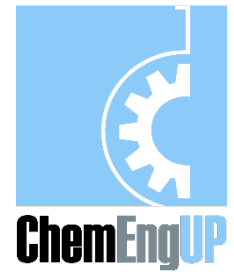




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS



CHM_582: Μηχανική Υλικών

Διάλεξη 10: Κόπωση

Κωνσταντίνος Γ. Δάσιος, Αναπλ. Καθηγητής
Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
kdassios@upatras.gr

Πάτρα, Μάιος 2025

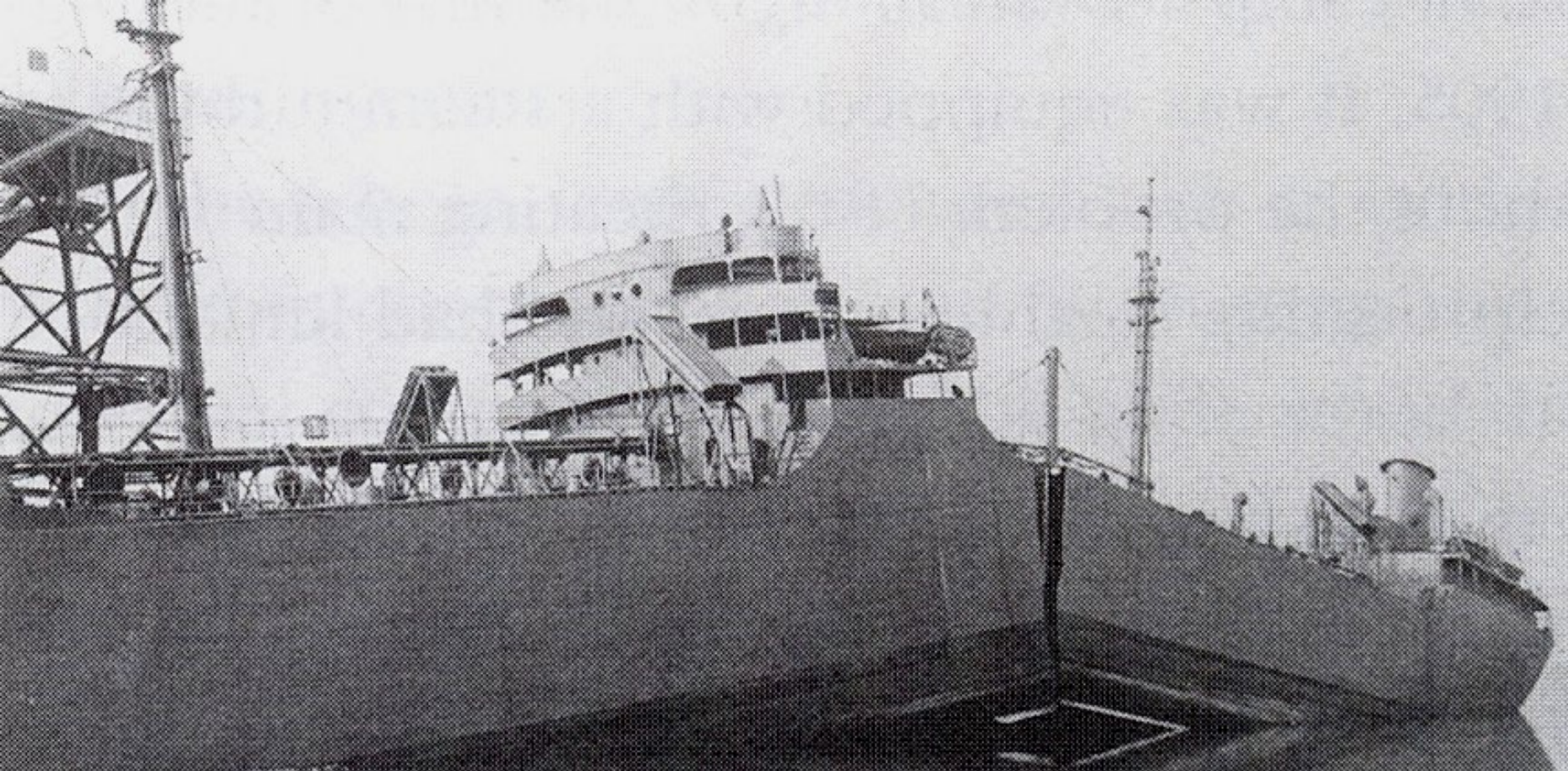
Κόπωση

Έως τώρα ο σχεδιασμός βάσει συντελεστών ασφαλείας βασιζόταν στην **αντοχή** του υλικού (διαρροή, εφελκυστική, θλιπτική, κλπ) ή στην ευστάθεια της κατασκευής (λυγισμός).

Συχνά, στοιχεία που υπόκεινται σε **δυναμικά κυμαινόμενες (κυκλικές) τάσεις** οποιασδήποτε μορφής, ακόμη και θερμικής φύσης, αστοχούν υπό **κόπωση**, σε **τάση χαμηλότερη της αντοχής διαρροής** του υλικού.



ΟΡΙΣΜΟΣ: Κόπωση είναι η μείωση της αντοχής ή αστοχία ενός υλικού, λόγω επαναλαμβανόμενης έκθεσης σε τάση μικρότερη του ορίου διαρροής του.



Μέσα 1900: Γέννηση της επιστήμης της Μηχανικής των Θραύσεων

1943: Το τανκερ Liberty S.S. Schenectady κόβεται στα δύο κατά τον ελλιμενισμό.

Κατά τον Β' ΠΠ, 19 από τα 2500 πλοία Liberty που κατασκευάστηκαν, κόπηκαν στα 2 λόγω κυκλικής φόρτισης και ψαθυρής συμπεριφοράς στις χαμηλές θερμοκρασίες του –κατά τα άλλα- όλκιμου μετάλλου, που οδήγησε σε διάδοση ρωγμής κατά μήκος της περιμέτρου του κοίτους.



Πλωτό Μουσείο Hellas Liberty, Λιμάνι Πειραιά.



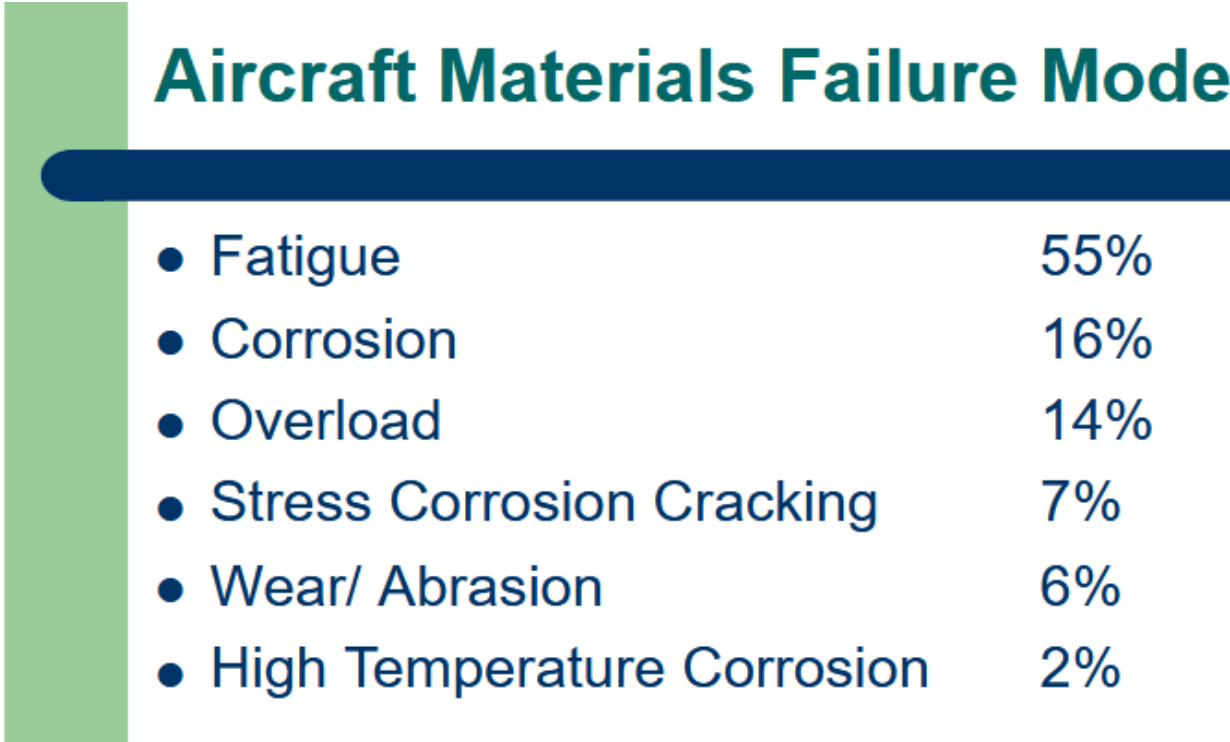
Πτήση Aloha 243, Απρίλιος 1988

Αποκόλληση μεγάλου μέρους του άνω κελύφους της ατράκτου Boeing B-737 λόγω διάδοσης ρωγμής κατά μήκος των μπουλονιών σύνδεσης της ατράκτου. Αστοχία στα 7300 m! Αιτία: **κόπωση**. Σχεδιασμός αεροσκάφους: 75000 πτήσεις. Είχε: 89090 κύκλους απογείωσης-προσγείωσης / ηλικία 19 ετών

Αστοχία και Κόπωση

Στατιστικά στοιχεία αιτιών αστοχίας
αεροναυπηγικών υλικών

Aircraft Materials Failure Modes



• Fatigue	55%
• Corrosion	16%
• Overload	14%
• Stress Corrosion Cracking	7%
• Wear/ Abrasion	6%
• High Temperature Corrosion	2%

Οι κατασκευές αστοχούν λόγω κακού σχεδιασμού ή υποτιμημένης πρόβλεψης, πολλές φορές με κόστος σε ανθρώπινες ζωές.

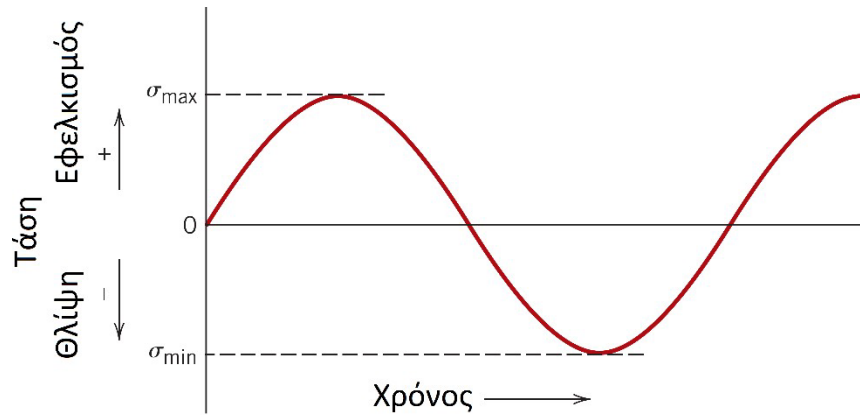
Στάδια Αστοχίας υπό Κόπωση

1. Δημιουργία **αρχικής μικροσκοπικής ρωγμής**, από **πυρήνες στην εξωτερική επιφάνεια** του υλικού ή όπου η τάση είναι μέγιστη (επιφανειακές ατέλειες, εγκλείσματα, οξείες ακμές από κακό σχεδιασμό ή από κατασκευή, κλπ).
2. **Ομαλή διάδοση** ρωγμής καθώς συνεχίζεται η κυκλική φόρτιση.
3. **Ξαφνική αστοχία** του υλικού, όταν η εναπομένουσα επιφάνεια διατομής είναι τόσο μικρή που δεν δύναται να υποστηρίξει το εφαρμοζόμενο φορτίο.

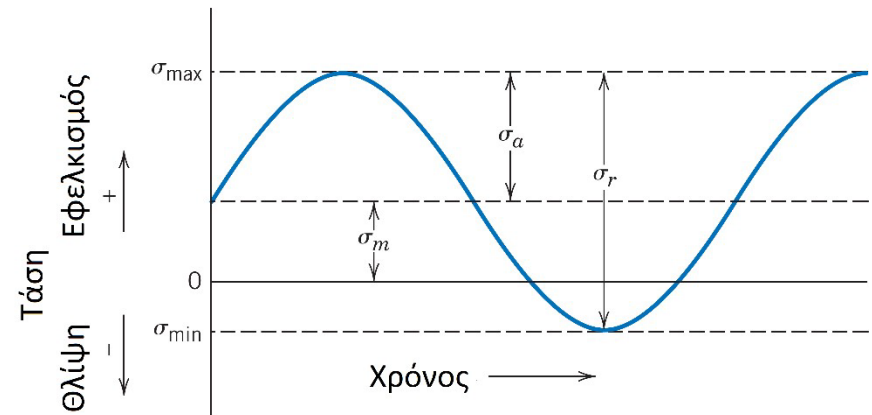
*Η αστοχία λόγω κόπωσης συμβαίνει σε μακροσκοπικά εφαρμοζόμενη τάση **χαμηλότερη από το όριο διαρροής**, επειδή η ένταση της τάσης υπερβαίνει την αντοχή.*

Εμφανίζεται κυριότερα σε μεταλλικά και πολυμερικά υλικά, τα κεραμικά έχουν ήδη χαμηλή δυσθραυστότητα και αστοχούν αμέσως μετά την εμφάνιση ρωγμών.

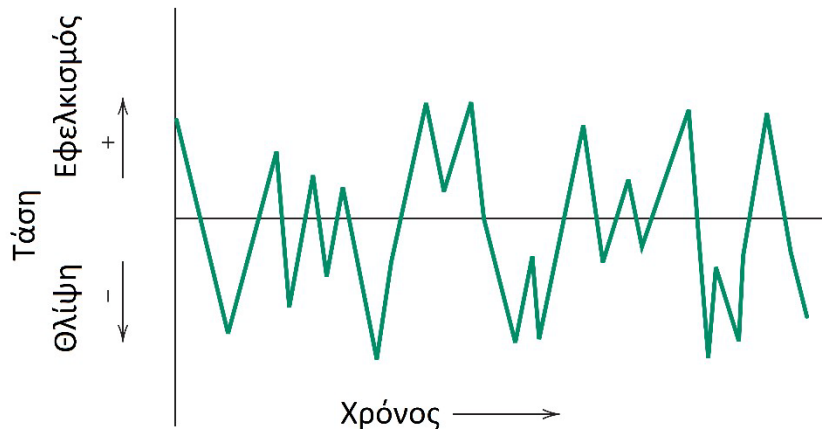
Τύποι Κυμαινόμενης Τάσης



Αντιστρεπτός κύκλος
φόρτισης

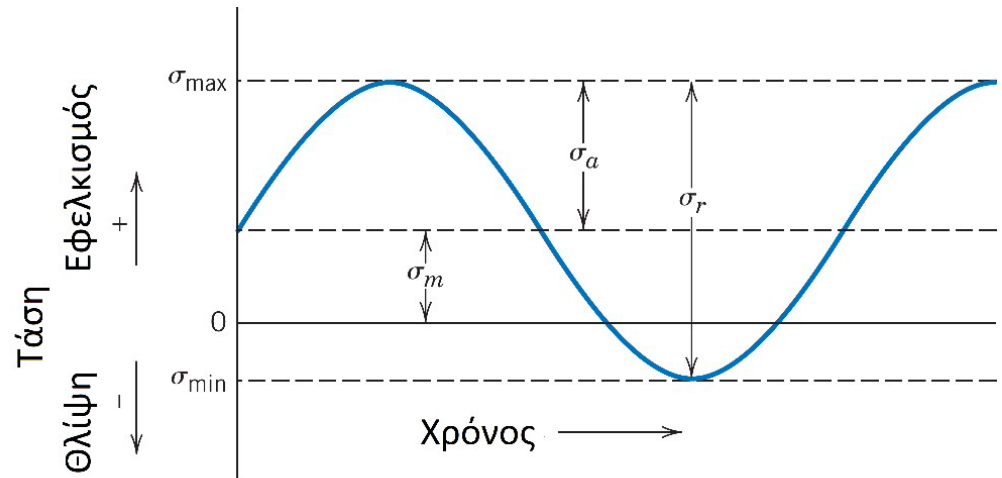


Επαναλαμβανόμενος
κύκλος φόρτισης



Τυχάιος κύκλος
φόρτισης

Ορισμός Κρίσιμων Μεγεθών της Κόπωσης



Η **μέση τάση, σ_m** , ορίζεται ως η μέση τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης στον κύκλο:

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

Το **εύρος των τάσεων, σ_r** , ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ των τιμών σ_{max} και σ_{min} :

$$\sigma_r = | \sigma_{max} - \sigma_{min} |$$

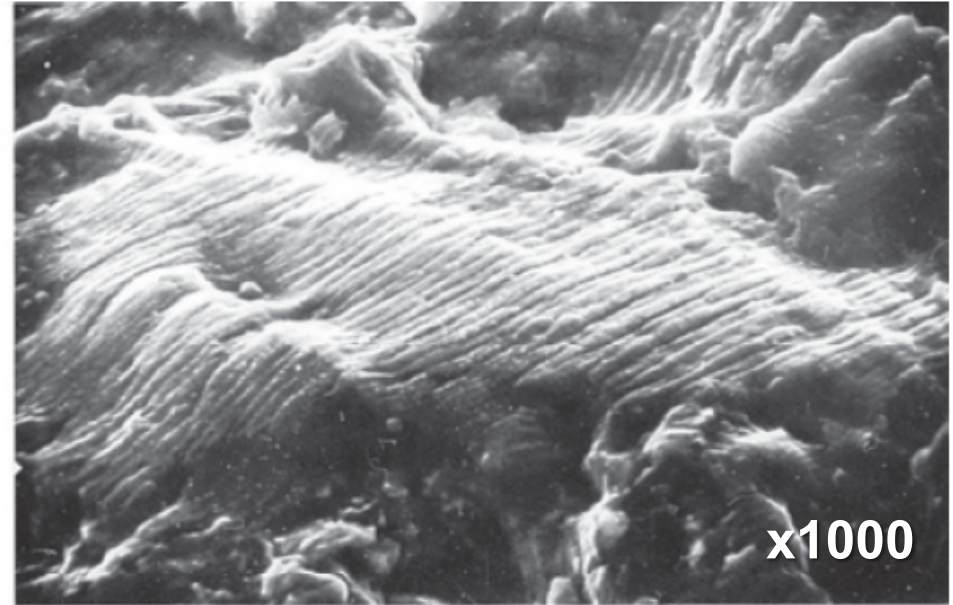
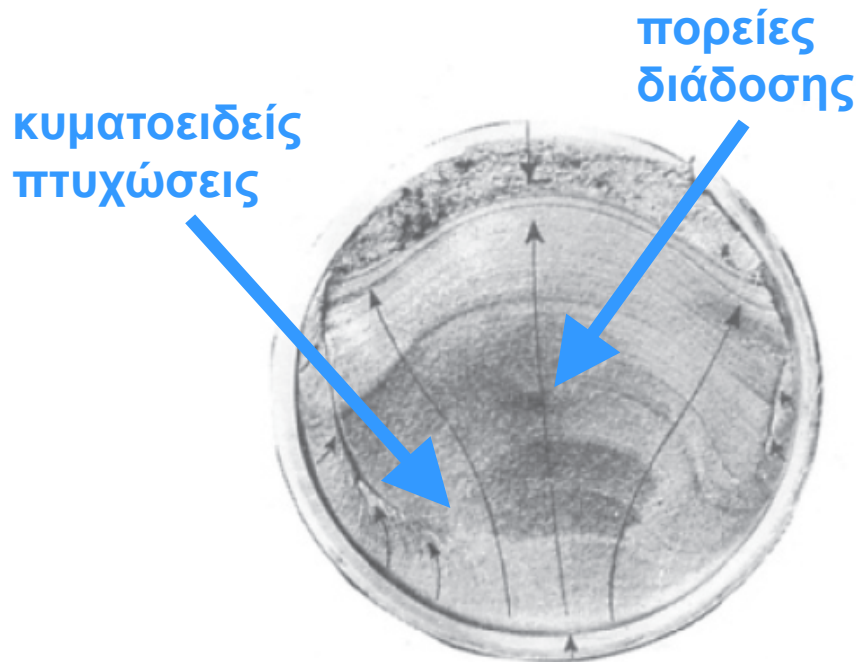
Το **πλάτος της τάσης, σ_a** , ορίζεται ως το μισό του εύρους των τάσεων:

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

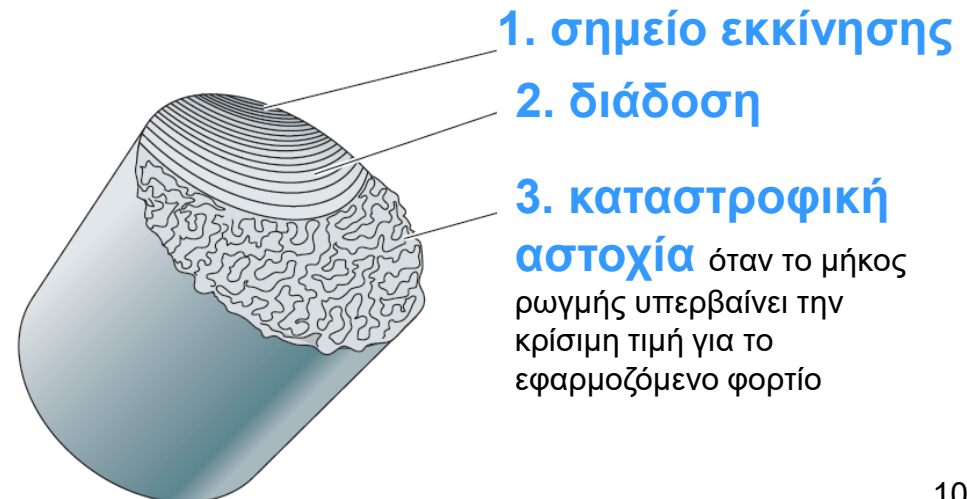
Ο **λόγος τάσεων R** ορίζεται ως ο λόγος του ελάχιστου προς το μέγιστο πλάτος τάσης:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Επιφάνεια Θραύσης υπό Κόπωση



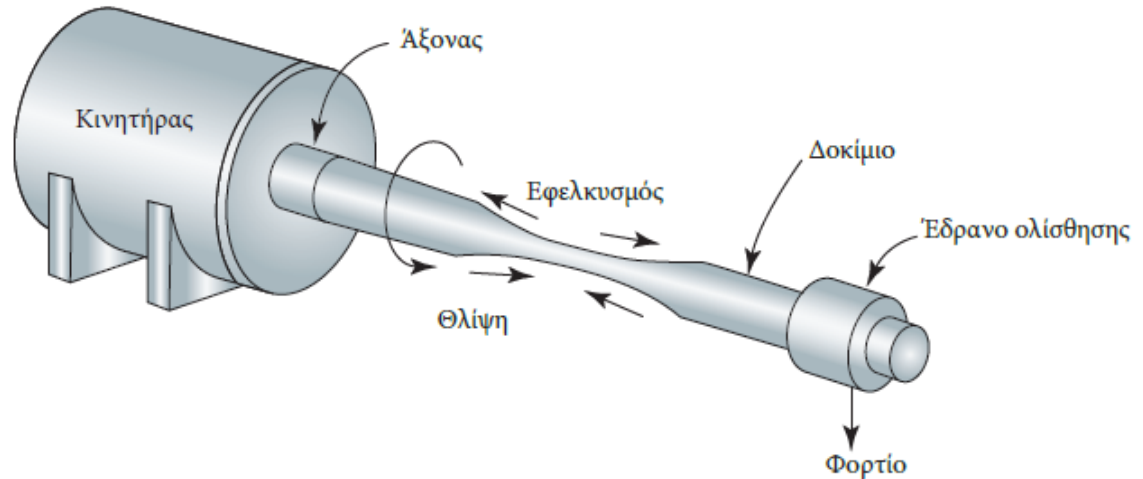
- Λεία στο σημείο εκκίνησης της ρωγμής
- Γίνεται τραχύτερη με διάδοση
- Μοτίβα κυματοειδών πτυχώσεων (beach marks) & μικρο-ραβδώσεις (striations)



Μέτρηση Αντοχής Υλικού στην Κόπωση

Δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου

(rotating cantilever beam test)



1. Ένα άκρο κυλινδρικού δοκιμίου στερεώνεται σε μηχανοκίνητο περιστροφέα, στο δεύτερο **αιωρείται βάρος** (ανάπτυξη τέμνουσας).
2. Αρχικά η άνω επιφάνεια του δοκιμίου καταπονείται σε **εφελκυσμό** και η κάτω σε **θλίψη**.
3. Μετά την περιστροφή κατά 90° , οι περιοχές που ήταν αρχικά υπό εφελκυσμό ή θλίψη **δεν υφίστανται καμία τάση**.
4. Μετά την περιστροφή κατά 180° , το τμήμα του υλικού που ήταν αρχικά σε εφελκυσμό βρίσκεται τώρα υπό θλίψη και αντίστροφα.

Συνεπώς, σε κάθε σημείο η τάση μεταβάλλεται ημιτονοειδώς από τη μέγιστη εφελκυστική τάση στη μέγιστη θλιπτική.

Μέτρηση Αντοχής Υλικού στην Κόπωση



Στη δοκιμή αυτή, η μέγιστη τάση είναι:

$$\pm \sigma = \frac{32 FL}{\pi d^3}$$

L : απόσταση ανάμεσα στα σημεία επιβολής
τέμνουσας δύναμης και στήριξης του δοκιμίου
 F : φορτίο
 d : διάμετρος δοκιμίου

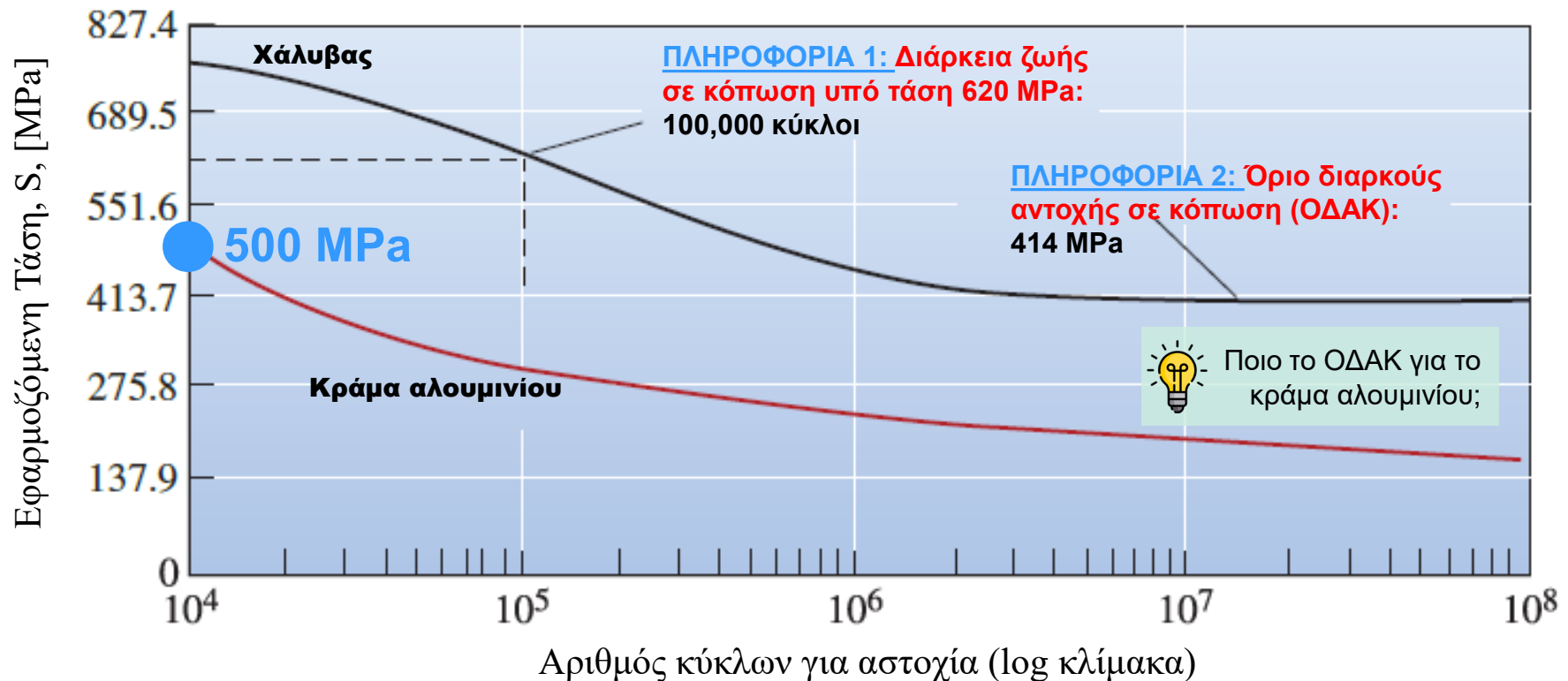


Νεότερες συσκευές: μηχανές άμεσης φόρτισης (direct loading machines) χρησιμοποιούν **σερβοϋδραυλικά** συστήματα για **εφαρμογή δυναμικής κυκλικής δύναμης, εκτροπής, μετατόπισης ή παραμόρφωσης**.

Αποτελέσματα Δοκιμών Κόπωσης

- Σειρά δειγμάτων εξετάζονται σε **διαφορετικές εφαρμοζόμενες τάσεις**.
- Καθένα αστοχεί μετά από **ικανό αριθμό κύκλων** κόπωσης.

Αναπαριστούμε την εφαρμοζόμενη τάση (S) ως προς τον αριθμό των κύκλων (N) που απαιτήθηκαν για την αστοχία του δείγματος.



Καμπύλη S-N (S-N curve) ή καμπύλη Wöhler

Πληροφορίες από Δοκιμές Κόπωσης

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ 1: Η **Διάρκεια Ζωής σε Κόπωση (κύκλοι)** μας δείχνει πόσο δύναται να επιβιώσει ένα εξάρτημα υπό συγκεκριμένη τάση.

- π.χ., αν ο χάλυβας υπόκειται σε κυκλική φόρτιση τάσης ίσης με 620 MPa, η διάρκεια ζωής του σε κόπωση είναι 100,000 κύκλοι.

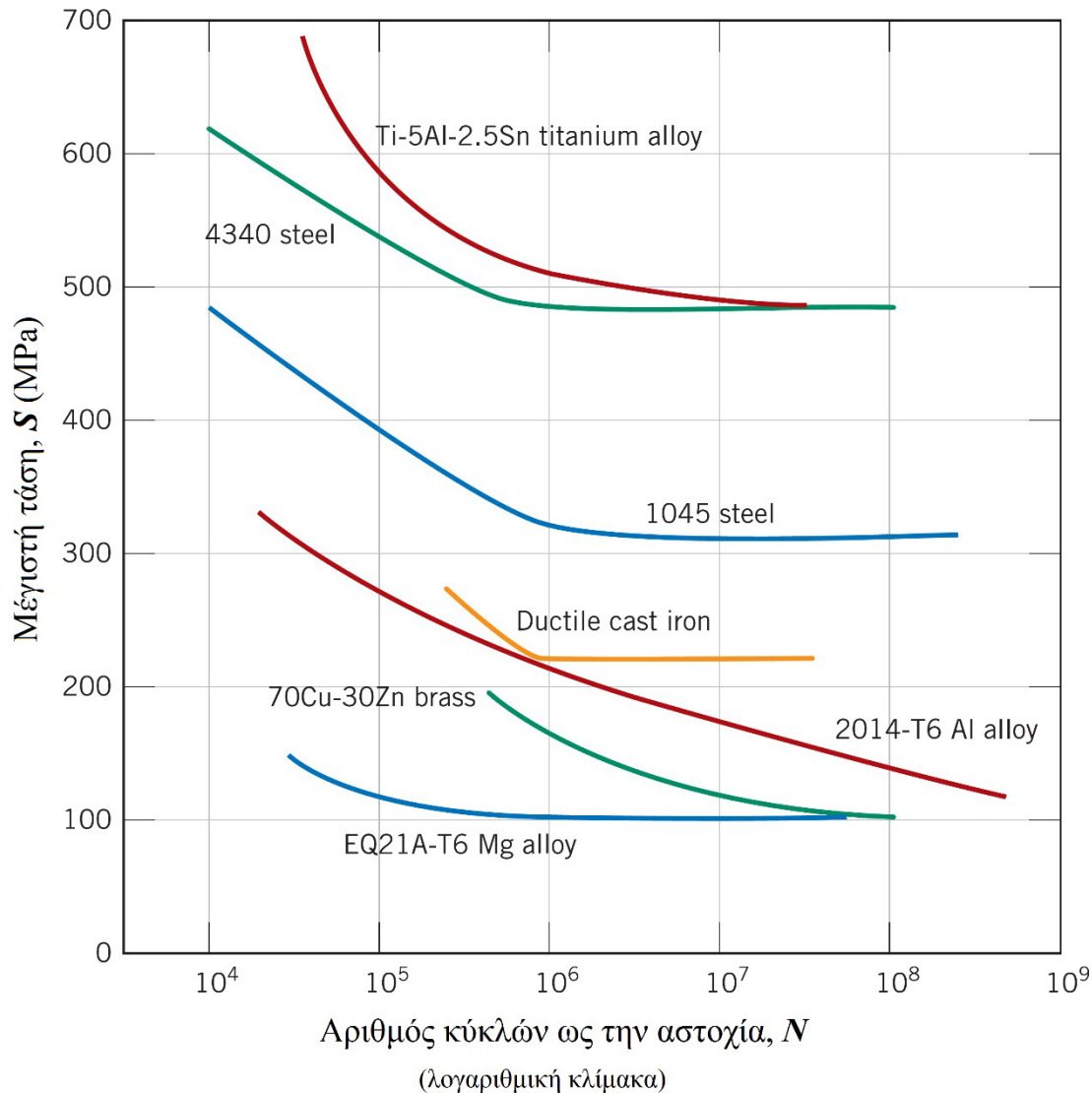
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ 2: Το **Όριο Διαρκούς Αντοχής σε Κόπωση (τάση) ή όριο κόπωσης**, είναι η τάση κάτω από την οποία υπάρχει 50% πιθανότητα να μη συμβεί αστοχία λόγω κόπωσης (αποτελεί το προτιμώμενο σχεδιαστικό κριτήριο)

- π.χ., προκειμένου να αποτρέψουμε την αστοχία ενός εξαρτήματος από χάλυβα, πρέπει η εφαρμοζόμενη τάση να μην ξεπερνά τα 413.7 MPa

Ως **Αντοχή στην Κόπωση (τάση)** ορίζουμε τη μέγιστη τάση για την οποία δεν εμφανίζεται αστοχία για συγκεκριμένο αριθμό κύκλων, π.χ. 500MPa.

- Η γνώση της είναι απαραίτητη στον σχεδιασμό με υλικά που δεν επιδεικνύουν όριο κόπωσης όπως αλουμίνιο και πολυμερικά.

Καμπύλες S-N μεταλλικών κραμάτων



Εμπειρικός Κανόνας

Ο λόγος μεταξύ του ορίου κόπωσης και της εφελκυστικής αντοχής είναι γνωστός ως **Λόγος Διαρκούς Αντοχής** (endurance ratio):

$$\text{Λόγος διαρκούς αντοχής} = \frac{\text{Όριο κόπωσης}}{\text{Αντοχή σε εφελκυσμό}}$$

Ο λόγος διαρκούς αντοχής επιτρέπει την εκτίμηση των ιδιοτήτων κόπωσης από αποτελέσματα εφελκυστικών δοκιμών.

Στους χάλυβες, το όριο κόπωσης είναι συνήθως το ήμισυ της εφελκυστικής αντοχής, δίνοντας λόγο διαρκούς αντοχής: **0.5**

Σε άλλα μεταλλικά υλικά, οι τιμές του κυμαίνονται **από ~0.3 έως 0.4**.

Προστασία από Κόπωση

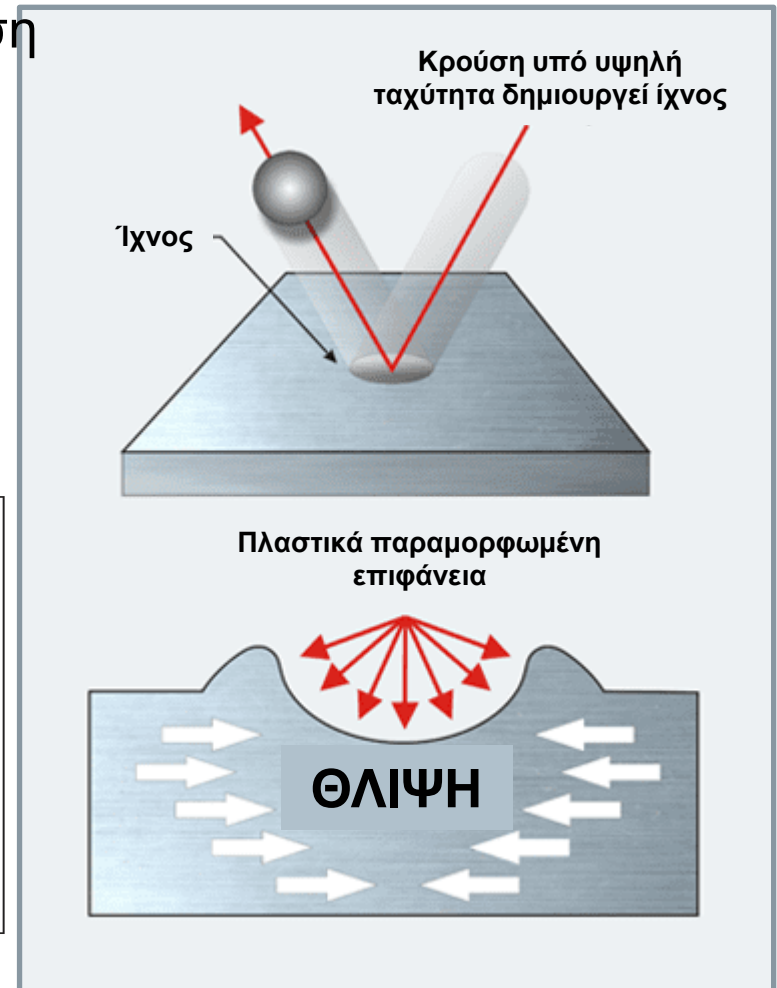
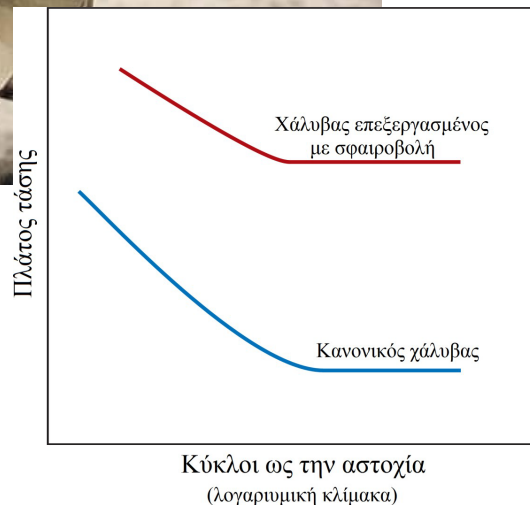
Τα περισσότερα υλικά παρουσιάζουν **ευαισθησία στην παρουσία ατελειών**: Οι ιδιότητες κόπωσής τους εξαρτώνται έντονα από τις ατέλειες, κυρίως τις επιφανειακές.

Οι ατέλειες που προκύπτουν από το σχεδιασμό ή κατά την κατασκευή, **ενισχύουν τις τάσεις και ελαττώνουν το όριο κόπωσης, την αντοχή στην κόπωση ή τη διάρκεια ζωής σε κόπωση**.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ Ι: Προετοιμασία εξωτερικών επιφανειών με υψηλό επίπεδο **λείανσης**, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας λόγω κόπωσης.

Προστασία από Κόπωση (2)

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ II: Στην **σφαιροβολή** (shot peening), βάλλοντας μικρές μεταλλικές σφαίρες στην επιφάνεια των υλικών, αναπτύσσονται σε αυτήν απομένουσες θλιπτικές τάσεις, που βελτιώνουν τη διάρκεια ζωής σε κόπωση



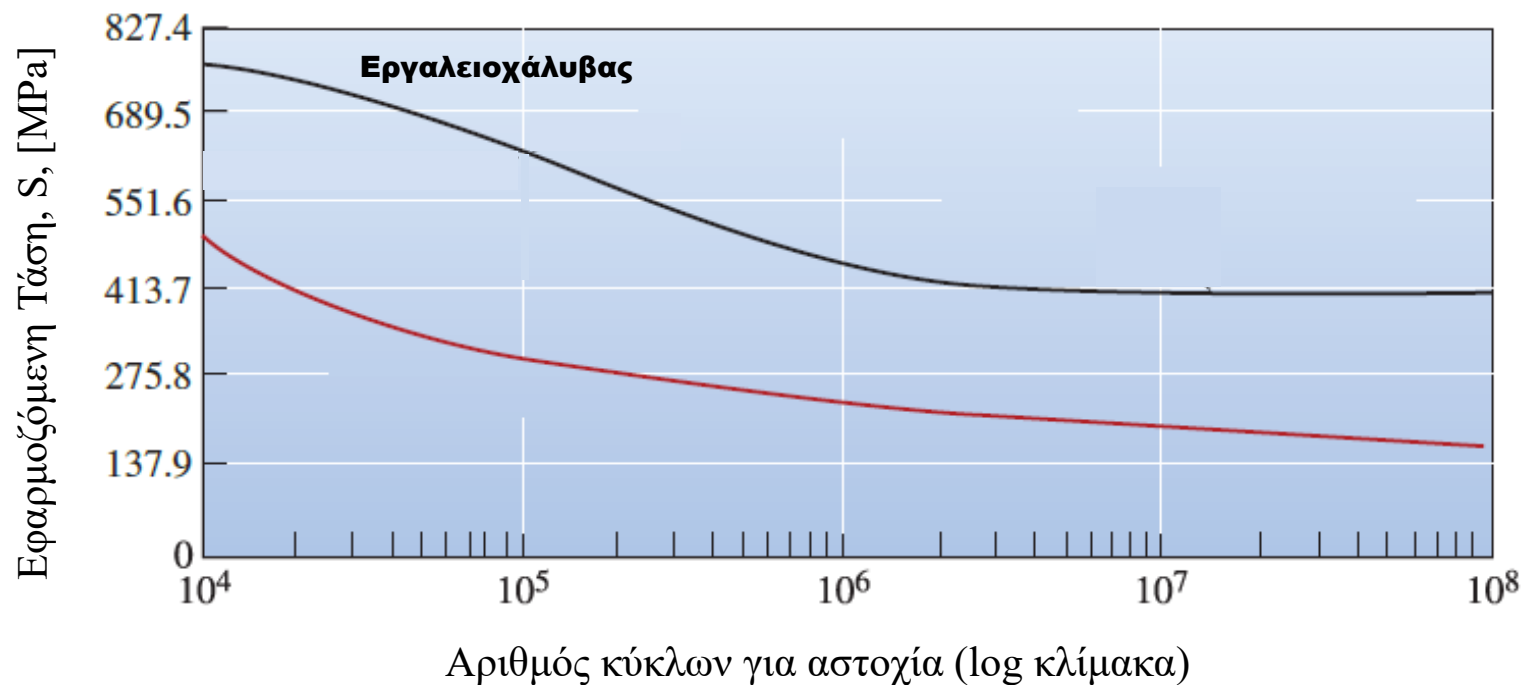
Προστασία από Κόπωση με Διάχυση (3)

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΙΙΙ: Η διάχυση αερίων στο εσωτερικό του μετάλλου είναι μία τεχνική βελτίωσης της **επιφανειακής σκληρότητας** και της **διάρκεια ζωής σε κόπωση** κραμάτων χάλυβα.

- Επιτυγχάνεται κυρίως μέσω **ενανθράκωσης ή εναζώτωσης** των χαλύβδινων εξαρτημάτων, εκθέτοντάς τα σε **ρεύματα των αερίων σε υψηλή θερμοκρασία**, για την ταχεία και έντονη διάχυση των αερίων ειδών στο εσωτερικό τους που δημιουργούν περίβλημα πλούσιο σε άνθρακα/άζωτο (πάχος ~1 mm).
- Η βελτίωση των ιδιοτήτων σε κόπωση προκύπτει από την **αυξημένη σκληρότητα του περιβλήματος** (σε σχέση με τον πυρήνα), καθώς επίσης από την ανάπτυξη επιθυμητών εναπομενουσών θλιπτικών τάσεων.

Παράδειγμα 1: Σχεδιασμός Περιστρεφόμενου Άξονα

Συμπαγής άξονας εργαλειοχάλυβα με την καμπύλη SN του διαγράμματος, σχεδιάζεται να λειτουργεί ως περιστρεφόμενος πρόβολος σε κλίβανο τσιμέντου όπου θα εκτελεί μία περιστροφή ανά λεπτό. Πρέπει να έχει μήκος 2.438 m και να επιβιώνει υπό συνεχή λειτουργίας για διάρκεια ενός έτους υπό φορτίο 55.6 kN. Σχεδιάστε άξονα που θα ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις.



Σχεδιασμός Περιστρεφόμενου Άξονα

Η διάρκεια ζωής σε κόπωση που απαιτείται για το συγκεκριμένο σχεδιασμό είναι **το πλήθος των κύκλων N** στους οποίους υποβάλλεται ο άξονας **σε ένα έτος**:

$$N = (1 \text{ κύκλος/min})(60 \text{ min/h})(24 \text{ h/day})(365 \text{ days/yr}) = 5.256 \times 10^5 \text{ κύκλοι/yr}$$

Από το διάγραμμα, η εφαρμοζόμενη τάση δεν πρέπει να ξεπερνά τα 495 MPa.



Σχεδιασμός Περιστρεφόμενου Άξονα (2)

Η διάμετρος του άξονα:

$$\pm \sigma = \frac{32FL}{\pi d^3}$$

$$496.4 \times 10^6 \text{ Pa} = \frac{(32)(55.6 \times 10^3 \text{ N})(2.438 \text{ m})}{\pi d^3}$$

$$d = 0.141 \text{ m}$$

Άξονας με διάμετρο 141 mm θα λειτουργήσει υπό αυτές τις συνθήκες για ένα έτος.

Εισάγουμε συντελεστή ασφαλείας, **έστω 2**. Τότε η μέγιστη επιτρεπτή τάση θα είναι ίση με $496.2/2 \text{ MPa} = \mathbf{248.2 \text{ MPa}}$ και τότε η ελάχιστη διάμετρος για αποφυγή αστοχίας:

$$248.2 \times 10^6 \text{ Pa} = \frac{32(55.6 \times 10^3 \text{ N})(2.438 \text{ m})}{\pi d^3}$$

$$d = 0.177 \text{ m}$$



Η μέγιστη επιτρεπτή τάση είναι μικρότερη του ορίου διαρκούς αντοχής σε κόπωση (414 MPa). Συνεπώς με τον συντελεστή ασφαλείας, εξασφαλίζουμε επιπρόσθετα ότι πιθανότατα ο άξονας δεν θα αστοχήσει ποτέ!

Ρυθμός Διάδοσης Ρωγμής σε Κόπωση

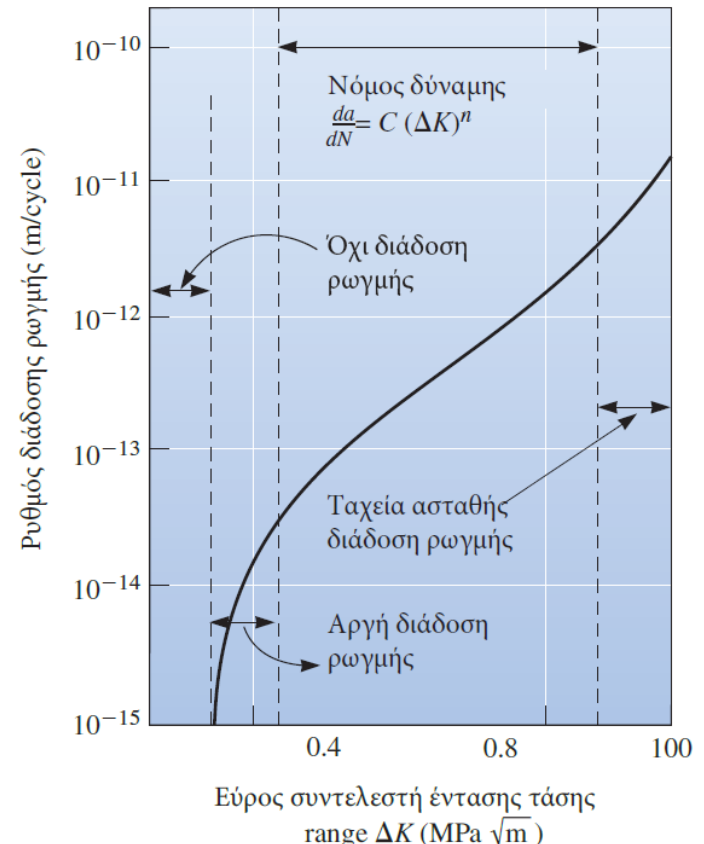
Από τα παραπάνω έγινε σαφές ότι ένα υλικό μπορεί να **μην κινδυνεύει να αστοχήσει**, ακόμη και αν **υφίσταται ατέλεια**, εάν βρίσκεται κάτω από το όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση.

Αν όμως η **ατέλεια διαδωθεί σε ρωγμή**, η τάση θα αυξηθεί σαν αποτέλεσμα τη συγκέντρωση τάσεων.

Συνεπώς για την εκτίμηση του ενδεχομένου αστοχίας, ιδιαίτερη σημασία έχει ο **ρυθμός με τον οποίο διαδίδεται μία ρωγμή**.

Μπορούμε να αποτυπώσουμε το ρυθμό διάδοσης μίας ρωγμής συναρτήσει του εύρους του **συντελεστή έντασης τάσεων ΔK** , παράμετρος που χαρακτηρίζει τη γεωμετρία της ρωγμής και το πλάτος της τάσης.

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$



Ρυθμός Διάδοσης Ρωγμής σε Κόπωση (2)

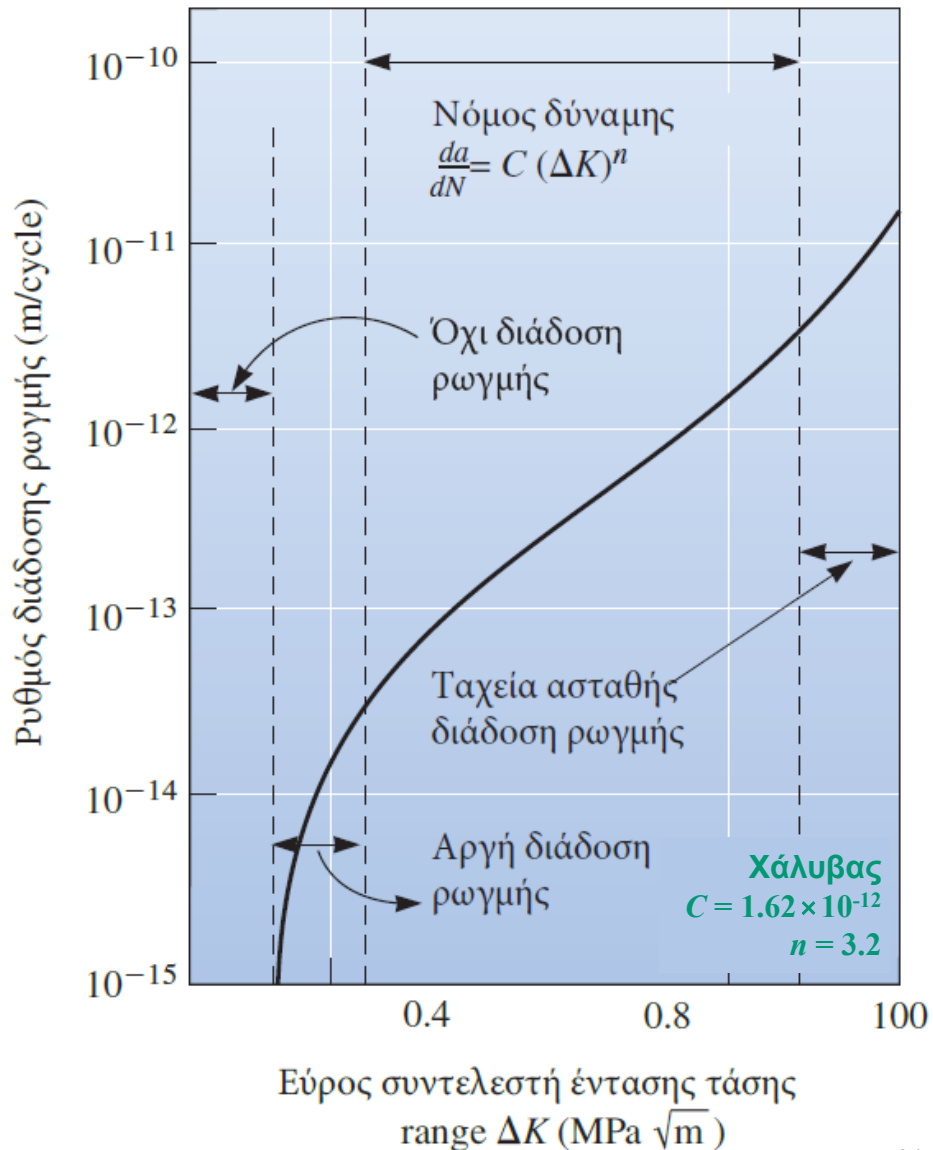
1. Κάτω από μία οριακή τιμή ΔK , η ρωγμή δεν αναπτύσσεται
2. Για υψηλότερες εντάσεις οι ρωγμές αναπτύσσονται αργά
3. Για ακόμη μεγαλύτερες εντάσεις, ο ρυθμός διάδοσης μιας ρωγμής δίνεται από:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

**Νόμος
Paris**

C, n : εμπειρικές σταθερές του υλικού

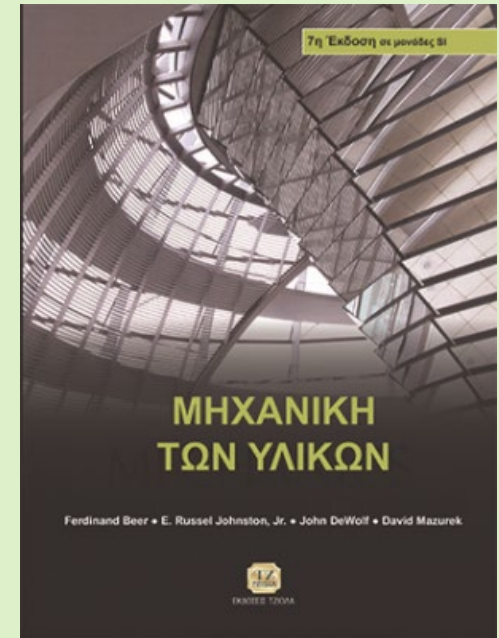
4. Όταν το εύρος ΔK είναι ακόμη υψηλότερο, οι ρωγμές διαδίδονται ταχύτατα και με ασταθή τρόπο, έως ότου επέλθει θραύση.



Ανακοινώσεις

Περισσότερη Μελέτη:

- Σημειώσεις
- Κεφ. 7, Essentials of Materials Science & Engineering, 4th Edition 2019, D.R. Askeland, W.J. Wright
- <https://www.marinersmuseum.org/2021/01/brittlee-fracture-when-ships-split-in-two/>



Ώρες συνεργασίας με φοιτητές: Τετάρτη 12.00-14.00