



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Υλικά

Ενότητα 9: Κόπωση

*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



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

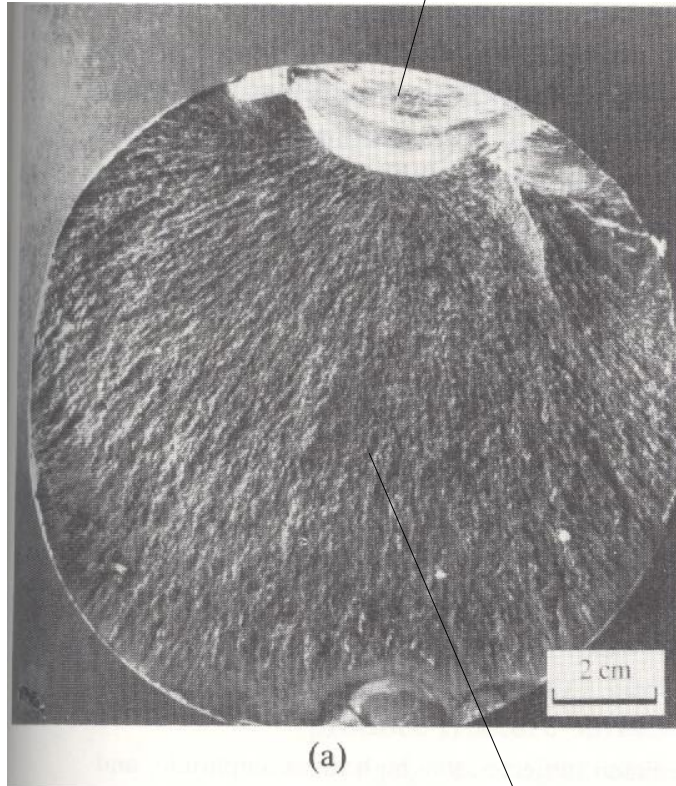
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Κόπωση – συσσώρευση αστοχίας

περιοχή αργής διάδοσης



περιοχή γρήγορης θραύσης



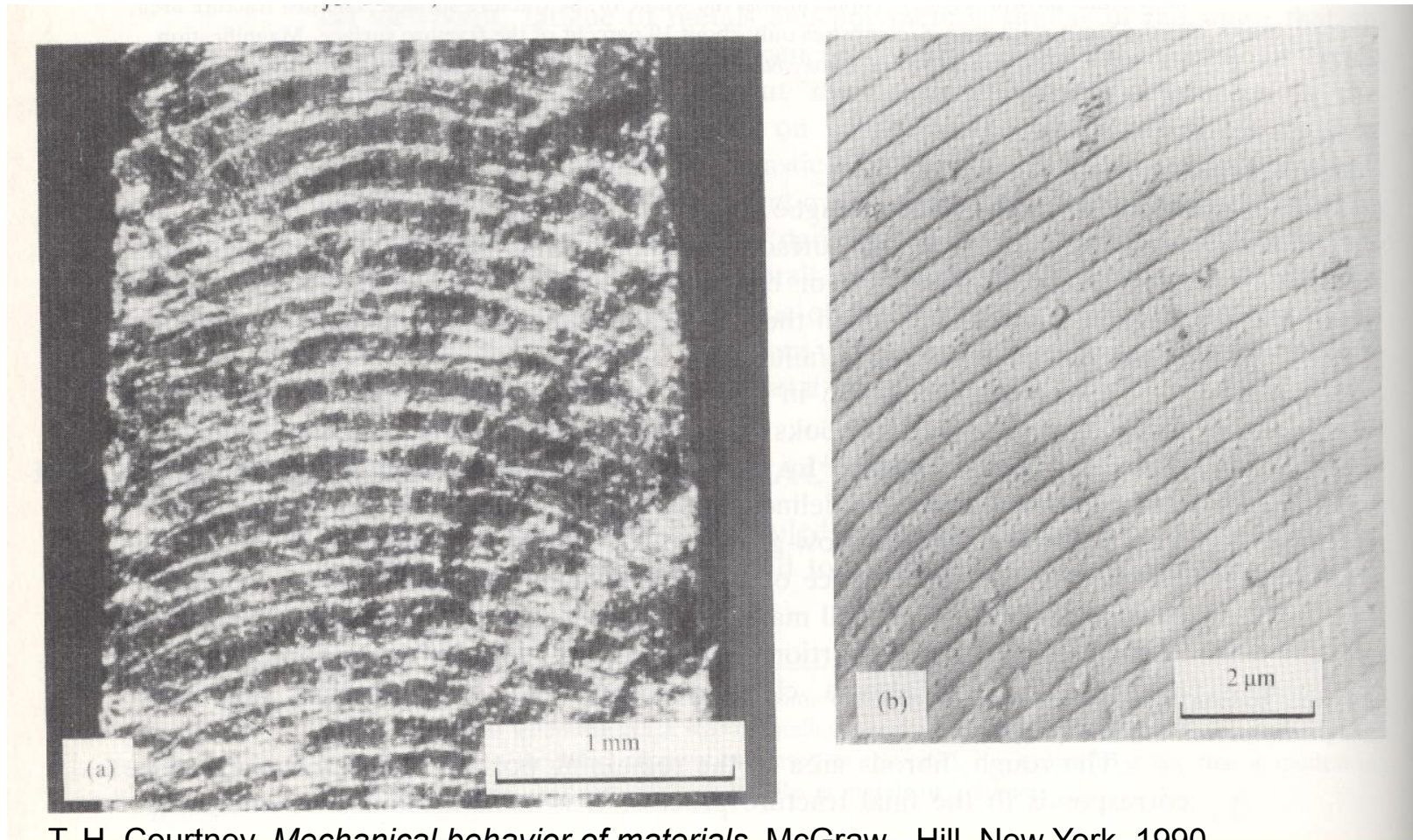
T. H. Courtney, *Mechanical behavior of materials*, McGraw - Hill, New York, 1990

πυρηνοποίηση ρωγμής → αργή διάδοση → γρήγορη θραύση

το σχετικό μέγεθος των περιοχών αργής διάδοσης και γρήγορης θραύσης αντανακλούν την μέγιστη κυκλική τάση

και/ ή την *δυσθραυστότητα* (γρήγορη θραύση) ή την *αντοχή σε εφελκυσμό* (όλκιμη αποκόλληση)

Κόπωση – αργή διάδοση ρωγμής



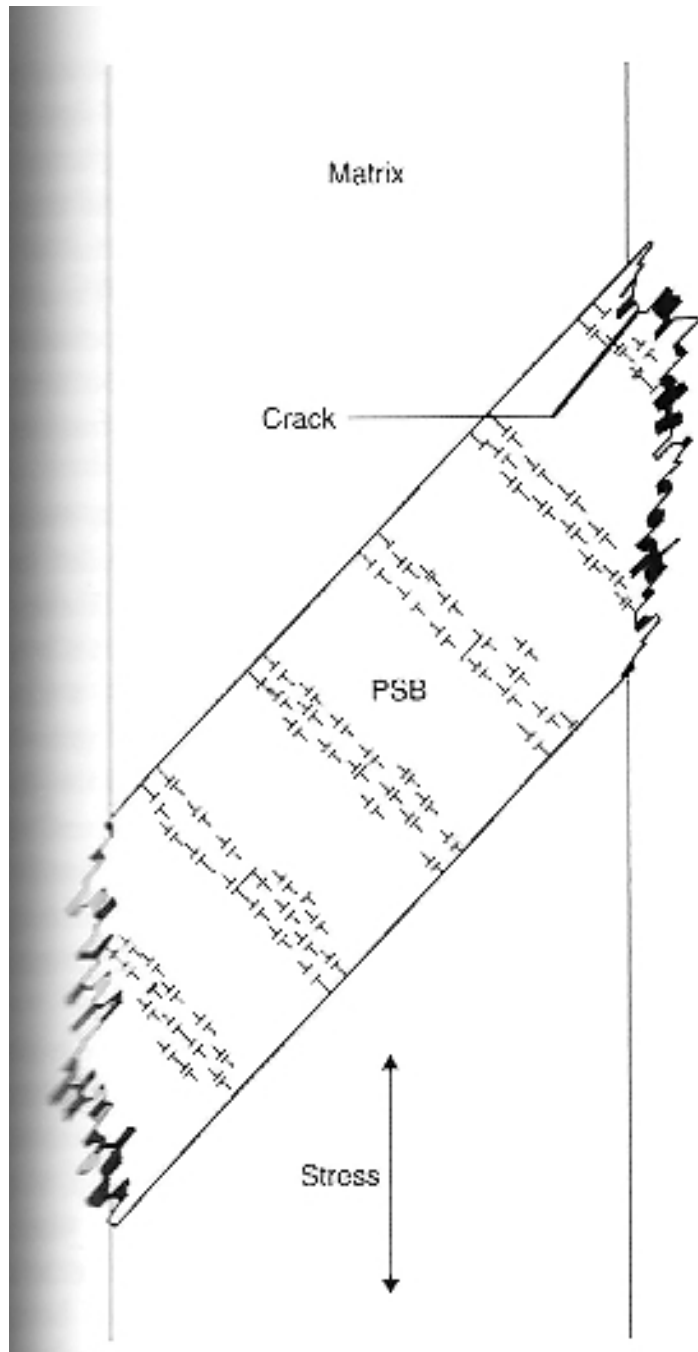
T. H. Courtney, *Mechanical behavior of materials*, McGraw - Hill, New York, 1990

μεγάλο εύρος τάσεων

μικρό εύρος τάσεων

κάθε κύκλος προκαλεί διάδοση της ρωγμής που εμφανίζεται με μικροσκοπικές αυλακώσεις (αόρατες σε γυμνό οφθαλμό) – η απόσταση μεταξύ των αυλακώσεων είναι ένα μέτρο του εύρους διακύμανσης της τάσης κατά την κυκλική φόρτιση

Κόπωση – πυρηνοποίηση ρωγμής



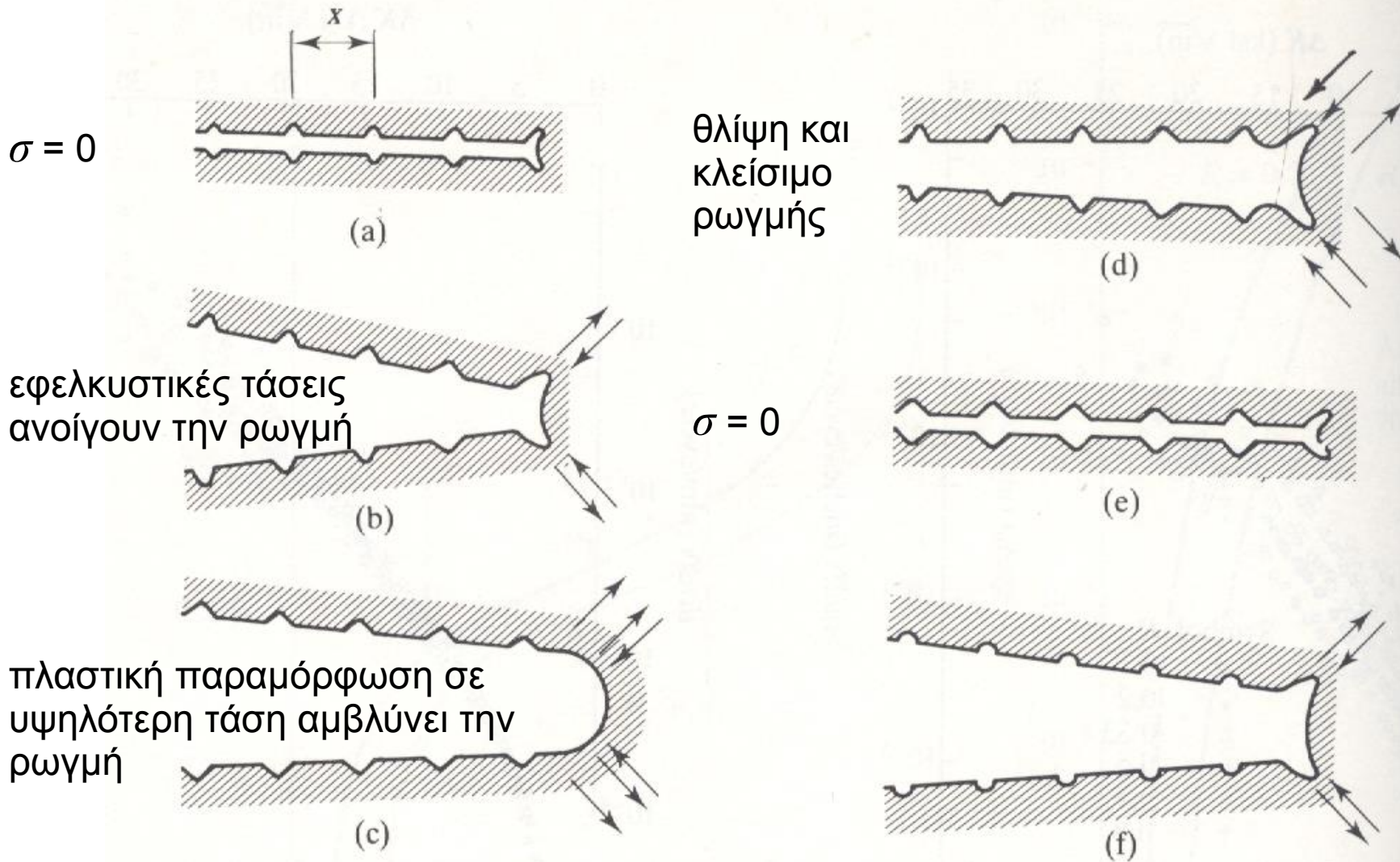
δημιουργείται μικρορωγμή σε εσωτερικές ή, συχνότερα, εξωτερικές επιφάνειες – τοπική ανομοιογένεια ή συγκέντρωση τάσεων

ετερογενής πλαστική παραμόρφωση δημιουργεί εσοχές και εξοχές στην επιφάνεια του υλικού – μικρορωγμές

αυτό το πρώτο στάδιο κόπωσης ορίζεται από την πλαστική ροή (κρυσταλλογραφικά)

μικροσκοπικά ανομοιογενής πλαστική ροή εμφανίζεται ακόμη κι αν μακροσκοπικά η φόρτιση είναι ελαστική

Κόπωση – αργή διάδοση ρωγμής



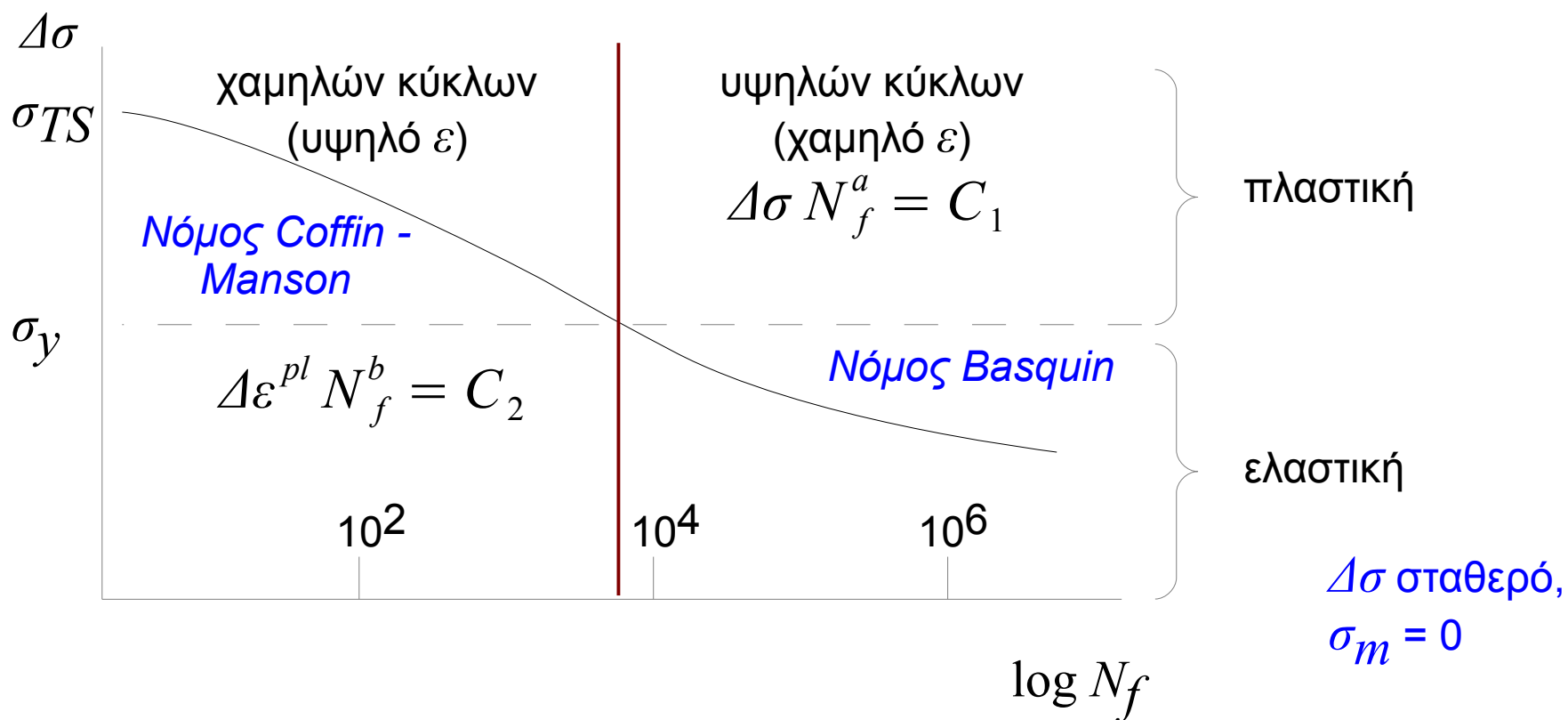
Κόπωση – ακριβείς σχέσεις

Ρωγμές δημιουργούνται και διαδίδονται σε τάσεις χαμηλότερες από

$$\sigma_f = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}}$$

όταν η φόρτιση είναι *κυκλική*

Μη ρωγματωμένες δομές



Κόπωση – προσεγγιστικές σχέσεις

Μη ρωγματωμένες δομές

$\sigma_m > 0$: Νόμος Goodman

$$\Delta\sigma_{\sigma_m} = \Delta\sigma_0 \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}} \right)$$

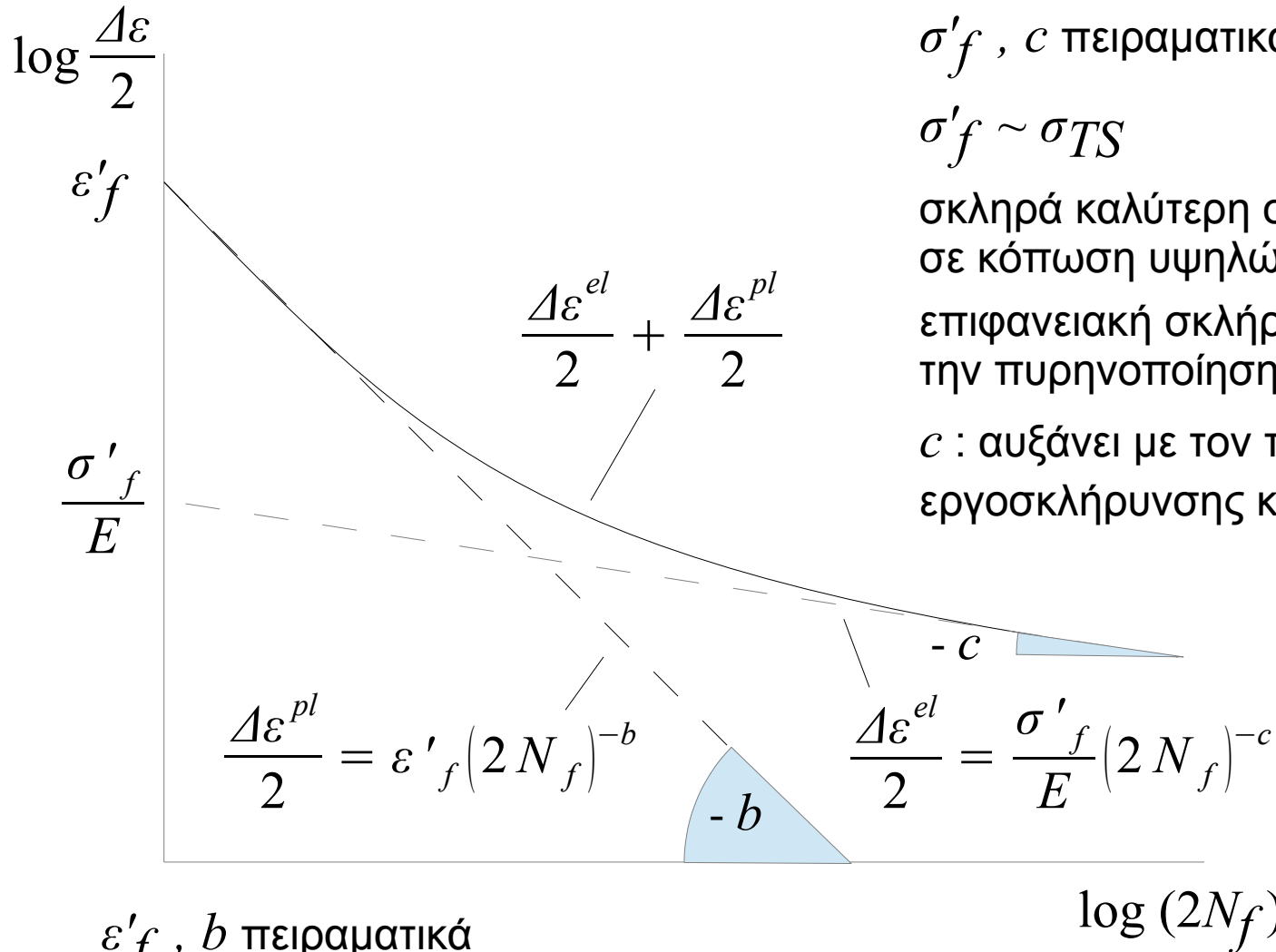
πως μεταβάλλεται το εύρος τάσεων ($\Delta\sigma$) για δεδομένο όριο ζωής (N_f), με το σ_m ;

μεταβλητό $\Delta\sigma$: Νόμος Miner

$$\sum_i \frac{N_i}{N_{fi}} = 1$$

αθροιστική βλάβη του υλικού

Κόπωση – παραμορφώσεις



σ'_f , c πειραματικά

$\sigma'_f \sim \sigma_{TS}$

σκληρά καλύτερη συμπεριφορά
σε κόπωση υψηλών κύκλων
επιφανειακή σκλήρυνση επιβραδύνει
την πυρηνοποίηση ρωγμής

c : αυξάνει με τον παράγοντα
εργοσκλήρυνσης κατά την κυκλική φόρτιση, n'

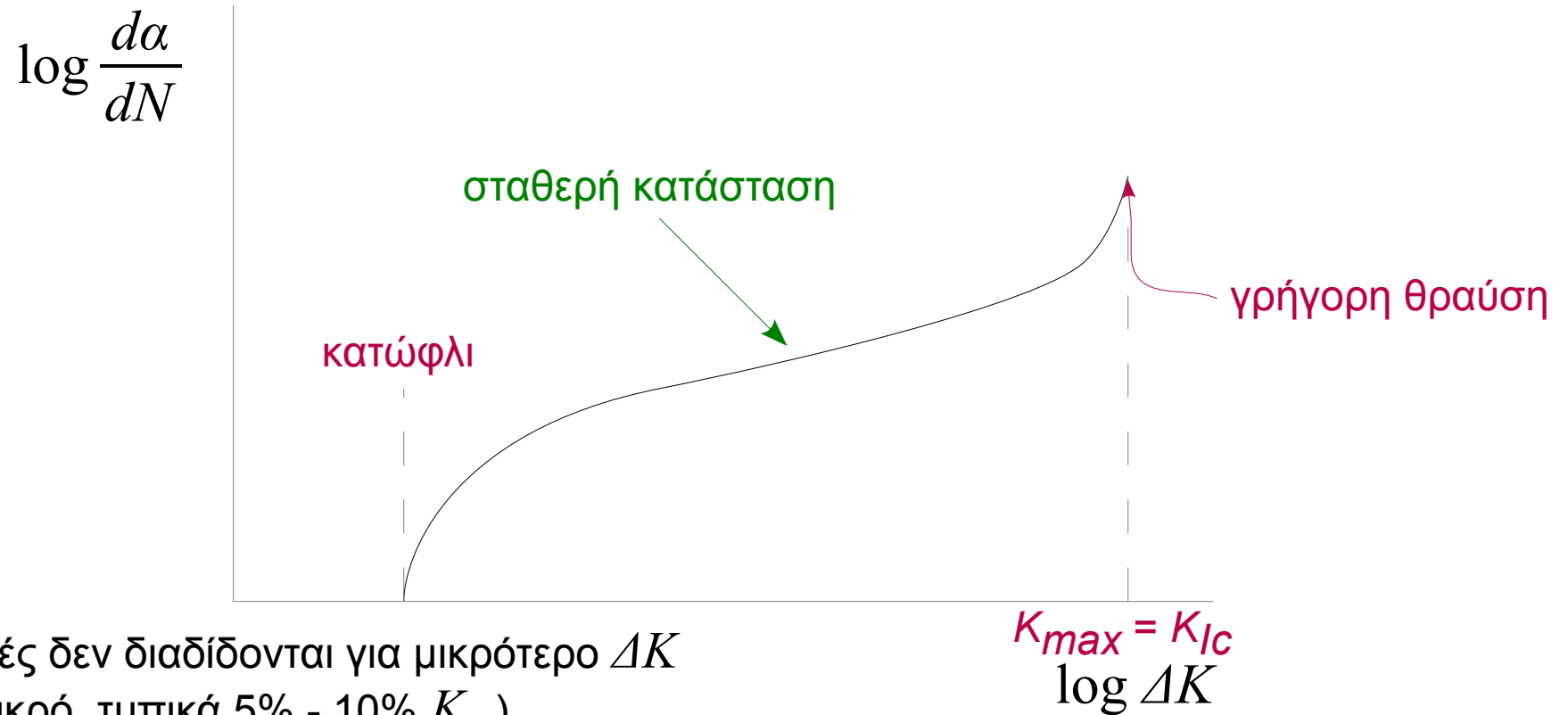
$$\sigma_a = K' \left(\frac{\Delta \varepsilon^{pl}}{2} \right)^{n'}$$

τυπικά, $n' \sim 0.1 - 0.2$

ε'_f , b πειραματικά

$\varepsilon'_f \sim \varepsilon_f$ b : μειώνεται με τον παράγοντα εργοσκλήρυνσης κατά την κυκλική φόρτιση, n'
όλκιμα και εργοσκληρυνόμενα καλύτερη συμπεριφορά σε κόπωση χαμηλών κύκλων

Κόπωση – ρωγματωμένες δομές



οι ρωγμές δεν διαδίδονται για μικρότερο ΔK
 (πολύ μικρό, τυπικά 5% - 10% K_{IC})

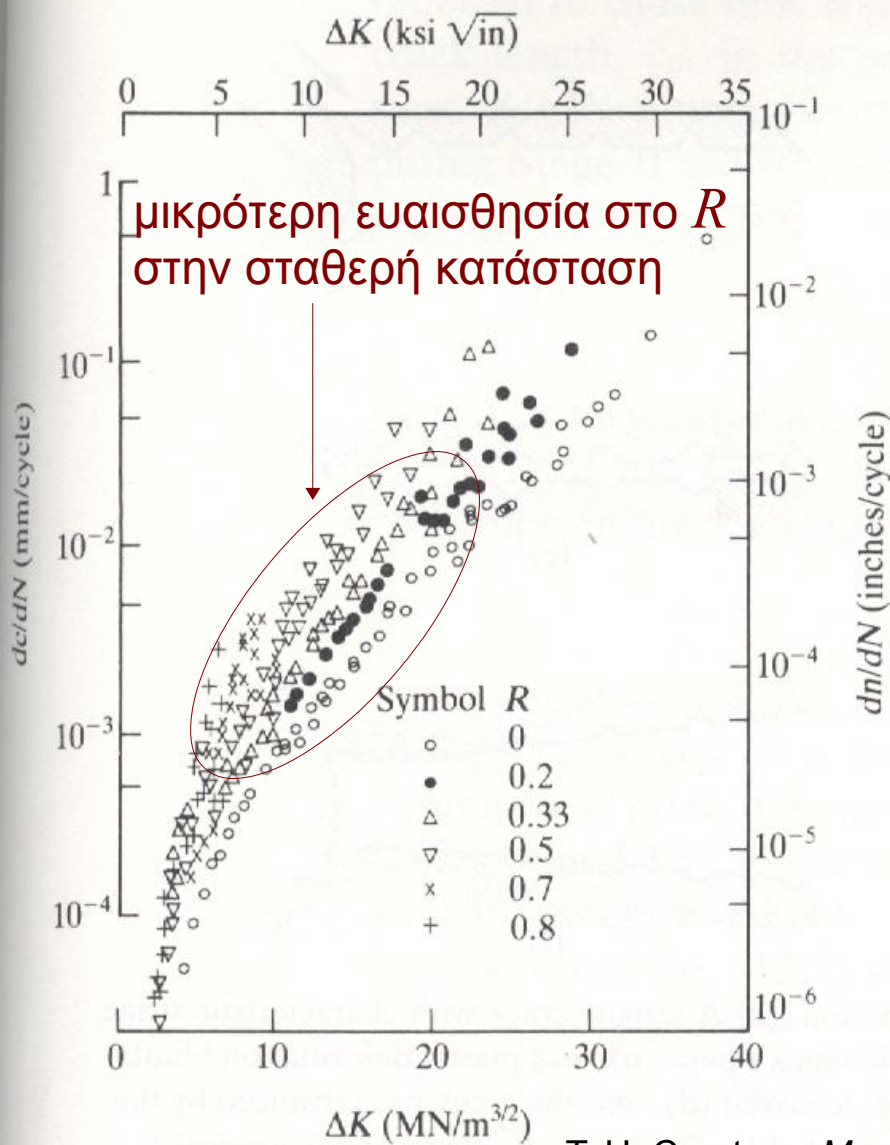
σταθερή κατάσταση
 (Νόμος του Paris)

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad 2 \leq m \leq 7$$

$$N_f = \int_0^{N_f} dN = \int_{\alpha_0}^{\alpha_f} \frac{d\alpha}{A(\Delta K)^m}$$

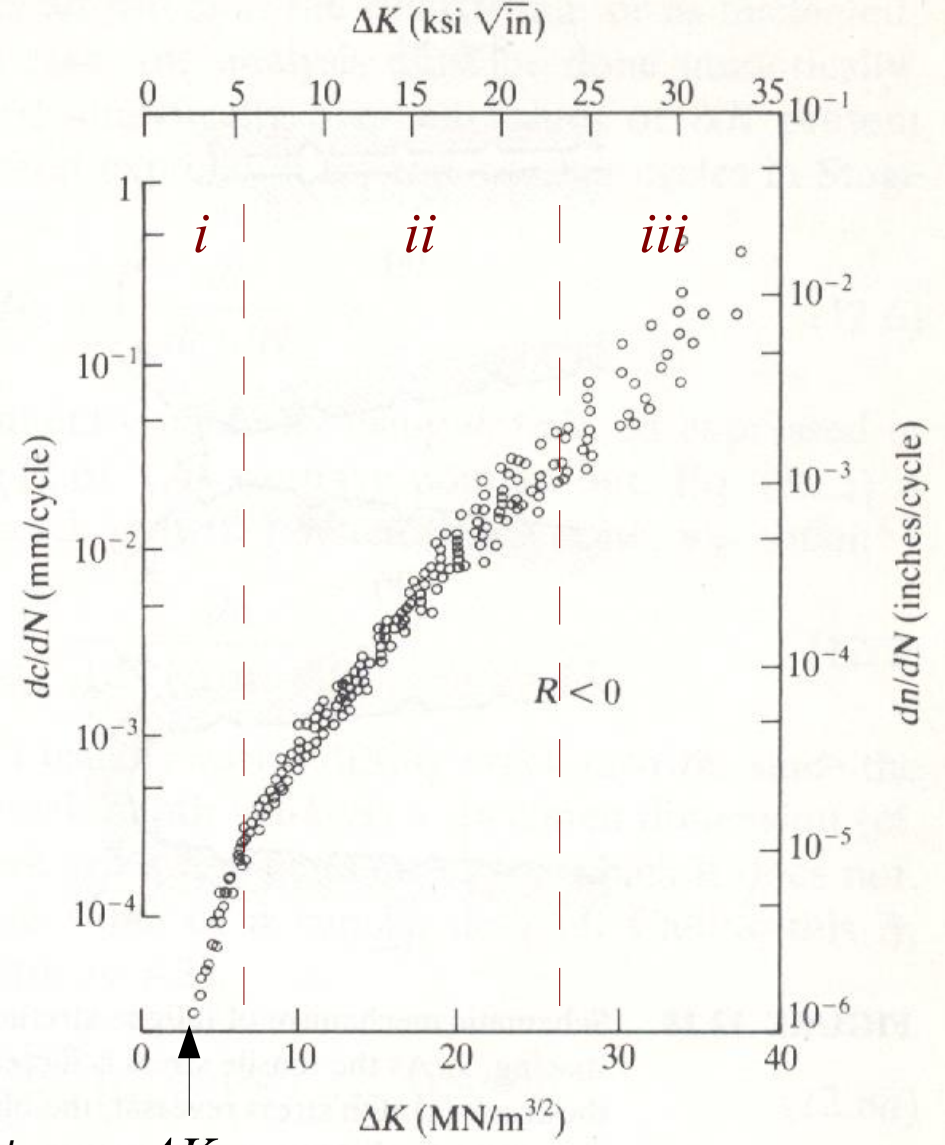
Κόπωση – ταχύτητα διάδοσης και R

κράμα αλουμινίου 7075-T6 : αποτελέσματα για σταθερό σ_a



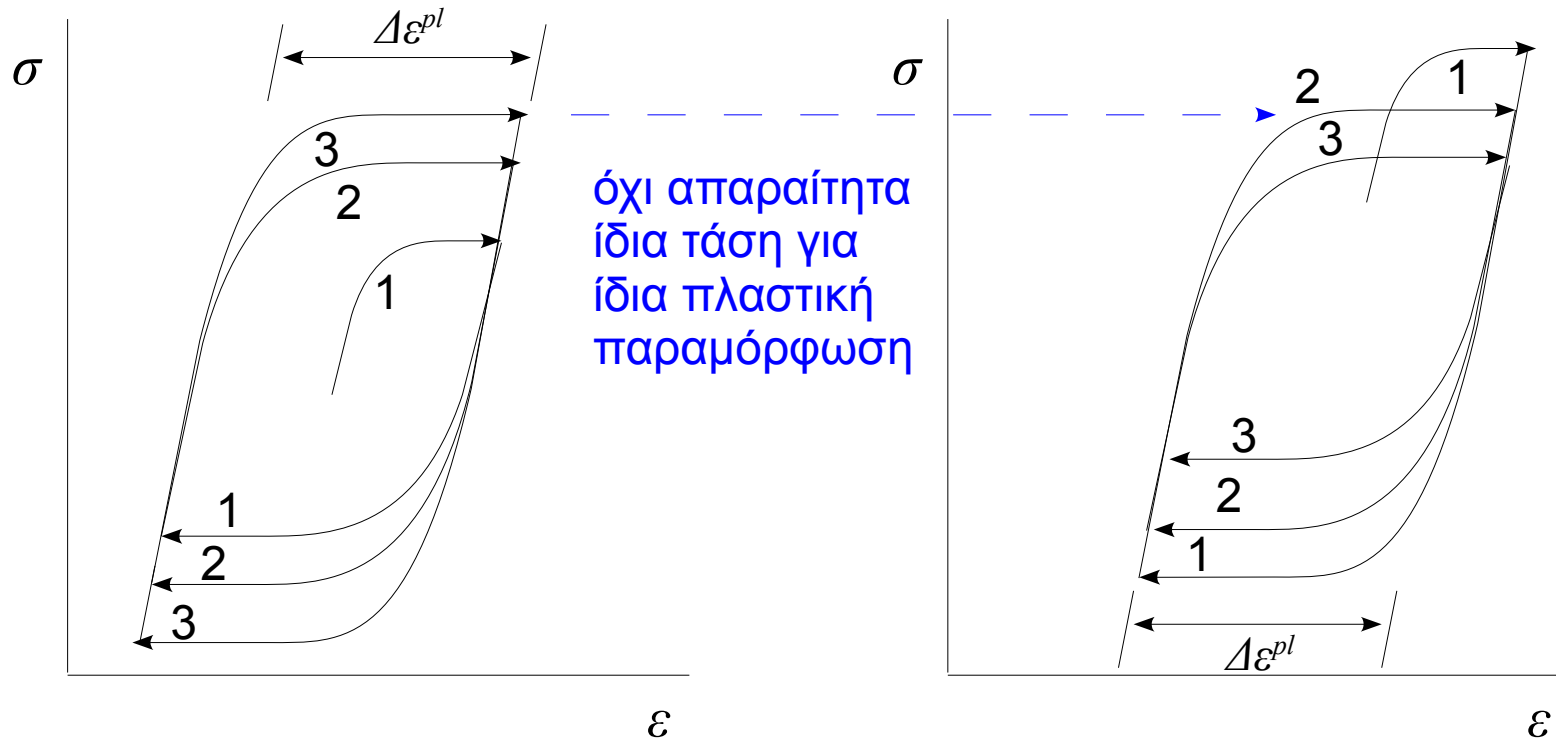
(a)

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



(b)

Κόπωση – συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης



το εύρος τάσεων *αυξάνεται* για να διατηρήσει το επιβαλλόμενο εύρος παραμορφώσεων, $\Delta\varepsilon^{pl}$

το υλικό σκληραίνει

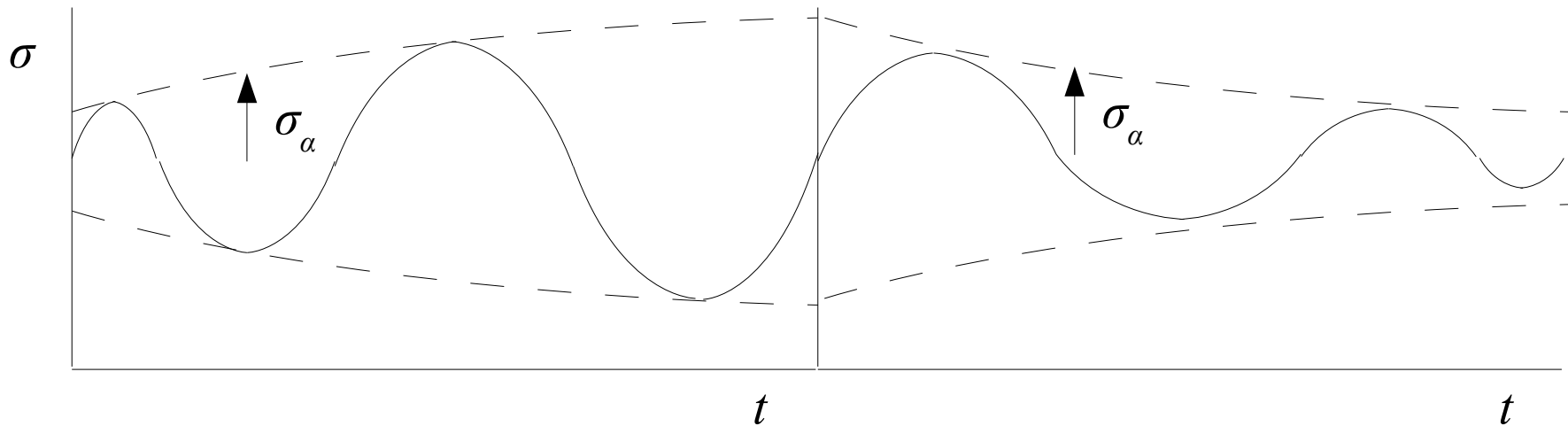
η τάση φτάνει σε σταθερή τιμή μετά από κάποιους κύκλους φόρτισης (τυπικά λιγότερους από 100)

το ίδιο υλικό, ανάλογα με το επίπεδο εργοσκληρυνσής του, μπορεί να σκληρύνει ή να μαλακώσει

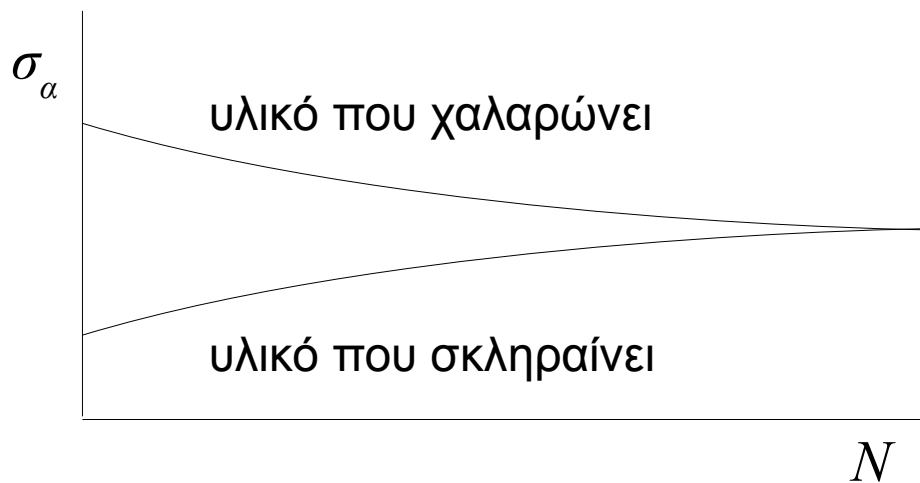
το εύρος τάσεων *μειώνεται* για να διατηρήσει το επιβαλλόμενο εύρος παραμορφώσεων, $\Delta\varepsilon^{pl}$

το υλικό μαλακώνει

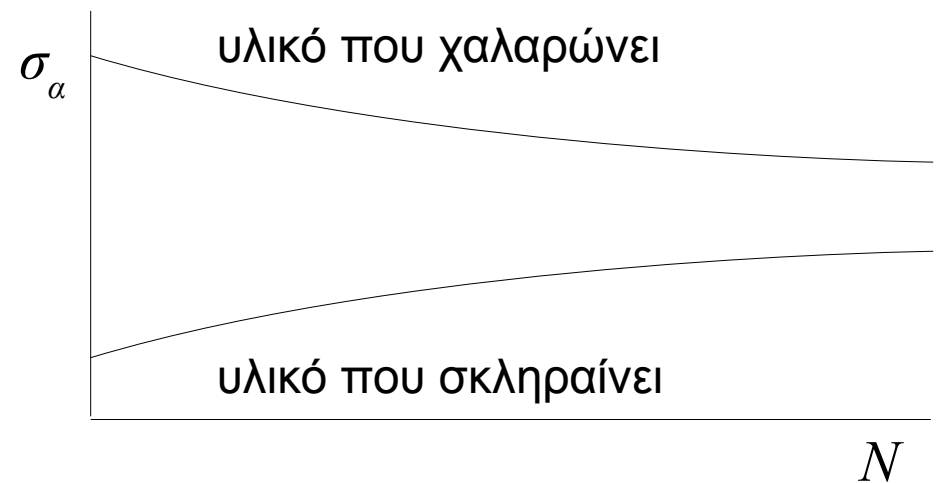
Κόπωση – σκλήρυνση / χαλάρωση (1)



το υλικό σκληραίνει / χαλαρώνει και, τυπικά, το εύρος τάσεων φτάνει σε σταθερή κατάσταση μετά από μερικούς κύκλους



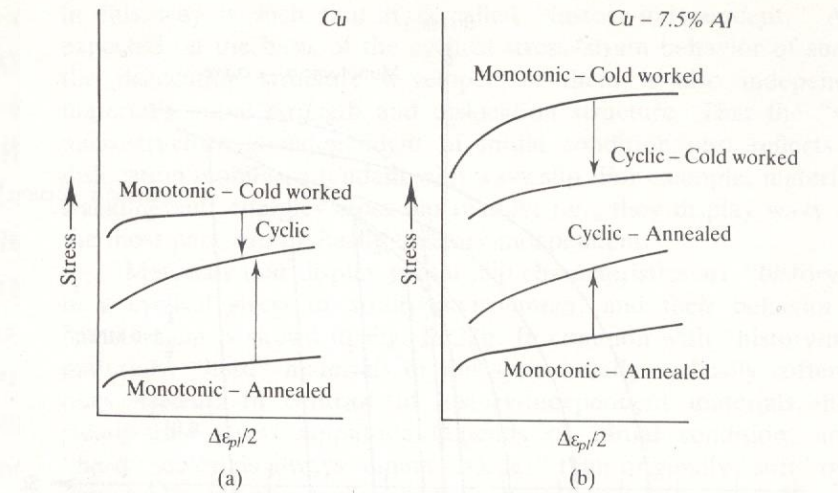
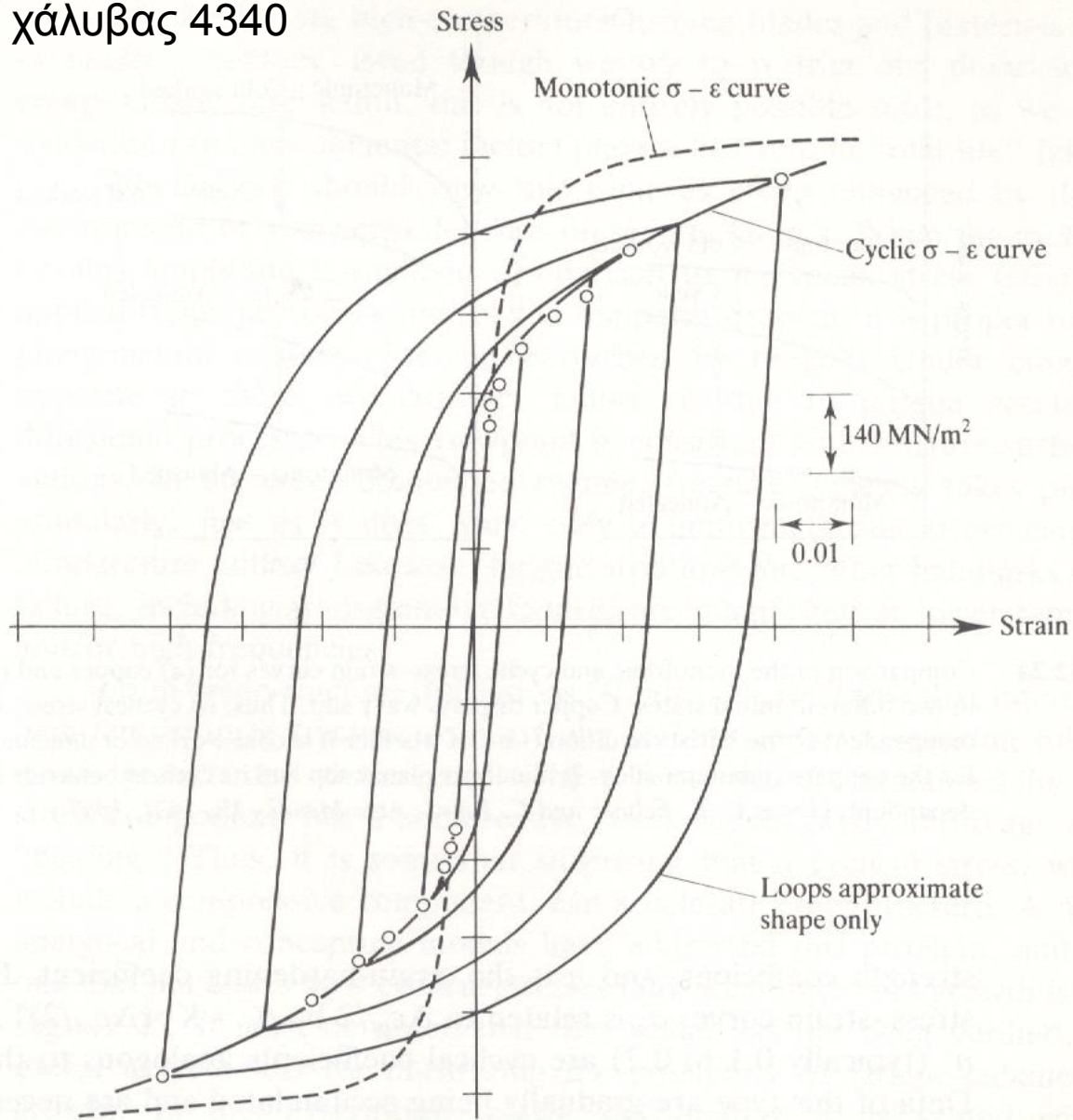
“ανεξάρτητα ιστορίας” - “κυματιστή” ολίσθηση



“εξαρτημένα ιστορίας” - επίπεδη ολίσθηση

Κόπωση – σκλήρυνση / χαλάρωση (2)

χάλυβας 4340



Comparison of the monotonic and cyclic stress-strain curves for (a) copper and (b) Cu - 7.5% Al

Cu
“ανεξάρτητο
ιστορίας”

Cu - 7.5% Al
“εξαρτημένο
ιστορίας”

Κόπωση πολυμερών – γενικές παρατηρήσεις

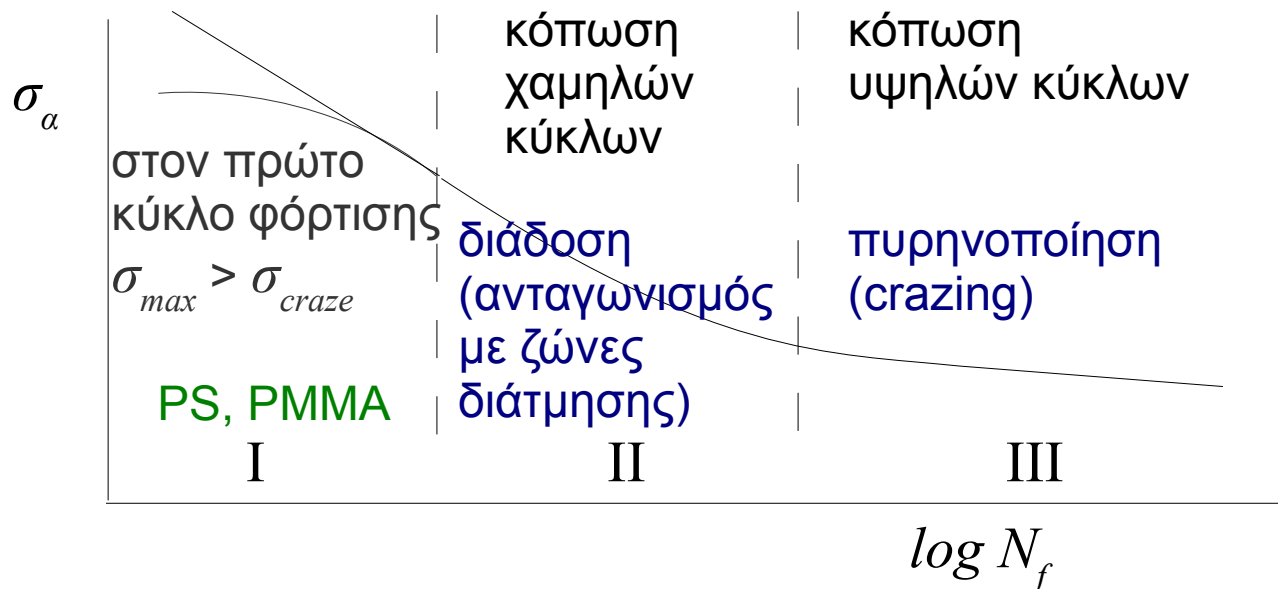
Η κόπωση πολυμερών σχετίζεται με την θερμοκρασία :

η θερμοκρασία δωματίου είναι υψηλό ποσοστό του T_g

η ιξωδελαστική συμπεριφορά (ανελαστικότητα) προκαλεί *αύξηση της θερμοκρασίας*

ακόμη και σε μακροσκοπικά ελαστικές τάσεις η παραμόρφωση μπροστά από την κορυφή μιας ρωγμής που διαδίδεται σε κόπωση έχει μερικό πλαστικό χαρακτήρα με αποτέλεσμα την *τοπική θέρμανση*

Διακρίνεται ομοιογενής ροή από ανομοιογενή (ζώνες διάτμησης και crazing)

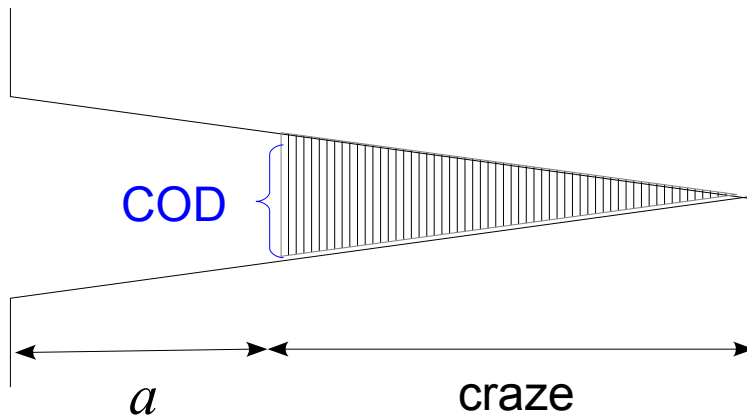


Κόπωση πολυμερών – διάδοση ρωγμής (1)

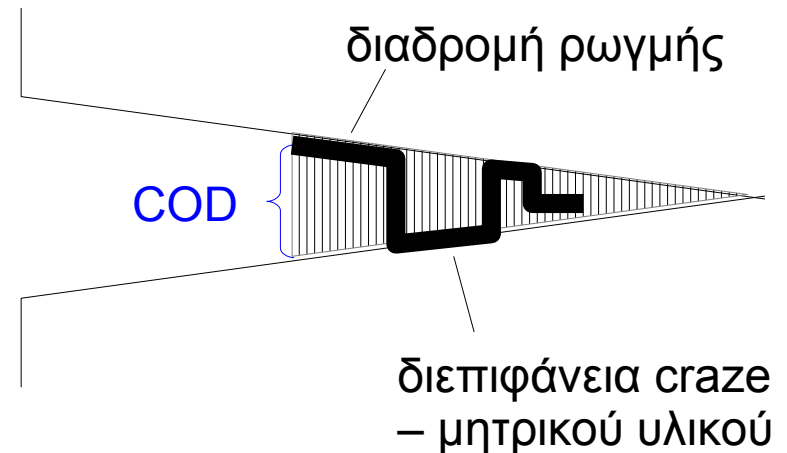
Συνήθως, η μικροσκοπικά ετερογενής πλαστική ροή μπροστά από την ρωγμή σχετίζεται με crazing

Σε μεγάλα ΔK παρατηρούνται αυλακώσεις που αντιστοιχούν στην πρόοδο της ρωγμής σε κάθε κύκλο (όπως στα μέταλλα)

Σε μικρότερα ΔK παρατηρούνται αυλακώσεις με μεγαλύτερες αποστάσεις από τις αναμενόμενες (ασυνεχής διάδοση ρωγμής – DCG: γεγονότα διάδοσης διαδέχονται περιόδους ακινησίας)

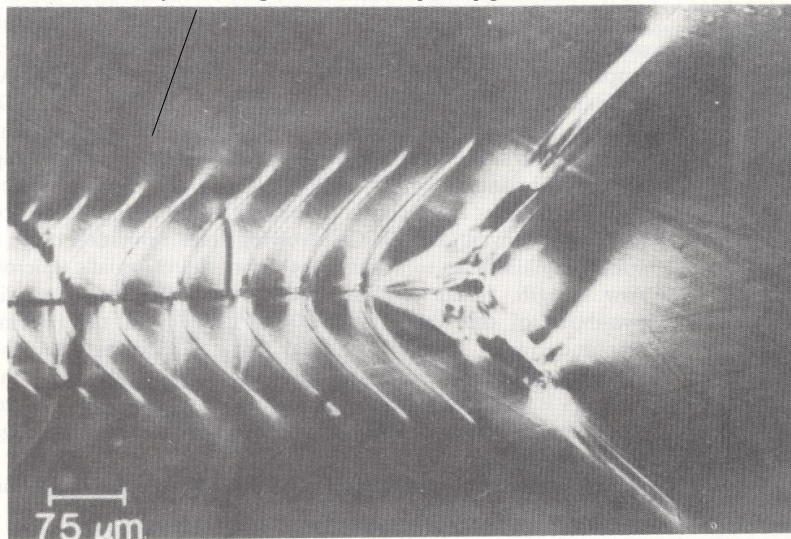
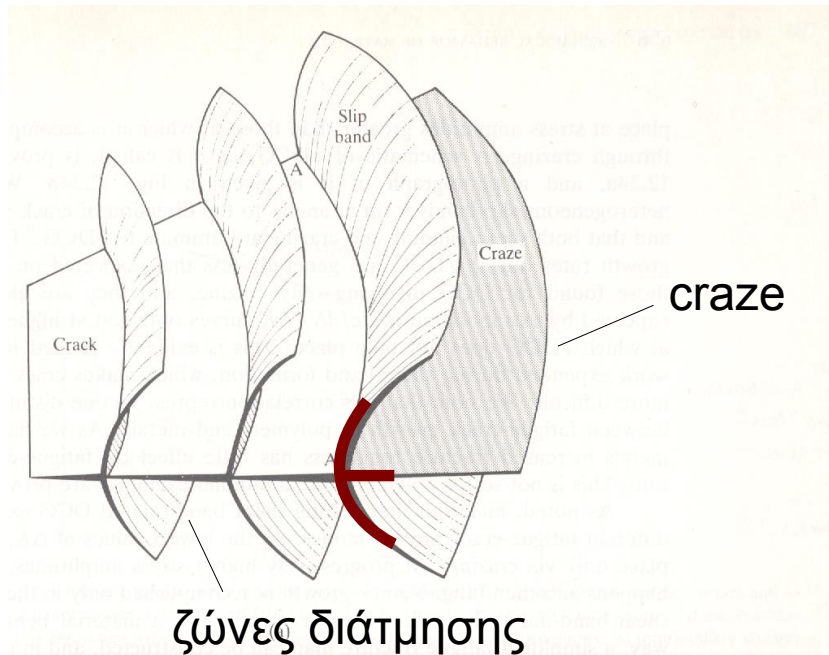


το άνοιγμα της ρωγμής (COD) αυξάνεται κατά την περίοδο ακινησίας



όταν το άνοιγμα αυξηθεί πέραν μιας κρίσιμης τιμής προκαλείται ένα γεγονός διάδοσης

Κόπωση πολυμερών – διάδοση ρωγμής (2)

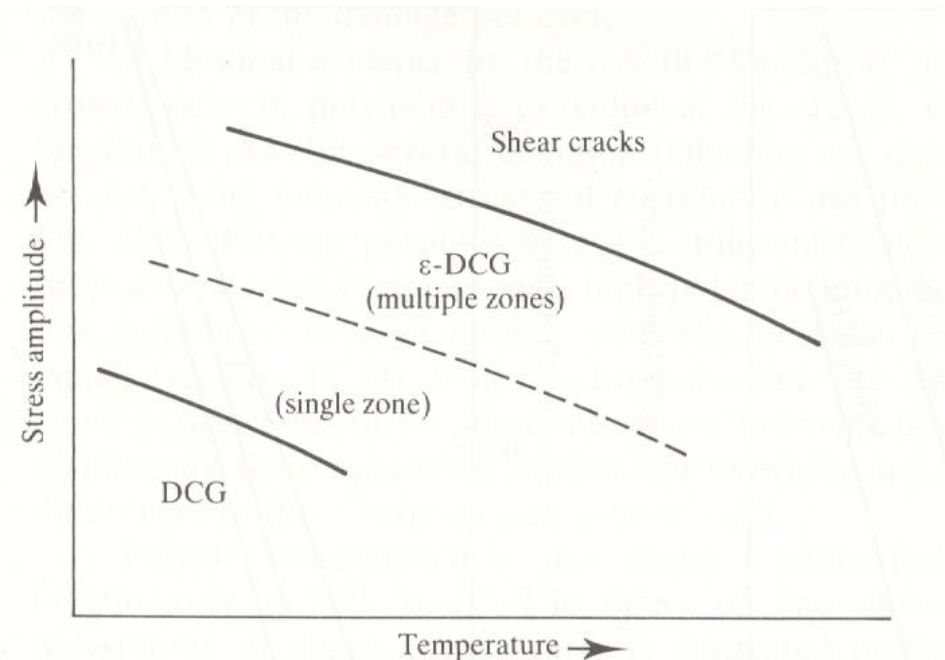


(b)

(a) Schematic and (b) actual appearance of deformation morphology associated with ϵ DCG. As for conventional DCG, crack tip crazing is present in ϵ DCG. However, slip bands are also found at the crack tip, and this makes crack advance more difficult for ϵ DCG. (M. T. Takemori, *Reproduced with permission, from the Ann. Rev. of Mats. Sc.*, **14**, 171, © 1984 by Annual Reviews Inc.)

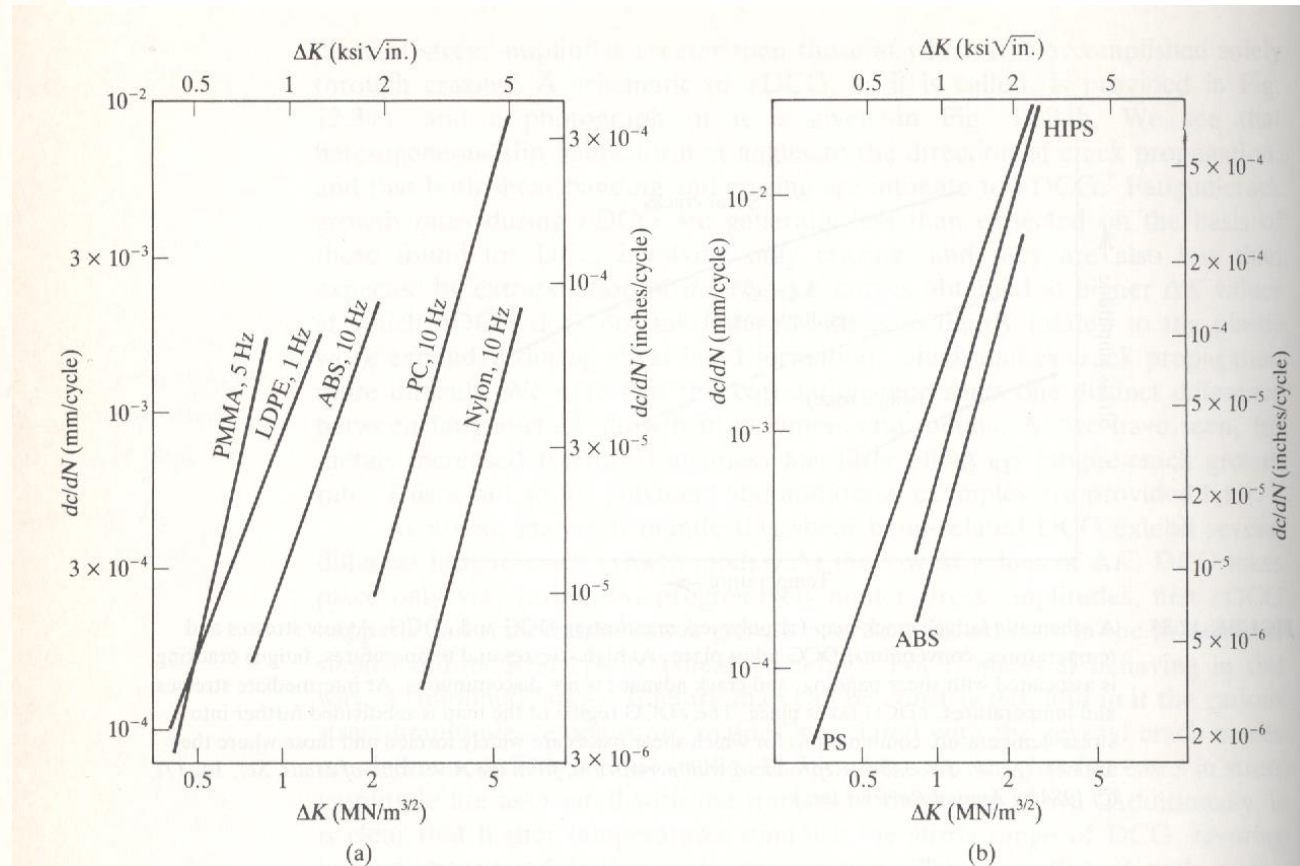
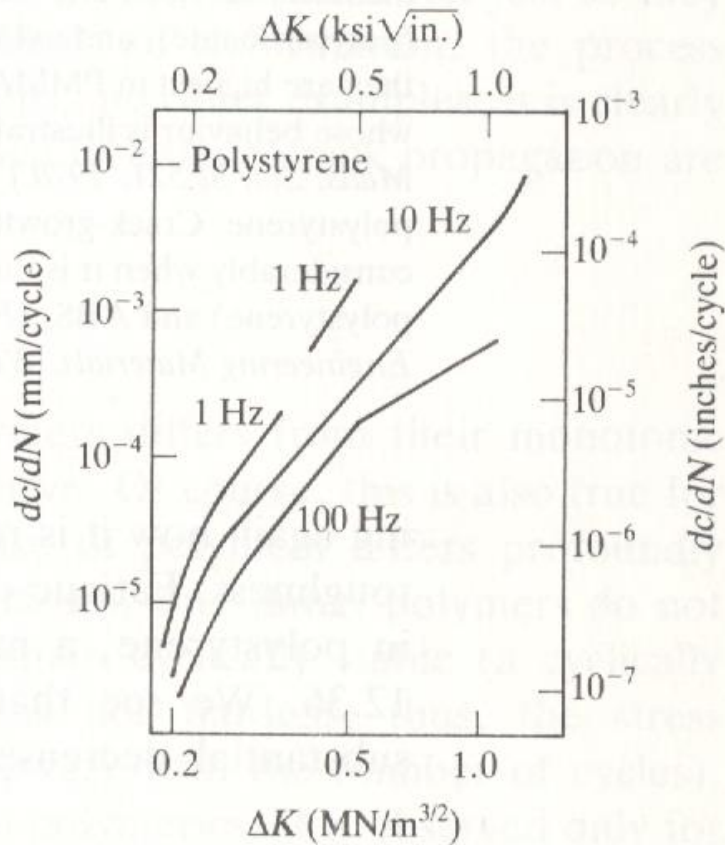
Σε πολυμερή με προδιάθεση παραμόρφωσης μέσω ζωνών διάτμησης (σε υψηλότερα σ_α) η ασυνεχής διάδοση συνοδεύεται και από ζώνες διάτμησης (ϵ DCG)

Οι ζώνες διάτμησης αυξάνουν την δυσθραυστότητα και καθυστερούν την διάδοση της ρωγμής κόπωσης



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

Κόπωση πολυμερών – διάδοση ρωγμής (3)



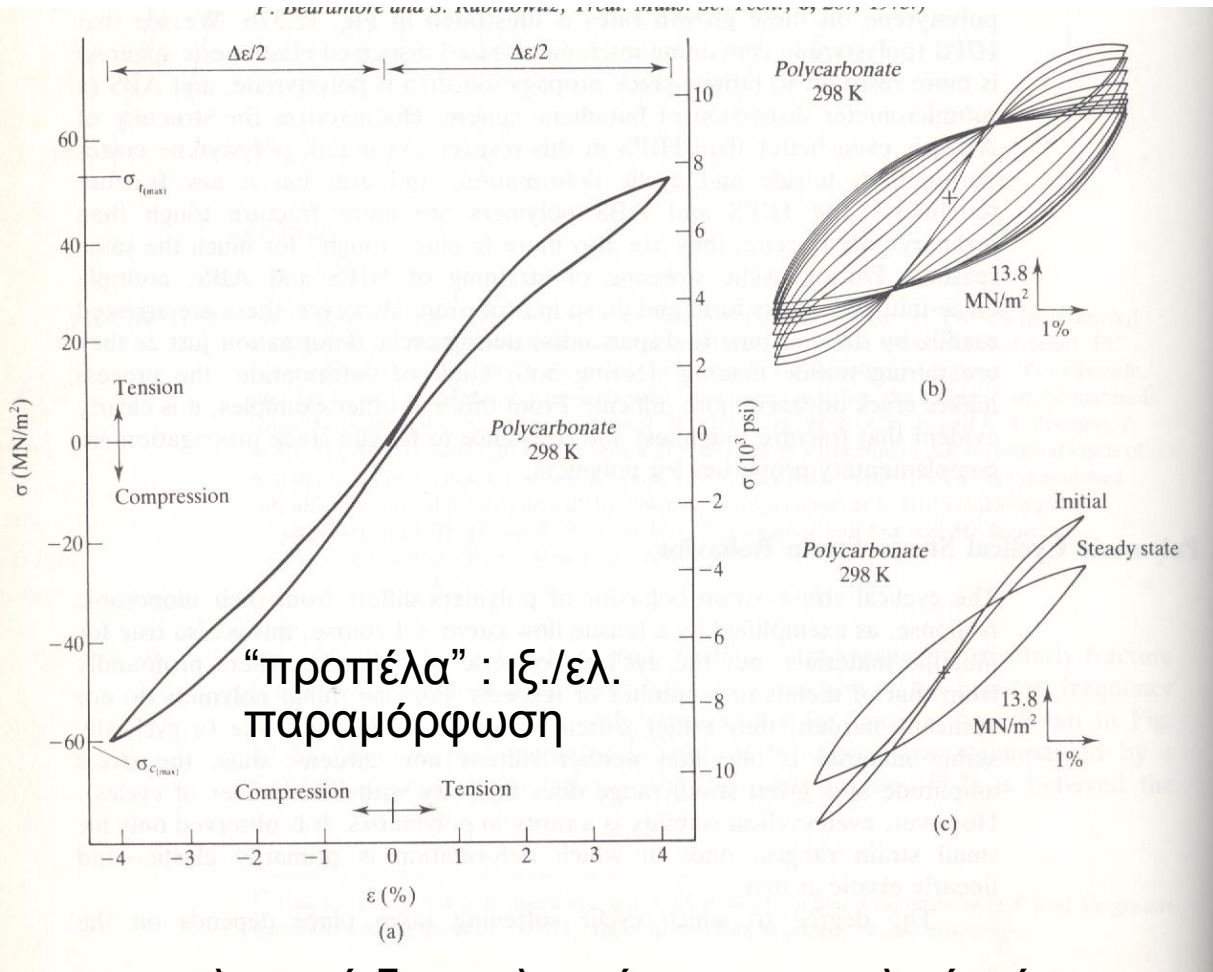
T. H. Courtney, *Mechanical behavior of materials*, McGraw - Hill, New York, 1990

Ο ρόλος της δυσθραυστότητας είναι σημαντικός στην κόπωση σταδίου II των πολυμερών :

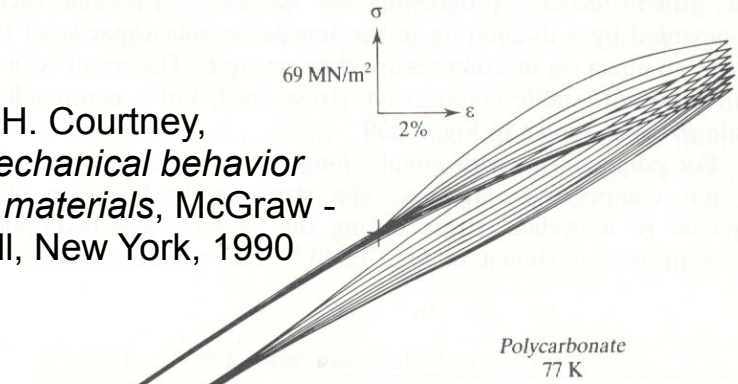
μείωση της ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής με αύξηση της συχνότητας λόγω αύξησης σ_{craze} με τον ρυθμό παραμόρφωσης

χαμηλότερη ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής για “δύσθραυστα” πολυμερή

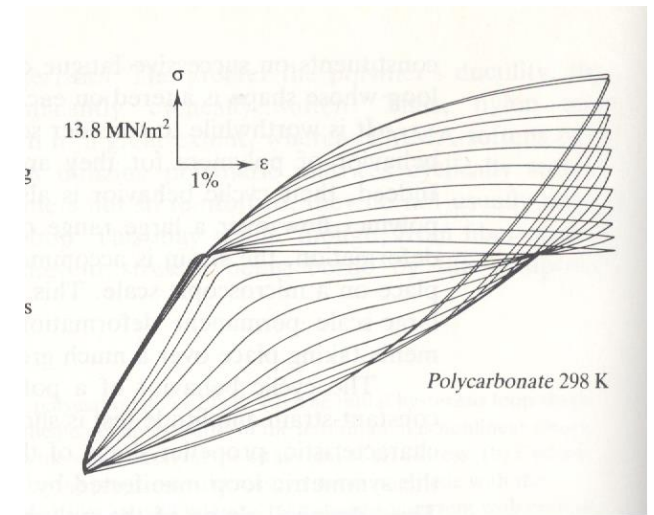
Κόπωση πολυμερών – χαλάρωση τάσεων



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



crazing : ασυμμετρία στην χαλάρωση



διάδοση σταδίου II : ασυμμετρία στην χαλάρωση

τα πολυμερή δεν σκληραίνουν με κυκλική φόρτιση - είτε εμφανίζουν σταθερή τάση είτε μαλακώνουν ο βαθμός χαλάρωσης αυξάνεται με την ολκιμότητα χαλάρωση κατά την κυκλική φόρτιση παρουσιάζουν και σύνθετα με πολυμερική μήτρα

Κόπωση πολυμερών – επίδραση της θερμοκρασίας

σε κάθε κύκλο χάνεται ενέργεια με την μορφή θερμότητας : $\delta Q = K \sigma_a^2$

ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η θερμότητα (απώλεια ισχύος) : $\dot{Q} = K v \sigma_a^2$

για αδιαβατική θέρμανση η θερμοκρασία αυξάνεται με ρυθμό : $\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q}}{C_p} = \frac{K v \sigma_a^2}{C_p}$

