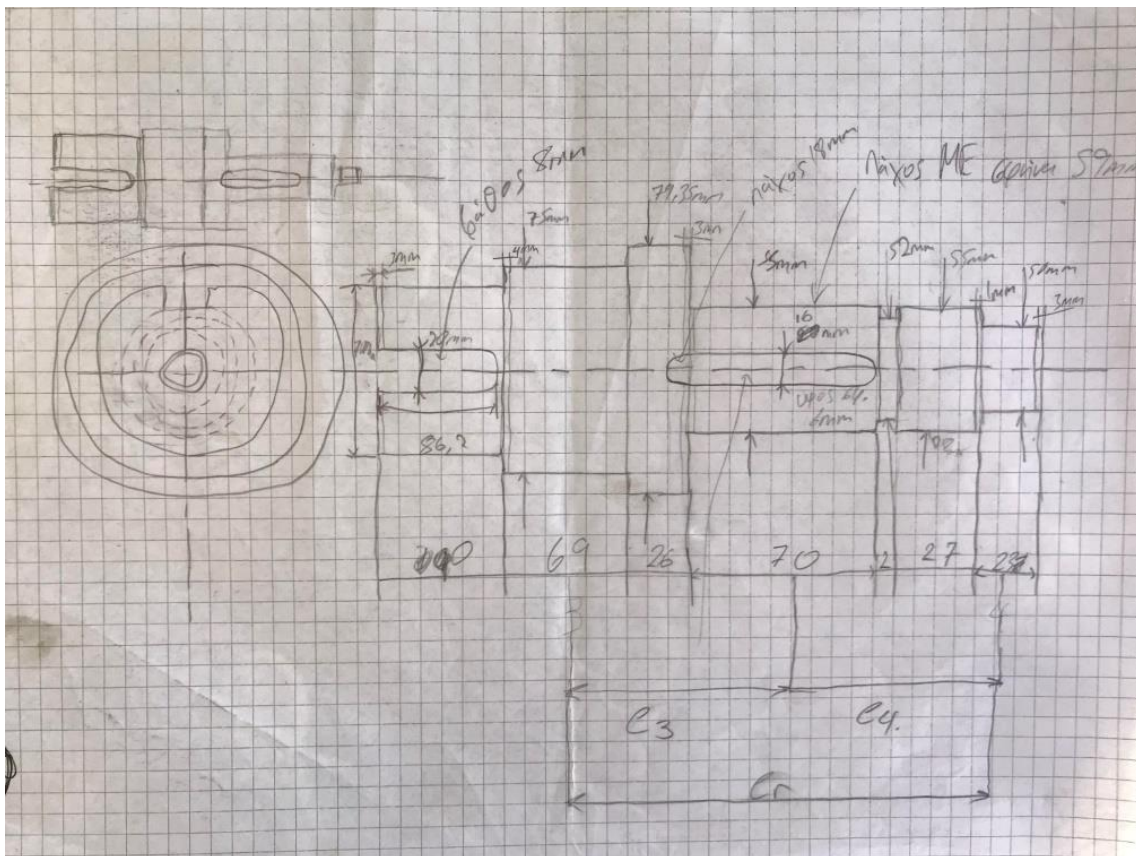
7 Πειραματική Διαδικασία Πτυχιακής

7.1 Εισαγωγή

Αρχικά, δημιουργήσαμε το σκαρίφημα του άξονα-ατράκτου για το οποίο γίνεται η μελέτη αστοχίας του υλικού του. Στη συνέχεια μοντελοποιήσαμε το σκαρίφημα με την βοήθεια προγράμματος C.A.D. (Inventor Autodesk), με σκοπό την υπολογιστική προσομοίωση με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Έπειτα, επισκεφτήκαμε την εταιρία (ΜΙΝΩΣ Ε.Π.Ε.), η οποία έχει αναλάβει την τοποθέτηση του μηχανισμού του συστήματος άξονα, κορώνα, στο σημείο λειτουργίας έτσι ώστε να συλλέξουμε όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες για τις συνθήκες λειτουργίας, συντήρησης και αστοχίας του συστήματος αλλά και του υλικού. Αμέσως μετά, ακολούθησε η διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων που ασκούνται στο σύστημα μέσω του οδοντωτού τροχού και της σφηνάλακας στον άξονα σύμφωνα με τα στοιχεία που είχαμε συλλέξει. Έπειτα, εισάγαμε τις δυνάμεις αυτές στο πρόγραμμα C.A.D. για να πραγματοποιήσουμε την υπολογιστική προσομοίωση της εντατικής κατάστασης μέσω των πεπερασμένων στοιχείων. Παρακάτω, προχωρήσαμε στην διακριτοποίηση της γεωμετρίας με μη δομημένο πλέγμα τριγωνικών στοιχείων (base curvature mesh), η οποία είχε δύο τοπικές πυκνώσεις στα σημεία ενδιαφέροντος, τα οποία είναι τα σημεία στα οποία είχε παρέλθει η θραύση στον άξονα που μελετήσαμε (σημείο θραύσης) αλλά και στην σφηνάλακα που μεταφέρει δύο εκ των τριών κύριων δυνάμεων (ακτινική και περιφερειακή).

7.2 Μέτρηση – Σχεδίαση του άξονα.

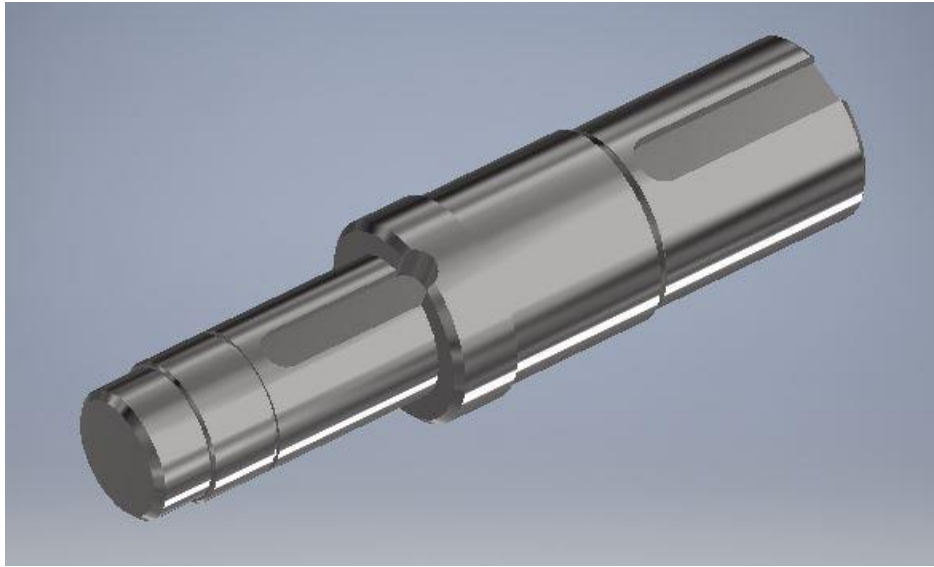
Αρχικά, παραλάβαμε τον άξονα που μελετάμε από τους υπεύθυνους καθηγητές της πτυχιακής. Στην συνέχεια, μετρήσαμε τις διαστάσεις του άξονα και των χαρακτηριστικών του στο εργαστήριο μηχανουργικής τεχνολογίας (μηχανουργείο) της σχολής με την βοήθεια του υπευθύνου καθηγητή και με τα όργανα που μας παρέιχε (παχύμετρο, μηχανουργική ρίγα). Έπειτα δημιουργήσαμε ένα σκαρίφημα του άξονα με σκοπό να το μοντελοποιήσουμε.



Εικόνα 7:1 Σκαρίφημα άξονα

7.3 Τρισδιάστατος σχεδιασμός – Μοντελοποίηση.

Με βάση το παραπάνω σκαρίφημα, σχεδιάσαμε με την βοήθεια προγράμματος C.A.D. (Inventor Autodesk) το τρισδιάστατο μοντέλο του άξονα με σκοπό να κάνουμε την υπολογιστική προσομοίωση με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 7:2 Τρισδιάστατο μοντέλο άξονα

7.4 Συλλογή στοιχείων λειτουργίας του συστήματος.

Έπειτα, επισκεφτήκαμε την εταιρία εγκατάστασης και εμπορίας του μηχανισμού με σκοπό να συλλέξουμε όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία για το σύστημα (άξονα και κορώνα) που μελετάμε. Εκεί, έπειτα από διάλογο με τον υπεύθυνο της μονάδας παραγωγής, πήραμε τα στοιχεία λειτουργίας (στροφές λειτουργίας, ισχύς ηλεκτροκινητήρα, modul κορώνας, αριθμό οδόντων κορώνας, γωνία κλίσης ατέρμονα, και πιθανό υλικό κατασκευής) που μας έδωσε.

Χαρακτηριστικό άξονα	Τιμή (Μονάδα μέτρησης)
Στροφές λειτουργίας άξονα:	28 rpm
Ισχύς Ηλεκτροκινητήρα:	6 kW
Modul:	4 mm
Αριθμός Οδόντων Κορώνας:	53
Γωνία κλίσης ατέρμονα:	15°
Υλικό κατασκευής:	Ck45

Πίνακας 1 Στοιχεία λειτουργίας συστήματος

7.5 Υπολογισμός φορτίων.

7.5.1 Υπολογισμός ροπής στρέψης

Γνωρίζουμε από τη θεωρία των στοιχείων μηχανών τη σχέση μετάδοσης, η οποία εκφράζει το λόγο αναλογίας μεταξύ γεωμετρικών αλλά και λειτουργικών χαρακτηριστικών των οδοντωτών τροχών. Έτσι λοιπόν διαιρώντας τον αριθμό των στροφών του κινητήριου άξονα προς του κινούμενου έχουμε:

$$i = \frac{n_1}{n_2}$$

Γνωρίζουμε ότι κατά την αστοχία οι στροφές περιστροφής ήταν 28 Rpm και ο κατασκευαστής της ηλεκτρικής μηχανής (μοτέρ) αναφέρει ότι η μηχανή δίνει στην έξοδο 1450 Rpm ονομαστικής ισχύος 6 KW. Μπορούμε λοιπόν να υπολογίσουμε την σχέση μετάδοσης:

$$i = \frac{1450 \text{ Rpm}}{28 \text{ Rpm}}$$

$$i = 53$$

Στη συνέχεια πρέπει να υπολογίσουμε τον αρχικό κύκλο του ατέρμονα, οποίος υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$d_{m1} = \frac{Z_1 \cdot m}{\tan 15^\circ}$$

Όπου m είναι το βήμα της οδόντωσης (modul). Αντικαθιστώντας τις τιμές με γνωστό το m ίσο με 4 και με Z1 ίσο με 1 έχουμε:

$$d_{m1} = 15 \text{ mm}$$

Τώρα πρέπει να υπολογίσουμε τη ταχύτητα ολίσθησης των κατατομών.

$$U_g = \frac{d_{m1} \cdot \pi \cdot n_1}{60 \cdot \cos \gamma m}$$

Το γm είναι η γωνία κλίσης του ατέρμονα η οποία μας είναι γνωστή, σε κάθε περίπτωση κυμαίνεται από 15° έως 25° . Στη δική μας περίπτωση είναι 15° . Μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την U_g :

$$U_g = 0,01 \text{ m/sec}$$

Συνεχίζοντας πρέπει να υπολογίσουμε το βαθμό απόδοσης του ζεύγους κορώνας-ατέρμονα. Για να γίνει αυτό πρέπει να επιλέξουμε από πίνακες τη γωνία τριβής. Στη περίπτωση μας επιλέγουμε από τον πίνακα 1,14 σελ. 139 [] $\rho' = 3,5^\circ$. Ο βαθμός απόδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_z = \frac{\tan \gamma m}{\tan \gamma m + \rho'}$$

$$\eta_z = \frac{0,26}{0,33}$$

$$\eta_z = 0,78$$

Προκειμένου να υπολογίσουμε τον ολικό βαθμό απόδοσης πρέπει να συμπεριλάβουμε και τον βαθμό απόδοσης των εδράνων του ατέρμονα και της κορώνας. Συνήθεις τιμές βαθμού απόδοσης κυμαίνονται περίπου στο 0,98. Ο ολικός βαθμός προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$\eta_{ολ} = \eta_z \cdot \eta_D \cdot \eta_D$$

$$\eta_{ολ} = 0,78 \cdot 0,98 \cdot 0,98$$

$$\eta_{ολ} = 0,78$$

Έχοντας υπολογίσει και τον ολικό βαθμό απόδοσης μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε τη ροπή στρέψης στον άξονα. Αρχικά θα υπολογίσουμε τη ροπή στον κινητήριο άξονα:

$$T_1 = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

Όπου P είναι η ονομαστική ισχύς και n ο αριθμό των στροφών αναγόμενος ως προς τη μονάδα του χρόνου σε δευτερόλεπτα (RPS).

$$T_1 = \frac{6000W}{2 \cdot \pi \cdot 24.17Rps}$$

$$T_1 = 39.5 \text{ Nm}$$

Για τον τελευταίο υπολογισμό της ροπής στο κινούμενο άξονα θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση μετάδοσης και τον ολικό βαθμό απόδοσης. Έτσι λοιπόν:

$$T_2 = i \cdot T_1 \cdot \eta_{ολ}$$

$$T_2 = 1540,5 \text{ Nm}$$

7.5.2 Υπολογισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών ατέρμονα

Αφού έγινε ο υπολογισμός της ροπής στρέψης στον κινητήριο άξονα όπου θα χρησιμοποιηθεί για τον πλήρη υπολογισμό των φορτίων στο ζεύγος του ατέρμονα και της κορώνας. Πριν όμως από αυτό θεωρείται δόκιμο να γίνει πλήρης υπολογισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Από πριν υπολογίσαμε το d_{m1} οπότε θα συνεχίσουμε τους υπολογισμούς από εκεί:

$$d_{m1} = 15 \text{ mm}$$

Τώρα θα υπολογίσουμε τη διάμετρο κύκλου κεφαλής $d_{\alpha 1}$ με ύψος κεφαλής $h_{\alpha 1}$ ίσο με το module.

$$d_{\alpha 1} = d_{m1} + 2 \cdot m$$

$$d_{\alpha 1} = d_{m1} + 2 \cdot 4 \text{ mm}$$

$$d_{\alpha 1} = 23 \text{ mm}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τη διάμετρο κύκλου πόδα d_{f1} από την παρακάτω σχέση:

$$d_{f1} \approx d_{m1} - 2.5 \cdot m$$

$$d_{f1} \approx d_{m1} - 2.5 \cdot 4 \text{ mm}$$

$$d_{f1} \approx 5 \text{ mm}$$

Τέλος θα πρέπει να υπολογίσουμε το μήκος του ατέρμονα προκειμένου να έχει γίνει ο αναλυτικός υπολογισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Το μήκος του ατέρμονα γίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$b_1 \geq 2 \cdot m \sqrt{Z_2 + 1}$$

$$b_1 \geq 59 \text{ mm}$$

7.5.3 Υπολογισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών Κορώνας

Όπως και παραπάνω έτσι και τώρα θα πρέπει να υπολογίσουμε τον αναγκαίο αριθμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κορώνας. Ξεκινάμε από τον αρχικό κύκλο της κορώνας:

$$d_2 = m \cdot Z_2$$

$$d_2 = 4 \cdot 53$$

$$d_2 = 212 \text{ mm}$$

Αμέσως μετά πρέπει να υπολογίσουμε τη διάμετρο κύκλου κεφαλής. Προκειμένου να γίνει αυτό πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το d_2 από την προηγούμενη εξίσωση.

$$d_{a2} = d_2 + 2 \cdot m$$

$$d_{a2} = 212 \text{ mm} + 2 \cdot 4 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 220 \text{ mm}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τη διάμετρο κύκλου πόδα από τη σχέση:

$$d_{f2} \approx d_2 - 2.5 \cdot m$$

$$d_{f2} \approx 212 \text{ mm} - 2.5 \cdot 4 \text{ mm}$$

$$d_{f2} \approx 202 \text{ mm}$$

Τελειώνοντας πρέπει να γίνει και η εκτίμηση της διαμέτρου του εξωτερικού κυλίνδρου η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$d_{e2} \approx d_{a2} + m$$

$$d_{e2} \approx 220 \text{ mm} + 4 \text{ mm}$$

$$d_{e2} \approx 224 \text{ mm}$$

7.5.4 Υπολογισμός δυνάμεων μηχανισμού

Έχοντας κάνει όλους τους παραπάνω υπολογισμούς μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε στο τελευταίο στάδιο που είναι ο υπολογισμός των φορτίων. Κατά την λειτουργία του μηχανισμού ατέρμονα -κορώνας επενεργούν τρεις δυνάμεις. Η πρώτη είναι η περιφερειακή F_{t1} η οποία είναι εφαπτομενική στην περιφέρεια του τροχού. Η δεύτερη είναι η ακτινική η οποία ενεργεί στο μήκος

του πλάτους του ατέρμονα ή της κορώνας. Και τέλος η αξονική δύναμη η οποία κατευθύνεται προς το κέντρο του άξονα.

Θα ξεκινήσουμε τον υπολογισμό των δυνάμεων από τον ατέρμονα και θα δούμε πως αντιστοιχίζονται οι δυνάμεις αυτές στη κορώνα.

Αρχικά θα υπολογίσουμε την περιφερειακή δύναμη:

$$F_{t1} = \frac{2000 \cdot T1}{dm1}$$

$$F_{t1} = \frac{2000 \cdot 39.5 \text{ Nm}}{15 \text{ mm}}$$

$$F_{t1} = 5.26 \text{ KN}$$

Μετά θα υπολογίσουμε την ακτινική δύναμη:

$$F_{r1} = \frac{F_{t1} \cdot \cos \rho' \cdot \tan \alpha n}{\sin(\gamma m + \rho')}$$

$$F_{r1} = \frac{5260 \text{ N} \cdot \cos 3.5^\circ \cdot \tan 20^\circ}{\sin 18.5^\circ}$$

$$F_{r1} = 6.03 \text{ KN}$$

Και τέλος θα υπολογίσουμε την ακτινική δύναμη η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$F_{\alpha 1} = \frac{F_{t1}}{\tan(\gamma m + \rho')}$$

$$F_{\alpha 1} = \frac{5260 \text{ N}}{\tan 18,5^\circ}$$

$$F_{\alpha 1} = 15,74 \text{ KN}$$

Με υπολογισμένες πλέον και τις δυνάμεις στον ατέρμονα μπορούμε να εξάγουμε τα φορτία τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων. Με βάση τα παραπάνω η αξονική δύναμη στη κορώνα λόγω δράσης αντίδρασης είναι ίση με του ατέρμονα. Όσο αφορά τις

περιφερειακές και ακτινικές δυνάμεις στην κορώνα είναι αντίστροφα σε σχέση με τον ατέρμονα. Έτσι λοιπόν συνοπτικά έχουμε:

$$F_{t2}=F_{a1}$$

$$F_{r2}=F_{r1}$$

$$F_{a2}=F_{t1}$$

7.6 Προετοιμασία για Χημική ανάλυση και Οπτική στερεοσκοπία

Σκοπεύοντας να προχωρήσουμε σε χημική ανάλυση και οπτική στερεοσκοπία, επισκεφτήκαμε μηχανουργείο του ιδιωτικού τομέα το οποίο μας έκοψε τον άξονα σε μικρότερα κομμάτια (δίσκους) πλησίον και εκατέρωθεν του σημείου θραύσης, με πάχος 10mm. Η διαδικασία της κοπής έγινε με την βοήθεια μηχανήματος κορδέλας κοπής.

7.7 Οπτική στερεοσκοπία.

Ύστερα από συνεννόηση των υπευθύνων καθηγητών της παρούσας πτυχιακής εργασίας με τον υπεύθυνο καθηγητή του εργαστηρίου Ποιοτικού Ελέγχου Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του τμήματος της σχολής, πραγματοποιήσαμε οπτική στερεοσκοπία (εικόνες υψηλής ευκρίνειας) με σκοπό να έχουμε καλύτερη εικόνα της θραύσης του συστήματος αλλά και για την δημιουργία οπτικού υλικού της θραύσης του συστήματος (άξονα – κορώνας).



Εικόνα 7:3 Φωτογραφία οπτικής στερεοσκοπίας στο σημείο θραύσεως



Εικόνα 7:4 Φωτογραφία οπτικής στερεοσκοπίας στο σημείο θραύσεως στο κέντρο του άξονα



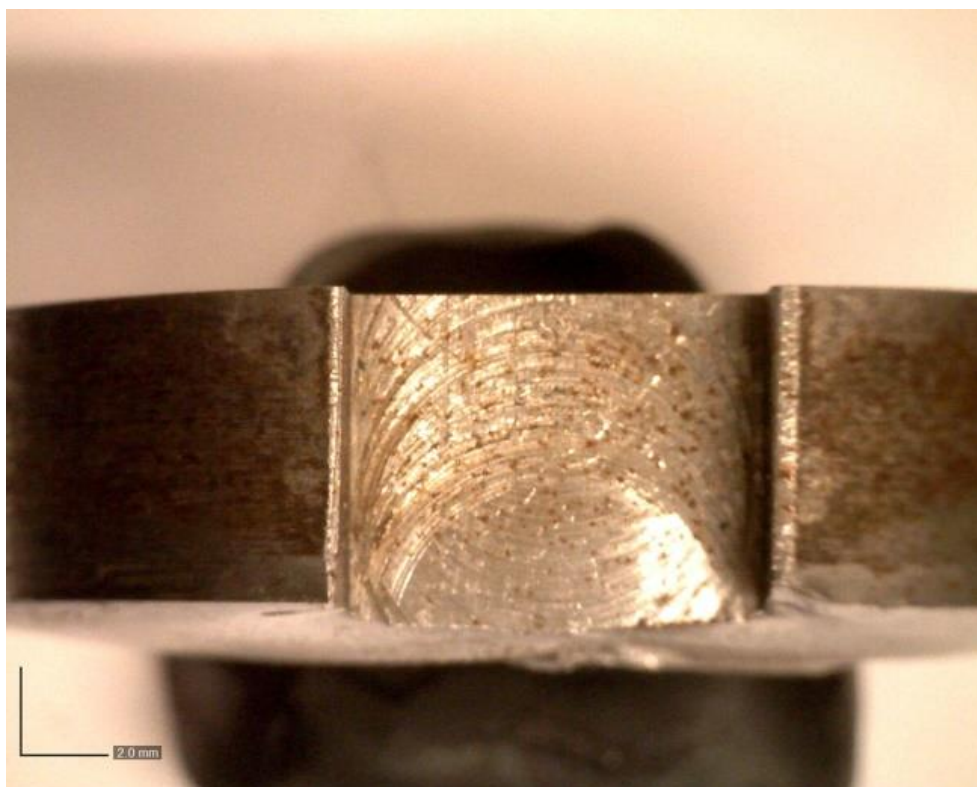
Εικόνα 7:5 Φωτογραφία οπτικής στερεοσκοπίας στο σημείο θραύσεως κάτω από τη σφηνάουλακα



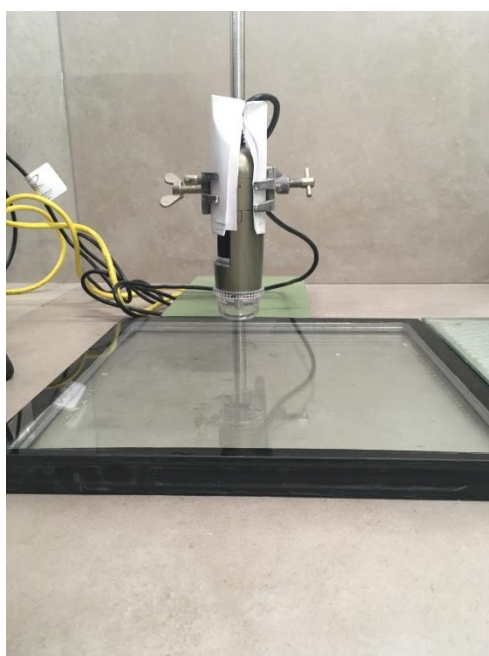
Εικόνα 7:4 Φωτογραφία οπτικής στερεοσκοπίας στο σημείο θραύσεως



Εικόνα 7:5 Φωτογραφία οπτικής στερεοσκοπίας στο σημείο θραύσεως κάτω από τη σφηναύλακα



Εικόνα 7:6 Φωτογραφία από οπτική στερεοσκοπία στη σφηναύλακα



Εικόνα 7:7 Πειραματικός εξοπλισμός οπτικής στερεοσκοπίας

7.8 Χημική ανάλυση.

Σε συνέχεια της εργασίας, σε συνεννόηση των υπεύθυνων καθηγητών της παρούσας πτυχιακής εργασίας με χημικό εργαστήριο εταιρίας του ιδιωτικού τομέα, πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση με σκοπό την ταυτοποίηση του υλικού του άξονα για μεταγενέστερη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της κατασκευάστριας εταιρίας αλλά και εξαγωγή αποτελεσμάτων πιο κοντά στην πραγματικότητα λόγω των ιδιοτήτων που θα χρησιμοποιούσαμε στην υπολογιστική προσομοίωση με την βοήθεια προγράμματος C.A.D.

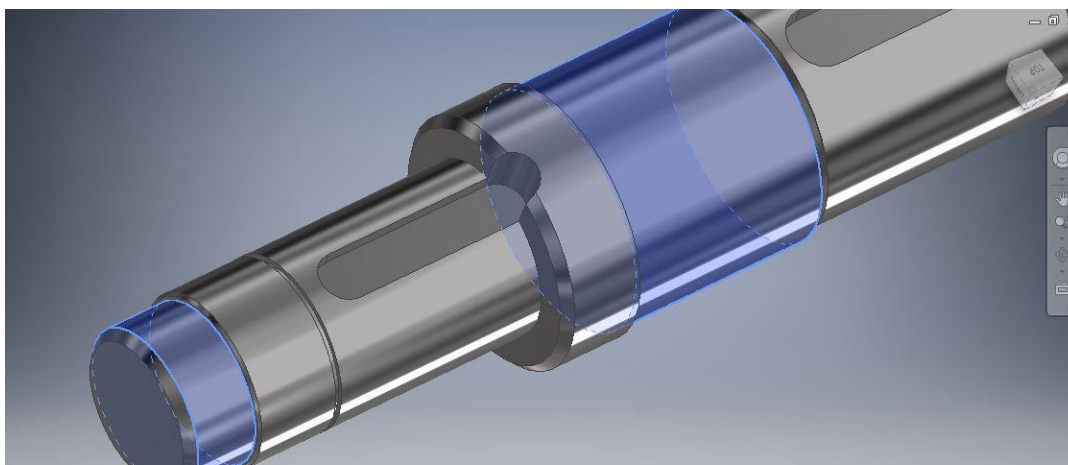
C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Al%	Cu%
0.446	0.245	0.560	0.0170	0.0041	0.0640	0.0580	0.0240	0.0170	0.127
Co%	Ti%	Nb%	V%	W%	Pb%	B%	Sb%	Sn%	Zn%
0.00750	0.00250	<0.0010	<0.0010	0.0590	<0.0010	<0.0002	0.0130	0.00870	0.00540
As%	Bi%	Ta%	Ca%	Ce%	Zr%	La%	Se%	N%	Fe%
0.0120	<0.0015	<0.0070	0.00130	<0.0020	0.00390	<0.0003	<0.0020	0.00910	98.3

Πίνακας 2 Στοιχεία χημικής ανάλυσης

7.9 Υπολογιστική Προσομοίωση – Πεπερασμένα στοιχεία.

Εφόσον, είχαμε δημιουργήσει σε προηγούμενο στάδιο το τρισδιάστατο μοντέλο του άξονα με την βοήθεια προγράμματος C.A.D. (Inventor Autodesk), συμπληρώσαμε τα στοιχεία τα οποία βασίζονταν στις ιδιότητες του υλικού, τις οποίες συλλέξαμε από την χημική ανάλυση που προαναφέρθηκε.

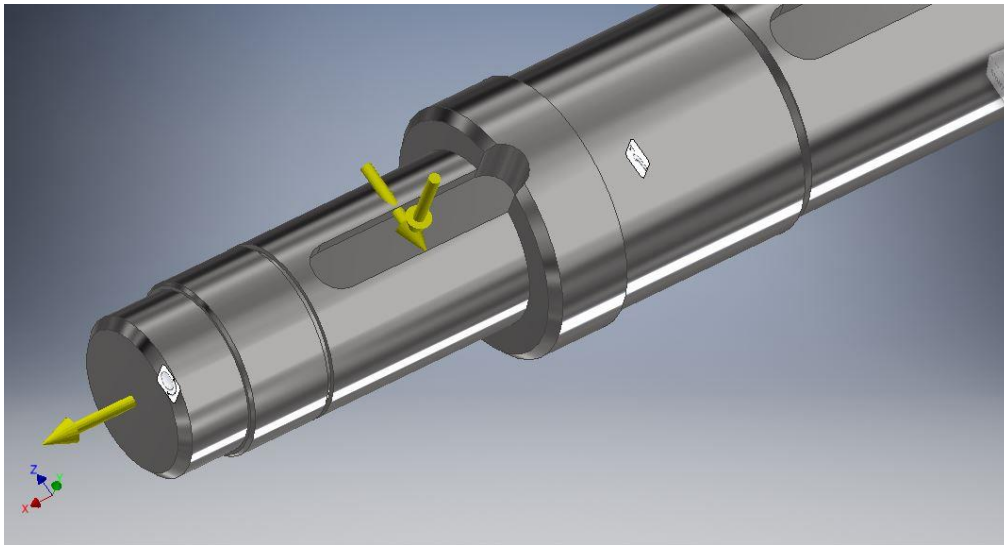
Έπειτα, ορίσαμε τις οριακές συνθήκες (φορτία και είδη στήριξης) προκειμένου να μπορεί να επιλυθεί το σύστημα. Τα είδη στήριξης του συστήματος είναι μία κύλιση και μια πάκτωση στα σημεία έδρασης του άξονα. Με σκοπό να ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες και κατά επέκταση το σύστημα των εξισώσεων που απαιτούσε το πρόγραμμα επίλυσης της εντατικής κατάστασης



Εικόνα 7:8 Σημεία εφαρμογής οριακών συνθηκών

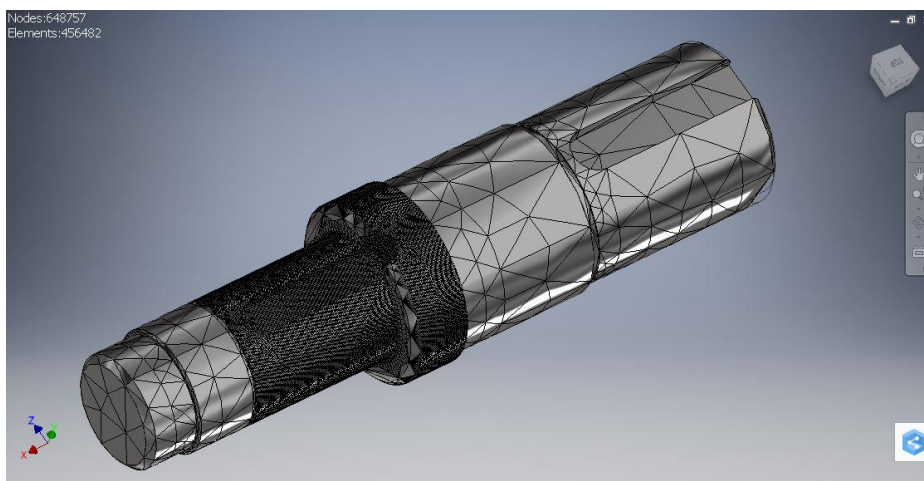
του άξονα, επιλέξαμε τις προαναφερθείσες στηρίξεις έναντι των δύο κυλίσεων που είναι στην πραγματικότητα.

Παρακάτω, ορίσαμε τα σημεία εφαρμογής των φορτίων που υπολογίσαμε σε προηγούμενο βήμα της εργασίας, επί του άξονα.

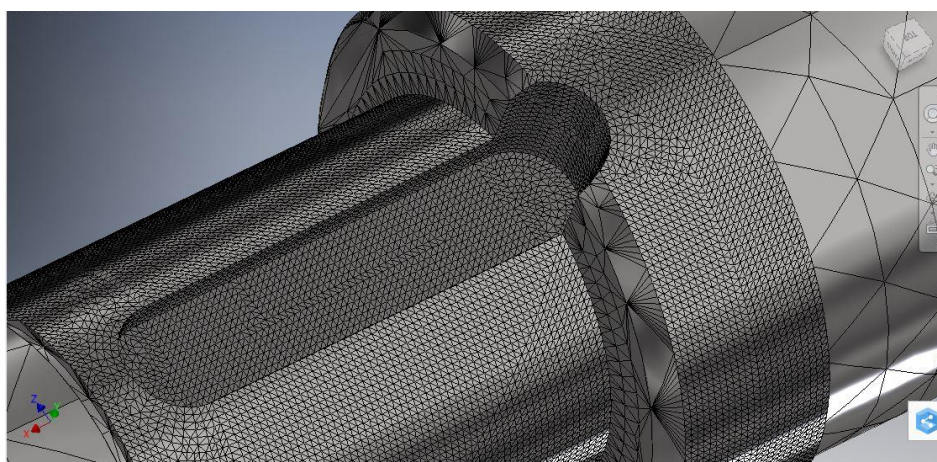


Εικόνα 7:9 Ορισμός σημείων εφαρμογής φορτίων

Στη συνέχεια, κάναμε διακριτοποίηση του άξονα σε πεπερασμένο αριθμό τριγωνικών στοιχείων. Για να έχουμε ακριβέστερα αποτελέσματα, τα οποία ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, κάναμε ορισμένες τοπικές πυκνώσεις στα σημεία ενδιαφέροντος. Τα σημεία ενδιαφέροντος είναι η περιοχή της σφηναύλακας, η διάμετρος έδρασης της κορώνας και η διάμετρος διαχωρισμού μεταξύ εδράνου και κορώνας.



Εικόνα 7:10 Διακριτοποίηση γεωμετρίας



Εικόνα 7:11 Περιοχές πύκνωσης

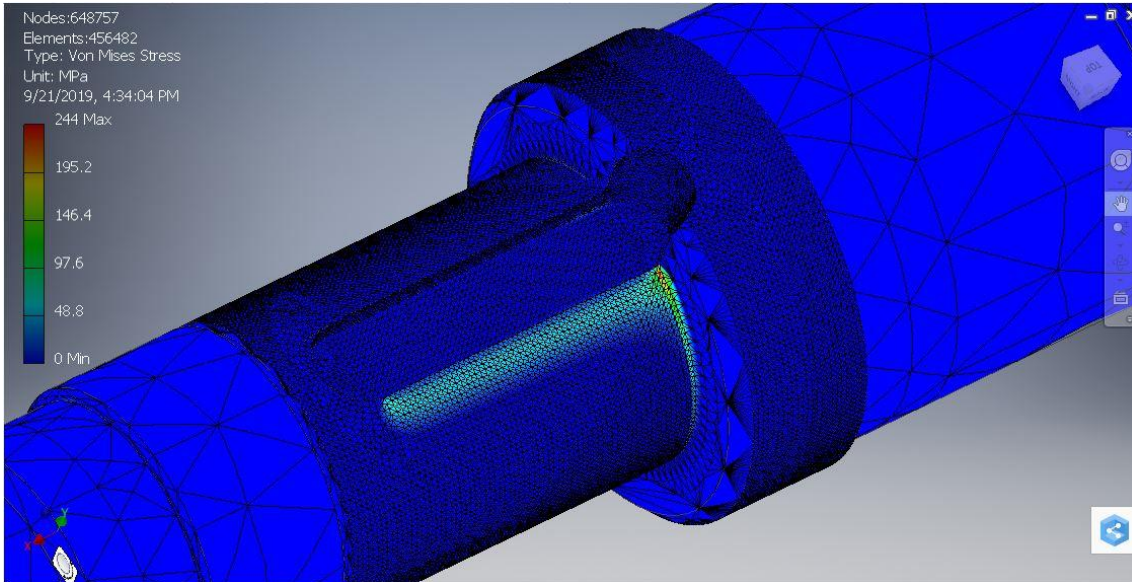
Στις ιδιότητες δημιουργίας του πλέγματος επιλέξαμε τα ακόλουθα στοιχεία:

Ιδιότητα πλέγματος	Τιμή (μονάδα μέτρησης)
Μέσο μέγεθος στοιχείου:	0,10mm
Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου:	0,20mm
Συντελεστής ανάπτυξης πλέγματος:	1,5
Μέγιστη γωνία στροφής :	60°

Πίνακας 3 Ιδιότητες πλέγματος

7.10 Αποτελέσματα

Ύστερα από την διακριτοποίηση της γεωμετρίας, πραγματοποιήσαμε την υπολογιστική προσομοίωση με την χρήση του προγράμματος C.A.D. (Inventor Autodesk), με βάση το κριτήριο Von Mises και πήραμε τα εξής αποτελέσματα:

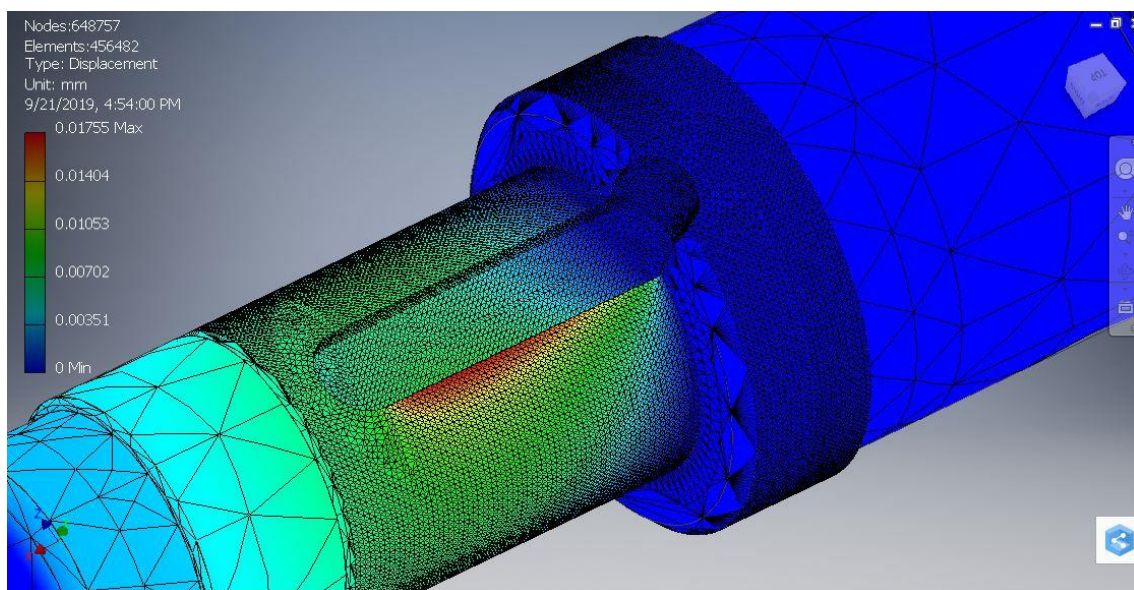


Εικόνα 7:12 Αποτελέσματα τάσεων Von Mises

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι:

- 1) Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στο σημείο της σφηνούλακας μεταξύ των διαβαθμίσεων,
- 2) Ο άξονας καταπονείται ακόμα στο σημείο της σφηνούλακας που εδράζεται η κορώνα, ωστόσο οι τάσεις που εμφανίζονται είναι πολύ μικρού μεγέθους.
- 3) Οι τάσεις λειτουργίας που εμφανίζονται στον υπόλοιπο άξονα είναι αμελητέες.
- 4) Παρατηρούμε ότι η μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στο ίδιο σημείο με το οποίο έχει αστοχήσει ο άξονας όπως φαίνεται στις παραπάνω φωτογραφίες της οπτικής στερεοσκοπίας.

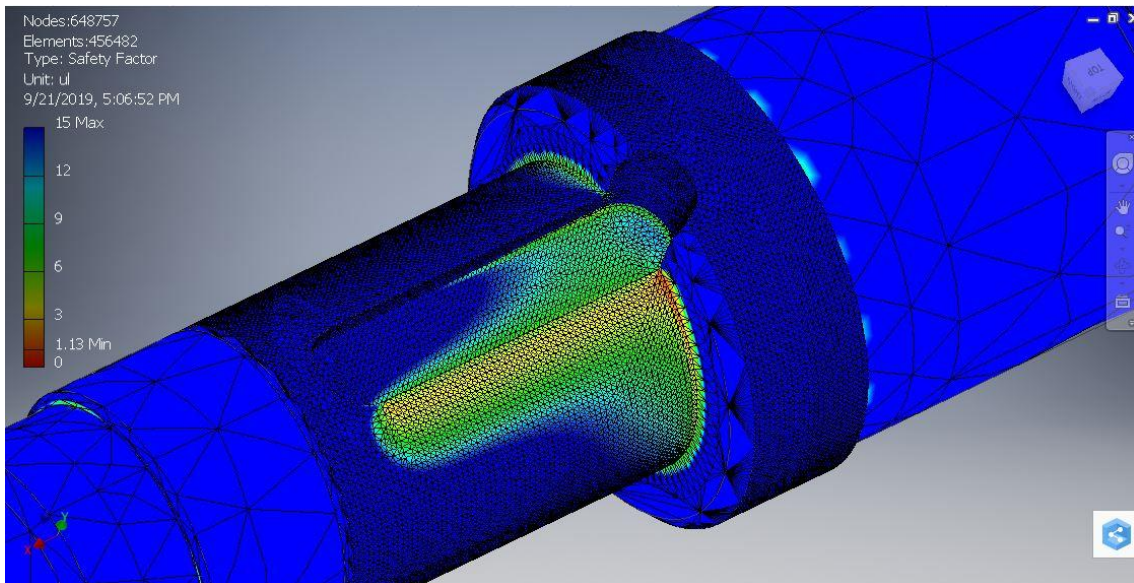
5) Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τάση Von Mises είναι 244MPa, τα στοιχεία της διακριτοποίησης που δημιουργούνται είναι 456482 και τα σημεία για τα οποία είναι γνωστές οι ιδιότητες είναι 648757.



Εικόνα 7:13 Αποτελέσματα Μετατοπίσεων.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι:

- 1) Η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στην σφηναύλακα αλλά όχι στο σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση Von Mises και αυτό είναι λογικό και οφείλεται στην μεγάλη διαβάθμιση που υπάρχει μεταξύ των δύο διαμέτρων με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλη συσσώρευση τάσεων στο σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση.
- 2) Παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση είναι 0,01755mm.
- 3) Παρατηρούμε ότι οι μετατοπίσεις είναι απότομες από το αριστερό άκρο που υπάρχει κύλιση μέχρι το δεξί άκρο της πάκτωσης.



Εικόνα 7:14 Αποτελέσματα Συντελεστή Ασφαλείας

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι:

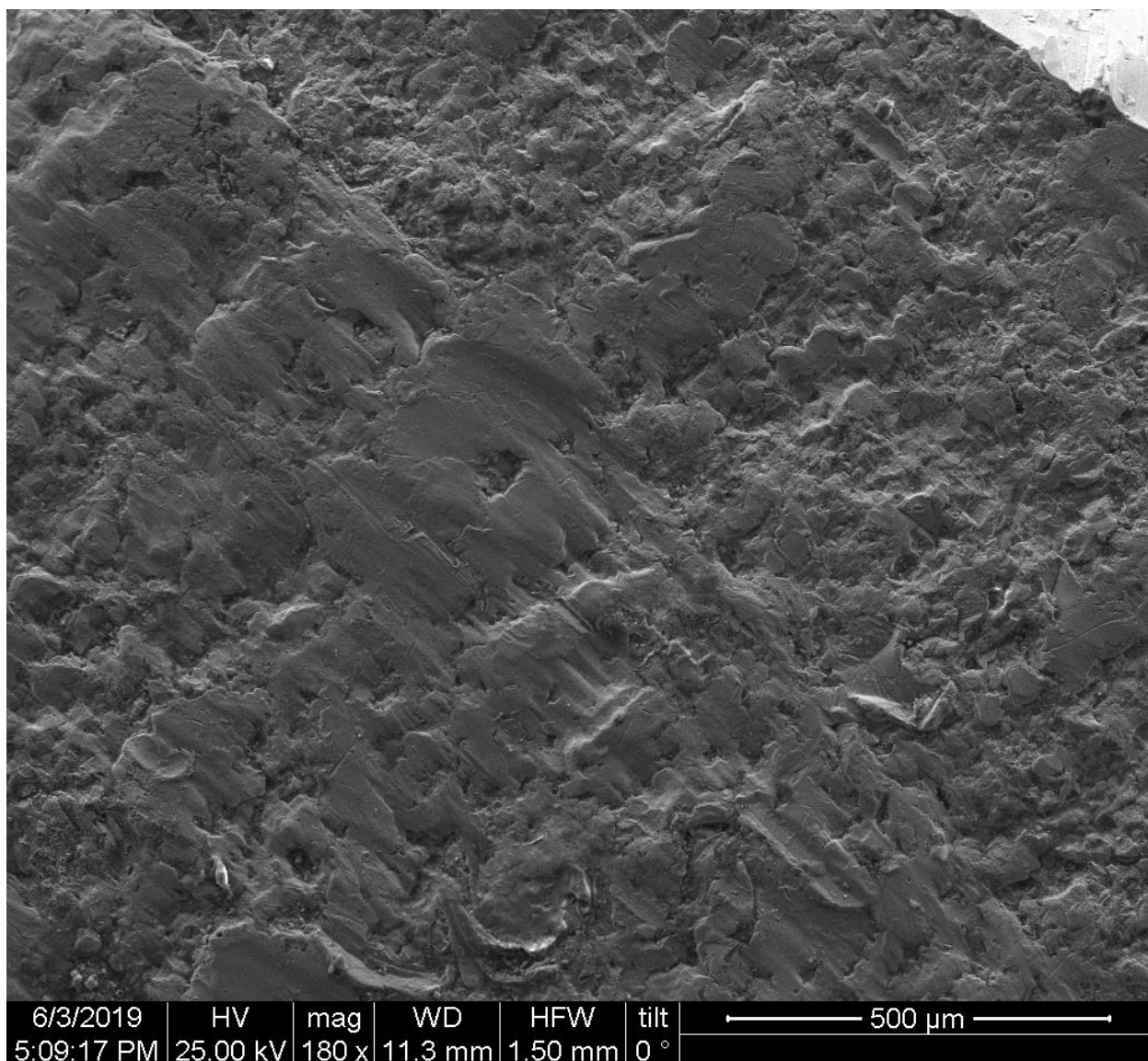
- 1) Στο σύνολό του ο άξονας παρουσιάζει κατά κύριο λόγο τον μέγιστο συντελεστή ασφαλείας ο οποίος είναι της τάξεως του 15, ο οποίος είναι αρκετός για την ασφαλή λειτουργία του μηχανισμού.
- 2) Ο μικρότερος συντελεστής ασφαλείας παρουσιάζεται στο σημείο της αστοχίας του άξονα, πράγμα που επαληθεύει τα οπτικά αποτελέσματα της στερεοσκοπίας και τις υποθέσεις μας, αλλά και τα δύο παραπάνω αποτελέσματα, καθώς η ακμή της σφηναύλακας μεταξύ των διαβαθμίσεων είναι το πιο επικίνδυνο σημείο για να αστοχήσει ο άξονας.
- 3) Παρατηρούμε ότι στο σημείο εμφάνισης των μέγιστων μετατοπίσεων παρουσιάζεται συντελεστής ασφαλείας της τάξεως από 3 έως 6, το οποίο εξασφαλίζει την λειτουργία του άξονα χωρίς αυτό να σημαίνει ότι είναι πλήρως ασφαλής.

7.11 Αποτελέσματα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας

Στο επόμενο στάδιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε πείραμα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σε εξωτερικό εργαστήριο και πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα. Οι φωτογραφίες λήφθηκαν στα σημεία του δοκιμίου που φαίνονται παρακάτω.

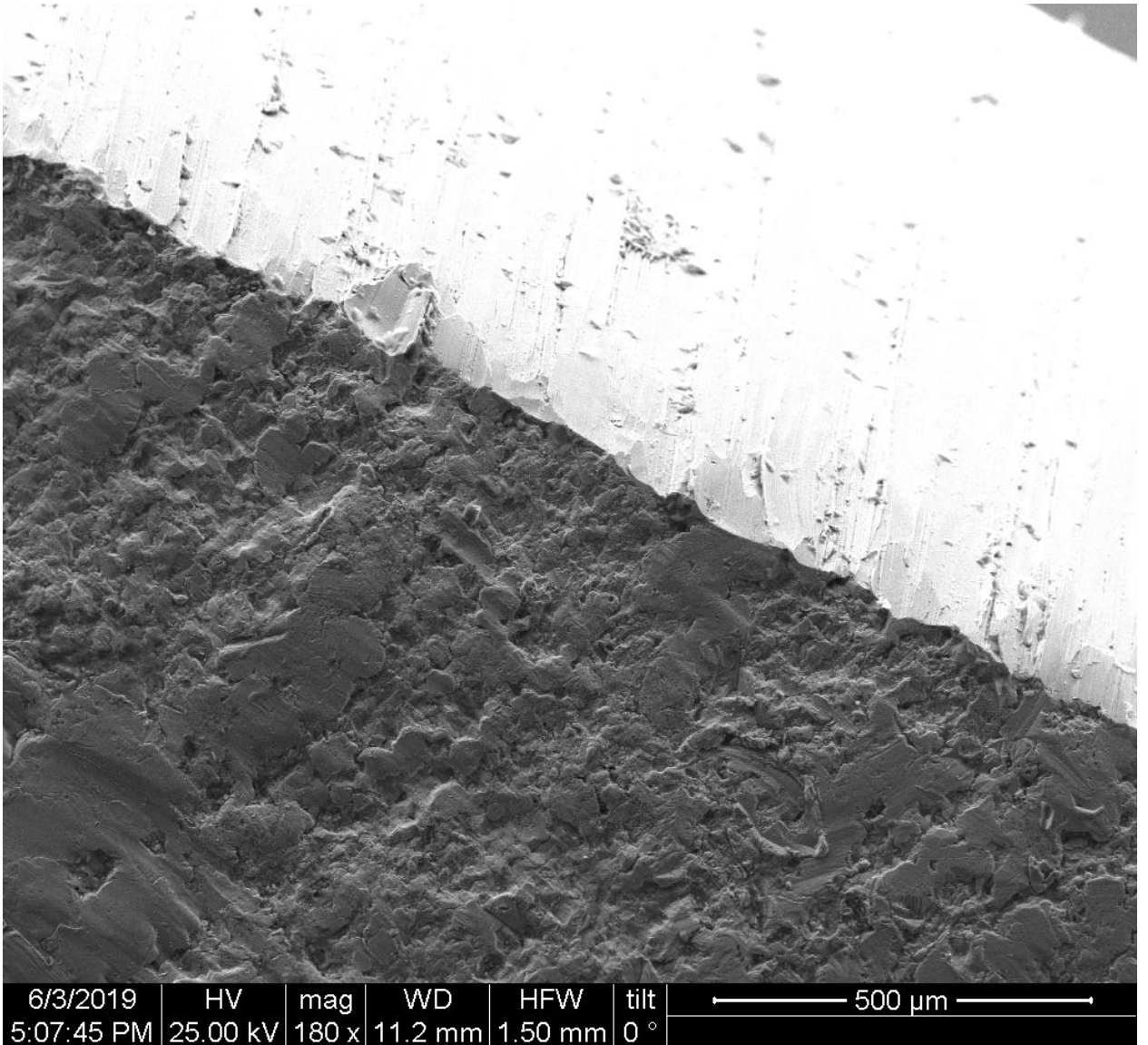


Εικόνα 7:15 Σημεία λήψεων φωτογραφιών ηλεκτρονικής μικροσκοπίας.



Εικόνα 7:16 Φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης της επιφάνειας θραύσεως, στο σημείο 1

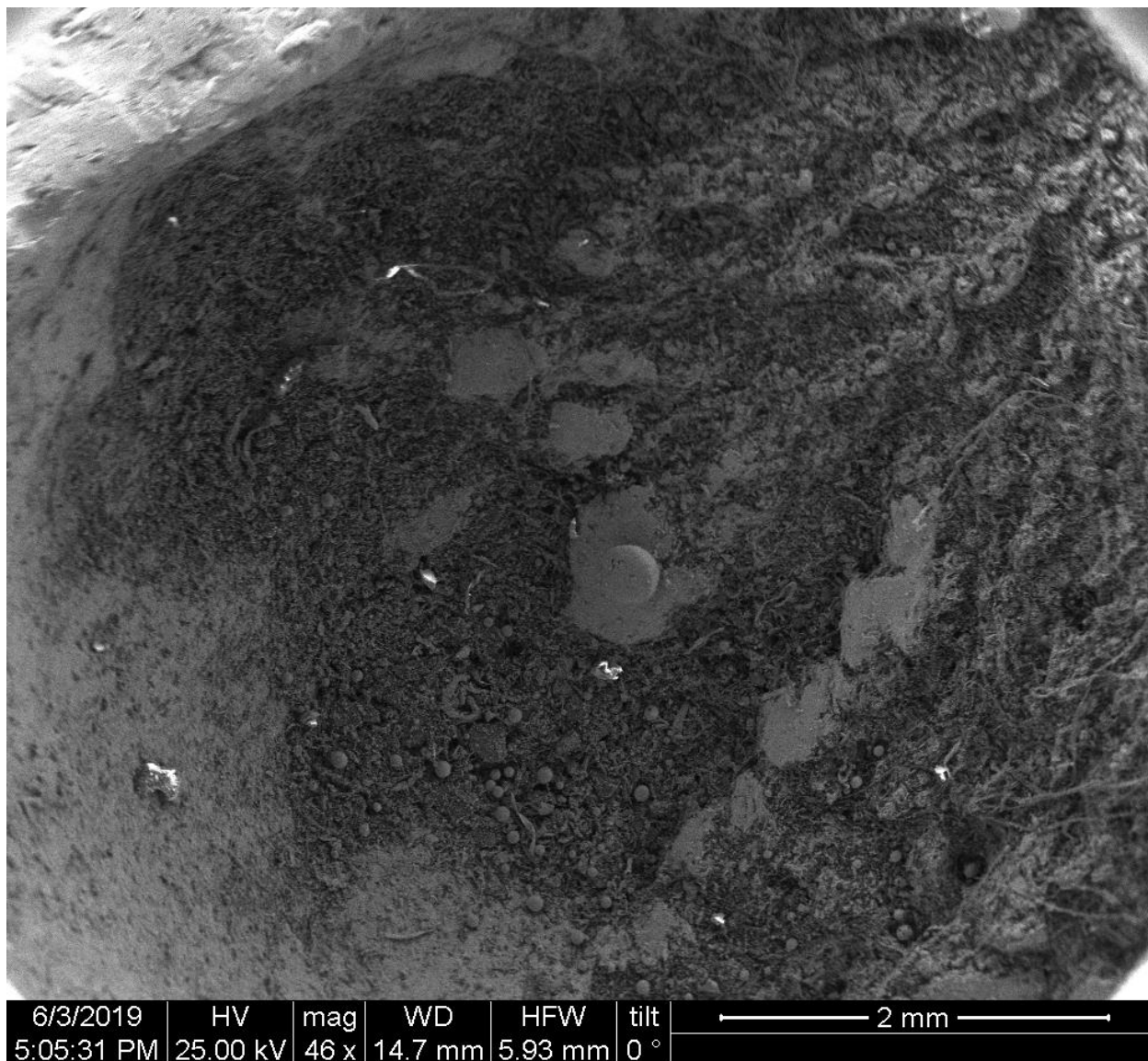
Η φωτογραφία αποτελεί φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) της επιφάνειας θραύσεως του δοκιμίου 500μm κάτω από την δεξιά ακμή της σφηναύλακας. Στην φωτογραφία παρατηρούνται χαρακτηριστικές περιοχές με έντονο ανάγλυφο, μικροκρατήρες, και μικρό οπές που αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά της όλκιμης θραύσης. Ταυτοχρόνως εμφανίζονται έντονα λεία πλατώματα με μικρορωγμές που πιθανότατα μπορούν να αποδοθούν σε φαινόμενα σχισμού των δύο επιφανειών και μπορεί να αποδοθούν στον έντονο ψαθυρό χαρακτήρα της θραύσης που επήλθε λόγω του φορτίου.



Εικόνα 7:17 Φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης της επιφάνειας θραύσεως, στο σημείο 2

Η φωτογραφία αποτελεί φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) της επιφάνειας θραύσεως του δοκιμίου 500μm κάτω από την δεξιά ακμή της σφηναύλακας. Όπου εμφανίζονται ταυτόχρονα περιοχές με έντονο ανάγλυφο το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό της όλκιμης θραύσης και λείες περιοχές με μικρορωγμές που αποδίδονται σε διακρυσταλλική ψαθυρή θραύση

η οποία πιθανώς επήλθε αμέσως μετά την θραύση στην ακμή της σφηναύλακας.



Εικόνα 7:18 Φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης της επιφάνειας θραύσεως, στο σημείο 3

Η φωτογραφία έχει ληφθεί από την επιφάνεια θραύσης στο σημείο 3 αποτελεί φωτογραφία της θραυσμένης επιφάνειας και αποτελεί φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) της επιφάνειας θραύσεως του δοκιμίου, έχει ληφθεί από το κέντρο του δοκιμίου όπου η στρεπτοκαμπτική

καταπόνηση του άξονα οδήγησε στην θραύση των εξωτερικών περιφερειών του άξονα και την αποκόλληση του εσωτερικού των δύο επιφανειών. Υπάρχει έντονος όγκιμος χαρακτήρας με τραχιές επιφάνειες και μικροκρατήρες καθώς και έντονα προϊόντα διάβρωσης τα οποία οφείλονται στην έκθεση της επιφάνειας μετά την θραύση σε διαβρωτικά περιβάλλοντα (έλαια, βαλβολίνες και ατμοσφαιρικό αέρα).

7.12 Προτεινόμενες σχεδιαστικές λύσεις.

Με βάση τα συμπεράσματα που αναφέραμε στο παραπάνω κεφάλαιο και με σκοπό την μελλοντική αποφυγή παρόμοιων αστοχιών σε ίδιου ή παρόμοιου τύπου άτρακτους – άξονες, καταλήξαμε στις εξής προτεινόμενες σχεδιαστικές λύσεις:

- 1) Αύξηση της διαμέτρου της ατράκτου στο μέρος σύνδεσης με την κορώνα με σκοπό να μειωθεί η διαφορά των διαμέτρων που υπάρχουν στην υφιστάμενη σχεδίαση της ατράκτου πράγμα που θα επιφέρει μεγαλύτερη αντοχή στις διατμητικές τάσεις που δημιουργούνται στην άτρακτο κατά την μεταφορά της ροπής από την κορώνα.
- 2) Δημιουργία ράδιων στην σφηναύλακα στο σημείο της διαβάθμισης με σκοπό την μείωση συσσώρευσης των τάσεων, στο σημείο που παρατηρούνται οι μέγιστες τάσεις Von Mises .
- 3) Δημιουργία ράδιων γενικότερα στις ακμές και ειδικότερα στις ακμές τις σφηναύλακας για την αποφυγή συσσώρευσης τάσεων και την ομαλή μετάδοση της κίνησης.

REFERENCES

1. Göksenli, A. and I.B. Eryürek, *Failure analysis of an elevator drive shaft*. Engineering Failure Analysis, 2009. **16**(4): p. 1011-1019.
2. Crivelli, D., R. Ghelichi, and M. Guagliano, *Failure analysis of a shaft of a car lift system*. Procedia Engineering, 2011. **10**: p. 3683-3691.
3. Cicero, S., et al., *Failure analysis of a lift gear shaft: Application of the FITNET FFS procedure fatigue module*. Engineering Failure Analysis, 2008. **15**(7): p. 970-980.
4. DeWolf, J.T., et al., *Mechanics of Materials*. 2014: McGraw-Hill Education.
5. Βουθούνης, Π.Α., *Αντοχή των υλικών-Μηχανική παραμορφώσιμου στερεού*. 2017.
6. Τριανταφυλλίδης, Γ.Κ., *Μεταλλογνωσία*. second ed. 2014.
7. Προβατίδης, Χ.Γ., *Πεπερασμένα στοιχεία στην ανάλυση κατασκευών*. second ed. 2017. 800.
8. Sadd, M.H., *Elasticity: Theory, Applications, and Numerics*. 2010: Elsevier Science.
9. Otegui, J.L., *Failure Analysis: Fundamentals and Applications in Mechanical Components*. 2014: Springer International Publishing.
10. Affonso, L.O.A., *Machinery Failure Analysis Handbook: Sustain Your Operations and Maximize Uptime*. 2013: Elsevier Science.
11. Στεργίου, Ι.Κ., *Στοιχεία μηχανών II : Μετάδοση κίνησης, οδοντωτοί τροχοί, ιμάντες, αλυσίδες* first ed. 2002.