

### 3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### 3.1 Κατηγορίες μηχανικών δοκιμών

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών είναι πολύ σημαντική, τόσο για την απευθείας χρήση τους σε μηχανολογικές κατασκευές, όσο και για την επιλογή του τρόπου διαμόρφωσής τους σε συγκεκριμένη γεωμετρία. Οι μηχανικές δοκιμές ή δοκιμασίες των υλικών έχουν ως σκοπό τον έλεγχο των μηχανικών τους ιδιοτήτων και χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες :

- (α) στις καταστρεπτικές μεθόδους (άμεσοι μέθοδοι), στις οποίες απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου και
- (β) στις μη καταστρεπτικές μεθόδους (έμμεσοι μέθοδοι), στις οποίες δεν απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου.

Στην κατηγορία των δοκιμών με καταστροφή του δοκιμίου ανήκουν βασικά οι μηχανικές δοκιμές, που έχουν ως αντικειμενικό στόχο τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Τέτοιες δοκιμές είναι οι ακόλουθες :

- (α) δοκιμή εφελκυσμού και θλίψεως
- (β) δοκιμή σκληρότητας
- (γ) δοκιμή κρούσης
- (δ) δοκιμή κόπωσης
- (ε) δοκιμή ερπυσμού

Η δοκιμή του εφελκυσμού έχει εξετασθεί αναλυτικά στην Αντοχή των Υλικών. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετασθούν οι ιδιότητες που ανταποκρίνονται στις δοκιμές (β), (γ), (δ) και (ε).

Στις μη καταστρεπτικές μεθόδους διαπιστώνεται αν το εξεταζόμενο τεμάχιο, όπως π.χ. ένα χυτό αντικείμενο ή η ραφή κάποιας συγκόλλησης άξονα ή δοχείου, περιέχει ρωγμές ή πόρους, που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, χωρίς όμως να καταστραφεί το εν λόγω τεμάχιο. Τέτοιες μέθοδοι είναι :

- (α) Υδροστατικές μέθοδοι ελέγχου μεταλλικών δοχείων, λεβήτων, κλπ.
- (β) Μαγνητικές δοκιμές ελέγχου ρωγμών μαγνητικών υλικών (π.χ. κοινοί χάλυβες, κράματα Fe-Ni, κ.λπ).
- (γ) Δοκιμές με διεισδυτικά υγρά για τον εντοπισμό ρωγμών κυρίως σε μη μαγνητικά υλικά (π.χ. κράματα αλουμινίου, ανοξειδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες, κ.λπ).
- (δ) Έλεγχος δομικών ατελειών (π.χ. μάκρο- και μικροπορώδες σε χυτά αντικείμενα) με υπερήχους, ραδιογραφία (ακτίνες γ), ακτινανάλυση (ακτίνες X).

#### 3.2 Σκληρότητα

**Σκληρότητα** ενός υλικού είναι η αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στη διεύθυνση ενός ξένου σώματος που πιέζεται στην επιφάνεια του υλικού με κάποια συγκεκριμένη δύναμη και για ορισμένη χρονική διάρκεια. Θα μπορούσε μαθηματικά η σκληρότητα να εκφραστεί ως εξής :

$$H = P/A \quad (3.1)$$

όπου P : η εφαρμοζόμενη δύναμη και  
A : η επιφάνεια του αποτυπώματος

Το σώμα αυτό που επιχειρεί να διεισδύσει στο προς εξέταση υλικό ονομάζεται **διεισδυτής** ή **εντυπωτής**. Η αρχή λειτουργίας των περισσότερων δοκιμών σκληρότητας βασίζεται στη μέτρηση των διαστάσεων του αποτυπώματος, που δημιουργεί ο διεισδυτής στο υλικό. Αν το αποτύπωμα αυτό είναι μικρό, σημαίνει ότι το υλικό αντιστέκεται στη διεύθυνση και επομένως είναι σκληρό, ενώ αν το αποτύπωμα είναι μεγαλύτερο, το υλικό αντιστέκεται λιγότερο και επομένως είναι λιγότερο σκληρό.

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι σκληρομετρήσεως :

- Brinell
- Rockwell
- Vickers

### 3.2.1 Η δοκιμή Brinell

Κατά τη δοκιμή αυτή, ο δεισδυτής είναι σφαίρα από σκληρυμένο χάλυβα ή από καρβίδιο, με αποτέλεσμα να δημιουργεί σφαιρικό αποτύπωμα στο υλικό. Η εφαρμοζόμενη δύναμη αλλά και η διάμετρος της σφαίρας ποικίλλουν. Η τυποποιημένη μέθοδος Brinell χρησιμοποιεί σφαίρα διαμέτρου **10 mm**, φορτίο **3000 kp** και διάρκεια 30 sec. Η σκληρότητα κατά Brinell δίδεται από τον τύπο:

$$HB = 2P/(\pi D \cdot (D - (D^2 - d^2)^{1/2})) \quad (3.2)$$

όπου P : η εφαρμοζόμενη δύναμη σε kp,  
D : η διάμετρος του δεισδυτή σε mm και  
d : η διάμετρος του αποτυπώματος σε mm

Αν αντικατασταθούν τα εκάστοτε μεγέθη με τις σωστές μονάδες, το αριθμητικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την εξίσωση 3.2 έχει μονάδες Kp/mm<sup>2</sup> ή απλώς HB.

Η δοκιμή Brinell εφαρμόζεται ευρέως σε μαλακά κυρίως υλικά με μεγάλη μεταλλουργική ανομοιογένεια.

### 3.2.2 Η δοκιμή Rockwell

Η δοκιμή αυτή βασίζεται στη μέτρηση του βάθους του αποτυπώματος (και όχι της διαμέτρου), που προκαλεί ο δεισδυτής κατά τη διάρκεια δύο φάσεων :

- (α) της προφορτίσεως, που χρησιμοποιείται μικρή δύναμη (10 Kp) και
- (β) της φορτίσεως που χρησιμοποιείται μεγαλύτερη δύναμη, η οποία είναι καθορισμένη (100 ή 150 Kp).

Σύμφωνα, τώρα, με το είδος του δεισδυτή και επιβαλλόμενων φορτίων και συνεπώς με τον τύπο του δοκιμαζόμενου υλικού, υπάρχουν δυο κυρίως ευρύτατα χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι σκληρομέτρησης κατά Rockwell :

- **Rockwell C** : Χρησιμοποιείται ως δεισδυτής κώνος από διαμάντι, γωνίας 120° και άκρης με ακτίνα καμπυλότητας 0.02 mm. Κατά τη διάρκεια της προφορτίσεως, η εφαρμοζόμενη δύναμη είναι ίση με 10 kp και κατά τη διάρκεια της φορτίσεως είναι ίση με 150 kp. Η κλίμακα της σκληρότητας εκτείνεται από 20 έως 70 HRC (HRC: μονάδα σκληρότητας κατά Rockwell C). Πρέπει να σημειωθεί ότι η δοκιμή σκληρότητας κατά Rockwell C εφαρμόζεται ευρύτατα στην περίπτωση θερμικά κατεργασμένων χαλύβων και γενικότερα μετάλλων και κραμάτων μετά από κατεργασίες σκληρύνσεως (π.χ. βαμμένοι χάλυβες, επιφανειακά κατεργασμένοι χάλυβες, κράματα αλουμινίου μετά από γήρανση (ντουραλουμίνιο), κ.λπ.).
- **Rockwell B** : Χρησιμοποιείται ως δεισδυτής σφαίρα από σκληρυμένο χάλυβα, διαμέτρου 1/16 in. (περίπου 1,59 mm). Η δύναμη προφορτίσεως είναι ίση με 10 kp και της φόρτισης είναι ίση με 100 kp. Η κλίμακα της ξεκινά από 35 HRB και φθάνει στα 100 HRB. Τα υλικά που μπορούν να σκληρομετρηθούν είναι κοινοί χάλυβες, ακατέργαστοι κραματωμένοι χάλυβες, κράματα χαλκού, κράματα αλουμινίου και γενικά υλικά που δεν έχουν υποστεί κατεργασίες σκληρύνσεως.

### 3.2.3 Η δοκιμή Vickers

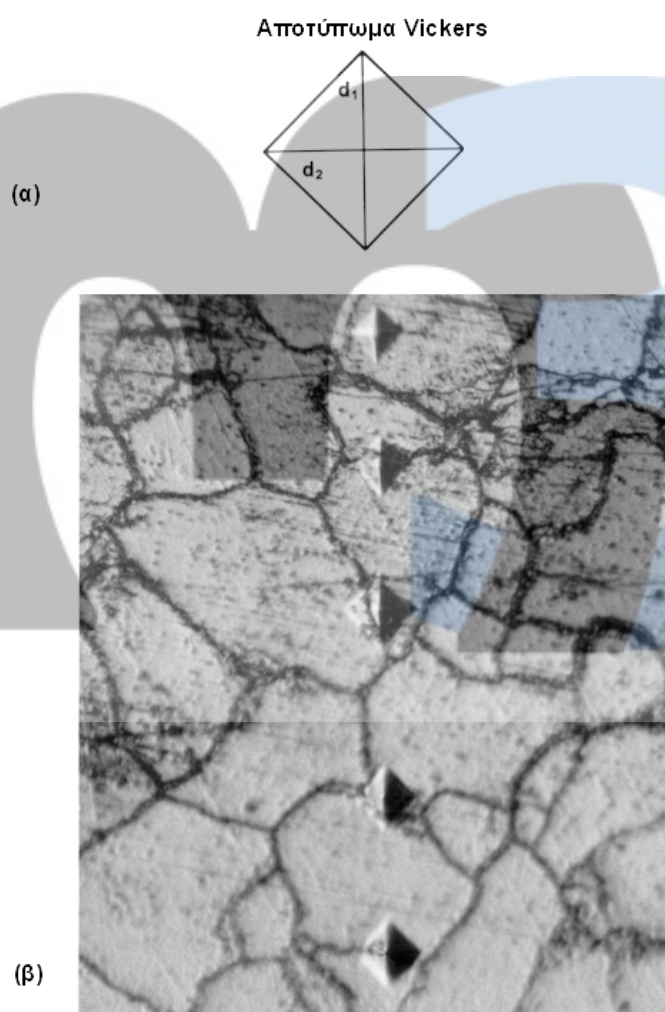
Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιεί ως δεισδυτή πυραμίδα διαμαντιού, ανοίγματος 136°. Τα φορτία που εφαρμόζονται ξεκινούν από μερικά p και φθάνουν μέχρι κάποιες εκατοντάδες Kp. Με τη διεύθυνση της πυραμίδας, μέσα στο υλικό, δημιουργείται ένα τετραγωνικό αποτύπωμα στην ιδανικότερη περίπτωση. Στην πραγματικότητα, το αποτύπωμα που δημιουργείται είναι σχήματος ρόμβου και οφείλεται στη μικροσκοπική ανισοτροπία του υλικού (σχήμα 3.1α).

Η τιμή της σκληρότητας δίδεται μαθηματικά από τον τύπο:

$$HV = 1,854 P/d^2 \quad (3.3)$$

όπου,  $P$  : η εφαρμοζόμενη δύναμη σε Κρ και  
 $d$  : ο μέσος όρος των διαγωνίων ( $= (d_1 + d_2)/2$ ) του αποτυπώματος (mm) (σχήμα 3.1α)

Το αριθμητικό αποτέλεσμα έχει μονάδες Κρ/μm<sup>2</sup> ή απλώς HV (HV : μονάδα σκληρότητας κατά Vickers). Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιείται για ένα μεγάλο εύρος υλικών (σκληρών και μαλακών) λόγω της ποικιλίας φορτίων που χρησιμοποιεί. Επίσης, λόγω του ρηχού αποτυπώματος που δημιουργεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί άνετα και στη σκληρομέτρηση πολύ λεπτών ελασμάτων (λαμαρίνες, φύλλα αλουμινίου). Η δυνατότητα χρήσης επίσης πολύ μικρών φορτίων (μάζας μερικών μόλις γραμμαρίων) κάνει τη μέθοδο Vickers κατάλληλη για μικροσκληρομέτρηση υλικών, η οποία είναι πολύ βασική για τη μελέτη της κατανομής της σκληρότητας, αλλά και για τη μέτρηση της σκληρότητας των διαφόρων φάσεων και συστατικών, που εμπεριέχονται μέσα στο υλικό. Οι διαστάσεις των μικροαποτυπωμάτων μετρούνται στο οπτικό μικροσκόπιο (σχήμα 3.1β).



Σχήμα 3.1 : (α) Μορφή αποτυπώματος κατά τη σκληρομέτρηση Vickers. (β) Οπτική μικρογραφία διαδοχικών μικροσκληρομετρήσεων σε μαλακό χάλυβα (μεγέθυνση Χ400).

Ο Πίνακας Π.3.1 παρουσιάζει συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των διαφόρων βασικών δοκιμών σκληρότητας.

Δοκιμή σκληρότητας	Διεισδυτής	Φορτίο	Χρήσεις
<b>Brinell</b>	σφαίρα βαμμένου χάλυβα, διαμέτρου 10mm (πρότυπη)	3000 Kp (πρότυπη)	μαλακά υλικά και ανομοιογενή υλικά
<b>Rockwell C</b>	κώνος διαμαντιού, 120°, καμπυλότητας 0.02 mm,	Προφόρτιση : 10 kp φόρτιση: 150 kp	σκληρά υλικά (βαμμένοι χάλυβες,)
<b>Rockwell B</b>	σφαίρα βαμμένου χάλυβα 1/16 in.	προφόρτιση : 10 kp φόρτιση: 100 kp	μαλακά υλικά
<b>Vickers</b>	πυραμίδα διαμαντιού, 136°	μερικά p έως εκατοντάδες kp	σκληρά και μαλακά υλικά, λεπτά φύλλα

Πίνακας Π.3.1 : Γενικά χαρακτηριστικά δοκιμών σκληρότητας

Η σκληρότητα ως μηχανική ιδιότητα συνδέεται και με άλλες μηχανικές ιδιότητες του υλικού: την αντοχή σε εφελκυσμό, την πλαστικότητα (επιμήκυνση κατά τη θραύση) και τη δυσθραυστότητα. Όταν αυξάνεται η σκληρότητα ενός υλικού, αυξάνεται η αντοχή του και μειώνονται η πλαστικότητα και η δυσθραυστότητά του. Άρα, ένα πολύ σκληρό υλικό είναι πολλές φορές και ψαθυρό (εύθραυστο).

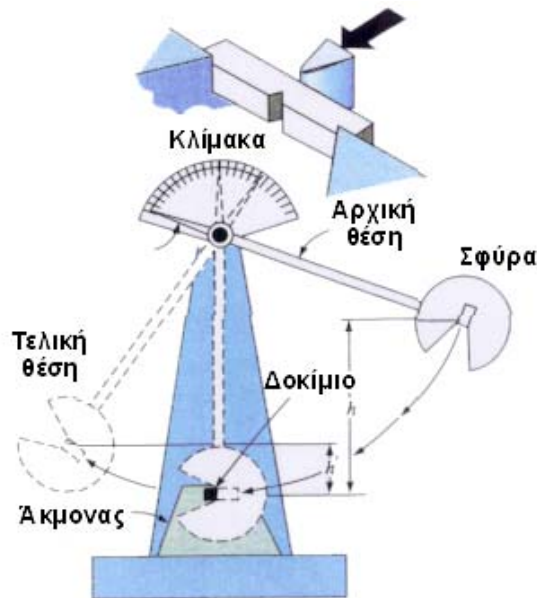
Μια προσεγγιστική σχέση που συνδέει τη σκληρότητα με το όριο διαρροής είναι :  $H=3\sigma_{\Delta}$

### 3.3 Δυσθραυστότητα

Η δυσθραυστότητα είναι πολύ σημαντική ιδιότητα των υλικών. Ο έλεγχός της γίνεται μέσω τυποποιημένης δοκιμής κρούσης με τη βοήθεια μηχανής **εκκρεμούςς σφύρας** (σχήμα 3.2). Οι διαφορετικοί τύποι δοκιμής είναι οι παρακάτω :

- δοκιμή Charpy
- δοκιμή Izod

Και οι δυο ανωτέρω τεχνικές βασίζονται στη μέτρηση του μηχανικού έργου, που χρειάζεται για τη θραύση ενός τυποποιημένων διαστάσεων δοκιμίου στο οποίο έχει γίνει κατάλληλη χαραγή σχήματος V. Στην περίπτωση της δοκιμής Charpy, το δοκίμιο συγκρατείται στα δύο του άκρα ως αμφιέριστος δοκός, ενώ στην περίπτωση της δοκιμής Izod, το δοκίμιο είναι πακτωμένο από το ένα άκρο στο άλλο (πρόβολος). Το όργανο που χρησιμοποιείται ονομάζεται εκκρεμές και για τη θραύση του δοκιμίου χρησιμοποιεί μια βαριά σφύρα (σχήμα 3.2). Η διαφορά της δυναμικής ενέργειας μεταξύ της τελικής (ύψος  $h'$  από τη θέση του δοκιμίου) και της αρχικής θέσης της σφύρας (ύψος  $h$  από τη θέση του δοκιμίου) δίνει και το απαιτούμενο για τη θραύση μηχανικό έργο.



Σχήμα 3.2 : Παράσταση της κρούσης (μηχανή εκκρεμούς σφύρας). Το δοκίμιο συγκρατείται στα δύο του άκρα ως αμφέρειστος δοκός (δοκιμή CHARPY) και το κτύπημα γίνεται στη μέση.

Το έργο, που καταναλώνεται για τη θραύση του δοκιμίου, προσδιορίζεται από τις θέσεις που παίρνει η σφύρα πριν και μετά τη θραύση του δοκιμίου. Η μηχανή δοκιμασίας σε κρούση έχει ένα δείκτη, που κινείται μαζί με τη σφύρα, ο οποίος μας δείχνει το έργο που καταναλώνεται κάθε φορά για τη θραύση του δοκιμίου. Η δυσθραυστότητα του δοκιμαζόμενου υλικού δίδεται από τη σχέση:

$$R = \Delta E / A_0 \quad (3.4)$$

όπου :  $\Delta E$ : το απαιτούμενο για τη θραύση μηχανικό έργο, που είναι ανάλογο της υψομετρικής διαφοράς  $h-h'$   
 $A_0$ : η διατομή του δοκιμίου

### 3.3.1 Όλκιμα και ψαθυρά υλικά

Ανάλογα με το ποσόν ενέργειας, που δαπανάται κατά τη θραύση στα πλαίσια της δοκιμής της κρούσης, τα τεχνικά υλικά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες :

- (α) **όλκιμα υλικά** και
- (β) **ψαθυρά υλικά**

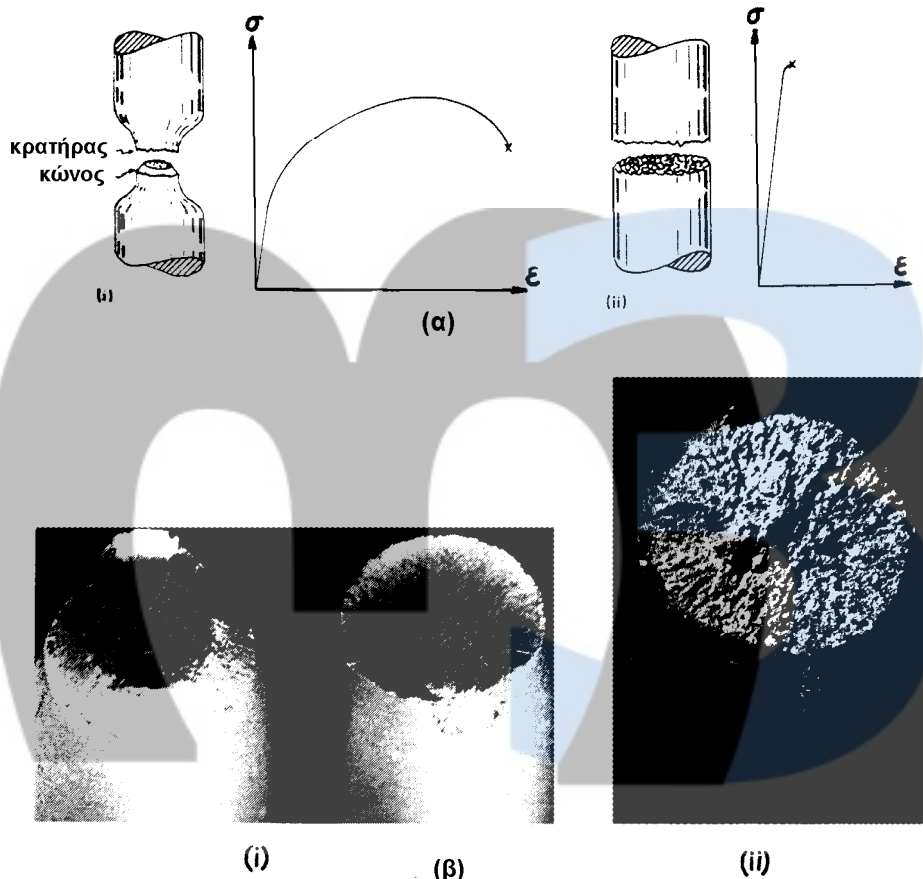
Τα όλκιμα υλικά απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας ( $> 100 \text{ J}$ ) κατά τις πρότυπες δοκιμές κρούσης, δηλαδή χαρακτηρίζονται από υψηλή **δυσθραυστότητα**. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των όλκιμων υλικών είναι η σημαντική πλαστική παραμόρφωση που προηγείται της θραύσης. Τα όλκιμα υλικά έχουν συνήθως μέτρια έως χαμηλή σκληρότητα και μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν εν ψυχρώ, είναι δηλαδή εύπλαστα και ευήλατα.

Οι επιφάνειες θραύσεις ενός όλκιμου μετάλλου, μετά από δοκιμή εφελκυσμού, παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική μορφή "**κώνου-κρατήρα**", ενώ η πλαστική παραμόρφωση, που προηγείται της θραύσης, διαπιστώνεται εύκολα με την παρουσία της στένωσης της διατομής (**λαιμός**), βλ. [σχήμα 3.3α](#) και [β](#). Όλκιμα υλικά είναι τα περισσότερα καθαρά μέταλλα (Fe, Al, Cu, Pb) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως και αρκετά από τα κράματα, όπως π.χ. οι χάλυβες με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ο μπρούντζος (Cu-Sn), ο ορείχαλκος (Cu-Zn), όταν δεν έχουν υποστεί κατεργασίες σκλήρυνσης.

Τα ψαθυρά (ή εύθραυστα) υλικά απορροφούν μικρά ποσά ενέργειας ( $< 40-50 \text{ J}$ ) κατά την κρούση, χαρακτηρίζονται δηλαδή από μικρή σχετικά δυσθραυστότητα (απλούστερα "**σπάζουν εύκολα**"). Τα κεραμικά υλικά, το γυαλί, ο γύψος κατατάσσονται σε αυτή την κατηγορία. Επίσης ορισμένα κράματα, όπως οι χάλυβες μεγάλης περιεκτικότητας σε άνθρακα μετά από σκλήρυνση (βαφή) και τα περισσότερα είδη

χυτοσίδηρου, εμφανίζουν ψαθυρή συμπεριφορά. Σε αντίθεση με τα όλκιμα υλικά, τα ψαθυρά υλικά σπάζουν απότομα χωρίς καμία προειδοποίηση (δηλαδή χωρίς να έχει προηγηθεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση) και παρουσιάζουν μεγάλη, συνήθως, σκληρότητα. Γι' αυτό το λόγο δε διαμορφώνονται εν ψυχρώ. Οι επιφάνειες θραύσης ενός ψαθυρού υλικού, μετά από δοκιμή εφελκυσμού, δεν παρουσιάζουν σημαντική παραμόρφωση, ενώ, μικροσκοπικά, χαρακτηρίζονται από κοκκώδη μορφολογία (σχήμα 3.3α και β).

Η τιμή της δυσθραυστότητας των υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη **χημική σύσταση** και την **κρυσταλλική δομή** του υλικού, αλλά και από την **θερμοκρασία**. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ορισμένα όλκιμα υλικά μπορούν να μετατραπούν σε ψαθυρά. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ψαθυροποίησης, λόγω χαμηλής θερμοκρασίας, εμφανίστηκε σε Βρετανικά πλοία που ταξίδευαν στο Νότιο Πόλο στις αρχές του 20ού αιώνα, όταν λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών, που επικρατούσαν, εμφανίσθηκαν κρίσιμες ρωγμές τόσο στη μηχανή, όσο και στις περιοχές συγκόλλησης των ελασμάτων των πλοίων.



Σχήμα 3.3 : (α) Μορφή θραύσης και διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$  όλκιμου (i) και ψαθυρού υλικού (ii), (β) Επιφάνεια όλκιμης (i) και ψαθυρής θραύσης (ii).

## 3.4 Κόπωση

### 3.4.1 Η αντοχή σε κόπωση

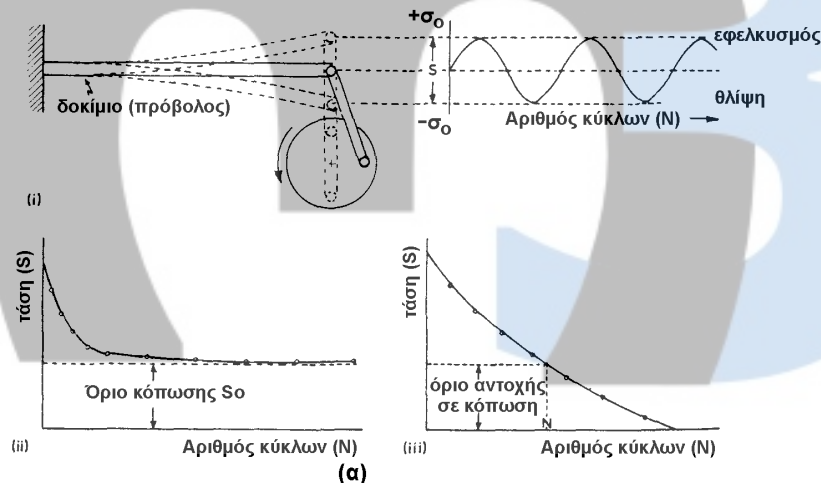
Στην πράξη οι περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές δεν υφίστανται την επίδραση ενός χρονικά σταθερού φορτίου. Τις περισσότερες φορές ο τύπος και η τιμή του φορτίου μεταβάλλονται με το χρόνο. Έτσι, πολλά από τα τεχνικά υλικά υπόκεινται σε **χρονικά μεταβαλλόμενα φορτία** ή **τάσεις** στις διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές, στις οποίες συμμετέχουν ως λειτουργικά εξαρτήματα. Αυτές οι τάσεις, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, καταπονούν το υλικό σε εφελκυσμό και σε θλίψη και η μέγιστη τιμή της τάσης δεν ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού. Τέτοιες περιοδικές καταπονήσεις υφίστανται πολλά μεταλλικά εξαρτήματα, όπως ο διωστήρας στις μηχανές εσωτερικής καύσης, τα αμορτισέρ των αυτοκινήτων, τα πτερύγια των αεροσκαφών και πολλά άλλα.

Οι επαναλαμβανόμενες αυτές μηχανικές καταπονήσεις, που αναπτύσσονται σε υλικά - εξαρτήματα μηχανών και κατασκευών, πολύ συχνά οδηγούν, μετά από κάποιες συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, σε αστοχίες

που είναι γνωστές ως αστοχίες λόγω **κόπωσης**. Πολύ απλά, **κόπωση** μπορεί να οριστεί ως η χαρακτηριστική χρονικά μεταβαλλόμενη καταπόνηση, η οποία μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού (θραύση από κόπωση). Το όριο διαρροής είναι μέτρο της λεγόμενης στατικής αντοχής του υλικού. Στην περίπτωση της κόπωσης, το αντίστοιχο όριο είναι κατώτερο του στατικού και αντιστοιχεί στη δυναμική αντοχή του υλικού.

Ας θεωρηθεί μία περιοδικά (κυκλικά) επαναλαμβανόμενη καταπόνηση που απεικονίζεται στο σχήμα 3.4α. Το συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζει τη χρονική μεταβολή της τάσης και δείχνει ότι το υλικό καταπονείται από μία μέγιστη θετική (εφελκυστική) τάση ( $\sigma_0$ ) έως μία ελάχιστη αρνητική (θλιπτική) τάση ( $-\sigma_0$ ). Ο κύκλος ή περίοδος φόρτισης είναι ο χρόνος που απαιτείται για ένα πλήρη κύκλο εναλλαγής της τιμής της τάσης (από μέγιστη σε μέγιστη ή από ελάχιστη σε ελάχιστη τιμή). Μετά από περίοδο συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος φόρτισης (ή αριθμού κύκλου φορτίσεως) το υλικό αστοχεί (σπάει). Όσο μεγαλώνει η τιμή του εύρους της τάσης  $S$ , τόσο ελαττώνεται και ο αριθμός κύκλων ( $N$ ), που πρέπει να συμπληρωθεί για την αστοχία του υλικού. Οι καμπύλες (ii) και (iii) του σχήματος 3.4α δείχνουν τη μεταβολή της τάσης  $S$  σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων ( $N$ ), που αντιστοιχεί στην αστοχία του υλικού. Οι καμπύλες αυτές είναι γνωστές ως **διαγράμματα S-N**. Το διάγραμμα (ii) του σχήματος 3.4α δείχνει ότι υπάρχει ένα κατώτατο όριο τάσης  $S_0$ , κάτω από το οποίο το υλικό αντέχει θεωρητικά σε άπειρο αριθμό κύκλων φορτίσεως, δηλαδή πρακτικά δε λαμβάνει χώρα αστοχία λόγω κόπωσης. Η τιμή της τάσης  $S_0$  ονομάζεται **όριο κόπωσης**. Το διάγραμμα (ii) του σχήματος 3.4α ισχύει κυρίως για τα περισσότερα είδη χαλύβων. Η καμπύλη (iii) του σχήματος 3.4α, η οποία ισχύει για τα μη σιδηρούχα κράματα, δείχνει ότι, για κάθε τιμή της τάσης (όσο μικρή είναι αυτή), το υλικό μετά από πεπερασμένο αριθμό κύκλων φόρτισης οδηγείται σε θραύση λόγω κόπωσης.

Άρα, ξεκινώντας από το όριο ζωής ενός μεταλλικού εξαρτήματος, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα αριθμό κύκλων φόρτισης ( $N$ ), μπορεί να ευρεθεί το **όριο αντοχής σε κόπωση** ( $S_N$ ) (σχήμα 3.4α).



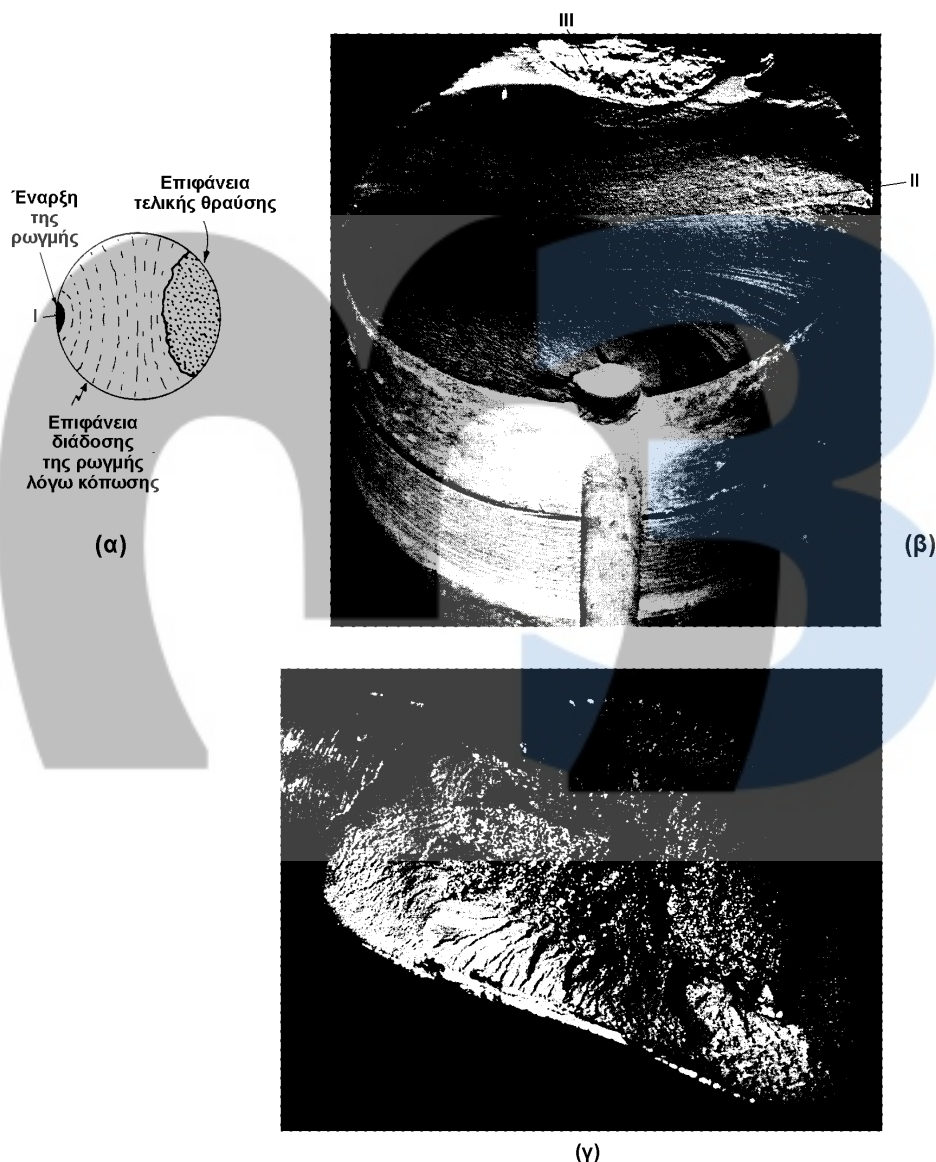
Σχήμα 3.4: (α) (i) Δοκιμή κυκλικής μηχανικής καταπόνησης (κόπωσης) σε δοκίμιο τύπου προβόλου και (ii), (iii) καμπύλες S-N. (β) Λεπτομέρεια του δοκιμίου για την πραγματοποίηση της δοκιμής της κόπωσης.

### 3.4.2 Η δοκιμή της κόπωσης

Οι μηχανές δοκιμής κόπωσης βασίζονται στη διάταξη του σχήματος 3.4β. Το δοκίμιο υπό μορφή προβόλου περιστρέφεται μέσω κατάλληλου σφιγκτήρα και φορτίζεται με κατακόρυφο φορτίο  $W$  στο ελεύθερο άκρο. Για κάθε περιστροφή  $180^\circ$  το φορτίο  $W$  αλλάζει φορά. Προκειμένου να καταρτισθεί το διάγραμμα S-N του υλικού, πραγματοποιούνται πολλές δοκιμές με διαφορετικό φορτίο  $W$  και υπολογίζεται για κάθε μία από αυτές ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ( $N$ ), που απαιτείται για την αστοχία (θραύση) του υλικού.

### 3.4.3 Μηχανισμός αστοχίας λόγω κόπωσης

Η αστοχία λόγω κόπωσης έχει αφητηρία κάποια επιφανειακή ατέλεια του υλικού, όπως π.χ. από επιφανειακή ρωγμή, χαραγή, κ.λπ.. Η ρωγμή που διαδίδεται λόγω κόπωσης δημιουργεί ραβδώσεις στην επιφάνεια φόρτισης του μετάλλου, που η κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε ένα κύκλο εναλλαγής της τάσης. Η επιφάνεια θραύσης λόγω κόπωσης περιλαμβάνει συνήθως τρεις χαρακτηριστικές περιοχές (σχήμα 3.5α) :



Σχήμα 3.5 : (α) Μορφή επιφάνειας θραύσης από κόπωση (I: θέση έναρξης ρωγμής, II: επιφάνεια διάδοσης της ρωγμής λόγω της κόπωσης και III: επιφάνεια τελικής θραύσης). (β) Επιφάνεια θραύσης στροφαλοφόρου άξονα λόγω κόπωσης και (γ) επιφάνεια θραύσης χαλύβδινου άξονα, που έχει υποστεί επιφανειακή βαφή λόγω έντονης στρεπτικής κόπωσης.

- την **περιοχή Α**, που είναι η περιοχή έναρξης της ρωγμής κόπωσης (συνήθως είναι μία επιφανειακή ατέλεια),



- την **περιοχή Β**, που αποτελεί την επιφάνεια διάδοσης της ρωγμής λόγω κόπωσης και η οποία έχει μορφολογία παρόμοια με την εξωτερική επιφάνεια αχιβάδας (σχήμα 3.5α και β). Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η περιοχή αυτή αποτελείται από **πολλαπλές ραβδώσεις**, ο αριθμός των οποίων δείχνει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης. Και τέλος,
- την **περιοχή Γ**, που αποτελεί την επιφάνεια τελικής θραύσης με χαρακτηριστική κοκκώδη (τραχιά) μορφολογία, η οποία προκαλείται από την ασταθή διάδοση της ρωγμής γύρω από τα όρια των κόκκων του μετάλλου.

Η μορφολογία της επιφάνειας θραύσης από στρεπτική κόπωση χαλύβδινου άξονα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5γ.

Οι έντονες μηχανικές καταπονήσεις, αλλά και η παρουσία διαβρωτικών συνθηκών του περιβάλλοντος υποβοηθούν το φαινόμενο της κόπωσης με αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία πολλών υλικών. Ο ελλιπής σχεδιασμός μεταλλικών εξαρτημάτων (ύπαρξη γωνιών και γενικά εγκοπών) δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων και μείωση της αντοχής τους σε κόπωση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Η βελτίωση της αντοχής σε κόπωση επιτυγχάνεται με την εξάλειψη επιφανειακών ατελειών (υποψήφιος θέσεις έναρξης της ρωγμής) με λείανση, καθώς και με μεθόδους επιφανειακής σκλήρυνσης, όπως π.χ. με αμμοβολή - υαλοβολή, ενανθράκωση, εναζώτωση, κ.λπ..

### 3.5 Ερπυσμός

Η πλαστική παραμόρφωση ( $\epsilon$ ) ενός υλικού ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης ( $\sigma$ ), του χρόνου επιβολής της τάσης ( $t$ ), καθώς και της θερμοκρασίας ( $T$ ), ονομάζεται ερπυσμός (λέξη που προέρχεται από το ρήμα "έρπω"). Δηλαδή :

$$\epsilon = f(\sigma, t, T) \quad (3.5)$$

Πρακτικά, η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού αποκτά σημαντικές τιμές **σε υψηλές θερμοκρασίες** και πιο συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της τιμής **0,4  $T_m$**  ( $T_m$  : το απόλυτο σημείο τήξεως του μετάλλου ( $K$ ) =  $\theta_m(^{\circ}C) + 273$ ). Μέταλλα με χαμηλό σημείο τήξεως εμφανίζουν ερπυσμό ακόμα και στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Π.χ. ο μόλυβδος (Pb) με  $\theta_m = 327^{\circ}C$  ( $T_m = 600 K$ ) παρουσιάζει ερπυσμό, διότι η απόλυτη θερμοκρασία περιβάλλοντος ισούται προς  $\theta_{περ} = (273 + 25) K = 298 K$  περίπου ίσο προς  $0,5 T_m > 0,4 T_m$ . Φύλλα μολύβδου στις στέγες των σπιτιών, καθώς και σωλήνες ύδρευσης από μόλυβδο, παρουσιάζουν το φαινόμενο του ερπυσμού ακόμα και στους  $-33^{\circ}C$  ( $= 0,4 T_m$ ).

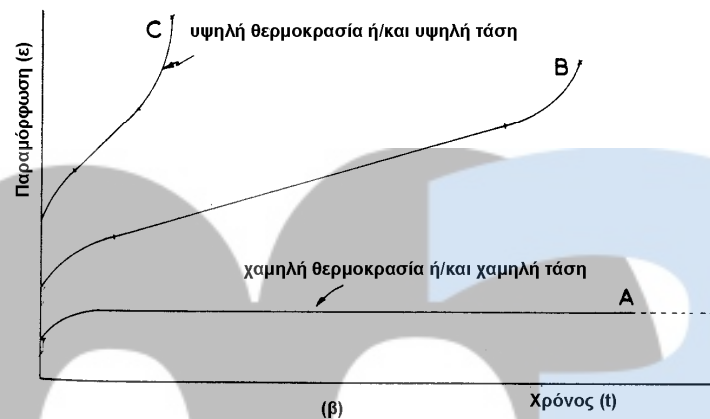
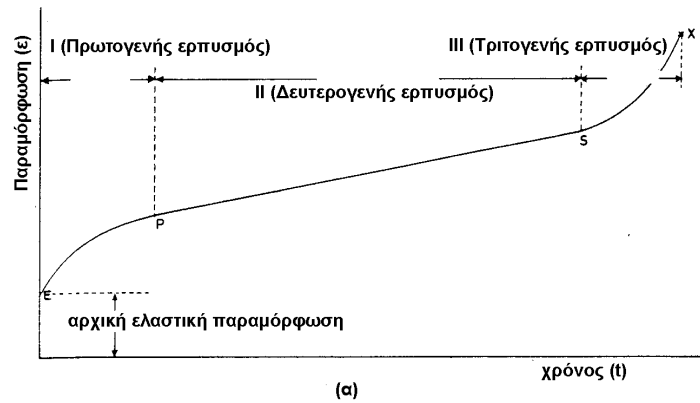
Ο ερπυσμός όμως δεν παρατηρείται μόνο σε μέταλλα με σχετικά χαμηλό σημείο τήξεως. Παρατηρείται επίσης σε υλικά, τα οποία καταπονούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως π.χ. οι εναλλάκτες θερμότητας, οι αντιστάσεις κλιβάνων, τα εξαρτήματα στο εσωτερικό θαλάμων καύσης, οι πτερωτές αεροστρόβιλων και ατμοστρόβιλων.

Το σχήμα 3.6α δείχνει τις τρεις διαφορετικές φάσεις ερπυσμού ενός μεταλλικού υλικού, με την πάροδο του χρόνου. Αυτές είναι οι ακόλουθες :

- φάση πρωτογενούς ερπυσμού (EP),
- φάση δευτερογενούς ερπυσμού (PS), που ο ρυθμός παραμόρφωσης παραμένει σταθερός,
- φάση τριτογενούς ερπυσμού, που χαρακτηρίζεται από ολοένα αυξανόμενο ρυθμό παραμόρφωσης έως την τελική θραύση του υλικού.

Αύξηση της θερμοκρασίας ή/και της τάσης μετατοπίζουν αριστερόστροφα τις καμπύλες  $\epsilon-t$  (βλ. σχήμα 3.6β).

Οι δοκιμές του ερπυσμού συνίστανται στην εφαρμογή εφελκυστικών τάσεων κάτω από υψηλές θερμοκρασίες και στην ακριβή μέτρηση της παραμόρφωσης για μεγάλες χρονικές περιόδους. Γι' αυτό και ο προσδιορισμός της καμπύλης  $\epsilon-t$  (ερπυσμού) ενός μεταλλικού υλικού θεωρείται επίπονη διαδικασία και απαιτεί όργανα μέτρησης υψηλής ακριβείας, όπως π.χ. επιμηκυσιόμετρο, το οποίο να μην επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.6 : (α) Καμπύλη  $\epsilon$ - $t$  ερπυσμού (I : πρωτογενής ερπυσμός, II : δευτερογενής ερπυσμός, III : τριτογενής ερπυσμός). (β) Μεταβολή καμπυλών  $\epsilon$ - $t$  ερπυσμού με αλλαγή της τάσης ή/και της θερμοκρασίας.

### 3.6. Κατεργασιμότητα

Η κατεργασιμότητα, ως ιδιότητα υλικών, είναι μία σύνθετη έννοια, η οποία ορίζεται ως η δυνατότητα (ευκολία ή δυσκολία) κατεργασίας, που παρουσιάζει ένα υλικό, προκειμένου από αυτό να κατασκευασθούν εξαρτήματα συγκεκριμένης γεωμετρίας. Η κατεργασία αυτή μπορεί να είναι κατεργασία διαμόρφωσης, κοπής, συγκόλλησης ή χύτευσης. Η παραπάνω έννοια της κατεργασιμότητας, ως γενική, μπορεί να διαιρεθεί σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το είδος της κατεργασίας που μας ενδιαφέρει :

**(α) Διαμορφωσιμότητα** καλείται η δυνατότητα ενός υλικού να διαμορφωθεί σε μία συγκεκριμένη γεωμετρία (έλασμα, φύλλο, σύρμα, κ.λπ.), μέσω κατεργασίας πλαστικής παραμόρφωσης. Όταν η κατεργασία αυτή αποβλέπει στη διαμόρφωση ελάσματος, τότε η δυνατότητα αυτή λέγεται **ελατότητα**, ενώ όταν αποβλέπει στη διαμόρφωση σύρματος, τότε λέγεται **ολκιμότητα**. Ειδικότερα, όσο μαλακό είναι ένα μέταλλο, τόσο πιο εύκολα μπορεί να διαμορφωθεί σε ελάσματα ή σε σύρματα, δηλαδή αυξάνεται η ελατότητα και η ολκιμότητά του αντίστοιχα.

**(β) Ευχυτότητα ή χυτευσιμότητα** καλείται η δυνατότητα ενός υλικού να διαμορφωθεί, μέσω χύτευσης, σε εξάρτημα συγκεκριμένης γεωμετρίας. Το σημείο τήξεως του μετάλλου, το ιξώδες και η επιφανειακή τάση του τήγματος του μετάλλου, καθώς και οι διάφορες προσμείξεις είναι παράγοντες, που επηρεάζουν σημαντικά την ευχυτότητα του μετάλλου.

**(γ) Συγκολλησιμότητα** καλείται η δυνατότητα συγκόλλησης ενός υλικού. Η καθαρότητα του μετάλλου και η χημική σύσταση του κράματος προς συγκόλληση είναι παράγοντες που άλλοτε επηρεάζουν θετικά και άλλοτε αρνητικά τη συγκολλησιμότητα. Π.χ. χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα (> 0,3%) εμφανίζουν ρωγμές κατά τη συγκόλληση και έτσι χαρακτηρίζονται από μικρή συγκολλησιμότητα, ενώ αντίθετα προσθήκες σε μαγγάνιο (Mn) έως 1% και πυρίτιο (Si) έως 0,3% αυξάνουν τη ρευστότητα του τήγματος, καθώς και την αντίστασή του σε οξειδωση υψηλών θερμοκρασιών, αυξάνοντας έτσι τη συγκολλησιμότητα των χαλύβων.

(δ) **Κατεργασιμότητα στην κοπή** καλείται η δυνατότητα διαμόρφωσης, που παρουσιάζει ένα υλικό, μέσω κατεργασιών αποβολής υλικού (π.χ. τόννευση, φρεζάρισμα, πλάνιση, λείανση, κ.λπ.). Και σε αυτή την κατηγορία η χημική σύσταση και η δομή του υλικού παίζουν πρωτεύοντα ρόλο. Οι **χάλυβες ελευθέρως κοπής** (δηλαδή υψηλής κατεργασιμότητας στην κοπή), που περιέχουν μαγγάνιο (Mn) και θείο (S), παρουσιάζουν μεγάλη ευκολία κατά την κοπή, λόγω της ύπαρξης απομονωμένων σωματιδίων (εγκλεισμάτων) **σουλφιδίου του μαγγανίου (MnS)**.

### 3.7 Ελαστική παραμόρφωση μονοκρυστάλλου

**Μονοκρύσταλλος ή μονοκρυσταλλικό υλικό** καλείται το υλικό εκείνο που αποτελείται από ένα μοναδικό κρύσταλλο ή κρυσταλλίτη. Ένα τέτοιο υλικό μπορεί να κατασκευασθεί με τεχνικές, στις οποίες απαιτούνται χαμηλοί ρυθμοί θέρμανσης και απόψυξης. Όπως είναι γνωστό από την Αντοχή των Υλικών, ένα μεταλλικό υλικό συνήθως μπορεί να καταπονηθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με την παραμόρφωση που τείνει να επιφέρει η επιβαλλόμενη τάση (σχήμα 3.7α). Έτσι, αναφέρεται ενδεικτικά η εφελκυστική καταπόνηση (**εφελκυσμός**), η θλιπτική καταπόνηση (**θλίψη**) και η διαμητική καταπόνηση (**διάτμηση ή στρέψη**). Τα περισσότερα εξαρτήματα ή στοιχεία μηχανών καταπονούνται σε πιο σύνθετες καταπονήσεις που αναλύονται σε απλούστερες, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Όταν η τάση διατηρηθεί κάτω από μία κρίσιμη τιμή (όριο ελαστικότητας) επιφέρει **ελαστικές παραμορφώσεις**, που εξαλείφονται μετά από την απόσυρση της δύναμης. Σε ατομικό επίπεδο οι εν λόγω τάσεις προκαλούν επιμήκυνση ή συμπίεση των ατομικών δεσμών, οι οποίες αντιστοιχούν στις παραμορφώσεις ελατηρίου (σχήμα 3.7β). Η τάση που προκαλεί μία τέτοια αντιστρεπτή (ελαστική) παραμόρφωση ακολουθεί το Νόμο του Hooke (βλ. Αντοχή των Υλικών) :

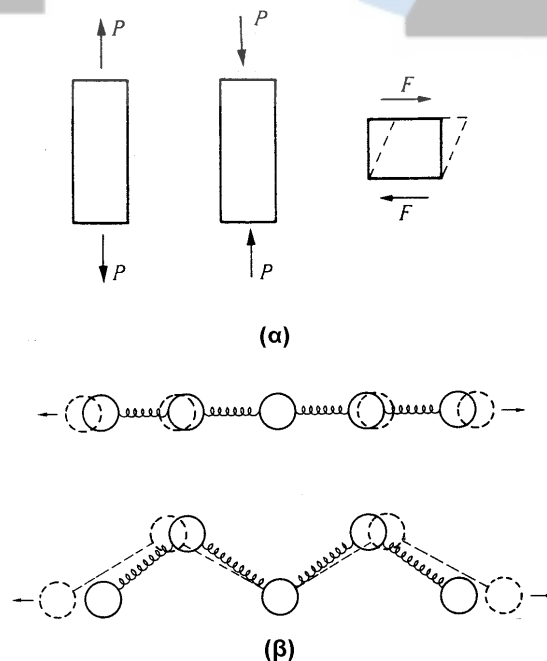
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.6)$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας (Young) του υλικού.

Σε ένα μακροσκοπικό στερεό η επιβολή εφελκυστικής καταπόνησης δεν οδηγεί μόνο σε παραμορφώσεις κατά τη διεύθυνση της τάσης, αλλά και κάθετα προς αυτήν. Όταν η επιβαλλόμενη τάση τείνει να επιμηκύνει το υλικό (κατά τη διεύθυνση x), είναι λογικό να μεταβάλλεται το πλάτος (y) και το πάχος (z) του υλικού. Ο λόγος της επιμέρους παραμόρφωσης ως προς αυτή κατά τη διεύθυνση της τάσης λέγεται λόγος Poisson ( $\nu$ ) :

$$\nu = - \varepsilon_y / \varepsilon_x = - \varepsilon_z / \varepsilon_x \quad (3.7)$$

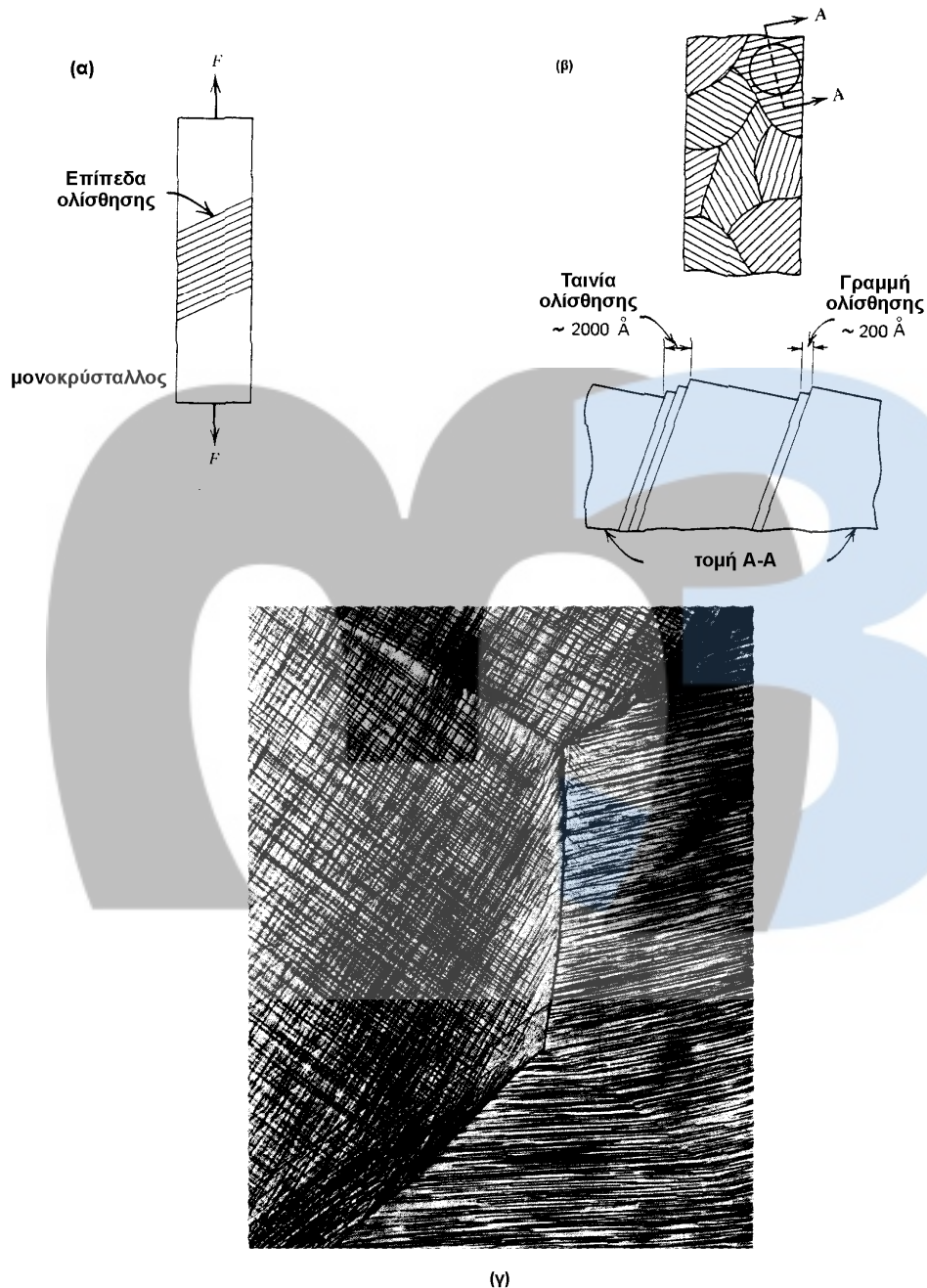
Το (-) πρόσημο τίθεται για να εξασφαλίσει τις θετικές τιμές του λόγου Poisson. Ο λόγος Poisson έχει συνήθως τιμή ίση προς 1/3 για τα μεταλλικά υλικά.



Σχήμα 3.7 : (α) Βασικές μηχανικές καταπονήσεις : εφελκυσμός, θλίψη και διάτμηση. (β) Σχηματική αναπαράσταση της ελαστικής μηχανικής καταπόνησης σε ατομική κλίμακα.

### 3.8 Πλαστική παραμόρφωση μονοκρυστάλλου

Στις κατεργασίες διαμόρφωσης σημαντικό ρόλο παίζει η πλαστική συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών. Η πλαστικότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να παραμορφωθεί μόνιμα κάτω από την επίδραση κάποιας τάσης. Ιεραρχικά θα εξετασθεί η πλαστική παραμόρφωση μονοκρυσταλλικών μετάλλων και ο μηχανισμός με τον οποίον προκαλείται. Η πλαστική παραμόρφωση ενός μονοκρυστάλλου κάτω από την επίδραση εφελκυστικής τάσης απεικονίζεται στο σχήμα 3.8α. Όταν η τάση που εφαρμόζεται υπερβεί το όριο ελαστικότητας του μονοκρυστάλλου, τότε λαμβάνει χώρα η διαδικασία της **ολίσθησης**.



Σχήμα 3.8: (α) Ολίσθηση κρυσταλλικών επιπέδων κατά την εφελκυστική καταπόνηση μονοκρυστάλλου, (β) Δημιουργία γραμμών και ταινιών ολίσθησης και (γ) μικροφωτογραφία πολυκρυσταλλικού μετάλλου (Al) στο οποίο έχουν σχηματισθεί ταινίες ολίσθησης (για κάθε κόκκο δημιουργείται ξεχωριστό «σετ» παραλλήλων μεταξύ τους γραμμών ολίσθησης). (Μεγέθυνση  $\times 100$ ).

Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, συγκεκριμένα επίπεδα ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος, τα οποία ονομάζονται κρυσταλλικά επίπεδα και παρουσιάζονται στο σχήμα 3.8β ως παράλληλες πλάκες, “γλιστρούν” κάτω από την επίδραση των διατμητικών τάσεων που δρουν πάνω σε αυτά. Για κάθε κόκκο

(κρύσταλλο), οι διάφορες στρώσεις των ολισθαινόντων κρυσταλλικών επιπέδων δημιουργούν τις ταινίες ολίσθησης, οι οποίες στο μικροσκόπιο φαίνονται ως παράλληλες μεταξύ τους γραμμές (σχήμα 3.8γ). Τα κρυσταλλικά επίπεδα ολίσθησης είναι τα επίπεδα που παρουσιάζουν τη μέγιστη πυκνότητα ατόμων. Η διεύθυνση ολίσθησης των επιπέδων αυτών σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  ως προς τον άξονα εφαρμογής της εφελκυστικής τάσης. Η διεύθυνση αυτή είναι η διεύθυνση εφαρμογής της μέγιστης ή κρίσιμης διατμητικής τάσης. Η τιμή της κρίσιμης διατμητικής τάσης ( $\tau^*$ ), στην οποία αντιστοιχούν οι πρώτες κρυσταλλογραφικές ολισθήσεις, ισούται με το μισό του ορίου διαρροής:

$$\sigma_{\Delta} = 2\tau^* \quad (3.8)$$

όπου :  $\sigma_{\Delta}$  το όριο διαρροής

Ο τρόπος με τον οποίο δρουν οι διατμητικές τάσεις σε κάθε κρύσταλλο γίνεται αντιληπτός με την αντιστοίχιση του κρυστάλλου με το πακέτο χαρτιών τράπουλας. Εάν στρώσουμε με μικρή δύναμη το πακέτο, τότε τα χαρτιά γλιστρούν το ένα πάνω στο άλλο παίρνοντας ανάλογη μορφή.

### 3.9 Πλαστική παραμόρφωση πολυκρυσταλλικών υλικών

Τα πολυκρυσταλλικά υλικά είναι αυτά που χρησιμοποιούνται στο μεγαλύτερο ποσοστό των βιομηχανικών εφαρμογών. Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμογή της τάσης (πάνω από μία κρίσιμη τιμή) προκαλεί πολλαπλές κρυσταλλογραφικές ολισθήσεις στους διάφορους κόκκους (κρυστάλλους) του μετάλλου. Οι ταινίες ολίσθησης αλλάζουν διεύθυνση από κόκκο σε κόκκο λόγω των διαφορετικών επιπέδων ολίσθησης. Η μετάδοση της παραμόρφωσης από κόκκο σε κόκκο δυσχεραίνεται λόγω της ύπαρξης των συνόρων των κόκκων και της αλλαγής διεύθυνσης των αντιστοιχών επιπέδων ολίσθησης. Έτσι, η παραμόρφωση που προκαλείται για μια συγκεκριμένη τιμή της τάσης είναι πολύ μικρότερη στην περίπτωση του πολυκρυσταλλικού υλικού απ' ό,τι στο μονοκρυσταλλικό υλικό.

**Το όριο διαρροής, και άρα και η μηχανική αντοχή, ενός πολυκρυσταλλικού υλικού είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι στο αντίστοιχο μονοκρυσταλλικό.** Π.χ., ο πολυκρυσταλλικός χαλκός έχει περίπου τριπλάσια μηχανική αντοχή σε σχέση με το μονοκρυσταλλικό χαλκό. Ο αριθμός, άρα και το μέγεθος των κόκκων του μετάλλου, επηρεάζουν άμεσα το όριο διαρροής και τη μηχανική αντοχή του. Το όριο διαρροής ενός πολυκρυσταλλικού υλικού συνδέεται με το μέγεθος των κόκκων ( $d$ ) με την παρακάτω σχέση (**Νόμος Hall-Petch**):

$$\sigma_{\Delta, \text{πολ}} = \sigma_{\Delta, \text{μον}} + k/d^{1/2} \quad (3.9)$$

όπου :  $\sigma_{\Delta, \text{πολ}}$ , το όριο διαρροής πολυκρυσταλλικού μετάλλου,  $\sigma_{\Delta, \text{μον}}$ , το όριο διαρροής του αντίστοιχου μονοκρυσταλλικού και  $k$  σταθερά.

Ο Νόμος Hall-Petch δείχνει κάτι πολύ σημαντικό : τα λεπτόκοκκα υλικά έχουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή από ότι τα χονδροκόκκα. Ο μηχανισμός πλαστικής παραμόρφωσης των υλικών εξηγείται αναλυτικά με τη θεωρία των διαταραχών.

Ένα άλλο φαινόμενο, χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών, είναι η **ανισοτροπία**. Ένα υλικό, το οποίο θεωρείται ως ένα τρισδιάστατο στερεό σώμα, καλείται **ισότροπο**, όταν παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες (π.χ. μηχανικές) ανεξάρτητα ως προς τη διεύθυνση εξέτασής τους, Αν συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή εάν το υλικό παρουσιάζει διαφορετική (μηχανική) συμπεριφορά ως προς τις διάφορες διευθύνσεις, τότε αυτό καλείται ανισότροπο και το φαινόμενο **ανισοτροπία**. Οι διάφορες μηχανικές κατεργασίες διαμόρφωσης εντείνουν το φαινόμενο της **ανισοτροπίας**, διότι παραμορφώνουν το υλικό πολύ περισσότερο ως προς μία διεύθυνση, αλλάζοντας τις ιδιότητές του σε σχέση με τις άλλες διευθύνσεις.

### 3.10 Κατεργασίες εν ψυχρώ : αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση

Οι ψυχρές κατεργασίες ή κατεργασίες εν ψυχρώ πραγματοποιούνται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και αφορούν κυρίως κατεργασίες μαλακών μετάλλων, όπως π.χ. αλουμινίου, μολύβδου, κασσιτέρου. Όπως είναι γνωστό από τη δοκιμή εφελκυσμού (Βλ. Αντοχή των Υλικών), η δημιουργία κάποιας πλαστικής παραμόρφωσης σε ένα μεταλλικό υλικό οδηγεί στην αύξηση του ορίου διαρροής, δηλαδή στη σκλήρυνση του υλικού, η οποία είναι γνωστή ως **ενδοτράχυνση** ή **εργοσκλήρυνση**. Έτσι λοιπόν και οι μηχανικές εν ψυχρώ διαμορφώσεις οδηγούν σε εργοσκλήρυνση, με αποτέλεσμα να μειώνεται η περαιτέρω διαμορφωσιμότητα

του υλικού και, πολλές φορές, λόγω της ανεπαρκούς ολκιμότητάς του να αστοχεί. Οι ψυχρές κατεργασίες διαμόρφωσης προκαλούν αυξημένες ατέλειες (διαταραχές) στην κρυσταλλική δομή του υλικού, οι οποίες είναι αποθηκευμένες με τη μορφή εσωτερικών τάσεων. Η δομή του κατεργασμένου υλικού αποτελείται από διαμήκεις κόκκους προσανατολισμένους κατά τη διεύθυνση της κατεργασίας. Απεικόνιση της δομής παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9α.

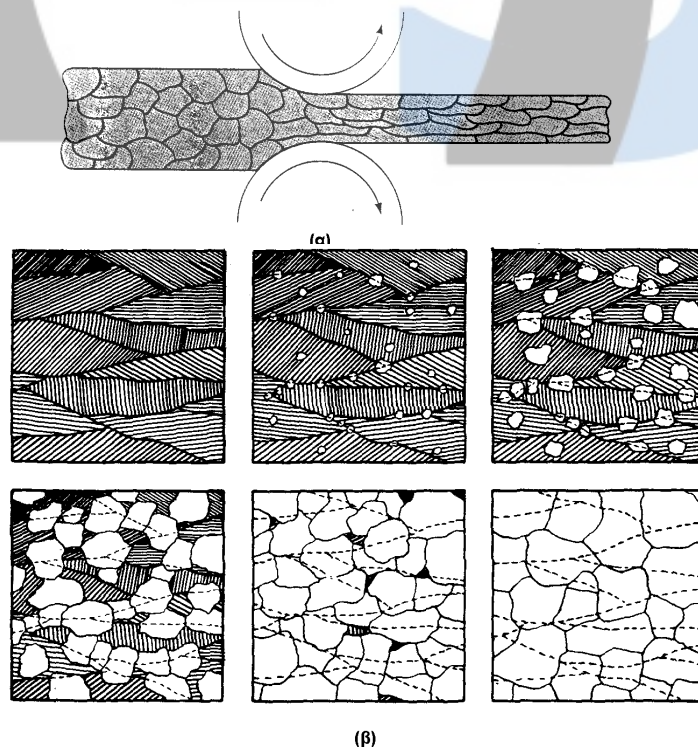
Η επίλυση των προβλημάτων, που δημιουργούνται λόγω της εν ψυχρώ παραμόρφωσης και δυσχεραίνουν την περαιτέρω κατεργασία, αλλά και τη λειτουργικότητα των υλικών, πραγματοποιείται με κατάλληλη θερμική κατεργασία που ονομάζεται **ανόπτηση**. Ανάλογα με τη θερμοκρασία ανόπτησης παρατηρούνται διάφορα στάδια αναφορικά με τις μεταβολές στις ιδιότητες και στη δομή του υλικού:

### Στάδιο 1: Αποκατάσταση ή απόταση

Αυτό το στάδιο πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια ανόπτησης σε χαμηλές θερμοκρασίες, η οποία ονομάζεται αποτατική ανόπτηση. Με την αποτατική ανόπτηση λαμβάνει χώρα ανακατανομή των αταξιών δομής (διαταραχών) και μείωση των εσωτερικών τάσεων. Η δομή του υλικού, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητές του, όπως είναι η σκληρότητα και το όριο διαρροής, δε μεταβάλλονται. Επειδή όμως με την αποκατάσταση βελτιώνεται η κατεργασιμότητα του υλικού, η διαδικασία μορφοποίησης του μπορεί να συνεχισθεί περαιτέρω. Επίσης, λόγω της ανακούφισης των εσωτερικών τάσεων, που λαμβάνει χώρα κατά την αποτατική ανόπτηση, αυξάνει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων και η διάρκεια ζωής ενός υλικού κατά τη λειτουργία του. Έτσι π.χ. η αποτατική ανόπτηση σε ελασμένα εξαρτήματα ορειχάλκου επιφέρει αύξηση της αντίστασης έναντι της διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση (‘‘εποχική θραύση’’). Φαινόμενο εποχικής θραύσης παρατηρείται σε ορειχάλκινους κάλυκες σε περιόδους αυξημένης υγρασίας.

### Στάδιο 2: Ανακρυστάλλωση

Το στάδιο αυτό πραγματοποιείται, συνήθως, σε θερμοκρασίες ανόπτησης μεταξύ 1/3 και 1/2 της απόλυτης θερμοκρασίας τήξεως του υλικού ( $T_m$ ). Κατά την ανακρυστάλλωση δημιουργούνται πυρήνες κρυστάλλωσης, οι οποίοι μεγαλώνουν σε βάρος των κρυστάλλων της αρχικής δομής, καταναλώνοντας την αποθηκευμένη ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης. Οι πυρήνες αυτοί αναπτύσσονται, αντικαθιστώντας τους κόκκους της αρχικής δομής με νέους απαρμόρφωτους κόκκους χωρίς προσανατολισμό. Η εξελικτική πορεία της ανακρυστάλλωσης που περιλαμβάνει τα στάδια πυρηνοποίησης και ανάπτυξης, φαίνεται στο σχήμα 3.9β.



Σχήμα 3.9: (α) Σχηματική αναπαράσταση της δομής του υλικού έπειτα από ψυχρή πλαστική παραμόρφωση. (β) Εξελικτική πορεία της πυρηνοποίησης και ανάπτυξης των πυρήνων κατά την ανακρυστάλλωση.

Η ανακρυστάλλωση πραγματοποιείται μονάχα, εάν το μέταλλο έχει υποστεί ψυχρή παραμόρφωση, το ποσοστό της οποίας θα πρέπει να υπερβαίνει μία κρίσιμη τιμή (**κρίσιμο ποσοστό παραμόρφωσης**). Αυτό ερμηνεύεται με το γεγονός ότι η αποθηκευμένη ενέργεια στο υλικό, λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, παίζει ρόλο **κινητήριας δύναμης** για την ανακρυστάλλωση. Άλλοι παράγοντες, που παίζουν σημαντικό ρόλο στη διεργασία της ανακρυστάλλωσης, είναι η **θερμοκρασία**, ο **χρόνος** και η **καθαρότητα του μετάλλου**. Υπάρχει μία συγκεκριμένη ελάχιστη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, κάτω από την οποία είναι αδύνατη η ανάπτυξη των πυρήνων της νέας δομής. Όσο πιο μεγάλη είναι η θερμοκρασία, τόσο ταχύτερα γίνεται η ανάπτυξη των νέων πυρήνων, δηλαδή μειώνεται ο **χρόνος ανακρυστάλλωσης**. Η καθαρότητα του μετάλλου ευνοεί το φαινόμενο της ανακρυστάλλωσης, διότι έχει διαπιστωθεί ότι οι προσμείξεις εμποδίζουν την ανάπτυξη των πυρήνων. Έτσι, π.χ. το αλουμίνιο εμπορικής καθαρότητας (99,9% Al) ανακρυσταλλώνεται στους 150 °C, ενώ το υπερκαθαρό αλουμίνιο (99,9999% Al) ανακρυσταλλώνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η ανακρυστάλλωση οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων :

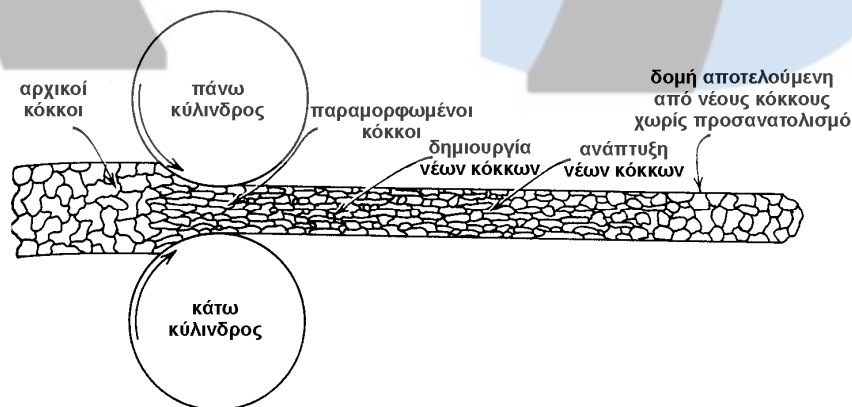
- Η σκληρότητα και το όριο διαρροής μειώνονται
- Η δυσθραυστότητα και η πλαστικότητα αυξάνονται

### Στάδιο 3 : Ανάπτυξη των κόκκων

Είναι το επόμενο στάδιο της ανόπτωσης, όταν ο χρόνος ή η θερμοκρασία υπερβούν τα όρια ανακρυστάλλωσης. Σε αυτή την περίπτωση οι κόκκοι του υλικού αναπτύσσονται γρήγορα και, αν η διάρκεια της ανόπτωσης είναι ακόμα μεγαλύτερη, το υλικό που προκύπτει είναι εξαιρετικά χονδρόκοκκο και κατά συνέπεια εύθραυστο (υπέρμετρη ανάπτυξη των κόκκων).

### 3.11 Κατεργασίες εν θερμώ

Οι εν θερμώ κατεργασίες λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του μετάλλου ( $0,5 T_m$ ) και έτσι οδηγούν σε δομές ανακρυστάλλωσης. Σχηματικά οι διάφορες ζώνες του μετάλλου κατά τη διάρκεια κατεργασίας εν θερμώ φαίνονται στο **σχήμα 3.10**. Οι περισσότερες βιομηχανικές κατεργασίες μορφοποίησης εξαρτημάτων ακριβείας και στοιχείων μηχανών (π.χ. από χάλυβα, ορείχαλκο, κ.λπ.) πραγματοποιούνται σε υψηλή θερμοκρασία, διότι η ψυχρή διαμόρφωση γίνεται με μεγάλη δυσκολία λόγω της σκληρότητας του μετάλλου και μπορεί να προκαλέσει σημαντική ζημιά στο χρησιμοποιούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό.



Σχήμα 3.10 : Σχηματική παράσταση της δομής του υλικού μετά από εν θερμώ πλαστική παραμόρφωση.