



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Υλικά

Ενότητα 8: Θραύση

*Νικόλαος Ζαχαρόπουλος
Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης
Προϊόντων και Συστημάτων*



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

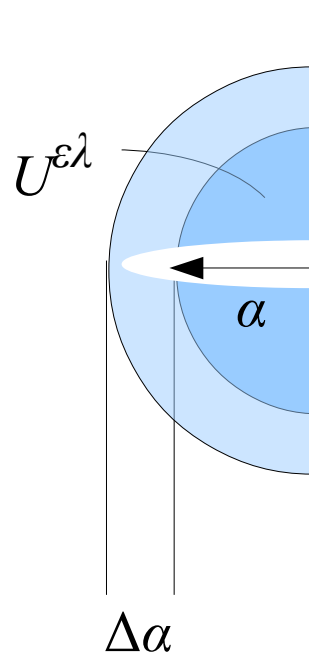
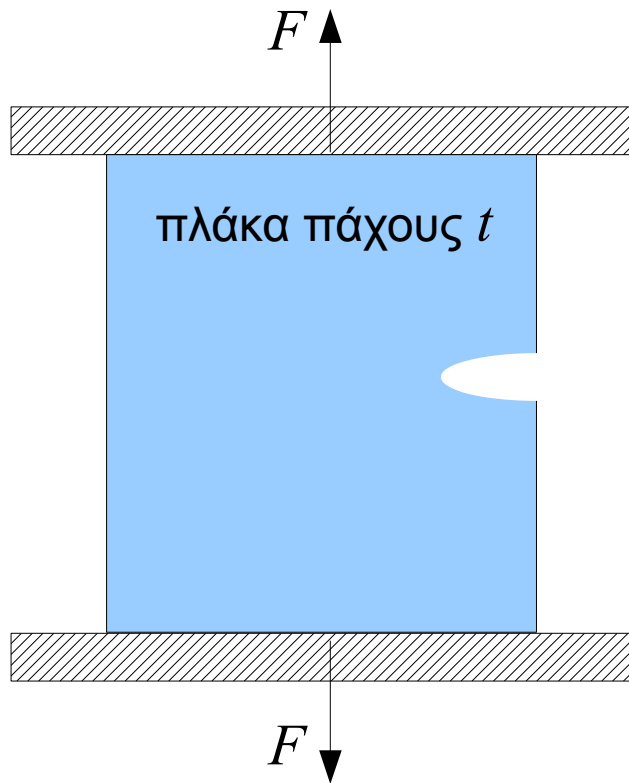


ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Γρήγορη θραύση σε σταθερή μετατόπιση



τα εξωτερικά φορτία
δεν κάνουν έργο,
 $\Delta W = 0$

$$U^{\epsilon\lambda} = \frac{\sigma^2}{2E} \frac{\pi \alpha^2 t}{2}$$

$$\Delta U^{\epsilon\lambda} = \frac{dU}{da} \Delta\alpha = \frac{\sigma^2}{2E} \frac{2\pi \alpha t}{2} \Delta\alpha$$

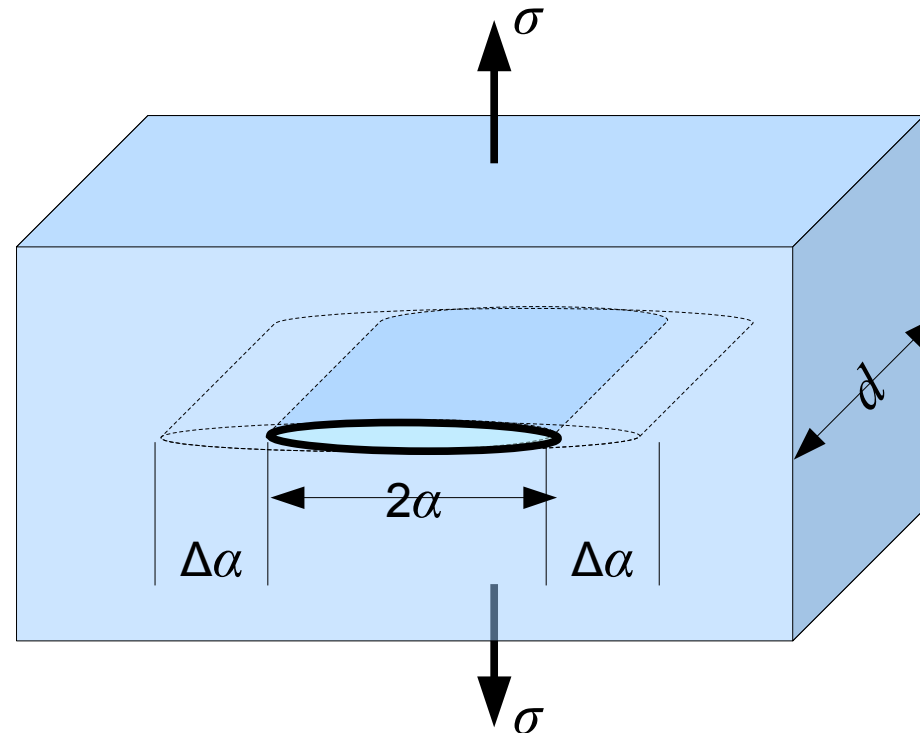
στο κρίσιμο σημείο :

$$\frac{\sigma^2 \pi \alpha}{2E} = G_{Ic}$$

πιο λεπτομερής ανάλυση δίνει :

$$\frac{\sigma^2 \pi \alpha}{E} = G_{Ic}$$

Ενεργειακό κριτήριο για γρήγορη θραύση (1)



Αν η ρωγμή επεκταθεί κατά $\Delta 2\alpha$, ελευθερώνεται ελαστική ενέργεια που ήταν αποθηκευμένη στην περιοχή του υλικού που διαδόθηκε η ρωγμή

Η ακριβής ποσότητα ελαστικής ενέργειας που ελευθερώνεται είναι :

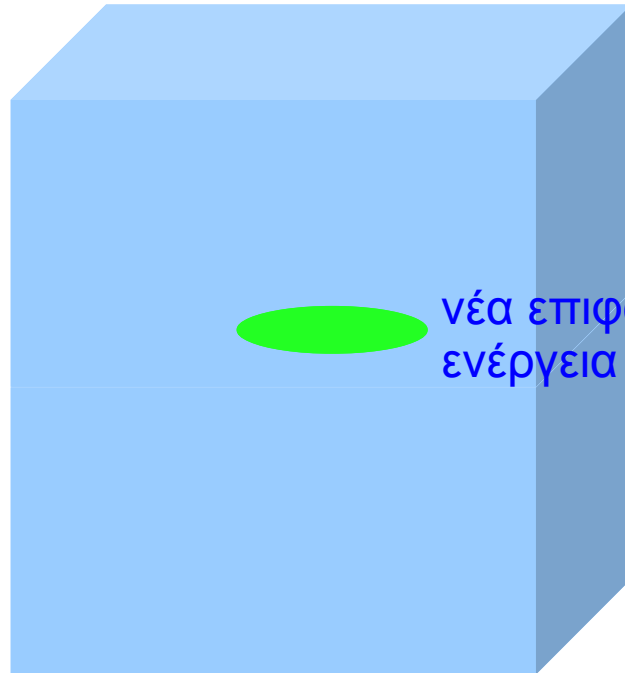
$$\Delta U^{\text{ελ}} = \frac{\pi \alpha \sigma^2}{E} d \Delta 2\alpha$$

Η διάδοση της ρωγμής δημιουργεί νέες επιφάνειες – αυτό απαιτεί ενέργεια :

$$\Delta E = 2 w d \Delta 2\alpha \quad \text{όπου } w \text{ σταθερά αναλογίας} \\ \text{(για ψαθυρά, η επιφανειακή ενέργεια)}$$

Επιφανειακή ενέργεια

μοναδιαίος
κύβος 1 m^3

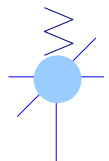


νέα επιφάνεια
ενέργεια γ/m^2

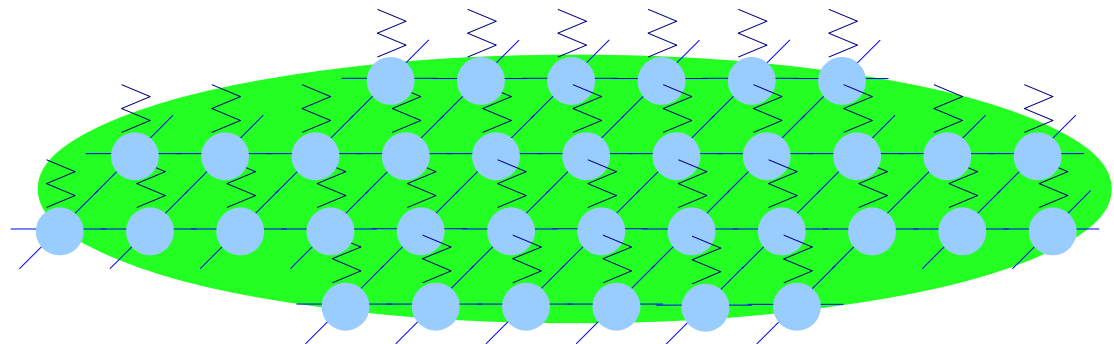
η επιφανειακή ενέργεια
σχετίζεται με την
ενέργεια συνοχής, H_c :

$$2\gamma(1 \text{ m}^2) \approx \frac{1}{6} H_c 4 r_o(1 \text{ m}^2)$$

$$\gamma \approx \frac{1}{3} H_c r_o$$



1/6 δεσμών
“κομμένο”



Ενεργειακό κριτήριο για γρήγορη θραύση (2)

Ανεξάρτητα της φυσικής σημασίας του w η συνθήκη για θραύση προκύπτει από την σύγκριση των δύο ενεργειών – η ρωγμή διαδίδεται όταν ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας, G_I που ορίζεται ως :

$$G_I \equiv \frac{1}{d} \frac{\Delta U^{\text{ελ}}}{\Delta 2\alpha} = \frac{\pi \alpha \sigma^2}{E}$$

μπορεί να παράσχει το έργο που απαιτείται για την δημιουργία της νέας επιφάνειας :

$$G_I \geq 2w \equiv G_{Ic}$$

G_{Ic} : κρίσιμος ρυθμός έκλυσης ενέργειας ή **δυσθραυστότητα**

Η κρίσιμη τιμή της τάσης είναι :

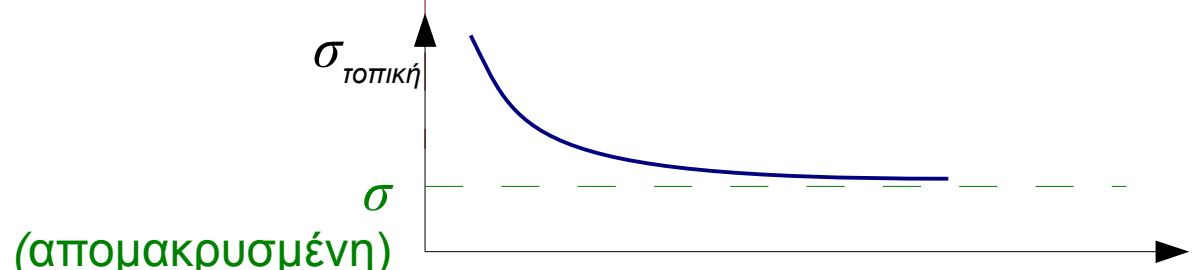
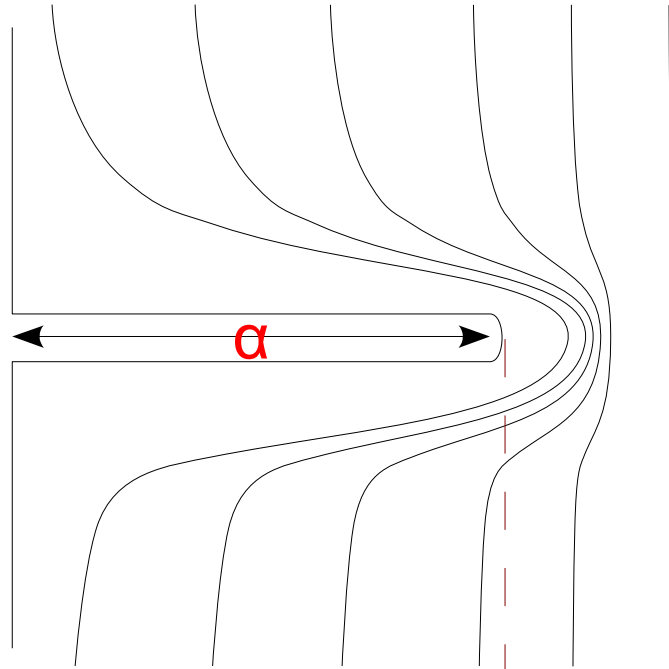
$$\sigma_c = \left(\frac{2 E w}{\pi \alpha} \right)^{1/2}$$

για χαμηλότερες τιμές η ρωγμή μόλις που ανοίγει διατηρώντας σταθερό μήκος

Ένταση τάσης και αντοχή σε θραύση

↑ απομακρυσμένη σ

γραμμές δύναμης
συγκεντρωμένες στην
ακμή της ρωγμής



(απομακρυσμένη)

απομάκρυση από την
κορυφή της ρωγμής, r

παράγοντας έντασης τάσης

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi \alpha}$$

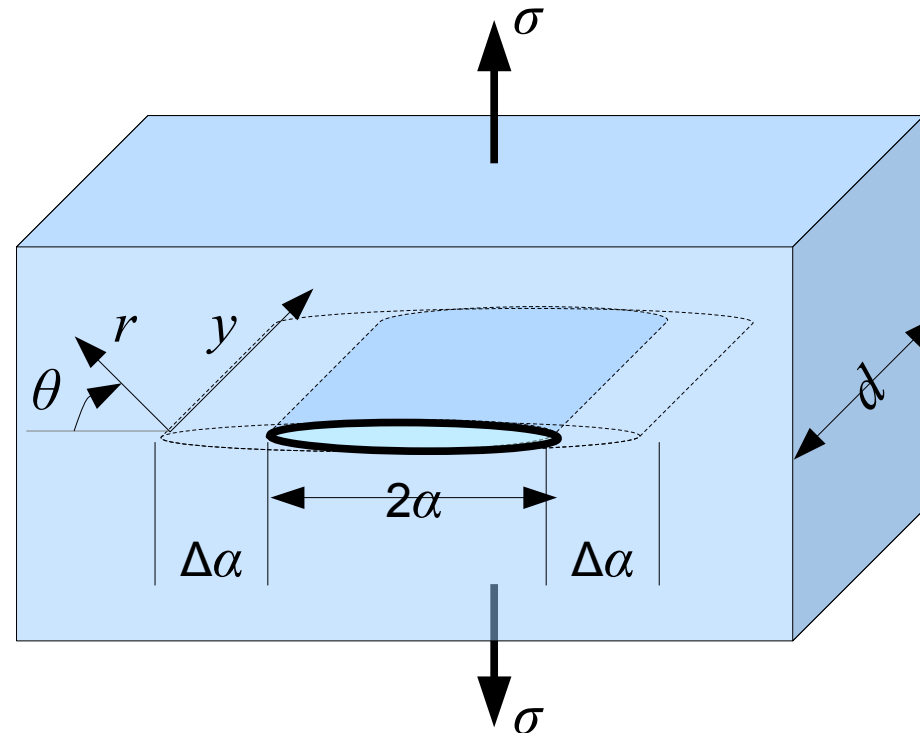
$$\sigma_{\text{τοπική}} = \sigma \left(1 + Y \sqrt{\left(\frac{\pi \alpha}{2 \pi r} \right)} \right)$$

Y : σταθερά γεωμετρίας,
περίπου 1

κοντά στην ρωγμή ($r \ll \alpha$)

$$\sigma_{\text{τοπική}} = \sigma Y \sqrt{\left(\frac{\pi \alpha}{2 \pi r} \right)}$$

Εναλλακτική μορφή κριτηρίου θραύσης



$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \Phi_{ij}(\theta)$$

το πεδίο των τάσεων στην κορυφή της ρωγμής εξαρτάται μόνο από r, θ

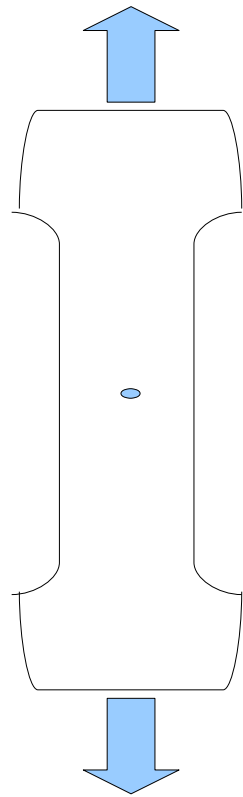
η σχετική κατανομή της τάσης γύρω από την ρωγμή δεν μεταβάλλεται από την εξωτερική τάση – αυτή επηρεάζει μόνο το μέγεθος της τάσης

η επίδραση της εξωτερικής τάσης βρίσκεται ενσωματωμένη στον παράγοντα K_I : τον παράγοντα έντασης τάσης

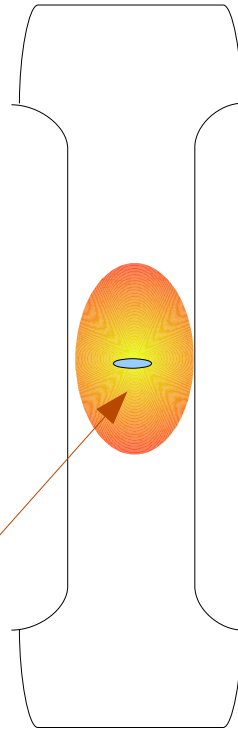
$$K_I = \sigma (\pi \alpha)^{1/2} \geq K_{Ic}$$

κρίσιμος παράγοντας έντασης τάσης

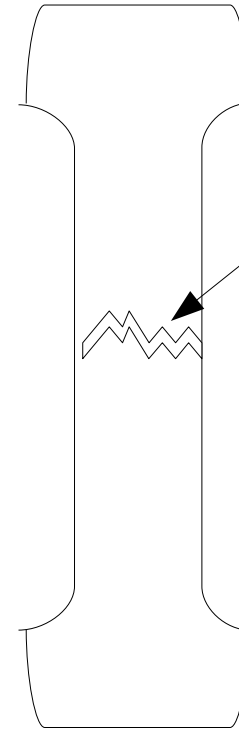
Διάκριση μεταξύ δύσθραυστης και ψαθυρής συμπεριφοράς



το υλικό αντιστέκεται στην διάδοση της ρωγμής (παραμορφούμενο πλαστικά)



δύσθραυστη συμπεριφορά



ψαθυρή συμπεριφορά

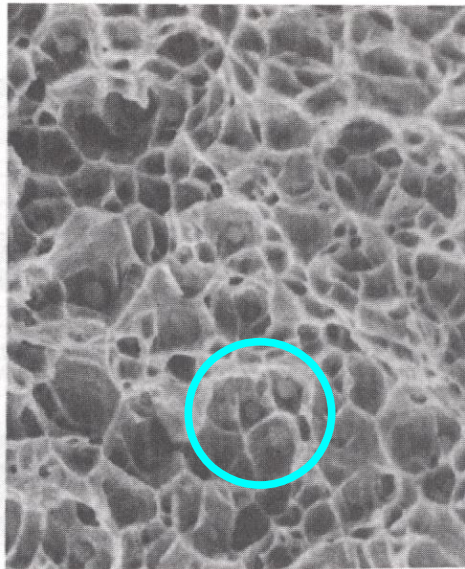
εύκολη διάδοση ρωγμής ...

... σε τάσεις δυνητικά πολύ χαμηλότερες της διαρροής

δυσθραυστότητα \neq **αντοχή**
(αντίσταση στην πλαστική παραμόρφωση)

Επιφάνειες θραύσης

W. F. Hosford, *Mechanical behavior of materials*, Cambridge University Press, New York, 2005



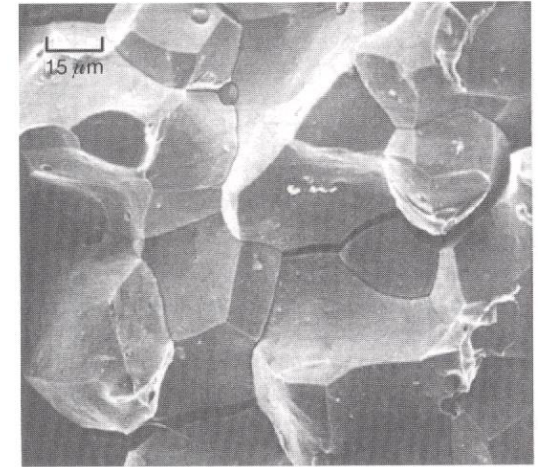
εγκλείσματα

όλκιμη αποκόλληση



SEM fractograph

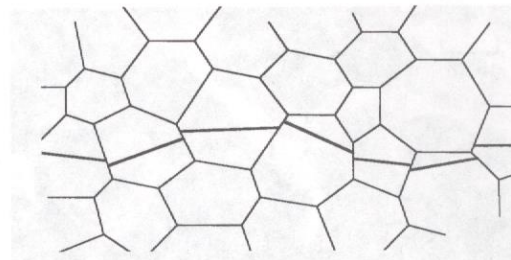
ενδοκρυσταλλική θραύση (cleavage) – ποτέ σε εκκ



διακρυσταλλική θραύση

ψαθυρές φάσεις στα όρια των κόκκων

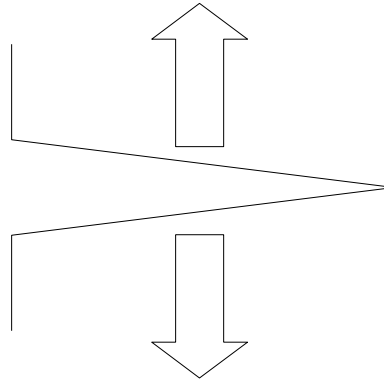
δομή	επίπεδο
ΧΚΚ	{100}
μπε	(0001)
NaCl	{100}
ZnS	{110}
CsCl	{100}



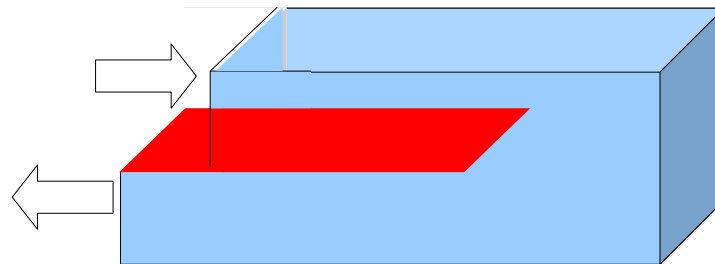
σε τρεις διαστάσεις τα κρυσταλλογραφικά επίπεδα θραύσης δεν ευθυγραμμίζονται

Τύποι θραύσης (μακροσκοπικοί)

1. θραύση τύπου I

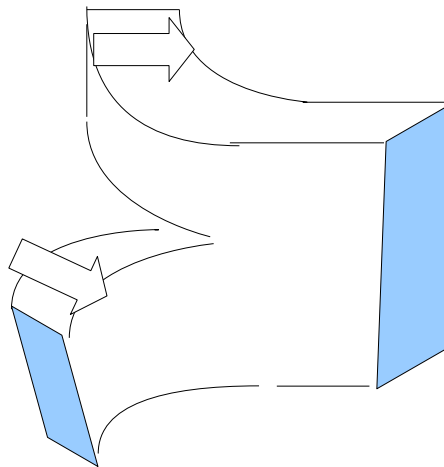


2. θραύση τύπου II

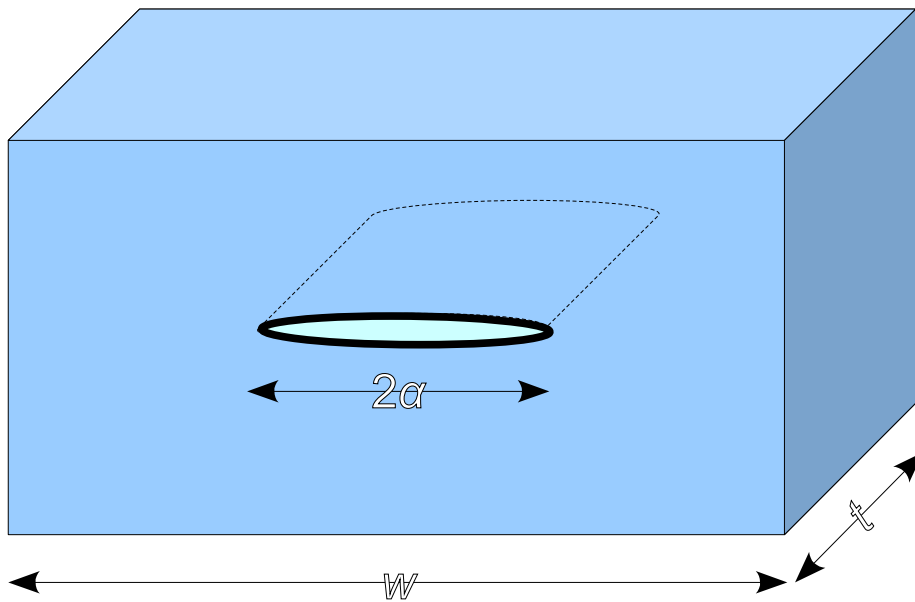


ρωγμές
δεν μεταδίδονται
σε θλίψη

3. θραύση τύπου III



Επίπεδη τάση και επίπεδη παραμόρφωση

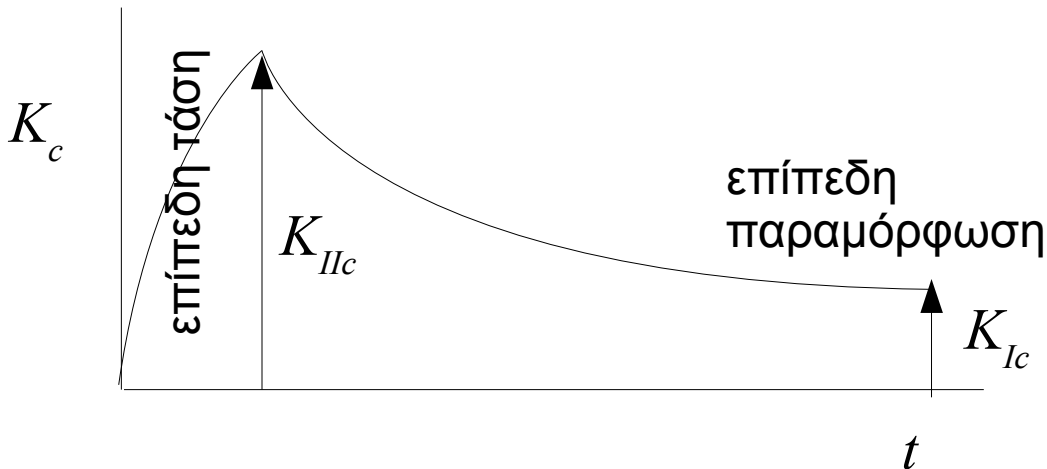


$w \gg a$
 $t \ll a$

} επίπεδη τάση (εκεί που η ρωγμή συναντάει την εξωτερική επιφάνεια)
 πλήρης χαλάρωση στην διεύθυνση του πάχους,
 $\sigma_z = 0$

$t \gg a$

επίπεδη παραμόρφωση (στο εσωτερικό)
 απουσία χαλάρωσης στην διεύθυνση του πάχους, $\epsilon_z = 0$

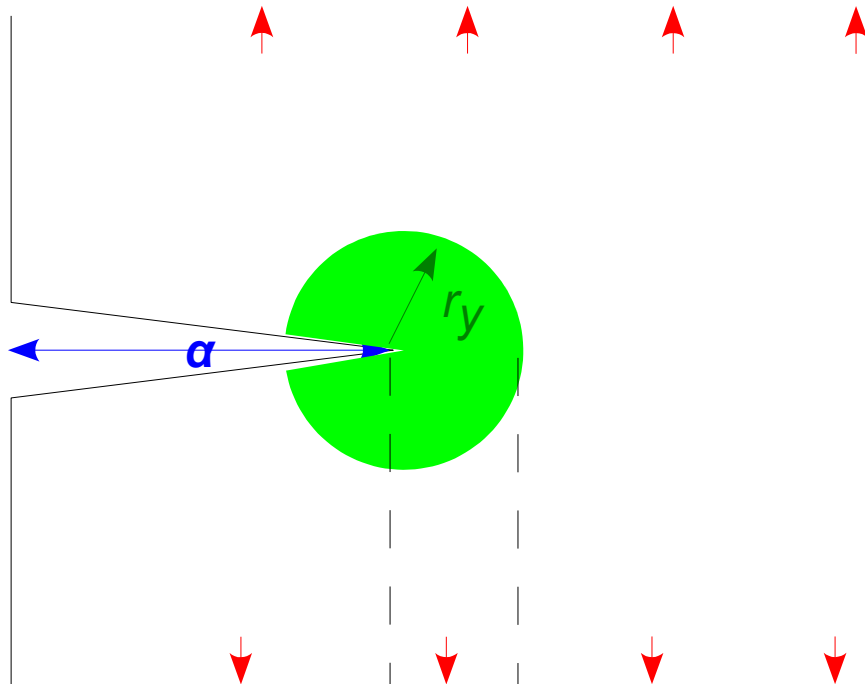


λεπτές δομές : κυρίως
 επίπεδη τάση

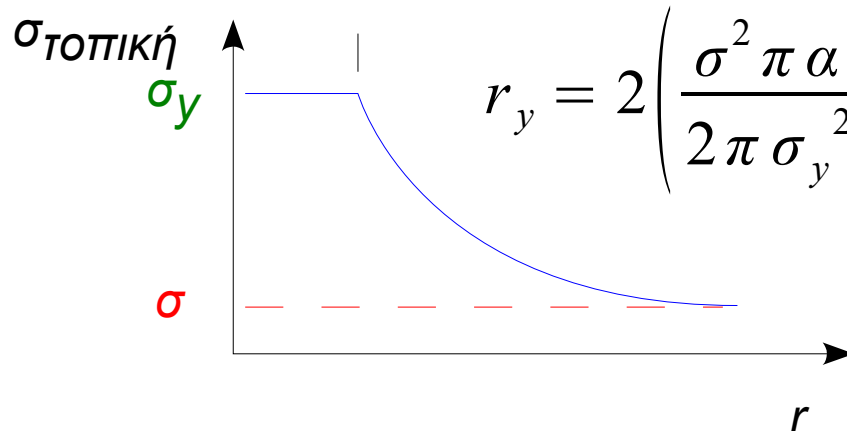
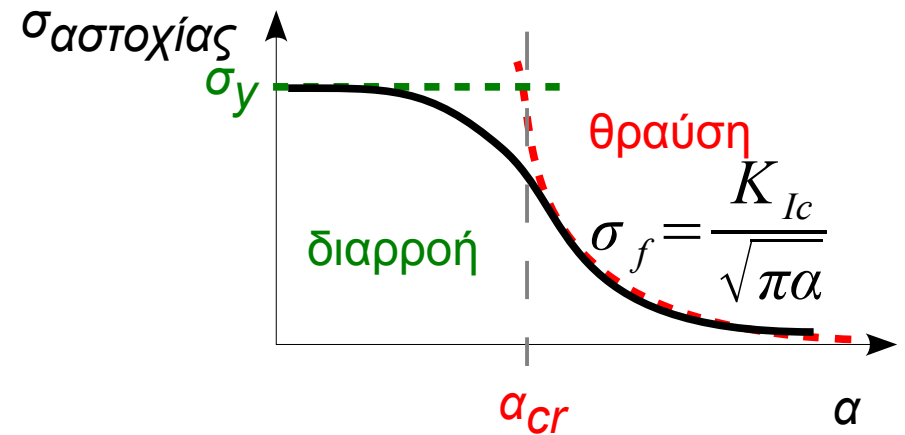
χοντρές δομές : κυρίως
 επίπεδη παραμόρφωση

Πλαστική ζώνη στην κορυφή της ρωγμής

σ (απομακρυσμένη τάση)



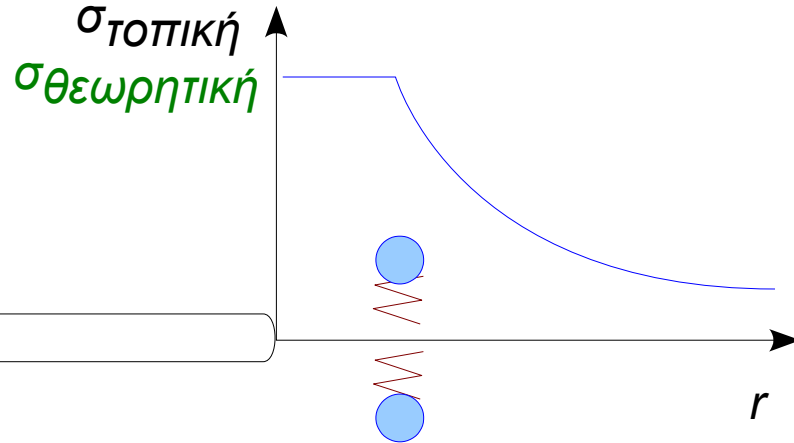
κρίσιμο μήκος ρωγμής



$$r_y = 2 \left(\frac{\sigma^2 \pi \alpha}{2 \pi \sigma_y^2} \right) = \frac{K_I^2}{\pi \sigma_y^2}$$

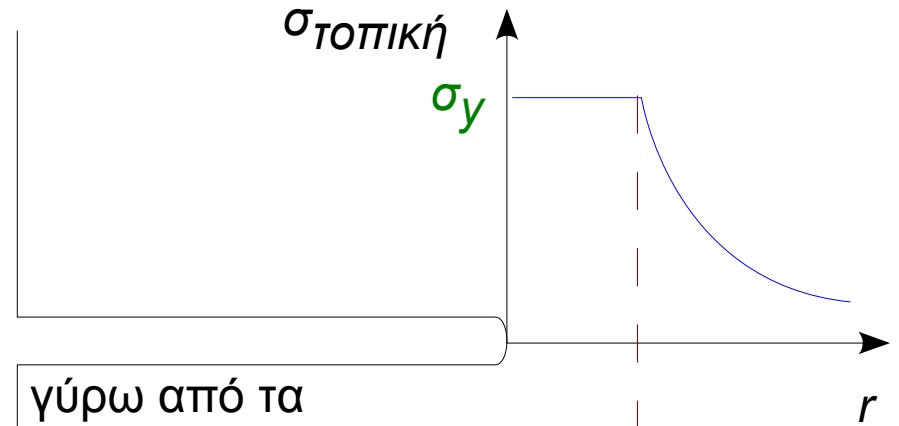
$$\alpha_{cr} = \frac{K_{Ic}^2}{\pi \sigma_y^2}$$

Ψαθυρή θραύση και όλκιμη αποκόλληση

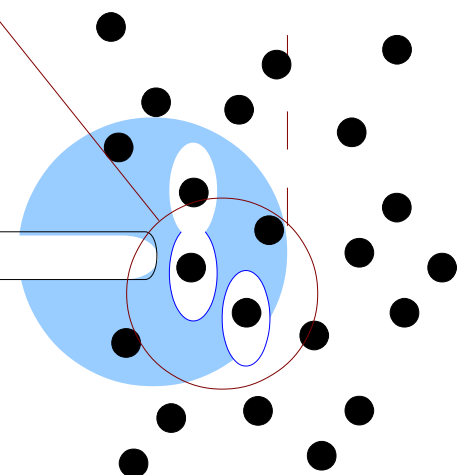


οι δεσμοί “σπάνε” στην θεωρητική αντοχή, $\sim E/15$

η ρωγμή διαδίδεται επιταχυνόμενη ως την ταχύτητα του ήχου : τα ψαθυρά θραύονται με θόρυβο



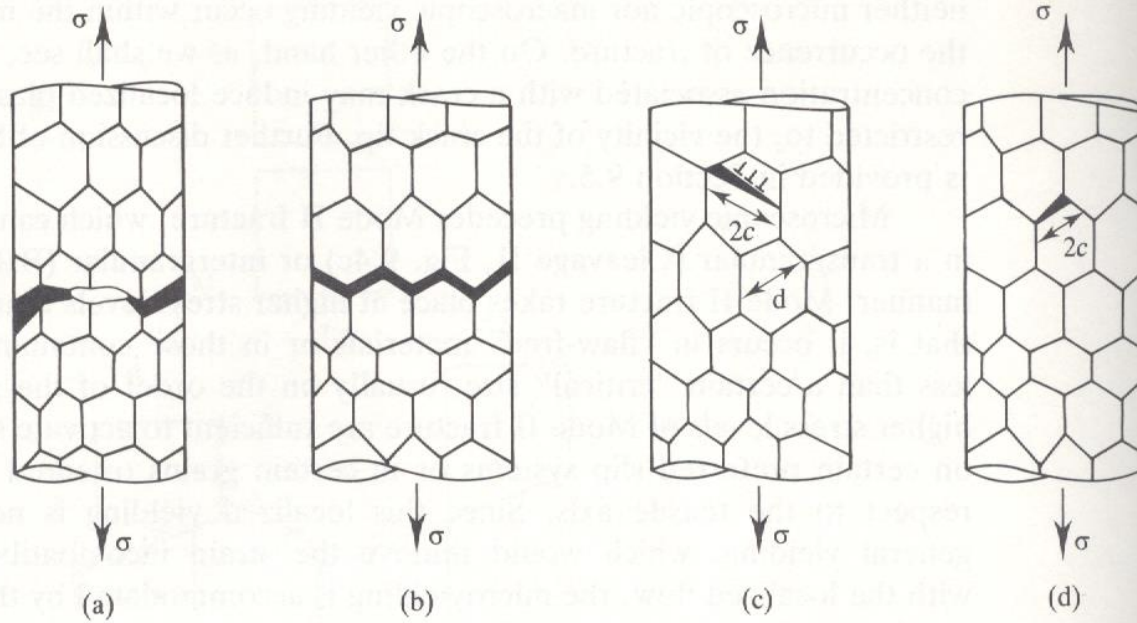
γύρω από τα εγκλείσματα το μέταλλο αποκολλάται και σχηματίζονται μικροί λαιμοί εφελκυσμού που αστοχούν με διαρροή



σκληρά εγκλείσματα

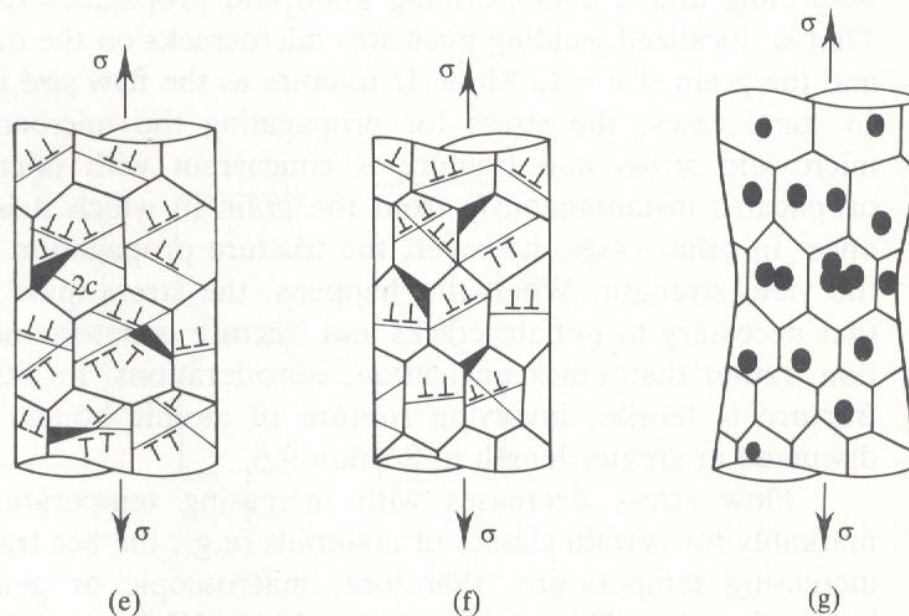
Τύποι θραύσης (μικροσκοπικοί) και πλαστική παραμόρφωση

- τύπου I :
- προϋπάρχουσες ατέλειες
 - χωρίς διαρροή



- τύπου II :
- μικροδιαρροή
 - ατέλειες σχηματίζονται από ασύμβατη παραμόρφωση

- τύπου III :
- μικροδιαρροή ή γενικευμένη διαρροή
 - αστοχία από γρήγορη θραύση

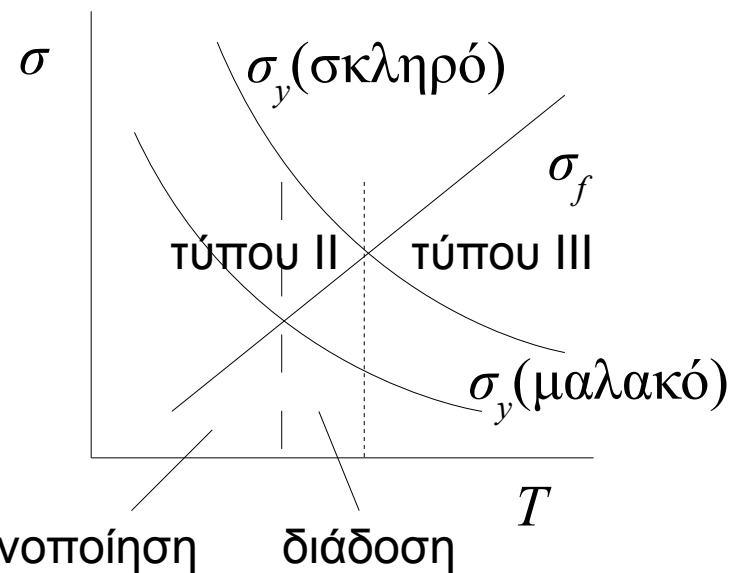
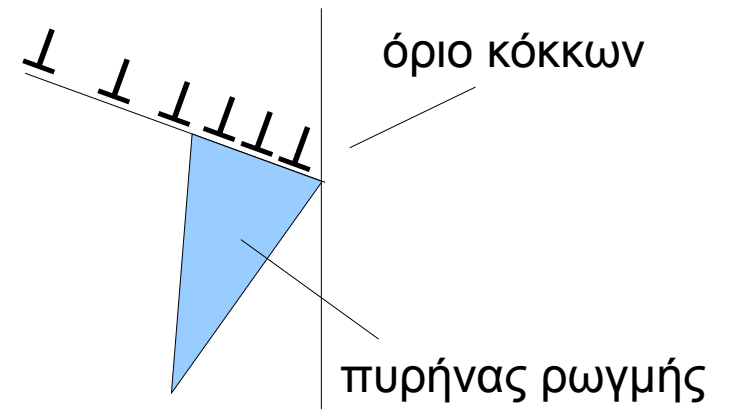
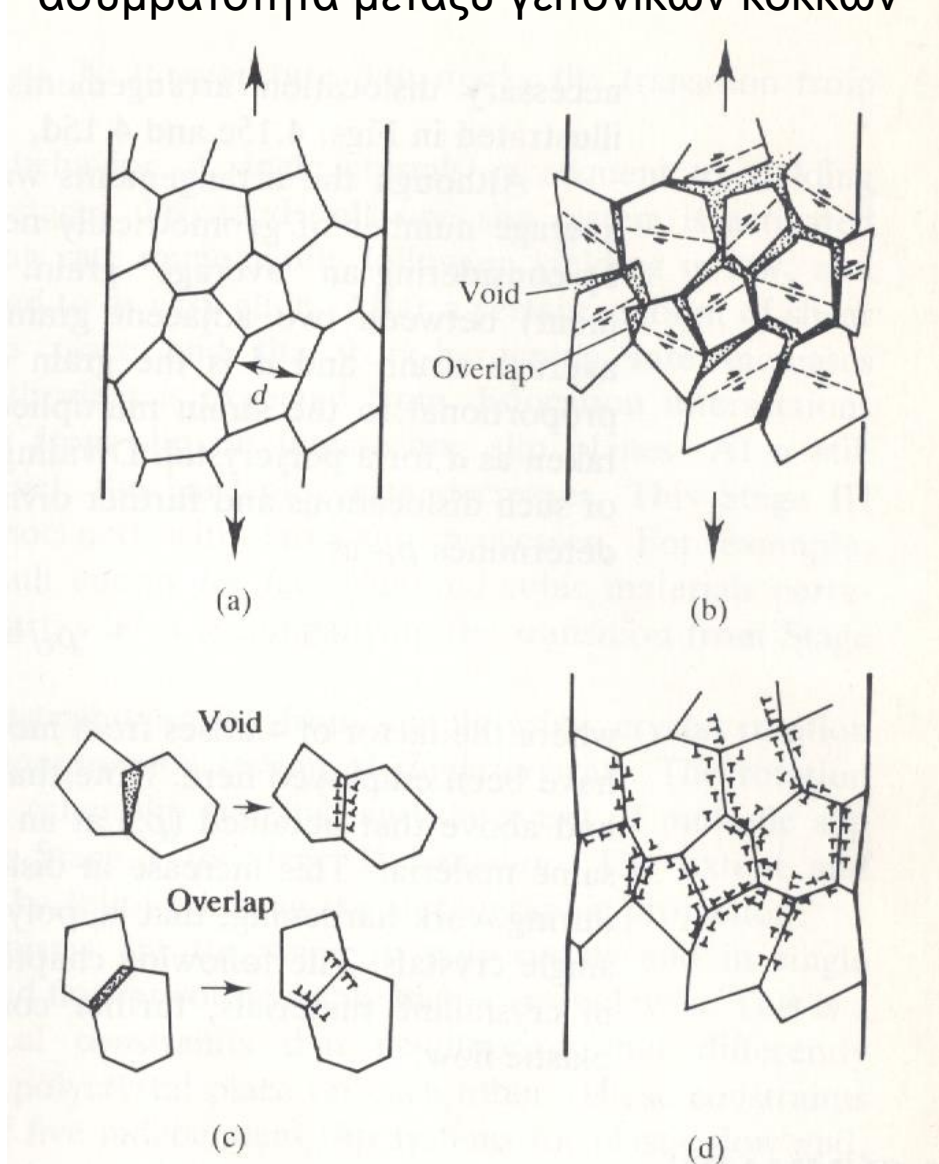


- όλκιμη θραύση :
- γενικευμένη διαρροή
 - αστοχία από συνένωση κενών (δημιουργία λαιμού)

Τύποι θραύσης II και III (μικροσκοπικοί)

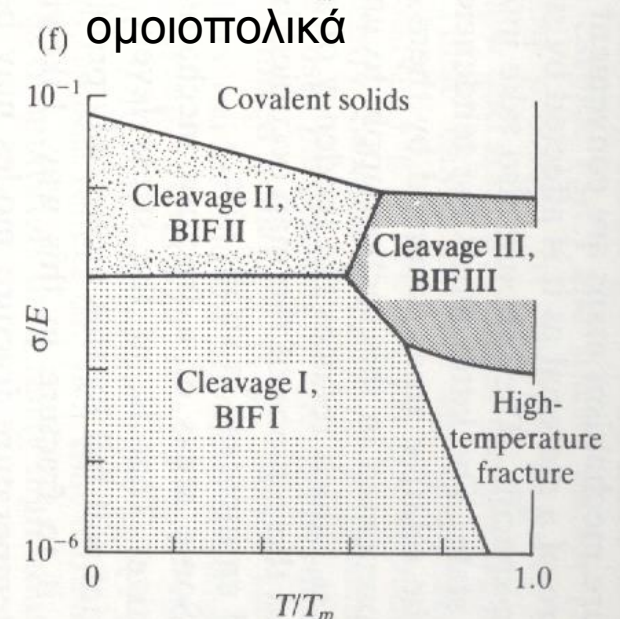
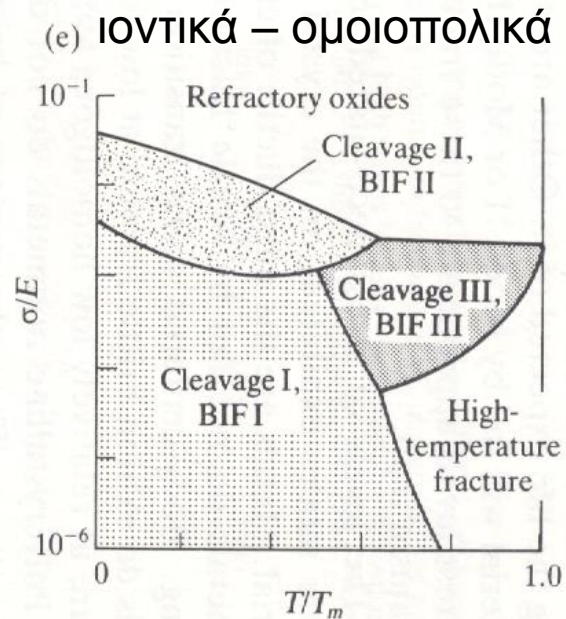
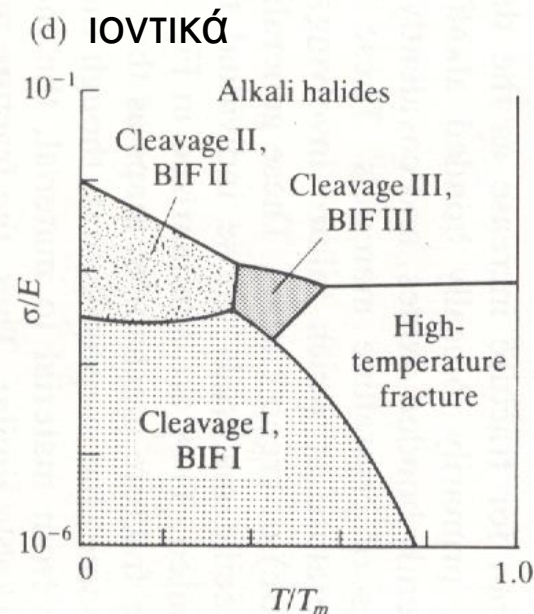
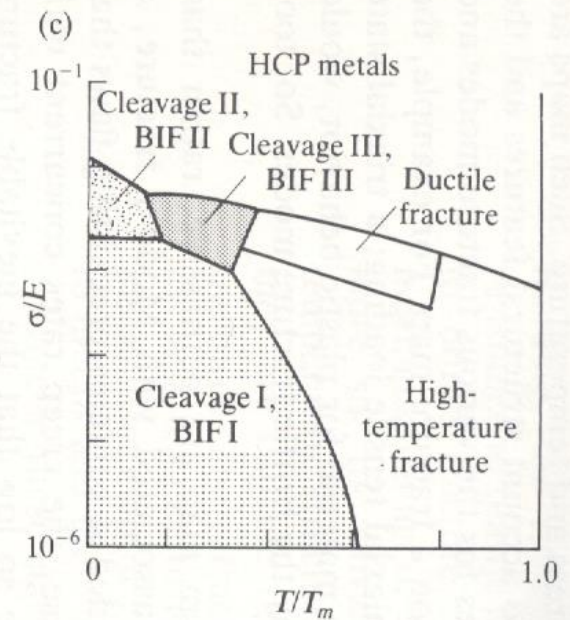
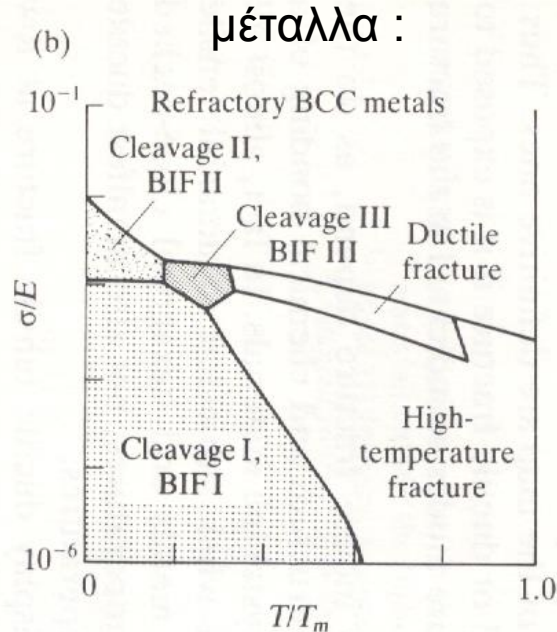
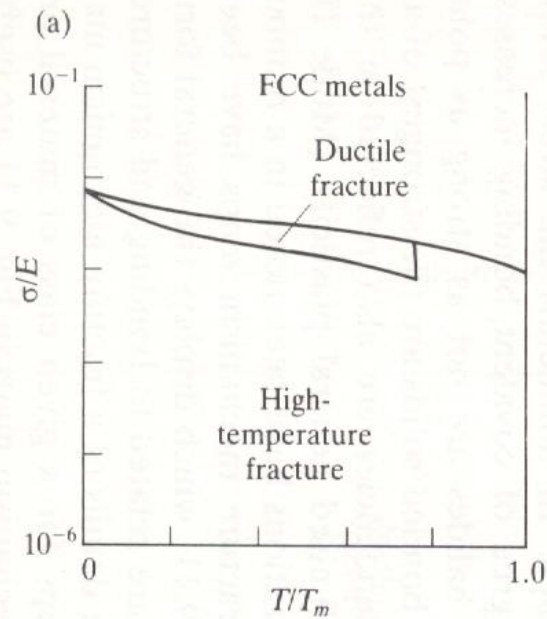
όταν η κίνηση διαταραχών είναι εύκολη σε πολλά επίπεδα δεν δημιουργείται ασυμβατότητα μεταξύ γειτονικών κόκκων

τα μπε δεν έχουν αρκετά συστήματα ολίσθησης και δημιουργείται ασυμβατότητα στην παραμόρφωση



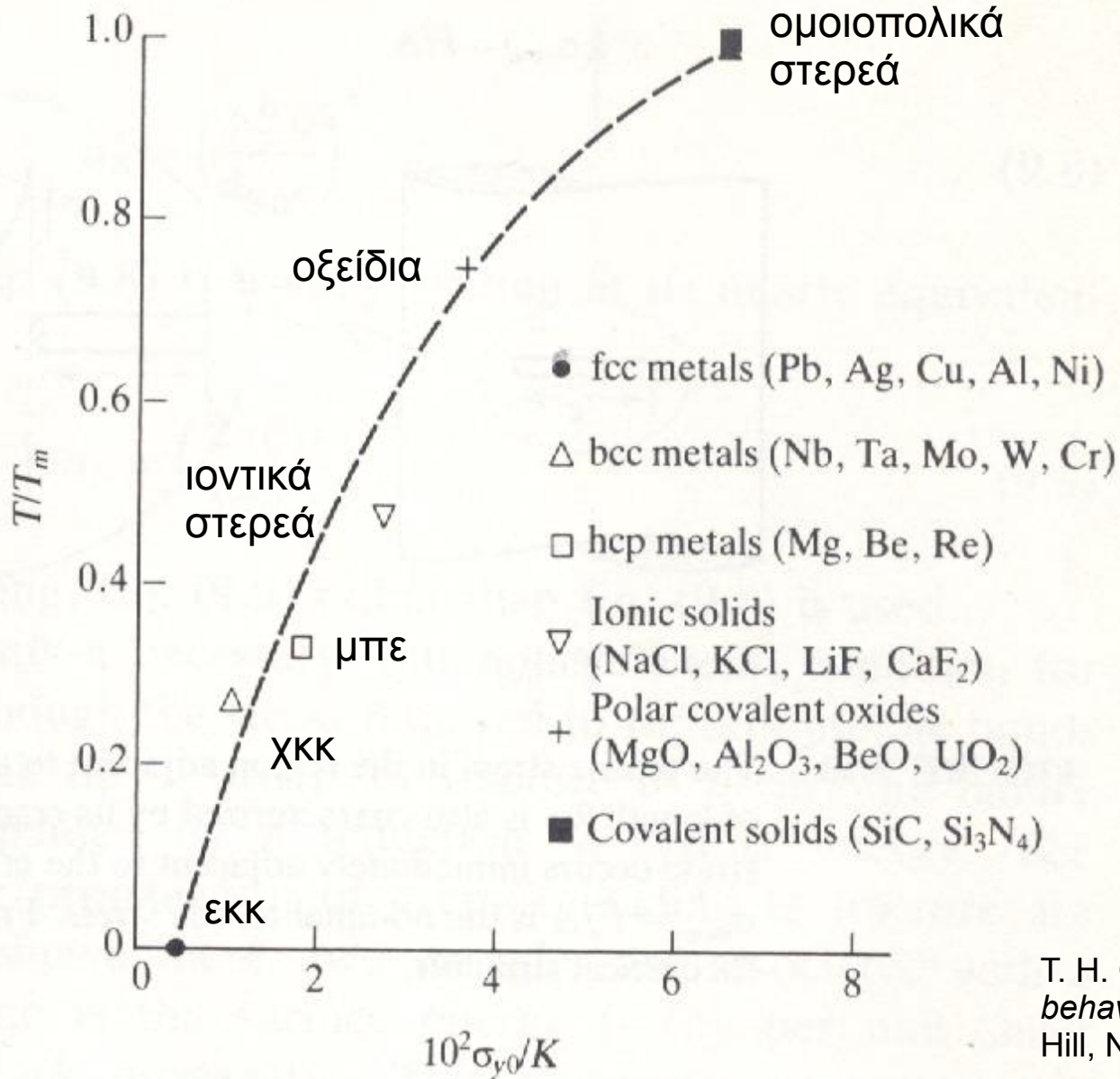
πυρηνοποίηση διάδοση

Χάρτες μηχανισμών θραύσης



Πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει θερμοκρασίας

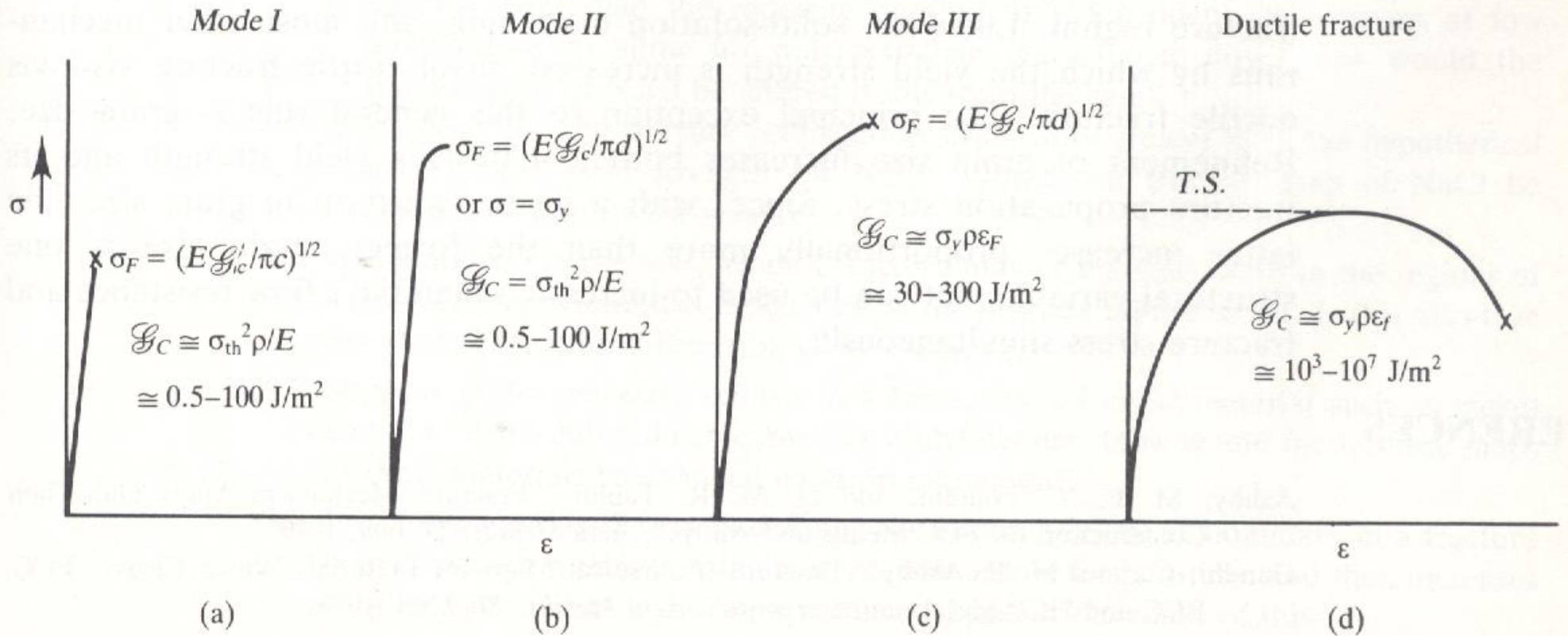
θερμοκρασία όπου παρατηρείται εκτεταμένη πλαστική συμπεριφορά



T. H. Courtney, *Mechanical behavior of materials*, McGraw - Hill, New York, 1990

ο λόγος τάσης διαρροής σε 0 K προς μέτρο όγκου αντανάκλα την προδιάθεση για ψαθυρή συμπεριφορά

Πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει θερμοκρασίας



T. H. Courtney, *Mechanical behavior of materials*, McGraw - Hill, New York, 1990

c : μήκος ρωγμής

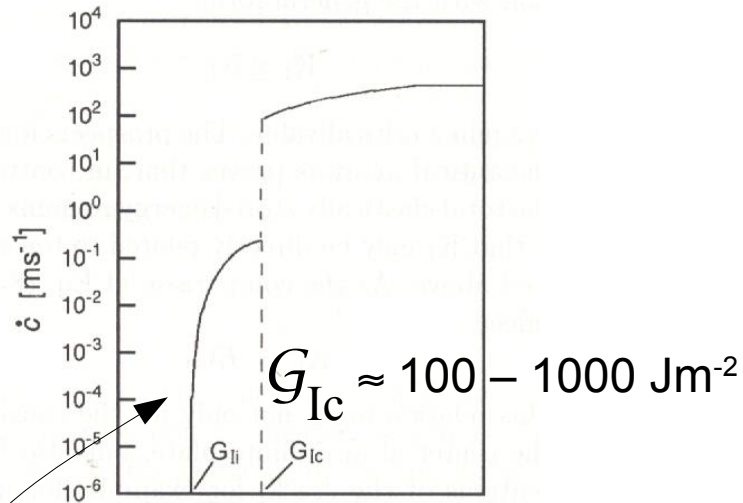
σ_{th} : θεωρητική αντοχή

ρ : ακτίνα καμπυλότητας ρωγμής /
ακτίνα πλαστικής ζώνης

ϵ_f : πλαστική παραμόρφωση
(εντός πλαστικής ζώνης)

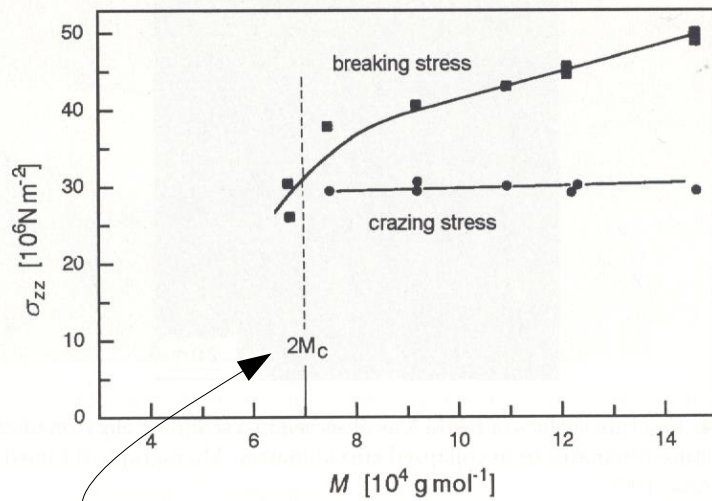
$$G_c \cong \sigma \rho \epsilon_f$$

Αργή και γρήγορη θραύση πολυμερών



υποκρίσιμη διάδοση (στάσιμη) – πλαστική ροή

$G_I = K_I^2 E^{-1}$ $2\gamma \approx 0.1 \text{ Jm}^{-2}$



M_c το κρίσιμο μοριακό βάρος στο όριο διαπλοκής

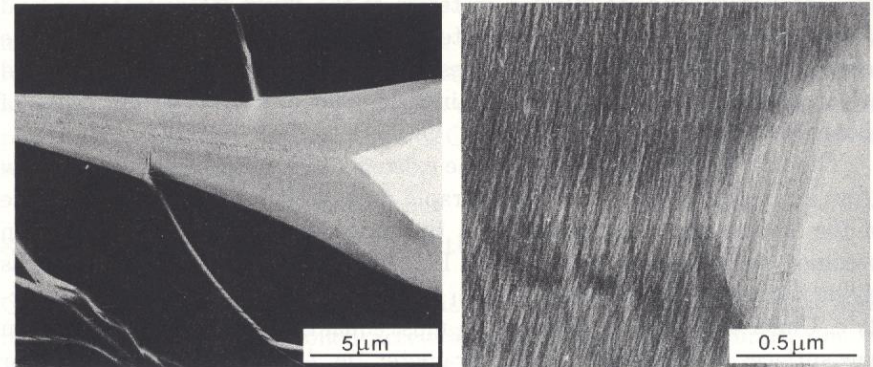


Fig. 8.32. Crack tip (bright sections on the right in both pictures) within a craze in PS. Electron micrographs obtained by Michler [98]

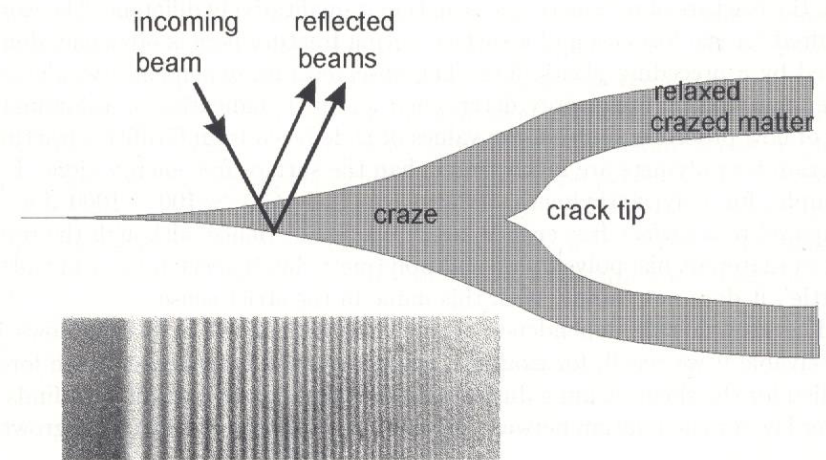


Fig. 8.33. Crack propagation behind a simultaneously moving zone with crazed matter. The profile of the preceding craze tip can be derived from the interference pattern produced by the two reflected beams. The fringe pattern presented here was obtained for PMMA by Doyle [99]