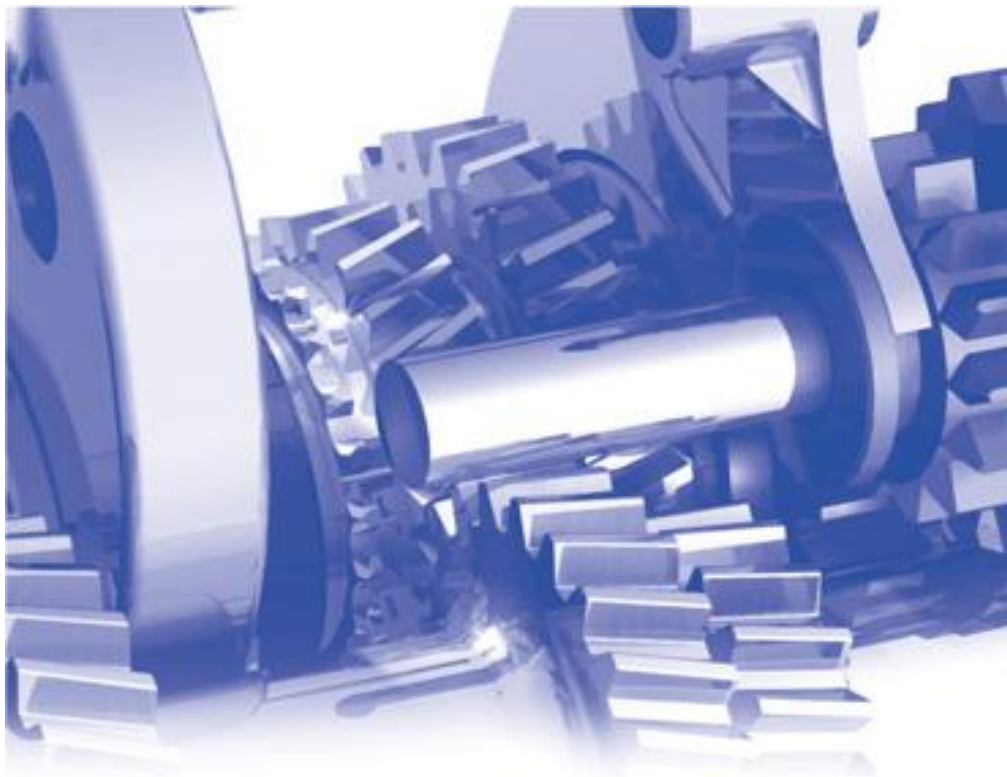


Α.Τ.Ε.Ι ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**



ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:
ΞΑΓΟΡΑΡΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ
ΕΞΑΜΗΝΟ ΠΤ Β΄
Α.Μ: 4481

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΓΙΑΝΝΕΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΠΑΤΡΑ 30/10/07

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	σελ.2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	σελ.3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Χάλυβες και κράματα.....	σελ.7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Αλουμίνιο.....	σελ.42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Χαλκός.....	σελ.56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Πλαστικά.....	σελ.79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Κεραμικά.....	σελ.99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Σύνθετα.....	σελ.114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Σύγκριση μεταξύ των υλικών.....	σελ.127
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	σελ.138

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η πτυχιακή εργασία αποτελεί έναν οδηγό επιλογής των κατάλληλων μηχανολογικών υλικών για κάθε μηχανολογική εφαρμογή. Περιλαμβάνονται πίνακες οι οποίοι δίνουν στοιχεία όπως η σκληρότητα, το όριο θραύσης κλπ. Η επιλογή των υλικών που παρουσιάζονται στην παρούσα έκθεση έχει γίνει με γνώμονα τη συχνότητα εφαρμογής των συγκεκριμένων υλικών από τους Έλληνες μηχανικούς. Δηλαδή οι πίνακες μπορούν να είναι χρήσιμοι σε εφαρμογές από μηχανικούς αλλά και άλλους ενδιαφερόμενους αφού περιέχουν πολύ χρήσιμες πληροφορίες.

Η εργασία χωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτο αφορά τα μεταλλικά υλικά (χάλυβας, αλουμίνιο, χαλκός) και το δεύτερο μέρος αφορά τα πιο μοντέρνα μη μεταλλικά υλικά (πλαστικά, κεραμικά, σύνθετα υλικά). Στο τελευταίο μέρος γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των υλικών χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από τα προηγούμενα κεφάλαια. Έτσι η παρούσα πτυχιακή εργασία δεν καταγράφει απλά τις ιδιότητες των μετάλλων, αλλά διευκολύνει την κρίση των αναγνωστών της. Δηλαδή το τρίτο μέρος κατευθύνει τον ενδιαφερόμενο στην επιλογή του σωστού μηχανολογικού υλικού το οποίο πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Με τον όρο απαιτούμενες προδιαγραφές δεν εννοούμε μόνο τις απαραίτητες αντοχές του υλικού (όπως αντοχή σε κάμψη, σκληρότητα κλπ.), αλλά περιλαμβάνουμε επίσης και τον οικονομικό παράγοντα ο οποίος ίσως να είναι και ο σημαντικότερος παράγοντας από όλους σ' αυτήν την εποχή.

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι το συνηθέστερο μηχανολογικό υλικό, τουλάχιστον στη χώρα μας, είναι ο χάλυβας. Γι' αυτόν τον λόγο γίνεται μια εκτενέστατη αναφορά στο πρώτο κεφάλαιο στο οποίο έχουν συμπεριληφθεί και όλα τα κράματά του. Αυτό γίνεται για να μη χρειαστεί ο αναγνώστης να ανατρέξει σε άλλα εγχειρίδια για τις απαραίτητες πληροφορίες.

Σε όλα τα κεφάλαια, οι πληροφορίες που συνοδεύουν το κάθε υλικό δε δίνονται συνοπτικά. Δηλαδή αυτή η εργασία δεν αποτελεί έναν οδηγό χρήσιμων μηχανολογικών υλικών. Έχει καταβληθεί κάθε δυνατή προσπάθεια έτσι ώστε να γίνεται σε βάθος η παρουσίαση του κάθε υλικού με τρόπο (όσο πιο δυνατόν) συνοπτικό. Αυτό θεωρήθηκε αναγκαίο έτσι ώστε το παρόν εγχειρίδιο να γίνει πιο ολοκληρωμένο. Γι' αυτόν τον λόγο, σε όλα τα κεφάλαια έχουν συμπεριληφθεί ενότητες όπως ο τρόπος παραγωγής και κάποιες φορές ένα σύντομο ιστορικό.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κύριος στόχος της κάθε εργασίας που σχετίζεται με την παραγωγική διαδικασία είναι η δημιουργία προϊόντων που θα ανταπεξέρχονται στις απαιτήσεις για τις οποίες θα έχουν σχεδιαστεί. Η εκπλήρωση αυτού του στόχου προϋποθέτει την κατασκευή υλικών από *επιλεγμένα μηχανολογικά υλικά* με την *απαιτούμενη γεωμετρική μορφή* και *ακρίβεια* και με *συγγενής υλικές δομές* οι οποίες θα βελτιστοποιούνται έτσι ώστε το υλικό να αντέχει στις μεταβολές του περιβάλλοντος. Ο ιδανικός σχεδιασμός είναι αυτός ο οποίος θα εκπληρώνει όλες τις παραπάνω απαιτήσεις. Οτιδήποτε παραπάνω θεωρείται άσκοπο ξόδεμα χρημάτων και υλικού, ενώ με οτιδήποτε λιγότερο θα έχουμε αποτύχει στην παραγωγή ενός αποδεκτού προϊόντος.

Δεν έχει περάσει πολύς καιρός από τότε που η κάθε ομάδα υλικών είχε τις δικές της ορισμένες εφαρμογές και τις δικές της αγορές. Τα μέταλλα είχαν ταξινομηθεί όταν η δύναμη, η σκληρότητα και η ανθεκτικότητα ήταν οι βασικές απαιτήσεις. Τα κεραμικά ήταν γενικά περιορισμένα σε χαμηλής αξίας εφαρμογές εκεί που η θερμότητα ή η χημική αντίσταση απαιτούνταν. Τα πλαστικά χρησιμοποιούνταν και αυτά σε εφαρμογές χαμηλής αξίας εκεί που το χαμηλό κόστος και το μικρό βάρος ήταν βασικοί παράγοντες ενώ η απόδοση ήταν δευτερεύων παράγοντας.

Σήμερα τέτοιου είδους διαχωρισμοί δεν υπάρχουν πια. Πολλά από τα μεταλλικά κράματα που χρησιμοποιούνται σήμερα δεν υπήρχαν πριν 30 χρόνια και τα κοινά κράματα που χρησιμοποιούνται εδώ και έναν αιώνα ή παραπάνω, έχουν βελτιποιηθεί χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας, στη μεταλλουργία και στην παραγωγική διαδικασία. Κεραμικά, πολυμερή και σύνθετα υλικά είναι τώρα διαθέσιμα με συγκεκριμένες ιδιότητες που συχνά ξεπερνούν τα παραδοσιακά όρια και περιορισμούς. Τα προηγμένα δομικά υλικά προσφέρουν μεγαλύτερη σκληρότητα και ανθεκτικότητα, σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλό βάρος και αντίσταση σε διάβρωση, ερπισμό και κόπωση. Άλλα υλικά είναι ενισχυμένα σε θερμικές, ηλεκτρικές, οπτικές, μαγνητικές και χημικές μεταβολές.

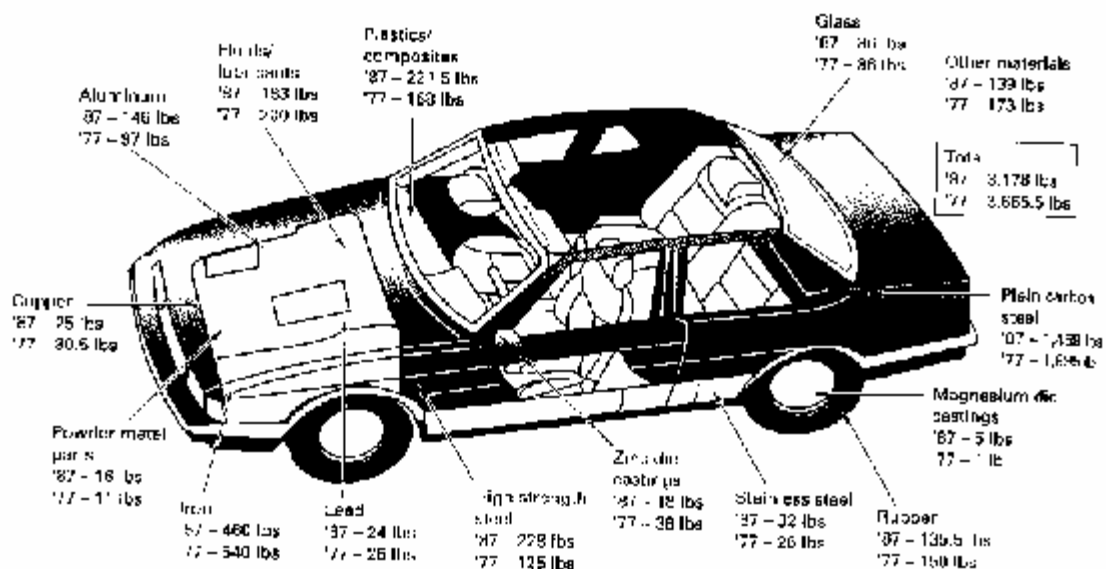
Σαν αποτέλεσμα αυτών των δυναμικών αλλαγών, η επιλογή των μηχανολογικών υλικών έχει γίνει πάρα πολύ σημαντική και η παραγωγική διαδικασία χρειάζεται συνεχώς επαναπροσέγγιση. Νέα υλικά διαρκώς αναπτύσσονται, άλλα μπορεί να μην είναι διαθέσιμα πια και οι τιμές αλλάζουν διαρκώς. Ανησυχίες που σχετίζονται με την περιβαλλοντολογική μόλυνση, ανακύκλωση και την υγεία (και ασφάλεια) των εργαζομένων έχουν επιβάλλει νέους περιορισμούς. Νέες επιθυμίες για μείωση βάρους, οικονομία

ενέργειας ή καλύτερη αντίσταση στην οξειδωση, μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές στα μηχανολογικά υλικά. Πίεσεις από εσωτερικούς και εξωτερικούς παράγοντες, αυξημένη ζήτηση για καλές ποιότητες και αρνητική πελατειακή ανατροφοδότηση μπορούν να προωθήσουν μία επανεξέταση των πραγμάτων.

Τέλος ο πολλαπλασιασμός των ενεργειών της ευθύνης των προϊόντων, ο οποίος είναι αποτέλεσμα λανθασμένης χρήσης των υλικών, έχει τονίσει την ανάγκη για συνεχή επανεξέταση των μηχανολογικών υλικών σε ένα προϊόν.

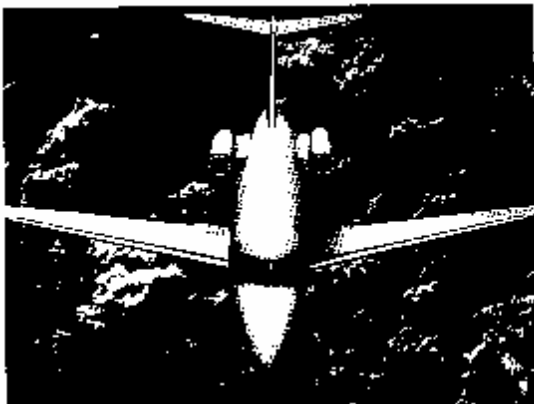
Οι αυτοκινητοβιομηχανίες μόνο καταναλώνουν περίπου 60 εκατομμύρια τόνους μηχανολογικών υλικών παγκοσμίως κάθε χρόνο (κυρίως ατσάλι, χυτοσίδηρο, αλουμίνιο, χαλκό, γυαλί, μόλυβδο, πολυμερή, λάστιχο και ψευδάργυρο). Το σχήμα 1 δείχνει τη δραματική αλλαγή των υλικών σε ένα τυπικό αμερικάνικο αυτοκίνητο μεταξύ 1977 και 1987. Παρατηρείστε την αυξημένη χρήση ελαφρύτερων υλικών και πιο δυνατών ατσαλιών καθώς επίσης πλαστικών και σύνθετων.

Σχήμα 1



Ένας επιπλέον μισός τόνος μηχανολογικών υλικών προορίζεται σε αεροναυπηγικές εφαρμογές. Εδώ τα βασικά υλικά είναι το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, το τιτάνιο, υπερκράματα (superalloys), πολυμερή, λάστιχο, ατσάλι, σύνθετα μέταλλα μήτρας και σύνθετα πολυμερή μήτρας. Ο ανταγωνισμός είναι έντονος και αντικατάσταση των υλικών συνεχής. Η χρήση προηγμένων σύνθετων υλικών στην κατασκευή αεροσκαφών έχει αυξηθεί από λιγότερο 2% το 1970 σε 30% (και πάνω) για την κατασκευή των YF-22 της αμερικάνικης αεροπορίας. Στο αεροσκάφος Beech Starship που απεικονίζεται στο

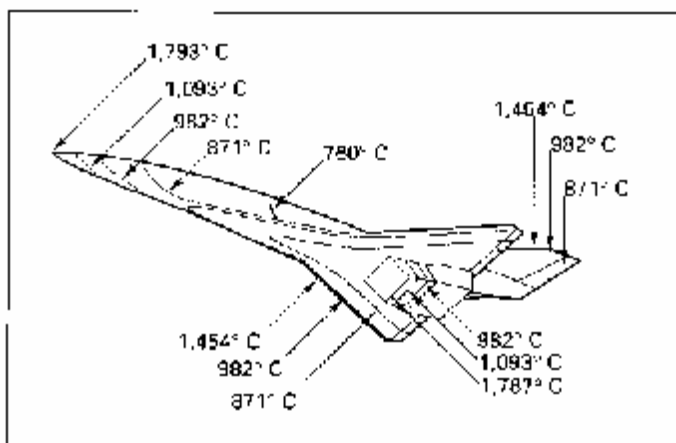
σχήμα 2 δε χρησιμοποιείται μέταλλο για την κατασκευή του εξωτερικού του μέρους. Το πλαίσιο είναι εξολοκλήρου φτιαγμένο από σύνθετα ενισχυμένα με ίνες.



Σχήμα 2

Κοιτάζοντας στο μέλλον σκεφτείτε τις υλικές απαιτήσεις των υπερηχητικών κατασκευών όπως το προτεινόμενο X-30 διεθνές διαστημικό αεροπλάνο (NASP). Κατασκευάζοντας ένα αεροπλάνο το οποίο θα απογειώνεται από έναν αεροδιάδρομο, θα πετάει στο διάστημα (με ταχύτητα 25 φορές παραπάνω από αυτήν του ήχου) και θα προσγειώνεται σε έναν άλλον αεροδιάδρομο μπορεί να φαίνεται λογικό αλλά τα μηχανολογικά προβλήματα είναι τεράστια. Αν τα προβλήματα προώθησης επιλυθούν, οι τεράστιες ταχύτητες θα δημιουργήσουν θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες από αυτών των συνηθισμένων αεροσκαφών. Το σχήμα 3 ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες θα είναι κοντά στους 1500 °C.

Σχήμα 3



Ανακεφαλαιώνοντας πρέπει να τονίσουμε ότι τελικά η τεχνολογία των υλικών είναι στενά συνδεδεμένη με την ιστορία του ανθρώπινου πολιτισμού. Η οικονομική καθώς και

η στρατιωτική ισχύς των λαών, εξαρτήθηκε κατά μεγάλο μέρος στις γνώσεις που διέθεταν για τα υλικά, αφού χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή των εργαλείων και των όπλων για τις εκάστοτε κατασκευές ή κατακτήσεις αντίστοιχα. Αξίζει να αναφέρουμε ότι την ιστορία του ανθρώπινου πολιτισμού τη χωρίζουμε, για τους Ευρωπαϊκούς και Μεσόγειους λαούς, στη νεολιθική εποχή (7000~5000 π.Χ), στην εποχή του χαλκού (5000~3000 π.Χ), στην εποχή του κρατερώματος (3000~1000 π.Χ) και στην εποχή του σιδήρου (1000 π.Χ έως σήμερα).

ΧΑΛΥΒΑΣ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΟΚΡΑΜΑΤΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο χάλυβας προέρχεται από την μεταλλουργία του σιδήρου. Η τελευταία ακολουθεί δύο φάσεις: α. παρασκευή χυτοσιδήρου και β. επεξεργασία χυτοσιδήρου. Από την επεξεργασία του χυτοσιδήρου, παρασκευάζεται τελικά ο χάλυβας. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι τον χάλυβα τον παίρνουμε από το λευκό χυτοσίδηρο. Αυτό το καταφέρνουμε ελαττώνοντας την περιεκτικότητά του (του λευκού χυτοσιδήρου) σε άνθρακα και σε άλλα στοιχεία που περιέχει με πύρωση σε ειδικές καμίνους.

Οι ανθρακούχοι χάλυβες είναι κράματα σιδήρου και άνθρακα με περιεκτικότητα σε άνθρακα μέχρι 2%, πρακτικά όμως είναι από 0,01% έως 1,5%. Αυτοί που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία περιέχουν συνήθως εκτός από άνθρακα και αρκετή αναλογία μαγγανίου που παραμένει στο κράμα και μετά από την καύση των ξένων προσμίξεων κατά την παρασκευή του χάλυβα. Περιέχουν επίσης, σε μικρή αναλογία, πυρίτιο, θείο και φώσφορο.

Τα χαλυβοκράματα ή ειδικοί χάλυβες είναι κράματα σιδήρου και άνθρακα στα οποία έχουν προστεθεί ένα ή περισσότερα ξένα στοιχεία τα οποία τα ονομάζουμε προσθήκες.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

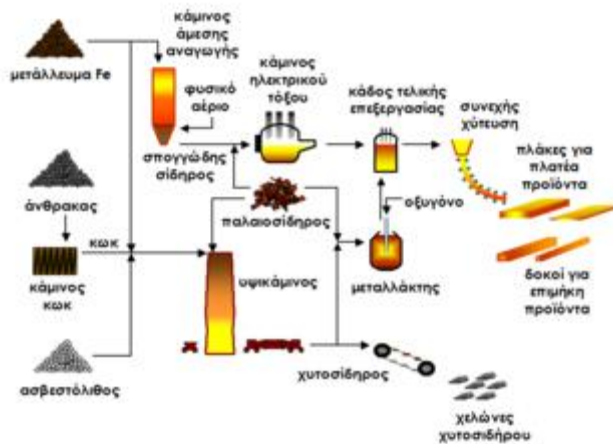
Η ιστορία του χάλυβα ξεκινά γύρω στο 1000 π.Χ., όταν μεταλλουργοί της εποχής εκείνης άρχισαν να παράγουν χάλυβα συστηματικά με ενανθράκωση σπογγώδους σιδήρου. Πάντως οι Χετταίοι γνώριζαν πώς να παράγουν χάλυβα ήδη από το 2300 π.Χ. Την εποχή της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, πολλοί μεσογειακοί λαοί, αλλά και οι Ινδοί, οι Κινέζοι και οι Ιάπωνες γνώριζαν την τέχνη της παραγωγής σπογγώδους σιδήρου και χάλυβα, καθώς και την τέχνη της σκλήρυνσης του χάλυβα με θέρμανση και απότομη ψύξη (βαφή). Περίφημα ήταν τα σφυρήλατα χαλύβδινα δαμασκηνά σπαθιά, που κατασκευάζονταν κατά τον Μεσαίωνα στην Συρία, αλλά και σε τόπους πιο μακρινούς όπως στην Ιαπωνία.

Η σύγχρονη ιστορία του χάλυβα αρχίζει στα μέσα του 19ου αι., όταν ο άγγλος εφευρέτης Χένρυ Μπέσσεμερ (Henry Bessemer), ανακάλυψε πως να μετατρέπει τον

τηγμένο χυτοσίδηρο σε χάλυβα με εμφύσηση οξυγόνου σε έναν κάδο (μεταλλάκτη) επενδυμένο με βασικά πυρίμαχα τούβλα. Την ίδια εποχή ανακαλύφθηκε η μετατροπή του χυτοσιδήρου σε χάλυβα σε καμίνο ανοικτής εστίας (κάμινο Siemens-Martin). Πάντως σήμερα, η ανακάλυψη του Μπέσσεμερ χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την απανθράκωση του χυτοσιδήρου. Η κάμινο Siemens-Martin εγκαταλείφθηκε ως πιο ενεργοβόρος και λιγότερο φιλική προς το περιβάλλον.

1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Το χάλυβα τον παίρνουμε από το λευκό χυτοσίδηρο. Αυτό το πετυχαίνουμε με το να ελαττώνουμε την περιεκτικότητα του λευκού χυτοσιδήρου σε άνθρακα και σε άλλα στοιχεία, που περιέχει, με πύρωση σε ειδικές καμίνο.



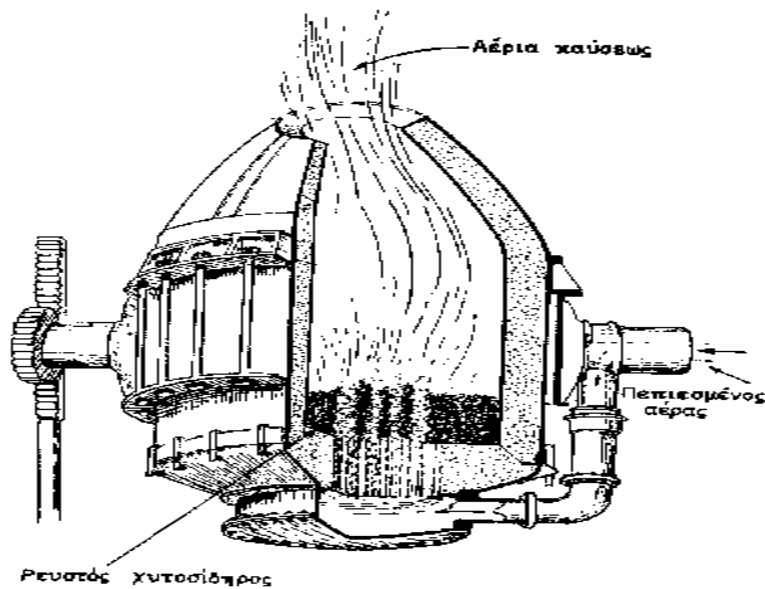
Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής χυτοσιδήρου και ημιτελών προϊόντων χάλυβα.

Η επεξεργασία του λευκού χυτοσιδήρου, που μας δίνει το χάλυβα, μπορεί να γίνει με τρεις μεθόδους:

- Τη μέθοδο Bessemer (Μπέσσεμερ).
- Τη μέθοδο Siemens - Martin (Σήμενς - Μαρτέν) και
- Την ηλεκτρική μέθοδο.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΠΕΣΣΕΜΕΡ

Χρησιμοποιείται ειδική κάμινο σε σχήμα αχλαδιού, που λέγεται άπιο (απίδι) του Μπέσσεμερ (Σχήμα 1.3.1). Το άπιο Μπέσσεμερ μπορεί να περιστρέφεται από



Σχήμα 1.3.1

την κατακόρυφη θέση μέχρι την οριζόντια, έτσι ώστε να γεμίζει με ρευστό χυτοσίδηρο και στη συνέχεια να χύνεται ο ρευστός χάλυβας με ευκολία. Η οξείδωση των ξένων προσμίξεων, όπως και στο σφυρήλατο σίδηρο, πετυχαίνεται με το οξυγόνο του αέρα, το οποίο εδώ φυσιέται (προσφυσάται) από τις τρύπες του πυθμένα μέσα από το ρευστό χυτοσίδηρο.

Πρώτα οξειδώνεται το μαγγάνιο και το πυρίτιο και μετά ο άνθρακας. Κατά τη διάρκεια της εμφυσήσεως του αέρα παρατηρείται ανύψωση της θερμοκρασίας του τήγματος, λόγω της θερμότητας που δημιουργείται από την καύση των ξένων προσμίξεων.

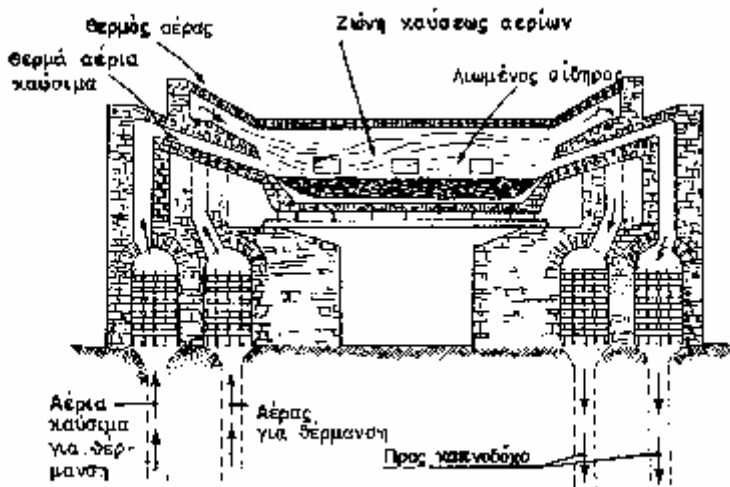
Η εργασία της παρασκευής χάλυβα με αυτή τη μέθοδο διαρκεί 20 έως 25 min. Μετά ο ρευστός χάλυβας αποχύνεται σε κάδους, αφού αναστρέψαμε το άπιο Μπέσσεμερ.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΗΜΕΝΣ - ΜΑΡΤΕΝ

Κατά τη μέθοδο αυτή θερμαίνεται μίγμα από χυτοσίδηρο και απορρίμματα σφυρήλατου σιδήρου ή χάλυβα (δηλ. παλιοσιδηρικά) με λίγο οξείδιο του σιδήρου που το προσθέτουμε στο μίγμα.

Το οξείδιο αυτό του σιδήρου επειδή έχει οξυγόνο, οξειδώνει τον άνθρακα του χυτοσιδήρου και έτσι ελαττώνεται η περιεκτικότητα του προϊόντος σε άνθρακα. Η παρασκευή του χάλυβα γίνεται σε ειδικές επίπεδες φλογοβόλους καμίνους Σήμενς - Μαρτέν (Σχήμα 1.3.2).

Η θέρμανση γίνεται με καύσιμα αέρια (από αεριογόνα). Τα αέρια αυτά προθερμαίνονται στους προθερμαντήρες, που είναι κάτω από την κάμινο. Η προθέρμανση των αερίων γίνεται με το ίδιο σύστημα που γίνεται στην υψικάμινο.



Σχήμα 1.3.2

Με τους προθερμαντήρες αυτούς η θερμοκρασία στην κάμινο φτάνει στους 1700°C. Μια κάμινο Σήμενς - Μαρτέν παράγει 100 έως 200 τόνους χάλυβα ανά 10 ώρες. Ο χάλυβας που παρασκευάζεται με αυτή τη μέθοδο, είναι ανώτερης ποιότητας από το χάλυβα που παρασκευάζεται με τη μέθοδο Μπέσσεμερ.

Άλλωστε, η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παρασκευή χάλυβα με τη μέθοδο Σήμενς - Μαρτέν, είναι κυρίως παλιοσιδηρικά. Στην περιοχή Σκαραμαγκά (Αττικής) δύο μεγάλα εργοστάσια παράγουν χάλυβα με τη μέθοδο Σήμενς -Μαρτέν.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Με τη μέθοδο αυτή η παρασκευή χάλυβα γίνεται σε ηλεκτρικές καμίνους που έχουν χωρητικότητα 10 έως 30 τόνους (Σχήμα 1.3.3).

Στις καμίνους αυτές η θέρμανση του λευκού χυτοσιδήρου γίνεται με ηλεκτρικό τόξο. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την παρασκευή χαλυβοκραμάτων.



Σχήμα 1.3.3

1.4 ΘΕΡΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΑ

ΤΟ ΠΛΗΡΕΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

Αφού ξέρουμε τις αλλοτροπικές μορφές, τις οποίες παίρνει ο σίδηρος κατά την πύρωση και την απόψυξη του, ας μελετήσουμε τώρα το θερμικό διάγραμμα ισορροπίας των κραμάτων σιδήρου - άνθρακα. Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι ο άνθρακας στους χάλυβες δεν βρίσκεται ελεύθερος (με μορφή γραφίτη), αλλά σχηματίζει με το σίδηρο μια χημική ένωση (καρβίδιο), την οποία ονομάζαμε σεμεντίτη (Fe_3C). Ο σεμεντίτης έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα 6,67%.

Στο σχήμα 1.4.1 δίνεται ολόκληρο το θερμικό διάγραμμα ισορροπίας των κραμάτων σιδήρου - σεμεντίτη, δηλαδή από τον καθαρό σίδηρο [$\text{π}(\text{C})=0,00\%$] μέχρι το σεμεντίτη [$\text{π}(\text{C}) = 6,67\%$]. Τα κράματα αυτά ανήκουν στην κατηγορία του διμερούς κράματος σύνθετου τύπου, όπως το κράμα κασσιτέρου - μόλυβδου. Έτσι, τα δυο στοιχεία του κράματος είναι τελείως αναμίξιμα στην υγρή κατάσταση και εν μέρει αναμίξιμα στη στερεά κατάσταση.

Παρόλο ότι το διάγραμμα αυτό φαίνεται πολύπλοκο, βασικά έχουμε να ασχοληθούμε με δυο στερεά διαλύματα, δηλαδή τον ωστενίτη και το φερρίτη και με το σεμεντίτη (καρβίδιο). Ο ωστενίτης είναι στερεό διάλυμα παρεμβολής. Σχηματίζεται, όταν στο κρυσταλλικό πλέγμα του γ -σιδήρου διαλυθεί άνθρακας. Ο άνθρακας διαλύεται σε αναλογία περίπου μέχρι 2% στη θερμοκρασία των 1130°C.

Στην αναλογία αυτή άνθρακα έχουμε κορεσμένο ωστενίτη. Ο ωστενίτης είναι αμαγνητικός. Ο φερρίτης είναι επίσης στερεό διάλυμα παρεμβολής και σχηματίζεται όταν ο άνθρακας διαλυθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα του α -σιδήρου. Στην περίπτωση αυτή ο άνθρακας διαλύεται σε πολύ μικρή αναλογία. Φθάνει κατά μέγιστο τα 0,03% σε θερμοκρασία 723°C (κορεσμένος φερρίτης). Ο φερρίτης είναι μαγνητικός μέχρι τη θερμοκρασία των 769°C. Στις πρακτικές εφαρμογές ο φερρίτης θεωρείται ότι έχει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες με τον καθαρό σίδηρο. Ο σεμεντίτης, όπως είδαμε, είναι χημική ένωση και σχηματίζεται όταν η περιεκτικότητα του κράματος σε άνθρακα είναι μεγαλύτερη από την περιεκτικότητα κορεσμού του φερρίτη (πάνω από 0,03%). Είναι πολύ σκληρός (η σκληρότητα του υπερβαίνει τους 700 βαθμούς Brinell) και πολύ εύθραυστος. Η γραμμή του liquidus (Σχήμα 1.4.1) είναι η ACD και η γραμμή του solidus είναι η AECFD. Αυτό ισχύει αν λάβουμε υπόψη μας τις λεπτομέρειες που υπάρχουν στο επάνω αριστερό μέρος του διαγράμματος, οι οποίες και το κάνουν περίπλοκο. Η γραμμή του solidus αρχίζει από

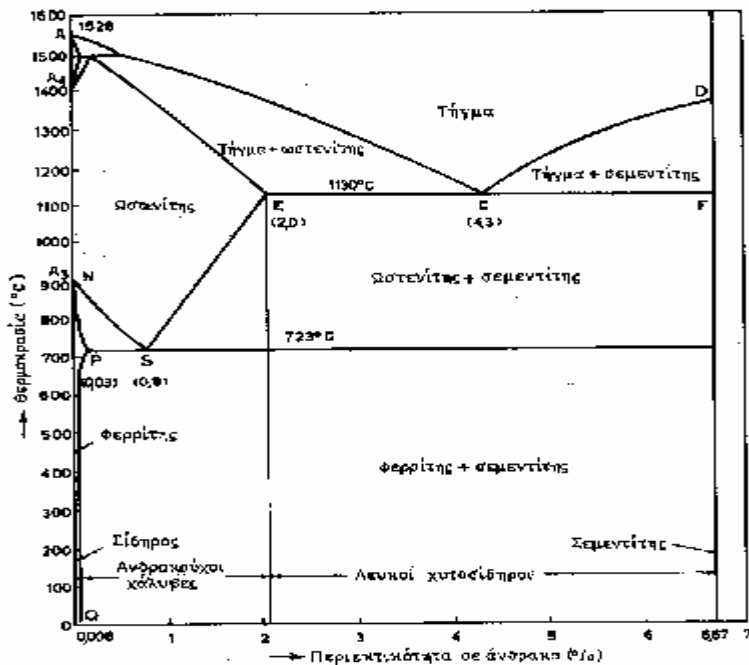
τη θερμοκρασία τήξεως του καθαρού σιδήρου (1528°C) και ακολουθεί το σχηματισμό του ωστενίτη μέχρι του κορεσμού του σε άνθρακα σε αναλογία 2% περίπου και σε θερμοκρασία 1130°C (σημείο E του διαγράμματος). Από εκεί και πέρα η γραμμή του solidus παραμένει ευθεία μέχρι τον καθαρό σεμεντίτη. Έτσι η στερεοποίηση τελειώνει για μεν τα κράματα με περιεκτικότητα σε άνθρακα μέχρι 2% στο διάστημα θερμοκρασιών από 1528°C έως 1130°C , για δε τα υπόλοιπα κράματα στη σταθερή θερμοκρασία των 1130°C .

Στο σημείο C του διαγράμματος, που αντιστοιχεί σε αναλογία άνθρακα 4,3% και βέβαια πάντα στη σταθερή θερμοκρασία 1130°C , η αρχή και το τέλος της στερεοποίησης συμπίπτουν. Παρατηρούμε επίσης ότι η θερμοκρασία αυτή (1130°C) είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία τήξεως που συναντάμε στα κράματα σιδήρου - σεμεντίτη. Το σημείο C είναι το σημείο της ευτηκτικής αναλογίας και το κράμα με αναλογία σε άνθρακα 4,3% είναι το ευτηκτικό κράμα. Το ευτηκτικό κράμα στην περίπτωση αυτή ονομάζεται λεδεμβουρίτης, σχηματίζεται δε από πλακοειδείς κρυσταλλίτες εναλλάξ κορεσμένου ωστενίτη [$\pi(\text{C}) = 2\%$] και σεμεντίτη.

Το σημείο S του διαγράμματος, που αντιστοιχεί σε αναλογία άνθρακα περίπου 0,80% και σε θερμοκρασία 723°C , είναι το λεγόμενο σημείο έυτηκτοειδούς αναλογίας και το σχετικό κράμα είναι το ευτηκτοειδές κράμα. Το ευτηκτοειδές κράμα ονομάζεται περλίτης, σχηματίζεται δε από πλακοειδείς κρυσταλλίτες εναλλάξ φερρίτη και σεμεντίτη. Αν παρατηρήσουμε το διάγραμμα του σχήματος 1.4.1 θα διακρίνουμε γενικά τις εξής κατηγορίες κραμάτων σιδήρου - σεμεντίτη, αφού λάβουμε υπόψη μας τα σημεία E και C του διαγράμματος:

- α) $\pi(\text{C}) < 2,0\%$: Χάλυβες (πρακτικά μέχρι 1,5%).
- β) $2,0 < \pi(\text{C}) < 4,3\%$: Υποευτηκτικά κράματα.
- γ) $\pi(\text{C}) = 4,3\%$: Ευτηκτικό κράμα (λεδεμβουρίτης).
- δ) $\pi(\text{C}) > 4,3\%$: Υπερευτηκτικά κράματα.

Τα κράματα σιδήρου - σεμεντίτη με περιεκτικότητα σε άνθρακα πάνω από 2% αποτελούν τους λεγόμενους λευκούς χυτοσιδήρους. Οι χυτοσίδηροι αυτοί ονομάζονται έτσι, γιατί η επιφάνεια θραύσεως τους φαίνεται λευκή (λευκόχρους). Πρέπει να πούμε επίσης ότι εκτός από τους λευκούς χυτοσιδήρους, έχουμε και τους λεγόμενους φαιούς χυτοσιδήρους, στους οποίους η επιφάνεια θραύσεως παρουσιάζεται φαιά (φαιόχρους). Οι χυτοσίδηροι αυτοί ανήκουν στα κράματα σιδήρου - γραφίτη. Σε αυτά τα κράματα ο άνθρακας βρίσκεται ελεύθερος και όχι σε χημική ένωση ως σεμεντίτης.



Σχήμα 1.4.1

Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Για τις πρακτικές εφαρμογές μας ενδιαφέρει πιο πολύ το τμήμα του πλήρους θερμικού διαγράμματος ισορροπίας, που περιλαμβάνει τους χάλυβες, δηλαδή από $\pi(\text{C}) = 0,0\%$ μέχρι $\pi(\text{C}) = 2,0\%$.

Αυτό το τμήμα του διαγράμματος το χρησιμοποιούμε και στις θερμικές κατεργασίες των ανθρακούχων χάλυβων. Για τους λόγους αυτούς θα μελετήσουμε παρακάτω με περισσότερες λεπτομέρειες το τμήμα αυτό, που δίνεται στο σχήμα 1.4.2.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, στο σημείο S του διαγράμματος του σχήματος 1.4.1 σχηματίζεται το ευτηκτοειδές κράμα, που ονομάσαμε περλίτη. Με βάση το σημείο αυτό οι ανθρακούχοι χάλυβες χωρίζονται σε:

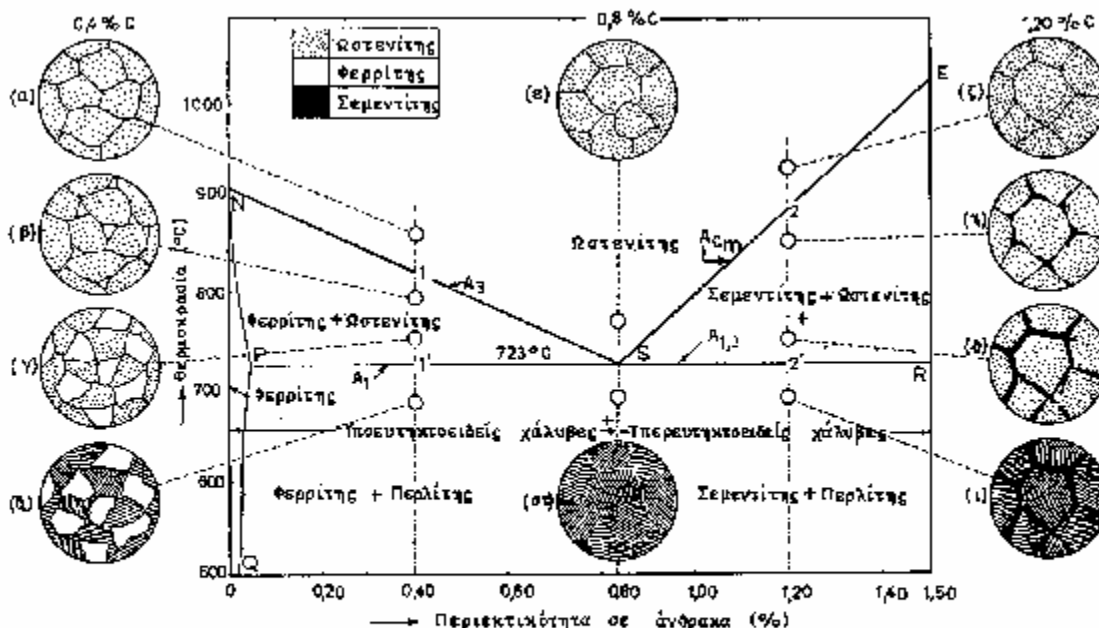
- α) Υποευτηκτοειδείς με $\pi(\text{C}) < 0,80\%$.
- β) Ευτηκτοειδείς με $\pi(\text{C}) = 0,80\%$ και
- γ) υπereυτηκτοειδείς με $0,80\% < \pi(\text{C}) < 2,0\%$.

Στην αριστερή άκρη του διαγράμματος βρίσκεται η περιοχή του φερρίτη. Κάθε σημείο της περιοχής αυτής αντιστοιχεί σε ορισμένη θερμοκρασία και περιεκτικότητα του κράματος σε άνθρακα, όπου ο άνθρακας μπορεί να διαλυθεί τελείως μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του α-σιδήρου και να σχηματίσει το στερεό διάλυμα του φερρίτη.

Κάθε σημείο δεξιά από τη γραμμή PO του διαγράμματος δείχνει ότι ο φερρίτης είναι πια κορεσμένος σε άνθρακα και επομένως ο υπόλοιπος άνθρακας του κράματος θα πρέπει να υπάρχει σ' αυτό ως σεμεντίτης. Η σημασία της κλίσεως της γραμμής PO είναι ότι, ενώ ο άνθρακας διαλύεται μέσα στον α-σίδηρο στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά ποσοστό περίπου 0,008%, στους 723°C διαλύεται κατά 0,03%.

Για να αντιληφθούμε την πορεία της στερεοποίησης, αλλά και τις μεταβολές που γίνονται στην κρυσταλλική δομή των ανθρακούχων χαλύβων, θα μελετήσαμε το διάγραμμα του σχήματος 1.4.2 για τρεις αντιπροσωπευτικούς χάλυβες.

Οι χάλυβες θερμαίνονται, για να μετασχηματισθούν σε ωστενίτη και κατόπιν αφήνονται να ψυχθούν ήρεμα μέχρι τη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.4.2

Το τμήμα του πλήρους θερμικού διαγράμματος των κράματων σιδήρου - σεμεντίτη, που αφορά τους ανθρακούχους χάλυβες. A₂: Γραμμή ανώτερων κρισίμων σημείων στην περιοχή των υποευτηκτοειδών χαλύβων. A₁: Γραμμή κατώτερων κρισίμων σημείων στην περιοχή των υποευτηκτοειδών χαλύβων. A_{cm}: Γραμμή ανώτερων κρισίμων σημείων στην περιοχή των υπereυτηκτοειδών χαλύβων. A_{1,2}: Γραμμή κατώτερων κρισίμων σημείων στην περιοχή των υπereυτηκτοειδών χαλύβων.

1.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Θερμική κατεργασία μετάλλου, ιδίως δε κράματος, ονομάζουμε συνδυασμό θερμάνσεως και αποψύξεως, ώστε αυτό να αποκτήσει ορισμένη κρυσταλλική δομή και μέγεθος κόκκου και επομένως τις μηχανικές ιδιότητες που επιθυμούμε. Γενικά το κράμα θερμαίνεται σε

προκαθορισμένη θερμοκρασία, παραμένει στη θερμοκρασία αυτή για ορισμένο κάθε φορά χρονικό διάστημα και ακολουθεί η απόψυξη του με ορισμένη επίσης ταχύτητα. Στο μέρος αυτό θα ασχοληθούμε με τις θερμικές κατεργασίες των χάλυβων. Γιατί οι χάλυβες είναι από τα λίγα εκείνα κράματα της τεχνικής, τα οποία με θερμικές κατεργασίες μπορούν να αποκτήσουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες ή και να αλλάξουν μηχανικές ιδιότητες. Αυτό οφείλεται σε μετασχηματισμούς της κρυσταλλικής τους δομής, οι οποίοι γίνονται στη στερεά κατάσταση. Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος εξαρτώνται από το είδος της κρυσταλλικής του δομής και από το μέγεθος των κόκκων του. Επειδή με τις θερμικές κατεργασίες μπορούμε να ρυθμίζουμε αυτά τα δυο, έπεται ότι μπορούμε να πετύχουμε τις μηχανικές ιδιότητες που επιθυμούμε. Έτσι, με την εκτέλεση καταλλήλων θερμικών κατεργασιών, μπορούμε όχι μόνο να αυξήσουμε π.χ. τη σκληρότητα του χάλυβα, αλλά και να βελτιώσουμε την αντοχή, τη δυσθραυστότητα και την πλαστικότητα του. Σαν παράδειγμα δίνεται ο πίνακας 1.5.1 ο οποίος αναφέρεται στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα με $\pi(C) = 0,30\%$ (περιεκτικότητα σε άνθρακα), που είναι δυνατό να αποκτήσει ανάλογα με τις θερμικές κατεργασίες.

Πίνακας 1.5.1

Μηχανικές ιδιότητες ανθρακούχου χάλυβα με $\pi(C) = 0,30\%$ έπειτα από διάφορες θερμικές κατεργασίες

Θερμική κατεργασία	Μέγιστη αντοχή σ_B [N/mm ²]	Επιμήκυνση θραύσεως, A [%]	Δυσθραυστότητα κατά IZOD* [Nm/m ²]	Σκληρότητα Brinell H_B
Εξομάλυνση σε 850°C	520	37,0	160	141
Βαφή στο νερό σε 850°C	1340	1,2	20	394
Βαφή στο νερό σε 850°C με				
α) Επαναφορά σε 200°C	1210	4,3	44	347
β) Επαναφορά σε 400°C	970	15,8	97	272
γ) Επαναφορά σε 600°C	630	34,2	160	184
δ) Επαναφορά σε 800°C	530	38,1	160	141

*Με τυποποιημένο δοκίμιο κρούσεως σύμφωνα με τη μέθοδο IZOD

Κατά την εκτέλεση των θερμικών κατεργασιών εξαιρετική σημασία έχουν οι επόμενοι παράγοντες, που συμβάλλουν στην τελική μορφή της κρυσταλλικής δομής του χάλυβα:

- α) Η ανώτατη θερμοκρασία στην οποία θερμαίνεται το τεμάχιο.
- β) Ο χρόνος παραμονής του τεμαχίου σ' αυτή τη θερμοκρασία.

γ) Η ταχύτητα αποψύξεως του τεμαχίου, που καθορίζεται από το μέσον που χρησιμοποιούμε (λουτρό) για να το ψύξουμε. Το τεμάχιο π.χ. αποψύχεται γρηγορότερα, αν βαφτιστεί σε νερό μετά από τη θέρμανση του, παρά αν βαφτιστεί σε λάδι ή αφεθεί να αποψυχθεί σε ήρεμο αέρα.

Οι σπουδαιότερες θερμικές κατεργασίες, που χρησιμοποιούμε, είναι οι εξής:

- Η πλήρης ανόπτηση ή απλά ανόπτηση.
- Η εξομάλυνση.
- Η ανόπτηση για ανακρυστάλλωση.
- Η αποτακική ανόπτηση.
- Η ανόπτηση για σφαιροποίηση του σεμεντίτη.
- Η βαφή
- Η επαναφορά.

Πίνακας 1.5.2

Μηχανικές ιδιότητες ανθρακούχων χαλμών μετά από ανόπτηση και εξομάλυνση

	Περιεκτικότητα σε άνθρακα [%]	Όριο διαρροής σ_d [N/mm ²]	Μέγιστη αντοχή σ_B [N/mm ²]	Επιμήκυνση θραύσεως A [%]	Σκληρότητα Brinell H _B
Μετά από ανόπτηση	0,20	250	415	37	115
	0,60	345	675	23	190
	0,80	365	810	15	220
	1,20	360	720	24	200
Μετά από εξομάλυνση	0,20	315	450	35	120
	0,60	420	770	19	220
	0,80	490	840	13	260
	1,20	700	1080	3	315

Πίνακας 1.5.3

Αντιστοίχιο βαθμών σκληρότητας για χάλυβα σύμφωνα με τις διάφορες μεθόδους μετρήσεως

Σκληρότητα κατά Brinell P=30.000N, D=10 mm		Σκληρότητα κατά Rockwell		Σκληρότητα κατά Vickers	Σκληρότητα κατά Shore
d [mm]	H _B	Κλίμακα B P=1000 N	Κλίμακα C P=1500 N	—	—
2,30	712	—	66	660	106
2,40	653	—	63	780	100
2,50	601	—	59	690	94
2,60	555	—	56	639	88
2,70	514	—	52	558	81
2,80	477	—	49	508	76
2,90	444	—	47	476	72
3,00	415	—	44	439	67
3,10	388	—	41	402	62
3,20	363	—	39	380	58
3,30	341	—	37	360	55
3,40	321	—	35	341	52
3,50	302	—	33	324	48
3,60	285	—	30	302	44
3,70	269	—	28	288	42
3,80	255	—	26	274	40
3,90	241	100	23	258	38
4,00	229	98	21	245	36
4,10	217	96	19	235	34
4,20	207	94	17	225	33
4,30	197	92	14	210	31
4,40	187	90	12	198	30
4,50	179	88	10	186	29
4,60	170	86	8	173	28
4,70	163	84	8	—	27
4,80	156	82	4	—	26
4,90	149	80	2	—	25
5,00	143	78	—	—	—
5,10	137	75	—	—	—
5,20	131	73	—	—	—
5,30	126	71	—	—	—
5,40	121	68	—	—	—
5,50	116	65	—	—	—
5,60	111	62	—	—	—
5,70	107	60	—	—	—

1.6 ΧΑΛΥΒΟΚΡΑΜΑΤΑ

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΩΝ ΧΑΛΚΥΒΩΝ

Τα μειονεκτήματα των ανθρακούχων χαλύβων.

Οι ανθρακούχοι χάλυβες, με τους οποίους ασχοληθήκαμε, παρουσιάζουν σοβαρά μειονεκτήματα σε σχέση με τις απαιτήσεις της σύγχρονης τεχνικής. Τα σπουδαιότερα από τα μειονεκτήματα αυτά είναι τα εξής:

1. Η μέγιστη αντοχή αυτών των χαλύβων σε συνδυασμό και με ικανοποιητική δυσθραυστότητα και πλαστικότητα θεωρείται χαμηλή.
2. Κατά τη βαφή τους παρατηρείται έντονο το φαινόμενο. Δηλαδή, τεμάχια με μεγάλη διατομή δεν μπορούν να βαφούν ομοιόμορφα σε όλη την έκταση της διατομής τους, έστω και στο δραστικότερο λουτρό βαφής. Επίσης από τη μεγάλη ταχύτητα

αποψύξεως που απαιτείται για τη βαφή των ανθρακούχων χαλύβων, δημιουργούνται στα τεμάχια στρεβλώσεις, ρωγμές ή και τα δύο.

3. Παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή στην οξειδωση και στη διάβρωση, ακόμη και στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η αντοχή τους αυτή μικραίνει με αύξηση της θερμοκρασίας.

4. Μετά την επαναφορά, η σκληρότητά τους πέφτει απότομα με αύξηση της θερμοκρασίας επαναφοράς. Αυτό αποτελεί σοβαρό μειονέκτημα των εργαλείων, κοπής, όπου είναι απαραίτητη η σκληρότητα και σε υψηλές θερμοκρασίες.

5. Με τους ανθρακούχους χάλυβες δεν μπορούμε να πετύχουμε ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες που είναι αναγκαίες σε εφαρμογές στον ηλεκτρισμό, μαγνητισμό ή αλλού, όπως π.χ. πολύ μικρό, σχεδόν μηδενικό, συντελεστή διαστολής.

Τα χαλυβοκράματα ή ειδικοί χάλυβες έχουν αναπτυχθεί ακριβώς για να καλύψουν τα σοβαρά μειονεκτήματα των ανθρακούχων χαλύβων.

Τα χαλυβοκράματα είναι κράματα σιδήρου και άνθρακα στα οποία προσθέτονται ένα ή περισσότερα ξένα στοιχεία, τα οποία ονομάζουμε προσθήκες. Σ αυτές τις προσθήκες οφείλονται οι βελτιωμένες ή και εντελώς νέες ιδιότητες των χαλυβοκραμάτων, τις οποίες δεν έχουν οι ανθρακούχοι χάλυβες. Έτσι, μικρές π.χ. ποσότητες νικελίου, Νί και χρωμίου, Cr, βελτιώνουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες ανθρακούχου χάλυβα, ενώ μεγαλύτερες ποσότητες αυτών των στοιχείων μας δίνουν ανοξειδωτο χάλυβα.

Οι πιο συνηθισμένες προσθήκες είναι:

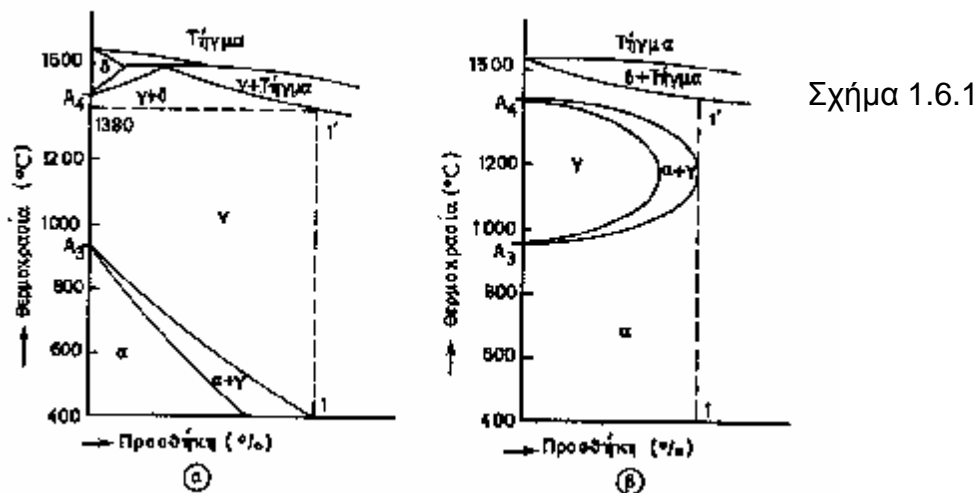
α) Το μαγγάνιο, Mn, το νικέλιο, Ni, το χρώμιο, Cr και το πυρίτιο, Si, τα οποία ονομάζουμε κύριες προσθήκες και β) το μολυβδαίνιο, Mo, το βολφράμιο, W, το βανάδιο, V, το κοβάλτιο, Co, και το αργίλιο, Al, τα οποία καλούμε δευτερεύουσες προσθήκες.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΘΗΚΩΝ. ΕΙΔΗ ΧΑΛΥΒΟΚΡΑΜΑΤΩΝ

Παρακάτω θα αναφέρουμε χονδρικά την επίδραση, που ασκούν οι προσθήκες, στις μηχανικές και άλλες ιδιότητες των χαλυβοκραμάτων, καθώς επίσης και την κρυσταλλική τους δομή. Έπειτα θα εξετάσουμε με λεπτομέρεια την επίδραση κάθε προσθήκης χωριστά. Έτσι:

α) Με τις προσθήκες προσδίνεται μεγαλύτερη αντοχή στο χαλυβόκρμα. β) Μερικές προσθήκες, όπως είναι το Ni, Mn και το Co κατεβάζουν το κρίσιμο σημείο A_3 (Σχήμα 1.4.1, 1.4.2). Έτσι, όταν τα στοιχεία αυτά προστεθούν σε ανθρακούχο χάλυβα (Σχήμα 1.6.1.α), σταθεροποιούν τον ωστενίτη και αυξάνουν την περιοχή θερμοκρασιών, στις οποίες ο ωστενίτης μπορεί να βρίσκεται σε κατάσταση ευστάθειας, δηλαδή να μη διασπάται. Αν π.χ. η προσθήκη φθάσει την περιεκτικότητα που αντιστοιχεί στο σημείο 1, τότε η

κρυσταλλική δομή του χαλυβοκράματος θα είναι ωστενίτης από θερμοκρασία 400°C μέχρι περίπου 1380°C (σημείο 1'). Όπως θα δούμε παρακάτω, μπορεί με κατάλληλες προσθήκες να έχουμε ευσταθή ωστενίτη και στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Άλλες προσθήκες, όπως είναι το Cr, W, V, Mo και Si κατεβάζουν το κρίσιμο σημείο A_4 και ανεβάζουν το A_3 (Σχήμα 1.6.1.β). Έτσι περιορίζονται οι θερμοκρασίες και περιεκτικότητες της προσθήκης, στις οποίες υπάρχει ευσταθής ωστενίτης και δημιουργείται ένας γ-βρόγχος, όπως τον ονομάζουμε. Επομένως, μόλις η προσθήκη υπερβεί την αναλογία που αντιστοιχεί στο σημείο 1 (Σχήμα 1.6.1.β), τότε το χαλυβόκρμα θα έχει κρυσταλλική δομή φερρίτη (α) σε οποιαδήποτε θερμοκρασία, μέχρι εκείνη που αντιστοιχεί στο σημείο 1'. Είναι φανερό, ότι αυτά τα χαλυβοκράματα δεν υφίστανται θερμικές κατεργασίες, γιατί δεν παρουσιάζουν κρίσιμα σημεία.

γ) Τα στοιχεία Cr, W, V, Mo, Ti και Mn, όταν προστεθούν σε ανθρακούχο χάλυβα σχηματίζουν σταθερά καρβίδια και μάλιστα πολύ σκληρότερα από το γνωστό σεμεντίτη. Όμως, άλλες προσθήκες όπως το Ni, Si και Al γραφίτοποιούν το σεμεντίτη.

Ο σεμεντίτης, σ' αυτήν την περίπτωση, διασπάται σε φερρίτη και γραφίτη. Στην πράξη, για να αποφύγουμε το αποτέλεσμα της γραφίτοποιήσεως του σεμεντίτη που χειροτερεύει τις μηχανικές ιδιότητες του χαλυβοκράματος, προσθέτουμε στοιχεία τα οποία σχηματίζουν καρβίδια, όπως συμβαίνει με τους νικελιοχρωμιούχους χάλυβες. Σε αυτούς, ενώ το Ni βοηθάει στην απελευθέρωση γραφίτη, το Cr σχηματίζει σκληρά καρβίδια.

δ) Οι προσθήκες μετατοπίζουν προς τα αριστερά το σημείο της ευτηκτοειδούς αναλογίας S (Σχήμα 1.4.2) του θερμικού διαγράμματος ισορροπίας του χάλυβα. Αυτό σημαίνει ότι το χαλυβόκρμα θα έχει κρυσταλλική δομή περλίτη, αν και θα περιέχει άνθρακα κάτω από 0,80%. Χαλυβοκράματα π.χ. με $\pi(\text{Mn}) = 2,50\%$ παρουσιάζει δομή περλίτη με $\pi(\text{C}) = 0,65\%$.

ε) Οι προσθήκες σε ανθρακούχο χάλυβα μεταθέτουν προς τα δεξιά το διάγραμμα Χ-Θ-Μ, με συνέπεια την ελάττωση της κρίσιμης ταχύτητας αποψύξεως του χαλυβοκράματος και αύξηση της ικανότητας του για βαφή. Αυτό επιτρέπει τη χρησιμοποίηση ηπιότερων λουτρών βαφής με τα γνωστά πλεονεκτήματα (αποφεύγονται στρεβλώσεις και ρωγμές των τεμαχίων).

Ας πάρουμε σαν παράδειγμα τον ευτηκτοειδή ανθρακούχο χάλυβα. Για να βαφεί, πρέπει να αποψυχθεί από 723°C μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε χρονικό διάστημα ενός περίπου δευτερολέπτου μέσα σε λουτρό νερού (δραστικό λουτρό βαφής). Αν προσθέσουμε σ' αυτό το χάλυβα μικρές ποσότητες Ni και Cr, η κρίσιμη ταχύτητα αποψύξεως ελαττώνεται τόσο, ώστε η βαφή να είναι δυνατή μέσα σε λουτρό ελαίου (ήπιο λουτρό βαφής). Ορισμένα χαλυβοκράματα, με κατάλληλες προσθήκες, βάφονται ακόμη και αν αποψυχθούν στον ελεύθερο αέρα (πολύ χαμηλή κρίσιμη ταχύτητα αποψύξεως).

στ) Προσθήκες, όπως το ογ, δ'ι και ΑΙ βελτιώνουν σημαντικά την αντοχή του χαλυβοκράματος σε διάβρωση.

ζ) Τέλος, ορισμένες προσθήκες αυξάνουν το μέγεθος των κόκκων του ωστενίτη, όπως είναι το Cr και το Si, ενώ άλλες ελαττώνουν το μέγεθος των κόκκων, όπως το Ni. Αυτό έχει, όπως είναι γνωστό, ιδιαίτερη σημασία, γιατί επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του χαλυβοκράματος. Η δυσθραυστότητα π.χ. βελτιώνεται με εκλέπτυνση των κόκκων.

Ας μελετήσουμε τώρα παρακάτω τις επιδράσεις κάθε προσθήκης χωριστά (Πίνακας 1.6.1), καθώς επίσης και τα αντίστοιχα χαλυβοκράματα.

Πίνακας 1.6.1

Επίδραση των προσθηκών στις διάφορες ιδιότητες των χάλυβων

Ιδιότητες των χάλυβων	Mn	Ni	Cr	W	Mo	V	Si	Al	Ca
1. Διαλυτότητα στο φερρίτη	5%	10%	απεριόριστη	33%	37,50%	απεριόριστη	18,50%	36%	75%
2. Διαλυτότητα στον ωστενίτη	απεριόριστη	απεριόριστη	12,80%	8%	3%	1%	2%	1,10%	απεριόριστη
3. Τάση σχηματισμού καρβιδίων	-	-	++	+ + +	+ +	+ - + +	-	-	+
		(γραφικατοποιεί)					(γραφικατοποιεί)	(γραφικατοποιεί)	
4. Μηχανικές ιδιότητες	βελτίωση	βελτίωση			βελτίωση				
5. Σταθεροποίηση ωστενίτη	ΝΑΙ	ΝΑΙ							
6. Σταθεροποίηση φερρίτη			ΝΑΙ				ΝΑΙ		
7. Ελάττωση κρίσιμης ταχύτητας αποψύξεως	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ		ΝΑΙ		ΝΑΙ		
8. Ελάττωση ευτηκτοειδούς περιεκτικότητας σε άνθρακα		ΝΑΙ	ΝΑΙ				ΝΑΙ		
9. Μέγεθος κόκκων		ελάττωση	αύξηση			ελάττωση		ελάττωση	
10. Αύξηση αντοχής σε φθορά από τριβή			ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ			
11. Αντοχή σε διάβρωση			αύξηση						
12. Αύξηση αντοχής σε επανοφορά			ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ			ΝΑΙ
13. Ευθραυστότητα από επανοφορά					περιορισμός				

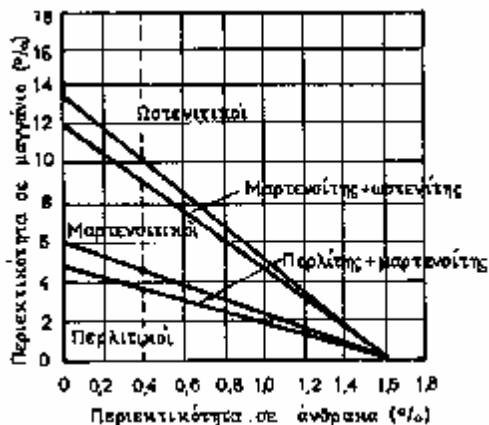
ΤΟ ΜΑΓΓΑΝΟ ΚΑΙ ΟΙ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Το μαγγάνιο περιέχεται μέχρι 1 % περίπου σε όλους τους χάλυβες. Αυτό είναι συνέπεια των μεθόδων παρασκευής του χάλυβα, όπου το μαγγάνιο χρησιμοποιείται σαν αποξειδωτικό.

Αν προστεθεί το μαγγάνιο σε μεγαλύτερες ποσότητες στους ανθρακούχους χάλυβες:

- α) Βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του χαλυβοκράματος.
- β) Χαμηλώνει την κρίσιμη ταχύτητα αποψύξεως.
- γ) Κατεβάζει το κρίσιμο σημείο A_3 και έτσι κάνει σταθερό τον ωστενίτη και
- δ) σχηματίζει σταθερά καρβίδια.

Οι μαγγανιούχοι χάλυβες έχουν κρυσταλλική δομή περλίτη (περλιτικοί χάλυβες), μαρτενσίτη (μαρτενσιτικοί) ή ωστενίτη (ωστενιτικοί) ανάλογα με την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα και μαγγάνιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6.2.



Σχήμα 1.6.2

Μαγγανιούχος χάλυβας π.χ. με $\pi(C) = 0,40\%$ θα έχει κρυσταλλική δομή περλίτη για $\pi(Mn) = 0\%$ ως $3,70\%$, μαρτενσίτη για $\pi(Mn) = 4,80\%$ ως 9% και ωστενίτη για $\pi(Mn) > 10,50\%$ κατά προσέγγιση. Οι περλιτικοί μαγγανιούχοι χάλυβες, που χρησιμοποιούνται βιομηχανικά, περιέχουν περίπου $1,50\%$ Mn και από $0,20\%$ μέχρι $0,25\%$ C. Για να ελαττωθεί το φαινόμενο μάζας κατά τη βαφή τους προσθέτουμε $0,20\%$ ως $0,55\%$ Mo.

Οι μαρτενσιτικοί μαγγανιούχοι χάλυβες δεν παρουσιάζουν βιομηχανικό ενδιαφέρον.

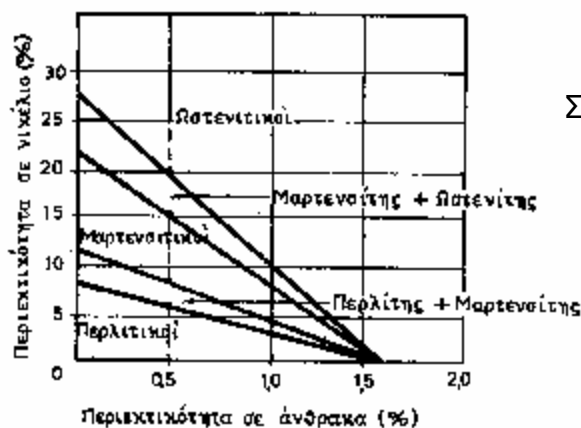
Πρέπει να σημειώσουμε, ότι ο μόνος ωστενιτικός μαγγανιούχος χάλυβας που μας ενδιαφέρει, είναι ο γνωστός ως χάλυβας Hadfield (Χάντφηντ) με περιεκτικότητα 1,20% C και 12,50% Mn που παρασκευάστηκε το 1882. Αυτός ο χάλυβας παρουσιάζει πολύ μεγάλη δυσθραυστότητα και αποκτάει εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής σε φθορά από κρούση κατά τη χρήση του. Η επιφάνειά του δηλαδή συνεχώς σκληραίνεται, όπως π.χ. κατά τη χρησιμοποίησή του σε χαλκοθραυστήρες με το κτύπημα των λίθων. Η χημική σύνθεση, οι μηχανικές ιδιότητες, οι θερμικές κατεργασίες, καθώς και οι βιομηχανικές χρήσεις των κυριότερων μαγγανιούχων χαλύβων αναγράφονται στον πίνακα 1.6.2.

ΤΟ ΝΙΚΕΛΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΝΙΚΕΛΙΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Το νικέλιο σαν προσθήκη στους ανθρακούχους χάλυβες:

- α) Βελτιώνει τις μηχανικές τους ιδιότητες.
- β) Ελαττώνει την ευτηκτοειδή περιεκτικότητα σε άνθρακα.
- γ) Χαμηλώνει την κρίσιμη ταχύτητα αποψύξεως.
- δ) Κατεβάζει το κρίσιμο σημείο A_3 και επομένως σταθεροποιεί τον ωστενίτη.
- ε) Γραφίτοποιεί το σεμεντίτη και
- στ) περιορίζει την αύξηση του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη.

Οι νικελιούχοι χάλυβες διακρίνονται σε περλιτικούς, μαρτενσιτικούς ή ωστενιτικούς. Το είδος αυτό της κρυσταλλικής τους δομής εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα και νικέλιο όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6.3.



Σχήμα 1.6.3

Από το όχημα αυτό προκύπτει, ότι ο νικελιούχος χάλυβας με $\pi(C) = 0,50\%$ θα είναι περλιτικός για $\pi(Ni) = 0\%$ μέχρι 6% , μαρτενσιτικός για $\pi(Ni) = 8\%$ μέχρι 15% και ωστενιτικός για $\pi(Ni) > 20\%$ περίπου.

Συνήθως οι περλιτικοί νικελιοχάλυβες περιέχουν μέχρι 5% Ni και άνθρακα από $0,10\%$ μέχρι $0,40\%$. Οι νικελιούχοι χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα ($0,10\%$ μέχρι

0,15%) είναι κατάλληλοι για ενανθράκωση και επιφανειακή σκλήρωση. Οι νικελιούχοι χάλυβες με άνθρακα από 0,25% μέχρι 0,40% χρησιμοποιούνται, αφού υποστούν επιβελτίωση για την κατασκευή τεμαχίων που καταπονούνται σε κόπωση, όπως είναι οι στροφαλοφόροι άξονες, οι διωστήρες και άλλα στοιχεία μηχανών.

Οι μαρτενσιτικοί νικελιούχοι χάλυβες και οι μαγγανιούχοι δεν παρουσιάζουν βιομηχανικό ενδιαφέρον.

Οι ωστενιτικοί νικελιούχοι χάλυβες είναι αμαγνητικοί. Όταν έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο, παρουσιάζουν αντοχή στη διάβρωση.

Όπως θα δούμε παρακάτω, το νικέλιο και το χρώμιο αποτελούν τις βασικές προσθήκες των ανοξειδωτων χαλύβων.

Ορισμένοι νικελιούχοι χάλυβες παρουσιάζουν πολύ μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής, όπως είναι το Ινβάρ (Invar) με $\pi(\text{Ni}) = 36\%$. Άλλοι παρουσιάζουν χαρακτηριστικές μαγνητικές ιδιότητες, όπως το Πέρμαλλοϋ (Permalloy) με $\pi(\text{Ni}) = 78,50\%$, το οποίο έχει πολύ μεγάλο συντελεστή μαγνητικής διαπερατότητας. Χαρακτηριστικά στοιχεία και εφαρμογές δίνονται στον πίνακα 1.6.3.

Πίνακας 1.6.2

Μαγγανιούχοι χάλυβες

Χημική σύνθεση [%]		Μηχανικές ιδιότητες				Θερμικές κατεργασίες	Βιομηχανικές χρήσεις
C	Mn	Κατάσταση χάλυθα	σ_B [N/mm ²]	A [%]	ρ^* [Nmm/cm ²]		
0,25	1,50	Μετά από εξομάλυνση	580	20	-	Βαφή σε λάδι από 860°C. Επαναφορά ανάλογα με τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες	Χάλυβας κατασκευών. Άξονες μεταδόσεως κινήσεως, στροφαλοφόροι άξονες, διωστήρες
0,35	1,50	Σε ράβδο διαμέτρου 30 mm	700	27	72	Βαφή σε νερό από 840°C έως 860°C. Επαναφορά σε 550°	Χάλυβας κατασκευών. Σε βιομηχανία αυτοκινήτων και για μηχανολογικές γενικά
		Μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά σε 600°C				έως 650°C και απόψυξη σε λάδι ή αέρα	κατασκευές, όπου δεν επαρκεί ο ανθρακούχος χάλυβας, δεν δικαιολογείται όμως ο ακριβότερος νικελισχραιμιούχος
1,20	12,50	Μετά από βαφή σε νερό από 1050°C	830	40	-	Βαφή από 1050°C σε νερό	Χάλυβας κατασκευών ανοξειδωτος. Μηχανήματα εξορύξεως, δόντια εκσκαφών, τροχοί ερπυστριών ελκυστήρων και γερανών, σιαγόνες θραυστήρων

* Δοκίμια κατά IZOD [σχ. Βα(α)].

Πίνακας 1.6.3

Χρωμιούχοι χάλυβες

Χημική σύνθεση [%]			Μηχανικές ιδιότητες				Θερμικές καταργώσεις	Βιομηχανικές χρήσεις
C	Mn	Ni	Κατάσταση χάλυβα	σ_b [N/mm ²]	A [%]	δ [N/mm ²]		
0,40	1,50	1,00	Μετά από βαφή και επαναφορά σε 600°C	710	25	96	Βαφή σε λάδι από 850°C. Επαναφορά σε 550° έως 550°C. Απόψυξη σε λάδι ή αέρα	Χάλυβας κατασκευών. Στροφαλοφόροι άξονες, άξονες μεταδόσεως κινήσεως, δισκίους, Τριμύρια βιομηχανίας αυτοκινήτων και γενικής μηχανολογίας
0,30	0,60	3,00	Μετά από βαφή και επαναφορά σε 600°C	870	25	110	Βαφή σε λάδι από 840°C. Επαναφορά σε 550° έως 650°C. Απόψυξη σε λάδι ή αέρα	Όπως παραπάνω. Επί πλέον για άξονες αντλιών και στροφάλων
0,12	0,45	3,00	Μετά από βαφή	790	20	82	Μετά την ενανθράκωση, βαφή πυρήνα από 860°C σε λάδι. Βαφή επιφανειακής στιβάδας από 770°C σε νερό	Χάλυβας κατασκευών (ενανθράκωση). Οδοντωτοί τροχοί, παίζοι, εκκεντροφόροι άξονες
0,12	0,40	5,00	Μετά από βαφή	870	22	72	Μετά την ενανθράκωση, βαφή πυρήνα από 850°C σε λάδι. Βαφή επιφανειακής στιβάδας από 760°C σε νερό	Χάλυβας κατασκευών (ενανθράκωση). Τριμύρια με σκληρή επιφάνεια φορτιζόμενα με μεγάλα φορτία. Οδοντωτοί τροχοί κινητήρων ταχυτήτων, κωνικοί οδοντωτοί τροχοί, πείροι, σπέρμονες κοχλίες

ΤΟ ΧΡΩΜΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΧΡΩΜΙΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Το χρώμιο σε ανθρακούχο χάλυβα:

α) Γενικά αυξάνει τη σκληρότητα του και την αντοχή του σε φθορά από τριβή, ιδιαίτερα σε χάλυβες που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα, επειδή σχηματίζονται σκληρά καρβίδια.

β) Ελαττώνει την κρίσιμη ταχύτητα αποψύξεως.

γ) Χαμηλώνει την ευτηκτοειδή περιεκτικότητα σε άνθρακα.

δ) Σχηματίζει σκληρά καρβίδια.

ε) Ανεβάζει το κρίσιμο σημείο A₃ και κατεβάζει το A₄, σχηματίζει δηλαδή γ-βρόγχο και έτσι σταθεροποιείται ο φερρίτης.

στ) Αυξάνει το μέγεθος των κόκκων του ωστενίτη και τέλος,

ζ) αυξάνει την αντοχή του χάλυβα στη διάβρωση (αποτελεί κύρια προσθήκη των ανοξειδωτων χαλύβων).

Οι χρωμιούχοι χάλυβες έχουν κρυσταλλική δομή φερρίτη-περλίτη για περιεκτικότητα σε χρώμιο μικρότερη από 7%. Επίσης έχουν πλατιά όρια μεταβολής της περιεκτικότητας σε άνθρακα και χρώμιο όταν είναι μαρτενσιτικοί. Τέλος, όταν έχουν π(Cr) > 13% και χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, είναι φερριτικοί χάλυβες.

Η χημική σύνθεση, οι μηχανικές ιδιότητες, οι θερμικές κατεργασίες, καθώς και τυπικές εφαρμογές των χρωμιούχων χάλυβων φαίνονται στον πίνακα 1.6.4.

Αναφέρουμε χαρακτηριστικά, ότι χρωμιούχοι χάλυβες με π(Cr) = 1,50% και π(V) = 0,20% χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ελατηρίων. Επίσης από χρωμιούχους χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (1%) και π(Cr) = 1,40% κατασκευάζονται ρουλεμάν (ένσφαιροι τριβείς). Το χρώμιο, όταν προστίθεται, σε μεγάλες όμως περιεκτικότητες (πάνω από 13%), προσδίνει στους χάλυβες μεγάλη αντοχή στη διάβρωση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία λεπτού και συνεκτικού προστατευτικού επιφανειακού στρώματος οξειδίων που εμποδίζει την παραπέρα διάβρωση του χάλυβα. Έτσι έχουμε τους ανοξειδωτους σιδήρους π(C) < 0,10(%) και τους ανοξειδωτους χάλυβες (με π(C) = 0,20% μέχρι 0,30%).

Πίνακας 1.6.4

Χρωμιούχοι χάλυβες							Θερμικές κατεργασίες	Βιομηχανικές χρήσεις
Χημική σύνθεση [%]			Μηχανικές ιδιότητες					
C	Mn	Cr	Κατάσταση χάλυβα	σ_b [N/mm ²]	A [%]	Σκληρότητα κατά Brinell		
0,60	0,65	0,85	Μετά από θέρμη και επαναφορά σε 200°C	-	-	700	Θέρμη σε λάδι από 800° έως 850°C. Επαναφορά για εργασία ψυχρήλασίας σε 200° έως 300°C και για εργασία θερμηλασίας σε 400° έως 600°C.	Χάλυβας εργαλείων. Γενικά για εργασία σιδηρομυγού και λεβητοποιού
0,45	0,90	1,00	Μετά από θέρμη σε λάδι και επαναφορά σε 650°C. Ραβδόσ, διαμέτρου 30 mm	930	20	-	Θέρμη σε λάδι από 880°C. Επαναφορά σε 550° έως 700°C	Χάλυβας κατασκευών. Σταχεία στρογγυλών μηχανών και εργαλείο-μηχανών. Λεπίδες και δόντια εκσκαφών. Άξονες μετάδοσης κίνησης, δισκοί, βραχίονες (μπαρές) συστήματος οδήγησης οχημάτων
1,00	0,45	1,40	Μετά από θέρμη	-	-	850	Θέρμη σε λάδι από 810°C. Επαναφορά σε 150°C	Χάλυβας κατασκευών. Έναρμους τριβείς (ροολεμάν). Έκκεντρα.
0,04	0,45	14,00	Μετά από ανόπτηση	50	91	-	Δεν θάβεται. Σκληρώνεται μόνο για ψυχρήλασία	Ανοξειδωτος σίδηρος. Οικιακά σκεύη (ιδιαίτερα περιπόνη και μαχαίρια)
0,22	0,50	13,00	Μετά από θέρμη και επαναφορά σε 700°C	75	28	220	Θέρμη σε λάδι, νερό ή αέρα από 950°C έως 1060°C. Επαναφορά σε 500° έως 750°C	Ανοξειδωτος χάλυβας κατασκευών. Βολβίδες και εξαρτήματα αντλών
2,10	-	12,60	Μετά από θέρμη σε λάδι και επαναφορά σε 200°C	-	-	850	Θέρμη σε λάδι από 960° έως 990°C. Επαναφορά σε 150° έως 400°C	Χάλυβας εργαλείων. Σιγελι (κρουμπάδες), μήτρες, λεπίδες ψαλίδων, μήτρες κοπιομεταλλουργίας, μήτρες κατασκευής σιμωμάτων με συμπίεση

Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ ΚΑΙ ΧΡΩΜΙΟΥ. ΟΙ ΝΙΚΕΛΙΟΥΧΡΩΜΙΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Συχνά, σαν προσθήκες στους ανθρακούχους χάλυβες χρησιμοποιείται το νικέλιο μαζί με το χρώμιο. Σ' αυτή την περίπτωση διατηρούνται οι ευνοϊκές ιδιότητες των δυο προσθηκών, ενώ εξουδετερώνονται τα μειονεκτήματα της μιας, όταν αυτή χρησιμοποιείται χωριστά, από την παρουσία της άλλης. Παρατηρούμε π.χ. ότι η γρήγορη αύξηση του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη, η οποία οφείλεται στο χρώξιο εξουδετερώνεται από

το νικέλιο που έχει τάση ελαττώσεως του μεγέθους των κόκκων. Αντίστροφα, η τάση που έχει το νικέλιο να γραφίτοποιεί το σεμεντίτη, αντισταθμίζεται από την ιδιότητα που έχει το χρώμιο να τον σταθεροποιεί και να σχηματίζει σκληρά καρβίδια.

Έτσι, η υψηλή αντοχή, η καλή δυσθραυστότητα και η πλαστικότητα, που δίνει στο χαλυβόκραμα το νικέλιο, συνδυάζονται με τη σκληρότητα, άρα και την αντοχή σε φθορά από τριβή που δίνει το χρώμιο. Εκτός από αυτά, το χρώμιο και το νικέλιο μαζί περιορίζουν κατά πολύ το φαινόμενο μάζας κατά τη βαφή. Έτσι, μπορεί να βαφούν μέχρι την καρδιά τεμάχια που έχουν διάμετρο ακόμη και 500 mm. Επίσης δίνουν γενικά πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, απαραίτητες για τεμάχια που καταπονούνται με υψηλές μηχανικές τάσεις. Έτσι, παρασκευάζεται ολόκληρη σειρά νικελιοχρωμιούχων χαλύβων, όπως λέγονται.

Αυτοί οι χάλυβες βρίσκουν εφαρμογές συνήθως σε κατάσταση επιβελτιώσεως και περιέχουν:

Από 1,00% μέχρι 3,50% Ni.

Από 0,25 μέχρι 1,50 Cr και

Από 0,25 μέχρι 0,40% C.

Από τη χημική τους σύνθεση παρατηρούμε ότι περιέχουν κατά πολύ περισσότερο νικέλιο παρά χρώμιο.

Σε περίπτωση που οι νικελιοχρωμιούχοι χάλυβες πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σαν χάλυβες ενανθρακώσεως, η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα είναι, όπως είναι γνωστό, χαμηλή και κυμαίνεται από 0,07% μέχρι 0,20%.

Η πλήρης θερμική κατεργασία των χαλύβων επιβελτιώσεως περιλαμβάνει από βαφή μέσα σε λάδι, από 820°C μέχρι 850°C και επαναφορά σε 550°C μέχρι 650°C.

Κατά την επαναφορά ορισμένων από τους νικελιοχρωμιούχους χάλυβες παρατηρείται το φαινόμενο της ευθραυστότητας από επαναφορά. Αυτά δηλαδή τα χαλυβοκράματα, σε ορισμένη περιοχή θερμοκρασίας επαναφοράς, παρουσιάζουν μειωμένη δυσθραυστότητα.

Για να αποφύγουμε αυτό το δυσάρεστο γεγονός, η επαναφορά των νικελιοχρωμιούχων χαλύβων γίνεται από 550°C ως 560°C, ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες που επιθυμούμε, με γρήγορη όμως απόψυξη.

Προσθήκη 0,30% μέχρι 0,50% μολυβδαινίου στους νικελιοχρωμιούχους χάλυβες περιορίζει κατά πολύ το φαινόμενο αυτό της ευθραυστότητας από επαναφορά. Οι χάλυβες που αναφέραμε ανήκουν στην κατηγορία των νικελιοχρωμιούχων χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε προσθήκες. Υπάρχουν όμως και οι ωστενιτικοί νικελιοχρωμιούχοι χάλυβες (ανοξειδωτοι χάλυβες) με βάση τον τυπικό χάλυβα 18-8, δηλαδή με $\pi(\text{Ni}) = 18\%$

και π(Cr) = 8%. Χαρακτηριστικά στοιχεία και εφαρμογές των νικελιοχρωμιούχων χαλύβων βρίσκονται στον πίνακα 1.6.5.

ΤΟ ΒΟΛΦΡΑΜΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΒΟΛΦΡΑΜΙΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Το βολφράμιο, όταν προστίθεται στο χάλυβα σχηματίζει κυρίως σταθερά, πολύ σκληρά και δύσθραυστα καρβίδια. Βαμμένοι βολφραμιούχοι χάλυβες δεν χάνουν τη σκληρότητα και τη μηχανική τους αντοχή ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή την ιδιότητα τους τη χαρακτηρίζουμε σαν αντοχή σε επαναφορά. Γι' αυτό το βολφράμιο, σε μεγάλες περιεκτικότητες, χρησιμοποιείται σαν βασική προσθήκη των χάλυβων εργαλείων, ιδιαίτερα των ταχυχάλυβων. Στον πίνακα 1.6.6 δίνουμε τα χαρακτηριστικά στοιχεία και τις εφαρμογές των βολφραμιούχων χαλύβων, εκτός των ταχυχάλυβων.

Πίνακας 1.6.5

Νικελιοχρωμιούχοι χάλυβες									
Χημική σύνθεση [%]				Μηχανικές ιδιότητες				Θερμικές κατεργασίες	Βιομηχανικές χρήσεις
C	Mn	Ni	Cr	Κατάσταση χάλυβα	σ_B [N/mm ²]	A [%]	ρ [N/m ³ cm ³]		
0,40	0,65	3,50	0,25	Μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά σε 600°C	960	23	90	Βαφή σε λάδι από 830° σε 850°C. Επαναφορά σε 550° έως 650°C	Χάλυβες κατασκευών. Άξονες μεταδόσεως κίνησης, διαστήρες, στροφαλοφόροι άξονες και άλλα.
0,30	0,60	3,00	0,80	Μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά σε 600°C	950	23	110	Βαφή σε λάδι από 820° έως 840°C. Επαναφορά από 550° έως 650°C	Χάλυβες κατασκευών. Για τεμάχια που καταπονούνται με μεγάλες τάσεις. Χρήσεις, όπως ο προηγούμενος χάλυβας
0,35	0,80	1,25	0,60	Μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά σε 600°C	960	22	90	Βαφή σε λάδι από 830° έως 850°C. Επαναφορά σε 180° έως 220°C ή σε 550° έως 650°C. Οι χάλυβες αυτοί υπόκεινται σε ευθραυστότητα από επαναφορά από 250° έως 400°C	Χάλυβες κατασκευών. Οδοντωτοί τροχοί μικρού και μέσου μεγέθους, πηνία διαφορικού, διωστήρες, στροφαλοφόροι άξονες, βλήτρα (μπουλόνια) και γενικά τεμάχια με κοχλίωση
0,30	0,45	4,25	1,25	Μετά από βαφή σε αέρα και επαναφορά σε 630°C	1000	21,50	65	Βαφή σε αέρα από 820° έως 830°C. Επαναφορά σε 180° έως 200°C για μέγιστη σκληρότητα. Σε 600° έως 650°C για μέγιστη δυσθραυστότητα. Απόψυξη σε λάδι. Απόφυγή αναπτήσεως από 250° έως 580°C	Χάλυβες κατασκευών. Τεμάχια με πολύπλοκη μορφή, των οποίων η βαφή σε λάδι θα προκαλούσε στρεβλώσεις, όπως π.χ. οδοντωτοί τροχοί
0,10	0,80	8,50	18,00	Μετά από θέρμ. σε 1050°C και απόψυξη σε αέρα	-	-	-	Δεν σκληρύνεται με θέρμ παρά μόνο με ψυχρήλασία	Ποτεντικός ανοξειδωτός χάλυβας. Κατάλληλος για οικιακές και διακοσμητικές χρήσεις
0,10	0,80	12,50	12,50						
0,07	0,80	8,50	18,00 2,70 Mo					Όπως στον προηγούμενο χάλυβα	Ποτεντικός ανοξειδωτός χάλυβας. Αντέχει σε διάβρωση σε θετικό, φωσφορ. οξύ και οργανικά οξέα

Πίνακας 1.6.6

Βολφραμιούχοι χάλυβες εκτός από ταχυχάλυβες

Είδος χάλυβα	Χημική σύνθεση [%]						Θερμικές κατεργασίες	Βιομηχανικές χρήσεις
	C	Si	Cr	Mo	V	W		
Χάλυβας εργαλείων	1,00	–	0,75	–	–	0,40	Βαφή σε λάδι από 790°C. Επαναφορά σε 200° έως 250°C	Φραιζες, ελεγκτήρες, μικρές μήτρες πρέσας
Χάλυβας μητρώων θερμηλασίας	0,35	1,00	5,00	1,50	0,40	1,35	Προθέρμανση σε 800°C με ταχεία θέρμανση σε 1020°C και απόψυξη σε αέρα. Επαναφορά σε 540° έως 620°C	Μήτρες διελάσεως κραμάτων χαλκού και αργιλίου. Μήτρες διαμορφώσεως εν θερμώ
Χάλυβας αντοχής σε κρούσεις για εργαλεία θερμηλασίας και ψυχρηλασίας	0,50	0,60	1,10	–	–	2,25	Βαφή σε λάδι από 880° έως 920°C. Επαναφορά σε 200° έως 300°C για εργαλεία ψυχρηλασίας. Επαναφορά σε 400° έως 600°C για εργαλεία θερμηλασίας	Γενικά εργαλεία κατασκευαστή λεβήτων. Στιγείς (ζουμπάδες), μήτρες, λεπίδες ψαλίδων, μήτρες αποκοπής. Μήτρες σχηματισμού κεφαλών εν θερμώ. Άλλες μήτρες θερμηλασίας
Χάλυβας μητρώων θερμηλασίας	0,30	0,15	2,85	–	0,35	10,00	Προθέρμανση σε 850°C με ταχεία θέρμανση σε 1150° έως 1200°C. Απόψυξη σε λάδι ή σε αέρα για μικρά τεμάχια. Επαναφορά σε 600° έως 700°C	Μήτρες παραμορφώσεως εν θερμώ θλιπτήρων, περικοχλίων, καρφίων και παρεμφερών στοιχείων μηχανών, όπου τα εργαλεία εργάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Μήτρες διελάσεως κραμάτων χαλκού. Μήτρες χυτεύσεως υπό πίεση κραμάτων χαλκού και αργιλίου

ΤΟ ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Το μολυβδαίνιο, όταν προστίθεται στο χάλυβα:

- α) Σχηματίζει σταθερά και πολύ σκληρά καρβίδια και έτσι αυξάνει τη σκληρότητα του χάλυβα.
- β) Ελαττώνει την κρίσιμη ταχύτητα αποψύξεως.
- γ) Περιορίζει την ευθραυστότητα από επαναφορά.
- δ) Αυξάνει την αντοχή του χάλυβα σε επαναφορά. Αυτό αποτελεί τη σπουδαιότερη ιδιότητα του σαν προσθήκη των χάλυβων εργαλείων.

Το μολυβδαίνιο σε περιεκτικότητα μέχρι περίπου 0,80% χρησιμοποιείται σαν προσθήκη σε χάλυβες κατασκευών, σε υψηλότερες όμως περιεκτικότητες (μέχρι και 9%) σε χάλυβες εργαλείων. Χρησιμοποιείται επίσης σαν προσθήκη και των πυρίμαχων χαλύβων. Συνήθως χρησιμοποιείται μαζί με το νικέλιο και το χρώμιο. Το μολυβδαίνιο αυξάνει την αντοχή του χάλυβα σε ερπυσμό και βελτιώνει τις μηχανικές του ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες. Γι' αυτό κατάλληλος μολυβδαινιούχος χάλυβας χρησιμοποιείται σε κατασκευή μερών λεβήτων, αεριοστροβίλων και άλλων συναφών κατασκευών.

Χαρακτηριστικά στοιχεία και εφαρμογές των μολυβδαινιούχων χαλύβων δίδονται στον πίνακα 1.6.7.

ΤΟ ΒΑΝΑΔΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΒΑΝΑΔΙΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Το βανάδιο ως προσθήκη των χαλύβων:

- α) Σχηματίζει σκληρά και πολύ λεπτά καρβίδια.
- β) Αυξάνει την αντοχή του χάλυβα σε επαναφορά.
- γ) Ευνοεί την ανάπτυξη κόκκων μικρού μεγέθους.

Πίνακας 1.6.7

Χημική σύνθεση [%]					Μηχανικές ιδιότητες				Θερμικές καταργαίες	Βιομηχανικές χρήσεις
C	Mn	Ni	Cr	Mo	Κατάσταση χάλυβα	σ_b [N/mm ²]	A [%]	ρ [N/mm ²]		
0,35	1,80	-	-	0,45	Μετά από θέρμη σε λάδι και επαναφορά σε 800°C	1100	19	73	Θέρμη σε λάδι από 850° έως 860°C. Επαναφορά σε 550° έως 650°C και απόψυξη σε λάδι ή αέρα.	Χάλυβας κατασκευών. Υποκαθιστά νικελιοχρωμιοχάλυβους με μεγαλύτερη τεμνοκρίση σε προμήδεις.
0,40	0,55	-	1,10	0,30	Μετά από θέρμη σε λάδι και επαναφορά σε 800°C	1000	18	70	Θέρμη σε νερό από 840° έως 860°C. Επαναφορά σε 550° έως 700°C και απόψυξη σε λάδι ή αέρα.	Χάλυβας κατασκευών. Υποκαθιστά το νικελιοχάλυβα με 3% Ni. Στραβαλοφόροι άξονες, δισκίους και παρόμοια στοιχεία μηχανών.
0,40	0,55	1,50	1,10	0,30	Μετά από θέρμη σε λάδι και επαναφορά σε 800°C	1070	22	73	Θέρμη σε λάδι από 850° έως 860°C. Επαναφορά σε 550° έως 850°C και απόψυξη σε λάδι ή αέρα.	Χάλυβας κατασκευών. Άξονες μεταδόσεως κινήσεως, στραβαλοφόροι άξονες και άλλα ισχυρά φορτιζόμενα τμήματα όπου η αντοχή σε κόπηση και κρούση είναι επιθυμητές. Μετά από ελαφρή επαναφορά (190° έως 200°C) χρησιμοποιείται για ολονότους τρυκούς αυτοκινήτων και εργαλειομηχανών.
0,10	0,60	-	0,0088 (Βόριο)	0,50	Μετά από εξομάλυνση σε 950°C και απειριστική ανάπτυξη σε 800°C	570	18	-	Εξομάλυνση σε 830° έως 880°C. Αποτακτική ανάπτυξη σε 590° έως 610°C για 8 ώρες.	Χάλυβας κατασκευών. Αντοχή σε εφελκυσμό μέχρι 400°C. Αεροδιακόσμια πύσσες, εργαλεία, θερμότητα, τεμάχια αεροπλανογών και αεροσφαιρών.

Πίνακας 1.6.8

Χημική σύνθεση [%]						Μηχανικές ιδιότητες			Θερμικές καταργαίες	Βιομηχανικές χρήσεις
C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Κατάσταση χάλυβα	σ_b [N/mm ²]	Σκληρότητα κατά Vickers		
0,45	0,25	0,60	1,05	-	0,15	Μετά από θέρμη και επαναφορά	162	-	-	Χάλυβας κατασκευών. Σέρμοελατήριον, κυλίνδρους βαλβίδες.
0,50	-	0,60	1,75	-	0,20	Μετά από θέρμη και επαναφορά	-	400	Προθέρμανση σε 700°C. Κατόπιν θέρμη από 850°C. Επαναφορά σε 550°C.	Χάλυβας εργαλείων. Μητρες χυτεύσεως υπό πίεση κραμάτων αμιδωργάνου.
0,35	1,00	0,30	5,00	1,50	1,00	Μετά από θέρμη και επαναφορά σε 550°C	-	800	Προθέρμανση σε 850°C. Ταχεία θέρμανση σε 1000°C. Θέρμη στον αέρα. Επαναφορά σε 550° έως 650°C.	Χάλυβας εργαλείων. Μητρες θερμολόγους κραμάτων χάλυβου όπου η θερμότητα δεν είναι πολύ υψηλή. Μητρες διείσεως για κράματα του αργιλίου. Μητρες για χύτευση αργιλίου υπό πίεση.
1,60	0,20	0,30	13,00	1,00	0,50	Μετά από θέρμη και επαναφορά σε 400°C	-	700	Προθέρμανση σε 650°C. Ταχεία θέρμανση σε 1000°C. Θέρμη σε λάδι ή αέρα. Επαναφορά σε 200° έως 400°C.	Χάλυβας εργαλείων. Μητρες κοιλάνσεως. Μητρες κατασκευής σπειρωμάτων με πίεση. Μητρες συμπαύσεως. Απειριστικές φασίλων για σκληρά μέταλλα.

Το βανάδιο χρησιμοποιείται σαν προσθήκη των ταχυχάλυβων (από 0,80% μέχρι 5%), άλλων χάλυβων εργαλείων (0,20% μέχρι 1,00%), καθώς επίσης και ορισμένων χάλυβων κατασκευών (από 0,15% μέχρι 0,25%), κυρίως μαζί με χρώμιο.

Το βανάδιο επειδή ευνοεί την εκλέπτυνση των κόκκων χρησιμοποιείται, σε μικρή όμως περιεκτικότητα, σε χυτοχαλύβδινα τεμάχια. Εφαρμογές των βαναδιούχων χάλυβων καθώς και χαρακτηριστικά τους στοιχεία δίνονται στον πίνακα 1.6.8.

ΤΟ ΠΥΡΙΤΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΠΥΡΙΤΙΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Το πυρίτιο, όπως και το μαγγάνιο, το συναντάμε σε όλους τους χάλυβες, γιατί χρησιμοποιείται σαν φτηνό αποξειδωτικό κατά την παρασκευή τους. Η περιεκτικότητα του φθάνει τα 0,20 έως 0,30%.

Το πυρίτιο, όταν προστεθεί σε ανθρακούχο χάλυβα:

- α) Γραφίτοποιεί το σεμεντίτη.
- β) Ανεβάζει το κρίσιμο σημείο A_3 και κατεβάζει το A_4 και έτσι σχηματίζει γ-βρόγχο, όπως και το χρώμιο.
- γ) Χαμηλώνει την ευτηκτοειδή περιεκτικότητα σε άνθρακα.
- δ) Χαμηλώνει την κρίσιμη ταχύτητα βαφής.

Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται τέσσερα είδη πυριτιούχων χάλυβων:

- Ο χάλυβας με $\pi(C) = 0,07\%$ και $\pi(Si) = 4\%$ παρουσιάζει μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες και γι' αυτό χρησιμοποιείται στην κατασκευή ελασμάτων πυρήνων μετασχηματιστών και μαγνητικών πόλων γεννητριών και ηλεκτροκινητήρων.
- Ο χάλυβας με $\pi(C) = 0,50\%$ ως $0,70\%$, $\pi(Si) = 1,50\%$ ως $2,00\%$ και $\pi(Mn) = 0,60\%$ ως $1,00\%$ παρουσιάζει υψηλή αντοχή, δυσθραυστότητα και καλή πλαστικότητα. Γι' αυτό χρησιμοποιείται στην κατασκευή ελατηρίων.
- Ο χάλυβας με $\pi(C) = 1,50\%$, $\pi(Si) = 1,50\%$ και $\pi(Cr) = 3,60\%$, λόγω των καλών του μηχανικών ιδιοτήτων, αλλά και της καλής του αντοχής σε φθορά, χρησιμοποιείται για εργαλεία κατεργασίας πετρωμάτων.
- Τέλος, το πυρίτιο αποτελεί δευτερεύουσα προσθήκη στους χάλυβες κατασκευής βαλβίδων μηχανών εσωτερικής καύσεως. Εδώ αναφέρουμε ως τυπικό το χάλυβα με $\pi(Cr) = 8\%$ και $\pi(Si) = 3,50$.

1.7 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Αν εξετάσουμε τους χάλυβες από άποψη βιομηχανικής τους χρήσεως, διακρίνονται σε:

- α) Χάλυβες κατασκευών.
- β) Χάλυβες εργαλείων και σε
- γ) ειδικά χαλυβοκράματα, όπως είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι πυρίμαχοι χάλυβες, οι χάλυβες μονίμων μαγνητών και άλλοι.

Πριν ασχοληθούμε μ' αυτό το Κεφάλαιο, θα προτάξουμε λίγα πράγματα σχετικά με την τυποποίηση των χαλύβων.

ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Στους χάλυβες κατασκευών περιλαμβάνονται οι χάλυβες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε όλες τις μεταλλικές κατασκευές (υπόστεγα, δοχεία, λέβητες, γέφυρες κλπ.), καθώς επίσης και στις κατασκευές στοιχείων μηχανών (στροφαλοφόρων αξόνων, διωστήρων, βαλβίδων, ελατηρίων και άλλων).

Γενικά οι χάλυβες κατασκευών πρέπει να έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες και σε ορισμένες περιπτώσεις και άλλες ιδιαίτερες ιδιότητες, όπως π.χ. αντοχή στη φθορά, αντοχή στη διάβρωση και άλλα. Συνήθως, για συγκεκριμένη εργασία επιλέγουμε σειρά από χάλυβες που είναι κατάλληλοι για αυτή την εργασία. Στην πράξη εκλέγεται ο χάλυβας που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της κατασκευής και συγχρόνως στοιχίζει φθηνότερα.

A) ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Οι ανθρακούχοι χάλυβες, με τους οποίους ασχοληθήκαμε χρησιμοποιούνται για συνηθισμένες κατασκευές και στοιχεία μηχανών. Η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα κυμαίνεται από 0,05% μέχρι 0,80% και γι' αυτό είναι υποευθηκτοειδείς χάλυβες.

Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, οι ανθρακούχοι χάλυβες κατασκευών διακρίνονται σε:

- α) Πολύ μαλακούς με $\pi(C) = 0,05\%$ μέχρι $0,15\%$.
- β) Μαλακούς με $\pi(C) = 0,15\%$ μέχρι $0,30\%$.
- γ) Ημιμαλακούς με $\pi(C) = 0,30\%$ μέχρι $0,40\%$.
- δ) Ημίσκληρους με $\pi(C) = 0,40\%$ μέχρι $0,60\%$.
- ε) Σκληρούς με $\pi(C) = 0,60\%$ μέχρι $0,70\%$.
- στ) Πολύ σκληρούς με $\pi(C) = 0,70\%$ μέχρι $0,80\%$.

Χαρακτηριστικά στοιχεία και βιομηχανικές χρήσεις των ανθρακούχων χαλύβων δίνονται στον πίνακα 1.7.1.

Σε περιπτώσεις που χρειάζεται να κατεργαστούμε τεμάχια σε αυτόματα μηχανήματα, όπως π.χ. σε αυτόματους τόνους, τότε για να έχουμε αποδοτική κοπή πρέπει τα απόβλητα να μην αποκτούν μεγάλο μήκος, δηλαδή να θρυμματίζονται εύκολα. Αυτό το κατορθώνουμε, αν προσθέσουμε στον ανθρακούχο χάλυβα, αλλά και στο χαλυβόκραμα, θείο, μόλυβδο ή σελήνιο. Έτσι, παίρνουμε τους λεγόμενους χάλυβες ελεύθερης κοπής ή χάλυβες αυτομάτων.

Παρακάτω παραθέτουμε τυπικούς χάλυβες αυτομάτων:

- α) Χάλυβας με π(C) = 0,10%, π(Mn) = 1,00% και π(S) = 0,25%.
- β) Χάλυβας με π(C) = 0,25%, π(Mn) = 1,00% και π(S) = 0,14%.
- γ) Χάλυβας με π(C) = 0,40%, π(Mn) = 1,00% και π(S) = 0,16%.
- δ) Χάλυβας με π(C) = 0,12%, π(Mn) = 1,00%, π(S) = 0,22% και π(Pb) = 0,20%.
- ε) Χάλυβας με π(C) = 0,40%, π(Mn) = 0,60%, π(S) = 0,03% και π(Pb) = 0,20%.

Πίνακας 1.7.1

Χημική σύνθεση [%] C Mn	Μηχανικές ιδιότητες			Θερμικές κατεργασίες	Βιομηχανικές χρήσεις	
	Κατάσταση χάλυβα	σ_b [N/mm ²]	A [%]			ρ [N/mm ²]
0,15 0,50	Μετά από bath σε νερό και επαναφορά σε 200°C	520	20	150	Εξομάλυνση ή ανόπτηση σε 900°C. Εναπόθεση σε 950°C. Βαφή σε 880°C. Επαναφορά σε 180°C έως 200°C και απόψυξη στον αέρα	0,05 έως 0,15% C: Αλυσίδες, καρφιά, κοχλίες και άλλα στοιχεία μηχανών, σωλήνες με ραφή, ταινίες, σιδηρούς μπετόν, διάφορες μεταλλικές κατασκευές. Τεμάχια που πρόκειται να αναθρακωθούν
0,22 0,80	Μετά από βαφή σε νερό και επαναφορά σε 550°C	670	15	90	Εξομάλυνση ή ανόπτηση σε 900°C. Βαφή σε νερό από 880°C έως 890°C. Επαναφορά σε 400°C έως 700°C και απόψυξη στον αέρα	0,15 έως 0,30% C: Κοχλίες, οδοντωτοί τροχοί, παύροι, άξονες, χάλυβες ελεύθερης κοπής (παράγρ. 21.2 (Α)), σφυρήλατα τεμάχια
0,35 0,50	Μετά από βαφή σε νερό και επαναφορά σε 550°C	900	10	60	Εξομάλυνση ή ανόπτηση σε 900°C. Βαφή σε νερό από 825°C έως 850°C. Επαναφορά σε 400°C έως 650°C και απόψυξη στον αέρα	0,30 έως 0,45% C: Δικωτήρες, άξονες, άγκιστρα γερανών, ακαθήμες χωρίς ραφή, σφυρήλατα τεμάχια
0,45 0,50	Μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά σε 550°C	950	8	35	Εξομάλυνση ή ανόπτηση σε 900°C. Βαφή σε λάδι από 840°C έως 845°C. Επαναφορά σε 300°C έως 365°C και απόψυξη στον αέρα	0,40 έως 0,50% C: Στροφαλοφόροι άξονες, άξονες μεταδόσεως κινήσεως, οδοντωτοί τροχοί, ζάντες, τεμάχια υφιστάμενα θερμικές κατεργασίες.
0,60 0,80	Μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά σε 550°C	1020	8	30	Εξομάλυνση ή επαναφορά σε 900°C. Βαφή σε λάδι από 825°C έως 850°C	0,50 έως 0,60% C: Τροχοί αμαξοστοιχιών, σιδηροτροχιές, ελατήρια, συμπυκνωτήρια, τμήματα άλλων

* Η περιεκτικότητα σε σελήνιο είναι ίση ή μικρότερη του 0,40%

B) ΧΑΛΥΒΟΚΡΑΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Είναι χάλυβες κατασκευών ανώτερης ποιότητας από τους ανθρακούχους. Οι ακαθαρσίες τους είναι μειωμένες. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε κατάσταση επιβελτιώσεως, δηλαδή μετά από βαφή και επαναφορά.

Μετά από όλα αυτά τα στοιχεία που δώσαμε για τα χαλυβοκράματα, δεν θα ασχοληθούμε περισσότερο με αυτά. Είναι όμως σκόπιμο να δώσουμε λίγα στοιχεία για τα χαλυβοκράματα ενανθρακώσεως και εναζωτώσεως, για τα οποία δεν έχουμε μιλήσει.

1) Χαλυβοκράματα ενανθρακώσεως.

Σαν χάλυβες ενανθρακώσεως μπορεί να χρησιμοποιηθούν ή ανθρακούχοι χάλυβες ή χαλυβοκράματα, με την προϋπόθεση όμως να έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, συνήθως κάτω από 0,30%. Και αυτό, για να αποκτάει το τεμάχιο δύσθραυστο πυρήνα μετά από τις θερμικές κατεργασίες που προβλέπονται για αυτούς τους χάλυβες.

Οι ανθρακούχοι χάλυβες ενανθρακώσεως περιέχουν άνθρακα μέχρι 0,30% και μαγγάνιο μέχρι περίπου 0,90%. Τα χαλυβοκράματα ενανθρακώσεως είναι νικελιούχα, νικελιοχρωμιούχα ή χλωρομαγγανιούχα με λίγο βανάδιο.

Παρακάτω δίνονται τυπικά χαλυβοκράματα ενανθρακώσεως:

α) Το χαλυβόκρομα με $\pi(\text{C}) = 0,15\%$, $\pi(\text{Mn}) = 0,50\%$ και $\pi(\text{Ni}) = 3\%$ που χρησιμοποιείται για τεμάχια, όπου απαιτείται σκληρή επιφάνεια και δύσθραυστος πυρήνας.

β) Το χαλυβόκρομα με $\pi(\text{C}) = 0,15\%$, $\pi(\text{Mn}) = 0,40\%$, $\pi(\text{Ni}) = 4,00\%$ και $\pi(\text{Cr}) = 1,20\%$ που χρησιμοποιείται για τεμάχια, για τα οποία απαιτείται πολύ σκληρή επιφάνεια και δύσθραυστος πυρήνας.

γ) Το χαλυβόκρομα με $\pi(\text{C}) = 0,40\%$, $\pi(\text{Mn}) = 1,50\%$, $\pi(\text{Cr}) = 1,00\%$ και $\pi(\text{V}) = 0,15\%$, που βρίσκει εφαρμογή όπου απαιτείται μεγάλη σκληρότητα της επιφάνειας, ενώ η δυσθραυστότητα του πυρήνα έχει δευτερεύουσα σημασία.

2) Χαλυβοκράματα εναζωτώσεως.

Εναζώτωση υφίστανται χάλυβες με ειδική σύνθεση, γιατί η σκλήρωση της επιφάνειας που επιτυγχάνεται μετά την εναζώτωση, οφείλεται στο σχηματισμό σκληρών ενώσεων του αζώτου με το χρώμιο, το αργίλιο και το βανάδιο. Το μολυβδαίνιο, όταν προστίθεται, δίνει μεγαλύτερη δυσθραυστότητα στον πυρήνα των τεμαχίων. Παρακάτω δίνουμε τυπικά χαλυβοκράματα εναζωτώσεως:

α) Το χαλυβόκραμα με $\pi(C) = 0,30\%$, $\pi(Mn) = 0,65\%$, $\pi(Cr) = 1,60\%$, $\pi(Mo) = 0,20\%$ και $\pi(Al) = 1,10\%$ που χρησιμοποιείται για τεμάχια με πολύ σκληρές επιφάνειες και αρκετά μεγάλη δυσθραυστότητα του πυρήνα.

β) Το χαλυβόκραμα με $\pi(C) = 0,35\%$, $\pi(Mn) = 0,50\%$, $\pi(Cr) = 2,00\%$, $\pi(Mo) = 0,25\%$, $\pi(V) = 0,15\%$, το οποίο χρησιμοποιείται για τεμάχια που απαιτούν μεγάλη σκληρότητα επιφάνειας και καλή τραχύτητα επιφάνειας, όπως π.χ. μήτρες πλαστικών.

ΧΑΛΥΒΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Τα διάφορα τεμάχια των κατασκευών και μηχανών μπορούν να πάρουν τη μορφή που επιθυμούμε με τη χύτευση, αλλά εκτός από αυτήν και με τη βοήθεια των:

α) Μηχανικών κατεργασιών κοπής, όπως είναι η τόννευση, το φραιζάρισμα, το πλάνισμα κλπ. και

β) των μηχανικών κατεργασιών διαμορφώσεως εν θερμώ ή εν ψυχρώ, όπως είναι η σφυρηλασία, η έλαση, η εξέλαση και άλλες. Στις μηχανικές κατεργασίες των μετάλλων χρησιμοποιούνται κατάλληλα για κάθε περίπτωση εργαλεία.

Κατά την κοπή των μετάλλων, μεταξύ του εργαλείου και του αποβλήτου δημιουργείται ισχυρή τριβή με αποτέλεσμα την ανάπτυξη θερμότητας και επομένως υψηλής θερμοκρασίας στη μύτη (ακή) του εργαλείου. Η θερμοκρασία αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Κατά την κοπή αναπτύσσονται επίσης και ταλαντώσεις ή και κρούσεις σε ορισμένες κατεργασίες, όπως κατά το φραιζάρισμα, όπου το κάθε δόντι του κοπτήρα αποκόπτει ξεχωριστά.

Κατά τις κατεργασίες διαμορφώσεως των μετάλλων χρησιμοποιούνται, όπως είναι γνωστό, σαν εργαλεία κατάλληλες μήτρες (καλούπια). Σε αυτή την περίπτωση αναπτύσσεται πάλι τριβή μεταξύ των μερών της μήτρας και του μετάλλου που διαμορφώνεται. Επίσης αναπτύσσονται και δυνάμεις κρουστικής συνήθως μορφής, που καταπονούν τη μήτρα.

Από όλα αυτά προκύπτει ότι οι χάλυβες εργαλείων θα πρέπει να συνδυάζουν, ανάλογα με την περίπτωση, τις εξής ιδιότητες:

- α) Καλή αντοχή στη φθορά από τριβή, δηλαδή μεγάλη σκληρότητα.
- β) Καλή δυσθραυστότητα.
- γ) Καλή αντοχή σε επαναφορά.
- δ) Καλή μηχανική αντοχή και
- ε) Ικανότητα βαφής σε όλη τους τη μάζα.

Επειδή ορισμένες από τις ιδιότητες που αναφέρουμε αντιστρατεύονται η μία την άλλη, όπως π.χ. η σκληρότητα τη δυσθραυστότητα, γι' αυτό οι χάλυβες εργαλείων παρασκευάζονται με κατάλληλη εκλογή των προσθηκών για ορισμένη χρήση του χάλυβα. Γι' αυτό οι χάλυβες εργαλείων κατατάσσονται στις εξής βασικές κατηγορίες, σύμφωνα με την αμερικανική τυποποίηση κατά AISI.

α) Στους κοινούς χάλυβες εργαλείων ή βαφής σε νερό, στους οποίους περιλαμβάνονται κυρίως ανθρακούχοι χάλυβες.

β) Στους χάλυβες εργαλείων αντοχής σε κρούσεις.

γ) Στους χάλυβες εργαλείων ψυχρηλασίας.

δ) Στους χάλυβες εργαλείων θερμηλασίας.

ε) Στους ταχυχάλυβες και

στ) Στους χάλυβες εργαλείων ειδικής χρήσεως.

A) ΚΟΙΝΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Χρησιμοποιούνται όπου οι απαντήσεις που αναφέραμε είναι μικρές. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα αυτών των χαλύβων κυμαίνεται από 0,60% μέχρι 1,50% ανάλογα με τη χρήση του χάλυβα. Πρέπει να είναι πολύ καθαροί, να περιορίζονται δηλαδή οι ακαθαρσίες τους στο ελάχιστο. Οι κοινοί χάλυβες εργαλείων αγοράζονται συνήθως σε κατάσταση ανοπτήσεως, για να κατεργάζονται εύκολα στη μορφή που θέλουμε και ύστερα υφίστανται βαφή στο νερό και κατάλληλη επαναφορά.

Σαν εργαλεία κοπής, οι κοινοί χάλυβες χρησιμοποιούνται για χαμηλές ταχύτητες κοπής και μικρά βάθη κοπής και για μικρές ταχύτητες προώσεως, καθώς επίσης και για μαλακά υλικά, όπως για μαλακούς χάλυβες, κράματα του χαλκού, του αργιλίου και άλλα.

Στον πίνακα 1.7.2 υπάρχουν στοιχεία θερμικών κατεργασιών και βιομηχανικές χρήσεις των ανθρακούχων χαλύβων εργαλείων σε σχέση με την περιεκτικότητα τους σε άνθρακα.

Πίνακας 1.7.2

Κοινά χάλυβες εργαλείων			
π(C)%	Θερμοκρασία [°C]		Βιομηχανικές χρήσεις
	Βαφής	Επαναφοράς	
0,60 – 0,70	850 – 820	180	Σφύρες, μήτρες σφυρηλασίας, λάμες πριονιών, εργαλεία ξυλουργού, αγροτικά εργαλεία
0,70 – 0,80	830 – 800	180	Σφύρες, μήτρες ψυχρηλασίας, λεπίδες ψαλιδιών, δρέπανα, διαγώνες συνθηκτόρων (δαγκανών), κλειδιά κοχλιών, εργαλεία οιδηρουργού
0,80 – 0,90	820 – 780	180	Όπως παραπάνω
0,90 – 1,00	800 – 770	180	Τυπικός χάλυβας γενικής χρήσεως για εργαλεία τόνου, Μαχαίρια, ελατήρια, στιγείς (ζουμπάδες)
1,00 – 1,10	790 – 760	150	Εργαλεία τόνου, φραζές, τρύπανα, γλίστρα, ελικοτομίδες (φιλιέρες και κολαρούζα)
1,10 – 1,20	790 – 760	150	Εργαλεία κοπής, όπως παραπάνω. Ένσφαιροι τριβείς (ρουλιάν)
1,20 – 1,50	790 – 760	150	Εργαλεία κοπής τελικής κατεργασίας, ρίνες, (λάμες), ξυράφια, λεπίδες ψαλιδιών

B) ΧΑΛΥΒΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΡΟΥΣΕΙΣ

Οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται για εργαλεία που υφίστανται κρούσεις και επομένως πρέπει να έχουν μεγάλη δυσθραυστότητα. Βρίσκουν εφαρμογές σε μήτρες διαμορφώσεως, σε στιγείς (ζουμπάδες) και μήτρες κοπής, σε κοππίδια, λεπίδες ψαλιδιών κλπ. Περιέχουν άνθρακα από 0,45% μέχρι 0,60% και σαν προσθήκες πυρίτιο ή χρώμιο και βολφράμιο και σε ορισμένες περιπτώσεις μολυβδαίνιο.

Τυπικοί χάλυβες αυτής της κατηγορίας είναι οι παρακάτω:

α) π(C) = 0,50%, π(Mn) = 0,80%, π(Si) = 2,00%, π(Mo) = 0,40%

β) π(C) = 0,50%, π(Cr) = 1,50%, π(W) = 2,50%

Γ) ΧΑΛΥΒΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΨΥΧΡΗΛΑΣΙΑΣ

Χρησιμοποιούνται πάρα πολύ. Σ' αυτή την κατηγορία χαλύβων εργαλείων υπάγονται:

α) Χάλυβες φτωχοί σε προσθήκες. Περιέχουν άνθρακα περίπου 1,00%, μαγγάνιο και μικρότερες ποσότητες χρωμίου και βολφραμίου και βάνονται σε λάδι. Δεν παραμορφώνονται πολύ κατά τις θερμικές κατεργασίες και παρουσιάζουν καλή αντοχή σε φθορά από τριβή. Η δυσθραυστότητά τους είναι μέτρια, η δε αντοχή τους σε επαναφορά πολύ χαμηλή, σχεδόν όπως των κοινών χαλύβων εργαλείων. Χρησιμοποιούνται για

μήτρες διαμορφώσεως, για ελικοτομίδες (κολαούζα - φιλιέρες) και ρυθμιζόμενα γλύφανα. Τυπικός χάλυβας αυτού του είδους είναι ο ακόλουθος:

$$\pi(\text{C}) = 0,90\%, \pi(\text{Mn}) = 1,00\%, \pi(\text{Cr}) = 0,50\%, \pi(\text{W}) = 0,50\%$$

β) Χάλυβες μέσης περιεκτικότητας σε προσθήκες. Περιέχουν περίπου 1 % άνθρακα, μαγγάνιο μέχρι 3%, χρώμιο μέχρι 5% και 1% μολυβδαίνιο. Παραμορφώνονται λίγο κατά τις θερμικές κατεργασίες. Έχουν καλή αντοχή στη φθορά από τριβή, μέτρια δυσθραυστότητά και αντοχή σε επαναφορά. Βάφονται στον αέρα. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μήτρων κοπής, διαμορφώσεως και σπειρωμάτων με συμπίεση.

Σαν τυπικός χάλυβας αυτού του είδους θεωρείται ο εξής:

$$\pi(\text{C}) = 2,25\%, \pi(\text{Cr}) = 12\%, \pi(\text{Mo}) = 1,00\%$$

Δ) ΧΑΛΥΒΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΘΕΡΜΗΛΑΣΙΑΣ

Σε ορισμένες εφαρμογές το εργαλείο θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει κυρίως κατά τη θερμηλασία, όπου το τεμάχιο υφίσταται την κατεργασία όταν είναι θερμό, αλλά εμφανίζεται και στη χύτευση με συμπίεση, καθώς επίσης και κατά τη χύτευση πλαστικών. Αυτοί οι χάλυβες θα πρέπει να έχουν κυρίως καλή αντοχή σε επαναφορά. Περιέχουν χρώμιο, μολυβδαίνιο και βολφράμιο, το άθροισμα δε όλων αυτών των προσθηκών πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 5%.

Διακρίνουμε τρεις ομάδες χαλύβων εργαλείων θερμηλασίας:

α) Τους χάλυβες με βάση το χρώμιο, οι οποίοι περιέχουν 0,35% μέχρι 0,55% άνθρακα, 5% μέχρι 7% χρώμιο και μικρότερες ποσότητες βαναδίου (0,40% μέχρι 1,00%), βολφραμίου (1,50% ως 7,00%) και μολυβδαινίου (1,50% ως 5,00%). Σαν αντιπροσωπευτικό χάλυβα αυτής της ομάδας αναφέρουμε τον εξής:

$$\pi(\text{C}) = 0,35\%, \pi(\text{Cr}) = 5\%, \pi(\text{V}) = 1,00\%, \pi(\text{Mo}) = 1,50\%$$

β) Τους χάλυβες με βάση το βολφράμιο, οι οποίοι περιέχουν 0,35% ως 0,55% άνθρακα, 2% ως 12% χρώμιο και 9% ως 18% βολφράμιο, όπως είναι ο χάλυβας:

$$\pi(\text{C}) = 0,45\%, \pi(\text{Cr}) = 3\%, \pi(\text{W}) = 15\%$$

γ) Τους χάλυβες με βάση το μολυβδαίνιο, οι οποίοι περιέχουν 0,55% ως 0,65% άνθρακα, 4% Cr, 1% ως 2% V, 1,5% ως 6,00% W και 5% ως 8% Mo, όπως είναι ο χάλυβας:

$$\pi(\text{C}) = 0,60\%, \pi(\text{Cr}) = 4\%, \pi(\text{V}) = 2\%, \pi(\text{W}) = 6\%, \pi(\text{Mo}) = 5\%$$

Οι χάλυβες εργαλείων θερμηλασίας έχουν γενικά καλή δυσθραυστότητα, μεγάλη αντοχή σε επαναφορά και μέτρια αντοχή στη φθορά. Βάφονται στον σέρα με πολύ μικρές παραμορφώσεις κατά τη βαφή.

Χρησιμοποιούνται για μήτρες σφυρηλασίας και για μήτρες διελάσεως αργιλίου, ορειχάλκου και χάλυβα εν θερμώ. Επίσης για λεπίδες ψαλιδιών, για ψαλιδισμό εν θερμώ, για μήτρες πλαστικών, καθώς και για μήτρες χυτεύσεως με συμπίεση.

ΤΑΧΥΧΑΛΥΒΕΣ

Οι ταχυχάλυβες χρησιμοποιούνται κυρίως σαν χάλυβες εργαλείων κοπής των μετάλλων. Χρησιμοποιούνται όμως και για μήτρες διελάσεως και μήτρες κοπής. Από τα χαλύβδινα εργαλεία, έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό προσθηκών. Συνήθως έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε βολφράμιο ή μολυβδαίνιο και κοβάλτιο. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα κυμαίνεται από 0,70% μέχρι και 1,50%. Η χημική σύνθεση των ταχυχαλύβων συντελεί ώστε να αποκτούν μεγάλη σκληρότητα και επομένως αντοχή σε φθορά, μεγάλη αντοχή σε επαναφορά και παραδεκτή σχετικά δυσθραυστότητα. Βάφονται συνήθως στον αέρα, σε λάδι, ή σε λουτρό αλάτων.

Οι ταχυχάλυβες ταξινομούνται σε δυο κατηγορίες:

α) Σε εκείνους, που έχουν σαν βάση το βολφράμιο. Προστίθεται βανάδιο και κοβάλτιο. Τυπικός χάλυβας αυτής της κατηγορίας είναι ο γνωστός ταχυχάλυβας 18-4-1 (18% W, 4% Cr, 1% V και 0,75% C) και β) σε εκείνους, που έχουν σαν βάση το μολυβδαίνιο, με προσθήκες βσλφραμίου, βαναδίου και κοβαλτίου, όπως είναι οι εξής ταχυχάλυβες:

$\pi(C) = 1,30\%$, $\pi(Cr) = 4\%$, $\pi(V) = 4\%$, $\pi(W) = 5,50\%$, $\pi(Mo) = 4,50\%$ ή $\pi(C) = 0,90\%$, $\pi(Cr) = 4\%$, $\pi(V) = 2\%$, $\pi(W) = 2\%$, $\pi(Mo) = 8\%$ και $\pi(Co) = 8\%$

Χονδρικά μπορούμε να πούμε ότι οι ταχυχάλυβες με βάση το βολφράμιο είναι περίπου ισοδύναμοι με εκείνους που έχουν βάση το μολυβδαίνιο. Οι δεύτεροι έχουν μεγαλύτερη δυσθραυστότητα. Το κοβάλτιο, σαν προσθήκη αυξάνει την αντοχή του ταχυχάλυβα σε επαναφορά.

Στον πίνακα 1.7.3α και 1.7.3β αναγράφονται στοιχεία σχετικά με τη χημική σύνθεση, τις θερμικές κατεργασίες και τις βιομηχανικές χρήσεις συνηθισμένων ταχυχαλύβων και των δυο κατηγοριών.

Πίνακας 1.7.3α

Τύπος ταχυγάλυβα	Χημική σύνθεση (%)						Θερμικές καταργώσεις	Σκληρότητα κατά Vickers	Βασικότερες χρήσεις
	C	P	Mn	Si	Mo	Cu			
14% θολοφραμίου	0,65	4,00	14,00	0,60	-	-	Θαρή σε ρεύμα αέρα ή λάδι από 1250° έως 1300°C. Διπλή επαναφορά σε 585°C επί μια ώρα	800 - 860	Γενικές μηχανουργικές εργασίες ελαφρού μορφής
18% θολοφραμίου (10 - 4 - 1)	0,75	4,20	18,20	1,20	-	-	Όπως παραπάνω, θαρή από 1200° έως 1340°C και διπλή επαναφορά	800 - 880	Εργασία τένιου, ιλιάνης, φρεζας, εργαλεία κοπής αδονοειδών εργαλείων σε υδροκράδεις, γλίστρανα, ελαστομερές, τριπόδινα, δίσκοι σφολιγής, φίλοι και ταινίες μεταλλοειδών και δόλω
22% θολοφραμίου	0,78	4,50	21,50	1,40	0,60	-	Όπως παραπάνω, θαρή από 1200° έως 1320°C και διπλή επαναφορά	830 - 900	Μεγάλου μεγέθους εργαλεία και κοπής εργαλείοκοπής, εργαλεία αυτοκινήτου τένιου, εργαλεία μορφής ακρίβειας, Ανώτατος σε ποιότητα του ταχυγάλυβα 18.4.1
12% κοβαλτίου - 21% θολοφραμίου	0,80	4,75	21,50	1,50	0,60	12	Όπως παραπάνω, θαρή από 1200° έως 1320°C και διπλή επαναφορά	800 - 880	Όπως ο ταχυγάλυβος 18.4.1, αλλά για πολύ σκληρά υλικά. Παρασιάζει πολύ μεγάλη αντοχή σε επαναφορά και μεγάλη δυσβρωσιτότητα

Πίνακας 1.7.3β

12% θολοφραμίου - 5% θαναδίου	1,50	4,50	12,50	5,00	-	5,00	Όπως παραπάνω, θαρή από 1280° έως 1320°C και διπλή επαναφορά	800 - 1000	Επιμετικά σκληρές και ελαστικές κοπής αντοχή σε επαναφορά. Εργαλεία μεγάλης ακρίβειας, ως και εργαλεία κοπής επί τρυγιάδας (τρίγωνοι, φρεζάρισμα, ριλιόνισμα κλπ.). Κατεργασία χαλυβοκραμάτων αρωματροειδών
18% θολοφραμίου - 5% θαναδίου	1,50	5,00	17,00	5,00	0,00	8,75	Όπως παραπάνω, θαρή σε 1280°C και διπλή επαναφορά	800 - 900	Εργαλεία κοπής για κατεργασία πολύ σκληρών υλικών
5% μαλιθθανίου	0,00	4,25	5,50	1,90	5,00	-	Όπως παραπάνω, θαρή σε 1250°C και διπλή επαναφορά	850 - 900	Χονδρικά κοπόμενες με τον ταχυγάλυβο 18.4.1 με μεγαλύτερη όμως δυσβρωσιτότητα. Τριπόδινα, γλίστρανα, ελαστομερές (κόλλοσώδα), φρεζές
8% μαλιθθανίου - 8% κοβαλτίου	0,80	4,75	1,85	1,10	9,50	8,25	Όπως παραπάνω, αλλά τριπλή επαναφορά σε 580°C για μια ώρα	830 - 935	Παρόμοιος με τον ταχυγάλυβο 12% κοβαλτίου - 21% θολοφραμίου

ΕΙΔΙΚΑ ΧΑΛΥΒΟΚΡΑΜΑΤΑ

Τα ειδικά χαλυβοκράματα έχουν αναπτυχθεί, για να ανταποκριθούν σε ορισμένες πρακτικές απαιτήσεις, τις οποίες δεν μπορούν να καλύψουν οι χάλυβες που έχουμε συναντήσει μέχρι τώρα. Σ' αυτή την παράγραφο θα μελετήσουμε τους πιο ενδιαφέροντες

τύπους ειδικών χαλυβοκραμάτων, όπως είναι οι ανοξειδωτοι χάλυβες, οι πυρίμαχοι χάλυβες και οι χάλυβες ειδικών ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών.

A) ΟΙ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Η ανακάλυψη των ανοξειδωτων χαλύβων αποδίδεται στον Μπρέρλεϋ (Brenly), όταν το 1913 παρατήρησε ότι ο χάλυβας με 13% Cr παρουσίαζε σημαντική αντοχή στη διάβρωση της ατμόσφαιρας.

Η αντοχή αυτή στη διάβρωση οφείλεται στο χρώμιο, το οποίο σχηματίζει λεπτό στρώμα οξειδίου του χρωμίου στην επιφάνεια του κράματος. Το στρώμα αυτό είναι ανθεκτικό και συμπαγές, προσκολλάται καλά στην επιφάνεια και έτσι εμποδίζει την προσβολή του χάλυβα. Με αυτό τον τρόπο δεν παρέχεται μόνο προστασία από την ατμόσφαιρα, αλλά και από ορισμένες διαλύσεις ή διαβρωτικό περιβάλλον.

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες επομένως είναι χαλυβοκράματα με βάση το χρώμιο, ανθεκτικά σε διαβρωτικό γενικά περιβάλλον συμπεριλαμβανόμενης και της ατμόσφαιρας.

Η διάβρωση των μετάλλων που βρίσκονται μέσα σε διαβρωτική ατμόσφαιρα, γίνεται είτε από συνεχή χημική προσβολή είτε από φαινόμενα ηλεκτρολύσεως είτε και από τα δυο μαζί. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι τα ανθεκτικά σε διάβρωση κράματα πρέπει:

α) Να έχουν κρυσταλλική δομή μιας μόνο ομοιογενούς φάσεως, όπως π.χ. ωστενίτη ή φερρίτη και

β) να σχηματίζουν επιφανειακά οξείδιο, το οποίο να προστατεύει το βασικό κράμα από παραπέρα διάβρωση.

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι κατά βάση χρωμιούχοι χάλυβες. Περισσότερο βελτιωμένοι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι οι νικελιοχρωμιούχοι.

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- Στους μαρτενσιτικούς.
- Στους ωστενιτικούς και
- στους φερριτικούς.

B) ΟΙ ΠΥΡΙΜΑΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Πυρίμαχους χάλυβες λέμε τους χάλυβες που αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως πάνω από 500°C. Οι πυρίμαχοι χάλυβες βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή βαλβίδων μηχανών εσωτερικής καύσεως, αυλών υπερθερμαντήρων, σωληνώσεων θερμικών εγκαταστάσεων ατμού, όπως και σε μεταφορικές ταινίες κλιβάνων, πτερύγια

στροβίλων, κιβώτια ανοπτήσεως, χωνευτήρια κλπ. Αυτοί οι χάλυβες πρέπει να έχουν τις εξής ιδιότητες στο περιβάλλον και στη θερμοκρασία εργασίας τους:

- α) Αντοχή στη διάβρωση.
- β) Καλή μηχανική αντοχή και
- γ) σταθερότητα διαστάσεων, δηλαδή τα διάφορα τεμάχια στην υψηλή θερμοκρασία εργασίας τους να μην αλλάζουν διαστάσεις πιο πολύ από τα επιτρεπόμενα όρια.

Στον πίνακα 1.7.4 παραθέτουμε τη χημική σύνθεση, τη μέγιστη θερμοκρασία εργασίας και τις βιομηχανικές χρήσεις τυπικών πυριμάχων χαλύβων.

Πίνακας 1.7.4

Χημική σύνθεση [%]					Άλλα στοιχεία	Μέγιστη θερμοκρασία εργασίας [%]	Βιομηχανικές χρήσεις
C	Si	Mn	Cr	Ni			
0,15	1,50	—	25	19	—	1100	Ωστενιτικός νικελιοχρωμιούχος χάλυβας. Χωνευτήρια, πολλαπλές εξαγωγές μηχανών αεροπλάνων, τεμάχια λεβήτων και υπερθερμαντήρων
0,35	0,60	—	28	—	—	1150	Φερριτικός χρωμιούχος χάλυβας. Αντέχει σε οξειδωτική βετούχα ατμόσφαιρα
0,12	—	0,70	12	2,50	1,80 Mo 0,35 V	800	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων, τεμάχια αεροστροβίλων
0,06	—	1,50	17	12,50	2,35 Mo	650	Τεμάχια εγκαταστάσεων ατμού, αυλοί υπερθερμαντήρων
0,40	3,50	—	8	—	0,50 Mo	700	Χάλυβας βαλβίδων μηχανών εσωτερικής καύσεως

Γ) ΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Αυτά τα χαλυβοκράματα μπορούν να διαιρεθούν σε:

- α) Μαγνητικώς μαλακά, τα οποία μαγνητίζονται και από μαγνητίζονται, χωρίς να χάνεται σημαντικό ποσό ενέργειας και
- β) μαγνητικώς σκληρά, τα οποία μαγνητίζονται εύκολα και διατηρούν το μαγνητισμό τους και μετά την αφαίρεση του μαγνητικού πεδίου, που τα μαγνήτισε.

Τα πρώτα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ελασμάτων πυρήνων μετασχηματιστών, τυμπάνων και πόλων ηλεκτρικών κινητήρων και γεννητριών. Τα δεύτερα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών.

ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί μέταλλα εδώ και περίπου 7 χιλιάδες χρόνια. Τα 200 χρόνια από την βιομηχανική επανάσταση και τα περίπου 100 από την βιομηχανική παραγωγή του αλουμινίου, μοιάζουν σαν ένας κόκκος άμμου στην κλεψύδρα της ιστορίας. Σε αντίθεση με τον χαλκό, τον χρυσό και τον σίδηρο, το αλουμίνιο δεν υπάρχει στην φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες, έτσι η απομόνωση του μετάλλου αυτού καθυστέρησε ιδιαίτερα. Η ανακάλυψή του αλλά και η παραγωγή του, έγινε δυνατή μόνον μετά την ανακάλυψη και ευρεία χρήση του ηλεκτρισμού και μόνον όταν η χημεία αποχωρίστηκε από το φάντασμα της αλχημείας. Ο Hans Christian Oersted ήταν ο πρώτος επιστήμονας που παρήγαγε καθαρό αλουμίνιο το 1825, με την χρήση χλωριδίου του αλουμινίου ($AlCl_3$) και αμάλγαμα ποτάσας, ένα κράμα δηλαδή ποτάσας και ψευδαργύρου. Ο Oersted ανεβάζοντας την θερμοκρασία του μίγματος, σε κατάσταση χαμηλής πίεσης πέτυχε την απομάκρυνση του ψευδαργύρου, το εναπομείναν δε υλικό ήταν το αλουμίνιο. Έτσι γεννήθηκε το μέταλλο που άλλαξε την ιστορία και οδήγησε τον άνθρωπο στο φεγγάρι, δίνοντάς του παράλληλα την δυνατότητα να μπορεί να εκσφενδονίζει πυραύλους μαζικής καταστροφής κατά του εαυτού του.

Οι φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου το καθιστούν μία από τις πλέον χρήσιμες βιομηχανικές πρώτες ύλες, που χαρακτήρισαν μεγάλα βήματα της ανθρωπότητας το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, όπως η κατάκτηση του διαστήματος. Το αλουμίνιο ή αργίλιο είναι το τρίτο κατά σειρά στοιχείο μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο που το συναντάμε στο φλοιό της γης. Σε αντίθεση με τον χαλκό, τον χρυσό και τον σίδηρο το αλουμίνιο δεν υπάρχει στη φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες, έτσι η απομόνωση του μετάλλου αυτού καθυστέρησε ιδιαίτερα.

Το αλουμίνιο προέρχεται από το υλικό βωξίτης, που μετά την εξόρυξή του μετατρέπεται σε αλουμίνα και στης συνεχεία με την ηλεκτρόλυση μετατρέπεται σε μέταλλο αλουμινίου. Η σημερινή υψηλή τεχνολογία και οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του, εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα εφαρμογών του.

2.2 ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΥΜΙΝΙΟΥ

ΒΩΞΙΤΗΣ

Η πρώτη ύλη για την παραγωγή του αλουμινίου είναι ο βωξίτης. Ο βωξίτης αποτελεί το κύριο μέταλλευμα από το οποίο εξάγεται πάνω από το 99% του αλουμινίου παγκοσμίως.

Σχήμα 2.2.1



Είναι ένα ετερογενές μίγμα ορυκτών που συντίθεται συνήθως από ένα ή και περισσότερα ένυδρα οξειδία του αλουμινίου. Τα ορυκτά αυτά είναι:

- Γιββσίτης ($\text{Al}(\text{OH})_3$ ή $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)
- Βαιμίτης (AlOOHH ή $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- Διάσπορο (AlOOHH ή $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Ο βωξίτης είναι ένα ιζηματογενές πέτρωμα το οποίο παράγεται επιτόπου από τη χημική αποσάθρωση κάτω από τροπικές ή υποτροπικές συνθήκες αργιλοτροπικών ορυκτών με υψηλό περιεχόμενο σε αστρίους.

Στον πίνακα 2.2.1 φαίνεται η τυπική χημική ανάλυση του βωξίτη, ενώ στον 2.2.2 οι κατηγορίες βωξιτών.

Πίνακας 2.2.1

Συστατικό	% κατά βάρος
Al ₂ O ₃	30-60
Fe ₂ O ₃	1-30
SiO ₂	0,5-10
TiO ₂	0,5-10
CaO	0,1-2
P ₂ O ₅	0,02-1
Organic Carbon	0,02-0,4

Πίνακας 2.2.2

Κατηγορίες βωξιτών	
Ερυθροί	15-30% Fe ₂ O ₃
Κίτρινοι	10-25% Fe ₂ O ₃
Λευκοί	0,5-5% Fe ₂ O ₃

ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΩΞΙΤΗ

Η μεταλλουργική επεξεργασία βωξίτη περιλαμβάνει 4 στάδια:

1. Προετοιμασία Βωξίτη
2. Εκχύλιση υπό πίεση
3. Καταβύθιση
4. Θερμική Διάσπαση

Η προετοιμασία του βωξίτη γίνεται σε δύο βασικά στάδια. Αρχικά πρέπει να διασφαλίσουμε την ομοιομορφία στην τροφοδοσία του βωξίτη ως προς τη χημική σύστασή του. Αυτό το καταφέρνουμε με την ανάμιξη βωξίτη από διαφορετικές πηγές και τη χρήση αποθεμάτων. Στο δεύτερο στάδιο θα γίνει η θραύση (μέγεθος <2cm) ή η λειτρίβηση βωξίτη (μέγεθος <0,15cm).

Το πρώτο χημικό στάδιο της κατεργασίας βωξίτη είναι η διάλυση όλου του περιεχομένου σε αυτόν Al₂O₃ σε ισχυρά αλκαλικό διάλυμα NaOH. Εκεί λαμβάνει χώρα η διαδικασία εκχύλισης υπό πίεση με διάλυμα καυστικού νατρίου. Οι στόχοι αυτής της διαδικασίας είναι:

- Η λήψη σταθερού διαλύματος με τη μέγιστη δυνατή συγκέντρωση σε Al.

- Η χρησιμοποίηση της ελάχιστης δυνατής ποσότητας ενέργειας.

Τα στερεά μετά την εκχύλιση περιέχουν σωματίδια με μέγεθος $>100\mu\text{m}$ τα οποία αποκαλούνται «άμμος» και πολύ λεπτότερα σωματίδια με μέγεθος $<10\mu\text{m}$. Η άμμος διαχωρίζεται πρώτα σε υδροκυκλώνες, μετά πλένεται με νερό κατά αντιρροή για να απομακρυνθεί το αργιλικό διάλυμα που τυχόν έχει συγκρατηθεί και τελικά απορρίπτεται στους χώρους απόθεσης στερεών παραπροϊόντων.

Το επόμενο στάδιο είναι η καταβύθιση ένυδρης αλουμίνας από το υπέρκορο αργιλικό διάλυμα. Σκοπός του σταδίου αυτού είναι η ανάκτηση του περιεχομένου εν διαλύσει σε αυτό αλουμινίου. Τα υπέρκορα αργιλικά διαλύματα είναι αρκούντως σταθερά (βρίσκονται σε μια μετασταθή κατάσταση), έτσι θα πρέπει:

1. Θερμοδυναμικά να διασπαστούν
2. Κινητικά, η διάσπασή τους απαιτεί πολύ μεγάλο χρόνο για να ξεκινήσει.

Στο τελευταίο στάδιο γίνεται η θερμική διάσπαση της ένυδρης αλουμίνας με σκοπό την παραγωγή αλουμίνας που ικανοποιεί τις προδιαγραφές για μεταλλουργική χρήση. Η διεργασία διεξάγεται σε θερμοκρασία 1100°C .

2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

Όπως γνωρίζουμε, το αλουμίνιο προέρχεται από το ορυκτό βωξίτης, που μετά την εξόρυξή του μετατρέπεται σε αλουμίνα και στη συνέχεια με ηλεκτρόλυση μετατρέπεται σε μέταλλο αλουμίνιο. Η σημερινή τεχνολογία και οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του, εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα εφαρμογών του.

Το αλουμίνιο μεταποιείται με διάλαση, με έλαση, με χύτευση και με μηχανουργικά εργαλεία για την παραγωγή προϊόντων ή τμημάτων διαφόρων προϊόντων (τα λεγόμενα ημι – προϊόντα για χρήση σε μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές εφαρμογές).

Η χρήση του αλουμινίου και των κραμάτων του εξασφαλίζουν σε κάθε περίπτωση την πολύ μεγάλη μηχανική αντοχή του σε σχέση με το βάρος του. Έτσι το αλουμίνιο καθιστάται ένα ιδανικό υλικό για την κατασκευή μεταφορικών μέσων λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται.

Το αλουμίνιο διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Η επιλογή του κατάλληλου κράματος γίνεται ανάλογα με την χρήση του τελικού προϊόντος και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς και από την μέθοδο της παραγωγικής επεξεργασίας. Η δυνατότητα που έχει το αλουμίνιο, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησης

του. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων κραματοποιών (χημικών) στοιχείων (π.χ. χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο, ψευδάργυρος κλπ), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη αλουμινίου με τις επιθυμητές και κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος.

Πίνακας 2.3.1

Ιδιότητες καθαρού αλουμινίου		
	Στοιχεία	Μον.Μέτρησης
Ατομικό βάρος	26,98	
Πυκνότητα (20°C)	2,6898	gr/cm ³
Σημείο τήξης	660,2	°C
Γραμμική διαστολή (0-100 °C)	23,5x10 ⁻⁶	(m/m)/°C
Ηλεκτρική αντίσταση (20 °C)	2,69	μΩcm
Μέτρο ελαστικότητας (E)	68,3	GPa
Μέτρο στρέψης (G)	25,5	GPa
Συντελεστής Poisson	0,34	

Πίνακας 2.3.2

Χημικές ιδιότητες αλουμινίου	
Ηλεκτρονική δομή	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ¹
Αριθμός οξειδωσης	3+

Πίνακας 2.3.3

Φυσικές ιδιότητες αλουμινίου	
Σημείο τήξης	933,5k ή 660 °C
Σημείο βρασμού	2767K ή 2494 °C
Πυκνότητα (στερεό)	2697 – 2699Kg/m ³
Θερμική αγωγιμότητα (K)	2,37 W/cm.K στους 298K
Ηλεκτρική ειδική αντίσταση	2,655x10 ⁻⁸ Ωm στους 298K

Επίσης το αλουμίνιο έχει τα εξής παρακάτω φυσικά χαρακτηριστικά:

- Αγωγιμότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με το 65% του χαλκού
- Στους 50K έχει μεγαλύτερη αγωγιμότητα από αυτή του χαλκού
- Γίνεται υπεραγώγιμο υλικό κάτω των 1,2K

Πίνακας 2.3.4

Ποιότητες αλουμινίου	
%Αλουμίνιο	Τύπος
<99,5	Scrap ή κραματωμένο Al
99,5 – 99,9	Εμπορική καθαρότητα
99,9 – 99,99	Υψηλή καθαρότητα
>99,99	Υπέρψηλη καθαρότητα

Πίνακας 2.3.5

Μηχανικές ιδιότητες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος		
Καθαρότητα %	Αντοχή σε εφελκυσμό Μρα	Επιμήκυνση ράβδου διαμέτρου 50mm %
99,99	45	50
99,8	60	45
99,6	70	43

Οι τελικές ιδιότητες κάθε προϊόντος που θα παραχθεί από αλουμίνιο, επιτυγχάνονται με την επιλογή του κατάλληλου κράματος αλουμινίου, την μέθοδο επεξεργασίας του (μηχανική πλαστική διαμόρφωση ή χύτευση) και τις θερμικές κατεργασίες (βαφή, τεχνητή γήρανση, ανόπτηση κλπ) που θα υποστεί.

Το αλουμίνιο και τα κράματά του, (είτε πρωτόχυτο είτε δευτερόχυτο), διαιρούνται σε δύο κύριες κατηγορίες :

- Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για χρήση σε χυτήρια (παραγωγή χυτών αντικειμένων).
- Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για μηχανική μεταποίηση (παραγωγή προϊόντων έλασης, διέλασης, ολκής, κλπ).

Οι ιδιότητες των προϊόντων του αλουμινίου ή των κραμάτων του, εξαρτώνται τόσο από την κραματοποίηση όσο και από τις μηχανικές ή θερμικές κατεργασίες που θα υποστεί.

ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΩΝ

Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN τα κράματα αλουμινίου συμβολίζονται με πέντε αριθμητικά ψηφία. Το πρώτο ψηφίο προσδιορίζει την ομάδα των κραμάτων βάσει του κυριότερου κραματοποιού στοιχείου. Το πέμπτο ψηφίο είναι πάντα 0. Του πενταψηφίου αυτού αριθμού προηγείται συμβολισμός που δείχνει την χρήση του κράματος.

Πίνακας 2.3.6

Κράματα χυτών		
Συμβολισμός ποιότητας	Συμβολισμός	Κύριο στοιχείο
	1XXX0	Κανένα (min 99,00% Al)
	2XXX0	Cu
EN AB-	4XXX0	Si
EN AC-	5XXX0	Mg
EN AM-	7XXX0	Zn
	8XXX0	Sn
	9XXX0	Μητρικά κράματα
Συμβολισμοί: Ευρωπαϊκό πρότυπο, A: Αλουμίνιο, B: χελώνα, C: κράμα για χυτά M: μητρικό κράμα		

Τα χαρακτηριστικότερα κράματα για την παραγωγή χυτών αντικειμένων είναι αυτά που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε πυρίτιο. Το πυρίτιο βελτιώνει τις ρεολογικές ιδιότητες έτσι ώστε το ρευστό μέταλλο να καταλαμβάνει όλες τις κοιλότητες του καλουπιού.

Πίνακας 2.3.7

Σύνθεση, χαρακτηριστικές ιδιότητες και προσδιορισμοί μερικών επεξεργασμένων κραμάτων αλουμινίου												
Προσδιορισμός	Σύνθεση (%)					Πίεση εφελκυσμού		Πίεση θλίψης		Επιμήκυνση σε	Σκληρότητα Brinell	Χρήσεις και χαρακτηριστικά
	Cu	Si	Mn	Mg	Άλλα	ksi	Mpa	ksi	Mpa	2 in (%)		
1100-0	0,12				99 Al	13	90	5	34	35	23	Διαφημιστικό Al (εύκολο στη μορφοποίηση)
1100-H14						16	110	14	97	9	32	Καλή αντίσταση στη διάβρωση
110-H18						24	165	21	145	5	44	Μαγειρικά εργαλεία και σκληρώσεις
3003-0	0,12		1,2			16	110	6	41	30	28	Παρόμοιο με το 1100
3003-H14						22	152	21	145	8	40	Λίγο δυνατότερο και λιγότερο όλκιμο
3003-H18						29	200	27	186	4	55	Μαγειρικά εργαλεία
5052-0				2,5	0,25 Cr	28	193	13	90	25	45	
5052-H32						33	228	28	193	12	60	Υψηλό όριο θλίψης και όριο κόπωσης
5052-H36						40	276	35	241	8	73	
2017-0	4	0,5	0,7	0,6		26	179	10	69	20	45	Ντουραλουμίνια, Δυνατό κράμα
2017-T4						62	428	40	276	20	105	
2024-0	4,4		0,6	1,5		27	186	11	76	20	42	Δυνατότερο από το 2017
2024-T4						64	441	45	290	19	120	Χρησιμοποιείται στην κατασκευή αεροσκαφών
2014-0	4,4	0,8	0,8	0,5		27	186	14	97	12	45	Ισχυρό κράμα για τραβηγμένες μορφές
2014-T6						65	448	55	379	10	125	Ισχυρό σφυρήλατο κράμα
Alclad												
2014-T6	4,5	1	0,8	0,4		63	434	56	386	7		
7075-0	1,6		0,2	2,5	0,3 Cr	33	228	15	103	17	60	Κράμα υψηλής δύναμης
7075-T6					5,6 Zn	76	524	67	462	11	150	Μικρότερη ολκιμότητα από το 2024
6061-T6	0,28	0,6		1	0,20 Cr	42	290	40	276	12	95	Δυνατό, αντίσταση στη διάβρωση
6063-T6		0,4		0,7		35	241	31	214	12	80	Καλές ιδιότητες μορφοποίησης και αντίσταση στη διάβρωση
6151-T6		0,9		0,6	0,25 Cr	48	331	43	297	17	90	Για περίπλοκα σφυρήλατα κομμάτια
2025-T6	4,5	0,8	0,8			55	379	30	207	18	100	Χαμηλό κόστος
2018-T6	4			0,7	2 Ni	55	379	40	276	10	100	Δυνατό σε αυξημένες θερμοκρασίες, πιστόνια
4032-T6	0,9	12,2		1,1	0,9 Ni	55	379	46	317	9	115	Πιστόνια αεροσκαφών
2011-T3	5,5			(0,5 Bi)	0,5 Pb	55	379	43	297	15	95	

Το αλουμίνιο και τα κράματα αλουμινίου που προορίζονται για μηχανική επεξεργασία (έλαση, διέλαση, σφυρηλασία κλπ) προσδιορίζονται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 573.

Πίνακας 2.3.8

Σύνθεση, ιδιότητες και προσδιορισμοί μερικών χυτών κραμάτων αλουμινίου											
Προσδιορισμός κράματος	Διαδικασία	Σύνθεση (%)						Πίεση εφελκυσμού		Επιμήκυνση σε 2 in (%)	Χρήσεις και χαρακτηριστικά
		Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Άλλα	ksi	Mpa		
208	S	4	3		1	1,2		19	131	1,5	Γενικού σκοπού χύτευση στο χώμα
242	S, P	4		1,6		1	2 Ni	40	276		Αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες
295	S	4,5	1			1		32	221	3	Δομικές χυτεύσεις
296	P	4,5	2,5			1,2		35	241	2	Μόνιμη εκδοχή φόρμας του 295
308	P	4,5	5,5		1			24	166		Μόνιμη εκδοχή φόρμας
319	S, P	3,5	6		1	1		31	214	1,5	Ανώτερα χαρακτηριστικά χυτών
354	P	1,8	9								Υψηλή δύναμη, αεροσκάφη
355	S, P	1,3	5					32	221	2	
C355	S, P	1,3	5					40	276	3	Δυνατότερο και πιο όλκιμο από το 355
356	S, P		7					30	207	3	Άριστη χύτευση και δυνατότητα χύτευσης
A356	S, P		7					37	255	5	Δυνατότερο και πιο όλκιμο από το 356
357	S, P		7					45	310	3	Υψηλή δύναμη στις βαριές χυτεύσεις
359	S, P		9								Υψηλή δύναμη, αεροσκάφη
360	D		9,5			2		44	303	2,5	Καλή αντίσταση στη διάβρωση
A360	D		9,5			2		46	317	3,5	Παρόμοιο με το 360
380	D	3,5	8,5		3	2		46	317	2,5	Υψηλή δύναμη και σκληρότητα
A380	D	3,5	8,5		3	1,3		47	324	3,5	Παρόμοιο με το 380
383	D	1,5	10,5		3	1,3		45	310	3,5	Υψηλή δύναμη και σκληρότητα
384	D	3,75	11,3		1	1,3		48	331	2,5	Υψηλή δύναμη και σκληρότητα
413	D	1	12			2		43	297	2,5	Γενική χρήση, καλή δυνατότητα χύτευσης
A413	D	1	12			1,3		42	290	3,5	Παρόμοιο με το 413
443	D	5,25				2		33	228	9	Γενική χρήση, καλή δυνατότητα χύτευσης
B443	S, P	5,25				2		17	117	3	Γενικής χρήσης χυτευτό κράμα
514	S			4				22	152	6	Καλή αντίσταση στη διάβρωση
518	D			8		1,8		45	310	5	Καλή αντίσταση στη διάβρωση, και καλή σκληρότητα
520	S			10				42	290	12	Καλή ολκιμότητα
535	S			6,9				35	241	9	Καλή αντίσταση στη διάβρωση και εύκολο στην κατεργασία
712	S				5,8			34	234	4	Καλές ιδιότητες χωρίς θερμικές κατεργασίες
713	S, P				7,5	1,1		32	221	3	Παρόμοιο με το 712
771	S				7			42	290	5	Στοιχεία αεροσκαφών και υπολογιστών
850	S, P	1					6,3 Sn 1 Ni				Κράμα εδράνων

(S: χύτευση στο χώμα, P: πρεσαριστή χύτευση σε καλούπι, D: κανονική χύτευση σε καλούπι)

2.4 Οι κατηγορίες των κραμάτων του αλουμινίου

Το αλουμίνιο και τα κράματά του (είτε πρωτόχυτο είτε δευτερόχυτο) διαιρούνται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για μηχανική πλαστική διαμόρφωση (παραγωγή προϊόντων έλασης, διέλασης, ολκής, κλπ)

- Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για χρήση σε χυτήρια (παραγωγή χυτών αντικειμένων)

Το αλουμίνιο και τα κράματά του που προορίζονται για μηχανική πλαστική διαμόρφωση (έλαση, διέλαση, ολκή, σφυρηλασία κλπ) προσδιορίζονται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 573 και προσδιορίζονται από τη χημική τους σύσταση βάσει ενός διεθνώς αποδεκτού συστήματος που χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς. Το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία δείχνει την ομάδα κράματος σύμφωνα με το, σε μεγαλύτερη αναλογία ευρισκόμενο, κραματοποιό στοιχείο. Τα κράματα για μηχανική επεξεργασία χωρίζονται σε: θερμοσκληρυνόμενα μη θερμοσκληρυνόμενα.

ΚΡΑΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΑ

Τα κράματα αυτά αποκτούν τις μηχανικές αντοχές μετά από θερμική επεξεργασία.

Σειρά 2000: κράματα αλουμινίου χαλκού. Τα κράματα της σειράς αυτής αποκτούν μηχανικές αντοχές υψηλότερες από αυτές του μέσου χάλυβα. Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις κατασκευών με απαίτηση υψηλές μηχανικές αντοχές. Κάτω από ειδικές συνθήκες παρουσιάζουν μια αυξημένη ευαισθησία στην ατμοσφαιρική διάβρωση, γιαυτό θα πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα προστασίας. Τα κράματα της σειράς αυτής μπορούν να συγκολληθούν με ειδικές τεχνικές, μόνον όπως η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική, βιομηχανία όπλων κλπ. Χαρακτηριστικά κράματα 2017, 2024.

Σειρά 6000: κράματα αλουμινίου - πυριτίου μαγνησίου. Αποτελούν τα κράματα που κατά βάση χρησιμοποιούνται στην διέλαση για την παραγωγή προφίλ. Η ομάδα αυτή χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην κατηγορία των κραμάτων που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο και πυρίτιο και που σε συνδυασμό με το μαγγάνιο, χρώμιο και ψευδάργυρο εξασφαλίζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Χαρακτηριστικά κράματα: 6005, 6061, 6082. Η άλλη κατηγορία αποτελείται από κράματα που περιέχουν μικρότερες ποσότητες μαγνησίου και πυριτίου και προσφέρουν μεγάλες ταχύτητες διέλασης, αλλά χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Παρουσιάζουν καλή διακοσμητική συμπεριφορά και έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως στις αρχιτεκτονικές και διακοσμητικές εφαρμογές. Χαρακτηριστικά κράματα: 6060,6063.

Σειρά 7000: κράματα αλουμινίου ψευδαργύρου. Ο ψευδάργυρος με το μαγνήσιο είναι τα κύρια κραματοποιά στοιχεία. Τα κράματα αυτά επιτυγχάνουν τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική βιομηχανία.

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΗ ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΑ

Τα κράματα αυτά αποκτούν τις μηχανικές αντοχές τους ανάλογα με το βαθμό της μηχανικής κατεργασίας που υφίστανται.

Σειρά 1000: καθαρό αλουμίνιο με 99,00% ελάχιστη καθαρότητα, Το καθαρό αλουμίνιο υποδιαιρείται σε κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αλουμίνιο. Το καθαρό αλουμίνιο χαρακτηρίζεται από την υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και την εύκολη μορφοποίηση. Οι μηχανικές αντοχές είναι σχετικά χαμηλές.

Σειρά 3000: κράματα αλουμινίου – μαγνανίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς αυτής είναι: η εύκολη μορφοποίηση, η καλή αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση, η ευκολία συγκόλλησης με τις συνήθεις μεθόδους. Χαρακτηριστικά κράματα το 3003 και 3004.

Σειρά 4000: κράματα αλουμινίου – πυριτίου. Η παρουσία του πυριτίου ελαττώνει το σημείο τήξης των κραμάτων της κατηγορίας αυτής. Το γεγονός αυτό, καθιστά αυτά τα κράματα κατάλληλα για χρήση ως ηλεκτρόδια πλήρωσης σε εργασίες συγκόλλησης κομματιών αλουμινίου.

Σειρά 5000: κράματα αλουμινίου – μαγνησίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτών είναι: πολύ καλή συγκολλητικότητα, πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες (κρυογενικά συστήματα), πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον, μέσες μηχανικές αντοχές. Χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυπηγική, στη χημική βιομηχανία, στις οικοδομές, στα μεταφορικά μέσα, κλπ. Χαρακτηριστικά κράματα: 5005, 5052, 5754, 5083, 5086, 5182.

2.5 Μηχανολογικές εφαρμογές αλουμινίου

Για τις μη ηλεκτρολογικές εφαρμογές, το αλουμίνιο (συνήθως) χρησιμοποιείται με τη μορφή των κραμάτων. Αυτά έχουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το καθαρό αλουμίνιο και έχουν ως πλεονεκτήματα το ελαφρό βάρος, την καλή αγωγιμότητα και την αντίσταση στη διάβρωση. Καθώς συνήθως είναι πιο αδύναμα από το ασάλι, μερικά κράματα τα οποία τώρα είναι διαθέσιμα έχουν εφελκυστικές ιδιότητες πάρα πολύ καλές. Αφού τα κράματα μπορούν να γίνουν 30 φορές πιο σκληρά από το καθαρό αλουμίνιο, οι σχεδιαστές έχουν ένα μεγαλύτερο εύρος δυνατοτήτων.

Με βάση το πηλίκιο σκληρότητα προς βάρος, τα περισσότερα κράματα αλουμινίου είναι ανώτερα από το ασάλι και άλλα δομικά υλικά αλλά φθείρονται πιο εύκολα και είναι κατώτερα σε ό,τι αφορά τον ερπισμό και την κόπωση. Αφού το αλουμίνιο συνήθως έχει κατώτερο όριο αντοχής, συμβαίνουν συχνά αστοχίες λόγω κόπωσης ακόμη και με σχετικά χαμηλές τάσεις. Εξαιτίας του μικρού τους σημείου τήξης, τα κράματα αλουμινίου χάνουν αμέσως την δύναμή τους καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για εφαρμογές με θερμοκρασίες άνω των 150 °C.

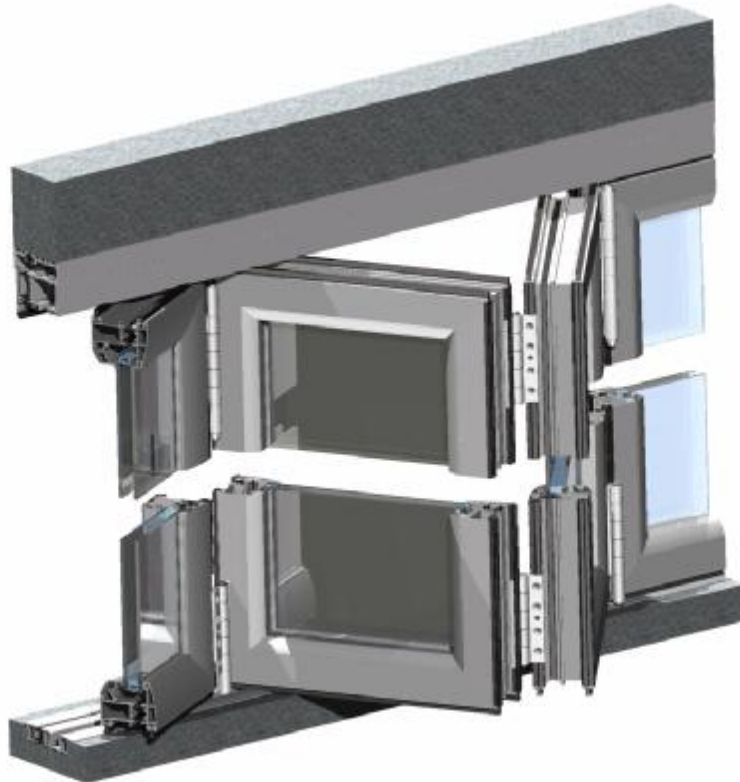
Η επιλογή ατσάλιου ή αλουμινίου για ένα εξάρτημα είναι συχνά θέμα κόστους, αν και σε αρκετές περιπτώσεις τα πλεονεκτήματα του μειωμένου βάρους ή της αντίστασης στη διάβρωση μπορούν να γίνουν κρίσιμα για την επιλογή. Το αλουμίνιο γενικά αντικαθιστά το ασάλι ή τον σφηνύλατο σίδηρο εκεί που υπάρχει μεγάλη ανάγκη για μικρό βάρος, αντίσταση στη διάβρωση, μικρές δαπάνες συντήρησης ή μεγάλη θερμική ή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Σε μοντέρνα οχήματα, το αλουμίνιο έχει υποστεί αυξημένη χρήση στο σασί του αυτοκινήτου, στο μπλοκ του κινητήρα, στο κιβώτιο ταχυτήτων και όπου γενικά χρειάζεται χαμηλό βάρος με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα σασί αυτοκινήτου κατασκευασμένο από αλουμίνιο.

Σχήμα 2.5.1



Στη χώρα μας το αλουμίνιο χρησιμοποιείται ευρύτατα για την κατασκευή παραθύρων, πορτών με μεγάλη επιτυχία και αποδοχή (σχήμα 2.5.2).

Σχήμα 2.5.2



ΧΑΛΚΟΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο χαλκός είναι ένα σημαντικό μέταλλο εφαρμοσμένης μηχανικής που ήταν σε χρήση για πάνω από 6000 έτη. Χρησιμοποιούμενος στην καθάρη του μορφή, ο χαλκός είναι η σπονδυλική στήλη της ηλεκτρολογικής βιομηχανίας. Είναι επίσης το σημαντικότερο μέταλλο σε διάφορα κράματα ιδιαίτερα σημαντικά, εφαρμοσμένης μηχανικής.

Για την εξαγωγή του χαλκού από τα ορυκτά του εφαρμόζονται ειδικές μέθοδοι, ανάλογα με την πρώτη ύλη και την περιεκτικότητά της σε χαλκό. Αν το ορυκτό είναι οξειδίο, ανάγεται από άνθρακα και εάν είναι ανθρακικό, πυρώνεται και μετατρέπεται σε οξειδίο, που, στη συνέχεια, ανάγεται. Αν το ορυκτό είναι θειούχο, η μεταλλουργία είναι πολύ πολύπλοκη και περιλαμβάνει εμπλουτισμό, φρύξη, σχηματισμό χαλκόλιθου και τέλος αναγωγή του χαλκόλιθου σε πρωτογενή χαλκό.

Η ευρεία χρήση του χαλκού είναι βασισμένη, πρώτιστα, σε τρεις σημαντικές ιδιότητες: τη μεγάλη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητά του, τη χρήσιμη δύναμη με την υψηλή ολκιμότητα και την αντίσταση στη διάβρωση. Οι καλύτεροι βαθμοί αγωγίμου χαλκού έχουν τώρα μία αγωγιμότητα περίπου 102% IACS (International Annealed Copper Standard, Διεθνές Ανοπτημένο Πρότυπο Χαλκού), απεικονίζοντας τις μεταλλουργικές βελτιώσεις που γίνονται από το 1913, όταν τα διεθνή ανοπτημένα πρότυπα χαλκού (IACS) εδραιώθηκαν και η αγωγιμότητα του καθαρού χαλκού τέθηκε κατά 100% IACS.

Δυστυχώς, ο χαλκός είναι βαρύτερος από το σίδηρο. Αν και οι δυνάμεις μπορούν να είναι αρκετά υψηλές, η αναλογία δύναμης/βάρους για τα κράματα χαλκού είναι συνήθως μικρότερη από τα πιο αδύναμα κράματα αλουμινίου και μαγνησίου. Επιπλέον, διάφορα προβλήματα εμφανίζονται όταν χρησιμοποιείται ο χαλκός σε αυξημένη θερμοκρασία. Εάν ο χαλκός καταπονείται για μια μακριά χρονική περίοδο σε υψηλή θερμοκρασία, το υλικό υπόκειται σε εσωκρυσταλλική αστοχία.

3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΚΟΥ

Τα πλεονεκτήματα του χαλκού, εξαιτίας των οποίων έχει μεγάλη βιομηχανική χρήση, είναι τα εξής:

- Η υψηλή του ηλεκτρική αγωγιμότητα τον καθιστά κατάλληλο υλικό για ηλεκτρικούς αγωγούς και άλλες κατασκευές της βιομηχανίας του ηλεκτρισμού. Ο χαλκός είναι το πιο αγώγιμο μέταλλο μετά τον άργυρο.
- Η εύκολη διαμόρφωσή του. Είναι πλαστικός και διαμορφώνεται εύκολα τόσο εν ψυχρώ όσο και εν θερμώ. Ιδιαίτερα διαμορφώνεται εύκολα με κοίλανση.

Ο χαλκός, μετά από ψυξηλασία υφίσταται ισχυρή σκλήρωση, η οποία εξαφανίζεται με ανόπτηση για ανακρυστάλλωση.

- Η καλή του αντοχή σε διάβρωση.
- Η καλή του σχετικά μηχανική αντοχή.

Ακόμη ο χαλκός είναι αμαγνητικός, έχει ευχάριστο χρωματισμό, συγκολλάται εύκολα και μπορεί να επιμεταλλωθεί (π.χ. να επινικελωθεί ή να επιχρωμιωθεί).

Ο τηγμένος χαλκός απορροφάει αέρια, που σχηματίζουν στη μάζα του φυσαλίδες κατά τη στερεοποίηση. Γι' αυτό ο καθαρός χαλκός είναι ακατάλληλος για χυτά τεμάχια.

Έχει ειδικό βάρος $8,90 \text{ g/cm}^3$, σημείο τήξεως 1083°C και ειδική αντίσταση $0,0175 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ και χρησιμοποιείται πάρα πολύ στη βιομηχανία του ηλεκτρισμού. Επίσης χρησιμοποιείται στη χημική βιομηχανία (σωλήνες ατμού, αερίων, λαδιού κλπ.), γιατί αντέχει στη διάβρωση.

Οι τυπικές μηχανικές ιδιότητες του χαλκού είναι οι εξής:

$\sigma_B = 220 \text{ N/mm}^2$, $A = 55\%$ και σκληρότητα 45 Brinell.

Αν υπάρχουν έστω και ίχνη ακαθαρσιών, ελαττώνεται κατά πολύ η ηλεκτρική του αγωγιμότητα. Οι ακαθαρσίες με τα πιο δυσμενή αποτελέσματα είναι κατά σειρά ο φωσφόρος, το πυρίτιο, ο σίδηρος, το αρσενικό, το αργίλιο και το νικέλιο. Περιεκτικότητα π.χ. μόνο 0,04% φωσφόρου ελαττώνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού κατά 25%. Γι' αυτό για ηλεκτρικούς αγωγούς χρησιμοποιείται χαλκός πολύ καθαρός (πάνω από 99,9%) (ηλεκτρολυτικός).

Στο εμπόριο υπάρχουν διάφορες ποιότητες χαλκού με βάση την καθαρότητά του.

Αν προσθέσουμε στο χαλκό 0,60% περίπου σελήνιο, βελτιώνεται ή κατεργαστικότητα του, χωρίς να κατεβαίνει πολύ η ηλεκτρική του αγωγιμότητα, Επίσης, προσθήκη περίπου 0,30% αρσενικού βελτιώνει την αντοχή του στη διάβρωση.

Ο καθαρός χαλκός στην ανοπτημένη μορφή του έχει μια εφελκυστική δύναμη μόνο περίπου 450 MPa, με μία επιμήκυνση σχεδόν 60%. Με την εν ψυχρώ κατεργασία, εντούτοις, η εκτατή εφελκυστική δύναμη μπορεί να αυξηθεί σε πάνω από 450 MPa, με μια μείωση στην επιμήκυνση περίπου 5%. Η σχετική χαμηλή δύναμη και η υψηλή ολκιμότητα κάνει το χαλκό ένα πολύ επιθυμητό μέταλλο για εφαρμογές όπου η εκτενής διαμόρφωση απαιτείται. Επιπλέον, τα αποτελέσματα σκλήρυνσης της εν ψυχρώ κατεργασίας μπορούν εύκολα να εξαλειφθούν, δεδομένου ότι η θερμοκρασία επανακρυστάλλωσης για το χαλκό είναι λιγότερο από 500°F (260°C).

Επίσης ο χαλκός είναι πρωταθλητής στη μάχη κατά των ανθεκτικών μικροβίων. Οι οργανισμοί και οι φορείς υγείας σε ολόκληρο τον κόσμο, στρέφονται στο χαλκό για να κερδίσουν προβάδισμα στη μάχη ενάντια στα ανθεκτικά μικρόβια, τα λεγόμενα “superbugs”, όπως το θανατηφόρο MRSA (Methicillin Resistant Staphylococcus Aureus).

Η Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας των ΗΠΑ (US Environment Protection Agency) βρίσκεται ήδη στη διαδικασία επικύρωσης των αντιβακτηριδιακών ιδιοτήτων του χαλκού. Τα αποτελέσματα, που αναμένονται στο άμεσο χρονικό διάστημα, θα καταστήσουν το χαλκό το πρώτο υλικό με επίσημη αναγνώριση για αντιβακτηριδιακές ιδιότητες.

Κλινικές δοκιμές που εξετάζουν επιφάνειες από χαλκό και κραμάτων του και πόσο αυτές επηρεάζουν την επιβίωση των μικροβίων, βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη σε νοσοκομεία της Μεγάλης Βρετανίας, της Ιαπωνίας, των ΗΠΑ, της Νότιας Αφρικής, της Γερμανίας και της Δανίας.

Μελέτες αποδεικνύουν ότι χαλκός επιφάνειας 1 μόνο τετραγωνικού εκατοστού, μπορεί να εξαφανίσει 10 εκατομμύρια βακτήρια MRSA μέσα σε 90 λεπτά.

3.3 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ

Τα κράματα του χαλκού, που χρησιμοποιούνται ευρύτερα στη βιομηχανία, περιλαμβάνουν:

- α) Τους ορείχαλκους.
- β) Τα κρατερώματα και

γ) άλλα κράματα του χαλκού, όπως είναι το χαλκοαργίλιο, το χαλκονικέλιο και άλλα.

Τα κράματα του χαλκού που υφίστανται κατεργασίες διαμορφώσεως τα ονομάζουμε μαλακτά, ενώ εκείνα που χυτεύονται τα ονομάζουμε χυτευτικά.

ΟΙ ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΙ

Οι ορείχαλκοι είναι κράματα χαλκού και ψευδαργύρου (μέχρι 68% Zn). Γενικά διατηρούν τις καλές ιδιότητες του χαλκού και κοστίζουν φθηνότερα, γιατί ο ψευδάργυρος έχει χαμηλότερη εμπορική αξία. Οι ορείχαλκοι με περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο από 5% μέχρι 39% έχουν καλή πλαστικότητα εν ψυχρώ, με περιεκτικότητα από 46% μέχρι 51% έχουν καλή πλαστικότητα εν θερμώ, ενώ ορείχαλκοι με ψευδάργυρο από 51% μέχρι 68% είναι εύθραυστοι.

Η ικανότητα των ορειχάλκων για πλαστική διαμόρφωση είναι μέγιστη με περιεκτικότητα 30% Zn, ενώ η μηχανική τους αντοχή με 43% Zn. Ο καλύτερος συνδυασμός πλαστικότητας και μηχανικής αντοχής επιτυγχάνεται με 40% Zn περίπου.

Με μικρές ποσότητες προσθηκών μπορεί να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες των ορειχάλκων, καθώς και η αντοχή τους σε διάβρωση. Έτσι ο κασσίτερος (μέχρι 1 %) και το νικέλιο αυξάνουν την αντοχή των ορειχάλκων σε διάβρωση, ο σίδηρος εκλεπτύνει τους κόκκους των χυτών, το μαγγάνιο (μέχρι 2%) βελτιώνει τη μηχανική τους αντοχή και το αργίλιο μεγαλώνει τη μηχανική αντοχή και την αντοχή τους σε διάβρωση. Προσθήκη μολύβδου 2% ως 3% σε ορείχαλκο με 40% Zn περίπου μας δίνει ορείχαλκο ελεύθερης κοπής με καλή κατεργαστικότητα. Σ' αυτή την περίπτωση, εξαιτίας της παρουσίας του μολύβδου, το απόβλητο θρυμματίζεται και η κοπή είναι εύκολη και με μικρή φθορά του εργαλείου. Οι ορείχαλκοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν σαν μαλακτοί και σαν χυτευτικοί.

Σαν χυτευτικοί χρησιμοποιούνται εκείνοι, οι οποίοι περιέχουν 40% περίπου ψευδάργυρο, συνήθως με τις προσθήκες που αναφέραμε.

ΤΑ ΚΡΑΤΕΡΩΜΑΤΑ Ή ΜΠΡΟΥΤΖΟΙ

Κρατερώματα ονομάζουμε τα κράματα χαλκού που έχουν σαν κύρια πρόσμιξη τον κασσίτερο (Sn). Είναι αρχαιότατα κράματα και χρησιμοποιούνται και σήμερα.

Τα κρατερώματα με περιεκτικότητα από 4% μέχρι 9% Sn χρησιμοποιούνται σαν μαλακτά και με περιεκτικότητα από 9% μέχρι 20% Sn σαν χυτευτικά. Κρατερώματα με

κασσίτερο πάνω από 20% παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα και γι' αυτό δύσκολα μπορούν να κατεργαστούν με κοπή.

Τα κρατερώματα έχουν καλή μηχανική αντοχή, αντοχή στη φθορά από τριβή, αντοχή στη διάβρωση από νερό και από την ατμόσφαιρα. Επίσης συγκολλώνται εύκολα.

Πολλά από τα κρατερώματα περιέχουν μικρές ποσότητες φωσφόρου, που απομένει, συνήθως μέχρι 0,05%, ο οποίος χρησιμοποιείται σαν αποξειδωτικό για την εύκολη και ικανοποιητική χύτευση του κράματος. Τα κρατερώματα αυτά δεν πρέπει να συγχέονται με τα λεγόμενα φωσφορούχα κρατερώματα ή φωσφορούχους μπρούντζους, όπου ο φωσφόρος, σε περιεκτικότητα από 0,10% μέχρι 1,00% αποτελεί προσθήκη. Ο φωσφόρος όχι μόνο μεγαλώνει τη μηχανική αντοχή του κρατερώματος, αλλά και βελτιώνει την αντοχή του σε διάβρωση.

Τα κρατερώματα μπορεί να περιέχουν και ψευδάργυρο. Αν προστεθεί ψευδάργυρος περίπου μέχρι 2% σε κρατερώματα με 3% Sn, δίνει μαλακό κρατέρωμα που χρησιμοποιείται στην κατασκευή νομισμάτων.

Το χυτευτικό κρατέρωμα με περιεκτικότητα 10% Sn και 2% Zn είναι γνωστό σαν μέταλλο πυροβόλων, έχει δε μεγάλη αντοχή στη διάβρωση.

Όπως στους ορείχαλκους, έτσι και στα κρατερώματα, αν προστεθεί μόλυβδος μέχρι 2% περίπου, βελτιώνει την κατεργαστικότητά τους. Επίσης, αν προστεθεί μόλυβδος σε μεγαλύτερη όμως ποσότητα, καθιστά το κρατέρωμα κατάλληλο για έδρανα που εργάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες, λόγω της μεγαλύτερης θερμικής αγωγιμότητας που τους προσδίνει.

Τα χυτευτικά κρατερώματα χρησιμοποιούνται βασικά στην κατασκευή εδράνων ολισθήσεως, συνήθως μεγάλων πιέσεων.

ΑΛΛΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ

Εκτός από τους ορείχαλκους και τα κρατερώματα που αναφέραμε, ο χαλκός σχηματίζει και άλλα χρήσιμα κράματα για την τεχνική. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε με λίγα λόγια τα σπουδαιότερα από αυτά.

1. Κράματα χαλκού – αργιλίου (ή χαλκοαργίλιο)

Η παρουσία του αργιλίου σχηματίζει αόρατο επιφανειακό προστατευτικό στρώμα οξειδίων, και έτσι το χαλκοαργίλιο παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή στην ατμοσφαιρική οξείδωση σε ελαφρά υψηλές θερμοκρασίες, επίσης και στη διάβρωση από θαλάσσιο νερό. Δύσκολα χυτεύεται και συγκολλάται, ακριβώς εξαιτίας του εύκολου σχηματισμού οξειδίων. Χαλκοαργίλιο με περιεκτικότητα από 4% μέχρι 7% Al κατεργάζεται εν ψυχρώ. Έχει ωραίο χρυσοκίτρινο χρώμα και χρησιμοποιείται συνήθως σε διακοσμήσεις, απομιμήσεις κοσμημάτων, καθώς και σε αυλούς συμπυκνωτών. Μπορεί να περιέχει και μέχρι 5% νικέλιο, που βελτιώνει ακόμη περισσότερο την αντοχή του σε διάβρωση. Χαλκοαργίλιο με περιεκτικότητα 8% μέχρι 10% Al κατεργάζεται εν θερμώ. Μπορεί να υποστεί βαφή (από 900 °C) και επαναφορά (σε 500 °C), όπως και ο χάλυβας. Επίσης μπορεί να περιέχει μέχρι 5% σίδηρο και νικέλιο. Χρησιμοποιείται στη χημική βιομηχανία, ιδιαίτερα για τεμάχια που εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες και γενικά, όπου χρειάζονται σφυρήλατα τεμάχια με αντοχή στη διάβρωση.

Χαλκοαργίλιο με περιεκτικότητα 9,50% μέχρι 12% Al και με σίδηρο και νικέλιο μέχρι 5% χυτεύεται σε άμμο ή με πίεση. Χρησιμοποιείται πολύ στη ναυπηγική βιομηχανία για έλικες, αντλίες, άξονες αντλιών, βλήτρα και άλλα. Επίσης χρησιμοποιείται για έδρες βαλβίδων και σώματα αναφλεκτήρων μηχανών εσωτερικής καύσεως και για έδρανα που καταπονούνται με μεγάλα φορτία.

Ενδεικτικά αναφέρουμε τις μηχανικές ιδιότητες κατεργαζόμενου εν θερμώ χαλκοαργιλίου με $\pi(\text{Cu}) = 80\%$, $\pi(\text{Al}) = 10\%$, $\pi(\text{Fe}) = 5\%$ και $\pi(\text{Ni}) = 5\%$.

Μετά από σφυρηλασία αποκτάει:

$\sigma_B = 740 \text{ N/mm}^2$, $A = 20\%$ και σκληρότητα 215 Brinell.

2. Κράματα χαλκού – νικελίου (χαλκονικέλιο)

Ο χαλκός και το νικέλιο σχηματίζουν σε όλες τις αναλογίες στερεό διάλυμα μιας φάσεως και γι' αυτό παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση. Έχουν επίσης καλή πλαστικότητα και μπορούν να διαμορφωθούν εν ψυχρώ και εν θερμώ με σφυρηλασία, έλαση, τύπωση και κοίλανση.

Παρακάτω αναφέρουμε αντιπροσωπευτικά κράματα χαλκού – νικελίου:

- $\pi(\text{Cu})=75\%$, $\pi(\text{Ni})=25\%$. Χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή νομισμάτων.
- $\pi(\text{Cu})=75\%$, $\pi(\text{Ni})=25\%$. Χρησιμοποιείται για αυλούς συμπυκνωτών και ψυγείων και όπου χρειάζεται καλή αντοχή στη διάβρωση.
- $\pi(\text{Cu})=60\%$, $\pi(\text{Ni})=40\%$, το λεγόμενο κονσταντάν. Βρίσκει εφαρμογές σε ηλεκτρικές αντιστάσεις και θερμοηλεκτρικά ζεύγη.
- $\pi(\text{Cu})=29\%$, $\pi(\text{Ni})=68\%$, $\pi(\text{Fe})=1,25\%$ και $\pi(\text{Mn})=1,25\%$, που συνδυάζει καλές μηχανικές ιδιότητες με εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Χρησιμοποιείται στη χημική βιομηχανία.

3.4 ΠΙΝΑΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΩΝ ΧΑΛΚΟΥ

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4.1
Ορείχαλκοι και κρατερώματα

Είδος Κράματος	Χημική σύνθεση [%]					Άλλα στοιχεία	Μηχανικές ιδιότητες				Βιομηχανικές χρήσεις
	Cu	Zn	Sn	P	Κατάσταση κράματος		σ_B [N/mm ²]	A [%]	Σκληρότητα κατά Brinell		
Ορείχαλκοι	90	10	-	-	-	-	Ανοπτημένος Σκληρωμένος	470 570	55 4	60 150	Αρχιτεκτονικές μεταλλοτεχνικές εργασίες, απομιμήσεις κοσμημάτων, έργα τέχνης λόγω της χρυσής αποχρώσεώς του και της δυνατότητας εύκολης συγκολλήσεως
	70	30	-	-	-	-	Ανοπτημένος Σκληρωμένος	330 700	70 5	65 185	Ορείχαλκος κοιλάνσεως. Κάλυψες φουσιγγίων και οβιδίων και για συρματοποίηση
	60	40	-	-	-	-	Μετά από θερμολασία	380	40	75	Τυπικός ορείχαλκος θερμολασίας. Σωλήνες και πλάκες εναλλακτών θερμότητας
	58	39	-	-	-	3% Pb	Μετά από διέλαση	460	30	100	Ορείχαλκος ελεύθερης κοπής, κατάλληλος ιδιαίτερα για κοπή με υψηλές ταχύτητες κοπής
	70	29	1	-	-	0,01 – 0,05 As	Ανοπτημένος Σκληρωμένος	350 600	70 10	65 175	Ορείχαλκος Ναυαρχείου. Πολύ καλή αντοχή σε διάβρωση. Αυτοί συμπυκνωτών ατμού
	76	22	-	-	-	0,02 – 0,06 As 2,00 Al	Ανοπτημένος Σκληρωμένος	380 630	70 8	65 175	Ορείχαλκος με αργίλιο. Όπως ο προηγούμενος
	95,50	1,50	3	-	-	-	Ανοπτημένος Σκληρωμένος	330 740	65 5	60 200	Κρατέρωμα νομισμάτων
	90	-	10	0,03 – 0,25	-	-	Χυτός σε άμμο	280	15	90	Χυτευτικό φωσφορούχο κρατέρωμα, τυπικό για έδρανα ολισθήσεως
88	2	10	-	-	-	Χυτός σε άμμο	300	16	85	Μέταλλο πυροδύλων. Χυτά μέρι και βαλβίδες αντλιών ιδίως για λειτουργία σε θαλάσσιο νερό λόγω αντοχής σε διάβρωση	
Κρατερώματα											

ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4.2

Καθαρός χαλκός										
Νούμερο	Cu	P	Pb	Sn	Zn	Παρατηρήσεις	0.2%Δύναμη απόδειξης	Εφελκυστική δύναμη	A	ISO spec'n
	%	%	%	%	%		MPa	MPa	%	
CW004A	99.9					Κατάλληλος για αγωγούς ηλεκτρικών κυκλωμάτων	50-340	200-400	50-5	Cu-ETP
CW006A	99.9					Γενικές ηλεκτρολογικές και κτιριακές εφαρμογές	50-340	200-400	50-5	Cu-FRTP
CW008A	99.95					Χωρίς οξυγόνο.	50-340	200-400	50-5	Cu-OF

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4.3

Ορείχαλκος										
Νούμερο	Cu	P	Pb	Sn	Zn	Παρατηρήσεις	0.2%Δύναμη απόδειξης	Εφελκυστική δύναμη	A	ISO spec'n
	%	%	%	%	%		MPa	MPa	%	
CW500L	94.0-96.0				Rem.	Πολύ καλές κατεργασίες εν ψυχρώ για ηλεκτρολογικές εφαρμογές	60-420	240-420	45-4	CuZn5
CW504L	71.0-73.0				Rem.	Πολύ καλές κατεργασίες εν ψυχρώ	120-420	310-500	30-2	CuZn28
CW509L	59.5-61.5				Rem.	Καλές ιδιότητες σε εν θερμώ και εν ψυχρώ κατεργασία.	200-420	340-500	45-2	CuZn40

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4.4

Μολυβδούχος ορείχαλκος										
Νούμερο	Cu	P	Pb	Sn	Zn	Παρατηρήσεις	0.2%Δύναμη απόδειξης	Εφελκυστική δύναμη	A	ISO spec'n
	%	%	%	%	%		MPa	MPa	%	
CW603N	60.0-62.0		2.5-3.5	2.5-3.5	Rem.	Αυτά τα κράματα είναι τέλεια στην Κατεργασία, αλλά είναι δύσκολα στην εν ψυχρώ κατεργασία	160-450	340-580	35-5	CuZn36Pb3
CW606N	61.0-62.0		1.6-2.5		Rem.	Εύκολο στη κατεργασία, σχετικά εύκολο στην εν ψυχρώ κατεργασία	160-450	300-580	45-5	CuZn37Pb2
CW610N	59.0-60.5		0.2-0.8		Rem.	Εύκολο στην εν ψυχρώ κατεργασία, εύκολο στη κατεργασία	150-450	360-580	40-5	CuZn39Pb0.5

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4.5

Κασσιτερούχος μπρούτζος										
Νούμερο	Cu	P	Pb	Sn	Zn	Παρατηρήσεις	0.2%Δύναμη απόδειξης	Εφελκυστική δύναμη	A	ISO spec'n
	%	%	%	%	%		MPa	MPa	%	
CW450K	Rem.	0.01-0.4		3.5-4.5		Όσο αυξάνει το ποσοστό του κασσίτερου, αυξάνει η αντοχή	140-850	320-950	60-1	CuSn4
CW452K	Rem.	0.01-0.4		5.5-7.0		Στοιχεία οργάνων, καλώδια, ελατήρια	140-950	340-1000	60-1	CuSn6
CW460K	Rem.	0.2-0.4	0.1-0.5	7.5-9.0			280-550	460-650	40-5	CuSn8PbP

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4.6

Χαλκός με αλουμίνιο											
Νούμερο	Cu	Al	Fe	Ni	As	Mn	Παρατηρήσεις	0.2%Δύναμη απόδειξης	Εφελκυστική δύναμη	A	ISO spec'n
	%	%	%	%	%	%		MPa	MPa	%	
CW300G	Rem.	4.0-6.5			0.1-0.4	-	Κράμα για κατασκευή σωλήνων	130	380	55	CuAl5As
CW306G	Rem.	9.0-11.0	2.0-4.0			1.5-3.5	Υψηλής αντοχής κράματα	330-510	600-720	15-5	CuAl10Fe3Mn2
CW308G	Rem.	10.5-12.5	5.0-7.0	5.0-7.0		-	Καλή αντοχή σε κρούση και σε φθορά	500-680	750-850	10-5	CuAl11Fe6Ni6

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4.7

Νικελιούχος χαλκός											
Νούμερο	Cu	Al	Fe	Ni	As	Mn	Παρατηρήσεις	0.2%Δύναμη απόδειξης	Εφελκυστική δύναμη	A	ISO spec'n
	%	%	%	%	%	%		MPa	MPa	%	
CW350H	Rem.			24.0-26.0			Κράμα που χρησιμοποιείται για νομίσματα	120	300	-	CuNi25
CW352H	Rem.		1.0-2.0	9.0-11.0		0.5-1.0	Άριστη αντοχή στη διάβρωση του νερού.	100-420	290-520	35-8	CuNi10Fe1Mn
CW354H	Rem.		0.4-1.0	30.0-32.0		0.5-1.5	Άριστη αντοχή στη διάβρωση του νερού.	130-330	350-520	35-12	CuNi30Mn1Fe

Τα κράματα χαλκού γίνονται ισχυρότερα και πιο όλκιμα καθώς η θερμοκρασία πέφτει. Διατηρούν επίσης την άριστη αντίσταση κρούσης. Αυτά τα γενικά χαρακτηριστικά έχουν αποκαλυφθεί σε δοκιμές σε 15 κραμάτων χαλκού, συμπεριλαμβανομένου ορείχαλκου, μπρούτζου και εμπορικά καθαρού χαλκού. Εξετάστηκαν από την Cryogenics Div., εθνικό γραφείο προτύπων, για τη βιομηχανία χαλκού και ορείχαλκου για να ελέγξουν την αντοχή, την αντοχή εγκοπών, το συντελεστή Youngs και τις ιδιότητες κρούσης σε θερμοκρασίες κάτω των 4 K (-454 F). Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται εδώ είναι βασισμένες σε μια έκθεση από R. P. Reed and R. P. Mikesell "Low Temperature Mechanical Properties Of Copper and Selected Copper Alloys," NBS Monograph 101, Institute for Materials Research, National Bureau of Standards, Boulder.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες των παραπάνω δοκιμών καθώς και τα διαγράμματα της τάσης (stress) σε συνάρτηση με την κόπωση (strain).

Copper and Copper Alloy*		Condition	Composition, %					
No.	Name		Pb	Fe	Sn	Zn	Ni	P
102	Oxygen Free	Cold drawn 60%	4 ppm	4 ppm	1 ppm		4 ppm	1 ppm
122	Phosphorus Deoxidized,	Annealed	0.0002	0.003	0.00035	0.001		0.028
	High Residual Phosphorus	Cold drawn 26%	Same as annealed samples					
150	Zirconium Copper	Annealed, 950 C; cold drawn 85 to 90%; aged, 450 C, 1 hr	Similar to that of Oxygen Free with Zr added					
220	Commercial Bronze, 90%	Annealed, 575 C, 3 hr	0.005	0.01		10.01		
230	Red Brass, 85%	Cold drawn 14%		0.02		15.33		
443	Admiralty Arsenical	Annealed, 575 C, 1 hr	0.04	0.03	0.97	27.56		
464	Naval Brass	Annealed, 593 C, 1 hr	0.09	0.02	0.63	39.71		
510	Phosphor Bronze, 5% A	Spring cold drawn 85%	0.02	0.02	4.85	0.05		0.18
614	Aluminum Bronze D	Commercial anneal		2.13				
647	Copper-nickel silicon	Aged, 450 C, 2 hr		0.01			1.97	
655	High Silicon Bronze A	Commercial anneal (soft)	0.01	0.09			0.04	
706	Copper Nickel 10%	Annealed, 677 C, 40 min	0.02	1.16		0.07	9.98	
715	Copper Nickel 30%	Commercial anneal	< 0.01	0.59	< 0.01	0.04	30.05	
	Nickel-aluminum bronze	Sand cast		3.35			5.20	

* Material was 3/4-in. bar, except nickel-aluminum bronze which was a billet.

** 16 ppm Ag; 12 ppm S; 2 ppm As; 5 ppm Sb; less than 3 ppm O; traces of Au, Bi, Mn, Hg, Cd, Zn

Table 1. Condition and Composition of Alloys (Continued)

Copper and Copper Alloy*		Condition	Others	Hardness	Average Grain Diameter, mm
No.	Name				
102	Oxygen Free	Cold drawn 60%	**	Rb 45 to 53	0.287 to 2.00
122	Phosphorus Deoxidized,	Annealed	Ag, Bi, Sb, Mn, As, Ni (trace)	Rf 35	0.051
	High Residual Phosphorus	Cold drawn 26%		Rb 50	0.101
150	Zirconium Copper	Annealed, 950 C; cold drawn 85 to 90%; aged, 450 C, 1 hr	Zr, 0.18	Rb 68	0.203
220	Commercial Bronze, 90%	Annealed, 575 C, 3 hr		Rf 49	0.051
230	Red Brass, 85%	Cold drawn 14%	Ag, Mg (trace)	Rf 64	0.025
443	Admiralty Arsenical	Annealed, 575 C, 1 hr	As, 0.041	Rf 55	0.144
464	Naval Brass	Annealed, 593 C, 1 hr		Rb 57	0.036
510	Phosphor Bronze, 5% A	Spring cold drawn 85%		Rb 94	0.101
614	Aluminum Bronze D	Commercial anneal	Al, 6.57	Rb 97	0.036
647	Copper-nickel silicon	Aged, 450 C, 2 hr		Rb 98	0.025
655	High Silicon Bronze A	Commercial anneal (soft)	Mn, 0.88; Si, 2.90	Rb 54	0.025
706	Copper Nickel 10%	Annealed, 677 C, 40 min		Rb 33	0.051
715	Copper Nickel 30%	Commercial anneal	Mn, 0.71 to 0.73 Al, < 0.01; As, < 0.01	Rb 47	0.036
	Nickel-aluminum bronze	Sand cast	Al, 9.95; Mn, 0.3	Rb 93	0.036

* Material was 3/4-in. bar, except nickel-aluminum bronze which was a billet.

** 16 ppm Ag; 12 ppm S; 2 ppm As; 5 ppm Sb; less than 3 ppm O; traces of Au, Bi, Mn, Hg,

Table 2. Average Properties of Copper and Copper Alloys at Low Temperatures				
Copper and Copper Alloy		Test Temperature, K	Elastic Properties	
No.	Name and Treatment		Youngs Modulus, 106 psi (5%)	Shear Modulus, 106 psi (2%)
102	Oxygen Free (Cold drawn 60%)	295	17.3	
		195		
		76		
		20		
		4		
122	Phosphorus Deoxidized, High Residual Phosphorus (Annealed)	295	15.1	6.46
		195	16.0	6.81
		76	16.2	7.20
		20	16.3	7.44
		4	16.4	
	(Cold drawn 26%)	295	18.9	
		195	19.9	
		76	20.3	
		20	20.8	
		4	21.1	
150	Zirconium Copper (Cold drawn, aged)	295	15.8	
		195		
		76	17.2	
		20		
		4	17.2	
220	Commercial Bronze, 90% (Annealed)	295	15.1	6.59
		195	16.4	6.97
		76	17.7	7.24
		20	18.0	7.37
		4	18.1	
230	Red Brass, 85% (Cold drawn 14%)	295	14.9	6.55
		195	15.8	6.77
		76	17.6	7.06
		20	18.1	7.20
		4	18.2	
443	Admiralty Arsenical	295	14.6	5.94
		195	14.9	6.15

	(Annealed)	76	15.5	6.48
		20	16.0	6.55
		4	16.2	
464	Naval Brass (Annealed)	295	14.0	5.76
		195	14.5	5.94
		76	14.8	6.16
		20	15.0	6.26
		4	15.1	
510	Phosphor Bronze, 5% A (Cold drawn 85%, spring)	295	15.6	
		195	16.5	
		76	16.7	
		20	16.5	
		4	16.4	
614	Aluminum Bronze D (Annealed)	295	15.8	
		195	16.1	
		76	16.3	
		20	16.3	
		4	16.3	
647	Copper-Nickel Silicon (Aged)	295	21.4	
		195	22.3	
		76	23.2	
		20	23.5	
		4	23.6	
655	High Silicon Bronze A (Annealed, soft)	295	15.6	
		195	15.8	
		76	16.1	
		20	17.0	
		4	17.5	
706	Copper Nickel 10% (Annealed)	295	17.7	
		195		
		76	19.5	
		20		
		4	20.5	
715	Copper Nickel 30% (Annealed)	295	22.0	
		195		
		76	23.0	
		20		
		4	23.2	
	Nickel- Aluminum Bronze (Sand cost)	295	16.8	
		195	17.8	
		76	18.5	
		20	18.5	
		4	18.5	

Table 2. Average Properties of Copper and Copper Alloys at Low Temperatures (Continued)

Copper and Copper Alloy		Test Temperature, K	Plastic Properties			
No.	Name and Treatment		Uniaxial			
		Tensile Strength, psi	Yield Strength, psi	Elongation, % in 4D	Reduction of Area, %	
102	Oxygen Free (Cold drawn 60%)	295	48,400	46,800	17	77
		195	52,900	49,800	20	74
		76	66,400	54,400	29	78
		20	74,500	58,500	42	76
		4	74,600	58,600	41	75
122	Phosphorus Deoxidized, High Residual Phosphorus (Annealed)	295	31,300	6,700	45	76
		195	38,300	6,600	56	87
		76	50,600	7,400	62	84
		20	63,800	8,400	68	83
		4	60,400	7,900	65	81
	(Cold drawn 26%)	295	51,800	49,400	17	76
		195	56,800	53,600	21	79
		76	68,400	59,900	28	76
		20	81,400	64,100	46	78
		4	81,000	63,600	44	72
150	Zirconium Copper (Cold drawn, aged)	295	64,450	59,600	16	62
		195	67,200	61,300	20	66
		76	77,400	65,700	26	71
		20	85,200	66,400	37	72
		4	85,700	64,700	36	69
220	Commercial Bronze, 90% (Annealed)	295	38,500	9,600	56	84
		195	41,800	10,200	57	80
		76	55,200	13,200	86	78
		20	73,200	15,600	95	73
		4	68,200	15,000	91	73
230	Red Brass, 85% (Cold drawn 14%)	295	40,400	13,000	48	74
		195	46,500	14,000	63	79
		76	62,000	16,400	83	77
		20	79,200	20,900	80	75
		4	71,000	18,300	82	71
443	Admiralty Arsenical (Annealed)	295	44,800	10,600	86	81
		195	49,600	12,600	91	79
		76	64,600	18,700	98	73
		20	76,800	20,800	99	68
		4	78,600	21,100	92	72

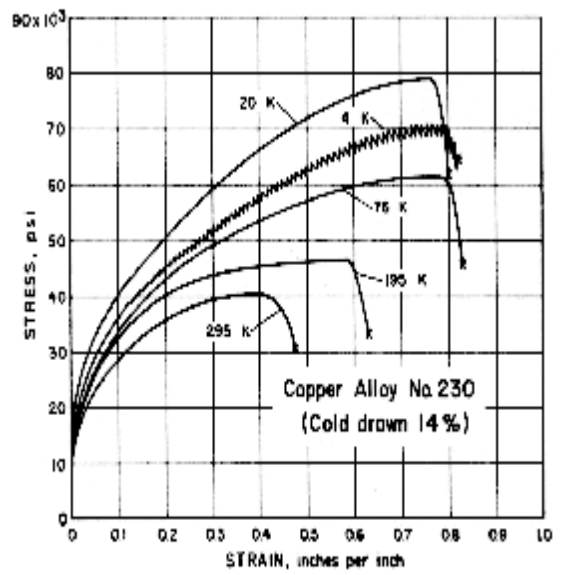
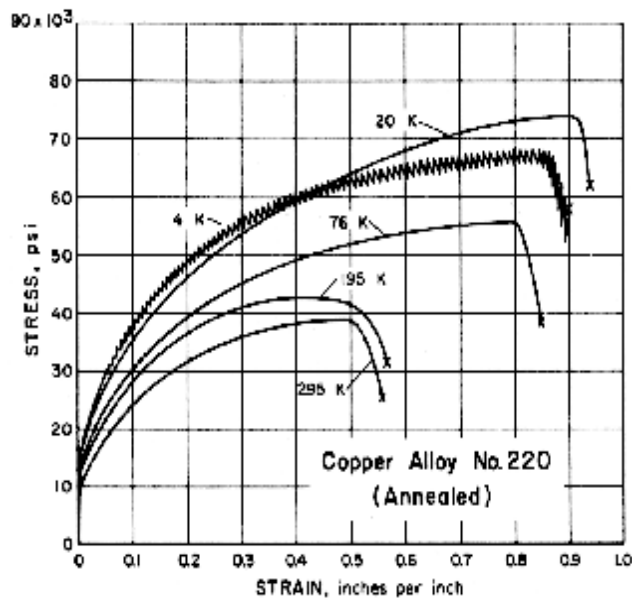
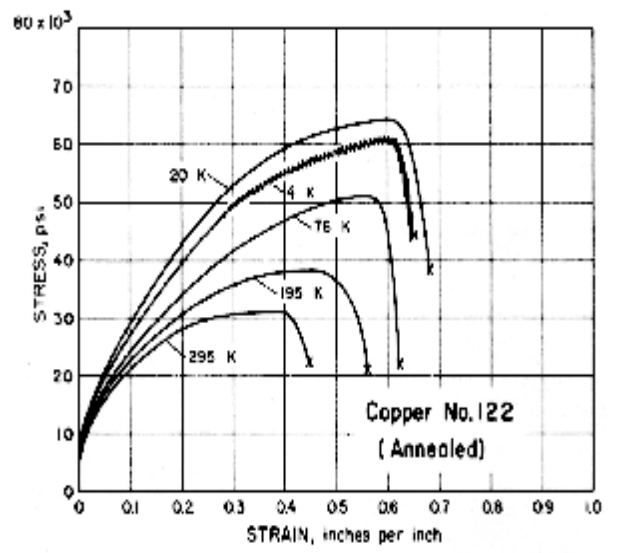
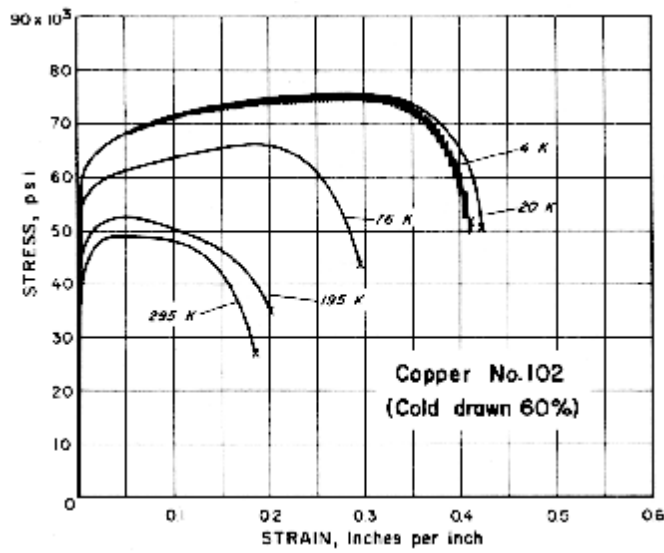
464	Naval Brass (Annealed)	295	63,300	31,000	37	52
		195	67,400	33,800	37	54
		76	80,400	38,000	44	48
		20	105,200	47,600	41	42
		4	99,600	43,700	40	48
510	Phosphor Bronze, 5% A (Cold drawn 85%, spring)	295	77,400	72,000	18	78
		195	85,600	78,700	20	78
		76	105,200	89,200	34	67
		20	131,000	104,800	39	62
		4	116,400	100,400	34	58
614	Aluminum Bronze D (Annealed)	295	83,200	59,400	40	66
		195	89,500	64,800	45	71
		76	105,800	69,500	52	64
		20	126,400	80,600	48	58
		4	134,500	82,400	52	59
647	Copper-Nickel Silicon (Aged)	295	112,400	105,000	15	60
		195	119,400	110,800	18	66
		76	123,600	114,100	24	70
		20	133,700	118,400	33	68
		4	135,800	119,800	31	65
655	High Silicon Bronze A (Annealed, soft)	295	61,400	24,200	66	79
		195	69,900	26,800	68	79
		76	89,000	31,900	71	69
		20	108,900	37,600	72	69
		4	101,200	36,900	71	70
706	Copper Nickel 10% (Annealed)	295	49,600	21,400	37	79
		195	54,700	24,700	42	77
		76	72,000	24,800	50	77
		20	82,500	30,200	50	73
		4	80,600	24,900	53	73
715	Copper Nickel 30% (Annealed)	295	57,800	18,700	47	68
		195	68,000	22,200	48	70
		76	89,800	31,600	52	70
		20	103,100	38,100	51	66
		4	104,600	40,100	48	65
	Nickel- Aluminum Bronze (Sand cost)	295	101,200	44,000	11	9
		195	104,600	47,800	9	9
		76	117,100	54,900	6	7
		20	126,600	61,600	6	2
		4	130,500	60,100	6	5

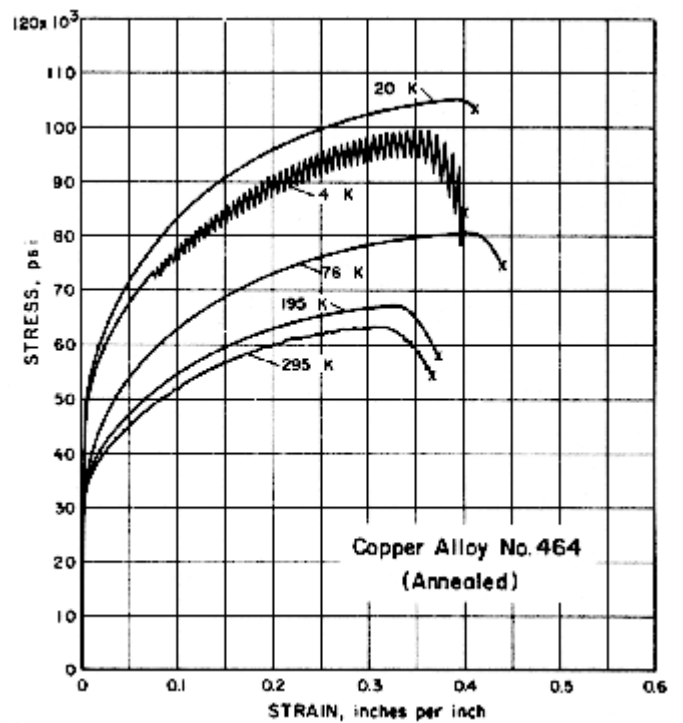
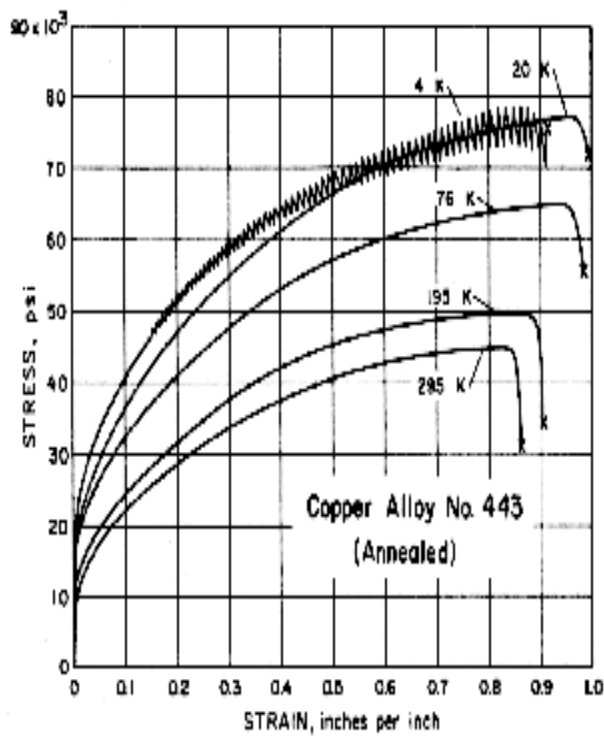
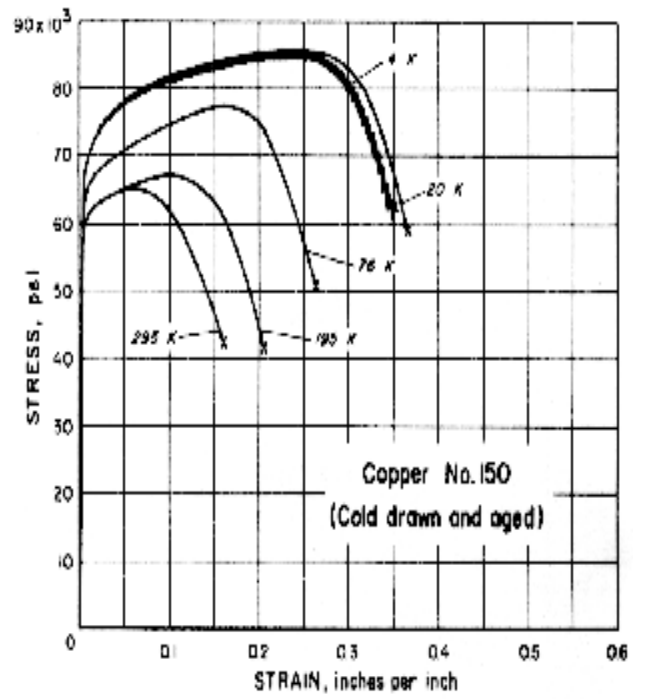
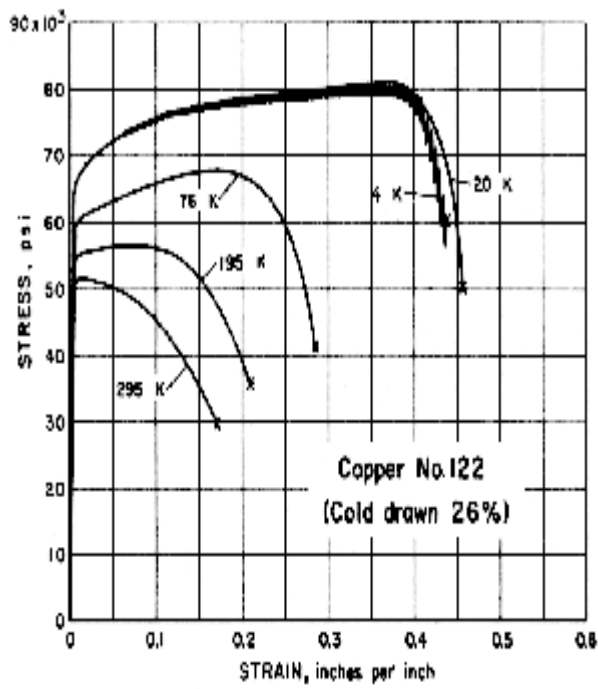
Table 2. Average Properties of Copper and Copper Alloys at Low Temperatures (Continued)

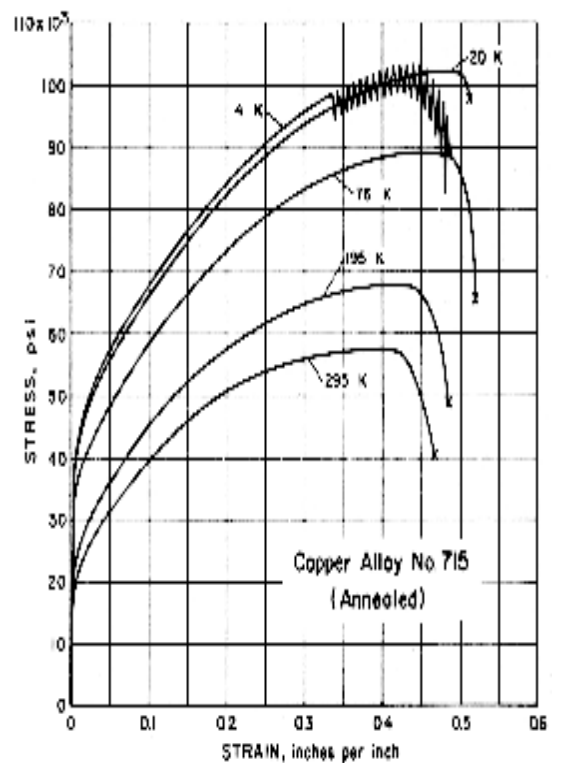
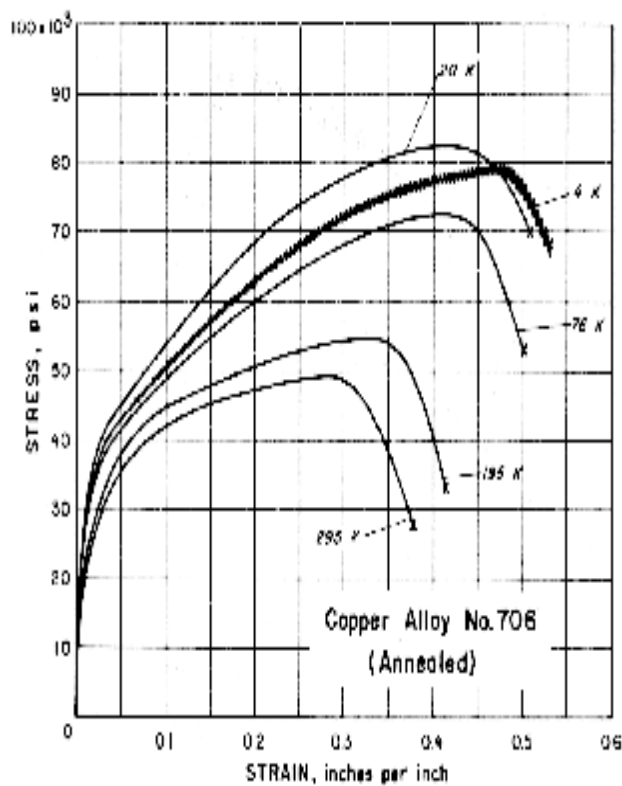
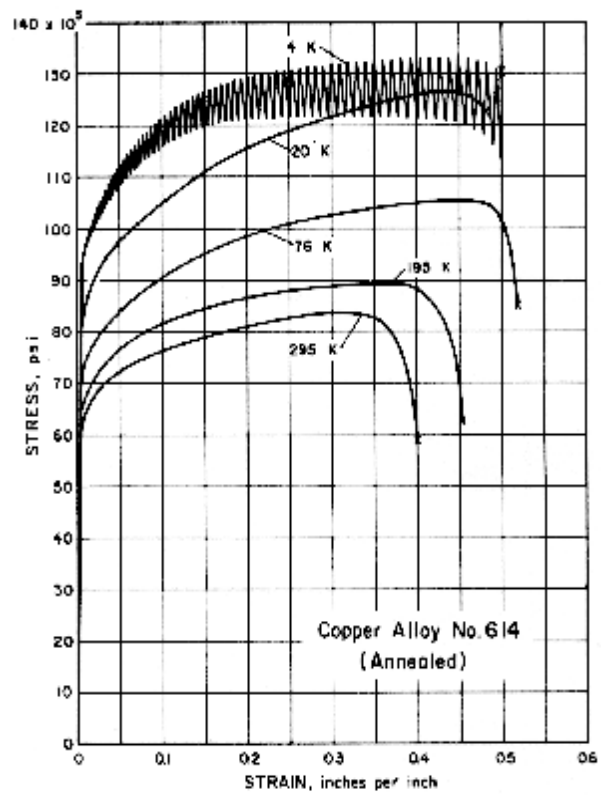
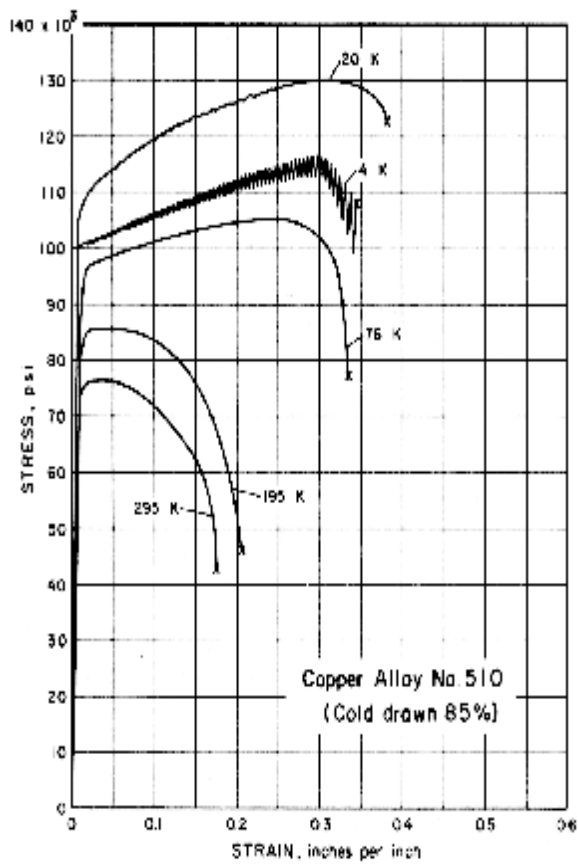
Copper and Copper Alloy		Test Temperature, K	Plastic Properties	
No.	Name and Treatment		Triaxial	
			Notch Tensile Strength (KT 5.0), psi	Impact Charpy
				Energy Absorbed, ft-lb
102	Oxygen Free (Cold drawn 60%)	295	75,700	96
		195	82,200	101
		76	93,600	95
		20	102,400	84
		4	100,600	
122	Phosphorus Deoxidized, High Residual Phosphorus (Annealed)	295	43,300	11
		195	50,400	112
		76	62,300	112
		20	72,000	118
		4	74,700	
	(Cold drawn 26%)	295	81,000	112
		195	86,800	112
		76	99,800	112
		20	108,600	119
		4	109,300	
150	Zirconium Copper (Cold drawn, aged)	295	97,600	89
		195	103,100	105
		76	112,400	114
		20	119,000	114
		4	121,600	
220	Commercial Bronze, 90% (Annealed)	295	49,900	112
		195	55,600	114
		76	69,200	112
		20	76,300	115
		4	78,900	
230	Red Brass, 85% (Cold drawn 14%)	295	53,900	96
		195	58,500	82
		76	71,200	78
		20	72,000	76
		4	74,900	
443	Admiralty Arsenical (Annealed)	295	53,800	112
		195	58,800	113
		76	75,200	114
		20	89,400	114

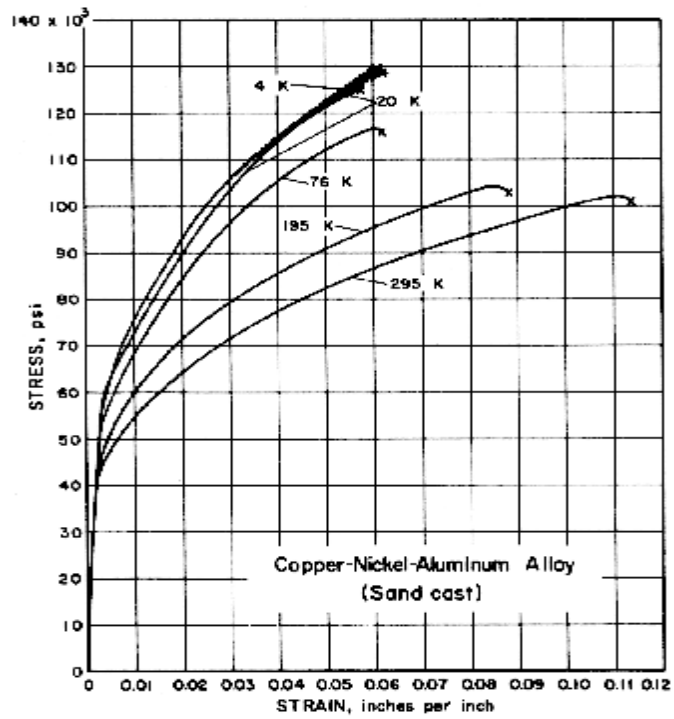
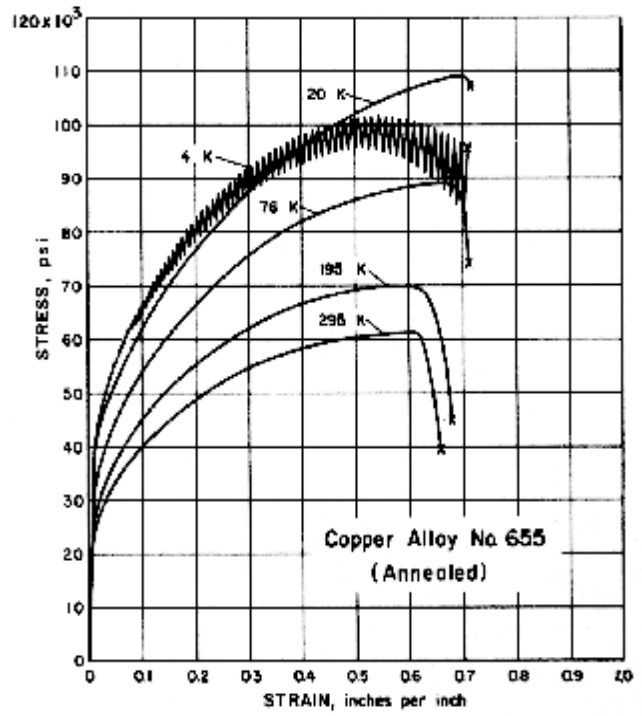
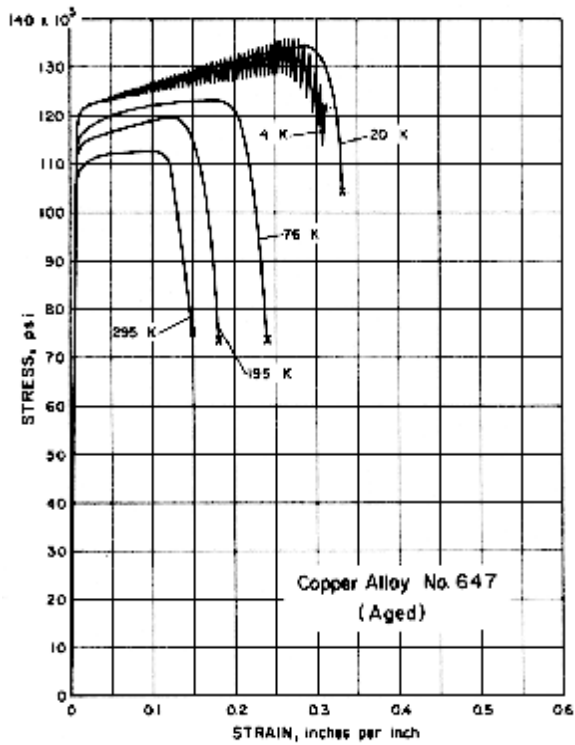
		4	86,200	
464	Naval Brass (Annealed)	295 195 76 20 4	74,700 84,800 100,700 113,900 115,400	38 42 38 35
510	Phosphor Bronze, 5% A (Cold drawn 85%, spring)	295 195 76 20 4	136,500 147,100 167,000 185,000 185,400	106 82 54 51
614	Aluminum Bronze D (Annealed)	295 195 76 20 4	122,500 133,300 148,100 174,300 160,800	110 100 72 66
647	Copper-Nickel Silicon (Aged)	295 195 76 20 4	189,700 194,800 204,600 255,800 212,200	110 106 109 116
655	High Silicon Bronze A (Annealed, soft)	295 195 76 20 4	81,200 92,000 110,700 126,300 122,100	112 112 114 116
706	Copper Nickel 10% (Annealed)	295 195 76 20 4	65,000 73,100 87,200 96,800 100,000	114 113 115 116
715	Copper Nickel 30% (Annealed)	295 195 76 20 4	79,400 90,500 112,900 127,600 130,500	115 114 114 114
	Nickel- Aluminum Bronze (Sand cost)	295 195 76 20 4	105,200 112,800 118,900 121,800 118,400	10 8 6 6

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ









ΠΛΑΣΤΙΚΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

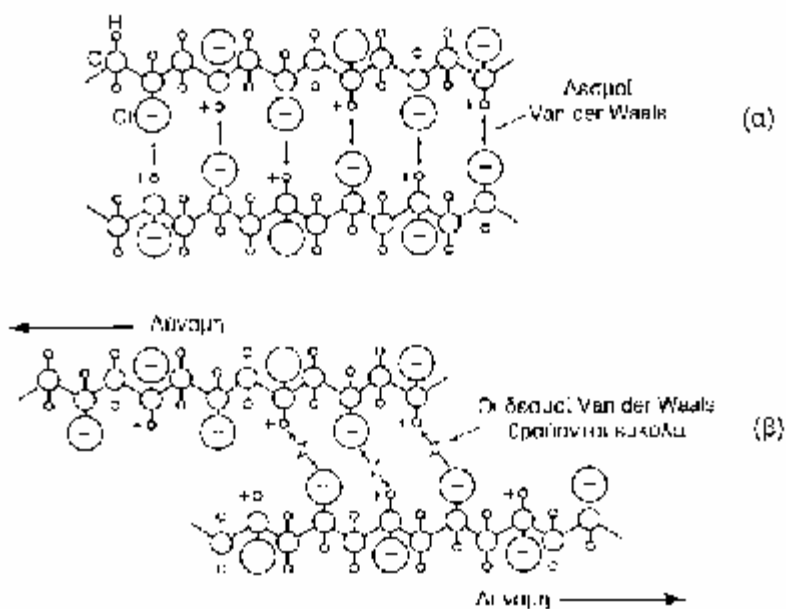
Είναι δύσκολο να δώσουμε έναν ακριβή ορισμό του όρου πλαστικά. Από τεχνικής άποψης, ο όρος εφαρμόζεται σε μία ομάδα μηχανολογικών υλικών που χαρακτηρίζονται από μεγάλα μόρια τα οποία αποτελούνται από μικρότερα μόρια. Αυτά είναι γνωστά με την ονομασία μακρομόρια. Τα πλαστικά προσφέρουν μικρή πυκνότητα, φθηνά εργαλεία, καλή αντίσταση στη διάβρωση, μείωση κόστους και μεταβλητότητα στον σχεδιασμό. Από χημικής άποψης, τα περισσότερα είναι οργανικές ουσίες που περιέχουν υδρογόνο, οξυγόνο, άνθρακα και άζωτο.

4.2 ΜΟΡΙΑΚΗ ΔΟΜΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

Είναι χρήσιμο να κατανοήσουμε την μοριακή δομή των πλαστικών. Πολλά βασίζονται σε υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης, στα οποία ο άνθρακας και το οξυγόνο συνδυάζονται στη σχέση: C_nH_{2n+2} . Θεωρητικά τα άτομα μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους επ' άοριστο για να σχηματίσουν πολύ μεγάλα μόρια. Οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων είναι ομοιοπολικοί. Δηλαδή προκύπτουν από αμοιβαία συνεισφορά ηλεκτρονίων μεταξύ δύο ατόμων, οπότε δημιουργείται σταθερή, κοινή οκτάδα ανά άτομο. Επειδή δεν υπάρχει χώρος για επιπλέον άτομα στην αλυσίδα, τα μόρια αυτά ονομάζονται κορεσμένα.

Ο άνθρακας και το υδρογόνο μπορούν να σχηματίσουν μόρια στα οποία τα άτομα του άνθρακα συγκρατούνται μεταξύ τους με διπλούς ή τριπλούς ομοιοπολικούς δεσμούς. Επειδή τέτοια μόρια δεν έχουν τον απαιτούμενο αριθμό ατόμων υδρογόνου ονομάζονται μη κορεσμένα και είναι σημαντικά στη διαδικασία *πολυμερισμού*, εκεί που τα μικρά μόρια ενώνονται για να σχηματίσουν τεράστια μόρια. Αυτά τα τεράστια μόρια είναι γνωστά ως μακρομόρια (όπως έχουμε ήδη προαναφέρει) και συγκρατούνται μεταξύ τους με δυνάμεις Van der Waals. Αυτοί οι δεσμοί αναπτύσσονται μεταξύ των μακρομορίων, είναι ασθενείς, ηλεκτροστατικής φύσης και είναι ανάλογοι του αντιστρόφου της έκτης δύναμης της απόστασης μεταξύ διπόλων (r^{-6}). Το σχήμα 4.2.1α είναι μια αναπαράσταση των δεσμών Van der Waals, ενώ το σχήμα 4.2.1β δείχνει την αντίδραση ενός πολυμερούς σε διατμητική τάση.

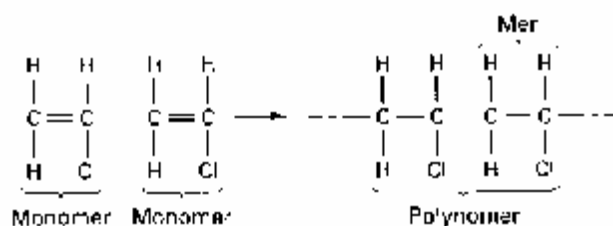
Σχήμα 4.2.1



4.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΡΙΩΝ ΑΠΟ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟ

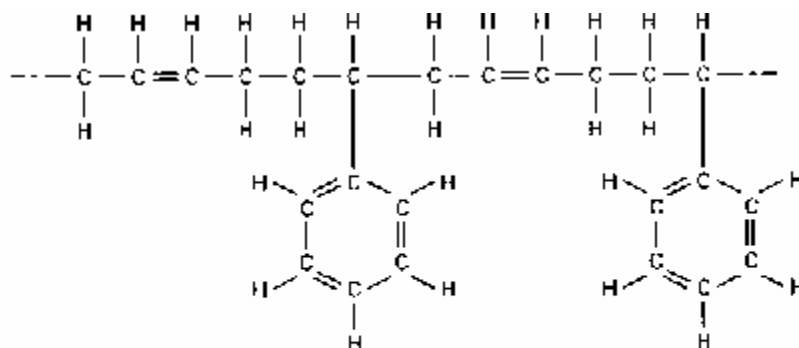
Η διαδικασία του πολυμερισμού λαμβάνει χώρα με έναν μηχανισμό *συμπλήρωσης* ή *συμπύκνωσης*. Το σχήμα 4.3.1 δείχνει πολυμερισμό με συμπλήρωση, όταν ένας αριθμός βασικών μονάδων (μονομερών) προστίθενται για να σχηματίσουν τεράστια μόρια (πολυμερή) στα οποία υπάρχει μία επαναλαμβανόμενη μονάδα (Mer) μονομερών.

Σχήμα 4.3.1



Ενεργοποιητές και καταλύτες ξεκινούν και τερματίζουν την αλυσίδα. Ο μέσος αριθμός των μονομερών είναι γνωστός ως *βαθμός πολυμερισμού* και κυμαίνεται από 75 έως 750 στα πιο εμπορεύσιμα πλαστικά. Τα συμπολυμερή είναι μια ειδική κατηγορία πολυμερών όπου δύο διαφορετικές κατηγορίες μονομερών (σχήμα 4.3.2) συνδυάζονται στην ίδια αλυσίδα.

Σχήμα 4.3.2



Ο σχηματισμός των συμπολυμερών αυξάνει τις πιθανότητες της δημιουργίας νέων τύπων πλαστικών με βελτιωμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες.

4.4 ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΑ, ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ

Οι όροι *θερμοσκληρυνόμενα* και *θερμοπλαστικά* αναφέρονται στην αντίδραση του υλικού στην υψηλή θερμοκρασία. Τα πολυμερή μπορούν να αντιμετωπισθούν ως μακριές αλυσίδες με στενούς δεσμούς ατόμων άνθρακα με κολλημένα μόρια υδρογόνου, φθορίου, χλωρίου ή δαχτυλιδιών βενζολίου. Όλοι οι δεσμοί μέσα στα μόρια είναι αρχικά ισχυροί. Παρόλα αυτά η έλξη μεταξύ των γειτονικών μορίων είναι μόνο από τις πολύ πιο αδύνατες Van der Waals δυνάμεις. Για αυτά τα υλικά, οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες καθορίζονται κατά ένα μεγάλο μέρος από τις διαμοριακές δυνάμεις. Γενικά, τείνουν να είναι εύκαμπτα και σκληρά. Επειδή οι δευτεροβάθμιοι δεσμοί αποδυναμώνονται από την ανυψωμένη θερμοκρασία, τα πλαστικά αυτού του τύπου μαλακώνουν με την αυξανόμενη θερμοκρασία και γίνονται σκληρότερα και ισχυρότερα όταν παγώνουν. Το μαλάκωμα και η σκλήρυνση αυτών των *θερμοπλαστικών* υλικών μπορούν να επαναληφθούν όσο συχνά θέλουμε και καμία χημική αλλαγή δε λαμβάνεται χώρα. Επειδή περιέχουν μόρια διαφορετικών μηκών, τα θερμοπλαστικά υλικά δεν έχουν μια καθορισμένη θερμοκρασία τήξης.

Επάνω από τη θερμοκρασία τήξης, οι δεσμοί μεταξύ των μοριακών αλυσίδων είναι τόσο αδύνατοι που μια εφαρμοσμένη δύναμη θα παραγάγει ροή χωρίς ελαστική πίεση. Το υλικό μπορεί να χυθεί και να μπει σε καλούπι ή να διαμορφωθεί με εγχύση. Κάτω από τη θερμοκρασία τήξης, το υλικό μπορεί να διατηρήσει την άμορφη δομή του αλλά με

τις ιδιότητες που το συνοδεύουν, που είναι κάπως ελαστικές. Η εφαρμογή μιας δύναμης παράγει και ελαστική και πλαστική παραμόρφωση. Μεγάλα ποσά μόνιμης παραμόρφωσης είναι διαθέσιμα και καθιστούν αυτήν την σειρά ελκυστική για τη σχηματοποίηση. Στις ακόμα χαμηλότερες θερμοκρασίες, οι δεσμοί γίνονται ισχυρότεροι και το πολυμερές είναι πιο δύσκαμπτο και κάπως δερματοειδές. Πολλά εμπορεύσιμα πολυμερή (π.χ., πολυαιθυλένιο) έχουν χρήσιμη δύναμη σε αυτήν την κατάσταση. Όταν παγώνει περαιτέρω κάτω από τη *θερμοκρασία μετάβασης γυαλιού*, το γραμμικό πολυμερές διατηρεί την άμορφη δομή του αλλά γίνεται σκληρό, εύθραυστο και διαφανές.

Πολλά θερμοπλαστικά μπορούν μερικώς να κρυσταλλώσουν όταν παγώσουν κάτω από τη θερμοκρασία τήξης. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας οι αλυσίδες ευθυγραμμίζονται σε αξιόλογες αποστάσεις, με μια αύξηση της πυκνότητας. Επιπλέον, το πολυμερές γίνεται πιο δύσκαμπτο, σκληρότερο, λιγότερο όλκιμο και ανθεκτικότερο στους διαλύτες και τη θερμότητα. Η δυνατότητα κρυστάλλωσης ενός πολυμερούς εξαρτάται από την πολυπλοκότητα των μορίων του, το βαθμό πολυμερισμού (μήκος των αλυσίδων), το ποσοστό ψύξης, και το ποσό παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της ψύξης.

Η μηχανική συμπεριφορά άμορφου ενός θερμοπλαστικού μπορεί να διαμορφωθεί από μία κοινή σφαίρα βαμβακιού. Τα μεμονωμένα μόρια συνδέονται μέσα από τους ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς και είναι ανάλογα με τις μεμονωμένες ίνες του βαμβακιού. Οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων είναι πολύ πιο αδύνατες και είναι παρόμοιες με τις δυνάμεις τριβής μεταξύ των σκελών του βαμβακιού. Όταν τραβιέται ή τεντώνεται, πλαστική παραμόρφωση εμφανίζεται από την ολίσθηση μεταξύ των ινών ή των μοριακών αλυσίδων. Μέθοδοι για να την αύξηση της δύναμη των θερμοπλαστικών έχουν εστιάσει στον περιορισμό της διαμοριακής ολίσθησης. Οι μακρύτερες αλυσίδες έχουν λιγότερη ελεύθερη κυκλοφορία και είναι επομένως ισχυρότερες. Η σύνδεση των παρακείμενων αλυσίδων με τις αρχικές διασυνδέσεις δεσμών, όπως με τους δεσμούς του θείου όταν γίνεται ο βουλκανισμός του λάστιχου, μπορεί επίσης να επιφέρει παραμόρφωση. Δεδομένου ότι η δύναμη των δευτεροβάθμιων δεσμών συσχετίζεται αντιστρόφως με την απόσταση χωρισμού των μορίων, διαδικασίες όπως η απομορφωποίηση ή «κρυστάλλωση» μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί μια σφιχτή παράλληλη ευθυγράμμιση των παρακείμενων μορίων και μια ταυτόχρονη αύξηση στη δύναμη, την ακαμψία και την πυκνότητα. Τα πολυμερή με τις μεγάλες δευτερεύουσες δομές, όπως τα άτομα χλωρίου ή οι δακτύλιοι βενζολίου, μπορούν να είναι ισχυρότερα ή πιο αδύνατα από εκείνα με μόνο υδρογόνο, ανάλογα με αν η κυρίαρχη επίδραση είναι το

εμπόδιο στην ολίσθηση ή την αυξανόμενη απόσταση χωρισμού. Τα διακλαδισμένα πολυμερή, όπου οι αλυσίδες χωρίζονται σε ένα «Υ» με τους αρχικούς δεσμούς που συνδέουν όλα τα τμήματα της αλυσίδας, είναι συχνά πιο αδύνατα αφού η διακλάδωση μειώνει την πυκνότητα.

Τα *θερμοσκληρυνόμενα* πλαστικά, αφ' ετέρου, συνήθως έχουν τρισδιάστατη δομή πλαισίου στην οποία όλα τα άτομα συνδέονται με ισχυρούς, ομοιοπολικούς δεσμούς. Αυτά τα υλικά παράγονται γενικά από τον πολυμερισμό συμπύκνωσης όπου η αυξημένη θερμοκρασία προωθεί την μη αναστρέψιμη αντίδραση, ως εκ τούτου ο όρος *θερμοσκληρυνόμενα*. Τα υλικά διατηρούν τις μηχανικές τους ιδιότητες μέχρι στη θερμοκρασία στην οποία απανθρακώνονται ή καίγονται. Η παραμόρφωση απαιτεί το σπάσιμο των αρχικών δεσμών, έτσι αυτά τα πλαστικά τείνουν να είναι ισχυρά αλλά εύθραυστα. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή σώματα επομένως είναι ισχυρότερα και πιο άκαμπτα από τα θερμοπλαστικά, αλλά έχουν μια χαμηλότερη ολκιμότητα και φτωχότερες ιδιότητες κρούσης.

Εάν ένα πολυμερές σώμα είναι θερμοσκληρυνόμενο ή θερμοπλαστικό είναι μεγάλης σπουδαιότητας στο να καθορίσουμε πώς θα αποδώσει στην αποστολή για την οποία προορίζεται. Για παράδειγμα τα θερμοπλαστικά μορφοποιούνται εύκολα. Αφού το καυτό, μαλακό υλικό έχει διαμορφωθεί στην επιθυμητή μορφή, η φόρμα πρέπει να παγώσει έτσι ώστε το πλαστικό θα σκληράνει και θα είναι σε θέση να διατηρήσει τη μορφή του όταν αφαιρεθεί. Αντίθετα, όταν ένα κομμάτι παράγεται από θερμοσκληρυνόμενα υλικά, η φόρμα μπορεί να παραμείνει σε μια υψηλή θερμοκρασία σε όλη τη διαδικασία, αλλά ο χρόνος ανά κομμάτι είναι συχνά πιο μακρόχρονος για να επιτρέψει ένα πλήρες «σετάρισμα». Το υλικό σκληραίνει ως αποτέλεσμα της αντίδρασης και έχει τη δύναμη και την ακαμψία ακόμα και όταν είναι καυτό. Η αφαίρεση των προϊόντων μπορεί να εκτελεστεί χωρίς την ψύξη της φόρμας.

Τα ελαστομερή είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες. Κατά τη φόρτισή τους μπορούν να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις, και να επανέλθουν στο αρχικό τους σχήμα μετά την άρση του φορτίου (ιδιότητα υπερελαστικότητας). Οι χαρακτηριστικότεροι αντιπρόσωποι των ελαστομερών είναι το ελαστικό κόμμι, το συνθετικό και φυσικό καουτσούκ, το συνθετικό πολυισοπρένιο, το ελαστικό στυρένιο-βουταδιένιο, το πολυχλωροπρένιο και οι σιλικόνες. Το καουτσούκ βρίσκει την κυριότερη εφαρμογή του στα λάστιχα των αυτοκινήτων. Όταν το καουτσούκ θερμανθεί με θείο, υφίσταται βουλκανισμό. Δημιουργούνται, δηλαδή, διασταυρώσεις μεταξύ των μορίων, οι οποίες ενισχύουν πολύ τη δομή του ελαστικού. Με τον τρόπο αυτό, το ελαστομερές

γίνεται σκληρότερο, ανθεκτικότερο και λιγότερο ευαίσθητο σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Η σχέση αναλογίας που υπάρχει ανάμεσα στην περιεκτικότητα του καουτσούκ σε θείο και της βελτίωσης των μηχανικών του ιδιοτήτων, επιτρέπει την παραγωγή καουτσούκ με μεγάλο εύρος ιδιοτήτων.

4.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

Οι ιδιότητες του πολυμερούς εξαρτώνται από τη φύση του μονομερούς, τις συνθήκες παραγωγής του, το μήκος της μοριακής αλυσίδας και το μοριακό βάρος του πολυμερούς.

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Πυκνότητα πολυμερών

Τα πολυμερή υλικά είναι ελαφρά, δηλαδή έχουν χαμηλή πυκνότητα, γεγονός που οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στα μικρά ατομικά βάρη των στοιχείων H, C που συνθέτουν, κυρίως, τις μακρομοριακές αλυσίδες.

Τα κρυσταλλικά πολυμερή παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τα άμορφα λόγω κανονικότερης, άρα και πιο πυκνής, διάταξης των αλυσίδων. Η παρουσία συμμετρικών διακλαδώσεων ευνοεί την κρυστάλλωση και άρα αυξάνει την πυκνότητα. Ομοίως δρα και η προσθήκη ενισχυτικών υλικών σε πολυμερείς μήτρες, όπως π.χ. ίνες γυαλιού σε μήτρα πολυαμιδίου ή πολυανθρακική.

Τα ελαφρύτερα πολυμερή είναι τα θερμοπλαστικά και από αυτά τη μικρότερη πυκνότητα έχει το πολυπροπυλένιο (0,85-0,92 g/cm³). Την υψηλότερη πυκνότητα παρουσιάζουν τα πολυμερή στη μοριακή αλυσίδα των οποίων μετέχουν άτομα αλογόνων.

Πίνακας 4.5.1

Πυκνότητα, αντοχή σε εφελκυσμό και ειδική αντοχή για διάφορα υλικά			
ΥΛΙΚΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ
	(g/cm ³)	(Mpa)	(MPa cm ³ /g)
Χάλυβας 0,10%C	7,8	450	58
Ντουραλουμίνιο	2,8	350	125
Ορείχαλκος (Cu-30% Zn)	8,3	400	48
Nylon 6.6	1,12	80	72
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)	0,96	30	30
ABS	1,1	45	41

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

i) Η θερμική αγωγιμότητα (k) των πολυμερών είναι πολύ μικρή, λόγω της απουσίας διεγερμένων ηλεκτρονίων στη δομή τους. Για το λόγο αυτό, τα πολυμερή βρίσκουν εφαρμογές και ως θερμομονωτικά υλικά, όπως για παράδειγμα πολυουρεθάνη, PS, PVC.

ii) Ο συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής (α_l) αυξάνεται όταν η ένταση των δεσμών είναι χαμηλή. Η παρουσία δευτερευόντων χαλαρών δεσμών στα πολυμερή υλικά, τους προσδίδει μεγάλο α_l .

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην περίπτωση συνθέτων υλικών μετάλλου - πολυμερούς, τα οποία μπορεί να οδηγηθούν σε αστοχία κατά τη θέρμανση - απόψυξή τους, λόγω του πολύ διαφορετικού α_l των δύο συστατικών τους.

iii) Η ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα (c_p) των πολυμερών είναι γενικά μεγάλη, λόγω των αυξημένων δονήσεων των ατόμων που μετέχουν στην αλυσίδα των μακρομορίων.

Πίνακας 4.5.2

Θερμικές ιδιότητες χαρακτηριστικών πολυμερών			
ΥΛΙΚΟ	ΘΕΡΜΙΚΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ	ΕΙΔΙΚΗ
	ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ	ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ
		ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ	
	(W/m.°C)	(10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	(KJ/Kg.°C)
LDPE	0,33	110-130	2,26
PVC	0,12-0,30	50-180	0,84-1,25
PS	0,10-0,14	60-80	1,34
PTFE	0,25	100	1,045
PC	0,19	70	1,25
PMMA	0,17-0,25	50-90	1,46
Nylon 6.6	0,25	100-150	1,67
Φαινοπλάστες	0,13-0,26	25-60	1,20-2,40
Γυαλί	1,25	3-4	0,71-0,84
Σίδηρος	55	11-12	0,44

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Λόγω των ομοιοπολικών δεσμών, στα πολυμερή υλικά δεν υπάρχουν φορείς ηλεκτρικού φορτίου, δηλαδή ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα. Για το λόγο αυτό, τα πολυμερή εμφανίζουν μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, μεταξύ 10¹⁵ και 10¹⁸ Ω.cm και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονωτές του ηλεκτρισμού. Για αυτήν τους την ιδιότητα, τα πολυμερή χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις επενδύσεις καλωδίων και συρμάτων.

ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

i) Όταν το πάχος τους είναι της τάξεως των μερικών δεκάτων του χιλιοστού, τα πολυμερή υψηλής καθαρότητας είναι άχρωμα και ο συντελεστής διαπερατότητας του φωτός παραμένει σταθερός σε όλο το φάσμα του ορατού (σχήμα 4.5.1).

Ο χρωματισμός των πολυμερών γίνεται είτε με προσθήκη ευδιάλυτων χρωμάτων (dyes), που δεν επηρεάζουν τη διαφάνεια τους, είτε με αδιάλυτες χρωστικές (pigments), οι οποίες καθιστούν τα πολυμερή αδιαφανή.

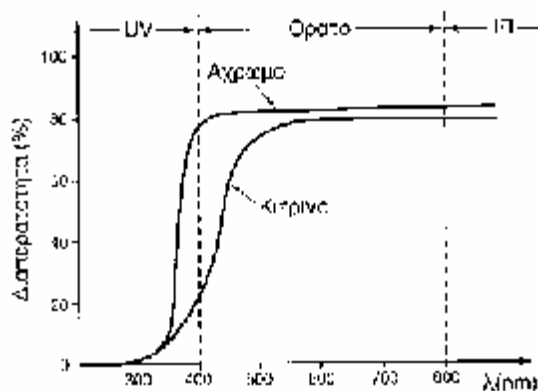
ii) Τα άμορφα πολυμερή είναι διαφανή, αφού δεν υπάρχουν κρύσταλλοι ώστε να προκαλείται σκέδαση του φωτός. Αντίθετα, τα κρυσταλλικά πολυμερή είναι ημιδιαφανή, αφού κάθε κρύσταλλος διαχέει το φως. Ωστόσο, και τα κρυσταλλικά πολυμερή

εμφανίζονται ως διαφανή, στην περίπτωση κατά την οποία οι κρύσταλλοι είναι προσανατολισμένοι παράλληλα μεταξύ τους.

Τα θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται συχνότερα σε οπτικές εφαρμογές, είναι τα πολυακρυλικά και τα πολυανθρακικά πολυμερή. Οι πολυμεθυλακρυλικοί εστέρες έχουν μεγάλη ικανότητα χρωματισμού, διαφάνεια και ακαμψία. Για αυτά τους τα χαρακτηριστικά βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή υαλοπινάκων ασφαλείας (plexiglass, Perspex, lucite), οπτικών οργάνων, φακών επαφής, διακοσμητικών και φωτιστικών αντικειμένων. Ωστόσο, λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζουν σε χαράξεις, έχει οδηγήσει σε αντικατάσταση τους από πολυανθρακικά πολυμερή, για εφαρμογές χαμηλότερων απαιτήσεων, όπως είναι οι φακοί για κιάλια, το διαφανές κάλυμα κράνους, οι φανοί το parebrise των αυτοκινήτων, κλπ.

Διάγραμμα 4.5.1

Συντελεστής διαπερατότητας του φωτός μέσα από υμένα πολυμερών, συναρτήση του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Πίνακας 4.5.3

Οπτικές ιδιότητες πολυμερών		
ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (%)
Πολυακρυλικά		
-PMMA	1,49-1,56	92
-A/MMA	1,51	90
Στυρένιο-		
βουταδένο, SB	1,57	90
Πολυανθρακικό, PC	1,59	88
Πολυσουλφονικό, PPSU	1,65	75
Πολυεστέρας, PETP	1,57-1,64	90

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Ελαστική συμπεριφορά πολυμερών

Η ελαστική συμπεριφορά των πολυμερών οφείλεται σε δυο μηχανισμούς:

i) Κατά τη μηχανική φόρτιση του υλικού στην ελαστική περιοχή, οι ομοιοπολικοί δεσμοί των αλυσίδων τεντώνονται και παραμορφώνονται, δηλαδή υφίστανται ελαστική επιμήκυνση. Μετά την απομάκρυνση του φορτίου πραγματοποιείται επαναφορά στο αρχικό μήκος. Ο υπολογισμός του σ_y (όριο διαρροής), γίνεται όπως και στα μέταλλα, εφόσον και στην περίπτωση των πολυμερών η ελαστική συμπεριφορά διέπεται από τη γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης.

ii) Για μεγαλύτερα φορτία, τμήματα αλυσίδων του πολυμερούς μπορεί να παραμορφωθούν τόσο, ώστε μετά την απομάκρυνση του φορτίου να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση μετά από κάποιο χρόνο (ώρες ή μήνες). Αυτό το είδος της ελαστικής συμπεριφοράς ονομάζεται μη γραμμική ελαστική συμπεριφορά.

Τα πολυμερή, λόγω της δομής τους, δευτερεύοντες ασθενείς δεσμοί μεταξύ αλυσίδων, είναι λιγότερο στιβαρά από τα μέταλλα. Έτσι το μέτρο ελαστικότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 1-4 GPa για τα θερμοπλαστικά και 1-22 GPa για τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή. Για λόγους σύγκρισης αναφέρουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας για κράματα αλουμινίου είναι 70 GPa και για χάλυβες 200 GPa.

Εξάλλου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, στα πολυμερή το E εξαρτάται από το χρόνο επιβολής φορτίου, σε αντίθεση με τα μέταλλα και τα κεραμικά που έχουν σταθερό μέτρο ελαστικότητας (E). Έτσι, όταν για παράδειγμα γράφεται E_{10s} , δείχνει την τιμή του E μετά από χρόνο επιβολής φορτίου δέκα δευτερολέπτων.

Σε θερμοκρασίες υψηλότερες αυτής του περιβάλλοντος, η μηχανική συμπεριφορά του πολυμερούς εξαρτάται από τη δομή του και, φυσικά, τη θερμοκρασία. Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

► Θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή.

Γενικά, το μέτρο ελαστικότητας των πολυμερών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Πλήρως κρυσταλλικό πολυμερές συμπεριφέρεται σαν μέταλλο και παραμένει στιβαρό ως το σημείο τήξεως.

Για 100% άμορφο πολυμερές, η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας με τη θερμοκρασία παρουσιάζει τρεις περιοχές:

- Για ένα μικρό εύρος χαμηλών θερμοκρασιών (μέχρι την T_g), το E παραμένει σταθερό και τα πολυμερή εμφανίζονται εύθραυστα, όπως τα γυαλιά (συμπεριφορά υαλώδους στερεού).
- Μόλις η θερμοκρασία υπερβεί τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g), αρχίζει η ραγδαία μείωση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας και κατά συνέπεια και της στιβαρότητας του πολυμερούς. Στη θερμοκρασιακή αυτή περιοχή τα πολυμερή εμφανίζουν συμπεριφορά ελαστομερούς.
- Στη θερμοκρασιακή περιοχή λίγο πριν από το σημείο τήξεως (T_m), οι δευτερεύοντες δεσμοί χαλαρώνουν και οι διακλαδώσεις των αλυσίδων αποκόπτονται. Το πολυμερές συμπεριφέρεται ως παχύρρευστο υγρό και για αυτό η μορφοποίηση του πραγματοποιείται, με χύτευση σε αυτή τη θερμοκρασιακή περιοχή.

Τα πολυμερή με μικτή δομή παρουσιάζουν ενδιάμεση συμπεριφορά, η οποία εξαρτάται από το βαθμό κρυσταλλικότητάς τους.

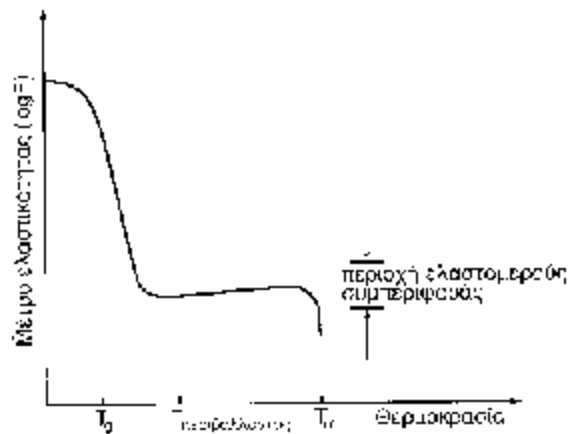
Γενικά, αυξανόμενης της θερμοκρασίας από 20 έως 200 °C, τα πολυμερή εμφανίζουν μια σταθερές μηχανικές ιδιότητες στο ίδιο θερμοκρασιακό εύρος.

► Ελαστομερή.

Τα ελαστομερή εμφανίζουν εκτεταμένη ελαστική περιοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για τα πολυμερή αυτά, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Διάγραμμα 4.5.2).

Διάγραμμα 4.5.2

Μέτρο ελαστικότητας ελαστομερών συναρτήσει της θερμοκρασίας.

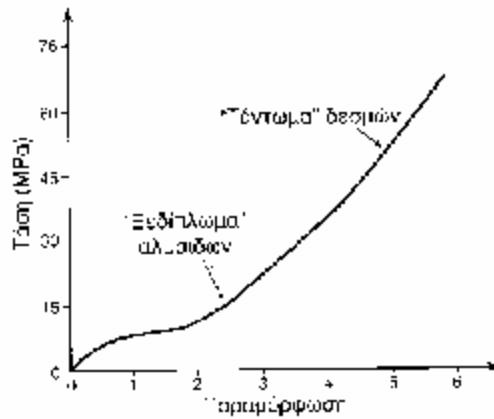


Το μέτρο ελαστικότητας είναι σχεδόν σταθερό από το T_g μέχρι και το σημείο T_m , διότι με την αύξηση της T , δεν «ξεμπλοκάρονται» οι κόμβοι των διακλαδώσεων στις αλυσίδες τους.

Η ελαστικότητα των ελαστομερών είναι η ιδιότητα βάσει της οποίας το ελαστομερές μπορεί να υποστεί ελαστικές επιμηκύνσεις από 300 έως 700%. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο ότι κάτω από το καθεστώς της φόρτισης, τα μόρια τείνουν να διευθετηθούν κανονικά μέσα στο υλικό. Στην αρχή «ξεδιπλώνονται» οι αλυσίδες των μακρομορίων, και στη συνέχεια, «τεντώνονται» οι μεταξύ τους δεσμοί. Η επιβολή της τάσεως τείνει να ευθυγραμμίσει τα μακρομόρια και να προσδώσει, έτσι, τάξη στο υλικό. Σταματώντας τη φόρτιση, το υλικό επανέρχεται στην αρχική διευθέτηση των μορίων του, τα οποία έχουν τη «μνήμη» της αρχικής φόρμας τους λόγω της αρχιτεκτονικής της δομής τους (πλέξιμο αλυσίδων και διακλαδώσεις με κόμβους). Αντίστοιχη συμπεριφορά $E = f(T)$ με αυτή των ελαστομερών, παρουσιάζουν τα θερμοσκληρυνόμενα και μερικά θερμοπλαστικά, έντονα διακλαδισμένα και τυχαίας κατανομής.

Διάγραμμα 4.5.3

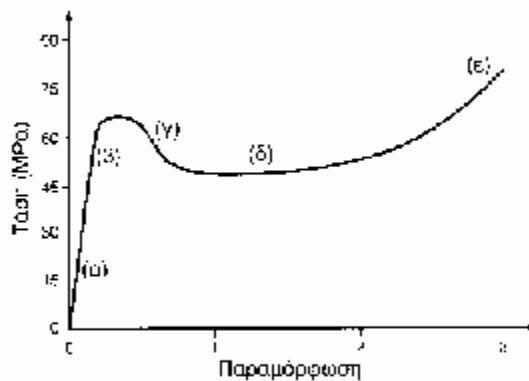
Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης για ελαστομερές υλικό.



ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ενός τυπικούς πολυμερούς (για παράδειγμα Nylon 6.6.) δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (διάγραμμα 4.5.4).

Διάγραμμα 4.5.4



Οι περιοχές κατά τη μηχανική καταπόνηση σε εφελκυσμό ενός πολυμερούς υλικού (διάγραμμα 4.5.4) είναι οι εξής:

- για μικρά φορτία, η περιοχή της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς (α),

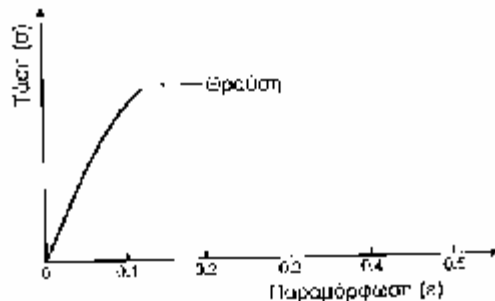
- για μεγαλύτερα φορτία, η περιοχή της μη γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς (β),
- για ακόμα μεγαλύτερα φορτία έχουμε σχηματισμό λαιμού (γ) και
- για πάρα πολύ μεγάλα φορτία, έχουμε την περιοχή της πλαστικής παραμορφώσεως (δ) που οδηγεί σε θραύση (ε) του υλικού.

Ψαθυρή θραύση

Για θερμοκρασίες μικρότερες του $0.75 T_g$ (διάγραμμα 4.5.5), η θραύση ξεκινά από τις ήδη υπάρχουσες μικρορωγμές, οι οποίες δημιουργήθηκαν είτε κατά την κατεργασία μορφοποίησης, είτε κατά την προετοιμασία του δοκιμίου του πολυμερούς για εφελκυσμό. Έτσι, κάτω από το καθεστώς εφελκυστικής καταπόνησης, μια ρωγμή μεγέθους μεγαλύτερου του κρισίμου, θα διαδοθεί πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα τη θραύση του υλικού.

Διάγραμμα 4.5.5

Ψαθυρή θραύση πολυμερών.



Θραύση μέσω ταινιών διάτμησης

Κατά τη δοκιμή θλίψεως ενός πολυμερούς, μπορούν να λάβουν χώρα υψηλές παραμορφώσεις (διάγραμμα 4.5.6). Δημιουργούνται λοιπόν, ταινίες διάτμησης μέσα στο πολυμερές, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που δημιουργούνται στα μέταλλα. Κάθε ταινία φανερώνει μία πεπερασμένη διάτμηση που έχει λάβει χώρα στο υλικό. Αύξηση του αριθμού των ταινιών αυτών, συνεπάγεται την αύξηση της παραμόρφωσης έως την τελική θραύση του πολυμερούς.

Διάγραμμα 4.5.6

Δημιουργία ταινιών διάτμησης κατά τη δοκιμή θλίψης.



Ερπυσμός και αντοχή σε κρούση πολυμερών

Ο ερπυσμός και η αντοχή σε κρούση των πολυμερών εξηγούνται από την ιξώδοελαστική συμπεριφορά των πολυμερών, διότι οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από το χρόνο.

Όταν η φόρτιση εφαρμόζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα και μάλιστα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, συμβαίνει μια ιξώδης ροή του πολυμερούς. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ερπυσμός. Μεγαλύτερη θερμοκρασία ή τάση εντείνουν το ανωτέρω φαινόμενο.

Η θερμοκρασία θερμικής κάμψης είναι μια ιδιότητα των πολυμερών που εκφράζει τη θερμοκρασία υπό την οποία το πολυμερές καταπονούμενο με ένα συγκεκριμένο φορτίο υφίσταται μια δεδομένη παραμόρφωση. Υψηλές HDT έχουν σαν αποτέλεσμα την αυξημένη αντοχή του υλικού σε ερπυσμό.

Όταν σε ένα πολυμερές επιβληθεί μια φόρτιση μεγάλης ταχύτητας (μεγάλου ρυθμού παραμόρφωσης), δεν υπάρχει χρόνος για να κινηθούν οι μακρομοριακές αλυσίδες, άρα να πραγματοποιηθεί πλαστική παραμόρφωση, με αποτέλεσμα να επακολουθήσει ψαθυρή θραύση του υλικού. Έτσι σε αυτή την περίπτωση, λέγεται ότι το πολυμερές παρουσιάζει μικρή αντοχή σε κρούση.

Τριβή-φθορά

Λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς τους, οι μηχανισμοί τριβής και φθοράς των πολυμερών συνδέονται άμεσα με ιδιότητες εξαρτώμενες ισχυρά από το χρόνο και τη θερμοκρασία. Λόγω της ευαισθησίας των μακρομοριακών αλυσίδων σε μηχανικές φορτίσεις, αλλά και σε περιβαλλοντολογικούς παράγοντες, οι παράμετροι του τριβοσυστήματος έχουν μεγάλη επίδραση στο μηχανισμό τριβής.

Η μελέτη της φθοράς των πολυμερών κατά την τριβή βρίσκεται ακόμη υπό ερευνητική παρατήρηση, ωστόσο έχει εκτιμηθεί ότι η τραχύτητα της επιφάνειας του ανταγωνιστικού υλικού επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την τριβολογική συμπεριφορά του πολυμερούς (διάγραμμα 4.5.7). Με την αύξηση της τραχύτητας ο συντελεστής τριβής και ο ρυθμός φθοράς των πολυμερών μειώνεται ως μία οριακή τιμή. Για υψηλότερες τιμές τραχύτητας, τα δύο μεγέθη αυξάνουν. Η ελάχιστη αυτή τιμή αποτελεί το όριο μεταξύ δύο περιοχών, όπου κυριαρχούν διαφορετικοί μηχανισμοί τριβής. Ενώ για χαμηλές τιμές τραχύτητας (R_a) κυριαρχεί ο μηχανισμός της πρόσφυσης, για υψηλότερες τιμές κυριαρχεί ο μηχανισμός της απόξεσης.

Διάγραμμα 4.5.7

Ο συντελεστής τριβής και ο ρυθμός φθοράς των θερμοπλαστικών εξαρτάται από την επιφανειακή τραχύτητα του ανταγωνιστικού υλικού.



4.6 Χρήσεις πολυμερών και πίνακας ιδιοτήτων

Τα κυριότερα θερμοπλαστικά πολυμερή και χρήσεις τους.

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΜΟΝΟΜΕΡΕΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ-ΧΡΗΣΕΙΣ
Πολυαιθυλένιο, PE Μερικώς κρυσταλλικό	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Σωλήνες, films, φιάλες, κύπελλα, ηλεκτρικές ιονώσεις, συσκευασία.
Πολυπροπυλένιο, PP Μερικώς κρυσταλλικό	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$	Έχει τις ίδιες εφαρμογές με το PE, αλλά είναι ελαφρότερο, σκληρότερο και ανθεκτικότερο στην ηλιακή ακτινοβολία.
Πολυτριφθορο- αιθυλένιο, PTFE Μερικώς κρυσταλλικό	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}$	Ταίλιο: έχει καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλά συντελεστή τριβής. Αντικολλητικές επενδύσεις μηχανών, σφραγίδες, κλπ.
Πολυστυρένιο, PS Αμορφο	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	Φθηνά προϊόντα χύτευσης. Μορφοποιείται και σε αφρώδες πολυμερές για υλικά συσκευασίας.
Χλωριούχο πολυβινύλιο, PVC Αμορφο	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array}$	Πλαίσια παραθύρων. Δίσκοι γραμμοφώνων. Λαμινώσεις δέρματος για ενδύματα, κλπ.
Πολυμεθυλο- μεθυλακρυλικό, PMMA Αμορφο	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{COOCH}_3 \end{array}$	Διαφανή φύλλα και άλλα προϊόντα. Παράθυρα αεροσκαφών, οικιών, κλπ.
Nylon 6,6	$-\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{N}_2\text{O}_2-$	Έχουν άριστη εγχ. πάχητα, καλές μηχανικές ιδιοότητες, διαστασιακή σταθερότητα, χαμηλή διαπερατότητα από αέρια και ατμούς, αργή καύση και αποσβέση. Χρησιμοποιούνται για κατασκευή αντικειμένων ηλεκτρολογικής χρήσεως (διακόπτες, μπρίζες, κλπ), ταπήτων, δικτυωτών ελαστικών, μελανοταινιών, χειρουργικών νημάτων, συνθετικών υφάνοιμων ινών με απεριόριστες εφαρμογές στην υφαντουργία.
Nylon 6	$-\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}-$	
Nylon 610	$-\text{C}_6\text{H}_{13}\text{N}_2\text{O}_2-$	
Nylon 11	$-\text{C}_{11}\text{H}_{21}\text{NO}-$	
Μερικώς κρυσταλλικά, μετά από ιονοποίηση		

Τα κυριότερα θερμοσκληρυνόμενα και οι χρήσεις τους.

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΜΟΝΟΜΕΡΕΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΡΗΣΙΣ
Εποξειδική ρητίνη Αμόρφο	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ -\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2- \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} $	Μημυ συνθέτων υλικών. Συστατικό για κόλλες (Araldite). Είναι ακριβό υλικό.
Πολυεστερικό Αμόρφο	$ \begin{array}{c} \text{O} \qquad \qquad \text{O} \qquad \qquad \text{CH}_2\text{OH} \\ \qquad \qquad \quad \qquad \qquad \\ \text{C}-(\text{CH}_2)_n-\text{C}-\text{O}-\text{C} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{CH}_2\text{OH} \end{array} $	Μορφοποιείται εύκολα Σύνθετα υλικά, κόλλες. Μορφοποιείται εύκολα σε λεπτό φύλλο. Μπορούν να δώσουν αφρώ- δη πολυμερή (πολυουρεθάν- νη). Είναι φθηνότερο της εποξειδικής ρητίνης.
<p>Ο πολυμερισμός φαινόλων και αλδεϊδών δίνει φαινοπλαστικές ή βακελίτες (resoles, πάνω ως κλπ.). Προκει. οι για άμορφα πολυμερή.</p>		<p>Έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (200-300 °C), διαμορφο- σι ικανότητα, κλπ. Χρησιμοποιούνται για κατασκευή δαπέδων αντοχής, για ηλεκτολογικές εφαρμ- γές, για την κατασκευή α- φρώδων πολυμερών και του βασικού υποστρώματος για κοσμητικών φύλλων Formica.</p>
<p>Ο συμπολυμερισμός φορμαλδεϋδης με ουρία ή με μελαμίνη δίνει πολυμερές ουρίας και πολυμερές μελαμίνης, αντίστοιχα. Τα παραγόμενα πολυμερή είναι άμορφα και ανήκουν στην οικογένεια των αμινοπλάστων.</p>		<p>Υστερούν σε μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τους φαινοπλαστικές, α- μως υπερτερούν σε διαμόρ- φοσι ικανότητα. Βρίσκουν ευρύτατη ε- φαρμογή στην κατασκευή ε- πιτοαπειζίων ειδών, την παρα- γωγή συγκολλητικών και υλι- κών προσιωποτεχνικών επικαλι- ψεων. Επικάλυψη φύλλων κο- ντρα-πλάκέ και βακελίτη σε φύλλο αμινοπλάστη ουρίας, παρέχει το διακοσμητικό υλι- κό Formica.</p>

Τα κυριότερα ελαστομερή και οι χρήσεις τους.

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΜΟΝΟΜΕΡΕΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ
Πολυισοπρένιο Αμορφο, με τάση προσανατολισμού σε μεγάλες παραμορφώσεις	$\begin{array}{cccc} & \text{H} & & \text{F} \\ & & & \\ - & \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} & - \\ & & & & & & & \\ & \text{H} & & \text{H} & & \text{CH}_3 & & \text{H} \end{array}$	Φυσικό ελαστικό.
Πόλυβουταδιένιο Αμορφο, με τάση προσανατολισμού σε μεγάλες παραμορφώσεις	$\begin{array}{cccc} & \text{H} & & \text{I} \\ & & & \\ - & \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} & - \\ & & & & & & & \\ & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} \end{array}$	Συνθετικό ελαστικό με εφαρμογές στην αεροκίνητοβιομηχανία.
Πολυχλωροπρένιο Αμορφο, με τάση προσανατολισμού σε μεγάλες παραμορφώσεις	$\begin{array}{cccc} & \text{H} & & \text{H} \\ & & & \\ - & \text{C} & - & \text{C} & = & \text{C} & - & \text{C} & - \\ & & & & & & & \\ & \text{H} & & \text{H} & & \text{Cl} & & \text{F} \end{array}$	Ελαστικό ανθεκτικό σε έλαιο. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή υφραγδών.
Πολυισοβουτυλένιο	$\begin{array}{ccc} & \text{H} & \text{CH}_3 \\ & & \\ - & \text{C} & - & \text{C} & - \\ & & & \\ & \text{H} & & \text{CH}_3 \end{array}$	Χρησιμοποιείται για την κατασκευή σιλήνων, μονωτικών, επιστρωμάτων.
Πολυσιλοξάνια ή σιλικόνες	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{Si} - \text{O} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	Κατασκευή πιπιλιτών και δακτυλίων σε συστήματα κυκλοφορίας θερμού αέρα, στεγανο κλείσιμο θερμών και παραθύρων. Μόνωση ηλεκτρικών καλω- δίων σε πλέρια ως μονω- τικά θερμοαντικων στο- χείων, για την περιθάλ- ψη καλωδίων μειωσρας σχυρών ρευμάτων. κλπ.

Ιδιότητες πολυμερών.

ΠΟΛΥΜΕΡΟΣ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (g.cm ⁻³)	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (20 °C 100s) (GPa)	ΑΝΤΟΧΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ (MPa)	ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΥΑΛΩΔΟΥΣ ΜΕΤΑΠΤΩΣΗΣ, T _g (K)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΑΛΑΚΥΝΣΗΣ, T _s (K)	ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ(MK ⁻¹)
ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ									
Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας, LDPE	0,91-0,94	0,15-0,20	7-17	1-2	270	355	2250	0,35	160-190
Πολυαιθυλένιο ψηλής πυκνότητας, HDPE	0,95-0,98	0,55-1,0	20-37	2-5	300	390	2100	0,52	150-300
Πολυπροπυλένιο, PP	0,91	1,2-1,7	50-70	3,5	253	310	1900	0,20	100-300
Πολυεστερφορ- αιθέλιο, PETE	2,20	0,35	17-28	-	-	395	1050	0,25	70-100
Πολυστυρένιο, PS	1,10	3,0-3,3	35-68	2,0	370	370	1350-1500	0,10-0,15	70-100
Χλωροϋγο πολυβινυλίο, PVC	1,40	2,4-3,0	40-60	2,4	350	370	-	0,15	50-70
Πολυοξυμεθυλέ- νιο, POM	1,41-1,56	3,5-10,5	80-90	1,6	223	400	1460	0,23	80
Nylons	1,15	2,0-3,5	60-110	3-5	340	350-420	1900	0,20-0,25	80-95
ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ									
Εποξειδικές ρητίνες	1,2-1,4	2,1-5,5	40-85	0,6-1,0	380	100-440	1700-2000	0,20-0,50	55-90
Πολυεστερες	1,1-1,4	1,3-4,5	45-85	0,5	340	420-440	1200-2400	0,20-0,24	50-100
Φαινολοεποξυμεθυλενιο	1,27	8	95-55	-	-	370-550	1500-1700	0,12-0,24	26-60
ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ ΠΟΛΥΜΕΡΗ									
Πολυισοπρένιο	0,91	0,002-0,1	≈10	-	220	≈350	≈2500	≈0,15	≈600
Πολυβουταδιένιο	1,50	0,004-0,1	-	-	171	≈350	≈2500	≈0,15	≈600
Πολυκλωροπρένιο	0,94	≈0,01	-	-	200	≈350	≈2500	≈0,15	≈600

ΚΕΡΑΜΙΚΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κεραμικά υλικά είχαν μια μακροχρόνια ιστορία στην ηλεκτρική βιομηχανία λόγω της υψηλής ηλεκτρικής τους αντίστασης, αλλά έχουν επίσης ιδιαίτερη σημασία σε ποικίλες άλλες μηχανολογικές εφαρμογές. Τα περισσότερα από αυτά χρησιμοποιούν τις σημαντικές φυσικές τους ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένου τη δυνατότητά τους να αντιστέκονται στις υψηλές θερμοκρασίες (πυρίμαχες ύλες και πυρίμαχα επιστρώματα), παρέχουν μια πληθώρα ηλεκτρικών ιδιοτήτων (στερεάς κατάστασης ηλεκτρονικά), και αντιστέκονται στη φθορά (επιστρωμένα κοπτικά εργαλεία). Γενικά, τα κεραμικά είναι σκληρά, εύθραυστα, υλικά υψηλής θερμοκρασίας τήξης με χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, χαμηλή μετάδοση θερμότητας, καλή χημική και θερμική ισορροπία, καλή αντίσταση ερπυσμού, υψηλό ελαστικό συντελεστή και δέχονται υψηλές θλιπτικές δυνάμεις. Πρόσφατα, μια οικογένεια δομικών κεραμικών έχει προκύψει, και αυτά τα υλικά τώρα παρέχουν ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες που τα καθιστούν ελκυστικά για διάφορες εφαρμογές που έχουν να κάνουν με αντοχή σε φορτία σε έδρανα.

Παρόλα αυτά, τα κεραμικά έχουν και κάποια μειονεκτήματα όπως την ευθραυστότητα, τη μικρή τους αντίσταση σε εφελκυσμό, την εύκολη διάδοση ρωγμών, τη μικρή τους αντοχή στην κόπωση όπως και στο λυγισμό αλλά και στην κρούση και φυσικά το υψηλό κόστος παραγωγής τους.

Από την άποψη των πωλήσεων του 1993, το γυαλί και τα προϊόντα γυαλιού αποτέλεσαν το 53% της κεραμικής αγοράς. Τα προηγμένα κεραμικά υλικά (που ενσωματώνουν τα δομικά κεραμικά, ηλεκτρικά και μαγνητικά κεραμικά και το οπτικό υλικό των ινών) περιέλαβαν το 20%.

5.2 ΦΥΣΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

Τα κεραμικά υλικά είναι ενώσεις μεταλλικών και μη μεταλλικών στοιχείων (συχνά με τη μορφή οξειδίων, καρβιδίων και νιτριδίων) και υπάρχουν σε μια ευρεία ποικιλία συνθέσεων και μορφών. Τα περισσότερα έχουν κρυστάλλινες δομές, αλλά αντίθετα από τα μέταλλα, τα συνδεδεμένα ηλεκτρόνια είναι συνήθως αιχμάλωτα σε ισχυρούς ιοντικούς ή ομοιοπολικούς δεσμούς. Η απουσία ελεύθερων ηλεκτρονίων κάνει τα κεραμικά υλικά φτωχούς ηλεκτρικούς αγωγούς και οδηγεί σε πολλά που είναι διάφανα στις λεπτές διατομές. Λόγω της δύναμης των αρχικών δεσμών, τα περισσότερα κεραμικά έχουν υψηλές θερμοκρασίες τήξης.

Οι κρυσταλλικές δομές των κεραμικών υλικών μπορούν να είναι αρκετά διαφορετικές από εκείνες που παρατηρούνται στα μέταλλα. Σε πολλά κεραμικά, τα άτομα που διαφέρουν πολύ στο μέγεθος πρέπει να συνοδεύονται από την ίδια δομή (όπως με τον κρύσταλλο χλωριούχου νατρίου του σχήματος 5.2.1).

Σχήμα 5.2.1

Τρισδιάστατη δομή χλωριούχου νατρίου. Παρατηρείστε πως διαφορετικά ιόντα περιτριγυρίζονται από ιόντα αντίθετου φορτίου.



Η ουδετερότητα του φορτίου πρέπει να διατηρηθεί μέσω των ιοντικών δομών. Η ουδετερότητα του φορτίου πρέπει να διατηρηθεί μέσω των ιοντικών δομών. Τα ομοιοπολικά υλικά πρέπει να έχουν δομές με έναν περιορισμένο αριθμό κοντινότερων γειτόνων, που ορίζεται από τον αριθμό των κοινών δεσμών ηλεκτρονίων. Αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες πυκνότητες από εκείνες που παρατηρούνται για τα μεταλλικά υλικά.

Τα κεραμικά μπορούν επίσης να υπάρξουν και σε μορφή αλυσίδας, παρόμοια δηλαδή με τα γραμμικά μόρια των πλαστικών. Όπως και τα πολυμερικά υλικά που έχουν αυτήν τη δομή, οι δεσμοί μεταξύ των αλυσίδων δεν είναι τόσο δυνατοί από

αυτούς μέσα στην αλυσίδα. Έτσι όταν εφαρμόζονται δυνάμεις, επέρχεται σχίσσιμο μεταξύ των αλυσίδων. Σε άλλα κεραμικά τα άτομα συνδέονται με τη μορφή ελασμάτων και παράγουν στρωματώδεις δομές.

Μία μονοκρυσταλλική δομή είναι επίσης πιθανή για τα στερεά κεραμικά. Αυτή η άμορφη κατάσταση αναφέρεται σαν *υαλώδης κατάσταση* και τα υλικά είναι γνωστά σαν *γυαλιά*.

5.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι κύριοι αντιπρόσωποι, η χημική τους σύσταση και χρήση των παραδοσιακών και προηγμένων κεραμικών. Έχουν εξαιρεθεί τα ορυκτά κεραμικά και το τσιμέντο επειδή αφορούν δομικές και όχι μηχανολογικές εφαρμογές.

Πίνακας 5.3.1

Χαρακτηριστικοί αντιπρόσωποι της ομάδας των παραδοσιακών κεραμικών		
ΚΕΡΑΜΙΚΑ	ΤΥΠΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΧΡΗΣΕΙΣ
Πορσελάνη	Αργιλική πρώτη ύλη: ένυδρη αλουμινοπυριτική σκόνη	Ηλεκτρικοί μονωτήρες. Είδη τέχνης, πιατικά και πλακίδια
Μίγμα αγγειοπλαστικής	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ Αναμιγνύεται με άλλα αδρανή υλικά	
Πλίνθοι		Οικοδομικά και πυρίμαχα τούβλα

Πίνακας 5.3.2

Χαρακτηριστικοί αντιπρόσωποι προηγμένων κεραμικών		
ΚΕΡΑΜΙΚΑ	ΤΥΠΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΧΡΗΣΕΙΣ
Αλούμινα μεγάλης πυκνότητας	Al_2O_3	Κοπτικά εργαλεία, παξιμάδια κοχλίων, αντιτριβικές
Καρβίδια και Νιτρίδια του πυριτίου	SiC, Si_3N_4	Επιφάνειες, τριβείς, ιατρικά εμφυτεύματα
Sialons	π.χ. Si_2AlON_3	Εξαρτήματα μηχανών εσωτερικής καύσης και κινητήρων, ενισχύσεις μεταλλικών σωμάτων
Κυβική ζirkονία	$ZrO_2+5\% \text{ wt MgO}$	

ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ

Τα παραδοσιακά κεραμικά κατασκευάζονται από φθηνές πρώτες ύλες, οι οποίες βρίσκονται εύκολα στη φύση, που σε συνδυασμό με την ευκολία κατεργασίας τους, καθιστούν τα παραδοσιακά κεραμικά υλικά ευρείας χρήσης (πίνακας 5.3.3).

Πίνακας 5.3.3

Κατηγορίες εφαρμογών και ειδικές χρήσεις παραδοσιακών κεραμικών	
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΧΡΗΣΕΙΣ
Λειαντικά προϊόντα	Τροχοί λείανσης, ακροφύσια αμμοβολής, λειαντικά χαρτιά
Πήλινα αντικείμενα	Τούβλα, αγγεία, αγωγοί αποχέτευσης
Οικοδομική	Τούβλα, σκυρόδεμα, πλακάκια, γύψος, γυαλί
Υαλουργία	Φιάλες, σκεύη εργαστηρίου, τζάμια
Πυρίμαχα	Τούβλα, χωνευτήρια, καλούπια, τσιμέντο
Πορσελάνη	Πιάτα, πλακάκια, αγωγοί ύδρευσης, επισμαλτώσεις

Είναι υλικά αυξημένου πορώδους, με μικτή δομή, όπου διακρίνεται υαλώδης και κρυσταλλική φάση. Παραλαμβάνονται από μίγμα αργίλου, άμμου και ορυκτών της ομάδας των αργιλοπυριτικών, μετά από έψησή του στους 850-1200 °C.

ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ

Μέχρι την περασμένη δεκαετία η διάκριση μεταξύ παραδοσιακών κεραμικών και τεχνικών κεραμικών ήταν ανύπαρκτη. Ο όρος κεραμικά αναφερόταν κύρια στα είδη εστίασης, υγιεινής, τα πλακίδια, τα τούβλα, κεραμίδια, διακοσμητικά και άλλα παραδοσιακά κεραμικά. Στην πραγματικότητα η εποχή των τεχνικών κεραμικών αρχίζει στη δεκαετία του 1950, με τη μαζική παραγωγή μπουζί από αλούμινα. Η τιτάνια, οι φερρίτες και τα άλατα τιτανίου είναι επίσης από τα πρώτα τεχνικά κεραμικά υλικά που αναπτύχθηκαν για ηλεκτρικές και μαγνητικές εφαρμογές.

Από το 1970 άρχισαν να χρησιμοποιούνται νέα υλικά, όπως βορίδια, νιτρίδια, καρβίδια κυρίως του τιτανίου, του βορίου και του πυριτίου. Ιδιαίτερη σημασία απέκτησαν το SiC και το Si₃N₄, που θεωρούνται ως τα καταλληλότερα για την κατασκευή αεριοστροβίλων και θερμικών μηχανών.

Το 1972, έκανε την εμφάνισή του το SiALON, πρόκειται για οξυνιτρίδιο του πυριτίου και αργιλίου, που εμφανίζει πολύ καλές θερμομηχανικές ιδιότητες.

Από το 1980 τα κεραμικά με βάση τη ζirkόνια (ZrO₂) γνώρισαν μεγάλη ανάπτυξη, λόγω του πολύ μικρού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και της ιδιαίτερης

κρυσταλλικής της δομής, αφού ξεπεράστηκαν τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την κατεργασία τους.

Για την ανάπτυξη υλικών με μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη και θλίψη η προσοχή έχει στραφεί στα σύνθετα υλικά με κεραμική ενίσχυση από κοντές ίνες. Τα υλικά αυτά, εκτός από βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή σε θερμικούς αιφνιδιασμούς.

Πίνακας 5.3.4

Κατηγορίες εφαρμογών και ειδικές χρήσεις προηγμένων κεραμικών	
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΧΡΗΣΕΙΣ
Βιομηχανία αυτοκινήτων και αεροσκαφών	Εξαρτήματα κινητήρων, θερμομονωτικοί χιτώνες και εναλλάκτες, εξαρτήματα ανάστροφης ροής και στεγανότητας
Ηλεκτρονική	Ημιαγωγοί, μονωτές, αγωγοί, lasers, διηλεκτρικά, στοιχεία θέρμανσης, οπτικές ίνες
Υψηλές θερμοκρασίες	Πυρίμαχα, συγκολλημένα εξαρτήματα κλιβάνων
Μηχανολογία και ηλεκτροτεχνία	Κοπτικά εργαλεία, εξαρτήματα ανθεκτικά σε τριβή και διάβρωση, κεραμικά υλικά, μαγνήτες υπεραγωγοί
Ιατρική	Σκεύη εργαστηρίου και ελέγχου, πρόσθετα μέλη οδοντιατρική
Πυρηνική τεχνολογία	Εξαρτήματα ελέγχου καυσίμων

Πίνακας 5.3.5

Είδη προηγμένων κεραμικών	
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ
ΟΞΕΙΔΙΑ	Al_2O_3 , ZrO_2 , UO_2 , πυριτικά γυαλιά
ΚΑΡΒΙΔΙΑ	SiC , B_4C , WC , TiC
ΝΙΤΡΙΔΙΑ	Si_3N_4 , AlN , BN
ΒΟΡΙΔΙΑ	ZrB_2 , TiB_2
ΠΥΡΙΤΙΔΙΑ	$MoSi_2$, $TiSi_2$
ΦΘΟΡΙΔΙΑ	CaF_2 , LiF

Πίνακας 5.3.6

Τιμές χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των κυριότερων τεχνικών κεραμικών				
ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΝΟΟΡ	ΜΕΤΡΟ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
		ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (Gpa)	ΘΛΙΨΗ (Mpa)	ΤΗΞΗΣ/ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ (°C)
Διαμάνι (C)	8000	930	7000	>3500
Νιτρίδιο βορίου (BN)	5000	860	7000	1540
Καρβίδιο βορίου (B ₄ C)	3500	450	2900	2425
Καρβίδιο τιτανίου (TiC)	3100	350	2800	3100
Καρβίδιο πυριτίου (SiC)	3000	400	1000	2400
Καρβίδιο βολφραμίου (WC)	2700	600	5000	2780
Αλούμινα (Al ₂ O ₃)	2100	350	3000	2050
Χαλαζίας (SiO ₂)	1000	54	1200	(-)

5.4 ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Λόγω της ισχυρής διατομικής σύνδεσης και της υψηλής αντίστασης κουράς τους, τα κεραμικά υλικά τείνουν να έχουν τη ολκιμότητα και υψηλή θλιπτική δύναμη. Θεωρητικά, τα κεραμικά θα μπορούσαν επίσης να δεχθούν υψηλά εφελκυστικά φορτία. Λόγω των υψηλών σημείων τήξης και της έλλειψης ολκιμότητας, τα περισσότερα κεραμικά υποβάλλονται σε επεξεργασία στη στερεή κατάσταση και τα προϊόντα γίνονται από το κονιοποιημένα υλικά. Κατά συνέπεια, οι μικρές ρωγμές, οι πόροι, και οι ακαθαρσίες είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα των περισσότερων κεραμικών και ενεργούν ως συμπυκνωτές πίεσης. Όταν τα φορτία εφαρμόζονται, η επίδραση αυτών των ρωγμών δεν μπορεί να μειωθεί μέσω της πλαστικής ροής, και το αποτέλεσμα είναι συχνά ένα εύθραυστο σπάσιμο. Με την εφαρμογή των αρχών των μηχανισμών σπασίματος, διαπιστώνουμε ότι τα κεραμικά είναι ευαίσθητα στις πολύ μικρές ρωγμές. Οι αποτυχίες εμφανίζονται χαρακτηριστικά στα εφελκυστικά φορτία πίεσης μεταξύ 20 έως 210 MPa.

Από τότε που το μέγεθος, ο αριθμός, η μορφή, και η θέση των ρωγμών είναι πιθανό να διαφέρουν από μέρος με μέρος, τα κεραμικά μέρη που παράγονται από το ίδιο υλικό με τις ίδιες μεθόδους συχνά αποτυγχάνουν σε διαφορετικά εφαρμοσμένα φορτία. Κατά συνέπεια οι μηχανικές ιδιότητες των κεραμικών προϊόντων τείνουν να ακολουθήσουν μια στατιστική διάδοση που είναι πολύ λιγότερο προβλέψιμη από ότι για τα μέταλλα. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα τείνει να περιορίσει τη χρήση των κεραμικών στις εφαρμογές κρίσιμης υψηλής αντοχής. Εάν οι διάφορες ρωγμές και ατέλειες θα μπορούσαν να αποβληθούν ή να μειωθούν σε πολύ μικρό βαθμό, οι

υψηλές και συνεχείς εφελκυστικές δυνάμεις θα μπορούσαν να ληφθούν. Η σκληρότητα, η αντοχή και η δύναμη στις υψηλές θερμοκρασίες είναι ελκυστικές ιδιότητες, μαζί με το ελαφρύ βάρος, την υψηλή ακαμψία, τη διαστατική σταθερότητα, τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, την αντίσταση στη διάβρωση και τη χημική αδράνεια. Η αξιοπιστία ίσως είναι ακόμα χαμηλή, εντούτοις η αποτυχία θα εμφανιζόταν ακόμα από μια εύθραυστη ρωγμή με ελάχιστη προγενέστερη προειδοποίηση. Λόγω της φτωχής θερμικής αγωγιμότητας, ο θερμικός κλονισμός μπορεί να είναι ένα πρόβλημα. Το κόστος αυτών των «ελεύθερων από ρωγμές» υλικών είναι μάλλον υψηλό και είναι εξαιρετικά δύσκολο να διαμορφωθούν αξιόπιστοι δεσμοί με άλλα μηχανολογικά υλικά. Επίσης πρέπει να τονίσουμε ότι η μηχανουργική τους κατεργασία είναι αρκετά δύσκολη.

ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΣΑΝ ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

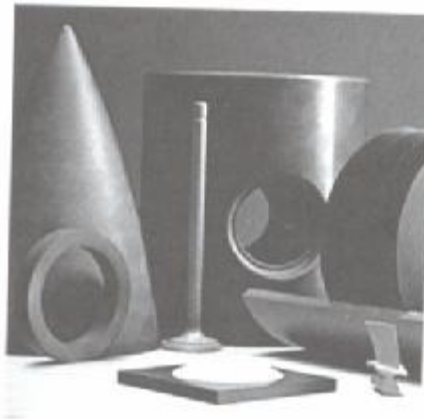
Τα κοπτικά εργαλεία έχουν βελτιωθεί αρκετά με τη χρήση της κεραμικής τεχνολογίας. Το καρβίδιο σιλικόνης είναι ένα πολύ σύνηθες λειαντικό. Το καρβίδιο βολφραμίου με δεσμούς κοβαλτίου (cobalt-bonded tungsten carbide) είναι ένα δημοφιλές υποκατάστατο των εργαλείων κοπής από ταχυχάλυβα.

Πολλά από αυτά ενισχύονται τώρα με επικάλυψη ατμού. Λεπτά στρώματα καρβιδίου τιτανίου, νιτρίδιου τιτανίου και οξειδίου αλουμινίου, μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη φθορά και την τριβή και έτσι να αυξήσουν την ταχύτητα κοπής. Τα εργαλεία κοπής αποτελούμενα από νιτρίδιο σιλοκόνης, κυβικό νιτρίδιο του βορίου και πολυκρυσταλλικό διαμάντι προσφέρουν ακόμα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου, υψηλότερες ταχύτητες κοπής και μειωμένη μηχανουργική εφαρμογή. Το οξείδιο αλουμινίου ενισχυμένο με 35% από «μουςτάκια» καρβιδίου σιλικόνης, μπορεί να κατεργαστεί υπερκράματα βασισμένα στο νικέλιο 10 φορές πιο γρήγορα από τα συνηθισμένα υλικά καρβιδίου. Οι ταχύτητες κοπής μπορούν να αυξηθούν από 3500 κοντά σε 90.000 m/hr (200-5000 ft/min).

ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΚ

Μία κυλινδροκεφαλή κατασκευασμένη από κεραμικά υλικά συνεχίζει να είναι ένα πεδίο συνεχούς ενδιαφέροντος και έρευνας. Αν μπορέσει να κατασκευαστεί θα επιτρέψει μεγαλύτερες θερμοκρασίες λειτουργίας της μηχανής και μεγαλύτερη απόδοση. Επιπλέον θα μείωνε σημαντικά την τριβή. Έχει υπολογιστεί ότι θα εξοικονομούσαν παραπάνω από το 30% του καυσίμου.

Σχήμα 5.4.1



Παρόλα αυτά, σήμερα κατασκευάζονται διάφορα μέρη μηχανών εσωτερικής καύσης από κεραμικά υλικά. Στην παραπάνω φωτογραφία (σχήμα 5.4.1), διακρίνουμε μία βαλβίδα και πιστόνια κατασκευασμένα από κεραμικά υλικά.

ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

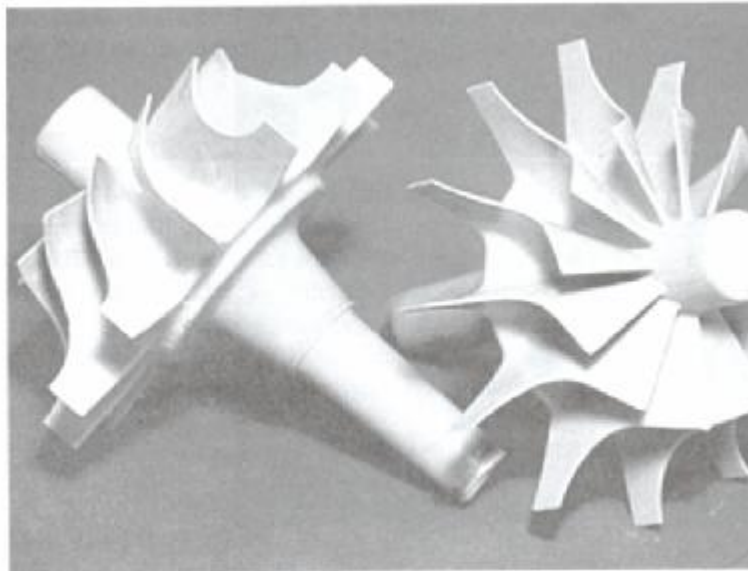
Το υψηλό κόστος των κεραμικών συνεχίζει να είναι εμπόδιο στην ευρεία διάδοση των κεραμικών. Τα «υψηλόβαθμα» κεραμικά είναι περίπου οχτώ φορές πιο ακριβά από τα αντίστοιχα μεταλλικά υλικά και γι' αυτόν το λόγο θα πρέπει να μειωθεί το κόστος. Η έρευνα εστιάζεται στην παραγωγή φθηνών κεραμικών τα οποία θα αντέχουν σε θερμοκρασίες έως 1300 °C και θα είναι ανθεκτικά και σκληρά.

Παράλληλα γίνεται και έρευνα μη καταστροφικής αξιολόγησης, εκεί που οι ροές από 10 έως 50m είναι εύκολα ανιχνεύσιμες. Αν ολοκληρωθεί αυτή η έρευνα, πιθανές εφαρμογές βρίσκουν έδαφος στο πεδίο των στροβιλομηχανών. Αντλίες, υπερτροφοδοτές (turbochargers) καθώς και φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες (αλλά και ΜΕΚ)

θα επωφεληθούν. Στο σχήμα 5.4.2 απεικονίζεται η εικόνα ενός ρότορα κατασκευασμένος από κεραμικά.

Σχήμα 5.4.2

Ρότορας από υπερτροφοδοτή κατασκευασμένος από νιτρίδιο σιλικόνης. Αυτό το ελαφρύ υλικό (έχει το μισό βάρος από ανοξείδωτο χάλυβα) προσφέρει αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς και τέλεια αντίσταση στη διάβρωση.



5.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Ηλεκτρικές ιδιότητες

Η έλλειψη ελευθέρων ηλεκτρονίων καθιστά τα κεραμικά, γενικά, κακούς αγωγούς της θερμότητας και του ηλεκτρισμού. Εδώ ωστόσο, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι:

- Ορισμένα κεραμικά είναι καλοί αγωγοί. Πρόκειται για τα καρβίδια, τα νιτρίδια και τα βαρίδια των στοιχείων: W, V, Nb, Cr, Co.
- Όταν είναι ενεργειακά δυνατή η μεταπήδηση ηλεκτρονίων μεταξύ των διαφορετικών σταθμών ενέργειας, τα κεραμικά εμφανίζουν

ημιαγωγιμότητα (Si, Ge, GaAs, SiC, κλπ).

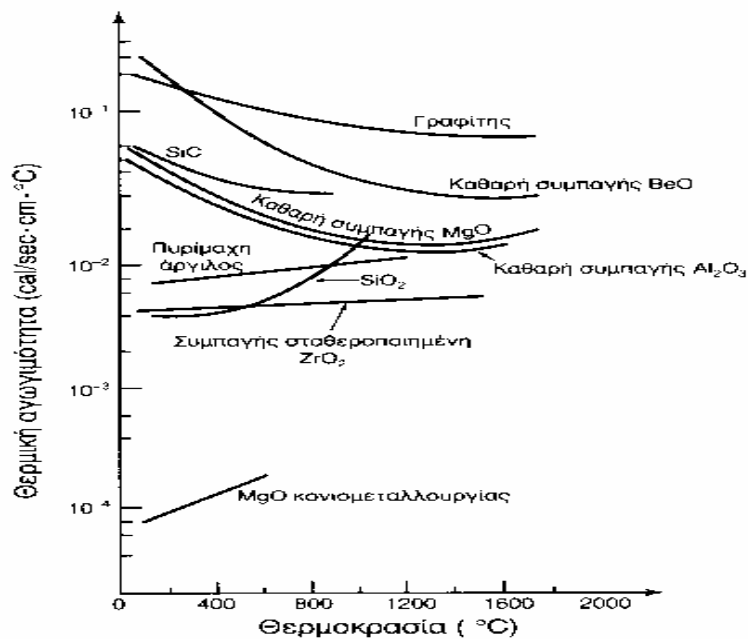
- Ορισμένα κεραμικά έχουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες και χρησιμοποιούνται σε διηλεκτρικά πυκνωτών.
- Ορισμένα κεραμικά έχουν φερροηλεκτρικές ιδιότητες.
- Από τις αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα, ο γραφίτης είναι αγωγός του ηλεκτρισμού, ενώ το διαμάντι μονωτικό υλικό.

Θερμικές ιδιότητες

Οι ιοντικοί και ομοιοπολικοί δεσμοί είναι πολύ ισχυροί και σταθεροί. Έτσι, τα κεραμικά εμφανίζουν υψηλά σημεία τήξης, υψηλότερα αυτών των μετάλλων.

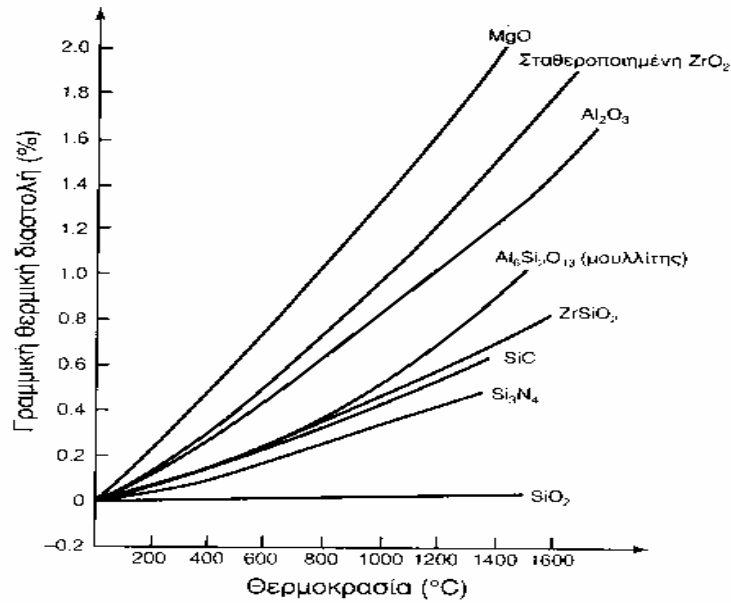
Διάγραμμα 5.5.1

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη θερμική αγωγιμότητα για διάφορα αντικείμενα.



Διάγραμμα 5.5.2

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη γραμμική θερμική διαστολή διαφόρων κεραμικών.



Πίνακας 5.5.1

Συντελεστές θερμικής διαστολής για μερικά ανισότροπα κεραμικά		
ΥΛΙΚΟ	ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΟ c-ΑΞΟΝΑ	ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΟ c-ΑΞΟΝΑ
Γραφίτης	1	27
Αλούμινα	8,3	9
Μουλλίτης	4,5	5,7
TiO ₂	6,8	8,3
ZrSiO ₄	3,7	6,2
Quartz	14	9

Πίνακας 5.5.2

Συντελεστές γραμμικής θερμικής διαστολής κεραμικών, πολυμερών και μετάλλων			
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ (1/°C)			
ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ		ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ	ΜΕΤΑΛΛΩΝ
Al ₂ O ₃	σταθεροπ. SiO ₂	PVC	Fe
8-9x10 ⁻⁶	9-14x10 ⁻⁶	50-180x10 ⁻⁶	11-12x10 ⁻⁶

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Σκληρότητα

Λόγω της ύπαρξης ισχυρών δεσμών, τα κεραμικά έχουν μεγάλη σκληρότητα. Η σκληρότητα των κεραμικών μπορεί να εκφραστεί και συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας (πίνακας 5.5.3). Για τα καθαρά μέταλλα, η ανηγμένη σκληρότητα (H/E) είναι πολύ χαμηλή. Για κράματα μετάλλων η (H/E) παίρνει μεγαλύτερες τιμές (10^{-3} - 10^{-2}), ενώ για τα κεραμικά η (H/E) είναι μεγαλύτερη από όλες.

Πίνακας 5.5.3

Σκληρότητα ανηγμένη ανά μονάδα μέτρου ελαστικότητας (H/E) καθαρών μετάλλων και κεραμικών					
ΚΑΘΑΡΑ ΜΕΤΑΛΛΑ	H/E	ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ	H/E	ΚΕΡΑΜΙΚΑ	H/E
Χαλκός	$1,2 \times 10^{-3}$	Μπρούτζος	9×10^{-3}	Διαμάνι	$1,5 \times 10^{-1}$
αλουμίνιο	$1,5 \times 10^{-3}$	Ντουραλουμίνιο (Al-4%Cu)	$1,5 \times 10^{-2}$	Al ₂ O ₃	4×10^{-2}
Νικέλιο	9×10^{-4}	Ανοξειδωτος χάλυβας	6×10^{-3}	ZrO ₂	6×10^{-2}
Σίδηρος	9×10^{-4}	Ελαφρά κραματωμένος χάλυβας	$1,5 \times 10^{-2}$	SiC	6×10^{-2}
Μέσος όρος μετάλλων	1×10^{-3}	Μέσος όρος κραμάτων	1×10^{-2}	Μέσος όρος κραμάτων	8×10^{-2}

Οι ισχυροί ιοντικοί και ομοιοπολικοί δεσμοί των κεραμικών προσδίδουν στο πλέγμα μεγάλη αντίσταση έναντι της κίνησης των διαταραχών.

Αντοχή των κεραμικών

Όπως θα διαπιστώσουμε από τον πίνακα 5.5.4, τα κεραμικά παρουσιάζουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας και αυξημένη σκληρότητα.

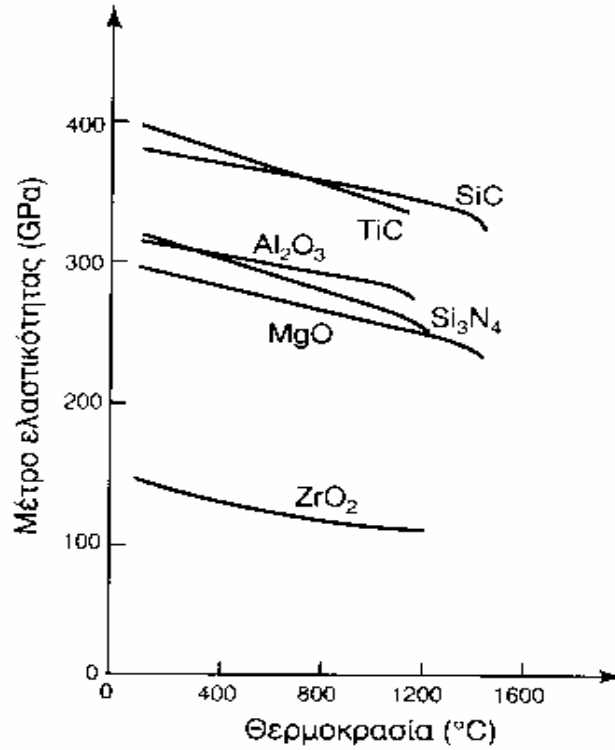
Πίνακας 5.5.4

Ειδικό μέτρο ελαστικότητας ορισμένων μετάλλων και κεραμικών			
ΥΛΙΚΟ	ΜΕΤΡΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΤΡΟ
	ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ		ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
	E (Gpa)	ρ (g.cm ⁻³)	E/ ρ (GPa/g.cm ⁻³)
Χάλυβες	210	7,8	27
Κράματα Al	70	2,7	26
Αλούμινα	390	3,9	100
Πυρίτια	69	2,6	27
Τσιμέντο	45	2,4	19

Το μέτρο ελαστικότητας των κεραμικών είναι υψηλότερο από αυτών των μετάλλων και είναι ανεξάρτητο τού χρόνου φόρτισης (σε αντίθεση με τα πολυμερή).

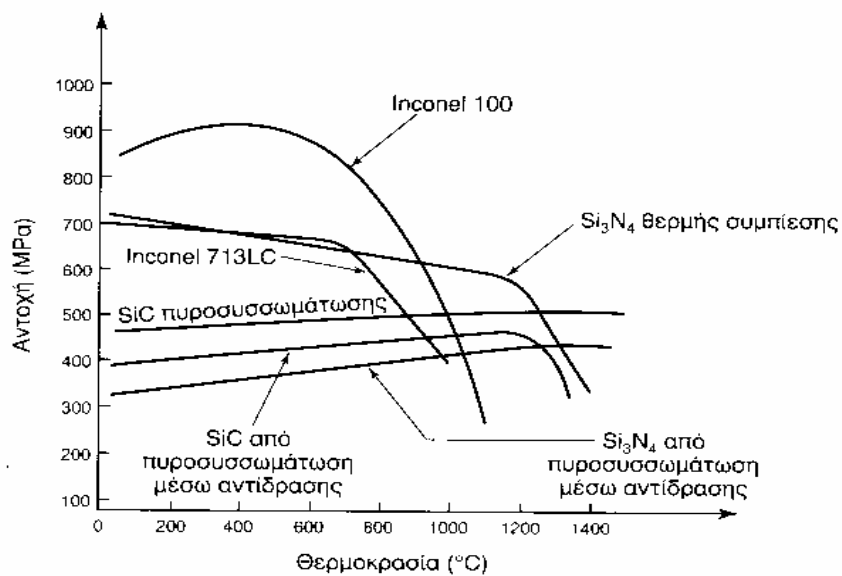
Διάγραμμα 5.5.3

Η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας διάφορων κεραμικών.



Διάγραμμα 5.5.4

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή των κυριότερων κεραμικών και υπερκραμάτων.

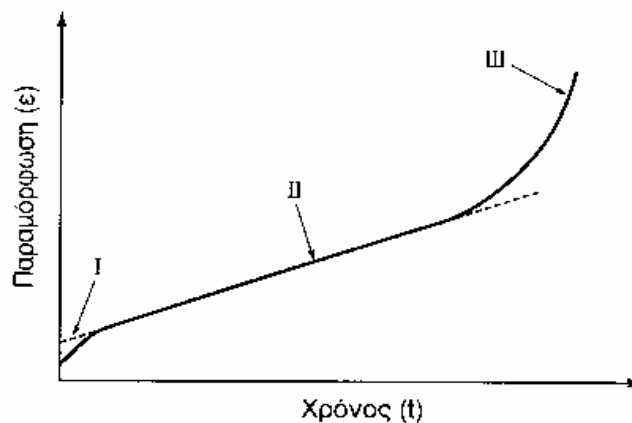


Ερπυσμός κεραμικών

Ο ερπυσμός για τα κεραμικά αποτελεί σημαντική ιδιότητα εξαιτίας της χρήσης τους σε υψηλές θερμοκρασίες, με τη συμπεριφορά τους να είναι όμοια με αυτήν των μετάλλων (διάγραμμα 5.5.5).

Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου του ερπυσμού (I), ο ρυθμός παραμόρφωσης μειώνεται με το χρόνο, τείνοντας να σταθεροποιηθεί (II) σε μια τιμή. Τελικά η ταχύτητα ερπυσμού αυξάνεται στο τρίτο στάδιο του ερπυσμού (III) και μέχρι τη θραύση του υλικού.

Διάγραμμα 5.5.5



5.6 Πίνακες ιδιοτήτων

Πίνακας 5.6.1

Μέσες τιμές θερμοκρασίας τήξης πολυμερών, μετάλλων και κεραμικών, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε μηχανολογικές κατασκευές.

ΠΟΛΥΜΕΡΗ		ΜΕΤΑΛΛΑ & ΚΡΑΜΑΤΑ		ΚΕΡΑΜΙΚΑ	
	Θ.Τ.(°C)		Θ.Τ.(°C)		Θ.Τ.(°C)
Πολυστυρένιο	65-75	Αλουμίνιο	660	Μουλίτης	1850
Πολυαιθυλένιο	120	Υπερκράμα Ni	1300	Αλούμινα	1850
Nylon 6.6	135-150	Υπερκράμα Co	1370	Σπινέλλιος	2135
Πολυαμίδιο	260	Ανοξ. Χάλυβες	1425	WC	2775
PTFE	290	Βολφράμιο	3370	TiC	3100

Ιδιότητες των Κεραμικών

ΚΕΡΑΜΙΚΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	ΜΕΤΡΟ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΑΪΨΗ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΪΨΗ	ΑΝΤΟΧΗ ΘΡΑΨΗ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΑΪΨΗ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΪΨΗ	ΑΝΤΟΧΗ ΘΡΑΨΗ	ΣΗΜΕΙΟ ΤΗ-ΞΗΣ (ΜΑΛΑ-ΚΥΝΗΣΗΣ)	ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΑΙΦΝΙΔΙΑ-ΣΜΟΥΣ (K)
	(g/cm ³)	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa m ^{1/2})	(K)	(MPa)	(MPa m ^{1/2})	(K)	(J/kg K ⁻¹)	(W m ⁻¹ K ⁻¹)	(M K ⁻¹)	(M K ⁻¹)
ΓΥΑΛΙΑ													
Νατρίου	2,48	74	1000	50	0,7	(1000)	990	1	8,5	84			
Βοραιοπυρρτικά	2,23	65	1200	55	0,8	(1100)	800	1	4,0	280			
ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ													
Πορσελάνη	2,3-2,5	70	350	45	1,0	(1400)	800	1	3,0	220			
ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ													
Διαμάντι	3,52	1050	5000	-	-	-	510	70	1,2	1000			
Συμπαγής Al ₂ O ₃	3,9	380	3000	300-400	3-5	2323 (1470)	795	25,6	8,5	150			
SiC	3,2	410	2000	200-500	-	3110 (-)	1422	84	4,3	300			
Si ₃ N ₄	3,2	310	1200	300-850	4	2173 (-)	827	17	3,2	500			
ZrO ₂	5,6	200	2000	200-500	4-12	2843 (-)	870	1,5	8,0	500			
SiAlON	3,2	300	2000	500-830	5	- (-)	710	20-25	3,2	510			

ΣΥΝΘΕΤΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα σύνθετο υλικό είναι ένα ετερογενές υλικό που αποτελείται από δύο ή περισσότερα υλικά που είναι μηχανικά ή μεταλλουργικά δεμένα μεταξύ τους. Κάθε ένα από τα επιμέρους συστατικά διατηρεί τη χαρακτηριστική δομή και ιδιότητες. Υπάρχουν εμφανείς διαφορές μεταξύ των υλικών. Παρόλα αυτά, το σύνθετο υλικό έχει γενικά χαρακτηριστικά όπως το ότι είναι ενισχυμένο, έχει απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες, έχει αντίσταση στη διάβρωση και χαμηλό βάρος. Όλες αυτές τις ιδιότητες δε θα ήταν δυνατόν να τις είχε μόνο το ένα υλικό από μόνο του.

Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από τη συνύπαρξη δύο τουλάχιστον συστατικών, από τα οποία το ένα, χαρακτηριζόμενο ως *συστατικό ενίσχυσης*, προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό, το οποίο καλείται *μήτρα* είναι χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

6.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Τα σύνθετα υλικά χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: 1. Στρωματικά σύνθετα υλικά, 2. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων, 3. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών.

Στρωματικά σύνθετα υλικά

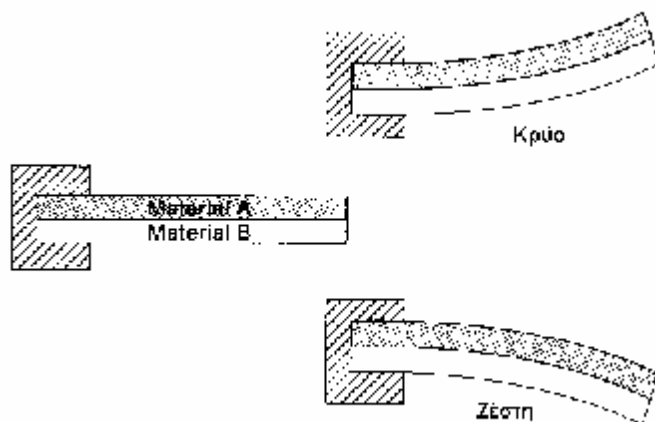
Τα στρωματικά σύνθετα υλικά είναι εκείνα που έχουν τα ευδιάκριτα στρώματα υλικού που συνδέονται μαζί με κάποιο τρόπο και περιλαμβάνουν τα μικρού και μεγάλου πάχους επιστρώματα, τα διμεταλλικά, τα πολυστρωματικά και τα sandwich υλικά. Γενικά η δημιουργία επιστρωμάτων συνιστάται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες είτε η κατασκευή ολόκληρου του από το υλικό ενίσχυσης είναι οικονομικά ασύμφορη, είτε απαιτείται η «καρδιά» της κατασκευής να έχει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες από την επιφάνεια. Η

ενίσχυση που προσφέρει το επίστρωμα αφορά την επιφανειακή ενίσχυση του υλικού και για βελτίωση της αντοχής του υποστρώματος σε διάβρωση, τριβή και φθορά.

Η διμεταλλική λουρίδα αποτελείται από δύο μέταλλα με τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής που συνδέονται μαζί σε ένα φύλλο πλαστικού. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία παράγουν την κάμψη ή την κυρτότητα στο προϊόν, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοστάτες φούρνων και κλιματιστικών αλλά και σε διακόπτες ηλεκτρικού ρεύματος. Το σχήμα 6.2.1 επεξηγεί αυτήν την επίδραση.

Σχήμα 6.2.1

Το υλικό A (Material A) έχει το μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής διαστολής.



Τα πολυστρωματικά είναι υλικά πολλών διαδοχικών στρώσεων. Σχηματίζονται από την επανάληψη ενός στοιχειώδους διστρωματικού υλικού A/B, του οποίου το πάχος είναι καθορισμένο και ονομάζεται περίοδος. Η περίοδος των πολυστρωματικών μπορεί να ποικίλλει από μερικά νανόμετρα ως δέκατα του χιλιοστού.

Όπως συμβαίνει και με τα σύνθετα με ενίσχυση ινών ή σωματιδίων, τα πολυστρωματικά σύνθετα προκύπτουν από το συνδυασμό μετάλλου-κεραμικού, μετάλλου-γυαλιού, μετάλλου-πολυμερούς, αλλά και με το συνδυασμό μετάλλων διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων. Πολύ γνωστά παραδείγματα πολυστρωματικών είναι η φορμάικα, υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην επιπλοποιία και το γυαλί ασφαλείας από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα τζάμια των συγχρόνων αυτοκινήτων.

Δομικό στοιχείο από sandwich υλικό προκύπτει από τη σύνδεση, κόλληση ή συγκόλληση, δύο λεπτών επιδερμίδων υλικού υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων, πάνω σε μία «καρδιά» ή

«ψίχα» ελαφρού υλικού χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων, που καλείται υλικό πλήρωσης και εξασφαλίζει τη διατήρηση της απόστασης μεταξύ των επιδερμίδων.

Το υλικό πλήρωσης είναι είτε κάποιο αφρώδες πολυμερές, συνηθέστερα πολυουρεθάνη, είτε κάποιο ελαφρύ μέταλλο, συνηθέστερα Al, το οποίο είναι διαμορφωμένο σε κυψελοειδή γεωμετρία.

Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων

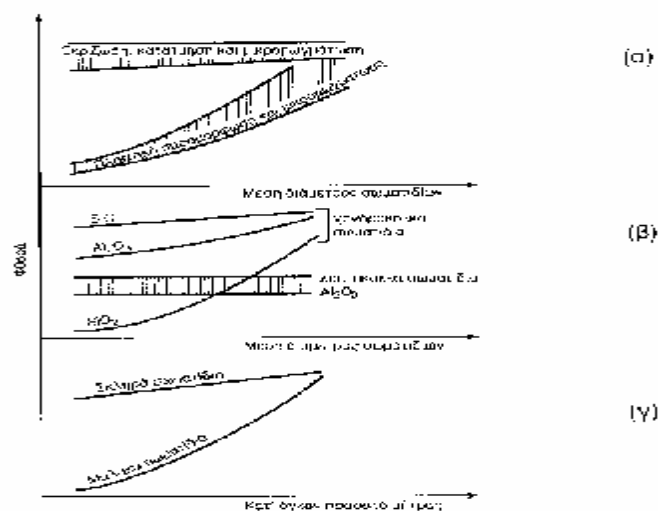
Τα σύνθετα υλικά στα οποία το υλικό ενίσχυσης έχει μορφή σωματιδίων, σφαιρικού συνήθως σχήματος, μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες με βάση το μέγεθος αυτών:

- Σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων μεγάλου μεγέθους.
- Σύνθετα με ενίσχυση μικρών σωματιδίων σε διασπορά.

Γενικά, τα σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων είναι λιγότερο ανθεκτικά από τα σύνθετα με ενίσχυση ινών, διότι η συμβολή των σωματιδίων στην αντοχή του συνθέτου υλικού είναι μικρότερη αυτής των ινών. Είναι χαμηλότερου κόστους σε σχέση με τα σύνθετα με ίνες και έχουν καλύτερη αντοχή σε φθορά-τριβή λόγω της παρουσίας σκληρών σωματιδίων.

Διάγραμμα 6.2.1

Φθορά κατά την τριβή σύνθετων υλικών συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων ενίσχυσης (α και β) και του κατόγκον ποσοστού της μήτρας (γ).



Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών

Ο δημοφιλέστερος τύπος σύνθετου υλικού είναι η *τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών*, όπου οι συνεχείς ή ασυνεχείς λεπτές ίνες ενός υλικού ενσωματώνονται σε μια μήτρα ενός άλλου υλικού. Η μήτρα υποστηρίζει και διαβιβάζει τις δυνάμεις στις ίνες, τις προστατεύει από το περιβάλλον και το χειρισμό, και παρέχει την ολκιμότητα και την ανθεκτικότητα, ενώ οι ίνες φέρνουν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου και μεταδίδουν την ενισχυμένη ακαμψία. Το ξύλο και το μπαμπού είναι δύο φυσικά εμφανιζόμενα σύνθετα ινών. Τα τούβλα από άχυρο και λάσπη μπορεί να ήταν το πρώτο υλικό (κατασκευασμένο από άνθρωπο) αυτής της ποικιλίας, και χρονολογείται από το 800 π.Χ. Τα λάστιχα των αυτοκινήτων χρησιμοποιούν τώρα ίνες νάιλον, Kevlar ή χάλυβα σε διάφορους αριθμούς και προσανατολισμούς για να ενισχύσουν το λάστιχο και να παρέχουν προστιθέμενες δυνάμεις και διάρκεια. Το σκυρόδεμα ενισχυμένο με χάλυβα είναι πραγματικά ένα διπλό σύνθετο, που αποτελείται από μία μήτρα που ενισχύεται με ίνες χάλυβα.

Οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού, είναι το πρώτο από τα μοντέρνα σύνθετα με ίνες, αναπτύχθηκαν αμέσως μετά από τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο σε μια προσπάθεια να παραχθούν ελαφριά υλικά με υψηλή δύναμη και υψηλή ακαμψία. Οι ίνες γυαλιού διαμέτρου περίπου 10 μm, συνδέονται σε μια ποικιλία πολυμερών, γενικά εποξικές ή πολυεστερικές ρητίνες. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, R και S με αυτές του τύπου E να είναι οι πιο χρησιμοποιούμενες. Οι τελευταίες παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες, καλά χαρακτηριστικά διαμόρφωσης, καλή αντοχή στην υγρασία και μέτρια ανθεκτικότητα σε χημικά αντιδραστήρια. Οι υπόλοιπες (τύπου R και S) έχουν κάνει πρόσφατα την εμφάνισή τους και παρόλο που έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, από αυτές του τύπου E, είναι πιο ακριβές.

Οι προσπάθειες να βελτιωθεί η δύναμη και ο συντελεστής εστίασαν στην ανάπτυξη των βελτιωμένων ινών. Οι ίνες βορίου είναι ένα υποσχόμενο υλικό το οποίο αποτελεί ένα εξαιρετικό ενισχυτικό σύνθετων υλικών (οι τεχνικές παραγωγής ινών από βόριο είναι πολύ ακριβές).

Οι ίνες από καρβιδίου του πυριτίου (SiC), που ανήκουν στις κεραμικές ίνες, έχουν έναν ακόμα υψηλότερο συντελεστή της ελαστικότητας. Αυτά τα υψηλής αντοχής-ακαμψίας υλικά αποτυγχάνουν γενικά με έναν ξαφνικό και καταστροφικό τρόπο λόγω της διάδοσης των ρωγμών. Παρόλα αυτά, όταν χρησιμοποιούνται ως ίνες η διάδοση μιας ρωγμής οδηγεί μόνο στην αποτυχία μιας μεμονωμένης ίνας.

Το Kevlar, οι ίνες από Nylon και πολυαιθυλενίου είναι δημοφιλείς ως ενισχυμένες ίνες και ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερικών ινών. Αυτές υπερβαίνουν το πρόβλημα της

χαμηλής στιβαρότητας των συνθετικών πολυμερών με το μέτρο ελαστικότητας τους να είναι ίσο ή υψηλότερο αυτού των ινών γυαλιού.

Ο όρος ανθρακονήματα αναφέρεται στις ίνες άνθρακα. Αυτές προσδίδουν υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση καθώς και χαμηλό συντελεστή γραμμικής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Για την παραγωγή τους χρησιμοποιούνται ίνες του πολυμερούς πολυακρυλονιτρίλιου (PAN) και είναι επίσης γνωστές με τον όρο ίνες τύπου PAN. Όπως και οι ίνες από Kevlar είναι και αυτές αρκετά διαδεδομένες.

Οι τριχίτες παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι συνήθως 1 μm και έχουν λείες εξωτερικές επιφάνειες οι οποίες δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων.

6.3 ΜΗΤΡΕΣ

Όπως προαναφέραμε, οι μήτρες είναι χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή τους στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι μηχανικές τάσεις που ασκούνται στο σύνθετο υλικό μεταφέρονται μέσω της μήτρας προς τις ίνες. Επίσης η διάδοση των ρωγμών που ξεκινούν από σπασμένες ίνες, ανακόπτεται από το υλικό της μήτρας. Οι μήτρες για να ανταπεξέλθουν στο έργο τους θα πρέπει να είναι όλκιμες, ανθεκτικές, εύκαμπτες, με υψηλότερο σημείο τήξης από αυτό της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας του σύνθετου υλικού και να παρουσιάζουν καλή συμβατότητα με τις ίνες.

Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Οργανικές μήτρες
2. Μεταλλικές μήτρες
3. Κεραμικές μήτρες

Οργανικές μήτρες

Αυτές ταξινομούνται στις θερμοπλαστικές και στις θερμοσκληρυνόμενες. Οι πρώτες χρησιμοποιούνται ευρεία και είναι φθηνές με αντιπροσωπευτικά παραδείγματα τις μήτρες από πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Οι θερμοσκληρυνόμενες χρησιμοποιούνται εκεί που απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.

Μεταλλικές και κεραμικές μήτρες

Οι μεταλλικές και κεραμικές μήτρες χρησιμοποιούνται όταν θέλουμε εφαρμογές σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Τα κεραμικά υλικά, ως γνωστό, είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και τη χημική προσβολή, με αποτέλεσμα να αποτελούν υλικά μεγάλου ενδιαφέροντος στην περιοχή των συνθέτων υλικών. Οι ίνες στην περίπτωση κεραμικής μήτρας αποβλέπουν, αφενός μεν, στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς, αφετέρου δε, στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η βελτίωση της αντοχής είναι συνάρτηση του ποσοστού των περιεχομένων ινών. Όλκιμες ίνες, μικρού μήκους (π.χ. Mo, Ni) βελτιώνουν την αντοχή της μήτρας (Al_2O_3 , MgO), ακόμα και σε μικρά κατόγκον ποσοστά. Αντίθετα, για να επιτευχθεί η ίδια ενίσχυση του υλικού, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνταν ψαθυρές ίνες μεγάλου μήκους, το κατόγκον ποσοστό ενισχυτικού θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο.

Το σημαντικότερο πρόβλημα που τίθεται από τη χρήση κεραμικών μήτρων αφορά τη συνάφεια ινών-μήτρας και προέρχεται από τις μεγάλες διαφορές του συντελεστή γραμμικής διαστολής μεταξύ της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών.

Πίνακας 6.3.1

Σύγκριση μεταλλικών-οργανικών μητρών.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none">• Μικρότερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών.• Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μετρου ελαστικότητας του συνθέτου.• Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου.• Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου, για ειδικές εφαρμογές.• Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).	<ul style="list-style-type: none">• Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμότητα και τη θραύση των ινών.• Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής.• Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών SiO_2 σε μήτρα Al).• Ασυνέχεια της καμπύλης σφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας.• Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.

6.4 ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Πίνακας 6.4.1

Παραδείγματα σύνθετων υλικών οργανικής μήτρας.

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Εποξειδική	Kevlar	Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. Βιομηχανία αθλητικών ειδών (ρακέτες tennis, μπάστούνια golf, είδη τοξοβολίας, καλάμια ψαρέματος).
Πολυεστερική	Γραφίτη	Αεροναυπηγική και αυτοκινητοβιομηχανία. Μέρη αεροσκαφών, πλοισαφίων και αυτοκινήτων, μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση. Αθλητικός εξοπλισμός.
Πολυμερική	Γυαλιού	

Πίνακας 6.4.2

Παραδείγματα σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας.

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Al	Borsic	Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.
	Al_2O_3	Εμβόλα μηχανών diesel.
	SiC	Πτερύγια εκτόξευσης βλημάτων.
	Γραφίτη	Ιστοί κεραικών τηλεσκοπίου Hubble.
Κράματα Cu	SiC	Υψηλής αντοχής τροπέλες υκαφών.
Κράματα Ti και W	SiC	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων.
	B_4N	

Πίνακας 6.4.3

Παραδείγματα σύνθετων υλικών κεραμικής μήτρας.

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Ανθρακικά	Ανθρακικά	Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προδιαγραφών (επαρτητή η λειτουργία ως τους 3000 °C). Διωκόφμενα σε αγωνιατικά αυτοκίνητα.
Al ₂ O ₃ , SiC, ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ και κεραμικά γυαλιά	Al ₂ O ₃ , SiC	Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας, συστήματα θερμομόνωσης.

Πίνακας 6.4.4

Παραδείγματα και εφαρμογές των κυριότερων σύνθετων υλικών με ενίσχυση σωματιδίων.

ΜΗΤΡΑ	ΕΝΙΣΧΥΣΗ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Ag	CdO	Ηλεκτρικές επαφές υλικών.
Al	Al ₂ O ₃	Πυρηνικοί αντιδραστήρες.
Be	BeO	Αεροπορικές και πυρηνικές εφαρμογές.
Co	ThO ₂ , Y ₂ O ₃	Μαγνητικά υλικά αντοχής σε ερπυισμό.
Ni-20% Cr	ThO ₂	Μέρη κινητήρων μηχανών.
Pb	PbO	Πλέγματα μπαταριών.
Pt	ThO ₂	Νήματα, μέρη ηλεκτρικών συσκευών.
W	ThO ₂ , ZrO ₂	Νήματα, θερμαντικά σώματα.
Co	WC	Αντιτριβικές εφαρμογές, κοπτικά εργαλεία

Πίνακας 6.4.5**Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.**

Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού				
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	R	S	SiO ₂ καθαρή
ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ (%)				
SiO ₂	54	60	65	>99,5
Al ₂ O ₃	16	25	25	(-)
B ₂ O ₃	8	(-)	(-)	(-)
CaO	17	9	(-)	(-)
MgO	5	6	10	(-)
Μέτρο ελαστικότητας (Gra)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (Mpa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2,54	2,5	2,48	2,2
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

Πίνακας 6.4.6**Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα.**

Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα		
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ
	ΑΝΤΟΧΗΣ	ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο ελαστικότητας (Gra)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (Mpa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

Πίνακας 6.4.7**Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar.**

Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar		
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (Gra)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (Mpa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4,5	2
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,45	1,45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200
θερμοκρασία αστοχίας (°C)	400	425

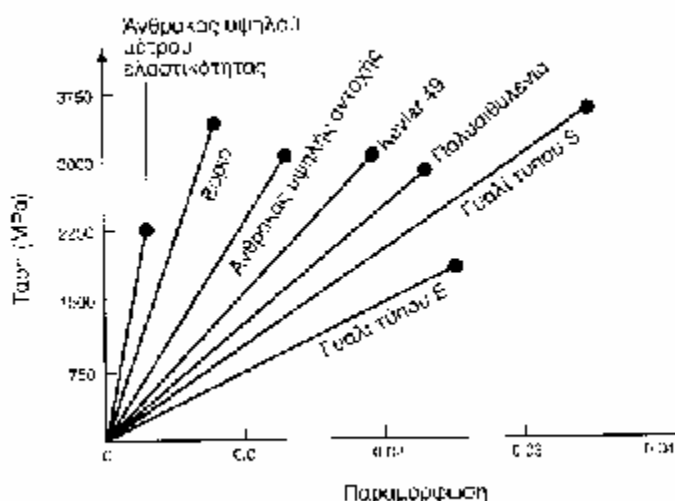
Πίνακας 6.4.8

Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών και τριχιτών από SiC και Al₂O₃.

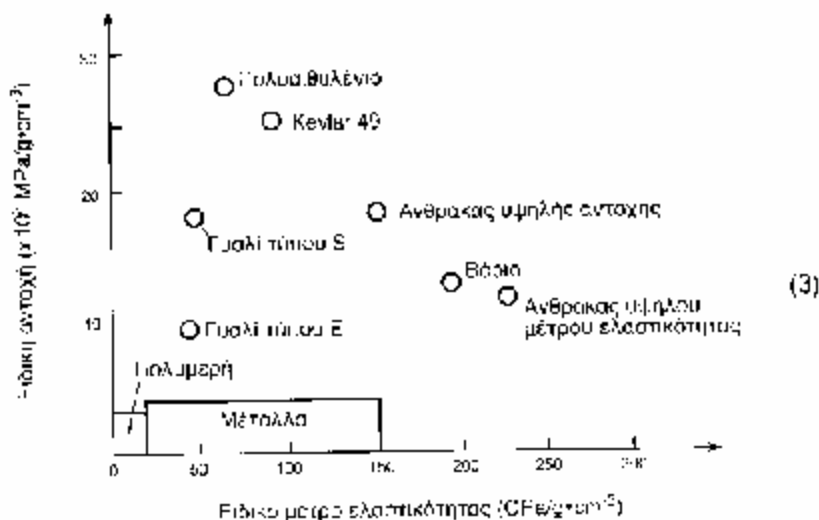
ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiC _{ΙΝΑ}	SiC _{ΤΡΙΧΙΤΗΣ}	Al ₂ O ₃ ΙΝΑ	Al ₂ O ₃ ΤΡΙΧΙΤΗΣ
Μέτρο ελαστικότητας (Gra)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (Μρα)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (g/cm ³)	3,2	3,2	4	4
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	900	1600	800	1300

Διάγραμμα 6.4.1

Σύγκριση διαφόρων ινών ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες.

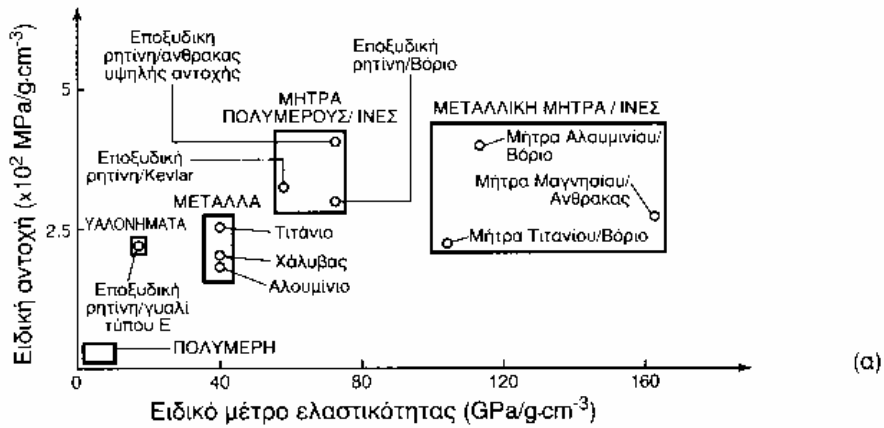


Διάγραμμα 6.4.2



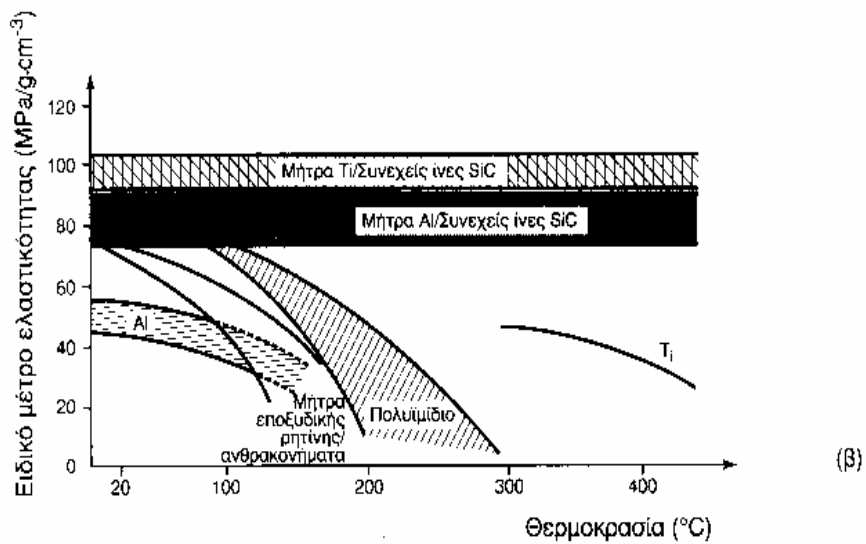
Διάγραμμα 6.4.3

Περιοχές ειδικής αντοχής και ειδικού μέτρου ελαστικότητας για διάφορα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών.



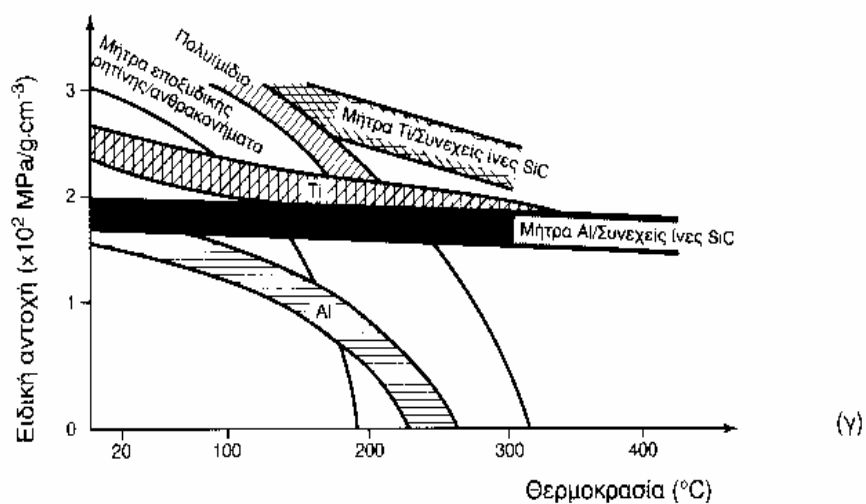
Διάγραμμα 6.4.4

Γραφική αναπαράσταση της μείωσης του ειδικού έργου με την αύξηση της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 6.4.5

Γραφική αναπαράσταση της μείωσης της ειδικής αντοχής με την αύξηση της θερμοκρασίας.



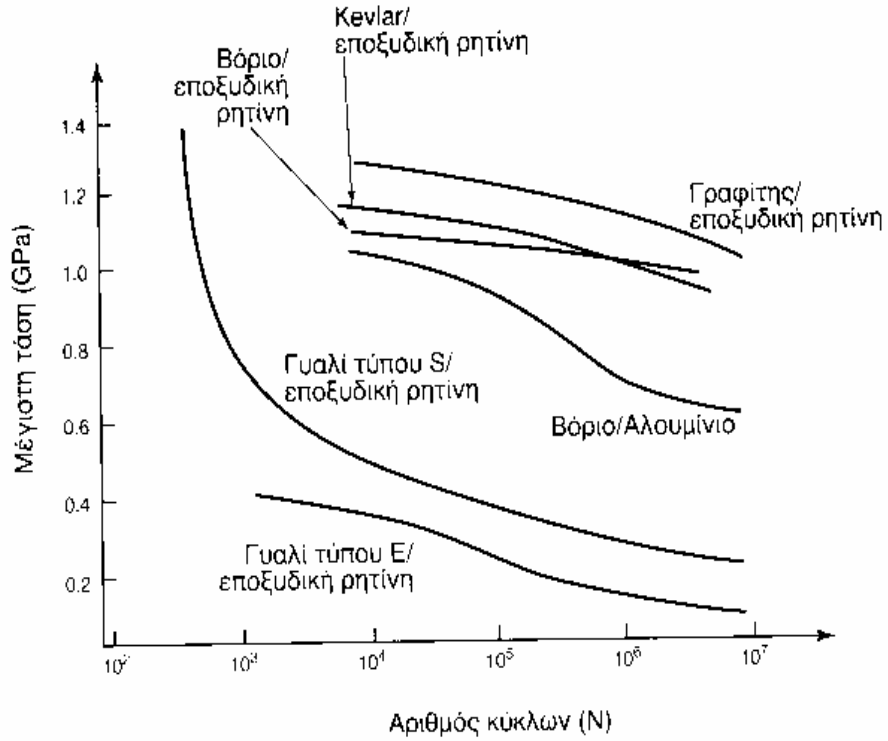
Πίνακας 6.4.9

Αύξηση της δυσθραυστότητας κεραμικής μήτρας σύνθετων υλικών με την αύξηση του ποσοστού των περιεχόμενων τριχίτων SiC.

ΜΗΤΡΑ	ΤΡΙΧΙΤΕΣ SiC(% κ.ο.)	ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ (MPa.m ^{-1/2})
Si ₃ N ₄	0	5-7
	10	6,5-9,5
	30	7,5-10
Al ₂ O ₃	0	4,5
	10	7,1
	20	7,5-9,0

Διάγραμμα 6.4.6

Αντοχή σε κυκλική κόπωση διάφορων σύνθετων υλικών.



ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το εύρος της επιλογής από τη μια αποτελεί ένα πλεονέκτημα για τον τελικό χρήστη – καταναλωτή, από την άλλη όμως δημιουργεί και σύγχυση, που συχνά οδηγεί ως κριτήριο επιλογής να εξετάζεται μόνο το τελικό κόστος αδιαφορώντας για τις ιδιότητες του κάθε υλικού. Γι' αυτό δεν είναι σπάνιο το φαινόμενο να επιλέγεται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή το «λάθος» υλικό. Η έννοια του «λάθους» εδώ προσδιορίζεται ως ακαταλληλότητα με βάση τις παραμέτρους που καθορίζουν τις οποιεσδήποτε απαιτήσεις μπορεί να έχει ο χρήστης, την αισθητική και την λειτουργικότητα του τελικού προϊόντος σε βάθος χρόνου. Δεν μπορεί να υποστηριχθεί ότι το ένα υλικό είναι καλύτερο ή χειρότερο από το άλλο. Το υλικό από τον τελικό χρήστη κρίνεται από πολλές παραμέτρους όπως για παράδειγμα, τις προδιαγραφές του έργου (ή του κομματιού), τις απαιτήσεις του πελάτη, τον κατασκευαστή που θα αναλάβει το έργο (ή το κομμάτι), το συνεργείο τοποθέτησης, με βάση οικονομικά κριτήρια κ.λπ.

Η μόνη σύγκριση που μπορούμε να κάνουμε εκ του ασφαλούς είναι η σύγκριση των ιδιοτήτων του κάθε υλικού.

7.2 ΠΛΑΣΤΙΚΑ

Τα πολυμερή υλικά τώρα συναγωνίζονται τα παραδοσιακά υλικά μέσα σε ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων. Τα πλαστικά έχουν κατακτήσει πάνω από το 20% της αγοράς γυαλιού. Οι σωλήνες από PVC έχουν αντικαταστήσει τον χαλκό και τον ορείχαλκο σε έναν μεγάλο αριθμό υδραυλικών εφαρμογών. Τα πλαστικά έχουν ακόμα αντικαταστήσει τα κεραμικά σε μέρη όπως σωληνώσεις υπονόμων και τουαλέτων.

Καθώς τα πλαστικά και τα μέταλλα συχνά αντιμετωπίζονται σαν ανταγωνιστικά υλικά, οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι συχνά διαφορετικές. Πολλά από τα ελκυστικά χαρακτηριστικά των πλαστικών έχουν ήδη συζητηθεί. Θα πρέπει να τονιστεί ότι το

μεγαλύτερο κόστος των πλαστικών υλικών αντισταθμίζεται από την ικανότητά τους να κατασκευάζονται φθηνότερα.

Τα μέταλλα από την άλλη μεριά, είναι συχνά φθηνότερα και προσφέρουν γρηγορότερες ταχύτητες επεξεργασίας και μεγαλύτερες κρουστικές αντιστάσεις. Είναι πιο δυνατά και πιο δύσκαμπτα και επιδέχονται βελτιώσεις θερμικής βαφής. Επιπλέον η αντίσταση στις φλόγες, στα οξέα και σε διάφορες άλλες μεταβλητές είναι καλύτερη. Ο πίνακας 7.2.1 συγκρίνει το κόστος ανά λίβρα και το όριο ελαστικότητας πέντε μηχανολογικών πλαστικών με το ξύλο, ατσάλι και αλουμίνιο.

Πίνακας 7.2.1

Υλικό	Συντελεστής ($\times 10^6$ psi)	\$/lb	\$/in ³
Αλουμίνιο	10.0	0.85	0.086
Ατσάλι	30.0	0.27	0.077
Ξύλο	1.8	0.36	0.0078
Glass/epoxy	3.0	0.92	0.066
Nylon	0.1	1.85	0.076
Polycarbonate	0.35	1.85	0.080
Polypropylene	0.2	0.57	0.018
Polystyrene	0.3	0.57	0.022

Οι τιμές κόστους είναι με στοιχεία του 1984

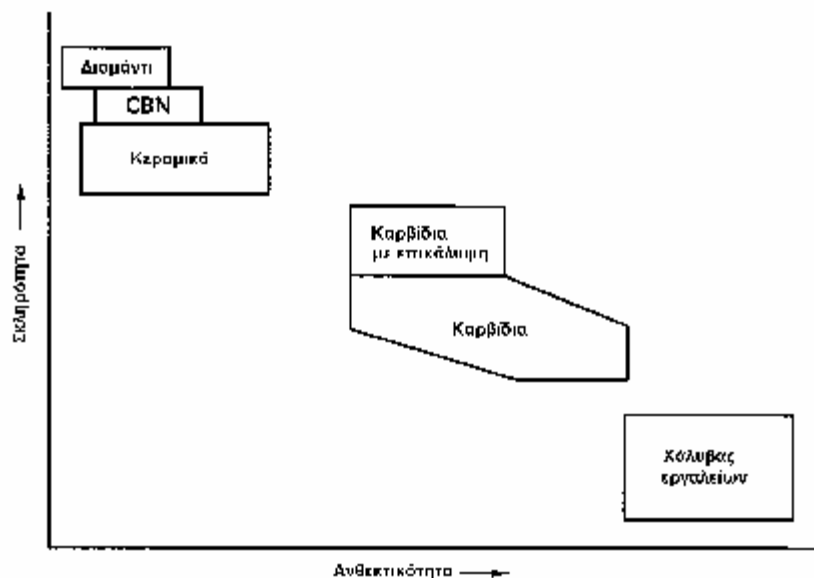
Το κόστος ανά κυβική ίντσα θα αποτελεί μια πιο χρήσιμη σύγκριση όταν τα μεγέθη είναι στάνταρ.

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες είναι ένα καλό παράδειγμα της ολοένα αυξημένης χρήσης των πλαστικών. Τα πολυμερή υλικά υπολογίστηκαν 243lb σε ένα τυπικό όχημα το 1992, ενώ το 1980 ήταν μόλις 195lb σε ένα βαρύτερο όχημα. Τώρα τα πλαστικά δε χρησιμοποιούνται μόνο στο εσωτερικό των οχημάτων αλλά και στο ντεπόζιτο καυσίμων, στους σωλήνες καυσίμων στις βαλβίδες και σε διάφορα άλλα εξαρτήματα.

7.3 ΚΕΡΑΜΙΚΑ

Όπως ήδη έχουμε πει στο κεφάλαιο 5, τα κεραμικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως: κοπτικά εργαλεία, σε εφαρμογές MEK και σε εφαρμογές στροβιλομηχανών. Χαρακτηριστικό είναι το διάγραμμα (διάγραμμα 7.3.1) της σκληρότητας (υπό αυξημένη θερμοκρασία) συναρτήσει της ανθεκτικότητας.

Διάγραμμα 7.3.1



Το διάγραμμα 7.3.1 δείχνει την ανωτερότητα των κεραμικών σε σχέση με τα άλλα υλικά για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων. Γι' αυτόν τον λόγο τα κεραμικά κοπτικά χρησιμοποιούνται σχεδόν εξολοκλήρου στα κοπτικά των CNC μηχανών. Παρόλα αυτά, τα κεραμικά θεωρούνται αρκετά ακριβά υλικά και η χρήση τους γίνεται όταν ο παράγοντας κόστος δε θεωρείται αμελητέος ή όταν επιβάλλονται από τις καταστάσεις.

7.4 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ

Υπάρχουν τέσσερεις βασικοί τύποι προηγμένων κεραμικών όπου το υλικό μήτρας ταιριάζει στην ίνα και στην εφαρμογή.

1) Τα προηγμένα οργανικά ή μήτρας-ρητίνης σύνθετα συχνά χρησιμοποιούν υψηλές δυνάμεις, υψηλούς συντελεστές ινών γραφίτη, Kevlar ή βορίου. Οι ιδιότητες μπορούν να οριστούν στα επιθυμητά ζητούμενα καθώς το υλικό παράλληλα θα ζυγίζει το μισό βάρος από το αντίστοιχο σε αλουμίνιο. Οι θερμικές διαστολές μπορούν να σχεδιαστούν να είναι μικρές ή ακόμη και αρνητικές. Δυστυχώς αυτά τα υλικά έχουν μια μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 315 °C (600 °F) η πολυμερική μήτρα αποδυναμώνεται όταν θερμαίνεται. Ο πίνακας 7.4.1 συγκρίνει τις ιδιότητες μερικών κοινών μήτρας-ρητίνης σύνθετων με μερικά ελαφριά μέταλλα χαμηλής θερμικής διαστολής.

Πίνακας 7.4.1

Υλικό	Ειδική ^a δύναμη (10 ⁶ in.)	Ειδική ^b θερμική διαστολή (10 ⁶ in.)	Πυκνότητα (lb/in ³)	Συντελεστής θερμικής διαστολής [in./in.-°F]	Θερμική αγωγιμότητα [Btu/(hr-ft-°F)]
Bacul-epoxy	3.3	457	0.07	2.2	1.1
Glass-epoxy (woven cloth)	0.7	15	0.065	6	0.1
Graphite-epoxy: high modulus (unidirectional)	2.1	700	0.063	-0.5	75
Graphite-epoxy: high strength (unidirectional)	5.4	400	0.056	-0.7	3
Kevlar-epoxy (woven cloth)	1	80	0.5	3	0.5
Αλουμίνιο	0.7	100	0.10	13	100
Beryllium	1.1	700	0.09	7.5	120
Iron ^c	0.2	70	0.29	1	6
Titάνιο	0.8	100	0.16	5	4

^a Δύναμη διαφερέμενη από την πυκνότητα

^b Τα μέτρα ελαστικότητας διαφερέμενα από την πυκνότητα

^c Μέταλλο που περιέχει 36% Ni και 6% Fe

Οι χαρακτηριστικές εφαρμογές περιλαμβάνουν αθλητικό εξοπλισμό (ρακέτες τένις, σκι, λέσυχες γκολφ, και καλάμια ψαρέματος), ελαφριά θωράκιση και πολλές χαμηλής θερμοκρασίας αεροδιαστημικές εφαρμογές.

2) Τα σύνθετα μέταλλο-μήτρας (MMCs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις θερμοκρασίες λειτουργίας μέχρι 1250°C (2300°F), όπου οι συνθήκες απαιτούν υψηλή δύναμη που συνδέεται με την ολκιμότητα ανθεκτικότητα. Το όλκιμο υλικό μήτρας μπορεί να είναι αργίλιο, χαλκός, μαγνήσιο, τιτάνιο, νικέλιο, υπερκράμα, ή ακόμα και μεσομεταλλική ένωση, και οι ίνες μπορούν να είναι από γραφίτη, καρβίδιο βορίου,

αλουμίνα ή καρβίδιο του πυριτίου. Λεπτά καρβιδίου του πυριτίου, και νιτριδίου του πυριτίου έχει χρησιμοποιηθεί επίσης ως ενίσχυση όπως και τα καλώδια τιτανίου, βολφραμίου, μολυβδαίνιου, βηρυλλίου, και ανοξειδωτου χάλυβα.

Έναντι των μετάλλων εφαρμοσμένης μηχανικής, αυτά τα σύνθετα προσφέρουν την υψηλότερη ακαμψία και δύναμη (ειδικά στις υψηλές θερμοκρασίες), έναν χαμηλότερο συντελεστή της θερμικής διαστολής και της ενισχυμένη αντίσταση στην κόπωση, στο γδάρισμα, και στην φθορά. Έναντι υλικά οργανικής μήτρας, προσφέρουν την υψηλότερη αντίσταση θερμότητας καθώς επίσης και τη βελτιωμένη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Είναι άφλεκτοι και δεν απορροφούν το νερό ή τα αέρια. Δυστυχώς, αυτά τα υλικά είναι αρκετά ακριβά, οι απέραντα διαφορετικές θερμικές διαστολές των συστατικών μπορούν να οδηγήσουν σε σπάσιμο των δεσμών με αποτέλεσμα τη γαλβανική διάβρωση.

Το αλουμίνιο ενισχυμένο με γραφίτη μπορεί να σχεδιαστεί για να έχει θερμική διαστολή κοντά στο μηδέν στην κατεύθυνση των ινών. Το αλουμίνιο ενισχυμένο με οξειδίο αλουμινίου έχει χρησιμοποιηθεί στις αυτοκινητοβιομηχανίες συνδέοντας ράβδους για να παρέχει την ακαμψία και την αντίσταση κόπωσης με παράλληλα μικρό βάρος. Το αλουμίνιο που ενισχύεται με μουςτάκια καρβιδίου σιλικόνης χρησιμοποιείται στα φτερά αεροσκαφών, εξοικονομώντας το 20 με 40% του βάρους. Στο μέλλον τα ενισχυμένα με ίνες υπερκράματα μπορούν να γίνουν ένα προτιμημένο υλικό για τις εφαρμογές όπως οι λεπίδες στροβίλων.

3) Τα σύνθετα άνθρακα-άνθρακα (από γραφίτη ίνες σε μια μήτρα άνθρακα) προσφέρουν την πιθανότητα ενός ανθεκτικού υλικού στη θερμότητα που θα μπορούσε να λειτουργήσει στις θερμοκρασίες μέχρι 3300°C (6000°F), με μια δύναμη που είναι 20 φορές πιο μεγάλη από αυτή του συμβατικού γραφίτη και μιας πυκνότητας που είναι 30% ελαφρύτερη. Όχι μόνο αυτό το υλικό αντιστέκεται στις υψηλές θερμοκρασίες, αλλά γίνεται στην πραγματικότητα ισχυρότερο όταν θερμαίνεται. Για τις θερμοκρασίες άνω των 540°C (1000 °F) το σύνθετο απαιτεί κάποια μορφή επιστρώματος για να το προστατεύσει από την οξειδωση. Τα διάφορα επιστρώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις διαφορετικές σειρές θερμοκρασίας. Οι τρέχουσες εφαρμογές περιλαμβάνουν: κώνος μύτης και η αιχμή του διαστημικού οχήματος, αγωνιστικά φρένα δίσκων αυτοκινήτων (που γίνονται ισχυρότερα όταν είναι καυτότερα), αεροδιαστημικοί στρόβιλοι και αεριωθούμενα τμήματα, ακροφύσια πυραύλων και χειρουργικά μοσχεύματα.

4) Τα σύνθετα κεραμικό-μήτρα (CMCs) προσφέρουν το ελαφρύ υψηλής θερμοκρασίας δύναμη και την καλή διαστατική και περιβαλλοντική σταθερότητα. Η μήτρα παρέχει την αντίσταση στη θερμοκρασία. Οι μήτρες γυαλιού μπορούν να λειτουργήσουν στις θερμοκρασίες τόσο υψηλές όσο 1500°C (2700 °F). Τα κρυσταλλικά κεραμικά, συνήθως βασισμένα στην αλουμίνα, καρβίδιο σιλικόνης, νιτρίδιο σιλικόνης, νιτρίδιο βορίου, ή ζirkονία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ακόμα καυτότερες συνθήκες. Οι ίνες προσθέτουν την κατευθυντική δύναμη, αυξάνουν την ανθεκτικότητα του σπασίματος και βελτιώνουν τη θερμική αντίσταση. Οι χαρακτηριστικές ενισχύσεις περιλαμβάνουν την ίνα άνθρακα, την ίνα γυαλιού, τις ίνες των διάφορων υλικών μήτρας και τα κεραμικά μουςτάκια. Ένα υλικό νιτρίδιου σιλικόνης ενισχυμένο με ίνες μουςτακιών καρβιδίου του σιλικόνης έχει 40% περισσότερη αντίσταση σε εσωτερικό ράγισμα και 25% περισσότερη αντίσταση στο πλήρες σπάσιμο από το μη ενισχυμένο με ίνες νιτρίδιο σιλικόνης.

ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ

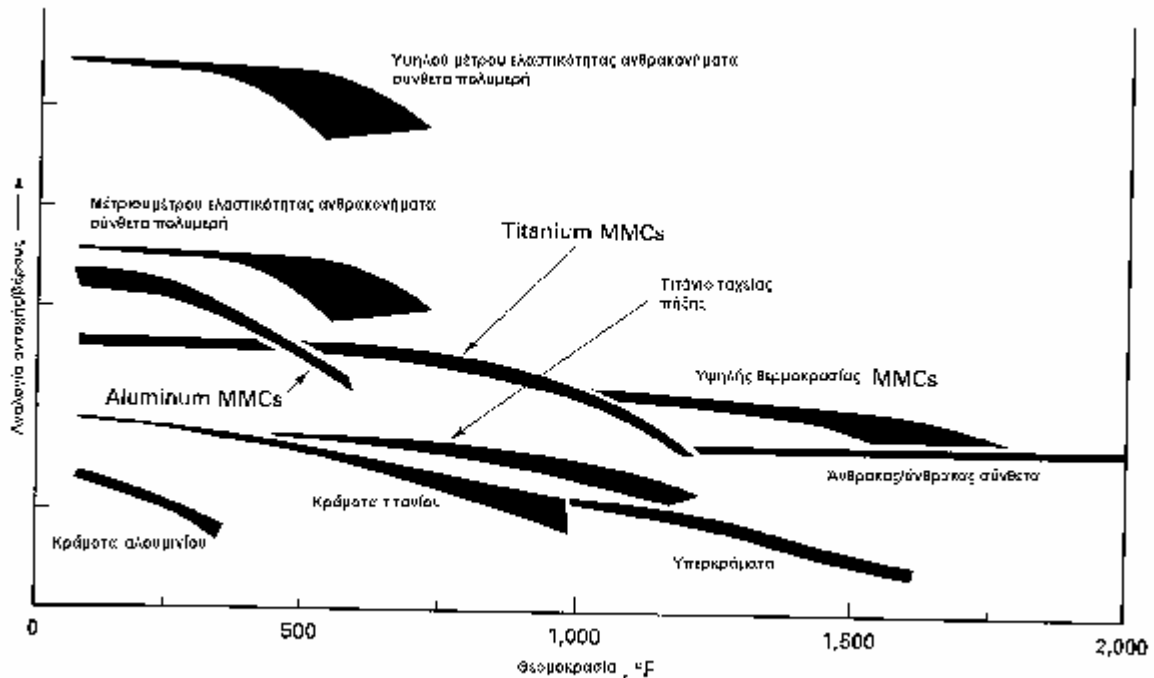
Τα υβριδικά σύνθετα περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερους τύπους ινών σε μια κοινή μήτρα. Ο συνδυασμός των ινών επιλέγεται συνήθως για να εξισορροπήσει τη δύναμη και την ακαμψία, τη διαστατική σταθερότητα, να μειώσει το κόστος, να μειώσει το βάρος, ή να βελτιώσει την κόπωση και την αστοχία.

ΠΡΟΤΕΡΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Το σχήμα 7.4.2 παρουσιάζει τις αναλογίες δύναμη προς βάρος των διάφορων αεροδιαστημικών υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η ανωτερότητα των διάφορων προηγμένων σύνθετων από τα διαστημικά μέταλλα είναι σαφώς εμφανής. Το βάρος μιας από σύνθετου εποξικού γραφίτη Ι-ακτίνας είναι λιγότερο από ένα πέμπτο του χάλυβα, ένα τρίτο αυτό του τιτανίου, και μισό από αυτό του αργιλίου. Η εφελκυστική τάση είναι ίση με ή υπερβαίνει αυτής των άλλων τριών υλικών, και κατέχει μια σχεδόν άπειρη περίοδο κόπωσης. Οι μέγιστοι περιορισμοί στη χρήση αυτού και άλλων σύνθετων είναι η σχετική εφθραυστότητα και το υψηλό κόστος τους. Οι από γραφίτη ίνες, που κοστίζουν μεταξύ \$400 και \$500 ανά λίβρα προς το τέλος της δεκαετίας του '60, είναι τώρα διαθέσιμες για περίπου \$10 ανά λίβρα, αλλά ακόμη και εκείνο το κόστος είναι αρκετά υψηλότερο από το κόστος πολλών εναλλακτικών υλικών. Τα σύνθετα μέταλλο-μήτρα κοστίζουν τώρα μεταξύ \$10 και \$200 ανά λίβρα. Τα σύνθετα κεραμικό- μήτρα

κυμαίνονται από \$20 ανά λίβρα ως πάνω από \$1000 ανά λίβρα για ειδικά διαστημικά υλικά.

Σχήμα 7.4.2



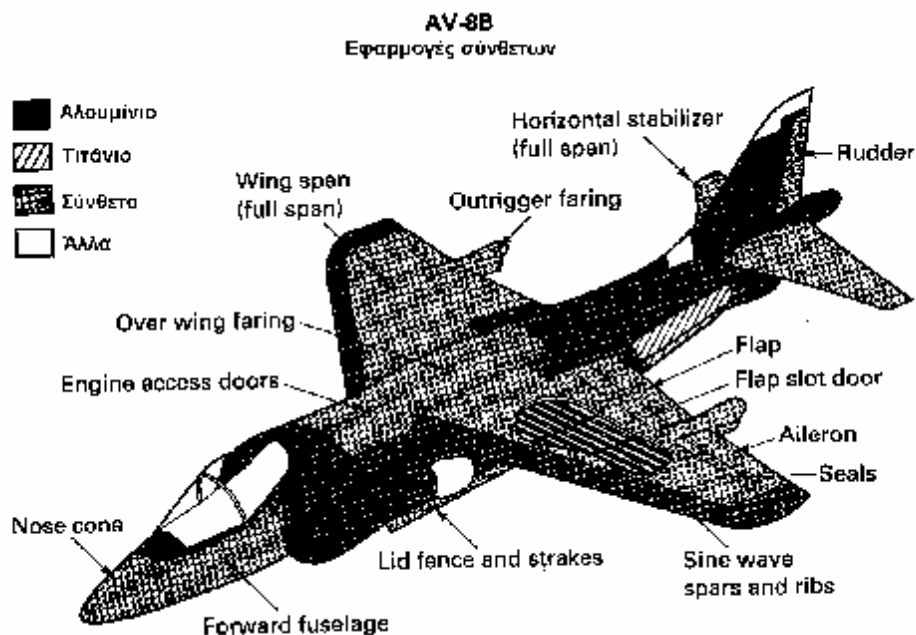
Ενώ ο τομέας έχει ωριμάσει, η κατασκευή με σύνθετα υλικά είναι ακόμα αρκετά εξειδικευμένη και υπάρχει ακόμα έλλειψη εκπαιδευμένων σχεδιαστών, καθορισμένων οδηγιών σχεδίου και στοιχείων, πληροφορίες για τις δαπάνες επεξεργασίας, και τις καλά ανεπτυγμένες μεθόδους ποιοτικού ελέγχου και επιθεώρησης. Υπάρχει συχνά κάποια ανησυχία για την αντίσταση θερμότητας και πολλά σύνθετα με τις πολυμερείς μήτρες είναι ευαίσθητα στην υγρασία, στα οξέα, στα χλωρίδια, στους οργανικούς διαλύτες, στα πετρέλαια, και στην υπεριώδη ακτινοβολία. Επιπλέον, τα περισσότερα σύνθετα έχουν περιορίσει τη δυνατότητα να επισκευάζονται, εμποδίζοντας τις διαδικασίες συντήρησης να καθιερωθούν σωστά και η ανακύκλωση είναι εξαιρετικά δύσκολη.

Παρόλα αυτά η διάθεση ενός υλικού το οποίο είναι ανθεκτικό κατά της διάβρωσης και η ακαμψία του είναι μεγαλύτερη του χάλυβα στο μόλις 1/5 του βάρους του, μπορεί να φέρει ορισμένους συμβιβασμούς.

ΤΟΜΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Πολλά σύνθετα υλικά είναι δυνατότερα από τον χάλυβα, ελαφρύτερα από το αλουμίνιο και πιο άκαμπτα από το τιτάνιο. Προσφέρουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, καλή αντίσταση στη θερμότητα, υψηλή αντοχή στην κόπωση, χαμηλούς βαθμούς διάβρωσης και αντίσταση στη φθορά. Για αυτούς τους λόγους έχουν καθιερωθεί αρκετά καλά σε ένα εύρος εφαρμογών. Οι αεροδιαστημικές εφαρμογές συχνά απαιτούν ελαφρύ βάρος, ακαμψία και αντίσταση στην κόπωση και τα σύνθετα αποτελούν το 65% του βάρους ενός αεροπλάνου. Στο σχήμα 7.4.3 φαίνεται η κατανομή των υλικών που χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός αμερικάνικου αεροπλάνου τύπου AV-8B.

Σχήμα 7.4.3



Ο εξοπλισμός των διάφορων σπορ τώρα κατασκευάζεται από διάφορα σύνθετα όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Πιθανές χρήσεις στην αυτοκινητοβιομηχανία περιλαμβάνουν (εκτός από τα εξωτερικά μέρη) άξονες κίνησης, ελατήρια και προφυλακτήρες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης σύνθετων υλικών αποτελεί το σχήμα 7.4.4 σε αυτοκίνητο αγώνων.

Σχήμα 7.4.4



7.5 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

Σύγκριση κόστους μερικών μηχανολογικών υλικών (συμπεριλαμβανομένου του αλουμινίου) η οποία δείχνει το κόστος ανά μονάδα βάρους και το κόστος ανά μονάδα όγκου. Οι τιμές αυτές είναι από υπολογισμένες για το έτος 1994.

Πίνακας 7.5.1

Υλικό	Κόστος		Πυκνότητα (lb/in ³)
	\$/lb	\$/in ³	
Αλουμίνιο	0,90-1,25	0,09-0,12	0,100
Χυτοσίδηρος	0,20-0,25	0,05-0,06	0,250
Μαγνήσιο	2,00-2,25	0,13-0,15	0,066
Ανοξείδωτος Χάλυβας τύπος 304	2,00	0,57	0,287
Χάλυβας 1015	0,30	0,09	0,285
4140 Q&T	1,25	0,36	0,285
Τιτάνιο	6,00-6,25	1,02-1,06	0,170

Οι παρακάτω πίνακες (7.5.2, 7.5.3) είναι αποτελέσματα συγκρίσεων που έχουν γίνει ανάμεσα στο αλουμίνιο και σε άλλα ανταγωνιστικά υλικά.

Πίνακας 7.5.2

Ιδιότητες	Αλουμίνιο	Χυτευμένο πλαστικό υλικό	Ξύλο	PVC (πολυμερές του κλωριστικού βινύλου)	Ελατός χάλυβας	Χαλκός
Αντοχή (στον εφελκυσμό)	Πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες	Μεγάλες αποκλίσεις που κυμαίνονται από 0,8 έως 8 ππν απειλή σε εφελκυσμό του αλουμινίου	Καλή αντοχή στην συμπίεση, που παύεται ανάλογα με το είδος του ξύλου και την περιεκτικότητα σε υγρασία	Χαμηλές μηχανικές ιδιότητες	Υψηλές μηχανικές ιδιότητες	Χαμηλές μηχανικές ιδιότητες
Πικρότητα (σείση βάρους προς όγκο)	Ελαφρύ (περίπου 1/3 του χαλκού ή του αλουμινίου)	Πολύ ελαφρύ (περίπου το 90% του βάρους του αλουμινίου)	Πολύ ελαφρύ όταν είναι «στεγνό» (περίπου το 1/3 της πυκνότητας του αλουμινίου)	Πολύ ελαφρύ (περίπου το 1/3 της πυκνότητας του αλουμινίου)	Υψηλή πυκνότητα (περίπου τρεις φορές πιο βαρύ από το αλουμίνιο)	Περίπου τρεις φορές πιο βαρύ από το αλουμίνιο
Λόγος αντίστασης/βάρους	Πολύ καλή	Χαμηλή προς καλή	Χαμηλή προς καλή	Χαμηλή προς καλή	Καλή	Χαμηλή

Πίνακας 7.5.3

Ιδιότητες	Αλουμίνιο	Συμπυκνωμένο πλαστικό υλικό	Ξύλο	PVC (πολυμερές του χλωριούχου βινυλίου)	Ελατός χάλυβας	Χαλκός
Ανθεκτικότητα στην διάβρωση	Άριστη και μπορεί να ενισχυθεί με την αλλαγή της εμφάνισής μέσω ανοξείδωσης ή άλλων επηρεαστικών καταργησών.	Άριστη (η επιλογή των αυτοσπινών και του χρώματος σημαντική για ακτινοβολίες UV)	Δεν έχει σχέση με την διάβρωση - Αποσυντίθεται	Υψηλή αντοχή σε οξικό και άλλα αλλά προσβάλλεται από οργανικούς διαλύτες και οργανικά αέρια	Χαμηλή. Συνήθως απαιτείται προστατευτική επανοξείδωση επεξεργασία	Άριστη
Διαμορφωτική ικανότητα	Μορφοποιείται εύκολα και μορφοποιείται με διάλυση σε τερπτικά ποσειά διατομών και με πολλαπλές κόμρες. Η μέθοδος της διάλυσης προσφέρει το πλεονέκτημα της ταπεθόστασης του μετάλλου ακριβώς εκεί που χρειάζεται	Μορφοποιείται ή κατεύεται εύκολα ακόμη και με περιήλικες διατομές	Φτωχή	Μορφοποιείται ή κατεύεται εύκολα ακόμη και με περιήλικες διατομές	Μορφοποιείται εύκολα αν και διατομές λεπτότερες από εκείνες του διαλυμένου αλουμινίου δεν μπορεί να ταποθετούνται πάντα στο ακριβή σημείο του σχεδιασμού	Άριστη ικανότητα μορφοποίησης και μεγάλη ευκαλία διάλυσης
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Άριστη αγωγιμότητα	Φτωχή. Χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό με υψηλές διηλεκτρικές επιδόσεις	Φτωχή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αγωγός ηλεκτρισμού, αλλά σπάνια χρησιμοποιείται και ως μονωση	Φτωχή έχει μονωτικό χαρακτηριστικό στον ηλεκτρισμό και την θέρμανση	Φτωχή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αγωγός ηλεκτρισμού	Άριστη αγωγιμότητα
Θερμική αγωγιμότητα	Άριστη, ιδανικό υλικό για εναλλάκτες θερμότητας	Φτωχή. Χαμηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	Φτωχή	Φτωχή	Φτωχή συνήθως δεν χρησιμοποιείται ως εναλλάκτης θερμότητας	Άριστη αγωγιμότητα
Εξοικονόμηση ενέργειας / θερμική ανακλαστική ικανότητα	Άριστη ανακλαστικότητα. Το αλουμίνιο μπορεί να προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη	Φτωχή θερμική ανακλαστικότητα	Φτωχή θερμική ανακλαστικότητα	Φτωχή θερμική ανακλαστικότητα	Φτωχή θερμική ανακλαστικότητα ακόμη και όταν είναι γαλβανισμένος	Φτωχή θερμική ανακλαστικότητα
Φθίση	Εξαιρών απεριόριστες οι δυνατές επανοξείδωσης φθίση, συμπιεραζομένων μηχανικών και χημικών προεργασιών, ανοξείδωση, βαφή και ηλεκτρολυτική επεξεργασία	Το χρώμα μπορεί να ενσωματωθεί στο υλικό και ακόμη να μπορεί να γίνει επικάλυψη, βαφή και θερμότητα	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί χρώμα ή γυαλιστικό βερνικι	Το χρώμα μπορεί να ενσωματωθεί στο υλικό	Χρησιμοποιούνται προστατευτικές επανοξείδωσης βαφές μαζί με επανοξείδωση γαλβανιστική	Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ποσειά βαφών και επικαλύξεων
Ανακύκλωση	Υψηλή αξία αποματάλλων επανακυκλώνεται δίνοντας νέα ημ-προϊόντα	Συνήθως επαναεξεργάζεται αλλά κόβει τις ιδιότητές του	Χαμηλή αξία των υπολειμμάτων	Χαμηλή αξία των υπολειμμένων Συνήθως επαναεξεργάζεται	Χαμηλή αξία των υπολειμμάτων	Υψηλή αξία αποματάλλων
Κόστος εργαλείων	Τα εργαλεία που απαιτούνται έχουν σχετικά μικρό κόστος και απαιτούν μικρό χρόνο κατασκευής	Τα εργαλεία είναι ακριβά και για την κατασκευή τους απαιτείται αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα	Πολύ ακριβά	Σχετικά χαμηλού κόστους	Τα εργαλεία είναι ακριβά και για την κατασκευή τους απαιτείται αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα	Χαμηλό για την διάλυση κόστος εργαλείων
Ευελκτικότητα	Δεν είναι εύκαμπτο. Δεν εκπέμπει τοξικά αέρια όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες	Εύκαμπτο και υπάρχει η πιθανότητα εκπομπής τοξικών αερίων όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες	Εύκαμπτο και εκπέμπει τοξικά αέρια όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες	Εύκαμπτο και υπάρχει η πιθανότητα εκπομπής τοξικών αερίων όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες	Δεν είναι εύκαμπτο. Δεν εκπέμπει τοξικά αέρια όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες	Δεν είναι εύκαμπτο. Δεν εκπέμπει τοξικά αέρια όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Materials and processes in manufacturing
eighth edition

(E. Paul Degarmo, JT. Black, Ronald A. Kohser)

Τεχνολογία Μηχανουργικών Υλικών (Πέτρου Γ. Πετρόπουλου)

Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά (Δημήτρης Ι. Παντέλης)

Μηχανική του απαραμόρφωτου στερεού -Στατική- (Δρ. Π. Α. Βουθούνης)

Τεχνική μηχανική Αντοχή των Υλικών (Δρ. Π. Α. Βουθούνης)

Τεχνολογία Υλικών (Παναγιώτης Ταβουλάρης)

Εργαστηριακές Ασκήσεις Τεχνολογίας Μηχανολογικών Υλικών (Ομήρου Σωτήρης
Δρ. Μηχ/γος Μηχ/κος)

Μεταλλουργία Αλουμινίου (Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ Πάνιας Δημήτριος)

Σύνδεσμος Ελλήνων Κατασκευαστών Αλουμινίου (Περιοδικό: Το αλουμίνιο)

www.copper.org