

Αστοχία



Περιέχει περιεχόμενο και υλικό από τα συγγράμματα:

Callister W. D., Rethwisch D. G. Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 10η Έκδοση, Εκδ. Α. Τζιόλα & Υιοί, 2022

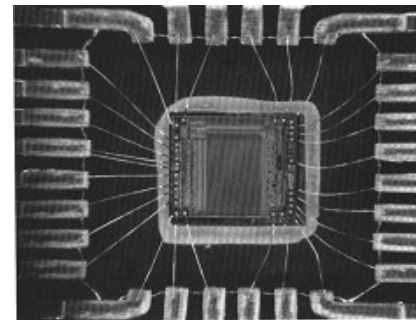
Β. Ζασπάλης, Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 2η Έκδοση, Εκδ. Α. Τζιόλα & Υιοί, 2020

- Πώς σχηματίζονται οι ρωγμές που οδηγούν σε αστοχία;
- Πώς ποσοτικοποιείται η αντίσταση σε θραύση; Πώς διαφοροποιείται ανάλογα με την κατηγοριών υλικών;
- Πώς υπολογίζεται η τάση θραύσης;
- Ρυθμός φόρτισης, ιστορικό φόρτισης και θερμοκρασία: Πώς επηρεάζουν τη συμπεριφορά αστοχίας των υλικών;



Neal Boenzi/New York Times Pictures/Redux Pictures

Πλοίο: κυκλική φόρτιση από κύματα.



Chip υπολογιστή: κυκλική θερμική φόρτιση.



Εμφύτευμα ισχίου: κυκλική φόρτιση από βάδιση.



Γιατί μελετάμε την αστοχία των υλικών;

Κατά τον σχεδιασμό μιας κατασκευής ή ενός εξαρτήματος ο μηχανικός καλείται να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα αστοχίας. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τους μηχανισμούς των διαφόρων τύπων αστοχίας, δηλαδή, τη **θραύση**, την **κόπωση** και τον **ερπυσμό**, και ακόμα περισσότερο να εξοικειωθούμε με τις κατάλληλες αρχές σχεδιασμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αποτραπεί αστοχία κατά την διάρκεια «λειτουργίας» των υλικών.

Που οφείλεται;

Συνήθη αίτια είναι η ακατάλληλη επιλογή υλικών, ακατάλληλη κατεργασία υλικών, ανεπαρκής σχεδιασμός των εξαρτημάτων και κακή χρήση.

ΘΡΑΥΣΗ

Μηχανισμοί θραύσης

- Όλκιμη θραύση
 - Συνοδεύεται από σημαντικό βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης
- Ψαθυρή θραύση
 - Ελάχιστη ή καθόλου πλαστική παραμόρφωση
 - Καταστροφική

Όλκιμη έναντι ψαθυρής θραύσης

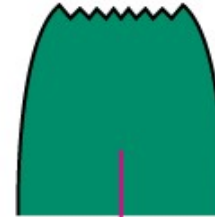
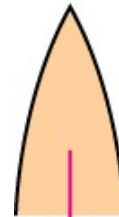
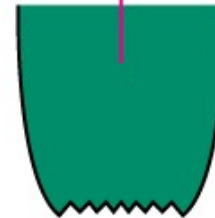
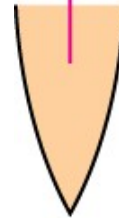
- Κατηγοριοποίηση:

Συμπεριφορά
θραύσης

Πολύ
όλκιμη

Μετρίως
όλκιμη

Ψαθυρή



%AR ή %EL

μεγάλο

μέτριο

μικρό

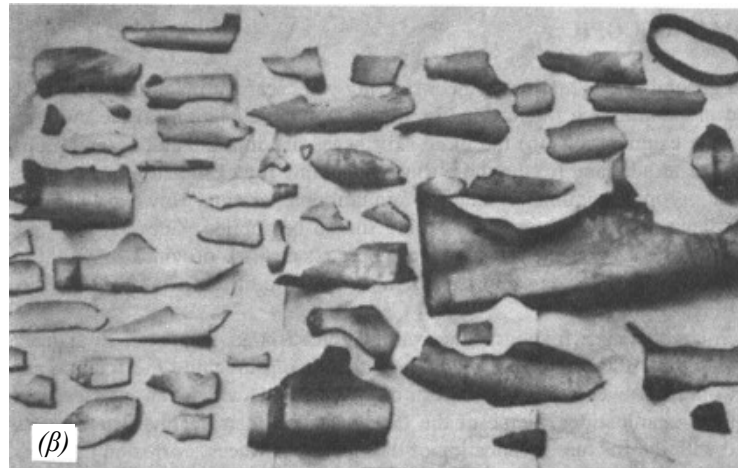
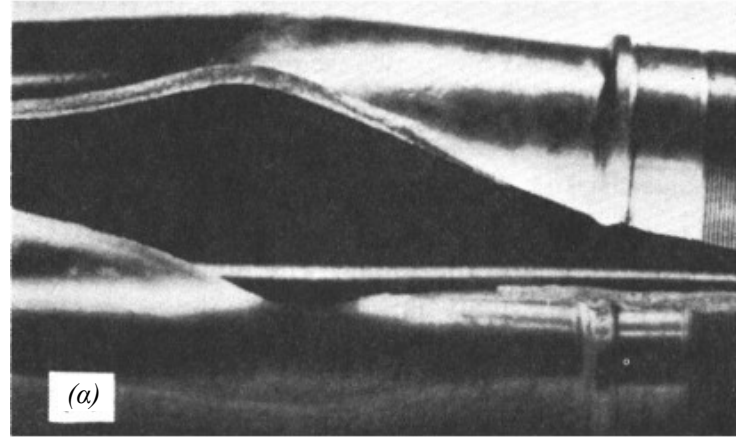
- Η όλκιμη θραύση είναι συνήθως πιο επιθυμητή από την ψαθυρή!

Όλκιμη:
“προειδοποίηση”
πριν από τη θραύση

Ψαθυρή:
θραύση χωρίς
προειδοποίηση

Παράδειγμα: Αστοχίες σωλήνων

- Αστοχία με **όλκιμο** τρόπο:
 - ένα κομμάτι
 - μεγάλη παραμόρφωση
- Αστοχία με **ψαθυρό** τρόπο:
 - πολλά κομμάτια
 - μικρές παραμορφώσεις



Σχήματα από V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Σχ. 4.1(α) και (β), p. 66 John Wiley and Sons, Inc., 1987. Χρησιμοποιείται με άδεια.

Αστοχία: Μετρίως όλκιμη θραύση

- Στάδια αστοχίας:

σχηματισμός
λαιμού



σχηματισμός
μικροκενών



ανάπτυξη και
συνένωση
μικροκενών



διάτμηση στην
επιφάνεια

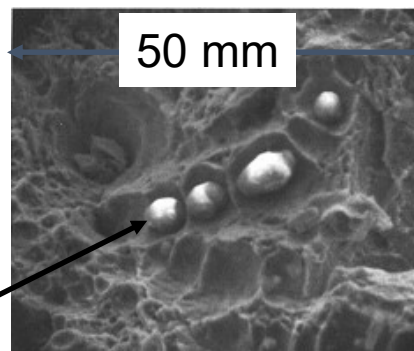


θραύση

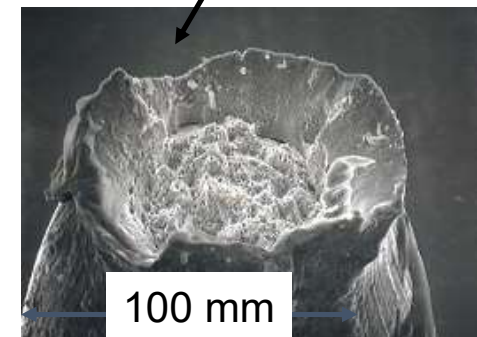


- Προκύπτουσες
επιφάνειες
θραύσης
(χάλυβας)

σωματίδια:
πυρήνες
σχηματισμού
μικροκενών



Από V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Σχ. 11.28, p. 294, John Wiley and Sons, Inc., 1987. (Αρχική πηγή: P. Thornton, *J. Mater. Sci.*, Vol. 6, 1971, pp. 347-56.)



Επιφάνεια θράυσης μετά από φόρτιση σε εφελκυσμό.
Πηγή: F. Roehrig, CC Technologies, Dublin, OH.
Χρησιμοποιείται με άδεια.

Μετρίως όλκιμη έναντι ψαθυρήs θραύσης



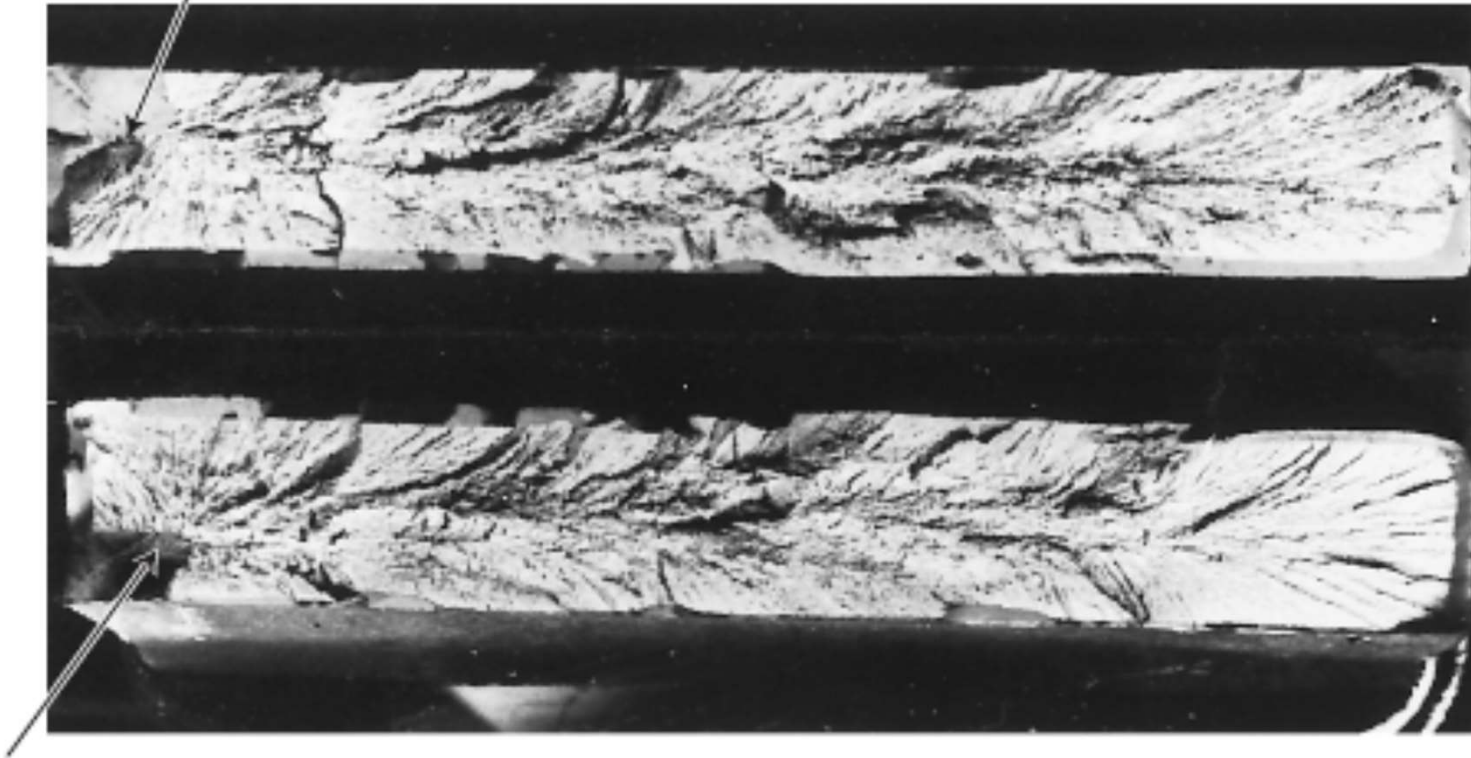
θραύση τύπου κυπέλλου-κώνου



ψαθυρή θραύση

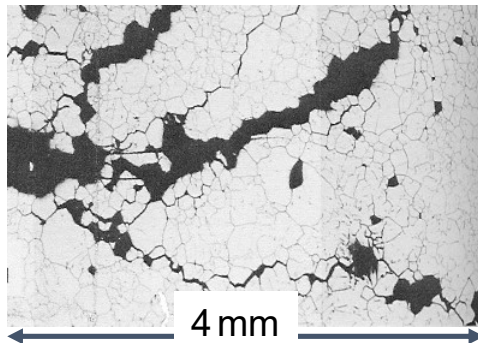
Αστοχία με ψαθυρή θραύση

Τα βέλη υποδεικνύουν το σημείο έναρξης της αστοχίας



Επιφάνειες ψαθυρής θραύσης

- Περικρυσταλλική
(μεταξύ κόκκων)



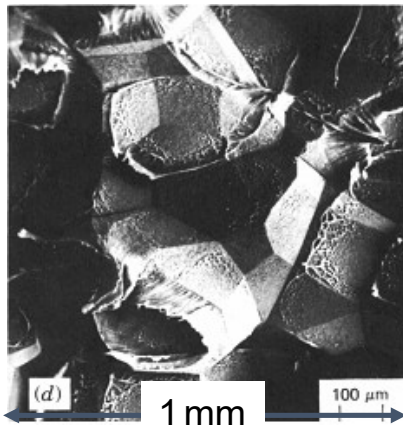
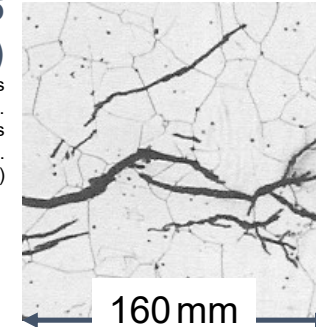
Αν. χάλυβας 304
(μέταλλο)

Αναπαράγεται με άδεια
από "Metals Handbook",
9th ed, Σχ. 633, p. 650.
© 1985, ASM International, Materials
Park, OH. (Μικροφωτογραφία:
J.R. Keiser and A.R. Olsen,
Oak Ridge National Lab.)

- Ενδοκρυσταλλική
(διαμέσου των κόκκων)

Αν. χάλυβας 316
(μέταλλο)

Αναπαράγεται με άδεια από "Metals
Handbook", 9th ed, Σχ. 650, p. 357.
© 1985, ASM International, Materials
Park, OH. (Μικροφωτογραφία: D.R.
Diercks, Argonne National Lab.)

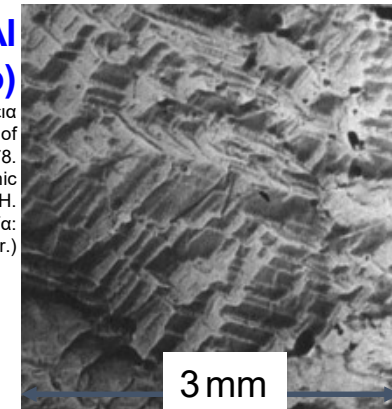


πολυπροπυλένιο
(πολυμερές)

Αναπαράγεται με άδεια
από R.W. Hertzberg,
"Deformation and Fracture Mechanics
of Engineering Materials", (4th ed.)
Σχ. 7.35(δ), p. 303,
John Wiley and Sons,
Inc., 1996.

Οξείδιο Al
(κεραμικό)

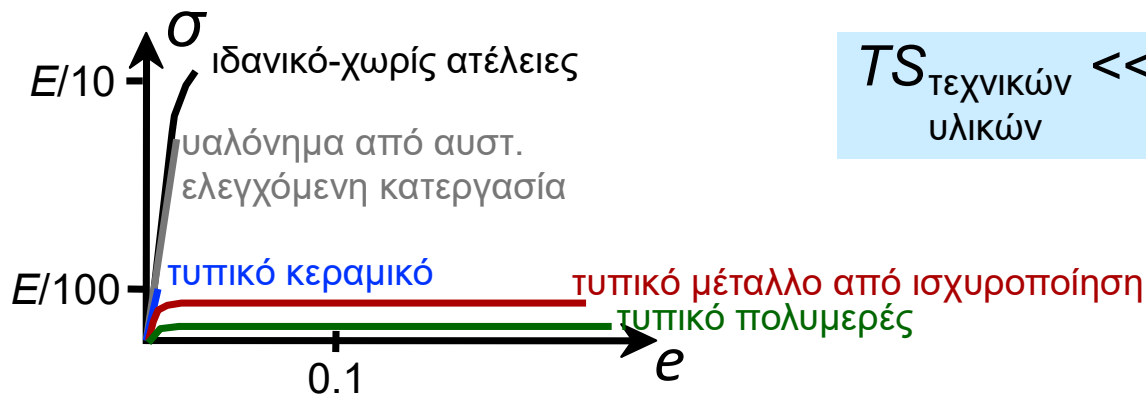
Αναπαράγεται με άδεια
από "Failure Analysis of
Brittle Materials", p. 78.
© 1990, American CerTheamic
Society, Westerville, OH.
(Μικροφωτογραφία:
R.M. Gruver and H. Kirchner.)



(Αρχική πηγή: K. Friedrich, *Fracture* 1977, Vol. 3, ICF4,
Waterloo, CA, 1977, p. 1119.)

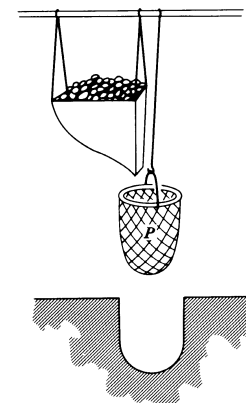
Ιδανικά έναντι πραγματικών υλικών

- Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης ($T_{\delta\omega\mu\alpha\tau\acute{\iota}\omicron\upsilon}$):



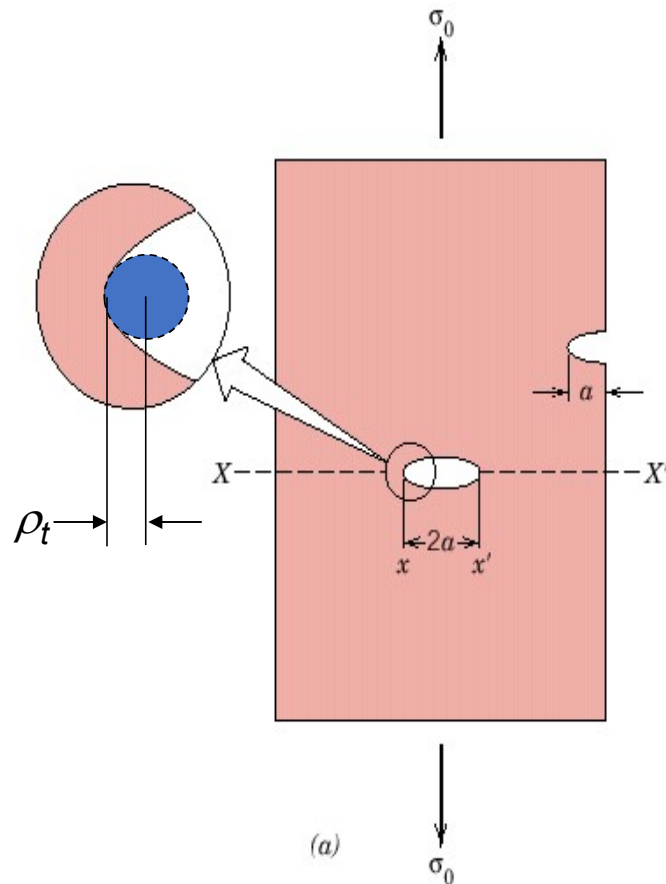
$$TS_{\text{τεχνικών υλικών}} \ll TS_{\text{ιδανικών υλικών}}$$

- (500 χρόνια πριν!) ο DaVinci παρατήρησε ότι...
 - όσο αυξάνεται το μήκος ενός σύρματος, τόσο μειώνεται το φορτίο αστοχίας.
- Αίτια:
 - οι ατέλειες προκαλούν πρόωγη αστοχία.
 - μεγαλύτερα τεμάχια περιέχουν μεγαλύτερες ατέλειες!



Αναπαράγεται με άδεια από
R.W. Hertzberg, "Deformation
and Fracture Mechanics of
Engineering Materials", (4th ed.)
Σχ. 7.4. John Wiley and Sons,
Inc., 1996.

Οι ατέλειες είναι θέσεις συγκέντρωσης τάσεων!



- Ρωγμή τύπου Griffith

$$\sigma_m = 2\sigma_o \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2} = K_t \sigma_o$$

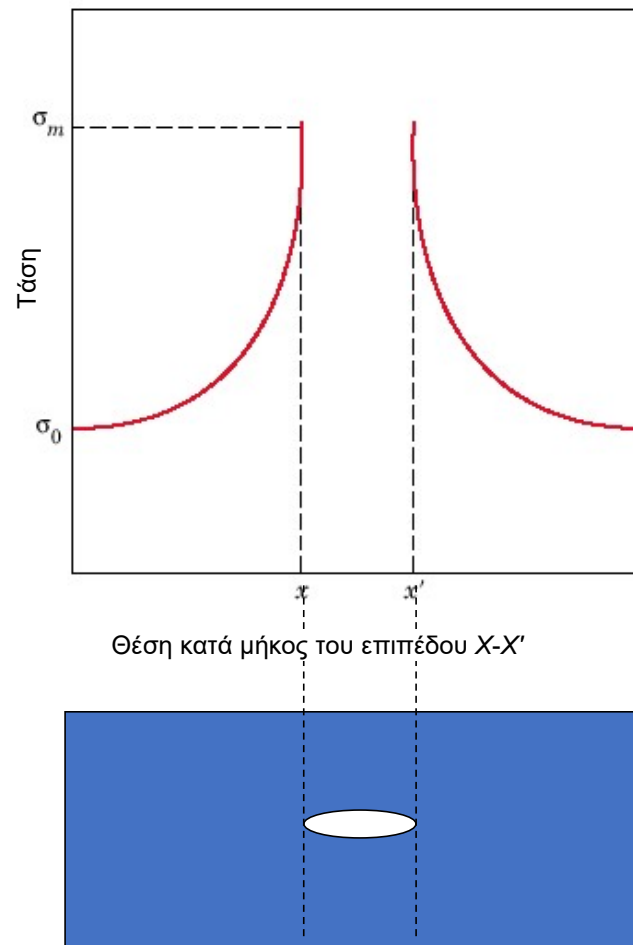
όπου

ρ_t = ακτίνα καμπυλότητας

σ_o = εφαρμοζόμενη τάση

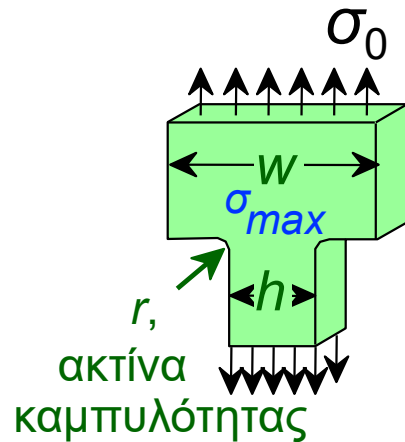
σ_m = τάση στην αιχμή
της ρωγμής

Συγκέντρωση τάσεων σε αιχμή ρωγμής

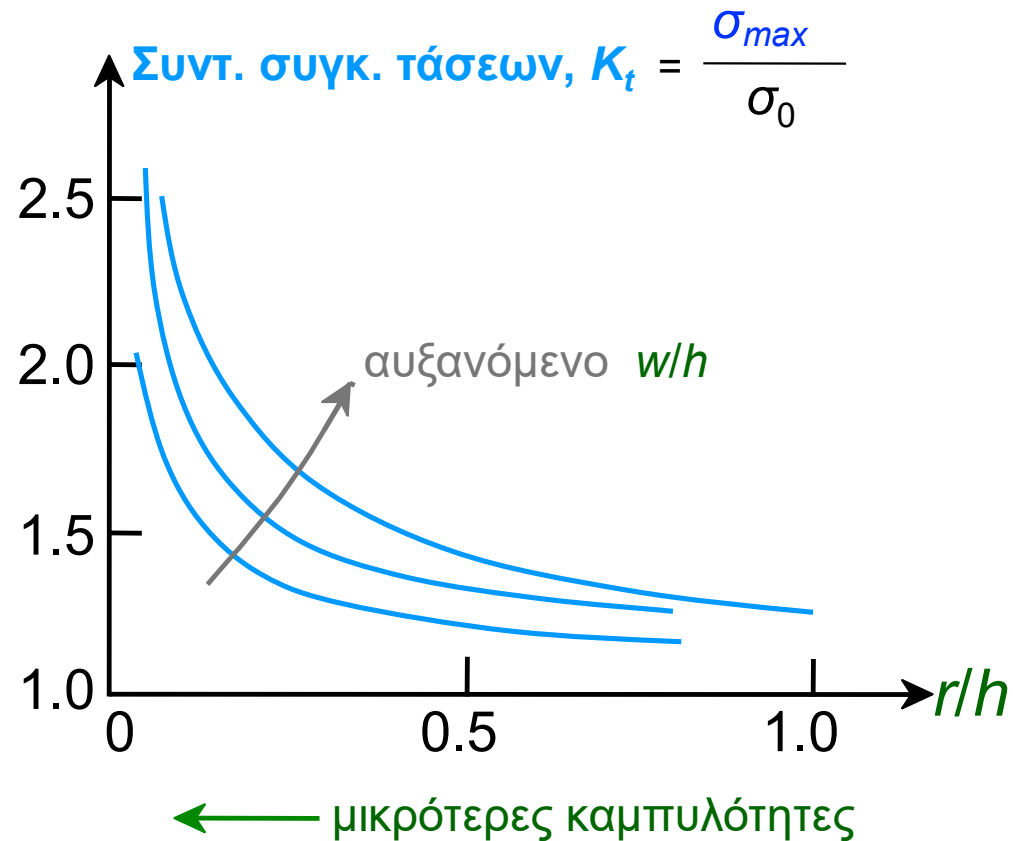


Σχεδιασμός για αποφυγή αστοχίας

- Να αποφεύγονται οι αιχμηρές γωνίες!



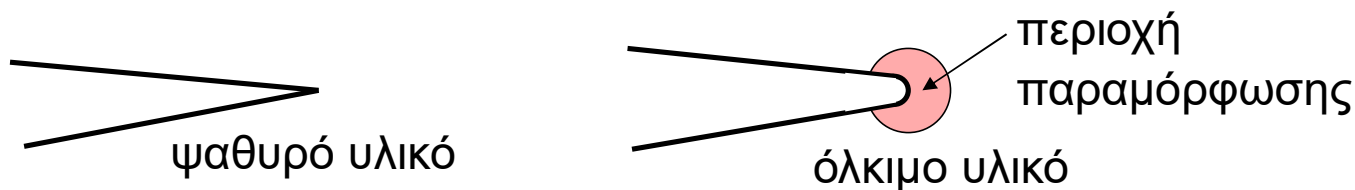
Διασκευή από Σχ. 8.2W(γ),
Callister 6e.
(Πηγή: G.H. Neugebauer, *Prod. Eng.* (NY), Vol. 14, pp. 82-87
1943.)



Διάδοση ρωγμών

Οι ρωγμές με αιχμηρές απολήξεις διαδίδονται ευκολότερα απ' ό,τι οι ρωγμές με αμβλείες απολήξεις.

- Η παραμόρφωση που υφίσταται ένα πλαστικό υλικό στην απόληξη ρωγμής, πρακτικά “αμβλύνει” τη ρωγμή.



Ενεργειακό "ισοζύγιο" στη ρωγμή

- Ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης
 - ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα υλικό καθώς αυτό παραμορφώνεται ελαστικά
 - αυτή η ενέργεια ελευθερώνεται όταν διαδίδεται μία ρωγμή
 - απαιτείται ενέργεια για τη δημιουργία νέων επιφανειών

Κριτήριο για διάδοση ρωγμής

Μία ρωγμή διαδίδεται εάν η τάση στην αιχμή της (σ_m) υπερβεί μία **κρίσιμη τάση** (σ_c)

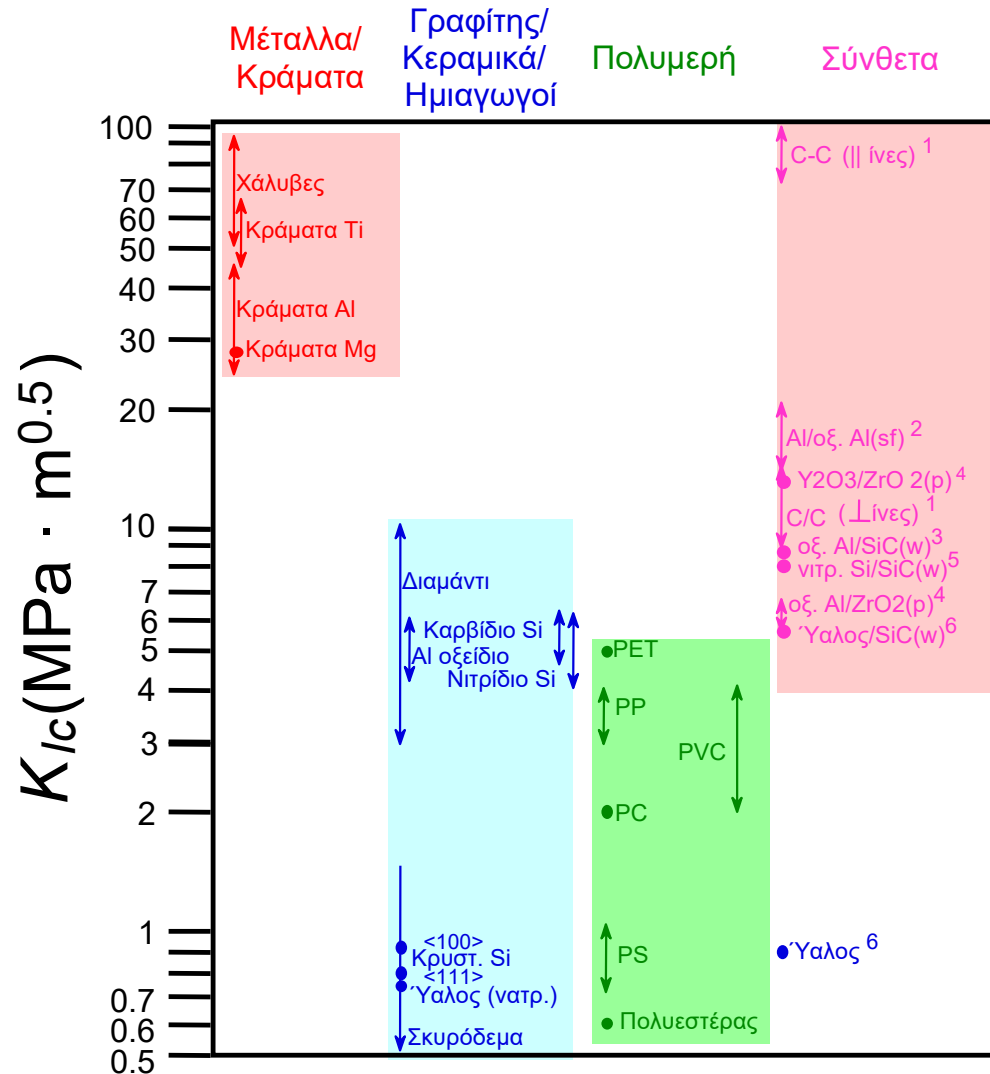
$$\text{δηλ.}, \sigma_m > \sigma_c \quad \sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

όπου

- E = μέτρο ελαστικότητας
- γ_s = ειδική ενέργεια επιφάνειας
- a = 1/2(μήκους εσωτερικής ρωγμής)

Για όλκιμα υλικά => αντικατάσταση του γ_s με $\gamma_s + \gamma_p$
όπου γ_p η ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης

Δυσθραυστότητα ανά κατηγορία υλικών



Γεωμετρία ενίσχυσης σύνθετων:

f = ίνες, sf = κοντές ίνες, w = τριχίτες,
p = σωματίδια.

Επιπλέον δεδομένα όπως δίνονται
(κλάσμα όγκου ενίσχυσης):

1. (55vol%) ASM Handbook, Vol. 21, ASM Int., Materials Park, OH (2001) p. 606.
2. (55 vol%) Πηγή: J. Cornie, MMC, Inc., Waltham, MA.
3. (30 vol%) P.F. Becher et al., *Fracture Mechanics of Ceramics*, Vol. 7, Plenum Press (1986). pp. 61-73.
4. Πηγή: CoorsTek, Golden, CO.
5. (30 vol%) S.T. Buljan et al., "Development of Ceramic Matrix Composites for Application in Technology for Advanced Engines Program", ORNL/Sub/85-22011/2, ORNL, 1992.
6. (20vol%) F.D. Gace et al., *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol. 7 (1986) pp. 978-82.

Σχεδιασμός για αποτροπή ανάπτυξης ρωγμών

K_c : δυσθραυστότητα (fracture toughness) – μέτρο της αντίστασης που προβάλλει ένα υλικό σε ψαθυρή θραύση όταν υφίσταται μια ρωγμή (Υ: εξαρτάται γεωμετρία ρωγμής και δοκιμίου)

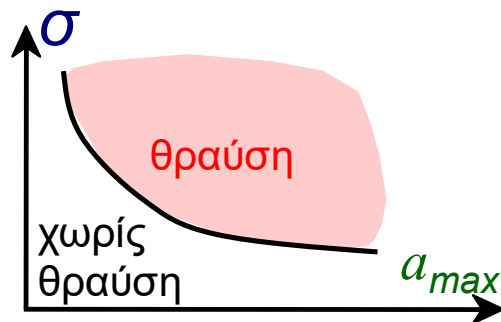
- Συνθήκη για ανάπτυξη ρωγμής:

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

- Οι μεγαλύτερου μήκους και οι δυσμενέστερα καταπονούμενες ρωγμές αναπτύσσονται πρώτες!

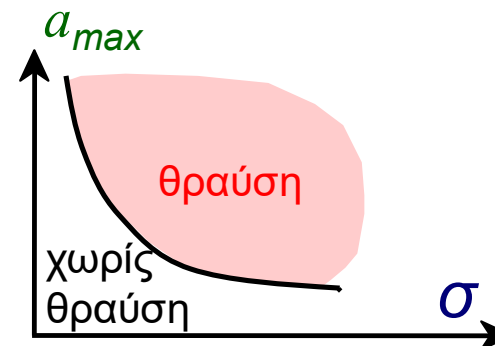
--Σενάριο 1: Το μέγιστο μέγεθος ατέλειας υπαγορεύει την τάση σχεδιασμού.

$$\sigma_{design} < \frac{K_c}{Y\sqrt{\pi a_{max}}}$$



--Σενάριο 2: Η τάση σχεδιασμού υπαγορεύει το μέγιστο μέγεθος ατέλειας.

$$a_{max} < \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{Y\sigma_{design}} \right)^2$$



Παράδειγμα σχεδιασμού: Πτέρυγα αεροσκάφους

- Υλικό με $K_{Ic} = 26 \text{ MPa-m}^{0.5}$
- Δύο σχεδιάσεις υπό εξέταση...

Σχεδίαση A

- μέγ. μέγεθος ατέλειας 9 mm
- τάση αστοχίας = 112 MPa

Σχεδίαση B

- χρήση ίδιου υλικού
- μέγ. μέγεθος ατέλειας 4 mm
- τάση αστοχίας = ?

- Υπολογισμός βάσει...

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{Y \sqrt{\pi a_{\max}}}$$

- Σημαντικό: τα Y και K_{Ic} είναι ίδια σε αμφότερες τις σχεδιάσεις.

$$\frac{K_{Ic}}{Y \sqrt{\pi}} = \sigma \sqrt{a} = \text{σταθερή}$$

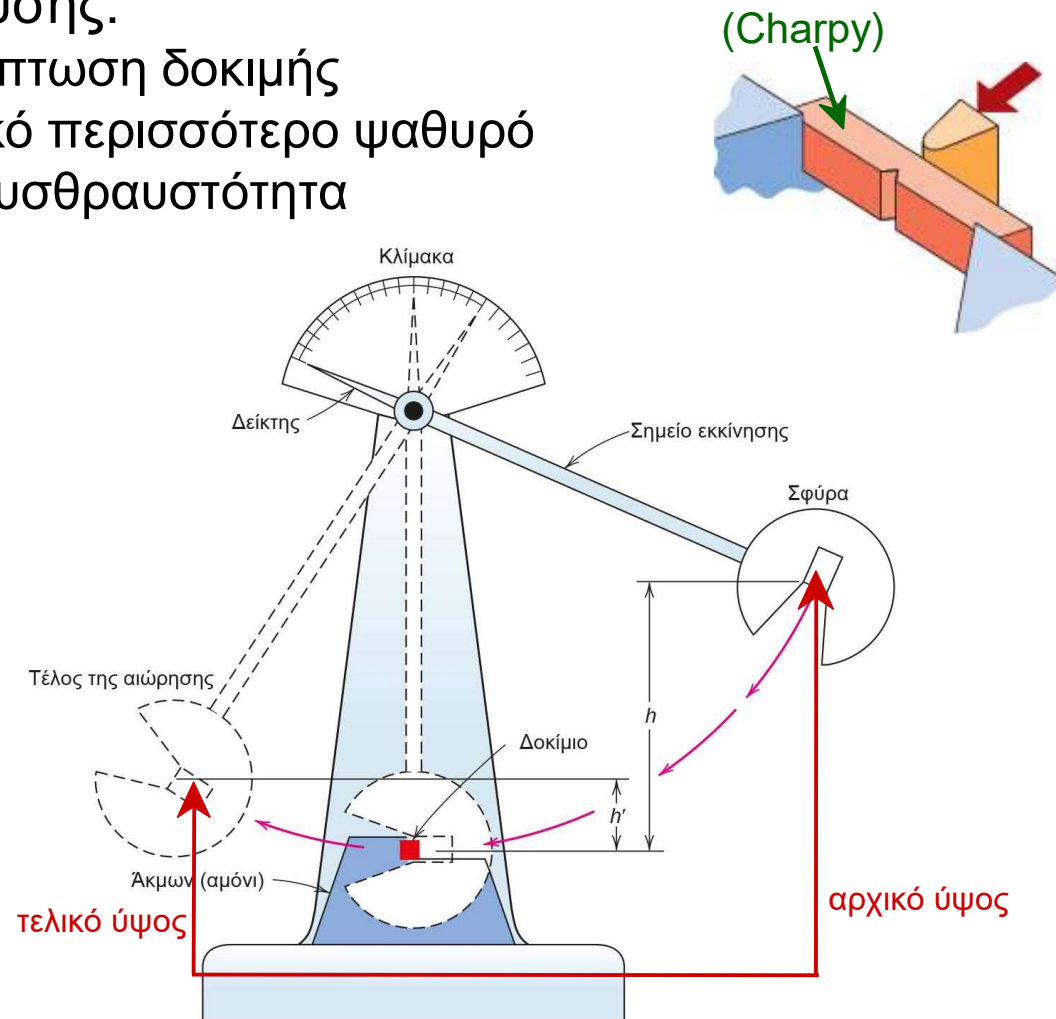
--Αποτέλεσμα:

$$\left(\overset{112 \text{ MPa}}{\sigma_c} \sqrt{\overset{9 \text{ mm}}{a_{\max}}} \right)_A = \left(\sigma_c \sqrt{\overset{4 \text{ mm}}{a_{\max}}} \right)_B$$

$$\text{Απάντηση: } (\sigma_c)_B = 168 \text{ MPa}$$

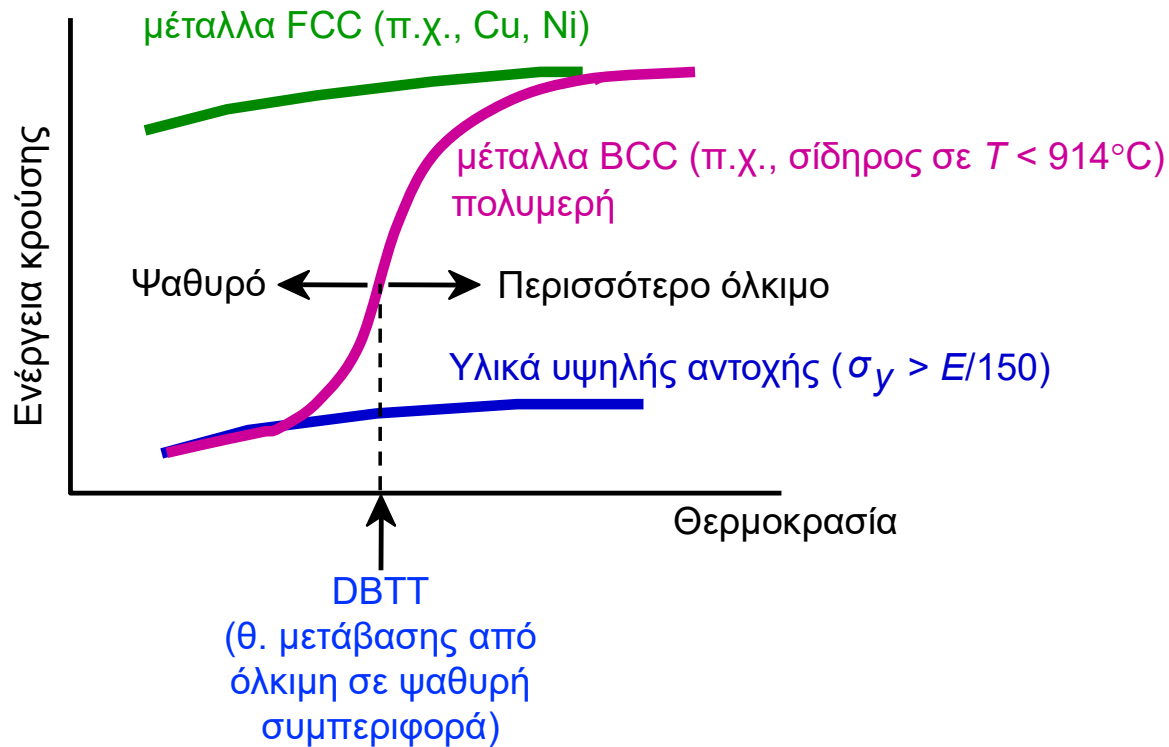
Δοκιμή κρούσης

- Φόρτιση κρούσης:
 - ακραία περίπτωση δοκιμής
 - κάνει το υλικό περισσότερο ψαθυρό
 - μειώνει τη δυσθραυστότητα



Επίδραση της θερμοκρασίας στην ενέργεια κρούσης

- Θερμοκρασία μετάβασης από όλκιμη σε ψαθυρή συμπεριφορά (ΘΜΟΨ ή DBTT)...



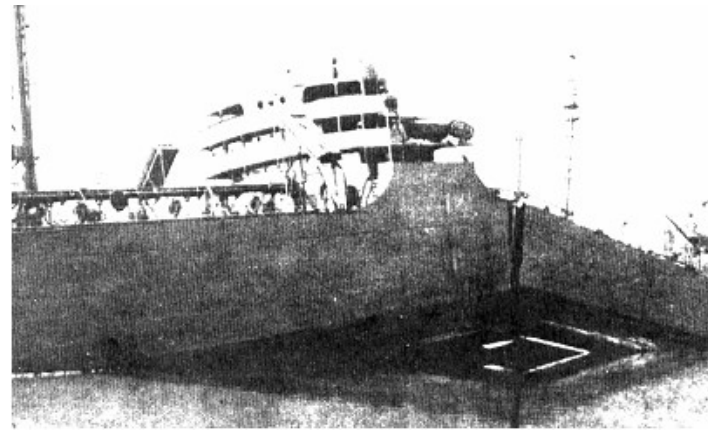
Στρατηγική σχεδιασμού: Μένουμε πάνω από τη DBTT!

- Προ WWII: Τιτανικός



Αναπαράγεται με άδεια από R.W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", (4th ed.) Σχ. 7.1(α), p. 262, John Wiley and Sons, Inc., 1996. (Αρχ. Πηγή: Dr. Robert D. Ballard, *The Discovery of the Titanic*.)

- WWII: Φορτηγά πλοία Liberty



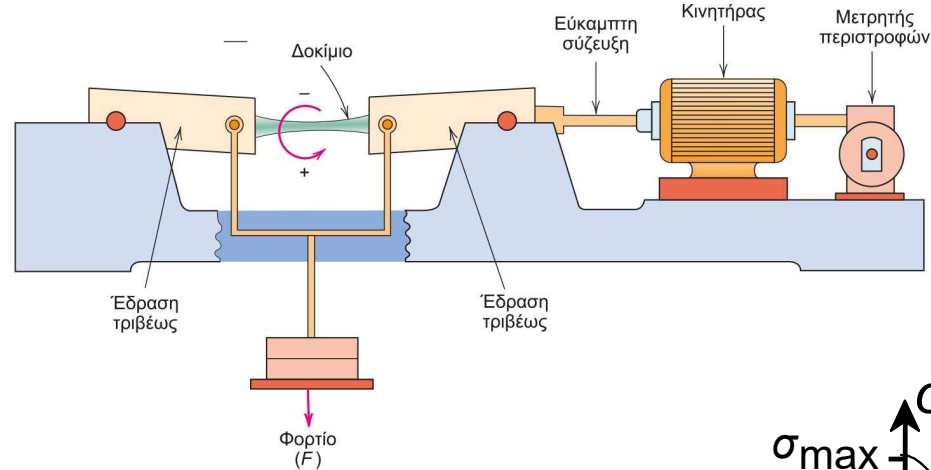
Αναπαράγεται με άδεια από R.W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", (4th ed.) Σχ. 7.1(β), p. 262, John Wiley and Sons, Inc., 1996. (Αρχ. Πηγή: Earl R. Parker, "Behavior of Engineering Structures", Nat. Acad. Sci., Nat. Res. Council, John Wiley and Sons, Inc., NY, 1957.)

- **Πρόβλημα:** Χρησιμοποιούνταν χάλυβες με DBTT οριακά κάτω από την $T_{\text{δωματίου}}$

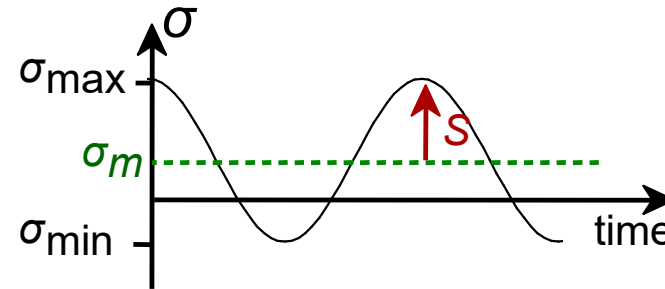
ΚΟΠΩΣΗ

Κόπωση

- **Κόπωση** = αστοχία υπό εφαρμοζόμενη κυκλική τάση.

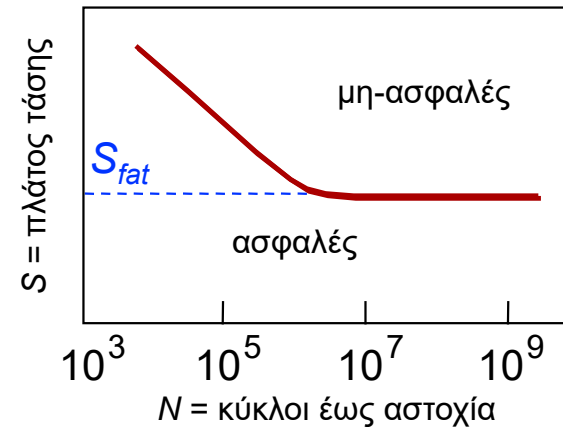


- Η τάση ως χρονικά κυμαινόμενο μέγεθος.
 - Βασικές παράμετροι: S , σ_m , και συχνότητα κύκλων φόρτισης
- Σημαντικό! Η κόπωση...
 - μπορεί να προκαλέσει αστοχία ενός μέλους ακόμα κι αν $\sigma_{\max} < \sigma_y$.
 - υπεύθυνη για ~90% των αστοχιών σε μηχανικές δομές.



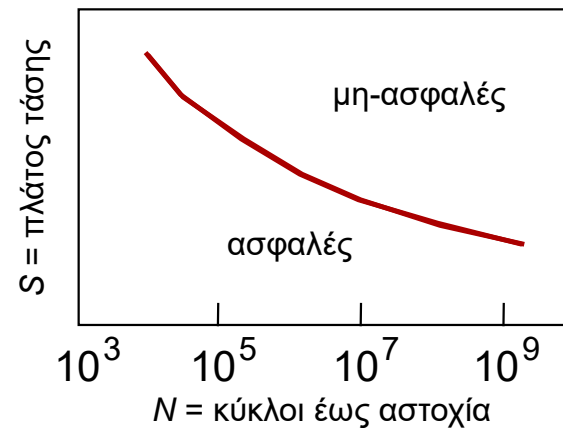
Συμπεριφορές κόπωσης

- Όριο κόπωσης, S_{fat} :
--δεν υφίσταται κόπωση
εάν $S < S_{fat}$



Περίπτωση για
χάλυβα (τυπ.)

- Για ορισμένα υλικά,
δεν υπάρχει όριο
κόπωσης!



περίπτωση
για Al (τυπ.)

Ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής κόπωσης

- Μία ρωγμή κόπωσης αναπτύσσεται *αυξητικά* (βαθμιαία)

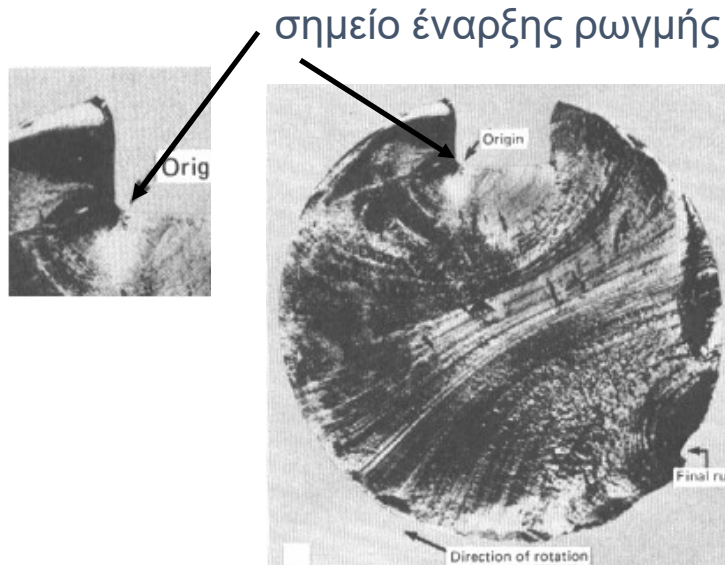
$$\frac{da}{dN} = (\Delta K)^m$$

τυπικά, 1 έως 6

$$\sim (\Delta \sigma) \sqrt{a}$$

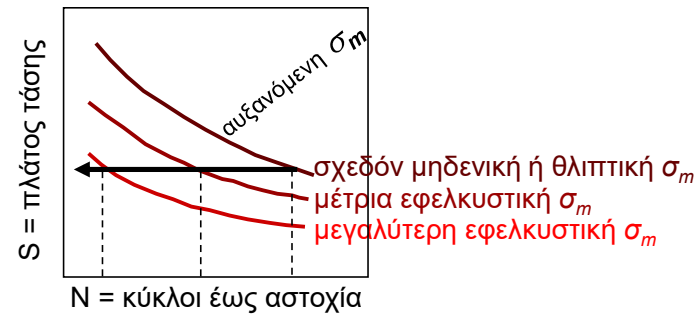
αύξηση μήκους ρωγμής ανά κύκλο φόρτισης

- Αστοχία περιστρ. άξονα
 - ανάπτυξη ρωγμής παρά το γεγονός ότι
$$K_{max} < K_c$$
 - ταχύτερη ανάπτυξη ρωγμής καθώς
 - αυξάνεται το $\Delta \sigma$
 - αυξάνεται το μήκος ρωγμής
 - αυξάνεται η συχνότητα φόρτισης.

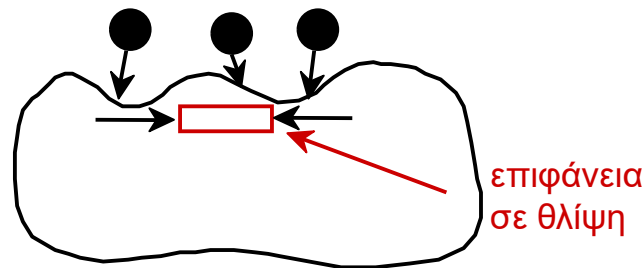


Βελτίωση της διάρκειας ζωής σε κόπωση

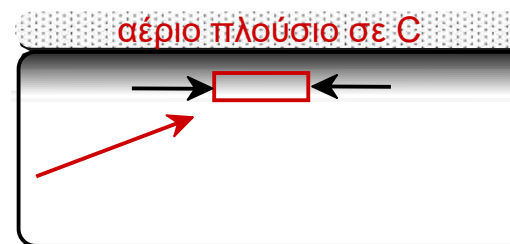
1. Επιβολή θλιπτικών τάσεων σε επιφάνειες (για αποτροπή ανάπτυξης των επιφανειακών ρωγμών)



--Μέθοδος 1: Σφαιροβολή



--Μέθοδος 2: Ενανθράκωση



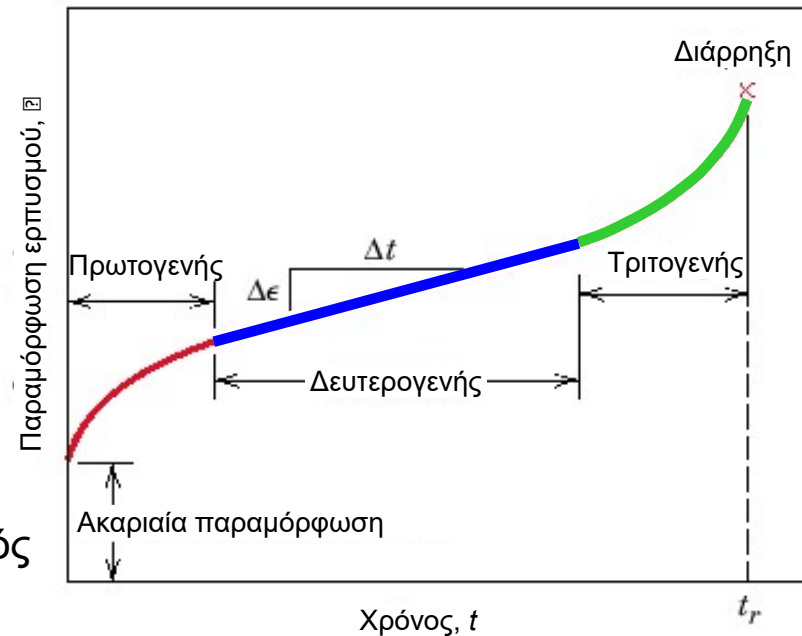
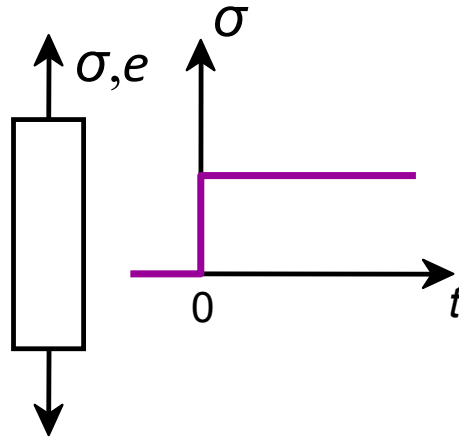
2. Σχεδιασμός: Εξάλειψη θέσεων συγκέντρωσης τάσεων.



ΕΡΠΥΣΜΟΣ

Ερπυσμός

Χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση ενός υλικού όταν υπόκεινται σε σταθερή τάση (σ)



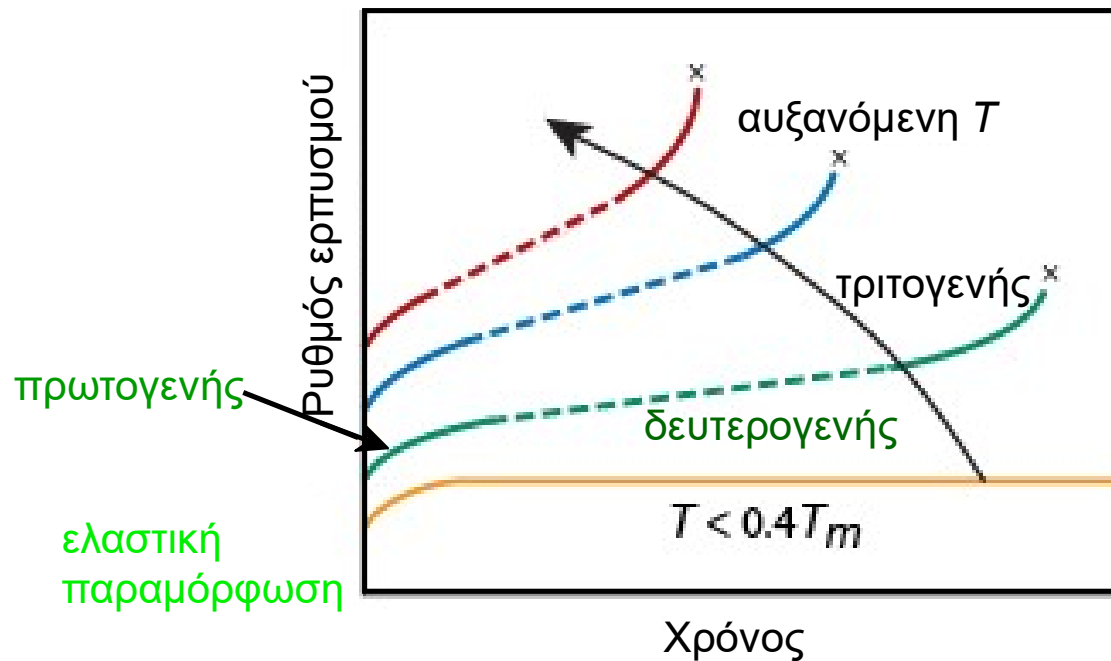
Πρωτογενής ερπυσμός: η κλίση (ρυθμός ερπυσμού) μειώνεται με τον χρόνο.

Δευτερογενής ερπυσμός: σταθερή κατάσταση - δηλ., σταθερή κλίση ($\Delta\epsilon / \Delta t$).

Τριτογενής ερπυσμός: η κλίση αυξάνεται με τον χρόνο (επιτάχυνση (ρυθμού ερπυσμού)).

Ερπυσμός: Εξάρτηση από τη θερμοκρασία

- Εκδηλώνεται σε αυξημένη θερμοκρασία, $T > 0.4 T_m$ (K)



Δευτερογενής ερπυσμός

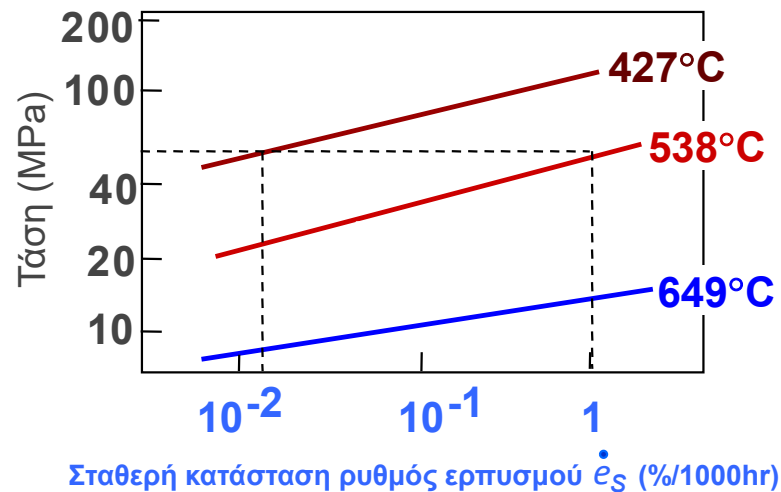
- Σταθερός ρυθμός παραμόρφωσης σε συγκεκριμένες τιμές των T , σ
-- εξισορρόπηση κράτυνσης από ανάκτηση (εκτόνωση εσωτ. ενέργειας παραμόρφωσης)

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

σταθ. υλικού K_2 εκθέτης τάσης (παράμετρος υλικού) n ενέργεια ενεργοποίησης για ερπυσμό (παράμετρος υλικού) Q_c

εφαρμοζόμενη τάση σ

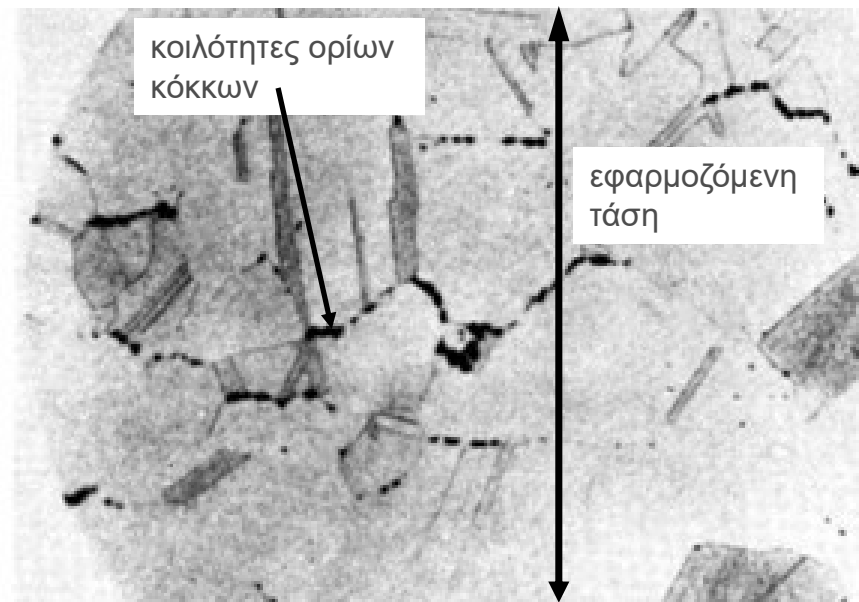
- Ο ρυθμός παραμόρφωσης αυξάνεται αυξανόμενων των T , σ



Διασκευή από Σχ. 9.38, Callister & Rethwisch 4e.
[Αναπαράγεται με άδεια από *Metals Handbook: Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials, and Special Purpose Metals*, Vol. 3, 9th ed., D. Benjamin (Senior Ed.), ASM International, 1980, p. 131.]

Αστοχία λόγω ερπυσμού

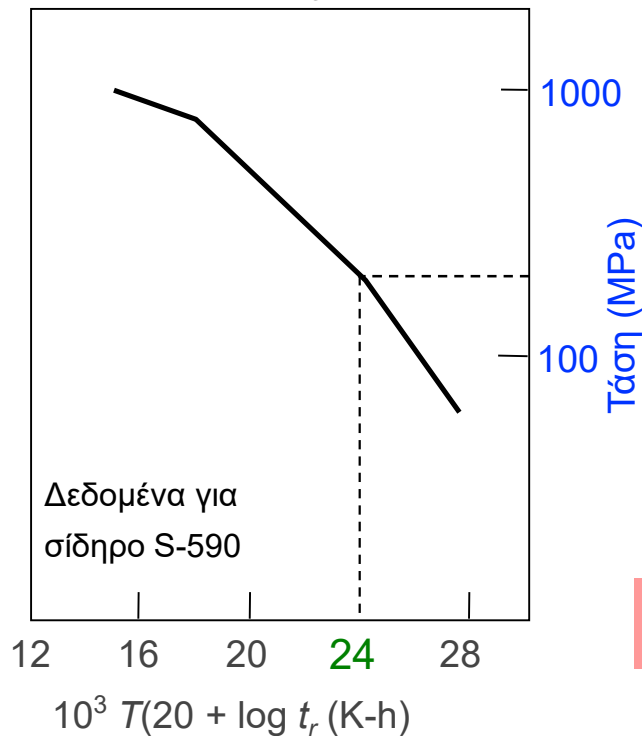
- Εκδηλώνεται κατά μήκος ορίων κόκκων.



Από V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Σχ. 4.32, p. 87, John Wiley and Sons, Inc., 1987. (Αρχική πηγή: Pergamon Press, Inc.)

Πρόβλεψη διάρκειας ζωής έως αστοχία λόγω ερπυσμού

- Υπολογισμός χρόνου έως διάρρηξη
S-590 σίδηρος, $T = 800^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 140 \text{ MPa}$



Χρόνος έως διάρρηξη, t_r

$$T(20 + \log t_r) = L$$

θερμοκρασία

χρόνος έως αστοχία
(διάρρηξη)

συνάρτηση
εφαρμοζόμενης
τάσης

$$(1073 \text{ K})(20 + \log t_r) = 24 \times 10^3$$

Απάντηση: $t_r = 233 \text{ hr}$



ΣΥΝΟΨΗ



- Τα τεχνικά υλικά δεν είναι τόσο ανθεκτικά όσο προβλέπεται από τη θεωρία
- Οι **ατέλειες** λειτουργούν ως **θέσεις συγκέντρωσης τάσεων** και μπορούν να προκαλέσουν αστοχία σε τάσεις χαμηλότερες από τις θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές
- Η ύπαρξη αιχμηρών γωνιών οδηγεί σε μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων και πρόωμη αστοχία.
- Ο τύπος της αστοχίας εξαρτάται από τις T και σ :
 - Για **απλή θραύση** (μη-κυκλικά εφαρμοζόμενη σ και $T < 0.4 T_m$) η τάση αστοχίας μειώνεται με:
 - αύξηση του μέγιστου μεγέθους ατέλειας,
 - μείωση της T ,
 - αύξηση του ρυθμού φόρτισης.
 - Για **κόπωση** (κυκλικά εφαρμοζόμενη σ):
 - οι κύκλοι έως αστοχία μειώνονται αυξανόμενης της $\Delta\sigma$.
 - Για **ερπυσμό** ($T > 0.4 T_m$):
 - ο χρόνος έως διάρρηξη μειώνεται αυξανόμενης της σ ή της T .

