



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων & Συστημάτων



Τεχνική Μηχανική

Μέρος Β - Αντοχή Υλικών

Θερμική καταπόνηση υλικών

Άνθιμος Σ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Eurlng

1. Γενικά

Τα υλικά κάτω υπό την επίδραση της θερμοκρασίας μεταβάλλουν τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

Τα δομικά στοιχεία υπό την επίδραση της θερμοκρασίας, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, παραμορφώνονται και αναπτύσσουν τάσεις. Με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση της θερμικής καταπόνησης:

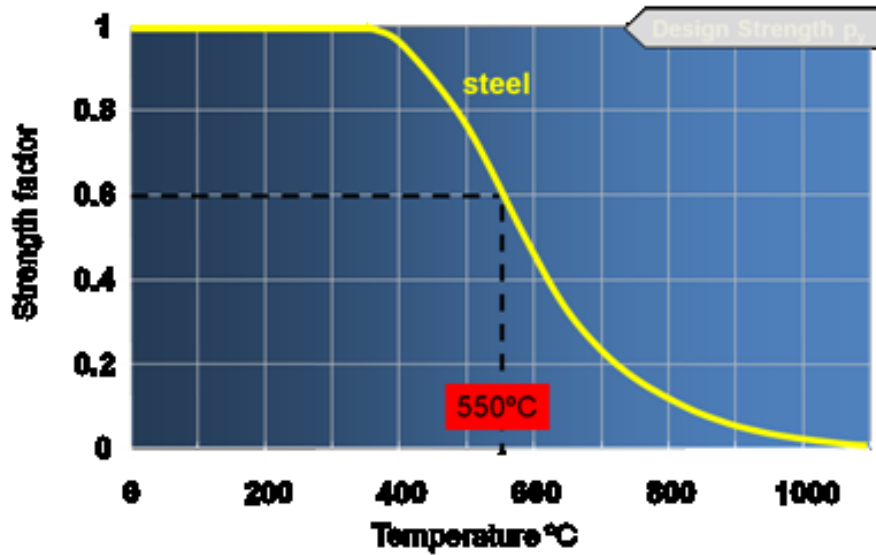
(i) αυξάνουν τις παραμορφώσεις ενώ τα εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία παραμένουν σταθερά [π.χ. ερπυσμός].

(ii) μειώνουν την φέρουσα ικανότητα [τα όρια αντοχής του υλικού].

Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από τις θερμικές του ιδιότητες, δηλ. την απόκριση του υλικού στην επιβολή της θερμοκρασίας ως εξωτερικής φόρτισης.

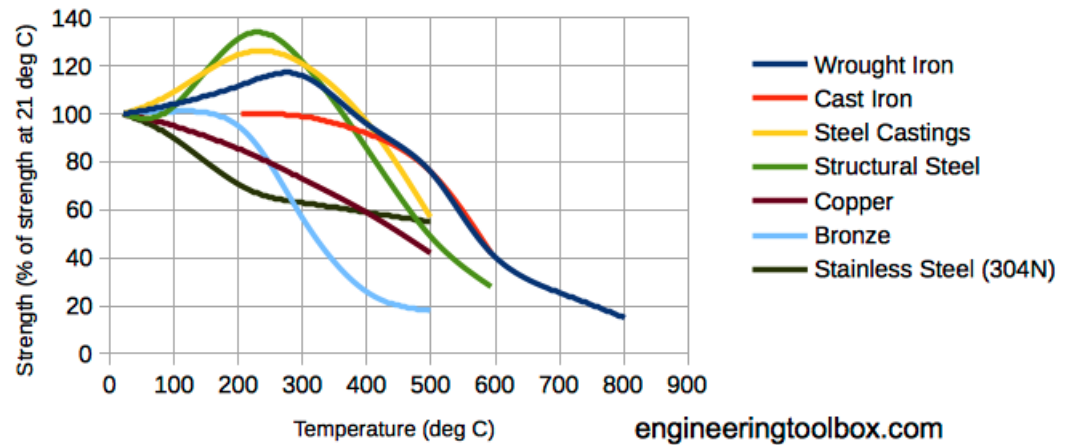
Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών είναι:

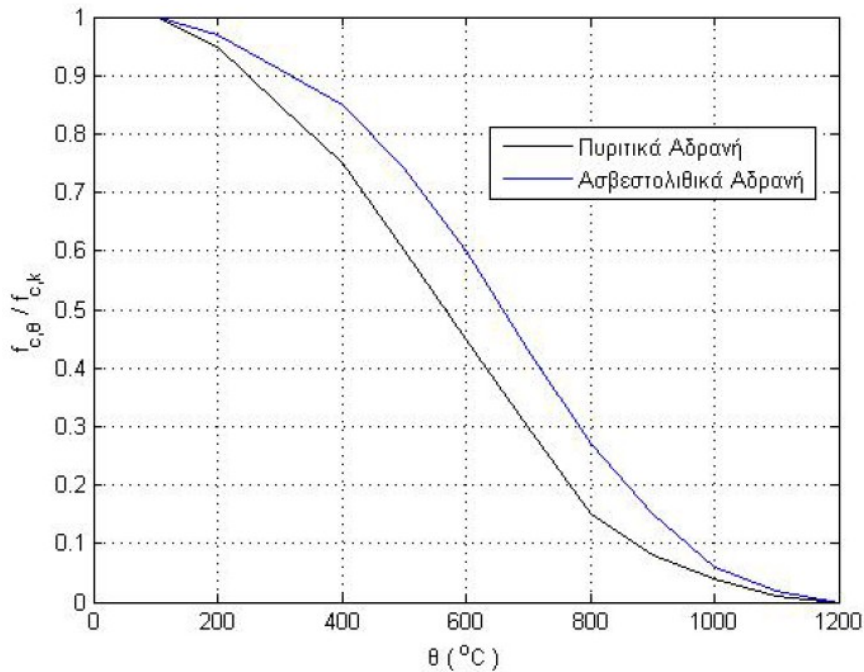
- Θερμοχωρητικότητα.
- **Θερμική παραμόρφωση [διαστολή-συστολή]. 😊**
- Θερμική αγωγιμότητα.



Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την αντοχή των μετάλλων

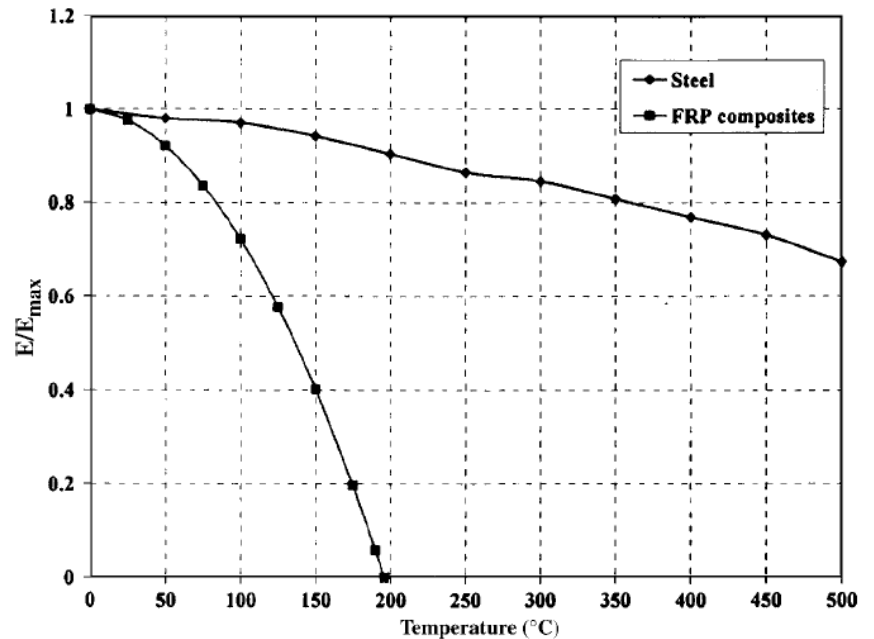
Strength of Metals
Influence of Temperature





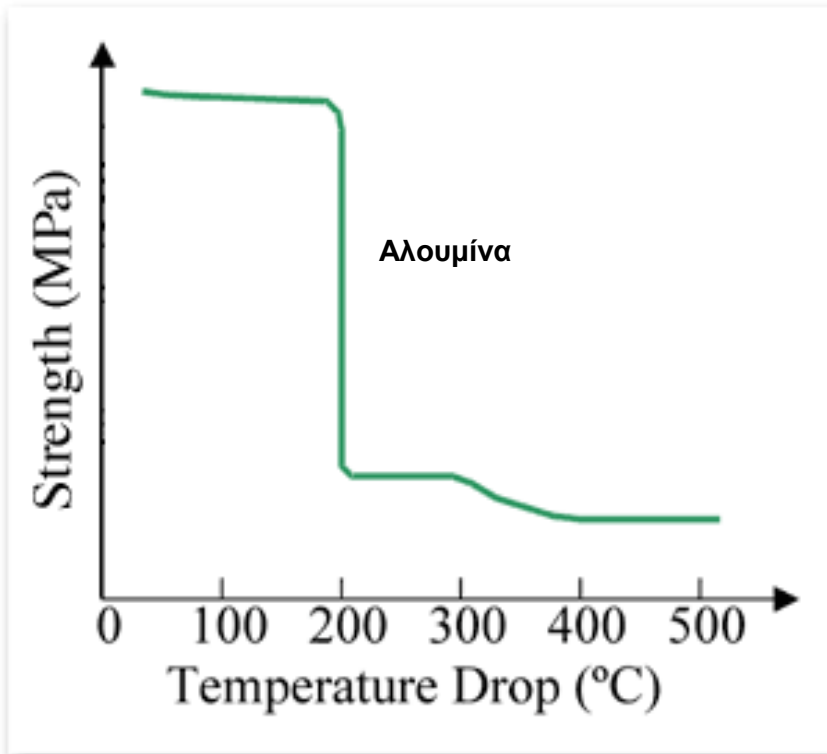
Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Συγκριτική παρουσίαση: επιρροής της θερμοκρασίας σε χάλυβα και ινοπλισμένα πολυμερή, [Fiber reinforced plastics, FRP].



Journal of Bridge Engineering - July 2006

DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:4(452)



https://digitalfire.com/4sight/glossary/glossary_thermal_shock.html

Θραύση από θερμικό σόκ

Θερμικό σοκ κεραμικών υλικών.
Διάγραμμα μείωσης αντοχής της
αλουμίνας υπό την επίδραση θερμικού
φορτίου

<https://textbooks.elsevier.com/manualsprotectedtextbooks/9780750663809/Static/ceramics/ceramics4c.htm>

2. Θερμική παραμόρφωση [διαστολή-συστολή]

Υπό την επίδραση της θερμοκρασίας τα υλικά και κατ'επέκταση τα δομικά στοιχεία που διαμορφώνουν:

(α) υφίστανται διαστολή [γραμμική, επιφανειακή ή κατ'όγκο], αύξηση των αρχικών διαστάσεων,

(β) υφίστανται συστολή [γραμμική, επιφανειακή ή κατ'όγκο], μείωση των αρχικών διαστάσεων.

Γραμμική θερμική παραμόρφωση στοιχείου υποβαλλόμενου σε θερμοκρασιακή μεταβολή

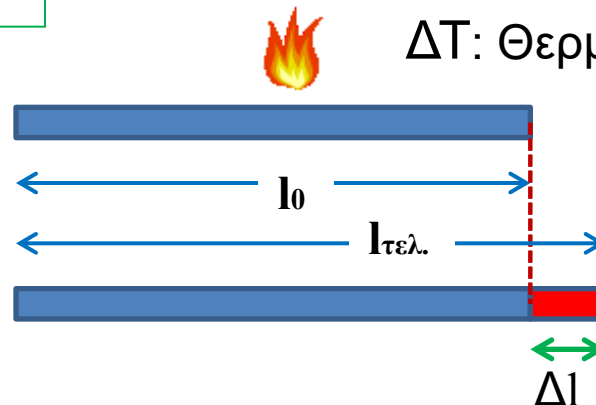
$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$$

Δl : Γραμμική μεταβολή

l_0 : Αρχικό μήκος ράβδου

α : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

ΔT : Θερμοκρασιακή μεταβολή [$\theta_{\text{τελ.}}$ - $\theta_{\text{αρχ.}}$]



$$\Delta l = l_{\text{τελ.}} - l_0$$

$$\Delta l = \alpha * \Delta T * l_0 = \alpha * [\theta_{\text{τελ.}} - \theta_{\text{αρχ.}}] * l_0$$

- (i) Όταν $\Delta l > 0$ έχουμε επιμήκυνση της ράβδου [διαστολή].
- (ii) Όταν $\Delta l < 0$ έχουμε βράχυνση της ράβδου [συστολή].

Η θερμική παραμόρφωση εξαρτάται:

- (i) Από το υλικό, μέσω του συντελεστή γραμμικής διαστολής, α .
- (ii) Από το εύρος της θερμοκρασιακής μεταβολής ΔT .
- (iii) Από το αρχικό μήκος του δομικού στοιχείου, l_0 .

Material	α_ℓ ($10^{-6}/^\circ\text{C}$) at room T
• <u>Polymers</u>	
Polypropylene	145-180
Polyethylene	106-198
Polystyrene	90-150
Teflon	126-216
• <u>Metals</u>	
Aluminum	23.6
Steel	12
Tungsten	4.5
Gold	14.2
• <u>Ceramics</u>	
Magnesia (MgO)	13.5
Alumina (Al ₂ O ₃)	7.6
Soda-lime glass	9
Silica (cryst. SiO ₂)	0.4

Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής σε θερμοκρασία δωματίου, βασικών υλικών [πολυμερή, μεταλλικά, κεραμικά].

Π.χ. για έναν σωλήνα κατασκευασμένο από πολυαιθυλένιο και ένα δεύτερο από χάλυβα, αμφότεροι με το ίδιο μήκος και την ίδια θερμοκρασιακή μεταβολή, ο πρώτος θα υποστεί μεγαλύτερη μεταβολή του μήκους του κατά περίπου 12 και πλέον φορές $\{(106+198)/2\}/12$

3. Τάσεις από θερμική καταπόνηση

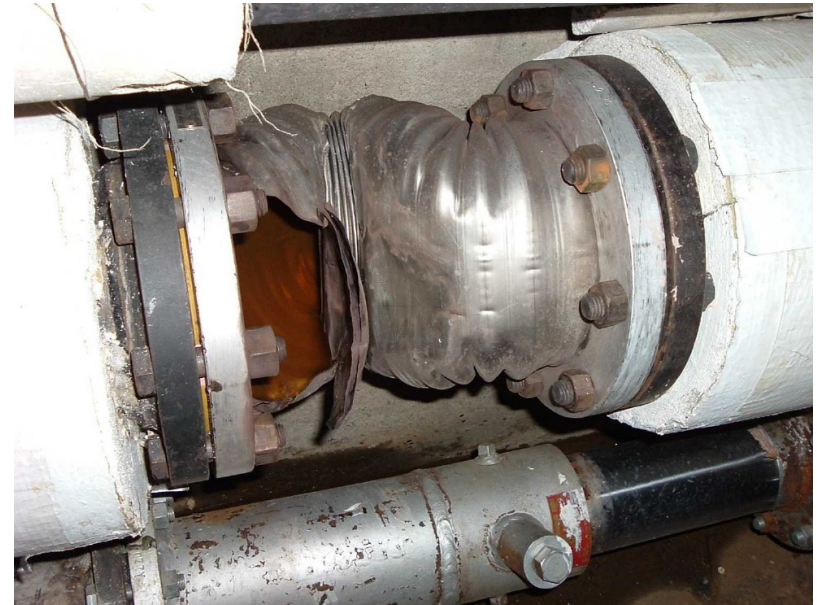
Η θερμική καταπόνηση, όταν ξεπεραστούν τα όρια αντοχή και παραμόρφωσης, προκαλεί:

(α) Θραύσεις.

(β) Μόνιμες παραμορφώσεις [πλαστικές παραμορφώσεις].

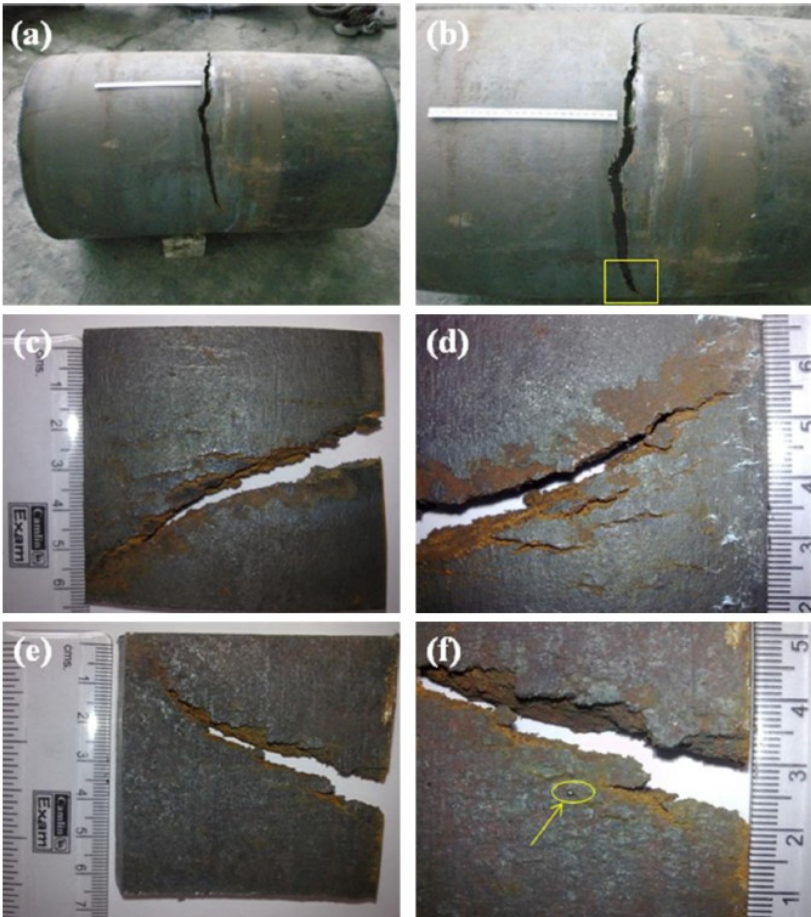


Πλαστικές παραμορφώσεις



Θραύση υλικού

<https://mechanicaltop.blogspot.com/2019/03/thermal-stress-and-strain.html>
<https://rockymtnashrae.com/downloads.php>



<http://dx.doi.org/10.1016/j.csefa.2013.05.001>



<https://rockymtnashrae.com/downloads.php>

Οι θερμοκρασιακές μεταβολές αναπτύσσουν εντατικές καταστάσεις που οφείλονται:

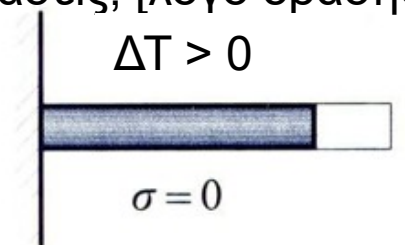
- (i) Θερμική καταπόνηση από συστολή-διαστολή και περιορισμό των παραμορφώσεων . 😊
- (ii) Θερμική καταπόνηση λόγω βαθμιδωτής θερμοκρασιακής κατανομής, κατά μήκος ή/και εγκάρσια του στοιχείου. Διαφορετικός ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας λόγω μεγέθους, σχήματος, θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας [π.χ. κατεργασίες ταχείας θέρμανσης ή ψύξης μεταβάλλουν διαφορετικά τις τάσεις στο εσωτερικό και το εξωτερικό του στοιχείου ανάλογο με τον όγκο, μήκος, κ.α.].
- (iii) Θερμικό σοκ. Ταχεία θερμοκρασιακή μεταβολή με αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων θραύσης. Τα όλκιμα υλικά όπως τα μέταλλα και τα πολυμερή υφίστανται πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ τα ψαθυρά όπως τα κεραμικά παρουσιάζουν θραύση του υλικού.

4. Θερμική καταπόνηση από συστολή-διαστολή και περιορισμό των παραμορφώσεων

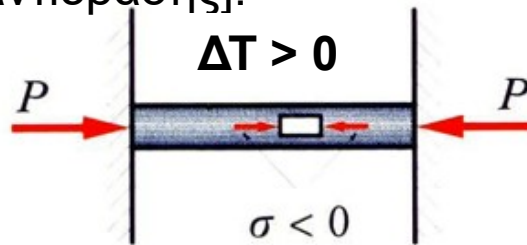
(i) Όταν το μηχανικό σύστημα **επιτρέπει** την ελεύθερη γραμμική μετακίνηση τότε στην περίπτωση αυτή **δεν αναπτύσσονται τάσεις από θερμική καταπόνηση**.

(ii) Όταν το μηχανικό σύστημα **δεν επιτρέπει** την ελεύθερη μετακίνηση, και σε αυτό η **θερμοκρασιακή μεταβολή είναι θετική**, δηλ. τείνει να διασταλεί, τότε λόγω της παρεμπόδισης της ελεύθερης μετακίνησης, εντός της δοκού αναπτύσσονται **θλιπτικές δυνάμεις** και κατ'έπекταση θλιπτικές τάσεις, [λόγο δράσης-αντίδρασης].

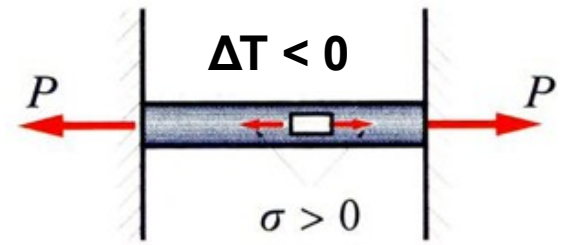
(iii) Όταν το μηχανικό σύστημα **δεν επιτρέπει** την ελεύθερη μετακίνηση, και σε αυτό η **θερμοκρασιακή μεταβολή είναι αρνητική**, δηλ. τείνει να συσταλεί, τότε λόγω της παρεμπόδισης της ελεύθερης μετακίνησης, εντός της δοκού αναπτύσσονται **εφελκυστικές δυνάμεις** και κατ'έπекταση εφελκυστικές τάσεις, [λόγο δράσης-αντίδρασης].



(i)
Ελεύθερη διαστολή

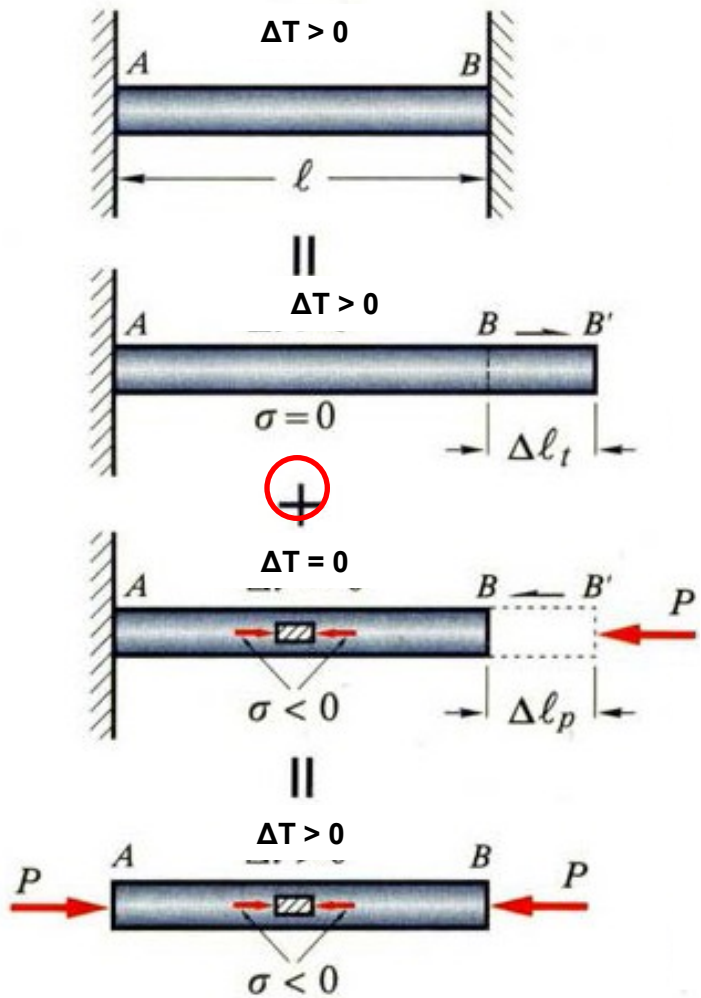


(ii)
Εμποδιζόμενη διαστολή



(iii)
Εμποδιζόμενη συστολή

(α) Ομογενής πακτωμένη δοκός ομοιόμορφης εγκάρσιας διατομής



Ισχύει ο κανόνας επαλληλίας. Αλγεβρική άθροιση καταπονήσεων που λαμβάνουν χώρας στο ελαστικό πεδίο συμπεριφοράς.

Επιρροή θερμικής καταπόνησης

$$\Delta l_t = \alpha * l * \Delta T$$

+

Επιρροή αξονικής δύναμης λόγω δράσης -αντίδρασης

$$\Delta l_p = P * l / E * A$$

$$\Delta l_t + \Delta l_p = 0$$

$$P = - \alpha * E * A * (\Delta T)$$

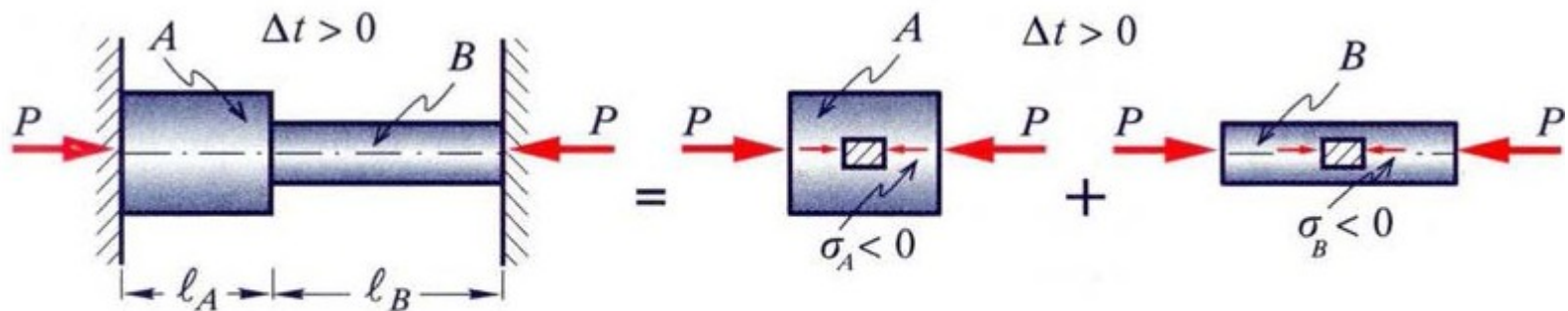
$$\sigma = P / A = - \alpha * E * (\Delta T)$$

$$\epsilon = \Delta l / l = \alpha * (\Delta T)$$

Οι σχέσεις ισχύουν στο πεδίο ελαστικής συμπεριφοράς των υλικών και της αντίστοιχης καταπόνησης του μηχανικού συστήματος.

(β) Σύνθετη πακτωμένη δοκός

[με θερμοκρασιακή καταπόνηση και εξωτερική αξονική καταπόνηση]



$$\Delta l_{o\lambda}^t + \Delta l_{o\lambda}^P = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta l_t^A + \Delta l_t^B = -\left(\Delta l_p^A + \Delta l_p^B\right) \quad \Rightarrow$$

$$(a_A l_A + a_B l_B) \Delta t = -P \left(\frac{l_A}{E_A F_A} + \frac{l_B}{E_B F_B} \right)$$

E = μέτρο
ελαστικότητας υλικού

F = εμβαδόν διατομής

EF = αξονική
δυσκαμψία

$$P = - (a_A l_A + a_B l_B) * \left(\frac{l_A}{E_A F_A} + \frac{l_B}{E_B F_B} \right) * \Delta t$$

5. Συνδυασμός τάσεων από εξωτερική και θερμοκρασιακή φόρτιση

Λόγο του νόμου της επαλληλίας τα φορτία από εξωτερική καταπόνησης προστίθενται αλγεβρικά στα φορτία που προέρχονται από θερμοκρασιακή μεταβολή.

Τάση από εξωτερικά φορτία: $\sigma_{\text{ext.}} = P/A$

Τάση από μεταβολή της θερμοκρασίας: $\sigma_{\text{themr}} = \alpha * E * (\Delta T)$

$$\sigma_{\text{ολ.}} = \sigma_{\text{ext.}} + \sigma_{\text{themr}}$$

Η εφελκυστική τάση λαμβάνεται θετική

Η θλιπτική τάση λαμβάνεται αρνητική

6. Παράγοντες σχεδιασμού

Μεταβολή θερμοκρασίας

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Εμβαδόν διατομής (σύνθετη διατομή)

Μήκος στοιχείου

Μηχανικά χαρακτηριστικά

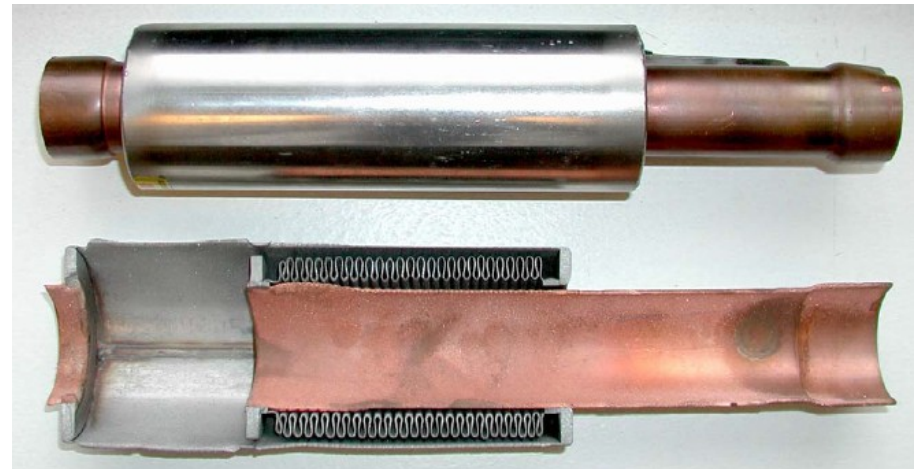
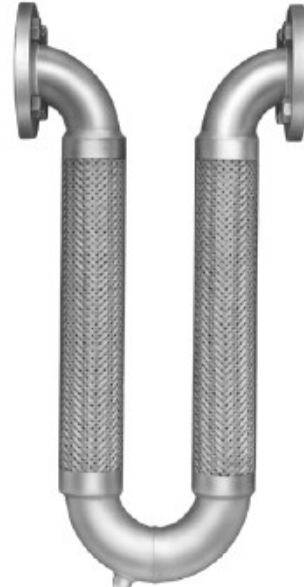
Μέτρο ελαστικότητας

Συντελεστής γραμμικής

θερμικής διαστολής

Οριακή τάση του υλικού

Χρήση ειδικών στοιχείων π.χ. για δίκτυα αγωγών και σωληνώσεων



<https://rockymtnashrae.com/downloads.php>



https://www.wikiwand.com/en/Thermal_expansion



<https://www.directindustry.com/prod/contitech/product-7393-2015727.html>

<http://www.lanphan.com/pipe-fittings/SelectRubberExpansionJointforEmulsifiedLiquidPipeline-462.mhtml>

Σημείωμα Αναφοράς σε έργα Τρίτων

Βιβλιογραφία

1. Beer F., Johnston E.R., Mazurek D.: Τεχνική Μηχανική-Στατική. Εκδόσεις Τζιόλα. Έκδ. 11^η 2019, [κωδ. Εύδοξος 59421317].
2. Gere J., Goodno B.: Αντοχή Υλικών. Εκδόσεις Τζιόλα. Έκδ. 9^η 2021, [κωδ. Εύδοξος 86055253].
3. Nash W.: Στατική και Μηχανική των Υλικών. Εκδόσεις Τζιόλα. Έκδ. 1^η 2002, [κωδ. Εύδοξος 18549012].
4. Π.Α. Βουθούνης: Τεχνική Μηχανική. Εκδόσεις Α. Βουθούνη. Έκδ. 10^η 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^η 2017, [ISBN 978-618-83280-1-3].
7. Π.Α. Βουθούνης: Αντοχή των Υλικών-Μηχανική του παραμορφώσιμου στερεού. Εκδόσεις Α. Βουθούνη. Έκδ. 4^η 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.

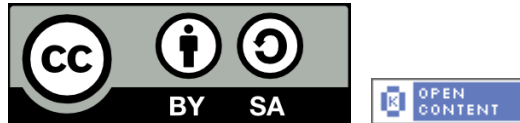
Άνθιμος Σ. Αναστασιάδης. «Τεχνική Μηχανική: Στατική και Αντοχή Υλικών». Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας. Πολυτεχνική Σχολή. Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων & Συστημάτων. Έκδοση 1^η, Κοζάνη, 2020.

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

Θερμική καταπόνηση υλικών

