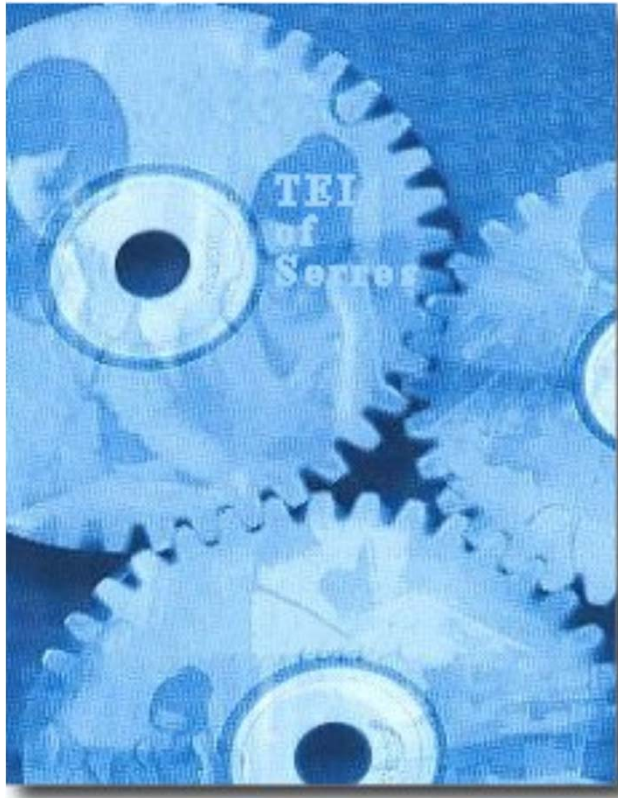


Μάθημα: Πειραματική αντοχή των υλικών

Συμπεριφορά των υλικών σε δυναμικές φορτίσεις-Κόπωση

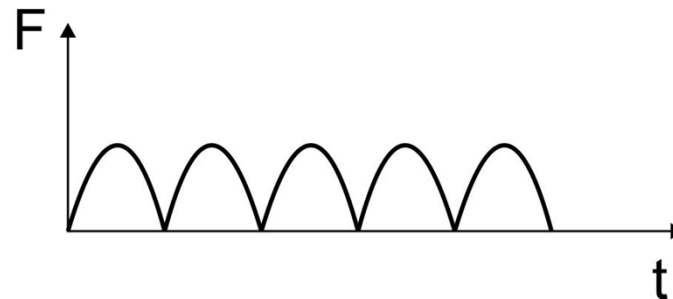


Κατασκευαστικός Τομέας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών

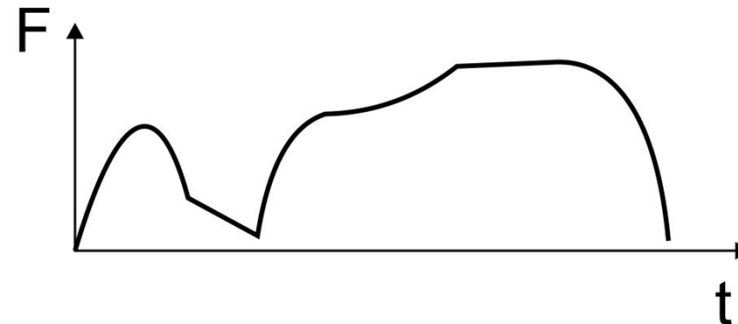
Οι καταπονήσεις των υλικών σωμάτων χαρακτηρίζονται ως δυναμικές όταν τα φορτία εφαρμόζονται συναρτήσει του χρόνου. Σε περίπτωση που τα φορτία είναι ανεξάρτητα του χρόνου τότε ονομάζονται στατικά.

Οι δυναμικές καταπονήσεις μπορούν να διακριθούν σε :

- Εναλλασσόμενες, όταν επαναλαμβάνονται περιοδικά



- Τυχαίες, όταν η εφαρμογή τους σε σχέση με το χρόνο είναι τυχαία



Η αστοχία που εμφανίζεται στα υλικά λόγω της επίδρασης δυναμικών καταπονήσεων ονομάζεται κόπωση. Οι τάσεις που εμφανίζονται λέγονται τάσεις κοπώσεως.

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

Το κύριο χαρακτηριστικό της κόπωσης είναι ότι μπορεί να εμφανιστεί στο υλικό σε τάση που η μέγιστη τιμή της είναι μικρότερη από τα όρια αντοχής σε στατική φόρτιση του ίδιου υλικού.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της αστοχίας στην καμπίνα δύο αεροσκαφών de Havilland Comet, το 1954. Στο συγκεκριμένο αεροσκάφος, η τεχνική που είχε χρησιμοποιηθεί για την τοποθέτηση πριτσινιών περιμετρικά των, παραθύρων της καμπίνας επιβατών, προκάλούσε την εμφάνιση μικρορωγμών, που σε συνδυασμό με την εναλλασσόμενη συμπίεση-αποσυμπίεση της καμπίνας κατά την υπηρεσιακή ζωή του αεροσκάφους προκάλεσε την εν πτήσει εκρηκτική αποσυμπίεση δύο επιβατικών αεροσκαφών με συνολική απώλεια 68 ανθρώπων.

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

- α) μία αρκετά υψηλή μέγιστη εφελκυστική ή θλιπτική 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.

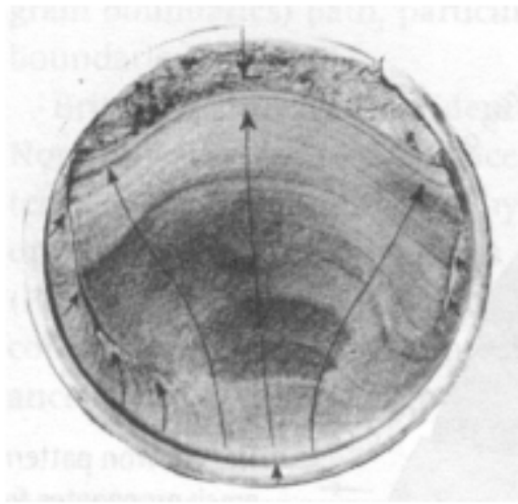
Εκτός από τους τρεις αυτούς βασικούς παράγοντες, η συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε κόπωση επηρεάζεται και από μία σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος, η μικροδομή του υλικού, η ύπαρξη παραμενουσών εσωτερικών τάσεων στο υλικό, κ.α. Αυτός είναι και ο λόγος 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.

Η αστοχία λόγω κόπωσης μπορεί να χωριστεί στα παρακάτω στάδια:

1. Πλαστική παραμόρφωση λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης
2. Έναρξη μικρορωγμών
3. Διάδοση μικρορωγμών
4. Σχηματισμός μεγάλου μεγέθους ρωγμών
5. Τελική αστοχία

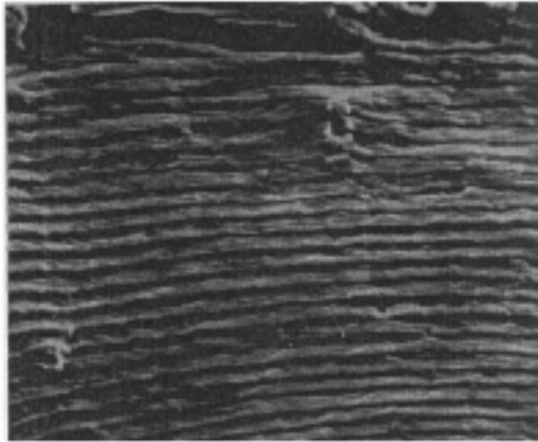
Πρακτικά, ο υπολογισμός των κατασκευών που καταπονούνται σε δυναμικά φορτία είναι σχετικά δύσκολος, διότι οι ατέλειες στο εσωτερικό των υλικών (πόροι, ρωγμές, κενά) συντελούν στο να δημιουργούνται κρίσιμες καταστάσεις για την αντοχή του υλικού. Εφόσον οι εσωτερικές ατέλειες δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων και διαφέρουν από σημείο σε σημείο του υλικού, είναι δυνατόν η αντοχή τεμαχίων που κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό να έχει σημαντικές διαφορές.

Έτσι, εφόσον ο θεωρητικός υπολογισμός της κόπωσης δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με ακρίβεια, υπάρχουν και εφαρμόζονται πειραματικές διαδικασίες, ώστε μέσω αυτών να προσδιοριστεί η αντοχή του εκάστοτε τεμαχίου. Υπάρχουν στην πράξη πολλών ειδών πειραματικές διατάξεις για διάφορους τύπους υλικών, καθώς και διαφορετικές θεωρητικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των οριακών τάσεων αντοχής σε κόπωση των υλικών.



Θραύση από κόπωση σε περιστρεφόμενο άξονα

Ένα 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 ανώμαλη 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.



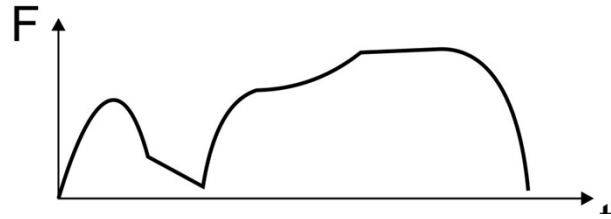
Γραμμώσεις κόπωσης σε επιφάνεια θραύσης κράματος Ti-6Al-4V

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 γράμμωσης από την άλλη δίνει μία καλή εκτίμηση της ταχύτητας με την οποία προωθήθηκε το ρήγμα μέσα στο υλικό.

Με το πείραμα κόπωσης μπορούν να προσδιοριστούν όρια στις τιμές των τάσεων ή των παραμορφώσεων, τα οποία παραμένουν σταθερά για οποιοδήποτε αριθμό επαναλήψεων της φόρτισης. Η χαρακτηριστική τιμή της τάσης αυτής ονομάζεται **διαρκής αντοχή σε κόπωση**. Οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τη διαρκή αντοχή είναι:

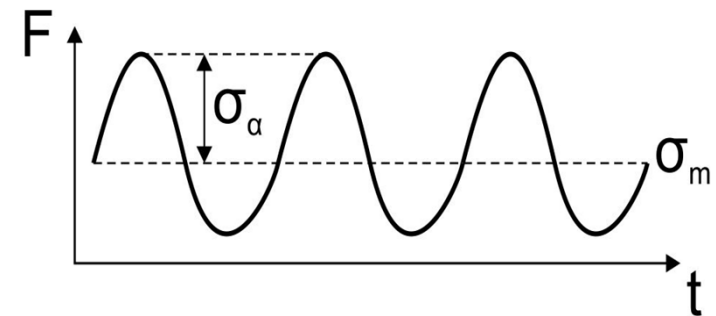
1. Ο τρόπος επιβολής του φορτίου, δηλαδή αν το είδος της φόρτισης είναι εφελκυστικό ή θλιπτικό ή εναλλάσσεται μεταξύ των δύο, αν είναι εναλλασσόμενο καμπτικό ή στρεπτικό.
2. Η μεταβολή των σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων με την αύξηση της παραμόρφωσης
3. Το μέγεθος του δοκιμίου
4. Η μέση τιμή της τάσης που προκαλείται από την επιβαλλόμενη φόρτιση
5. Η συχνότητα των εναλλαγών
6. Η θερμοκρασία του πειράματος.

Στον έλεγχο σε κόπωση γίνεται σειρά δοκιμών που εξετάζεται **μόνο ένας** από τους παραπάνω παράγοντες κάθε φορά.



Όταν ο τρόπος φόρτισης είναι γενικός όπως αυτός του σχήματος τότε η καμπύλη φόρτισης μπορεί να αναλυθεί με σειρές Fourier σε ημιτονοειδής καμπύλες. Για την ανάλυση επομένως του γενικού τρόπου φόρτισης αρκεί να παρατηρηθεί μία ημιτονοειδής εναλλασσόμενη φόρτιση.

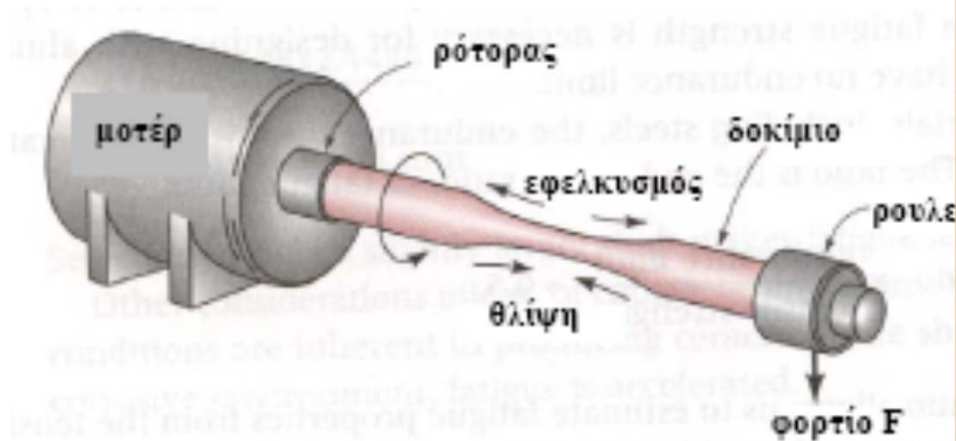
Σε κάθε δοκιμή κόπωσης επαναλαμβάνεται ο κύκλος φορτίσεων σε μεγάλο αριθμό. Κατά τον κύκλο φορτίσεων μεταβάλλεται η φόρτιση μεταξύ δύο οριακών τιμών, δηλαδή μιας μέγιστης σ_{\max} και μιας ελάχιστης σ_{\min} . Προκύπτει για τη μεταβολή της τάσης $\sigma(t)$



$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a * \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$$

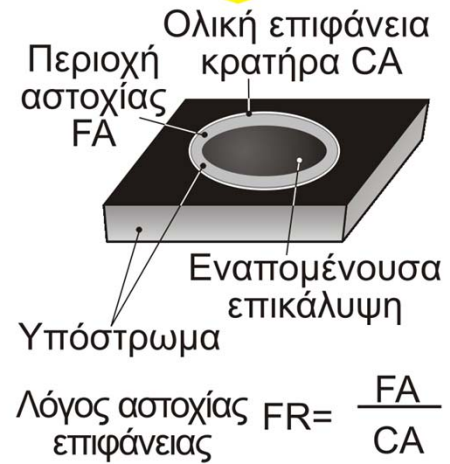
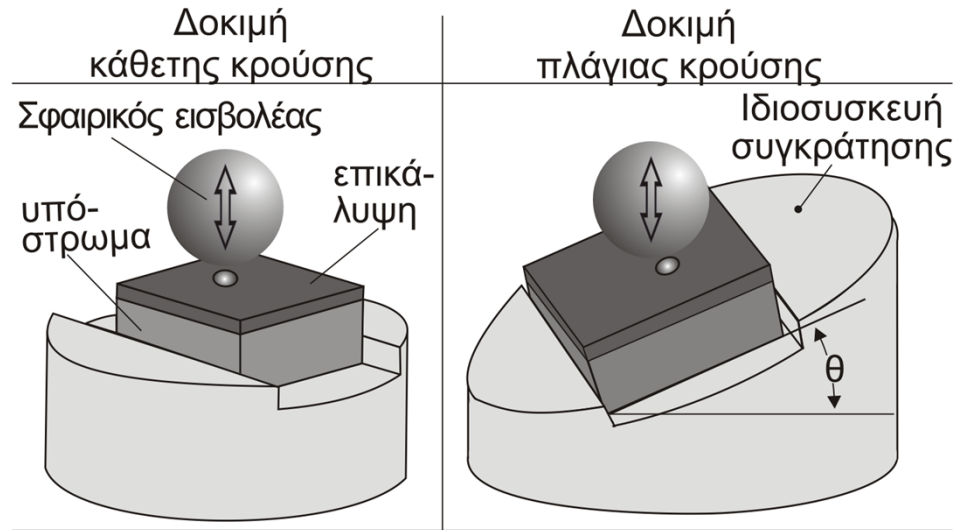
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$



Δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου

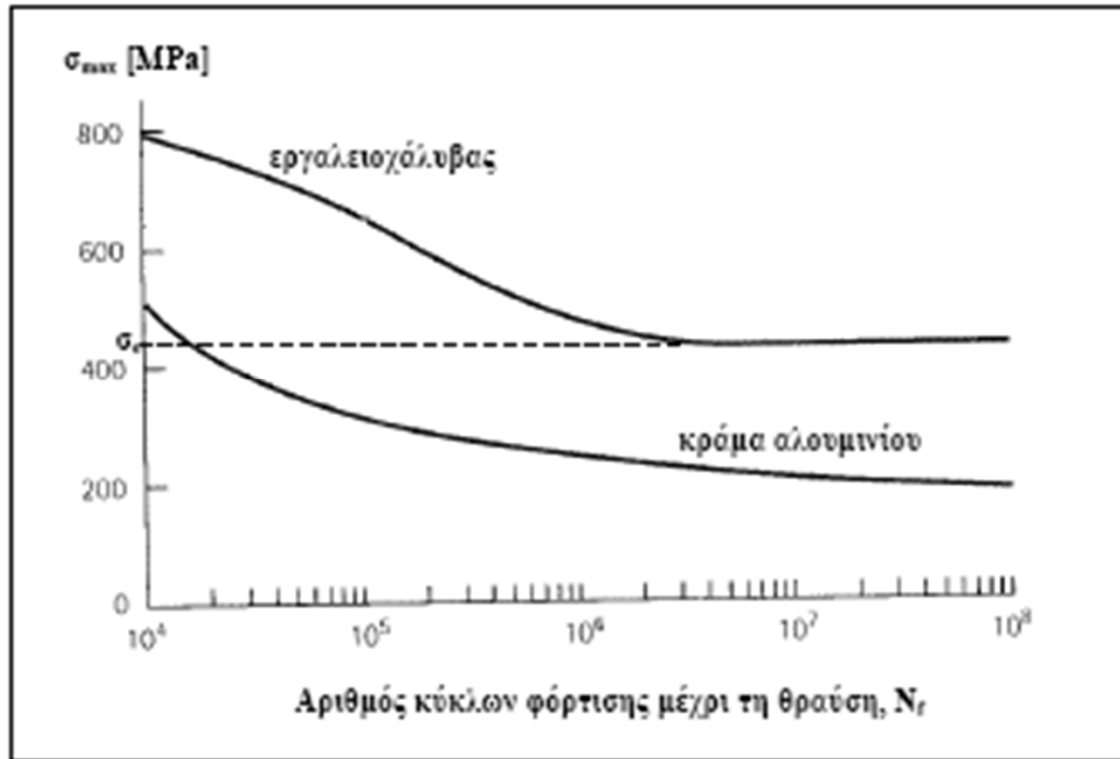


Δοκιμή επαναλαμβανόμενης κρούσης



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. Οι καμπύλες αυτές σχεδιάζονται σε διαγράμματα που στον κατακόρυφο άξονα έχουν ένα μέγεθος “ S ” σχετιζόμενο με την τάση (συνηθέστερα το σ_{max}) 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 σχεδόν πάντοτε είναι εκφρασμένος σε λογαριθμική (\log) κλίμακα.

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 μεταλλικών υλικών προέρχονται από δοκιμές περιστρεφόμενου προβόλου, όπου $\sigma_m = 0$.



Για τον εργαλειοχάλυβα του σχήματος η διαρκής αντοχή σε κόπωση είναι 410 MPa

Το όριο αντοχής σε κόπωση είναι η μέγιστη τάση σ_a γύρω από μία μέση τάση σ_m η οποία εφαρμοζόμενη σε δοκίμιο με «άπειρο» αριθμό επαναλήψεων δεν επιφέρει αστοχία. Πρακτικά, λαμβάνοντας υπόψη και τη μορφή του διαγράμματος Woehler, ο «άπειρος» αριθμός επαναλήψεων είναι 10^6 , για τα περισσότερα μεταλλικά υλικά.

Οι καμπύλες S-N των περισσότερων μεταλλικών υλικών 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).

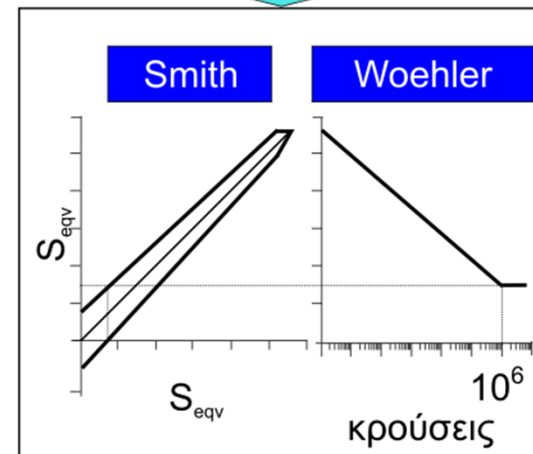
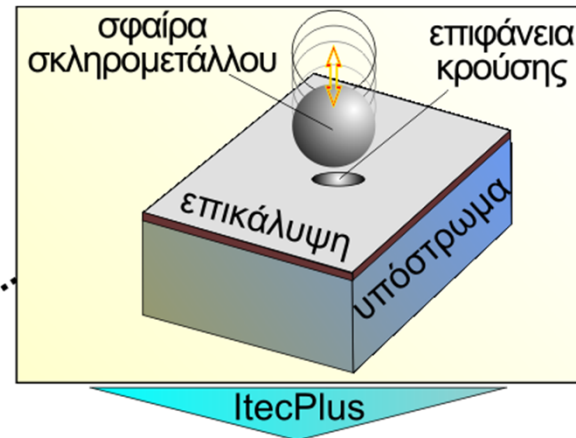
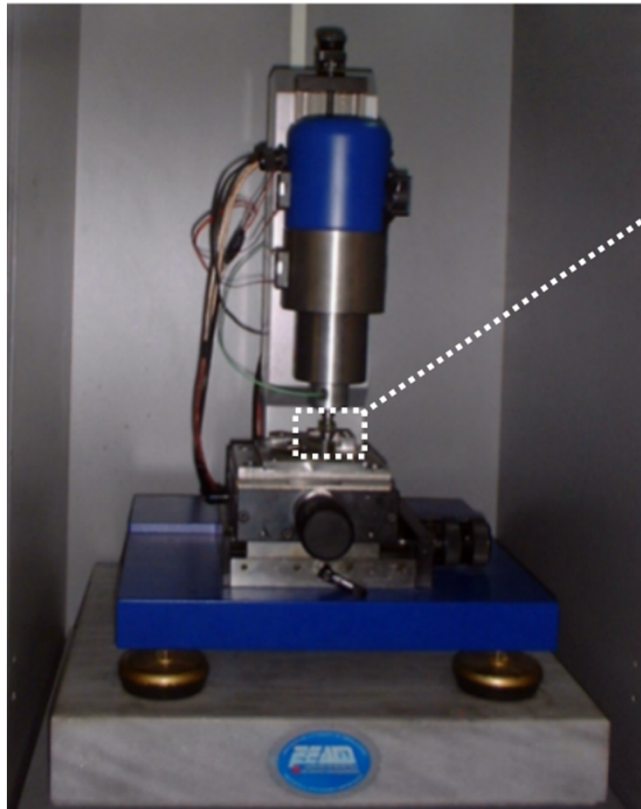
Όταν οι εφαρμοζόμενες τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού, με συνέπεια αυτό σε κάθε κύκλο φόρτισης να υφίσταται ένα ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, τότε η διάρκεια ζωής σε κόπωση μειώνεται σημαντικά ($N_f < 10^4$ κύκλοι). Επειδή στις περιπτώσεις αυτές είναι δύσκολο να εκφραστεί 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).

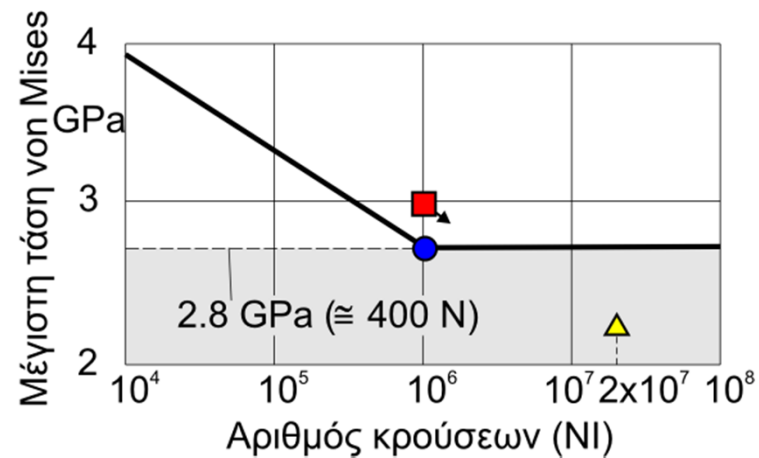
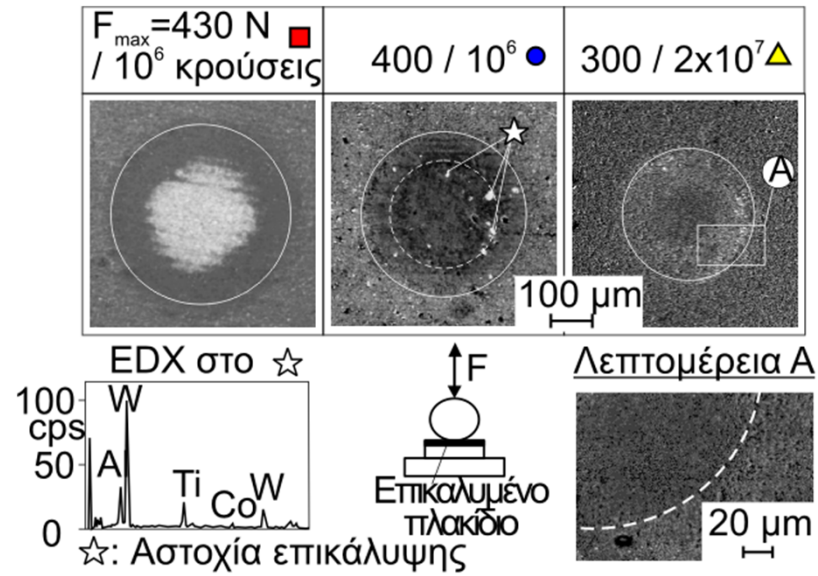
- Η διάρκεια ζωής σε κόπωση αυξάνεται όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση.
- Σε μεταλλικά υλικά μεγάλης πρακτικής σημασίας, όπως οι χάλυβες και το τιτάνιο, υπάρχει μία χαρακτηριστική τιμή τάσης (σ_e) κάτω από την οποία η καμπύλη γίνεται οριζόντια Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη από σ_e , τότε ουσιαστικά το υλικό έχει άπειρη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Με άλλα λόγια δεν κινδυνεύει να υποστεί θραύση λόγω κόπωσης. Για αυτό και 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. Στις περιπτώσεις αυτές, για να μπορεί να ορισθεί μία τάση σαν αντοχή του υλικού σε κόπωση και να χρησιμοποιηθεί για την σχεδιομελέτη κατασκευών, έχει καθιερωθεί η χρήση της **συμβατικής αντοχής σε κόπωση (fatigue strength)**. Η συμβατική αντοχή σε κόπωση είναι η τάση εκείνη, για την οποία το υλικό θα έχει μία προκαθορισμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Συνήθως επιλέγεται μία μεγάλη διάρκεια ζωής της τάξεως των $10^7 - 10^8$ κύκλων φόρτισης.
- Σε διαβρωτικό περιβάλλον παύει να υφίσταται η διαρκής αντοχή σε κόπωση για όλα τα υλικά

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. 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, π.χ. μετά από 10^6 κύκλους. Τότε σαν όριο διαρκούς αντοχής του υλικού ορίζεται η υψηλότερη τάση στην οποία το δοκίμιο δεν αστόχησε.

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 (σ_{max} , σ_{min} , σ_m , κ.τ.λ.) θα παρατηρήσουμε ότι η διάρκεια ζωής τους σε κόπωση θα είναι αρκετά διαφορετικός από δοκίμιο σε δοκίμιο. 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 σχεδιομελέτης μίας κατασκευής.

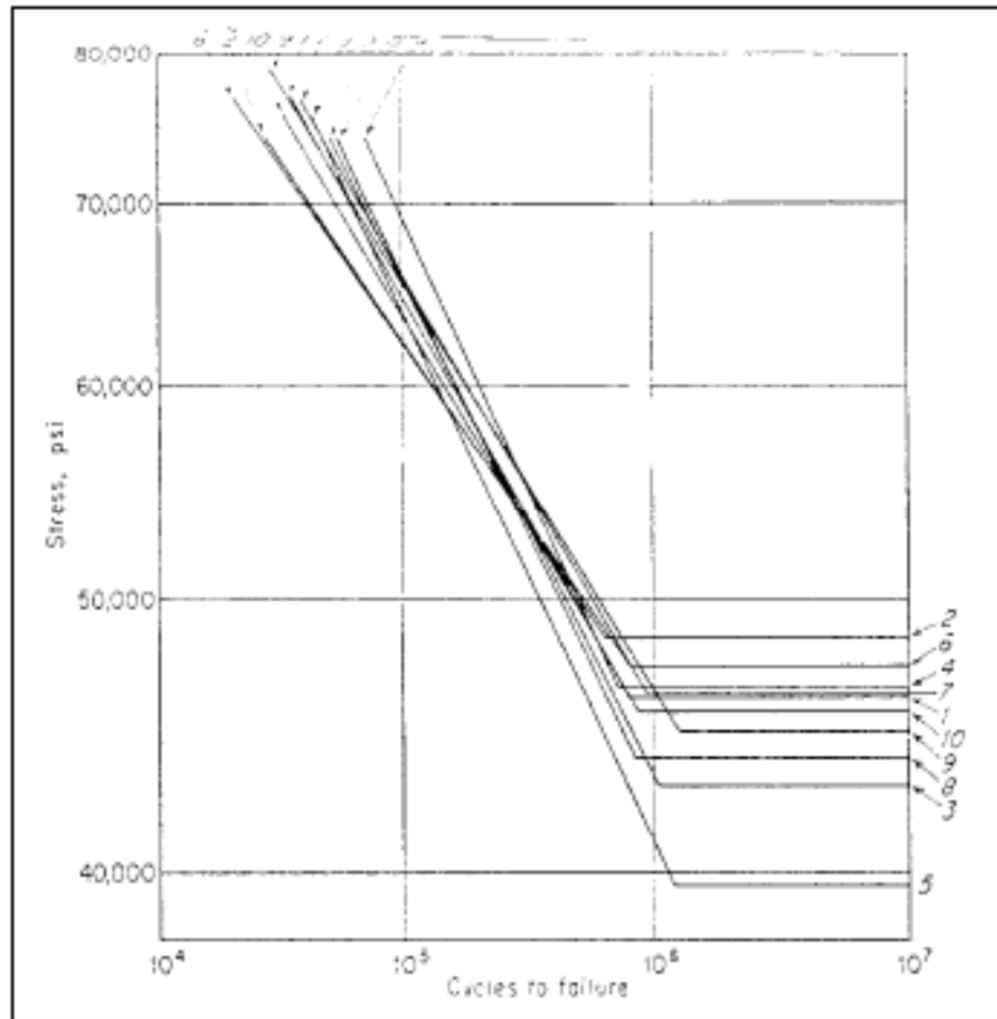
Δοκιμαστήριο επαναλαμβανόμενης κρούσης





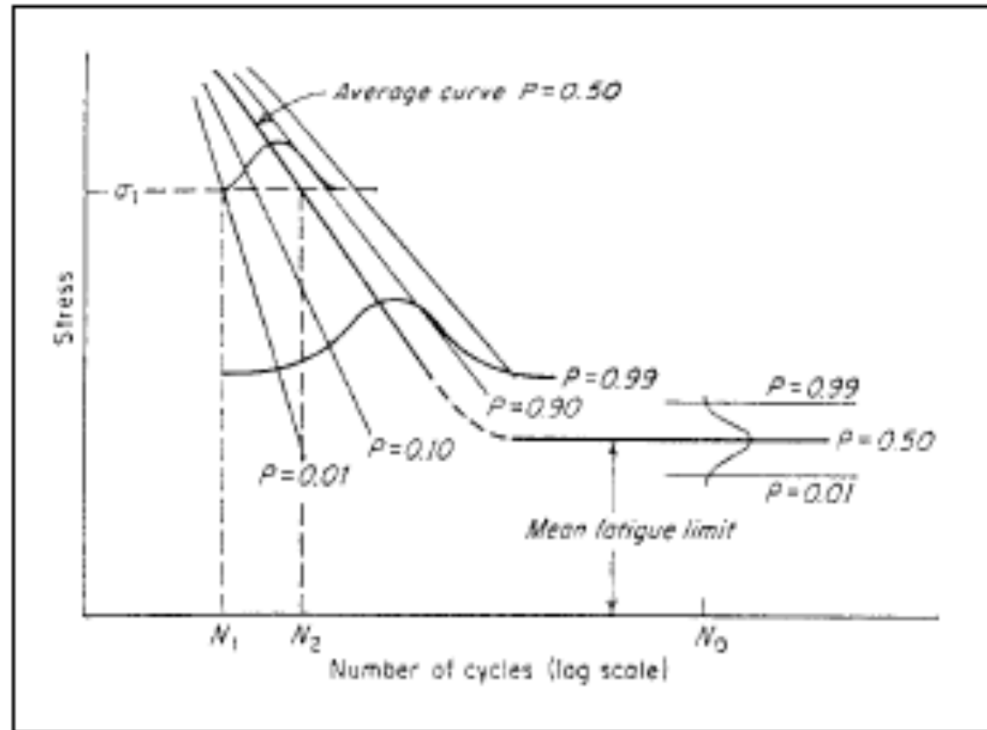
Για να γίνει πιο κατανοητή η μεγάλη στατιστική διασπορά που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης, που πραγματοποιούνται με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες σε δοκίμια από το ίδιο υλικό, έχει ενδιαφέρον να εξετάσουμε το πείραμα του Ransom, που πραγματοποιήθηκε το 1952. Ο Ransom χρησιμοποίησε μία ράβδο από έναν χάλυβα, από την οποία έκοψε και κατασκεύασε 100 πανομοιότυπα δοκίμια κόπωσης, τα οποία στη συνέχεια χώρισε σε 10 ομάδες (10 δοκίμια ανά ομάδα). Κάθε ομάδα δοκιμίων υπεβλήθη σε δοκιμές κόπωσης με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες. Επομένως, για κάθε ομάδα δοκιμίων προέκυψε η αντίστοιχη καμπύλη $S - N$. Οι δέκα συνολικά καμπύλες $S - N$ που προέκυψαν με τον τρόπο αυτό φαίνονται στο διάγραμμα της επόμενης διαφάνειας. Οι δέκα καμπύλες $S - N$ όχι μόνο δεν συμπίπτουν μεταξύ τους, αλλά αντίθετα εμφανίζουν μεγάλες διαφορές, τόσο ως προς την διάρκεια ζωής για κάποια δεδομένη τιμή τάσης, όσο και ως προς το όριο διαρκούς αντοχής.

Το πείραμα του Ransom καταδεικνύει τις πολύ σοβαρές, έως και καταστροφικές, συνέπειες που μπορεί να έχει η αγνόηση αυτής της “στατιστικής” πλευράς της κόπωσης. Για παράδειγμα, εάν για ένα υλικό υπήρχε διαθέσιμη μόνο μια καμπύλη $S - N$, τότε ένας μηχανικός που θα έκανε τη σχεδιομελέτη για μία κατασκευή από το συγκεκριμένο υλικό θα έπαιρνε ως δεδομένο ότι $\sigma_e = 324 \text{ MPa}$. Η πράξη όμως μπορεί να τον διέψευδε, καθώς το υλικό στην πραγματικότητα μπορεί να ακολουθούσε άλλη καμπύλη και να είχε πραγματικό όριο διαρκούς αντοχής μόλις 269 MPa , με αποτέλεσμα κάποια στιγμή να αστοχούσε λόγω κόπωσης.



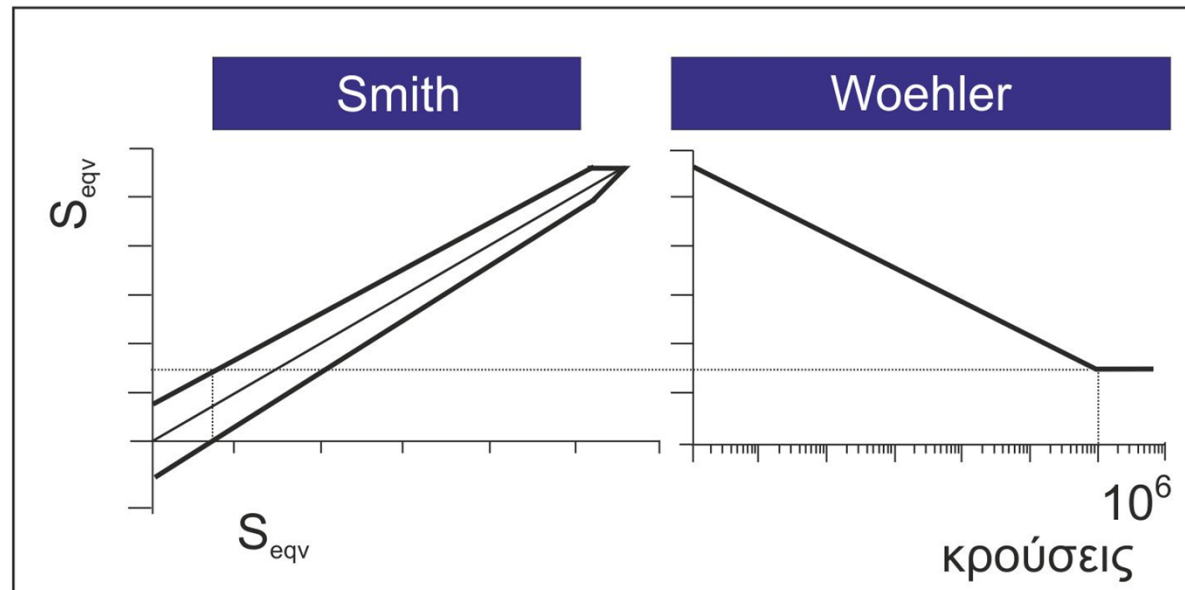
Με βάση όλα τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι τα δεδομένα για την συμπεριφορά ενός υλικού σε κόπωση πρέπει να εμπεριέχουν και πληροφορία σχετικά με το με πόση πιθανότητα (probability) είναι ακριβή και αξιόπιστα.

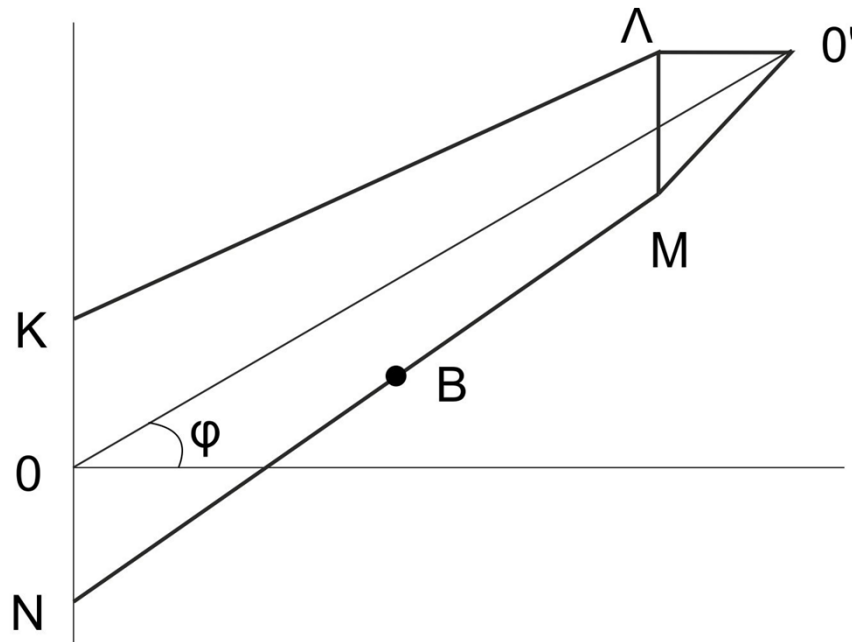
Για να παραχθεί ένα διάγραμμα αυτού του είδους απαιτείται ένα τεράστιο πλήθος δοκιμών του υλικού. Επομένως, το κόστος για την δημιουργία ενός τέτοιου διαγράμματος είναι αρκετά υψηλό.



Όταν μία κατασκευή είναι πολύ κρίσιμη και πρέπει οπωσδήποτε να αποφύγουμε την αστοχία λόγω κόπωσης, τότε λαμβάνουμε υπόψη τα δεδομένα της καμπύλης με πιθανότητα μόλις 1%, επειδή οι προβλέψεις αυτές αφορούν τη χειρότερη δυνατή συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το όριο αντοχής σε κόπωση εξαρτάται από τη μέση τάση σ_m και από το ημιέυρος της διακύμανσης σ_a . Για αυτό το λόγο σε σώματα που καταπονούνται τόσο σε δυναμικά όσο και στατικά φορτία έχει επικρατήσει η χρήση των διαγραμμάτων ασφαλούς λειτουργίας Smith, τα δεδομένα τους προκύπτουν από την εφαρμογή των αποτελεσμάτων των καμπύλων Woehler και των χαρακτηριστικών στατικών ιδιοτήτων αντοχής των υλικών.





$$OK = 2 * O' \Lambda$$

$$OK = ON$$

$$\varphi = 45^{\circ}$$

$$x_{0'} = y_{0'} = \sigma_{\theta}$$

$$x_B = \sigma_m$$

$$y_B = \sigma_{\min}$$

$$OK = \frac{-\sigma_{\min} + 2\sigma_{\theta} - \sqrt{\sigma_{\min}^2 - 4\sigma_{\theta}\sigma_{\max} + 4\sigma_{\theta}^2}}{2}$$

Πολλά στοιχεία μηχανών, δομικά στοιχεία κατασκευών, είτε ακόμη και ολόκληρες συναρμολογημένες διατάξεις τέτοιων επιμέρους στοιχείων, περιέχουν εξ αρχής ρήγματα, τα οποία δημιουργούνται συνήθως σε κάποιο από τα στάδια παραγωγής ή/και κατεργασίας τους. Με την έναρξη λειτουργίας της κατασκευής αυτά τα προϋπάρχοντα ρήγματα, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες κόπωσης, έχουν τη δυνατότητα να προωθηθούν σταδιακά μέσα στο υλικό και να προκαλέσουν την θραύση του. Για τον εντοπισμό και την εκτίμηση του μεγέθους τέτοιων ρηγμάτων, τόσο πριν όσο και κατά τη λειτουργία της κατασκευής, έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου (Non-Destructive Testing – NDT), όπως η ραδιογραφία με ακτίνες Χ, ο έλεγχος με υπερήχους, ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια, ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά, κ.α.

Με δεδομένη την – πολλές φορές αναπόφευκτη – ύπαρξη ρηγμάτων στις κατασκευές, έχει αναπτυχθεί μία φιλοσοφία σχεδιασμού, που στοχεύει στον καθορισμό των συνθηκών λειτουργίας μίας κατασκευής, έτσι ώστε τα δεδομένα προϋπάρχοντα ρήγματα να παραμένουν σταθερά κατά τη λειτουργία της και να μην οδηγούν σε αστοχία (θραύση) από κόπωση. Για τον λόγο αυτό η φιλοσοφία αυτή αναφέρεται συνήθως στη διεθνή βιβλιογραφία σαν “damage–tolerant” (ανεκτικός σε ζημία) ή “fail–safe” (ασφαλής από αστοχία) design.

Η συγκεκριμένη τεχνική σχεδιασμού βασίζεται στην παρατήρηση ότι ο ρυθμός με τον οποίο προωθείται ένα προϋπάρχον ρήγμα μέσα σε ένα υλικό, σε συνθήκες εναλλασσόμενης φόρτισης, ακολουθεί ένα νόμο της μορφής:

$$\frac{da}{dN} = C * (\sigma_a)^m * a^n$$

Στην παραπάνω εξίσωση da/dN είναι η αύξηση του μεγέθους του ρήγματος ανά κύκλο φόρτισης (δηλ. ο ρυθμός προώθησης του ρήγματος), σ_a το εύρος της εναλλασσόμενης τάσης, a το στιγμιαίο μέγεθος του ρήγματος και C μία σταθερά. Διάφορες μελέτες σε μεταλλικά υλικά έχουν δείξει ότι ο εκθέτης m παίρνει τιμές μεταξύ 2 και 4, ενώ ο εκθέτης n μεταξύ 1 και 2.

Η πρακτική χρήση του σχεδιασμού “fail-safe” σημείωσε μεγάλη πρόοδο, όταν διαπιστώθηκε ότι ο ρυθμός προώθησης ρήγματος (da/dN) για διάφορα επίπεδα εναλλασσόμενων τάσεων μπορεί να εκφραστεί σε ένα και μόνο διάγραμμα, σαν συνάρτηση του εύρους του παράγοντα έντασης τάσεων, ΔK . Το εύρος του παράγοντα έντασης τάσεων ορίζεται ως εξής:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = f * \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} - f * \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} = f * \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

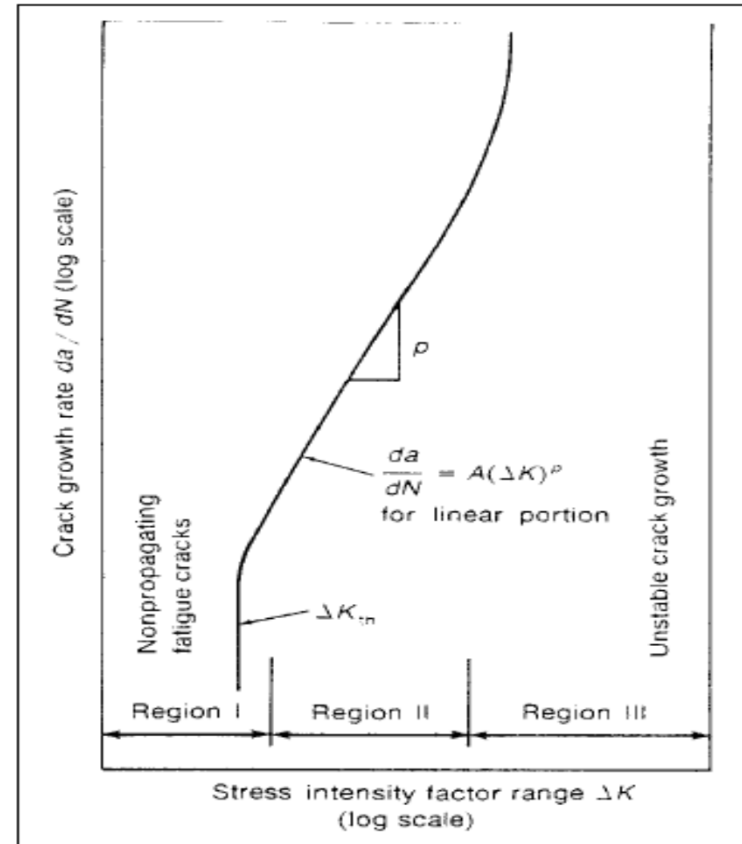
όταν η σ_{\min} είναι θλιπτική ($\sigma_{\min} < 0$) τότε θεωρείται ότι $K_{\min} = 0$

Η καμπύλη διακρίνεται σε τρεις καλά καθορισμένες περιοχές. Στην περιοχή I τα ρήγματα παραμένουν σταθερά, δηλαδή δεν υπάρχει παρατηρήσιμη αύξηση του μεγέθους τους με αύξηση του ΔK . Η περιοχή I εκτείνεται μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή ΔK_{th} , η οποία ονομάζεται τάση “κατωφλίου” (threshold).

Η περιοχή II εμφανίζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από πρακτικής απόψεως, καθώς εδώ εμφανίζεται μία γραμμική συσχέτιση μεταξύ του $\log(da/dN)$ και του $\log(\Delta K)$:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^p$$

Τέλος, στην περιοχή III τα ρήγματα γίνονται ασταθή και ο ρυθμός προώθησής τους αυξάνεται ραγδαία.



Η αύξηση της μέσης τάσης σ_m του κύκλου φόρτισης οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού προώθησης των ρηγμάτων και στις 3 περιοχές της καμπύλης (η καμπύλη μετατοπίζεται συνολικά προς τα πάνω). Αυτό συμβαίνει επειδή αύξηση της σ_m σημαίνει μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις, γεγονός που ευνοεί την ταχύτερη προώθηση των ρηγμάτων.

- **Επίδραση Γεωμετρικών Ασυνεχειών:** η ύπαρξη γεωμετρικών ασυνεχειών, όπως οπές, εγκοπές, σφηναύλακες, κ.τ.λ. μειώνει δραματικά το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού σ_e , αλλά και την διάρκεια ζωής σε κόπωση για ένα δεδομένο επίπεδο δυναμικής καταπόνησης.
- **Επίδραση Μεγέθους:** 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 ιδίου υλικού. Η εξέταση της επίδρασης του μεγέθους είναι καθαρά εμπειρική και δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί μία θεωρία που να καλύπτει όλα τα μεταλλικά υλικά.
- **Κατάσταση της Επιφάνειας:** Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι όλες οι αστοχίες λόγω κόπωσης ξεκινούν από την εξωτερική επιφάνεια του υλικού. Αυτό οφείλεται στο ότι ακόμη και μικρές ανωμαλίες της επιφάνειας, όπως για παράδειγμα η τραχύτητα, μπορούν να λειτουργήσουν σαν σημεία πυρήνωσης ρηγμάτων, 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. Καλύτερη ποιότητα της επιφάνειας αυξάνει κατά πολύ την αντοχή σε κόπωση.