



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τεχνολογία Υλικών II

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Δρ. Σκλήρη Ευαγγελία

Δοκιμές Δυθραυστότητας

□ Δοκιμές Δυθραυστότητας

- Υπάρχουν τυποποιημένες μέθοδοι για τον προσδιορισμό της **αντοχής σε θραύση (fracture toughness)**.
- Τα πρότυπα καθορίζονται κυρίως από οργανισμούς όπως η ASTM (American Society of Testing Materials).
- Τα δοκίμια έχουν **προϋπάρχουσα ρωγμή** (τεχνητά δημιουργημένη).
- Κατά τη δοκιμή μετρώνται:
 - το φορτίο
 - η μετατόπιση της ρωγμής (εξέλιξη της ρωγμής)
- Τα δεδομένα μπορούν να συσχετιστούν με K_{Ic} , που εκφράζει την **αντίσταση του υλικού στη διάδοση ρωγμής**.

Οι μέθοδοι εφαρμόζονται κυρίως σε μέταλλα, αλλά και σε κεραμικά, πολυμερή και σύνθετα

□ Δοκιμές Κρούσης (Impact Testing)

- Αναπτύχθηκαν πριν τη σύγχρονη θεωρία μηχανική θραύσης.
- Σκοπός η αξιολόγηση συμπεριφοράς σε **υψηλούς ρυθμούς φόρτισης**.
- Η συμπεριφορά σε κρούση διαφέρει από αυτή σε αργή φόρτιση (στατική φόρτιση)
- Δοκιμές κρούσης προσομοιώνουν δυσμενείς συνθήκες θραύσης :
 - χαμηλή θερμοκρασία**
 - υψηλός ρυθμός παραμόρφωσης**
 - τριαξονική κατάσταση τάσεων (π.χ. λόγω εγκοπής)**
- Χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της **μετάβασης από όλκιμη σε ψαθυρή θραύση**.

Δοκιμές Δυθραυστότητας

Πρότυπες δοκιμές κρούσης: Charpy και Izod

Μετρούν την **ενέργεια κρούσης (impact energy)** που απορροφά το υλικό μέχρι τη θραύση.

Χαρακτηριστικά δοκιμίου:

Δοκός **ορθογωνικής διατομής**

Περιέχει **εγκοπή (V-notch)** → δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων

Διαδικασία δοκιμής:

Εκκρεμές σφυρί αφήνεται από ύψος **h**

Χτυπά το δοκίμιο στην εγκοπή και το θραύει

Συνεχίζει σε μικρότερο ύψος **h'**

Ενέργεια που απορροφήθηκε:

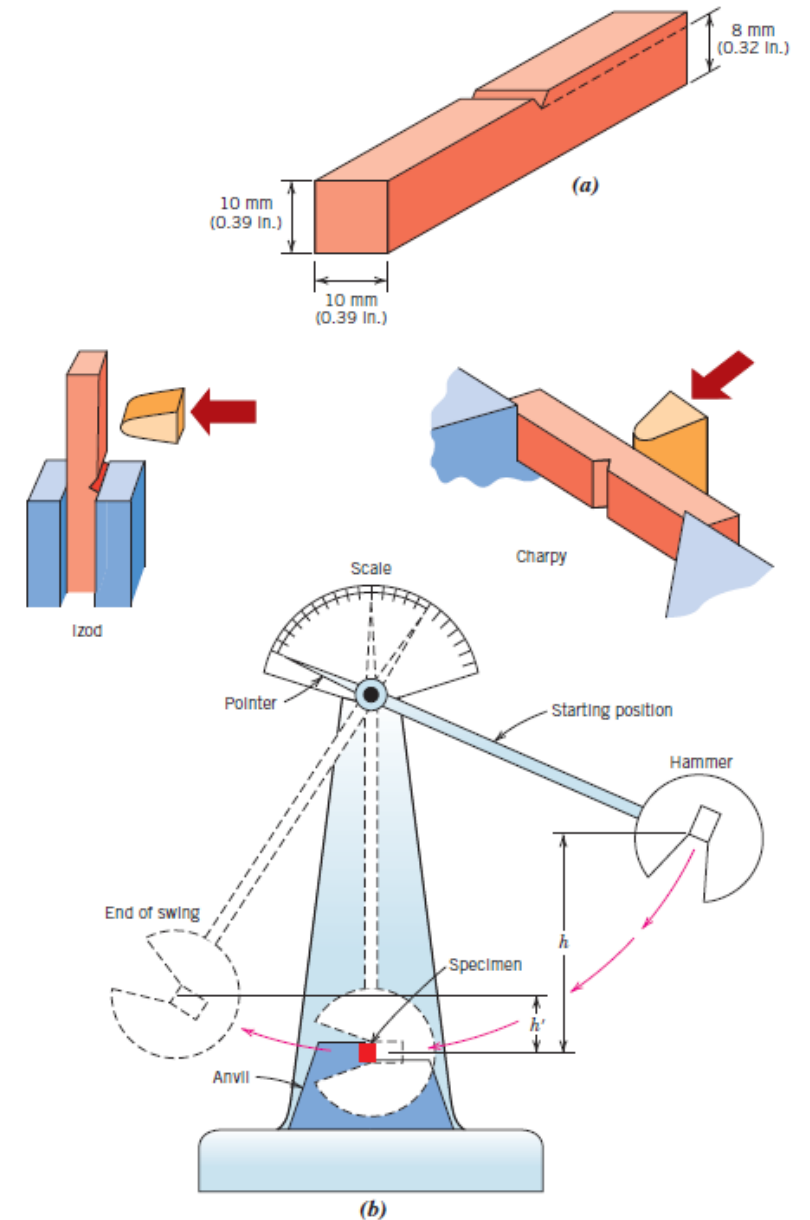
$$E = mg(h - h')$$

Εκφράζει την **αντίσταση του υλικού στη θραύση υπό κρούση**

Διαφορά Charpy – Izod:

Charpy: στήριξη σε δύο άκρα

Izod: στήριξη στο ένα άκρο



Δοκιμές Δυθραυστότητας

Σημασία δοκιμών κρούσης

Είναι **ποιοτικές δοκιμές** (όχι θεμελιώδης ιδιότητα όπως το K_{IC})

Χρησιμοποιούνται για:

- **σύγκριση υλικών**
- εκτίμηση **ευθραυστότητας**

Σχετίζονται με τη **μετάβαση όλκιμης → ψαθυρής συμπεριφοράς**

- Ένα υλικό που απορροφά μεγάλη ενέργεια είναι πιο όλκιμο, ενώ ένα υλικό που σπάει με μικρή ενέργεια είναι πιο ψαθυρό.

Μετάβαση από την Όλκιμη στην Ψαθυρή Συμπεριφορά

Ορισμένα υλικά εμφανίζουν μετάβαση από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Με μείωση θερμοκρασίας:

- μειώνεται η ενέργεια κρούσης
- το υλικό γίνεται πιο ψαθυρό

- Σε υψηλές θερμοκρασίες → όλκιμη θραύση
- Σε χαμηλές θερμοκρασίες → ψαθυρή θραύση

☐ Διάγραμμα Ενέργειας - Θερμοκρασίας

Η ενέργεια κρούσης αυξάνεται με τη θερμοκρασία.

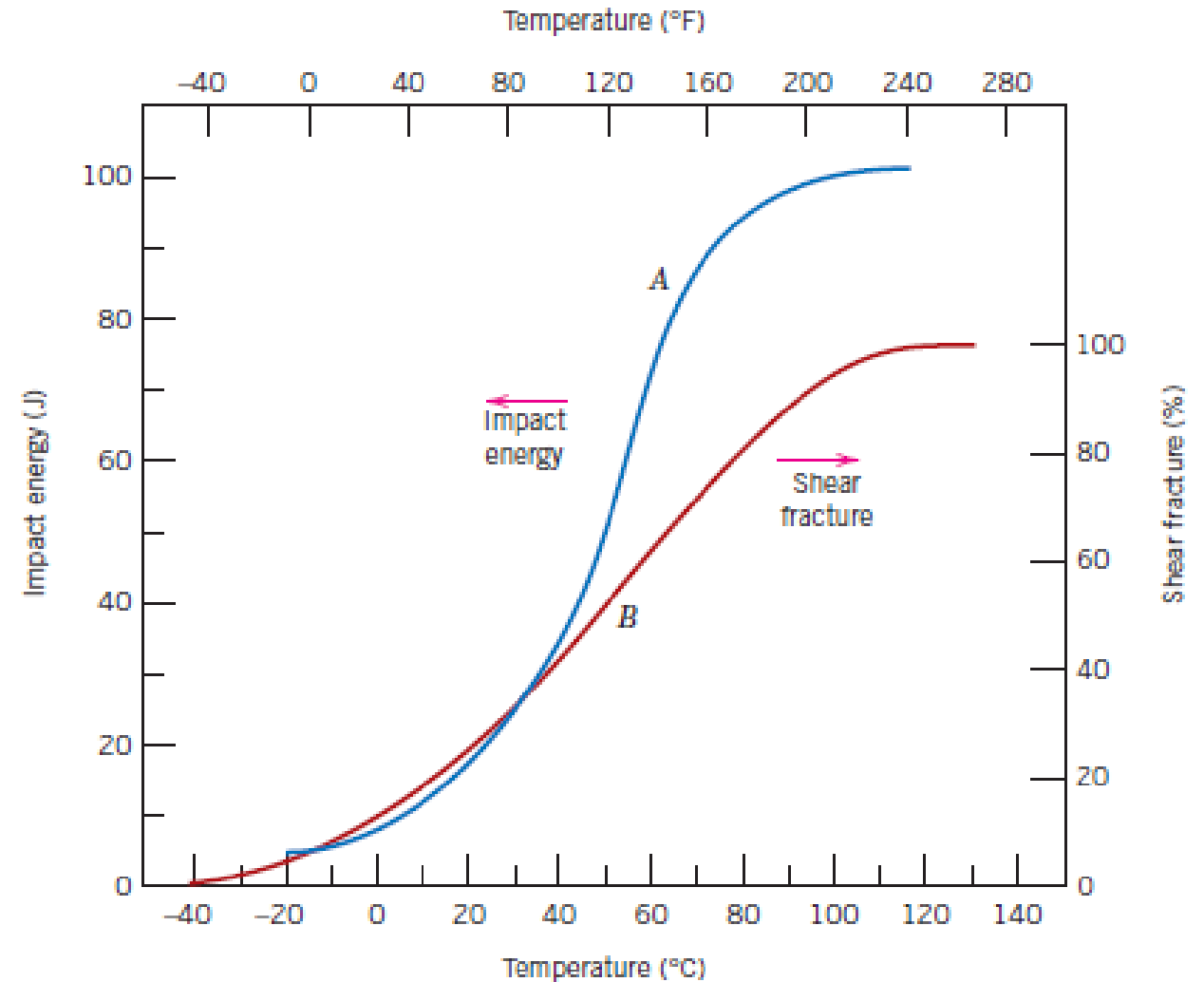
Υπάρχει περιοχή μετάβασης.

Ορίζεται θερμοκρασία μετάβασης :

- από συγκεκριμένη τιμή ενέργειας
- ή από το ποσοστό όλκιμης θραύσης

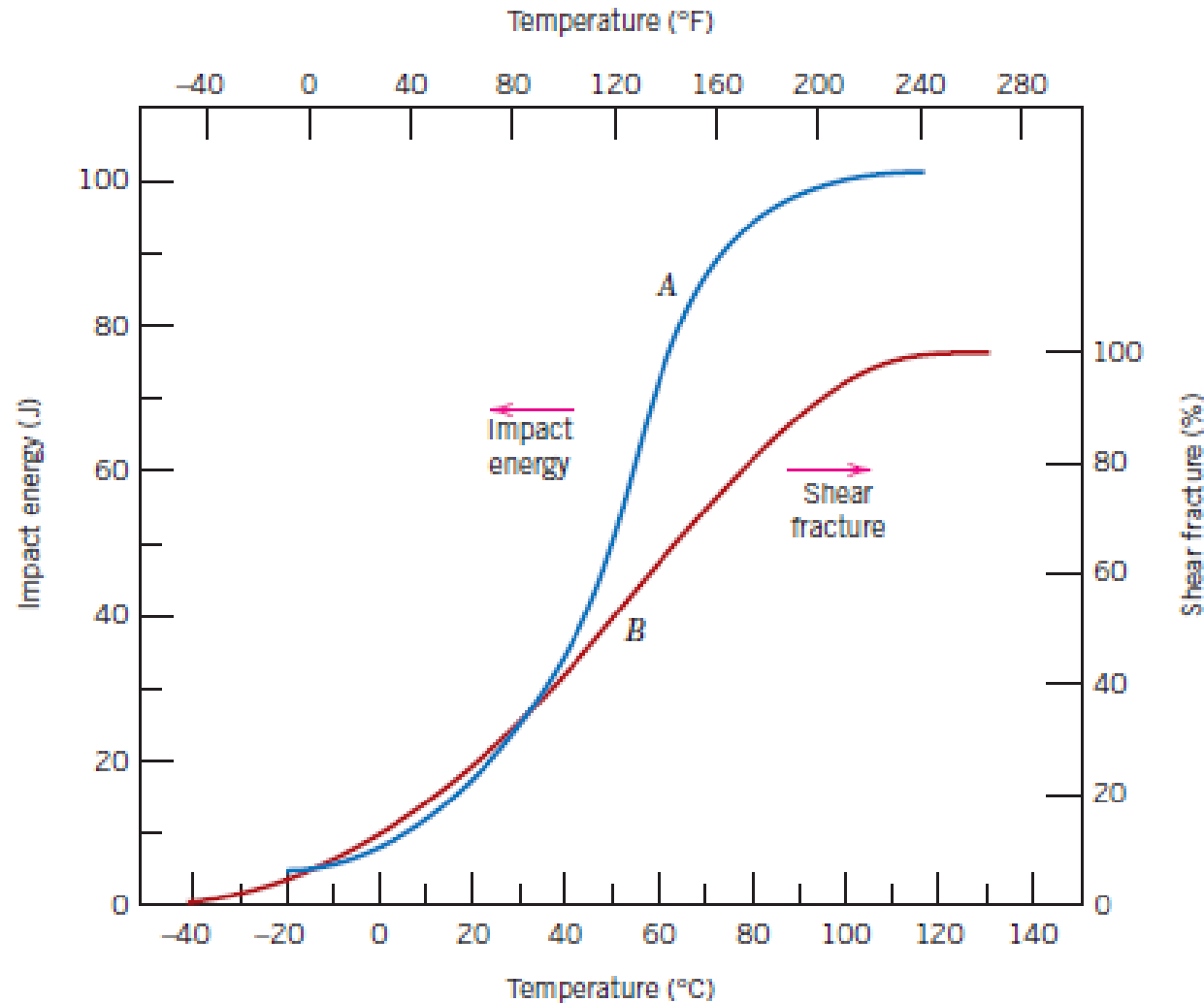
Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία:

- αυξάνεται η **ενέργεια κρούσης**
- αυξάνεται το **ποσοστό όλκιμης θραύσης**
- Το υλικό μεταβαίνει από **ψαθυρό** → **όλκιμο**



Μετάβαση από την Όλκιμη στην Ψαθυρή Συμπεριφορά

□ Διάγραμμα Ενέργειας - Θερμοκρασίας



Καμπύλη A (μπλε)

Είναι η **ενέργεια κρούσης (impact energy)**

Προέρχεται από τη δοκιμή **Charpy**

Δείχνει πόση ενέργεια απορροφά το υλικό πριν σπάσει

Καμπύλη B (κόκκινη)

Είναι το **ποσοστό όλκιμης θραύσης (shear fracture %)**

Προκύπτει από την παρατήρηση της επιφάνειας θραύσης

Χαμηλές θερμοκρασίες:

- μικρή ενέργεια κρούσης
- χαμηλό ποσοστό όλκιμης θραύσης
- → **ψαθυρή συμπεριφορά**

Αύξηση θερμοκρασίας:

- αυξάνεται η ενέργεια κρούσης
- αυξάνεται το ποσοστό όλκιμης θραύσης
- → μετάβαση προς όλκιμη συμπεριφορά

Περιοχή μετάβασης (~20–80°C):

- από ψαθυρό → όλκιμο
- → **κρίσιμη για σχεδιασμό κατασκευών**

Μετάβαση από την Όλκιμη στην Ψαθυρή Συμπεριφορά

□ Μορφολογία επιφάνειας θραύσης

Όλκιμη θραύση:

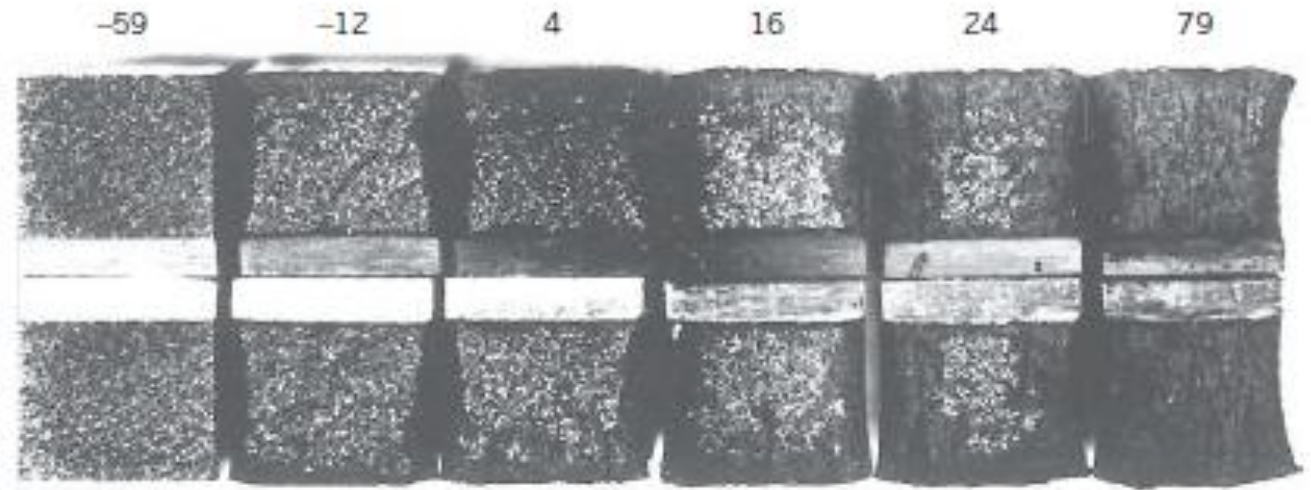
- τραχιά, **ινώδης (fibrous)** επιφάνεια
- έντονη πλαστική παραμόρφωση

Ψαθυρή θραύση:

- λεία, **γυαλιστερή (cleavage)** επιφάνεια
- απότομη θραύση χωρίς παραμόρφωση

Περιοχή μετάβασης:

- συνύπαρξη και των δύο χαρακτηριστικών



Αριστερά (χαμηλές T): λεία/γυαλιστερή → ψαθυρή
Μέση: μικτή μορφή → περιοχή μετάβασης
Δεξιά (υψηλές T): τραχιά/ινώδης → όλκιμη

Η ψαθυρή θραύση είναι **αιφνίδια και καταστροφική**

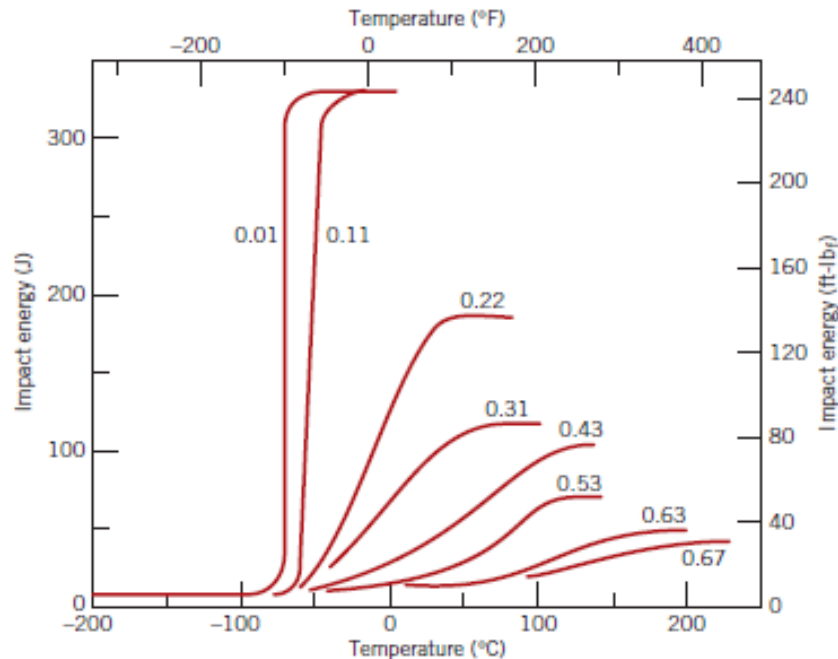
Οι ρωγμές ξεκινούν από:

- **ατέλειες**
- **συγκεντρώσεις τάσεων** (π.χ. εγκοπές)

Παράδειγμα: αστοχίες κατασκευών σε χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. πλοία)

Μετάβαση από την Όλκιμη στην Ψαθυρή Συμπεριφορά

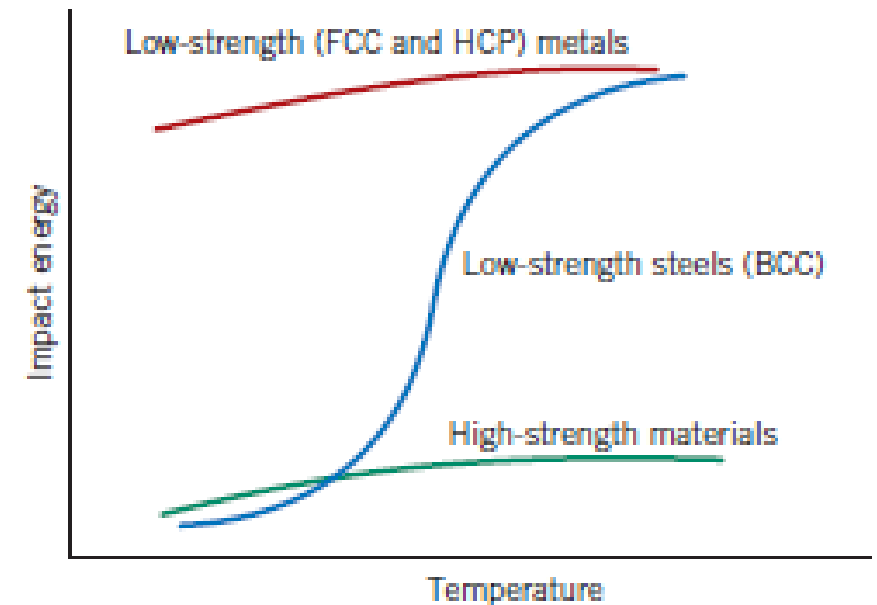
- ❑ Παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάβαση
 - Κρυσταλλική δομή:
 - BCC:** εμφανίζει έντονη μετάβαση
 - FCC:** δεν εμφανίζει έντονη μετάβαση (παραμένει όλκιμο)
 - Μικροδομή:
 - μικρότερο μέγεθος κόκκων → καλύτερη αντοχή
 - Σύνθεση:
 - αύξηση άνθρακα → αυξάνει θερμοκρασία μετάβασης



FCC & HCP (χαμηλής αντοχής μέταλλα)
Υψηλή ενέργεια σε όλες τις θερμοκρασίες
πάντα όλκιμα (δεν έχουν μετάβαση)

BCC (χάλυβες)
Απότομη αύξηση ενέργειας
έχουν **ductile-to-brittle transition**

Υψηλής αντοχής υλικά
Χαμηλή ενέργεια παντού
παραμένουν πιο ψαθυρά



Κόπωση (Fatigue)

- Η **κόπωση** είναι αστοχία λόγω κυκλικών φορτίσεων Συμβαίνει σε τάσεις μικρότερες από την αντοχή του υλικού. Είναι η πιο συχνή αιτία αστοχίας σε μέταλλα (~90%).

❑ Στάδια κόπωσης

- έναρξη ρωγμής
- διάδοση ρωγμής (σταδιακή αύξηση με κάθε κύκλο φόρτισης)
- Τελική θραύση (αστοχία)

❑ Χαρακτηριστικά κόπωσης

- Μικρή ή καθόλου πλαστική παραμόρφωση.
- Απότομη και αιφνίδια αστοχία.
- Η επιφάνεια θραύσης είναι κάθετη στην εφαρμοζόμενη εφελκυστική τάση.

Κυκλικές Τάσεις

❑ Κυκλικές τάσεις (Cyclic Stresses)

Οι τάσεις μεταβάλλονται με τον χρόνο

Μπορεί να είναι:

- εφελκυσμός–θλίψη
- κάμψη
- στρέψη

Προκαλούν **κόπωση (fatigue)**

❑ Τύποι κύκλων τάσης

▪ Αντιστρεφόμενος κύκλος τάσης

Συμμετρικός γύρω από το 0

Μέση τάση $\sigma_m = 0$

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

▪ Επαναλαμβανόμενος κύκλος τάσης

Ασύμμετρος κύκλος

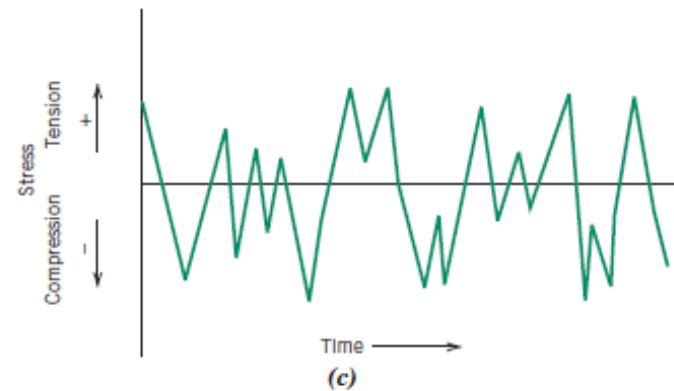
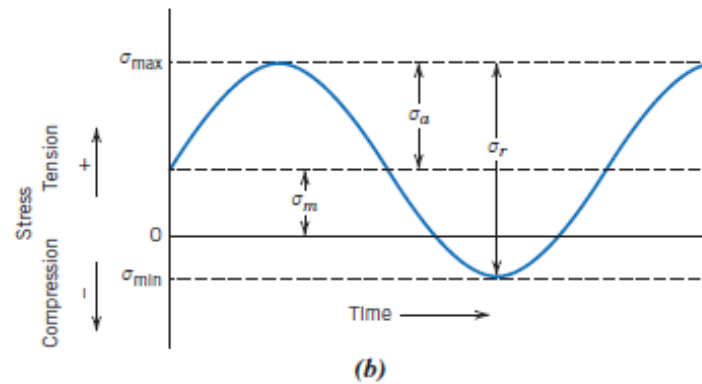
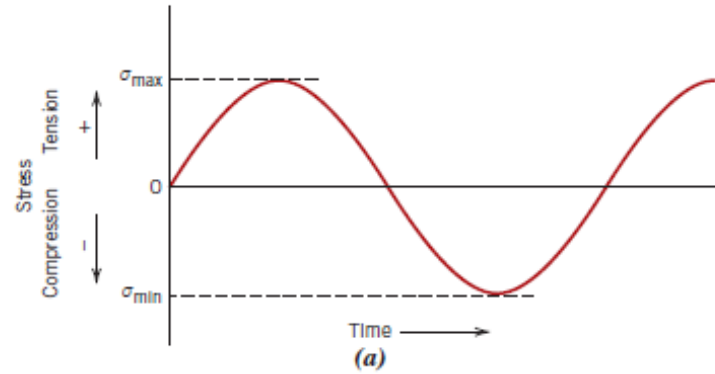
Μέση τάση $\sigma_m \neq 0$

Μετατοπισμένος ως προς το 0

▪ Τυχαία μεταβαλλόμενος κύκλος τάσης

Μη περιοδική μεταβολή τάσης

Τυχαίο πλάτος και συχνότητα



Κυκλικές Τάσεις

- Μέση τάση για κυκλική φόρτιση – εξάρτηση από το μέγιστο και ελάχιστο επίπεδο τάσης
Δείχνει τη **μετατόπιση του κύκλου από το 0**

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

- Υπολογισμός του εύρους τάσεων για κυκλική φόρτιση
εκφράζει τη διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής

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

- Υπολογισμός του πλάτους τάσης για κυκλική φόρτιση
Κρίσιμο μέγεθος για κόπωση

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

- Υπολογισμός του λόγου τάσεων
Περιγράφει το είδος του κύκλου

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

- $R = -1 \rightarrow$ πλήρως αναστρεφόμενος κύκλος
- Μεγαλύτερο $R \rightarrow$ μικρότερο εύρος

Καμπύλη S-N

Καμπύλη S-N (Wöhler)

Περιγράφει τη συμπεριφορά κόπωσης

Συσχετίζει:

- **Τάση (S)**
- **αριθμό κύκλων μέχρι θραύση (N)**

Προκύπτει από πειραματικές δοκιμές κόπωσης

Πειραματική διαδικασία

Το δοκίμιο περιστρέφεται με κινητήρα

Εφαρμόζεται σταθερό φορτίο **F**

Κατά την περιστροφή:

το πάνω μέρος → **θλίψη**

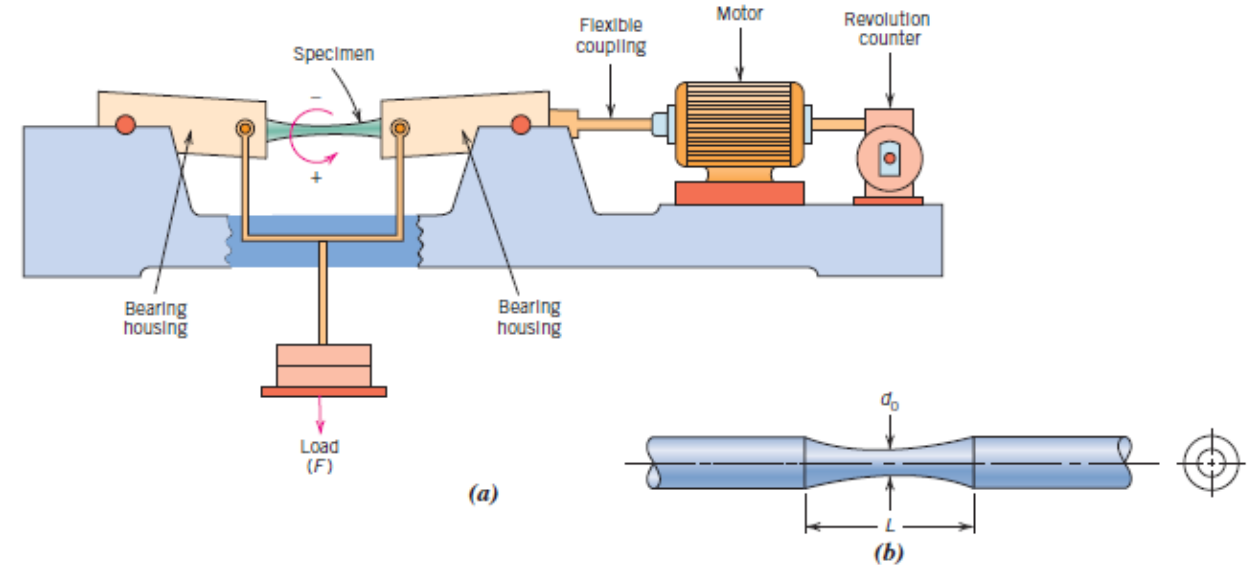
το κάτω μέρος → **εφελκυσμός**

Οι τάσεις **εναλλάσσονται συνεχώς**

Έχουμε **πλήρως αντιστρεφόμενο κύκλο (R = -1)**

Μετράμε τον **αριθμό κύκλων μέχρι τη θραύση (N)**

Για διαφορετικές τάσεις → κατασκευάζουμε την **καμπύλη S-N**



Καμπύλη S-N

- Όσο αυξάνεται η τάση → μειώνεται ο αριθμός κύκλων μέχρι θραύση
- Υψηλή τάση → **γρήγορη αστοχία**
- Χαμηλή τάση → **μεγάλη διάρκεια ζωής**

☐ Υλικά με όριο κόπωσης (Fatigue limit)

Η καμπύλη γίνεται οριζόντια σε μεγάλους αριθμούς κύκλων

Υπάρχει **όριο κόπωσης (fatigue limit)**

Κάτω από αυτή την τάση:

το υλικό **δεν αστοχεί** (θεωρητικά άπειρη ζωή)

Χάλυβες (BCC)

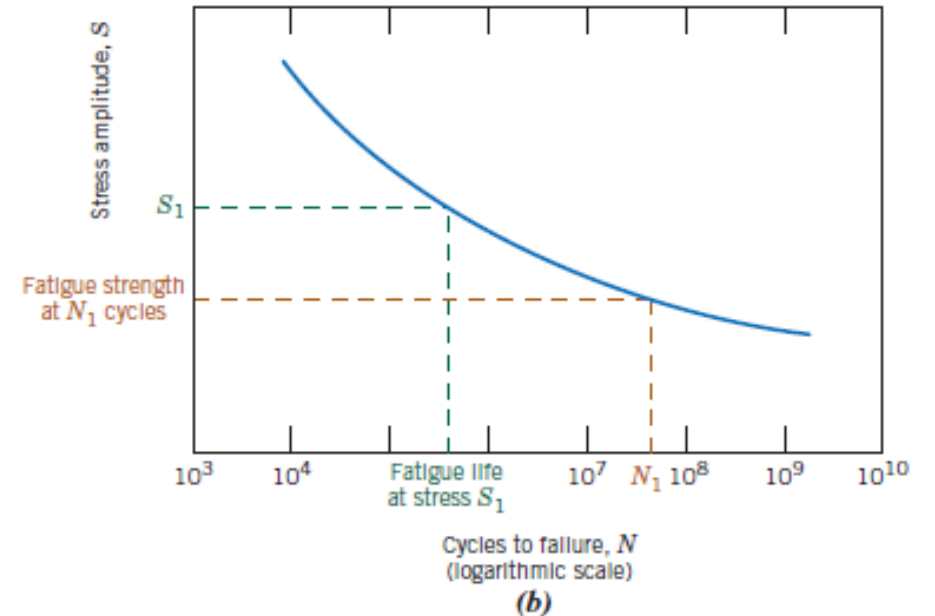
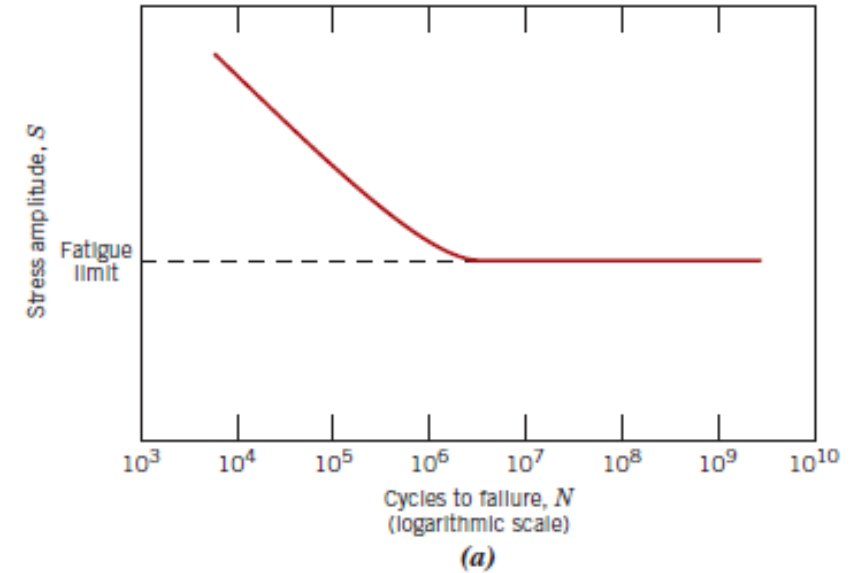
☐ Υλικά χωρίς όριο κόπωσης

Η καμπύλη συνεχίζει να πέφτει

Δεν υπάρχει όριο κόπωσης

Επέρχεται κόπωση ακόμη και για μικρές τάσεις (σε μεγάλο αριθμό κύκλων)

Αλουμίνιο (Al), χαλκός (Cu)



Καμπύλη S-N

Αντοχή σε κόπωση (Fatigue strength)

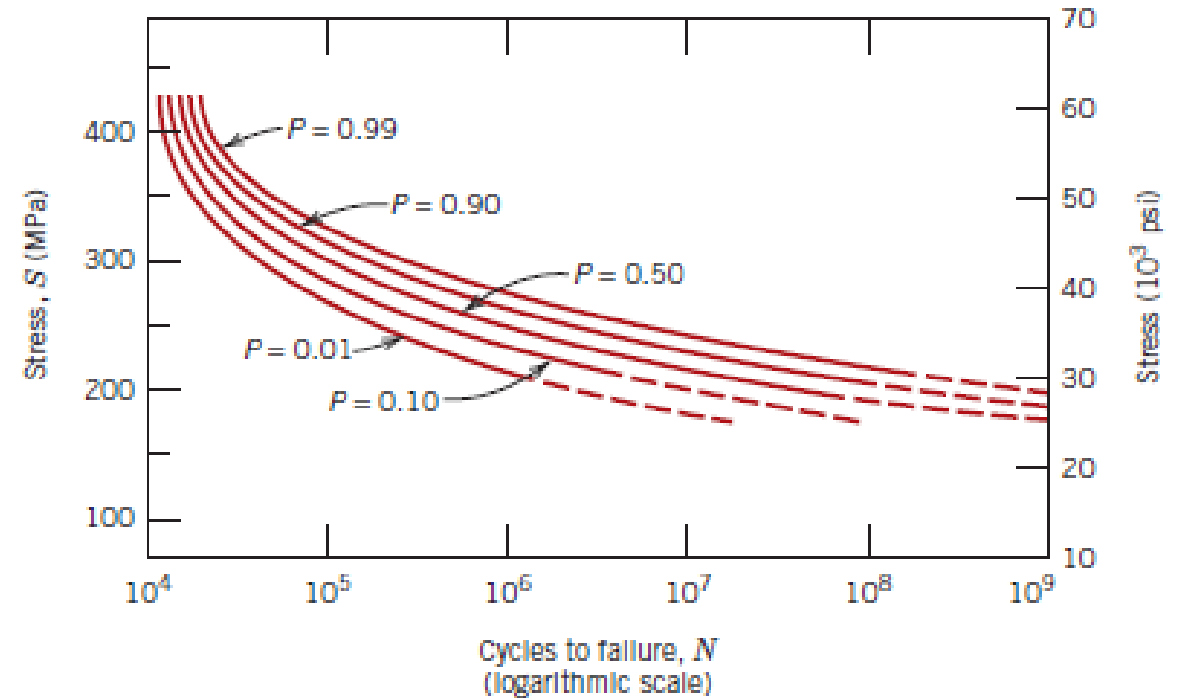
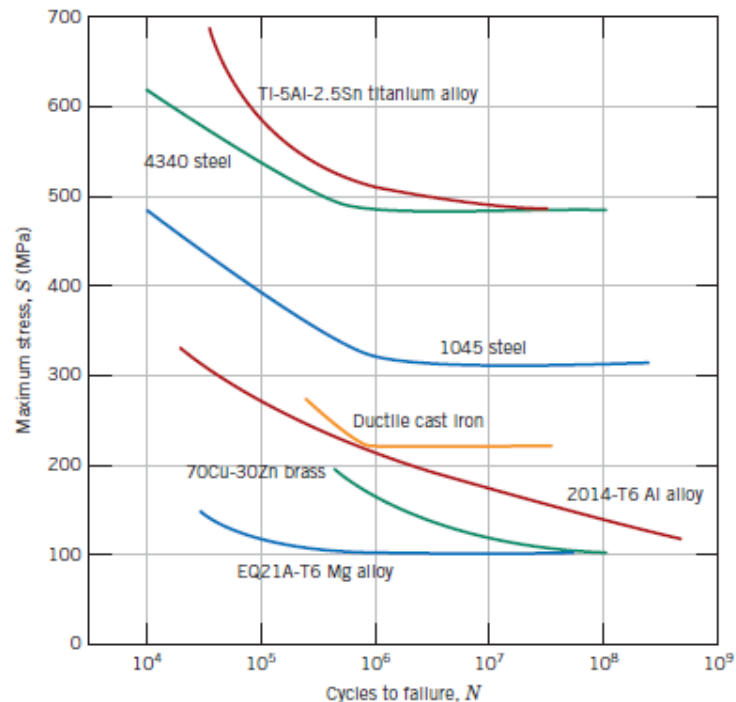
Η τάση που αντέχει το υλικό για συγκεκριμένο αριθμό κύκλων

Διάρκεια ζωής σε κόπωση (Fatigue life, Nf)

Ο αριθμός κύκλων μέχρι αστοχία για δεδομένη τάση

Σύγκριση υλικών

Η καμπύλη S-N επιτρέπει σύγκριση διαφορετικών υλικών
Υψηλότερη καμπύλη → μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση



Πιθανότητα αστοχίας (P)

- Οι S-N καμπύλες εξαρτώνται από πιθανότητα αστοχίας
- Υψηλό P → μικρότερη διάρκεια ζωής
- Χαμηλό P → μεγαλύτερη διάρκεια ζωής

Εναρξη και Διάδοση Ρωγμών

□ Η αστοχία λόγω κόπωσης εξελίσσεται σε **τρία στάδια**:

1. Έναρξη ρωγμής
2. Διάδοση ρωγμής
3. Τελική θραύση

□ **Έναρξη ρωγμής (Crack initiation)**

Η ρωγμή ξεκινά σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων

Παραδείγματα

- ατέλειες επιφάνειας
- γρατζουνιές, πόροι, εγκοπές

Η κυκλική φόρτιση δημιουργεί μικρορωγμές

Εναρξη και Διάδοση Ρωγμών

Διάδοση ρωγμής (Crack propagation)

Η ρωγμή μεγαλώνει σταδιακά

Προχωρά με κάθε κύκλο φόρτισης

Η πρόοδος είναι **αργή και προοδευτική**

Τελική θραύση

Όταν η ρωγμή φτάσει κρίσιμο μέγεθος:

η αστοχία γίνεται **απότομα**

Η περιοχή αυτή είναι:

τραχιά

μεγαλύτερη

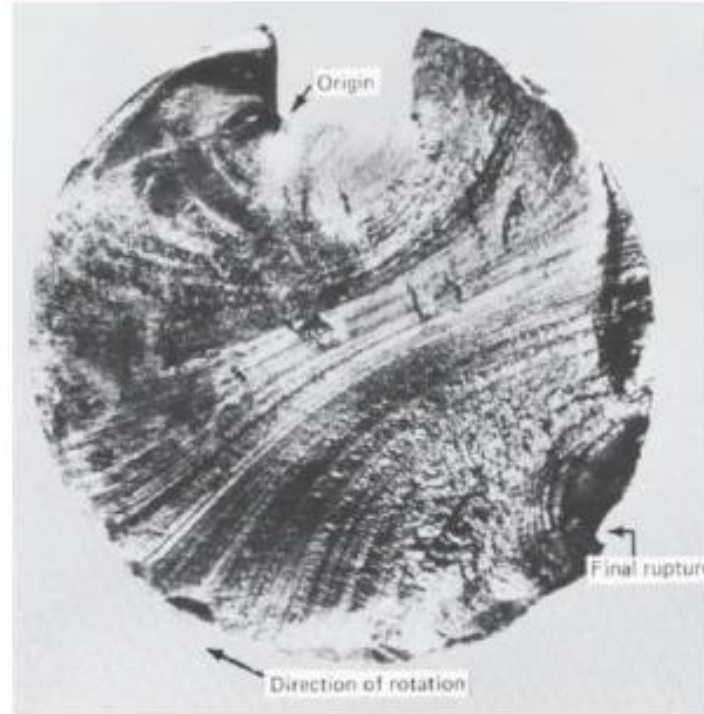


Figure 8.23 Fracture surface of a rotating steel shaft that experienced fatigue failure. Beachmark ridges are visible in the photograph. (From D. J. Wulpi, *Understanding How Components Fail*, 1985. Reproduced by permission of ASM International, Materials Park, OH.)



Figure 8.24 Transmission electron fractograph showing fatigue striations in aluminum. 9000 \times . (From V. J. Colangelo and F. A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures*, 2nd edition. Copyright © 1987 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Επιφάνεια θραύσης κόπωσης

Διακρίνονται διαφορετικές περιοχές:

- έναρξη ρωγμής
- διάδοση
- τελική θραύση

Από αυτές μπορούμε να καταλάβουμε την αιτία αστοχίας

Εναρξη και Διάδοση Ρωγμών

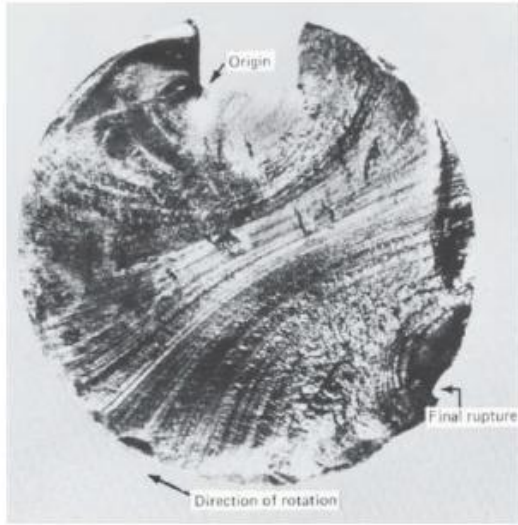


Figure 8.23 Fracture surface of a rotating steel shaft that experienced fatigue failure. Beachmark ridges are visible in the photograph. (From D. J. Wulpi, *Understanding How Components Fail*, 1985. Reproduced by permission of ASM International, Materials Park, OH.)

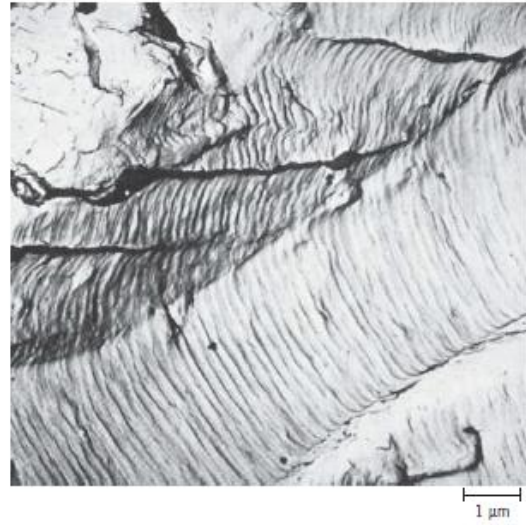


Figure 8.24 Transmission electron fractograph showing fatigue striations in aluminum. 9000X. (From V. J. Colangelo and F. A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures*, 2nd edition. Copyright © 1987 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

❑ Μακροσκοπικά

➤ Κυματοειδείς πτυχώσεις στην επιφάνεια

Δείχνουν:

τη θέση έναρξης

την εξέλιξη της ρωγμής

Ορατές με γυμνό μάτι

❑ Μικροσκοπικά

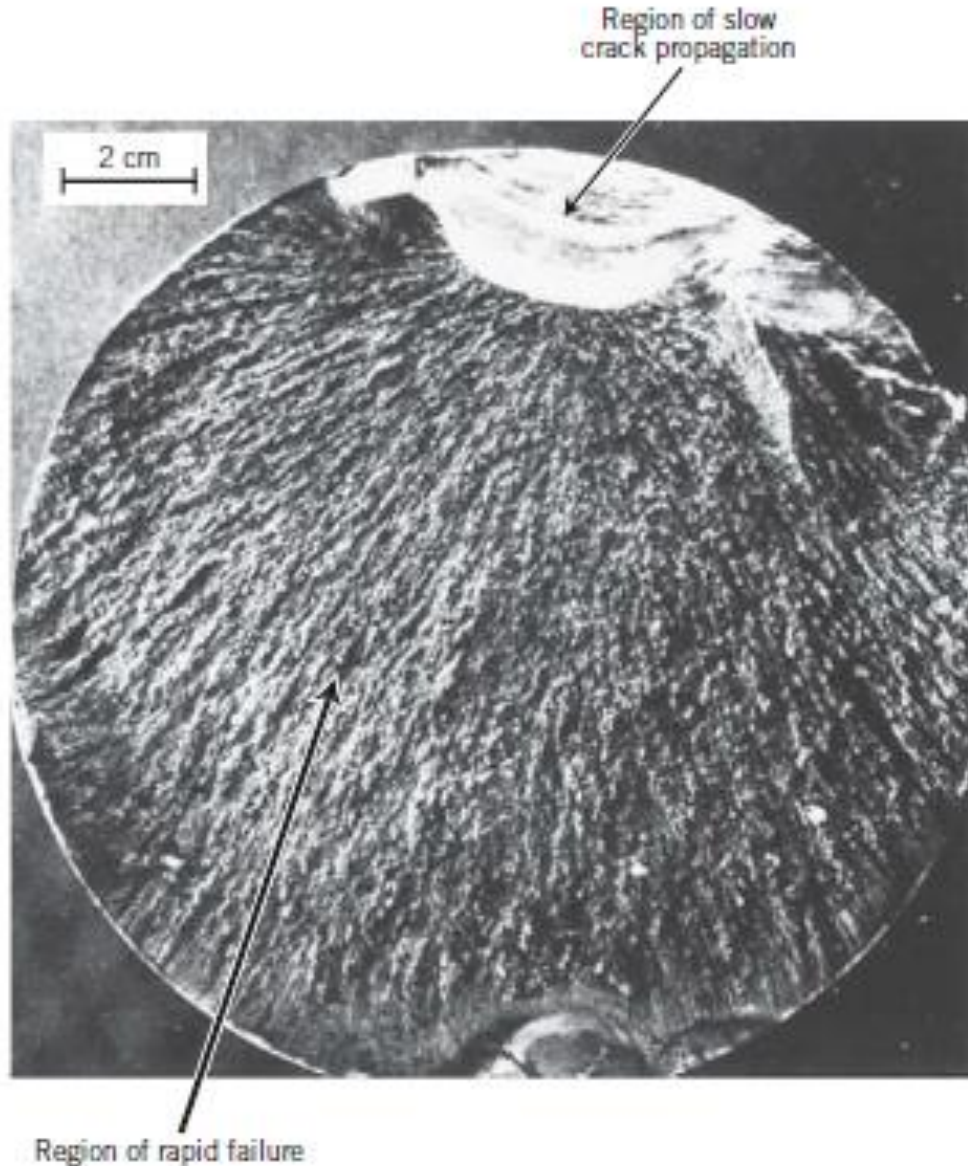
➤ Μικροραβδώσεις - Πολύ λεπτές γραμμές (SEM/TEM)

Κάθε γραμμή αντιστοιχεί:

σε έναν κύκλο φόρτισης

Το πλάτος τους αυξάνεται με την τάση

Έναρξη και Διάδοση Ρωγμών



Επιφάνεια αστοχίας λόγω κόπωσης

- Λεία περιοχή: αργή διάδοση ρωγμής
- Τραχιά περιοχή: ταχεία τελική θραύση

Η κόπωση είναι **προοδευτική αστοχία**

Ξεκινά από μικρές ατέλειες

Η τελική θραύση είναι αιφνίδια

Η επιφάνεια θραύσης δίνει πληροφορίες για την θέση έναρξης και τον μηχανισμό

Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Διάρκεια Ζωής σε Κόπωση

Η διάρκεια ζωής σε κόπωση επηρεάζεται από:

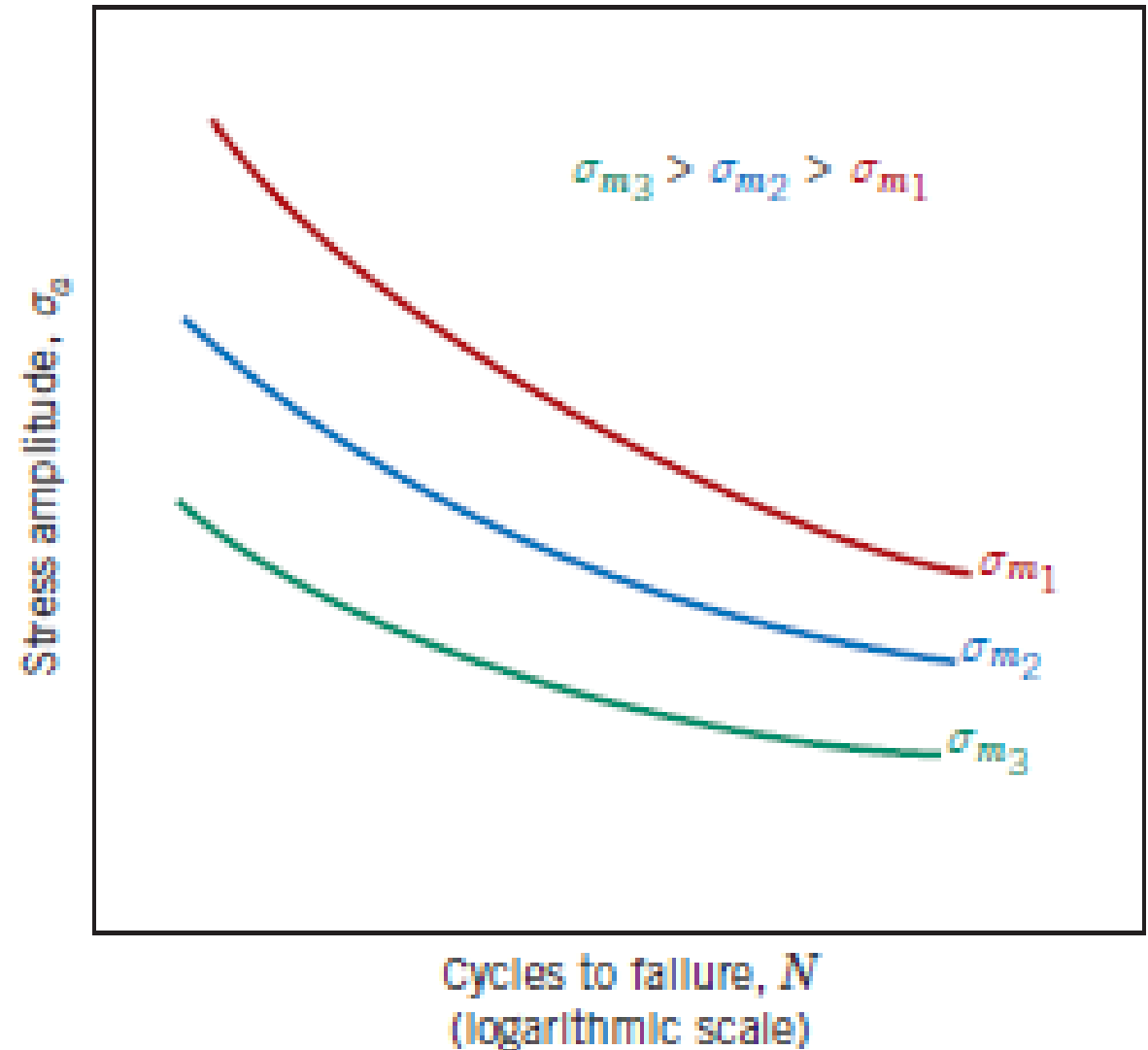
- μέση τάση
- γεωμετρία (design) - συγκεντρώσεις τάσεων
- επιφάνεια
- μικροδομή
- Περιβάλλον (διάβρωση, θερμοκρασία)

□ Επίδραση μέσης τάσης

Η κόπωση εξαρτάται από τη μέση τάση σ_m

Αύξηση της $\sigma_m \rightarrow$ μείωση της διάρκειας ζωής σε κόπωση

Διαφορετικές $\sigma_m \rightarrow$ διαφορετικές S-N καμπύλες



Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Διάρκεια Ζωής σε Κόπωση

❑ Επιφανειακά φαινόμενα

Η κόπωση ξεκινά συνήθως από την **επιφάνεια** λόγω **συγκέντρωσης τάσεων**

Άρα:

η **ποιότητα επιφάνειας** είναι κρίσιμη
γρατζουνιές, ατέλειες → μειώνουν την διάρκεια ζωής σε κόπωση (fatigue life)

❑ Παράγοντες σχεδίασης (Design)

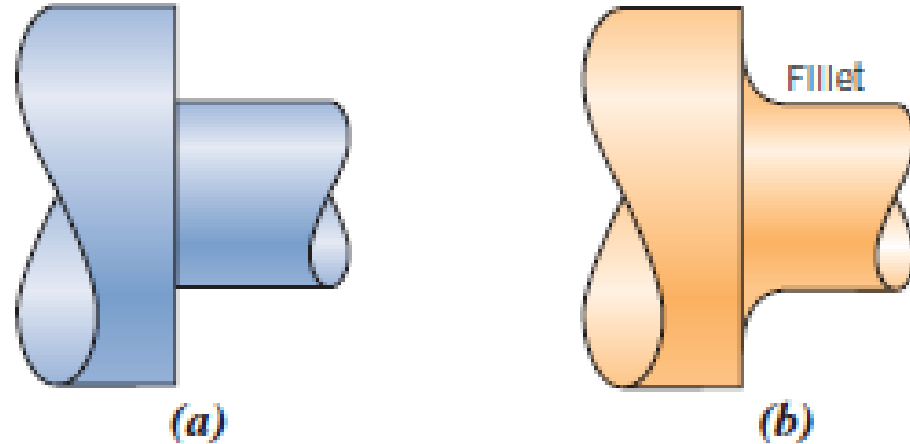
•Γεωμετρικές ασυνέχειες:

εγκοπές

σπειρώματα

αλλαγές διατομής

λειτουργούν ως **σημεία συγκέντρωσης τάσεων**



Βελτίωση σχεδιασμού

Οξείες γωνίες → αυξάνουν τις τάσεις

Στρογγυλεμένες ακμές (fillets) → μειώνουν τις τάσεις
αυξάνουν τη **διάρκεια ζωής σε κόπωση**

Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Διάρκεια Ζωής σε Κόπωση

❑ Επιφανειακές Κατεργασίες

Κατεργασίες δημιουργούν μικροατέλειες

Λείανση/γυάλισμα → αυξάνει διάρκεια ζωής σε κόπωση

Εισαγωγή θλιπτικών υπολειπόμενων τάσεων → μειώνει πιθανότητα ρωγμής

❑ Σφαιροβολή (Shot peening)

Βολή μικρών σωματιδίων στην επιφάνεια

Δημιουργεί:

- θλιπτικές τάσεις στην επιφάνεια
άρα αυξάνει διάρκεια ζωής σε κόπωση

❑ Εμποτισμός (Case hardening)

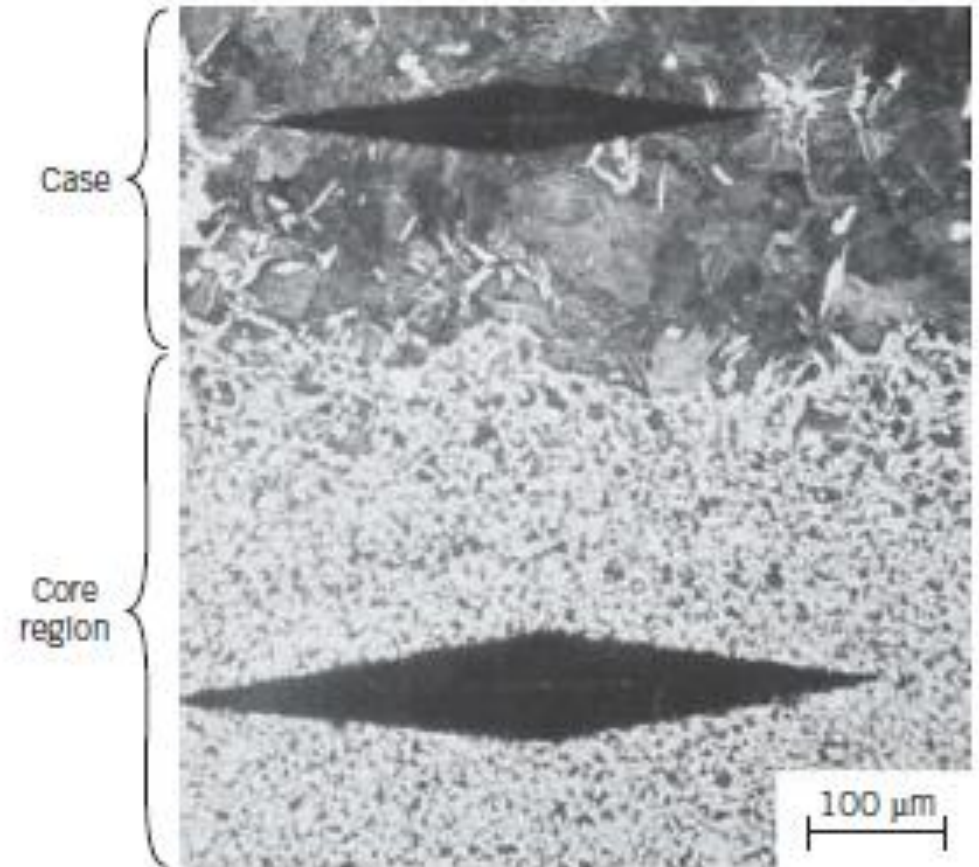
Σκλήρυνση επιφανειακού στρώματος μέσω ατομικής διάχυσης

Μέθοδοι:

- Ενανθράκωσης (carburizing)
- Εναζώτωσης (nitriding)

Σκληρή επιφάνεια + όλκιμος πυρήνας

βελτιωμένη αντοχή σε κόπωση



Περιβαλλοντικές Επιδράσεις

Το περιβάλλον επηρεάζει την κόπωση

Δύο βασικές περιπτώσεις:

- **Θερμική κόπωση**
- **Κόπωση από διάβρωση (corrosion fatigue)**

Θερμική κόπωση

Προκαλείται από μεταβολές θερμοκρασίας

Δεν απαιτεί εξωτερική φόρτιση

Οφείλεται σε θερμικές τάσεις λόγω διαστολής/συστολής

Εξίσωση θερμικών τάσεων

$$\sigma = \alpha_l E \Delta T$$

- σ : θερμική τάση (MPa)
- α : συντελεστής θερμικής διαστολής (1/K ή 1/°C)
- E : μέτρο ελαστικότητας (MPa)
- ΔT → μεταβολή θερμοκρασίας (°C ή K)

☐ Κόπωση από Διάβρωση (Corrosion fatigue)

Συνδυασμός:

- κυκλικής φόρτισης + χημικής επίδρασης

Προκαλεί:

- ταχύτερη διάδοση ρωγμών
- μικρότερη διάρκεια ζωής

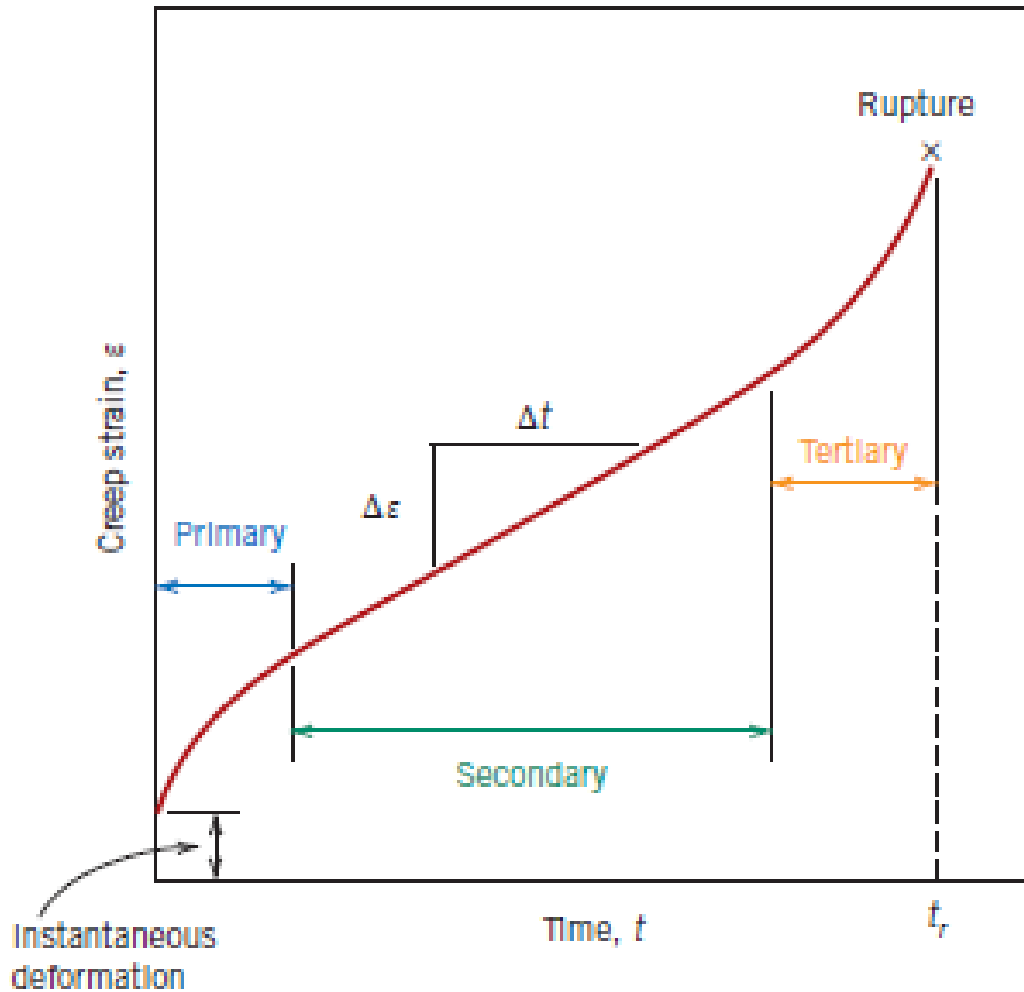
Πρόληψη

- Προστατευτικές επικαλύψεις (βαφές, επιστρώσεις)
- Επιλογή ανθεκτικών υλικών
- Έλεγχος περιβάλλοντος (υγρασία, χημικά)
- Μείωση τάσεων/καλύτερος σχεδιασμός

□ Ερπυσμός (creep)

- Παραμόρφωση με τον χρόνο υπό σταθερή τάση (φορτίο)
- Σημαντικός σε υψηλές θερμοκρασίες
- Εμφανίζεται κυρίως στα μέταλλα $T > 0.4T_m$
- Πολυμερή ακόμη και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες

□ Καμπύλη παραμόρφωσης ερπυσμού συναρτήσει του χρόνου



1. Πρωτογενής (Primary)

Ο ρυθμός παραμόρφωσης μειώνεται

Το υλικό σκληραίνει

2. Δευτερογενής (Secondary)

Σταθερός ρυθμός

Το πιο σημαντικό στάδιο (χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό)

3. Τριτογενής (Tertiary)

Ρυθμός αυξάνεται

Δημιουργούνται ρωγμές → αστοχία ή διάρρηξη

Ρυθμός ερπυσμού (steady-state)

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$$

Κλίση στο δευτερογενές στάδιο – σταθερός ρυθμός ερπυσμού

Χρόνος μέχρι θραύση (rupture time)

διάρκεια ζωής μέχρι αστοχία

□ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΑΣΗΣ & ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Αύξηση τάσης:

- Αυξάνεται ο ρυθμός ερπυσμού (creep rate)
- Μειώνεται ο χρόνος ζωής

Αύξηση θερμοκρασίας:

ίδια επίδραση

Μέταλλα: Κάτω από $0.4T_m$ ερπυσμός αμελητέος

Επίδραση Τάσης και Θερμοκρασίας

- Εξάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης ερπυσμού από την τάση

$$\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n$$

$\dot{\epsilon}_s$ ρυθμός ερπυσμού (s^{-1})

K_1 σταθερά υλικού

σ τάση (MPa)

n εκθέτης τάσης (χωρίς μονάδες)

- Εξάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης ερπυσμού από την τάση και την θερμοκρασία (σε K)

$$\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$$

• $\dot{\epsilon}_s$: ρυθμός ερπυσμού (s^{-1})

• σ εφαρμοζόμενη τάση (MPa)

• T θερμοκρασία (K)

• Q_c ενέργεια ενεργοποίησης (J/mol)

• R παγκόσμια σταθερά αερίων J/mol·K

• K_2 εξαρτάται από το υλικό

• $n \rightarrow$ χωρίς μονάδες

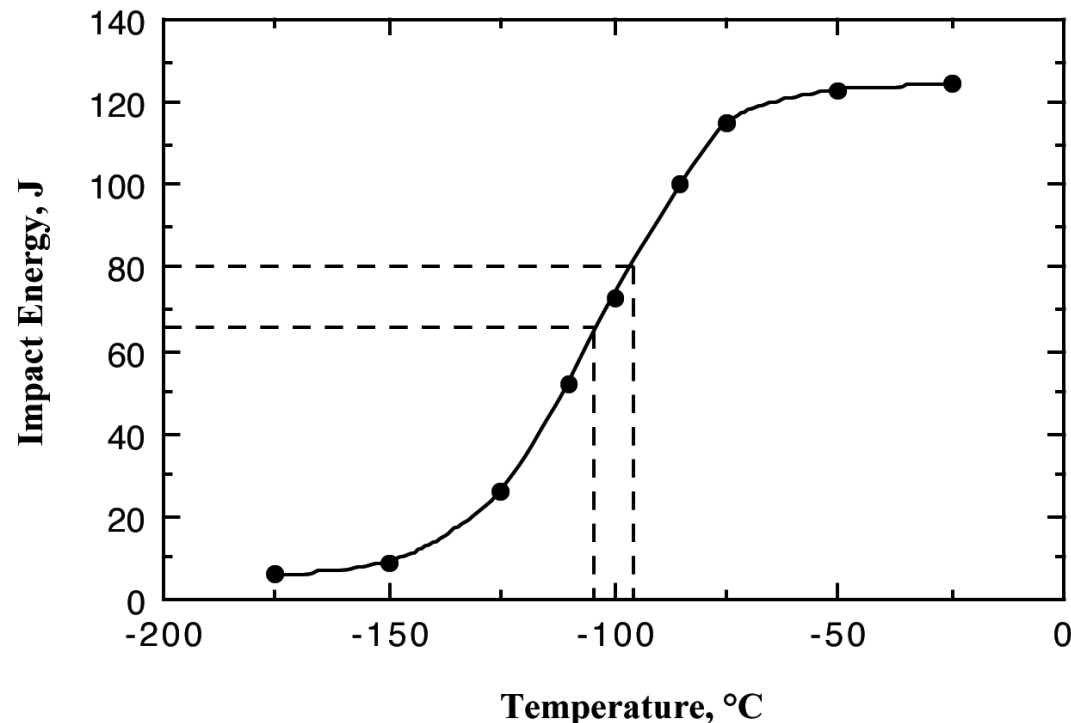
Δοκιμές Δυθραυστότητας

Άσκηση:

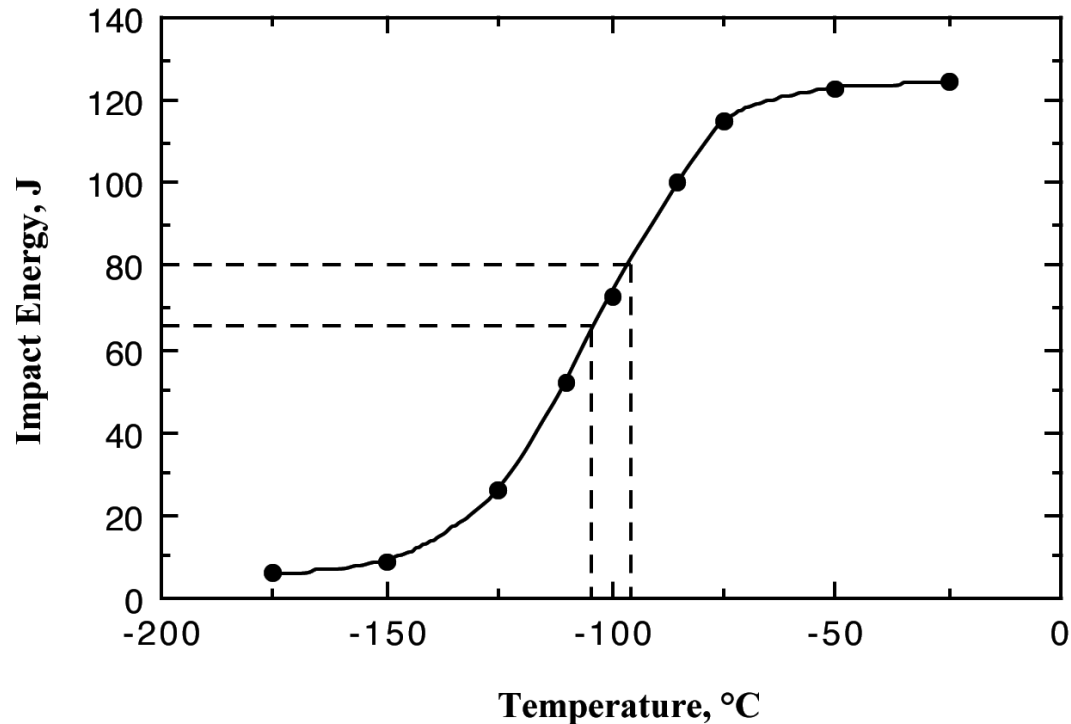
Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται η μεταβολή της ενέργειας κρούσης (Impact Energy, J) συναρτήσει της θερμοκρασίας για ένα όλκιμο χυτοσίδηρο, όπως προέκυψε από δοκιμές Charpy.

(α) Με βάση το διάγραμμα, να προσδιορίσετε τη θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά, ως τη θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη μέση τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης ενέργειας κρούσης.

(β) Να προσδιορίσετε τη θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά ως τη θερμοκρασία στην οποία η ενέργεια κρούσης είναι **80 J**.



Δοκιμές Δυθραυστότητας



(α) Μέση τιμή:

$$E_{\mu\epsilon\sigma\eta} = \frac{125 + 5}{2} = 65 \text{ J}$$

Από το διάγραμμα αντιστοιχεί περίπου σε **T = -105 °C**

(β) Από το διάγραμμα για 80 J → **T = -95 °C**

- Μετάβαση από ψαθυρή (χαμηλές T) → όλκιμη (υψηλές T)
- Η μετάβαση δεν είναι απότομη, αλλά πραγματοποιείται σε εύρος θερμοκρασιών (μεταβατική ζώνη).»

Άσκηση:

Κατά την διεξαγωγή μιας πειραματικής δοκιμής κόπωσης, η μέση τάση ήταν 50 MPa και το πλάτος τάσης 225 MPa.

Να υπολογιστούν:

- (a) τα επίπεδα μέγιστης και η ελάχιστης τάσης
- (b) ο λόγος τάσεων
- (c) το μέγεθος του εύρους τάσεων

(α) Μέγιστη και ελάχιστη τάση

- $\sigma_m = 50 \text{ MPa}$
- $\sigma_a = 225 \text{ MPa}$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = 50 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} + \sigma_{\min} = 100 \text{ MPa}$$

Ισχύει:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = 225 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 450 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = 275 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = -175 \text{ MPa}$$

(β) Λόγος τάσης

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{-175 \text{ MPa}}{275 \text{ MPa}} = -0.64$$

(γ) Εύρος τάσης

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 275 \text{ MPa} - (-175 \text{ MPa}) = 450 \text{ MPa}$$

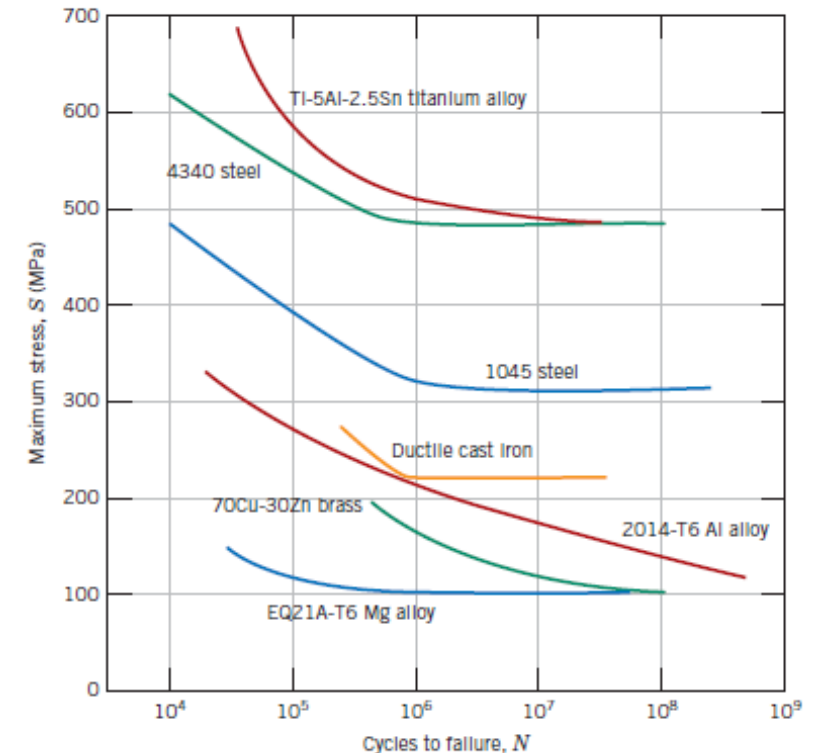
Κυκλικές Τάσεις

Άσκηση:

Μια κυλινδρική ράβδος ορείχαλκου 70Cu–30Zn (Σχ. 8.21) υποβάλλεται σε δοκιμή κόπωσης εφελκυσμού–θλίψης με αντιστρεφόμενη κυκλική φόρτιση. Το πλάτος του φορτίου είναι 10,000 N.

Να υπολογιστεί η ελάχιστη επιτρεπτή διάμετρο της ράβδου ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα προκληθεί αστοχία από κόπωση στους 10^7 κύκλους.

Υποθέστε ότι τα δεδομένα του Σχήματος έχουν ληφθεί από δοκιμές αξονικού εφελκυσμού-θλίψης με αντιστρεφόμενη φόρτιση, όπου S το πλάτος τάσης και θεωρήστε παράγοντα ασφαλείας 2.5.



Κυκλικές Τάσεις

Από το διάγραμμα S-N

Για 10^7 κύκλους:

$$\sigma_{\text{κόπωση}} = 115 \text{ MPa}$$

Η επιτρεπόμενη τάση είναι:

$$\sigma_{\text{design}} = \frac{\sigma_{\text{κόπωση}}}{N} = \frac{115}{2.5} = 46 \text{ MPa} = 46 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Ισχύει:

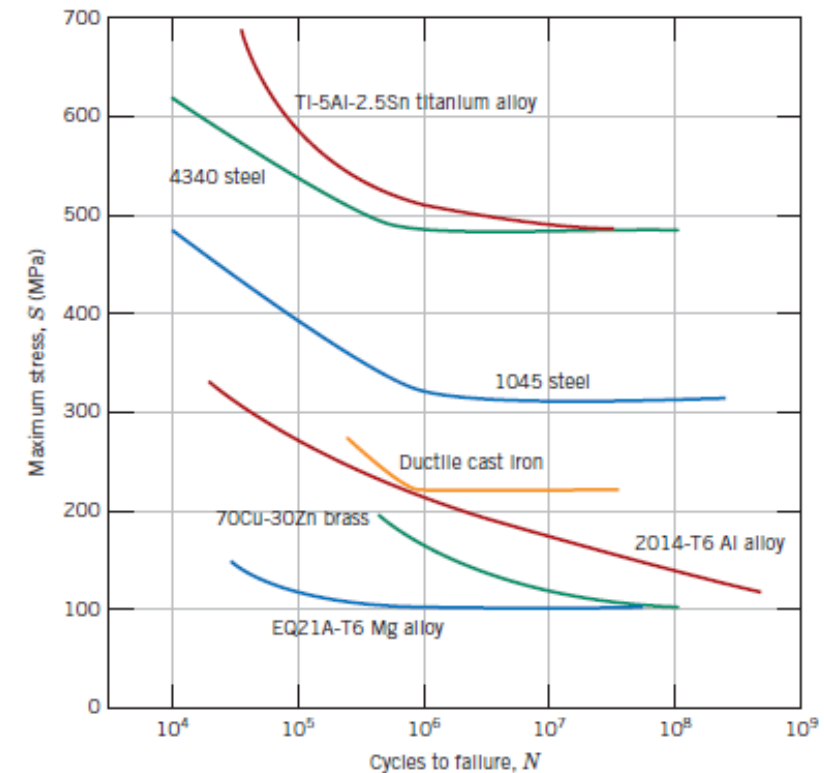
$$\sigma_a = \frac{F_a}{A}$$

Για κυκλική διατομή:

$$A = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2$$

Άρα:

$$\sigma_a = \frac{F_a}{\pi(d/2)^2} = \frac{4F_a}{\pi d^2}$$



Άρα

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi \sigma_{\text{design}}}} = 16.6 \text{ mm}$$

Άσκηση:

Δίνονται δεδομένα ρυθμού ερπυσμού σταθερής κατάστασης (steady-state creep rate) για αλουμίνιο στους **260°C**.

$\dot{\epsilon}_s$ (h^{-1})	σ (MPa)
2.0×10^{-4}	3
3.65	25

Να υπολογιστεί ο ρυθμός ερπυσμού σταθερής κατάστασης σε τάση 10 MPa και θερμοκρασία 260°C

Απάντηση:

Αφού η θερμοκρασία είναι σταθερή (260°C), χρησιμοποιούμε:

$$\dot{\epsilon}_s = K\sigma^n$$

$$\ln \dot{\epsilon}_s = \ln K + n \ln \sigma$$

Από τα δεδομένα:

$$\ln(2.0 \times 10^{-4}) = \ln K + n \ln(3)$$

$$\ln(3.65) = \ln K + n \ln(25)$$

Αφαιρούμε τη δεύτερη από την πρώτη:

$$\ln(2.0 \times 10^{-4}) - \ln(3.65) = n[\ln(3) - \ln(25)]$$

Υπολογισμός n

$$n = \frac{\ln(2.0 \times 10^{-4}) - \ln(3.65)}{\ln(3) - \ln(25)} = 4.63$$

Υπολογισμός K

Αντικαθιστούμε στην πρώτη εξίσωση:

$$\ln K = \ln(2.0 \times 10^{-4}) - (4.63)\ln(3)$$

$$\ln K = -13.60$$

$$K = e^{-13.60} = 1.24 \times 10^{-6}$$

Υπολογισμός για $\sigma = 10\text{MPa}$

$$\dot{\epsilon}_s = K\sigma^n$$

$$\dot{\epsilon}_s = (1.24 \times 10^{-6})(10)^{4.63}$$

$$\dot{\epsilon}_s = 5.3 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$$

Άσκηση:

Να υπολογιστεί η κατά προσέγγιση θερμοκρασία στην οποία ο ερπυσμός γίνεται σημαντικός για τα παρακάτω μέταλλα: **Ni, Cu, Fe, W, Pb, Al.**

Δίνονται οι θερμοκρασίες τήξης:

Ni: 1455 °C

Cu: 1085 °C

Fe: 1538 °C

W: 3410 °C

Pb: 327 °C

Al: 660 °C

$$T_{\text{ερπυσμος}} \sim 0.4 T_m$$

Ni

$$T_m = 1455 + 273 = 1728 \text{ K}$$
$$T = 0.4 \cdot 1728 = 691 \text{ K} = 418^\circ\text{C}$$

Cu

$$T_m = 1085 + 273 = 1358 \text{ K}$$
$$T = 0.4 \cdot 1358 = 543 \text{ K} = 270^\circ\text{C}$$

Al

$$T_m = 660 + 273 = 933 \text{ K}$$
$$T = 0.4 \cdot 933 = 373 \text{ K} = 100^\circ\text{C}$$

Fe

$$T_m = 1538 + 273 = 1811 \text{ K}$$
$$T = 0.4 \cdot 1811 = 725 \text{ K} = 452^\circ\text{C}$$

W

$$T_m = 3410 + 273 = 3683 \text{ K}$$
$$T = 0.4 \cdot 3683 = 1473 \text{ K} = 1200^\circ\text{C}$$

πολύ υψηλή θερμοκρασία (ανθεκτικό)

Pb

$$T_m = 327 + 273 = 600 \text{ K}$$
$$T = 0.4 \cdot 600 = 240 \text{ K} = -33^\circ\text{C}$$

πολύ χαμηλή θερμοκρασία

□ Μέθοδος Larson–Miller για Πρόβλεψη Χρόνου Θραύσης

- Σε δοκιμές ερπυσμού, ο χρόνος μέχρι τη θραύση μπορεί να είναι πολύ μεγάλος (μήνες ή χρόνια).
- Για αυτό χρησιμοποιούνται **υψηλότερες θερμοκρασίες** και μικρότεροι χρόνοι δοκιμής στο εργαστήριο.
- Τα αποτελέσματα προεκτείνονται στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας μέσω της παραμέτρου **Larson–Miller**.
- Η παράμετρος Larson–Miller δίνεται από:

$$m = T(C + \log t_r)$$

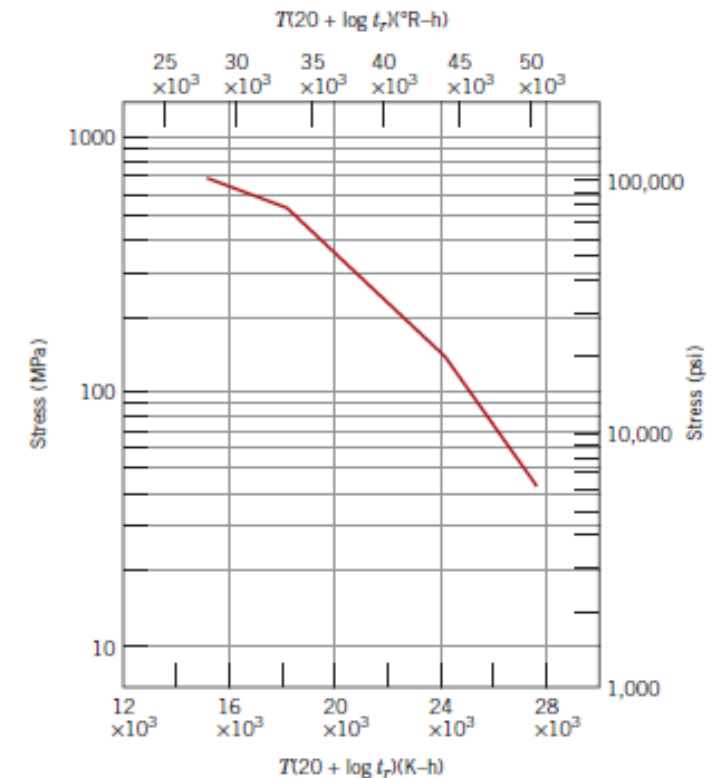
όπου:

m : παράμετρος Larson–Miller

T : απόλυτη θερμοκρασία (K)

t_r : χρόνος μέχρι θραύση (h)

C : σταθερά υλικού



Ερπυσμός

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα Larson–Miller για το κράμα S-590 που φαίνονται στο Σχήμα, να προβλεφθεί ο χρόνος μέχρι τη θραύση για ένα εξάρτημα που υποβάλλεται σε τάση 140 MPa στους 800°C (1073 K).

Απάντηση:

Από το Σχήμα, για τάση 140 MPa, η τιμή της παραμέτρου Larson–Miller είναι:

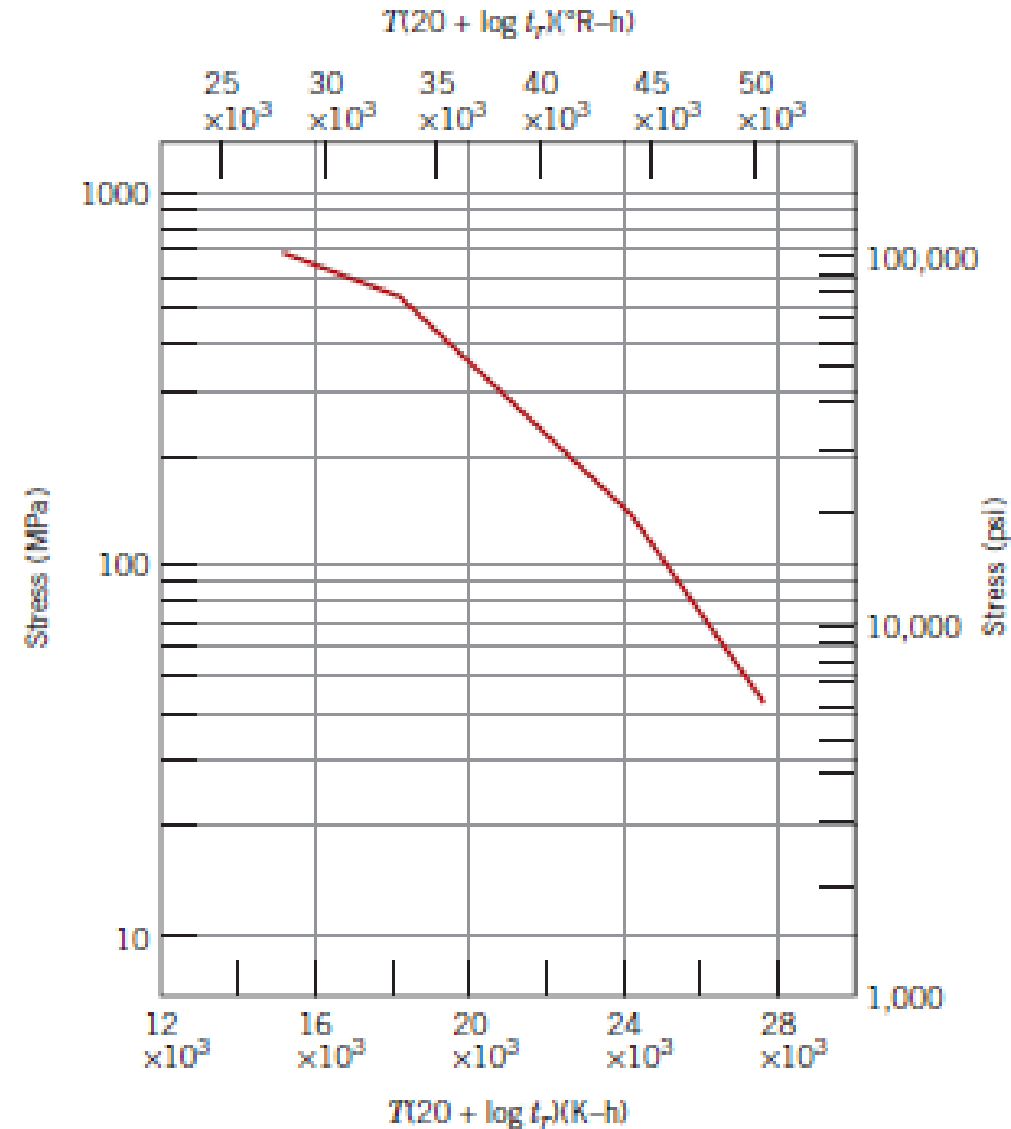
$$24.0 \times 10^3$$

για T σε Kelvin και t_r σε ώρες (h). Επομένως:

$$\begin{aligned} 24.0 \times 10^3 &= T(20 + \log t_r) \\ &= 1073(20 + \log t_r) \end{aligned}$$

και, επιλύοντας ως προς τον χρόνο μέχρι τη θραύση, προκύπτει:

$$\begin{aligned} 22.37 &= 20 + \log t_r \\ t_r &= 233 \text{ h (9.7 ημερες)} \end{aligned}$$



Figures adapted from:

Materials Science and Engineering: An Introduction (W. D. Callister Jr. & D. Rethwisch),
10th ed., Chapter 8.