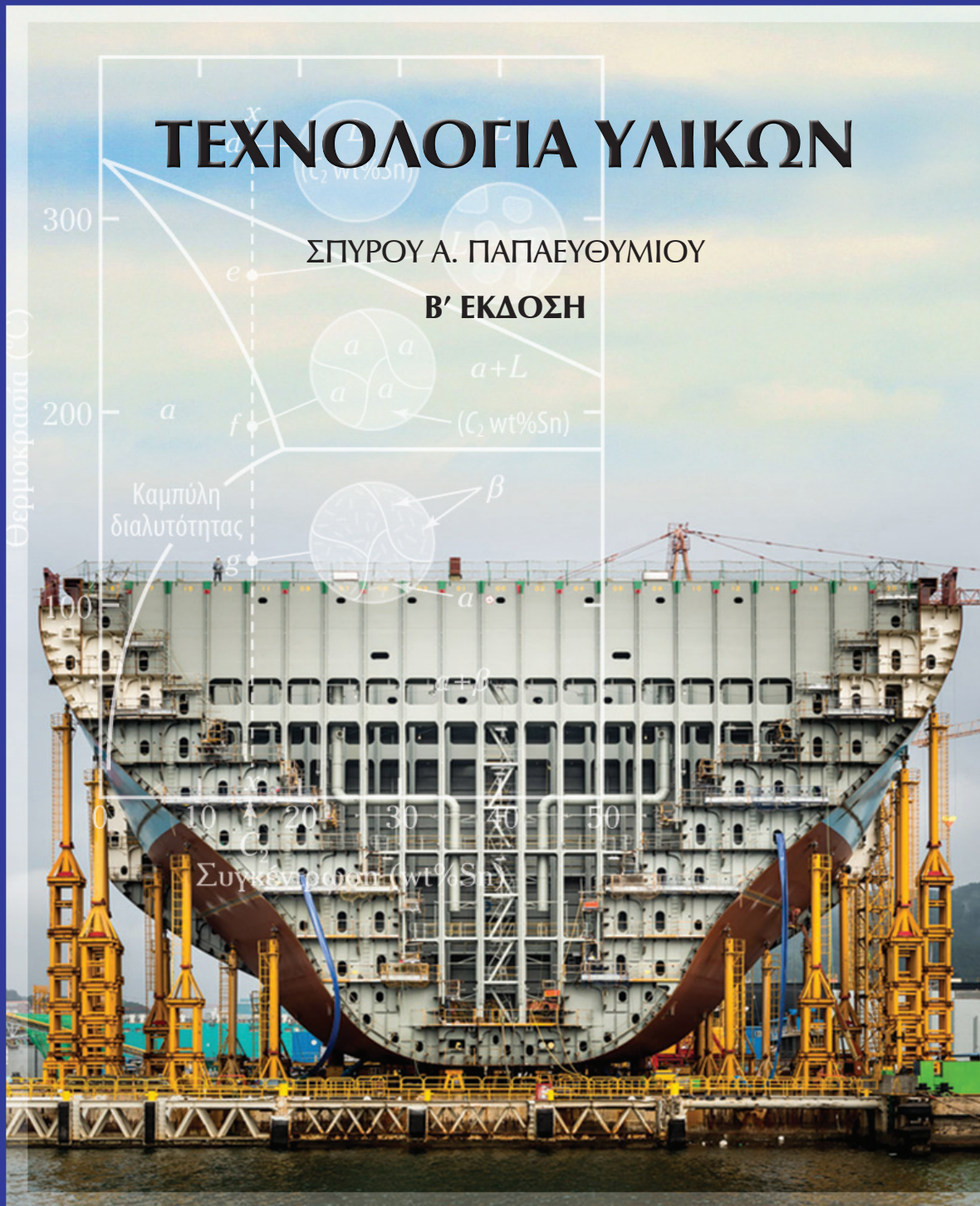




ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ
ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ ΓΙΑ ΤΙΣ
ΑΚΑΔΗΜΙΕΣ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ



ΑΘΗΝΑ 2017

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 στερεοποιήσεως (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 αυξήσεως 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, θερμπλασία 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	Αλλοιοποιήσεις 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 σφαιροποίησης 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 κόνων (σκόνης).....	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
-----	-----------------------------	----



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 δι-οξείδιο 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, **άκαμπα** (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 συννηθέστερα 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-

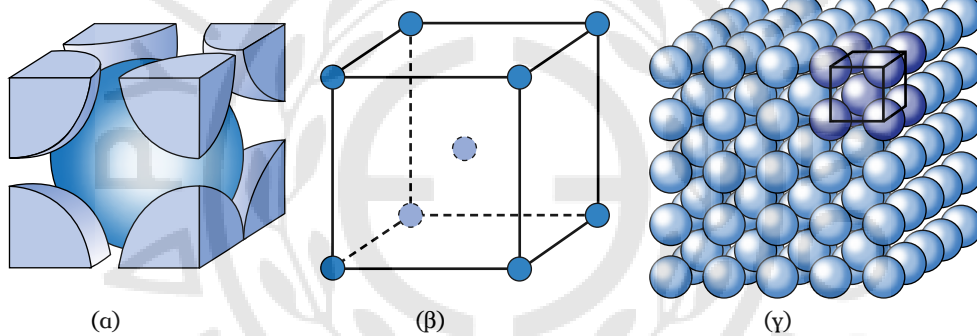
τη θεώρηση αυτή, τα γειτονικά άτομα εφάπτονται το ένα στο άλλο. Αν θεωρήσουμε μικρότερο τον όγκο των σφαιρών, αλλά σταθερή την απόσταση από το κέντρο τους, συνθέτουμε την έννοια του **πλέγματος** (lattice) και μπορούμε να απεικονίσουμε την κυψελίδα με όρους γεωμετρικούς. Υπάρχουν 14 τύποι κρυσταλλικών 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 κύβο αντιστοιχούν **τέσσερα άτομα** στην περίπτωση αυτή.

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

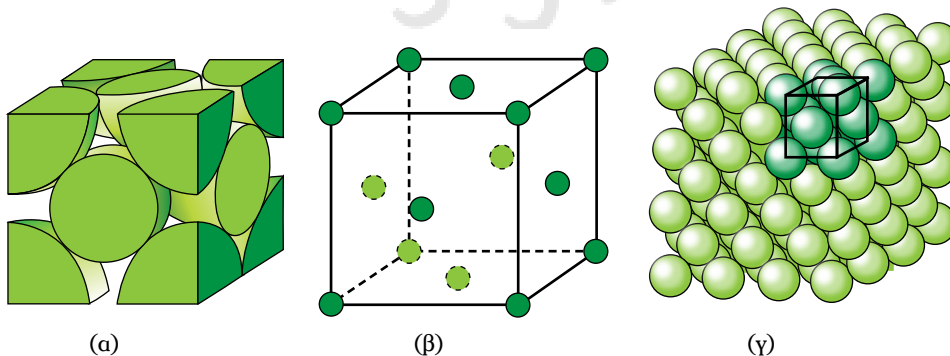
2) Το **εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα** (Face Centered Cubic – FCC) (σχ. 1.2στ). Παραδείγματα μετάλλων: χαλκός (Cu), άργυρος (Ag), χρυσός (Au), αργίλιο ή αλουμίνιο (Al), μόλυβδος (Pb), γ-σίδηρος (γ-Fe), β-χρώμιο (β-Cr), β-κοβάλτιο (β-Co), β-νικέλιο (β-Ni). Στο **εδροκεντρωμένο** κυβικό πλέγμα τα κέντρα 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 εξαγωγικό** (Hexagonal Close-Packed – HCP) (σχ. 1.2ζ). Παραδείγματα



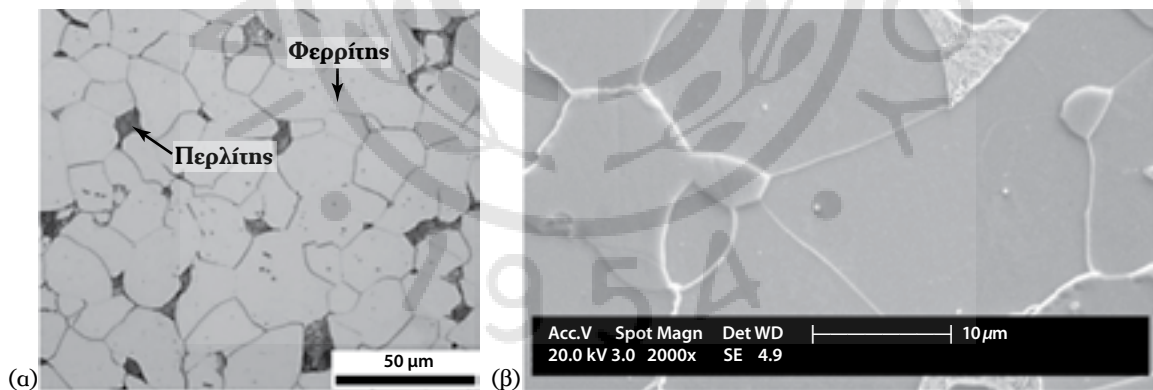
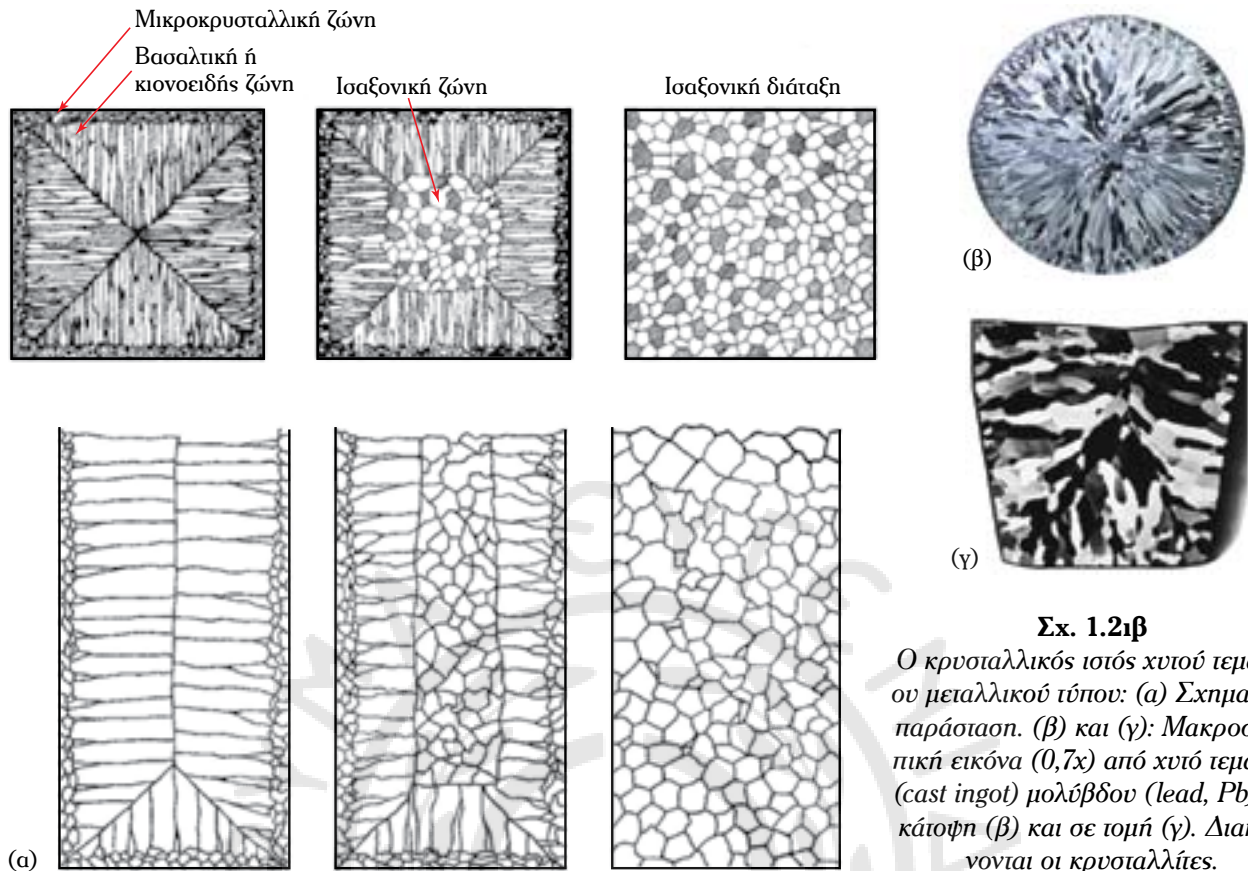
Σχ. 1.2ε

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



Σχ. 1.21γ

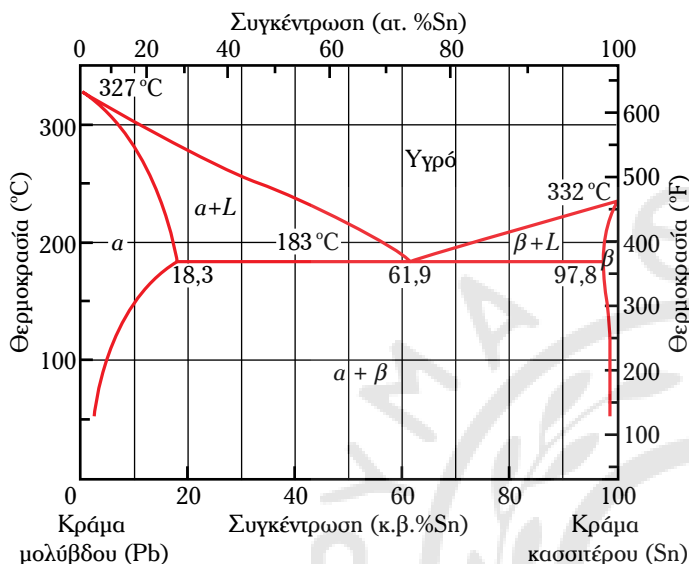
Χάλυβας κατασκευών ή ναυπηγικός χάλυβας (χαμηλά κραματωμένος υποευτηκτοειδής χάλυβας): (α) εικόνα από το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο (Optical Microscopy – OM), και (β) εικόνα από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως (Scanning Electron Microscope – SEM).

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 κραματωμένου υποευτηκτοειδούς χάλυβα) στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο (Optical Microscopy – OM) αποτελούμενου από φερρίτη (α-Fe) και περλίτη (μείγμα φερρίτη - σεμεντίτη, δηλ. του καρβιδίου του σιδήρου – Fe_3C).

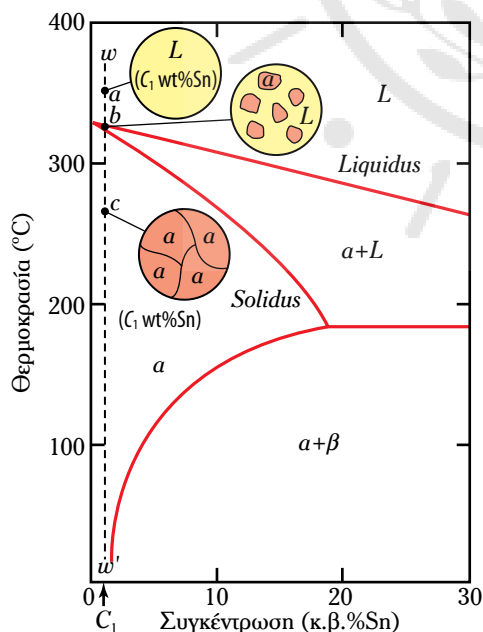
(Sn) - μολύβδου (Pb), φαίνεται στα σχήματα 1.4β και 1.4γ. Με βάση την εκάστοτε χημική σύσταση, διαφορετικές μικροδομές είναι εφικτές υπό την προϋπόθεση της αργής αποψύξεως στο ευτηκτικό αυτό σύστημα.

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.



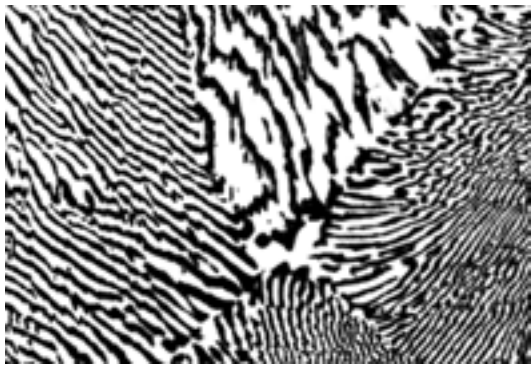
Σχ. 1.4γ

Λεπτομέρεια του διαγράμματος
Pb-Sn για συγκέντρωση κράματος C_1 .

(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) C_1 , 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 C_1 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' αγγίξει 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 C_1 .

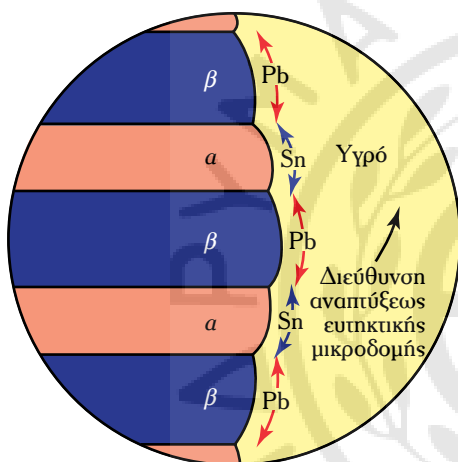
Ως δεύτερη περίπτωση εξετάζουμε τώρα τα κράματα με ευτηκτικές περιεκτικότητες για το ίδιο σύστημα μολύβδου (Pb) – κασσιτέρου (Sn) (lead-tin system). Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4β, τα σχετικά κράματα διαθέτουν περιεκτικότητες μεταξύ 2% κ.β. Sn ως 18,3% κ.β. Sn (πλούσια σε Pb κράματα) και από 97,8% κ.β. Sn ως περίπου 99% κ.β. Sn (πλούσια σε Sn κράματα). Εξετάζουμε ένα κράμα συγκέντρωσης C_2 , 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 ε), 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) συγκεντρώσεως C_2 . 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. 1.4στ

Μικροδομή κράματος Pb-Sn ευτηκτικής 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 ευτηκτικής μικροδομής από την υγρή φάση σε ένα κράμα Pb-Sn ευτηκτικής περιεκτικότητας.

1.5 Τρόποι αύξησης σκληρότητας.

Έχοντας αντιληφθεί τις έννοιες της κρυσταλλώσεως και του στερεού διαλύματος, έχοντας κατανοήσει τι σημαίνει μεσομεταλλική ένωση και τι ευτηκτική 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 επεμβούμε 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 αύξησης σκληρότητας των μεταλλικών υλικών είναι:

- 1) με δημιουργία στερεού διαλύματος.
- 2) με κατακρήμνιση μεσομεταλλικών ενώσεων (γήρανση).
- 3) με εκλέπτυνση (ελάττωση του μεγέθους) κόκκου.
- 4) μέσω μετασχηματισμών φάσεως (π.χ. μαρτενσιτικών 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).

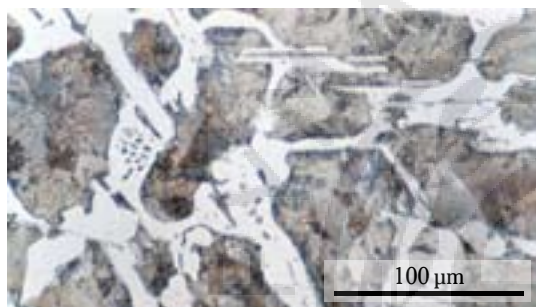
1.5.2 Σκλήρυνση με κατακρήμνιση.

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

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	Ανόπτηση	F	~240	~365	18	150
	Ανόπτηση	F-M	~310	~450	8	180
	Βαφή και επαναφορά	M	~480	~620	2	250
Ελατός	Ανόπτηση	F	~280	~385	18	170
	Ακατέργαστος	P – F	~420	~560	6	200
	Βαφή και επαναφορά	M	~630	~840	2	270

F: φερρίτης (ferrite), P: περλίτης (pearlite), M: μαρτενσίτης (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 μεγάλης διάρκειας 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.

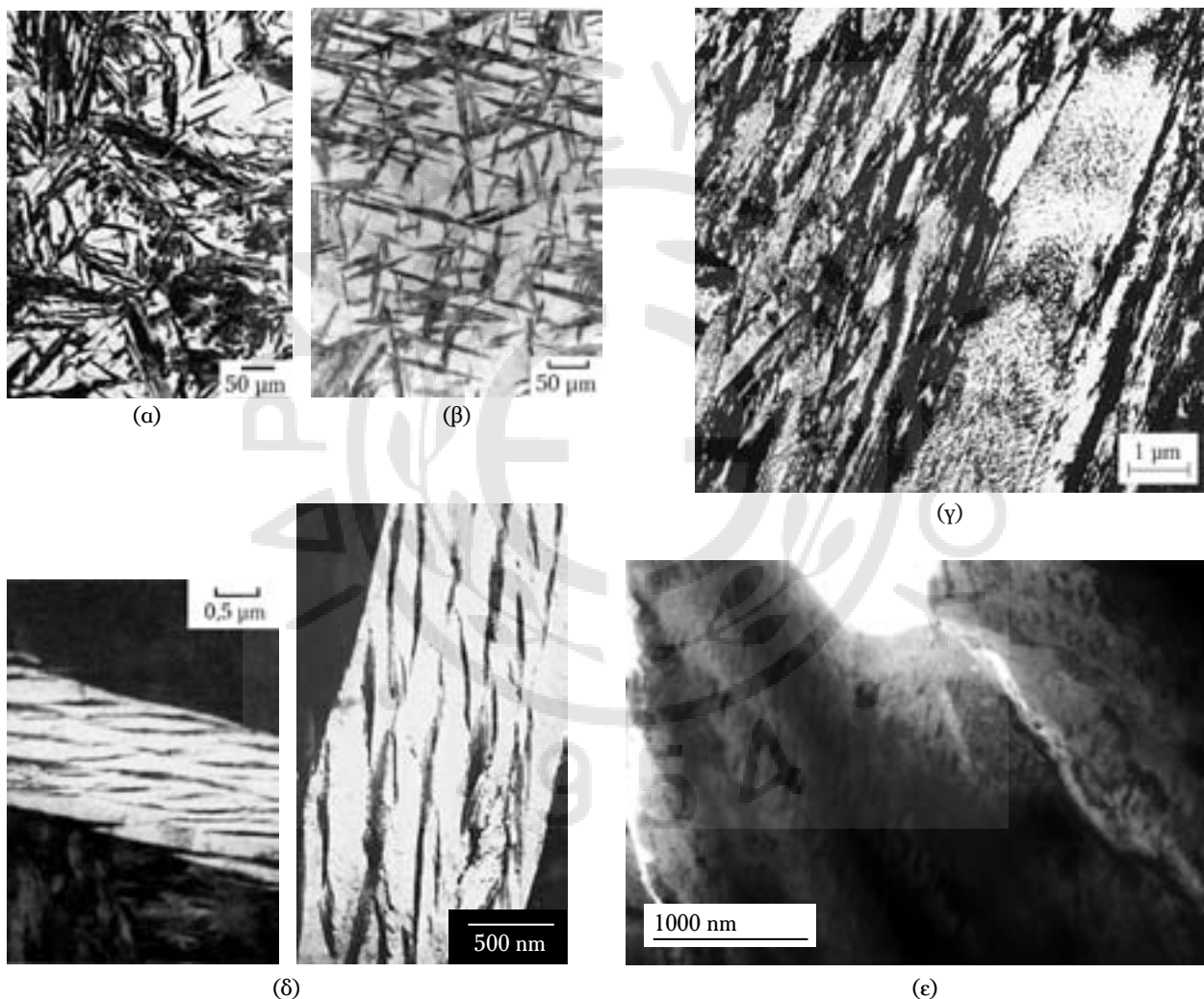
Αυτοί οι χυτοσίδηροι παράγονται μετά από ανόπτηση λευκού χυτοσιδήρου με ορισμένη χημική σύνθεση και κάτω από κατάλληλες συνθήκες. Η θερμική αυτή κατεργασία σκοπό έχει τον σχηματισμό γραφίτη από τη διάσπαση του υπάρχοντος σεμεντίτη ($\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \alpha + \text{C}_{\text{γραφίτης}}$).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

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

ότι ανθρακούχος χάλυβας με 0,80% κ.β. C, βαμμένος (μαρτενοίτης), 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 χαλύβων. 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) Μαρτενσίτη και (β) μπαινίτη όπως φαίνονται στο οπτικό-μεταλλογραφικό μικροσκόπιο (OM), (γ) μαρτενσίτη σε χάλυβα AISI4140 (42CrMo4) μετά από επαναφορά στους 150°C, (δ) ανώτερος μπαινίτης και (ε) κατώτερος μπαινίτης. Τα καρβίδια του σιδήρου (σεμενίτης – Fe_3C) 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 μπαινίτη μοιάζουν. Μάλιστα, τόσο η σκληρότητά τους όσο και η αντοχή τους μπορεί να είναι παραπλήσια, ιδιαίτερα όταν ο χάλυβας περιέχει αντίστοιχες περιεκτικότητες σε άνθρακα.

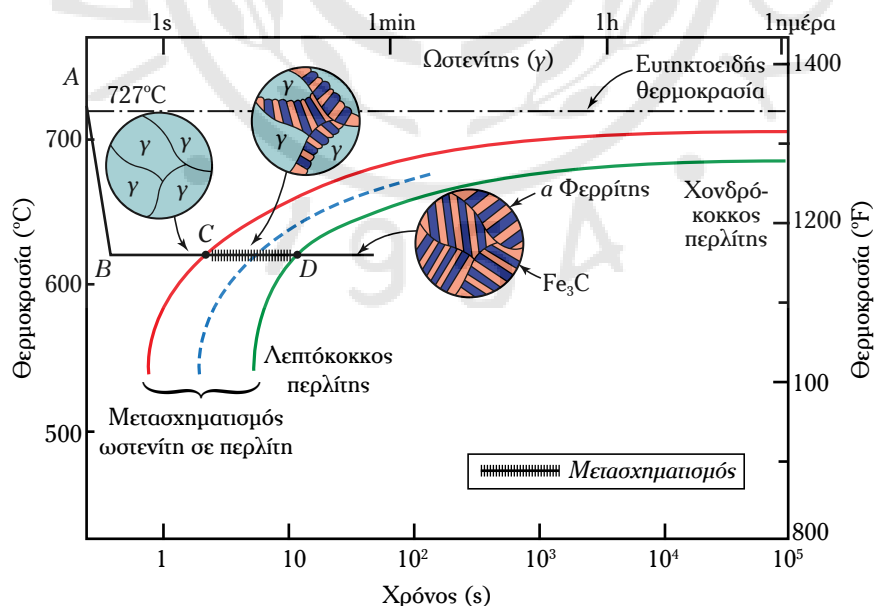
Οι περισσότεροι μετασχηματισμοί στερεάς καταστάσεως δεν πραγματοποιούνται στιγμιαία, όπως ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, αλλά απαιτούν χρόνο για την ολοκλήρωσή τους. Κατά τη διάρκεια της εξέλιξής τους μέσω διαχύσεως σχηματίζονται νέες φάσεις με διαφορετική κρυσταλλική δομή από εκείνη του μπητρικού πλέγματος. Το πρώτο στάδιο του μετασχηματισμού είναι η **πυρήνωση** και το δεύτερο η **ανάπτυξη**. Πολλές φορές οι μετασχηματισμοί γίνονται ισοθερμοκρασιακά, όπως ο μπαινιτικός 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 ευτηκτο-

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.

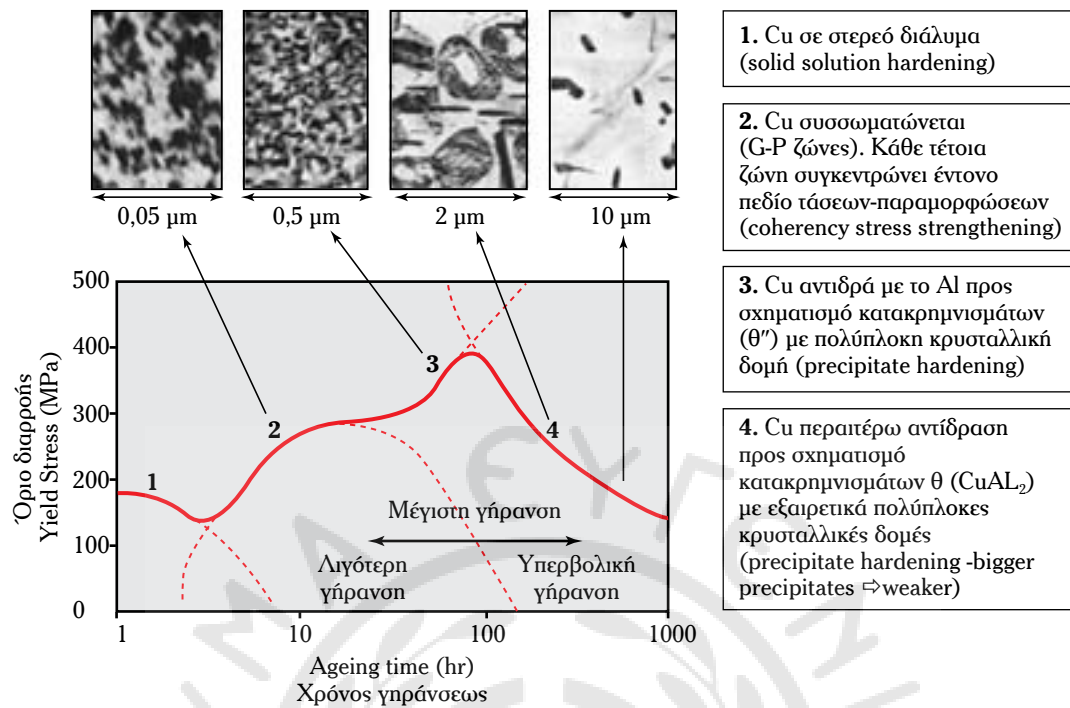
Η ταχύτητα αποψύξεως αυξάνεται κατά τη σειρά των συνηθισμένων μέσων βαφής: αέρας, λάδι, νερό. Σε κάθε μέσο αποψύξεως αντιστοιχεί και ορισμένη καμπύλη αποψύξεως, που μπορεί να παρασταθεί στους ίδιους άξονες, όπως και το διάγραμμα TTT (X-Θ-M) (σχ. 3.3α), δηλαδή στον άξονα του χρόνου και της θερμοκρασίας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



Σχ. 3.2β

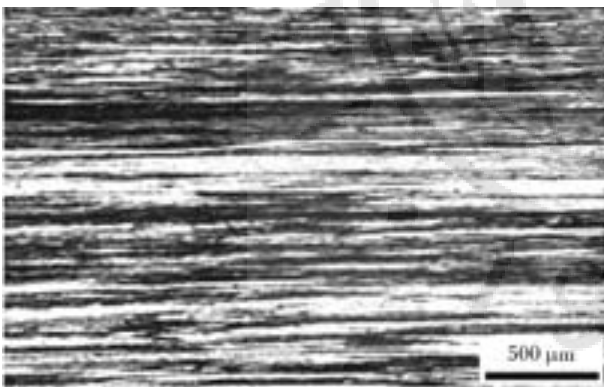
Ισοθερμοκρασιακός μετασχηματισμός ωστενίτη σε περλίτη ενός χάλυβα ευτηκτοιδούς συστάσεως (0,8% κ.β. C) συναρτήσει του χρόνου για τη θερμοκρασία των 675°C με υπέρθεση της καμπύλης της ισοθερμοκρασιακής θερμικής κατεργασίας ABCD. Διακρίνονται σχηματικά οι αποκτώμενες μικροδομές πριν, κατά τη διάρκεια και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

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 ισότροπη 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 διαλυτοποιήσεως (solution annealing) στους 630°C για 2 ώρες, ψυχρήλωση 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



Σχ. 5.3α

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

νήθως 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.

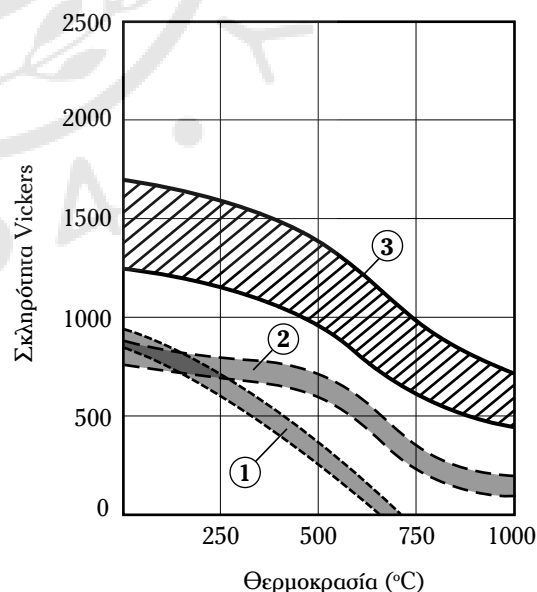
Στο σχήμα 5.3β συγκρίνονται τρία υλικά εργαλείων κοπής, δηλαδή οι κοινοί χάλυβες εργαλείων, οι ταχυχάλυβες και τα σκληρομέταλλα με κριτήριο τη σκληρότητα που παρουσιάζουν, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία κοπής. Κι αυτό, γιατί η θερμοκρασία κοπής αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας κοπής. Επομένως, το εργαλείο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

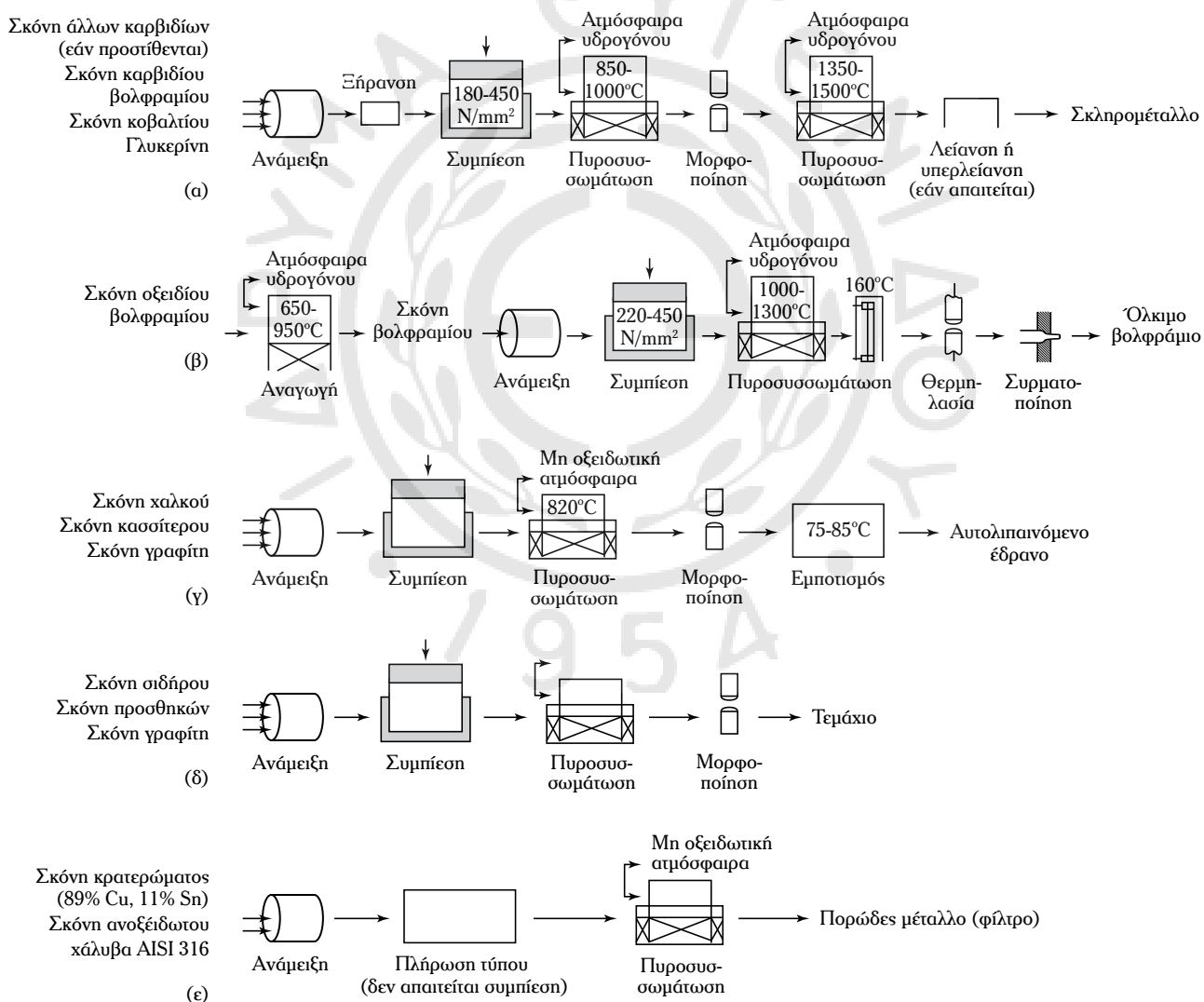
κατηγορίας χαρακτηρίζονται από τους διψήφιους αριθμούς (αριθμούς ποιότητας) 01, 10, 20, 25, 30, 40, 50 για την κατηγορία P, από τους 10, 20, 30 για την κατηγορία M και από τους 01, 05, 10, 20, 30, 40 για την κατηγορία K. Ελάττωση αυτών των αριθμών ποιότητας από 50 σε 01 (κατηγορία P), από 30 σε 10 (κατηγορία 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) αυτολιπαινόμενου εδράνου ολισθήσεως χαλκού-κασσιτέρου, (δ) σιδηρούχων τεμαχίων και (ε) μεταλλικών φίλτρων.

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 σφυριδόπανο. 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 d 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).

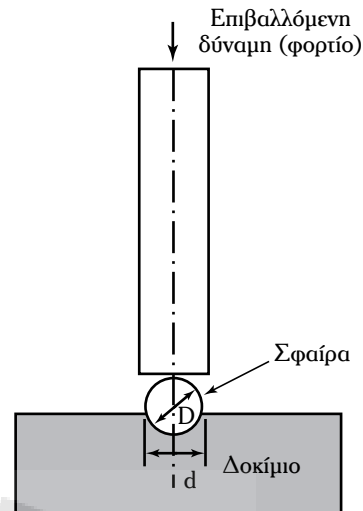
Έτσι, κατά τη δοκιμασία χαλύβδινου τεμαχίου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σφαίρα με διάμετρο 10 mm σε συνδυασμό με φορτίο 30.000 N.

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

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.



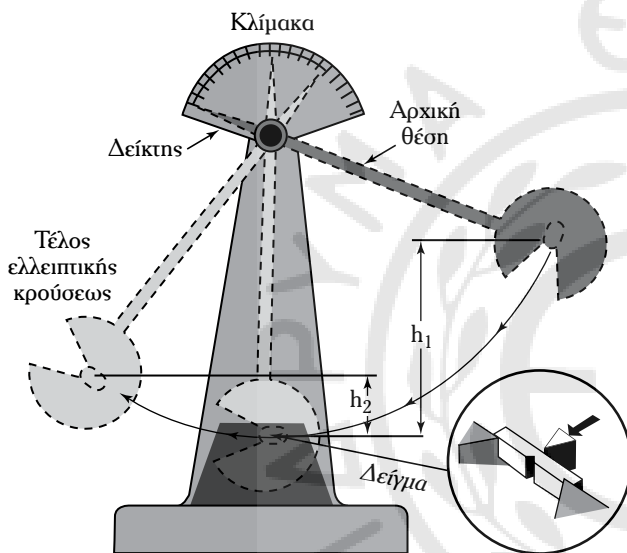
Σχ. 6.2β

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 κασσιτέρου	10



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.

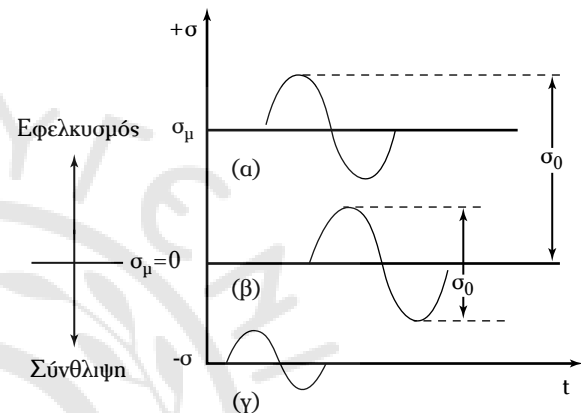
6.2.4 Η δοκιμή κοπώσεως.

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.



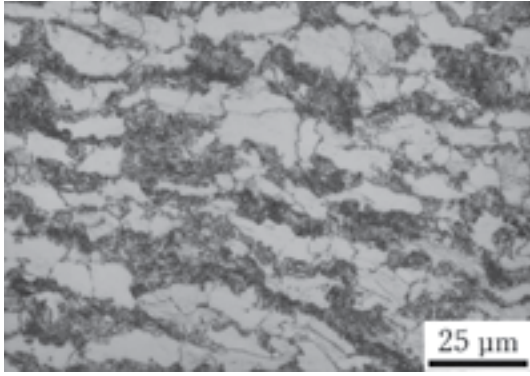
Σχ. 6.2η

Τιμές των τάσεων δυναμικής καταπόνησεως.

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



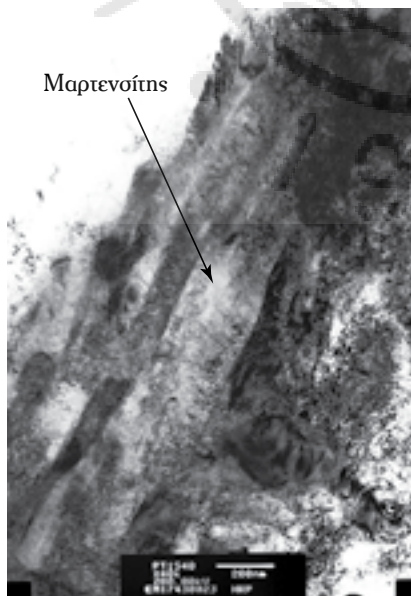
Σχ. 6.36

Χαρακτηριστική μικροδομή φερρίτη (ανοιχτό γκρι) και περλίτη (σκούρο γκρι) χάλυβα κατασκευών με 0,2%- κ.β. C.

κτός ο προσδιορισμός της χημικής συστάσεως 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.



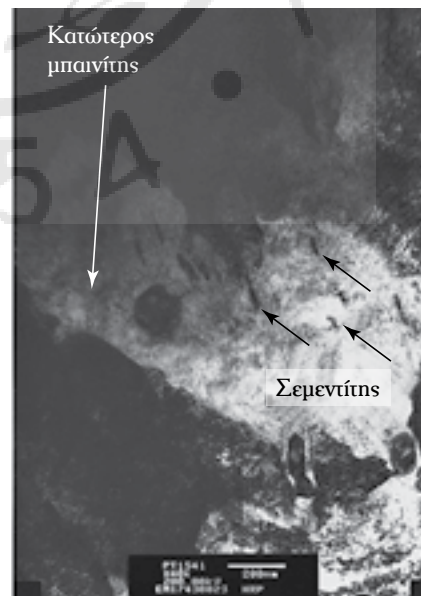
© S. Papaefthymiou, 2015

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**.

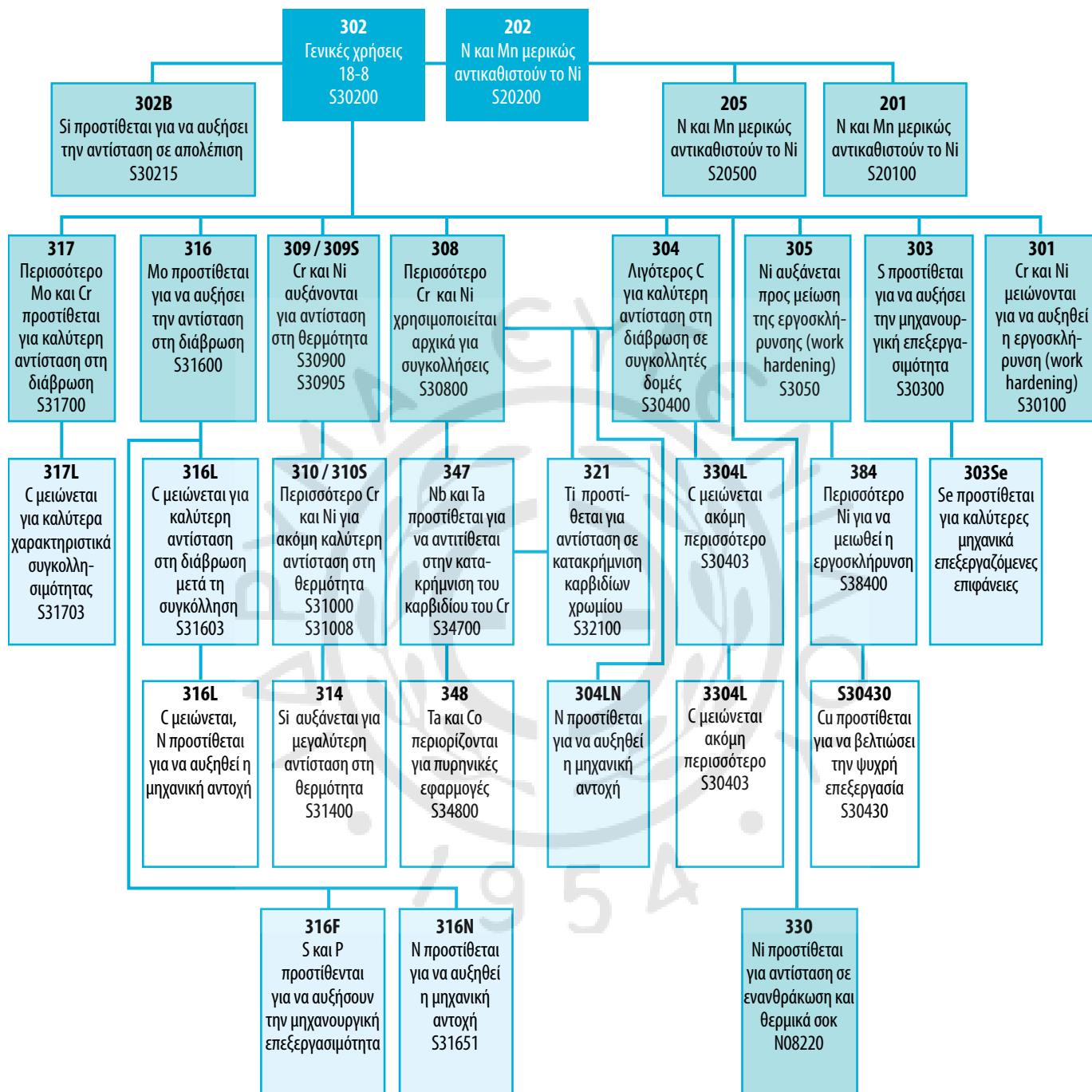
Όταν συμβαίνουν επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, κυκλικές εφελκυστικές και συνθλιπτικές εναλλαγές στην τάση, τότε η αστοχία μπορεί να επέλθει σε τάσεις (κατά πολύ) χαμηλότερες του ορίου διαρροής του υλικού κατόπιν κάποιων εκατοντάδων ή χιλιάδων ή εκατοντάδων χιλιάδων κύκλων φορτίσεως. Η αστοχία αυτή ονομάζεται **θραύση λόγω κοπώσεως**. Σε



Σχ. 6.3ε

Ενδεικτικές μικρογραφίες μαρτενσίτη και μπαινίτη (κατώτερου μπαϊνίτη) στο TEM.

Πίνακας Π.Α.3
Οικογενειακές σχέσεις ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.





Ο Ήφαιστος παραδίδει στην Θέτιδα την ασπίδα του Αχιλλέα
που κατασκεύασε από χρυσό, ασήμι και κασσίτερο
(Αττική ερυθρόμορφη κύλιξ, 490-480 π.Χ.).
Altes Museum, Βερολίνο.