

# Μηχανικές Ιδιότητες Πολυμερών

Εισαγωγή στην Ιξωδοελαστικότητα

Μηχανική αστοχία

Τα πολυμερή είναι **ιξωδοελαστικά** υλικά καθώς η απόκρισή τους σε μία ασκούμενη δύναμη είναι ταυτόχρονα **ελαστική** και **ιξώδης** παραμόρφωση

Ανάλογα με την **θερμοκρασία** και την **χρονική κλίμακα** του πειράματος μπορούν να εμφανίσουν όλη την ενδιάμεση περιοχή ιδιοτήτων από ένα **ελαστικό στερεό** μέχρι ένα **ιξώδες υγρό**

### γραμμική ιξωδοελαστικότητα

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$

Νόμος Newton

$$\sigma = \eta \dot{e}$$

$$e = (L - L_0) / L_0$$

$$\sigma = G \gamma$$

Νόμος Hooke

$$\sigma = E e$$

$$e = dL / L_0$$

διάτμηση

εφελκυσμός

διάταση

**Μονοαξονική φόρτηση:** **Ερπυσμός (creep)**  
**χαλάρωση τάσης (stress relaxation)**  
**Δυναμικές μηχανικές ιδιότητες**

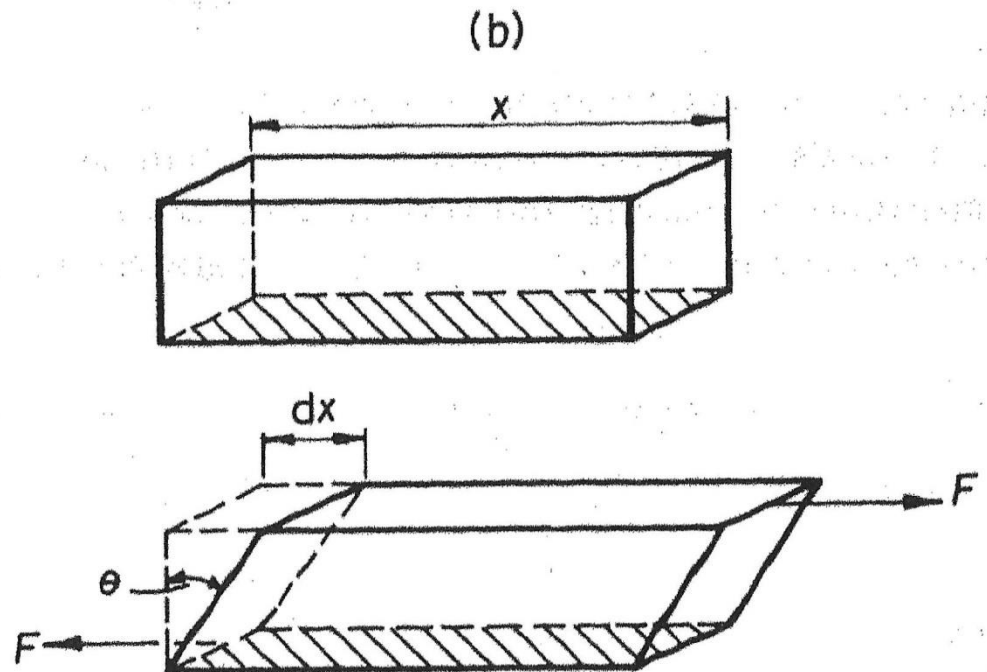
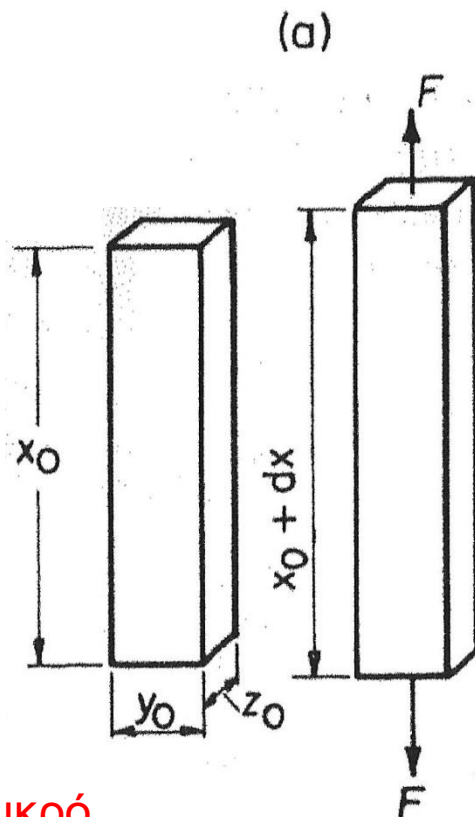
**Οι δοκιμές πραγματοποιούνται στην γραμμική περιοχή που το  $\eta$  και το  $G$  είναι ανεξάρτητα του ρυθμού διάτμησης και παραμόρφωσης αντίστοιχα**

$\sigma = Ee$  εφελκυσμός  
 $\sigma = Ge$  διάτμηση

Λόγος Poisson  
 $\nu_p = (dy/y_0)/dx/x_0$   
 0,5 χωρίς μεταβολή όγκου

$G = (F/yz)/(dx/y) = F/A \tan\theta$   
 $G = F/A\theta$  για πολύ μικρό  $e$

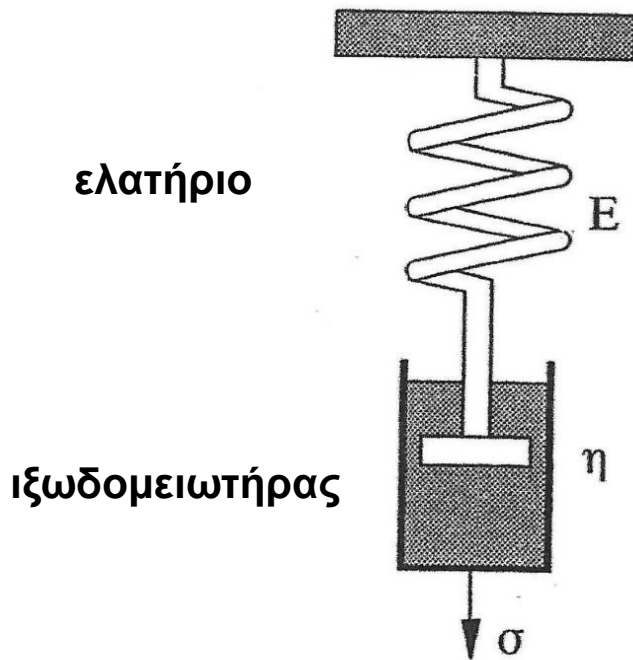
$E = 2(1 + \nu_p) G$   
 τα μέτρα σχετίζονται



Για  $dx$  μικρό  
 ισχύει ο νόμος του Hooke

# Μοντέλο Maxwell

απεικονίζει ένα ιξωδοελαστικό υγρό



$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$$

$$\sigma = E e_1$$

$$\sigma = \eta \dot{e}_2 = \eta (de_2/dt)$$

$$e = e_1 + e_2$$

$$\dot{e} = \dot{e}_1 + \dot{e}_2$$

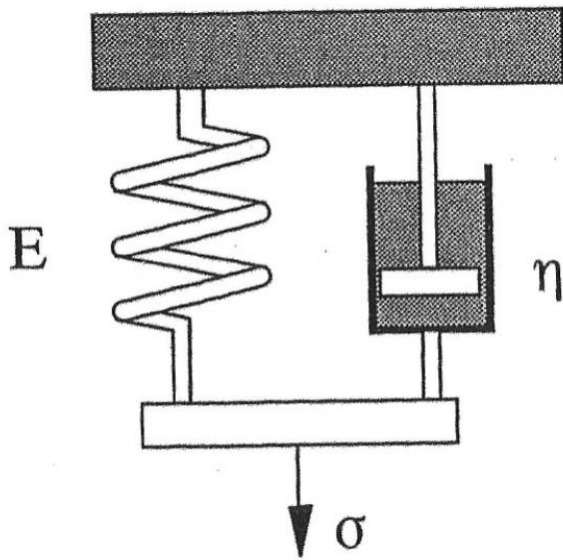


$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma$$

Εξίσωση κίνησης

## Μοντέλο Kelvin (Voigt)

απεικονίζει ένα ιξωδοελαστικό στερεό



$$e = e_1 = e_2$$

$$\sigma_1 = Ee$$

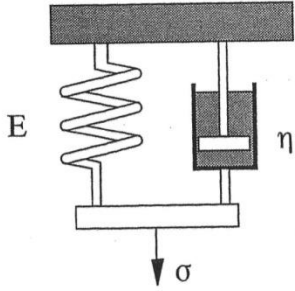
$$\sigma_2 = \eta \dot{e}$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

$$\sigma = Ee + \eta \frac{de}{dt}$$

Εξίσωση κίνησης

**Ερπυσμός (creep):** μεταβολή της παραμόρφωσης με τον χρόνο  $e(t)$  υπό την επίδραση σταθερού φορτίου  $\sigma$



Η διάταση θα αυξηθεί αργά καθώς ο ιξωδομειωτήρας αντιτίθεται στη γρήγορη παραμόρφωση. Καθώς η διάταση αυξάνει κύριο ρόλο αναλαμβάνει η αντίσταση του ελατηρίου ώσπου σε μεγάλους χρόνους η διάταση θα κορεστεί.

στοιχείο Voigt  $\sigma = Ee + \eta \frac{de}{dt}$

$$\left( \frac{de}{dt} + \frac{E}{\eta} e = \frac{\sigma}{\eta} \right)$$

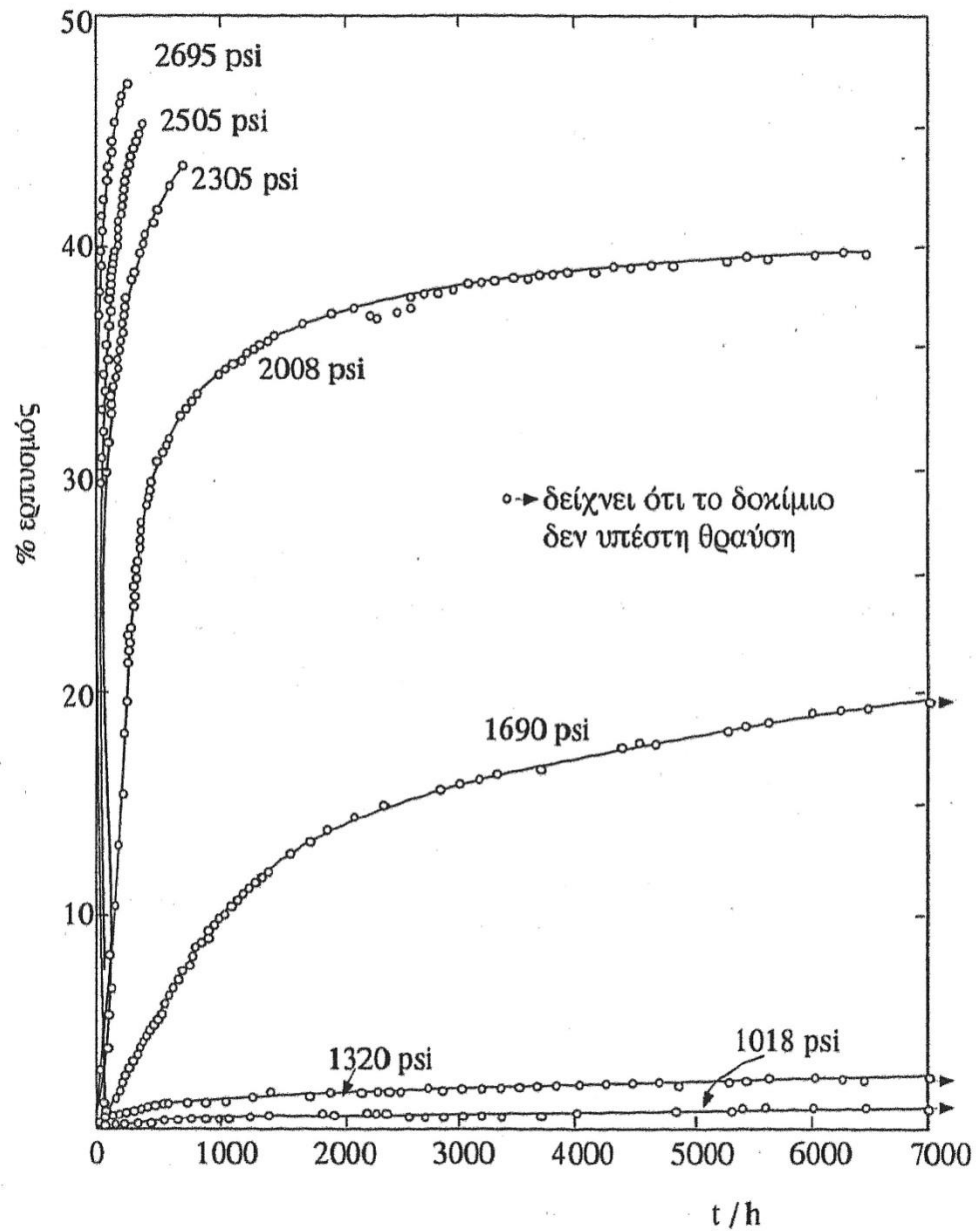
$$e(t) = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right) \right] \quad e(t) = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right) \right]$$

$\tau_R = \eta/E$  χρόνος καθυστέρησης  $e(t) = 63,21\%$  της ολικής  $\sigma/E$

Ανάκτηση:  $\sigma=0, e=e'$   $Ee + \eta \frac{de}{dt} = 0$   $e(t) = e' \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right)$

# ερπυσμός

το υλικό που εμφανίζει σημαντικό ερπυσμό είναι ακατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν διαστατική σταθερότητα



$J(t)=e(t)/\sigma$  ενδοτικότητα (compliance) υλικού

από στοιχείο Maxwell  
ιξωδοελαστικό υγρό

$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma$$

για σταθερή τάση  $\frac{d\sigma}{dt} = 0$



$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{\eta} \sigma$$

ορ. συνθ.  $e(0)=\sigma/E$

$$e = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} t$$

$$J(t) = \frac{e(t)}{\sigma} = \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta} = J_e^0 + \frac{t}{\eta}$$



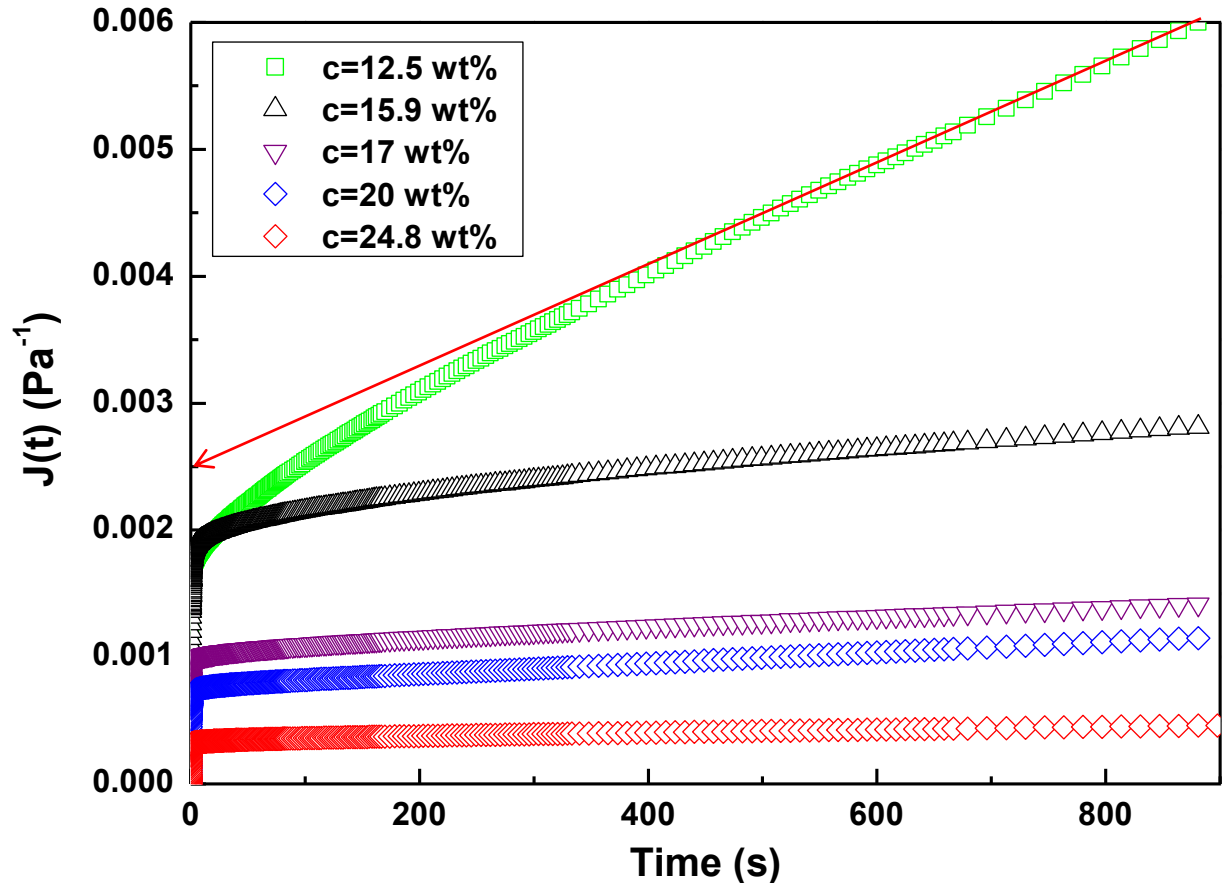
# Ιξωδοελαστικά ρευστά

## Πολυμερικά νανοσωματίδια / ιονικό υγρό (Complex fluids)

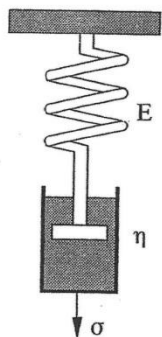
$$J(t) = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{\eta_0} t$$

$$\eta_0 = G_0 \tau_R$$

↑  
προσδιορίζεται



**χαλάρωση τάσης (stress relaxation):** μεταβολή της τάσης με τον χρόνο  $\sigma(t)$  για σταθερή παραμόρφωση



Η αρχική παραμόρφωση οφείλεται εξ ολοκλήρου στο ελατήριο το οποίο θα εξασκήσει μία δύναμη στον ιξωδομειωτήρα προκαλώντας ροή. Τελικά το ελατήριο θα χαλαρώσει επιστρέφοντας στο μήκος ηρεμίας και η τάση θα μηδενιστεί.

από στοιχείο **Maxwell**

$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma$$

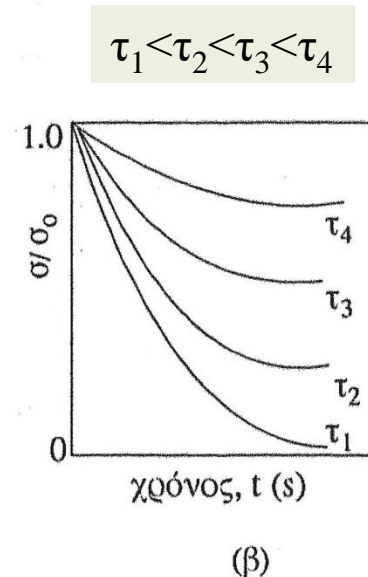
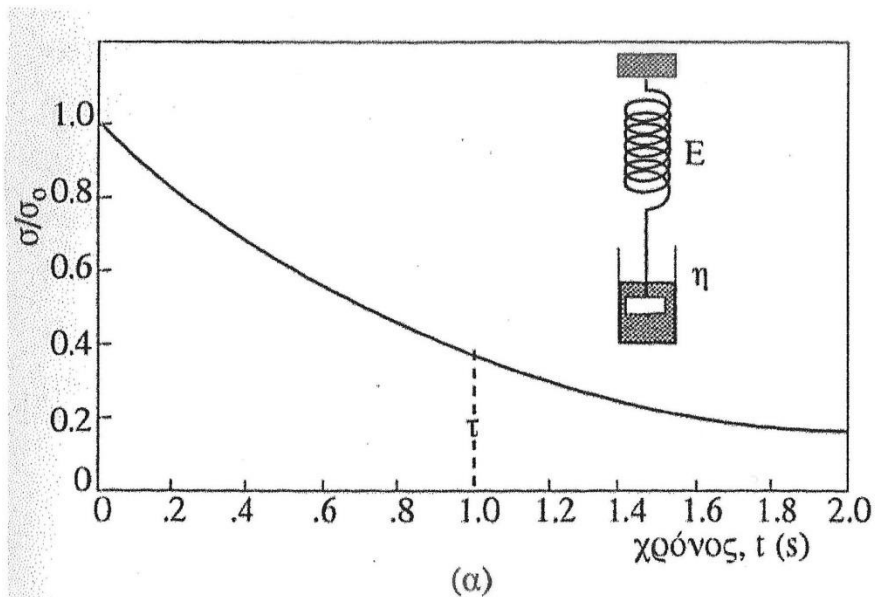
$$\frac{de}{dt} = 0$$

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{\eta} dt$$

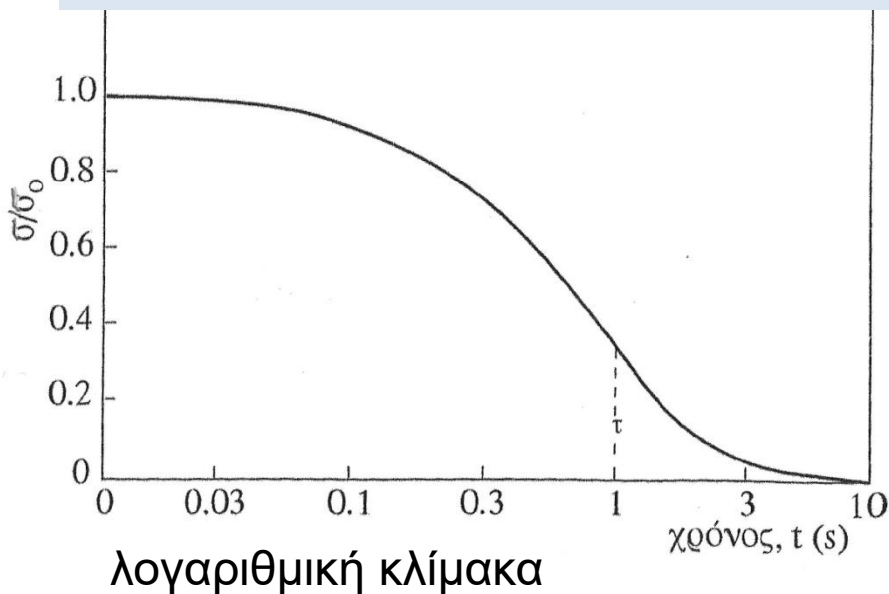
$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \text{εκθετική απόσβεση}$$

$$\tau = \eta/E \quad \text{χρόνος χαλάρωσης} \quad \sigma(\tau) = 0,368\sigma_0 \quad (1/e \sigma_0)$$

Ουσιαστικά ο χρόνος χαλάρωσης είναι ένα μέτρο του χρόνου που απαιτείται για να επιστρέψει το σύστημα στην ισορροπία μετά από οποιαδήποτε διαταραχή



Ανεξάρτητη της παραμόρφωσης στην γραμμική περιοχή



Μέτρο χαλάρωσης

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{e} = \frac{\sigma_0}{e} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Μοντέλα MAX εν παραλλήλω

Γενικευμένο μοντέλο

$$E_r(t) = \int E(\tau) e^{-t/\tau} d\tau + E_\infty$$

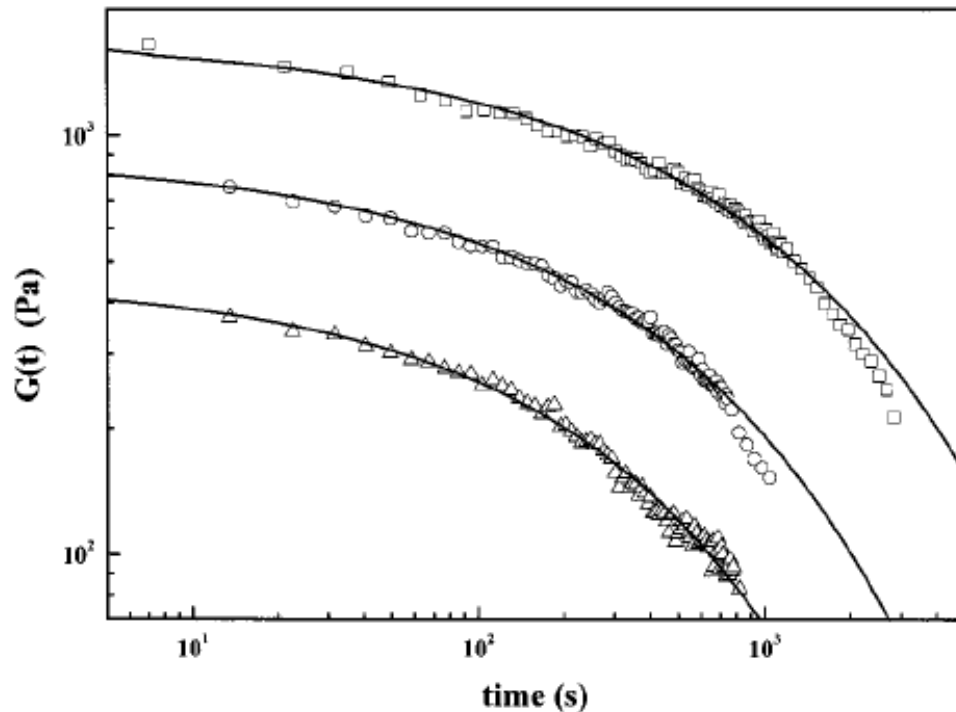
Κατανομή χρόνων χαλάρωσης

$$G(t) = G_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Συμπεριφορά Maxwell  
μοναδικός  $\tau$

$$G(t) = G_0 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\alpha\right]$$

Για κατανομή χρόνων



Φυσικό υδροπήκτωμα από  
ABA συμπολυμερές  
← διαφορετικών συγκεντρώσεων

Το μοντέλο συλλαμβάνει το κύριο χαρακτηριστικό της απόκρισης χαλάρωσης τάσης σε κάθε υγρό. Το υλικό συγκρατεί την τάση για  $t \ll \tau$  αλλά ρέει ώσπου η τάση να εξαφανιστεί για  $t \gg \tau$

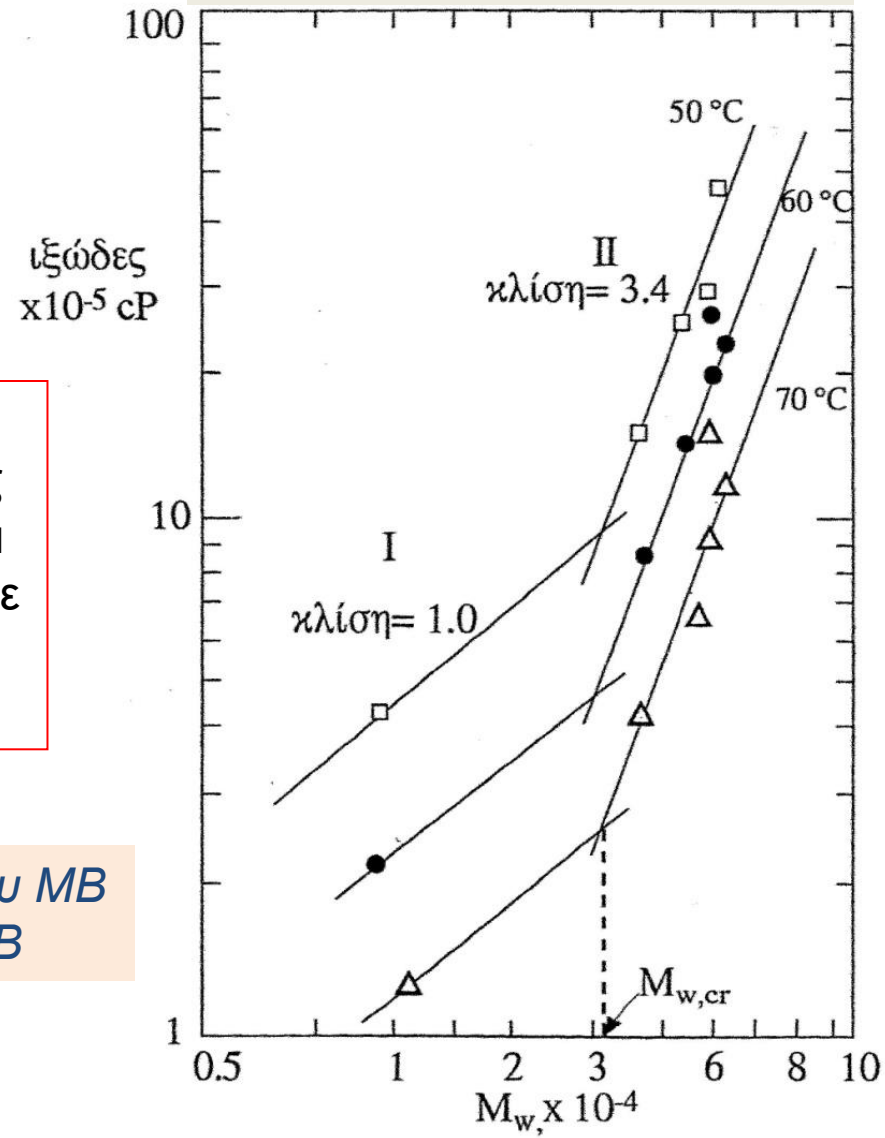
# Επίδραση MB στον ερπυσμό

ερπυσμός εξαρτάται από το η  
αντιστρόφως ανάλογα

Υπάρχει ένα κρίσιμο  $M_{w,cr}$   
χαρακτηριστικό κάθε πολυμερούς  
πάνω από το οποίο εμφανίζονται  
αλληλοεμπλοκές των αλυσίδων με  
αποτέλεσμα το ιξώδες να  
μεταβάλλεται ανάλογα του  $M^{3,4}$

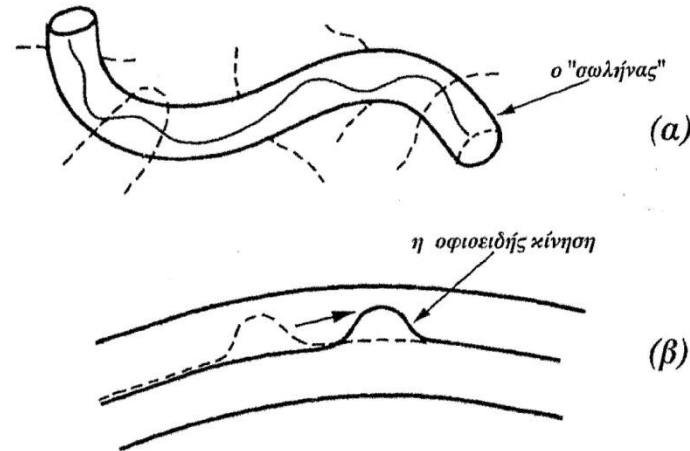
Ερπυσμός αντιστρόφως ανάλογος του MB  
Ανάκτηση ερπυσμού αυξάνει με το MB

Ιξώδες τήγματος πολυμερούς  
συναρτήσεϊ του MB



# Μοντέλο ενδοσωλήνιας κίνησης

P.J. de Gennes



Απόσταση διάχυσης  $\rightarrow \overline{x^2} = 2D\tau$

μήκος σωλήνα = διάσταση αλυσίδας,  $x = nl_0$

$n$  = βαθμός πολυμερισμού  
 $l_0$  = μήκος μονομερούς

$$D_t = \frac{kT}{n\zeta}$$

συντελεστής τριβής ανά μομομερές



$$\tau = \frac{(nl_0)^2}{2D_t}$$

$$\tau = (nl_0)^2 \frac{n\zeta}{2kT} = \left(\frac{l_0^2 \zeta}{2kT}\right) n^3$$

$\tau_0 = 10^{-10} \text{ sec}$

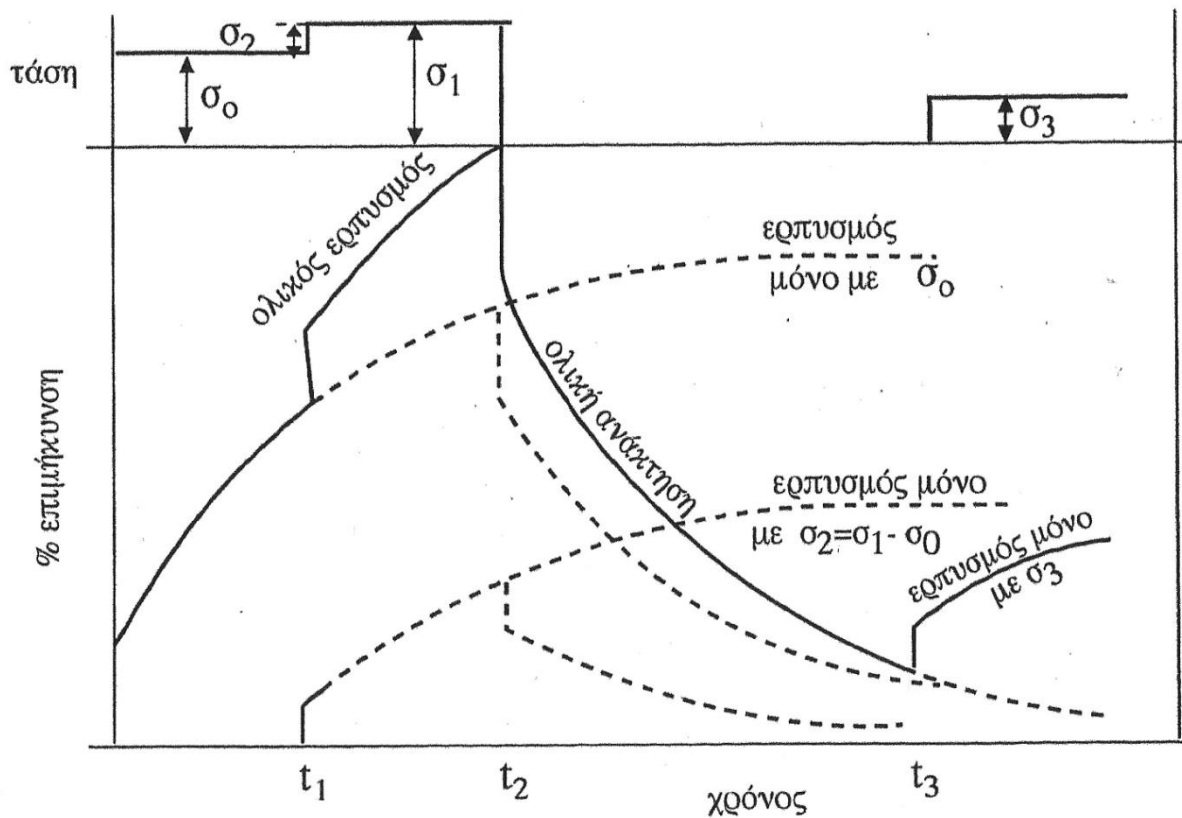
Για  $n=10.000$   
 $\tau=100 \text{ sec}$

$$\eta_0 = G_0 \tau_R$$

## Αρχή επαλληλίας του Boltzmann

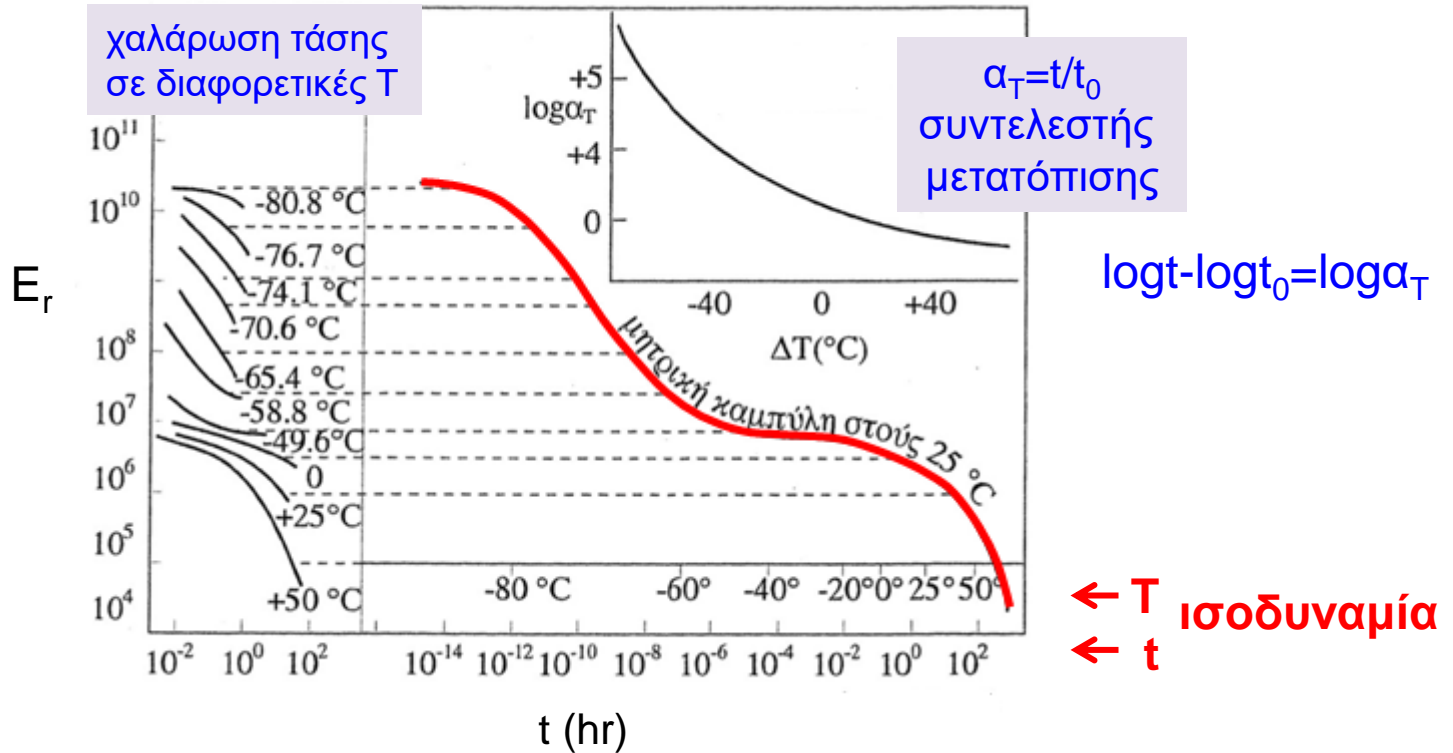
Η τάση στο υλικό είναι το άθροισμα των τάσεων από όλες τις παραμορφώσεις που συνέβησαν στο παρελθόν.

Μπορούμε δηλαδή να προσθέσουμε όλες τις συνεισφορές διότι η απόκριση του υλικού σε οποιαδήποτε παραμόρφωση είναι γραμμική και ανεξάρτητη από το τι συνέβη πριν ή μετά.



# Αρχή ισοδυναμίας χρόνου - Θερμοκρασίας

Μία μέτρηση σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και χρόνο (1/συχνότητα) είναι ισοδύναμη με μία μέτρηση σε χαμηλότερη θερμοκρασία και μεγαλύτερο χρόνο



Οι καμπύλες διορθώνονται προς θερμοκρασία και πυκνότητα

$T_0$  θερμοκρασία αναφοράς:

$$E_r(t)_{\text{διορθ.}} = \left(\frac{T_0 \rho_0}{T \rho}\right) E_r(t)_{\text{πειρ.}}$$

$$\alpha_T = \frac{\tau_1(T)}{\tau_1(T_0)} = \frac{\eta(T)}{\eta(T_0)} \left(\frac{T_0 \rho_0}{T \rho}\right) \cong \frac{\eta(T)}{\eta(T_0)}$$

$$\log \alpha_T = \log \frac{\eta(T)}{\eta(T_0)} = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}$$

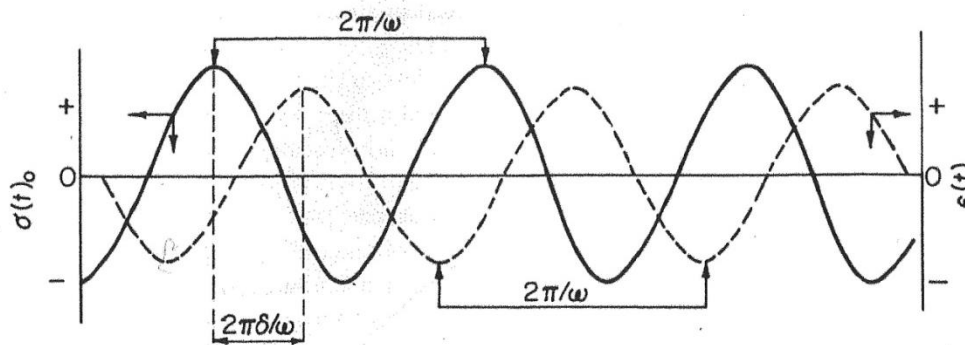
WLF



## Δυναμικές μηχανικές ιδιότητες

Επιβάλλεται στο δοκίμιο μία περιοδικώς μεταβαλλόμενη (ημιτονοειδής) τάση η παραμόρφωση και μελετάται η απόκριση του υλικού.

Στη γραμμική ιξωδοελαστική συμπεριφορά, τόσο η επιβαλλόμενη τάση (η παραμόρφωση) όσο και η αποκρινόμενη παραμόρφωση (η τάση) θα μεταβάλλονται ημιτονοειδώς αλλά θα είναι εκτός φάσης.



$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$$

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$$

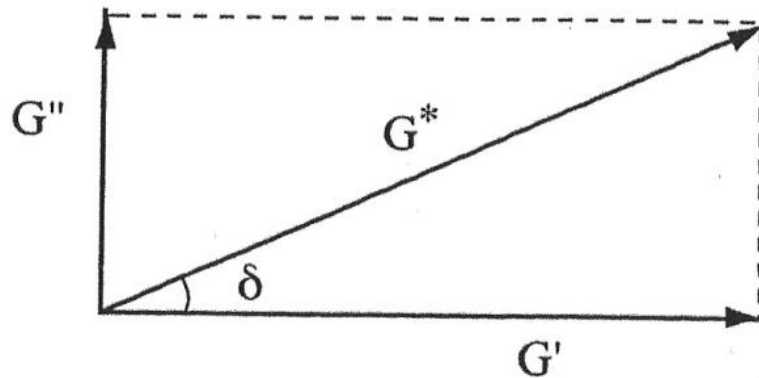
### 2 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ

$$\sigma = (\sigma_0 \cos \delta) \sin \omega t + (\sigma_0 \sin \delta) \cos \omega t \rightarrow \sigma = \gamma_0 G' \sin \omega t + \gamma_0 G'' \cos \omega t$$

σε φάση  $G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta$   
(αποθήκευσης)

διαφορά φάσης 90°  $G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta$   
(απώλειας)

# μιγαδική έκφραση



$$\gamma = \gamma_0 \exp(i\omega t)$$

$$\sigma = \sigma_0 \exp[i(\omega t + \delta)]$$

$$G' = G^* \cos \delta$$

$$G'' = G^* \sin \delta$$

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2}$$

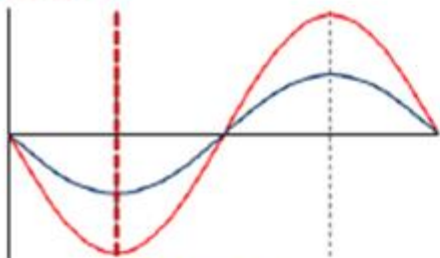
$$\tan \delta = G''/G'$$

$$\frac{\sigma}{\gamma} = G^* = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \exp(i\delta) = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} (\cos \delta + i \sin \delta)$$

$$G^* = G' + iG''$$

$$\frac{G''}{G'} = \tan \delta$$

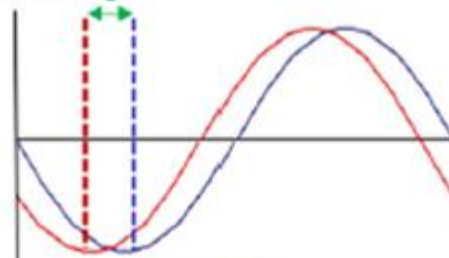
Max stress



Max strain

Elastic ( $\delta = 0$ )

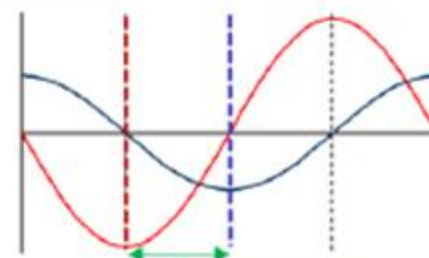
Max stress  $\delta$



Max strain

Viscoelastic ( $0 < \delta < 90^\circ$ )

Max stress



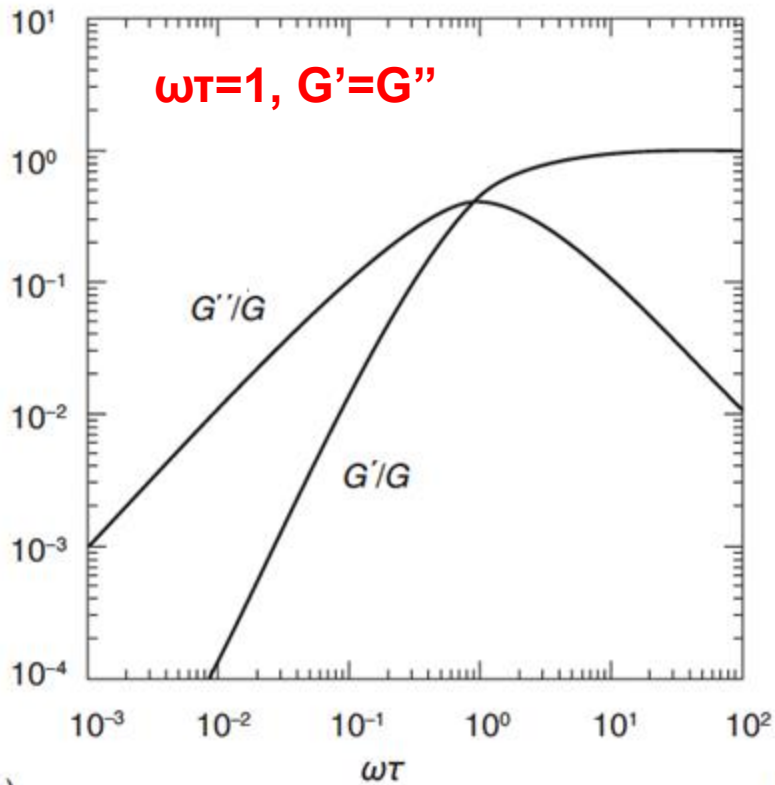
Max strain

Viscous ( $\delta = 90^\circ$ )

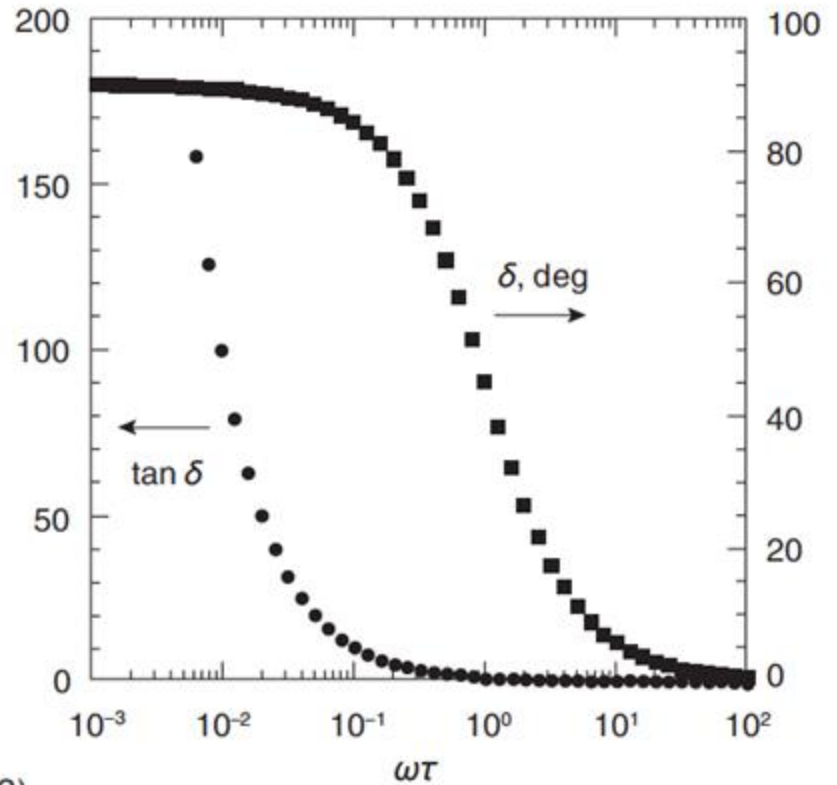
**Figure** Stress and strain wave relationships for a purely elastic (ideal solid), purely viscous (ideal liquid) and a viscoelastic material

$$\omega\tau \ll 1 \quad G' \sim \omega^2 \quad G'' \sim \omega^1$$

$$\omega\tau \gg 1 \quad G' \sim \omega^0 \quad G'' \sim \omega^{-1}$$



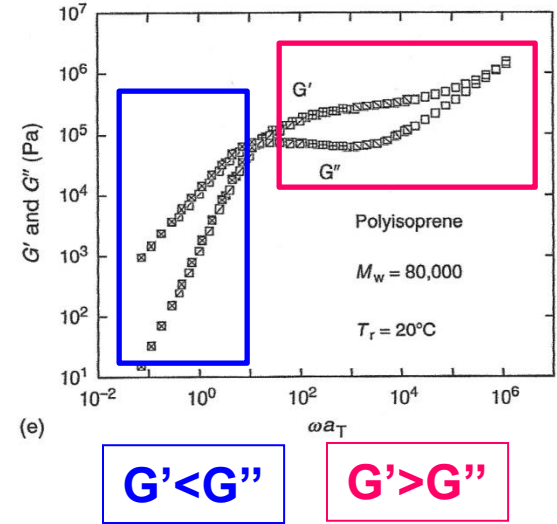
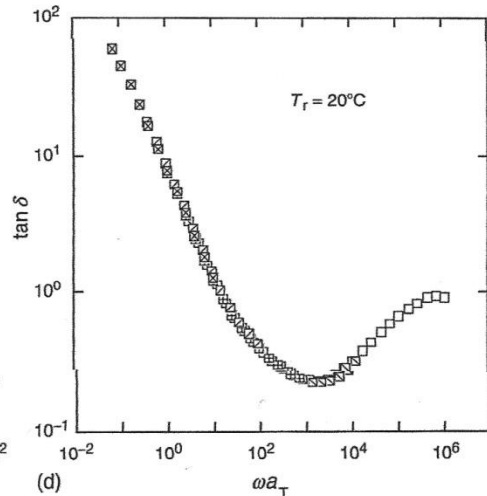
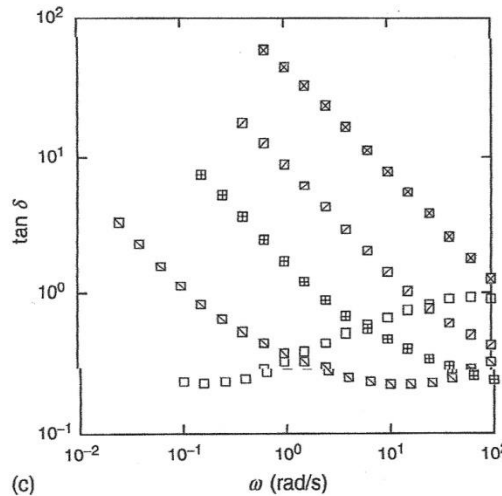
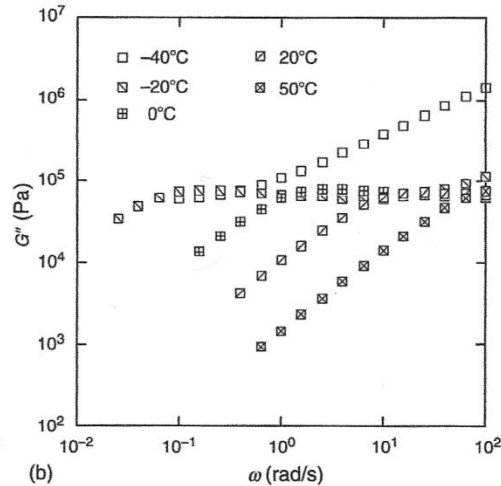
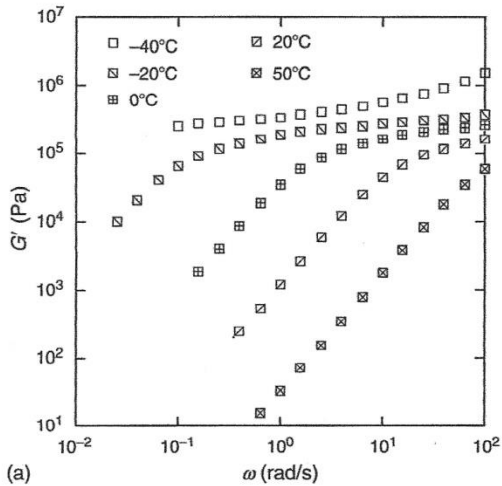
(α)



(β)

(α) Κανονικοποιημένα δυναμικά μέτρα  $G'/G$  και  $G''/G$  και (β) διαφορά φάσης  $\delta$  και επαπτομένη απώλειας  $\tan \delta$ , ως συνάρτηση της ανηγμένης συχνότητας  $\omega\tau$  για το στοιχείο Maxwell.

# Υπέρθεση χρόνου θερμοκρασίας

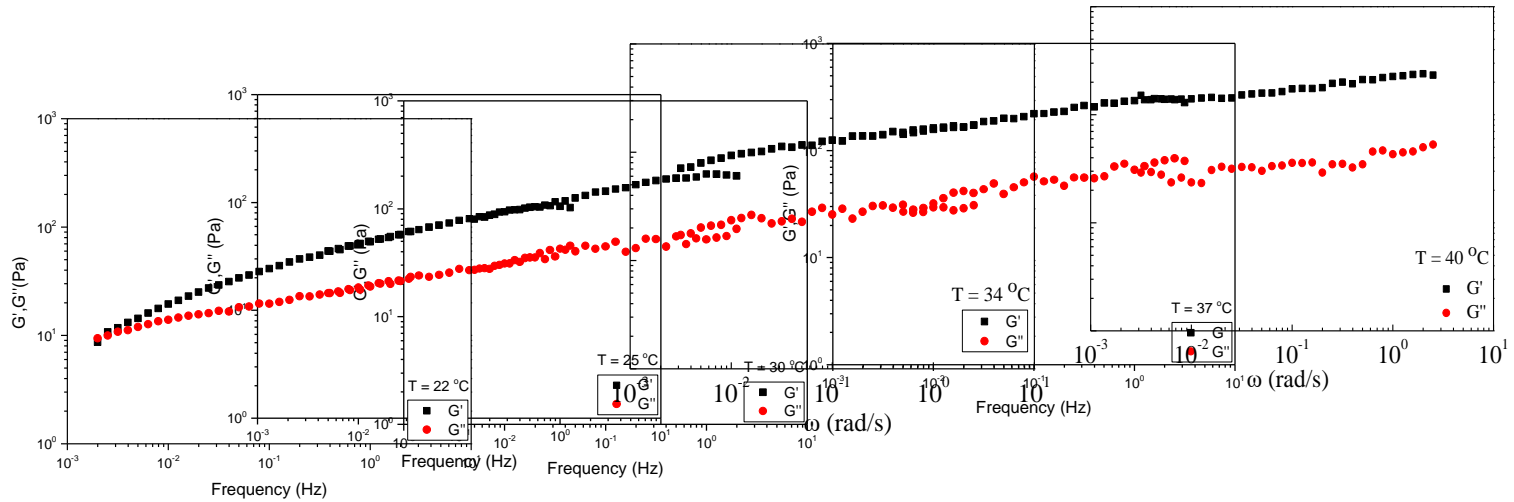


Το υλικό συμπεριφέρεται  
 σαν υγρό σε χαμηλές συχνότητες  
 (σε μεγάλους χρόνους)  
 σαν στερεό σε υψηλές συχνότητες  
 (σε μικρούς χρόνους)

$$G' = \frac{G(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2}$$

$$G'' = \frac{G\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}$$

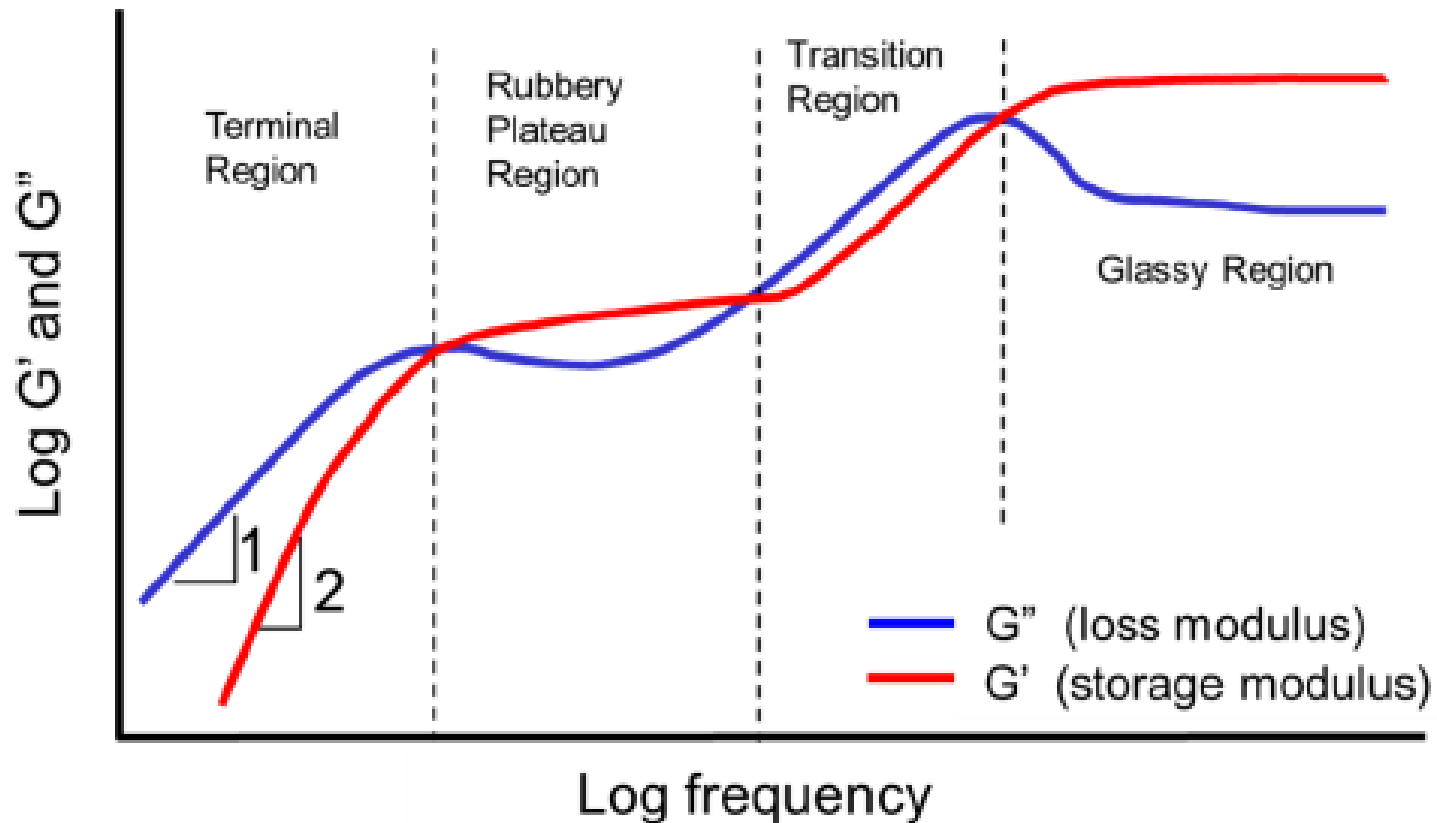
NaAlg-g-P(NIPAM<sub>80</sub>-co-NtBAM<sub>20</sub>)<sub>3</sub>



$\tau_{ref} = 70 \text{ sec}$

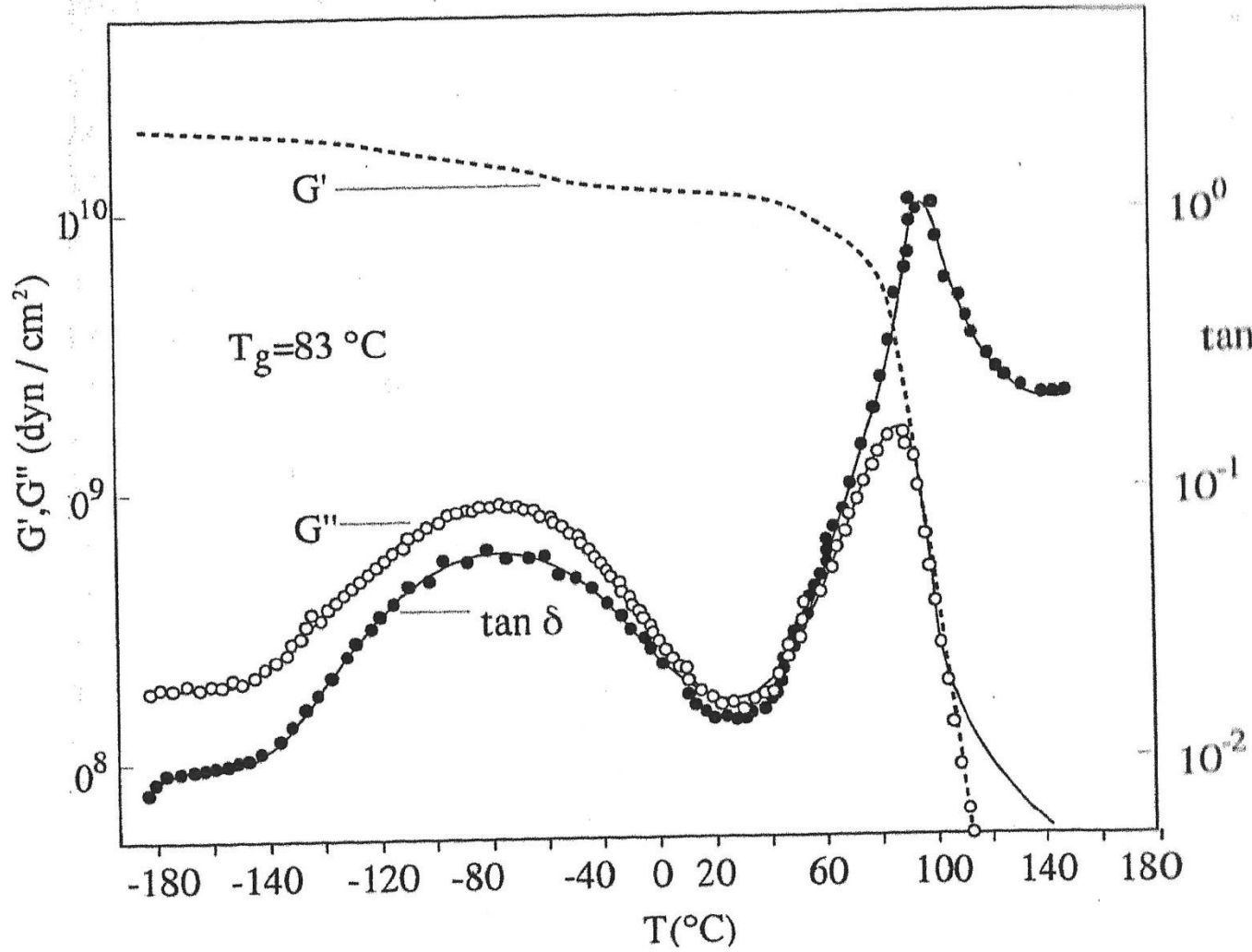
$$\tau = 1/\omega_c$$

$$\tau = \tau_{ref} a_T$$



**A typical viscoelastic spectrum for an entangled polymer system**

# Θερμομηχανικά φάσματα



## **Μηχανική αστοχία των πολυμερών (μεγάλες παραμορφώσεις)**

Η γραμμική ιξωδοελαστικότητα δεν ισχύει στις μεγάλες παραμορφώσεις, ούτε μπορεί να προβλέψει τη θραύση ή την αντοχή των πολυμερών.

ένα πλαστικό αντικείμενο καθίσταται ακατάλληλο για την τελική χρήση για την οποία προορίζεται είτε λόγω υπερβολικής παραμόρφωσης είτε λόγω θραύσης. Το υλικό τότε «αστοχεί» και η υπερβολικής παραμόρφωση ή θραύση αναφέρεται ως **μηχανική αστοχία** (failure)

Επομένως η κατανόηση των μηχανικών τελικών ιδιοτήτων των πολυμερών και των παραγόντων που τις επηρεάζουν είναι κρίσιμη για την ασφαλή χρήση των υλικών αυτών.



## Δοκιμές εφελκυσμού (tensile testing)

### Διαγράμματα τάσης ( $\sigma$ ) παραμόρφωσης ( $\epsilon$ )

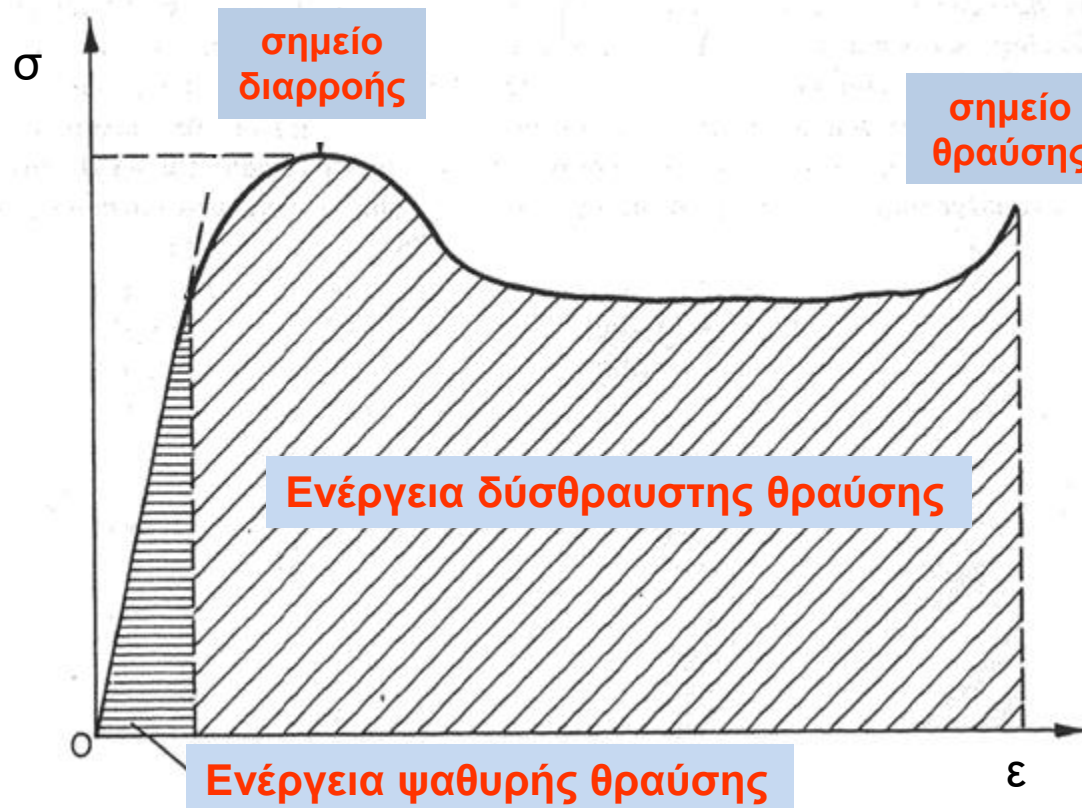
Παράγοντες που επηρεάζουν τη μορφή των διαγραμμάτων είναι: **Θερμοκρασία, Ρυθμός επιμήκυνσης, Προϊστορία υλικού, Γεωμετρία δοκιμίου, Εξωτερική πίεση.**

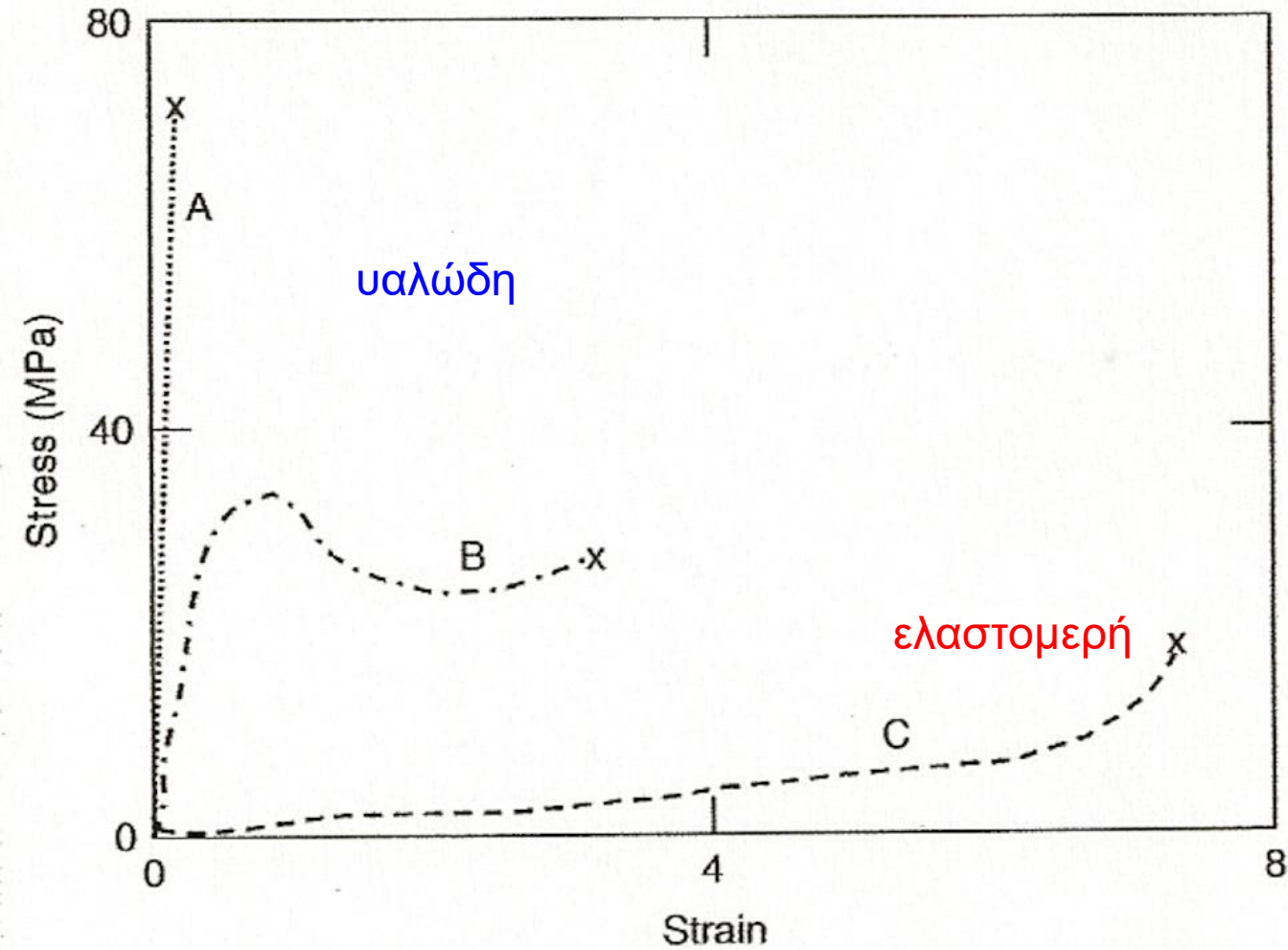


## Μηχανική αστοχία των πολυμερών (μεγάλες παραμορφώσεις)

Τελικές μηχανικές ιδιότητες: φαινόμενο ενδώσεως ή διαρροής (yielding) λαίμωσης (necking) ψυχρής έλασης (cold drawing) θραύσης (fracture) κόπωσης (fatigue)

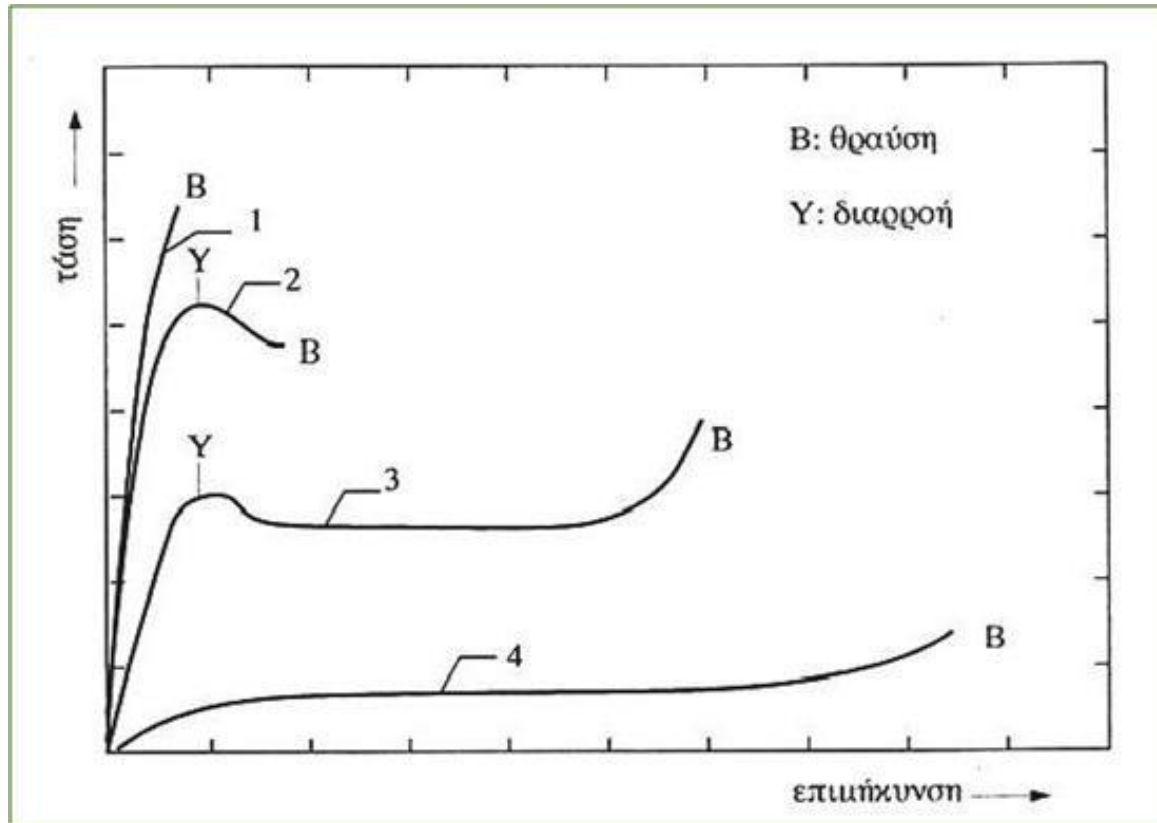
μηχανική αστοχία ((failure): υπερβολική παραμόρφωση, θραύση





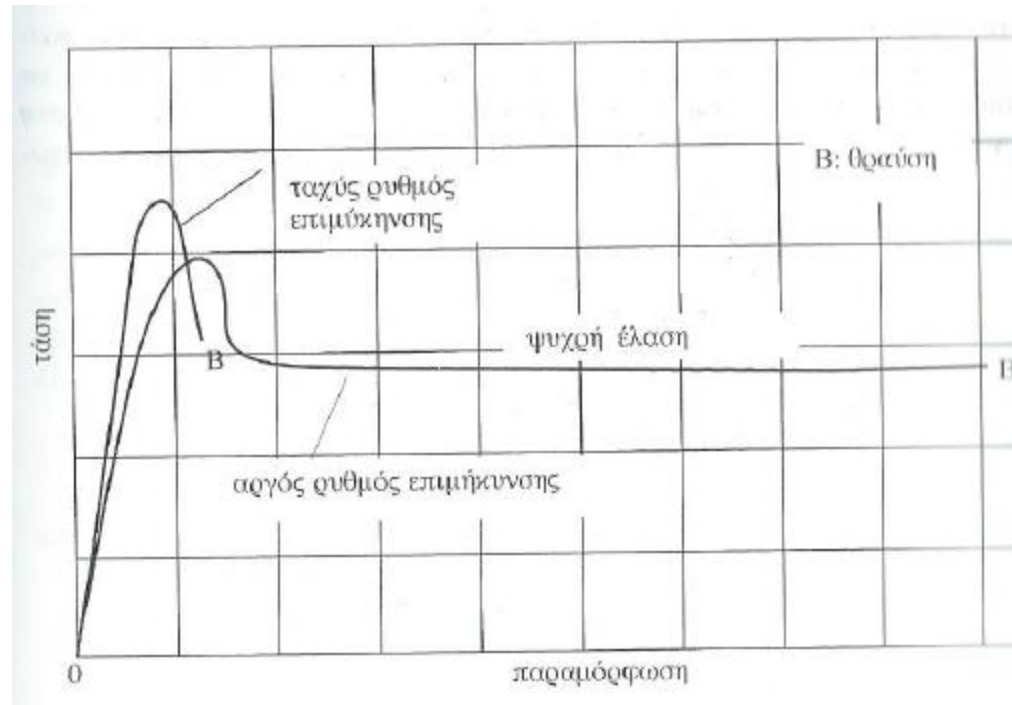
- A] Ψαθυρή θραύση  
Brittle fracture
- B] Ελατή θραύση  
Ductile fracture
- C] Ελαστομερή  
elastomeric

## Τυπικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης πολυμερών

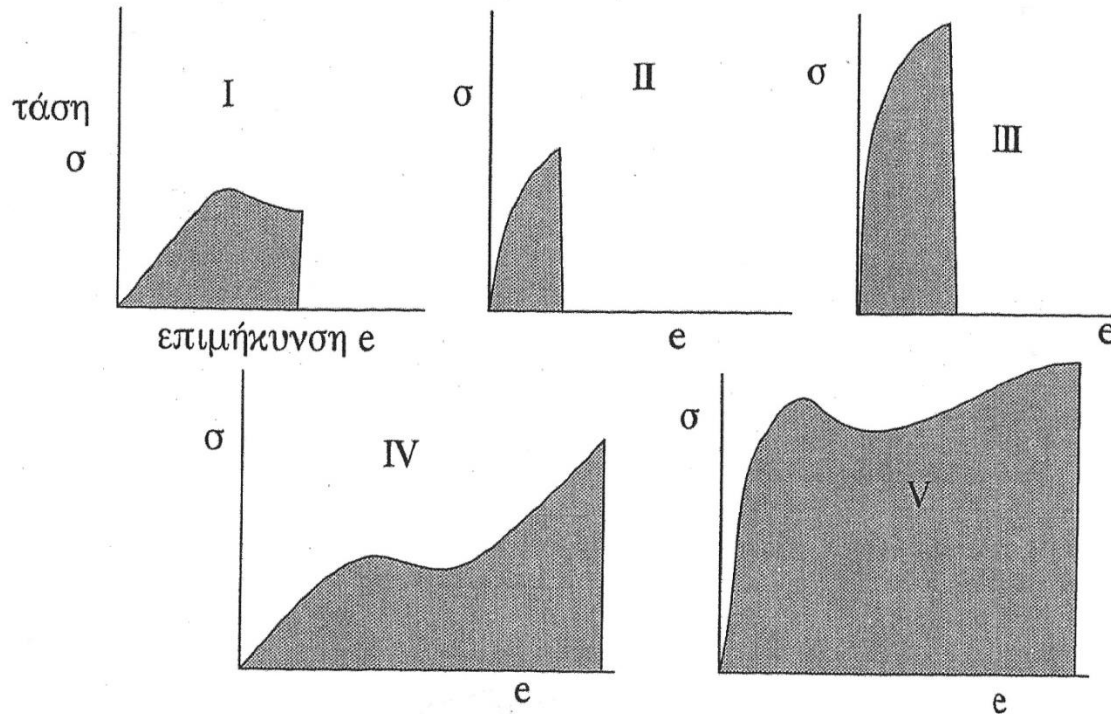


Το ίδιο υλικό μπορεί να εμφανίσει τις συμπεριφορές αυτές σε διαφορετικές θερμοκρασίες 100K πριν και μετά την  $T_g$  του

## Επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης



## Τύποι διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης



I μαλακά, ασθενή  
soft, weak

II σκληρά, εύθραυστα  
hard, brittle

III σκληρά, δύσκαμπτα  
hard, strong

IV μαλακά, δύσθραυστα  
soft, tough

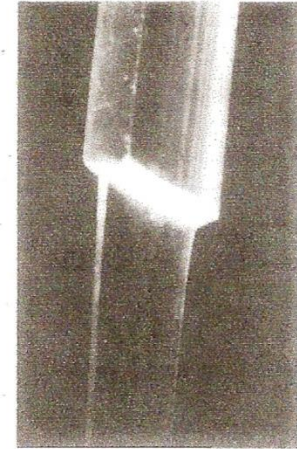
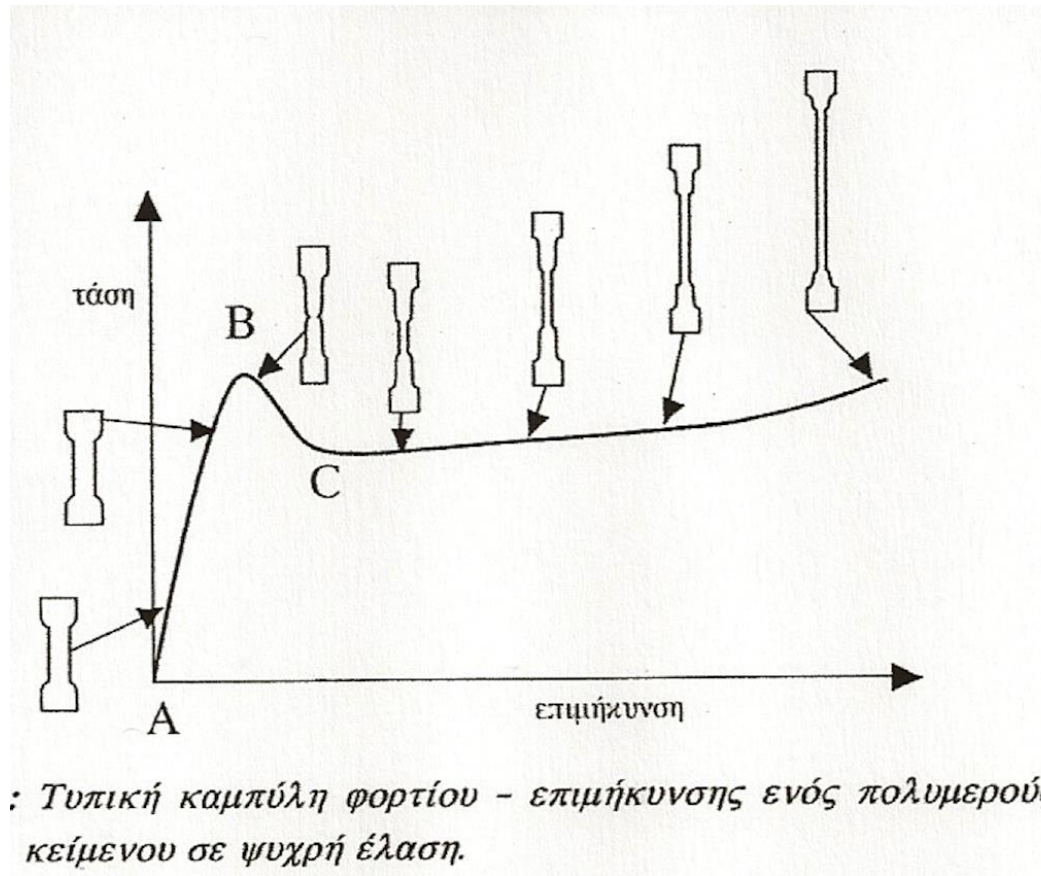
V σκληρά, δύσθραυστα  
hard, tough

### Δυσθραυστότητα

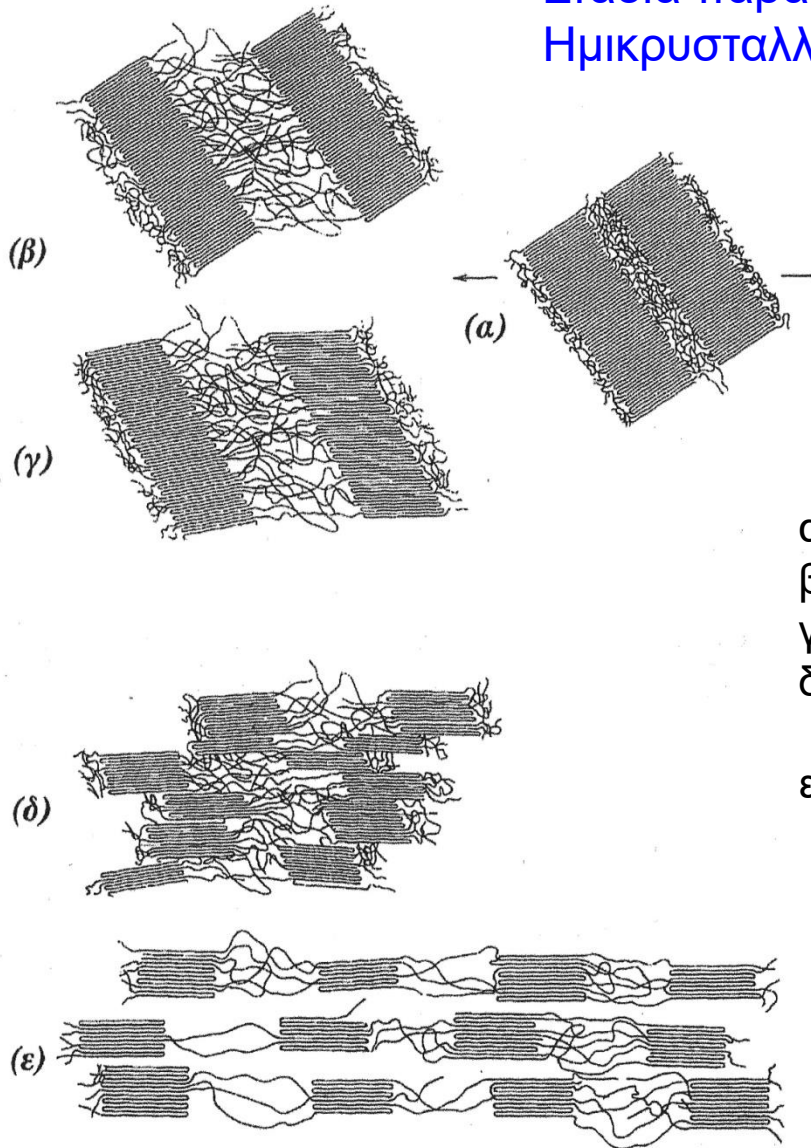
ενέργεια που απαιτείται  
για την θραύση του υλικού

$$W_B = \int_0^{e_B} \sigma de$$

## Φαινομενολογία διαρροής



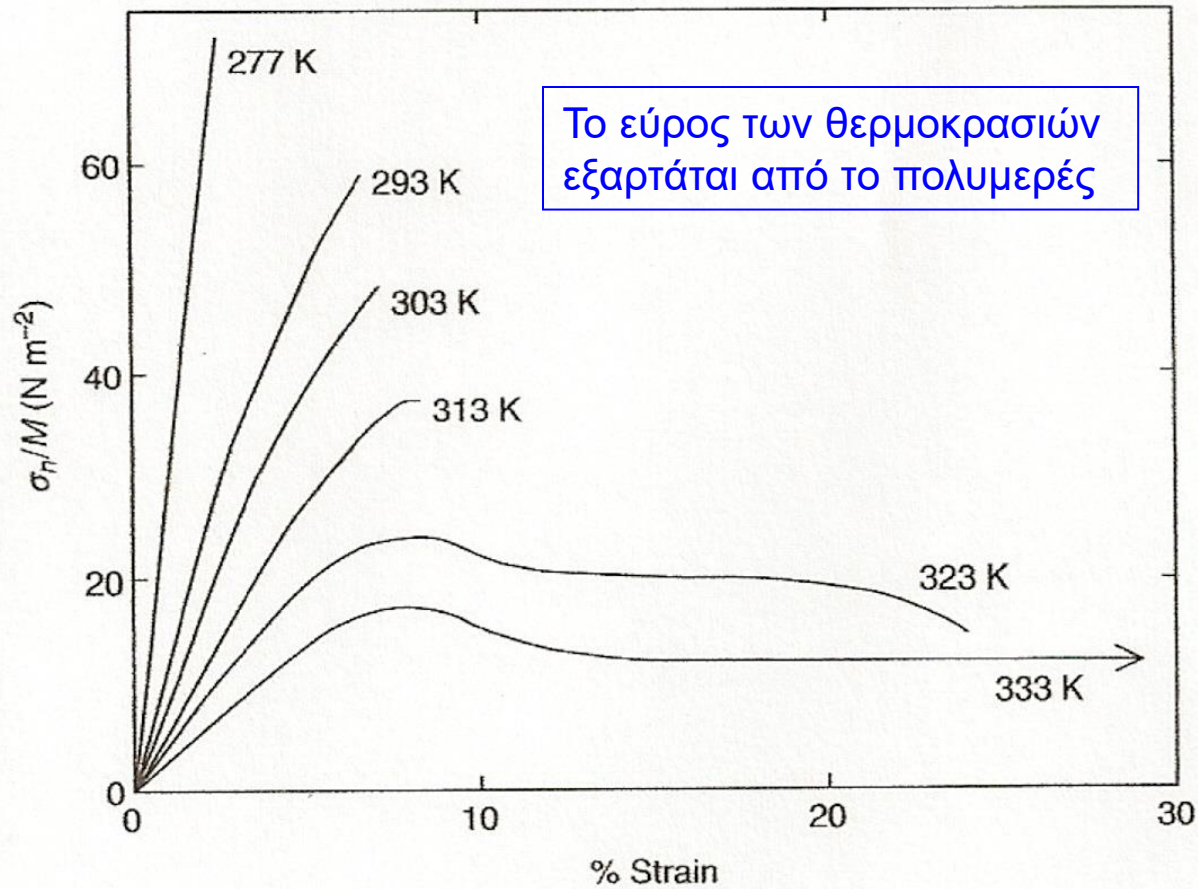
## Στάδια παραμόρφωσης κατά τον εφελκυσμό Ημικρυσταλλικού πολυμερούς



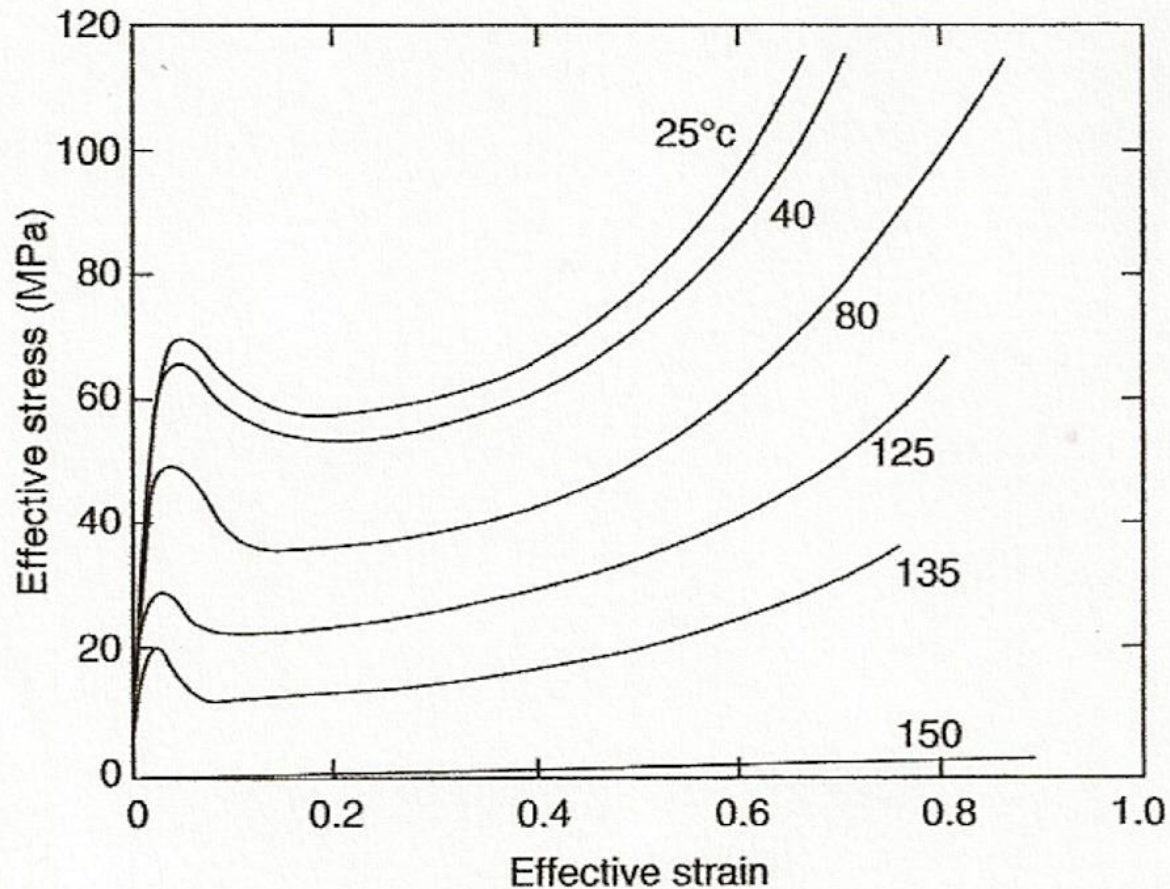
- α) φυλλίδια σφαιρουλίτη
- β) επιμήκυνση άμορφου τμήματος
- γ) Συστροφή φυλλιδίων
- δ) αποκόλληση συστάδων κρυσταλλικού υλικού από τα φυλλίδια
- ε) προσανατολισμός στην διεύθυνση της τάσης



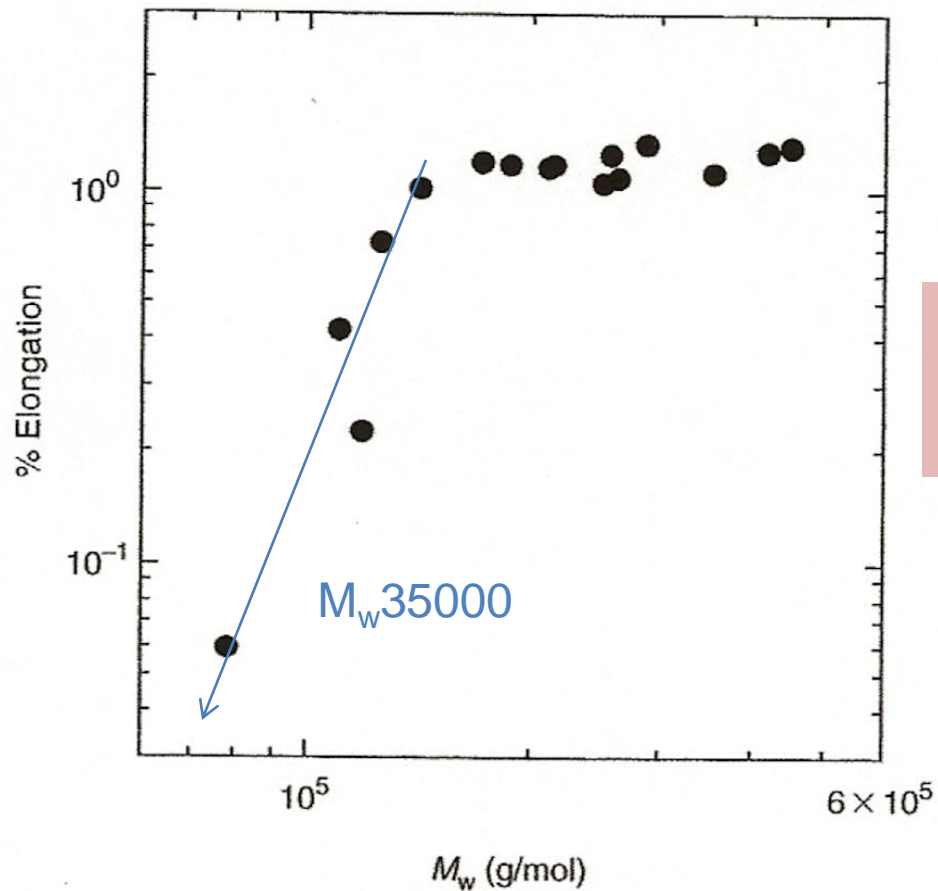
# Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης PMMA (ψαθυρή-ελατή μετάβαση)



Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης polycarbonate  
σε  $200^{\circ} < T_g$  το υλικό δεν γίνεται ψαθυρό  
*Άρα η μοριακή δομή πρέπει να έχει σπουδαία επίδραση*



## Επιμήκυνση θραύσης συναρτήσει του $M_w$ του Πολυστυρολίου



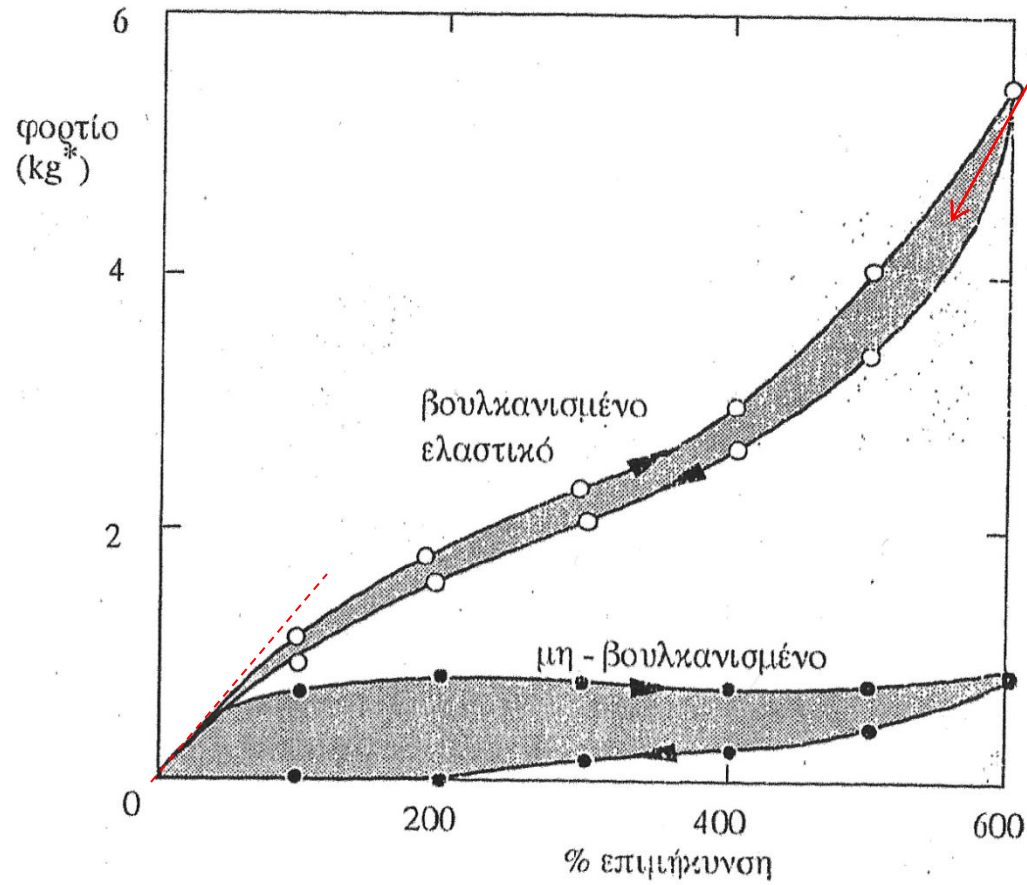
$$G = \rho RT / M_e$$

$M_e$  MB μεταξύ  
αλληλοεμπλοκών  
entanglements

Για  $M_w < 35000$  δεν υπάρχει ουσιαστικά αντοχή στον εφελκυσμό. Δεδομένου ότι  $M_e = 13000$  μετά την δημιουργία 10 εμπλοκών ανά αλυσίδα η αντοχή στον εφελκυσμό γίνεται σταθερή

# Ελαστομερή (1-4 cis διένια)

Κρυστάλλωση λόγω προσανατολισμού αλυσίδων



## Σύνοψη κεφαλαίου

Εισάγονται οι έννοιες της γραμμικής ιξωδοελαστικότητας (μικρές παραμορφώσεις) και της μηχανικής αστοχίας (μεγάλες παραμορφώσεις) των εύκαμπτων πολυμερών.

Τα πολυμερικά υγρά (τήγματα) παρουσιάζουν εν γένει ιξωδοελαστική συμπεριφορά, δηλαδή η απόκριση σε μια επιβαλλόμενη παραμόρφωση είναι ενδιάμεση μεταξύ της ιξώδους ροής των ρευστών και την ελαστική παραμόρφωση των στερεών. Η απόκριση αυτή αντανακλάται σε μια ποικιλία παραμέτρων όπως το ιξώδες, το μέτρο χαλάρωσης τάσης, η ενδοτικότητα έρπυσης και το δυναμικό μέτρο ή το δυναμικό ιξώδες.

Ο στοιχειώδης χαρακτήρας της ιξωδοελαστικής απόκρισης περιγράφεται από τα απλά μηχανικά μοντέλα Maxwell και Voigt. Εν γένει, ένα πολυμερικό υγρό συμπεριφέρεται περισσότερο ως ένα ελαστικό στερεό σε μικρούς χρόνους ή υψηλές συχνότητες και πιο πολύ ως ιξώδες υγρό σε μεγάλους χρόνους ή χαμηλές συχνότητες. Η διάκριση μεταξύ αυτών των ορίων προσδιορίζεται από τους χρόνους χαλάρωσης του υλικού.

Στο όριο της γραμμικής απόκρισης, δηλαδή σε αρκετά μικρά πλάτη και ρυθμούς διάτασης, ώστε η δομή του υλικού να μην επηρεάζεται, ισχύει η αρχή υπέρθεσης του Boltzmann που προσφέρει μια άμεση πορεία υπολογισμού του ιξώδους, των δυναμικών μέτρων και της ανακτήσιμης ενδοτικότητας από το μέτρο χαλάρωσης τάσης.

Για πολυμερή αρκετά μεγάλου μοριακού βάρους σε πυκνά διαλύματα ή τήγματα, το φαινόμενο της εμπλοκής κυριαρχεί στις ιξωδοελαστικές ιδιότητες. Συνάγεται ένα χαρακτηριστικό μοριακό βάρος μεταξύ εμπλοκών, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί στη βάση δεδομένων για την ευκαμψία και την πυκνότητα της πολυμερικής αλυσίδας.

Το μοντέλο ερπυσμού παρέχει μια περιγραφή της κίνησης των αλυσίδων και της χαλάρωσης τάσης σε πεπλεγμένα πολυμερή. Οι θεωρητικές προβλέψεις για τη διάχυση και το ιξώδες ανταποκρίνονται σχετικά καλά στα πειραματικά δεδομένα.

Η αρχή της υπέρθεσης χρόνου-θερμοκρασίας αποτελεί βασικό συστατικό στη μελέτη της ιξωδοελαστικότητας των πολυμερών γιατί μικρές μεταβολές στη θερμοκρασία προκαλούν μεγάλες μεταβολές στους χρόνους χαλάρωσης των πολυμερών. Ως συνέπεια, μετρήσεις σε ένα πεπερασμένο εύρος χρόνου ή συχνοτήτων σε μια θερμοκρασία μπορούν να υπερτεθούν με μετρήσεις σε άλλες θερμοκρασίες για την κατασκευή κύριων καμπύλων δυναμικής απόκρισης, που μπορεί να εκτείνονται σε 20 τάξεις μεγέθους ανηγμένου χρόνου ή συχνότητας.

Παρουσιάζονται βασικές έννοιες σχετιζόμενες με τις τελικές μηχανικές ιδιότητες όπως: φαινόμενο ενδώσεως η διαρροής (yielding), λαίμωσης ( necking,) ψυχρής έλασης ( cold drawing), θραύσης ( fracture ), κόπωσης (fatigue) και μηχανικής αστοχίας (υπερβολική παραμόρφωση η θραύση)

Τα υαλώδη πολυμερή (θερμοπλαστικά) μπορεί κάτω από μεγάλη παραμόρφωση να υποστούν είτε ψαθυρή θραύση, μέσω μιας διακριτής τοπικής διαδικασίας διαρροής γνωστής ως ρηγμάτωση, είτε μακροσκοπική διαρροή οδηγώντας σε πολύ μεγάλη επιμήκυνση πριν από τη θραύση. Και οι δύο διαδικασίες περιλαμβάνουν έκταση των αλυσίδων. Ο τελικός τρόπος της απόκρισης επηρεάζεται έντονα από την ευκαμψία των αλυσίδων και την πυκνότητα εμπλοκών του υλικού.