



«Αθηνά»

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΟΠΛΩΝ

Θωμά Χατζίκου 11,, Θεσσαλονίκη 56122, Τηλ/Fax: 2310904794 / 6944165341, www.armscontrol.info

ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΥΛΙΚΑ Ι

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΚΟΛΟΒΟΣ

ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΔΙΔΑΚΤΩΡ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΛΕΚΤΟΡΑΣ Π.Δ. 407/80 Σ.Σ.Ε.

ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ ΤΟΥ Ε.Κ.Ε.Ο «ΑΘΗΝΑ»

ΒΑΡΗ 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2.	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ	4
3.	ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ	6
4.	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΩΝ	8
5.	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	9
6.	ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΥΛΙΚΩΝ	10
7.	Η ΕΡΕΥΝΑ ΣΗΜΕΡΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	11
8.	ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	13
9.	ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ	23
10.	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ	25
11.	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	28
12.	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ	55
13.	ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΚΑΙ ΓΥΑΛΙΑ	68
14.	ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	75
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	83

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι παρούσες Διδακτικές Σημειώσεις αποτυπώνουν την ύλη του μαθήματος *ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΥΛΙΚΑ Ι*, που διδάχτηκε στους Ευέλπιδες της ΙΙης Τάξης του 5^{ου} εξαμήνου σπουδών της Ροής Χημείας της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων, στο χειμερινό εξάμηνο του Ακαδημαϊκού Έτους 2011-2012. Δεν αποσκοπούν στην πληρότητα κάλυψης του αντικειμένου, το οποίο είναι εξ' άλλου ευρύτατο, όσο στην εισαγωγή των Ευελπίδων στις βασικές έννοιες, αρχές και μεθόδους της Επιστήμης και Τεχνολογίας υλικών, με έμφαση στις Στρατιωτικές Εφαρμογές.

Οι Ευέλπιδες που παρακολούθησαν το μάθημα, με την ενεργό συμμετοχή τους και τις εύστοχες και συχνά ευρηματικές ερωτήσεις τους συνέβαλαν σε αρκετό βαθμό και στη διαμόρφωση των παρόντων Διδακτικών Σημειώσεων.

Ασφαλώς, στην πρώτη αυτή έκδοση θα υπάρχουν ατέλειες και παραλήψεις. Οι καλοπροαίρετες επισημάνσεις των αναγνωστών θα είναι ιδιαίτερα ευπρόσδεκτες.

Κωνσταντίνος Γ. Κολοβός,

Ιανουάριος 2012

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υλικά αποτελούν μέρος της βάσης όλων των τεχνολογικών εξελίξεων. Όλες οι ανθρώπινες δραστηριότητες και το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την πρόοδο στην Επιστήμη των Υλικών. Λόγω της μεγάλης σημασίας των υλικών στην εξέλιξη της ανθρωπότητας, ιστορικές περίοδοι χαρακτηρίστηκαν με βάση το είδος των υλικών από τα οποία κατασκευάζονταν εργαλεία και όπλα (Παλαιολιθική και Νεολιθική Εποχή, Εποχή του Χαλκού, Εποχή του Σιδήρου). Μερικά από τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα υλικά είναι τα μέταλλα και τα κράματά τους, όπως ο χαλκός, ο χάλυβας, το αλουμίνιο και άλλα, το ξύλο, τα κεραμικά (παραδοσιακά και προηγμένα), το γυαλί, τα δομικά υλικά (αδρανή, τσιμέντα, σκυρόδεμα, χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος, δομικός χάλυβας κ.α.) και τα σύνθετα. Το δεύτερο ήμισυ του 20ου αιώνα μπορεί να χαρακτηριστεί ως η εποχή των ελαφρών και οικονομικών πολυμερών υλικών, από τα οποία κατασκευάζονται πλήθος προϊόντων.

Η γνώση της σχέσης μεταξύ δομής και ιδιοτήτων των υλικών κατέστησε τους μηχανικούς ικανούς να επιλέγουν τα περισσότερο κατάλληλα υλικά για κάθε εφαρμογή και να αναπτύσσουν τις βέλτιστες μεθόδους κατεργασίας τους. Η πλήρης κατανόηση της συσχέτισης μεταξύ της δομής και των ιδιοτήτων των υλικών αποτελεί την βασική προϋπόθεση όχι μόνο της δυνατότητας επιλογής του καταλληλότερου υλικού για συγκεκριμένη εφαρμογή, αλλά και της ανάπτυξης νέων υλικών.

Οι μηχανικοί υλικών εστιάζουν την έρευνά τους στη δημιουργία νέων υλικών ή την τροποποίηση των ιδιοτήτων των υπαρχόντων. Οι μηχανικοί στη βιομηχανία χρησιμοποιούν τα υπάρχοντα, τροποποιημένα και τα καινούργια υλικά για το σχεδιασμό και τη δημιουργία νέων προϊόντων και συστημάτων. Μερικές φορές συμβαίνει το αντίθετο και οι κατασκευαστές μηχανικοί αντιμετωπίζουν πρόβλημα στο σχεδιασμό, ο οποίος απαιτεί ένα νέο υλικό να δημιουργηθεί από τους επιστήμονες-ερευνητές.

Η έρευνα για καινούργια υλικά συνεχίζεται διαρκώς. Για παράδειγμα, οι μηχανολόγοι μηχανικοί κατευθύνουν την έρευνά τους σε υλικά με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες για αποδοτικότερη λειτουργία των κινητήρων προώθησης. Οι ηλεκτρολόγοι μηχανικοί ερευνούν για νέα υλικά ούτως ώστε οι ηλεκτρονικές διατάξεις να μπορούν να λειτουργούν γρηγορότερα και σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι αεροναυπηγοί μηχανικοί ενδιαφέρονται για υλικά με υψηλότερο λόγο αντοχής προς βάρος για τα αεροσκάφη και τα διαστημόπλοια. Οι χημικοί μηχανικοί αναζητούν αποτελεσματικότερα υλικά από πλευράς ανθεκτικότητας σε διάβρωση.

2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τα υλικά διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: μεταλλικά, πολυμερή και κεραμικά – γυαλιά. Επιπρόσθετα, μπορούν να θεωρηθούν δύο άλλες κατηγορίες: τα σύνθετα υλικά και τα ηλεκτρονικά υλικά λόγω της μεγάλης σπουδαιότητάς τους.

Μεταλλικά υλικά

Αποτελούνται από μίγματα δύο ή περισσότερων μετάλλων και μπορούν επίσης να περιέχουν μερικά μη μεταλλικά στοιχεία, όπως άνθρακα, άζωτο, οξυγόνο κ.ά. Τα μέταλλα έχουν κρυσταλλική δομή, δηλαδή τα άτομα που τα αποτελούν διατάσσονται με κανονικό, επαναλαμβανόμενο και συμμετρικό τρόπο. Γενικά τα μέταλλα είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας και του ηλεκτρικού ρεύματος, έχουν σχετικά μεγάλη αντοχή, ολκιμότητα, μεγάλη συνεκτικότητα, πλαστιμότητα και δυνατότητα μορφοποίησης. Οι ιδιότητες αυτές εξηγούν την εκτεταμένη χρήση τους ως μηχανολογικά υλικά.

Πολυμερή

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα εκτενώς χρησιμοποιούμενα πλαστικά και ελαστικά. Αποτελούνται από οργανικά μόρια μεγάλου μεγέθους (μακρομόρια), στη χημική δομή των οποίων συμμετέχουν κυρίως ο άνθρακας και το υδρογόνο και σε μικρότερο βαθμό άλλα στοιχεία, όπως άζωτο, οξυγόνο, θείο, πυρίτιο κ.ά..

Από δομικής άποψης τα πολυμερή στη στερεή κατάσταση μπορεί να είναι άμορφα, μερικώς κρυσταλλικά (ημικρυσταλλικά) ή σχεδόν κρυσταλλικά. Τα πολυμερή υλικά παρουσιάζουν μια μεγάλη ποικιλία ιδιοτήτων που εξαρτώνται από τη δομή τους. Η αντοχή και η πλαστιμότητα των πολυμερών ποικίλλει ευρέως.

Τα περισσότερα από αυτά τα υλικά είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος και χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές μονώσεις πέραν των ποικίλων άλλων εφαρμογών. Γενικά τα πολυμερή έχουν χαμηλές πυκνότητες και σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες τήξης και αποσύνθεσης.

Κεραμικά

Τα κεραμικά, όπως οι πλίνθοι, η πορσελάνη, τα τσιμέντα, το γυαλί, τα πυρίμαχα και τα λειαντικά, είναι ανόργανα υλικά που αποτελούνται από μεταλλικά και μη μεταλλικά στοιχεία. Τα κεραμικά υλικά μπορεί να είναι άμορφα, μερικώς κρυσταλλικά ή κρυσταλλικά. Έχουν χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, μεγάλη σκληρότητα, μικρή δυσθραυστότητα και συχνά χρησιμοποιούνται ως μονωτές.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν κεραμικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές κατασκευές. Τα πλεονεκτήματα σ' αυτό το πεδίο εφαρμογής είναι το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή και σκληρότητα, η θερμική αντοχή, αντοχή στη φθορά και την τριβή και οι θερμομονωτικές ιδιότητες. Τα πλεονεκτήματα αυτά τα καθιστούν επίσης χρήσιμα για επιστρώσεις κλιβάνων υψηλών θερμοκρασιών.

Σύνθετα υλικά

Είναι μίγματα δύο ή περισσότερων υλικών. Τα περισσότερα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ένα επιλεγμένο πληρωτικό ή ενισχυτικό υλικό που είναι διεσπαρμένο σε ένα άλλο υλικό (μήτρα), συνήθως πολυμερές, για την επίτευξη των ειδικών επιθυμητών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων. Συνήθως τα ανωτέρω υλικά είναι μη αναμίξιμα και διαχωρίζονται από μια ενδιάμεση φάση. Τα σύνθετα υλικά είναι διάφορων τύπων. Οι επικρατέστεροι τύποι είναι αυτοί στους οποίους το πληρωτικό υλικό αποτελείται από ίνες και εκείνοι στους οποίους το πληρωτικό υλικό αποτελείται από σωματίδια (εγκλείσματα), τα οποία μπορούν να ενταχθούν και τα αναπτυσσόμενα τελευταία νανοσύνθετα πολυμερικά υλικά με χαρακτηριστικές διαστάσεις των εγκλεισμάτων 1-100 nm, τα οποία παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση των ιδιοτήτων τους σε σύγκριση με τα αντίστοιχα παραδοσιακά σύνθετα υλικά.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών, που χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, είναι τα πολυμερικά υλικά (όπως πολυεστέρας ή εποξειδικές ρητίνες) ενισχυμένα με ίνες γυαλιού και ίνες άνθρακα. Η βιομηχανική σπουδαιότητα ενός σύνθετου υλικού έγκειται στο ότι αυτό συνδυάζει τις ελκυστικές ιδιότητες των επί μέρους συστατικών. Τα σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού συνδυάζουν την αντοχή του γυαλιού και την ελαστικότητα του πολυμερούς. Σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως σύνθετα υλικά σε πληθώρα εφαρμογών.

Ηλεκτρονικά υλικά

Αποτελούν ένα σπουδαίο τύπο υλικών για την προχωρημένη τεχνολογία. Τα υλικά αυτής της κατηγορίας, όπως το πυρίτιο, το γερμάνιο και διάφορες χημικές ενώσεις (π.χ. GaAs), είναι σημαντικά στην βιομηχανία των υπολογιστών και για εφαρμογές στον τομέα της ηλεκτρονικής και τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες αυτών των υλικών μπορούν να ελεγχθούν με ακρίβεια έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως transistors, δίοδοι και ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ

Κατά τη διαδικασία επιλογής κατάλληλου υλικού για δεδομένη εφαρμογή πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ούτως ώστε να επιλεγεί ένα υλικό που

(α) να έχει τις επιθυμητές ιδιότητες, οι οποίες συχνά εξαρτώνται από την κατεργασία του υλικού

(β) να μπορεί να μορφοποιηθεί ή να παραχθεί στο επιθυμητό σχήμα και

(γ) αυτό και η διαδικασία κατεργασίας του να έχουν αποδεκτό κόστος.

Η επιλογή των υλικών αποτελεί την τελική, πρακτική απόφαση στη διαδικασία του μηχανικού σχεδιασμού και καθοριστικό παράγοντα της επιτυχίας ή αποτυχίας αυτού του σχεδιασμού. Ουσιαστικά πρέπει να ληφθούν δυο ξεχωριστές αποφάσεις:

- 1^ο, πρέπει να αποφασισθεί ποιος γενικός τύπος (κατηγορία) υλικών είναι κατάλληλος.

- 2^ο, πρέπει να βρεθεί το καλύτερο ειδικό υλικό αυτής της κατηγορίας για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (π.χ. να προτιμηθεί ένα κράμα μαγνησίου από κράμα αλουμινίου ή χάλυβα;).

Μερικές φορές η επιλογή του καταλληλότερου υλικού είναι απλή και προφανής. Για μια ηλεκτρονική συσκευή που απαιτεί έναν ημιαγωγό, οι αγωγοί και οι μονωτές είναι εντελώς ακατάλληλοι για το σκοπό αυτό. Όμως οι περισσότερες επιλογές έχουν ένα βαθμό δυσκολίας, καθόσον οι απαιτήσεις του σχεδιασμού είναι δυνατό σε γενικές γραμμές να καλύπτονται από διάφορα διαθέσιμα υλικά. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται η αναζήτηση για την τελική επιλογή μεταλλικού κράματος ως του καταλληλότερου υλικού για την κατασκευή κυλινδρικών δοχείων αποθήκευσης αερίων υπό πίεση μέχρι και 140 atm για απεριόριστες χρονικές περιόδους. Κατ' αρχήν από τις τρεις κύριες κατηγορίες υλικών (μεταλλικά υλικά, κεραμικά και πολυμερή) τα πολυμερή πρέπει να αποκλεισθούν λόγω των χαμηλών τους αντοχών. Αν και μερικά κατασκευαστικά κεραμικά υλικά μπορούν να αντέξουν το προβλεπόμενο φορτίο, γενικά δεν διαθέτουν την πλαστιμότητα που απαιτείται. Η χρήση τέτοιων εύθραυστων υλικών για κατασκευή δοχείων αποθήκευσης υπό πίεση μπορεί να είναι εξαιρετικά επικίνδυνη. Διάφορα συνήθη μεταλλικά υλικά διαθέτουν ικανοποιητική αντοχή και πλαστιμότητα για τη συγκεκριμένη χρήση. Επίσης πολλά σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες ικανοποιούν τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Ωστόσο, τα υλικά αυτά αποκλείονται λόγω του υψηλού τους κόστους. Το επί πλέον κόστος κατασκευής με τέτοιου είδους υλικά δικαιολογείται μόνο εάν προκύπτει κάποιο ειδικό πλεονέκτημα, όπως το μειωμένο βάρος. Περιορίζοντας την επιλογή στα μεταλλικά υλικά υπάρχει ακόμα ένας μεγάλος αριθμός υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Λαμβάνοντας υπόψη τα εμπορικά διαθέσιμα κράματα μετρίου κόστους με τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες προκύπτει μια λίστα υποψηφίων υλικών. Για την τελική επιλογή του κράματος πρέπει να γίνεται λεπτομερής σύγκριση των ιδιοτήτων σε κάθε βήμα της πορείας επιλογής. Σε ορισμένες περιπτώσεις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες μπορεί να βαρύνουν στην απόφαση εκλογής, αλλά συχνότερα το καθοριστικότερο είναι το κόστος.

Σε ορισμένες περιπτώσεις και ειδικότερα στις αεροδιαστημικές εφαρμογές το βάρος έχει κρίσιμη σημασία, λόγω του ότι το επί πλέον βάρος του διαστημόπλοιου αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου και μειώνει την μέγιστη δυνατή απόσταση που μπορεί να διανύσει. Για την κατασκευή πολλών μοντέρνων διαστημόπλοιων χρησιμοποιούνται ακριβότερα σύνθετα υλικά, όπως εποξειδικές ρητίνες ενισχυμένες με ίνες άνθρακα, αντί των παραδοσιακών κραμάτων αλουμινίου. Ωστόσο, η

οικονομική ωφέλεια από την εξοικονόμηση καυσίμων λόγω του υψηλότερου λόγου αντοχής προς βάρος του σύνθετου υλικού υπερκαλύπτει την υψηλότερη αρχική επένδυση για το αεροσκάφος.

Σε κάθε περίπτωση κατά την επιλογή των υλικών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η προστασία του περιβάλλοντος και η εξασφάλιση της ασφαλούς χρήσης τους.

4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

Υποκατάσταση μετάλλων με πολυμερή

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η αντικατάσταση αλουμινίου ή χάλυβα με Nylon, που έχει υποστεί σκλήρυνση, σε εξαρτήματα αγωνιστικών μηχανών (αλυσοκινούμενοι τροχοί). Το nylon διαδόθηκε ευρέως λόγω των αντιτριβικών του ιδιοτήτων και των λιγότερων αστοχιών (φθοράς και θραύσεων) αλυσίδων μοτοσυκλετών. Η καλύτερη απόδοση του nylon σε σχέση με τα συμβατικά μεταλλικά υλικά έγκειται στο συνδυασμό καλής αντοχής και δυσθραυστότητας. Επίσης, η κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων από πολυμερή επιφέρει μείωση του συνολικού βάρους της κατασκευής.

Υποκατάσταση μετάλλων με σύνθετα υλικά

Η μείωση του βάρους που προκύπτει με την αντικατάσταση μετάλλων από πολυμερή ή σύνθετα υλικά οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας. Η οικονομία στα καύσιμα και η επακόλουθη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος τίθενται ως επιτακτικές ανάγκες της κοινωνίας του 2000. Για κάθε kg βάρους ένα αεριοθούμενο αεροπλάνο (jet) ξοδεύει 830 λίτρα καυσίμου το χρόνο. Η αεροναυπηγική βιομηχανία έχει προχωρήσει στην αντικατάσταση πολλών συμβατικών μεταλλικών υλικών με προηγμένα σύνθετα υλικά, όπως είναι τα πολυμερή με ίνες Kevlar ή ίνες γραφίτη, μειώνοντας το βάρος πολλών αεροσκαφών (όπως Lockheed-L-1011 και Boeing 767) μέχρι και 600 κιλά.

Μέταλλα και πολυμερή ως υλικά για τον ανθρώπινο οργανισμό (βιοϋλικά)

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό ως εμφυτεύματα (π.χ. ορθοπεδικοί σύνδεσμοι, οδοντιατρικά πρόσθετα) πρέπει, εκτός της μηχανικής αντοχής τους και του μικρού βάρους, να χαρακτηρίζονται από **βιοσυμβατότητα**. Δηλαδή θα πρέπει να έχουν μεγάλη αντοχή στην οξείδωση και διάβρωση και να μην υποβαθμίζονται οι μηχανικές τους ιδιότητες μέσα στα υγρά του ανθρώπινου σώματος (π.χ. αίμα). Από μεταλλικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως κράματα του τιτανίου και συγκεκριμένα το Ti-4% Al-6% V, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη μηχανική αντοχή, αντοχή σε διάβρωση και μικρή πυκνότητα.

Το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA) είναι ένα πολυμερές, το οποίο χρησιμοποιείται και αυτό σε ορθοπεδικά εμφυτεύματα, σε συνδυασμό με μεταλλικά υλικά, λόγω της μεγάλης αντοχής στην οξείδωση, της μικρής του πυκνότητας και της μεγάλης του αντίστασης σε φθορά-τριβή.

5. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανική παραγωγή υλικών διακρίνεται σε **πρωτογενή** και **δευτερογενή**. Στην πρωτογενή παραγωγή ανήκουν οι πρωτογενείς κατεργασίες, που περιλαμβάνουν την επεξεργασία της πρώτης ύλης μέχρι και τη διαμόρφωση του υλικού σε συγκεκριμένες γεωμετρίες. Στη δευτερογενή παραγωγή περιλαμβάνονται όλες εκείνες οι κατεργασίες, που δίνουν στο υλικό τις τελικές του διαστάσεις και το καθιστούν ικανό να ανταποκριθεί στις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής ή της κατασκευής στην οποία αποτελεί και βασικό εξάρτημα.

Πρωτογενείς κατεργασίες

(i) Χημική επεξεργασία των πρώτων υλών. Περιλαμβάνονται κυρίως φυσικές και χημικές διεργασίες κατά τις οποίες μετατρέπεται η πρώτη ύλη έτσι, ώστε να οδηγήσει στην παρασκευή του εκάστοτε υλικού. Π.χ. η εξαγωγή των μετάλλων από τα μεταλλεύματα, όπως είναι η αναγωγή των οξειδίων του σιδήρου σε μεταλλικό σίδηρο στην υψικάμνο για την παραγωγή χυτοσιδήρου και χάλυβα ή η ηλεκτρολυτική αναγωγή της αλουμίνας σε αλουμίνιο. Επίσης, ο πολυμερισμός, όπως π.χ. η διαδικασία παρασκευής πολυαιθυλενίου από αιθυλένιο, αποτελεί πρωταρχική διαδικασία παραγωγής.

(ii) Χύτευση. Είναι η πιο ευρείας εφαρμογής πρωτογενής κατεργασία για μεταλλικά υλικά. Κατά τη χύτευση συνήθως το μέταλλο μορφοποιείται σε πλίνθωμα (χελώνα) με τήξη σε κατάλληλο καμίνι και στη συνέχεια με απόχυση του τήγματος σε τύπο (άμμος, καλούπι).

(iii) Διαμόρφωση. Είναι όλες οι πρωτογενείς κατεργασίες, οι οποίες πραγματοποιούνται είτε εν ψυχρώ είτε εν θερμώ, κατά τις οποίες το υλικό αποκτά ένα συγκεκριμένο σχήμα μέσω πλαστικής παραμόρφωσης (ράβδοι, μπιγιέτες, ελάσματα). Επίσης, στην περιοχή των διαμορφώσεων εντάσσονται και οι μέθοδοι της **κονιομεταλλουργίας**, δηλαδή των διεργασιών μορφοποίησης κόνεων μετάλλων ή κεραμικών υλικών, όπως π.χ. είναι η κατασκευή κοπτικών εργαλείων από καρβίδιο του βολφραμίου (WC).

Δευτερογενείς κατεργασίες

(i) Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού. Περιλαμβάνουν όλες εκείνες τις μηχανουργικές κατεργασίες κατά τις οποίες αφαιρείται μάζα του υλικού, προκειμένου να επιτευχθούν οι τελικές διαστάσεις του εξαρτήματος, όπως π.χ. τórνευση, φρεζάρισμα, πλάνιση, λείανση, κ.λπ.. Μαζική παραγωγή εξαρτημάτων συγκεκριμένης γεωμετρίας, όπως π.χ. πείρων, εδράνων, αξόνων, κ.λπ. γίνεται σε σύγχρονες αυτόματες εργαλειομηχανές, οι οποίες είναι γνωστές ως **εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση (CNC)**.

(ii) Συνδέσεις. Είναι όλες οι κατεργασίες σύνδεσης υλικών, που αποτελούν ένα μέρος μίας κατασκευής ή ένα στοιχείο μηχανής, οι οποίες επιτυγχάνονται είτε με σύντηξη, είτε με θέρμανση είτε με συμπίεση των επιμέρους υλικών (π.χ. οξυγονοκόλληση, ηλεκτροσυγκόλληση, συγκόλληση με τριβή, κ.λπ.). Επίσης, μεταξύ των μεθόδων σύνδεσης υλικών ανήκουν οι ηλώσεις, κοχλιώσεις (μη μόνιμες συνδέσεις) και οι κολλήσεις με τη βοήθεια κόλλας.

(iii) Θερμικές κατεργασίες. Είναι απαραίτητες για την απόκτηση της τελικής σκληρότητας και της αντοχής του υλικού. Έτσι, υπάρχουν οι θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης (βαφή-επαναφορά χαλύβων, γήρανση αλουμινίου) και οι θερμικές κατεργασίες που οδηγούν σε μείωση των εσωτερικών τάσεων ή ακόμα και της σκληρότητας του υλικού (ανόπτηση).

(iv) Επιφανειακές κατεργασίες. Είναι το τελικό στάδιο επεξεργασίας του υλικού πριν από τη χρήση του ως στοιχείο κάποιας μηχανής ή κατασκευής. Αφορά κυρίως περιπτώσεις υλικών, που καταπονούνται σε τριβή ή/και λειτουργούν σε διαβρωτικό περιβάλλον. Τέτοιες κατεργασίες είναι:

- Μηχανικές (αμμοβολή και σφαιροβολή).
- Θερμοχημικές (εναζώτωση και ενανθράκωση).
- Θερμικές (π.χ. φλογοβαφή, επαγωγική βαφή, βαφή με laser κ.α.).
- Επιστρώσεις (ηλεκτρολυτικές επιστρώσεις (επιχρωμίωση, επινικέλωση), γαλβανισμός, επικασσιτέρωση, κεραμικές επιστρώσεις (π.χ. με ψεκασμό πλάσματος, με φυσική ή χημική εναπόθεση ατμών) κλπ).
- Οργανικές επικαλύψεις (εφαρμογή κάποιου αντιδιαβρωτικού πλαστικού χρώματος πάνω σε μεταλλικές επιφάνειες).

6. ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΥΛΙΚΩΝ

Στην αγορά υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ των υλικών. Με την πάροδο του χρόνου προκύπτουν διάφοροι παράγοντες που καθιστούν δυνατόν ένα υλικό να αντικαταστήσει ένα άλλο σε ορισμένες εφαρμογές. Η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, το κόστος παραγωγής, η ανάπτυξη νέων υλικών με ειδικές ιδιότητες για ορισμένες εφαρμογές και νέων μεθόδων κατεργασίας αποτελούν τους σπουδαιότερους παράγοντες που επιφέρουν αλλαγές στη χρήση των υλικών. Για παράδειγμα, είναι γνωστή η σημαντική αύξηση της παραγωγής για το αλουμίνιο και τα πολυμερή που παρατηρήθηκε μετά το 1930. Η αύξηση της παραγωγής σε πολυμερή είναι πιο έντονη λόγω του μικρού τους βάρους.

Για ορισμένες εφαρμογές μόνο ορισμένα υλικά ικανοποιούν τις σχεδιαστικές απαιτήσεις και τα υλικά αυτά μπορεί να είναι σχετικά ακριβά. Για παράδειγμα, για την κατασκευή των κινητήρων προώθησης των αεροσκαφών χρησιμοποιούνται υπερκράματα νικελίου που αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτά τα κράματα είναι ακριβά και δεν βρέθηκαν πιο φθηνά για να τα αντικαταστήσουν.

7. Η ΕΡΕΥΝΑ ΣΗΜΕΡΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η σημερινή τεχνολογική επανάσταση γίνεται στο «πολύ μικρό». Η έρευνα αιχμής ασχολείται με τις μοριακές ιδιότητες των υλικών. Οι τομείς που περιλαμβάνει εκτείνονται από την διάγνωση της σεισμικής συμπεριφοράς, την αναχαίτιση υλικών καταστροφών, την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων παραδοσιακών υλικών έως την διάδραση με τον χρήστη για την δημιουργία μεταβαλλόμενων-ευφών περιβαλλόντων διαβίωσης με την χρήση έξυπνων υλικών.

Στόχος η δημιουργία κτηρίων-περιβαλλόντων με λειτουργίες και ιδιότητες που πλησιάζουν αυτές ενός ζωντανού οργανισμού ίσως ακόμα και εμπλουτισμένες με ανθρώπινη νοημοσύνη. Περιβάλλοντα που λειτουργούν με πολλαπλούς τρόπους και ταυτόχρονα διαντιδρούν με τις μεταβαλλόμενες συμπεριφορές και επιθυμίες των ανθρώπων. Η ευφυΐα τους είναι ροϊκή και ελεύθερη για αυτό και δεν αποτελούν ένα ιδανικό σύστημα αλλά «μια ρευστή διάδραση ανάμεσα στον άνθρωπο και στο περιβάλλον».

Τα έξυπνα υλικά

Τα έξυπνα υλικά έχουν μεταβλητές ιδιότητες και ανταποκρίνονται σε εφήμερες ανάγκες. Έχουν την ικανότητα να αποκρίνονται σε πολλαπλές καταστάσεις αντί να βελτιστοποιούνται για μία μοναδική κατάσταση. Σε αντίθεση με τα καθιερωμένα στατικά υλικά που αντέχουν στις δυνάμεις, τα έξυπνα υλικά είναι δυναμικά δηλαδή συμπεριφέρονται σε απόκριση των ενεργειακών πεδίων.

Δεν είναι εύκολο να συλλάβει κανείς ένα τελικό αποτέλεσμα, καθώς αυτά τα υλικά υπόκεινται σε συνεχείς μετασχηματισμούς δράσης και αλληλεπίδρασης. Θα μπορούσε ενδεχομένως να πει κανείς πως μιλάμε περισσότερο για σειρές ενεργειών, για ένα σύνολο ή συναρμογή ιδιοτήτων παρά για υλικά αναγνωρίσιμα και ποσοτικοποιήσιμα από την μοριακή δομή τους.

Είναι αρκετά δύσκολο να ορίσει κανείς τι είναι αυτό που κάνει ένα υλικό έξυπνο τη στιγμή που ότι μπορεί να κάνει ένα έξυπνο υλικό μπορεί να το κάνει και ένα συμβατικό. Πολλές φορές η εξυπνάδα ταυτίζεται με την αυτοματοποίηση και τα καθολικά έμμεσα κατασκευαστικά συστήματα που είχαμε έως τώρα για τη διαχείριση των μεταβολών θερμοκρασίας, φωτός κλπ. Συστήματα που κάθε άλλο από ξεχωριστά και άμεσα δεν είναι.

Τα έξυπνα υλικά μας αναγκάζουν να σκεφτούμε σε μικρή κλίμακα: τι χρειάζεται το σώμα και όχι τι χρειάζεται το κτήριο. Δίνουν τη δυνατότητα να σχεδιάσουμε άμεσα και ξεχωριστά περιβάλλοντα για το σώμα, αλλά δεν έχουμε οδηγό για την εφαρμογή τους σε αυτή την σημαντική αρένα. Οι πιο σπουδαίες σκέψεις για τα έξυπνα υλικά είναι αυτές που σταχυολογούνται από την συμπεριφορά τους. Είτε πρόκειται για μόριο, για υλικό, για συνδυασμό ή για ένα σύστημα, τα έξυπνα υλικά θα παρουσιάσουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Αμεσότητα (immediacy) – αποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο
- Παροδικότητα (transiency) – αποκρίνονται σε περισσότερες από μία περιβαλλοντικές καταστάσεις
- Αυτο – ενεργοποίηση (self-actuation) – η ευφυΐα τους είναι εγγενής
- Επιλεκτικότητα (selectivity) – η απόκρισή τους είναι ξεχωριστή και προβλεπόμενη
- Ευθύτητα (directness) – η απόκρισή τους είναι τοπική σε ένα ενεργοποιημένο γεγονός.

Είναι μάλλον αυτό το τελευταίο χαρακτηριστικό, η ευθύτητα, που θέτει την μεγαλύτερη πρόκληση στους μηχανικούς και οδηγεί στην σκέψη της χρήσης των έξυπνων υλικών, επιλεκτικά και στρατηγικά. Έτσι αντί να επιλέγονται αφού έχει ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός, τα υλικά και οι ιδιότητές τους αποτελούν το σημείο εκκίνησης.

Τα έξυπνα υλικά δεν φαίνονται και δεν σχεδιάζονται σαν να ήταν γνωστά αντικείμενα εγκαταστημένα σε ένα τόπο. Και αυτό επηρεάζει και τον ίδιο τον σχεδιασμό που πρέπει να εστιάζει περισσότερο στο τι θέλουμε να κάνουν αυτά τα υλικά και όχι στο πως φαίνονται τελικά. Έχοντας πια τη δυνατότητα να σχεδιάζουμε αρχίζοντας από το πολύ μικρό, από μια μόνη κίνηση και να δημιουργούμε τοπικά και διασυνδεδεμένα γεγονότα, το πρόβλημα της εμπειρίας, του τι αισθάνονται οι χρήστες και πώς θα μπορούσαν να διαντιδρούν με το περιβάλλον τους, επιστρέφει στο προσκήνιο της Μηχανικής.

8. ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Εισαγωγή

Για να εξηγηθούν και να κατανοηθούν βασικές μακροσκοπικές ιδιότητες των υλικών είναι απαραίτητο να εξεταστεί η δομή τους, δηλαδή οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων κάθε υλικού (οι δυνάμεις που συγκρατούν τα άτομα), η γεωμετρική ταξινόμηση των ατόμων (ο τρόπος τοποθέτησης τους) και οι ατέλειες που εμφανίζονται στη γεωμετρική ταξινόμηση των ατόμων.

Ατομικοί Δεσμοί

Τα άτομα που αποτελούν ένα υλικό συνδέονται μεταξύ τους με πρωτεύοντες (ισχυρούς) ή δευτερεύοντες (σχετικά ασθενείς) δεσμούς ή και με συνδυασμούς αυτών. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν ο ιοντικός, ο ομοιοπολικός και ο μεταλλικός δεσμός, ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν ο δεσμός van der Waals και ο δεσμός υδρογόνου.

Ιοντικός Δεσμός

Στο δεσμό αυτό ηλεκτρικά θετικά άτομα αποδίδουν ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια σε ηλεκτρικά αρνητικά άτομα δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικά ιόντα. Οι δυνάμεις δεσμού προκύπτουν από την (ηλεκτροστατική) αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ιόντων.

Ομοιοπολικός Δεσμός

Ο ομοιοπολικός δεσμός, ο οποίος κυριαρχεί στις ενώσεις του πυριτίου (π.χ. λίθοι, πλίνθοι, γυαλί, ορισμένα συστατικά του τσιμέντου), οφείλεται στο ότι τα άτομα μοιράζονται τα ηλεκτρόνια του εξωτερικού τους φλοιού με άλλα άτομα. Έτσι, κάθε άτομο εμφανίζει στον εξωτερικό του φλοιό έναν πλήρη αριθμό ηλεκτρονίων. Επισημαίνεται ότι ο ιοντικός δεσμός παρουσιάζεται μεταξύ ισχυρά θετικών και αρνητικών φορτισμένων στοιχείων, ενώ ο ομοιοπολικός δεσμός παρουσιάζεται μεταξύ ατόμων του ίδιου τύπου ή άλλων γειτονικών στοιχείων του περιοδικού συστήματος.

Μεταλλικός Δεσμός

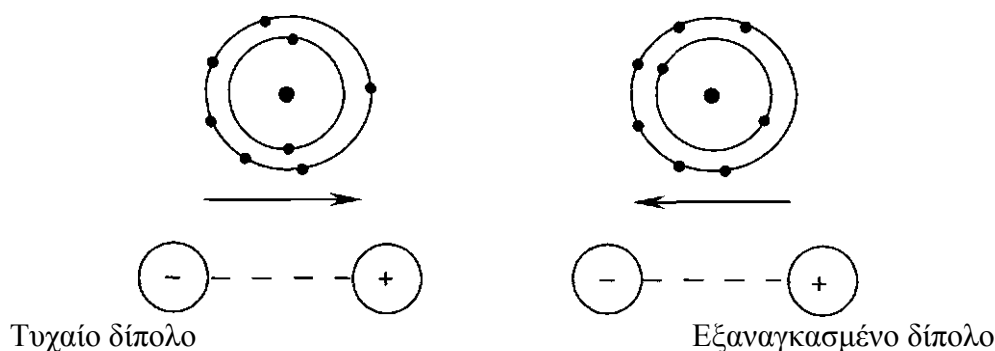
Ο μεταλλικός δεσμός συναντάται, όπως δηλώνει και το όνομά του, μόνο στα μέταλλα, δηλαδή σε στοιχεία που έχουν λίγα σχετικά ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα τα οποία απέχουν πολύ από τον πυρήνα. Λόγω του αδύνατου δεσμού με τον πυρήνα, τα ηλεκτρόνια αυτά κινούνται ελεύθερα (νέφος ηλεκτρονίων) ανάμεσα στα μεταλλικά ιόντα.

Η ευχέρεια της κίνησης των ηλεκτρονίων εξηγεί και τη σχετικά υψηλή θερμική (και ηλεκτρική) αγωγιμότητα των μετάλλων. Επίσης, η απλότητα στη δομή των

ενώσεων με μεταλλικούς δεσμούς είναι υπεύθυνη σε σημαντικό βαθμό για την πλάστιμη συμπεριφορά των μετάλλων (δηλαδή την ικανότητά τους να αναπτύσσουν μεγάλες παραμορφώσεις πριν τη θραύση τους).

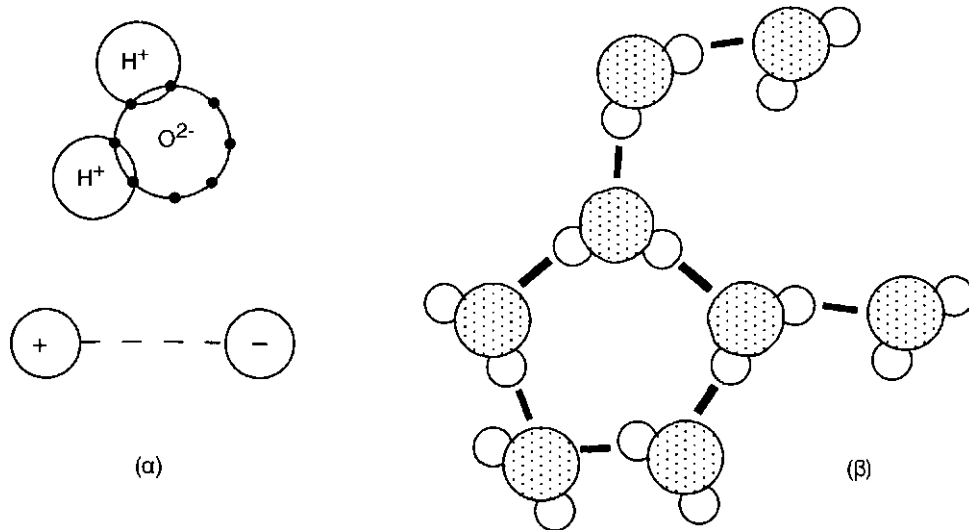
Δεσμοί van der Waals και Υδρογόνου

Ο δεσμός van der Waals είναι σχετικά ασθενής δεσμός μεταξύ ευσταθών ατόμων με πλήρη εξωτερική στοιβάδα και οφείλεται κυρίως στην εμφάνιση πολικότητας, δηλαδή στην ιδιότητα στιγμιαίου προσανατολισμού του ηλεκτρικού φορτίου (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση δεσμού van der Waals.

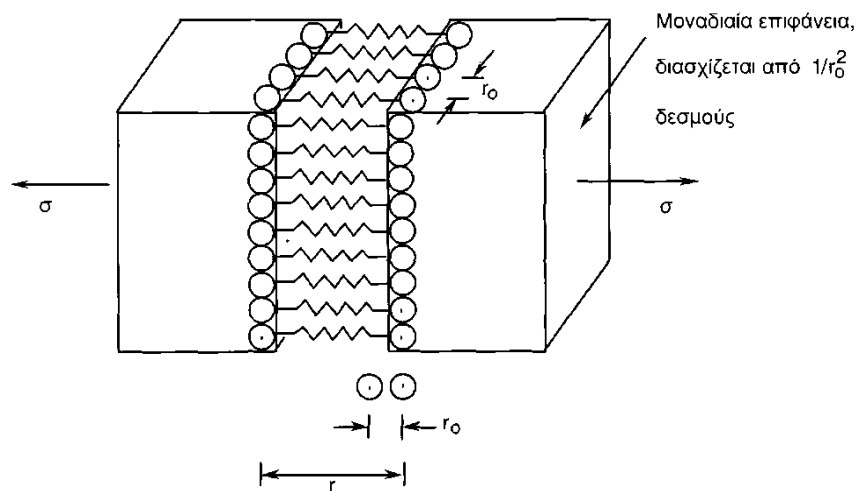
Ιδιαίτερα σημαντική είναι η αλληλεπίδραση δίπολων τα οποία αναπτύσσονται λόγω της ύπαρξης ατόμων υδρογόνου. Οι αντίστοιχοι μοριακοί δεσμοί, που αναφέρονται ως δεσμοί υδρογόνου, είναι μία τάξη μεγέθους ισχυρότεροι από άλλους δεσμούς van der Waals, αλλά και αρκετά ασθενέστεροι (10-20 φορές) από τους πρωτεύοντες δεσμούς. Στους δεσμούς υδρογόνου οφείλεται η ρευστή κατάσταση του νερού (Σχήμα 2). Δεσμοί υδρογόνου συναντώνται επίσης μεταξύ των μορίων των πολυμερών, τα άτομα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρούς ιοντικούς δεσμούς. Έτσι εξηγείται και το ότι πολλά πολυμερή χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα που επιτρέπει την κατεργασία τους με αύξηση της θερμοκρασίας, διότι η τελευταία μπορεί σχετικά εύκολα να προκαλέσει χαλάρωση των μικρών ενδομοριακών δυνάμεων.



Σχήμα 2: Ο δεσμός υδρογόνου. (α) Μόριο νερού και αντίστοιχο δίπολο, (β) Δομή του νερού.

Δυνάμεις μεταξύ Ατόμων. Ενέργεια Δεσμού

Κάθε ατομικός δεσμός χαρακτηρίζεται από ελκτικές και απωθητικές δυνάμεις λόγω αλληλεπίδρασης των ηλεκτρονίων και των πυρήνων. Χάρη στις δυνάμεις αυτές τα υλικά "αντιδρούν" στις παραμορφώσεις λόγω εξωτερικών φορτίων, θερμοκρασιακών μεταβολών κ.τ.λ. Οι ενέργειες που αντιστοιχούν στις δυνάμεις αυτές χαρακτηρίζονται με τη σειρά τους ως ελκτικές ή απωστικές ενέργειες αλληλεπίδρασης και αυξάνονται ή μειώνονται, αντίστοιχα, με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των ατόμων. Μάλιστα, όταν τα άτομα βρίσκονται σε θέση ισορροπίας, τότε οι μεταξύ τους ελκτικές και απωστικές δυνάμεις εξουδετερώνονται, η συνολική ενέργεια αλληλεπίδρασης (που ισούται με το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών) παίρνει την ελάχιστη τιμή της.



Σχήμα 3: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας βάσει της δυσκαμψίας ατομικών δεσμών.

Με βάση τη σχέση δύναμης δεσμού F και απόστασης μεταξύ δύο ατόμων r (Σχήμα 3), η δυσκαμψία S του δεσμού υπολογίζεται ως εξής:

$$S = \frac{dF}{dr} = \frac{d^2U}{dr^2}$$

Για μικρές μεταβολές του r από την τιμή r_0 , η δυσκαμψία S είναι σταθερή και ίση με

$$S_o = \left(\frac{d^2U}{dr^2} \right)_{r=r_0}$$

Με άλλα λόγια, ο δεσμός είναι ελαστικός. Αυτή η διαπίστωση αποτελεί και τη φυσική εξήγηση του νόμου του Hooke, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Ας φανταστούμε ότι τα άτομα εκατέρωθεν μίας διατομής με επιφάνεια A ενός στερεού σώματος συγκρατούνται μέσω ελαστικών δεσμών (ελατηρίων), όπως δείχνεται στο Σχ. 2.7. Για απλούστευση, θεωρούμε ότι τα άτομα καταλαμβάνουν τις κορυφές κύβων πλευράς r_0 . Η συνολική δύναμη που ασκείται ανά μονάδα επιφάνειας ορίζεται ως ορθή τάση σ , και για την περίπτωση απομάκρυνσης των ατόμων κατά $(r-r_0)$ ισούται με

$$S = NS_o(r - r_o)$$

όπου N είναι ο αριθμός των δεσμών ανά μονάδα επιφάνειας, ίσος με M . Διαιρώντας την επιμήκυνση $(r-r_0)$ με το αρχικό μήκος r_0 υπολογίζουμε την ορθή παραμόρφωση ε , κι έτσι καταλήγουμε στη σχέση

$$S = \frac{S_o}{r_o} \varepsilon = E \cdot \varepsilon$$

όπου E ορίζεται το μέτρο ελαστικότητας (χαρακτηριστική ιδιότητα του υλικού), ενώ η τελευταία σχέση εκφράζει το νόμο του Hooke.

Γεωμετρική Ταξινόμηση των Ατόμων

Τα στερεά σώματα κατατάσσονται με βάση την ταξινόμηση των ατόμων σε κρυσταλλικά και άμορφα. Στα κρυσταλλικά υλικά (όπως είναι π.χ. τα μέταλλα και πολλά φυσικά ορυκτά), οι δομικές μονάδες (άτομα, μόρια) καταλαμβάνουν αυστηρά καθορισμένες θέσεις στο χώρο, σύμφωνα με ένα γεωμετρικό υπόδειγμα που λέγεται κρυσταλλικό σύστημα. Όλα σχεδόν τα κρυσταλλικά σώματα εμφανίζονται με τη μορφή συσσωματωμάτων κρυστάλλων μεγέθους κλάσματος του χιλιοστού έως μερικά εκατοστά και όχι ως ενιαίοι κρύσταλλοι. Στα άμορφα υλικά (π.χ. σημαντικό ποσοστό του τσιμεντοπολτού, ξύλο, οπτόπλινθοι, πολυμερή), οι δομικές μονάδες κατέχουν τυχαίες θέσεις στη μάζα του στερεού. Η ταξινόμηση των ατόμων στα υλικά αυτά είναι δυνατόν να παρουσιάσει τοπική κανονικότητα (κρυσταλλική δομή), η οποία όμως δεν επεκτείνεται σε όλο το σώμα.

Κρυσταλλικά Υλικά

Για την περιγραφή των κρυσταλλικών υλικών είναι σκόπιμο να ξεκινήσει κανείς από τον στοιχειώδη κρύσταλλο ή στοιχειώδες κύτταρο, με περιοδική επανάληψη του οποίου σε ορισμένες διευθύνσεις μπορεί να προκύψει κάθε κρύσταλλος. Ο Bravais έδειξε το 1848 ότι υπάρχουν 14 διαφορετικά στοιχειώδη κύτταρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.

Η παράπλευρη επανάληψη, προς όλες τις διευθύνσεις, των στοιχειωδών κυττάρων, έτσι ώστε γειτονικά κύτταρα να έχουν κοινές πλευρές, σχηματίζει τα κρυσταλλικά πλέγματα. Τα 14 στοιχειώδη κύτταρα κατατάσσονται στα παρακάτω 7 κρυσταλλογραφικά συστήματα: κυβικό, τετραγωνικό, ρομβοεδρικό, εξαγωνικό, ορθορομβικό, μονοκλινές, τρικλινές. Σημειώνεται ότι από τους 14 τύπους κρυστάλλων που απαντώνται στα υλικά, τα μέταλλα κρυσταλλώνονται κατά κανόνα σύμφωνα με 3, ήτοι το κυβικό χωροκεντρωμένο, το κυβικό εδροκεντρωμένο και το εξαγωνικό σύστημα.

Ευθείες και επίπεδα που διέρχονται από το κέντρο ενός μεγάλου αριθμού ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος ονομάζονται κρυσταλλικοί άξονες και κρυσταλλικά επίπεδα, αντίστοιχα. Τα στοιχεία αυτά έχουν άμεση σχέση με την εμφάνιση διαφορετικών τιμών ορισμένων μηχανικών ιδιοτήτων (π.χ. μέτρο ελαστικότητας, αντοχή) σε μερικά υλικά, ανάλογα με τη διεύθυνση μέτρησης της ιδιότητας.

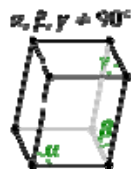
Άμορφα Υλικά

Ενώ θα αναμενόταν τα περισσότερα υλικά να εμφανίζονται σε κρυσταλλική δομή, αφού αυτή παρουσιάζει τη χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση, αρκετά υλικά αποτελούνται από άτομα και μόρια ταξινομημένα μέσα στην ύλη κατά μάλλον τυχαίο τρόπο. Τυπικά παραδείγματα της δομής άμορφων υλικών, όπως τα πολυμερή και το γυαλί, δίνονται στο Σχήμα 5.

Χαρακτηριστικό της δομής πολλών άμορφων υλικών (π.χ. πολυμερή) είναι η ύπαρξη μακρομοριακών αλυσίδων, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους ανά διαστήματα με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς (Σχήμα 6) και είναι υπεύθυνες για πολλές από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών αυτών.

Κρυσταλλικό Σύστημα

Τρικλινές

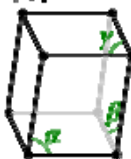


Απλό

$$\alpha \neq 90^\circ$$

$$\beta, \gamma = 90^\circ$$

Μονοκλινές

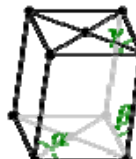


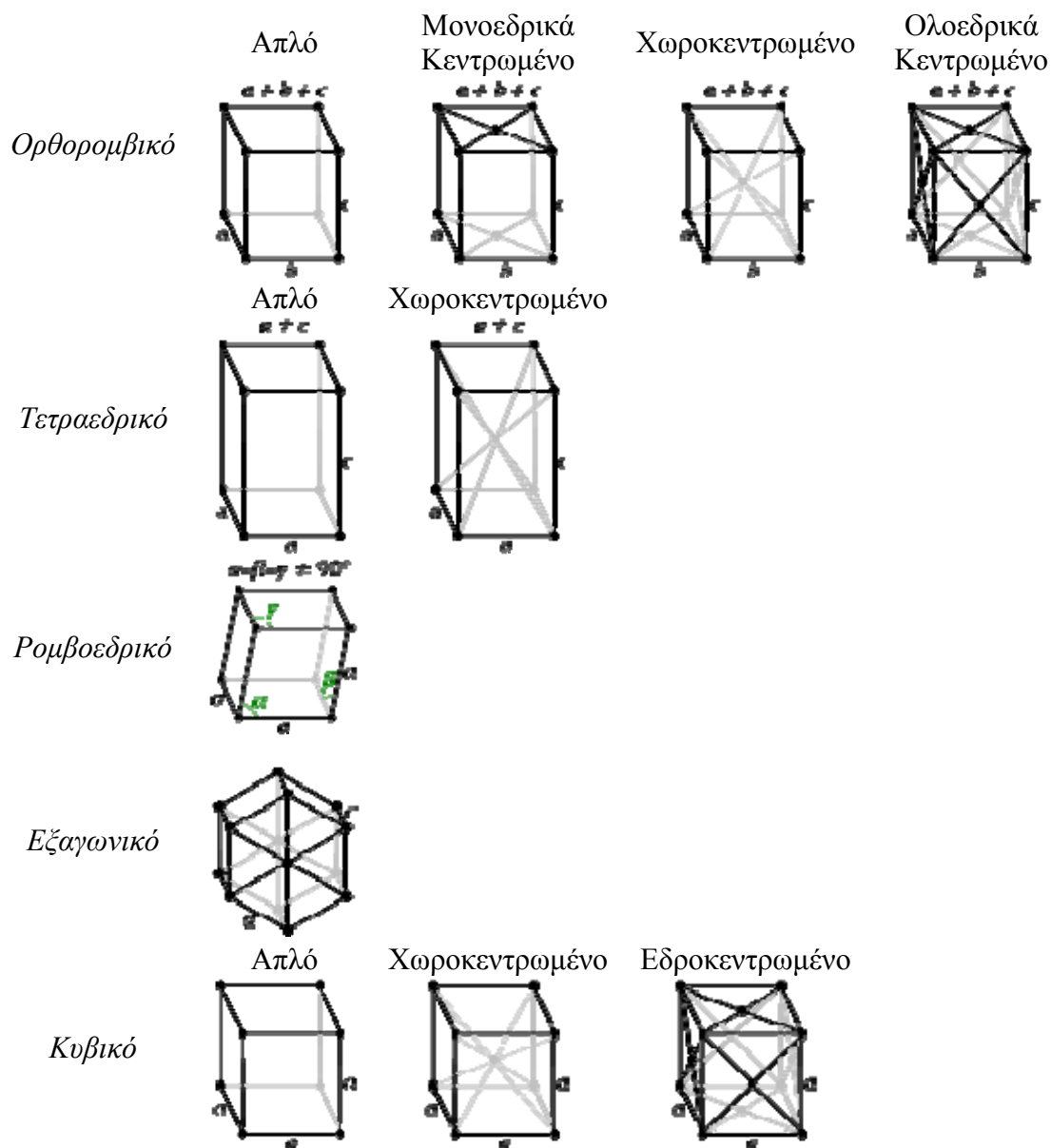
Κρυσταλλικά Πλέγματα

Κεντρωμένο

$$\alpha \neq 90^\circ$$

$$\beta, \gamma = 90^\circ$$

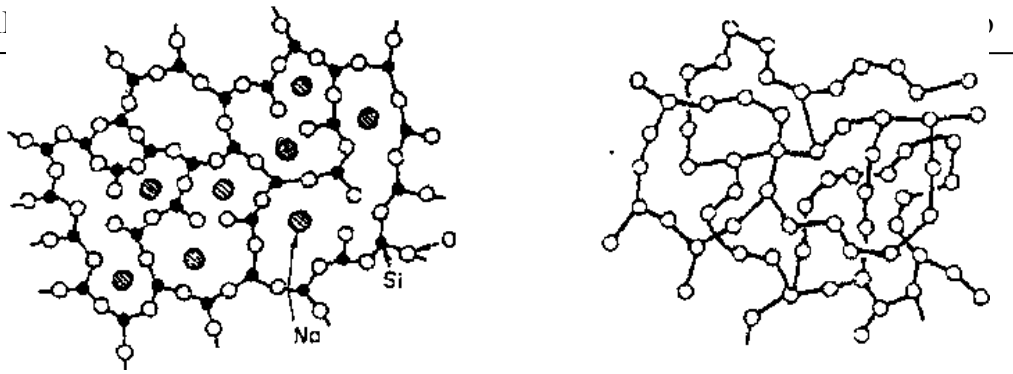




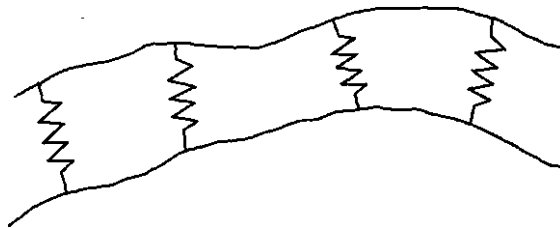
Σχήμα 4: Στερεομετρική απεικόνιση των 7 κρυσταλλικών συστημάτων και των αντίστοιχων 14 κρυσταλλικών πλεγμάτων.

Κρυσταλλικές Ατέλειες

Η δομή των πραγματικών κρυσταλλικών υλικών παρουσιάζει διάφορες ατέλειες, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες των υλικών. Για παράδειγμα, η θεωρητική αντοχή ενός ιδανικού κρυστάλλου είναι κατά 103 περίπου φορές μεγαλύτερη από την αντοχή του αντίστοιχου πραγματικού σώματος (π.χ. McClintock and Argon 1966). Ανάλογα με τις διαστάσεις και τη γεωμετρική τους μορφή, οι ατέλειες χαρακτηρίζονται σε σημειακές, γραμμικές, επιφανειακές και χωρικές.



Σχήμα 5: Σχηματική παράσταση της δομής άμορφων υλικών: (α) Γυαλί, (β) Πολυμερές όπου οι μακρομοριακές αλυσίδες ενώνονται ανά διαστήματα με ομοιοπολικούς δεσμούς.

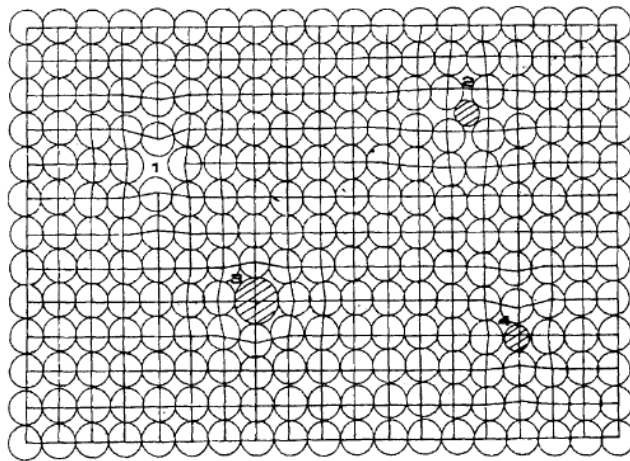


Σχήμα 6: Μακρομοριακές αλυσίδες και ενδιάμεσοι ομοιοπολικοί δεσμοί στα πολυμερή.

Σημειακές Ατέλειες

Οι ατέλειες αυτές έχουν τοπικό χαρακτήρα και περιορίζονται σε χώρο με διαστάσεις της τάξης των ατόμων του κρυστάλλου. Παρουσιάζονται κυρίως όταν άτομα άλλης ύλης καταλαμβάνουν ενδιάμεσες θέσεις στο πλέγμα του κρυστάλλου, όταν κανονικές θέσεις ατόμων παραμένουν κενές και όταν άτομα της ύλης διαχέονται σε ενδιάμεσες θέσεις του πλέγματος ή αντικαθίστανται από άλλα (μεγαλύτερα ή μικρότερα) άτομα (Σχήμα 7).

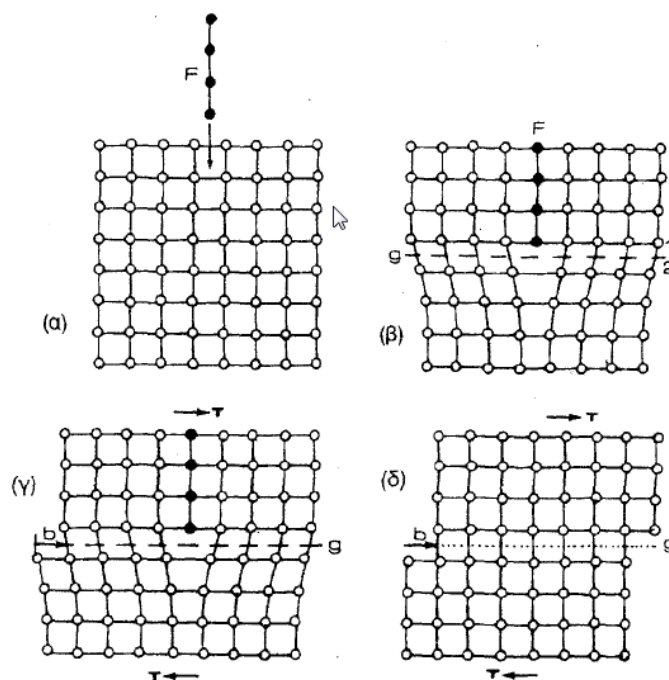
Οι σημειακές ατέλειες είναι σε σημαντικό βαθμό υπεύθυνες για τη μηχανική συμπεριφορά ορισμένων μετάλλων, όπως είναι τα κράματα, τα οποία δημιουργούνται με την προσθήκη διαφορετικών ατόμων στη δομή μετάλλων.



Σχήμα 7: Σημειακές ατέλειες σε κρυσταλλικό υλικό.

Γραμμικές Ατέλειες

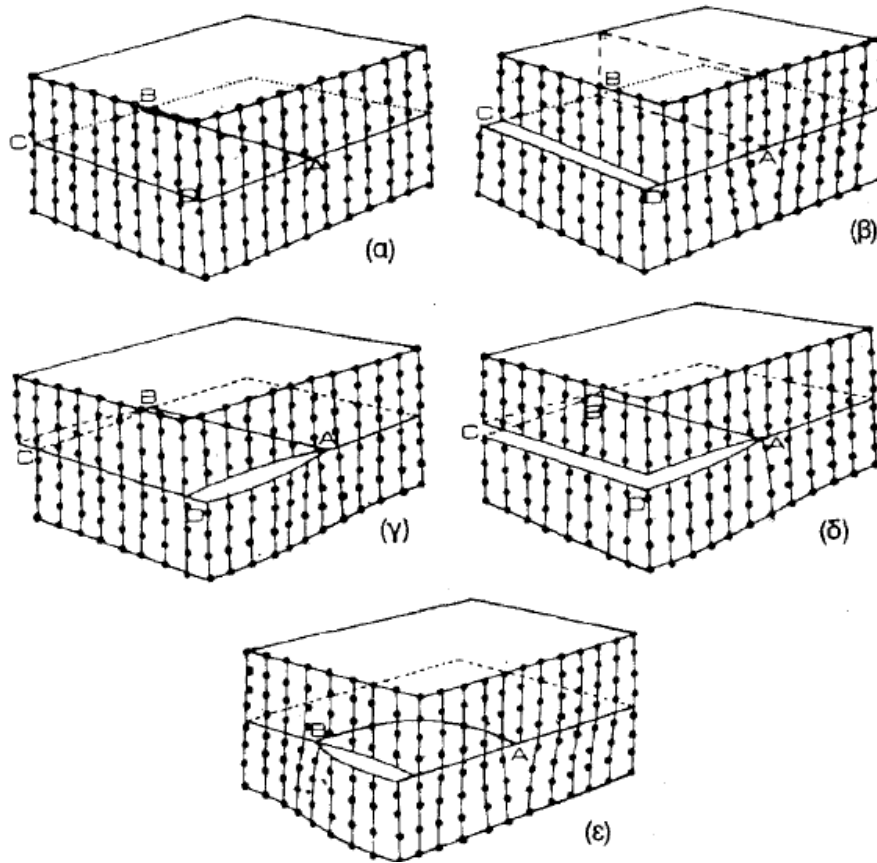
Όπως δηλώνει και το όνομα τους, οι γραμμικές ατέλειες, οι οποίες δημιουργούνται κατά κανόνα στο στάδιο κρυστάλλωσης της ύλης, αναπτύσσονται μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα κατά μήκος γραμμών. Ονομάζονται και καταναγκασμοί και είναι υπεύθυνες για την ικανότητα μερικών υλικών, όπως τα μέταλλα, να διαρρέουν λόγω διατμητικών τάσεων (που όπως θα δούμε είναι οι εσωτερικές δυνάμεις ανά μονάδα επιφάνειας που ασκούνται εφαπτομενικά σε κάποιο επίπεδο του υλικού).



Σχήμα 8: Γεωμετρική παραγωγή καταναγκασμού και ολίσθηση λόγω διατμητικών τάσεων.

Για κατανόηση, θεωρούμε το ιδανικό κρυσταλλικό πλέγμα του Σχήματος 8α, στο οποίο εισάγεται μία επιφάνεια από άτομα της ίδιας ή άλλης ύλης (Σχήμα 8β). Η γραμμή που ενώνει τις κορυφές του πλέγματος της επιφάνειας F λέγεται γραμμή καταναγκασμού. Τα άτομα γύρω από τις γραμμές καταναγκασμού δεν κατέχουν ιδανικές θέσεις και βρίσκονται σε κατάσταση σχετικά ασταθούς ισορροπίας. Έτσι με την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων μετατοπίζονται σχετικά εύκολα κατά μήκος της επιφάνειας g , μεταξύ των επιπέδων 1 και 2.

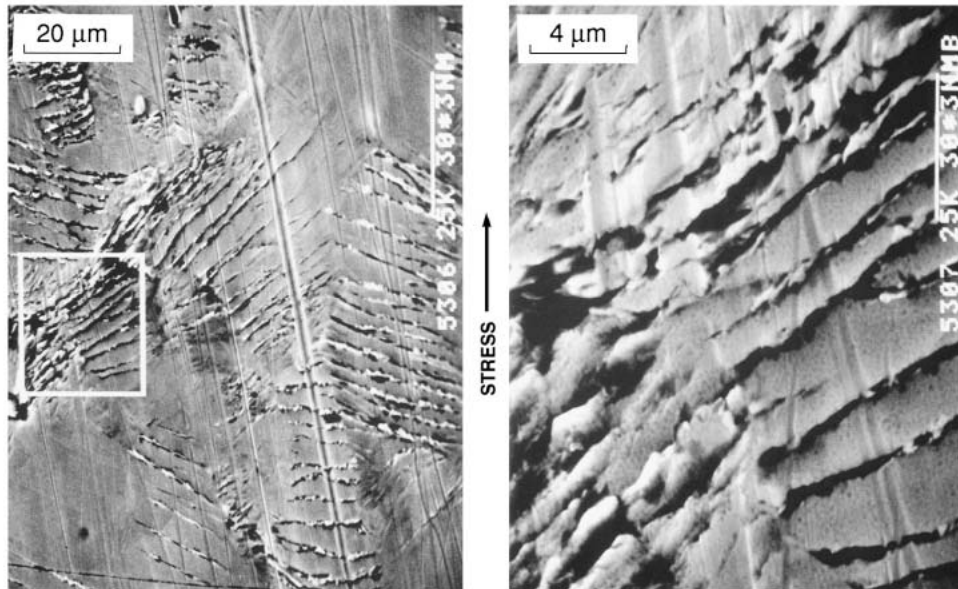
Ο καταναγκασμός που περιγράφεται παραπάνω λέγεται βαθμιδωτός και αποτελεί ειδική περίπτωση, με τις μετατοπίσεις των ατόμων να είναι κάθετες στη γραμμή καταναγκασμού. Άλλες περιπτώσεις δίνονται στο Σχήμα 9. Ας σημειωθεί πάντως ότι στην ύπαρξη των γραμμικών ατελειών οφείλονται πολλές από τις εξαιρετικές ιδιότητες των μεταλλικών υλικών, όπως είναι η ικανότητά τους να διαμορφώνονται με μηχανικούς τρόπους (π.χ. εξέλαση, πρέσες κ.τ.λ.), αλλά όμως και το ότι η πραγματική αντοχή τους είναι κατά πολύ μικρότερη από τη θεωρητική.



Σχήμα 9: (α) Ιδανικό κρυσταλλικό πλέγμα, (β) βαθμιδωτός καταναγκασμός, (γ) ελικοειδής καταναγκασμός, (δ) βαθμιδωτός καταναγκασμός και (ε) μεικτός καταναγκασμός.

Επιφανειακές και Χωρικές Ατέλειες

Στις επιφανειακές ατέλειες ανήκουν οι οριακές επιφάνειες των κόκκων και αυτές των φάσεων (περιοχές με σταθερή ατομική και χημική σύνθεση που μπορούν να ξεχωριστούν με μηχανικά μέσα) των πολυφασικών υλικών. Ένας από τους χαρακτηριστικούς ρόλους τέτοιων ατελειών στην πλαστική παραμόρφωση των υλικών (ανάπτυξη μόνιμων παραμορφώσεων, που δηλαδή δεν αναιρούνται κατά την αφαίρεση της φόρτισης, υπό σχεδόν σταθερή τάση) είναι η παρεμπόδιση, ως ένα βαθμό, της κίνησης των γραμμικών ατελειών. Οι χωρικές ατέλειες είναι μακροσκοπικά σημεία ασυνέχειας σε 3 διαστάσεις. Τέτοιες είναι, για παράδειγμα, οι περιοχές συσσώρευσης κενών θέσεων ατόμων, οι ρωγμές κ.τ.λ. Προκύπτουν κυρίως κατά την παραγωγή των υλικών και επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά τους μέσω της διάδοσης ρωγμών, που έχει ως αποτέλεσμα τη θραύση των υλικών.



Σχήμα 10: Ζώνες ολίσθησης και βαθμίδες ολίσθησης που προκαλούνται στην επιφάνεια των κρυστάλλων και οφείλονται στην μετατόπιση ομάδων εξαρμώσεων από δυναμική φόρτιση AISI 1010 χάλυβα.

9. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Γενικά

Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες ιδιότητες. Από αυτές, οι φυσικές ιδιότητες έχουν ιδιαίτερη σπουδαιότητα για το μηχανικό, γιατί είναι καθοριστικές για την ποιότητα, την ασφάλεια και τη διάρκεια των τεχνικών έργων.

Πυκνότητα και Πορώδες

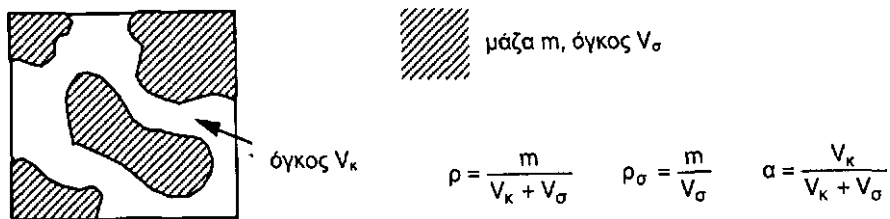
Ως φαινόμενη πυκνότητα ορίζεται ο λόγος της μάζας m ενός υλικού προς τον φαινόμενο όγκο V που καταλαμβάνει. Στη μελέτη των δομικών υλικών μερικές φορές ενδιαφέρει η πραγματική πυκνότητα ή πυκνότητα στερεών ρ_σ , που ορίζεται ως

$$\rho_\sigma = \frac{m}{V - V_\kappa}$$

όπου V_κ ο όγκος των κενών. Επίσης συχνά γίνεται χρήση του πορώδους

$$\alpha = \frac{V_\kappa}{V}$$

Τα παραπάνω συνοψίζονται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11: Πυκνότητα και πορώδες.

Απορροφητικότητα, Διαπερατότητα, Υγροσκοπικότητα

Οι ιδιότητες αυτές εμφανίζονται κυρίως στα πορώδη υλικά (π.χ. σκυρόδεμα) και εξαρτώνται από την πυκνότητα, το πορώδες και το είδος, μέγεθος και βαθμό επικοινωνίας των πόρων.

Απορροφητικότητα είναι η ιδιότητα που έχουν τα υλικά να απορροφούν (χωρίς εξωτερική πίεση) κάποιο ρευστό, το οποίο συνήθως είναι νερό (οπότε και η αντίστοιχη ιδιότητα λέγεται υδαταπορροφητικότητα). Η ιδιότητα αυτή μετράται συνήθως με τη μάζα επί τοις % που απορροφά η μονάδα μάζας του υλικού μετά από εμβάπτιση (έως ότου σταθεροποιηθεί το βάρος, π.χ. για 24 ώρες) σε νερό. Ορίζεται ως

$$Y(\%) = \frac{m_v - m_\xi}{m_\xi} \cdot 100\%$$

όπου m_v η μάζα μετά την εμβάπτιση του υλικού και m_ξ η ξηρή μάζα (που προσδιορίζεται σε θερμοκρασία μέχρι 120°C).

Διαπερατότητα είναι η ιδιότητα που χαρακτηρίζει την αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό στη δίοδο ενός ρευστού όταν βρίσκεται σε επαφή με αυτό υπό ορισμένη πίεση. Στην περίπτωση που το ρευστό είναι νερό η παραπάνω ιδιότητα ονομάζεται υδατοπερατότητα, και μετράται συνήθως με τη μάζα του νερού που διαπερνά στη μονάδα του χρόνου, υπό ατμοσφαιρική πίεση, μοναδιαία επιφάνεια μίας πλάκας μοναδιαίου πάχους από το εξεταζόμενο υλικό. Την υδατοπερατότητα επί το πάχος του υλικού ονομάζουμε συντελεστή υδραγωγιμότητας. Συχνά στην πράξη χρησιμοποιείται το αντίστροφο της υδατοπερατότητας, που ονομάζεται **υδατοστεγανότητα**. Η διαπερατότητα γενικά ποσοτικοποιείται με το συντελεστή διαπερατότητας k , βάσει του νόμου του Darcy:

$$\frac{dq}{dt} = k \frac{\Delta h A}{L \mu}$$

όπου dq/dt ο ρυθμός ροής του ρευστού, μ το ιξώδες, Δh η διαφορά πίεσης, A η επιφάνεια και L το πάχος του στοιχείου. Η παραπάνω ιδιότητα στην περίπτωση υδρατμών ονομάζεται **υδρατμοδιαπερατότητα**, και προσδιορίζεται π.χ. βάσει της Αμερικάνικης Προδιαγραφής ASTM-E96.

Υγροσκοπικότητα είναι η ιδιότητα που έχουν τα υλικά να απορροφούν υγρασία από την ατμόσφαιρα, όταν η σχετική υγρασία αυτής είναι δεδομένη, και μετράται με τρόπο ανάλογο προς αυτόν της υδαταπορροφητικότητας. Η παραμένουσα υγρασία σε ένα υλικό μετά την εξισορρόπηση με την υγρασία του περιβάλλοντος λέγεται υγρασία ισορροπίας.

10. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Θερμική Διαστολή και Συστολή

Η μεταβολή θερμοκρασίας κατά ΔT (σε $^{\circ}\text{C}$) έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των διαστάσεων δομικών στοιχείων με βάση το νόμο γραμμικής θερμικής διαστολής

$$\Delta \ell = \alpha \ell_o \Delta T$$

όπου $\Delta \ell$ η μεταβολή της κύριας διάστασης, ℓ_o η αρχική διάσταση του στοιχείου και α ο συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής ή συστολής. Ο συντελεστής α είναι μερικές φορές συνάρτηση της αρχικής θερμοκρασίας του στοιχείου, αλλά για το συνηθισμένο φάσμα θερμοκρασιών σε τεχνικά έργα μπορεί να θεωρηθεί (κατά πολύ καλή προσέγγιση) σταθερός.

Η βασική συνεργιστική ιδιότητα σκυροδέματος-οπλισμού είναι ο ισότιμος α ($0.012 \text{ mm/m}\cdot\text{K}$)

Θερμική Αγωγιμότητα

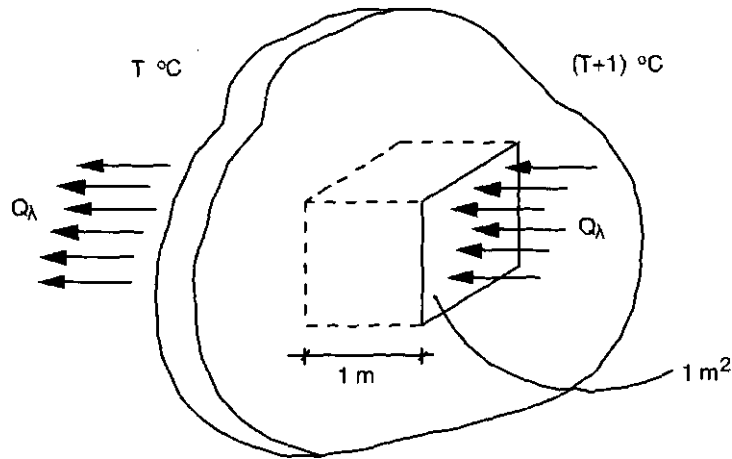
Είναι η ικανότητα που έχουν τα υλικά να επιτρέπουν τη διέλευση της θερμότητας μέσω της μάζας τους και περιγράφεται από το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (μονάδες: W/mK στο σύστημα S.I., μερικές φορές και $\text{kcal/mh}^{\circ}\text{C}=1.16\text{W/mK}$). Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το ποσό θερμότητας Q_λ που διαφεύγει στη μονάδα του χρόνου (συνήθως μία ώρα) μέσω επιφάνειας 1m^2 υλικού πάχους 1m , όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επιφανειών του εν λόγω υλικού είναι 1°C (Σχήμα 12).

Η συνολική θερμότητα Q που διέρχεται μέσω σώματος επιφάνειας A και πάχους d σε χρόνο t , όταν η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο παράλληλων επιφανειών του είναι ΔT , προκύπτει από την γενική εξίσωση Fourier για την μεταφορά θερμότητας με αγωγή

$$q'' = -\lambda \nabla T \Leftrightarrow q'' = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \right)$$

η οποία για μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας καταλήγει στην

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{d} A t$$



Σχήμα 12: Σχηματική παράσταση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Ο συντελεστής λ μειώνεται με την αύξηση του πορώδους, ενώ αυξάνεται με το ποσοστό υγρασίας που περιέχει ένα υλικό, με την αύξηση της θερμοκρασίας (λόγω διαστολής των πόρων) και συνήθως με την αύξηση των διαστάσεων. Επίσης υλικά με κλειστούς και μικρούς πόρους έχουν μικρότερο λ από εκείνα με ανοικτούς και μεγάλους πόρους.

Το αντίστροφο του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k

$$k = \frac{1}{\lambda}$$

ονομάζεται συντελεστής θερμικής αντίστασης. Η θερμική αντίσταση (ή αντίσταση θερμοδιαφυγής) σώματος πάχους d είναι ίση με

$$R = kd = \frac{d}{\lambda}$$

Αν το στοιχείο αποτελείται από n διαδοχικά στρώματα διάφορων υλικών (π.χ. τοιχοποιίες με θερμομόνωση, στοιχεία τύπου "σάντουιτς") με συντελεστές λ_i ($i=1, 2, \dots, n$) και πάχη d_i , αντίστοιχα, η θερμική αντίσταση θα είναι

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}$$

Στην αντίσταση αυτή θα πρέπει να προστεθούν οι αντιστάσεις εισόδου, $1/a_1$, και εξόδου, $1/a_2$, δηλαδή οι αντιστάσεις των οριακών στρωμάτων αέρα που βρίσκονται σε επαφή με τις δύο παρειές του σώματος. Έτσι, η συνολική θερμική αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$R = \frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_2}$$

Η μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στο εργαστήριο γίνεται συνήθως βάσει της μεθόδου "θερμής πλάκας", η οποία περιγράφεται λεπτομερώς από το Πρότυπο ΕΛΟΤ-514. Εναλλακτικά μπορεί να εφαρμοστεί και η μέθοδος του "μετρητή ροής θερμότητας" (συγκριτική μέθοδος γρήγορης μέτρησης που εφαρμόζεται κυρίως σε ινώδη, κυψελωτά και κοκκώδη μονωτικά υλικά), η οποία περιγράφεται στην Αμερικάνικη Προδιαγραφή ASTM-C518.

11. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ελαστικότητα-Πλαστικότητα

Όταν πάνω σ' ένα σώμα ασκηθούν βραδέως και προοδευτικώς εξωτερικές δυνάμεις, τότε το σώμα παραμορφώνεται. Η παραμόρφωση συνεχίζεται μέχρι ν' αποκατασταθεί η ισορροπία μεταξύ των εξωτερικών και των αναπτυσσόμενων εσωτερικών δυνάμεων. Μετά τη βαθμιαία αποφόρτιση, το σώμα επανέρχεται μερικώς ή ολικώς στις αρχικές διαστάσεις του.

Η ιδιότητα των σωμάτων να επανέρχονται πλήρως στην αρχική τους μορφή μετά από αποφόρτιση, ονομάζεται **ελαστικότητα**. Τα σώματα αυτά ονομάζονται **ελαστικά** και οι παραμορφώσεις τους **ελαστικές**.

Αν η παραμόρφωση που οφείλεται στις εξωτερικές δυνάμεις δεν αποδίδεται στο σύνολο της μετά την αποφόρτιση, τότε το σώμα είναι μερικώς ελαστικό. Η ολική παραμόρφωση αποτελείται από δύο συνιστώσες, την ελαστική παραμόρφωση που εξαφανίζεται μαζί με τη φόρτιση που την προκάλεσε, και την παραμένουσα στο σώμα παραμόρφωση μετά την αποφόρτιση. Η τελευταία παραμόρφωση ονομάζεται **μόνιμη** ή **πλαστική**. Τα σώματα που συμπεριφέρονται μ' αυτό τον τρόπο ονομάζονται **ελαστοπλαστικά**.

Τα δομικά υλικά έχουν εν γένει ελαστοπλαστικές ιδιότητες. Τα περισσότερα όμως απ' αυτά συμπεριφέρονται ελαστικά, εφόσον κατά την καταπόνησή τους δεν προκαλείται υπέρβαση κάποιου ορίου που ονομάζεται **όριο ελαστικότητας**. Την ιδιότητα αυτή των υλικών εκμεταλλευόμαστε για τον υπολογισμό και τη μόρφωση των κατασκευών, των οποίων η συμπεριφορά επιζητείται κατά κανόνα να είναι ελαστική. Σε μερικές περιπτώσεις δεχόμαστε για διάφορους λόγους την εκδήλωση στις κατασκευές, και σε περιορισμένη κλίμακα, πλαστικών παραμορφώσεων.

Αναλογία φορτίων-παραμορφώσεων

Πολλά υλικά, όπως λ.χ. ο χάλυβας, καταπονούνται με φόρτιση που αυξάνει προοδευτικά, παραμορφώνονται ανάλογα με το μέγεθος της εξωτερικής δύναμης. Η γραμμική αυτή συνάρτηση που συνδέει φορτία-παραμορφώσεις, ισχύει μέχρι κάποιο όριο για κάθε υλικό, το **όριο αναλογίας**. Το όριο αυτό είναι διαφορετικό από το όριο ελαστικότητας και έχει εν γένει μικρότερη τιμή απ' αυτό. Τα υλικά αυτά ονομάζονται **γραμμικώς ελαστικά**.

Ο νόμος που εκφράζει την αναλογία δυνάμεων-παραμορφώσεων διατυπώθηκε αρχικά από τον R. Hooke και γι' αυτό είναι γνωστός ως **νόμος του Hooke**. Για τον υπολογισμό των συνήθων κατασκευών αποδεχόμαστε εν γένει την ισχύ του και γι' αυτό ο νόμος αυτός αποτελεί τη βάση της Αντοχής των Υλικών και γενικότερα της θεωρίας **Ελαστικότητας**.

Στα υλικά που δεν συμπεριφέρονται στην πραγματικότητα γραμμικά, στα **μη γραμμικώς ελαστικά**, όπως ο χυτοσίδηρος, το σκυρόδεμα κ.ά. δεχόμαστε συνήθως και σ' αυτά την ισχύ του νόμου του Hooke μέχρι κάποιο όριο, με σκοπό την απλοποίηση των υπολογισμών.

Όταν δεχόμαστε εκδήλωση πλαστικών παραμορφώσεων σ' ένα σώμα τότε δεν έχει εφαρμογή ο νόμος του Hooke. Ο υπολογισμός των κατασκευών στηρίζεται σ' αυτή την περίπτωση στη θεωρία **Πλαστικότητας**.

Βασικές υποθέσεις

Η διατύπωση των αναλυτικών σχέσεων που εκφράζουν την *ελαστική* συμπεριφορά των υλικών, στηρίζεται σε υποθέσεις που αναφέρονται στις ιδιότητες των συνήθων υλικών που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές.

Προϋποτίθεται ότι η ταχύτητα επιβολής ή αφαίρεσης των φορτίων ή των παραμορφώσεων είναι πολύ μικρή κι αυτό για να αποκλείσουμε κατά το δυνατό την εκδήλωση δυναμικών φαινομένων. Τότε η φόρτιση των σωμάτων με αυτό τον τρόπο ονομάζεται *στατική*.

Υποθέτουμε ότι τα υλικά έχουν τις επόμενες ιδιότητες:

- α. Συνίστανται από *συνεχή* ύλη, δηλαδή οι ποσότητες που περιγράφουν τα πεδία των μετακινήσεων, των τάσεων και των παραμορφώσεων, είναι συνεχείς συναρτήσεις των συντεταγμένων.
- β. Είναι *ομοιογενή*, δηλαδή έχουν τις ίδιες ιδιότητες σε κάθε σημείο του σώματος.
- γ. Είναι *ισότροπα*, δηλαδή έχουν ιδιότητες ανεξάρτητες από τη διεύθυνση. Στην αντίθετη περίπτωση τα σώματα ονομάζονται ανισότροπα (τέτοιο είναι λ.χ. το ξύλο).
- δ. Είναι *γραμμικώς ελαστικά*, δηλ. υπακούουν στον νόμο του Hooke: οι παραμορφώσεις είναι ανάλογες των δυνάμεων στην ελαστική περιοχή.
- ε. Υφίστανται κατά τη φόρτιση πολύ μικρές παραμορφώσεις: η υπόθεση αυτή επιτρέπει την εφαρμογή στους υπολογισμούς, τάσεων και παραμορφώσεων που αναφέρονται στις αρχικές διαστάσεις των σωμάτων (*συμβατικά* μεγέθη) και όχι στις εκάστοτε πραγματικές (*πραγματικά* μεγέθη), πράγμα που περιπλέκει τα προβλήματα. Το σφάλμα απ' αυτή την απλοποίηση είναι ασήμαντο στις συνήθεις περιπτώσεις.
- στ. Φέρουν σταθερά φορτία επί μακρό χρονικό διάστημα, χωρίς μεταβολή της αρχικής παραμόρφωσης του σώματος σε συνάρτηση με τον χρόνο. Διαφορετικά έχουμε εκδήλωση του φαινομένου του *ερπυσμού*.
- ζ. Αποκρίνονται αμέσως στην επιβολή ή αφαίρεση των φορτίων, χωρίς εμφάνιση στη συνέχεια άλλης παραμόρφωσης. Στην αντίθετη περίπτωση έχουμε το φαινόμενο *υστέρησης*.

Στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν κατασκευαστικά υλικά, που να έχουν αυτές τις ιδιότητες. Χρησιμοποιούνται όμως οι παραπάνω υποθέσεις σαν βάση για τη μελέτη των συνήθων κατασκευών, διότι απλοποιούν και διευκολύνουν σημαντικά τους υπολογισμούς. Από την εμπειρία που έχει αποκτηθεί αποδεικνύεται ότι οι υποθέσεις αυτές, γνωστές ως *βασικές υποθέσεις*, περιγράφουν με επαρκή ασφάλεια τη γενική συμπεριφορά μεγάλου αριθμού υλικών που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές.

Αβεβαιότητες

Οι διαστάσεις των φορέων των υλικών καθορίζονται έτσι ώστε να μπορούν να φέρουν με ασφάλεια όλα τα φορτία που προβλέπεται να τα καταπονήσουν. Ο καθορισμός αυτός γίνεται πάντοτε σε συνάρτηση με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Η δυσμενέστερη φόρτιση που προβλέπεται να καταπονήσει μια κατασκευή πρέπει για λόγους ασφαλείας να είναι αρκετά μικρότερη από τη φόρτιση που προκαλεί την καταστροφή της. Η διαφορά αυτών των δύο φορτίσεων αποτελεί το *περιθώριο ασφαλείας* που υφίσταται κατά τη λειτουργία της κατασκευής και που επιβάλλεται για να καλύψει τις αβεβαιότητες που παρεμβαίνουν σε όλες τις

διαδοχικές φάσεις που οδηγούν από τη μελέτη στην υλοποίηση και στην εκμετάλλευσή της.

Οι κυριότεροι λόγοι που επιβάλλουν την ύπαρξη αυτού του περιθωρίου είναι οι αναφερόμενοι συνοπτικά στη συνέχεια:

1. Οι καταπονήσεις στις οποίες υπόκεινται οι κατασκευές λ.χ. από σεισμική φόρτιση, ανεμοπίεση κ.ά. δεν είναι πάντοτε γνωστές με ακρίβεια. Γι' αυτό υπάρχει αβεβαιότητα ως προς τις δυνάμεις που εισάγονται στους υπολογισμούς από άποψη μεγίστων τιμών (ενδεχόμενα οι πραγματικές δυνάμεις να υπερβούν τις προβλεπόμενες), του τρόπου ενεργείας τους (στατική ή δυναμική φόρτιση), και της θέσης ή διεύθυνσης επιβολής τους (σημεία εφαρμογής και φορά).

2. Ο υπολογισμός της έντασης με επαρκή ακρίβεια, και ιδιαίτερα στις σύνθετες κατασκευές, είναι συχνά πολύ δυσχερές ή και ασύμφορος όταν λ.χ. απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα. Ανατρέχουμε τότε σε απλοποιητικές υποθέσεις που παριστάνουν ατελώς την πραγματικότητα, οι οποίες οδηγούν σε επίλυση κατά προσέγγιση. Υπάρχει τότε αβεβαιότητα στα εξαγόμενα αποτελέσματα, αν και κατά πόσον αυτά προσεγγίζουν την πραγματική ένταση της κατασκευής. Ανεξάρτητα όμως από τα παραπάνω, οι βασικές υποθέσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως εισάγουν στους υπολογισμούς το στοιχείο της αβεβαιότητας.

3. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά όλων των κατασκευαστικών υλικών παρουσιάζουν διασπορά από την άποψη μεγέθους, που οφείλεται στην εσωτερική ανομοιογένεια των υλικών. Γι' αυτό οι χαρακτηριστικές τιμές των αντοχών που εισάγονται στους υπολογισμούς και που διαμορφώνονται από εργαστηριακές μετρήσεις σε περιορισμένο αριθμό δοκιμών παρουσιάζουν αβεβαιότητα ως προς το πραγματικό τους μέγεθος. Στο υλικά που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή ενός έργου, η διασπορά των αντοχών, συνεπώς και η αβεβαιότητα, είναι μεγαλύτερη, διότι η ποικιλία της ανομοιογένειας που εμφανίζεται στο έργο, που έχει πολλαπλάσιο όγκο από ότι τα εργαστηριακά δοκίμια, είναι σημαντικότερη. Ως παράδειγμα αναφέρεται η σχετική διασπορά που παρουσιάζεται στις αντοχές σε εφελκυσμό του χάλυβα ή σε θλίψη του σκυροδέματος. Υπάρχει λοιπόν αβεβαιότητα ως προς τα πραγματικά μηχανικά χαρακτηριστικά των κατασκευαστικών υλικών. Η πιθανότητα να αποκτήσουμε πειραματικά αποτελέσματα τα οποία να προσεγγίζουν τις αντοχές που επιτυγχάνονται στα υλικά, αυξάνει μαζί με τον αριθμό των εργαστηριακών δοκιμών και την ομοιογένεια του υλικού. Η αξιοποίηση των εργαστηριακών μετρήσεων γίνεται τότε με χάραξη του διαγράμματος της σχετικής συχνότητας των πραγματοποιούμενων αντοχών (καμπύλες διασποράς).

4. Για ανάλογο λόγο η αντοχή μιας κατασκευής αυξάνει όταν το δυσμενέστερα καταπονούμενο τμήμα της μειώνεται σε όγκο, διότι περιορίζεται έτσι η πιθανότητα παρουσίας σε αυτό το τμήμα, υλικού με μειωμένη αντοχή. Συνεπώς η αντοχή των κατασκευών εξαρτάται και από τον τρόπο που καταπονούνται. Ως παράδειγμα αναφέρεται η καταπόνηση δύο ομοίων ράβδων από το ίδιο ψαθυρό υλικό, σε εφελκυσμό η μία και σε κάμψη η άλλη. Η τάση που προκαλεί τη θραύση του υλικού είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη στην καμπτόμενη ράβδο, παρόλο που είναι κατασκευασμένη από το ίδιο υλικό.

5. Κατά την υλοποίηση των εφαρμογών είναι πιθανό να σημειωθούν μικρές παραλείψεις ή αθέλητες μικροκακοτεχνίες που να οφείλονται, είτε σε ανεπαρκή επίβλεψη ή έλεγχο, είτε στις δυσμενέστερες συνθήκες που επικρατούν στον χώρο των κατασκευών (εργοστάσιο ή εργοτάξιο) σε σχέση με το εργαστήριο. Ως παραδείγματα αναφέρονται, η ανακριβής τοποθέτηση ή μετατόπιση του σιδηροπλισμού πριν από τη διάστρωση του σκυροδέματος, η ανακριβής διαμόρφωση στοιχείων μηχανών ως προς τις διαστάσεις, η μηχανική ή θερμική επεξεργασία κλπ. Άλλο παράδειγμα είναι η

περίπτωση ανακριβούς συναρμολόγησης των διαφόρων στοιχείων κατασκευής, που έχει σαν αποτέλεσμα την εκδήλωση σ' αυτή πρόσθετης, μη προβλεπόμενης έντασης.

6. Κατά τη λειτουργία των κατασκευών υφίσταται πάντοτε πιθανότητα απρόβλεπτης αλλοίωσης των υλικών από τα οποία συνίστανται, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής τους με την πάροδο του χρόνου, όπως λ.χ. εξαιτίας διάβρωσης, χημικών αλλοιώσεων, φθοράς, ανεπαρκούς συντήρησης, επίδρασης θερμοκρασίας κλπ.

Εύρος ασφαλείας

Όλες οι παραπάνω αβεβαιότητες πρέπει να αντιμετωπίζονται με ιδιαίτερη προσοχή, για να είναι ασφαλείς οι κατασκευές. Επιβάλλεται λοιπόν πάντοτε η ύπαρξη περιθωρίου ασφαλείας, μεταξύ της δυσμενέστερης φόρτισης που προβλέπεται να καταπονήσει κάθε κατασκευή και της φόρτισης που προκαλεί την καταστροφή της.

Το εύρος αυτού του περιθωρίου είναι συνάρτηση όλων των πιθανών αβεβαιοτήτων αλλά και των προσωπικών παρατηρήσεων, της εμπειρίας και της ικανότητας του μελετητή της κατασκευής. Ο μελετητής μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο τολμηρός, καθορίζοντας ανάλογα μικρότερο ή μεγαλύτερο εύρος ασφαλείας, μετά φυσικά και από τη συνεκτίμηση των συνεπειών ενδεχόμενης καταστροφής της κατασκευής. Είναι λ.χ. δυνατό να προκληθούν ζημιές με ή χωρίς θύματα, με οικονομικές ή άλλες επιπτώσεις με διάφορη βαρύτητα (π.χ. καθυστέρηση παραγωγής, διακοπή συγκοινωνίας κτλ.). Ο μελετητής μπορεί επίσης να εκτιμήσει χωριστά από άποψη ασφαλείας τα διάφορα τμήματα της κατασκευής, όταν η αστοχία καθενός από τα τμήματα αυτά έχει διαφορετικής σημασίας συνέπειες στο σύνολο της κατασκευής.

Ένας άλλος παράγοντας που υπεισέρχεται στην εκτίμηση του εύρους ασφαλείας είναι η διάρκεια που προβλέπεται να λειτουργήσει η κατασκευή. Στις προσωρινές κατασκευές επιλέγεται συνήθως μικρότερο εύρος από ότι στις μόνιμες.

Από τα προηγούμενα μπορεί να συμπεράνουμε ότι το εύρος ασφαλείας, αποτελεί το καταστάλαγμα της προόδου της Μηχανικής, της πείρας και της κρίσης, υπόκειται συνεπώς σε αναθεώρηση με την πάροδο του χρόνου.

Θα προσθέσουμε εδώ ότι η καταστροφή μιας κατασκευής είναι ενδεχόμενο να σημειωθεί είτε με μορφή θραύσης μετά από εξάντληση της αντοχής της είτε με μορφή κατάρρευσης ή ακόμη και σημαντικής παραμόρφωσης που οδηγεί σε αχρήστευση της λειτουργίας της. Στα επόμενα, με τη λέξη **αστοχία** θα καλύπτονται όλα τα παραπάνω είδη καταστροφής.

Συντελεστές ασφαλείας

Από την ανάλυση που έγινε οδηγούμεθα στην εισαγωγή της έννοιας του συντελεστή ασφαλείας των εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιούνται υλικά. Εξ ορισμού, οποιαδήποτε εφαρμογή παρουσιάζει συντελεστή ασφαλείας η έναντι αστοχίας, όταν οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων που φέρονται απ' αυτή κατά τη λειτουργία της, πολλαπλασιαζόμενες επί η ($\eta > 1$) οδηγούν στη φόρτιση που προκαλεί αστοχία. Συνεπώς η εφαρμογή θεωρείται ασφαλής, όταν η προβλεπόμενη μέγιστη φόρτισή της παραμένει κάτω από υποπολλαπλάσιο της φόρτισης αστοχίας.

Η εκτίμηση του συντελεστού ασφαλείας θα μπορούσε να γίνει με απ' ευθείας δοκιμές πάνω στην ίδια την κατασκευή, που να οδηγούν σε αστοχία. Αυτό είναι εφικτό σε κατασκευές μικρού σχετικά κόστους, όπως π.χ. σε μεμονωμένα στοιχεία

κατασκευών, εξαρτήματα μηχανών κ.ά.. Είναι όμως αντιθέτως αδύνατο ή εξαιρετικά δαπανηρό εν γένει να ακολουθηθεί η ίδια πορεία σε σημαντικότερες κατασκευές, όπως π.χ. σε λέβητες, γέφυρες, φράγματα κλπ.

Ορισμός του συντελεστού ασφαλείας:

Κατασκευή παρουσιάζει συντελεστή ασφαλείας η έναντι αστοχίας, όταν οι μέγιστες τιμές των αναπτυσσόμενων σ' αυτή **τάσεων λειτουργίας** πολλαπλασιαζόμενες επί η ($\eta > 1$), παρέχουν τάσεις που προκαλούν αστοχία του υλικού. Η ασφάλεια επιτυγχάνεται τώρα όταν οι τάσεις λειτουργίας στην κατασκευή τηρούνται κάτω από υποπολλαπλάσιο των τάσεων αστοχίας.

Το πλεονέκτημα του τελευταίου ορισμού του συντελεστού ασφαλείας που αναφέρεται στις εσωτερικές τάσεις, έναντι του προηγούμενου, είναι ότι για να προσδιοριστεί η επικίνδυνη ένταση μιας κατασκευής, αρκούν τα στοιχεία που εξάγονται από απλά συνήθως πειράματα σε δείγματα από το υλικό της κατασκευής (τάσεις αστοχίας).

Η έννοια της ασφάλειας των κατασκευών είναι αρκετά πολύπλοκη. Θα έπρεπε για κάθε μορφή αβεβαιότητας να καθορίσουμε ξεχωριστό συντελεστή ασφαλείας, που να βασίζεται στους Νόμους των Πιθανοτήτων. Εδώ προτείνεται ολικός συντελεστής ασφαλείας, που καλύπτει το σύνολο των αβεβαιοτήτων που επηρεάζουν την ασφάλεια της κατασκευής και ο οποίος καθορίζεται με βάση την αβεβαιότητα των φορτίων λειτουργίας και μόνο, ενώ αγνοείται η επιρροή όλων των άλλων αβεβαιοτήτων. Οι ατέλειες του συντελεστού ασφαλείας που ορίζεται με αυτό τον τρόπο, είτε αυτός αναφέρεται στα εξωτερικό φορτίο, είτε στις αναπτυσσόμενες τάσεις, είναι προφανείς.

Ο συντελεστής ασφαλείας που αναφέρεται στις τάσεις, κρίνεται ειδικότερα ικανοποιητικός σε κατασκευές των οποίων το υλικό συμπεριφέρεται σαν ψαθυρό, διότι σε αυτά τα υλικά δεχόμαστε πρακτικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση. Αντίθετα σε κατασκευές που τα υλικά τους συμπεριφέρονται σαν όλκιμα, ο συντελεστής ασφαλείας δεν θεωρείται ικανοποιητικός.

Τάσεις-Ανηγμένες Παραμορφώσεις

Εξετάζουμε ομοιογενή πρισματική ράβδο με σταθερή διατομή, που υφίσταται αξονικό φορτίο εφελκυσμού P , προοδευτικά αυξανόμενο. Το φορτίο αυτό, ομοιόμορφα διανεμημένο στα άκρα της ράβδου, διέρχεται από το κέντρο βάρους της διατομής (Σχήμα 13).

Τυχαία επίπεδη διατομή F_0 , κάθετη στον άξονα της ράβδου πριν από τη φόρτιση, παραμένει επίπεδη και κάθετη στον άξονα και μετά την επιβολή του φορτίου, διότι υπάρχει συμμετρία φόρτισης και δοκιμίου. Άρα όλες οι διαμήκεις ίνες της ράβδου υπόκεινται στην ίδια παραμόρφωση.

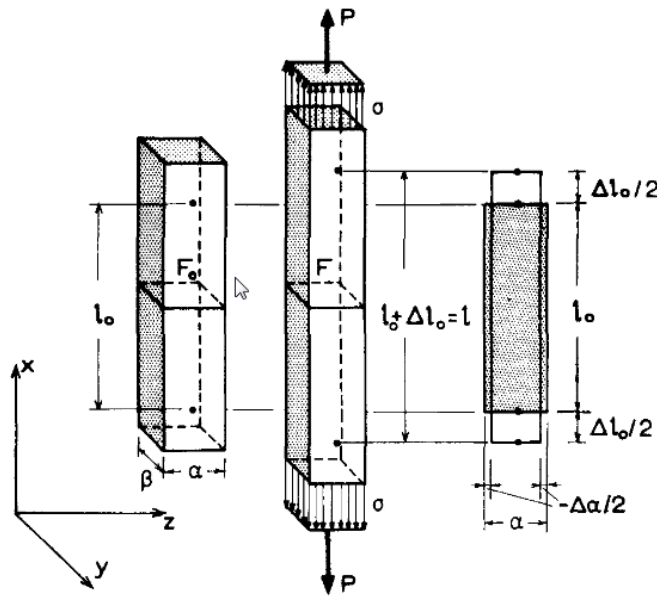
Τα προηγούμενα ισχύουν ανεξάρτητα αν το υλικό υπακούει στον νόμο του Hooke ή αν οι παραμορφώσεις είναι ελαστικές ή πλαστικές. Απαραίτητη όμως προϋπόθεση είναι, να παραμένει σταθερή η διατομή της ράβδου σ' όλο της το μήκος κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Θεωρούμε τυχαία κάθετη τομή F που διαχωρίζει νοερά τη ράβδο. Τότε για την ισορροπία του ενός τμήματός της, πρέπει οι εσωτερικές δυνάμεις που διαβιβάζονται από το ένα τμήμα στο άλλο, να εξισορροπούν το εξωτερικό φορτίο P το εφαρμοσμένο στο ελεύθερο άκρο της ράβδου.

Επειδή όλες οι ίνες υφίστανται την ίδια μήκυνση, η διανομή των εσωτερικών δυνάμεων πάνω στην κάθετη διατομή θα είναι ομοιόμορφη. Αν καλέσουμε σ την ορθή δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας, τότε σύμφωνα με τα προηγούμενα πρέπει. $\sigma \cdot F_0 = P$, από την οποία

$$\sigma = \frac{P}{F_0}$$

Το πηλίκο αυτό ονομάζεται **τάση** και εκφράζεται συνήθως σε N/mm^2 ή kN/cm^2 . Σημειώνεται ότι το βάρος της ράβδου θεωρείται εδώ αμελητέο συγκρινόμενο με το μέγεθος του φορτίου P .



Σχήμα 13: Ομοιογενής πρισματική ράβδος με σταθερή διατομή, που υφίσταται αξονικό εφελκυστικό φορτίο P , προοδευτικά αυξανόμενο.

Αν καλέσουμε $\Delta \ell$ την παραμόρφωση που υφίσταται τμήμα της ράβδου με αρχικό μήκος ℓ_0 για αξονικό φορτίο P , τότε η παραμόρφωση η ανηγμένη στη μονάδα του μήκους δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}$$

Το μέγεθος αυτό ονομάζεται **ανηγμένη παραμόρφωση**, είναι αδιάστατο και εκφράζεται συνήθως επί τοις εκατό (%).

Το φορτίο P μπορεί να είναι είτε εφελκυστικό, είτε θλιπτικό. Για διάκριση, τα μεγέθη σ και ε προσημαίνονται με το $+$ ή το $-$, όταν το φορτίο που τα προκαλεί είναι αντίστοιχα εφελκυστικό ή θλιπτικό. Γενικότερα, οι θετικές ανηγμένες παραμορφώσεις αντιστοιχούν σε επιμήκυνση και οι αρνητικές σε βράχυνση.

Διαγράμματα Τάσεων-Ανηγμένων Παραμορφώσεων (σ-ε)

Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στις συνήθεις κατασκευές που λειτουργούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και καταπονούνται με φορτία ή παραμορφώσεις που επιβάλλονται με μικρές ταχύτητες, προσδιορίζονται με απλές δοκιμές εφελκυσμού ή θλίψης που ονομάζονται *στατικές*. Στις δοκιμές αυτές η αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων, από τη μηδενική μέχρι την τελική τους τιμή είναι βραδεία και βαθμιαία, έτσι ώστε το φαινόμενο της φόρτισης να κατανέμεται σε στιγμιαίες καταστάσεις ισορροπίας. Με αυτό τον τρόπο φόρτισης αποφεύγεται, κατά το δυνατό, η εκδήλωση δυναμικών φαινομένων.

Οι μέθοδοι εκτέλεσης των διαφόρων δοκιμών προδιαγράφονται κατά κανόνα από τους Κανονισμούς κάθε χώρας. Γι' αυτό τα αποτελέσματα που εξάγονται κατά τον εργαστηριακό έλεγχο ενός υλικού, μπορούν να συγκριθούν με τις απαιτήσεις συγκεκριμένου Κανονισμού, μόνο όταν κατά τις δοκιμές τηρούνται επακριβώς οι σχετικές προδιαγραφές.

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων εφελκυσμού ή θλίψης σε μηχανές δοκιμών, καταγράφονται συνήθως με αυτόματη διάταξη, οι τιμές του φορτίου P και της αντίστοιχης παραμόρφωσης $\Delta\ell$. Όταν δεν διατίθεται πανομοιότυπη διάταξη τα μεγέθη αυτά αναζητούνται σε κατάλληλα επιλεγόμενες βαθμίδες φόρτισης, με τη βοήθεια βοηθητικών οργάνων μέτρησης (π.χ. παραμορφωσιμέτρων-gauge strain). Τα P και $\Delta\ell$, μετατρέπονται σε τάσεις ($\sigma=P/F_0$) και ανηγμένες παραμορφώσεις ($\varepsilon=\Delta\ell/\ell_0$), με αναγωγή τους αντίστοιχα στην αρχική διατομή F_0 και το αρχικό μήκος ℓ_0 του δοκιμίου, στο οποίο αναφέρεται η μέτρηση των παραμορφώσεων.

Για τη διευκόλυνση της αξιολόγησης των πειραματικών αποτελεσμάτων, χαράσσεται το διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Στον άξονα των τεταγμένων αναφέρονται οι τάσεις σ και στον άξονα των τετμημένων, οι ανηγμένες παραμορφώσεις ε .

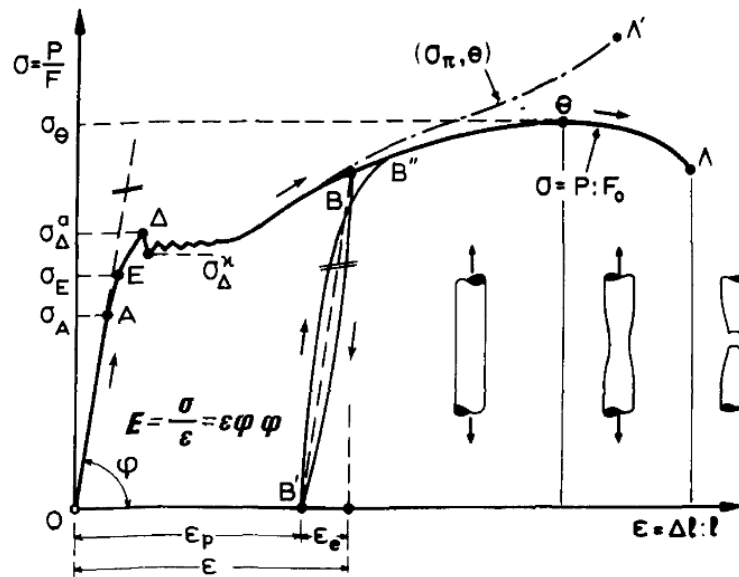
Οι ιδιότητες των υλικών που προσδιορίζονται πειραματικά από το διάγραμμα σ - ε , αναφέρονται συνήθως ως **μηχανικές ιδιότητες**. Οι ιδιότητες αυτές παρέχουν ένα μέτρο της ικανότητας του υλικού, αφ' ενός για αντίσταση σε καταπόνηση που οφείλεται στην επιβολή δύναμης ή παραμόρφωσης και αφ' ετέρου για απορρόφηση ενέργειας.

Στην περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών που ακολουθεί, διαχωρίζονται τα υλικά σε δύο βασικές κατηγορίες, στα **όλκιμα** και στα **ψαθυρά**.

Όλκιμα υλικά-Δοκιμή εφελκυσμού

Τα υλικά που παρουσιάζουν σημαντικές παραμορφώσεις μέχρι τη θραύση, ονομάζονται **όλκιμα**. Στην κατηγορία αυτή υπάγεται ο κοινός δομικός χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός κ.α.

Στη συνέχεια διερευνάται το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σ - ε όλκιμου υλικού, που έχει τη χαρακτηριστική μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 14. Το διάγραμμα αυτό έχει κατασκευαστεί με στοιχεία μετρήσεων που λήφθηκαν κατά το πείραμα εφελκυσμού ράβδου (δοκιμίου) από κοινό χάλυβα.



Σχήμα 14: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σ-ε όλκιμου υλικού.

Στο αρχικό τμήμα OA του διαγράμματος, παρατηρείται ότι η τάση μεταβάλλεται ανάλογα με την παραμόρφωση. Στην περιοχή αυτή ισχύει ο νόμος του Hooke και η εξίσωση της ευθείας OA δίνεται από τη σχέση

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \text{ όπου } E = \varepsilon \phi \phi$$

Η εφαπτομένη της κλίσης ϕ της OA, ορίζει τον συντελεστή αναλογίας E που συνδέει τα σ και ε . Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται **μέτρο ελαστικότητας** E του υλικού ή μέτρο Young (Young modulus) και παίρνει τιμές μεγαλύτερες όσο το υλικό είναι λιγότερο παραμορφώσιμο. Αν αφαιρέσουμε το φορτίο πριν αυτό υπερβεί την οριακή τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο A του διαγράμματος, τότε μηδενίζονται οι παραμορφώσεις και η ράβδος επανέρχεται στις αρχικές της διαστάσεις. Η συμπεριφορά αυτή της ράβδου ονομάζεται γραμμικώς ελαστική και η τάση στο σημείο A ονομάζεται **τάση ορίου αναλογίας** (σ_A) του υλικού.

Όταν η τάση υπερβεί την σ_A το διάγραμμα καμπυλώνεται και δεν υπάρχει πλέον αναλογία μεταξύ των σ και ε . Μέχρις όμως το σημείο E, το υλικό εξακολουθεί να συμπεριφέρεται ελαστικά, όπως διαπιστώνεται αποφορτίζοντας το δοκίμιο. Η τάση που αντιστοιχεί στο σημείο E, ονομάζεται **τάση ορίου ελαστικότητας** (σ_E) του υλικού.

Για τάσεις μεγαλύτερες της σ_E , το υλικό δεν είναι πλέον ελαστικό. Μετά την αποφόρτιση της ράβδου παραμένουν μόνιμες παραμορφώσεις, αφού αποδοθούν οι ελαστικές παραμορφώσεις. Αν συνεχίσουμε αυξάνοντας τη φόρτιση φθάνουμε σε χαρακτηριστική τιμή P_Δ του φορτίου, για την οποία σημειώνεται συνεχής και σημαντική παραμόρφωση της ράβδου παρ' όλο που το φορτίο διατηρείται περίπου σταθερό. Το φαινόμενο αυτό, που εκφράζει την αλλοίωση της εσωτερικής δομής του υλικού, ονομάζεται **διαρροή** και η τάση στο σημείο Δ ονομάζεται **τάση ορίου διαρροής** (σ_Δ) του υλικού. Η περιοχή της διαρροής εκτείνεται στο τμήμα του διαγράμματος που εμφανίζει σχεδόν οριζόντια μέση γραμμή. Η ασυνεχής μορφή του διαγράμματος σε αυτή την περιοχή παρέχει δύο χαρακτηριστικές τιμές της τάσης που

αντιστοιχούν στην ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή της τάσης κατά τη διαρροή. Έτσι διακρίνουμε τάση **κάτω ορίου** και τάση **άνω ορίου** διαρροής.

Σημειώνεται ότι οι τάσεις διαρροής που μετρούνται κατά το πείραμα επηρεάζονται από τη συνολική δυσκαμψία της μηχανής δοκιμής. Το άνω όριο αυξάνει και το κάτω μειώνεται όσο μεγαλώνει η δυσκαμψία της, ενώ η διαφορά μεταξύ αυτών των ορίων εκμηδενίζεται σε μηχανές μικρής δυσκαμψίας.

Για παραπέρα αύξηση της φόρτισης της ράβδου, η παραμόρφωση αυξάνει μαζί με την τάση μέχρι το σημείο Θ, στο οποίο η τάση παρουσιάζει μέγιστη τιμή. Η περιοχή αυτή του διαγράμματος ονομάζεται περιοχή **κράτυνσης**. Η μέγιστη τάση που μπορεί να αναλάβει η ράβδος ονομάζεται τάση **θραύσης** (σ_θ). Η ράβδος δεν θραύεται γι' αυτή την τάση (σημείο Θ του διαγράμματος) αλλά για την τάση που αντιστοιχεί στο σημείο Λ του διαγράμματος (για μικρότερο φορτίο).

Στο διάγραμμα P-Δλ διακρίνονται τα φορτία αναλογίας, διαρροής θραύσης και λοιπά στοιχεία, αντίστοιχα με τα αναφερθέντα κατά τη διερεύνηση του διαγράμματος σ-ε.

Με την έναρξη της φόρτισης της ράβδου, η διαμήκης παραμόρφωση συνοδεύεται από εγκάρσια βράχυνση (Σχήμα 15). Η βράχυνση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή μείωση της διατομής της ράβδου κατά την εξέλιξη της φόρτισης. Στο διάγραμμα σ-ε (Σχήμα 14) όμως, η τάση σ προέκυψε από το πηλίκο του εκάστοτε φορτίου δια της αρχικής διατομής και όχι της πραγματικής και η ανηγμένη παραμόρφωση ε, από το πηλίκο της συνολικής παραμόρφωσης δια του αρχικού μήκους μέτρησης και όχι του εκάστοτε. Τα μεγέθη που εξάγονται με αυτό τον τρόπο καθώς και τα σχετικά διαγράμματα ονομάζονται **συμβατικά**. Η κατασκευή του διαγράμματος σ-ε όπως περιγράψαμε ακολουθείται συνήθως επειδή είναι απλούστερη. Έτσι οι τάσεις διαρροής, θραύσης κλπ, χωρίς ιδιαίτερο χαρακτηρισμό, αναφέρονται κατά κανόνα στην αρχική διατομή της ράβδου εφόσον δεν δηλώνεται το αντίθετο.

Όταν όμως απαιτείται ο υπολογισμός της **πραγματικής τάσης** σ_π και της **πραγματικής ανηγμένης παραμόρφωσης** ε, τότε το φορτίο P πρέπει να διαιρείται κάθε φορά με την πραγματική διατομή F_π της ράβδου, οπότε

$$\sigma = \frac{P}{F_\pi}$$

και η παραμόρφωση $\Delta\ell_i$ με το πραγματικό μήκος αναφοράς ℓ_i που αντιστοιχεί σε κάθε βαθμίδα φόρτισης,

$$\Delta e = \frac{\Delta\ell_i}{\ell_i}$$

Για πολύ μικρές μεταβολές έχουμε:

$$de = \frac{d\ell_i}{\ell_i}$$

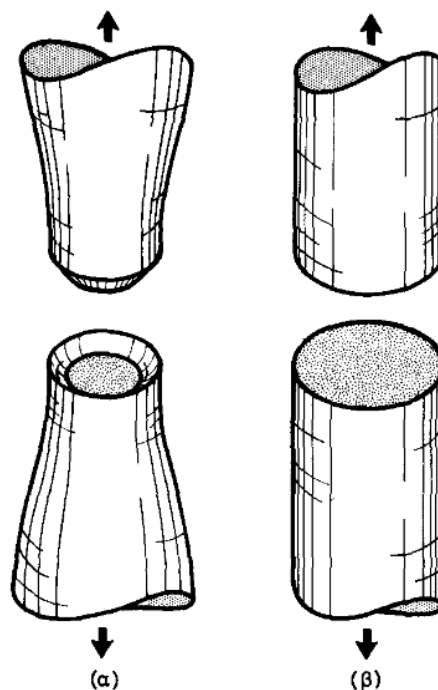
Η πραγματική ανηγμένη παραμόρφωση e_i , για μεταβολή του μήκους από ℓ_0 έως ℓ ισούται τότε με

$$e = \int de = \int_{\ell_o}^{\ell} \frac{d\ell_i}{\ell_i} = \ln\left(\frac{\ell}{\ell_o}\right)$$

Η σχέση που συνδέει τις συμβατικές ε με τις πραγματικές e ανηγμένες παραμορφώσεις προκύπτει ως ($e < \varepsilon$):

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

Μετά το σημείο Θ συνεχίζεται η μήκυνση της ράβδου με παράλληλη μείωση του φορτίου. Ταυτόχρονα σε κάποια θέση της ράβδου, την ασθενέστερη, παρουσιάζεται εντονότερη και συνεχώς αυξανόμενη τοπικά συστολή και μήκυνση. Στη θέση αυτή σχηματίζεται ο **λαιμός** θραύσης (Σχήμα 15), όπου τελικά επέρχεται η λύση της συνέχειας του υλικού, για τάση που αντιστοιχεί στη θέση Λ του διαγράμματος. Η πτώση της τάσης στο τμήμα ΘΛ είναι φαινομενική, διότι το διάγραμμα αναφέρεται σε συμβατικές τάσεις. Στην πραγματικότητα οι τάσεις εδώ είναι πολύ μεγαλύτερες διότι το φορτίο, παρόλο που είναι μικρότερο αυτού που αντιστοιχεί στο σημείο Θ, διαιρούμενο με διατομή που μειώνεται ταχύτερα από την πτώση του φορτίου, παρέχει πραγματική τάση συνεχώς αυξανόμενη (Σχήμα 14) μέχρι τη θέση Λ' του διαγράμματος.



Σχήμα 15: Σχηματισμός λαιμού θραύσης.

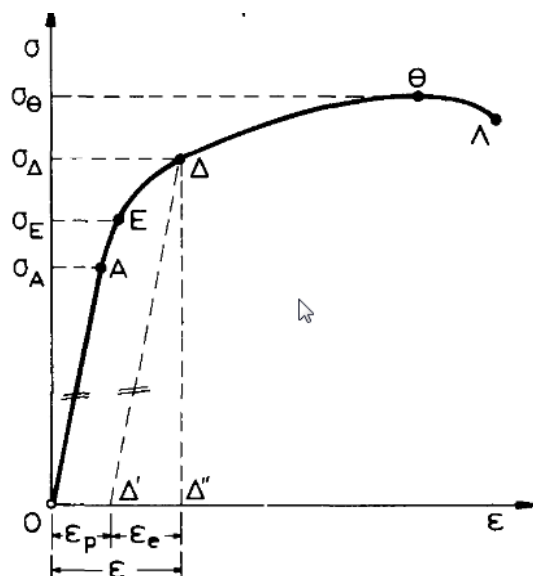
Όταν κατά το πείραμα διακοπεί η φόρτιση λ.χ. στο φορτίο που αντιστοιχεί στο σημείο Β (Σχήμα 14) και αποφορτιστεί βραδέως η ράβδος, τότε το διάγραμμα αποφόρτισης ακολουθεί τη μορφή της καμπύλης ΒΒ'. Η ράβδος βραχύνεται κατά ε_e σαν ο χάλυβας να είχε ελαστική συμπεριφορά μέχρι το σημείο Β, ενώ η ευθεία που συνδέει τα σημεία Β και Β' είναι περίπου παράλληλη με την ευθεία αναλογίας ΟΑ. Η διαμήκης ανηγμένη παραμόρφωση e της ράβδου πριν από την αποφόρτιση, ισούται

λοιπόν με το άθροισμα της αποδιδόμενης κατά την αποφόρτιση ελαστικής παραμόρφωσης $\epsilon_e = \sigma/E$ και της παραμένουσας πλαστικής ϵ_p . Αν μετά σύντομο χρονικό διάστημα (μετά λίγα λεπτά) επαναφορτιστεί η ράβδος, το διάγραμμα ακολουθεί την καμπύλη B'B" και στη συνέχεια την B"ΘΛ, σαν να μην είχε διακοπεί η δοκιμή φόρτισης με την αποφόρτιση. Όταν όμως η ράβδος επαναφορτιστεί μετά μερικές μέρες από την αποφόρτιση, η καμπύλη επαναφόρτισης υπέρκειται συνήθως της B"ΘΛ.

Ο βρόχος που σχηματίζεται από τις κάμπιες αποφόρτισης-επαναφόρτισης ονομάζεται βρόχος υστέρησης, ενώ το περικλειόμενο εμβαδό παρέχει την αναλωθείσα ενέργεια.

Από τα προηγούμενα συνάγεται ότι ο χάλυβας αν επαναφορτιστεί, μετά την αποφόρτιση του από φορτίο που αντιστοιχεί στην πλαστική περιοχή, τότε παρουσιάζει και πάλι ελαστική συμπεριφορά κατά το πρώτο στάδιο της επαναφόρτισης, με μεγαλύτερη περιοχή αναλογίας κατά κανόνα. Συνεπώς ο κοινός χάλυβας συμπεριφέρεται πλέον σαν διαφορετικό υλικό.

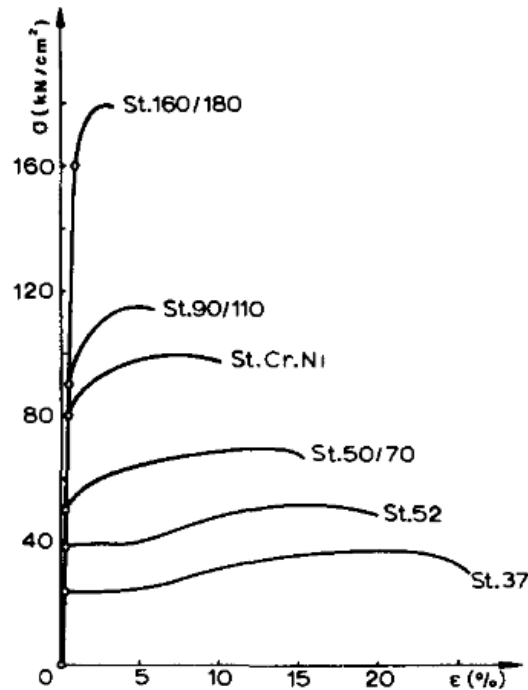
Άλλα όλκιμα υλικά όπως ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο χάλυβας ανώτερης αντοχής κ.ά. παρουσιάζουν διαγράμματα εφελκυσμού σ-ε χωρίς τη χαρακτηριστική περιοχή διαρροής που διαπιστώνεται στον κοινό χάλυβα (Σχήμα 16).



Σχήμα 16: Διαγράμματα εφελκυσμού σ-ε χωρίς τη χαρακτηριστική περιοχή διαρροής.

Σε αυτά τα υλικά καθορίζεται **συμβατικό όριο διαρροής**, το οποίο αντιστοιχεί σε τάση που παρέχει μετά την αποφόρτιση μόνιμη ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_p . Το μέγεθος της ϵ_p ορίζεται κατά περίπτωση από τους Κανονισμούς. Στις συνήθειες εφαρμογές καθορίζεται $\epsilon_p = 0,2\%$, οπότε η αντίστοιχη τάση και παραμόρφωση συμβολίζονται, $\sigma_{0,2}$ και $\epsilon_{0,2}$. Πολλές φορές για να αποφύγουμε τις δυσχέρειες που παρουσιάζονται στον προσδιορισμό του ορίου ελαστικότητας, καθορίζουμε με ανάλογο τρόπο ένα συμβατικό όριο ελαστικότητας, που αντιστοιχεί σε μόνιμη παραμόρφωση $0,01\%$, οπότε έχουμε αντίστοιχα με τα προηγούμενα $\sigma_{0,01}$ και $\epsilon_{0,01}$.

Στο Σχήμα 17 φαίνονται συγκριτικά με την ίδια κλίμακα, διαγράμματα σ - ϵ σε εφελκυσμό διαφόρων τύπων χαλύβων. Παρατηρείται χαρακτηριστικά ότι η αύξηση της αντοχής συμβαδίζει εν γένει με τη μείωση της ολκιμότητας των χαλύβων.



Σχήμα 17: Διαγράμματα εφελκυσμού σ - ϵ διαφόρων τύπων χαλύβων.

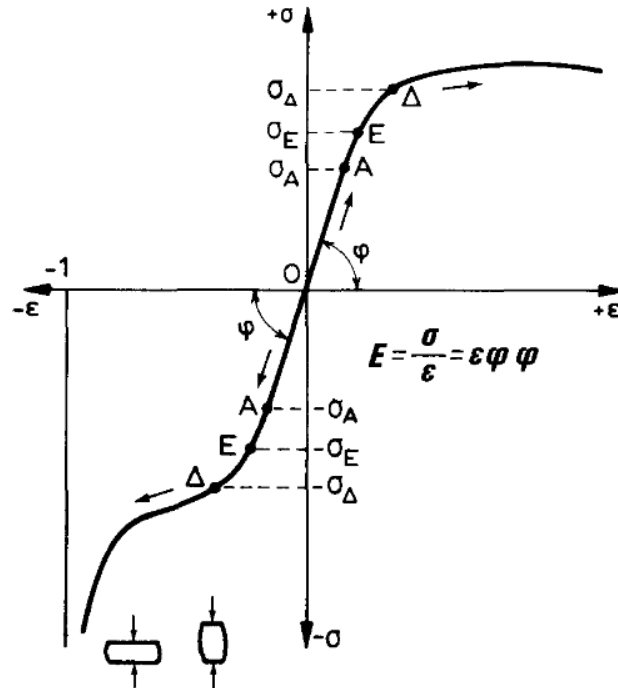
Δοκιμή θλίψης

Από τον έλεγχο όλκιμων υλικών σε θλίψη, προκύπτουν διαγράμματα σ - ϵ πρακτικώς όμοια μ' αυτά που λαμβάνονται κατά τη δοκιμή εφελκυσμού των ίδιων υλικών, όταν οι παραμορφώσεις είναι σχετικά μικρές (Σχήμα 18). Αυτό σημαίνει ότι οι τάσεις ορίων αναλογίας, ελαστικότητας και διαρροής καθώς και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη, έχουν πρακτικώς τις ίδιες τιμές όπως και στον εφελκυσμό.

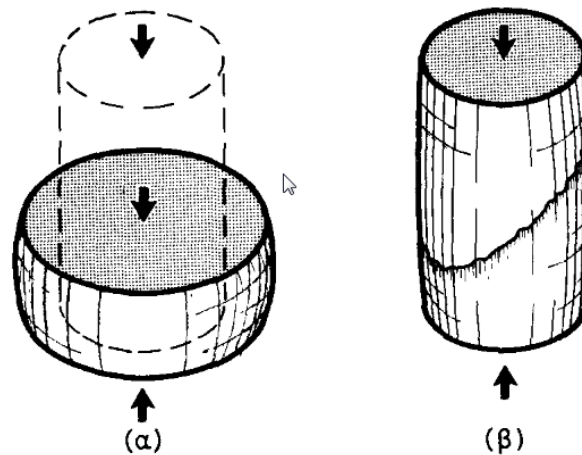
Επειδή τα όλκιμα υλικά δεν θραύονται σε θλίψη αλλά συμπιέζονται (Σχήμα 19α), δεν παρέχεται τάση θραύσης σε θλίψη αυτών των υλικών. Το διάγραμμα σ - ϵ σε θλίψη τείνει ασυμπτωτικά στο άπειρο (Σχήμα 18) για παραμόρφωση $\epsilon = \Delta\ell/\ell = -1$, αφού η βράχυνση του δοκιμίου δεν μπορεί προφανώς να υπερβεί το αρχικό ύψος του.

Τα πορίσματα αυτά ισχύουν με την προϋπόθεση ότι το ύψος του δοκιμίου θλίψης είναι 2-4 φορές μεγαλύτερο από την εγκάρσια διάσταση του. Ο περιορισμός αυτός τίθεται για δύο λόγους:

- για τον αποκλεισμό του ενδεχόμενου να σημειωθεί λυγισμός της ράβδου, λόγω μεγάλου μήκους σε σχέση με τις εγκάρσιες διαστάσεις (άνω όριο)
- για να υπάρχει περί το μέσο του ύψους του δοκιμίου επαρκής περιοχή που να καταπονείται κατά προσέγγιση μονοαξονικά, ελεύθερη πρακτικά από την επίδραση της σύνθετης έντασης που αναπτύσσεται κοντά στις επιφάνειες έδρασης εξαιτίας των δυνάμεων τριβής που εκδηλώνονται στις επιφάνειες επιβολής του φορτίου (κάτω όριο). Σ' αυτήν την τριβή που αναπτύσσεται κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης, οφείλεται η βαρελοειδής μορφή των θλιβόμενων δοκιμίων (Σχήμα 19).



Σχήμα 18: Δοκιμή εφελκυσμού και θλίψης όλκιμων υλικών.



Σχήμα 19: Βαρελοειδής μορφή θλιβόμενων δοκιμίων.

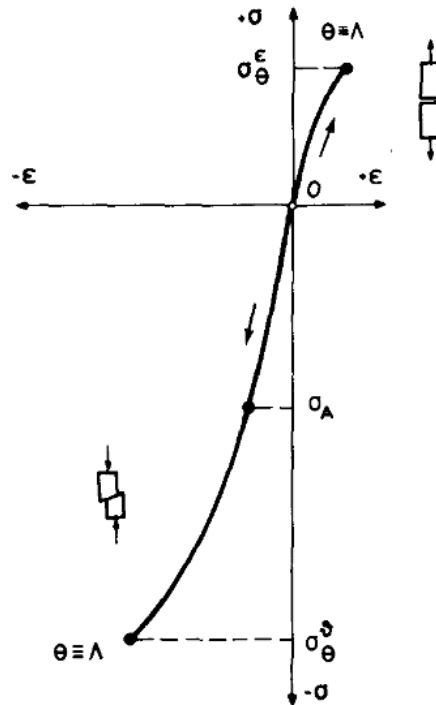
Ψαθυρά υλικά

Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν πολύ μικρές παραμορφώσεις μέχρι τη θραύση αν τις συγκρίνουμε με τις παραμορφώσεις των χαρακτηρισθέντων ήδη σαν όλκιμων υλικών. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται ο χυτοσίδηρος, το σκυρόδεμα, τα φυσικά πετρώματα, το γυαλί κ.ά.

Τα διαγράμματα σ-ε αυτών των υλικών που καταπονούνται σε εφελκυσμό, έχουν τη μορφή της πάνω καμπύλης που εικονίζεται στο Σχήμα 20, ενώ σε θλίψη τη

μορφή της κάτω καμπύλης που φαίνεται στο ίδιο Σχήμα. Τα ψαθυρά υλικά παρουσιάζουν εν γένει πολύ μικρή περιοχή αναλογίας, και η αντοχή θραύσης τους σε θλίψη είναι κατά κανόνα πολλαπλάσια της αντοχής θραύσης σε εφελκυσμό.

Η θραύση των ψαθυρών υλικών σε εφελκυσμό επέρχεται απότομα με αποχωρισμό του υλικού, χωρίς σχηματισμό λαιμού (Σχήμα 15β), ενώ σε θλίψη επέρχεται με ολίσθηση, υπό γωνία ως προς τη διεύθυνση φόρτισης (Σχήμα 19β) που ποικίλει ανάλογα με το υλικό μεταξύ 25° - 35° και αφού το δοκίμιο πάρει μορφή ελαφρώς βαρελοειδή.



Σχήμα 20: Διαγράμματα σ-ε ψαθυρών υλικών σε εφελκυσμό και θλίψη.

Τάσεις Υπολογισμού-Τάση αστοχίας

Τα όλκιμα υλικά παρουσιάζουν όριο διαρροής σ_{Δ} ή $\sigma_{0,2}$ πέραν του οποίου εκδηλώνονται μεγάλες παραμορφώσεις. Η ανάπτυξη στις κατασκευές τάσεων ίσων ή μεγαλύτερων από το όριο διαρροής του υλικού έχει σαν αποτέλεσμα κατά κανόνα την εμφάνιση απαγορευτικών παραμορφώσεων, που αχρηστεύουν ή περιορίζουν τη λειτουργία τους. Γι' αυτό η ένταση της διαρροής θεωρείται ότι προκαλεί επικίνδυνη κατάσταση στις κατασκευές. Οι τάσεις λειτουργίας συνεπώς στις κατασκευές, πρέπει να είναι μικρότερες της τάσης που προκαλεί διαρροή του υλικού. Ο κίνδυνος προσέγγισης της τάσης θραύσης σε εφελκυσμό ή θλίψη, όταν δεν προηγείται το φαινόμενο του λυγισμού, καλύπτεται πλήρως από την προηγούμενη απαίτηση αφού η θραύση έπεται της διαρροής.

Τα ψαθυρά υλικά συμπεριφέρονται σχεδόν ελαστικά μέχρι τη θραύση και παρουσιάζουν παραμορφώσεις μικρού μεγέθους χωρίς εκδήλωση φαινομένου διαρροής. Κατά συνέπεια οι τάσεις λειτουργίας στις κατασκευές που μορφώνονται

από ψαθυρά υλικά, οφείλουν να είναι μικρότερες από την τάση θραύσης που προκαλεί καταστροφή της κατασκευής.

Τάση αστοχίας (σ_a ή τ_a) ονομάζεται η τάση που προκαλεί επικίνδυνη κατάσταση, διαρροή ή θραύση αντίστοιχα στα όλκιμα ή ψαθυρά υλικά.

Επιτρεπόμενη τάση

Επιτρεπόμενη τάση ή **τάση υπολογισμού** ονομάζεται η μέγιστη τιμή της τάσης που επιτρέπεται να αναπτυχθεί μέσα στην κατασκευή.

Η επιτρεπόμενη ορθή τάση ισούται με το πηλίκο της τάσης σ_a προς τον συντελεστή ασφαλείας η . Ανάλογα ισχύουν και για την επιτρεπόμενη διατμητική τάση.

Οι τάσεις λειτουργίας και ειδικότερα οι μέγιστες τάσεις σε οποιοδήποτε σημείο κάθε κατασκευής πρέπει συνεπώς να είναι μικρότερες ή ίσες της αντίστοιχης επιτρεπόμενης τάσης του υλικού. Σύμφωνα με τα προηγούμενα πρέπει:

$$\sigma \leq \sigma_{\varepsilon\pi} = \frac{1}{\eta} \sigma_a$$

$$\tau \leq \tau_{\varepsilon\pi} = \frac{1}{\eta} \tau_a$$

Ο συντελεστής ασφαλείας η μπορεί να είναι μικρότερος στα όλκιμα υλικά από ότι στα ψαθυρά. Αυτό διότι η ανάπτυξη της τάσης αστοχίας, έχει αποτέλεσμα την απότομη καταστροφή των κατασκευών που συνίστανται από ψαθυρά υλικά, χωρίς προειδοποιητικές ενδείξεις, πράγμα που δεν συμβαίνει στις κατασκευές από όλκιμα υλικά στις οποίες εκδηλώνεται κατά κανόνα σημαντική παραμόρφωση στην πρώτη φάση της αστοχίας τους.

Οι συντελεστές ασφαλείας λαμβάνουν τιμές που εξαρτώνται και από τον τρόπο καταπόνησης της κατασκευής. Έτσι λ.χ. για στατική φόρτιση, οι συντελεστές ασφαλείας είναι μικρότεροι των συντελεστών που καθορίζονται για περισσότερο επικίνδυνες φορτίσεις, όπως είναι η εναλλασσόμενη ή η δυναμική φόρτιση. Επίσης στις κατασκευές στις οποίες είναι ενδεχόμενο να εκδηλωθεί το φαινόμενο αστάθειας, οι συντελεστές η παίρνουν αυξημένες τιμές.

Οι συντελεστές η , ή οι τάσεις $\sigma_{\varepsilon\pi}$, $\tau_{\varepsilon\pi}$, παρέχονται από τις σχετικές προδιαγραφές των Κανονισμών για κάθε υλικό και σε συνάρτηση με το είδος καταπόνησης. Αν λοιπόν είναι γνωστές οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών και οι συντελεστές η , μπορούμε να βρούμε τις ελάχιστες διαστάσεις μιας κατασκευής με τη βοήθεια των επιτρεπομένων τάσεων.

Στη γενική περίπτωση οι σχέσεις

$$\sigma \leq \sigma_{\varepsilon\pi} = \frac{1}{\eta} \sigma_a$$

$$\tau \leq \tau_{\varepsilon\pi} = \frac{1}{\eta} \tau_a$$

παρέχουν τις επιτρεπόμενες τάσεις σε απλές καταπονήσεις, όπως σε εφελκυσμό, θλίψη ή και σε διάτμηση. Στις σύνθετες καταπονήσεις το κριτήριο αντοχής είναι περισσότερο πολύπλοκο. Είναι όμως δυνατό και σ' αυτές τις περιπτώσεις να

αναζητήσουμε ισοδύναμη τάση σύγκρισης $\sigma_{ισοδ}$, για την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης που αναφέρεται στις ορθές τάσεις.

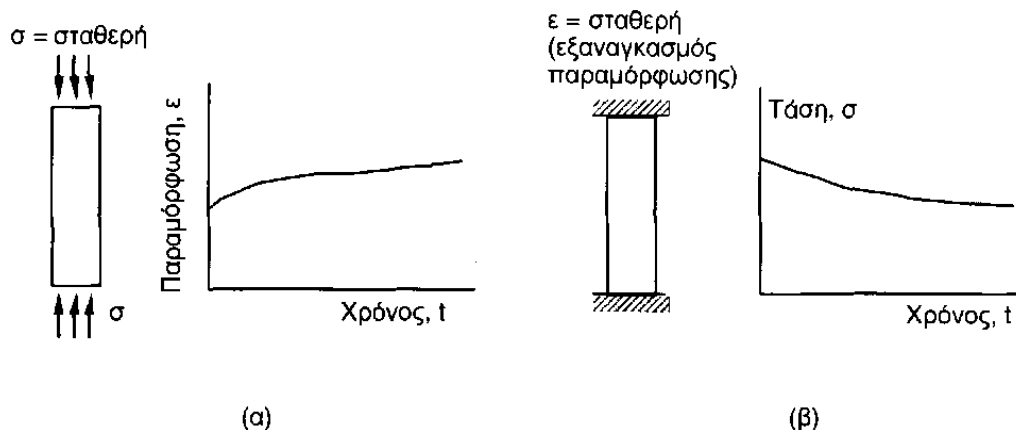
Στα υλικά που παρουσιάζουν την ίδια απολύτως τάση αστοχίας σε εφελκυσμό και θλίψη, όπως στα όλκιμα ($\pm \sigma_A$), έχουμε μία μόνο αριθμητική τιμή της $\sigma_{επ}$ για τον έλεγχο των κατασκευών που καταπονούνται τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη. Αντίθετα στα υλικά που έχουν διαφορετική απόλυτη τιμή σε εφελκυσμό από ότι σε θλίψη, όπως στα ψαθυρά, διακρίνουμε άλλη επιτρεπόμενη τάση σε θλίψη ($\sigma_{επ}^θ$) και άλλη σε εφελκυσμό ($\sigma_{επ}^ε$).

Σημειώνεται τέλος, ότι η επιτρεπόμενη τάση σε διάτμηση $\tau_{επ}$, έχει διαφορετική τιμή από την επιτρεπόμενη ορθή τάση, αφού οι αντίστοιχες τάσεις αστοχίας έχουν διαφορετικές τιμές.

Ερπυσμός και Χαλάρωση

Ερπυσμός καλείται το φαινόμενο που χαρακτηρίζει την ιδιότητα ορισμένων υλικών να εμφανίζουν συνεχή αύξηση των παραμορφώσεων με το χρόνο, ενώ οι αντίστοιχες τάσεις παραμένουν σταθερές. Στο φαινόμενο αυτό οφείλεται η αύξηση των παραμορφώσεων σε κατασκευές που καταπονούνται σε μακροχρόνια φορτία (π.χ. υποστυλώματα φορτιζόμενα από το ίδιο βάρος κτιρίων). Συνέπεια του φαινομένου του ερπυσμού είναι η αστοχία υλικών μετά πάροδο ορισμένου χρόνου υπό σταθερή τάση που είναι μικρότερη από την αντίστοιχη αντοχή σε βραχυχρόνια φόρτιση. Εμφανίζεται κυρίως: α) σε υλικά σε θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξης, β) σε πορώδη υλικά που απορροφούν υγρασία και γ) σε ινώδη υλικά συνδεδεμένα με ασθενείς δεσμούς.

Αντίθετο με τον ερπυσμό είναι το φαινόμενο της χαλάρωσης, που χαρακτηρίζει την ιδιότητα ορισμένων υλικών να εμφανίζουν συνεχή μείωση των τάσεων με το χρόνο, ενώ οι αντίστοιχες παραμορφώσεις παραμένουν σταθερές. Τα φαινόμενα αυτά περιγράφονται παραστατικά στο Σχήμα 21.



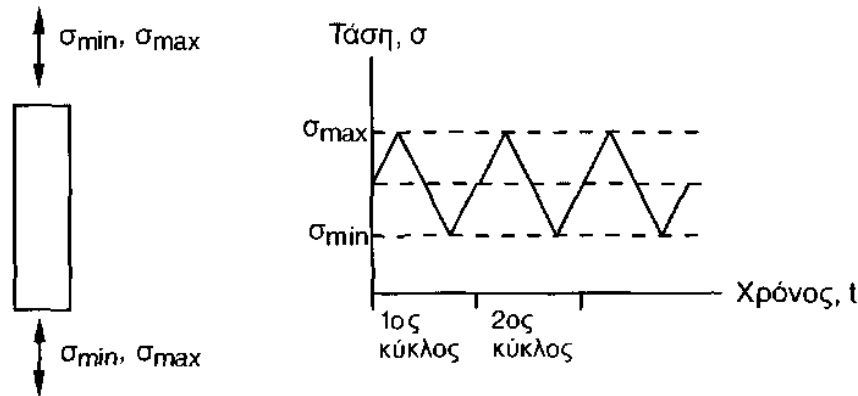
Σχήμα 21: Τα φαινόμενα (α) του ερπυσμού και (β) της χαλάρωσης.

Κόπωση

Η καταπόνηση ενός υλικού σε εναλλασσόμενη δυναμική φόρτιση καθορισμένης συχνότητας με τάση που δεν ξεπερνά συγκεκριμένα όρια (ελάχιστη-

μέγιστη τάση) ονομάζεται κόπωση. Παραδείγματα κόπωσης έχουμε σε γέφυρες, όπου τα δομικά στοιχεία (π.χ. δοκοί) υποβάλλονται σε περιοδική καταπόνηση λόγω των φορτίων των οχημάτων.

Η φόρτιση ενός υλικού σε κόπωση δείχνεται παραστατικά στο Σχήμα 22. Ως αντοχή ενός υλικού σε κόπωση ορίζεται συνήθως ο αριθμός N_1 των κύκλων φόρτισης (δεδομένης συχνότητας) πριν την αστοχία για δεδομένες ακραίες τάσεις ($\sigma_{\min}$, $\sigma_{\max}$), ή η μέγιστη τάση $\sigma_{\max}$ που αντιστοιχεί σε δεδομένο αριθμό N κύκλων φόρτισης (καθορισμένης συχνότητας) και δεδομένη ελάχιστη τάση $\sigma_{\min}$.



Σχήμα 22: Φόρτιση υλικού σε κόπωση (η συνάρτηση της φόρτισης είναι ενδεικτική).

Αντοχή σε Κρούση

Η αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό σε θραύση λόγω τοπικής κρούσης (π.χ. κρούση οχήματος σε βάθρο γέφυρας από σκυρόδεμα) ονομάζεται αντοχή σε κρούση. Η μέτρηση της ιδιότητας αυτής γίνεται συχνά με τη συσκευή Charpy. Η δοκιμή περιλαμβάνει ένα εκκρεμές που ανυψώνεται σε ορισμένο ύψος και κατόπιν αφήνεται να πέσει ελεύθερο σε επίμηκες δοκίμιο που φέρει εγκοπή στο μέσο και στηρίζεται στα δύο άκρα. Μετά τη θραύση του δοκιμίου η μάζα του εκκρεμούς συνεχίζει την κίνηση μέχρι κάποιο άλλο ύψος, οπότε μπορεί να μετρηθεί η διαφορά των δυναμικών ενεργειών στην αρχική και τελική θέση του εκκρεμούς, η οποία ισούται με την ενέργεια που απορροφά το δοκίμιο κατά τη θραύση. Η ενέργεια αυτή διαιρούμενη με την επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου δίνει την ενέργεια που απορροφάται κατά την κρούση ανά μονάδα επιφάνειας, και αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης της αντοχής ενός υλικού σε κρούση. Σημειώνεται ότι καθοριστικοί για τα αποτελέσματα της δοκιμής παράγοντες είναι η ταχύτητα κρούσης, η θερμοκρασία του δοκιμίου, και το σχήμα και οι διαστάσεις της εγκοπής.

Θερμική Αντοχή και Αντοχή σε Πυρκαγιά

Θερμική αντοχή ονομάζεται η ικανότητα των υλικών να διατηρούν σχεδόν αμετάβλητες βασικές μηχανικές τους ιδιότητες (π.χ. αντοχές, μέτρο ελαστικότητας) σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Πολλά υλικά ουσιαστικά αχρηστεύονται σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από το σημείο ανάφλεξης (π.χ. ξύλο, ορισμένα πολυμερή) ή από το σημείο τήξης (π.χ. μέταλλα, ορισμένα πολυμερή, γυαλί).

Με τον όρο αντοχή σε πυρκαγιά αποδίδεται η ικανότητα των υλικών να μην παραμορφώνονται σημαντικά και να διατηρούν σημαντικό ποσοστό της αντοχής τους όταν υποβάλλονται σε πυρκαγιά και στο συνδυασμό πυρκαγιάς και νερού πυρόσβεσης (που έχει ως αποτέλεσμα την απότομη ψύξη του υλικού) επί αρκετές ώρες. Με βάση το ενδεχόμενο ανάφλεξης τα υλικά διακρίνονται σε άκαυστα (π.χ. κεραμικά, μέταλλα), πυρανθεκτικά (υλικά που καίγονται με δυσκολία και μόνο παρουσία φλογών, όπως το ξύλο που έχει διαποτιστεί με ειδικά υγρά) και καύσιμα (υλικά που συντηρούν από μόνα τους την καύση, όπως είναι τα περισσότερα υλικά οργανικών ενώσεων).

Ανθεκτικότητα σε Διάρκεια

Ανθεκτικότητα σε διάρκεια είναι η ικανότητα των υλικών να αντιστέκονται στην αλλοίωση των φυσικών, μηχανικών και χημικών χαρακτηριστικών τους κάτω από τη δράση κλιματικών συνθηκών της ατμόσφαιρας και εν γένει περιβαλλοντικών επιδράσεων (π.χ. υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος, θερμοκρασιακές μεταβολές, παγετός, χημικές ουσίες). Βάσει του παραπάνω ορισμού η ανθεκτικότητα σε διάρκεια συμπεριλαμβάνεται μόνο εν μέρει στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Ειδικά για την περίπτωση του παγετού αναφέρεται ότι κατά την πήξη του το νερό που είναι ενδεχομένως εγκλωβισμένο στους πόρους ενός υλικού αυξάνεται σε όγκο, με αποτέλεσμα την άσκηση ισχυρών δυνάμεων στα τοιχώματα των πόρων και γενικά στη μάζα του υλικού. Έτσι αντοχή σε παγετό είναι η ικανότητα ενός κορεσμένου με νερό υλικού να υποστεί διαδοχικούς κύκλους (περίπου 25-40) πήξης και τήξης του νερού χωρίς να παρουσιάσει εμφανή σημεία βλάβης (η απώλεια βάρους λόγω απότριψης να μην ξεπερνά π.χ. το 5% του αρχικού βάρους) και χωρίς να μειωθεί η μηχανική του αντοχή πάνω από περίπου 25% της αρχικής της τιμής. Από τα πορώδη υλικά ανθεκτικότερα σε παγετό είναι εκείνα που έχουν κλειστούς πόρους και τα υλικά με μεγάλους και σχετικά ευθύγραμμους πόρους (σε αντίθεση αυτών με μικρούς και δαιδαλώδεις).

Σκληρότητα

Ένα άλλο φαινόμενο που σχετίζεται άμεσα με την ανθεκτικότητα των υλικών σε διάρκεια αφορά στην επιφανειακή φθορά (π.χ. σε οδοστρώματα, δάπεδα, πεζοδρόμια, ή άλλες κατασκευές που υφίστανται τη μηχανική δράση ανέμου, νερού κ.τ.λ.). Το φαινόμενο της επιφανειακής φθοράς σχετίζεται με τη σκληρότητα ενός υλικού, δηλαδή την αντίσταση που προβάλλει η επιφάνειά του στη χάραξη από άλλο σώμα. Σκληρότητα ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει η επιφάνεια ενός μετάλλου στην προσπάθεια κάθετης παραμόρφωσης της επιφάνειάς του και εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου, την κρυσταλλική του δομή και τις τεχνικές κατασκευής και κατεργασίας του. Ο έλεγχος της σκληρότητας των υλικών γίνεται με διάφορες μεθόδους, όπως η σκληρότητα σε εγχάραξη, η σκληρότητα σε λείανση, η σκληρότητα σε κρουστικά φορτία και η σκληρότητα σε διείδυση. Η σκληρότητα ενός υλικού καθορίζεται συνήθως από τη σκληρομετρική κλίμακα του Mohs. Η κλίμακα αυτή έχει 10 βαθμίδες, σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί ένα γνωστό ορυκτό που χαράζει το αμέσως προηγούμενο και χαράζεται από το αμέσως επόμενο (Πίνακας 1).

Επειδή η μέθοδος Mohs είναι κατάλληλη κυρίως για πετρώματα και προϊόντα τους και γενικά δίνει χονδρικά αποτελέσματα, συνήθως χρησιμοποιούνται

ακριβέστερες μέθοδοι, που ποικίλουν ανάλογα με το είδος της σκληρότητας της οποίας επιδιώκεται προσδιορισμός. Έτσι, σε υλικά όπως το σκυρόδεμα, οι λίθοι (π.χ. αδρανή) και οι πλίνθοι (π.χ. τούβλα), στα οποία ενδιαφέρει ιδιαίτερα η αντίσταση σε απότριψη, μία συνηθισμένη δοκιμή είναι η δοκιμή Los Angeles. Αυτή συνίσταται στην τοποθέτηση ορισμένης ποσότητας υλικού μέσα σε περιστρεφόμενο χαλύβδινο τύμπανο που περιέχει σφαίρες από χυτοσίδηρο. Μετά από ορισμένο αριθμό περιστροφών (με ορισμένη επίσης ταχύτητα) υπολογίζεται η % απώλεια βάρους λόγω απότριψης, και το ποσοστό αυτό αποτελεί δείκτη σκληρότητας.

Πίνακας 1: Σκληρομετρική κλίμακα του Mohs.

Ορυκτό	Σκληρότητα
Στεατίτης	1
Γύψος	2
Ασβεστίτης	3
Φθορίτης	4
Απατίτης	5
Αστρίος	6
Χαλαζίας	7
Τοπάζιο	8
Κορούνδιο	9
Διαμάντι	10

Άλλες μέθοδοι, που εφαρμόζονται κυρίως σε μεταλλικά υλικά, περιλαμβάνουν μέτρηση του ίχνους που αφήνει στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού ένα σώμα ορισμένων διαστάσεων και ποιότητας όταν υποστεί ορισμένη πίεση. Τέτοιες μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας είναι οι μέθοδοι Brinell (χρησιμοποιείται χαλύβδινη σφαίρα), Rockwell (χρήση χαλύβδινης σφαίρας ή κώνου από διαμάντι) και Vickers (χρήση τετραγωνικής πυραμίδας από διαμάντι). Οι μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας διείσδυσης στηρίζονται στην μέτρηση της αντίστασης που προβάλλει το υλικό στην διείσδυση ενός σκληρού, μικρών διαστάσεων, εξαρτήματος (διείσδυτή), το οποίο πιέζεται με κατάλληλη δύναμη κάθετα στην επιφάνεια του υλικού. Η σκληρότητα διείσδυσης είναι μέθοδος απλή, γρήγορη, σχετικά εύκολη και μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με την αντοχή σε εφελκυσμό. Μεγαλύτερη σκληρότητα συνεπάγεται μεγαλύτερη αντοχή σε παραμόρφωση.

Τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με διάφορα θέματα που χαρακτηρίζουν τα υλικά όπως για παράδειγμα :

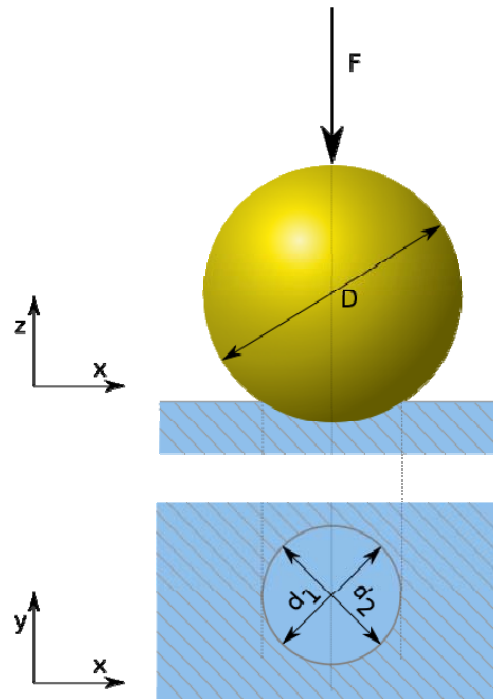
- Προσδιορισμός υλικού.
- Έλεγχος ορθής διαδικασίας θερμικής κατεργασίας.
- Έλεγχος ποιότητας επιφανειακών κατεργασιών.
- Συμπεριφορά και αντοχή του υλικού κατά τη διάρκεια του χρόνου.
- Συμπεριφορά του υλικού σε συνθήκες φθοράς και καταπόνησης.
- Έλεγχος μείωσης αντοχής μετά από θερμική κατεργασία.
- Πληροφορίες σχετικά με αντοχή σε εφελκυσμό.

Η σκληρότητα είναι ένα χαρακτηριστικό του υλικού και η τιμή της έχει άμεση σχέση με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εύρεση της. Οι βασικές μέθοδοι σκληρομέτρησης είναι τρεις: **Brinell**, **Vickers** και **Rockwell**. Οι μέθοδοι αυτές διαφέρουν ως προς τον τύπο του διείσδυτή που χρησιμοποιούν και τα βάρη-

δυνάμεις με τα οποία πιέζεται κάθε φορά ο διεισδυτής κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Μέθοδος Brinell

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην κάθετη, αργή και σταθερή διείσδυση στο δοκίμιο, μίας πολύ σκληρής σφαίρας καρβιδίου του βολφραμίου (ή παλαιότερα χαλύβδινης), με διάμετρο D σε mm, υπό την εφαρμογή ενός σταθερού φορτίου F (σε kgf ή N) για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η σφαίρα έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο χωρίς κρούση και στη συνέχεια επιβάλλεται βαθμιαία η δύναμη F , αρχίζοντας από μηδενική τιμή και φθάνοντας στην πλήρη F μετά από 5 s. Η δύναμη διατηρείται για 15 ή 30 s και στη συνέχεια ο διεισδυτής απομακρύνεται. Στην επιφάνεια του δοκιμίου απομένει αποτύπωμα σχήματος σφαιρικού τμήματος. Μετά την αποφόρτιση μετρίεται με μεγεθυντικό φακό η διάμετρος του αποτυπώματος d (σε mm). Το εφαρμοζόμενο φορτίο (kgf) προς την επιφάνεια του κυκλικού αποτυπώματος (mm^2) δίνει το μέτρο της σκληρότητας του υλικού. Αναλόγως το προς μέτρηση υλικό εφαρμόζεται και το ανάλογο φορτίο, συνήθως 4.90 kN (500 kgf), 14.7 kN (1500 kgf) ή 29.4 kN (3000 kgf). Το φορτίο των 500 kgf χρησιμοποιείται για πιο μαλακά υλικά όπως χαλκός, αλουμίνιο και άλλα μη σιδηρούχα. Το φορτίο των 1500 kgf για κράματα αλουμινίου και υλικά μεσαίας σκληρότητας, ενώ των 3000 kgf για χάλυβα, χυτοσίδηρο και άλλα σκληρά υλικά.



Σχήμα 23. Διεισδυτής Brinell και αποτύπωμα.

Η σκληρότητα σύμφωνα με τη μέθοδο Brinell συμβολίζεται ως HBW και δίδεται από τη σχέση:

$$HBW = 0.102 \cdot \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

όπου: F (σε N) φορτίο, D (σε mm) η διάμετρος της σφαίρας και d (σε mm) η διάμετρος του αποτυπώματος (η τιμή του μέσου όρου δύο κάθετων μεταξύ τους διαμέτρων).

Το αποτέλεσμα στην κλίμακα HBW δίνεται με τη μορφή, για παράδειγμα "75 HBW 10/500/30". Αυτό ερμηνεύεται ως σκληρότητα 75 Brinell με χρήση σφαίρας διαμέτρου 10 mm, υπό φορτίο 500 kgf, για χρόνο εφαρμογής 30 s. Στην περίπτωση όπου t=15 s ο χρόνος δεν αναγράφεται. Επίσης στην περίπτωση όπου F=3000 kgf και D=10 mm δεν αναγράφονται τα F και D.

Η μέθοδος Brinell εφαρμόζεται κυρίως σε χυτά ή χυτοπρεσαριστά υλικά που δεν είναι πολύ σκληρά και με σχετικά μεγάλο πάχος (τουλάχιστον 10 φορές το βάθος του αποτυπώματος). Το δοκίμιο μετά την σκληρομέτρηση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί λόγω του βάθους του αποτυπώματος.

Για την ακριβή σκληρομέτρηση εφαρμόζονται οι κάτωθι προδιαγραφές:

- Η επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να έχει λειανθεί καλά (τυχόν επιφανειακές μικροανωμαλίες επιφέρουν αλλοίωση στην εκτίμηση των διαστάσεων του αποτυπώματος)

- Το φορτίο πρέπει να επιβάλλεται κάθετα προς τη σκληρομετρούμενη επιφάνεια και με βραδύ ρυθμό (όχι κρουστικά)

- Η αποφόρτιση να γίνεται μετά από κάποιο χρόνο, απαραίτητο για να δημιουργηθεί η πλαστική παραμόρφωση στο αποτύπωμα

- Η πρότυπη σφαίρα του διεισδυτή έχει διάμετρο 10.0 mm με απόκλιση που δεν υπερβαίνει τα 0.005 mm σε όλες τις διαμέτρους. Για τις μικρότερες σφαίρες ισχύουν αντίστοιχοι περιορισμοί (D=5 mm, A=± 0.004 και για D=2.5 mm, 2 mm και 1 mm, A=±0.003).

- Η διάμετρος του αποτυπώματος δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ μικρή ούτε πολύ μεγάλη σε σχέση με τη διάμετρο του διεισδυτή, γιατί τα όριά της θα είναι τότε είτε ασαφή είτε θα υπερχειλίζουν, πράγματα που δεν θα μας επιτρέπουν την ακριβή εκτίμηση των διαστάσεών της. Συνίσταται η διάμετρος του αποτυπώματος να είναι μεταξύ του 24% και 60% της διαμέτρου του διεισδυτή.

- Το πάχος s του σκληρομετρούμενου δοκιμίου πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην δημιουργούνται σημάδια στην αντίθετη πλευρά του δοκιμίου μετά την σκληρομέτρηση. Ως γενικός κανόνας, το πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα φορές μεγαλύτερο από το βάθος της διείσδυσης. Για κάθε πάχος δοκιμίου και για κάθε φορτίο, το δοκίμιο πρέπει να έχει μια ελάχιστη σκληρότητα, έτσι ώστε να εκτελείται με ασφάλεια η δοκιμή Brinell. Για παράδειγμα, για πάχος δοκιμίου s=1.6 mm και για φορτίο 3000 kg, το δοκίμιο πρέπει να έχει ελάχιστη σκληρότητα 602 HBW, ενώ για το ίδιο πάχος και για φορτίο 1500 kgf, η αντίστοιχη σκληρότητα είναι 301 HBW.

- Η απόσταση του διεισδυτή από τις άκρες του δοκιμίου να είναι τουλάχιστον 2,5 φορές τη διάμετρο του αποτυπώματος.

- Τα σημεία δοκιμής να απέχουν τουλάχιστον 5 διαμέτρους μεταξύ τους.

- Λόγω κινδύνου πλαστικής παραμόρφωσης του διεισδυτή, η μέθοδος περιορίζεται στη σκληρομέτρηση υλικών σκληρότητας μέχρι HB=650, όταν χρησιμοποιείται διεισδυτής από καρβίδιο βολφραμίου.

Τέλος με χρήση του πρότυπου διεισδυτή 10 mm συνιστάται η χρήση φορτίου 3000 kgf για υλικά σκληροτήτων από 96 έως 600 HBW, φορτίου 1500 kgf για υλικά

σκληροτήτων από 48 έως 300 HBW και φορτίου 500 kgf για υλικά σκληροτήτων από 16 έως 100 HBW.

Μέθοδος Vickers

Η μέθοδος Vickers είναι παρεμφερής της μεθόδου Brinell. Θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου τα δοκίμια είναι λεπτά και από πολύ σκληρό υλικό όπως επίσης και αν έχουν δεχθεί οποιαδήποτε επιφανειακή θερμική κατεργασία και η επιφάνεια τους έχει καταστεί πολύ σκληρή.

Βασίζεται στην αργή επιβολή ενός φορτίου, μέσω ενός αδαμάντινου διεισδυτή, σε ένα δοκίμιο το οποίο έχει υποστεί πολύ καλή λείανση. Ο διεισδυτής έχει σχήμα κανονικής τετραγωνικής πυραμίδας με γωνία απέναντι εδρών 136° . Το φορτίο κυμαίνεται από 0,2 έως 100 kgf και ο χρόνος εφαρμογής του είναι περίπου 15-30 s. Η ταχύτητα διείσδυσης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 0,3 mm/s. Τα τυποποιημένα σκληρόμετρα Vickers έχουν σύστημα αυτόματης επιβολής και απελευθέρωσης του εκλεγόμενου κάθε φορά φορτίου. Η μέτρηση της σκληρότητας του δοκιμίου γίνεται από την μέτρηση των δύο διαγωνίων του τετραγωνικού αποτυπώματος (d_1, d_2).

Η τιμή της σκληρότητας κατά Vickers προκύπτει από την χρήση του τύπου:

$$HV = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

όπου F είναι το φορτίο εφαρμογής (σε kgf) και d^2 η επιφάνεια του αποτυπώματος

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{σε mm}^2).$$

Η σκληρότητα κατά Vickers δίνεται υπό την μορφή, για παράδειγμα, 800HV/10/t που δηλώνει σκληρότητα 800 Vickers με χρήση φορτίου 10 kp για χρόνο t. Αν ο χρόνος είναι 15 s δεν αναγράφεται.

Η γεωμετρία του διεισδυτή, η επιλογή δηλαδή της γωνίας των 136° έγινε έτσι ώστε να αντιστοιχεί σε δοκιμή Brinell με λόγο $d/D=3/8=0.375$. Επίσης αποδεικνύεται ότι η σχέση μεταξύ βάθους h του αποτυπώματος και της μέσης τιμής d των διαγωνίων της βάσης του αποτυπώματος είναι $h/d=1/7=0.143$. Τα μικρά βάθη διεισδύσεως που οφείλονται στην αμβλεία γωνία των 136° επιτρέπουν την σκληρομέτρηση λεπτών δοκιμίων. Για το πάχος S του δοκιμίου θα πρέπει να ισχύει $S > 1,5d$, για να μην επηρεάζεται η μέτρηση από την αντίσταση του υποστηρίγματος του δοκιμίου. Τα σημεία δοκιμής πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 3 διαγώνιους μεταξύ τους.

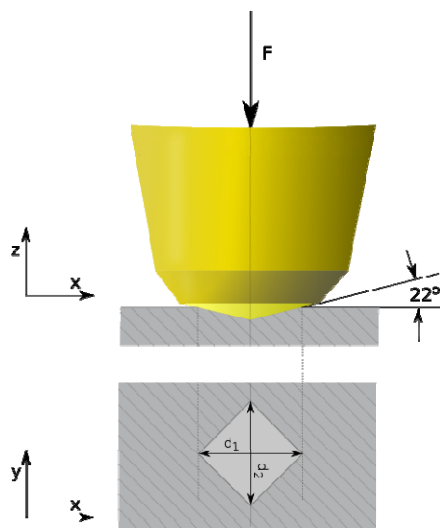
Η μέθοδος πλεονεκτεί της μεθόδου Brinell στο ότι τα όρια του αποτυπώματος είναι πιο καθαρά και σαφή και στο γεγονός ότι το διαμάντι είναι πολύ σκληρό υλικό με αποτέλεσμα να μην παραμορφώνεται εύκολα.

Μέθοδοι Rockwell

Οι μέθοδοι Rockwell διαφέρουν από τις προηγούμενες στο ότι ο προσδιορισμός της σκληρότητας στηρίζεται στη μέτρηση του βάθους διείσδυσης του διεισδυτή και όχι της διαμέτρου ή της διαγωνίου του αποτυπώματος.

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου Rockwell είναι το ότι φέρει βαθμονομημένη κλίμακα ανάγνωσης που δίνει απευθείας τη μέτρηση του βάθους του αποτυπώματος σε μονάδες σκληρότητας Rockwell. Το γεγονός αυτό καθιστά τη μέθοδο αυτή απλή και γρήγορη.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι Rockwell, που χρησιμοποιούν διαφορετική γεωμετρία διεισδυτή και τιμή επιβαλλόμενου φορτίου (Πίνακας 2).



Σχήμα 24: Διεισδυτής Vickers και αποτύπωμα.

Πίνακας 2. Μέθοδοι σκληρομέτρησης κατά Rockwell.

Μέθοδος	Τύπος διεισδυτή	Ολικό Φορτίο (kgf)	Εφαρμογές
B	Σφαίρα (D=1.588mm)	100	Ανοπτημένοι χάλυβες, ορείχαλκοι
C	Κώνος	150	Σκληροί χάλυβες, Ti
A	Κώνος	60	Πολύ σκληρά υλικά
D	Κώνος	100	Σκληροί χάλυβες λεπτού πάχους
E	Σφαίρα (D=3.175mm)	100	Πολύ μαλακά υλικά (Κράματα Al, Mg, χυτοσίδηρος)
F	Σφαίρα (D=1.588mm)	60	Μαλακά υλικά (Al, Cu, μπρούντζος)
L	Σφαίρα (D=6.350mm)	60	Pb, πλαστικά
N	Κώνος	15/30/45	Λεπτά δείγματα

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες είναι οι μέθοδοι Rockwell B με σφαιρικό διεισδυτή από σκληρυμένο χάλυβα σταθερής διαμέτρου 1/16'' (1.588 mm) και χρησιμοποιείται για μετρήσεις μικρών τιμών σκληρότητας και Rockwell C με κωνικό διεισδυτή με γωνία κορυφής 120° και σφαιρικό άκρο διαμέτρου 0.2 mm, για μετρήσεις σκληρότητας σκληρών υλικών.

Ως σκληρότητα κατά Rockwell (HR) ορίζεται το βάθος διείσδυσης z του διεισδυτή, μετρημένο με μονάδα μέτρησης τα μm , δηλ. η σκληρότητα κατά Rockwell είναι μήκος, ενώ στις προηγούμενες μεθόδους η σκληρότητα έχει μονάδες τάσης.

Το φορτίο επιβάλλεται σε δύο στάδια:

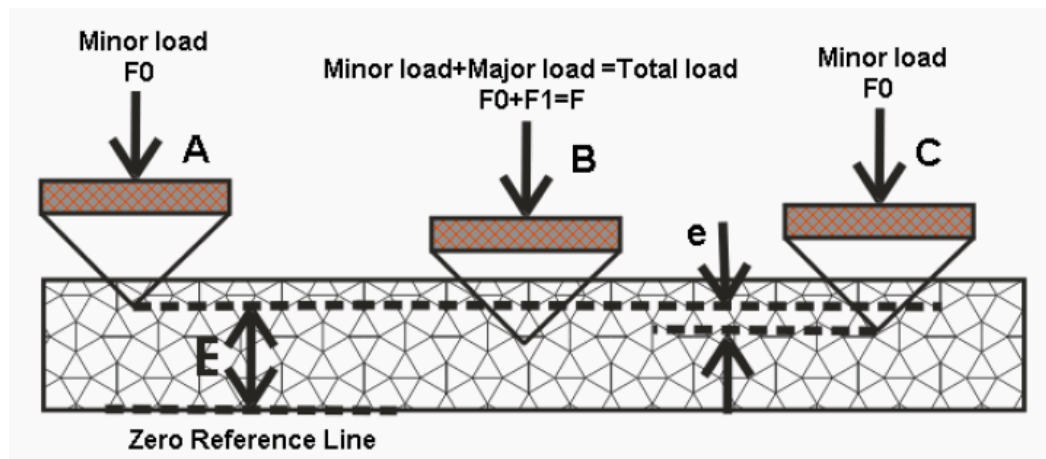
- Στο πρώτο στάδιο (προφόρτιση), επιβάλλεται φορτίο $F_0=10 \text{ kgf}$ (98 N), οπότε δημιουργείται κοιλότητα με Δ_0 που έχει σκοπό την ισοπέδωση τυχόν τοπικών ανωμαλιών.

- Στο δεύτερο στάδιο (φόρτιση) επιβάλλεται πρόσθετο φορτίο F_1 , το οποίο α εφαρμόζεται για 20-30 s, με τελική διείσδυση Δ . Ανάλογα με την μέθοδο, το αντίστοιχο συνολικό φορτίο F είναι 100 kgf (981 N) στην Rockwell B και 150 kgf (1471 N) στη Rockwell C. Στη συνέχεια απομακρύνεται και επανέρχεται στη δύναμη προφόρτισης F_0 . Ο διεισδυτής οπισθοχωρεί και διατηρείται μια παραμένουσα διείσδυση Δ_π , όπου $\Delta_0 < \Delta_\pi < \Delta$. Η σκληρότητα υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$HRB = 130 - \frac{\Delta_\pi - \Delta_0}{0.002}$$

$$HRC = 100 - \frac{\Delta_\pi - \Delta_0}{0.002}$$

και διαβάζεται απευθείας στη βαθμονομημένη κλίμακα του οργάνου.



Σχήμα 25: Μέθοδος Rockwell.

Για την ονοματολογία της μεθόδου Rockwell χρησιμοποιούνται οι χαρακτήρες HR. Για παράδειγμα 45 HRC σημαίνει ότι το υλικό έχει σκληρότητα 45 κατά την κλίμακα C.

Για να μην επηρεάζεται η μέτρηση από την αντίσταση του υποστηρίγματος του δοκιμίου, πρέπει το πάχος του δοκιμίου να είναι 10 φορές μεγαλύτερο από το βάθος του αποτυπώματος στη Rockwell C και 15 φορές από το βάθος του αποτυπώματος στη Rockwell B. (Οι προδιαγραφές δίνουν το ελάχιστο επιτρεπτό πάχος των δοκιμίων, ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης και την τιμή σκληρότητας).



Σχήμα 26. Σκληρόμετρο Rockwell.

Συσχέτιση αριθμών σκληρότητας

Αν και υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα στη συσχέτιση της σκληρότητας μεταξύ των διαφόρων μεθόδων που χρησιμοποιούνται, στην πράξη με την εφαρμογή ημιεμπειρικών τύπων και με σφάλμα της τάξης του $\pm 10 \%$ είναι δυνατή η συσχέτιση της σκληρότητας που προσδιορίζεται με τη μέθοδο Brinell με αυτήν της μεθόδου Rockwell.

Η σχέση που εφαρμόζεται στην περίπτωση τιμών Rockwell B μεταξύ 35 και 100, είναι η παρακάτω:

$$HB = \frac{7300}{130 - HRB}$$

Υπάρχουν στην βιβλιογραφία διαγράμματα, που συσχετίζουν τις σκληρότητες ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη συσχέτιση αυτή πρέπει να αξιολογούνται με προσοχή. Οι προδιαγραφές δίνουν την αντιστοιχία των σκληροτήτων μετά από μετρήσεις με διαφορετικές μεθόδους (ASTM-E140). Οι μετατροπές ισχύουν για συγκεκριμένα κράματα.

Συσχέτιση σκληρότητας με αντοχή σε εφελκυσμό

Ο προσδιορισμός της σκληρότητας διείσδυσης είναι δυνατόν να συσχετιστεί με τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό (σ_t) του υλικού.

Ο συσχετισμός αυτός εφαρμόζεται στις περιπτώσεις εκείνες που ο προσδιορισμός με το πείραμα του εφελκυσμού είτε είναι ανέφικτος είτε δύσκολος.

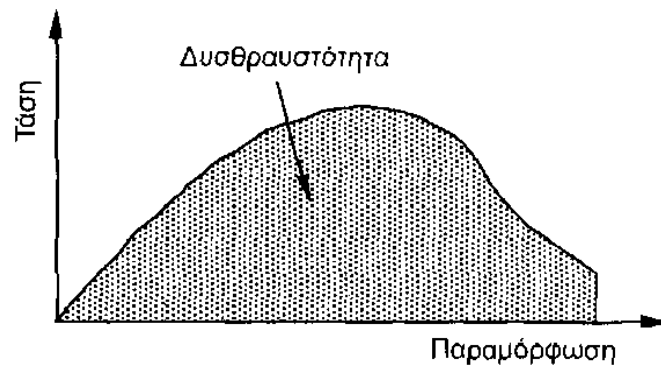
Οι προσεγγιστικές σχέσεις που εφαρμόζονται για τις βασικές κατηγορίες μεταλλικών υλικών ενδιαφέροντος δομικού είναι:

- Χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα

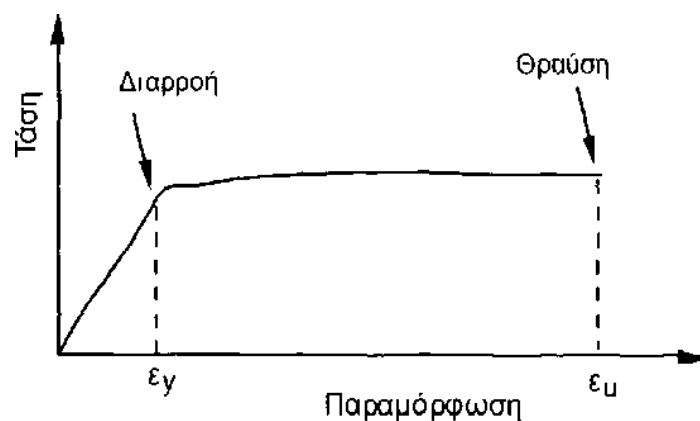
για σκληρότητα 120-175 HB	$\sigma_t=0,34 \text{ HB (kg/mm}^2\text{)}$
- Χαλκός, ορείχαλκος, μπρούτζος.	
- ανοπτημένος	$\sigma_t=0,55 \text{ HB (kg/mm}^2\text{)}$
- σκληρυμένος με παραμόρφωση	$\sigma_t=0,40 \text{ HB}$
- Αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου	
για HB μεταξύ 20-25	$\sigma_t=0,33-0,36 \text{ HB}$
Ντουραλουμίνιο	$\sigma_t=0,36 \text{ HB}$

Δυσθραυστότητα, Πλαστικότητα και Πλαστιμότητα

Δυσθραυστότητα ονομάζεται η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ενέργεια κατά την παραμόρφωση του μέχρι τη θραύση, και ποσοτικοποιείται υπολογίζοντας το εμβαδόν της επιφάνειας που περικλείεται από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (Σχήμα 27). Το εμβαδόν αυτό (όχι κατ' ανάγκη μέχρι τη θραύση) ονομάζεται γενικά και ειδική ενέργεια παραμόρφωσης, η ολοκλήρωση της οποίας στο συνολικό όγκο του υλικού δίνει τη **συνολική ενέργεια παραμόρφωσης**.



Σχήμα 27: Ορισμός της δυσθραυστότητας.



Σχήμα 28: Πλαστιμότητα υλικού.

Ως **πλαστικότητα** ενός υλικού ορίζεται η ικανότητά του να αναπτύσσει πλαστικές παραμορφώσεις, δηλαδή σημαντικές μόνιμες παραμορφώσεις υπό σχεδόν σταθερή τάση, χωρίς να θραύεται. Η πλαστικότητα ποσοτικοποιείται με την

πλαστιμότητα ή καλύτερα με το δείκτη πλαστιμότητας μ_ϵ , που για υλικά υπολογίζεται διαιρώντας την παραμόρφωση κατά τη θραύση προς αυτήν κατά τη διαρροή, $\mu_\epsilon = \epsilon_u / \epsilon_y$, όπως αυτές ορίζονται στο Σχήμα 28.

Τόσο η μεγάλη δυσθραυστότητα όσο και η μεγάλη πλαστιμότητα είναι ιδιαίτερα επιθυμητές ιδιότητες των υλικών, διότι σχετίζονται με την ικανότητά τους να απορροφούν ενέργεια κατά τη διάρκεια έντονης καταπόνησης, όπως είναι π.χ. ο σεισμός.

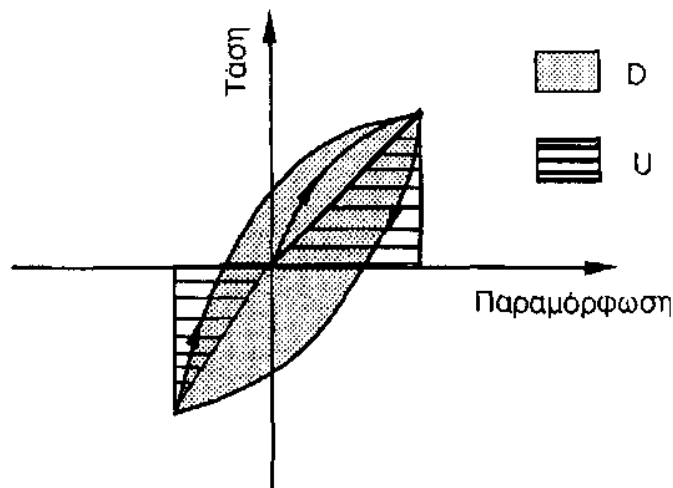
Απόσβεση

Όταν ένα υλικό καταπονείται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, οπότε αλλάζει το πρόσημο των τάσεων και παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης, μέρος της ενέργειας παραμόρφωσης χάνεται με τη μορφή π.χ. θερμότητας. Η ιδιότητα αυτή των υλικών ονομάζεται απόσβεση. Η απόσβεση ποσοτικοποιείται μέσω του συντελεστή απόσβεσης ή απώλειας η , που ισούται με

$$\eta = \frac{D}{2\pi U}$$

όπου D είναι η απώλεια ενέργειας σε έναν πλήρη κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης και U είναι η μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης αν η συμπεριφορά του υλικού ήταν γραμμικά ελαστική μέχρι τη μέγιστη παραμόρφωση. Ο ορισμός αυτός εξηγείται στο Σχήμα 29.

Τυπικές τιμές του η είναι $10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2}$ για σκυρόδεμα, $2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$ για χάλυβα και 0.5-1.5 για ελαστομερή υλικά (π.χ. νεοπρένιο, καουτσούκ). Η απόσβεση εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενης φόρτισης, όπως αυτή λόγω σεισμού, ανέμου κ.τ.λ., και αποτελεί ιδιαίτερα επιθυμητή ιδιότητα για τέτοιου είδους φορτίσεις.



Σχήμα 29: Ορισμός του συντελεστή απόσβεσης η .

12. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ

Εισαγωγή

Ένα καθαρό μέταλλο μεταβαίνοντας από την υγρή κατάσταση (τήγμα) στη στερεή κρυσταλλώνεται, αποκτά δηλαδή την κρυσταλλική του δομή. Όταν το τήγμα ψυχόμενο αποκτήσει ορισμένη θερμοκρασία, χαρακτηριστική για κάθε καθαρό μέταλλο (σημείο τήξης ή πήξης), τότε αρχίζει η στερεοποίησή του. Αρχικά σχηματίζονται στη μάζα του τήγματος μικροσκοπικοί κρύσταλλοι, σε τυχαίες θέσεις, που ονομάζονται πυρήνες ή κέντρα κρυστάλλωσης. Στις θέσεις όπου έχουν δημιουργηθεί πυρήνες, αρχίζει ο σχηματισμός κρυσταλλικής δομής με προσθήκη ατόμων, σε θέσεις που καθορίζονται από το είδος του κρυσταλλικού πλέγματος του συγκεκριμένου μετάλλου. Όσο διαρκεί η στερεοποίηση, στους πυρήνες προστίθενται και άλλα άτομα, αρχίζουν να σχηματίζονται κρύσταλλοι, ενώ σε άλλες νέες τυχαίες θέσεις δημιουργούνται νέοι πυρήνες. Ο αριθμός των νέων πυρήνων περιορίζεται, καθώς η απόψυξη συνεχίζεται. Οι κρύσταλλοι αυτοί έχουν την μορφή δενδριτών, δηλαδή κρυσταλλικών σκελετών με διακλαδώσεις. Τα κλαδιά των δενδριτών συνεχίζουν να αναπτύσσονται, μέχρι όλος ο χώρος να καταληφθεί από στερεοποιημένο μέταλλο. Οι εξωτερικοί κλάδοι των δενδριτών, κατά την ανάπτυξή τους, εφάπτονται με κλάδους άλλων γειτονικών δενδριτών, που προέρχονται από άλλους πυρήνες. Έτσι στις θέσεις επαφής διαφορετικών δενδριτών είναι αδύνατη η περαιτέρω ανάπτυξη.

Όταν συμπληρωθεί η στερεοποίηση, το μέταλλο αποτελείται από κόκκους ή κρυσταλλίτες. Το μέταλλο δηλαδή δεν απαρτίζεται από συνεχές κρυσταλλικό πλέγμα (μονοκρύσταλλος), αλλά από πολλούς κρυσταλλίτες, με ιδιαίτερο ο καθένας προσανατολισμό. Οι επιφάνειες επαφής των δενδριτών αποτελούν τα όρια των κόκκων. Τα όρια των κόκκων είναι ζώνες ατόμων υψηλότερης ενέργειας σε σχέση με τα άτομα των γειτονικών κόκκων. Εξαιτίας αυτού, η τήξη των καθαρών μετάλλων ξεκινά από τα όρια των κόκκων, τα οποία έχουν χαμηλότερο σημείο τήξης από τον κύριο κρύσταλλο κατά 15°C. Επιπλέον οι διάφορες προσμίξεις που περιέχουν τα μέταλλα καταλαμβάνουν τα όρια των κόκκων, γιατί έχουν την τάση να παραμένουν με το μέταλλο που στερεοποιείται τελευταίο.

Ένας μονοκρύσταλλος είναι, γενικά, ανισότροπος. Αντίθετα, ένα πολυκρυσταλλικό μέταλλο είναι, γενικά, ισότροπο, δεδομένου ότι οι κόκκοι έχουν διάφορους προσανατολισμούς και οι ιδιότητες, μετρούμενες σε ένα μεγάλο αριθμό κόκκων, παρουσιάζουν τη μέση τιμή του συνόλου.

Η ταχύτητα ψύξης του τήγματος επηρεάζει την μικροκρυσταλλική δομή. Απότομη ψύξη συνεπάγεται τη δημιουργία πολλών πυρήνων και οδηγεί σε λεπτόκοκκο στερεό. Αντίθετα αργή ψύξη οδηγεί σε χοντρόκοκκο στερεό.

Κράματα

Κράμα ονομάζεται κάθε μεταλλικό σώμα που προέρχεται από την ανάμιξη δύο ή περισσότερων χημικών στοιχείων, από τα οποία το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο, ενώ το άλλο μπορεί να είναι επίσης μέταλλο (που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση), ή αμέταλλο (όπως π.χ. C, N₂). Το πλέον σύνηθες κράμα αυτής της περίπτωσης είναι το κράμα Fe με C. Εάν ο C βρίσκεται σε αναλογία 0,01-2,00 %, το κράμα Fe/C ονομάζεται χάλυβας. Εάν ο C βρίσκεται σε αναλογία 2,5-

4,0%, το κράμα Fe/C ονομάζεται χυτοσίδηρος. Τα κράματα δύο συστατικών ονομάζονται διμερή κράματα. Τα κράματα έχουν ιδιότητες σε μικρό ή μεγάλο βαθμό, διαφορετικές από εκείνες των συστατικών τους (π.χ. μηχανική αντοχή, σκληρότητα, αντοχή στη διάβρωση).

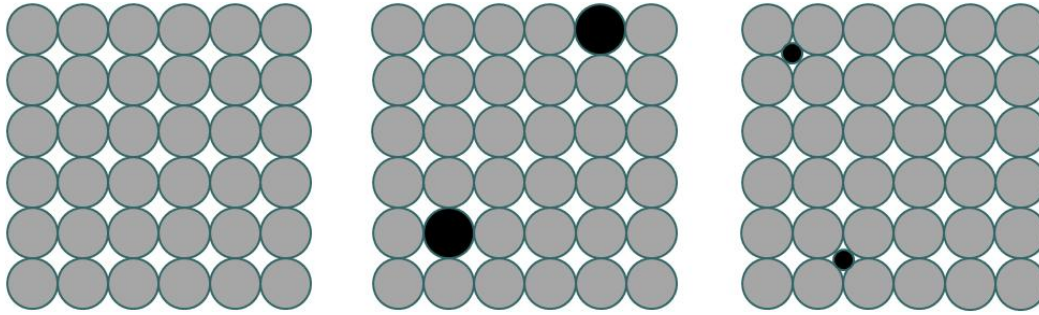
Ο όρος **φάση** αναφέρεται σε μια ομοιογενή περιοχή της ύλης με σαφή και περιγεγραμμένα όρια, στην οποία τόσο η χημική σύσταση, όσο και η κρυσταλλική δομή, κατά συνέπεια και οι ιδιότητες, διατηρούνται ίδιες σε όλη της την έκταση. Αποτελεί τμήμα ενός συστήματος και διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα τμήματα του συστήματος από μια επιφάνεια. Στη συνήθη θερμοκρασία τα διάφορα κράματα αποτελούνται από μία ή περισσότερες φάσεις που ο αριθμός τους εξαρτάται κυρίως από τη σύσταση του κάθε κράματος. Η φύση και η κρυσταλλική δομή των στερεών φάσεων των κραμάτων μελετούνται με εξειδικευμένες φυσικοχημικές μεθόδους, οι σπουδαιότερες από τις οποίες είναι η θερμική ανάλυση, η μικροσκοπική ανάλυση και η ακτινανάλυση (ακτίνες X, XRD, κλπ).

Η συστηματική μελέτη των κραμάτων με τις παραπάνω μεθόδους απέδειξε, ότι σε στερεά κατάσταση, τα κράματα μπορεί να έχουν την ακόλουθη σύσταση:

A) Μεταξύ των μετάλλων που αποτελούν το κράμα σχηματίζεται καθορισμένης αναλογίας χημική ένωση η οποία ονομάζεται **διαμεταλλική ένωση**. Οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων στις διαμεταλλικές ενώσεις είναι μεταλλικοί δεσμοί και επομένως στις ενώσεις αυτές η αναλογία ατόμων δεν ανταποκρίνεται αναγκαστικά στο σθένος τους. Έτσι ενώ ορισμένες έχουν τύπους που ανταποκρίνονται στο σθένος των ατόμων τους όπως π.χ. Mg_2Sn , $CuBe$, Mg_2Pb , οι περισσότερες από τις διαμεταλλικές ενώσεις έχουν τύπους που δεν ανταποκρίνονται στο σθένος των ατόμων τους, όπως π.χ. Cu_5Sn , $CoZn_3$, Cu_9Al_4 κ.ά. Πολλές διαμεταλλικές ενώσεις χαρακτηρίζονται από την ικανότητα που έχουν να διαλύουν σε περίσσεια ένα από τα συστατικά τους.

B) Το στερεό διάλυμα είναι ομογενής κρυσταλλική φάση δύο ή περισσότερων στοιχείων. Όπως στα υγρά διαλύματα, έτσι και στην περίπτωση αυτή, η σύσταση του στερεού διαλύματος είναι μεταβλητή. Υπάρχει επίσης και βαθμός κορεσμού, ο οποίος, όπως και στα υγρά διαλύματα, εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Έτσι π.χ. ο χαλκός διαλύει έως 5% άργυρο, ο μόλυβδος μέχρι 19,1% κασσίτερο, ο κασσίτερος μέχρι 2,5% μόλυβδο, ενώ ο χαλκός και το νικέλιο διαλύονται μεταξύ τους σε οποιαδήποτε αναλογία. Στα κράματα της κατηγορίας αυτής, εάν το μέταλλο που βρίσκεται στη μεγαλύτερη αναλογία θεωρηθεί σαν το διαλυτικό μέσο, το δε άλλο μέταλλο ή άλλα μέταλλα σαν το διαλυμένο σώμα, τότε τα άτομα του διαλυμένου σώματος αντικαθιστούν τυχαία άτομα του διαλυτικού μέσου. Στην κρυσταλλική δομή δηλαδή του στερεού διαλύματος συμβαίνει αντικατάσταση των ατόμων της μιας κρυσταλλικής δομής από άτομα της άλλης. Ένας τέτοιος τύπος στερεού διαλύματος ονομάζεται **στερεό διάλυμα αντικατάστασης**. Οι ιδιότητες των στερεών διαλυμάτων είναι όμοιες με τις ιδιότητες του διαλυτικού μετάλλου με τη διαφορά ότι συνήθως έχουν μικρότερη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, είναι σκληρότερα και λιγότερο ελατά από το καθαρό μέταλλο.

Ένας άλλος τύπος στερεών διαλυμάτων είναι τα καρβίδια, τα υδρίδια, τα βορίδια και τα νιτρίδια. Στα στερεά αυτά διαλύματα τα άτομα του διαλυμένου αμέταλλου στοιχείου βρίσκονται στα διάκενα του κρυσταλλικού πλέγματος του μετάλλου. Επειδή τα διαστήματα μεταξύ των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα των μετάλλων είναι μικρά, ο τύπος αυτός των στερεών διαλυμάτων, περιορίζεται στη διάλυση στα μέταλλα, αμέταλλων στοιχείων, των οποίων τα άτομα έχουν πάρα πολύ μικρό όγκο, όπως το υδρογόνο, ο άνθρακας, το άζωτο και το βόριο. Ένας τέτοιος τύπος στερεού διαλύματος ονομάζεται **στερεό διάλυμα παρεμβολής**.



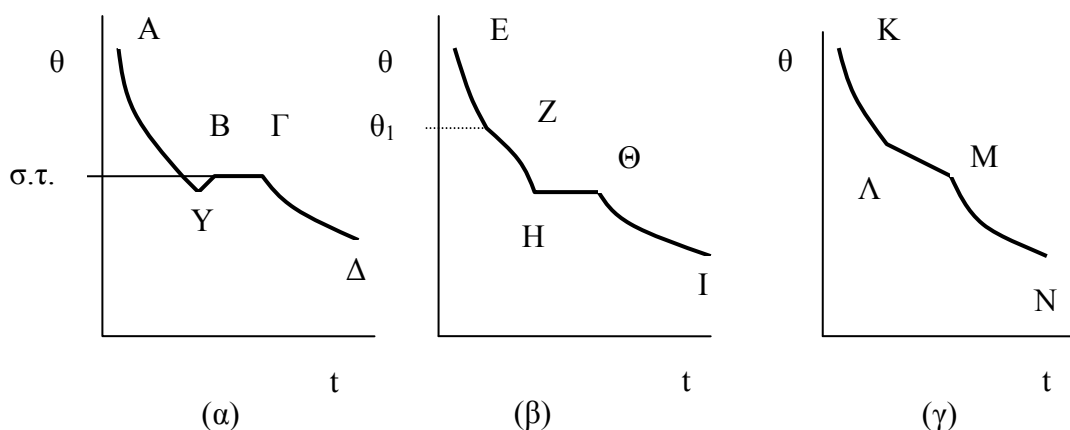
Σχήμα 30: α) Κρύσταλλος β) Στερεό διάλυμα αντικατάστασης γ) Στερεό διάλυμα παρεμβολής.

Γ) Τα κράματα είναι μηχανικά μίγματα φάσεων, οι οποίες μπορούν να είναι καθαρό μέταλλο, στερεό διάλυμα ή διαμεταλλική ένωση. Στην περίπτωση π.χ. του κράματος χαλκού - μολύβδου, καθαρός μολύβδος είναι διασκορπισμένος σε μορφή μικρών σφαιριδίων μέσα σε χαλκό. Τα κράματα αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται από μια αναλογία αναμίξεως των συστατικών του κράματος στην οποία το κράμα παρουσιάζει το ταπεινότερο σημείο τήξεως, το οποίο ονομάζεται ευτηκτικό σημείο. Το κράμα δε που αντιστοιχεί στην αναλογία αυτή ονομάζεται ευτηκτικό. Ένα κράμα μπορεί να παρουσιάζει μια ή και περισσότερες από τις συστάσεις αυτές.

Καμπύλες ψύξης

Ένα υγρό σώμα (τήγμα) ευρισκόμενο σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος, χαμηλότερη του σημείου τήξης, μεταβαίνει στη στερεά κατάσταση. Η καταγραφή της θερμοκρασίας του σώματος συναρτήσει του χρόνου, δίνει την καμπύλη ψύξης του υλικού. Η μορφή της καμπύλης εξαρτάται από τη φύση του σώματος.

Οι καθαρές ουσίες, όταν είναι σε κρυσταλλική μορφή, έχουν σε σταθερή πίεση συγκεκριμένο σημείο (θερμοκρασία) πήξης (ή τήξης), που αποτελεί και την ταυτότητα της καθαρής ουσίας (Σχήμα 31α). Οι καθαρές ουσίες σε άμορφη κατάσταση δεν έχουν συγκεκριμένο σημείο τήξης, αλλά μεταβαίνουν σταδιακά, καθώς κατέρχεται η θερμοκρασία από την υγρή στη στερεά κατάσταση (Σχήμα 31γ). Τα κράματα δεν έχουν συγκεκριμένη θερμοκρασία πήξης (ή τήξης) αλλά χαρακτηρίζονται από μία θερμοκρασία έναρξης και μία θερμοκρασία λήξης της πήξης (ή τήξης) (Σχήματα 31β, 31γ). Οι θερμοκρασίες αυτές εξαρτώνται από τη φύση και την εκατοστιαία σύσταση του κράματος.



Σχήμα 31: Καμπύλες ψύξης. α) Καθαρή κρυσταλλική ουσία ή κράμα ευτηκτικού τύπου που έχει την ευτηκτική σύσταση. β) Κράμα ευτηκτικού τύπου. γ) Κράμα με πλήρη αναμιξιμότητα των συστατικών του σε στερεά κατάσταση ή άμορφο στερεό.

Θερμική ανάλυση

Η μέθοδος της χημικής ανάλυσης δεν μπορεί στην περίπτωση των κραμάτων να καθορίσει την κρυσταλλική τους δομή, αλλά μόνο την αναλογία των συστατικών τους. Αν υποθεθεί π.χ. ότι γίνεται χημική ανάλυση σε σίδηρο, ο οποίος τη μια φορά ετάκη και αφέθηκε να ψυχθεί μόνος του, ενώ την άλλη φορά ψύχθηκε απότομα από τους 900°C, η χημική ανάλυση και των δύο αυτών δειγμάτων, με τις συνηθισμένες αναλυτικές μεθόδους, θα οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για τον ίδιο σίδηρο. Στην πραγματικότητα όμως ο σίδηρος που έχει ψυχθεί απότομα από τους 900°C έχει διαφορετική κρυσταλλική δομή και διαφορετικές ιδιότητες.

Στα κράματα είναι ακόμα πιο χαρακτηριστική η ανεπάρκεια της χημικής ανάλυσης. Έτσι π.χ. στο κράμα χρυσού – χαλκού, ο χαλκός διαλύεται στο χρυσό και παραμένει διαλυμένος και μετά τη στερεοποίηση, σχηματίζοντας στερεό διάλυμα. Η χημική ανάλυση του κράματος αυτού οδηγεί μόνο στο συμπέρασμα ότι το κράμα αποτελείται από π.χ. 30% χαλκό και 70% χρυσό, χωρίς να μπορεί να καθορίσει εάν ο χρυσός και ο χαλκός αποτελούν ενιαίο κρυσταλλικό είδος, εάν δηλαδή είναι διαμεταλλική ένωση, μίγμα στερεών φάσεων ή στερεό διάλυμα. Για το λόγο αυτό ακριβώς τα κράματα εξετάζονται με μεθόδους όπως η θερμική ανάλυση. Η θερμική ανάλυση βασίζεται στις καμπύλες ψύξης. Για παράδειγμα οι καμπύλες ψύξης στο σχήμα 3 αντιστοιχούν :

α) Καμπύλη ψύξης καθαρής κρυσταλλικής ουσίας, όπου AB τήγμα, Y έναρξη κρυστάλλωσης (στερεοποίησης) με υστέρηση πήξης, BΓ στερεοποίηση στη σταθερή θερμοκρασία του σημείου τήξης (σ.τ.), Γ πέρασ στερεοποίησης, ΓΔ στερεό.

Η καμπύλη (α) καλύπτει και την περίπτωση στερεοποίησης κράματος ευτηκτικού τύπου που έχει την ευτηκτική σύσταση. Τότε στο σ.τ. αντιστοιχεί η ευτηκτική θερμοκρασία.

β) Καμπύλη ψύξης κράματος ευτηκτικού τύπου, με μη αναμιξιμότητα των συστατικών του σε στερεά κατάσταση (π.χ. κράμα Zn-Cd) ή μερική αναμιξιμότητα των συστατικών του σε στερεά κατάσταση (π.χ. κράμα Pb-Sn), όπου EZ τήγμα, Z έναρξη κρυστάλλωσης, H το τήγμα που απομένει έχει την ευτηκτική σύσταση, HΘ

στερεοποίηση τήγματος που έχει την ευτηκτική σύσταση σε σταθερή θερμοκρασία (ευτηκτική θερμοκρασία) με σχηματισμό ευτηκτικών κόκκων, ΘΙ στερεό.

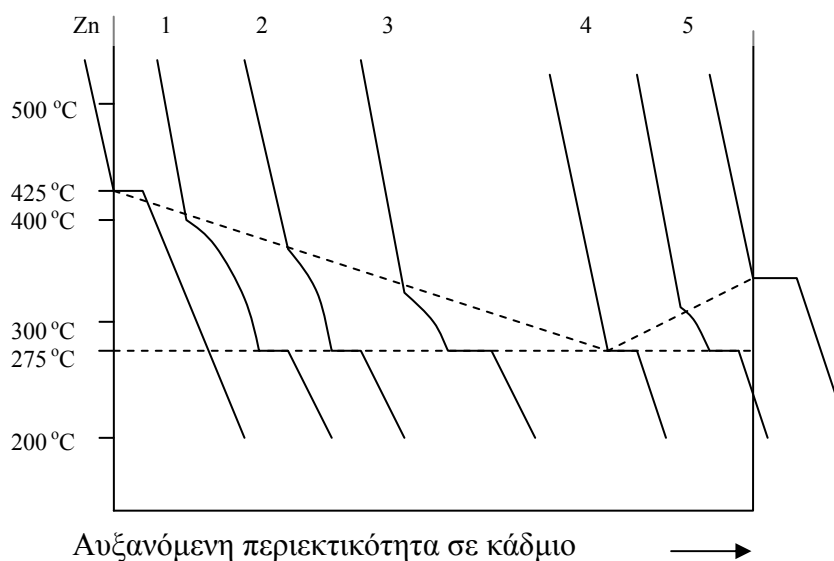
γ) Καμπύλη ψύξης κράματος με πλήρη αναμιξιμότητα των συστατικών του σε στερεά κατάσταση π.χ. κράμα Cu-Ni, όπου ΚΛ τήγμα, Λ έναρξη στερεοποίησης, Μ πέρασ στερεοποίησης, ΜΝ στερεό. Η καμπύλη (γ) καλύπτει και την περίπτωση στερεοποίησης άμορφου στερεού.

Διαγράμματα φάσεων κραμάτων

Η κατανομή των φάσεων ενός κράματος σε διάφορες θερμοκρασίες και για διάφορες αναλογίες σύστασής του, δίνονται από τα διαγράμματα ισορροπίας των φάσεων. Τα διαγράμματα αυτά προκύπτουν με τη βοήθεια της θερμικής ανάλυσης.

Το πλήρες διάγραμμα φάσεων ενός κράματος δύο συστατικών ευτηκτικού τύπου προκύπτει από το σχηματισμό κραμάτων από τα δύο στοιχεία με διάφορες εκατοστιαίες αναλογίες και πειραματικά κατασκευάζεται η καμπύλη της μεταβολής της θερμοκρασίας του καθενός κράματος, σε συνάρτηση με το χρόνο (καμπύλες ψύξης). Ενώνονται τα σημεία Ζ που παριστάνουν την αρχή στερεοποίησης των διαφόρων κραμάτων, καθώς και τα τμήματα ΗΘ τα οποία είναι περιοχές στασιμότητας της θερμοκρασίας (βλ. Σχήμα 31β).

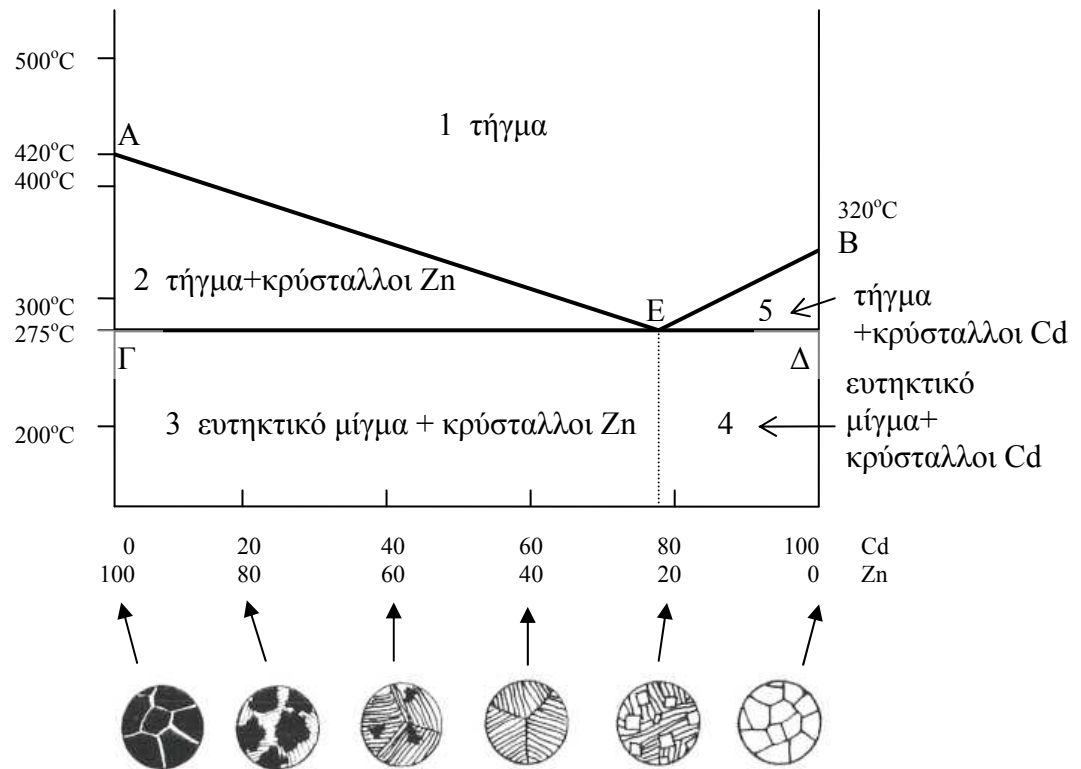
Για μια ορισμένη αναλογία του κράματος, η καμπύλη ψύξης του είναι όμοια με τη καμπύλη που αντιστοιχεί σε καθαρή κρυσταλλική ουσία (Σχήμα 31α). Δηλαδή παρουσιάζει μια στασιμότητα της θερμοκρασίας, σε μια περιοχή, όπου στερεοποιούνται ταυτόχρονα και τα δύο στοιχεία. Η καμπύλη επομένως του κράματος αυτού θα είναι ομαλή χωρίς το τμήμα ΖΗ, το οποίο αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση της πτώσης της θερμοκρασίας. Το μίγμα της αναλογίας αυτής είναι το **ευτηκτικό κράμα** των δύο στοιχείων που αποτελούν το κράμα και η θερμοκρασία όπου παρατηρείται η στασιμότητα (σταθεροποίηση) της θερμοκρασίας είναι η **ευτηκτική θερμοκρασία**. Προφανώς στο ευτηκτικό κράμα τα σημεία Ζ και Η συμπίπτουν.



Σχήμα 32: Καμπύλες ψύξης κραμάτων ψευδαργύρου – καδμίου (Zn-Cd).

Το Σχήμα 32 παριστάνει ένα τέτοιο πλήρες διάγραμμα του κράματος ψευδαργύρου-καδμίου. Οι καμπύλες 1-5 που είναι μεταξύ της καμπύλης Zn (η οποία αντιστοιχεί στον καθαρό ψευδάργυρο) και της καμπύλης Cd (η οποία αντιστοιχεί στο καθαρό κάδμιο) αντιστοιχούν σε κράματα αυξανόμενης περιεκτικότητας σε κάδμιο. Η καμπύλη 4 αντιστοιχεί στο ευτηκτικό κράμα ψευδαργύρου-καδμίου. Στο Σχήμα 33 παριστάνεται το διάγραμμα φάσεων του κράματος ψευδαργύρου-καδμίου.

Η περιοχή 1 περιλαμβάνει το τήγμα, η περιοχή 2 το τήγμα με κρυστάλλους ψευδαργύρου, η περιοχή 3 το ευτηκτικό μίγμα με κρυστάλλους ψευδαργύρου, η περιοχή 4 το ευτηκτικό μίγμα με κρυστάλλους καδμίου και η περιοχή 5 το τήγμα με κρυστάλλους καδμίου. Η περιοχή 1 είναι μονοφασική περιοχή, ενώ οι περιοχές 2, 3, 4 και 5 διφασικές. Το σημείο E είναι το **ευτηκτικό** σημείο του κράματος και αντιστοιχεί στην ευτηκτική θερμοκρασία και στην ευτηκτική αναλογία (σύσταση). Η ευτηκτική θερμοκρασία (275°C) είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του ευτηκτότερου συστατικού του κράματος (Cd με σ.τ. 320°C).



Σχήμα 33: Φάσεις του κράματος ψευδαργύρου-καδμίου (Zn-Cd).

Η γραμμή AEB ονομάζεται **liquidus**. Πάνω από την γραμμή αυτή υπάρχει τήγμα. Η γραμμή ΓΕΔ ονομάζεται **solidus**. Κάτω από την γραμμή αυτή υπάρχει στερεό.

Κράματα που έχουν σύσταση αριστερά της ευτηκτικής σύστασης ονομάζονται **υποευτηκτικά**, ενώ τα κράματα που έχουν σύσταση δεξιά της ευτηκτικής σύστασης ονομάζονται **υπερευτηκτικά**.

Στο Σχήμα 33 επίσης φαίνονται οι κόκκοι του κράματος για διάφορες περιεκτικότητες. Το λευκό χρώμα αντιστοιχεί σε καθαρό Cd, ενώ το μαύρο αντιστοιχεί σε καθαρό Zn. Οι γραμμωτοί κόκκοι αντιστοιχούν σε κράμα που έχει την

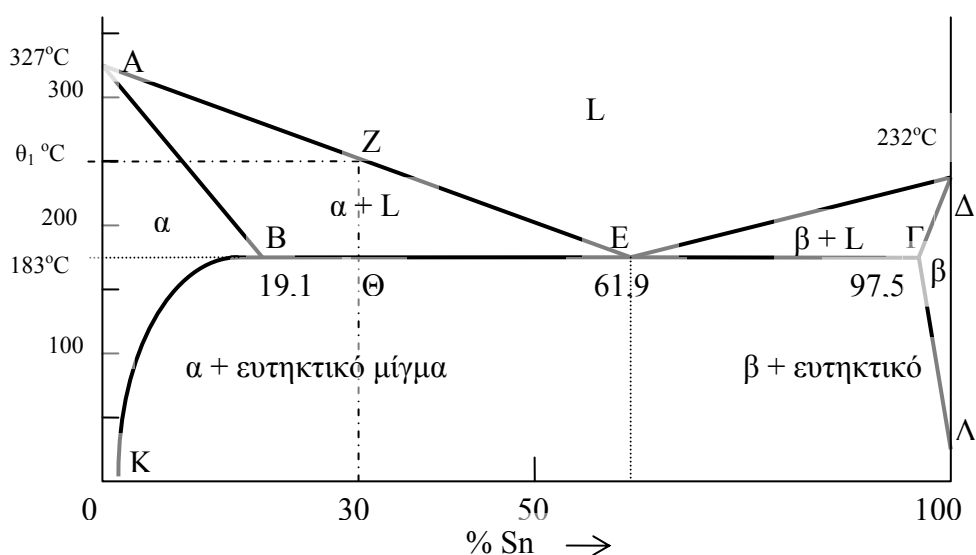
ευτηκτική σύσταση (ευτηκτικό μίγμα) και διακρίνονται οι επάλληλες στρώσεις Cd (λευκό) και Zn (μαύρο).

Τα παραπάνω διαγράμματα αφορούν στην περίπτωση κατά την οποία δύο μέταλλα, όπως ο ψευδάργυρος και το κάδμιο, σχηματίζουν μίγμα στερεών φάσεων, οι οποίες αποτελούνται από καθαρό μέταλλο. Τα μέταλλα αυτά είναι πλήρως μη αναμίξιμα σε στερεά κατάσταση, δηλαδή παρουσιάζουν μηδενική αμοιβαία διαλυτότητα σε στερεά κατάσταση. Τα διαγράμματα αυτά είναι χαρακτηριστικά για όλα τα κράματα της κατηγορίας αυτής.

Το διάγραμμα φάσεων του κράματος Sn-Pb

Τα κράματα κασσιτέρου-μολύβδου αφορούν στην περίπτωση κατά την οποία δύο μέταλλα, όπως ο Sn και ο Pb, σχηματίζουν μίγμα στερεών φάσεων, οι οποίες αποτελούνται από στερεό διάλυμα. Τα μέταλλα αυτά είναι μερικώς αναμίξιμα σε στερεά κατάσταση, δηλαδή παρουσιάζουν αμοιβαία διαλυτότητα σε στερεά κατάσταση με όρια διαλυτότητας. Τα διαγράμματα αυτά είναι χαρακτηριστικά για όλα τα κράματα της κατηγορίας αυτής.

Για παράδειγμα, στο διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος κασσιτέρου-μολύβδου στο Σχήμα 34, διακρίνονται η υγρή φάση L (τήγμα) και οι στερεές φάσεις α (στερεό διάλυμα Sn σε Pb) και β (στερεό διάλυμα Pb σε Sn). Επίσης διακρίνονται οι καμπύλες liquidus (ΑΕΔ) και solidus (ΑΒΕΓΔ), καθώς και το ευτηκτικό σημείο E (για 61,9 % Sn) στους 183°C.



Σχήμα 34: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος Pb-Sn.

Πάνω από την καμπύλη liquidus υπάρχει τήγμα, ενώ κάτω από την καμπύλη solidus υπάρχει στερεό. Το ευτηκτικό σημείο E αντιστοιχεί στην χαμηλότερη θερμοκρασία που μπορεί να υπάρξει το κράμα σε κατάσταση τήγματος και η αντίστοιχη % σύσταση αποτελεί την ευτηκτική σύσταση.

Επίσης φαίνονται οι καμπύλες solvus (KB) και (ΓΛ). Οι καμπύλες *solvus* είναι καμπύλες διαλυτότητας. Η καμπύλη KB εκφράζει την διαλυτότητα σε στερεά κατάσταση του Sn μέσα σε Pb συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η μέγιστη διαλυτότητα

εμφανίζεται στην ευτηκτική θερμοκρασία (183°C) και είναι 19,1% σε Sn. Η καμπύλη ΓΛ εκφράζει την διαλυτότητα σε στερεά κατάσταση του Pb μέσα σε Sn συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η μέγιστη διαλυτότητα εμφανίζεται στην ευτηκτική θερμοκρασία (183°C) και είναι 2,5% σε Pb με 97,5% σε Sn.

Οι γραμμές liquidus, solidus και solvus ορίζουν τα όρια των φάσεων στο διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος Pb-Sn. Με L συμβολίζεται το τήγμα, με α το στερεό διάλυμα του Sn μέσα στο Pb (σύμβολο $(\text{Pb})_{\% \text{Sn}}$) και με β το στερεό διάλυμα του Pb μέσα στο Sn (σύμβολο $(\text{Sn})_{\% \text{Pb}}$). Οι περιοχές των στερεών διαλυμάτων (α , β) και του τήγματος (L) είναι **μονοφασικές**. Οι άλλες περιοχές του διαγράμματος είναι **διφασικές**.

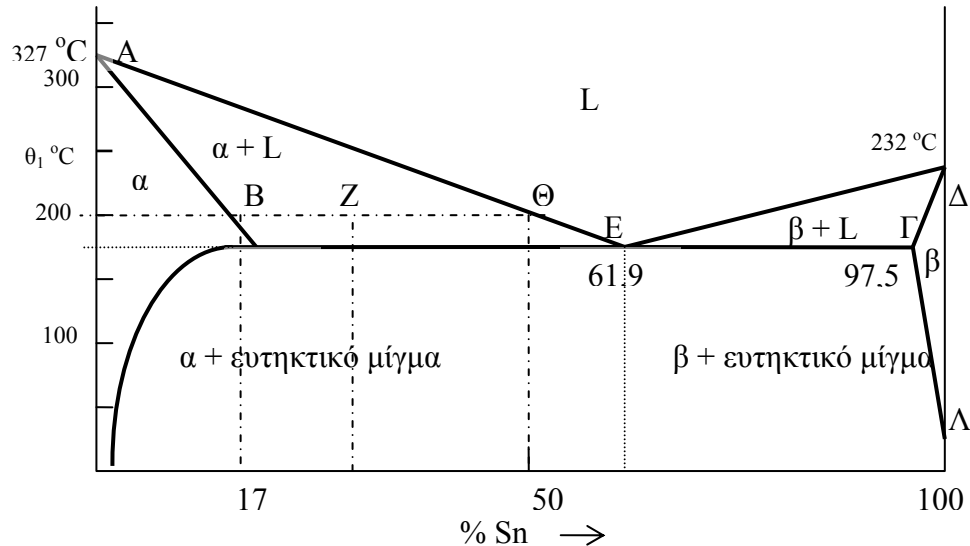
Γενικά οι καμπύλες liquidus και solidus των διαγραμμάτων φάσεων, καταρτίζονται με την παρακολούθηση του ρυθμού μείωσης της θερμοκρασίας του τήγματος ενός μετάλλου ή κράματος όταν βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος, χαμηλότερη από εκείνη της πήξης του (καμπύλη ψύξης μετάλλου), δηλαδή με τη μέθοδο της θερμικής ανάλυσης.

Για παράδειγμα η καμπύλη ψύξης ενός κράματος 30% Sn και 70% Pb (βλ. σχήμα 6) έχει τη μορφή της καμπύλης (β) του Σχήματος 34. Στο σημείο Z του σχήματος 3β αρχίζει η στερεοποίηση του κράματος και είναι σημείο της καμπύλης liquidus (βλ. και σχήμα 6 σημείο Z). Στο σημείο Θ του Σχήματος 34β έχει ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του κράματος και είναι σημείο της καμπύλης solidus (βλ. και Σχήμα 35 σημείο Θ). Από τις καμπύλες ψύξης και άλλων κραμάτων Sn-Pb με διάφορες % συστάσεις μπορούν να προσδιοριστούν και τα άλλα σημεία των καμπυλών liquidus και solidus. Ενώνοντας τα σημεία κατασκευάζεται το διάγραμμα φάσεων του κράματος Sn-Pb.

Αντίστροφα, αν είναι γνωστή η ποιοτική σύσταση ενός κράματος πχ. Sn-Pb, αλλά όχι η ποσοτική (% περιεκτικότητα), μπορεί να προσδιοριστεί εφόσον είναι διαθέσιμο το διάγραμμα φάσεων. Κατασκευάζεται η καμπύλη ψύξης του κράματος που έχει την μορφή της καμπύλης (β) του Σχήματος 32. Από το σημείο Z της καμπύλης προσδιορίζεται η αντίστοιχη θερμοκρασία θ_1 . Στη συνέχεια στο διάγραμμα φάσεων (Σχήμα 35) φέρεται από το θ_1 ευθεία παράλληλη στον οριζόντιο άξονα και από το σημείο τομής της ευθείας με την liquidus (σημείο Z) προσδιορίζεται η % σύσταση του κράματος.

Υπολογισμός του είδους των φάσεων

Υποθέτοντας ένα κράμα 30% σε Sn και 70% σε Pb βρίσκεται σε θερμοκρασία 200°C , στο Σχήμα 35 η θέση του αντιστοιχεί στο σημείο Z που βρίσκεται σε διφασική περιοχή ($\alpha + \text{L}$). Δηλαδή το κράμα αποτελείται από δύο φάσεις, αφενός στερεό διάλυμα Sn μέσα σε Pb (α) και αφετέρου τήγμα (L). Από το σημείο Z φέρεται το ευθύγραμμο τμήμα ΒΘ παράλληλο προς τον άξονα των x. Τα σημεία Β και Θ είναι στα όρια της διφασικής περιοχής ($\alpha + \text{L}$) και το Β αντιστοιχεί στο στερεό διάλυμα (α) και το Θ στο τήγμα (L). Φέροντας από το Β την κάθετο προς τον άξονα των x βρίσκεται ότι η περιεκτικότητα του στερεού διαλύματος (α) είναι 17% σε Sn και αυτή η φάση συμβολίζεται $(\text{Pb})_{17}$. Φέροντας από το Θ την κάθετο προς τον άξονα των x βρίσκεται η περιεκτικότητα του τήγματος (L) 50% σε Sn και αυτή η φάση συμβολίζεται $(\text{L})_{50}$. Με ανάλογο τρόπο σε κάθε διφασική περιοχή, μπορεί να βρεθούν τα είδη των φάσεων και η χημική σύσταση της κάθε φάσης.



Σχήμα 35: Υπολογισμός του είδους των φάσεων από το διάγραμμα φάσεων.

Υπολογισμός της ποσότητας των φάσεων. Ο κανόνας του μοχλού.

Για τον υπολογισμό των ποσοτήτων των δύο φάσεων $(Pb)_{17}$ και $(L)_{50}$ ισχύει:

$$(Pb)_{17} + (L)_{50} = 100 \quad (1)$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα των ροπών (κανόνας του μοχλού) ως προς το σημείο Z ισχύει :

$$(Pb)_{17} \cdot BZ = (L)_{50} \cdot Z\Theta \quad (2)$$

Η σχέση (2) γράφεται υπό μορφή αναλογίας :

$$\frac{(Pb)_{17}}{(L)_{50}} = \frac{Z\Theta}{BZ} \quad (3)$$

Εφαρμόζοντας ιδιότητα των αναλογιών η (3) γίνεται :

$$\frac{(Pb)_{17}}{(L)_{50} + (Pb)_{17}} = \frac{Z\Theta}{BZ + Z\Theta} \quad (4)$$

Από τις σχέσεις (1) και (4) τελικά προκύπτει :

$$(Pb)_{17} = (Z\Theta/B\Theta) \cdot 100 \quad (5)$$

$$(L)_{50} = 100 - (Pb)_{17} \quad (6)$$

Μετρώντας τα ευθύγραμμα τμήματα πάνω στον άξονα των x προκύπτει:

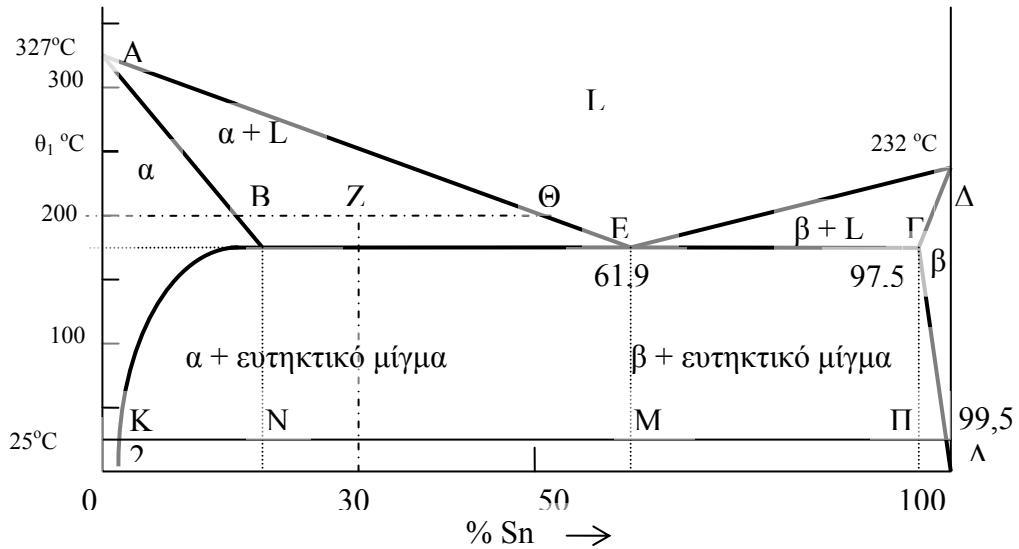
$$Z\Theta = 50 - 30 \text{ και } B\Theta = 50 - 17$$

και τελικά : $(Pb)_{17} = 60,61\%$ και $(L)_{50} = 39,39\%$.

Υπολογισμός του είδους και της ποσότητας των φάσεων μέσα στους κόκκους

Δίνεται κράμα αποτελούμενο από Sn και Pb με περιεκτικότητα 61,9% σε Sn (ευτηκτική σύσταση). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τήγμα που έχει την ευτηκτική σύσταση, στερεοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία 183°C (ευτηκτική θερμοκρασία). Οι κόκκοι που σχηματίζονται από τη στερεοποίηση του ευτηκτικού τήγματος είναι διφασικοί, αποτελούμενοι από επάλληλες στρώσεις στερεού διαλύματος Sn μέσα σε

Pb (α) και στερεού διαλύματος Pb μέσα σε Sn (β). Οι επάλληλες αυτές στρώσεις στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο εμφανίζονται σαν γραμμώσεις.



Σχήμα 36. Υπολογισμός του είδους και της ποσότητας των φάσεων μέσα στους κόκκους.

Έστω ότι η θερμοκρασία του κράματος είναι 183°C, δηλαδή οριακά κάτω από την ευτηκτική θερμοκρασία. Η θέση του κράματος στο διάγραμμα φάσεων είναι οριακά κάτω από την solidus, δηλαδή το κράμα έχει στερεοποιηθεί. Για να βρούμε την ποσότητα κάθε μιας από τις δύο φάσεις (Pb)_{19,1} και (Sn)_{2,5} που αποτελούν τους σχηματισθέντες κόκκους, εφαρμόζουμε τον κανόνα του μοχλού:

$$(Pb)_{19,1} = \frac{97,5-61,9}{97,5-19,1} 100 = 45,4\% \quad (7)$$

$$(Sn)_{2,5} = 100 - 45,4 = 54,6\% \quad (8)$$

Εάν η θερμοκρασία του παραπάνω κράματος κατεβεί στους 25°C, η θέση του κράματος στο διάγραμμα φάσεων είναι στο σημείο M (βλ. Σχήμα 36). Το κράμα είναι σε διφασική περιοχή και η ευθεία η παράλληλη προς τον άξονα των x τέμνει τα όρια της περιοχής (καμπύλες solvus) στα σημεία K και Λ. Από τις καμπύλες solvus φαίνεται ότι η διαλυτότητα του Sn στον Pb έχει μειωθεί από 19,1% που ήταν στους 183°C σε 2% και η διαλυτότητα του Pb στον Sn έχει μειωθεί από 2,5% που ήταν στους 183°C σε 0,5%.

Για τον υπολογισμό της ποσότητας κάθε μιας από τις δύο φάσεις (Pb)₂ και (Sn)_{0,5} που αποτελούν τους κόκκους στους 25°C, εφαρμόζεται ο κανόνας του μοχλού:

$$(Pb)_2 = \frac{ML}{KL} 100 = \frac{99,5-61,9}{99,5-2} 100 = 38,6\% \quad (9)$$

$$(Sn)_{0,5} = 100 - 38,6 = 61,4\% \quad (10)$$

Δίνεται κράμα Pb/Sn με περιεκτικότητα σε Sn 19,1%. Το κράμα αυτό σε θερμοκρασία 183°C έχει στερεοποιηθεί και οι σχηματισθέντες κόκκοι είναι ομογενείς μονοφασικοί (το κράμα βρίσκεται οριακά στην μονοφασική περιοχή του στερεού διαλύματος τύπου α). Η φάση από την οποία αποτελούνται οι κόκκοι είναι η (Pb)_{19,1}.

Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το παραπάνω κράμα εισέρχεται σε διφασική περιοχή, γιατί όπως φαίνεται από την καμπύλη solvus η διαλυτότητα του Sn στον Pb μειώνεται και η επιπλέον ποσότητα του Sn που δεν μπορεί να διαλυθεί στον Pb αποβάλλεται στα όρια των κόκκων υπό μορφή στερεού διαλύματος τύπου β.

Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος π.χ. 25°C η θέση του παραπάνω κράματος στο διάγραμμα φάσεων αντιστοιχεί στο σημείο N (βλ. Σχήμα 36). Οι μονοφασικοί (ομογενείς) στους 183°C κόκκοι έχουν διασπαστεί και είναι διφασικοί (ετερογενείς). Από το σημείο N φέρουμε ευθεία παράλληλη προς τον άξονα των x, που τέμνει τα όρια της διφασικής περιοχής στα σημεία K και Λ. Οι δύο φάσεις που αποτελούν τους κόκκους είναι (Pb)₂ και (Sn)_{0,5}.

Για τον υπολογισμό της ποσότητας κάθε μιας από τις δύο φάσεις (Pb)₂ και (Sn)_{0,5} που αποτελούν τους κόκκους στους 25°C, εφαρμόζεται ο κανόνας του μοχλού:

$$(Pb)_2 = \frac{NL}{KL} 100 = \frac{99,5-19,1}{99,5-2} 100 = 82,5\% \quad (11)$$

$$(Sn)_{0,5} = 100 - 82,5 = 17,5 \quad (12)$$

Δίνεται κράμα Pb/Sn με περιεκτικότητα σε Sn 97,5%, άρα 2,5% σε Pb. Το κράμα αυτό σε θερμοκρασία 183°C έχει στερεοποιηθεί και οι σχηματισθέντες κόκκοι είναι ομογενείς μονοφασικοί (το κράμα βρίσκεται οριακά στην μονοφασική περιοχή του στερεού διαλύματος τύπου β). Η φάση από την οποία αποτελούνται οι κόκκοι είναι η (Sn)_{2,5}.

Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το παραπάνω κράμα εισέρχεται σε διφασική περιοχή, γιατί όπως φαίνεται από την καμπύλη solvus η διαλυτότητα του Pb στον Sn μειώνεται και η επιπλέον ποσότητα του Pb που δεν μπορεί να διαλυθεί στον Sn αποβάλλεται στα όρια των κόκκων υπό μορφή στερεού διαλύματος τύπου α.

Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος π.χ. 25°C η θέση του παραπάνω κράματος στο διάγραμμα φάσεων αντιστοιχεί στο σημείο Π (βλ. Σχήμα 36). Οι μονοφασικοί (ομογενείς) στους 183°C κόκκοι έχουν διασπαστεί και είναι διφασικοί (ετερογενείς). Από το σημείο Π φέρουμε ευθεία παράλληλη προς τον άξονα των x, που τέμνει τα όρια της διφασικής περιοχής στα σημεία K και Λ. Οι δύο φάσεις που αποτελούν τους κόκκους είναι (Pb)₂ και (Sn)_{0,5}.

Για να βρούμε την ποσότητα κάθε μιας από τις δύο φάσεις (Pb)₂ και (Sn)_{0,5} που αποτελούν τους κόκκους στους 25°C, εφαρμόζουμε τον κανόνα του μοχλού:

$$(Pb)_2 = \frac{ΠΛ}{ΚΛ} 100 = \frac{99,5-97,5}{99,5-2} 100 = 2,05\% \quad (13)$$

$$(Sn)_{0,5} = 100 - 2,05 = 97,95\% \quad (14)$$

Συγκολλήσεις τύπου Soldering

Η τεχνολογία των ψυχρών κολλήσεων ή των συγκολλήσεων soldering χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, από κολλήσεις ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε ηλεκτρονικές πλακέτες έως κολλήσεις σε βιομηχανικούς εναλλάκτες θερμότητας. Με την τεχνική soldering συγκολλούνται δύο υλικά με τη χρήση ενός τρίτου συγκολλητικού υλικού, το οποίο με την τήξη του επιτυγχάνει τη συγκόλληση χωρίς να τακούν τα προς συγκόλληση υλικά. Όταν τα συγκολλητικά υλικά που χρησιμοποιούνται, τήκονται κάτω από τους 450°C, η συγκόλληση ονομάζεται soldering. Όταν η θερμοκρασία τήξης υπερβαίνει τους 450°C, η συγκόλληση ονομάζεται brazing.

Οι χημικές συστάσεις και οι μηχανικές ιδιότητες των συγκολλητικών κραμάτων καλύπτονται από διεθνείς προδιαγραφές. Στις Η.Π.Α. χρησιμοποιείται η προδιαγραφή ASTM B32 (ASTM B32-08 Standard Specification for Solder Metal), ενώ στην ΕΕ η προδιαγραφή ISO/DIS 9453 (ISO/DIS 9453 Soft solder alloys - Chemical compositions and forms).

Τα συγκολλητικά κράματα υψηλού μολύβδου, που περιέχουν 5-20% κ.β. Sn, χρησιμοποιούνται στην μικροηλεκτρονική ή σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Έχουν μεγάλη περιοχή τήξης, γεγονός που τους προσδίδει δυνατότητα μορφοποίησης. Τα συγκολλητικά υλικά με την πιο ευρεία χρήση είναι το ευτηκτικό κράμα Pb-63Sn, καθώς και τα κράματα Pb-60Sn και Pb-50Sn. Αυτά τα κράματα χρησιμοποιούνται τόσο σε ηλεκτρονικές (συναρμολόγηση ηλεκτρονικών πλακετών) όσο και σε δομικές εφαρμογές, όπως η συγκόλληση αγωγών μη πόσιμου νερού και αερίων. Η μικρή περιοχή τήξης περιορίζει την διαμορφωσιμότητά τους. Κράματα με υψηλότερο ποσοστό Sn (65-100%Sn), έχουν περιορισμένες εφαρμογές κυρίως λόγω του γεγονότος ότι το ίδιο εύρος τήξης επιτυγχάνεται με τα πιο οικονομικά κράματα που είναι πλούσια σε Pb.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει παγκόσμιο ενδιαφέρον για την απομάκρυνση τοξικών στοιχείων από ηλεκτρονικά προϊόντα ευρείας χρήσεως. Αυτό έχει οδηγήσει σε αντίστοιχες προσπάθειες αντικατάστασης του μολύβδου στα συγκολλητικά κράματα που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρονική βιομηχανία. Οι προσπάθειες αυτές εστιάζονται στην ανάπτυξη συγκολλητικών κραμάτων χωρίς μολύβδο (lead-free solder alloys) για την αντικατάσταση του κλασσικού κράματος Pb-Sn. Τα μεταλλικά στοιχεία που θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τον Pb είναι μέταλλα χαμηλού σημείου τήξης όπως τα Bi, Sb και In, καθώς και εκείνα που σχηματίζουν ευτηκτικό σημείο με τον κασσίτερο όπως τα Ag και Cu.

Θερμοχωρητικότητα

Κατά την απορρόφηση ποσού θερμότητας dQ από ένα υλικό, η θερμοκρασία του αυξάνεται κατά dT . Το διαφορικό πηλίκο (dQ/dT) ονομάζεται **θερμοχωρητικότητα** ή ειδική θερμότητα:

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να προκληθεί είτε υπό σταθερό όγκο, είτε υπό σταθερή πίεση (C_p). Ισχύει ότι ειδική θερμότητα=θερμοχωρητικότητα/ατομικό βάρος. Οι μονάδες μέτρησης της θερμοχωρητικότητας στο S.I. είναι $J/mol \cdot K$, ενώ οι μονάδες μέτρησης της ειδικής θερμότητας στο ίδιο σύστημα $J/g \cdot K$. Χρησιμοποιώντας το συντελεστή μετατροπής J σε cal ($1 J/g = 0,24 cal/g$) και μετατρέποντας τους βαθμούς K σε βαθμούς $^{\circ}C$, η ειδική θερμότητα εκφράζεται σε μονάδες $cal/g^{\circ}C$.

Η θερμική ενέργεια Q (σε cal) που απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας κατά ΔT (σε $^{\circ}C$), ενός σώματος μάζας m (σε g), που έχει ειδική θερμότητα C_p ($cal/g^{\circ}C$), δίνεται από τη σχέση:

$$Q = mC_p\Delta T$$

Για τη μετάβαση μιας ορισμένης ποσότητας υλικού από τη στερεά στην υγρή κατάσταση, απαιτείται η πρόσδοση ορισμένου ποσού θερμότητας. Η ποσότητα της θερμότητας αυτής ονομάζεται **λανθάνουσα θερμότητα τήξης**, εξαρτάται από το είδος του υλικού και είναι ανάλογη της μάζας του υλικού που τήκεται (αναφερόμαστε συνήθως στη λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας). Λέγεται **λανθάνουσα θερμότητα**, διότι η απορρόφησή της δεν αυξάνει τη θερμοκρασία του υλικού, αλλά ξοδεύεται στη μετατροπή του από στερεό σε υγρό. Καθ' όλη τη διάρκεια της τήξης, η θερμοκρασία του υλικού παραμένει σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία τήξης. Η **ειδική λανθάνουσα θερμότητα** (L_F) (σε kJ/kg) είναι η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας για τη μετατροπή 1 kg υλικού από τη στερεή κατάσταση στην υγρή (ή αντίστροφα) χωρίς αλλαγή θερμοκρασίας. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης Q_L (σε kJ) δίνεται από τη σχέση:

$$Q_L = mL_F$$

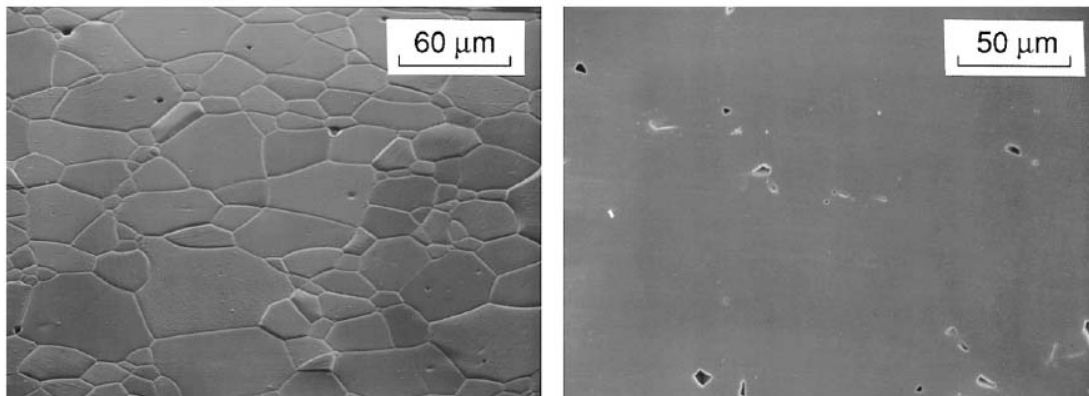
όπου, m μάζα (σε kg) και L_F ειδική λανθάνουσα θερμότητα (σε kJ/kg). Αν η ειδική λανθάνουσα θερμότητα εκφραστεί σε cal/g και η μάζα σε g, τότε η λανθάνουσα θερμότητα τήξης δίνεται σε cal/g.

13. ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΚΑΙ ΓΥΑΛΙΑ

Τα κεραμικά και γυαλιά δεν είναι ούτε μεταλλικά, ούτε οργανικά υλικά. Είναι ανόργανα μη μεταλλικά υλικά, το οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες ($>1000^{\circ}\text{C}$) είτε κατά το στάδιο της επεξεργασίας τους είτε κατά το στάδιο της εφαρμογής τους.

Τα κεραμικά των μηχανολογικών εφαρμογών (engineering ceramics) είναι συνήθως ενώσεις μετάλλων ή μεταλλοειδών όπως το πυρίτιο και το βόριο με μη μεταλλικά στοιχεία όπως το οξυγόνο, ο άνθρακας και το άζωτο. Ο άνθρακας στη μορφή γραφίτη και διαμάντι θεωρείται κεραμικό.

Τα κεραμικά είναι κυρίως κρυσταλλικά, ενώ τα γυαλιά είναι άμορφα. Οι ισχυροί ομοιοπολικοί ή μεικτού χαρακτήρα (ιοντικός-ομοιοπολικός) δεσμοί είναι υπεύθυνοι για τις ιδιαίτερες μηχανικές και θερμικές ιδιότητές τους.



Σχήμα 37: Παράδειγμα κρυσταλλικού κεραμικού: SEM δείγματος Αλούμινας (Al_2O_3): (αριστερά) είναι ορατά τα όρια των κόκκων, (δεξιά) μετά από λείανση τα όρια των κόκκων δεν διακρίνονται αλλά φαίνονται πόροι (σκούρες περιοχές).

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από τη χρήση κεραμικών και γυαλιών

Τα κεραμικά και γυαλιά εμφανίζουν ως πλεονέκτημα

- Σχετικά χαμηλή πυκνότητα (πιο ελαφριά υλικά)
- Υψηλό σημείο τήξης (μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών υψηλής θερμοκρασίας)
- Χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα (μονωτές)
- Πολύ υψηλή σκληρότητα (πιο ανθεκτικά σε φθορά από τριβή)
- Είναι ανθεκτικά σε διάβρωση.

και ως μειονέκτημα

- Μικρή αντίσταση σε εφελκυσμό λόγω της εύκολη διάδοσης ρωγμών (ψαθυρή συμπεριφορά, ευθραυστότητα)
- Μικρή αντοχή σε κόπωση, λυγισμό και κρούση
- Κόστος παραγωγής το οποίο ποικίλει.

Αργίλοι (Clays)

Αποτελείται από διάφορα πυριτικά άλατα-ορυκτά όπως ο καολινίτης, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Κατά την κατεργασία της η άργιλος αναμιγνύεται αρχικά με νερό στην πυκνότητα/συνεκτικότητα μιας παχύρευστης αλοιφής και μετά μορφώνεται σε οποιοδήποτε σχήμα. Ακολουθεί έψηση στους $800\text{-}1200^\circ\text{C}$ όπου εξατμίζεται το νερό και τήκεται μέρος του SiO_2 για να σχηματίσει γυαλί που θα δεσμεύσει το Al_2O_3 και το εναπομένον SiO_2 σε ένα στερεό σώμα.

Μηχανολογικά Κεραμικά

Πολλά Μηχανολογικά Κεραμικά όπως η Αλουμίνα Al_2O_3 και Ζιρκονία (ZrO_2) παράγονται από ορυκτά. Άλλα όπως το καρβίδιο του πυριτίου (SiC), καρβίδιο του βολφραμίου (WC), νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4) παρασκευάζονται από χημικές αντιδράσεις. Λειοτριβούνται σε σκόνη και συμπυκνώνονται σε χρήσιμα σχήματα/μορφές με ψυχρή ή θερμή συμπίεση. Μετά ακολουθεί έψηση (sintering), όπου λαμβάνει χώρα πυροσυσσωμάτωση, θέρμανση στους $\sim 0.7T_m$ σε συμπαγή μάζα (χωρίς ρευστοποίηση) και συμπίεση για την εξάλειψη των πόρων.

Τα μηχανολογικά κεραμικά εμφανίζουν υψηλή ελαστικότητα, χαμηλό βάρος, μεγάλη αντοχή στη θλίψη, υψηλή σκληρότητα κλπ.

Σύνθετα κεραμικά υλικά (cermets, cemented carbides)

Παρασκευάζονται με πυροσυσσωμάτωση σκόνης κεραμικού και μετάλλου. Το μέταλλο περιβάλλει τα κεραμικά σωματίδια που δίνουν στο υλικό υψηλή σκληρότητα και αντίσταση στη φθορά. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι το καρβίδιο του βολφραμίου WC με 3-25% κοβάλτιο Co , άλλα καρβίδια όπως το καρβίδιο του τιτανίου TiC , το καρβίδιο του τανταλίου TaC , το καρβίδιο του χρωμίου Cr_3C_2 σε συνδυασμό με WC με κοβάλτιο, νικέλιο ή και χάλυβα.

Προηγμένα κεραμικά

Ο όρος προηγμένα κεραμικά έκανε την εμφάνισή του την περασμένη δεκαετία, καθώς η διάκριση μεταξύ παραδοσιακών και σύγχρονων κεραμικών ήταν ανύπαρκτη. Ουσιαστικά όμως, η είσοδος των σύγχρονων κεραμικών άρχισε την δεκαετία του 1950, με την μαζική παραγωγή μπουζί από αλούμινα. Από το 1970 άρχισαν να χρησιμοποιούνται βορίδια, νιτρίδια και καρβίδια κυρίως του τιτανίου του βορίου και του πυριτίου και το 1972 εμφανίστηκε το SiALON , το οποίο παρουσιάζει εξαιρετικές θερμομηχανικές ιδιότητες. Στην δεκαετία του 1980, εμφανίστηκαν κεραμικά με βάση την ζιρκονία ZrO_2 , και η χρήση τους επεκτάθηκε πολύ γρήγορα λόγω της πολύ χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς.

Τα προηγμένα κεραμικά κατηγοριοποιούνται με κριτήριο το κύριο μη μεταλλικό στοιχείο των ενώσεών τους. Γενικά, είναι ενώσεις σταθερότερες των μετάλλων, με καλά ελεγχόμενη μικροδομή, μεγάλη χημική καθαρότητα και μικρό αριθμό φάσεων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν συνδυασμό καλών ιδιοτήτων. Επίσης, είναι σκληρά και ψαθυρά υλικά. Ενώ η αστοχία των μετάλλων οφείλεται σε θραύση, μετά από πλαστική παραμόρφωση ή σε κόπωση, η αστοχία των κεραμικών

οφείλονται στην ψαθυροποίηση τους, είτε λόγω άμεσης φόρτισης, είτε λόγω θερμικών τάσεων. Παρακάτω γίνεται παρουσίαση των κυρίων κατηγοριών των προηγμένων κεραμικών και ορισμένων βασικών αντιπροσώπων.

(α) Οξείδια

Αλουμίνα (Al_2O_3): πιθανόν το πλέον διαδεδομένο προηγμένο κεραμικό. Πρωτοχρησιμοποιήθηκε το 1893. Αποτελείται από εύτηκτο βωξίτη, ρινίσματα σιδήρου και κάρβουνο. Έχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, υψηλή μονωτικότητα και δυστηκτότητα. Χρησιμοποιείται ως λειαντικό υλικό, ως ηλεκτρικός και θερμικός μονωτής, ως εργαλείο κοπής, στην κατασκευή laser, στην οδοντιατρική κ.α.

Ζirkονία (ZrO_2): έχει καλή σκληρότητα, υψηλή αντοχή στα θερμικά σοκ, στην τριβή και την διάβρωση, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και χαμηλό συντελεστή τριβής. Παρουσιάζει 3 κρυσταλλογραφικές φάσεις ανάλογα με την θερμοκρασία. Σε θερμοκρασία πάνω από 2680°C , έχει κυβική δομή, από 2680 έως 1150°C , έχει τετραγωνική δομή, ενώ κάτω από 1150°C κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα. Συνήθεις χρήσεις της είναι στις βαλβίδες διαφυγής αερίων, ως αντιδιαβρωτική επένδυση εξαρτημάτων στους κινητήρες αυτοκινήτων και ως καλούπια στις εν θερμώ κατεργασίες μετάλλων. Η προσθήκη υττρίας (Y_2O_3) σε περιεκτικότητα από 0-9%, δίνει είτε πλήρως, είτε μερικώς σταθεροποιημένη ζirkονία, η οποία χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικές εφαρμογές. Τα οξείδια MgO , CaO και Y_2O_3 αποτελούν για την ζirkονία σταθεροποιητές πλέγματος και η προσθήκη τους αποτρέπει την δημιουργία ρωγμών στο υλικό.

(β) Καρβίδια

Καρβίδιο του βορίου (B_4C): είναι υλικό με μικρή πυκνότητα και υψηλή σκληρότητα και χρησιμοποιείται συνήθως ως αντιτριβική προστασία στα εργαλεία κοπής.

Καρβίδιο του βολφραμίου (WC): χρησιμοποιείται ως κοπτικό εργαλείο και ως υλικό καλούπιών. Αποτελείται από μόρια βολφραμίου και άνθρακα με κοβάλτιο ως συνδετικό.

Καρβίδιο του τιτανίου (TiC): χρησιμοποιείται στους λειαντικούς τροχούς και ως λειαντικό υλικό. Έχει νικέλιο και μόλυβδο ως συνδετικά και δεν είναι τόσο σκληρό όσο το WC .

Καρβίδιο του πυριτίου (SiC): Ανακαλύφθηκε το 1891. Παρουσιάζει καλή αντοχή στην φθορά, στην διάβρωση και πολύ καλή συμπεριφορά σε συνθήκες οξείδωσης και σε υψηλές θερμοκρασίες, γι' αυτό χρησιμοποιείται συχνά στην επικάλυψη μετάλλων π.χ. σε αεριοστρόβιλους, και ως ενισχυτικό σε σύνθετα υλικά με μεταλλική μήτρα. Η χρήση του ως προστατευτικό στρώμα σε αεριοτουρμπίνες επιμηκώνει τον χρόνο λειτουργίας τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

(γ) Νιτρίδια

Νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4): είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες και σε συνθήκες οξείδωσης όπως και το SiC , έχει χαμηλή θερμική διαστολή και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Χρησιμοποιείται για κατασκευή ή επικάλυψη εξαρτημάτων σε κινητήρες αυτοκινήτων προσδίδοντας χαρακτηριστικά αθόρυβης και ανθεκτικής λειτουργίας, ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες. Στο θάλαμο καύσης του κινητήρα, όπου αναπτύσσονται συνθήκες πίεσης 130 bar και 800°C , χρησιμοποιείται ως μονωτικό μειώνοντας την κατανάλωση του καυσίμου και την ρύπανση.

Νιτρίδιο του βορίου (BN): είναι το δεύτερο πιο σκληρό υλικό μετά το διαμάντι και είναι κακός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος. Έχει συνήθη εφαρμογή σε κοπτικά εργαλεία, όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή στην τριβή και την φθορά και στους

λειαντικούς τροχούς. Δεν υπάρχει στη φύση και παράχθηκε συνθετικά περίπου το 1970, με παρόμοιες τεχνικές με αυτές που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του συνθετικού διαμαντιού.

Νιτρίδιο του τιτανίου (TiN): λόγω της αντοχής του σε φθορά, χρησιμοποιείται ως επίστρωμα σε κοπτικά εργαλεία.

Οξυνιτρίδιο του πυριτίου και αργιλίου SiALON: είναι μίγμα αλουμίνας και νιτρίδιου του πυριτίου που βρίσκεται μέσα σε υαλώδη φάση που αποτελείται κυρίως από Y_2O_3 . Είναι σχετικά ελαφρύ με χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής και πολύ καλή αντοχή σε θραύση και τριβή, σε σχέση με άλλα κεραμικά. Χρησιμοποιείται σε εξαρτήματα κινητήρων που λειτουργούν σε χαμηλές και μέσες θερμοκρασίες και υφίστανται τριβή, σε ακροφύσια συγκόλλησης, ρουλεμάν και εργαλεία κοπής.

Ενώσεις του ουρανίου (UO_2 , UC, US, κλπ): Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε πυρηνικές εφαρμογές, λόγω του συνδυασμού δυστηκτότητας, μηχανικής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες και αντοχής στη ραδιενέργεια. Βρίσκουν εφαρμογή ως υλικά επένδυσης πυρηνικών αντιδραστήρων (δυνατότητα δέσμευσης των προϊόντων της σύντηξης).

(δ) Άνθρακας

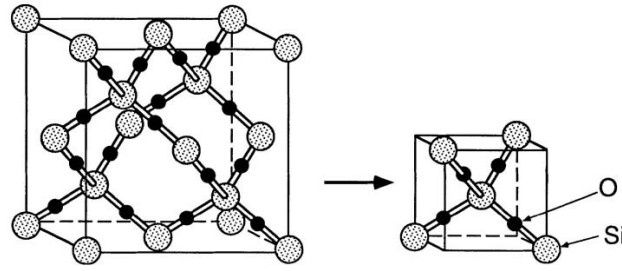
Χρησιμοποιείται με τις δύο αλλοτροπικές μορφές του:

Γραφίτης: τα άτομα του άνθρακα είναι διατεταγμένα σε πυκνά επίπεδα, προσδίδοντας στο υλικό κακή αντοχή σε διάτμηση και σε τριβή. Ωστόσο, έχει πολύ καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεγάλη θερμική αντίσταση και χρησιμοποιείται ως ενισχυτικό στα σύνθετα υλικά, με την μορφή ινών.

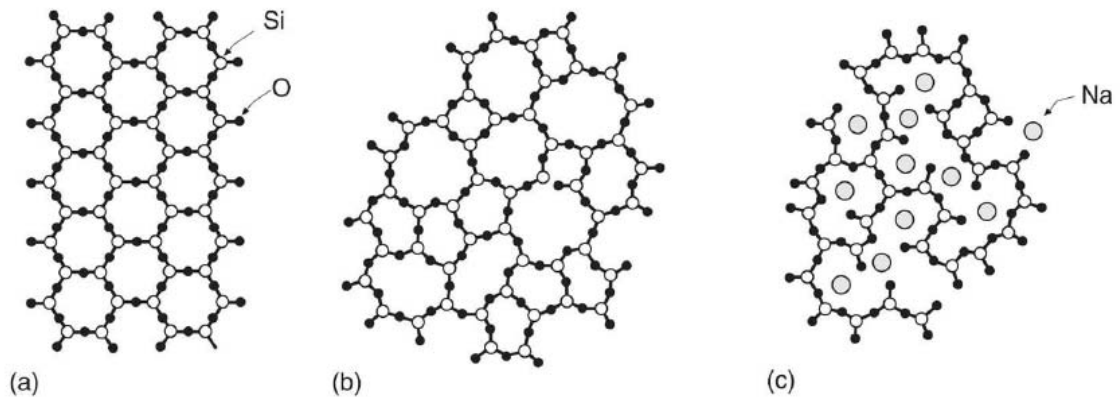
Διαμάντι: είναι το πιο σκληρό φυσικό υλικό (7000-8000 HV), με κακή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Έχει ευρεία χρήση ως κοπτικό εργαλείο και ως τροχός λείανσης. Χρησιμοποιείται και ως καλούπι στην συρματοποίηση για διαμέτρους μικρότερες από 0.06 mm. Το συνθετικό διαμάντι κατασκευάστηκε το 1955 και χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε βιομηχανικές εφαρμογές. Σε σχέση με το φυσικό διαμάντι έχει έως 50 φορές μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα και 10 φορές καλύτερη αντοχή στην διάβρωση από laser.

Γυαλιά

Τα γυαλιά είναι συνήθως άμορφα στερεά και έχουν ως βασική μονάδα την πυριτία SiO_2 . Η υαλώδης δομή λαμβάνεται κατά την ταχύτατη απόψυξη τήγματος οξειδίων. Οι υψηλές τιμές ιξώδους και οι ισχυροί δεσμοί που αναπτύσσονται μεταξύ των τετραέδρων της πυριτίας (SiO_4^{2-}) δεν επιτρέπουν την έναρξη της κρυστάλλωσης. Η καθαρή πυριτία SiO_2 έχει ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία κατεργασίας (1800°C). Μπορεί όμως να μειωθεί με την προσθήκη άλλων οξειδίων μετάλλων όπως του νατρίου, καλίου και ασβεστίου, που επίσης μειώνουν την ψαθυρότητα.



Σχήμα 38: Πυριτία SiO_2 στη κρυσταλλική μορφή χαλαζία (quartz).



Σχήμα 39: Απλουστευμένες διδιάστατες δομές πυριτίας (a) χαλαζίας, (b) γυαλί, (c) γυαλί με τροποποιητή πλέγματος που μειώνει τη θερμοκρασία κατεργασίας.

Ηλεκτρικές ιδιότητες κεραμικών

Τόσο τα ιοντικά όσο και τα ομοιοπολικά κεραμικά δεν έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια σθένους, γεγονός που τα καθιστά, γενικά, κακούς αγωγούς της θερμότητας και του ηλεκτρισμού. Υπάρχουν όμως και κάποιες εξαιρέσεις. Για παράδειγμα τα καρβίδια, τα νιτρίδια και τα βορίδια των στοιχείων W, V, Nb, Cr, Co, είναι καλοί αγωγοί. Επίσης, υλικά όπως Si, Ge, SiC κλπ, παρουσιάζουν ημιαγωγιμότητα, όπου έχουμε μεταπήδηση ηλεκτρονίων μεταξύ διαφορετικών σταθμών ενέργειας. Τα κεραμικά, λόγω της ηλεκτρομαγνητικής τους συμπεριφοράς, βρίσκουν εφαρμογή σε συσκευές όπως κεραίες, μαγνήτες, μαγνητικές μνήμες H/Y, μετασχηματιστές, πυκνωτές, ηλιακοί συσσωρευτές, κλπ.

Διηλεκτρικές ιδιότητες κεραμικών

Τα κεραμικά που είναι καλοί μονωτές αναφέρονται σαν διηλεκτρικά υλικά. Αν και τα υλικά αυτά δεν άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα, όταν βρεθούν μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο υφίστανται μια ελαφρά αλλαγή στην ισορροπία της φόρτισης τους, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό δίπολο. Αυτή η ιδιότητα τα καθιστά εξαιρετικά υλικά στην χρήση τους ως πυκνωτές, για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες κεραμικών

Σε κάποια υλικά, οι μονοκρυστάλλοι είναι δυνατόν να παρουσιάσουν πόλωση, υπό την επίδραση φορτίου. Η μία πλευρά του κρυστάλλου έλκει ένα αρνητικά φορτισμένο ιόν, ενώ η άλλη ένα θετικά φορτισμένο ιόν. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πιεζοηλεκτρικότητα. Η παραπάνω ιδιότητα έχει εξαπλώσει την χρήση των πιεζοηλεκτρικών κεραμικών ως μετατροπείς σε υπερηχητικές συσκευές, μικρόφωνα, επιταχυνσιόμετρα, συσκευές σόναρ κ.α.

Μαγνητικές ιδιότητες κεραμικών

Οι μαγνητικές ιδιότητες των κεραμικών είναι γνωστές εδώ και αιώνες, όμως η φύση και η πηγή του μαγνητισμού δεν μπορούσε να εξηγηθεί. Πιο πρόσφατες μελέτες έδειξαν, ότι τα οξειδία κάποιων στοιχείων έχουν ισχυρές μαγνητικές ιδιότητες, υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και χαμηλές απώλειες. Αυτές οι ιδιότητες έδωσαν στα κεραμικά ένα σημαντικό προβάδισμα έναντι των μετάλλων, ιδιαίτερα σε συσκευές υψηλής συχνότητας. Η χρήση τους σε εφαρμογές όπως μονάδες μνήμης σε υπολογιστές, κεφαλές σε μαγνητόφωνα και μικροκυκλώματα σε τηλεοράσεις, τρανζίστορ, μικροκύματα και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές, είναι πλέον συνήθειες.

Οπτικές ιδιότητες κεραμικών

Οι οπτικές ιδιότητες ενός υλικού περιλαμβάνουν την απορρόφηση, την διαφάνεια, την διάθλαση, το χρώμα και το φωσφορισμό. Αυτές οι ιδιότητες καθορίζονται βασικά από την επίδραση μεταξύ της επικείμενης μαγνητικής ακτινοβολίας και των ηλεκτρονίων εντός του υλικού. Η επικείμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία έχει ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και μήκων κύματος, μπορεί να διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο κάνοντας το να μετακινηθεί από το αρχικό του ενεργειακό επίπεδο σε ένα διαφορετικό επίπεδο. Κάθε υλικό αντιδρά με διαφορετικό τρόπο σε κάθε μήκος κύματος. Ο βαθμός απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το είδος του χημικού δεσμού και την διαθεσιμότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τα κεραμικά υλικά μπορούν να εγκλωβίζουν ορισμένα μήκη κύματος της ακτινοβολίας και να είναι διαφανή μόνο σε ένα μικρό εύρος αυτών. Έτσι βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή ως φακοί, πρίσματα, φίλτρα καθώς και ως οθόνες παλμογράφων και τηλεοράσεων, λυχνίες φωτοτυπικών συσκευών κ.α..

Θερμικές ιδιότητες κεραμικών

Λόγω της σταθερότητας των ιοντικών και ομοιοπολικών δεσμών, τα κεραμικά εμφανίζουν υψηλά σημεία τήξης, υψηλότερα από των μετάλλων. Η *θερμοχωρητικότητα C* ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να αυξήσει την θερμοκρασία ενός υλικού κατά ένα βαθμό. Σαν μέγεθος είναι ανεξάρτητη από την κρυσταλλική δομή ή την σύνθεση του υλικού, αλλά εξαρτάται κυρίως από το ποσοστό του πορώδους. Συνεπώς, υλικά με ελάχιστο πορώδες απαιτούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από περισσότερο πορώδη υλικά, για την ίδια θερμοκρασιακή αύξηση.

Η *θερμική αγωγιμότητα* k είναι ο ρυθμός ροής της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού. Στα κεραμικά υλικά συναντάμε ένα μεγάλο εύρος των τιμών της. Υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας απαντώνται σε υλικά που αποτελούνται από στοιχεία με παρόμοια ατομικά βάρη (π.χ. SiC, BeO, B₄C) ή από ένα στοιχείο (διαμάντι ή γραφίτης). Υλικά όπως το οξείδιο του ουρανίου (UO₂) ή το οξείδιο του θορίου (ThO₂) με μεγάλες διαφορές στο μέγεθος και στα ατομικά βάρη των ανιόντων και των κατιόντων, εμφανίζουν μικρή θερμική αγωγιμότητα, καθώς επίσης και στοιχεία που βρίσκονται σε στερεή κατάσταση. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την αγωγιμότητα είναι οι ακαθαρσίες, το πορώδες, οι μικρορωγμές, η μη κρυσταλλικότητα, τα όρια και το μέγεθος των κόκκων.

14. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Σύνθετα καλούνται τα υλικά που κατασκευάζονται από δύο διαφορετικά υλικά προκειμένου να αποκτήσουν βελτιωμένες ιδιότητες (μηχανικές, ηλεκτρικές). Μία απλή περίπτωση παραδοσιακού σύνθετου υλικού είναι οι κολόνες οπλισμένου σκυροδέματος (μπετόν αρμέ), οι οποίες αποτελούνται από σκυρόδεμα (το οποίο από μόνο του αποτελεί σύνθετο υλικό από τσιμέντο και χαλίκια) και εσωτερικά από ράβδους μαλακού χάλυβα. Το οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει αυξημένη αντοχή και δυσθραυστότητα.

Κάθε σύνθετο υλικό αποτελείται από το υλικό της μήτρας και από το ενισχυτικό υλικό. Ανάλογα με τη μορφή του ενισχυτικού υλικού, υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες σύνθετου υλικού:

- **Σύνθετα υλικά με διασπορά σωματιδίων.** Ένα παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι το σύνθετο πολυστυρενίου-ελαστομερούς. Το σύνθετο αυτό υλικό περιέχει σε διασπορά σωματίδια λάστιχου μέσα σε μήτρα πολυστυρενίου και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πλαστικότητας του αρχικά ψαθυρού πολυστυρενίου. Ένα άλλο παράδειγμα είναι το αλουμίνιο με διεσπαρμένους κόκκους καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Λόγω των κεραμικών κόκκων (SiC), το υλικό συνδυάζει υψηλή σκληρότητα και ολκιμότητα λόγω της μήτρας αλουμινίου.

- **Σύνθετα υλικά με ίνες.** Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου σύνθετου υλικού είναι πολυμερές (φαινολικά, πολυεστέρες, εποξικές ρητίνες) ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (fiberglass). Ένα τέτοιο σύνθετο υλικό παρουσιάζει μεγάλη μηχανική, χημική αντοχή και δυσθραυστότητα σε συνδυασμό με τη μικρή πυκνότητα. Χρησιμοποιείται σε αεροναυπηγικές-ναυπηγικές εφαρμογές και στη χημική βιομηχανία για την κατασκευή δοχείων που περιέχουν διαβρωτικά υγρά. **Πολυμερή με ίνες Kevlar** (είναι η εμπορική ονομασία κάποιου πολυαμιδίου που παρασκεύασε η εταιρεία DuPont) ή άνθρακα είναι σύνθετα υλικά με μεγάλη αντοχή στην κρούση. Βρίσκουν εφαρμογές στην κατασκευή αμαξωμάτων αγωνιστικών αυτοκινήτων, τριβέων και εδράνων και γενικά στοιχείων μηχανών, που καταπονούνται κάτω από έντονες συνθήκες (μηχανικές-θερμικές).

Στα **παραδοσιακά σύνθετα** ανήκουν υλικά όπως το fiberglass, το ξύλο και το σκυρόδεμα. Τα υπόλοιπα σύνθετα που χρησιμοποιούνται σε τεχνικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων συνιστούν τα λεγόμενα **προηγμένα σύνθετα υλικά**.

Ανάλογα με το υλικό της μήτρας υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες σύνθετων υλικών:

- Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας
- Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας
- Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας.

Τα προηγμένα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας χρησιμοποιούνται ως υλικά υψηλών προδιαγραφών στη ναυπηγική, αεροναυπηγική και αυτοκινητοβιομηχανία, αλλά και στην κατασκευή εδράνων, τριβέων, οδοντωτών τροχών και άλλων στοιχείων μηχανών, που εκτός της μηχανικής αντοχής παίζει σπουδαίο ρόλο και η ελαχιστοποίηση του βάρους της κατασκευής. Τα προηγμένα σύνθετα κεραμικής ή μεταλλικής μήτρας χρησιμοποιούνται για την κατασκευή στοιχείων μηχανών εσωτερικής καύσης, αεριοστροβίλων αλλά και εργαλείων (cermet WC/Co) και γενικά εξαρτημάτων, που απαιτείται να αντέχουν σε έντονες μηχανικές καταπονήσεις και σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Νανοτεχνολογία

Η Νανοτεχνολογία σχετίζεται με την κατανόηση και τον έλεγχο της ύλης σε διαστάσεις 1 έως 100 nm, όπου φυσικά φαινόμενα επιτρέπουν πρωτότυπες εφαρμογές. Αν και ακούγεται περισσότερο ως τεχνικός όρος, εντούτοις έχει επικρατήσει να περιλαμβάνει την Επιστήμη, τη Μηχανική και την Τεχνολογία της Νανοκλίμακας και εμπλέκει τη φαντασία, τη μέτρηση, την προσομοίωση και τον χειρισμό της ύλης σε αυτές τις διαστάσεις. Στη νανοκλίμακα, οι φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες των υλικών διαφέρουν εκπληκτικά με τη συμπεριφορά της ύλης στον μακρόκοσμο, όπως δηλαδή έχουμε μάθει να την αντιλαμβανόμαστε με τις αισθήσεις μας. Η Νανοτεχνολογία στοχεύει ακριβώς στην κατανόηση αυτών των ιδιοτήτων και στη δημιουργία νέων, βελτιωμένων υλικών, συσκευών και συστημάτων έχοντας ως γνώμονα αυτές.

Ένας από τους σημαντικότερους λόγους για τους οποίους η Νανοτεχνολογία έχει βρεθεί στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος είναι ότι μας βοηθά να καλύψουμε ένα μεγάλο κενό που έχουμε στην κατανόηση της ύλης. Μέχρι τώρα, γνωρίζουμε αρκετά πράγματα για τα υποατομικά σωματίδια αλλά και τη συμπεριφορά μεμονωμένων ατόμων και μορίων με τη συμβολή της Φυσικής και της Χημείας. Επίσης έχουμε μάθει πολλά για τη συμπεριφορά της ύλης στον μακρόκοσμο. Ωστόσο η γνώση μας ήταν μικρή για τη συμπεριφορά συστημάτων ατόμων ή/και μορίων. Η Νανοτεχνολογία μας επέτρεψε να εμβαθύνουμε σε αυτές τις διαστάσεις.

Ένας άλλος λόγος, εξίσου σημαντικός, είναι ότι τα φαινόμενα της νανοκλίμακας γεννούν μεγάλες προσδοκίες για εκπληκτικές εφαρμογές. Για παράδειγμα είναι δυνατή η αρχιτεκτονική εξειδικευμένων μορίων άτομο-προς άτομο. Για αυτούς τους λόγους και για πολλούς ακόμα δεν είναι τυχαίο που δαπανούνται μεγάλα ποσά από τις κυβερνήσεις των προηγμένων κρατών για την χρηματοδότηση προγραμμάτων που αφορούν την Νανοτεχνολογία.

Όσον αφορά την ιστορική εξέλιξη της Νανοτεχνολογίας, η απαρχή της μπορεί να τοποθετηθεί σε μια ιστορική ομιλία του μεγάλου και διορατικού νομπελίστα φυσικού Richard P. Feynman, την οποία έδωσε στις 29 Δεκεμβρίου 1959 στο ετήσιο συνέδριο της Αμερικανικής Ένωσης Φυσικών που διεξήχθη στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Καλιφόρνια, με τίτλο *Υπάρχει πολύς χώρος στον πυθμένα (There's Plenty of Room at the Bottom)*. Στην ομιλία αυτή ο Feynman εξετάζει τις επιπτώσεις που θα είχε ο ενδεχόμενος έλεγχος της ύλης στην ατομική κλίμακα, προσβλέπει σε καλύτερα ηλεκτρονικά μικροσκόπια, και πραγματεύεται μερικές πολύ πρωτότυπες ιδέες που προκάλεσαν αίσθηση εκείνη την εποχή.

Μεγάλοι σταθμοί στην ανάπτυξη της Νανοτεχνολογίας ήταν το 1981 η ανακάλυψη του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (STM) αλλά και η πρώτη δημοσίευση που έκανε λόγο για μοριακή μηχανική με ακρίβεια ατόμου από τον K. Eric Drexler. Το 1985 η ανακάλυψη των φουλερενίων και το 1986 η ανακάλυψη του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης (AFM) έδωσαν μεγάλη δυναμική, που επιβεβαιώνεται με την δημοσίευση πολλών ερευνητικών προσπαθειών για την νανοκλίμακα και την έκδοση πολλών νέων επιστημονικών περιοδικών που αφορούν αποκλειστικά τις νανοδιαστάσεις.

Σταδιακά η Νανοτεχνολογία άρχισε να εμπλέκεται με πολλά επιστημονικά πεδία, όπως η Ιατρική, η Βιολογία, η Επιστήμη Υλικών, η Χημική Μηχανική και άλλα. Ως φυσικό επακόλουθο δημιουργήθηκαν και Νανο-υλικά.

Νανοςύνθετα υλικά

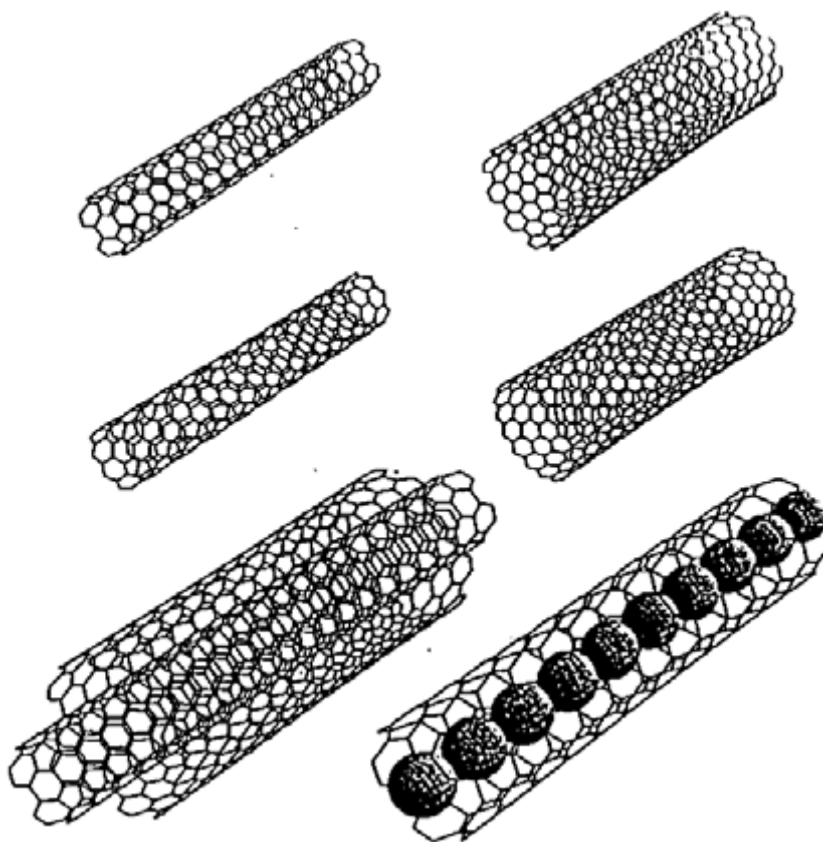
Αν και οι όροι **νανοϋλικό** και **νανοσύνθετο** αντιπροσωπεύουν νέα πεδία στην Επιστήμη των Υλικών, στην πραγματικότητα τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται εδώ και αιώνες και υπάρχουν γύρω μας στη φύση. Ωστόσο δεν είναι παρά τα τελευταία χρόνια που ο χαρακτηρισμός και ο έλεγχος της ύλης στις νανοδιαστάσεις, διερευνήθηκαν διεξοδικά. Ένα νανοςύνθετο ορίζεται ως ένα σύνθετο υλικό του οποίου κάποιο από τα συστατικά του έχει τουλάχιστον μία διάστασή του στη νανοκλίμακα. Η πρόκληση και το ενδιαφέρον στην ανάπτυξη νανοσυνθέτων υλικών είναι να βρούμε τρόπους να δημιουργήσουμε μακροδομές που θα ωφελούνται από τις μοναδικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των νανοδομών που θα υπάρχουν μέσα τους.

Φυσικά υλικά όπως τα κόκκαλα, τα δόντια, είναι πολύ καλά παραδείγματα της πετυχημένης εφαρμογής αυτής της ιδέας, προσφέροντας άριστες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με αυτές των συστατικών τους. Τέτοια σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πολύ καλά οργανωμένες δομές τόσο σε μακροσκοπικό επίπεδο, όσο και στις νανοδιαστάσεις. Οι επιστήμονες αγωνίζονται να κατανοήσουν αυτά τα υλικά, που είναι η φυσική εκδοχή των νανοσυνθέτων. Συνήθως τα υλικά αυτά αποτελούνται από δύο συστατικά: το υλικό της ενίσχυσης, οι διαστάσεις του οποίου είναι στην νανοκλίμακα και τη μήτρα που φιλοξενεί την ενίσχυση, και η οποία είναι ένα μαλακό υλικό, συνήθως πρωτεϊνικής φύσης. Γιατί όμως η νανοκλίμακα παίζει τόσο σημαντικό ρόλο;

Από μηχανική άποψη, ο μηχανισμός για αυτά τα βιοσύνθετα είναι απλός: η μήτρα μεταφέρει τη φόρτιση μέσω διάτμησης στην ενίσχυση. Ένας μεγάλος λόγος μήκους προς τη διάμετρο (aspect ratio) της ενίσχυσης αντισταθμίζει το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας της μαλακής πρωτεϊνικής μήτρας, οδηγώντας σε βελτιωμένη δυσκαμψία του συνθέτου. Επίσης η αντοχή στη θραύση των βιοσυνθέτων εξαρτάται από τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό της ενίσχυσης. Έτσι, η χρήση νανοδομών επιτρέπει την προσέγγιση της μέγιστης θεωρητικής αντοχής του υλικού, καθώς οι μηχανικές ιδιότητες δεν επηρεάζονται από ατέλειες στη νανοκλίμακα. Αυτή η παρατήρηση είναι μια επέκταση της κλασσικής προσέγγισης για ανθεκτικά υλικά, σύμφωνα με την οποία πρέπει να μειώνονται οι διαστάσεις τόσο ώστε να αποκλείονται κρίσιμες ατέλειες. Γι' αυτό, χρησιμοποιούνται ως ενίσχυση υλικά με υψηλή κρυσταλλικότητα και με διαστάσεις σε νανόμετρα, οπότε όλες οι ατέλειες εκτός από τις ατομικές μπορούν να εξαλειφθούν. Αυτή η εξερεύνηση των ιδιοτήτων σαν συνάρτηση των ατελειών δεν περιορίζεται μόνο στις μηχανικές, καθώς ένα μεγάλο εύρος από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών επίσης εξαρτώνται από τη συγκέντρωση των ατελειών. Ακόμη, η μικρή κλίμακα μεγέθους μπορεί να δημιουργήσει διάφορα εγγενή φαινόμενα, για παράδειγμα μέσω του κβαντικού περιορισμού ή της δραματικής αύξησης της διεπιφανειακής περιοχής.

Η ιδέα της ανάπτυξης δομικών και λειτουργικών νανοσυνθέτων υλικών με βελτιωμένη συμπεριφορά βρίσκεται αυτή τη στιγμή στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος για μια ευρεία ποικιλία μεταλλικών, κεραμικών και πολυμερικών μητρών, αν και έμφαση έχει δοθεί κυρίως στα πολυμερή υλικά. Τα υλικά ενίσχυσης μπορούν να είναι είτε οργανικά είτε ανόργανα, με πολύ μεγάλη ποικιλία συνδυασμών και δομών. Το σύνθετο που προκύπτει γενικά παρουσιάζει πλήθος βελτιωμένων ιδιοτήτων, τόσο ώστε να είναι δύσκολο να το διακρίνουμε σε δομικό ή λειτουργικό. Τέλος πρέπει να σημειώσουμε ότι στη βιβλιογραφία αντί του όρου *υλικό ενίσχυσης* (reinforcement) πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος *υλικό πλήρωσης* (filler) χωρίς διακριτή διαφορά.

Ένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως ως υλικό ενίσχυσης είναι οι **νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes)**. Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί προβλέφθηκε αρχικά και στη συνέχεια επαληθεύτηκε πειραματικά ότι έχουν αξιόλογες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Ο συνδυασμός αυτών των ιδιοτήτων με τη χαμηλή τους πυκνότητα τους καθιστά ιδανικούς για πολυμερικά σύνθετα υλικά υψηλής απόδοσης. Κατά μία έννοια μάλιστα, ίσως να αποτελούν την επόμενη γενιά ινών άνθρακα. Παρόλο που δεκάδες ή και εκατοντάδες κιλά νανοσωλήνων άνθρακα παράγονται αυτή τη στιγμή κάθε μέρα, η ανάπτυξη υψηλής αντοχής και δυσκαμψίας πολυμερικών συνθέτων που να βασίζονται στους νανοσωλήνες καθυστερεί από την έλλειψη διαθεσιμότητας νανοσωλήνων υψηλής καθαρότητας και ποιότητας σε μεγάλες ποσότητες.



Σχήμα 40: Σχηματική αναπαράσταση διαφόρων δομών νανοσωλήνων άνθρακα.

Το μικρό μέγεθος αυτών των ενισχυτικών υλικών γεννά ένα πλήθος προκλήσεων που πρέπει να ξεπεραστούν. Παρόλο που τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει μεγάλα βήματα για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες στην παραγωγή πολυμερών νανοσυνθέτων, η διαδικασία παραγωγής αποτελεί κλειδί για την πλήρη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των νανοϋλικών της ενίσχυσης. Μια πρωταρχική δυσκολία είναι η επίτευξη καλής διασποράς της ενίσχυσης στη μήτρα. Αν δεν επιτευχθεί, τότε τα συσσωματώματα δρουν ως ατέλειες, γεγονός που περιορίζει τη μηχανική συμπεριφορά του συνθέτου. Τα συσσωματώματα αυτά επηρεάζουν τις φυσικές ιδιότητες του συνθέτου, όπως για παράδειγμα την οπτική διαπερατότητα.

Όταν διασπείρονται μικρά σωματίδια σε ένα χαμηλού ιξώδους μέσο, μηχανισμοί διάχυσης, αλλά και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματίων μεταξύ τους και με τη μήτρα παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο καθώς η διάμετρός τους μειώνεται κάτω από 1 μm . Δεν είναι τόσο το μέγεθος που έχει μεγάλη σημασία, όσο ο διεπιφανειακός όγκος που επηρεάζει σημαντικά τις τελικές ιδιότητες. Οι διεπιφανειακές περιοχές μπορούν να έχουν διαφορετικές ιδιότητες από αυτές του καθαρού πολυμερούς και να αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό ποσοστό του όγκου του συνθέτου για νανοσωματίδια με επιφάνεια της τάξης εκατοντάδων m^2/g . Ο διεπιφανειακός όγκος εξαρτάται τόσο από τη διασπορά και την κατανομή των νανοσωματιδίων, όσο και από την επιφάνειά τους.

Στα παραδοσιακά ινώδη σύνθετα, η διεπιφανειακή περιοχή ορίζεται σαν την περιοχή της οποίας οι ιδιότητες διαφέρουν και από την μήτρα και από την ενίσχυση. Με άλλα λόγια, οι ιδιότητες της πολυμερικής μήτρας του νανοςυνθέτου διαφέρουν από αυτές του καθαρού πολυμερούς, σε όρους όπως ο βαθμός πολυμερισμού, η μορφολογία των πολυμερικών αλυσίδων, ο βαθμός κρυσταλλικότητας και άλλες. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να επηρεάσουν την παραγωγή και τις τελικές ιδιότητες του νανοςυνθέτου. Μια απλή αλλά σημαντική συνέπεια αυτών είναι το γεγονός ότι γίνεται εξαιρετικά δύσκολη η διαβροχή ολόκληρης της επιφάνειας των νανοσωματιδίων από το πολυμερές, οπότε γίνεται και δύσκολη η ομοιόμορφη διασπορά των σωματιδίων. Επίσης, η ισχυρή επίδραση των διεπιφανειακών αλληλεπιδράσεων κατά τη διαδικασία παραγωγής μπορεί να μεταβάλλει τη μικροδομή της μήτρας, πράγμα που επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του νανοςυνθέτου ανεξάρτητα από το αν η ενίσχυση φέρει το βάρος της φόρτισης. Επομένως, η μικροδομή του νανοςυνθέτου πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη όταν αξιολογείται η συμπεριφορά συνθέτων πολυμερικής μήτρας-νανοσωλήνων άνθρακα. Πρέπει επίσης να αναφέρουμε ότι λόγω της ποικιλομορφίας στη δομή των νανοσωλήνων, ποικίλουν και τα συστήματα πολυμερών-νανοσωλήνων που ερευνώνται, και η σχέση δομής-ιδιοτήτων αναδύεται μέσα από την έρευνα αυτή.

Νανοςωλήνες άνθρακα

Από την ανακάλυψή τους το 1991 από τον Iijima, οι νανοςωλήνες άνθρακα έχουν προκαλέσει τεράστια δραστηριότητα στις περισσότερες περιοχές της επιστήμης και της τεχνολογίας λόγω των ανεπανάληπτων φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους. Κανένα άλλο υλικό στο παρελθόν δεν έχει επιδείξει το συνδυασμό μηχανικών, θερμικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων που τους αποδίδεται. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τους νανοςωλήνες ιδανικούς όχι μόνο για μια πληθώρα εφαρμογών, αλλά και για έρευνα πάνω σε θεμελιώδη ζητήματα της επιστήμης.

Πιο συγκεκριμένα, αυτός ο συνδυασμός ιδιοτήτων κάνει τους νανοςωλήνες ιδανικούς υποψηφίους για υλικά πλήρωσης στα σύνθετα. Οι ερευνητές προσπαθούν να εκμεταλλευτούν την αγωγιμότητα και τον υψηλό λόγο διαστάσεων τους για να παράγουν αγωγή πλαστικά με υπερβολικά χαμηλό «κατώφλι διήθησης» (ή αλλιώς κρίσιμη περιεκτικότητα). Επίσης ερευνάται η δυνατότητα κατασκευής θερμικά αγωγιμών συνθέτων υλικών, λόγω της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας των νανοςωλήνων. Ωστόσο το πιο πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας έχει να κάνει με τη μηχανική βελτίωση των πλαστικών χρησιμοποιώντας νανοςωλήνες άνθρακα ως ενισχυτικά υλικά.

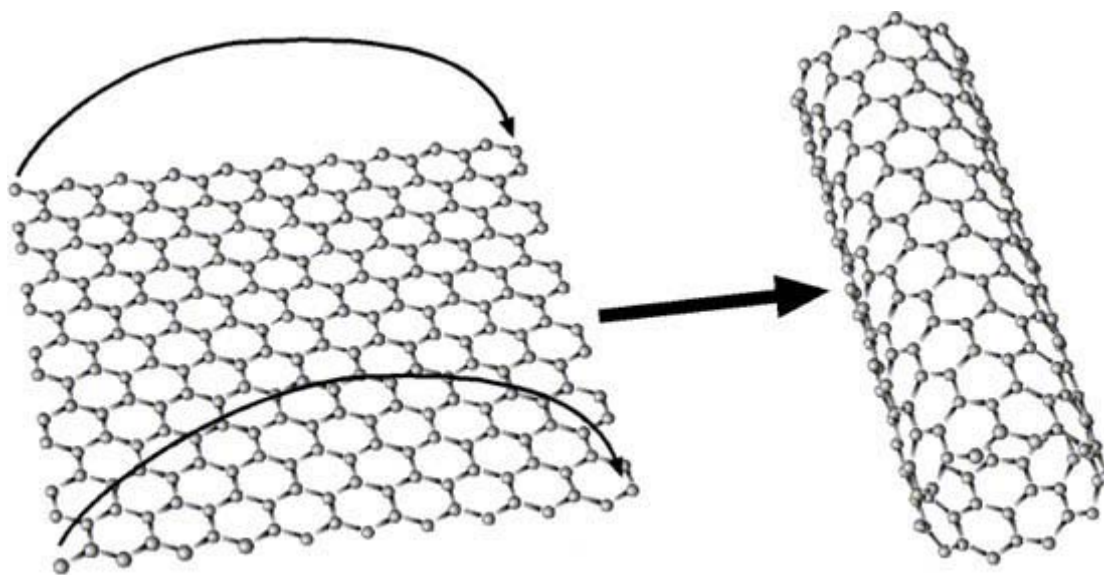
Η ιδέα της χρήσης ψευδο-μονοδιάστατων πληρωτικών υλικών σαν ενισχυτικά μέσα δεν είναι καθόλου καινούργια. Το άχυρο για παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε σαν

ενίσχυση στον πηλό για την παραγωγή τούβλων από το 4000 π.Χ.. Τις τελευταίες δεκαετίες ίνες φτιαγμένες από υλικά όπως η αλουμίνη, το γυαλί, το βόριο, το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) και κυρίως οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται σαν ενίσχυση στα σύνθετα υλικά. Ωστόσο, οι συμβατικές αυτές ίνες έχουν διαστάσεις στη μεσοκλίμακα με διαμέτρους δεκάδων μικρομέτρων και μήκος της τάξης των χιλιοστών.

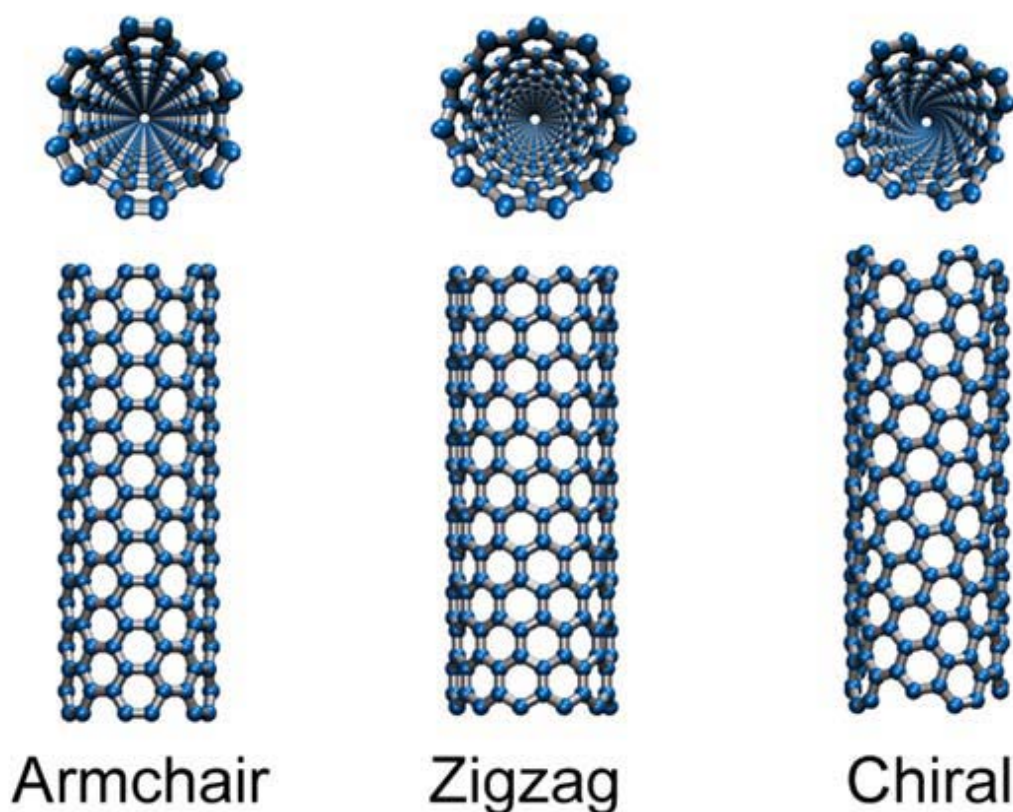
Οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι εντυπωσιακές, με τις ίνες άνθρακα να επιδεικνύουν μέτρο ελαστικότητας και αντοχή με τιμές 230-725 GPa και 1.5-4.8 GPa αντίστοιχα. Τα τελευταία χρόνια νανοϊνες άνθρακα αναπτύσσονται από την αέρια φάση με διαμέτρους της τάξης των 100 nm και μήκη μεταξύ 20 και 100 μm . Αυτές οι μικρές διαστάσεις σημαίνουν ότι οι νανοϊνες αυτές έχουν πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια ανά μονάδα μάζας από τις συμβατικές ίνες άνθρακα επιτρέποντας μεγαλύτερη αλληλεπίδραση με τη μήτρα του συνθέτου. Επίσης έχουν εκπληκτικές μηχανικές ιδιότητες με το μέτρο του Young να κυμαίνεται στο εύρος 100-1000 GPa και την αντοχή μεταξύ 2.5 και 3.5 GPa.

Ωστόσο το υπέρτατο υλικό ενίσχυσης είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα. Οι νανοσωλήνες μπορούν να έχουν διαμέτρους από 1 nm έως και 100 nm και μήκη που φτάνουν ακόμα και τα χιλιοστά. Η πυκνότητά τους μπορεί να είναι ιδιαιτέρως χαμηλή (περίπου 1.3 g/cm³).

Απαιτείται όμως πολύ δουλειά ακόμα για να εκμεταλλευτούμε πλήρως τις ιδιότητες τους. Γι' αυτό το λόγο πάρα πολλά εργαστήρια σε όλο τον κόσμο έχουν επιδοθεί σε έναν μαραθώνιο έρευνας με αντικείμενο αυτά τα υλικά της νανοκλίμακας, πράγμα που επιβεβαιώνεται από το πλήθος των δημοσιεύσεων στα επιστημονικά περιοδικά.



Σχήμα 41: Σχηματισμός single walled nanotubes (SWNT) από το τόλιγμα του γραφενίου.

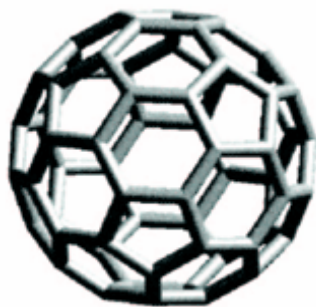


Σχήμα 42: *Είδη των single walled nanotubes (SWNT).*

Φουλερένια

Τα φουλερένια (fullerenes) ανακαλύφθηκαν το 1985 από τους Harold Kroto, James R. Heath, Sean O'Brien, Robert Curl και Richard Smalley. Οι Kroto, Curl και Smalley βραβεύτηκαν με βραβείο Νόμπελ Χημείας το 1996 για την ανακάλυψη αυτής της οικογένειας ενώσεων. Το πιο σταθερό φουλερένιο είναι αυτό το οποίο αποτελείται από 60 άτομα άνθρακα (60 C) κι έχει σχεδόν σφαιρική δομή. Ωστόσο, φουλερένια με 70, 76 ή 84 άτομα άνθρακα είναι εξίσου κοινά. Το όνομα τους προέρχεται από τον αρχιτέκτονα Richard Buckminster Fuller, ο οποίος κατέστησε δημοφιλή το γεωδαιτικό θόλο, καθώς ο δεύτερος έχει παρόμοιο σχήμα με αυτό του μορίου.

Τα φουλερένια είναι γενικά σταθερά μόρια και απαιτούν θερμοκρασίες της τάξεως των 1000°C και άνω για να διασπαστούν οι δεσμοί μεταξύ των ανθράκων οι οποίοι το αποτελούν. Ανάλυση με ακτίνες X ή σκέδαση νετρονίων ενός μοριακού κρυστάλλου 60 C μπορεί να φανερώσει τη σφαιρική δομή του μορίου καθώς και τη διάμετρο του. Επιπλέον υπό φασματοσκοπία NMR δίνει ένα φάσμα μίας μόνο κορυφής, υποδεικνύοντας πως όλα τα άτομα άνθρακα του μορίου είναι ισοδύναμα γεγονός το οποίο επίσης παραπέμπει σε σφαιρική δομή.



Σχήμα 43: Δομή φουλερένιου.

Τρία ηλεκτρόνια από κάθε άνθρακα συμμετέχοντας σε sp^2 υβριδικά ενώνουν τους άνθρακες μεταξύ τους με σ δεσμούς. Υπάρχουν δύο είδη δεσμών στο μόριο, ένας μεταξύ ανθράκων στην κοινή ακμή μιας πενταγωνικής και μιας εξαγωνικής έδρας καθώς και ένας στην κοινή ακμή δύο εξαγωνικών εδρών. Η σκέδαση με νετρόνια μας δίνει μήκη δεσμών 0,1455 nm και 0,1391 nm αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα άτομα άνθρακα σε ένα φύλλο γραφίτη χαρακτηρίζονται επίσης από ίδιου τύπου υβριδικά (sp^2) όπως το φουλερένιο. Αυτού του είδους υβριδικά δίνουν τρεις ισχυρούς σ δεσμούς πάνω στο ίδιο επίπεδο και έναν ασθενή π σε κάθετη διεύθυνση. Καθώς οι σ δεσμοί είναι κορεσμένοι ο γραφίτης θεωρείται χημικά αδρανής. Στην περίπτωση του φουλερενίου ωστόσο, λόγω της κυρτότητας του μορίου, οι σ δεσμοί παύουν να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο ενώ επίσης το νέφος των π ηλεκτρονίων παραμορφώνεται κάνοντας το φουλερένιο περισσότερο ενεργό χημικά.

Η διάμετρος του μορίου του 60 C βρίσκεται από διάφορες φασματοσκοπικές μεθόδους ίση με 0,710 nm. Προκειμένου να βρεθεί η ενεργός διάμετρος του μορίου θα πρέπει να συνυπολογιστεί το εύρος του ηλεκτρονικού νέφους των π -ηλεκτρονίων το οποίο είναι ίσο με 0,335nm και τελικά η διάμετρος του μορίου βρίσκεται 1,380nm. Το φουλερένιο 60 C εμφανίζει 3 είδη αξόνων συμμετρίας, 2ης, 3ης και 5ης τάξεως, συνολικά σε αριθμό 21. Εμφανίζει επίσης 15 διαφορετικά επίπεδα συμμετρίας. Τέλος παραμένει αναλλοίωτο σε αντιστροφή των αξόνων του συστήματος αναφοράς. Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω βρίσκεται πως είναι πιθανές 120 διαφορετικές διαδικασίες συμμετρίας σημείου. Αυτό καθιστά το μόριο του 60 C το περισσότερο συμμετρικό.

Η συμμετρία αυτή πηγάζει από την σχεδόν τέλεια σφαιρικότητα του μορίου. Αυτή επιτυγχάνεται με την ύπαρξη πενταγωνικών εδρών καθώς είναι αυτά τα οποία εισάγουν κυρτότητα στο μόριο. Η ύπαρξη δύο γειτονικών πενταγόνων σε ένα φουλερένιο, επιβαρύνει τη σταθερότητα του μορίου καθώς έχει σαν αποτέλεσμα αυξημένη κυρτότητα και κατ' επέκταση μεγαλύτερη παραμόρφωση. Είναι επομένως ενεργειακά συμφέρον κάθε πεντάγωνο να βρίσκεται απομονωμένο και αυτό υποδεικνύει ο κανόνας του απομονωμένου πενταγώνου (isolated pentagon rule). Λόγω των παραπάνω κάθε φουλερένιο αποτελείται από ούτε περισσότερα ούτε λιγότερα 12 πεντάγωνα ενώ το μικρότερο δυνατό φουλερένιο είναι το 20 C, το οποίο αποτελείται από 12 πεντάγωνα μόνο.

Τέλος, το μοριακό υλικό που προκύπτει με βάση του φουλερένιο ονομάζεται φουλερίτης (fullerite) και έχει εδροκεντρωμένη δομή. Επιπλέον, με προσθήκη ατόμων, ιόντων, μορίων ή ριζών στα διαμοριακά κενά του κρυστάλλου του φουλερίτη προκύπτει το λεγόμενο φουλερίδιο (fulleride).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W. D. Callister, *Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών*, 5^η Έκδοση, Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη (2004)
- [2] Γ. Καλκάνη, Ι. Χατήρη, *Τεχνολογία Υλικών*, 3^η Έκδοση, Εκδ. Ίων, Αθήνα (2005)
- [3] Γ. Χρυσουλάκη, Ι. Παντελή, *Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών*, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα (1996)
- [4] A. Everett, C. M. H. Barritt, *Materials (Mitchell's Building)*, 5th Ed., Longman (1994)
- [5] J. F. Shackelford, *Introduction to Material Science for Engineers*, 5th ed., Prentice Hall, New Jersey (2000)
- [6] W. D. Callister, Jr., *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*, 2nd Ed., Wiley, New York (2005)
- [7] W. F. Smith, J. Hashemi, *Foundations of Materials Science and Engineering*, Mc Graw Hill, New York (2005)
- [8] M. A. White, *Properties of Materials*, Oxford University Press, New York (1999)
- [9] J. Schaffer, A. Saxena, T. Sanders Jr., S. Antolovich, S. Warner, *Science and Design of Engineering Materials*, 2nd Ed., Mc Graw Hill, New York (2001)
- [10] J. A. Jacobs, Th. F. Kilduff, *Engineering Materials Technology – Structures, Processing, Properties and Selection*, 5th Ed., Pearson Education, New Jersey (2005)
- [11] E. P. DeGarmo, J. T. Black, R. A. Kohser, *Materials and Processes in Manufacturing*, 9th Ed., Wiley, New York (2003)
- [12] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, 3rd Ed., Wiley, New York (2006)
- [13] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, *Mechanics of Materials*, 4th Ed., McGraw Hill, Singapore (2006)
- [14] D. Roylance, *Mechanics of Materials*, John Wiley & Sons, USA (1996)
- [15] Madhukar Vable, *Mechanics of Materials*, Oxford University Press, New York (2002)
- [16] Michelle Addington & Daniel Schodek, *Smart materials and technologies*, Architectural Press, 2005
- [17] Peter Cook, *Architecture: action and plan*, Studio Vista. Reinhold Publishing Corporation, London 1967
- [18] Manuel DeLanda, *Material Complexity*, digital tectonics, ed. Neil Leach, David Turnbull, Chris Williams, Wiley – Academy, 2004
- [19] Michelle Addington & Daniel Schodek, *Smart materials and technologies*, Architectural Press, 2005
- [20] Γ. Καλκάνη, Ι. Χατήρη, *Τεχνολογία των Δομικών Υλικών*, 2^η Έκδοση, Εκδ. Ίων, Αθήνα (2004)
- [21] Α. Τριανταφύλλου, *Δομικά Υλικά*, 7^η Εκδ., Πάτρα (2005)
- [22] R. Wendehorst, *Δομικά Υλικά*, 2^η Έκδ., Εκδόσεις Μ. Γκιούρδα, Αθήνα (1981)
- [23] Γ. Βιάζη, *Τεχνολογία Δομικών Υλικών*, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα (2005)
- [24] M. S. Mamlouk, J. P. Zaniewski, *Materials for Civil and Construction Engineers*, 2nd Ed., Pearson Education, New Jersey (2006)
- [25] G. D. Taylor, *Materials in Construction – Principles, Practice and Performance*, Pearson Education, Malaysia (2002)

Σχετικά με την «Αθηνά»

Το Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων «Αθηνά» αποτελεί ένα ανεξάρτητο, μη κερδοσκοπικό Νομικό Πρόσωπο Ιδιωτικού Δικαίου (Αστική μη Κερδοσκοπική Εταιρία), λειτουργεί ως κοινωφελές κέντρο επιστημονικών ερευνών σε θέματα ελέγχου Όπλων και Ακτινοβολίας, επιδιώκει κοινωφελείς επιστημονικούς και πολιτιστικούς σκοπούς και απονέμει υποτροφίες. Οι σκοποί του Ελληνικού Κέντρου Ελέγχου Όπλων (σύμφωνα με το καταστατικό ίδρυσης και λειτουργίας του που δημοσιεύθηκε στο Πρωτοδικείο Θεσσαλονίκης) είναι αυτοί που προβλέπονται από το θεσμικό πλαίσιο έρευνας και τεχνολογίας (Ν.3653/2008) περί ερευνητικών και τεχνολογικών φορέων (άρθρο 2 παρ.β και παρ. γ.). Όλα τα έσοδα από τους διάφορους πόρους του διατίθενται για τις επιστημονικές-ερευνητικές του δραστηριότητες. Στα πλαίσια της κοινωφελούς της ερευνητικής της δραστηριότητας η «Αθηνά» διεξάγει μελέτες και μετρήσεις είτε αυτεπάγγελτα είτε μετά από πρόσκληση των συνδρομητών, δωρητών και ευεργετών του καθώς και μετά από πρόσκληση κάθε ιδιωτικού ή δημοσίου φορέα που μπορεί να καλύψει τα έξοδα της σχετικής επιστημονικής έρευνας. Η Διεύθυνση Ερευνών της «Αθηνάς» καταθέτει στον ενδιαφερόμενο φορέα επιστημονική έκθεση σχετικά με τα αποτελέσματα της επιστημονικής έρευνας που διεξήγαγε.

Το Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων «Αθηνά» ως έγκυρος και ανεξάρτητος επιστημονικός φορέας σε θέματα οπλικής, στρατιωτικής και αντιτρομοκρατικής επιστήμης απευθύνεται:

Σε κάθε Έλληνα που θεωρεί ότι η Ελλάδα πρέπει να αναπτύξει μια πανίσχυρη οπλική, αμυντική και αντιτρομοκρατική επιστήμη και τεχνολογία.

Σε κάθε Έλληνα που θέλει να μάθει με μαθηματική ακρίβεια τις επιπτώσεις και τον έλεγχο των πάσης φύσεως οπλικών, πολεμικών και τρομοκρατικών δραστηριοτήτων στην Ελλάδα και το Εξωτερικό

Στα στελέχη των Μέσων Μαζικής Ενημέρωσης που αναζητούν μια έγκυρη πηγή πληροφόρησης και ειδήσεων

Στα στελέχη των Ενόπλων Δυνάμεων και των Σωμάτων Ασφαλείας καθώς και τους αποστράτους αυτών.

Στις Υγειονομικές Υπηρεσίες και τις Υπηρεσίες Πολιτικής Προστασίας

Σε κάθε Δικαστική και Εισαγγελική Αρχή που αναζητεί έγκυρη και τεκμηριωμένη πραγματογνωμοσύνη

Στους Δικηγόρους που αναζητούν επιστημονικά στοιχεία και μια πλήρη βάση νομικών δεδομένων προκειμένου να τεκμηριώσουν την υπεράσπιση των πελατών τους

Στους Πολιτικούς που θα κληθούν να πάρουν αποφάσεις και να νομοθετήσουν σε θέματα Εθνικής και Διεθνούς Ασφάλειας

Οι επιστημονικές εκθέσεις και μελέτες του Ελληνικού Κέντρου Ελέγχου Όπλων:

Αποτελούν επιστημονικές μελέτες τις οποίες η Διεύθυνση Ερευνών της «Αθηνάς» θα υποστηρίξει ενώπιον κάθε δημοσίου ή ιδιωτικού φορέα καθώς και κάθε ανακριτικής, εισαγγελικής και δικαστικής αρχής.

Δεν αντικαθιστούν πιστοποιητικά και βεβαιώσεις που σύμφωνα με τη νομοθεσία παρέχουν αποκλειστικά οι κρατικοί φορείς.

Δεν αποτελούν ιατρικές βεβαιώσεις, διαγνώσεις ή συμβουλές. Στην περίπτωση που ο χρήστης των εκθέσεων αυτών θέλει να τις χρησιμοποιήσει για ιατρικούς σκοπούς η «Αθηνά» συνεργάζεται με εξειδικευμένους ιατρούς (ακτινολόγους, ογκολόγους κλπ) οι οποίοι είναι στη διάθεση των ενδιαφερομένων.

Αποποίηση Ευθυνών:

Οι απόψεις των ερευνητών και συνεργατών του ερευνητικού ιδρύματος «Αθηνά» δεν συμπίπτουν απαραίτητα με τις απόψεις της Διεύθυνσης του ιδρύματος.

Οι απόψεις του ιδρύματος δεν συμπίπτουν απαραίτητα με τις απόψεις του ΥΠΕΘΑ, των υπηρεσιών και των στρατιωτικών ή πολιτικών στελεχών του.

Ισχύουν όλα τα αναλυτικά στοιχεία περί αποποίησης ευθυνών που αναφέρονται στην ιστοσελίδα του ιδρύματος τα οποία καλούνται οι αναγνώστες να μελετήσουν.