



Α.Τ.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΚΟΠΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ

(FATIGUE FAILURE CRITERIA)

Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή: **Βασιλείου Άρης (Αρ.Μ. 34800)**

Επιβλέπων καθηγητής: **Τσολάκης Αντώνιος**

ΑΘΗΝΑ 2017

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Κεφάλαιο 1	
1.Εισαγωγή.....	6
1.2. Αστοχίες λόγω κόπωσης - Η ανάγκη μελέτης του φαινομένου.....	6
1.2.1 Χρονοδιάγραμμα από σύγχρονες μελέτες σχετικά με την κόπωση.....	6
1.2.2. Ιστορικά συμβάντα που οφείλονται σε αστοχία κόπωσης.....	8
1.2.2.1 De Havilland Comet.....	8
1.2.2.2. Πλατφόρμα Alexander L. Kielland.....	9
1.3 Κατηγοριοποίηση των ειδών κόπωσης.....	11
1.4 Η σημασία της κόπωσης στην ανάπτυξη μηχανολογικών συστημάτων.....	14
1.5 Θεώρηση της κόπωσης βάσει κλίμακας μεγέθους.....	18
Κεφάλαιο 2	
2. Μελέτη του Φαινομένου.....	24
2.1 Κατηγορίες κύκλων φόρτισης.....	26
2.1.1. Πολυκυκλική κόπωση - (High Cycle Fatigue – HCF).....	26
2.1.2. Ολιγοκυκλική κόπωση - (Low Cycle Fatigue – LCF).....	26
2.2 Δυναμικές Καταπονήσεις.....	27
2.3 Καμπύλες S – N (καμπύλες Wöhler).....	29
2.4 Πειραματικός Προσδιορισμός των Καμπυλών S – N.....	32
2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν το όριο διαρκούς αντοχής.....	35
2.5.1 Συντελεστής επιφανειακής κατεργασίας – Cf.....	36
2.5.2. Συντελεστής μεγέθους - Cs.....	37
2.5.3 Συντελεστής Θερμοκρασίας Ct.....	39
2.5.4 Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων Kt.....	39
2.5.5 Συντελεστής εγκοπής (Kf) και ευαισθησίας (q) σε κόπωση.....	42
2.6 Η επίδραση μέσης τάσης στην κόπωση.....	43
2.6.1 Προσέγγιση κατά Goodman.....	45
2.6.2 Προσέγγιση κατά Soderberg.....	46
2.6.3 Προσέγγιση κατά Gerber.....	47
Κεφάλαιο 3	
3. Μελέτη Περίπτωσης: Ανάλυση αστοχίας σε άξονα στρατιωτικού οχήματος.....	50
3.1 Ο σχεδιασμός του άξονα.....	50
3.2 Αξιολόγηση της αστοχίας.....	52
3.3 Έλεγχος του άξονα.....	52
3.3.1 Κάμψη από στατικό φορτίο.....	52
3.3.2 Στρέψη κατά την περιστροφή του άξονα.....	52
3.4 Αντοχή του υλικού σε κόπωση.....	54
3.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων.....	55
3.6 Προτεινόμενες αλλαγές στον τρόπο σχεδιασμού.....	56
3.7 Συμπεράσματα.....	58
Βιβλιογραφία	59

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι η μελέτη της κόπωσης ως ενός σύνθετου μηχανισμού αστοχίας.

Αρχικά, γίνεται εισαγωγή στο φαινόμενο της κόπωσης, δίνοντας τον ορισμό της, και αναφέρονται οι λόγοι για τους οποίους είναι σημαντική η ανάγκη διερεύνησης και μελέτης του. Ακόμα, αναφέρονται οι σύγχρονες μελέτες που έχουν καταγραφεί καθώς και ιστορικά γεγονότα που αφορούν αστοχίες λόγω της κόπωσης.

Στην συνέχεια, αναφέρονται οι συνθήκες που οδηγούν στην εμφάνιση της κόπωσης, και προσδιορίζονται οι δύο κατηγορίες εμφάνισης της σε πολυκυκλική ή ολιγοκυκλική, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά της κάθε μίας. Στην συνέχεια, αναλύονται οι δυναμικές καταπονήσεις και οι διάφορες μορφές με τις οποίες αυτές μπορούν να εκδηλωθούν, και παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθούμε κατά την διεξαγωγή μιας δοκιμής κόπωσης καθώς επίσης και το πώς αυτή θα οδηγήσει στην σύνταξη μιας καμπύλης σ-N. Περιγράφεται επίσης η διαδικασία που ακολουθούμε κατά την διεξαγωγή εργαστηριακών μετρήσεων σε δοκίμια, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται, καθώς επίσης και η απαραίτητη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων ώστε αυτά να χρησιμοποιηθούν ως αξιόπιστα δεδομένα για τον σχεδιασμό κατασκευαστικών στελεχών. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη της κόπωσης και τα μοντέλα Goodman Sodeberg και Gerber.

Τέλος εξετάζονται μελέτες περίπτωσης σε πραγματικές εφαρμογές, τα σφαλματα στην διαδικασία σχεδιασμού, ο υπολογισμός των παράμερων που επηρεάζουν το φαινόμενο και προτείνονται τρόποι επανασχεδιασμού για την ανάπτυξη προϊόντων και κατασκευών ανθεκτικών απέναντι σε κόπωση.

Abstract

The purpose of this essay is the study of fatigue as a complex failure mechanism.

Firstly, an introduction to fatigue is given by mentioning its definition and analysing the reasons of importance to investigate this mechanism. Furthermore, modern studies and historic facts about fatigue are presented.

At the second part are mentioned the conditions which lead a mechanism to fail and the types of load are presented. The type of stresses are categorised to high cycle or low cycle which their characteristics are investigated. Also, the methodology of experimentation and its data analysis proposed. Particular emphasis was given to the factors of the fatigue and the models of Goodman, Gerber and Soldeberg.

At the end of this essay, there is a detailed case studies analysis by mentioning the failure mechanism, the calculation of the fatigue and proposed methods of redesign and developing products and constructions durable to fatigue failure.

Κεφάλαιο 1: Αστοχίες λόγω κόπωσης - Η ανάγκη μελέτης του φαινομένου

1.Εισαγωγή

Ήδη από το 1830 είχε διαπιστωθεί ότι τα μεταλλικά υλικά, όταν καταπονούνται από επαναλαμβανόμενες (δυναμικές) τάσεις, μπορούν να αστοχήσουν σε θραύση, ακόμη και όταν οι τιμές των τάσεων αυτών βρίσκονται αρκετά χαμηλότερα από την αντοχή του υλικού σε θραύση. Η αστοχία που εμφανίζεται στα μεταλλικά υλικά λόγω της επίδρασης δυναμικών καταπονήσεων ονομάζεται *κόπωση* (fatigue). Το βασικό χαρακτηριστικό της κόπωσης είναι ότι απαιτεί μία σημαντική χρονική περίοδο λειτουργίας του δομικού στοιχείου ή εξαρτήματος μίας κατασκευής για να εμφανιστεί.

1.2. Αστοχίες λόγω κόπωσης - Η ανάγκη μελέτης του φαινομένου

Η μελέτη του φαινομένου της κόπωσης, η πρόβλεψη και αποφυγή αστοχιών που οφείλονται σε αυτήν, είναι αντικείμενο επιστημονικών μελετών για πάνω από 150 χρόνια. Μάλιστα, καθώς με την πρόοδο της τεχνολογίας αναπτύσσετε νέα δομικά στοιχεία, τα οποία εφαρμόζονται σε κατασκευές όπως αυτοκίνητα, αεροσκάφη, συμπιεστές, στρόβιλοι, κλπ., στα οποία οι μηχανικές καταπονήσεις είναι κατ' εξοχήν δυναμικές, η κόπωση απέκτησε σταδιακά όλο και μεγαλύτερη σημασία ως μηχανισμός αστοχίας. Σήμερα εκτιμάται ότι το 90% των αστοχιών, που προέρχονται από μηχανικά αίτια, οφείλεται σε κόπωση.

1.2.1. Χρονοδιάγραμμα από σύγχρονες μελέτες σχετικά με την κόπωση

- 1837: Ο [Wilhelm Albert](#) δημοσιεύει το πρώτο άρθρο σχετικά με την κόπωση των υλικών. Σχεδιάζει και αναπτύσσει μια πειραματική συσκευή κίνησης με αλυσίδες που χρησιμοποιήθηκε στα ορυχεία του [Clausthal](#)^[1].
- 1839: Ο [Jean-Victor Poncelet](#) περιγράφει ότι τα μέταλλα “κουράζονται” στις διαλέξεις του στην στρατιωτική σχολή του [Metz](#).
- 1842: Ο [William John Macquorn Rankine](#) αναγνωρίζει την

βαρύτητα των παραμενουσών τάσεων στην ερευνά του για την αστοχία αξόνων αμαξοστοιχιών. Η καταστροφή του τρένου των Βερσαλλιών (εικ.1.1) προήρθε από την αστοχία λόγω κόπωσης του κινητήριου άξονα.^[2]



Εικόνα 1.1.: Το ατύχημα του τρένου των Βερσαλλιών, 8 Μαΐου 1842

- 1843: Ο Joseph Glynn αναφαίρετε στην κόπωση άξονα ενός κινητήριου βαγονιού. Αναγνωρίζει την δημιουργία της ρωγμής.
- 1848: Η επιθεώρηση σιδηροδρόμων ([Railway Inspectorate](#)) αναφέρει ότι η αστοχία στον τροχό ενός βαγονιού, πιθανώς να προέρχεται από ένα κοχλία συγκράτησης του τροχού όπου καταστράφηκε λόγω κόπωσης.

- 1849: Ο [Eaton Hodgkinson](#) χρηματοδοτήθηκε από το βρετανικό κοινοβούλιο, για την μελέτη του "Εξακρίβωση με πειραματισμό, για την επίδραση της συνεχούς αλλαγής των φορτίσεων σε μεταλλικά στοιχεία και πως θα μπορούν να φορτίζονται χωρίς κίνδυνο, εξασφαλίζοντας την απολυτή ασφάλεια".



Εικ.1.2. Wöhler 1918

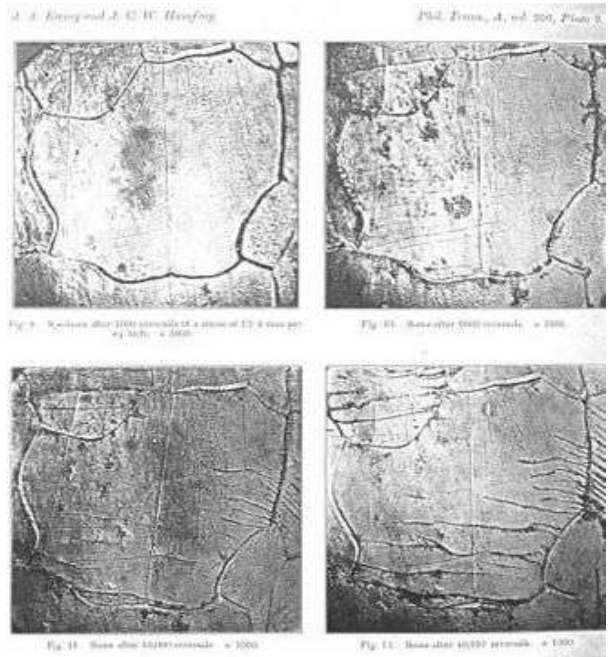
1854: Η Braithwaite αναφέρει και καταγράφει περιπτώσεις αστοχίας λόγω κόπωσης και επινοεί τον όρο "*fatigue*".^[3]

- 1860: Πραγματοποιείτε συστηματική μελέτη και πειραματισμός για το φαινόμενο την κόπωσης από τον Sir [William Fairbairn](#) και [August Wöhler](#) (Εικ1.2).
- 1870: Ο Wöhler συνοψίζει το έργο του που αφορά τις περιπτώσεις αστοχίας αξόνων τρένων. Συμπεραίνει ότι το εύρος της κυκλικής φόρτισης είναι πιο σημαντική από την μέγιστη τιμή φόρτισης και εισάγει την έννοια του ορίου αντοχής "*endurance limit*".^[4]

- 1903:

Ο Sir [James Alfred Ewing](#) παρουσιάζει την εξέλιξη της κόπωσης παρουσιάζοντας την ανάπτυξη μικροσκοπικών ρωγμών. (Εικ.1.3).

- 1910: Ο [O. H. Basquin](#) προτείνει μια λογαριθμική συσχέτιση (log-log relationship) για τις S-N καμπύλες βασιζόμενος στα πειρατικά δεδομένα του Wöhler.
- 1945: Ο [A. M. Miner](#) παρουσιάζει στο κοινό την μελέτη του Palmgren (1924) ως μια πρακτική μέθοδο σχεδιασμού κατά της κόπωσης.
- 1954: Το πρώτο επιβατικό αεροσκάφος, [de Havilland Comet](#), καταστρέφεται, ενώ άλλα τρία αεροσκάφη διαλύονται κατά την πτήση αναγκάζοντας την de Havilland και όλες τις άλλες κατασκευάστριες εταιρίες να ξανασχεδιάσουν τα αεροσκάφη τους αντικαθιστώντας τις τετράγωνες επιφάνειες του σε κυκλικές.
- 1961: Ο [P. C. Paris](#) προτείνει μεθόδους για την πρόβλεψη του ρυθμού ανάπτυξης των ρωγμών.
- 1968: Ο [Tatsuo Endo](#) και ο [M. Matsuishi](#) αναπτύσσει τον [rainflow-counting algorithm](#) και επαλυθνεύει την αξιοπιστία του Miner για τις τυχαίες φορτίσεις.^[5]
- 1970: Ο [W. Elber](#) αναλύει τους μηχανισμούς και την σημασία του τερματισμού της ανάπτυξης της ρωγμής, και προτείνει μεθόδους για την επιβράδυνση της διαδικασίας που οδηγεί σε αστοχία λόγω κόπωσης.



Εικ.1.3. Φωτογραφίες παρουσιάζουν πως αναπτύσσονται οι ρωγμές ενώ το υλικό φορτίζεται. Από Ewing & Humfrey, 1903

1.2.2. Ιστορικά συμβάντα που οφείλονται σε αστοχία κόπωσης

Ιστορικά, έχουν καταγραφεί πολλά συμβάντα που προκλήθηκαν από αστοχία υλικών, λόγω του φαινομένου της κόπωσης, που προκάλεσαν μεγάλες υλικές ζημιές και κόστισαν την ζωή πολλών ανθρώπων. Ατυχήματα, τα οποία υποδεικνύουν το ποσό μεγάλη καταστροφή μπορεί να προκαλέσει η άγνοια του φαινομένου της κόπωσης, το οποίο μάλιστα στις περισσότερες περιπτώσεις δεν δείχνει ορατά σημάδια προειδοποίησης της εκδήλωσής του. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι παρακάτω δύο περιπτώσεις ατυχημάτων:

1.2.2.1 De Havilland Comet

Το 1954, δυο επιβατικά αεροσκάφη τύπου Havilland Comet (Εικ.1.4) θρυμματίστηκαν εν ώρα πτήσης και συνετρίβησαν, μέσα σε ένα χρονικό διάστημα δύο μηνών το ένα από το άλλο. Στις έρευνες που ακολούθησαν για τον εντοπισμό των αιτιών των δυο αυτών ατυχημάτων, διεξήχθησαν έλεγχοι σε μια άτρακτο ίδιου τύπου με αυτήν που ήταν εξοπλισμένα τα αεροσκάφη. Η άτρακτος, βυθίστηκε σε μια δεξαμενή νερού και συμπίεστηκε, ώστε να εξομοιωθούν οι συνθήκες πίεσης που θα δεχόταν η άτρακτος εν ώρα πτήσης. Έπειτα από τεστ ισοδύναμα με 3000 ώρες πτήσης, οι ερευνητές ήταν σε θέση να καταλήξουν στο συμπέρασμα πως



Εικ.1.4 British European Airways (BEA) Comet 4B arriving at Berlin Tempelhof Airport in 1969

η συντριβή οφειλόταν σε αστοχία της καμπίνας συμπίεσης στο μπροστινό παράθυρο της οροφής. Αυτό το «παράθυρο» ήταν στην πραγματικότητα ένα από τα δύο ανοίγματα για τις κεραίες ενός ηλεκτρονικού συστήματος πλοήγησης, στο οποίο αδιαφανές πάνελ fiberglass πήρε τη θέση του «γυαλιού» του παραθύρου. Η αστοχία ήταν αποτέλεσμα φαινομένου κόπωσης, που προκλήθηκε λόγω της επαναλαμβανόμενης συμπίεσης – αποσυμπίεσης της καμπίνας. Επίσης, τα υποστηρίγματα γύρω από τα παράθυρα (Εικ.1.5.) συγκρατούνταν με ήλους, και δεν ήταν συγκολλημένα, όπως οι αρχικές προδιαγραφές του αεροσκάφους απαιτούσαν.

Το πρόβλημα αυτό επιδεινώθηκε, από την τεχνική του κρουστικού καρφώματος των ήλων. Σε αντίθεση με την τεχνική της ήλωσης με τρυπάνι, η ατελής φύση της οπών που δημιουργήθηκαν με κρουστική διάτρηση, προκάλεσαν κατασκευαστικές ατέλειες (μικρορωγμές) οι οποίες ενδεχομένως να ήταν η αιτία της δημιουργίας ρωγμών κοπώσεως γύρω από τον ήλο. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι οι τάσεις γύρω από τα ανοίγματα της καμπίνας πίεσεως ήταν σημαντικά υψηλότερες από ότι είχε προβλεφθεί, ιδιαίτερα γύρω από απότομες γωνίες, όπως τα παράθυρα.

Ως αποτέλεσμα, όλα τα μελλοντικά μοντέλα αεροπλάνων θα διέθεταν παράθυρα με στρογγυλεμένες γωνίες, η καμπύλη των οποίων θα εξάλειφε την συγκέντρωση τάσεων. Αυτό ήταν ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό όλων των μεταγενέστερων μοντέλων του Comet.

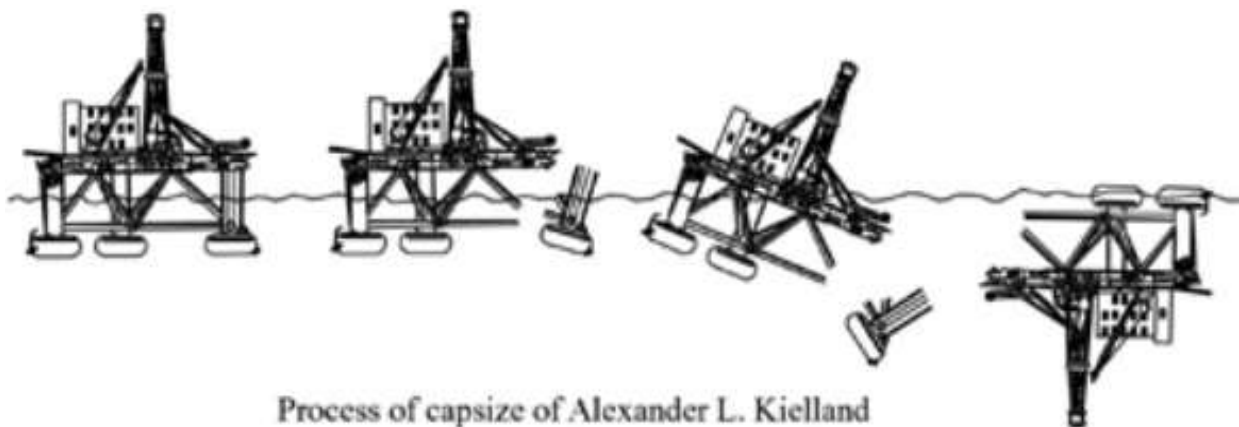
Οι ερευνητές δήλωσαν σε μια δημόσια έρευνα ότι οι απότομες γωνίες κοντά σε ανοίγματα των παραθύρων των Comets «ενήργησαν ως θέσεις εκκίνησης για ρωγμές. Το περίβλημα του αεροσκάφους ήταν επίσης πολύ λεπτό, και ρωγμές από τάσεις κατά την κατασκευή ήταν εμφανείς στις γωνίες.»



Εικ.1.5. Άτρακτος Comet Κομμάτι της ατράκτου του Comet, εκτίθεται στο Μουσείο Επιστημών του Λονδίνου, στο οποίο φαίνονται τα δύο παράθυρα στα οποία συνέβη η αρχική αστοχία.

1.2.2.2. Πλατφόρμα Alexander L. Kielland

Το Alexander L. Kielland, ήταν ένα Νορβηγικό ημι-υποβρύχιο γεωτρύπανο που ανατράπηκε, ενώ λειτουργούσε στο κοιτάσμα πετρελαίου Ekofisk τον Μάρτιο του 1980 σκοτώνοντας 123 άτομα. Η ανατροπή του ήταν η χειρότερη καταστροφή στα Νορβηγικά ύδατα από το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.



Εικ. 1.6 Η διαδικασία ανατροπής της πλατφόρμας Alexander L. Kielland

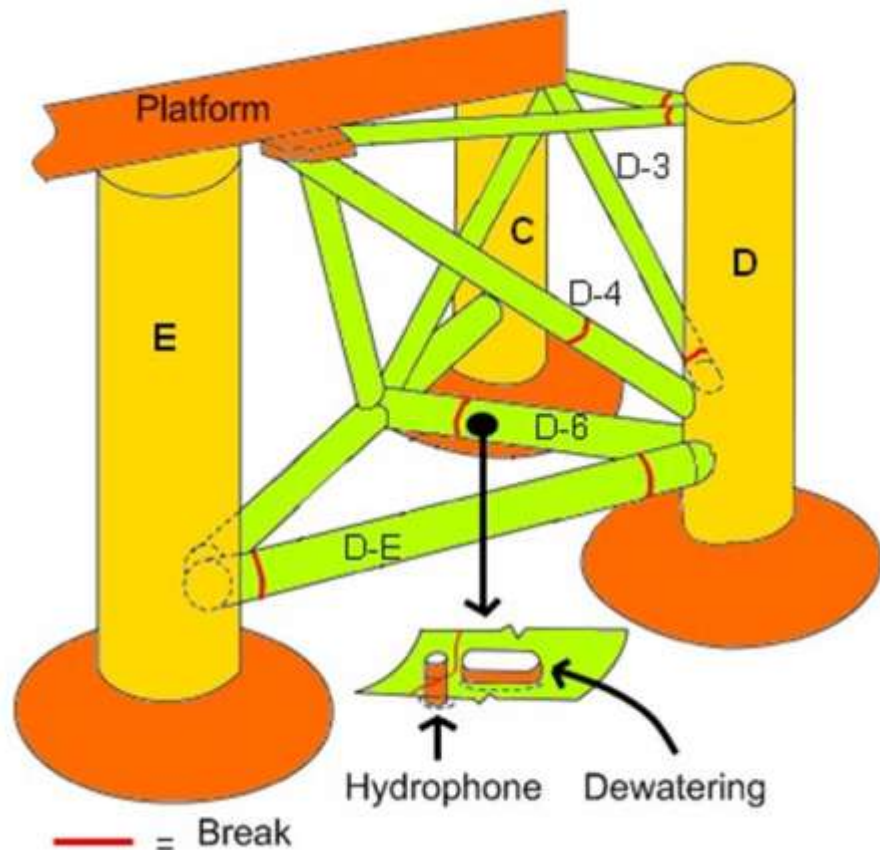
Λίγα λεπτά πριν τις 18:30 στις 27 Μαρτίου του 1980, οι περίπου 200 επιβαίνοντες στην πλατφόρμα ένωσαν ένα «απότομο σπάσιμο» ακολουθούμενο από «κάποιο είδος τρέμουλο».

Ξαφνικά η εξέδρα έκλινε πάνω από 30 ° και στη συνέχεια σταθεροποιήθηκε. Πέντε από τα έξι καλώδια αγκύρωσης είχαν σπάσει, ενώ ένα μόνο καλώδιο εμπόδιζε την εξέδρα από την ανατροπή. Τρία λεπτά αργότερα και το εναπομένον καλώδιο αγκύρωσης έσπασε και η εξέδρα γύρισε ανάποδα (Εικ.1.7).



Εικ. 1.7 Η ανατροπή της πλατφόρμας “Alexander L. Kielland”. 27 Μαρτίου 1980

Έναν χρόνο αργότερα, το Μάρτιο του 1981, η ερευνητική έκθεση κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η πλατφόρμα κατέρρευσε λόγω μιας ρωγμής κόπωσης σε έναν από τους έξι της συνδέσμους (σύνδεσμος D-6), ο οποίος συνεδέε το πόδι που κατέρρευσε (πόδι D) με την υπόλοιπη πλατφόρμα (Εικ.1.8). Το πρόβλημα εντοπίστηκε σε μια λεπτή μεταλλική πλάκα, συγκολλημένη επάνω στον σύνδεσμο D-6. Στην έρευνα διαπιστώθηκε σημαντικό ποσοστό σχισίματος στην πλάκα,



Εικόνα 1.8 Σχεδιάγραμμα της πλατφόρμας Alexander L. Kielland

και ρωγμές στα σημεία συγκόλλησης. Οι ρωγμές αυτές, αυξημένες τάσεις λόγω του εξασθενημένου κολάρου, το φτωχό προφίλ της συγκόλλησης και κυκλικά μεταβαλλόμενες τάσεις (λόγω των κυμάτων της θάλασσας), έπαιξαν συλλογικά ρόλο στην κατάρρευση της πλατφόρμας.

1.3 Κατηγοριοποίηση των ειδών κόπωσης

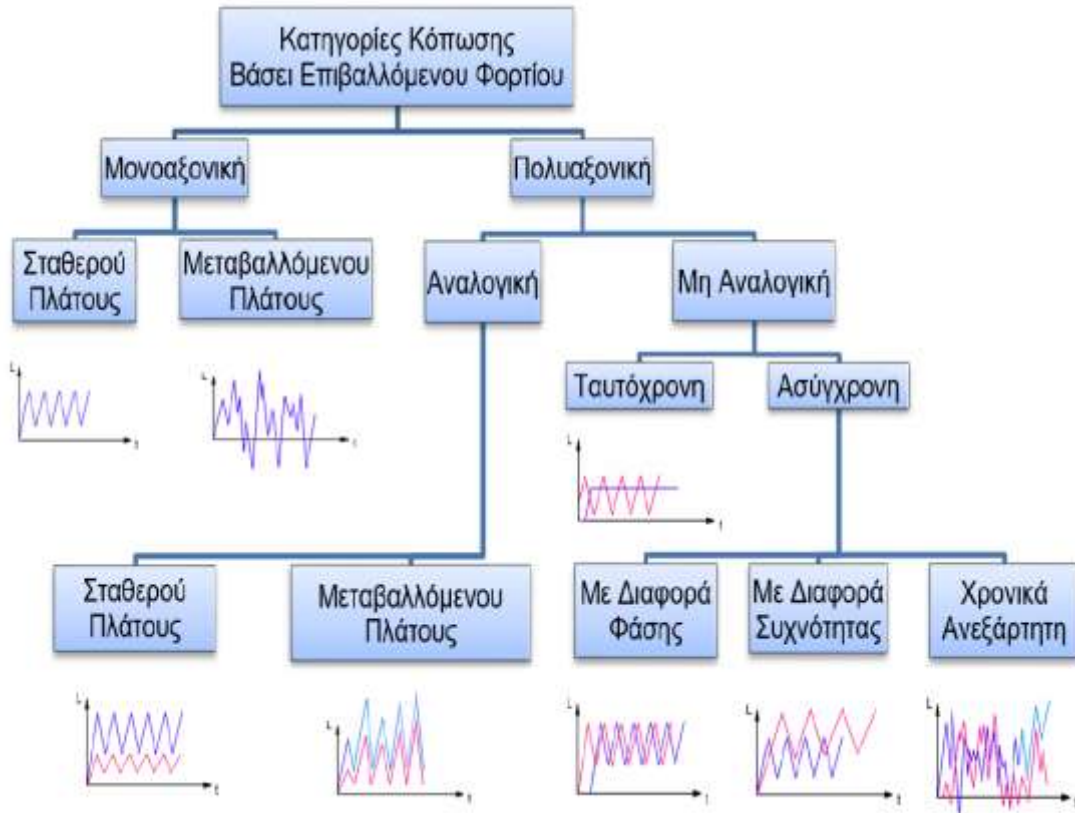
Η κόπωση των υλικών είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθεί είτε βάσει του είδους της επιβαλλόμενης φόρτισης (Διάγραμμα 1.1) είτε βάσει του είδους της αστοχίας (Σχήμα Διαγραμμα1.2.).

Η κόπωση βάσει του είδους του επιβαλλόμενου φορτίου διακρίνεται σε **μονοαξονική** και **πολυαξονική**.

- Η μονοαξονική κόπωση περιλαμβάνει τις περιπτώσεις όπου το πλάτος ($L_{max} - L_{min}$) του παράγοντα φόρτισης, L , διατηρείται σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του ιστορικού φόρτισης καθώς και περιπτώσεις όπου το πλάτος του παράγοντα L μεταβάλλεται.
- Η πολυαξονική κόπωση κατηγοριοποιείται σε αναλογική και μη αναλογική. Η αναλογική κόπωση διακρίνεται σε σταθερού και μεταβαλλόμενου πλάτους. Συνθήκες αναλογικής κόπωσης είναι δυνατόν να απαντηθούν ακόμη και σε καταπονήσεις όπου εφαρμόζεται ένας παράγοντας κόπωσης, ο οποίος προκαλεί την ανάπτυξη πολυαξονικής εντατικής κατάστασης, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην περίπτωση ενός καμπτικού φορτίου που εφαρμόζεται στο άκρο δοκού και σε απόσταση από τον διαμήκη άξονά της, λειτουργώντας ταυτόχρονα και ως στρεπτικό φορτίο. Χαρακτηριστικό της αναλογικής κόπωσης είναι ότι οι παράγοντες φόρτισης, L_1, L_2, \dots, L_n (π.χ. στρεπτικός και εφελκυστικός – θλιπτικός) λαμβάνουν ταυτόχρονα τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές τους με αποτέλεσμα τη διατήρηση του προσανατολισμού των επιπέδων των κύριων τάσεων και παραμορφώσεων.

Η μη αναλογική κόπωση διακρίνεται σε **ταυτόχρονη** και **ασύγχρονη**.

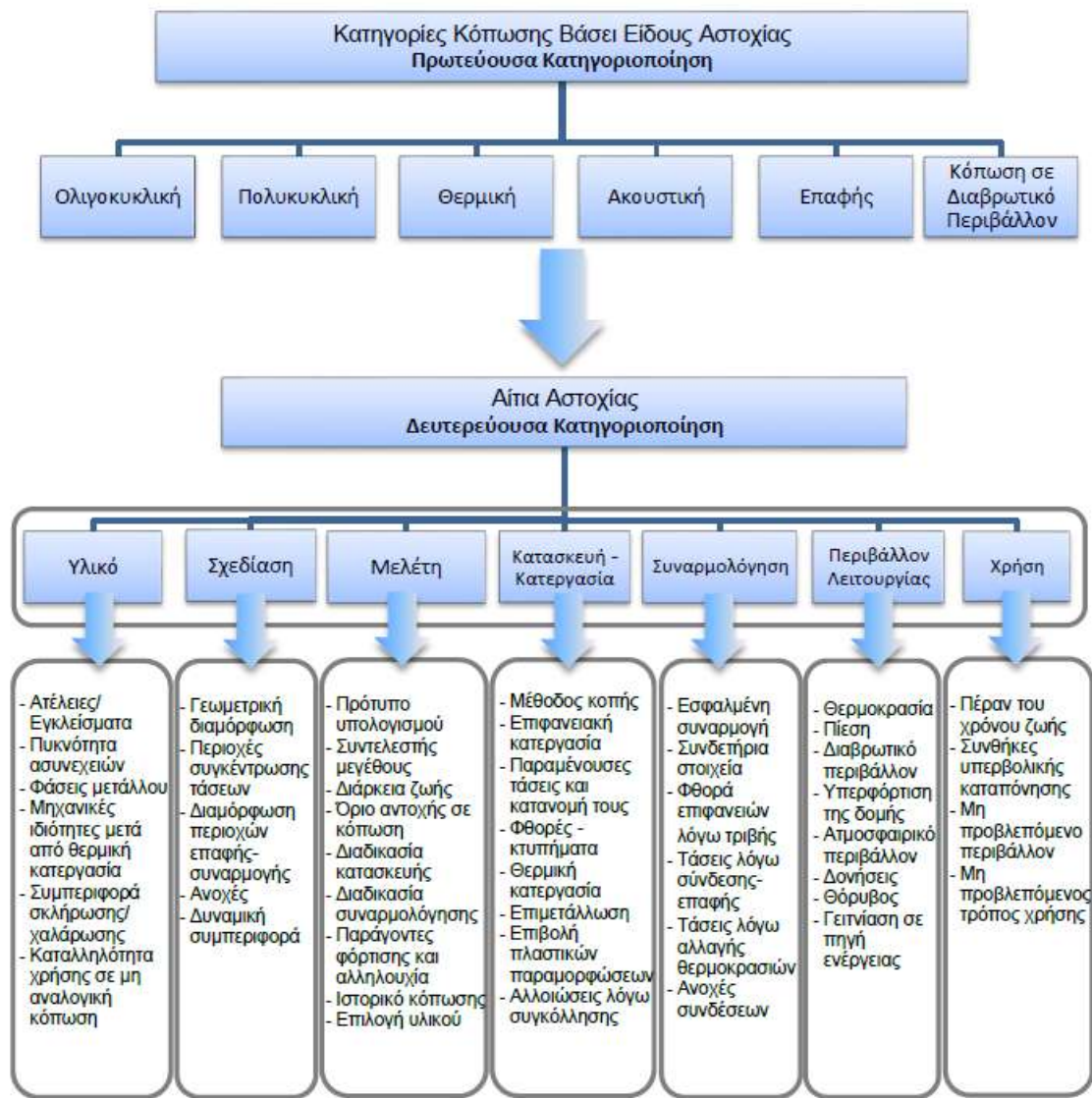
- Η ταυτόχρονη μη αναλογική κόπωση αποτελεί την απλούστερη μορφή μη αναλογικής κόπωσης, όπου εφαρμόζεται ένας σταθερός και ένας χρονικά μεταβαλλόμενος παράγοντας φόρτισης. Συνθήκες ταυτόχρονης μη αναλογικής κόπωσης απαντώνται επί παραδείγματι σε τροχήλατες δεξαμενές υπό σταθερή πίεση και υπό χρονικά μεταβαλλόμενα δυναμικά φορτία, λόγω της κίνησης του οχήματος μεταφοράς.
- Η ασύγχρονη μη αναλογική κόπωση περιλαμβάνει περιπτώσεις, όπου οι παράγοντες κόπωσης έχουν την ίδια συχνότητα, αλλά επιβάλλονται με διαφορά φάσης, περιπτώσεις όπου οι παράγοντες κόπωσης εφαρμόζονται με διαφορετικές συχνότητες, και τη γενικότερη περίπτωση πολυαξονικής κόπωσης, όπου οι επιβαλλόμενοι παράγοντες κόπωσης δεν είναι δυνατόν να περιγραφούν ως κυματοειδείς συναρτήσεις σταθερού η μεταβαλλόμενου πλάτους, αλλά οι τιμές τους μεταβάλλονται τυχαία συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 1.1: Κατηγορίες κόπωσης βάσει του είδους φόρτισης.

Κύριο στοιχείο διαφοροποίησης της μη αναλογικής από την αναλογική κόπωση είναι η αλλαγή του προσανατολισμού των επιπέδων κύριων τάσεων και παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου που παρατηρείται στην μη αναλογική κόπωση. Η εν λόγω στροφή των κύριων επιπέδων είναι ο λόγος για τον οποίο η χρήση της ισοδύναμης τάσης και παραμόρφωσης ως παραμέτρων υπολογισμού της διάρκειας ζωής σε περιπτώσεις μη αναλογικής κόπωσης οδηγεί σε υπερεκτιμήσεις, γεγονός που έχει επαληθευτεί θεωρητικά και πειραματικά.

Αντίθετα, η ισοδύναμη τάση και παραμόρφωση αποτελούν παραμέτρους υπολογισμού της διάρκειας ζωής σε αναλογική κόπωση με αξιόπιστα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 1.2: Κατηγοριοποίηση της κόπωσης βάσει είδους και αιτίας αστοχίας.

Στο διάγραμμα 1.2 απεικονίζονται οι κατηγορίες κόπωσης βάσει του είδους αστοχίας. Παράβλεψη κατά τον υπολογισμό της αντοχής σε κόπωση έστω και ενός εκ των αιτιών αστοχίας της δευτερεύουσας κατηγοριοποίησης του διαγράμματος 1.2, δύναται να οδηγήσει σε πρώιμη αστοχία.

Ως εκ τούτου, για την επίτευξη της απαιτούμενης αντοχής των κατασκευών σε κόπωση δεν αρκεί μόνον ο υπολογισμός των φορτιοκύκλων μέχρι την αστοχία βάσει αριθμητικών αναλύσεων, αναλυτικών μεθόδων και πειραματικών μελετών σε πρότυπες εργαστηριακές συνθήκες, αλλά και αναγωγή των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της κατασκευής, που επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των παραμέτρων της δευτερεύουσας κατηγοριοποίησης του σχήματος 2 και την επίδρασή τους στη συνολική διάρκεια ζωής.

Για τον λόγο αυτό πολύ σημαντικό ποσοστό επί του συνολικού χρόνου και κόστους ανάπτυξης μηχανολογικών κατασκευών καταλαμβάνει η ανάπτυξη και δοκιμή πρωτοτύπου. Παρότι η αστοχία των κατασκευών σε κόπωση εξαρτάται από ένα μεγάλο πλήθος παραμέτρων, όπως αυτές συνοψίζονται στα διαγράμματα 2.1 και 2.2, η μελέτη της αντοχής των κατασκευών σε κόπωση βασίζεται στην γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών σε κόπωση. Λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των δυνατών ειδών και αιτιών αστοχίας σε κόπωση εξασφαλίζεται η ελάχιστη δυνατή απόκλιση μεταξύ της υπολογισθείσας αντοχής με εφαρμογή αριθμητικών και αναλυτικών μεθόδων και της πραγματικής διάρκειας ζωής των κατασκευών σε συνθήκες λειτουργίας.

1.4 Η σημασία της κόπωσης στην ανάπτυξη μηχανολογικών συστημάτων

Κατά τη χρονική περίοδο όπου η γνώση στον τομέα της κόπωσης ήταν ακόμη περιορισμένη (19ος έως αρχές 20ου αιώνα), το στάδιο της θεωρητικής μελέτης της αντοχής σε κόπωση δεν υφίστατο ως διαδικασία κατά την ανάπτυξη μηχανολογικών συστημάτων. Αρχικά, οι μελέτες κόπωσης αφορούσαν στην παρατήρηση της συμπεριφοράς της κατασκευής σε συνθήκες λειτουργίας με σκοπό τον εντοπισμό των αποτελεσμάτων της κόπωσης στη δομή, όπου ήταν εφικτό, και την έγκαιρη αντικατάσταση των δομικών τμημάτων πριν από την αστοχία. Αυτό είχε πολύ συχνά ως αποτέλεσμα την απαίτηση για αλλαγές στην αρχική σχεδίαση ή/και στα χρησιμοποιούμενα υλικά, με συνέπεια την δραματική αύξηση του τελικού κόστους μέχρι την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου μηχανολογικού συστήματος, αλλά και του χρόνου για την επίτευξη της διαμόρφωσης που θα εξασφάλιζε την επιθυμητή διάρκεια ζωής σε κόπωση.

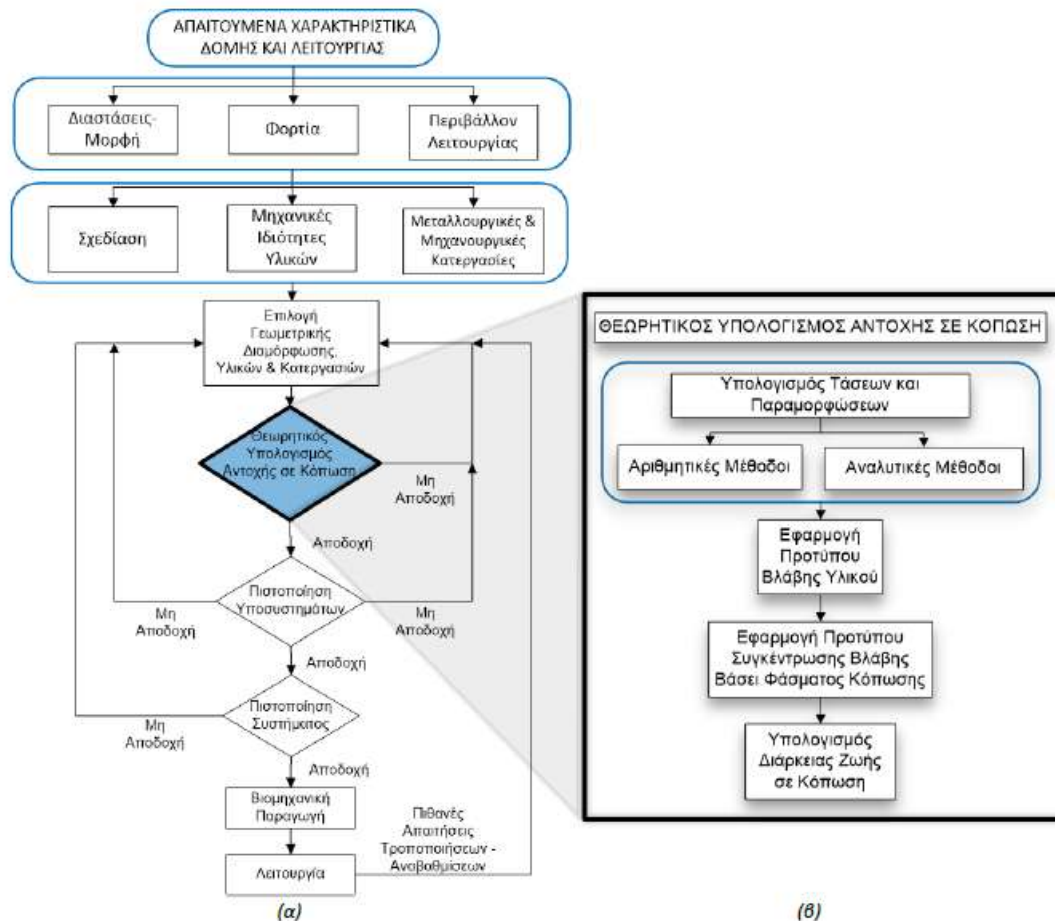
Με την πάροδο των ετών και τη σταδιακή απόκτηση γνώσης στο πεδίο της κόπωσης, κατέστη δυνατή η ανάπτυξη θεωρητικών μεθόδων για τον υπολογισμό της αντοχής των μηχανολογικών συστημάτων σε κόπωση, πριν από την κατασκευή τους. Σήμερα το στάδιο θεωρητικής μελέτης της αντοχής κατασκευών σε κόπωση αποτελεί διαδικασία κομβικής σημασίας για την εξέλιξη του χρονοδιαγράμματος ανάπτυξης μηχανολογικών συστημάτων (διάγραμμα 1. 3.α), αφού το πέρας του σηματοδοτεί την αποδοχή της σχεδίασης και τον καθορισμό των υλικών και των μεταλλουργικών και μηχανουργικών κατεργασιών, αλλά και την έναρξη κατασκευής και συναρμολόγησης δομικών τμημάτων με σκοπό την κατασκευή και δοκιμή υποσυγκροτημάτων της κατασκευής και του πρωτοτύπου, πριν την έναρξη μαζικής παραγωγής.

Κατά το στάδιο της θεωρητικής μελέτης αντοχής των κατασκευών σε κόπωση απαιτείται γνώση του πεδίου των τάσεων και παραμορφώσεων σε όλο το εύρος της δομής (διάγραμμα 1. 3.β).

Για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων εφαρμόζονται αριθμητικές και αναλυτικές μέθοδοι. Λόγω της πολυπλοκότητας των υπό μελέτη δομών και του πολύ

μεγάλου αριθμού φορτιοκύκλων, η εκτέλεση αριθμητικών αναλύσεων σε όλο το εύρος του ιστορικού κόπωσης καθίσταται, για τις υπάρχουσες δυνατότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών, ιδιαίτερα χρονοβόρος, εάν όχι απαγορευτική, εάν ληφθεί υπόψη το περιορισμένο χρονικό πλαίσιο των προγραμμάτων ανάπτυξης μηχανολογικών συστημάτων. Για τον λόγο αυτό, τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη αξιόπιστων αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού τάσεων και παραμορφώσεων και διάρκειας ζωής των κατασκευών σε κόπωση, με αποτέλεσμα, σήμερα, η εφαρμογή αυτών των μεθόδων να συνδράμει σημαντικά στη μείωση της χρονικής διάρκειας του σταδίου μελέτης της αντοχής των κατασκευών σε κόπωση, αλλά ακόμη πιο ουσιαστικά στη μείωση του κόστους πειραματικής μελέτης της αντοχής της εκάστοτε κατασκευής και υποσυγκροτημάτων αυτής. Αυτό συμβαίνει διότι η εφαρμογή των εν λόγω αναλυτικών μεθόδων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των απαιτούμενων πειραμάτων πιστοποίησης, αφού παρέχει ποιοτική και ποσοτική πληροφορία, πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας, αναφορικά με τις περιοχές όπου εντοπίζονται οι δυσμενέστερες συνθήκες κόπωσης σε κατάσταση λειτουργίας.

Μετά τον αναλυτικό ή αριθμητικό υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων τα αποτελέσματα εισάγονται σε μαθηματικό πρότυπο υπολογισμού βλάβης υλικού. Ο θεωρητικός υπολογισμός της διάρκειας ζωής σε κόπωση επιτυγχάνεται με συνδυασμό του υπόψη προτύπου βλάβης υλικού με αλγόριθμο συγκέντρωσης βλάβης για όλο το ιστορικό κόπωσης, που αφορά σε διάφορα σενάρια λειτουργίας της κατασκευής, αναφορικά με τα επιβαλλόμενα φορτία και το περιβάλλον λειτουργίας.



Διάγραμμα 1.3: Λογικό διάγραμμα της διαδικασίας ανάπτυξης μηχανολογικών συστημάτων (α), και επιμέρους στάδια του θεωρητικού υπολογισμού αντοχής των κατασκευών σε κόπωση (β).

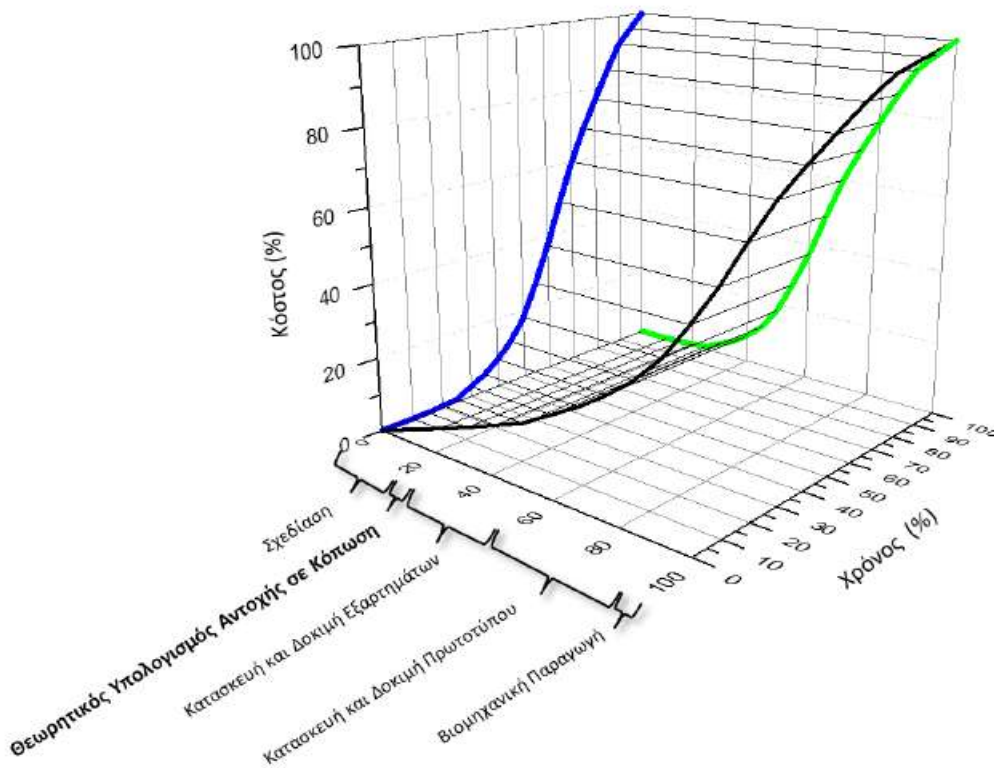
Στο ποιοτικό διάγραμμα 1.4, απεικονίζεται η σχέση μεταξύ χρόνου και κόστους (ως ποσοστά επί τοις εκατό επί του αντίστοιχου συνόλου), για τα διάφορα στάδια προγραμμάτων ανάπτυξης μηχανολογικών συστημάτων.

Συγκεκριμένα με μπλε χρώμα απεικονίζεται η καμπύλη κόστους – χρόνου ανάπτυξης μηχανολογικού συστήματος, ενώ με πράσινο χρώμα, η καμπύλη κόστους – φάσης υλοποίησης. Η καμπύλη μαύρου χρώματος είναι η καμπύλη στο χώρο των τριών αξόνων σταδίου ανάπτυξης – χρόνου – κόστους.

Συνεπώς στο εν λόγω διάγραμμα αποδίδεται η σημασία του σταδίου θεωρητικού υπολογισμού της αντοχής των κατασκευών σε κόπωση στο χρόνο και το κόστος υλοποίησης του προγράμματος. Ειδικότερα, αν και η διάρκειά του εν λόγω σταδίου δεν ξεπερνά το 5% του συνολικού χρόνου ανάπτυξης, φαίνεται (βλ. καμπύλη πράσινου χρώματος) ότι αποτελεί το κομβικό σημείο πέραν του οποίου το κόστος ανάπτυξης αυξάνεται εκθετικά με το χρόνο.

Βάσει των ανωτέρω και λαμβάνοντας υπόψη ότι σφάλματα κατά το στάδιο υπολογισμού της αντοχής των κατασκευών σε κόπωση μπορεί να εντοπισθούν ακόμη και μετά το πέρας του

προγράμματος ανάπτυξης ενός μηχανολογικού συστήματος, ήτοι αφότου ξεκινήσει η μαζική παραγωγή του, προκύπτει ότι εσφαλμένος υπολογισμός της αντοχής των κατασκευών σε κόπωση (που μεταφράζεται ως πρώιμη αστοχία λόγω κόπωσης), πέραν των δυσμενών συνεπειών στον άνθρωπο και το περιβάλλον, επιφέρει καθυστέρηση στον αρχικό προγραμματισμό υλοποίησης του προγράμματος και σημαντική αύξηση του κόστους ανάπτυξης του συστήματος σε σχέση με το κόστος που θα προέκυπτε απουσία σφάλματος.



Διάγραμμα 1.4: Στάδια ανάπτυξης μηχανολογικών συστημάτων συναρτήσει χρόνου και κόστους.

Σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος κατά τη θεωρητική μελέτη της αντοχής των κατασκευών σε κόπωση, αποτελούν οι περιοχές συγκέντρωσης τάσεων καθώς και περιοχές όπου υφίσταται πολυτονική εντατική κατάσταση.

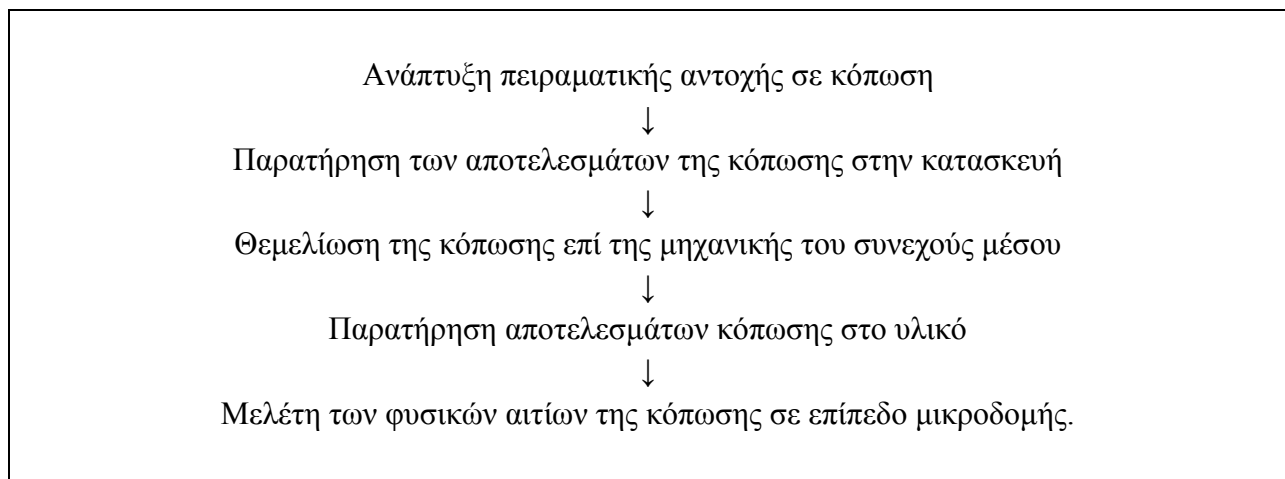
Προτεινόμενες αλλαγές στη σχεδίαση που προκύπτουν κατά την θεωρητική μελέτη αντοχής των κατασκευών σε κόπωση μπορεί να αφορούν για παράδειγμα στη διαμόρφωση των εγκοπών και των σημείων ασυνέχειας και στη διάταξη-συναρμογή των διαφόρων δομικών τμημάτων με σκοπό την βέλτιστη κατανομή των εσωτερικών δυνάμεων και ροπών προς αποφυγή συνθηκών πολυαξονικής κόπωσης, όπου καθίσταται δυνατόν.

Επίσης κατά το στάδιο της θεωρητικής μελέτης της αντοχής των κατασκευών σε κόπωση καθορίζεται το σύνολο των προς χρήση υλικών ανάλογα με την περιοχή της δομής, το εύρος και το είδος των αναπτυσσόμενων τάσεων, την πιθανή παρουσία θερμικού πεδίου, ή/και

διαβρωτικού περιβάλλοντος και το είδος των επαφών μεταξύ των δομικών τμημάτων, παράμετροι που επηρεάζουν το συνολικό κόστος κατασκευής.

1.5 Θεώρηση της κόπωσης βάσει κλίμακας μεγέθους

Αν και η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών σε κόπωση αποτελεί το θεμέλιο για τη μελέτη της αντοχής των κατασκευών σε κόπωση, η επιστημονική προσέγγιση του προβλήματος της κόπωσης, όπως αναλύθηκε στην ιστορική αναδρομή της εισαγωγής, ακολούθησε αντίστροφη πορεία:



Παρά ταύτα, από τα πρώτα έτη συστηματικής μελέτης της κόπωσης έγινε αντιληπτό ότι η αστοχία των κατασκευών λόγω κόπωσης εξαρτάται από τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών και ότι η αντοχή των υλικών σε κόπωση είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε επίπεδο μικροδομής και εντοπίζονται τόσο σε κλίμακα μεγέθους κόκκου υλικού όσο και διατομικών αποστάσεων.

Στο σχήμα 5 απεικονίζονται τα επίπεδα μελέτης της κόπωσης βάσει κλίμακας μεγέθους, οι αντίστοιχοι τρόποι θεώρησης και η αναγωγή του προβλήματος της κόπωσης από φαινομενολογική σε φυσική βάση μειούμενου του μεγέθους της υπό μελέτη δομής. Ιστορικά, η μελέτη της κόπωσης ξεκινά από κλίμακα μεγέθους κατασκευής, που εντοπίζεται στην κορυφή της ανάστροφης πυραμίδας του σχήματος 5 και προχωρά, με την πάροδο του χρόνου, σε ολοένα μικρότερες κλίμακες μεγέθους ακολουθώντας τα τεχνολογικά βήματα ανάπτυξης πειραματικών – μετρητικών διατάξεων.

Συνδετήριο κόμβος μεταξύ των δύο θεωρήσεων της κόπωσης, αλλά και της μηχανικής των υλικών γενικότερα, είναι η μηχανική του συνεχούς μέσου. Επειδή οι πρώτες μελέτες της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών σε κόπωση βασίστηκαν αρχικά σε αποτελέσματα πειραμάτων δύναμης – μετατόπισης, και έπειτα σε δεδομένα τάσης – παραμόρφωσης στο υλικό

θεωρούμενο ως συνεχές μέσο, στη συνέχεια, η γνώση περί κόπωσης αποκτήθηκε αρχικά σε φαινομενολογική βάση. Σήμερα, στο πλαίσιο της μηχανικής του συνεχούς μέσου, η υπάρχουσα γνώση επιτρέπει:

- Τον θεωρητικό υπολογισμό της αντοχής των κατασκευών σε κόπωση με ικανοποιητική ακρίβεια για τις περισσότερες των περιπτώσεων κόπωσης βάσει είδους φόρτισης (σχήμα 1).
- Τον εντοπισμό των περιοχών ανάπτυξης ρωγμών τον προσανατολισμό τους και το ρυθμό διάδοσης αυτών μέχρι τη θραύση.

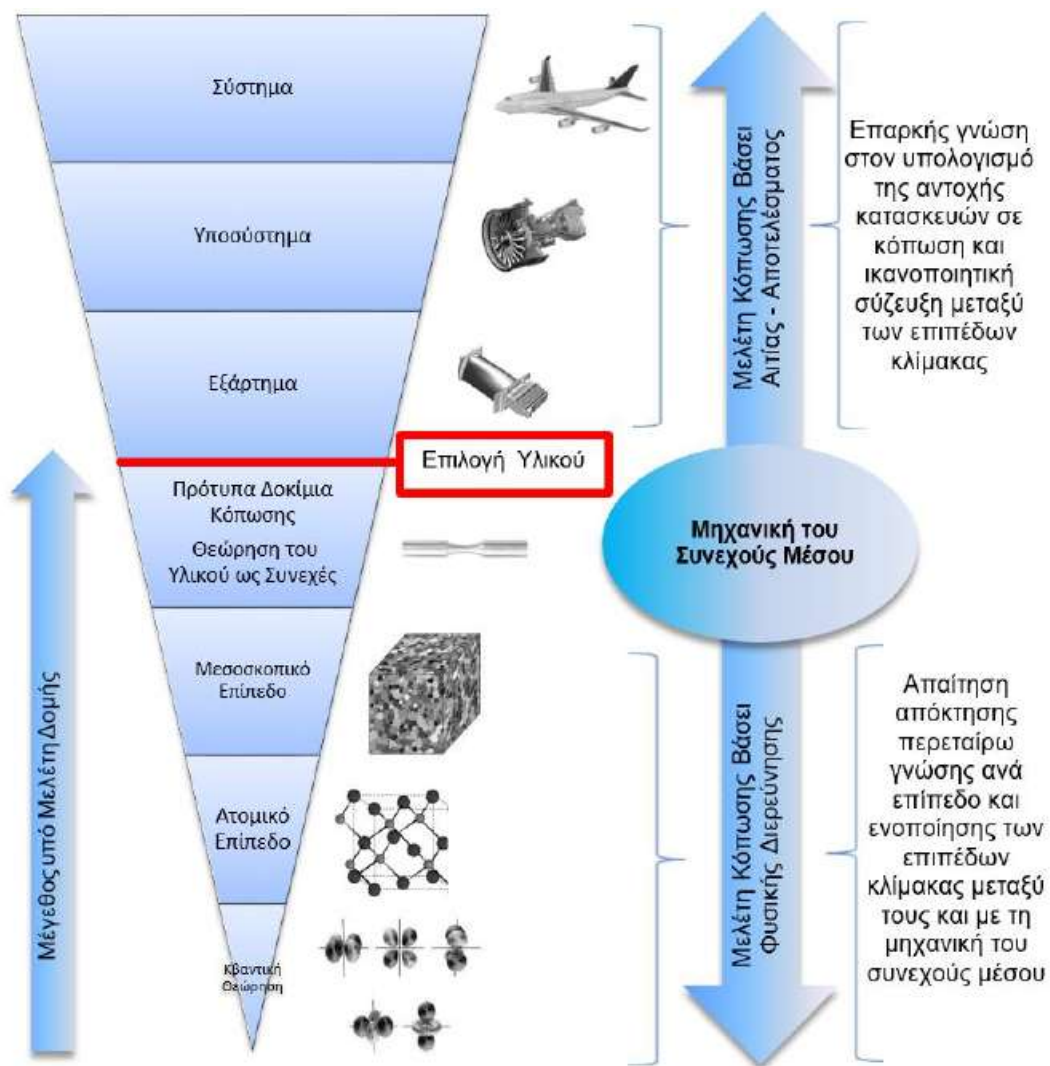
Στον αντίποδα, αναφορικά με τη θεώρηση της κόπωσης σε φυσική βάση, όσο ελαττώνεται το μήκος αναφοράς στο οποίο μελετώνται τα φαινόμενα που σχετίζονται με την κόπωση των υλικών, τόσο περιορίζεται το εύρος της θεωρητικής και πειραματικής γνώσης. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στο γεγονός ότι η παρατήρηση, καταγραφή και πειραματική μελέτη πολλών εκ των φαινομένων που εντοπίζονται σε επίπεδο μικροδομής κατέστη τεχνολογικά δυνατή μόλις πριν από μερικές δεκαετίες, αλλά και διότι, όσο ελαττώνεται το μήκος αναφοράς στο οποίο μελετάται η κόπωση, τόσο αυξάνεται ο αριθμός των φυσικών παραμέτρων που υπεισέρχονται στην περιγραφή του φαινομένου της κόπωσης, καθώς και ο αριθμός και το είδος των μεταξυ τους αλληλεπιδράσεων.

Πέραν των ανωτέρω, στο διάγραμμα 1.5 επισημαίνεται ο σταθμός της επιλογής του υλικού, για τον καθορισμό του οποίου λαμβάνονται υπόψη το είδος της επιβαλλόμενης φόρτισης (διάγραμμα 1. 1) καθώς και τα πιθανά αίτια αστοχίας λόγω κόπωσης (διάγραμμα 1. 2). Στο παρελθόν, η επιλογή του υλικού προέκυπτε ως αποτέλεσμα μελέτης της αντοχής σε κόπωση μόνο σε φαινομενολογική βάση με εφαρμογή αριθμητικών, αναλυτικών και πειραματικών μεθόδων επί των αρχών της μηχανικής του συνεχούς μέσου. Σήμερα η εφαρμογή μεθόδων θεώρησης της κόπωσης των υλικών σε φυσική βάση, δηλαδή σε κλίμακα μεγέθους μικροδομής - μικρομηχανική των υλικών- συνδράμει ολοένα και περισσότερο στην διαδικασία επιλογής του υλικού.

Τα αποτελέσματα αυτής της συνδρομής είναι αξιοσημείωτα αφού χάρη στην διακριτική ικανότητα των μεθόδων που εδράζονται σε φυσική βάση, είναι πλέον δυνατόν να καθοριστούν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά της μικροδομής προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη δυνατή αντοχή του υλικού για δεδομένες συνθήκες κόπωσης. Τέτοια χαρακτηριστικά της μικροδομής είναι το μέγεθος και ο προσανατολισμός των κόκκων του υλικού, το είδος και η περιεκτικότητα του στερεού διαλύματος σε φάσεις υλικού και η πυκνότητα και διάταξη των ατελειών. Επίσης η μελέτη των φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με την κόπωση σε επίπεδο μικροδομής κατέστησε δυνατό τον προσδιορισμό του μεγέθους και προσανατολισμού των επιβαλλόμενων πλαστικών παραμορφώσεων κατά την μεταλλουργική κατεργασία, και των τάσεων κατά την εφαρμογή μεθόδων επιβολής προέντασης σε υλικά, ανάλογα με την εντατική

κατάσταση που αναπτύσσεται σε συνθήκες λειτουργίας και συνέδραμε στη απόκτηση γνώσης για την ποιοτική και ποσοτική επίδραση των ανωτέρω διεργασιών στην αντοχή των υλικών σε κόπωση.

Επίσης η γνώση της φύσης των πραγμάτων σε επίπεδο μικροδομής αναφορικά με την κόπωση, εισήγαγε προκλήσεις στην επιστήμη της μεταλλουργίας για ανάπτυξη υλικών με ολοένα βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την ανάπτυξη μονοκρυσταλλικών υλικών (mono-crystals) τη δεκαετία του 1980 τα οποία πλέον χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την κατασκευή πτερυγίων αεροστροβίλων αεροσκαφών βελτιώνοντας σημαντικά την αξιοπιστία και την απόδοση λειτουργίας τους.



Διάγραμμα 1.5: Επίπεδα μελέτης της κόπωσης βάσει κλίμακας μεγέθους και αντίστοιχοι τρόποι θεώρησης.

Αναφορικά με τις μεθόδους διερεύνησης της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών σε κόπωση που εδράζονται στη μελέτη των αντίστοιχων φυσικών φαινομένων σε επίπεδο μικροδομής (κάτω

μισό ανάστροφης πυραμίδας σχήματος S), απαιτείται σύγκλιση μεταξύ των επιπέδων κλίμακας καθώς και μεταξύ αυτών με τη μηχανική του συνεχούς μέσου.

Αυτό προκύπτει ως αποτέλεσμα της απαίτησης για αναγωγή των υπολογισμών αντοχής των υλικών σε κόπωση από επίπεδο μικροδομής, σε αποτελέσματα των οποίων η αξιολόγηση είναι δυνατή σε φαινομενολογική βάση.

Βάσει αυτού του σκεπτικού η σημασία της μηχανικής του συνεχούς μέσου δεν απαξιώνεται με την εμβάθυνση επί των μεθόδων μελέτης της κόπωσης που έχουν φυσική βάση, ούτε είναι δυνατή η αντικατάστασή της από τις μεθόδους αυτές, αφού το μεγάλο μειονέκτημά τους είναι ότι αναφέρονται σε κλίμακα μεγέθους που δεν συνάδει με την κλίμακα μεγέθους των κατασκευών.

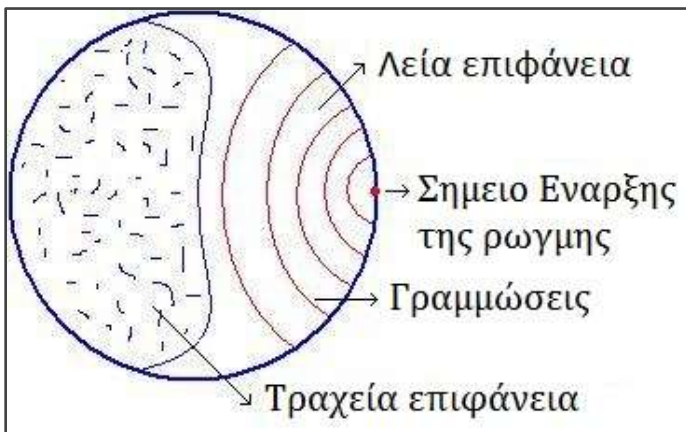
Ως εκ τούτου, λαμβάνοντας υπόψη τη στάθμη της τεχνικής στον τομέα της κόπωσης των υλικών και τις υπάρχουσες προοπτικές για βελτίωση, φαίνεται ότι η μηχανική του συνεχούς μέσου θα συνεχίσει να αποτελεί τον κόμβο που συνδέει τα πραγματικά γενεσιουργά αίτια της κόπωσης - φυσικά φαινόμενα που εντοπίζονται σε επίπεδο μικροδομής- με τα μακροσκοπικά - φαινομενολογικά παρατηρούμενα αιτιατά που αφορούν στην αντοχή των υλικών και των κατασκευών και γίνονται αντιληπτά με τις ανθρώπινες αισθήσεις.

Κεφάλαιο 2: Μελέτη του φαινομένου

2.Μελέτη του φαινομένου

Η κόπωση των μεταλλικών υλικών είναι ένας από τους πλέον σύνθετους μηχανισμούς αστοχίας, καθώς πραγματοποιείται χωρίς να εμφανίζει προειδοποιητικές ενδείξεις. Μία αστοχία λόγω κόπωσης μπορεί να αναγνωρισθεί, αφότου εκδηλωθεί, από ορισμένα χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης.

Μερικές επιφάνειες θραύσης από κόπωση φαίνονται στις φωτογραφίες **Εικ.2.1** **Εικ.2.2** **Εικ.2.3**. Ένα μεγάλο τμήμα της επιφάνειας θραύσης έχει λεία εμφάνιση, η οποία οφείλεται στην τριβή των επιφανειών του ρήγματος μεταξύ τους, καθώς αυτό προωθείται σταδιακά κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Αντίθετα, ένα μικρότερο τμήμα της επιφάνειας, το οποίο αντιστοιχεί στο τελικό στάδιο της θραύσης, έχει τραχεία εμφάνιση και οφείλεται στη γρήγορη τελική προώθηση του ρήγματος με όλκιμο τρόπο μέσα στο υλικό, καθώς η μειωμένη διατομή του υλικού που έχει απομείνει δεν μπορεί να αντέξει πλέον τα επιβαλλόμενα φορτία.



Εικ.2.1. Περιγραφή επιφάνειας θραύσης

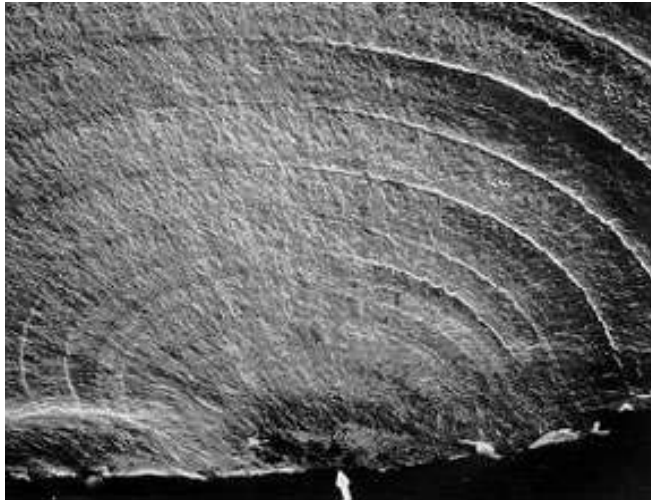


Εικ. 2.2 Παράδειγμα θραύσης σε άξονα



Εικ. 2.3 Παράδειγμα θραύσης σε δομικό στοιχείο

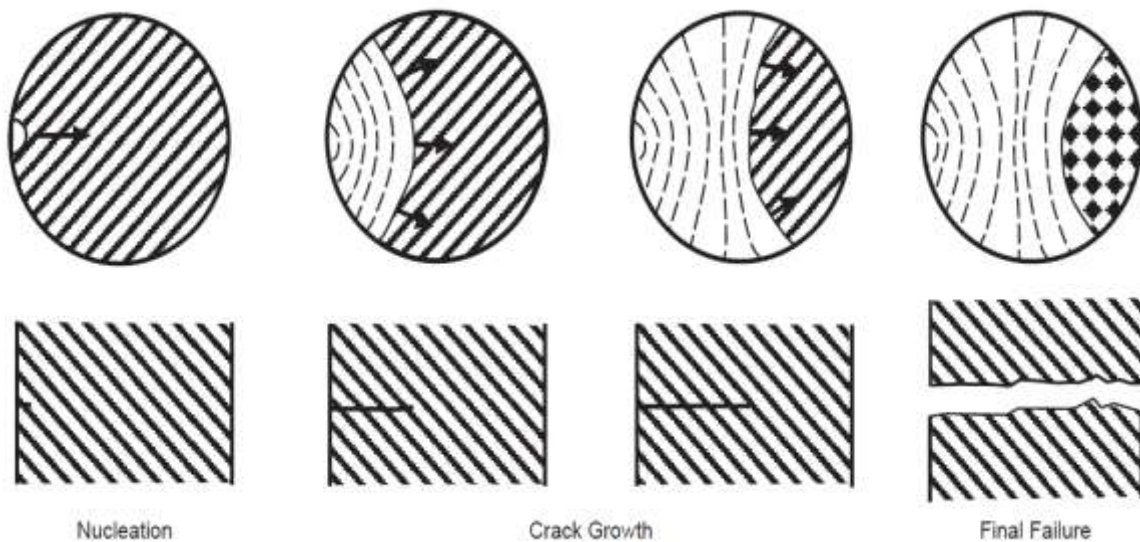
Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των επιφανειών αστοχίας από κόπωση είναι οι γραμμώσεις (striations) που δημιουργούνται σε αυτήν. Οι γραμμώσεις αυτές έχουν συνήθως σχήμα τόξων από ομόκεντρους κύκλους, το κέντρο των οποίων υποδεικνύει το σημείο όπου βρισκόταν το αρχικό ρήγμα. Η απόσταση της μίας γραμμώσης από την άλλη δίνει μία καλή εκτίμηση της ταχύτητας με την οποία προωθήθηκε το ρήγμα μέσα στο υλικό. Χαρακτηριστικές γραμμώσεις κόπωσης φαίνονται στις φωτογραφίες Εικ. 2.4 και Εικ.2.5 και Εικ.2.6



Εικ.2.4 Γραμμώσεις κόπωσης σε επιφάνεια θραύσης



Εικ.2.5 Γραμμώσεις κόπωσης σε επιφάνεια θραύσης



Εικ. 2.6 Διαμόρφωση της επιφάνειας κατά την εξέλιξη της ρωγμής

Υπάρχουν τρεις βασικοί παράγοντες που συνεργάζονται για να εμφανισθεί αστοχία από κόπωση:

- α) μία αρκετά υψηλή μέγιστη *εφελκυστική τάση*,
- β) μία αρκετά μεγάλη και επαναλαμβανόμενη *διακύμανση της τάσης* κατά τη λειτουργία και
- γ) ένας αρκετά μεγάλος αριθμός *κύκλων φόρτισης*, δηλαδή επαναλήψεων της δυναμικής καταπόνησης.

Εκτός από τους τρεις αυτούς βασικούς παράγοντες, η συμπεριφορά των υλικών σε κόπωση επηρεάζεται και από μία σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος, η μικροδομή του υλικού, ή ύπαρξη παραμενουσών εσωτερικών τάσεων στο υλικό. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η κόπωση των μεταλλικών υλικών δεν έχει εξηγηθεί πλήρως θεωρητικά και η ανάλυσή της βασίζεται σε μεγάλο βαθμό, ακόμη και σήμερα, σε πειραματικές και εμπειρικές παρατηρήσεις.

2.1 Κατηγορίες κύκλων φόρτισης

Το φαινόμενο της κόπωσης χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την **Πολυκυκλική** και την **Ολιγοκυκλική** κόπωση, ανάλογα το είδος των τάσεων και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης των καταπονήσεων που υφίσταται το υλικό.

2.1.1. Πολυκυκλική κόπωση - (High Cycle Fatigue – HCF)

Η πολυκυκλική κόπωση (high cycle fatigue) η οποία χαρακτηρίζεται από τον μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης που υφίσταται το υλικό μέχρι την αστοχία ($N > 10^4$), καθώς οι τιμές των τάσεων που ασκούνται είναι ελαστικές, με αποτέλεσμα το υλικό να μην υφίσταται πλαστικές παραμορφώσεις.

Η Πολυκυκλική κόπωση, μπορεί να εμφανιστεί για παράδειγμα σε περιστρεφόμενους άξονες κατά την λειτουργία τους, ή στα φτερά ενός αεροπλάνου.

2.1.2. Ολιγοκυκλική κόπωση - (Low Cycle Fatigue – LCF)

Η ολιγοκυκλική κόπωση (low cycle fatigue) η οποία εμφανίζεται στην περίπτωση που το υλικό δέχεται τάσεις μεγαλύτερες από το όριο διαρροής του, με αποτέλεσμα, σε κάθε κύκλο φόρτισης να υφίσταται ένα ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης. Έτσι, μειώνεται κατά πολύ ο αριθμός των κύκλων φόρτισης του υλικού μέχρι την αστοχία ($N < 10^4$).

Κλασικό παράδειγμα εκδήλωσης ολιγοκυκλικής κόπωσης, είναι η καταπόνηση που υφίσταται ο οπλισμός των κτηρίων κατά την διάρκεια ενός σεισμού.

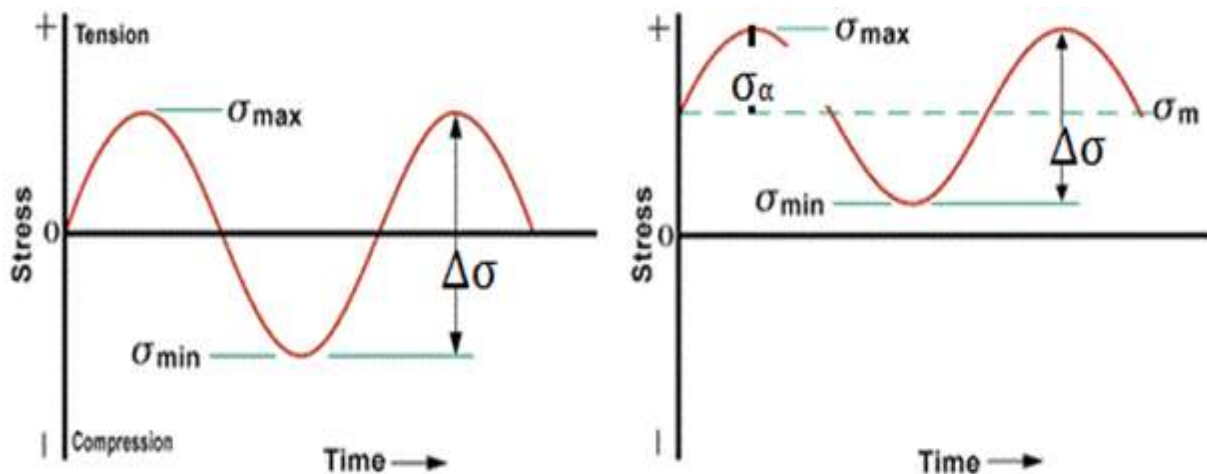
2.2 Δυναμικές Καταπονήσεις

Η καταπόνηση στις κατασκευές και στα επιμέρους εξαρτήματα δεν μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια για αυτόν τον λόγο διαχωρίζονται σε τύπους θεωρητικούς και τύπους που προσεγγίζουν την πραγματική λειτουργία τους.

Το διάγραμμα 2.1 δείχνει μερικούς χαρακτηριστικούς τύπους δυναμικών καταπονήσεων, δηλαδή μεταβολής της τάσης σε συνάρτηση των κύκλων φόρτισης.

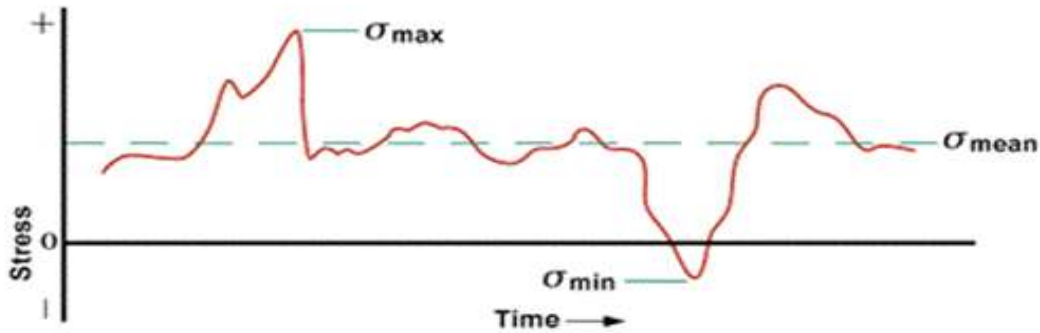
Ποιο συγκεκριμένα το διάγραμμα 2.1.α απεικονίζει μία πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση ημιτονοειδούς μορφής. Η ημιτονοειδής δυναμική καταπόνηση είναι μία εξιδανικευμένη κατάσταση, η οποία δεν συναντάται σε πραγματικές εφαρμογές. Ωστόσο, σε επίπεδο εργαστηριακού πειράματος, μπορεί εύκολα να επιτευχθεί με έναν άξονα ο οποίος περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα και καταπονείται από ένα σταθερό καμπτικό φορτίο. Σε αυτόν τον τύπο δυναμικής καταπόνησης η απόλυτη τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή $|\sigma_{max}| = |\sigma_{min}|$, όπου $\sigma_{max} > 0$ (εφελκυστική) και $\sigma_{min} < 0$ (θλιπτική).

Το διάγραμμα 2.1.β. απεικονίζει μία περιοδική δυναμική καταπόνηση στην οποία $|\sigma_{max}| \neq |\sigma_{min}|$. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα της του διαγράμματος 2.1.β τόσο η $\sigma_{max} > 0$ όσο και η $\sigma_{min} > 0$ (δηλ. εφελκυστικές). Ωστόσο, θα μπορούσε η σ_{max} να είναι εφελκυστική και η σ_{min} θλιπτική, ή ακόμη να είναι και οι δύο θλιπτικές.



Διάγραμμα 2.1.α και 2.1.β Παραδείγματα περιοδικών δυναμικών καταπονήσεων

Τέλος, το διάγραμμα 2.1.γ δείχνει μία ακανόνιστη ή τυχαία δυναμική καταπόνηση, η οποία δεν εμφανίζει καμία απολύτως περιοδικότητα. Στην πραγματικότητα τέτοιας μορφής δυναμικές καταπονήσεις εμφανίζονται στις περισσότερες εφαρμογές. Για παράδειγμα, το διάγραμμα 2.1.γ θα μπορούσε να αντιστοιχεί στη δυναμική καταπόνηση που δέχεται το φτερό ενός αεροσκάφους, όταν χτυπηθεί από ένα ξαφνικό και ισχυρό ρεύμα ανέμου.



Διάγραμμα 2.1.γ Παράδειγμα τυχαίας ή ακανόνιστης δυναμικής καταπόνησης

Μία δυναμική καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο “συνιστώσες”: μία μέση ή “σταθερή” τάση σ_m και μία μεταβαλλόμενη τάση σ_a . Επίσης, στην ανάλυση μιας δυναμικής καταπόνησης πρέπει να λάβουμε υπόψη και το εύρος της τάσης, $\Delta\sigma$. Όπως φαίνεται και στην Εικ. 3β, το εύρος τάσης ορίζεται σαν η αλγεβρική διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τάση:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1)$$

Αντίθετα, η μεταβαλλόμενη τάση, σ_a , ορίζεται σαν το μισό του εύρους $\Delta\sigma$, δηλαδή:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

Μέση τάση, σ_m , είναι ο αλγεβρικός μέσος όρος της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης του κύκλου φόρτισης:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3)$$

Επίσης, πολύ συχνά στην ανάλυση προβλημάτων δυναμικών καταπονήσεων και κόπωσης χρησιμοποιούνται δύο ακόμη μεγέθη. Το ένα είναι η αναλογία τάσεων (stress ratio), η οποία ορίζεται ως εξής:

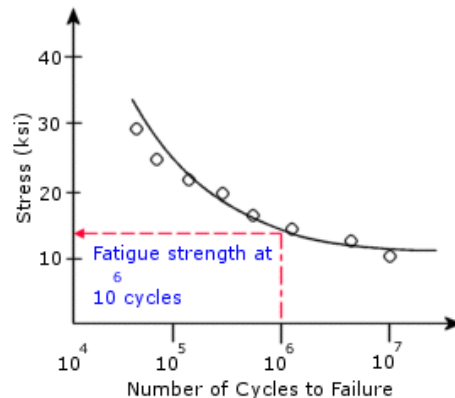
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (4)$$

Τέλος, η αναλογία εύρους τάσεων (amplitude ratio), ορίζεται ως εξής:

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \quad (5)$$

2.3 Καμπύλες S – N (καμπύλες Wöhler)

Η βασική μορφή με την οποία υπάρχουν διαθέσιμα στη βιβλιογραφία πειραματικά δεδομένα, σχετικά με την συμπεριφορά μεταλλικών υλικών σε κόπωση, είναι οι καμπύλες $S - N$ ή, όπως είναι πιο γνωστές, οι καμπύλες Wöhler (Διαγρ.2.2.). Οι καμπύλες αυτές σχεδιάζονται σε διαγράμματα που στον κατακόρυφο άξονα έχουν ένα μέγεθος “S” σχετιζόμενο με την τάση (συνηθέστερα κάποιο από τα σ_a , σ_{max} ή σ_{min}), ενώ στον οριζόντιο άξονα δείχνουν τον αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση, δηλαδή την διάρκεια ζωής σε κόπωση N_f , του υλικού. Ο άξονας του αριθμού κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση εκφράζεται σε λογαριθμική κλίμακα.



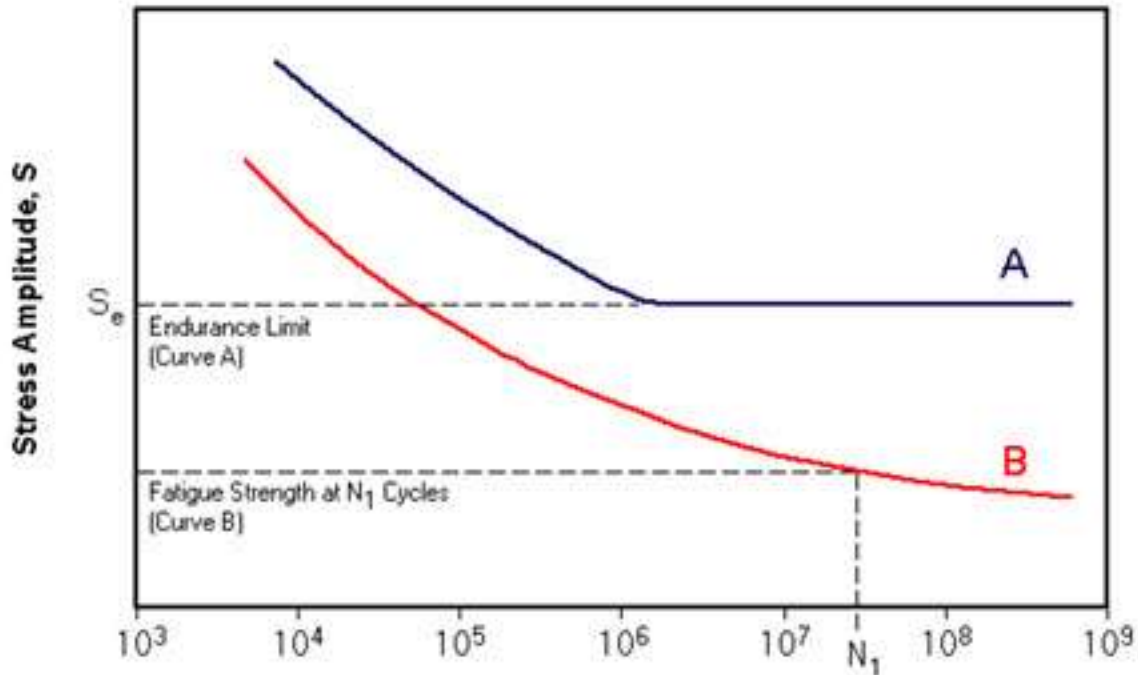
Διάγραμμα 2.2: Τυπικό διάγραμμα S-N ή διάγραμμα Wohler

Κάθε καμπύλη $S - N$ ενός υλικού ισχύει για την συγκεκριμένη τιμή μέσης τάσης (σ_m) και αναλογίας τάσεων (R) στην οποία έχουν διεξαχθεί οι αντίστοιχες δοκιμές κόπωσης. Εάν για το ίδιο υλικό πραγματοποιηθούν δοκιμές κόπωσης με διαφορετική τιμή σ_m ή/και R , η καμπύλη $S - N$ που θα προκύψει δεν θα είναι ίδια με την προηγούμενη.

Συνήθως, οι περισσότερες καμπύλες $S - N$ των υλικών προέρχονται από δοκιμές περιστρεφόμενου προβόλου, όπου $\sigma_m = 0$. Ωστόσο, επειδή στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές ισχύει ότι $\sigma_m \neq 0$, σε επόμενη παράγραφο θα εξετάσουμε ποιες διαφορές προκύπτουν στην περίπτωση αυτή. Ένα τυπικό διάγραμμα αυτού του είδους φαίνεται στο διάγραμμα 2.3, στο οποίο υπάρχουν δύο καμπύλες $S-N$: μία που είναι χαρακτηριστική για σιδηρούχα κράματα (χάλυβες) και μία για μη σιδηρούχα κράματα (π.χ. κράματα αλουμινίου).

Αξίζει να προσέξει κανείς ότι οι καμπύλες $S-N$ αναφέρονται σε θραύση λόγω κόπωσης μετά από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης, δηλαδή για $N_f > 10^4$ κύκλους. Στις περιπτώσεις αυτές οι τάσεις σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι ελαστικές, με αποτέλεσμα μακροσκοπικά να μην προκαλείται πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Η κόπωση αυτού του είδους ονομάζεται *πολυκυκλική κόπωση* (high cycle fatigue – HCF).

Όταν οι εφαρμοζόμενες τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού, με συνέπεια αυτό σε κάθε κύκλο φόρτισης να υφίσταται ένα ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, τότε η διάρκεια ζωής σε κόπωση μειώνεται σημαντικά ($N_f < 10^4$ κύκλοι). Επειδή στις περιπτώσεις αυτές είναι δύσκολο να εκφραστεί η δυναμική καταπόνηση σε όρους τάσης, οι δοκιμές κόπωσης διεξάγονται έτσι, ώστε σε κάθε κύκλο φόρτισης να προσδίδεται στο υλικό ένα προκαθορισμένο ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, παρά μία προκαθορισμένη μεταβολή τάσης. Αυτό το είδος κόπωσης ονομάζεται *ολιγοκυκλική κόπωση* (low cycle fatigue – LCF), όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο.



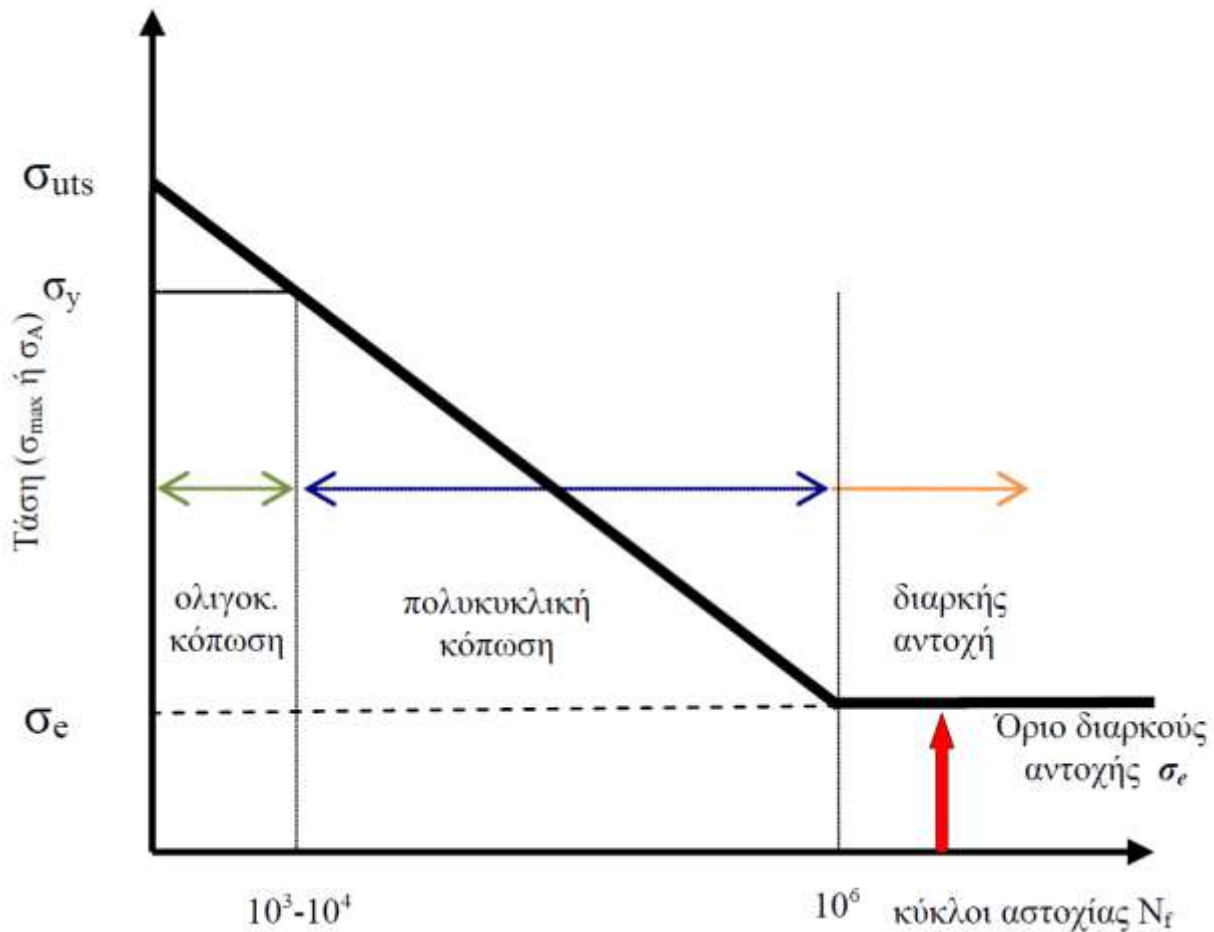
Διάγραμμα 2.3 : Καμπύλες Wöhler για σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα
A:1045 Χάλυβας B:2014-T6 Κράμα αλουμινίου

Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι, η διάρκεια ζωής σε κόπωση (δηλ. ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση) αυξάνεται όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση. Μία δεύτερη παρατήρηση έχει να κάνει με τη μορφή των καμπυλών. Σε μεταλλικά υλικά μεγάλης πρακτικής σημασίας, όπως οι χάλυβες και το τιτάνιο, υπάρχει μία χαρακτηριστική τιμή τάσης (σ_e) κάτω από την οποία η καμπύλη γίνεται ευθεία. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη από σ_e , τότε ουσιαστικά το υλικό δεν θα αστοχήσει από κόπωση. Η τάση σε ονομάζεται *όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση* (endurance limit).

Η συμπεριφορά αυτή δεν εμφανίζεται σε όλα τα μεταλλικά υλικά. Τα περισσότερα μη σιδηρούχα κράματα, όπως τα κράματα αλουμινίου, μαγνησίου, χαλκού, κ.α., δεν εμφανίζουν όριο διαρκούς αντοχής. Αντίθετα το παράδειγμα του κράματος αλουμινίου του διαγράμματος 2.3 είναι χαρακτηριστικό και οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα κράματα με τη συγκεκριμένη συμπεριφορά πάντοτε έχουν μία πεπερασμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση, ανεξάρτητα με το μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης.

Για παράδειγμα, το κράμα αλουμινίου του διαγράμματος 2.3 κάποια στιγμή, έστω και μετά από πάρα πολλούς κύκλους φόρτισης, θα υποστεί θραύση λόγω κόπωσης, ακόμα και για πολύ μικρού μεγέθους εναλλασσόμενες τάσεις. Στις περιπτώσεις αυτές, για να μπορεί να ορισθεί μία τάση σαν αντοχή του υλικού σε κόπωση και να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη κατασκευών, έχει καθιερωθεί η χρήση της *συμβατικής αντοχής σε κόπωση* (fatigue strength).

Σε μια καμπύλη αντοχής σε κόπωση διακρίνονται τρεις ζώνες :



Διάγραμμα 2.4: Ζώνες στην καμπύλη Wohler

Ζώνη ολιγοκυκλικής κόπωσης:

Στην ζώνη ολιγοκυκλικής κόπωσης, η διάρκεια ζωής του δοκιμίου (αριθμός επαναλήψεων μέχρι την θραύση) είναι σύντομη ($N < 10^4$ κύκλοι). Στην ζώνη αυτή, η τάση που ασκείται έχει τιμή μεγαλύτερη του ορίου διαρροής του υλικού, με αποτέλεσμα σε κάθε κύκλο φόρτισης αυτό να υφίσταται ένα ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης.

Ζώνη πολυκυκλικής κόπωσης:

Στην ζώνη της πολυκυκλικής φόρτισης, οι τιμές της τάσης ελαττώνονται (σε τιμές μικρότερες του ορίου διαρροής του υλικού), με αποτέλεσμα το δοκίμιο να μην υφίσταται πλαστικές παραμορφώσεις, παρά μόνο ελαστικές. Έτσι, ο αριθμός των επαναλήψεων ως την θραύση αυξάνεται (συνήθως 10^6 με 10^7 κύκλους φόρτισης).

Ζώνη απεριόριστης αντοχής ή ζώνη ασφαλείας:

Για πολλά υλικά, κυρίως στους χάλυβες αλλά και σε κράματα Ti, Mg, μερικά κράματα Al-Mg, κ.λπ., παρατηρείται στην καμπύλη Wohler μια οριζόντια ασυμπτωτική περιοχή, που προσδιορίζει το όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση (endurance limit) του υλικού σε. Σε ένα

υλικό που υποβάλλεται σε κυκλική καταπόνηση τιμής μικρότερης της σε δεν παρατηρείται θραύση από κόπωση. Το όριο αντοχής σε κόπωση ωστόσο, δεν είναι δυνατόν να προσδιορισθεί για όλα τα υλικά, καθώς όσο και να μειωθεί η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης, τα υλικά αυτά θα παρουσιάσουν πάλι πεπερασμένο όριο ζωής σε κόπωση, δηλαδή θα επέλθει θραύση μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων. Για τις περιπτώσεις αυτές, έχει καθιερωθεί η χρήση της συμβατικής αντοχής σε κόπωση (fatigue strength).

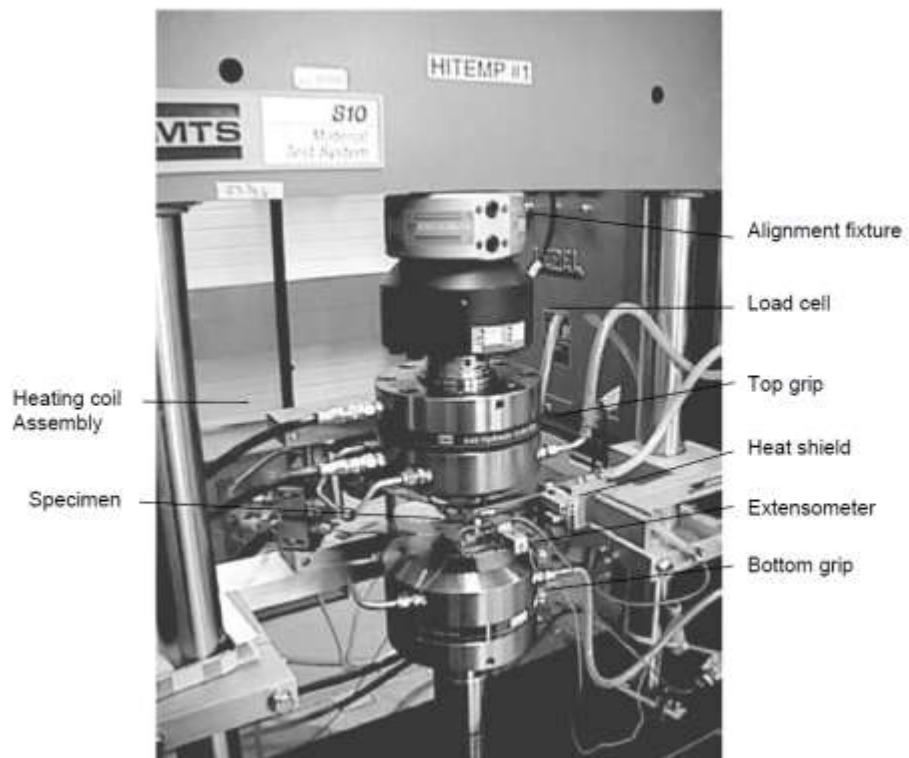
Ως συμβατική αντοχή σε κόπωση, εννοούμε μια τιμή τάσης, για την οποία το υλικό έχει μία μεγάλη διάρκεια ζωής σε κόπωση (συνήθως 10^6 με 10^7 κύκλους φόρτισης).

2.4 Πειραματικός Προσδιορισμός των Καμπυλών S – N

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες μπορεί να διερευνηθεί πειραματικά η συμπεριφορά ενός υλικού σε εναλλασσόμενες καταπονήσεις, δηλαδή σε κόπωση. Περισσότερο διαδεδομένες είναι πιθανότατα αυτές που πραγματοποιείται σε συνήθη δοκίμια εφελκυσμού.

Υπάρχουν τύποι μηχανών εφελκυσμού που διαθέτουν την δυνατότητα εκτέλεσης δοκιμών κόπωσης, εξασκώντας προκαθορισμένη εναλλασσόμενη φόρτιση στο δοκίμιο. Στις πλέον σύγχρονες

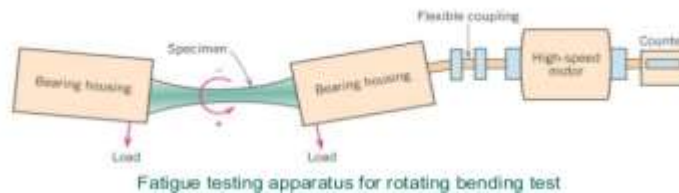
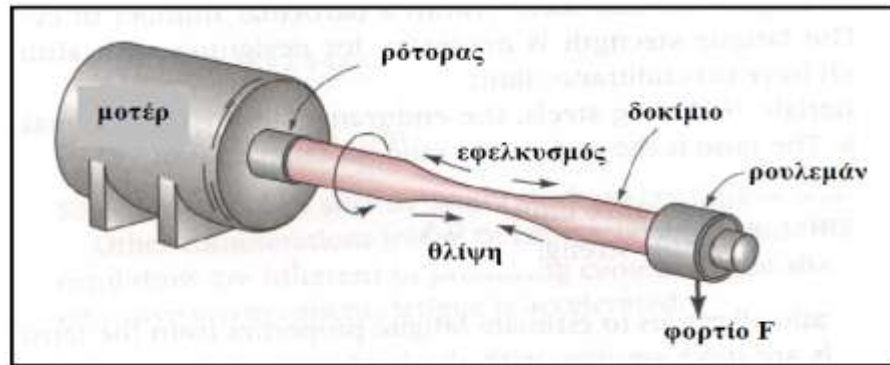
μηχανές εφελκυσμού – κόπωσης υπάρχει η δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένου τύπου δυναμικής καταπόνησης (π.χ. ημιτονοειδής) καθώς και των χαρακτηριστικών αυτής (π.χ. σmax και σmin, σm, κ.τ.λ.), γεγονός που επιτρέπει την μελέτη της συμπεριφοράς σε κόπωση σε μεγάλο εύρος συνθηκών δυναμικής καταπόνησης.



Εικόνα 2.7 Παράδειγμα σύγχρονης μηχανής εφελκυσμού – κόπωσης

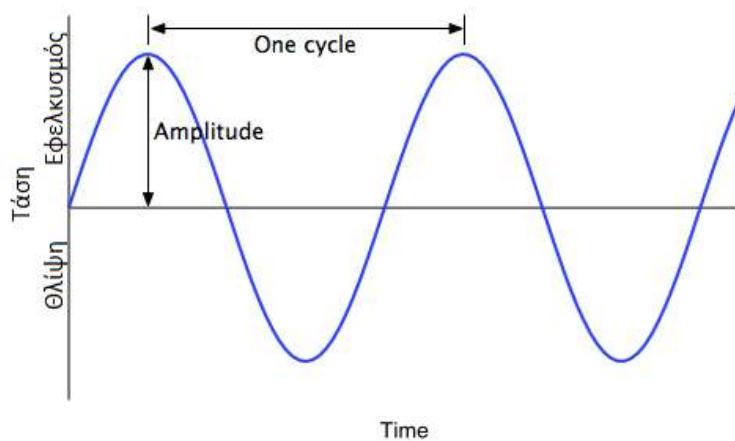
Ένας εναλλακτικός τύπος δοκιμής κόπωσης είναι η *δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου* (rotating cantilever beam test).

Η πειραματική διάταξη της δοκιμής αυτής είναι σχετικά απλή και απεικονίζεται στην Εικ 2.8. Στη δοκιμή υποβάλλεται δοκίμιο κυλινδρικής γεωμετρίας του υπό εξέταση υλικού. Το ένα άκρο του δοκιμίου συγκρατείται σε έναν ρότορα που συνδέεται με έναν ηλεκτρικό κινητήρα, ενώ στο άλλο άκρο τοποθετείται ένα εγκάρσιο φορτίο, ασκώντας έτσι κάμψη στο δοκίμιο.



Εικ. 2.8 Διάταξη συσκευής δοκιμής περιστρεφόμενου προβόλου

Καθώς ο ρότορας τίθεται σε περιστροφική κίνηση το δοκίμιο αρχίζει να υποβάλλεται σε μία εναλλασσόμενη καταπόνηση. Όπως είναι γνωστό από την θεωρία κάμψης δοκών, οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στις εξωτερικές επιφάνειες της δοκού. Έτσι και στην περίπτωση του περιστρεφόμενου προβόλου, όταν ένα σημείο του υλικού που βρίσκεται στην άνω επιφάνεια δέχεται την μέγιστη εφελκυστική τάση. Έπειτα, μετά από περιστροφή 90° το σημείο αυτό έρχεται σε μία θέση όπου η τάση μηδενίζεται. Τέλος, μετά από περιστροφή άλλων 90° , (δηλαδή συνολικά 180° από την αρχή) το σημείο έρχεται στην κάτω επιφάνεια, όπου εκεί δέχεται την μέγιστη θλιπτική τάση (διάγραμμα 2.4).



Διάγραμμα 2.5 Συμπεριφορά εξωτερικού σημείου περιστρεφόμενου προβόλου

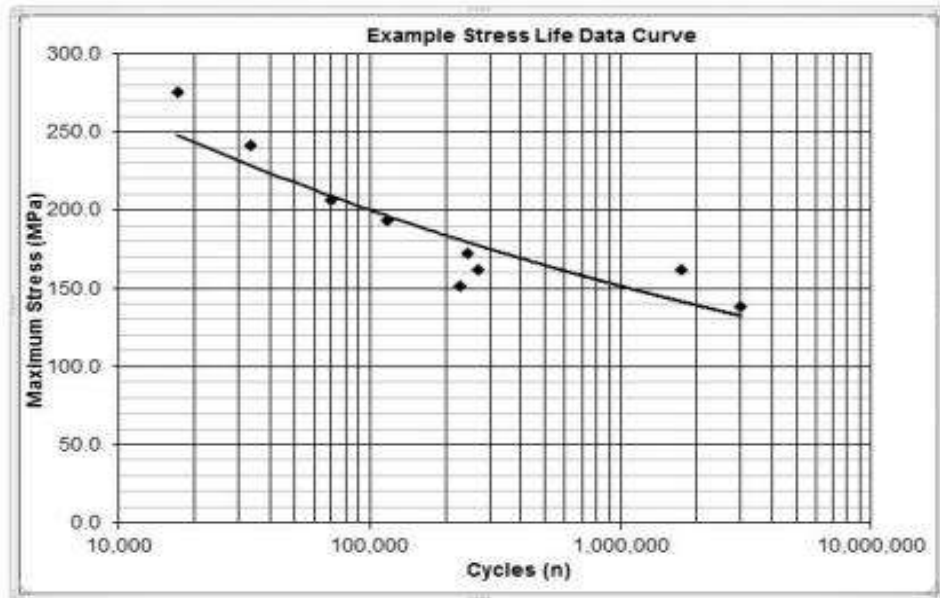
Σε κάθε περιστροφή του δοκιμίου επαναλαμβάνεται η ίδια πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση, η οποία μάλιστα για την συγκεκριμένη δοκιμή κόπωσης έχει ημιτονοειδή μορφή με μέση τάση $\sigma_m = 0$ και $R = -1$.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τάση που καταπονούν το δοκίμιο υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\sigma_{max} = -\sigma_{min} = \frac{10.18 L F}{D^3} \quad (6)$$

όπου L και D το μήκος και η διάμετρος του δοκιμίου, αντίστοιχα και F το επιβαλλόμενο εξωτερικό φορτίο. Έτσι, μεταβάλλοντας κατάλληλα τα L, F και D μπορεί να παραχθεί ένα πολύ μεγάλο πλήθος διαφορετικών δυναμικών καταπονήσεων.

Η συνήθης διαδικασία για τον καθορισμό μίας καμπύλης S – N ξεκινά υποβάλλοντας το πρώτο δοκίμιο σε μία υψηλή τάση, στην οποία περιμένουμε ότι το δοκίμιο θα υποστεί θραύση μετά από μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης. Συνήθως, για το πρώτο αυτό δοκίμιο, η τάση που επιλέγεται ισοδυναμεί με τα 2/3 της μέγιστης αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό

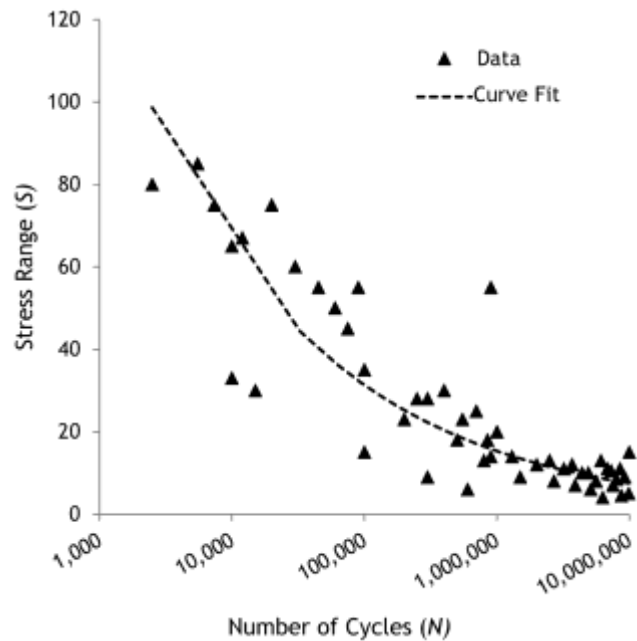


(σ_{UTS}). Τα επόμενα δοκίμια υποβάλλονται σε όλο και μικρότερες τάσεις και καταγράφεται ο αριθμός κύκλων στον οποίο αστοχούν με θραύση. Η δοκιμή συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο, μέχρις ότου ένα ή δύο δοκίμια να μην έχουν αστοχήσει μετά από έναν προκαθορισμένο μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης. Τότε σαν όριο διαρκούς αντοχής του υλικού ορίζεται η υψηλότερη τάση στην οποία το δοκίμιο δεν αστόχησε.

Στα μεταλλικά υλικά που δεν εμφανίζουν όριο διαρκούς αντοχής, οι δοκιμές τερματίζονται όταν το δοκίμιο αντέξει σε έναν πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων, π.χ. 10⁸ κύκλους, χωρίς να αστοχήσει. Η τιμή της τάσης που χρησιμοποιήθηκε στο δοκίμιο αυτό λαμβάνεται τότε σαν η συμβατική αντοχή του υλικού σε κόπωση.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, για τον καθορισμό μίας καμπύλης S – N χρησιμοποιούνται συνολικά από 8 έως 12 δοκίμια του υλικού.

Εκείνο που έχει εξαιρετική σημασία να γνωρίζουμε, είναι ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης σε ένα συγκεκριμένο υλικό εμφανίζουν μεγάλη διασπορά (scatter). Δηλαδή, εάν πάρουμε αρκετά δοκίμια από το ίδιο υλικό και τα υποβάλλουμε σε δοκιμές κόπωσης με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες (σmax, σmin, σm) θα παρατηρήσουμε ότι η διάρκεια ζωής τους σε κόπωση (δηλ. ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι να αστοχήσουν) θα έχει μεγάλες αποκλίσεις. Για αυτό το λόγο τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης υποβάλλονται σε κατάλληλη στατιστική επεξεργασία, προκειμένου να καταστούν αξιόπιστα και ασφαλή και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δεδομένα ενός υλικού, κατά το στάδιο μελέτης μίας κατασκευής.



Διάγραμμα 2.6. Διασπορά πειραματικών δεδομένων σε δοκιμασία κόπωσης

2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν το όριο διαρκούς αντοχής

Το όριο διαρκούς αντοχής σε που προκύπτει από τα πειράματα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό μηχανών, γιατί τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές που είναι αδύνατο να παρουσιασθούν στο δομικό εξάρτημα μια μηχανής .

Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι το όριο αυτό επηρεάζεται από την επιφανειακή κατεργασία, το μέγεθος του δοκιμίου, την μεταβολή της γεωμετρίας (φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων), την θερμοκρασία κ.α. Για να χρησιμοποιηθεί η εργαστηριακή τιμή του σε στον σχεδιασμό ενός δομικού στοιχείου πρέπει να τροποποιηθεί, χρησιμοποιώντας κατάλληλους διορθωτικούς συντελεστές, οι οποίοι εξαρτώνται από τις πραγματικές συνθήκες στις οποίες θα κλιθεί αυτό να λειτουργήσει. Για τους στόχους του σχεδιασμού διατυπώνεται η εξίσωση:

$$\sigma_e = CF \times CS \times C_c \times CT (1/K_f) \times \sigma_e' \quad (7)$$

Όπου:

σ_e = το πραγματικό όριο διαρκούς αντοχής (του μηχ. στοιχείου)

σ_e' = το πειραματικό όριο διαρκούς αντοχής (καμπύλη S-N)

CF = διορθωτικός συντελεστής επιφανειακής κατεργασίας

CS = διορθωτικός συντελεστής μεγέθους

C_c = διορθωτικός συντελεστής είδους φόρτισης

CT = διορθωτικός συντελεστής θερμοκρασίας

K_f = συντελεστής εγκοπής σε κόπωση (επίδραση από συγκέντρωση τάσεων σε κόπωση)

Οι διορθωτικοί συντελεστές παίρνονται από πίνακες και γραφήματα που ισχύουν για κάθε υλικό. Στα παρακάτω σχήματα δίνονται σχετικοί πίνακες (από Στοιχεία Μηχανών, Χ. Παπαδόπουλος, Τόμος Α, Εκδόσεις Τζιόλα) για τον υπολογισμό συντελεστών που επιδρούν στο όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση.

2.5.1 Συντελεστής επιφανειακής κατεργασίας - Cf

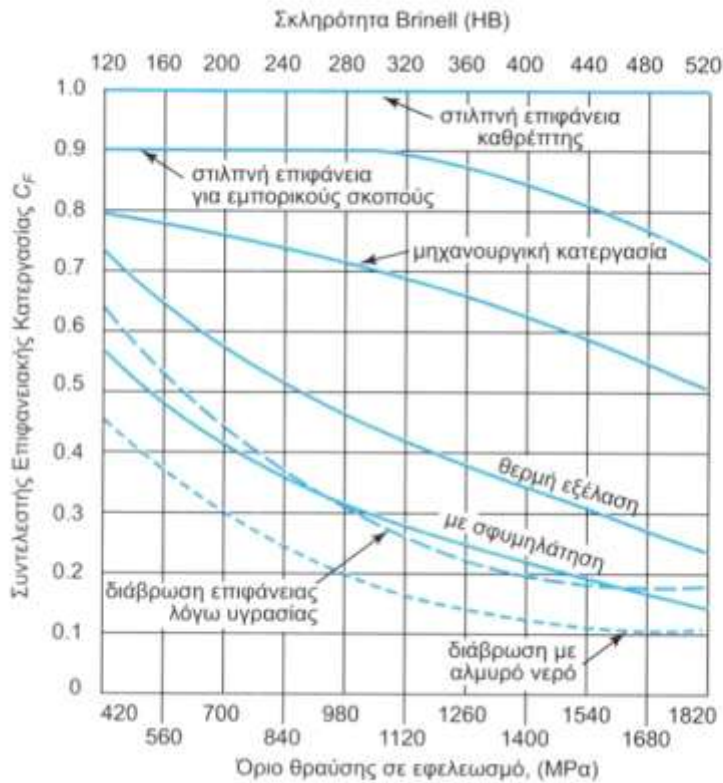
Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι όλες οι αστοχίες λόγω κόπωσης ξεκινούν από την εξωτερική επιφάνεια του υλικού. Αυτό οφείλεται στο ότι ακόμα και μικρές ανωμαλίες της επιφάνειας, όπως για παράδειγμα η τραχύτητα, μπορούν να λειτουργήσουν σαν σημεία πυρήνωσης ρημάτων, τα οποία στη συνέχεια αναπτύσσονται και προκαλούν την τελική θραύση του υλικού

Η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας είναι καταλυτική για την διάρκεια ζωής σε κόπωση ενός μεταλλικού υλικού. Αυτό φαίνεται πολύ χαρακτηριστικά στον Πίνακα 2.1, ο οποίος δείχνει την διάρκεια ζωής σε κόπωση σαν συνάρτηση της επιφανειακής τραχύτητας δοκιμίων από χάλυβα SAE 3130, τα οποία υπεβλήθησαν σε πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση με $\sigma_{max} = 655 \text{ MPa}$. Οι διαφορετικές τραχύτητες στα δοκίμια επετεύχθησαν χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους φινιρίσματος της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, η επίδραση της τραχύτητας στη διάρκεια ζωής είναι μμεγάλη, αφού όσο μεγαλύτερη η τραχύτητα (δηλ. όσο πιο ανώμαλη η επιφάνεια) τόσο μικρότερη η διάρκεια ζωής σε κόπωση.

Μέθοδος φινιρίσματος	Τραχύτητα επιφανείας [μm]	Αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση
Τορνίρισμα	2,67	24.000
Μερική στίλβωση με το χέρι	0,15	91.000
Πλήρης στίλβωση με το χέρι	0,13	137.000
Λείανση	0,18	217.000
Λείανση και στίλβωση	0,05	234.000

Πινάκας 2.1 Η διάρκεια ζωής σε κόπωση σε συνάρτηση της επιφανειακής τραχύτητας δοκιμίων από χάλυβα SAE 3130

Επιπλέον στο διάγραμμα 2.6.παρουσιάζετε ο συντελεστής Επιφανειακής Κατεργασίας (Cf) για διαφορετικές ποιότητες επιφάνειας συνρτηση της σκληρότητας τους.



Διάγραμμα 2.6. Συντελεστής επιφανειακής κατεργασίας C_F

2.5.2. Συντελεστής μεγέθους - C_s

Ένα σημαντικό πρακτικό πρόβλημα στην αντιμετώπιση της κόπωσης είναι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς σε κόπωση ενός ογκώδους εξαρτήματος, έχοντας σαν δεδομένο τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης του υλικού του εξαρτήματος, τα οποία όμως προέρχονται από δοκιμές κόπωσης σε δοκίμια μικρού μεγέθους. Η εμπειρία έχει δείξει ότι το μέγεθος ενός εξαρτήματος έχει αρνητική επίδραση στην αντοχή σε κόπωση, δηλαδή η αντοχή σε κόπωση ογκωδών εξαρτημάτων είναι μικρότερη από εκείνη μικρού μεγέθους εξαρτημάτων του ίδιου υλικού.

Η εξέταση της επίδρασης του μεγέθους είναι καθαρά εμπειρική και δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί μία θεωρία που να καλύπτει όλα τα μεταλλικά υλικά. Αντίθετα, έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης της επίδρασης αυτής. Για παράδειγμα, όσον αφορά το όριο διαρκούς αντοχής χαλύβων που υφίστανται εναλλασσόμενη φόρτιση σε κάμψη, έχει βρεθεί ότι το όριο διαρκούς αντοχής μειώνεται σύμφωνα με ένα συντελεστή C_s , η τιμή του οποίου εξαρτάται από τη διάμετρο δοκιμίου. Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή αυτού, που ισχύουν μόνο για χάλυβες υποκείμενους σε εναλλασσόμενη κάμψη, δίδονται στον Πίνακα 2.2.

Διάμετρος δοκιμίου [mm]	C_s
$D \leq 10,16$	1,0
$10,16 \leq D \leq 50,8$	0,9
$50,8 \leq D \leq 228,6$	$1 - \frac{D - 0,03}{15}$

Πινάκας 2.2 Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή C_s για χάλυβες υποκειμένους σε εναλλασσόμενη κάμψη

Για στοιχεία με κυκλική επιφάνεια διατομής ο συντελεστής μεγέθους C_s υπολογίζεται ως εξής:

Για διάμετρο διατομής $d \leq 7.6\text{mm}$	$C_s=1$
Για διάμετρο διατομής $7.6 < d \leq 50\text{mm}$	$C_s=0.85$
Για διάμετρο διατομής $d > 50\text{mm}$	$C_s=0.75$

Τέλος, σημειώνετε ότι η επεξεργασία ενός μεγάλου αριθμού πειραματικών αποτελεσμάτων σε χάλυβες έδειξε ότι υπάρχει μία σχέση ανάμεσα στο όριο διαρκούς αντοχής και τον όγκο του αντικειμένου:

$$\sigma_e = \sigma_e^o \left(\frac{V}{V^o} \right)^{-0,034}$$

όπου σε το όριο διαρκούς αντοχής του αντικειμένου με όγκο V , ενώ το γνωστό όριο διαρκούς αντοχής αντικειμένου με όγκο αναφοράς V^o σσο. Ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί ότι σχέσεις αυτού του είδους είναι εμπειρικές και πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο κατά περίπτωση και με πολύ μεγάλη προσοχή.

198

2.5.3 Συντελεστής Θερμοκρασίας C_t

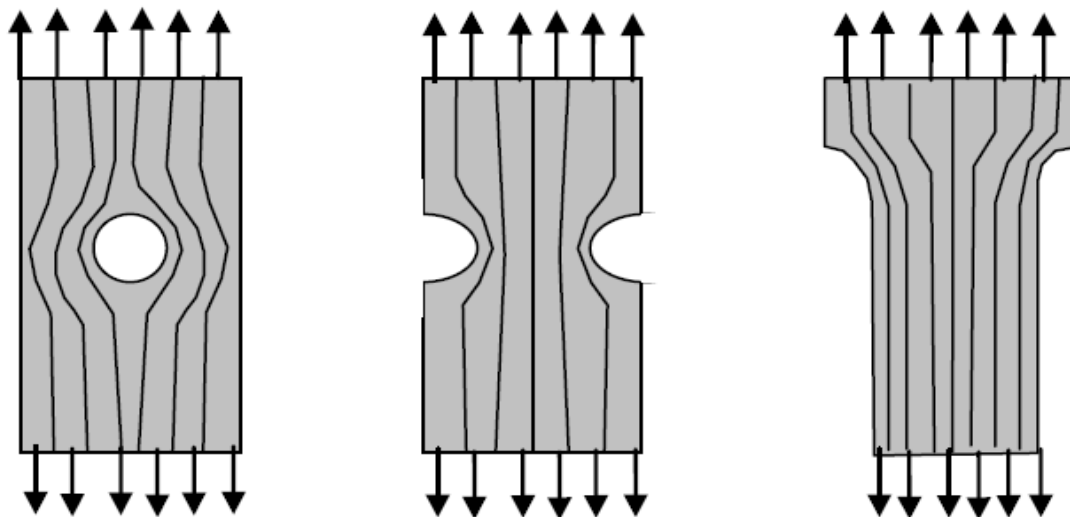
Θερμοκρασία °C	$C_T=S_T/S_{RT}$	Θερμοκρασία °C	$C_T=S_T/S_{RT}$
20	1.000	350	0.943
50	1.01	400	0.9
100	1.02	450	0.84
150	1.025	500	0.766
200	1.02	550	0.67
250	1.000	600	0.546
300	0.975		

Πίνακας 2.3 Συντελεστής θερμοκρασίας C_t ^[6]

*όπου S_T η εφελκυστική αντοχή σε θερμοκρασία λειτουργίας και S_{RT} η εφελκυστική αντοχή σε θερμοκρασία δωματίου

2.5.4 Συντελεστής Συγκεντρώσεις τάσεων K_t

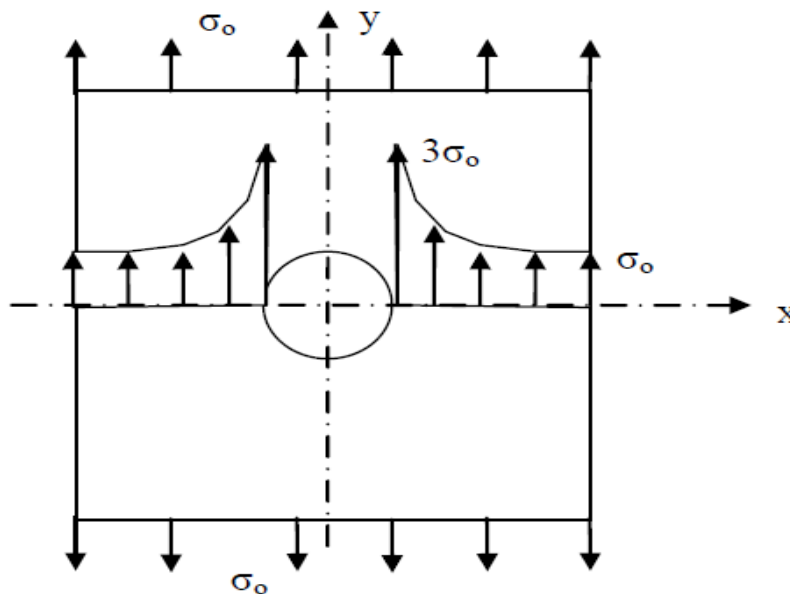
Τα δομικά εξαρτήματα είτε για κατασκευαστικούς λόγους, είτε για λόγους ασφάλειας της κατασκευής στις συνθήκες λειτουργίας της, παρουσιάζουν απότομες ή όχι μεταβολές στη γεωμετρία, π.χ. απότομη μεταβολή διαστάσεων, εγκοπές, οπές κ.α. Όταν στο εξάρτημα ενεργούν φορτία οι μεταβολές αυτές οδηγούν σε μεταβολές του τοπικού πεδίου των τάσεων και συνήθως αποτελούν πηγές εκκίνησης και δημιουργίας βλαβών και αστοχίας



Εικόνα 2.9 Γεωμετρικές ασυνέχειες που δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων

Για τον σχεδιασμό έχει εισαχθεί μια παράμετρος η οποία λαμβάνει υπόψη την μεταβολή αυτή του εντατικού πεδίου που ονομάζεται συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων:

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{αναφοράς}}} = \frac{\text{μέγιστη τάση στο δομικό στοιχείο}}{\text{τάση αναφοράς}}$$



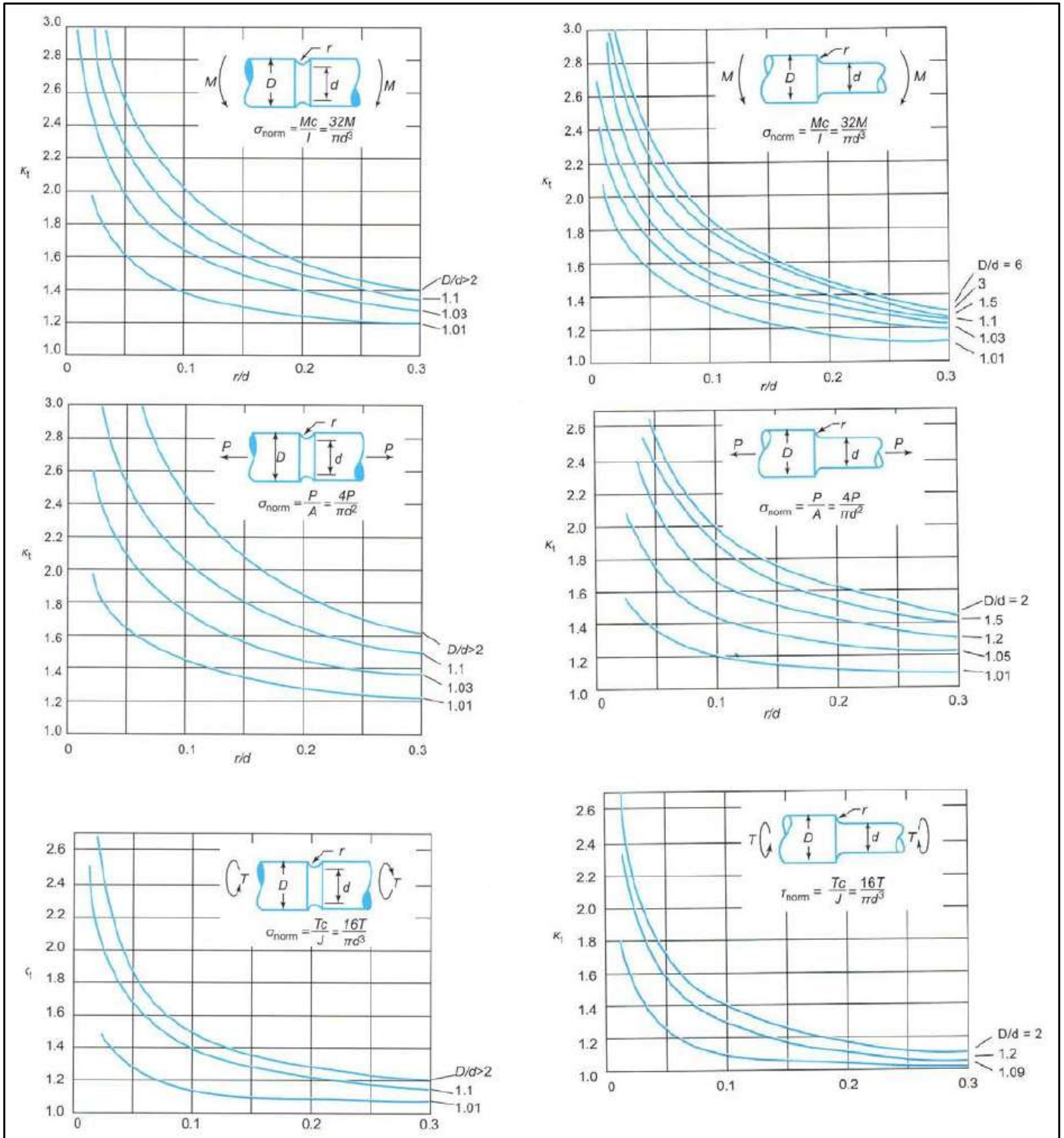
Εικόνα 2.10 Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων σε δίσκο με οπή: $K_t=3$

Ως τάση αναφοράς εννοείται η τάση στο ίδιο σημείο, αν δεν υπήρχε η γεωμετρική ανωμαλία. Για παράδειγμα στον δίσκο του σχήματος που καταπονείται σε εφελκυσμό με ομοιόμορφο φορτίο, οι ορθές τάσεις στην διεύθυνση του φορτίου είναι ίση με την εφαρμοσμένη τάση σ_0 . Αν στον δίσκο κάνουμε μια τρύπα οι τάσεις στον δίσκο παύει να είναι ομοιόμορφες. Γύρω από τη οπή και ιδιαίτερα κατά μήκος της περιμέτρου οι τάσεις αυξάνουν έντονα.

Η θεωρία της ελαστικότητας μας δίνει την λύση που παριστάνεται γραφικά στο σχήμα. Από την λύση αυτή προκύπτει ότι στην περίμετρο στα σημεία 1 και 2 η τάση είναι τριπλάσια από την τάση αναφοράς και επομένως ο συντελεστής συγκέντρωσης είναι $K_t=3$.

Ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων προσδιορίζεται με την βοήθεια

- της θεωρίας ελαστικότητας
- της αριθμητικής ανάλυσης (πεπερασμένων στοιχείων)
- πειραματικά (φωτοελαστικότητα)



Διάγραμμα 2.7. Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων K_t για διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης σε άξονες με εγκοπή

2.5.5 Συντελεστής εγκοπής (Kf) και ευαισθησίας (q) σε κόπωση

Η επίδραση της συγκέντρωσης τάσεων στην κόπωση έχει πειραματικά παρατηρηθεί ότι δεν είναι ανάλογη του ελαστικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων Kt. Συγκεκριμένα εάν ληφθεί υπόψη ότι οι το στοιχείο λειτουργεί με τάσεις Kt επί σA αντί για σA γίνεται υπερεκτίμηση της υποβάθμισης της διάρκειας ζωής σε κόπωση. Πειράματα έχουν δείξει ότι προκληθείσα υποβάθμιση περιγράφεται καλύτερα από το τον συντελεστή εγκοπής σε κόπωση σύμφωνα με Την σχέση:

$$Kf = \frac{\sigma e(\text{χωρίς εγκοπή})}{\sigma e(\text{με εγκοπή})}$$

Όπου Kf ο συντελεστής εγκοπής σε κόπωση.

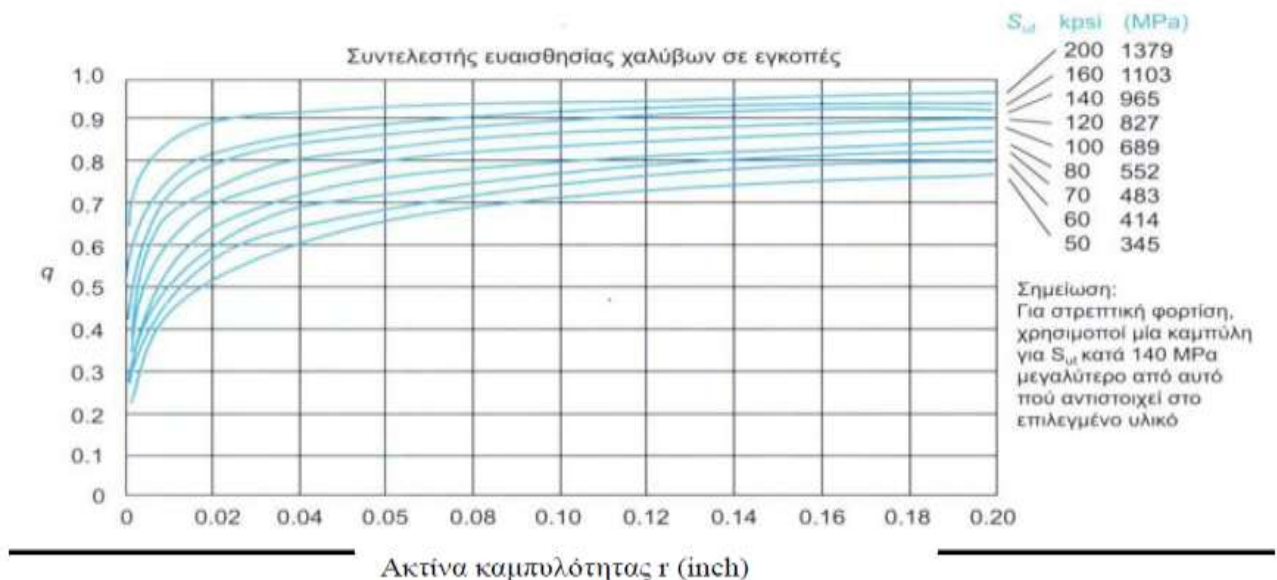
Η τιμή του Kf είναι γενικά μικρότερη από αυτήν του Kt εκτός από περιπτώσεις ψαθυρών μετάλλων (χαλύβων) υψηλής αντοχής.

Οι συντελεστές Kf και Kt σχετίζονται μεταξύ τους μέσω του συντελεστή ευαισθησίας σε κόπωση q με την σχέση:

$$q = \frac{Kf - 1}{Kt - 1}$$

Εάν Kf = Kt τότε q=1 και υπάρχει πλήρης επίδραση της εγκοπής στην συμπεριφορά κόπωσης του υλικού.

Εάν Kf < Kt τότε q < 1 και η επίδραση της εγκοπής στην κόπωση είναι μικρότερη αυτής που αντιστοιχεί στον συντελεστή Kt



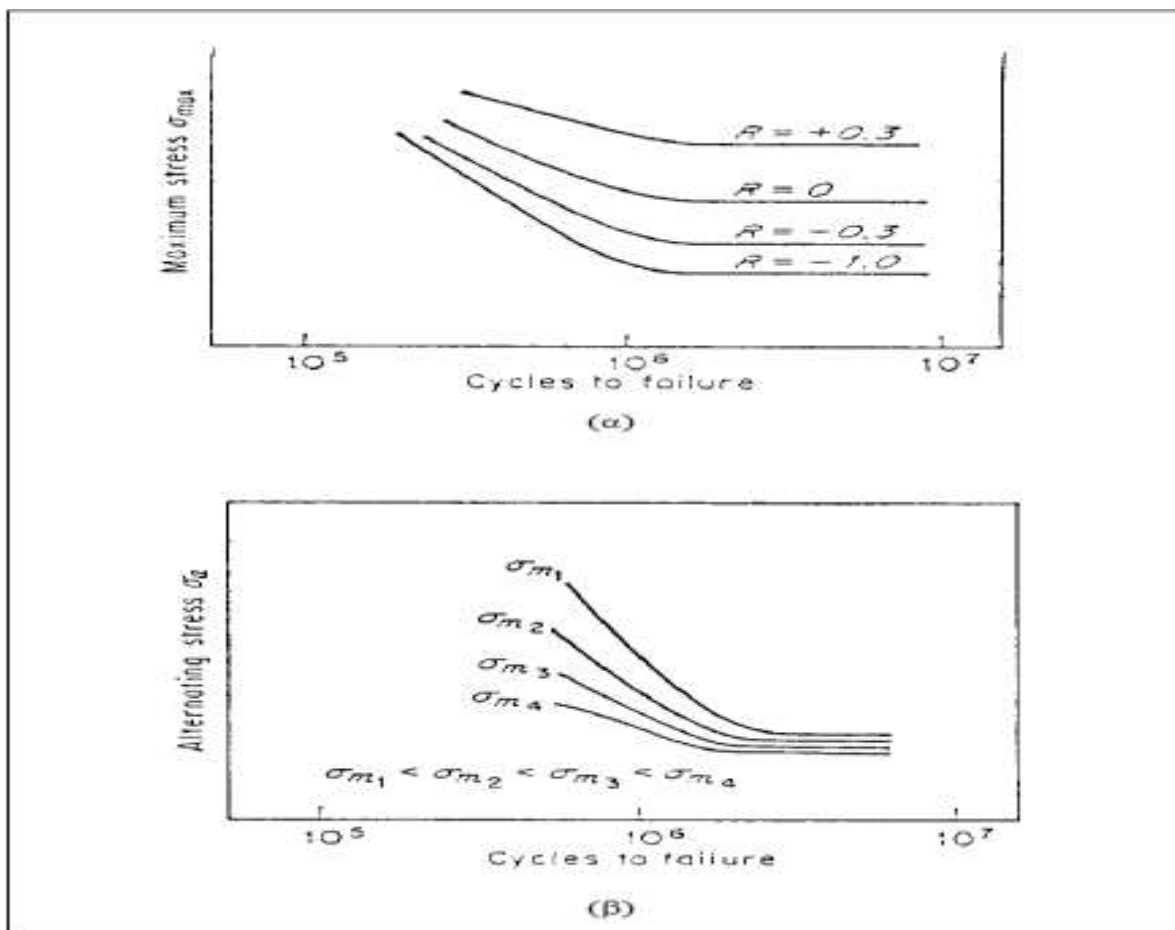
Διάγραμμα 2.10 Συντελεστής ευαισθησίας σε κόπωση q για χάλυβες

2.6 Η επίδραση μέσης τάσης στην κόπωση

Τα περισσότερα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα κόπωσης στη βιβλιογραφία έχουν προκύψει από δοκιμές κόπωσης με πλήρως αναστρεφόμενους κύκλους φόρτισης, για τους οποίους ισχύει ότι $\sigma_m = 0$. Ωστόσο, στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές η μέση τάση δεν ισούται με το μηδέν.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούν να καθοριστούν οι καμπύλες $S - N$ όταν $\sigma_m \neq 0$. Το διάγραμμα 2.11 δείχνει τους δύο πιο συνηθισμένους τρόπους παρουσίασης των δεδομένων κόπωσης στις περιπτώσεις αυτές. Στο διάγραμμα 2.11α οι καμπύλες $S - N$ παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα μέγιστης τάσης (σ_{max}) – αριθμών κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση (N_f), όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μία σταθερή τιμή $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$. Όταν $R = -1$ η τάση είναι πλήρως αναστρεφόμενη ($\sigma_{max} = -\sigma_{min}$) και επομένως η μέση τάση $\sigma_m = 0$. Όσο το R γίνεται πιο θετικό, που ισοδυναμεί με το ότι η μέση τάση σ_m αυξάνεται, το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού αυξάνεται.

Το διάγραμμα 2.11β δείχνει τα ίδια δεδομένα, εκφρασμένα όμως σε ένα διάγραμμα εύρους τάσης (σ_a) – αριθμών κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση (N_f), όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μία σταθερή μέση τάση σ_m .



Διάγραμμα 2.11 Συνήθεις τρόποι παρουσίασης των δεδομένων κόπωσης

Παρατηρείτε ότι όσο η μέση τάση σ_m αυξάνεται, τόσο μικρότερο πρέπει να είναι το εύρος τάσης σ_a για να επιτευχθεί μία συγκεκριμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση N_f .

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα τα οποία περιγράφουν τη συσχέτιση μεταξύ της μέσης τάσης (σ_m) και του εύρους τάσης (σ_a), για μία προκαθορισμένη διάρκεια ζωής του υλικού σε κόπωση. Τα τρία πιο διαδεδομένα από τα μοντέλα αυτά είναι το παραβολικό μοντέλο Goodman, το γραμμικό μοντέλο Soderberg και το γραμμικό μοντέλο Gerber

Τα συγκεκριμένα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να απαντήσουν στο εξής θέμα: Έχοντας δεδομένα κόπωσης για ένα υλικό, τα οποία έχουν καθοριστεί από δοκιμές κόπωσης με πλήρως αναστρεφόμενη τάση. Δηλαδή έχουμε δεδομένα για δυναμική καταπόνηση με:

- $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$
- $R = -1$
- $\sigma_m = 0$
- $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2 = [\sigma_{\max} - (-\sigma_{\max})]/2 = (2\sigma_{\max})/2 = \sigma_{\max}$

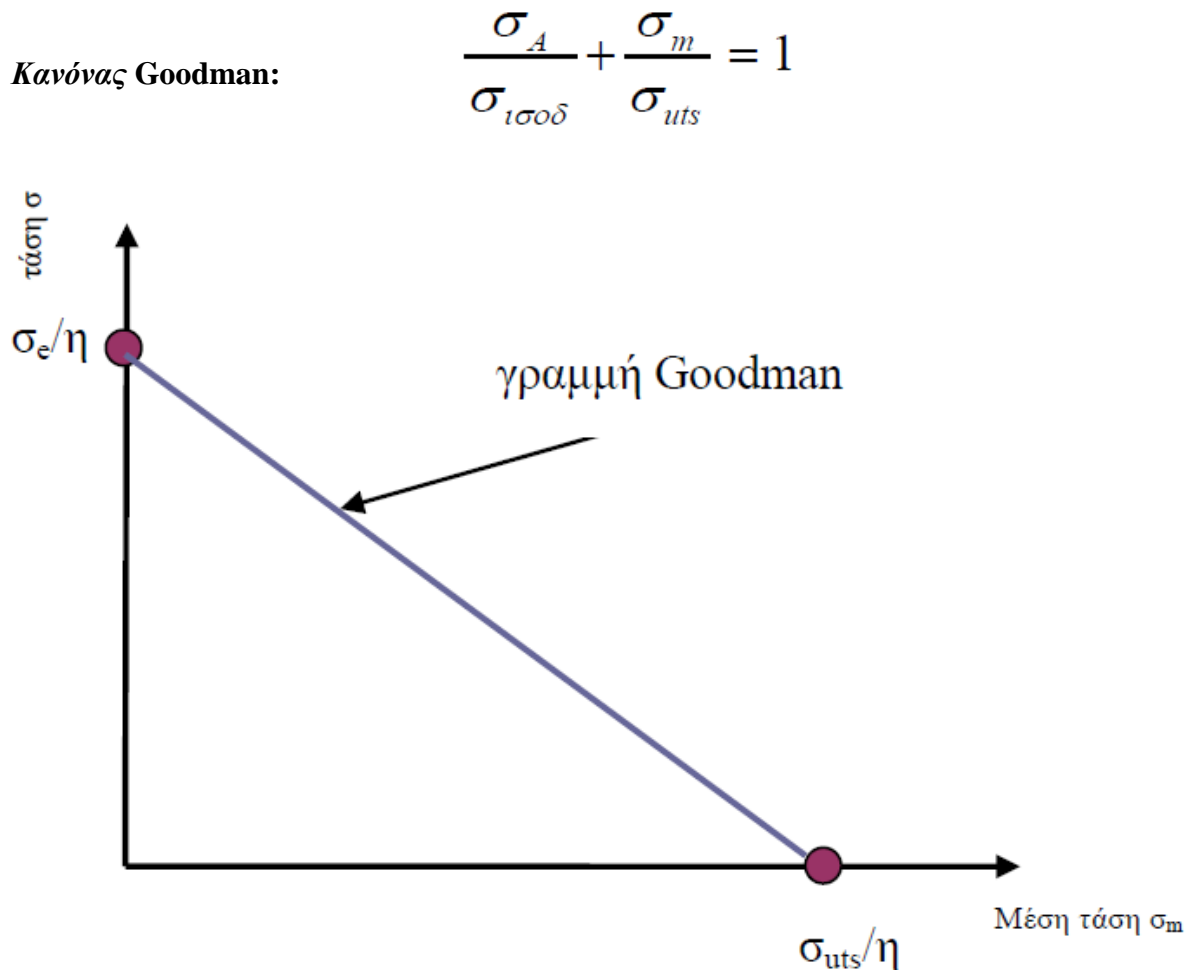
Από τα δεδομένα αυτά γνωρίζουμε το όριο διαρκούς αντοχής (σ_e) του υλικού (για την πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση) και γνωρίζουμε και τη διάρκεια ζωής σε κόπωση του υλικού N_f για κάθε εφαρμοζόμενη τάση (από την καμπύλη $S - N$). Εάν σε μία κατασκευή, στην οποία θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε το υλικό αυτό, η μέση τάση είναι $\sigma_m \neq 0$, τότε πόσο πρέπει να είναι το εύρος της τάσης $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$, έτσι ώστε για μία συγκεκριμένη εφαρμοζόμενη τάση να διασφαλίζεται ίδια διάρκεια ζωής σε κόπωση, όπως θα ισχύει για $\sigma_m = 0$;

Ακριβώς στο ερώτημα αυτό προσπαθούν να δώσουν απάντηση τα μοντέλα Goodman Soderberg και Gerber, το καθένα με τον διαφορετικό του τρόπο.

2.6.1 Προσέγγιση κατά Goodman

Κατά **Goodman** ο σχεδιασμός ενός δομικού στοιχείου, το οποίο υπόκειται σε εναλλασσόμενες καταπονήσεις μπορεί να γίνει ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία:

1. Προσδιορίζουμε το όριο διαρκούς αντοχής για το δομικό στοιχείο
2. Επιλέγουμε τον συντελεστή ασφάλειας η και υπολογίζουμε τις επιτρεπόμενες τάσεις σ_e/n και σ_{UTS}/n
3. Σε ένα διάγραμμα τάσης – μέσης τιμής σημειώνουμε το σημείο που αντιστοιχεί στην επιτρεπόμενη τάση διαρροής σ_y/n και το σημείο που αντιστοιχεί στην επιτρεπόμενη τάση ορίου διαρκούς αντοχής σ_e/n .
4. Ενώνουμε τα σημεία A, B με μια ευθεία γραμμή (γραμμή Goodman)
5. Κάθε σημείο επάνω στην ευθεία Goodman καθορίζει τις επιτρεπόμενες τάσεις σχεδιασμού (σ_A και σ_m) σε συνθήκες κόπωσης.



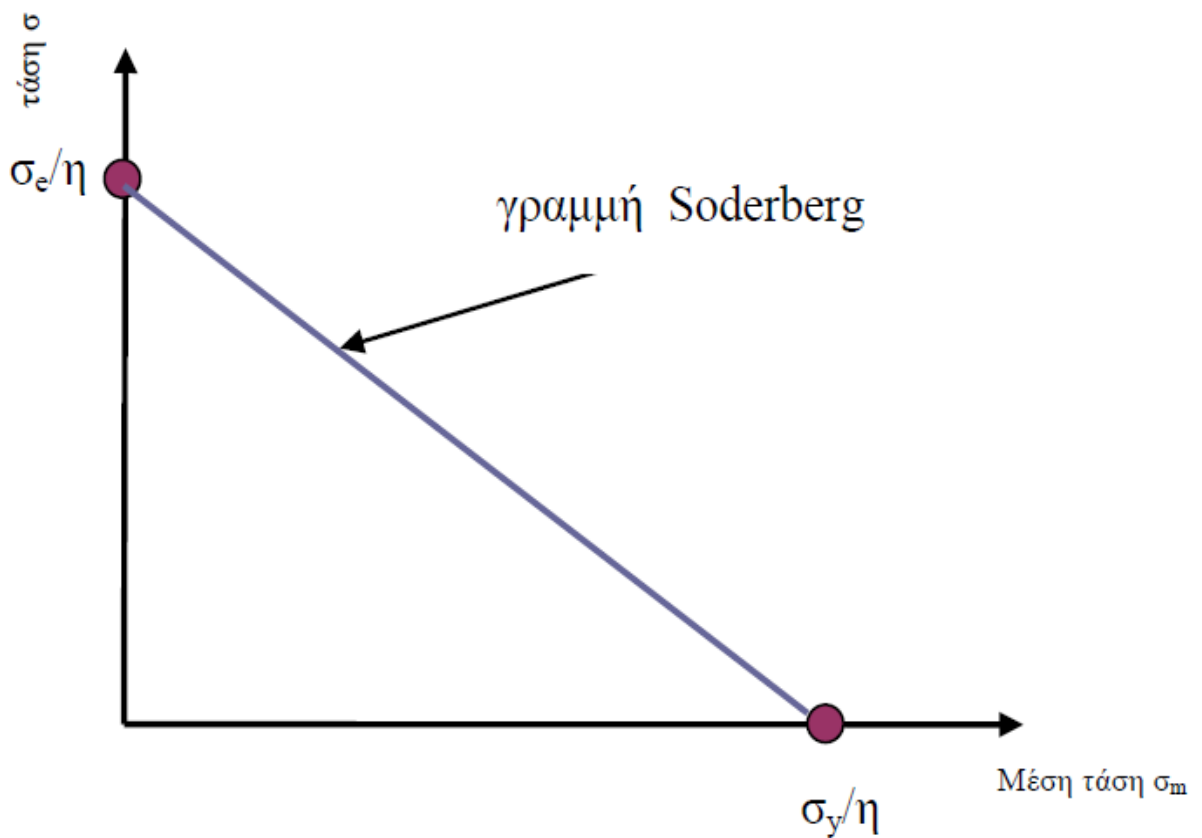
Διάγραμμα 2.13 Ευθεία Goodman

2.6.2 Προσέγγιση κατά Soderberg

Η προσέγγιση κατά **Soderberg** είναι ίδια με αυτήν του **Goodman** με μόνη διαφορά, αντί της αντοχής θραύσης παίρνεται το όριο διαρροής του υλικού.

Κανόνας Soderberg:

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_{ισοδ}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1$$



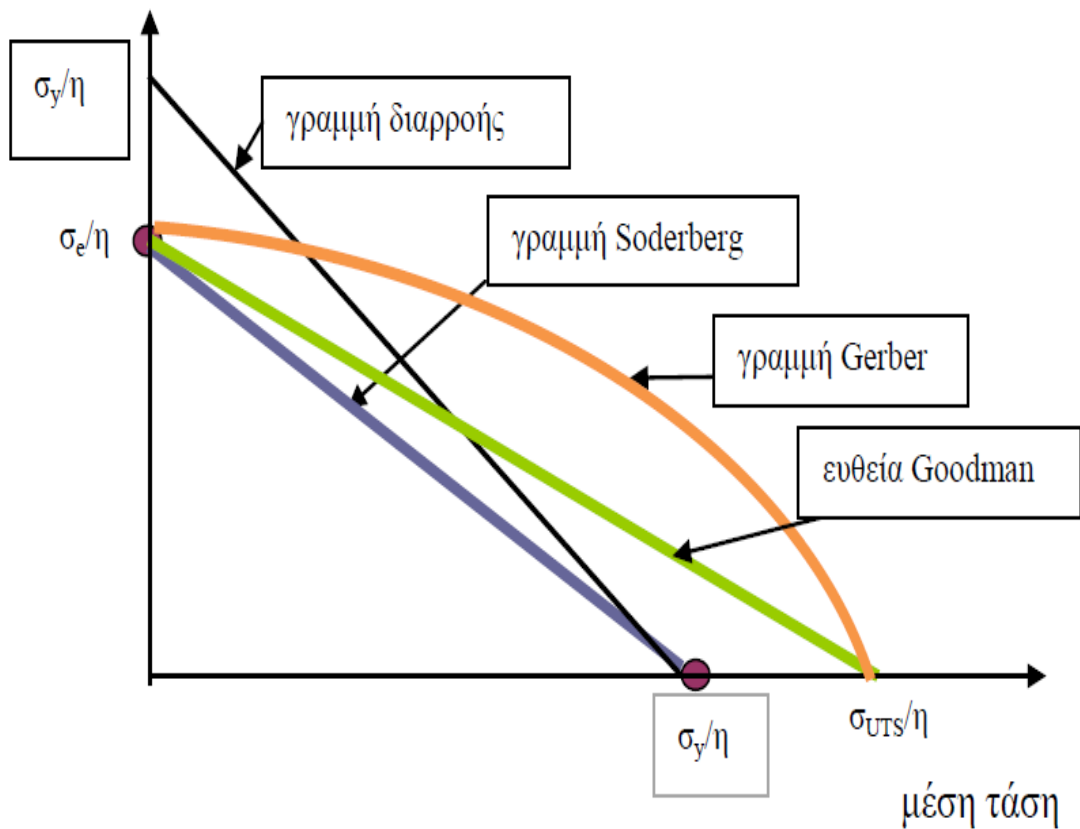
Διάγραμμα 2.14 Ευθεία Soderberg

2.6.3 Προσέγγιση κατά Gerber

Τα παραπάνω κριτήρια αστοχίας σε εναλλασσόμενες καταπονήσεις Soderberg και Goodman περιγράφονται με ευθείες γραμμές και χαρακτηρίζονται ως γραμμικές θεωρίες. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν και μη γραμμικές θεωρίες, οι οποίες περιγράφονται με παραβολική καμπύλη ή με έλλειψη κλπ. Ιδιαίτερη θέση κατέχει η παραβολική καμπύλη Gerber (θεωρία Gerber)

Κανόνας Gerber:
$$\frac{\sigma_A}{\sigma_{ισοδ}} + \left[\frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}} \right]^2 = 1$$

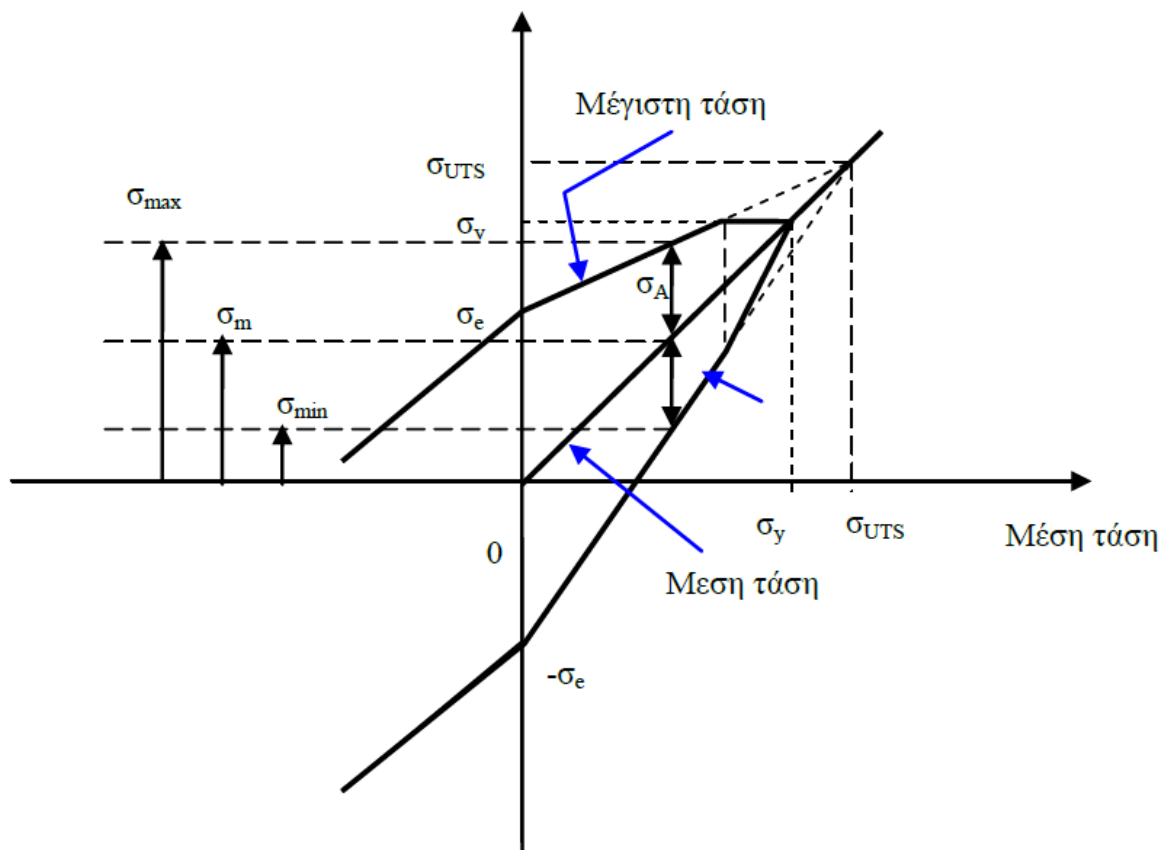
Στο παρακάτω διάγραμμα παριστάνονται για σύγκριση και οι τρεις αυτές θεωρίες



Διάγραμμα 2.15 Σύγκριση Soderberg/Goodman/Gerber

Ο σχεδιασμός που στηρίζεται στις θεωρίες Soderberg/Goodman είναι συντηρητικός, οδηγεί δηλαδή σε δομικά εξαρτήματα με μεγαλύτερες διαστάσεις από εκείνα που σχεδιάζονται με βάση τη θεωρία Gerber. Η θεωρία Gerber οδηγεί σε καλύτερες εκτιμήσεις όσον αφορά στην εκτίμηση της διάρκειας ζωής.

Στο επόμενο διάγραμμα, παριστάνεται το ολοκληρωμένο διάγραμμα **Goodman**, το οποίο δείχνει την αντοχή κόπωσης τόσο στην ελαστική, όσο και στη θλιπτική ή και στην ελαστική-θλιπτική περιοχή. Αν η μέση τάση είναι θλιπτική τα όρια αστοχίας προσεγγίζονται με δύο παράλληλες γραμμές, οι οποίες διέρχονται από τα σημεία (+σε, -σε). Το διάγραμμα αυτό είναι πολύ χρήσιμο για έλεγχο, δηλαδή αν είναι γνωστές οι διαστάσεις, του δομικού εξαρτήματος, οπότε είναι γνωστές οι τάσεις και συνάμα οι διορθωτικοί συντελεστές. Για τον σχεδιασμό δομικών εξαρτημάτων δεν ενδείκνυται γιατί οι τάσεις δεν είναι γνωστές.



Κεφάλαιο 3: Μελέτη Περίπτωσης: Ανάλυση αστοχίας σε άξονα στρατιωτικού οχήματος

3. Μελέτη Περίπτωσης: Ανάλυση αστοχίας σε άξονα στρατιωτικού οχήματος

Εισαγωγή

Η χρήση ενός άξονα με την ροπή στρέψης να προέρχεται κατευθείαν από μια πηγή ισχύος (σε αυτή την περίπτωση ηλεκτρικά τροφοδοτούμενο από μπαταρία) χρησιμοποιώντας γρανάζια, είναι μια πολύ συχνή εφαρμογή σε οχήματα που έχουν συνήθως πολύ μικρό κόστος και εύκολη κατασκευή. Το πλεονέκτημα ενός περιστρεφόμενου άξονα μια τέτοιας διάταξης είναι ότι πολύ απλά και εύκολα μπορεί μέσω ενός γραναζιού να μεταφέρει την ροπή σε δύο τροχούς. Παρόλα αυτά το μειονέκτημα αυτού του τύπου σχεδιασμού είναι ότι ο περιστρεφόμενος άξονας δέχεται συνεχώς καμπτικές και εφελκυστικές δυνάμεις σε κάθε του περιστροφή.

Ακόμα και να κινείτε το όχημα με σχετικά μικρές ταχύτητες και ελάχιστο φορτίο η εναλλασσόμενη φόρτιση που δέχεται ο άξονας μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία λόγω κόπωσης ειδικά στην περίπτωση που ο άξονας φέρει τροχούς μικρής διαμέτρου γεγονός που αυξάνει σημαντικά τον αριθμό περιστροφών ανά μονάδα απόστασης που διανύει. Στην περίπτωση στρατιωτικών οχημάτων, που θα αναλυθεί παρακάτω, η ανάγκη να φέρει μεγάλες μπαταρίες λόγω αυτονομίας και η βαριά του θωράκιση κάνουν το πρόβλημα ακόμα μεγαλύτερο.

Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου οχήματος είναι πολύ σύνθετος και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες εάν υποθέσουμε ότι οι συνθήκες, το έδαφος και το περιβάλλον λειτουργίας ποικίλουν ανάλογα την αποστολή. Επιπλέον η απότομη επιβράδυνση και επιτάχυνση είναι παράγοντες που καταπονούν τον άξονα σε στρέψη αλλά και σε διατμητικές και εφελκυστικές τάσεις. Τέλος, η λειτουργία του οχήματος σε ανώμαλα εδάφη χωρίς την χρήση συστήματος απόσβεσης των κραδασμών είναι ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει την λειτουργία και την αντοχή του άξονα.

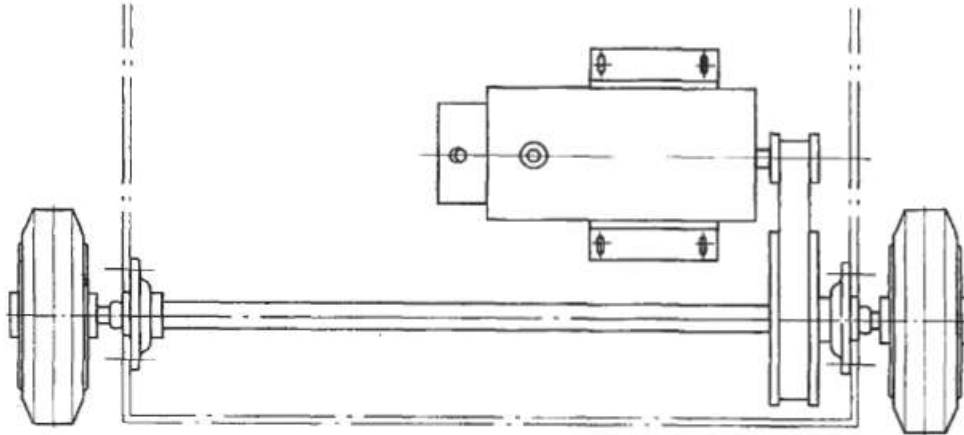


Για όλους τους παραπάνω λόγους ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη τέτοιου είδους κατασκευών θα πρέπει να μελετηθεί ώστε να επιτυγχάνεται η διασφάλιση της συνεχούς καλής λειτουργίας του οχήματος και η αποφυγή κάθε είδους αστοχίας.

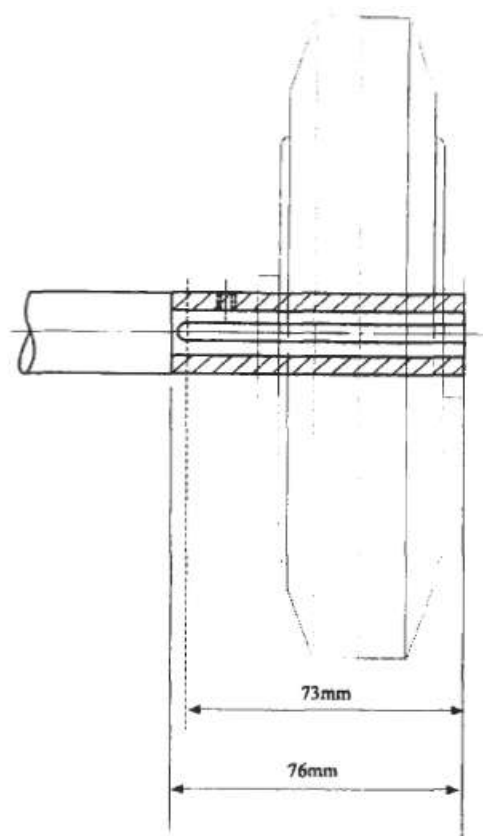
3.1 Ο σχεδιασμός του άξονα

Ο άξονας κατασκευάστηκε από ανοξείδωτο ατσάλι INOX 316 και торνιρίστηκε ως την διάμετρο των 20 mm με συνολικό μήκος τα 725 mm. Μια σφηνάυλακα κατασκευάστηκε

κοντά σε ένα άκρο για να συγκρατεί το γρανάτζι που μεταδίδει την κίνηση. Τα άκρα του άξονα διαμορφώθηκαν μετά από μηχανουργική κατεργασία στην διάμετρο των 12 mm σε μήκος 76 mm από τα άκρα με ράδιο R3 mm, σε αυτήν την διάμετρο έδραζαν οι 150 mm τροχοί. Τέλος με μια σφήνα κατά μήκος των 73 mm γινόταν η συναρμογή με τον τροχό ενώ στο τέλος του άξονα ένας κοχλίας M6 εξασφάλιζε την συγκράτηση του τροχού. (εικ 3.3)



Εικόνα 3.2 Γενική απεικόνιση του συστήματος μετάδοσης της κίνησης



Εικόνα 3.3 Η συναρμογή Άξονα - Τροχού

3.2 Αξιολόγηση της αστοχίας

Ο άξονας που αστόχησε κόπηκε σε δυο μέρη. Το σημείο τομής ήταν πολύ κοντά στο τέλος της σφηνάουλακας (73mm από το ένα άκρο) στην διατομή των 12 mm (εικ 3.3.)

Η ρωγμή ήταν χαρακτηριστική της διαδικασίας της κόπωσης και στην διατομή στο σημείο της θραύσης φαινόταν ότι το σημείο εκκίνησης ήταν από την πλευρά της σφηνάουλακας. Οι χαρακτηρίστηκες γραμμές που εμφανίζονται κατά την κόπωση, στην διατομή του άξονα , φαίνονταν ξεκάθαρα χωρίς την χρήση κάποιου οπτικού μέσου. Το υπόλοιπο τμήμα του άξονα καταστράφηκε αφού μετά την έναρξη και την διάδοση της ρωγμής, δεν μπορούσε να εξασφαλίσει την συγκράτηση του φορτίου. Από την οπτική εξέταση του κατεστραμμένου άξονα δεν είναι εφικτό να καθοριστεί εάν η τελική αστοχία του άξονα προήρθε από στρέψη ή κάμψη ή από τον συνδυασμό τους.

3.3 Έλεγχος του άξονα

Επειδή από την μελέτη του κατεστραμμένου άξονα δεν ήταν εφικτό να φάνει εάν ο κύριος παράγοντας της τελικής αστοχίας ήταν η κάμψη ή η στρέψη, θα πρέπει να μελετηθούν και οι δυο περιπτώσεις.

3.3.1 Κάμψη από στατικό φορτίο

Το όχημα μαζί με την θωράκιση του ζύγιζε $W = 320\text{kg}$ (3,2 KN). Το φορτίο κατανέμονταν στους τέσσερεις τροχούς του και κατά μήκος της επιφάνειας που έδραζε ο τροχός. Σε αυτήν την περίπτωση το φορτίο θα μελετηθεί σημειακά στο σημείο που ο άξονας αστόχησε.

Όποτε στο σημείο αστοχίας (73mm από το άκρο του άξονα):

$$M = \frac{W}{4} \times (73-30) = 34 \text{ Nm}$$

Εφόσον η διάμετρος του άξονα στο σημείο αστοχίας ήταν 12mm η καμπτική τάση είναι

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{32 \times 34.4}{\pi \times 0.0123} = 203 \text{ MN/m}$$

3.3.2 Στρέψη κατά την περιστροφή του άξονα

Ο ηλεκτροκινητήρας είχε ισχύ $P = 0,25 \text{ KN}$ με ταχύτητα περιστροφής $N = 1500\text{rpm}$

Η μεγίστη ταχύτητα στον άξονα λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο των γραναζιών είναι:

$$N = 1500 \times \frac{16}{48} = 500 \text{ rpm}$$

Η μέγιστη στρεπτική τάση στον άξονα είναι:

$$T_{\max} = \frac{250 \times 60}{500 \times 2 \times \pi} = 4.77 \text{ Nm}$$

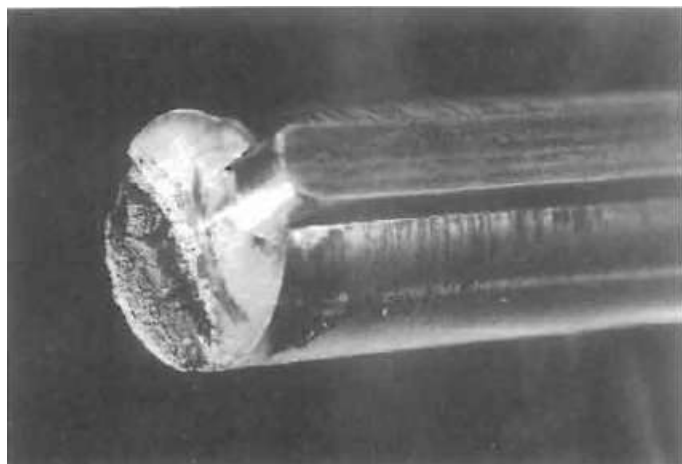
Η μέγιστη διατμητική τάση στον άξονα:

$$\tau = \frac{16 \times T}{\pi d^3} = \frac{16 \times 4.77}{\pi \times 0.012^3} = 14 \text{ MN/m}^2$$

Λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο της απότομης πέδησης:

$$\text{Εφαρμοσμένη ροπή: } T = \mu \frac{W}{4} \times \frac{D_{\text{wheel}}}{2} = \frac{0.5 \times 3200 \times 0.145}{4 \times 2} = 29 \text{ Nm}$$

$$\text{Διατμητική τάση: } \tau = \frac{16 \times 29}{\pi \times 0.012^3} = 86.5 \text{ MN/m}^3$$



Εικόνα 3.4 Ο άξονας που αστόχησε



Εικόνα 3.5 Ο τροχός του οχήματος

3.4 Αντοχή του υλικού σε κόπωση

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του άξονα ήταν INOX 316 τα δεδομένα για το υλικό και ο συντελεστής συσσώρευσης τάσεων παρέχονται από την βιβλιογραφία.

Αντοχή σε εφελκυσμό :

$$\sigma_t = 552 \text{ MN/m}^2$$

Αντοχή σε κόπωση (χωρίς εγκοπή):

$$\sigma_e = 262 \text{ MN/m}^2 \text{ (στους } 10^7 \text{ κύκλους)}$$

Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων στο τέλος του σφηναύλακα:

$$k_t = 1.9 \text{ (Άξονας με ακτίνα } d/D = 4/12)$$

Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων στην αλλαγή των διαμέτρων:

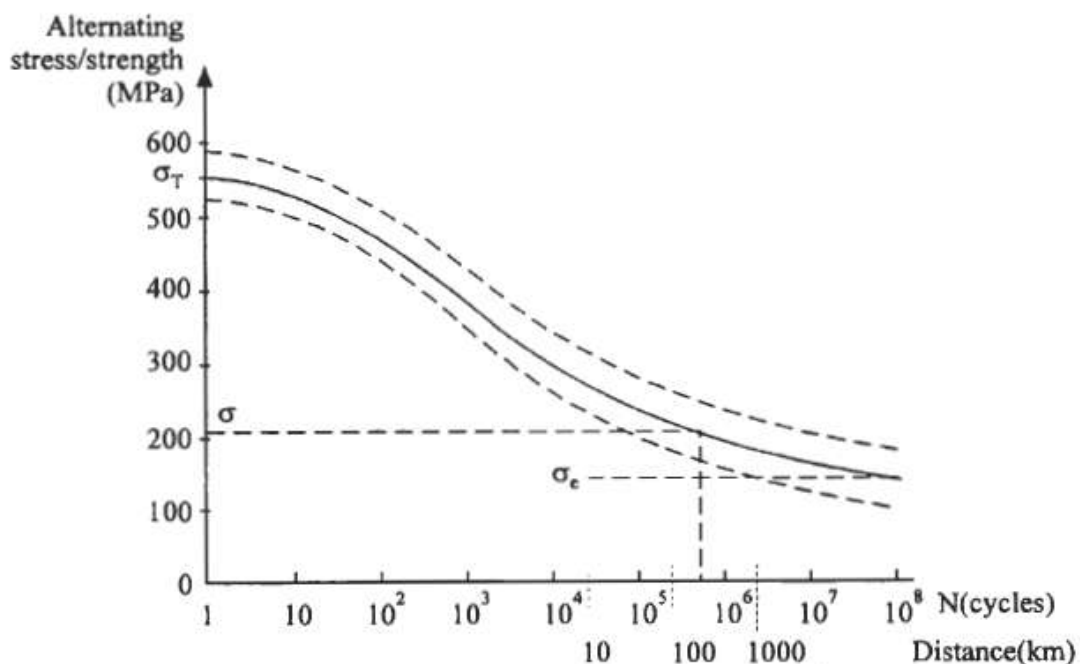
$$k_t = 1.4 \text{ (αλλαγή διαμέτρου με ράδιο } R/D = 3/12)$$

Όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση:

$$\sigma_e = \frac{261}{19} = 262 \text{ MN/m}^2$$

Η τελευταία τιμή υπολογίζετε προσεγγιστικά και χρησιμοποιείτε ενδεικτικά, θα ήταν ακόμα μικρότερη αν λαμβάναμε υπόψη τον συντελεστή επιφανείας. Εφόσον αυτές οι ιδιότητες εφαρμοστούν σε καμπύλη S-N προσεγγίζετε και είναι εύκολο να προβλεφτεί ο κύκλος ζωής των εξαρτημάτων όταν εφαρμόζετε μια γνωστή εναλλασσόμενη τάση κατά την λειτουργία του (διάγραμμα 3.1)

Όπως φαίνεται ξεκάθαρα στο διάγραμμα εφαρμόζοντας μια τάση του μεγέθους των 262 MN/m^2 που είναι ξεκάθαρα μια μεγάλη μεγέθους τάση και παράλληλα ένας μεγάλος συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων οδηγούμαστε σε μια πεπερασμένη διάρκεια ζωής της κατασκευής λόγω κόπωσης. Καθώς παρατηρείτε ο αριθμός των κύκλων φόρτισης, δηλ των περιστροφών των τροχών του οχήματος, και τον συσχετίσουμε με την απόσταση που έχει διανύσει το όχημα, λαμβάνουμε μια ξεκάθαρη εκτίμηση για τον χρόνο ζωής του οχήματος.



Ο κάθε τροχός του οχήματος διαμέτρου 150 mm περιστρέφεται 2100 φορές για κάθε χιλιόμετρο που διανύει το όχημα. Η πρόβλεψη γίνεται ακόμα πιο δυσμενής αν υπολογίσουμε δευτερεύοντες παράγοντες όπως οι απότομες αλλαγές του φορτίου η τραχύτητα του εδάφους η ποιότητα επιφανείας του άξονα και τέλος ότι το όχημα χρησιμοποιήθηκε για να μεταφέρει επιπλέον φορτία.

3.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Η αστοχία του άξονα στο μικρό στρατιωτικό όχημα είναι μια χαρακτηριστική περίπτωση κόπωσης όταν εφαρμόζονται συνεχόμενα εναλλασσόμενα φορτία (λόγο περιστροφής). Με την διατμητική τάση να σημαίνει ακαριαία και να καταστρέφει τον άξονα.

Το σημείο που αστόχησε ο άξονας δεν είναι το σημείο που ασκείται η μεγίστη κοπτική τάση (δηλ. το σημείο αλλαγής της διαμέτρου) αλλά πολύ κοντά στο σημείο που τελειώνει η αύλακα (δηλ. το σημείο με την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων).

Βάση υπολογισμών αποδείχτηκε ότι το μέγεθος της καμτικής τάσης είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέγεθος της διατμητικής τάσης που προήρθε από την στρέψη και τις απότομες επιταχύνσεις - επιβραδύνσεις

Τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν πολύ μεγάλη βαρύτητα για πιθανή βελτίωση της κατασκευής και της επανασχεδίασης της όπως αναλύεται στην παρακάτω παράγραφο.

3.6 Προτεινόμενες αλλαγές στον τρόπο σχεδιασμού

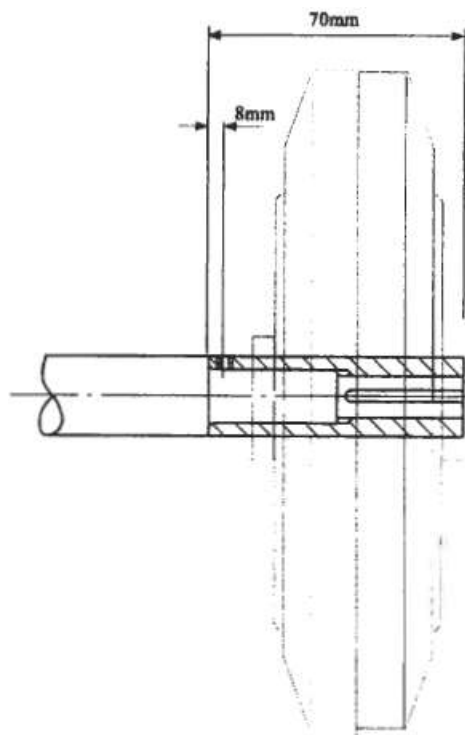
Εφόσον η κατασκευή που μελετήθηκε πρόκειται να αστοχήσει μετά από έναν πεπερασμένο χρόνο λειτουργίας, προτείνονται τροποποιήσεις στον τρόπο σχεδιασμού της που θα οδηγήσουν στην μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Μερικές απλές διορθώσεις θα μπορούσαν να συντελέσουν σε μελλοντικές παρόμοιες εφαρμογές άξονα-τροχού . Οι πιο αποτελεσματικοί τρόποι είναι οι εξής

1. Μείωση του μήκους της σφηνάλακας. Το συγκεκριμένο μήκος ήταν αδικαιολόγητα μεγαλύτερο από το απαιτούμενο μήκος για την μεταφορά της ροπής από τον άξονα στον τροχό. Το μήκος της σφηνάλακας θα πρέπει να μειωθεί και να μεταφερθεί στο άκρο του άξονα όπως φαίνετε στην εικόνα 3.5
2. Αύξηση της διαμέτρου του άξονα και της οπής του τροχού. Αυξάνοντας τον άξονα από 12mm σε 16 mm για μήκος 30mm και επομένως την διάμετρο της οπής του τροχού που εδράζει στον άξονα αυξάνεται σημαντικά η αντοχή της κατασκευής. Μια ακόμα τροποποίηση θα μπορούσε να ήταν η αλλαγή της σπειροτομημένης οπής από M6 σε M4 που θα ήταν εξίσου ικανή να συγκρατήσει τους τροχούς
3. Αύξηση του ράδιο στην αλλαγή της διαμέτρου. Παρόλο που άξονας δεν αστόχησε σε αυτό το σημείο μια πολύ μικρή αλλαγή του ράδιο από R3 σε R5 θα ήταν σημαντική ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση των τάσεων στο σημείο αυτό
4. Μείωση του πάχους των τροχών στο σημείο εδρασης τους στο άξονα. Στην περίπτωση αυτή θα μειωθεί αντίστοιχα και το μήκος του άξονα που «κατέβηκε» στα 12 mm. Η αλλαγή αυτή δεν θα επηρεάσει την λειτουργία αλλά θα αυξήσει κατά πολύ την διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο νέος άξονας που κατασκευάστηκε εφαρμόζοντας τις 4 παραπάνω προτάσεις για αλλαγή του σχεδιασμού



Οι δυο πρώτες προτάσεις για αλλαγή του τρόπου σχεδιασμού είναι αυτές που θα έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην μεγαλύτερη αντοχή της κατασκευής αποφεύγοντας την χρήση άλλων ακριβότερων υλικών. Επίσης με αυτές τις αλλαγές αποφεύγονται και μεγάλες αλλαγές στην διαδικασία της μηχανουργικής κατεργασίας διατηρώντας χαμηλό το κόστος.



3.7 Συμπεράσματα

Ξεκάθαρα απαιτείτε αλλαγή στον τρόπο μελέτης και σχεδιασμού της συναρμογής άξονα-τροχού. Ακόμα και αν λειτουργούσε το όχημα υπό ιδανικές συνθήκες ο χρόνος ζωής του είναι σημαντικά περιορισμένος. Θα πρέπει να υπολογίζετε ο παράγοντας της κόπωσης σε όλη την διάρκεια του σχεδιασμού και την ανάπτυξης ενός προϊόντος και πολύ περισσότερο σε περιστρεφόμενους άξονες χωρίς να δίνονται περιθώρια σε αστοχίας κατά την λειτουργία του. Κάνοντας απλούς υπολογισμούς όπως έγιναν σε αυτό το κεφαλαίο είναι εφικτό να βελτιώσουμε την σχεδίαση των κατασκευών χωρίς να αυξήσουμε το κόστος από την χρήση ακριβότερων υλικών και των τρόπων κατεργασίας.

Βιβλιογραφία

1. Ν. Ανδριανόπουλος, Ε.Κυριαζή, Κ.Λιακόπουλος, "Πειραματική αντοχή των υλικών", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1991
2. Α. Κατσαμάς, "Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών", πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, 2004
3. Norman E. Dowling «Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue», Prentice Hall PTR, 1999
4. Νικόλαος Δ. Πίτατζης, "Μηχανική Συμπεριφορά και Διάρκεια Ζωής Κατασκευαστικών Στοιχείων σε Πολυαξονική Κόπωση", διδακτορική διατριβή, 2015
5. Αλ. Κερμανιδης, Σημείωσης μαθήματος Στοιχεία Μηχανών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (2011)
6. J.Datsko, "Material Properties and Manufacturing Processes", John Wiley and Sons, New York 1966, p 18-20.
7. 14. N.E.Dowling, "Mechanical Behaviour of Materials", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993, p 682.
8. 15. J.M.Gere and S.P.Timoshenko, "Mechanics of Materials", 4th ed., PWS Publishing Co., 1997.
9. Fatigue (material) From Wikipedia, the free encyclopedia [online], 2001. Available from:
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_\(material\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(material))> [accessed 24/03/2017].
10. D.R.H Jones, "Failure Analysis Case Studies II" Pergamom 1997-1998 p 247-255