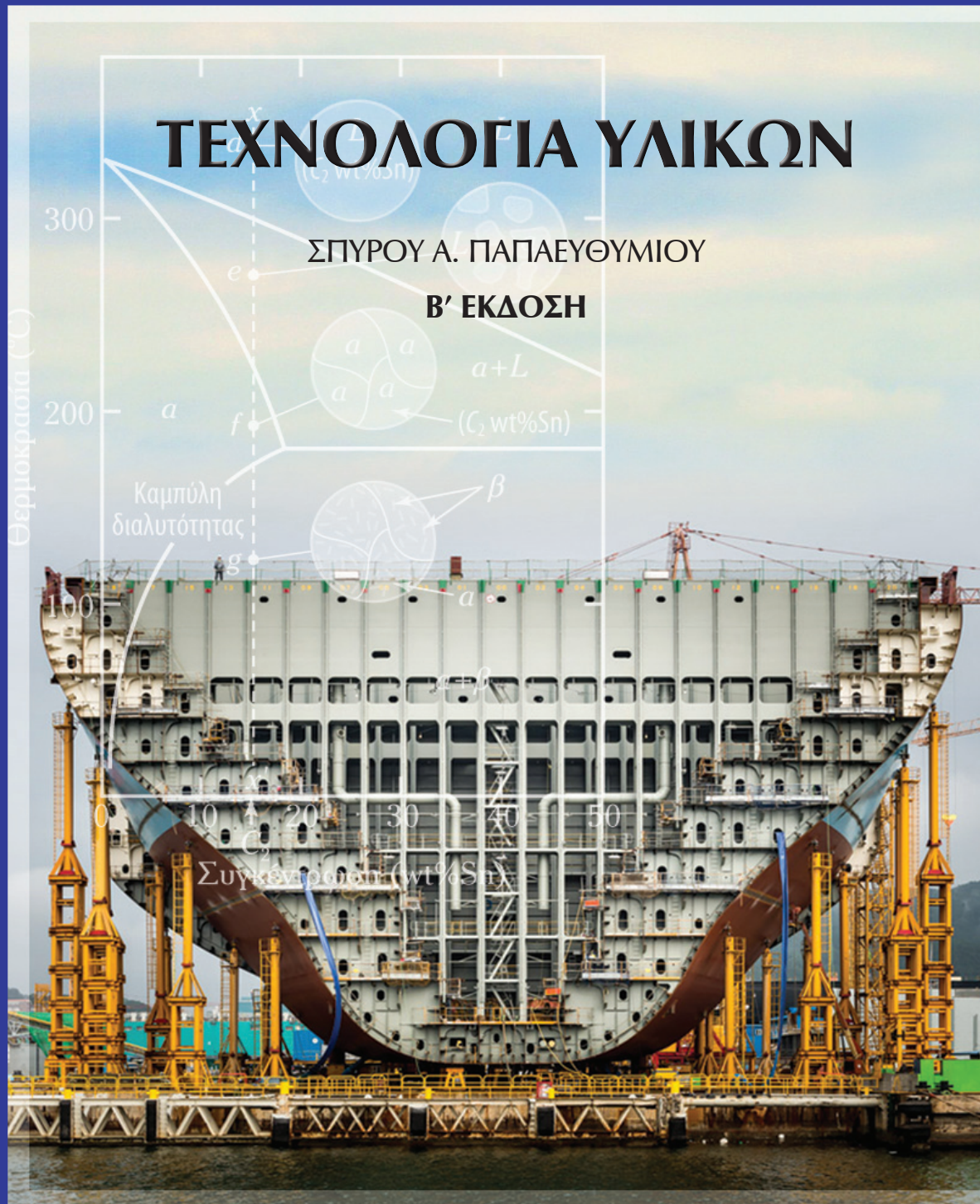




ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ
ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ ΓΙΑ ΤΙΣ
ΑΚΑΔΗΜΙΕΣ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ



ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ



ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΓΙΑ
ΤΙΣ ΑΚΑΔΗΜΙΕΣ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ



Α' ΕΚΔΟΣΗ 1986

Β' ΕΚΔΟΣΗ 2017

ISBN: 978-960-337-129-8

Copyright © 2017 Ίδρυμα Ευγενίδου

Απαγορεύεται η ολική ή μερική ανατύπωση του βιβλίου και των εικόνων με κάθε μέσο καθώς και η διασκευή, η προσαρμογή, η μετατροπή και η κυκλοφορία του (Άρθρο 3 του ν. 2121/1993).

Φωτογραφία εξωφύλλου: Ναυπήγηση πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (container ship) από κράματα χάλυβα.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Το 1952 ο Ευγένιος Ευγενίδης (1882-1954) όρισε με τη διαθήκη του τη σύσταση του Ιδρύματος Ευγενίδου, του οποίου ως μοναδικό σκοπό έταξε «να συμβάλη εις την εκπαίδευσιν νέων έλληνικής ύπηκοότητας εν τῷ έπιστημονικῷ καὶ τεχνικῷ πεδίῳ». Ο ιδρυτής και χορηγός του Ιδρύματος Ευγενίδου ορθά προέβλεψε ότι αναγκαίο παράγοντα για την πρόοδο της Ελλάδος αποτελεί η άρτια κατάρτιση των Ελλήνων τεχνιτών κατὰ τα πρότυπα της επαγγελματικής εκπαίδευσως άλλων ευρωπαϊκών χωρών.

Την 23η Φεβρουαρίου του 1956 εγκρίθηκε η σύσταση του κοινωφελούς Ιδρύματος Ευγενίδου, την διαχείριση του οποίου κατὰ την ρητή επιθυμία του ιδρυτή του ανέλαβε η αδελφή του Μαριάνθη Σίμου (1895-1981). Τότε ξεκίνησε η υλοποίηση του σκοπού του Ιδρύματος και η εκπλήρωση μίας από τις βασικότερες ανάγκες του εθνικού μας βίου από την Μαριάνθη Σίμου και τους επιστημονικούς συνεργάτες της.

Το έργο της Μαριάνθης Σίμου συνέχισε από το 1981 ο πολύτιμος συνεργάτης και διάδοχος του Ευγενίου Ευγενίδη, Νικόλαος Βερνίκος-Ευγενίδης (1920-2000). Από το 2000 συνεχιστής του έργου του Ιδρύματος Ευγενίδου έχει αναλάβει ο Λεωνίδας Δημητριάδης-Ευγενίδης.

Μία από τις πρώτες δραστηριότητες του Ιδρύματος Ευγενίδου, ευθύς μετά την ίδρυσή του, υπήρξε η συγγραφή και έκδοση κατάλληλων διδακτικών εγχειριδίων για τους μαθητές των τεχνικών σχολών, καθώς διαπιστώθηκε ότι αποτελεί πρωταρχική ανάγκη ο εφοδιασμός των μαθητών με σειρές από βιβλία, τα οποία θα έθεταν τα ορθά θεμέλια για την παιδεία τους και θα αποτελούσαν συγχρόνως πολύτιμη βιβλιοθήκη για κάθε τεχνικό. Καρπός αυτής της δραστηριότητας είναι η Βιβλιοθήκη του Τεχνίτη (1957-1975), η οποία αριθμεί 32 τίτλους, η Βιβλιοθήκη του Τεχνικού (1962-1975), που περιλαμβάνει 50 τίτλους, η Τεχνική Βιβλιοθήκη (1969-1980) με 11 τίτλους και η Βιβλιοθήκη του Τεχνικού Βοηθού Χημικού (1971-1973) με 3 τίτλους. Επί πλέον, από το 1977 μέχρι σήμερα έχουν εκδοθεί 171 τίτλοι για τους μαθητές των Τεχνικών και Επαγγελματικών Λυκείων και 16 για τους μαθητές των Σχολών Μέσης Τεχνικής και Επαγγελματικής εκπαίδευσως.

Έξχωριστή σειρά βιβλίων του Ιδρύματος Ευγενίδου αποτελεί η Βιβλιοθήκη του Ναυτικού (1967 έως σήμερα), η οποία είναι το αποτέλεσμα της συνεργασίας του Ιδρύματος Ευγενίδου με την Διεύθυνση Εκπαίδευσως Ναυτικών του Υπουργείου Ναυτιλίας. Η συγγραφή και έκδοση των εκπαιδευτικών εγχειριδίων για τους σπουδαστές των ναυτικών σχολών ανειτέθη στο Ίδρυμα Ευγενίδου με την υπ' αριθμ. 61288/5031/9.8.1966 απόφαση του Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας, οπότε και λειπούργησε η αρμόδια Επιτροπή Εκδόσεων, η οποία είχε συσταθεί ήδη από το 1958. Η συνεργασία Ιδρύματος Ευγενίδου και Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας ανανεώθηκε με την υπ. αριθμ. Μ2111.1/2/99 υπουργική απόφαση όπως τροποποιήθηκε από την Μ3611.2/05/05/16-12-2005, με την οποία το ΥΕΝ ανέθεσε στο Ίδρυμα Ευγενίδου την συγγραφή διδακτικών εγχειριδίων για τις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού.

Στην Βιβλιοθήκη του Ναυτικού περιλαμβάνονται συνολικά 134 τίτλοι μέχρι σήμερα: 27 τίτλοι για τις Δημόσιες Σχολές Εμπορικού Ναυτικού (1967-1979), 42 τίτλοι για τις Ανώτατες Δημόσιες Σχολές Εμπορικού Ναυτικού (1981-2001), 37 τίτλοι για τις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού, 13 εγχειρίδια κατευθυνόμενης εκπαίδευσως επί πλοίου και 15 μεταφράσεις ναυτικών εγχειριδίων.

Όλα τα βιβλία της Βιβλιοθήκης του Ναυτικού, εκτός του ότι έχουν συγγραφεί σύμφωνα με τα αναλυτικά προγράμματα διδασκαλίας των σχολών και ανταποκρίνονται στις ανάγκες των σπουδαστών, είναι γενικότερα χρήσιμα για όλους τους αξιωματικούς του Εμπορικού Ναυτικού, που ασκούν το επάγγελμα ή εξελίσσονται στην ιεραρχία. Επί πλέον οι συγγραφείς και η Επιτροπή Εκδόσεων

καταβάλλουν κάθε προσπάθεια ώστε τα βιβλία να είναι επιστημονικώς άρτια αλλά και προσαρμοσμένα στις ανάγκες και στις δυνατότητες των σπουδαστών.

Την περίοδο 2012-2013 το ΥΝΑ με το υπ' αριθμ. Μ3616/01/2012/26-09-2012 έγγραφο ανέθεσε στην Επιτροπή Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου την σύσταση ειδική ομάδας εργασίας εμπειρογνομητών για την επικαιροποίηση των αναλυτικών προγραμμάτων σπουδών για τις ΑΕΝ, τα ΚΕΣΣΕΝ και τα ειδικά σχολεία Πλοίαρχων και Μηχανικών, εφαρμοζοντας τις νέες απαιτήσεις εκπαίδευσης και πιστοποίησης ναυτικών της Διεθνούς Συμβάσεως STCW '78 (Standards of Training, Certification and Watchkeeping for seafarers – Manila amendments 2010). Με βάση τα νέα αναλυτικά προγράμματα για τις ΑΕΝ, τα οποία εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά την χρονιά 2013-2014, ξεκίνησε από το 2014 και η επικαιροποίηση των υφισταμένων διδακτικών εγχειριδίων, προκειμένου αυτά να είναι συμβατά με τις νέες διεθνείς απαιτήσεις.

Με την προσφορά των εκδόσεών του στους καθηγητές, στους σπουδαστές των ΑΕΝ και σε όλους τους αξιωματικούς του Εμπορικού Ναυτικού, το Ίδρυμα Ευγενίδου συνεχίζει να συμβάλλει στην τεχνική εκπαίδευση της Ελλάδος, υλοποιώντας επί 60 και πλέον χρόνια το όραμα του ιδρυτή του, αείμνηστου ευεργέτη Ευγενίου Ευγενίδου.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Εμμανουήλ Δρns, Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ, Πρόεδρος.

Αχιλλέας Ματσόγγος, Αντιναύαρχος Λ.Σ. (ε.α.).

Βενετία Καλλιπολίτου, Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντρια Ναυτ. Εκπαιδ. Υπ. Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής.

Σύμβουλος επί των εκδόσεων του Ιδρύματος **Κων. Αγγ. Μανάφης**, Ομ. Καθηγ. Φιλοσοφικής Σχολής Πανεπιστημίου Αθηνών.

Γραμματέας της Επιτροπής, **Ελευθερία Τελειώνη**.

Διατελέσαντα μέλη της Επιτροπής

Γ. Κακριδής (1955-1959) Καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Καλογεράς* (1957-1970) Καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Παππάς* (1955-1983) καθηγητής ΕΜΠ, *Χ. Καβουνίδης* (1955-1984) Μπχ. Ηλ. ΕΜΠ, *Μ. Αγγελόπουλος* (1970-2003) ομ. καθηγητής ΕΜΠ, *Σπ. Γουλιέλμος* (1958) Αντ/ρχος, *Ξ. Αντωνιάδης* (1959-1966) Αντ/ρχος, Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Γ. Τσακίρης* (1967-1969) Πλοίαρχος, Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ελλ. Σίδερης* (1967-1969) Υποναύαρχος, *Π. Φουσιέρης* (1969-1971) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αλ. Μοσχονάς* (1971-1972) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Χρυσανθακόπουλος* (1972-1974) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αθαν. Σωτηρόπουλος* (1974-1977) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Σπαριώτης* (1977) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., προσωρινός Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Θ. Πουλάκης* (1977-1979) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Λυκούδης* (1979-1981) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αναστ. Δημαράκης* (1981-1982) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Τσαντίλας* (1982-1984) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Σιαυρόπουλος* ομ. καθηγητής Πειραιώς (2003-2008) *Ε. Τζαβέλας* (1984-1986) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Ιρηγοράκος* (1986-1988) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Μπαρκασιός* (1988-1989) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Παπαναστασίου* (1989) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Λάμπρου* (1989-1992) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Κοκορέτσιος* (1992-1993) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μαρκάκης* (1993-1994) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Ζουμπούλης* (1994-1995) Πλοίαρχος Λ.Σ., *Φ. Ψαρράς* (1995-1996) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Καλαρώνης* (1996-1998) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Θ. Ρενιζεπέρης* (1998-2000) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Σιεφανάκης* (2000-2001) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μαρβίνος* (2001) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Εξαρχόπουλος* (2001-2003) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μπριλάκης* (2003-2004) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ν. Θεμέλαρος* (2003-2004) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Κουβέλης* (2004-2005) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Δ. Βασιλάκης* (2005-2008) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Πετρόπουλος* (2008-2009) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Ματσόγγος* (2009-2011) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Σέργγης* (2011-2012) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Τζαβάρας*, (2004-2013) Αντιναύαρχος Λ.Σ. (Ε.Α.), *Ι. Τεγόπουλος* (1988-2013) ομ. καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Θεοφανόπουλος* (2012-2014) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ.

ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

ΣΠΥΡΟΥ Α. ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ

Επικ. Καθηγητή Ε.Μ.Π.

Β' ΕΚΔΟΣΗ

Επικαιροποίηση του βιβλίου

Μεταλλουργία

του Π. Γ. Πετρόπουλου

ΑΘΗΝΑ
2017



ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Η επιστήμη που μελετά τη φύση και τη δομή μετάλλων-κραμάτων και συνδέει αυτές με τις ιδιότητες των υλικών είναι η «Μεταλλογνωσία». Στις μέρες μας τα υλικά εξελίσσονται διαρκώς και αποκτούν ολοένα και περισσότερη σημασία. Η τάση σήμερα είναι να χρησιμοποιούμε υλικά αποκλειστικά προσαρμοσμένα στην εκάστοτε εφαρμογή (fit-for-purpose).

Η επισταμένη μελέτη των μετάλλων, των κραμάτων, των κεραμικών, των ημιαγωγών, των μαγνητικών υλικών, των νανοϋλικών, της δομής και των ιδιοτήτων τους, αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της «Επιστήμης των Υλικών» (“Materials Science”) και της «Τεχνολογίας των Υλικών» (“Materials Technology”). Πολλές φορές χάρην συντομίας συμπύσσονται στον όρο «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών».

Η Επιστήμη των Υλικών αναφέρεται στην εις βάθος ανάλυση και ερμηνεία της σχέσης δομής-ιδιοτήτων των υλικών. Περαιτέρω, ο όρος πρωτίστως «Μηχανική των Υλικών» (“Materials Engineering”) και δευτερευόντως ο όρος «Τεχνολογία Υλικών», αναφέρονται στον σχεδιασμό συγκεκριμένων ιδιοτήτων μέσω του απόλυτου ελέγχου της δομής των υλικών, της επεξεργασίας, της κατεργασίας και της μορφοποίησής τους.

Η έννοια της δομής (structure) είναι εξόχως σημαντική και αφορά στην περιοδική διάταξη της ύλης σε ατομικό επίπεδο. Η ατομική δομή συμπεριλαμβάνει και τα πλεκτρόνια, την αλληλεπίδρασή τους με τον πυρήνα και την οργάνωσή τους σε μόρια. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, αναφερόμαστε στην οργάνωση πολλών ατομικών μερών σε ομάδες πολλών ομοίων ατόμων. Τα άτομα, η διάταξή τους στον χώρο, η κρυσταλλική τους δομή και ο συνεχής τρόπος διασύνδεσής τους, αποτελούν αυτό που όλοι μας γνωρίζουμε ως συνεχές στερεό σώμα σε μακροσκοπικό επίπεδο.

Για να κατανοήσουμε, να ελέγξουμε, να επιλέξουμε και να σχεδιάσουμε υλικά (π.χ. μέταλλα και κράματα), οφείλουμε να γνωρίζουμε τις βασικές αρχές της ατομικής δομής της ύλης και να αποκτήσουμε βασικές γνώσεις της Μεταλλογνωσίας και της Επιστήμης Υλικών. Για να χρησιμοποιήσουμε, να ελέγξουμε, να αναλύσουμε τα υλικά και να τα προσαρμόσουμε στις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, πρέπει να κατανοήσουμε τη σχέση δομής-ιδιοτήτων. Βασική προϋπόθεση είναι να διαθέτουμε στοιχειώδεις γνώσεις σχετικά με την αντοχή των υλικών και του ελέγχου αυτών, καθώς επίσης είναι ανάγκη και να αντιλαμβανόμαστε τον τρόπο υποβάθμισης της μικροδομής (φθορά, διάβρωση, ερπυσμός κ.ά.), ώστε να κατανοούμε τις παραμέτρους εκείνες, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν τα χρησιμοποιούμενα υλικά σε αστοχία, σε μερική ή ολική θραύση (όλκιμης ή ψαθυρής) μετά την εφαρμογή στατικών, δυναμικών ή λοιπών φορτίσεων. Για τους λόγους αυτούς, εκτός από τη βασική γνώση σχετικά με τη δομή και τη διάταξη της ύλης, τη Μεταλλογνωσία και τη γνώση των υλικών εν γένει, ο μελετητής θα αναζητήσει και θα αξιοποιήσει πληροφορίες αναφορικά με τον καταστρεπτικό και μη-καταστρεπτικό έλεγχο των υλικών, καθώς και τις μεθόδους ανάλυσης και χαρακτηρισμού των μικροδομών. Επιπλέον, παρέχεται η απαραίτητη καθοδήγηση για τη μελέτη αστοχιών μέσω της ανάλυσης επιφανειών θραύσης.

Το παρόν βιβλίο αποτελεί επικαιροποιημένη β' έκδοση του βιβλίου «Μεταλλουργία» του Καθηγητή Π. Πετρόπουλου και απευθύνεται στους σπουδαστές και στις σπουδάστριες Β' εξαμήνου των σχολών Μηχανικών των Ακαδημιών Εμπορικού Ναυτικού.

Μέσω της παρούσης συγγραφής επιχειρείται μία εισαγωγή τους στον κόσμο των υλικών

με τρόπο επιστημονικό, αλλά συνάμα απλό και κατανοητό. Καταβλήθηκε προσπάθεια να περιοριστεί η ύλη, ώστε οι σπουδαστές αλλά και κάθε ενδιαφερόμενος να μπορεί να επικεντρωθεί στα σημαντικά και να αποκτήσει μία σφαιρική εικόνα και βασική γνώση αναπτύσσοντας παράλληλα εποπτική αντίληψη για τα βιομηχανικά κράματα, την επιλογή και τη χρήση των υλικών. Επίσης προστέθηκαν με μικρότερα τυπογραφικά στοιχεία επεξηγήσεις εκτός ύλης στα σημεία όπου κρίθηκε απαραίτητο για την καλύτερη κατανόηση του κειμένου.

Τέλος, θερμές ευχαριστίες οφείλονται στην κ. Μαρία Μακκά, Χημικό Μηχανικό και Διευθύντρια Σπουδών της ΑΕΝ Χίου και στον κ. Γιώργο Μαΐσιρο PhD Χημικό Μηχανικό, Ε.Ε.Π. ΑΕΝ Χίου για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους, καθώς και στην Επιτροπή Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου για την όλη παρακολούθηση της συγγραφής του βιβλίου.

*Dr.-Ing. Σπύρος Α. Παπαευθυμίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.*



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Μέρος Πρώτο

Στοιχειώδεις γνώσεις Μεταλλογνωσίας – Κράματα σιδήρου – Χάλυβες – Χυτοσίδηροι – Θερμικές κατεργασίες χαλύβων

Κεφάλαιο Πρώτο

Ορισμοί, κατάταξη και στοιχειώδεις γνώσεις

1.1	Ορισμοί, κατάταξη και στοιχειώδεις γνώσεις Μεταλλογνωσίας και υλικών.	1
1.2	Δομή ατόμων – μορίων – ενώσεων και οι ιδιότητές τους.	3
1.2.1	Η δομή του ατόμου.	3
1.2.2	Σχηματισμός των χημικών ενώσεων. Ατομικοί δεσμοί.	4
1.2.3	Η κρυσταλλική δομή των μετάλλων.	5
1.2.4	Βασικές αρχές στερεοποίησης (κρυσταλλώσεως).	8
1.3	Τα κράματα.	11
1.3.1	Το κράμα.	11
1.3.2	Το στερεό διάλυμα.	11
1.3.3	Το ευτηκτικό κράμα ή ευτηκτική ένωση.	12
1.3.4	Οι μεσομεταλλικές ενώσεις.	12
1.4	Το θερμικό διάγραμμα θερμοδυναμικής ισορροπίας.	13
1.5	Τρόποι αύξησης σκληρότητας.	16
1.5.1	Σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος.	16
1.5.2	Σκλήρυνση με κατακρήμνιση.	16
1.5.3	Σκλήρυνση με εκλέπτυνση κόκκου.	17
1.6	Ανακρυστάλλωση.	18
1.7	Πλαστική παραμόρφωση, θερμηλασία και ψυχρηλασία.	19
1.7.1	Θεωρητικό υπόβαθρο: διαταραχές και ο μηχανισμός της πλαστικής παραμορφώσεως.	19
1.7.2	Βασικές κατεργασίες πλαστικής παραμορφώσεως μετάλλων και κραμάτων.	20

Κεφάλαιο Δεύτερο

Ο σίδηρος και τα κράματά του

2.1	Σίδηρος – Ανθρακούχοι χάλυβες – Χυτοσίδηροι – Ανοξείδωτοι χάλυβες.	25
2.2	Αλλοτροπίες του σιδήρου.	25
2.3	Τα διμερή διαγράμματα σιδήρου-άνθρακα και σιδήρου-σεμεντίτη.	26
2.4	Οι χυτοσίδηροι.	30
2.4.1	Λευκοί και φαιοί χυτοσίδηροι.	31
2.4.2	Μαλακοί χυτοσίδηροι.	32
2.4.3	Χυτοσίδηροι σφαιροειδούς γραφίτη ή ελατοί χυτοσίδηροι.	33
2.4.4	Ειδικοί χυτοσίδηροι.	34
2.5	Ανοξείδωτοι χάλυβες.	34
2.6	Είδη χαλύβων. Η επίδραση των προσθηκών.	36

2.6.1 Η τυποποίηση των χαλύβων.....	36
2.6.2 Οι ακαθαρσίες των χαλύβων.....	37
2.6.3 Τα κραματικά στοιχεία.....	37

Κεφάλαιο Τρίτο
Θερμικές κατεργασίες

3.1 Θερμικές κατεργασίες.....	39
3.2 Επίδραση της ταχύτητας αποψύξεως.....	40
3.3 Συνδυασμός των καμπυλών αποψύξεως χάλυβα και του διαγράμματος TTT (X-Θ-M).....	42
3.4 Οι θερμικές κατεργασίες των χαλύβων στην πράξη.....	44
3.4.1 Πλήρης ανόπτηση ή ανόπτηση.....	44
3.4.2 Ανόπτηση εξομαλύνσεως.....	44
3.4.3 Ανόπτηση σφαιροποιήσεως σεμεντίτη.....	44
3.4.4 Ανόπτηση για ανακρυστάλλωση.....	44
3.4.5 Αποτακτική ανόπτηση.....	44
3.4.6 Βαφή.....	44
3.4.7 Επαναφορά.....	47
3.4.8 Επιφανειακή σκλήρυνση των χαλύβων.....	47

Μέρος Δεύτερο
Μη σιδηρούχα μέταλλα – Κράματα –
Κονιομεταλλουργία και σύνθετα υλικά

Κεφάλαιο Τέταρτο
Μη σιδηρούχα μέταλλα και κράματα

4.1 Μη σιδηρούχα μέταλλα και κράματα – Γενικά.....	49
4.2 Ο χαλκός και τα κράματά του.....	49
4.2.1 Ο χαλκός.....	49
4.2.2 Τα κράματα του χαλκού.....	50
4.3 Το αλουμίνιο (αργίλιο) και τα κράματά του.....	52
4.3.1 Το αλουμίνιο.....	52
4.3.2 Τα κράματα του αλουμινίου.....	53
4.4 Το μαγνήσιο και τα κράματά του.....	55
4.4.1 Το μαγνήσιο.....	56
4.4.2 Τα κράματα του μαγνησίου.....	57
4.5 Ο ψευδάργυρος και τα κράματά του.....	57
4.5.1 Ο ψευδάργυρος.....	57
4.5.2 Τα κράματα του ψευδαργύρου.....	58
4.6 Ο μόλυβδος και τα κράματά του.....	58
4.6.1 Ο μόλυβδος.....	58
4.6.2 Τα κράματα του μολύβδου.....	58
4.7 Το νικέλιο και τα κράματά του.....	59
4.7.1 Το νικέλιο.....	59
4.7.2 Τα κράματα του νικελίου.....	59
4.8 Υπερκράματα.....	60
4.9 Αντιτριβικά κράματα ή κράματα εδράνων ολισθήσεως.....	61
4.9.1 Αντιτριβικά κράματα με βάση τον χαλκό.....	61
4.9.2 Λευκά μέταλλα.....	62

Κεφάλαιο Πέμπτο
Κονιομεταλλουργία και σύνθετα υλικά

5.1	Κονιομεταλλουργία και σύνθετα υλικά	63
5.2	Οι φάσεις της κονιομεταλλουργίας.....	63
5.2.1	Η παραγωγή των κόνεων (οκόνης).....	63
5.2.2	Ανάμειξη των συστατικών.....	64
5.2.3	Συμπίεση.....	64
5.2.4	Πυροσυσσωμάτωση.....	64
5.2.5	Δευτερεύουσες φάσεις της κονιομεταλλουργίας.....	65
5.3	Εφαρμογές της κονιομεταλλουργίας.....	65
5.3.1	Τα σκληρομέταλλα με καρβίδια ή απλώς σκληρομέταλλα.....	65
5.3.2	Άλλες εφαρμογές (προϊόντα) της κονιομεταλλουργίας.....	68
5.4	Συνθετικές ύλες (πλαστικά).....	69
5.4.1	Οι συνθετικές ύλες.....	69
5.4.2	Υποδιαίρεση των συνθετικών υλών.....	69
5.4.3	Διάφορες εφαρμογές των συνθετικών υλών.....	71
5.5	Οι συνθετικές ύλες για μηχανολογικές κατασκευές.....	71
5.5.1	Υποδιαίρεση των συνθετικών υλών, που χρησιμοποιούνται για μηχανολογικές κατασκευές.....	71
5.5.2	Αναγνώριση του είδους μίας συνθετικής ύλης.....	71
5.6	Ιδιότητες των συνθετικών υλών.....	72
5.7	Διάδοση των συνθετικών υλών για μηχανολογικούς σκοπούς.....	72

Μέρος Τρίτο
Έλεγχος υλικών – Τεχνικές ελέγχου μικροδομής –
Χαρακτηρισμός θραύσεων – Διάβρωση και προστασία

Κεφάλαιο Έκτο
Έλεγχος υλικών

6.1	Καταστρεπτικός και μη καταστρεπτικός έλεγχος μετάλλων και κραμάτων	75
6.2	Μηχανικές δοκιμασίες μετάλλων-κραμάτων (καταστρεπτικός έλεγχος).....	75
6.2.1	Η δοκιμή της σκληρότητας.....	75
6.2.2	Η δοκιμή εφελκυσμού και συνθλίψεως.....	77
6.2.3	Η δοκιμή κρούσεως (δοκιμή δυσθραυστότητας).....	80
6.2.4	Η δοκιμή κοπώσεως.....	81
6.3	Τεχνικές ελέγχου μικροδομής.....	82
6.3.1	Οπτική μικροσκοπία.....	83
6.3.2	Ηλεκτρονική μικροσκοπία	84
6.4	Χαρακτηρισμός θραύσεων.....	85
6.5	Μη καταστρεπτικός έλεγχος υλικών.....	86
6.5.1	Ραδιογραφία.....	86
6.5.2	Υπέρηχοι.....	87
6.5.3	Μαγνητικά σωματίδια.....	87
6.5.4	Δινορρέυματα.....	87
6.5.5	Διεισδυτικά υγρά.....	87

Κεφάλαιο Έβδομο
Διάβρωση και προστασία

7.1	Διάβρωση και προστασία.....	88
-----	-----------------------------	----

7.2 Βασικό υπόβαθρο ηλεκτροχημείας.	88
7.3 Ηλεκτρωνική και γαλβανική σειρά των μετάλλων.	89
7.4 Τύποι διαβρώσεως..	90
7.5 Προστασία από τη διάβρωση..	92

Παραρτήματα

Παράρτημα Α Πίνακες.	94
Παράρτημα Β Βασικά στοιχεία για την κατηγοριοποίηση χαλύβων..	104
Παράρτημα Γ Χρονολόγιο εξελίξεως της οπτικής μικροσκοπίας.	107
Ευρετήριο.	108
Βιβλιογραφία.	113





ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΕΙΣ ΓΝΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ – ΚΡΑΜΑΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ – ΧΑΛΥΒΕΣ – ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΙ – ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Ορισμοί, κατάταξη και στοιχειώδεις γνώσεις

1.1 Ορισμοί, κατάταξη και στοιχειώδεις γνώσεις Μεταλλογνωσίας και υλικών.

Η κατανόηση των ατομικών δεσμών και της δομής της ύλης επιτρέπει την ερμηνεία των μηχανικών και λοιπών ιδιοτήτων των στερεών σωμάτων, των στοιχείων του περιοδικού πίνακα. Τα στοιχεία διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα **μέταλλα** και στα **αμέταλλα**. Με βάση τη χημική σύνθεση των στερεών σωμάτων και την ατομική τους δομή, τα στερεά υλικά διακρίνονται σε **μέταλλα**, **κεραμικά** και **πολυμερή**.

Σε ορισμένες περιπτώσεις αμετάλλων, είναι δυνατόν αυτά να έχουν μία ή περισσότερες χαρακτηριστικές ιδιότητες μετάλλου, όπως ο άνθρακας, που, αν και αμέταλλο, είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, πράγμα που αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα των μετάλλων. Αναλυτικότερα λοιπόν:

1) **Μέταλλο** (metal) ονομάζεται κάθε στοιχείο ή κράμα (δηλ. μέταλλο αποτελούμενο από ένα ή περισσότερα στοιχεία σε μικρές περιεκτικότητες), συνήθως σκληρό με ειδική λάμψη (μεταλλική) και το οποίο έχει ως επί το πλείστον καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής και πλαστικότητας. Συνήθως τα μέταλλα εξάγονται μέσω μεταλλουργικής κατεργασίας από μεταλλεύματα, είναι στερεά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, αδιαφανή, έχουν σχετικά υψηλό σημείο τήξεως και ειδικό βάρος. Σε γενικές γραμμές είναι ελατά και όλκιμα, επομένως μπορούν να διαμορφωθούν με σφυρηλάτηση, έλαση, ολκή σε διαφορετικά σχήματα χωρίς να ρηγματωθούν ή να σπάσουν. Περίπου 91 εκ των 118 στοιχείων του περιοδικού πίνακα είναι μέταλλα, τα υπόλοιπα είναι αμέταλλα ή βρίσκονται σε διττή υπόσταση. Στην πλειονότητά τους έχουν αργυρόφαιο χρώμα, με εξαίρεση τον χαλκό (ερυθρός – κόκκινος) και τον χρυσό (κίτρινος). Μέταλλα όπως ο σίδηρος (Fe), το κοβάλτιο (Co) και το νικέλιο (Ni) έχουν αξιοποιήσιμες μαγνητικές ιδιότητες. Ατέλειες στη δομή των μετάλλων (σημειακές,

γραμμικές και τρισδιάστατες) επιτρέπουν την πλαστική τους παραμόρφωση αλλά και την απόκτηση συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων.

2) Τα **κεραμικά** (ceramics) αποτελούν ενώσεις μεταξύ μετάλλων και αμετάλλων. Συνήθως είναι **οξειδία** (oxides), **αζίδια** γνωστά και ως **νιρίδια** (nitrides) και **καρβίδια** (carbides). Διαδεδομένα και πολύ γνωστά κεραμικά είναι επί παραδείγματι το οξείδιο του αλουμινίου (αλουμίνα – Al_2O_3), το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2 , silicon dioxide or silica), το καρβίδιο του πυριτίου (SiC, silicon carbide), το αζίδιο του πυριτίου (Si_3N_4 , silicon nitride), το ρουτίλιο – διοξείδιο του τιτανίου (Ti_2O , titanium dioxide, rutile), η πορσελάνη, το τσιμέντο και το γυαλί. Τα κεραμικά είναι σκληρά, **άκαμπτα** (stiff) και παρουσιάζουν αντοχές αντίστοιχες με αυτές των μετάλλων. Ωστόσο, δεν είναι όλκιμα, αλλά εξαιρετικά ψαθυρά και, για τον λόγο αυτόν, πιο ευάλωτα στη θραύση. Είναι καλοί μονωτές της θερμότητας και του ηλεκτρισμού (έχουν χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα), αλλά παρουσιάζουν εξαιρετική ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες (σε υψηλότερες από τα συνθέστερα σημεία τήξεως των μετάλλων) και σε σκληρές συνθήκες (π.χ. έντονα διαβρωτικό περιβάλλον). Κάποια κεραμικά είναι διαφανή, άλλα μερικώς διαφανή, μπορούν όμως να είναι και αδιαφανή, όπως τα μέταλλα. Τέλος, κάποια κεραμικά (οξειδία) παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες (π.χ. Fe_3O_4 , μαγνητίτης).

3) Στα **πολυμερή** (polymers) συμπεριλαμβάνονται τα **πλαστικά**, τα **λάστιχα** και οι **γόμμες** (rubbers). Αυτά είναι οργανικές ενώσεις βασιζόμενες στον άνθρακα και στο υδρογόνο, αλλά και σε μη μεταλλικά στοιχεία, όπως το οξυγόνο, το άζωτο και το πυρίτιο. Διαθέτουν πολύ μεγάλες μοριακές δομές σε αλυσίδες με βάση τον άνθρακα. Μερικές από τις γνωστότερες είναι το πολυαιθυλένιο (polyethylene – PE), το νάιλον (nylon), το πολυ-βινυλιο-χλωρίδιο (poly vinyl chloride – PVC), τα πολυανθρακικά (polycar-

bonate-PC), το πολυστυρένιο (polystyrene-PS) και η πυριτική γόμμη (silicon rubber). Τα υλικά αυτά διαθέτουν χαμηλές πυκνότητες και η αντοχή τους είναι χαμηλότερη των κεραμικών και των μετάλλων. Ωστόσο, με βάση το ειδικό τους βάρος, οι αντοχές τους μπορεί να εμφανίζονται και ανάλογες με αυτές των μετάλλων και των κεραμικών. Η καλή τους ολκιμότητα και η εξαιρετική τους πλαστικότητα ευνοεί την μορφοποίησή τους. Είναι αδρανή ως προς τη χημική τους σύσταση και ανθεκτικά σε πληθώρα από διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος. Το βασικότερό τους μειονέκτημα αποτελεί η ιδιότητά τους να μαλακώνουν και να αποσυντίθενται σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες, πράγμα που περιορίζει και τη χρήση τους.

Επί πλέον έχουν αναπτυχθεί τα κάτωθι:

1) **Σύνθετα** (composites) υλικά είναι εκείνα, τα οποία αποτελούνται συνήθως από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά προερχόμενα από τις κατηγορίες των μετάλλων, των κεραμικών και των πολυμερών. Τα συνθετικά αυτά υλικά σχεδιάζονται, ώστε να συνδυάζουν ανώτερες ιδιότητες από εκείνες των επιμέρους μερών από τα οποία αποτελούνται. Στη φύση συναντάμε δύο σύνθετα υλικά, το ξύλο και τα οστά. Ένα από τα γνωστότερα σύνθετα υλικά είναι το «φάιμπερ-γκλάς» (fiberglass) ή αλλιώς τα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού πολυμερή (Glass Fiber-Reinforced Polymers-GFRP). Η μήτρα του πολυμερούς, συνήθως έποξυ (epoxy) ή πολυεστέρας (polyester), ενισχύεται με ίνες γυαλιού προς αύξηση της αντοχής του σύνθετου υλικού. Επιτυγχάνεται έτσι εξαιρετική αύξηση της αντοχής, με παράλληλη όμως μείωση της ολκιμότητας και της πλαστικότητας. Συνεπώς, το σύνθετο υλικό διαθέτει βελτιωμένη σχέση αντοχής και ακαμψίας, χωρίς να χάνει ολοσχερώς την ολκιμότητα και την χαμηλή του πυκνότητα. Άλλα ευρέως χρησιμοποιούμενα σύνθετα υλικά είναι τα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα πολυμερή υλικά (Carbon Fiber-Reinforced Polymers-CFRP). Αυτά παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερες αντοχές και από τα GFRP (fiberglass), έχουν όμως μεγαλύτερο κόστος.

2) Στις μέρες μας ιδιαίτερη σημασία έχουν αποκτήσει τα λεγόμενα **εξελιγμένα-προχωρημένα υλικά** (advanced materials). Σε αυτά συγκαταλέγονται όλα τα υλικά για τις ηλεκτρονικές εφαρμογές και χρήσεις (π.χ. για Η/Υ, οπτικά συστήματα, flash-discs και λιγότερο πλέον για CD, DVD κ.λπ.), καθώς και για χρήσεις στην ναυπηγική, στην αεροναυπηγική, στη διαστημική τεχνολογία και στις αμυντικές/στρατιωτικές εφαρμογές. Τα εξελιγμένα υλικά, συγκεκριμένα σε περιπτώσεις που το κόστος πολλές φορές δεν

αποτελεί περιοριστικό παράγοντα, αποκαλούνται και **υλικά του μέλλοντος** (materials of the future). Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται τα λεγόμενα **έξυπνα υλικά** (smart materials) και τα **νανοϋλικά** (nanomaterials), π.χ. για χρήσεις σε λέιζερ (laser), υγρούς κρυστάλλους (LCDs) και οπτικές ίνες (fiber optics), εσωτερικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, μαγνητικούς δίσκους αποθηκεύσεως δεδομένων κ.ά.. Τα έξυπνα υλικά χαρακτηρίζονται έτσι, καθώς είναι σε θέση να ανιχνεύουν τις όποιες μεταβολές στο περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν, και να αντιδρούν σε αυτές αναλόγως, όπως αν επρόκειτο για ζωντανούς οργανισμούς [π.χ. αισθητήρες (sensors) και ενεργοποιητές (actuators), **υλικά μνήμης σχήματος** (shape memory alloys, **πιεζοηλεκτρικά κεραμικά** (piezoelectric ceramics), **μαγνητοσυστολικά υλικά** (magnetostrictive materials) και ηλεκτρο- ή μαγνητο-ρεολογικά υγρά (electorheological/magnetorheological fluids)].

3) Ως **νανοϋλικά** (ή/και «nano-engineered materials») νοούνται τα υλικά εκείνα, τα οποία σχεδιάζονται ώστε οι κόκκοι τους να παραμένουν σε μέγεθος 10^{-9} m, και είναι συνήθως περί τα 100 nm (δηλ. όσο περίπου 500 ατομικές ακτίνες). Κλασικό παράδειγμα αποτελούν οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes).

4) Επί πλέον, μία σημαντική ακόμα κατηγορία είναι οι **ημιαγωγοί** (semiconductors), οι οποίοι παρουσιάζουν ηλεκτρικές ιδιότητες ενδιάμεσες εκείνων των ηλεκτρικών αγωγών (μετάλλων και κραμάτων) και των μονωτών (κεραμικών και πολυμερών). Αποτελούν σημαντική κατηγορία υλικών.

5) Τα **βιοϋλικά** (biomaterials) αποτελούν τη βάση για αντικατάσταση ή υποστήριξη μερών του ανθρώπινου σώματος, που έχουν υποστεί κάποια φθορά ή θραύση λόγω ατυχήματος ή κάποιας άλλης αιτίας, επειδή αυτά παρουσιάζουν εξαιρετική συμβατότητα με τους ανθρώπινους ιστούς. Ως βιοϋλικά μπορεί να χρησιμοποιηθούν μέταλλα (π.χ. τιτάνιο), κεραμικά, πολυμερή, σύνθετα και ημιαγωγοί.

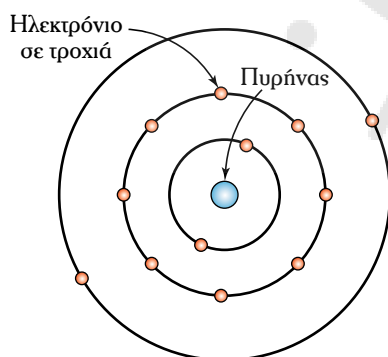
6) Στο μέλλον ολοένα και πιο πολύπλοκα υλικά θα αναπτύσσονται, με στόχο να μπορούν να αντεπεξέρχονται σε αντίξοες συνθήκες (extreme conditions). Τέτοια υλικά είναι π.χ. μέταλλα ανθεκτικά στην ακτινοβολία ακτίνων-X για πυρηνικές εφαρμογές, υλικά ανθεκτικά σε έντονα διαβρωτικές συνθήκες ή σε κυψέλες καυσίμου (ή/και κυψέλες υδρογόνου) (fuel cells, hydrogen fuel cells), υλικά για ισχυρούς μαγνήτες, για αισθητήρες π.χ. για τον έλεγχο καυσαερίων, ρύπων, υδάτων κ.λπ., σπάνιες

γαίες για χρήσεις σε μπαταρίες και σε ηλεκτρονικές συσκευές, αλλά και σε αυτοκίνητα κ.ά.

Γίνεται πλέον σαφές ότι είναι απολύτως απαραίτητη η σε βάθος γνώση της συμπεριφοράς των υλικών (ιδιαίτερα των μετάλλων-κραμάτων, των κεραμικών, των πολυμερών κ.ά.) για τον σχεδιασμό νέων και για την βέλτιστη χρήση, αξιοποίηση και ανακύκλωσή τους, ώστε να επιτυγχάνεται η απόλυτα **προσαρμοσμένη χρήση στην εκάστοτε εφαρμογή** (fit-for-purpose material design).

1.2 Δομή ατόμων – μορίων – ενώσεων και οι ιδιότητές τους.

Κάθε άτομο αποτελείται από πυρήνες πρωτονίων και νετρονίων, γύρω από τους οποίους διαγράφουν τροχιές κινούμενα ηλεκτρόνια ευρισκόμενα σε συγκεκριμένες στοιβάδες (σε συνολικά έως επτά ηλεκτρονικούς φλοιούς, ατομικό μοντέλο του Bohr) (σχ. 1.2α). Ηλεκτρόνια και πρωτόνια είναι ηλεκτρικώς φορτισμένα, με φόρτιση της τάξεως των $1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ($\text{C} = \text{coulomb}$)· τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό σθένος, ενώ τα πρωτόνια θετικό. Τα νετρόνια είναι ουδέτερα. Η μάζα των πρωτονίων και των νετρονίων είναι $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, σημαντικά μεγαλύτερη των ηλεκτρονίων, που είναι $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$. Πρωτόνια και νετρόνια μαζί ονομάζονται **νουκλεόνια**. Αφού ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενός ατόμου είναι ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων του ίδιου ατόμου, έπεται ότι το άτομο, όταν βρίσκεται ελεύθερο, παρουσιάζεται ως ηλεκτρικά ουδέτερο.



Σχ. 1.2α

Σχηματική απεικόνιση του ατομικού μοντέλου του Bohr.

1.2.1 Η δομή του ατόμου.

Το άτομο κάθε στοιχείου περιλαμβάνει ορισμένο αριθμό ηλεκτρονίων. Ο αριθμός των πρωτονίων κα-

λείται **ατομικός αριθμός** (Z) (atomic number) του στοιχείου. Αυτός εκφράζει, επίσης, και τον αριθμό των ηλεκτρονίων του (1 για το υδρογόνο H, 92 για το ουράνιο U). Ο ατομικός αριθμός αναγράφεται ως δείκτης στην κάτω αριστερή γωνία του συμβόλου (π.χ. ${}_{92}\text{U}$). Ο αριθμός των νουκλεονίων (πρωτόνια+νετρόνια) του ατόμου ονομάζεται **μαζικός αριθμός** (A) (atomic mass). Ο μαζικός αριθμός του πυρήνα ενός στοιχείου αναγράφεται στην αριστερή πλευρά επάνω από το σύμβολο του στοιχείου (π.χ. ${}^1\text{H}$). Αν θεωρήσουμε ότι ο αριθμός νετρονίων συμβολίζεται με το «N», τότε:

$$A \approx Z + N$$

Ο μαζικός αριθμός δεν είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός χημικού στοιχείου, αφού υπάρχουν πολλά διαφορετικά στοιχεία, των οποίων οι πυρήνες έχουν ίδιο μαζικό αριθμό (αλλά βέβαια διαφορετικό ατομικό αριθμό). Τέτοιοι πυρήνες είναι ισοβαρείς μεταξύ τους, π.χ. οι πυρήνες βορίου ${}^{12}\text{B}$ και άνθρακα ${}^{12}\text{C}$. Ο μαζικός αριθμός είναι διαφορετικός για κάθε ισότοπο ενός χημικού στοιχείου, αφού τα ισότοπα διαφέρουν μεταξύ τους στον αριθμό των νετρονίων που περιέχουν. Ως μαζικός αριθμός ενός στοιχείου αναφέρεται αυτός του σταθερού ισότοπου και αν αυτά είναι πολλά, του ισότοπου με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στο χημικό στοιχείο. Για παράδειγμα ο χρυσός (Au) που υπάρχει στη φύση αποτελείται από ένα σταθερό ισότοπο με μαζικό αριθμό 197 και επομένως ο μαζικός αριθμός του χρυσού είναι 197 (σύμβολο ${}^{197}\text{Au}$).

Το **ατομικό βάρος** (AB) (atomic weight) ή (σχετική ή μέση) **ατομική μάζα** (A_r) είναι ένας αριθμός που αναφέρεται σε ένα στοιχείο ή σε ένα ισότοπο ενός στοιχείου. Εκφράζει τη μάζα του ατόμου κάποιου στοιχείου μετρημένη σε μονάδες ατομικής μάζας και ισούται με τη μάζα σε γραμμάρια που περιέχει ένα mole ατόμων του ισότοπου ή του στοιχείου.

Το ατομικό βάρος ενός ισότοπου είναι ο αριθμός που δείχνει πόσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του ατόμου του ισότοπου από το 1/12 της μάζας του ατόμου του άνθρακα-12 (${}^{12}\text{C}$). Το 1/12 της μάζας του ατόμου του άνθρακα-12 (${}^{12}\text{C}$) ονομάζεται **μονάδα ατομικής μάζας** (amu ή u).

Το ατομικό βάρος ή το μοριακό βάρος (molecular weight) μίας ενώσεως μπορεί να καθοριστεί στη βάση της ατομικής μάζας (amu ή u) ανά άτομο (molecule) ή μάζας ανά mole του υλικού. Σε ένα mole

ύλης βρίσκονται $6,023 \times 10^{23}$ (αριθμός Avogadro) άτομα ή molecules. Έτσι,

$$1 \text{ amu/atom (ή molecule)} = 1 \text{ g/mol}$$

Για παράδειγμα, το ατομικό βάρος του σιδήρου (Fe) είναι 55,85 amu/atom ή 55,85 g/mol. Ορισμένες φορές η χρήση amu/atom ή mol είναι βολική, ενώ συνήθως προτιμάται η χρήση g (ή Kg)/mol.

1.2.2 Σχηματισμός των χημικών ενώσεων. Ατομικοί δεσμοί.

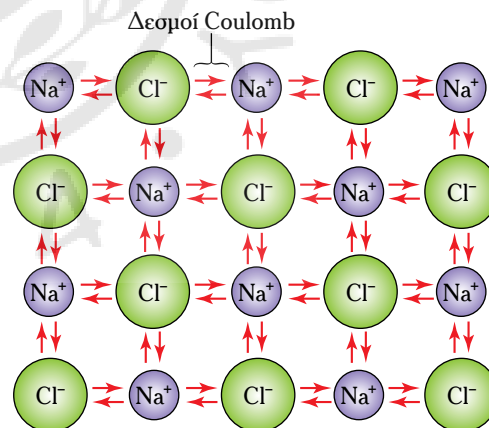
Τα διάφορα απλά στοιχεία αντιδρούν μεταξύ τους κάτω από κατάλληλες συνθήκες και σχηματίζουν νέα σώματα, τα οποία καλούνται **χημικές ενώσεις**. Εξάιρεση αποτελούν τα ευγενή αέρια, όπως είναι το ήλιο (He), το νέο (Ne), το αργό (Ar) και άλλα, τα οποία είναι χημικώς αδρανή (δηλ. δεν σχηματίζουν χημικές ενώσεις). Άλλωστε, τα ευγενή αέρια έχουν στον εξώτατο ηλεκτρονικό φλοιό τους 8 ηλεκτρόνια με εξαίρεση μόνο το ήλιο, που έχει 2. Πιστεύεται ότι ο αριθμός των οκτώ ηλεκτρονίων του εξώτατου ηλεκτρονικού φλοιού αποτελεί την αιτία πίσω από την εξασφάλιση της σταθερότητας των στοιχείων από άποψη χημικών ιδιοτήτων και συμπεριφοράς. Συμπεραίνομε, λοιπόν, ότι **για να συντελεστεί μία χημική ένωση, θα πρέπει ο εξωτερικός ηλεκτρονικός φλοιός των ατόμων να μην έχει τη διαμόρφωση των ευγενών αερίων. Όταν τα άτομα αποκτήσουν οκτώ ηλεκτρόνια στον εξώτατο ηλεκτρονικό φλοιό τους, τότε διακόπτεται κάθε περαιτέρω αντίδραση μεταξύ τους.** Αυτό συμβαίνει γιατί τα ηλεκτρόνια αυτά είναι και τα λιγότερο δεσμευμένα από τον πυρήνα και έρχονται πρώτα σε επαφή με τα ηλεκτρόνια των ξένων ατόμων. Ο εξωτερικός ηλεκτρονικός φλοιός ονομάζεται **φλοιός σθένους** του στοιχείου και τα ηλεκτρόνια του **ηλεκτρόνια σθένους**.

Κατά τις διάφορες αντιδράσεις το άτομο προσλαμβάνει ή αποβάλλει ηλεκτρόνια, ώσπου ο φλοιός σθένους του να συμπληρωθεί με οκτώ ηλεκτρόνια, οπότε το άτομο εμφανίζεται ως **ión**. Τα στοιχεία που έχουν τάση να προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια (εκείνα που έχουν στον φλοιό σθένους 7, 6, 5 ή και 4 ηλεκτρόνια κάποιες φορές), και να γίνονται αρνητικά ίοντα, τα ονομάζουμε **ηλεκτραρνητικά**. Τα στοιχεία που έχουν τάση να αποβάλλουν ηλεκτρόνια (εκείνα που έχουν στον φλοιό σθένους 1, 2, 3 ή και 4 ηλεκτρόνια κάποιες φορές) και να παρουσιάζονται ως θετικά ίοντα, ονομάζονται **ηλεκτροθετικά**. Σύμφωνα

να με όσα αναφέραμε, παρατηρούμε γενικά ότι τα άτομα συνδέονται μεταξύ τους με τρεις τρόπους, δημιουργούνται δηλαδή τρία είδη **ατομικών δεσμών**:

1) Ο ετεροπολικός ή ιοντικός δεσμός.

Το είδος αυτό ατομικού δεσμού το συναντάμε στα στερεά σώματα της Ανόργανης Χημείας και παρατηρείται όταν ηλεκτροθετικά στοιχεία (μέταλλα) συναντήσουν ηλεκτραρνητικά (αμέταλλα). Στην περίπτωση αυτή τα άτομα του ηλεκτροθετικού στοιχείου αποβάλλουν τα ηλεκτρόνια σθένους, ενώ τα άτομα του ηλεκτραρνητικού στοιχείου τα προσλαμβάνουν έτσι, ώστε ο φλοιός σθένους τους να αποκτήσει δομή ευγενούς αερίου. Ως παράδειγμα αναφέρουμε το χλωριούχο νάτριο (NaCl). Το νάτριο είναι μέταλλο, δηλαδή ηλεκτροθετικό στοιχείο με 1 ηλεκτρόνιο σθένους. Το χλώριο είναι αμέταλλο με 7 ηλεκτρόνια σθένους. Κατά τον σχηματισμό του χλωριούχου νατρίου το ένα ηλεκτρόνιο σθένους του νατρίου συμπληρώνει τα 7 ηλεκτρόνια σθένους του χλωρίου. Έτσι, ο φλοιός σθένους και των δύο ατόμων (του νατρίου και του χλωρίου) είναι συμπληρωμένος με 8 ηλεκτρόνια. Το άτομο του νατρίου έχει γίνει θετικό ίον, γιατί έχει χάσει ένα ηλεκτρόνιο και το άτομο του χλωρίου αρνητικό ίον, γιατί έχει προσλάβει ένα ηλεκτρόνιο. Τα δύο αυτά ίοντα έλκονται μεταξύ τους γιατί έχουν ηλεκτρικό φορτίο αντίθετου σημείου (σχ. 1.2β).



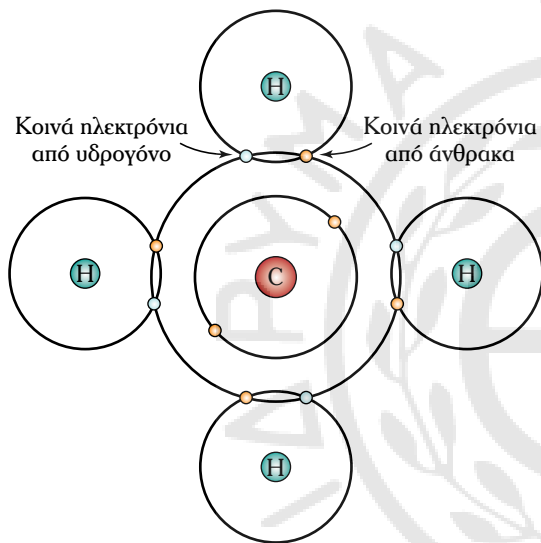
Σχ. 1.2β

Σχηματική απεικόνιση του ιοντικού δεσμού του χλωριούχου νατρίου (NaCl).

2) Ο ομοιοπολικός δεσμός.

Το είδος αυτό του δεσμού το συναντάμε κυρίως στις οργανικές ενώσεις. Σύμφωνα με αυτόν, δεν παρατηρείται μεταφορά ηλεκτρονίων από το άτομο του

ενός στοιχείου στο άτομο του άλλου. Αντί γι' αυτό, ορισμένος αριθμός ηλεκτρονίων σθένους είναι κοινός μεταξύ των δύο ατόμων. Έτσι, είναι δυνατόν και τα δύο άτομα να έχουν συμπληρωμένο τον φλοιό σθένους τους. Στο μόριο του μεθανίου (H_4) 4 άτομα υδρογόνου αντιδρούν με 1 άτομο άνθρακα (σχ. 1.2γ). Το άτομο του άνθρακα έχει 4 ηλεκτρόνια σθένους, συνδέεται δε με 4 άτομα υδρογόνου με κοινά ζεύγη ηλεκτρονίων. Έτσι, συμπληρώνονται τα 8 ηλεκτρόνια του φλοιού σθένους του άνθρακα, ενώ συγχρόνως κάθε άτομο υδρογόνου με το να δανειζεται 1 ηλεκτρόνιο σθένους από τον άνθρακα παρουσιάζει φλοιό σθένους με 2 ηλεκτρόνια, όπως συμβαίνει και για το ευγενές αέριο ήλιον.

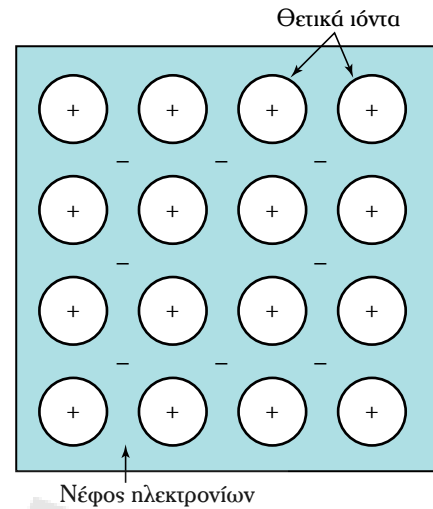


Σχ. 1.2γ

Σχηματική απεικόνιση του ομοιοπολικού δεσμού του μεθανίου (CH_4).

3) Ο μεταλλικός δεσμός.

Τον δεσμό αυτόν τον συναντάμε στα μέταλλα και στα κράματα. Τα ηλεκτρόνια σθένους στην περίπτωση αυτή δεν συγκρατούνται σταθερά απ' τα άτομα, αλλά μπορούν να μετακινούνται ελεύθερα σε όλη τη μάζα του μετάλλου. Έτσι, τα ηλεκτρόνια σθένους δεν σχετίζονται αποκλειστικά πια με ορισμένο άτομο, αλλά κατανέμονται έτσι, ώστε να σχηματίζεται **νέφος ηλεκτρονίων** (σχ. 1.2δ). Το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια σθένους μετακινούνται σχετικά ελεύθερα, μπορεί να ερμηνεύσει την **υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα** των μετάλλων. Ο μεταλλικός δεσμός δικαιολογεί, επίσης, και την **πλαστικότητα** των μετάλλων, γιατί στρώματα θετικών ιόντων, αν επιδρά-



Σχ. 1.2δ

Σχηματική απεικόνιση του μεταλλικού δεσμού.

σουν πάνω τους δυνάμεις, μπορούν να ολισθήσουν σε άλλα γειτονικά στρώματα ιόντων, χωρίς να διαταραχθεί σοβαρά η σχέση της θέσεώς τους ως προς το νέφος ηλεκτρονίων, από το οποίο δανείζονται τα ηλεκτρόνια.

1.2.3 Η κρυσταλλική δομή των μετάλλων.

Εφόσον ορίσαμε την έννοια του δεσμού σε ατομικό επίπεδο, γίνεται γνωστό πώς αυτός καθορίζεται από τη δομή των ηλεκτρονίων των επιμέρους ατόμων. Στη συνέχεια περνάμε στη δομή της ύλης και ειδικότερα στον τρόπο διατάξεως των υλικών σε στερεά κατάσταση. Θεμελιώδες ζήτημα για την κατανόηση της στερεάς καταστάσεως της ύλης είναι η κατανόηση της έννοιας της κρυσταλλικής δομής. Αυτή ορίζεται με όρους μίας **στοιχειώδους κυψελίδας** (unit cell) (σχ. 1.2ε, σχ. 1.2στ και σχ. 1.2ζ). Επομένως, κάθε υλικό, του οποίου τα άτομα καταλαμβάνουν στον τρισδιάστατο χώρο μία συγκεκριμένη διάταξη (στοιχειώδης κυψελίδα) και η διάταξη αυτή επαναλαμβάνεται περιοδικά σε θέσεις πολλαπλάσιες των ατομικών αποστάσεων (long-range order), διαθέτει **κρυσταλλική δομή** (crystal structure). Αυτή η δομή σχηματίζεται μετά τη **στερεοποίηση** (solidification) και χάνεται κατά την **τήξη** (melting).

Για την περιγραφή της κρυσταλλικής δομής, των ατόμων (ή ιόντων), αντιλαμβανόμαστε τα άτομα ως σφαίρες (atomic hard sphere model), που διαθέτουν συγκεκριμένες και προκαθορισμένες διαμέτρους χωρίς να λαμβάνομε υπόψη μας την υπόλοιπη ατομική δομή, δηλαδή τα ηλεκτρόνια. Σύμφωνα με

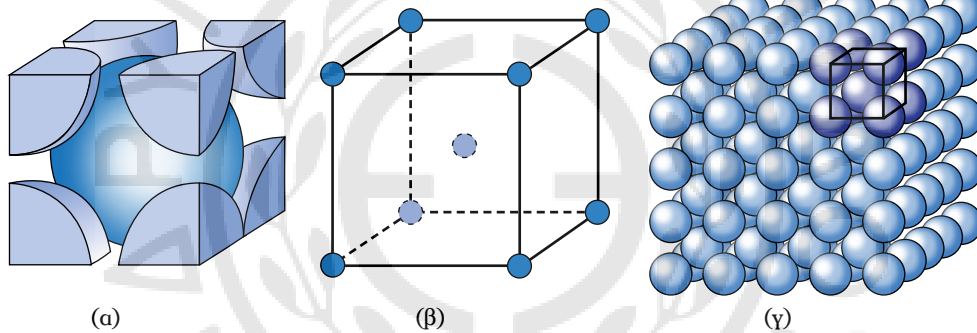
τη θεώρηση αυτή, τα γειτονικά άτομα εφάπτονται το ένα στο άλλο. Αν θεωρήσουμε μικρότερο τον όγκο των σφαιρών, αλλά σταθερή την απόσταση από το κέντρο τους, συνθέτουμε την έννοια του **πλέγματος** (lattice) και μπορούμε να απεικονίσουμε την κυψελίδα με όρους γεωμετρικούς. Υπάρχουν 14 τύποι κρυσταλλικών πλεγμάτων. Τα περισσότερα όμως από τα μέταλλα κρυσταλλώνονται κατά τρία απλά και με μεγάλη συμμετρία κρυσταλλικά πλέγματα, τα οποία είναι τα εξής:

1) Το **χωροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα** (Body Centered Cubic – BCC) (σχ. 1.2ε). Παραδείγματα μετάλλων: βανάδιο (V), μολυβδαίνιο (Mo), βολφράμιο (W), α-σίδηρος (α-Fe), δ-σίδηρος (δ-Fe), α-χρώμιο (α-Cr). Στο **χωροκεντρωμένο** κυβικό πλέγμα τα κέντρα βάρους των ατόμων (σφαιρών) καταλαμβάνουν τις κορυφές και το γεωμετρικό κέντρο

της στοιχειώδους κυψελίδας. Σε κάθε στοιχειώδη κυψελίδα αντιστοιχούν δύο άτομα. Πολλές ενωμένες στοιχειώδεις κυψελίδες αποτελούν το κρυσταλλικό πλέγμα.

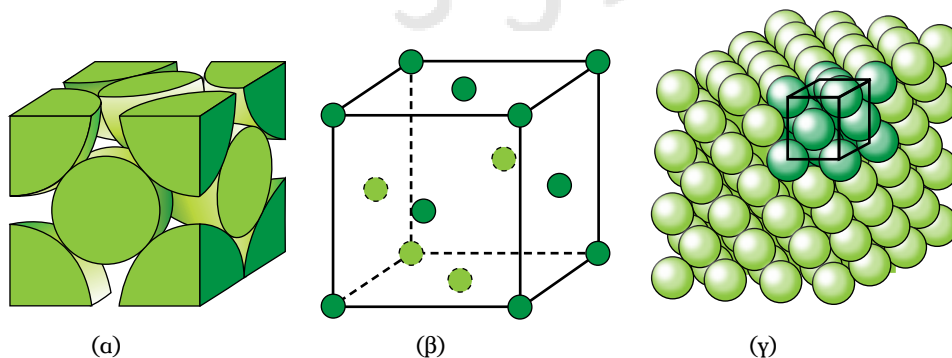
2) Το **εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα** (Face Centered Cubic – FCC) (σχ. 1.2στ). Παραδείγματα μετάλλων: χαλκός (Cu), άργυρος (Ag), χρυσός (Au), αργίλιο ή αλουμίνιο (Al), μόλυβδος (Pb), γ-σίδηρος (γ-Fe), β-χρώμιο (β-Cr), β-κοβάλτιο (β-Co), β-νικέλιο (β-Ni). Στο **εδροκεντρωμένο** κυβικό πλέγμα τα κέντρα βάρους των ατόμων καταλαμβάνουν τις κορυφές και τα γεωμετρικά κέντρα των εδρών του στοιχειώδους κύβου του πλέγματος (σχ. 1.2στ). Σε κάθε στοιχειώδη κύβο αντιστοιχούν **τέσσερα άτομα** στην περίπτωση αυτή.

3) Το **μέγιστης πυκνότητας εξαγωνικό** (Hexagonal Close-Packed – HCP) (σχ. 1.2ζ). Παραδείγ-



Σχ. 1.2ε

Σχηματική απεικόνιση του χωροκεντρωμένου κυβικού πλέγματος (BCC): (α) θεώρηση σφαιρών (hard sphere model), (β) μειωμένου μεγέθους σφαίρες (reduced-sphere model) και (γ) διάταξη πολυκρυσταλλικού υλικού με επισήμανση της στοιχειώδους κυψελίδας (unit cell).



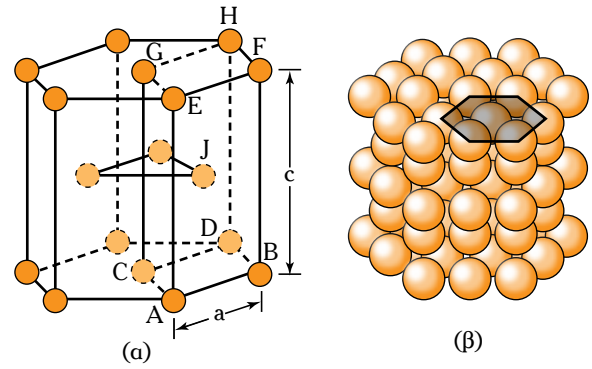
Σχ. 1.2στ

Σχηματική απεικόνιση του εδροκεντρωμένου κυβικού πλέγματος (FCC): (α) θεώρηση σφαιρών (hard sphere model), (β) μειωμένου μεγέθους σφαίρες (reduced-sphere model) και (γ) διάταξη πολυκρυσταλλικού υλικού με επισήμανση της στοιχειώδους κυψελίδας (unit cell).

ματα μετάλλων: βηρύλλιο (Be), μαγνήσιο (Mg), ψευδάργυρος (Zn), κάδμιο (Cd), α-κοβάλτιο (α-Co), α-νικέλιο (α-Ni). Στο **μέγιστης πυκνότητας εξαγωγικό κρυσταλλικό πλέγμα** τα κέντρα βάρους των ατόμων διατάσσονται, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2ζ. Σε κάθε στοιχειώδη κυψελίδα αντιστοιχούν **έξι άτομα**.

Ο πίνακας 1.2 παρουσιάζει τις σχέσεις και τις παραμέτρους του πλέγματος για τα επτά βασικότερα κρυσταλλικά συστήματα, το **κυβικό**, το **εξαγωγικό**, το **τετραγωνικό**, το **τριγωνικό**, το **ορθορομβικό**, το **μονοκλινές** και το **τρικλινές**.

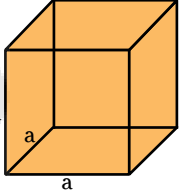
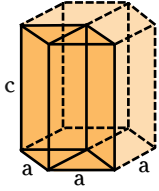
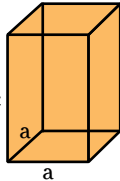
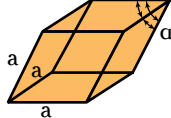
Μονοκρυσταλλοί, πολυκρυσταλλικά υλικά, αλλά και άμορφα (όσα υλικά επιδεικνύουν την απουσία κρυσταλλικότητας στη δομή τους) αποτελούν τη βάση των υλικών, των μετάλλων και κραμάτων, που χρησιμοποιούμε καθημερινά.



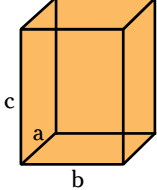
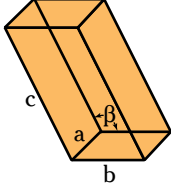
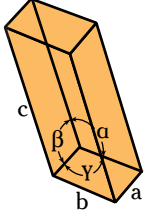
Σχ. 1.2ζ

Σχηματική απεικόνιση του εξαγωγικού πλέγματος μέγιστης πυκνότητας: (α) θεώρηση μειωμένου μεγέθους σφαιρών (*reduced-sphere model*) και (β) διάταξη πολυκρυσταλλικού υλικού με επισήμανση της στοιχειώδους κυψελίδας (*unit cell*).

Πίνακας 1.2
Σχέσεις συμμετρίας και παράμετροι πλέγματος για τα επτά βασικότερα κρυσταλλικά συστήματα.

Κρυσταλλικό πλέγμα/σύστημα Crystal system	Σχέσεις συμμετρίας Axial relationships	Γωνίες Interaxial angles	Γεωμετρία κυψελίδας Unit cell geometry
Κυβικό Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Εξαγωγικό Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Τετραγωνικό Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Ρομβοεδρικό (τριγωνικό) Rhombohedral (trigonal)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	

(συνεχίζεται)

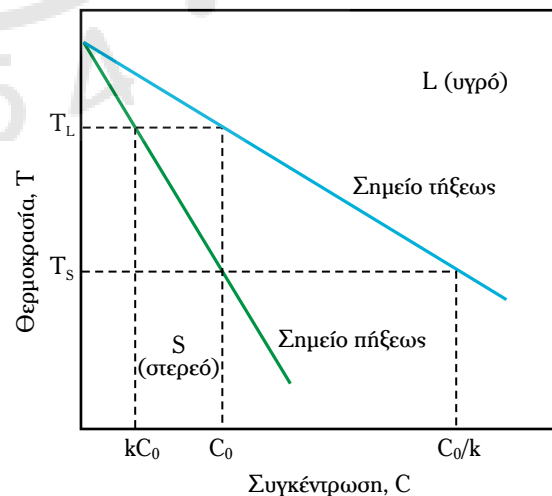
Κρυσταλλικό πλέγμα/σύστημα Crystal system	Σχέσεις συμμετρίας Axial relationships	Γωνίες Interaxial angles	Γεωμετρία κυψελίδας Unit cell geometry
Ορθορομβικό Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Μονοκλινές Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Τρικλινές Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

1.2.4 Βασικές αρχές στερεοποιήσεως (κρυσταλλώσεως).

Όταν ένα καθαρό μέταλλο ή ένα κράμα στερεοποιείται, αποκτά κρυσταλλική δομή. Επομένως, περνάει από την πιο αδιάτακτη, υγρή κατάσταση (τήγμα), σε μία νέα κατάσταση συγκεκριμένης πλέον δομής στον τρισδιάστατο χώρο.

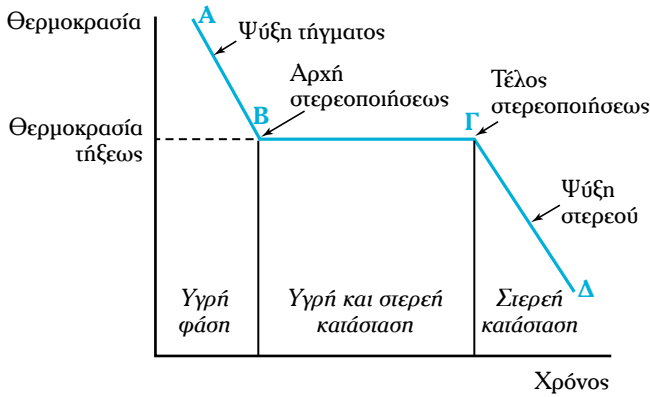
Όταν αρχίσει το τήγμα να αποψύχεται (με αφαίρεση θερμότητας) και αποκτήσει ορισμένη θερμοκρασία, χαρακτηριστική για κάθε καθαρό μέταλλο [**σημείο πήξεως (solidus)**, T_S ή **τήξεως (liquidus)** T_L / πρόκειται για την ίδια θερμοκρασία, η οποία αναφέρεται στην απόψυξη και στην αναθέρμανση αντίστοιχα], τότε αρχίζει η στερεοποίησή του (σχ. 1.2n). Αρχικά σχηματίζεται στη μάζα του τήγματος μικροσκοπικός κρύσταλλος, έχομε συνύπαρξη στερεού και υγρού αμέσως μετά, σχηματίζονται και άλλοι μικροσκοπικοί κρύσταλλοι σε τυχαίες θέσεις, οι οποίοι ονομάζονται **φύτρα** ή **κέντρα κρυσταλλώσεως**. Το σχήμα 1.2θ παρουσιάζει την καμπύλη αποψύξεως ενός καθαρού μετάλλου. Στις θέσεις που έχουν δημιουργηθεί φύτρα, αρχίζει ο σχηματισμός της κρυσταλλικής δομής. Οι κρύσταλλοι αυτοί έχουν μορφή **δενδριτών**, δηλαδή κρυσταλλικών

μερών και των διακλαδώσεών τους με μορφολογία και όψη αντίστοιχη ενός δένδρου. Από αυτούς τους κλάδους φυτρώνουν άλλοι δευτερεύοντες κλάδοι κ.ο.κ. (σχ. 1.2ι). Οι κλάδοι των δενδριτών συνεχίζουν να αναπτύσσονται, ώσπου να καταληφθεί ο χώρος μεταξύ τους από στερεοποιημένο μέταλλο



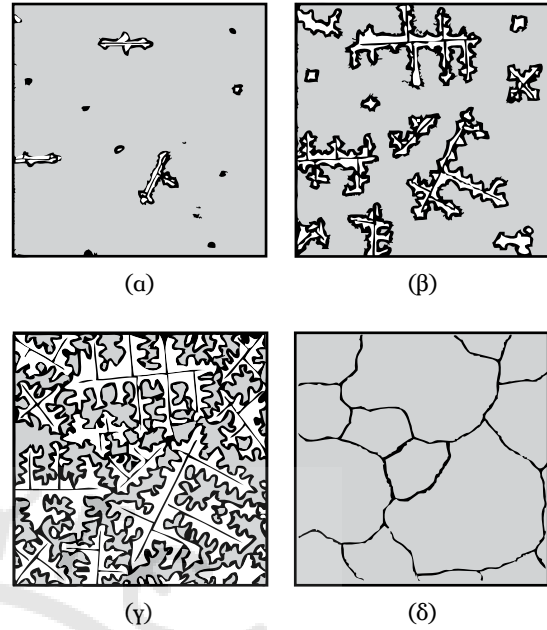
Σχ. 1.2n

Μονοφασική περιοχή διαγράμματος φάσεων κατά την έναρξη στερεοποιήσεως.



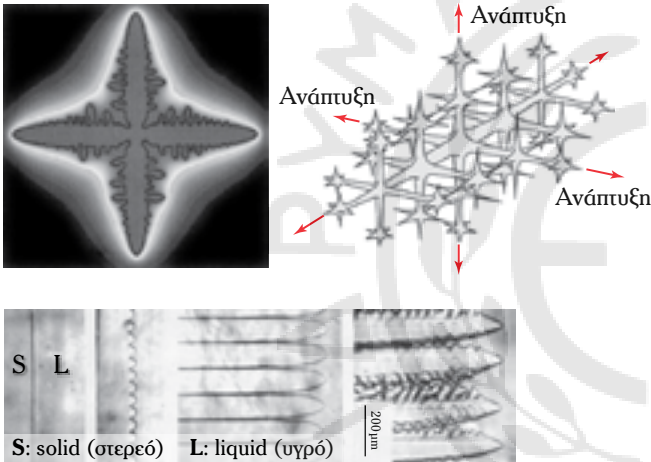
Σχ. 1.20

Καμπύλη αποψύξεως (θερμοκρασίας-χρόνου) για τη στερεοποίηση καθαρού μετάλλου. Οι κλίσεις των AB και ΓΔ εξαρτώνται από την ειδική θερμότητα του υγρού και στερεού αντίστοιχα.



Σχ. 1.21α

Σχηματική παράσταση της εξέλιξης της στερεοποίησης ενός μετάλλου. (α) Πρώτα εμφανιζόμενα φύτρα, (β) πρώτοι δενδρίτες, (γ) ανάπτυξη στερεού και (δ) εμφάνιση κόκκων και ορίων κόκκου.



Σχ. 1.21

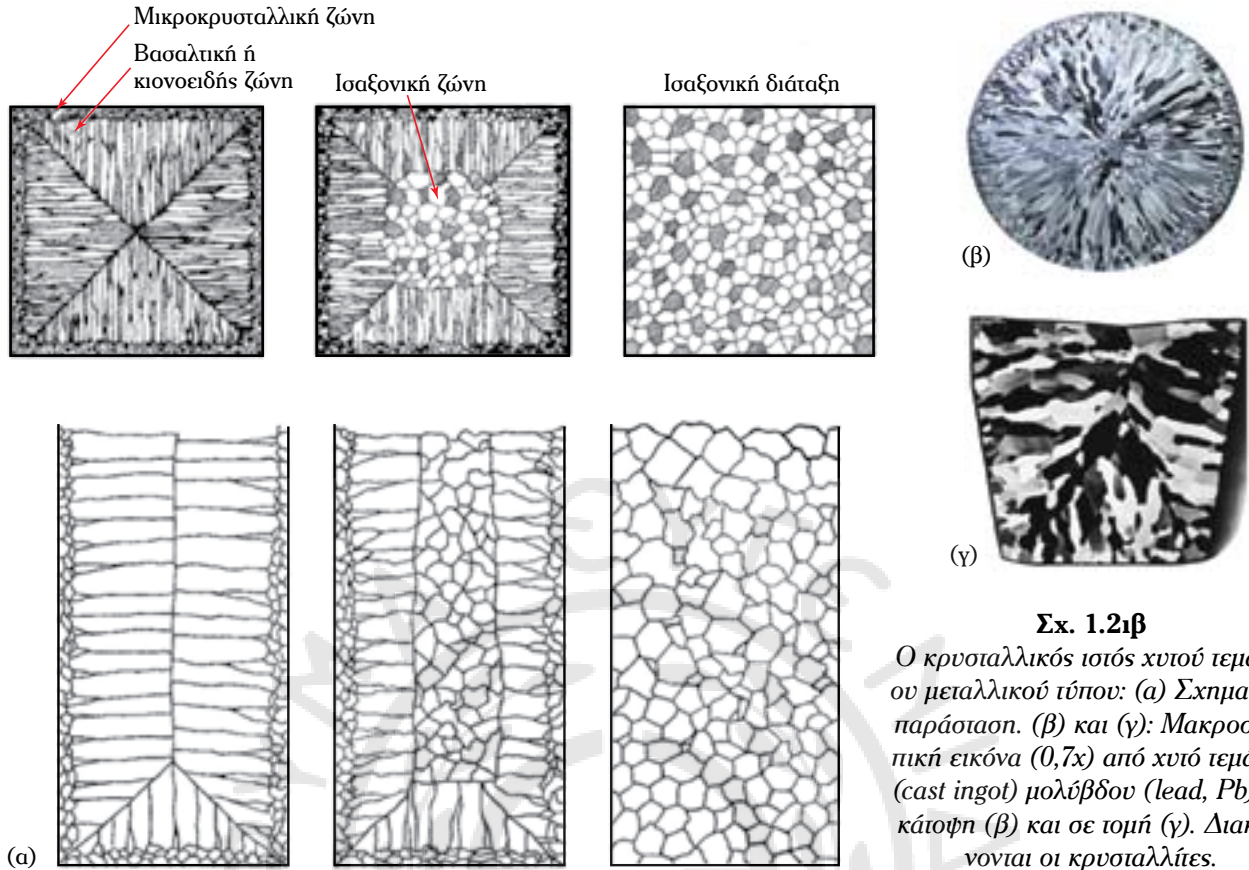
Μορφή δενδρίτη και σχηματική απεικόνιση της αναπτύξεώς του σε διαφορετικές διευθύνσεις.

(οι πρωτογενείς κλάδοι αναπτύσσονται πάνω σε συγκεκριμένες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις, π.χ. η διεύθυνση <100> στα BCC και FCC). Εν τω μεταξύ οι εξωτερικοί κλάδοι των δενδριτών κατά την ανάπτυξή τους εφάπτονται με κλάδους άλλων γειτονικών δενδριτών, που έχουν αναπτυχθεί ανεξάρτητα από άλλα φύτρα. Έτσι, στις θέσεις επαφής των κλάδων διαφορετικών δενδριτών εμποδίζεται η περαιτέρω ανάπτυξη. Ο τρόπος αυτός της δημιουργίας των κρυστάλλων κατά τη στερεοποίηση μετάλλων εξηγεί το ακανόνιστο γενικά σχήμα τους. Στο σχήμα 1.21α απεικονίζεται σχηματικά η πορεία της στερεοποίησης ενός μετάλλου.

Η ανάπτυξη μπορεί να είναι επίπεδη, πλευρική

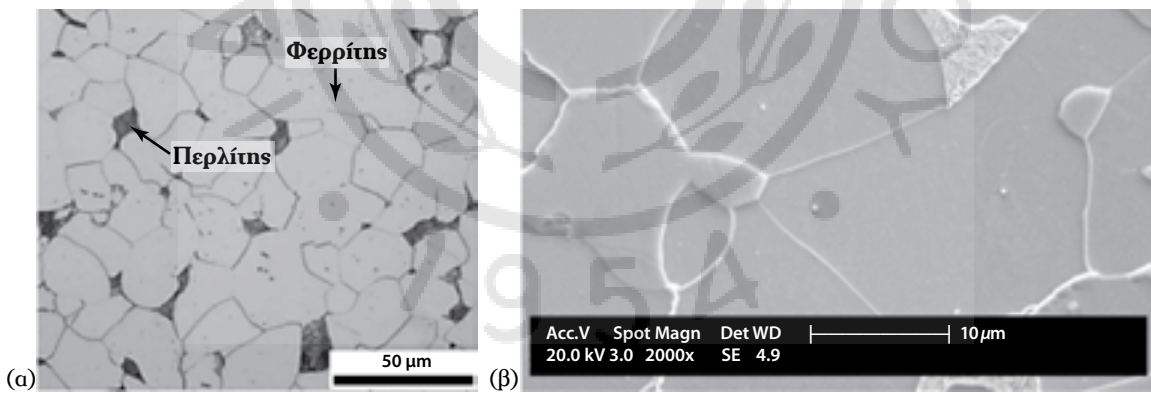
ή κοχλιωτή. Από θερμοδυναμικής πλευράς, τα μεταλλικά υλικά με υψηλές τιμές εντροπίας και τήξεως αναπτύσσονται σε επίπεδες και λείες επιφάνειες. Αν όμως η διεπιφάνεια στερεού – υγρού περιέχει «σκαλοπάτια», τότε προσκολλώνται πάνω σε αυτά. Τα «σκαλοπάτια» δεν είναι θέσεις ισορροπίας. Όταν συμπληρωθεί η στερεοποίηση, τα μέταλλα αποτελούνται από κόκκους ή κρυσταλλίτες, είναι δηλαδή πολυκρυσταλλικά. Οι επιφάνειες επαφής των δενδριτών αποτελούν τα «όρια των κόκκων». Η μορφολογία της στερεοποιημένης ζώνης εξαρτάται από τον ρυθμό προόδου της στερεοποίησης, η οποία φυσικά είναι απόρροια του ρυθμού αποψύξεως και των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του μετάλλου ή του κράματος. Γενικά, η στερεοποίηση ξεκινά από την εξωτερική επιφάνεια (που βρίσκεται σε επαφή με τα τοιχώματα του τύπου/καλουπιού) και προχωρά προς το εσωτερικό. Επομένως, παρατηρείται βαθμίδα θερμοκρασίας.

Ο ιστός της στερεοποίησης αποτελείται από τρεις ζώνες διαφορετικής μορφολογίας: αυτές είναι από έξω προς τα μέσα: η **μικροκρυσταλλική** (chilled), η **βασαλική** ή **κιονοειδής** (columnar) και η **ισοαξονική** (equiaxed). Στο σχήμα 1.21β διακρίνεται ο κρυσταλλικός ιστός χυτού τεμαχίου σχηματικά [σχ. 1.21β(α)] και μακροσκοπικά [σχ. 1.21β(β)(γ)]. Τα



Σχ. 1.21β

Ο κρυσταλλικός ισός χυτού τεμαχίου μεταλλικού τύπου: (α) Σχηματική παράσταση. (β) και (γ): Μακροσκοπική εικόνα (0,7x) από χυτό τεμάχιο (cast ingot) μολύβδου (lead, Pb) σε κάτοψη (β) και σε τομή (γ). Διακρίνονται οι κρυσταλλίτες.



Σχ. 1.21γ

Χάλυβας κατασκευών ή ναυπηγικός χάλυβας (χαμηλά κραματωμένος υποευτηκτοειδής χάλυβας): (α) εικόνα από το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο (Optical Microscopy – OM), και (β) εικόνα από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως (Scanning Electron Microscope – SEM).

μέταλλα δεν είναι συνήθως απόλυτα καθαρά, αλλά περιέχουν διάφορες ακαθαρσίες ή προσμείξεις, όπως είναι το θειάφι, ο φωσφόρος, ο χαλκός κ.ά.. Οι ακαθαρσίες αυτές βρίσκονται συνήθως στα όρια των κόκκων. Η παρουσία τέτοιων ξένων στοιχείων απομειώνει τις μηχανικές αντοχές του κράματος και για τον λόγο αυτόν καταβάλλεται προσπάθεια περιορισμού

τους. Στο σχήμα 1.21γ παρουσιάζεται η κρυσταλλική δομή ενός χάλυβα κατασκευών ή ναυπηγικού χάλυβα (χαμηλά κραματωμένος υποευτηκτοειδούς χάλυβα) στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο (Optical Microscopy – OM) αποτελούμενου από φερρίτη (α-Fe) και περλίτη (μείγμα φερρίτη - σεμεντίτη, δηλ. του καρβιδίου του σιδήρου – Fe₃C).

1.3 Τα κράματα.

1.3.1 Το κράμα.

Κράμα καλείται κάθε μεταλλικό σώμα, το οποίο προκύπτει από την ανάμειξη δύο ή περισσότερων χημικών στοιχείων, κατά κανόνα σε κατάσταση τήξεως (ή μέσω συμπίεσης, όπως στην περίπτωση της κonioμεταλλουργίας), από τα οποία το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο (κύριο στοιχείο του κράματος). Για τον σχηματισμό κραμάτων χρησιμοποιούνται διάφορα μέταλλα, αμέταλλα ή μεταλλοειδή, και κυρίως ο άνθρακας. Τα κράματα αποτελούν την κύρια ύλη των βιομηχανικών εφαρμογών, των μεταλλικών κατασκευών κ.ά., αφού με την κραματοποίηση βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητες του κύριου μετάλλου, όπως είναι η σκληρότητα, το όριο ελαστικότητας (ή διαρροής), η αντοχή σε εφελκυσμό και η δυσθραυστότητα (έννοιες που θα συναντήσουμε στο κεφ. 6). Επίσης, είναι πιθανό να βελτιώνεται αντίστοιχα και η αντοχή σε κόπωση, φθορά ή/και διάβρωση. Ο χάλυβας (κράμα σιδήρου και άνθρακα), για τον οποίο γίνεται ιδιαίτερη μνεία παρακάτω, είναι ανθεκτικότερος από τον σίδηρο και μάλιστα μπορεί να γίνει ακόμα πιο ανθεκτικός με κατάλληλες θερμικές κατεργασίες.

Τα καθαρά μέταλλα τα χρησιμοποιούμε μόνο σε περιπτώσεις που μας ενδιαφέρουν οι ιδιαίτερες ιδιότητές τους, όπως είναι η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού και αλουμινίου (αργιλίου), που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ηλεκτρικών αγωγών.

Τα κράματα, ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων που περιλαμβάνουν, διακρίνονται σε **διμερή** (δύο στοιχεία), **τριμερή** (τρία στοιχεία) κ.λπ.. Τα διμερή κράματα, τα οποία και θα μελετήσουμε, διακρίνονται σε κράματα μετάλλου-μετάλλου, σε κράματα μετάλλου-μεταλλοειδούς και σε κράματα μετάλλου-αμέταλλου.

Παρακολουθούμε τώρα τι συμβαίνει, όταν δύο μέταλλα Α και Β που σχηματίζουν κράμα, αναμειγνύονται σε κατάσταση τήξεως και μετά τα αφήνουμε να στερεοποιηθούν ήρεμα. Κατ' αρχάς, προϋπόθεση αποτελεί ότι η ανάμειξη των δύο μετάλλων σε κατάσταση τήξεως είναι πλήρης και, επομένως, το τήγμα σε όλη του τη μάζα είναι ομοιογενές. Κατά τη στερεοποίηση του κράματος μπορούν να παρουσιασθούν οι εξής περιπτώσεις:

1) Τα μέταλλα που αποτελούν το κράμα και στην κατάσταση τήξεως ήταν τελείως αναμείξιμα, γίνονται

πλήρως μη αναμείξιμα στη στερεά κατάσταση και επομένως παρουσιάζονται στο στερεοποιημένο κράμα ως απλά, ξεχωριστά στοιχεία (Α και Β) και διατηρούν την αρχική τους μορφή και τις ιδιότητές τους.

2) Τα μέταλλα που στην κατάσταση τήξεως ήταν τελείως αναμείξιμα, εξακολουθούν να είναι πλήρως ή μερικώς αναμείξιμα και στην στερεά κατάσταση.

3) Καθώς η στερεοποίηση του κράματος προχωρεί, τα δύο μέταλλα αντιδρούν χημικά και σχηματίζουν μεσομεταλλικές ενώσεις (intermetallic compounds), που αποτελούν ιδιαίτερο κρυσταλλικό είδος στην κρυσταλλική δομή του κράματος.

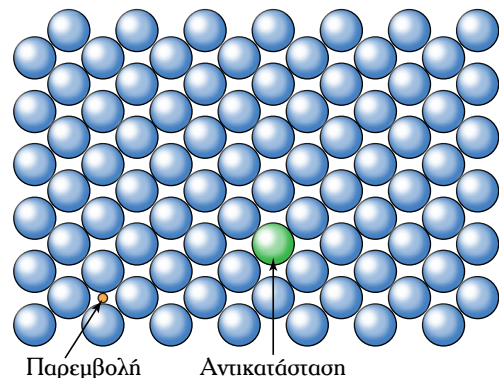
Στην πρώτη περίπτωση σχηματίζεται απλό στερεό διάλυμα (θα δώσουμε τον ορισμό παρακάτω), ενώ στη δεύτερη περίπτωση προκύπτει σχηματισμός δύο διαφορετικών στερεών διαλυμάτων.

1.3.2 Το στερεό διάλυμα.

Στερεό διάλυμα σχηματίζεται όταν σε διμερές κράμα τα δύο στοιχεία Α (κύριο στοιχείο του κράματος) και Β, που είναι πλήρως αναμείξιμο στην κατάσταση τήξεως, παραμένουν διαλυμένα το ένα μέσα στο άλλο και μετά τη στερεοποίηση. Για να σχηματισθεί στερεό διάλυμα, θα πρέπει τα άτομα του στοιχείου Β να παίρνουν θέσεις μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του άλλου στοιχείου Α. Ανάλογα με τη θέση που καταλαμβάνουν τα άτομα του Β μέσα στον κρυσταλλικό ιστό του Α, διακρίνουμε:

1) Το στερεό διάλυμα αντικαταστάσεως (substitutional solid solution).

Σύμφωνα με αυτό, τα άτομα του μετάλλου Β αντικαθιστούν (ακανόνιστα και σπανιότερα κανονικά) μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα άτομα του μετάλλου Α (σχ. 1.3α).



Σχ. 1.3α

Στερεό διάλυμα αντικαταστάσεως και παρεμβολής αντίστοιχα.

2) Το στερεό διάλυμα παρεμβολής (*interstitial solid solution*).

Τα άτομα του στοιχείου Β (συνήθως αμέταλλα) παίρνουν θέσεις ακανόνιστα και σπανιότερα κανονικά μεταξύ των ατόμων του Α (μετάλλου) μέσα στο κρυσταλλικό του πλέγμα (σχ. 1.3α). Τυπικό στερεό διάλυμα παρεμβολής είναι του σιδήρου και του άνθρακα, που αποτελεί συστατικό των χαλύβων. Το στερεό αυτό διάλυμα, ανάλογα με τη θερμοκρασία σχηματισμού του, ονομάζεται **φερρίτης** (α -Fe) ή **ωστενίτης** (γ -Fe) και κρυσταλλώνεται στο κυβικό κωροκεντρωμένο (BCC) και στο εδροκεντρωμένο (FCC) κυβικό πλέγμα αντίστοιχα.

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί παράγοντες, που καθορίζουν αν το στοιχείο Β θα αντικαταστήσει ή θα παρεμβληθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα του στοιχείου Α. Αυτοί είναι:

1) Η **ατομική ακτίνα** (atomic size factor). Ικανές ποσότητες ενός στερεού διαλύματος μπορούν να σχηματιστούν, εφόσον οι ατομικές ακτίνες μεταξύ των δύο ατόμων είναι $<15\%$ ($\pm 15\%$). Σε περιπτώσεις $15\% - 30\%$ η αντικατάσταση γίνεται με δυσκολία και για $>30\%$ είναι αδύνατη. Στην δεύτερη περίπτωση προκαλούνται σημαντικές στρεβλώσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα, οι λεγόμενες διαταραχές ή αταξίες.

2) Η **κρυσταλλική δομή** (crystal structure). Για ικανοποιητική στερεά διαλυτότητα οι κρυσταλλικές δομές των δύο στοιχείων θα πρέπει να είναι ίδιες.

3) Η **ηλεκτραρνητικότητα** (electronegativity). Όσο πιο ηλεκτροθετικό είναι το ένα στοιχείο και περισσότερο ηλεκτραρνητικό το άλλο, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να σχηματίσουν μία μεσομεταλλική ένωση αντί ενός στερεού διαλύματος αντικαταστάσεως (substitutional solid solution).

4) Το **σθένος** (valence). Όταν οι άλλοι παράγοντες είναι ίσοι, ένα μέταλλο έχει την τάση να διαλύεται σε ένα άλλο μέταλλο υψηλότερου σθένους και όχι σε ένα χαμηλότερου σθένους.

1.3.3 Το ευτηκτικό κράμα ή ευτηκτική ένωση.

Κατά τη στερεοποίηση διμερών κραμάτων με συστατικά Α και Β (π.χ. δύο μέταλλα), τα οποία ενώ στην υγρή κατάσταση είναι πλήρως αναμείξιμα και στη στερεά κατάσταση πλήρως μη αναμείξιμα, δημιουργείται σε ορισμένη αναλογία των συστατικών Α και Β (ευτηκτική αναλογία) και σε ορισμένη θερμοκρασία (ευτηκτική θερμοκρασία) ένα χαρακτηρι-

στικό κρυσταλλικό είδος, που ονομάζεται **ευτηκτικό κράμα** ή **ευτηκτική ένωση**.

Το ευτηκτικό κράμα αποτελείται από πλακοειδείς κρυσταλλίτες¹ των συστατικών Α και Β του κράματος εναλλάξ και έχει χαμηλότερο σημείο τήξεως σε σχέση με τα συγγενή συστατικά. Ευτηκτικό κράμα κατά τη στερεοποίηση λαμβάνομε, επίσης, στην περίπτωση που τα δύο μέταλλα είναι μερικώς αναμείξιμα σε στερεά κατάσταση. Υπάρχει όμως η διαφορά ότι το ευτηκτικό αυτό κράμα αποτελείται από εναλλασσόμενους πλακοειδείς κρυσταλλίτες από δύο κορεσμένα στερεά διαλύματα. Ο πρώτος κρυσταλλίτης είναι πλούσιος σε μέταλλο Α, ενώ ο δεύτερος είναι πλούσιος σε μέταλλο Β.

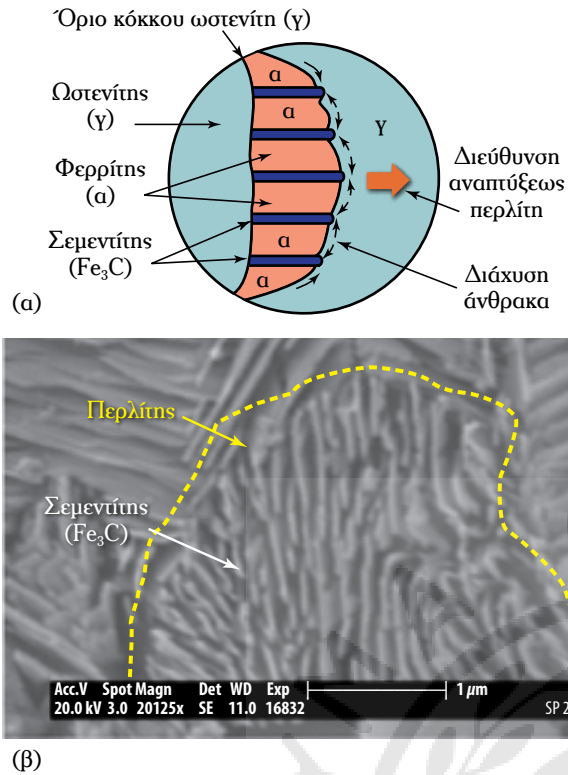
Σε ορισμένα κράματα, σε χαμηλότερη όμως θερμοκρασία, το στερεό πια διάλυμα μετασχηματίζεται πάλι με μορφή ευτηκτικού κράματος. Το κρυσταλλικό αυτό είδος ονομάζεται **ευτηκτοειδές κράμα** ή **ευτηκτοειδής ένωση**. Ονομάζεται έτσι, γιατί δεν σχηματίζεται από το τήγμα του κράματος, όπως το ευτηκτικό κράμα, αλλά από στερεό διάλυμα, όσο προχωρά η στερεοποίηση. Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη (στερεό διάλυμα) στην ευτηκτοειδή μορφή του περλίτη, μείγμα φάσεων φερρίτη και σεμενίτη (καρβιδίου του σιδήρου – Fe_3C), αποτελεί τυπικό παράδειγμα μετασχηματισμού αυτού του είδους (σχ. 1.3β).

1.3.4 Οι μεσομεταλλικές ενώσεις.

Κατά τη στερεοποίηση κράματος, συχνά δύο μέταλλα μπορούν να ανυδράσουν χημικώς μεταξύ τους και να σχηματίσουν τη λεγόμενη **μεσομεταλλική ένωση**, που όμως δεν έχει μεταλλικό χαρακτήρα. Οι μεσομεταλλικές ενώσεις είναι συνηθισμένες στα βιομηχανικά κράματα. Έτσι, το κράμα θα αποτελείται βασικά από στερεά διαλύματα και από μεσομεταλλικές ενώσεις σε διάφορες αναλογίες. Το στερεό διάλυμα και η μεσομεταλλική ένωση έχουν εντελώς διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Το στερεό διάλυμα έχει μεγάλη μηχανική αντοχή, παρουσιάζει δυσθραυστότητα και είναι ολκιμο. Η μεσομεταλλική ένωση έχει μικρή αντοχή, είναι πολύ σκληρή και πολύ εύθραυστη. Γι' αυτό η μεσομεταλλική ένωση μόνη ή σε μεγάλη αναλογία μέσα στα κράματα, τα καθιστά ακατάλληλα για βιομηχανική χρήση.

Όταν το κράμα σχηματίζεται βασικά από στερεό/ά διαλύματα/ματα, ενώ περιέχει και κόκκους μεσομε-

¹ Λείες επίπεδες επιφάνειες καταλήγουν σε **πλακοειδείς κρυσταλλίτες** κατά την στερεοποίηση.



Σχ. 1.3β

(α) Σχηματική αναπαράσταση μετασχηματισμού του ωστενίτη στο μείγμα φάσεων φερρίτη (α -Fe) και σεμενίτη (Fe_3C), δηλαδή περλίτη. (β) Τυπική μορφολογία περλίτη, όπως απεικονίζεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως.

ταλλικής ενώσεως, σε μικρή βέβαια αναλογία, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί, γιατί συνδυάζει τις καλές μηχανικές ιδιότητες του στερεού διαλύματος με τη μεγάλη σκληρότητα της μεσομεταλλικής ενώσεως.

1.4 Το θερμικό διάγραμμα θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Για τη βιομηχανική παραγωγή των διαφόρων κραμάτων και τη χρησιμοποίησή τους στην πράξη, μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε τις φάσεις, στις οποίες κρυσταλλώνεται το κράμα με βάση την αναλογία των συστατικών τους και τη θερμοκρασία. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν: Η **θερμοκρασία ενάρξεως και ολοκλήρωσης της στερεοποίησης** και οι **μετασχηματισμοί που γίνονται στην κρυσταλλική δομή του κράματος** όσο διαρκεί η στερεοποίηση, αλλά και μετά απ' αυτήν. Το είδος της κρυσταλλικής δομής του κράματος, η μορφολογία των φάσεων και το μέσο μέγεθος κόκκου, ως γνωστόν, καθορίζουν τις μηχανικές του ιδιότητες. Τα στοιχεία της κρυσταλλικής δομής λαμβάνονται απ' το **θερμικό διάγραμ-**

μα θερμοδυναμικής ισορροπίας του κράματος ή απλά το **διάγραμμα φάσεων** του κράματος.

Βασική προϋπόθεση είναι ότι το κράμα βρίσκεται σε κατάσταση **ισορροπίας φάσεων**. Τουτέστιν, οποιαδήποτε μεταβολή στην κρυσταλλική δομή του κράματος πρέπει να γίνεται πλήρως. Αυτό προϋποθέτει ότι η απόψυξη του κράματος από τη ρευστή στην στερεή κατάσταση ως τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος θα πρέπει να γίνεται με πάρα πολύ αργό ρυθμό. Σε διαφορετική περίπτωση, όπως κατά την ταχεία απόψυξη του κράματος (π.χ. στη βαφή του χάλυβα), η έλλειψη χρόνου δεν επιτρέπει ολοκληρωμένους μετασχηματισμούς στην κρυσταλλική δομή, με αποτέλεσμα να προκύπτει τελικά διαφορετική κρυσταλλική δομή από εκείνη που θα προέκυπτε με βραδεία απόψυξη.

Κατά τη στερεοποίηση των διμερών κραμάτων διακρίνουμε τρεις κύριες περιπτώσεις (σχ. 1.4α):

1) Τα συστατικά του κράματος A και B είναι πλήρως μη αναμείξιμα στην στερεά κατάσταση (κράμα απλού ευτηκτικού τύπου).

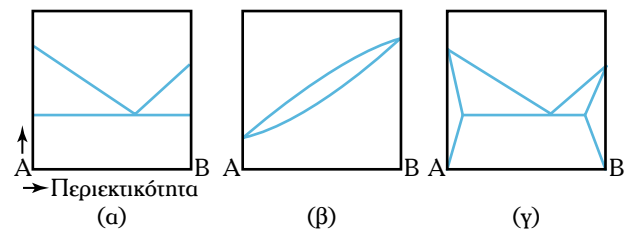
2) Τα συστατικά του κράματος είναι πλήρως αναμείξιμα στην στερεά κατάσταση και σε κάθε αναλογία (κράμα τύπου στερεού διαλύματος), και

3) τα συστατικά του κράματος είναι εν μέρει αναμείξιμα στην στερεά κατάσταση, δηλ. σχηματίζονται στερεά διαλύματα, μέχρι μίας ορισμένης αναλογίας των συστατικών του κράματος (κράμα σύνθετου τύπου).

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε το θερμικό διάγραμμα ισορροπίας κράματος σύνθετου ευτηκτικού τύπου, όπως είναι το σύστημα Sn-Pb, που μοιάζει με το διάγραμμα των κραμάτων Fe-C, που θα δούμε κατά τη μελέτη των χαλύβων.

– Το **διάγραμμα κράματος σύνθετου ευτηκτικού τύπου**.

Το θερμικό διάγραμμα ισορροπίας τυπικού σύνθετου κράματος, όπως είναι το κράμα κασιτέρου

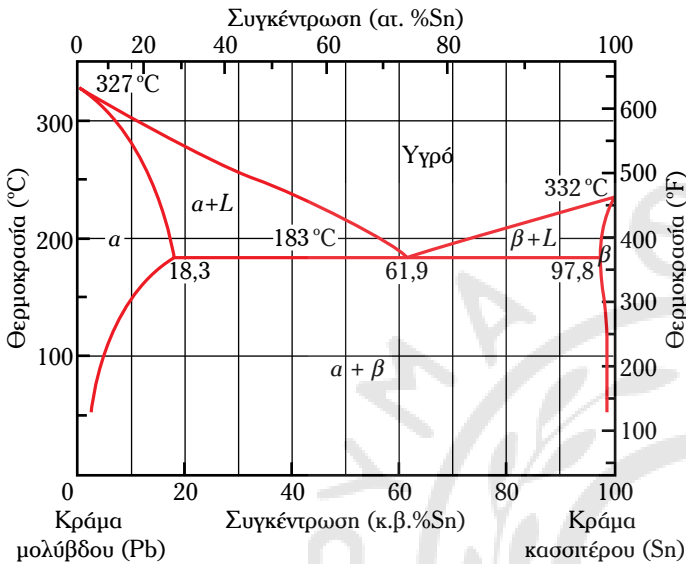


Σχ. 1.4α

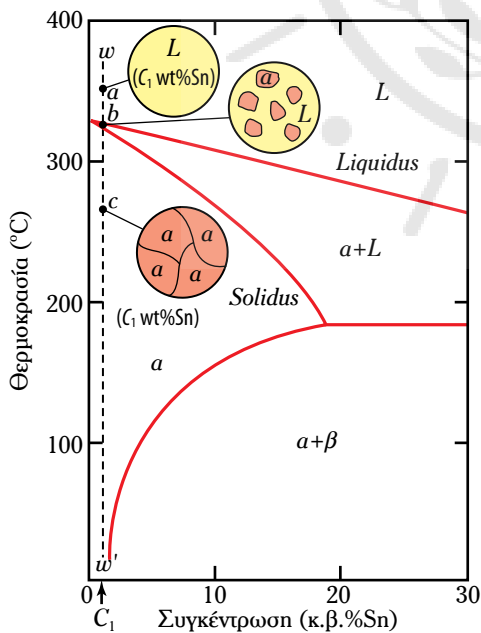
Χαρακτηριστικοί τύποι θερμικών διαγραμμάτων ισορροπίας διμερών κραμάτων με συστατικά A και B: (α) απλού ευτηκτικού τύπου, (β) τύπου στερεού διαλύματος, (γ) σύνθετου ευτηκτικού τύπου.

(Sn) - μολύβδου (Pb), φαίνεται στα σχήματα 1.4β και 1.4γ. Με βάση την εκάστοτε χημική σύσταση, διαφορετικές μικροδομές είναι εφικτές υπό την προϋπόθεση της αργής αποψύξεως στο ευτηκτικό αυτό σύστημα.

Εξετάζουμε αρχικά την περιοχή του διαγράμματος (σχ. 1.4β) με Pb και με 0 ως και περίπου 2% κ.β. Sn



Σχ. 1.4β
Διάγραμμα φάσεως μολύβδου (lead) Pb – κασσιτέρου (tin) Sn.

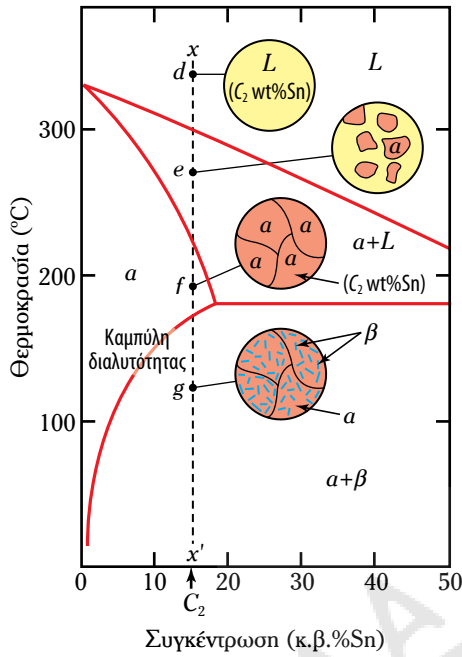


Σχ. 1.4γ
Λεπτομέρεια του διαγράμματος Pb-Sn για συγκέντρωση κράματος C₁.

(2% κ.β. Sn) (για στερεό διάλυμα της φάσεως α). Επί πλέον, για περιεκτικότητες από 99% – κ.β. Sn και καθαρό Sn (β φάση) ο τρόπος κρυσταλλώσεως είναι πανομοιότυπος. Ας υποθέσουμε για παράδειγμα ένα κράμα (alloy) με συγκέντρωση (composition) C₁, το οποίο αποψύχεται αργά από την υγρή φάση π.χ. από τους 350°C (κινούμαστε επί της διακεκομμένης γραμμής προς χαμηλότερες θερμοκρασίες, δηλ. προς τα κάτω στο διάγραμμα). Το κράμα παραμένει σε υγρή μορφή και με συγκέντρωση C₁ έως ότου φτάσουμε στη θερμοκρασία liquidus, στους περίπου 330°C, όταν αρχίζει και σχηματίζεται η στερεή φάση α. Διαπερνώντας την διφασική περιοχή με συνύπαρξη φάσεως α και υγρού (α+L) η κρυστάλλωση προωθείται, μέχρις ότου το υγρό να μετασχηματιστεί στη φάση α. Αυτό συμβαίνει, όταν η διακεκομμένη γραμμή ww' αγγίζει την καμπύλη solidus. Στη διφασική αυτή περιοχή οι συγκεντρώσεις υγρού και στερεού είναι διαφορετικές και ακολουθούν τις καμπύλες liquidus και solidus αντίστοιχα. Το κράμα που προκύπτει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτελείται από 100% φάση α και έχει συγκέντρωση C₁.

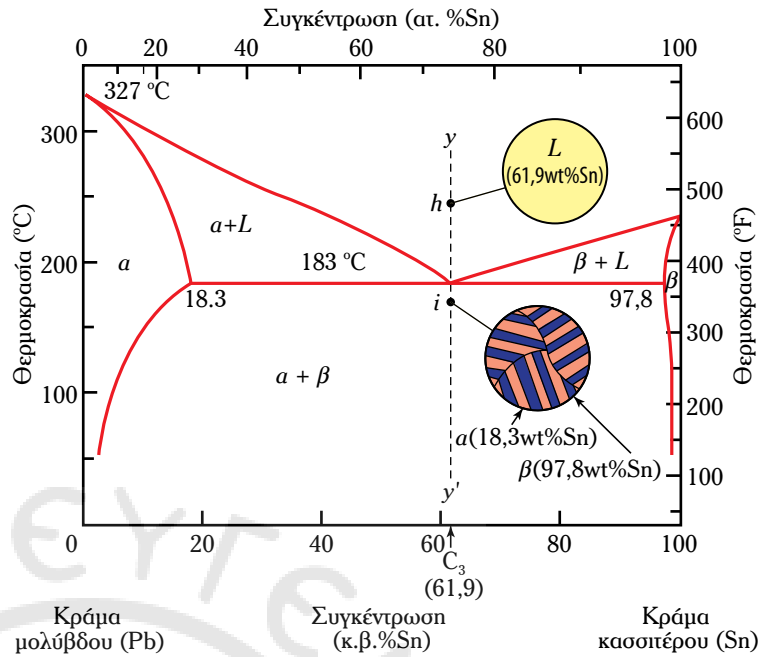
Ως δεύτερη περίπτωση εξετάζουμε τώρα τα κράματα με ευτηκτικές περιεκτικότητες για το ίδιο σύστημα μολύβδου (Pb) – κασσιτέρου (Sn) (lead-tin system). Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4β, τα σχετικά κράματα διαθέτουν περιεκτικότητες μεταξύ 2% κ.β. Sn ως 18,3% κ.β. Sn (πλούσια σε Pb κράματα) και από 97,8% κ.β. Sn ως περίπου 99% κ.β. Sn (πλούσια σε Sn κράματα). Εξετάζουμε ένα κράμα συγκέντρωσεως C₂, καθώς αυτό αποψύχεται κατά μήκος της γραμμής xx' στο σχήμα 1.4δ. Όσο προχωράει η απόψυξη και βρισκόμαστε στη διφασική περιοχή α+L (π.χ. σημείο e), η κρυστάλλωση προχωράει, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Όσο χρόνο η θερμοκρασία μειώνεται, εισερχόμαστε στη μονοφασική περιοχή της φάσεως α, οπότε και όλο το κράμα αποκτά αντίστοιχη δομή (σημείο f) συγκέντρωσεως C₂. Ωστόσο, με την πτώση της θερμοκρασίας τέμνομε την **καμπύλη διαλυτότητας** (solvus), όπου η διαλυτότητα της φάσεως α είναι μέγιστη, με αποτέλεσμα κάτω από τη θερμοκρασία αυτή να έχουμε την κατακρήμνιση μικρών στερεών σωματιδίων από τη φάση β (π.χ. σημείο g). Με την πτώση της θερμοκρασίας το ποσοστό της β φάσεως αυξάνεται.

Στην τρίτη περίπτωση εξετάζουμε την στερεοποίηση κράματος με ευτηκτική σύσταση, δηλαδή 61,9% κ.β. Sn (σχ. 1.4ε). Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα κράμα ευτηκτικής συστάσεως και ξεκινάμε τη μελέτη π.χ. από τη θερμοκρασία των 250°C, από την



Σχ. 1.46

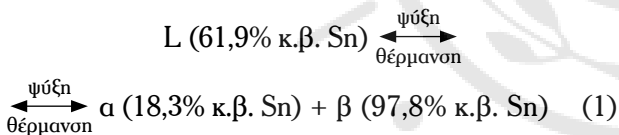
Λεπτομέρεια του διαγράμματος Pb-Sn για συγκέντρωση κράματος C_2 .



Σχ. 1.4ε

Λεπτομέρεια του διαγράμματος Pb-Sn για συγκέντρωση κράματος C_1 .

υγρή δηλαδή φάση ακολουθώντας τη γραμμή yy' στο σχήμα 1.4ε. Όπου να φτάσουμε στην ευτηκτική θερμοκρασία των 183°C δεν έχουμε καμία αλλαγή. Περνώντας την ευτηκτική θερμοκρασία (eutectic isotherm), η υγρή φάση μετασχηματίζεται στις φάσεις α και β σύμφωνα με την ευτηκτική αντίδραση:

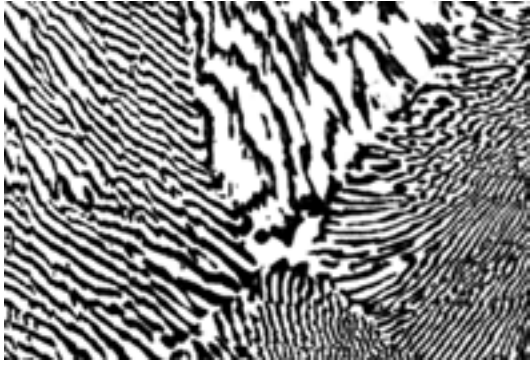


Στο σημείο αυτό η σύσταση των φάσεων α και β καθορίζεται από την ευτηκτική θερμοκρασία και ονομάζεται **ευτηκτική δομή** (eutectic structure, σημείο i , σχ. 1.4ε).

Κατά τη διάρκεια αυτού του μετασχηματισμού υπάρχει διαφορισμός² της χημικής συστάσεως, διαφορετική δηλαδή ανακατανομή της συγκεντρώσεως του μολύβδου και του κασσιτέρου στις φάσεις α και β σε σχέση με την αρχική συγκέντρωση στην υγρή

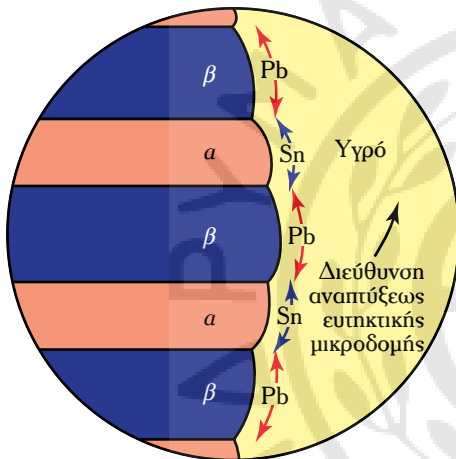
φάση, όπως καθορίζεται από την εξίσωση (1). Αυτή η ανακατανομή επιτυγχάνεται μέσω της μετακινήσεως μάζας μέσω μάζας, δηλαδή μέσω διαχύσεως σε ατομικό επίπεδο. Η τελική μικροδομή αποτελείται από εναλλασσόμενα πλακίδια (lamellae) της φάσεως α και της φάσεως β , τα οποία σχηματίζονται ταυτόχρονα. Η δομή αυτή είναι αντίστοιχη της δομής του περλίτη, του μείγματος φάσεων φερρίτη (α) και σεμεντίτη (Fe_3C) (καρβίδιο του σιδήρου) στους χάλυβες, απλά στη θέση του φερρίτη έχουμε τη φάση β , πλούσια σε Pb και στη θέση του σεμεντίτη έχουμε τη φάση α , πλούσια σε Sn (σχ. 1.3β). Το σχήμα 1.4στ παρουσιάζει μία μικροδομή κράματος Pb-Sn ευτηκτικής περιεκτικότητας στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, η οποία αποτελείται από εναλλασσόμενα πλακίδια πλούσια σε Pb (σκούρες περιοχές) και πλακίδια πλούσια σε Sn (ανοιχτόχρωμα πλακίδια). Στο σχήμα 1.4ζ παρουσιάζεται ο σχηματισμός της ευτηκτικής μικροδομής από την υγρή φάση.

² **Διαφορισμός** (segregation): Ο χημικός διαφορισμός στην επιστήμη και τεχνολογία υλικών αναφέρεται στον εμπλουτισμό ατόμων ή μορίων σε ατομική κλίμακα ή μικροκλίμακα. Συνήθως συμβαίνει με την έναρξη της στερεοποίησης κραμάτων. Αντιλαμβάνεται κάποιος την αιτία της διαφορετικής χημικής συστάσεως σε διαφορετικά σημεία μέσα στη μικροδομή, αν συλλογιστεί ότι το υγρό έχει υψηλότερη διαλυτότητα σε κραματικά στοιχεία από ό,τι το στερεό. Επομένως, όσο προωθείται η στερεοποίηση, το στερεό είναι φτωχότερο σε κραματικά στοιχεία, ενώ το υγρό εμπλουτίζεται με αυτά. Στο τέλος της στερεοποίησης, στο κέντρο του χυτού, το οποίο είναι και το τελευταίο κλάσμα ύλης που στερεοποιείται, εγκλωβίζονται υψηλότερες περιεκτικότητες σε κραματικά στοιχεία από ό,τι στις γειτονικές περιοχές.



Σχ. 1.4στ

Μικροδομή κράματος Pb-Sn ευηκτικής περιεκτικότητας στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, που αποτελείται από εναλλασσόμενα πλακίδια πλούσια σε Pb (σκούρες περιοχές) και σε Sn (ανοιχτόχρωμα πλακίδια).



Σχ. 1.4ζ

Σχηματική αναπαράσταση του σχηματισμού της ευηκτικής μικροδομής από την υγρή φάση σε ένα κράμα Pb-Sn ευηκτικής περιεκτικότητας.

1.5 Τρόποι αυξήσεως σκληρότητας.

Έχοντας αντιληφθεί τις έννοιες της κρυσταλλώσεως και του στερεού διαλύματος, έχοντας κατανοήσει τι σημαίνει μεσομεταλλική ένωση και τι ευηκτική αντίδραση, μπορούμε να αντιληφθούμε ότι η μικροδομή των μεταλλικών υλικών μπορεί να είναι πολυφασική. Σε συνδυασμό με την πολυκρυσταλλικότητα, την επίδραση της θερμοκρασίας και του χρόνου στους μετασχηματισμούς και στην μορφολογία, αλλά και στην δομή της ύλης σε στερεά κατάσταση, είναι εύκολα αντιληπτό ότι μπορούμε να επέμβουμε στη σκληρότητα, άρα και στις μηχανικές ιδιότητες ενός μεταλλικού υλικού (καθαρού μετάλλου ή κράματος). Σκοπός μας πολλές φορές είναι

η αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής (κυρίως του ορίου διαρροής) του κράματος για τη δημιουργία κραμάτων στιβαρότερων και ανθεκτικότερων. Οι κυριότερες τεχνικές αυξήσεως σκληρότητας των μεταλλικών υλικών είναι:

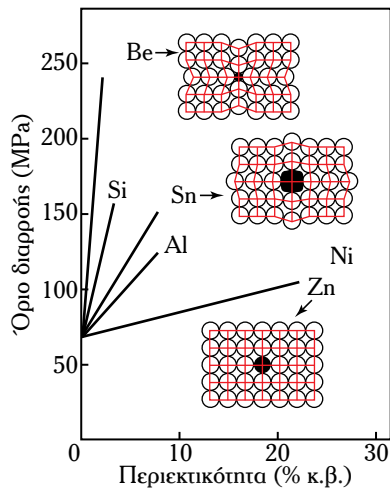
- 1) με δημιουργία στερεού διαλύματος.
- 2) με κατακρήμνιση μεσομεταλλικών ενώσεων (γύφανση).
- 3) με εκλέπτυνση (ελάττωση του μεγέθους) κόκκου.
- 4) μέσω μετασχηματισμών φάσεως (π.χ. μαρτενιτικών μετασχηματισμών, δηλ. παραμόρφωση μηχανικών τάσεων).
- 5) με **ενδοιράχυνση** (work hardening – dislocation hardening).

1.5.1 Σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος.

Τα καθαρά μέταλλα είναι γενικά πιο μαλακά από τα κράματά τους. Στην περίπτωση των κραμάτων, οι προσθήκες στοιχείων αντικαταστάσεως ή παρεμβολής (στερεό διάλυμα) στο μητρικό πλέγμα οδηγούν σε μια συνεργατική μετακίνηση της στοιχειώδους κυψελίδας (κρυσταλλικού πλέγματος), με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη, ώστε να παρεισφρύσει ένα ξένο σώμα μέσα στους κόκκους του κράματος. Αυτή η εξέλιξη οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας. Το αποτέλεσμα της παραμορφώσεως του πλέγματος ονομάζεται **διαταραχή** (dislocation) ή **αταξία**. Οι διαταραχές μπορούν αναλόγως να μετακινούνται. Όσο όμως δυσκολότερη είναι η μετακίνησή τους, τόσο αυξάνεται η απαιτούμενη ενέργεια για την κίνησή τους. Άρα αυξάνεται και το όριο διαρροής του κράματος. Η διαφορά μεγέθους των ατόμων προσθήκης και το ποσοστό του προστιθέμενου στοιχείου, αυξάνουν την σκληρότητα και τη αντοχή του μητρικού μετάλλου. Στο σχήμα 1.5α φαίνεται η επίδραση των διαφορετικών στοιχείων κραματώσεως στο όριο διαρροής του χαλκού (Cu).

1.5.2 Σκλήρυνση με κατακρήμνιση.

Η εμφάνιση μικρών και ομοιόμορφα διασκορπισμένων φάσεων (π.χ. της φάσεως β στο κράμα Pb-Sn, σχ. 1.4δ) ή μεσομεταλλικών ενώσεων εντός της μητρικής φάσεως του μετάλλου αυξάνει τη σκληρότητα και την αντοχή των κραμάτων. Η κατακρήμνιση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με φυσικό τρόπο είτε μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες. Η διαδικασία με τη χρήση θερμικών κατεργασιών ονομάζεται **σκλήρυνση με κατακρήμνιση** (precipitation hardening), ενώ τα σωματίδια



Σχ. 1.5α

Επίδραση διαφορετικών στοιχείων κραματώσεως στο όριο διαρροής του χαλκού (Cu). Το νικέλιο (Ni) και ο ψευδάργυρος (Zn) έχουν παραπλήσιο μέγεθος με αυτό του χαλκού (Cu), ενώ το βηρύλλιο (Be) και ο κασσίτερος (Sn) πολύ διαφορετικό. Η διαφορά μεγέθους των ατόμων προσθήκης και το ποσοστό του προσοσθέντος στοιχείου, αυξάνουν την σκληρότητα και την αντοχή του μητρικού μετάλλου.

ονομάζονται **κατακρημνίσματα**³ (precipitates). Ο όρος **σκλήρυνση με γήρανση** αναφέρεται στη φυσική σκλήρυνση, η οποία επέρχεται με την πάροδο του χρόνου. Τα βασικότερα μέταλλα, τα οποία υπόκεινται σκλήρυνση με κατακρήμνιση είναι:

- 1) Τα κράματα αλουμινίου (Al-Cu, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg).
- 2) Τα κράματα του χαλκού (Cu-Be, Cu-Sn).
- 3) Οι κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες, οι χάλυβες μαρτενιγράνσεως ή «maraging»⁴ και οι ανοξείδωτοι χάλυβες.
- 4) Τα υπερκράματα νικελίου (Ni) και κοβαλτίου (Co).

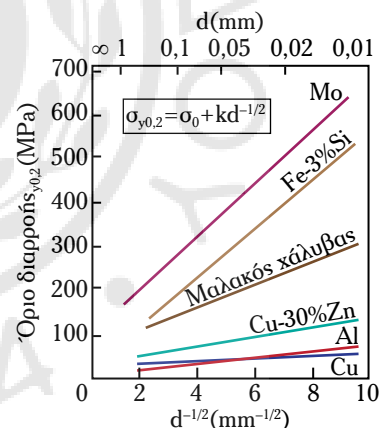
1.5.3 Σκλήρυνση με εκλέπτυνση κόκκου.

Η ελάττωση του μεγέθους του κόκκου (εκλέπτυνση κόκκου: grain refinement), η οποία μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω ταχείας στερεοποίησης, είτε

μέσω μηχανικής παραμορφώσεως (ενδοτραχύνσεως), π.χ. μετά από θερμή ή ψυχρή έλαση, επιφέρει αύξηση της αντοχής και της σκληρότητας. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της υπάρξεως περισσότερων εμποδίων στη μετακίνηση των διαταραχών, αφού υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός κόκκων ανά μονάδα όγκου στο κράμα. Δύο γειτονικοί κρυσταλλίτες (κόκκοι) είναι δυνατόν να έχουν κρυσταλλωθεί σε διαφορετικές κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις στον τρισδιάστατο χώρο. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά προσανατολισμού μεταξύ των κόκκων, τόσο εντονότερη είναι και η παρεμπόδιση της ολισθήσεως και μετακινήσεως των διαταραχών, επομένως, και μεγαλύτερη η αύξηση της αντοχής. Για τα μέταλλα του κωροκεντρωμένου κυβικού συστήματος, όπως ο σίδηρος και οι χάλυβες, η τιμή του ορίου διαρροής (σ_y) είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους των κόκκων, όπως προσδιορίζεται από τη σχέση Hall-Petch (2):

$$\sigma_{y,0.2} = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (2)$$

όπου: $\sigma_{y,0.2}$ το συμβατικό όριο διαρροής (σχ. 1.5β), σ_0 μια σταθερά με διαστάσεις τάσεως (MPa), k παράμετρος εξαρτώμενη από το υλικό, και d η μέση διάμετρος των κόκκων.



Σχ. 1.5β

Μεταβολή του συμβατικού ορίου διαρροής ($\sigma_{y,0.2}$) διαφόρων μετάλλων και κραμάτων σε συνάρτηση με την μέση διάμετρο των κόκκων, όπως προσδιορίζεται από τη σχέση Hall-Petch.

³ Πολλές φορές, π.χ. στο αλουμίνιο (Al), όταν τα κατακρημνίσματα έχουν εξαιρετικά μικρό μέγεθος, χρησιμοποιείται και ο όρος “dispersoids”.

⁴ Οι χάλυβες **μαρτενιγράνσεως** προκύπτουν ως σύμπτυξη των όρων «μαρτενσίτης» και «γήρανση» και αποτελούν χάλυβες, οι οποίοι είναι γνωστοί για τις ανώτερες μηχανικές τους ιδιότητες ταυτόχρονα με υψηλή ολκιμότητα και δυσθραυστότητα. Η ολκιμότητα από την αντοχή υλικών αναφέρεται στην παραμόρφωση θραύσεως, ενώ η δυσθραυστότητα στην απαιτούμενη για τη θραύση ενέργεια του όγκου του υλικού. Τα μέταλλα ως γνωστόν διαθέτουν υψηλή δυσθραυστότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι όμως η αντοχή τους, η ολκιμότητα και η δυσθραυστότά τους μειώνονται. Οι χάλυβες **μαρτενιγράνσεως** (maraging από τα «martensitic» and «aging») λαμβάνουν αυτές τις ανώτερες ιδιότητες κατόπιν εκτεταμένων θερμικών κατεργασιών.

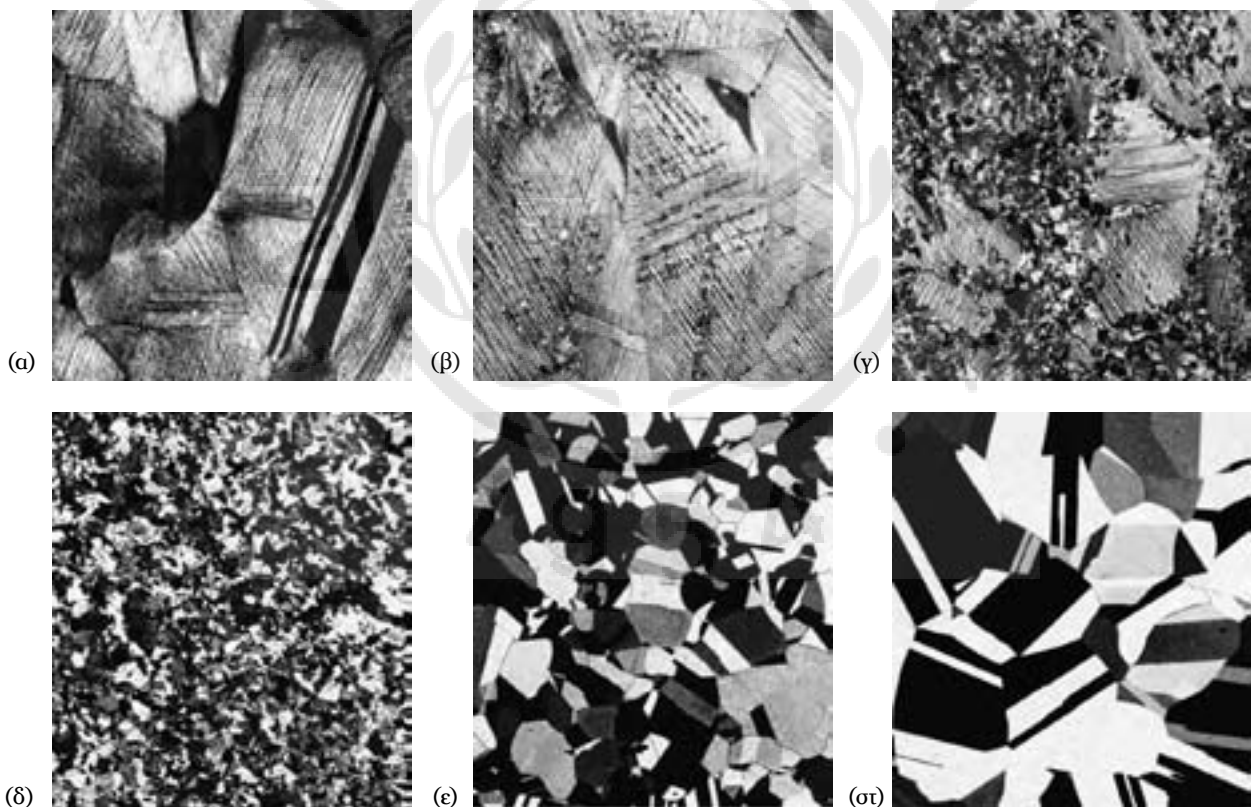
1.6 Ανακρυστάλλωση.

Κατά την αναθέρμανση των κραμάτων και την θερμική τους επεξεργασία ή και κατόπιν κοπής τους μέσω τοπικής τήξεως (π.χ. φλογοκοπή) αλλά και κατά τη διάρκεια της πλαστικής τους παραμορφώσεως (π.χ. θερμή έλαση, διέλαση, σφυρηλάτηση, ολκή), η μικροδομή του κράματος υφίσταται αλλοίωση. Αυτή η αλλαγή διενεργείται μέσω της διευκολύνσεως της μετακινήσεως των διαταραχών και των ατόμων σε ατομικό επίπεδο και μέσω της διαχύσεως (μετακινήσεως μάζας μέσω μάζας). Αποτέλεσμα της μεταβολής αυτής στη μικροδομή είναι ο σχηματισμός νέων κόκκων, απαλλαγμένων από έντονη πυκνότητα διαταραχών, αλλά και από μεσομεταλλικές ενώσεις ή κατακρημνίσματα. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται ως **ανακρυστάλλωση** (recrystallization).

Η ανακρυστάλλωση καθορίζεται από τη θερμοκρασία και τον χρόνο παραμονής σε αυτήν. Εφόσον

οι νέοι κόκκοι, τα νέα φύτρα (όπως και στην στερεοποίηση), μετά τον σχηματισμό τους δεν μεγεθυνθούν, αν π.χ. το κράμα αποψυχθεί τάχιστα, είναι εφικτή η αύξηση της αντοχής του κράματος. Σε αντίθετη περίπτωση, με μακρά παραμονή σε υψηλή θερμοκρασία, οι κόκκοι θα μεγεθυνθούν και θα επιφέρουν μείωση της σκληρότητας. Το κράμα γίνεται πιο μαλακό και η ολκιμότητά του αυξάνεται. Είναι εφικτή τώρα πλέον η πλαστική του παραμόρφωση με επιβολή σημαντικά μικρότερης ενέργειας (άρα και με μικρότερο κόστος), από ό,τι στην περίπτωση ενός σκληρού κράματος.

Στο σχήμα 1.6 παρουσιάζονται διαδοχικά στάδια ανακρυσταλλώσεως σε ένα κράμα ορείχαλκου (κράμα χαλκού-ψευδάργυρου, Cu-Zn), το οποίο είχε αρχικώς υποστεί 35% **ψυχρηλασία** [Cold Work – CW, σχ. 1.6(α)] και στη συνέχεια αφέθηκε για 3 s σε θερμοκρασία 580°C [σχ. 1.6(β)]. Αμέσως νέοι κόκκοι έκαναν την εμφάνισή τους [σχ. 1.6(γ)]



Σχ. 1.6

Εικόνες οπτικής μικροσκοπίας σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, οι οποίες απεικονίζουν τα διαδοχικά στάδια ανακρυσταλλώσεως και μεγεθύνσεως κόκκων σε κράμα ορείχαλκου. Μεγέθυνση $\times 75$. (α) Μικροδομή κατόπιν 33% ψυχρηλασίας (33% CW). (β) Αρχικό στάδιο ανακρυσταλλώσεως (recrystallization) μετά από θέρμανση 3 s στους 580°C. (γ) Μερική αντικατάσταση της ψυχρήλαιτης μικροδομής από νέους ανακρυσταλλωμένους κόκκους (μετά την πάροδο 4 s στους 580°C). (δ) Πλήρης ανακρυστάλλωση (8 s στους 580°C). (ε) Μεγέθυνση των κόκκων κατόπιν 15 min στους 580°C. (στ) Μεγέθυνση των κόκκων κατόπιν 10 min στους 700°C.

και το φαινόμενο της ανακρυσταλλώσεως ολοκληρώθηκε μετά από 8 s [σχ. 1.6(δ)]. Μετά από χρονική διάρκεια 15 min στους 580°C παρατηρήθηκε αύξηση του μεγέθους των κόκκων [σχ. 1.6(ε)]. Το ίδιο συνέβη και υπό παραμονή 10 min σε υψηλότερη θερμοκρασία των 700°C [σχ. 1.6(στ)].

1.7 Πλαστική παραμόρφωση, θερμπλασία και ψυχρηλασία.

Τα μέταλλα και τα κράματα που χρησιμοποιούμε καθημερινά, διαθέτουν συνήθως γεωμετρικά σχήματα διαφορετικά από το αρχικό σχήμα του χυτού τεμαχίου, το οποίο έλαβαν κατά τη στερεοποίησή τους. Η επίτευξη του τελικού σχήματος γίνεται μέσω πλαστικής, μόνιμης παραμορφώσεως. Εφόσον η κατεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από το ήμισυ περίπου του σημείου τήξεως ($0,5T_m$) ή πιο συγκεκριμένα πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυσταλλώσεως του μετάλλου, τότε πρόκειται για **θερμή κατεργασία** (θερμπλασία). Σε αντίθετη περίπτωση (π.χ. κατεργασία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) έχουμε **ψυχρή κατεργασία** (ψυχρηλασία).

Ανάλογα με τη γεωμετρία του τελικού προϊόντος (σχήμα, πάχος κ.λπ.), οι κατεργασίες διαμορφώσεως διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- 1) Σφυρηλάτηση.
- 2) Έλαση.
- 3) Διέλαση, εξέλαση.
- 4) Συρματοποίηση (ολκή) και σωληνοποίηση.
- 5) Βαθειά κοίλανση.
- 6) Διαμόρφωση με έκταση και με κάμψη.

Μετά την έντονη πλαστική παραμόρφωση ο κρυσταλλικός ιστός του μετάλλου ή του κράματος παρουσιάζει επιμήκυνση των κρυσταλλιτών (κόκκων) του προς την κατεύθυνση της κατεργασίας, με αποτέλεσμα το υλικό να έχει υποστεί σκλήρυνση ή σκλήρωση. Το μέταλλο ή το κράμα που έχει υποστεί σκλήρυνση, αποκτά:

- 1) **Μεγαλύτερη σκληρότητα** (hardness) από την αρχική.
- 2) **Υψηλότερο όριο ελαστικότητας** (yield strength).
- 3) **Υψηλότερο όριο θραύσεως** (tensile strength).

4) **Μικρότερη πλαστικότητα** (ductility), δηλαδή μικρότερη παραμόρφωση θραύσεως.

5) **Μικρότερη δυσθραυστικότητα** (impact strength).

Η σκλήρυνση οφείλεται στο γεγονός ότι, πρακτικά, η πλαστική παραμόρφωση γίνεται κατά επίπεδα ολισθήσεως, όχι ιδανικά, αλλά κάπως στρεβλωμένα. Λόγω της στρεβλώσεως αυτής οι επιφάνειες ολισθήσεως συρρικνώνονται και επομένως παρουσιάζουν αντίσταση στη μετακίνηση των διαταραχών (dislocations).

Έχοντας κατανοήσει από τις προηγούμενες παραγράφους την κρυσταλλική δομή και τη δυνατότητα που παρέχει ο μεταλλικός δεσμός για την αλλαγή της γεωμετρικής θέσεως των ατόμων στον τρισδιάστατο χώρο μετά από την άσκηση μηχανικής τάσεως ή μετά από διάχυση (π.χ. κατά την ανακρυστάλλωση), μπορούμε να προσεγγίσουμε τις βασικές έννοιες μηχανικών κατεργασιών διαμορφώσεως των μετάλλων και κραμάτων, καθώς και τις μηχανικές τους ιδιότητες. Για την πλήρη κατανόηση των μεταλλουργικών φαινομένων είναι απαραίτητη η απόκτηση βασικών εννοιών αναφορικά με τις διαταραχές ή αταξίες δομής, της ολισθήσεως, των κρυσταλλογραφικών επιπέδων ολισθήσεως και της μετακινήσεως των διαταραχών (σημειακών, γραμμικών ή τρισδιάστατων ατελειών).

1.7.1 Θεωρητικό υπόβαθρο: διαταραχές και ο μηχανισμός της πλαστικής παραμορφώσεως.

Όταν ένα μέταλλο παραμορφώνεται πλαστικά εν θερμώ ή εν ψυχρώ, δηλαδή φορτίζεται πέρα από το όριο ελαστικότητάς⁵ του, τα άτομα του κρυσταλλικού του πλέγματος μετακινούνται σε νέες, μόνιμες θέσεις. Η πλαστική παραμόρφωση των πολυκρυσταλλικών μετάλλων γίνεται με ολίσθηση στρώματος ατόμων (κρυσταλλικών επιπέδων) σε σχέση με άλλο στρώμα ατόμων κατά μήκος του λεγόμενου επιπέδου ολισθήσεως και μέσα στον ίδιο κρυσταλλίτη (κόκκο). Κατά την πλαστική παραμόρφωση πολυκρυσταλλικού μετάλλου, οι κρυσταλλίτες του δεν αλλάζουν δομή, αλλά μόνο σχήμα. Παραμορφώνονται, π.χ. μακραίνουν προς την κατεύθυνση

⁵ Η παραμόρφωση ενός μετάλλου ή κράματος μπορεί να είναι **ελαστική** (ανυστρεπτή) ή **πλαστική** (αναντίστρεπτη ή μόνιμη). Κατά την ελαστική παραμόρφωση παρατηρείται περιορισμένη στρέβλωση του κρυσταλλικού πλέγματος του μετάλλου, χωρίς όμως τα άτομα να μετακινούνται μόνιμα από την κανονική τους θέση. Μόλις αφαιρεθεί η τάση που προκαλεί την παραμόρφωση, η στρέβλωση εξαφανίζεται και τα άτομα επανέρχονται στην προηγούμενη θέση τους. Στην πλαστική παραμόρφωση τα άτομα παραμένουν στη νέα θέση και μετά την αφαίρεση του φορτίου.

της ελάσεως. Έτσι, το μέταλλο αποκτά διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες κάθετα ή παράλληλα προς την αρχική κατεύθυνση του κρυσταλλικού ιστού.

Η σύγχρονη άποψη για τον μηχανισμό της πλαστικής παραμορφώσεως μετάλλου βασίζεται στη θεωρία των διαταραχών⁶ (αταξιών) και είναι η εξής: Στο σχήμα 1.7α(α) απεικονίζεται σχηματικά το κυβικό κρυσταλλικό πλέγμα κρυσταλλίτη, χωρίς να έχει αναπτυχθεί σε αυτό οποιαδήποτε τάση ($\sigma = 0$). Στο σχήμα 1.7α(β) παρατηρείται το αποτέλεσμα της εφαρμογής μικρής τάσεως σ κατά την κατεύθυνση –φορά– του βέλους. Αν η τάση αυτή σταματήσει, ο κρυσταλλίτης θα επανέλθει στην κανονική του θέση [σχ. 1.7α(α)]. Αν όμως η τάση σ γίνει μεγαλύτερη από το όριο διαρροής, τότε θα συμβεί ολίσθηση [σχ. 1.7α(γ)] με μετακίνηση των ανωτέρων στρωμάτων ατόμων προς τα δεξιά κατά μία ατομική απόσταση, δηλαδή κατά την απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους δύο γειτονικών ατόμων, χωρίς όμως να συμβεί καμία αλλαγή στο δεξιό μέρος του κρυσταλλίτη. Εδώ παρατηρούμε ότι το πρώτο στάδιο της πλαστικής παραμορφώσεως [σχ. 1.7α(γ)] επιδρά πάνω σε λίγα μόνο άτομα κατά μήκος του επιπέδου ολισθήσεως. Η παραμόρφωση αυτή μπορεί να προκληθεί με πολύ μικρότερη τάση από εκείνη που θα ήταν αναγκαία, αν όλα τα άτομα στο επίπεδο ολισθήσεως έπρεπε συγχρόνως να μετακινηθούν προς τα δεξιά. Στο στάδιο αυτό της πλαστικής παραμορφώσεως έχει δημιουργηθεί ως επακόλουθο η διαταραχή (αταξία) [σχ. 1.7α(δ)]. Η αταξία αυτή του κρυσταλλικού πλέγματος μετακινείται προς τα δεξιά [σχ. 1.7α(δ) και (ε)], καθώς και στο τελικό στάδιο [σχ. 1.7α(στ)] έχει επέλθει πλαστική παραμόρφωση κατά μία ατομική απόσταση. Επομένως, ως όριο διαρροής, σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, μπορεί να θεωρηθεί η τάση που απαιτείται για να μετακινηθεί η αταξία. Η μετακίνηση της αταξίας και η απαιτούμενη τάση μπορούν να εξομοιωθούν με τη μετακίνηση ενός τάππτα, που είναι απλωμένος σε οριζόντιο δάπεδο (σχ. 1.7β).

Όλοι έχουμε παρατηρήσει ότι, αν ο τάππτας είναι μεγάλος και βαρύς, είναι πολύ δύσκολο να μετακινηθεί με έλξη από τη μία άκρη. Αν όμως σχηματίσουμε στη μία άκρη μία πτυχή, όπως στο σχήμα 1.7β, τότε αυτή εύκολα μπορεί να μετακινηθεί μέχρι την άλλη άκρη του τάππτα με εφαρμογή μικρής δυνάμεως και χωρίς ο τάππτας να χάσει την επαφή του με το δάπεδο. Συνεπώς, όπως ολόκληρος ο τάππτας μετακινείται

κατά μικρή απόσταση, έτσι ακριβώς μετακινείται και η διαταραχή (αταξία) μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα, χωρίς να αποχωρίζονται τα άτομα κατά μήκος του επιπέδου ολισθήσεώς τους.

Επειδή κάθε αταξία που μετακινείται μέσα σε έναν κρυσταλλίτη (κόκκο), σχετίζεται με μετακίνηση κατά μία ατομική απόσταση μόνο ($0,25 \cdot 10^{-6}$ mm) συμπεραίνεται ότι, για να υπάρξει μετακίνηση (μόνιμη παραμόρφωση), την οποία να μπορούμε πρακτικά να την μετρήσουμε, χρειάζεται να μετακινηθεί πολύ μεγάλος αριθμός διαταραχών. Στο σχήμα 1.7γ παρουσιάζονται σχηματικά οι τύποι των διαταραχών ακμής, κοχλία και μεικτού τύπου. Η **διαταραχή κοχλία** (screw dislocation) εμφανίζεται, όταν μία διατημητική τάση προκαλεί τη μετακίνηση των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα κατά μία ατομική απόσταση προς τα δεξιά, όπως φαίνεται στο πρόσθιο μέρος στο σχήμα 1.7γ(α). Η **διαταραχή κοχλία** προσδίδει μία μετακίνηση κατά μήκος της γραμμής AB, σχήμα 1.7γ(β). Στο σχήμα 1.7γ(γ) παρουσιάζεται σχηματικά μία **μεικτού τύπου διαταραχή** (περιλαμβάνει αταξία ακμής και κοχλία), η οποία κινείται κατά μήκος της καμπύλης AB στο σχήμα 1.7γ(δ). Η διεύθυνση κινήσεως της διαταραχής και το εύρος της παραμορφώσεως του πλέγματος εκφράζεται από το διάλυσμα του Burgers (b). Στο σχήμα 1.7δ διακρίνονται διαταραχές στη διεπιφάνεια (δηλ. στο όριο μεταξύ δύο φάσεων) ωστενίτη-φερρίτη σ' έναν κοινό ανθρακούχο χάλυβα μετά από θερμή έλαση.

1.7.2 Βασικές κατεργασίες πλαστικής παραμορφώσεως μετάλλων και κραμάτων.

Για την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος, μετά τη στερεοποίησή του, απαιτείται χρήση μίας ή και περισσότερων **τεχνικών μορφοποιήσεως** (metal-forming techniques) σε συνδυασμό θερμπλασίας και ψυχρπλασίας. Η επιλογή της μεθόδου βασίζεται στους εξής βασικούς παράγοντες:

1) **Ιδιότητες του μετάλλου/κράματος.**

2) **Γεωμετρικό σχήμα** (διαστάσεις και, κυρίως, πάχος) και η μορφολογία του τελικού προϊόντος, συμπεριλαμβανομένης της ποιότητας της επιφάνειας, και

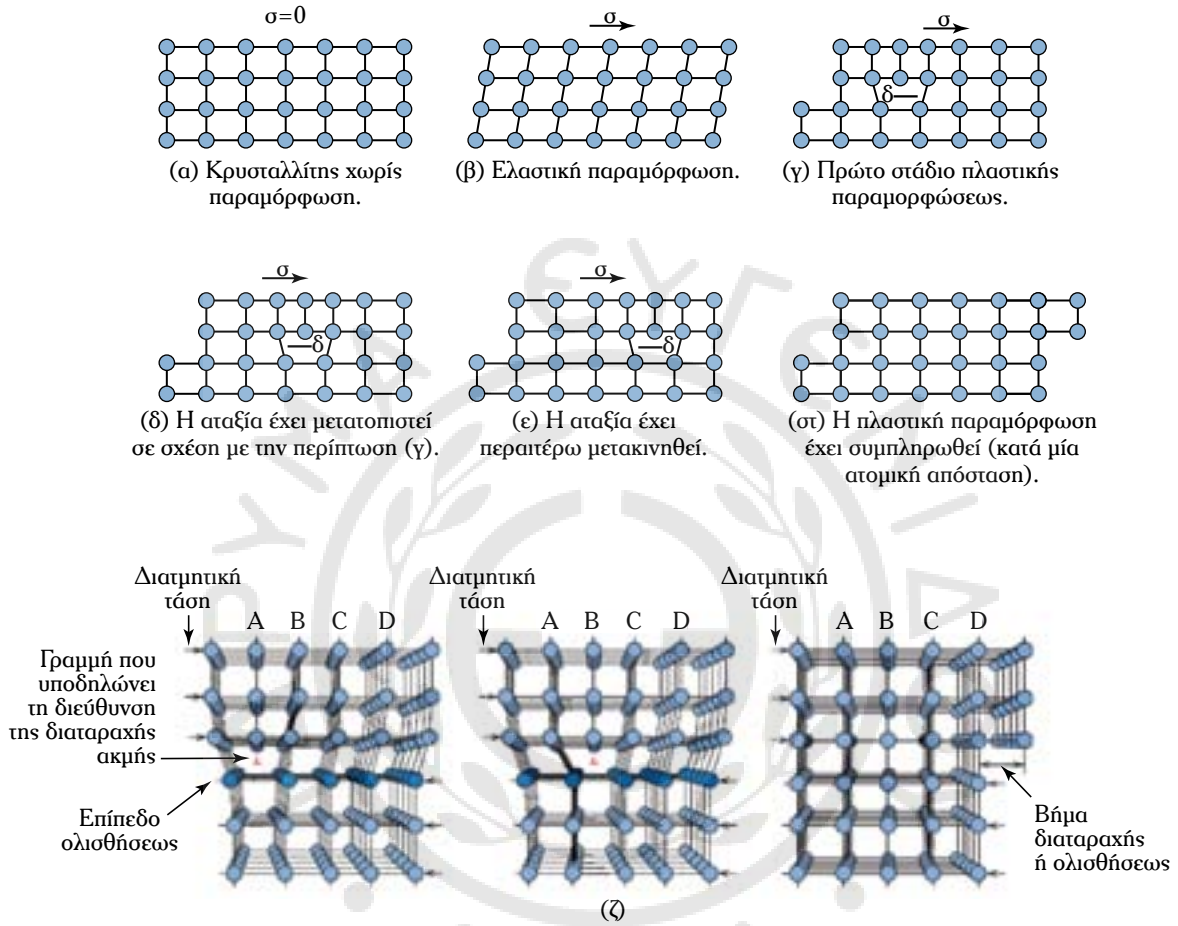
3) **κόστος κατεργασίας.** Στη συνέχεια παρουσιάζονται επιγραμματικά οι βασικές αρχές των κυριότερων μεθόδων κατεργασίας.

⁶ **Διαταραχή** ή **αταξία** ονομάζεται οποιαδήποτε ανωμαλία στην κανονικότητα του κρυσταλλικού πλέγματος του μετάλλου. Έχουμε διαταραχές ακμής, κοχλία ή μεικτού τύπου.

1) Σφρηλασία/Σφρηλάτση.

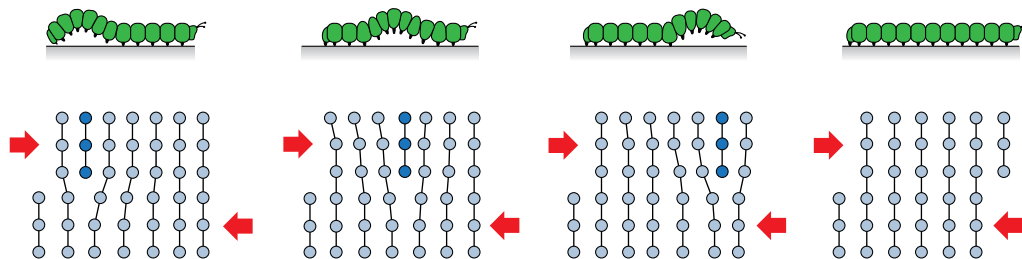
Σύμφωνα με την τεχνική της **σφρηλασίας** (forging), μία σφύρα κρούει ή συμπιέζει το προς διαμόρφωση μέταλλο εν θερμώ, εφόσον η κατεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασία ανώτερη

της θερμοκρασίας ανακρυσταλλώσεως του κράματος, ή εν ψυχρώ. Το τεμάχιο του μετάλλου υπόκειται «μάλαξη» σε διαδοχικά βήματα και σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα λαμβάνει τις τελικές του διαστάσεις. Κατά τη σφρηλάτση οι παραμορφώ-



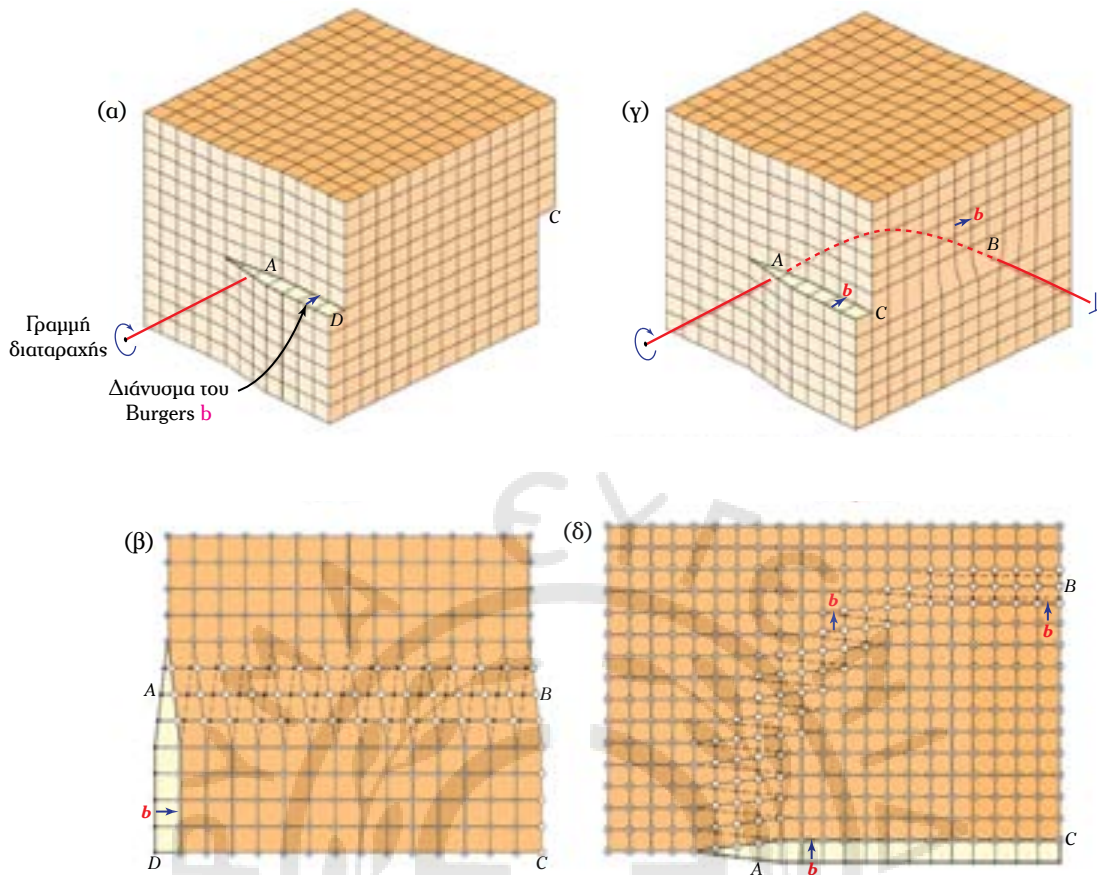
Σχ. 1.7α

Πλαστική παραμόρφωση κρυσταλλίτη σύμφωνα με τη θεωρία των αταξιών. (i) Διοδιάστατη (2D) απεικόνιση. Η διαταραχή (αταξία) σημειώνεται με δ και με παχιά μικρή γραμμή. (ii) Τριοδιάστατη (3D) απεικόνιση της θέσεως των ατόμων γύρω από μία διαταραχή ακμής.

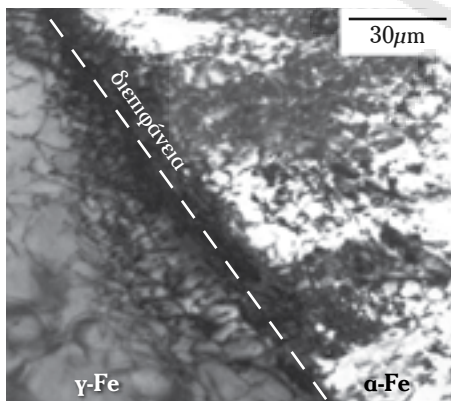


Σχ. 1.7β

Παρομοίωση της μετακινήσεως της διαταραχής και της απαιτούμενης τάσεως με την μετακίνηση ενός τάπια, απλωμένου σε οριζόντιο δάπεδο.



Σχ. 1.7γ
Σχηματική παράσταση διαταραχών (α, β) κοκλίας και (γ, δ) μεικτού τύπου.



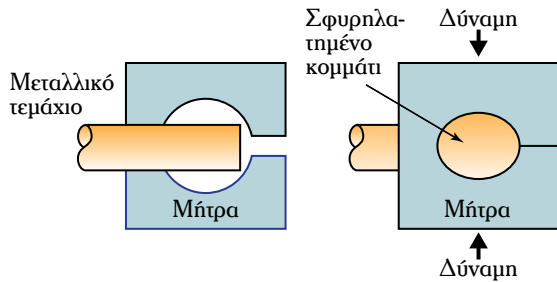
Σχ. 1.7δ
Διαταραχές στη διεπιφάνεια ωσιτενίτη (γ-Fe) και φερρίτη (α-Fe) σε έναν κοινό ανθρακούχο χάλυβα μετά από θερμή έλαση. Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης ηλεκτρονίων (Transmission Electron Microscope – TEM).

σεις διενεργούνται ασυνεχώς και διαρκούν ελάχιστο χρονικό διάστημα. Η σφυρηλασία διακρίνεται σε **κρουστική** και σε **συμπιεστική** διαδικασία, ανάλογα με την ταχύτητα επιβολής των φορτίων διαμορφώσεως. Διακρίνουμε περαιτέρω την σφυρηλασία:

1) **Ανοικτής μήτρας** (open die forging), σύμφωνα με την οποία τα σχετικά άκρα διαμορφώσεως της σφύρας αποτελούνται από δύο απλές πλάκες, επίπεδες ή κοίλες. Με την τεχνική αυτή διαμορφώνονται π.χ. άξονες.

2) **Κλειστής μήτρας** (closed die forging), σύμφωνα με την οποία τόσο η σφύρα όσο και ο άκμονας δεν είναι επίπεδα, αλλά φέρουν εσωτερικά δύο κοιλότητες με κατάλληλο ανάγλυφο, π.χ. σχήμα 1.7ε.

3) **Ανάστροφη** (upset forging), σύμφωνα με την οποία ο άκμονας φέρει μήτρα με κανονικό συμμετρικό σχήμα, ενώ η σφύρα είναι ένα πρισματικό έμβολο.

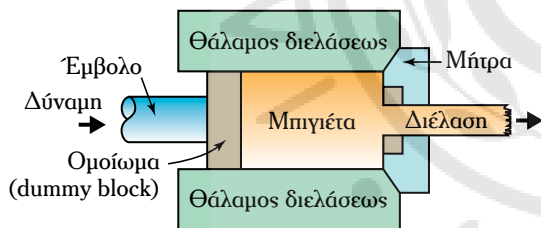


Σχ. 1.7ε

Σχηματική απεικόνιση της σφυρηλασίας κλειστής μήτρας (closed die forging).

2) Διέλαση.

Η **διέλαση** (extrusion) είναι μία απλή τεχνική διαμορφώσεως, σύμφωνα με την οποία το **τεμάχιο** (μπιγιέτα, billet) τοποθετείται εντός ενός θαλάμου και εξωθείται με τη βοήθεια ενός εμβόλου μέσα από μία μήτρα (φιλιέρα) (σχ. 1.7στ). Η τεχνική αυτή αξιοποιεί την εξαιρετική πλαστικότητα και την άνετη ροή του μετάλλου, όταν αυτό βρίσκεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες της θερμοκρασίας ανακρυσταλλώσεως. Το **βασικότερο πλεονέκτημα** της μεθόδου είναι ότι σε ένα μόνο στάδιο μπορεί να παραχθεί μία απλή ή πολύπλοκη διατομή μεγάλου μήκους.



Σχ. 1.7στ

Σχηματική απεικόνιση της διελάσεως κλειστής μήτρας.

Για παράδειγμα, χάλκινη ράβδος μήκους 10 mm παράγεται από μπιγιέτα 120 mm σε ένα μόνο βήμα, ενώ στην περίπτωση ελάσεως θα απαιτούνταν τουλάχιστον δέκα-δώδεκα διαδοχικά στάδια υποβιβασμών μέσα από συστοιχία ελάστρων. Τα πλεονεκτήματα της ελάσεως γίνονται ακόμα πιο έκδηλα όταν οι διατομές είναι πολύπλοκες.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της διελάσεως είναι ότι οι εφαρμοζόμενες τάσεις έχουν συμπιεστικό χα-

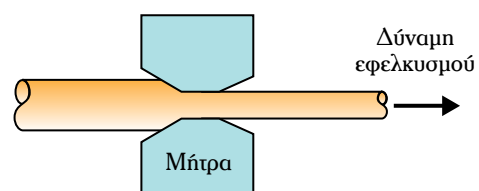
ρακτήρα, όπως ακριβώς και της σφυρηλασίας (στην έλαση μπορεί να εμφανιστούν και εφελκυστικές δυνάμεις). Και η κατεργασία αυτή πραγματοποιείται εν θερμώ, για κάποια όμως κράματα χρησιμοποιείται και κατεργασία εν ψυχρώ (π.χ. στο αλουμίνιο). Το φινίρισμα της επιφάνειας μετά το πέρας της κατεργασίας είναι εξαιρετικό. Όλα τα σύνθετα προφίλ αλουμινίου για τις εφαρμογές στην αρχιτεκτονική, στα δομικά έργα και για άλλες εφαρμογές (π.χ. πλαίσια ελεγχόμενης παραμορφώσεως στα αυτοκίνητα) παράγονται με διέλαση. Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές της διελάσεως είναι η παραγωγή σωλήνων χωρίς ραφή (με βάση την τεχνική του Mannesmann)⁷.

3) Ολκή.

Η **ολκή** ή **συρματοποίηση** (wire drawing) συνίσταται στην εν ψυχρώ παραμόρφωση ενός μετάλλου ή κράματος υπό μονοαξονική καταπόνηση (εφελκυσμό), ώστε αυτό να διαμορφωθεί σε σύρμα (σχ. 1.7ζ). Το μέταλλο υπόκειται σε διαδοχική πλαστική παραμόρφωση περνώντας μέσα από κωνικές μήτρες διαφορετικής διατομής, έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή του διατομή.

4) Έλαση.

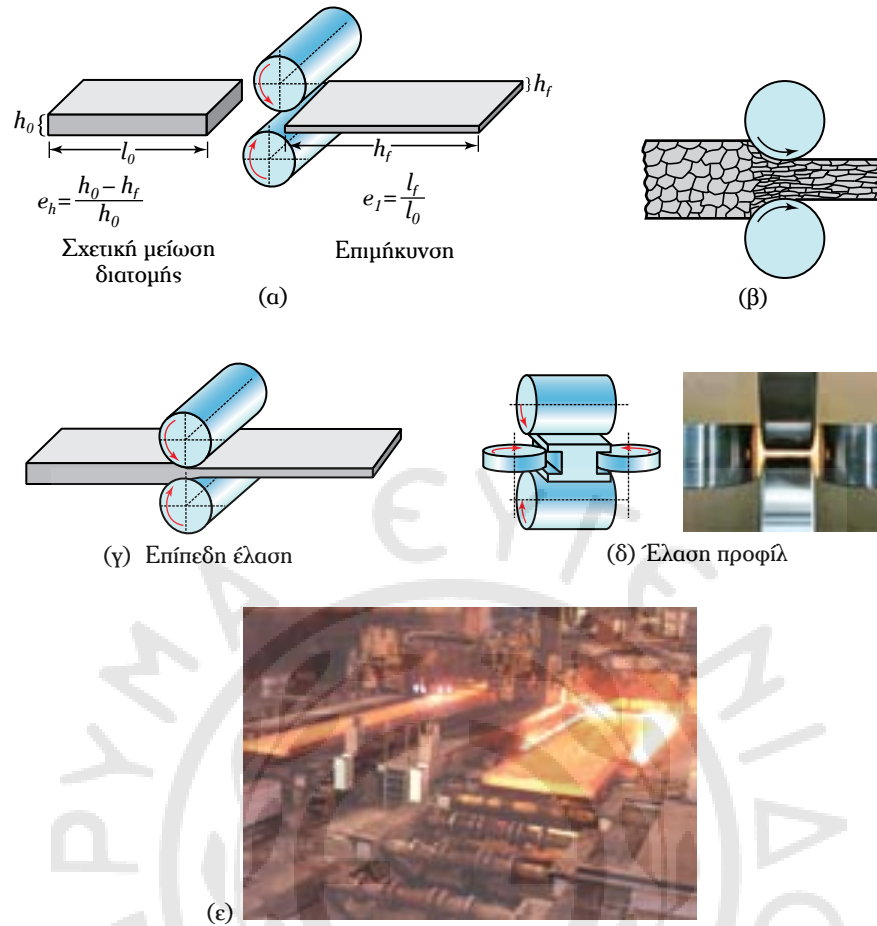
Έλαση (rolling) είναι η κατεργασία πλαστικής παραμορφώσεως των μετάλλων και των κραμάτων με χρήση δύο με αντίρροπη φορά περιστρεφόμενων **ρόλων** (ράουλα – rolls) (σχ. 1.7η). Το υλικό παρασύρεται ανάμεσα στους ρόλους διαμορφώσεως εξαιτίας της τριβής και ο κρυσταλλικός ιστός του μετάλλου/κράματος παραμορφώνεται πλαστικά με επιμήκυνση των κόκκων του προς την κατεύθυνση της κατεργασίας [σχ. 1.7η(β)]. Η μηχανή, η οποία διενεργεί την κατεργασία, ονομάζεται **έλαστρο** (rolling mill), ενώ το κάθε βήμα υποβιβασμού (reduction step) ονομάζεται **πάσο** (pass).



Σχ. 1.7ζ

Σχηματική απεικόνιση της ολκής.

⁷ Η τεχνική του Mannesmann συνίσταται στη διάτρηση μίας μπιγιέτας προς παραγωγή σωλήνα χωρίς ραφή μέσω ελάσεως μορφής.



Σχ. 1.7n

(α) Σχηματική αναπαράσταση ελάσεως, (β) του μεταλλικού ιστού, (γ) σχηματικά η επίπεδη έλαση, (δ) ελάσεως μορφής (προφίλ), και (ε) σιγμιότυπο από θερμή έλαση πλάκας (επίπεδη έλαση) σε ελασματοουργείο.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

Ο σίδηρος και τα κράματά του

2.1 Σίδηρος – Ανθρακούχοι χάλυβες – Χυτοσίδηροι – Ανοξειδωτοι χάλυβες.

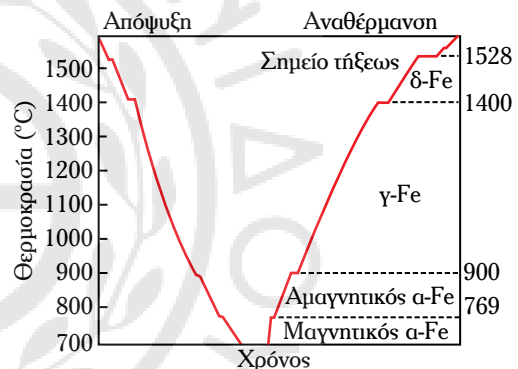
Ο σίδηρος και τα κράματά του και οι χάλυβες αποτελούν τα σπουδαιότερα βιομηχανικά υλικά, η χρήση των οποίων καλύπτει ποσοστό άνω του 80% παγκοσμίως. Σε καθημερινή βάση χρησιμοποιούνται περισσότερα από 2.000 κράματα χάλυβα. Χάλυβες κατασκευών για γέφυρες, κτήρια, πλοία, δομικές κατασκευές, βάσεις βαρέος τύπου μηχανημάτων, χάλυβες μηχανουργικών κατεργασιών για μηχανολογικές εφαρμογές, χάλυβες εργαλείων, χάλυβες για χρήση σε ειδικές εφαρμογές για ανυψωτικά μηχανήματα, υδραυλικά συστήματα, πυρηνικά εργοστάσια κ.ά., για χρήσεις στην αυτοκινητοβιομηχανία, ανοξειδωτοι χάλυβες για οικιακά σκεύη, εργαλεία, για τη χημική βιομηχανία κ.ά., χυτοσίδηροι κ.λπ.. Οι χάλυβες είναι απόλυτα ανακυκλώσιμοι. Σήμερα η πλειονότητά τους παράγεται μέσω ανατίξεως παλαιοσιδήρων, που έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο της ζωής τους, σε **ηλεκτρικές καμίνους** (Electric Arc Furnace – EAF). Ο σίδηρος βρίσκεται σε ποσοστό 4% στον στερεό φλοιό της γης, πράγμα το οποίο συμβάλλει καθοριστικά στην προσιτή τιμή των προϊόντων του. Όπου και αν κοιτάξει κάποιος, συναντά χρήσεις του σιδήρου και των χαλύβων. Για τον λόγο αυτόν ο τεχνοοικονομικός πολιτισμός μας εξακολουθεί να βρίσκεται στην εποχή του σιδήρου και του χάλυβα.

2.2 Αλλοτροπίες του σιδήρου.

Το φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο τα μέταλλα μπορούν να εμφανίζουν διαφορετικές κρυσταλλικές δομές ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται κάθε φορά ονομάζεται **αλλοτροπία** ή **πολυμορφισμός**.

Κατά την **αναθέρμανση**, ως τους 500°C χρησιμοποιείται ο όρος «θέρμανση» και σε ανώτερες

θερμοκρασίες ο όρος **πύρωση του σιδήρου** (δεξιά καμπύλη πυρώσεως, σχ. 2.2α), παρατηρούμε ότι, όταν η θερμοκρασία φθάσει στους 769°C, 909°C, 1400°C και 1528°C (σημείο τήξεως του καθαρού σιδήρου), παραμένει για λίγο διάστημα στάσιμη, και ύστερα εξακολουθεί να ανυψώνεται. Αυτό σημαίνει ότι ο σίδηρος στις θερμοκρασίες αυτές απορροφά θερμότητα, χωρίς όμως να αυξάνεται η θερμοκρασία του. Η θερμότητα αυτή αναλώνεται από τον μετασχηματισμό¹.

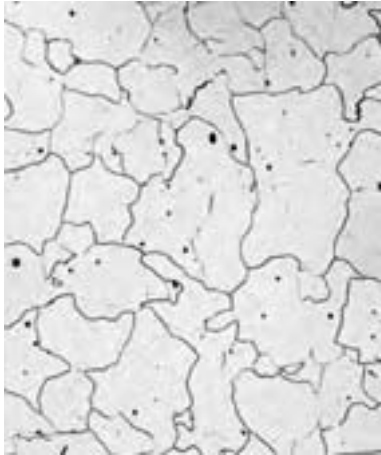


Σχ. 2.2α

Καμπύλη πυρώσεως και αποψύξεως του καθαρού σιδήρου.

Οι θερμοκρασίες A_2 (769°C), A_3 (909°C) και A_4 (1400°C) καλούνται **κρίσιμες θερμοκρασίες**. Κατά τον χρόνο που η θερμοκρασία παραμένει στάσιμη στις θερμοκρασίες A_3 και A_4 παρατηρείται αλλαγή στην κρυσταλλική δομή του σιδήρου. Έτσι, ο καθαρός σίδηρος μέχρι την A_3 παρουσιάζεται ως **άλφα-σίδηρος** (α -Fe) (σχ. 2.2β), έχει **χωροκεντρωμένο κυβικό** (BCC) κρυσταλλικό πλέγμα και μέχρι τους 769°C είναι **μαγνητικός**. Από τη θερμοκρασία αυτή, η οποία ονομάζεται **θερμοκρασία Curie** (κρίσιμο σημείο A_2) και μέχρι τη θερμοκρασία A_3 γίνεται **αμαγνητικός**. Στη συνέχεια ο α -Fe στους 909°C μετασχηματίζεται σε **γάμμα-σίδηρο** (γ -Fe)

¹ Πειραματικά οι μετασχηματισμοί στον χάλυβα και σε άλλα μέταλλα, τα οποία εμφανίζουν αλλοτροπικούς μετασχηματισμούς, προσδιορίζονται με τη χρήση θερμικής ανάλυσης ή διαστολομετρίας (dilatometry).

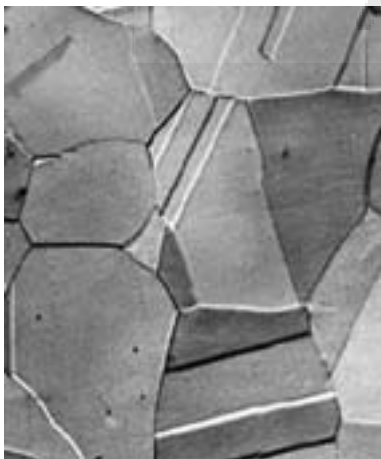


Σχ. 2.2β

Φερρίτης (α -Fe) (Φωτογραφία από μικροσκόπιο, $\times 90$).

(σχ. 2.2γ), ο οποίος έχει **εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα** (FCC) και είναι **αμαγνητικός**. Ο γ -Fe, όταν θερμανθεί στους 1400°C (A_4), μετασχηματίζεται σε δέλτα-σίδηρο (δ -Fe), με **χωροκεντρωμένο κυβικό** κρυσταλλικό πλέγμα, δηλαδή όμοιο με το πλέγμα του α -Fe. Στους 1528°C γίνεται η τήξη του καθαρού σιδήρου. Κατά την απόψυξη του τήγματος καθαρού σιδήρου παρατηρούνται οι ίδιες μεταβολές, με αντίστροφη όμως σειρά, στην κρυσταλλική δομή του και στις ίδιες θερμοκρασίες A_4 , A_3 , A_2 , όπως συμβαίνει κατά την αναθέρμανσή του. Ο α -Fe δεν διαλύει τον άνθρακα, παρά ελάχιστα (μέγιστη στερεά διαλυτότητα $0,022\%$ κ.β. στη θερμοκρασία A_1 των 723°C και $0,008\%$ κ.β. στους 25°C).

Ο γ -Fe, ο οποίος τον διαλύει (μέγιστη διαλυτότητα $2,1\%$ κ.β. στους 1130°C), μπορεί να υπάρξει και στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος,



Σχ. 2.2γ

Ωστενίτης (γ -Fe) (Φωτογραφία από μικροσκόπιο, $\times 90$).

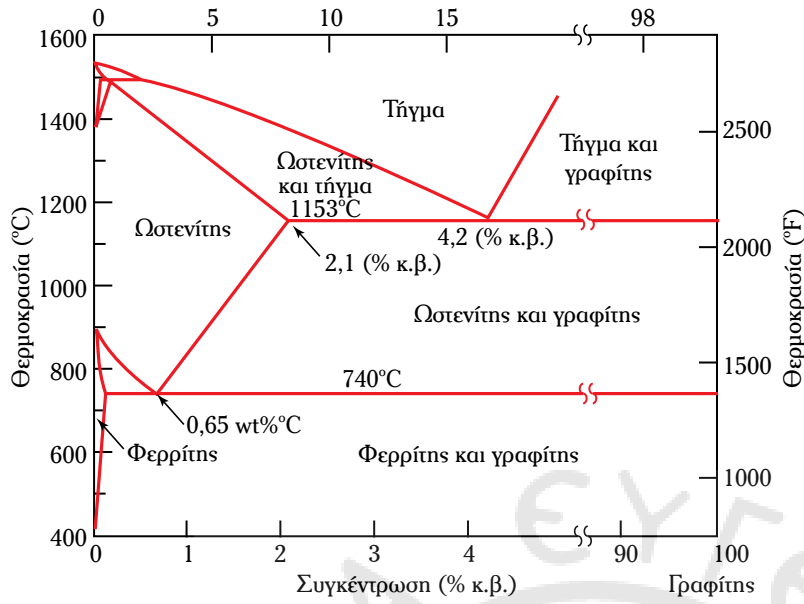
αν προσθέσουμε σε αυτόν ορισμένα στοιχεία, όπως είναι το νικέλιο και το μαγγάνιο, που έχουν την ιδιότητα να μειώνουν τη θερμοκρασία A_3 και να διευρύνουν τον ωστενιτικό βρόχο στο διάγραμμα Fe-C (ή Fe-Fe₃C). Από αυτά που είπαμε, συμπεραίνουμε ότι ο σίδηρος υπάρχει σε δύο αλλοτροπικές μορφές, δηλαδή ως α -Fe και ως δ -Fe με χωροκεντρωμένο κυβικό κρυσταλλικό πλέγμα (BCC) και ως γ -Fe με εδροκεντρωμένο κυβικό κρυσταλλικό πλέγμα (FCC).

2.3 Τα διμερή διαγράμματα σιδήρου-άνθρακα και σιδήρου-σεμεντίτη.

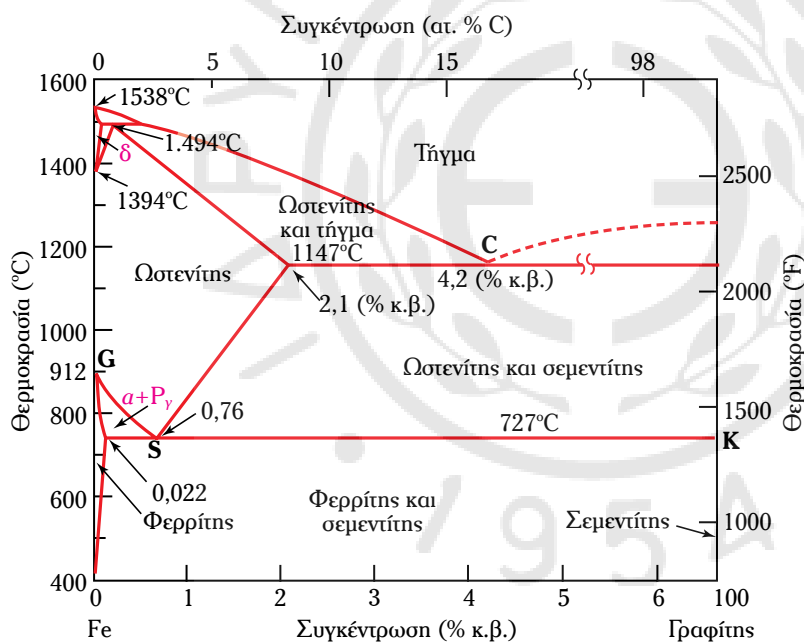
Γνωρίζοντας τις αλλοτροπικές μορφές του σιδήρου, εξετάζουμε το στερεό διάλυμα του σιδήρου με τον άνθρακα (σχ. 2.3α). Ο άνθρακας στους χάλυβες δεν βρίσκεται ελεύθερος (με μορφή γραφίτη), αλλά σχηματίζει με τον σίδηρο μία χημική ένωση (καρβίδιο), η οποία ονομάζεται **σεμεντίτης** (Fe₃C). Ο σεμεντίτης έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα $6,67\%$ κ.β., επομένως είναι εξαιρετικά σκληρός.

Πρακτικά μας ενδιαφέρει το διάγραμμα ισορροπίας Fe-Fe₃C (σχ. 2.3β). Οι χάλυβες αποτελούν το στερεό διάλυμα του σιδήρου με τον άνθρακα σε περιεκτικότητες ως και $2,1\%$ κ.β. (χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα ως $0,76\%$ κ.β. ονομάζονται **υποευνεκτοειδείς**, από $0,76\%$ – $2,14\%$ κ.β. **υπερευνεκτοειδείς**).

Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι μετασχηματισμοί του ωστενίτη (γ -Fe) σε φερρίτη (α -Fe) και ωστενίτη (γ -Fe) σε φερρίτη και σεμεντίτη (Fe₃C). Ο φερρίτης θεωρείται ότι έχει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες με τον καθαρό σίδηρο. Ο ωστενίτης παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς αφού κρυσταλλώνεται στο FCC, μπορεί να δεχτεί μεγάλες παραμορφώσεις. Γι' αυτό, όλες οι διαμορφώσεις διενεργούνται εντός του ωστενιτικού βρόχου. Η μεγάλη διαφορά στη στερεά διαλυτότητα του άνθρακα στον φερρίτη και στον ωστενίτη αντανακλάται στη σημαντική διαφορά της εκτάσεως των βρόχων φερρίτη και ωστενίτη αντίστοιχα. Είναι λοιπόν κατανοητό ότι όλα τα στοιχεία, που διευρύνουν τον ωστενιτικό βρόχο, τα λεγόμενα **γ -φερρογόνα** (γ -stabilizers), όπως το νικέλιο (Ni), το μαγγάνιο (Mn) και ο άνθρακας (C), τα οποία μειώνουν την θερμοκρασία A_3 . Αντίστοιχα, όσα διευρύνουν τον φερριτικό βρόχο [(α -φερρογόνα) (α -stabilizers)] μετατοπίζουν προς ανώτερες θερμοκρασίες τις A_1 και A_3 . Τέτοια είναι το τιτάνιο (Ti), το πυρίτιο (Si), ο φωσφόρος (P), το μολυβδαίνιο (Mo), τα οποία αποκτούν ιδιαίτερη σημασία για την



Σχ. 2.3α
Το διάγραμμα σιδήρου-άνθρακα (γραφίτη).



Σχ. 2.3β
Το διάγραμμα σιδήρου-σεμενίτη (Fe_3C).

διευκόλυνση της μηχανικής, πλαστικής παραμορφώσεως των χαλύβων εν θερμώ.

Εξετάζοντας το διάγραμμα $Fe-Fe_3C$ παρατηρούμε ότι η γραμμή στερεοποίησης αρχίζει από τη θερμοκρασία τήξεως του καθαρού σιδήρου ($1528^\circ C$) και ακολουθεί τον σχηματισμό του ωστενίτη μέχρι του κορεσμού του σε άνθρακα σε αναλογία 2% περίπου και σε θερμοκρασία $1147^\circ C$. Από εκεί και πέρα η γραμμή στερεοποίησης παραμένει ευθεία μέχρι τον καθαρό σεμενίτη. Έτσι, η στερεοποίηση

ολοκληρώνεται για τα κράματα με περιεκτικότητα σε άνθρακα μέχρι $\sim 2\%$ στο διάστημα θερμοκρασιών από $1528-1147^\circ C$, για τα υπόλοιπα κράματα στη σταθερή θερμοκρασία των $1147^\circ C$. Ενδιάμεσα, στη θερμοκρασία των $1493^\circ C$ και σε περιεκτικότητες σε άνθρακα ως $0,11\%$ κ.β. εμφανίζεται το περιπλεκτικό σημείο με συνύπαρξη $\delta-Fe$ και τήγματος. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει την στερεοποίηση των «περιπλεκτικών», όπως ονομάζονται, χαλύβων.

Σε αναλογία άνθρακα $4,3\%$ κ.β. στη σταθερή

θερμοκρασία των 1147°C η αρχή και το τέλος της στερεοποιήσεως συμπίπτουν. Παρατηρούμε επίσης ότι η θερμοκρασία αυτή (1147°C) είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία τήξεως που συναντάμε στα κράματα Fe-Fe₃C. Το σημείο C στο σχήμα 2.3β είναι το σημείο της **ευτηκτικής αναλογίας** και το κράμα με αναλογία σε άνθρακα 4,3% κ.β. είναι το **ευτηκτικό κράμα**, το οποίο ονομάζεται **λεδεμβουρίτης**² και σχηματίζεται με εναλλασσόμενους πλακοειδείς κρυσταλλίτες κορεσμένου γ-Fe (με περιεκτικότητα 2% κ.β.) και Fe₃C.

Το σημείο S στο σχήμα 2.3β, που αντιστοιχεί σε αναλογία άνθρακα περίπου 0,76% κ.β. και στην θερμοκρασία A₁ (723°C) είναι το λεγόμενο σημείο **ευτηκτοειδούς αναλογίας** και το σχετικό κράμα είναι το **ευτηκτοειδές κράμα**, το οποίο ονομάζεται **περλίτης**, μείγμα φάσεων εναλλασσομένων πλακιδίων α-Fe και Fe₃C.

Τα κράματα σιδήρου-σεμενίτη με περιεκτικότητα σε άνθρακα πάνω από 2% αποτελούν τους λεγόμενους **λευκούς χυτοσιδήρους**. Οι χυτοσίδηροι αυτοί ονομάζονται έτσι, γιατί η επιφάνεια θραύσεώς 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 με τον άνθρακα να βρίσκεται ελεύθερος και όχι σε χημική ένωση ως σεμενίτης.

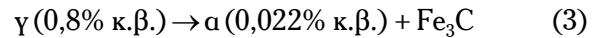
- Η περιοχή των ανθρακούχων χαλύβων.

Οι χάλυβες είναι τα βιομηχανικά προϊόντα με τη μεγαλύτερη και ευρύτερη πρακτική εφαρμογή. Για τον λόγο αυτόν στο διάγραμμα θερμοδυναμικής ισορροπίας Fe-Fe₃C (σχ. 2.3β) ενδιαφερόμαστε ιδιαίτερα για την περιοχή με συγκεντρώσεις ως και 2,1% κ.β., δηλαδή μελετούμε προσεκτικότερα την περιοχή των χαλύβων.

Στο σχήμα 2.3γ διακρίνουμε τις κρίσιμες θερμοκρασίες A₁ (γραμμή PS), θερμοκρασία ευτηκτοειδούς αντιδράσεως (723°C), και A₃ (γραμμή GS), μετασχηματισμού α→γ. Οι θερμοκρασίες A₁ και A₃ εξαρτώνται από τον ρυθμό αναθερμάνσεως και αποψύξεως, καθώς και από την περιεκτικότητα του χάλυβα σε κραματικά στοιχεία. Εξετάζουμε την περι-

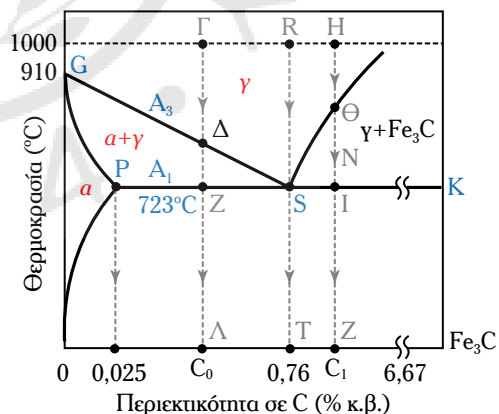
πτωση αποψύξεως χαλύβων με διαφορετικές συγκεντρώσεις σε άνθρακα. Ας υποθέσουμε ότι αποψύχεται ο χάλυβας μας από μία θερμοκρασία εντός του ωστενιτικού βρόχου, π.χ. από τους 1000°C, στη θερμοκρασία δωματίου (25°C).

Ξεκινούμε με την περίπτωση ευτηκτοειδούς χάλυβα με συγκεντρωση 0,76% κ.β. (σημείο R, σχ. 2.3γ). Όταν φτάσουμε στη θερμοκρασία A₁ (σημείο S, σχ. 2.3γ), συμβαίνει η ευτηκτική αντίδραση



σύμφωνα με την οποία ο ωστενίτης μετατρέπεται σε φερρίτη και σεμενίτη, δηλαδή στο μείγμα φάσεων του περλίτη (σχ. 2.3β, 2.3γ και 2.3δ).

Περνάμε τώρα στην περίπτωση αποψύξεως ενός υποευτηκτοειδούς χάλυβα με περιεκτικότητα C₀ π.χ. με 0,4% κ.β. C (σημείο Γ, σχ. 2.3γ). Στην A₃ (σημείο Δ, σχ. 2.3γ) ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε φερρίτη (γ→α). Στη συνέχεια ως τη θερμοκρασία A₁ (σημείο Z, σχ. 2.3γ) σχηματίζεται ολόενα και περισσότερος φερρίτης, ενώ παράλληλα ο ωστενίτης εμπλουτίζεται σε άνθρακα. Η αύξηση της περιεκτικότητάς του σε C ακολουθεί την γραμμή ΔS (σχ. 2.3γ) και οφείλεται στην απόρριψη του C από τον φερρίτη προς τον ωστενίτη, λόγω της μεγάλης διαφοράς στη στερεά διαλυτότητά τους. Ο φερρίτης αυτός, ο οποίος σχηματίζεται μεταξύ της A₃ και της A₁, ονομάζεται **προευτηκτοειδής φερρίτης**.



Σχ. 2.3γ

Διμερές διάγραμμα φάσεων σιδήρου-σεμενίτη για την περιοχή των χαλύβων. Εξετάζονται οι μετασχηματισμοί και οι μικροδομές χαλύβων με διαφορετικές περιεκτικότητες σε άνθρακα.

² Ο λεδεμβουρίτης ονομάστηκε έτσι προς τιμήν του πρώτου καθηγητή μεταλλουργίας της Bergakademie, Adolf Ledebur (Karl Heinrich Adolf Ledebur, 1837–1906), ο οποίος ανακάλυψε τη δομή αυτή το 1882.

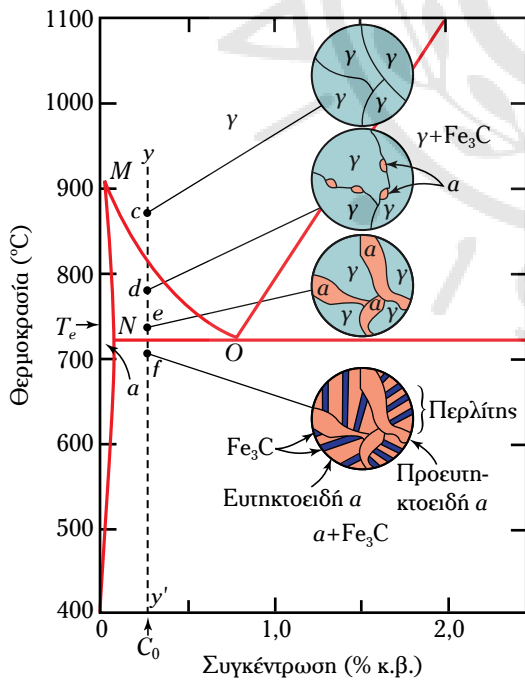
Έτσι, οι υποευτηκτοιειδείς χάλυβες (με σύσταση από 0,022% έως 0,76% κ.β.) αποτελούνται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος από προευτηκτοιειδή φερρίτη και περλίτη. Στο σχήμα 2.3δ παρουσιάζεται η εξέλιξη των μετασχηματισμών και της μικροδομής στον χάλυβα με περιεκτικότητα C_0 . Τέλος, εξετάζουμε την περίπτωση αργής αποψύξεως ενός υπερευτηκτοιειδούς χάλυβα με περιεκτικότητα C_1 (π.χ. 1,2% κ.β. C) (σημείο Η, σχ. 2.3γ). Στο σημείο Θ κατακρημνίζεται σεμεντίτης στον ωστενίτη ($\gamma \rightarrow \gamma + Fe_3C$). Ο σεμεντίτης αυτός ονομάζεται **προευτηκτοιειδής σεμεντίτης**. Κατά την ψύξη προς τη θερμοκρασία A_1 η περιεκτικότητα του Fe_3C ολοένα και αυξάνεται αποσπώντας διαρκώς άνθρακα από τον ωστενίτη, με αποτέλεσμα η περιεκτικότητας του τελευταίου να μειώνεται ακολουθώντας την καμπύλη ΘΣ του διαγράμματος φάσεως (σχ. 2.3γ). Έτσι, ο ωστενίτης έχει αποκτήσει ευτηκτική σύσταση και η ψύξη του κάτω από την θερμοκρασία A_1 οδηγεί στον μετασχηματισμό του σε περλίτη. Στη θερμοκρασία περιβάλλοντος οι υπερευτηκτοιειδείς χάλυβες με σύσταση $0,8\% < C < 2,1\%$ κ.β. αποτελούνται από προευτηκτοιειδή σεμεντίτη και περλίτη.

Στο σχήμα 2.3ε παρουσιάζεται η εξέλιξη των

μετασχηματισμών και της μικροδομής στον υπερευτηκτοιειδή χάλυβα με περιεκτικότητα C_1 . Υπό την προϋπόθεση ότι ο ρυθμός αποψύξεως είναι ιδιαίτερα αργός, τονίζεται ότι αυτοί οι μετασχηματισμοί και η ανακατανομή του άνθρακα μεταξύ των φάσεων συντελούνται μέσω διαχύσεως. Στην περίπτωση ταχείας ή ραγδαίας αποψύξεως πραγματοποιούνται ο μπαινιτικός ή/και ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός (σχ. 2.3στ).

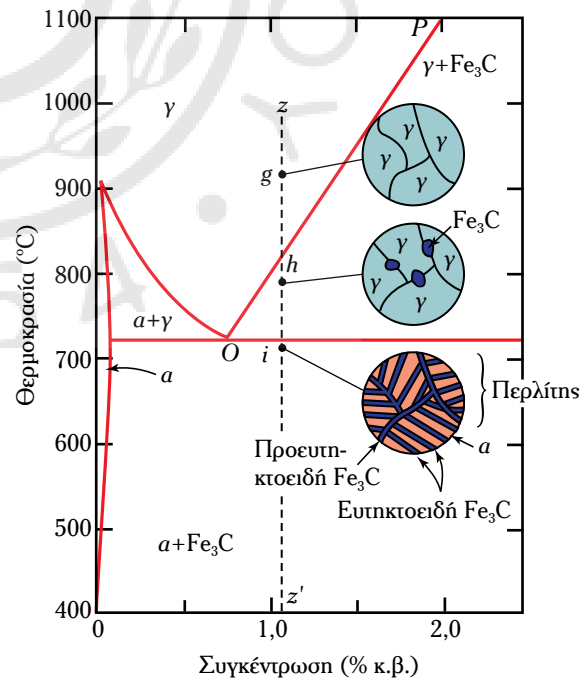
Οι μετασχηματισμοί φάσεως σε στερεά κατάσταση στους χάλυβες διέπονται από την παρουσία διαχύσεως (δηλ. μετακινήσεως μάζας μέσω μάζας, π.χ. τη μετακίνηση του μαγγανίου ή του άνθρακα ή του χρωμίου κ.ά. στοιχείων μέσα στο πλέγμα του σιδήρου στους χάλυβες) ή την απουσία διαχύσεως. Παράδειγμα μετασχηματισμού διαχύσεως αποτελεί ο **περλιτικός μετασχηματισμός** και μετασχηματισμού με απουσία διαχύσεως ο **μαρτενσιτικός**. Μάλιστα ο **μαρτενσιτικός μετασχηματισμός** συνοδεύεται από διάτμηση του πλέγματος, δηλαδή δεν πραγματοποιείται με τον κλασικό μηχανισμό πυρηνοποιήσεως και αναπτύξεως.

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός μπορεί να γίνει και σε θερμοκρασία λίγο πιο πάνω από 0 K (απόλυτο μηδέν), ενώ ο μετασχηματισμός διαχύσεως σε πολύ



Σχ. 2.3δ

Σχηματική απεικόνιση της μικροδομής ενός υποευτηκτοιειδούς χάλυβα με περιεκτικότητα C_0 (π.χ. 0,4% κ.β.) κατά την απόψυξή του από την ωστενιτική περιοχή.



Σχ. 2.3ε

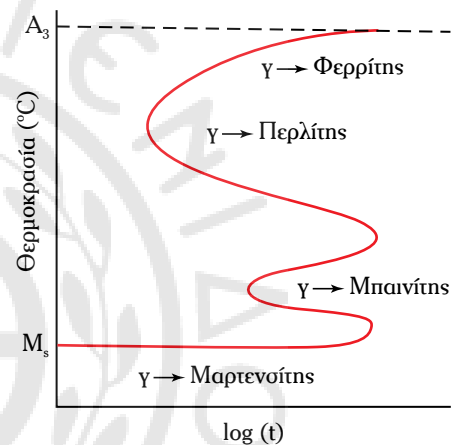
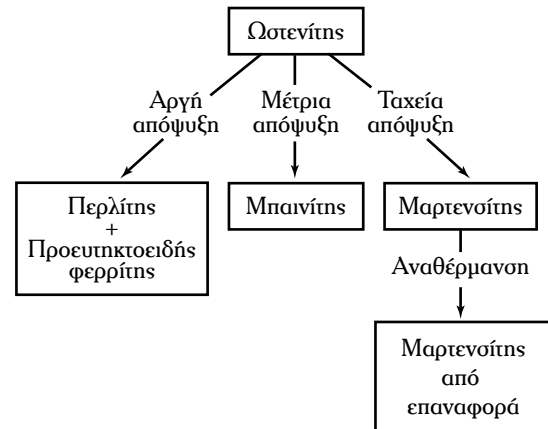
Σχηματική απεικόνιση της μικροδομής ενός υπερευτηκτοιειδούς χάλυβα με περιεκτικότητα C_0 (π.χ. 1,2% κ.β.) κατά την απόψυξή του από την ωστενιτική περιοχή.

υψηλότερες θερμοκρασίες και συγκεκριμένα πάνω από $0,3 T_f$ (T_f = σημείο τήξεως του υλικού).

Η ταχύτητα διαχύσεως είναι πολύ μικρή και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, ενώ η ταχύτητα του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι σχεδόν σταθερή και πολύ υψηλή. Φθάνει την ταχύτητα του ήχου στο σίδηρο (5000 m/s). Ο χρόνος ολοκλήρωσης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι της τάξεως των 10–7 s.

Το ποσοστό του παραγόμενου μαρτενσίτη εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ξεκινά κάτω από μια θερμοκρασία ενάρξεως, που συμβολίζεται M_s , και ολοκληρώνεται σε μια θερμοκρασία τέλους, που συμβολίζεται M_f ($M_s > M_f$). Στην τελευταία θερμοκρασία έχει μετατραπεί όλος ο ωστενίτης σε μαρτενσίτη (100% μετατροπή). Κατά τη διάχυση, όμως, το ποσοστό μετατροπής εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία, όσο και από τον χρόνο παραμονής στην εκάστοτε θερμοκρασία. Μετά από το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό δεν υπάρχουν αλλαγές στη χημική σύσταση, δηλαδή ο μαρτενσίτης περιέχει ποσοστό άνθρακα όσο και ο ωστενίτης από τον οποίον προήλθε. Αντίθετα, κατά τη διάχυση οι νέες φάσεις έχουν διαφορετική σύσταση από τις παλαιές.

Ο **μπαϊνιτικός μετασχηματισμός** είναι ενδιάμεσος μετασχηματισμός, καθώς παρουσιάζει χαρακτηριστικά διαχύσεως και διατηρήσεως. Σημαντική λοιπόν επίδραση στους αλλοτροπικούς μετασχηματισμούς των χαλύβων αποτελεί ο ρυθμός αποψύξεως του κράματος. Ο μπαϊνίτης, όπως και ο μαρτενσίτης, είναι δομές εκτός ισορροπίας και δεν επισημαίνονται από τα διαγράμματα φάσεων.



Σχ. 2.3στ

2.4 Οι χυτοσίδηροι.

Οι χυτοσίδηροι είναι κράματα σιδήρου–άνθρακα και πυριτίου (Fe-C-Si) με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα, η οποία κυμαίνεται από 2,1% ως 4%. Οι ταχύτητες αποψύξεως αλλά και η περιεκτικότητα σε πυρίτιο (Si) καθορίζουν τη μικροδομή, άρα και τις ιδιότητές τους. Ο άνθρακας εμφανίζεται με τη μορφή σεμενίτη και συχνά με τη μορφή γραφίτη σε διαφορετικές μορφολογίες. Τα βασικά **πλεονεκτήματα** του χυτοσιδήρου, ως τεχνικού υλικού, συγκριτικά με τον χάλυβα είναι το **χαμηλότερο κόστος**, το **χαμηλότερο σημείο τήξεως** (1150°C – 1250°C) και ότι σε κατάσταση τήξεως είναι πολύ λεπτόρρευστος και επομένως μπορεί να παίρνει περίπλοκα σχήματα κατά τη χύτευση, δηλαδή έχει, όπως λέμε, εξαιρετική δυνατότητα χυτεύσεως (ευχυτότητας).

Ο χυτοσίδηρος ως υλικό έχει σημαντική ικανότητα αποσβέσεως κραδασμών. Γι' αυτό θεωρείται υλικό κατάλληλο για σώματα εργαλειομηχανών και γε-

νικά για βάσεις μηχανών. Σημαντικό **μειονέκτημά** του συγκριτικά με τον χάλυβα είναι ότι παρουσιάζει χαμηλότερο όριο θραύσεως, χαμηλότερη δυσθραυστότητα και πολύ μικρή ή και ανύπαρκτη πλαστικότητα. Το τελευταίο σημαίνει ότι ο χυτοσίδηρος δεν μπορεί να υποστεί κατεργασία με πλαστική παραμόρφωση, δηλαδή δεν είναι κράμα διαμορφώσεως. Στη συνέχεια θα δούμε ότι με ορισμένες θερμικές κατεργασίες ή προσθήκες μπορούμε να πετύχουμε χυτοσιδήρους με ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες. Οι χυτοσίδηροι, όπως και οι χάλυβες, εκτός από τον άνθρακα περιέχουν και τις γνωστές ακαθαρσίες, δηλαδή πυρίτιο, μαγγάνιο, θείο και φωσφόρο, σε μεγαλύτερες όμως ποσότητες.

Οι χυτοσίδηροι κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες: **λευκοί**, **φαιοί** (γκρίζοι), **μαλακτοί**, **ελατοί** ή **χυτοσιδήροι σφαιροειδούς γραφίτη** και **ισχυρά κραματωμένοι**.

Οι βασικές χημικές συστάσεις (% κ.β.) των κύρι-

Πίνακας 2.4.1
Βασικές χημικές συστάσεις (% κ.β.) των κύριων κατηγοριών χυτοσιδήρων.

<i>Τύπος χυτοσιδήρου</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
<i>Λευκός</i>	1,8–3,6	0,5–1,9	0,25–0,8	0,06–0,2	0,06–0,18
<i>Φαιός</i>	2,5–4,0	1,0–3,0	0,25–1,0	0,02–0,25	0,05–1
<i>Μαλακτός</i>	2,0–2,6	1,1–1,6	0,2–1	0,04–0,18	<0,18
<i>Ελατός</i>	3,0–4,0	1,8–2,8	0,1–1	<0,03	<0,10

ων κατηγοριών χυτοσιδήρων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4.1.

Αν ο άνθρακας, που εμπεριέχεται, σχηματίζει μαζί με τον σίδηρο σεμεντίτη, τότε ο χυτοσίδηρος είναι σκληρός, εύθραυστος και δυσκατέργαστος. Κατά τη θραύση του, η επιφάνεια θραύσεως είναι λευκή (λευκόχρους). Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε τον **λευκό χυτοσίδηρο**. Αν ο άνθρακας περιέχεται ελεύθερος, σαν γραφίτης, ο χυτοσίδηρος είναι σχετικά **μαλακός** και **κατεργάσιμος**, η δε επιφάνεια θραύσεως είναι φαιά (γκρίζα). Σ' αυτήν την περίπτωση έχουμε τον **φαιό χυτοσίδηρο**. Οι παράγοντες που καθορίζουν ποια μορφή παίρνει και πώς κατανέμεται ο άνθρακας στον χυτοσίδηρο, είναι η **ταχύτητα αποψύξεως** κατά τη χύτευση, η **χημική του σύνθεση** και οι **θερμικές κατεργασίες**, που ακολουθούν τη χύτευσή του και που επηρεάζουν τις μηχανικές του ιδιότητες. Έτσι:

1) Η υψηλή ταχύτητα αποψύξεως τείνει να σταθεροποιήσει τον σεμεντίτη και, επομένως, δίνει λευκό χυτοσίδηρο, ενώ η χαμηλή ταχύτητα αποψύξεως υποβοηθεί τον σχηματισμό γραφίτη, οπότε παράγεται φαιός χυτοσίδηρος. Η ταχύτητα αποψύξεως εξαρτάται από το μέγεθος της διατομής του χυτευόμενου τεμαχίου, καθώς επίσης και από το είδος του τύπου (καλουπιού) χυτεύσεως. Επομένως, στο ίδιο χυτό, με διαφορετικές όμως διατομές, μπορούμε να παρατηρήσουμε τον σχηματισμό λευκού χυτοσιδήρου στις λεπτές διατομές, ενώ στις παχύτερες σχηματίζεται φαιός χυτοσίδηρος. Σημειώνεται ότι η ταχύτητα αποψύξεως είναι υψηλότερη στους μεταλλικούς τύπους (καλούπια), ενώ είναι χαμηλότερη στους τύπους άμμου.

2) Το **πυρίτιο** υποβοηθεί τον σχηματισμό γραφίτη και, επομένως, έχει την τάση να σχηματίζει φαιό χυτοσίδηρο. Το **θείο** σταθεροποιεί τον σεμεντίτη και, επομένως, υποβοηθεί τον σχηματισμό λευκού χυτοσιδήρου. Το **μαγγάνιο** σχηματίζει μαζί με το θείο θειούχο μαγγάνιο και, έτσι, υποβοηθεί έμμεσα τον

σχηματισμό γραφίτη, γιατί δεσμεύει το θείο, που τείνει να σταθεροποιήσει τον σεμεντίτη. Ο **φωσφόρος** βελτιώνει την ιδιότητα του χυτοσιδήρου να χυτεύεται εύκολα και, έτσι, χυτοσίδηρος με 1% φωσφόρο π.χ. είναι κατάλληλος για χύτευση τεμαχίων με λεπτές διατομές.

Τέλος, διάφορες **προσθήκες** μάς δίνουν τους λεγόμενους **ειδικούς χυτοσιδήρους**, οι οποίοι παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες ή άλλες χαρακτηριστικές ιδιότητες.

3) Όπως θα εξετάσουμε παρακάτω, ορισμένες θερμικές κατεργασίες έχουν ως αποτέλεσμα τη γραφίτιποίηση του λευκού χυτοσιδήρου, με επακόλουθο να παίρνουμε τους **μαλακούς** χυτοσιδήρους.

Ο πίνακας 2.4.2 παρουσιάζει τις βασικές μηχανικές ιδιότητες των χυτοσιδήρων.

2.4.1 Λευκοί και φαιοί χυτοσιδήροι.

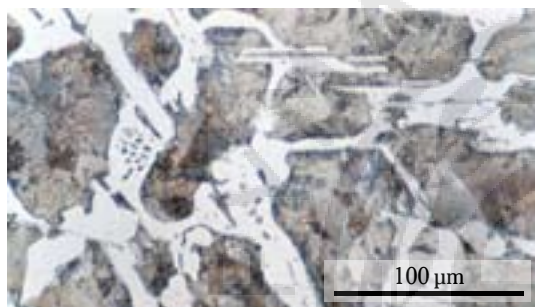
Οι **λευκοί χυτοσιδήροι** σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτελούνται από κόκκους περλίτη σε φόντο σεμεντίτη (σχ. 2.4α). Σχηματίζονται όταν ο περισσότερος άνθρακας του τηγμένου χυτοσιδήρου σχηματίζει κατά τη στερεοποίηση σεμεντίτη αντί για γραφίτη. Λόγω του σεμεντίτη έχουν εξαιρετική αντοχή στη φθορά σε τριβή, υψηλή σκληρότητα (400–550 HB) (πίν. 2.4.2), είναι όμως ψαθυροί και έχουν κακή κατεργασιμότητα. Εξαιτίας της λαμπερής, λευκής τους επιφάνειας θραύσεως ονομάζονται **λευκοί χυτοσιδήροι**. Με την προσθήκη χρωμίου, νικελίου και μολυβδαινίου βελτιώνεται ακόμα περισσότερο η αντοχή τους σε περίπτωση εκτριβής υπό την προϋπόθεση της θερμικής τους επεξεργασίας για τον σχηματισμό μαρτενσίτη.

Οι **φαιοί χυτοσιδήροι** προκύπτουν μετά τη στερεοποίηση, όταν μετά από θέρμανση και βραδεία απόψυξη ο σεμεντίτης διασπάται και ο άνθρακας κατακρημνίζεται με μορφή φύλλων γραφίτη (σχ. 2.4β). Ο φυλλοειδής αυτός γραφίτης βρίσκεται μέσα σε φερριτική, περλιτική ή φερριτοπερλιτική μήτρα ανά-

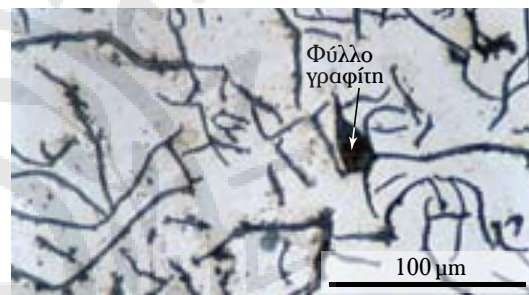
Πίνακας 2.4.2
Κύριες μηχανικές ιδιότητες χυτοσιδήρων.

Τύπος χυτοσιδήρου	Κατάσταση	Μητρική δομή	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	Μηχανικές σ_{TS} (MPa)	Ιδιότητες TEL (%)	HB
Λευκός	Ακατέργαστος	P	-	250-500	0	400-600
Φαιός	Ακατέργαστος	F-P	-	150-220	0	155-210
	Ακατέργαστος	P	-	290-430	0	235-300
Μαλακτός	Ανόπηση	F	~240	~365	18	150
	Ανόπηση	F-M	~310	~450	8	180
	Βαφή και επαναφορά	M	~480	~620	2	250
Ελατός	Ανόπηση	F	~280	~385	18	170
	Ακατέργαστος	P – F	~420	~560	6	200
	Βαφή και επαναφορά	M	~630	~840	2	270

F: φερρίτς (ferrite), P: περλίτς (pearlite), M: μαρτενσίτς (martensite).



Σχ. 2.4α
Λευκός χυτοσίδηρος.



Σχ. 2.4β
Φαιός (γκρίζος) χυτοσίδηρος.
Διακρίνονται τα φύλλα (λέπια) γραφίτη.

λογα με τη χημική σύσταση του χυτοσιδήρου. Αυτή η διάσπαση του σεμεντίτη επιτυγχάνεται από το πυρίτιο, που συνήθως κυμαίνεται από 1% μέχρι 3%, και τη μεγάλη διάρκεια παραμονή του σε υψηλές θερμοκρασίες. Τις μεταβολές στην κρυσταλλική δομή των φαιών χυτοσιδήρων τις παρακολουθούμε με τη βοήθεια του θερμικού διαγράμματος ισορροπίας σιδήρου–γραφίτη, το οποίο είναι παρόμοιο με το διάγραμμα σιδήρου–σεμεντίτη στο σχήμα 2.3α. Μέτριες ταχύτητες αποψύξεως ευνοούν τον σχηματισμό περλιτικής μήτρας, ενώ αργές ταχύτητες ευνοούν τον σχηματισμό φερριτικής μήτρας. Οι χυτοσίδηροι αυτοί ονομάζονται **φαιοί** ή **γκρίζοι**, διότι η επιφάνεια θραύσεώς τους έχει γκριζό χρώμα εξαιτίας της παρουσίας του γραφίτη.

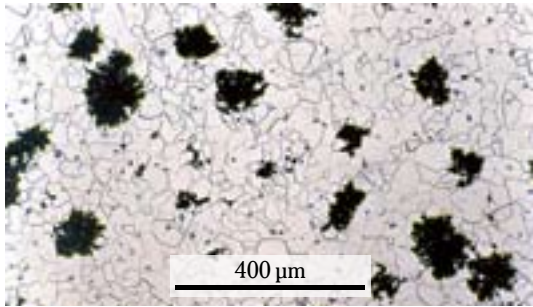
Στην περίπτωση χυτεύσεως ενός ογκώδους αντικειμένου από χυτοσίδηρο και ταχείας αποψύξεως, η εξωτερική του επιφάνεια θα αποκτήσει δομή λευκού χυτοσιδήρου, ενώ ο πυρήνας θα έχει τη δομή φαιού χυτοσιδήρου.

2.4.2 Μαλακοί χυτοσίδηροι.

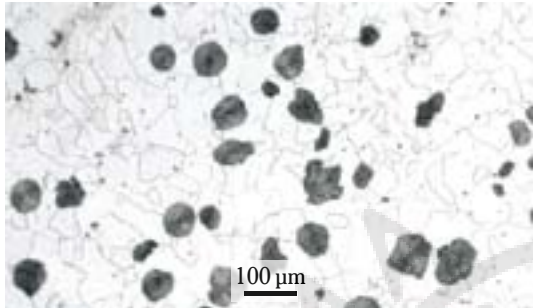
Οι **μαλακοί χυτοσίδηροι** έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τους φαιούς χυτοσίδηρους. Η βελτίωση αυτή των ιδιοτήτων τους οφείλεται στη συσσωμάτωση του ελεύθερου γραφίτη σε σφαιρίδια με ανώμαλη επιφάνεια, τα οποία φαίνονται σαν **ροζέτες** στις μικροφωτογραφίες (σχ. 2.4γ). Έτσι, με αυτή τη μορφή που παίρνει ο γραφίτης, δεν διασπάται η συνέχεια του δύσθραυστου φερρίτη ή του περλίτη του χυτοσιδήρου, όπως συμβαίνει στους φαιούς χυτοσίδηρους, όπου ο γραφίτης έχει μορφή λεπιών.

Αυτοί οι χυτοσίδηροι παράγονται μετά από ανόπηση λευκού χυτοσιδήρου με ορισμένη χημική σύνθεση και κάτω από κατάλληλες συνθήκες. Η θερμική αυτή κατεργασία σκοπό έχει τον σχηματισμό γραφίτη από τη διάσπαση του υπάρχοντος σεμεντίτη ($\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \alpha + \text{C}_{\text{γραφίτη}}$). Ο σχηματισμός του γραφίτη πραγματοποιείται σε δύο στάδια:

1) **Γραφίτιση**. Λευκός χυτοσίδηρος θερμαίνε-



(α)



(β)

Σχ. 2.4γ

(α) Φερριτικός μαλακτός χυτοσίδηρος μαύρης επιφάνειας θραύσεως. Ακανόνισια σφαιρίδια (ροζέτες) γραφίτη σε φόντο φερρίτη. Προσβολή με 5% Nital. (β) Φερριτικός μαλακτός χυτοσίδηρος σφαιροειδούς γραφίτη. Κανονικά σφαιρίδια γραφίτη σε φόντο φερρίτη. Προσβολή με 2% Nital.

ται σε θερμοκρασία υψηλότερη της ευπικτοειδούς (850–940°C, σχ. 2.3α) για 3–20 h, ανάλογα με τη χημική σύσταση, τη μικροδομή και το μέγεθος του αντικειμένου. Στο στάδιο αυτό ο σεμεντίτης του λευκού χυτοσιδήρου μετασχηματίζεται σε γραφίτη και ωστενίτη.

2) **Απόψυξη.** Επιλέγοντας κατάλληλα την ταχύτητα αποψύξεως, ο ωστενίτης του προηγούμενου σταδίου μετατρέπεται σε φερρίτη, περλίτη ή μαρτενσίτη.

Για τον σχηματισμό **φερριτικού μαλακού χυτοσιδήρου** επιλέγεται αρχικώς ταχεία απόψυξη σε θερμοκρασία 740–760°C και στη συνέχεια βραδεία με ρυθμό 3–11°C/h. Οι φερριτικοί καλούνται, επίσης, και μαλακοί **χυτοσίδηροι μέλανος (μαύρης) καρδιάς**, αφού μετά από θραύση ο πυρήνας του αντικειμένου φαίνεται μαύρος, λόγω του γραφίτη, ενώ η εξωτερική επιφάνεια λευκή εξαιτίας της απανθράκωσης κατά την μεγάλη παραμονή σε υψηλή θερμοκρασία. Μετά από παρατεταμένη παραμονή σε υψηλή θερμοκρασία, η απανθράκωση μπορεί να φτάσει ως το κέντρο. Στην περίπτωση αυτή ο χυτοσίδηρος καλείται **μαλακτός λευκής καρδιάς**.

Για τον σχηματισμό **περλιτικού μαλακού χυτοσιδήρου**, ο χυτοσίδηρος αποψύχεται βραδέως ως τους 870°C και αφήνεται να αποψυχθεί πλήρως στον αέρα.

Για τον σχηματισμό **μαρτενσιτικού μαλακού χυτοσιδήρου**, ο χυτοσίδηρος αποψύχεται σε φούρνο ως τους 845–870°C, αφήνεται για 15–30', για να επέλθει ομογενοποίηση, και στη συνέχεια βάφεται (δηλ. ψύχεται απότομα με μεγάλο ρυθμό αποψύξεως) σε λάδι. Ακολουθεί επαναφορά στους 1100–1340°C.

2.4.3 Χυτοσίδηροι σφαιροειδούς γραφίτη ή ελατοί χυτοσίδηροι.

Πρόκειται για φαιούς χυτοσιδήρους, στους οποίους όμως ο γραφίτης συσσωματώνεται σε σφαιρικούς κόκκους κανονικού σχήματος. Προέρχονται από τους φαιούς, εάν πριν από τη χύτευση προστεθεί στο τήγμα 0,1% κ.β. μαγνήσιο (Mg) υπό τη μορφή κράματος Mg-Ni ή Mg-Fe-Si. Η μορφολογία του γραφίτη των ελατών χυτοσιδήρων είναι εντελώς διαφορετική απ' αυτήν των φαιών χυτοσιδήρων. Πρόκειται για συμπαγή γραφίτη σφαιροειδούς μορφής, ο οποίος βελτιώνει την ολκιμότητα και αυξάνει τη δυσθραυστότητα του χυτοσιδήρου. Η μήτρα του χυτοσιδήρου μπορεί να είναι φερριτική, περλιτική ή φερριτοπερλιτική. Οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι συγκρίσιμες με αυτές των χαλύβων (δηλ. υψηλή μηχανική αντοχή, καλή δυσθραυστότητα και εμβαπτότητα, εξαιρετική κατεργασιμότητα), ενώ η αντοχή τους στην τριβή είναι υψηλότερη. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κυλίνδρων κινητήρων εσωτερικής καύσεως αυτοκινήτων, αγωγών, αντλιών, διακοπών, γρاناζιών και μηχανικών εξαρτημάτων, τα οποία αφορούν σε κρούσεις ή εναλλασσόμενες καταπονήσεις.

Δυσθραυστότητα: είναι η ενέργεια του όγκου του υλικού, που απαιτείται για τη θραύση του.

Εμβαπτότητα: Είναι η ικανότητα σκλήρυνσης του υλικού μετά από τη βαφή. Η εμβαπτότητα εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η χημική σύσταση και το μέγεθος των κόκκων του χάλυβα, το μέγεθος του τεμαχίου και το μέσο αποψύξεως.

Η εμβαπτότητα προσδιορίζεται με την πρότυπη δοκιμή Jominy και εκφράζεται με τη βοήθεια των παρακάτω παραμέτρων:

α) Κρίσιμο βάθος βαφής: είναι η απόσταση μετρούμενη, από το ψυχόμενο άκρο του υλικού, στην οποία έχει μετατραπεί ο ωστενίτης κατά 50% σε μαρτενσίτη. Το κρίσιμο βάθος βαφής εξαρτάται

από το υλικό και από το μέσο αποψύξεως.

β) Κρίσιμη ταχύτητα βαφής: είναι η ελάχιστη ταχύτητα που πρέπει να αποψυχθεί ο χάλυβας έτσι ώστε να σχηματισθεί στην επιφάνειά του 100% μαρτενσίτης. Η κρίσιμη ταχύτητα βαφής εξαρτάται μονάχα από το υλικό.

Επομένως, η εμβαπτότητα ενός χάλυβα αυξάνεται με την αύξηση του κρίσιμου βάθους βαφής ή/και με τη μείωση της κρίσιμης ταχύτητας βαφής.

2.4.4 Ειδικοί χυτοσίδηροι.

Οι ειδικοί χυτοσίδηροι είναι κοινοί χυτοσίδηροι, στους οποίους προσθέτουμε στοιχεία (προσθήκες) με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών και άλλων ιδιοτήτων τους.

Η επίδραση των προσθηκών στην κρυσταλλική δομή και τις ιδιότητες των χυτοσιδήρων είναι συνήθως ίδια με εκείνη των χαλύβων, που έχουν οι προσθήκες στους χάλυβες. Έτσι, τοποθετούνται προσθήκες προς βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, εκλέπτυνση κόκκων, αύξηση της σκληρότητας ή δημιουργία μαρτενσίτη ή και για την σταθεροποίηση του ωστενίτη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Πρέπει να τονίσουμε ότι ο γραφίτης θα πρέπει να κατανέμεται ομοιογενώς στη μάζα του χυτοσιδήρου και να βρίσκεται με μορφή, όσο γίνεται, λεπτοτέρων τεμαχιδίων.

Συνηθισμένες προσθήκες που επιλέγονται είναι:

1) Το **νικέλιο (Ni)**, που όπως είναι γνωστό, υποβοηθεί τον σχηματισμό γραφίτη (C), λιγότερο όμως από το πυρίτιο (Si). Ελαττώνει, επίσης, το μέγεθος των κόκκων. Ιδιαίτερα αν το Ni προστεθεί σε τεμάχια, των οποίων η διατομή μεταβάλλεται, εμποδίζει τον σχηματισμό χοντρών κόκκων στις διατομές μεγάλου πάχους, όπως επίσης και τον σχηματισμό λευκού χυτοσιδήρου στις λεπτές διατομές, εξαιτίας της τάσεως που έχει να γραφίτοποιεί τον σεμεντίτη.

2) Το **χρώμιο (Cr)**, που σχηματίζει σκληρότερα και σταθερότερα καρβίδια από τον σεμεντίτη. Λόγω αυτών των καρβιδίων αυξάνεται η σκληρότητα του χυτοσιδήρου και, επομένως, και η αντοχή του στη φθορά λόγω τριβής. Όπως και στα χαλυβοκράματα με χαμηλή περιεκτικότητα σε προσθήκες, έτσι και στους χυτοσιδήρους ο συνδυασμός Ni και Cr δίνει πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

3) Το **μολυβδαίνιο (Mo)**, που σχηματίζει και αυτό, όπως και το Cr, σκληρά καρβίδια και επομένως συντελεί στην αύξηση της σκληρότητας, ιδιαίτερα στα χοντρά τεμάχια. Κάνει ακόμη περισσότερο ομοιογενή την κρυσταλλική δομή των χυτοσιδήρων. Προσθήκη

0,50% περίπου μολυβδαινίου βελτιώνει σχετικά τη δυσθραυστότητα.

4) Το **βανάδιο (V)**, που καθιστά τον χυτοσίδηρο περισσότερο ανθεκτικό στη θερμοκρασία (πυρίμαχο), γιατί τα καρβίδια που σχηματίζονται δεν διασπώνται και σε αρκετά υψηλές ακόμη θερμοκρασίες.

5) Ο **χαλκός (Cu)**, που βελτιώνει την αντοχή του χυτοσιδήρου στη διάβρωση.

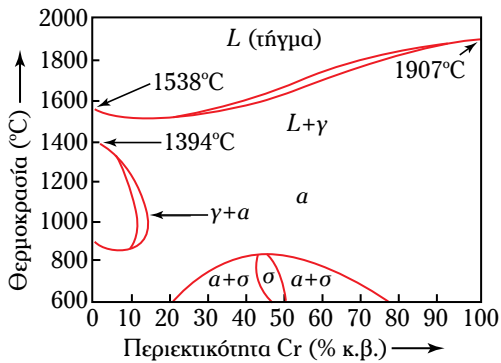
Στοιχεία σχετικά με τη χημική σύνθεση, τις μηχανικές ιδιότητες και τις εφαρμογές συνηθισμένων ειδικών χυτοσιδήρων δίνονται στον πίνακα Π.Α.1 του Παραρτήματος Α.

2.5 Ανοξειδωτοι χάλυβες.

Ο ανοξειδωτος χάλυβας περιέχει **απαραιτήτως σίδηρο** ως κυριότερο συστατικό και **χρώμιο (Cr)** ως **βασικό κραματικό στοιχείο** (σε ποσοστά άνω του 12% κ.β.) κατά της διαβρώσεως. Το Cr σχηματίζει επιφανειακά ένα διαφανές στρώμα οξειδίου, το οποίο προστατεύει (παθητικοποιεί) την επιφάνεια του χάλυβα. Σε ορισμένες κατηγορίες χαλύβων συμμετέχει και το **νικέλιο (Ni)**, επίσης ως **βασικό στοιχείο εξευγενισμού** του κράματος κατά της διαβρώσεως. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες μπορούν να περιέχουν, σε σχετικά **χαμηλές περιεκτικότητες** άλλα στοιχεία, όπως **μολυβδαίνιο (Mo)**, **βανάδιο (V)**, **αλουμίνιο (Al)**, **νιόβιο (Nb)** (ή κολόμβιο) και **τιτάνιο (Ti)**, που βελτιώνουν ορισμένες ιδιότητες σε συγκεκριμένες κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων. **Μαγγάνιο (Mn)** και **πυρίτιο (Si)** προστίθενται σε μικρές αναλογίες, ενώ ο άνθρακας (C) και το **άζωτο (N)**, στοιχεία παρεμβολής, παίζουν ανάλογο ρόλο, όπως στους κοινούς χάλυβες. Το Cr είναι α-φερρογόνο στοιχείο, συντελεί στη διεύρυνση του φερριτικού βρόγχου στο διάγραμμα φάσεων Fe-C-Cr και περιορίζει την περιοχή του ωστενίτη. Στο σχήμα 2.5α παρουσιάζεται το διάγραμμα θερμοδυναμικής ισορροπίας Fe-Cr, ενώ στο σχήμα 2.5β αυτό του Fe-Ni.

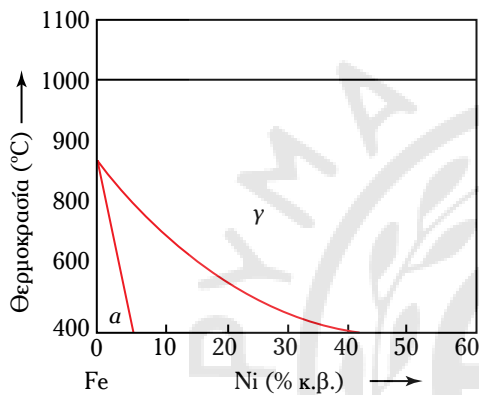
Από το διάγραμμα Fe-Cr καθίσταται σαφές ότι για περιεκτικότητες σε Cr άνω του 12% κ.β. τα κράματα Fe-Cr είναι φερριτικά σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Υφίσταται βέβαια μία μικρή διφασική περιοχή φερρίτη-ωστενίτη (α + γ) μεταξύ 12–13% κ.β. Cr. Η προσθήκη άνθρακα στο διμερές σύστημα Fe-Cr διευρύνει τη διφασική περιοχή α + γ και μεγεθύνει τον ωστενιτικό βρόχο.

Επομένως, γίνεται σαφές ότι με την επιλογή της περιεκτικότητας σε άνθρακα μπορούμε να λάβουμε διαφορετικές μικροδομές ανοξειδωτων χαλύβων. Έτσι, έχουμε **φερριτικούς** (Παράρτ. Α, πίν. Π.Α.2),



Σχ. 2.5α

Διμερές διάγραμμα θερμοδυναμικής ισορροπίας σιδήρου-χρωμίου (Fe-Cr)³.

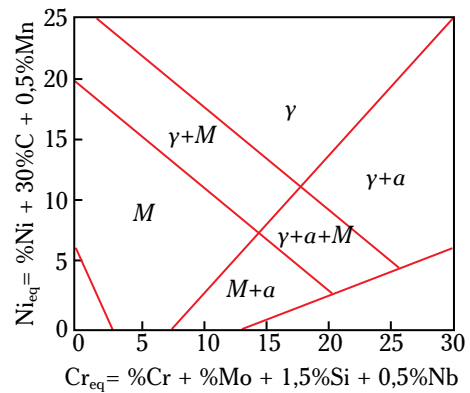


Σχ. 2.5β

Διάγραμμα θερμοδυναμικής ισορροπίας σιδήρου-νικελίου (Fe-Ni).

ωστενιτικούς (Παράρτ. Α, πίν. Π.Α.3), τους **duplex** (ωστενιτο-φερριτικούς) και τους **μαρτενιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες** (Παράρτ. Α, πίν. Π.Α.4). Με βάση τη χημική σύσταση, τα α- και γ-φερογόνα στοιχεία, ο **Schaeffler**⁴ κατάφερε να φτιάξει ένα πρακτικό διάγραμμα για την πρόβλεψη των δομών των ανοξειδωτων χάλυβων (σχ. 2.5γ).

Για να σταθεροποιήσουμε τον ωστενίτη με στόχο την παραγωγή ωστενιτικών ανοξειδωτων χάλυβων, προσθέτουμε Ni, γ-φερογόνο στοιχείο. Οι χάλυβες αυτοί παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στη διάβρωση σε θερμοκρασίες μέχρι και 900°C, καλές μηχανικές



Σχ. 2.5γ

Διάγραμμα Schaeffler, όπου οι αποκτούμενες δομές των ανοξειδωτων χάλυβων παρουσιάζονται συναρτήσει των περιεκτικοτήτων των α- και γ-φερογόνων στοιχείων.

ιδιότητες και καλή μηχανουργική κατεργασιμότητα. Δεν είναι μαγνητικοί, σε αντίθεση με τους φερριτικούς και τους μαρτενιτικούς, οι οποίοι παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες.

Ο πίνακας Π.Α.5 του Παραρτήματος Α, δίνει τη χημική σύσταση και τις μηχανικές ιδιότητες των φερριτικών και των ωστενιτικών ανοξειδωτων χάλυβων. Οι συνήθεις ωστενιτικοί χάλυβες 304 και 316 περιέχουν 10–12% κ.β. Ni και 17–19% κ.β. Cr. Οι φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες περιέχουν 12–19% Cr και μικρότερη ποσότητα Ni, 0,3–0,5% κ.β. Ni. Η σειρά 201–216 δεν έχει ευρεία χρήση και δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον. Η σειρά 300 μπορεί να θεωρηθεί εξέλιξη της σειράς 200. Από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων οι φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες υστερούν ως προς τη **συνολική επιμήκυνση** (Total ELongation–TEL) και το όριο θραύσεως (Tensile Strength–TS), ενώ το όριο διαρροής τους (Yield Strength–YS) είναι στα ίδια επίπεδα με αυτά των ωστενιτικών. Το όριο θραύσεως των φερριτικών ανοξειδωτων χάλυβων βρίσκεται 10–30% χαμηλότερα από εκείνο των ωστενιτικών και η συνολική τους επιμήκυνση υστερεί κατά 30–50%. Ως προς την επιδεκτικότητα συγκολλήσεως [«συγκολλησιμότητα» (weldability)], η σειρά 300 πλεονεκτεί έναντι της σειράς 400, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν μπορεί να γίνει επιτυχής συγκόλληση της σειράς 400. Οι ωστε-

³ Το διάγραμμα υπολογίστηκε με τη χρήση του θερμοδυναμικού πακέτου Thermo-Calc με χρήση της βάσεως δεδομένων PBIN. Το σημείο τήξεως του σιδήρου και του χρωμίου σε πίεση 101.325 Pa είναι 1538°C και 1907°C αντίστοιχα. Η φάση (σ) (μεσομεταλλική ένωση FeCr) μπορεί να σχηματιστεί στα κράματα Fe-Cr, όπως στους ανοξειδωτους χάλυβες AISI 316 και AISI 310 και έχει καταστροφική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες (π.χ. την ολκιμότητα–ductility) και την αντοχή στη διάβρωση.

⁴ Ο Schaeffler το 1947 μελετώντας τις προκύπτουσες μικροδομές σε συγκολλήσεις ανοξειδωτων χάλυβων και ανόμοιων χάλυβων κατασκεύασε πρώτος ένα εμπειρικό διάγραμμα πρόβλεψης της προκύπτουσας μικροδομής με γνώμονα την περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία όπως νικέλιο και χρώμιο. Ιδιαίτερη έμφαση είχε δοθεί στην πρόβλεψη της ψαθυρής μαρτενιτικής μικροδομής. Δημοσίευσε το πρωτόλειο της δουλειάς του το 1947, ενώ δυο χρόνια αργότερα το οριστικό διάγραμμα, το οποίο έλαβε τιμητικά και το όνομά του.

νιτικοί χάλυβες λόγω του γεγονότος ότι επιτυγχάνουν υψηλότερη επιμήκυνση παρουσιάζουν και καλύτερη επιδεκτικότητα διαμόρφωσης [«διαμορφωσιμότητα» (formability)]. Ως προς τα κριτήρια «διαμορφωσιμότητας» τους, κατατάσσονται επιλεγμένοι χάλυβες της σειράς 300 αλλά και 400 στις κατηγορίες Α: άριστα (excellent) Β: καλώς (good). Ως προς την ευκαμψία τους (bending), που μας ενδιαφέρει για τη διαμόρφωση σωλήνων, αλλά και την εν ψυχρώ διαμόρφωση με πρέσα (press forming), οι χάλυβες 304, 304L, 316, 316L, 405, 409 και 430 συμπεριφέρονται άριστα.

Ως προς την αντοχή τους στη διάβρωση και τη συμπεριφορά τους παράλληλα υπό συνθήκες διαβρώσεως και φορτίσεως (stress corrosion cracking), οι χάλυβες της σειράς 300 είναι οι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενοι τόσο σε ήπιες όσο και σε έντονες συνθήκες διαβρώσεως (304 και 316 αντίστοιχα). Επί πλέον, ο χάλυβας 316 βρίσκει εφαρμογή και σε ιατρικές χρήσεις. Η σειρά 300 παρουσιάζει προβλήματα, όταν καταπονείται ενώ βρίσκεται σε περιβάλλον χλωριόντων και σε θερμοκρασίες άνω των 50°C. Οι χάλυβες της σειράς 400 βρίσκουν γενική χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία, όπου επικρατούν ήπια διαβρωτικά περιβάλλοντα. Επίσης, κάποια ειδικά κράματα της σειράς αυτής χρησιμοποιούνται σε καταλύτες και εξατμίσεις, όπου επικρατούν έντονα διαβρωτικές συνθήκες σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπρόσθετα, βρίσκουν εφαρμογή και σε μεταφορά ελαίων και αερίων. Η σειρά 400 παρουσιάζει υψηλή ανθεκτικότητα σε περιβάλλον χλωριόντων. Ωστόσο, σε περίπτωση θαλάσσιου περιβάλλοντος υπάρχει κίνδυνος ψαθυροποίησης από υδρογόνο (H).

2.6 Είδη χαλύβων. Η επίδραση των προσθηκών.

Οι χάλυβες, τα κράματα δηλαδή Fe-C, με περιεκτικότητα ως 2% κ.β. περιέχουν σε μικρές ποσότητες και ορισμένα στοιχεία κραματώσεως, τα οποία τροποποιούν τις χημικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Ως προς τη χημική τους σύσταση, οι **χάλυβες** διακρίνονται σε **κοινούς** (ή **ανθρακούχους**) και σε **κραματωμένους** (ή **ειδικούς**). Οι τελευταίοι, ανάλογα με το ποσοστό τους σε κραματικά στοιχεία διακρίνονται σε ελαφρά, μέτρια και ισχυρά κραματωμένους. Επί πλέον, αναφορικά με τον προορισμό τους οι χάλυβες διακρίνονται σε χάλυβες **διαμορφώσεως** και **χυτοχάλυβες**.

Οι χάλυβες είναι τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα βιομηχανικά υλικά. Διακρίνονται ανάλογα με τη χρήση τους σε **χάλυβες κατασκευών** (υποευτη-

κτοιδείς, νικελιούχοι, νικελιοχρωμιούχοι, χάλυβες Ni-Cr-Mo, Cr-V, MnSi, μαρτενγενήσεως ή paraging, διφασικοί, πολυφασικοί κ.λπ.), σε **εργαλειοχάλυβες** (χάλυβες με ιδιαίτερη αντοχή στη φθορά λόγω τριβής, με καλή δυσθραυστότητα, εμβαπτότητα και αντοχή σε επαναφορά), σε **ανοξειδωτους** και χάλυβες **πλεκτρικών** και **πλεκτρομαγνητικών εφαρμογών** (μαλακοί μαγνήτες, μόνιμοι μαγνήτες, μη μαγνητικοί – ωστενιτικοί χάλυβες).

2.6.1 Η τυποποίηση των χαλύβων.

Η ανάγκη για αναγνωρίσιμες τεχνολογικές ιδιότητες των υλικών οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων τυποποίησης. Αυτά αρχικά βασίστηκαν σε εθνικά πρότυπα (αγγλικό – BS, γερμανικό – DIN, αμερικανικό – API), στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός γραμμάτων και αριθμών, ενώ αργότερα χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα ταυτοποίησης μέσω αριθμών, π.χ. χάλυβας 1.0037, χυτοσίδηρος 0.6030, χάλυβας 1.4303. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση σήμερα χρησιμοποιούνται οι Ευρωκώδικες (EUROCODES). Το 1961 δημιουργήθηκε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (Comité Européen de Normalisation – CEN, European Committee for Standardisation, Europäisches Komitee für Normung). Η Ελλάδα εκπροσωπείται από τον Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης – ΕΛΟΤ. Για τον χάλυβα υπάρχει ειδική Επιτροπή για την Τυποποίηση του Σιδήρου και Χάλυβα (European Committee for Iron and Steel Standardization – ECIS).

Τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα διακρίνονται από τα δύο γράμματα EN ακολουθούμενα από έναν αριθμό, π.χ. το πρότυπο EN 10020 αφορά στους ορισμούς και την ταξινόμηση των χαλύβων. Κάθε οργανισμός μέλος της CEN θέτει μπροστά από το EN το δικό της σύμβολο, π.χ. ΕΛΟΤ EN 10020, DIN EN 10020 για τη Γερμανία κ.λπ.. Τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα επανεξετάζονται, αναθεωρούνται, βελτιώνονται με βάση την εμπειρία από την εφαρμογή σε τακτά χρονικά διαστήματα, π.χ. κάθε 5 έτη.

Οι πίνακες Π.Α.6 και Π.Α.7 του Παραρτήματος Α παραθέτουν πληροφοριακά τα ευρωπαϊκά σύμβολα, τους αριθμούς υλικού (material number στα αγγλικά, Werkstoffnummer στα γερμανικά και numero de materie στα γαλλικά) και παλαιότερες εθνικές τυποποιήσεις ενδεικτικά.

Τα βασικά στοιχεία για την κατηγοριοποίηση των βασικών οικογενειών των χαλύβων (κατασκευών, εργαλείων, ειδικοί, ανοξειδωτοι) παρουσιάζονται επιγραμματικά στο Παράρτημα Β.

2.6.2 Οι ακαθαρσίες των χαλύβων.

Οι ακαθαρσίες των χαλύβων απορρέουν κυρίως από την μεταλλουργική κατεργασία, τα στάδια και το είδος της εφαρμοζόμενης τεχνικής εξαγωγικής μεταλλουργίας. Συνήθως αναφερόμαστε στον **φωσφόρο** (P), στο **πυρίτιο** (Si), στο **θείο** (S), στο **αρσενικό** (As), στο **αντιμόνιο** (Pb), στον **χαλκό** (Cu), στον **κασσίτερο** (Sn) και στον **ψευδάργυρο** (Zn). Αυτές οι ακαθαρσίες τις περισσότερες φορές μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα **θερμής ρηγματώσεως** (hot shortness) κατά τη στερεοποίηση, τη μορφοποίηση ή και τη συγκόλληση. Σχηματίζουν κατακρημνίσματα ή συσσωρεύονται σε όρια κόκκων ευθραυστοποιώντας τα, αφού πολλές φορές σχηματίζουν ευπικτικά ή τήκονται σε θερμοκρασίες, κατά τις οποίες ο χάλυβας είναι στερεός και μορφοποιείται διαρρηγνύοντας την συνοχή των ορίων των κόκκων του πολυκρυσταλλικού υλικού. Το θείο (S) μειώνει την ποιότητα της επιφάνειας του χυτού και σχηματίζει κατακρημνίσματα θειούχου σιδήρου (FeS), τα οποία είναι ψαθυρά και με χαμηλό σημείο τήξεως οδηγώντας σε ρηγμάτωση κατά τη θερμή κατεργασία. Αντίστοιχα ο φωσφόρος (P) σχηματίζει ενώσεις με τον σίδηρο, που μειώνουν τη δυσθραυστότητα του χυτού. Επί πλέον, η επιλεκτική συγκέντρωση φωσφόρου κατά τη θερμική κατεργασία ή κατά τη λειτουργία των χαλύβων υψηλής κραματώσεως οδηγεί σε ψαθυροποίηση επαναφοράς.

2.6.3 Τα κραματικά στοιχεία.

Με επιλεγμένες προσθήκες συγκεκριμένων στοιχείων, είναι εφικτό να αυξηθεί η αντοχή του χάλυβα σε φθορά, διάβρωση, καθώς και να αυξηθούν οι μηχανικές αντοχές χρησιμοποιώντας τις γνωστές μεθόδους, οι οποίες περιγράφονται στην παράγραφο 1.5. Συγκεκριμένα, στους χάλυβες μπορεί να επέλθει σκλήρυνση με τους ακόλουθους τρόπους:

- 1) Δημιουργία στερεού διαλύματος,
- 2) σχηματισμό καρβιδίων,
- 3) μεταβολή της κρίσιμης ταχύτητας βαφής και
- 4) σταθεροποίηση του ωστενίτη (γ-φερρογόνα στοιχεία) ή του φερρίτη (α-φερρογόνα).

Το ποσοστό του C στους κραματωμένους χάλυβες στην πράξη δεν υπερβαίνει το 1%. Οι κραματωμένοι χάλυβες διακρίνονται σε:

1) **Ελαφρά κραματωμένους** ή **μικροκραματωμένους**, όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μικρότερο από 2%.

2) **Μετρίως κραματωμένους**, με ποσοστό στοιχείων προσθήκης από 2% έως 10%.

3) **Ισχυρά κραματωμένους**, όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μεγαλύτερο του 10%.

Τα κυριότερα κραματικά στοιχεία είναι τα εξής:

1) Το **μαγγάνιο** (Mn) είναι βασικό συστατικό των χαλύβων. Αποτελεί μέσο αποξειδώσεως του τηγμένου μετάλλου και βοηθεί στην μετέπειτα μορφοποίηση, καθώς μειώνει την ευαισθησία του χάλυβα σε **θερμή ρηγμάτωση** (hot shortness) με την αποφυγή της δημιουργίας σουλφιδίου του σιδήρου (FeS), φάσεως με χαμηλό σημείο τήξεως (-800°C), και του σχηματισμού εγκλεισμάτων μαγγανιούχων σουλφιδίων, τύπου MnS ή (Fe, Mn)S. Το μαγγάνιο βελτιώνει την αντοχή και τη σκληρότητα, με αρνητικές επιπτώσεις όμως στην ολκιμότητα και τη συγκολλησιμότητα, μικρότερες βέβαια από την επίδραση του άνθρακα.

2) Το **πυρίτιο** (Si) είναι βασικό αποξειδωτικό μέσο στους χάλυβες και η περιεκτικότητα του χάλυβα σε αυτό το στοιχείο εξαρτάται κυρίως από τη μέθοδο αποξειδώσεως που επιλέχθηκε. Έχει μικρή τάση για σχηματισμό καρβιδίων. Είναι α-φερρογόνο στοιχείο και παρουσιάζει 18,5% κ.β. μέγιστη διαλυτότητα στον α-Fe, ενώ 6% κ.β. στον γ-Fe. Παρουσιάζει αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα της επιφάνειας του χάλυβα, ιδιαίτερα στους χάλυβες χαμηλού άνθρακα. Αυξάνει ελαφρά την αντοχή του φερρίτη χωρίς έντονη μείωση στην ολκιμότητα. Σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες αυξάνει την αντίσταση του χάλυβα σε οξείδωση (μέχρι τους 260°C) και μειώνει τη μαγνητική απώλεια υστερήσεως. Οι πλούσιοι σε Si χάλυβες παρουσιάζουν δυσκολίες στην κατεργασία τους, π.χ. στη χύτευση.

3) Ο **χαλκός** (Cu) έχει μέτρια τάση να κατακρημνίζεται και παρουσιάζει αρνητικές επιπτώσεις στην εν θερμώ κατεργασιμότητα του υλικού (θερμή ρηγμάτωση), όταν βρίσκεται σε μεγάλες περιεκτικότητες (περιεκτικότητα $> 0,3\%$ κ.β.). Επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα της επιφάνειας. Σε περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 0,20% συνεισφέρει στην προστασία από την ατμοσφαιρική διάβρωση (οι συγκεκριμένες ποιότητες χάλυβα ονομάζονται **weathering steels** και χρησιμοποιούνται συχνά σε γέφυρες).

4) Το **χρώμιο** (Cr) συντελεί στην αντιδιαβρωτική προστασία. Είναι α-φερρογόνο με πλήρη διαλυτότητα στον α-Fe και 12,8% κ.β. στον γ-Fe. Συνεισφέρει στην αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα μέσω του σχηματισμού καρβιδίων, αλλά και μέσω σχηματισμού στερεού διαλύματος με τον φερρίτη, τον οποίο και σταθεροποιεί. Επί πλέον, προσδίδει

αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και αντοχή στην τριβή. Φυσικά, η βασικότερή του ιδιότητα είναι η αύξηση της αντοχής στη διάβρωση.

5) Το **νικέλιο (Ni)** είναι σταθεροποιητής του ωστενίτη και δεν σχηματίζει καρβίδια. Η μέγιστη διαλυτότητά του στον α-Fe είναι 10% κ.β., ενώ στον γ-Fe φυσικά είναι χωρίς ανώτατο όριο. Προκαλεί σημαντική αύξηση της αντοχής σε επαναφορά, παρεμποδίζει την ανακρυστάλλωση, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή σε διάβρωση. Σε συνδυασμό με το Cr, το Ni αποδίδει χάλυβες με αυξημένη σκληρότητα, αντοχή σε κρούση και κόπωση.

6) Το **μολυβδαίνιο (Mo)** είναι α-φερρογόνο στοιχείο, αυξάνει την σκληρότητα των χαλύβων και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στον περιορισμό της σκληρότητας μεταξύ επιλεγμένων τιμών. Επί πλέον, σχηματίζει πολύ εύκολα καρβίδια, τα οποία κατακρημνίζονται, κυρίως στα όρια των κόκκων, παρεμποδίζοντας την αύξηση του μεγέθους των κόκκων των χαλύβων. Εξαιτίας αυτού, προκαλεί μεγάλη αύξηση στην εμβαισιότητα. Αυξάνει τη σκληρότητα και τη δυσθραυστότητα και παρεμποδίζει τη γήρανση. Η παρουσία του Mo βελτιώνει την αντοχή σε ερπυσμό και την αντίσταση σε τοπική διάβρωση και μειώνει την επιδεικτικότητα των χαλύβων υψηλής κραματώσεως στην ευθραυστοποίηση (ψαθυροποίηση) λόγω επαναφοράς. Επί πλέον, καθυστερεί τον μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαινίτη και συμβάλλει στην απόκτηση μαινιτικών μικροδομών κατά τη διάρκεια της αποψύξεως («continuous cooling»).

7) Το **βανάδιο (V)** είναι α-φερρογόνο, αποτελεί μικροκραματικό στοιχείο, είναι πολύ ισχυρά καρβιδιογόνο. Χρησιμοποιείται για σκλήρυνση, κυρίως με κατακρήμνιση καρβιδίων και αζιδίων (νιτριδίων – nitrides). Επιφέρει περιορισμό του μεγέθους των κόκκων κατά τη διάρκεια θερμικής κατεργασίας. Συνεισφέρει στην αντοχή και στη σκληρότητα των χαλύβων, που υπέστησαν σκλήρυνση και επαναφορά. Η θετική επιρροή του V στη σκληρότητα του χάλυβα σταματά για περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 0,05% κ.β. V. Επί πλέον, το V είναι συχνή προσθήκη στους εργαλειοχάλυβες, καθώς τα VC, VN και V(C,V) προσδίδουν αντίσταση σε φθορά και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

8) Το **νιόβιο (Nb)**, επίσης μικροκραματικό στοιχείο, σχηματίζει εύκολα καρβίδια, σταθεροποιεί τον φερρίτη, συμβάλλει στην εκλέπτυνση κόκκων και βελτιώνει τη δυσθραυστότητα των χαλύβων. Η δράση του είναι ανάλογη, αλλά αποτελεσματικότερη του

V. Συμβάλλει στην αύξηση της αντοχής των χαλύβων τόσο με εκλέπτυνση κόκκων όσο και με σκλήρυνση με κατακρήμνιση.

9) Το **αλουμίνιο (Al)** είναι α-φερρογόνο στοιχείο, χρησιμοποιείται ως αποξειδωτικό στους χάλυβες, καθώς και για τον έλεγχο του μεγέθους κόκκων μέσω του σχηματισμού οξειδίων και νιτριδίων του στα όρια των κόκκων (το αλουμίνιο δεν σχηματίζει καρβίδια).

10) Το **τιτάνιο (Ti)** είναι α-φερρογόνο στοιχείο, χρησιμοποιείται για την αποξείδωση των χαλύβων. Σχηματίζει πολύ εύκολα καρβίδια και καρβονιτρίδια. Αυξάνει έντονα την εμβαισιότητα. Αυξάνει την αντοχή και τη σκληρότητα μέσω του ελέγχου του μεγέθους των κόκκων, λιγότερο αποτελεσματικά βέβαια από το Nb. Είναι, όμως, εξίσου ή περισσότερο αποτελεσματικό με το V στην αύξηση αντοχής σε σκλήρυνση από κατακρήμνιση. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο κατά την αναθέρμανση, τις θερμικές κατεργασίες και συγκολλήσεις του χάλυβα, αφού σχηματίζει αζίδιο του τιτανίου (Titanium nitride, TiN) σε υψηλές θερμοκρασίες (~1450°C). Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με V και με Nb.

11) Το **βόριο (B)** προστίθεται σε ελάχιστες ποσότητες στους πλήρως αποξειδωμένους χάλυβες με στόχο τη βελτίωση της αποκρίσεως του χάλυβα στη σκλήρυνση με θερμική κατεργασία, αφού αυξάνει εξαιρετικά την εμβαισιότητα (δηλ. την ικανότητα του χάλυβα να σχηματίζει μαρτενσίτη). Η παρουσία του δρα απαγορευτικά στις συγκολλήσεις.

12) Το **βολφράμιο (W)** αυξάνει τη σκληρότητα, προκαλεί εκλέπτυνση κόκκων και συνεισφέρει στην αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε υψηλές θερμοκρασίες σχηματίζει καρβίδια, τα οποία είναι πολύ σκληρά και σταθερά και αποτρέπουν την απώλεια αντοχής («μαλάκωμα» – softening) του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες.

13) Το **κοβάλτιο (Co)** είναι γ-φερρογόνο στοιχείο και καρβιδιογόνο. Προκαλεί μείωση της εμβαισιότητας και μεταθέτει προς τα αριστερά τις καμπύλες Χρόνου - Θερμοκρασίας - Μετασχηματισμού (Time - Temperature - Transformation – TTT, καμπύλες ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού), ενώ βοηθά στη διατήρηση της σκληρότητας.

14) Ο **μόλυβδος (Pb)** σε ποσοστά 0,015–0,035% κ.β. προστίθεται με σκοπό τη βελτίωση της μηχανουργικής κατεργασιμότητας.

15) Παρόμοια δράση έχει και το **βισμούθιο (Bi)**, το οποίο τα τελευταία χρόνια αντικαθιστά τον μόλυβδο.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

Θερμικές κατεργασίες

3.1 Θερμικές κατεργασίες.

Από αρχαιότατων χρόνων ήταν γνωστή η σκλήρυνση εργαλείων, αλλά και των σπαθιών, με τη μέθοδο της θερμικής κατεργασίας της βαφής. Ο Όμηρος έγραφε χαρακτηριστικά πως «τσιρίζει το ατσάλι» όταν εμβαπτίζεται σε νερό, θέλοντας να υπογραμμίσει τη σπουδαιότητα της (εμπειρικής) τεχνογνωσίας που διέθεταν οι αρχαίοι Έλληνες. Οι θερμικές κατεργασίες εφαρμόζονταν σε σιδηρουργεία της Αθήνας (Χρυσούς Αιών του Περικλέους, 5^{ος} π.Χ. αι.) και, φυσικά, στο Λαύριο (θησαυροφυλάκιο μετάλλων της αρχαιότητας¹). Περαιτέρω, οι λεπίδες των περίπρανων δαμασκνών σπαθιών αποκτούσαν τρομερή σκληρότητα και ταυτόχρονα υψηλή δυσθραυστότητα εξαιτίας της βαθύτερης εμπειρικής γνώσεως των τεχνιτών εκείνης της εποχής αναφορικά με τον συνδυασμό των κατεργασιών βαφής και επαναφοράς. Η σπουδαιότητα των θερμικών κατεργασιών έγκειται ακριβώς στο γεγονός ότι πρόκειται για έναν εμπειρικό αρχικά (τέχνη), επιστημονικά άρτιο και εξακριβωμένο τρόπο επιτεύξεως συγκεκριμένων ιδιοτήτων στα τεχνικά υλικά σήμερα (τεχνολογία). Περνώντας λοιπόν από την τέχνη (αρχαιότητα) στην τεχνολογία μέσω της επιστήμης (σήμερα), μπορούμε να ισχυριστούμε με αξιώσεις ότι η ανθρωπότητα εξελίσσεται διαχρονικά περνώντας από το γενικό στο ειδικό, από το αφηρημένο στο συγκεκριμένο, χωρίς όμως να χάνει την στόχευσή της.

– **Ορισμός, σημασία και είδη θερμικών κατεργασιών.**

Θερμική κατεργασία ονομάζεται ο συνδυασμός θερμάνσεως και αποψύξεως, ώστε το μέταλλο/κράμα να αποκτήσει ορισμένη κρυσταλλική δομή και μέγεθος κόκκου και, επομένως, τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Γενικά το κράμα θερμαίνεται σε προκαθορισμένη θερμοκρασία, παραμένει στη θερμοκρασία αυτή για ορισμένο κάθε φορά χρονικό διάστημα και ακολουθεί η απόψυξή του με ορισμένη ταχύτητα.

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.

Με τις θερμικές κατεργασίες δεν επενεργούμε ούτε στη μορφή του τεμαχίου, ούτε στη χημική του σύνθεση, αλλά μόνο στο είδος της κρυσταλλικής του δομής. Τα περισσότερα μέταλλα και κράματα υφίστανται σε κάποιο από τα στάδια της επεξεργασίας τους θερμικές κατεργασίες. Χρησιμοποιούνται, κυρίως, για σκλήρυνση, αλλά και για την ελάττωση ή την ολική απάλειψη των εσωτερικών τάσεων μετά από ψυχρηλασία ή συγκόλληση. Τέλος, αξιοποιούνται για τη ρύθμιση του μεγέθους των κόκκων και των μηχανικών ή άλλων ιδιοτήτων των μετάλλων και των κραμάτων.

Κατά την εκτέλεση των θερμικών κατεργασιών,

¹ Το Λαύριο ήταν γνωστό από την κλασική αρχαιότητα για την εξόρυξη ασημιού, μία από τις κύριες πηγές εισοδήματος της πόλεως-κράτους της Αθήνας για την παραγωγή νομισμάτων και την χρηματοδότηση του Αθηναϊκού στόλου, αλλά και για την εξόρυξη χαλκού και άλλων μετάλλων όπως ο χαλκός και ο μόλυβδος. Η ονομασία Λαύρ(ε)ιο προέρχεται από την λέξη «λαύρα», «λαύρη», που σημαίνει τη στενωπό, το πέραςμα, τη στοά, τον υπόγειο στενό διάδρομο, τη μεταλλευτική στοά. Στο Λαύριο έχουν αναφερθεί πολλοί αρχαίοι συγγραφείς, μεταξύ των οποίων, κατ' αλφαβητική σειρά, οι: Αισχίνης, Αισχύλος, Αριστοτέλης, Αριστοφάνης, Δημοσθένης, Διόδωρος Σικελιώτης, Θουκυδίδης, Λυσίας, Ξενοφών, Πλίνιος, Πολύβιος, Στράβων, Υπερείδης κ.ά.. Η μεταλλευτική δραστηριότητα στην περιοχή του Λαυρίου και στον γειτονικό Θορικό ξεκίνησε πριν το 3.000 π.Χ.. Η εκμετάλλευση των μεταλλείων συνεχίστηκε αδιάπαυστα μέχρι και τον 6^ο αιώνα π.Χ., οπότε και αναφέρεται συστηματική και εντατική εκμετάλλευση των αργυρομολυβδούχων μεταλλευμάτων. Από τις αρχές του 6^{ου} αιώνα π.Χ. η Αθήνα, χρησιμοποιώντας άργυρο από τα μεταλλεία Λαυρίου, έκοψε ασημένια νομίσματα, τις περίφημες «λαυρεωτικές γλαύκες». Την εποχή του Πεισίστρατου δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην εκμετάλλευση των μεταλλείων και τα έσοδα διατέθηκαν για δημόσια έργα. Με τις μεταρρυθμίσεις του Κλεισθένη που πραγματοποιήθηκαν μετά την πτώση της τυραννίδας τα μεταλλεία κρατικοποιήθηκαν. Μετά την μάχη του Μαραθώνα, ο Θεμιστοκλής έπεισε τους Αθηναίους να διαθέσουν το εισόδημα που προερχόταν από τα ορυχεία για την κατασκευή πλοίων. Έτσι, θέσπισε την θεμελίωση του Αθηναϊκού πολεμικού ναυτικού και κατέστησε δυνατή την νίκη στην Ναυμαχία της Σαλαμίνας.

εξαιρετική σημασία έχουν οι επόμενοι παράγοντες, που συμβάλλουν στην τελική μορφή της κρυσταλλικής δομής του χάλυβα:

1) Η ανώτατη θερμοκρασία, στην οποία θερμαίνεται το τεμάχιο (θερμοκρασία κατεργασίας).

2) Ο χρόνος παραμονής του τεμαχίου στη θερμοκρασία κατεργασίας.

3) Η ταχύτητα αποψύξεως του τεμαχίου, η οποία καθορίζεται από το μέσο που χρησιμοποιούμε (λουτρό), για να το ψύξουμε. Το τεμάχιο για παράδειγμα αποψύχεται γρηγορότερα, αν εμβαπτιστεί σε νερό μετά από τη θέρμανσή του, παρά αν εμβαπτιστεί σε λάδι ή αφεθεί να αποψυχθεί στον αέρα.

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

1) Η **πλήρης ανόπτιση** ή απλά **ανόπτιση**.

2) Η **εξομάλυνση**.

3) Η **ανόπτιση** για **ανακρυστάλλωση**.

4) Η **αποτακτική ανόπτιση**.

5) Η **ανόπτιση** για **σφαιροποίηση** του **σεμεντίτη**.

6) Η **βαφή** και

7) η **επαναφορά**.

Τέλος, εξαιρετική τεχνολογική σπουδαιότητα έχουν και οι **θερμοτεχνικές κατεργασίες** χάλυβων με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα της **ενανθρακώσεως** και της **εναζωτώσεως**, οι οποίες προσδίδουν μεγάλη σκληρότητα στην επιφανειακή στιβάδα (ζώνη) των τεμαχίων, ενώ η αντοχή και η δυσθραυστότητα του πυρήνα παραμένουν σε ανεκτά όρια. Αναφέρουμε, επίσης, και τη **φλογοβαφή**, καθώς και τη βαφή με **ηλεκτρομαγνητική επαγωγή**, με τις οποίες πετυχαίνουμε επιφανειακή σκλήρυνση τεμαχίων από χάλυβα, ο οποίος όμως επιδέχεται βαφή.

3.2 Επίδραση της ταχύτητας αποψύξεως.

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ανάλογα με την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα και υπό συνθήκες αργής αποψύξεως, δηλαδή υπό συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας, σχηματίζονται μείγματα φερρίτη-περλίτη σε διαφορετικές αναλογίες. Η ταχύτητα αποψύξεως στην περίπτωση αυτή είναι τόσο μικρή, ώστε να δοθεί στο κράμα η ευκαιρία και ο απαιτούμενος χρόνος για να αποκτήσει την κρυσταλλική του δομή με τρόπο πλήρη και φυσιολογικό.

Τι γίνεται όμως σε περίπτωση ταχύτερης ή ραγδαίας αποψύξεως, όταν δεν υφίσταται ο απαραίτητος χρόνος για να επέλθει μετασχηματισμός υπό συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας; Στην περίπτωση αυτή, η τελική μικροδομή που θα προκύψει, θα είναι διαφορετική. Νέες κρυσταλλογραφικές φάσεις, συνήθως λεπτομερείς, θα εμφανιστούν. Η συννηθέστερη είναι αυτή του **μαρτενοίτη**².

Ο μαρτενοίτης αποτελείται από λεπούς βελονοειδείς κρυσταλλίτες, πολύ σκληρούς και εύθραυστους, που προσανατολίζονται κατά τις πλευρές ισόπλευρου τριγώνου κατά προσέγγιση. Σε χάλυβες με λιγότερο από 0,4% κ.β. C, ο μαρτενοίτης έχει τη μορφή λωρίδων, ενώ σε χάλυβες με περισσότερο από 0,6% κ.β. C, ο μαρτενοίτης έχει τη μορφή πιο λεπτών πλακιδίων. Σε χάλυβες με περιεχόμενο άνθρακα μεταξύ 0,4 και 0,6% κ.β., παρατηρούνται φακοειδείς λωρίδες και λεπτά πλακίδια. Ο μαρτενοίτης παρουσιάζει εσωτερική δομή, που χαρακτηρίζεται από διδυμίες και έντονη παρουσία διαταραχών (κρυσταλλικών ατελειών). Κατά την απόψυξη ο γ-σίδηρος μετασχηματίζεται σε α-σίδηρο, αλλά όμως, επειδή η απόψυξη έγινε απότομα, ο άνθρακας που βρίσκεται στο πλέγμα του γ-σιδήρου, δεν μπορεί να εγκαταλείψει το πλέγμα του α-σιδήρου, αν και δεν διαλύεται σε αυτό. Επομένως, κατ' ανάγκη ο άνθρακας παραμένει κλεισμένος στον α-σίδηρο (φερρίτη).

Ο μαρτενοίτης, επομένως, είναι φερρίτης υπερκορεσμένος σε άνθρακα στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, που βρίσκεται σε κατάσταση αστάθειας. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι ο άνθρακας, που είναι κλεισμένος στον φερρίτη, μπορεί να φθάσει και μέχρι 1,50% κ.β. C, ενώ με την ήρεμη απόψυξη του χάλυβα δεν υπερβαίνει τα 0,025% κ.β. C. Ο άνθρακας που περισσεύει, στρεβλώνει το κρυσταλλικό πλέγμα του φερρίτη και το μετατρέπει από χωροκεντρωμένο κυβικό σε χωροκεντρωμένο τετραγωνικό (η διάσταση β του πλέγματος γίνεται μεγαλύτερη). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη σοβαρών εσωτερικών τάσεων.

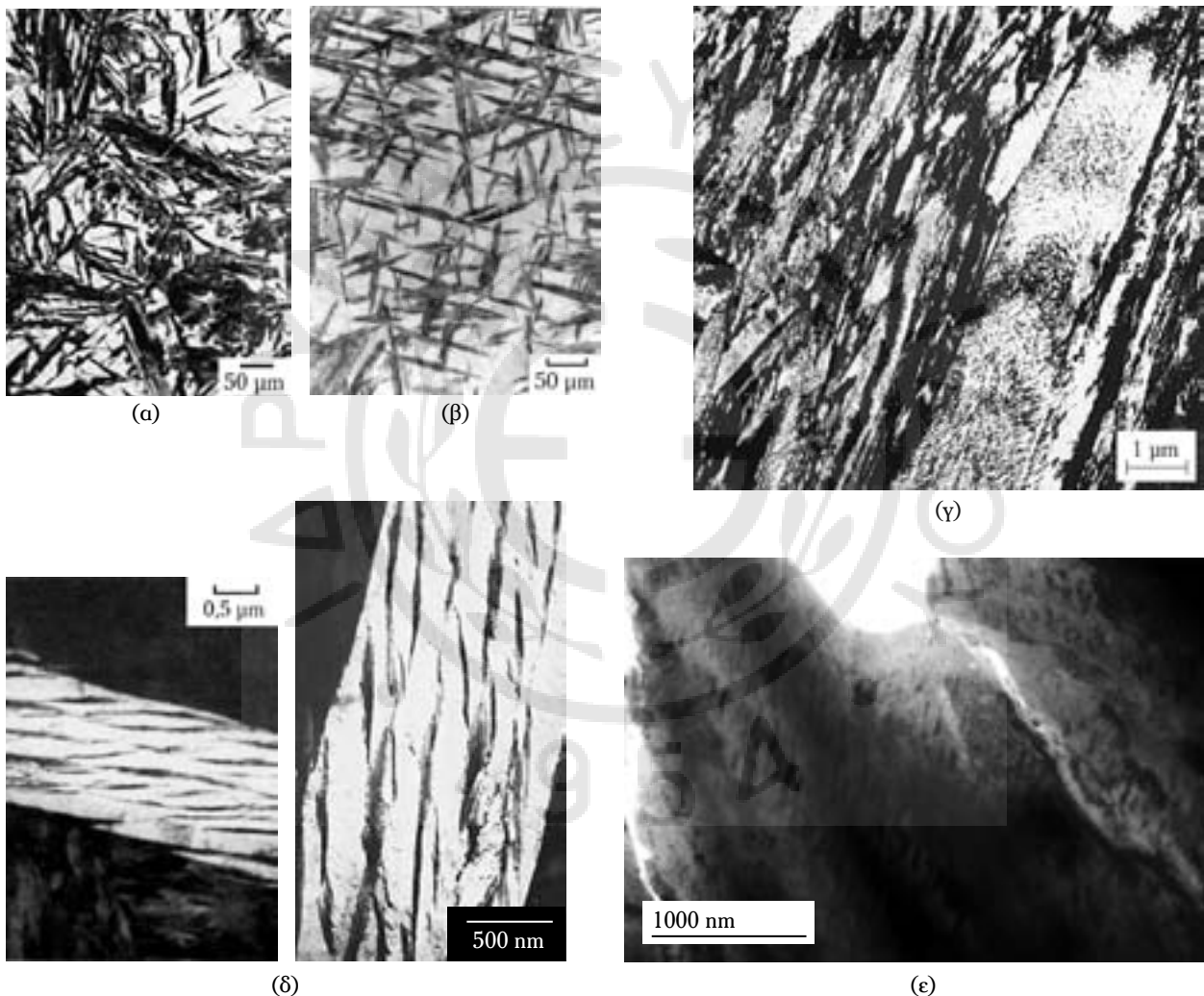
Κατά τον μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενοίτη αυξάνεται ο όγκος του τεμαχίου. Στον μετασχηματισμό του μαρτενοίτη οφείλεται το ότι ο χάλυβας αποκτά μεγάλη σκληρότητα, όπως επίσης και υψηλότερη και μέγιστη αντοχή αλλά και όριο ελαστικότητας, που συνοδεύονται όμως από χαμηλή δυσθραυστότητα και από έλλειψη πλαστικότητας. Αναφέρεται ενδεικτικά

² Ο μαρτενοίτης έλαβε το όνομά του από τον Γερμανό μεταλλουργό Adolf Martens (1850–1914), που πρώτος παρατήρησε την δομή του μαρτενοίτη στο μικροσκόπιο.

ότι ανθρακούχος χάλυβας με 0,80% κ.β. C, βαμμένος (μαρτενσίτης), έχει σκληρότητα 940 Vickers, ενώ ανοπτημένος (περλίτης) έχει μόνο 220 Vickers.

Σε μικρότερης εντάσεως απόψυξη ή μετά από αργή διέλευση ή εν μέσω ισοθερμοκρασιακής παραμονής (ισόθερμος βαφή) σε θερμοκρασίες μεταξύ 550–250°C, δηλαδή σε θερμοκρασίες κατώτερες του περλιτικού μετασχηματισμού και ανώτερες του μαρτενσιτικού, σχηματίζεται **μπαινίτης**³. Στην απόψυξη με ενδιάμεσες ταχύτητες αποψύξεως προκύπτουν νέα

κρυσταλλικά είδη μεταξύ περλίτη και μαρτενσίτη, τα οποία έχουν μεγάλη σημασία στη βιομηχανική χρήση των χάλυβων. Τα νέα αυτά κρυσταλλικά είδη είναι ο **ανώτερος μπαινίτης** και ο **κατώτερος μπαινίτης**. Η εμφάνιση τόσο του μαρτενσίτη, όσο και του μπαινίτη, προσδίδει σκληρότητα και αυξημένη αντοχή στον χάλυβα μειώνοντας παράλληλα την ολκιμότητά του. Στο σχήμα 3.2α παρουσιάζονται χαρακτηριστικές μικρογραφίες μαρτενσίτη, αλλά και ανώτερου και κατώτερου μπαινίτη. Όπως μπορεί κάποιος να



Σχ. 3.2α

Μικρογραφίες μαρτενσίτη και μπαινίτη. (α) Μαρτενσίτης και (β) μπαινίτης όπως φαίνονται στο οπτικό-μεταλλογραφικό μικροσκόπιο (OM), (γ) μαρτενσίτης σε χάλυβα AISI4140 (42CrMo4) μετά από επαναφορά στους 150°C, (δ) ανώτερος μπαινίτης και (ε) κατώτερος μπαινίτης. Τα καρβίδια του σιδήρου (σεμενίτης – Fe₃C) είναι εμφανή και με συγκεκριμένο προσανατολισμό.

³ Η δομή του μπαινίτη, που αποτελείται από φερρίτη και σεμενίτη, ανακαλύφθηκε την δεκαετία του 1930 από τον Αμερικανό μεταλλουργό E.C. Bain και τον μαθητή του E.S. Davenport.

παρατηρήσει, η μορφολογία του μαρτενσίτη και του κατώτερου μαινίτη μοιάζουν. Μάλιστα, τόσο η σκληρότητά τους όσο και η αντοχή τους μπορεί να είναι παραπλήσια, ιδιαίτερα όταν ο χάλυβας περιέχει αντίστοιχες περιεκτικότητες σε άνθρακα.

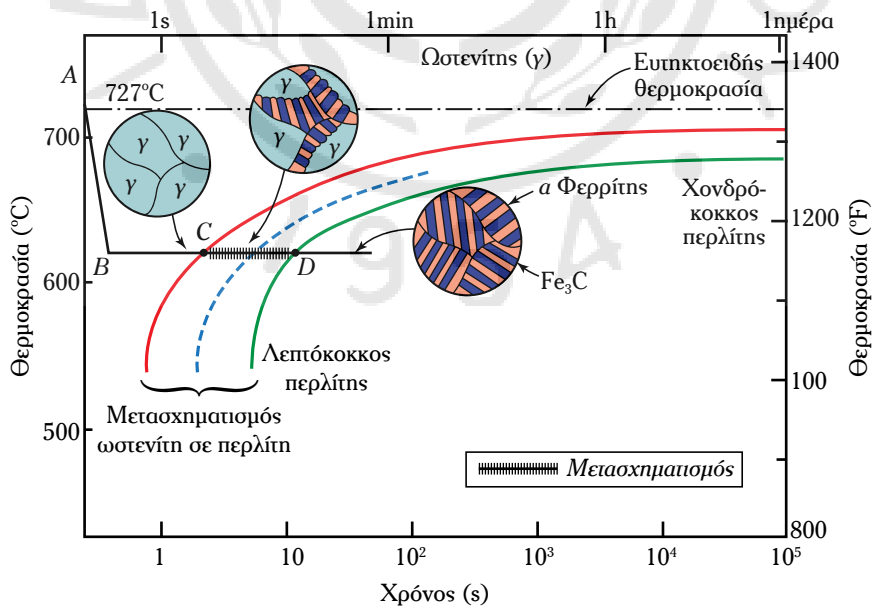
Οι περισσότεροι μετασχηματισμοί στερεάς καταστάσεως δεν πραγματοποιούνται στιγμιαία, όπως ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, αλλά απαιτούν χρόνο για την ολοκλήρωσή τους. Κατά τη διάρκεια της εξελίξεώς τους μέσω διαχύσεως σχηματίζονται νέες φάσεις με διαφορετική κρυσταλλική δομή από εκείνη του μητρικού πλέγματος. Το πρώτο στάδιο του μετασχηματισμού είναι η **πυρήνωση** και το δεύτερο η **ανάπτυξη**. Πολλές φορές οι μετασχηματισμοί γίνονται ισοθερμοκρασιακά, όπως ο μαινιτικός μετασχηματισμός. Η γνώση του ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού μόνο σε μία θερμοκρασία είναι ανεπαρκής. Για τον λόγο αυτόν μελετάται ο μετασχηματισμός σε εύρος θερμοκρασιών. Μετά τη μελέτη για χάλυβες συγκεκριμένης χημικής συστάσεως (περιεκτικότητα σε άνθρακα και σε κραματικά στοιχεία), κατασκευάζονται τα διαγράμματα χρόνου – θερμοκρασίας – μετασχηματισμού (X-Θ-M) (Time – Temperature – Transformation – TTT). Στο σχήμα 3.2β παρουσιάζεται ο ισοθερμοκρασιακός μετασχηματισμός ωστενίτη σε περλίτη ενός χάλυβα ευηκτο-

ειδούς συστάσεως (0,8% κ.β. C) σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη θερμοκρασία των 675°C με υπέρθεση της καμπύλης της ισοθερμοκρασιακής θερμικής κατεργασίας ABCD. Διακρίνονται σχηματικά οι αποκτώμενες μικροδομές πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τον πραγματοποιούμενο μετασχηματισμό.

3.3 Συνδυασμός των καμπυλών αποψύξεως χάλυβα και του διαγράμματος TTT (X-Θ-M).

Στην πράξη ο χάλυβας δεν βάφεται με ισόθερμη βαφή, αλλά με συνεχή βαφή. Δηλαδή από τη θερμοκρασία, στην οποία βρίσκεται σε κατάσταση ωστενίτη, αποψύχεται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος μέσα σε κατάλληλο υγρό. Το υγρό αυτό αποψύξεως είναι συνήθως νερό, λάδι ή αέρας.

Η ταχύτητα αποψύξεως αυξάνεται κατά τη σειρά των συνηθισμένων μέσων βαφής: αέρας, λάδι, νερό. Σε κάθε μέσο αποψύξεως αντιστοιχεί και ορισμένη καμπύλη αποψύξεως, που μπορεί να παρασταθεί στους ίδιους άξονες, όπως και το διάγραμμα TTT (X-Θ-M) (σχ. 3.3α), δηλαδή στον άξονα του χρόνου και της θερμοκρασίας (σχ. 3.3β). Αν παρακολουθήσουμε τα διαγράμματα στο σχήμα 3.3β, τα οποία αναφέρονται σε ευηκτοειδή ανθρακούχο χάλυβα. Οι καμπύλες αποψύξεως (α), (θ), (γ), (δ), (ε), (ζ) αντιστοιχούν σε διαφορετικές ταχύτητες αποψύξεως

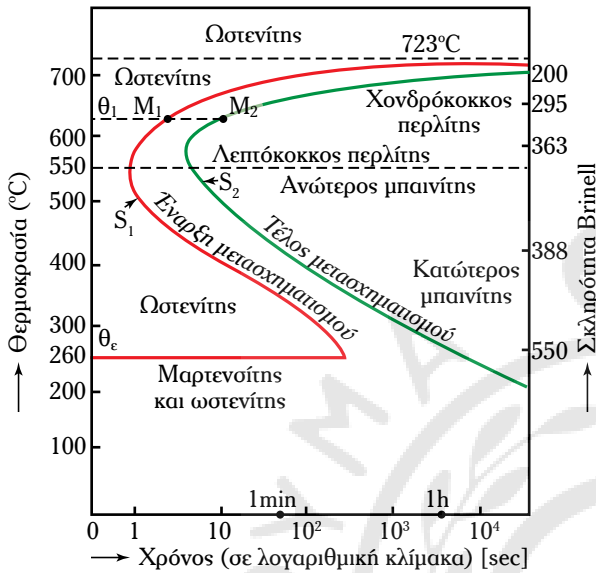


Σχ. 3.2β

Ισοθερμοκρασιακός μετασχηματισμός ωστενίτη σε περλίτη ενός χάλυβα ευηκτοειδούς συστάσεως (0,8% κ.β. C) συναρτήσει του χρόνου για τη θερμοκρασία των 675°C με υπέρθεση της καμπύλης της ισοθερμοκρασιακής θερμικής κατεργασίας ABCD. Διακρίνονται σχηματικά οι αποκτώμενες μικροδομές πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τον πραγματοποιούμενο μετασχηματισμό.

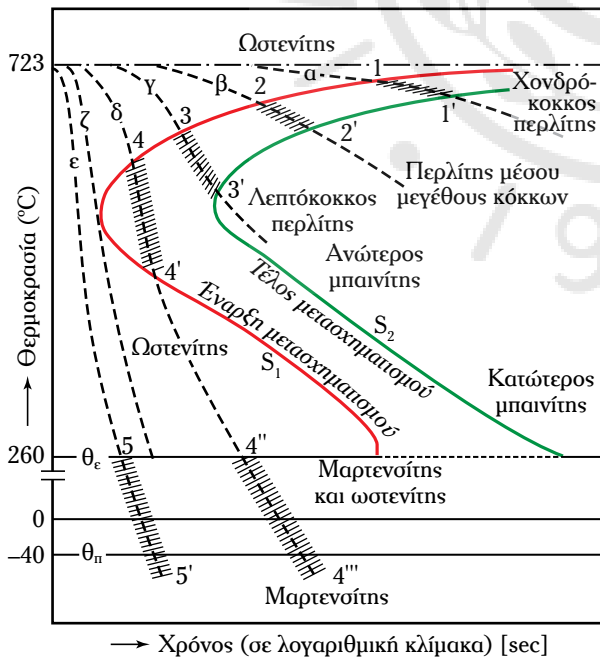
και μάλιστα συνεχώς αυξανόμενες από την καμπύλη (α) μέχρι την καμπύλη (ε).

Η καμπύλη αποψύξεως (α) παριστάνει απόψυξη με χαμηλή ταχύτητα, όπως συμβαίνει στην **ανόπτη-ση** του χάλυβα. Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται στο σχήμα, ο χάλυβας παραμένει στην κατάσταση



Σχ. 3.3α

Το διάγραμμα TTT (Χ-θ-M) ανθρακούχου ευτηκιοειδούς χάλυβα.



Σχ. 3.3β

Καμπύλες συνεχούς αποψύξεως – Διάγραμμα TTT ευτηκιοειδούς ανθρακούχου χάλυβα.

του ωστενίτη για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη αρχίζει από το σημείο 1 και τελειώνει στο σημείο 1'. Το προϊόν του μετασχηματισμού αυτού είναι χονδρόκοκκος περλίτης με χαμηλή σκληρότητα, πράγμα που ήδη έχουμε επισημάνει. Επειδή η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των σημείων 1 και 1' είναι πολύ μικρή, έπεται ότι πολύ μικρή θα είναι και η διαφορά του μεγέθους των κόκκων του περλίτη στην έναρξη (σημείο 1') και στο τέλος (σημείο 1') του μετασχηματισμού του ωστενίτη. Κάτω από το σημείο 1' η ταχύτητα αποψύξεως δεν έχει πια καμιά επίδραση στην κρυσταλλική δομή του χάλυβα. Το τεμάχιο, συνεπώς, μπορεί να αποψυχθεί και με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα, χωρίς να παρατηρηθεί καμία άλλη μεταβολή στη δομή του.

Η καμπύλη (β) αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ταχύτητα αποψύξεως και μπορεί να θεωρηθεί σαν τυπική καμπύλη για τη θερμική κατεργασία της **εξομαλύν-σεως**. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε χονδρόκοκκο περλίτη (σημείο 2) και σε περλίτη, που έχει μεσαίο μέγεθος κόκκων (σημείο 2'). Επειδή η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των σημείων 2 και 2' είναι μεγαλύτερη από όσο είναι στην ανόπτηση, ο χάλυβας μετά από εξομαλυνση παρουσιάζει κρυσταλλική δομή κάπως ανομοιομορφή, με μικρότερο όμως ποσοστό χονδρόκοκκου περλίτη.

Η καμπύλη αποψύξεως (γ) είναι τυπική της **βαφής** του χάλυβα σε λάδι, η δε κρυσταλλική του δομή θα περιλαμβάνει λεπτόκοκκο περλίτη και περλίτη με κόκκους μεσαίου μεγέθους.

Η καμπύλη (δ) είναι χαρακτηριστική ενδιάμεσης ταχύτητας αποψύξεως. Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη αρχίζει από το σημείο 4' και τελειώνει, όχι εντελώς, στο σημείο 4', όπου ορισμένο ποσοστό ωστενίτη έχει μετασχηματισθεί σε λεπτόκοκκο περλίτη, που περιβάλλεται από τον ωστενίτη που έχει απομείνει. Στο σημείο 4' (θερμοκρασία θ_c), αφού προηγουμένως η θερμοκρασία έχει αρκετά μειωθεί, αρχίζει ο μετασχηματισμός του ωστενίτη αυτού σε μαρτενσίτη. Στο σημείο 4'' (θερμοκρασία θ_n) ο ωστενίτης έχει τελείως μετασχηματισθεί σε μαρτενσίτη.

Η καμπύλη (ε) είναι τυπική της βαφής σε μεγάλη ταχύτητα αποψύξεως, όπως συμβαίνει αν χρησιμοποιηθεί ως μέσο ψύξεως κρύο αλατούχο νερό. Η καμπύλη (ε) δεν τέμνει καθόλου το διάγραμμα Χ-θ-M. Ο χάλυβας, σε κατάσταση ωστενίτη, μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη μεταξύ των θερμοκρασιών $\theta_c = 260^\circ\text{C}$ (σημείο 5) και $\theta_n = -40^\circ\text{C}$ (σημείο 5'). Κάτω από τη θερμοκρασία θ_n η κρυσταλλική δομή του χάλυβα είναι μαρτενσίτης.

Η καμπύλη (Ζ) εφάπτεται στη μύτη του διαγράμματος TTT (X-M-Θ) και καθορίζει την **κρίσιμη ταχύτητα αποψύξεως**, όπως ονομάζεται. Δηλαδή οποιαδήποτε ταχύτητα αποψύξεως ίση ή μεγαλύτερη από αυτήν μας δίνει μαρτενσίτη.

3.4 Οι θερμικές κατεργασίες των χαλύβων στην πράξη.

3.4.1 Πλήρης ανόπτηση ή ανόπτηση.

Ο όρος **ανόπτηση** αναφέρεται στη θερμική κατεργασία, κατά την οποία ένα υλικό εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία για παρατεταμένο χρονικό διάστημα και, στη συνέχεια, ψύχεται με χαμηλούς ρυθμούς. Η ανόπτηση στους χάλυβες συνήθως εκτελείται για την αποκατάσταση τάσεων, την αύξηση της πλαστικότητας, της ολκιμότητας και της δυσθραυστότητας ή για την δημιουργία μίας συγκεκριμένης μικροδομής. Η διαδικασία της ανοπτήσεως περιλαμβάνει τη θέρμανση του χάλυβα σε επιθυμητή θερμοκρασία, παραμονή στη θερμοκρασία αυτή για κάποιο χρονικό διάστημα και την τελική ψύξη συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η πλήρης ανόπτηση έχει ως στόχο να «μαλακώσει» τον χάλυβα πριν από οποιαδήποτε μηχανική κατεργασία. Η κατεργασία αυτή χρησιμοποιείται συχνά σε χαμηλού ή μεσαίου άνθρακα χάλυβες, οι οποίοι πρόκειται να υποστούν μηχανική επεξεργασία ή να δεχθούν εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση κατά τη μορφοποίησή τους. Ο χάλυβας ωστενιτοποιείται σε μία θερμοκρασία περίπου 15–40°C πάνω από την καμπύλη A_1 ή A_3 , έως ότου επιτευχθεί ισορροπία.

3.4.2 Ανόπτηση εξομαλύνσεως.

Η ανόπτηση εξομαλύνσεως χρησιμοποιείται, προκειμένου να δημιουργηθεί ομοιόμορφη, κυτταροειδής και λεπτοκρυσταλλική φερριτοπερλιτική δομή. Για να επιτευχθεί αυτό, ο χάλυβας θερμαίνεται κατά 55–85°C υψηλότερα της άνω κρίσιμης θερμοκρασίας, η οποία είναι A_{c3} για χάλυβες που έχουν λιγότερο από 0,76% C και A_{cm} για χάλυβες με περισσότερο από 0,76% C στη χημική τους σύσταση, για περίπου μία ώρα. Μετά απ' αυτό ο χάλυβας ψύχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η κύρια βιομηχανική εφαρμογή της ανοπτήσεως εξομαλύνσεως είναι η εκλέπτυνση των κόκκων των προϊόντων χυτεύσεως χάλυβα.

3.4.3 Ανόπτηση σφαιροποίησης σεμεντίτη.

Η **ανόπτηση σφαιροποίησης** χρησιμοποιείται

είναι ευρέως σε χάλυβες, οι οποίοι περιέχουν στην μικροδομή τους χοντρόκοκκο περλίτη και είναι πολύ δύσκολο να τους επεξεργαστούμε ή να επιβάλουμε πλαστική παραμόρφωση. Η διαδικασία αυτή συνίσταται στη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία ελαφρά κάτω από την καμπύλη A_{c1} ή περίπου στους 700°C, στην περιοχή $\alpha + Fe_3C$ και στη συνέχεια ακολουθεί η πολύ αργή απόψυξη, η οποία μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 18 και 25 ωρών. Έτσι, επιτυγχάνεται η σφαιροποίηση του σεμεντίτη. Η παρουσία σφαιροποιημένου σεμεντίτη βελτιώνει την κατεργασιμότητα των χάλυβων, δεδομένου ότι αυτός γίνεται μαλακότερος και ολκιμότερος.

3.4.4 Ανόπτηση για ανακρυστάλλωση.

Η **ανόπτηση ανακρυστάλλωσης** συνίσταται στη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης, εντός της φερριτικής περιοχής (650–750°C) ακολουθούμενη από ελεγχόμενη απόψυξη. Κατά τη διαδικασία αυτή πραγματοποιείται κάποιος μετασχηματισμός φάσεως και στόχος της είναι η εξάλειψη του ιστού της ενδοτραχύνσεως, ο οποίος έχει προέλθει από την ψυχρήλαση του χάλυβα.

3.4.5 Αποαιτική ανόπτηση.

Η **αποαιτική ανόπτηση** αποσκοπεί στην εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων, οι οποίες παραμένουν εσωτερικά στα μέταλλα μετά την χύτευση, την πλαστική παραμόρφωση ή μετά από θερμική επεξεργασία, φλογοκοπή ή συγκόλληση. Κατά τη διάρκεια της αποαιτικής ανοπτήσεως το κράμα θερμαίνεται εντός της φερριτικής περιοχής, μεταξύ 580 με 650°C και στη συνέχεια υφίσταται αργή απόψυξη. Λόγω της βραδείας μεταβολής των θερμοκρασιών, πραγματοποιείται μείωση ή εξάλειψη των εσωτερικών μηχανικών τάσεων, οι οποίες είχαν συσσωρευτεί από την προηγούμενη κατεργασία.

3.4.6 Βαφή.

Η **ωστενιτοποίηση** (austenitizing) περιλαμβάνει τη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία υψηλότερη κατά 50°C περίπου της υψηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας, η οποία οριοθετείται από την καμπύλη A_{c3} . Η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης είναι μεταξύ 830–900°C για υποευτηκτοειδείς χάλυβες, 750–780°C για τους υπερευτηκτοειδείς, ενώ 1000–1100°C για υψηλά κραματοποιημένους χάλυβες. Κατά τη διαδικασία της ωστενιτοποίησης

υψίστης σημασίας είναι ο έλεγχος του χρόνου παραμονής στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, καθώς η παρατεταμένη παραμονή σε αυτήν οδηγεί σε ανεπιθύμητα μεγεθυμένους κόκκους ωστενίτη.

Ως **βαφή** (quenching) καλείται η διαδικασία ταχύτατης (ραγδαίας) αποψύξεως ενός ωστενιτοποιημένου χάλυβα, η οποία οδηγεί στη λήψη φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας. Χρησιμοποιείται πιο συχνά για τη σκλήρυνση των χάλυβων, μέσω της δημιουργίας μαρτενσίτη ή μπαινίτη. Προϋπόθεση για την μαρτενσιτική βαφή αποτελεί η πλήρης ωστενιτοποίηση πρώτα του χάλυβα. Από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης ο χάλυβας ψύχεται ακαριαία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στους χάλυβες με κραματικά στοιχεία, όπως το νικέλιο και το μαγγάνιο (γ-φερρογόνα), η θερμοκρασία A_3 μειώνεται επιτρέποντας στη βαφή να ξεκινήσει σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Οι παραλλαγές της βαφής, οι βασικές τεχνικές, είναι οι ακόλουθες:

1) Η **άμεση βαφή** (direct quenching) γίνεται άμεσα από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης σε θερμοκρασία δωματίου. Είναι η περισσότερο διαδεδομένη τεχνική βαφής.

2) Κατά τη **χρονική βαφή** (time quenching) ο ρυθμός ψύξεως του μετάλλου αλλάζει απότομα κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξεως. Η συνήθης πρακτική είναι η ακόλουθη: πρώτα μειώνεται η θερμοκρασία του μετάλλου σε μία θερμοκρασία στόχου, π.χ. μέσω βαφής σε νερό, και στη συνέχεια το μέταλλο μεταφέρεται σε ένα δεύτερο λουτρό (π.χ. σε λάδι, αέρα ή αδρανές αέριο), ώστε να ψυχθεί πιο αργά εντός της θερμοκρασιακής περιοχής σχηματισμού μαρτενσίτη. Η συγκεκριμένη τεχνική βαφής χρησιμοποιείται συχνά για την ελαχιστοποίηση παραμορφώσεων και την αποφυγή ρωγμών.

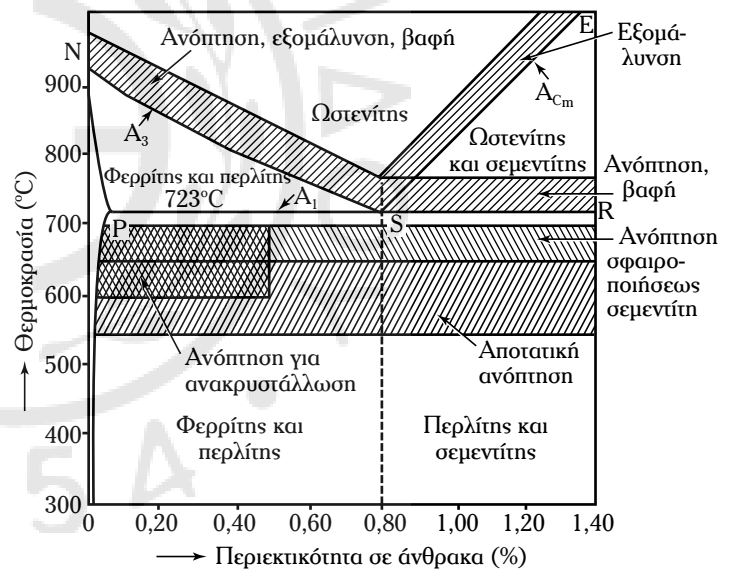
3) **Επιλεκτική βαφή**⁴ (selective quenching) χρησιμοποιείται όταν είναι επιθυμητό να παραμείνουν ορισμένες περιοχές του χάλυβα ανεπηρέαστες από το μέσο βαφής.

4) Η **βαφή με ψεκασμό** (spray quenching) γίνεται με ρεύματα υγρών υψηλής πίεσης, τα οποία εφαρμόζονται στο μέταλλο στα σημεία όπου είναι επιθυμητοί υψηλότεροι ρυθμοί ψύξεως.

5) Η **διακοπόμενη βαφή** (interrupted quenching) είναι η διαδικασία, στην οποία γίνεται ταχεία ψύξη του μετάλλου από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης σε ένα σημείο πάνω από την θερμοκρασία ενάρξεως του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (θερμοκρασία M_s), όπου και κρατείται για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο ακολουθούμενη από ψύξη στον αέρα.

Το σχήμα 3.4α παρουσιάζει στο διάγραμμα Fe-C την περιοχή θερμοκρασιών διαφόρων ειδών ανοπίσεως, εξομαλύνσεως και βαφής των ανθρακούχων χάλυβων, ενώ το σχήμα 3.4β παρουσιάζει συγκριτικά την άμεση και την διακοπόμενη βαφή.

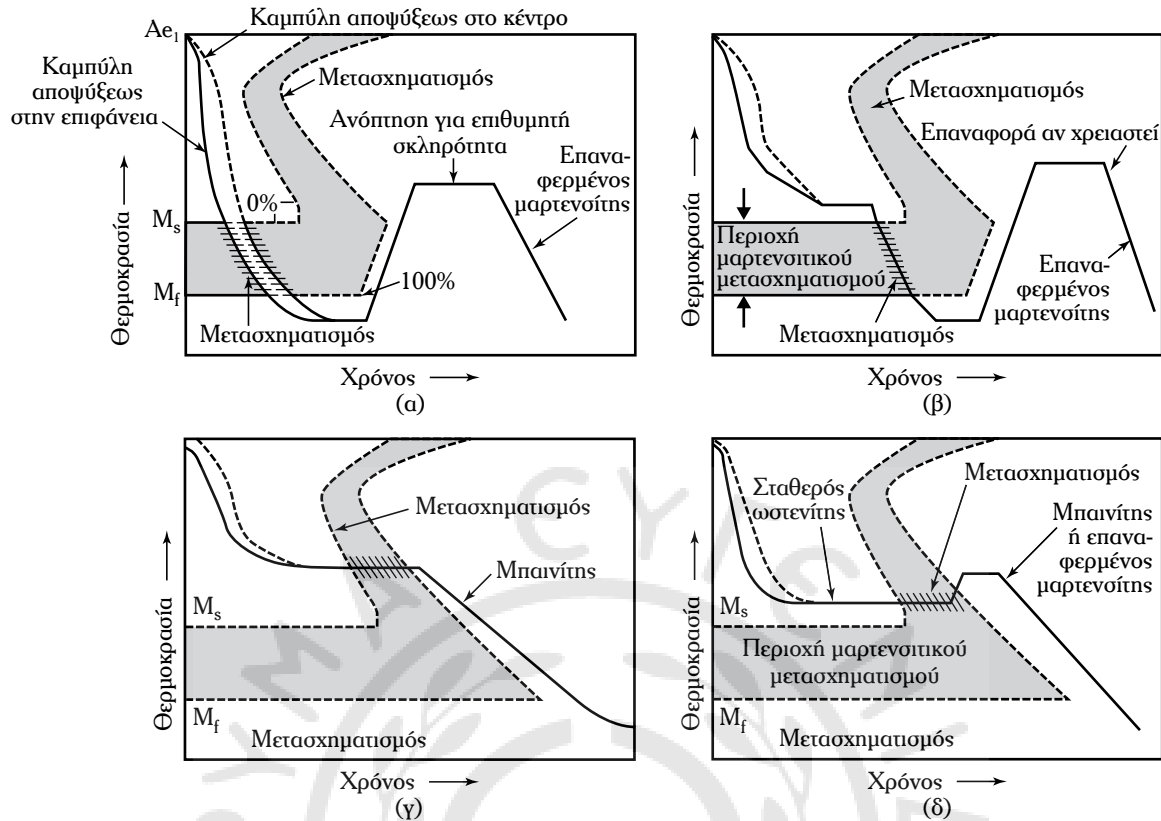
Υπάρχουν τρεις τύποι διακοπόμενης βαφής: η διαδικασία του **austempering**, η διαδικασία του **martempering**, και η **ισοθερμοκρασιακή βαφή**.



Σχ. 3.4α

Περιοχή θερμοκρασιών διαφόρων ειδών ανοπίσεως, εξομαλύνσεως και βαφής των ανθρακούχων χάλυβων.

⁴ Χαρακτηριστικό παράδειγμα η βαφή του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, όπου μετά την έλαση και σε θερμοκρασία άνω της A_3 η «μπετόβεργα» διέρχεται από δεξαμενή με νερό με ταχύτητα τέτοια, ώστε να μην είναι δυνατή η απόλυτη ψύξη της σε όλη τη μάζα της. Αποτέλεσμα αυτής της κατεργασίας είναι ο εξωτερικός μανδύας του χάλυβα οπλισμού να αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη και το εσωτερικό από φερρίτη-περλίτη. Η επαναφορά γίνεται αυτόματα εξαιτίας της παραμένουσας υψηλής θερμοκρασίας στον πυρήνα της ράβδου. Άρα, η εξωτερική επιφάνεια ψύχεται ραγδαία, οι ενδιάμεσες περιοχές πιο αργά και ο πυρήνας ακόμα πιο αργά. Αποτέλεσμα της υπάρξεως υψηλής θερμοκρασίας στον πυρήνα είναι η άνοδος της θερμοκρασίας προς την εξωτερική επιφάνεια της ράβδου και η επαναφορά της μαρτενσιτικής μικροδομής.



Σχ. 3.4β

Σύγκριση των ρυθμών ψύξεως και των θερμοκρασιών καθώς τα δείγματα περνούν μέσα από την περιοχή μαρτενσιτικού μετασχηματισμού για μία συμβατική διαδικασία βαφής και για διαδικασία διακοπτόμενης βαφής. (α) Συμβατική διαδικασία βαφής και επαναφοράς που χρησιμοποιούνται λάδι, νερό ή κάποιο πολυμερές ως μέσο βαφής. (β) Διαδικασία marquenching, στην οποία χρησιμοποιείται ως μέσο βαφής αλατόνερο ή ζεστό λάδι. (γ) Διαδικασία austempering, στην οποία χρησιμοποιούνται τήγματα αλάτων ως μέσο βαφής. (δ) Διαδικασία ισοθερμοκρασιακής βαφής, στην οποία χρησιμοποιούνται τήγματα αλάτων ή ζεστό λάδι ως μέσο βαφής.

Κατά τον ισοθερμοκρασιακό μετασχηματισμό του ωστενίτη σε θερμοκρασίες σχηματισμού μπαϊνίτη (**austempering**) ο χάλυβας ψύχεται απότομα από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης στους 230–400°C, κρατώντας μία σταθερή θερμοκρασία για να μπορεί να γίνει ο ισοθερμοκρασιακός μετασχηματισμός. Έπειτα, πραγματοποιείται απόψυξη στον αέρα. Η κατεργασία αυτή έχει ως στόχο την ισχυροποίηση του χάλυβα με σχηματισμό μπαϊνίτη αντί για μαρτενσίτη. Επειδή ο σχηματισμός του μπαϊνίτη πραγματοποιείται ισόθερμα, δεν υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ επιφάνειας και κέντρου. Επί πλέον, ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας είναι μικρότερος και οι αλλαγές στην κρυσταλλική δομή λιγότερο έντονες από την περίπτωση του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, με αποτέλεσμα να μην σχηματίζονται ρωγμές ή στρεβλώσεις. Τελευταία οι μπαϊνιτικοί χάλυβες βρίσκουν

όλο και περισσότερες εφαρμογές στη βιομηχανία εξαιτίας του εξαιρετικού συνδυασμού αντοχής και ολκιμότητάς τους. Η τεχνική αυτή βρίσκει εφαρμογή συνήθως στους χάλυβες μεσαίου άνθρακα. Το ψυκτικό μέσο είναι συνήθως λουτρά αλάτων, υπάρχει όμως η δυνατότητα χρήσεως διαφόρων τύπων λαδιών, αν και τα τετηγμένα άλατα έχουν καλύτερες ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας και δεν υπάρχει κίνδυνος πυρκαγιάς.

Η ήπια **μαρτενσιτική βαφή (marquenching)** είναι παρόμοια διαδικασία με αυτήν του ισοθερμοκρασιακού ωστενιτικού μετασχηματισμού σε θερμοκρασίες εμφάνισης μπαϊνίτη (austempering). Στη μαρτενσιτική βαφή το υλικό παραμένει σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία αντί του σύντομου περάσματος από τη θερμοκρασία ενάρξεως του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού ως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος,

το οποίο δείχνει ότι η χρονική παραμονή είναι ικανή να δώσει στο υλικό ίδια θερμοκρασία σε όλο του μήκος. Στη συνέχεια, όταν η θερμοκρασία έχει επιφέρει ισορροπία στο υλικό, αλλά πριν ξεκινήσει κάποιος μετασχηματισμός, το υλικό αφαιρείται από το λουτρό άλατος και ψύχεται σε αέρα μέχρι την θερμοκρασία δωματίου. Η παραγόμενη δομή του χάλυβα είναι σχεδόν η ίδια με εκείνη που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της άμεσης βαφής.

Η **ισοθερμοκρασιακή βαφή** είναι, επίσης, παρόμοια με το austempering, αφού ο χάλυβας ψύχεται ταχέως μέσω της φερριτικής και της perlιτικής περιοχής σε θερμοκρασία λίγο πάνω από την M_s (Martensite start temp). Ωστόσο, η ισοθερμοκρασιακή βαφή διαφέρει από το austempering, διότι χρησιμοποιούνται δύο λουτρά ψύξεως. Μετά την πρώτη ψύξη, και προτού προλάβει να γίνει ο μετασχηματισμός, το υλικό μεταφέρεται σε ένα δεύτερο λουτρό σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, στο οποίο ισοθερμοκρασιακά γίνεται μετασχηματισμός και τέλος ψύχεται στον αέρα.

Ανάλογα με τις αποκτώμενες τελικά μικροδομές μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ κλιμακωτής μαρτενσιτικής, κλιμακωτής μπαϊνιτικής και κλιμακωτής μπαϊνιτομαρτενσιτικής βαφής.

Η κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή ξεκινά από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης με απόψυξη του χάλυβα σε θερμοκρασία λίγο ανώτερη της M_s . Εκεί παραμένει για μερικά δευτερόλεπτα με σκοπό να αποκτήσει ομοιογενή θερμοκρασία στη μάζα του. Για τον σκοπό αυτόν χρησιμοποιείται λουτρό τηγμένων αλάτων. Στη συνέχεια ο χάλυβας εμβαπτίζεται σε ψυχρό λουτρό ή αφήνεται να αποψυγεί πλήρως στον αέρα. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός λαμβάνει χώρα κατά το δεύτερο στάδιο. Το πρώτο στάδιο βαφής είναι απαραίτητο, ώστε να αποφευχθούν θερμοκρασιακές διαφορές, οι οποίες θα οδηγήσουν σε ανάπτυξη τάσεων και ρηγμάτωση.

Στην κλιμακωτή μπαϊνιτική βαφή ο ωστενιτοποιημένος χάλυβας αποψύχεται και πάλι σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία, στην περίπτωση όμως αυτή παραμένει εκεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (για μερικές ώρες). Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται ο πλήρης μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μπαϊνίτη. Η τεχνική αυτή ακολουθούμενη από ελαφρά θέρμανση μπορεί να αντικαταστήσει τη μαρτενσιτική βαφή και επαναφορά, καθώς και ο μπαϊνίτης προσφέρει υψηλό όριο διαρροής και θραύσεως, καλή δυσθραυστότητα και αντοχή σε κόπωση. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί

ότι η μέθοδος μειονεκτεί ως προς την απαίτησή της για ειδικά λουτρά αλάτων, τα οποία για περιβαλλοντικούς λόγους αποφεύγονται σήμερα (περιλαμβάνουν κυάνιο). Η κλιμακωτή μπαϊνιτο-μαρτενσιτική βαφή αποτελείται από ένα στάδιο αποψύξεως από την ωστενιτική περιοχή σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία, όπου παραμένει μερικά λεπτά με στόχο τον μερικό μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μπαϊνίτη και στη συνέχεια σε δεύτερο στάδιο αποψύξεως, κατά το οποίο ο υπολειπόμενος ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη. Όπως είναι αναμενόμενο, τα ποσοστά μπαϊνίτη και μαρτενσίτη εξαρτώνται στην τελική δομή από τον χρόνο παραμονής του χάλυβα στην ενδιάμεση θερμοκρασία.

3.4.7 Επαναφορά.

Την βαφή του χάλυβα ακολουθεί η επαναφορά, η οποία στόχο έχει τη βελτίωση της ολκιμότητας, δεδομένου ότι ο μαρτενσίτης που προήλθε από τη βαφή είναι σκληρός και ψαθυρός. Πρόκειται για τη διαδικασία θερμάνσεως των βαμμένων μαρτενσιτικών χαλύβων σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της M_s και μικρότερη της A_1 (250–650°C) και για χρόνο κατάλληλο, ώστε ο μαρτενσίτης να εξελιχθεί μερικώς στην κατάσταση ισορροπίας, ακολουθούμενη από ήρεμη ψύξη (λάδι, αέρας ή μέσα στον φούρνο). Η δομή που λαμβάνεται, καλείται «μαρτενσίτης από επαναφορά» και χαρακτηρίζεται από σχετικά μειωμένη σκληρότητα σε σύγκριση με την προηγούμενη, διαθέτει όμως αυξημένη δυσθραυστότητα και ολκιμότητα.

3.4.8 Επιφανειακή σκλήρυνση των χαλύβων.

Για μία πληθώρα εφαρμογών πολλά τεμάχια πρέπει να διαθέτουν σκληρή επιφάνεια για μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά, ενώ παράλληλα ο πυρήνας τους πρέπει να διατηρεί ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές και δυσθραυστότητα. Τυπικό παράδειγμα τέτοιου είδους τεμαχίου είναι ο πείρος, που συνδέει τον διωστήρα με το έμβολο στη μηχανή εσωτερικής καύσεως (MEK). Κατά τη φάση της αναφλέξεως στον αντίστοιχο κύλινδρο της μηχανής και για μικρό χρονικό διάστημα ο πείρος καταπονείται με φορτίο κρουστικής μορφής. Από αυτό προκύπτει ότι ο πείρος πρέπει να είναι κατασκευασμένος από χάλυβα με μεγάλη δυσθραυστότητα. Συγχρόνως η επιφάνεια του πείρου πρέπει να έχει μεγάλη σκληρότητα, για να μην φθείρεται λόγω της τριβής με το έδρανο του διωστήρα. Ο συνδυασμός αντοχής και δυσθραυστότητας του πυρήνα, αφενός, και σκληρότητας της επιφάνει-

ας αφετέρου, επιτυγχάνεται με μία από τις παρακάτω μεθόδους:

1) Την **ενανθράκωση**, μία θερμοχημική κατεργασία, κατά την οποία η επιφανειακή στιβάδα φτωχού σε άνθρακα χάλυβα (κάτω από 0,2%) εμπλουτίζεται με άτομα άνθρακα. Κατά την κατεργασία αυτή ακολουθεί συνδυασμός θερμικών κατεργασιών για τη σκλήρυνση της επιφανειακής στιβάδας του τεμαχίου και την εκλέπτυνση των κόκκων της επιφάνειας και του πυρήνα του (αύξηση της δυσθραυστότητας).

2) Την **εναζώτωση**, επίσης θερμοχημική κατεργασία, κατά την οποία προσθέτουμε στην επιφανειακή στιβάδα του τεμαχίου άζωτο, το οποίο σχηματίζει πολύ σκληρές χημικές ενώσεις με τον σίδηρο [σιδηρονιτρίδιο (Fe_4N)]. Το τεμάχιο κατασκευάζεται από ειδικό χάλυβα εναζωτώσεως. Μετά την εναζώτωση δεν απαιτούνται θερμικές κατεργασίες.

3) Την **ενδοκυάνωση**, θερμοχημική και αυτή κατεργασία, κατά την οποία η επιφανειακή στιβάδα του τεμαχίου εμποτίζεται με άνθρακα και άζωτο συγχρόνως. Την ενδοκυάνωση ακολουθεί κατάλληλη βαφή.

4) Τη **φλογοβαφή** και τη **βαφή με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή**. Σύμφωνα με αυτές το τεμάχιο από χάλυβα, ο οποίος πρέπει να επιδέχεται βαφή, συνήθως με περιεκτικότητα σε C $\geq 0,35\%$, βάφεται επιφανειακά σε ελεγχόμενο βάθος.

Μετά την εφαρμογή των τριών πρώτων θερμοχημικών κατεργασιών μεταβάλλεται η χημική σύνθεση της επιφανειακής στιβάδας των τεμαχίων. Ωστόσο, με την τέταρτη θερμοχημική κατεργασία (φλογοβαφή) δεν αλλάζει η χημική σύνθεση της επιφανειακής στιβάδας των τεμαχίων, απλά αυτά βάφονται σε ελεγχόμενο βάθος.





ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΜΕΤΑΛΛΑ – ΚΡΑΜΑΤΑ – ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ Μη σιδηρούχα μέταλλα και κράματα

4.1 Μη σιδηρούχα μέταλλα και κράματα – Γενικά.

Τα μεταλλικά υλικά, σε γενικές γραμμές, κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στα **σιδηρούχα** (ferrous) και στα **μη σιδηρούχα** (non-ferrous) **μέταλλα και κράματα** (metals and alloys). Τα μη σιδηρούχα μέταλλα και κράματα έχουν ως κύριο συστατικό άλλο μέταλλο, όχι σίδηρο. Τα κυριότερα εξ αυτών είναι ο χαλκός (Cu), το αλουμίνιο (Al), το μαγνήσιο (Mg), το νικέλιο (Ni), το τιτάνιο (Ti), ο κασσίτερος (Sn), ο μόλυβδος (P) και ο ψευδάργυρος (Zn). Σε μικρότερη έκταση χρησιμοποιούνται και το μολυβδαίνιο (Mo), το βηρύλλιο (Be), καθώς και τα πολύτιμα μέταλλα, ο χρυσός (Au), ο άργυρος (Ag) και ο λευκόχρυσος (Pt). Επί πλέον, πολλά εξωτικά ή σπάνια μέταλλα είναι μη-σιδηρούχα, όπως το κοβάλτιο (Co), ο υδράργυρος (Hg), το βολφράμιο (W), το βισμούθιο (Bi), το δημήτριο (Ce), το κάδμιο (Cd), το νιόβιο (Nb), το ίνδιο (In), το γάλλιο (Ga), το γερμάνιο (Ge), το λίθιο (Li), το σελένιο (Se), το ταντάλιο (Ta), το τελούριο (Te), το βανάδιο (V) και το ζιρκόνιο (Zr). Ο χαλκός, το νικέλιο, ο ψευδάργυρος και ο μόλυβδος διαθέτουν εξαιρετικά υψηλό ειδικό βάρος. Ανήκουν στα λεγόμενα **βαριά μέταλλα** (heavy metals). Αντίθετα, το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, το τιτάνιο, το βηρύλλιο και το λίθιο είναι **ελαφρά μέταλλα** (light metals).

Τα μη σιδηρούχα μέταλλα είναι πιο ακριβά από τα σιδηρούχα. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον εξαιτίας των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, όπως είναι το χαμηλό τους βάρος (π.χ. αλουμίνιο, μαγνήσιο), η υψηλότερη θερμική αγωγιμότητά τους (π.χ. χαλκός), οι μη-μαγνητικές τους ιδιότητες, καθώς και η καλύτερη αντιδιαβρωτική τους συμπεριφορά (π.χ. ψευδάργυρος). Πολλά μη σιδηρούχα μέταλλα χρησιμοποιούνται ως μέρος της χαλυβοποιήσεως (π.χ. ως αποξειδωτικά μέσα) ή ως κραματικά στοιχεία. Ακόμη, πολλά πολύτιμα μέταλλα βρίσκουν εφαρμογές στη

μικροηλεκτρονική και στη σύγχρονη ηλεκτροτεχνία. Σήμερα μάλιστα, ιδιαίτερα το λίθιο και άλλες σπάνιες γαίες έχουν αποκτήσει εξαιρετική στρατηγική σημασία για την ανάπτυξη συσσωρευτών (μπαταριών) για πλήθος χρήσεων, ακόμα και για την αυτοκίνηση.

Παρακάτω θα αναφερθούμε επιγραμματικά στις κύριες ιδιότητες του χαλκού, του αλουμινίου, του μαγνησίου, του ψευδαργύρου, του μολύβδου, του νικελίου και των κραμάτων τους, καθώς επίσης και στα αντιτριβικά κράματα.

4.2 Ο χαλκός και τα κράματά του.

4.2.1 Ο χαλκός.

Ο χαλκός ως μέταλλο παρουσιάζει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, είναι μη-μαγνητικός, ελατός και όλκιμος, επομένως διαμορφώνεται εύκολα εν θερμώ, με κοίλανση, με ολκή (συρματοποίηση) και εν ψυχρώ. Έχει υψηλό ειδικό βάρος, $8,9 \text{ g/cm}^3$, τήκεται στους 1083°C και παρουσιάζει ειδική αντίσταση $0,0175 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$. Κατόπιν ψυχρηλασίας υφίσταται ισχυρή σκλήρυνση, η οποία μπορεί να αναιρεθεί μετά από θερμική κατεργασία ανοπήσεως για ανακραυστάλλωση. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή σε διάβρωση και επίσης καλές μηχανικές αντοχές (όριο διαρροής 220 MPa, όλκιμότητα θραύσεως $A = 55\%$, σκληρότητα Brinell = 45). Σε συνδυασμό με τις λοιπές φυσικές του ιδιότητες καθίσταται εξαιρετικά κατάλληλος για βιομηχανικές χρήσεις, κυρίως, του ηλεκτρισμού, αλλά και στη χημική βιομηχανία (σωλήνες ατμού, αερίων, λαδιού κ.ά.). Είναι, ωστόσο, ακατάλληλος για χυτά τεμάχια, καθώς τηγμένος απορροφά αέρια, τα οποία σχηματίζουν φυσαλίδες και οπές στη μάζα του κατά τη στερεοποίηση.

Ο χαλκός έχει ευχάριστο χρωματισμό, επιμεταλλώνεται (π.χ. επινικελώνεται, επιχρωμιώνεται) και συγκολλάται εύκολα. Αν υπάρχουν ακόμη και ίχνη ακαθαρσιών, μειώνεται κατά πολύ η ηλεκτρική του αγωγιμότητα. Οι ακαθαρσίες με τα πιο δυσμε-

νή αποτελέσματα είναι κατά σειρά ο φωσφόρος, το πυρίτιο, ο σίδηρος, το αρσενικό, το αλουμίνιο και το νικέλιο. Περιεκτικότητα για παράδειγμα μόνο 0,04% φωσφόρου μειώνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού κατά 25% κ.β.. Γι' αυτό, για ηλεκτρικούς αγωγούς χρησιμοποιείται χαλκός εξαιρετικά καθαρός (πάνω από 99,9%) (ηλεκτρολυτικός). Στο εμπόριο υπάρχουν διάφορες ποιότητες χαλκού με βάση την καθαρότητά του. Αν προσθέσουμε στον χαλκό 0,60% κ.β. περίπου σελήνιο, βελτιώνεται η κατεργασιμότητά του, χωρίς να μειώνεται πολύ η ηλεκτρική του αγωγιμότητα. Επίσης, προσθήκη περίπου 0,30% κ.β. αρσενικού βελτιώνει την αντοχή του στη διάβρωση.

4.2.2 Τα κράματα του χαλκού.

Τα κράματα του χαλκού που χρησιμοποιούνται ευρύτερα στη βιομηχανία και στη ναυτιλία, περιλαμβάνουν τους ορείχαλκους, τους μπρούντζους ή κρατερώματα και άλλα κράματα του χαλκού, όπως είναι το χαλκοαργίλιο, το χαλκοβηρύλλιο, το χαλκονικέλιο κ.ά..

Τα κράματα του χαλκού που υφίστανται κατεργασίες διαμορφώσεως, καλούνται **μαλακτά**, ενώ εκείνα που χυτεύονται, ονομάζονται **χυτευτικά**.

1) Οι ορείχαλκοι.

Οι ορείχαλκοι είναι κράματα χαλκού και ψευδαργύρου Zn (μέχρι 68% κ.β.). Γενικά διατηρούν τις καλές ιδιότητες του χαλκού, αλλά είναι φθηνότεροι εξαιτίας της χαμηλότερης εμπορικής αξίας του ψευδαργύρου. Οι ορείχαλκοι με περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο από 5% κ.β. μέχρι 39% κ.β. έχουν καλή πλαστικότητα εν ψυχρώ. Με περιεκτικότητα από 46% κ.β. μέχρι 51% κ.β. έχουν καλή πλαστικότητα εν θερμώ, ενώ ορείχαλκοι με ψευδάργυρο από 51% κ.β. μέχρι 68% κ.β. είναι εύθραυστοι.

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

Με μικρές ποσότητες προσθηκών μπορεί να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες των ορειχάλκων, καθώς επίσης βελτιώνεται και η αντοχή τους σε διάβρωση. Έτσι, ο κασσίτερος (μέχρι 1% κ.β.) και το νικέλιο αυξάνουν την αντοχή των ορειχάλκων σε διάβρωση, ο σίδηρος εκλεπτύνει τους κόκκους των χυτών, το μαγγάνιο (μέχρι 2% κ.β.) βελτιώνει τη μηχανική τους αντοχή και το αλουμίνιο αυξάνει τη μηχανική

αντοχή και την αντοχή τους σε διάβρωση. Προσθήκη μολύβδου 2% κ.β. – 3% κ.β. σε ορείχαλκο με περιεκτικότητα 40% κ.β. Zn περίπου μάς δίνει ορείχαλκο ελεύθερης κοπής και πιο κατεργάσιμο. Σ' αυτήν 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 ως μαλακοί και ως χυτευτικοί. Ως χυτευτικοί χρησιμοποιούνται εκείνοι που περιέχουν 40% κ.β. περίπου ψευδάργυρο, συνήθως με τις προσθήκες που αναφέρθηκαν.

2) Μπρούντζοι ή κρατερώματα.

Μπρούντζους ή κρατερώματα ονομάζουμε τα κράματα χαλκού, τα οποία έχουν ως κύρια πρόσμιξη τον κασσίτερο (Sn). Είναι αρχαιότατα κράματα και χρησιμοποιούνται ως σήμερα. Οι μπρούντζοι με περιεκτικότητα από 4% κ.β. – 9% κ.β. κασσίτερου χρησιμοποιούνται ως μαλακτά και με περιεκτικότητα από 9% κ.β. – 20% κ.β. ως χυτευτικά κράματα. Κρατερώματα με κασσίτερο πάνω από 20% κ.β. παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα. Γι' αυτό δύσκολα μπορούν να κατεργαστούν με κοπή.

Οι μπρούντζοι έχουν καλή μηχανική αντοχή, αντοχή στη φθορά από τριβή, αντοχή στη διάβρωση από νερό και από την ατμόσφαιρα. Επίσης συγκολλώνονται εύκολα. Πολλά από τα κρατερώματα περιέχουν μικρές ποσότητες φωσφόρου, συνήθως μέχρι 0,05% κ.β.. Ο φωσφόρος απομένει στο κράμα από τη χρήση του ως αποξειδωτικό και υποβοηθεί την εύκολη και ικανοποιητική χύτευση του κράματος. Τα κρατερώματα αυτά δεν πρέπει να συγχέονται με τους φωσφορούχους μπρούντζους, όπου ο φωσφόρος σε περιεκτικότητα από 0,10% κ.β. – 1% κ.β. αποτελεί προσθήκη. Ο φωσφόρος όχι μόνο αυξάνει 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% κ.β. σε κρατερώματα με περιεκτικότητα 3% κ.β. Sn, δίνει μαλακό κρατέρωμα, που χρησιμοποιείται στην κατασκευή νομισμάτων. Το χυτευτικό κρατέρωμα με περιεκτικότητα 10% κ.β. Sn και 2% κ.β. Zn είναι γνωστό σαν μέταλλο πυροβόλων, έχει δε μεγάλη αντοχή στη διάβρωση.

Όπως στους ορείχαλκους, έτσι και στα κρατερώματα, αν προστεθεί μολύβδος μέχρι 2% κ.β. περίπου, διευκολύνει την κατεργασιμότητά τους. Επίσης, αν προστεθεί μολύβδος σε μεγαλύτερη όμως ποσότητα,

καθιστά το κρατέρωμα κατάλληλο για έδρανα που εργάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες, λόγω της μεγαλύτερης θερμικής αγωγιμότητας, που τους προσδίδει.

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

3) Κράματα χαλκού-αλουμινίου (χαλκοαλουμίνιο).

Το χαλκοαλουμίνιο ή χαλκαλουμίνιο, όπως μαρτυρά και η ονομασία του, είναι κράμα χαλκού (Cu) και αλουμινίου (Al). Ανάλογα με την περιεκτικότητα του Al, που όμως δεν υπερβαίνει το 14% κ.β., παράγονται πολλοί τύποι χαλκοαλουμινίων για διάφορες χρήσεις. Κατά κανόνα τα χαλκοαλουμίνια εμφανίζουν υψηλή μηχανική αντοχή και καλή αντίσταση στη διάβρωση. Τα καθαρά διμερή κράματα με περιεκτικότητα αλουμινίου μέχρι 8,5% κ.β. παρουσιάζουν μονοφασική δομή. Είναι ιδιαίτερα μαλακτά, κατάλληλα σε ολκή, εξέλαση, σφράγιση ή και βαθιά κοίλανση.

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

Χαλκοαλουμίνιο με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο από 9,50% κ.β.– 12% κ.β. και με σίδηρο και νικέλιο μέχρι 5% κ.β. χυτεύεται σε άμμο ή με πίεση. Χρησιμοποιείται πολύ στη ναυπηγική βιομηχανία για έλικες, αντλίες, άξονες αντλιών, μπουλόνια (βλήτρα) κ.ά.. Επίσης, χρησιμοποιείται για έδρες βαλβίδων και σώματα αναφλεκτήρων MEK και για έδρανα που κα-

ταπονούνται με μεγάλα φορτία. Τα χαλκοαλουμίνια χρησιμοποιούνται κυρίως ως αντιδιαβρωτικά υλικά. Ειδικότερα τα φερόμενα με περιεκτικότητα 6% κ.β. Al και 2% κ.β. Ni χρησιμοποιούνται στη νομισματοκοπία. Με μεγαλύτερη περιεκτικότητα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην ναυπηγική, στην αεροναυπηγική, σε εξαρτήματα μηχανών θαλάσσης (εσω/εξωλέμβιες) κ.λπ.. Τα φερόμενα με προσμείξεις μαγγανίου διευκολύνουν την εν θερμώ κατεργασία και συγκόλληση, ενώ με προσμείξεις σιδήρου χρησιμοποιούνται σε βαρύτερες κατασκευές.

Ενδεικτικά αναφέρουμε τις μηχανικές ιδιότητες κατεργαζόμενου εν θερμώ χαλκοαλουμινίου με περιεκτικότητα Cu 80% κ.β., Al 10% κ.β., Fe 5% κ.β. και Ni 5% κ.β., οι οποίες μετά από σφυρηλασία είναι:

$$\sigma_B = 740 \text{ MPa}, A = 20\% \text{ και} \\ \text{σκληρότητα 215 Brinell}$$

4) Κράματα χαλκού-βηρυλλίου (χαλκοβηρύλλιο).

Το χαλκοβηρύλλιο, όπως προσδιορίζει και η σύνθετη ονομασία του, είναι κράμα χαλκού (Cu) και βηρυλλίου (Be), περιεκτικότητας 2% κ.β..

Το χαλκοβηρύλλιο φέρεται σε πολλές των περιπτώσεων και με προσμείξεις νικελίου ή κοβαλτίου. Πρόκειται για το σκληρότερο αλλά και ελαστικότερο από όλα τα κράματα του χαλκού. Λόγω των ιδιοτήτων ονομάζεται καταχρηστικά **μπρούντζος βηρυλλίου**.

Είναι κράμα σχετικά μαλακό, όγκιμο και εύκολα μπορεί να διαμορφωθεί, ειδικά μετά από επεξεργασία βαφής, ενώ μετά από επαναφορά καθίσταται σκληρό και ελαστικό. Γενικά παρουσιάζει αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά, τόσο μηχανικά όσο και ηλεκτρικά, τα οποία το καθιστούν κατάλληλο σε πολλές εφαρμογές.

Κυριότερο χαρακτηριστικό του είναι ότι τα διάφορα εργαλεία που κατασκευάζονται μ' αυτό το κράμα, δεν παράγουν σπινθήρες και είναι αυτά που χρησιμοποιούνται σε ορυχεία, πυριτιδοποιεία και σε χώρους όπου παρατηρούνται επικίνδυνα αέρια.

Σημειώνεται ότι σε όλα τα δεξαμενόπλοια, υγραεροφόρα ή άλλα πλοία που μεταφέρουν επικίνδυνα πτητικά φορτία (εκρηκτικά αέρια), καθώς και σε πλωτές εξέδρες εξορύξεως πετρελαίου, όπως και σε συναφείς εγκαταστάσεις ξηράς, υποχρεωτικά για λόγους ασφαλείας όλα τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται π.χ. κλειδιά, πένσες, ξύστρες, σφυριά, κοινώς ματσακόνια, αεροματσακόνα κ.λπ. πρέπει να κατασκευάζονται από χαλκοβηρύλλιο, τα οποία και

υπόκεινται σε αυστηρό έλεγχο από επιθεωρητές και νπογνώμονες.

Άλλες συννηθέστερες εφαρμογές του χαλκοβηρυλλίου αφορούν σε κατασκευές ελατηρίων, αποζευκτών και ηλεκτρικών επαφών, στην κατασκευή ψυγείων, καθώς λόγω της σκληρότητάς του χρησιμοποιείται και ως αλεξίσφαιρο υλικό σε θωράκιση θυρών, οχημάτων κ.λπ.. Με προσμείξεις μικρής περιεκτικότητας κοβαλτίου κατασκευάζονται κυρίως καλούπια περιορισμένης χυτεύσεως.

5) Κράματα χαλκού-νικελίου (χαλκονικέλιο).

Το χαλκονικέλιο είναι κράμα χαλκού, νικελίου (σε περιεκτικότητα λιγότερο από το 50% κ.β.) και προσμείξεις σκληρυντικών μετάλλων, όπως ο σίδηρος (0,5 κ.β. – 6% κ.β.) και το μαγγάνιο (0,3 κ.β. – 1% κ.β.).

Βασική ιδιότητα του χαλκονικελίου είναι ότι δεν διαβρώνεται εύκολα από το θαλασσινό νερό, ιδιότητα που ενισχύεται όσο ψηλότερη είναι η περιεκτικότητα σε νικέλιο. Για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιείται ευρέως σε μεταλλικά μέρη σκαφών.

Το κράμα αυτό διατίθεται στο εμπόριο σε μορφή πλακών, ελασιμάτων, ταινιών, σωλήνων, ράβδων και συρμάτων. Η πιο ευρεία πάντως χρήση του είναι στην παραγωγή κερμάτων με ασπμνία απόχρωση. Στην νομισματοκοπεία, η αναλογία του κράματος είναι περίπου 75% κ.β. Cu και 25% κ.β. Ni. Χρησιμοποιείται, επίσης, για την παραγωγή ανθεκτικών ηλεκτρικών αντιστάσεων και θερμοστοιχείων.

Ο χαλκός και το νικέλιο σχηματίζουν σε όλες τις αναλογίες στερεό διάλυμα μίας 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.

Αντιπροσωπευτικά κράματα χαλκού-νικελίου είναι:

1) Περιεκτικότητα 75% κ.β. Cu, 25% κ.β. Ni. Χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή νομισμάτων.

2) Περιεκτικότητα 70% κ.β. Cu, 30% κ.β. Ni. Χρησιμοποιείται για αυλούς συμπυκνωτών και ψυγείων και όπου ακόμη χρειάζεται καλή αντοχή στη διάβρωση.

3) Περιεκτικότητα 60% κ.β. Cu, 40% κ.β. Ni, το λεγόμενο **κονσταντάν**. Βρίσκει εφαρμογές σε ηλεκτρικές αντιστάσεις και θερμοηλεκτρικά ζεύγη.

4) Περιεκτικότητα 29% κ.β. Cu, 68% κ.β. Ni, 1,25% κ.β. Fe και 1,25% κ.β. Mn, που συνδυάζει κα-

λές μηχανικές ιδιότητες με εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Χρησιμοποιείται στη χημική βιομηχανία.

4.3 Το αλουμίνιο (αργίλιο) και τα κράματά του.

4.3.1 Το αλουμίνιο.

Το αλουμίνιο (Al) είναι το πιο διαδεδομένο στοιχείο του στερεού φλοιού της γης μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Ως πρώτη ύλη για την παραγωγή του αλουμινίου χρησιμοποιείται ο βωξίτης (ένυδρο οξειδίο του αργιλίου με προσμείξεις οξειδίου του σιδήρου). Αυτός δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φυσική κατάσταση, επειδή περιέχει πολλές προσμείξεις, όπως Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , αλλά υποβάλλεται σε προεργασία καθάρσεως. Μετά από διαδικασία χημικής καθάρσεως παραμένει το καθαρό οξειδίο του αργιλίου (Al_2O_3), κοινώς **αλουμίνα**, το οποίο και υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία.

Το αλουμίνιο εξάγεται από την αλουμίνα με ηλεκτρόλυση. Αυτή σήμερα είναι η μόνη βιομηχανική μέθοδος για την παραγωγή του αλουμινίου. Για να γίνει η ηλεκτρόλυση, η αλουμίνα πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση τήξεως. Επειδή όμως το σημείο τήξεώς της είναι πολύ υψηλό ($2050^\circ C$), προσθέτομε κρυόλιθο [$Na_3(AlFe_6)$] και έτσι μειώνεται στους $900^\circ C$ ως $1000^\circ C$. Το μείγμα τηγμένης αλουμίνας και κρυολίθου ηλεκτρολύεται μέσα σε κάμινο. Ως κάθοδος χρησιμοποιείται ο ενισχυμένος με γραφίτη πυθμνας και τα εσωτερικά τοιχώματα της καμίνου. Ως άνοδος χρησιμοποιείται άνθρακας σε ράβδους. Το αλουμίνιο λαμβάνεται από την κάθοδο, ενώ από την άνοδο εκλύεται οξυγόνο, που καίει τον άνθρακα της ανόδου.

Για την παραγωγή 1 kg αλουμινίου απαιτούνται περίπου 2 kg αλουμίνας, 1 kg άνθρακα και 20 kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, για την παραγωγή του αλουμινίου καταναλώνονται μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Γι' αυτό η βιομηχανία παραγωγής του αλουμινίου υπάγεται στην κατηγορία των ηλεκτροβόρων χημικών βιομηχανιών.

Το αλουμίνιο (και τα κράματά του) χρησιμοποιείται εκτενώς στη βιομηχανία λόγω των εξαιρετικά χρήσιμων ιδιοτήτων του. Είναι ελαφρύ, έχει καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, αλλά και καλή αντοχή σε διάβρωση, είναι κατεργάσιμο, δεν είναι τοξικό και είναι μη-μαγνητικό. Ως σοβαρά μειονεκτήματα του αλουμινίου μπορούν να θεωρηθούν η μικρή μηχανική του αντοχή και το χαμηλό του σημείο τήξεως ($660^\circ C$).

Η καθαρότητα του αλουμινίου είναι κατά μέσο όρο 99,5%, μπορεί όμως να φτάσει και τα 99,99% με κατάλληλη επεξεργασία. Έχει ειδικό βάρος 2,7 g/cm³, δηλαδή πολύ χαμηλότερο από το ειδικό βάρος του σιδήρου (7,8 g/cm³). Η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση είναι 0,029 Ω mm²/m. Παρουσιάζει σχετική ηλεκτρική αγωγιμότητα 63%, ενώ αυτή του χαλκού είναι 98%. Η παρουσία ακαθαρσιών ελαττώνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου. Εξαιτίας της μεγάλης του ηλεκτρικής αγωγιμότητας χρησιμοποιείται για την κατασκευή ηλεκτρικών αγωγών (καλωδίων), τα οποία όμως ενισχύονται συνήθως με χαλύβδινο πυρήνα, για να αποκτήσουν ικανοποιητική μηχανική αντοχή.

Το αλουμίνιο έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα (πέντε περίπου φορές μεγαλύτερη από αυτή του μαλακού χάλυβα) και γι' αυτό χρησιμοποιείται για αυλούς ψυγείων, θερμαντικά σώματα κ.ά..

Όταν το αλουμίνιο εκτεθεί στην ατμόσφαιρα, σχηματίζεται στην επιφάνειά του πολύ λεπτή, διαφανής, συνεχής και συνεκτική στιβάδα οξειδίου του αλουμινίου (αλουμίνα), που προφυλάσσει το μέταλλο από μεγαλύτερη οξείδωση. Έτσι, το αλουμίνιο παρουσιάζει καλή αντοχή σε διάβρωση στον αέρα και στο καθαρό νερό, όχι όμως και στο θαλασσινό νερό. Αυτή η ιδιότητα καθιστά το αλουμίνιο κατάλληλο για εφαρμογές στη χημική βιομηχανία, στη βιομηχανία τροφίμων (δεν είναι τοξικό), καθώς επίσης και σε μαγειρικά σκεύη. Το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο είναι μαλακό και χαμηλής μηχανικής αντοχής. Παρουσιάζει όμως μεγάλη πλαστικότητα και έτσι μπορεί να αποκτήσει πολύ μικρό πάχος (μέχρι και 0,01 mm) μετά από εξέλαση.

Οι τυπικές μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου καθαρότητας 99,50% σε κατάσταση ανοπήσεως είναι:

$$\sigma_B = 75 \text{ μέχρι } 90 \text{ MPa, } A = 31 \% \text{ μέχρι } 42\% \\ \text{και σκληρότητα } 20 \text{ μέχρι } 27 \text{ Brinell}$$

Εξαιτίας της χαμηλής του μηχανικής αντοχής και σκληρότητας, το αλουμίνιο είναι ακατάλληλο για πολλές βιομηχανικές χρήσεις, αν και έχει τα άλλα σοβαρά πλεονεκτήματα που αναφέραμε ήδη.

Οι μηχανικές του όμως ιδιότητες μπορούν να βελτιωθούν είτε με σκλήρυνση μετά από ψυκρυσία είτε με προσθήκη ξένων στοιχείων (κραμάτων), τα οποία με σειρά σπουδαιότητας είναι ο χαλκός, το πυρίτιο, το μαγνήσιο, ο ψευδάργυρος, το μαγγάνιο, το νικέλιο και το χρώμιο. Επί πλέον, ορισμένα κράματα του αργιλίου μπορούν να υποστούν

και θερμικές κατεργασίες για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

4.3.2 Τα κράματα του αλουμινίου.

Τα κράματα του αλουμινίου περιλαμβάνουν τα μαλακτά και τα χυτευτικά κράματα. Και οι δύο κατηγορίες περιλαμβάνουν κράματα θερμικώς επεξεργάσιμα και μη.

1) Μαλακτά κράματα αλουμινίου.

α) Μη θερμικώς επεξεργάσιμα.

Τα κυριότερα κράματα αυτής της ομάδας είναι εκείνα που περιέχουν μέχρι 1,5% κ.β. Μη περίπου και εκείνα που περιέχουν από 2% κ.β. μέχρι 7,5% κ.β. Mg. Σκληρύνονται με ψυκρυσία και γενικά έχουν καλή αντοχή στη διάβρωση. Τα κράματα που περιέχουν μαγνήσιο αντέχουν ιδιαίτερα στο θαλασσιο νερό, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική βιομηχανία.

β) Θερμικώς επεξεργάσιμα.

Τα κράματα αυτά αποκτούν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες με τη λεγόμενη **σκλήρυνση** με κατακρήμνιση μέσω γηράνσεως. Σε αυτήν την περίπτωση οι σπουδαιότερες προσθήκες είναι ο χαλκός, το μαγνήσιο, το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος.

2) Χυτευτικά κράματα.

α) Μη θερμικώς επεξεργάσιμα.

Τα σπουδαιότερα από αυτά τα κράματα περιέχουν 10% κ.β. μέχρι 12% κ.β. πυρίτιο και είναι κατάλληλα για χύτευση σε άμμο, καθώς επίσης και για χύτευση με βαρύτητα ή κάτω από πίεση. Από το θερμικό διάγραμμα ισορροπίας των κραμάτων αλουμινίου – πυριτίου προκύπτει ότι αυτά τα κράματα είναι περίπου ευτηκτικής αναλογίας. Οι μηχανικές τους ιδιότητες βελτιώνονται, αν κατά τη χύτευση προστεθεί στο τήγμα 0,05% περίπου νάτριο. Και αυτό συμβαίνει γιατί το νάτριο, όταν προστεθεί, λεπταίνει τους κόκκους της ευτηκτικής κρυσταλλικής δομής. Σπουδαία σημασία έχουν, επίσης, και τα κράματα αργιλίου – μαγνησίου – μαγγανίου, τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, ιδιαίτερα δε στο θαλασσινό νερό. Είναι κατάλληλα για χύτευση σε άμμο και χύτευση με βαρύτητα.

β) Θερμικώς επεξεργάσιμα.

Πολλά από αυτά τα κράματα περιέχουν κυρίως 4% κ.β. χαλκό, ενώ άλλα περιέχουν επί πλέον 2%

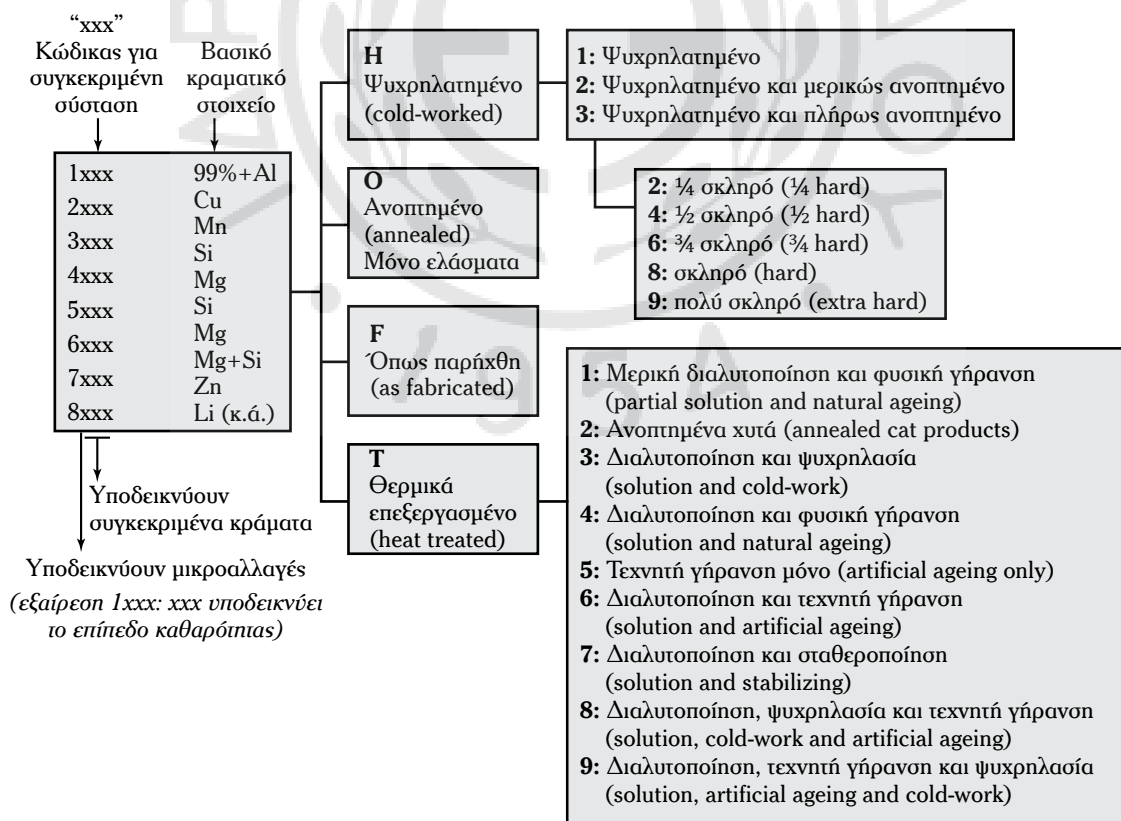
κ.β. νικέλιο. Άλλος τύπος τέτοιου χυτευτικού κράματος είναι εκείνος που περιέχει 12% κ.β. ή 5% κ.β. πυρίτιο με προσθήκες χαλκού, μαγνησίου και νικελίου ή μαγνησίου και μαγγανίου. Η θερμική τους κατεργασία είναι παρόμοια με εκείνη των μαλακτών κραμάτων.

Το κράματα του αλουμινίου μπορούν να ισχυροποιηθούν μέσω φυσικής ή τεχνητής γήρανσης, δηλαδή μέσω θερμάνσεως για συγκεκριμένο χρόνο σε επιλεγμένη θερμοκρασία και μετέπειτα με αργή ή ραγδαία απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επί πλέον, μέσω θερμπλασίας, αλλά κυρίως ψυχρηλασίας μπορούν να σκληρύνουν σημαντικά. Με κραμάτωση με χαλκό (Cu), μαγγάνιο (Mn), πυρίτιο (Si), μαγνήσιο (Mg), ψευδάργυρο (Zn) και λίθιο (Li) μπορούμε να επιτύχομε ιδιαίτερες ιδιότητες. Το αλουμίνιο κατατάσσεται σε 8 σειρές με βάση το κύριο κραματικό στοιχείο. Επίσης, με βάση τη θερμική προϊστορία και την επιτευχθείσα παραμόρφωση, το αλουμίνιο κατατάσσεται σε **ψυχρήλατο** (H / cold worked), **θερμήλατο** (hot rolled), **ανοπτημένο** (O), **θερμικά επεξεργασμένο** (T) ή **χυτό** (F / as-fabricated). Στο σχήμα 4.3α παρουσιάζεται επι-

γραμματικά η κατάταξη των κραμάτων αλουμινίου και οι θερμικές του κατεργασίες σε συνδυασμό με την επιτευχθείσα μέθοδο διαμορφώσεως (ψυχρή ή θερμή έλαση).

Στο σχήμα 4.3β παρουσιάζονται συνοπτικά τα στάδια θερμικής επεξεργασίας κράματος αλουμινίου της σειράς 2xxx με κύριο κραματικό στοιχείο τον Cu. Διακρίνονται διαδοχικά από τη θέση 1, η σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος (solid solution strengthening). Στη θέση 2, η αύξηση της αντοχής μέσω του σχηματισμού ζωνών συνοχής και ημισυνοχής με τη μήτρα του αλουμινίου (coherency stress strengthening), ενώ στη θέση 3 η σκληρότητα και η αντοχή αυξάνονται με την κατακρήμνιση ενώσεων πλούσιων σε χαλκό και αλουμίνιο (ένωση θ''). Περαιτέρω θέρμανση θα οδηγήσει στον σχηματισμό της φάσεως θ με αρνητικά επακόλουθα στη σκληρότητα εξαιτίας της μεγεθύνσεως των μεσομεταλλικών ενώσεων.

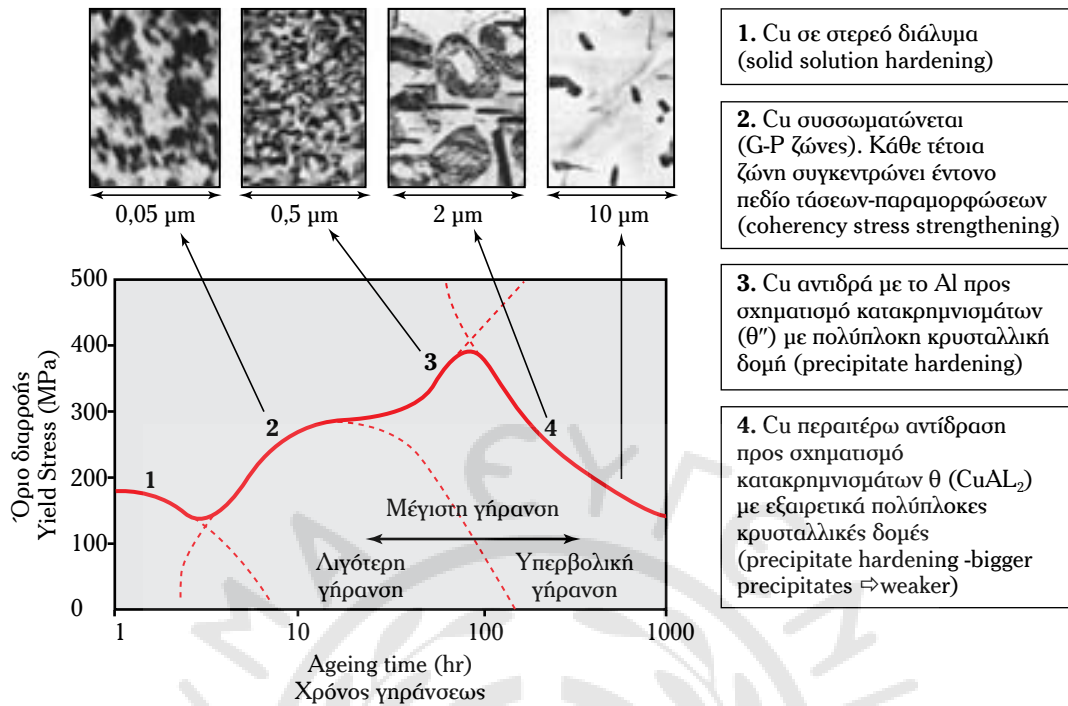
Στο σχήμα 4.3γ διακρίνεται η ενόδη μορφολογία κράματος αλουμινίου, το οποίο έχει υποστεί ψυχρηλασία. Η ψυχρή έλαση καταστρέφει τη συνοχή των κόκκων και έτσι αυτοί δεν είναι πλέον ευδιάκριτοι και το υλικό αποκτά ανισοτροπία. Αυτό συνεπάγεται



Σχ. 4.3α

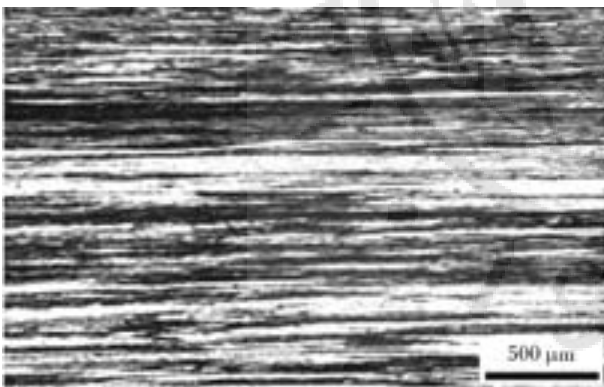
Κράματα του αλουμινίου και κατάταξή τους.

Θερμική κατεργασία κράματος αλουμινίου



Σχ. 4.3β

Θερμική κατεργασία κράματος αλουμινίου
(S.G. Roberts: Engineering "C" – High Performance Alloys: HT 2000).



Σχ. 4.3γ

Αλουμίνιο, πλήρως εργοσκληρυνμένο.



Σχ. 4.3δ

Αλουμίνιο, ανακρυσταλλωμένο.

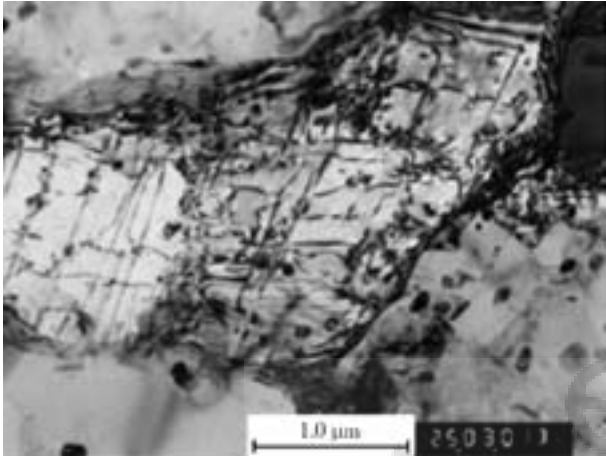
διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικές διευθύνσεις σε σχέση με αυτή της ελάσεως, όπου η αντοχή και η ολκιμότητα λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους. Για να απαλύνουμε τη σκληρότητα και να επαναφέρουμε την ισοτροπία συμπεριφορά στο κράμα, κάνουμε θερμική κατεργασία ανακρυσταλλώσεως. Έτσι σχηματίζονται νέοι κόκκοι και οι παλαιοί ανακρυσταλλώνονται (σχ. 4.3δ).

Στο σχήμα 4.3ε διακρίνονται διαταραχές (ατα-

ξίες) μετά από παρατήρηση κράματος αλουμινίου 3003 μετά από ανόπτηση διαλυτοποίησης (solution annealing) στους 630°C για 2 ώρες, ψυχρηλασία μέχρι 70%, παραμόρφωση ($\epsilon = 0,7$) και ανόπτηση στους 370°C για 11 ώρες.

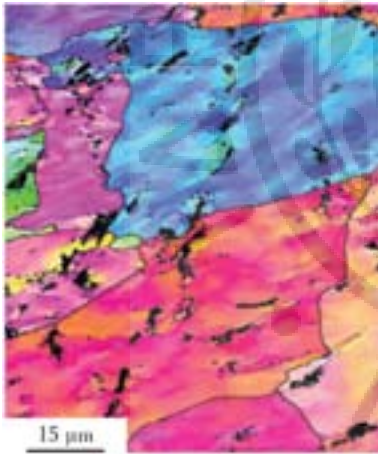
Η ανακρυσταλλωμένη μικροδομή με απουσία διαταραχών και παραμορφώσεως γίνεται ευδιάκριτη στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως (Scanning Electron Microscopy – SEM) με χρήση της τεχνικής

EBS (Electron BackScatter Diffraction). Χαρακτηριστικό παράδειγμα διακρίνεται στο σχήμα 4.3στ.



Σχ. 4.3ε

Αλουμίνιο, μικροδομή του κράματος 3003 στο TEM μετά από ανόπτιση διαλυτοποίησης (solution annealing) στους 630°C για 2 ώρες, ψυκρηλασία μέχρι $\epsilon=0,7$ και ανόπτιση στους 370°C για 11 ώρες.



Σχ. 4.3στ

Αλουμίνιο, ανακρυσταλλωμένο, εικόνα EBSD.

4.4 Το μαγνήσιο και τα κράματά του.

Το μαγνήσιο ανήκει στα ελαφρά μη σιδηρούχα μέταλλα. Με ειδικό βάρος $1,74 \text{ g/cm}^3$, όταν είναι 99,80% καθαρό, είναι σημαντικά πιο ελαφρύ (1,5 φορά ελαφρύτερο) από το αλουμίνιο (ειδικό βάρος $2,70 \text{ g/cm}^3$) και 4,3 φορές ελαφρύτερο από τον χάλυβα (ειδικό βάρος $7,50 \text{ g/cm}^3$). Τα κράματα του μαγνησίου εξαιτίας του μικρού ειδικού βάρους και των καλών μηχανικών τους ιδιοτήτων, χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική για κυτά και σφυρήλατα εξαρτή-

ματα (σώματα κινητήρων, πυξίδες λιπάνσεως, συστήματα προσγειώσεως κ.ά.), καθώς και για αποθήκες καυσίμων. Επίσης, βρίσκουν χρήσεις και σε μορφοποιημένα τεμάχια του σκελετού των αεροσκαφών. Πρόσφατα, ελάσματα μαγνησίου άρχισαν να βρίσκουν τη θέση τους στο σασί των αυτοκινήτων. Μέχρι πρότινος στην αυτοκινητοβιομηχανία, ιδιαίτερα στα αγωνιστικά αυτοκίνητα, χρησιμοποιούνταν κυτά μέρη για ζάντες και βάσεις καθισμάτων, σε κιβώτια ταχυτήτων, σε καλύμματα συμπλέκτη και παρεμφερή εξαρτήματα. Ακόμη, χρησιμοποιούνται για μεταλλικά καθίσματα, γραφομηχανές, φωτογραφικές μηχανές κ.ά.. Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζονται σύγχρονες χρήσεις του Mg στην αυτοκινητοβιομηχανία.

4.4.1 Το μαγνήσιο (Mg).

Το καθαρό μαγνήσιο τήκεται στους 650°C. Αποκτά σημαντική πλαστικότητα μεταξύ 300°C και 500°C, ιδιαίτερα όταν περιέχει ζιρκόνιο (Zr). Δεν διαμορφώνεται εν ψυχρώ, αφού ανήκει στο εξαγωνικό σύστημα υψηλής πυκνότητας (hexagonal closed packed). Έχει μεγάλη συγγένεια με το οξυγόνο. Όταν θερμανθεί στον αέρα στους 800°C καίγεται με εκτυφλωτική λάμψη. Γι' αυτό και χρησιμοποιείται για την παραγωγή φωτός κατά τη λήψη φωτογραφιών (flash).

Το καθαρό μαγνήσιο έχει πολύ χαμηλές μηχανικές ιδιότητες και γι' αυτό είναι ακατάλληλο για κατασκευές. Επίσης, παρουσιάζει ασημαντη αντοχή στη διάβρωση εξαιτίας της συνάφειάς του με το οξυγόνο. Οι μηχανικές του όμως ιδιότητες βελτιώνονται με προσθήκες και στη συνέχεια με ψυκρηλασία ή κατάλληλη θερμική κατεργασία. Επί πλέον, με κατάλληλες προσθήκες μπορεί να βελτιωθεί σχετικά και η αντοχή του σε διάβρωση. Οι κύριες προσθήκες, τόσο για τα μαλακά, όσο και για τα χυτευτικά κράματα του μαγνησίου είναι το αλουμίνιο, ο ψευδάργυρος, το ζιρκόνιο και το μαγγάνιο.

Πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι η χύτευση των κραμάτων του μαγνησίου παρουσιάζει δυσκολίες, γιατί το κράμα διατρέχει τον κίνδυνο να αναφλεγεί, όταν μάλιστα υπερθερμανθεί. Γι' αυτό λαμβάνονται ειδικά προστατευτικά μέτρα κατά τη χύτευση (π.χ. προστατευτική ατμόσφαιρα από αδρανή αέρια).

4.4.2 Τα κράματα του μαγνησίου.

1) Κράματα μαγνησίου – αργιλίου – ψευδαργύρου – μαγγανίου (Mg – Al – Zn – Mn).

Τα συγκεκριμένα κράματα περιέχουν κυρίως



Εσωτερική ενίσχυση οροφής αυτοκινήτου



Πλαίσιο πλιροφοφής



Πίνακας οργάνων σπορ αυτοκινήτου

Σχ. 4.4

Σύγχρονες χρήσεις μαγνησίου στην αυτοκινητοβιομηχανία.

3% κ.β. μέχρι 10% κ.β. αλουμίνιο και μικρότερες ποσότητες ψευδαργύρου (μέχρι 1%) και μαγγανίου (περίπου 0,3%). Το αλουμίνιο αυξάνει τη μηχανική αντοχή και τη σκληρότητα του κράματος, ενώ ο ψευδάργυρος αυξάνει την αντοχή του σε διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον. Το μαγγάνιο αυξάνει επίσης την αντοχή του κράματος σε διάβρωση και το καθιστά εύκολα συγκολλητό.

Τα κράματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως μαλακτά είτε ως χυτευτικά. Τα μαλακτά κράματα σκληρύνονται με διαμόρφωση εν ψυχρώ, ενώ τα χυτευτικά υφίστανται σκλήρυνση με κατακρήμιση

μέσω γηράνσεως, όπως ορισμένα κράματα του αλουμινίου.

Ως τυπικά κράματα Mg – Al – Zn – Mn αναφέρονται τα ακόλουθα:

1) **Μαλακτό κράμα:** Περιεκτικότητα 6% κ.β. Al, 1% κ.β. Zn, 0,3% κ.β. Mn. Μετά από διέλαση, το κράμα αποκτά: $\sigma_B = 300 \text{ MPa}$ και $A = 10\%$.

2) **Χυτευτικό κράμα:** Περιεκτικότητα 8% κ.β. Al, 0,7% κ.β. Zn 0,3% κ.β. Mn. Μετά από θερμική κατεργασία (θέρμανση σε 410°C , βαφή και τεχνητή γήρανση στους 190°C (επί 10 ώρες) το κράμα αποκτά: $\sigma_B = 220 \text{ MPa}$ και $A = 2\%$.

2) Κράματα μαγνησίου – μαγγανίου (Mg – Mn).

Περιέχουν περίπου 1,50% Mn, παρουσιάζουν καλή αντοχή σε διάβρωση και συγκολλώνται εύκολα.

3) Κράματα μαγνησίου – ψευδαργύρου – ζirkονίου (Mg – Zn – Zr).

Το ζirkόνιο (Zr) προκαλεί εκλέπτυνση των κόκκων του κράματος και, επομένως, βελτιώνει τις μηχανικές του ιδιότητες. Τα κράματα αυτού του είδους μπορεί να χρησιμοποιηθούν τόσο ως μαλακτά, όσο και ως χυτευτικά. Τα χυτευτικά μπορούν να υποστούν σκλήρυνση «εκ κατακρήμισεως διά γηράνσεως». Προσθήκη και θορίου (Th) περίπου 3% αυξάνει την αντοχή του κράματος σε ερπυσμό. Παρακάτω παρουσιάζονται τυπικά κράματα Mg – Zn – Zr.

1) **Μαλακτό κράμα:** Περιεκτικότητα 3% κ.β. Zn, 0,70% κ.β. Zr. Μετά από διέλαση παρουσιάζει: $\sigma_B = 320 \text{ MPa}$ και $A = 8\%$.

2) **Χυτευτικό κράμα:** Περιεκτικότητα 4,5% κ.β. Zn, 0,7% κ.β. Zr. Μετά από θερμική κατεργασία (τεχνητή γήρανση σε 170°C επί 12 ώρες χωρίς προηγούμενη βαφή), αποκτά: $\sigma_B = 270 \text{ MPa}$ και $A = 9\%$.

Σήμερα, εκτός των χυτών μερών από Mg, τα λεπτά ελάσματα αποκτούν ιδιαίτερη σημασία και χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα αυτοκίνητα. Κυρίως χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα κράματα Mg: AZ31, AZ61, AZ91D, AM50 και AM60.

4.5 Ο ψευδάργυρος και τα κράματά του.

4.5.1 Ο ψευδάργυρος (Zn).

Είναι μέταλλο λευκού χρώματος. Έχει ειδικό βάρος $7,14 \text{ g/cm}^3$, αντίστοιχο με αυτό του σιδήρου, και σχετικά χαμηλό σημείο τήξεως $419,5^\circ\text{C}$, χαμηλότερο του μαγνησίου και του αλουμινίου. Μάλιστα το σημείο βρασμού του είναι στους 910°C . Διαθέτει και

αυτό, όπως και το μαγνήσιο, εξαγωνική δομή υψηλής πυκνότητας. Στη συνηθισμένη θερμοκρασία είναι εύθραυστος, όπως επίσης και σε θερμοκρασία ανώτερη των 210°C. Όταν θερμανθεί στους 100°C μέχρι 150°C, αποκτά πλαστικότητα. Δεν οξειδώνεται στον αέρα ούτε στο νερό. Επομένως, εξαιτίας αυτής της ιδιότητας, χρησιμοποιείται για την **επιψευδαργύρωση** ελασμάτων (λαμαρινών) χάλυβα, τα οποία σε αυτήν την περίπτωση ονομάζονται **γαλβανοσιμενά**.

Μετά από χύτευση ο ψευδάργυρος παρουσιάζει:

$$\sigma_B = 60 \text{ MPa}$$

$$\sigma_B = 220 \text{ MPa} \text{ μετά από ψυχρηλασία.}$$

Οι κυριότερες χρήσεις του μαγνησίου είναι οι ακόλουθες:

- 1) Για **γαλβάνισμα** (galvanizing) (55%).
- 2) Για **κραμάτωση** (alloying) (21%).
- 3) Για **ορείχαλκους** και **μπρούντζους** (brass and bronze) (16%).
- 4) Για λοιπές (π.χ. αποξείδωση χάλυβα) (8%).

4.5.2 Τα κράματα του ψευδαργύρου.

Τα κράματα του ψευδαργύρου χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στη βιομηχανία, κυρίως ως χυτά εξαρτήματα μετά από χύτευση υπό πίεση. Βασικά περιέχουν περίπου 4% κ.β. αλουμίνιο, που προσδίδει στο κράμα καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και ευκολία χυτεύσεως. Επίσης, μπορεί να περιέχουν και χαλκό (μέχρι 2,50%), που διευκολύνει τη χύτευση του κράματος και του δίνει καλή κατεργασιμότητα.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συνηθέστερα κράματα ψευδαργύρου:

- 1) Περιεκτικότητα 4% κ.β. Al, 0,04% κ.β. Mg. Παρουσιάζει $\sigma_B = 290 \text{ MPa}$ και $A = 13\%$.
- 2) Περιεκτικότητα 4% κ.β. Al, 0,04% κ.β. Mg και 1% κ.β. Cu. Παρουσιάζει $\sigma_B = 34 \text{ MPa}$ και $A = 8,5\%$.

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι αυτά τα κράματα, μετά τη χύτευση, υφίστανται μικρή συστολή, που συμπληρώνεται συνήθως μέσα σε πέντε περίπου εβδομάδες. Αυτό το χρονικό διάστημα μπορεί να ελαττωθεί με θέρμανση του κράματος. Έτσι, θέρμανση σε 100°C το περιορίζει σε 6 ώρες, ενώ θέρμανση σε 150°C σε 3 ώρες.

Πρέπει να τονίσουμε ότι, ακόμα και ελάχιστες ποσότητες κασσιτέρου (πάνω από 0,001%), μόλυβδου (πάνω από 0,003%) και καδμίου (πάνω από 0,003%), είναι καταστρεπτικές για το κράμα.

4.6 Ο μόλυβδος και τα κράματά του.

4.6.1 Ο μόλυβδος (Pb).

Ο μόλυβδος έχει χρώμα φαιό (γκρίζο). Το ειδικό του βάρος είναι 11,34 g/cm³, μεγαλύτερο και από το ειδικό βάρος του σιδήρου. Έχει σημείο τήξεως 327°C, χαμηλότερο και από αυτό του ψευδαργύρου. Γι' αυτό είναι εξαιρετικά εύτηκτο μέταλλο. Έχει εξαιρετική πλαστικότητα και, επομένως, διαμορφώνεται εύκολα. Η μηχανική του αντοχή είναι πολύ μικρή, χαρακτηρίζεται όμως από σημαντική αντοχή σε διάβρωση.

Ο μόλυβδος χρησιμοποιείται πολύ για την κατασκευή σχαρών πλακών συσσωρευτών, σωλήνων νερού, ελασμάτων στεγανοποίησης οροφής, βολίδων φυσιογίων φορητών όπλων και για την επένδυση των υπογείων και υποβρυχίων καλωδίων. Χρησιμοποιείται, επίσης, στη χημική βιομηχανία και αποθήκευση και μεταφορά διαβρωτικών υγρών, όπως στη βιομηχανία του θειϊκού οξέος. Τέλος, ο μόλυβδος έχει εφαρμογή στην προστασία από την ακτινοβολία X και γ (ατομική ενέργεια, ιατρική).

Σημειώνεται ωστόσο ότι οι σωληνώσεις νερού από μόλυβδο έχουν απαγορευτεί εξαιτίας της τοξικότητας του μετάλλου και της επικινδυνότητάς του για την ανθρώπινη υγεία.

4.6.2 Τα κράματα του μόλυβδου.

1) Κράματα μόλυβδου – αντιμονίου (Pb – Sb).

Κράματα μόλυβδου με περιεκτικότητα αντιμονίου 7% κ.β. – 12% κ.β. χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σχαρών πλακών συσσωρευτών.

Για την αύξηση της αντοχής των μολυβδίνων περιβλημάτων των υπογείων καλωδίων και των επενδύσεων δοχείων και δεξαμενών της χημικής βιομηχανίας διαβρωτικών υγρών προστίθεται αντιμόνιο σε μικρή ποσότητα.

2) Κράματα μόλυβδου – κασσιτέρου (Pb – Sn).

Προσθήκη 20% κ.β. μέχρι 50% κ.β. κασσιτέρου στον μόλυβδο μάς δίνει κράματα χαμηλού σημείου τήξεως, τις γνωστές μας κολλήσεις, που έχουν εκτεταμένη χρήση. Συνιστάται ως το καλύτερο και οικονομικότερο κράμα κολλήσεως εκείνο που περιέχει 35% κ.β. κασσίτερο.

3) Κράματα μόλυβδου – αντιμονίου – κασσιτέρου (Pb – Sb – Sn) ή τυπογραφικά κράματα.

Χαρακτηρίζονται από χαμηλό σημείο τήξεως, εύκολη και καλή χύτευση (αποδίδονται τελείως όλες οι

λεπτομέρειες των τυπογραφικών στοιχείων) και καλή αντοχή σε φθορά.

Παρακάτω αναφέρομε αντιπροσωπευτικά τυπογραφικά κράματα, τα οποία χρησιμοποιούνταν παλαιότερα στην τυπογραφία:

10% κ.β. μέχρι 13% κ.β. Sb και 2% κ.β. – 4% κ.β. Sn για λιντυπία 14% κ.β. μέχρι 19% κ.β. Sb και 7% κ.β. μέχρι 10% κ.β. Sn για μονοτυπία 14% κ.β. μέχρι 17% κ.β. Sb και 3% κ.β. μέχρι 10% κ.β. Sn για στερεοτυπία.

4.7 Το νικέλιο και τα κράματά του.

4.7.1 Το νικέλιο (Ni).

Είναι μέταλλο λευκό προς το φαιό (γκρίζο) και σκληρό, αλλά ελατό. Έχει ειδικό βάρος $8,9 \text{ g/cm}^3$ και σημείο τήξεως 1450°C . Στον αέρα παραμένει σταθερό, δεν οξειδώνεται. Γι' αυτό χρησιμοποιείται για επικάλυψη μεταλλικών επιφανειών. Αυτή η εργασία γίνεται ηλεκτρολυτικά και ονομάζεται **επινικέλωση**. Πριν από την επινικέλωση σιδηρών ή χαλυβδίνων επιφανειών απαιτείται **επιχάλκωση** των τεμαχίων. Το νικέλιο που χρησιμοποιείται στο εμπόριο έχει καθαρότητα περίπου 99,5% και περιέχει ελάχιστες ποσότητες χαλκού, σιδήρου, μαγγανίου, άνθρακα και θείου.

Το νικέλιο παρουσιάζει καλό συνδυασμό μηχανικών ιδιοτήτων και αντοχή σε διάβρωση.

Ως τυπικές μηχανικές ιδιότητες του νικελίου με μορφή ελασμάτων αναφέρομε τις εξής:

α) Μετά από ψυχρηλασία και ανόπηση: $\sigma_B = 350$ μέχρι 570 MPa, $A = 35\%$ μέχρι 50% και σκληρότητα από 90 μέχρι 120 Brinell.

β) Μετά από ψυχρηλασία (σκληρό): $\sigma_B = 640$ μέχρι 700 MPa, $A = 8\%$ μέχρι 12% και σκληρότητα από 180 έως 210 Brinell.

Το νικέλιο χρησιμοποιείται πάρα πολύ στη χημική βιομηχανία λόγω της αντοχής του σε διάβρωση, ιδιαίτερα για τα αλκάλια. Επίσης, στη βιομηχανία των τροφίμων, καθώς δεν παρουσιάζει τοξικότητα. Το νικέλιο ως προσθήκη βρίσκει εφαρμογή στους νικελιούχους χάλυβες, στους νικελιοχρωμιούχους χάλυβες, σε ορισμένα μη σιδηρούχα κράματα, καθώς και στα πολύ χρήσιμα ειδικά κράματά του, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

4.7.2 Τα κράματα του νικελίου.

1) Κράματα νικελίου – χαλκού (Ni – Cu) ή Μονέλ (monel).

Περιέχουν χονδρικά 2/3 νικελίου και 1/3 χαλκού

και μικρές ποσότητες μαγγανίου, σιδήρου, πυριτίου και άνθρακα. Εμφανίζουν καλή αντοχή σε διάβρωση στο νερό, στην άλμη, στα αλκάλια, στον υπέρθερμο ατμό και σε άλλα.

Οι καλές του μηχανικές ιδιότητες διατηρούνται και σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τυπικό κράμα νικελίου – χαλκού έχει: 67% κ.β. Ni, 30% κ.β. Cu, 1% Mn, 1,4% κ.β. Fe, 0,11% κ.β. Si και 0,15% κ.β. C. Οι μηχανικές του ιδιότητες έχουν ως εξής:

1) Έλασμα ανοπτημένο: $\sigma_B = 500 \text{ MPa}$, $A = 36\%$, $\rho = 220 \text{ Nm/cm}^2$ και σκληρότητα 120 Brinell.

2) Έλασμα σκληρό: $\sigma_B = 720 \text{ MPa}$, $A = 20\%$, $\rho = 170 \text{ Nm/cm}^2$ και σκληρότητα 185 Brinell.

Το Μονέλ χρησιμοποιείται ως μαλακό και ως χυτευτικό κράμα.

Βρίσκει εφαρμογές σε άξονες και πτερωτές αντλιών, βελόνες ακροφυσίων υδροστροβίλων, καθώς και σε πτερύγια στροβίλων. Προσθήκη 2% μέχρι 4% αργιλίου δίνει στο Μονέλ βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες μετά από θερμική κατεργασία. Το κράμα σε αυτήν την περίπτωση σκληρύνεται με κατακρήμιση μέσω γηράνσεως, ενώ διατηρεί τις καλές του αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Είναι γνωστό σαν **Μονέλ Κ**. Βάφεται από 950°C μέχρι 1100°C και μετά υφίσταται τεχνητή γήρανση σε 590°C επί 16 περίπου ώρες.

Παρακάτω αναφέρομε μεσαίες μηχανικές ιδιότητες του Μονέλ Κ μετά από ψυχρηλασία και θερμική κατεργασία: $\sigma_B = 960$ μέχρι 1180 MPa, $A = 30\%$ μέχρι 15% και σκληρότητα 280 μέχρι 340 Brinell. Χρησιμοποιείται για άξονες ελίκων πλοίων, όργανα πίεσεως κ.ά..

2) Πυρίμαχα κράματα με βάση το νικέλιο και το χρώμιο.

1) Το **Ινκονέλ** (inconel) περιέχει εκτός από νικέλιο, 14% Cr και 6% Fe. Συνδυάζει εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση και καλές μηχανικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιείται πάρα πολύ στη χημική βιομηχανία (μηχανήματα επεξεργασίας τροφίμων) για σωλήνες καυσαερίων αεριοστροβίλων, σε προστατευτικά καλύμματα θερμοηλεκτρικών ζευγών, θερμοηλεκτρικών στοιχείων ηλεκτρικών θερμοστρονών και κλιβάνων κ.ά..

2) Το κράμα **Χαστελλόν** (hastelloy C) περιέχει: 35% Ni, 15% Cr, 17% Mo, 5% W και 5% Fe, και παρουσιάζει αντοχή σε νιτρικό και φωσφορικό οξύ, όπως επίσης και σε οξειδωτική ατμόσφαιρα μέχρι 1.000°C . Το Χαστελλόν Χ με 47% κ.β. Ni, 22% κ.β. Cr, 18% κ.β. Fe, 9% κ.β. Mo και 1% κ.β. W δια-

τηρεί καλή μηχανική αντοχή, καθώς και αντοχή σε διάβρωση μέχρι 1200°C. Γι' αυτό, χρησιμοποιείται για τμήματα και εξαρτήματα κλιβάνων και μηχανών αεριοθήσεως (τζετ).

3) Η σειρά των κραμάτων **Νιμόνικ** (nimonic), που συνέβαλαν πολύ στην κατασκευή των μηχανών αεριοθήσεως, περιλαμβάνει κράματα κατά κύριο λόγο νικελίου-χρωμίου με καλή αντοχή σε ερπυσμό, σε κόπωση και σε διάβρωση σε υψηλές θερμοκρασίες, χάρη σε προσμείξεις τιτανίου, αργιλίου, κοβαλτίου, ζirkονίου, σιδήρου και άνθρακα.

α) Το **Νιμόνικ 75** λοιπόν περιέχει: 20% κ.β. Cr, 0,2% κ.β. μέχρι 0,6% κ.β. Ti, 2,5% κ.β. Fe και 0,1% κ.β. C. Αποτελεί βασικό κράμα για την κατασκευή φλογοσωλήνων αεριοστροβίλων.

β) Το **Νιμόνικ 80 A** περιέχει: 20% κ.β. Cr, 2,2% κ.β. Ti, 1,5% κ.β. Fe, 1,4% κ.β. Al και 0,05% κ.β. C. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή δίσκων και περυγίων αεριοστροβίλων. Υφίσταται σκλήρυνση «εκ κατακρημνίσεως διά γήρανσεως» μετά από βαφή στον αέρα από 1080°C και τεχνητή γήρανση επί 16 ώρες σε 700°C και απόψυξη στον αέρα.

γ) Το **Νιμόνικ 90** περιέχει: 20% κ.β. Cr, 2,5% κ.β. Ti, 1,5% κ.β. Fe, 1,4% κ.β. Al, 18% κ.β. Co και 0,06% κ.β. C. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι θερμοκρασία 870°C.

δ) Τέλος, το νεότερο **Νιμόνικ 115** περιέχει: 15% κ.β. Cr, 4% κ.β. Ti, 0,5% κ.β. Fe, 5% κ.β. Al, 15% κ.β. Co και 0,10% κ.β. C. Παρουσιάζει τις πιο βελτιωμένες ιδιότητες της σειράς των κραμάτων Νιμόνικ σε υψηλές θερμοκρασίες.

4) Τα κράματα **ηλεκτρικών αντιστάσεων** έχουν την τυπική χημική σύνθεση: 80% κ.β. Ni και 20% κ.β. Cr. Συνδυάζουν υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και αντοχή στη διάβρωση σε θερμοκρασίες λειτουργίας από 1150°C μέχρι 1250°C. Επίσης αναφέρομε εδώ και το κράμα: 65% κ.β. Ni, 15% κ.β. Cr και 20% κ.β. Fe, που χρησιμοποιείται για ηλεκτρικές αντιστάσεις σε θερμοκρασίες λειτουργίας μέχρι 950°C.

4.8 Υπερκράματα.

Τα **υπερκράματα** (superalloys) βασίζονται στο νικέλιο ή στον συνδυασμό νικελίου-σιδήρου ή/και στο κοβάλτιο. Παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές αντοχές και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και περιορισμένη φθορά και υποβάθμιση της επιφάνειάς τους, ακόμα και έντονες συνθήκες λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται σε τουρμπίνες αεροσκαφών, σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας (π.χ. σε εργοστά-

σια καύσεως ορυκτών πρώτων υλών –λιγνίτη/λιθάνθρακα, φυσικού αερίου– και πυρηνικών ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών), καθώς και σε εφαρμογές σε εξαιρετικά διαβρωτικές συνθήκες. Η εξαιρετική αντοχή των υπερκραμάτων νικελίου ακόμα και σε έκθεση σε θερμοκρασίες, οι οποίες αγγίζουν και το 80% του σημείου τήξεώς τους, ανεβάζουν τα κράματα αυτά στην κορυφή της επιλογής υλικών για χρήσεις σε εξαιρετικά αντίξοες συνθήκες.

Στις τουρμπίνες αεροσκαφών, στα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής (υπέρθερμου ατμού) και στους πυρηνικούς σταθμούς χρησιμοποιούνται σε θαλάμους καύσεως, σε βίδες, περιβλήματα, άξονες, εξατμίσεις, λεπίδες, βάνες, καυστήρες, εναλλάκτες. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην αεροναυπηγική τα υπερκράματα νικελίου καλύπτουν το 50% του βάρους των εξελιγμένων κινητήρων των σημερινών αεροσκαφών.

Επί πλέον, χρησιμοποιούνται στην παραγωγή μετάλλων για εργαλεία θερμής επεξεργασίας και μήτρες διελάσεως ή χυτεύσεως. Χρησιμοποιούνται και για ιατρικούς σκοπούς, π.χ. στην οδοντιατρική ή σε προσθετικά μέλη. Στη χημική βιομηχανία και σε διυλιστήρια πετρελαίου αξιοποιούνται για αντλίες, βάνες, ανεμιστήρες, αγωγούς και σωληνώσεις.

Για την ισχυροποίηση των υπερκραμάτων χρησιμοποιούνται τα γνωστά από τους χάλυβες κραματικά στοιχεία, κυρίως το χρώμιο (Cr), το μολυβδαίνιο (Mo), το κοβάλτιο (Co) αλλά και το βολφράμιο (W), το ταγγάλιο (Ta), το νιόβιο (Nb). Αυτά σχηματίζουν κατακρημνίσματα, κυρίως καρβίδια του τύπου MC, M7C3, M23C6, M6C, καρβίδια-αζίδια (καρβονιτρίδια) M(CN) (Παράρτ. Α, πίν. Π.Α.8).

Τα βασιζόμενα στο κοβάλτιο υπερκράματα, σε αντίθεση με τα λοιπά υπερκράματα (νικελίου ή νικελίου-σιδήρου), δεν υπόκεινται σκλήρυνση με κατακρημνιση, παρά μόνο μέσω στερεού διαλύματος. Το κοβάλτιο κρυσταλλώνεται κάτω από τους 417°C εξαγωνικό μέγιστης πυκνότητας (HCP), ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες βρίσκεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (FCC). Επομένως, για να σταθεροποιηθούν τα υπερκράματα κοβαλτίου στην FCC δομή, κραματώνονται με νικέλιο. Έτσι, διατηρούν σταθερή FCC κρυσταλλική δομή από το σημείο στερεοποίησης ως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα υπερκράματα κοβαλτίου είναι ανώτερα στην αντίσταση στη διάβρωση κάτω από την επίδραση υψηλής θερμοκρασίας, ιδιαίτερα όταν περιέχουν σημαντικά ποσοστά χρωμίου. Είναι συγκολλησίμα και παρουσιάζουν ανώτερη αντοχή σε κόπωση σε υψηλή θερμοκρασία (thermal-fatigue). Ένα άλλο σημαντικό

πλεονέκτημά τους έναντι των λοιπών υπερκραμιμάτων είναι ότι γι' αυτά δεν απαιτείται η τήξη τους να συντελείται υπό συνθήκες κενού, όπως είναι απαραίτητο στην περίπτωση των υπερκραμιμάτων σιδήρου-νικελίου ή νικελίου, τα οποία έχουν σημαντικές περιεκτικότητες αλουμινίου και τιτανίου στη σύστασή τους.

4.9 Αντιτριβικά κράματα ή κράματα εδράνων ολισθήσεως.

Όπως είναι γνωστό, τα έδρανα είναι στοιχεία μηχανής, στα οποία σπριζονται οι άτρακτοι ή οι άξονες, οι οποίοι παραλαμβάνουν τα φορτία που τους καταπονούν. Έχομε δύο ειδών έδρανα:

1) Τα **έδρανα κυλίσεως** (ρουλεμάν), στα οποία ο τροφέας κυλίνεται πάνω σε σφαίρες ή σε άλλα κυλιόμενα σώματα, όπου αναπτύσσεται **τριβή κυλίσεως** και

2) τα **έδρανα ολισθήσεως**. Τα έδρανα αυτά έχουν συνήθως κατάλληλη επιφανειακή στρώση **αντιτριβικού κράματος**, πάνω στην οποία στρέφεται ο τροφέας. Τα έδρανα ολισθήσεως λιπαίνονται πάντοτε. Σ' αυτήν την περίπτωση εδράνων αναπτύσσεται **τριβή ολισθήσεως**. Τα έδρανα ολισθήσεως κατασκευάζονται, τις περισσότερες φορές, από διφασικά κράματα. Το αντιτριβικό κράμα φέρεται από κατάλληλο μεταλλικό χιτώνιο. Για να είναι αποτελεσματικό, θα πρέπει να έχει τις επόμενες βασικές ιδιότητες:

α) Επαρκή σκληρότητα, ώστε να αντέχει στη φθορά από τριβή.

β) Καλή μηχανική αντοχή για τα στατικά φορτία που το καταπονούν.

γ) Καλή δυσθραυστότητα και αντοχή σε κόπωση.

δ) Επαρκή πλαστικότητα, γιατί κατά τη λειτουργία παρατηρούνται παραμορφώσεις του άξονα, οι οποίες πρέπει να παραλαμβάνονται από τον τριβέα του εδράνου.

ε) Καλές ιδιότητες τήξεως και χυτεύσεως.

στ) Καλή θερμική αγωγιμότητα, ώστε η θερμότητα που παράγεται από την τριβή κατά τη λειτουργία του εδράνου να μεταδίδεται στο περιβάλλον. Έτσι μπορεί να διατηρείται η θερμοκρασία του μέσα στα επιτρεπόμενα όρια, και

ζ) αντοχή στη διάβρωση από τα χρησιμοποιούμενα λιπαντικά και μάλιστα στη θερμοκρασία λειτουργίας του εδράνου.

Οι ιδιότητες που αναφέραμε είναι αδύνατο να καλυφθούν από κράμα μίας μόνο φάσεως. Αυτό συμβαίνει γιατί τα στερεά διαλύματα είναι δύσθραυστα και μαλακά, ενώ οι μεσομεταλλικές ενώσεις είναι σκλη-

ρές αλλά εύθραυστες. Επομένως, θα πρέπει να γίνεται κάποιος συγκερασμός των πλεονεκτημάτων της μαλακής και της σκληρής φάσεως στο ίδιο κράμα.

Έτσι, το αντιτριβικό κράμα συνίσταται από σκληρά τεμαχίδια μεσομεταλλικής ενώσεως κατανεμημένα μέσα σε στερεό διάλυμα ή μερικές φορές μέσα σε ευτηκτική ή και στα δύο (σχ. 4.9). Στην πράξη, μετά από ολιγόχρονη λειτουργία, η μαλακή φάση του κράματος φθείρεται ελαφρά κάτω από το επίπεδο των τεμαχιδίων της σκληρής φάσεως, με αποτέλεσμα πρώτον μεν την ελάττωση του συντελεστή τριβής του κράματος, δεύτερον δε τη δημιουργία μικροσκοπικών σωληνώσεων, που υποβοηθούν τη ροή του λιπαντικού. Τα αντιτριβικά κράματα κατατάσσονται σε:

- 1) Κράματα με βάση τον χαλκό και σε
- 2) κράματα με βάση τον κασσίτερο ή τον μόλυβδο (λευκά μέταλλα).



Σχ. 4.9

Κρυσταλλική δομή λευκού μετάλλου κασσίτερου - αντιμονίου - χαλκού. Κύβοι μεσομεταλλικής ενώσεως αντιμονίου - κασσίτερου μέσα σε πλέγμα βελονοειδών δενδριτών ενώσεως χαλκού - κασσίτερου.

4.9.1 Αντιτριβικά κράματα με βάση τον χαλκό.

Στην παράγραφο 4.2.2 αναφέραμε κρατερώματα με 10% κ.β. – 15% κ.β. κασσίτερο, καθώς και χυτευτικά φωσφορούχα κρατερώματα με περιεκτικότητα σε κασσίτερο 10% κ.β. – 13% κ.β. και σε φωσφόρο 0,3% κ.β. μέχρι 1% κ.β., κατάλληλα για έδρανα ολισθήσεως. Αυτά τα κράματα ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις αντιτριβικού κράματος που έχομε αναφέρει, γιατί περιλαμβάνουν σκληρή μεσομεταλλική ένωση χαλκού-κασσίτερου μέσα σε μαλακό και δύσθραυστο στερεό διάλυμα χαλκού-κασσίτερου. Γενικά χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που τα φορτία είναι μεγάλα.

Ως αντιτριβικά κράματα χρησιμοποιούνται κρατερώματα με περιεκτικότητα σε μόλυβδο 10% κ.β. μέχρι 15% κ.β. ή και κράματα χαλκού - μόλυβδου με περιεκτικότητα σε μόλυβδο 25% κ.β. μέχρι 30% κ.β.. Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε φθορά από τριβή και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Έχουν εφαρμογή σε

έδρανα βάσεως στροφαλοφόρων αξόνων μηχανών αυτοκινήτων και πετρελαιομηχανών.

Επίσης, κρατέρωμα με 2,5% κ.β. Sn, 1,5% κ.β. Fe και 1,2% κ.β. Cr είναι κατάλληλο σε περιπτώσεις λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες με δυσμενείς συνθήκες φθοράς (π.χ. ως αντιτριβικό μέταλλο για οδηγούς βαλβίδων ΜΕΚ, έδρανα οδοντωτού τροχού-ατέρμονα κοκλία καταπονούμενα με μεγάλες πιέσεις κ.ά.).

Εξαιτίας του χαμηλού τους κόστους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένες περιπτώσεις και οι ορείχαλκοι σαν αντιτριβικά μέταλλα ή και σαν χιτώνια, κυρίως τριβέων από κρατερώματα. Χρησιμοποιείται συνήθως ο ορείχαλκος με 60% κ.β. Cu και 40% κ.β. Zn με προσθήκη μέχρι 1% κ.β. Al, Fe και Mg.

Τέλος, για μικρά έδρανα και δακτυλίδια, συνήθως τυποποιημένα, βρίσκουν εφαρμογή πορώδη κράματα χαλκού – κασσιτέρου, που παράγονται με μεθόδους της κωνιομεταλλουργίας.

4.9.2 Λευκά μέταλλα.

Γενικά, αυτά τα κράματα ονομάζονται **λευκά μέταλλα** από το χρώμα τους, σε αντίθεση προς τα κράματα με βάση τον χαλκό, τα οποία είναι ερυθρωπά. Οι κύριες προσμείξεις είναι το αντιμόνιο από 3% κ.β. μέχρι 10% κ.β. και ο χαλκός περίπου 3,5% κ.β.. Σε αυτά τα κράματα υπάρχουν δύο σκληρές φάσεις (σχ. 4.9), δηλαδή κύβοι μεσομεταλλικής ενώσεως αντιμονίου-κασσιτέρου και βελόνες μεσο-μεταλλικής ενώσεως χαλκού-κασσιτέρου. Επειδή είναι μαλακά, χυτεύονται σε χαλύβδινα χιτώνια και ύστερα τριβούνται στην τελική τους διάσταση. Το ίδιο συμβαίνει

και για τα λευκά μέταλλα με βάση τον μόλυβδο. Παρουσιάζουν καλή πλαστικότητα.

Τυπικά αντιτριβικά κράματα αυτού του είδους είναι τα εξής:

1) Το κράμα με 3,5% Sb και 3,5% Cu. Κύρια χρήση: ακραία έδρανα μεγάλου μεγέθους.

2) Το κράμα με 10,5% Sb και 3,5% Cu (έδρανα μηχανών αυτοκινήτων, γενικές αντιτριβικές χρήσεις).

– Λευκά μέταλλα με βάση τον μόλυβδο.

Στα αντιτριβικά αυτά κράματα, μέρος του κασσιτέρου αντικαθίσταται από μόλυβδο, που είναι φτηνότερος. Περιέχουν 10% κ.β. μέχρι 15% κ.β. κασσίτερο, 6% κ.β. μέχρι 65% κ.β. μόλυβδο και 1,5% κ.β. μέχρι 3% κ.β. χαλκό.

Χρησιμοποιούνται για πιο ήπιες συνθήκες φορτίσσης από ό,τι τα λευκά μέταλλα με βάση τον κασίτερο.

Ως τυπικά τέτοια αντιτριβικά κράματα αναφέρουμε τα εξής με:

1) 11% κ.β. Sb, 6% κ.β. Pb, 3% κ.β. Cu. Γενικής χρήσεως και για έδρανα, που φορτίζονται με υψηλά φορτία.

2) 10% κ.β. Sb, 28,5% κ.β. Pb, 1,5% κ.β. Cu. Χρησιμοποιείται για έδρανα ατμαμαξών, ΜΕΚ, γεννητριών και ηλεκτρικών κινητήρων.

3) 10% κ.β. Sb, 48,5% κ.β. Pb, 1,5% κ.β. Cu. Για τροχούς τρένων με μέση φόρτιση.

4) 15% κ.β. Sb, 63,5% κ.β. Pb, 1,5% κ.β. Cu. Εφαρμόζεται σε χαμηλότερα φορτία σε σύγκριση με τα προηγούμενα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

Κονιομεταλλουργία και σύνθετα υλικά

5.1 Κονιομεταλλουργία και σύνθετα υλικά.

Με τον όρο **κονιομεταλλουργία** (powder metallurgy – PM) αναφερόμαστε στην παραγωγή και κατεργασία μετάλλων σε μορφή σκόνης (κόνεως), τα οποία μέσω συμπίεσης ή/και πυροσυσσωματώσεώς τους (pressed and/or sintered) παίρνουν τη μορφή αντικειμένων. Με τη χρήση της μεθόδου αυτής πολλές φορές επιτυγχάνεται η παραγωγή υλικών, τα οποία δεν θα είμασταν σε θέση να παράγουμε με άλλη μέθοδο, είτε επειδή αυτά είναι δύσπηκτα είτε είναι δύσκολη η διαμόρφωσή τους. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η παραγωγή καρβιδίου του βολφραμίου (WC) σε ποσότητες άνω των 50.000 τόνων ετησίως.

Ως **σύνθετο υλικό** (composite material or composite) ορίζουμε ένα υλικό, το οποίο αποτελείται από δύο ή περισσότερα συστατικά με σημαντικά διαφορετικές φυσικές ή χημικές ιδιότητες. Τα συστατικά αυτά συνδυάζονται, για να προκύψει το νέο (σύνθετο υλικό) με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες από τα αρχικά συστατικά. Στα σύνθετα υλικά, το ένα από τα δύο τουλάχιστον μέρη που τα απαρτίζουν, καλείται **συστατικό ενισχύσεως** και προσδίδει σε αυτά βελτιωμένες ιδιότητες (π.χ. μηχανικές ιδιότητες), ενώ το δεύτερο αποτελεί τη **μήτρα** και είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας. Διακρίνονται τρεις μεγάλες κατηγορίες σύνθετων υλικών:

- 1) Τα σύνθετα υλικά με **ενίσχυση ινών** (fibrous composites),
- 2) τα σύνθετα υλικά με **ενίσχυση σωματιδίων** (particulate composites), και
- 3) τα σύνθετα υλικά σε **διαστρωματώσεις** (laminar composites).

– Γενικά περί κονιομεταλλουργίας.

Η κονιομεταλλουργία εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και αφορά στα περισσότερα μέταλλα και κράματα της σύγχρονης εποχής. Με εφαρμογές κονιομεταλλουργίας κατασκευάζεται σήμερα πληθώρα προϊόντων σε διαφορετικές μορφές και σχήματα από σιδηρούχα και μη σιδηρούχα κράματα. Η ετήσια πα-

ραγωγή σήμερα ξεπερνά τους ένα εκατομμύριο τόνους παγκοσμίως.

Στις κονιομεταλλουργικές εφαρμογές αρχικά επιλέγουμε το μείγμα των στοιχείων ή κόνεων των κραμάτων. Στη συνέχεια τα τοποθετούμε σε μία μήτρα, ώστε μετά να συμπίεστούν ή να πυροσυσσωματωθούν μέσα σε έναν φούρνο με ελεγχόμενη ατμόσφαιρα και να συνδεθούν μεταλλουργικά. Η μεγάλη ακρίβεια με την οποία παράγονται τα προϊόντα της κονιομεταλλουργίας, οδηγεί αυτά στο να διαθέτουν σχεδόν τελικό σχήμα, εξαιρετικές ιδιότητες και καλά διαστασιολογικά χαρακτηριστικά, ώστε να μην απαιτείται περαιτέρω μηχανουργική κατεργασία.

Η παραγωγή μερών με ομοιογενή δομή βοηθά τους παραγωγούς να παράγουν προϊόντα με μεγαλύτερη ακρίβεια και προβλέψιμα χαρακτηριστικά για πληθώρα χρήσεων και εφαρμογών. Επί πλέον, η κονιομεταλλουργία επιτρέπει τον ακριβή σχεδιασμό των φυσικών χαρακτηριστικών του προϊόντος, ώστε αυτό να ταιριάζει απόλυτα στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και στα λειτουργικά χαρακτηριστικά για τον σκοπό για τον οποίο προορίζεται. Έτσι, με την κονιομεταλλουργία είναι εφικτή η επίτευξη των κάτωθι:

- 1) Κατασκευαστικά μέρη με πολύπλοκα σχήματα.
- 2) Ελεγχόμενο πορώδες.
- 3) Ελεγχόμενες επιδόσεις.
- 4) Καλή λειτουργία υπό την εφαρμογή φορτίων και για την απόσβεση κραδασμών.
- 5) Ειδικές ιδιότητες, όπως σκληρότητα και αντίσταση στην τριβή.
- 6) Εξαιρετική ακρίβεια και καλή επιφανειακή τραχύτητα και όψη.
- 7) Μεγάλη σειρά τεμαχίων με εξαιρετικά μικρές ανοχές στις διαστάσεις.

5.2 Οι φάσεις της κονιομεταλλουργίας.

5.2.1 Η παραγωγή των κόνεων (σκόνης).

Το προϊόν της κονιομεταλλουργίας εξαρτάται σπ-

μαντικά από τη χημική σύνθεση και από την καθαρότητα των συστατικών του, από τα οποία παράγεται η σκόνη, καθώς επίσης και από το μέγεθος και τη μορφή των τεμαχιδίων της σκόνης. Σφαιρικά τεμαχίδια σκόνης για παράδειγμα έχουν εξαιρετικές ιδιότητες πυροσυσσωματώσεως και δίνουν ομοιογενές προϊόν. Στο μέγεθος και τη μορφή των τεμαχιδίων της σκόνης επιδρά σημαντικά η μέθοδος παραγωγής της. Παραγωγή σκόνης γίνεται με ρεύμα πεπιεσμένου αέρα, με αναγωγή οξειδίων ή με ηλεκτρόλυση αλάτων των μετάλλων.

Η περίπτωση ρεύματος πεπιεσμένου αέρα χρησιμοποιείται συνήθως για μέταλλα χαμηλού σχετικά σημείου τήξεως (π.χ. κασίτερος, μόλυβδος, ψευδάργυρος, αλουμίνιο, χαλκός). Το τηγμένο μέταλλο αναγκάζεται να περάσει από ακροφύσιο με οπή μικρής διαμέτρου. Μετά, προσβάλλεται με ρεύμα πεπιεσμένου αέρα ή αδρανούς αερίου, καταμερίζεται και ύστερα στερεοποιείται σε τεμαχίδια μικρού μεγέθους, σφαιρικού σχήματος. Αυτή η μέθοδος παραγωγής κόνεων μας δίνει μέγεθος τεμαχιδίων, που κυμαίνεται μέσα σε πλατιά όρια, πράγμα που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου.

Κατά τη μέθοδο αναγωγής οξειδίων, τα οξείδια των αντιστοιχών μετάλλων κονιοποιημένα ανάγονται με υδρογόνο ή μονοξείδιο του άνθρακα. Παράγονται σπογγώδη τεμαχίδια ανώμαλου σχήματος. Το μέγεθός τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τον χρόνο αναγωγής. Η μέθοδος με αναγωγή των οξειδίων είναι η μοναδική που εφαρμόζεται για την παραγωγή κόνεων από πυρίμαχα μέταλλα, όπως είναι το βολφράμιο και το μολυβδαίνιο. Αξιοσημείωτο είναι ότι ιδιαίτερος συμφέρε η μέθοδος αυτή για την παραγωγή κόνεων σιδήρου, νικελίου, κοβαλτίου και χαλκού.

Τέλος, η ηλεκτρόλυση των αλάτων των μετάλλων ενδείκνυται για την παραγωγή εξαιρετικά καθαρών κόνεων, ιδιαίτερα για την κατασκευή των αυτολιπαινομένων εδράνων ολισθήσεως από χαλκό. Τα τεμαχίδια της σκόνης που παράγονται είναι σπογγώδη και έχουν μορφή δενδρίτη. Έτσι διευκολύνεται η συμπίεση και η πυροσυσσωμάτωση του κράματος, γιατί κατά την πρώτη τα τεμαχίδια του κασιτέρου εγκλωβίζονται στους κλάδους των τεμαχιδίων του χαλκού, που έχουν δενδρική μορφή, ενώ κατά τη δεύτερη ο κασίτερος, καθώς τήκεται, διεισδύει περισσότερο μέσα σ' αυτά.

5.2.2 Ανάμειξη των συστατικών.

Η κανονική ανάμειξη των συστατικών του κρά-

ματος με μορφή κόνεων είναι ουσιώδης. Με αυτή επιτυγχάνεται η ομοιογένεια του προϊόντος της κονιομεταλλουργίας. Κατά την ανάμειξη προστίθεται στο μείγμα λιπαντικό, όπως παραφίνη, γλυκερίνη ή κάτι παρόμοιο, για να ελαττώσει την τριβή μεταξύ των τεμαχιδίων των κόνεων και των τοιχωμάτων της μήτρας κατά την συμπίεση. Η τριβή αυτή είναι πολύ ισχυρή, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται υψηλές ταχύτητες συμπίεσεως. Έτσι, αποφεύγεται η ταχεία φθορά της μήτρας.

5.2.3 Συμπίεση.

Η **συμπίεση**, ως φάση της κονιομεταλλουργίας, βασίζεται στην εξής αρχή: Αν μεταλλική σκόνη υποστεί αρκετά υψηλή πίεση, τότε και στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ακόμη γίνεται σύνδεση των τεμαχιδίων της σκόνης μεταξύ τους με ψυχρή συγκόλληση, ώστε να δημιουργηθεί συμπαγής μάζα. Ο βαθμός της συνδέσεως των τεμαχιδίων εξαρτάται από την επιβαλλόμενη πίεση, από την καθαρότητα της επιφάνειας των τεμαχιδίων και από το μέγεθος και το σχήμα τους. Μετά την αφαίρεση της πίεσεως παραμένουν ορισμένες κοιλότητες στο τεμάχιο, οι οποίες του προσδίδουν πορώδες ορισμένου βαθμού. Αυτό το πορώδες είναι ωφέλιμο σε ορισμένες εφαρμογές, όπως στην περίπτωση των αυτολιπαινομένων εδράνων ολισθήσεως και των μεταλλικών φίλτρων.

5.2.4 Πυροσυσσωμάτωση.

Μετά τη φάση της συμπίεσεως, το συμπίεσμα υφίσταται **πυροσυσσωμάτωση**. Η πυροσυσσωμάτωση αφορά στη θέρμανση του συμπίεσματος σε ορισμένη θερμοκρασία και για ορισμένο χρόνο ανάλογα με τα συστατικά του κονιομεταλλουργικού κράματος.

Τα αυτολιπαινόμενα έδρανα ολισθήσεως για παράδειγμα απαιτούν κατεργασία λίγων λεπτών σε 820°C, ενώ τα σκληρομέταλλα με καρβίδια απαιτούν πύρωση μέχρι δύο ωρών σε θερμοκρασία από 1350°C έως 1500°C. Για την πυροσυσσωμάτωση του βολφραμίου απαιτείται ακόμη υψηλότερη θερμοκρασία, δηλαδή περίπου 1600°C.

Με την πυροσυσσωμάτωση επιτυγχάνεται ισχυρότερη σύνδεση των τεμαχιδίων του συμπίεσματος σε σχέση με τη συμπίεση, ενώ ταυτόχρονα ελαττώνεται το πορώδες του και αυξάνεται το ειδικό του βάρος.

Οι κλίβανοι πυροσυσσωματώσεως είναι συνήθως ηλεκτρικοί. Μπορεί όμως να χρησιμοποιηθούν και κλίβανοι πετρελαίου ή αερίου. Σε περιπτώσεις

μεγάλου αριθμού τεμαχίων για πυροσυσσωμάτωση ενδείκνυται η χρησιμοποίηση κλιβάνων μεταφορικής ταινίας. Επίσης, απαιτείται αυστηρός έλεγχος της θερμοκρασίας του κλιβάνου.

Επειδή η σύνδεση των τεμαχιδίων της σκόνης μεταξύ τους εμποδίζεται από τυχόν ξένες ουσίες που επικάθηνται στην επιφάνειά τους, όπως οξειδία, πρέπει να καταβάλλεται κάθε προσπάθεια αποφυγής δημιουργίας τους. Γι' αυτόν τον λόγο, ο κλιβανός πρέπει να είναι στεγανός και να δημιουργείται μέσα σ' αυτόν προστατευτική αναγωγική ατμόσφαιρα υδρογόνου ή μονοξειδίου του άνθρακα. Η αναγωγική αυτή ατμόσφαιρα δεν επιτρέπει τη διατήρηση ή τον σχηματισμό οξειδίων στην επιφάνεια των τεμαχιδίων της σκόνης.

Το κράμα που προκύπτει μετά την πυροσυσσωμάτωση, έχει μηχανικές ιδιότητες που πλησιάζουν τις ιδιότητες του αντίστοιχου συμπαγούς κράματος, που προκύπτει με τήξη των συστατικών του.

5.2.5 Δευτερεύουσες φάσεις της κονιομεταλλουργίας.

Για πολλά προϊόντα της κονιομεταλλουργίας απαιτείται μεγάλη ακρίβεια των διαστάσεων, όπως για τα αυτολιπαινόμενα έδρανα ολισθήσεως. Η πυροσυσσωμάτωση όμως προκαλεί, όπως είναι φυσικό, μεταβολές στις διαστάσεις του τεμαχίου ή και στρέβλωση. Γι' αυτό συνήθως γίνεται **τελική κατεργασία** (κοπή, λείανση, αμμοβολή κ.ά.) του τεμαχίου, ώστε να του δοθούν οι τελικές ακριβείς του διαστάσεις.

Για εφαρμογές, στις οποίες απαιτείται μεγαλύτερη πυκνότητα του προϊόντος σε συνδυασμό με ακριβέστερες διαστάσεις, η πυροσυσσωμάτωση ακολουθείται από ψυκρηλασία γνωστή ως **ανασυμπίεση** ή **τύπωση**. Η θέρμανση για πυροσυσσωμάτωση μπορεί να διακοπεί σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία. Αυτό είναι γνωστό ως **προπυροσυσσωμάτωση**. Μετά απ' αυτήν την κατεργασία, το τεμάχιο έχει καλή κατεργασιμότητα και, έτσι, μπορεί να υποστεί τις απαιτούμενες κατεργασίες μορφοποιήσεώς του, οι οποίες δεν είναι εφικτές μετά την πυροσυσσωμάτωση εξαιτίας της μεγάλης σκληρότητας που αποκτά το τεμάχιο. Σε άλλες περιπτώσεις εκτελείται **αναπυροσυσσωμάτωση** μετά την ανασυμπίεση, με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του προϊόντος.

Στα αυτολιπαινόμενα έδρανα ολισθήσεως εκτελείται, μετά την πυροσυσσωμάτωση, ο λεγόμενος **εμποτισμός**, για να βελτιωθούν οι αντιτριβικές του ιδιότητες. Με τον εμποτισμό γεμίζουν με λιπαντικό οι πόροι του εδράνου. Ο εμποτισμός με λάδι γίνεται

με εμβάπτιση των τεμαχίων μέσα σε δοχείο με ζεστό λάδι ή με αφαίρεση του αέρα των πόρων των εδράνων μέσα σε κενό και ύστερα με συμπίεση λαδιού μέσα στους πόρους. Ως λιπαντικά για εμποτισμό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη το κερί, τα λίπη και μέταλλα ή κράματα χαμηλού σημείου τήξεως, όπως είναι ο μόλυβδος, ο κασσίτερος κ.ά..

5.3 Εφαρμογές της κονιομεταλλουργίας.

Η εξαιρετικά ακριβής παραγωγή εξαρτημάτων και προϊόντων καθιστά την κονιομεταλλουργία μια ενδιαφέρουσα μέθοδο για ειδικές εφαρμογές. Πληθώρα προϊόντων παράγονται σήμερα από διαφορετικά κράματα, όπως ανοξείδωτος χάλυβας, μπρούντζος, χαλκός, αλουμίνιο, σκληρομέταλλα, τιτάνιο, βολφράμιο (και καρβίδιο του βολφραμίου). Οι εφαρμογές ποικίλλουν απ' την αεροναυπηγική, την αυτοκινητοβιομηχανία, τη βαριά βιομηχανία (π.χ. εργαλεία κοπής), την εξορυκτική δραστηριότητα, την ιατρική, τα ιατρικά μηχανήματα, τις κατασκευές ως και την κατασκευή ειδικών εξαρτημάτων για υψηλής ακρίβειας επιστημονικά μηχανήματα, ακροφύσια διαμορφώσεως μετάλλων και πλαστικών και τον τομέα της ασφάλειας.

Η ευελιξία που υπάρχει στην παραγωγή και η ικανότητα να προσδιορίζεται με μεγάλη ακρίβεια πληθώρα ιδιοτήτων, που πολλές φορές δεν θα είχαμε τη δυνατότητα να διαθέτομε σε ένα προϊόν μείγμα συστατικών διαφορετικών ιδιοτήτων, αποτελεί σημαντικότατο πλεονέκτημα. Η αυξημένη σκληρότητα σε συνδυασμό με την απόσβεση κραδασμών αποτελούν περαιτέρω πλεονεκτήματα. Το σχήμα 5.3α παρουσιάζει ενδεικτικά διαφορετικά προϊόντα, που παράγονται με τις μεθόδους της κονιομεταλλουργίας.

5.3.1 Τα σκληρομέταλλα με καρβίδια ή απλώς σκληρομέταλλα.

Για την κοπή μετάλλων συνήθως χρησιμοποιούνται εργαλειοχάλυβες και ταχυχάλυβες. Ωστόσο, η κονιομεταλλουργία μάς δίνει και μία άλλη, τρίτη κατηγορία υλικών, κατάλληλη κυρίως για εργαλεία κοπής, αλλά και για ορισμένες μήτρες διαμορφώσεως, τα **σκληρομέταλλα**.

Τα σκληρομέταλλα, ως εργαλεία κοπής, πλεονεκτούν σημαντικά συγκριτικά με τους ταχυχάλυβες. Έτσι, με τη χρησιμοποίησή τους επιτυγχάνονται στην πράξη πολύ υψηλότερες ταχύτητες κοπής, από εκείνες των ταχυχαλύβων και, επομένως, η κοπή είναι αποδοτικότερη. Τα σκληρομέταλλα αποτελούνται συ-



Σχ. 5.3α

Ενδεικτικά προϊόντα κονιομεταλλουργίας για διαφορετικές χρήσεις υψηλής ακρίβειας (βαλβίδες, πιστόνια, γρανάζια).

νήτως από καρβίδια του βολφραμίου, του τιτανίου, του τανταλίου ή και του νιοβίου, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κοβάλτιο ή νικέλιο. Το είδος των καρβιδίων, οι αναλογίες τους και η συνδετική ύλη εκλέγονται ανάλογα με τη χρήση του σκληρομετάλλου.

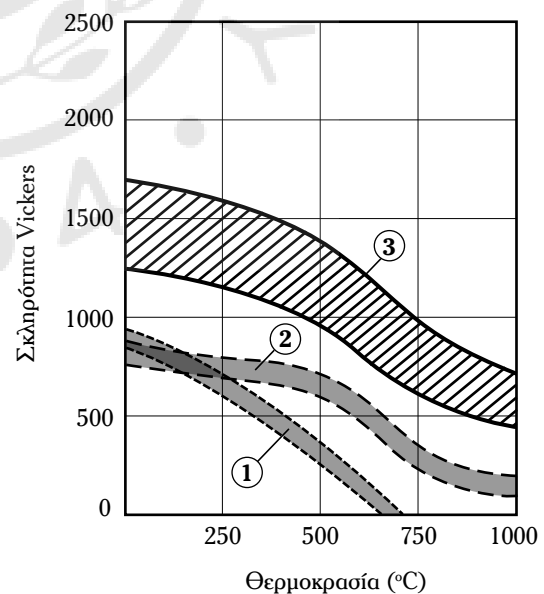
Στο σχήμα 5.3β συγκρίνονται τρία υλικά εργαλείων κοπής, δηλαδή οι κοινοί χάλυβες εργαλείων, οι ταχυχάλυβες και τα σκληρομέταλλα με κριτήριο τη σκληρότητα που παρουσιάζουν, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία κοπής. Κι αυτό, γιατί η θερμοκρασία κοπής αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας κοπής. Επομένως, το εργαλείο που διατηρεί τη σκληρότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες, θα τη διατηρεί και σε υψηλές ταχύτητες κοπής.

Από τις καμπύλες αυτές (σχ. 5.3β) παρατηρούμε ότι σε θερμοκρασία π.χ. 500°C ο κοινός χάλυβας εργαλείων κοπής παρουσιάζει σκληρότητα που κυμαίνεται από 285–420 Vickers μόνο, ο ταχυχάλυβας από 620–775 Vickers, ενώ το σκληρομέταλλο από 970–1.400 Vickers κατά προσέγγιση. Γίνεται ξεκάθαρη λοιπόν από τη σύγκριση αυτή η υπεροχή των σκληρομετάλλων ως εργαλείων κοπής.

Στο σχήμα 5.3γ παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της παραγωγής προϊόντων κονιομεταλλουργίας.

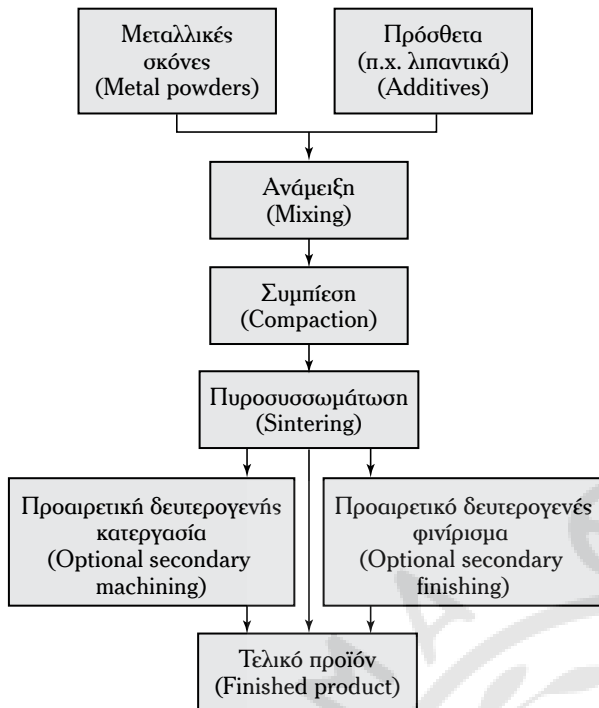
Ως παράδειγμα θα παρουσιάσουμε επιγραμματικά τις φάσεις παραγωγής σκληρομετάλλων με καρβίδιο του βολφραμίου και με κοβάλτιο ως συνδετική ύλη. Αρχικά παίρνουμε μεταλλικές σκόνες του βολφραμίου και του κοβαλτίου με θέρμανση και αναγωγή

οξειδίου του βολφραμίου και οξειδίου του κοβαλτίου, αντίστοιχα, σε ρεύμα υδρογόνου. Η σκόνη του βολφραμίου ανακατεύεται με αιθάλη στην αναλογία που χρειάζεται, για να δώσουν μαζί καρβίδιο του βολφραμίου, το οποίο και λαμβάνουμε μετά από θέρμανση δύο ωρών σε ουδέτερη ατμόσφαιρα. Ύστε-



Σχ. 5.3β

Καμπύλες σκληρότητας - θερμοκρασίας για διάφορα υλικά εργαλείων κοπής: (1) Κοινοί χάλυβες εργαλείων, (2) Ταχυχάλυβες, (3) Σκληρομέταλλα.



Σχ. 5.3γ

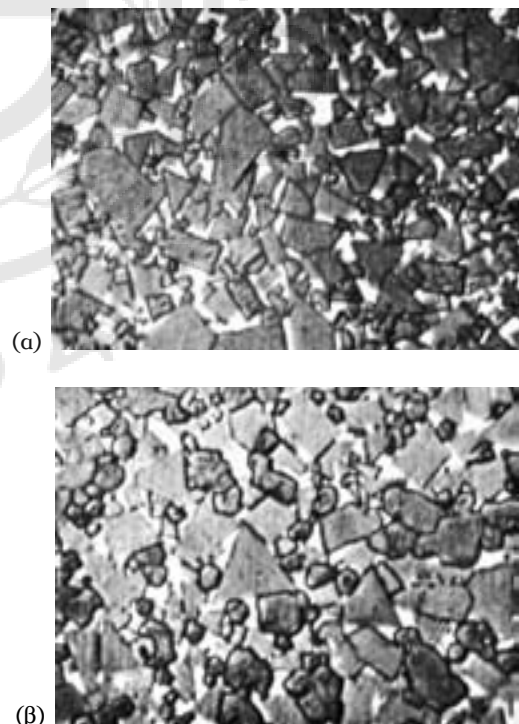
Διάγραμμα ροής της παραγωγής προϊόντων
κονιομεταλλουργίας.

ρα, το καρβίδιο του βολφραμίου λειοτριβείται, ώστε τα τεμαχίδια της σκόνης που προκύπτουν να έχουν μέγεθος 20 μm περίπου. Η σκόνη του καρβιδίου του βολφραμίου ανακατεύεται κατόπιν με τη σκόνη του κοβαλτίου. Σ' αυτό το μείγμα προστίθεται και μικρή ποσότητα γλυκερίνης, που υποβοηθά τη συμπίεσή του. Η συμπίεση του μείγματος, μετά από ξήρανση, γίνεται σε μήτρες από κατάλληλο χάλυβα εργαλείων και κάτω από πίεση 180 – 450 N/mm². Το συμπιεσμένο που προκύπτει αποτελεί τα 2/3 του αρχικού όγκου του μείγματος.

Ακολουθεί προπυροσυσσωμάτωση σε 850°C – 1000°C σε ατμόσφαιρα υδρογόνου. Το προϊόν που λαμβάνεται κατά τη φάση αυτή είναι αρκετά ανθεκτικό, ώστε να υποστεί κατεργασία σε εργαλειομηχανές και να πάρει τη μορφή που χρειάζεται. Κατά την κατεργασία αυτή δίνουμε τις αναγκαίες ανοχές των διαστάσεων του τεμαχίου, αφού λάβουμε υπόψη μας τις μεταβολές των διαστάσεων που θα προκύψουν μετά την πυροσυσσωμάτωση. Η πυροσυσσωμάτωση γίνεται σε ηλεκτρικό κλίβανο, κυλινδρικής μορφής συνήθως, μέσα απ' τον οποίο εμφυσάται ξηρό υδρογόνο. Ο χρόνος της πυροσυσσωμάτωσης ανέρχεται σε 90 min περίπου και η θερμοκρασία της κυμαίνεται από 1350°C – 1500°C. Μετά την πυροσυσσωμάτωση τα τεμαχία αφήνονται να αποψυχθούν ήρεμα μέχρι

τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Τελικά, τα σκληρομέταλλα υφίστανται κατεργασία αποπερατώσεως με λείανση ή υπερλείανση, αν είναι απαραίτητο, και είναι έτοιμα για το εμπόριο. Η κρυσταλλική δομή σκληρομετάλλων εικονίζεται στο σχήμα 5.3δ.

Ο πίνακας Π.Α.9 του Παραρτήματος Α παρουσιάζει χαρακτηριστικές ιδιότητες των σκληρομετάλλων. Σύμφωνα με την τυποποίηση κατά DIN 4990, τα σκληρομέταλλα ως εργαλεία κοπής κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, που συμβολίζονται με τα γράμματα P, M και K, και που έχουν ως διακριτικό χρώμα το γαλάζιο (κυανούν), το κίτρινο και το ερυθρό αντίστοιχα. Τα σκληρομέταλλα της κατηγορίας P χρησιμοποιούνται για την κατεργασία κυρίως χαλύβων και χυτοχαλύβων. Τα σκληρομέταλλα της κατηγορίας M χρησιμοποιούνται για την κατεργασία χαλύβων, χυτοχαλύβων, ωστενιτικών χαλυβοκραμάτων, ειδικών χυτοσιδήρων, μαλακτικοποιημένων χυτοσιδήρων και χυτοσιδήρου σφαιροειδούς γραφίτη. Τέλος, τα σκληρομέταλλα της κατηγορίας K χρησιμοποιούνται για την κατεργασία φαιού χυτοσιδήρου, μαλακτικοποιημένων χυτοσιδήρων, βαμμένων χαλύβων, μη σιδηρούχων μετάλλων και κραμάτων, πλαστικών και ξύλου. Οι ποιότητες των σκληρομετάλλων κάθε



Σχ. 5.3δ

Μικροδομές σκληρομετάλλων. Μεγέθυνση ×1500.
(α) Καρβίδιο του βολφραμίου-κοβαλτίου. (β) Καρβίδιο του βολφραμίου, καρβίδια των τανιαλίου, πιανίου-κοβαλτίου.

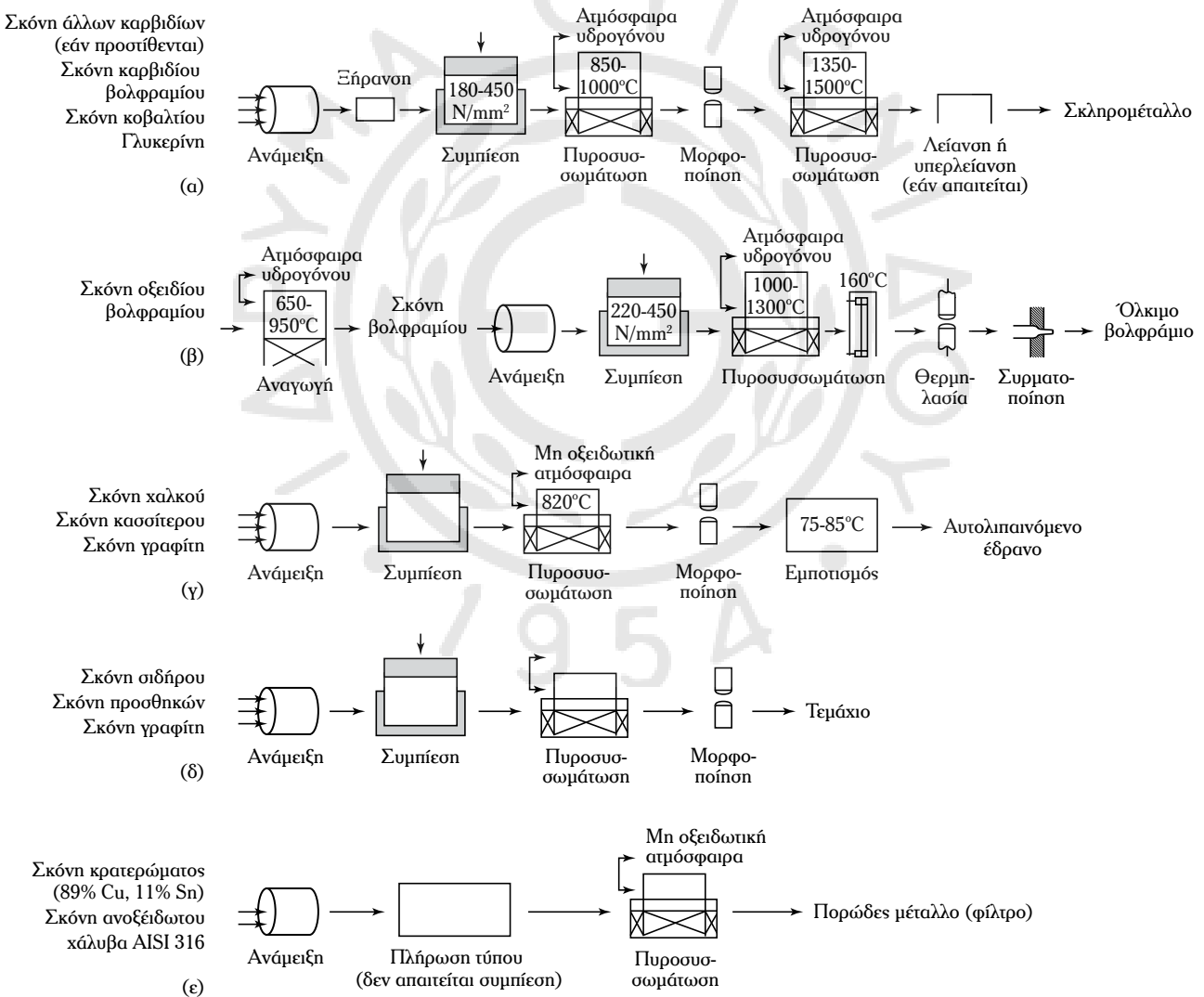
κατηγορίας χαρακτηρίζονται από τους διψήφιους αριθμούς (αριθμούς ποιότητας) 01, 10, 20, 25, 30, 40, 50 για την κατηγορία P, από τους 10, 20, 30 για την κατηγορία M και από τους 01, 05, 10, 20, 30, 40 για την κατηγορία K. Ελάττωση αυτών των αριθμών ποιότητας από 50 σε 01 (κατηγορία P), από 30 σε 10 (κατηγορία M) και από 40 σε 01 (κατηγορία K) σημαίνει αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής σε φθορά του σκληρομετάλλου (αύξηση της ταχύτητας κοπής) και μείωση της δυσθραυστότητάς του. Αντίθετα, αύξηση των αριθμών ποιότητας σημαίνει αύξηση της δυσθραυστότητας και μείωση της σκληρότητας και της αντοχής σε φθορά του σκληρομετάλλου.

Ο ρόλος που παίζουν οι αριθμοί ποιότητας δείχνεται παραστατικά με τα βέλη 1 και 2 (Παράρτ. Α, πίν. Π.Α.9).

5.3.2 Άλλες εφαρμογές (προϊόντα) της κονιομεταλλουργίας.

Στο σχήμα 5.3ε παριστάνονται τα στάδια που ακολουθούνται, καθώς επίσης και άλλα στοιχεία κατεργασίας για την παραγωγή τυπικών προϊόντων κονιομεταλλουργίας, εκτός των σκληρομετάλλων, των οποίων η παραγωγή περιγράφηκε λεπτομερώς στην παράγραφο 5.3.1:

1) Του πυρίμαχου μετάλλου βολφραμίου [σχ. 5.3ε(β)],



Σχ. 5.3ε

Τυπικά διαγράμματα ροής που δείχνουν τις φάσεις της κονιομεταλλουργίας κατά την παραγωγή: (α) Σκληρομετάλλου καρβιδίου του βολφραμίου-κοβαλτίου, (β) πυρίμαχου μετάλλου-βολφραμίου, (γ) αυτολιπανόμενου εδράνου ολισθήσεως χαλκού-κασσίτερου, (δ) σιδηρούχων τεμαχίων και (ε) μεταλλικών φίλτρων.

2) των αυτολιπαινομένων εδράνων χαλκού - κασιτέρου [σχ. 5.3ε(γ)],

3) των ποικίλων σιδηρούχων τεμαχίων [σχ. 5.3ε(δ)] και

4) των μεταλλικών φίλτρων [σχ. 5.3ε(ε)].

5.4 Συνθετικές ύλες (πλαστικά).

Η έλλειψη φυσικών πρώτων υλών (π.χ. το φυσικό καουτσούκ) οδήγησε στην ανάγκη αντικαταστάσεώς τους από συνθετικές. Σύντομα οδηγηθήκαμε στην παρασκευή νέων υλικών με προκαθορισμένες φυσικές και τεχνολογικές ιδιότητες, τις οποίες κατά κανόνα δεν συναντάμε στα φυσικά προϊόντα. Έτσι, δημιουργήθηκαν νέες ουσίες, οι οποίες μέρη με τη μέρη αυξάνονται. Σ' αυτές τις ουσίες δόθηκαν οι ονομασίες «συνθετικές ύλες», «ρπίνες», «πλαστικά» ή «πολυμερή». Καμία απ' αυτές τις ονομασίες δεν καλύπτει το σύνολο των προϊόντων αυτού του είδους, οι δύο όμως τελευταίες (πλαστικά ή πολυμερή) καλύπτουν τις περισσότερες τεχνητές ύλες από απόψεως χημικής συνθέσεως και τεχνολογικών ιδιοτήτων.

5.4.1 Οι συνθετικές ύλες.

Οι νέες ουσίες παράγονται από φυσικές ή συνθετικές οργανικές ενώσεις μικρού μοριακού βάρους, οι οποίες γενικά καλούνται μονομερείς ενώσεις. Παράγονται με πολυμερισμό ή πολυσυμπύκνωση ή πολυπροσθήκη των ενώσεων αυτών, γι' αυτό ονομάστηκαν **πολυμερή**. Οι μονομερείς ενώσεις, όπως γνωρίζουμε από την οργανική χημεία, είναι συνήθως υδρογονάνθρακες, οξέα, αλκοόλες, αμίνες κ.λπ.. Αυτές οι ουσίες περιέχουν στο μόριό τους διπλούς δεσμούς:



ή ορισμένες χαρακτηριστικές ομάδες όπως τις $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$ κ.λπ., οι οποίες και παρέχουν τη δυνατότητα πολυμερισμού προς σχηματισμό μεγαλομοριακών ενώσεων, δηλαδή ενώσεων με πολύ μεγάλο μοριακό βάρος.

5.4.2 Υποδιαίρεση των συνθετικών υλών.

1) Υποδιαίρεση ανάλογα με τη χημική δομή.

Οι συνθετικές ύλες, ανάλογα με τη χημική τους δομή, μπορούν να διακριθούν σε συνθετικές ύλες με βάση: φαινόλες, κρεζόλες, φορμαλδεΐδη, ουρία-φορμαλδεΐδη, παράγωγα αιθυλενίου, προπυλενίου, βουταδενίου, στυρενίου, παράγωγα οργανικών

οξέων, φυσικό και συνθετικό καουτσούκ, σιλκόνες, παράγωγα κυτταρίνης, παράγωγα πρωτεϊνών.

2) Υποδιαίρεση ανάλογα με το είδος της χημικής αντιδράσεως σχηματισμού των συνθετικών υλών.

Οι συνθετικές ύλες, ανάλογα με τον χημικό τρόπο σχηματισμού τους, υποδιαιρούνται σε συνθετικές ύλες από **πολυσυμπύκνωση**, από **πολυμερισμό** και από **πολυπροσθήκη**.

1) **Πολυσυμπύκνωση** σημαίνει σύνδεση πολλών μικρών μορίων μίας χημικής ενώσεως προς ένα πολύ μεγάλο σύμπλοκο μόριο με τη χρησιμοποίηση μορίων μίας άλλης ενώσεως ή συνδετικού κρίκου. Κατά την πολυσυμπύκνωση αποσπώνται άτομα και από τα δύο είδη των μορίων. Αυτά τα άτομα σχηματίζουν νέα χημική ένωση, η οποία εκλύεται, τις περισσότερες φορές, με τη μορφή αερίου [σχ. 5.4(α)], π.χ. νερό με μορφή υδρατμών.

2) **Πολυμερισμός** είναι η απευθείας ένωση πολλών μικρών ομοειδών μορίων προς πολύ μεγάλα μόρια. Κατά τον πολυμερισμό δεν αποσπώνται άλλες ενώσεις όπως στην πολυσυμπύκνωση. Η διαδικασία του πολυμερισμού επιτυγχάνεται με το άνοιγμα του διπλού δεσμού [σχ. 5.4(β)].

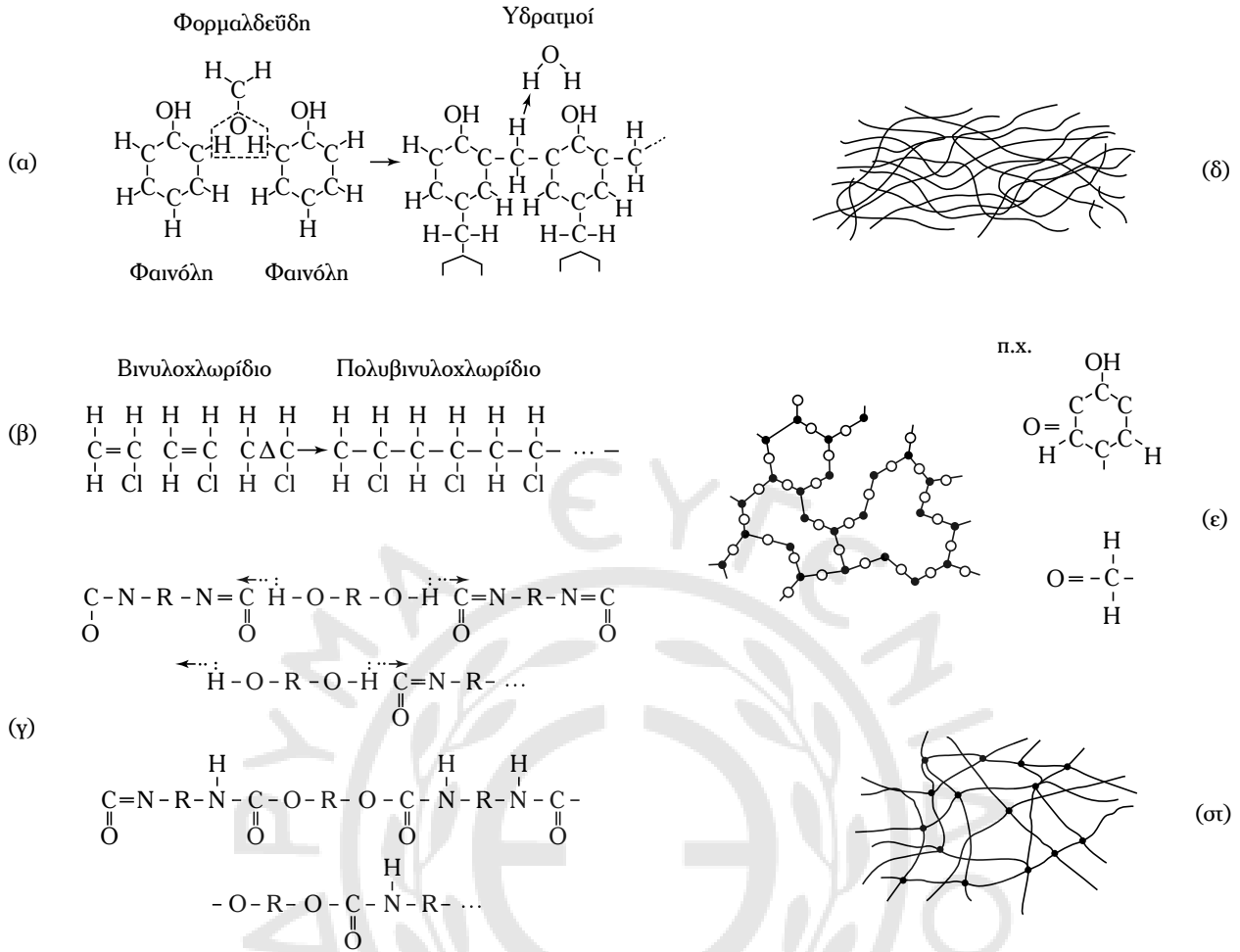
3) **Πολυπροσθήκη** είναι τρόπος χημικής αντιδράσεως, κατά τον οποίο σχηματίζονται μεγαλομοριακές ενώσεις, χωρίς όμως και εδώ να αποσπασθούν άλλες ενώσεις κατά τον σχηματισμό. Επίσης, η σύνδεση των δομικών μορίων μεταξύ τους δεν επιτυγχάνεται μόνο με το άνοιγμα των διπλών δεσμών (όπως συμβαίνει κατά τον πολυμερισμό). Βασική προϋπόθεση για να σχηματισθεί ένα μεγαλομόριο με πολυπροσθήκη, είναι η αλλαγή θέσεως ατόμων υδρογόνου με σύγχρονο άνοιγμα διπλών δεσμών. Αυτό φαίνεται σαφώς στο σχήμα 5.4(γ).

3) Υποδιαίρεση ανάλογα με την δομή του μεγαλομορίου στον χώρο.

Η υποδιαίρεση αυτή αντιστοιχεί προς την ταξινόμηση των συνθετικών υλών [σχ. 5.4(δ),(ε),(στ)] και δίνει πολύ καλή εποπτική εικόνα για όλες τις συνθετικές ύλες, γιατί οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των συνθετικών υλών οφείλονται στη διάταξη των μεγαλομορίων μέσα στον χώρο.

a) Νηματοειδή μεγαλομόρια.

Αυτά τα μόρια μπορούν να είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με τελείως ακανόνιστο τρόπο, όπως οι ίνες μίας τολύπης ερίου [σχ. 5.4(δ)] ή και να είναι εν μέρει ταξινομημένα.



Σχ. 5.4

(α) Συμπύκνωση φαινόλης και φορμαλδεΐδης προς βακελίτη, (β) Πολυμερισμός βινυλοχλωριδίου προς πολυβινυλοχλωρίδιο, (γ) Πολυπροσθήκη πολυϊσοκυανικής ενώσεως και πολυαλκοόλης προς πολουρεθάνη, (δ) Μοριακή δομή: Ακατόνιστη διάταξη νηματοειδών μορίων προκαλεί θερμοπλαστική συμπεριφορά (δομή τολύπης ερίου), (ε) Μοριακή δομή: Η σύνδεση ομάδων ατόμων προς ένα τρισδιάστατο πλέγμα δημιουργεί την τελική κατάσταση των σκληρυνόμενων συνθετικών υλών και (στ) Μοριακή δομή: Σύνδεση νηματοειδών μορίων διά γεφυρών θείου προς σχηματισμό δικτύου προκαλεί την ελαστικότητα του καουτσούκ.

Τα μόρια αυτά έχουν πάντοτε **θερμοπλαστικές** ιδιότητες, δηλαδή με θέρμανση γίνονται μαλακά και εύπλαστα, όταν δε ψυχθούν ξανά, γίνονται σκληρά.

Αυτή η ιδιότητα των μεγαλομορίων να μαλακώνουν με θέρμανση και να γίνονται σκληρά ξανά με ψύξη είναι απεριόριστη, δηλαδή τα μεγαλομόρια αυτά (σώματα) μπορούν να μαλακώνουν και να σκληραίνουν απεριόριστα.

β) Τρισδιάστατοι στερεοί σκελετοί.

Η διάταξη ατόμων προς **τρειςδιάστατους στερεούς σκελετούς** μορίων προκαλεί την κατάσταση των σκληρυνόμενων συνθετικών υλών, δηλαδή συνθετικών υλών, οι οποίες όταν θερμαίνονται γίνονται εύ-

πλαστες μέχρι ένα όριο και μπορούν να μορφοποιηθούν, αλλά με περισσότερη θέρμανση σκληραίνουν. Αφού σκληρύνουν οι συνθετικές αυτές ύλες, δεν μπορούν με νέα θέρμανση να γίνουν πάλι πλαστικές. Αν επιμείνομε να τις θερμαίνομε, μπορεί να τις απανθρακώσομε, αλλά ποτέ δεν θα τις κάνομε και πάλι εύπλαστες [σχ. 5.4(ε)].

γ) Δομή σαν πλέγμα (εν είδει πλέγματος).

Τρίτο είδος δομής του μορίου είναι η δομή σαν **πλέγμα (εν είδει πλέγματος)**, η οποία προέρχεται από τη σύνδεση μεμονωμένων θέσεων νηματοειδών μορίων. Αυτή η δομή παραμορφώνεται εύκολα, είναι όμως συνεκτική και γι' αυτό προκαλεί τη χαρακτηρι-

στική ελαστικότητα του καουτσούκ, το οποίο έχει υποστεί βουλκανισμό [σχ. 5.4(στ)].

5.4.3 Διάφορες εφαρμογές των συνθετικών υλών.

Είναι γνωστή η μεγάλη ποικιλία των εφαρμογών των πλαστικών γενικά. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότεροι τομείς εφαρμογής των πλαστικών.

1) Αρχιτεκτονική.

Σε πολλές χώρες γίνεται ήδη χρήση πλαστικών για κατασκευή ετοιμών θυρών και παραθύρων με πολύ καλύτερες ιδιότητες απ' τα συνηθισμένα ξύλινα και με ανταγωνιστικό κόστος.

2) Βιομηχανία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών.

Τα πλαστικά χρησιμοποιούνται πολύ στη βιομηχανία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών για μωνώσεις, επενδύσεις και άλλα, επειδή έχουν άριστες διηλεκτρικές και λοιπές σταθερές. Ακόμα χρησιμοποιούνται και στους ατομικούς αντιδραστήρες.

3) Οικιακές εφαρμογές.

Τα πλαστικά βρίσκουν εφαρμογές ιδιαίτερες ως εξαρτήματα ειδών οικιακού εξοπλισμού, όπως επενδύσεις επιφανειών επίπλων, ταπεταρίες, υποκατάσταση ξύλινων τεμαχίων επίπλων κ.λπ..

4) Ιατρικές εφαρμογές.

Σήμερα υπάρχει πληθώρα ιατρικών εφαρμογών, στις οποίες χρησιμοποιούνται τα πλαστικά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται για την απόφραξη αρτηριών, τα προσθετικά μέλη, τα βοηθήματα ακοής, οι κάψουλες για φάρμακα κ.ά..

5) Συσκευασία.

Η αλματώδης διάδοση των πλαστικών στη συσκευασία συνέβαλε στη διάδοση της τυποποίησης των αγαθών και ιδίως των τροφίμων, καθώς και στην εφαρμογή της συσκευασίας για τη χρήση των κατεψυγμένων τροφίμων.

6) Υφάσματα.

Από το νάιλον, τον πολυεστέρα και από τον συνδυασμό πλήθους συνθετικών και φυσικών υφανσίμων ινών παράγονται υφάσματα με καλύτερες ιδιότητες από το μετάξι και το μαλλί και με πολύ χαμηλό κόστος.

7) Παιχνίδια και σπορ.

Το χαμηλό κόστος και οι αναπτυγμένες τεχνικές μορφοποιήσεως των πλαστικών οδήγησε στη μαζική παραγωγή παιχνιδιών και ειδών σπορ (όπως ρακέτες, βτραχοπέδιλα, καλάμια ψαρέματος κ.ά.).

8) Μεταφορές.

Η διάδοση των πλαστικών στη βιομηχανία αυτοκινήτων, στην αεροναυπηγική, στη ναυπηγική και στους σιδηροδρόμους, αλλά και τα υπόλοιπα μέσα μεταφοράς επιτεύχθηκε ως αποτέλεσμα της αναπτύξεως πληθώρας εφαρμογών των πλαστικών στις μηχανολογικές κατασκευές.

5.5 Οι συνθετικές ύλες για μηχανολογικές κατασκευές.

5.5.1 Υποδιαίρεση των συνθετικών υλών, που χρησιμοποιούνται για μηχανολογικές κατασκευές.

Οι συνθετικές ύλες που χρησιμοποιούνται για μηχανολογικές κατασκευές υποδιαιρούνται σε κατηγορίες ανάλογα:

- 1) με τον σκοπό και
- 2) με τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται.

Στις κατηγορίες ανάλογα με τον σκοπό λαμβάνονται υπόψη οι διάφορες ιδιότητες που παρουσιάζουν οι συνθετικές ύλες. Επομένως, για τις συνθετικές ύλες π.χ. που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ηλεκτρικών ειδών, θεωρούνται σημαντικές οι μηχανικές τους ιδιότητες, ώστε οι συνθετικές αυτές ύλες να είναι κατάλληλες για τον σκοπό που προορίζονται.

Στις κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο χρησιμοποίησης εξετάζουμε αν οι συνθετικές ύλες χρησιμοποιούνται με μορφή καθαρής συνθετικής ύλης ή βρίσκονται σε ανάμειξη με άλλες. Είναι δυνατόν να διαποτιστούν ταινίες χαρτιού ή υφάσματος ή να επιστρωθούν πλαστικές ύλες σε καπλαμάδες οξιάς.

Επομένως, διακρίνουμε τις ακόλουθες κατηγορίες συνθετικών υλών ανάλογα με τον τρόπο χρησιμοποίησης:

- 1) Καθαρές συνθετικές ύλες.
- 2) Συνθετικές ύλες με αναμειξεις.
- 3) Συνθετικές ύλες σε στρώσεις.

5.5.2 Αναγνώριση του είδους μίας συνθετικής ύλης.

1) Από την πυκνότητα.

Από την πυκνότητα σε g/cm^3 είναι δυνατό να

αναγνωρίσoμε μία συνθετική ύλη ως εξής:

Πυκνότητα	
έως 1,0:	πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο, πολυϊσοβουτυλένιο, καουτσούκ χωρίς ξένες ουσίες.
1,0 – 1,2:	πολυστυρένιο αναμειγμένο με ξένες ύλες, καουτσούκ, αιθέρες κυτταρίνης, πολυμεθακρυλικές ενώσεις, πολυανθρακικές ενώσεις.
1,2 – 1,4:	πολυβινυλοχλωρίδιο, πολυβινυλεστέρες, είδη βακελίτη, βακελίτες με οργανικές ύλες εμπλησμού.
1,4 – 1,5:	πλαστικά ουρίας με οργανικές ενώσεις εμπλησμού.
1,5 – 1,8:	πεπεσμένες ύλες με οργανικές ύλες εμπλησμού, πολυβινυλιδενοχλωρίδιο, χλωριωμένο καουτσούκ.
1,8 – 1,9:	πολυεστερικές ρητίνες οπλισμένες με υαλοβάμβακα, σιλκόνες με ύφασμα από ίνες υάλου (γυαλιού).
άνω του 2,0:	πολυτετραφθοριοαιθυλένιο, πολυτριφθοριοιμονο-χλωριοαιθυλένιο.

2) Με δοκιμή καύσεως.

Την ύλη που εξετάζoμε την φέρνομε αρχικά στη φλόγα ενός λύχνου Bunsen και παρατηρούμε τη συμπεριφορά της κατά την καύση, δηλαδή το χρώμα της φλόγας, την οσμή κ.λπ.. Η συμπεριφορά αυτή κατά την καύση συγκρίνεται με τη συμπεριφορά γνωστών προτύπων συνθετικών υλών (νάιλον, πολυαιθυλένιο, βακελίτης κ.ά.), που καίγονται κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

5.6 Ιδιότητες των συνθετικών υλών.

Οι συνθετικές ύλες, επειδή έχουν την ικανότητα να απορροφούν και να συγκρατούν τα λιπαντικά λάδια (έλαια), σε ορισμένες περιπτώσεις είναι κατάλληλες για την κατασκευή μη λιπαινομένων εδράνων. Έδρανα ελάστρων, κατασκευασμένα από συνθετικές ύλες, όταν τα συγκρίναμε με άλλα από ορείχαλκο, είδαμε ότι έδωσαν άριστα αποτελέσματα (μακρότερος χρόνος ζωής, καλύτερη απόδοση).

Η ικανότητα αποσβέσεως κρούσεων ή ταλαντώσεων, την οποία παρουσιάζουν οι συνθετικές ύλες είναι ανώτερη από την ανάλογη ικανότητα των μετάλλων (πάνω από 10πλάσια). Γι' αυτό οδοντωτοί τροχοί από πολυαμίδες (νάιλον) και άλλες συνθετικές ύλες

λειτουργούν με πολύ μικρότερο θόρυβο από τους μεταλλικούς.

Αν διαιρέσομε το ειδικό βάρος κάθε υλικού με το ειδικό βάρος του νερού, ορίζομε έναν ειδικό συντελεστή, που καθορίζει τη σχέση του ειδικού βάρους του υλικού προς το ειδικό βάρος του νερού. Αν τώρα διαιρέσομε τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό κάθε υλικού με τον ειδικό αυτόν συντελεστή, καταλήγομε σε μία τελείως νέα κατάταξη των κατασκευαστικών υλικών. Από τη νέα αυτή κατάταξη βλέπομε ότι, αν ενδιαφερόμαστε για το μικρό βάρος μίας κατασκευής, το προσηφορότερο κατασκευαστικό υλικό δεν είναι πια ο χάλυβας. Αν λάβομε υπόψη ότι το ειδικό βάρος των περισσότερων συνθετικών υλικών κυμαίνεται από 0,9% – 2,0 g/cm³, βλέπομε ότι αυτά είναι προτιμότερα από τον χάλυβα για τις περισσότερες κατασκευές.

1) Αντοχή του υλικού:

α) Χάλυβας $\sigma_b = 1000 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$.

β) Ντουραλουμίνιο $\sigma_b = 460 \text{ MPa}$.

γ) Συνθετική ρητίνη πάνω σε καπλαμά $\sigma_b = 250 \text{ MPa}$.

2) Αντοχή του υλικού διαιρεμένη με τον ειδικό συντελεστή:

α) Συνθετική ρητίνη πάνω σε καπλαμά $\sigma_b = 190 \text{ MPa}$.

β) Ντουραλουμίνιο $\sigma_b = 160 \text{ MPa}$.

γ) Χάλυβας $\sigma_b = 128 \text{ MPa}$.

5.7 Διάδοση των συνθετικών υλών για μηχανολογικούς σκοπούς.

Σήμερα οι συνθετικές ύλες είναι περισσότερο εξειδικευμένες απ' ό,τι ήταν στο παρελθόν. Αντί λίγων βασικών συνθετικών υλών για τη βιομηχανία των πλαστικών, οι παραγωγοί παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ποικιλία συνθετικών υλών, από τις οποίες κάθε μία προσαρμόζεται στις ανάγκες ειδικών εφαρμογών. Η τάση αυτή εξειδικεύσεως είναι σήμερα πολύ φανερή στα διάφορα είδη νάιλον και στα άλλα θερμοπλαστικά, τα οποία χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές κατασκευές. Τα πλαστικά για μηχανολογικούς σκοπούς έχουν τη δυνατότητα υποκαταστάσεως των μετάλλων σε μεγάλη κλίμακα.

Οι κυριότεροι λόγοι της συνεχούς υποκαταστάσεως των μετάλλων και κραμάτων από τα πλαστικά στις μηχανολογικές κατασκευές είναι:

1) μικρότερο κόστος παραγωγής,

2) μικρότερη φθορά από τη χρήση,

3) ευχερέστερη κατασκευή,

- 4) μεγαλύτερη ανοχή διαστάσεων,
- 5) απλούστερη σχεδίαση.

Τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές κατασκευές αποτελούν μία ομάδα πλαστικών υλικών, που διαθέτουν καλύτερες μηχανικές ή/και θερμικές ιδιότητες από τα ευρέως διαδεδομένα πλαστικά, όπως το πολυστυρένιο, το PVC, το πολυπροπυλένιο και το πολυαιθυλένιο.

Το υψηλότερο κόστος παραγωγής τους οδηγεί σε μικρότερες ποσότητες παραγωγής σε ετήσια βάση και σε χρήση σε μικρότερα και πιο εξειδικευμένα αντικείμενα. Παραδείγματα εφαρμογών συμπεριλαμβάνουν το ABS (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο – acrylonitrile butadiene styrene), το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον για προφυλακτήρες και για εσωτερικά μέρη (π.χ. στον πίνακα οργάνων, στις πόρτες, σε χερούλια κ.λπ.) αυτοκινήτων, για τουβλάκια Lego, για κράνη μοτοσυκλετιστών, ποδηλατιστών ή άλλων αθλητών (π.χ. στο σκι), αλλά και σε μέρη διαφόρων μηχανημάτων και συσκευών.

Τα υλικά αυτά έχουν αντικαταστήσει παραδοσιακά υλικά κατασκευών, όπως είναι το ξύλο και το μέταλλο για πληθώρα εφαρμογών. Έτσι, η παγκόσμια αγορά πλαστικών άγγιξε τα περίπου \$60 δισ. το 2014, ενώ αναμένεται να αγγίξει τα \$92 δισ. το 2020 με ετήσια αύξηση 8,2%.

– Τα κυριότερα θερμοπλαστικά για τις μηχανολογικές κατασκευές.

1) Ακετάλες [Polyoxymethylene plastic (POM/Acetal)].

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτών των υλικών είναι ότι δεν είναι αυτοσβενόμενα υλικά, δηλαδή εάν αναφλεγούν, συντηρούν την καύση μέχρι να καούν τελείως. Χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία του αυτοκινήτου, σε εγκαταστάσεις εσωτερικής υδρεύσεως για κατασκευή κρουστών, μπαταριών λουτήρων κ.λπ..

2) Φθοριοπλαστικά (πολυτετραφθοροαιθυλένιο και άλλα).

Παρουσιάζεται μεγάλη αύξηση των φθοριοπλαστικών στη βιομηχανία κατασκευής ηλεκτρονικών υπολογιστών. Επίσης, η απλοποίηση της τεχνικής επενδύσεως με πολυτετραφθοροαιθυλένιο αυξάνει

τις εφαρμογές αυτού του πλαστικού για μηχανολογικές κατασκευές.

3) Βελτιωμένο πολυαιθυλενοξείδιο.

Αυτό το υλικό χρησιμοποιείται για μεγάλες κατασκευές, οι οποίες θα πρέπει να είναι ανθεκτικές στη θερμότητα, να μην είναι εύφλεκτες και να αντέχουν στην επίδραση του θερμού νερού.

4) Νάιλον (Naylon 6, naylon 6-6).

Το νάιλον είναι το κυριότερο πλαστικό που χρησιμοποιείται σε μηχανολογικές κατασκευές. Μέχρι τώρα αναφέρονται τα: νάιλον 11, νάιλον 12, νάιλον 6/12, νάιλον 6/6¹ και τελευταία το νάιλον 13.

5) Πολυανθρακικά πλαστικά.

Είναι από τα νεότερα πλαστικά, τα οποία παρουσιάζουν λαμπρό μέλλον για τις κατασκευές μηχανολογικών εξαρτημάτων. Τα πολυανθρακικά πλαστικά χρησιμοποιούνται ιδίως όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή σε κρούση.

6) Πολυϊμίδες (polyimides).

Είναι πλαστικό με ραγδαία ανάπτυξη. Οι εφαρμογές των πολυϊμιδών στις μηχανολογικές κατασκευές εμφανίζονται σε τεμάχια αεροπλάνων και πλοίων, έδρανα και ηλεκτρολογικά εξαρτήματα. Με την αύξηση της καταναλώσεως και του όγκου της παραγωγής αυτού του πλαστικού προβλέπεται η σημαντική ελάττωση της τιμής του.

7) Οι στερεές, αλλά όχι αφρώδεις, πολυουρεθάνες.

Έκτός από τις αφρώδεις πολυουρεθάνες χρησιμοποιούνται και μη αφρώδεις πολυουρεθάνες, οι οποίες μπορούν να υποστούν μορφοποίηση μέσα στις μηχανές χυτεύσεως αφρώδους πολυουρεθάνης. Συγκριτικά με τους εύκαμπτους αφρούς πολυουρεθάνης, τα υλικά αυτά έχουν καλύτερες κατασκευαστικές ιδιότητες. Αν συγκριθούν οι νέες πολυουρεθάνες με οπλισμένους πολυεστέρες, οι οποίοι μορφοποιούνται με το χέρι, προσφέρουν καλές κατασκευαστικές ιδιότητες και πολύ χαμηλότερο κόστος μορφοποίησης. Αν συγκριθούν με θερμοπλαστικά που χυτεύονται με έγχυση και που έχουν παρόμοιες ιδιότητες αντοχής, οι νέες ουρεθάνες απαιτούν μήτρες και εξοπλισμό χαμηλότερου κόστους.

¹ Οι δύο αριθμοί 6 υποδηλώνουν ότι αυτό το νάιλον παράγεται με πολυμερισμό δύο διαφορετικών μορίων, που το καθένα έχει 6 άτομα άνθρακα. Ο αριθμός 11 υποδηλώνει το πλήθος ατόμων άνθρακα στο πολυμερισμένο μόριο της ουσίας.

Οι νέες πολυουρεθάνες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή στοιχείων μηχανών στη ναυπηγική, στην ηλεκτροτεχνία, για την κατασκευή αυτοκινήτων κ.λπ.. Στη βιομηχανία των αυτοκινήτων από τις νέες πολυουρεθάνες κατασκευάζονται καπό, καθίσματα και καλύμματα χώρου αποσκευών. Στις άλλες βιομηχανίες κατασκευάζονται οδοντωτοί τροχοί, σκάφη, ανεμιστήρες, έλικες, ειδικά τεμάχια σωλήνων κ.λπ.. Τα νέα αυτά υλικά είναι αυτοσβενόμενα, δηλαδή δεν συντηρούν την καύση τους, αλλά σβήνουν μόνα τους. Έχουν μεγάλη αντοχή στη θερμοκρασία και πολύ μεγάλη αντοχή σε κρούση. Το μικρό ιξώδες των δύο πρώτων υλών, από τις οποίες σχηματίζονται οι πολυουρεθάνες που έχομε αναφέρει, επιτρέπει χύτευση μεγάλων τεμαχίων χωρίς ατέλειες. Ο χρόνος πηκτωματοποίησης, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει ένα ρευστό υλικό στερεό, όπως η «πηκτί», είναι 4–5 min και επαρκεί για την καλή ανάμειξη της αναγκαίας ποσότητας υλικού. Αν προστεθούν καταλύτες, δημιουργούνται συστήματα που αντιδρούν πολύ πιο γρήγορα με χρόνους πηκτωματοποίησης από 30–90 s.

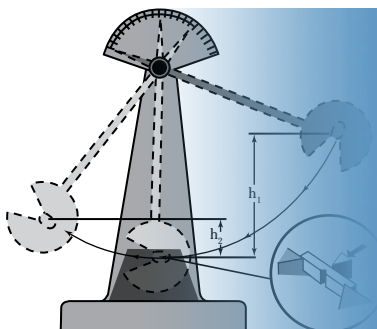
Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η ανάπτυξη και η διάδοση των νέων ουρεθανών οφείλεται περισσότερο στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σε ό,τι αφορά στην ευχέρεια της μορφοποίησης τεμαχίων για μηχανολογικές κατασκευές, παρά στις βελτιωμένες ιδιότητες που προσφέρουν τα νέα αυτά υλικά. Δηλαδή αν και οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των στερεών ουρεθανών είναι καλές, δεν είναι σημαντικά ανώτερες ή διαφορετικές από τις ιδιότητες των άλλων πολυμερών, ώστε να παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σαν νέα υλικά. Όπως είπαμε, το τεράστιο πλεονέκτημά τους είναι η ευχέρεια μορφοποίησης τεμαχίων που αποτελούνται από αυτά τα υλικά.

8) Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (Polytetrafluoroethylene – PTFE / Teflon).

Το πολυτετραφθοροαιθυλένιο PTFE είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο υλικό, γιατί παρουσιάζει μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων. Το Teflon είναι χημικώς ανενεργό, αδιάβροχο, εξαιρετικός ηλεκτρικός μονωτής, ανθεκτικό σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες και διαθέτει χαμηλό συντελεστή τριβής. Σωλήνες από Teflon χρησιμοποιούνται ως μονωτές για καλύμματα από ρόλους και για προστασία ηλεκτρικών μερών. Επίσης, μπορεί να βρεθεί σε μορφή λεπτών ελασμάτων ή φιλμ, όπου χρησιμοποιείται για το πακετάρισμα προϊόντων. Το Teflon® αποτελεί το εμπορικό όνομα για το πολυτετραφλουοροαιθυλένιο (PTFE).

9) Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (Polyethylene terephthalate – PET).

Επειδή το PET είναι αδιαπέραστο (απόλυτα στεγανό) στο νερό και στην υγρασία, χρησιμοποιείται ευρέως για πλαστικά μπουκάλια για νερό και αναψυκτικά. Για συγκεκριμένα είδη μπουκαλιών, για αυτά που θα περιέχουν αλκοόλ, χρησιμοποιείται μία επίστρωση από πολυβινυλο-αλκοόλη (polyvinyl alcohol PVOH), η οποία μειώνει περαιτέρω τη διαπερατότητα στο οξυγόνο. Χρησιμοποιείται και σε πληθώρα άλλων συσκευασιών, π.χ. στις συσκευασίες προπαρασκευασμένων γευμάτων. Επίσης, χρησιμοποιείται για συνθετικά υφάσματα και χρήσεις σε θαλάσσια σπόρ (π.χ. ελαφρά πανιά ιστιοπλοΐας). Είναι δυνατό να ενισχυθεί με ίνες γυαλιού ή άνθρακα προς αύξηση της αντοχής του. Επί πλέον, χρησιμοποιείται και ως υπόστρωμα στα λεπτά φιλμ των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΛΙΚΩΝ – ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΘΡΑΥΣΕΩΝ – ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ Έλεγχος υλικών

6.1 Καταστρεπτικός και μη καταστρεπτικός έλεγχος μετάλλων και κραμάτων.

Ο έλεγχος των υλικών έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της επιλογής υλικών για πάσης φύσεως κατασκευές. Οι απαιτήσεις για τα υλικά αυξάνονται ολοένα και περισσότερο. Η ευθύνη του μηχανικού, καθώς και όσων χρησιμοποιούν εργαλεία, μηχανές και κατασκευές, είναι μεγάλη. Η γνώση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των υλικών αποτελεί σημαντικό παράγοντα ασφάλειας.

Η κατάταξη και χρήση των υλικών, η γνώση της συμπεριφοράς τους κατά τη λειτουργία τους, η αντίστασή τους σε στατικές ή σε δυναμικές καταπονήσεις, η αντίστασή τους σε φθορά λόγω διαβρώσεως ή υποβαθμίσεως εν γένει των αρχικών τους χαρακτηριστικών, αποτελούν ίσως τη σημαντικότερη πληροφορία πριν και κατά τη χρήση και αξιοποίησή τους. Για τον λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί πληθώρα καταστρεπτικών και μη-καταστρεπτικών ελέγχων και δοκιμών. Ο πειραματικός έλεγχος των υλικών θέτει με ακρίβεια ποσοτικοποιημένα δεδομένα στη διάθεση του μηχανικού, ώστε αυτός να επιλέξει ορθά το καταλληλότερο κράμα/υλικό για την εκάστοτε χρήση.

Επί πλέον, η χρησιμότητα των μη-καταστρεπτικών ελέγχων είναι τεράστια, αν αναλογιστεί κάποιος τη δυσκολία αξιολογήσεως των υλικών, τα οποία έχουν μόλις παραχθεί ή βρίσκονται ήδη σε χρήση και έχουν υποστεί κάποιου μεγέθους, μικρού ή μεγάλου, φθορά και υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων π.χ. εξαιτίας της λειτουργίας τους, του ίδιου τους του βάρους, της γηράνεως, κοπώσεως, προσκρούσεως (δυναμικής καταπονήσεως), των διαβρωτικών συνθηκών ή γαλβανικής διαβρώσεως.

Είναι λοιπόν προφανής ο λόγος της βαθύτερης κατανοήσεως των τεχνικών ελέγχου υλικών και της ικανότητας επιλογής των σωστών μεθόδων και δοκιμών.

6.2 Μηχανικές δοκιμασίες μετάλλων-κραμάτων (καταστρεπτικός έλεγχος).

Στην κατηγορία των δοκιμασιών με καταστροφή του δοκιμίου ανήκουν, κυρίως, οι μηχανικές δοκιμές, που έχουν σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων μετάλλων, των κραμάτων και των υλικών εν γένει. Τα μέταλλα και τα κράματα, εκτός από τις άλλες χαρακτηριστικές τους ιδιότητες, εμφανίζουν μεγάλη μηχανική αντοχή και πλαστικότητα.

Έτσι, έχουμε τις ακόλουθες δοκιμασίες:

- 1) **Σκληρότητας** (hardness).
- 2) **Εφελκυσμού** (tensile test) και **συνθλίψεως** (compression test).
- 3) Σε **κρούση** ή **δοκιμασία δυσθραυστότητας** (impact or toughness test) και
- 4) **κοπώσεως** (fatigue) ή **δοκιμασία σε δυναμική αντοχή** (dynamic loading).

Παρακάτω θα περιγράψουμε τον τρόπο εκτελέσεως κάθε μηχανικής δοκιμασίας και θα καθορίσουμε τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τις μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων.

6.2.1 Η δοκιμή της σκληρότητας.

Σκληρότητα μετάλλου ή κράματος, αλλά και οποιουδήποτε στερεού υλικού ονομάζεται η αντίσταση, την οποία αυτό παρουσιάζει στη διεύθυνση ξένου σώματος που πιέζεται, με κατάλληλο τρόπο, πάνω σ' αυτό. Οι κύριες μέθοδοι για τη μέτρηση της σκληρότητας είναι τρεις: η μέθοδος Brinell, η μέθοδος Vickers και η μέθοδος Rockwell. Αναλυτικότερα:

1) Η μέθοδος Brinell.

Η δοκιμασία σκληρότητας κατά Brinell είναι η πιο γνωστή, την οποία επινόησε και χρησιμοποίησε για πρώτη φορά ο Σουηδός μηχανικός Johan Brinell το 1900.

Κατά τη δοκιμασία αυτή, μία βαμμένη (σκληρή) χαλύβδινη σφαίρα, που έχει τυποποιημένη δι-

άμετρο, πιέζεται κάθετα επάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου ή του τεμαχίου, του οποίου πρόκειται να μετρήσουμε τη σκληρότητα. Η επιβαλλόμενη δύναμη (φορτίο δοκιμασίας) είναι επίσης τυποποιημένη.

Η επιφάνεια του δοκιμίου λειαίνεται με λίμα και ύστερα με σμυριδόπανο. Πιέζοντας τη σφαίρα επάνω στην επιφάνεια σχηματίζεται σφαιρική κοιλότητα, η οποία έχει τόσο μεγαλύτερη διάμετρο, όσο το υλικό είναι μαλακότερο, για το ίδιο όμως φορτίο δοκιμασίας.

Η σκληρότητα κατά Brinell H_B , σε N/mm^2 ή σε βαθμούς Brinell, δίνεται από τη σχέση:

$$H_B = \frac{P}{F} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

όπου: P σε N είναι το φορτίο δοκιμασίας και F σε mm^2 είναι η επιφάνεια της σχηματιζόμενης κατά τη δοκιμασία σφαιρικής κοιλότητας. Η επιφάνεια F προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \text{ (mm}^2\text{)}$$

όπου: D και d σε mm είναι η διάμετρος της σφαίρας και της σφαιρικής κοιλότητας αντίστοιχα (σχ. 6.2α).

Σύμφωνα με τον ορισμό αυτόν, η σκληρότητα κατά Brinell παριστάνει την πίεση που ασκείται στην επιφάνεια επαφής σφαίρας-δοκιμίου. Η δοκιμασία γίνεται με ειδικές συσκευές, που ονομάζονται **σκληρόμετρα** (σχ. 6.2β).

Για να αποφεύγουμε πολύπλοκους υπολογισμούς, η σκληρότητα δίνεται από πίνακες που συντάσσονται με τυποποιημένες τιμές του φορτίου P και της διαμέτρου της σφαίρας D . Προηγουμένως όμως χρειάζεται να μετρηθεί σε μεγέθυνση η διάμετρος a του ίχνους της σφαίρας επάνω στην επιφάνεια.

Κατά τη δοκιμασία αυτή της σκληρότητας, για να έχουμε αξιόπιστα και συγκρίσιμα αποτελέσματα, ο λόγος P/D^2 έχει τυποποιηθεί (P σε N και D σε mm) για διάφορα υλικά (πίν. 6.1).

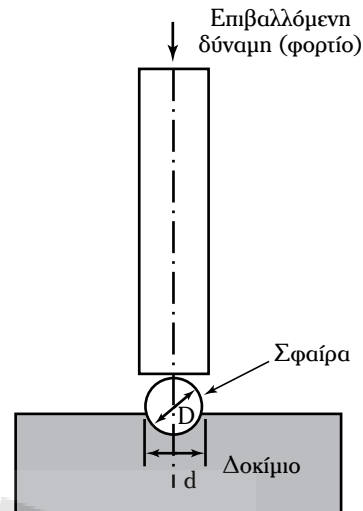
Έτσι, κατά τη δοκιμασία χαλύβδινου τεμαχίου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σφαίρα με διάμετρο 10 mm σε συνδυασμό με φορτίο 30.000 N .

$$\frac{P}{D^2} = \frac{30.000}{10^2} = 300$$

ή σφαίρα με διάμετρο 5 mm με φορτίο 7.500 N

$$\left(\frac{P}{D^2} = \frac{7.500}{5^2} = 300 \right)$$

Για να παίρνομε ακριβείς μετρήσεις, το πάχος



Σχ. 6.2α

Διάταξη της δοκιμασίας σκληρότητας κατά Brinell.



Σχ. 6.2β

Σκληρόμετρο για μέτρηση σκληρότητας κατά τη μέθοδο Brinell και Vickers.

Πίνακας 6.1

Τυποποιημένος λόγος P/D^2 για διάφορα υλικά.

Υλικό	Σταθερά P/D^2
Χάλυβας	300
Κράματα χαλκού	100
Χαλκός και κράματα αργιλίου	50
Μόλυβδος και κράματα κασιτέρου	10

του δοκιμίου ή του τεμαχίου πρέπει να είναι 7 φορές τουλάχιστον μεγαλύτερο από το βάθος της κοιλότητας για τα σκληρά μέταλλα και 15 φορές μεγαλύτερο για τα μαλακά.

2) Η μέθοδος Vickers.

Κατά τη μέθοδο Vickers αντί για σφαίρα, όπως κατά τη μέθοδο Brinell, χρησιμοποιείται αδαμάντινη πυραμίδα με τετραγωνική βάση, η οποία, όταν πιέζεται επάνω στο δοκίμιο, δίνει όμοιες γεωμετρικές κοιλότητες για διαφορετικά όμως φορτία δοκιμασίας P .

Η κορυφή της αδαμάντινης πυραμίδας έχει γωνία 136° , το επιβαλλόμενο φορτίο μεταβάλλεται από 50–1.200 N και η δοκιμασία αυτή εκτελείται σε σκληρόμετρο (σχ. 6.2β).

Η πυραμίδα πιεζόμενη αφήνει στην επιφάνεια του δοκιμίου τετραγωνική κοιλότητα, της οποίας μετράμε τη διαγώνιο με μικροσκόπιο, που έχει και κατάλληλο όργανο μέτρησης μήκους. Οι μετρήσεις της διαγώνιου του τετραγωνικού ίχνους της πυραμίδας μετατρέπονται σε σκληρότητα κατά Vickers HV με τη βοήθεια πινάκων. Επειδή τα ίχνη της πυραμίδας στην επιφάνεια του δοκιμίου έχουν πολύ μικρές διαστάσεις, η μέθοδος αυτή είναι καλή (ενδεικνύεται) για τη μέτρηση της σκληρότητας λείων και σκληρών επιφανειών.

Γενικά, η μέθοδος μέτρησης της σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιείται με ικανοποιητικά αποτελέσματα για σκληρά υλικά, ενώ η μέθοδος κατά Brinell για μαλακά υλικά.

3) Η μέθοδος Rockwell.

Η δοκιμασία αυτής της σκληρότητας γίνεται γρήγορα στο εργοστάσιο και με προσωπικό μη εξειδικευμένο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται απ' ευθείας στο κατάλληλο μετρητικό όργανο. Υπολογίζεται ότι μπορούν να εκτελεστούν 300 περίπου μετρήσεις αυτού του είδους σε διάστημα μίας ώρας.

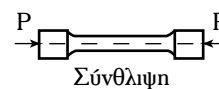
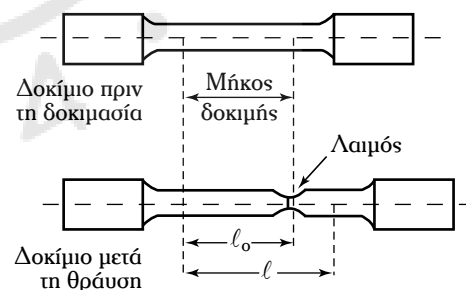
Κατά τη δοκιμασία αυτή χρησιμοποιούνται δύο κλίμακες: η κλίμακα Rockwell B και η κλίμακα Rockwell C. Όταν χρησιμοποιείται η κλίμακα B, χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου $1/16$ in (1,58 mm) πιέζεται επάνω στο δοκίμιο με συνολικό φορτίο 1.000 N. Η κλίμακα αυτή εφαρμόζεται για τη μέτρηση της σκληρότητας μαλακών χαλύβων και σκληροτέρων μη σιδηρούχων μετάλλων και κραμάτων. Κατά τη χρησιμοποίηση της κλίμακας Rockwell C, αδαμάντινος κώνος με γωνία κορυφής 120° πιέζεται επάνω στο τεμάχιο με συνολικό φορτίο 1.500 N. Η κλίμακα

αυτή εφαρμόζεται για τη μέτρηση της σκληρότητας σκληρών χαλύβων.

Η δοκιμασία γίνεται ως εξής: Το τεμάχιο τοποθετείται επάνω στο τραπέζι του σκληρομέτρου και πιέζεται αρχικά η σφαίρα (κλίμακα B) ή ο κώνος (κλίμακα C) με προκαταρκτικό φορτίο 100 N. Ύστερα μηδενίζεται το μετρητικό όργανο και εφαρμόζεται το κανονικό φορτίο, το οποίο μετά τη συμπίεση αφαιρείται και παραμένει το προκαταρκτικό φορτίο των 100 N, οπότε γίνεται και η μέτρηση της σκληρότητας κατά Rockwell. Μετά αφαιρείται το προκαταρκτικό φορτίο και το τεμάχιο αποσύρεται από το τραπέζι του σκληρομέτρου.

6.2.2 Η δοκιμή εφελκυσμού και συνθλίψεως.

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η σπουδαιότερη από τις μηχανικές δοκιμασίες και αυτή που εφαρμόστηκε πρώτα. Για τη δοκιμασία του εφελκυσμού χρησιμοποιούνται ειδικά δοκίμια (σχ. 6.2γ), τα οποία ελέγ-



Σχ. 6.2γ

Δοκίμια εφελκυσμού.

χονται σε ειδικό μηχανήμα (σχ. 6.26). Το μηχανήμα αυτό έχει δυνατότητα **εφελκυσμού** ή **συνθλίψεως** (συμπιέσεως) του δοκιμίου.

Εφελκυσμός ονομάζεται η διαδικασία, κατά την οποία η καταπόνηση δοκιμίου πραγματοποιείται μοναξονικά. Δηλαδή οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις P , ίσες και αντίθετες, ενεργούν κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου, και τείνουν να αυξήσουν το μήκος του.

Σύνθλιψη ή **συνπίεση** ονομάζεται η αντίθετη του εφελκυσμού καταπόνηση, επίσης κατά μήκος ενός άξονα, όπου οι ίσες και αντίθετες δυνάμεις P τείνουν να ελαττώσουν το μήκος του δοκιμίου.

Επάνω στο δοκίμιο τοποθετείται ειδική συσκευή (επιμηκυνσιόμετρο) για την ακριβή μέτρηση της κάθε φορά παραμορφώσεώς του, όσο διαρκεί η δοκιμασία. Το μηχανήμα έχει ενδεικτικό όργανο μέτρησης της εφαρμοζόμενης δυνάμεως εφελκυσμού ή συνθλίψεως.

Κατά τη δοκιμασία του εφελκυσμού σε κάθε τιμή της εφαρμοζόμενης δυνάμεως εφελκυσμού, που μετρείται από το ειδικό όργανο, αντιστοιχεί και ορισμένη επιμήκυνση, η οποία μετρείται από το επι-



Σχ. 6.26

Μηχανήμα εφελκυσμού (*tensile*) και συνθλίψεως (*compression*).

μηκυνσιόμετρο. Από τις μετρούμενες τιμές της δυνάμεως εφελκυσμού και της επιμηκύνσεως μπορούμε να χαράξουμε το λεγόμενο **διάγραμμα εφελκυσμού – διάγραμμα τάσεως-παραμορφώσεως (εκ του διαγράμματος δυνάμεως-επιμηκύνσεως)** του δοκιμαζόμενου υλικού για το τυποποιημένο δοκίμιο που χρησιμοποιήσαμε (σχ. 6.2ε).

Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος εφελκυσμού τοποθετείται η λεγόμενη **παραμόρφωση** (ειδική επιμήκυνση) ($\epsilon\%$), που δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 [\%] \quad (1)$$

όπου: l_0 είναι το μήκος δοκιμής του δοκιμίου (σχ. 6.2γ) σε mm και l σε mm είναι το μήκος αυτό μετά την εφαρμογή της δυνάμεως εφελκυσμού F . Η παραμόρφωση είναι η αύξηση του μήκους του δοκιμίου ανά μονάδα μήκους δοκιμής. Στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος τοποθετούμε τη λεγόμενη **τάση εφελκυσμού** σ , δηλαδή τη δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας της αρχικής διατομής του δοκιμίου A_0 , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

όπου: F σε N είναι η δύναμη εφελκυσμού και A_0 σε mm^2 η αρχική διατομή του δοκιμίου.

Μελετώντας το διάγραμμα εφελκυσμού μαλακού χάλυβα (σχ. 6.2ε) που, όπως είπαμε, κατασκευάζεται από πειραματικά δεδομένα, παρατηρούμε τα εξής:

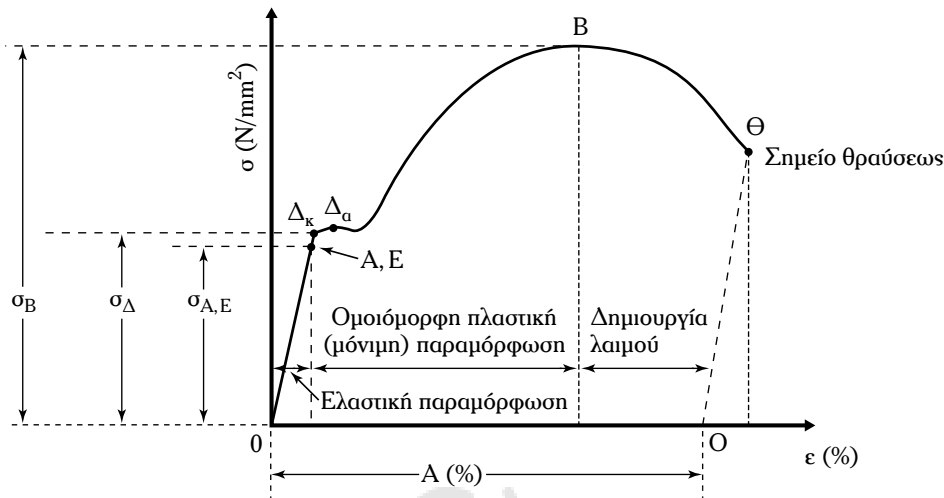
1) Το τμήμα OA του διαγράμματος είναι ευθύγραμμο, πράγμα που σημαίνει ότι κατά μήκος του τμήματος αυτού η τάση εφελκυσμού σ είναι ανάλογη με την παραμόρφωση. Δηλαδή, για να προκληθεί διπλάσια π.χ. παραμόρφωση, χρειάζεται η τάση εφελκυσμού να διπλασιασθεί. Αυτό εκφράζεται μαθηματικά με τον γνωστό Νόμο του Hooke:

$$\sigma = \epsilon \cdot E \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3)$$

Στον τύπο αυτόν E σε N/mm^2 είναι το λεγόμενο **μέτρο ελαστικότητας** του υλικού του δοκιμίου. Αυτό είναι σταθερό για κάθε υλικό και επομένως, ανάλογα με το υλικό, παίρνει ορισμένη τιμή. Το μέτρο ελαστικότητας όλων των ειδών ελατού σιδήρου και χάλυβα κυμαίνεται μεταξύ $2 \cdot 10^5$ και $2,15 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$.

Η τάση που αντιστοιχεί στο σημείο A του δια-

¹ Στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων του ISO (Διεθνής Οργανισμός Τυποποιήσεως) η μονάδα δυνάμεως είναι το Νιούτον (Newton), που συμβολίζεται με το γράμμα N. 1 kp είναι κατά προσέγγιση ίσο με 10 N (1 kp = 9,81 N = 10 N).



Σχ. 6.2ε

Το διάγραμμα εφελκυσμού μαλακού χάλυβα.

γράφματος ονομάζεται **όριο αναλογίας**, γιατί μέχρι αυτό το σημείο οι τάσεις είναι ανάλογες με τις παραμορφώσεις (Νόμος του Hooke), και παριστάνεται ως σ_A . Το όριο αναλογίας στην περίπτωση του μαλακού χάλυβα συμπίπτει πρακτικά με το όριο ελαστικότητας σ_E . Ως όριο ελαστικότητας θεωρούμε την τάση εφελκυσμού, μέχρι την οποία η παραμόρφωση είναι ελαστική. Αν δηλαδή αφαιρεθεί το φορτίο, το δοκίμιο επανέρχεται στην πριν από τη φόρτιση κατάσταση του ως προς τις διαστάσεις. Αυτό σημαίνει ότι δεν παρατηρείται καμία μόνιμη παραμόρφωση του δοκιμίου. Σε άλλα μέταλλα, κράματα ή υλικά γενικώς, μπορεί να μην συμπίπτουν τα όρια αναλογίας και ελαστικότητας.

2) Λίγο πιο πάνω από το όριο ελαστικότητας εμφανίζεται ξαφνική μόνιμη παραμόρφωση, χωρίς ουσιαστική μεταβολή της δυνάμεως εφελκυσμού που εφαρμόζεται. Η τάση σ_Δ , στην οποία συμβαίνει αυτό, ονομάζεται **όριο διαρροής**. Πολλές φορές παρατηρείται ανωμαλία στην περιοχή του ορίου διαρροής (σχ. 6.2ε), οπότε διακρίνουμε δύο όρια διαρροής: το ανώτερο $\sigma_{\Delta\alpha}$ και το κατώτερο $\sigma_{\Delta\kappa}$.

3) Μετά το όριο διαρροής, η αύξηση της τάσης εφελκυσμού συνοδεύεται από έντονη αύξηση της παραμορφώσεως σε όλο το μήκος δοκιμής του δοκιμίου ομοιόμορφα. Η αύξηση αυτή είναι πλαστική (μόνιμη) κατά το μεγαλύτερο μέρος του δοκιμίου. Από το σημείο B του διαγράμματος και πέρα, το δοκίμιο αρχίζει να σχηματίζει λαιμό σε κάποια θέση. Ενώ δηλαδή η τάση εφελκυσμού ελαττώνεται (πτώση της καμπύλης), η επιμήκυνση του δοκιμίου συνεχίζεται, μέχρι που να θραυσθεί (σπάσει) το δο-

κίμιο (σημείο Θ του διαγράμματος). Η πτώση της καμπύλης δεν σημαίνει ότι η αντοχή του δοκιμίου σε εφελκυσμό ελαττώθηκε, αντίθετα αυξήθηκε, γιατί το δοκίμιο υφίσταται σκλήρωση (κράτυνση, κεφ. 10). Η πτώση αυτή εξηγείται από το ότι η τάση εφελκυσμού υπολογίζεται με βάση την αρχική διατομή του δοκιμίου [σχέση (2)] και όχι με βάση την ελάχιστη διατομή, λόγω της δημιουργίας του λαιμού.

Από το πείραμα του εφελκυσμού, όπως το περιγράψαμε, μέχρι τη θραύση του δοκιμίου προκύπτουν τα ακόλουθα μεγέθη, που χαρακτηρίζουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού του δοκιμίου:

1) Το **μέτρο ελαστικότητας** (όπως ήδη έχει οριστεί).

2) Το **όριο διαρροής** (όπως ήδη έχει οριστεί). Η μέγιστη αντοχή σ_B (σχ. 6.2ε), που ορίζεται ως η μέγιστη τάση εφελκυσμού που αναπτύχθηκε στο υλικό πριν από την πρώτη και μετρείται σε N/mm^2 . Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται η αρχική διατομή του δοκιμίου A_0 . Η τάση θραύσεως, που ορίζεται ως το πηλίκο του φορτίου θραύσεως (του σημείου Θ) διά της αρχικής διατομής A_0 και μετρείται σε N/mm^2 .

3) Η εκατοστιαία παραμόρφωση θραύσεως $A[\%]$, που λαμβάνεται ως η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου μέχρι τη θραύση και που πρακτικά προσδιορίζεται από το διάγραμμα εφελκυσμού, αν φέρομε την ευθεία ΘΟ παράλληλη προς την ΑΟ (σχ. 6.2ε). Το μέγεθος αυτό χαρακτηρίζει τη λεγόμενη **πλαστικότητα** του μετάλλου.

4) Η εκατοστιαία στένωση της διατομής στη θραύση $\Sigma(\%)$, που εκφράζεται από τη σχέση:

$$\Sigma = \frac{A_0 - A_\theta}{A_0} \times 100 \text{ [%]} \quad (4)$$

όπου: A_0 σε mm^2 η αρχική διατομή του δοκιμίου και A_θ σε mm^2 η ελάχιστη διατομή αυτού μετά τη θραύση.

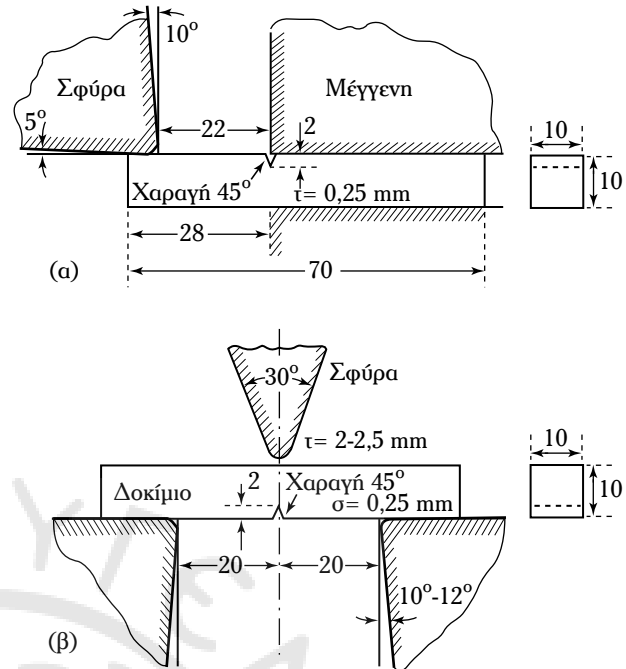
Όπως θα δούμε στο μέρος της βιομηχανικής χρήσεως των μετάλλων και των κραμάτων, η γνώση όλων ή ορισμένων από τις μηχανικές ιδιότητές τους χρειάζεται στην πράξη, για να μπορέσουμε να τα χαρακτηρίσουμε.

Έχοντας ως βάση τη δοκιμή του εφελκυσμού, διακρίνουμε τα υλικά σε **ολκίμα** και σε **ψαθυρά**. Όλκιμα είναι εκείνα τα υλικά, για τα οποία το στάδιο της πλαστικής παραμορφώσεως, όπως φαίνεται στο διάγραμμα εφελκυσμού, είναι μακρύ. Ψαθυρά είναι εκείνα τα υλικά, για τα οποία συμβαίνει το αντίθετο. Όλκιμο υλικό είναι ο μαλακός χάλυβας, ενώ ψαθυρά υλικά είναι το τσιμεντοκονίαμα, ο χυτοσίδηρος, ο λίθος (πέτρα), η πορσελάνη, το γυαλί κ.ά..

Κατά τη δοκιμή συνθλίψεως (συμπέσεως) ολκίμων υλικών παρατηρούνται περίπου τα ίδια, όπως και κατά τη δοκιμασία του εφελκυσμού. Η **παραμόρφωση συνθλίψεως** ή **συμπέσεως** (ειδική βράχυνση) του δοκιμίου, στην περίπτωση αυτή, είναι και πάλι μέχρι ένα όριο ανάλογη με την αναπτυσσόμενη **τάση συνθλίψεως**. Το δοκίμιο συνήθως δεν θραύεται, αλλά παίρνει πεπλατυσμένο σχήμα, ενώ διαστελλεται εγκάρσια. Η δοκιμή συνθλίψεως έχει μεγάλη σημασία για τα ψαθυρά υλικά, που και στις εφαρμογές καταπονούνται κυρίως σε συμπίεση. Κατά τη δοκιμή συνθλίψεως των υλικών αυτών παρατηρούνται σοβαρές αποκλίσεις συγκριτικά με το τι συμβαίνει κατά τη σύνθλιψη ολκίμων υλικών.

6.2.3 Η δοκιμή κρούσεως (δοκιμή δυσθραυστότητας).

Η αντοχή των μετάλλων σε κρούση (δυναμική, όχι στατική καταπόνηση, όπως στον εφελκυσμό) έχει μεγάλη σπουδαιότητα για την πράξη, για παράδειγμα σε μέρη μηχανών και κατασκευών που καταπονούνται όταν βρίσκονται σε λειτουργία με αυτόν τον τρόπο. Τώρα θα περιγράψουμε τη δοκιμασία σε κρούση, από την οποία προσδιορίζεται η **δυσθραυστότητα**, που είναι σημαντική ιδιότητα των μετάλλων. Κατά τη μέθοδο δοκιμασίας σε κρούση Charpy ή Izod χρησιμοποιούνται τυποποιημένα δοκίμια (σχ. 6.2στ), τα οποία έχουν στη μία πλευρά τους **εγκοπή** (notch). Η εγκοπή αυτή βοηθάει στη θραύση του δοκιμίου, καθώς συγκεντρώνει τις τάσεις στο συγκεκριμένο σημείο και καθοδηγεί την εξέλιξη της ρωγμής



Σχ. 6.2στ

Τυποποιημένα δοκίμια και τρόπος επιβολής του φορτίου κατά τη δοκιμασία σε κρούση. (α) Μέθοδος Izod. (β) Μέθοδος Charpy.

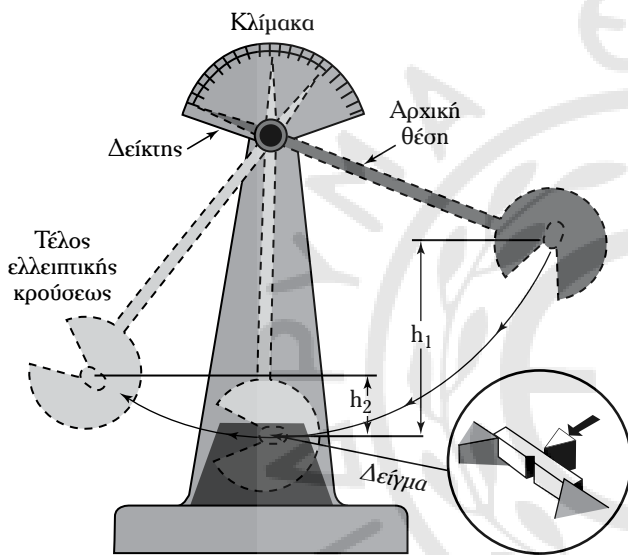
ως απόρροια της προσκρούσεως της σφύρας στο μέσο του δοκιμίου από την αντιδιαμετρική πλευρά της εγκοπής.

Το δοκίμιο τοποθετείται κατάλληλα στη βάση της μηχανής δοκιμασίας σε κρούση (σχ. 6.2ζ) σε ειδική μέγγενη. Στη συνέχεια, το δοκίμιο το χτυπάει μία βαριά σφύρα που κινείται σαν εκκρεμές. Κατά τη μέθοδο Charpy, όπου το δοκίμιο στηρίζεται στα δύο του άκρα **-αμφιέρειτος δοκός-** το χτύπημα γίνεται στη μέση. Κατά τη μέθοδο Izod, όπου το δοκίμιο στηρίζεται στη μία του άκρη **-πρόβολος-** η κρούση γίνεται στην άλλη ελεύθερη άκρη.

Το απαιτούμενο για τη θραύση του δοκιμίου έργο E , σε Nm ανά μονάδα της πλήρους διατομής του δοκιμίου F_0 , σε cm^2 , λαμβάνεται ως μέτρο της αντοχής του υλικού σε κρούση και ονομάζεται **δυσθραυστότητα** του υλικού. Η δυσθραυστότητα, επομένως, δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{E}{F_0} \text{ (Nm/cm}^2\text{)} \quad (7)$$

Το έργο που καταναλώνεται για τη θραύση του δοκιμίου, προσδιορίζεται από τις θέσεις που παίρνει η σφύρα (εκκρεμές) πριν και μετά τη θραύση του δοκιμίου. Η μηχανή δοκιμασίας σε κρούση έχει έναν δείκτη που κινείται μαζί με τη σφύρα και επά-



Σχ. 6.2ζ

Η μηχανή δοκιμασίας σε κρούση.

νω σε μία βαθμονομημένη κλίμακα μάς δείχνει το έργο, που καταναλώνεται κάθε φορά για τη θραύση του δοκιμίου.

Στον πίνακα Π.Α.10 του Παραρτήματος Α δίνονται ενδεικτικά οι μηχανικές ιδιότητες μερικών καθαρών μετάλλων.

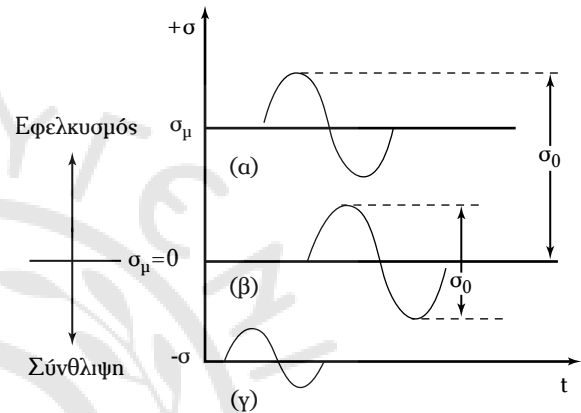
6.2.4 Η δοκιμή κοπώσεως.

Κόπωση ονομάζουμε την καταπόνηση υλικού, όταν εφαρμόζονται σε αυτό επαναληπτικά φορτία, που έχουν ως επακόλουθο την ανάπτυξη επαναληπτικών τάσεων. **Επαναληπτικές τάσεις** είναι εκείνες που μεταβάλλονται σε συνάρτηση με τον χρόνο t . Στην πράξη έχουν διάφορες μορφές, κατά τη δοκιμασία όμως της κοπώσεως η συνήθης μορφή των επαναληπτικών τάσεων που εφαρμόζονται

πάνω στο δοκίμιο, είναι εναλλασσόμενη (σχ. 6.2η).

Οι τάσεις αυτές μπορούν να είναι μόνο εφελκυστικές (α) ή κατά τη μία ημιπερίοδο εφελκυστικές και κατά την άλλη συνθλιπτικές (β) ή μόνο συνθλιπτικές (γ).

Γενικά, η συμπεριφορά των υλικών απέναντι στα επαναληπτικά φορτία δεν είναι η ίδια με τη συμπεριφορά τους απέναντι στα στατικά φορτία. **Στατικά φορτία** είναι εκείνα που παραμένουν σταθερά σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Σχ. 6.2η

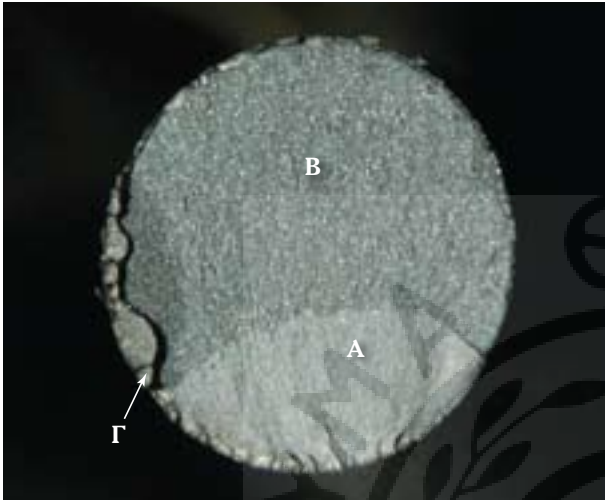
Τιμές των τάσεων δυναμικής καταπόνησης.

Έχει παρατηρηθεί ότι τεμάχια μηχανών από ελατά μέταλλα θραύονται (σπάνε) συχνά κατά τη λειτουργία τους, όταν φορτίζονται από επαναληπτικά φορτία. Τα φορτία αυτά μπορεί να δημιουργούν τάσεις, που να είναι πολύ μικρότερες και από το όριο ελαστικότητας του μετάλλου. Πειράματα έχουν αποδείξει ότι η θραύση λόγω κοπώσεως επέρχεται μετά από προοδευτική ρήξη του υλικού, χωρίς να παρατηρείται προηγουμένως εμφανής μόνιμη παραμόρφωση. Η κόπωση έχει βαρύνουσα σημασία για την πράξη, καθώς μεγάλο ποσοστό (περίπου 90%) περιπτώσεων θραύσεως τεμαχίων μηχανών, ιδιαίτερα οχημάτων και αεροσκαφών, οφείλεται σε κόπωση και μόνο 10% σε υπέρβαση του ορίου θραύσεως.

Στο σχήμα 6.2θ φαίνεται επιφάνεια θραύσεως άξονα μπαινιτικού χάλυβα λόγω κοπώσεως. Η επιφάνεια αυτή περιλαμβάνει σαφώς δύο περιοχές: την περιοχή Α και την περιοχή Β.

Η περιοχή Α, που είναι λεία και πολλές φορές έχει και γραμμώσεις, οφείλει τη δημιουργία της στο ελάττωμα Γ του υλικού, που φαίνεται στα αριστερά της φωτογραφίας. Η περιοχή Β είναι τραχεία και χονδρόκοκη και έχει φανερές παραμορφώσεις του

υλικού. Η πρώτη περιοχή δημιουργείται κατά τη διάρκεια της καταπόνησής του υλικού σε επαναληπτικά φορτία. Η λεία εμφάνισή της οφείλεται στην τριβή μεταξύ των προοδευτικώς διαχωριζομένων επιφανειών του τεμαχίου. Η δεύτερη περιοχή δημιουργήθηκε κατά την απότομη θραύση του τεμαχίου, όταν πια η διατομή του είχε εξασθενήσει.



Σχ. 6.20
Επιφάνεια θραύσεως άξονα
μπαινιτικού κάλυβα λόγω κοπώσεως.

Η δοκιμασία της κοπώσεως πραγματοποιείται με ειδικές μηχανές. Λαμβάνεται ορισμένος αριθμός δοκιμών τυποποιημένων από το ίδιο υλικό και με την ίδια τραχύτητα επιφάνειας (η οποία χαρακτηρίζει τις ανωμαλίες της, που προέρχονται από τη μηχανική κατεργασία, με την οποία μορφοποιείται το δοκίμιο). Κάθε ένα από τα δοκίμια αυτά υποβάλλεται σε εναλλασσόμενη φόρτιση, όπως σε εφελκυσμό-σύνθλιψη, με ορισμένη τιμή της μέσης τάσεως, συνήθως $\sigma_m = 0$ και για ορισμένη επίσης τιμή της μέγιστης τάσεως σ_0 (σχ. 6.2n). Σε κάθε περίπτωση μετρείται με κατάλληλο μετρητή ο αριθμός των εναλλαγών φορτίσεως (κύκλων), στον οποίο το δοκίμιο θραύεται κάτω από ορισμένη μέγιστη τάση σ_0 .

Από τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της δοκιμασίας και για όλα τα δοκίμια που χρησιμοποιήσαμε, χαράσσεται η λεγόμενη **καμπύλη κοπώσεως του υλικού** ή **καμπύλη Wöhler** (σχ. 6.2i).

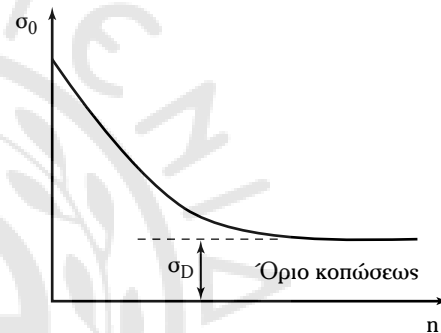
Στον οριζόντιο άξονα τοποθετείται ο αριθμός των κύκλων ή και στον κατακόρυφο η μέγιστη τάση σ_0 . Από την καμπύλη Wöhler παρατηρούμε ότι, πέρα από ορισμένη τιμή σ_0 της μέγιστης τάσεως, το δοκίμιο δεν θραύεται, όσο και αν αυξηθεί ο αριθμός των κύκλων n . Η τάση αυτή σ_D ονομάζεται **όριο κοπώ-**

σεως ή **δυναμική αντοχή** του υλικού και παρέχει ασφάλεια σε θραύση από την κόπωση. Στη δυναμική αντοχή υλικού επιδρούν:

1) Η **τραχύτητα επιφάνειας του τεμαχίου**, δηλαδή τραχύτερη επιφάνεια του τεμαχίου έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της δυναμικής του αντοχής.

2) Η **μορφή του τεμαχίου**. Τρύπες (οπές), χαραγές, μεταβολές της διατομής του έχουν ως αποτέλεσμα την ελάττωση της δυναμικής του αντοχής.

3) Το **όριο θραύσεως του υλικού** σ_0 . Αύξηση του ορίου θραύσεως έχει ως επακόλουθο ανάλογη αύξηση της δυναμικής αντοχής, αφού όμως το τεμάχιο έχει λειανθεί καλά και δεν έχει μορφή που να επιδρά δυσμενώς στη δυναμική του αντοχή, όπως αναφέραμε στην παραπάνω περίπτωση (β).



Σχ. 6.2i
Η καμπύλη κοπώσεως του υλικού
ή καμπύλη Wöhler.

6.3 Τεχνικές ελέγχου μικροδομής.

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη των υλικών συνετέλεσε και στην σημαντική πρόοδο των τεχνικών ελέγχου και ποσοτικοποίησής της μικροδομής. Η μικροδομή συμβάλλει στην επίτευξη των ιδιοτήτων των υλικών. Η σε βάθος ανάλυσή της είναι πλέον απαραίτητη. Με τη χρήση βελτιωμένων τεχνικών μικροσκοπίας και των σχετικών αναλυτικών συσκευών είναι πλέον εφικτή η ανάλυση μικροδομών σε μεγεθύνσεις μερικών νανομέτρων και σε ακόμα μικρότερες, όπου χρειαστεί. Η αξιοποίηση της Φυσικής στις αναλυτικές τεχνικές ήδη από το 1930 και ωρύτερα είχε οδηγήσει στην ανάπτυξη προηγμένων οπτικών και ηλεκτρονικών μεθόδων ανάλυσεως μικροδομής.

Οι μέθοδοι χαρακτηρισμού των υλικών είναι οι ακόλουθες:

Καταστρεπτικές μέθοδοι:

1) Φωτο-ηλεκτρομαγνητικές:

α) Οπτική μικροσκοπία, β) μικροσκοπία La-

ser (Scanning Laser Microscopy–SLM, Raman), γ) ακουσική μικροσκοπία και δ) φασματοσκοπία Mossbauer.

2) *Ηλεκτρονικές:*

α) Ηλεκτρονική μικροσκοπία (Scanning Electron Microscopy–SEM, Transmission Electron Microscopy–TEM), β) ηλεκτρονική μικροανάλυση (Electron Micro Probe Analyzer–EPMA, Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy–EDS) και γ) φασματοσκοπία Auger (Auger Electron Spectroscopy–AES).

3) *Περίθλαση:*

α) Περίθλαση ακτίνων–X (X-ray Diffraction–XRD), β) περίθλαση ηλεκτρονίων (Electron Spectroscopy–ES) και γ) περίθλαση νετρονίων (Neutron Diffraction–ND).

4) *Ατομικές – ιοντικές:*

α) Φασματομετρία μάζας δευτερογενών ιόντων (Secondary Ion Mass Spectroscopy–SIMS και β) Ιοντική μικροσκοπία πεδίου (Field Ion Microscope–FIM).

5) *Θερμικές:*

α) Διαφορική θερμική ανάλυση (Differential thermal analysis–DTA), β) διαφορική θερμιδομετρική ανίχνευση (Differential Scanning Calorimetry–DSC) και γ) θερμοβαρυστική ανάλυση (Thermogravimetric Analysis ή Thermal Gravimetric Analysis–TGA).

6) *Μηχανικές:*

α) Στατικές (όπως η σκληρομέτρηση, η τραχυμέτρηση κ.λπ.), β) δυναμικές, γ) φθορά, τριβή (π.χ. pin on disc) και δ) Μετρήσεις τάσεων.

Μη καταστρεπτικές μέθοδοι.

1) *Οπτικές:*

– Στερεοσκοπία, ανάλυση σχήματος κ.ά..

2) *Ραδιογραφίες:*

α) Ραδιογραφία ακτίνων X. β) Ραδιογραφία ακτίνων Υ.

3) *Μαγνητικές.*

4) *Θερμογραφία.*

5) *Φθορίζονια – διεισδυτικά υγρά.*

6) *Υπέρηχοι.*

7) *Δινορρεύματα.*

Πιο κάτω θα αναφερθούμε εκτενέστερα στις σημαντικότερες μεθόδους εξ αυτών.

6.3.1 Οπτική μικροσκοπία.

Η μεγέθυνση με χρήση ενός ποτηριού νερού περιγράφεται από τον Seneca τον 4^ο π.Χ. αιώνα. Τον 13^ο μ.Χ. αιώνα ο Salvano D’Armate (1258–1312) κατασκευάζει στην Ιταλία το πρώτο γυαλί οράσεως. Ο

Roger Bacon (1214–1294), Άγγλος φραγκισκανός μοναχός, εργάζεται επάνω στη χρήση διόπτρων και καθρεπτών και χρησιμοποιεί τον πρώτο διπλό φακό οράσεως, ενώ τον 16^ο αιώνα ο Zacharias Jansen μαζί με τον πατέρα του Hans εφευρίσκουν το οπτικό μικροσκόπιο με δυνατότητα μεγεθύνσεως 3x.

Σήμερα το οπτικό μικροσκόπιο με βάση την πρόοδο της τεχνολογίας και τα βελτιωμένα οπτικά συστήματα είναι εφικτό να παρατηρήσει αντικείμενα θεωρητικού ελάχιστου μεγέθους 200 nm (σύμφωνα με τον Abbe). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι τα οπτικά μικροσκόπια μπορούν να εστιάσουν σε αντικείμενα τάξεως μεγέθους με το μήκος κύματος του φωτός (εκτιμάται ότι το μήκος κύματος έχει πάχος περίπου 550 nm).

Στερεοσκοπία και μεταλλογραφικά μικροσκόπια αποτελούν τα κυριότερα παραδείγματα οπτικής μικροσκοπίας που χρησιμοποιούνται καθημερινά. Στο Παράρτημα Γ παρατίθεται χρονολόγιο της εξελίξεως της οπτικής μικροσκοπίας.

1) Στερεοσκόπιο (σχ. 6.3α).

Η στερεοσκοπία αποτελεί την απλούστερη μορφή οπτικής μικροσκοπίας. Το φως διέρχεται μέσω κατάλληλων διόπτρων ή ανακλάται από το δείγμα και επιτρέπεται με τον τρόπο αυτόν η μεγέθυνση της παρατηρούμενης επιφάνειας. Η παρατήρηση γίνεται απευθείας διά γυμνού οφθαλμού μέσα από φακούς ή έμμεσα με τη χρήση κάμερας και απεικόνιση σε οθόνη υπολογιστή ή σε τηλεόραση.

2) Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο.

Τα μεταλλογραφικά μικροσκόπια μπορεί να είναι άμεσες παρατηρήσεως ή αντίστροφα. Η μεγέθυνση επιτυγχάνεται μέσω συστήματος φακών, ενώ οι αναλύσεις διαφορετικών φακών ξεκινούν από 5x και



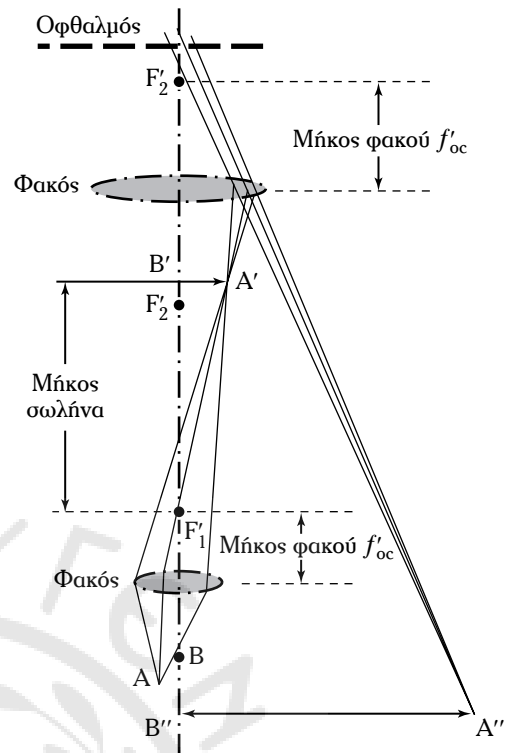
Σχ. 6.3α
Στερεοσκόπιο.

φτάνουν ως τις 100x. Μαζί με την 10x αρχική μεγέθυνση του μικροσκοπίου αγγίζουμε μεγεθύνσεις ως και 1000x. Αυτό επιτρέπει την παρατήρηση των περισσότερων μετάλλων και ορυκτών. Υπάρχει δυνατότητα χρήσεως πολωμένου φωτός, καθώς και διαφορετικών φίλτρων, ώστε να είναι εφικτή η παρατήρηση δειγμάτων από διαφορετικά υλικά. Η λειτουργία του μικροσκοπίου στηρίζεται σε τρεις βασικές λειτουργίες, τη **διοχέτευση φωτός** από μία κατάλληλη πηγή, τη **συλλογή του φωτός** αυτού και την **τροποποίηση της εντάσεώς του**. Το σχετικό σύστημα καλείται **οπτικό σύστημα** (illumination optical system). Επί πλέον, τα σύγχρονα μικροσκόπια είναι συνδεδεμένα με μία ψηφιακή CCD κάμερα για τη λήψη φωτογραφιών ηλεκτρονικά.

Η βασική αρχή της παρατήρησης στο μικροσκόπιο φαίνεται στο σχήμα 6.3β. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μικροσκοπιών και φακών παρατήρησης (μεγεθύνσεως) απεικονίζονται στο σχήμα 6.3γ. Ένα παράδειγμα μικροδομής ναυπηγικού χάλυβα που παρατηρεί κάποιος σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο διακρίνεται στο σχήμα 6.3δ.

6.3.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως (Scanning Electron Microscopy – SEM) μπορεί να μεγεθύνει χιλιάδες φορές περισσότερο από ένα οπτικό μικροσκόπιο. Είναι πλέον εφικτή η μικροανάλυση για τον προσδιορισμό της τοπικής χημικής συστάσεως μικρογραφικών συστατικών, προσμείξεων ή ακαθαρσιών των υλικών. Για την επίτευξη τόσο μεγάλων μεγεθύνσεων και την υπέρβαση του περιορισμού των 200 nm, χρησιμοποιείται δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία εμφανίζει εξαιρετικά μικρότερο



Σχ. 6.3β

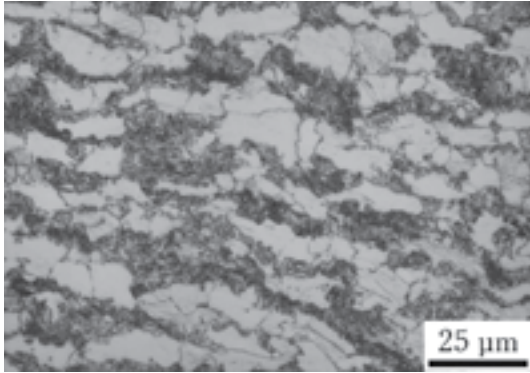
Βασική αρχή της παρατήρησης στο οπτικό μικροσκόπιο.

μήκος κύματος από αυτό του φωτός. Η ηλεκτρονική μικροσκοπία μπορεί να απεικονίσει λεπτομέρειες μικροδομών ή και επιφανειών. Η διακριτική ικανότητα φτάνει τα 0,3–0,4 nm. Έτσι, εκτός της αναλύσεως μικροδομών, είναι εφικτή και η παρατήρηση επιφανειών θραύσεως, πράγμα ιδιαίτερα σημαντικό στην καταγραφή και στην αναζήτηση αιτιών αστοχίας (είτε από κόπωση, είτε από υπερβάσεις μέγιστης αντοχής, ή κατόπιν δυναμικών καταπονήσεων). Με τη χρήση ακτίνων X και μικροανάλυσεως είναι εφικ-



Σχ. 6.3γ

Χαρακτηριστικά παραδείγματα μικροσκοπιών και φακών παρατήρησης (μεγεθύνσεως).



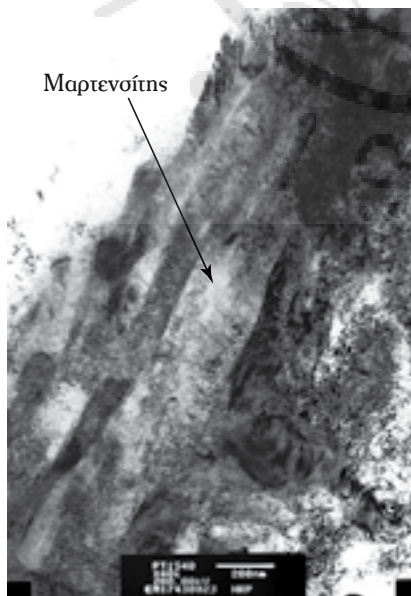
Σχ. 6.36

Χαρακτηριστική μικροδομή φερρίτη (ανοιχτό γκρι) και περλίτη (σκούρο γκρι) χάλυβα κατασκευών με 0,2%- κ.β. C.

κτός ο προσδιορισμός της χημικής σύστασης ακαθαρσιών, προσμείξεων ή μικρογραφικών συστατικών των μελετώμενων υλικών.

– Μικροσκοπία διερχόμενης δέσμης.

Η μικροσκοπία διερχόμενης δέσμης (Transmission Electron Microscopy – TEM) είναι αντίστοιχης φιλοσοφίας με αυτή της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, με τη διαφορά ότι η δέσμη ηλεκτρονίων διέρχεται (δεν ανακλάται) από το δείγμα. Η διακριτική ικανότητα ανέρχεται σε 0,05 nm. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μικροδομής χάλυβα, συγκεκριμένα μαρτενσίτη και μπαινίτη, διακρίνεται στο σχήμα 6.3ε.



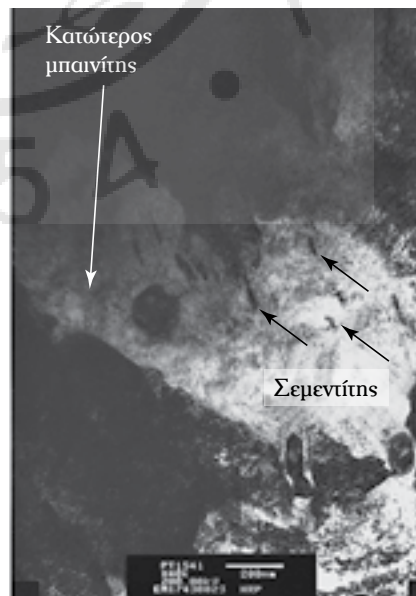
© S. Papaefthymiou, 2015

6.4 Χαρακτηρισμός θραύσεων.

Η πρόβλεψη της θραύσεως και η κατανόηση των μηχανισμών που τη διέπουν είναι εξόχως σημαντικά ζητήματα, αφού συνεισφέρουν στην ασφάλεια των κατασκευών και των υλικών. Η θραύση ενός υλικού αντιπροσωπεύει την τελική του αστοχία και μπορεί να συμβεί σε χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες (ερπυσμός), μικρές ή μεγάλες εφελκυστικές ή διατμητικές τάσεις, στατικές ή δυναμικές καταπονήσεις ή να προέλθει από περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. διάβρωση), κόπωση ή και συνδυασμό αυτών των παραγόντων.

Κατά την εφελκυστική θραύση πραγματοποιείται διαχωρισμός επιπέδων και ατομικών δεσμών υπό την εφαρμογή της τάσεως. Αυτά αποτελούν τα επίπεδα θραύσεως. Η επιφάνεια της αποκολλήσεως ονομάζεται **επιφάνεια αστοχίας**. Σε περίπτωση εφαρμογής της τάσεως σε υψηλές θερμοκρασίες, τα φαινόμενα ενισχύονται και απ' τις μετακινήσεις ατόμων λόγω διαχύσεως. Η εφελκυστική θραύση σε υψηλή θερμοκρασία καλείται **θραύση από ερπυσμό**.

Όταν συμβαίνουν επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, κυκλικές εφελκυστικές και συνθλιπτικές εναλλαγές στην τάση, τότε η αστοχία μπορεί να επέλθει σε τάσεις (κατά πολύ) χαμηλότερες του ορίου διαρροής του υλικού κατόπιν κάποιων εκατοντάδων ή χιλιάδων ή εκατοντάδων χιλιάδων κύκλων φορτίσεως. Η αστοχία αυτή ονομάζεται **θραύση λόγω κόπωσης**. Σε



Σχ. 6.3ε

Ενδεικτικές μικρογραφίες μαρτενσίτη και μπαινίτη (κατώτερου μπαινίτη) στο TEM.

περίπτωση λειτουργίας ενός υλικού π.χ. σε διαβρωτικό περιβάλλον, η ρήξη των επιπέδων του πλέγματος του υλικού και των ατομικών δεσμών μπορεί να ενισχυθεί προωθώντας με τον τρόπο αυτόν τη διάδοση των ρωγμών (ευθραυστοποίηση ορίων κόκκου και ψαθυροποίηση του υλικού τελικά). Τέτοιες περιβαλλοντικές αστοχίες, που συνδέονται με ευθραυστοποίηση των ορίων κόκκου των υλικών είναι: η ευθραυστοποίηση από υδρογόνο, η ψαθυροποίηση λόγω υπέρβασης υγρού μετάλλου στα όρια κόκκων (θερμή ρηγμάτωση) και η διάβρωση από μηχανική καταπόνηση.

Σε γενικές γραμμές, η εμφάνιση των επιφανειών θραύσεως και οι θραύσεις εν γένει χωρίζονται σε όλκιμες και ψαθυρές. Συχνά συναντάμε και μικτές θραύσεις.

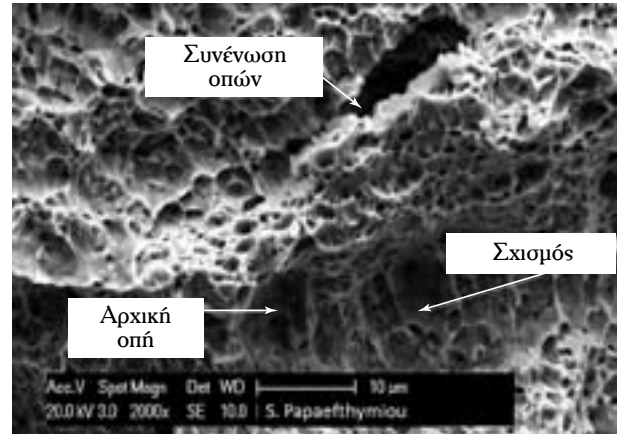
– Ορισμός της όλκιμης και ψαθυρής θραύσεως.

Η πλαστική παραμόρφωση που προηγείται της θραύσεως αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον διαχωρισμό των θραύσεων. Μικρή πλαστική παραμόρφωση οδηγεί σε **ψαθυρή θραύση** (brittle fracture). Η εμφάνιση της επιφάνειας θραύσεως είναι γυαλιστερή, καθώς τα επίπεδα θραύσεως έχουν αποκολληθεί, χωρίς προηγουμένως να έχει προηγηθεί πλαστική τους παραμόρφωση. Στην αντίθετη περίπτωση, που η επιβολή φορτίου παραμορφώνει σημαντικά τα κρυσταλλογραφικά επίπεδα και τους κόκκους, έχουμε **όλκιμη θραύση** (ductile fracture). Η επιφάνεια της όλκιμης θραύσεως εμφανίζεται μακροσκοπικά μη γυαλιστερή (ματ).

Παρατηρώντας σε μεγαλύτερη μεγέθυνση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο εμφανίζονται οπές, **μικροκοιλότητες** (dimples), καθώς και συνενώσεις οπών, οι οποίες σχηματίζουν όλκιμες ρωγμές, που οδηγούν σε ρήξη μεγάλων επιπέδων και σε τελική αστοχία του υλικού.

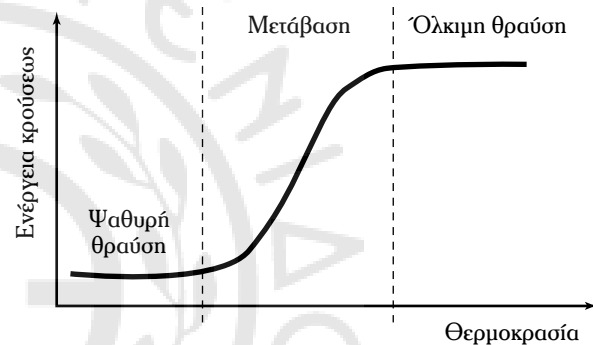
Αντίθετα, στην ψαθυρή επιφάνεια θραύσεως παρατηρούμε στο SEM μεγάλα επίπεδα αστοχίας και πολλές μικρές ρωγμές να υπάρχουν στην επιφάνεια. Μεγάλες ρωγμές, οι λεγόμενοι **σχιισμοί** (cleavages), οδηγούν πληθώρα κρυσταλλογραφικών επιπέδων σε μαζική αποκόλληση και το υλικό σε άμεση αστοχία μετά την υπέρβαση της αντοχής του τοπικά στα σημεία της αστοχίας, όπου εμφανίζεται και η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων (σχ. 6.4α).

Σε μακροσκοπικό επίπεδο η **όλκιμη θραύση** (ductile fracture) συνοδεύεται από μεγάλη πλαστική παραμόρφωση και σε μικροσκοπικό επίπεδο από τον σχηματισμό **οπών** (voids) και μικροκοιλοτήτων,



Σχ. 6.4α

Επιφάνεια όλκιμης θραύσεως με μικρή εμφάνιση σχισμών.



Σχ. 6.4β

Καμπύλη μεταβάσεως από την όλκιμη στην ψαθυρή περιοχή σε χάλυβες υπό έλεγχο σε δυναμική καταπόνηση κάτω από χαμηλές θερμοκρασίες (υπό το μηδέν).

που οδηγούν σε θραύση (dimple fracture at microscopic level). Η ψαθυρή θραύση μακροσκοπικά δεν συνοδεύεται από πλαστική παραμόρφωση (η αστοχία επέρχεται μετά την υπέρβαση του ορίου διαρροής του υλικού), ενώ μικροσκοπικά διακρίνουμε τη μαζική αποκόλληση, σχισμό των κρυσταλλογραφικών επιπέδων του υλικού.

Ένα όλκιμο υλικό, όπως οι περισσότεροι χάλυβες, μπορεί να αστοχήσει ψαθυρά σε χαμηλές θερμοκρασίες υπό δυναμική φόρτιση. Για τον λόγο αυτόν για κάθε υλικό είναι εξόχως σημαντικό να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία μεταβάσεως από την όλκιμη στην ψαθυρή θραύση (σχ. 6.4β).

6.5 Μη καταστρεπτικός έλεγχος υλικών.

6.5.1 Ραδιογραφία.

Με τη μέθοδο της ραδιογραφίας ελέγχονται υλικά με τη βοήθεια κάποιας πηγής ακτίνων-Χ ή ακτίνων-γ.

Λόγω του μικρού μήκους κύματος επιτρέπουν μεγάλου βάθους διεισδύσεις. Έτσι, ελέγχονται και αντικείμενα σχετικά μεγάλου πάχους.

Η ραδιοφωτογραφία (δηλ. η φωτογραφία που λαμβάνεται απ' τη ραδιογραφία) προέρχεται από την πρόσπτωση των ακτίνων-Χ, οι οποίες εξέρχονται από το εξεταζόμενο δοκίμιο, πάνω σε ένα φωτοευαίσθητο φιλμ πίσω από το δοκίμιο. Οι περιοχές μεγαλύτερης πυκνότητας απορροφούν μεγαλύτερη ποσότητα ακτίνων-Χ. Επομένως οι πόροι, οι ρωγμές κ.λπ. εμφανίζονται πιο ανοιχτόχρωμες και έτσι εντοπίζονται.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως στον ποιοτικό έλεγχο συγκολλήσεων, χυτών, σφυρήλατων και λοιπών κατασκευών, αλλά και για τη μέτρηση των μεταβολών του πάχους των υλικών, π.χ. σε περιπτώσεις διαβρώσεως.

6.5.2 Υπέρηχοι.

Η χρήση ηχητικών κυμάτων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ατελειών εντός των υλικών. Χρησιμοποιούνται ηχητικά κύματα συχνότητας 1-5 MHz. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη και χρησιμοποιείται σε συγκολλητές και χυτές κατασκευές. Κατά την εκπομπή υπερήχων μέσα στο εξεταζόμενο δείγμα, το ηχητικό κύμα ανακλάται κατά ένα ποσοστό συναντώντας εσωτερικές ασυνέχειες (ρωγμές, πόρους, εγκλείσματα). Έτσι, το ηχητικό κύμα, που φθάνει στον δέκτη και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, έχει μικρότερη ένταση. Για σταθερή ταχύτητα του κύματος στο υλικό μπορεί να εντοπιστεί η θέση της ασυνέχειας.

6.5.3 Μαγνητικά σωματίδια.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ασυνεχειών σε σιδηρομαγνητικά υλικά, κυρίως σε χάλυβες. Είναι μία εύκολη μέθοδος, που επιτρέπει την ταχεία ανίχνευση επιφανειακών σφαλμάτων όπως ρωγμές, πόρους και μη-μεταλλικά εγκλείσματα, που δεν ανιχνεύονται διά γυμνού οφθαλμού.

Όσον αφορά στη μέθοδο, αυτή μπορεί να πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους. Το προς εξέταση υλικό αρχικά μπορεί να μαγνητίζεται και στη συνέχεια να καλύπτεται επιφανειακά με λεπτή σκόνη σιδήρου. Η μαγνήτιση και η εναπόθεση της σκόνης μπορεί να συμβαίνουν και ταυτόχρονα. Σήμερα χρησιμοποιούνται και ειδικά μαγνητικά σπρέι συντελώντας στην ταχύτητα και την ευκολία της ανιχνεύσεως. Οι επιφανειακές ατέλειες προκαλούν «διαρροή» και συγκέντρωση του μαγνητικού πεδίου δημιουργώντας

τοπικούς βόρειους και νότιους πόλους έλκοντας τοπικά τα σωματίδια της σκόνης. Οι ατέλειες που βρίσκονται σε σχετικά μικρό βάθος κάτω απ' την επιφάνεια προκαλούν προφανώς μικρότερη έλξη, ενώ αυτές που βρίσκονται αρκετά βαθιά δεν είναι δυνατόν να ανιχνευτούν με την τεχνική αυτή.

6.5.4 Δινορρεύματα.

Με τη χρήση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου εξαιτίας της εφαρμογής εναλλασσόμενης τάσεως σε πρωτεύον πηνίο, εντός του οποίου βρίσκεται το προς εξέταση δείγμα, επάγονται ρεύματα (δινορρεύματα), τα οποία έχουν συχνότητα ίδια μ' αυτή της μεταβολής του πεδίου (φαινόμενο επαγωγής). Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν τα δινορρεύματα μέσα στο εξεταζόμενο υλικό, ανιχνεύεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα.

Οι ατέλειες προκαλούν «διαρροή» του μαγνητικού πεδίου και, έτσι, ανιχνεύονται. Είναι προφανές ότι η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και τον εντοπισμό ελαττωμάτων, ασυνεχειών δομής και μεταβολών χημικής συστάσεως σε αγωγίμα μόνο υλικά. Επί πλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση επιφανειακών ατελειών και για τη μέτρηση του πάχους επιστρώσεων.

6.5.5 Διεισδυτικά υγρά.

Η τεχνική αυτή στηρίζεται στη διείσδυση κατάλληλων υγρών μεγάλης επιφανειακής τάσεως (άρα μεγάλης διεισδυτικής τάσεως) στις επιφάνειες των προς εξέταση υλικών. Αρχικά, ένα λεπτό στρώμα του διεισδυτικού υγρού αποτίθεται στην επιφάνεια και παραμένει, ωσότου διεισδύσει. Έπειτα, η επιφάνεια ξεπλένεται και στην επιφάνεια προστίθεται κατάλληλη σκόνη, γνωστή ως εμφανιστής, που δρα ως «σφουγγάρι» τραβώντας το υγρό έξω από την επιφανειακή ατέλεια και μεγεθύνοντας το ίχνος της ατέλειας πάνω στην επιφάνεια.

Όταν το υγρό είναι φθορίζον, εκπέμπει ορατό φως και εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία με τη χρήση κατάλληλης λυχνίας. Η μέθοδος αυτή, που απαιτεί ιδιαίτερη ευαισθησία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα υλικά, μαγνητικά ή μη. Χρησιμοποιείται και αυτή για την ανίχνευση επιφανειακών σφαλμάτων χυτών και κατασκευών μετά από συγκόλληση, καθώς και κατόπιν επιφανειακών κατεργασιών και κοπής (π.χ. λείανση, φρεζάρισμα κ.ά.).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

Διάβρωση και προστασία

7.1 Διάβρωση και προστασία.

Η διάβρωση των μετάλλων αποτελεί μία ηλεκτροχημική διαδικασία, κατά την οποία συντελούνται αντιδράσεις οξειδώσεως και αναγωγής. Κατά την οξείδωση το μέταλλο χάνει ηλεκτρόνια από την εξωτερική του στοιβάδα και διαβρώνεται. Τα απολεσθέντα ιόντα εισέρχονται στο διάλυμα που προκαλεί τη διάβρωση ή σχηματίζουν με κάποιο άλλο στοιχείο ένα σταθερό προϊόν διαβρώσεως (π.χ. οξείδιο). Κατά την αναγωγή αυτά τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται τουλάχιστον σε ένα άλλο άτομο. Η οξειδοαναγωγική αντίδραση και τα προκύπτοντα προϊόντα καθορίζονται από τον τύπο του διαβρωτικού περιβάλλοντος (διάλυμα ή αέριο ή στερεό) και τα μέταλλα, καθώς και τα στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα.

Τα μέταλλα δεν οξειδώνονται όλα με την ίδια ένταση. Αυτό μπορεί εύκολα να παρουσιαστεί μέσω ενός γαλβανικού στοιχείου. Όταν σε έναν ηλεκτρολύτη ένα μέταλλο (άνοδος) οξειδώνεται, η αναγωγική αντίδραση θα προκύψει στο άλλο μέταλλο (κάθοδος). Η ένταση του ηλεκτρικού δυναμικού, που διαμορφώνεται ανάμεσα στα δύο μέταλλα, στην άνοδο και στην κάθοδο, είναι ενδεικτική για την κινούμενη δύναμη της διαβρώσεως (όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο ταχύτερα διαβρώνεται το μέταλλο της ανόδου). Υπάρχουν μέταλλα όπως το αλουμίνιο, ο ψευδάργυρος, ο ανοξείδωτος χάλυβας κ.ά., τα οποία μετά την οξειδοαναγωγική αντίδραση παθητικοποιούνται, δηλαδή σχηματίζεται ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα οξειδίου στην επιφάνειά τους, το οποίο δεν επιτρέπει την περαιτέρω οξείδωση και απώλεια μετάλλου.

Κατόπιν μελέτης του ηλεκτρικού δυναμικού και της διαβρώσεως των μετάλλων, έχουν συνταχθεί ηλεκτροχημικές και γαλβανικές σειρές των μετάλλων. Αυτές πρέπει να τις συμβουλευόμαστε κατά την επαφή των μετάλλων μεταξύ τους σε κατασκευές, για την έκθεση μετάλλων/κραμάτων σε περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση, καθώς και για την κατανόηση των παραγόντων προσκλήσεως εκτενούς διαβρώσεως υπό φόρτιση (στατική ή δυναμική) στοιχείων μηχανών, κατασκευ-

ών κ.ά. μεταλλικών μερών, ώστε αυτές οι συνθήκες να αποφεύγονται στο μέτρο του εφικτού. Η βασική μελέτη του ηλεκτρικού δυναμικού βασίζεται στην τάξη μεγέθους του ρεύματος που παράγεται όταν ένα πρότυπο κελί μετάλλου τοποθετηθεί σε σύζευξη με ένα ηλεκτρόδιο υδρογόνου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C). Αντίστοιχα, η γαλβανική σειρά των μετάλλων παρουσιάζει τις σχετικές δραστηριότητες των μετάλλων και των κραμάτων κατόπιν εμβραπίσεώς τους σε θαλασσινό νερό.

Ο ρυθμός διαβρώσεως εκφράζεται ως διείσδυση της διαβρώσεως στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή το πάχος της απώλειας υλικού ανά μονάδα χρόνου (συνήθως μετρείται σε χιλιοστά απώλειας ανά έτος).

Οι συνηθέστεροι τύποι διαβρώσεως κατατάσσονται ως εξής: **ομοιόμορφη διάβρωση** (uniform attack), **γαλβανική διάβρωση** (galvanic corrosion), **διάβρωση οπής/ρωγμής** (crevice corrosion), **επιφανειακή – βελονοειδής διάβρωση** (pitting), **περικρυσταλλική διάβρωση** (intergranular), **επιλεκτική έκπλυση** (selective leaching), **μηχανική διάβρωση** (erosion-corrosion), **διάβρωση με παράλληλη επιβολή φορτίου** (stress corrosion), **ψαθυροποίηση υδρογόνου** (hydrogen embrittlement).

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε επιγραμματικά τα κυριότερα φαινόμενα της διαβρώσεως.

7.2 Βασικό υπόβαθρο ηλεκτροχημείας.

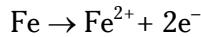
Η διάβρωση για τα μεταλλικά υλικά είναι υπό κανονικές συνθήκες μία ηλεκτροχημική διαδικασία. Πρακτικά συντελείται μία ηλεκτροχημική αντίδραση, κατά την οποία μεταφέρονται ηλεκτρόνια από το ένα μέταλλο στο άλλο. Τα μέταλλα συνήθως χάνουν ηλεκτρόνια από την εξωτερική τους στοιβάδα (αντίδραση οξειδώσεως), δηλαδή οξειδώνονται. Για παράδειγμα, ένα μέταλλο Μ, το οποίο έχει η ηλεκτρόνια e στην εξωτερική του στοιβάδα, μπορεί να οξειδωθεί, σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



όπου Μ: μέταλλο, Μⁿ⁺: θετικά φορτισμένο μέταλλο,

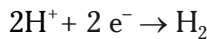
ne^- : αριθμός αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων.

Παράδειγμα ο σίδηρος και το αλουμίνιο:



Το σημείο όπου πραγματοποιείται η απώλεια ηλεκτρονίων καλείται **άνοδος**. Αντίστοιχα, η πλευρά όπου καταλήγουν τα ηλεκτρόδια σύμφωνα με την αναγωγική αντίδραση καλείται **κάθοδος**.

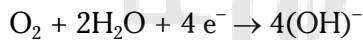
Όταν βρεθούν τα μέταλλα σε όξινα διαλύματα με υψηλή συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (H^+), διαβρώνονται. Η αναγωγική αντίδραση προς παραγωγή αερίου H_2 είναι η ακόλουθη:



Επίσης, μερικές ακόμα αναγωγικές αντιδράσεις είναι πιθανές να συμβούν με βάση τον τύπο του υδατικού διαλύματος, στο οποίο είναι εκτεθειμένο το μέταλλο. Σε παρουσία διαλυμένου οξυγόνου σε όξινο διάλυμα έχουμε την αντίδραση:



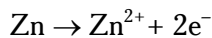
Αντίστοιχα, σε ουδέτερο ή βασικό υδατικό διάλυμα, θα πάρομε την αντίδραση:



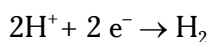
Κάθε ιόν μετάλλου στο υδατικό διάλυμα μπορεί να αναχθεί μερικώς ή πλήρως σύμφωνα με τις παρακάτω δύο αντιδράσεις αντίστοιχα:



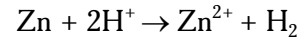
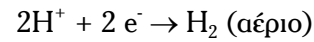
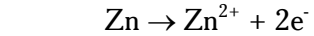
Από τα παραπάνω καθίσταται κατανοητό ότι κατά την πορεία της διαβρώσεως μπορεί να συμβαίνουν μερικές οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις και η συνολική πορεία της οξειδοαναγωγής να συμβεί σε στάδια. Για παράδειγμα, ας δούμε τι συμβαίνει όταν ο ψευδάργυρος εμβαπτιστεί σε όξινο διάλυμα παρουσία H^+ ιόντων. Σε σημεία της επιφάνειάς του ο ψευδάργυρος θα οξειδωθεί σύμφωνα με την αντίδραση:



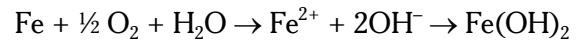
Αντίστοιχα τα H^+ ιόντα θα αναχθούν σύμφωνα με την αντίδραση:



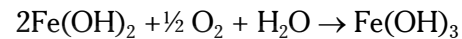
Επομένως, εφόσον δεν συμβαίνουν άλλες οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, η συνολική αντίδραση της διαβρώσεως για τον ψευδάργυρο συνοψίζεται ακολούθως:



Αντίστοιχα, ως τελευταίο παράδειγμα παρουσιάζουμε την οξείδωση του σιδήρου στο νερό, το οποίο περιέχει διαλυμένο οξυγόνο. Η διάβρωση προκύπτει σε δύο στάδια· στο **πρώτο** οξιδώνεται ο σίδηρος σε Fe^{2+} [$\text{Fe}(\text{OH})_2$]

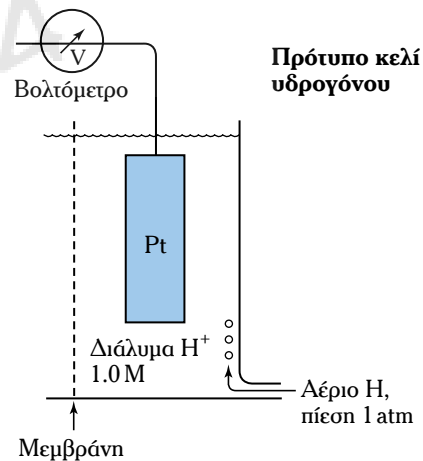


και στο **δεύτερο**, σε Fe^{3+} [$\text{Fe}(\text{OH})_3$]



7.3 Ηλεκτρωνική και γαλβανική σειρά των μετάλλων.

Η μελέτη του ηλεκτρικού δυναμικού βασίζεται στην τάξη μεγέθους του ρεύματος, που παράγεται όταν σε ένα πρότυπο κελί το προς μελέτη μέταλλο είναι σε σύζευξη με ένα ηλεκτρόδιο πλατίνας (Pt), ενώ παράλληλα ιόντα υδρογόνου βρίσκονται στο διάλυμα και αέριο υδρογόνο σε φυσαλίδες περνάει μέσα από το διάλυμα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C) και πίεση μίας ατμόσφαιρας (1 atm). Το πρότυπο αυτό κελί ονομάζεται **κελί υδρογόνου** και παρουσιάζεται στο σχήμα 7.3. Η πλατίνα δεν συμμετέχει στην ηλεκτρωνική αντίδραση. Δρα απλά ως επιφάνεια, πάνω στην οποία τα άτομα υδρογόνου οξειδώνονται ή ανάγονται. Η ηλεκτρωνική σειρά των μετάλλων έχει κατασκευαστεί με τη σύζευξη κελιών διαφόρων μετάλλων με το κελί υδρογόνου και την καταγραφή του ηλεκτρικού δυναμικού διαβρώσεως.

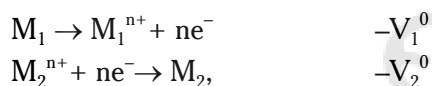


Σχ. 7.3

Πρότυπο κελί υδρογόνου για τη μέτρηση του ηλεκτρικού δυναμικού.

Ο πίνακας Π.Α.11 του Παραρτήματος Α παρουσιάζει την ηλεκτρωνική σειρά των μετάλλων και το δυναμικό διαβρώσεως διαφόρων μετάλλων. Τα μέταλλα που βρίσκονται στο άνω τμήμα είναι ευγενή ή χημικά σταθερά. Κατεβαίνοντας προς τα κάτω στον πίνακα τα μέταλλα γίνονται πιο ενεργά, πράγμα που σημαίνει ότι είναι επιδεκτικότερα οξειδώσεως. Το νάτριο και το κάλιο έχουν το μεγαλύτερο δυναμικό διαβρώσεως.

Για να κατανοήσουμε την έννοια του ηλεκτρικού δυναμικού, θα πρέπει να προσέξουμε τις βασικές αντιδράσεις οξειδώσεως του μετάλλου M_1 και αναγωγής του μετάλλου M_2 :



όπου τα V_1^0 και V_2^0 είναι τα δυναμικά των μετάλλων από την ηλεκτρωνική σειρά των μετάλλων.

Επομένως, οι παραπάνω αντιδράσεις μπορούν να γραφούν τελικά ως εξής:



ενώ το συνολικό δυναμικό διαβρώσεως ΔV^0 είναι:

$$\Delta V^0 = V_2^0 - V_1^0$$

Για να προκύψει αυτή η αντίδραση αυθόρμητα, θα πρέπει το ΔV^0 να είναι θετικό. Αν είναι αρνητικό, η αντίδραση είναι η αντίθετη από αυτή που θεωρήσαμε παραπάνω, δηλαδή:



Στην περίπτωση οξειδοαναγωγής, δηλαδή διαβρώσεως, το μέταλλο με αρνητικό δυναμικό θα υποστεί οξείδωση, ενώ αυτό με το θετικό, αναγωγή.

Παρά το γεγονός ότι η ηλεκτρωνική σειρά των μετάλλων έχει προκύψει κάτω από ιδανικές συνθήκες, έχει, ωστόσο, περιορισμένη πρακτική χρησιμότητα. Στην πράξη υπάρχει μία πιο ρεαλιστική και πρακτική σειρά, η γαλβανική σειρά των μετάλλων (Παραρτ. Α, πίν. Π.Α.12). Αυτή αντιπροσωπεύει τη δραστηριότητα των βασικότερων μετάλλων και κραμάτων, όταν αυτά εκτίθενται (ή εμβαπίζονται) σε θαλασσινό νερό. Τα κράματα κοντά στην κορυφή είναι καθοδικά και μη δραστικά, ενώ αυτά στο κάτω μέρος του πίνακα είναι ανοδικά. Στη σειρά αυτή δεν δίνεται δυναμικό διαβρώσεως. Η σύγκριση με την ηλεκτρωνική σειρά των μετάλλων δείχνει μεγάλη συσχέτιση αναφορικά με τη θέση των βασικών μετάλλων, άρα και το δυναμικό διαβρώσεώς τους. Τα περισσότερα μέταλλα και κράματα οξειδώνονται

λίγο ή περισσότερο σε διαφορετικό περιβάλλον. Πρακτικά τα περισσότερα καθαρά μέταλλα είναι σταθερότερα σε ιοντική κατάσταση παρά σε μεταλλική. Για τον λόγο αυτόν στη φύση συναντώνται κυρίως σε μορφή κραμάτων, οξειδίων, υδροξειδίων, καρβιδίων, σουλφιδίων κ.ά. με εξαίρεση τον χρυσό και την πλατίνα, μέταλλα ευγενή, τα οποία δεν οξειδώνονται και ως εκ τούτου συναντώνται καθαρά.

7.4 Τύποι διαβρώσεως.

Η διάβρωση προκαλεί συνήθως υποβάθμιση της επιφάνειας του μετάλλου/κράματος, με αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία της κατασκευής ή του μέρους της μηχανής, στο οποίο ανήκει το εν λόγω κράμα. Επομένως, είναι σημαντικό να αποφεύγεται ή, αν δεν είναι εφικτή η αποφυγή, πρέπει να διαγνωσθεί εγκαίρως, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προφυλάξεως. Για τον σκοπό αυτόν είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ο τύπος της διαβρώσεως. Σε γενικές γραμμές οι συνηθέστεροι τύποι διαβρώσεως είναι οι ακόλουθοι:

1) Ομοιόμορφη διάβρωση (*uniform attack*).

Πρόκειται για την πιο απλή και πιο διαδεδομένη μορφή διαβρώσεως, κατά την οποία η εμφανιζόμενη ηλεκτροχημική διάβρωση εμφανίζεται στο σύνολο της εκτιθέμενης επιφάνειας οδηγώντας στην εμφάνιση οξειδίου (σκωρίας) επάνω της.

2) Γαλβανική διάβρωση (*galvanic corrosion*).

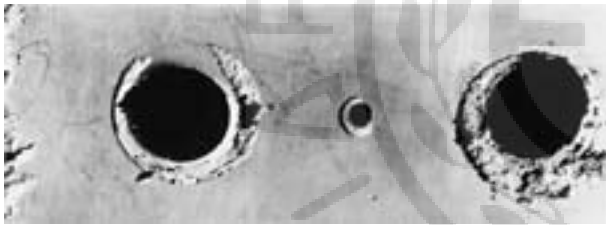
Εμφανίζεται όταν δύο μέταλλα ή κράματα διαφορετικής συστάσεως έρχονται σε επαφή την ώρα που εκτίθενται σε κάποιον ηλεκτρολύτη. Τα λιγότερα ευγενή μέταλλα/κράματα θα διαβρωθούν, ενώ τα πιο ανενεργά μέταλλα, που αποτελούν την κάθοδο, θα παραμείνουν άθικτα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι καλύβδινες βίδες, που διαβρώνονται όταν έρχονται σε επαφή με ορείχαλκο σε θαλάσσιο περιβάλλον. Αντίστοιχα, οι καλύβδινοι σωλήνες, όταν έρχονται σε επαφή με χάλκινες σε σύστημα θερμάνσεως, οι οποίοι διαβρώνονται κοντά στην επαφή των δύο μετάλλων.

Η ένταση της γαλβανικής διαβρώσεως εξαρτάται από την έκταση της επιφάνειας που βρίσκεται σε έκθεση στον ηλεκτρολύτη, ενώ ο ρυθμός της διαβρώσεως από τη σχέση επιφάνειας καθόδου-άνόδου. Αυτό σημαίνει ότι για δεδομένη επιφάνεια καθόδου μία μικρότερη άνοδος θα διαβρωθεί ραγδαία σε σχέση με μία μεγάλη. Η αιτία βρίσκεται στο παραγόμενο

ρεύμα ανά μονάδα επιφάνειας, που διαβρώνεται, και όχι απλά στην ένταση του παραγόμενου ρεύματος διαβρώσεως.

3) Διάβρωση οπής/ρωγμής (*crevice corrosion*).

Ηλεκτροχημική διάβρωση μπορεί να εμφανιστεί και μεταξύ δύο περιοχών του ίδιου μεταλλικού αντικειμένου ως αποτέλεσμα της συγκεντρώσεως ιόντων ή της διαλύσεως αερίων σε ηλεκτρολύτη. Για ένα τέτοιο κελί συγκεντρώσεως η διάβρωση εμφανίζεται στην περιοχή με τη χαμηλότερη συγκέντρωση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διάβρωση σε οπές ή σε επιφανειακές ρωγμές ή σε σημεία εναποθέσεως περιβαλλοντικών ακαθαρσιών ή σε προϊόντα οξειδώσεως, όπου το διάλυμα ή ο ηλεκτρολύτης εγκλωβίζεται και μπορεί να οδηγήσει σε διάλυση οξυγόνου. Η οξείδωση των σημείων αυτών είναι τοπική, εντοπίζεται στις επιφανειακές αυτές ανωμαλίες και καλείται διάβρωση οπής/ρωγμής (σχ. 7.4α). Η οπή συνήθως είναι αρκετά μικρή για να μπορεί να εισχωρήσει το διάλυμα. Ωστόσο, είναι και φαρδιά για να μπορεί να το εγκλωβίσει.



Σχ. 7.4α

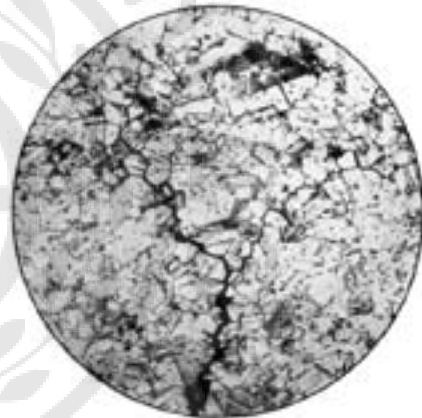
Εμφάνιση διαβρώσεως οπής σε πλάκα ευρισκόμενη σε θαλασσινό νερό.

4) Επιφανειακή – βελονοειδής διάβρωση (*pitting*).

Πρόκειται, και στην περίπτωση αυτή, για τοπική διαβρωτική επίθεση, που εμφανίζεται σε μικρά ανοίγματα ή οπές. Ο μηχανισμός είναι παραπλήσιος με αυτόν της διαβρώσεως οπής/ρωγμής. Εμφανίζεται συνήθως στα μέταλλα σε περιοχές όπου υπάρχουν επιφανειακές ατέλειες, όπως εκδορές, χαραγές ή διαφοροποιήσεις στη χημική σύσταση. Οι εξαιρετικά λειασμένες επιφάνειες παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε αυτόν τον τύπο διαβρώσεως. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες γενικά παρουσιάζουν επιδεκτικότητα διαβρώσεως αυτού του τύπου, αλλά με κραμάτωση με 2% κ.β. μολυβδαίνιο το θέμα αυτό αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά.

5) Περικρυσταλλική διάβρωση (*intergranular*) (σχ. 7.4β).

Όπως γίνεται κατανοητό και από την ονομασία της διαβρώσεως αυτής, προκύπτει κατά μήκος ορίων κόκκου του υλικού σε συγκεκριμένο περιβάλλον. Μακροσκοπικά το αποτέλεσμα είναι η αποδόμηση και υποβάθμιση της επιφάνειας του υλικού κατά μήκος των ορίων κόκκου του. Ιδιαίτερα συμβαίνει σε ορισμένους ανοξείδωτους χάλυβες όταν αυτοί θερμαίνονται μεταξύ 500°C και 850°C για σχετικά μεγάλα διαστήματα. Αυτό επιτρέπει την κατακρήμνιση καρβιδίου του χρωμίου στα όρια των κόκκων με μείωση αντίστοιχα της περιεκτικότητας του χρωμίου πλησίον των ορίων κόκκου. Αποτέλεσμα είναι να στερείται ο χάλυβας της προστασίας-παθητικοποίησης της επιφάνειάς του από το χρώμιο και τελικά να διαβρώνεται περικρυσταλλικά. Το συγκεκριμένο πρόβλημα εμφανίζεται έντονα στις συγκολλήσεις ανοξείδωτων χαλύβων.



Σχ. 7.4β

Σχήμα μικροδομής με εμφάνιση περικρυσταλλικής διαβρώσεως μετά την επιβολή φορτίου (*intergranular stress corrosion cracking*) σε ορείχαλκο.

6) Επιλεκτική έκπλυση (*selective leaching*).

Αυτού του είδους η διάβρωση συμβαίνει στα κράματα που περιέχουν στερεά διαλύματα, όταν ένα στοιχείο εκ του στερεού διαλύματος απομακρύνεται επιλεκτικά ως αποτέλεσμα διεργασιών διαβρώσεως. Το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα είναι η επιλεκτική απομάκρυνση του ψευδαργύρου από τους ορείχαλκους (κράμα χαλκού-ψευδαργύρου). Έτσι, εκτός του γεγονότος ότι οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος υποφέρουν από την απομάκρυνση του ψευδαργύρου, ο χρωματισμός του κράματος επηρεάζεται και παίρνει ερυθρά μορφή από κιτρινωπή που ήταν μέχρι πρότινος. Αντίστοιχη επιλεκτική έκπλυση συμβαίνει και σε

άλλα συστήματα, όπως το αλουμίνιο, ο σίδηρος, το κοβάλτιο, το χρώμιο κ.ά..

7) Μηχανική διάβρωση (*erosion-corrosion*).

Προκύπτει από τη συνδυαστική δράση χημικής επιθέσεως και μηχανικής εκτριβής ή φθοράς ως αποτέλεσμα της κινήσεως ενός υγρού. Πρακτικά κάθε μέταλλο ή κράμα είναι επιδεκτικό μηχανικής διαβρώσεως. Ιδιαίτερα για τα μέταλλα, τα οποία παθητικοποιούνται από ένα λεπτό υμένιο οξειδίου στην επιφάνειά τους, είναι εξαιρετικά καταστρεπτικό το αποτέλεσμα της μηχανικής διαβρώσεως. Τα μαλακά μέταλλα, όπως ο χαλκός ή ο μόλυβδος, είναι αυτά τα οποία είναι τα πιο ευαίσθητα στη διάβρωση αυτή. Συμβαίνει συνέχεια σε τουρμπίνες, σε λεπίδες, σε βαλβίδες, σε αντλίες, σε προπέλες πλοίων και σε κινητά μέρη μηχανών μέσα σε υγρά, σε σωλήνες, ιδιαίτερα σε σημεία αλλαγής πορείας του υγρού μέσου ή σε σημεία τυρβώδους ροής.

8) Διάβρωση με παράλληλη επιβολή φορτίου (*stress corrosion*).

Η συνδυασμένη δράση διαβρώσεως και φορτίσεως, συγκεκριμένα εφελκυστικών τάσεων, οδηγεί σε ταχεία αποδόμηση της επιφάνειας κάποιων υλικών. Ιδιαίτερα εμφανής είναι η υποβάθμιση της επιφάνειας υπό την επίδραση εφελκυστικών τάσεων, ενώ η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος θα μπορούσε να μην οδηγήσει από μόνη της σε υποβάθμιση και αστοχία. Μάλιστα η αστοχία επέρχεται με τρόπο ψαθυρό και μάλιστα σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα τάσεων, σημαντικά χαμηλότερα από το όριο θραύσεως του υλικού. Παράδειγμα τέτοιας αστοχίας είναι στους ανοξειδωτους χάλυβες όταν αυτοί βρίσκονται σε περιβάλλον ιόντων χλωρίου ή στους ορείχαλκους, όταν εκτεθούν σε αμμωνία.

9) Ψαθυροποίηση υδρογόνου (*hydrogen embrittlement*).

Διάφορα κράματα, ιδιαίτερα οι χάλυβες, αλλά και οι ορείχαλκοι, εμφανίζουν σημαντική υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και, επί πλέον, εκτεταμένη ρηγμάτωση μετά από διείσδυση ατομικού υδρογόνου στο πλέγμα τους. Το υδρογόνο, το οποίο διαθέτει τη μικρότερη ατομική ακτίνα, μπορεί εύκολα να παρεισφρύσει στο πλέγμα και να βρεθεί σε ατέλειες αυτού (π.χ. διαταραχές), σε όρια κόκκου και σε εγκλείσματα. Σε περίπτωση που δύο άτομα υδρογόνου έρθουν σε επαφή, σχηματίζεται αέριο H_2 , το οποίο και διαφεύγει με έκρηξη προκαλώντας τεράστια ρήγματα στο μέταλλο. Η ψαθυροποίηση υδρογόνου είναι εντονότερη όταν υπάρχουν παραμένουσες

τάσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα του μετάλλου/κράματος. Το φαινόμενο είναι έντονο σε αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου ή φυσικού αερίου παρουσία υδροθείου (H_2S). Στην περίπτωση αυτή, η διείσδυση του ατομικού υδρογόνου στο πλέγμα του σιδήρου έρχεται ως αποτέλεσμα διαβρώσεως του σιδήρου, με αποτέλεσμα τη διάσπαση του υδροθείου και τον σχηματισμό σουλφιδίου του σιδήρου (Fe_2S) και ατομικού υδρογόνου, το οποίο και προσροφάται στο μεταλλικό πλέγμα του σιδήρου.

7.5 Προστασία από τη διάβρωση.

Η προστασία από τη διάβρωση είναι τόσο αποτελεσματική, όσο καλύτερα αντιληφθούμε την επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος και των τύπων διαβρώσεως σε συνάρτηση με το εκάστοτε μέταλλο ή κράμα.

Διαβρωτικό περιβάλλον αποτελεί η ατμόσφαιρα, τα υδατικά διαλύματα, το χώμα, τα οξέα, οι βάσεις, οι ανόργανοι διαλύτες, τα τήγματα αλάτων, τα υγρά μέταλλα και το ανθρώπινο σώμα. Για την προστασία από τη διάβρωση πρέπει πρωτίστως να αναλύεται το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και να εκτεθεί το μέταλλο/κράμα κατά τη λειτουργία του.

Φυσικά το κόστος της προστασίας πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, πάντα σε συνδυασμό με τη χρήση και τις συνθήκες λειτουργίας του εκάστοτε συστήματος. Αν και πολλές φορές είναι εφικτή η απόλυτη προστασία από τη διάβρωση, το κόστος μπορεί να είναι ο σημαντικότερος περιοριστικός παράγοντας. Για παράδειγμα, στην περίπτωση χαλυβδίνων κατασκευών, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ανοξειδωτοι χάλυβες, κάτι που όμως θα ήταν ιδιαίτερος δαπανηρό. Επομένως, χρησιμοποιούνται βαφές ή επικαλύψεις για τη μόνωση των εκτεθειμένων μεταλλικών μερών. Άλλες φορές η αλλαγή του περιβάλλοντος λειτουργίας, π.χ. με τη μείωση της θερμοκρασίας, την αλλαγή της χημικής συστάσεως των διαλυμάτων του ηλεκτρολύτη κ.ά., μπορούν να αποτελέσουν αποτελεσματική λύση.

Η παθητικοποίηση αποτελεί σε πληθώρα περιπτώσεων τη βέλτιστη αντιδιαβρωτική λύση. Επί πλέον, στην περίπτωση ηλεκτρολυτών χρησιμοποιούνται ουσίες που μειώνουν την δραστηρότητά τους. Οι ουσίες αυτές καλούνται **ανασταλτικοί παράγοντες** (inhibitors). Η σύστασή τους εξαρτάται από τα χρησιμοποιούμενα κράματα και τους διαθέσιμους ηλεκτρολύτες, αλλά και το διαβρωτικό περιβάλλον εν γένει.

Παρακάτω πραγματοποιείται μία συνοπτική αναφορά σε άμεσα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για την προστασία από διάφορους χαρακτηριστικούς τύπους διαβρώσεως.

1) Τα μέτρα για την **προστασία απ' τη γαλβανική διάβρωση** είναι:

α) Στην περίπτωση που είναι απαραίτητη η επαφή μεταξύ ανομοίων μετάλλων ή κραμάτων, θα πρέπει να επιλέγονται δύο τέτοια, που βρίσκονται κοντά στη γαλβανική σειρά.

β) Η μη βέλτιστη επιφάνεια εκθέσεως ανόδου-καθόδου θα πρέπει να αποφεύγεται. Πρακτικά πρέπει να επιλέγεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανοδική επιφάνεια.

γ) Να μονώνονται ηλεκτρικά τα ανόμοια μέταλλα.

δ) Να συνδέεται ένα τρίτο ανοδικό μέταλλο με τα άλλα δύο, ώστε να επιτυγχάνεται καθοδική προστασία (σχ. 7.5).

2) Τα μέτρα για **προστασία από την περιφερειακή διάβρωση** στις **συγκολλήσεις ανοξειδωτών χαλύβων** πρέπει:

α) Να υπόκεινται οι συγκολλήσεις σε θερμική καταργασία υψηλής θερμοκρασίας για τη διαδικασία διαλύσεως των καρβιδίων του χρωμίου.

β) Να περιορίζεται η περιεκτικότητα του ανοξει-

δωτου χάλυβα σε άνθρακα, συνήθως κάτω από 0,03%-κ.β. C, ώστε ο σχηματισμός καρβιδίων να είναι εξαιρετικά περιορισμένος.

γ) Να κραματώνεται ο χάλυβας με πιο καρβιδιογόνα μέταλλα, όπως το νιόβιο ή το τιτάνιο, ώστε να σχηματίζουν αυτά τα καρβίδια και το χρώμιο να παραμένει σε στερεό διάλυμα.

3) Για την **αποφυγή μηχανικής διαβρώσεως** πρέπει:

α) Να χρησιμοποιούνται σκληρές επικαλύψεις σε μαλακά υλικά.

β) Να χρησιμοποιούνται όσο τον δυνατόν υψηλότερης σκληρότητας κράματα.

γ) Να αλλάζει ο σχεδιασμός στις αντλίες, ώστε να αποφεύγεται η τυρβώδης ροή, και

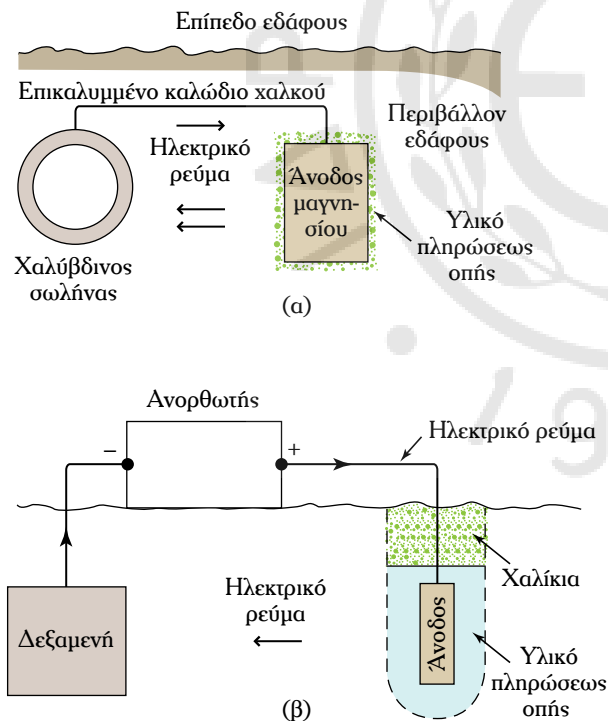
δ) να απομακρύνονται τυχόν φυσαλίδες ή εισερχόμενα σώματα μέσα στο υγρό μέσο.

Για την **αποφυγή της διαβρώσεως με παράλληλη φόρτιση** (stress corrosion) θα πρέπει να μειωθεί ή να απαλειφθεί το επίπεδο των εφαρμοζόμενων τάσεων ή να αυξηθεί η διατομή του φορτιζόμενου κράματος. Επί πλέον, οι όποιες παραμένουσες τάσεις θα πρέπει να έχουν εξαιρεθεί μετά από κατάλληλη θερμική καταργασία εξομαλύνσεως.

Τέλος, σε κατασκευές, σε πλοία ή και αλλού μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λεγόμενη **καθοδική προστασία**¹, που αποτελεί μία από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους αντιδιαβρωτικής προστασίας. Εξάλλου σε πληθώρα περιπτώσεων μπορεί να σταματήσει ολοσχερώς την διάβρωση. Στην περίπτωση αυτή η διάβρωση ενός μετάλλου εμφανίζεται ως εξής:



Σύμφωνα με την καθοδική προστασία διοχετεύεται ρεύμα από μία εξωτερική πηγή. Έτσι, τα ηλεκτρόνια προστατεύουν το μέταλλο καθιστώντας το κάθοδο. Επομένως, η παραπάνω αντίδραση αντιστρέφεται και γίνεται αναγωγική. Το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα της τεχνικής αυτής είναι το **γαλβανικό στοιχείο** (galvanic couple). Σύμφωνα με αυτό το μέταλλο, που προστατεύεται, συνδέεται με ένα δραστικότερο εντός του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Το τελευταίο αναλώνεται, αφού οξειδώνεται προστατεύοντας το πρώτο (το λιγότερο δραστικό) και καλείται **θυσιαζόμενη άνοδος** (sacrificial anode). Τα συνηθέστερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται ως θυσιαζόμενες άνοδοι είναι ο ψευδάργυρος και το μαγνήσιο, καθώς βρίσκονται στο τέλος της ανοδικής γαλβανικής σειράς.



Σχ. 7.5

Καθοδική προστασία σε υπογειοποιημένο αγωγό (α) με τη χρήση θυσιαζόμενης ανόδου από μαγνήσιο και (β) σε υπόγεια δεξαμενή με τη χρήση επιβαλλόμενου ρεύματος.

¹ Βλ. Ι. Δάγκινη - Α. Γλύκα, *Βοηθητικά Μηχανήματα Πλοίων*, Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου, 2015, Παράρτημα Β', σελ. 489.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

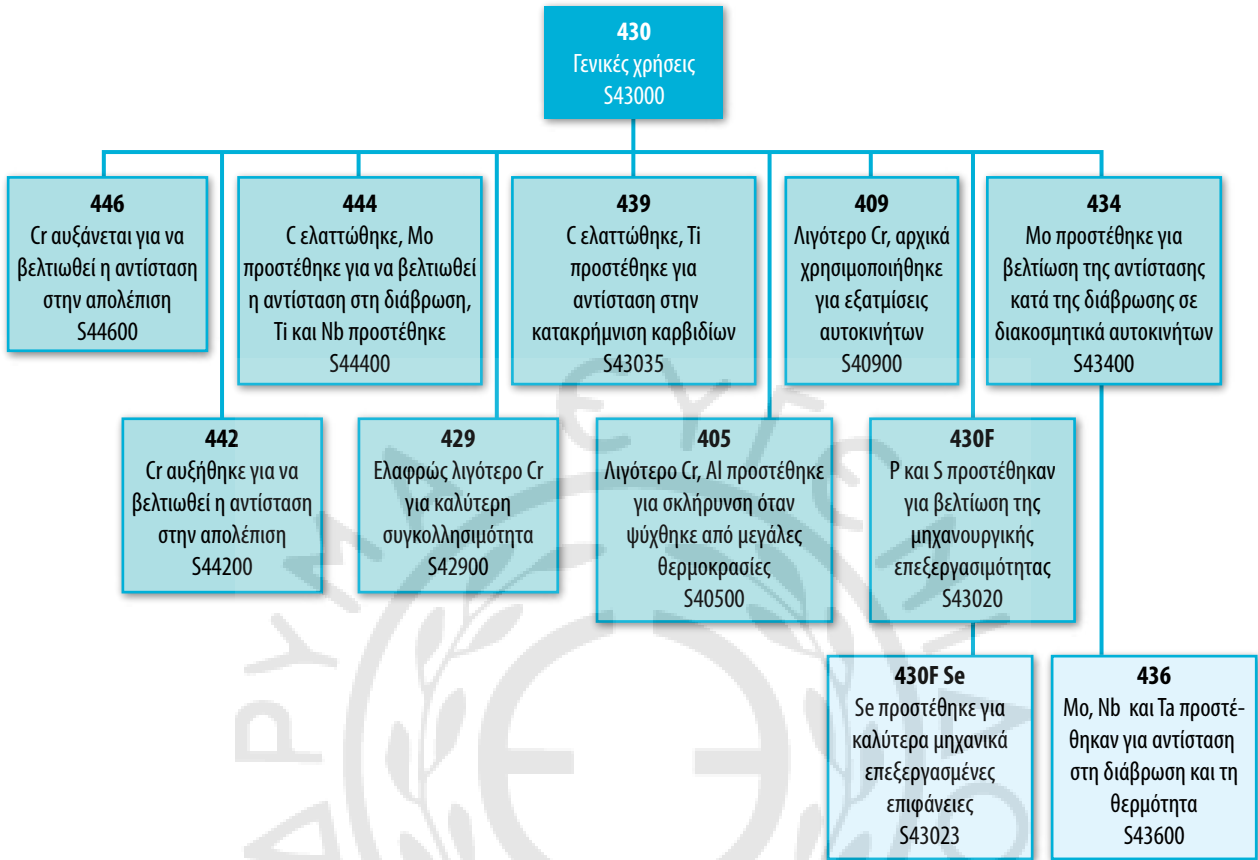
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακες

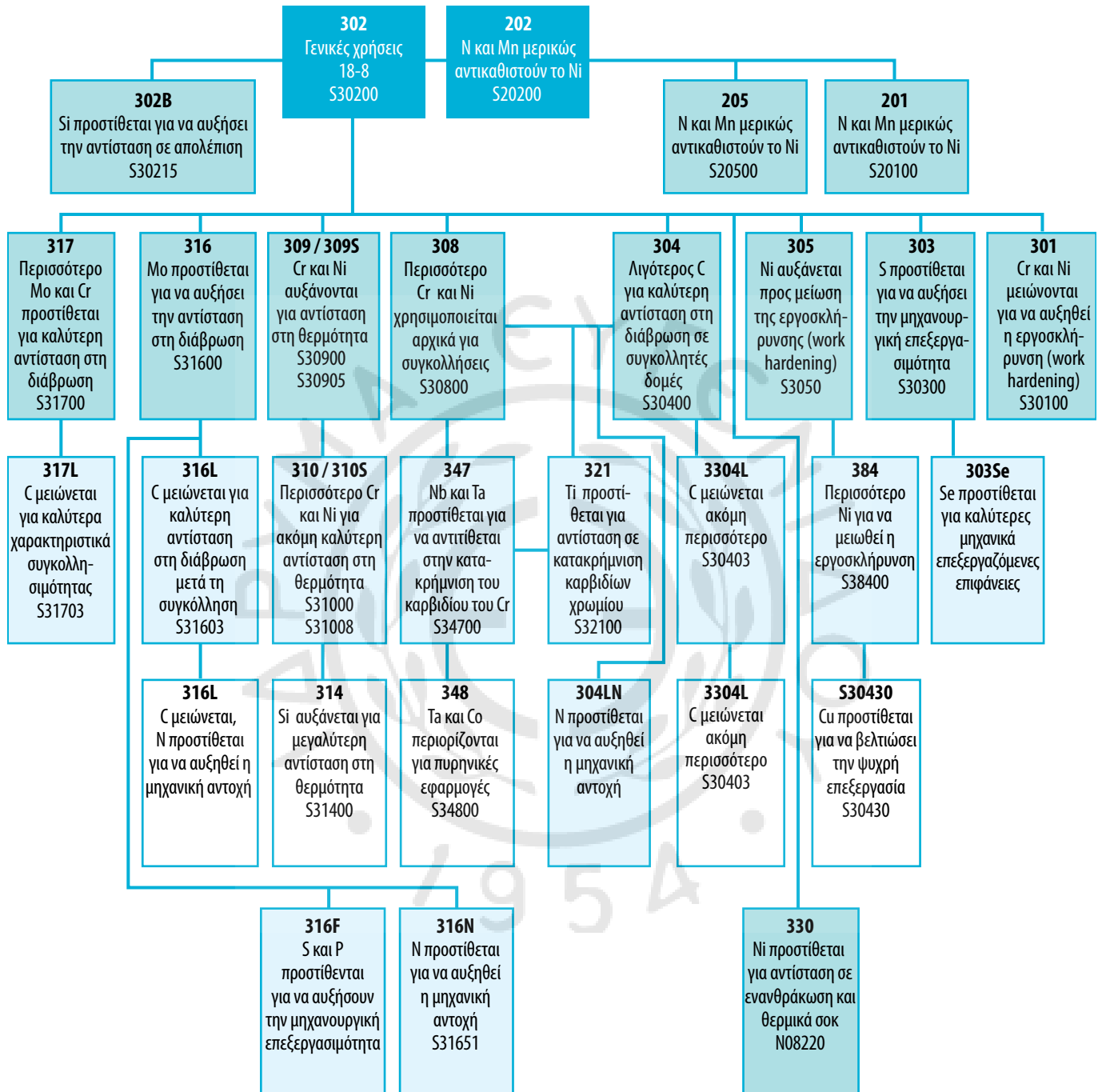
Πίνακας Π.Α.1
Ειδικοί χυτοσίδηροι.

Χημική σύνθεση (% κ.β.)								Μηχανικές ιδιότητες		Ιδιότητες/ Βιομηχανικές χρήσεις
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Άλλα στοιχεία	[N/mm ²]	Σκληρότητα κατά Brinell	
3,2	2,1	0,8	0,05	0,17	–	0,30	–	290	230	Σώματα κυλίνδρων μηχανών εσωτερικής καύσεως, τύμπανα φρένων κ.λπ..
3,6	2,8	0,6	0,05	0,50			0,17 V			Ανθεκτικός σε φθορά από τριβή και με μεγάλη διάρκεια ζωής. Ελατήρια εμβόλων βενζινομηχανών και πετρελαιομηχανών.
3,1	2,1	0,8	0,08	0,09	0,50	0,90	0,90 Mo	380	300	Σκληρός, ανθεκτικός, δύσθραυστος.
3,4	2,0	0,6	0,05	0,10	0,35	0,65	1,25 Cu	290	220	Ανθεκτικός σε φθορά. Τύμπανα φρένων και δίσκοι συμπλέκτη.
3,3	1,1	0,5			4,50	1,50			600	Μαρτενιτικός με μεγάλη αντοχή στη φθορά από τριβή.
2,8 2,9	1,3 2,1	1,0	0,05	0,10	21,00 15,00	2,00 2,00	6,00 Cu	180 220	140 130	Ωστενιτικός, αμαγνητικός, ανθεκτικός στη διάβρωση Ωστενιτικός, ανθεκτικός στη διάβρωση. Χυτά αντλιών.
2,8 2,5	1,5 5,0	6,0	–	–	11,00	–	–	250 180	210	Ωστενιτικός, ανθεκτικός στη διάβρωση, πυρίμαχος.

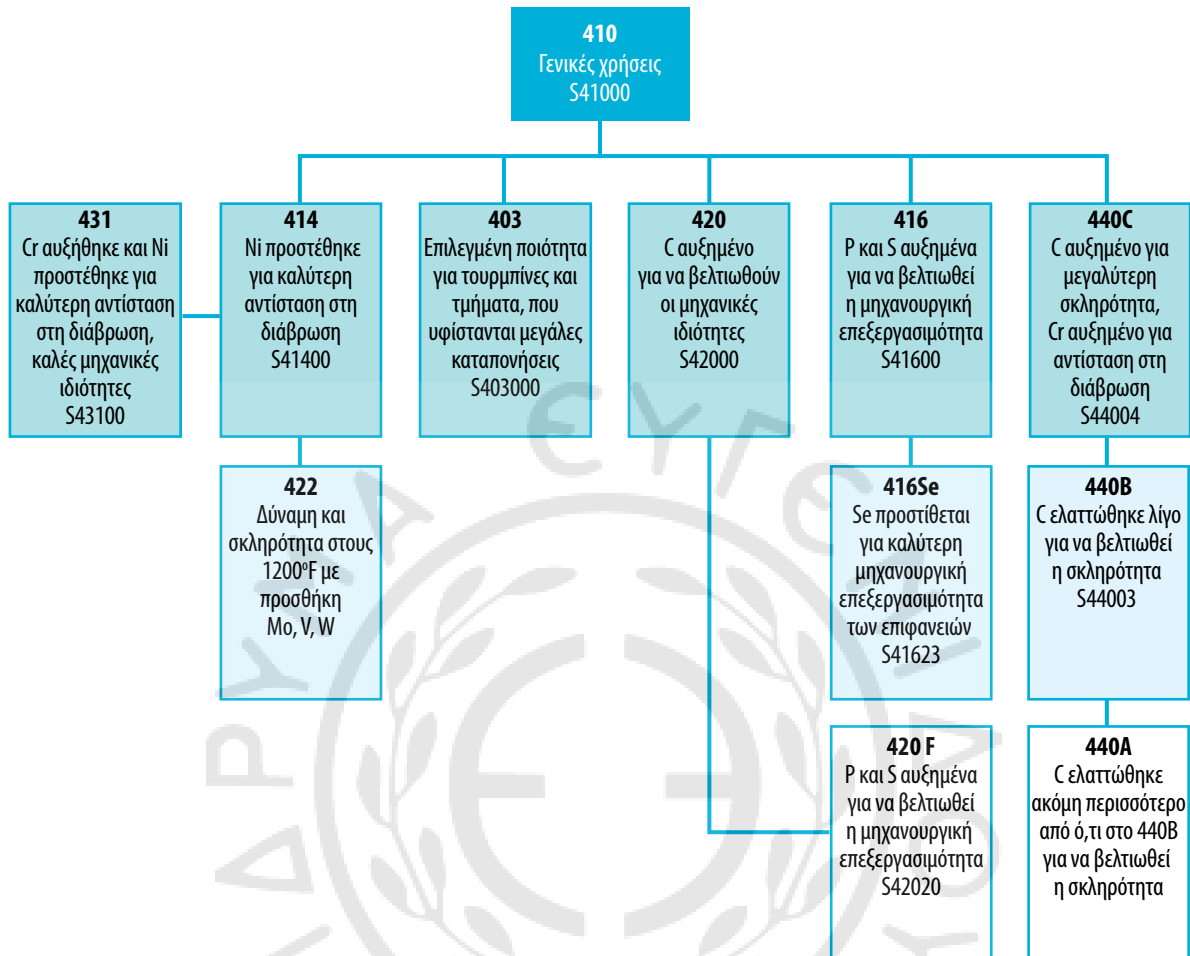
Πίνακας Π.Α.2
Οικογενειακές σχέσεις φερριτικών ανοξειδωτων χαλύβων.



Πίνακας Π.Α.3
Οικογενειακές σχέσεις ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων.



Πίνακας Π.Α.4
Οικογενειακές σχέσεις μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.



Πίνακας Π.Α.5
Χημική σύσταση, μηχανικές ιδιότητες φερριτικών και ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.

Χάλυβας	Χημική σύσταση (% κ.β.)											Μηχανικές ιδιότητες*		
	C (max)	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Μο	N	Άλλο	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	
Ωστενιτικός	201	0,2	5,5–7,5	1,0	17,0	4,2	0,06	0,03	–	0,25	–	310	655	40
	202	0,15	7,5–10,0	1,0	18,0	5,0	0,06	0,03	–	0,10	–	260	620	40
	205	0,12–0,25	14,0–15,5	1,0	17,2	1,4	0,06	0,03	–	0,36	–	450	790	40
	216	0,05	8,50	1,00	10,0	6,0		0,03	2,5	0,4	–	415	690	40
	304	0,08	2,0	1,0	19,0	10,0	0,054	0,03	–	–	0,15 min Se	295	660	56
	304L	0,04–0,10	2,0	1	19,0	10,0	0,05	0,03	–	–	–	310	620	30
	316	0,08	2,0	1	17,0	12,0	0,05	0,03	2,5	–	–	275	595	60
	316L	0,03	2,0	1	17,0	12,0	0,05	0,03	2,5	–	–	310	620	40
Φερριτικός	405	0,08	–	–	14,5	–	–	–	–	–	0,1–0,3 Al	170	415	20
	409	0,08	–	–	12,0	0,5	–	–	–	–	0,1–0,3 Al	205	380	20
	441	0,02	–	–	18,0	0,30	0,04	0,03	0,5-1	–	0,7 Nb, 0,3 Ti	310	550	20
	439	0,07	–	–	19,0	0,5	0,06	0,15 min	–	–	1,2 Al, 0,4 Ti	365	530	23

* Οι μηχανικές ιδιότητες είναι μετρημένες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και οι χάλυβες είναι σε ανοπτημένη (μαλακή) κατάσταση. YS: όριο διαρροής και TS: όριο θραύσεως, EL: επιμήκυνση θραύσεως.

Πίνακας Π.Α.6
Αντιστοιχία ευρωπαϊκών και εθνικών συμβόλων για χάλυβες.

Ευρωπαϊκός χαρακτηρισμός		Παλαιοί εθνικοί χαρακτηρισμοί										
Σύμβολο EN 10027-1	Αριθμός υλικού	EN 10025-1990	Γερμανία DIN	Γαλλία AFNOR	Ηνωμένο Βασίλειο BSI	Ισπανία AENOR	Ιταλία UNI	Βέλγιο NBN	Σουηδία SIS	Πορτογαλία IPQ	Αυστρία ON	Νορβηγία SN
S185	1.0035	Fe310-0	St33	A33		A310-0	Fe320	A320	1300-00	Fe310-0	St320	
S235JR	1.0037	Fe360B	St37-2	A37-2/ E24-2			Fe360B	AE235-B/AE24B/ AE235C/37B/360C	1311-00	Fe360-B		NS12120
S235JRG1	1.0036	Fe360BFU	USt37-2			AE235B-FU					U St360B	NS12122
S235JRG2	1.0038	Fe360BFN	RSt37-2		40B	AE235BFN			1312-00		R St360B	NS12123
S235JO	1.0114	Fe360C	St37-3U	E24-3	40C	AE235C	Fe360C	AE235-C		Fe360-C	St360C	NS12124
S235J2G3	1.0116	Fe360D1	St37-3N	E24-4	40D	AE235D	Fe360D	AE235-D		Fe360-D	St360D	NS12124
S235J2G4	1.0117	Fe360D2					430B					
S275JR	1.0044	Fe430B	St44-2	E28-2	43B	AE275B	Fe430C	AE255-B	1412-00	Fe430-B	St430B	NS12142
S275JO	1.0143	Fe430C	St44-3U	E28-3	43C	AE275C	Fe430D	AE255-C		Fe430-C	St430C	NS12143
S275J2G3	1.0144	Fe430D1	St44-3N	E28-4	43D	AE275D	Fe	AE255-D	1414-00	Fe430-D	St430D	NS12143
S275J2G4	1.0145	Fe430D2				355B	510B		1414-01			
S355JR	1.0045	Fe510B		E36-2	50B	AE355C	Fe510C	AE355-B		Fe510-B		
S355JO	1.0553	Fe510C	St52-3U	E36-3	50C	AE355D	Fe510D	AE355-C		Fe510-C	St510C	NS12153
S355J2G3	1.0570	Fe510D1	St52-3N/ St52-3	E36-3	50D	AE	Fe	AE355D/AE36C/ A52C/A510D		Fe510-D	St510D	NS12153
S355J2G4	1.0577	Fe510D2										
S355K2G3	1.0595	Fe510DD1		E36-4	50DD			AE355-DD		Fe510-DD		
S355K2G4	1.0596	Fe510DD2					480					
E295	1.0050	Fe490-2	St50-2	A50-2		A490	Fe580	A490-2	1550-00	Fe490-2	St460	
E335	1.0060	Fe590-2	St50-3	A60-2		A590	Fe680	A590-2	1650-00	Fe590-2	St590	
E360	1.0070	Fe690-2	St50-4	A70-2		A690	Fe		1655-00	Fe690-2	St690	

Σημείωση: Το πρότυπο EN 10025-1990 ακολουθεί τους συμβολισμούς κατά EURONORM.

Πίνακας Π.Α.7
Αντιστοιχία διεθνών και εθνικών συμβόλων για χάλυβες.

Ευρωπαϊκός χαρακτηρισμός		Παλαιοί εθνικοί χαρακτηρισμοί			ΗΠΑ
Σύμβολο EN 10027-1	Αριθμός υλικού	Γερμανία DIN	Γαλλία AFNOR	Βέλγιο NBN	
C15E	1.1141	Ck15	XC18		SAE1015
C35E 1.1181		Ck35	XC38	C35-2/C36	SAE1035
C45E	1.1191	Ck45	XC48	C45m	SAE1045
	1.5217	20MnV6	20MV6		
E355	1.0580	St52	Tu52b/A50	4LM	SAE1518
	1.1235	37Mn6			
C35	1.0501	C35	XC38	C30-2/C35-2/A490-2	A360gr80
11SMnPb37	1.0737	9SMnPb36	S300Pb		SAE12L14
11SMn37	1.0736	9SMn36	S300		SAE1213
11SMnPb30	1.0718	9SMnPb28	S250Pb		SAE12L13
11SMn30	1.0715	9SMn28	S250		SAE1213
46S20	1.0727	45S20	45MF6.3	ETG100	SAE1144
16MnCr5	1.7131	16MnCr5G	16MC5/16MC/ NFA35-552	16MnCr5G/ NBN253-03/16MnCr5	
20NiCrMo2-2	1.6523	21NiCrMo2	20NCD2	20NiCrMo2	SAE8620
42CrMoS4	1.7227	42CrMoS4V	42CD4T	42CrMoS4V	SAE4140
42CrMo4	1.7225	42CrMo4V	42CD4	42CrMo4	SAE4140
34CrNiMo6	1.6582	34CrNiMo6V	35NCD6T/ 35NCD6	35NiCrMo6V/ NiCrMo415	
	1.2328	45CrMoV7	45KDV7		
	1.0605	C75	C75		
	1.0903	51Si7	50S7	Si518	
51CrV4	1.8159	50CrV4	520CrV4	50CrV4	SAE6150
X210CrW12	1.2436	X210CrW12	Z200CW12		AISID3
X210Cr12	1.2080	X210Cr12	Z200C12		AISID3
X5CrNi18-10	1.4301	X5CrNi18.9	Z6CN18.09		AISI304
X8CrNiS18-9	1.4305	X12CrNiS18.8	Z10CNF18.09		AISI303

Πίνακας Π.Α.8
Επίδραση των στοιχείων στα υπερκράματα.

Επίδραση	Υπερκράματα με βάση		
	τον σίδηρο	το κοβάλτιο	το νικέλιο
Στερεό διάλυμα (solid solution)	Cr, Mo	Nb, Cr, Mo, Ni, W, Ta	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
Ισοχυροποίηση του fcc	C, W, Ni	Ni	...
Καρβίδια			
MC	Ti	Ti, Ta, Nb	W, Ta, Ti, Mo, Nb
M ₇ C ₃	...	Cr	Cr
M ₂₃ C ₆	Cr	Cr	Cr, Mo, W
M ₆ C	Mo	Mo, W	Mo, W
Καρβονιρίδια			
M(CN)	C, N	C, N	C, N
γ-Ni ₃ (Al,Ti)	Al, Ni, Ti	...	Al, Ti
Καθυστέρηση σχηματισμού εξαγωνικού η(Ni ₃ Ti)	Al, Zr
Κατακρήμνιση ενώσεων (pre- cipitation)	Al, Ni, Nb	Al, Mo, Ti(α), W, Ta	Al, Ti, Nb
Σχηματίζει γ''(Ni ₃ Nb)	Nb
Αντίσταση στην οξειδωση	Cr	Al, Cr	Al, Cr
Αντίσταση στη διάβρωση εν θερμώ (hot corrosion resis- tance)	La, Y	La, Y, Th	La, Th
Αντίσταση στον σχηματισμό σουλφιδίων (sulfidation resis- tance)	Cr	Cr	Cr
Αύξηση ολκιμότητας (rupture ductility)	B	B, Zr	B, Zr
Κατακρήμνιση σε όρια κόκκων (grain boundary segregation)	B, C, Zr

Πίνακας Π.Α.9
Τυποποίηση και ιδιότητες των σκληρομετάλλων.

Τυποποίηση κατά DIN 4990			Χημική σύνθεση [%] περίπου			Άλλες ιδιότητες				
Κατηγορίες	Ποιότητες	Διακριτικό χρώμα	Καρβίδιο βολφραμίου	Καρβίδιο τιτανίου + Καρβίδιο τανταλίου	Κοβάλτιο	Σκληρότητα κατά Vickers	Πυκνότητα [g/cm ³]			
P	P01 ₃	↑ ↓ 1 2 ↑ ↓	Γαλάζιο	51	43	6	1.800	8,5		
	P10			65	26	9	1.600	10,7		
	P20			76	14	10	1.500	11,9		
	P25			70	20	10	1.450	12,5		
	P30			82	8	10	1.450	13,1		
	P40			74	12	14	1.350	12,6		
	P50			67	15	18	1.250	12,4		
	M10			84	10	6	1.700	13,1		
M K	M20	↑ ↓ 1 2 ↑ ↓	Κίτρινο	82	10	8	1.550	13,3		
	M30			79	6	15	1.300	13,6		
	K01			92	4	4	1.800	15,0		
	K05			91	3	6	1.750	14,5		
	K		K10	↑ ↓ 1 2 ↑ ↓	Κόκκινο	92	2	6	1.650	14,8
			K20			92	2	6	1.550	14,8
			K30			91	–	9	1.400	14,6
			K40			88		12	1.300	14,3

Κατά τη φορά του τόξου 1: Αύξηση σκληρότητας αντοχής σε φθορά, ταχύτητα κοπής.
Ελάττωση της δυσθραυστότητας.

Κατά τη φορά του τόξου 2: Αύξηση δυσθραυστότητας ταχύτητας προώσεως.
Ελάττωση σκληρότητας, αντοχής σε φθορά, ταχύτητας κοπής.

Πίνακας Π.Α.10
Μηχανικές ιδιότητες συνηθισμένων καθαρών μετάλλων.

Μέταλλο	Μέγιστη αντοχή	Επιμήκνωση θραύσεως	Σκληρότητα κατά Brinell	Δυσθραυστότητα
	σ_B [N/mm ²]	A [%]	H _B	P [Nm/mm ²]
Αλουμίνιο (Al)	70 – 110	35 – 45	15 – 20	100 – 110
Κασσίτερος (Sn)	27,7	40	5	–
Μαγνήσιο (Mg)	170 – 190	4,6 – 6,0	33	–
Μόλυβδος (Pb)	11 – 19	50 – 70	7,0	–
Νικέλιο (Ni)	110 – 180	35 – 45	80 – 100	190
Σίδηρος (Fe)	180 – 250	40 – 50	50 – 70	160 – 200
Χαλκός (Cu)	210 – 240	38 – 50	40	60 – 100
Ψευδάργυρος (Zn)	140 – 200	18 – 35	30 – 32	6 – 8

Πίνακας Π.Α.11
Ηλεκτρωνική σειρά των μετάλλων.

	Ηλεκτροχημική αντίδραση	Δυναμικό ηλεκτροδίου V^0 (V)
↑ Αυξανόμενα αδρανής (καθοδική)	$Au^{3+} + 3e^- \rightarrow Au$	+1,420
	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	+1,229
	$Pt^{2+} + 2e^- \rightarrow Pt$	~+1,2
	$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$	+0,800
	$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	+0,771
	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4(OH^-)$	+0,401
	$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	+0,340
	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	0,000
	$Pb^{2+} + 2e^- \rightarrow Pb$	-0,126
	$Sn^{2+} + 2e^- \rightarrow Sn$	-0,136
↓ Αυξανόμενα ενεργή (ανοδική)	$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	-0,250
	$Co^{2+} + 2e^- \rightarrow Co$	-0,277
	$Cd^{2+} + 2e^- \rightarrow Cd$	-0,403
	$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$	-0,440
	$Cr^{3+} + 3e^- \rightarrow Cr$	-0,744
	$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	-0,763
	$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al$	-1,662
	$Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg$	-2,363
	$Na^+ + e^- \rightarrow Na$	-2,714
	$K^+ + e^- \rightarrow K$	-2,924

Πίνακας Π.Α.12
Γαλβανική σειρά των μετάλλων.

↑ Αυξανόμενα αδρανής (καθοδική)	Πλατίνα (Platinum)
	Χρυσός (Gold)
	Γραφίτης (Graphite)
	Τιτάνιο (Titanium)
	Ασήμι (Silver)
	Ανοξείδωτος χάλυβας (stainless steel) 316 (παθητικός)
	Ανοξείδωτος χάλυβας (stainless steel) 304 (παθητικός)
	Inconel (80Ni-13Cr-7Fe) (παθητικός)
	Νικέλιο (Nickel) (παθητικό)
	Monel (70Ni-30Cu)
↓ Αυξανόμενα ενεργή (ανοδική)	Κράματα Χαλκού-Νικελίου (Copper-Nickel)
	Μπρούντζος (Bronze) (κράματα Cu-Sn)
	Χαλκός (Copper)
	Ορείχαλκος (Brass) (κράματα Cu-Zn)
	Inconel (δραστικό)
	Νικέλιο (Nickel) (δραστικό)
	(Tin)
	(Lead)
	Ανοξείδωτος χάλυβας (stainless steel) 316 (δραστικός)
	Ανοξείδωτος χάλυβας (stainless steel) 304 (δραστικός)
Χυτοσίδηρος (Cast iron)	
Σίδηρος και χάλυβας (Iron and steel)	
Αλουμίνιο και τα κράματά του (Aluminium alloys)	
Κάδμιο (Cadmium)	
Εμπορικά καθαρό Αλουμίνιο (Commercially pure aluminium)	
Ψευδάργυρος (Zinc)	
Μαγνήσιο και τα κράματά του (Magnesium and its alloys)	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Βασικά στοιχεία για την κατηγοριοποίηση χαλύβων

Π.Β.1 Εισαγωγικά στοιχεία.

Οι σχετικές με τους χάλυβες έννοιες καθορίζονται στο ευρωπαϊκό πρότυπο EN 10020. Το πρότυπο EN 10020 συντάχθηκε από την Τεχνική Επιτροπή 6 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την Τυποποίηση του Σιδήρου και του Χάλυβα ECISS, ECISS/TC 6, αρχικά το 1995, και αναθεωρήθηκε το 2000. Πρόκειται για εξέλιξη της EURONORM 20:1974, όπου η ECISS έλαβε υπόψη το εναρμονισμένο σύστημα ονοματοδοσίας του Παγκόσμιου Οργανισμού Δασμών (World Customs Organisation, WCO):

1) Τα διεθνή πρότυπα ISO 4948-1 και ISO 4948-2.

2) Την εμπειρία από την εφαρμογή της EURONORM 20, καθώς και τις εξελίξεις στην ευρωπαϊκή βιομηχανία του χάλυβα.

Το πρότυπο EN 10020 ορίζει την έννοια «χάλυβας» και διακρίνει τους χάλυβες σε μη κραματωμένους, ανοξείδωτους και λοιπούς κραματωμένους χάλυβες ανάλογα με τη χημική τους σύσταση. Οι κύριες κλάσεις ποιότητας ορίζονται από τα κύρια χαρακτηριστικά ιδιοτήτων ή χρήσεως των μη κραματωμένων, ανοξείδωτων και λοιπών κραματωμένων χαλύβων.

Π.Β.2 Ορισμός κλάσεων.

1) Μη κραματωμένοι χάλυβες.

Μη κραματωμένοι χάλυβες είναι είδη χαλύβων, στους οποίους σύμφωνα με τον ορισμό των περιεκτικότητων δεν επιτυγχάνεται καμία από τις οριακές τιμές του πίνακα Π.Β.1.

2) Ανοξείδωτοι χάλυβες.

Ανοξείδωτοι χάλυβες είναι χάλυβες με ελάχιστο κλάσμα μάζας χρωμίου τουλάχιστον 10,5% και κατά μέγιστο 1,2% άνθρακα.

3) Λοιποί κραματωμένοι χάλυβες.

Λοιποί κραματωμένοι χάλυβες είναι είδη χαλύβων, οι οποίοι δεν αντιστοιχούν στον ορισμό για ανοξείδωτους χάλυβες και στους οποίους, σύμφωνα με τον ορισμό των περιεκτικότητων επιτυγχάνεται τουλάχιστον μια από τις οριακές τιμές του πίνακα Π.Β.1.

Πίνακας Π.Β.1

Όρια μεταξύ μη κραματωμένων και κραματωμένων χαλύβων.

	Στοιχείο	Οριακή τιμή κλάσμα μάζας %
Al	Αργίλιο (αλουμίνιο)	0,3
B	Βόριο	0,0008
Bi	Βισμούθιο	0,1
Co	Κοβάλτιο	0,3
Cr	Χρώμιο	0,3
Cu	Χαλκός	0,4
La	Λανθανίδες (αξιολογούμενα ξεχωριστά)	0,1
Mn	Μαγγάνιο	1,65*
Mo	Μολυβδαίνιο	0,08
Nb	Νιόβιο	0,06
Ni	Νικέλιο	0,3
Pb	Μόλυβδος	0,4
Se	Σελήνιο	0,1
Si	Πυρίτιο	0,6
Te	Τελλούριο	0,1
T	Τιτάνιο	0,05
V	Βανάδιο	0,1
W	Βολφράμιο	0,3
Zr	Ζιρκόνιο	0,05
	Λοιπά, με εξαίρεση: άνθρακα, φωσφόρο, θείο, άζωτο	0,1

* Στην περίπτωση που καθοριστεί για το μαγγάνιο υψηλότερη τιμή, η οριακή τιμή είναι 1,8% και δεν ισχύει ο κανόνας του 70%.

Π.Β.3 Ταξινόμηση των κύριων κλάσεων ποιότητας.

Π.Β.3.1 Μη κραματωμένοι χάλυβες.

1) Μη κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας.

α) Γενική περιγραφή.

Οι μη κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας είναι είδη χάλυβων για τους οποίους υφίστανται γενικά καθορισμένες απαιτήσεις, π.χ. για την σκληρότητα, το μέγεθος κόκκου και/ή τη δυνατότητα διαμορφώσεως.

β) Ορισμός.

Οι μη κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας (non alloy quality steels) είναι μη κραματωμένοι χάλυβες, οι οποίοι είναι διαφορετικοί από τους κραματωμένους ειδικούς χάλυβες.

Οι μη κραματωμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες ορίζονται ως μη κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας με καθορισμένες απαιτήσεις για τις μέγιστες τιμές, για την ειδική ολική απώλεια μαγνητίσεως ή τις ελάχιστες τιμές για την μαγνητική επαγωγή, πόλωση ή διαπερατότητα.

2) Μη κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες.

α) Γενική περιγραφή.

Οι μη κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες έχουν ιδιαίτερα, όσον αφορά στις μη μεταλλικές προσμείξεις τους, έναν υψηλότερο βαθμό καθαρότητας από ό,τι οι μη κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις προορίζονται για επιβελτίωση ή επιφανειακή σκλήρυνση και χαρακτηρίζονται από συμβατή απόκριση σε μία τέτοια επεξεργασία. Ακριβής ρύθμιση της χημικής συστάσεως και ιδιαίτερη φροντίδα κατά την παραγωγή και την επίβλεψη της διεργασίας εξασφαλίζουν βελτιωμένες ιδιότητες για να ικανοποιηθούν αυξημένες απαιτήσεις.

Αυτές οι ιδιότητες, οι οποίες γενικά εμφανίζονται σε συνδυασμό μεταξύ τους και εντός στενά περιορισμένων ορίων, περιλαμβάνουν υψηλές ή στενά περιορισμένες τιμές των τιμών της αντοχής σε εφελκυσμό ή της δυνατότητας σκληρύνσεως, μερικές φορές συνδεδεμένες με καταλληλότητα για ψυχρή διαμόρφωση, συγκόλληση ή σκληρότητα.

β) Ορισμός.

Οι μη κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες (non alloy special steels) είναι είδη χάλυβων, που ικανοποιούν μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Καθορισμένη ελάχιστη τιμή για το έργο κρουστικής δοκιμής στην επιβελτιωμένη κατάσταση.
- Καθορισμένο βάθος διεισδύσεως της σκληρότητας ή καθορισμένη επιφανειακή σκληρότητα στη σκληρυμένη, επιβελτιωμένη ή επιφανειακά σκληρυμένη κατάσταση, και
- ιδιαίτερα χαμηλές περιεκτικότητες σε μη μεταλλικές προσμείξεις.

Πίνακας Π.Β.2

Κατάλληλοι για συγκόλληση κραματωμένοι λεπτόκοκκοι χάλυβες κατασκευών - Όριο της χημικής συστάσεως μεταξύ ποιοτικών και ανοξειδωτων χάλυβων.

	Στοιχείο	Οριακή τιμή κλάσμα μάζας %
Cr	Χρώμιο	0,5
Cu	Χαλκός	0,5
Mn	Μαγγάνιο	1,8
Mo	Μολυβδαίνιο	0,1
Nb	Νιόβιο	0,08
Ni	Νικέλιο	0,5
T	Τιτάνιο	0,12
V	Βανάδιο	0,12
Zr	Ζιρκόνιο	0,12

Οι ειδικοί χάλυβες και οι χάλυβες κατασκευών διαχωρίζονται από τους ανοξειδωτους χάλυβες με γνώμονα την περιεκτικότητά τους σε κραματικά στοιχεία, κυρίως χρώμιο και νικέλιο. Οι χάλυβες αυτοί είναι κατάλληλοι για συγκόλληση όταν έχουν μέχρι μία μέγιστη περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία, όπως αυτή ορίζεται στον πίνακα Π.Β.2.

Σμείωση: Αυτή η κλάση περιλαμβάνει είδη για τα οποία το πρότυπο ή η προδιαγραφή προϊόντος προβλέπει τέτοιους περιορισμούς των προσμείξεων. Πάντως, οι καθορισμένες ιδιότητες για τη συστολή θραύσεως κάθετα στην επιφάνεια του προϊόντος δεν μεταβάλλουν τίποτε στην ταξινόμηση του αρχικού χάλυβα.

Καθορισμένη μέγιστη περιεκτικότητα σε φωσφόρο και θείο:

- για την ανάλυση τήγματος < 0,020%.
- για την ανάλυση τεμαχίου < 0,025%.

3) Ανοξειδωτοι χάλυβες.

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες ορίζονται σύμφωνα με τη χημική τους σύσταση και διακρίνονται περαιτέρω σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

- α) ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νικέλιο σε:
 - Νικέλιο λιγότερο από 2,5%.
 - Νικέλιο 2,5% ή περισσότερο.
- β) ανάλογα με τις κύριες ιδιότητες σε:
 - Mn διαβρώσιμοι (corrosion resisting).
 - Ανθεκτικοί στη θερμότητα (heat resisting).
 - Ανθεκτικοί σε ερπυσμό (creep resisting).

4) Λοιποί κραματωμένοι χάλυβες.

α) Κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας.

Οι κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας (alloy quality steels) είναι είδη χαλύβων, για τους οποίους υφίστανται απαιτήσεις σχετικές π.χ. με τη σκληρότητα, το μέγεθος κόκκου και/ή τη δυνατότητα διαμορφώσεως. Οι κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας γενικά δεν προορίζονται για επιβελτίωση (quenching tempering με εμβάπτιση ή βαφή) ή για επιφανειακή σκλήρυνση.

β) Κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες.

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει είδη χαλύβων, εκτός από ανοξείδωτους χάλυβες, στους οποίους δίνονται μέσω ακριβούς ρυθμίσεως της χημικής τους σύστασης, καθώς και ειδικών συνθηκών παραγωγής και επιβλέψεως της δι-

αδικασίας, βελτιωμένες ιδιότητες, οι οποίες συνήθως καθορίζονται σε συνδυασμό και εντός στενά περιορισμένων ορίων.







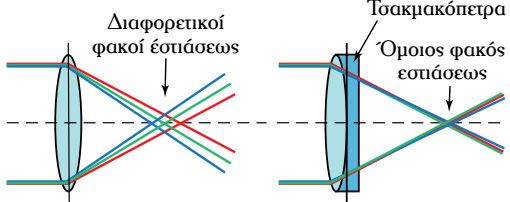
Όλοι οι λοιποί κραματωμένοι χάλυβες, οι οποίοι δεν εξαιρούνται από τον ορισμό για κραματωμένους χάλυβες ποιότητας, είναι κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες (alloy special steels).

Οι κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες περιλαμβάνουν κραματωμένους χάλυβες για μηχανολογικές κατασκευές και κραματωμένους χάλυβες για δοχεία υπό πίεση, χάλυβες εδράνων κυλίσεως, χάλυβες εργαλείων, χάλυβες υψηλής ταχύτητας και χάλυβες με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες, όπως φερριτικοί νικελιούχοι χάλυβες με ελεγχόμενο συντελεστή διαστολής ή χάλυβες με ιδιαίτερη ηλεκτρική αντίσταση.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Χρονολόγιο εξέλιξης της οπτικής μικροσκοπίας

	<p>2^{ος} αιώνας π.Χ. – ο Κλαούντιος Πτολεμαίος περιέγραψε το φαινόμενο κατά το οποίο ένα εμβαπτιζόμενο στο νερό κλαδί να φαίνεται ότι λυγίζει, ενώ είναι ίσιο. (Κατέγραψε δε με ακρίβεια μισής μοίρας τις γωνίες).</p> <p>1^{ος} αιώνας μ.Χ. – Οι Ρωμαίοι πειραματίστηκαν με ποτήρια και παρατήρησαν ότι τα αντικείμενα εμφανίζονται μεγαλύτερα, όταν παρατηρούνται μέσω του γυαλιού.</p>
	<p>12^{ος} αιώνας – Ο Salvino D' Armate από την Ιταλία κατασκεύασε τα πρώτα γυαλιά οράσεως επιφέροντας στον χρήστη τη δυνατότητα μικρής μεγεθύνσεως στον έναν οφθαλμό (ματογυάλι).</p>
	<p>1590 – Δύο Ολλανδοί, ο Zacharias Jansen και ο πατέρας του Hans ξεκίνησαν τους πειραματισμούς με την ενσωμάτωση δύο φακών σε έναν σωλήνα, το πρώτο μικροσκόπιο (compound microscope.)</p>
	<p>1609 – Ο Galileo Galilei αναπτύσσει ένα απλό μικροσκόπιο με διόπτρες και κοίλους φακούς.</p>
	<p>1665 – Το βιβλίο του Robert Hooke με την ονομασία «Μικρογραφία» (Micrographia) παρουσίασε επίσημα τις καταγραφές του για μία πληθώρα παρατηρήσεων μέσω μικροσκοπίου.</p>
	<p>1674 – Ο Anton van Leeuwenhoek αξιοποίησε τις γνώσεις του στη λείανση φακών, για να επιτύχει μεγαλύτερη μεγέθυνση. Τους φακούς τούς χρησιμοποίησε στην κατασκευή μικροσκοπίου δίνοντας τη δυνατότητα για λεπτομερειακές παρατηρήσεις βακτηρίων.</p>
 <p style="text-align: center;"> Διαφορετικοί φακοί εστιάσεως Τσακμακόπετρα Όμοιος φακός εστιάσεως </p> <p style="text-align: center;"> Αχρονικό χρωματικό σφάλμα Αχρωματικός μανδύας </p>	<p>1826 – Ο Joseph Jackson Lister κατασκεύασε έναν διαυγή φακό, για να τον αξιοποιήσει στη δημιουργία χρωματισμού προκαλούμενου από διέλευση φωτός διαφορετικού μήκους κύματος.</p>
<p>1860s – Ο Ernst Abbe ανακαλύπτει τη λεγόμενη προς τιμήν του «συνθήκη του ημίτονου του Abbe» («the Abbe sine condition»), δηλαδή τη συνθήκη που πρέπει να πληροίται από έναν φακό ή άλλο οπτικό σύστημα, ώστε να δημιουργεί εστιασμένες εικόνες. Αυτό αποτέλεσε μία μεγάλη ανακάλυψη, ένα μεγάλο βήμα προς τα εμπρός στον σχεδιασμό μικροσκοπίων, γιατί έως τότε όλα βασίζονταν σε δοκιμή και σφάλμα («trial and error»).</p>	
<p>1931 – Ο Ernst Ruska ξεκινά να κατασκευάζει το πρώτο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο («electron microscope»).</p>	

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

A

αζίδια 1
άζωτο 34
άκαμπα κεραμικά 1
ακετάλες 73
αλλοτροπία 25
αλουμίνα 52
 αλουμίνιο 34, 38, 52
 ανοπτημένο 54
 θερμήλατο 54
 θερμικά επεξεργασμένο 54
 χυτό 54
 ψυχρήλατο 54
άλφα - σίδηρος 25
αμαγνητικός άλφα - σίδηρος 25
αμαγνητικός γάμα - σίδηρος 26
αμέταλλα 1
αμφιέρειστος δοκός 80
αναθέρμανση 25
ανακραυστάλλωση 18
ανάπτυξη 42
αναपुरοσσωμάτωση 65
ανασταλτικοί παράγοντες 92
ανασυμπίεση ή τύπωση 65
άνοδος 89θυσιαζόμενη 93
ανοξειδωτοι χάλυβες 34
 μαρτενσιτικοί 35
 φερριτικοί 34
 ωστενιτικοί 35
 duplex (ωστενιτο-φερριτικοί) 35
ανόπτηση για ανακραυστάλλωση 40, 44
αντιμόνιο 40
αποτακτική ανόπτηση 40, 44
αποφυγή μηχανικής διαβρώσεως 93
 της διαβρώσεως με παράλληλη φόρτιση 93
απόψυξη 33
αρσενικό 40
αταξία (βλ. διαταραχή)
ατομική μάζα 3
ατομική ακτίνα 12
ατομικό βάρος 3
ατομικοί δεσμοί 4
ατομικός αριθμός 3

B

βανάδιο 34, 38
βασαλτική ή κιονοειδής ζώνη 9
βασικό κραματικό στοιχείο 34
βασικό στοιχείο εξευγενισμού 34
βαφή 40, 43, 44
 άμεση 45
 διακοπόμενη 45
 επιλεκτική 45
 ισοθερμοκρασιακή 47
 μαρτενσιτική 46
 με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή 48
 με ψεκασμό 45
 χρονική 45
βελτιωμένο πολυαιθυλενοξειδιο 73
βιοϋλικά 2
βισμούθιο 38
βολφράμιο 38
βόριο 38

Γ

γάμα - σίδηρος 25
γαλβανικό στοιχείο 93
γόμμες 1
γραφίτιση 32
γ-φερρογόνα 26

Δ

δενδρίτες 8
διάβρωση
 γαλβανική 88, 90
 επιλεκτική έκπλυση 88, 91
 επιφανειακή – βελονοειδής 88, 91
 με παράλληλη επιβολή φορτίου 88, 92
 μηχανική 88, 92
 ομοιόμορφη 88, 90
 οπής/ρωγμής 88, 91
 περικρυσταλλική 88, 91
 ψαθυροποίηση υδρογόνου 88, 92
διάγραμμα εφελκυσμού – διάγραμμα
 τάσεως - παραμορφώσεως 78
διάγραμμα φάσεως 13
διαστρωματώσεις 63
διαταραχή 16, 20

διαταραχή κοχλία 20
 διαφορισμός 15
 διεισδυτικά υγρά 87
 διέλαση 23
 δινορρεύματα 87
 διοχέτευση φωτός 84
 δομή σαν πλέγμα (εν είδει πλέγματος) 70
 δοκιμασίες
 εφελκυσμού 75, 77
 κοπώσεως ή δοκιμασία σε δυναμική αντοχή 75, 81
 κρούσεως ή δοκιμασία δυσθραυστότητας 75, 80
 σκληρότητας 75
 συνθλίψεως 75, 77
 δυσθραυστότητα 33, 80

Ε

εγκοπή 80
 έδρανα
 κυλίσεως 61
 ολισθήσεως 61
 έδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα 6, 26
 έλαση 23
 έλαστρο 23
 εμβαπτότητα 33
 εμποτισμός 65
 εναζώτωση 40, 48
 ενανθράκωση 40, 48
 ενδοκυάνωση 48
 ενδοιτράχυνση 16
 ενίσχυση
 ινών 63
 σωματιδίων 63
 εξελιγμένα-προχωρημένα υλικά 2
 εξομάλυνση 40, 43
 έξυπνα υλικά 2
 επαναληπτικές τάσεις 81
 επαναφορά 40, 47
 επινικέλωση 59
 επιφάνεια αστοχίας 85
 επιχάλκωση 59
 επιψευδαργύρωση 58
 εργαλειοχάλυβες 36
 ευτηκτική αναλογία 28
 ευτηκτική δομή 15
 ευτηκτική ένωση (βλ. ευτηκτικό κράμα)
 ευτηκτικό κράμα 12, 28
 ευτηκτοειδές κράμα 12, 28
 ευτηκτοειδής αναλογία 28
 ευτηκτοειδής ένωση (βλ. ευτηκτοειδές κράμα)

εφελκυσμός 75, 78

Η

ημιαγωγοί 2
 ηλεκτρωνητικά ιόντα 4
 ηλεκτρωνητικότητα 12
 ηλεκτρικές κάμινοι 25
 ηλεκτροθετικά ιόντα 4
 ηλεκτρομαγνητική επαγωγή 40
 ηλεκτρόνια σθένους 4

Θ

θείο 31, 37
 θερμή κατεργασία 19
 θερμή ρηγμάτωση 37
 θερμικές κατεργασίες 31
 θερμική κατεργασία 39
 θερμικό διάγραμμα θερμοδυναμικής
 ισορροπίας του κράματος (βλ. διάγραμμα φάσεως)
 θερμοκρασία Curie 25
 θερμοπλαστικές ιδιότητες 70
 θερμοτεχνικές κατεργασίες 40
 θραύση
 από ερπυσμό 85
 λόγω κοπώσεως 85
 όλκιμη 86
 ψαθυρή 86

Ι

Ίνκονέλ 59
 ιόν 4
 ισαξονική ζώνη 9
 ισορροπία φάσεων 13
 ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες 37
 ισχυρά κραματωμένοι χυτοσιδήροι 30

Κ

καθοδική προστασία 93
 κάθοδος 89
 καμπύλη διαλυτότητας 14
 καμπύλη κοπώσεως του υλικού ή καμπύλη Wöler 82
 καρβίδια 1
 κασσίτερος 37
 κατακρημνίσματα 17
 καταστρεπτικές μέθοδοι 82
 κατεργασία
 θερμή 19
 ψυχρή 19
 κελί υδρογόνου 89
 κέντρα κρυσταλλώσεως 8
 κεραμικά 1

κοβάλτιο 38
 κονιομεταλλουργία 63
 κονσταντάν 52
 κόπωση 81
 κράμα 11
 αντιτριβικό 61
 Ινκονέλ 59
 Μονέλ Κ 59
 Νιμόνικ 60
 Νιμόνικ 75 60
 Νιμόνικ 80 Α 60
 Νιμόνικ 115 60
 Χαστελλού 59

κράματα
 αλουμινίου 53
 διμερή 11
 ηλεκτρικών αντιστάσεων 60
 μαγνησίου 56
 μαλακτά 57
 μολύβδου 58
 νικελίου 59
 τριμερή 11
 χαλκού 50
 χυτευτικά 53
 ψευδαργύρου 58
 κρίσιμες θερμοκρασίες 25
 κρίσιμη ταχύτητα αποψύξεως 44
 κρουστική διαδικασία 22
 κρυσταλλικό σύστημα
 εξαγωγικό 7
 κυβικό 7
 μονοκλινές 7
 ορθορομβικό 7
 τετραγωνικό 7
 τριγωνικό 7
 τρικλινές 7
 κρυσταλλική δομή 5, 12

Λ

λάστιχα 1
 λεδεμβουρίτης 28
 λευκά μέταλλα 62

Μ

μαγγάνιο 31, 34, 37
 μαγνήσιο 56
 μαγνητικά σωματίδια 87
 μαγνητικός άλφα - σίδηρος 25
 μαγνητοσυστολικά υλικά 2
 μαζικός αριθμός 3

μαρτενσίτης 40
 μαρτενσιτικός μαλακτός χυτοσίδηρος 33
 μαρτενσιτικός μετασχηματισμός 29
 μεγαλύτερη σκληρότητα 19
 μέγιστης πυκνότητας εξαγωγικό
 κρυσταλλικό πλέγμα 6, 7
 μέθοδος
 Brinell 75
 Rockwell 77
 Vickers 77
 μεικτού τύπου διαταραχή 20
 μεσομεταλλική ένωση 12
 μέταλλα 1
 βαριά 49
 ελαφρά 49
 μέταλλα και κράματα 49
 μη σιδηρούχα 49
 σιδηρούχα 49
 μετρίως κραματωμένοι χάλυβες 37
 μέτρο ελαστικότητας 78
 μη καταστρεπτικές μέθοδοι 83
 μήτρα 63
 μικροκοιλότητες 86
 μικροκρυσταλλική ζώνη 9
 μικροσκοπία
 διερχόμενης δέσμης 85
 ηλεκτρονική 84
 οπτική 83
 μικρότερη δυσθραυστότητα 19
 μικρότερη πλαστικότητα 19
 μολυβδαίνιο 34, 38
 μολύβδος 38, 58
 μονάδα ατομικής μάζας 3
 Μονέλ Κ 59
 μορφή του τεμαχίου 82
 μπαϊνίτης 41
 ανώτερος 41
 κατώτερος 41
 μπαϊνιτικός μετασχηματισμός 30
 μπρούντζοι ή κρατερώματα 50
 μπρούντζος βηρυλλίου 51

Ν

νάιλον 73
 νανοϋλικά 2
 νέφος ηλεκτρονίων 5
 νηματοειδή μεγαλομόρια 69
 νικέλιο 34, 38, 59
 νιόβιο 34, 38
 νουκλεόνια 3

Ο

ολκή 23
 οξείδια 1
 οπές 86
 οπικό σύστημα 84
 ορείχαλκοι 50
 όριο
 αναλογίας 79
 διαρροής 79
 ελαστικότητας 19
 θραύσεως του υλικού 82
 κοπώσεως ή δυναμική αντοχή 82

Π

παραμόρφωση 78
 συνθλίψεως ή συμπίεσεως 80
 πάσο 23
 περλίτης 28
 περλιτικός μαλακτός χυτοσίδηρος 33
 περλιτικός μετασχηματισμός 29
 πιεζοηλεκτρικά κεραμικά 2
 πλακοειδείς κρυσταλλίτες 12
 πλαστικά 1
 πλαστικότητα 5, 79
 πλέγμα 6
 πλήρης ανόπτηση ή ανόπτηση 40, 44
 εξομαλύνσεως (εξομάλυνση) 40, 44
 σφαιροποιήσεως 40, 44
 πολυμερή 1, 69
 πολυμερισμός 69
 πολυμορφισμός (βλ. αλλοτροπία)
 πολυανθρακικά πλαστικά 73
 πολυϊμίδες 73
 πολυουρεθάνες 73
 πολυπροσθήκη 69
 πολυσυμπύκνωση 69
 πολυτετραφθοροαιθυλένιο 74
 πρόβολος 80
 προευνκτοειδής
 σεμεντίτης 29
 φερρίτης 28
 προπυροσσωμάτωση 65
 προσαρμοσμένη χρήση στην εκάστοτε εφαρμογή 3
 προσθήκες 31
 προστασία απ' τη γαλβανική διάβρωση 93
 προστασία απ' την περικρυσταλλική διάβρωση 93
 πυρήνωση 42
 πυρίτιο 31, 34, 37

πυροσσωμάτωση 64
 πύρωση του σιδήρου 25

Ρ

ραδιογραφία 86
 ροζέτες 32
 ρόλοι 23

Σ

σεμεντίτης 26
 σημείο
 πήξεως 8
 τήξεως 8
 σθένος 12
 σκληρομέταλλα 65
 σκληρόμετρα 76
 σκλήρυνση
 με γήρανση 17
 με εκλέπτυνση κόκκου 17
 με κατακρήμνιση 16
 στατικά φορτία 81
 στερεοποίηση 5
 στοιχειώδης κυψελίδα 5
 συμπίεση 64
 συμπίεστική διαδικασία 22
 συλλογή του φωτός 84
 σύνθετα υλικά 2, 63
 σύνθλιψη ή συμπίεση 78
 συνολική επιμήκυνση 35
 συρματοποίηση (βλ. ολκή)
 συστατικό ενισχύσεως 63
 σφυρηλασία 21
 ανάστροφη 22
 ανοικτής μήτρας 22
 κλειστής μήτρας 22
 σχισμοί 86

Τ

τάση εφελκυσμού 78
 τάση συνθλίψεως 80
 ταχύτητα αποψύξεως 31
 τεμάχιο 23
 τελική κατεργασία 65
 τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο 74
 τεχνικές μορφοποιήσεως 20
 τήξη 5
 τιτάνιο 34, 38
 τραχύτητα επιφάνειας του τεμαχίου 82
 τριβή
 κυλίσεως 61

ολισθήσεως 61
 τρισδιάστατοι στερεοί σκελετοί 70
 τροποποίηση της εντάσεως του φωτός 84

Υ

υλικά
 μνήμης σχήματος 2
 όγκιμα 80
 του μέλλοντος 2
 ψαθυρά 80
 υπερευηκτοειδείς 26
 υπέρηχοι 87
 υπερκράματα 60
 υποευηκτοειδείς 26
 υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα 5
 υψηλότερο όριο
 ελαστικότητας 19
 θραύσεως 19

Φ

φαιοί χυτοσίδηροι 28, 30, 31
 φερρίτης 12
 φερριτικός μαλακός χυτοσίδηρος 33
 φθοριοπλαστικά 73
 φλογοβαφή 40, 48
 φλοιός σθένους 4
 φύτρα (βλ. κέντρα κρυσταλλώσεως)
 φωσφόρος 31, 37

Χ

χαμηλές περιεκτικότητες 34
 χαμηλότερο σημείο τήξεως 30
 χαλκός 34, 37, 49
 χάλυβες
 ανοξείδωτοι 36, 104, 105
 διαμορφώσεως 36
 ελαφρά κραματωμένοι
 ή μικροκραματωμένοι 37
 ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών 36
 κατασκευών 36
 κοινοί (ή ανθρακούχοι) 36
 κραματωμένοι (ή ειδικοί) 36
 κραματωμένοι ειδικοί 106

κραματωμένοι ποιότητας 106
 λοιποί κραματωμένοι 104, 106
 μαρτενηράνεως 17
 μαρτενοιτικοί - ανοξείδωτοι 35
 μη κραματωμένοι 104
 μη κραματωμένοι ειδικοί 105
 μη κραματωμένοι ποιότητας 105
 duplex 35

Χαστελλού 59
 χημικές ενώσεις 4
 χημική σύνθεση 31
 χρώμιο 34, 37
 χυτοσίδηροι 30
 γκρίζοι ή φαιοί 28, 30, 31, 32
 ειδικοί 31
 ελατοί ή σφαιροειδούς γραφίτη 30
 μαλακοί 30, 31, 32
 μαλακός λευκής καρδιάς 33
 μέλανος (μαύρης) καρδιάς 33
 λευκοί 28, 30, 31
 χυτοχάλυβες 36
 κωροκεντρωμένο κυβικό
 κρυσταλλικό πλέγμα 6, 26

Ψ

ψευδάργυρος 37, 57
 ψυχρηλασία 18

Ω

ωστενίτης 12
 ωστενιτοποίηση 44

A

austempering 45

M

marquenching (βλ. μαρτενοιτική βαφή) 46
 martempering 45

S

Schaeffler 35

W

weathering steels 37

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγγλικά:

- Aluminium Alloys, Theory and Applications; Light Alloys, Fourth Edition From Traditional Alloys to Nanocrystals.
- Aluminum Structures A Guide to Their Specifications and Design.
- Anon, 1991. *Heat Treating Handbook - vol 4*. s.l.: ASM.
- Bhadeshia H. K. D. H., 2001. *Bainite in Steels*. 1st επιμ. s.l.: Institute of Materials.
- Boyer H. E., 1987. *Practical Heat Treating*. s.l.: American Society for Metals.
- Callister W. D., 2008. *Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών*. s.l.: Εκδόσεις Τζόλα.
- Cambridge U. ο., 2002. <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/newbainite.html> [ηλεκτρονικό].
- Davis J. R., 2001. *Alloying – Understanding the basics*. s.l.:ASM International.
- E. S. Davenport, E. C. B., 1930. “Transformation of austenite at constant subcritical temperatures”. *Transactions of AIME*, vol. 90, pp. 117 – 154.
- F. Hosford and R. M. Caddell: *Metal forming, Mechanics & Metallurgy*, 1983.
- F.J. Humphreys and M. Hatherly, *Recrystallization and related annealing phenomena*, 2nd edition, 2004, Elsevier.
- G. E. Dieter: *Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition*, McGraw - Hill Book Company, 1988.
- G. E. Totten, D. S. MacKenzie: *Handbook of Aluminium, Vol. II, Alloy Production and Materials Manufacturing*. ISBN: 0-8247-0896-2, 2003.
- Guy A., 1976. *Essentials of Materials Science*. New York: McGraw - Hill Book Company.
- H. W. Paxton, J. B. A., 1972. Historical account of the contributions of E. C. Bain. *Metallurgical Transactions*, Τόμος 3, p. 1036 – 1042.
- Handbook A. M., n.d. *Castings, Volume 15*. s.l.: s.n.
- John E. Hatch, *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*, 1984, ASM.
- Massalski T. B., 1990. *Binary Alloy Phase Diagrams*. 2nd Vol. 3 επιμ. Materials Park, OH: ASM International.
- Metals Handbook, V. 9., 1985. *Metallography and Microstructures*. 9th επιμ. OH: ASM, Metals Park.
- Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering, 6th Edition.
- Papaefthymiou S., 2008. *Selected Optical Micrography and Scanning Electron Microscopy micrographs*, Athens: ELKEME S.A..
- Papaefthymiou S., 2016. A new outlook for the design of heterogeneous-phase microstructures via ultra-fast thermal cycling. *Annals of Materials Research*.
- Pat T., n.d. *Imaging and Analysis - Techniques in Materials - Science II*, Stockholm: LINK Nordiska.
- Sinha A., 2002. *Physical Metallurgy Handbook*. s.l.: Mcgraw-Hill Handbooks.
- Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials, Volume 11 (Pergamon Materials Series).
- Tim Maitland, S. S., 2007. Electron Backscatter Diffraction (EBSD) Technique and Materials - Characterization Examples. Στο: *Scanning Microscopy for Nanotechnology*. New York: Springer-Verlag.
- Totten G. E., n.d. *Steel Heat Treatment Handbook*. 2nd επιμ. s.l.: s.n.
- University of Glasgow , n.d. *ISAAC: Imaging Spectroscopy and Analysis Centre - EBSD*, Glasgow: s.n.
- W. D. Callister, D. G. R., n.d. *Materials Science and Engineering*. s.l.: s.n.

Ελληνικά:

- Γ. Χρυσουλάκης Δ. Π., 1996. *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Λεκάτου Α., 2005. *Βιομηχανικά Κράματα*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Παπαδημητρίου Γ., 1986. *Μεταλλοτεχνία*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π..
- Παπαδημητρίου Γ., 1993. *Γενική Μεταλλογνωσία II - Τα κράματα*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Παπαεθυμίου Σ. Α., 2015. *Σημειώσεις μαθήματος «Μεταλλοτεχνία»*, s.l.: ΕΜΠ.

- Πασπαλάς Κ. Γ., 2009. *Η ευρωπαϊκή τυποποίηση των χαλύβων και χυτοσιδήρων*. Θεσσαλονίκη: Σύλλογος Μηχανολόγων - Ηλεκτρολόγων Β. Ελλάδος.
- Πετρόπουλος Π., 1986. *Μεταλλουργία*. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
- Φούρλαρης Γ., 2014. *Μετασχηματισμοί Φάσεων*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Χαϊδεμενόπουλος Γ. Ν., 2000. *Φυσική Μεταλλουργία, Θεμελιώδεις αρχές*. 1^η επιμ. Βόλος: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας.
- Χρυσουλάκης Γ. & Παντελής Δ., 1996. *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μειαλλικών Υλικών*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.





*Ο Ήφαιστος παραδίδει στην Θέτιδα την ασπίδα του Αχιλλέα
που κατασκεύασε από χρυσό, ασήμι και κασίτερο
(Αττική ερυθρόμορφη κύλιξ, 490-480 π.Χ.).
Altes Museum, Βερολίνο.*