



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων & Συστημάτων



# Τεχνική Μηχανική

## Μέρος Β - Αντοχή Υλικών

### Μηχανική συμπεριφορά υλικών

**Άνθιμος Σ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ**  
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Eurlng

# 1. Γενικά

Για να είναι δυνατός ο σχεδιασμός του φορέα είναι απαραίτητο να είναι γνωστά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του δομικού υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος [μέτρο ελαστικότητας, μέτρο διάτμησης, όριο διαρροής, όριο θραύσης, ικανότητα παραμόρφωσης].

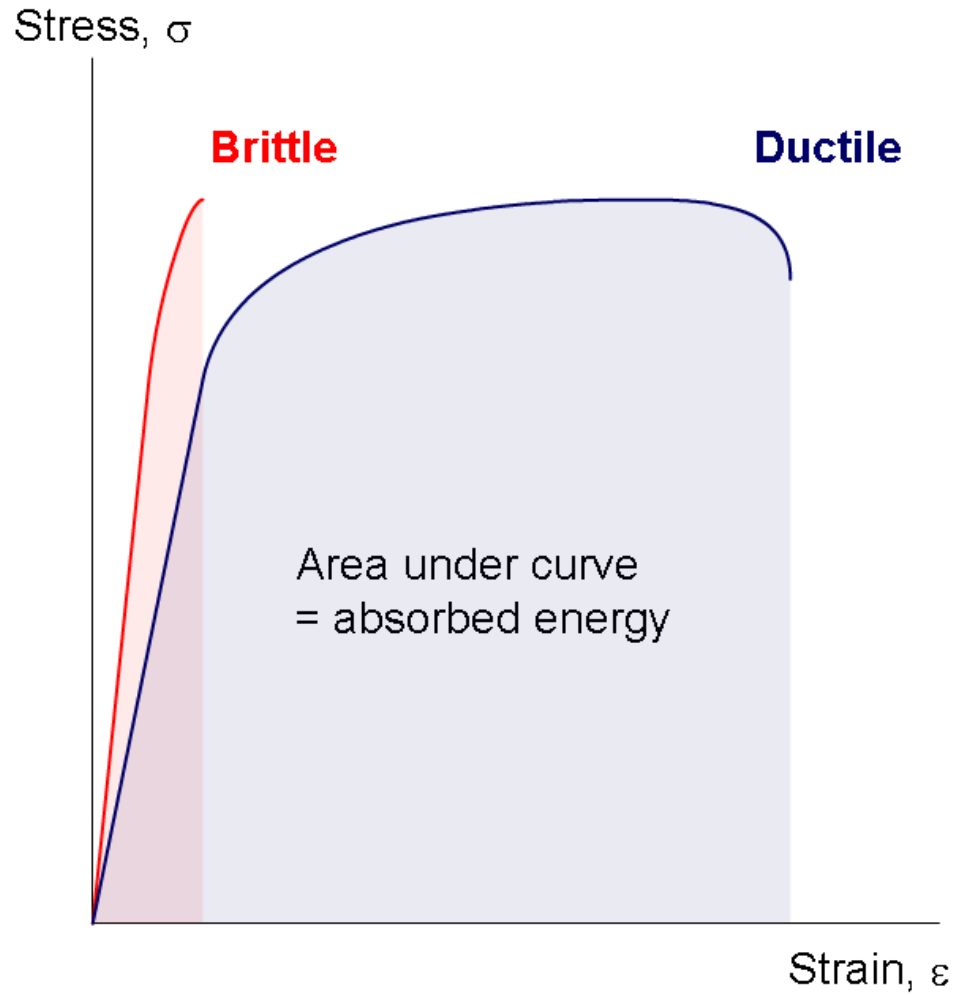
Διενεργούνται πειραματικές δοκιμές υλικών [μέταλλα, κεραμικά, σκυρόδεμα, σύνθετα υλικά] **για τον προσδιορισμό ή των έλεγχο των μηχανικών χαρακτηριστικών.**

- Δοκιμές εφελκυσμού, θλίψης. 😊
- Δοκιμές κρούσης.
- Δοκιμές σκληρότητας.
- Δοκιμές κόπωσης.
- Δοκιμές ερπυσμού.

## **Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών εξαρτάται:**

- Από το μέγεθος και τον χρόνο επιβολής της φόρτισης.
- Από την ταχύτητα φόρτισης.
- Από τις θερμοκρασιακές συνθήκες.
- Από την σύνθεση του υλικού.

# Όλκιμα – Ψαθυρά υλικά



## 2. Μηχανική συμπεριφορά χάλυβα σε εφελκυσμό, πείραμα εφελκυσμού



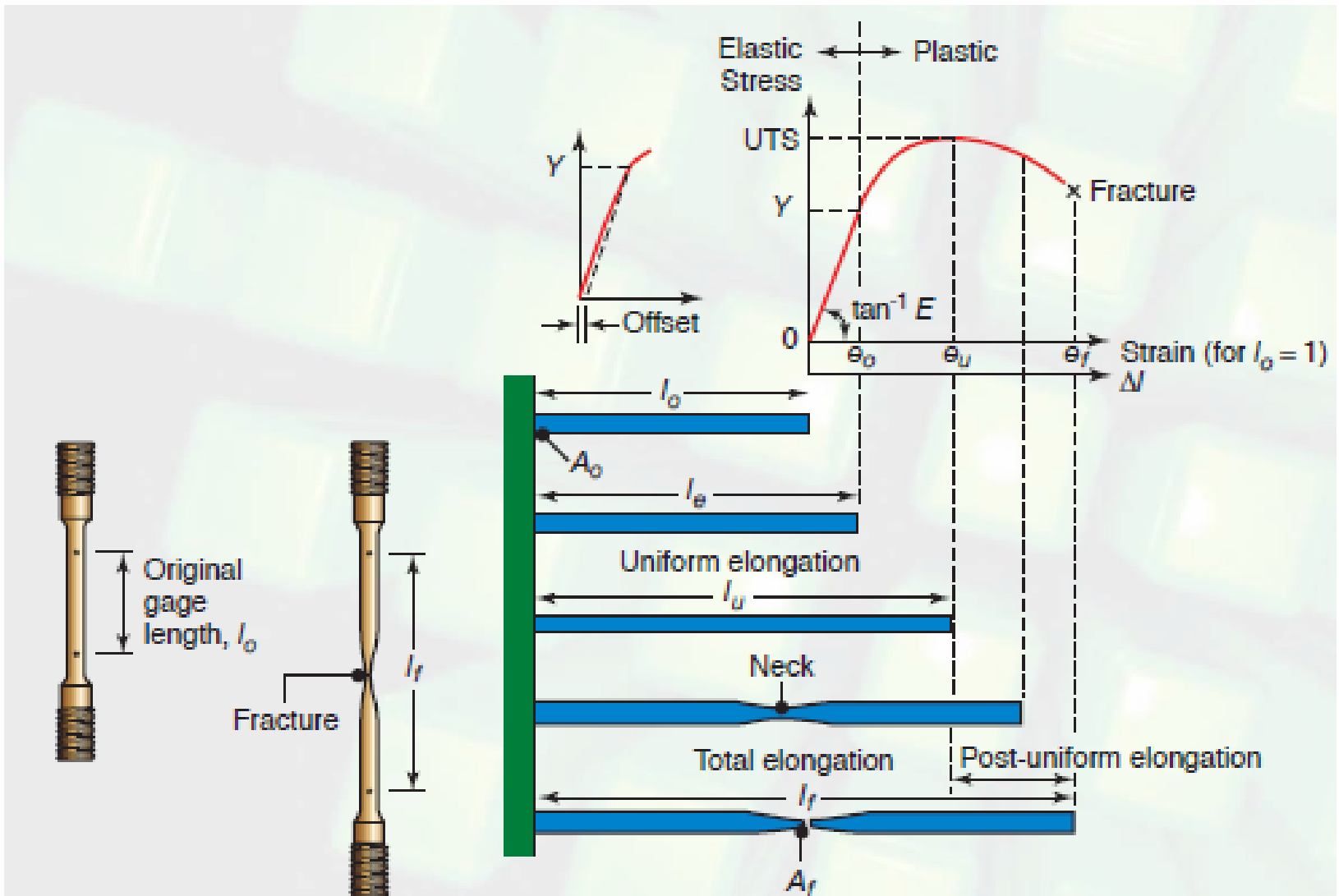
[www.istron.com](http://www.istron.com)



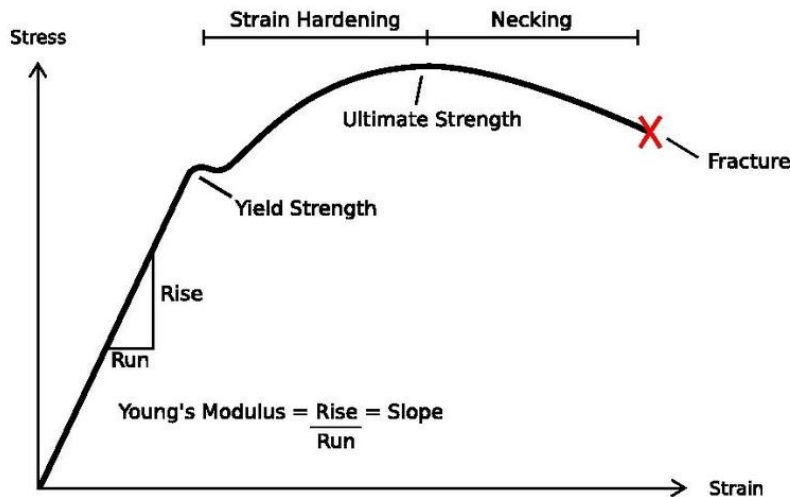
brittle fracture

deformation fracture

<https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/tensile-test/>



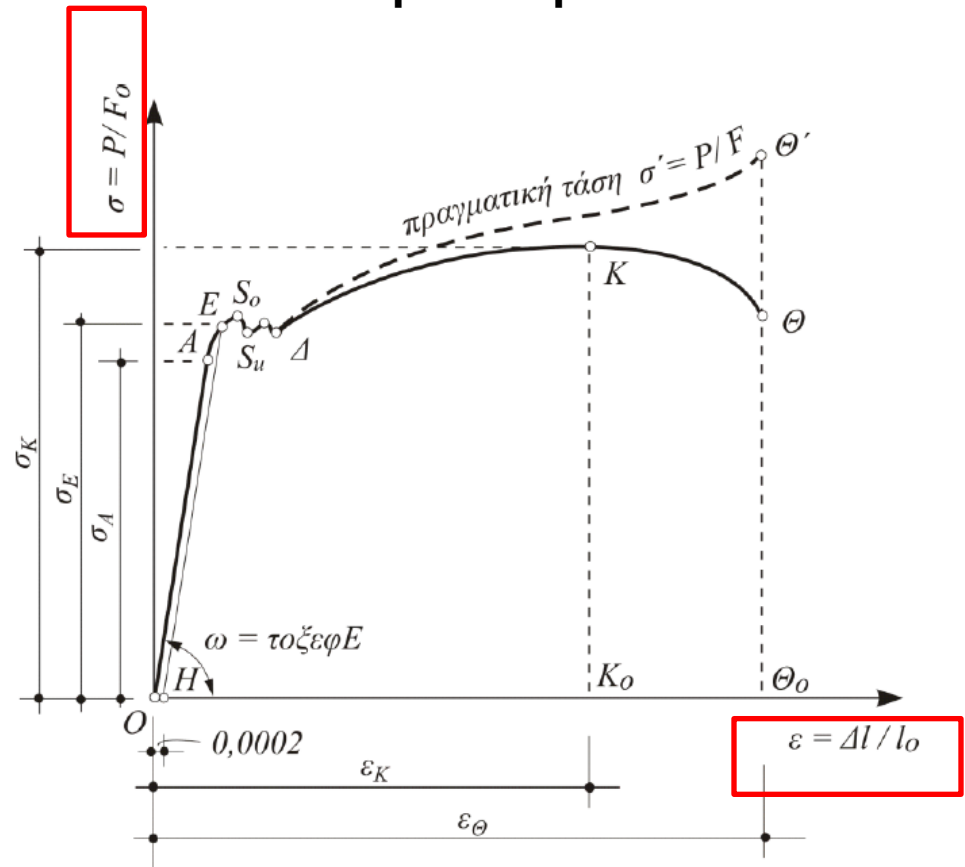
Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.  
 Kalpakjian • Schmid  
 © 2008, Pearson Education  
 ISBN No. 0-13-227271-7



Σχηματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για δομικό χάλυβα

- Όριο διαρροής = Yield strength
- Κράτυνση = Strain hardening
- Λαιμός = Necking
- Όριο αντοχής = Ultimate strength
- Θραύση = Fracture

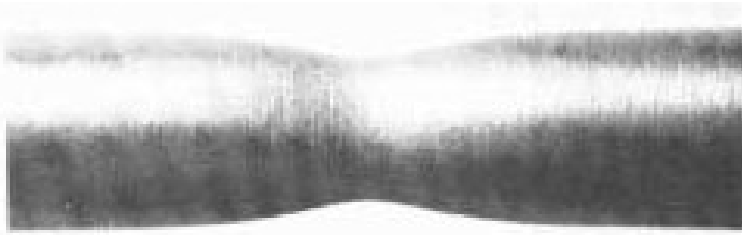
## Χαρακτηριστική καμπύλη συμπεριφοράς δομικού χάλυβα σε εφελκυσμό



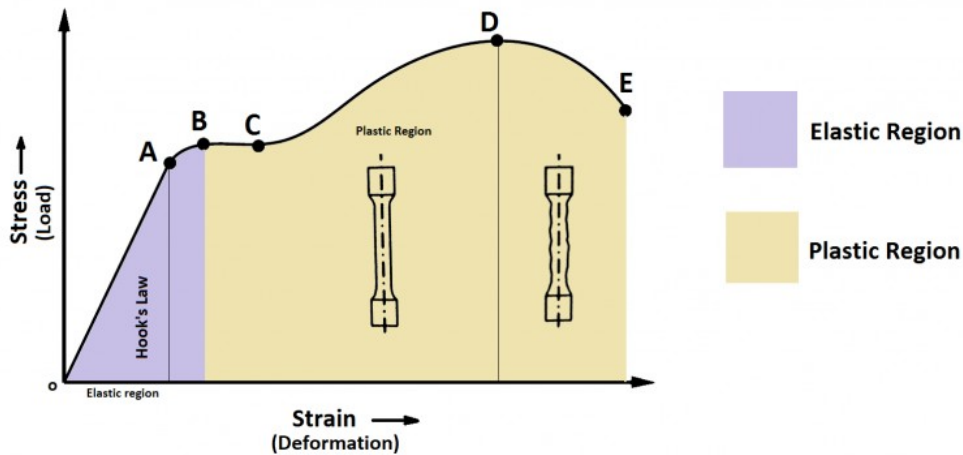
Χαρακτηριστικά όρια τάσεων-παραμορφώσεων για δομικό χάλυβα

[https://en.wikipedia.org/wiki/Stress%E2%80%93strain\\_curve](https://en.wikipedia.org/wiki/Stress%E2%80%93strain_curve)

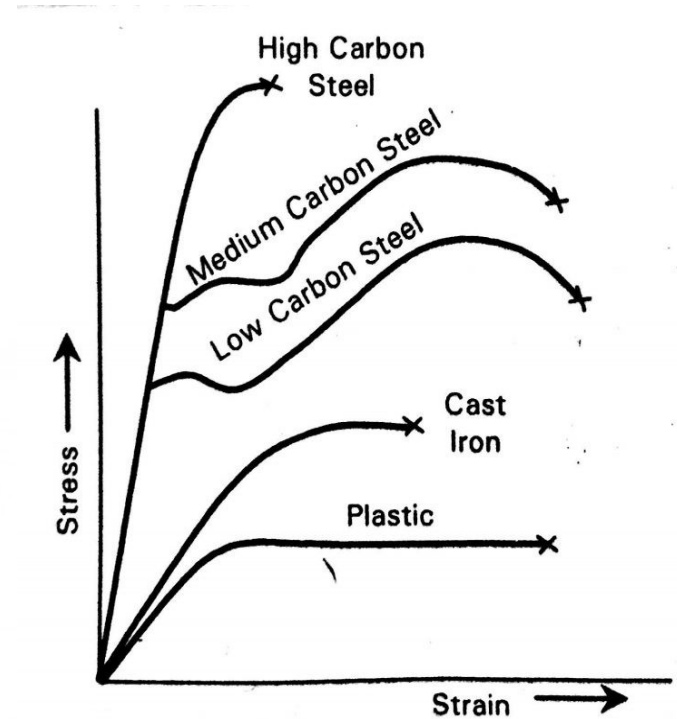
Φ. Λόκκας. Αρχές και Μέθοδοι στην Αντοχή Υλικών. Λάρισα 2003



Λαιμός εφελκόμενης ράβδου



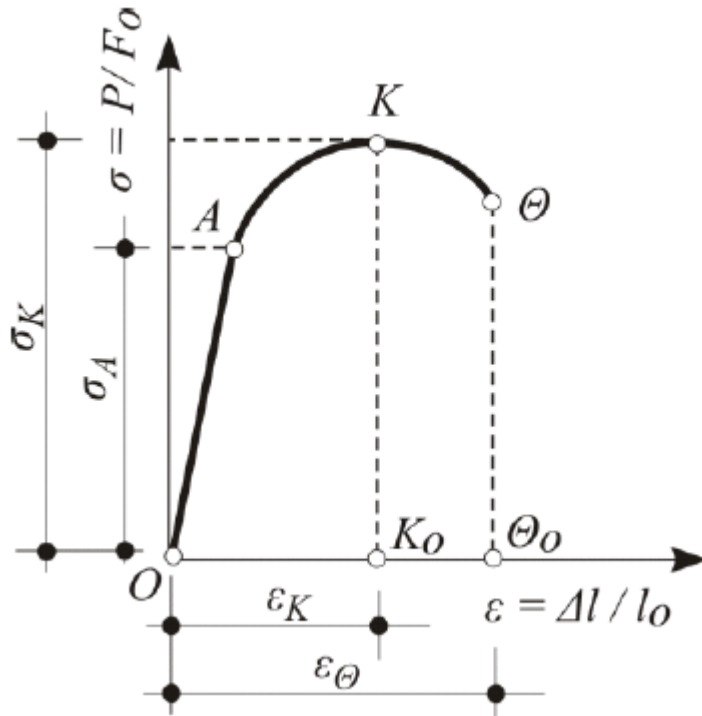
Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα με σήμανση της ελαστικής και πλαστικής περιοχής



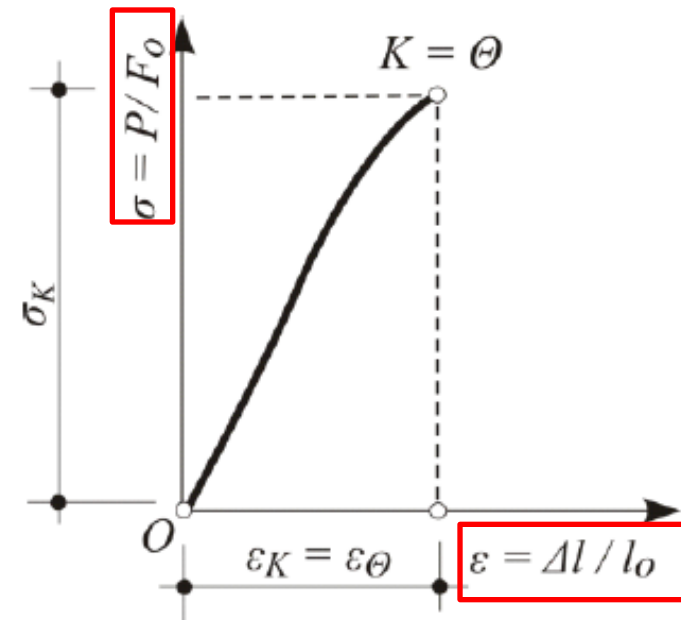
Ποιοτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δομικών χαλύβων



## Χαρακτηριστική καμπύλη συμπεριφοράς δομικού χαλκού, αλουμινίου, σε εφελκυσμό



## Χαρακτηριστική καμπύλη συμπεριφοράς ψαθρών υλικών όπως χυτοσίδηρου, ορείχαλκου, γυαλιού, σκυροδέματος



## Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα σκυροδέματος

Ιδιότητα	Τεχνική κατηγορία ποιότητας	
	B500A	B500C
Όριο διαρροής, $f_y$ (MPa)	$\geq 500$	$\geq 500$
Λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής, $f_{y,act}/f_{y,nom}$		$\leq 1,25$
Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής, $f_t/f_y$	$\geq 1,05$ ( $\geq 1,03$ για $d < 6\text{mm}$ )	$\geq 1,15 \leq 1,35$
Συνολική ανηγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) στο μέγιστο φορτίο $\epsilon_u$ (%)	$\geq 2,5$ ( $\geq 2$ για $d < 6\text{mm}$ )	$\geq 7,5$

[MPa]

1MPa = 1000 KPa ~  
100 t/m<sup>2</sup> = 0.0102  
t/cm<sup>2</sup> = 10.20  
Kgr/cm<sup>2</sup>

## Μηχανικά χαρακτηριστικά δομικού χάλυβα

Πρότυπο και κατηγορία	Ονομαστικό πάχος στοιχείων (mm)			
	$t \leq 40$		$40 < t \leq 80$	
EN 10025-2	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$
S235	235	360	215	340
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550

[MPa]

Norme Standard Norma	Nuances Grades Güten	Limite d'élasticité minimale Minimum yield strength Mindestwert der oberen Streckgrenze					Résistance à la traction Tensile strength Zugfestigkeit		Allongement minimal Minimum elongation Mindestwert der Bruchdehnung $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ A, %				Essai de flexion par choc, en long Notch impact test, longitudinal Kerbschlagbiegeversuch, längs		
		$R_{eH}$ , MPa					$R_m$ , MPa						Température Temperature Temperatur	Énergie absorbée min. <sup>1)</sup> Min. absorbed energy <sup>1)</sup> Mind. Kerbschlagarbeit <sup>1)</sup>	
		Épaisseur nominale (mm) Nominal thickness (mm) Nominalna grubošć (mm)					Épaisseur nominale (mm) Nominal thickness (mm) Nominalna grubošć (mm)		Épaisseur nominale (mm) Nominal thickness (mm) Nenn Dicke (mm)				°C	J	
		≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤140	≥3 ≤100	>100 ≤140	≥3 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤100	>100 ≤140	°C	J

S235JR	☎	235	225		215	195	360-510	350-500	26	25	24	22	+ 20	27
S235J0		235	225		215	195	360-510	350-500	26	25	24	22	0	27
S235J2	☎	235	225		215	195	360-510	350-500	26	25	24	22	-20	27

S460JR	☎	460	440	420	400	390	390	550-720	530-700	17	17	17	17	+ 20	27
S460J0	☎	460	440	420	400	390	390	550-720	530-700	17	17	17	17	0	27
S460J2	☎	460	440	420	400	390	390	550-720	530-700	17	17	17	17	-20	27
S460K2	☎	460	440	420	400	390	390	550-720	530-700	17	17	17	17	-20	40

[https://sections.arcelormittal.com/products\\_and\\_solutions/Product\\_catalogues/EN](https://sections.arcelormittal.com/products_and_solutions/Product_catalogues/EN)

Norme Standard Norm	Nuances Grades Güten	Analyse de coulée Ladle analysis Schmelzanalyse												
		C max. %			Mn max. %	Si <sup>6)</sup> max. %	P max. %	S max. %	N <sup>2)</sup> max. %	Cu max. %	Autres <sup>7)</sup> Other <sup>7)</sup> Sonstige <sup>7)</sup> max. %	CEV <sup>4)</sup> max. %		
		Epaisseur nominale (mm) Nominal thickness (mm) Nenndicke (mm)										Epaisseur nominale (mm) Nominal thickness (mm) Nenndicke (mm)		
		≤ 16	>16 ≤40	>40 <sup>3)</sup>	≤30	>30 ≤40	>40 ≤140							
	S235JR	0,17	0,17	0,20	1,40	-	0,040 <sup>6)</sup>	0,040	0,012	0,55	-	0,35	0,35	0,38
	S235J0	0,17	0,17	0,17	1,40	-	0,035	0,035	0,012	0,55	-	0,35	0,35	0,38
	S235J2 <sup>5)</sup>	0,17	0,17	0,17	1,40	-	0,030	0,030	-	0,55	-	0,35	0,35	0,38
	S460JR <sup>5)</sup>	0,20	0,20 <sup>1)</sup>	0,22	1,70	0,55	0,035	0,035	0,025	0,55	8)	0,47	0,49	0,49
	S460J0 <sup>5)</sup>	0,20	0,20 <sup>1)</sup>	0,22	1,70	0,55	0,035	0,035	0,025	0,55	8)	0,47	0,49	0,49
	S460J2 <sup>5)</sup>	0,20	0,20 <sup>1)</sup>	0,22	1,70	0,55	0,035	0,035	0,025	0,55	8)	0,47	0,49	0,49
	S460K2 <sup>5)</sup>	0,20	0,20 <sup>1)</sup>	0,22	1,70	0,55	0,035	0,035	0,025	0,55	8)	0,47	0,49	0,49

Η μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα [όριο διαρροής, θραύσης, παραμόρφωση], όπως εν γενεί και του συνόλου των δομικών υλικών, εξαρτάται από την χημική σύνθεση.

[https://sections.arcelormittal.com/products\\_and\\_solutions/Product\\_catalogues/EN](https://sections.arcelormittal.com/products_and_solutions/Product_catalogues/EN)

## Εφελκυστική αντοχή αλουμινίου

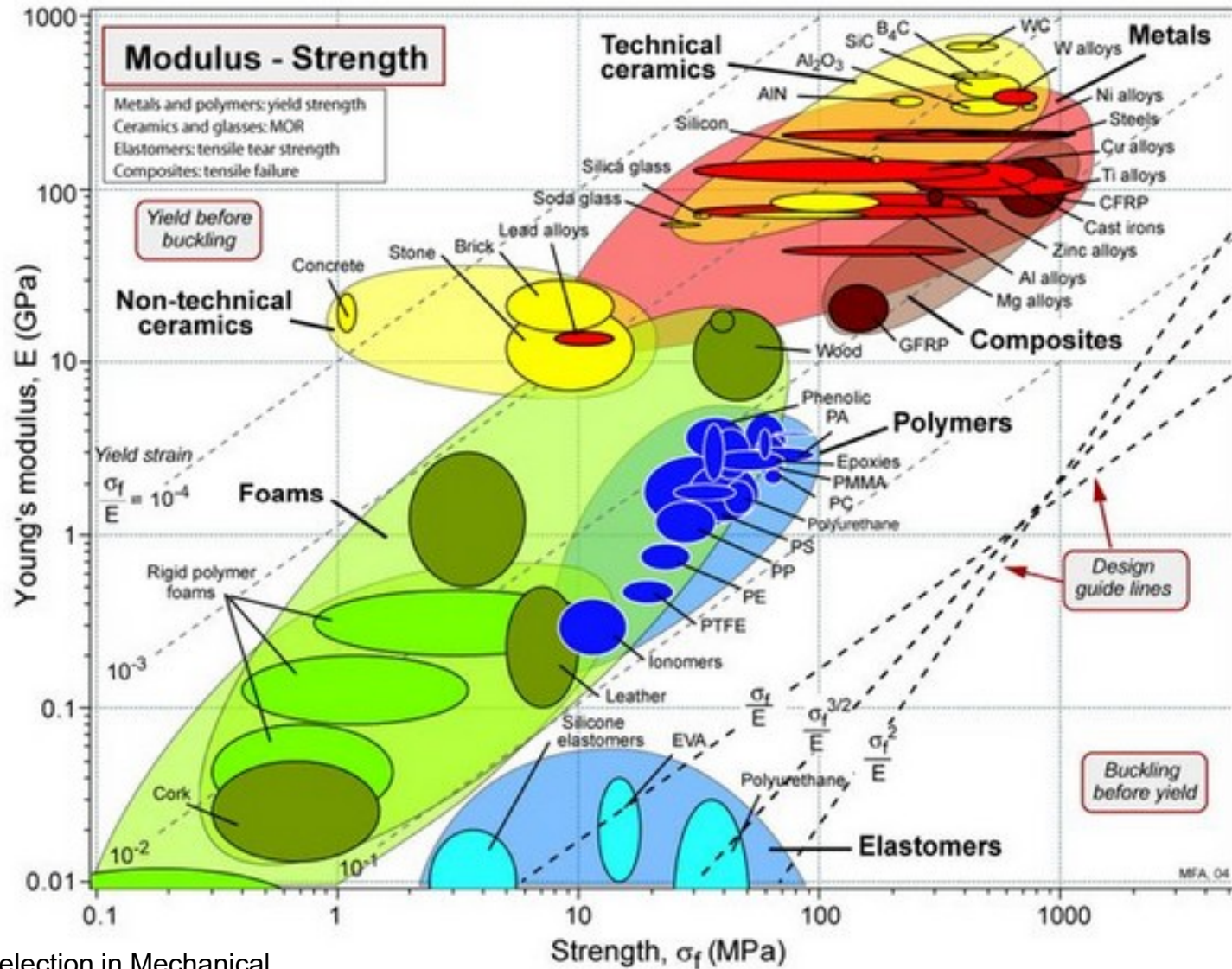
Συμβολισμός	Κραματικά στοιχεία					Εφελκυστική αντοχή (MPa)
	Mn	Mg	Si	Cu	Zn	
<i>Al</i>						70
<i>Al Mn</i>	0.8-1.5					100
<i>Al Mg 3</i>	0.0-0.4	2.6-3.3				180
<i>Al Mg 5</i>	0.0-0.6	4.3-5.5				240
<i>Al Mg Mn</i>	0.5-1.5	1.6-2.5				180
<i>Al Mg Si 1</i>	0.0-1.0	0.6-1.4	0.6-1.6			320
<i>Al Cu Mg 2</i>	0.3-1.1	1.2-1.8	3.8-4.9			440
<i>Al Zn Mg Cu 1.5</i>	0.0-0.3	2.1-2.9	0.0-0.5	1.2-2.0	5.1-6.1	520

## Μηχανικά χαρακτηριστικά μετάλλων

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Μέτρο Διάτμησης (GPa)	Λόγος Poisson
Αλουμίνιο	69	25	0.33
Ορείχαλκος	97	37	0.34
Χαλκός	110	46	0.34
Μαγνήσιο	45	17	0.29
Νικέλιο	207	76	0.31
Χάλυβας	207	83	0.30
Τιτάνιο	107	45	0.34
Βολφράμιο	407	160	0.28
Δομικός Χάλυβας	200-210	80	0.30

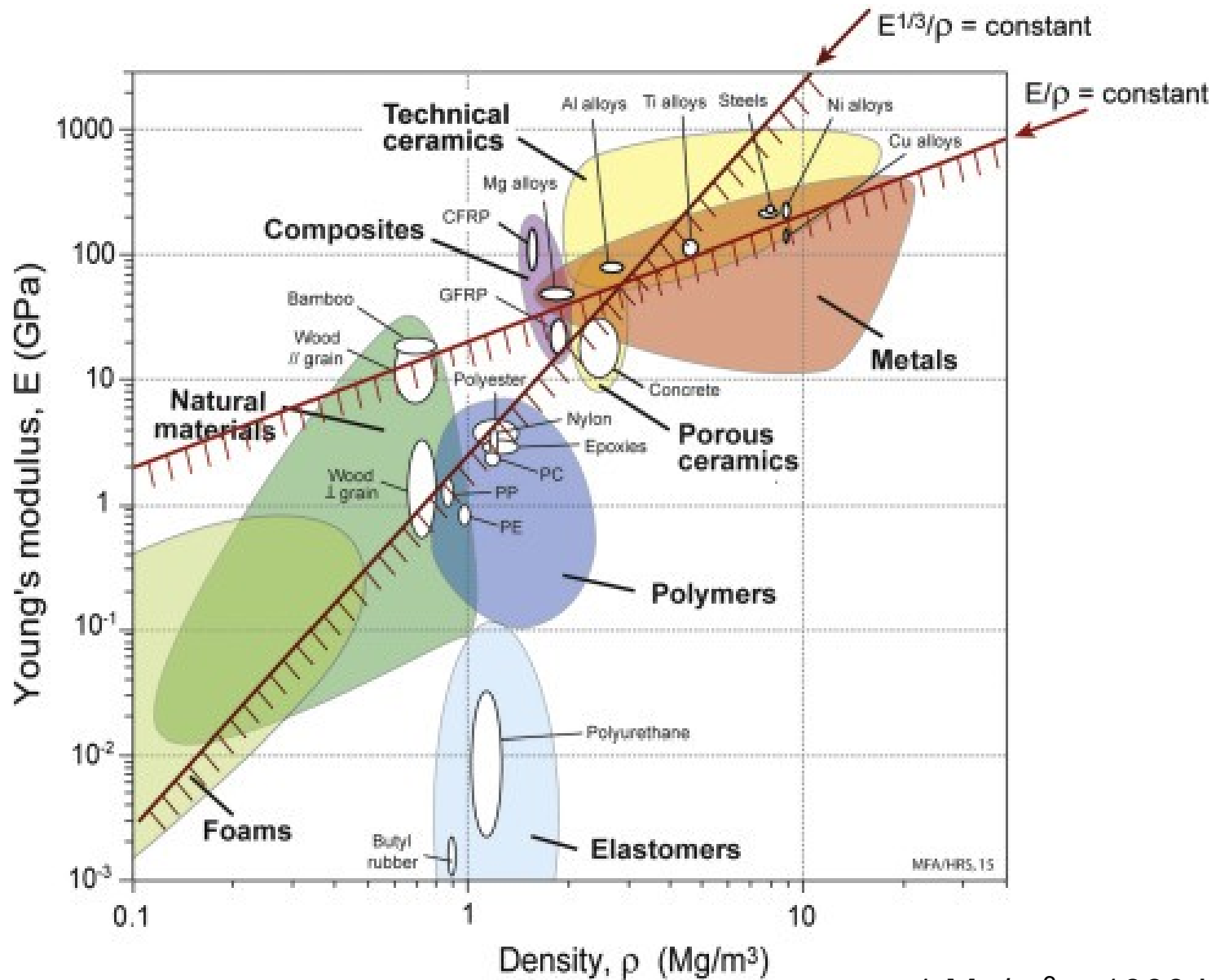
Υλικό	Αντοχή διαρροής MPa (ksi)	Εφελκυστική αντοχή MPa (ksi)	Ολκιμότητα %EL (σε 50mm)
Αλουμίνιο	35 (5)	90 (13)	40
Χαλκός	69 (10)	200 (29)	45
Ορείχαλκος (70Cu -30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Σίδηρος	130 (19)	262 (38)	45
Νικέλιο	138 (20)	480 (70)	40
Χάλυβας	180 (26)	380 (55)	25
Τιτάνιο	450 (65)	520 (75)	25
Μολυβδένιο	565 (82)	655 (95)	35

# Ashby plots



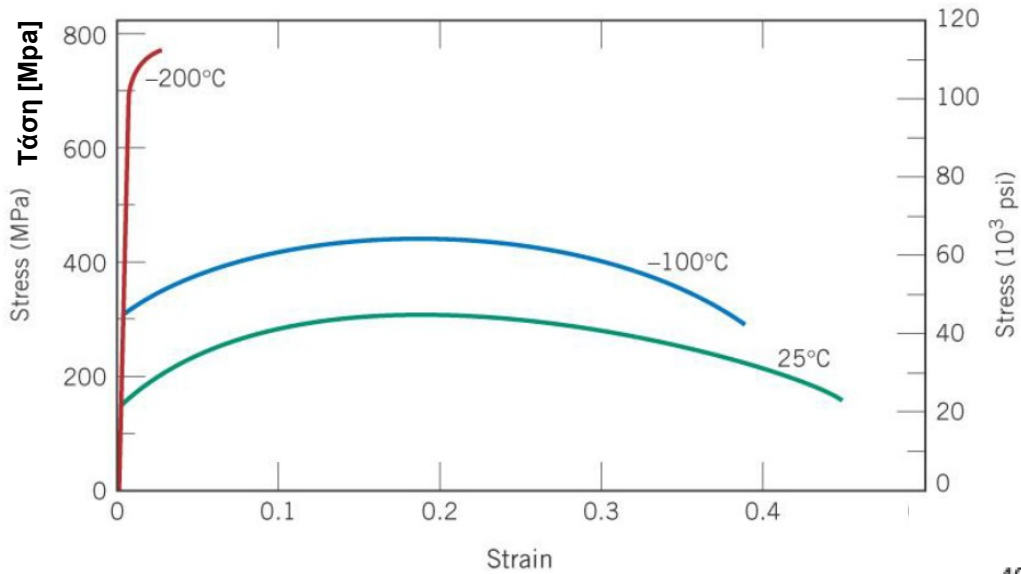
"Materials Selection in Mechanical Design" 3rd edition, by M.F. Ashby (Elsevier-Butterworth Heinemann, Oxford, 2005)





1 Mg/m<sup>3</sup>  $\approx$  1000 kg/m<sup>3</sup>

<https://www.proxom.net/material-selection/>

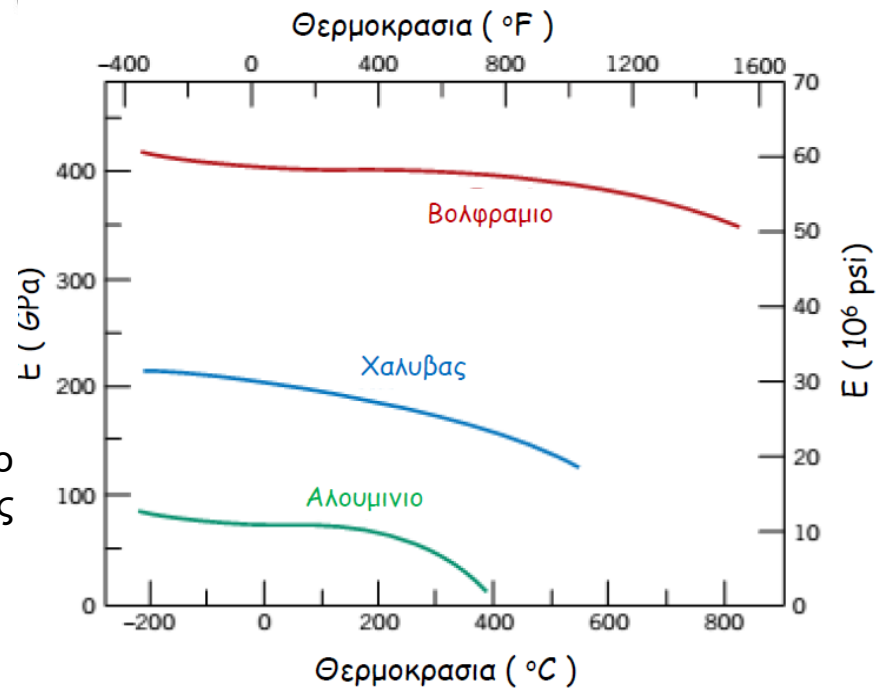


Ανηγμένη παραμόρφωση

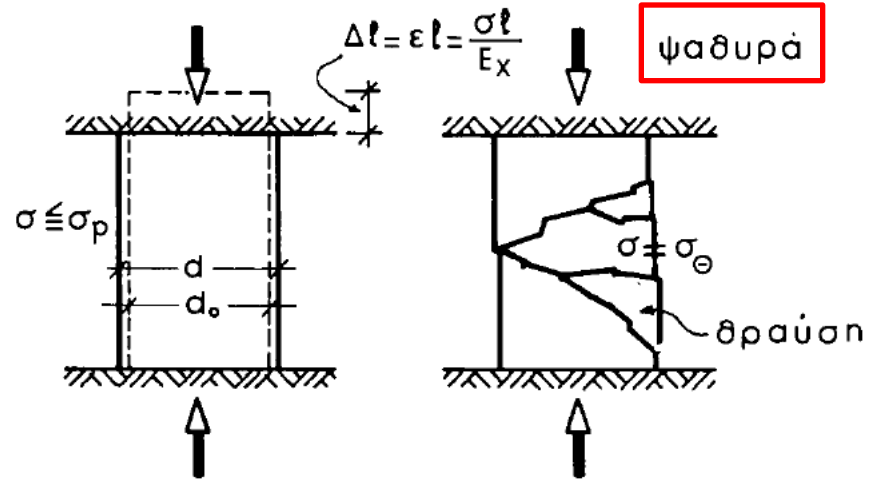
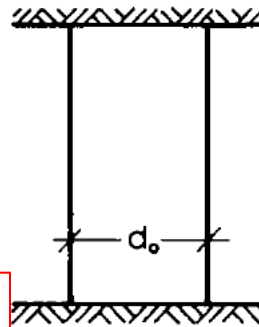
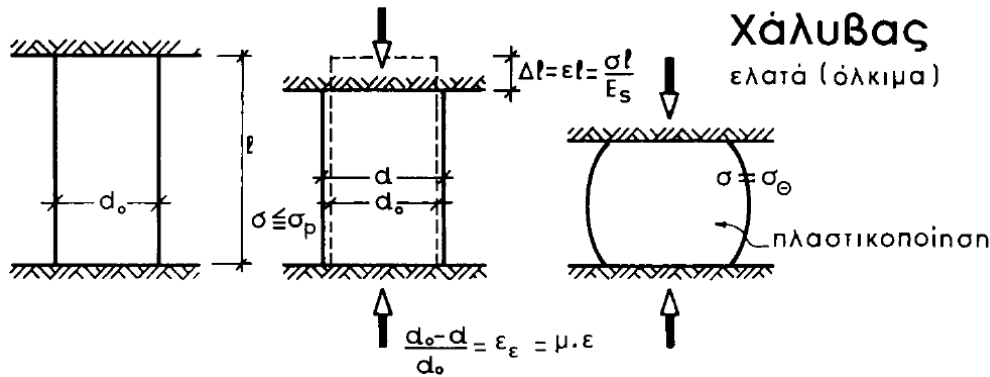
Επιρροή της θερμοκρασίας στον σίδηρο

Επιρροή της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας

## Επιρροή της θερμοκρασίας

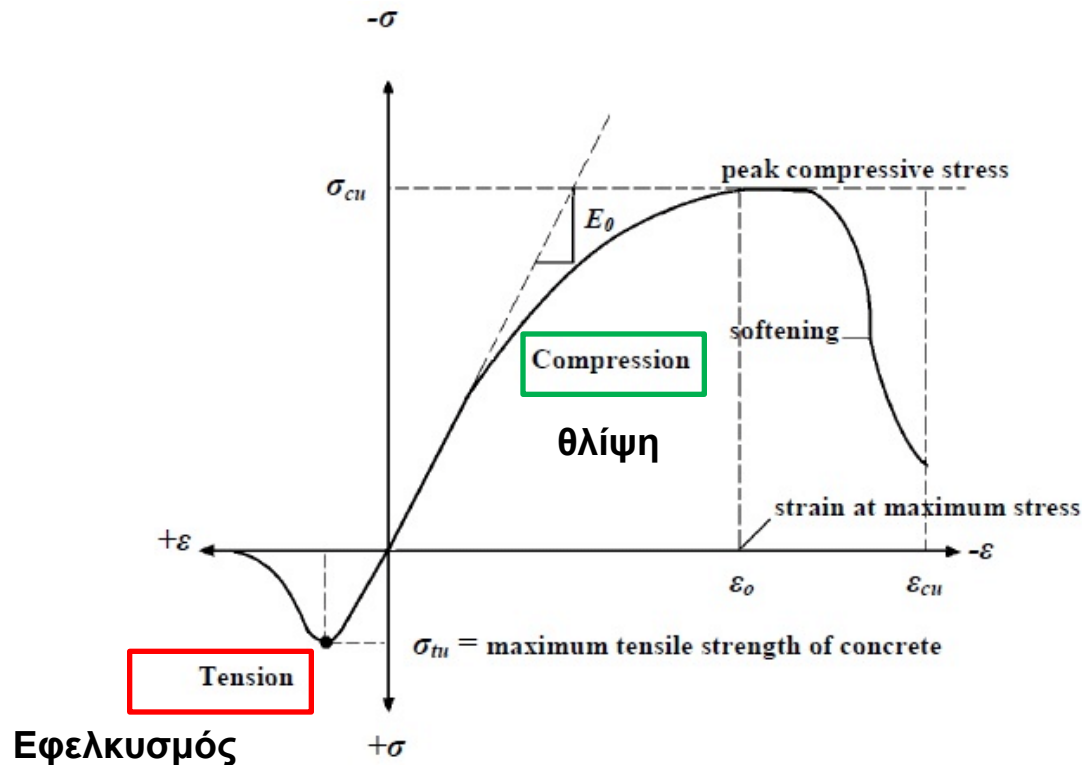


# 3. Μηχανική συμπεριφορά υλικών σε θλίψη



<https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000400003>

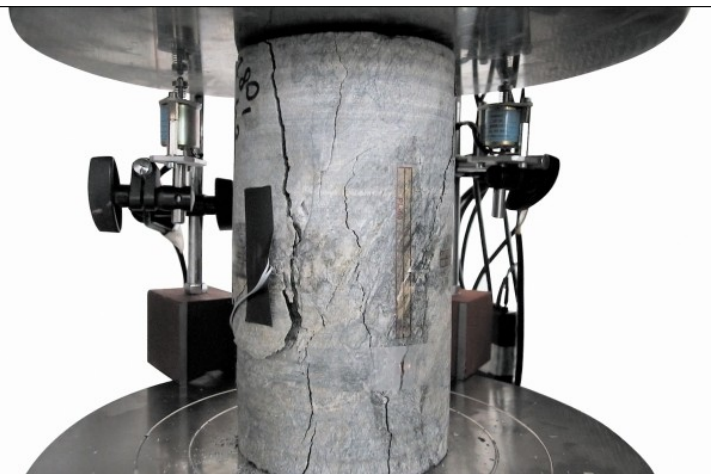
Για τα όλκιμα υλικά η καμπύλη τάση παραμόρφωσης είναι ίδια σε θλίψη και εφελκυσμό. Σε θλίψη δεν παρουσιάζουν στένωση [λαιμό], αλλά διογκώνονται. Τα ψαθυρά υλικά έχουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη και πολύ μικρότερη σε εφελκυσμό. Το μέτρο ελαστικότητας είναι το ίδιο σε θλίψη και εφελκυσμό.



Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για σκυρόδεμα

## Concrete Design Properties according to EN1992-1-1 ( $\gamma_c = 1.50, f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ )

Symbol	Description	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50
$f_{ck}$ (MPa)	Characteristic cylinder compressive strength	12	16	20	25	30	35	40
$f_{ck,cube}$ (MPa)	Characteristic cube compressive strength	15	20	25	30	37	45	50
$f_{cm}$ (MPa)	Mean compressive strength	20	24	28	33	38	43	48
$f_{ctm}$ (MPa)	Mean tensile strength	1.57	1.90	2.21	2.56	2.90	3.21	3.51
$E_{cm}$ (MPa)	Elastic modulus	27085	28608	29962	31476	32837	34077	35220

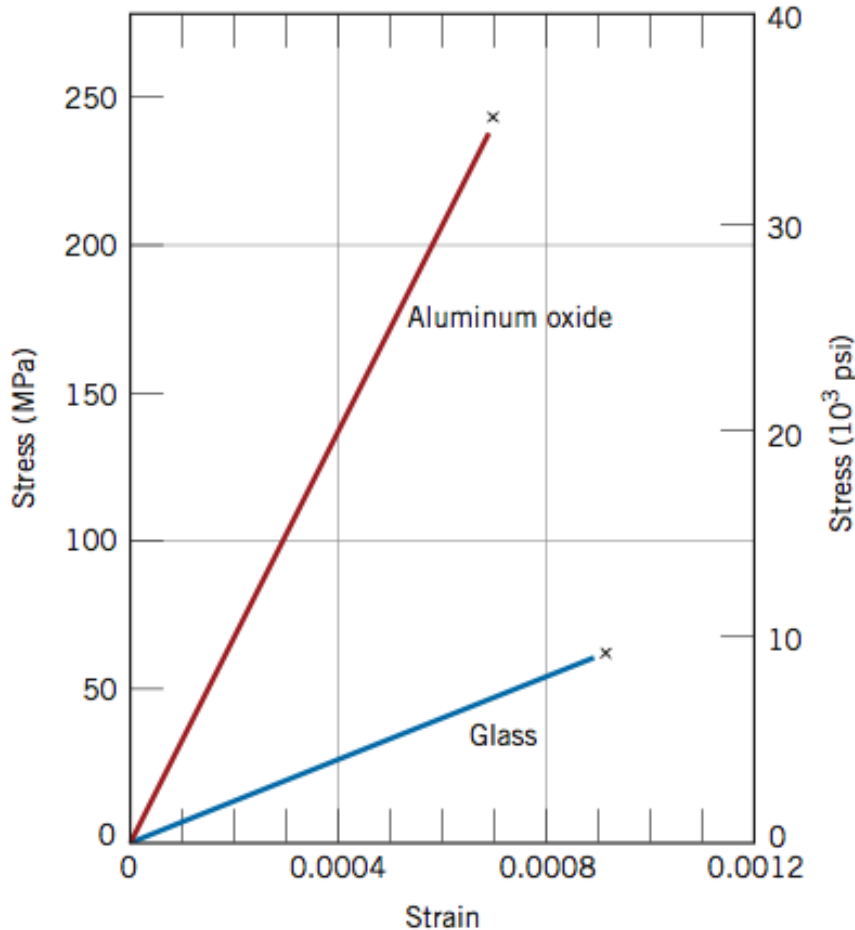


Κυλινδρικό δοκίμιο

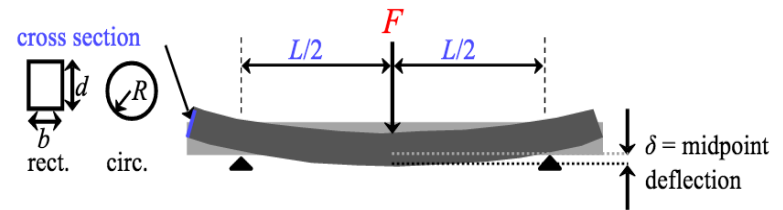


Κυβικό δοκίμιο

# 4. Μηχανική συμπεριφορά κεραμικών σε κάμψη

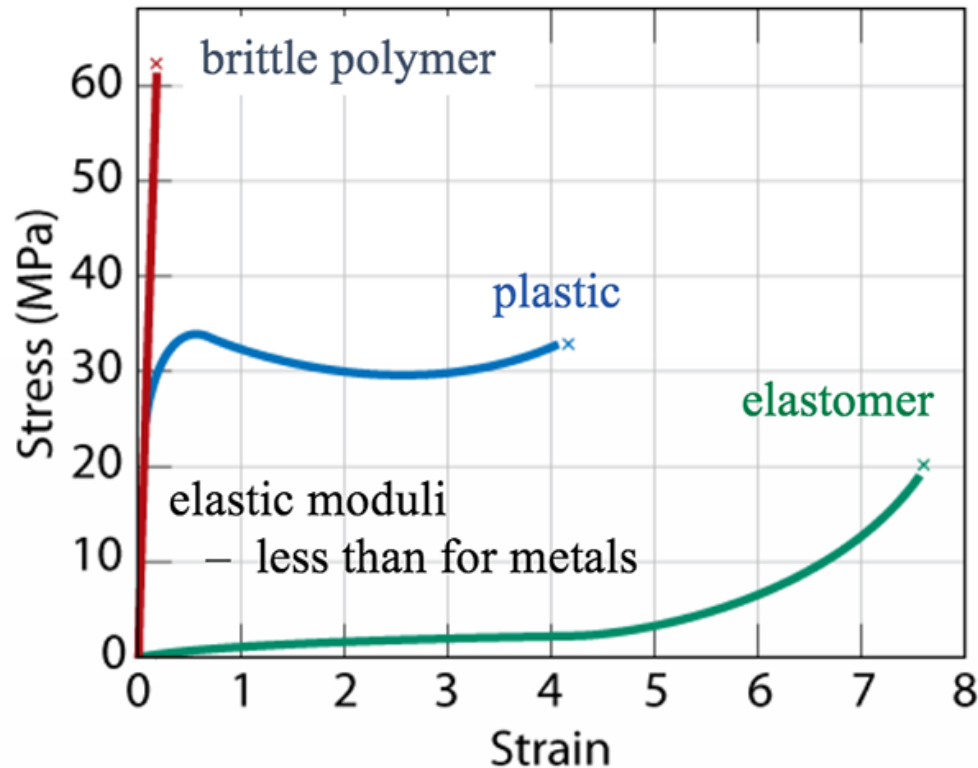


Τα κεραμικά υλικά είναι ψαθυρά και για το λόγο αυτό δύσκολα μπορούν να τοποθετηθούν στην πειραματική διάταξη χωρίς να υποστούν κάποια βλάβη. Ως εκ τούτου εν γένει δεν δοκιμάζονται σε εφελκυσμό αλλά σε κάμψη

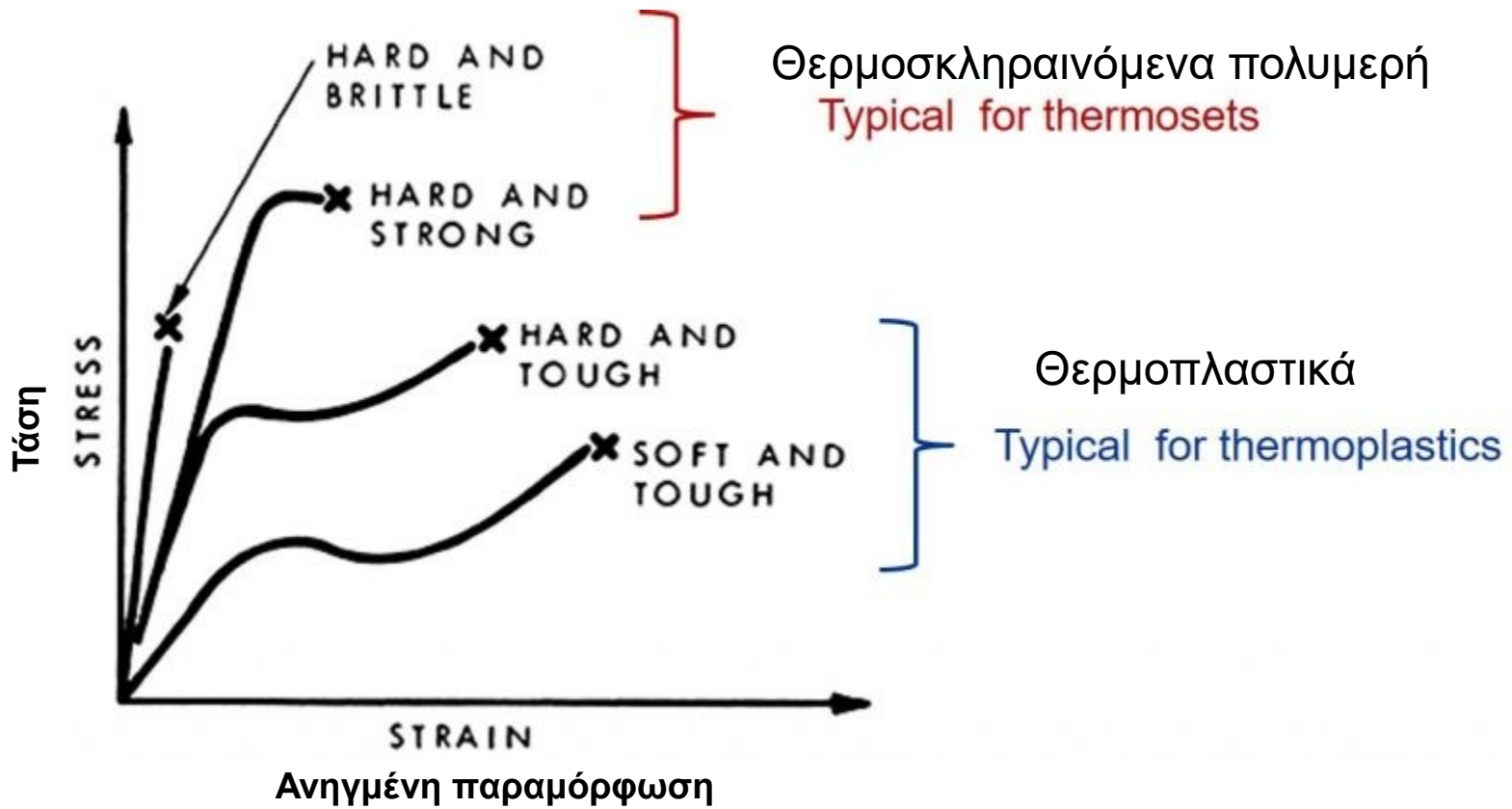


<https://www.e-education.psu.edu/matse81/node/2108>

## 5. Μηχανική συμπεριφορά πολυμερών

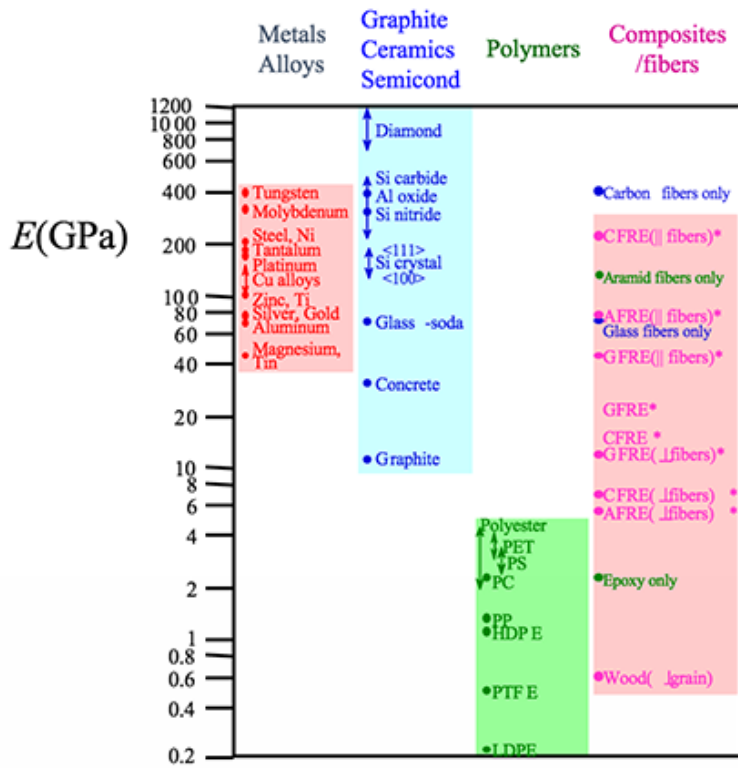


Ένα υψηλά ελαστικό πολυμερές διαθέτει μια ικανότητα να παραμορφωθεί περί τις 10 φορές το αρχικό του μήκος, πριν την θραύση, ενώ ένα μεταλλικό στοιχείο μόνο το 10% του αρχικού του μήκους, εντός του ελαστικού σταδίου, και δύο φορές το αρχικό μήκος εντός του πλαστικού σταδίου.

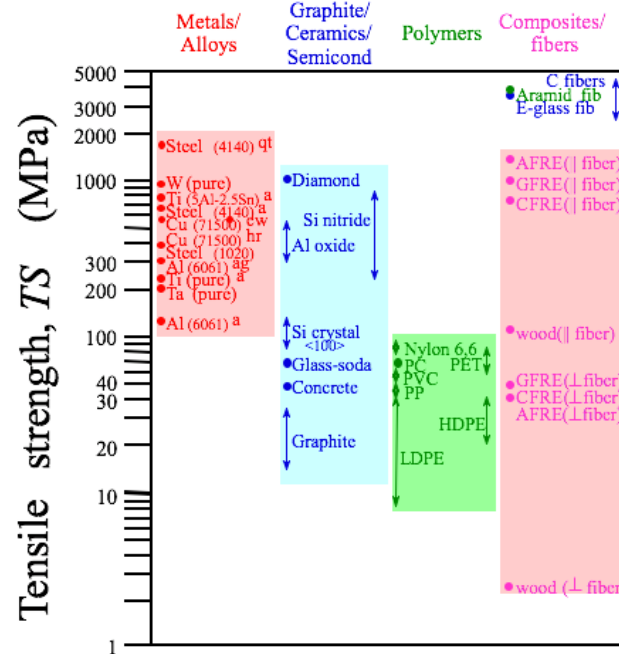


<https://polymerinnovationblog.com/characterization-thermosets-part-20-tensile-testing-part-one/>





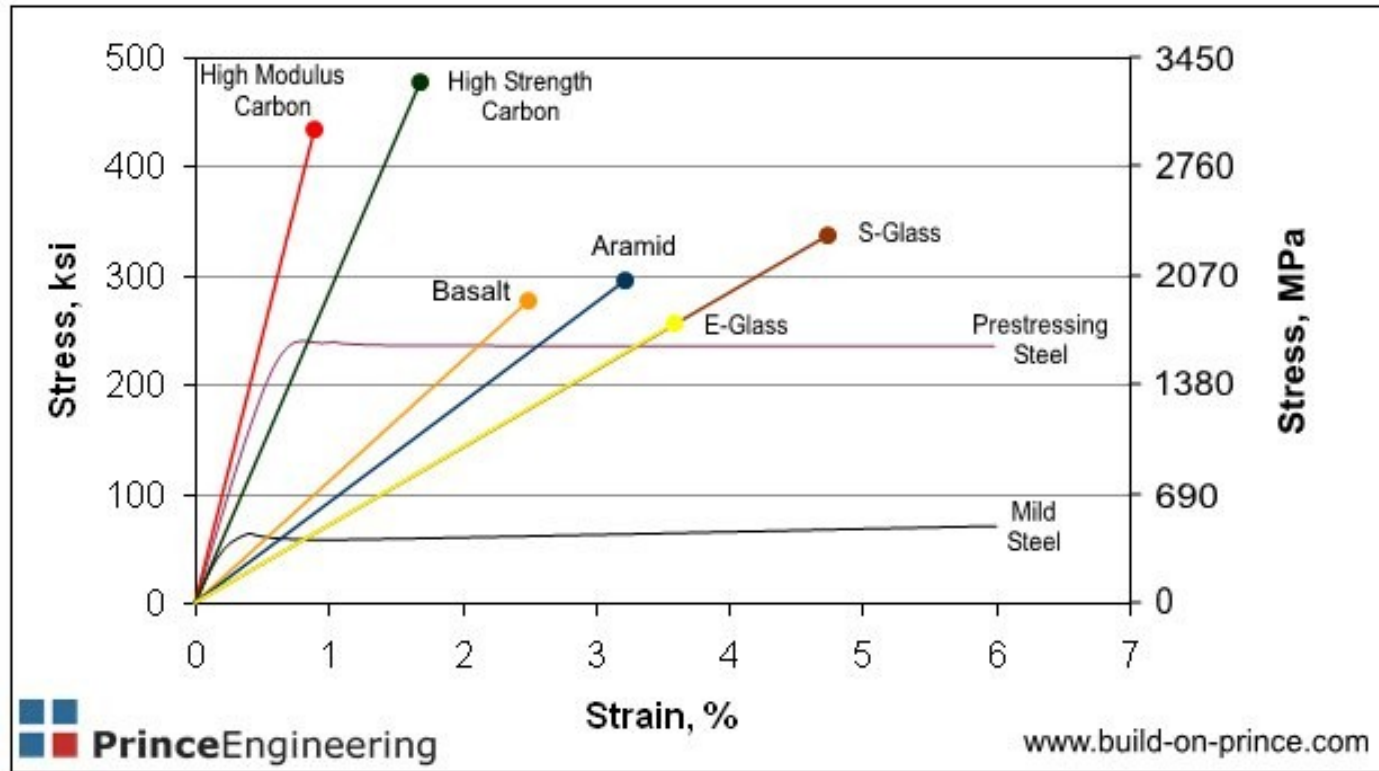
Based on data in Table B.2, *Callister & Rethwisch 5e*.  
 Composite data based on reinforced epoxy with 60 vol% of aligned carbon (CFRE), aramid (AFRE), or glass (GFRE) fibers.



### Room temperature values

Based on data in Table B4, *Callister & Rethwisch 5e*.  
 a = annealed  
 hr = hot rolled  
 ag = aged  
 cd = cold drawn  
 cw = cold worked  
 qt = quenched & tempered  
 AFRE, GFRE, & CFRE = aramid, glass, & carbon fiber-reinforced epoxy composites, with 60 vol% fibers.

## 6. Μηχανική συμπεριφορά σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών



1Ksi = 6,8947 MPa

<https://www.build-on-prince.com/frp-reinforcement.html>

Τρες	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> × 10 <sup>3</sup> )	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκ. Αντοχή (MPa)	Παραμόρφ.Αστοχίας (%)
<b>Ανθρακα</b>				
Υψηλής αντοχής	1.80	215-235	3500-4800	1.40-2.00
Πολύ υψηλής αντοχής	1.80	215-235	3500-6000	1.50-2.30
Υψηλού μέτρου ελαστ.	1.90	350-500	2500-3100	0.50-0.90
Πολύ υψηλού μέτρου ελαστ.	1.90	500-700	2100-2400	0.20-0.40
<b>Γυαλιού</b>				
Τύπου E	2.55	70-75	1900-3000	3.00-4.50
Τύπου S	2.45	85-90	3500-4800	4.50-5.50
<b>Αραμιδιού</b>				
Χαμηλού μέτρου ελαστ.	1.45	70-80	3500-4100	4.30-5.00
Υψηλού μέτρου ελαστ.	1.45	115-130	3500-4000	2.50-3.50
<b>Χάλυβας</b>	7.86	200	400-1700	12.0-25.0

fib, 2001. Externally Bonded FRP Reinforcement for R.C. Structures, fib Bul. No 14, Lausanne.

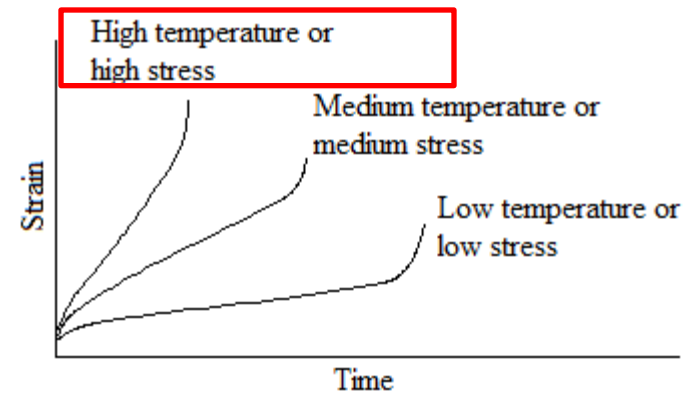
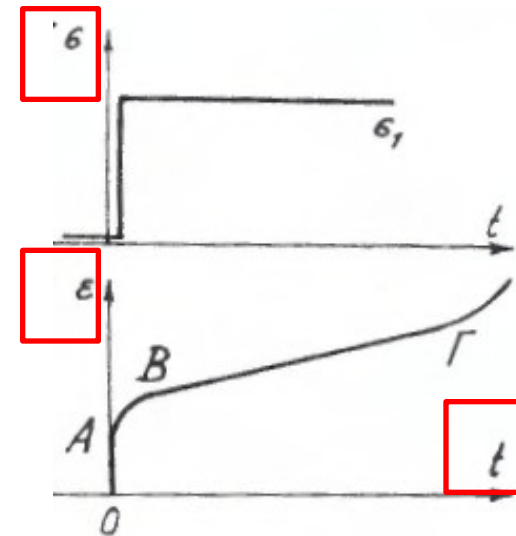
# 7. Μηχανική συμπεριφορά μεταβλητή στον χρόνο

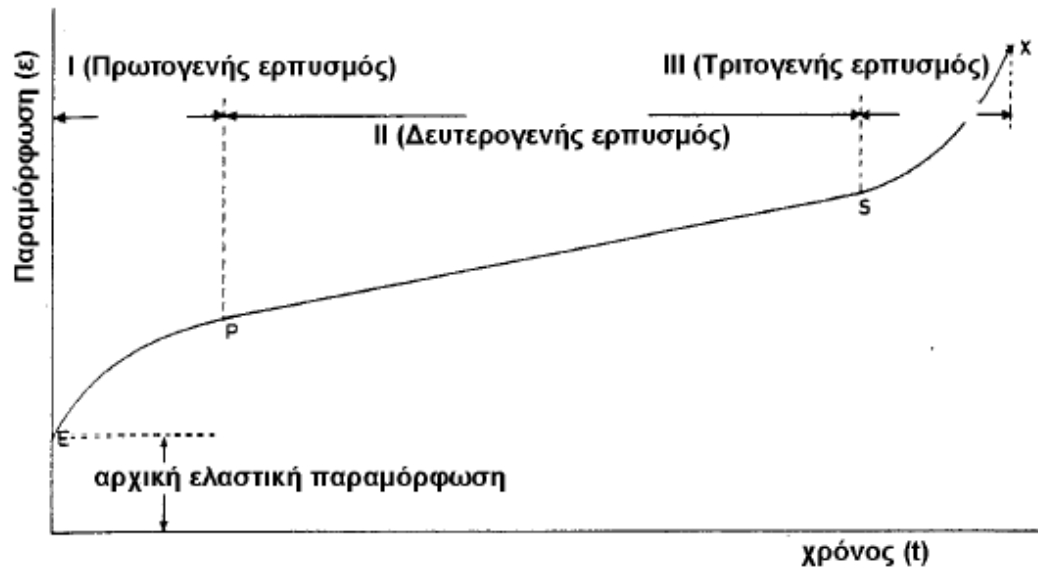
## (α) Ερπυσμός [creep]

Η συνεχής μεταβολή της παραμόρφωσης, ενώ το ασκούμενο φορτίο παραμένει σταθερό και κάτω από την τιμή διαρροής του υλικού.

Ο ερπυσμός εξαρτάται και από την θερμοκρασία. Αύξηση της τάσης σε συνδυασμό με την αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε σημαντική αύξηση ερπυστικά φαινόμενα.

Υλικά που εμφανίζουν ερπυσμό: μέταλλα, το έδαφος, στοιχεία που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες.





### Φάσεις ερπυστικού φαινομένου

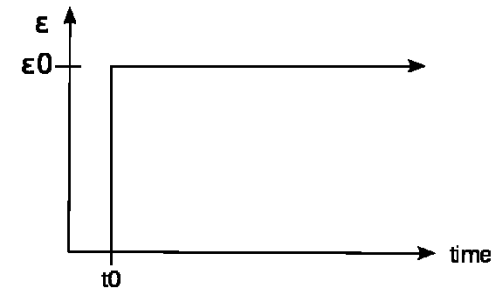
(α) Πρωτογενής ερπυσμός, όπου η παραμόρφωση αυξάνεται σταθερά με τον χρόνο.

(β) Δευτερογενής ερπυσμός, ο ρυθμός παραμόρφωσης παραμένει σταθερά αυξητικός με τον χρόνο.

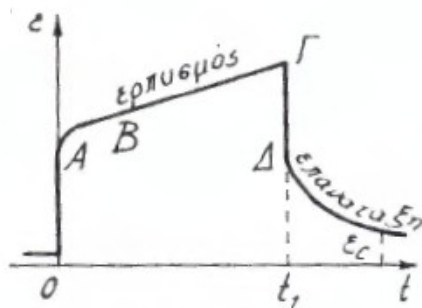
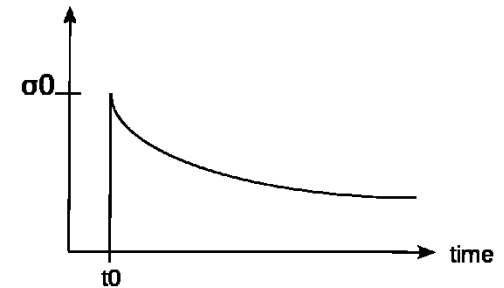
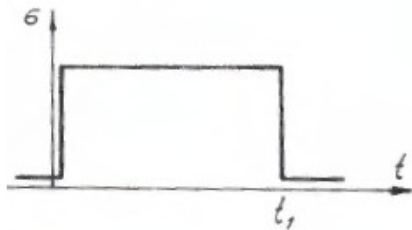
(γ) Τριτογενής ερπυσμός, επιταχυνόμενη αύξηση των παραμορφώσεων έως την θραύση του υλικού.

## (β) Χαλάρωση [relaxation]

Η συνεχής μείωση με τον χρόνο της τάσης ενός υλικού που υποβάλλεται σε σταθερή παράμορφωση.



## (γ) Επανάταξη



Το φαινόμενο όπου ένα υλικό, αφού προηγουμένως, έχει υποστεί παραμόρφωση, επανέρχεται-επανατάσσεται, όταν αποφορτιστεί πλήρως.

## 8. Επιλογή υλικών

Ανάλογα με τις **λειτουργικές ανάγκες**, το **επίπεδο φόρτισης**, τις **περιβαλλοντικές συνθήκες**, και την **χρήση του φορέα που θέλουμε να κατασκευάσουμε**, σε συνδυασμό με τις οικονομικές δυνατότητες, επιλέγουμε, εναλλακτικά, ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά:

**(α) Υλικά με υψηλή αντοχή και χαμηλή ικανότητα παραμόρφωσης.**

**(β) Υλικά με χαμηλή αντοχή και υψηλή ικανότητα παραμόρφωσης.**

Επιθυμητή η όσο μεγαλύτερη υψηλή αντοχή σε συνδυασμό με υψηλή ικανότητα παραμόρφωσης.

# Σημείωμα Αναφοράς σε έργα Τρίτων

## Βιβλιογραφία

1. Beer F., Johnston E.R., Mazurek D.: Τεχνική Μηχανική-Στατική. Εκδόσεις Τζιόλα. Έκδ. 11<sup>η</sup> 2019, [κωδ. Εύδοξος 59421317].
2. Gere J., Goodno B.: Αντοχή Υλικών. Εκδόσεις Τζιόλα. Έκδ. 9<sup>η</sup> 2021, [κωδ. Εύδοξος 86055253].
3. Nash W.: Στατική και Μηχανική των Υλικών. Εκδόσεις Τζιόλα. Έκδ. 1<sup>η</sup> 2002, [κωδ. Εύδοξος 18549012].
4. Π.Α. Βουθούνης: Τεχνική Μηχανική. Εκδόσεις Α. Βουθούνη. Έκδ. 10<sup>η</sup> 2019, [ISBN 978-618-83280-4-4].
5. F.P. Beer, E.R. Johnston Jr., J.T. Wolf, D.F. Mazuerk: Μηχανική των Υλικών. Εκδόσεις Τζιόλα. Έκδ. 2012-2019. [ISBN: 978-960-418-381-4]. Ελληνική μετάφραση.
6. Π.Α. Βουθούνης: Στατική-Μηχανική του απαραμόρφωτου στερεού. Εκδόσεις Α. Βουθούνη. Έκδ. 6<sup>η</sup> 2017, [ISBN 978-618-83280-1-3].
7. Π.Α. Βουθούνης: Αντοχή των Υλικών-Μηχανική του παραμορφώσιμου στερεού. Εκδόσεις Α. Βουθούνη. Έκδ. 4<sup>η</sup> 2019, [ISBN 978-618-83280-3-7].
8. Μ. Ματσιοκούδη-Ηλιοπούλου: Τεχνική Μηχανική: Αρχές Στατικής και Εισαγωγή στην Θεωρία των Παραμορφώσιμων Σωμάτων. Εκδόσεις Ζυγός. Έκδοση 1991/2016. [ISBN13: 97896080652533], [κωδ. Εύδοξος 1753].
9. Γ. Γκρός. Μηχανική. Τόμος Α. Ευγενείδιο Ίδρυμα, 1976.



# Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.

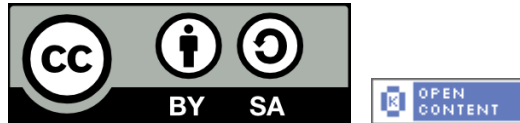
Άνθιμος Σ. Αναστασιάδης. «Τεχνική Μηχανική: Στατική και Αντοχή Υλικών». Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας. Πολυτεχνική Σχολή. Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων & Συστημάτων. Έκδοση 1<sup>η</sup>, Κοζάνη, 2020.

Διαθέσιμο από την διαδικτυακή διεύθυνση:

<https://eclass.uowm.gr/courses/MRE250/>

# Σημείωμα αδειοδότησης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Παρόμοια Διανομή [<https://creativecommons.org/>] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



## Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να περιλαμβάνει τα παρακάτω:

- ❖ Σημείωμα Αναφοράς
- ❖ Σημείωμα Αδειοδότησης
- ❖ Δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- ❖ Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει), μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

# Τέλος Ενότητας

## Μηχανική συμπεριφορά υλικών

