



Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

# Τεχνολογία Υλικών Ι

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:

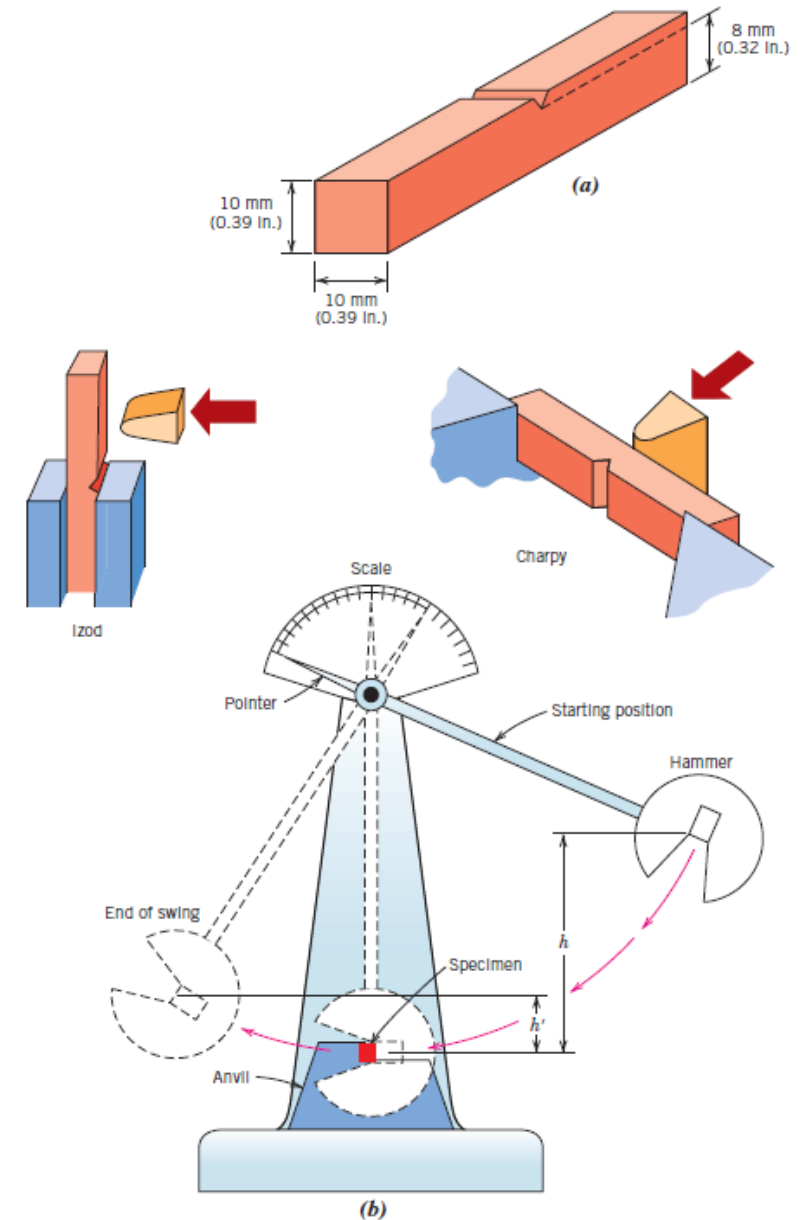
$$E = mg(h - h')$$

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.

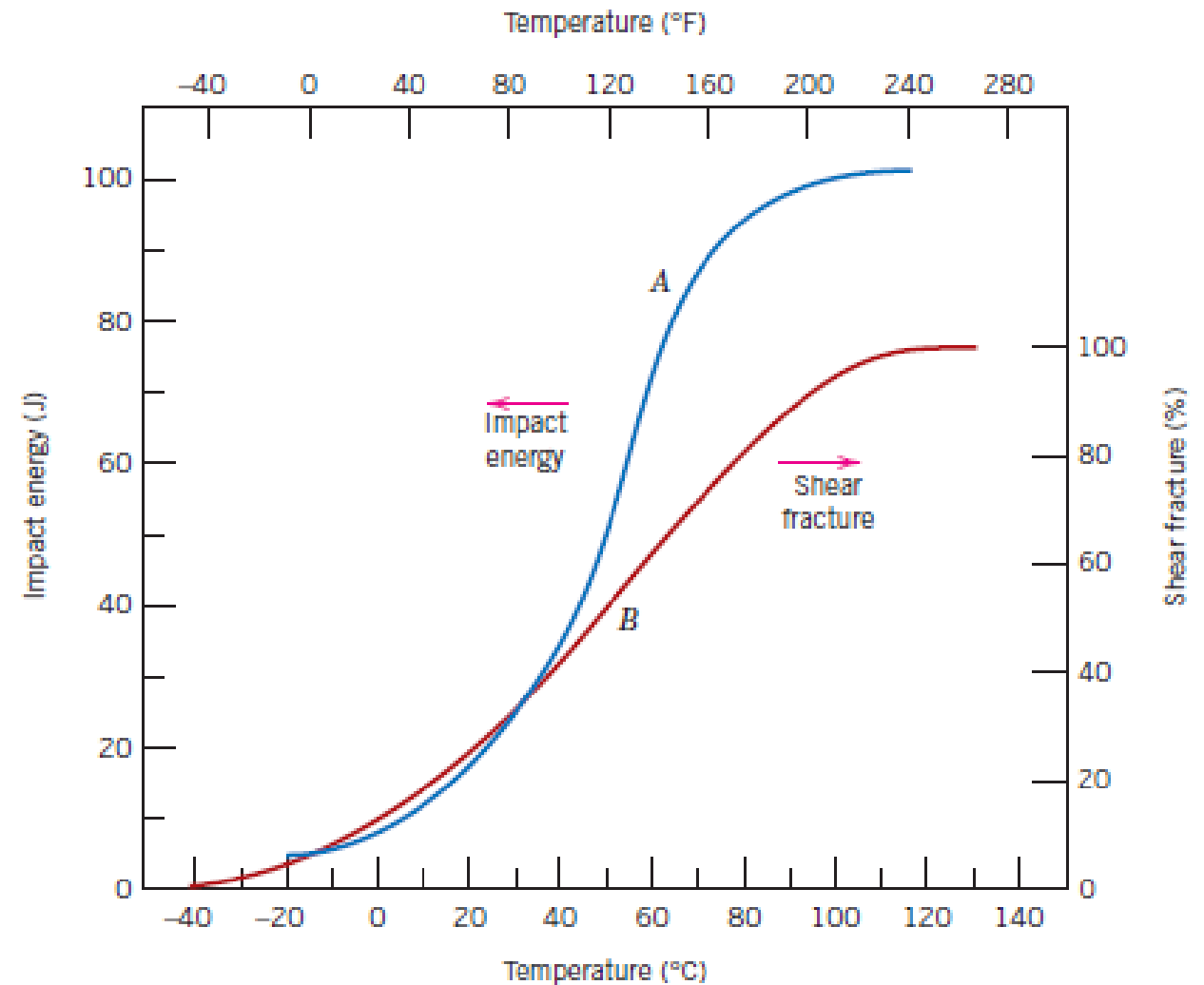
Υπάρχει περιοχή μετάβασης.

Ορίζεται θερμοκρασία μετάβασης :

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

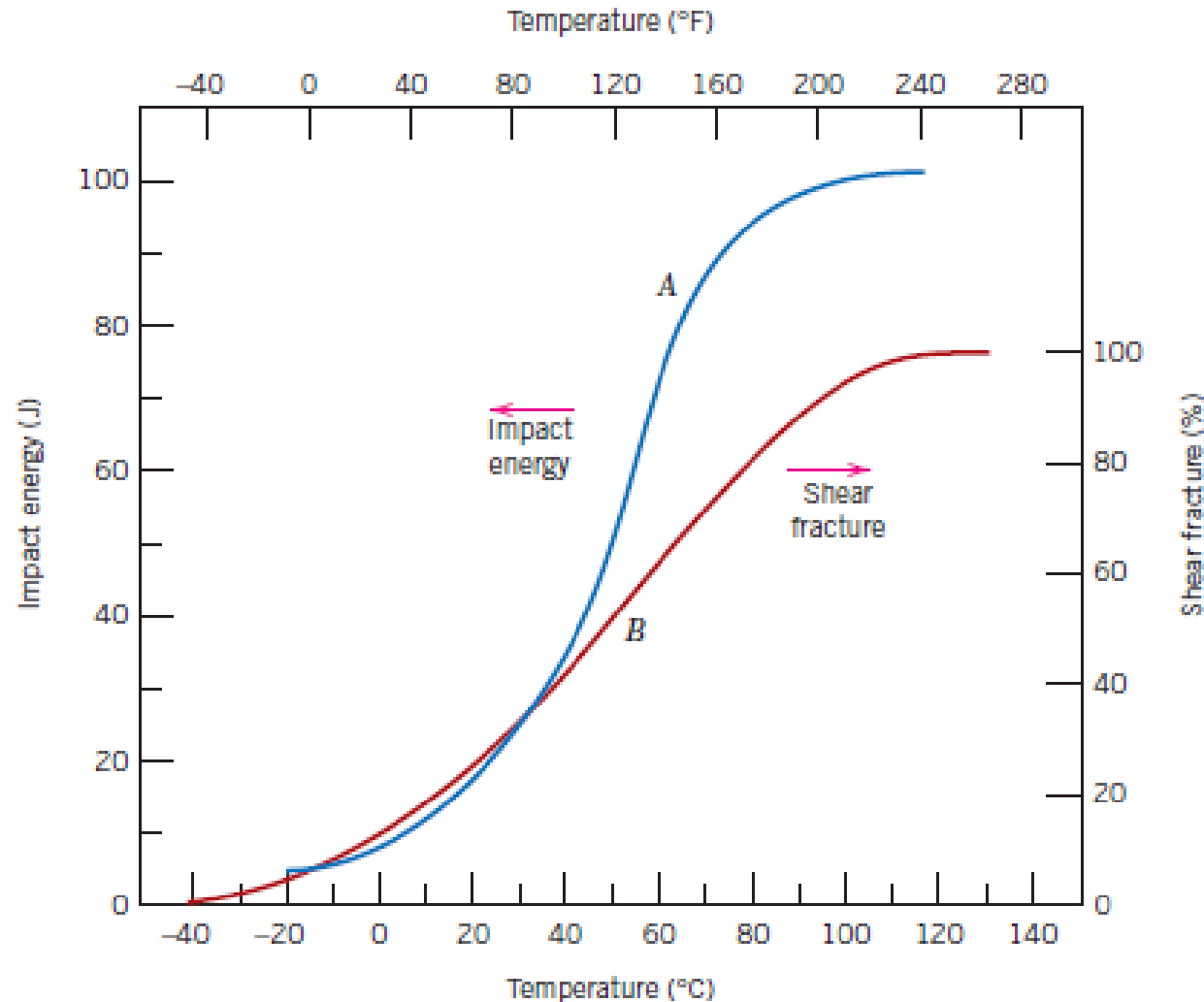
Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία:

- 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:

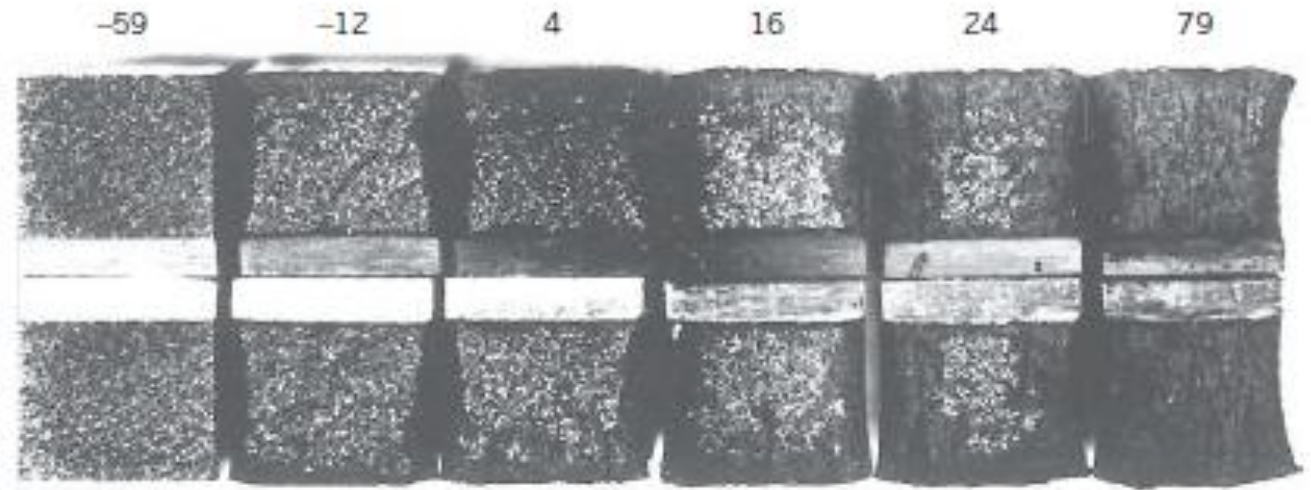
- τραχιά, **ινώδης (fibrous)** επιφάνεια
- έντονη πλαστική παραμόρφωση

### 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**

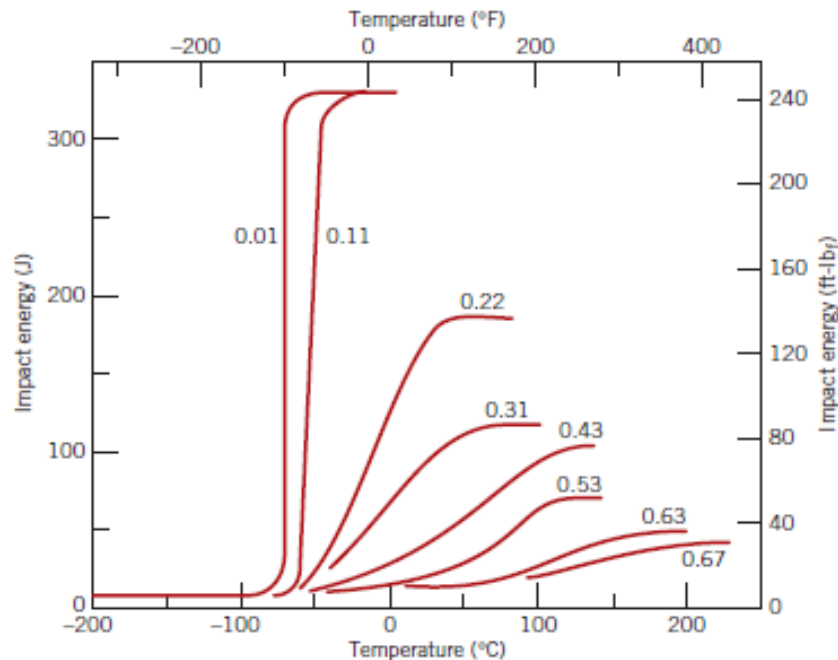
Οι ρωγμές ξεκινούν από:

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

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

# Μετάβαση από την Όλκιμη στην Ψαθυρή Συμπεριφορά

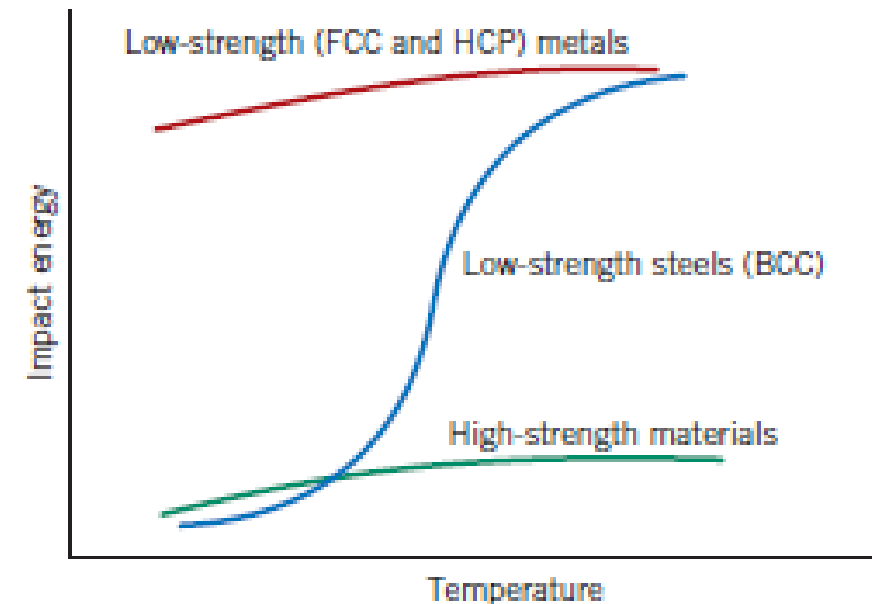
- ❑ Παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάβαση
  - Κρυσταλλική δομή:
    - BCC:** εμφανίζει έντονη μετάβαση
    - FCC:** δεν εμφανίζει έντονη μετάβαση (παραμένει όλκιμο)
  - Μικροδομή:
    - μικρότερο μέγεθος κόκκων → καλύτερη αντοχή
  - Σύνθεση:
    - αύξηση άνθρακα → αυξάνει θερμοκρασία μετάβασης



**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

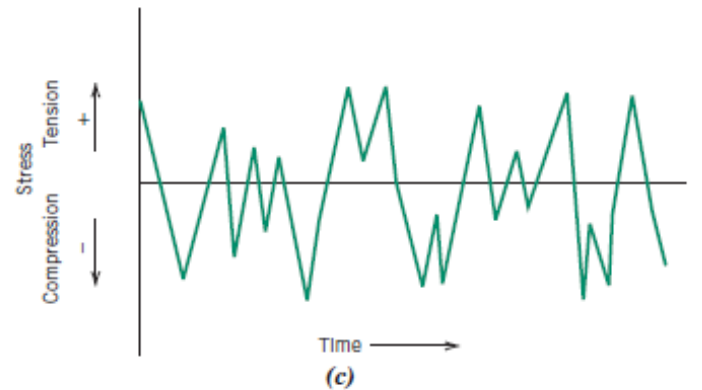
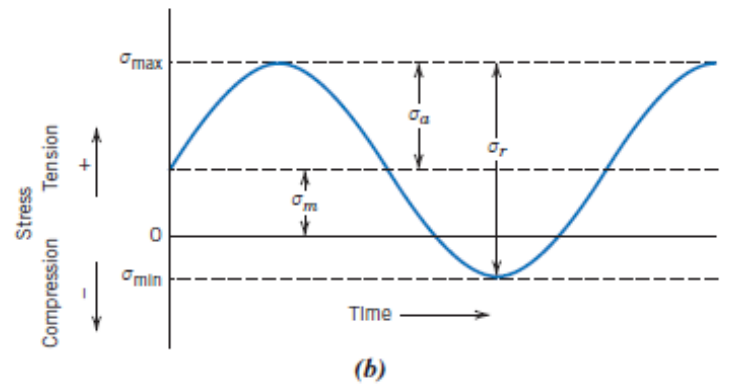
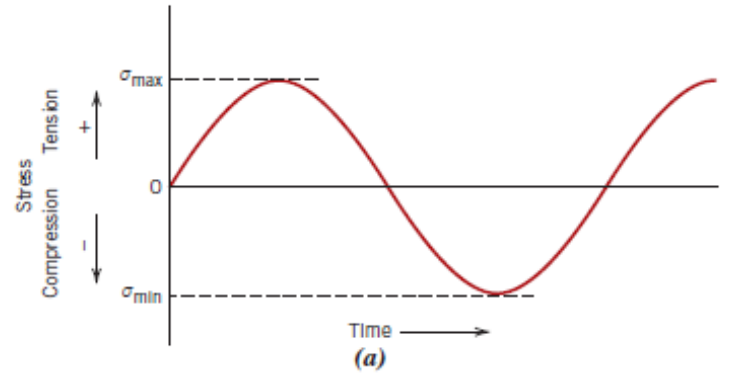
Μέση τάση  $\sigma_m \neq 0$

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**

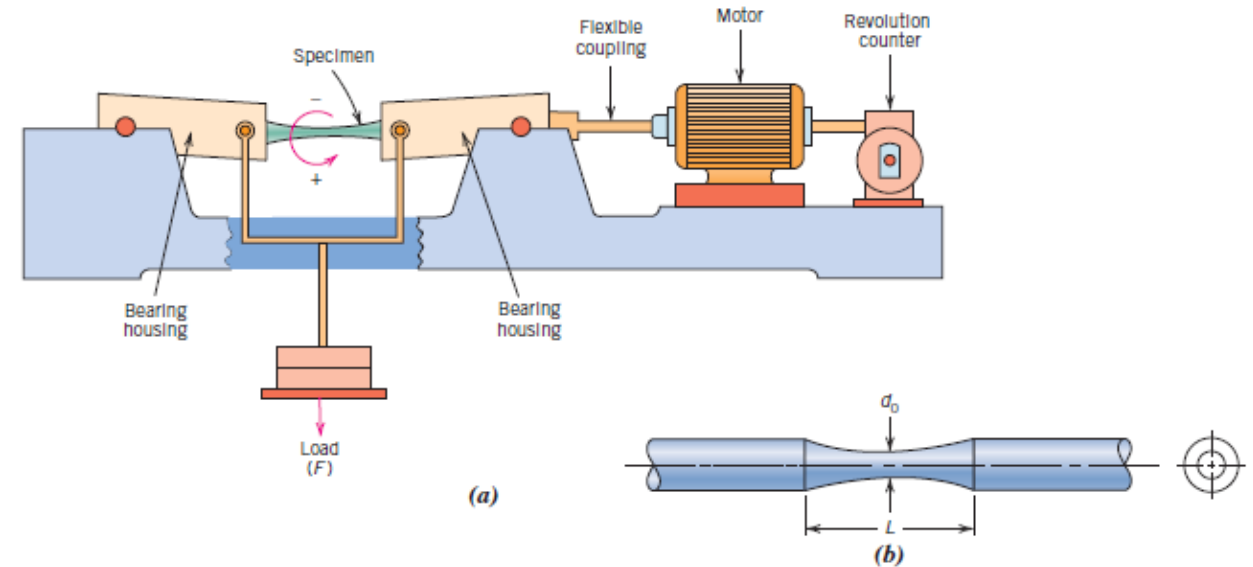
το κάτω μέρος → **εφελκυσμός**

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)

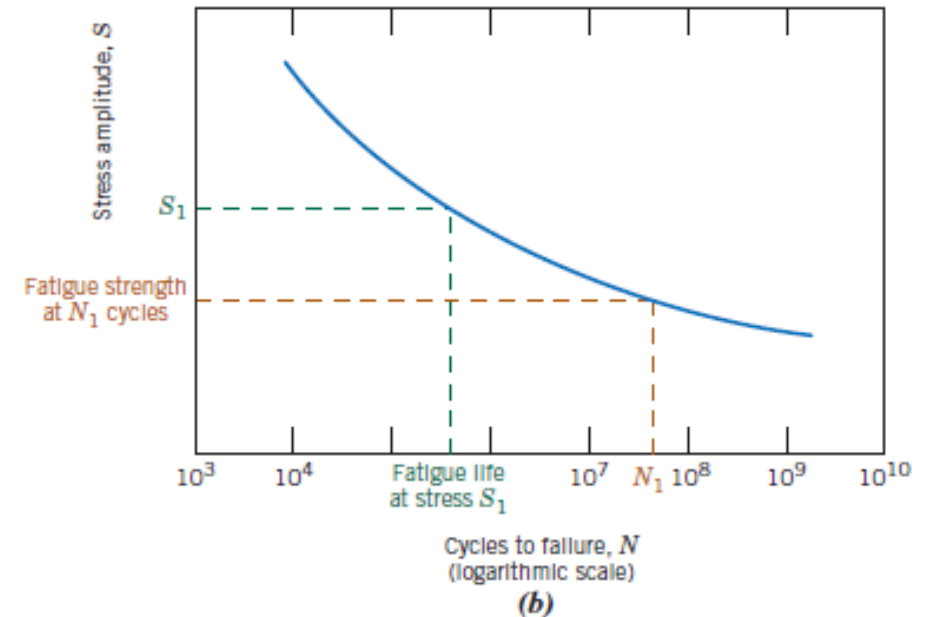
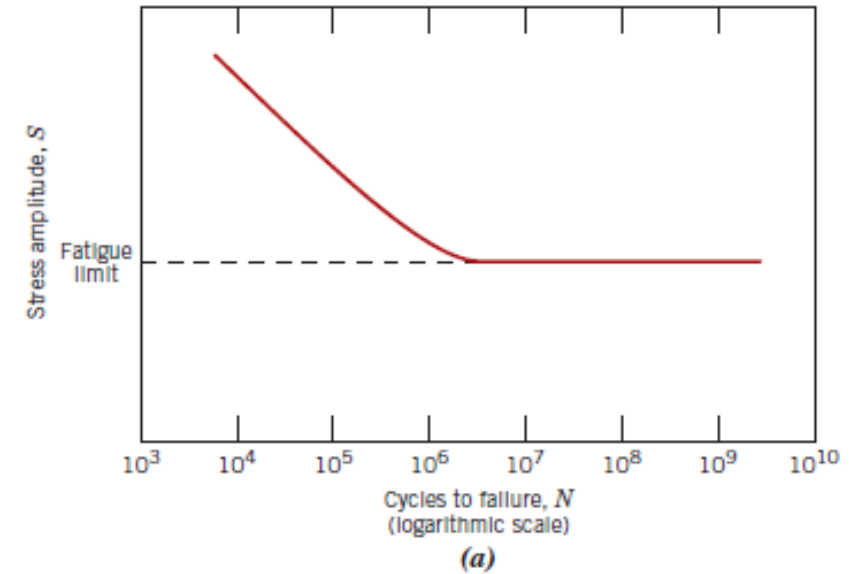
## ☐ Υλικά χωρίς όριο κόπωσης

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)

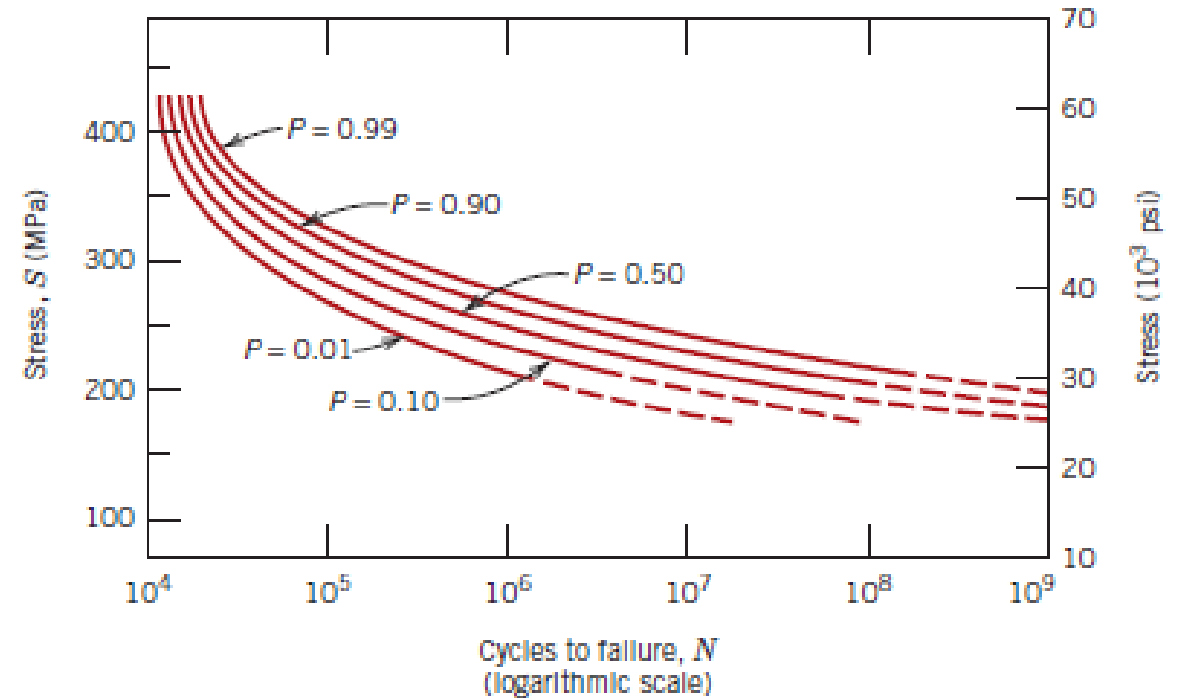
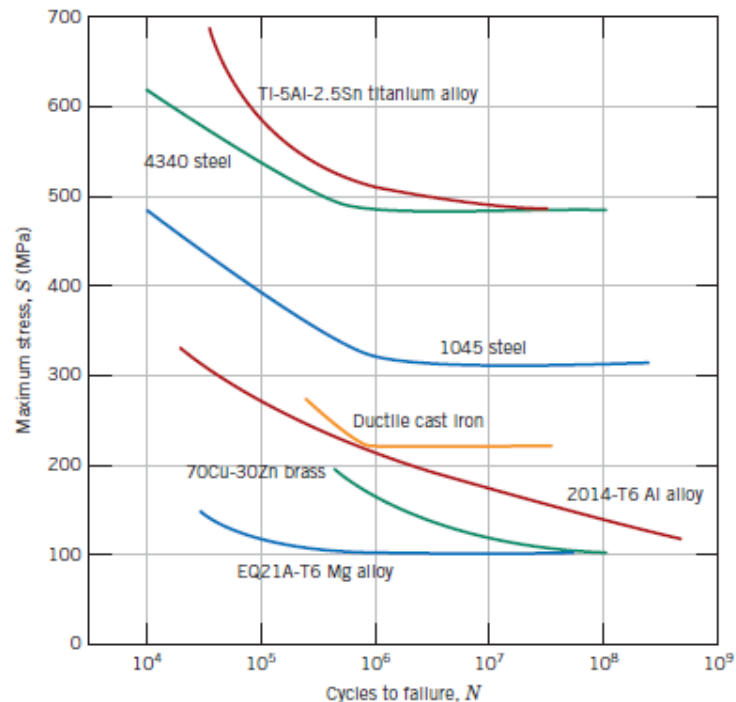
Η τάση που αντέχει το υλικό για συγκεκριμένο αριθμό κύκλων

## Διάρκεια ζωής σε κόπωση (Fatigue life, $N_f$ )

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

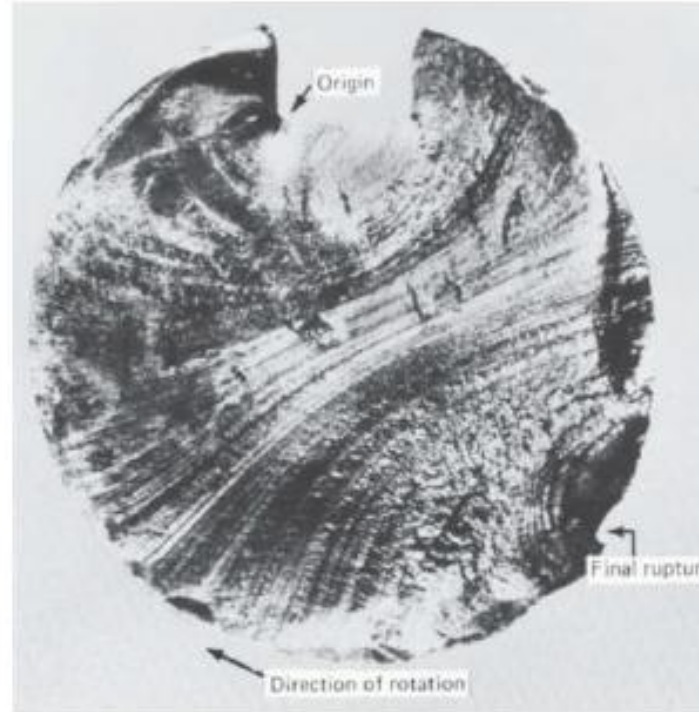
Όταν η ρωγμή φτάσει κρίσιμο μέγεθος:

η αστοχία γίνεται **απότομα**

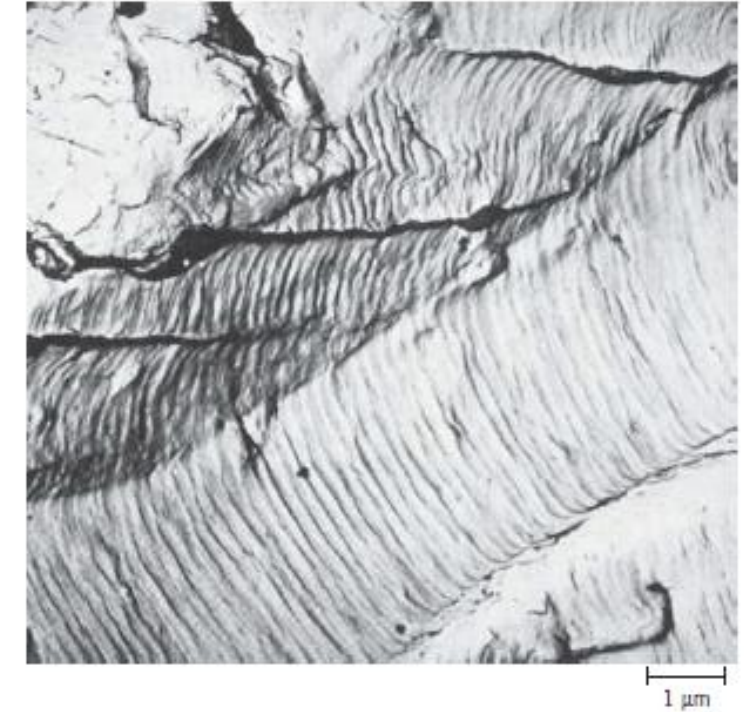
Η περιοχή αυτή είναι:

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.)

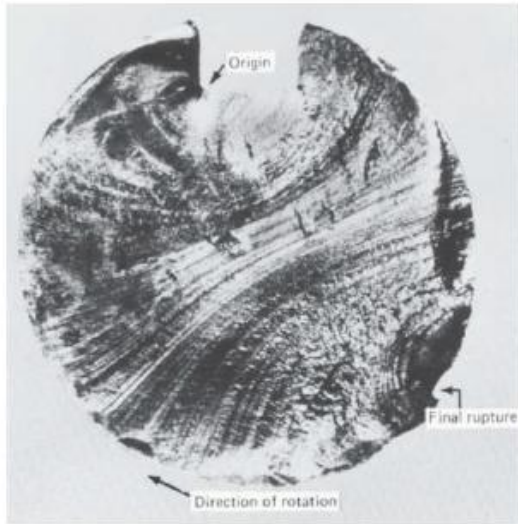
## Επιφάνεια θραύσης κόπωσης

Διακρίνονται διαφορετικές περιοχές:

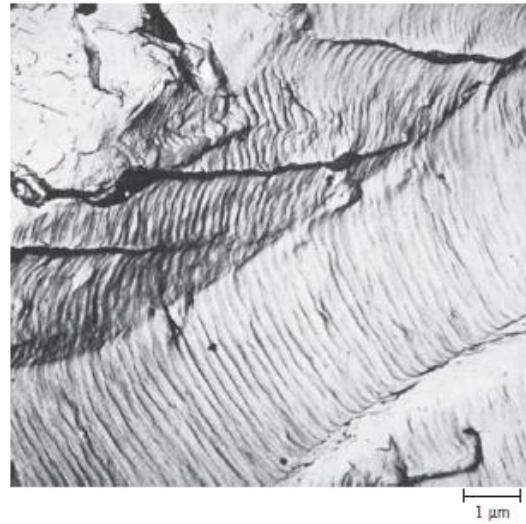
- έναρξη ρωγμής
- διάδοση
- τελική θραύση

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

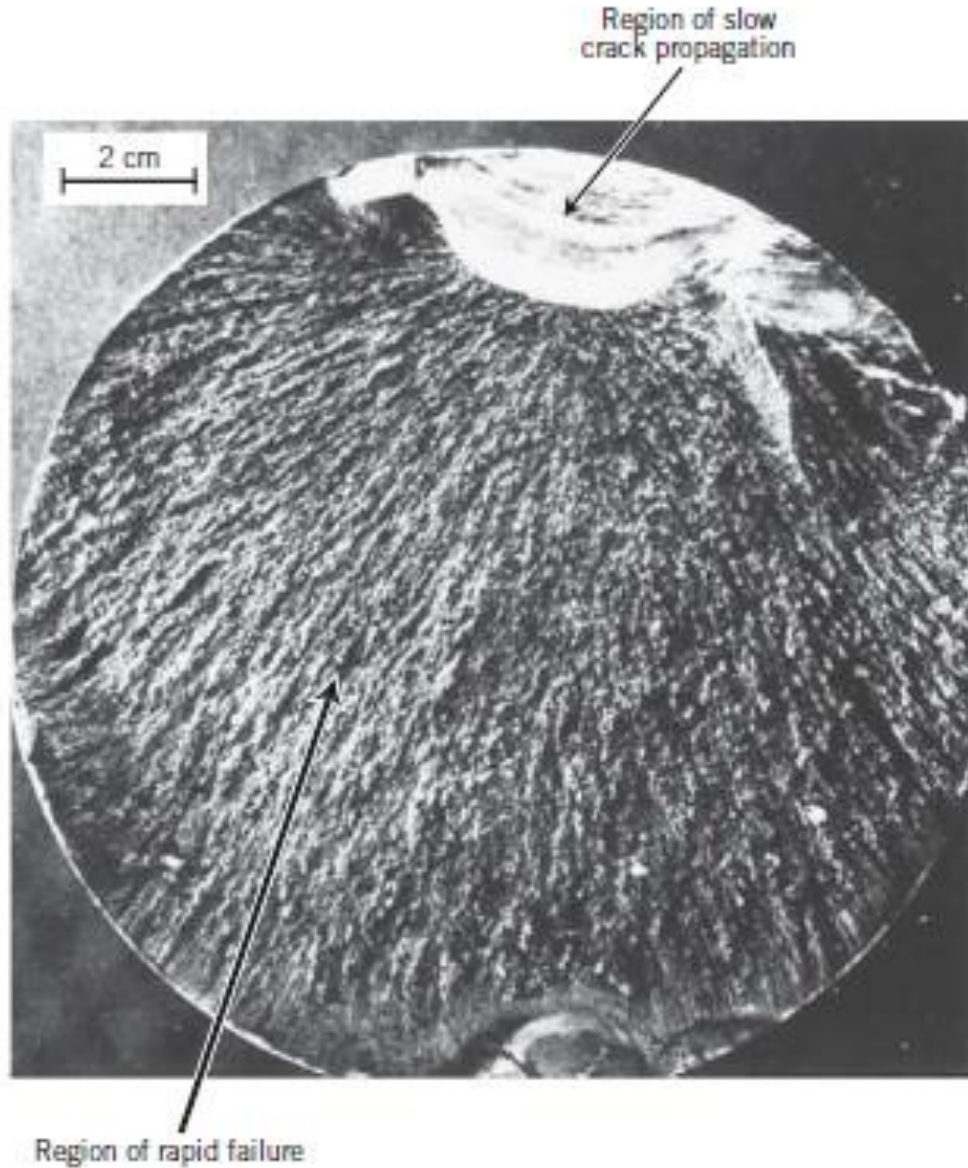
➤ Μικροραβδώσεις - Πολύ λεπτές γραμμές (SEM/TEM)

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:

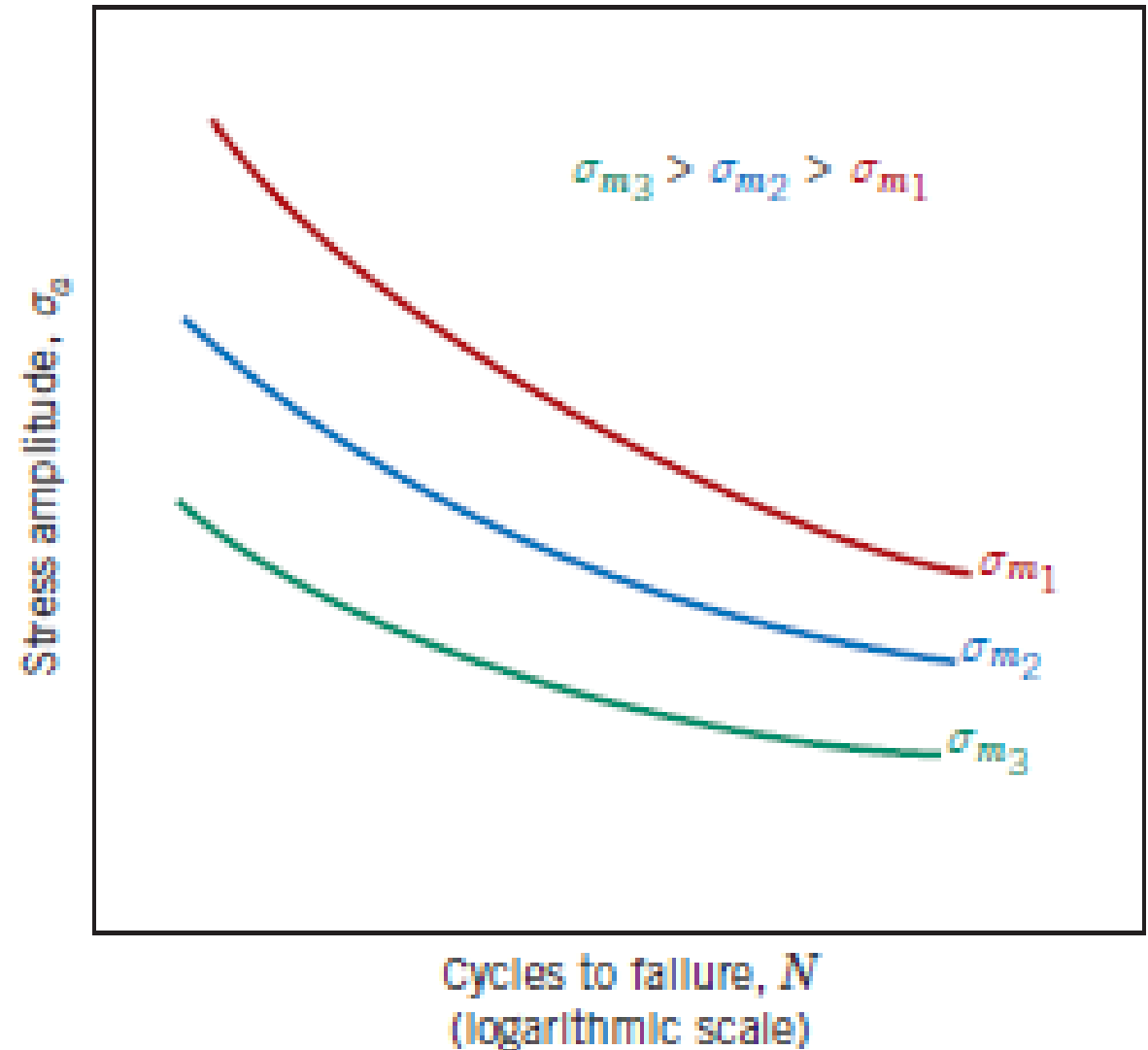
- μέση τάση
- γεωμετρία (design) - συγκεντρώσεις τάσεων
- επιφάνεια
- μικροδομή
- Περιβάλλον (διάβρωση, θερμοκρασία)

## □ Επίδραση μέσης τάσης

Η κόπωση εξαρτάται από τη μέση τάση  $\sigma_m$

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)

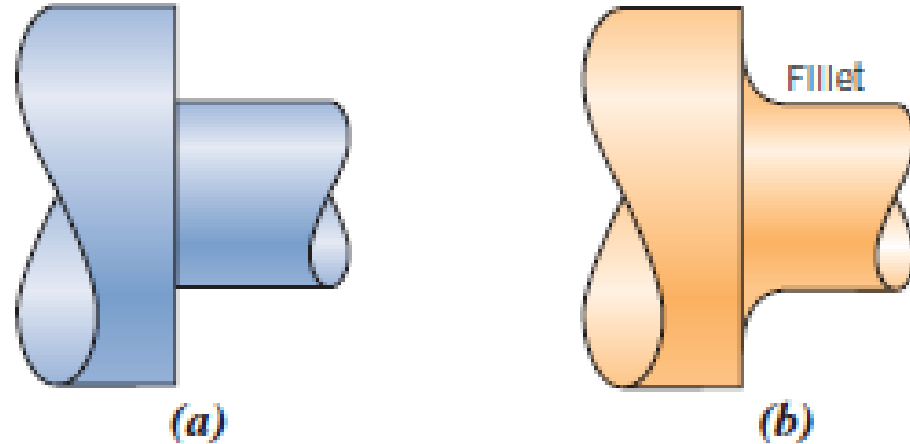
•Γεωμετρικές ασυνέχειες:

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)

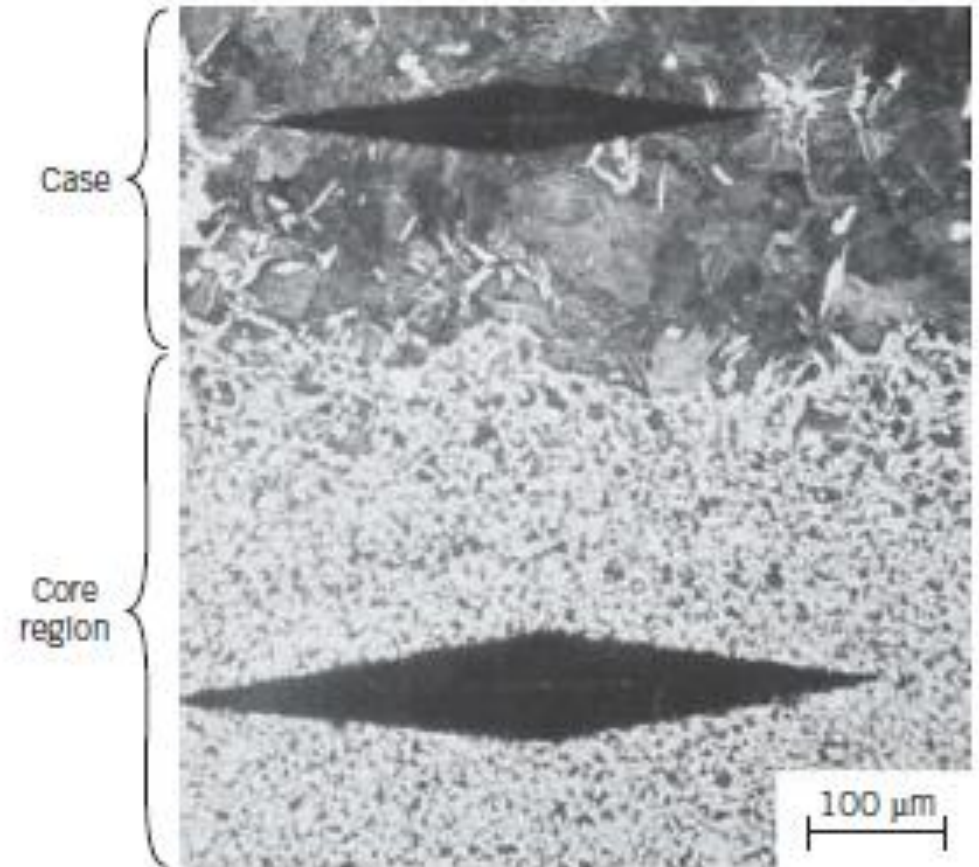
Σκλήρυνση επιφανειακού στρώματος μέσω ατομικής διάχυσης

Μέθοδοι:

- Ενανθράκωσης (carburizing)
- Εναζώτωσης (nitriding)

Σκληρή επιφάνεια + όγκιμος 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

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

- $\sigma$ : θερμική τάση (MPa)
- $\alpha$ : συντελεστής θερμικής διαστολής (1/K ή 1/°C)
- $E$ : μέτρο ελαστικότητας (MPa)
- $\Delta T$  → μεταβολή θερμοκρασίας (°C ή K)

## ☐ Κόπωση από Διάβρωση (Corrosion fatigue)

Συνδυασμός:

- κυκλικής φόρτισης + χημικής επίδρασης

Προκαλεί:

- ταχύτερη διάδοση ρωγμών
- μικρότερη διάρκεια ζωής

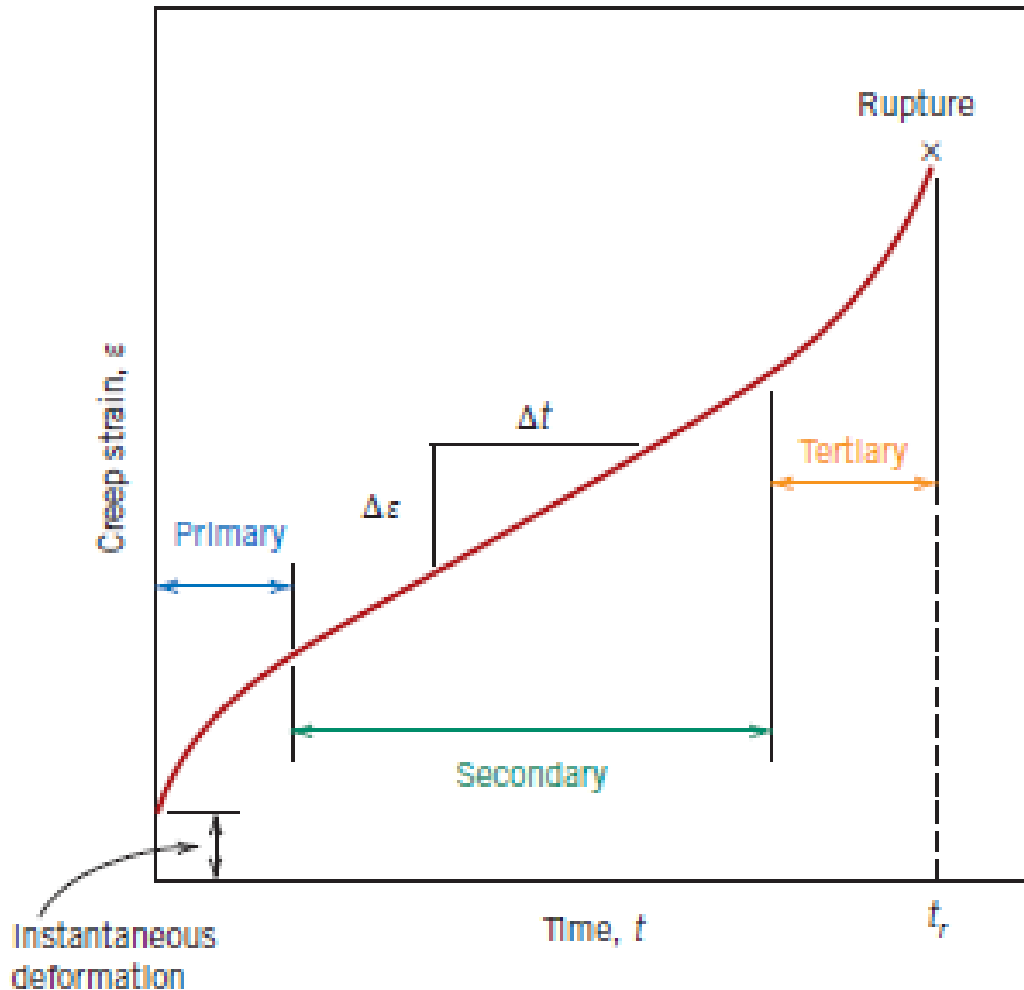
## Πρόληψη

- 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

$\sigma$  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 ( $s^{-1}$ )

•  $\sigma$  εφαρμοζόμενη τάση (MPa)

•  $T$  θερμοκρασία (K)

•  $Q_c$  ενχργεια ενεργοποίησης (J/mol)

•  $R$  παγκόσμια σταθερά αερίων J/mol·K

•  $K_2$  εξαρτάται από το υλικό

•  $n \rightarrow$  χωρίς μονάδες

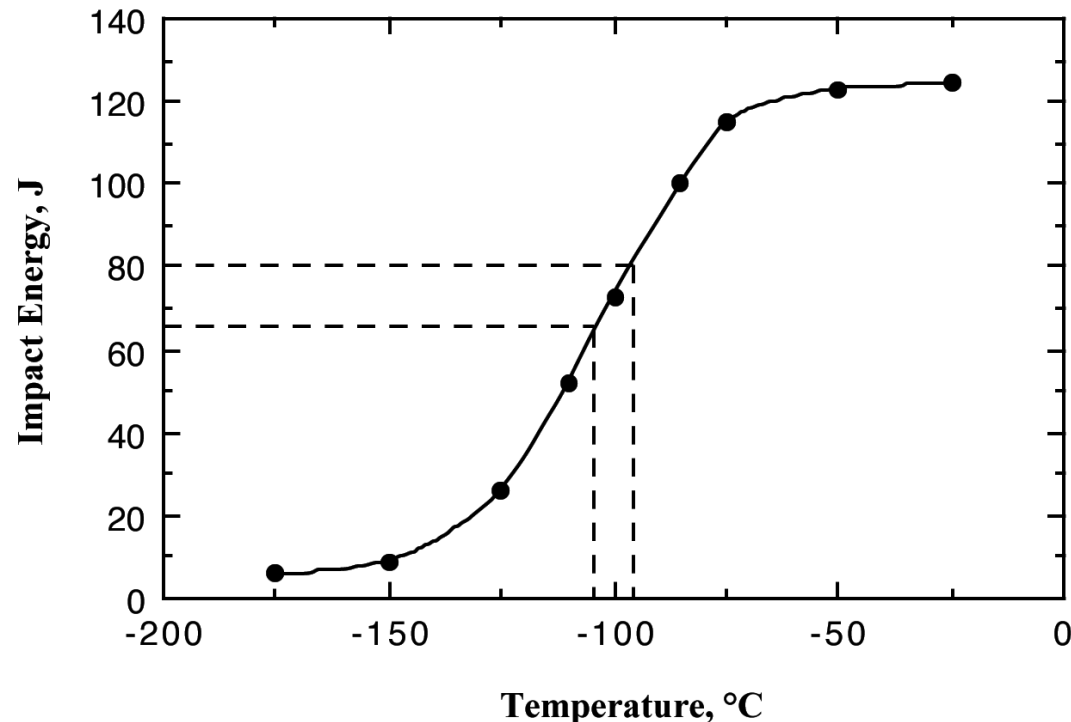
# Δοκιμές Δυθραυστότητας

## Άσκηση:

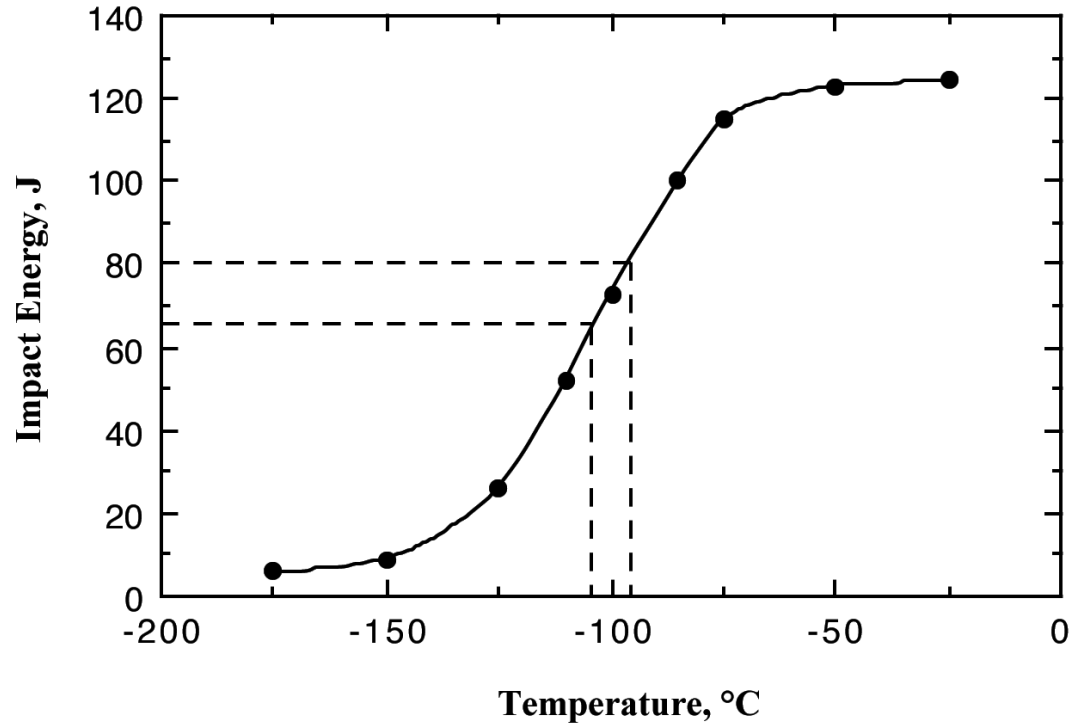
Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται η μεταβολή της ενέργειας κρούσης (Impact Energy, J) συναρτήσει της θερμοκρασίας για ένα όλκιμο χυτοσίδηρο, όπως προέκυψε από δοκιμές Charpy.

**(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

# Κυκλικές Τάσεις

## (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

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

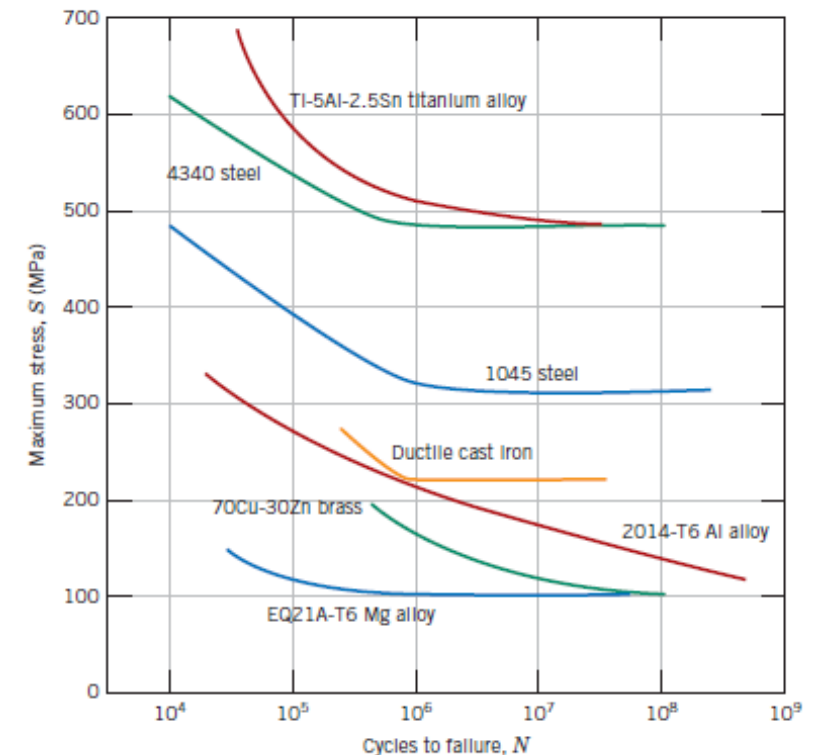
# Κυκλικές Τάσεις

## 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:

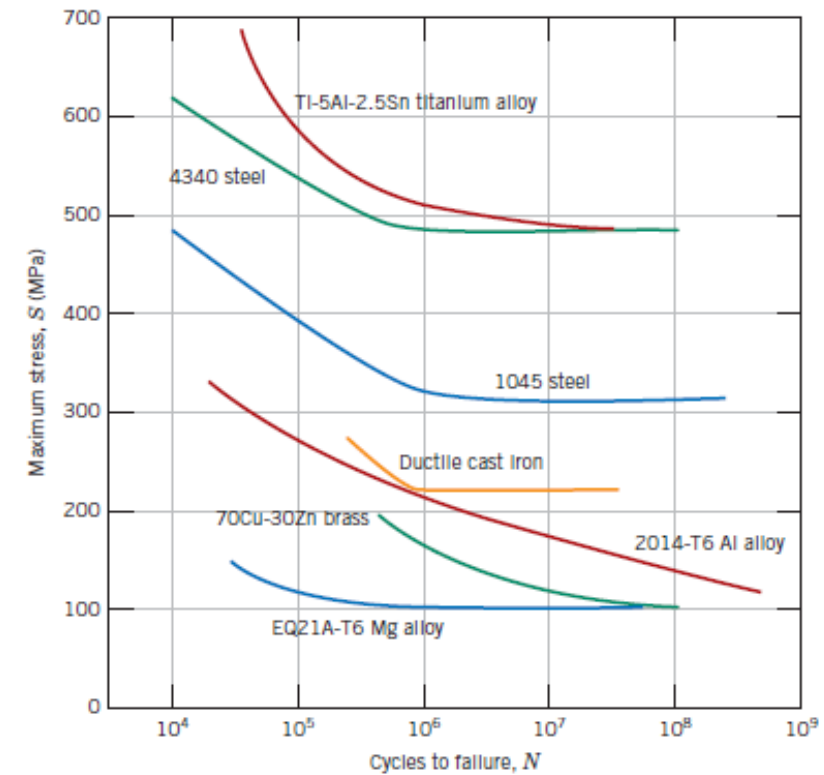
$$\sigma_a = \frac{F_a}{A}$$

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**.

$\dot{\epsilon}_s$ ( $h^{-1}$ )	$\sigma$ (MPa)
$2.0 \times 10^{-4}$	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

Figures adapted from:

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