

Σημειώσεις Εργαστηριακής Άσκησης  
 Εφελκυσμός χαλύβδινης ράβδου

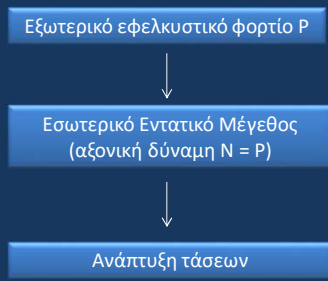
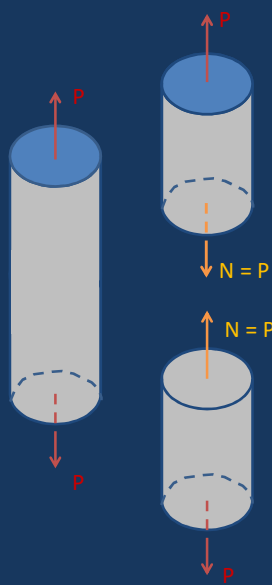
Δρ. Σωτήρης Δέμης

Πολιτικός Μηχανικός  
 (Πανεπιστημιακός Υπότροφος)



1

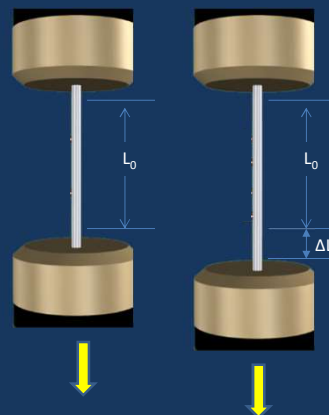
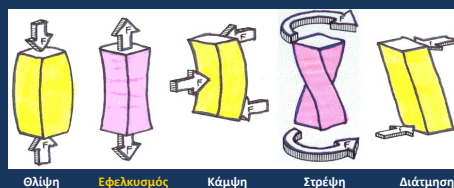
Το υλικό «πονάει». Πως; Πόσο;



2

### Εισαγωγή στη Δοκιμή Εφελκυσμού

- Δοκίμιο στερεωμένο ακλόνητα στο πάνω άκρο.
- Στο κάτω άκρο εφαρμόζεται εφελκυστική δύναμη που προκαλεί επιμήκυνση δοκιμίου.
- Η καταγραφή της μεταβολής του μήκους μπορεί να γίνει με μηκυσιοόμετρα σε ένα σταθερό αρχικό μήκος.



3

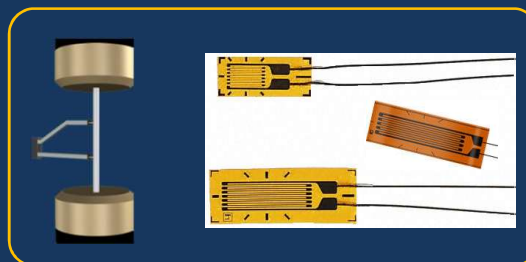
### Η Ορθή Παραμόρφωση ..

- Η μήκυνση ( $\Delta L$ ) δεν δίνει από μόνη της την αίσθηση του πόσο καταπονείται το υλικό του δοκιμίου, εκτός εάν συγκριθεί με το αρχικό μήκος ( $L$ ).



#### Ορθή παραμόρφωση ( $\Delta L/L$ )

- Αδιάστατο μέγεθος, δεκαδικός ή %, γενικά πολύ μικρός (0.1 %).
- % μεταβολή διαστάσεων στην αξονική διεύθυνση (μήκους)
- Φυσική σημασία: "πόσο" καταπονείται/αποκρίνεται το υλικό/δοκίμιο όταν του ασκηθεί δύναμη  $P$

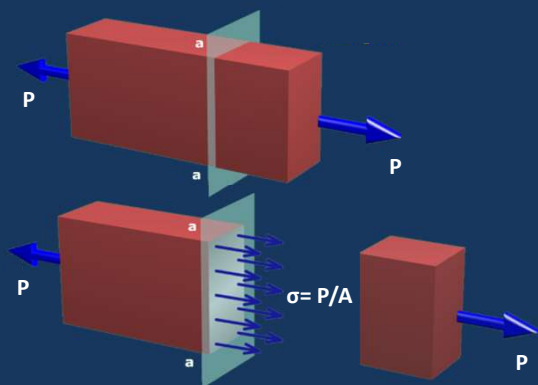


4

## Η Τάση ..

- Άρα το υλικό υπό τη φόρτιση της δύναμης P, επιμηκύνεται (παραμορφώνεται).
- Από πλευράς καταπόνησης του υλικού τι μας ενδιαφέρει πιο πολύ? Δύναμη που ασκείται, ή **Τάση** που αυτή προκαλεί?

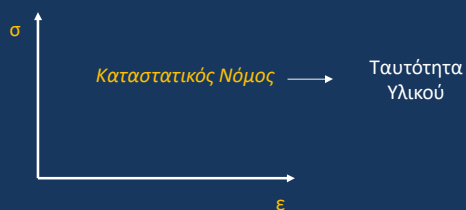
- Τάση σε ένα σημείο του υλικού: εσωτερική δύναμη που αναπτύσσεται στην περιοχή του σημείου ανά μονάδα επιφάνειας γύρω από αυτό.



Η τάση έχει την έννοια της εσωτερικής αντίστασης του υλικού, όταν το υλικό αλλάζει σχήμα λόγω επιβολής φορτίου.

5

## Σχέση Τάσης - Παραμόρφωσης

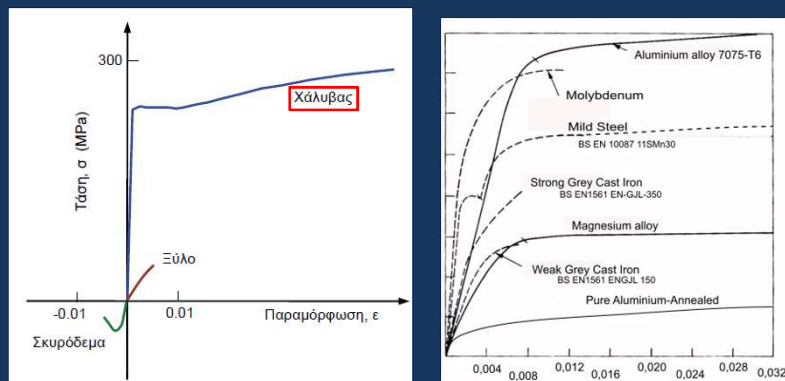


- Σχέση μεταξύ τάσης ( $\sigma$ ) και παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) είναι ανεξάρτητη από διαστάσεις δοκμίου.
- $\sigma$ - $\epsilon$ , σχετίζονται με τρόπο που καθορίζει το ίδιο το υλικό (π.χ. Λάστιχο/σύρμα ιδίων διαστάσεων/διατομής, για δεδομένη δύναμη,  $\epsilon$ ?) Είναι **χαρακτηριστικά του υλικού** (περιγράφουν την μηχανική συμπεριφορά του υλικού)
- Προσδιορίζεται πειραματικά με τη δοκιμή εφελκυσμού

Προσοχή: Μονάδες Τάσεις MPa ( $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N} / \text{mm}^2$ )

6

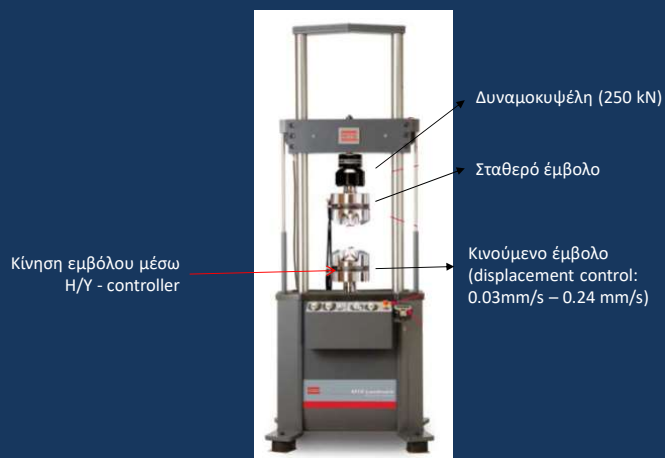
## Σχέση Τάσης - Παραμόρφωσης



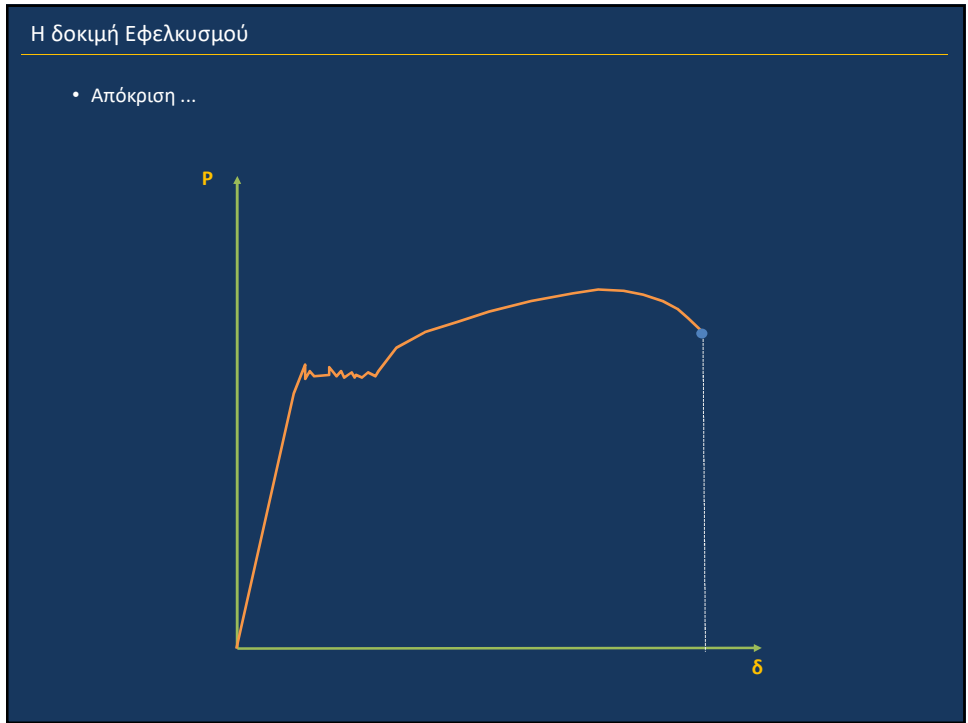
7

## Η δοκιμή Εφελκυσμού

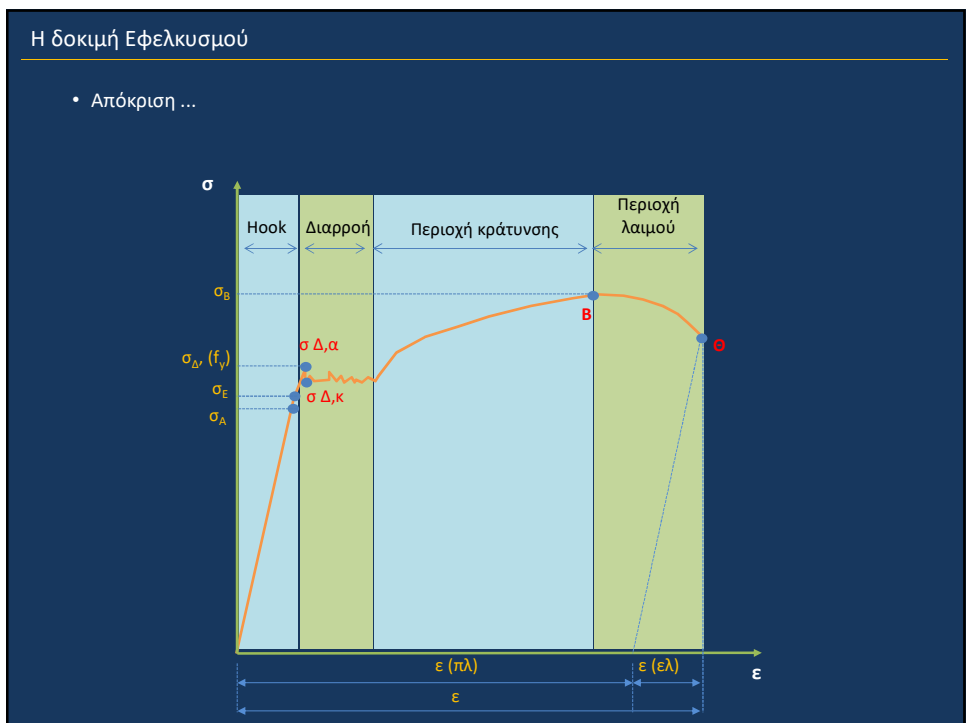
- Δοκίμιο στερεωμένο ακλόνητα στο πάνω άκρο.
- Στο κάτω άκρο εφαρμόζεται δεδομένος ρυθμός επιμήκυνσης (mm/sec), και μέσω δυναμοκυψέλης μέτρηση δύναμης
- Υποθέτουμε ότι το υλικό είναι ομογενές και ισότροπο



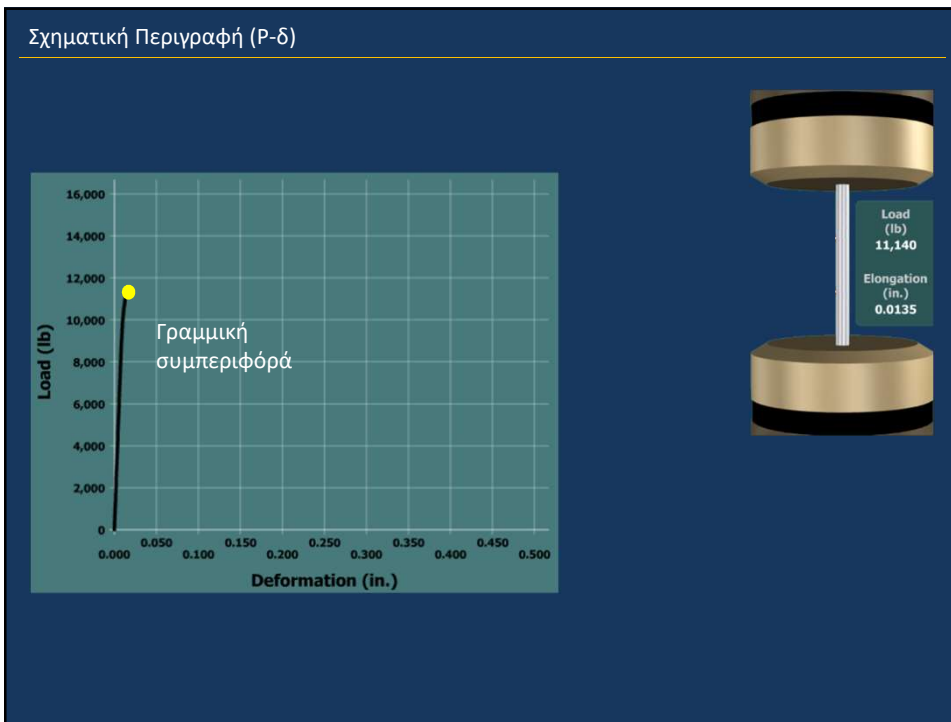
8



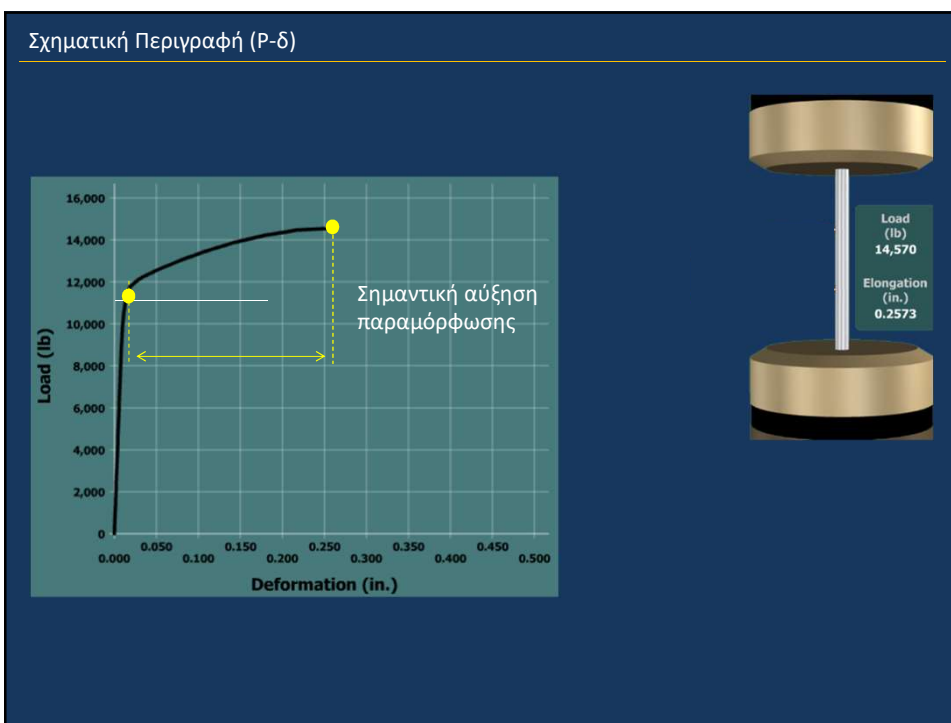
9



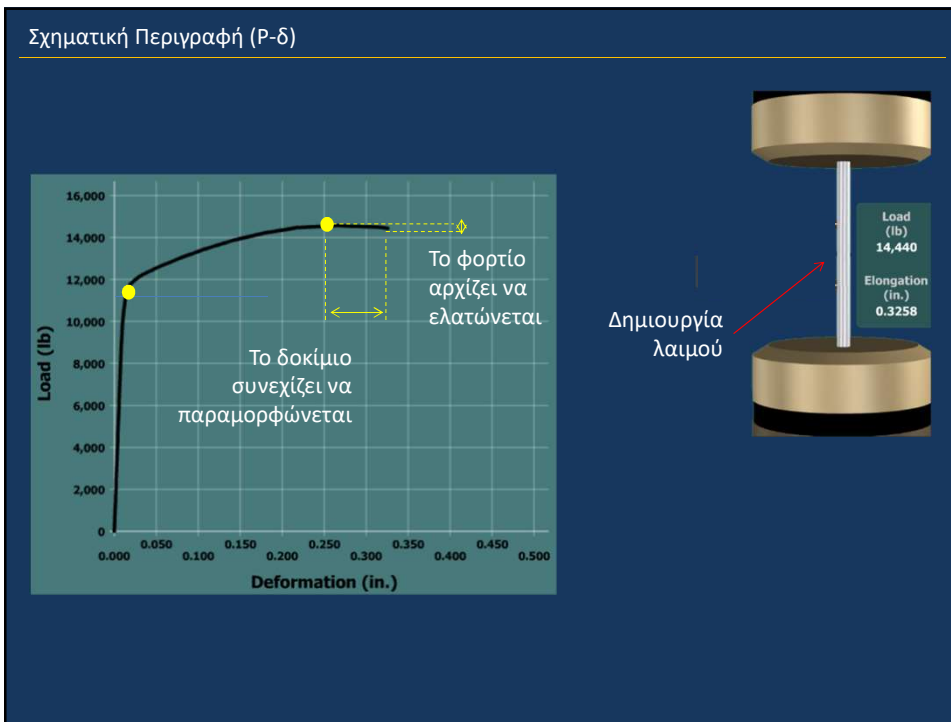
10



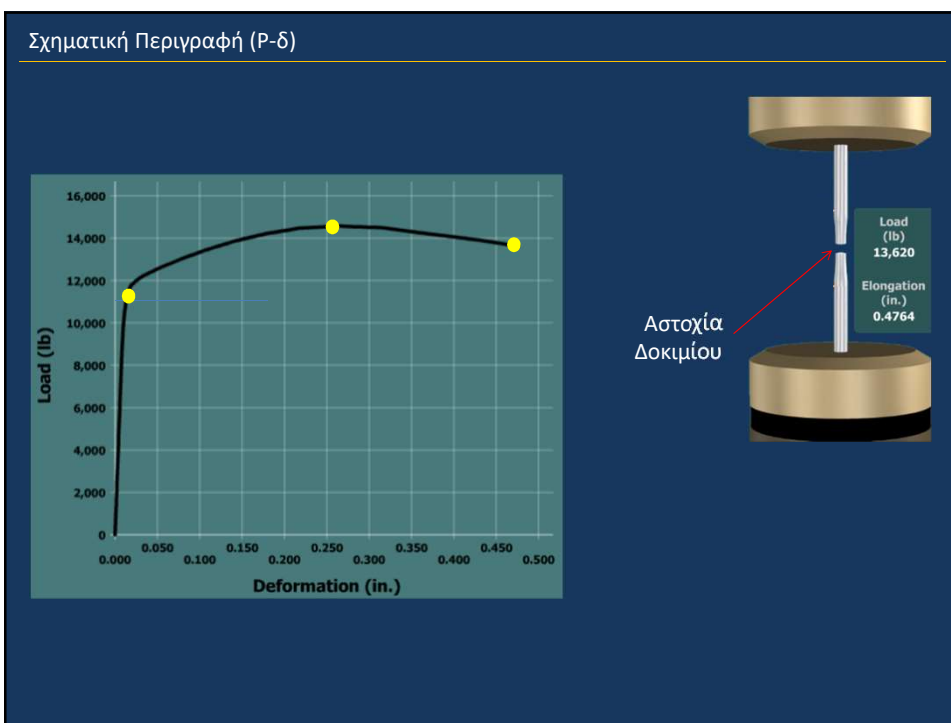
11



12



13



14

### Διάγραμμα $\sigma$ - $\epsilon$ – Όριο Αναλογίας, όριο Ελαστικότητας

- Δοκίμιο επιμηκύνεται σταθερά με το χρόνο
- Αυξάνεται το φορτίο (τάση), αυξάνεται και η επιμήκυνση (παραμόρφωση)

- Για σχετικά μικρές  $\epsilon$ , γραμμική σχέση  $\sigma$ - $\epsilon$
- Γραμμική-Ελαστική συμπεριφορά
- Ελαστικές παραμορφώσεις
- Ισχύει ο Νόμος του Hooke

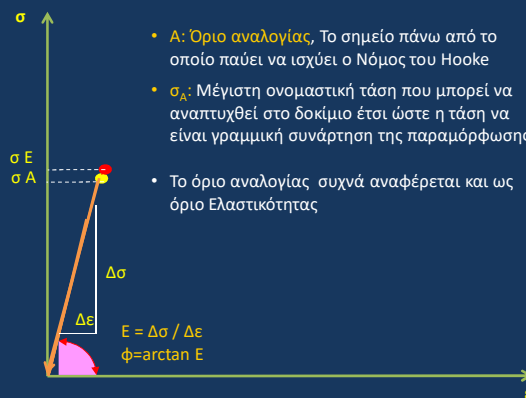
$$\sigma = E \epsilon$$

E: Μέτρο Ελαστικότητας

#### • Χαρακτηριστική ιδιότητα υλικού

- Για περισσότερα υλικά το E αλλά και η συμπεριφορά υπό φόρτιση **είναι ανεξάρτητα διεύθυνσης φόρτισης (ΙΣΟΤΡΟΠΑ ΥΛΙΚΑ)**

- **Φυσική σημασία:** μέτρο δυσκολίας ή ευκολίας με την οποία κάθε υλικό παραμορφώνεται όταν φορτίζεται



- **A:** Όριο αναλογίας, Το σημείο πάνω από το οποίο παύει να ισχύει ο Νόμος του Hooke
- $\sigma_A$ : Μέγιστη ονομαστική τάση που μπορεί να αναπτυχθεί στο δοκίμιο έτσι ώστε η τάση να είναι γραμμική συνάρτηση της παραμόρφωσης

- Το όριο αναλογίας συχνά αναφέρεται και ως όριο Ελαστικότητας

- **E:** Όριο ελαστικότητας (στον δομικό χάλυβα συνήθως συμπίπτει με το όριο αναλογίας)

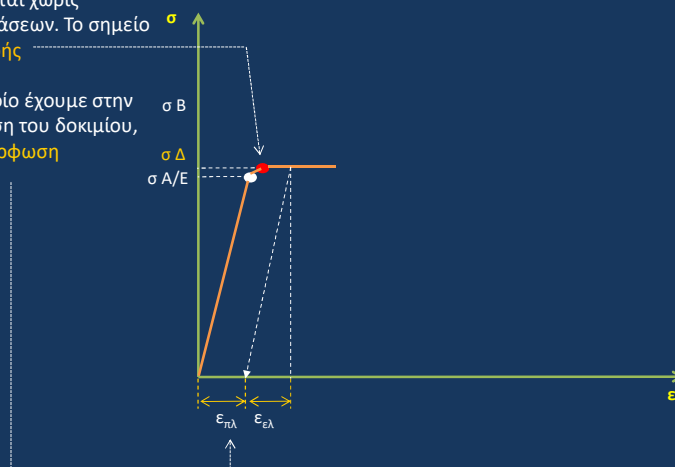
- $\sigma_E$ : Μέγιστη ονομαστική τάση που μπορεί να αναπτυχθεί στο δοκίμιο χωρίς να παρουσιαστούν μόνιμες παραμορφώσεις

15

### Διάγραμμα $\sigma$ - $\epsilon$ – Όριο Διαρροής

- Από κάποια τιμή της τάσης και μετά οι παραμορφώσεις αυξάνονται χωρίς ιδιαίτερη μεταβολή των τάσεων. Το σημείο αυτό είναι το **όριο διαρροής**

- Το σημείο πέρα από το οποίο έχουμε στην ουσία, μετά την αποφόρτιση του δοκιμίου, μετρήσιμη **μόνιμη παραμόρφωση**



- Το υλικό "ρέει" υπό σταθερή τάση

16



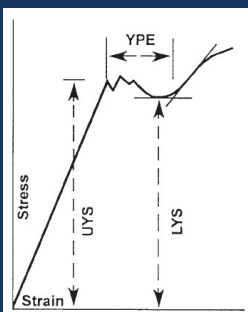
Διάγραμμα σ-ε – Όριο Διαρροής

- Συνήθως στον Δομικό Χάλυβα έχουμε έντονη πτώση τάσης => άνω και κάτω όριο διαρροής
- Αυτή η “μη ομαλή” περιοχή δηλώνει μη ομοιόμορφη διαρροή στο μήκος του δοκίμιου.
- Η διαρροή ξεκινά από μία μικρή περιοχή “Ludders” και επεκτείνεται σε όλο το δοκίμιο.
- Μετά από κάποια ολική παραμόρφωση, το υλικό για την παραπέρα παραμόρφωση του απαιτεί μεγαλύτερη τάση
- Γενικά στον χάλυβα η τάση διαρροής είναι πολύ κοντά στο όριο αναλογίας

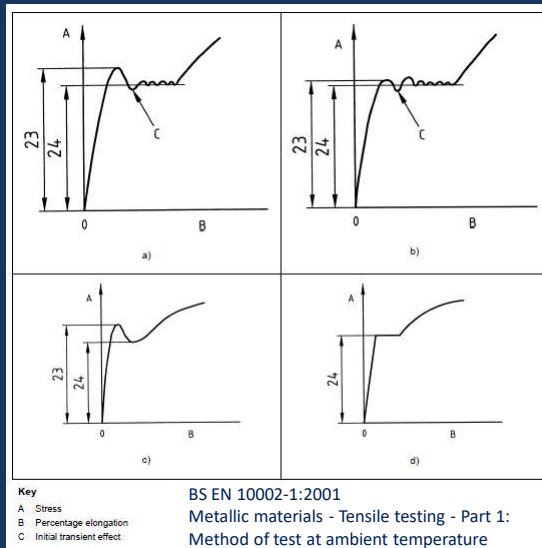


17

Διάγραμμα σ-ε – Όριο Διαρροής



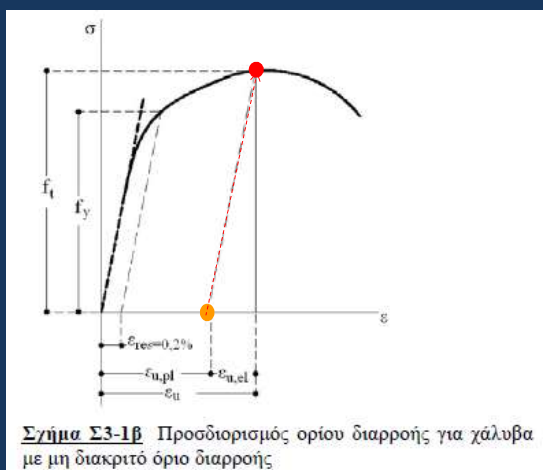
ASTM E 8 – 04 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials<sup>1</sup>



18

### Συμβατικό όριο διαρροής

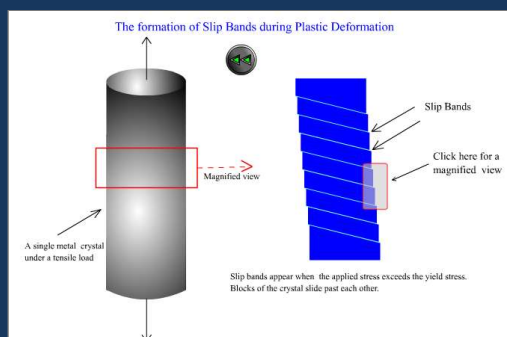
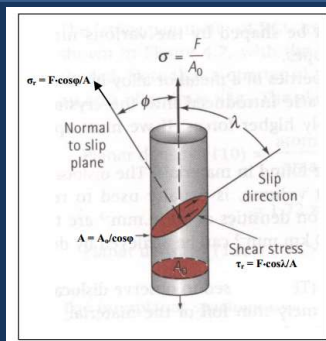
- Σε άλλα υλικά όπως ο χάλυβας υψηλής αντοχής ή το αλουμίνιο το όριο διαρροής είναι δύσκολο να προσεγγιστεί
- Συμβατικό (ή τεχνητό) όριο διαρροής μπορεί να υπολογισθεί γραφικά για 0,2% παραμόρφωση



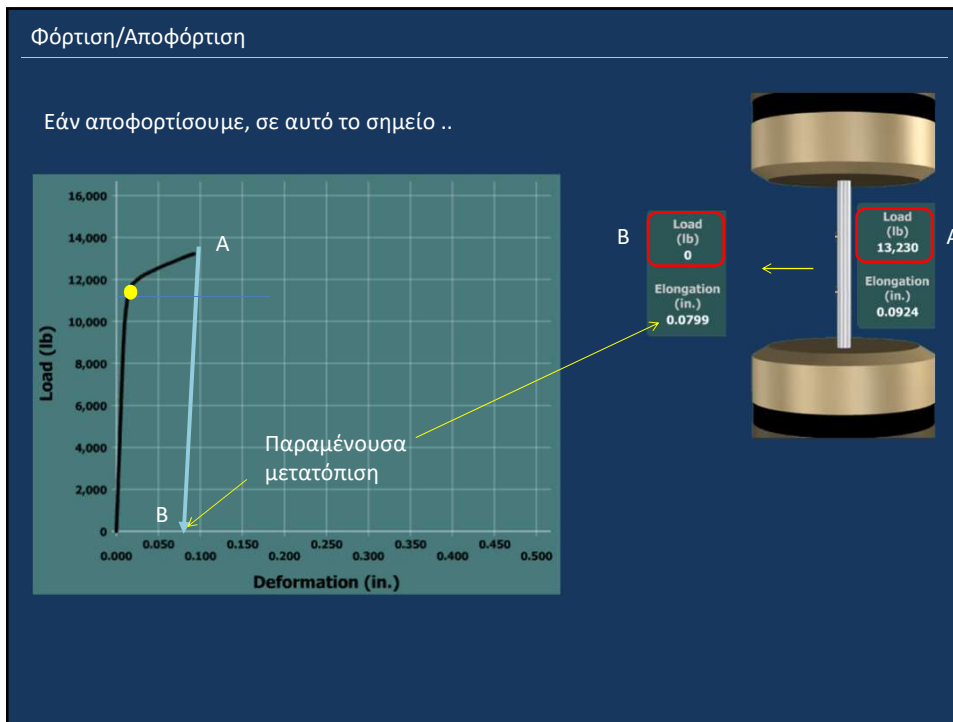
19

### Γιατί διαρρέει το υλικό (ρόλος διατμητικών τάσεων)?

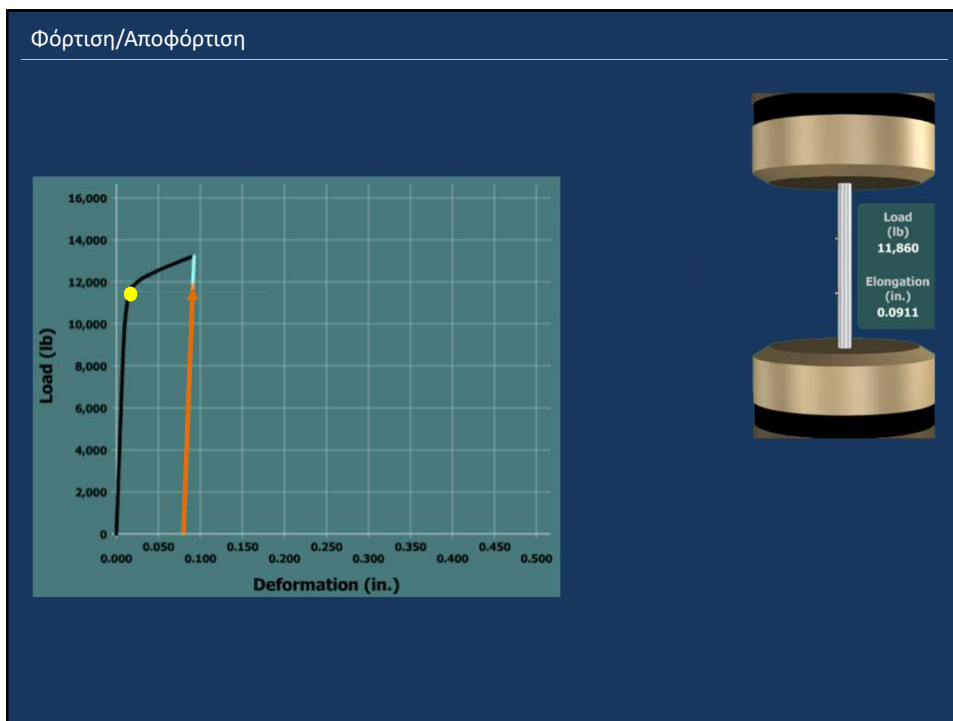
- Τόσο η μέγιστη ορθή όσο και η διατμητική τάση είναι καθοριστική για σχεδιασμό δομικών στοιχείου σε εφελκυσμό.
- Σε γενικές γραμμές στα όλκιμα υλικά, η μέγιστη διατμητική τάση λαμβάνεται ως κριτήριο, λόγω του ότι όταν οι διατμητικές τάσεις ξεπεράσουν ένα κρίσιμο όριο, το υλικό αρχίζει να ρέει.
- η πλαστική παραμόρφωση των μεταλλικών υλικών (σε μακροσκοπική κλίμακα) συντελείται με την ολίσθηση κρυσταλλικών επιπέδων (σε μικροσκοπική κλίμακα) μέσω διατμητικών τάσεων



20

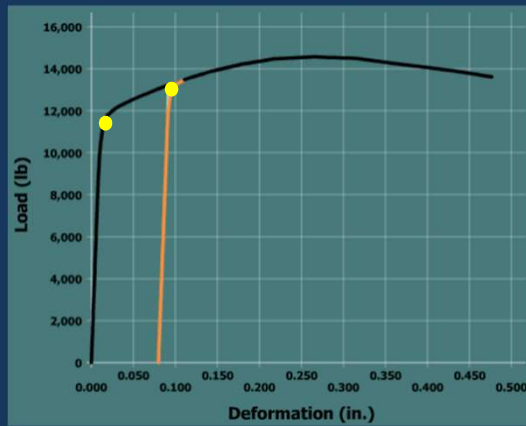


21



22

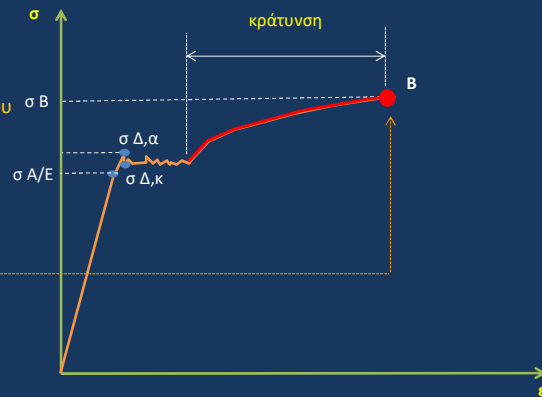
## Φόρτιση/Αποφόρτιση



23

## Διάγραμμα σ-ε – Κράτνση

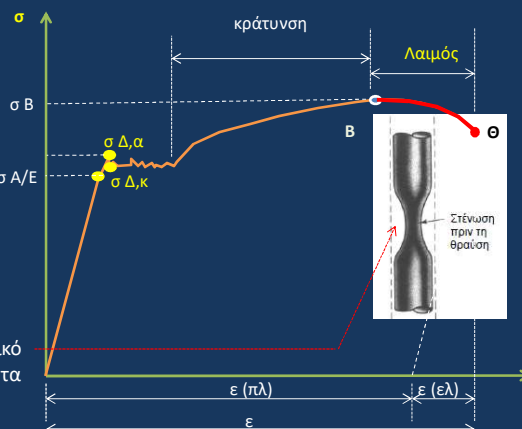
- Στη συνέχεια, η τάση αυξάνεται σημαντικά μετά το όριο διαρροής, χωρίς να επέλθει θραύση (κράτνση).
- Το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στην μέγιστη τάση ονομάζεται "Αντοχή του Υλικού" ( $\sigma_B$ ).



24

### Διάγραμμα $\sigma$ - $\epsilon$ – Λαιμός

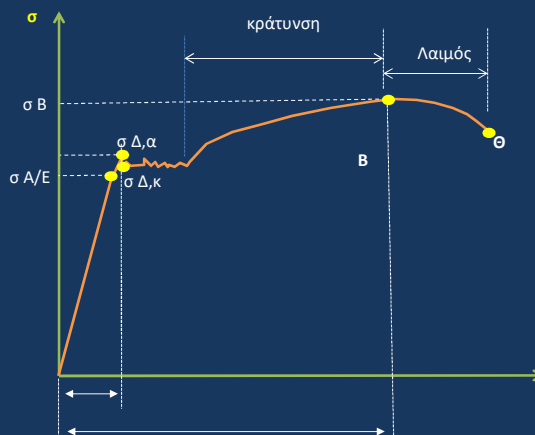
- Κατόπιν μπαίνουμε στην “περιοχή του λαιμού”, όπου έχουμε έντονη εγκάρσια παραμόρφωση και πτώση τάσης
- Η ταχύτητα παραμόρφωσης του δοκιμίου και η επιφάνεια που αντιστέκεται στην φόρτιση μικραίνει, λόγω της δημιουργίας λαιμού, όλο και πιο πολύ μέχρι που το δοκίμιο στην πιο λεπτή διατομή του αστοχεί.
- Η στένωση της θραύσης είναι χαρακτηριστικό του υλικού και “χαρακτηρίζει” την ολκιμότητα ή ψαθηρότητα του.



25

### Ολκιμότητα

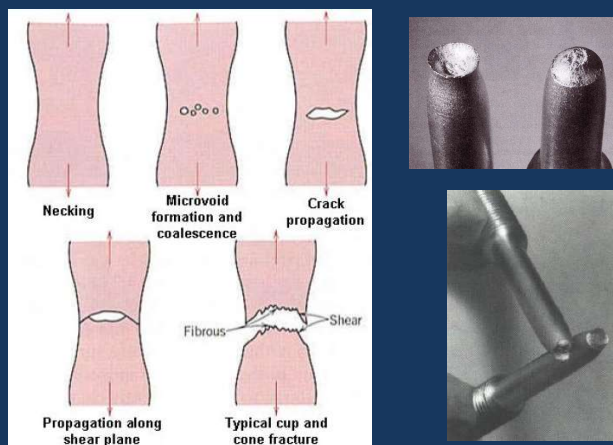
- Η **ολκιμότητα** είναι ιδιότητα του υλικού
- Ικανότητα να παραμορφώνεται (να αναλαμβάνει πλαστικές παραμορφώσεις) χωρίς να αστοχεί
- Εκφράζει τη σχέση πλαστικών παραμορφώσεων προς τις ελαστικές (ανοιγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο / παραμόρφωση στο όριο διαρροής)
- Η ολκιμότητα του χάλυβα είναι η βασικότερη προϋπόθεση για να αναπτύξει πλαστιμότητα μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα



26

### Αστοχία Δοκιμίου

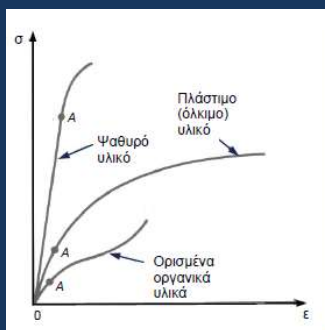
- Επιφάνεια θραύσης: εξαρτάται από τύπο υλικού
- Χάλυβα: Διατμητική ολίσθιση υλικού σε επίπεδα που σχηματίζουν γωνίες 45 μοιρών με άξονα δοκιμίων (επιφάνειες θραύσης έχουν μορφή προεξέχοντος/εισέχοντος κώνου)
- Σε σκυρόδεμα, χυτοσίδηρο επιφάνεια θραύσης περίπου επίπεδη και κάθετη στον άξονα δοκιμίου



27

### Όλκιμα – Ψαθυρά Υλικά

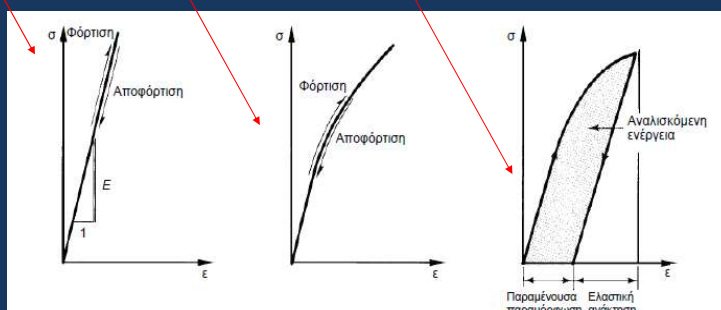
- Από την δοκιμή εφελκυσμού, με βάση την μηχανική τους συμπεριφορά τα υλικά χαρακτηρίζονται σαν όλκιμα ή ψαθυρά
  - **Όλκιμα:** Υλικά για τα οποία οι παραμορφώσεις αυξάνονται σημαντικά χωρίς ιδιαίτερη αύξηση της τάσης (π.χ. Χάλυβας σε εφ. και θλ., Ξύλο σε θλίψη) **ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**
  - **Ψαθυρά:** Υλικά για τα οποία η καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$  αυξάνεται απότομα, χωρίς να “οριζοντιώνεται” ιδιαίτερα (Σκυρόδεμα, κεραμικά, γυαλί)



28

### Καμπύλες Τάσης – Παραμόρφωσης (γενικά)

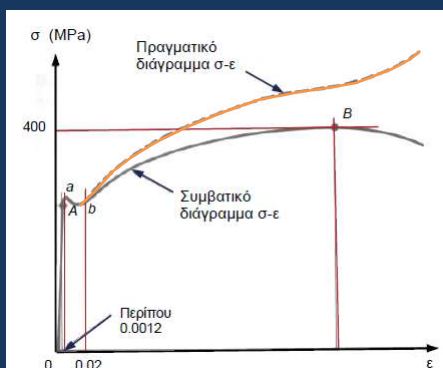
- **Γραμμικά Ελαστικά:** ισχύει ο νόμος του Hooke
  - **Μη γραμμικά Ελαστικά:** η καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$  είναι μη γραμμική, αλλά όταν αποφορτίζονται δεν έχουν πλαστικές παραμορφώσεις
  - **Ανελαστικά:** παραμένουσες παραμορφώσεις



29

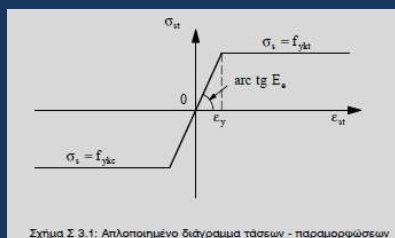
### Πραγματικές Τάσεις

- Μέχρι τώρα σαν τάσεις θεωρούσαμε τις συμβατικές τάσεις (δύναμη / ονομασική διατομή)
- Στη πραγματικότητα το δοκίμιο παραμορφώνεται και στην εγκάρσια διεύθυνση (μείωση διατομής)
- Εάν λειφθεί υπόψη η πραγματική διατομή στον υπολογισμό τάσεων, προκύπτουν οι πραγματικές τάσεις.
- Διαφοροποίηση σε μεγάλες παραμορφώσεις

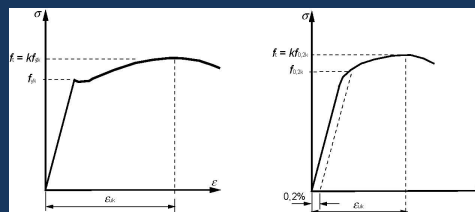


30

Εξειδικευμένα διαγράμματα σ-ε

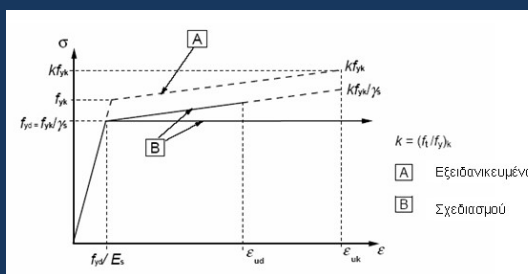


Σχήμα Σ 3.1: Απλοποιημένο διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων



Χάλυβας κατεργασμένος εν θερμώ

Χάλυβας κατεργασμένος εν ψυχρώ

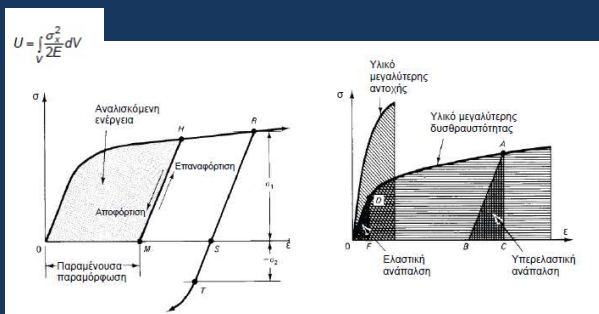


Εξειδικευμένο διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων και διάγραμμα σχεδιασμού χάλυβα σπλισμού (για εφελκυσμό και θλίψη)

31

Ελαστική Ενέργεια Παραμόρφωσης (Δυσθραυστότητα)

- Δράση εξωτερικών δυνάμεων (σε δομικό στοιχείο που συμπεριφέρεται ελαστικά) έχει ως αποτέλεσμα παραγωγή εσωτερικού έργου που "αποθηκεύεται" στο δομικό στοιχείο ως εσωτερική ελαστική ενέργεια (ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης).
- Έργο = Εσωτερική Δύναμη x Μετακίνηση Δύναμης
- Γραφικά περιγράφεται από το **εμβαδόν κάτω από τη καμπύλη σ-ε**.
- Αποτελεί μέτρο ικανότητας του υλικού να απορροφήσει ενέργεια μέχρι την αστοχία (**δυσθραυστότητα**)



32





Κανονιστικό Πλαίσιο

- (π.χ.) Ο ΚΤΧ 2008, προδιαγράφει ελάχιστες γενικές και ειδικές απαιτήσεις τις οποίες πρέπει να ικανοποιούν οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος

Κεφάλαιο 2: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 Διάκριση χάλυβων

- 2.1.3 Σύμφωνα με την ολκιάση, σε:
- Χάλυβες χαμηλής ολκιάσητας
  - Χάλυβες υψηλής ολκιάσητας

2.2 Τεχνικές κατηγορίες ποιότητας χάλυβων

Οι χάλυβες που αποτελούν αντικείμενο αυτού του Κανονισμού είναι συγκολλησιμοι, διακρίνονται σε στις εξής τεχνικές κατηγορίες:

- B500A κατά ΕΛΟΤ 1421-2
- B500C κατά ΕΛΟΤ 1421-3.

2.3 Μορφές χάλυβων

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος παραδίδονται στις παρακάτω μορφές:

- Ευθύγραμμες ράβδοι
- Καυλοφόρες
- Ευθύγραμμωμένα προϊόντα
- Πλέγματα (βλ. και Κεφ.9).

Στους χάλυβες χαμηλής ολκιάσητας κατατάσσονται οι χάλυβες κατηγορίας B500A κατά ΕΛΟΤ 1421-2 οι οποίοι επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται μόνο για την παραγωγή τυποποιημένων δομικών πλεγμάτων και δοκτωμάτων μέχρι διάμετρο Φ8.

Στους χάλυβες υψηλής ολκιάσητας κατατάσσονται οι χάλυβες κατηγορίας B500C κατά ΕΛΟΤ 1421-3, οι οποίοι καλύπτουν τις αυξημένες απαιτήσεις για αντισεισμική συμπεριφορά των κατασκευών, όπως προβλέπονται από τον ΕΚΩΣ και από τους Ευρωπαϊκούς.

Και για τις δύο αυτές κατηγορίες χάλυβων, η ονομαστική (χαρακτηριστική) τιμή του ορίου διαρροής  $f_{yk}$  είναι 500MPa.

35

Κανονιστικό Πλαίσιο

**Πίνακας 3-3** Όρια μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβων σε εφελκυσμό κατά ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 (Χαρακτηριστικές τιμές,  $X_k$ )

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, $f_{y,d}/f_{y,nom}$	-	$\leq 1,25$
Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής, $f_t/f_y$	$\geq 1,05$ ( $\geq 1,03$ για $d < 6mm$ )	$\geq 1,15$ $\geq 1,35$
Συνολική ανηγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) στο μέγιστο φορτίο $\epsilon_k$ (%)	$\geq 2,5$ ( $\geq 2$ για $d < 6mm$ )	$\geq 7,5$

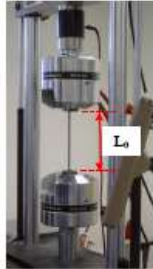
**Πίνακας 3-1** Ονομαστικές διαμέτρους, ονομαστικές διατομές, ονομαστική μάζα και ανozές ως προς την ονομαστική μάζα - Πεδίο εφαρμογής:

Ονομαστική διάμετρος (mm)	Πεδίο εφαρμογής					Ονομαστική διατομή (mm <sup>2</sup> )	Ονομαστική μάζα/μέτρο (kg/m)	Ανοzός μάζας/μέτρο (%)
	Ράβδοι	Καυλοφόρες και ευθύγραμμωμένα προϊόντα		Ηλεκτροσυγκολλημένα πλέγματα και δικτυώματα				
		B500C	B500A	B500C	B500A			
5,0		✓			✓	19,6	0,154	±6
5,5		✓			✓	23,8	0,187	±6
6,0	✓	✓	✓	✓	✓	28,3	0,222	±6
6,5		✓			✓	33,2	0,260	±6
7,0		✓			✓	38,5	0,302	±6
7,5		✓			✓	44,2	0,347	±6
8,0	✓	✓	✓	✓	✓	50,3	0,395	±6
10,0	✓		✓		✓	78,5	0,617	±4,5
12,0	✓		✓		✓	113	0,888	±4,5
14,0	✓		✓		✓	154	1,21	±4,5
16,0	✓		✓		✓	201	1,58	±4,5
18,0	✓					254	2,00	±4,5
20,0	✓					314	2,47	±4,5
22,0	✓					380	2,98	±4,5
25,0	✓					491	3,85	±4,5
28,0	✓					616	4,83	±4,5
32,0	✓					804	6,31	±4,5
40,0	✓					1257	9,86	±4,5

36

## Εργαστηριακή Άσκηση

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**  
**Εαρινό Εξάμηνο 2018-2019**  
**1<sup>η</sup> ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ - Εφελκυσμός χαλύβδινης ράβδου**

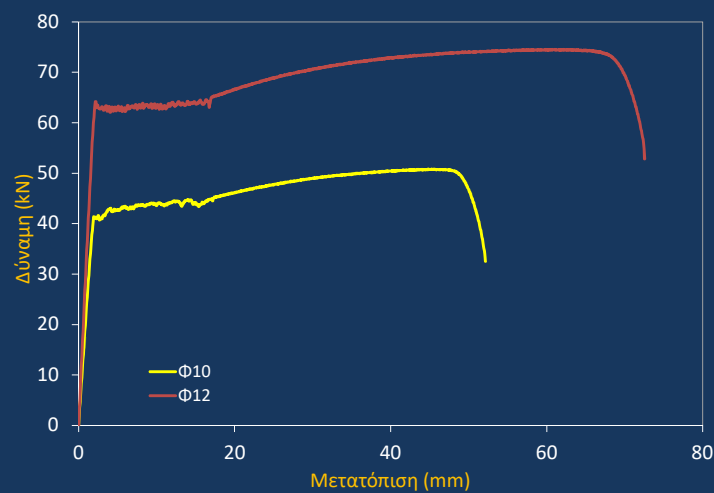


Δύο χαλύβδινες ράβδοι Α και Β (κατηγορίας B500C), αρχικού ελεύθερου μήκους ( $L_0$ ) 500 mm και διαμέτρου ( $d_A$ ) 12 mm και ( $d_B$ ) 10 mm υπόκεινται σε δοκιμή εφελκυσμού. Με βάση τα αρχεία με τα δεδομένα των δοκιμών που σας δίνονται, ζητούνται και για τις δύο ράβδους:

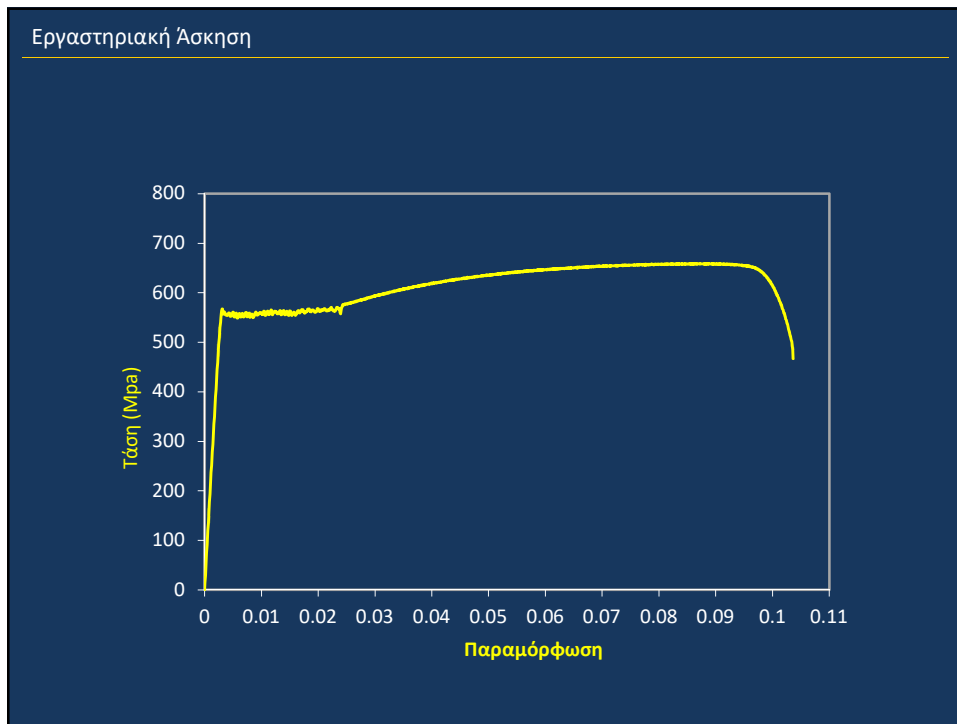
1. Να κατασκευαστούν τα διαγράμματα φορτίου ( $P$ ) - μετατόπισης ( $\delta$ ) και τάσης ( $\sigma$ ) - παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ).
2. Να σημειωθούν στο διάγραμμα ( $\sigma$ )-( $\epsilon$ ) τα σημεία: διαρροής, αντοχής, και θραύσης και να δοθούν οι τιμές των ζευγών τάσης ( $\sigma$ ) – παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) των σημείων αυτών.
3. Να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας.
4. Να υπολογιστούν τα μήκη των ράβδων κατά τη διαρροή, την επίτευξη της αντοχής τους και τη θραύση τους.
5. Να υπολογιστούν τα μήκη των δύο ράβδων μετά την αποφόρτίσή τους, η οποία πραγματοποιήθηκε σε παραμόρφωση ίση με 2.5%.
6. Ποια θα είναι (προσεγγιστικά) η εφελκυστική αντοχή μίας ράβδου ίδιας κατηγορίας χάλυβα (B500c), διαμέτρου 16 mm.

37

## Εργαστηριακή Άσκηση



38



39