

4. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Έστω στοιχειώδης κύβος στερεού σώματος, στον οποίο εφαρμόζουμε μία δύναμη F κάθετη στη μία έδρα του. Ίση και αντίθετη δύναμη πρέπει να ασκηθεί στην απέναντι έδρα του, ώστε να βρίσκεται σε ισορροπία. Η επίδραση της δύναμης F μεταφέρεται εντός του κύβου σε όλα τα επίπεδα τα παράλληλα στις δύο έδρες που βρίσκονται υπό φόρτιση. Ο κύβος βρίσκεται υπό τάση σ η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της δύναμης F προς το εμβαδόν A της έδρας

$$\sigma = F / A$$

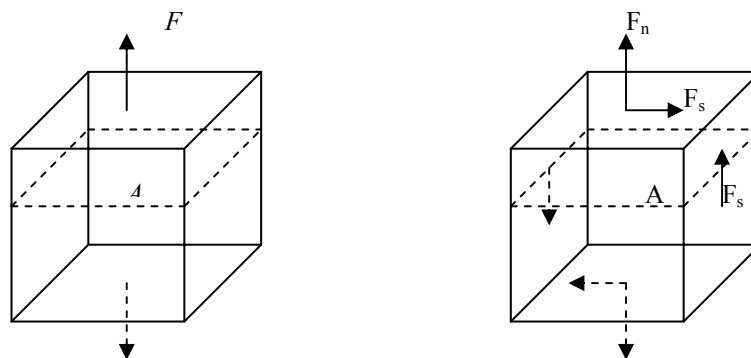
Η τάση που προκαλείται από δύναμη κάθετη στην επιφάνεια του κύβου καλείται **ορθή τάση**. Όταν τείνει να επιμηκύνει το στερεό ονομάζεται **εφελκυστική**, τάση ενώ όταν τείνει να το συμπιέσει καλείται **θλιπτική** τάση. Η εφελκυστική τάση θεωρείται ότι έχει θετικό πρόσημο (+), ενώ η θλιπτική έχει αρνητικό (-).

Αν η δύναμη στις δύο πλευρές του στοιχειώδους κύβου δεν ασκείται κάθετα στις έδρες, αλλά υπό γωνία, τότε μπορεί να αναλυθεί σε μία κάθετη F_n και σε μία εφαπτομενική ως προς την έδρα συνιστώσα F_s . Η κάθετη συνιστώσα προκαλεί μία ορθή τάση σ ενώ η εφαπτομενική συνιστώσα προκαλεί μία τάση η οποία καλείται **διατμητική τάση τ** , με μέτρο

$$\tau = F_s / A$$

Μονάδα μέτρησης της τάσης στο SI είναι το *Pascal* (Pa) το οποίο ισούται με 1 N/m^2 . Επειδή είναι μικρή μονάδα, χρησιμοποιείται συνήθως το MPa, το οποίο ισούται με 10^6 Pa .

ΣΧΗΜΑ 4.1:

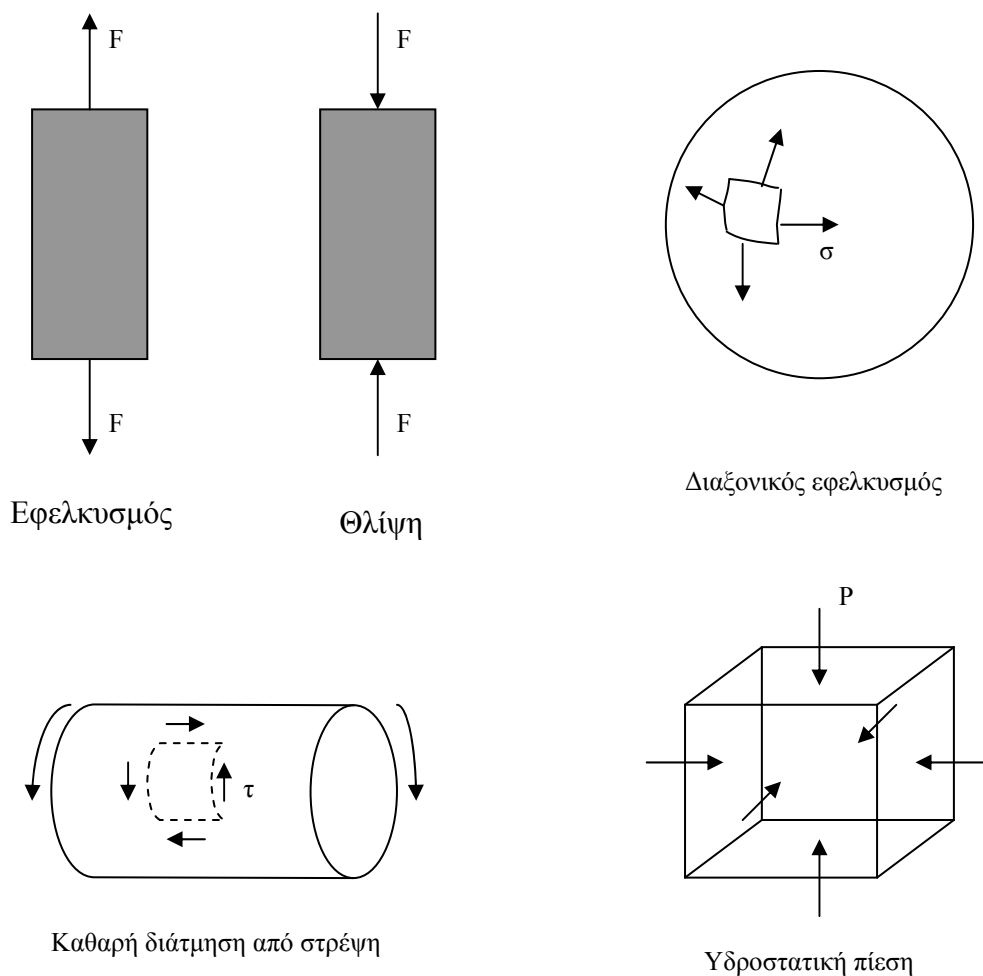


4.2 ΕΙΔΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Οι διάφορες καταπονήσεις μπορούν να αναλυθούν σε τέσσερα βασικά είδη φορτίσεων, τον απλό εφελκυσμό ή απλή θλίψη, τον διαξονικό εφελκυσμό, την υδροστατική πίεση και την καθαρή διάτμηση.

Στην πρώτη κατηγορία οι τάσεις που καταπονούν το σώμα δρουν ορθά και κατά μήκος ενός άξονα (του άξονα του εφελκυσμού ή αντίστοιχα της θλίψης). Στη δεύτερη κατηγορία έχουμε πάλι ορθές μόνο τάσεις, οι οποίες δρουν σε δύο διευθύνσεις στην επιφάνεια ενός κελύφους. Είναι χαρακτηριστική η περίπτωση της φόρτισης της επιφάνειας σφαιρικού κελύφους γεμάτου με αέριο υπό πίεση (μπαλόνι). Στην τρίτη κατηγορία έχουμε άσκηση θλιπτικών ορθών τάσεων και προς τις τρεις διευθύνσεις. Είναι η περίπτωση της βύθισης ενός στερεού μέσα σε ένα υγρό. Στην καθαρή διάτμηση έχουμε την εμφάνιση διατμητικών μόνο τάσεων μέσα στο στερεό. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση άξονα που φορτίζεται σε στρέψη.

ΣΧΗΜΑ 4.2:



4.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η αλλαγή των διαστάσεων των στερεών σωμάτων λόγω της επιβολής των τάσεων ονομάζεται παραμόρφωση. Η παραμόρφωση η οποία μηδενίζεται αν αφαιρέσουμε τις επιβαλλόμενες τάσεις ονομάζεται **ελαστική παραμόρφωση** (το στερεό επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις). **Πλαστική παραμόρφωση** είναι η μόνιμη παραμόρφωση, η οποία παραμένει στο σώμα και μετά την αφαίρεση των επιβαλλόμενων τάσεων. Μία εφελκυστική τάση, που θα εφαρμοστεί σε ένα στερεό κύβο, θα έχει ως αποτέλεσμα την επιμήκυνση του κύβου κατά τη διεύθυνση του άξονα επιβολής της τάσης. Ταυτόχρονα ο κύβος τείνει να συμπιεστεί στους δύο άλλους άξονες. Αν η διεύθυνση της δύναμης που προκαλεί την παραμόρφωση είναι κατά τον άξονα z τότε έχουμε την αξονική παραμόρφωση

$$\varepsilon_z = w/dz$$

και την πλευρική παραμόρφωση

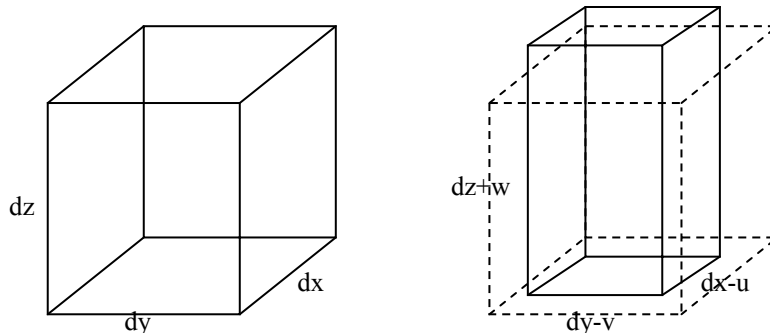
$$\varepsilon_x = u/dx, \varepsilon_y = v/dy$$

Η πλευρική παραμόρφωση συνδέεται με την αξονική παραμόρφωση (για την περίπτωση ελαστικών παραμορφώσεων) με τη σχέση

$$\nu = -\varepsilon_y / \varepsilon_z = -\varepsilon_x / \varepsilon_z$$

όπου ο συντελεστής ν καλείται **λόγος Poisson**, και παίρνει τιμές από 0,25 έως 0,4, ενώ για τα περισσότερα μέταλλα η τιμή του είναι περίπου ίση με 0,33.

ΣΧΗΜΑ 4.3: Αξονική και πλευρική παραμόρφωση κύβου.



Η εφαρμογή μίας διατμητικής τάσης προκαλεί διατμητική παραμόρφωση γ , η οποία δίδεται

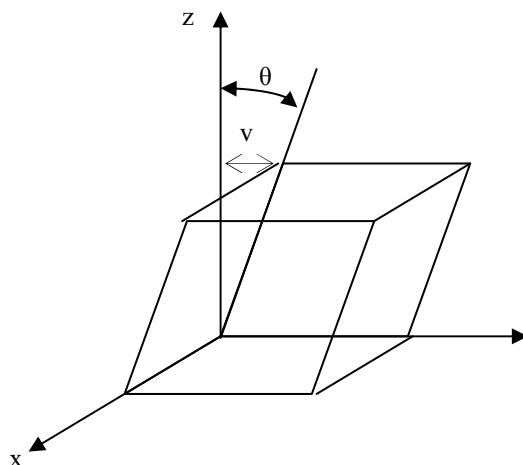
$$\gamma = v/dz = \varepsilon\phi(\theta)$$

όπου θ η γωνία διάτμησης, ενώ για μικρές παραμορφώσεις θεωρούμε ότι ισχύει:

$$\gamma = \theta.$$

ΣΧΗΜΑ 4.4:

Διατμητική
Παραμόρφωση κύβου.

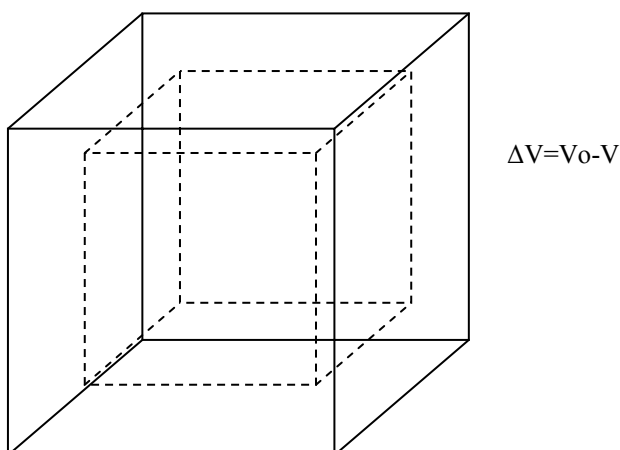


Η εφαρμογή υδροστατικής πίεσης προκαλεί κατ' όγκο παραμόρφωση Δ , η οποία δίδεται

$$\Delta = \Delta V / V_0$$

όπου V_0 ο αρχικός όγκος του στερεού και ΔV η μεταβολή του όγκου του.

Σε κάθε περίπτωση η παραμόρφωση είναι αδιάστατο μέγεθος και συνήθως μετράται επί τοις εκατό.

ΣΧΗΜΑ 4.5: Κατ' όγκο παραμόρφωση κύβου.

4.4 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Όλα τα υλικά εμφανίζουν ένα **όριο ελαστικότητας**, δηλαδή μία τάση πάνω από την οποία αλλάζει η συμπεριφορά τους ως προς τη μονιμότητα των παραμορφώσεων που αυτή προκαλεί. Ένα **ψαθυρό** υλικό όπως το γυαλί θραύεται πάνω από το όριο ελαστικότητας. Ένα **όλκιμο** υλικό αντίθετα αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης πάνω από το όριο ελαστικότητας.

Τα μεταλλικά υλικά επιδεικνύουν ελαστική συμπεριφορά σε πολύ μικρά όρια παραμόρφωσης (περίπου μέχρι 0,1%). Μέχρι το όριο αυτό, αν αφαιρεθούν οι επιβαλλόμενες τάσεις, δεν υπάρχουν παραμένουσες παραμορφώσεις. Πάνω από το όριο αυτό υπάρχουν παραμένουσες παραμορφώσεις (πλαστικές παραμορφώσεις) στο υλικό, ακόμη και μετά την αφαίρεση των τάσεων.

Τα υλικά για τα οποία μέσα στην ελαστική περιοχή έχουμε γραμμική σύνδεση της τάσης και της προκαλούμενης παραμόρφωσης, λέμε ότι έχουν **γραμμική ελαστική συμπεριφορά**. Τα υλικά αυτά ακολουθούν τον **νόμο του Hooke**. Για τον απλό εφελκυσμό στον άξονα x ισχύει

$$\sigma = E \varepsilon$$

όπου **E το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young**. Για την περίπτωση της καθαρής διάτμησης ισχύει

$$\tau = G \gamma$$

όπου **G το μέτρο διάτμησης**. Για την περίπτωση της υδροστατικής πίεσης ισχύει

$$p = -K \Delta$$

όπου **K το μέτρο διόγκωσης**. Το μέτρο ελαστικότητας έχει μονάδες τάσης (η παραμόρφωση είναι αδιάστατο μέγεθος). Για τα περισσότερα μέταλλα ισχύουν οι σχέσεις

$$K = E = 2G(1+\nu)$$

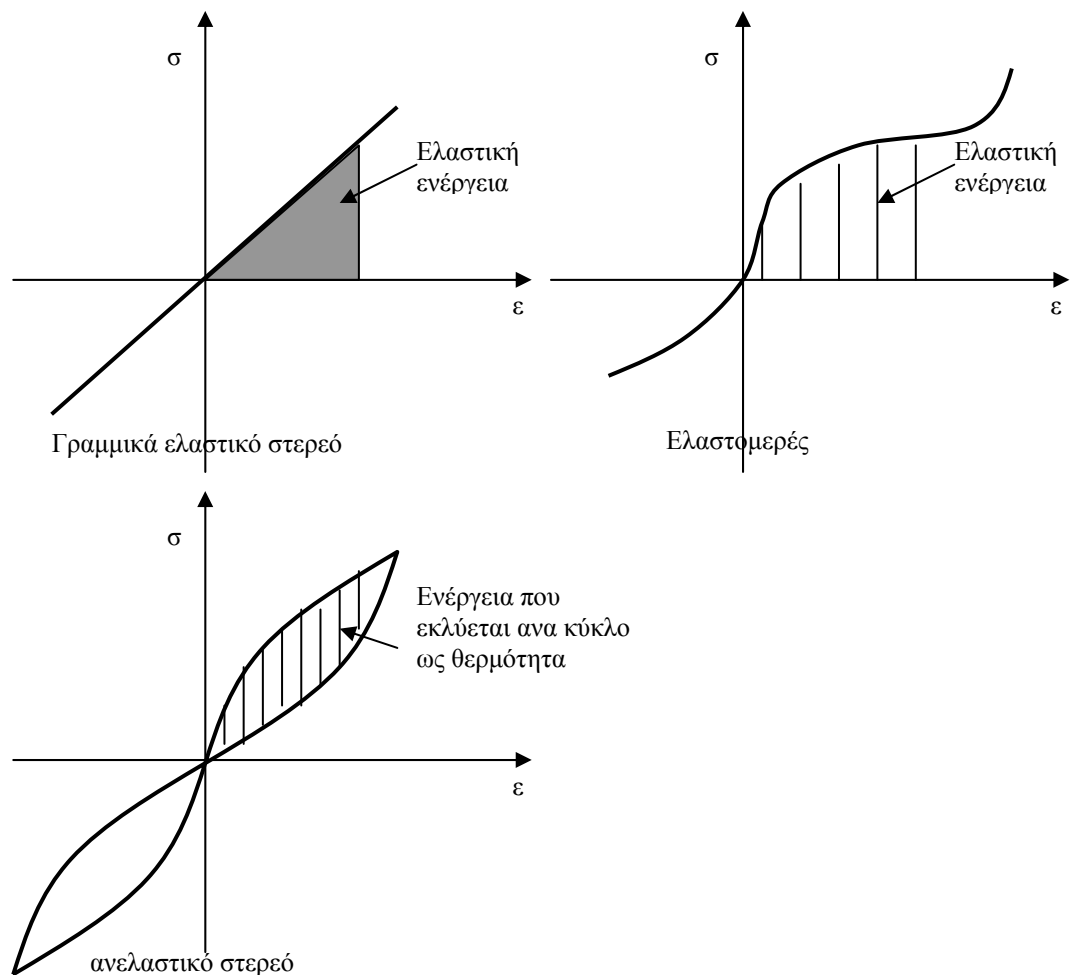
Υλικά τα οποία εμφανίζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά είναι κυρίως τα ψαθυρά υλικά όπως το γυαλί και τα κεραμικά υλικά. Τα περισσότερα μεταλλικά υλικά εμφανίζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά στο πρώτο στάδιο της φόρτισής τους και για μικρές παραμορφώσεις. Η κλίση της ευθείας τάσης – παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή εφελκυσμού δίνει το μέτρο ελαστικότητας E του υλικού. Το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την γραφική παράσταση εκφράζει την **ελαστική ενέργεια ανά μονάδα όγκου** η οποία αποθηκεύτηκε στο υλικό. Η ενέργεια αυτή αποδίδεται πλήρως με την άρση της φόρτισης.

Υπάρχουν υλικά τα οποία εμφανίζουν μη γραμμική ελαστική

συμπεριφορά. Στην περίπτωση π.χ. ενός **ελαστομερούς** (καουτσούκ) η τάση δεν είναι ανάλογη της παραμόρφωσης, δεν ισχύει δηλαδή ο νόμος του Hooke. Το υλικό όμως συμπεριφέρεται ελαστικά, δηλαδή με την άρση της φόρτισης αποδίδει πλήρως την ελαστική ενέργεια που είχε απορροφήσει και επανέρχεται στην αρχική του μορφή. Τα υλικά αυτά μπορεί να εμφανίσουν πολύ μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις μέχρι και 400 έως 500%.

Τέλος υπάρχουν υλικά τα οποία εμφανίζουν **ανελαστική συμπεριφορά** (ανελαστικά στερεά). Για τα υλικά αυτά δεν συμπίπτουν οι διαδρομές φόρτισης και αποφόρτισης στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται **βρόγχος υστέρησης**. Το εμβαδόν που περικλείεται εντός του βρόγχου δίδει την ενέργεια ανά μονάδα όγκου η οποία εκλύεται από το σύστημα υπό μορφή θερμότητας. Η συμπεριφορά αυτή είναι επιθυμητή σε περίπτωση απόσβεσης κραδασμών και εμφανίζεται σε διάφορα πολυμερή αλλά και σε μαλακά μέταλλα όπως ο μόλυβδος. Δεν είναι όμως καθόλου επιθυμητή στην περίπτωση κατασκευής ελατηρίων.

ΣΧΗΜΑ 4.6: Τυπική συμπεριφορά γραμμικά ελαστικών στερεών, ελαστομερών και ανελαστικών στερεών



4.5 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να υπολογιστεί με τη μέτρηση της ελαστικής παραμόρφωσης ε , που προκαλείται από γνωστή τάση σ , από τη σχέση $E = \sigma/\varepsilon$. Αν το E έχει πολύ μεγάλη τιμή τότε για δεδομένη τάση είναι πολύ μικρή η ελαστική παραμόρφωση και έτσι είναι δύσκολο να μετρηθεί, οπότε και ο υπολογισμός του E είναι μικρής ακρίβειας.

Η φυσική συχνότητα ταλάντωσης f κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου d και μήκους l , με μάζα M αναρτημένη από το μέσον του, δίδεται από τη σχέση

$$f = \pi [(3\pi E d^4) / (4l^3 M)]^{1/2} / 2$$

Με τη χρήση στροβοσκοπικών τεχνικών είναι δυνατό να μετρηθεί η f με μεγάλη ακρίβεια και να υπολογιστεί και το μέτρο ελαστικότητας από την παραπάνω σχέση.

Η καλύτερη μέθοδος μέτρησης του E βασίζεται στη μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου μέσα από το υλικό. Η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων u_l δίδεται από τη σχέση

$$u_l = (E/\rho)^{1/2}$$

όπου ρ η πυκνότητα του υλικού. Με μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου εντός ράβδου με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων, υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας από την παραπάνω σχέση.

Τιμές του μέτρου ελαστικότητας για διάφορα υλικά δίδονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Τιμές του μέτρου
Ελαστικότητας E για
διάφορα υλικά.

Υλικό	E (GPa)
Διαμάντι	1000
Βολφράμιο	406
Μαλακός Χάλυβας	196
Χυτοσίδηροι	170-190
Κράματα Χαλκού	120-150
Κράματα Αλουμινίου	69-79
Αργυρος	76
Χρυσός	82
Κράματα Τιτανίου	80-130

4.6 ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Τα περισσότερα μέταλλα, αν φορτιστούν πάνω από το όριο ελαστικότητας, εμφανίζουν μη αντιστρεπτές μεταβολές στο σχήμα και το μέγεθός τους, οι οποίες ονομάζονται πλαστικές παραμορφώσεις. Κλασική περίπτωση είναι η δοκιμή φόρτισης σε εφελκυσμό μιας μεταλλικής ράβδου. Αν καταγραφεί η δύναμη F σε συνάρτηση με την επιμήκυνση ε μέχρι τη θραύση του δοκιμίου, λαμβάνεται διάγραμμα δύναμης - παραμόρφωσης. Αν η

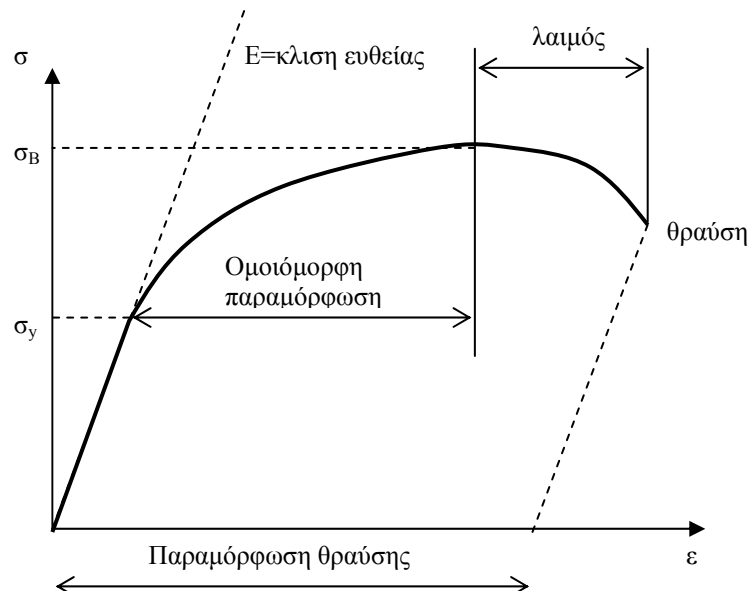
δύναμη εφελκυσμού διαιρεθεί με την αρχική διατομή του δοκιμίου προκύπτει το αντίστοιχο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης. Κατά τη δοκιμή, με την αύξηση της τάσης πέρα από την ελαστική περιοχή αρχίζει έντονη παραμόρφωση του δοκιμίου. Η δύναμη F φτάνει σε μία μέγιστη τιμή και μετά μειώνεται μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Η μέγιστη τιμή συνοδεύεται από την εμφάνιση τοπικής ελάττωσης της διατομής του δοκιμίου, που καλείται **λαιμός**, στην περιοχή του οποίου θα συμβεί η θραύση του δοκιμίου. Επειδή μεταβάλλεται η πραγματική διατομή του δοκιμίου, η τάση που σχεδιάζεται στο παραπάνω διάγραμμα δεν είναι η πραγματική που εξασκείται στην περιοχή στένωσης του δοκιμίου, αλλά καλείται **ονομαστική** τάση.

Στο διάγραμμα ονομαστικής τάσης – παραμόρφωσης ορίζουμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά μεγέθη:

- **όριο διαρροής σ_y** : η τάση πάνω από την οποία εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση.
- **μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό σ_B (UTS – Ultimate Tensile Strength)**: η μέγιστη τιμή της τάσης στο ονομαστικό διάγραμμα σ - ϵ
- **παραμόρφωση θραύσης**: είναι η παραμόρφωση που παρουσιάζεται μετά τη θραύση του δοκιμίου

Στο διάγραμμα αυτό τα μεγέθη της τάσης και της παραμόρφωσης ορίζονται ως προς τις αρχικές διαστάσεις του στερεού σώματος, δηλαδή αρχικό μήκος και αρχική διατομή, είναι δηλαδή **ονομαστικά** και όχι τα πραγματικά, τα οποία σχετίζονται με τις πραγματικές κάθε στιγμή διαστάσεις του υλικού.

ΣΧΗΜΑ 4.7:
Χαρακτηριστικά μεγέθη
στο ονομαστικό
διάγραμμα τάσης –
παραμόρφωσης



Για τιμές της τάσης μικρότερες του ορίου διαρροής έχουμε ελαστικές παραμορφώσεις ενώ για μεγαλύτερες τιμές έχουμε τόσο ελαστικές όσο και πλαστικές παραμορφώσεις. Στους μαλακούς χάλυβες και σε άλλα υλικά υπάρχει όχι σημείο διαρροής αλλά περιοχή διαρροής που ορίζεται από άνω και κάτω όριο διαρροής. Στους σκληρούς χάλυβες δεν υπάρχει χαρακτηριστικό σημείο ορίου διαρροής. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνουμε ως συμβατικό όριο διαρροής την τάση που προκαλεί πλαστική παραμόρφωση 0,1% ή 0,2%.

Παρατηρώντας το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης βλέπουμε ότι για την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης μετά το όριο διαρροής απαιτείται αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης. Το φαινόμενο αυτό καλείται **ενδοτράχυνση** και περιγράφεται στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης από το παραβολικό τμήμα της καμπύλης μετά την ελαστική περιοχή. Η ενδοτράχυνση είναι ουσιαστικά η **σκλήρυνση** του υλικού που συμβαίνει κατά την πλαστική του παραμόρφωση και οφείλεται στην παρεμποδιζόμενη κίνηση των διαταραχών λόγω της παρουσίας άλλων διαταραχών. Το στάδιο της ενδοτράχυνσης λαμβάνει χώρα μεταξύ του ορίου διαρροής και του σχηματισμού του λαιμού, στο μέγιστο δηλαδή σημείο του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης. Στο στάδιο αυτό συμβαίνει ομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση του υλικού.

Μετά τη δημιουργία του λαιμού έχουμε ανομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση, εντοπισμένη στο σημείο του λαιμού, όπου τελικά συμβαίνει και η θραύση του υλικού.

Το συμβατικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δεν αποδίδει σωστά την πλαστική παραμόρφωση του υλικού, γιατί δεν εμφανίζει ούτε τις πραγματικές τάσεις ούτε τις πραγματικές παραμορφώσεις. Λόγω της στένωσης της διατομής του δοκιμίου, ειδικά στο σχηματισμό του λαιμού, η πραγματική τάση είναι πάντα μεγαλύτερη της ονομαστικής και ορίζεται με βάση τη στιγμιαία διατομή του δοκιμίου. Αν A_0 και A η αρχική και η στιγμιαία διατομή του υλικού και l_0 και l το αρχικό και το στιγμιαίο μήκος του δοκιμίου, τότε τα ονομαστικά μεγέθη δίδονται

$$\sigma_n = F / A_0 \text{ και } \varepsilon_n = \Delta l / l_0$$

ενώ τα πραγματικά μεγέθη δίδονται

$$\sigma = F / A \text{ και } d\varepsilon = dl / l$$

όπου η παραμόρφωση ορίστηκε από τη στιγμιαία μεταβολή της. Λόγω της διατήρησης του όγκου ισχύει

$$A_0 l_0 = A l$$

και η ονομαστική παραμόρφωση γίνεται

$$\varepsilon_n = (A_0 - A) / A$$

(το παραπάνω μέγεθος ονομάζεται και βαθμός ενδοτράχυνσης, όσο

μεγαλύτερη η τιμή του, τόσο μεγαλύτερη η ενδοτράχυνση και τόσο μεγαλύτερη η σκλήρυνση του μετάλλου).

Η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$A = A_0 / (1 + \varepsilon_n)$$

Έτσι η πραγματική τάση γίνεται

$$\sigma = \sigma_n (1 + \varepsilon_n)$$

Η συνολική πραγματική παραμόρφωση θα δίνεται ως το ολοκλήρωμα των στοιχειωδών παραμορφώσεων από το l_0 στο l , δηλαδή

$$\varepsilon = \int (dl/l) = \ln (l / l_0) = \ln (A_0 / A)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει με παραγωγή:

$$d\varepsilon = - (dA/A)$$

Επειδή για την ονομαστική παραμόρφωση ισχύει

$$\varepsilon_n = (l - l_0)/l_0 = (l/l_0) - 1$$

θα έχουμε

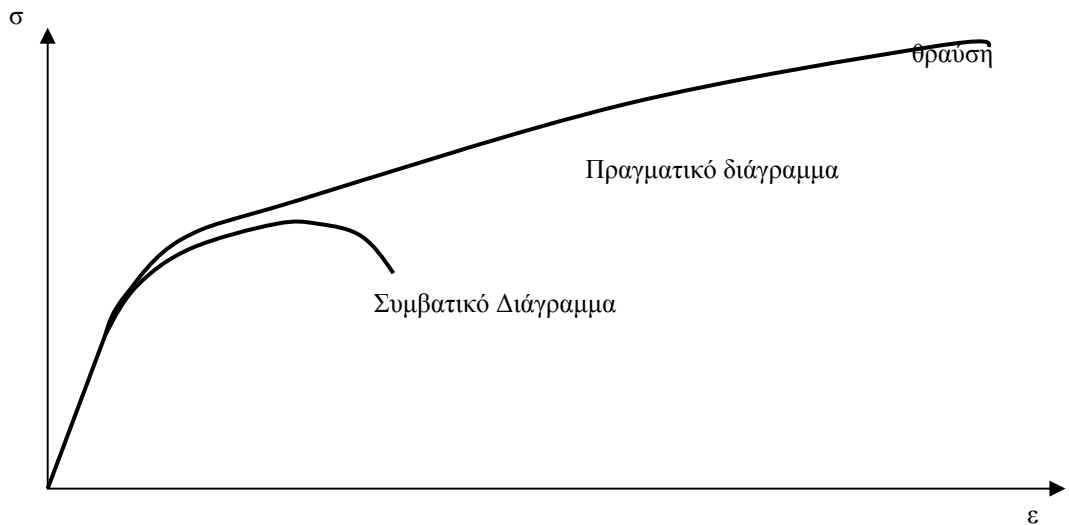
$$\varepsilon = \ln (1 + \varepsilon_n)$$

Αν ορίσουμε ως RA την μείωση της επιφάνειας του δοκιμίου κατά τη θραύση, τότε η πραγματική παραμόρφωση θραύσης προκύπτει:

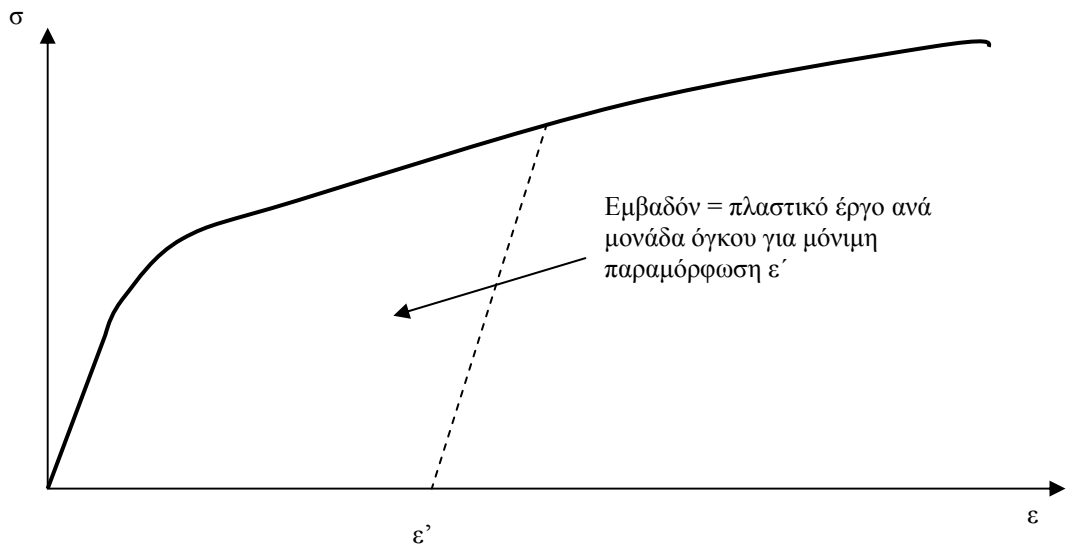
$$\varepsilon_f = \ln (1 / [1 - RA])$$

Από τα ονομαστικά μεγέθη μπορούν συνεπώς να προκύψουν τα πραγματικά, τα οποία, αν σχεδιαστούν σε γραφική παράσταση τάσης – παραμόρφωσης, δίδουν μία συνεχώς αύξουσα καμπύλη μέχρι και τη θραύση του δοκιμίου.

ΣΧΗΜΑ 4.8: Σύγκριση ονομαστικού και πραγματικού διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης.



ΣΧΗΜΑ 4.9: Πλαστικό έργο παραμόρφωσης στο πραγματικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης.



Η πλαστική περιοχή του πραγματικού διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης ακολουθεί για πολλά υλικά την **εξίσωση Hollomon**:

$$\sigma = K \varepsilon^{\eta}$$

όπου **K** η σταθερά αντοχής και **η** ο **συντελεστής ενδοτράχυνσης** του υλικού. Και τα δύο μεγέθη είναι χαρακτηριστικά του υλικού και μπορούν να βρεθούν από πίνακες. Ο συντελεστής ενδοτράχυνσης εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο σκληραίνει το υλικό κατά την πλαστική του παραμόρφωση. Αυτό φαίνεται αν πάρουμε τη λογαριθμική μορφή της παραπάνω σχέσης:

$$\ln(\sigma) = \ln(K) + \eta \ln(\varepsilon)$$

ενώ με παραγωγή της παραπάνω σχέσης έχουμε:

$$d\sigma / \sigma = \eta (d\varepsilon / \varepsilon)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι μία απειροστή μεταβολή της πραγματικής τάσης που προκαλείται από αντίστοιχη απειροστή μεταβολή της πραγματικής παραμόρφωσης, έχει συντελεστή αναλογίας τον εκθέτη ενδοτράχυνσης η . Όσο μεγαλύτερη η τιμή του η , τόσο μεγαλύτερες τάσεις απαιτούνται για αύξηση της παραμόρφωσης του υλικού.

Η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για τα πραγματικά μεγέθη ονομάζεται **καμπύλη ενδοτράχυνσης**, ενώ η κλίση της σε κάποιο σημείο ισούται με τον συντελεστή ενδοτράχυνσης η . Ο συντελεστής ενδοτράχυνσης ισούται με την πραγματική παραμόρφωση μέγιστου φορτίου, δηλαδή στο σημείο που αρχίζει ο σχηματισμός του λαιμού (UTS) (το οποίο θα δείξουμε στη συνέχεια).

Στο σημείο έναρξης σχηματισμού του λαιμού, η ασκούμενη δύναμη γίνεται μέγιστη (όπως φαίνεται από το ονομαστικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης), οπότε θα ισχύει:

$$dF / dl = 0$$

επειδή ισχύει:

$$F = \sigma A$$

Θα έχουμε παραγωγίζοντας την παραπάνω σχέση:

$$dF / dl = \sigma (dA/dl) + A(d\sigma/dl) = 0$$

ή

$$\sigma dA = -A d\sigma$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση του Hollomon προκύπτει:

$$K\epsilon^\eta (dA/A) = -K\eta \epsilon^{(\eta-1)} d\epsilon$$

Όπως δείξαμε ισχύει:

$$d\epsilon = - (dA/A)$$

οπότε από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει τελικά ότι

$$\epsilon = \eta$$

(για το σημείο της μέγιστης ονομαστικής τάσης σ_B).

Ο συντελεστής ενδοτράχυνσης εκφράζει δηλαδή τη μέγιστη επιμήκυνση που μπορεί να υποστεί το δοκίμιο ομοιόμορφα, πριν δηλαδή αρχίσει ο σχηματισμός του λαιμού και η περιοχή πλαστικής αστάθειας. Όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής ενδοτράχυνσης τόσο ασφαλέστερα μπορεί να

παραμορφωθεί πλαστικά ένα υλικό χωρίς κίνδυνο δημιουργίας λαιμού, διότι η πλαστική αστάθεια είναι μετατοπισμένη προς μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις κατεργασίες παραμόρφωσης των υλικών, όπως θα φανεί σε επόμενα κεφάλαια..

Η ενδοτράχυνση είναι πάρα πολύ σημαντική ιδιότητα των μετάλλων, διότι αν το υλικό εξακολουθούσε να παραμορφώνεται (όπως συμβαίνει στα τέλεια πλαστικά υλικά), τότε θα θραυόταν μόλις περνούσε το όριο διαρροής, λόγω της συνεχούς παραμόρφωσης που θα προκαλούνταν υπό την επίδραση της τάσης αυτής.

Ο εκθέτης ενδοτράχυνσης n είναι σημαντικός για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των υλικών κατά την υποβολή τους σε διάφορες κατεργασίες. Για παράδειγμα μεγάλη τιμή του n σημαίνει μικρή τιμή της **κατεργασιμότητας**. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κοπτικό εργαλείο με την παραμόρφωση που προκαλεί στο υλικό στην περιοχή της κοπής, αυξάνει την αντοχή του εμπρός από το κοπτικό, καθώς και τη σκληρότητά του σε μεγάλες τιμές λόγω του υψηλού n .

Αντιθέτως οι υψηλές τιμές του n είναι επιθυμητές στην περίπτωση διαμόρφωσης ελασμάτων, κατά την οποία είναι επιθυμητή η αντίσταση του υλικού στη δημιουργία λαιμού και στη μείωση της διατομής του ελάσματος. Στην περίπτωση αυτή, με την έναρξη της δημιουργίας του λαιμού, το υλικό γίνεται πιο ισχυρό στην περιοχή του λαιμού, με αποτέλεσμα η πλαστική παραμόρφωση να μεταφερθεί σε γειτονικά πιο ασθενή σημεία. Με τον τρόπο αυτό αντί να έχουμε απότομους λαιμούς αυτοί γίνονται επιμήκεις και πιο ομοιόμορφοι, με αποτέλεσμα την ομαλότερη και λιγότερο επικίνδυνη για θραύση παραμόρφωση του υλικού. Στην περίπτωση αυτή η θραύση μεταφέρεται σε υψηλότερες τιμές της παραμόρφωσης (δηλαδή έχουμε μεγαλύτερη παραμόρφωση θραύσης).

Χρησιμοποιώντας τη σχέση που συνδέει την πραγματική με την ονομαστική παραμόρφωση και την παραπάνω σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε την ονομαστική παραμόρφωση στη μέγιστη ονομαστική τάση εφελκυσμού του υλικού του υλικού:

$$\varepsilon_{n \text{ UTS}} = \exp(n) - 1$$

Όπου $\varepsilon_{n \text{ UTS}}$ η ονομαστική παραμόρφωση στη μέγιστη ονομαστική τάση εφελκυσμού του υλικού.

Από τους ορισμούς της πραγματικής και ονομαστικής τάσης προκύπτει:

$$\sigma/\sigma_n = A_0/A$$

Παίρνοντας το λογάριθμο της παραπάνω σχέσης έχουμε τελικά:

$$\ln(\sigma/\sigma_n) = \ln(A_0/A) = \varepsilon$$

οπότε, χρησιμοποιώντας και τη σχέση μεταξύ πραγματικής και ονομαστικής παραμόρφωσης προκύπτει τελικά:

$$\sigma = \sigma_n (\varepsilon_n + 1)$$

Με την παραπάνω σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε την πραγματική τάση από την ονομαστική τάση και παραμόρφωση για την περιοχή της ομογενούς παραμόρφωσης (μέχρι το UTS).

Συνδυάζοντας τη σχέση

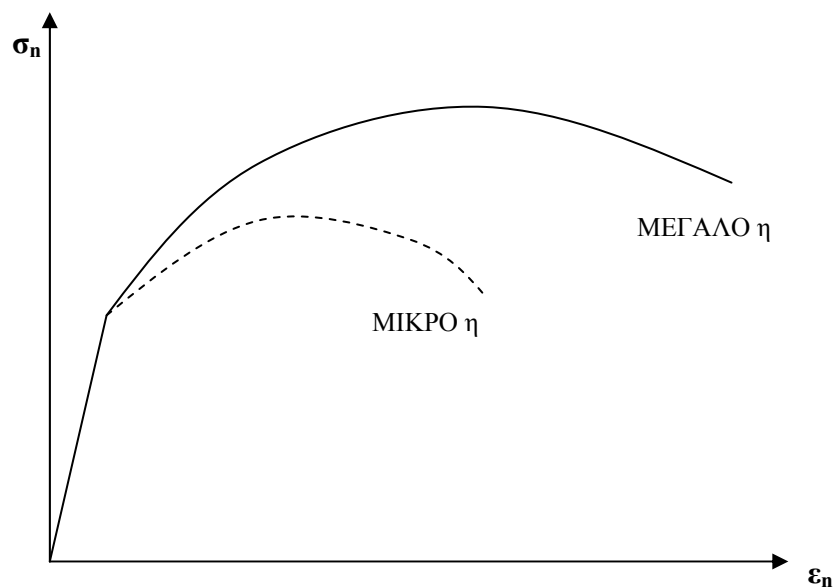
$$\varepsilon_{n \text{ UTS}} = \exp(\eta) - 1$$

με την προηγούμενη (στο σημείο UTS), προκύπτει η πραγματική τάση στο UTS σε σχέση με την ονομαστική σ_B (θέτοντας όπου σ_n το σ_B):

$$\sigma_{\text{UTS}} = \sigma_B \exp(\eta)$$

ΣΧΗΜΑ 4.10:

Επίδραση του συντελεστή ενδοτράχυνσης στη μορφή του ονομαστικού διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης.



4.7 ΕΡΓΟ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Αν σε κάποιο σημείο της διαδικασίας πλαστικής παραμόρφωσης αποφορτίσουμε το υλικό (αφαιρέσουμε δηλαδή την ασκούμενη δύναμη), η αποφόρτιση ακολουθεί μία ευθεία παράλληλη της ευθείας της γραμμικής ελαστικής περιοχής, αφήνοντας μία μόνιμη – πλαστική- παραμόρφωση στο σώμα. Το εμβαδόν που περικλείεται μεταξύ της πραγματικής καμπύλης φόρτισης μέχρι το συγκεκριμένο σημείο, της καμπύλης αποφόρτισης και του άξονα της παραμόρφωσης, εκφράζει το **ειδικό έργο παραμόρφωσης ή πλαστικό έργο**, το μηχανικό έργο δηλαδή **ανά μονάδα όγκου** που δαπανήθηκε για να γίνει η συγκεκριμένη πλαστική παραμόρφωση. Είναι πολύ σημαντικό μέγεθος γιατί δίνει το μέτρο της ενέργειας ανά μονάδα όγκου που απαιτείται προκειμένου να δοθεί σε συγκεκριμένο υλικό μία συγκεκριμένη μορφή μέσω μίας κατεργασίας πλαστικής παραμόρφωσης. Εκφράζεται προσεγγιστικά (αν αμεληθεί το έργο ελαστικής παραμόρφωσης):

$$u = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon$$

Με αντικατάσταση στην παραπάνω σχέση της εξίσωσης Hollomon έχουμε

$$u = K \int_0^{\varepsilon} \varepsilon^n d\varepsilon$$

η οποία με ολοκλήρωση δίνει:

$$u = \frac{K \varepsilon^{n+1}}{n+1} = \bar{\sigma} \varepsilon$$

όπου

$$\bar{\sigma} = \frac{K \varepsilon^n}{n+1}.$$

Η μέση πραγματική τάση του υλικού για πραγματική πλαστική παραμόρφωση ίση με ε . Αν λάβουμε υπ' όψιν τον συνολικό όγκο V του σώματος, το συνολικό έργο πλαστικής παραμόρφωσης γίνεται:

$$W_i = \frac{KV \varepsilon^{n+1}}{n+1}$$

Ο δείκτης i δείχνει ότι το παραπάνω έργο είναι **ιδεατό** γιατί ο υπολογισμός αντιστοιχεί σε ομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου. Το μέγεθος που προκύπτει είναι μικρότερο του πραγματικού έργου παραμόρφωσης, αφού δεν λαμβάνονται υπ' όψιν οι δυνάμεις τριβής και οι εσωτερικές τοπικές διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την μη ομογενή παραμόρφωση του δοκιμίου. Στην περίπτωση αυτή τα επίπεδα κάθετα στην διεύθυνση της δύναμης παραμορφώνονται και δεν έχουν πια επίπεδη μορφή.

4.8 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΝ ΘΕΡΜΩ

Εξ ορισμού οι διαμορφώσεις εν θερμώ πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης, περίπου ίσης με το ήμισυ του σημείου τήξης (σε απόλυτη θερμοκρασία). Αντιθέτως οι ψυχρές διαμορφώσεις πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες μικρότερες του 0.3 της θερμοκρασίας τήξης του υλικού.

Κατά την θερμή διαμόρφωση λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα διαφορετικές διεργασίες. Κατ' αρχήν, εξαιτίας της αύξησης της πυκνότητας των διαταραχών έχουμε **ενδοτράχυνση** και σκλήρυνση του υλικού. Όμως λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του μετάλλου υπάρχει αρκετή διαθέσιμη ενέργεια ώστε να ξεκινήσει **δυναμική ανακρυστάλλωση** του μετάλλου. Οι δύο διεργασίες πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης γι' αυτό και χαρακτηρίζονται ως δυναμικές. Η ανακρυστάλλωση δρα ανταγωνιστικά προς την ενδοτράχυνση γιατί καταστρέφει τις διαταραχές και μαλακώνει έτσι το μέταλλο, με αποτέλεσμα την μείωση των αναγκαίων τάσεων για την παραμόρφωση του μετάλλου και τη μείωση του αναγκαίου έργου και του μεγέθους των μηχανών.

Εξ' αιτίας της ανταγωνιστικής δράσης της ενδοτράχυνσης και της ανακρυστάλλωσης, η τελική αντοχή και σκληρότητα του μετάλλου λίγο διαφέρει από την αρχική του, πριν δηλαδή την υποβολή του σε διαμόρφωση. Επιπλέον συχνά προκαλείται πλήρης ανακρυστάλλωση κατά την ψύξη του μετάλλου.

Επειδή η ανακρυστάλλωση πραγματοποιείται μέσω ατομικής διάχυσης, η οποία απαιτεί συγκεκριμένο χρόνο, οι διαμορφώσεις εν θερμώ εξαρτώνται από τον ρυθμό της παραμόρφωσης (δηλαδή ουσιαστικά από τον χρόνο που απαιτείται για συγκεκριμένη παραμόρφωση). Ο ρυθμός παραμόρφωσης δίδεται προφανώς:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

ενώ για τον απλό μονοαξονικό εφελκυσμό γίνεται:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{l}$$

όπου v η ταχύτητα της κεφαλής του μηχανισμού που εφελκύει το δοκίμιο και l το στιγμιαίο μήκος του δοκιμίου. Προφανώς οι παραπάνω σχέσεις έχουν εφαρμογή για την ομογενή περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης. Για την περιοχή της μη ομογενούς παραμόρφωσης (σχηματισμός λαιμού) ο ρυθμός παραμόρφωσης ορίζεται ως:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d}{dt} \left(\ln \frac{Ao}{A} \right) = - \frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$$

Η συμπεριφορά των διαφόρων υλικών σε σχέση με τον ρυθμό παραμόρφωσης περιγράφεται με τη χρήση χαρακτηριστικών καμπυλών πραγματικής τάσης – πραγματικής παραμόρφωσης για διάφορες τιμές του ρυθμού παραμόρφωσης. Στις καμπύλες αυτές, συνήθως για δεδομένη πραγματική παραμόρφωση παρατηρείται σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της πραγματικής τάσης και του ρυθμού παραμόρφωσης για λογαριθμική κλίμακα στον άξονα της τάσης. Αυτό εκφράζεται με λογαριθμική σχέση της μορφής:

$$\ln \sigma = m \ln \dot{\epsilon} + \ln C$$

ή

$$\sigma = C \dot{\epsilon}^m$$

όπου m ο συντελεστής ευαισθησίας του μετάλλου στο ρυθμό παραμόρφωσης και C η σταθερά αντοχής στον ρυθμό παραμόρφωσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συντελεστές αυτοί μεταβάλλονται για διαφορετικές τιμές της πραγματικής παραμόρφωσης, αν και το m δεν εξαρτάται σημαντικά από την τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης και συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί σταθερό για μεγάλο εύρος πραγματικών παραμορφώσεων.

Αποδεικνύεται εύκολα ότι για τις πραγματικές παραμορφώσεις και τους ρυθμούς μεταβολής τους στην τρισδιάστατη κατάσταση ισχύουν οι σχέσεις (λόγω διατήρησης του όγκου):

$$\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0$$

και

$$\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z = 0$$

4.9 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ

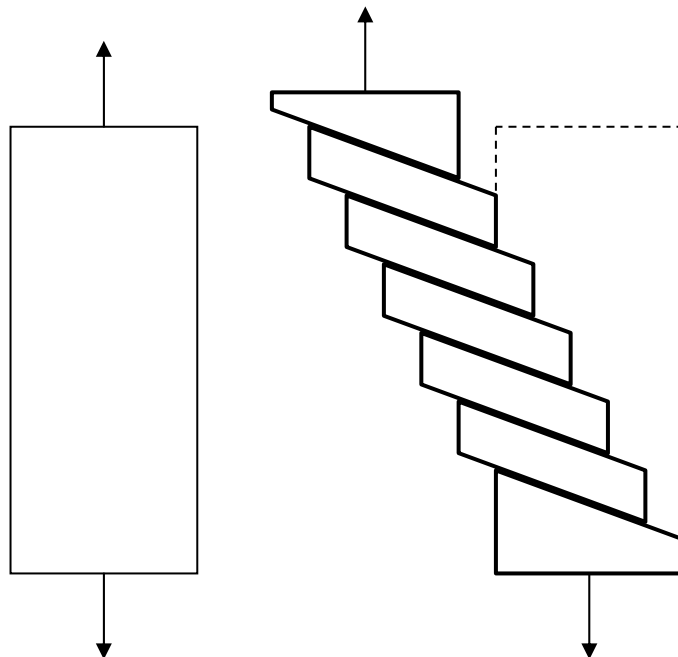
Η πλαστική παραμόρφωση ενός μονοκρυστάλλου πραγματοποιείται μέσω της **ολίσθησης** τμημάτων του κρυσταλλικού πλέγματος, του ενός σε σχέση με το άλλο, κατά μήκος ορισμένων κρυσταλλικών επιπέδων, των επιπέδων ολίσθησης. Η ολίσθηση των επιπέδων γίνεται με τη διάδοση διαταραχών, κατά μήκος των επιπέδων ολίσθησης. Η ολίσθηση είναι αποτέλεσμα της εφαρμογής **διατμητικών τάσεων** στο επίπεδο ολίσθησης, ανεξάρτητα των τάσεων που εφαρμόζονται στον κρύσταλλο (ενεργεί η συνιστώσα η εφαπτόμενη στο επίπεδο ολίσθησης).

Η ολίσθηση των επιπέδων μπορεί να παρομοιαστεί με την ολίσθηση των κερμάτων που είναι διατεταγμένα το ένα πάνω στο άλλο σε μία στοίβα, όταν εφαρμοστεί μία πλάγια δύναμη στα κέρματα. Στην περίπτωση αυτή η στοίβα των κερμάτων είναι ο μονοκρύσταλλος και οι επιφάνειες των κερμάτων τα επίπεδα ολίσθησης.

Η τιμή της εφαρμοζόμενης διατμητικής τάσης που απαιτείται για να συμβεί ολίσθηση καλείται **κρίσιμη διατμητική τάση τ^*** . Όλοι οι μονοκρύσταλλοι του ίδιου μετάλλου ολισθαίνουν κάτω από την ίδια κρίσιμη διατμητική τάση.

Επειδή ακριβώς η ολίσθηση πραγματοποιείται με τη διάδοση διαταραχών απαιτεί πολύ λιγότερη ενέργεια, καθώς επίσης και την εφαρμογή πολύ μικρότερης διατμητικής τάσης από την θεωρητικά υπολογιζόμενη (η οποία προκύπτει από την ταυτόχρονη μετακίνηση όλων των ατόμων στις δύο πλευρές του επιπέδου ολίσθησης). Η ολίσθηση με την μετακίνηση των διαταραχών προσομοιάζει με την μετακίνηση ενός χαλιού μέσω της κίνησης μιας πτυχής του. Προφανώς με τον τρόπο αυτό χρειάζεται πολύ μικρότερη δύναμη από ότι στην περίπτωση της συνολικής μετακίνησης του χαλιού.

ΣΧΗΜΑ 4.11:
Παραμόρφωση
μονοκρυστάλλου με
ολίσθηση επιπέδων.



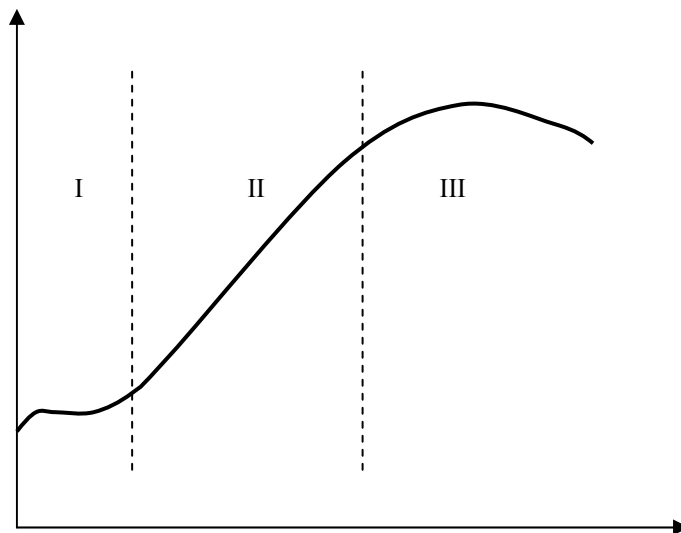
Κατά την πλαστική παραμόρφωση η μετατόπιση των ατόμων είναι τοπική και δεν καταστρέφεται ο μεταλλικός δεσμός. Αυτό υποβοηθείται από τη φύση του μεταλλικού δεσμού, ο οποίος δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένα άτομα. Έτσι δεν υπάρχει ανάγκη για σπάσιμο του δεσμού μεταξύ δύο ατόμων, όπως θα γινόταν στην περίπτωση του ιοντικού ή του ομοιοπολικού δεσμού. Ολίσθηση στους ιοντικούς ή ετεροπολικούς δεσμούς απαιτεί πολύ μεγαλύτερη τάση από ότι στους μεταλλικούς δεσμούς.

Η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης ενός μονοκρυστάλλου είναι διαφορετική από αυτή ενός πολυκρυσταλλικού υλικού. Χωρίζεται σε τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή, είναι η περιοχή της εύκολης ολίσθησης, σχεδόν γραμμική με μικρή κλίση. Περιλαμβάνει την αυξανόμενη κίνηση διαταραχών με την αύξηση της τάσης. Εμφανίζονται οι γραμμές ολίσθησης. Η ολίσθηση συμβαίνει μόνο κατά μία διεύθυνση (ενεργοποίηση του κύριου συστήματος ολίσθησης).

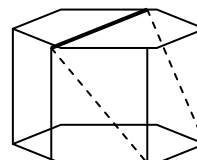
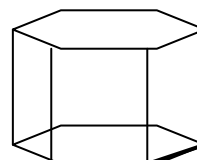
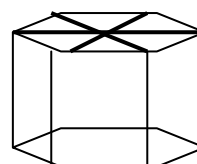
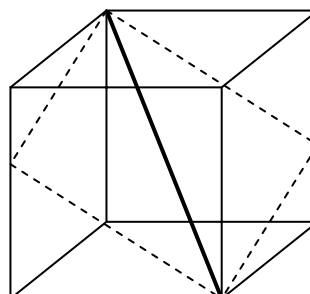
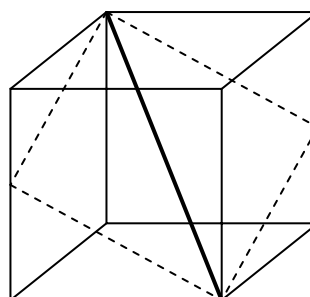
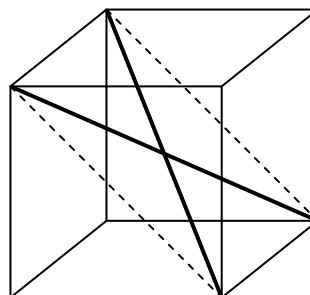
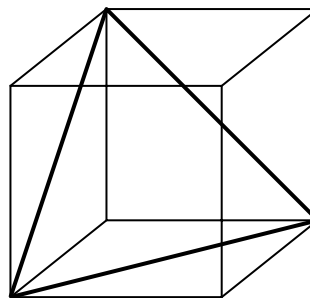
Η δεύτερη περιοχή είναι σχεδόν γραμμική με μεγαλύτερη κλίση που περιγράφει την σκλήρυνση του μετάλλου. Με την ενεργοποίηση δευτερευόντων διαταραχών (δευτερεύοντα συστήματα ολίσθησης) και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους, σχηματίζονται ακίνητες διαταραχές, οι οποίες εμποδίζουν την κίνηση των υπολοίπων, σκληραίνουν έτσι το υλικό. Οι γραμμές ολίσθησης εξασθενούν.

Η τρίτη περιοχή είναι παραβολική και χαρακτηρίζεται από τη μείωση της ταχύτητας σκλήρυνσης. Οι γραμμές ολίσθησης εξαφανίζονται και εμφανίζονται ταινίες ολίσθησης. Αποδεσμεύονται ορισμένες διαταραχές λόγω της αύξησης της φόρτισης και διευκολύνεται έτσι η ολίσθηση.

ΣΧΗΜΑ 4.12:
Καμπύλη τάσης –
παραμόρφωσης
μονοκρυστάλλου.



Δομή	Επίπεδο ολίσθησης	Διεύθυνση ολίσθησης	Αριθμός Συστημάτων Ολίσθησης
FCC: Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, γ Fe	{111}	$\langle 1-10 \rangle$	$4 \times 3 = 12$
BCC: AFe, W, Mo	{110}	$\langle -111 \rangle$	$6 \times 2 = 12$
AFe, Mo, W, Na	{211}	$\langle -111 \rangle$	$12 \times 1 = 12$
AFe, K	{321}	$\langle -111 \rangle$	$24 \times 1 = 24$
HCP: Cd, Zn, Mg, Ti, Be	(0001)	$\langle 11-20 \rangle$	$1 \times 3 = 3$
Ti (πρισματικά επίπεδα)	{10-10}	$\langle 11-20 \rangle$	$3 \times 1 = 3$
Ti, Mg	{10-11}	$\langle 11-20 \rangle$	$6 \times 1 = 6$

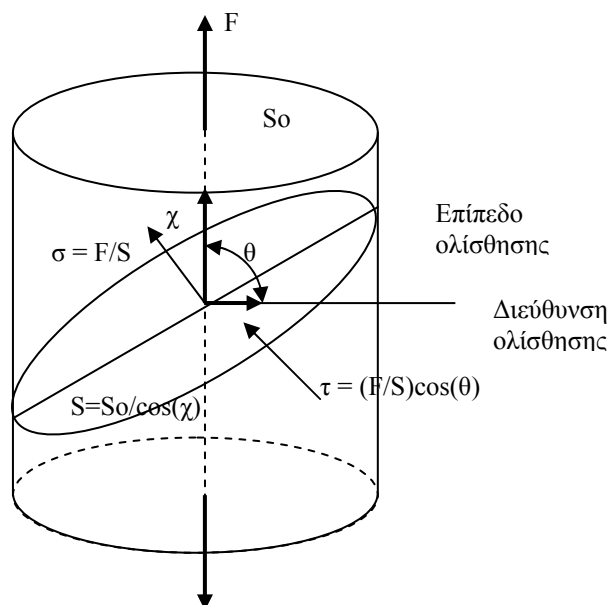


Η διεύθυνση των επιπέδων ολίσθησης, σε ένα κρύσταλλο πλαστικά παραμορφωμένο, γίνεται αντιληπτή με την εμφάνιση στην επιφάνειά του ταινιών ολίσθησης. Τα επίπεδα ολίσθησης των κρυστάλλων στα μέταλλα και τα κράματα των συνήθων συστημάτων είναι **τα πυκνά σε άτομα επίπεδα**, τα οποία είναι και τα επίπεδα με την μεγαλύτερη πλεγματική απόσταση μεταξύ τους. Στα επίπεδα αυτά, η απαιτούμενη διατμητική τάση για τη μετακίνηση των ατόμων είναι η μικρότερη, λόγω της μεγαλύτερης απόστασης μεταξύ διαδοχικών επιπέδων. Σε αυτά τα πυκνά επίπεδα η διεύθυνση της ολίσθησης είναι **η διεύθυνση της μέγιστης πυκνότητας**, στην οποία η ενδοατομική απόσταση είναι η ελάχιστη. Επειδή η ολίσθηση γίνεται και σε μικρότερη απόσταση (μικρότερο διάνυσμα Burgers της διαταραχής λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας ατόμων), απαιτείται συνολικά λιγότερο έργο. Η ενέργεια παραμόρφωσης είναι ανάλογη του τετραγώνου του διανύσματος Burgers. Επειδή λοιπόν η ενέργεια αυτή ελαχιστοποιείται στην περίπτωση των πυκνών σε άτομα επιπέδων και των πυκνών σε άτομα διευθύνσεων, η ολίσθηση συμβαίνει κυρίως σε πυκνά επίπεδα και πυκνές διευθύνσεις.

Ο συνδυασμός ενός επιπέδου και μιας πυκνής σε άτομα διεύθυνσης καθορίζει ένα πιθανό σύστημα ολίσθησης. Ο αριθμός των δυνατών συστημάτων ολίσθησης σε μια κρυσταλλική δομή δίνει μία πρώτη ένδειξη όσον αφορά την πλαστικότητα της συγκεκριμένης μορφής και τη δυνατότητα των μετάλλων της συγκεκριμένης δομής να κατεργαστούν με ψυχρές κατεργασίες. Έτσι τα μέταλλα του fcc συστήματος (π.χ. Al, Cu, Au), το οποίο έχει περισσότερα επίπεδα μέγιστης πυκνότητας από το hcp, εμφανίζουν πολύ υψηλότερη κατεργασιμότητα από τα μέταλλα του hcp (όπως ο Zn).

Επίπεδα της ίδιας οικογένειας είναι μεταξύ τους ισοδύναμα ως προς την ευκολία ολίσθησης. Αν υπάρχουν πολλά ισοδύναμα συστήματα ολίσθησης, η ολίσθηση ξεκινά από εκείνο το σύστημα με τη μεγαλύτερη συνιστώσα διατμητικής τάσης. Αν εφαρμοστεί η ίδια διατμητική τάση σε περισσότερα του ενός ισοδύναμα συστήματα, τότε η ολίσθηση ξεκινά ταυτόχρονα σε όλα.

ΣΧΗΜΑ 4.13:



Λόγω του ότι η κινούσα δύναμη της ολίσθησης είναι η διατμητική τάση κατά τη διεύθυνση του συστήματος ολίσθησης, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν για την ολίσθηση η συνιστώσα της επιβαλλόμενης τάσης κατά τη διεύθυνση της ολίσθησης. Αν S_0 η επιφάνεια της διατομής του μονοκρυστάλλου, χ η γωνία μεταξύ της καθέτου στο επίπεδο ολίσθησης και της διεύθυνσης της επιβαλλόμενης δύναμης, F η επιβαλλόμενη δύναμη και θ η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης ολίσθησης και της F , τότε η διατμητική συνιστώσα προκύπτει ως

$$\tau = (F/S_0) \sin(\chi) \sin(\theta)$$

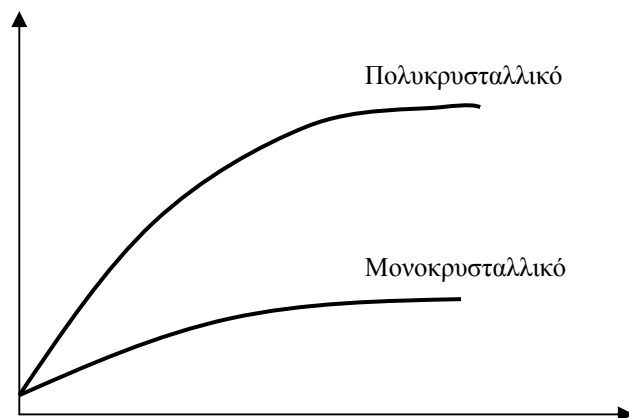
Ο παραπάνω νόμος καλείται **νόμος του Schmid** και ο παράγοντας $\sin(\chi)\sin(\theta)$ παράγοντας Schmid. Σύμφωνα με το νόμο αυτό, όταν μονοκρύσταλλοι του ίδιου υλικού εφελκύνονται μονοαξονικά με το ίδιο φορτίο αλλά κατά μήκος διαφορετικών κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων, η διατμητική τάση που θα προκαλέσει την πλαστική παραμόρφωση έχει διαφορετική τιμή για κάθε κρυσταλλογραφική διεύθυνση. Η μόνη σταθερή τιμή είναι της κρίσιμης διατμητικής τάσης τ^* , στην οποία αντιστοιχούν οι πρώτες ολισθήσεις. Επειδή τα μέταλλα είναι πολυκρυσταλλικά, σε μία καταπόνηση θα υπάρχουν πάντα κόκκοι με $\theta=\chi=\pi/4$, με μέγιστη δηλαδή τιμή του παράγοντα Schmid ($=0.5$). Έτσι το πραγματικό όριο ελαστικότητας ισούται με $2\tau^*$. Όσο αυξάνεται η τιμή της τάσης τόσο η διεύθυνση της ολίσθησης πλησιάζει την διεύθυνση της επιβαλλόμενης δύναμης.

4.10 ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Στα πολυκρυσταλλικά υλικά (τα περισσότερα κράματα και μέταλλα), η ύπαρξη των διαχωριστικών επιφανειών των κόκκων ισχυροποιεί το υλικό, εμποδίζοντας τη διάδοση των διαταραχών. Έτσι τα λεπτόκοκκα μέταλλα εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή, γιατί με την μείωση των κόκκων αυξάνονται σε μήκος τα εμπόδια που συναντούν οι διαταραχές.

Σε κάθε περίπτωση καταπόνησης, η αντοχή ενός πολυκρυσταλλικού σώματος είναι ανώτερη του μονοκρυστάλλου του σώματος. Οι γραμμές ολίσθησης παρουσιάζουν ασυνέχεια στα όρια των κόκκων και διαφορετική διεύθυνση από κόκκο σε κόκκο, λόγω διαφορετικού προσανατολισμού, από κόκκο σε κόκκο, των επιπέδων και των διευθύνσεων μέγιστης πυκνότητας.

ΣΧΗΜΑ 4.14:



Σε υψηλότερες θερμοκρασίες τα όρια των κόκκων έχουν δυσμενή επίδραση στην αντοχή, εξασθενώντας το μέταλλο λόγω της επίδρασης του φαινομένου του ερπυσμού.

Τα fcc μέταλλα παραμορφώνονται πιο εύκολα από τα hcp, λόγω της παρουσίας περισσότερων επιπέδων μέγιστης πυκνότητας. Στα hcp παρατηρείται η δημιουργία διδυμίων. Με τη δημιουργία διδυμίων αυξάνονται οι διευθύνσεις μέγιστης πυκνότητας εντός του κρυστάλλου, διευκολύνοντας έτσι την πλαστική παραμόρφωση.

Κατά τη διάρκεια της ενδοτράχυνσης αυξάνεται η πυκνότητα των διαταραχών, εμποδίζοντας την κίνησή τους για τη δημιουργία ολισθήσεων. Έτσι αυξάνεται η αντοχή και η σκληρότητα του υλικού, διότι απαιτείται συνεχώς μεγαλύτερη τάση για την συνέχιση της παραμόρφωσης.

Το όριο διαρροής ενός πολυκρυσταλλικού υλικού περιγράφεται από τον **νόμο των Hall-Petch**, που δίδεται

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$$

όπου σ_0 η τάση διαρροής του μονοκρυστάλλου και d η διάμετρος των κόκκων. Η σταθερά K εξαρτάται από τη δομή των ορίων των κόκκων.

4.11 ΥΠΕΡΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ορισμένα κράματα επιτυγχάνουν ομοιόμορφες πλαστικές παραμορφώσεις από 100% έως και 1000%, χωρίς τοπικές ανωμαλίες ή θραύση. Η συμπεριφορά αυτή ονομάζεται υπερπλαστικότητα. Τέτοια κράματα είναι: Ti-6%Al-4%V και Zn-23%Al.

Για να έχουμε υπερπλαστικότητα θα πρέπει το υλικό να είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκο, η παραμόρφωση να λαμβάνει χώρα σε υψηλή θερμοκρασία ($T_a = 0,5-0,65T_m$), η ταχύτητα παραμόρφωσης να είναι πολύ μικρή και οι διαχωριστικές επιφάνειες των κόκκων να είναι πολύ ομαλές, επιτρέποντας την ολίσθηση και την περιστροφή τους.

4.12 ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

Μια από τις πιο κοινές δοκιμές για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών είναι η *δοκιμή σκληρότητας*. Η **σκληρότητα** ενός υλικού ορίζεται γενικά ως η αντίστασή του στη μόνιμη επιβολή φορτίου (τοπική πλαστική παραμόρφωση) από ένα άλλο σώμα. Αποτελεί συνεπώς μέτρο της αντίστασης των υλικών σε χάραξη, σε τριβή και σε φθορά καθώς και ένα σκληρό υλικό είναι δύσκολο να χαραχθεί ή να διατηρηθεί από ένα άλλο σώμα.

Η σκληρότητα συνήθως μετράται με την αντίσταση στη διείσδυση ενός σώματος στη μάζα του υλικού. Το σώμα αυτό (διεισδύτης) είναι από

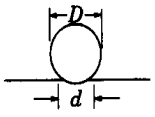
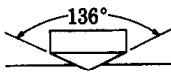
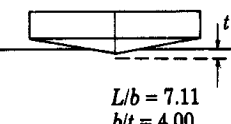
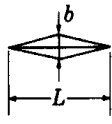
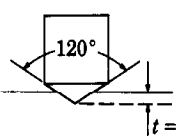
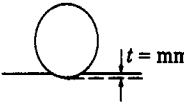
καθορισμένο υλικό (χάλυβα, διαμάντι, καρβίδιο του βολφραμίου) και έχει καθορισμένο σχήμα (σφαίρας, πυραμίδας ή κώνου). Στις περισσότερες δοκιμές σκληρότητας, επιβάλλεται ένα **σταθερό φορτίο** στον διεισδύτη καθώς αυτός πιέζεται μέσα στην επιφάνεια του υλικού που ελέγχεται για την σκληρότητα του. Αφού ολοκληρωθεί η διείσδυση αποσύρεται στην συνέχεια ο διεισδύτης από την επιφάνεια του υλικού και η σκληρότητα υπολογίζεται με βάση εμπειρικούς τύπους από το **εμβαδόν ή το βάθος του ίχνους** που άφησε ο διεισδύτης πάνω στην επιφάνεια του σώματος.

Διάφορες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για να μετρήσουν τη σκληρότητα των υλικών χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά και γεωμετρίες. Επειδή η αντίσταση εξαρτάται από τη μορφή του διεισδύτη και του φορτίου που εφαρμόζεται η σκληρότητα δεν είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα.

Μεταξύ των πιο κοινών τυποποιημένων δοκιμών σκληρότητας είναι οι δοκιμές Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop, και σκληροσκοπίου. Οι τιμές σκληρότητας αναφέρονται πάντα με το όνομα της μεθόδου μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε (π.χ. σκληρότητα Brinell, Vickers, Knoop, Rockwell κ.λ.π.), το φορτίο και το χρόνο επιβολής.

ΣΧΗΜΑ 4.15

Γενικά χαρακτηριστικά μεθόδων μέτρησης σκληρότητας.

ΔΟΚΙΜΗ	ΤΥΠΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ	ΣΧΗΜΑ ΙΧΝΟΥΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ	ΚΑΤΟΨΗ	ΦΟΡΤΙΟ
Brinell	Σφαίρα 10 mm από χάλυβα ή καρβίδιο του βολφραμίου			500 kg 1500 kg 3000 kg
Vickers	Πυραμίδα από διαμάντι			1-120 kg
Knoop	Πυραμίδα από διαμάντι			25 g-5 kg
Rockwell				kg
A	Κώνος από διαμάντι			60
C				150
D				100
B	Χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου 1/16 in.			100
F				60
G				150
E	Χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου 1/16 in.			100
				Αριθμοί Σκληρότητας
				HRA HRC HRD
				= 100 - 500t
				HRB HRF HRG
				= 130 - 500t
				HRE

Δοκιμή Brinell

Στη δοκιμή Brinell, μια σφαίρα από χάλυβα ή καρβίδιο του βολφραμίου με διάμετρο 10 mm, πιέζεται ενάντια σε μια επιφάνεια, με φορτίο 500, 1500, ή

3000 Kg. Ο αριθμός σκληρότητας Brinell (HB) ορίζεται ως η αναλογία του φορτίου P στον κυρτή περιοχή της διείσδυσης, και δίνεται από τον τύπο

$$HB = \frac{2 * P}{(\pi * D) * (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{Kg/mm}^2$$

όπου D είναι η διάμετρος της σφαίρας και d είναι η διάμετρος του ίχνους.

Ανάλογα με την κατάσταση του υλικού διαφορετικοί τύποι ίχνών εντοπίζονται στην επιφάνεια μετά την εκτέλεση της δοκιμής σκληρότητας Brinell. Τα ανοπτημένα υλικά έχουν γενικά ένα στρογγυλεμένο προφίλ, ενώ τα κατεργασμένα εν ψυχρώ υλικά έχουν ένα αιχμηρό προφίλ (Σχ. 2). Η σωστή μέθοδος μέτρησης της διαμέτρου d της διείσδυσης και για τις δύο περιπτώσεις φαίνεται στο σχήμα.

ΣΧΗΜΑ 4.16

Γεωμετρία διείσδυσης-ίχνος για τη δοκιμή σκληρότητας Brinnell:
(a) ανοπτημένο μέταλλο
(b) εν ψυχρώ κατεργασμένο μέταλλο.



Επειδή ο διεισδύτης (σφαίρα) επίσης υποβάλλεται σε ελαστική παραμόρφωση κάτω από το εφαρμοζόμενο φορτίο P , οι μετρήσεις σκληρότητας δεν είναι ακριβείς. Μια μέθοδος που ελαχιστοποιεί αυτήν την επίδραση είναι να χρησιμοποιηθούν σφαίρες καρβιδίου του βολφραμίου, οι οποίες, παραμορφώνονται λιγότερο από τις σφαίρες χάλυβα. Επίσης, δεδομένου ότι τα σκληρότερα υλικά προς κατεργασία παράγουν πολύ μικρές επιδράσεις, ένα φορτίο της τάξεως των 1500 Kg ή 3000 Kg. συστήνεται προκειμένου να λάβει επιδράσεις που είναι αρκετά μεγάλες για την ακριβή μέτρηση. Οι σφαίρες καρβιδίου του βολφραμίου συστήνονται γενικά για αριθμούς σκληρότητας Brinell υψηλότερους από 500. Στην υποβολή εκθέσεων των αποτελεσμάτων της δοκιμής για αριθμούς σκληρότητας Brinell μεγαλύτερους από 500, ο τύπος της χρησιμοποιούμενης σφαίρας πρέπει να αναφέρεται.

Το αποτυπώματα που γίνονται από την ίδια σφαίρα σε διαφορετικά φορτία, δεν είναι γεωμετρικά παρόμοια. Οπότε ο αριθμός σκληρότητας Brinell εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο φορτίο. Κατά συνέπεια το φορτίο που χρησιμοποιείται πρέπει επίσης να αναφερθεί με τα αποτελέσματα της δοκιμής. Η δοκιμή Brinell είναι γενικά κατάλληλη για υλικά χαμηλής έως μέσης σκληρότητας.

Δοκιμή Rockwell

Στη δοκιμή Rockwell μετράται το βάθος της διείσδυσης. Ο διεισδύτης πιέζεται στην επιφάνεια, πρώτα με ένα δευτερεύον φορτίο και έπειτα με ένα πρωτεύον. Η διαφορά στο βάθος της διείσδυσης είναι ένα μέτρο μέτρησης της σκληρότητας. Υπάρχουν διάφορες κλίμακες δοκιμής σκληρότητας Rockwell που χρησιμοποιούν διαφορετικά φορτία, διαφορετικά υλικά και γεωμετρίες

διεισδύτη. Μερικές από τις πιο κοινές κλίμακες σκληρότητας και οι διεισδύτες που χρησιμοποιούνται παρατίθενται στο Σχήμα 4.15. Ο αριθμός σκληρότητας Rockwell, που διαβάζεται άμεσα από έναν πίνακα στη μηχανή δοκιμής, εκφράζεται όπως ακολουθεί:

Εάν ο αριθμός σκληρότητας είναι 55 χρησιμοποιώντας την κλίμακα C, γράφεται ως 55 HRC. Οι επιφανειακές δοκιμές σκληρότητας Rockwell έχουν αναπτυχθεί επίσης χρησιμοποιώντας μικρότερα φορτία και τον ίδιο τύπο διεισδύτη.

Δοκιμή Vickers

Η δοκιμή Vickers, επίσης γνωστή ως δοκιμή σκληρότητας πυραμίδων διαμαντιών, χρησιμοποιεί ένα διεισδύτη, διαμάντι διαμορφωμένο σε μορφή πυραμίδας με φορτία που κυμαίνονται από 1 έως 120 Kg. Ο **αριθμός σκληρότητας Vickers (HV)** δίνεται από τον τύπο

$$HV = \frac{1.854 * P}{L^2}$$

Οι επιδράσεις-ίχνος είναι χαρακτηριστικά λιγότερο από 0.5 χιλ. στη διαγώνιο. Η δοκιμή Vickers δίνει ουσιαστικά τον ίδιο αριθμό σκληρότητας ανεξάρτητα από το φορτίο. Είναι κατάλληλο για υλικά με ένα ευρύ φάσμα σκληρότητας, συμπεριλαμβανομένων των πολύ σκληρών χαλύβων.

Δοκιμή Knoop

Η δοκιμή Knoop χρησιμοποιεί διαμάντι με μορφή μιας επιμηκυμένης πυραμίδας με φορτία που κυμαίνονται γενικά από 25 g ως 5 g. Ο **αριθμός σκληρότητας Knoop (HK)** δίνεται από τον τύπο

$$HK = \frac{14.2 * P}{L^2}$$

Η δοκιμή Knoop είναι μια δοκιμή μικροσκληρότητας λόγω των μικρών φορτίων που χρησιμοποιούνται ως εκ τούτου είναι κατάλληλη για πολύ μικρά ή λεπτά δείγματα και για εύθραυστα υλικά, όπως οι πολύτιμοι λίθοι, τα καρβίδια, και το γυαλί. Αυτή η δοκιμή χρησιμοποιείται επίσης στη μέτρηση της σκληρότητας ξεχωριστών κόκκων ενός μετάλλου. Το μέγεθος της διείσδυσης-ίχνος που δημιουργείται στην επιφάνεια είναι γενικά μεταξύ 0,01 έως 0,10 mm έτσι, η προετοιμασία επιφάνειας είναι πολύ σημαντική. Επειδή ο αριθμός σκληρότητας που προκύπτει εξαρτάται από το εφαρμοζόμενο φορτίο, τα αποτελέσματα της δοκιμής πρέπει πάντα να αναφέρουν το φορτίο που εφαρμόζεται.

Σκληροσκόπιο

Το σκληροσκόπιο είναι ένα όργανο στο οποίο, ένας διεισδύτης με αιχμή του ένα διαμάντι (τοποθετημένο στην άκρη του), αφήνεται να πέσει στο δείγμα από ένα ορισμένο ύψος. Η σκληρότητα καθορίζεται από την αναπήδηση του διεισδύτη, όσο υψηλότερη η αναπήδηση, τόσο σκληρότερο το δείγμα. Η διείσδυση-ίχνος που δημιουργείται είναι μικρή. Το όργανο είναι φορητό και χρήσιμο για τη μέτρηση σκληρότητας μεγάλων αντικειμένων.

Δοκιμή Mohs

Η δοκιμή Mohs είναι βασισμένη στην ικανότητα ενός υλικού να χαράξει ένα άλλο. Η σκληρότητα Mohs αντιστοιχεί σε μια κλίμακα του 10, με 1 για ορυκτό

μαγνησίου σε σκόνη (talc) και 10 για το διαμάντι (η σκληρότερη γνωστή ουσία). Κατά συνέπεια, ένα υλικό με υψηλότερη σκληρότητα Mohs μπορεί να χαράξει τα υλικά με χαμηλότερη σκληρότητα. Η κλίμακα Mohs χρησιμοποιείται γενικά από μεταλλειολόγους και γεωλόγους. Εντούτοις, μερικά από τα δοκιμασμένα υλικά είναι χρήσιμα στους μηχανικούς κατασκευών. Αν και η κλίμακα Mohs είναι ποιοτική, προκύπτει μια καλή συσχέτιση με την σκληρότητα Knoop. Τα μαλακά μέταλλα έχουν σκληρότητα Mohs που κυμαίνεται 2 έως 3, οι σκληροί χάλυβες περίπου 6, και το οξείδιο του αργιλίου 9.

Durometer (ντουρόμετρο)

Η σκληρότητα των λάστιχων, των πλαστικών, και των παρεμφερών μαλακών και ελαστικών υλικών μετριέται γενικά με ένα όργανο αποκαλούμενο durometer. Αυτό είναι μια εμπειρική δοκιμή στην οποία ένας διεισδύτης πιέζεται ενάντια στην επιφάνεια, με ένα σταθερό φορτίο που εφαρμόζεται γρήγορα. Το βάθος της διείσδυσης μετριέται μετά από ένα δευτερόλεπτο, και η σκληρότητα συσχετίζεται αντιστρόφως με τη διείσδυση. Υπάρχουν δύο διαφορετικές κλίμακες για αυτήν την δοκιμή. Ο τύπος A έχει αμβλύ διεισδύτη ένα φορτίο 1 Kg, και χρησιμοποιείται για μαλακότερα υλικά. Ο τύπος D έχει αιχμηρότερο διεισδύτη, ένα φορτίο 5 Kg, και χρησιμοποιείται για τα σκληρότερα υλικά. Οι αριθμοί σκληρότητας σε αυτές τις δοκιμές κυμαίνονται από 0 έως 100.

Σκληρότητα και Πίεση

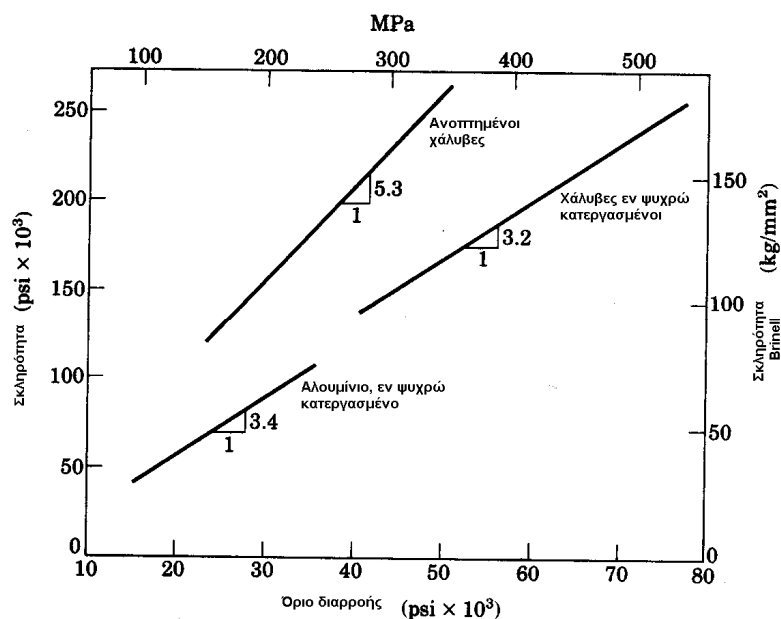
Δεδομένου ότι η σκληρότητα είναι η αντίσταση στη διείσδυση (τοπική πλαστική παραμόρφωση), η δοκιμή για αυτή, είναι ισοδύναμη με την εκτέλεση μιας δοκιμής συμπίεσης σε ένα μικρό τμήμα της επιφάνειας του υλικού. Κατά συνέπεια θα αναμέναμε κάποιο συσχετισμό μεταξύ της σκληρότητας και της πίεσης Y , υπό μορφή

$$\text{Σκληρότητα} = c \cdot Y,$$

όπου το c είναι μια σταθερά αναλογίας.

ΣΧΗΜΑ 4.17

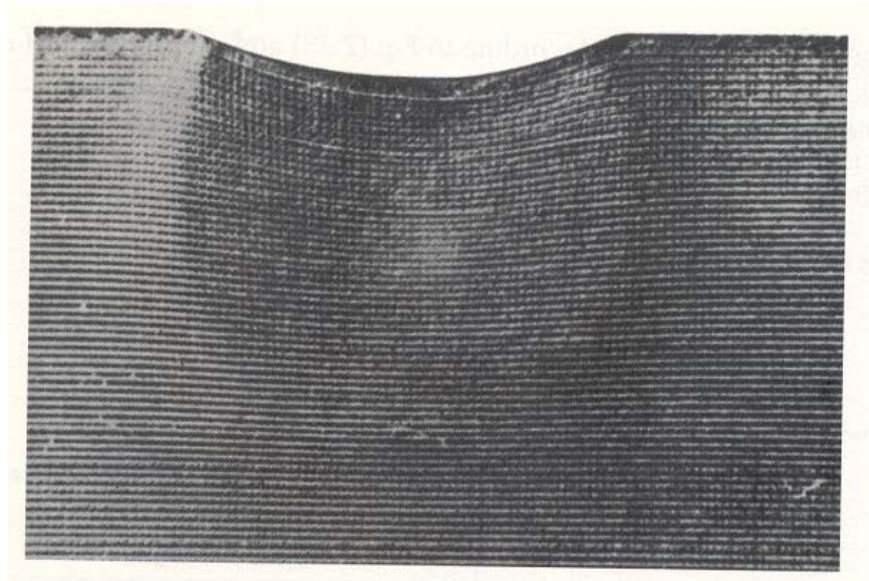
Σχέση μεταξύ της σκληρότητας Brinell και της πίεσης για αλουμίνιο και χάλυβες



Οι θεωρητικές μελέτες, βασισμένες στην ανάλυση σχεδίου ολίσθησης γραμμών πίεσης με μια ομαλή επίπεδη διάτρηση που χαράσσει την επιφάνεια ενός ημιάπειρου σώματος, δείχνουν ότι για ένα τέλεια πλαστικό υλικό της πίεσης Y , η τιμή του c είναι περίπου 3. Αυτή η θεωρητική τιμή είναι πολύ κοντά με τα πειραματικά αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα εν ψυχρώ κατεργασμένα υλικά (που είναι κοντά στο να γίνουν τέλεια πλαστικά στη συμπεριφορά τους) παρουσιάζουν καλύτερη συμφωνία από τα ανοπτημένα υλικά. Η υψηλότερη τιμή c για τα ανοπτημένα υλικά εξηγείται από το γεγονός ότι, λόγω της σκλήρυνσης, η μέση πίεση που εκθέτουν κατά τη διάρκεια της διείσδυσης είναι υψηλότερη από την αρχική πίεση.

ΣΧΗΜΑ 4.18

Μαζική παραμόρφωση στον μαλακό χάλυβα κάτω από σφαιρικό διεισδύτη. Το βάθος της παραμορφωμένης ζώνης είναι περίπου ένα μέγεθος μεγαλύτερο από το βάθος της διείσδυσης. Η περιβάλλουσα μάζα αποτρέπει αυτόν την ποσότητα του υλικού από να παραμορφωθεί ελεύθερα. Στην πραγματικότητα, αυτός ο όγκος υπόκειται σε τριαξονική συμπίεση.



Πιο πρακτικά, μια σχέση επίσης έχει παρατηρηθεί μεταξύ της μέγιστης τάσης-αντοχής σε εφελκυσμό UTS (UTS=Ultimate Tensile Strength) και του αριθμού σκληρότητας Brinell (HB) για τους χάλυβες:

$$UTS = 500 (HB) ,$$

όπου UTS είναι σε psi και HB σε Kg/mm² όπως μετريέται με φορτίο 3000 Kg. Στο σύστημα SI , η σχέση δίνεται

$$UTS = 3,5 (HB) ,$$

όπου UTS είναι σε MPa.

Οι δοκιμές σκληρότητας εν θερμώ μπορούν επίσης να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας τους συμβατικούς ελεγκτές. Η σκληρότητα των υλικών εν θερμώ είναι σημαντική στις εφαρμογές όπου τα υλικά υποβάλλονται στις υψηλές θερμοκρασίες, όπως στα εργαλεία κοπής για τη μεταλλουργία.

4.13 ΚΟΠΩΣΗ

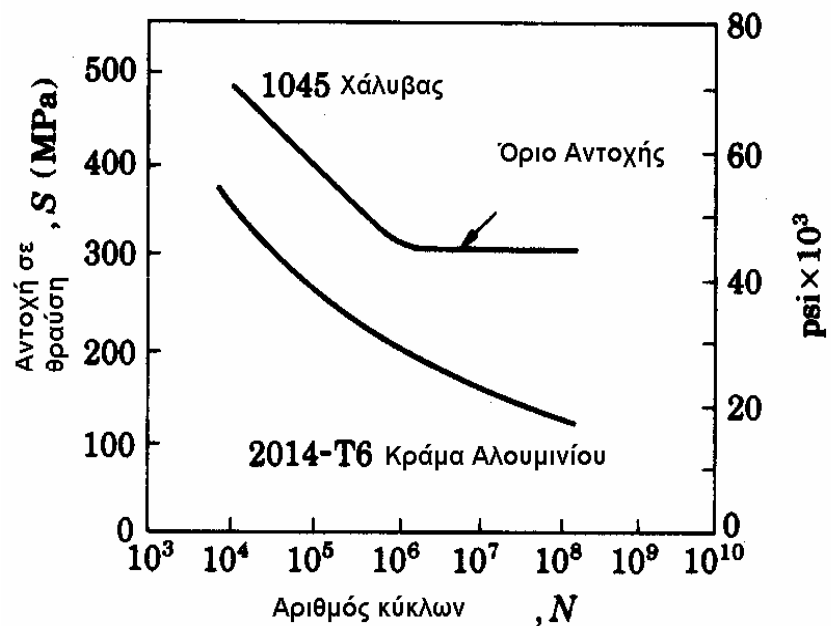
Οι διάφορες δομές και τα συστατικά σε διαδικασίες κατασκευής, όπως τα εργαλεία, τροχοί, έκκεντρα, άξονες, και ελατήρια, υποβάλλονται σε γρήγορα κυμαινόμενα (κυκλικά ή περιοδικά) φορτία, καθώς επίσης και σε στατικά φορτία. Οι κυκλικές φορτίσεις μπορούν να προκληθούν από τα κυμαινόμενα μηχανικά φορτία, όπως τα δόντια των τροχών, ή από τις θερμικές πιέσεις, όπως ψυχρά ρεύματα που έρχονται σε επαναλαμβανόμενη επαφή με τα προς κατεργασία θερμά κομμάτια. Υπό αυτούς τους όρους, το κομμάτι αστοχεί, σε επίπεδο τάσης χαμηλότερο από το οποίο η αστοχία θα εμφανιζόταν, κάτω από στατική φόρτιση. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως **αστοχία κόπωσης**, και είναι αρμόδιο για την πλειοψηφία των αστοχιών στα μηχανικά υλικά.

Οι μέθοδοι δοκιμής κόπωσης περιλαμβάνουν δείγματα δοκιμής που καταπονούνται κάτω από διάφορες καταστάσεις πίεσης, συνήθως σε συνδυασμό εφελκυσμός και πίεσης, ή στρέψης. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε διάφορα τιμές αντοχής σε θραύση (S), και σε αριθμό κύκλων κόπωσης (N) για να προκαλέσει συνολική αστοχία του δείγματος ή μέρους που καταγράφεται.

Ένα χαρακτηριστικό σχεδιάγραμμα, γνωστό ως καμπύλες $S-N$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.19. Η δοκιμή περιλαμβάνει την υποβολή του δοκιμίου σε θλιπτικά και εφελκυστικά φορτία που εναλλάσσονται διαρκώς, ενώ το δείγμα περιστρέφεται. Κατά την διάρκεια της δοκιμής καταγράφεται η τάση θραύσης του υλικού σε συνάρτηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης. Η δοκιμή μπορεί επίσης να εκτελεσθεί σε έναν περιστρεφόμενο άξονα με σταθερό φορτίο με φορά προς τα κάτω. Η μέγιστη τάση στην οποία το υλικό μπορεί να υποβληθεί χωρίς αστοχία κόπωσης, ανεξάρτητα από τον αριθμό κύκλων, είναι γνωστή ως **όριο αντοχής ή όριο κόπωσης**.

ΣΧΗΜΑ 4.19

Χαρακτηριστικές $S-N$ καμπύλες για δύο μέταλλα. Σε αντίθεση με το χάλυβα, το αλουμίνιο δεν έχει ένα όριο αντοχής.

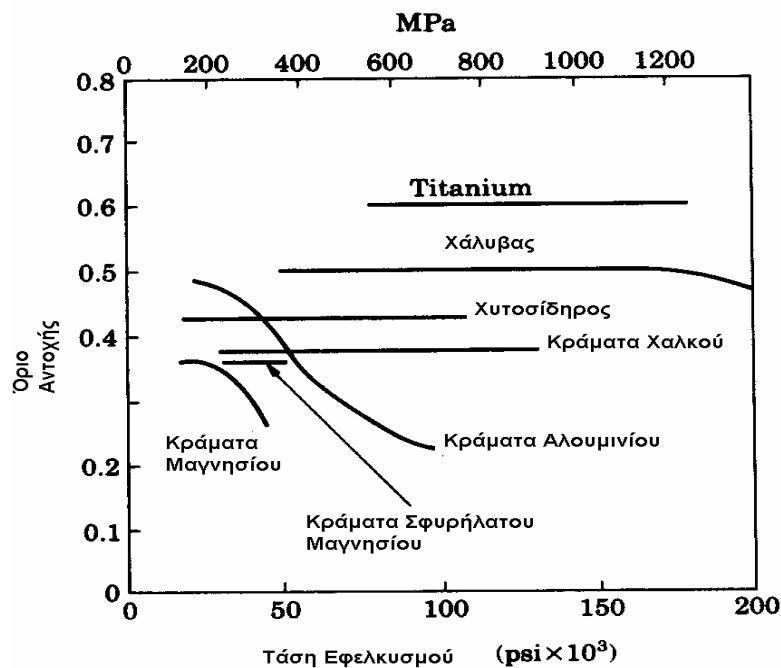


Το όριο αντοχής για τα μέταλλα σχετίζεται με την μέγιστη τάση-αντοχή σε εφελκυσμό UTS (=Ultimate Tensile Strength). Για τους χάλυβες, το όριο

αντοχής είναι περίπου το μισό της μέγιστης τάσης. Αν και πολλά μέταλλα, ειδικά χάλυβες, έχουν ένα καθορισμένο όριο αντοχής, τα κράματα αργιλίου δεν έχουν ένα, και η καμπύλη S-N συνεχίζει την προς τα κάτω τάση της. Για τα μέταλλα που εκθέτουν τέτοια συμπεριφορά, η δύναμη κόπωσης καθορίζεται σε συγκεκριμένο αριθμό κύκλων, όπως 10^7 . Με αυτό τον τρόπο, η ωφέλιμη ζωή του αντικειμένου μπορεί να καθοριστεί.

ΣΧΗΜΑ 4.20

Αναλογία ορίου αντοχής
και τάσης εφελκυσμού
για διάφορα μέταλλα



4.14 ΕΡΠΥΣΜΟΣ

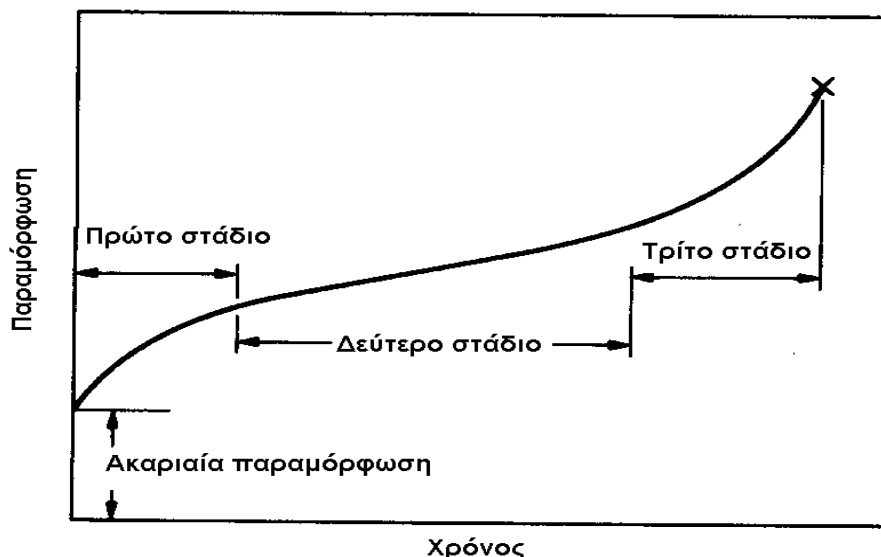
Ο **ερπυσμός** είναι η μόνιμη επιμήκυνση (χρονική μεταβολή παραμόρφωσης) ενός υλικού κάτω από ένα στατικό φορτίο που διατηρείται (σταθερές συνθήκες καταπόνησης) για μια χρονική περίοδο. Είναι ένα φαινόμενο των μετάλλων και ορισμένων μη μεταλλικών υλικών, όπως η θερμοπλαστικά και τα λάστιχα, και μπορεί να εμφανιστεί σε οποιαδήποτε θερμοκρασία. Ο μόλυβδος, για παράδειγμα, υφίσταται ερπυσμό κάτω από ένα σταθερό εφελκυστικό φορτίο σε θερμοκρασία δωματίου. Το πάχος του τζαμιού των παραθύρων στα παλαιά σπίτια είναι μεγαλύτερο στο κατώτατο σημείο απ' ό,τι στην κορυφή των παραθύρων, το γυαλί έχει υποβληθεί σε ερπυσμό από το βάρος του κατά τη διάρκεια πολλών ετών.

Για τα μέταλλα και τα κράματά τους, ο ερπυσμός εμφανίζεται στις υψηλές θερμοκρασίες, που αρχίζουν περίπου 200°C για τα κράματα αλουμινίου, και περίπου πάνω από 1500°C για τα πυρίμαχα κράματα. Ο μηχανισμός του ερπυσμού σε υψηλή θερμοκρασία στα μέταλλα αποδίδεται γενικά στην ολίσθηση ορίου των κόκκων. Το φαινόμενο του ερπυσμού πρέπει ιδιαίτερα να λαμβάνεται υπ' όψη ιδίως στην κατασκευή τουρμπινών ατμού και αέρα, ατμού σε χημικά εργοστάσια και σε μηχανήματα φούρνων που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου ο ερπυσμός συμβαίνει ευκολότερα. Οι ακτίνες υψηλής πίεσης και τα συστατικά των πυρηνικών καυσίμων μπορούν επίσης να υπόκεινται σε ερπυσμό. Η παραμόρφωση ερπυσμού μπορεί επίσης να εμφανιστεί σε εργαλεία που υπόκεινται σε υψηλές πιέσεις και σε υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια κατεργασιών όπως η σφυρηλάτηση και η εξώθηση.

Εάν ο ερπυσμός συνεχιστεί για ένα αρκετά μακρύ χρονικό διάστημα, το αντικείμενο τελικά θα θραυτεί. Η θραύση αρχίζει με μία μικροσκοπική διακρυσταλλική ρωγμή, η οποία εξελίσσεται σε τελειωτική θραύση που είναι τυπική ψαθυρή θραύση.

ΣΧΗΜΑ 4.21

Σχηματική απεικόνιση μιας χαρακτηριστικής καμπύλης ερπυσμού



Μια δοκιμή ερπυσμού αποτελείται χαρακτηριστικά από την υποβολή ενός δείγματος σε ένα σταθερό εφελκυστικό φορτίο, ως εκ τούτου σταθερή μηχανική πίεση, σε μια ορισμένη θερμοκρασία και τη μέτρηση της αλλαγής στο μήκος για μια χρονική περίοδο. Μια χαρακτηριστική καμπύλη ερπυσμού συνήθως αποτελείται από **τρία στάδια**. Αρχικά εμφανίζεται γρήγορη-ακαριαία

παραμόρφωση του δείγματος και στην συνέχεια παρατηρείται το **πρώτο στάδιο** του ερπυσμού κατά το οποίο ο ρυθμός ερπυσμού μειώνεται σταθερά μέχρι μια τιμή η οποία διατηρείται στην συνέχεια σταθερή κατά το **δεύτερο στάδιο** του ερπυσμού οπότε και παρατηρούμε γραμμική μεταβολή της παραμόρφωσης με τον χρόνο. Στο **τρίτο στάδιο** παρατηρείται συνεχής αύξηση του ρυθμού ερπυσμού μέχρι την θραύση του δείγματος. Το δείγμα αποτυγχάνει τελικά από την δημιουργία λαιμού και θραύση, όπως σε μια δοκιμή εφελκυσμού. Το ποσοστό ερπυσμού αυξάνεται με τη θερμοκρασία και το εφαρμοζόμενο φορτίο.

Η σχεδίαση του ρυθμού ερπυσμού περιλαμβάνει συνήθως γνώση της δεύτερου σταδίου (γραμμική μεταβολή) και της κλίσης της γραμμής, δεδομένου ότι το ποσοστό ερπυσμού μπορεί να καθοριστεί αξιόπιστα όταν έχει η καμπύλη μια σταθερή κλίση. Γενικά, η αντίσταση στον ερπυσμό αυξάνεται με τη θερμοκρασία τήξης ενός υλικού, το οποίο χρησιμεύει ως μια γενική οδηγία για λόγους σχεδιαστικούς. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες, τα υπερκράματα, και τα πυρίμαχα μέταλλα και τα κράματα χρησιμοποιούνται συνήθως στις εφαρμογές όπου η αντίσταση ερπυσμού απαιτείται.

Εφόσον το μέγεθος του ερπυσμού εξαρτάται από το χρόνο, εάν είναι γνωστή η αντοχή σε ερπυσμό μπορεί να υπολογιστεί μια κατασκευή για να αντέχει σε ορισμένο χρονικό διάστημα. Η αντίσταση στον ερπυσμό ενός υλικού ορίζεται ως η αντοχή σε θραύση από ερπυσμό ή αντοχή σε ερπυσμό.

Όριο Θραύσης σε Ερπυσμό

Είναι η εφελκυστική τάση που προκαλεί θραύση σ' ένα μέταλλο αφού έχει επιδράσει πάνω σ' αυτό για ορισμένο χρονικό διάστημα, σε ορισμένη θερμοκρασία. Συνήθως ο χρόνος μετριέται σε διαστήματα 100, 1000, 10000 ή 100000 ωρών και η τάση θραύσης συμβολίζεται ως π.χ. $\sigma_{cB} 100000/650^\circ$ όπου το c σημαίνει ερπυσμός (creep), B σημαίνει θραύση (Break), 100000 είναι ο αριθμός ωρών και 650° η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου.

Όριο Ερπυσμού

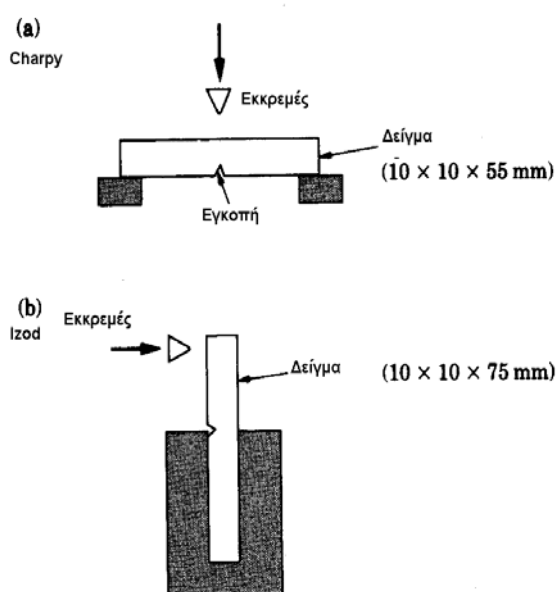
Είναι η μέτρηση της τάσης εφελκυσμού που προκαλεί μία ορισμένη πλαστική παραμόρφωση σ' ένα μέταλλο αφού έχει επιδράσει πάνω σ' αυτό για ορισμένο χρονικό διάστημα, σε ορισμένη θερμοκρασία. Η πλαστική παραμόρφωση συνήθως ορίζεται ως παραμόρφωση 0.2%, 0.5% ή 1.0% μετά από 100, 1000, 10.000 ή 100000 ώρες. Το όριο ερπυσμού συμβολίζεται ως π.χ. $\sigma_c 0.5/1000 650^\circ$, που σημαίνει ότι η τάση ερπυσμού που αναφέρεται προκαλεί 0.5% μόνιμη παραμόρφωση σε 10000 ώρες στους 650° .

4.15 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Σε πολλές διαδικασίες κατασκευής, καθώς επίσης και κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής των υλικών, τα υλικά υποβάλλονται σε δυναμική φόρτιση, όπως στις μεγάλες μεταλλουργικές διαδικασίες. Οι δοκιμές έχουν αναπτυχθεί για να καθορίσουν την ανθεκτικότητα των μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών κάτω από δυναμική φόρτιση. Μια χαρακτηριστική δοκιμή αποτελείται από την τοποθέτηση ενός χαραγμένου δείγματος σε έναν ελεγκτή και το σπάσιμο του με ένα ταλαντευόμενο εκκρεμές. Στη δοκιμή Charpy το δείγμα υποστηρίζεται και στις δύο άκρες, ενώ στη δοκιμή Izod υποστηρίζεται από τη μία πλευρά. Από την ποσότητα ταλάντευσης του εκκρεμούς, λαμβάνεται η ενέργεια που απελευθερώνεται στο σπάσιμο του δείγματος. Αυτή η ενέργεια είναι η ανθεκτικότητα (impact toughness) του υλικού.

ΣΧΗΜΑ 4.22

Σχηματική αναπαράσταση των δοκιμών Charpy και Izod



Οι δοκιμές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στον καθορισμό της όλκιμης-εύθραυστης θερμοκρασίας μετάβασης των υλικών. Τα υλικά που έχουν την αντίσταση αντίκτυπου είναι γενικά εκείνα που έχουν υψηλή δύναμη και υψηλή όλκιμότητα, ως εκ τούτου υψηλή ανθεκτικότητα. Η ευαισθησία στις ατέλειες επιφάνειας (ευαισθησία εγκοπών) είναι σημαντική, καθώς χαμηλώνει την ανθεκτικότητα.

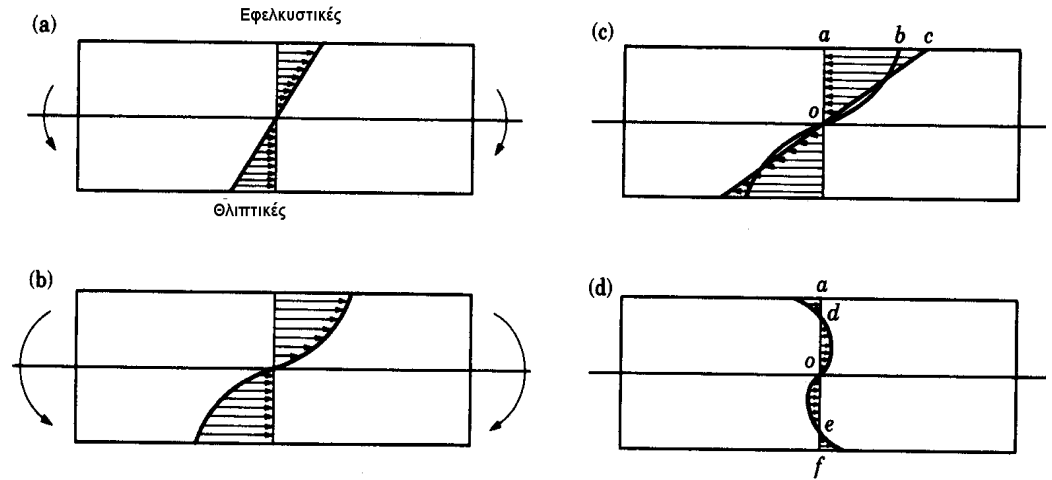
4.16 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Οι μη ομογενείς παραμορφώσεις οδηγούν σε παραμένουσες τάσεις - τάσεις που παραμένουν μέσα σε ένα υλικό αφού έχει παραμορφωθεί και δεν εφαρμόζεται καμιά εξωτερική δύναμη. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της ανομοιογενούς παραμόρφωσης είναι η κάμψη μιας δοκού. Η στιγμή της κάμψης αρχικά παράγει μια γραμμική ελαστική διανομή τάσης. Καθώς η αυτή στιγμή αυξάνεται, οι εξωτερικές ίνες αρχίζουν να υποχωρούν και λαμβάνεται τελικά η διανομή τάσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.23b. Αφού το αντικείμενο έχει καμφθεί (μόνιμα, δεδομένου ότι έχει περάσει η πλαστική παραμόρφωση), η στιγμή τελειώνει με την αποφόρτιση. Αυτή η αποφόρτιση είναι ισοδύναμη με

την εφαρμογή μιας ίσης και αντίθετης στιγμής στην δοκό.

ΣΧΗΜΑ 4.23

Παραμένουσες τάσεις που έχουν αναπτυχθεί ύστερα από κάμψη δοκού από ελαστικό υλικό. Η αποφόρτιση είναι ισοδύναμη με την εφαρμογή μιας ίσης και αντίθετης στο αντικείμενο, όπως φαίνεται στο (b).



Στο σχήμα 4.23c, οι στιγμές των περιοχών oab και oac για τον ουδέτερο άξονα πρέπει να είναι ίσες. (Για λόγους αυτής της επεξεργασίας, υποθέτουμε ότι ο ουδέτερος άξονας δεν μετατοπίζεται.).

Η διαφορά μεταξύ των δύο διανομών τάσης παράγει το σχέδιο παραμενουσών τάσεων μέσα στην δοκό. Σημειωτέον ότι υπάρχουν θλιπτικές παραμένουσες τάσεις στα στρώματα ad και oe , και εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις στα στρώματα do και ef . Χωρίς εξωτερικές δυνάμεις, το σύστημα των παραμενουσών τάσεων μέσα στη δοκό πρέπει να είναι σε στατική ισορροπία. Αν και αυτό το παράδειγμα περιλαμβάνει τάσεις προς μια κατεύθυνση μόνο, στις περισσότερες καταστάσεις στην διαδικασία επεξεργασίας παραμενουσών τάσεων είναι τρισδιάστατες.

Σε αυτό το παράδειγμα, η ισορροπία των παραμενουσών τάσεων μπορεί να διανεμηθεί με την αλλαγή της γεωμετρίας της δοκού, όπως με την αφαίρεση ενός στρώματος του υλικού. Η δοκός θα αποκτήσει έπειτα μια νέα ακτίνα κυρτότητας προκειμένου να εξασφαλιστεί η ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων. Ένα άλλο παράδειγμα αυτής της επίδρασης είναι η διάτρηση των στρογγυλών τρυπών στις επιφάνειες με παραμένουσες τάσεις. Μπορεί να διαπιστωθεί ότι, ως αποτέλεσμα της αφαίρεσης αυτού του υλικού, η ισορροπία των παραμενουσών τάσεων διαταράσσεται και η τρύπα γίνεται οβάλ.

Τέτοιες διαταραχές των παραμενουσών τάσεων οδηγούν στη στρέβλωση, μερικά απλά παραδείγματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.24. Η ισορροπία των παραμενουσών τάσεων μπορεί επίσης να διαταραχθεί από τη «χαλάρωση» αυτών των τάσεων μετά από μια ορισμένη χρονική περίοδο, η οποία οδηγεί στην αστάθεια των διαστάσεων και της μορφής του αντικειμένου. Αυτές οι διαστατικές αλλαγές μπορούν να είναι μια σημαντική εκτίμηση για τα μηχανήματα ακρίβειας και τα όργανα μέτρησης.

Οι παραμένουσες τάσεις προκαλούνται επίσης από τις **αλλαγές φάσης** στα μέταλλα κατά τη διάρκεια ή μετά της επεξεργασίας λόγω των διαφορών πυκνότητας μεταξύ των φάσεων (όπως μεταξύ σιδηρίτη και του μαρτενσίτη στους χάλυβες). Οι αλλαγές φάσης προκαλούν μικροσκοπικές ογκομετρικές

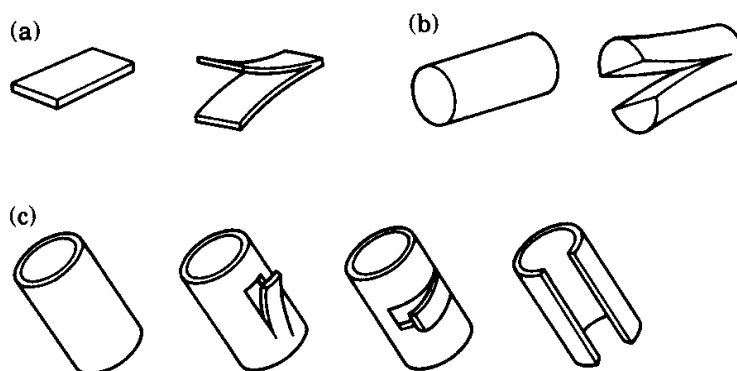
αλλαγές που καταλήγουν σε παραμένουσες τάσεις. Αυτό το φαινόμενο είναι σημαντικό στη θερμή κατεργασία και στη θερμική επεξεργασία μετά από την κατεργασία εν ψυχρώ (όπως η παραμόρφωση σε θερμοκρασία δωματίου).

Οι παραμένουσες τάσεις μπορούν επίσης να προκληθούν από τις **μεταβολές της θερμοκρασίας** μέσα σε ένα σώμα, όπως κατά τη διάρκεια της ψύξης ενός κύκλου κατεργασίας, κατά εφαρμογή των φρένων σε μια ρόδα σιδηροδρόμου, ή σε μια λειτουργία λείανσης. Η διαστολή και η συστολή λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας είναι ανάλογες με τη μη ομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση.

Οι εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια ενός υλικού θεωρείται γενικά ανεπιθύμητος, επειδή χαμηλώνουν τη αντοχή θραύσης. Μια επιφάνεια με εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις μπορεί να στηρίξει λιγότερες εξωτερικές εφελκυστικές φορτίσεις σε σχέση με μια επιφάνεια απαλλαγμένη από παραμένουσες τάσεις. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα σχετικά εύθραυστα υλικά, όπου η θραύση πραγματοποιείται με ελάχιστη ή με μη πλαστική παραμόρφωση. Οι εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις τα κατασκευασμένα προϊόντα μπορεί επίσης να οδηγήσει στο ράγισμα ή την διάβρωση μετά από μια χρονική περίοδο. Αντιθέτως, οι θλιπτικές παραμένουσες τάσεις σε μια επιφάνεια είναι γενικά επιθυμητές. Στην πραγματικότητα, προκειμένου να αυξηθεί η ζωή των αντικειμένων, οι θλιπτικές παραμένουσες τάσεις μεταδίδονται στις επιφάνειες με τεχνικές όπως η σφυρηλάτηση με βολές και το κύλισμα επιφάνειας

ΣΧΗΜΑ 4.24

Διαχωρισμός του κομματιού-αντικειμένου μετά από παραμένουσες τάσεις από κοπή ή να σκίσιμο: (α) λάμα (β) ράβδος (γ) σωλήνωση.



Οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να μειωθούν ή να εξαλειφθούν είτε με την **ανόπτηση τάσεων** είτε από την περαιτέρω **πλαστική παραμόρφωση**. Δίνοντας συγκεκριμένο χρόνο, οι παραμένουσες τάσεις μπορούν επίσης να ελαχιστοποιηθούν σε θερμοκρασία δωματίου με την «χαλάρωση». Ο χρόνος που απαιτείται μπορεί να μειωθεί πολύ από τη θερμοκρασία του υλικού.

Ο μηχανισμός της μείωσης ή της αποβολής των παραμενουσών τάσεων μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης είναι ο ακόλουθος: Υποθέστε ότι ένα κομμάτι του μετάλλου έχει τις παραμένουσες τάσεις (όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.25, δηλαδή, εφελκυστικά εξωτερικά και θλιπτικά εσωτερικά. Το μέρος με αυτές τις τάσεις, οι οποίες είναι στην ελαστική περιοχή, είναι σε ισορροπία. Επίσης υποθέστε ότι το υλικό είναι ελαστικό και τέλεια πλαστικό,

όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.25d.

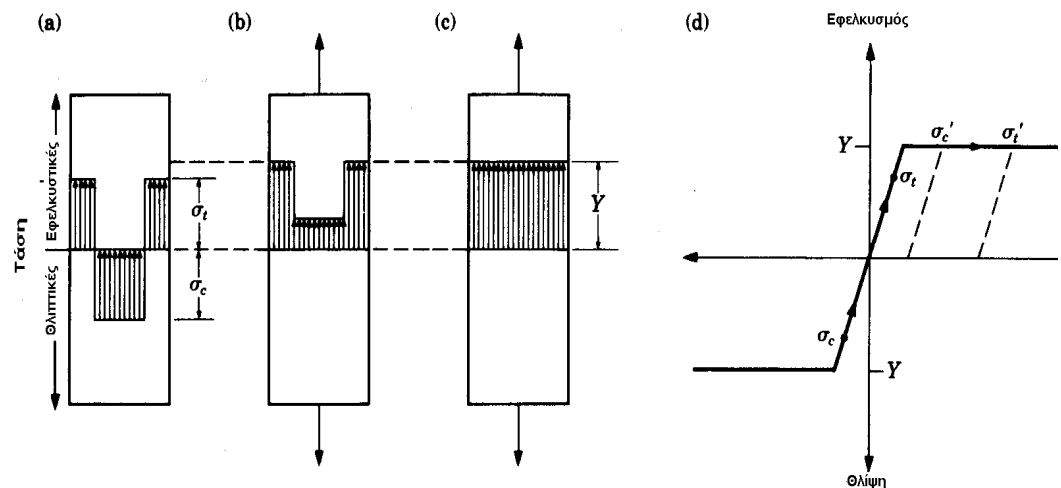
Τα επίπεδα των παραμενουσών τάσεων παρουσιάζονται στο διάγραμμα **τάσης-παραμόρφωσης**, και τα δύο να βρίσκονται κάτω από την τάση Y . Εάν μια ομοιόμορφα διανεμημένη τάση εφαρμόζεται σε αυτό το δείγμα, οι δείκτες σ_c και σ_t ανεβαίνουν προς τα πάνω ,στο διάγραμμα, όπως δείχνουν τα βέλη. Το ανώτατο όριο που αυτές οι τάσεις μπορούν να φθάσουν, είναι η τάση εφελκυσμού Y . Με την αρκετά υψηλή φόρτιση, η διανομή τάσης γίνεται ομοιόμορφη σε όλο το μέρος του αντικειμένου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.25c. Εάν το φορτίο έπειτα αφαιρεθεί, οι τάσεις ανακτώνται ελαστικά και το αντικείμενο δεν έχει πλέον παραμένουσες τάσεις.

Σημειώτεον ότι πολύ μικρή τάση απαιτείται για να εξαλειφθούν οι παραμένουσες τάσεις. Ο λόγος είναι ότι οι ελαστικές περιοχές των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για τα μέταλλα, είναι πολύ απότομες ως εκ τούτου οι ελαστικές τάσεις μπορούν να αυξηθούν με πολύ λίγη τάση.

Η τεχνική για την μείωση των παραμενουσών τάσεων με την μέθοδο της πλαστικής παραμόρφωσης, όπως περιγράφεται, απαιτεί συγκεκριμένη παραμόρφωση για να καθιερώσει μια ομοιόμορφα διανεμημένη τάση στο αντικείμενο. Εάν η κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης στην πλαστική περιοχή είναι μικρή, η διαφορά μεταξύ σ_c και σ_t θα είναι μάλλον μικρή και μικρή παραμένουσα τάση θα μείνει στο αντικείμενο μετά από αποφόρτισή του.

ΣΧΗΜΑ 4.25

Εξάλειψη των παραμενουσών τάσεων με εφελκυσμό. Οι παραμένουσες τάσεις μπορούν επίσης να μειωθούν ή να εξαλειφθούν με θερμική επεξεργασία



4.17 ΘΡΑΥΣΗ

Τα τυπικά είδη θραύσης παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Εφελκυστική θραύση χαμηλών θερμοκρασιών
- Εφελκυστική θραύση υψηλών θερμοκρασιών (από ερπυσμό)
- Θραύση από κόπωση
- Περιβαλλοντική θραύση (επίδραση της διάβρωσης)

Στη συνέχεια θα εξεταστεί η περίπτωση της εφελκυστικής θραύσης χαμηλών θερμοκρασιών, ενώ τα υπόλοιπα είδη θραύσης θα εξετασθούν σε επόμενα κεφάλαια.

Η θραύση ενός ιδανικού κρυσταλλικού στερεού σε χαμηλή θερμοκρασία συμβαίνει με την ταυτόχρονη ρήξη των ατομικών δεσμών κάθετα στο επίπεδο της θραύσης, με αποτέλεσμα το στερεό να διαχωρίζεται. Η ελαστική παραμόρφωση του υλικού ανακτάται μετά την θραύση του υλικού. Η θεωρητική ανάλυση δίδει θεωρητικό όριο θραύσης μία τάξη μεγέθους μικρότερο από το μέτρο ελαστικότητας του εκάστοτε υλικού. Στην πραγματικότητα όμως το όριο θραύσης είναι πολύ μικρότερο, λόγω της παρουσίας των ατελειών εντός της κρυσταλλικής δομής. Οι ατέλειες αυτές οδηγούν στη δημιουργία και στη διάδοση ρωγμών, με αποτέλεσμα τη θραύση του υλικού.

Η εφελκυστική θραύση χαμηλής θερμοκρασίας χωρίζεται σε **ψαθυρή** και **όλκιμη**, ανάλογα με το βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται της θραύσης. Στην περίπτωση της όλκιμης θραύσης έχουμε σημαντική μείωση της διατομής στην περιοχή της θραύσης, λόγω της σημαντικής πλαστικής παραμόρφωσης που προηγήθηκε. Στην περίπτωση ψαθυρής θραύσης η ελάττωση της διατομής είναι αμελητέα έως μηδενική, ενώ μακροσκοπικά δεν παρατηρείται σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Η ψαθυρή θραύση χωρίζεται σε τρεις τύπους: I, II και III.

4.12.1 Ψαθυρή θραύση τύπου I

Παρουσιάζει μηδενική πλαστική παραμόρφωση του υλικού πριν τη θραύση. Παρατηρείται σε μικρές τάσεις και θερμοκρασίες. Η ρωγμή διαδίδεται μέσα ή γύρω από τους κόκκους. Η θραύση οφείλεται σε προϋπάρχουσες ρωγμές ή ατέλειες στο υλικό με τάξη μεγέθους αυτή των κόκκων. Η συγκέντρωση τάσεων, που εμφανίζεται στα όρια της ρωγμής, ευθύνεται για τη διάδοση της ρωγμής, με την τοπική ρήξη των ατομικών δεσμών στην περιοχή αυτή.

4.12.2 Ψαθυρή θραύση τύπου II

Παρουσιάζει μικροσκοπική πλαστική παραμόρφωση, μη παρατηρήσιμη μακροσκοπικά. Η ρωγμή διαδίδεται μέσα ή γύρω από τους κόκκους. Λαμβάνει χώρα σε υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας και φόρτισης από τον τύπο I και σε υλικά χωρίς προϋπάρχουσες ρωγμές ή ατέλειες, ή με μέγεθος ατελειών μικρότερο αυτού των κόκκων. Η μικροσκοπική πλαστική παραμόρφωση, η οποία συμβαίνει λόγω των υψηλότερων τάσεων, οδηγεί στη δημιουργία μικρορωγμών, οι οποίες διαδίδονται στο υλικό και οδηγούν στη θραύση του. Η τάση θραύσης

είναι αντιστρόφως ανάλογη της ρίζας της διαμέτρου των κόκκων του υλικού. Αυτό οφείλεται στο ότι τα λεπτόκοκκα υλικά παραμορφώνονται δυσκολότερα.

4.12.3 Ψαθυρή θραύση τύπου III

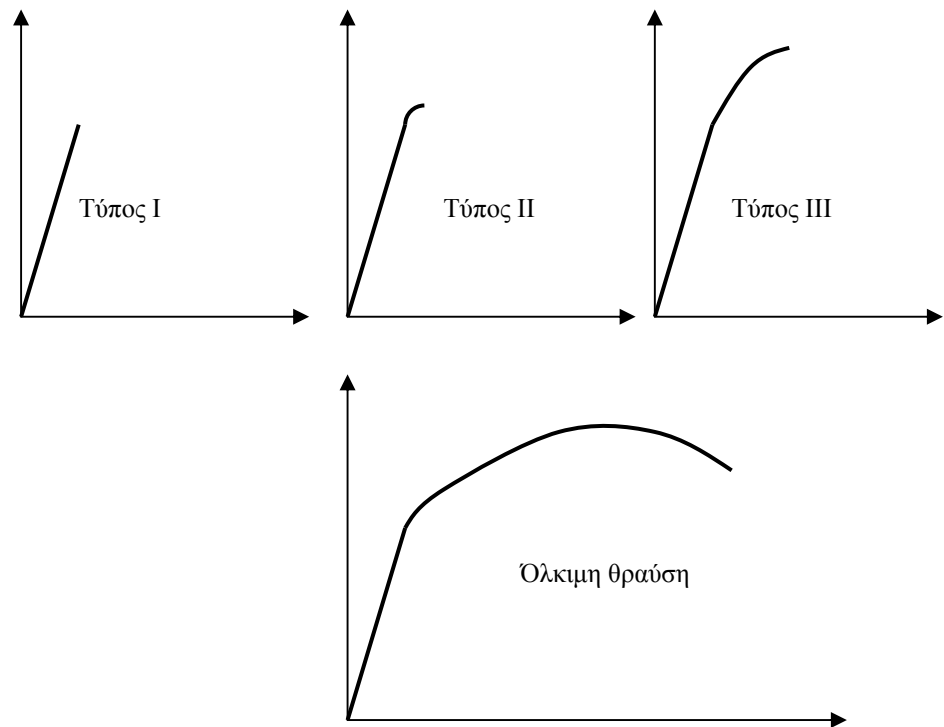
Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται σημαντική μακροσκοπική παραμόρφωση πριν τη θραύση με ελάττωση της διατομής όχι πάνω του 10%. Η ρηγματώση μπορεί να γίνει μέσα ή γύρω από τους κόκκους. Η πλαστική παραμόρφωση που συμβαίνει οδηγεί στη συνένωση των μικρορωγμών και την τελική θραύση του υλικού. Κατά τη διάδοση των ρωγμών προηγείται του μετώπου τους σημαντική ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης, η οποία οδηγεί σε σημαντική άμβλυνση της ρωγμής και μείωση της συγκέντρωσης των τάσεων. Απαιτείται λοιπόν μεγαλύτερο φορτίο για τη διάδοση της ρωγμής, με αποτέλεσμα την καμπύλη μορφή του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης.

4.12.4 Όλκιμη Θραύση

Συνοδεύεται από την παρουσία σημαντικής πλαστικής παραμόρφωσης πριν τη θραύση, καθώς και από τη δημιουργία λαιμού στη δοκιμή εφελκυσμού. Η θραύση οφείλεται στο μηχανισμό που καλείται «**συνένωση μικροκενών**». Η ολκιμότητα του υλικού επηρεάζεται αρνητικά από την παρουσία δευτερογενών φάσεων ή εγκλεισμάτων εντός του υλικού. Κατά την πλαστική παραμόρφωση, επειδή αυτά ακολουθούν διαφορετική συμπεριφορά από το μητρικό υλικό, οδηγούν στη δημιουργία μικροκενών ή μικρορωγμών μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειάς τους και της επιφάνειας του μητρικού μετάλλου. Τα κενά αυτά ενώνονται μεταξύ τους είτε με την τοπική δημιουργία λαιμού, είτε μέσω της δημιουργίας ζώνης διάτμησης μεταξύ των γειτονικών κόκκων. Η τελική θραύση του υλικού στα όριά του έχει ή τη μορφή κώνου – κρατήρα ή διπλού κρατήρα. Η επιφάνεια της θραύσης έχει χαρακτηριστική κυψελωτή ινώδη μορφή λόγω της συνένωσης των μικροκενών.

ΣΧΗΜΑ 4.26:

Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για τα τρία είδη ψαθυρής θραύσης και για όλκιμη θραύση.

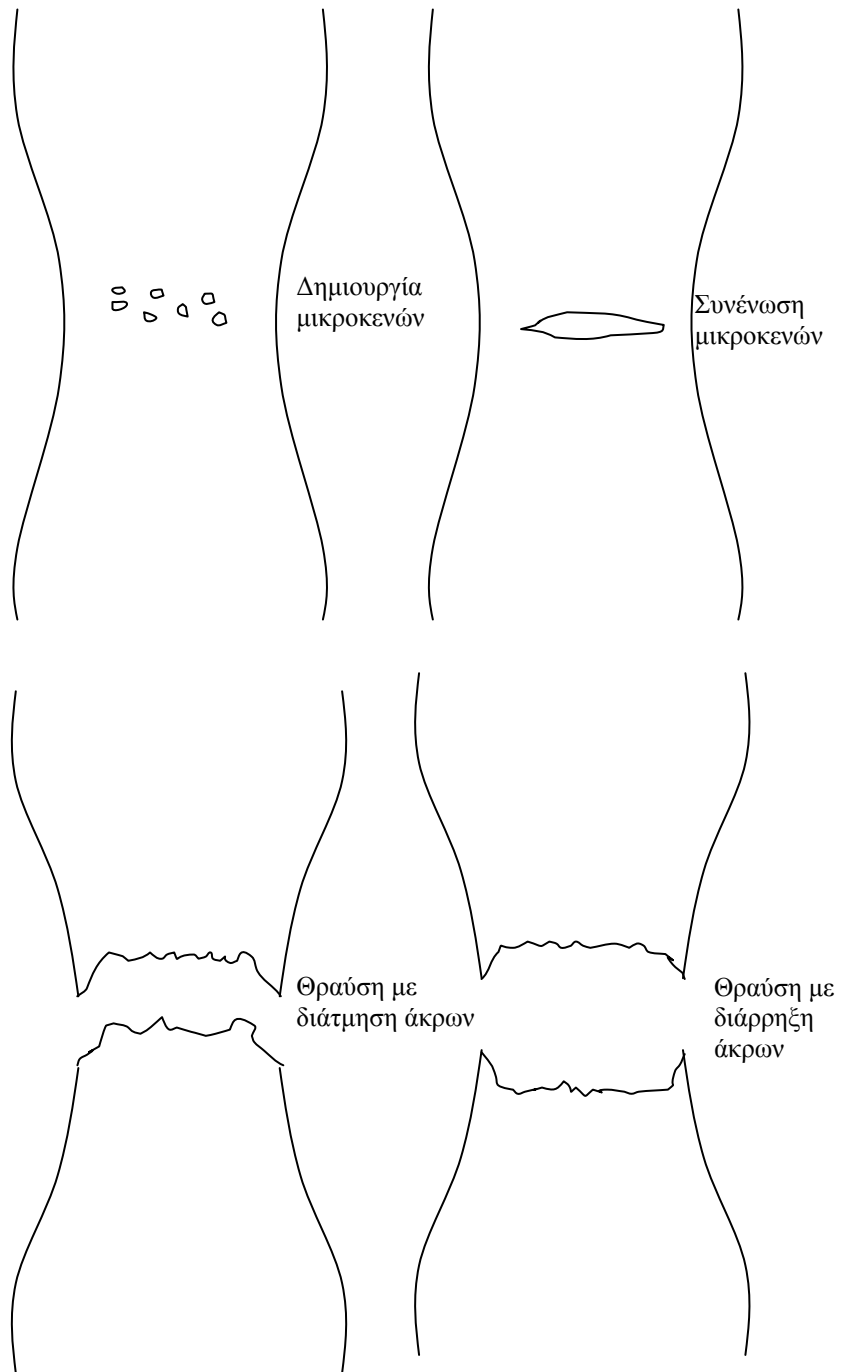


Το σχήμα των θυλάκων που σχηματίζονται κατά τη συνένωση των μικροκενών εξαρτάται από το είδος της καταπόνησης. Αν οι τάσεις είναι ορθές οι θύλακες είναι ισοαξονικοί (προσομοιάζουν σε κύκλους). Στην περίπτωση που έχουμε και παρουσία διατμητικών τάσεων έχουν παραβολική μορφή με αντίθετη φορά στις δύο επιφάνειες. Για συνδυασμό κάμψης και εφελκυσμού οι θύλακες είναι παραβολικοί με ίδια φορά στις δύο επιφάνειες της θραύσης.

Η μορφή αυτή της επιφάνειας κατά την όλκιμη θραύση είναι πολύ διαφορετική από την επιφάνεια της ψαθυρής θραύσης, η οποία συμβαίνει με διάδοση ρωγμών μέσα ή γύρω από τους κόκκους και δίνει πιο λείες επιφάνειες. Αυτό μας επιτρέπει να βρούμε το είδος της θραύσης από την μικροσκοπική παρατήρηση της επιφάνειάς της.

ΣΧΗΜΑ 4.27:

Διαδικασία
εφελκυστικής θραύσης
με συνένωση
μικροκενών.



4.18 ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ

Όταν ένα μέταλλο παραμορφωθεί εν ψυχρώ (ενδοτραχυνθεί) μεταβάλλονται οι μηχανικές του ιδιότητες:

- Αυξάνεται η σκληρότητά του
- Αυξάνεται το όριο ελαστικότητάς του
- Αυξάνεται η αντοχή του (όριο θραύσης)
- Ελαττώνεται η πλαστικότητα του και η ολκιμότητά του
- Αυξάνεται η ευθραυστότητά του

Κατά τη διαδικασία της ενδοτράχυνσης παρατηρείται μεταβολή της μικρογραφικής μορφής των κόκκων του μετάλλου. Οι κόκκοι παραμορφώνονται και εμφανίζουν κοινό προσανατολισμό, σχηματίζουν, όπως λέμε, ιστό. Στην περίπτωση της έλασης για παράδειγμα οι κόκκοι επιμηκύνονται κατά τη διεύθυνση της έλασης.

Η παραμόρφωση του σχήματος των κόκκων οφείλεται στην ολίσθηση των επιπέδων του μετάλλου, λόγω της εξωτερικά επιβαλλόμενης καταπόνησης.

4.19 ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Αν ένα ήδη ψυχρά παραμορφωμένο μέταλλο θερμανθεί σε ορισμένη θερμοκρασία, εξαρτώμενη από το είδος του μετάλλου, παρατηρείται μία διαδοχή φαινομένων, πολύ σημαντικών για τις ιδιότητες του μετάλλου.

Μέχρι μία αρχική θερμοκρασία t_1 δεν φαίνεται να συμβαίνει τίποτα το σημαντικό, όσον αφορά τη μικροδομή του μετάλλου. Από τη θερμοκρασία t_1 αρχίζουν να δημιουργούνται φύτρα ανακρυστάλλωσης μέσα στους ψυχρά παραμορφωμένους κόκκους. Αυτά τα φύτρα είναι νέοι μικροσκοπικοί κόκκοι, οι οποίοι μεγαλώνουν γρήγορα, σε βάρος των προηγούμενων κόκκων. Σε κάποια θερμοκρασία t_2 οι προηγούμενοι παραμορφωμένοι κόκκοι έχουν τελειώς εξαφανισθεί, και τη θέση τους έχουν πάρει νέοι κόκκοι, οι οποίοι είναι κυτταροειδείς, χωρίς προσανατολισμό και χωρίς πλαστική παραμόρφωση.

Αν συνεχίσουμε τη θέρμανση του μετάλλου οι κόκκοι θα συνεχίζουν να αυξάνονται, με πολύ μικρότερη όμως ταχύτητα, μέχρι ένα τελικό μέγεθος.

Μέχρι τη θερμοκρασία t_1 λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αποκατάστασης. Αν και δεν παρατηρείται τίποτα μακροσκοπικά, γίνεται ωστόσο μεταβολή της δυναμικής κατάστασης και των ιδιοτήτων του μετάλλου. Πάνω από τη θερμοκρασία t_1 έχουμε το φαινόμενο της ανακρυστάλλωσης.

Από τη θερμοκρασία t_1 έως τη θερμοκρασία t_2 η κινούσα δύναμη για τη δημιουργία και το μεγάλωμα των νέων κόκκων είναι η αποθηκευμένη στο μέταλλο ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι θέσεις των ατόμων εκτός της κρυσταλλικής δομής είναι υψηλότερης ενέργειας. Όταν λοιπόν ένα μέταλλο παραμορφώνεται πλαστικά, ένα τμήμα της ενέργειας

που προσφέρουμε (~90%) μετατρέπεται σε θερμότητα, ενώ το υπόλοιπο τμήμα αποθηκεύεται εντός του μετάλλου και συνδέεται με διάφορα ελαττώματα των κρυστάλλων που δημιουργούνται κατά την παραμόρφωση (κυρίως διαταραχές και σημειακά ελαττώματα από την αλληλεπίδραση διαταραχών). Η ενέργεια αυτή που αποθηκεύεται, δίνει τη δυνατότητα στο μέταλλο κατά τη διαδικασία της ανόπτησης να απαλλαγεί από τις τάσεις της πλαστικής παραμόρφωσης.

Πάνω από τη θερμοκρασία t_2 η κινούσα δύναμη για την αύξηση του μεγέθους των κόκκων είναι η επιφανειακή ενέργεια των ορίων των κόκκων και δεν σχετίζεται άμεσα με την πλαστική παραμόρφωση.

Το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης μπορεί να αυξηθεί με αύξηση της έντασης της παραμόρφωσης, ελάττωση της θερμοκρασίας παραμόρφωσης και μετατροπή του καθαρού μετάλλου σε κράμα. Όσο αυξάνεται η παραμόρφωση τόσο αυξάνεται η αποθηκευμένη ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης, αλλά συγχρόνως μειώνεται ως ποσοστό της συνολικής ενέργειας που δίδεται στο υλικό. Δηλαδή για μεγάλες παραμορφώσεις χρειάζεται πολύ περισσότερη ενέργεια, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας χάνεται ως θερμότητα, με το ποσοστό της ενέργειας που αποθηκεύεται να μειώνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης.

Η ελεύθερη ενέργεια ενός ψυχρά παραμορφωμένου μετάλλου είναι μεγαλύτερη από αυτή ενός ανοπτημένου, κατά ένα ποσό σχεδόν ίσο με την ενέργεια της πλαστικής παραμόρφωσης. Ταυτόχρονα όμως είναι αυξημένη και η εντροπία του μετάλλου, λόγω της παρουσίας των μη αντιστρεπτών ατελειών, οι οποίες δημιουργήθηκαν με την διαδικασία της πλαστικής παραμόρφωσης. Αν F η ελεύθερη ενέργεια του μετάλλου που σχετίζεται με την ψυχρή παραμόρφωση, E η εσωτερικά αποθηκευμένη ενέργεια παραμόρφωσης, T η απόλυτη θερμοκρασία και S η αύξηση της εντροπίας τότε

$$F = E - TS$$

Επειδή ο δεύτερος όρος είναι μικρός η αύξηση της ελεύθερης ενέργειας μπορεί να αποδοθεί πλήρως στην αποθηκευμένη ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης.

Τα πλαστικά παραμορφωμένα μέταλλα με την περισσότερη ενέργεια θα έπρεπε να οδηγούνται αυτόματα στην κατάσταση του ανοπτημένου, λόγω της μικρότερης ενέργειας της δεύτερης κατάστασης. Αυτό δεν γίνεται αυτόματα, λόγω της αυξημένης εντροπίας της παραμορφωμένης κατάστασης και των μη αντιστρεπτών διαδικασιών που ακολουθήθηκαν. Η επιστροφή λοιπόν στην απαραμόρφωτη κατάσταση μπορεί να γίνει μόνο με την παροχή ενέργειας, κάτι που συμβαίνει κατά τη διαδικασία την ανόπτησης. Κατά τη θέρμανση του μετάλλου απελευθερώνεται η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, κινώντας τη διαδικασία ανακρυστάλλωσης του μετάλλου.

4.20 ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Κατά τη θερμική διεργασία της αποκατάστασης, οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου, οι οποίες έχουν μεταβληθεί με την ψυχρή παραμόρφωση, τείνουν να επανέλθουν στις αρχικές τιμές τους. Οι ιδιότητες δεν επανέρχονται όλες ταυτόχρονα και με την ίδια ταχύτητα. Έτσι για παράδειγμα η ηλεκτρική αντίσταση μπορεί να έχει αποκατασταθεί σχεδόν πλήρως πριν την έναρξη της ανακρυστάλλωσης, ενώ η σκληρότητα μεταβάλλεται συγχρόνως με την ανακρυστάλλωση.

Κατά τη φάση της αποκατάστασης έχουμε αποβολή τμήματος της αποθηκευμένης ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης, υπό μορφή θερμότητας. Η αποβαλλόμενη αυτή ενέργεια οφείλεται στη συγκέντρωση των διαταραχών σε δέσμες εντός του κρυστάλλου και στην αλληλεξουδετέρωση αντίθετων διαταραχών.

4.21 ΑΝΑΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ

Η ανακρυστάλλωση συμβαίνει μετά τη φάση της αποκατάστασης και ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσό απελευθερούμενης ενέργειας. Επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, το χρόνο της θερμικής κατεργασίας καθώς και από το βαθμό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί το μέταλλο. Όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία τόσο λιγότερος χρόνος απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας ανακρυστάλλωσης.

Ο απαιτούμενος για την ανακρυστάλλωση χρόνος t και η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης T συνδέονται με τον ημιεμπειρικό τύπο:

$$1/t = A e^{(-Q_r/RT)}$$

όπου t είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η ανακρυστάλλωση έχει συντελεστεί κατά 50%, Q_r η ενέργεια ενεργοποίησης της ανακρυστάλλωσης, R η σταθερά των αερίων (2 Cal/(mole K)) και T η απόλυτη θερμοκρασία.

Ορίζουμε ως θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης τη θερμοκρασία στην οποία, ένα μέταλλο με ορισμένο ποσό πλαστικής παραμόρφωσης, θα έχει ανακρυσταλλωθεί πλήρως στο χρονικό διάστημα μιας ώρας. Λόγω των μεγάλων ποσών θερμότητας ενεργοποίησης που απαιτούνται για την έναρξη της ανακρυστάλλωσης, υπάρχει ένα ελάχιστο όριο θερμοκρασίας κάτω από το οποίο δεν συμβαίνει ανακρυστάλλωση. Επειδή η σχέση σύνδεσης μεταξύ θερμοκρασίας και χρόνου είναι εκθετική, μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας επιφέρουν μεγάλες μεταβολές στο χρόνο, με αποτέλεσμα κάτω από κάποια θερμοκρασία, ο χρόνος ανακρυστάλλωσης απειρίζεται και έτσι δεν υπάρχει ανακρυστάλλωση. Επομένως η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης είναι μία σταθερή ιδιότητα του μετάλλου και ανεξαρτητοποιείται έτσι από τον παράγοντα χρόνο.

Το ποσό της πλαστικής παραμόρφωσης (ενδοτράχυνσης) που έχει υποστεί

το μέταλλο επηρεάζει την ταχύτητα της ανακρυστάλλωσης. Δύο μέταλλα με διαφορετικό βαθμό ενδοτράχυνσης, θερμαινόμενα στην ίδια θερμοκρασία, θα ανακρυσταλλωθούν σε διαφορετικό χρόνο, με μεγαλύτερη ταχύτητα ανακρυστάλλωσης να εμφανίζει το ισχυρότερα παραμορφωμένο μέταλλο. Το γεγονός αυτό συνδέεται με το μεγαλύτερο ποσό της ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης, το οποίο έχει αποθηκευθεί στο περισσότερο παραμορφωμένο μέταλλο, η οποία ενέργεια είναι η κινητήρια δύναμη της ανακρυστάλλωσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι παραμορφωμένοι κρυσταλλικοί κόκκοι αντικαθίστανται από ισοαξονικούς κόκκους, οι οποίοι δεν είναι επιμήκεις αλλά κυτταροειδείς και περίπου ίδιων διαστάσεων.

Οι κόκκοι αυτοί σχηματίζονται από αρχικά φύτρα τα οποία αυξάνονται σε μέγεθος. Τα φύτρα δημιουργούνται σε σημεία όπου υπάρχει μεγάλη αποθηκευμένη ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης, όπως είναι τα όρια των κόκκων ή τα σημεία που το πλέγμα έχει μεγάλη καμπυλότητα.

Το μέγεθος των κόκκων που θα προκύψουν από τη διαδικασία της ανόπτησης εξαρτάται από το βαθμό της πλαστικής παραμόρφωσης. Μεγάλος βαθμός παραμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία λεπτόκοκκου μετάλλου, ενώ μικρός βαθμός παραμόρφωσης δίνει μέταλλο χονδρόκοκκο. Για τον ίδιο βαθμό ενδοτράχυνσης, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στη δημιουργία μεγαλύτερων κόκκων.

Ο μεγαλύτερος βαθμός πλαστικής παραμόρφωσης οδηγεί στη δημιουργία περισσότερων σημείων με αυξημένη ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης, συνεπώς και περισσότερων πιθανών σημείων για δημιουργία φύτρων, άρα περισσότερων κόκκων στο τελικό μέταλλο.

Ανακρυστάλλωση δεν συμβαίνει χωρίς προηγούμενη πλαστική παραμόρφωση. Ένα μέταλλο πριν ανακρυσταλλωθεί πρέπει να παραμορφωθεί σε όλη του την έκταση κατά τον ίδιο βαθμό, ώστε οι κόκκοι που θα προκύψουν να έχουν το ίδιο μέγεθος. Για να έχει καλή μηχανική αντοχή, πρέπει να παραμορφωθεί ισχυρά ώστε να γίνει λεπτόκοκκο.

ΣΧΗΜΑ 4.29:
Σχηματική παράσταση
ανακρυστάλλωσης
κόκκων.

