

Αστοχία των υλικών

Διάγνωση της αστοχίας
Failure analysis



- plastic (permanent) deformation of a bridge
- deformation led to eventual collapse
- Tacoma Narrows suspension bridge, near Puget Sound, failed on at 11 am Nov. 7, 1940, after only having been open for traffic a few months





- 500 T2 tankers and 2700 Liberty ships were built during WWII
- prefabricated all-welded construction, with brittle steel
- one vessel was built in 5 days!

Brittle fracture of SS Schenectady, Jan. 1943

SS John P. Gaines split in two in 1943

- initially, some 30% of Liberty ships suffered catastrophic failure
- cracks started at stress concentrations (e.g., hatchways) and propagated rapidly through the steel hull as the metal became too brittle at low temperatures



SS John P. Gaines split in two in 1943



Air France charter flight from
Paris to New York - July 25, 2000

- the Concorde crashed into a hotel shortly after take-off, 5 miles from airport, with 109 fatalities
- attributed to a piece of metal on the runway causing the bursting of a tire
- the impact of the tire debris on the fuel tank punctured it, leading to loss of engine power, and the subsequent crack
- an example of *foreign-object damage (FOD)*



- De Havilland Comet, first commercial jet aircraft, had five major crashes in 1952 - 54 period
- caused by fatigue cracks initiated at square windows, driven by cabin pressurization and depressurization



- Aloha Airlines Boeing 737, in route from Hilo to Honolulu (April 1998) undergoes explosive decompression – 1 fatality
- caused by a weakening of the fuselage due to corrosion and small cracks – led to Aging Aircraft Initiative



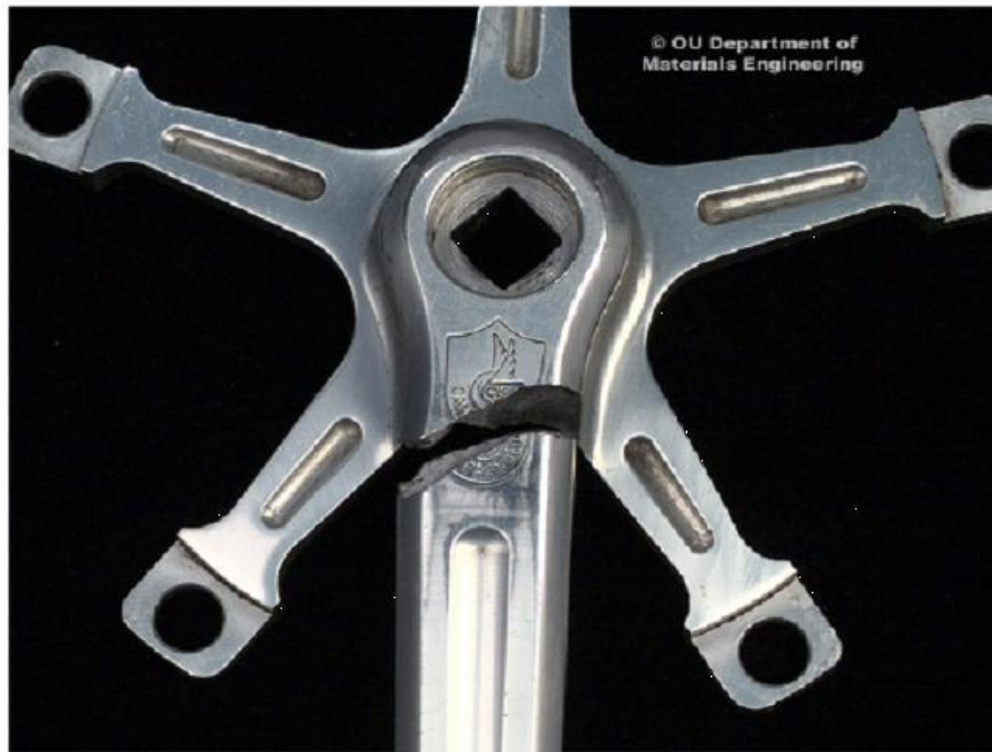
- A major wear problem is with railroad tracks, where surface wear from metal-to-metal rolling contact can damage the rails leading to derailment



Derailement of 100 ton tank wagon and the rest of the train in Lincolnshire, UK in 1982



Rail collapse leads to derailment of a locomotive in Driffield, UK, in 1981



A fatigue failure in a bicycle crank spider arm. This was a high quality component that had very high load cycles but was in excellent apparent condition until the final fracture.

https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=YcvtlsZv12E

ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ:

- Έκθεση ανθρώπινων ζωών σε κίνδυνο
- Οικονομικές απώλειες
- Εμπόδιση της διαθεσιμότητας υλικών και υπηρεσιών

ΕΥΘΥΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΥΝΑΦΩΝ ΜΕ ΤΟ ΣΥΜΒΑΝ ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΩΝ

- Να προλαμβάνουν με κατάλληλο σχεδιασμό και επιλογή υλικών και κατασκευή
- Να σχεδιάζουν τρόπους αντιμετώπισης της αστοχίας
- Να προσδιορίζουν σε περίπτωση τα αίτια με ακρίβεια
- Να παίρνουν τα κατάλληλα αποτρεπτικά μέτρα εναντίον μελλοντικών συμβάντων

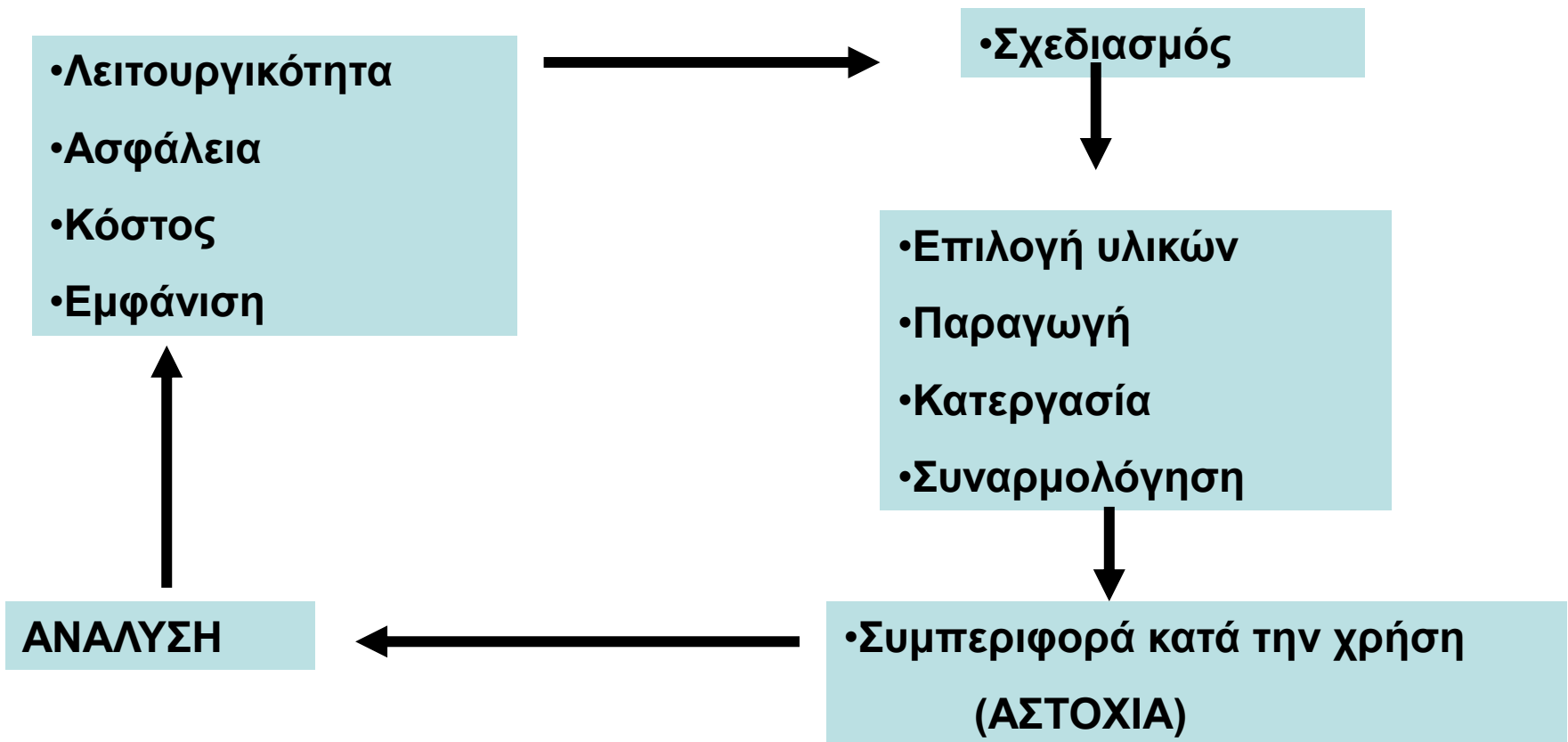
Αιτίες αστοχίας

- ❑ Λανθασμένη επιλογή και σχεδιασμός
- ❑ Λανθασμένη χρησιμοποίηση και εφαρμογή
- ❑ Υποβάθμιση των ιδιοτήτων λόγω χρήσης

Μεθοδολογία ανάλυσης της αστοχίας

- Παρατηρήσεις (αυτοψία στο σημείο του ατυχήματος) - Συλλογή στοιχείων
- Συλλογή των διαθέσιμων επιστημονικών και τεχνικών δεδομένων που σχετίζονται με την περίπτωση που εξετάζεται
- Εργαστηριακές εξετάσεις στο υλικό που αστόχησε
- Ανάλυση των στοιχείων που συλλέχθηκαν και ερμηνεία της αστοχίας
- Σύνταξη εμπειριστατωμένου πορίσματος

Αλληλεπίδραση μεταξύ σχεδιασμού συμπεριφοράς κατά χρήση(αστοχίας)



Μηχανισμοί αστοχίας των υλικών

- Ταχεία (ή Απότομη) θραύση (Fast fracture)
- Κόπωση (Fatigue)
- Ερπυσμός (Creep)

Ταχεία ή (Απότομη) θραύση



Neal Boenzi (photograph)
-The New York Times

Συγκέντρωση τάσεων (*Stress concentration*)

$$\sigma_m = \sigma_0 [1 + 2(a / \rho_t)^{1/2}]$$

Για ελλειπτική μικρορωγμή
κάθετη προς τη διεύθυνση της τάσης

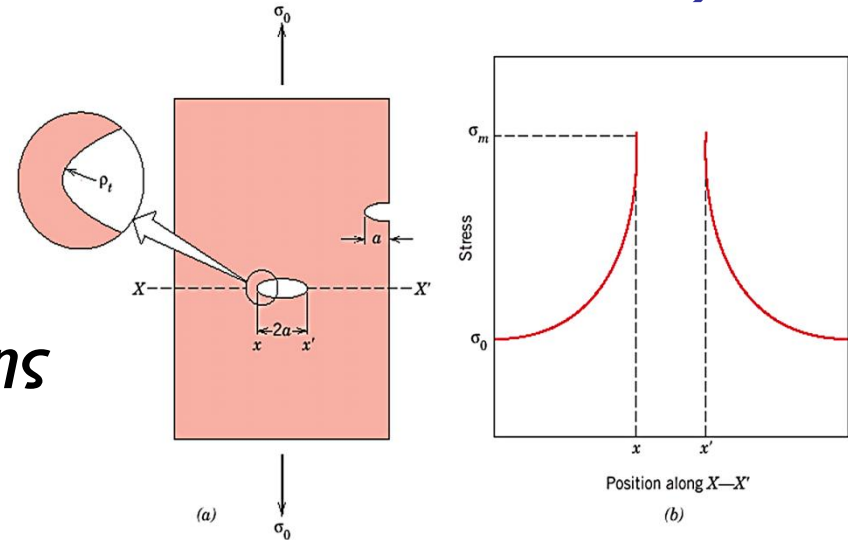
$$\sigma_m = 2 \sigma_0 (a / \rho_t)^{1/2}$$

Όταν η ρωγμή είναι πολύ μικρή
(αιχμηρή μικρορωγμή)

$$K_t = \sigma_m / \sigma_0 = 2 (a / \rho_t)^{1/2}$$

K_t ονομάζεται
Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων
(the stress concentration factor)

Μέτρο του βαθμού ενίσχυσης των μηχανικών τάσεων στην αιχμή της
μικρορωγμής ή ατέλειας



(a) Γεωμετρία εσωτερικής και
επιφανειακής μικρορωγμής (b)
Σχηματική απεικόνιση της μεταβολής
της τάσης κατά μήκος της γραμμής
 $X-X'$ στο (a), Δείχνει την ενίσχυση
της τάσης στα άκρα της
μικρορωγμής.

Συγκέντρωση τάσεων,

Ορισμός δυσθραυστότητας (Toughness)

Ενεργειακό κριτήριο ανάπτυξης μικρορωγμής:

$$dW \gg dW_E + G_c l da$$

Έργο που παράγεται
από το φορτίο

Μεταβολή της
ελαστικής ενέργειας

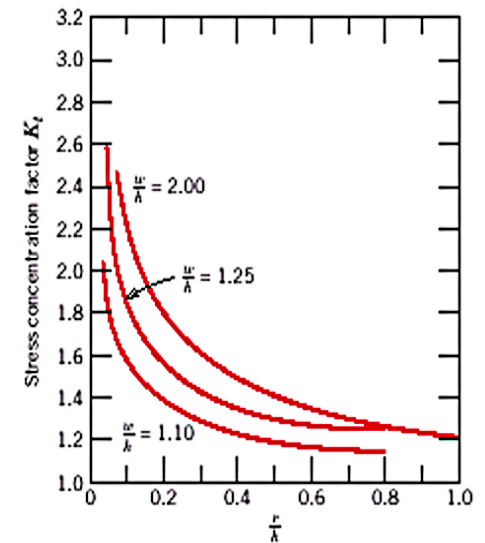
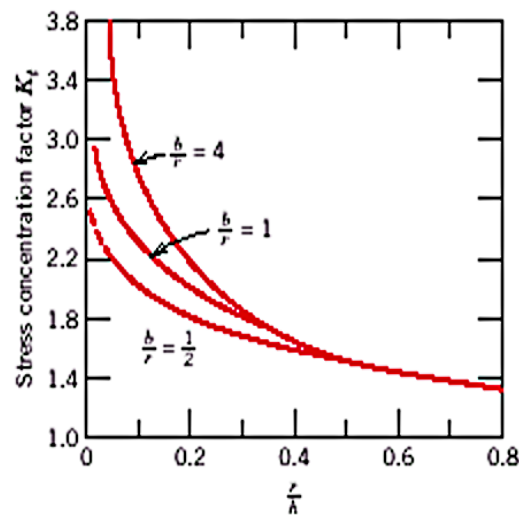
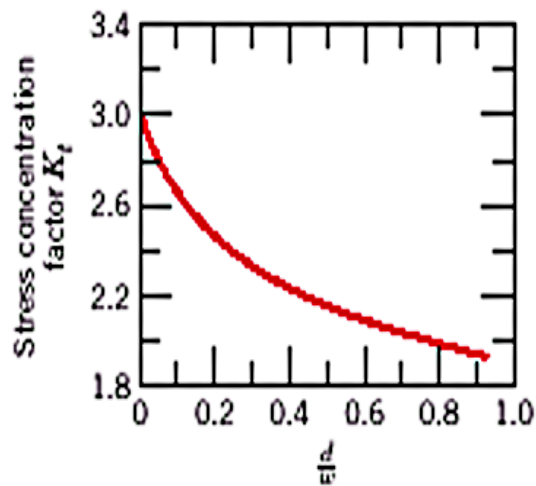
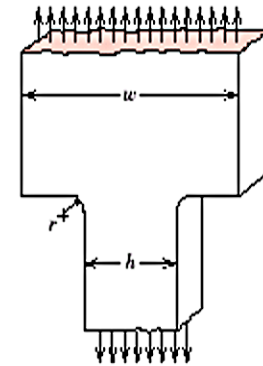
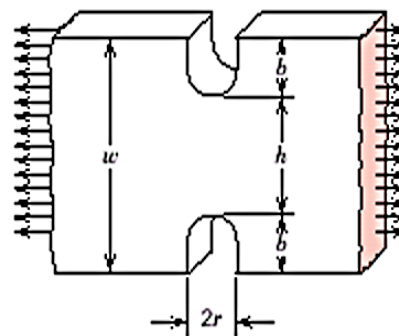
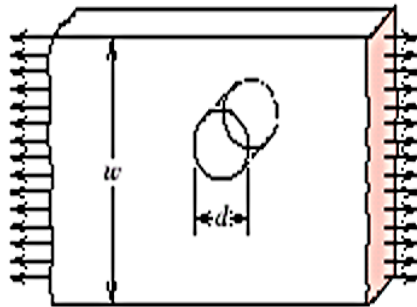
Ενέργεια που
απορροφιάται στην
περιοχή της ρωγμής

G_c , Δυσθραυστότητα : Είναι η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας της ρωγμής η οποία απαιτείται για την ανάπτυξη της ρωγμής .
Μονάδες J/m^2

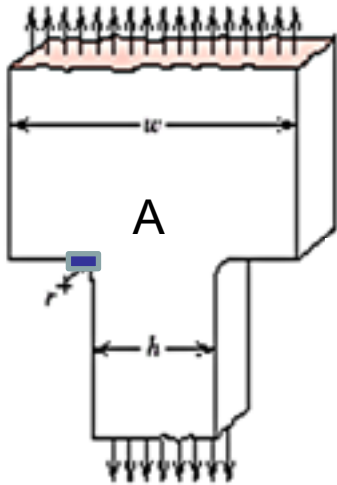
Cu: $10^6 J/m^2$

Γυαλί : $10 J/m^2$

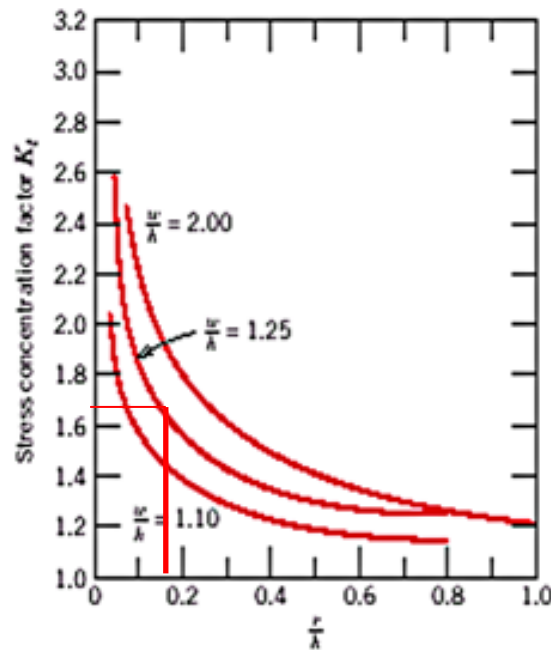
Θεωρητικές καμπύλες συγκέντρωσης τάσεων για τρία γεωμετρικά σχήματα



Παράδειγμα Εφαρμογής: Στο δοκίμιο εφελκυσμού του σχήματος οι διαστάσεις είναι: $w=25\text{ mm}$, $h=20\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ και το πάχος του δοκιμίου είναι 8mm . (α) Να υπολογίσετε το μέγεθος της τάσης στο σημείο A όταν η εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση είναι 100MPa . (β) Πόσο πρέπει να αυξηθεί η ακτίνα καμπυλότητας ώστε η επαγόμενη τάση στο A να μειωθεί 20%



Για τον υπολογισμό θα χρησιμοποιήσω τις θεωρητικές καμπύλες του σχήματος. Υπολογίζω τις ποσότητες $(w/h)=1,25$. και $(r/h)=0,15$. Από την κατάλληλη καμπύλη του σχήματος υπολογίζω την $K_t=(\sigma_m/\sigma_o)=1,68$



**Συνεπώς $\sigma_m=1,68*\sigma_o$
= 168MPa**

Ακολουθώντας πορεία αντίστροφη επιλύεται το (β) ερώτημα

Στοιχεία μηχανικής θραύσης (θραυστομηχανικής)
Θεωρία Griffith για φαθυρή θραύση
Fracture mechanics – Griffith Theory for brittle fracture

$$\sigma_c = (2 E \gamma_s / \pi a)^{1/2}$$

όπου: E = Μέτρο ελαστικότητας γ_s = ειδική επιφανειακή ενέργεια

a = το μισό του μήκους επιφανειακής ρωγμής

σ_c = κρίσιμη τάση για να επέλθει η θραύση

Αργότερα ο Griffith συμπλήρωσε την παραπάνω εξίσωση

$$\sigma_c = [2 E (\gamma_s + \gamma_p) / \pi a]^{1/2}$$

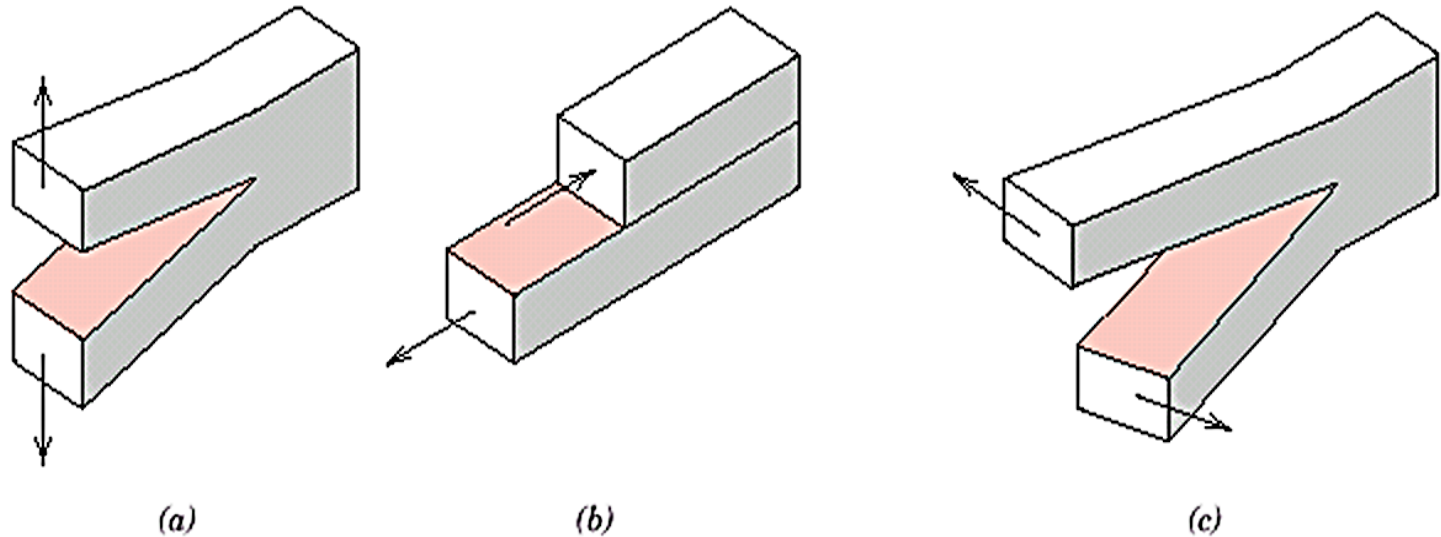
όπου: γ_p = ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης ανάπτυξης της ρωγμής

Συνεισφορά G.G Irwin

$$G_c = 2 (\gamma_s + \gamma_p) = (\pi \sigma^2 a) / E$$

Όπου: G_c = Κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης

Στοιχεία μηχανικής θραύσης (θραυστομηχανική) Θεωρία Griffith για φαθυρή θραύση Fracture mechanics – Griffith Theory



Τύποι ανάπτυξης μικρορωγμής

Τρόποι μετατόπισης των επιφανειών της ρωγμής

(a) Τύπος I, εφελκυστικός τύπος (tensile mode)

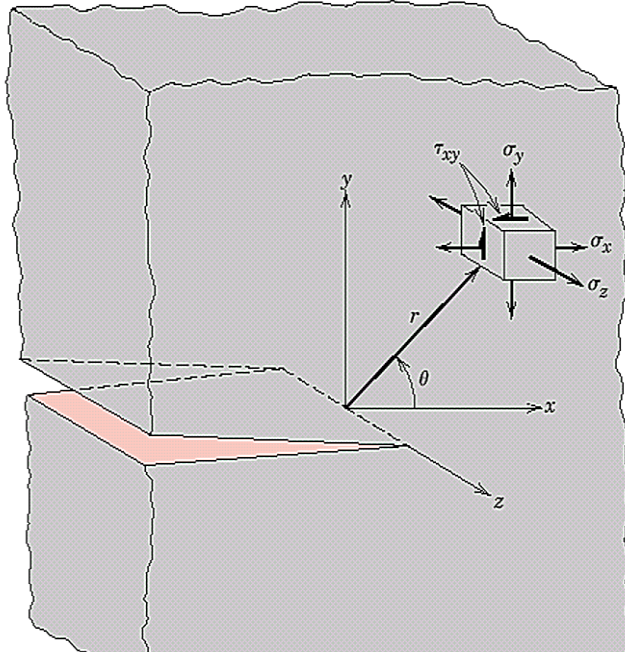
(b) Τύπος II, Τύπος ολίσθησης (sliding mode) και

(c) τύπος III, αποσχιστικός τύπος (tearing mode).

Παράγοντας ή συντελεστής έντασης τάσεων

K (Stress intensity factor)

Ανάλυση του εφελκυστικού Τύπου θραύσης I



Τάσεις που αναπτύσσονται στη ρωγμή για την ανάπτυξη της

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

- ✓ Σε περίπτωση που το πάχος του δοκιμίου είναι μικρό σε σχέση με τις διαστάσεις της ρωγμής $\sigma_z = 0$ (Συνθήκες Επίπεδης Τάσης)
- ✓ Σε περίπτωση που το πάχος του δοκιμίου είναι μεγάλο σε σχέση με τις διαστάσεις της ρωγμής $\sigma_z = f(\sigma_x, \sigma_y)$ (Συνθήκες Επίπεδης Παραμόρφωσης)

Ποια η σημασία του K; (Συντελεστή Έντασης Τάσης) Stress Intensity Factor

Προσδιορίζει την κατανομή των τάσεων γύρω από την ατέλεια

Οι συντελεστές K_t και K συσχετίζονται ; Είναι παρόμοιοι όχι όμως ισοδύναμοι

$$K = Y \sigma (\pi a)^{1/2}$$

όπου Y μια αδιάστατη ή συνάρτηση η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμίου και της ρωγμής. Συχνά γράφεται και ως $Y(a/W)$

η K έχει μονάδες $\text{Τάση} * \sqrt{\text{μήκος}}$ $MPa * \sqrt{m}$

Αντίσταση θραύσης ή Ανθεκτικότητα θραύσης (Fracture toughness)

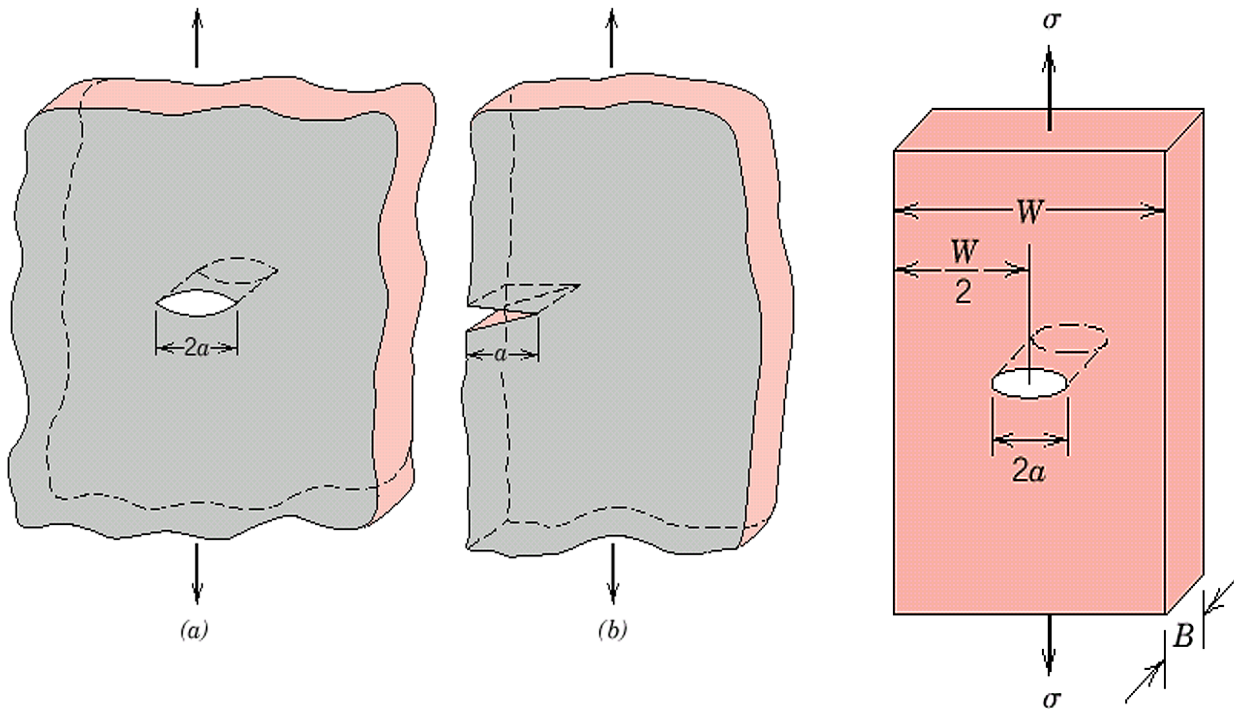
$$K_c = Y(a/W) \sigma_c (\pi a)^{1/2}$$

Η K_c προκύπτει όταν η επαγομένη στην αιχμή της ρωγμής τάση σ λάβει την κρίσιμη τιμή σ_c

ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΑΧΕΪΑΣ (ή ΑΠΟΤΟΜΗΣ) ΘΡΑΥΣΗΣ

Απότομη θραύση (Fast fracture) Συμβαίνει όταν $K=K_c=(G_c E)^{1/2}$

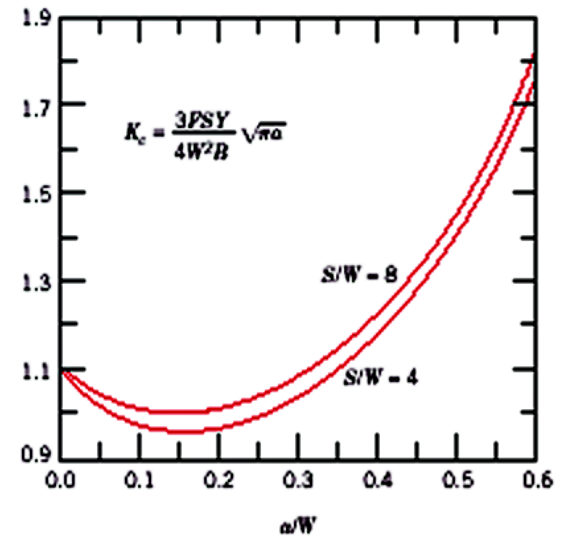
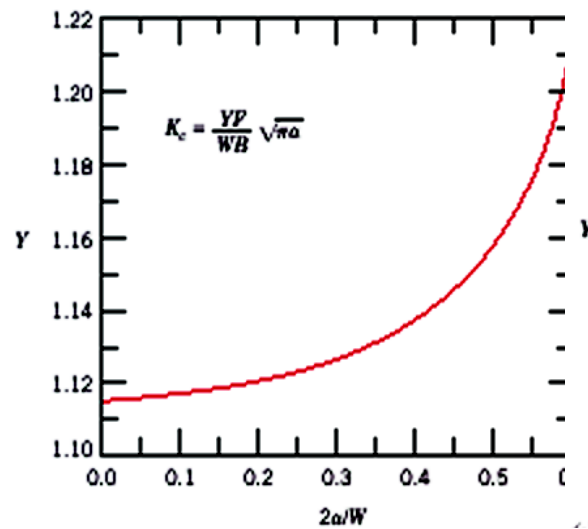
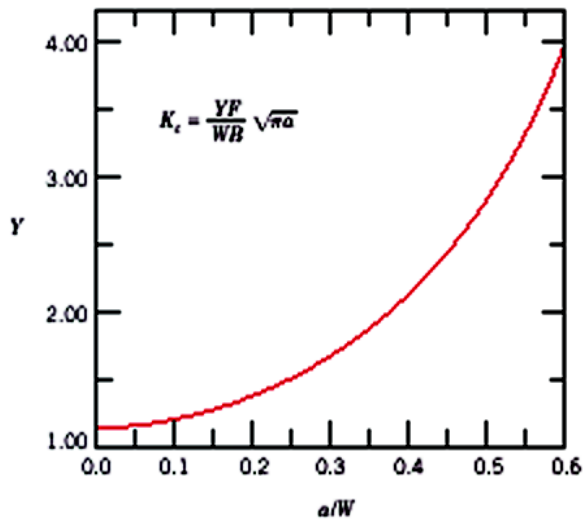
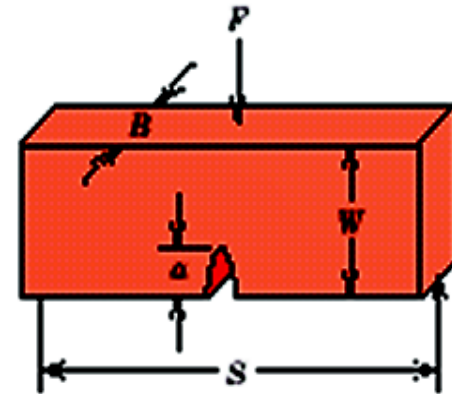
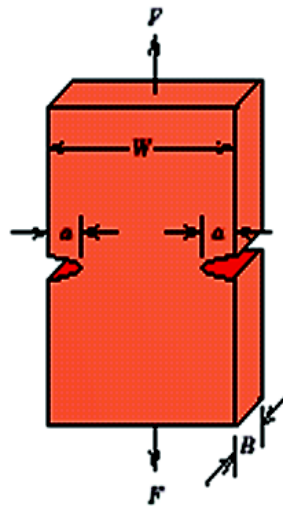
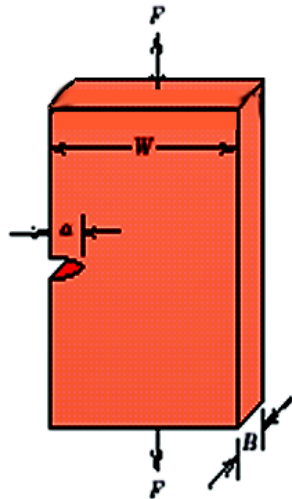
Ποιες είναι οι τιμές που παίρνει η συνάρτηση $Y(a/W)$;



$$Y(a/W) = \frac{W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{W}$$

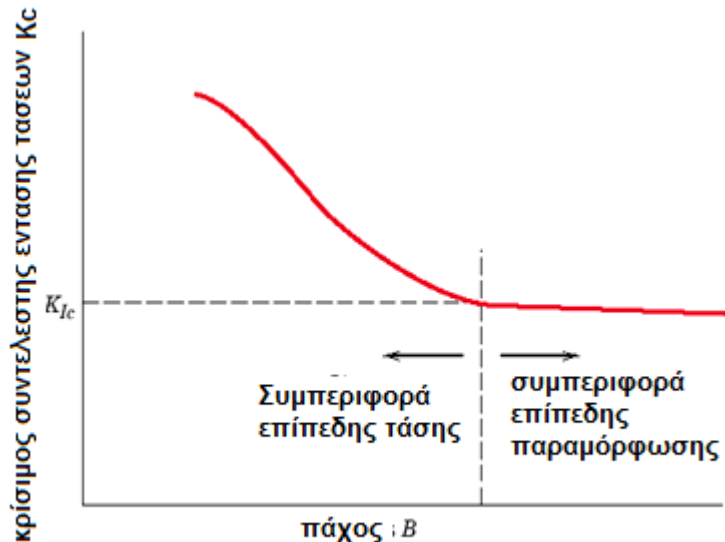
Όταν a/W προσεγγίζει το μηδέν δηλαδή το πλάτος της πλάκας είναι πάρα πολύ μεγάλο και η διαμπερής ρωγμή μικρή (σχ α) η συνάρτηση Y παίρνει τιμή 1. Ενώ στην περίπτωση σχ β 1,1).

Καμπύλες βαθμολόγησης Y σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρικών σχημάτων πλάκας ρωγμής



Αντίσταση ή Ανθεκτικότητα θραύσης (K_C) για δοκίμιο ορθογώνιας διατομής Plane strain and plane stress fracture toughness

Η K_C είναι σταθερή? ΌΧΙ μεταβάλλεται με το πάχος του δοκιμίου. Γιατί?



$$K_{IC} = Y \sigma (\pi a)^{1/2}$$

Παρατήρηση: Η K_C μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος για μικρά πάχη

Ενώ σε μεγάλα πάχη παραμένει αμετάβλητη.

Εξήγηση: Η τάση που εφαρμόζεται στο υλικό αναλύεται σε τρεις συνιστώσες σ_x , σ_y , σ_z . Για μικρά πάχη $\sigma_z=0$. Αυτό σημαίνει ότι στο άκρο της ρωγμής επιδρά ένα διαξονικό σύστημα τάσεων το οποίο προκαλεί εκτεταμένη ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης με αποτέλεσμα η K_C να επηρεάζεται από το πάχος. Οριακή τιμή πάχους $B=2,5(K_{IC}/\sigma_y)^2$

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ K_{ic}

- Τι εκφράζει η K_{ic}?
- Μικρή για ψαθυρά υλικά
- Μεγάλη για όλκιμα υλικά
- Μεγάλο σχεδιαστικό ενδιαφέρον για τα υλικά με ενδιάμεση συμπεριφορά

Η K_{ic} είναι θεμελιώδης ιδιότητα των υλικών και εξαρτάται:

- ✓ Θερμοκρασία
- ✓ Το ρυθμό παραμόρφωσης
- ✓ Την μικροδομή (μέγεθος κόκκων)
- ✓ Μέγεθος ατέλειας

Αύξηση Αντοχή με στερεό διάλυμα ή διασπορά >> Διαρροής Μείωση K_{ic}

Αύξηση ρυθμού παραμόρφωσης και μείωση της θερμοκρασίας >> Μείωση K_{ic}

Μείωση του μεγέθους των κόκκων >> Αύξηση K_{ic}

**Room-Temperature Yield Strength and Plane Strain
Fracture Toughness Data for Selected Engineering Materials**

<i>Material</i>	<i>Yield Strength</i>		<i>K_{IC}</i>	
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa√m</i>	<i>ksi√in.</i>
Metals				
Aluminum Alloy ^a (7075-T651)	495	72	24	22
Aluminum Alloy ^a (2024-T3)	345	50	44	40
Titanium Alloy ^a (Ti-6Al-4V)	910	132	55	50
Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 260°C)	1640	238	50.0	45.8
Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 425°C)	1420	206	87.4	80.0
Ceramics				
Concrete	—	—	0.2–1.4	0.18–1.27
Soda-Lime Glass	—	—	0.7–0.8	0.64–0.73
Aluminum Oxide	—	—	2.7–5.0	2.5–4.6
Polymers				
Polystyrene (PS)	—	—	0.7–1.1	0.64–1.0
Polymethyl Methacrylate (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	0.7–1.6	0.64–1.5
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	2.2	2.0

Πρόβλημα:

Έστω επίπεδη πλάκα εύρους 90mm η οποία περιέχει στο κέντρο της και σε όλη την έκταση του πάχους της ρωγμή 20mm. Ζητείται να υπολογίσετε την αντίσταση ή ανθεκτικότητα θραύσης K_{IC} ώστε να μη συμβεί θραύση σε τάση 375MPa.

Το πρόβλημα ζητά να υπολογίσουμε την ελάχιστη αντίσταση θραύσης K_{IC} ώστε να μην έχουμε αστοχία. Υπολογίζω πρώτα την $Y(a/W)$ από την σχέση :

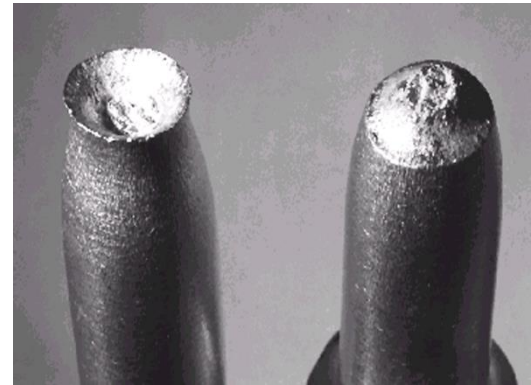
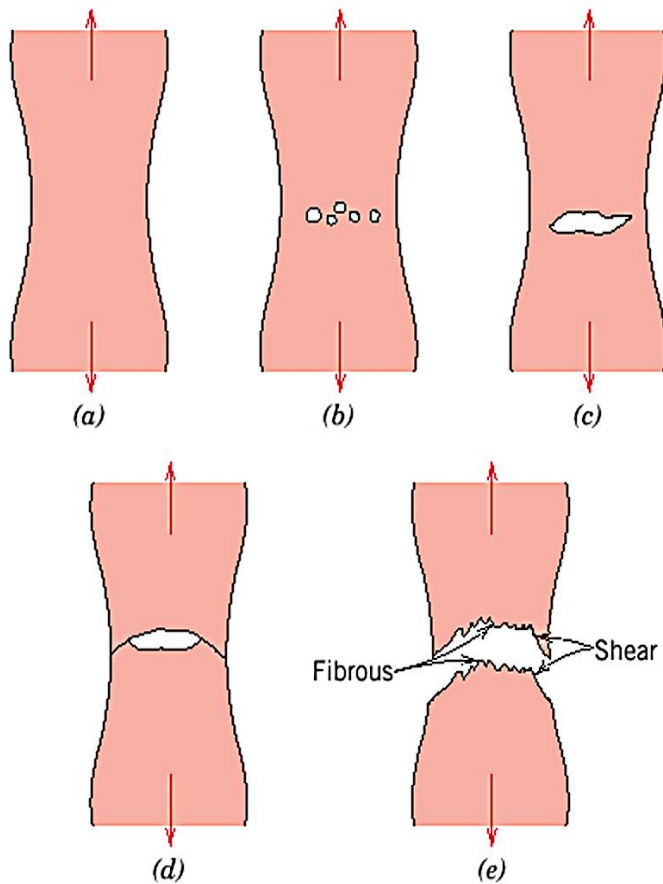
$$Y(a/W) = \left[\frac{W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{W} \right]^{1/2} = \left[\frac{90 \text{ mm}}{(\pi)(10 \text{ mm})} \tan \frac{(\pi)(10 \text{ mm})}{90 \text{ mm}} \right]^{1/2} = 1.021$$

Στη συνέχεια υπολογίζω την K_{IC} :

$$K_{IC} = Y(a/W)\sigma\sqrt{\pi a}$$
$$= (1.021)(375 \text{ MPa})\sqrt{(\pi)(10 \times 10^{-3} \text{ m})} = 67.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Πλαστική ή όλκιμη θραύση (Ductile fracture)

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ: Μακροσκοπικές ατέλειες (δρουν ως σημεία συγκέντρωσης τάσεων) \longrightarrow Τοπικά επαγόμενες τάσεις $> \sigma_y$ \longrightarrow Τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις \longrightarrow Ανάπτυξη ρωγμών



Στάδια όλκιμης θραύσης

Κυπέλλου -κώνου

(a) Αρχική στένωση.

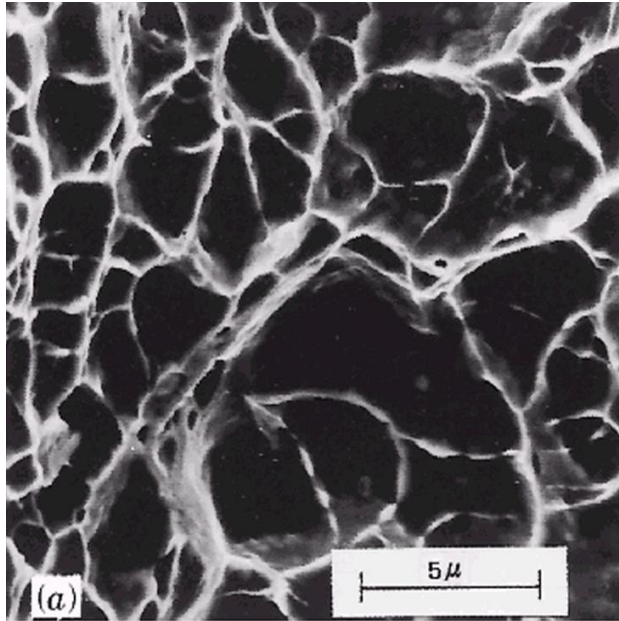
(b) Σχηματισμός μικρών κοιλοτήτων.

(c) Συνένωση κοιλοτήτων και σχηματισμός ρωγμής

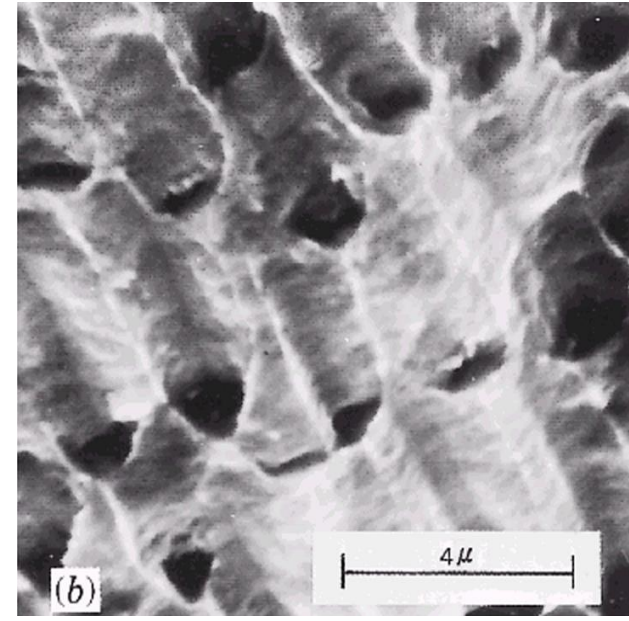
(d) Ανάπτυξη ρωγμής

(e) Τελική διατμηματική θραύση σε γωνία 45^οως προς τη διεύθυνση της τάσης.

Μορφολογία επιφάνειας θραύσης ■ **Εσοχές-εξάρσεις,**
■ **Μικροκοιλότητες ή ουλές σφαιρικές ή παραβολικές** ■ **Ινώδη υφή**



Ηλεκτρονική φρακτογραφία η οποία δείχνει σφαιρικές μικροκοιλότητες χαρακτηριστικές της όλκιμης ή πλαστικής θραύσης από μονοαξονικά φορτία 3300X



Ηλεκτρονική φρακτογραφία η οποία δείχνει παραβολικές μικροκοιλότητες χαρακτηριστικές της όλκιμης ή πλαστικής θραύσης από διατμητική φόρτιση 5000X

Υλικά : Μέταλλα,

Πολυμερή $T > T_g$

Μηχανισμοί απότομης θραύσης

Ψαθυρή θραύση (*Brittle fracture*)

Είναι διαδικασία που εξελίσσεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα όταν αρχίσει η διαδικασία ανάπτυξης της μικρορωγμής διαδίδεται στο υλικό χωρίς να απαιτείται προοδευτικά υψηλότερη τάση.

Η ανάπτυξη της μικρορωγμής γίνεται κάθετα προς τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης.

Μηχανισμός θραύσης με σκίσιμο (Cleavage). Η επιφάνεια θραύσης είναι επίπεδη και μικροκρυσταλλική.

Είναι συνηθισμένο η θραύση να ξεκινά ταυτόχρονα από μικρορωγμές που βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα στο υλικό. Η επιφάνεια θραύσης είναι πολυεπίπεδη και μικροκρυσταλλική σε κάθε επίπεδο της. (Τύπος Chevron pattern). Με ψαθυρή θραύση θραύονται τα :

**Τα Κεραμικά , Τα θερμοπλαστικά σε $T < T_g$, Τα σύνθετα πολυμερή
Διασταυρωμένα πολυμερή,**

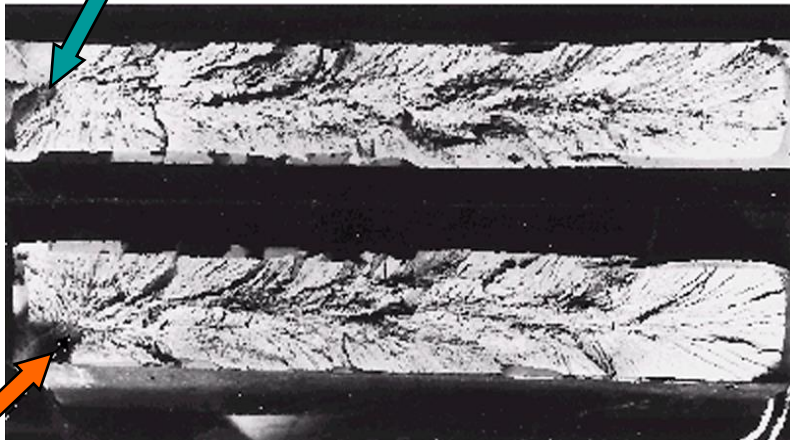
Τα μέταλλα υπό προϋποθέσεις

Ψαθυρή θραύση

Brittle fracture

Λόγω των τοπικά επαγόμενων τάσεων $\sigma_{\text{επ}} \gg \sigma_y$ έχουμε ανάπτυξη μικρορωγμών \longrightarrow Απότομη ψαθυρή θραύση

Βασικό κριτήριο: Ενέργεια για το σπάσιμο των δεσμών < ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης



Φωτογραφία δείχνει τα διαδοχικά σημάδια V στην επιφάνεια. Το βέλος δείχνει το σημείο έναρξης της ρωγμής

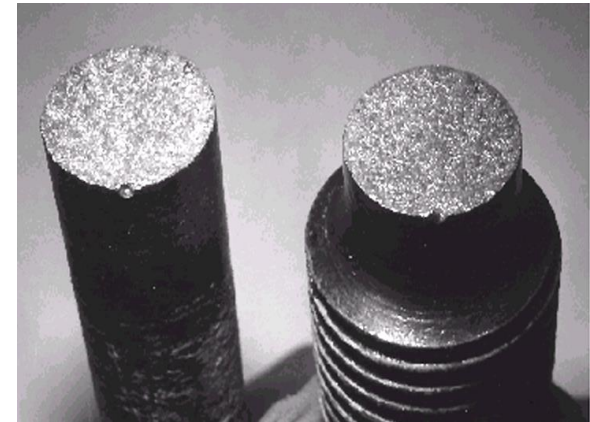
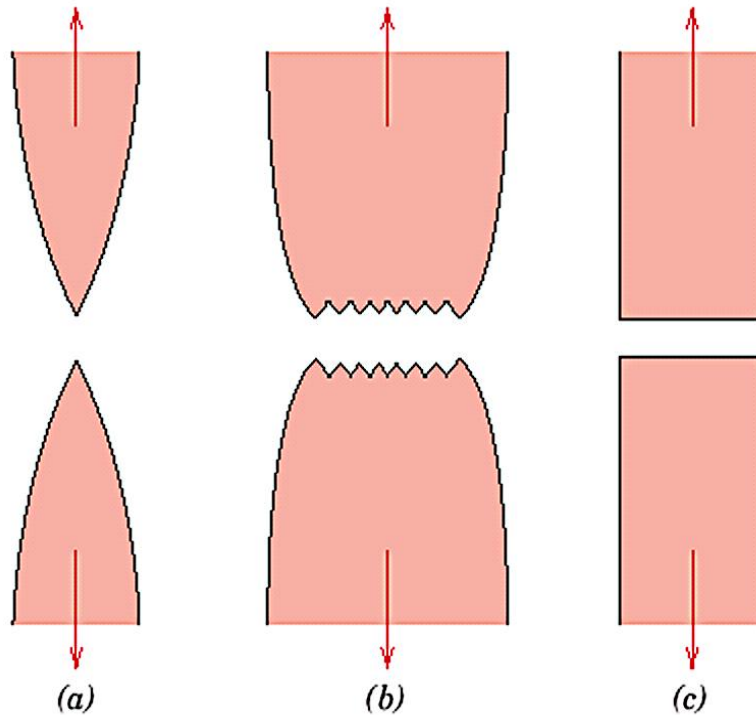
Επιφάνεια ψαθυρής θραύσης. Ακτινωτές γραμμές ή αυλακώσεις στην επιφάνεια. Το βέλος δείχνει το σημείο έναρξης της ρωγμής..



Ψαθυρή και όλκιμη ή πλαστική παραμόρφωση

Brittle and Ductile fracture

Τρεις αντιπροσωπευτικοί τρόποι θραύσης



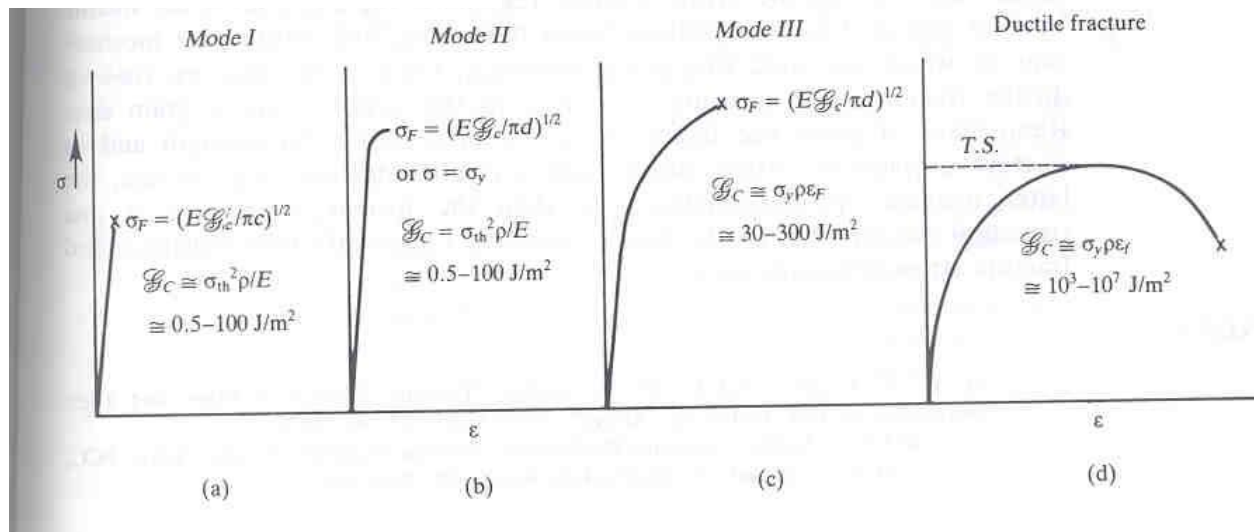
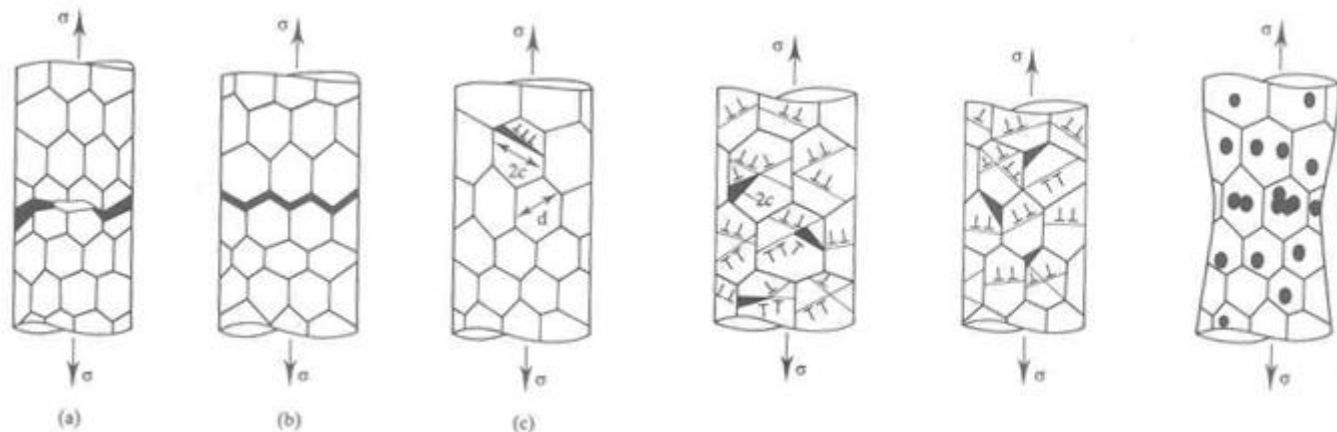
*(a) Θραύση με μεγάλη
πλαστική παραμόρφωση*

*(b) Θραύση με μικρή πλαστική
παραμόρφωση*

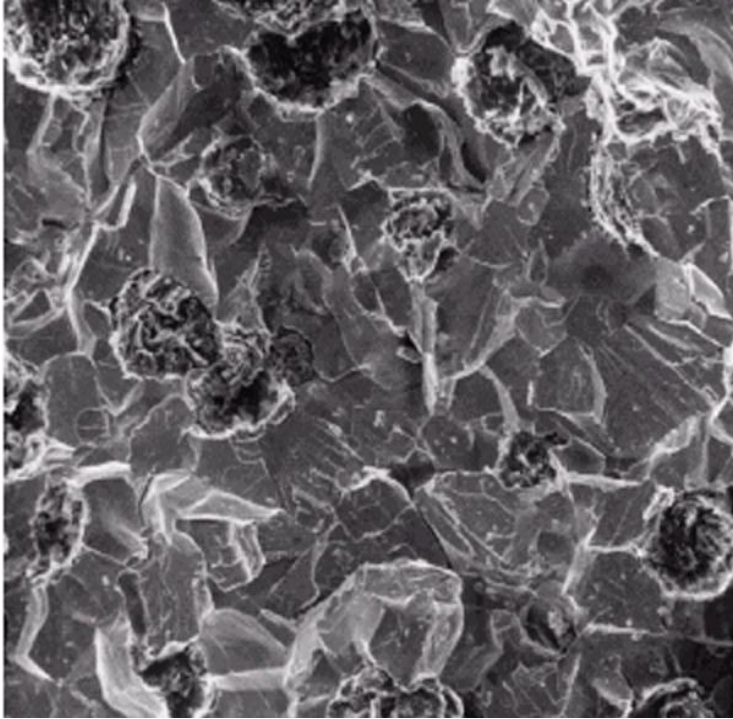
*(c) Ψαθυρή χωρίς πλαστική
παραμόρφωση*

Αναλυτική παρουσίαση των μηχανισμών θραύσης .

Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα



Ενδοκρυσταλλική και διακρυσταλλική θραύση



**Θραυστοφωτογραφία
ηλεκτρονικού μικροσκοπίου
επιφάνειας Ενδοκρυσταλλική
όλκιμης ή πλαστικής θραύσης.**



**Θραυστοφωτογραφία
ηλεκτρονικού μικροσκοπίου
επιφάνειας διακρυσταλλικής
θραύσης.50x**

Ψαθυρή συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών

Οι παράμετροι που καθορίζουν το είδος της θραύσης των μεταλλικών υλικών είναι:

1. Η ταχύτητα εφαρμογής της τάσης

2. Η θερμοκρασία

Τα μέταλλα θραύονται με τον μηχανισμό της ψαθυρής θραύσης υπό εξής προϋποθέσεις:

- Επίδραση κρουστικών τάσεων

- Χαμηλές θερμοκρασίες

- Υψηλή σκληρότητα (λόγω καθίζησης και διασποράς)

Σημασία της κρυσταλλικής δομής:

Τα μεταλλικά υλικά με δομή BCC ή HPC είναι ευαίσθητα σε κρουστικές τάσεις και μπορεί να θραυτούν ψαθυρά σε αντίθεση με τα μέταλλα με δομή FCC

Σημασία της μακροσκοπικής δομής:

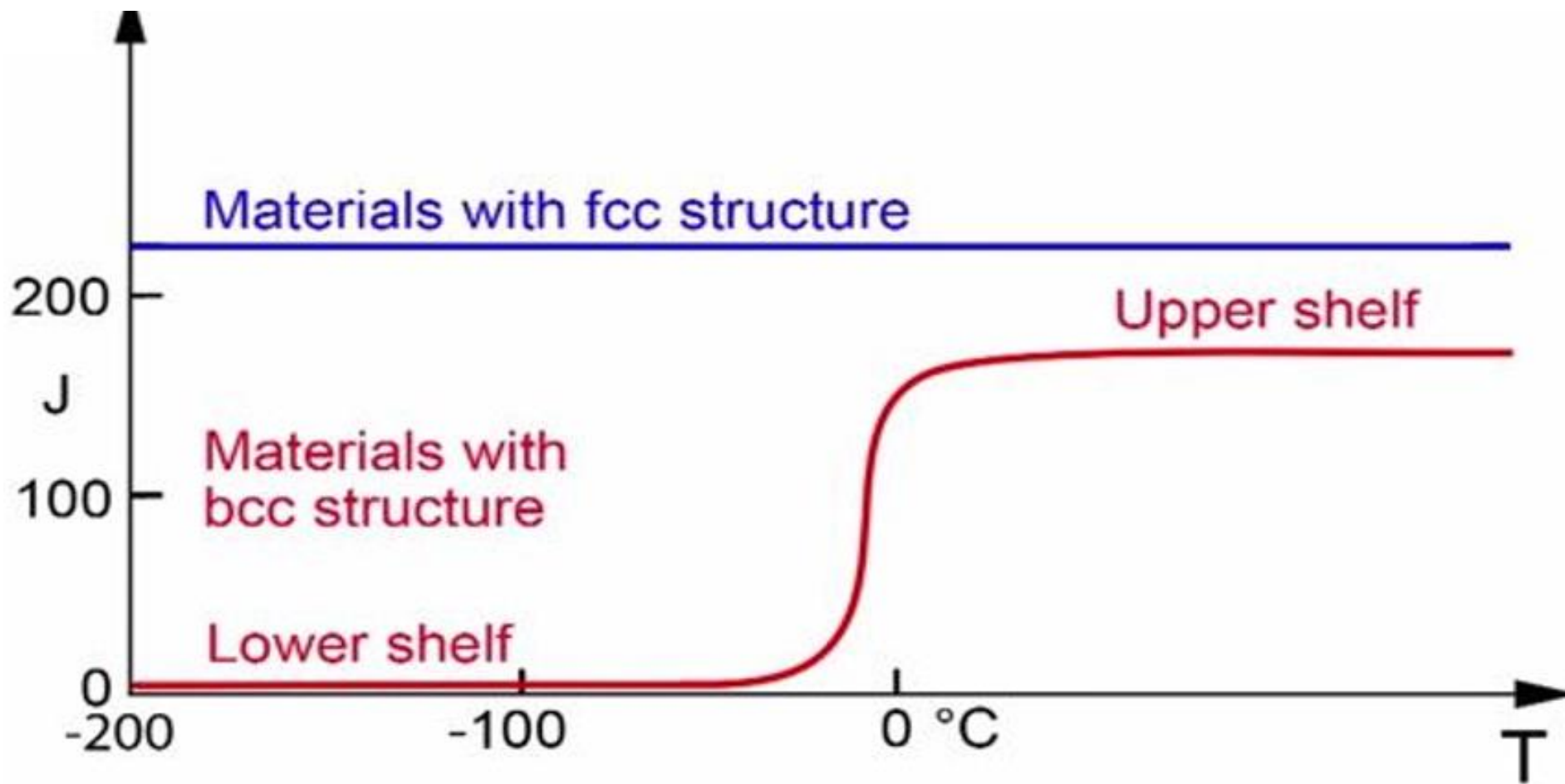
Η κατάσταση της επιφάνειας, η γεωμετρία των εξαρτημάτων πχ απότομη αλλαγή της διατομής, τα επιφανειακά κτυπήματα, οι προσμείξεις, το πορώδες κλπ αυξάνουν την πιθανότητα ψαθυρής θραύσης.

Σημασία της θερμοκρασίας:

Η αύξηση της θερμοκρασίας δεν ευνοεί τη ψαθυρή θραύση.

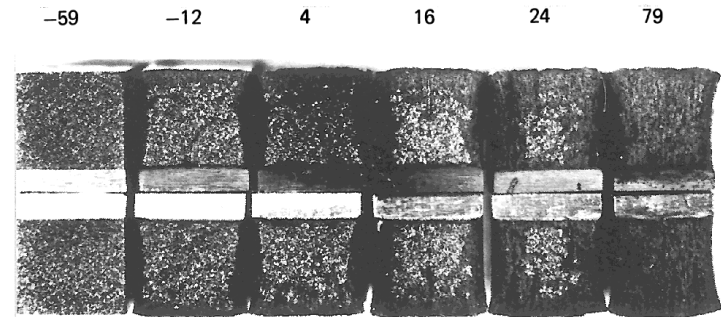
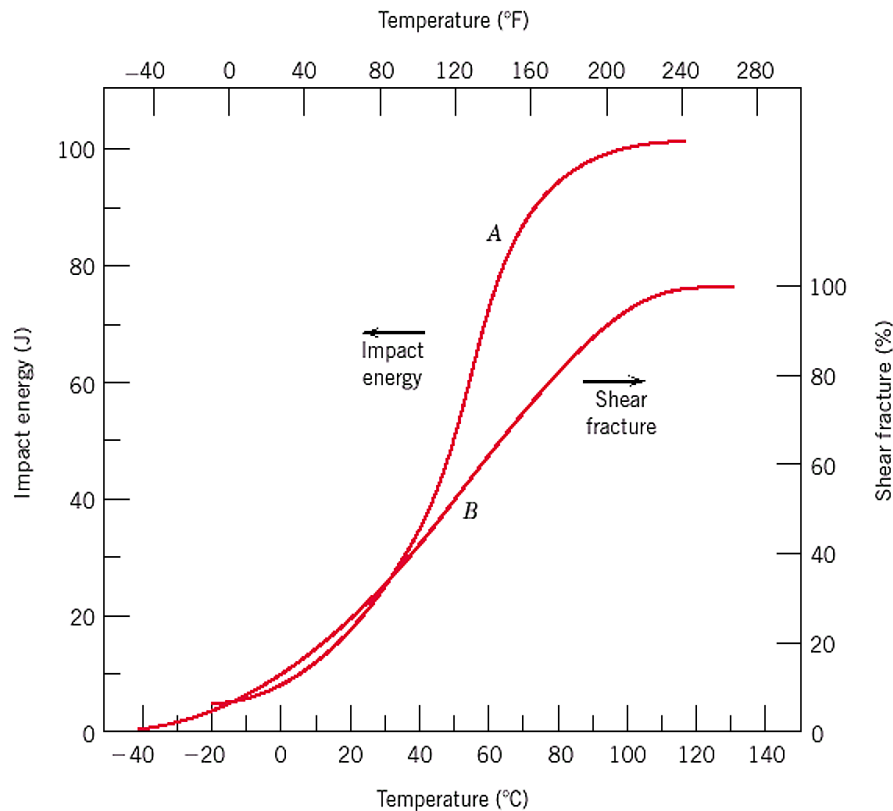
Ψαθυρή θραύση μπορεί να έχουμε μόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες

Σε μέταλλα με δομή BCC και HPC η ταυτόχρονη επίδραση κρουστικών τάσεων και μέτρια χαμηλής θερμοκρασίας ευνοεί το φαινόμενο της ψαθυρής θραύσης.



Effect of Temperature on materials with FCC and BCC structure

Μετάπτωση από την (όλκιμη) πλαστική στην ψαθυρή κατάσταση (Ductile-to-Brittle transition)

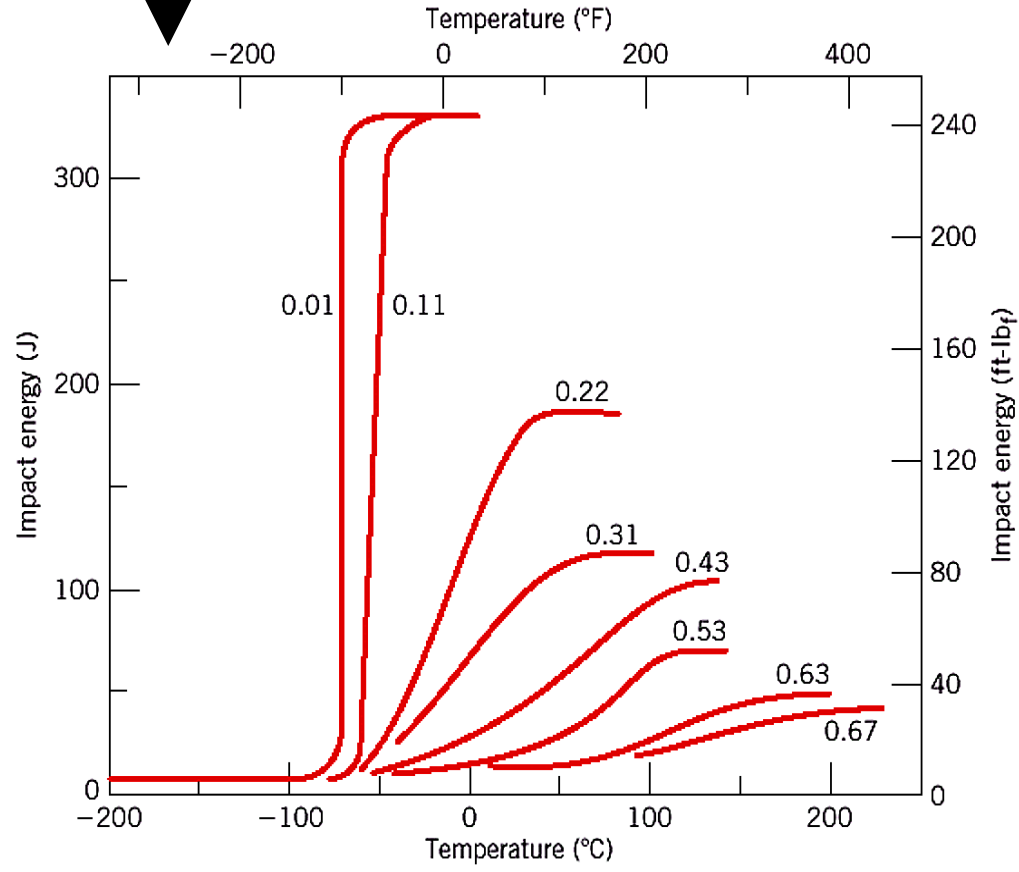


Φωτογραφίες επιφανειών θραύσης δοκιμίων για Charpy τεστ (εγκοπή V) σε διάφορες θερμοκρασίες. (καμπύλη A) μεταβολή της ενέργειας κρούσης and percent shear fracture (καμπύλη B) επί τοις εκατό ποσοστό διατμητικής θραύσης.

Τα μέταλλα με δομή FCC είναι όλκιμα σε όλες τις θερμοκρασίες ενώ τα μέταλλα με δομή BCC ή HCP παρουσιάζουν μετάπτωση από την πλαστική (όλκιμη) στην ψαθυρή κατάσταση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι ανθρακούχοι χάλυβες. Σε μικρές ταχύτητες εφαρμογή της τάσης $\Theta_M = -170$ °C, με συνδυασμό κρουστικής τάσης $\Theta_M = 0$ °C

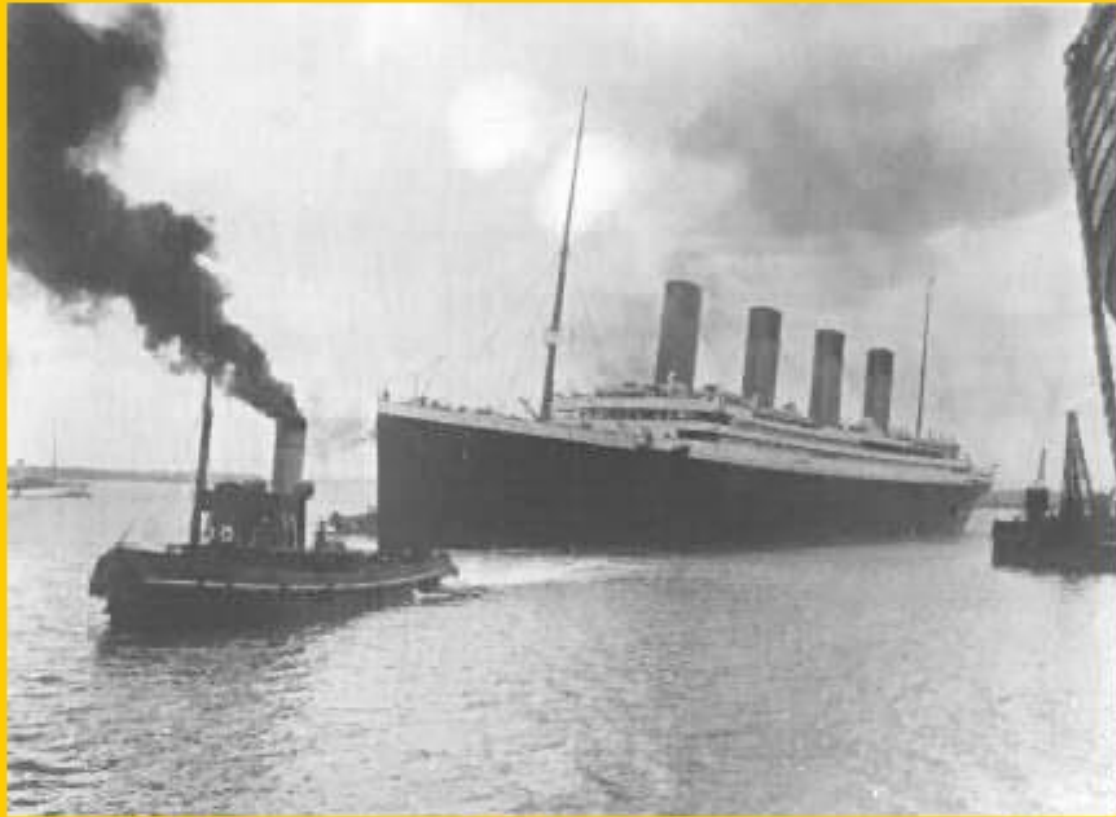
Επίδραση της Περιεκτικότητας άνθρακα στην δυσθραυστότητα και τη θερμοκρασία μετάπτωσης των ανθρακούχων χαλύβων

Effect of composition on the impact strength of carbon steels



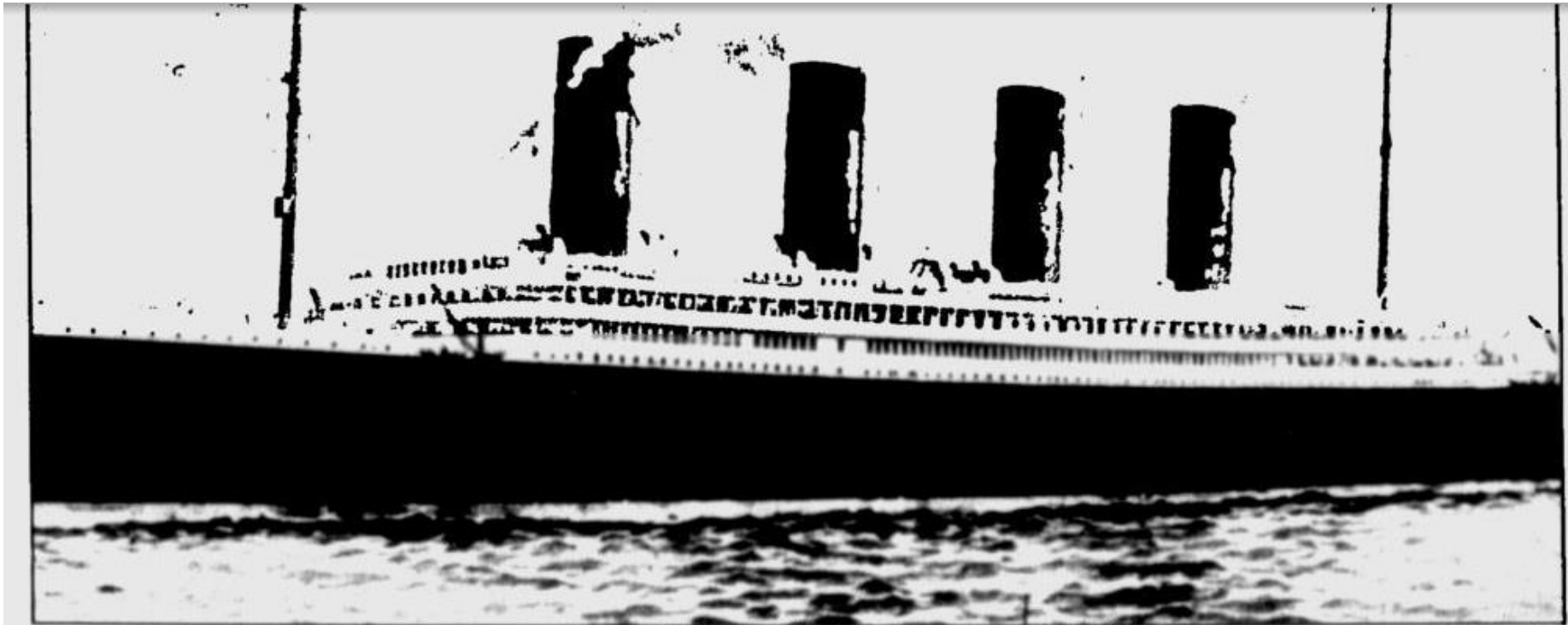
Μετάπτωση από την
ψαθυρή στην πλαστική
κατάσταση εμφανίζουν τα
κεραμικά σε $T=0,5(\Theta_T+273)$

Μετάπτωση από την
πλαστική στη ψαθυρή
κατάσταση εμφανίζουν τα
θερμοπλαστικά σε $T < T_g$



Cold Water Sinks TITANIC

Iceberg Gets Bum Rap in TITANIC Sinking



Associated Press

If a better grade of steel had been used, experts say more passengers might have survived when the Titanic hit an iceberg and sank 81 years ago.

'Brittle fracture' doomed Titanic

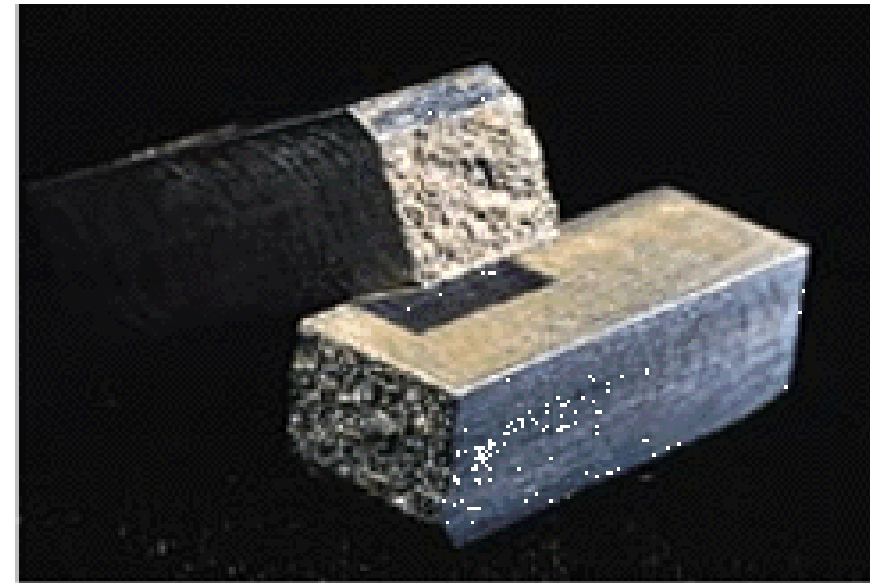
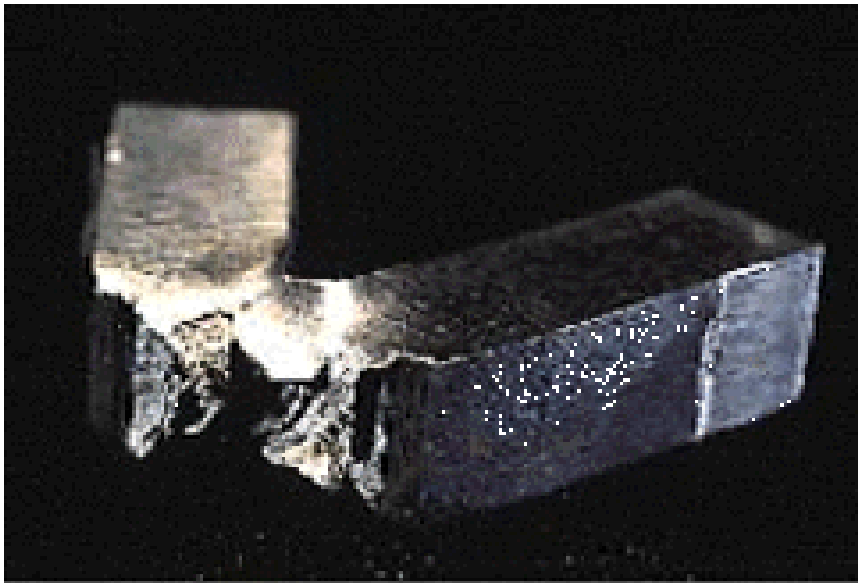
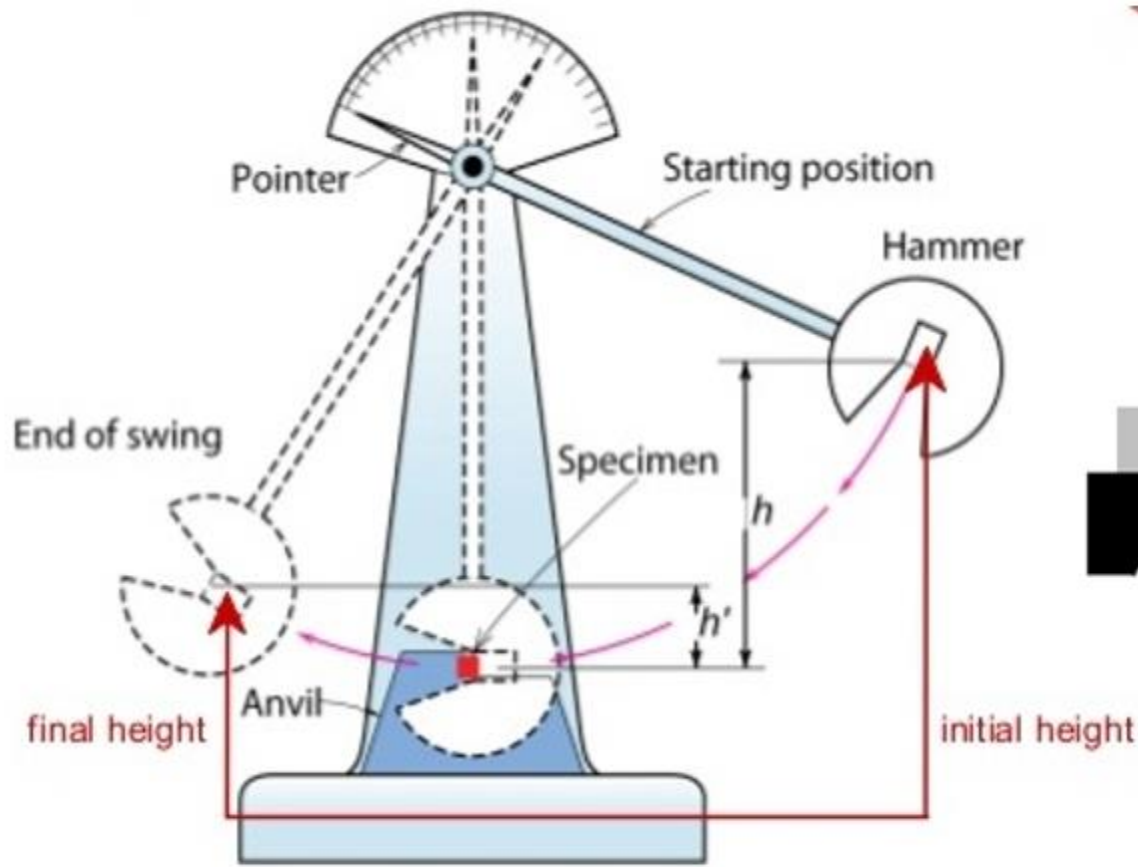
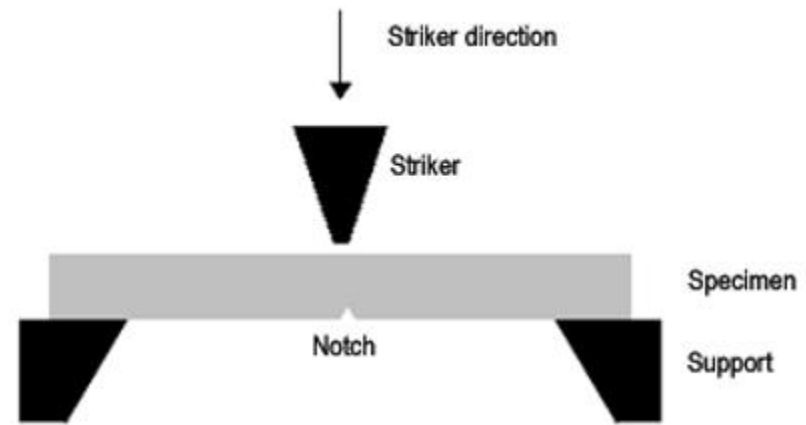


Figure 1. Results of the Charpy test for modern steel and Titanic steel [Gannon, 1995]. When a pendulum struck the modern steel, on the left, with a large force, the sample bent without breaking into pieces; it was ductile. Under the same impact loading, the Titanic steel, on the right, was extremely brittle; it broke in two pieces with little deformation.



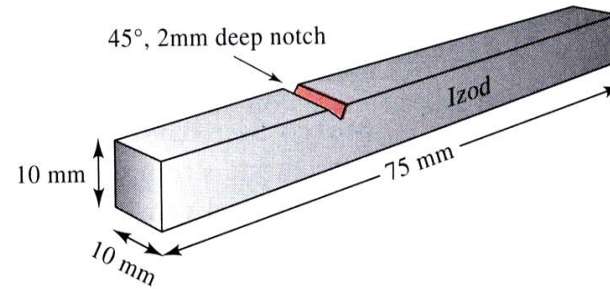
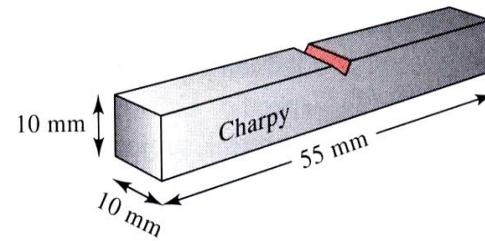
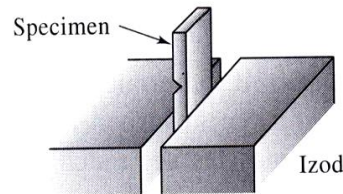
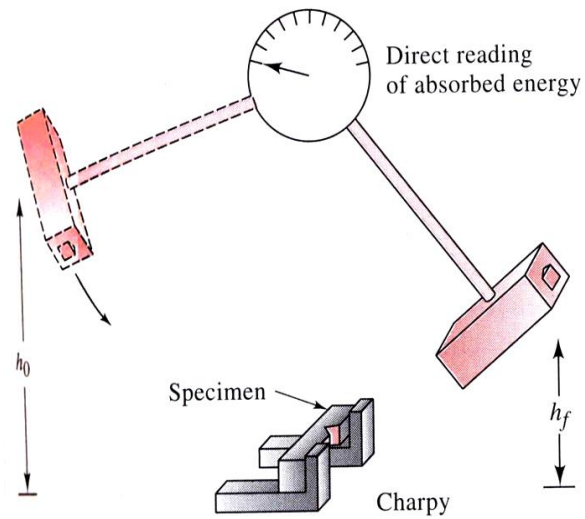
Schematic of the Charpy impact test.



Schematic of the Charpy specimen impact test.

Κρουστικές δοκιμασίες

Impact tests



(a)

(b)

The impact test: (a) the Charpy and Izod tests, and (b) dimensions of typical specimens.

Υπολογισμός ενέργειας κρούσης με δοκιμασία Charpy (Determination of Charpy Impact Energy)

Impact energy (E) = $mgh_1 - mgh_2 = mg (h_1 - h_2)$

Energy unit is Joule = N.m

h unit is m

g is gravity (9.8 N/Kg or m/s^2)

m unit (Kg)

Τα δύσθραυστα υλικά απορροφούν μεγάλη ποσότητα ενέργειας ενώ τα ψαθυρά μικρή ποσότητα ενέργειας πριν την θραύση τους.

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ K_{IC} με την CVN (ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ)

Και οι δύο προσδιορίζουν τις ιδιότητες θραύσης των υλικών

- Η K_{IC} έχει ποσοτικό χαρακτήρα καθώς δίνει τη δυνατότητα να προσδιοριστεί το μέγεθος της ρωγμής και η κρίσιμη τάση αστοχίας
- Η CVN χρησιμοποιείται για ποιοτικές συγκρίσεις και ελάχιστα για σχεδιαστικούς λόγους.

Υπάρχει μαθηματική συσχέτιση μεταξύ K_{IC} και CVN ?
Υπάρχουν ερευνητικές εργασίες που επιχειρούν τη συσχέτιση χωρίς μεγάλη επιτυχία

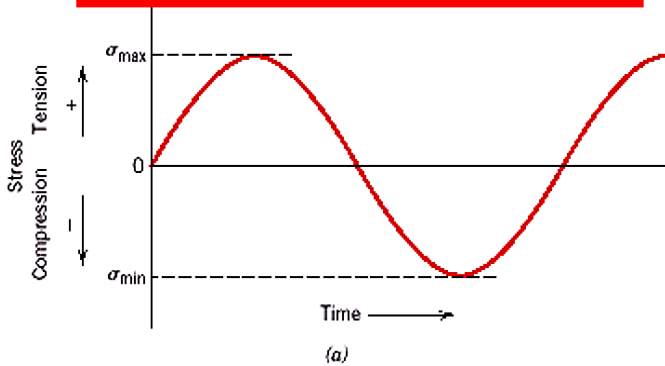
ΚΟΠΩΣΗ (FATIGUE)

Είναι η αστοχία εξαρτημάτων και κατασκευών όταν αυτές υποβάλλονται σε δυναμικές και επαναλαμβανόμενες φορτίσεις.

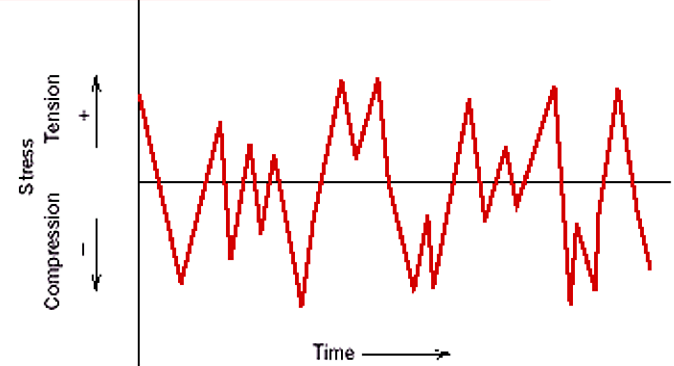
Fatigue is a form of failure that occurs in structures subjected to Dynamic and fluctuating stresses.

Τύποι επαναλαμβανόμενων φορτίσεων

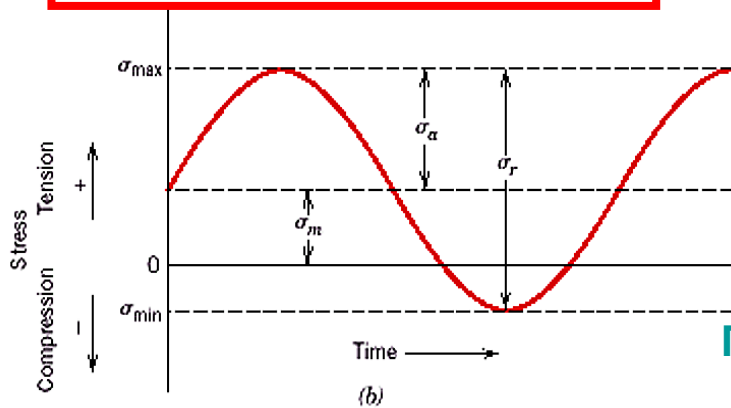
Εναλλασσόμενη φόρτιση



Τυχαία μεταβαλλόμενη



Μεταβαλλόμενη φόρτιση



Παράμετροι που ορίζονται για κάθε τύπο φόρτισης

Μέση τάση (Mean stress) $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$

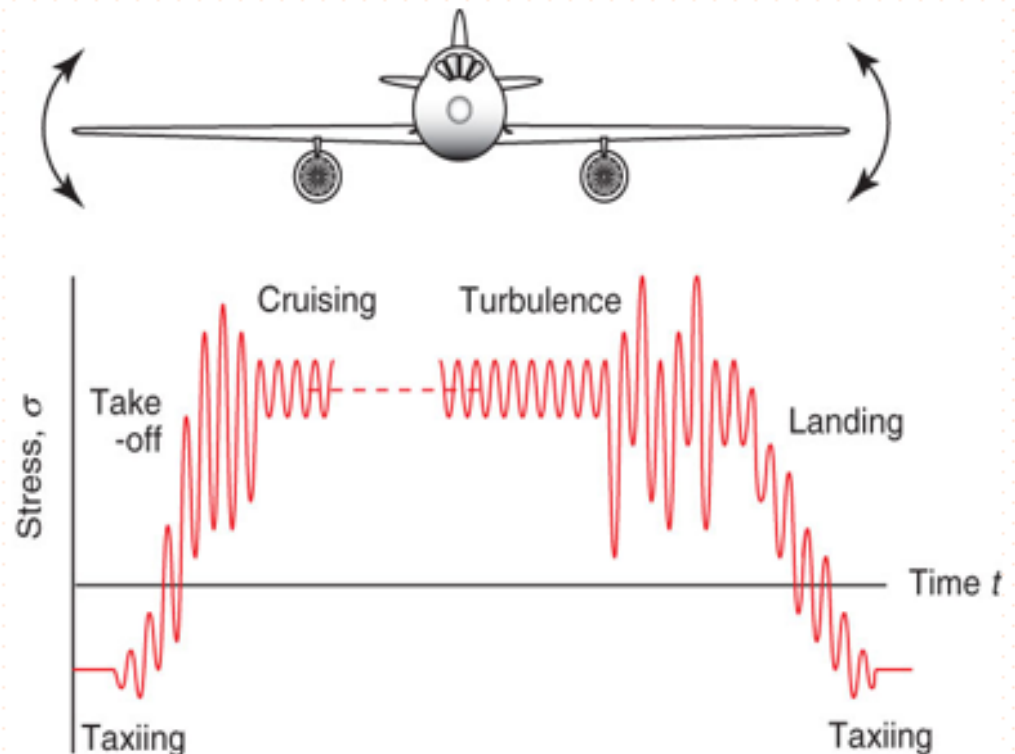
Περιοχή τάσης (Range of stress) $\sigma_r = (\sigma_{max} - \sigma_{min})$

Πλάτος τάσης (Stress amplitude) $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2 = \sigma_r/2$

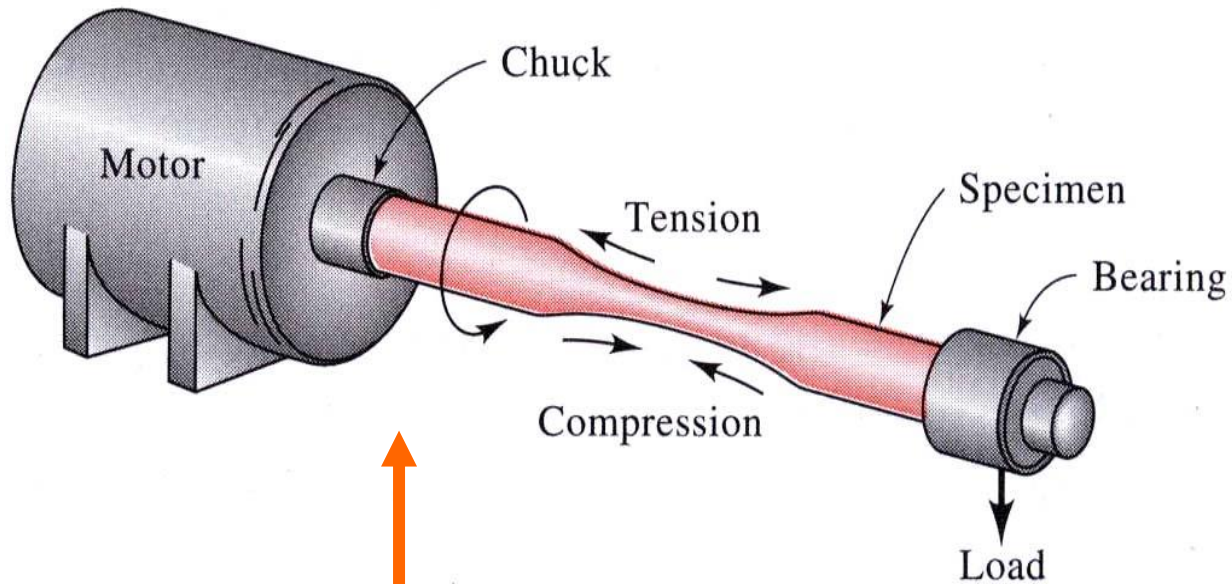
Λόγος τάσης (Stress ratio): $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$

SCHEMATIC OF THE STRESS CYCLING ON THE UNDERSIDE OF A WING

Loading cycles can be in the millions for an aircraft; fatigue testing must employ millions of fatigue cycles to provide meaningful design data.

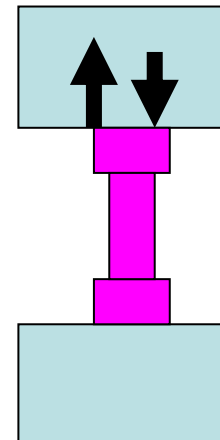


<https://www.youtube.com/watch?v=ywDsB3umK2Y>



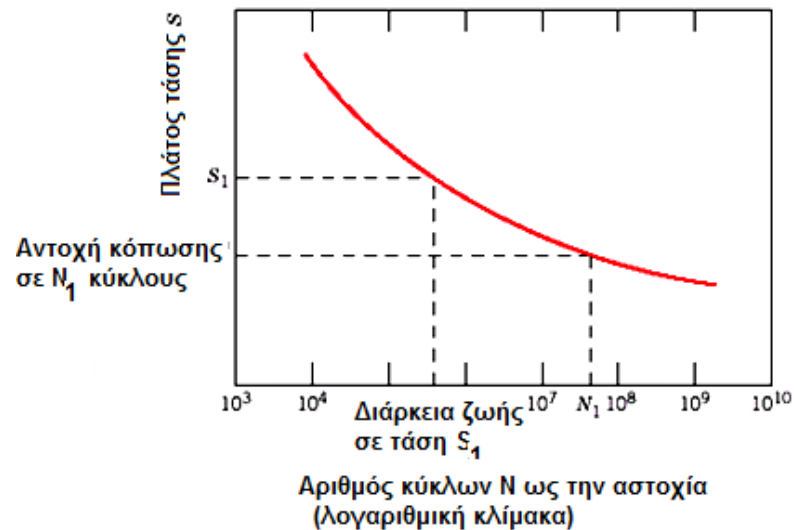
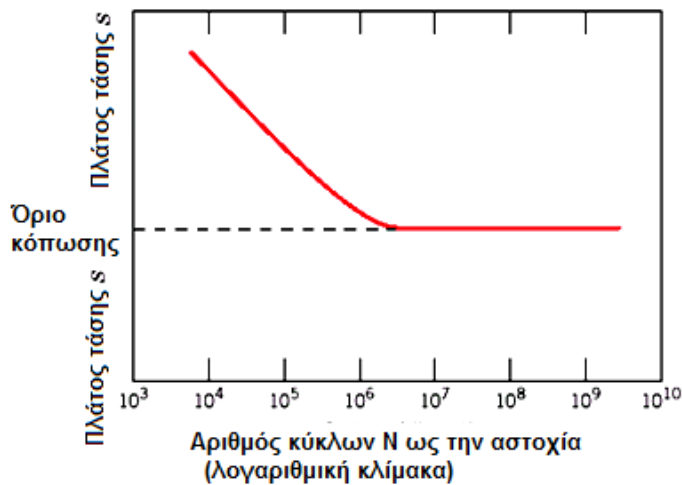
Δοκιμασία κόπωσης περιστροφής - κάμψης

**Δοκιμασία κόπωσης μονοαξονικής
θλίψης - εφελκυσμού**



Καμπύλες κόπωσης: Απεικονίζουν το πλάτος τάσης(S) ως προς τον λογάριθμο του αριθμού των κύκλων φόρτισης ($\log N$) που το υλικό αστοχεί.

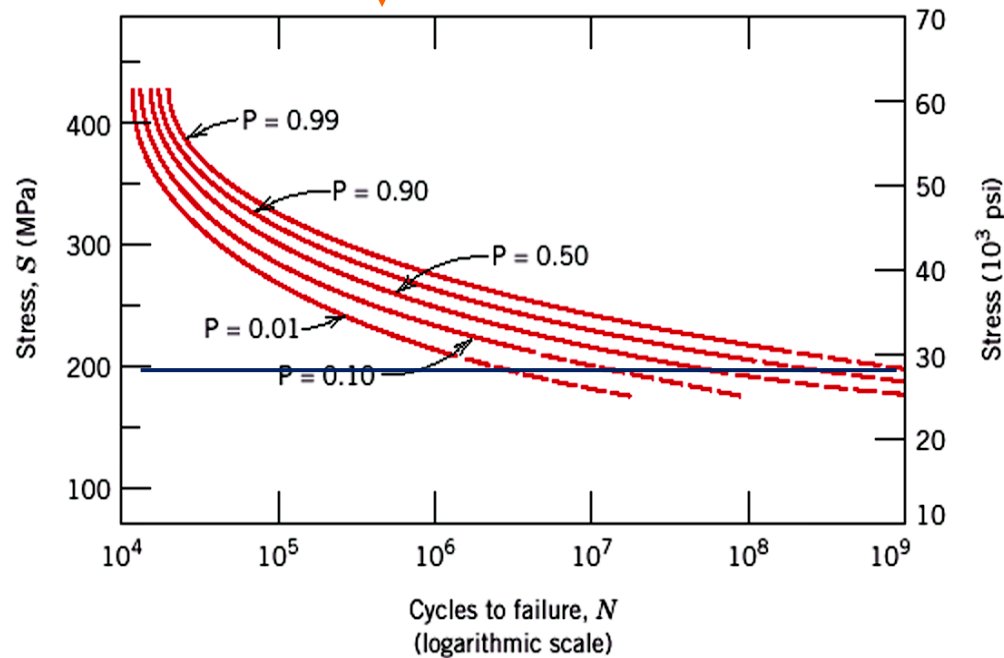
The S-N curve: stress vs. the logarithm.



α) Υλικά με όριο κόπωσης β) Υλικά που δεν εμφανίζουν όριο κόπωσης

- ✓ Όριο κόπωσης (fatigue limit) ή όριο αντοχής κόπωσης (endurance limit)
- ✓ Σημασία του ορίου κόπωσης
- ✓ Αντοχή σε κόπωση

Καμπύλες που δείχνουν την πιθανότητα αστοχίας ενός υλικού (κράμα αλουμινίου 7075-T6) σε ορισμένες συνθήκες τάσης .
P: δείχνει την πιθανότητα αστοχίας



Σημασία της συχνότητας κυκλικής φόρτισης στη αντοχή σε κόπωση :

Τα πολυμερή υλικά επηρεάζονται σημαντικά ακόμη και σε χαμηλές συχνότητες.

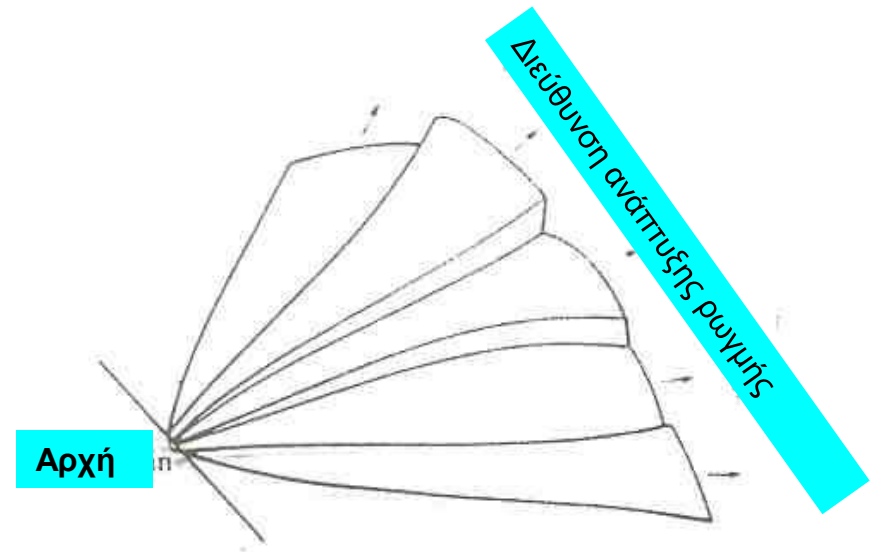
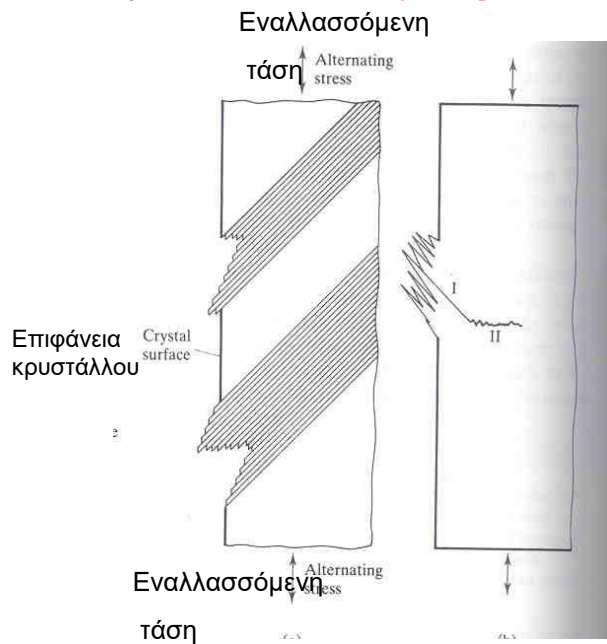
Τα μέταλλα για συχνότητα μέχρι 200HZ πρακτικά παραμένουν ανεπηρέαστα

Μηχανισμός εξέλιξης της κόπωσης

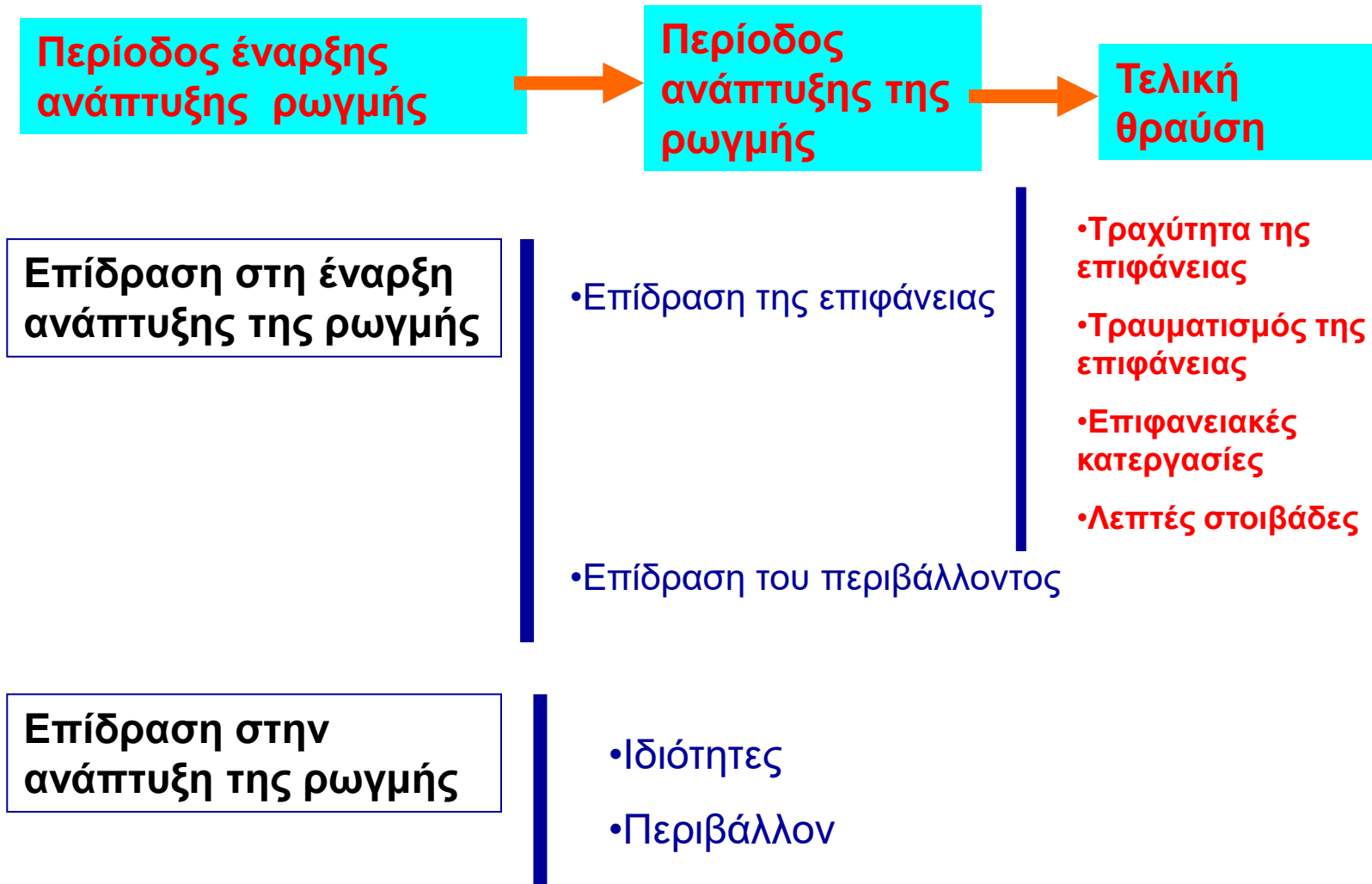
Στάδιο I: Δημιουργία μικρορωγμής «Οι μικρορωγμές δημιουργούνται σε περιοχές του υλικού που επάγονται υψηλές τάσεις και ταυτόχρονα το υλικό παρουσιάζει τη χαμηλότερη αντοχή. Οι περιοχές βρίσκονται στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του υλικού όπου υπάρχουν επιφανειακές ατέλειες ΠΧ κτυπήματα ,χαραγές .απότομες εξοχές-εσοχές λόγω κακής σχεδίασης ή παραγωγής, προσμείξεις ,μεγάλη συγκέντρωση εξαρμώσεων. Στις περιοχές αυτές επάγονται υψηλές τάσεις»

Στάδιο II: Αργή ανάπτυξη της ρωγμής κατά τη διάρκεια των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων

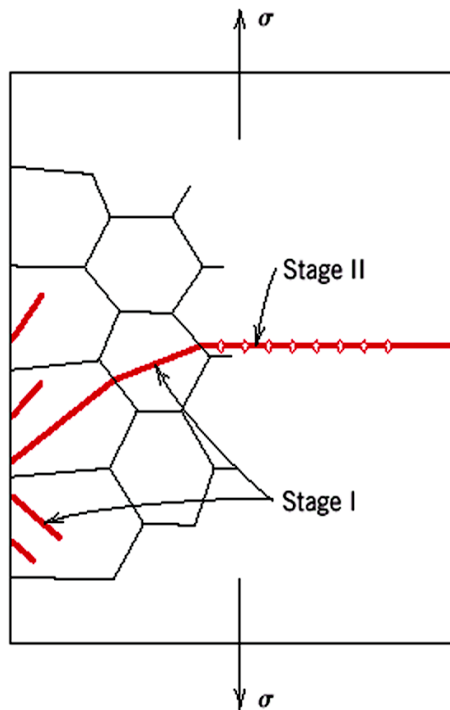
Στάδιο III: Απότομη θραύση. Λαμβάνει χώρα με μεγάλη ταχύτητα μόλις η ρωγμή αποκτήσει ένα κρίσιμο μέγεθος. **Η διάρκεια ζωής σε κόπωση καθορίζεται από τα στάδια I και II**



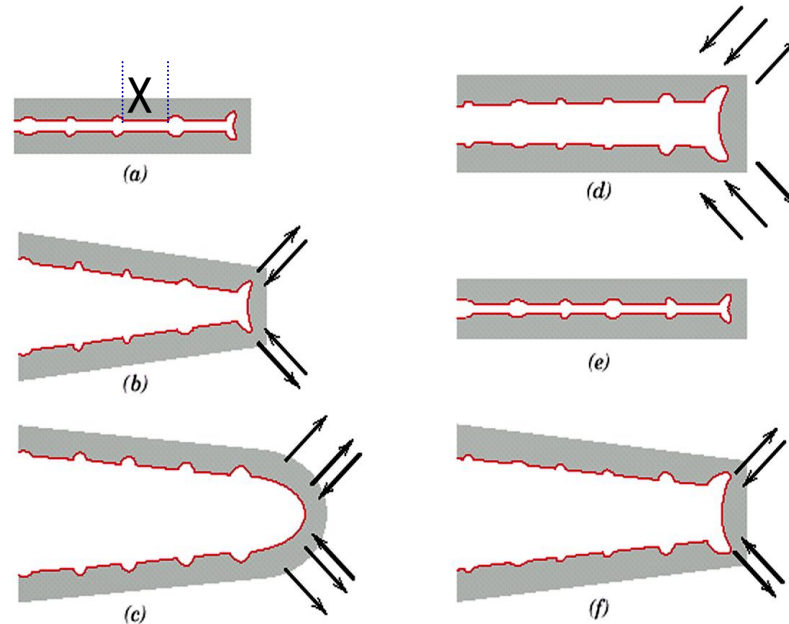
Εξέλιξη του φαινομένου της κόπωσης



Έναρξη δημιουργίας και ανάπτυξης μικρορωγμής κατά την κόπωση Crack initiation and propagation in fatigue



Σχηματική παράσταση που δείχνει τα στάδια I και II ανάπτυξης ρωγμών σε πολυκρυσταλλικά μέταλλα



Σχηματική παράσταση σχηματισμού ραβδώσεων κόπωσης. (a) Αρχική μορφή ρωγμής με χαρακτηριστική απόσταση ραβδώσεων χ . Καθώς αυξάνει η τάση εφελκυσμού η ρωγμή ανοίγει (b), και η πλαστική παραμόρφωση αμβλύνει τη ρωγμή (c), με μείωση της τάσης (αναστροφή) η άμβλυνση απομακρύνεται (d), και η ρωγμή αυξάνεται κατά ένα χαρακτηριστικό βήμα χ . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται (e, f).

Μορφολογία της επιφάνειας θραύσης

Η κόπωση ως αιτία αστοχίας αναγνωρίζεται από τα κοινά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της επιφάνειας θραύσης:

Αρχικό στάδιο I (ή στάδιο εκκόλαψης της μικρορωγμής)

Μια μικρή έκταση γύρω από το αρχικό σημείο εκκίνησης της μικρορωγμής είναι επίπεδη που προσομοιάζει με ψαθυρή θραύση.

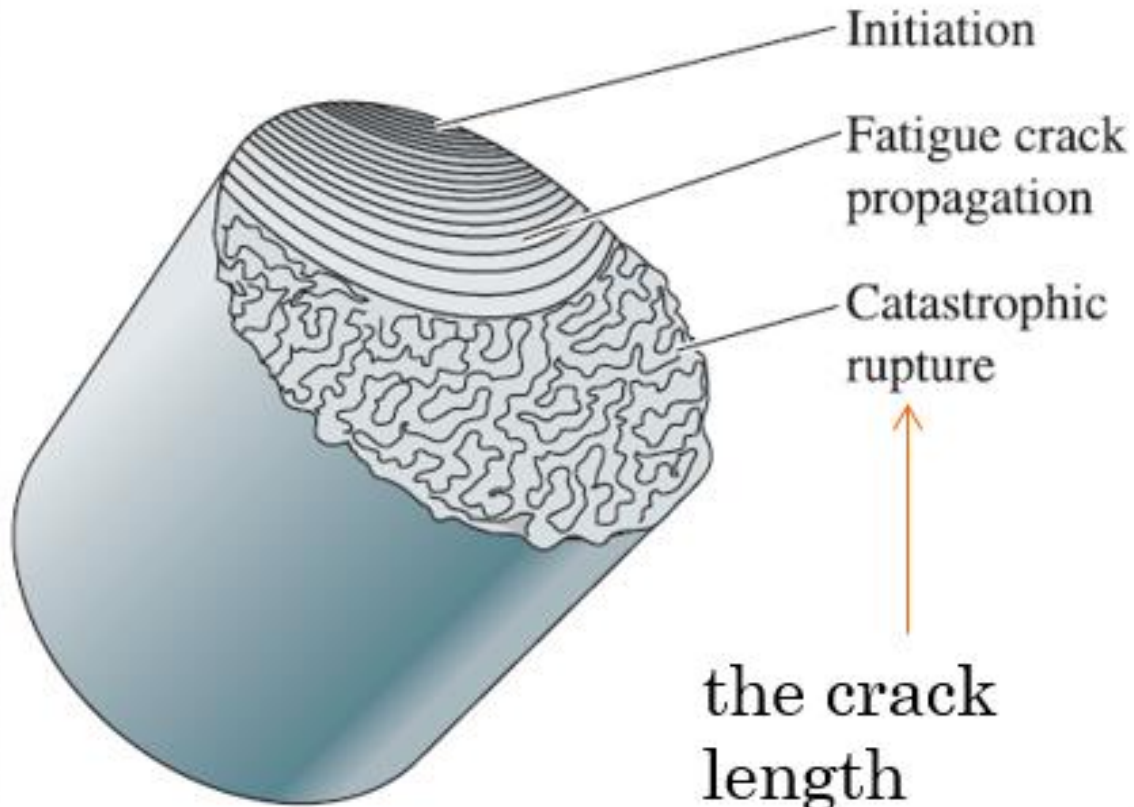
Στάδιο II. Η περιοχή του σταδίου ανάπτυξης της ρωγμής περιέχει δυο χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

(α) Προεξέχουσες κηλίδες (Beach marks ή Shell markings) «Προέρχονται από εσωτερική οξείδωση του υλικού»

(β) κυματοειδείς ραβδώσεις (Striations) «Προέρχονται από το διαδοχικό άνοιγμα και κλείσιμο της ρωγμής υπό την επίδραση της κυκλικής φόρτισης»

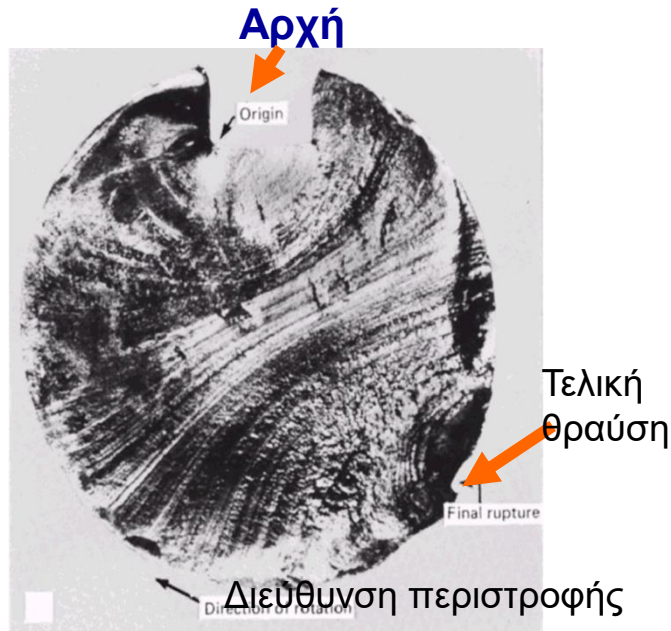
Παρατηρούνται με οπτικό ή ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

Διάβρωση κόπωση (Fatigue-Corrosion). «Παρατηρείται χαρακτηριστική πολλαπλή διακλάδωση ανάπτυξης της ρωγμής»

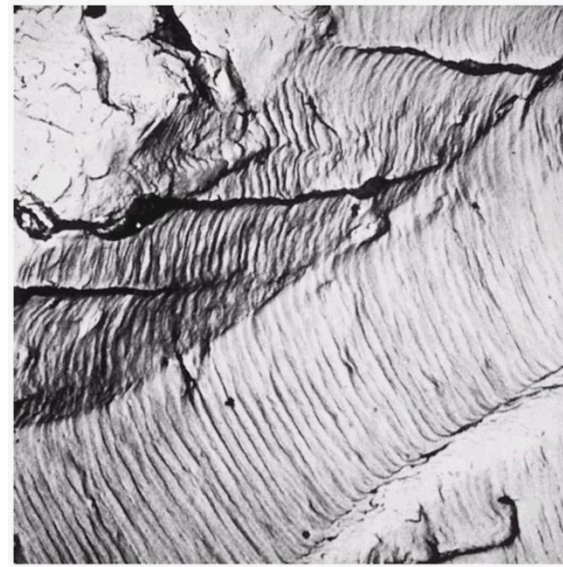


the crack length exceeds a critical value at the applied stress.

Χαρακτηριστικές φωτογραφίες επιφανειών θραύσης εξαρτημάτων ύστερα από κόπωση

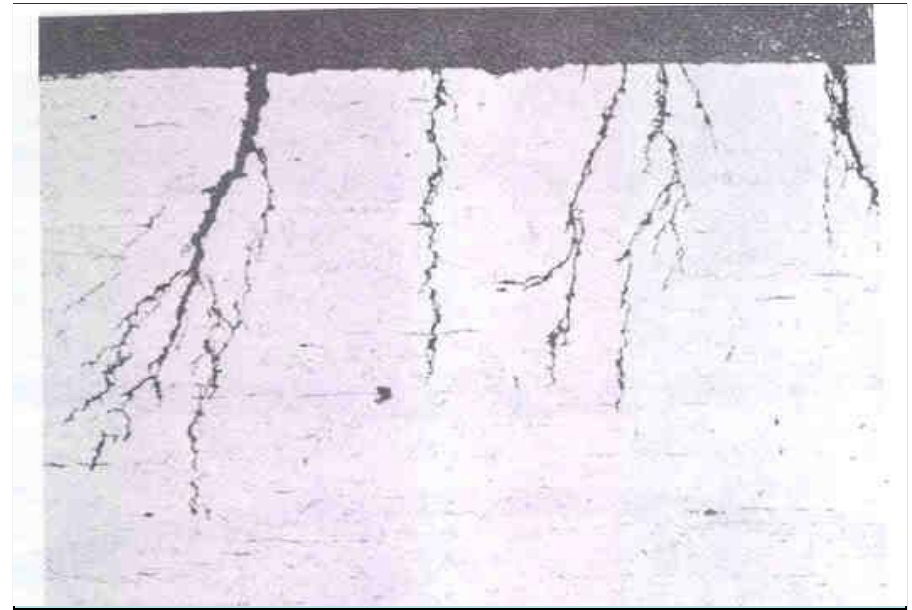
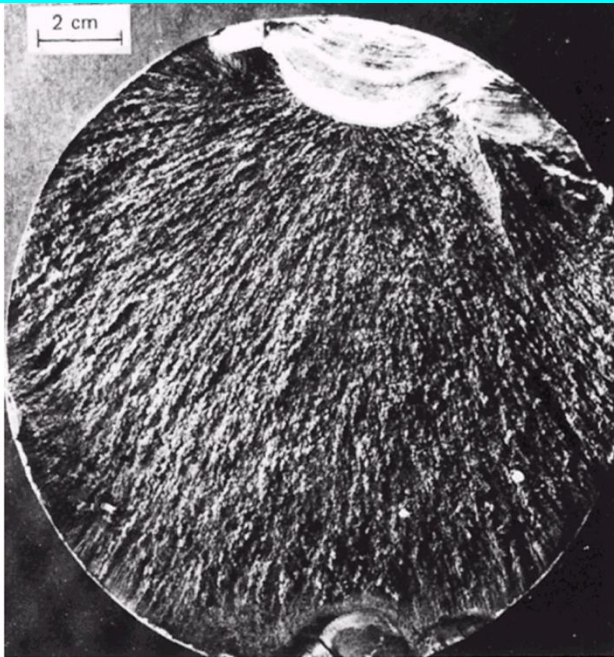


Επιφάνεια θραύσης περιστρεφόμενου χαλύβδινου άξονα οποίος αστόχησε λόγω κόπωσης . Στη φωτογραφία είναι ορατές οι προεξέχουσες κηλίδες διάβρωσης



Μικροφωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο TEM στην οποία φαίνονται οι κυματοειδείς ραβδώσεις λόγω κόπωσης.

Χαρακτηριστικές φωτογραφίες επιφανειών θραύσης εξαρτημάτων ύστερα από κόπωση



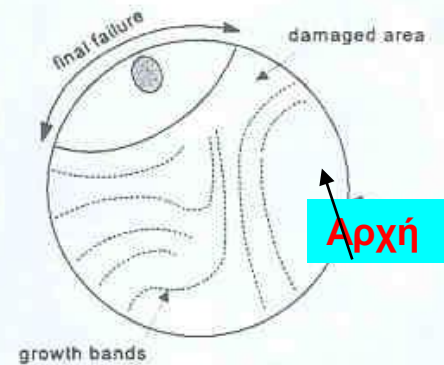
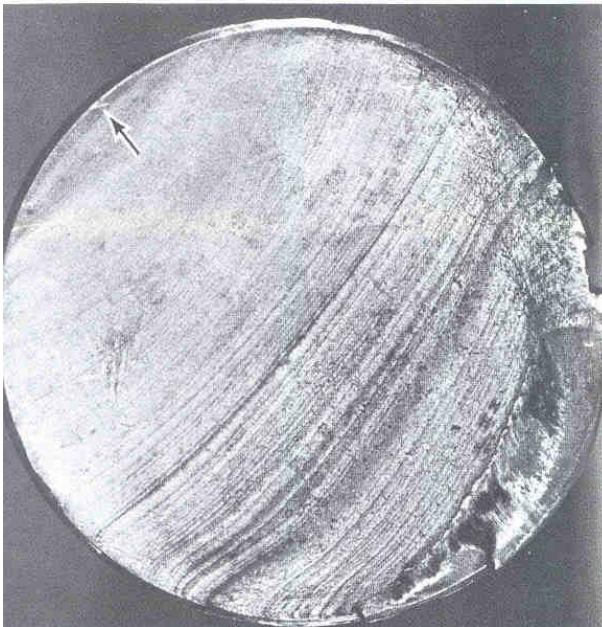
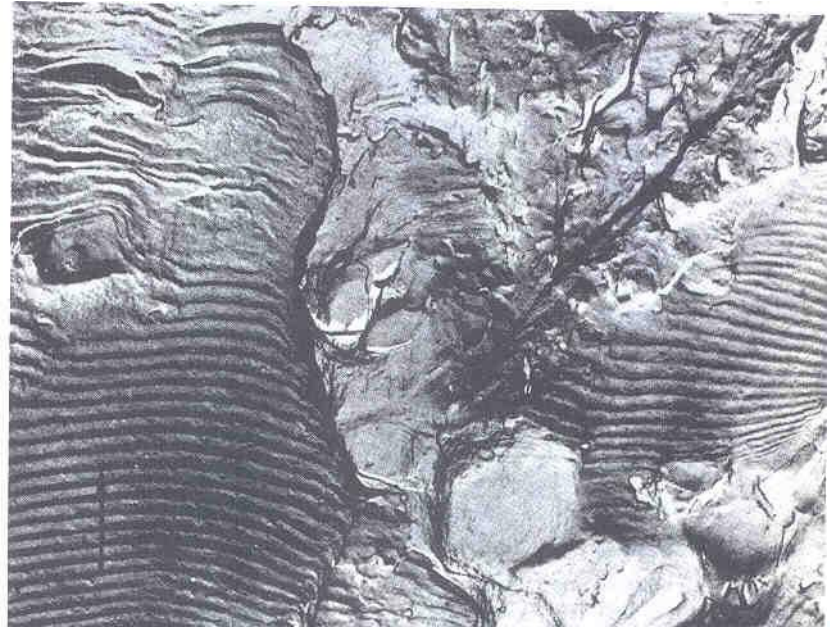
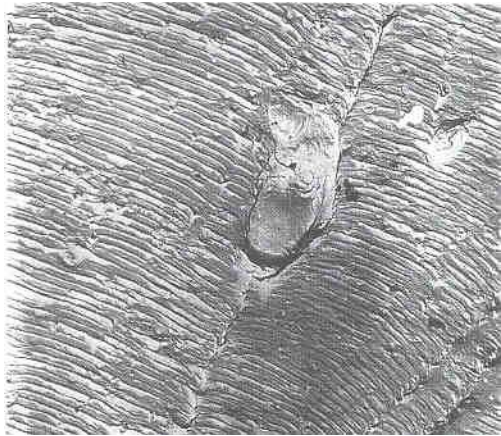
Επιφάνεια αστοχίας με κόπωση. Η επίπεδη επιφάνεια στο άνω μέρος είναι η περιοχή Έναρξης της κόπωσης (Στάδιο I)

Το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας έχει ινώδη μορφή.(Στάδιο II)

Λόγω της ταχείας εξέλιξης του φαινομένου δεν παρατηρούνται ραβδώσεις,και κηλίδες.

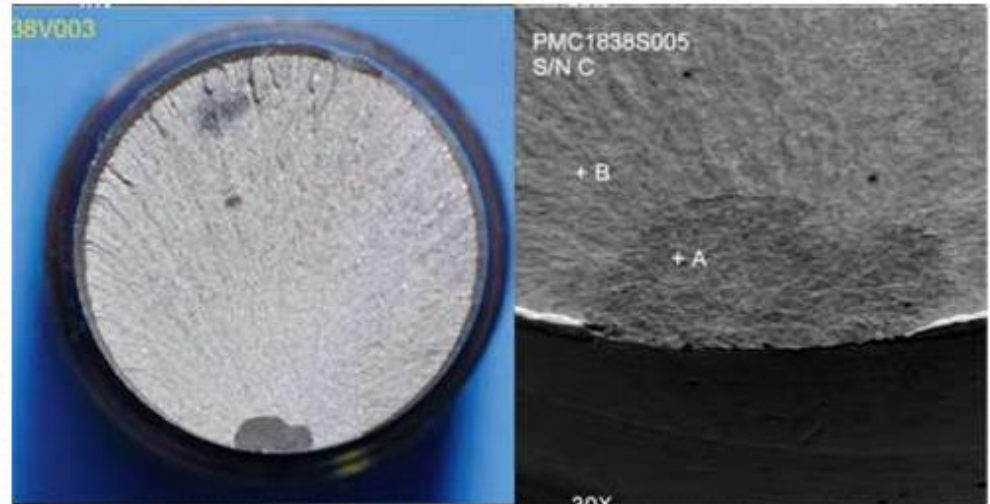
Διάβρωση κόπωση

Μικροφωτογραφίες επιφανειών εξαρτημάτων που αστόχησαν με κόπωση





Fatigue fracture area in a shaft caused by corroded inside area



Fatigue failures occur due to cyclic loading at stresses below a material's yield strength

<https://www.youtube.com/watch?v=dGQfUWvP0II>

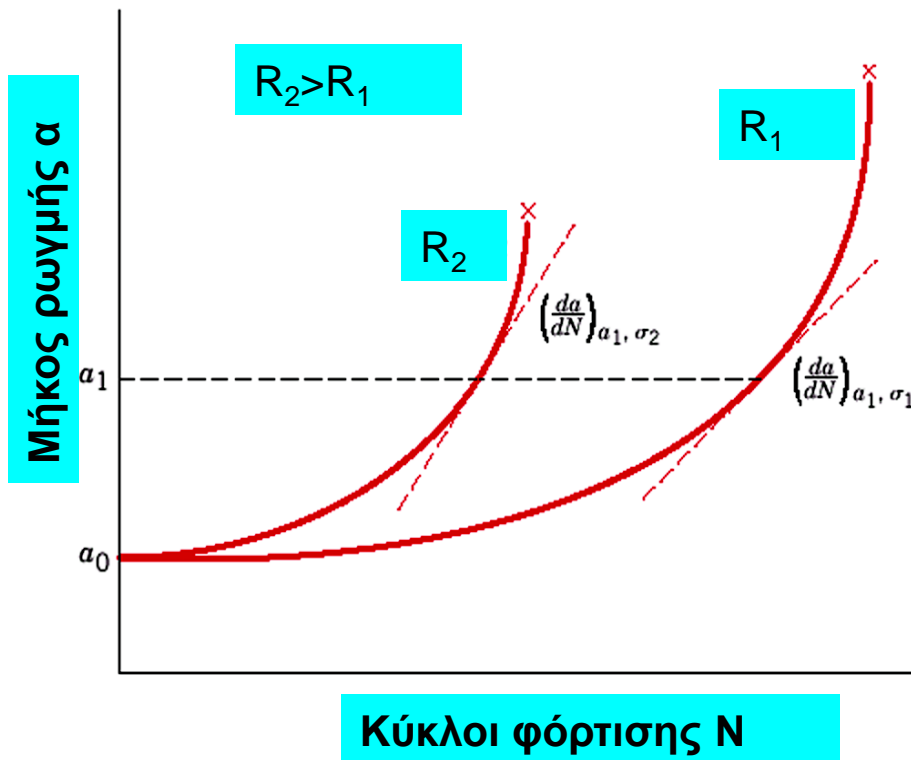
Ταχύτητα ανάπτυξης μικρορωγμής. (Crack propagation rate)

$$\left[\frac{da}{dN} \right] = A(\Delta K)^m$$

A: Σταθερά εξαρτώμενη από τη φύση του υλικού, το περιβάλλον και τα χαρακτηριστικά της τάσης.

m: Σταθερά 2-7

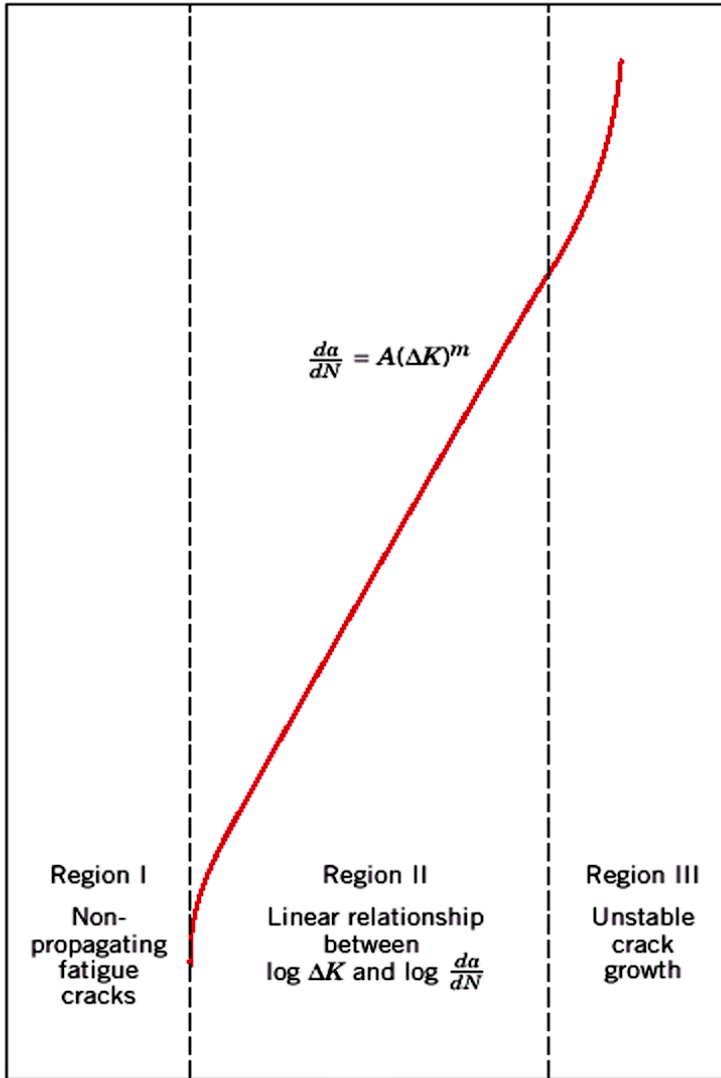
K: Συντελεστής έντασης τάσης



Μήκος ρωγμής ως προς τον αριθμό των κύκλων φόρτισης για δύο φορτίσεις με διαφορετικούς λόγους

$\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, και ίδιο πλάτος φόρτισης.

Ταχύτητα ανάπτυξης ρωγμής κόπωσης $\text{Log}(da/dN)$



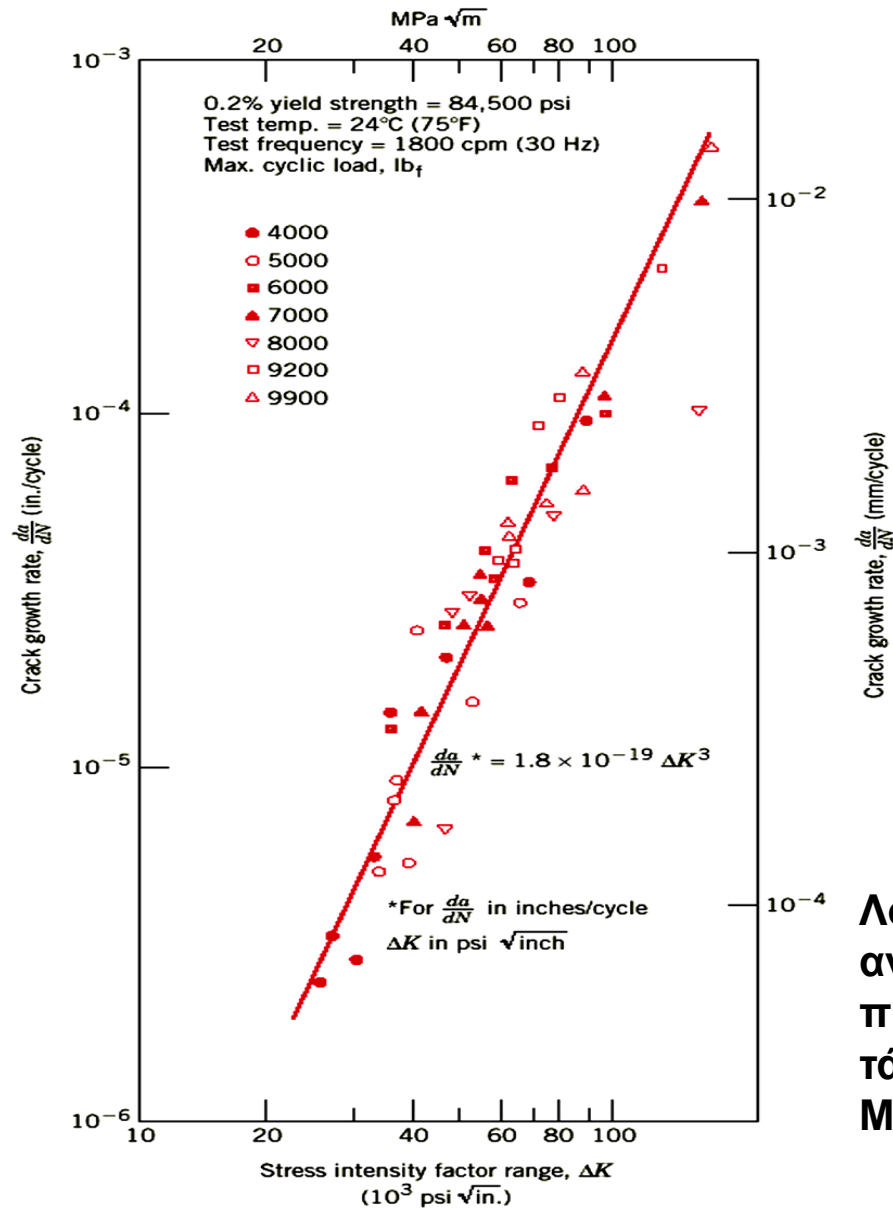
Διάρκεια ζωής σε κόπωση:
Στάδιο I+ Στάδιο II
+αμελητέο

$$N_f = N_i + N_p$$

Διαγραμματική παράσταση του λογαρίθμου της ταχύτητας $\frac{da}{dN}$ ως προς τον της περιοχής ΔK του παράγοντα έντασης τάσης.

Διακρίνονται τρεις περιοχές διαφορετικής ταχύτητας ανάπτυξης των ρωγμών (I,II,III)

Περιοχή παράγοντα έντασης τάσης ,Log ΔK



Λογάριθμος της ταχύτητας ανάπτυξης της ρωγμής L ως προς τον συντελεστή έντασης τάσης για κράμα χάλυβα Ni-Mo-V steel.

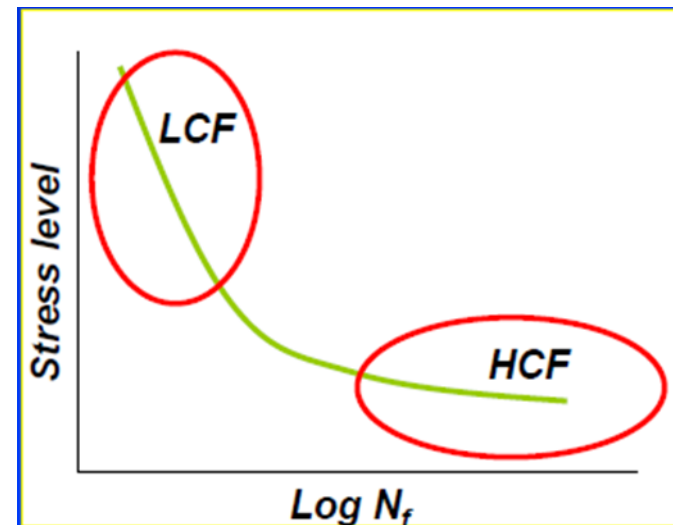
ΚΟΠΩΣΗ ΥΨΗΛΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΥΚΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

HIGH- CYCLIC FATIGUE

- Για χαμηλά επίπεδα τάσεων όπου οι παραμορφώσεις είναι εντελώς ελαστικές, προκύπτουν μεγαλύτερες διάρκειες ζωής σε κόπωση . Αυτό ονομάζεται «HIGH- CYCLIC FATIGUE» επειδή απαιτούνται σχετικά μεγάλοι αριθμοί κύκλων φόρτισης για την αστοχία ..
- Η «HIGH- CYCLIC FATIGUE» συνδέεται με διάρκειες ζωής μεγαλύτερες από 10^4 έως 10^7 κύκλους.
- Το διάγραμμα S-N για κόπωση μεγάλου αριθμού κύκλων φόρτισης περιγράφεται από την εξίσωση Basquin equation

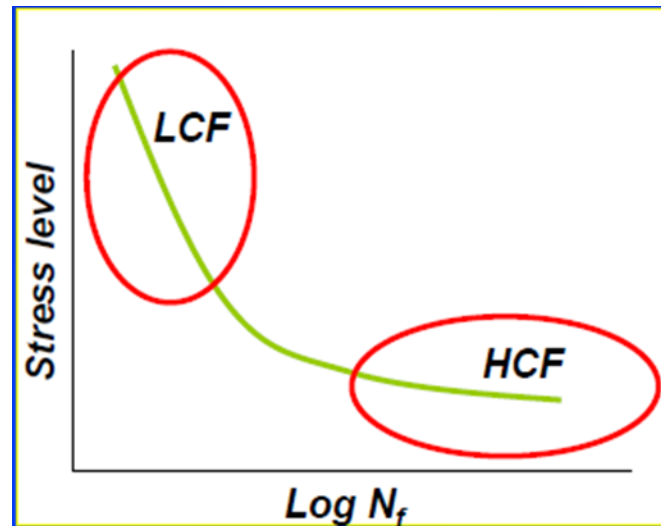
$$N\sigma_a^p = C$$

p και C είναι εμπειρικές σταθερές



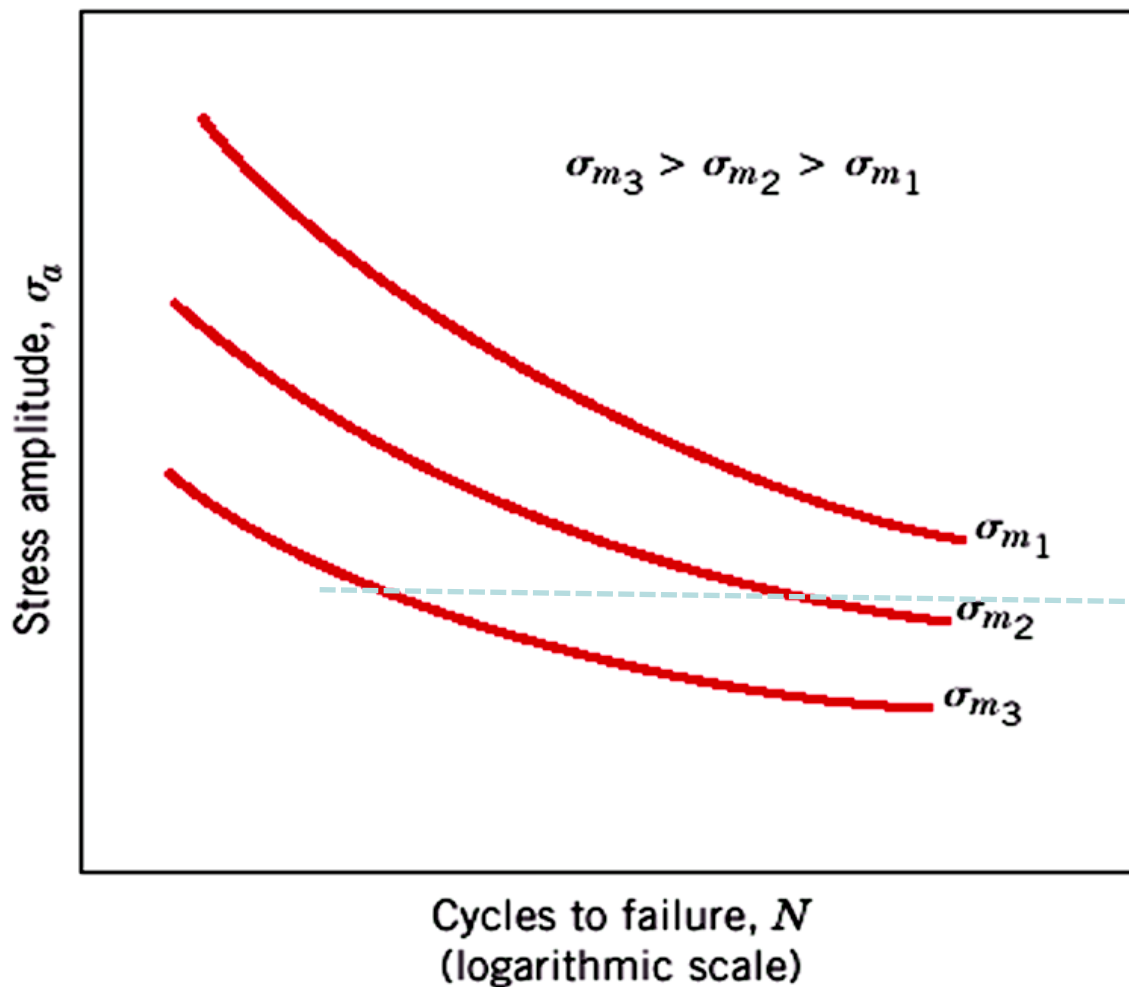
ΚΟΠΩΣΗ ΧΑΜΗΛΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΥΚΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ « LOW- CYCLE FATIGUE »

- Σχετίζεται με υψηλά φορτία (τάσεις) οι οποίες προκαλούν ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις σε κάθε κύκλο φόρτισης.
- Συνεπώς η διάρκεια ζωής είναι μικρότερη και κυμαίνεται μεταξύ 10^4 to 10^5 cycles



Παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή κόπωσης του υλικού

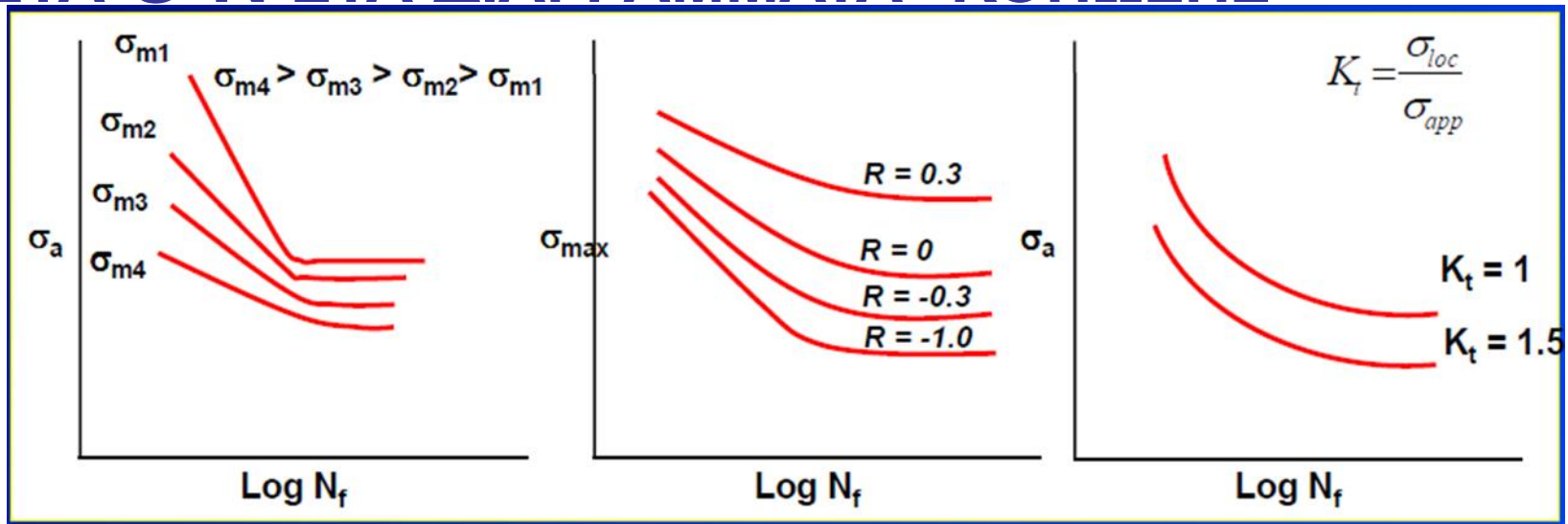
Επίδραση της μέσης τάσης στη διάρκεια ζωής σε κόπωση
Effect of mean stress on the fatigue life



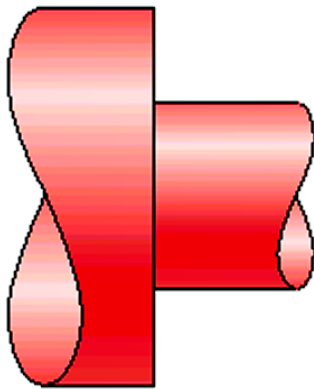
$$\sigma_m = (\sigma_{\min} + \sigma_{\max}) / 2$$

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$$

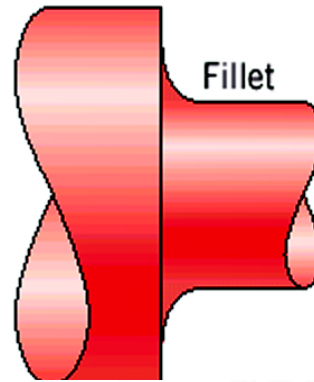
**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ (MEAN STRESS),
ΕΥΡΟΥΣ ΤΑΣΗΣ (STRESS RANGE)
ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ (ΡΩΓΜΗ) (STRESS
INTENSITY ,NOTCH)
ΣΤΑ S-N ΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΟΠΩΣΗΣ**



Επίδραση του σχεδιασμού στη διάρκεια ζωής σε κόπωση Effect of design on the fatigue life

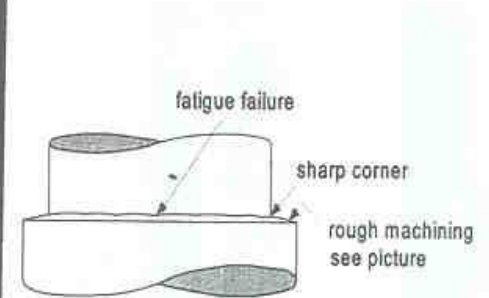
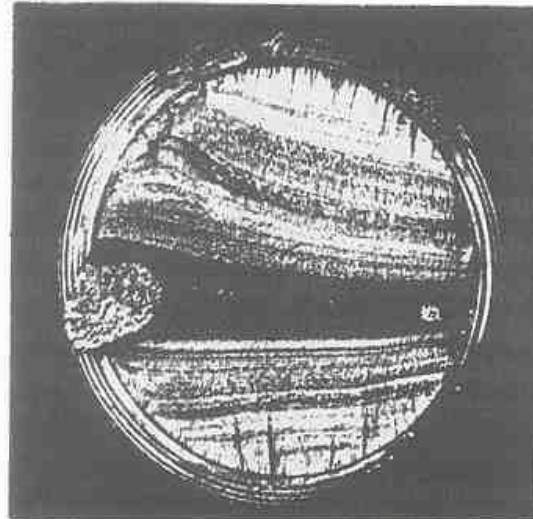


(a)

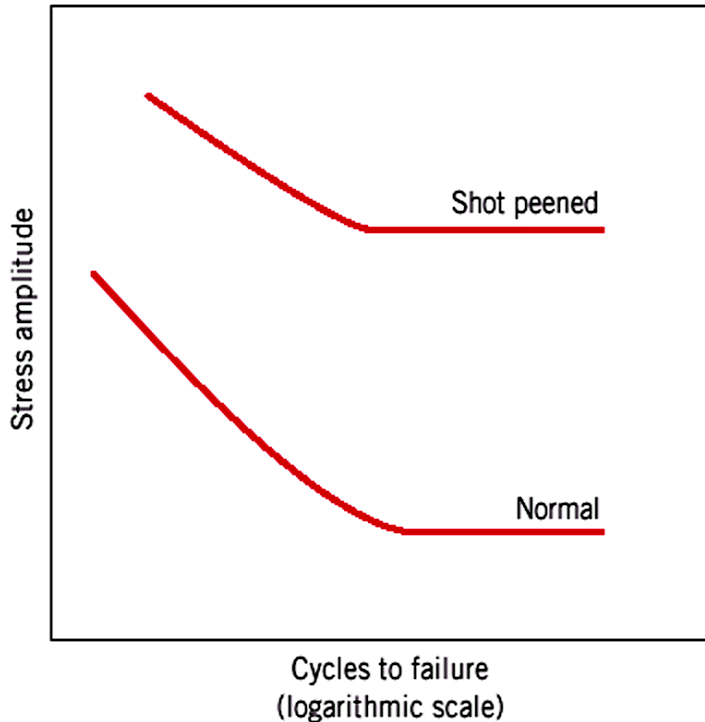


α) Λανθασμένος σχεδιασμός.
Απότομες γωνίες

β) Σωστός σχεδιασμός.
Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής



Επίδραση της κατάστασης της επιφάνειας Effect of surface treatment on the fatigue life



Ποια είναι η σημασία της επιφάνειας στην κόπωση;

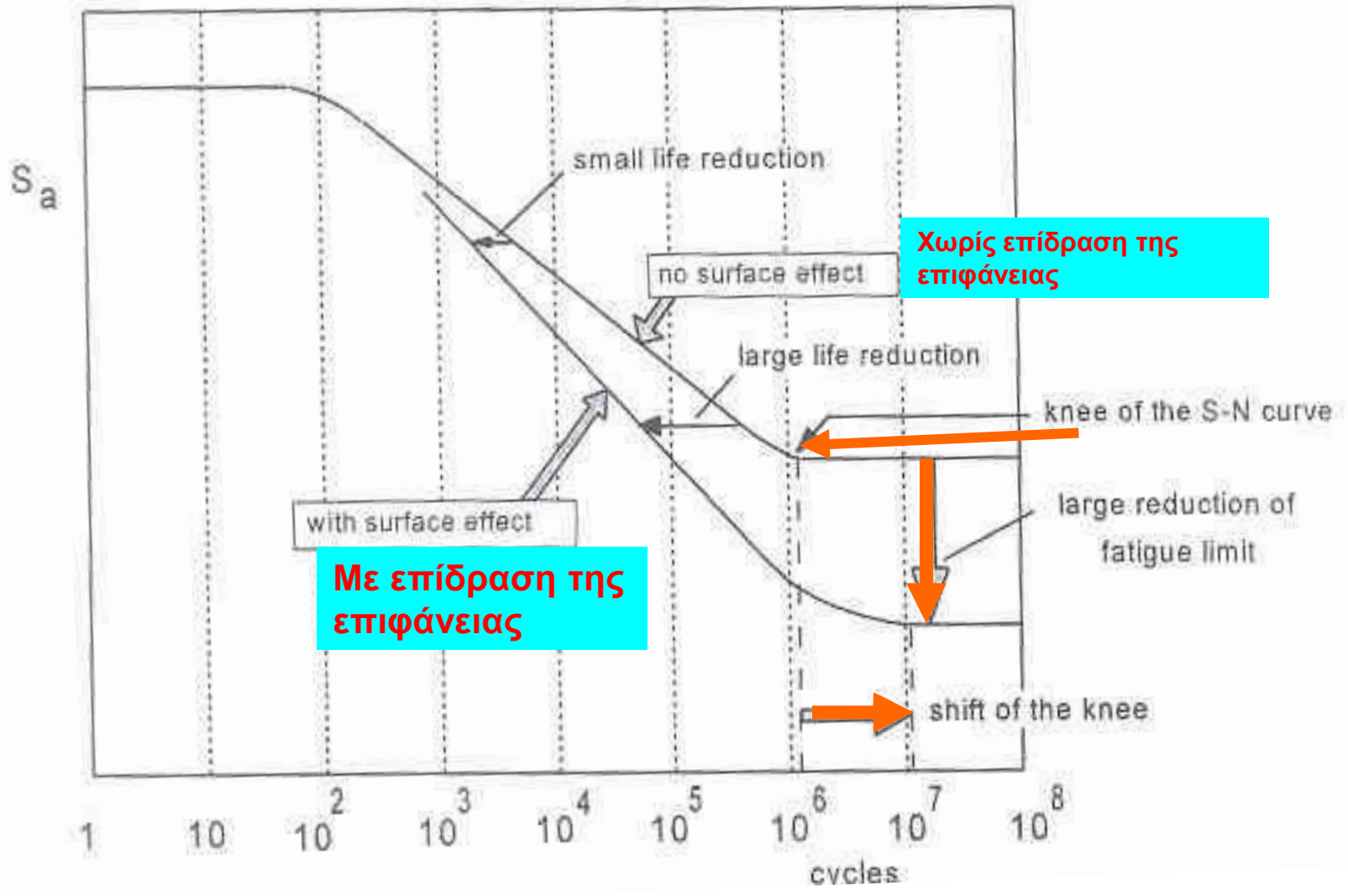
Με ποιες τεχνικές βελτιώνεται η κατάσταση της επιφάνειας υλικού και κατ' επέκταση η αντοχή σε κόπωση;

Τεχνικές

- Επιφανειακή σκλήρυνση με βορβαδισμό (shot peening) λεπτών σωματιδίων.
- Επιφανειακή σκλήρυνση με θερμική κατεργασία
- Εναπόθεση στην επιφάνεια στοιβάδας κεραμικού (TiC,SiC.AIN)
- Ειδικά για τους χάλυβες εφαρμόζονται τεχνικές όπως :

Εναζώτωση,ενανθράκωση κλπ

Επίδραση της κατάστασης της επιφάνειας στην καμπύλη κόπωσης S-N



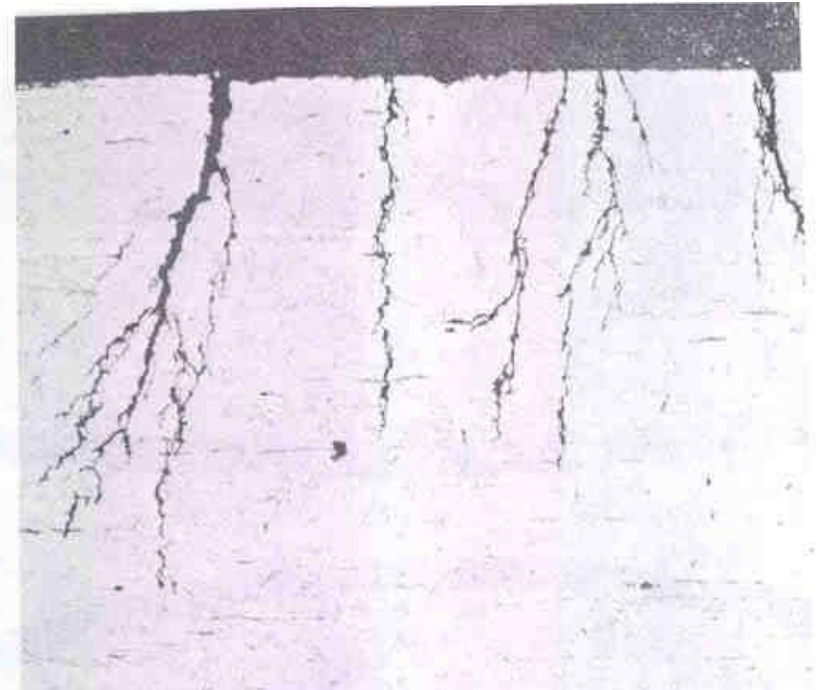
Επίδραση της θερμοκρασίας

- Θερμικές τάσεις (Thermal Stresses)
- Θερμική κόπωση (Thermal fatigue)

$$\sigma = \alpha_{th} \cdot E \cdot \Delta T$$

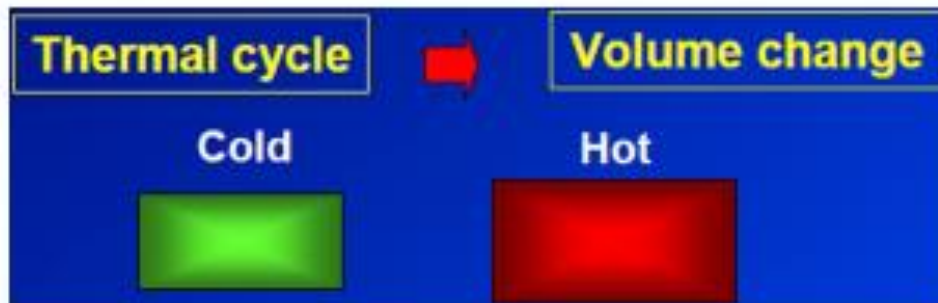
Επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος

- Διάβρωση κόπωση (Corrosion fatigue)



THERMAL FATIGUE

- Thermal fatigue occurs when metal is subjected to high and low temperature, producing fluctuating cyclic thermal stress



- Normally occurs in high temperature equipment.
- Low thermal conductivity and high thermal expansion properties are critical.

The thermal stress developed by a temperature change T is

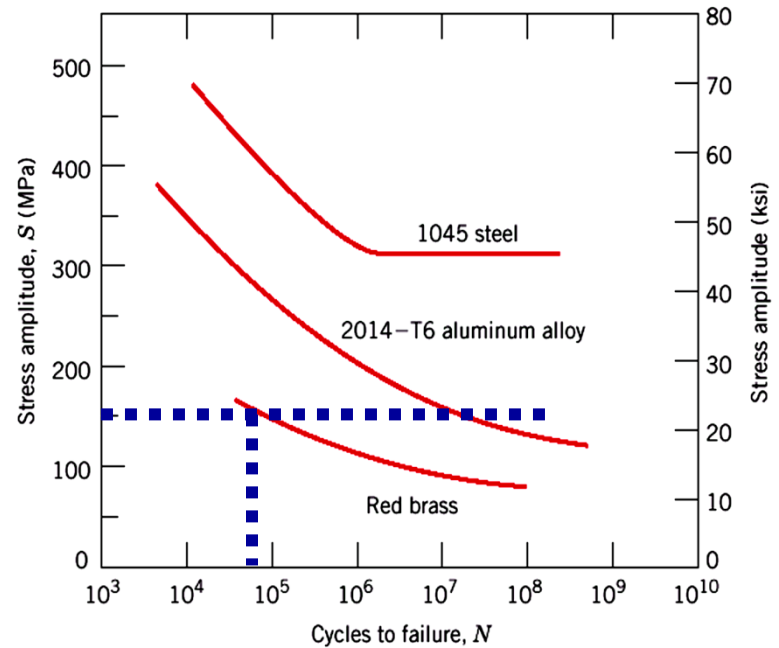
$$\sigma = \alpha E \Delta T$$

α is linear thermal coefficient of expansion
 E is elastic modulus

If failure occurs by one application of thermal stress, the condition is called thermal shock.

Παράδειγμα ερώτησης

Κυλινδρική ράβδος διαμέτρου 8mm κατασκευασμένη από ορείχαλκο υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις εφελκυσμού και θλίψεως κατά μήκος του άξονα της. Αν οι τάσεις εφελκυσμού και θλίψεως είναι 7500 N και 7500N αντίστοιχα να υπολογίσετε τη διάρκεια ζωής της σε κόπωση. Δίδεται το διάγραμμα S-N



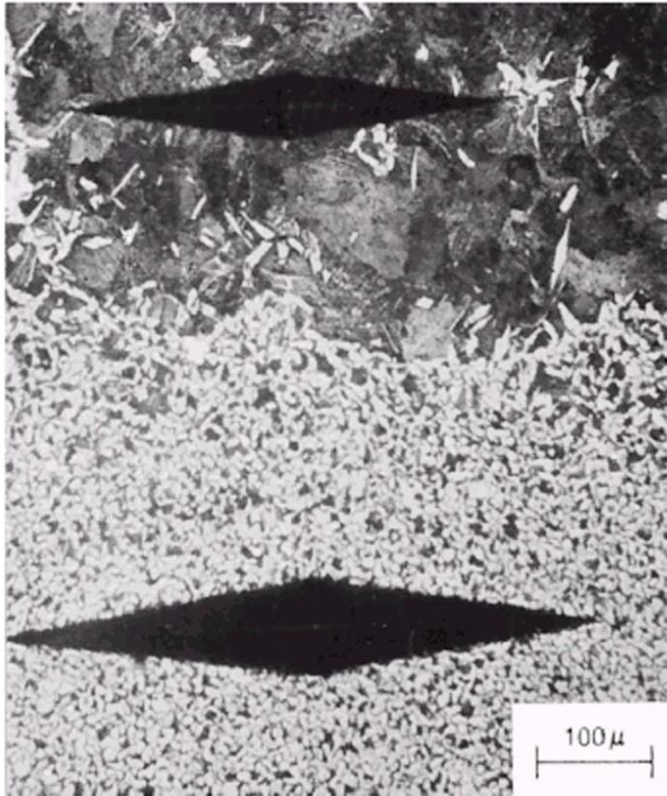
Λύση: Υπολογίζουμε τις τάσεις σ_{\max} και σ_{\min} από τις σχέσεις:

$$\sigma_{\max} = (F_{\max} / A_0) = 150 \text{MPa}$$

$$\sigma_{\min} = (F_{\min} / A_0) = 150 \text{MPa}$$

Από την σχέση $\sigma_{\max} - \sigma_{\min} / 2$ υπολογίζουμε το εύρος της τάσης $\sigma_a = 150 \text{MPa}$

Και από διάγραμμα τους κύκλους κόπωσης μέχρι την αστοχία $\sim 10^5$ κύκλους



Photomicrograph showing both core (bottom) and carburized outer case (top) regions of a case-hardened steel. The case is harder as attested by the smaller microhardness indentation. 100X.

ΕΡΠΥΣΜΟΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ CREEP OF ENGINEERING MATERIALS

Βιβλιογραφία:

- *W.Callister :Επιστήμη και Τεχνολογία των υλικών*

- **ASE324: Aerospace Materials Laboratory-**

Instructor: Rui Huang, Dept of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics The University of Texas at Austin

- *Thomas H.Courtney “mechanical Behavior of materials”*

- *M.F.Ashby and D.H. Jones “Engineering Materials” Pergamon press*

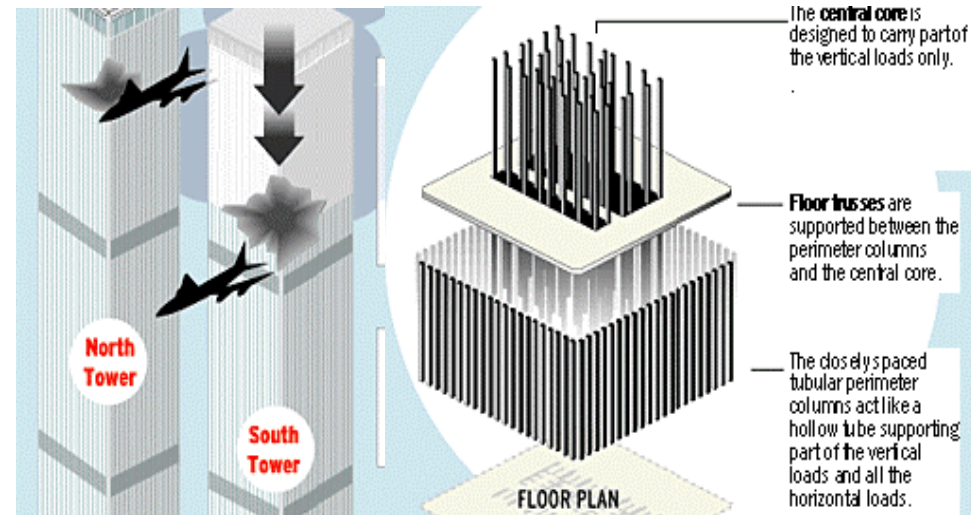
ΕΡΠΥΣΜΟΣ

Ερπυσμός είναι η παραμόρφωση του υλικού υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών και στατικής μηχανικής τάσης η οποία είναι μικρότερη της αντοχής παραμόρφωσης του στη θερμοκρασία δωματίου. Η παραμόρφωση ερπυσμού είναι συνάρτηση της στατικής τάσης σ , του χρόνου t και της θερμοκρασίας T « $\epsilon=f(\sigma,t,T)$ »

Creep: is the material deformation under elevated temperature and static mechanical stress

World Trade Center Collapse

- *Tubular* constructed building.
- Well designed and *strong*.
- Strong but not from *buckling*.
- Supports lost at crash site, and the floor supported inner and outer tubular structures.
- Heat from burning fuel adds to loss of structural support from softening of steel (*strength vs. T, stress-strain behavior*).
- Building “pancakes” due to enormous buckling loads.



See estimate by Tom Mackie in MIE

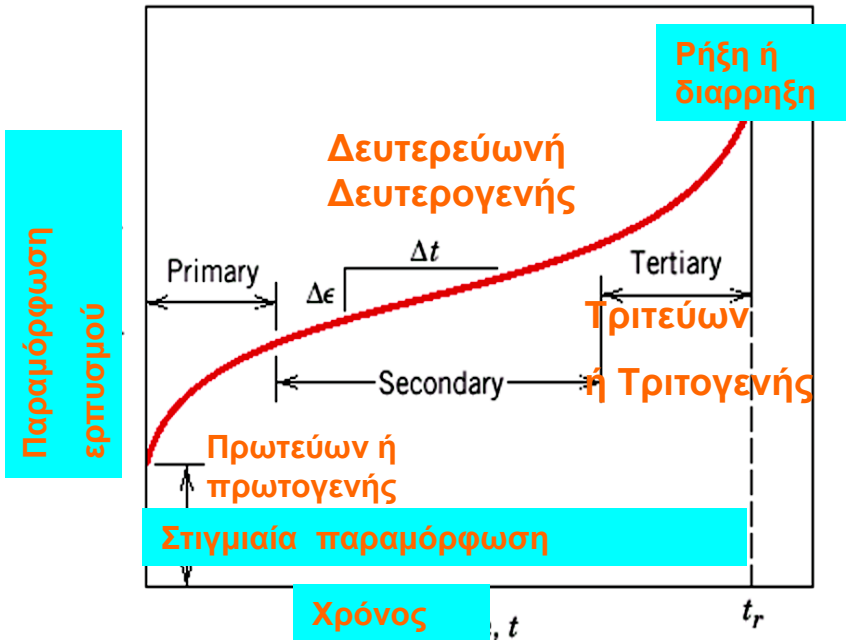
Πότε μια θερμοκρασία θεωρείται υψηλή για ένα υλικό;

- Μέταλλα: $T > 0,3T_m$ έως $0,4T_m$
- Κεραμικά : $T > 0,4T_m$ έως $0,5T_m$
- Πολυμερή : $T > T_g$ (Θερμοκρασία υάλου)
(Θερμοπλαστικά)

T_m : Θερμοκρασία τήξης σε $^{\circ}K$.

$$T_m = \theta_T (^{\circ}C) + 273$$

ΕΡΠΥΣΜΟΣ



Τυπική μορφή διαγράμματος ερπυσμού. «Παραμόρφωση ερπυσμού ως προς το χρόνο σε σταθερή υψηλή θερμοκρασία και στατική τάση»

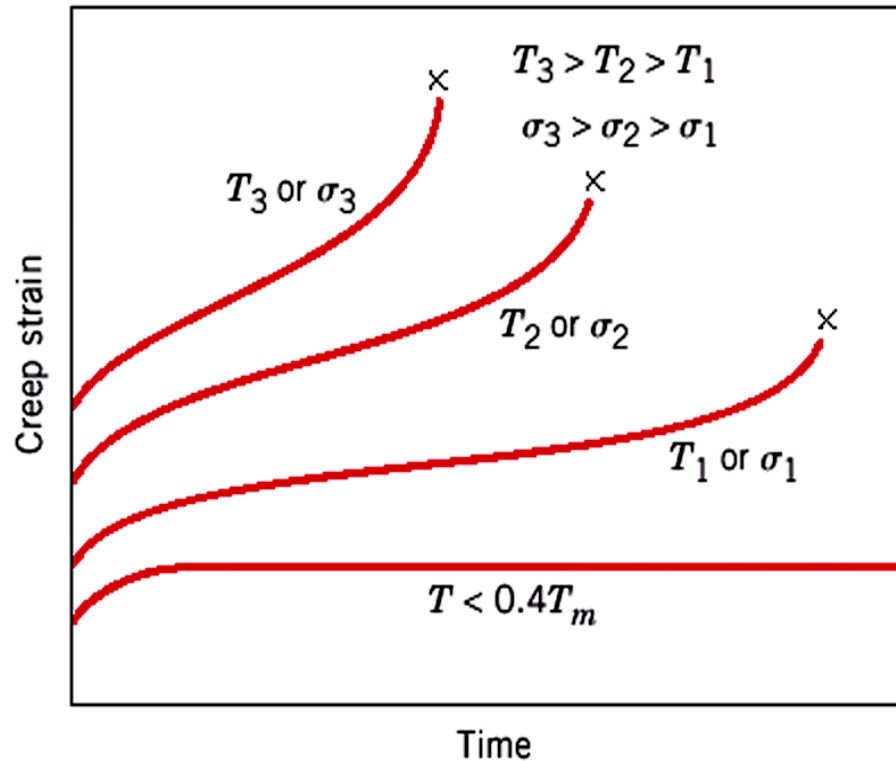
Η ταχύτητα ερπυσμού καθορίζεται από την κλίση $d\epsilon/dt$ του τμήματος του διαγράμματος που αντιστοιχεί στο στάδιο του δευτερεύοντος ή δευτερογενή ερπυσμού.

Ο χρόνος ρήξης ή διάρρηξης του υλικού t_r

Παράμετροι για δεδομένες συνθήκες τάσης και θερμοκρασίας:

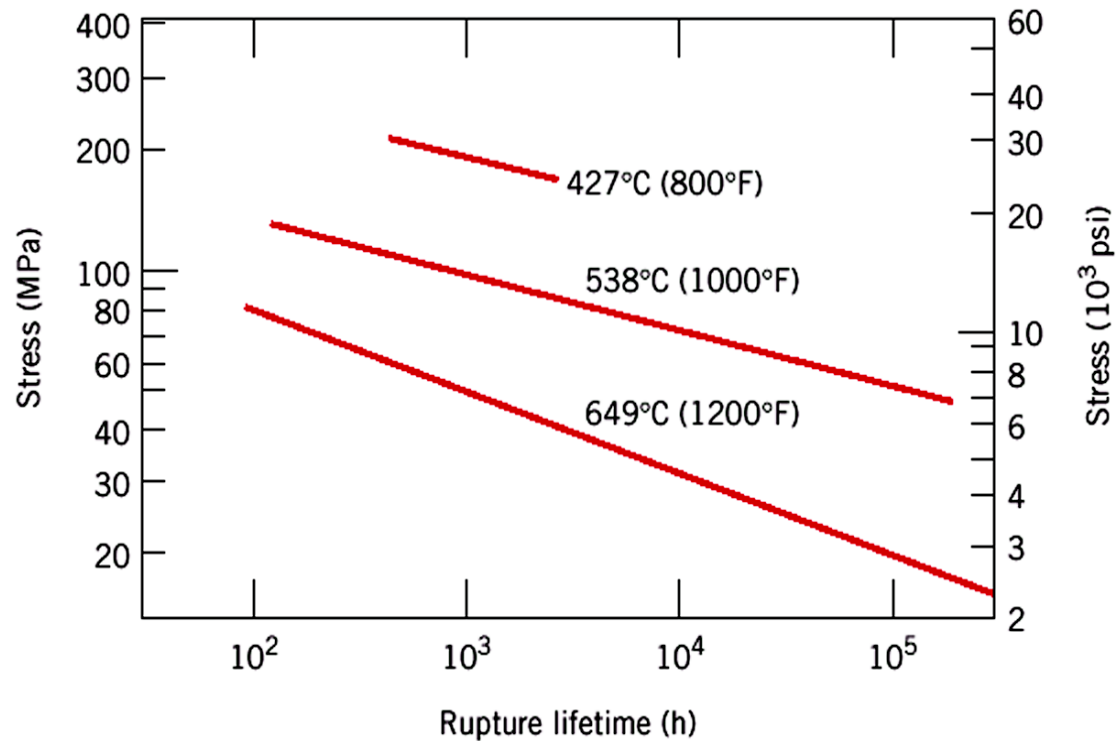
$\epsilon_{II} = d\epsilon/dt$, Χρόνος ρήξης t_r

Επίδραση της θερμοκρασίας και της τάσης στην ταχύτητα ερπυσμού
Influence of stress σ and temperature T on creep behavior.



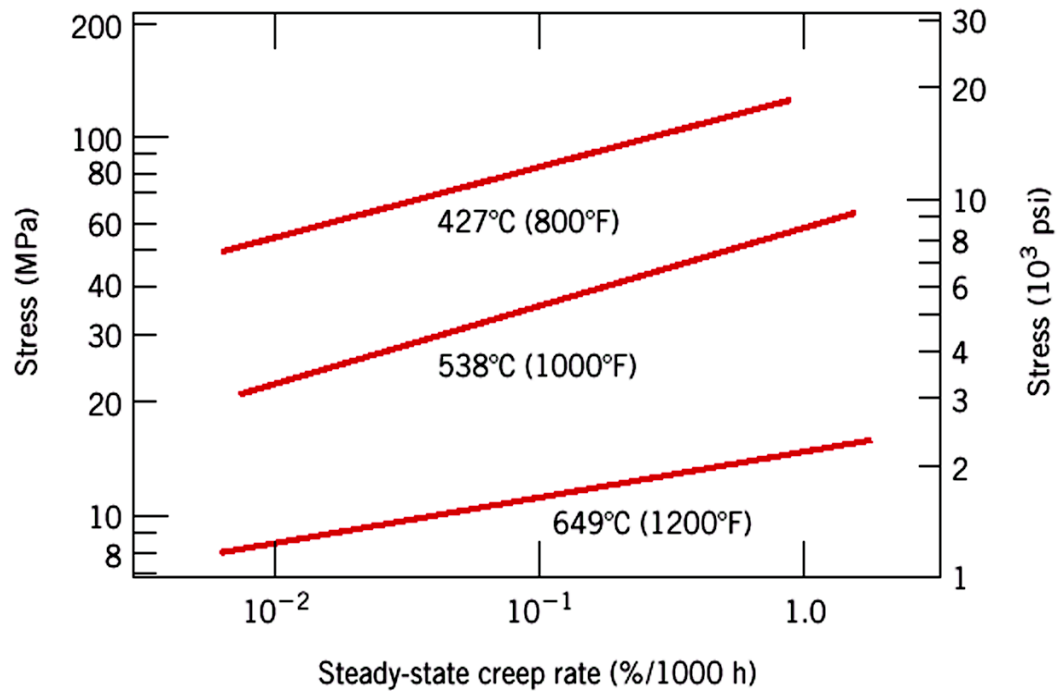
Επίδραση της στατικής τάσης και της θερμοκρασίας

Stress and temperature effects



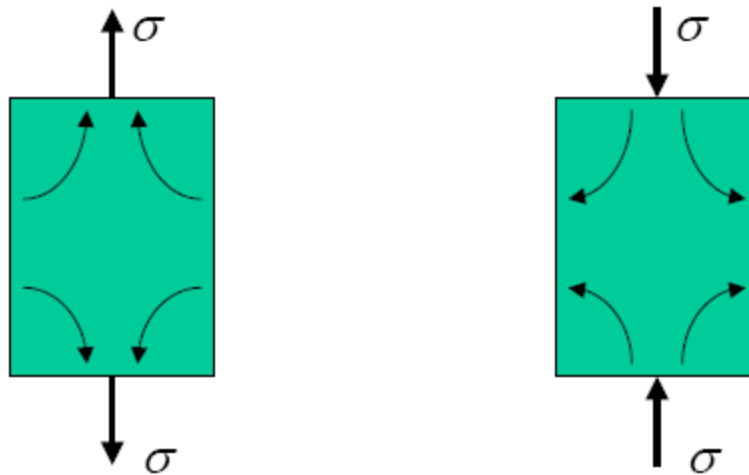
Επίδραση της στατικής τάσης και της θερμοκρασίας

Stress and temperature effects



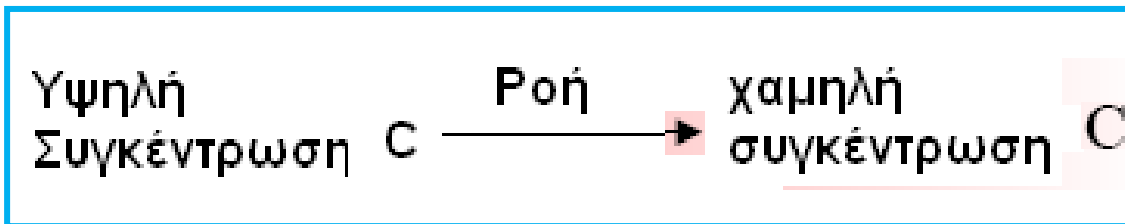
Μηχανισμός ερπυσμού Creep mechanism

Όταν το υλικό βρεθεί στην κατάλληλη περιοχή θερμοκρασίας η επίδραση της μηχανικής τάσης προκαλεί **διάχυση των ατόμων** η οποία οδηγεί σε παραμόρφωση ερπυσμού.



Διάχυση(Diffusion)

- Είναι γνωστό ότι λαμβάνει χώρα στα υγρά και τα αέρια
- Λαμβάνει χώρα και στα στερεά
- Προκαλείται από τη διαφορά συγκέντρωσης



$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

- J =ροή (αριθμός ατόμων ανά μονάδα επιφάνειας ανά second)
- C = Συγκέντρωση (αριθμός ατόμων ανά μονάδα όγκου)
- D = Συντελεστής διάχυσης

Νόμος Arrhenius

- Για τη διάχυση

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right)$$

- Για την ταχύτητα ερπυσμού

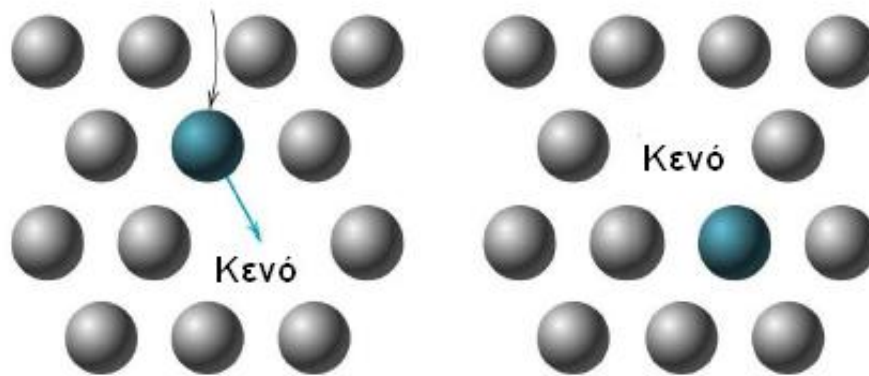
$$\dot{\epsilon}_{ss} = C \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right)$$

- Ανάλογες σχέσεις εφαρμόζονται για την ταχύτητα διάβρωσης και οξειδωσης

Διάχυση στα στερεά

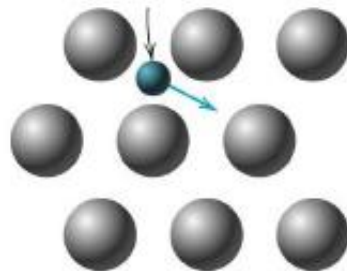
- **Διάχυση όγκου (Bulk diffusion)**: Διάχυση των ατόμων παρεμβολής και των κενών θέσεων του κρυσταλλικού πλέγματος
- **Διάχυση των ορίων των κόκκων** (γρήγορη διαδικασία)
- **Διάχυση των ατόμων των εξαρμώσεων** (γρήγορη διαδικασία)
- **Επιφανειακή διάχυση**
- Γενικώς η **διάχυση** προκαλείται από **διαφορά συγκέντρωσης**, **διαφορά μηχανικής τάσης**, **διαφορά δυναμικού**

Διάχυση Όγκου(bulk diffusion)

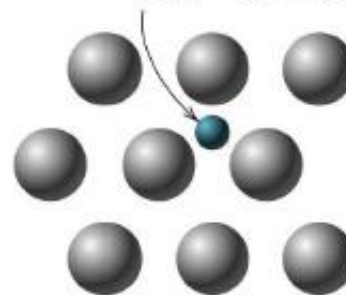


(α)

θέση ατόμου παρέμβολής
πριν τη διάχυση

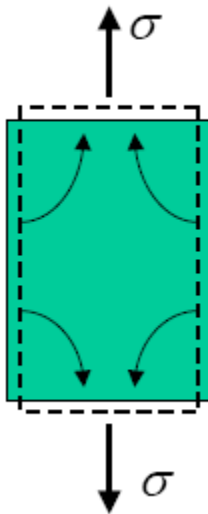


θέση ατόμου παρέμβολής
μετά τη διάχυση



Διάχυση Nabarro-Herring

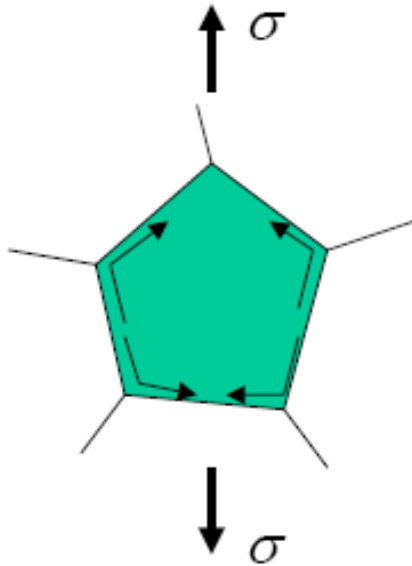
- Η μηχανική τάση προκαλεί **διάχυση** εντός των κρυσταλλικών κόκκων (bulk diffusion)
- **Χαμηλή τάση υψηλή θερμοκρασία**



$$\dot{\epsilon}_{NH} = A \frac{D}{d^2} \frac{\sigma \Omega}{kT}$$

Διάχυση Coble

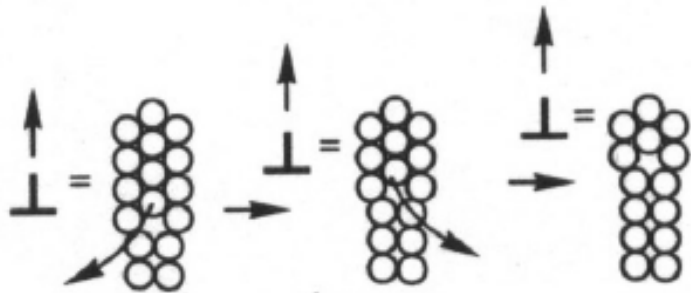
- Σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες η **διάχυση** των ορίων των κόκκων καθορίζει τη διάχυση εντός των κρυσταλλικών κόκκων



$$\dot{\epsilon}_C = A \frac{\delta D_{GB}}{d^3} \frac{\sigma \Omega}{kT}$$

Διάχυση εξαρμώσεων

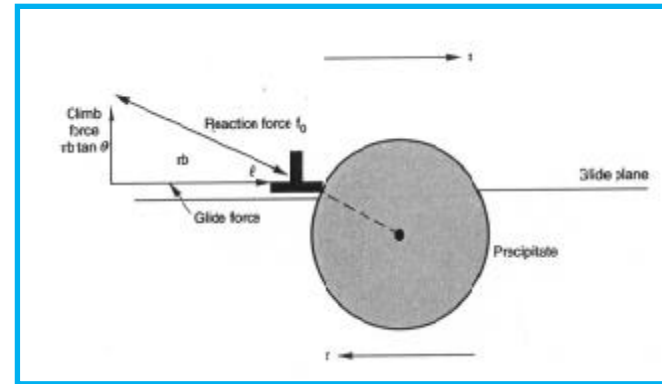
- Η διάχυση των ατόμων μέσα ή έξω από τον πυρήνα των εξαρμώσεων οδηγούν στην αναρρίχηση (αλλαγή επίπεδου των εξαρμώσεων).
- Η εξάρμωση αλλάζει επίπεδο και ολισθαίνει προκαλώντας ερπυσμό του υλικού



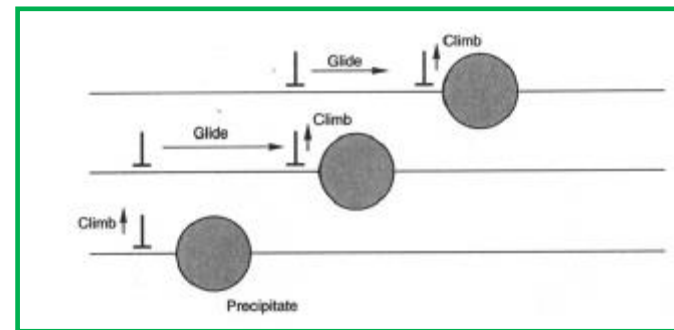
$$\dot{\epsilon}_D = A \frac{DGb}{kT} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n$$

Κίνηση εξάρμωσης κατά τον ερπυσμό

- Τα άτομα με διάχυση απελευθερώνουν την εξάρμωση από το εμπόδιο (πχ άτομο πρόσμειξης, ή σωματίδιο καθίζησης κλπ



- Η μηχανική τάση που δημιουργείται οδηγεί την εξάρμωση να αλλάξει επίπεδο (αναρριχηθεί) και να συνεχίσει την ολίσθηση της σε άλλο κρυσταλλικό επίπεδο.

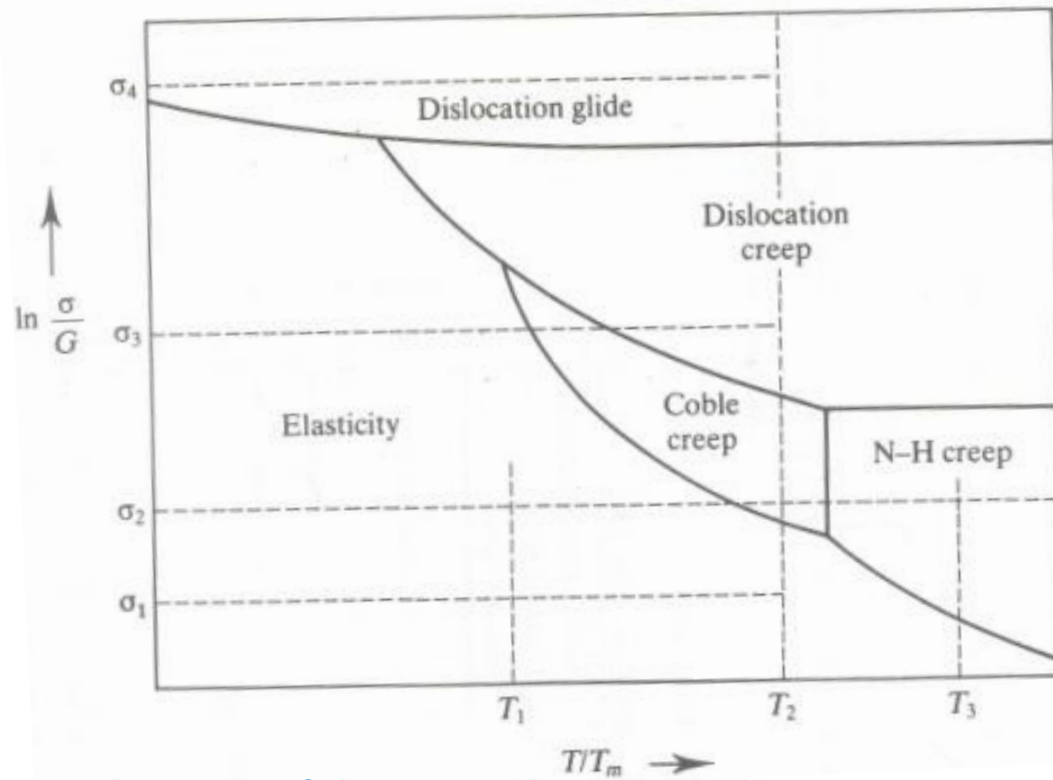


Διάχυση και ερπυσμός

- Όλοι οι μηχανισμοί ερπυσμού σχετίζονται με τη διάχυση
- Η διάχυση όγκου και η διάχυση ορίων των κόκκων οδηγεί σε γραμμικό ερπυσμό ($n=1$).
- Η διάχυση εξαρμώσεων οδηγεί σε εκθετικές σχέσεις ($n= 5-7$).
- Η ταχύτητα ερπυσμού εξαρτάται από τον συντελεστή διάχυσης τη θερμοκρασία και περιγράφεται με το νόμο του Arrhenius.

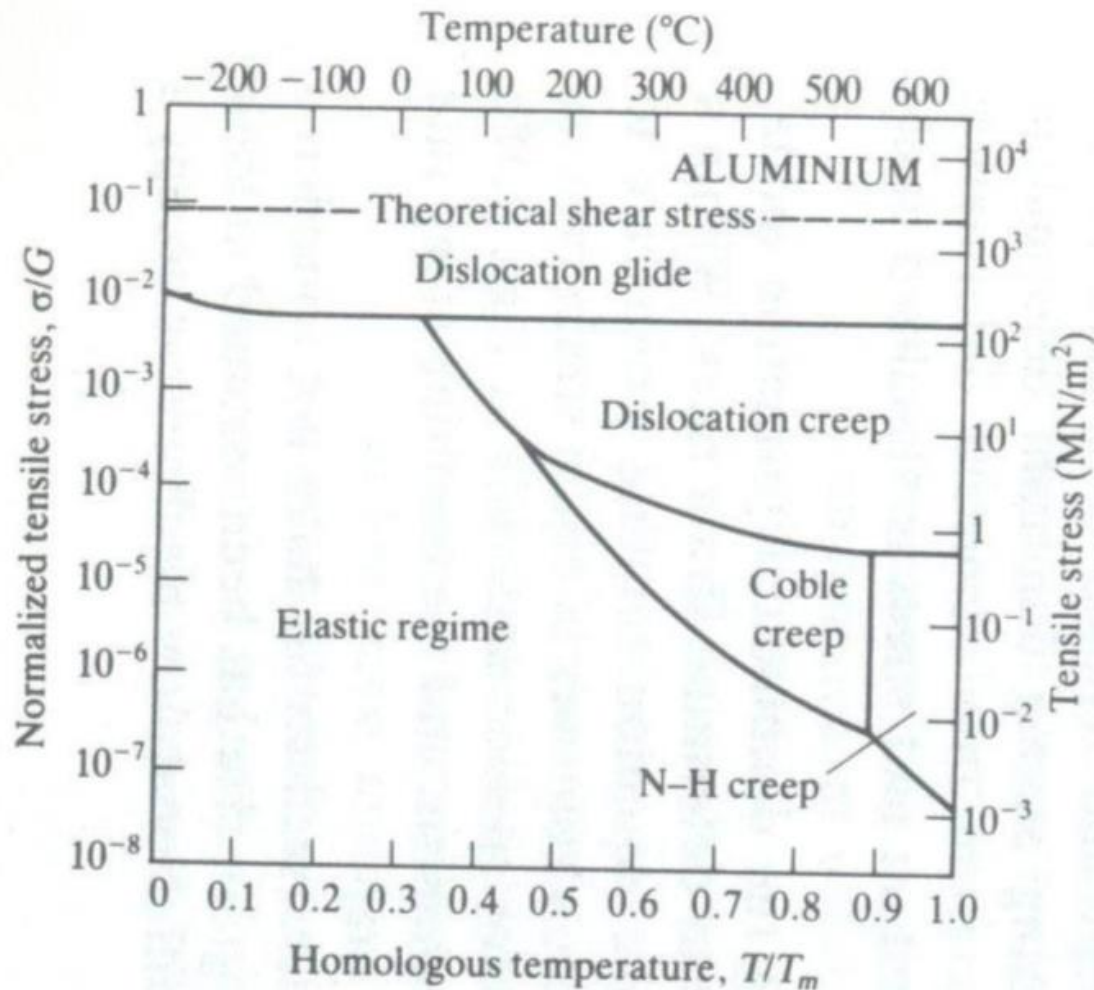
Χάρτες μηχανισμών παραμόρφωσης

Deformation mechanism maps

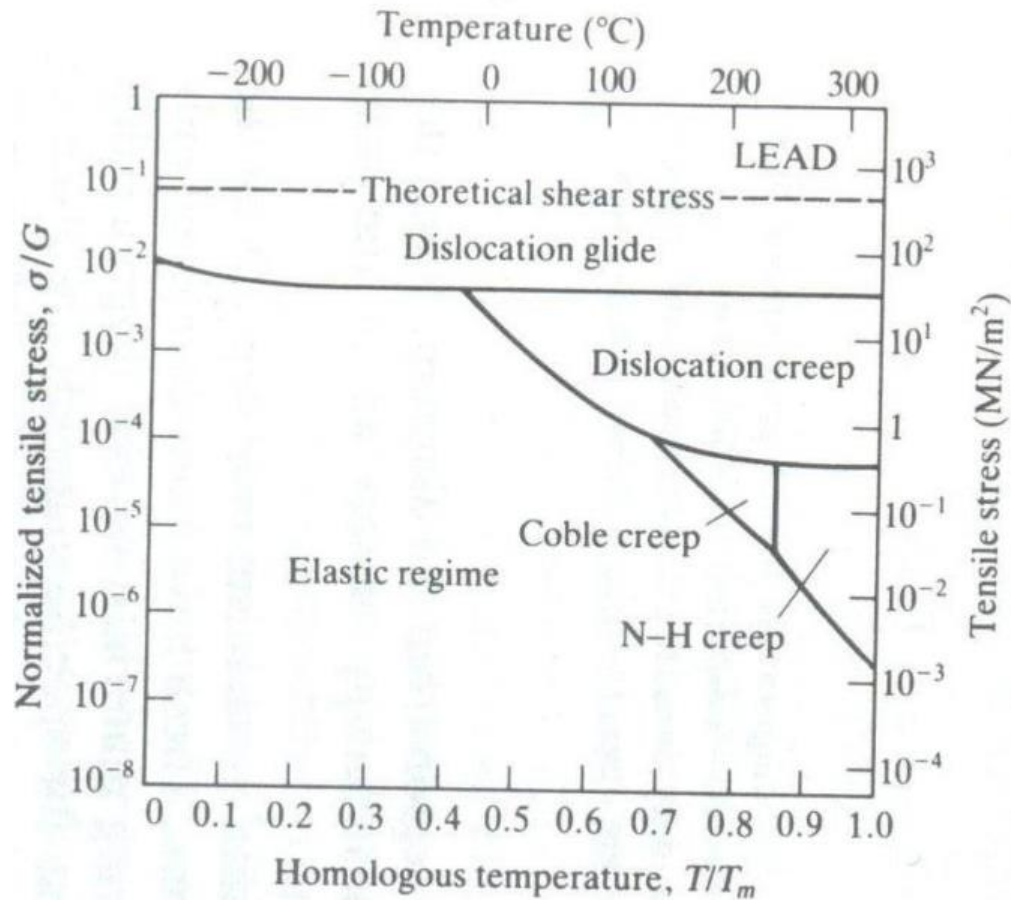


Μπορεί να λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα διαφορετικοί μηχανισμοί

Μηχανισμοί παραμόρφωσης ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

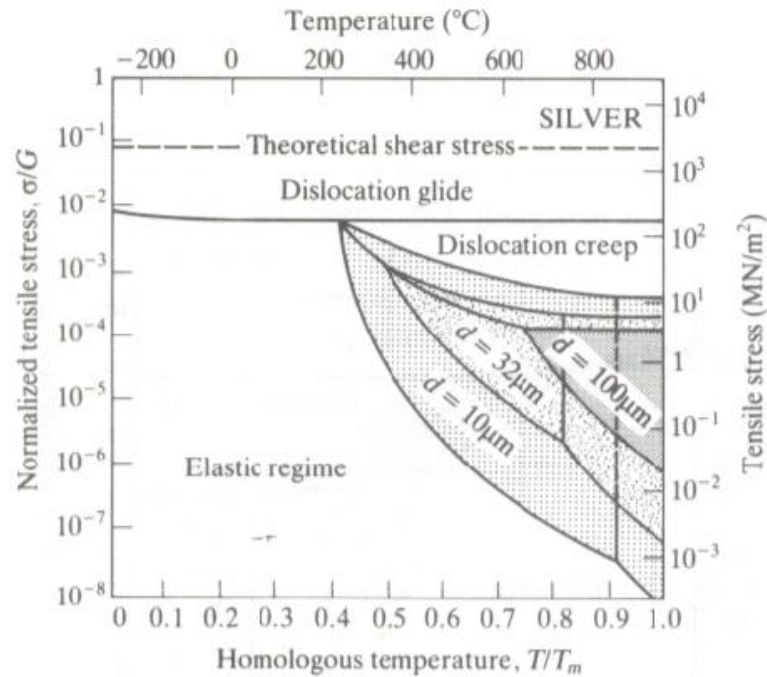


Μηχανισμοί παραμόρφωσης ΜΟΛΥΒΔΟΥ

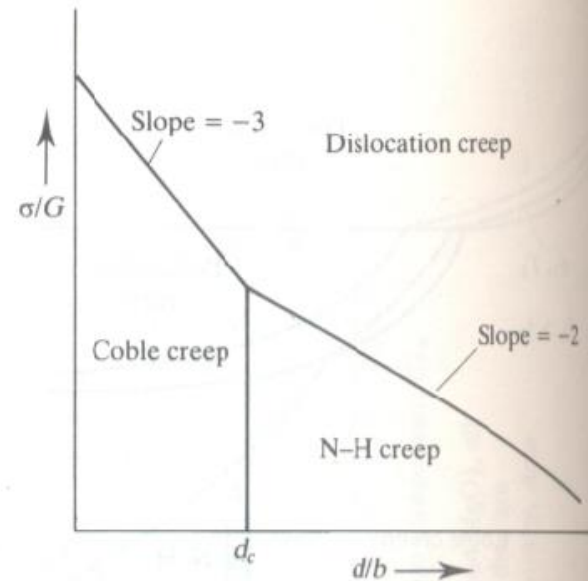


Frost and Ashby, Deformation Mechanism Maps, Pergmon Press, 1982

Επίδραση του μεγέθους των κρυσταλλικών κόκκων στο ερπυσμό



(a)



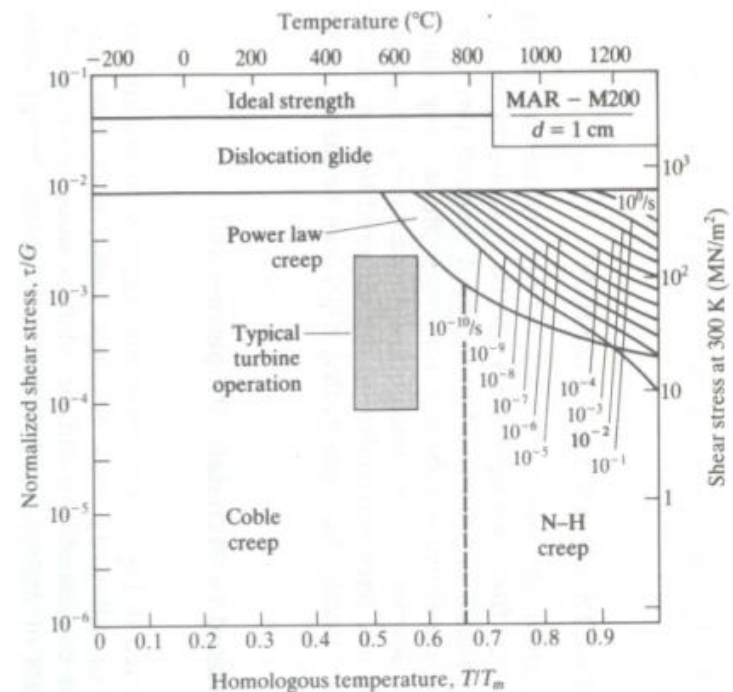
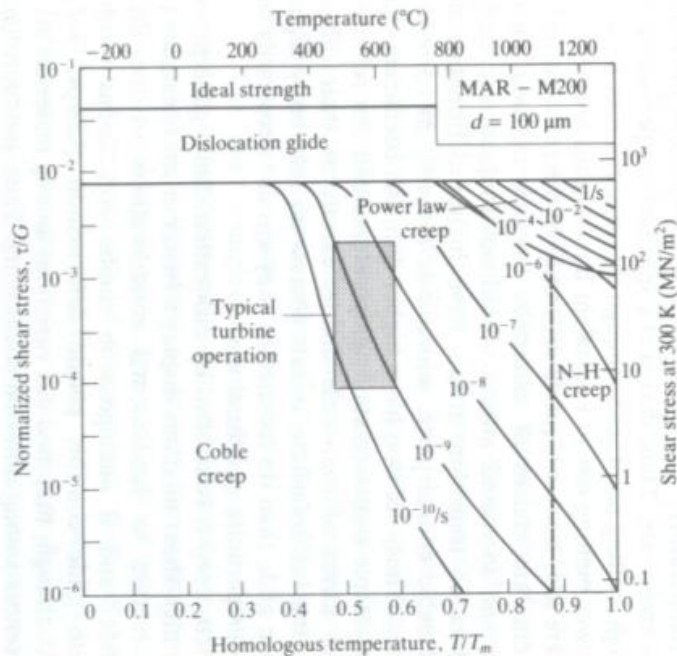
(b)

Όσο μικραίνει το μέγεθος των κόκκων ευνοούνται οι μηχανισμοί Nabarro-Herring και Coble.

Ερώτηση: Τι ισχύει όταν οι κρυσταλλικοί κόκκοι είναι μεγάλοι;

M.F. Ashby Acta metall 20,887,1972

Διαγράμματα παραμόρφωσης ερπυσμού για το κράμα Ni mar-m200. Χρησιμοποιείται στις τουρμπίνες των αεροπλάνων

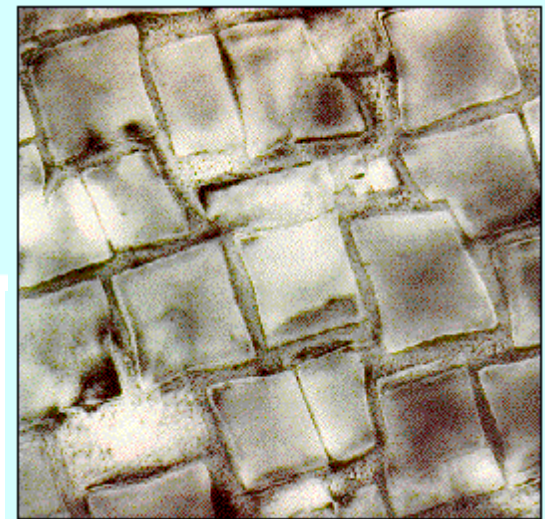


Απεικονίζεται η επίδραση του μεγέθους των κρυσταλλικών κόκκων. Όταν μεγαλώνει το μέγεθος των κόκκων σημαντικά το υλικό στις συνθήκες εφαρμογής δεν εμφανίζει ερπυσμό. Για το λόγο αυτό το υλικό χρησιμοποιείται σε μονοκρυσταλλική δομή και όχι πολυκρυσταλλική

Nickel Superalloy, MAR M-200

MAR-M-200 is a nickel alloy with the nominal composition: (Ni - 0.15C -9.0Cr -12.5W -10Co -5Al -2Ti -1Cu -0.05Zr). In this superalloy, Ni₃Al precipitates in a cubic habit in the Ni matrix as shown in the photograph. These precipitates restrict dislocation motion and reduce creep. Dislocation slip through the Ni₃Al produces antiphase boundaries that are energetically expensive to form. The precipitates also impeded crack propagation through the material.

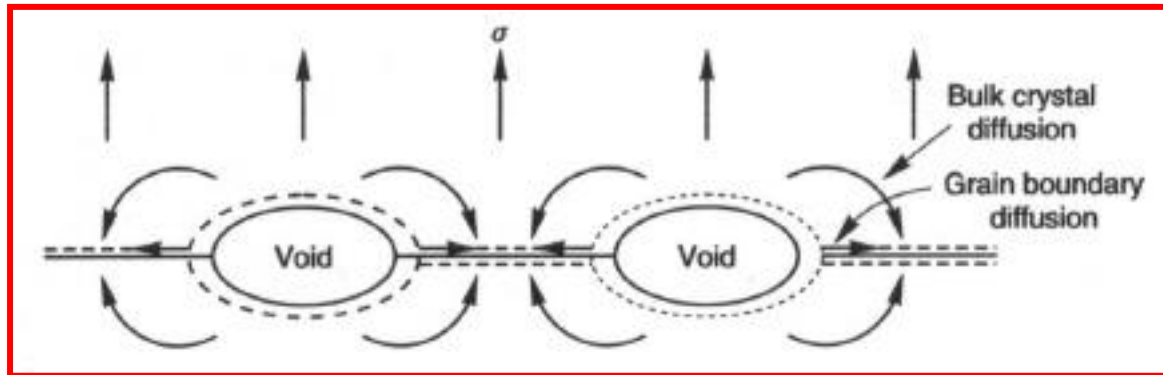
Παρεμπόδιση
κίνησης
εξαρμώσεων



Παρεμπόδιση
ανάπτυξης
μικρορωγμών

Μηχανισμός θραύσης ερπυσμού

- Κατά τη διάρκεια του ερπυσμού η ζημιά συσσωρεύεται υπό μορφή εσωτερικών κενών
- Τα κενά εμφανίζονται στα όρια των κόκκων κάθετα στη εφελκυστική τάση.
- Τα άτομα διαχέονται από τα κενά στα όρια των κόκκων και τα κενά μεγαλώνουν.
- Τα κενά μεγαλώνουν με γοργούς ρυθμούς μέχρι να συνενωθούν και να οδηγήσουν σε θραύση ερπυσμού.

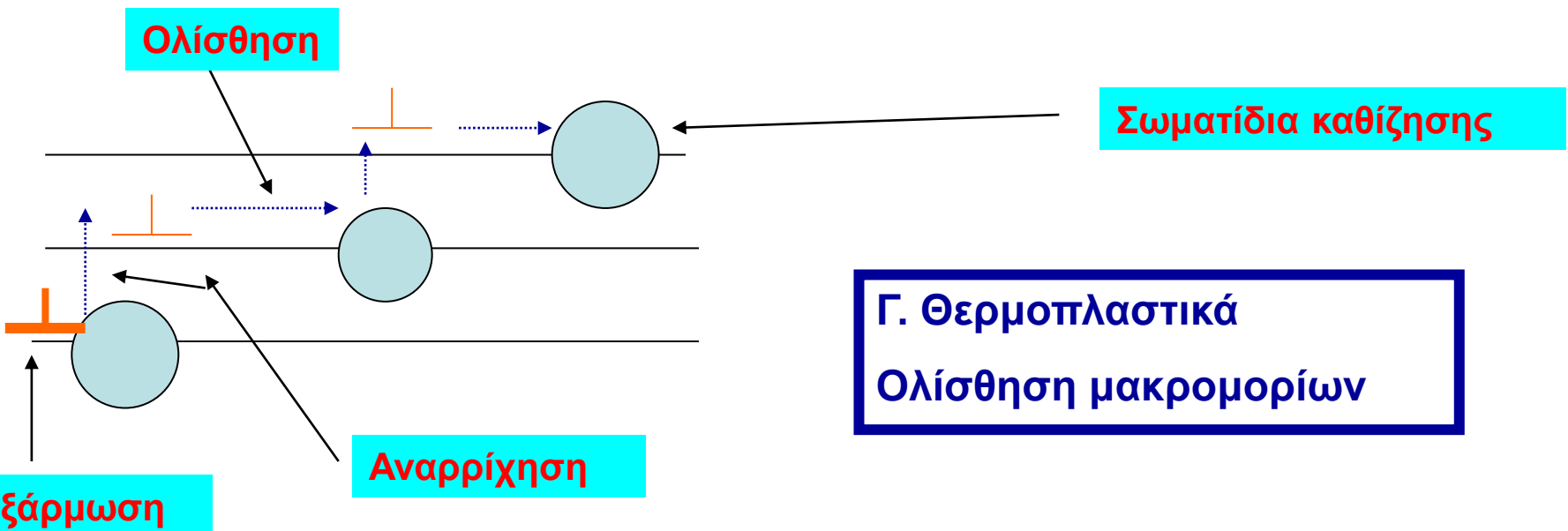


Μηχανισμός ερπυσμού

A: Μέταλλα (Συνήθως)

Πρώτο στάδιο: Ολίσθηση εξαρμώσεων

Δεύτερο στάδιο: Ολίσθηση και αναρρίχηση εξαρμώσεων (Αλλαγή επιπέδου ολίσθησης)



Γ. Θερμοπλαστικά
Ολίσθηση μακρομορίων

Β: Κεραμικά : Μετακίνηση ορίων
κρυσταλλικών κόκκων-Αλλαγή διαστάσεων
κρυσταλλικών κόκκων. «Μηχανισμός
διάχυσης»

Σχεδιασμός μηχανολογικών κατασκευών(εξαρτημάτων) για αντοχή σε ερπυσμό

Η ταχύτητα ερπυσμού εξαρτάται από :

A) Το μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης

B) Την αυτοδιάχυση των ατόμων η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία T/T_m

Γ) από το μέγεθος των κόκκων

- Βασικό κριτήριο επιλογής , το υψηλό σημείο τήξεως
- Αύξηση του μεγέθους των κόκκων υπό προϋποθέσεις (μονοκρυσταλλικά)
- Παρεμπόδισης της ολίσθησης των ορίων των κόκκων
- Σκλήρυνση με δημιουργία κράματος ή με καθίζηση και διασπορά λεπτών σωματιδίων για την παρεμπόδιση ολίσθησης των εξαρμώσεων .
- Εσωτερική ψύξη για ελάττωση της θερμοκρασίας.

Σχεδιασμός μηχανολογικών κατασκευών(εξαρτημάτων) για αντοχή σε ερπυσμό

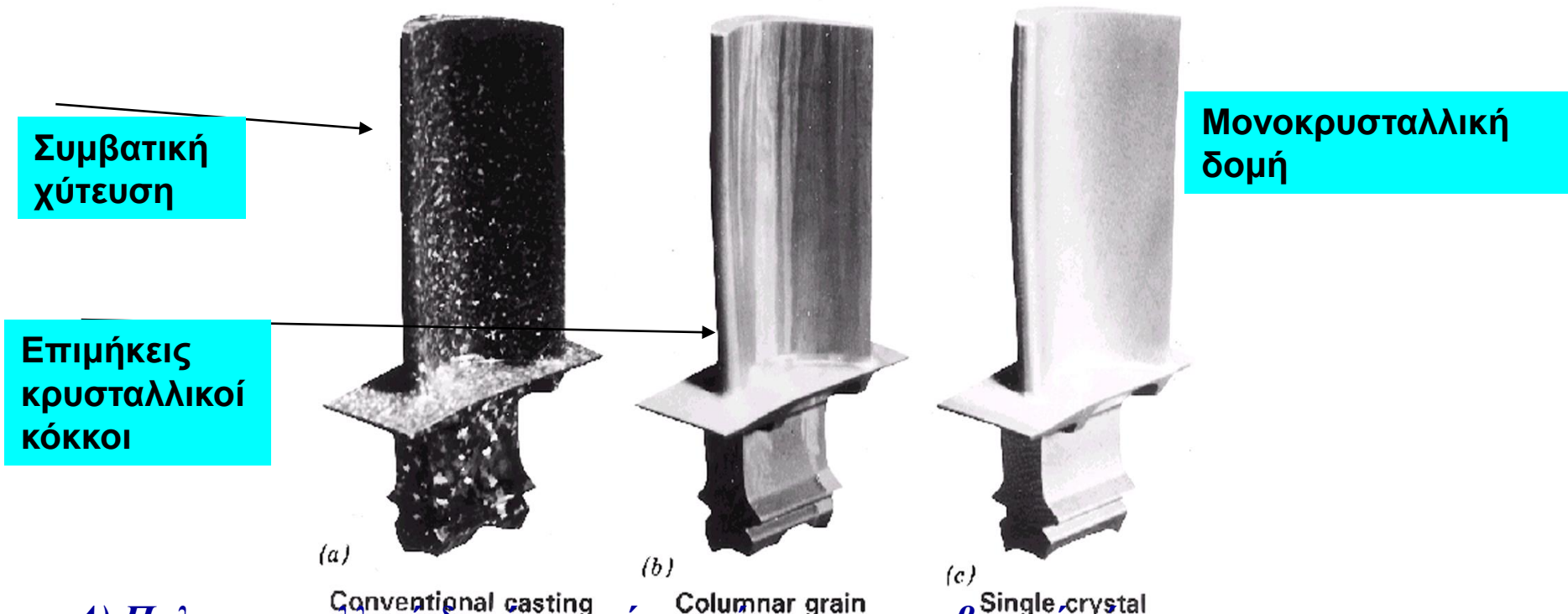
Ενίσχυση των σύνθετων υλικών για παρεμπόδιση ροής μάζας /κίνησης των εξαρμώσεων

Πολυμερή:Επιδιώκεται αύξηση του ιξώδους η οποία έχει ως συνέπεια της μείωση της ταχύτητας ερπυσμού. Επιτυγχάνεται με:

Προσθήκη πληρωτικών υλικών «σωματίδια Γυαλιού, σίλικα, ίνες άνθρακα γυαλιού κλπ-Αύξηση του Μοριακού βάρους- Αύξηση της δικτύωσης των μορίων- Κρυσταλλικότητα

Κράματα για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες

Alloys for high temperature use



A) Πολυκρυσταλλική δομή η οποία προέκυψε με συμβατική χύτευση

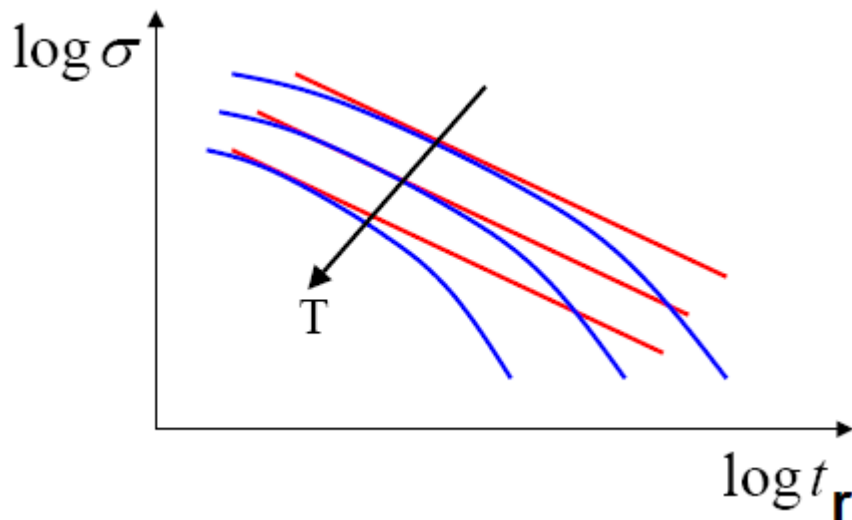
B) Βελτίωση της αντοχής σε ερπυσμό λόγω χύτευσης με κατάλληλη τεχνική ώστε το εξάρτημα να έχει επιμήκεις κρυσταλλικούς κόκκους προσανατολισμένους κατά μήκος της μεγάλης διάστασης του εξαρτήματος.

Γ) Μέγιστη αντοχή λόγω της μονοκρυσταλλικής δομής

Χρόνος ρήξης ή διάρρηξης Rupture time

Είναι αντιστρόφως ανάλογος της ταχύτητας ερπυσμού

$$\ln \varepsilon_{II} = \ln \frac{a}{t_r} = -\frac{E_c}{RT} + g(\sigma)$$



Αλλαγή της κλίσης (δηλαδή της ταχύτητας ερπυσμού) λόγω αλλαγής του μηχανισμού ερπυσμού

Επιτάχυνση της δοκιμασίας ερπυσμού

- Η διαδικασία ερπυσμού τις περισσότερες φορές είναι μια αργή και εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία
- Οι δοκιμασίες (test) ερπυσμού όταν προσομοιάζουν τις πραγματικές συνθήκες απαιτούν εξαιρετικά μεγάλους χρόνους.
- Η επιτάχυνση της δοκιμασίας(test) με τη βοήθεια διαθέσιμων μαθηματικών μοντέλων να προβάλλουμε αποτελέσματα που λήφθηκαν από δοκιμασίες σε υψηλές θερμοκρασίες δηλαδή σε μεγάλες ταχύτητες ερπυσμού)σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (μικρότερες ταχύτητες ερπυσμού).

- Μια από τις τρεις γνωστές μεθόδους που θα χρησιμοποιήσουμε είναι μέθοδος LARSON MILLER
- Για σταθερή τάση η παράμετρος LARSON MILLER (LM) είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία

Μέθοδος προβολής των αποτελεσμάτων Extrapolating results method-Μέθοδος Larson- Miller

Βασίζεται στη σχέση:

$$\ln \varepsilon_{II} = -\frac{E_c}{RT} + g(\sigma)$$

όπου $g(\sigma)$ συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης, E_c ενέργεια ενεργοποίησης. Ο χρόνος ρήξης t_r είναι αντιστρόφως ανάλογος της ταχύτητας ερπυσμού ε_{II} . ($t_r = a / \varepsilon_{II}$)

Η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\text{ή} \quad T[\ln t_r - \ln a + g(\sigma)] = \frac{E_c}{R}$$

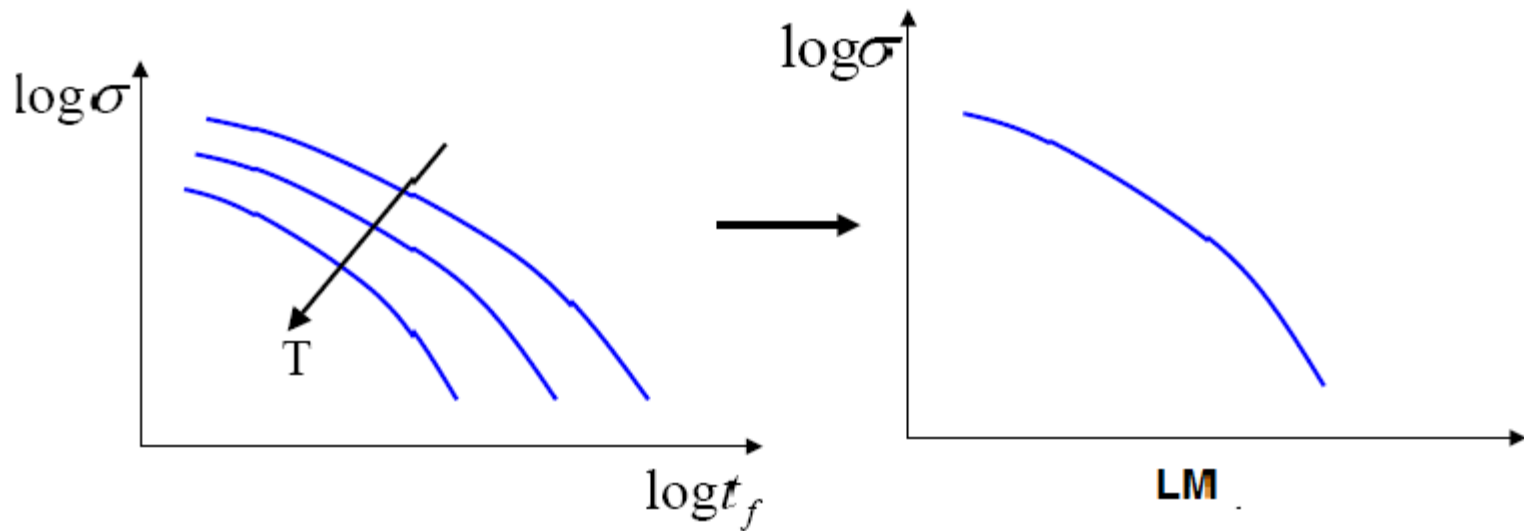
$$LM = T(\log t_r + Q)$$

Όπου

Q: Εμπειρική σταθερά = 20 για τα περισσότερα μέταλλα, t_r : Ο χρόνος ρήξης σε ώρες (h), παράμετρος LM.

Διάγραμμα Larson-Miller

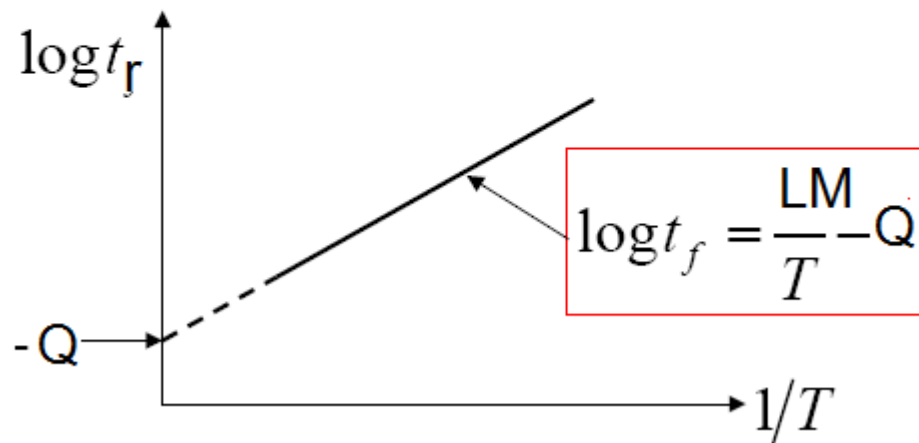
Προβάλλει ή προεκβάλλει αποτελέσματα ερπυσμού από υψηλές θερμοκρασίες σε χαμηλές θερμοκρασίες



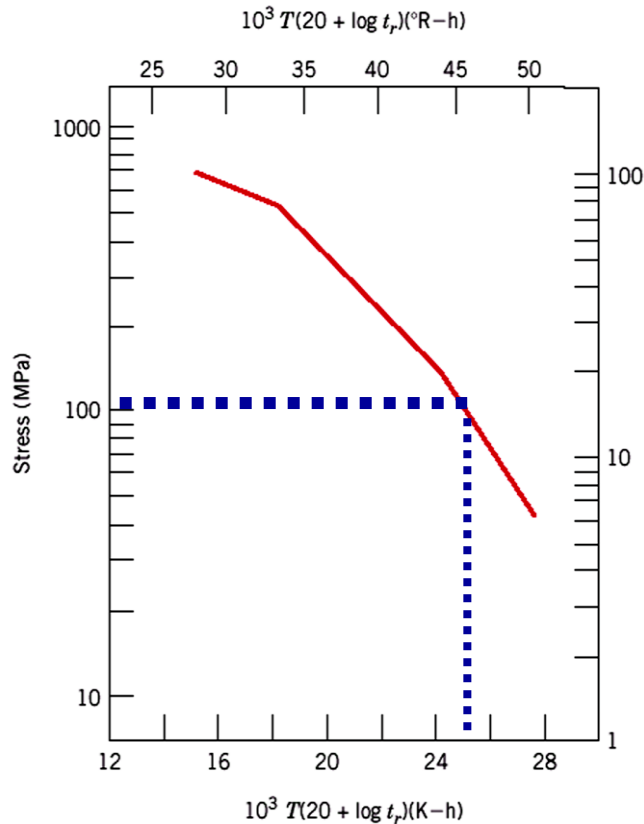
Υπολογισμός σταθεράς C LARSON MILLER

Υπολογίζουμε το χρόνο ρήξης σε δυο διαφορετικές θερμοκρασίες και προχωρούμε σε υπολογισμό όπως παρακάτω:

$$Q = \frac{T_2 \log t_2 - T_1 \log t_1}{T_1 - T_2}$$



Διαδικασία μεθόδου Larson - Miller



A) Πραγματοποιούνται πειράματα σε ορισμένες θερμοκρασίες

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε διάγραμμα τάσης - χρόνου « σ -tr» ή καταρτίζεται πίνακας

τιμών « σ -tr»

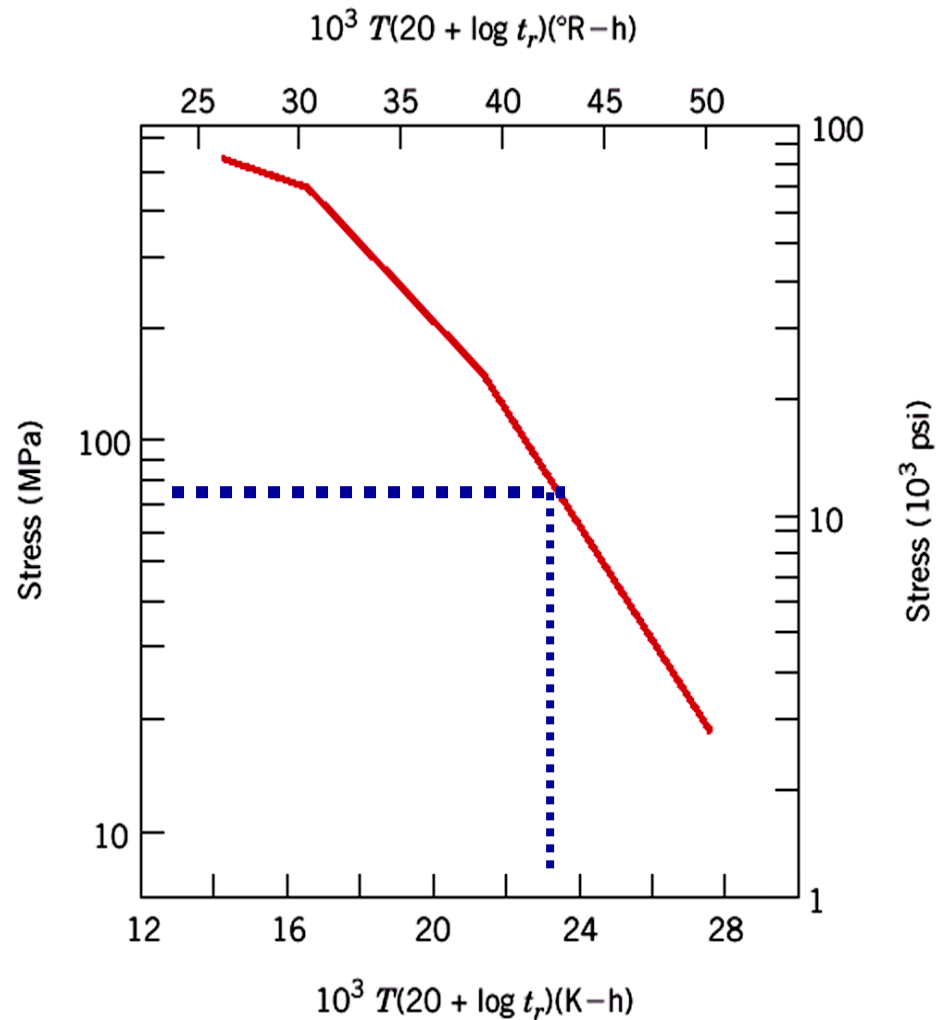
B) Από τα δεδομένα των πειραμάτων κατασκευάζεται διάγραμμα LM- σ

Γ) Υπολογισμός: Έστω ότι ζητείται να υπολογίσουμε το χρόνο ζωής τα στους $600^{\circ}C$ και τάση 100 Mpa

Από το διάγραμμα υπολογίζω την παράμετρο LM . Και από τον αντίστοιχο τύπο το χρόνο ρήξης tr στους $600^{\circ}C$

Παράδειγμα

Για ένα ανοξείδωτο χάλυβα 18-8 να προσδιορίσετε τον χρόνο ρήξης (θραύσης) ενός εξαρτήματος το οποίο υποβάλλεται σε τάση 80 Mpa στους 700 °C (973K)



Διάγραμμα λογαρίθμου της τάσης ως προς την σταθερά Larson Miller

Λύση

Από το διάγραμμα που δίνεται η παράμετρος LM είναι $23,5 \cdot 10^3$

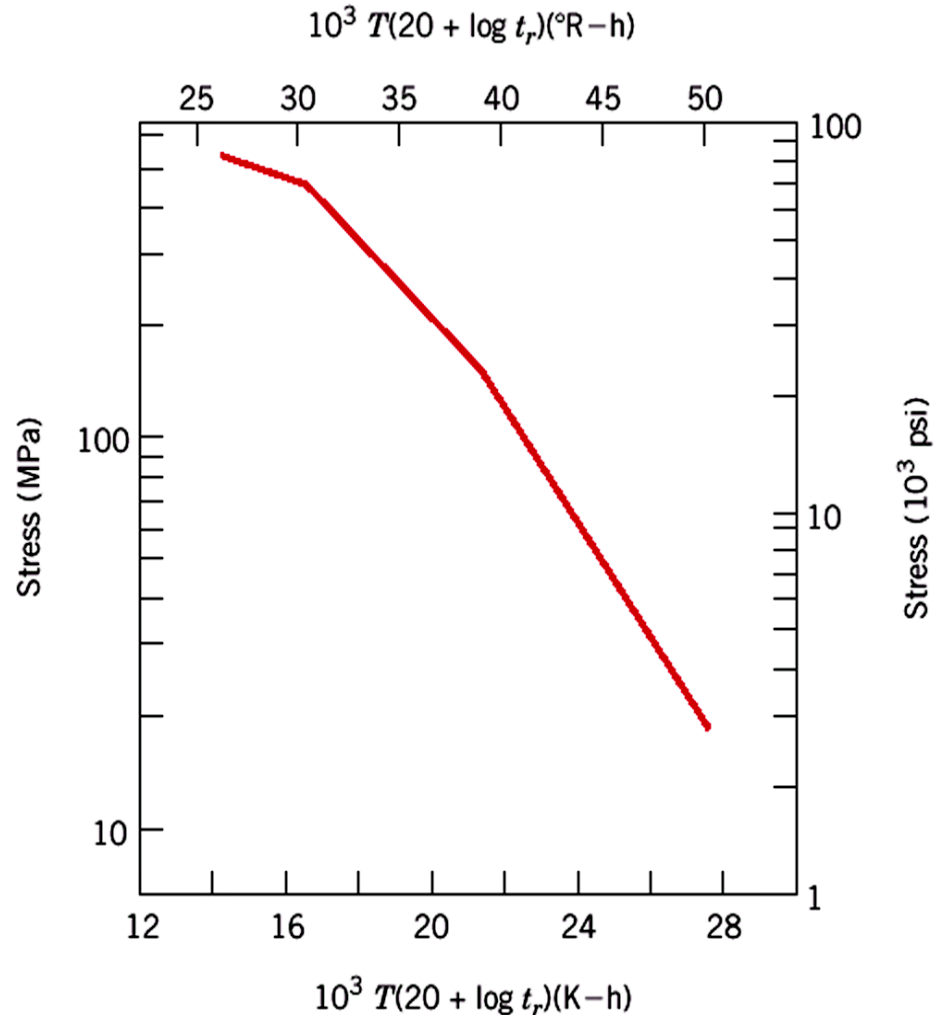
για την T σε K και την t_r σε h.

Από τον τύπο της LM υπολογίζουμε το χρόνο ρήξης:

$$t_r = 1,42 \cdot 10^4 \text{ h} = 1,6 \text{ yr}$$

Παράδειγμα

Για ένα ανοξείδωτο χάλυβα 18-8 που εκτίθεται σε θερμοκρασία 500 °C ποιο είναι το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο τάσης για χρόνο ζωής (α) 5 έτη (β) 20 έτη



Διάγραμμα λογαρίθμου της τάσης ως προς την σταθερά Larson Miller