



Τεχνικές Μηχανικού Χαρακτηρισμού

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΣΤΟΧΙΑ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΑΣΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Κουλούρη Ευσταθία

Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό

Περιεχόμενα

- ▶ Μηχανική αστοχία πολυμερών
- ▶ Δοκιμές τάσης εφελκυσμού
- ▶ Ιξωδοελαστικότητα
- ▶ Παραμόρφωση vs χρόνος, ερπυσμός, χαλάρωση τάσης
- ▶ Μαθηματικά μοντέλα
- ▶ Δυναμική μηχανική συμπεριφορά ιξωδοελαστικών υλικών

Τραγωδία του Challenger (28 Ιανουαρίου 1986)

3



A major malfunction

Challenger's brief flight

.678 seconds

Following Challenger's liftoff, a puff of black smoke — seen only by automatic launch cameras — indicates a problem with one of the O-ring seals at the joint between segments of the shuttle's right-hand solid rocket booster.

No human eyes see the smoke, and there would have been no way to abort the flight if they had.

58 seconds

A small jet of smoke and flame bursts through the side of the booster and quickly grows.

73 seconds

The flame burns through the strut attaching the solid rocket booster to the external fuel tank, causing the booster to swivel into the side of the tank. The resulting massive explosion destroys the space shuttle.

Full thrust

Once the boosters ignite, there is no way to shut them off.

Main shuttle engines

3 minutes, 58 seconds

Challenger's crew compartment, which appeared to come away from the exploding shuttle more or less intact, smashes into the Atlantic Ocean at 200 mph.

Officials never determined whether the shuttle's explosion or the impact with the ocean killed the crew.

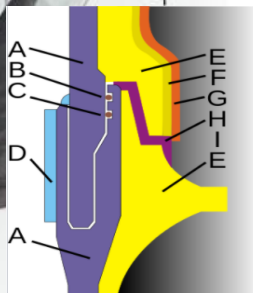
External fuel tank

Holds about 143,000 gallons of liquid oxygen and 385,000 gallons of liquid hydrogen.

Solid rocket booster

Manufactured in segments, which are then stacked.

Liquid hydrogen



Simplified cross section of the joints between rocket segments SRB; outside to left.

Legend:

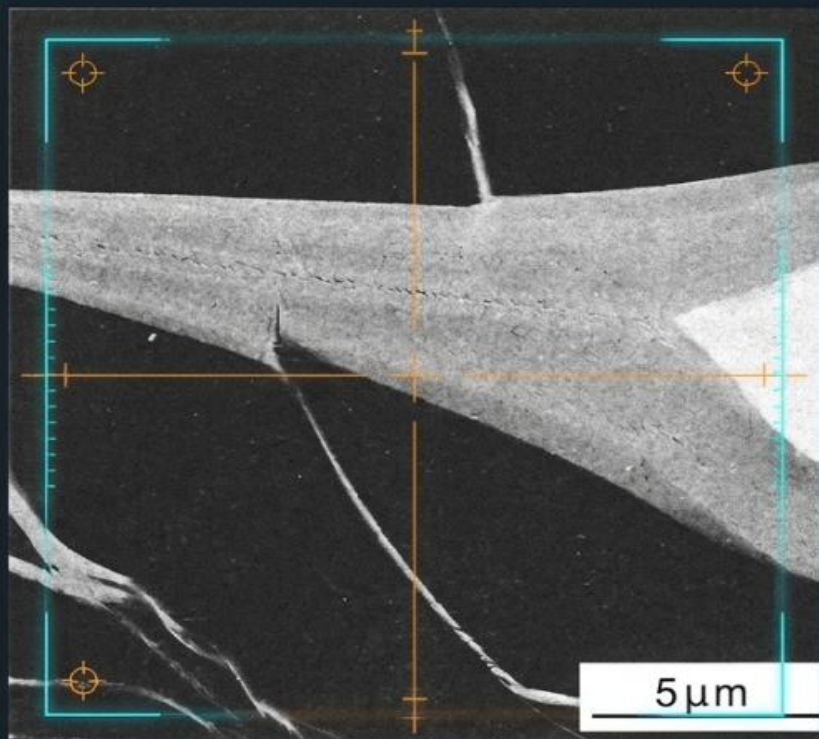
A — steel wall 0.5 inches (12.7 mm) thick
B — base O-ring gasket,
C — backup O-ring gasket,
D — Strengthening-Cover band,
E — insulation,
F — insulation,
G — carpeting,
H — sealing paste,
I — fixed propellant

Η έρευνα διαπίστωσε ότι η έκρηξη προκλήθηκε από την αποτυχία λειτουργίας ενός "κυκλικού δακτυλίου (τύπου O)" που σφράγιζε μία από τις δύο δεξαμενές στερεών καυσίμων των πυραύλων. Ο ελαστικός δακτύλιος δεν ανταποκρίθηκε όπως αναμενόταν λόγω της ασυνήθιστα χαμηλής θερμοκρασίας την ώρα της εκτόξευσης. Η υαλώδης μετάβαση ακύρωσε την ελαστικότητά του δακτυλίου με αποτέλεσμα να ξεκινήσει μια αλυσίδα γεγονότων που οδήγησαν στην τελική έκρηξη.

Richard Feynman

<https://www.youtube.com/watch?v=raMmRKgkGD4>

Μηχανική αστοχία



Ορισμός: Ένα πλαστικό αντικείμενο καθίσταται ακατάλληλο για την τελική του χρήση.

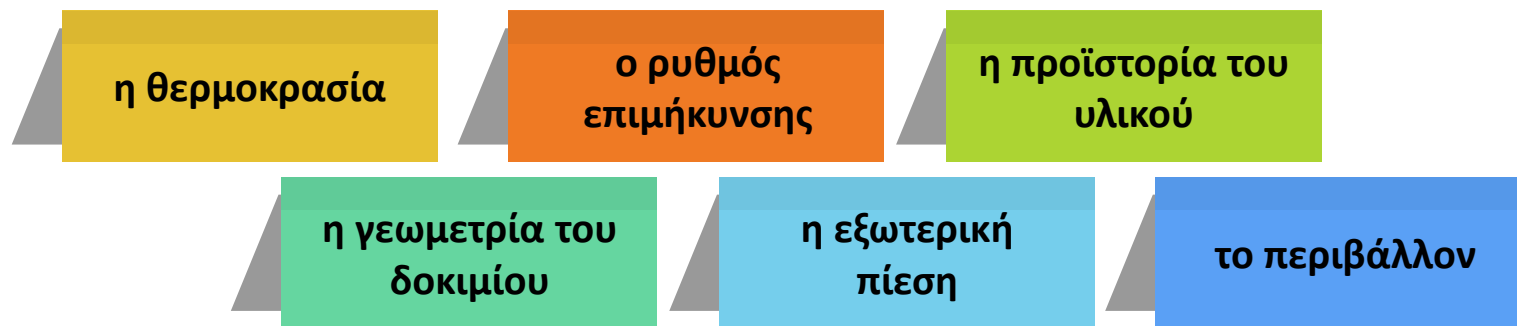
1. Υπερβολική Παραμόρφωση: Το υλικό χάνει το σχήμα του, αδυνατώντας να επιτελέσει τον λειτουργικό του σκοπό (π.χ. αδυναμία σφράγισης ενός O-ring).

2. Θραύση (Fracture): Ολικός διαχωρισμός του υλικού υπό την επίδραση τάσης.

Το Ζητούμενο: Η κατανόηση των τελικών μηχανικών ιδιοτήτων και των παραγόντων (όπως η θερμοκρασία) που τις μεταβάλλουν δραματικά.

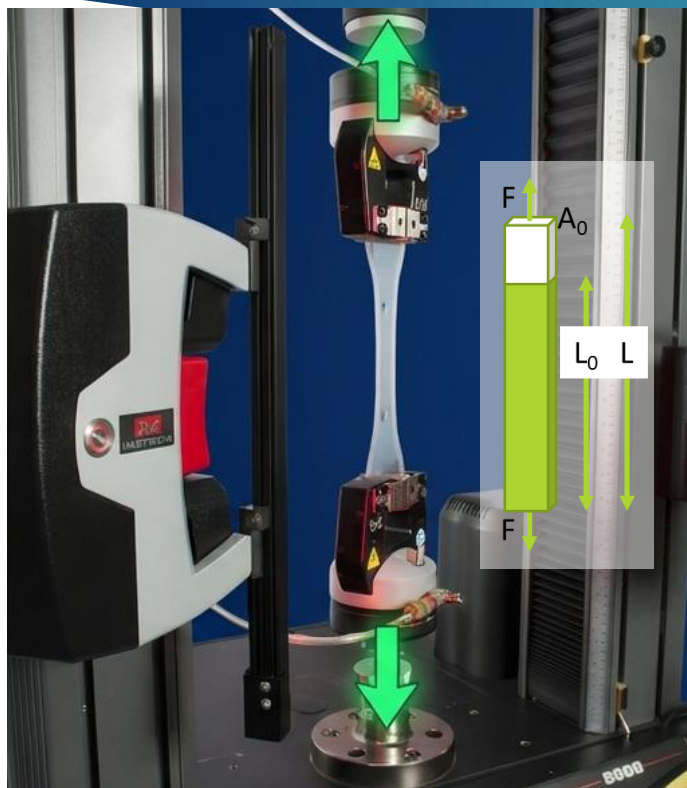
Μηχανική αστοχία

Η πλέον διαδεδομένη δοκιμή για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων είναι η **δοκιμή του εφελκυσμού**, η καταγραφή δηλαδή του διαγράμματος τάσης (σ) – επιμήκυνσης/παραμόρφωσης (ϵ). Θα πρέπει να τονίσουμε ότι υπάρχει ένα πλήθος παραγόντων που επηρεάζουν τη μορφή ενός διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης όπως:



Είναι προφανές πως το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης είναι πρακτικά άχρηστο αν δεν είναι γνωστές με σαφήνεια οι **συνθήκες κατά τη δοκιμή**.

Δοκιμές τάσης εφελκυσμού



ΣΚΟΠΟΣ: Καταγραφή του διαγράμματος τάσης (σ) παραμόρφωσης (ε) μέχρι τη θραύση.

ΜΕΘΟΔΟΣ: Μονοαξονική επιμήκυνση με σταθερή ταχύτητα v (cross-head velocity) και ταυτόχρονη μέτρηση της μονοαξονικής εφελκυστικής δύναμης (φορτίο) F .

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Τάση (Stress)

Εφελκυστική δύναμη (F) ανά μονάδα αρχικής διατομής (A).

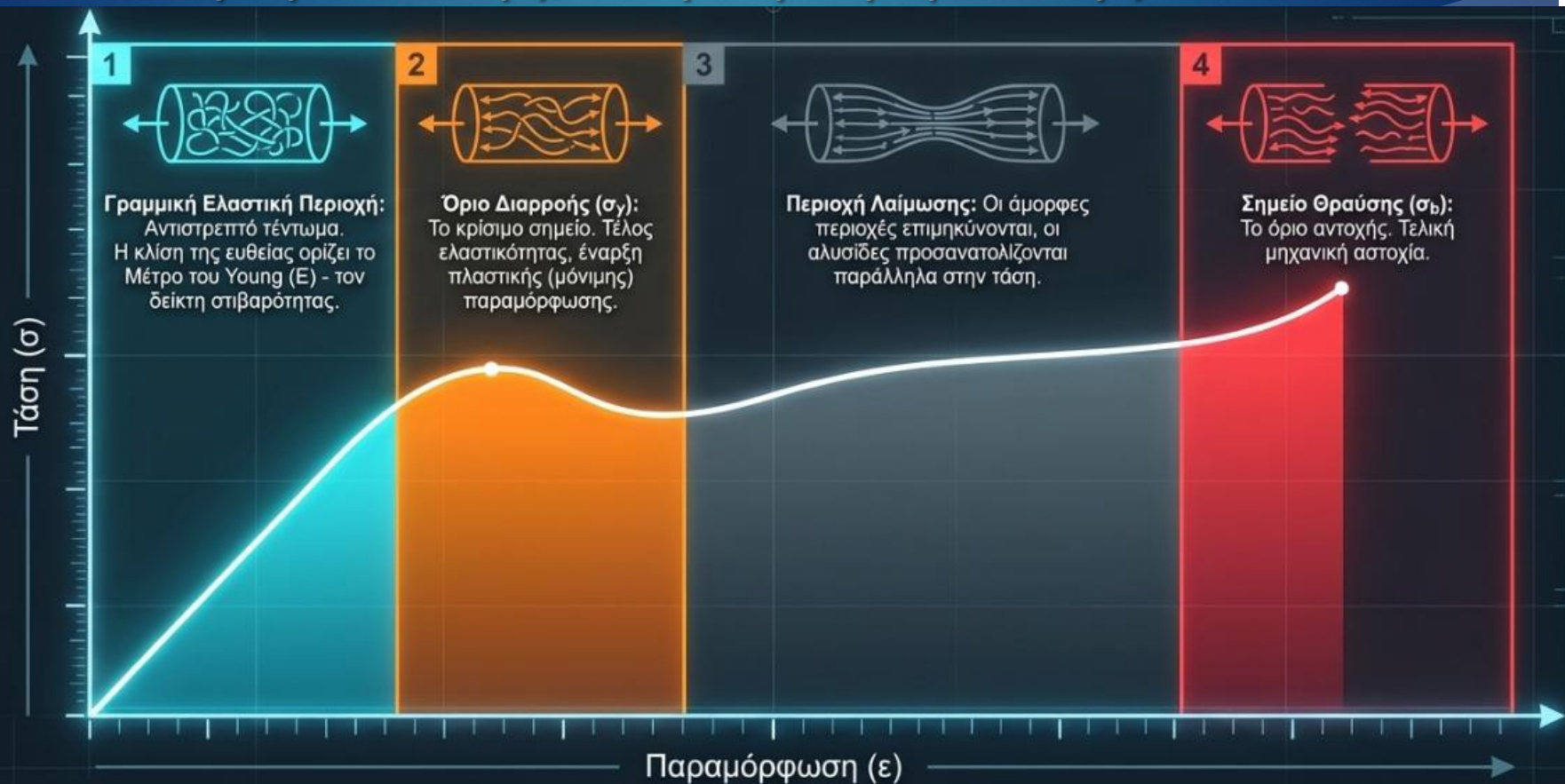
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Παραμόρφωση (Strain)

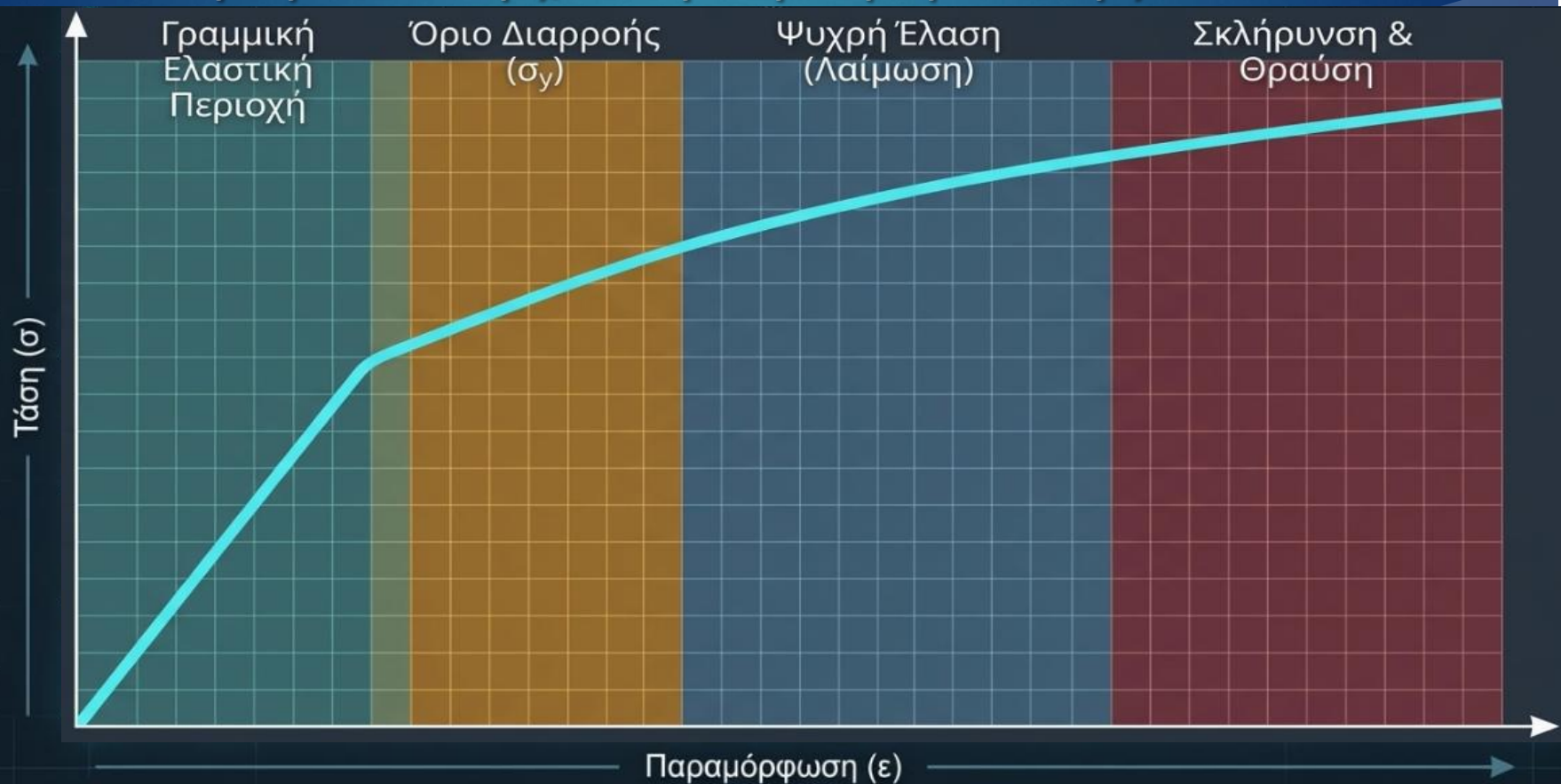
Σχετική μεταβολή μήκους (ΔL) προς το αρχικό μήκος (L_0). Είναι αδιάστατο μέγεθος.

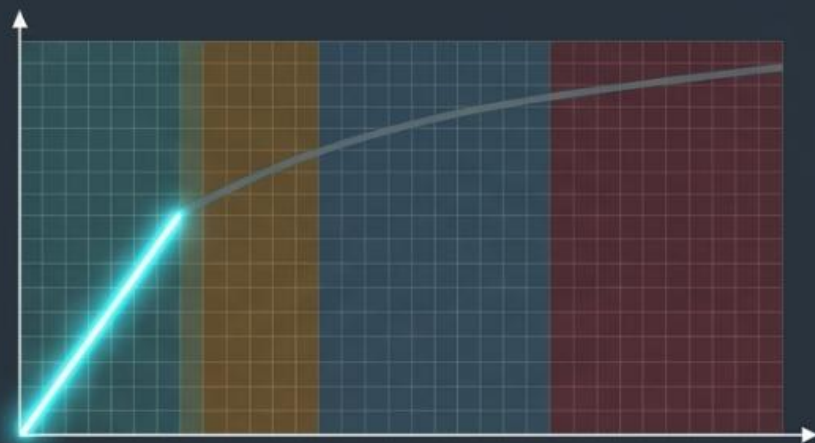
Καμπύλη τάσης επιμήκυνσης/παραμόρφωσης

ΑΜΟΡΦΑ



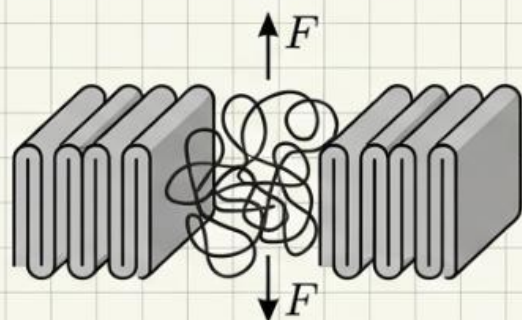
Καμπύλη τάσης επιμήκυνσης/παραμόρφωσης

ΗΜΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ



Στάδιο 1: Γραμμική Ελαστική Περιοχή.

Το υλικό παραμορφώνεται αντιστρεπτά. Η κλίση της ευθείας ορίζει το Μέτρο του Young (E), το οποίο εκφράζει την αρχική στιβαρότητα.



Αρχική Κατάσταση



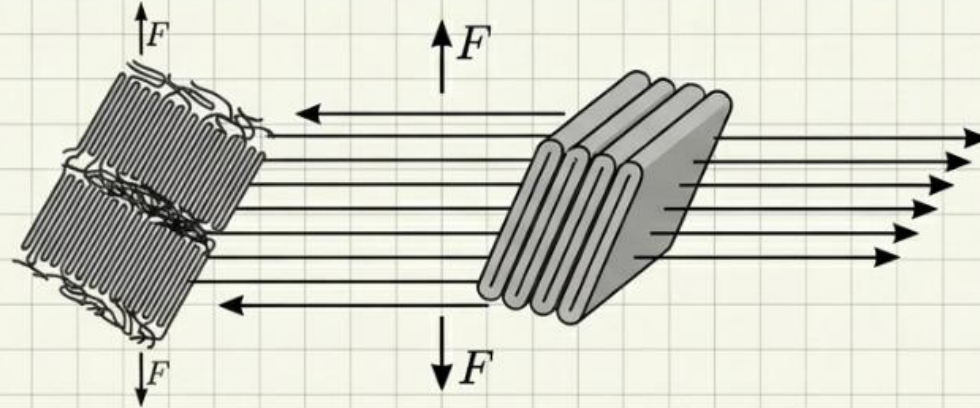
Γραμμική Ελαστική Περιοχή

Τι συμβαίνει στα μόρια: Μόνο οι άμορφες περιοχές ξετυλίγονται και επιμηκώνονται.
Οι κρυσταλλικές δομές παραμένουν άθικτες.



Στάδιο 2: Το Όριο Διαρροής (Yield Point).

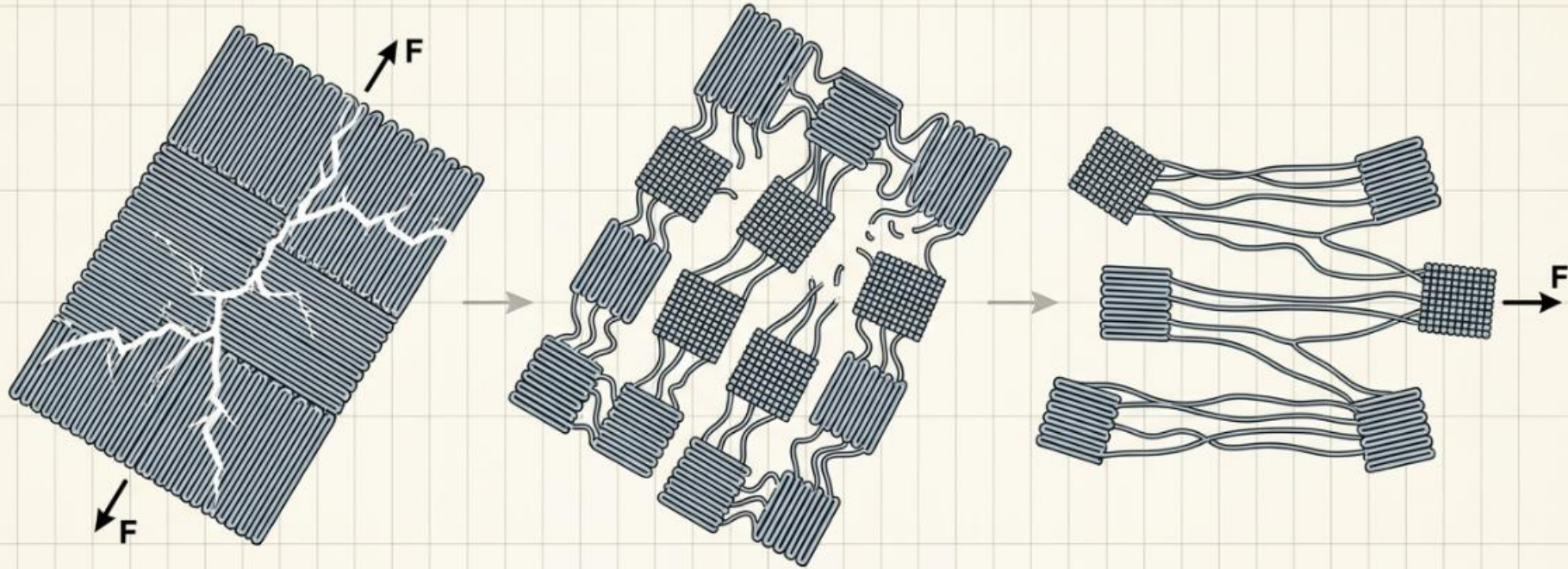
Η μέγιστη τάση πριν το υλικό ενδώσει. Τέλος της ελαστικότητας, αρχή της πλαστικής (μόνιμης) παραμόρφωσης.



Τι συμβαίνει στα μόρια: Οι άμορφες αλυσίδες έχουν τεντωθεί στο έπακρο. Το μηχανικό φορτίο μεταφέρεται απευθείας στους κρυστάλλους. Ξεκινά η κλίση (tilting) των κρυσταλλικών λαμελών

Στάδιο 3: Λαίμωση

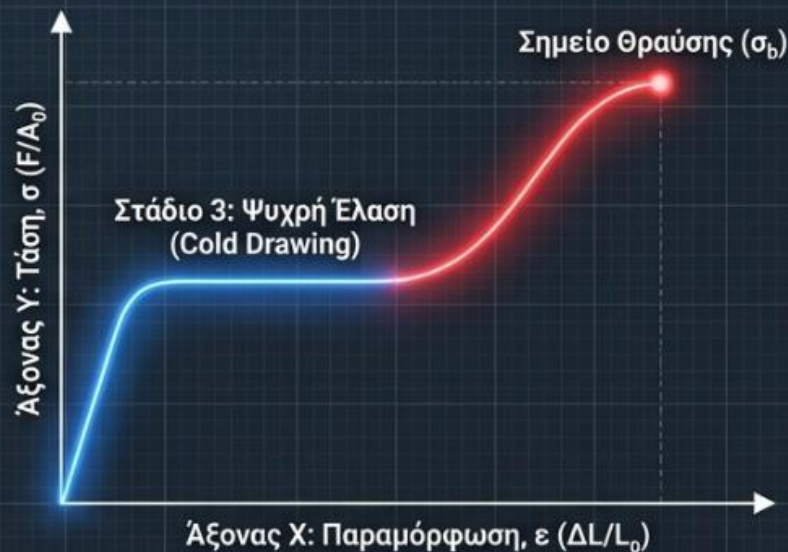
Ο Μοριακός Μηχανισμός της Λαίμωσης



1. Θραύση: Η ακραία τάση σπάει τις κρυσταλλικές λαμέλες.

2. Διαχωρισμός: Οι μεγάλες δομές κατακερματίζονται σε μικρότερες κρυσταλλικές συστάδες (blocklets).

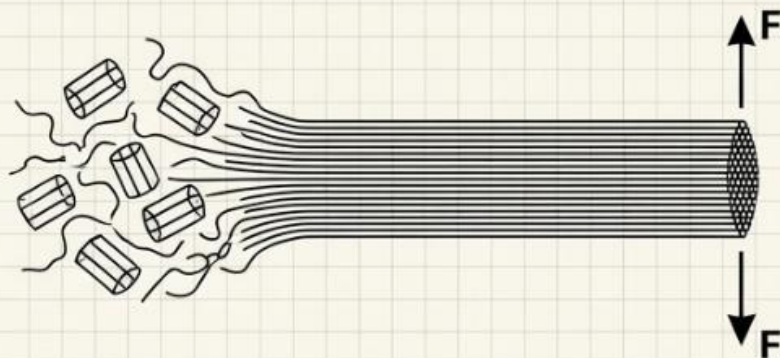
3. Ολίσθηση: Αυτές οι συστάδες παρασύρονται από τις άμορφες αλυσίδες και ολισθαίνουν προς την κατεύθυνση της φόρτισης. Αυτό επιτρέπει τη μεγάλη μακροσκοπική επιμήκυνση.



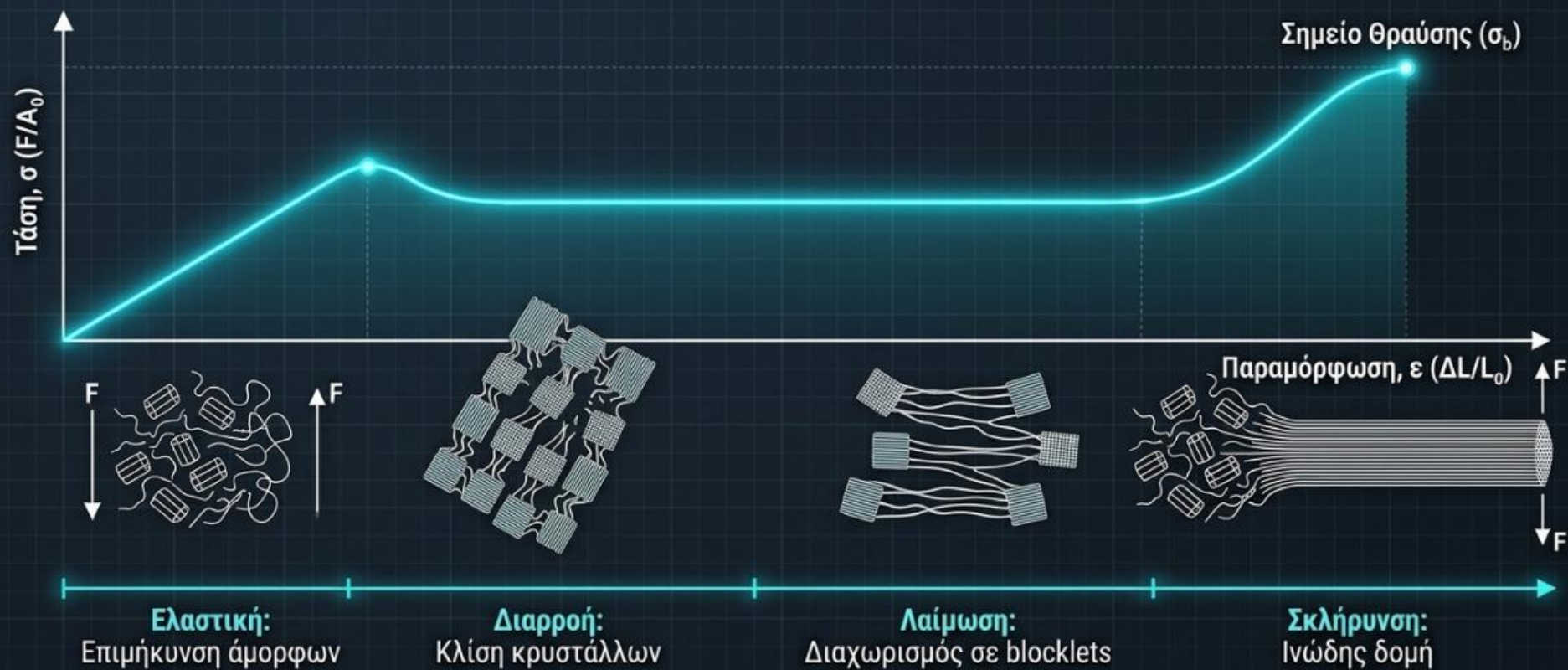
Στάδιο 4: Σκλήρυνση λόγω Παραμόρφωσης (Strain Hardening)

Η τάση αυξάνεται ξανά καθώς το υλικό προβάλλει τελική αντίσταση μέχρι την οριστική μηχανική αστοχία (θραύση).

Ο Μοριακός Μηχανισμός της Σκλήρυνσης λόγω Παραμόρφωσης



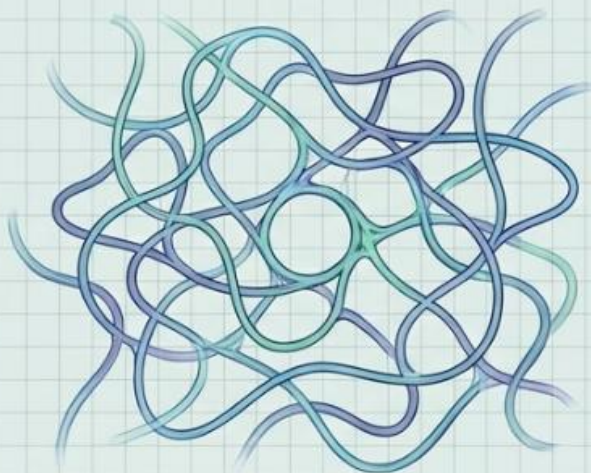
Τι συμβαίνει στα μόρια: Οι κατακερματισμένοι κρύσταλλοι και οι άμορφες αλυσίδες έχουν πλέον ευθυγραμμιστεί πλήρως, δημιουργώντας μια ανθεκτική ινώδη δομή. Η θραύση επέρχεται όταν σπάσουν οι ομοιοπολικοί δεσμοί.



Η Επίδραση της Μικροδομής: Ο Βαθμός Κρυσταλλικότητας

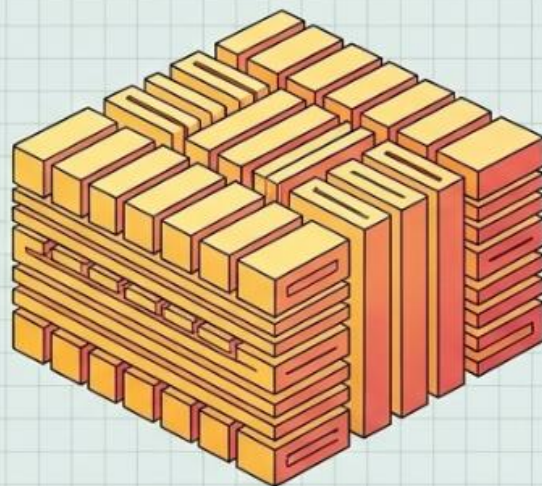
Τα ημικρυσταλλικά πολυμερή είναι υλικά δύο φάσεων. Η συμπεριφορά τους εξαρτάται από την αναλογία αυτών των δύο αντιμαχόμενων δυνάμεων.

Άμορφες Περιοχές

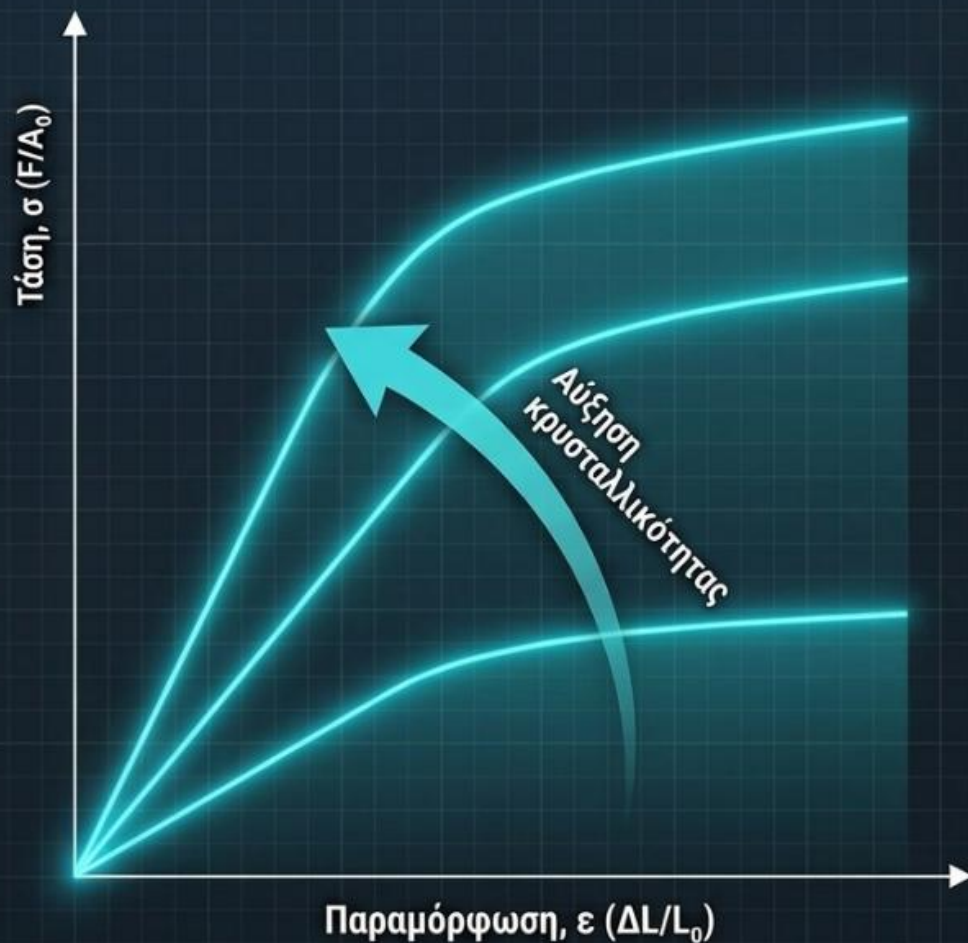


Ευκαμψία & Ελαστικότητα. Επιτρέπουν μεγάλες παραμορφώσεις. Λειτουργούν ως το ελατήριο του συστήματος.

Κρυσταλλικές Περιοχές



Ακαμψία & Αντοχή. Λειτουργούν ως άκαμπτοι, φυσικοί σταυροδεσμοί που κλειδώνουν τη δομή.



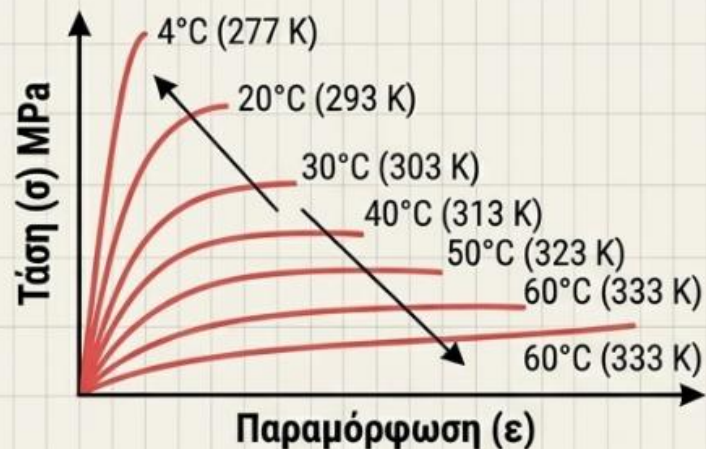
1. Μεγαλύτερο Μέτρο Ελαστικότητας

Όσο αυξάνεται το ποσοστό των άκαμπτων κρυστάλλων, η αρχική κλίση γίνεται πιο απότομη. Το υλικό γίνεται πιο στιβαρό (stiffer) και αντιστέκεται στην αρχική παραμόρφωση.

2. Υψηλότερη Αντοχή Διαρροής (σ_y)

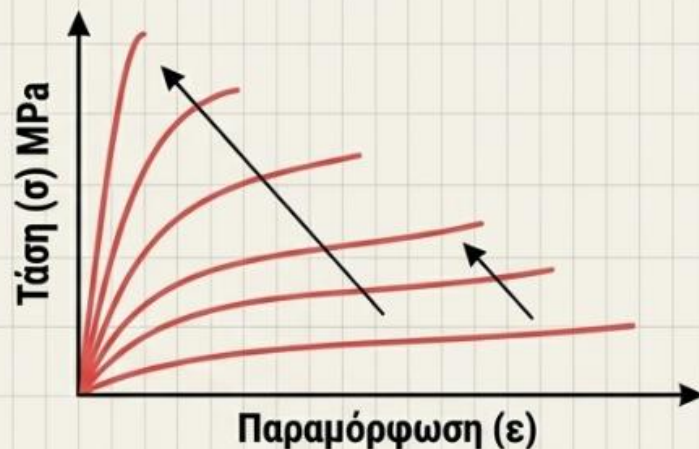
Απαιτείται πολύ μεγαλύτερη δύναμη για να ξεκινήσει η κλίση και η θραύση των πολυάριθμων κρυσταλλικών λαμελών.

Θερμοκρασία (T)



Αύξηση Θερμοκρασίας ($T \uparrow$). Η θερμική ενέργεια **διευκολύνει** την κινητικότητα των αλυσίδων. Το **μέτρο Young (E)** και η αντοχή **μειώνονται**. Το υλικό **μετατρέπεται από** υαλώδες σε όλκιμο / ελαστομερές.

Ρυθμός Εφελκυσμού ($d\epsilon/dt$)

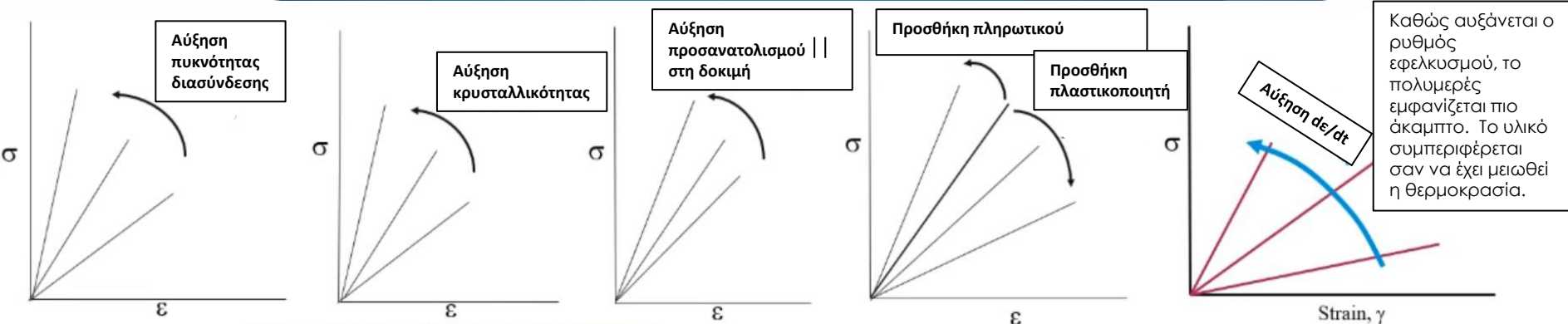


Αύξηση Ταχύτητας ($d\epsilon/dt \uparrow$). Οι μακρομοριακές αλυσίδες **δεν** προλαβαίνουν να αναδιαταχθούν στο χώρο. Το υλικό συμπεριφέρεται πιο **άκαμπτα** και **ψαθυρά**.

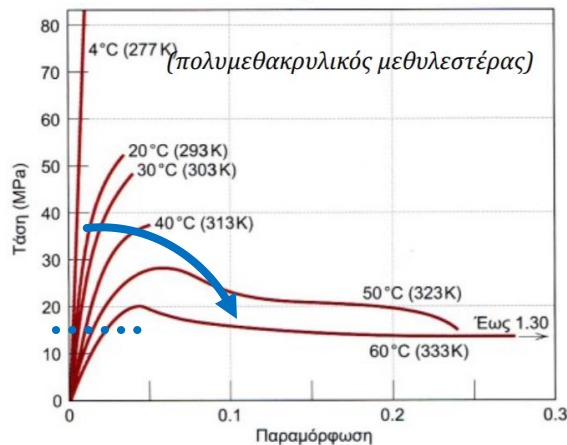


Αρχή Επαλληλίας: Η αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης έχει σχεδόν το ίδιο μηχανικό αποτέλεσμα με τη δραστική μείωση της θερμοκρασίας.

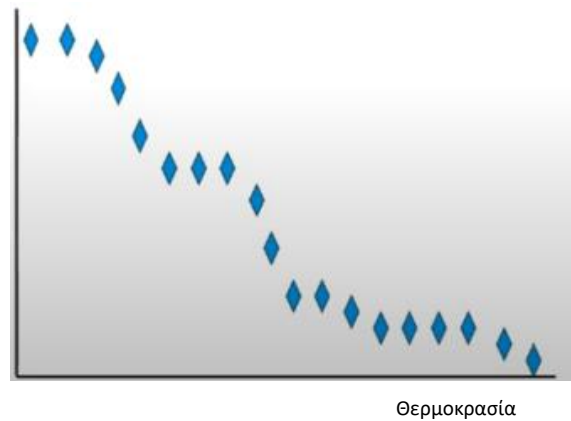
Επίδραση διαφόρων παραγόντων στη μορφή ενός διαγράμματος τάσης-επιμήκυνσης



Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός εφελκυσμού, το πολυμερές εμφανίζεται πιο άκαμπτο. Το υλικό συμπεριφέρεται σαν να έχει μειωθεί η θερμοκρασία.



Μέτρο ελαστικότητας



Μέτρο Ανθεκτικότητας (U_R)

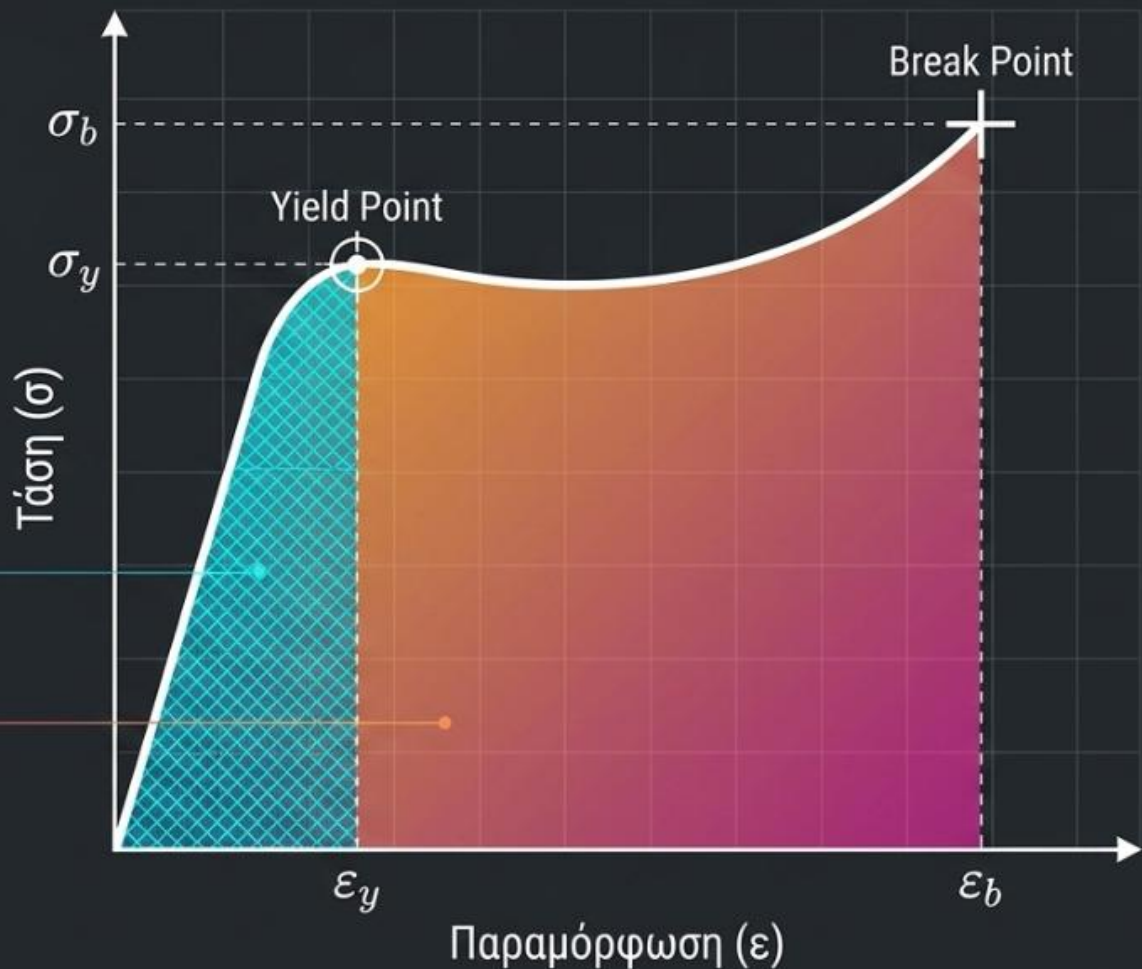
Η ελαστική ενέργεια ανά μονάδα όγκου που απορροφάται χωρίς μόνιμη παραμόρφωση (πλήρως ανακτήσιμη).

$$U_R = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma \cdot d\varepsilon \approx \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

Σκληρότητα (E_b)

Η συνολική ενέργεια που απορροφάται από το υλικό μέχρι τη θραύση του (μέτρο αντοχής στην κρούση).

$$E_b = \int_0^{\varepsilon_b} \sigma \cdot d\varepsilon$$



Σκληρά και εύθραυστα $T_g \gg T$

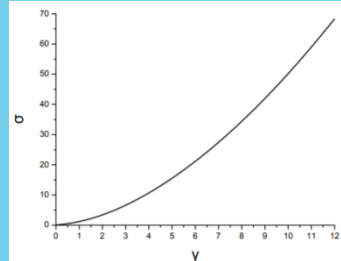
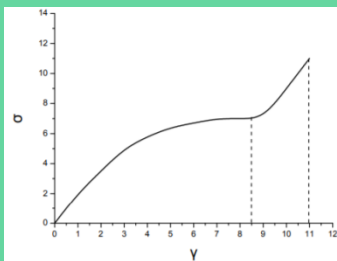
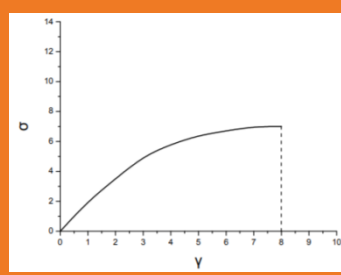
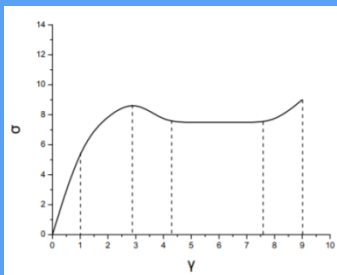
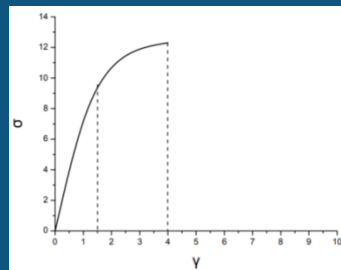
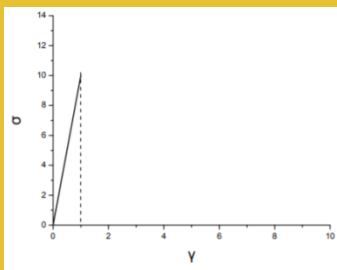
Η παραμόρφωση που υφίστανται είναι πολύ μικρή ακόμη και με μεγάλη εφαρμογή τάσης, μέχρι το σημείο θραύσης τους (ιδανικά ελαστικά στερεά). Παραδείγματα τέτοιων πολυμερών είναι το πολυστυρένιο και ο πολυ(μεθακρυλικός μεθυλεστέρας) με T_g στην περιοχή των 100°C .

Σκληρά και ανθεκτικά $T_g \approx T$

Σε πολυμερή με T_g κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (π.χ. Νάilon με $T_g \approx 50^\circ\text{C}$) μετά την ελαστική και ελαφρώς ελαστομερή συμπεριφορά, παρατηρείται μια μείωση της τάσης με αύξηση της παραμόρφωσης-το σημείο διαρροής. Από κάποιο σημείο και μετά το υλικό συμπεριφέρεται και πάλι σαν ελαστικό στερεό με μικρή αύξηση της παραμόρφωσης με αύξηση της τάσης μέχρι το σημείο θραύσης. Παραδείγματα τέτοιων πολυμερών είναι η οξική και νιτρική κυτταρίνη, το ABS, κ.α.

Μαλακά και ανθεκτικά $T_g < T$

Σε πολυμερή με ακόμη πιο χαμηλά T_g , όπως για παράδειγμα το πλαστικοποιημένο PVC ή το πολυαιθυλένιο (με T_g περίπου στους -35°C), μετά την καθαρά ελαστομερή συμπεριφορά, εμφανίζεται και μια ελαστική με γραμμική αύξηση της τάσης ως προς την παραμόρφωση μέχρι το σημείο θραύσης.



Σκληρά και στιβαρά $T_g > T$

Αν το T_g του υλικού είναι και πάλι υψηλότερο από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά μικρότερο από την προηγούμενη περίπτωση, ($T_g > T$), τότε τα υλικά χαρακτηρίζονται ως σκληρά και στιβαρά και εμφανίζουν μεγαλύτερη παραμόρφωση με την εφαρμογή τάσης. Παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι το PVC με $T_g = 80^\circ\text{C}$.

Μαλακά και ασθενή $T_g < T$

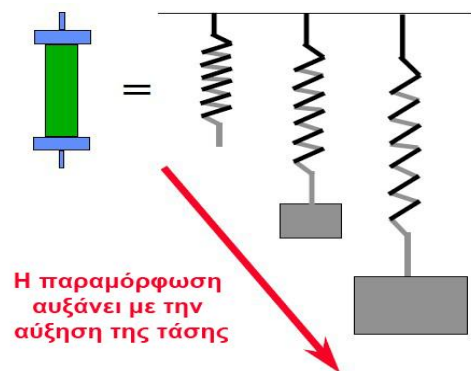
Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι πάνω από το T_g του πολυμερούς τότε το υλικό χαρακτηρίζεται ως ελαστομερές. Χρειάζεται, επομένως, μικρή τάση για να έχουμε αρκετή παραμόρφωση. Παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι το πολυισοβουτυλένιο

Ελαστομερή $T_g < T$

Τα πολυμερή με πολύ χαμηλό T_g είναι τα καθαρά ελαστομερή, όπου έχουμε μεγάλη παραμόρφωση με μικρή εφαρμογή τάσης. Παραδείγματα τέτοιων πολυμερών είναι το φυσικό ελαστικό (πολυισοπρένιο με $T_g = -70^\circ\text{C}$), το SBR με $T_g = -60^\circ\text{C}$, κ.α

Παραμόρφωση των υλικών

✿ Όλα τα υλικά μεταβάλλουν τις διαστάσεις τους (το σχήμα, τον όγκο τους ή και τα δύο) κάτω από την επίδραση μηχανικής τάσεως.



Ιδανικό στερεό

Ελαστική συμπεριφορά

01

Ιδανικό ρευστό

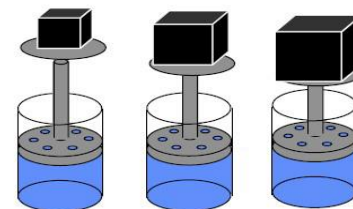
Πλήρως ιξώδης συμπεριφορά

02

03

Συνήθη υλικά

Ιξωδοελαστική συμπεριφορά



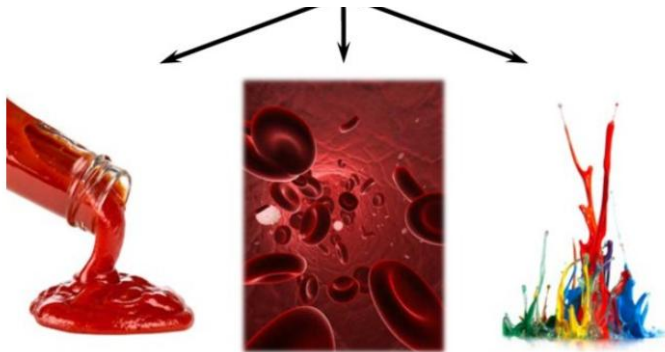
Η ταχύτητα με την οποία ρέει το υγρό μέσα από τις οπές αυξάνει με την τάση.

Ιξωδοελαστικότητα

ιξώδες ρευστό + ελαστικό στερεό



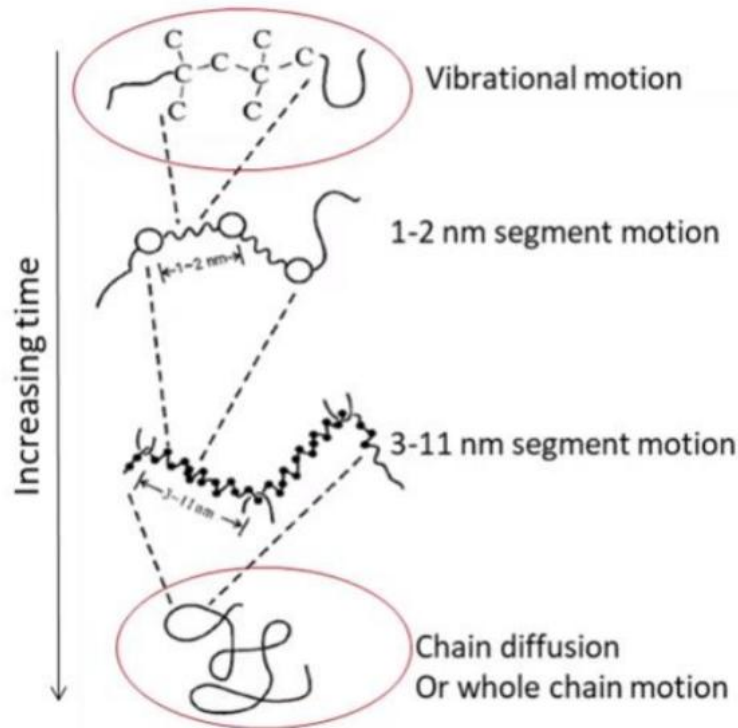
ιξωδοελαστικό υλικό



Ιξωδοελαστικότητα: Η συμπεριφορά κατά την οποία ορισμένα υλικά συνδυάζουν χαρακτηριστικά ενός **ελαστικού στερεού** με χαρακτηριστικά ενός **ιξώδους ρευστού**.

Η ιξωδοελαστικότητα αποτελεί ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά γνωρίσματα των πολυμερών. Μαζί με τη **θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης** και το **μοριακό βάρος** αποτελούν, ίσως, τις σημαντικότερες ιδιότητες των πολυμερών.

Γιατί τα Πολυμερή παρουσιάζουν ιξωδοελαστική συμπεριφορά



Μικροσκοπικές αλλαγές-παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια κινήσεων

- ▶ Δονητικές κινήσεις των χημικών δεσμών
- ▶ Κίνηση πλευρικών ομάδων

Ελαστικές

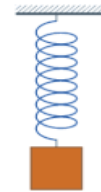
- ▶ Συνεπικουρικές κινήσεις μεταφοράς, περιστροφής και διαχύσεως αλυσίδας

Ιξώδεις

Εκτατική παραμόρφωση - εφελκυσμός



Δοκίμιο αρχικού μήκους L που υφίσταται εφελκυστική δύναμη F και επιμηκύνεται κατά ΔL .



Η ασκούμενη τάση τανυσμού - **εφελκυστική τάση** (tensile stress) σ είναι: $\sigma = \frac{F}{A}$

Τάση (stress)=(εσωτερική) δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας
Μονάδες SI: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$, Imperial $1 \text{ psi} = 1 \text{ lb/in}^2$, $1 \text{ psi} \sim 6900 \text{ Pa}$
❁ Ορθή τάση: δρα **κάθετα στην επιφάνεια**

Σχέσεις μεταξύ Τάσης και Παραμόρφωσης στην Ελαστική και Γραμμική Περιοχή

Εκτατική παραμόρφωση - εφελκυσμός

Η ασκούμενη τάση τανυσμού - **εφελκυστική τάση** (tensile stress) σ έχει ως αποτέλεσμα την κλασματική μεταβολή του μήκους ($\Delta L/L$) στην κατεύθυνση του εφελκυσμού, την **παραμόρφωση** του δοκιμίου (επιμήκυνση) ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

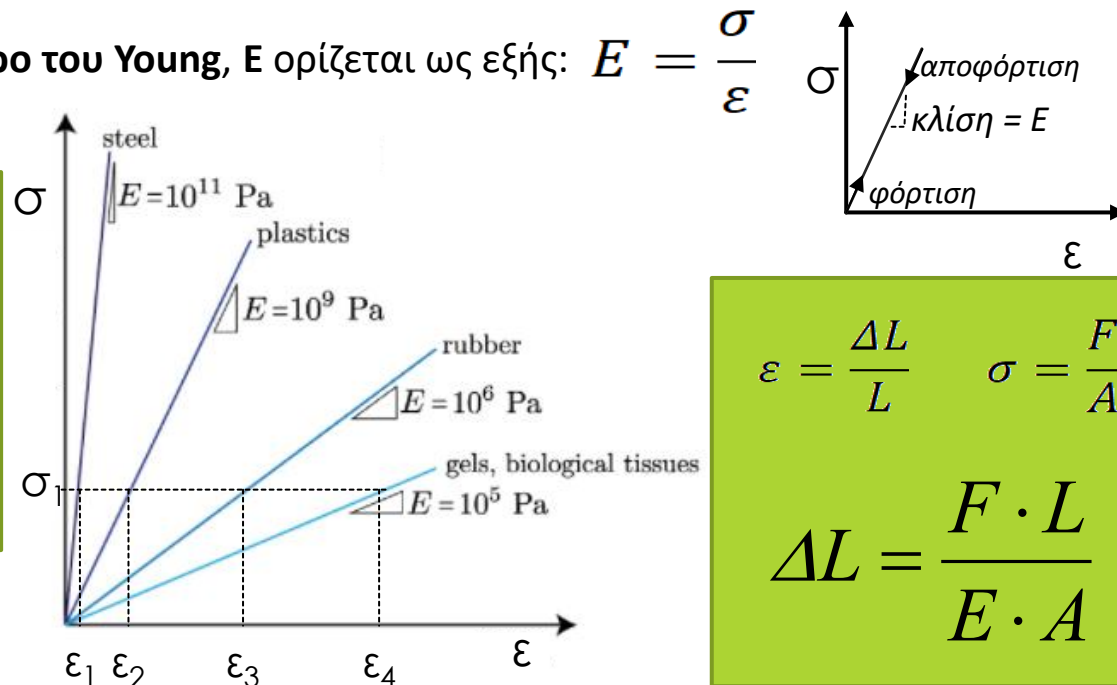
Παραμόρφωση: ε , (strain): η σχετική αλλαγή σχήματος ενός υλικού υπό κατάσταση εξωτερικής φόρτισης.

Μεταβολή μήκους ανά μονάδα μήκους (σχετική μεταβολή-αδιάστατο μέγεθος)

Εκτατική παραμόρφωση - εφελκυσμός

Το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young, E ορίζεται ως εξής: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

Το μέγεθος αυτό έχει μονάδες μέτρησης $[N/m^2]$ ή $[Pa]$ και εκφράζει την στιβαρότητα ενός υλικού, δηλαδή την αντίσταση που προβάλλει στην ελαστική του παραμόρφωση.

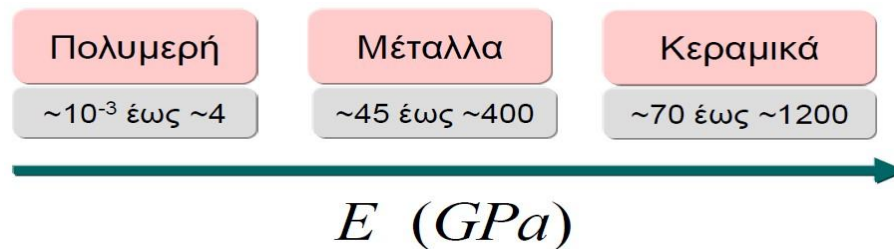


$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \sigma = \frac{F}{A}$$

$$\Delta L = \frac{F \cdot L}{E \cdot A}$$

Σχέσεις μεταξύ Τάσης και Παραμόρφωσης στην Ελαστική και Γραμμική Περιοχή

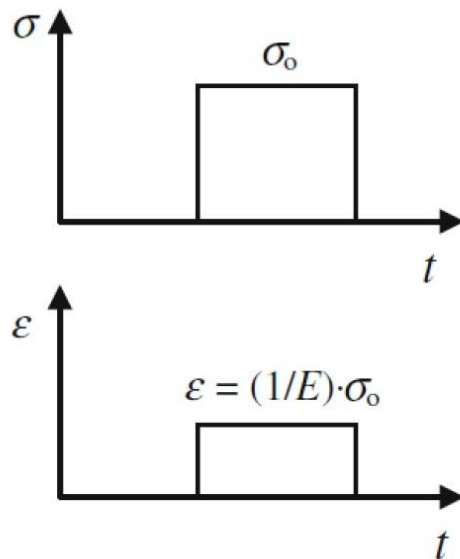
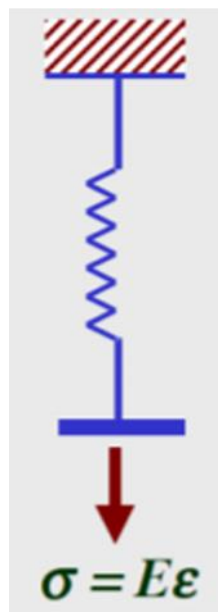
Υλικά που σχηματίζουν **ισχυρούς χημικούς δεσμούς**, όπως τα μέταλλα (**μεταλλικοί δεσμοί**) και τα κεραμικά (**ομοιοπολικοί ή ετεροπολικοί δεσμοί**), χαρακτηρίζονται από **υψηλό μέτρο ελαστικότητας**. Αντίθετα, υλικά όπως τα πολυμερή και τα ελαστομερή, των οποίων οι μοριακές αλυσίδες συγκρατούνται μεταξύ τους με **ασθενείς χημικούς δεσμούς** (π.χ. *Van der Waals*), χαρακτηρίζονται από **χαμηλό μέτρο ελαστικότητας**.



Για να πάρουμε πολυμερή με μεγάλη αντοχή (super-strong plastics) πρέπει να **ευθυγραμμίσουμε (align)** τις **πολυμερικές αλυσίδες**. Τότε οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων άνθρακα (carbon-carbon bonds) θα προσδώσουν την επιθυμητή αντοχή. Απλό νήμα (single-filament) πολυαιθυλενίου έχει μέτρο αντοχής που ξεπερνάει αυτό του σιδήρου!!! (260 GPa έναντι 210 GPa).

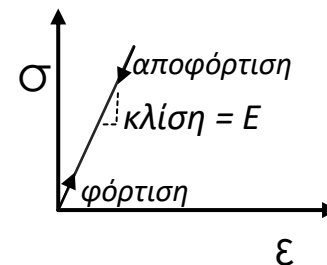
Μαθηματικό μοντέλο γραμμικού ελατηρίου

Απολύτως ελαστικά υλικά

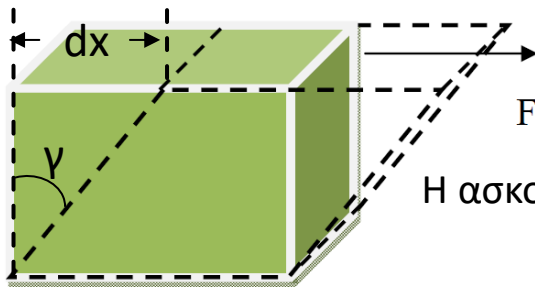


Απόκριση γραμμικού ελατηρίου σε
σταθερή τάση πεπερασμένης
διάρκειας

- ✱ Καθορισμένο σχήμα
- ✱ Με την επίδραση τάσης, ακαριαία παραμόρφωση
- ✱ Αντιστρεπτή παραμόρφωση



Διατμητική παραμόρφωση - διάτμηση



Δοκίμιο που υφίσταται διατμητική δύναμη, F
παράλληλα στην επιφάνεια

Η ασκούμενη **διατμητική τάση** στην επιφάνεια A θα είναι: $\tau = \frac{F}{A}$

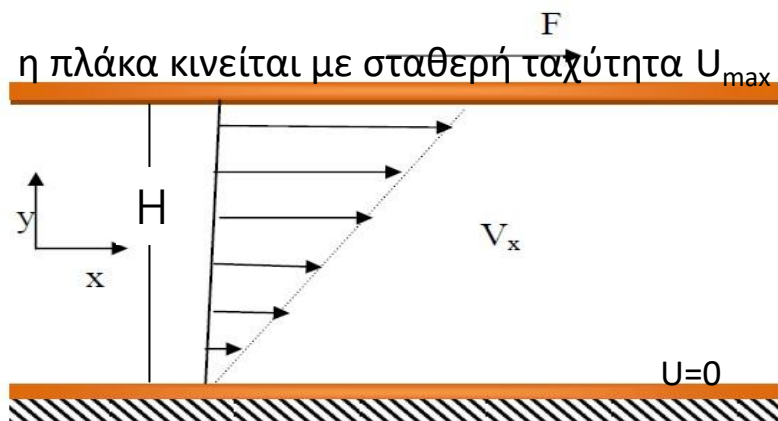
Υπό την επίδραση της τ , παρατηρείται στρέβλωση του ορθογωνίου στο πλάγιο παραλληλόγραμμο. Το μέτρο της στρέβλωσης αυτής είναι η **γωνιακή τροπή** ή **γωνιακή παραμόρφωση** ή **διατμητική τροπή** ή **διατμητική παραμόρφωση**, γ (αδιάστατο μέγεθος, γωνία σε rad).

Για πολύ μικρές τιμές της γωνίας γ : $\tan \gamma \approx \sin \gamma \approx \gamma$ (σε rad)

Οπότε το **μέτρο διάτμησης** ή **μέτρο αποθήκευσης** G θα είναι: $G = \frac{\tau}{\gamma}$

Σχέση μεταξύ Τάσης και Παραμόρφωσης στην Ιξώδη και Γραμμική Περιοχή

Γραμμική ιξωδοελαστικότητα



Προφίλ ταχύτητας κατά την κίνηση ρευστού ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες, εκ των οποίων η πάνω κινείται κάτω από την επίδραση **σταθερής δύναμης F** ενώ η κάτω παραμένει ακίνητη. Η απαιτούμενη δύναμη για να κινηθεί η επάνω πλάκα με ταχύτητα U είναι:

$$F \propto \frac{AU}{H} \Rightarrow \frac{F}{A} \propto \frac{U}{H}$$

Το πηλίκο F/A ονομάζεται **διατμητική τάση τ** και το πηλίκο U/H αντιπροσωπεύει την κλίση (βαθμίδα) ταχύτητας du/dy , και ονομάζεται **ρυθμός διάτμησης γ** . Επομένως, μπορούμε να γράψουμε:

Σχέση μεταξύ Τάσης και Παραμόρφωσης στην Ιξώδη και Γραμμική Περιοχή

Πρότυπο ιξώδους συμπεριφοράς

Νόμος του Newton

$$\tau = \eta \frac{dU_x}{dy}$$

για μονοδιάστατη στρωτή ροή (ορισμός του ιξώδους)

όπου η είναι χαρακτηριστική σταθερά του ρευστού και ονομάζεται συντελεστής (διατμητικού) ιξώδους ή απλώς ιξώδες. Στο σύστημα μονάδων SI η μονάδα ιξώδους είναι το Pa.s. Ισχύει ότι 1 Pa.s = 10 poise

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

τ : εφαρμοζόμενη διατμητική τάση

η : ιξώδες

$\dot{\gamma}$: ρυθμός διάτμησης-παραμόρφωσης

Σχέση μεταξύ Τάσης και Παραμόρφωσης στην Ιξώδη και Γραμμική Περιοχή

Ιξώδες

Το ιξώδες είναι χαρακτηριστική ιδιότητα ενός ρευστού και εκφράζει την **αντίσταση που εμφανίζει το ρευστό στη ροή**. Ουσιαστικά, το ιξώδες εκφράζει την **εσωτερική τριβή** που εμφανίζεται κατά την σχετική κίνηση παράλληλων στρωμάτων του ρευστού και αποτελεί έναν μηχανισμό απωλειών ενέργειας. Για τα υλικά που συνήθως είναι στερεά, το **ιξώδες αποκτά ιδιαίτερη σημασία μόνο για τις θερμοκρασίες όπου αυτά ρευστοποιούνται**. Για παράδειγμα, τα μέταλλα και τα πολυμερή, σε υψηλές θερμοκρασίες συμπεριφέρονται σαν παχύρευστα υγρά που το ιξώδες τους μειώνεται συνεχώς όσο η θερμοκρασία αυξάνεται.

$$\eta = f(S, T, P, \dot{\gamma}, t, V)$$

Το ιξώδες εξαρτάται από:

- ▶ S: το είδος του υλικού, σχετίζεται με τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του υλικού
- ▶ T: τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το υλικό
- ▶ P: την πίεση στην οποία υπόκειται το υλικό (ασθενής εξάρτηση: αύξηση της πίεσης κατά 1000 bar, προκαλεί αύξηση του ιξώδους κατά 30%)
- ▶ $\dot{\gamma}$: το ρυθμό διάτμησης ή παραμόρφωσης (μεταβολή της παραμόρφωσης με το χρόνο)
- ▶ t: το χρόνο, δηλαδή την ιστορία του δείγματος (τις παραμορφώσεις που έχει υποστεί)
- ▶ V: τη διαφορά δυναμικού που ασκείται στο υλικό καθώς ρέει (ισχυρή εξάρτηση από ηλεκτρικές δυνάμεις).

Νευτώνεια ρευστά

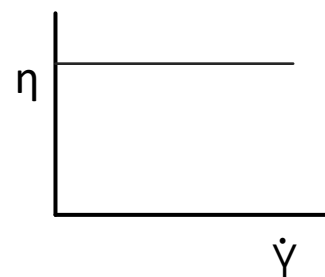
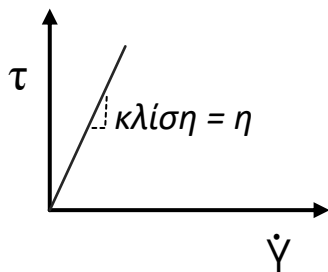
Νευτώνεια είναι τα ρευστά στα οποία η διατμητική τάση τ και ο ρυθμός παραμόρφωσης συνδέονται με μια γραμμική σχέση:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad \eta = \text{δυναμικό ιξώδες}$$

Παραδείγματα νευτώνειων ρευστών αποτελούν όλα τα αέρια και όσα υγρά αποτελούνται από ομοιόμορφα (ή σχεδόν ομοιόμορφα) μόρια, όπως π.χ. το νερό, οι κοινοί υδρογονάνθρακες (βενζίνη, κηροζίνη), η γλυκόλη, η αιθανόλη.

✿ στα νευτώνεια ρευστά το ιξώδες είναι μια πραγματική και όχι φαινομενική ιδιότητα, της οποίας η τιμή εξαρτάται από τη φύση του ρευστού και τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης.

στα νευτώνεια ρευστά το ιξώδες είναι ανεξάρτητο από το ρυθμό παραμορφώσεως

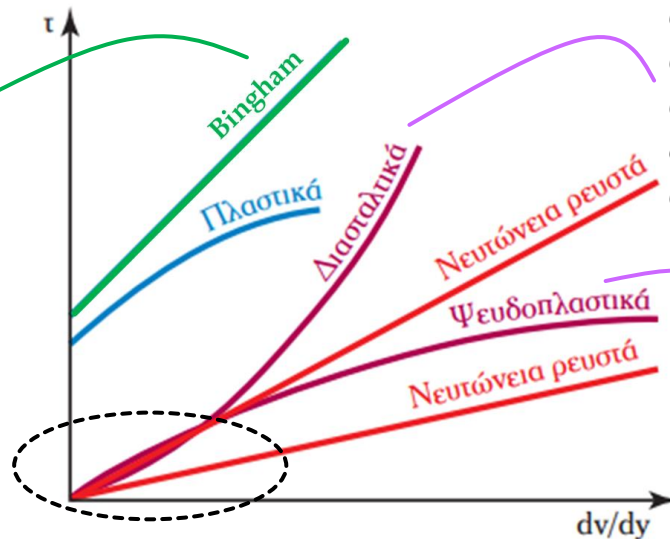


Μη νευτώνεια ρευστά

Τα μη νευτώνεια ρευστά αποκλίνουν από το νόμο του Νεύτωνα και είναι υγρά που περιέχουν μόρια των οποίων το **μέγεθος διαφέρει πολύ**, όπως διαλύματα πολυμερών ή διαλύματα που περιέχουν αιωρούμενα σωματίδια.

✿ για πολύ μικρούς ρυθμούς διάτμησης τα ρευστά αυτά συμπεριφέρονται σαν νευτώνεια

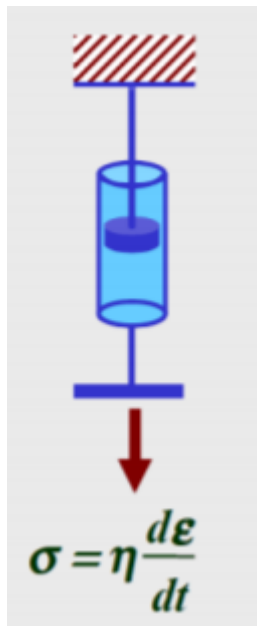
το ρευστό Bingham (οδοντόπαστα, μαγιονέζα, ζελέ κ.ά.) ρέει γραμμικά μόνο όταν η διατμητική τάση που του ασκείται ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή



όταν το φαινομενικό ιξώδες του ρευστού αυξάνεται καθώς ο ρυθμός διάτμησης αυξάνει τότε το ρευστό καλείται διασταλτικό (π.χ. τσιμεντοσκυρόδεμα, αμυλούχες κόλλες κ.ά.)

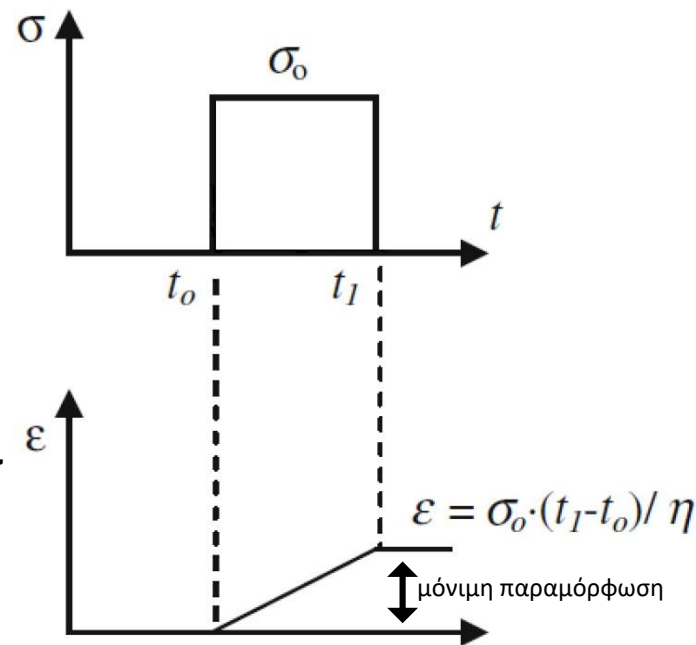
όταν το φαινομενικό ιξώδες του ρευστού ελαττώνεται καθώς ο ρυθμός διάτμησης αυξάνει τότε το ρευστό καλείται ψευδοπλαστικό (π.χ. γαλακτώματα, κολλοειδή, χυμούς φρούτων, φυσικές κόλλες κ.ά.)

Μαθηματικό μοντέλο γραμμικού ιξώδους αποσβεστήρα



Ιξώδη υλικά με συμπεριφορά
νευτωννείου ρευστού

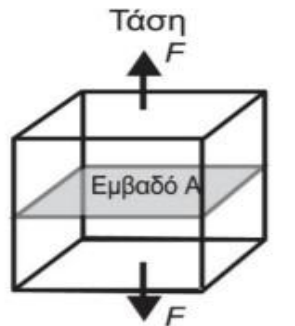
- ✱ Όχι καθορισμένο σχήμα
- ✱ Με την επίδραση τάσης η παραμόρφωση δεν είναι ακαριαία
- ✱ Η παραμόρφωση δεν είναι αντιστρεπτή



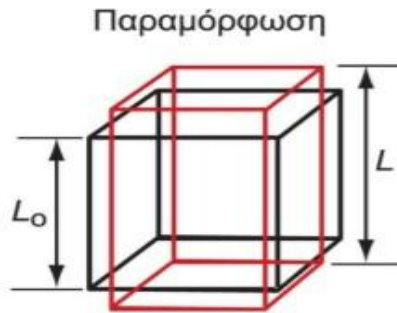
Απόκριση ιξώδους αποσβεστήρα σε
σταθερή τάση πεπερασμένης διάρκειας

Εκτατική παραμόρφωση - εφελκυσμός

(α)



Εφελκυστική τάση $\sigma = F/A$
συνήθεις μονάδες MPa

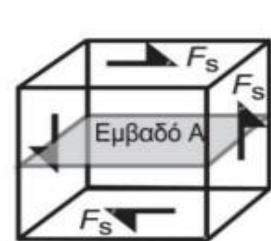


Εφελκυστική παραμόρφωση
 $\varepsilon = (L - L_0)/L_0$

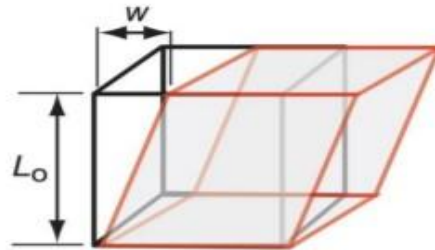


Διατμητική παραμόρφωση - διάτμηση

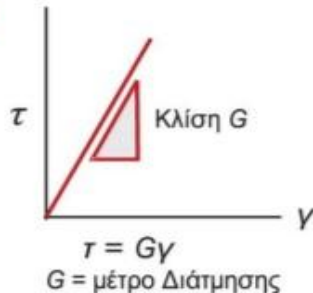
(β)



Διατμητική τάση $\tau = F_s/A$
συνήθεις μονάδες MPa

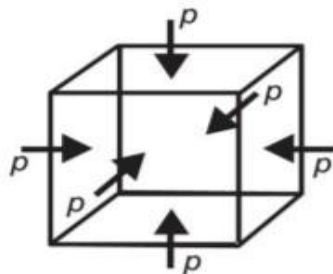


Διατμητική παραμόρφωση $\gamma = w/L_0$

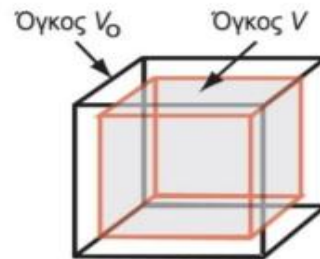


Υδροστατική συμπίεση

(γ)



Πίεση p συνήθεις
μονάδες MPa



Παραμόρφωση όγκου
(διαστολή ή συστολή)
 $\Delta = (V - V_0)/V_0$



Παραμόρφωση vs χρόνος

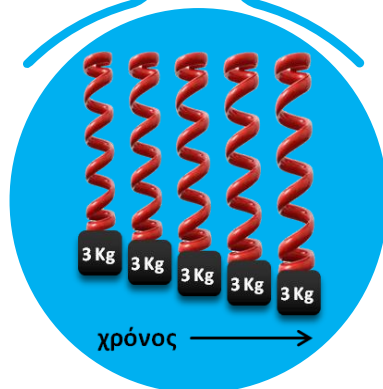
Χωρίς αμφιβολία το νερό είναι ρευστό επειδή ρέει αμέσως. Στους καθεδρικούς ναούς της Ευρώπης έχει παρατηρηθεί ότι το κάτω μέρος των βιτρώ είναι παχύτερο από το πάνω. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι η ύαλος έχει ουσιαστικά υποστεί ροή, αλλά σε διάστημα περισσότερο από 100 χρόνια. Είναι επομένως θέμα χρόνου για να υπάρξει ροή.

- ▶ Η χρονική σταθερά για το νερό $\lambda = 10^{-12}$ s (σύμφωνα με θεωρητικές εκτιμήσεις)
- ▶ Η χρονική σταθερά για την ύαλο $\lambda = 100$ χρόνια (σύμφωνα με εκτιμήσεις από παρατηρήσεις σε ναούς)
- ▶ Η χρονική σταθερά για πολυμερικά τήγματα $\lambda = 10^{-2} - 10^2$ s (σύμφωνα με μετρήσεις)

Διάφοροι τύποι δοκιμών τάσης- παραμόρφωσης των πολυμερών με τον χρόνο

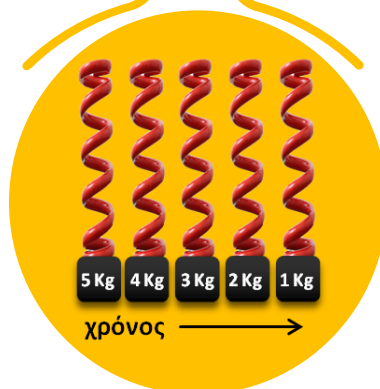
Ερπυσμός (creep)

μελετάται η μεταβολή της παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου ($\epsilon(t)$) υπό την επίδραση σταθερού φορτίου



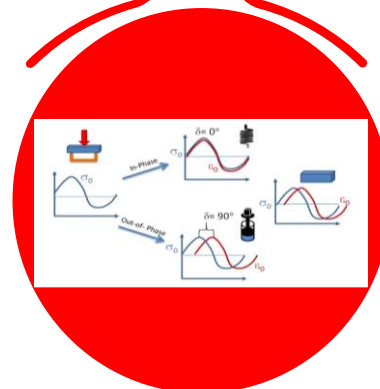
Χαλάρωση Τάσης (stress relaxation)

μελετάται η μεταβολή της τάσης με το χρόνο ($\sigma(t)$) για σταθερή παραμόρφωση



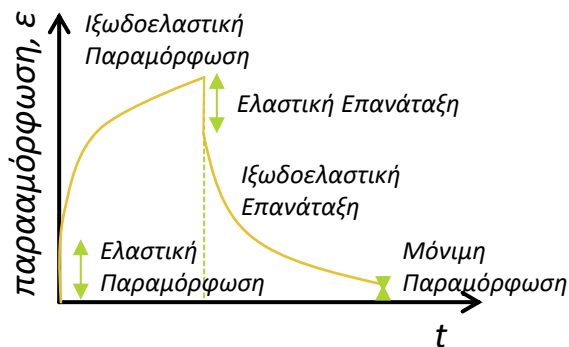
Δυναμική μηχανική ανάλυση (DMA)

μελετάται η παραμόρφωση του υλικού υπό την επίδραση ημιτονοειδούς μεταβαλλόμενης με τον χρόνο τάσης ($\sigma = \sigma_0 \sin t$) ή το αντίστροφο



Ερπυσμός (creep)

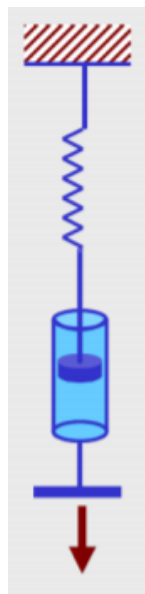
Το φαινόμενο κατά το οποίο υλικά που βρίσκονται υπό την επίδραση **σταθερού φορτίου** και σε περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας και υγρασίας παρουσιάζουν **αύξηση της παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου**, ονομάζεται **ερπυσμός (creep)**. Ο ερπυσμός είναι εξαιρετικά σημαντική ιδιότητα ιδίως σε εφαρμογές που απαιτούν διαστατική σταθερότητα (π.χ. έπιπλα, σακούλες, κιβώτια αποθήκευσης, κλπ.).



Η αποφόρτιση του υλικού χαρακτηρίζεται από μία **χρονικά εξαρτώμενη μείωση της παραμόρφωσης**. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **επανάταξη (recovery)**.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται δύο κυρίως μοντέλα του Maxwell και του Kelvin-Voigt.

Μαθηματικό μοντέλο Maxwell



Προκύπτει στην περίπτωση που τα στοιχεία του ελατηρίου και του αποσβεστήρα είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους και συνεπώς δέχονται πάντα την ίδια **σταθερή φόρτιση**. Άρα, $\sigma = \text{σταθερό}$ και $d\sigma/dt = 0$.

Η συνολική παραμόρφωση του μοντέλου ισούται με το άθροισμα των επί μέρους παραμορφώσεων των δύο στοιχείων.

Γραμμικό
ελατήριο

Γραμμικός
ιξώδης
αποσβεστήρας

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \cancel{\frac{d\sigma}{dt}} + \frac{\sigma}{\eta} \Rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \cdot \sigma_1 \quad \dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{\eta} \cdot \sigma_2$$

$$\varepsilon_{total} = \frac{1}{E} \cdot \sigma_1 + \frac{1}{\eta} \cdot \sigma_2$$

Η εξίσωση ολοκληρώνεται με όρια για $t = 0$, $\varepsilon = \sigma/E$. Αυτό σημαίνει ότι στην αρχή της φόρτισης η συνολική παραμόρφωση του συστήματος ισούται με την παραμόρφωση του ελατηρίου ή ότι αυτό παραμορφώνεται ακαριαία. Έτσι, προκύπτει:

Μαθηματικό μοντέλο Maxwell

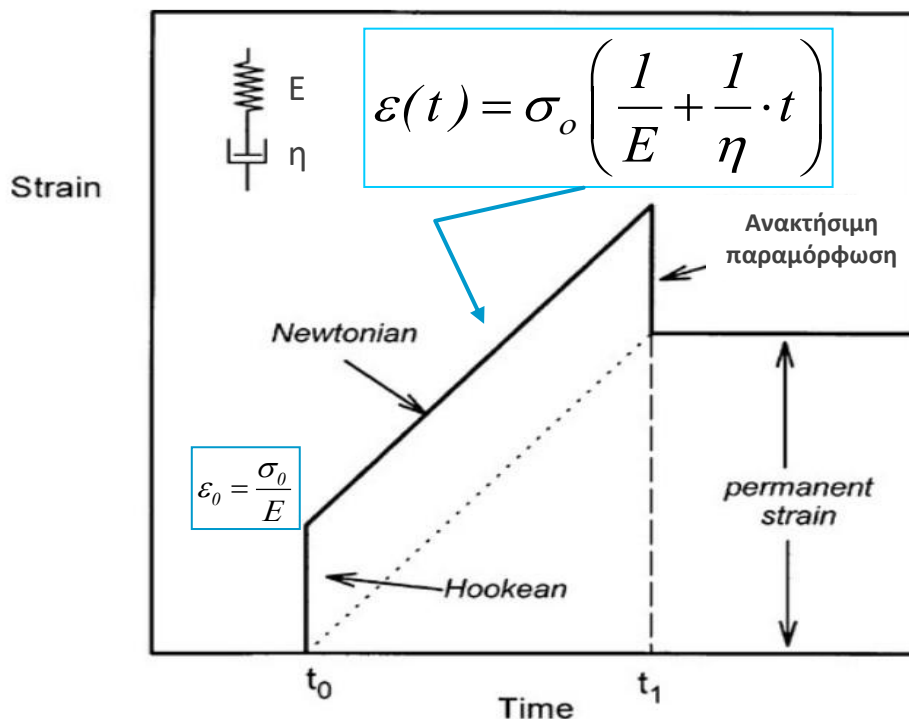
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \Rightarrow d\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} dt \Rightarrow \int d\varepsilon = \int \frac{\sigma}{\eta} dt \Rightarrow \varepsilon - \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma}{\eta} \cdot (t - 0) \Rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \cdot t$$

Η εξίσωση
ολοκληρώνεται με
όρια για $t=0$, $\varepsilon=\sigma/E$

Μαθηματικό μοντέλο Maxwell

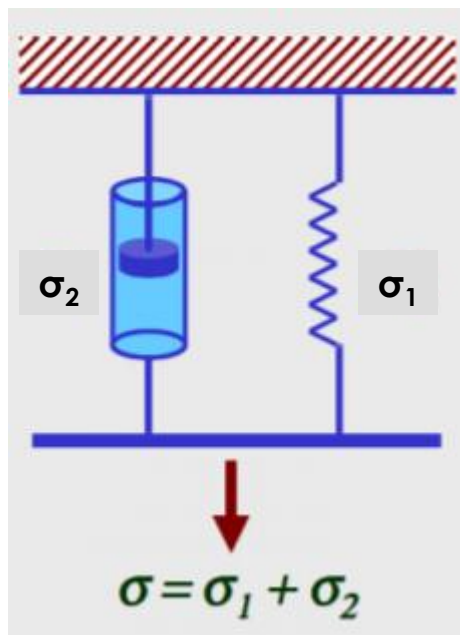
Ανάκτηση της παραμόρφωσης:

Όταν κάποια χρονική στιγμή t_1 απομακρυνθεί το σταθερό φορτίο, υπάρχει μια **ακαριαία ανάκτηση** της ελαστικής παραμόρφωσης.



Απόκριση μοντέλου Maxwell σε σταθερή τάση πεπερασμένης διάρκειας

Μαθηματικό μοντέλο Kelvin-Voigt



Προκύπτει από την παράλληλη σύνδεση ενός γραμμικού ελατηρίου και ενός γραμμικού ιξώδους αποσβεστήρα. Και τα δύο στοιχεία έχουν την **ίδια παραμόρφωση** ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) ενώ η συνολική τάση που δέχεται το μοντέλο ισούται με το άθροισμα των τάσεων που ασκούνται στα δύο ξεχωριστά στοιχεία του:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{d\sigma_2}{dt} = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon \quad \sigma_2 = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$$

$$\sigma_{total} = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon}$$

Γραμμικό
ελατήριο

Γραμμικός
ιξώδης
αποσβεστήρας

Μαθηματικό μοντέλο Kelvin-Voigt

Στην περίπτωση του ερπυσμού, η τάση που εφαρμόζεται είναι σταθερή και η εξίσωση μπορεί να επιλυθεί ως γραμμική διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης με όρια για $t = 0$, $\varepsilon = 0$ και $t \rightarrow \infty$, $\varepsilon = \sigma/E$.

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \Rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E}{\eta} \varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} \Rightarrow \varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} [1 - \exp(-\frac{E}{\eta} t)] \Rightarrow \varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_R})]$$

Αυτή η παράλληλη σύνδεση δεν επιτρέπει στο ελατήριο να παραμορφωθεί ακαριαία, όπως θα γινόταν δηλαδή σε ένα απολύτως ελαστικό υλικό. Επομένως, όταν ασκηθεί μια **σταθερή τάση** το υλικό παραμορφώνεται με έναν **μεταβαλλόμενο ρυθμό** και η συνολική παραμόρφωση τείνει να εξισωθεί με ένα **άνω όριο**, το οποίο καθορίζεται αποκλειστικά από την στιβαρότητα του υλικού.

$$\tau_R = \frac{\eta}{E}$$

Όπου τ_R : χρόνος καθυστέρησης

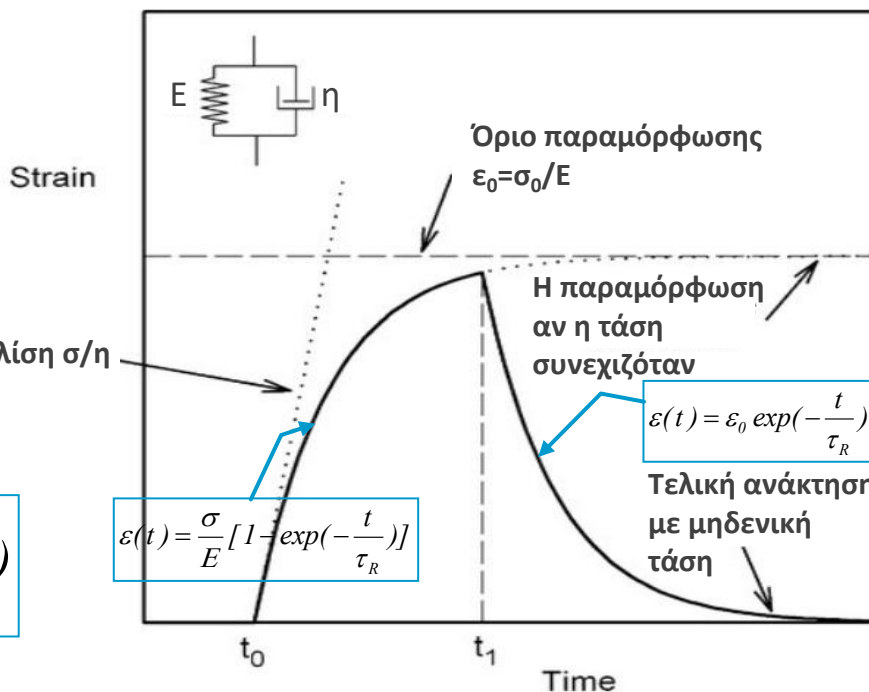
Μαθηματικό μοντέλο Kelvin-Voigt

Ανάκτηση της παραμόρφωσης:

Όταν κάποια χρονική στιγμή t_1 απομακρυνθεί το σταθερό φορτίο, η συνολική παραμόρφωση μειώνεται σταδιακά με μεταβαλλόμενο ρυθμό ώσπου να επιστρέψει το υλικό στην αρχική του κατάσταση.

$$\sigma=0, \varepsilon=\varepsilon_0$$

$$E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \Rightarrow \varepsilon(t) = \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right)$$



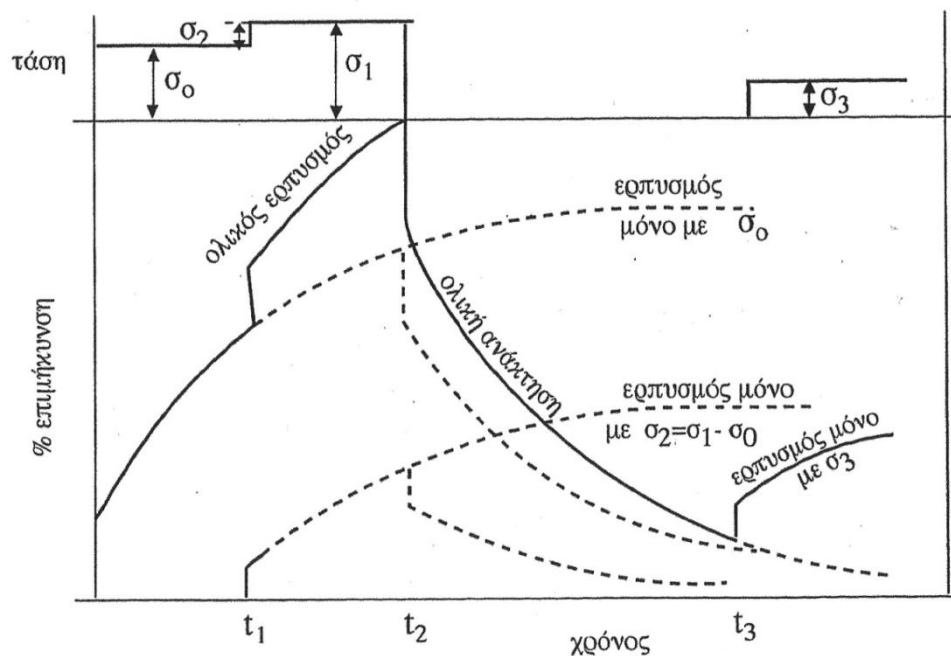
Απόκριση μοντέλου Kelvin-Voigt σε σταθερή τάση πεπερασμένης διάρκειας

Αρχή της επαλληλίας του Boltzmann

Σχεδόν στο σύνολο των πολυμερών ισχύει ένας απλός νόμος που καλείται ως Αρχή της Επαλληλίας του Boltzmann.

Με βάση την αρχή της επαλληλίας προκύπτει ότι **μία πολύπλοκη ιστορία φόρτισης ασκεί αθροιστική παραμόρφωση στο πολυμερές ανάλογη των παραμορφώσεων που συνέβησαν στο παρελθόν.**

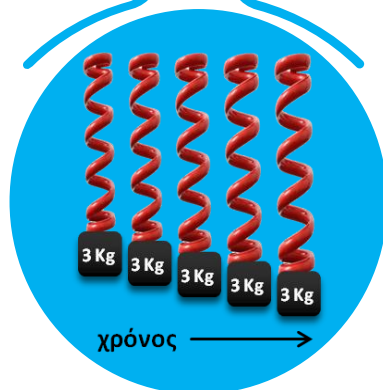
Μπορούμε δηλαδή να προσθέσουμε όλες τις συνεισφορές διότι η απόκριση του υλικού σε οποιαδήποτε παραμόρφωση είναι γραμμική και ανεξάρτητη από το τι συνέβη πριν η μετά.



Διάφοροι τύποι δοκιμών τάσης-παραμόρφωσης των πολυμερών με τον χρόνο

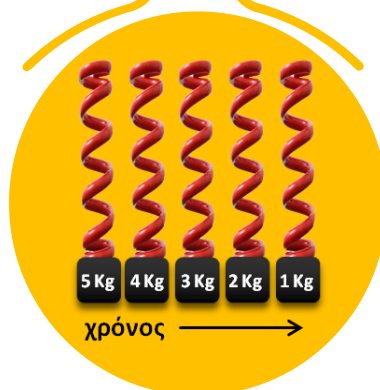
Ερπυσμός (creep)

μελετάται η μεταβολή της τάσης με το χρόνο ($\sigma(t)$) για σταθερή παραμόρφωση



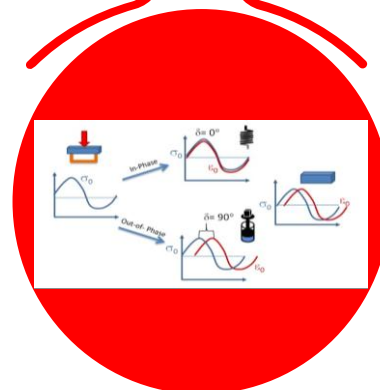
Χαλάρωση Τάσης (stress relaxation)

μελετάται η μεταβολή της παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου ($\epsilon(t)$) υπό την επίδραση σταθερού φορτίου



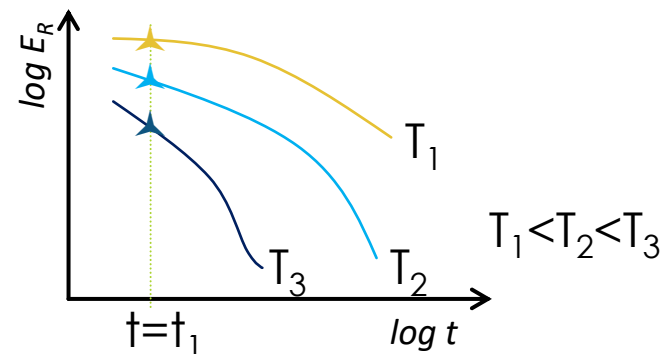
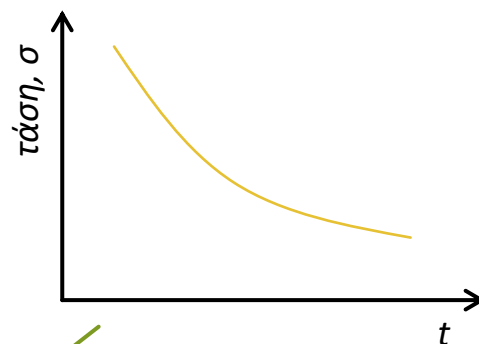
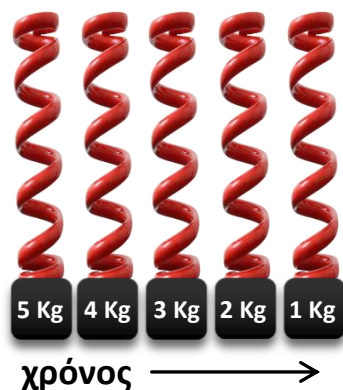
Δυναμική μηχανική ανάλυση (DMA)

μελετάται η παραμόρφωση του υλικού υπό την επίδραση ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενης με τον χρόνο τάσης ($\sigma = \sigma_0 \sin t$) ή το αντίστροφο



Χαλάρωση Τάσης (stress relaxation)

Το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται **σταδιακή μείωση της τάσης**, σε συνάρτηση με το χρόνο, **υπό σταθερή παραμόρφωση**, σε περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας και υγρασίας, ονομάζεται **χαλάρωση** και παρατηρείται σε ιξωδοελαστικά υλικά.



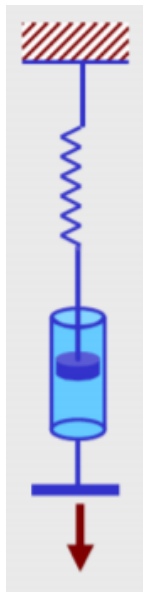
- ☑ η τάση μειώνεται με τον χρόνο λόγω διαδικασιών μοριακής χαλάρωσης
- ☑ το μέτρο χαλάρωσης (relaxation modulus) είναι χρονικά εξαρτώμενο

Μέτρο ελαστικότητας
ή χαλάρωσης

$$E_R = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$$

$\sigma(t)$: μετρούμενη χρονικά εξαρτωμένη τάση
 ε_0 : επίπεδο παραμόρφωσης που διατηρείται σταθερό

Μαθηματικό μοντέλο Maxwell



Προκύπτει στην περίπτωση που τα στοιχεία του ελατηρίου και του αποσβεστήρα είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους και συνεπώς δέχονται πάντα την ίδια φόρτιση. Στην περίπτωση της χαλάρωσης τάσης, η παραμόρφωση είναι σταθερή. Άρα, $\varepsilon = \text{σταθερό}$ και $d\varepsilon/dt = 0$.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = 0$$

Γραμμικό
ελατήριο

Γραμμικός
ιξώδης
αποσβεστήρας

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \cdot \sigma_1 \quad \dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{\eta} \cdot \sigma_2$$

$$\varepsilon_{total} = \frac{1}{E} \cdot \sigma_1 + \frac{1}{\eta} \cdot \sigma_2$$

Μαθηματικό μοντέλο Maxwell

Η εξίσωση ολοκληρώνεται με όρια
για $t=0$, $\sigma=\sigma_0$

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma}{\eta} \Rightarrow \frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{\eta} dt \Rightarrow \int \frac{d\sigma}{\sigma} = \int \left(-\frac{E}{\eta}\right) dt \Rightarrow \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = -\frac{E}{\eta} \cdot (t-0)$$

$$\Rightarrow \sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E}{\eta} \cdot t\right) \Rightarrow \sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right)$$

$\tau_R = \frac{\eta}{E}$

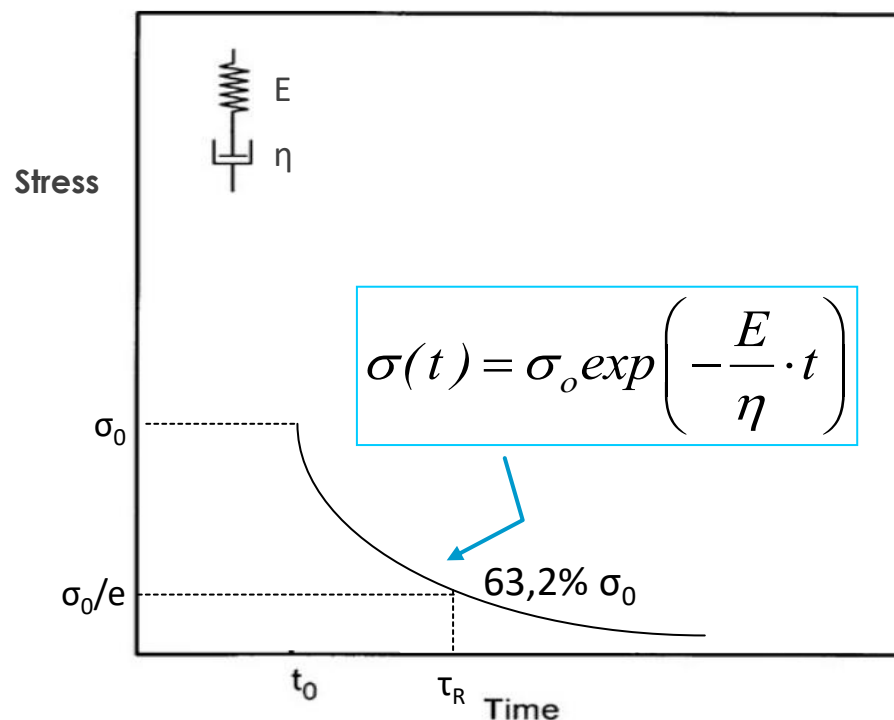
Όπου τ_R : χρόνος
χαλάρωσης

Το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο χαλάρωσης ορίζεται από τη σχέση:

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

Μαθηματικό μοντέλο Maxwell

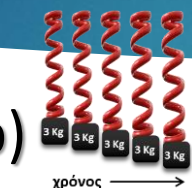
Η μεταβολή της τάσης με το χρόνο κάτω από την επίδραση σταθερής παραμόρφωσης (χαλάρωση τάσης) σύμφωνα με το μοντέλο του Maxwell δείχνει ότι όταν κάποια χρονική στιγμή t_0 εφαρμόζεται μία σταθερή παραμόρφωση η τάση αρχικά παίρνει την τιμή σ_0 ενώ στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται εκθετικά. Η τάση μειώνεται με το χρόνο λόγω διαδικασιών μοριακής χαλάρωσης στο πολυμερές



Απόκριση μοντέλου Maxwell υπό την επίδραση σταθερής παραμόρφωσης

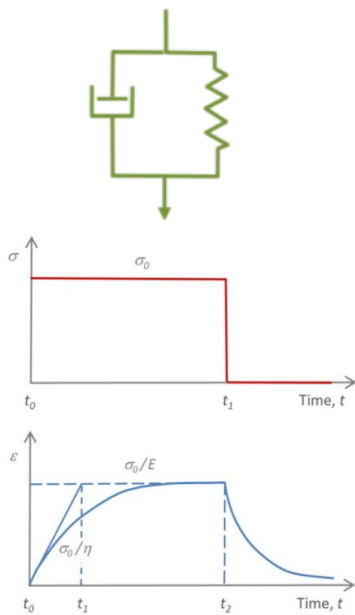
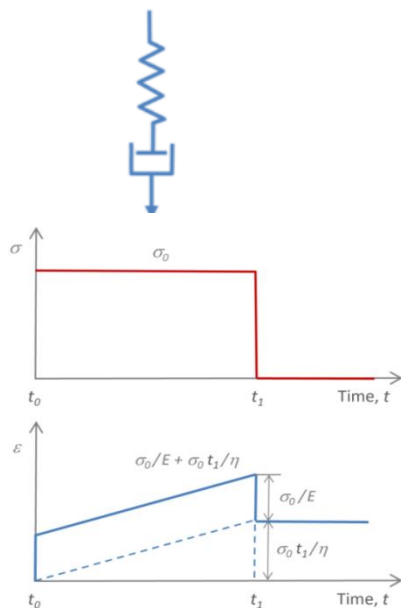
Μαθηματικά μοντέλα (σύνοψη)

Ερπυσμός (creep)

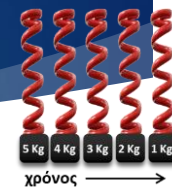


Maxwell Model

Voiigt Model

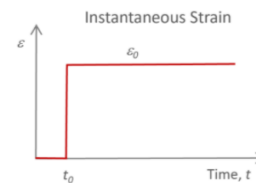


Χαλάρωση Τάσης (stress relaxation)



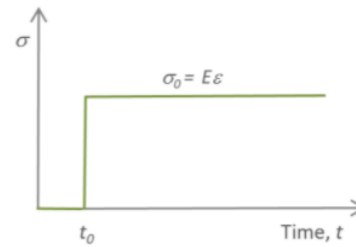
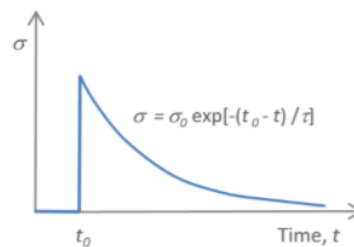
Maxwell Model

Voiigt Model



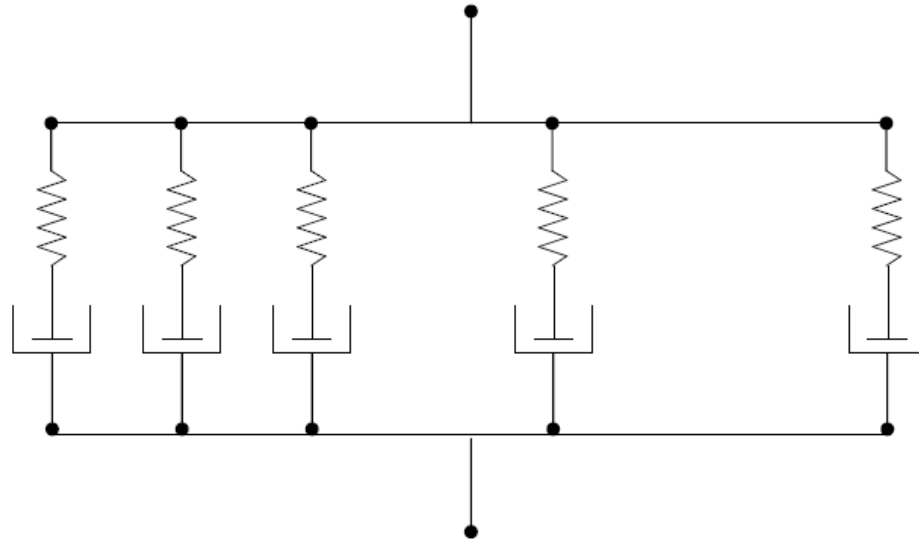
Stress Response of Maxwell Model

Stress Response of Voiigt Model



Γενικευμένο μαθηματικό μοντέλο Χαλάρωσης τάσης

Για να προσομοιωθούν πειραματικά δεδομένα πολλές φορές απαιτείται να γίνει εισαγωγή περισσότερων χρόνων χαλάρωσης. Έτσι, μπορούν να συνδυαστούν πολλά μοντέλα Maxwell παράλληλα, όπως φαίνεται στην εικόνα:



Γενικευμένο μαθηματικό μοντέλο Χαλάρωσης τάσης

Στην γενική περίπτωση η τελική μεταβολή της τάσης σ θα δίνεται από τη σχέση:

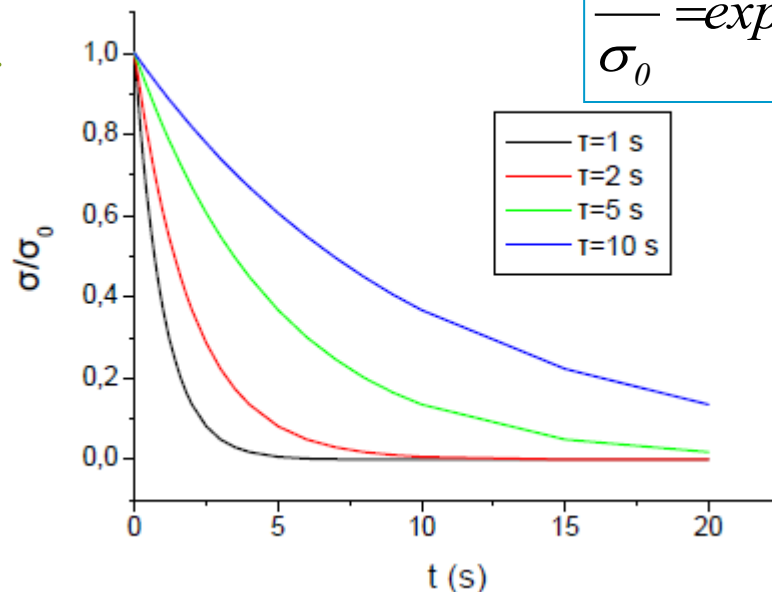
$$\sigma = \sigma_{01} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{R1}}\right) + \sigma_{02} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{R2}}\right) + \sigma_{03} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{R3}}\right) + \dots$$

Αντίστοιχα το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο χαλάρωσης θα είναι:

$$E_r(t) = E_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{R1}}\right) + E_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{R2}}\right) + E_3 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{R3}}\right) + \dots$$

Γενικευμένο μαθηματικό μοντέλο Χαλάρωσης τάσης

Παρατηρείται ότι μείωση του χρόνου χαλάρωσης οδηγεί σε πολύ γρήγορη απόκριση του συστήματος και μηδενισμό της τάσης σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.



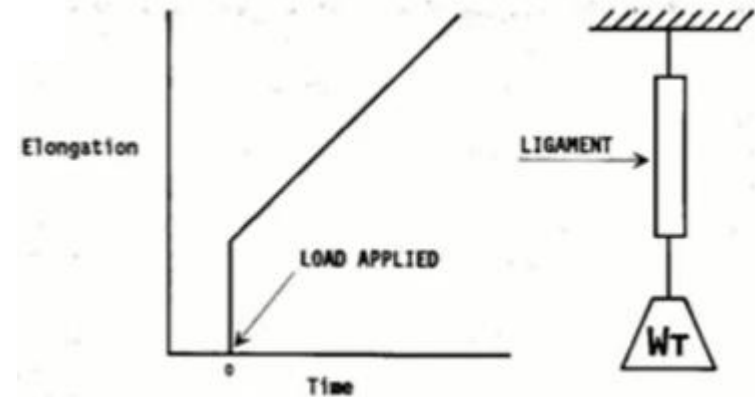
$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right)$$

$$\tau_R = \frac{\eta}{E}$$

Μεταβολή της τάσης με το χρόνο, σε πείραμα χαλάρωσης τάσης για διάφορες τιμές του χρόνου χαλάρωσης

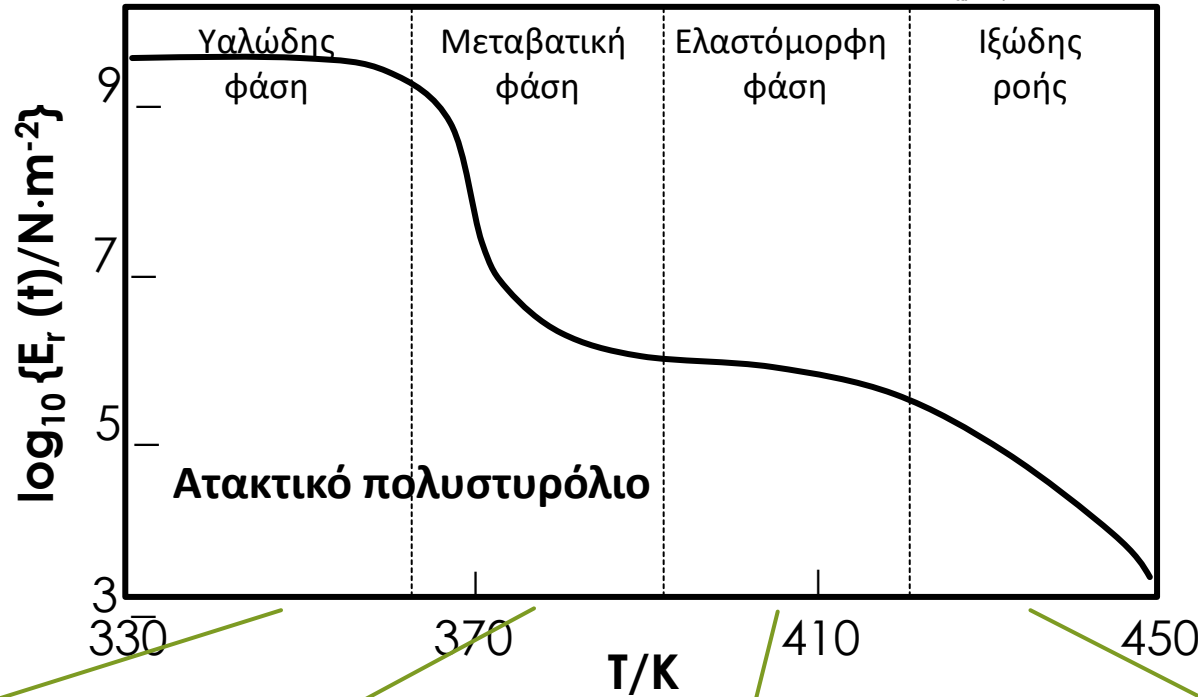
Ιξωδοελαστική συμπεριφορά πολυμερών

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πολυμερών κατά το ερπυσμό, η μεταβολή δηλαδή της παραμόρφωσής τους κατά την επιβολή σταθερής τάσης, εξαρτάται από το χρόνο εφαρμογής της τάσης και τη θερμοκρασία. Αν υποθέσουμε ότι επιβάλλεται στο πολυμερές μια σταθερή τάση τη χρονική στιγμή t_1 , η οποία παύει να εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή t_2 , τότε τα διαγράμματα ερπυσμού άμορφου γραμμικού πολυμερούς σε διάφορες περιοχές θερμοκρασίας φαίνονται ακολούθως:



Ερπυσμός (creep) πολυστυρολίου

57

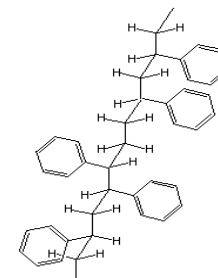
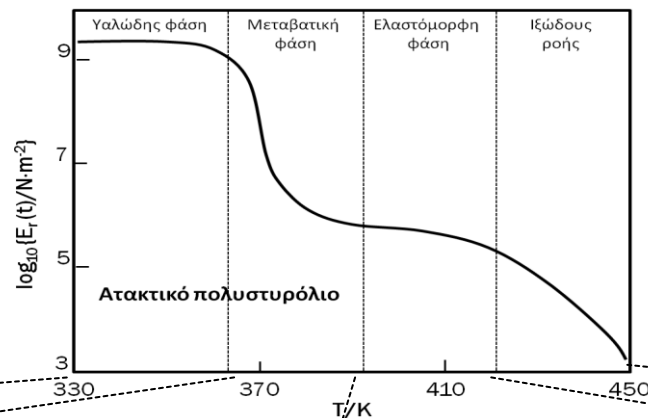
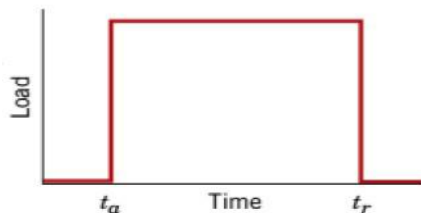


- υλικό δύσκαμπτο και ψαθυρό
- $E_r(t_1)$ ανεξάρτητο της T
- οι μακριές μοριακές αλυσίδες είναι «παγωμένες» στη θέση που βρίσκονται αν αφαιρέσουμε το φορτίο

- δερματώδης περιοχή, ή περιοχή υαλώδους μετάβασης
- $E_r(t_1)$ μειώνεται απότομα
- η παραμόρφωση εξαρτάται από τον χρόνο και δεν είναι πλήρως ανακτήσιμη αν αφαιρέσουμε το φορτίο

- το υλικό παραμορφώνεται με καουτσουκικό (ελαστομερικό) τρόπο
- υπάρχει τόσο το ελαστικό όσο και το ιξώδες τμήμα της καμπύλης
- $E_r(t_1)$ είναι σχετικά μικρό → εύκολα προκαλείται παραμόρφωση

- Ιξώδης ροή- $E_r(t_1)$ μειώνεται δραματικά όσο αυξάνεται T
- έντονη κίνηση των αλυσίδων
- η συμπεριφορά παραμόρφωσης καθορίζεται συναρτήσει του ιξώδους (κριτήριο της αντοχής του υλικού στη ροή που προκαλείται από διατμητικές τάσεις)



Υαλώδης κατάσταση ($T_g > T_{πειρ}$, ελαστική συμπεριφορά)	Ιξωδοελαστική συμπεριφορά $T_g < T_{πειρ} < (T_g + \approx 30^\circ\text{C})$	Ιξωδοελαστική συμπεριφορά $(T_g + \approx 30^\circ\text{C}) < T_{πειρ} < T_m$	Ιξώδης κατάσταση ($T_{πειρ} > T_m$), νευτώνεια συμπεριφορά
Γενικά, τα ιδανικά στερεά είναι υλικά που παραμορφώνονται ελαστικά . Η ενέργεια, δηλαδή, που απαιτείται για την παραμόρφωση, ανακτάται πλήρως όταν αφαιρεθούν οι τάσεις.	Τα πολυμερή είναι ιξωδοελαστικά υλικά , σε ασκούμενη μηχανική τάση παρουσιάζουν τόσο ελαστική παραμόρφωση όσο και ιξώδη. Έχουν χαρακτηριστικά ελαστικών στερεών και ιξωδών υγρών .		Αντίθετα τα ιδανικά ρευστά παραμορφώνονται αναντιστρεπτά . Η ενέργεια, δηλαδή, που απαιτείται για την παραμόρφωση, μεταπίπτει σε θερμική ενέργεια (viscous dissipation) και δεν ανακτάται όταν αφαιρεθούν οι τάσεις.

Αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας (Time temperature superposition)

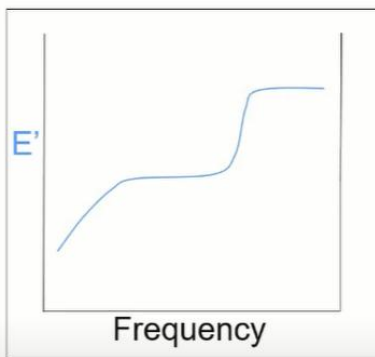
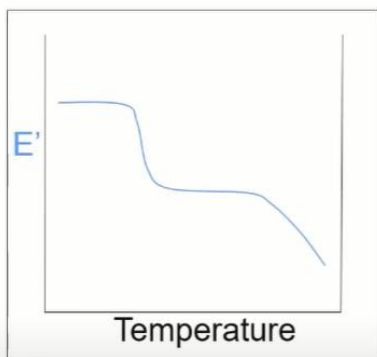
Η ιξωδοελαστική φύση των πολυμερών υλικών καθιστά απαραίτητη την ανάλυση της συμπεριφοράς τους **σε μεγάλη κλίμακα χρόνου**. Σε ένα πολυμερές:

Το μέτρο ελαστικότητας είναι συνάρτηση του χρόνου για μια σταθερή θερμοκρασία

1

2

το μέτρο ελαστικότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας για συγκεκριμένο χρόνο (συχνότητα ταλάντωσης)

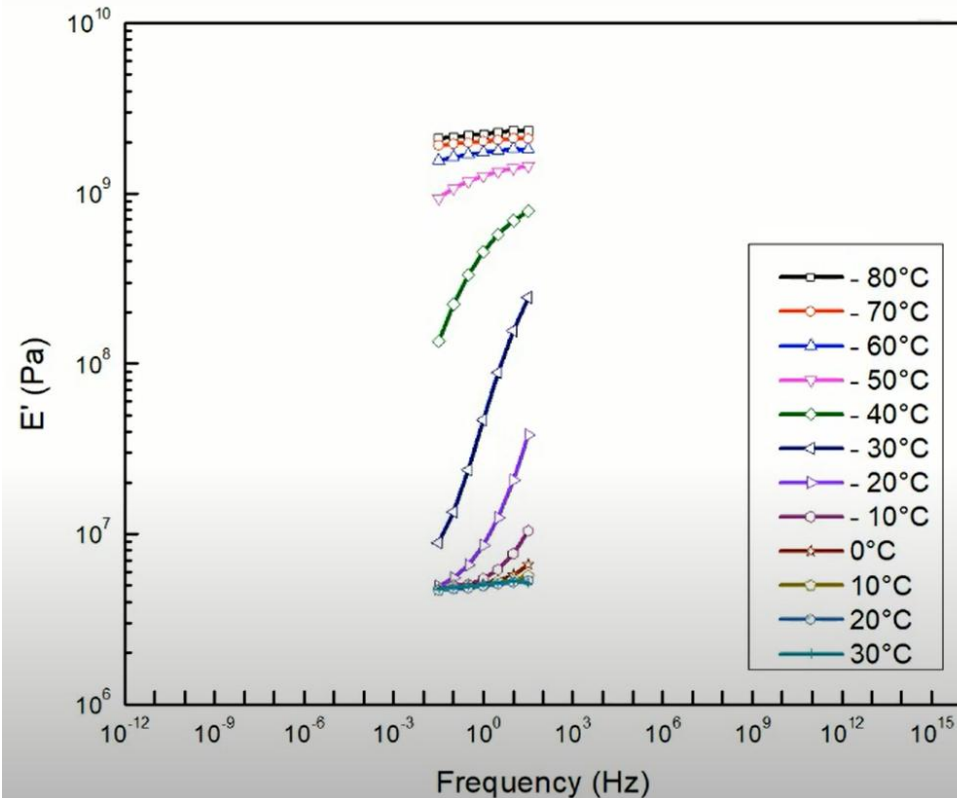


Με βάση την αρχή ισοδυναμίας χρόνου-θερμοκρασίας και τη χρήση της μητρικής καμπύλης μπορούμε να προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά υλικών σε χρόνους που δεν είναι εφικτό να γίνουν πειράματα, ή σε θερμοκρασίες πολύ διαφορετικές από τη θερμοκρασία των δοκιμών του υλικού.

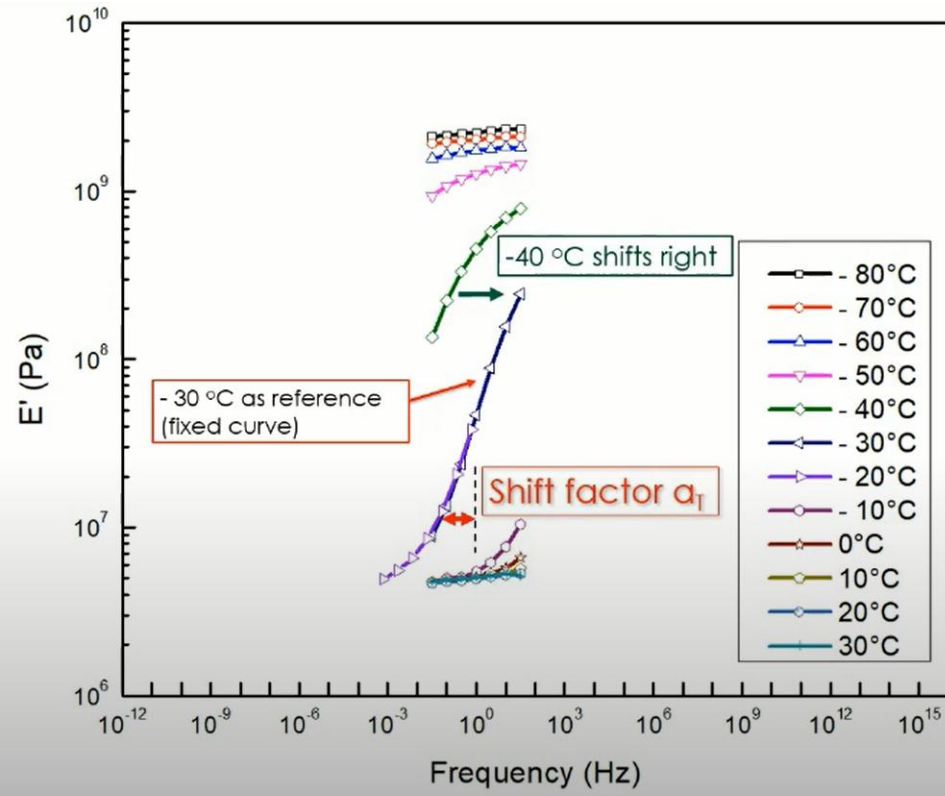
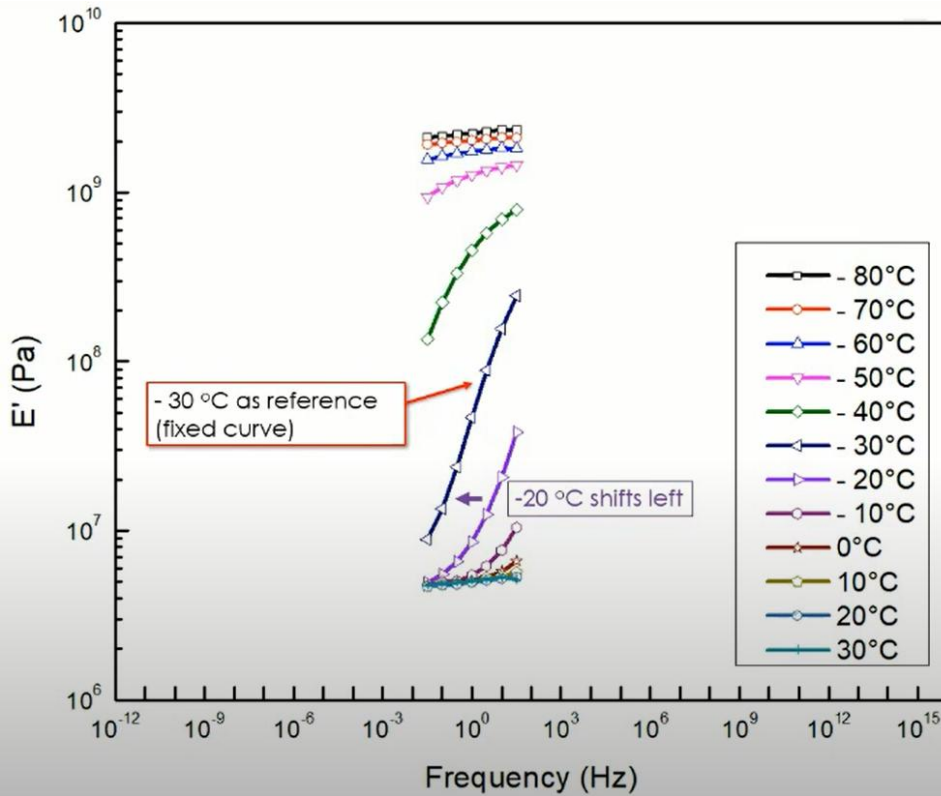
Αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας (Time temperature superposition)

Η διαδικασία περιλαμβάνει την εκτέλεση πειραμάτων σε διάφορες θερμοκρασίες και σχετικά σύντομους χρόνους. Στη συνέχεια, γίνεται μετατόπιση με τον κατάλληλο συντελεστή και δημιουργία μιας μητρικής καμπύλης Mastercurve, που ισχύει για ένα μεγάλο εύρος χρόνων.

Σάρωση συχνοτήτων από 0,01 Hz μέχρι 100 Hz σε κάθε θερμοκρασία -80°C, -70°C, 30°C.



Αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας (Time temperature superposition)



Αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας (Time temperature superposition)

Το πρώτο μοντέλο που χρησιμοποιείται συνήθως για τον υπολογισμό του συντελεστή μετατόπισης, είναι η **εξίσωση Arrhenius**:

$$\log a_{\tau} = -\frac{E_a}{2.303 \cdot R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

όπου E_a είναι η ενέργεια ενεργοποίησης που σχετίζεται με τη χαλάρωση, το R είναι η παγκόσμια σταθερά αερίων, το T είναι η θερμοκρασία μέτρησης, το T_0 είναι η θερμοκρασία αναφοράς και το a_{τ} είναι ο παράγοντας μετατόπισης βάσει του χρόνου.

Το δεύτερο θεωρητικό μοντέλο είναι η **εξίσωση Williams-Landel-Ferry (WLF)** η οποία εφαρμόζεται μόνο σε πολυμερή που εμφανίζουν T_g και σε θερμοκρασιακό εύρος $[T_g, T_g + 100 \text{ }^{\circ}\text{C}]$:

$$\log a_T = \log \frac{\eta_T}{\eta_{T_0}} = \frac{-C_1 \cdot (T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}$$

όπου C_1 και C_2 είναι σταθερές, T_0 είναι η θερμοκρασία αναφοράς, T είναι η θερμοκρασία μέτρησης (σε K) και το a_T είναι ο συντελεστής μετατόπισης. Αν τεθεί $T_0 = T_g$, τότε οι σταθερές C_1 και C_2 προσεγγίζονται από τις παγκόσμιες σταθερές C_1 και C_2 .

Αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας (Time temperature superposition)

Οι σταθερές C_1 και C_2 για διάφορα πολυμερή φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

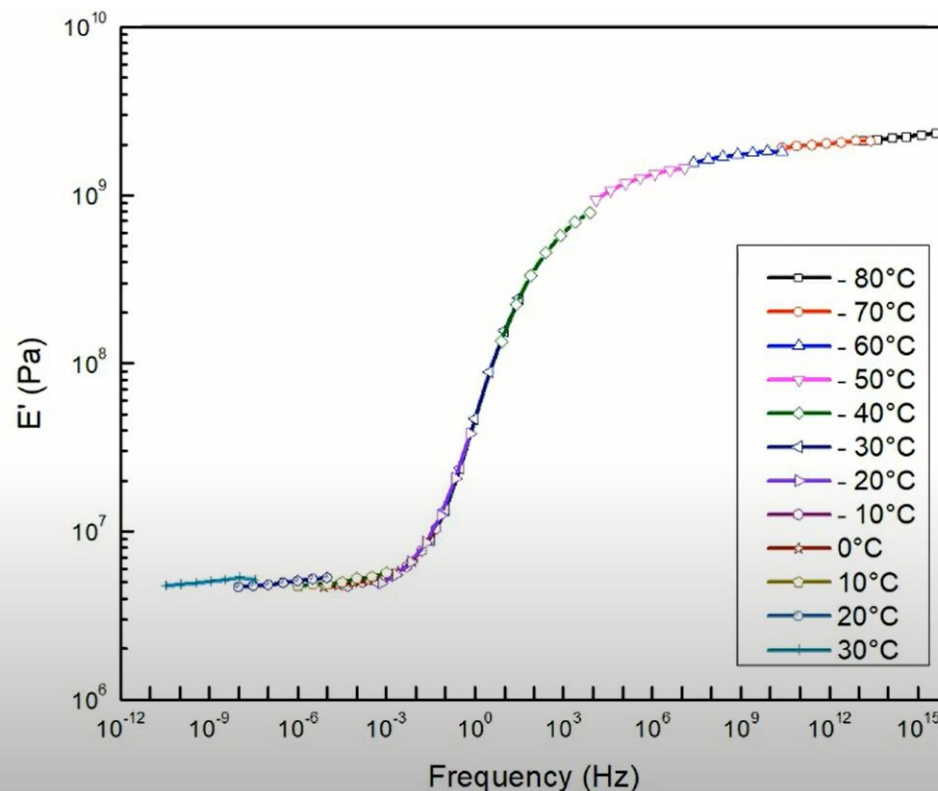
Πολυμερές	T_g (K)	C_1	C_2
Φυσικό ελαστικό	200	16.7	53.6
Πολυισοβουτυλένιο	202	16.6	104
Πολυουρεθάνη	238	15.6	32.6
Πολυ(οξικός βινυλεστέρας)	304	17.4	43.4
Πολυ(μεθακρυλικός αιθυλεστέρας)	335	17.6	65.5
Πολυ(τερεφθαλικός αιθυλενεστέρας)-PET-άμορφος	343	17.1	31.7
Πολυ(τερεφθαλικός αιθυλενεστέρας)-κρυσταλινός	353	30.4	106.6
Πολυβινυλοχλωρίδιο	353	16.2	49.7
Πολυστυρένιο	373	13.7	50.0

Συνήθως όταν $T_0 = T_g$ για άμορφα πολυμερή παίρνουμε $C_1 \approx 17.44$ and $C_2 \approx 51.6$ K.

Αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας (Time temperature superposition)

- Shift factor a_T

Temperature (°C)	Log a_T
-80	14.61
-70	11.90
-60	8.90
-50	5.60
-40	2.39
-30	0
-20	-1.66
-10	-2.81
0	-3.62
10	-4.49
20	-6.50
30	-8.95

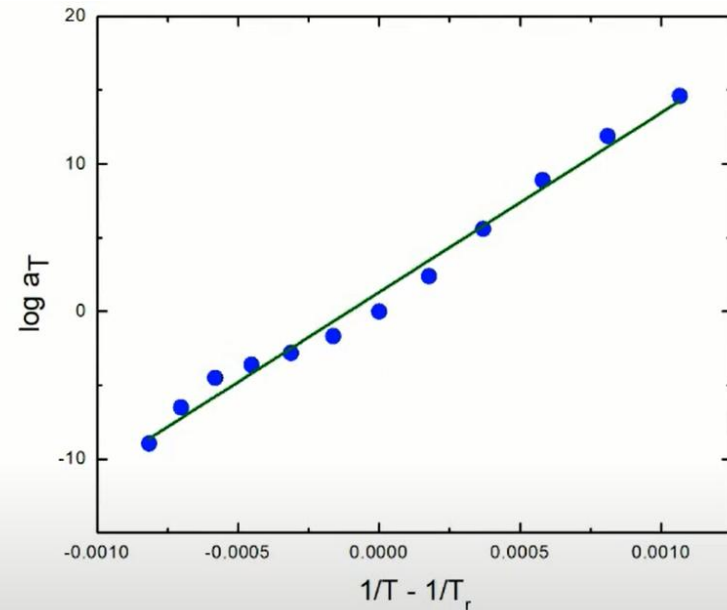


Αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας (Time temperature superposition)

- Shift factor a_T

Temperature (°C)	Log a_T
-80	14.61
-70	11.90
-60	8.90
-50	5.60
-40	2.39
-30	0
-20	-1.66
-10	-2.81
0	-3.62
10	-4.49
20	-6.50
30	-8.95

- Arrhenius equation
 - $\text{Log } a_T = (0.434 E_a / R)(1/T - 1/T_r)$



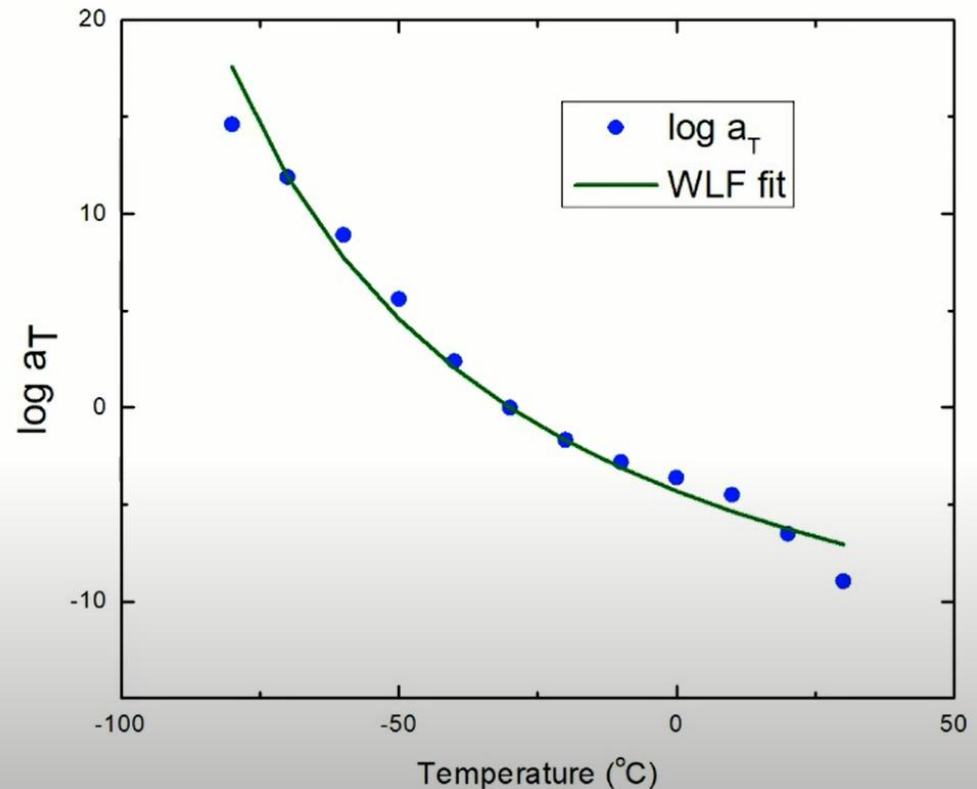
- $E_a = 219.71 \text{ kJ/mol}$

Αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας (Time temperature superposition)

- WLF model

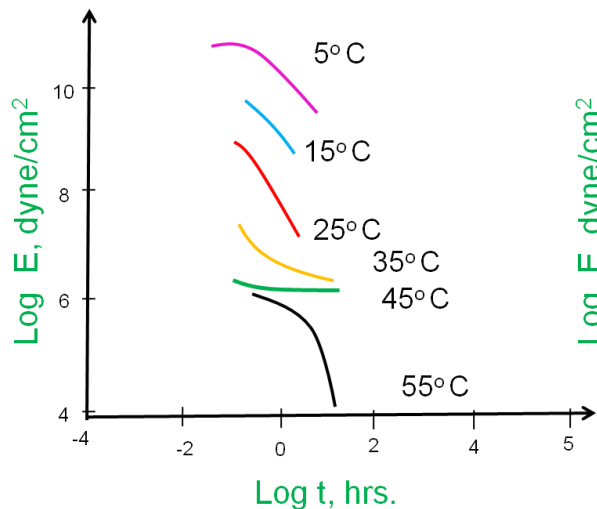
$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_g)}{C_2 + (T - T_g)}$$

- C_1 and C_2 are material constants, similar for many amorphous polymers with $C_1 = 17.44$ and $C_2 = 51.6$ in the temperature range between T_g and $T_g + 100$ °C.
- C_1 may be identified as relating to fractional free volume



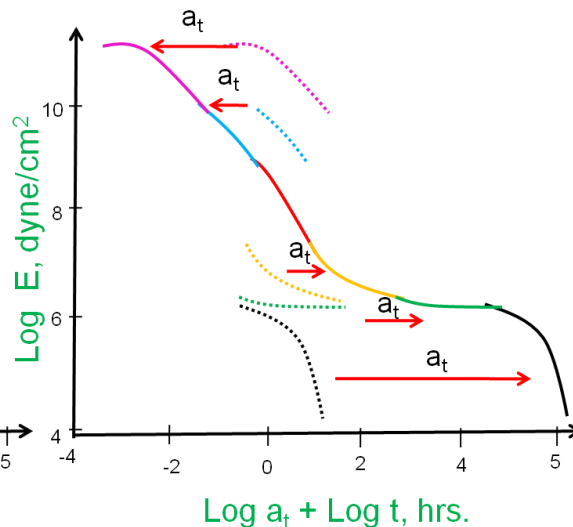
Αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας (Time temperature superposition)

Relaxation modulus data of polymer



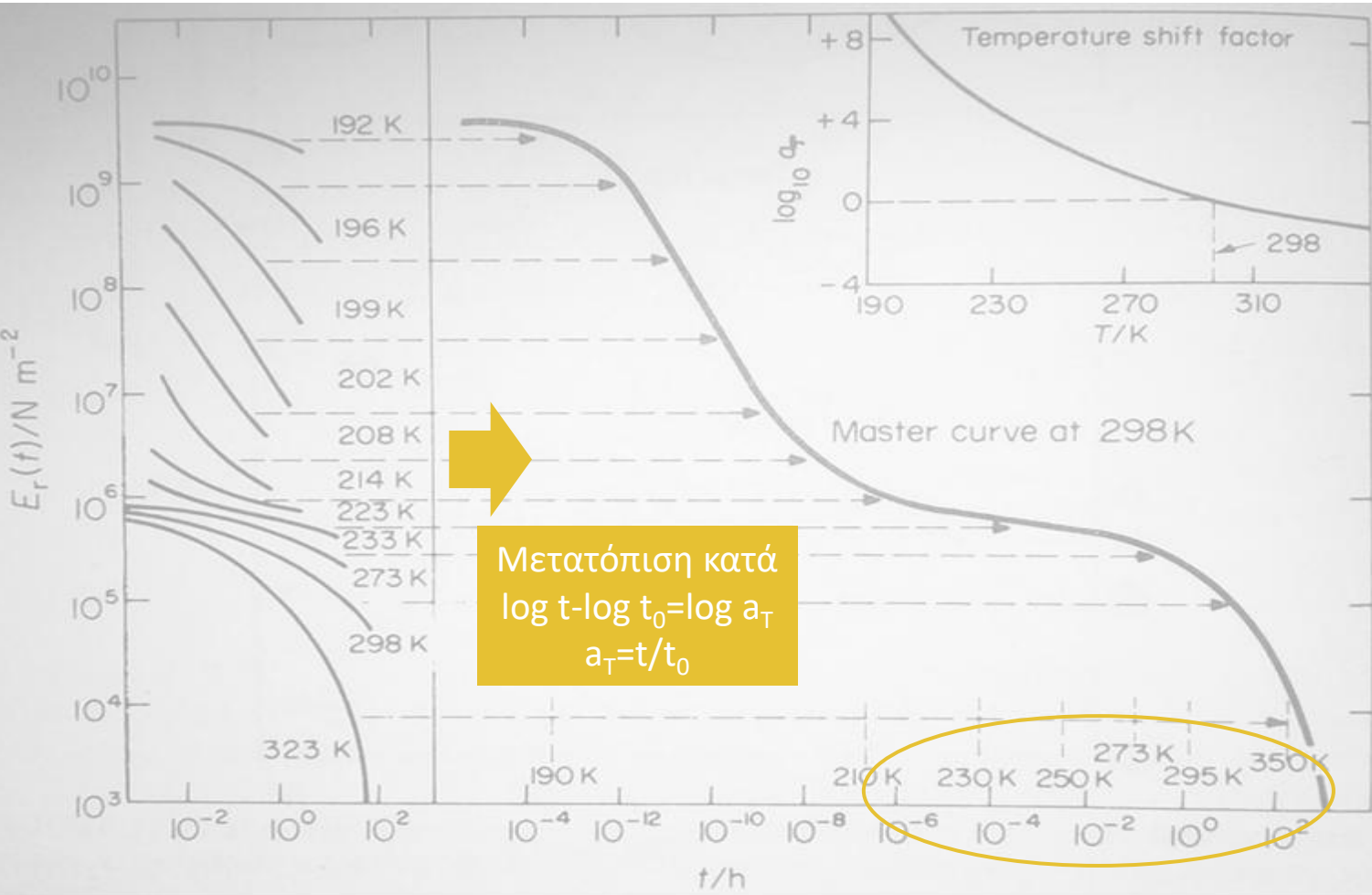
E - Relaxation modulus
 t - Time

Master curve at 25°C



a_t - horizontal shift factor

Με βάση την αρχή ισοδυναμίας χρόνου-θερμοκρασίας και τη χρήση της μητρικής καμπύλης μπορούμε να προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά υλικών σε χρόνους που δεν είναι εφικτό να γίνουν πειράματα, ή σε θερμοκρασίες πολύ διαφορετικές από τη θερμοκρασία των δοκιμών του υλικού.



Το μέτρο ελαστικότητας δίνεται σαν συνάρτηση του χρόνου (για περιορισμένο εύρος συχνοτήτων), για διάφορες θερμοκρασίες. Επιλέχθηκε η θερμοκρασία αναφοράς $T_0 = 25^\circ\text{C}$, και οι υπόλοιπες ισόθερμες καμπύλες μετατοπίστηκαν οριζόντια σε σχέση με την ισόθερμη καμπύλη των 25°C μέχρι να γίνει η υπέρθεσή τους σε μια συνεχή καμπύλη η οποία περιλαμβάνει έναν πολύ μεγαλύτερο αριθμό συχνοτήτων, και είναι γνωστή ως κύρια ή μητρική καμπύλη (master curve).

Αρχή επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας του Πολυισοβουτυλενίου για $T_0 = 298\text{K}$. Ο παράγοντας μετατόπισης φαίνεται στο ένθετο.

Διάφοροι τύποι δοκιμών τάσης- παραμόρφωσης των πολυμερών με τον χρόνο

Χαλάρωση Τάσης (stress relaxation)

μελετάται η μεταβολή της παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου ($\epsilon(t)$) υπό την επίδραση σταθερού φορτίου



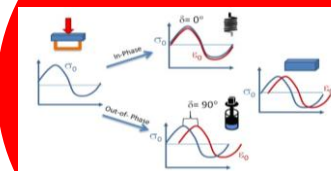
Ερπυσμός (creep)

μελετάται η μεταβολή της τάσης με το χρόνο ($\sigma(t)$) για σταθερή παραμόρφωση



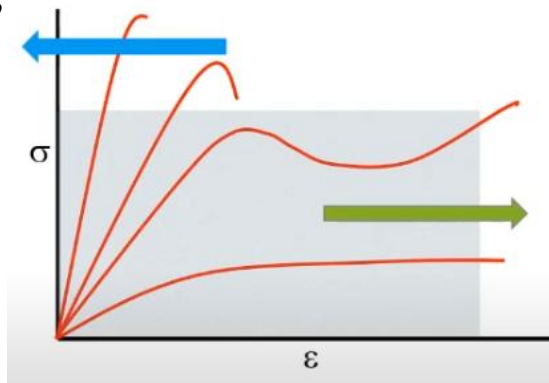
Δυναμική μηχανική ανάλυση (DMA)

μελετάται η παραμόρφωση του υλικού υπό την επίδραση ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενης με τον χρόνο τάσης ($\sigma = \sigma_0 \sin t$) ή το αντίστροφο



Απλές μηχανικές δοκιμές vs δυναμική μηχανική ανάλυση

- ▶ Υψηλές δυνάμεις (1000+ κN)
- ▶ Πλήρη σ/ϵ καμπύλη
- ▶ Οι μετρήσεις αφορούν κυρίως την περιοχή έξω από τη γραμμική ιξωδοελαστικότητα
- ▶ Έμφαση στο μέτρο ελαστικότητας
- ▶ Αντοχή στη διαρροή
- ▶ Μέγιστη εφελκυστική αντοχή
- ▶ Μεγάλα δείγματα



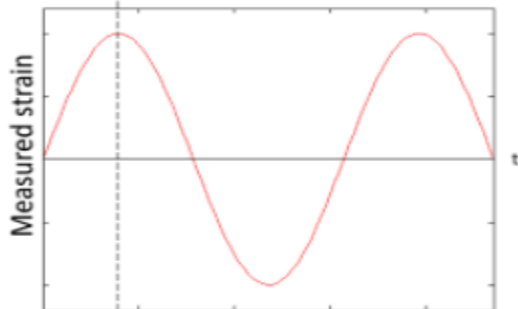
- ▶ Χαμηλές δυνάμεις (συνήθως <20 N)
- ▶ Οι μετρήσεις αφορούν κυρίως την περιοχή της γραμμικής ιξωδοελαστικότητας
(μετρήσεις πιο ευαίσθητες στη χημεία και τις μικροδομές του υλικού)
- ▶ Μπορεί να διαχωρίσει τα μέτρα ελαστικότητας της ελαστικής (E') και ιξώδους (E'') φύσης του υλικού
(μετρήσεις πιο ευαίσθητες στη χημεία και τις μικροδομές του υλικού)
- ▶ Εξάρτηση από συχνότητα και θερμοκρασία
- ▶ Μικρά δείγματα (<50 mm)

Δυναμική διέγερση και απόκριση ενός υλικού

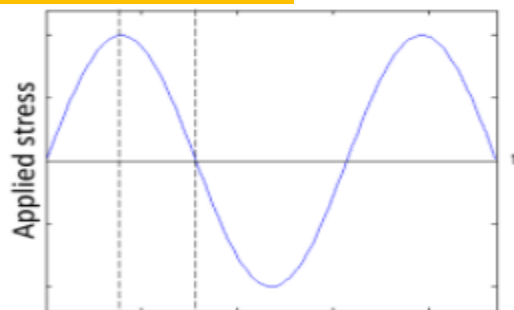
ελαστικού υλικού



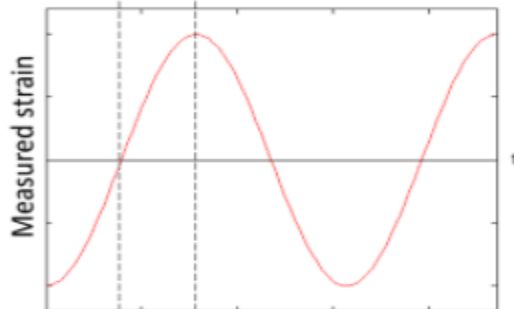
Phase lag = 0°



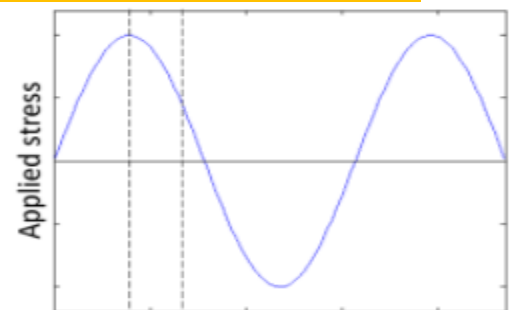
ιξώδους υλικού



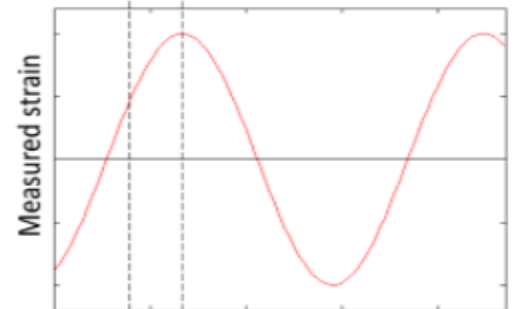
Phase lag = 90°



ιξωδοελαστικού υλικού

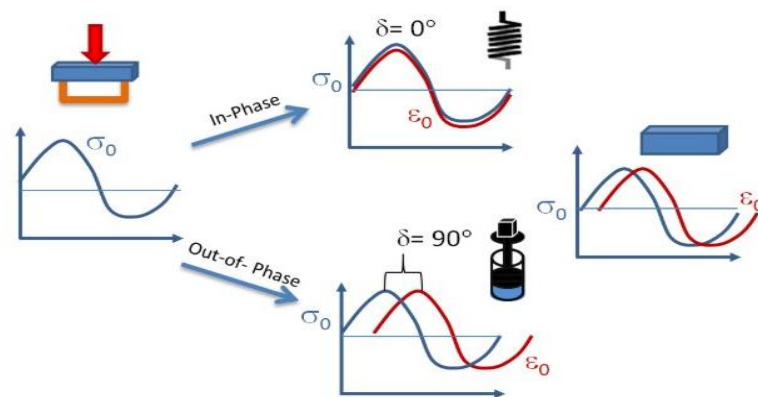
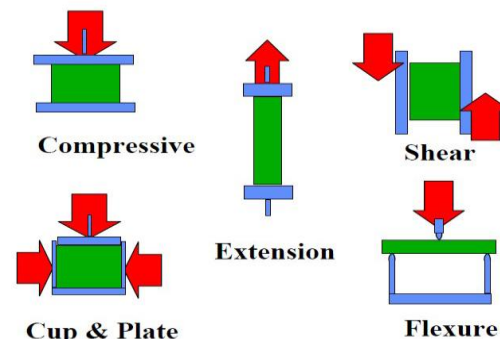


$0^\circ < \text{Phase lag} < 90^\circ$



Δυναμική μηχανική συμπεριφορά ιξωδοελαστικών υλικών

Το πιο κοινό πείραμα Δυναμικής Μηχανικής Ανάλυσης (Dynamic Mechanical Analysis) περιλαμβάνει τη **σάρωση** μιας περιοχής θερμοκρασιών με σταθερό ρυθμό και σταθερή συχνότητα μέτρησης. Από τα γραφήματα του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, του δυναμικού μέτρου απωλειών και του συντελεστή απωλειών συναρτήσει της θερμοκρασίας μπορούμε να αναγνωρίσουμε τις αλλαγές φάσης του υλικού, τις θερμοκρασίες υαλώδους μετάβασης και τήξης καθώς και δευτερεύοντες μηχανισμούς μοριακής κινητικότητας. Ανεξάρτητα από το είδος φόρτισης που θα εφαρμοστεί στο δοκίμιο (θλίψη, διάτμηση εφελκυσμός, κάμψη) η **διέγερση** θα είναι **αρμονική συνάρτηση του χρόνου** και εκτός από την μεταβολή της θερμοκρασίας σε σταθερή συχνότητα μέτρησης, μπορούμε να μεταβάλλουμε την συχνότητα σε σταθερή θερμοκρασία.



Δυναμική μηχανική συμπεριφορά ιξωδοελαστικών υλικών

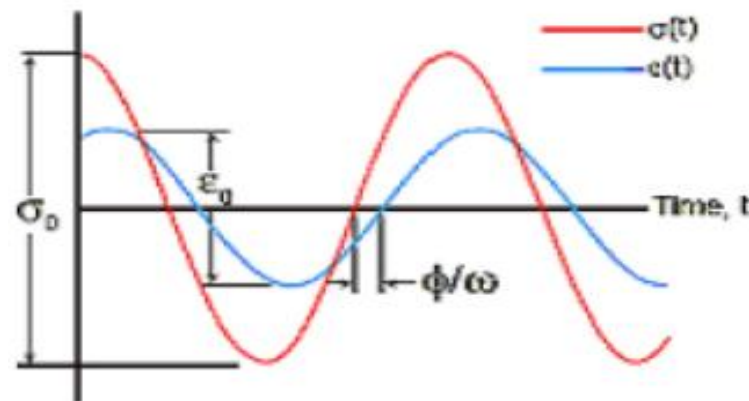
Επιβάλλεται στο δοκίμιο μία περιοδικώς μεταβαλλόμενη (ημιτονοειδής) τάση ή παραμόρφωση και μελετάται η απόκριση του υλικού.

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

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

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega t$$

Όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα και δ η διαφορά φάσης.



Δυναμική μηχανική συμπεριφορά ιξωδοελαστικών υλικών

Χρησιμοποιώντας την τριγωνομετρική ταυτότητα:

$$\sin(a + b) = \sin a \cdot \cos b + \sin b \cdot \cos a$$

η περιοδική τάση $\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t + \delta)$ μπορεί να εκφραστεί με την μορφή:

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

$$\sigma' = \sigma_0 \cdot \cos \delta$$

$$\sigma'' = \sigma_0 \cdot \sin \delta$$

$$\sigma(t) = \sigma' \sin \omega t + \sigma'' \cos \omega t$$

Σε φάση με την απόκριση

Παρουσιάζει διαφορά φάσης 90° με την απόκριση

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega t \quad \cos \omega t = \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Δυναμική μηχανική συμπεριφορά ιξωδοελαστικών υλικών

Η τάση σε ένα δυναμικό πείραμα είναι μιγαδική ποσότητα σ^* .

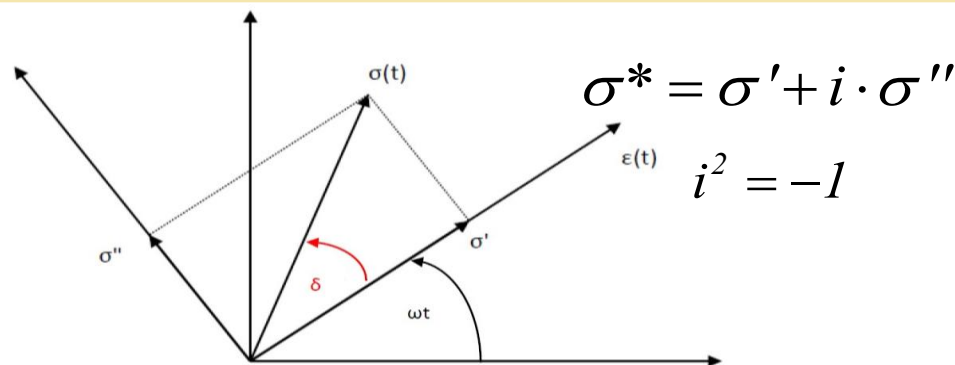
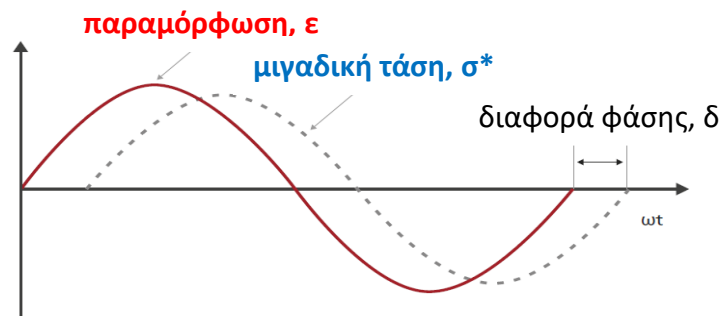
Η μιγαδική
τάση

Πραγματικό
μέρος

Η ελαστική τάση που βρίσκεται σε φάση με την παραμόρφωση: $\sigma' = \sigma_0 \cos \delta$ όπου ο όρος σ' εκφράζει τον βαθμό κατά τον οποίο το υλικό συμπεριφέρεται ως **τέλειο ελαστικό** σώμα.

Φανταστικό
μέρος

Η ιξώδης τάση σε φάση με τον ρυθμό παραμόρφωσης: $\sigma'' = \sigma_0 \sin \delta$ όπου ο όρος σ'' εκφράζει τον βαθμό κατά τον οποίο το υλικό συμπεριφέρεται ως **ιδανικό ρευστό**.



Χρονικά μεταβαλλόμενες τάσεις και παραμορφώσεις μαζί με τις αντίστοιχες συνιστώσες τους για κάποια τυχαία στιγμή t .

Δυναμική μηχανική συμπεριφορά ιξωδοελαστικών υλικών

Η σχέση που περιγράφει την τάση μπορεί να γραφεί με τη βοήθεια νόμου του Hooke:

$$\sigma(t) = \sigma' \sin \omega t + \sigma'' \cos \omega t$$

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta$$

$$E'' = \frac{\sigma''}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta$$



$$\sigma(t) = \varepsilon_0 (E' \sin \omega t + E'' \cos \omega t)$$

Είναι εμφανές ότι από τις δύο συνιστώσες της διέγερσης μόνο αυτή που είναι **σε φάση** με την απόκριση **προσφέρει στο υλικό μηχανική ενέργεια που αποθηκεύεται και μπορεί αργότερα να ανακτηθεί**. Η συνιστώσα που είναι **εκτός φάσης** ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την μηχανική ενέργεια που απορροφά το υλικό με την **μορφή θερμότητας** και **δεν μπορεί να ανακτηθεί κατά την αποφόρτιση**.

Δυναμική μηχανική συμπεριφορά ιξωδοελαστικών υλικών

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 (E' \sin \omega t + E'' \cos \omega t)$$

Μέτρο αποθήκευσης
 E' (storage modulus)

Μέτρο αποθήκευσης E'
(storage modulus)

Εκφράζει το μέρος της μηχανικής ενέργειας που αποθηκεύεται στο υλικό με την μορφή δυναμικής ενέργειας

Μέτρο απωλειών E''
(loss modulus)

Μέτρο απωλειών
 E'' (loss modulus)

Εκφράζει το ποσό της μηχανικής ενέργειας που χάνεται λόγω της μετατροπής της σε θερμότητα

Δυναμική μηχανική συμπεριφορά ιξωδοελαστικών υλικών

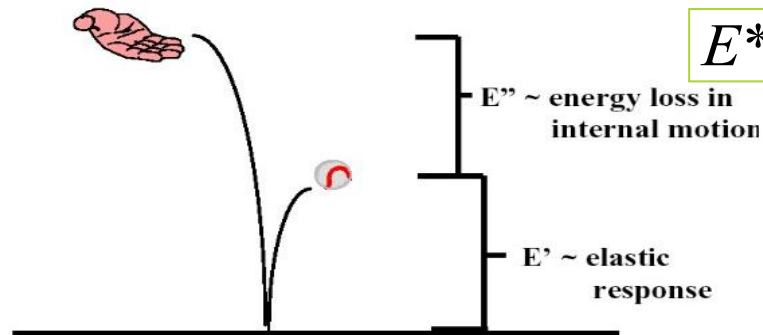
Με έκφραση της τάσης και της παραμόρφωσης με μιγαδική μορφή ορίζεται το μιγαδικό ή δυναμικό μέτρο ελαστικότητας:

$$\cos\theta + i\sin\theta = e^{i\cdot\theta}$$

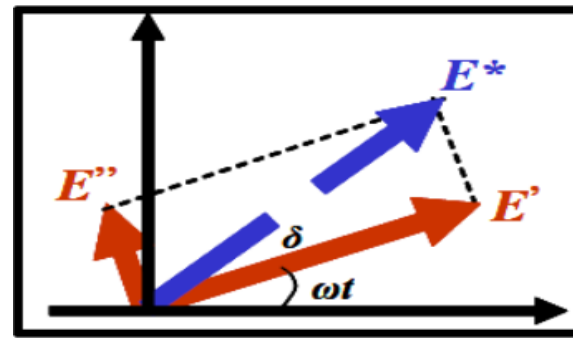
Θεώρημα του Euler

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0 \cdot e^{i(\omega t + \delta)}}{\varepsilon_0 \cdot e^{i\omega t}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot e^{i\delta} \Rightarrow E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot (\cos\delta + i\sin\delta) = E' + i \cdot E''$$

Κατά το δυναμικό χαρακτηρισμό το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, E^* , εκφράζει την **συνολική αντίσταση** του υλικού στην παραμόρφωση και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα.



$$E^* = E' + i \cdot E''$$



Δυναμική Μηχανική Ανάλυση - Ιξωδοελαστικές Παράμετροι

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)}$$

1 Το Μιγαδικό Μέτρο Ελαστικότητας

Εκφράζει την συνολική αντίσταση του υλικού στην παραμόρφωση.

1

2

Το Μέτρο Αποθήκευσης (ελαστικό)

Εκφράζει το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται στο υλικό κατά τη διάρκεια μιας περιόδου και αποδίδεται ξανά σε κάθε κύκλο εφαρμοζόμενης τάσης. Είναι ένας δείκτης της ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού και αποτελεί μέτρο της δυναμικής δυσκαμψίας του υλικού.

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

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

3 Το Μέτρο Απωλειών (ιξώδεις)

Εκφράζει το ποσό της ενέργειας που διαχέεται με τη μορφή θερμότητας σε κάθε κύκλο εφαρμοζόμενης τάσης, εξαιτίας εσωτερικών μοριακών δονήσεων. Είναι ένας δείκτης της ιξώδους συμπεριφοράς του υλικού.

3

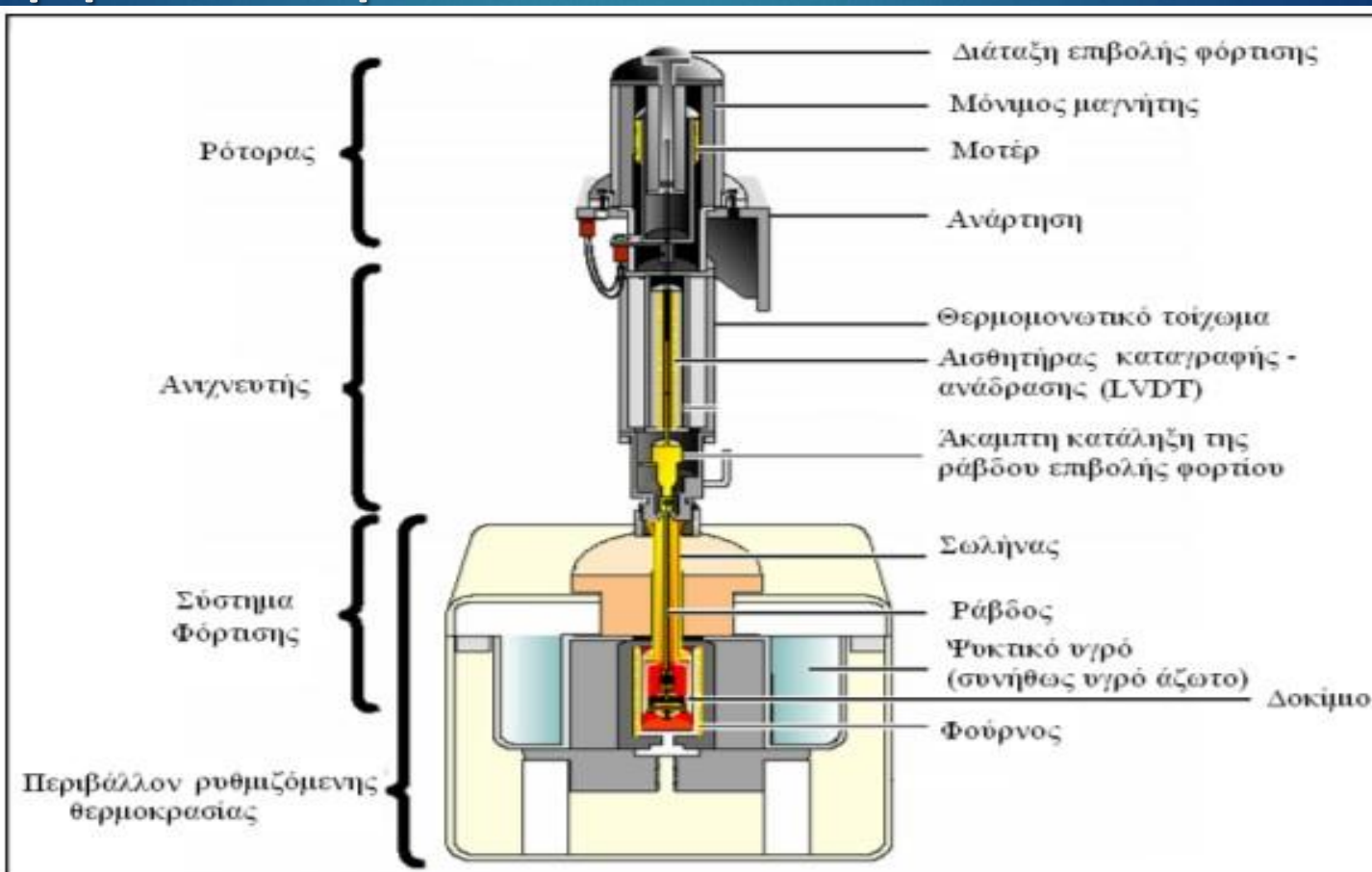
4 Συντελεστής απωλειών (loss factor)

Ο συντελεστής $\tan \delta$ αποτελεί ένα μέτρο της μηχανικής απόσβεσης. Η δυναμική ποσότητα $\tan \delta$ παρέχει ακόμη σημαντικές και ποιοτικές πληροφορίες για τις ενεργειακές μεταβάσεις ενός υλικού, οι οποίες σχετίζονται άμεσα με την αλλαγή της μοριακής κίνησης και λαμβάνουν χώρα σε ορισμένες θερμοκρασίες. Ένα πλήρως ελαστικό στερεό έχει $\tan \delta = 0$.

4

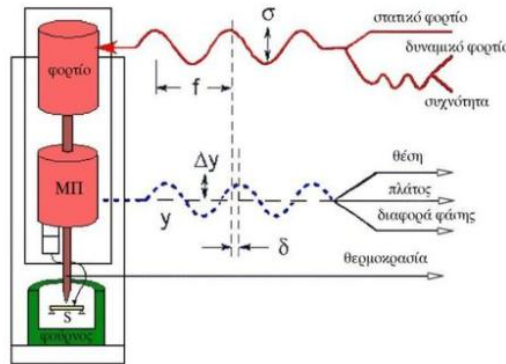
$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}$$

Οργανολογία

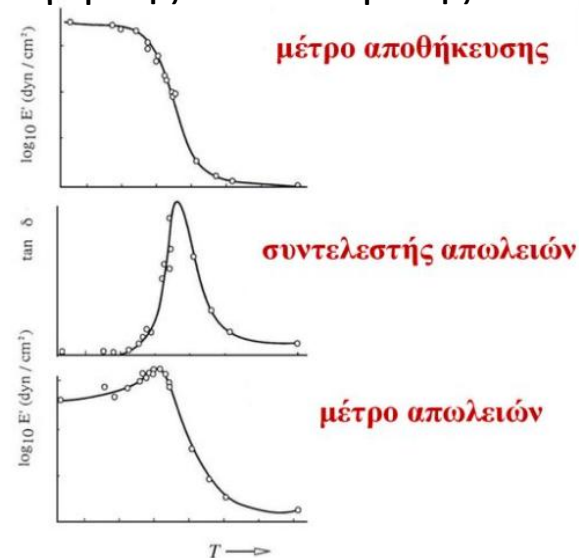


Δυναμική μηχανική συμπεριφορά ιξωδοελαστικών υλικών

- ✱ Εφαρμόζεται μία χρονικά μεταβαλλόμενη (ημιτονοειδής) διέγερση (τάση ή παραμόρφωση) στο δείγμα.
- ✱ Μετράται η απόκριση (τάση ή παραμόρφωση) του υλικού.
- ✱ Μετράται η διαφορά φάσεως δ , μεταξύ διέγερσης και απόκρισης.



ΜΠ: μετρητής παραμόρφωσης
S: δείγμα



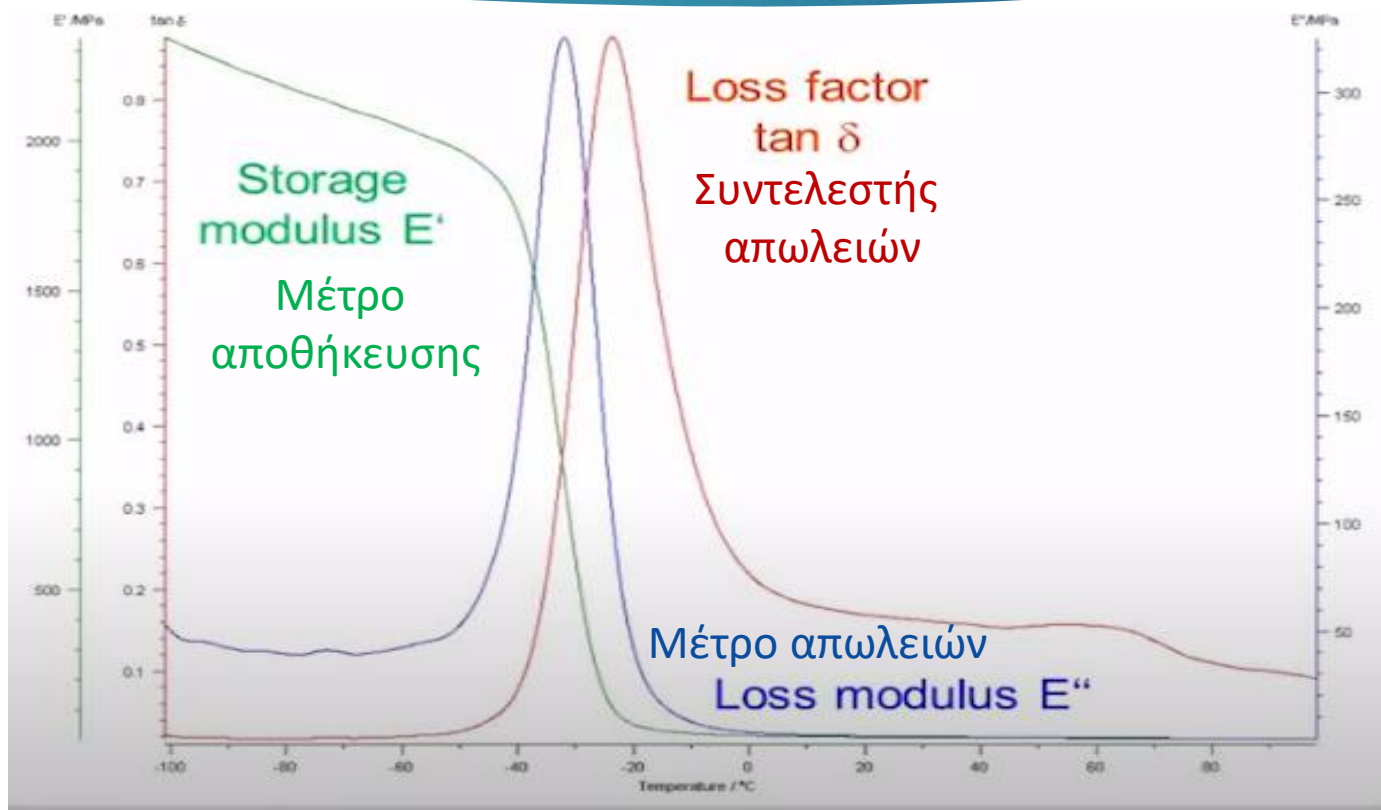
Προσδιοριζόμενες ιδιότητες με Δυναμική Μηχανική Ανάλυση

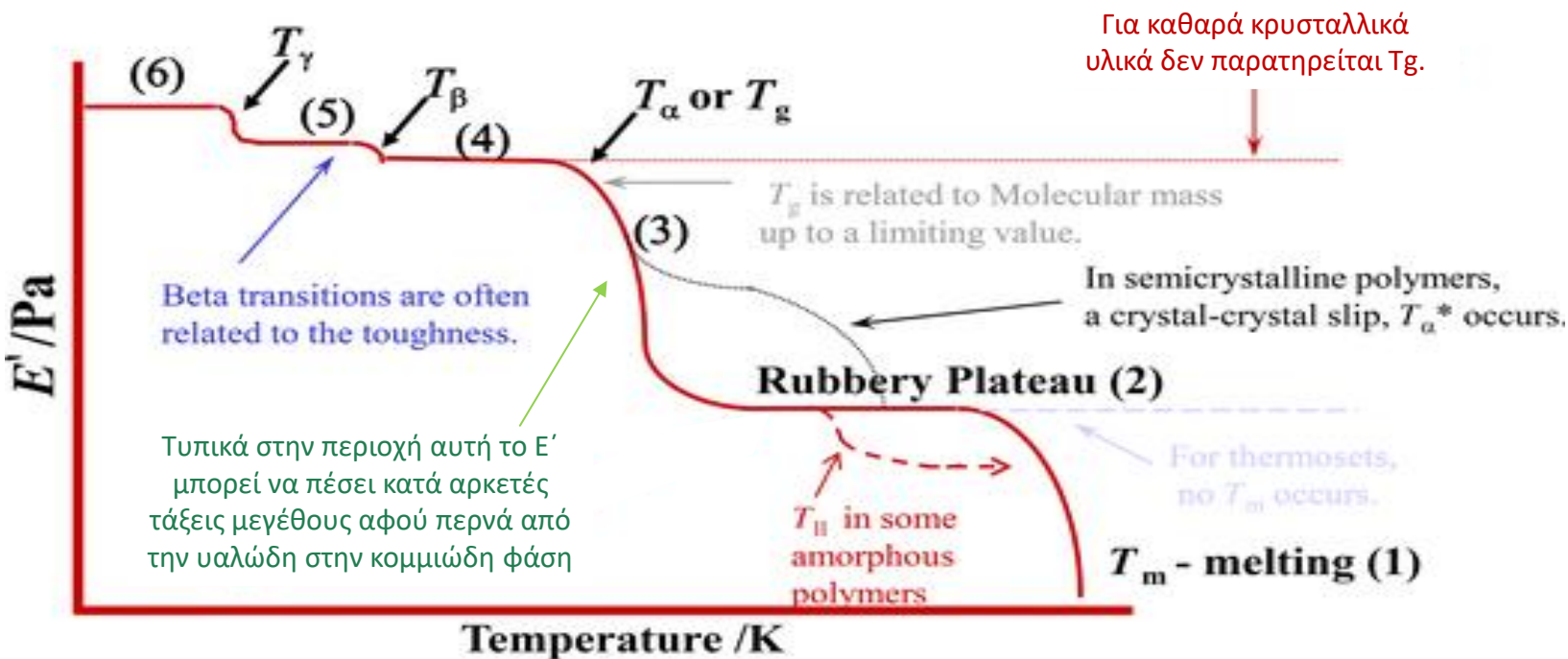
- 1 μέτρο αποθήκευσης και απωλειών (storage and loss modulus)
- 2 θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης T_g (glass transition temperature)
- 3 δευτερογενείς μεταβάσεις (sub- T_g , transitions)
- 4 βαθμός κρυσταλλικότητας (degree of crystallinity)
- 5 ερπυσμός και χαλάρωση τάσης (creep and stress relaxation)
- 6 συμβατότητα ανισοτροπίας ή προσανατολισμού (compatibility of anisotropy or orientation).
- 7 μοριακό βάρος/πυκνότητα σταυροδεσμών (crosslink densities)
- 8 γήρανση (aging effects)
- 9 διαχωρισμός φάσεων (πολυμερικά μίγματα, συμπολυμερή,...)
- 10 σύνθετα υλικά
- 11 σκλήρυνση (curing) δικτύων
- 12 επίδραση προσθέτων
- 13 προσανατολισμός

Με DMA μπορούν να αναλυθούν υλικά, όπως θερμοπλαστικά, θερμοσκληρυνόμενα, ελαστομερή, κεραμικά, σύνθετα (composites) κ.λ.π.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η εφαρμογή της μεθόδου για τη μελέτη των πολυμερικών μιγμάτων (polymers blends).

DMA γράφημα – σάρωση θερμοκρασίας





(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
Τοπικές κινήσεις	Τέντωμα και δίπλωμα δεσμών	Κίνηση πλευρικών ομάδων	Μεταβολή της κινητικότητας της κύριας πολυμερικής αλυσίδας - υαλώδης μετάβαση	Συντονισμένη κίνηση του άμορφου μέρους της αλυσίδας	Ολίσθηση αλυσίδων - Περιοχή τήξης

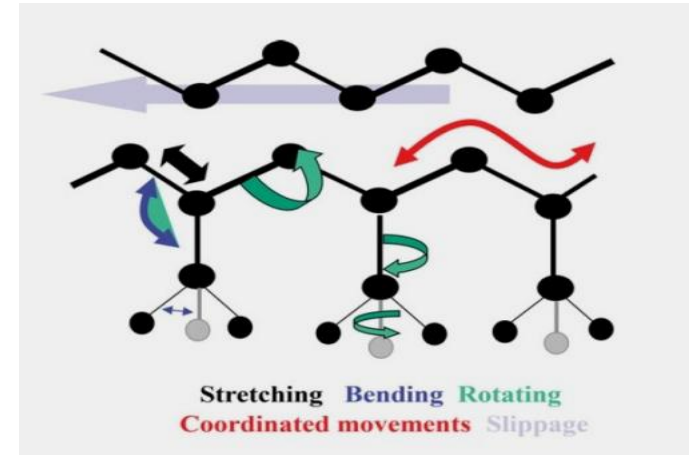
Ακαμψία των Αλυσίδων

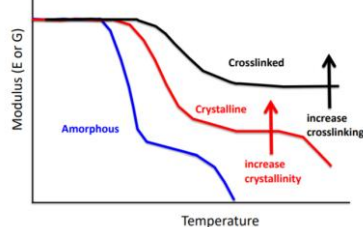
Η ακαμψία των αλυσίδων καθορίζεται από την ευκολία περιστροφής γύρω από τους χημικούς δεσμούς και κατά μήκος της αλυσίδας.

Η παρουσία διπλών - τριπλών δεσμών και αρωματικών ομάδων στις αλυσίδες ελαττώνει την ευκαμψία σε αυτές και προκαλεί αύξηση της T_g .

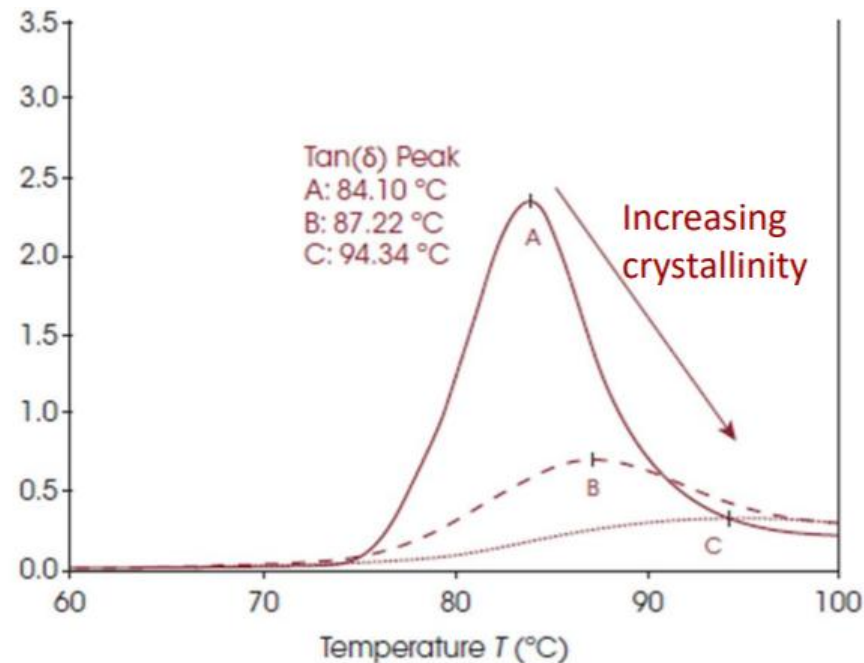
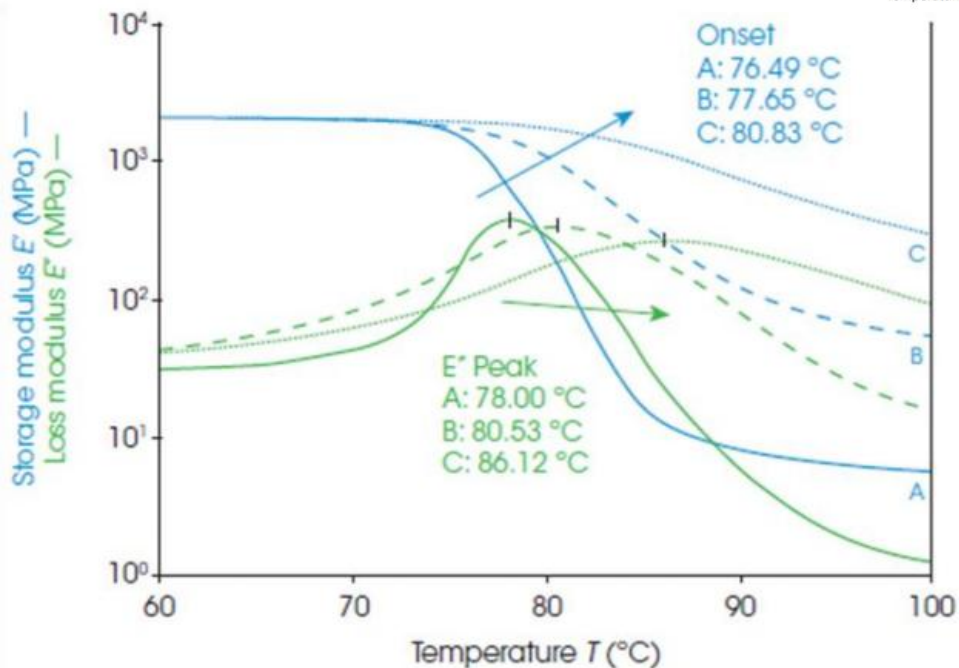
Το μέγεθος και το είδος των πλευρικών ομάδων επηρεάζει την περιστροφή και την ευκαμψία των αλυσίδων.

Μεγάλες πλευρικές ομάδες μειώνουν την μοριακή περιστροφή και αυξάνουν τη T_g .



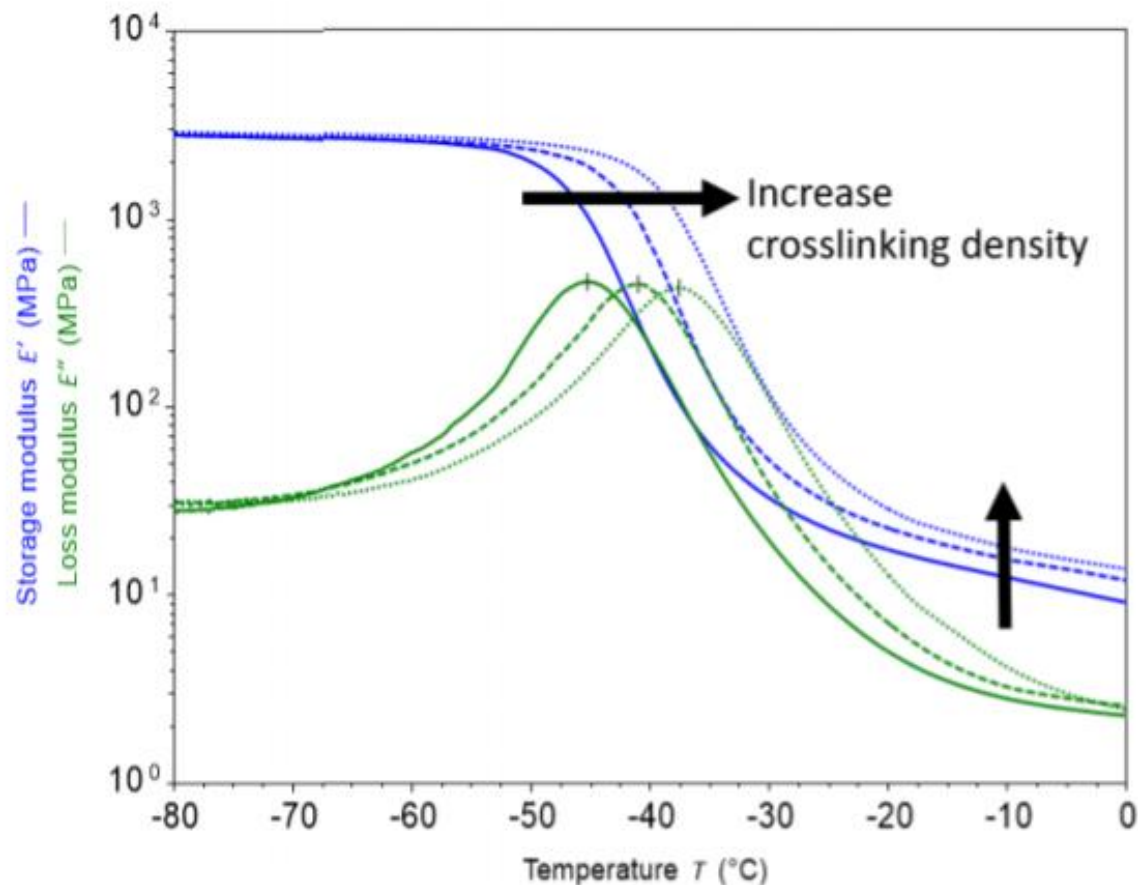
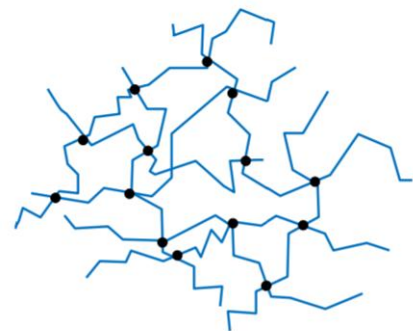


Επίδραση της δομής στο T_g .



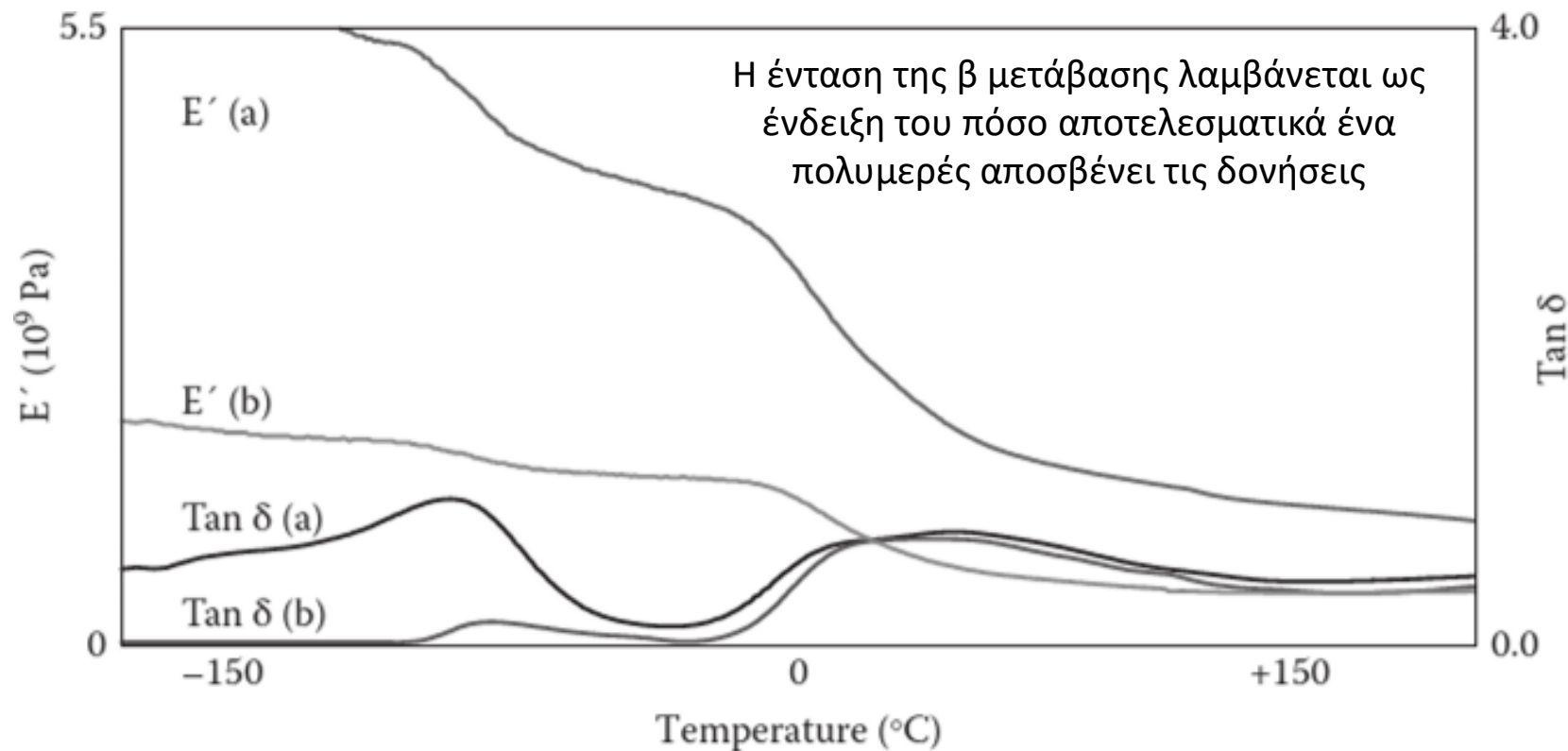
Επίδραση της κρυσταλλικότητας στο μέτρο αποθήκευσης, στο μέτρο απωλειών και στο $\tan\delta$ του PET.

Αύξηση κρυσταλλικότητας $\rightarrow$ T_g μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες T , η μετάβαση γίνεται πιο ευρεία και ασθενής ($\tan\delta$ μειώνεται), το πλατό της ελαστομόρφης φάση μετατοπίζεται προς τα πάνω.



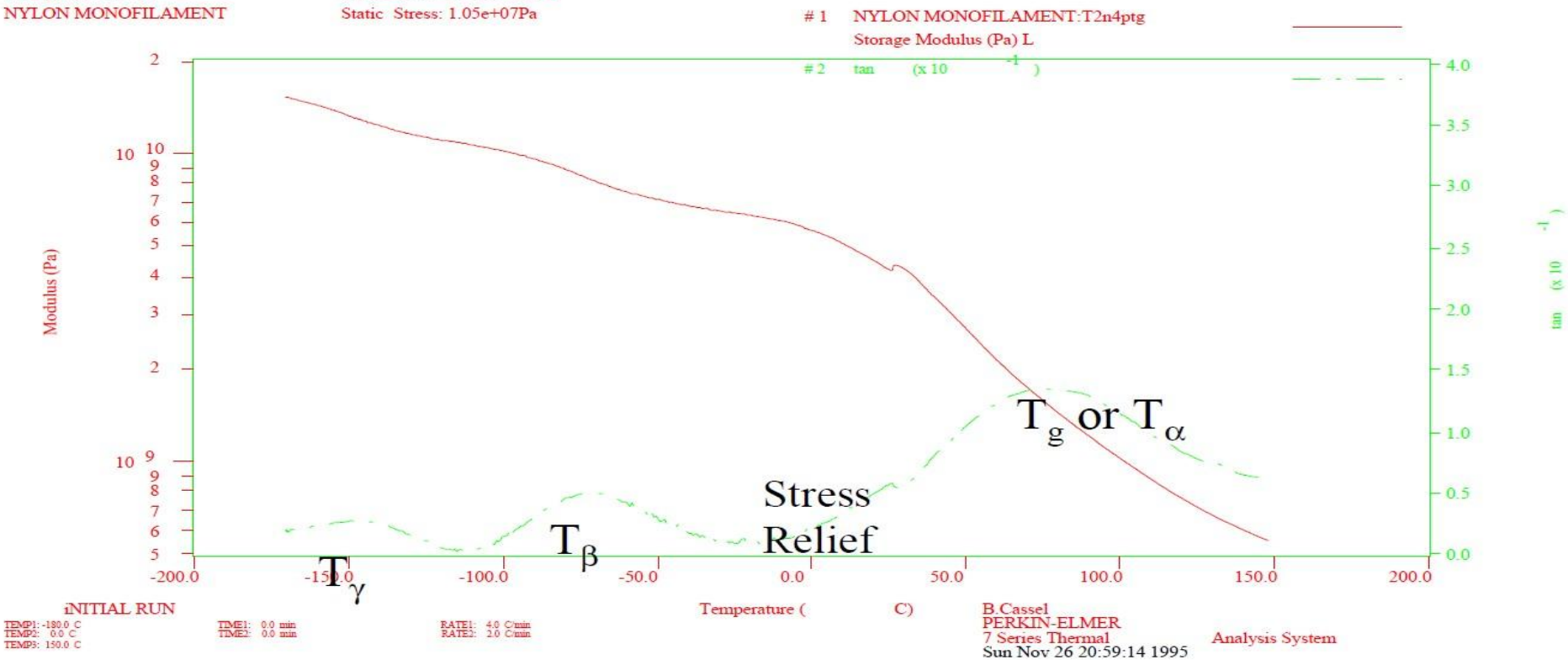
Επίδραση της διασύνδεσης στο T_g .

Αύξηση διασύνδεσης $\rightarrow T_g$ μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες T , η μετάβαση γίνεται πιο ευρεία και ασθενής (tanδ μειώνεται), το πλατό της ελαστομόρφης φάσης μετατοπίζεται προς τα πάνω.



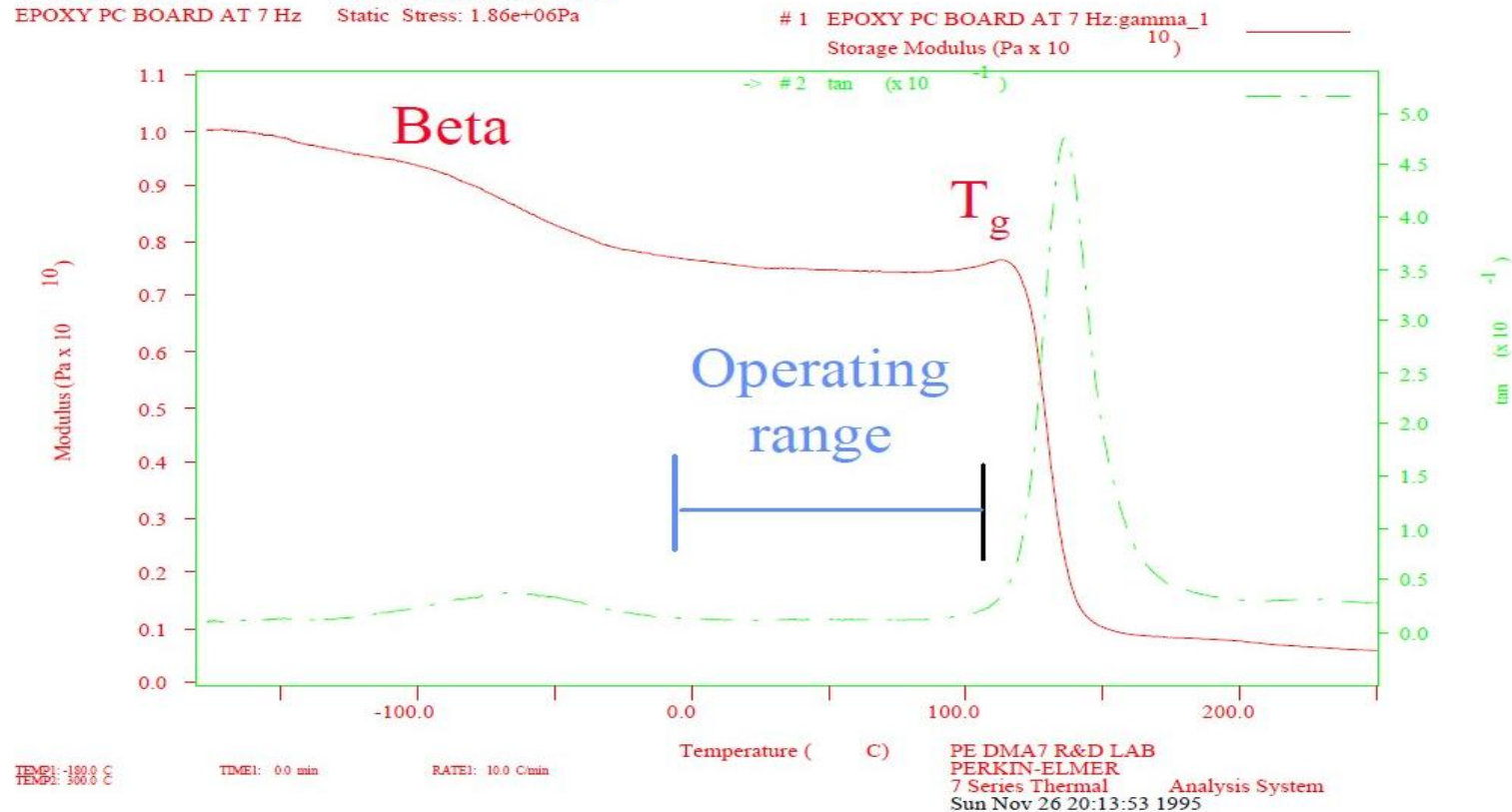
β μεταβάσεις και σκληρότητα. Σχετικές διαφορές μεταξύ β κορυφών και T_g για ένα high impact (a) και ένα low impact πολυαμίδιο (b).

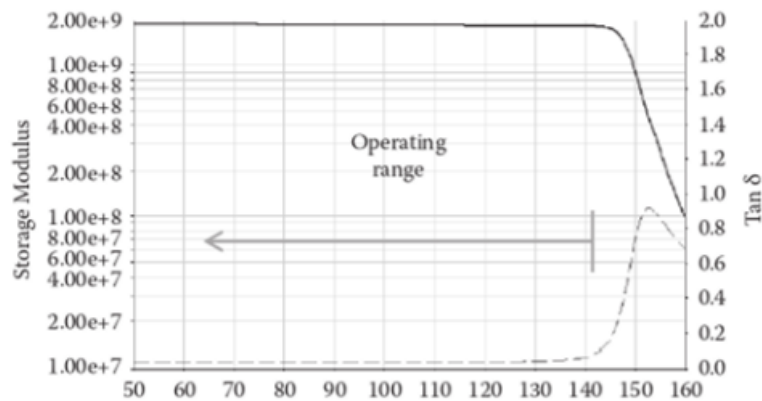
Curve 1: DMA Temp/Time Scan in Extension
File info: T2n4ptg Fri Jan 18 18:14:51 1991
Frequency: 1.00 Hz Dynamic Stress: 1.00e+07Pa
NYLON MONOFILAMENT Static Stress: 1.05e+07Pa



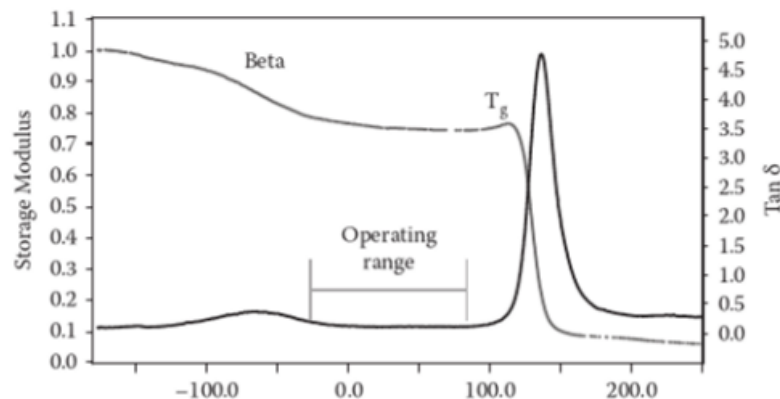
Καμπύλες DMA ενός μονόκλωνου πολυαμιδίου.

Curve 1: DMA Temp/Time Scan in 3 Point Bending
 File info: gamma_1 Thu Jun 30 02:17:24 1988
 Frequency: 7.00 Hz Dynamic Stress: 1.86e+06Pa
 EPOXY PC BOARD AT 7 Hz Static Stress: 1.86e+06Pa

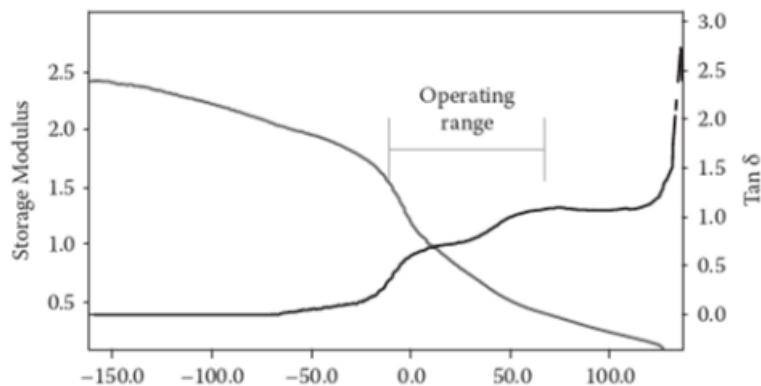




(a)

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

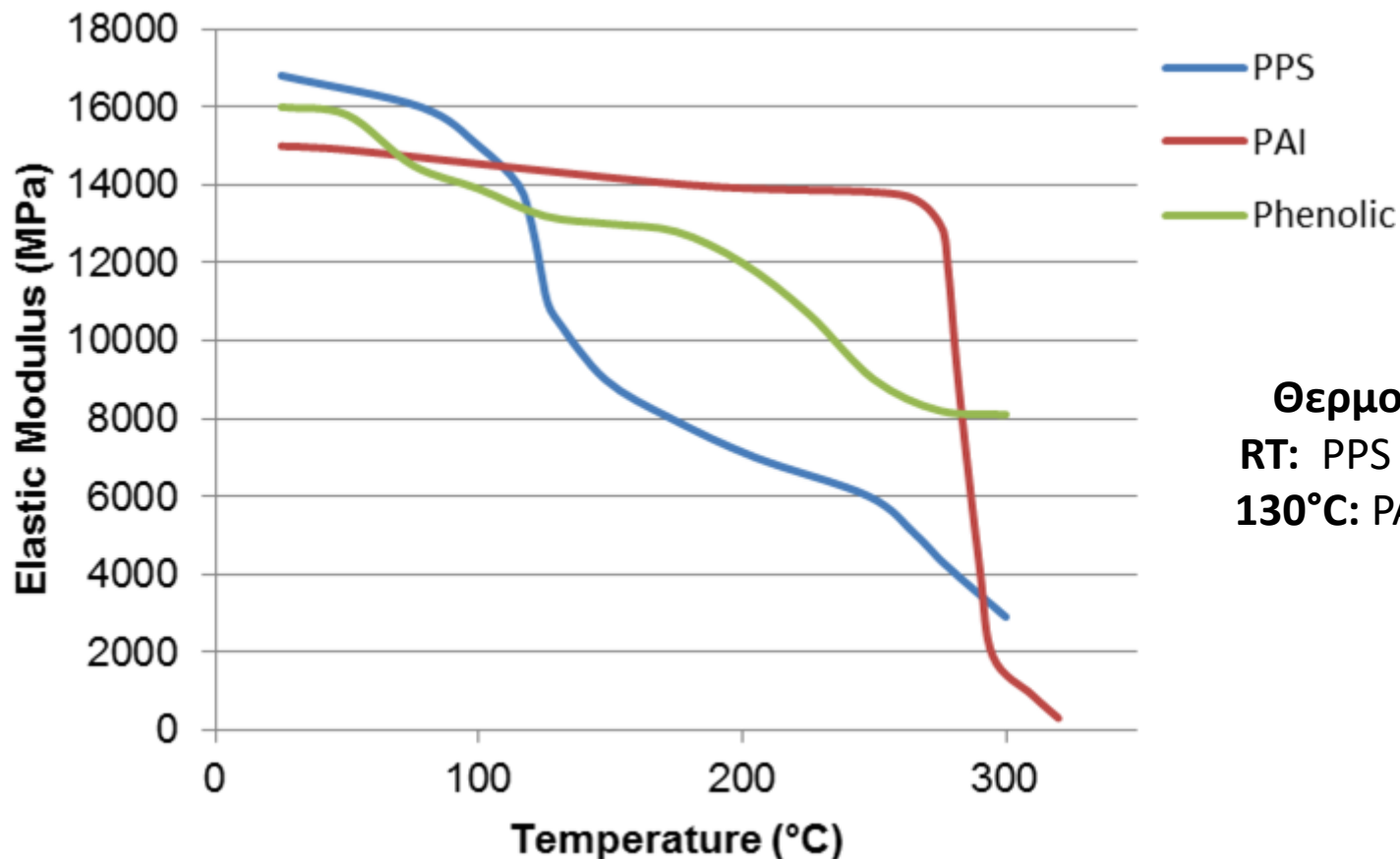
(b)

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

(c)

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

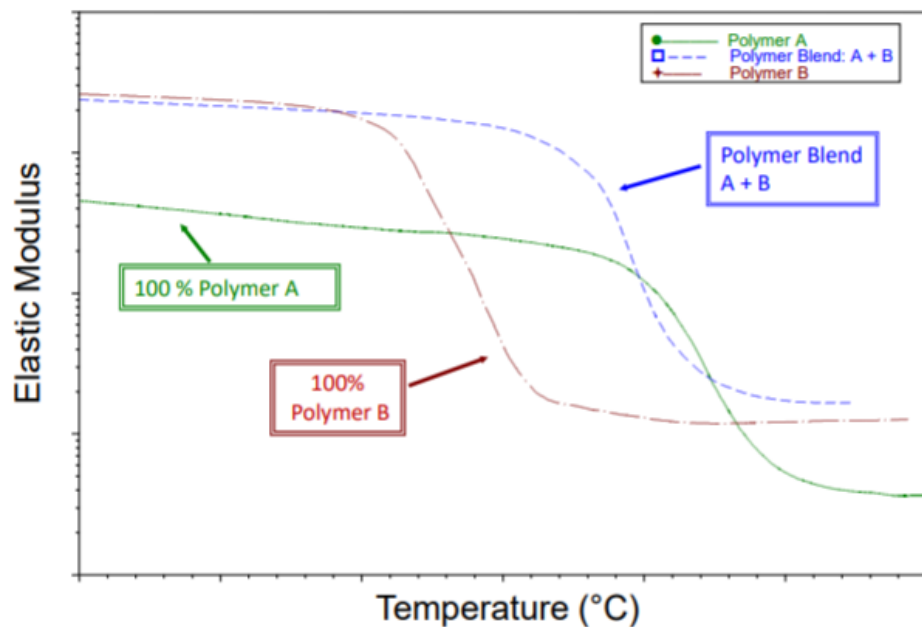
Καθορισμός του εύρους θερμοκρασιών χρήσης με βάση την θερμοκρασία T_g
 (a) polycarbonate, (b) epoxy, and (c) polypropylene.



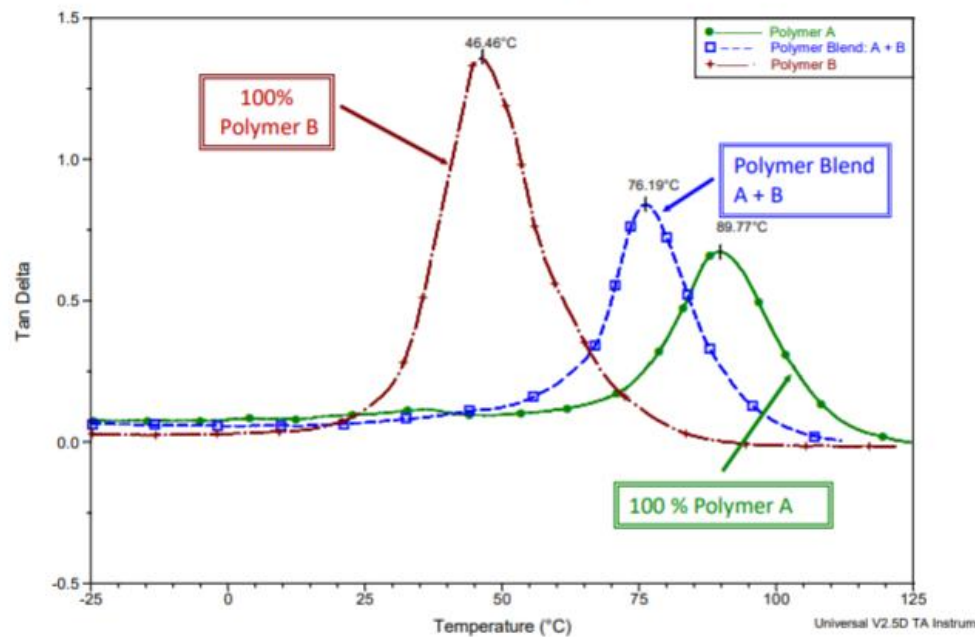
Θερμοκρασία χρήσης
RT: PPS και Phenolic > PAI
130°C: PAI > Phenolic >> PPS

Καμπύλες DMA πολυπροπυλενοσουλφόνης (PPS), πολυαμιδίου ιμιδίου (PAI) και φαινόλης (θερμοσκληρυνόμενο).

Aerospace Coating



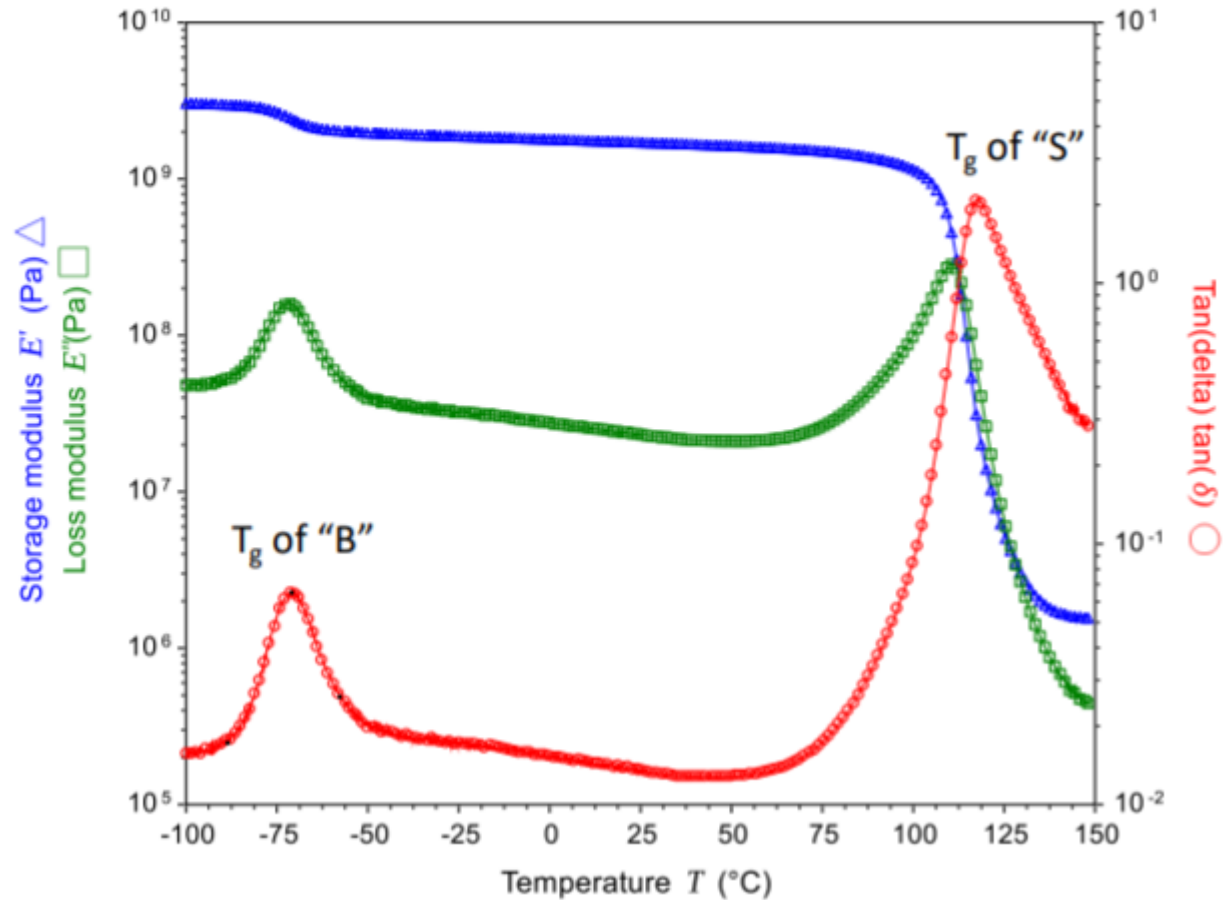
Aerospace Coating



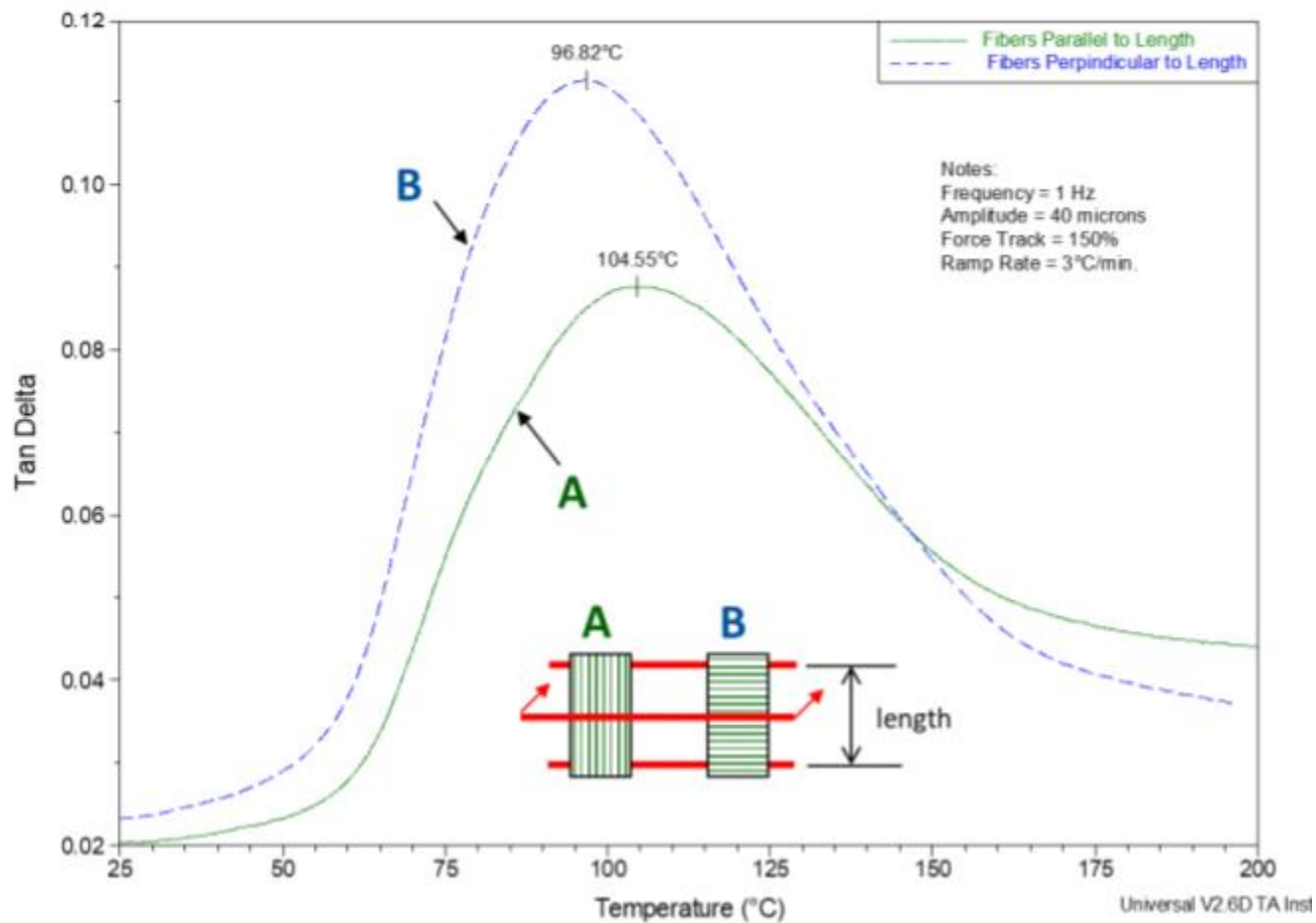
Tg αναμίξιμου μίγματος πολυμερών.

Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) is a polymer blend

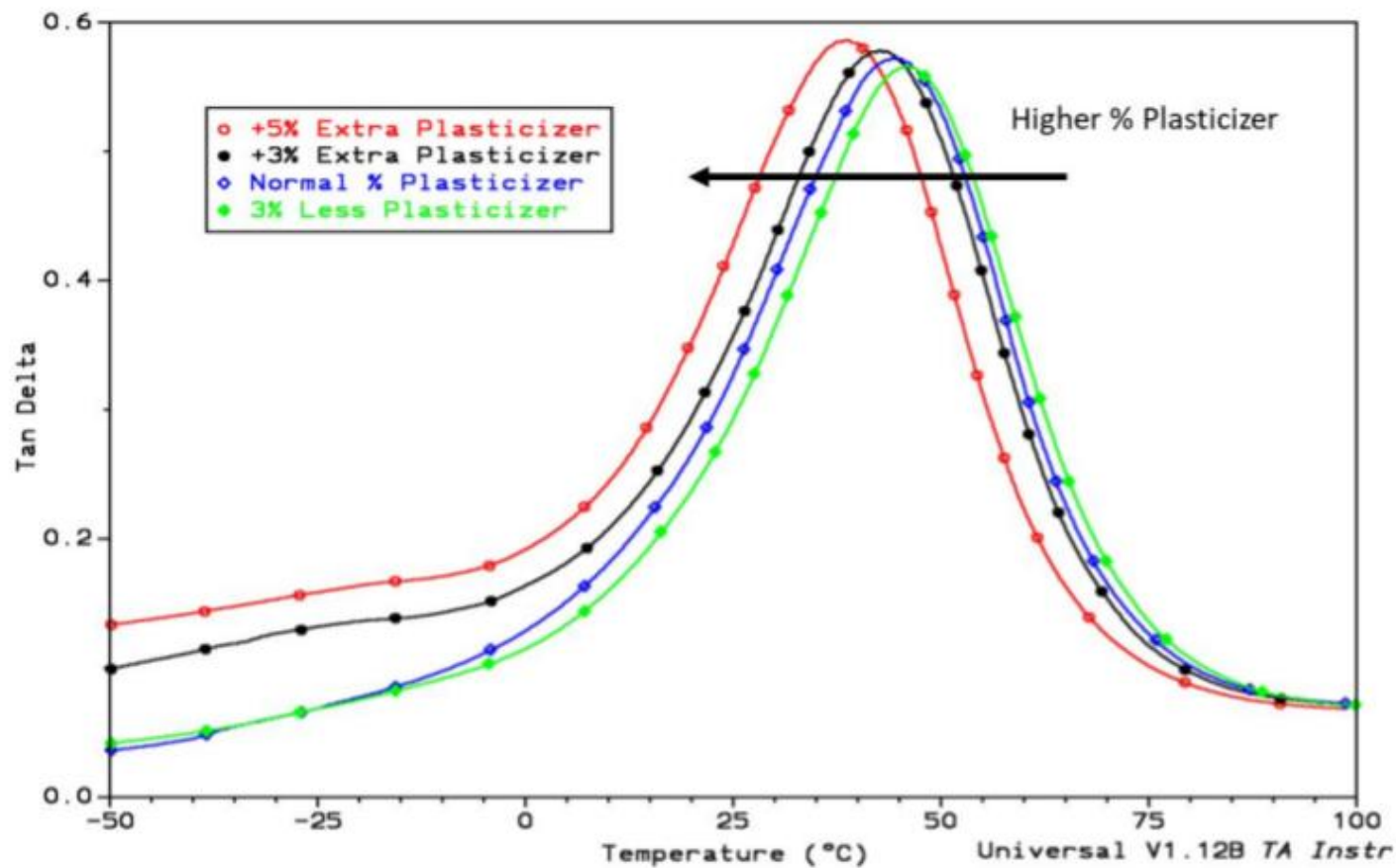
94



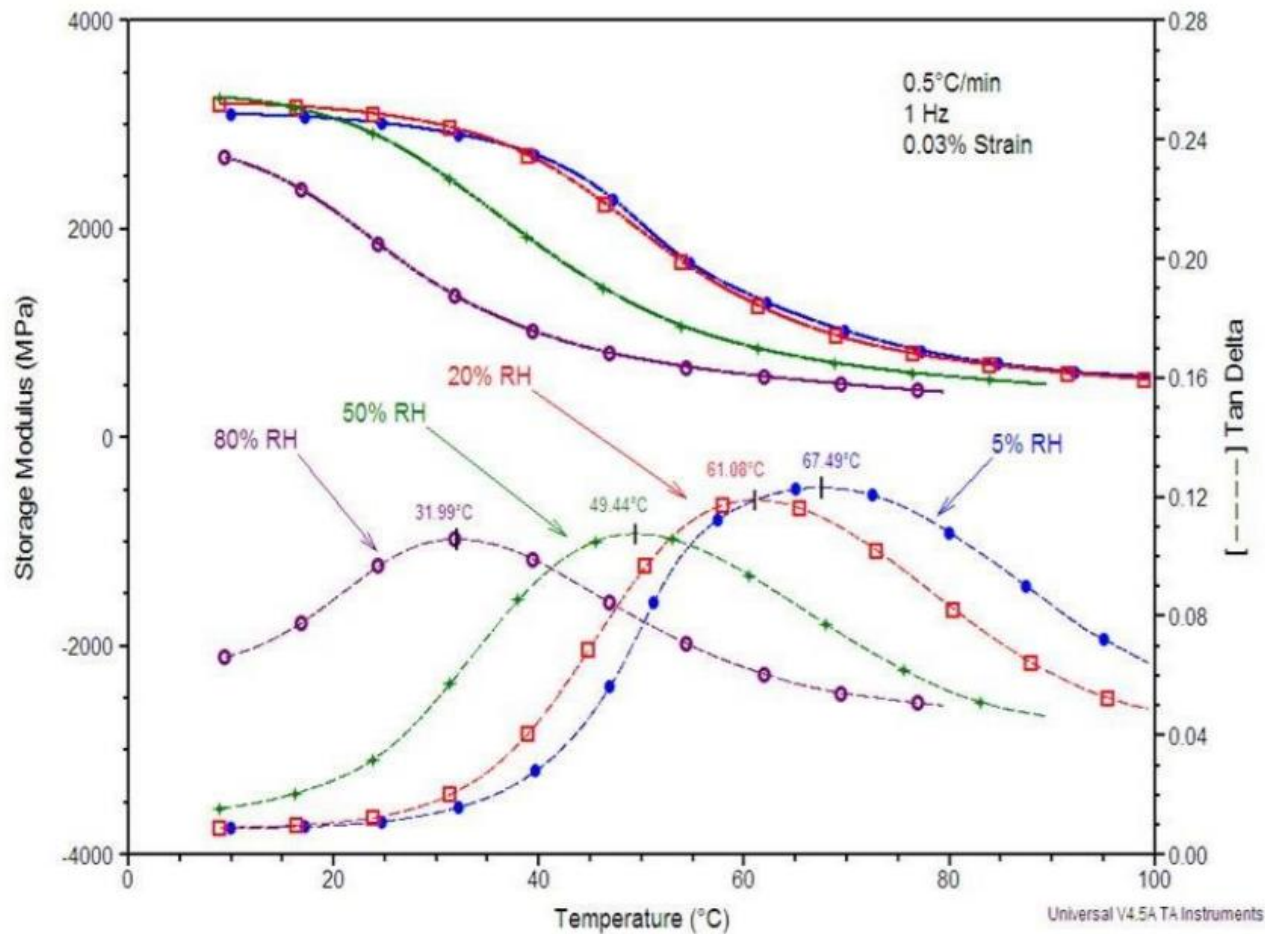
T_g μη αναμίξιμου μίγματος πολυμερών.



Τg ενισχυμένου πολυεστέρα με ίνες υάλου κατά μήκος (A) και εγκάρσια (B).



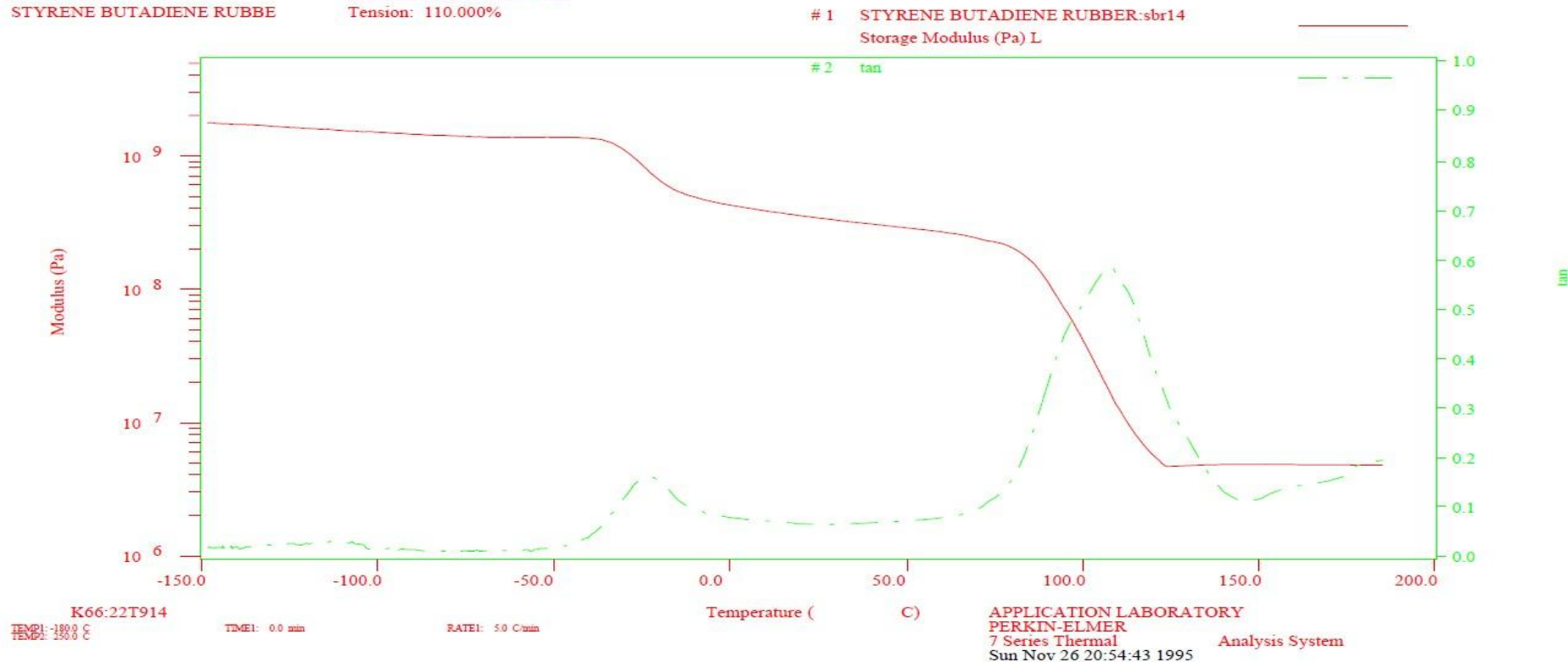
Επίδραση του πλαστικοποιητή στο Tg βινυλικού δαπέδου.

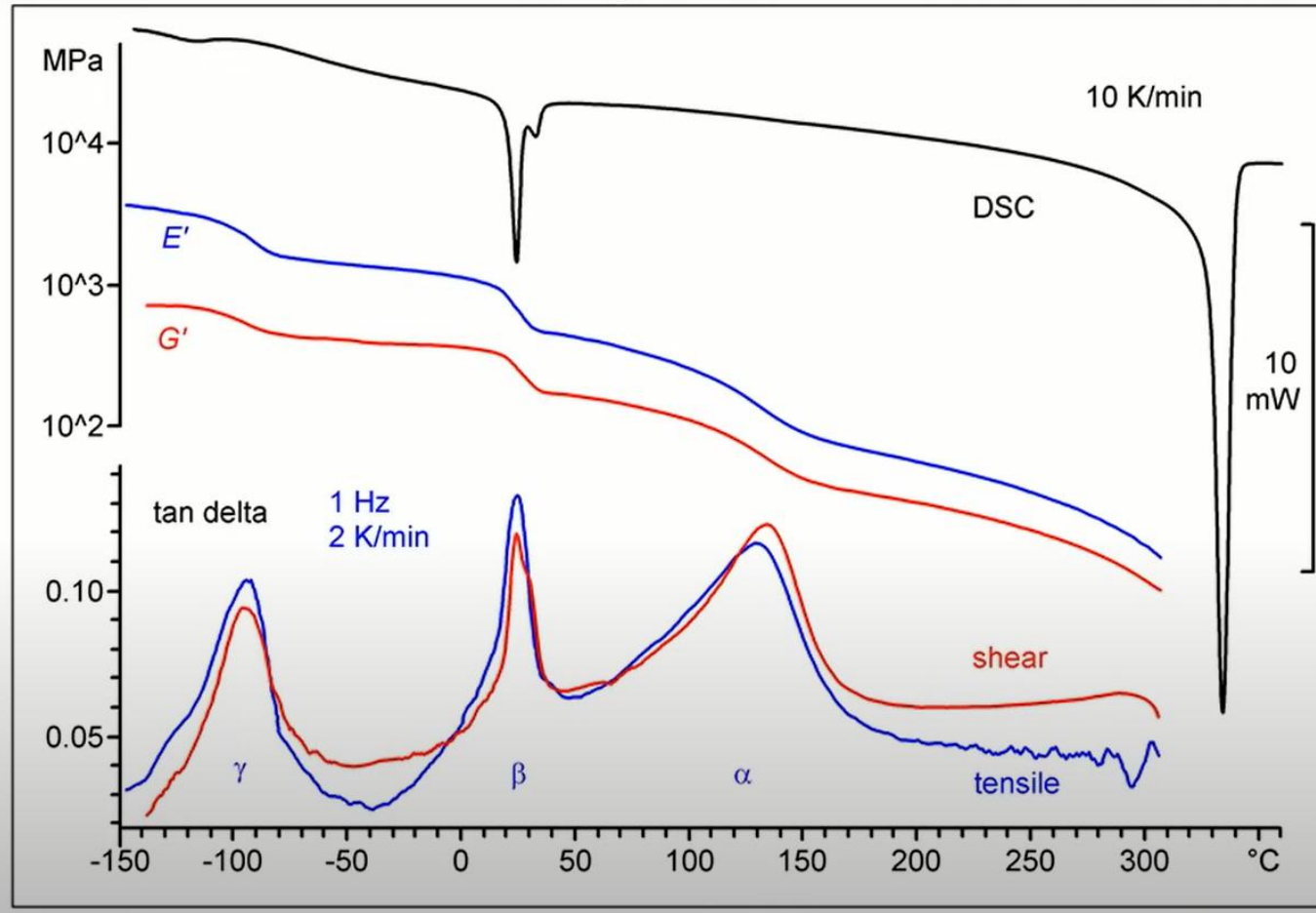


Επίδραση υγρασίας στο Tg φιλμ πολυαμιδίου.

Συμπολυμερές στυρενίου-βουταδιενίου (SBR).

Curve 1: DMA Temp/Time Scan in 3 Point Bending
 File info: sbr14 Thu Feb 15 10:45:19 1990
 Frequency: 1.00 Hz Dynamic Stress: 2.00e+05Pa
 STYRENE BUTADIENE RUBBER Tension: 110.000%





Διασυνδεδεμένο πολυμερές με T_g μη ανιχνεύσιμη με DSC.