

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



Θραύση και δυσθραυστότητα

Η *δυσθραυστότητα* δεν θα πρέπει να συγχέεται με την αντοχή του υλικού. Η αντοχή είναι η αντίσταση σε πλαστική ροή η οποία έχει ελάχιστη τιμή το όριο διαρροής, σ_y , και αυξάνεται συνεχώς όσο το υλικό παραμορφώνεται (εργοσκλήρυνση). Δυσθραυστότητα είναι η αντίσταση του υλικού στην διάδοση μιας ρωγμής. Η ύπαρξη μιας ρωγμής δεν είναι από μόνη της αρκετή να οδηγήσει το υλικό σε θραύση. Εφόσον το υλικό υπό τάση είναι δύσθραυστο, μια μικρή ρωγμή (που προκαλεί αμελητέα μείωση διατομής) δεν αλλάζει την συμπεριφορά του: θα υποστεί διαρροή, θα εργοσκληρύνει και θα απορροφήσει ενέργεια. Αντίθετα, σε υλικό χαμηλής δυσθραυστότητας μια ρωγμή που φορτίζεται θα διαδοθεί απότομα και το υλικό θα υποστεί θραύση για τάσεις πολύ χαμηλότερες του ορίου διαρροής του.

Παράγοντας έντασης τάσης K_I και αντοχή σε θραύση K_{Ic}

Οι ρωγμές συγκεντρώνουν τάσεις. Η τοπική τάση σε απόσταση r από την κορυφή ρωγμής μήκους c σε υλικό που φορτίζεται σε εφελκυσμό με απομακρυσμένη ομοιόμορφη τάση σ δίνεται από την σχέση

$$\sigma_{\text{τοπική}} = \sigma \left(1 + Y \sqrt{\frac{\pi c}{2 \pi r}} \right) ,$$

όπου Y σταθερά με τιμή κοντά στην μονάδα που εξαρτάται από γεωμετρία του ρωγματωμένου σώματος. Μακριά από την κορυφή της ρωγμής ($r \gg c$) η τάση πέφτει στην τιμή σ (δεν είναι πια τοπική) αλλά κοντά στην κορυφή αυξάνεται απότομα σε

$$\sigma_{\text{τοπική}} = Y \sigma \frac{\sqrt{\pi c}}{\sqrt{2 \pi r}} .$$

Επομένως, για δεδομένο r η τοπική τάση αυξάνεται σύμφωνα με $\sigma(\pi c)^{1/2}$ που επομένως αποτελεί ένα μέτρο της έντασης της τάσης. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται *παράγοντας έντασης τάσης τύπου ένα* (τύπος ένα σημαίνει εφελκυστική φόρτιση της ρωγμής)

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi c}$$

και έχει μονάδες $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Οι ρωγμές διαδίδονται όταν ο παράγοντας έντασης τάσης ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή, την *αντοχή σε θραύση*, K_{Ic} . Η αντοχή σε θραύση είναι ιδιότητα του υλικού, άρα το ίδιο ισχύει και τον εκάστοτε συνδυασμό $\sigma - c$: υπάρχει μια κρίσιμη τάση που για δεδομένο μέγεθος ρωγμής οδηγεί σε θραύση, όπως και κρίσιμο μήκος ρωγμής για δεδομένη τάση.

Ρυθμός έκλυσης ενέργειας G και δυσθραυστότητα G_c

Όταν διαδίδεται μια ρωγή δημιουργείται νέα επιφάνεια στο εσωτερικό του υλικού. Οι επιφάνειες είναι ενεργειακά αναβαθμισμένες – έχουν επιφανειακή ενέργεια, γ (τυπικά $\gamma = 1 \text{ J/m}^2$). Όταν θραύεται ένα δοκίμιο κατά μια διατομή εμβαδού A δημιουργεί εμβαδόν νέας επιφάνειας $2A$ απαιτώντας ενέργεια $2\gamma A$. Η αναγκαία συνθήκη για θραύση είναι, επομένως, ότι το έργο που προσφέρεται ή η ελαστική ενέργεια που ελευθερώνεται (επειδή σπάνε τεντωμένοι δεσμοί) θα πρέπει να υπερβαίνει την ενέργεια της νέας επιφάνειας

$$G \geq 2\gamma,$$

όπου G ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας. Πρακτικά, απαιτείται πολύ περισσότερη ενέργεια από 2γ λόγω πλαστικής παραμόρφωσης γύρω από την κορυφή της ρωγμής. Σε κάθε περίπτωση, η ενέργεια θα πρέπει να υπερβεί κάποια κρίσιμη τιμή, G_c , ένα είδος “ισοδύναμης” επιφανειακής ενέργειας που ονομάζεται *δυσθραυστότητα*. Η δυσθραυστότητα συνδέεται με την αντοχή σε θραύση K_{Ic} με την σχέση

$$K_{Ic} = \sqrt{E G_c} .$$

Η πλαστική ζώνη στην κορυφή της ρωγμής

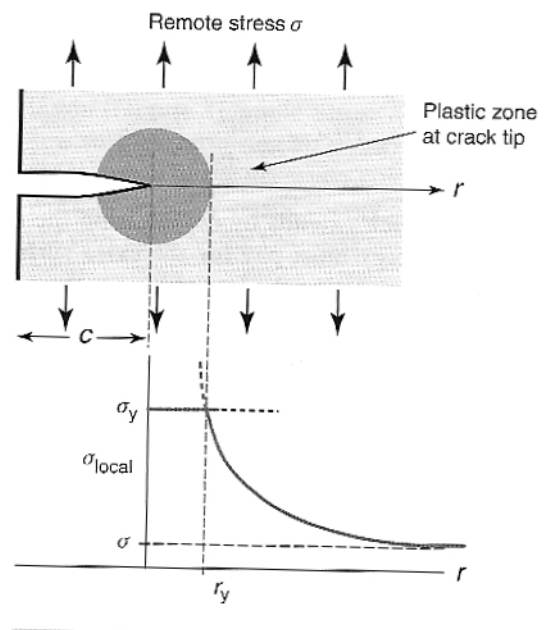
Η υψηλή τάση στην κορυφή της ρωγμής παράγει μια ζώνη διαργασιών: πλαστική ζώνη σε όλκιμα υλικά, ζώνη μικρορωγμών σε κεραμικά, ζώνη αποκόλλησης στρώσεων – ινών (delamination, debonding, fiber pull-out) σε σύνθετα. Εντός της ζώνης διεργασιών καταβάλλεται έργο εναντίον των πλαστικών δυνάμεων και δυνάμεων τριβής από το οποίο προκύπτει και η διαφορά μεταξύ G_c

και 2γ . Με την βοήθεια του παρακάτω σχήματος μπορεί να γίνει μια εκτίμηση για το μέγεθος της πλαστικής ζώνης:

$$r_y = 2 \left(\frac{\sigma^2 \pi c}{2 \pi \sigma_y^2} \right) = \frac{K_I^2}{\pi \sigma_y^2} \quad (Y=1).$$

Το μέγεθος της πλαστικής ζώνης μειώνεται γρήγορα με την αύξηση της αντοχής του υλικού:

ρωγμές σε μαλακά μέταλλα έχουν μεγάλες πλαστικές ζώνες¹ – κεραμικά και γυαλιά έχουν μικρές έως ανύπαρκτες ζώνες διεργασιών.



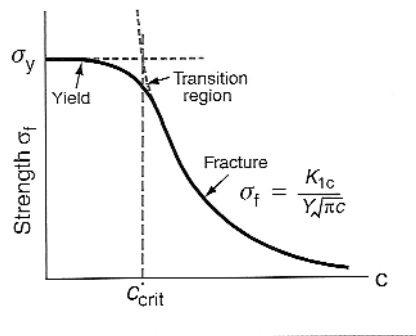
Όταν η ρωγμή είναι μικρή το υλικό αστοχίσει από πλαστική παραμόρφωση πριν επέλθει θραύση· το αντίθετο συμβαίνει όταν η ρωγμή είναι μεγάλη. Το κρίσιμο μέγεθος που συμβαίνει αυτή η αλλαγή στον τρόπο αστοχίας μπορεί να υπολογιστεί από την αντοχή σε θραύση ($Y = 1$):

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi c} \Rightarrow \sigma_f = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi c}},$$

δηλ., η τάση για την οποία αστοχεί σε εφελκυσμό ένα ρωγματωμένου υλικού αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος της ρωγμής. Για μεγέθη μικρότερα από μια κρίσιμη τιμή η τάση αστοχίας γίνεται ίση με την αντοχή του υλικού, $\sigma_f = \sigma_y$:

$$c_{crit} = \frac{K_{Ic}^2}{\pi \sigma_y^2}.$$

¹ Η πλαστική ζώνη σε πολύ όλκιμα μέταλλα υπερβαίνει την διατομή του αντικείμενου· στην περίπτωση αυτή η ρωγμή δεν αναπτύσσεται καθόλου – το αντικείμενο απλά αστοχεί από διαρροή.



Η τιμή αυτή είναι ίση με το μέγεθος της πλαστικής ζώνης κατά την θραύση, όταν $K_I = K_{Ic}$. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται το εύρος τιμών κρίσιμου μήκους ρωγμής για διάφορες κατηγορίες υλικών. Αυτό το μέγεθος είναι ένα μέτρο της ανοχής σε βλάβη του υλικού. Δύσθραυστα μέταλλα μπορούν να περιέχουν μεγάλες ρωγμές αλλά να εξακολουθούν να αστοχούν διαρρέοντας με προβλέψιμο τρόπο. Τα κεραμικά (τα οποία πάντα περιέχουν μικρές ρωγμές) αστοχούν ψαθυρά σε τάσεις πολύ χαμηλότερες του ορίου διαρροής τους. Τα γυαλιά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά στοιχεία αλλά απαιτούν προσεκτική κατεργασία ώστε να αποτραπεί η ανάπτυξη επιφανειακών ρωγμών. Τα πολυμερή θεωρούνται δύσθραυστα εξαιτίας της αντίστασής τους σε κρούση όταν δεν είναι ρωγματωμένα. Όμως ρωγμές μικρότερες από χιλιοστό είναι ικανές να τα οδηγήσουν σε ψαθυρή αστοχία.

Κατηγορία υλικών	Κρίσιμο μήκος ρωγμής, c_{crit} (mm)
Μέταλλα	1 – 1000
Πολυμερή	0.1 – 10
Κεραμικά	0.01 – 0.1
Σύνθετα	0.1 – 10

Επιφανειακή ενέργεια

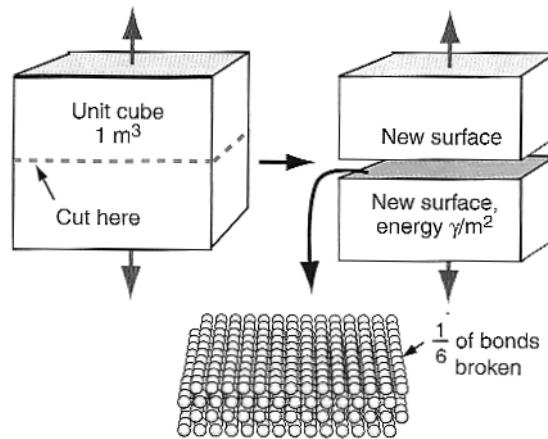
Η επιφανειακή ενέργεια στερεού είναι το ενεργειακό κόστος για την δημιουργία της επιφάνειας.

Έστω κύβος 1 m^3 που κόβεται σε δύο ίσα μέρη σε οριζόντια τομή όπως στο παρακάτω σχήμα. Για την δημιουργία των δύο νέων επιφανειών απαιτείται η λύση του $1/6$ των δεσμών των ατόμων που

βρίσκονται σε δύο ατομικές στρώσεις, δηλ., σε όγκο $4r_0^3$, όπου r_0 η ατομική ακτίνα. Η συνοχή του στερεού χαρακτηρίζεται από την ενέργεια συνοχής H_c (ενέργεια ανά μονάδα όγκου που απαιτείται για). Επομένως, η επιφανειακή ενέργεια είναι

$$2\gamma \approx \frac{1}{6} H_c 4r_0 \quad \text{ή} \quad \gamma \approx \frac{1}{3} H_c r_0 .$$

Τυπικές τιμές για την ενέργεια συνοχής και την ατομική ακτίνα είναι $3 \cdot 10^{10} \text{ J/m}^3$ και 10^{-10} m αντίστοιχα, οπότε επιφανειακή ενέργεια είναι περίπου 1 J/m^2 . Η δυσθραυστότητα δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 2γ . Για τα περισσότερα υλικά είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη. Η επιπλέον ενέργεια διοχετεύεται για την πλαστική παράμορφωση του υλικού.



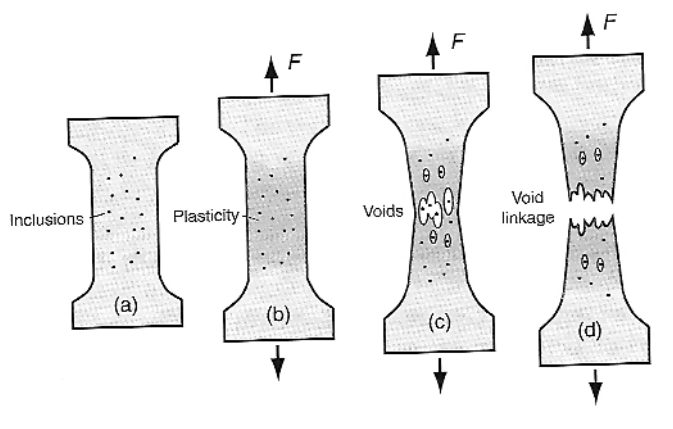
Ψαθυρή θραύση

Η ψαθυρή θραύση είναι χαρακτηριστική των κεραμικών και γυαλιών. Αυτά έχουν πολύ υψηλά όρια διαρροής που δεν τους επιτρέπουν να εκτονώσουν τις υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται στην κορυφή της ρωγμής με πλαστική παραμόρφωση. Άρα η τάση κοντά στην κορυφή φτάνει την θεωρητική αντοχή ($\sim E/15$), σπάει τους δεσμούς και οδηγεί σε διάδοση της ρωγμής. Καθώς, δε, $K_I = \sigma (\pi c)^{1/2}$ αύξηση του μήκους της ρωγμής αυξάνει το K_I και επιταχύνει την ρωγμή έως την ταχύτητα του ήχου – τα ψαθυρά υλικά θραύονται με κρότο. Κάποια πολυμερή είναι επίσης ψαθυρά, ιδιαίτερα τα άμορφα.

Όλκιμη θραύση αποκόλλησης

Η διάδοση ρωγμών σε όλκιμα υλικά γίνεται κατανοητή αν εξετάσουμε πως αστοχεί σε εφελκυσμό

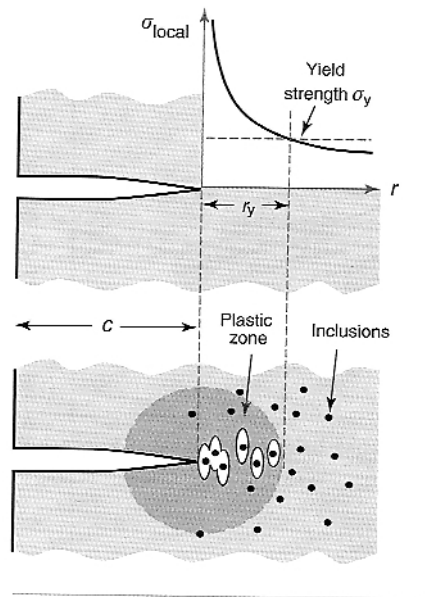
ένα δοκίμιο που δεν περιέχει ρωγμή. Όλκιμα μέταλλα μόλις ξεπεράσουν το όριο διαρροής τους παραμορφώνονται πλαστικά και εργοσκληραίνονται έως την αντοχή σε εφελκυσμό. Στην συνέχεια εξασθενούν και αστοχούν. Αν το μέταλλο ήταν εξαιρετικά καθαρό θα μπορούσε να λεπταίνει έως μηδενική διατομή. Όμως, όλα σχεδόν τα τεχνικά κράματα περιέχουν εγκλείσματα – μικρά, σκληρά σωματίδια οξειδίων, νιτριδίων, θειούχων, κ.τ.λ. Καθώς το υλικό εφελκύεται, αρχικά παραμορφώνεται ομοιόμορφα, αυξάνοντας την τάση στα εγκλείσματα που λειτουργούν ως συγκεντρώσεις τάσεων. Αυτά είτε αποσπώνται από την μήτρα είτε θραύονται, δημιουργώντας πολύ μικρές οπές. Καθώς αυξάνεται η τάση, οι οπές μεγαθύνονται και συνδέονται, μειώνοντας την διατομή του δοκιμίου στο ύψος όπου είναι πολυπληθέστερες, έως την τελική τους συνένωση και την όλκιμη αποκόλληση². Πολλά πολυμερή είναι επίσης όλκιμα. Δεν περιέχουν εγκλείσματα αλλά όταν εφελκύνονται δημιουργούνται στο εσωτερικό τους ρωγμοειδείς οπές (crazes) που τελικά μεγαθύνονται και συνενώνονται καταλήγοντας σε όλκιμη αποκόλληση.



Έστω ρωγματωμένο δοκίμιο – η τάση στην περιοχή της ρωγμής αυξάνεται σύμφωνα με $1/\sqrt{r}$ καθώς προσεγγίζεται η κορυφή, αλλά σε απόσταση όπου ξεπερνάει το όριο διαρροής, σ_y , το υλικό διαρρέει δημιουργώντας μια πλαστική ζώνη. Στο εσωτερικό της λαμβάνουν χώρα τα φαινόμενα που περιγράφηκαν παραπάνω: δημιουργούνται οπές που συνενώνονται προκαλώντας πλαστική αποκόλληση. Η ρωγμή αναπτύσσεται και η διεργασία επαναλαμβάνεται, αμβλύνοντας ταυτόχρονα την κορυφή της ρωγμής και μειώνοντας την τάση σε επίπεδα μόλις επαρκή για να διατηρεί την

² Η δυσθραυστότητα αυξάνεται (χωρίς μείωση της αντοχής) με απομάκρυνση των εγκλεισμάτων. “Καθαροί” χάλυβες, υπερκράματα και κράματα αλουμινίου στα οποία το τήγμα φιλτράρεται πριν την χύτευση έχουν υψηλότερη δυσθραυστότητα από αυτά που παράγονται με συμβατική χύτευση.

πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή της. Αυτή η πλαστική παραμόρφωση απορροφά ενέργεια και αυξάνει το G_c .



Όλκιμη-σε-ψαθυρή μετάπτωση

Η ψαθυρή θραύση είναι πολύ πιο επικίνδυνη από την όλκιμη. Πραγματοποιείται χωρίς προειδοποίηση ή προηγούμενη πλαστική παραμόρφωση. Σε χαμηλές θερμοκρασίες κάποια μέταλλα και όλα τα πολυμερή³ γίνονται ψαθυρά και η μορφή θραύσης αλλάζει από όλκιμη σε ψαθυρή – μόνον τα μέταλλα με εκκ δομή (π.χ., Cu, Al, Ni, ανοξείδωτος χάλυβας) παραμένουν όλκιμα έως πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Όλα τα υπόλοιπα παρουσιάζουν αύξηση του ορίου διαρροής τους με την πτώση της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα η πλαστική ζώνη στην κορυφή μιας οποιασδήποτε ρωγμής που τυχόν περιέχουν να συρρικνώνεται ώσπου γίνεται τόσο μικρή ώστε ο τρόπος θραύσης αλλάζει, προκαλώντας μια *όλκιμη-σε-ψαθυρή* μετάπτωση⁴. Για κάποιους χάλυβες η θερμοκρασία μετάπτωσης φτάνει τους 0°C (αν και για τους περισσότερους είναι αρκετά χαμηλότερη) με αποτέλεσμα χαλύβδινα πλοία, γέφυρες και θαλάσσιες εξέδρες άντλησης

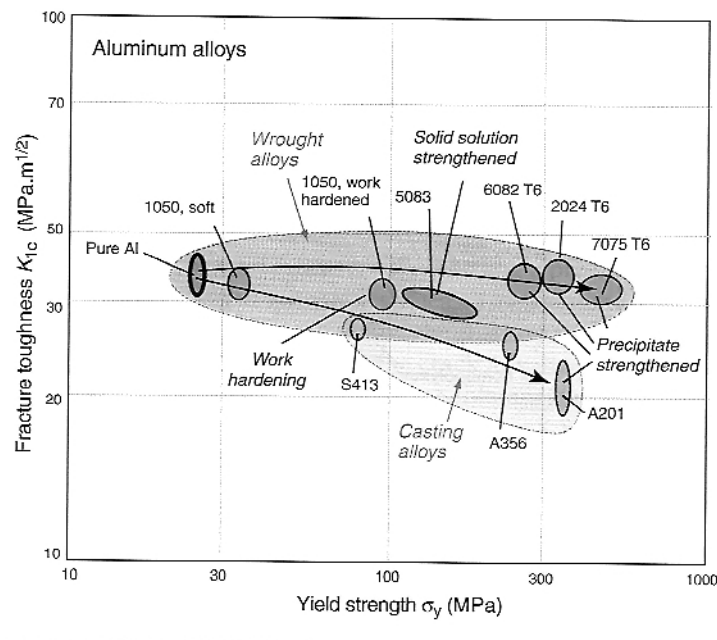
³ Πρόκειται για την υαλώδη μετάπτωση, σημαντική στην επιλογή πολυμερών για ψυγεία και καταψύκτες.

⁴ Υπάρχουν κι άλλες αιτίες ψαθυροποίησης εκτός της θερμοκρασίας. Μια συχνή είναι ο χημικός διαχωρισμός. Όταν στερεοποιούνται μέταλλα οι κόκκοι σχηματίζονται σε αιώρημα στο τήγμα και αναπτύσσονται ώσπου τελικά συναντώνται στα όρια των κόκκων. Αυτές οι περιοχές είναι οι τελευταίες που στερεοποιούνται και καταλήγουν αποταμιευτήρες για τις προσμίξεις του κράματος. Ο διαχωρισμός των προσμίξεων στα όρια των κόκκων δημιουργεί ένα δίκτυο από διαδρομές χαμηλής δυσθραυστότητας έτσι ώστε ακόμη κι αν οι ίδιοι οι κόκκοι είναι δύσθραυστοι το υλικό τελικά αστοχεί με ψαθυρή περικρυσταλλική θραύση.

πετρελαίου να αστοχούν με μεγαλύτερη πιθανότητα χειμώνα παρά καλοκαίρι.

Συμβιβασμός μεταξύ αντοχής (ή ακαμψίας) και δυσθραυστότητας

Η αντοχή και η δυσθραυστότητα είναι ανταγωνιστικές ιδιότητες όπως φαίνεται από το διάγραμμα δυσθραυστότητας – ορίου διαρροής για κράματα αλουμινίου. Το πιο δύσθραυστο (αλλά και το πιο μαλακό) είναι το καθαρό αλουμίνιο. Τα χυτά κράματα (casting alloys) είναι λιγότερο δύσθραυστα από τα κράματα που κατεργάζονται με πλαστική παραμόρφωση (wrought alloys), π.χ., σφυρηλατημένα.



Η δυσθραυστότητα των πολυμερών μπορεί επίσης να βελτιωθεί, συνήθως εις βάρος της ακαμψίας τους. Εξαίρεση αποτελούν τα πολυμερή με ενίσχυση ινών, όπου η ρωγμή αλλάζει προσανατολισμό.

