



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Υλικά

Ενότητα 7: Πλαστική συμπεριφορά άμορφων υλικών και πολυμερών

*Νικόλαος Ζαχαρόπουλος
Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης
Προϊόντων και Συστημάτων*



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

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



Χρηματοδότηση

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



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



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

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Πλαστική παραμόρφωση σε άμορφα υλικά

Σε κρυσταλλικά υλικά η πλαστική παραμόρφωση οφείλεται σε ατέλειες – σε άμορφα οι ατέλειες δεν αναγνωρίζονται με την ίδια ευκολία

Σε μεταλλικά, ανόργανα και οργανικά γυαλιά η διαρροή σε *υψηλή θερμοκρασία* είναι *Νευτώνια* : $\tau \sim \dot{\gamma}$

Ιξώδη υγρά : μόνιμη μετατόπιση των μοριακών μονάδων

Μέταλλα : άτομα

Ανόργανα γυαλιά : τετράεδρα SiO_4

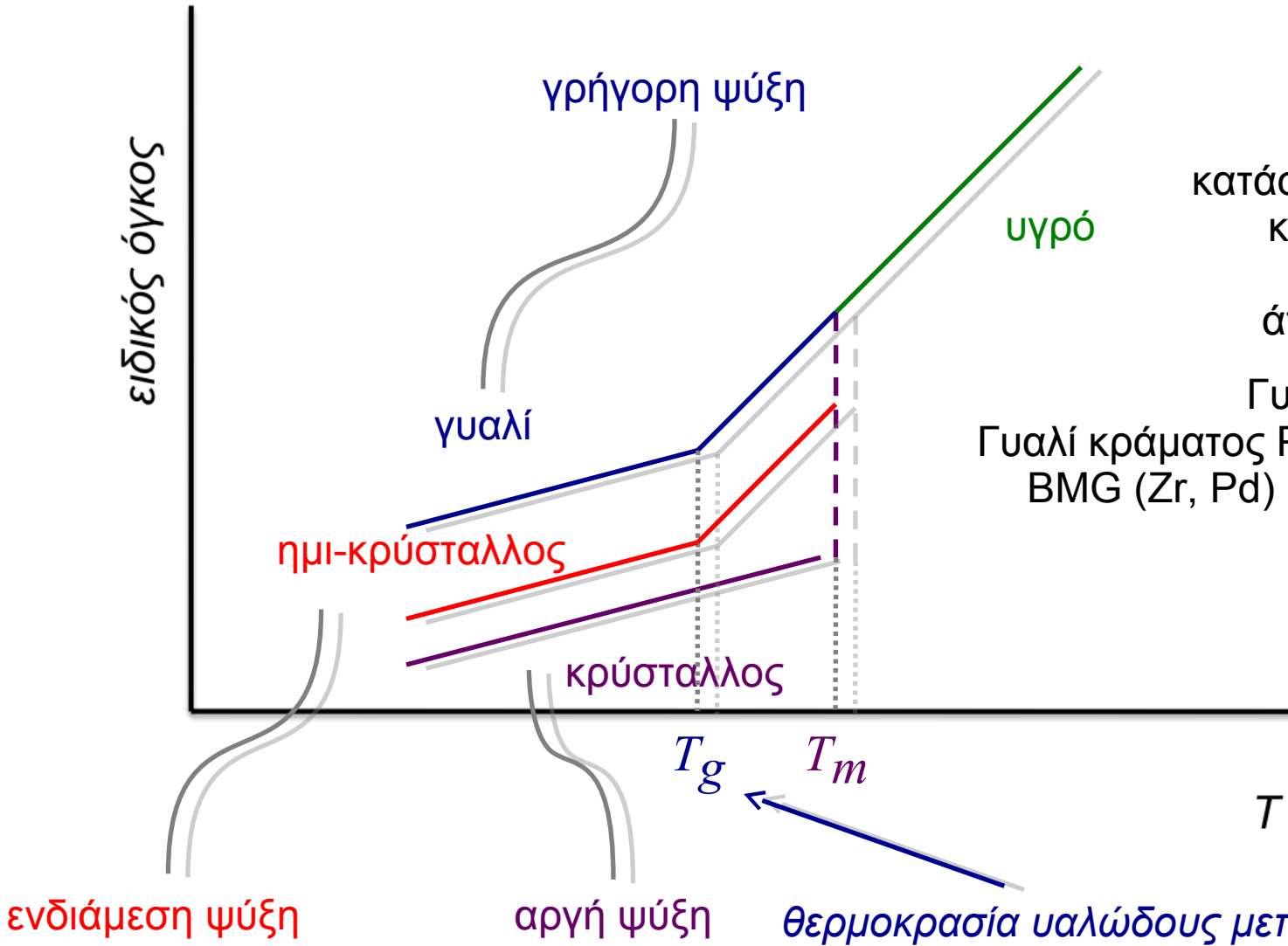
Οργανικά γυαλιά : μακρομόρια

Σε *υψηλές θερμοκρασίες* η παραμόρφωση είναι *ομοιόμορφη* σε όλη την μάζα του υλικού – όταν μειώνεται :

Ανόργανα γυαλιά → ψαθυρά (ελαστικά)

για χαμηλό $\dot{\gamma}$ Μέταλλα και πολυμερή παρουσιάζουν ανομοιόμορφη παραμόρφωση

Κρυσταλλικά έναντι άμορφων



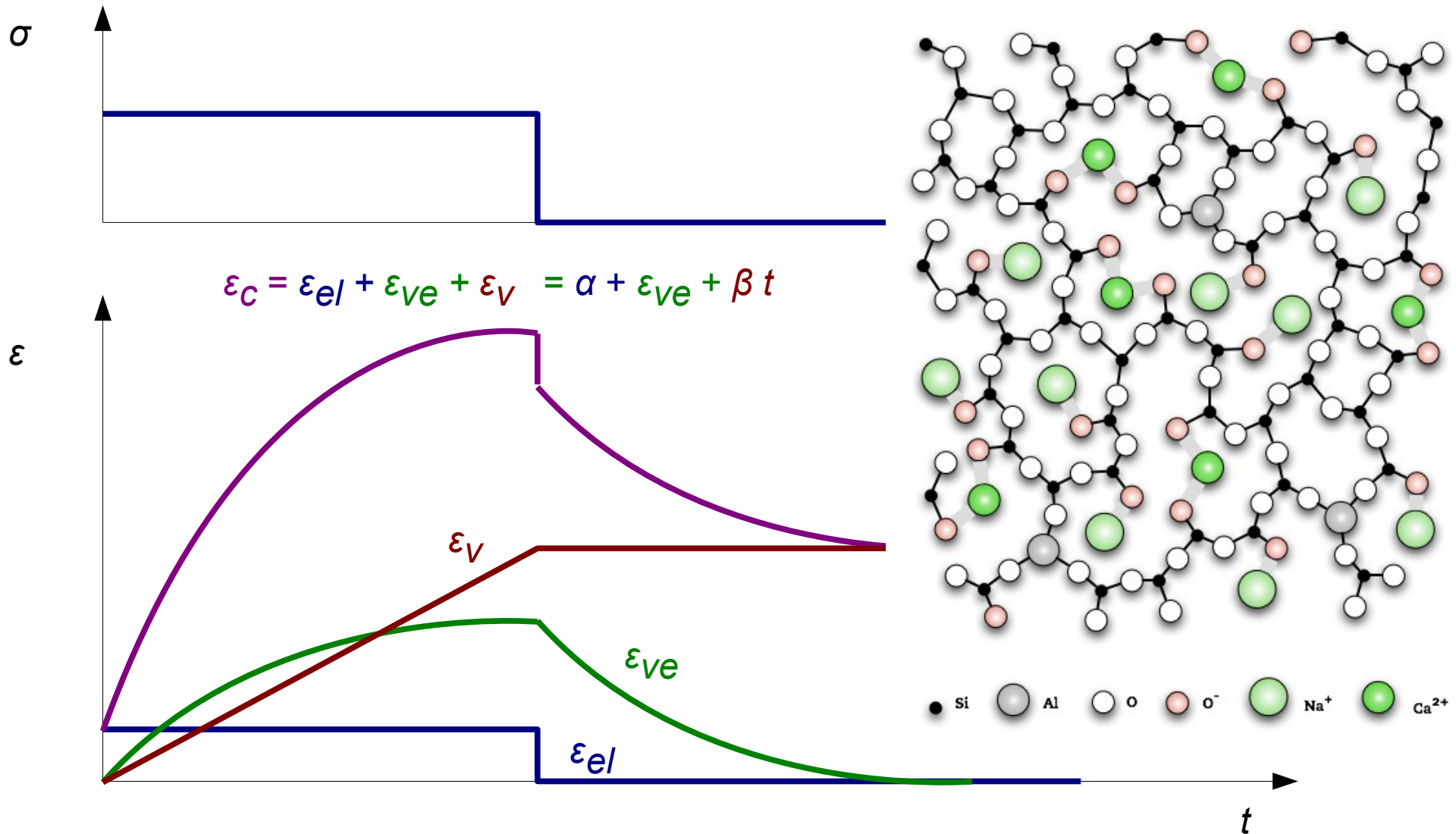
Η προδιάθεση για κρυσταλλική ή άμορφη κατάσταση εξαρτάται από την κινητικότητα των δομικών μονάδων :

άτομα \rightarrow $\text{SiO}_4 \rightarrow \{ \}$

Γυαλί καθαρού Ag 10^{10} K/s
 Γυαλί κράματος P, B, Fe, Ni $10^2 - 10^6$ K/s
 BMG (Zr, Pd) 1 K/s (κανονικός ρυθμός χύτευσης)

Η άμορφη κατάσταση είναι επικρατέστερη όταν $T_g > \frac{2}{3} T_m$ (στα μέταλλα συνήθως $T_g > \frac{1}{2} T_m$)

Ιξωδελαστική συμπεριφορά ανόργανων γυαλιών

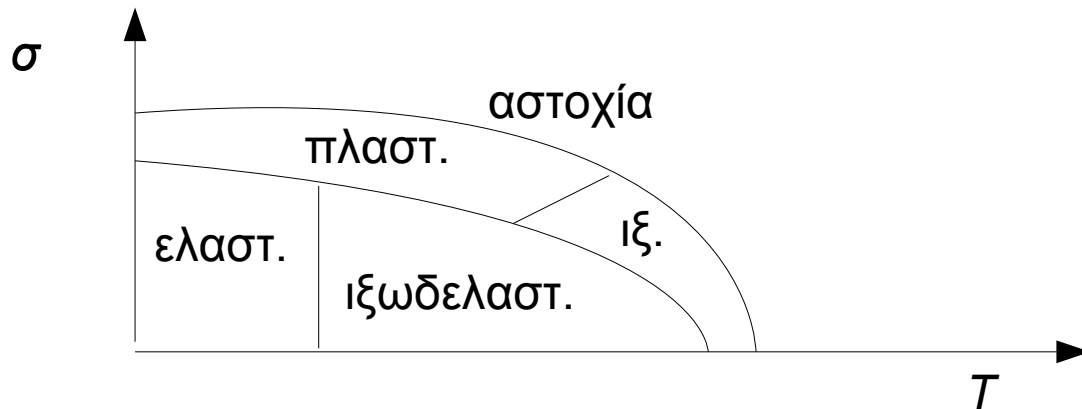


η σχετική συνεισφορά κάθε όρου εξαρτάται από την θερμοκρασία :
 σε χαμηλή θερμοκρασία κυριαρχεί ο ελαστικός, σε υψηλή ο ιξώδης
 – κοντά στο T_g ο ιξ/ελ κι ο ελαστικός είναι συγκρίσιμοι

Ιξώδης συμπεριφορά οξειδίων και μετάλλων

Το ιξώδες των οργανικών γυαλιών (οξειδίων) μειώνεται με την προσθήκη τροποποιητών Na^+_2O , Ca^+_2O : τα Na^+ , Ca^+ “σπάνε” την δομή του SiO_2 για να διατηρηθεί η ηλεκτρουδετερότητα – αυξάνουν την ιξωδελαστικότητα

Σε αντίθεση με τα γυαλιά οξειδίων, τα μεταλλικά γυαλιά παραμορφώνονται πλαστικά σε υψηλές τάσεις
Η διαφορά με την ιξώδη συμπεριφορά έγκειται στην έκταση (εντοπισμένη έναντι ομοιόμορφης) – δημιουργούνται ζώνες υψηλής παραμόρφωσης όπου παρατηρείται τροπική χαλάρωση [παρατηρείται το αντίθετο της εργοσκληρυνσης λόγω τοπικής αύξησης του ελεύθερου όγκου μετά την αρχική μετατόπιση των ατόμων όταν η τάση υπερβεί την θεωρητική αντοχή – η διαφορά όγκου μεταξύ ζώνης και περιβάλλοντος υλικού προκαλεί συγκέντρωση τάσεων στην διεπιφάνεια]



χάρτης παραμόρφωσης

Πλαστική ροή σε πολυμερή (1)

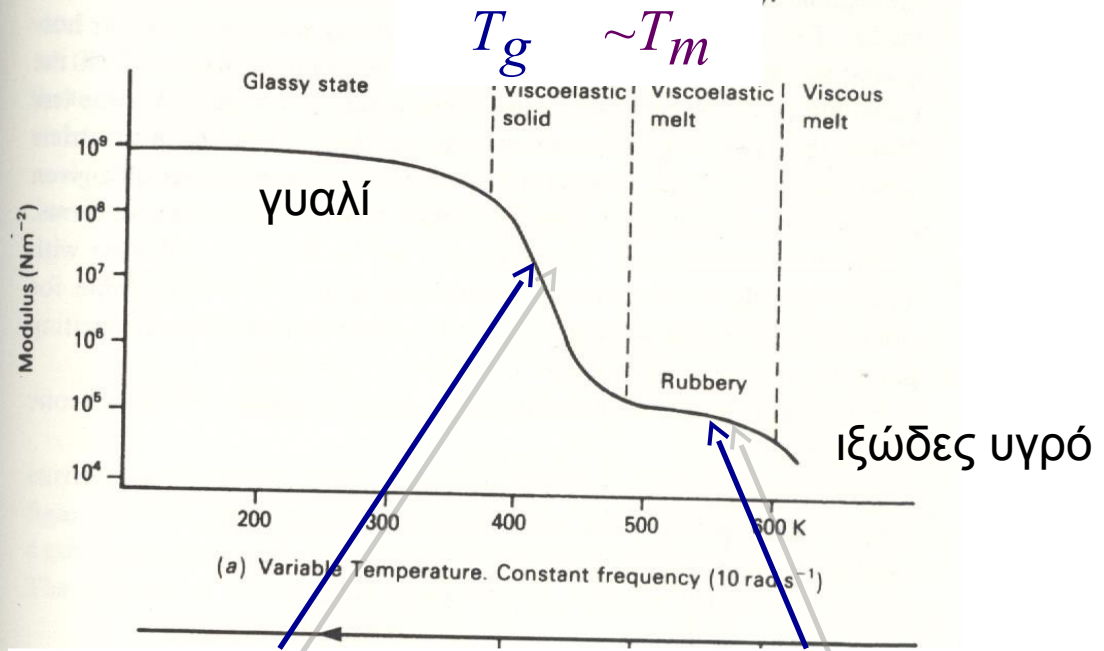
Σε χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από $\approx \frac{3}{4} T_g$) τα πολυμερή είναι ψαθυρά

Όταν εφελκούνται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οι αλυσίδες “ξετυλίγονται” και ευθυγραμμίζονται με την διεύθυνση εφελκυσμού (*drawing*)

Το “τραβηγμένο” υλικό είναι πολύ πιο άκαμπτο και σκληρό, κατά έναν παράγοντα ≈ 8 (όμως με την κατεργασία *drawing* μπορούν να κατασκευαστούν αποκλειστικά λεπτές γεωμετρίες, όπως φύλλα και ίνες)

PS

Figure 13.7. Four states of polystyrene. (a) Constant frequency, $\sim 10 \text{ rad s}^{-1}$ variable temperature. (b) Constant temperature (470 K), variable frequency. Data provided by Dr M. R. Mackley.

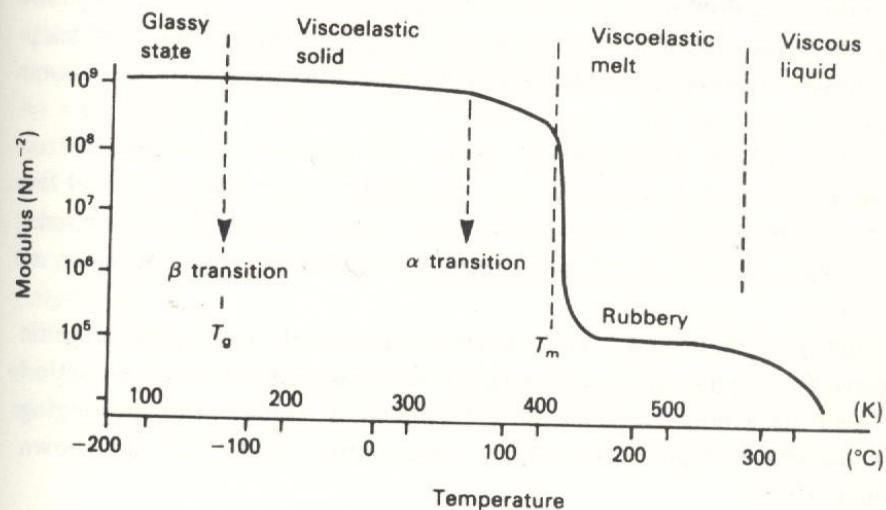


ιξωδελαστικό στερεό (δερμάτινο)

ιξωδελαστικό υγρό (λαστιχένιο)

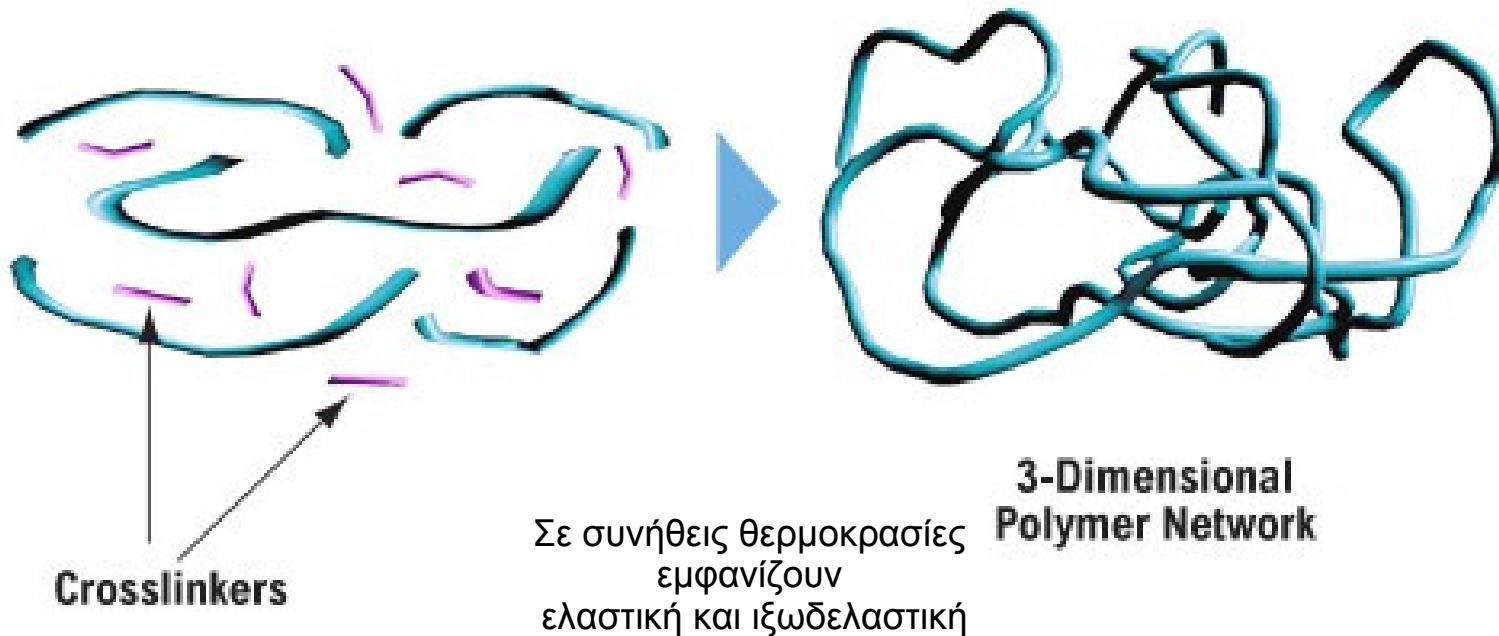
PE

Figure 13.8. Modulus of polyethylene as a function of temperature at constant frequency $\sim 10 \text{ rad s}^{-1}$. The polymer is monodisperse linear PE, i.e. of uniform molecular mass 130 000. Data provided by Dr M. R. Mackley.



Πλαστική ροή σε πολυμερή (2)

Θερμοσκληρυνόμενα δεν παραμορφώνονται πλαστικά εξαιτίας του τριδιάστατου πλέγματος (δεν εμφανίζουν ιξώδη ροή ως έχουν)



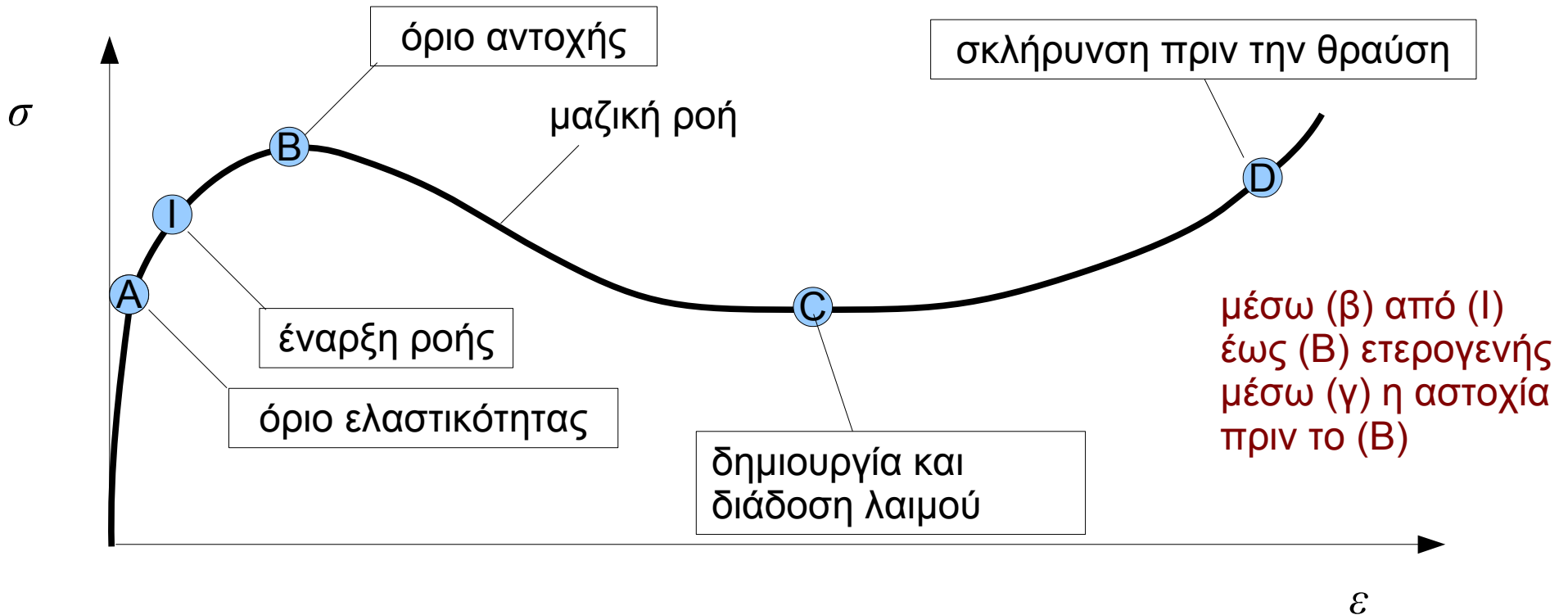
Ελαστομερή με υψηλό βαθμό διασταύρωσης συμπεριφέρονται όπως τα θερμοσκληρυνόμενα
Θερμοπλαστικά με διασταυρώσεις εμφανίζουν ελαστομερική συμπεριφορά

Κρυσταλλικά δεν διαρρέουν εύκολα

Μηχανισμοί πλαστικής παραμόρφωσης

Τρεις μηχανισμοί ροής : (α) ομοιογενής ροή [ευνοείται σε υψηλές θερμοκρασίες όπως τα μεταλλικά γυαλιά] (β) ανομοιογενής δημιουργία ζωνών διάτμησης [παρόμοιο σ/E για μεγάλες παραμορφώσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες με μεταλλικά γυαλιά]
(γ) *crazing*

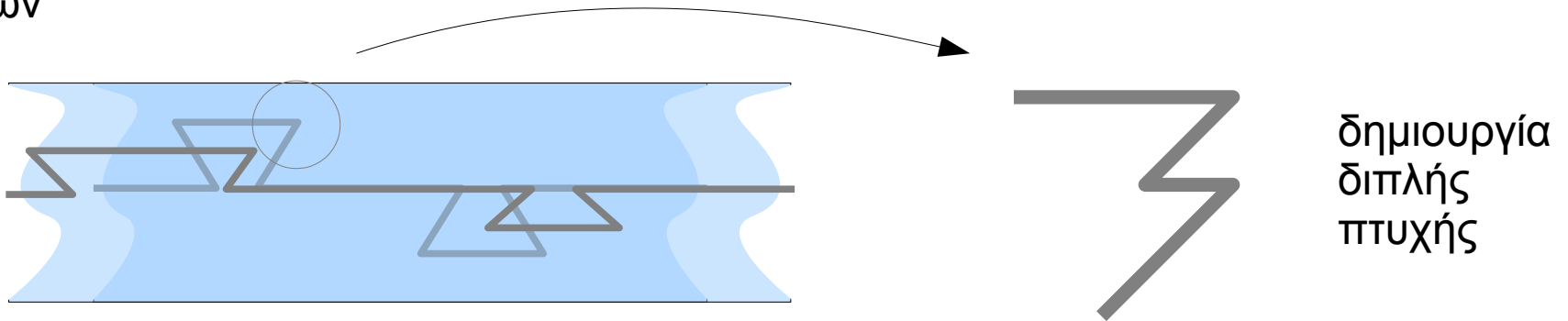
ψυχρή έλαση



Ομοιογενής ροή

$\epsilon_{\text{ξωδελ.}} / \epsilon_{\text{ελ.}} \approx 100$ για χαμηλό σ κοντά στο T_g

Η ροή προκαλείται από την μετατόπιση τμημάτων της αλυσίδας και την σταδιακή ευθυγράμμιση με τον άξονα εφελκυσμού μέσω “σιδερώματος” πτυχών

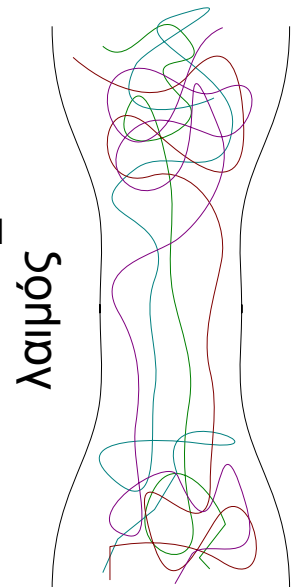


Η παραμόρφωση εξαρτάται από την ενεργοποίηση πτυχών κατά μήκος μιας πολυμερικής αλυσίδας, καθώς πρόκειται για συνεργατική διεργασία

Ο όγκος που απαιτείται για την ενεργοποίηση του μηχανισμού αυξάνεται από διογκωτικές τάσεις

Η εμφάνιση σημείου διαρροής δεν πρέπει να συγχέεται με τροπική χαλάρωση γιατί η γεωμετρική αστάθεια δεν περιορίζεται τοπικά αλλά επεκτείνεται

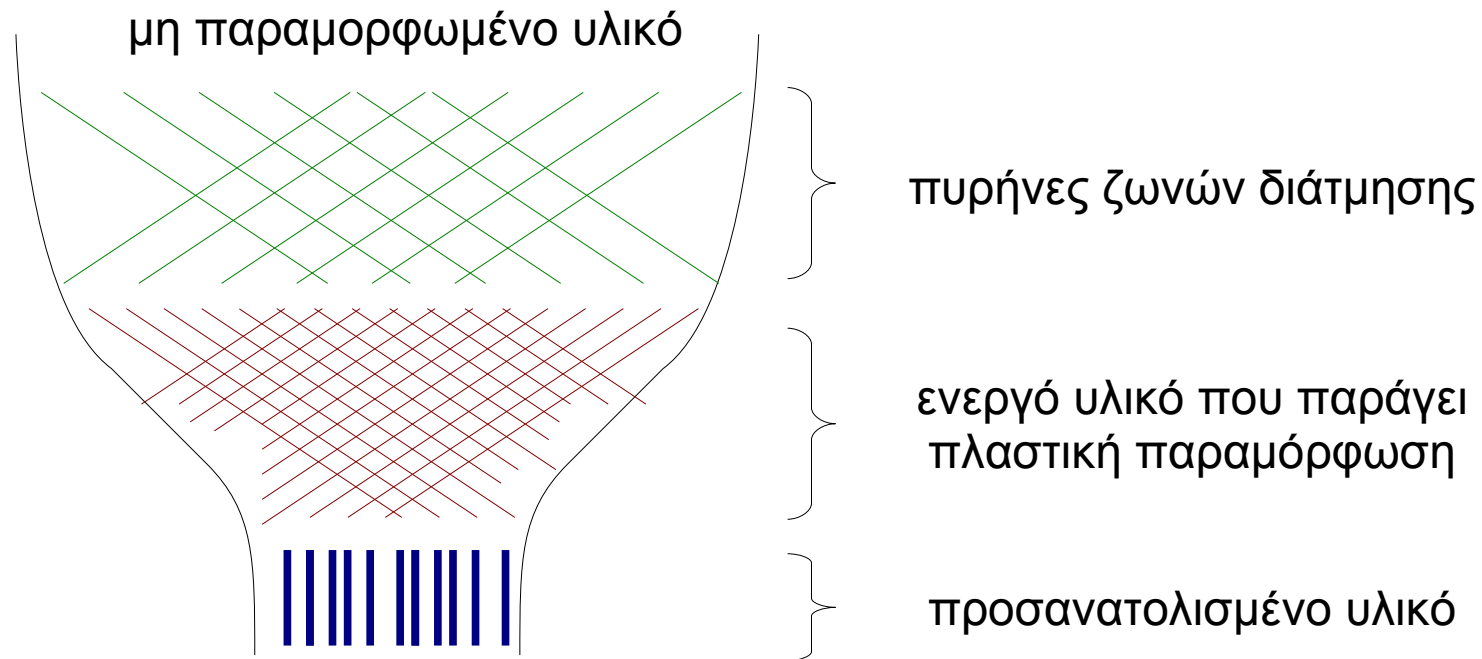
Σε μεγάλες παραμορφώσεις εμφανίζεται μακροσκοπική ετερογένεια



Ζώνες διάτμησης

από το (A) αρχίζουν να σχηματίζονται ζώνες διάτμησης σε 45° ως προς την διεύθυνση εφελκυσμού (μέγιστη διατμητική τάση)

τυπικός μηχανισμός παραμόρφωσης για ημικρυσταλλικά πολυμερή μπορεί να εξηγηθεί με τον μηχανισμό διπλής πτυχής που όμως καταλύει παραμόρφωση του *γειτονικού* υλικού και συνακόλουθη εντοπισμένη τροπική χαλάρωση



η διαφορά με την ομοιογενή ροή είναι καθαρά μορφολογική

Crazing

σε χαμηλές θερμοκρασίες και διογκωτική εντατική κατάσταση (δεν εμφανίζονται σε θλίψη ή καθαρή διάτμηση)

η παρουσία crazes δεν αποκλείει τις ζώνες διάτμησης

crazes εμφανίζονται κυρίως σε άμορφα πολυμερή με μοριακό βάρος μεγαλύτερο από αυτό που απαιτείται για την δημιουργία διαπλοκών

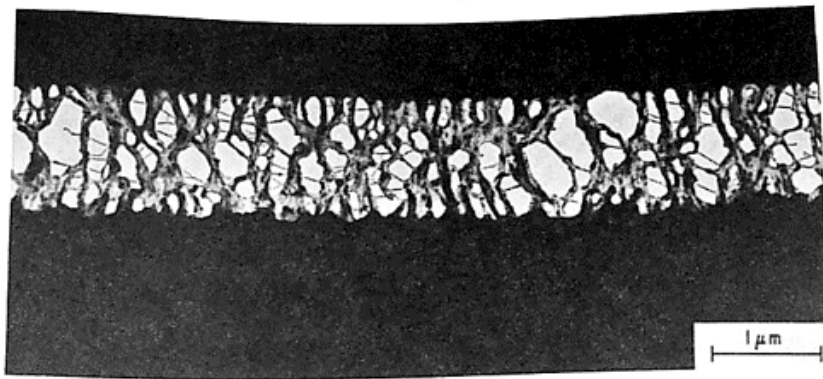
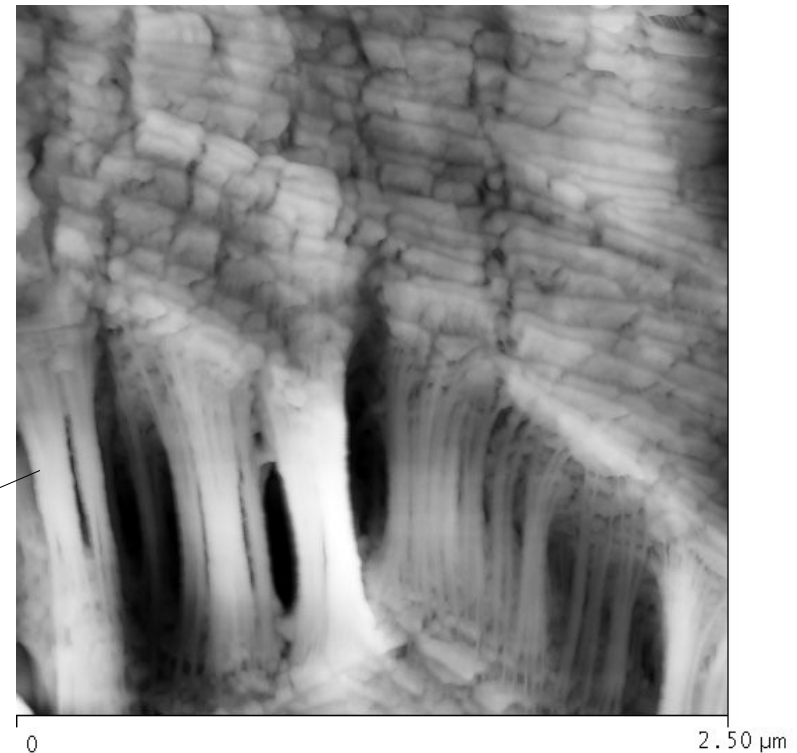


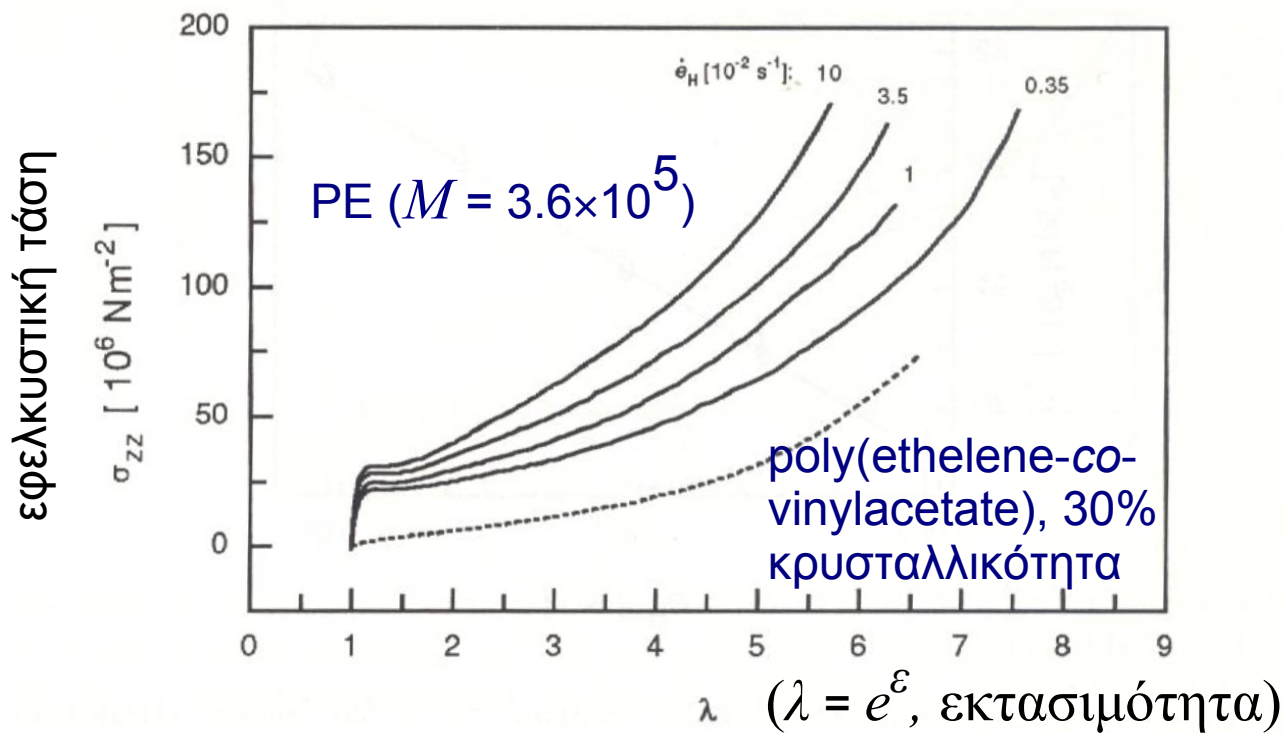
Figure 48 Transmission electron micrograph of a thin section through a craze in polystyrene, showing the fibrils that traverse the craze

ινίδια



Η συγκέντρωση τάσεων επεκτείνει το craze κατά μήκος της διεύθυνσης κάθετα στην φόρτιση χωρίς αύξηση του ανοίγματος – τα ινίδια έχουν τυπική διάμετρο 10 nm και αποτελούν το 50% του όγκου του craze

Ομοιότητα με υπερελαστική συμπεριφορά ελαστομερούς



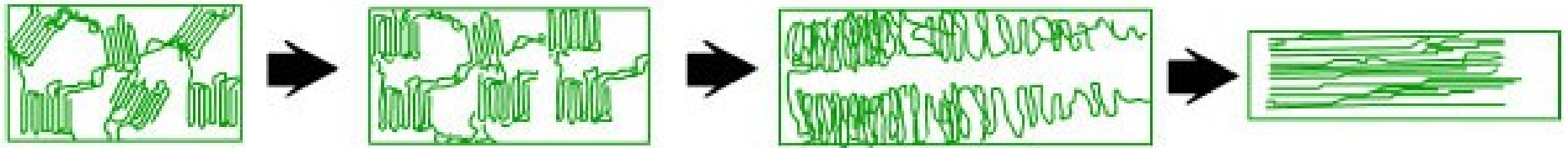
δομικές αλλαγές κατά την ψυχρή έλαση συμπεριλαμβάνουν το τέντωμα δικτύου διαπλοκών :

σε χαμηλές τάσεις τα στοιχεία του στερεού (οι κρυσταλλίτες στα ημικρυσταλλικά και οι άμορφες περιοχές στα γυαλιά) εμποδίζουν την παραμόρφωση του δικτύου

όταν η τάση υπερβεί το όριο διαρροής τα στοιχεία αυτά δεν είναι πλέον σταθερά – οι διαστρωματωμένοι κρυσταλλίτες περιστρέφονται και διαχωρίζονται σε μοσαϊκό κρυσταλλικών περιοχών και η στερεά υαλώδης δομή αναδιατάσσεται με συνεχή τρόπο

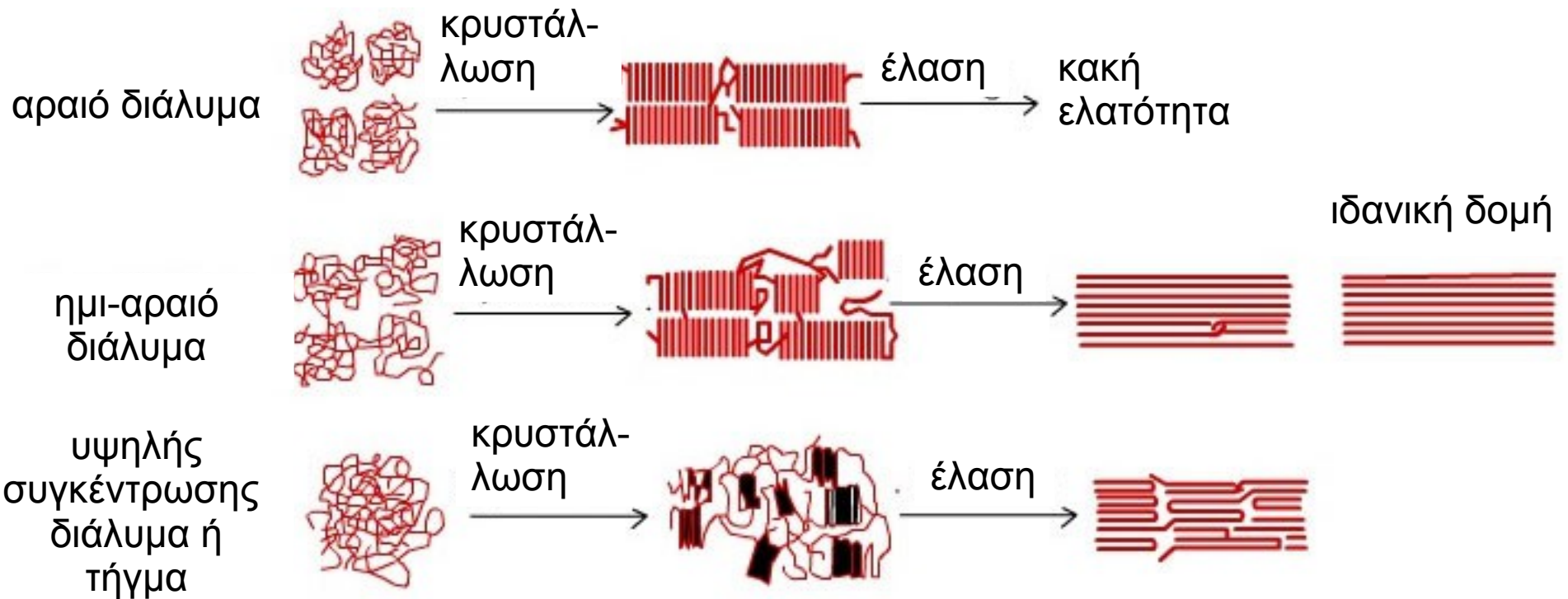
Αναδιοργάνωση κρυσταλλινών σε ευθυγραμμισμένες αλυσίδες

Η αναδιοργάνωση της στερεάς δομής συνεχίζεται σε όλη την περιοχή του πλατό και συνοδεύεται από αυξανόμενη ευθυγράμμιση των αλυσίδων

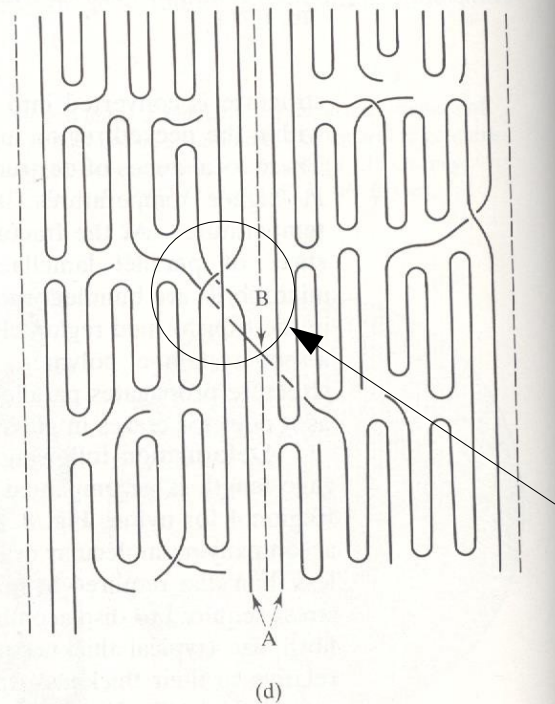
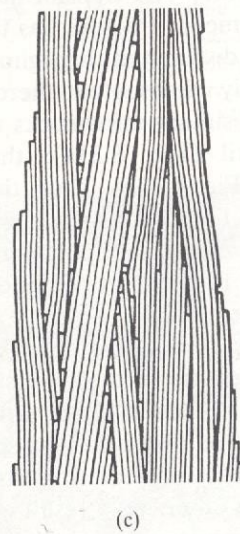
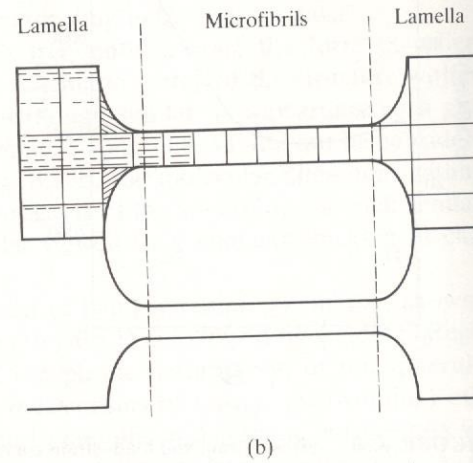
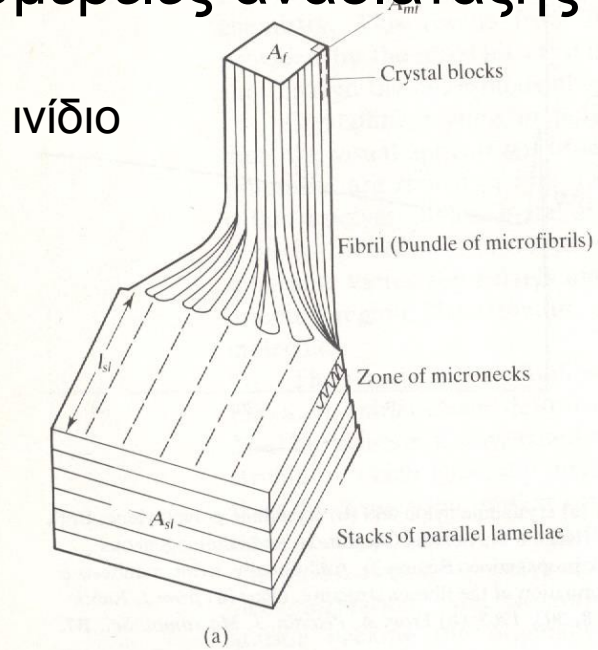


Σε υψηλότερες παραμορφώσεις η πεπερασμένη εκτασιμότητα μεταξύ των διαπλοκών αυξάνει απότομα την τάση

Η ελατότητα εξαρτάται από την προέλευση των αρχικών κρυσταλλινών

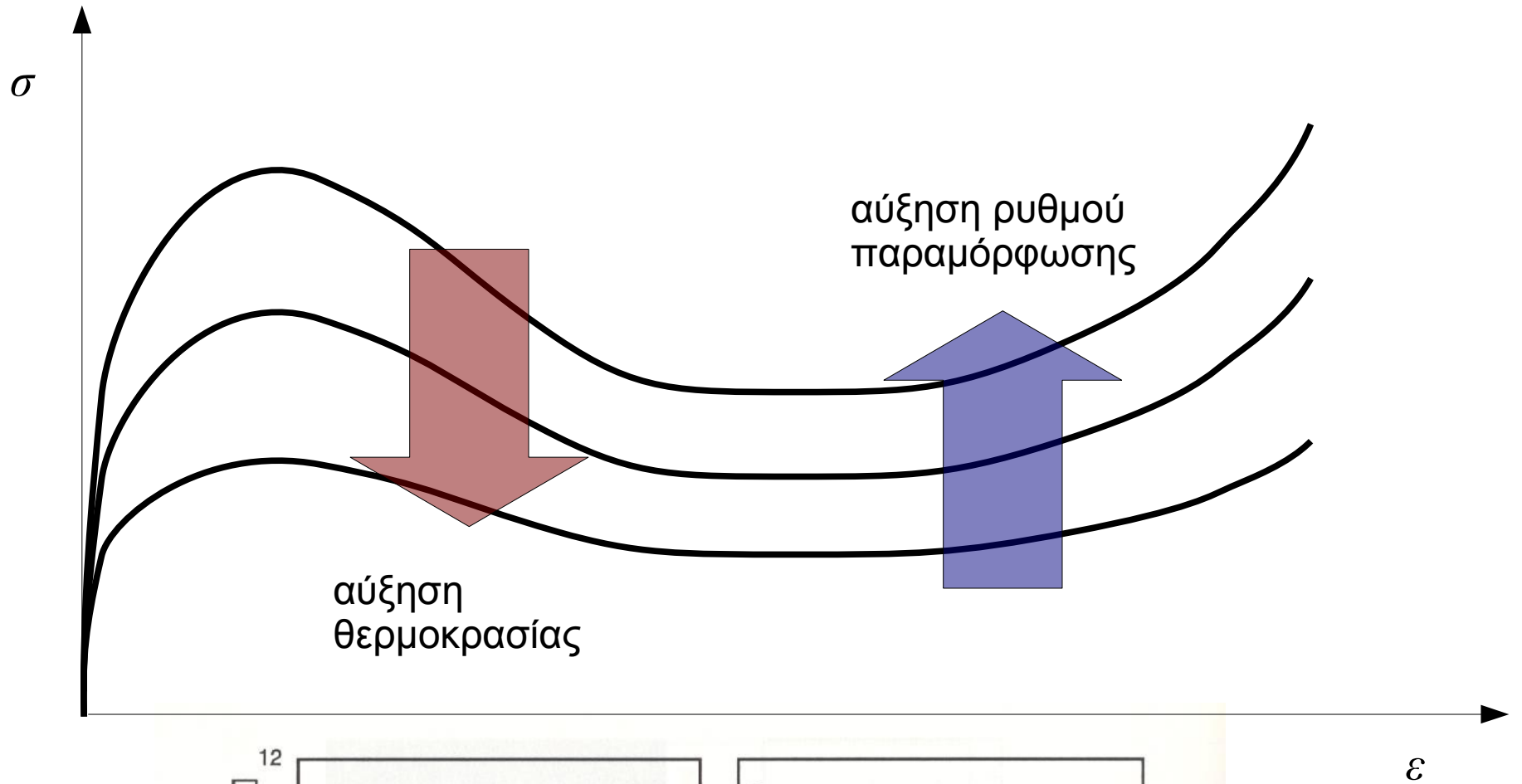


Λεπτομέρειες αναδιάταξης κρυσταλλιτών (ψυχρή έλαση)

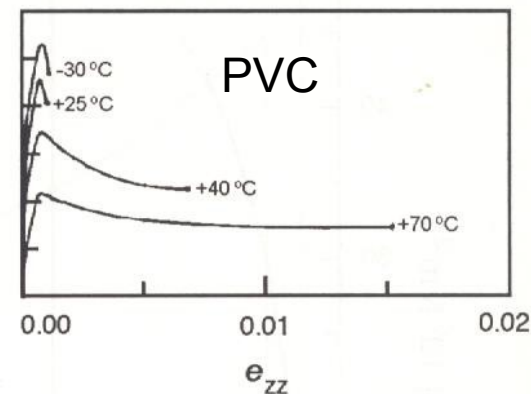
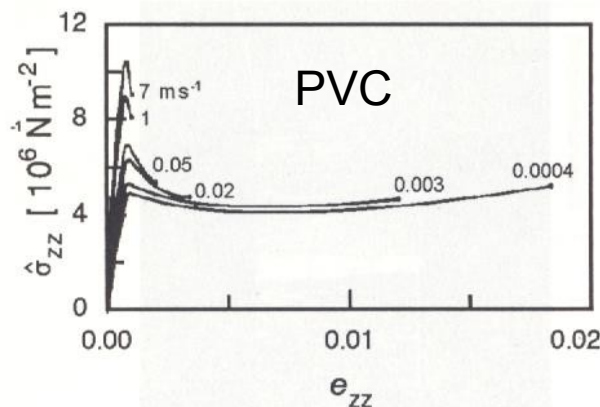


διαπλοκή

Επίδραση θερμοκρασίας και ρυθμού παραμόρφωσης στην πλαστική συμπεριφορά

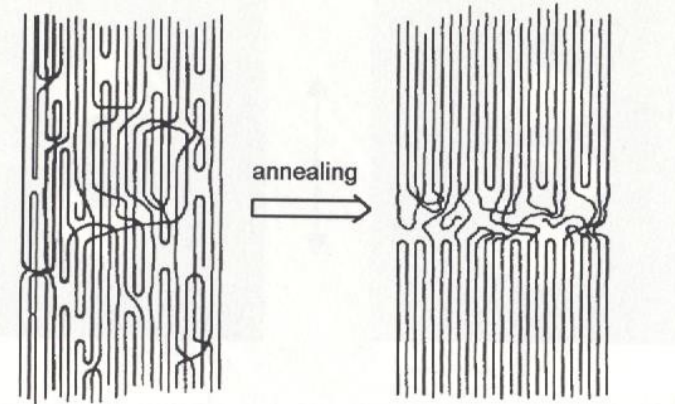
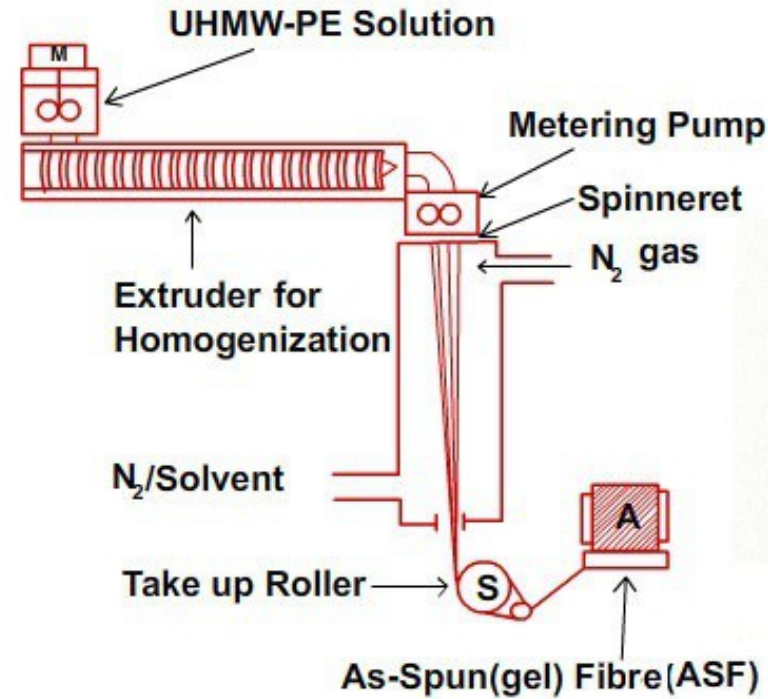
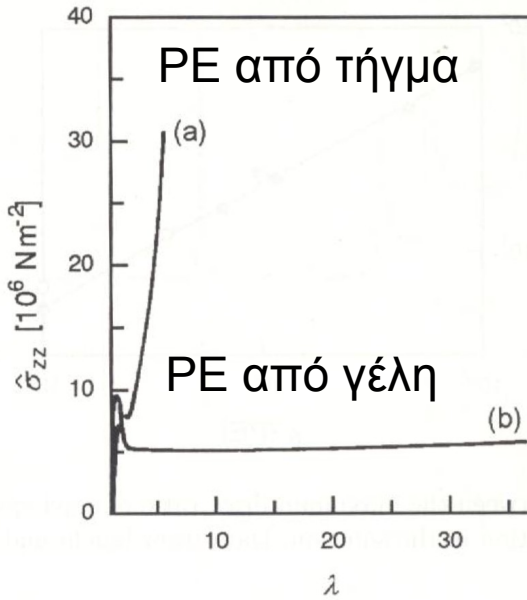


θερμοκρασία
δωματίου



ρυθμός παραμόρφωσης
1 ms⁻¹

Υπερέλαση, ανόπτηση και μνήμη σχήματος



ινοποίηση γέλης
(ακολουθεί ψυχρή έλαση)

ανόπτηση σε θερμοκρασίες
κάτω από το T_m

τόσο τα crazes όσο και η ψυχρή έλαση αναιρούνται όταν η θερμοκρασία υπερβεί το T_g ή το T_m για κρυσταλλικά και άμορφα πολυμερή αντίστοιχα