

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Πλαστική παραμόρφωση

Οι πλαστικές ιδιότητες ποσοτικοποιούνται μέσω της τυποποιημένης δοκιμής εφελκυσμού, κατά την οποία τα υλικά οδηγούνται σε αστοχία. Το όριο διαρροής (ή όριο ελαστικότητας), σ_y , απαιτεί προσεκτικό ορισμό. Για τα μέταλλα η απαρχή της πλαστικότητας δεν είναι πάντα διακριτή οπότε ορίζουμε συμβατικά το σ_y ως την τάση που προκαλεί 0.2% πλαστική παραμόρφωση [$\varepsilon_{πλαστική} = \varepsilon_{ολική} - \sigma/E$ (ελαστική)]. Έχει την ίδια τιμή σε εφελκυσμό και θλίψη. Όταν ξεπεράσουν το όριο διαρροής τα περισσότερα μέταλλα *εργοσκληραίνουν* προκαλώντας άνοδο της καμπύλης $\sigma_{ov} - \varepsilon_{ov}$ (ονομαστικά μεγέθη) έως μια μέγιστη τιμή, την αντοχή σε εφελκυσμό, σ_{TS} . Το μέγιστο ταυτίζεται με την ανάπτυξη μιας γεωμετρικής αστάθειας (*λαϊμός*) η οποία επεκτείνεται και οδηγεί σε θραύση. Για τα πολυμερή σ_y είναι η τάση όπου η καμπύλη $\sigma_{ov} - \varepsilon_{ov}$ γίνεται σημαντικά μη γραμμική: τυπικά για μόνιμη παραμόρφωση 1%. Η περαιτέρω συμπεριφορά εξαρτάται από την θερμοκρασία ως προς το T_g . Αρκετά κάτω από το T_g τα περισσότερα πολυμερή είναι *ψαθυρά* (δεν παρουσιάζουν ολκιμότητα¹). Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία εμφανίζεται μερική πλαστικότητα ώσπου, για θερμοκρασίες γύρω από το T_g , τα θερμοπλαστικά εμφανίζουν *ψυχρή έλαση*: μεγάλη πλαστική έκταση σε περίπου σταθερή τάση κατά την οποία τα μακρομόρια “ξετυλίγονται” ευθυγραμμιζόμενα με την διεύθυνση παραμόρφωσης, ακολουθούμενη από σκλήρυνση και θραύση όταν ολοκληρωθεί η ευθυγράμμιση. Σε ακόμη μεγαλύτερες θερμοκρασίες τα θερμοπλαστικά γίνονται ιξώδη και μπορούν να καλουπωθούν, ενώ τα θερμοσκληρυνόμενα γίνονται λαστιχένια και τελικά αποσυντίθενται.

Τα κεραμικά και τα γυαλιά είναι ψαθυρά σε θερμοκρασία δωματίου. Τα όρια διαρροής τους είναι τόσο υψηλά ώστε σε εφελκυσμό θραύονται πριν τα φτάσουν. Συνήθως, ως όριο διαρροής λαμβάνεται το ελαστικό όριο σε θλίψη, σ_{el} , το οποίο είναι η αντοχή σε θλιπτικό κατακερματισμό (εκτεταμένη διάδοση και συνένωση ρωγμών που οδηγεί σε θρυματισμό).

¹ Η *ολκιμότητα* είναι μέτρο της έκτασης της πλαστικής παραμόρφωσης και για τις δοκιμές εφελκυσμού αντιστοιχεί στην μόνιμη παραμόρφωση έως την θραύση, ε_f (ονομαστικό μέγεθος). Το ε_f δεν είναι ιδιότητα του υλικού καθώς εξαρτάται από τις διαστάσεις του δοκιμίου. Οι τιμές που αναγράφονται σε πίνακες αναφέρονται σε συγκεκριμένη γεωμετρία δοκιμής.

Δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης δεν είναι πάντα επιθυμητές γιατί απαιτείται μεγάλο δοκίμιο και είναι καταστροφικές. Εναλλακτικά (αλλά όχι ισοδύναμα), χρησιμοποιείται η δοκιμή σκληρότητας, όπου ένα διαμάντι (πυραμίδα) ή μια σκληρυμμένη χαλύβδινη σφαίρα πιέζεται στην επιφάνεια του υλικού αφήνοντας ένα αποτύπωμα του οποίου οι διαστάσεις προσδιορίζονται με μικροσκόπιο. Η σκληρότητα, H , ορίζεται ως το πηλίκο του φορτίου που απαιτείται για την δημιουργία του αποτυπώματος προς το εμβαδόν του αποτυπώματος προβαλλόμενο σε επίπεδο κάθετο στο φορτίο. Επειδή περιορίζεται από το υλικό γύρω από την παραμορφούμενη περιοχή, η σκληρότητα είναι υψηλότερη από το όριο διαρροής, $H \approx 3\sigma_y$.

Θεωρητική αντοχή και κρυσταλλικές ατέλειες

Οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων “σπάνε” όταν εκταθούν κατά περίπου 10%. Η παραμόρφωση αυτή αντιστοιχεί σε μια δύναμη F ,

$$F \approx \frac{S\alpha_0}{10},$$

όπου S η ακαμψία του δεσμού και α_0 η διαπλεγματική σταθερά (διατομική απόσταση ισορροπίας).

Αν σε κάθε άτομο αντιστοιχεί επιφάνεια εμβαδού α_0^2 , η θεωρητική αντοχή είναι

$$\sigma_{\text{θεωρ}} \approx \frac{F}{\alpha_0^2} = \frac{S}{10\alpha_0} = \frac{E}{10}.$$

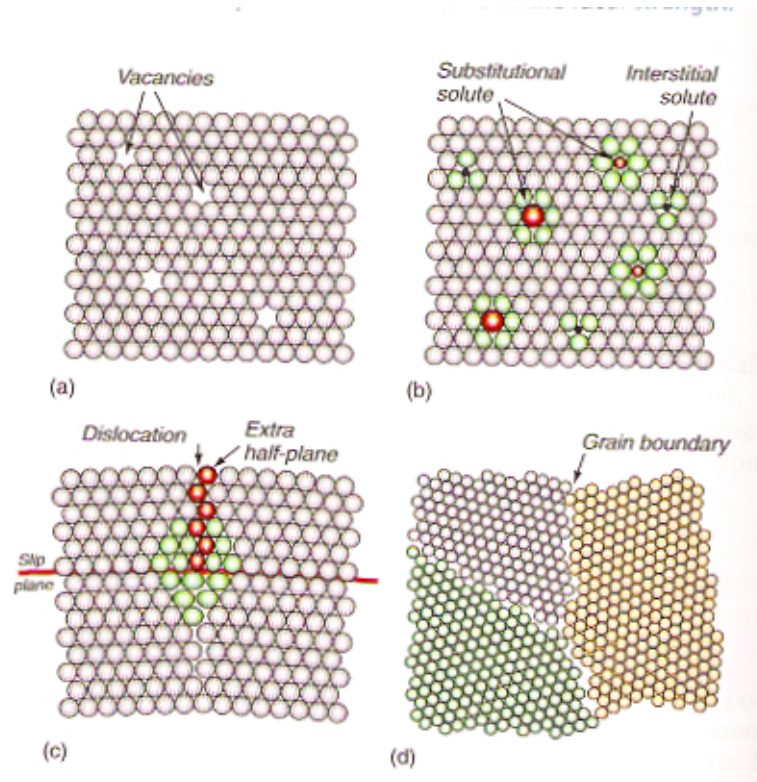
Περισσότερο ακριβείς υπολογισμοί οδηγούν σε λόγο $\sigma_{\text{θεωρ}}/E$ περίπου 1/15. Ο θεωρητικός αυτός λόγος είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν που προκύπτει από τις πειραματικές τιμές. Αυτό συμβαίνει επειδή τα υλικά περιέχουν ατέλειες.

Κρυσταλλικές ατέλειες σε μέταλλα και κεραμικά

Τα υλικά περιέχουν ατέλειες πολλών ειδών. Στο σχήμα δίνονται παραδείγματα ατελειών, οι οποίες, σύμφωνα με την διάστασή τους, χαρακτηρίζονται ως σημειακές [(a) και (b)], γραμμικές [(c)] και επιφανειακές [(d)]. Στο (a) φαίνεται ένα παράδειγμα κενής πλεγματικής θέσης. Τα κενά αυτά είναι

2 Για τον χαρακτηρισμό της σκληρότητας συνήθως χρησιμοποιείται η κλίμακα Vickers, H_v , σε kg/mm^2 , με αποτέλεσμα, $H_v \approx \sigma_y/3$.

πολύ σημαντικά για την διάχυση, τον ερπυσμό και την πυροσυσσωμάτωση αλλά δεν επηρεάζουν την αντοχή.



Κανένας κρύσταλλος δεν είναι 100% καθαρός και τέλειος. Κάποιες προσμίξεις είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας παραγωγής του υλικού, όμως, συνηθέστερα, προστίθενται επίτηδες, δημιουργώντας *κράματα*: υλικό όπου διαλύεται ένα δεύτερο (ή τρίτο ή τέταρτο) στοιχείο. Το διάλυμα που προκύπτει είναι στερεό. Στο (b) φαίνονται δύο τύπων τέτοια διαλύματα: *στερεό διάλυμα αντικατάστασης* (τα άτομα της διαλυμένης ουσίας αντικαθιστούν τα άτομα του διαλύτη) και *στερεό διάλυμα παρεμβολής* (τα άτομα της διαλυμένης ουσίας “στριμώνονται” μεταξύ των συντεταγμένων ατόμων σε *διαπλεγματικές θέσεις*). Τα διαλυμένα άτομα σπανίως έχουν το ίδιο μέγεθος με τα άτομα του διαλύτη, επομένως παραμορφώνουν το πλέγμα *ελαστικά* (η περιοχή παραμόρφωσης εκτείνεται στα πράσινα άτομα). Αυτή η παραμόρφωση είναι μία από τις αιτίες που τα κράματα είναι ισχυρότερα (σκληρότερα) από τα καθαρά υλικά.

Ο πρωταγωνιστής της πλαστικής παραμόρφωσης σε κρυσταλλικά υλικά είναι η *διαταραχή*. Στο (c) φαίνεται μια διαταραχή *ακμής* που οφείλεται στην παρεμβολή ενός ημιεπιπέδου μεταξύ των τακτικών επιπέδων της περιοδικής δομής (η ασυνέχεια λαμβάνει χώρα στην γειτονία της ακμής του

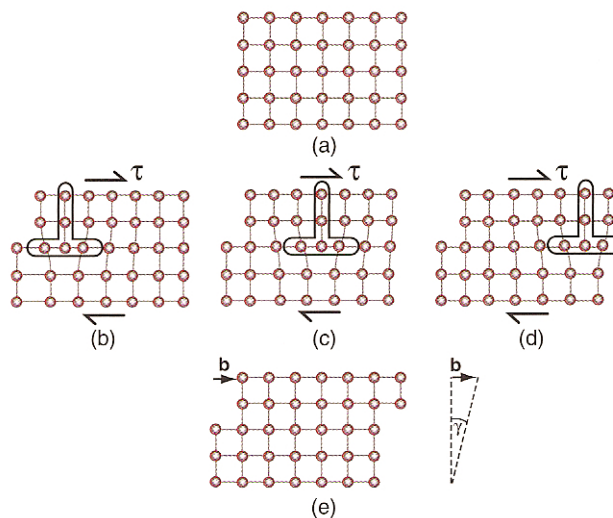
ημιεπιπέδου που ορίζει την γραμμή της διαταραχής). Οι διαταραχές παραμορφώνουν την κρυσταλλική δομή ελαστικά κι επομένως φέρουν ελαστική ενέργεια. Η ελαστική ενέργεια ανά μονάδα μήκους διαταραχής (τάση σύρματος της διαταραχής – αντίσταση στην αύξηση του μήκους της), T , είναι

$$T \approx \frac{1}{2}Eb^2.$$

Τα περισσότερα κρυσταλλικά υλικά περιέχουν ακόμη δραματικότερες ατέλειες, όπως φαίνεται στο (d). Στο σχήμα συναντώνται τρεις τέλειοι κρύσταλλοι με διαφορετικό σχετικό προσανατολισμό. Οι κρύσταλλοι ονομάζονται κόκκοι και οι διεπιφάνειες μεταξύ τους όρια κόκκων. (Τα άτομα των κόκκων είναι διαφορετικά χρωματισμένα χάριν ευκρίνειας, αλλά πρόκειται για τα ίδια άτομα.)

Διαταραχές και πλαστική ροή

Μια διαταραχή κατά την κίνησή της προκαλεί την σχετική ολίσθηση των τμημάτων του υλικού εκατέρωθεν του επιπέδου ολίσθησης³, παράγοντας διατμητική παραμόρφωση. Στο σχήμα φαίνονται τα στάδια κίνησης μιας διαταραχής ακμής υπό την επίδραση της διατμητικής τάσης τ .



Όταν η διαταραχή διατρέξει τον κρύσταλλο από άκρου εις άκρον το πάνω μέρος έχει ολισθήσει ως προς το κάτω κατά b , το διάνυσμα ολίσθησης ή διάνυσμα *Burger*⁴. Το αποτέλεσμα είναι η

³ Οι διαταραχές κινούνται κατά προτίμηση σε πυκνά επίπεδα και σε πυκνές διευθύνσεις (διευθύνσεις ολίσθησης).

⁴ Το διάνυσμα Burger είναι κάθετο στην γραμμή της διαταραχής ακμής. Όταν είναι παράλληλο, πρόκειται για διαταραχή κοχλία (τα επίπεδα κάθετα στην γραμμή της διαταραχής δημιουργούν μια συνεχόμενη επιφάνεια κοχλία). Όταν μια διαταραχή κοχλία κινείται κάθετα στην γραμμή της, ο κρύσταλλος μετατοπίζεται παράλληλα με την γραμμή της διαταραχής, κι όχι κάθετα σε αυτήν όπως στην περίπτωση της διαταραχής ακμής. Οι διαταραχές

διατμητική παραμόρφωση γ .

Ο κρύσταλλος αντιστέκεται στην κίνηση της διαταραχής με μια δύναμη τύπου τριβής. Η δύναμη αντίστασης ανά μονάδα μήκους διαταραχής f είναι

$$f = \tau b$$

για οποιαδήποτε διαταραχή (ακμής, κοχλία, μικτής). Εφόσον η τάση ξεπεράσει την τιμή f/b η διαταραχή κινείται και προκαλεί διάτμηση (πλαστική) του κρυστάλλου.

Πλαστική ροή στα πολυμερή

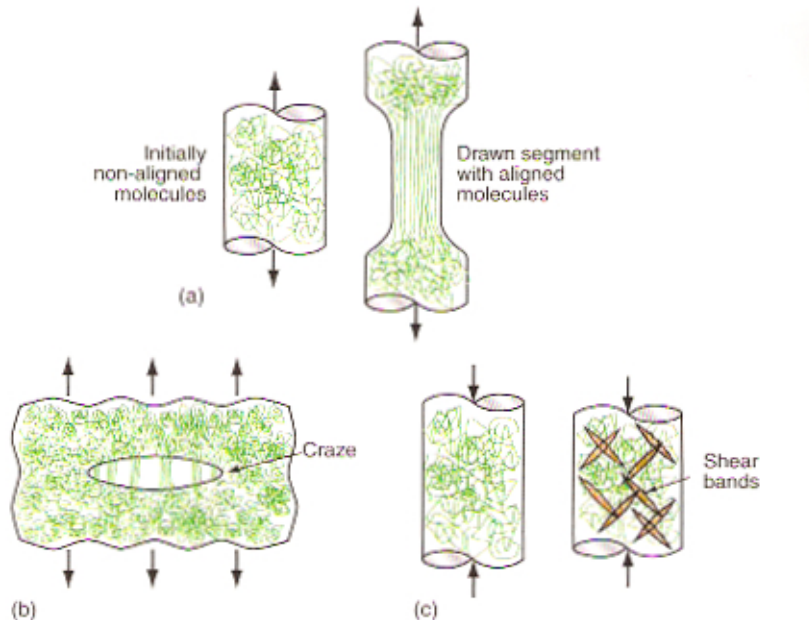
Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από περίπου $\frac{3}{4} T_g$ τα πολυμερή είναι ψαθυρά – υψηλότερα εκδηλώνουν πλαστική συμπεριφορά. Όταν υποστούν εφελκυσμό οι αλυσίδες ξετυλίγονται και ευθυγραμμίζονται με την διεύθυνση εφελκυσμού. Η κατεργασία ονομάζεται *ψυχρή έλαση* (*drawing*). Η ζώνη ευθυγράμμισης σκληραίνει (κατά έναν παράγοντα περίπου 8) και επεκτείνεται στο υπόλοιπο μήκος του δοκιμίου. Οι μηχανικές ιδιότητες εξελασμένων πολυμερών είναι εξαιρετικές όμως οι γεωμετρίες που προκύπτουν από ψυχρή έλαση είναι περιορισμένες σε ίνες και φύλλα.

Πολλά πολυμερή όπως πολυαιθυλένιο (PE), πολυπροπυλένιο (PP) και νάυλον υφίστανται ψυχρή έλαση σε θερμοκρασία δωματίου. Άλλα, με υψηλότερη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, όπως το PMMA (ακρυλικό πολυμερές – π.χ., plexiglass), σε θερμοκρασία δωματίου δεν υφίστανται έλαση (σε υψηλότερη όμως ελάσσονται επαρκώς) αλλά σχηματίζουν *πορώδεις ρωγμές* (*crazes*), όπου οι επιφάνειες της ρωγμής ενώνονται μέσω *ινωδών γεφυρών* (*fibrils*). Παρουσιάζουν, δηλ., εκτεταμένη *τοπική* πλαστική παραμόρφωση. Αυξάνοντας την τάση, τα crazes συνενώνονται σε κανονικές ρωγμές, και το δείγμα θραύεται πριν προλάβει να εμφανίσει μακροσκοπική παραμόρφωση.

Όταν το crazing περιορίζει την ολκιμότητα σε εφελκυσμό, μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις είναι

συνήθως σχηματίζουν βρόγχους, δηλ., έχουν μικτό χαρακτήρα – αποτελούνται από μικρά βήματα ακμής και κοχλία. Κάθε τμήμα της καμπύλης γραμμής της διαταραχής έχει το ίδιο διάνυσμα Burger γιατί η γραμμή της διαταραχής είναι απλά το όριο του κρυσταλλογραφικού επιπέδου που έχει υποστεί μετατόπιση b .

δυνατές σε θλίψη μέσω ζωνών διάτμησης⁵. Οι ζώνες διάτμησης είναι περιοχές διάσπαρτες στο υλικό οι οποίες εμφανίζουν πλαστική παραμόρφωση παρόμοια μορφολογικά με αυτήν που προκαλεί η κίνηση διαταραχών σε κρυσταλλικά υλικά.



Αύξηση της αντοχής σε μέταλλα

Η αντοχή σε κρυσταλλικά υλικά αυξάνεται δημιουργώντας εμπόδια στην κίνηση των διαταραχών.

Σε καθαρό κρύσταλλο η διαταραχή κινείται όταν η δύναμη ανά μονάδα μήκους διαταραχής tb ξεπεράσει την εγγενή αντίσταση πλέγματος f_i . Αυτή είναι ιδιότητα που εξαρτάται από την φύση του υλικού και δεν επιδέχεται ουσιαστικής μεταβολής. Τα εμπόδια αλληλεπιδρούν ελαστικά με τις διαταραχές με αποτέλεσμα να τις καθυλώνουν με μια δύναμη ανάλογη του Eb^2 . Επομένως, η τάση για την αποδέσμευση της διαταραχής από το εμπόδιο είναι

$$\tau = \alpha \frac{Eb}{L} ,$$

όπου L η μέση απόσταση των εμποδίων και α η ισχύς του εμποδίου.

Αν τα εμπόδια είναι διαλυμένα άτομα (π.χ., ο χαλκός μπορεί να διαλύσει έως 30% ψευδάργυρο για

⁵ Η αντοχή σε θλίψη των πολυμερών είναι σημαντικά υψηλότερη από την αντοχή σε εφελκυσμό. Αυτό είναι σε αντίθεση με την συμπεριφορά κρυσταλλικών υλικών τα οποία δεν παρουσιάζουν διαφορά στην αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό. Η εξάρτηση της αντοχής από την εντατική κατάσταση σημαίνει ότι ο διαθέσιμος όγκος για ξετύλιγμα των αλυσίδων αυξάνεται υπό την επίδραση μιας διογκωτικής τάσης (το αντίθετο της υδροστατικής πίεσης) και μειώνεται από μια υδροστατική πίεση.

να σχηματίσει κράμα ορείχαλκου ως τυχαίο στερεό διάλυμα αντικατάστασης) με ατομικό ποσοστό c , τότε η μέση απόσταση είναι $b/c^{1/2}$ και η τάση για την απεμπλοκή της διαταραχής από το ελαστικό πεδίο του διαλυμένου ατόμου είναι

$$\tau_{ss} = \alpha E c^{1/2}.$$

Με αυτόν τον τρόπο αποκτούν την αντοχή τους κράματα όπως ο ορείχαλκος, ο μπρούτζος και ο ανοξείδωτος χάλυβας, καθώς και άλλα με μόνη διαφορά τον βαθμό παραμόρφωσης του πλέγματος από το διαλυμένο άτομο, που περιγράφεται από την σταθερά α .

Ένας περισσότερο αποτελεσματικός τρόπος για την ακινητοποίηση μιας διαταραχής είναι η *διασπορά* μικρών, ανθεκτικών σωματιδίων στο υλικό. Αυτό μπορεί να γίνει με διασπορά σωματιδίων υψηλού σημείου τήξης σε τήγμα μετάλλου. Με αυτήν την μέθοδο δημιουργούνται σύνθετα μεταλλικής μήτρας όπως Al-SiC. Εναλλακτικά, τα σωματίδια μπορούν να δημιουργηθούν *in situ* με κατεργασία *κατακρυσμίνησης*. Αν μια διαλυμένη ουσία (π.χ., χαλκός σε αλουμίνιο) βρίσκεται σε υπέρκορο διάλυμα τότε κατακρυσμνίζεται ως μικρά σωματίδια σε θερμοκρασία δωματίου (όπως το αλάτι κατακρυσμνίζεται σε κρυστάλλους σε υπέρκορο διάλυμα νερού όταν ψυχθεί). Ένα παράδειγμα είναι το ντουραλουμίνιο (αλουμίνιο με 4% χαλκό) το οποίο μπορεί να υποστεί θερμική κατεργασία ώστε να περιέχει σε διασπορά σωματίδια της σκληρής ένωσης CuAl_2 . Χαλκός κραματωμένος με λίγο βυρίλιο δίνει κατακρυσμίσματα CuBe . Οι περισσότεροι χάλυβες σκληραίνουν μέσω κατακρυσμίσματος καρβιδίων. Τα κατακρυσμίσματα έχουν μεγάλη συνεισφορά στην αντίσταση στην κίνηση της διαταραχής:

$$\tau_{ppt} = \frac{2\Gamma}{bL} \approx \frac{Eb}{L}.$$

Η αύξηση της αντοχής με την παραμόρφωση που παρατηρείται στο διάγραμμα σ - ϵ οφείλεται στην *εργοσκλήρυνση*: δημιουργείται λόγω της συσσώρευσης διαταραχών που προκαλεί η πλαστική παραμόρφωση. Η *πυκνότητα διαταραχών*, ρ_d , ορίζεται ως το μήκος γραμμής διαταραχής ανά μονάδα όγκου (m/m^3). Ακόμη και σε ένα ανοπτυμένο⁶ μαλακό μέταλλο η πυκνότητα διαταραχών

⁶ Ανόπτυση είναι η θερμική κατεργασία που σκοπό έχει να επαναφέρει μέρος της ολκιμότητας που είχε το μέταλλο πριν την πλαστική του παραμόρφωση διευκολύνοντας την κίνηση διαταραχών και την αλληλεξουδετέρωσή τους (αποκατάσταση), να αναγεννήσει κόκκους απελευθερωμένους από διαταραχές που θα αντικαταστήσουν τους παραμορφωμένους (ανακρυστάλλωση), ή/και να αυξήσει το μέγεθος των κόκκων (μεγέθυνση κόκκων).

είναι περίπου 10^{10} m/m^3 , δηλ., κύβος 1 cm περιέχει 10 km γραμμής διαταραχής. Όταν τα υλικά παραμορφώνονται πλαστικά οι διαταραχές πολλαπλασιάζονται και η πυκνότητά τους μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει τα 10^{17} m/m^3 , δηλ., 100 εκατομμύρια km γραμμής διαταραχής σε κύβο 1 cm. Από το επίπεδο ολίσθησης μιας διαταραχής διέρχονται γραμμές άλλων διαταραχών (δάσος διαταραχών) που απέχουν κατά μέσο όρο $L = \rho^{-1/2}$ (καθώς το ρ είναι αριθμός διαταραχών ανά μονάδα επιφάνειας). Καθώς η κινούμενη διαταραχή διασχίζει το δάσος των διαταραχών δημιουργεί σε κάθε διαταραχή που τέμνει ένα βήμα που φέρει επιπλέον ελαστική ενέργεια $Eb^2/2$ οπότε η αντίσταση στην κίνηση της διαταραχής είναι

$$\tau_{wh} \approx \frac{E b}{2} \sqrt{\rho} .$$

Όλα τα μέταλλα εργοσκληραίνονται: κατά την έλαση λεπτών φύλλων η κατεργασία διακόπτεται για να ανοπτυθεί το μέταλλο, μια μέθοδος γνωστή σε σιδηρουργούς για αιώνες. Όμως είναι και πολύ χρήσιμη μέθοδος σκλήρυνσης για κράματα τα οποία δεν μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία για σκλήρυνση από κατακρυμνίσματα.

Όταν οι διαταραχές συναντήσουν στην κίνησή τους όριο κόκκου ακινητοποιούνται. Δεν μπορούν να διασχίσουν στον επόμενο κόκκο καθώς τα επίπεδα ολίσθησης δεν ευθυγραμμίζονται. Θα πρέπει να δημιουργηθούν νέες διαταραχές στον γειτονικό κόκκο με διανύσματα ολίσθησης τέτοια ώστε οι παραμορφώσεις στο όριο κόκκου να έχουν αντιστοιχία. Η συνεισφορά στην αντοχή εξαιτίας της παρεμβολής των ορίων των κόκκων είναι

$$\tau_{gb} = \frac{k_p}{\sqrt{D}} ,$$

όπου k_p η σταθερά *Petch* και D η μέση διάμετρος κόκκου, συνήθως 10 – 100 μm . Το μέγεθος κόκκων γίνεται σημαντικός παράγοντας αντοχής για μικροκρυσταλλικά ή νανοκρυσταλλικά υλικά.

Σε πρώτη προσέγγιση, οι παραπάνω παράγοντες αθροίζονται για να δώσουν τάση διαρροής, τ_y

$$\tau_y = \tau_i + \tau_{ss} + \tau_{ppt} + \tau_{wh} + \tau_{gb}.$$

Τα υλικά με μεγάλη αντοχή παρουσιάζουν είτε υψηλή εγγενή αντοχή, τ_i (όπως το διαμάντι), ή βασίζονται στην ενίσχυση λόγω στερεού διαλύματος, τ_{ss} , κατακρυμνισμάτων, τ_{ppt} , και

εργοσκλήρυνσης, τ_{wh} (όπως χάλυβες υψηλής αντοχής). Τα ναοκρυσταλλικά υλικά εκμεταλλεύονται παράλληλα και την συνεισφορά του τ_{gb} .

Η έως τώρα ανάλυση αφορά έναν κρύσταλλο που υφίσταται διάτμηση. Η προέκταση σε πολυκρυσταλλικό υλικό σε εφελκυσμό γίνεται σε δύο στάδια. Καταρχήν, μια εφελκυστική τάση σ προκαλεί διατμητική τάση σε επίπεδο που σχηματίζει γωνία με τον άξονα εφελκυσμού. Οι διαταραχές θα αρχίσουν να κινούνται σε επίπεδο όπου η διατμητική τάση είναι μέγιστη. Για τυχαίο επίπεδο με προσανατολισμό θ ως προς τον άξονα εφελκυσμού η διατμητική τάση είναι

$$\tau = \sigma \sin\theta \cos\theta,$$

δηλ., παρουσιάζει μέγιστο για απόκλιση 45° το οποίο είναι ίσο με $\sigma/2$.

Κατά δεύτερο λόγο, όταν αυτή η διατμητική τάση δρα σε συνονθύλευμα κρυστάλλων (στους κόκκους που αποτελούν τον πολυκρύσταλλο), κάποιοι από αυτούς θα είναι ευνοϊκά προσκείμενοι ως προς την διατμητική τάση και άλλοι όχι. Αυτή η τυχειότητα του προσανατολισμού αυξάνει την αντοχή κατά παράγοντα 1.5 (παράγοντας *Taylor*). Συνδυάζοντας τα δύο αποτελέσματα, η τάση διαρροής σε εφελκυσμό είναι τριπλάσια της διατμητικής αντοχής μονοκρυστάλλου:

$$\sigma_y \approx 3 \tau_y.$$

Στον πίνακα αναφέρονται οι μέθοδοι σκλήρυνσης που χρησιμοποιούνται σε συνήθη βιομηχανικά κράματα.

Κράμα	Τυπική χρήση	Στερεό διάλυμα	Κατακρυσμνίσματα	Εργοσκλήρυνση
Καθαρό Al	Αλουμινόχαρτο			Συνήθως
Καθαρό Cu	Καλώδιο			Συνήθως
Χυτό Al, Mg	Τμήματα αυτοκινήτου	Συνήθως	Ενίοτε	
Μπρούτζος (Cu-Sn), ορείχαλκος (Cu-Zn)	Τμήματα πλεούμενου	Συνήθως	Ενίοτε	
Μη θερμικά κατεργάσιμο κατεργασμένο Al	Πλοία, κουτιά, δομές	Συνήθως		Συνήθως
Θερμικά κατεργάσιμο κατεργασμένο Al	Αεροπλάνα, δομές	Ενίοτε	Συνήθως	Ενίοτε
Χάλυβες χαμηλού άνθρακα	Αμαξώματα, δομές, πλοία, κουτιά	Συνήθως		Συνήθως
Χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης	Τμήματα αυτοκινήτου, εργαλεία	Ενίοτε	Συνήθως	Ενίοτε
Ανοξειδωτοι χάλυβες	Δοχεία πίεσης	Συνήθως	Ενίοτε	Συνήθως
Χυτά κράματα Ni	Τουρμπίνες μηχανών τζετ	Συνήθως	Συνήθως	