



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τεχνολογία Υλικών II

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Δρ. Σκλήρη Ευαγγελία

Ψαθυρή Θραύση Κεραμικών

- ❑ Σε αντίθεση με τα μέταλλα, τα κεραμικά υλικά σε θερμοκρασία δωματίου σχεδόν πάντα θραύονται χωρίς να προηγηθεί πλαστική παραμόρφωση. Δηλαδή δεν προλαβαίνουν να “παραμορφωθούν” — σπάνε απότομα.
- ❑ Οι ιοντικοί και ομοιοπολικοί δεσμοί είναι ισχυροί και κατευθυντικοί, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπουν εύκολα την ολίσθηση επιπέδων (όπως γίνεται στα μέταλλα). Έτσι, όταν εφαρμοστεί εφελκυστική τάση, το υλικό δεν μπορεί να απορροφήσει ενέργεια μέσω πλαστικής παραμόρφωσης και η ενέργεια συγκεντρώνεται σε τοπικές ατέλειες.
- ❑ Στην πραγματικότητα, η αντοχή των κεραμικών δεν καθορίζεται από την ιδανική τους δομή, αλλά από μικροσκοπικές ατέλειες:
 - μικρορωγμές,
 - πόρους,
 - εγκλείσματα,
 - γωνίες κόκκων.
- ❑ Αυτές λειτουργούν ως συγκεντρωτές τάσης.

Ψαθυρή Θραύση Κεραμικών

- Η ικανότητα ενός κεραμικού να αντιστέκεται στη διάδοση ρωγμής περιγράφεται από την **αντοχή σε θραύση (δυθραυστότητα σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης, K_{IC})**. Όσο μικρότερη είναι, τόσο πιο εύκολα διαδίδεται μια ρωγμή. Τα περισσότερα κεραμικά έχουν μικρές τιμές K_{IC} σε σύγκριση με τα μέταλλα.

Για επίπεδη παραμόρφωση:

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

όπου:

- **Y** = γεωμετρικός παράγοντας (αδιάστατο μέγεθος)
- **σ** = εφαρμοζόμενη τάση (Pa ή MPa)
- **a** = μήκος ρωγμής (m)

Η ρωγμή διαδίδεται όταν:

$$K_{applied} \geq K_{IC}$$

Τα κεραμικά έχουν μικρό $K_{IC} < 10\text{MPa}\sqrt{m}$

Στατική Κόπωση (Static fatigue)

Στα μέταλλα, όταν λέμε “κόπωση”, συνήθως εννοούμε κυκλική φόρτιση.

Στα κεραμικά όμως:

- Μια ρωγμή μπορεί να μεγαλώνει ακόμα κι αν το φορτίο είναι σταθερό
- Δηλαδή χωρίς εναλλαγή τάσης

Αυτό λέγεται στατική κόπωση.

Έχουμε ένα κεραμικό με μια μικρή ρωγμή και εφαρμόζουμε μια σταθερή τάση, μικρότερη από την άμεση αντοχή θραύσης. Θεωρητικά, το υλικό “δεν θα έπρεπε” να σπάσει.

Όμως

Στην άκρη της ρωγμής η τοπική τάση είναι τεράστια.

Οι δεσμοί βρίσκονται σε κατάσταση εφελκυστικής καταπόνησης

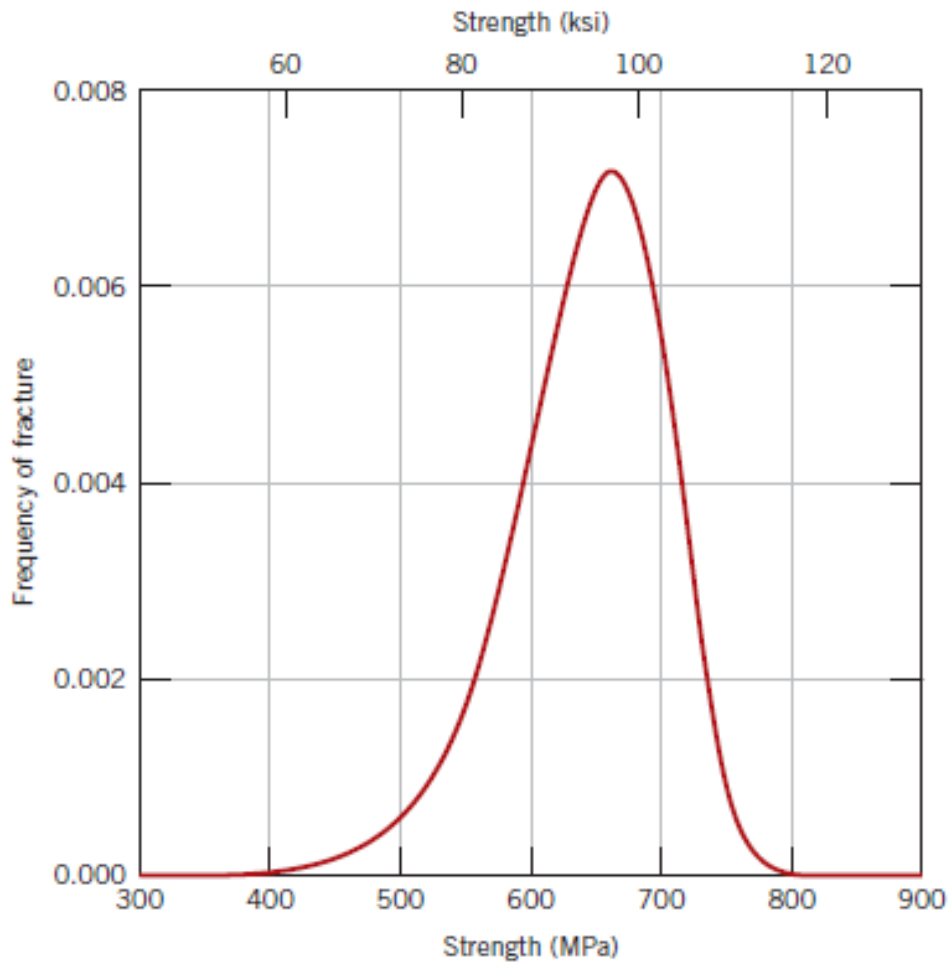
Αν υπάρχει υγρασία στο περιβάλλον, τα μόρια νερού επιτίθενται χημικά στους δεσμούς.

Στα κεραμικά, μια ρωγμή μπορεί να μεγαλώνει ακόμη και με σταθερό φορτίο, επειδή η υγρασία αποδυναμώνει τους δεσμούς στην άκρη της ρωγμής. Αυτό ονομάζεται στατική κόπωση ή stress corrosion.

Ο συνδυασμός της εφαρμοζόμενης τάσης εφελκυσμού και της ατμοσφαιρικής υγρασίας προκαλεί ρήξη των ιοντικών δεσμών.

Στατική Κατανομή Αντοχής σε Θραύση

Κατανομή συχνοτήτων των μετρούμενων τιμών αντοχής σε θραύση για ένα δοκίμιο από νιτρίδιο πυριτίου.



Αν πάρουμε πολλά δοκίμια από το ίδιο κεραμικό:

- Δεν θα σπάσουν όλα στην ίδια τάση.
- Κάποια θα σπάσουν χαμηλότερα.
- Κάποια υψηλότερα.
- Τα περισσότερα γύρω από μια χαρακτηριστική τιμή (η κορυφή της καμπύλης).

Εξαρτάται από:

- την τεχνική παραγωγής και οποιαδήποτε επακόλουθη κατεργασία
 - Το μέγεθος ή τον όγκο του δοκιμίου
 - Όσο μεγαλύτερο είναι ένα δοκίμιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ύπαρξης ατελειών -> μείωση αντοχής σε θραύση
- Η αντοχή των κεραμικών είναι στατιστικό μέγεθος
- Εξαρτάται από πιθανότητα ύπαρξης κρίσιμης ρωγμής
- Μεγαλύτερος όγκος → μεγαλύτερη πιθανότητα ατέλειας → μικρότερη αντοχή

Αντοχή σε Θλίψη

❑ Στη **θλιπτική φόρτιση** δεν υπάρχει ενίσχυση τάσης στις ρωγμές.

Τα ψαθυρά κεραμικά επιδεικνύουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη συγκριτικά με την αντοχή σε εφελκυσμό.

Αν δημιουργήσουμε **υπολειπόμενες θλιπτικές τάσεις στην επιφάνεια**:

Καθυστερεί η έναρξη ρωγμής

Αυξάνεται η αντοχή

Παράδειγμα:

Thermal tempering (σκλήρυνση γυαλιού)

- ✓ Τα κεραμικά αποδίδουν καλύτερα σε θλιπτικά φορτία
- ✓ Είναι επικίνδυνα σε εφελκυσμό
- ✓ Ο σχεδιασμός πρέπει να βασίζεται σε στατιστική προσέγγιση

Θραυστογραφική Μελέτη Κεραμικών Υλικών

□ Η θραυστογραφική μελέτη συνίσταται στην εξέταση:

(α) του τρόπου και της διαδρομής διάδοσης των ρωγμών

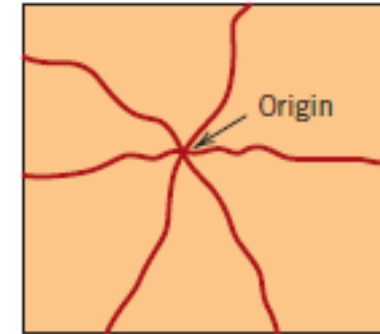
(β) των μικροσκοπικών χαρακτηριστικών των επιφανειών θραύσης

□ Τύποι Φόρτισης & Μορφή Ρωγμών

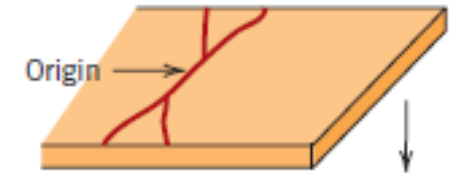
Στα ψαθυρά κεραμικά, η μορφή της ρωγμής εξαρτάται από τον τρόπο

φόρτισης:

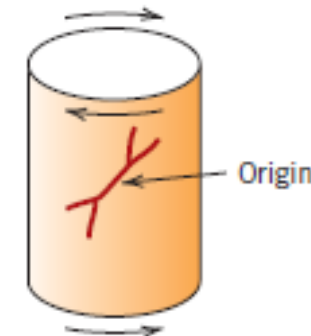
- Κρουστική ή σημειακή φόρτιση
- Κάμψη
- Στρέψη
- Εσωτερική πίεση



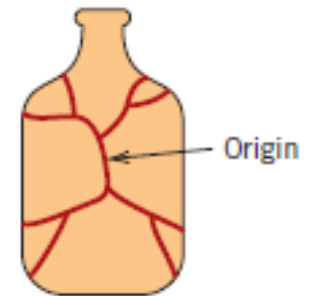
Impact or point loading
(a)



Bending
(b)



Torsion
(c)



Internal pressure
(d)

Θραυστογραφική Μελέτη Κεραμικών Υλικών

Στάδια Διάδοσης Ρωγμής

Μετά την έναρξη (nucleation), η ρωγμή επιταχύνεται μέχρι να φτάσει μια κρίσιμη ταχύτητα.

Για το γυαλί, η κρίσιμη ταχύτητα είναι περίπου το μισό της ταχύτητας του ήχου.

Όταν φτάσει αυτή την ταχύτητα:

Η ρωγμή αρχίζει να διακλαδώνεται

Δημιουργείται οικογένεια ρωγμών

Κατά τη διάδοση, η ρωγμή αλληλεπιδρά με:

- τη μικροδομή
- το πεδίο τάσεων
- τα ελαστικά κύματα που παράγονται

Αυτές οι αλληλεπιδράσεις δημιουργούν χαρακτηριστικά μορφολογικά ίχνη στην επιφάνεια θραύσης.

Θραυστογραφική Μελέτη Κεραμικών Υλικών

Τυπικά χαρακτηριστικά στην επιφάνεια θραύσης ενός ψαθυρού κεραμικού

▪ Λεία περιοχή

Η πιο εσωτερική περιοχή.

Πολύ λεία και σχετικά επίπεδη.

Σχηματίζεται στα αρχικά στάδια διάδοσης της ρωγμής.

Στο κέντρο της βρίσκεται η εστία θραύσης

▪ Περιοχή “ομίχλης”

Βρίσκεται έξω από τη λεία περιοχή.

Πιο τραχιά επιφάνεια.

Εμφανίζεται όταν η ρωγμή επιταχύνεται.

Έχει μορφή δακτυλίου γύρω από τη λεία περιοχή.

▪ Περιοχή “χαίτης”

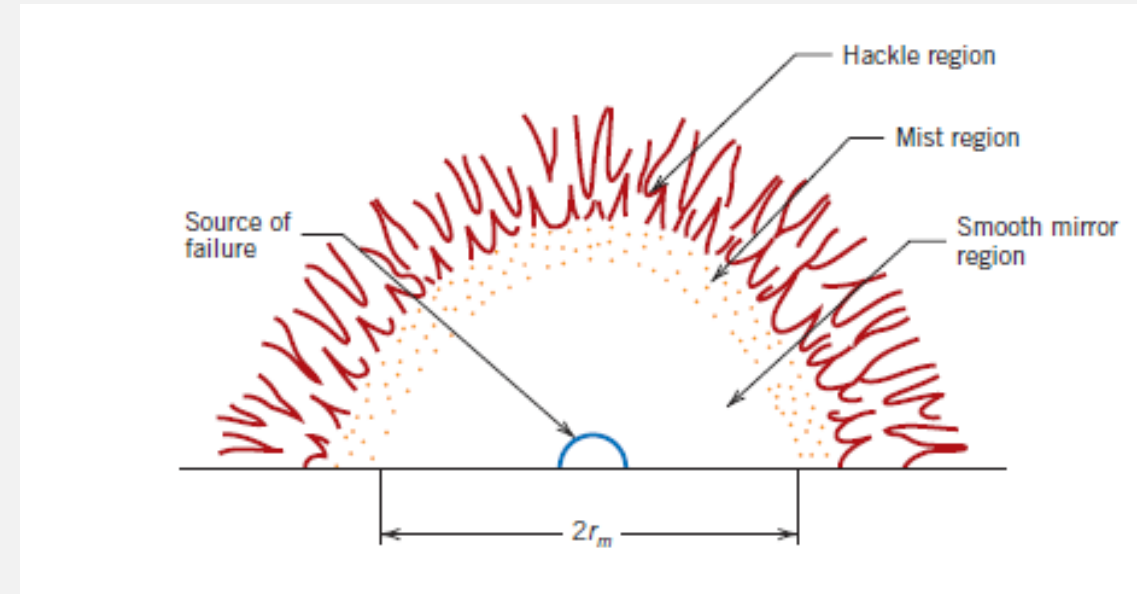
Η πιο εξωτερική και πιο τραχιά περιοχή.

Έχει ακτινωτές γραμμώσεις που μοιάζουν με “χαίτη”.

Δημιουργείται όταν η ρωγμή διακλαδώνεται έντονα.

Οι γραμμώσεις δείχνουν την κατεύθυνση διάδοσης.

Το σημείο σύγκλισης των πτυχώσεων αντιστοιχεί στην έναρξη της ρωγμής.



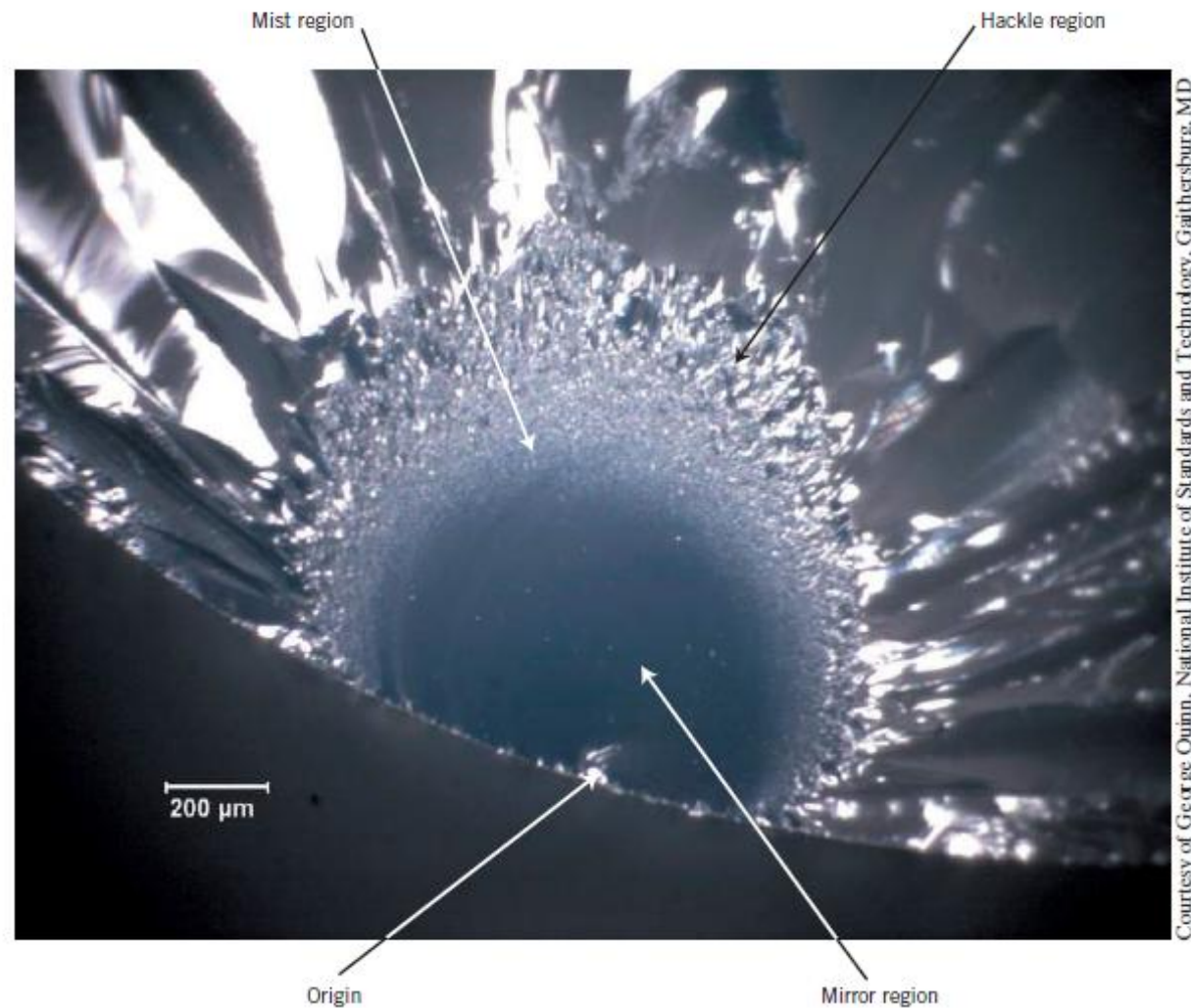


Figure 12.29 Photomicrograph of the fracture surface of a 6-mm-diameter fused silica rod that was fractured in four-point bending. Features typical of this kind of fracture are noted—the origin as well as the mirror, mist, and hackle regions. 60 \times .

Θραυστογραφική Μελέτη Κεραμικών Υλικών

Σχέση μεταξύ της τάσης θραύσης και του μεγέθους της λείας περιοχής.

Πειραματικά έχει παρατηρηθεί:

$$\sigma_f \propto \frac{1}{\sqrt{r_m}}$$

Όπου:

• σ_f = τάση θραύσης

• r_m = ακτίνα mirror περιοχής

Όσο μεγαλύτερη η τάση -> τόσο μικρότερη η mirror περιοχή

Η λεία περιοχή σχηματίζεται στα πρώτα στάδια διάδοσης της ρωγμής.

- Αν η εφαρμοζόμενη τάση είναι χαμηλή → η ρωγμή επιταχύνεται αργά → δημιουργείται μεγάλη λεία περιοχή.
- Αν η τάση είναι υψηλή → η ρωγμή επιταχύνεται πολύ γρήγορα → μικρή λεία περιοχή και γρήγορη μετάβαση σε περιοχή “ομίχλης” και περιοχή “χαίτης”

Συμπεριφορά Τάσης - Παραμόρφωσης

Αντοχή σε Κάμψη

Η συμπεριφορά τάσης–παραμόρφωσης των ψαθυρών κεραμικών δεν προσδιορίζεται συνήθως με δοκιμή εφελκυσμού για τους εξής λόγους:

- Είναι δύσκολη η παρασκευή δοκιμίων με την απαιτούμενη γεωμετρία.
- Η σύσφιξη του δοκιμίου χωρίς πρόκληση θραύσης είναι δύσκολη στη μηχανή δοκιμών εφελκυσμού.
- Τα κεραμικά θραύονται σε πολύ μικρές παραμορφώσεις (~0.1%).
- Η παραμικρή κακή ευθυγράμμιση δημιουργεί καμπτικές τάσεις.
- Για τον λόγο αυτό, προτιμάται η **δοκιμή κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων**.

Δοκιμή Κάμψης Τριών Σημείων

Σε αυτή τη δοκιμή:

- Το δοκίμιο στηρίζεται σε δύο σημεία.
- Εφαρμόζεται φορτίο στο μέσο- δύναμη F .
- Η άνω επιφάνεια βρίσκεται σε **θλίψη**.
- Η κάτω επιφάνεια βρίσκεται σε **εφελκυσμό**.
- Η θραύση ξεκινά από την εφελκυσόμενη πλευρά.

Η μέγιστη εφελκυστική τάση αναπτύσσεται στο κάτω μέρος του δοκιμίου, ακριβώς κάτω από το σημείο φόρτισης.

Πιθανές διατομές

Στήριξη

F

$L/2$ $L/2$

b d Ορθογωνική

R Κυκλική

$\sigma = \text{τάση} = \frac{Mc}{I}$

όπου M = μέγιστη ροπή κάμψης
 c = απόσταση από κέντρο δοκιμίου έως εξωτερικές ίνες
 I = ροπή αδράνειας διατομής
 F = εφαρμοζόμενο φορτίο

	M	c	I	σ
Ορθογωνική	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bd^2}$
Κυκλική	$\frac{FL}{4}$	R	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

Δοκιμή Κάμψης Τριών Σημείων

❑ Αντοχή δοκιμίου για ορθογωνική διατομή:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2}$$

όπου:

σ = τάση κάμψης (MPa)

F = εφαρμοζόμενο φορτίο (N)

L = απόσταση μεταξύ των στηρίξεων (m ή mm)

b = πλάτος δοκιμίου (m ή mm)

d = ύψος (πάχος) δοκιμίου (m ή mm)

❑ Αντοχή δοκιμίου για κυκλική διατομή:

$$\sigma = \frac{FL}{\pi R^3}$$

όπου:

σ = τάση κάμψης

F = εφαρμοζόμενο φορτίο

L = απόσταση στηρίξεων

R = ακτίνα της κυκλικής διατομής

π = 3.14

Πιθανές διατομές

Ορθογωνική

Κυκλική

$\sigma = \text{τάση} = \frac{Mc}{I}$

όπου M = μέγιστη ροπή κάμψης
 c = απόσταση από κέντρο δοκιμίου έως εξωτερικές ίνες
 I = ροπή αδράνειας διατομής
 F = εφαρμοζόμενο φορτίο

	$\frac{M}{F}$	$\frac{c}{d}$	$\frac{I}{d^4}$	$\frac{\sigma}{FL}$
Ορθογωνική	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bd^2}$
Κυκλική	$\frac{FL}{4}$	R	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

Ελαστική Συμπεριφορά

Η σχέση τάσης–παραμόρφωσης είναι:

- Γραμμική μέχρι τη θραύση.
- Δεν παρατηρείται πλαστική παραμόρφωση.
- Η κλίση της ευθείας είναι το μέτρο ελαστικότητας (E).

Τα κεραμικά έχουν:

- Υψηλό E (70–500 GPa).
- Απότομη θραύση χωρίς προειδοποίηση.

Table 12.5
Tabulation of Flexural Strength (Modulus of Rupture) and Modulus of Elasticity for Ten Common Ceramic Materials

<i>Material</i>	<i>Flexural Strength</i>		<i>Modulus of Elasticity</i>	
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>
Silicon nitride (Si ₃ N ₄)	250–1000	35–145	304	44
Zirconia ^a (ZrO ₂)	800–1500	115–215	205	30
Silicon carbide (SiC)	100–820	15–120	345	50
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	275–700	40–100	393	57
Glass-ceramic (Pyroceram)	247	36	120	17
Mullite (3Al ₂ O ₃ –2SiO ₂)	185	27	145	21
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	110–245	16–35.5	260	38
Magnesium oxide (MgO)	105 ^b	15 ^b	225	33
Fused silica (SiO ₂)	110	16	73	11
Soda-lime glass	69	10	69	10

^aPartially stabilized with 3 mol% Y₂O₃.

^bSintered and containing approximately 5% porosity.

Μηχανισμοί Πλαστικής Παραμόρφωσης

Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος:

- Τα περισσότερα κεραμικά θραύονται πριν εμφανίσουν πλαστική παραμόρφωση.
- Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να εμφανιστούν μηχανισμοί παραμόρφωσης.

Κρυσταλλικά Κεραμικά

Η πλαστική παραμόρφωση συμβαίνει μέσω κίνησης διαταραχών (ολίσθηση).

Όμως:

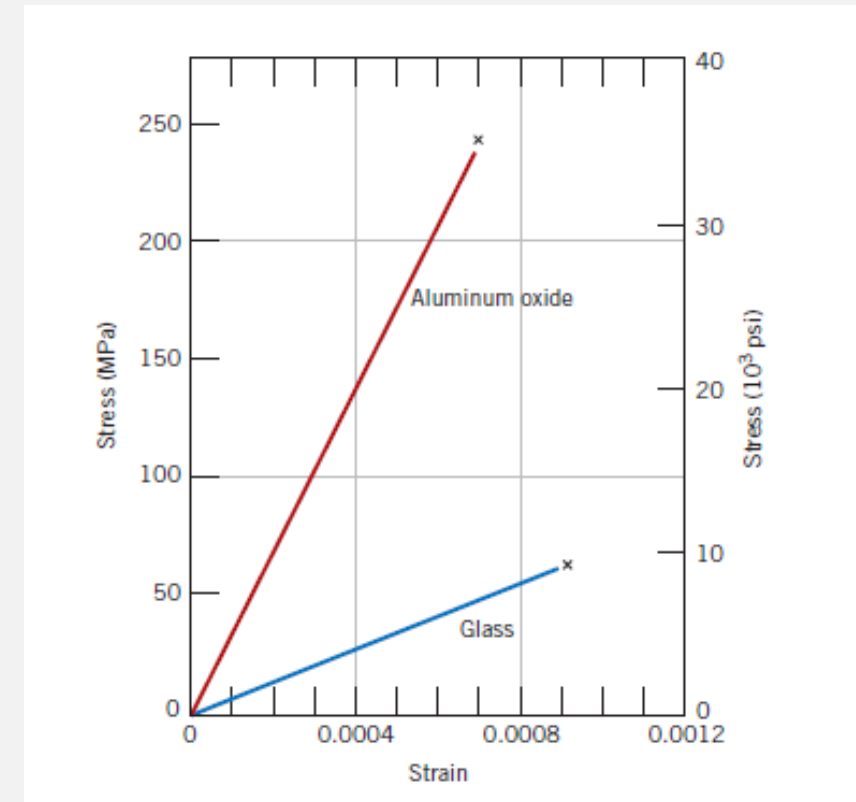
- Οι ιοντικοί δεσμοί είναι ηλεκτροστατικά φορτισμένοι.
- Η ολίσθηση φέρνει όμοια φορτία σε γειτονικές θέσεις.
- Αναπτύσσονται ισχυρές απωστικές δυνάμεις.

Συνεπώς, η ολίσθηση είναι εξαιρετικά δύσκολη.

Κεραμικά με Ομοιοπολικό Δεσμό

Η πλαστική παραμόρφωση είναι επίσης περιορισμένη διότι:

- Οι ομοιοπολικοί δεσμοί είναι ισχυροί.
- Είναι κατευθυντικοί.
- Υπάρχουν περιορισμένα συστήματα ολίσθησης.



Μηχανισμοί Πλαστικής Παραμόρφωσης

Άμορφα (Μη Κρυσταλλικά) Κεραμικά

Δεν εμφανίζεται ολίσθηση διαταραχών.

Η παραμόρφωση γίνεται μέσω:

- Ιξώδους ροής.
- Θραύσης και επανασηματισμού δεσμών.

Η ιξώδης ροή περιγράφεται από:

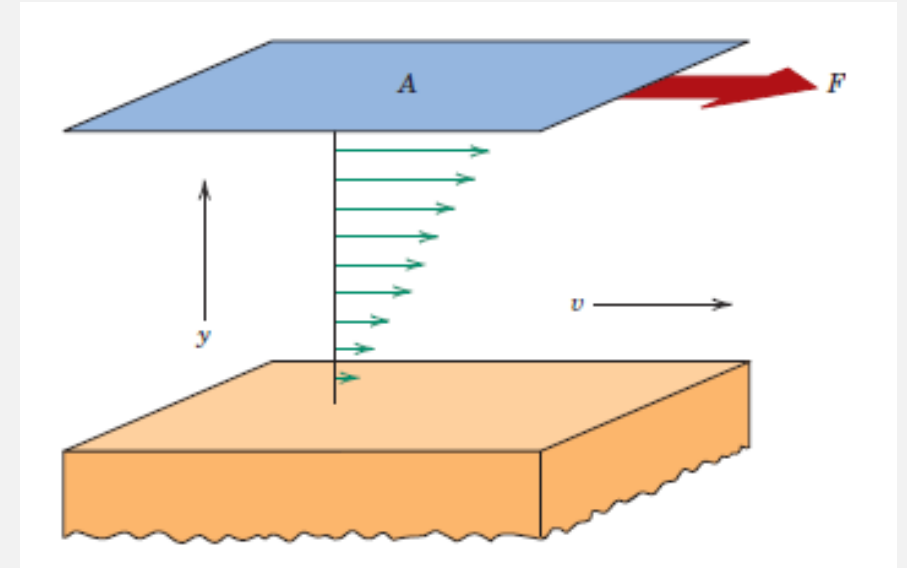
$$\eta = \frac{\tau}{d u / d y}$$

όπου:

- η = ιξώδες
- τ = διατμητική τάση
- du = μεταβολή ταχύτητας
- dy = απόσταση κάθετη προς τις πλάκες και με φορά απομακρυνόμενη από αυτές

Όσο μεγαλύτερο το ιξώδες:

- Τόσο πιο δύσκολα ρέει το υλικό.
- Τόσο μεγαλύτερη δύναμη χρειάζεται.



Επίδραση Πορώδους στο Μέτρο Ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται με αύξηση του πορώδους:

$$E = E_0(1 - 1.9P + 0.9P^2)$$

όπου:

- P = κλασματικό πορώδες
- E_0 = μέτρο χωρίς πόρους

Οι πόροι μειώνουν την ικανότητα μεταφοράς φορτίου.

Επίδραση Πορώδους στην Αντοχή Κάμψης

Η αντοχή μειώνεται εκθετικά:

$$\sigma_f = \sigma_0 e^{-nP}$$

Οι πόροι:

- Μειώνουν την ενεργό διατομή.
- Δρουν ως συγκεντρωτές τάσης.
- Αυξάνουν την πιθανότητα έναρξης ρωγμής.

Σκληρότητα Κεραμικών

Οι μετρήσεις είναι δύσκολες λόγω:

- Ψαθυρότητας.
- Εκτεταμένου σχηματισμού ρωγμών.

Χρησιμοποιούνται:

- Μέθοδος Vickers
- Μέθοδος Knoop

Τα κεραμικά συγκαταλέγονται στα σκληρότερα γνωστά υλικά.

Table 12.6 Vickers (and Knoop) Hardnesses for Eight Ceramic Materials

<i>Material</i>	<i>Vickers Hardness (GPa)</i>	<i>Knoop Hardness (GPa)</i>	<i>Comments</i>
Diamond (carbon)	130	103	Single crystal, (100) face
Boron carbide (B_4C)	44.2	—	Polycrystalline, sintered
Aluminum oxide (Al_2O_3)	26.5	—	Polycrystalline, sintered, 99.7% pure
Silicon carbide (SiC)	25.4	19.8	Polycrystalline, reaction bonded, sintered
Tungsten carbide (WC)	22.1	—	Fused
Silicon nitride (Si_3N_4)	16.0	17.2	Polycrystalline, hot pressed
Zirconia (ZrO_2) (partially stabilized)	11.7	—	Polycrystalline, 9 mol% Y_2O_3
Soda-lime glass	6.1	—	

Ερπυσμός στα Κεραμικά

- ❑ Ο ερπυσμός είναι η αργή, σταδιακή παραμόρφωση ενός υλικού με τον χρόνο, όταν αυτό βρίσκεται υπό σταθερό φορτίο.

Τα κεραμικά παρουσιάζουν ερπυσμό:

- Σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Συνήθως υπό θλιπτικές τάσεις.
- Ο μηχανισμός είναι παρόμοιος με των μετάλλων, αλλά εμφανίζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Ευχαριστώ για την προσοχή σας!