

ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΙΙ

(ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ)



Γ' ΤΑΞΗ ΕΠΑ.Λ.

ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑ: ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ
ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ II

(ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ)

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ:

- Σπυρίδωνος Πέτρος

ΚΡΙΤΕΣ:

- Ιωαννίδου Μαρία
- Μπιλάλης Νικόλαος
- Σκοταράς Νικόλαος

ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:

- Λαμπάκη Ελεάνα

ATELIER (παρακολούθηση - συνεργασία):

- Πανταζόπουλος Γεώργιος
- COSMOSWARE

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΝΕΚΔΟΣΗΣ

Η επανέκδοση του παρόντος βιβλίου πραγματοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων «Διόφαντος» μέσω ψηφιακής μακέτας.

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

Αριστομένης Αντωνιάδης

Γεώργιος Πανταζόπουλος

Η συγγραφή και η επιστημονική επιμέλεια του βιβλίου πραγματοποιήθηκε
υπό την αιγίδα του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου

ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ II

(ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ)

Γ΄ ΤΑΞΗ ΕΠΑ.Λ.

Ειδικότητα: Τεχνικός Μηχανολογικών
Εγκαταστάσεων και Κατασκευών

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ
«ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν βιβλίο με τίτλο *Μηχανουργική Τεχνολογία II - Κατεργασίες Διαμόρφωσης*, απευθύνεται στους μαθητές της Γ΄ Τάξης των Επαγγελματικών Λυκείων (ΕΠΑ.Λ.), του Τομέα Μηχανολογίας και της Ειδικότητας Τεχνικών Μηχανολογικών Εγκαταστάσεων και Κατασκευών. Έχει ως στόχο αφενός, την ενημέρωση και εξοικείωση των μαθητών σε θέματα τεχνολογίας υλικών και κατεργασιών διαμόρφωσής τους, και, αφετέρου την δημιουργία ενός κατάλληλου εγχειριδίου ή οδηγού χρήσης των διαφόρων υλικών και κατεργασιών. Το συγκεκριμένο μάθημα μαζί με το Μηχανολογικό Σχέδιο, την Αντοχή Υλικών, τη Μηχανουργική Τεχνολογία I και τα Στοιχεία Μηχανών, συναποτελούν το βασικό “κορμό” γνώσεων της Κατασκευαστικής Τεχνολογίας, βάσει του οποίου ο καταρτιζόμενος μπορεί να συμβάλλει σε θέ-

ματα επιλογής υλικών έως και στο σχεδιασμό κάποιας συγκεκριμένης μηχανολογικής κατασκευής. Βασική προϋπόθεση κατανόησης και εμπέδωσης όλων των παραπάνω, καθίσταται, εκτός της σωστής κριτικής μελέτης των αντίστοιχων εγχειριδίων, και η κατάλληλη εργαστηριακή εφαρμογή η οποία να συμβαδίζει με τη θεωρία.

Η γνωστική περιοχή των Κατεργασιών των Υλικών είναι πολύ ευρεία από άποψη εφαρμογών στη σύγχρονη πραγματικότητα. Οποδήποτε υπάρχει μέσα σε ένα σπίτι (οικιακά σκεύη, έπιπλα, κ.λπ.) αλλά και σε ένα σύγχρονο εργοστάσιο κατασκευής αεριοπροωθούμενων κινητήρων (jet), όπως π.χ. πτερωτές αεριοστροβίλων, βαλβίδες και μπλοκ μηχανών, είναι μερικές από τις χιλιάδες εφαρμογές της Μηχανουργικής Τεχνολογίας.

Παρόλο που τα περιεχόμενα του βιβλίου παρουσιάζουν έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον και χρήζουν αντιμετώπισης υψηλού επιπέδου, καταβλήθηκαν έντονες προσπάθειες, από τους συγγραφείς, να παρουσιασθούν με σαφήνεια και παραστατικότητα (μέσω καταλλήλων σχημάτων και παραδειγμάτων από την καθημερινή ζωή και τη βιομηχανική πρακτική) χωρίς τον απαιτούμενο αυστηρό μαθηματικό φορμαλισμό. Επίσης συμπεριελήφθησαν μέσα στο κείμενο οι στοιχειώδεις γνώσεις από τη Χημεία (π.χ. χημικοί δεσμοί) και την Αντοχή Υλικών (μηχανικές δοκιμές, σκληρότητα, αντοχή σε εφελκυσμό), με σκοπό τη δημιουργία ενός αυτοτελούς κειμένου. Επιπλέον, θεωρήθηκε μείζονος σημασίας η κάλυψη θεμάτων που αφορούν την τεχνολογία συγχρόνων υλικών (όπως π.χ. υπερκράματα) και μη συμβατικών κατεργασιών, όπως είναι οι κατεργασίες με δέσμη laser (βαφή, συγκολλήσεις) και οι επικαλύψεις με μεγάλη αντοχή στη φθορά και τη διάβρωση (ψεκασμός πλάσματος, φυσική και χημική εναπόθεση ατμών, κ.λπ.).

Το βιβλίο διαιρείται σε έξι μεγάλες ενότητες:

Μέρος Α: Υλικά. Παρουσιάζονται διεξοδικά η δομή (χημικοί δεσμοί και κρυσταλλική δομή) και οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Δίδεται έμφαση στη μελέτη του συστήματος σιδήρου-άνθρακα που αποτελεί τη βάση των χαλύβων καθώς και στις κυριότερες θερμικές τους κατεργασίες (ανόπτηση, βαφή, επαναφορά, επιφανειακή σκλήρυνση). Παρουσιάζονται τα διάφορα είδη κραματωμένων χαλύβων, όπως π.χ. ανοξείδωτοι χάλυβες, εργαλειαχάλυβες, με παραδείγματα χρήσης και εφαρμογών στις μηχανολογικές κατασκευές. Κατόπιν παρουσιάζονται τα βασικότερα είδη μη σιδηρούχων βιομηχανικών κραμάτων (χαλκού, αλουμινίου, τιτανίου, κ.λπ.) και οι κυριότερες εφαρμογές τους. Τέλος γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των μη μεταλλικών υλικών (πολυμερή, κεραμικά, σύνθετα υλικά) και

αναφέρονται στοιχεία αλλά και παραδείγματα από την πράξη που αφορούν τη μεθοδολογία της επιλογής υλικών.

Μέρος Β: Χύτευση και Κονιομεταλλουργία. Περιγράφονται και αναλύονται οι διάφορες συμβατικές και μη συμβατικές τεχνικές χύτευσης (χύτευση σε άμμο, χύτευση σε καλούπι, “χαμένο κερί”, φυγοκεντρική χύτευση, κ.λπ.). Επίσης παρουσιάζονται οι μέθοδοι της Κονιομεταλλουργίας, με τις οποίες κατασκευάζονται από σκόνες μετάλλων ή κεραμικών υλικών πολλά εξαρτήματα κατασκευών και στοιχεία μηχανών.

Μέρος Γ: Μηχανικές Διαμορφώσεις. Γίνεται μια εισαγωγή με την παρουσίαση των βασικών αρχών και εννοιών της πλαστικότητας των μετάλλων. Κατόπιν παρουσιάζονται αναλυτικά οι κυριότερες κατεργασίες διαμόρφωσης μετάλλων (απότμηση, βαθεία κοίλανση, κάμψη, σφυρηλασία, έλαση, διέλαση, περιώθηση) και ειδικές περιπτώσεις (π.χ. διαμόρφωση σπειρωμάτων, σωλήνων, κουταλιών, εκρηκτική διαμόρφωση). Δίδονται υπολογιστικά παραδείγματα και πληθώρα εφαρμογών των εν λόγω κατεργασιών στην καθημερινή ζωή αλλά και στη βιομηχανία με έμφαση στην κατασκευή μηχανολογικών εξαρτημάτων και στοιχείων μηχανών. Τέλος αναφέρονται οι σημαντικότερες από τις μεθόδους διαμόρφωσης πλαστικών, όπως π.χ. χύτευση με έγχυση, χύτευση με συμπίεση, εξώθηση, χύτευση με εμφύσηση, θερμοδιαμόρφωση, κ.λπ.

Μέρος Δ: Συγκολλήσεις. Παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι συγκολλήσεων μετάλλων: συγκολλήσεις αερίου (π.χ. οξυγονοκόλληση), συγκολλήσεις τόξου (ηλεκτροσυγκολλήσεις, MIG, TIG, κ.λπ.), συγκολλήσεις αντίστασης, ετερογενείς συγκολλήσεις (κασσιτεροκολλήσεις, μπρουντζοκολλήσεις), κ.λπ. Επίσης αναφέρονται μερικές από τις μη συμβατικές συγκολλήσεις: συγκόλληση με τριβή, συγκόλληση με δέσμη laser.

Μέρος Ε: Επιφανειακές Κατεργασίες. Αρχικά παρουσιάζονται οι διάφορες μέθοδοι καθαρισμού της επιφάνειας των μετάλλων (π.χ. μηχανικός, χημικός, ηλεκτρολυτικός καθαρισμός), που αποτελεί βασικό στάδιο πριν από οποιαδήποτε διαδικασία επιμετάλλωσης. Στη συνέχεια αναφέρονται οι κυριότερες επικαλύψεις για προστασία από τη διάβρωση και τη φθορά, όπως είναι επικαλύψεις με εμβάπτιση (γαλβάνισμα, επικασσιτέρωση), η φωσφάτωση και οι ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις (π.χ. επινικέλωση, επιχρωμίωση). Τέλος παρουσιάζονται μερικές από τις κυριότερες μη συμβατικές επικαλύψεις, όπως είναι αυτές με ψεκασμό πλάσματος και οι επικαλύψεις λεπτού πάχους (φυσική και χημική εναπόθεση ατμών).

Μέρος ΣΤ: Ασφάλεια Εργασίας. Αναπτύσσονται οι βασικοί κανόνες ασφάλειας που πρέπει να τηρούνται στον αντίστοιχο χώρο εργασίας και το αντίστοιχο θεσμικό πλαίσιο που τους διέπει.

Επιθυμούμε να ευχαριστήσουμε τη συντονιστική ομάδα έργου του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου για την άψογη συνεργασία καθόλη τη διάρκεια συγγραφής του παρόντος βιβλίου. Επίσης ευχαριστούμε τους κριτές για τα εποικοδομητικά τους σχόλια στο τεχνικό και στο γλωσσικό μέρος του κειμένου.

Τέλος θέλουμε να απευθύνουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειές μας για την αστείρευτη υπομονή, κατανόηση και ψυχική συμπαράσταση με τις οποίες μας περιέβαλλαν καθόλο το διάστημα της συγγραφής του ανά χείρας βιβλίου.

Οι συγγραφείς



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή	3
1.2 Οι βασικές κατηγορίες υλικών - το “λειτουργικό τρίγωνο”	6
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΕΤΑΛΛΑ - ΚΡΑΜΑΤΑ	9
2.1 Γενικά	11
2.2 Κύριοι χημικοί δεσμοί	12
2.3 Δευτερεύοντες δεσμοί	14

2.4	Ορισμός και ιδιότητες των μετάλλων	16
2.5	Η κρυσταλλική δομή των μετάλλων	18
2.6	Αλλοτροπία - Αλλοτροπικά μέταλλα	22
2.7	Κράματα - Βασικές έννοιες	23
2.8	Στερεά διαλύματα - μεσομεταλλικές ενώσεις	25
2.9	Ανάπτυξη πολυκρυσταλλικής δομής	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ 31

3.1	Κατηγορίες μηχανικών δοκιμών	33
3.2	Σκληρότητα	35
3.3	Δυσθραυστότητα	39
3.4	Κόπωση	42
3.5	Ερπυσμός	46
3.6	Κατεργασιμότητα	48
3.7	Ελαστική παραμόρφωση μονοκρυστάλλου	49
3.8	Πλαστική παραμόρφωση μονοκρυστάλλου	51
3.9	Πλαστική παραμόρφωση πολυκρυσταλλικών υλικών	53
3.10	Κατεργασίες εν ψυχρώ: αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση ...	54
3.11	Κατεργασίες εν θερμώ	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ - ΑΝΘΡΑΚΑ 61

4.1	Διαγράμματα ισορροπίας των φάσεων	63
4.2	Το διμερές διάγραμμα φάσεων Fe-C	71
4.3	Βασικοί μετασχηματισμοί φάσεων στο διάγραμμα Fe-Fe ₃ C	73
4.4	Χυτοσίδηροι	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ 85

5.1	Γενικά	87
5.2	Ανόπτηση	89
5.3	Θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης	93
5.4	Επαναφορά	103
5.5	Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες χαλύβων	106
5.6	Φούρνοι θερμικών κατεργασιών	108

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΚΡΑΜΑΤΑ 115

6.1	Κατάταξη των χαλύβων	117
-----	----------------------------	-----

6.2	Τυποποίηση χαλύβων	119
6.3	Κραματωμένοι χάλυβες	121
6.4	Χάλυβες κατασκευών	123
6.5	Ανοξείδωτοι χάλυβες	124
6.6	Εργαλειοχάλυβες	126
6.7	Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών	128
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΜΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΚΡΑΜΑΤΑ		133
7.1	Κράματα Χαλκού	135
7.2	Κράματα Αλουμινίου	140
7.3	Κράματα Μαγνησίου	144
7.4	Κράματα Τιτανίου	145
7.5	Κράματα Νικελίου	146
7.6	Κράματα Ψευδαργύρου	147
7.7	Κράματα Μολύβδου	147
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ		153
8.1	Πολυμερή	155
8.2	Κεραμικά-Γυαλιά	162
8.3	Σύνθετα Υλικά	167
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ		173
9.1	Η διαδικασία επιλογής υλικών	175
9.2	Υλικά και βιομηχανική παραγωγή	177
9.3	Παραδείγματα περιπτώσεων επιλογής υλικών	180
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ΧΥΤΕΥΣΗ		183
10.1	Γενικά	185
10.2	Μοντέλα - ορολογία χύτευσης	187
10.3	Μέθοδοι χύτευσης	188
10.4	Προβλήματα κατά τη χύτευση	188
10.5	Χύτευση σε καλούπια μιας χρήσης	190
10.6	Χύτευση με καλούπια πολλαπλών χρήσεων	199

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ 207

11.1 Γενικά περί κονιομεταλλουργίας	209
11.2 Στάδια της κονιομεταλλουργίας	210
11.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κονιομεταλλουργίας	214
11.4 Εφαρμογές της κονιομεταλλουργίας	215

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ. 217

12.1 Γενικά	219
12.2 Πλαστική παραμόρφωση	220
12.3 Παραμόρφωση εν θερμώ και εν ψυχρώ	227
12.4 Είδη μηχανικών διαμορφώσεων	229
12.5 Πρέσες	232

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ .. 239

13.1 Σφυρηλασία	241
13.2 Έλαση	251
13.3 Εξώθηση ή Διέλαση	265

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ**ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ 275**

14.1 Απότμηση	277
14.2 Βαθεία κοίλανση	294
14.3 Κάμψη	315
14.4 Περιώθηση	330

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 15 ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 341

15.1 Διαμόρφωση σπειρώματος	343
15.2 Αποτύπωση	344
15.3 Ολκή	345
15.4 Διαμόρφωση σωλήνων	346
15.5 Υψηλού ρυθμού ενέργειας παραμορφώσεις	346
15.6 Ψαλιδισμός	348
15.7 Διαμορφώσεις πλαστικών	350

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 16 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ 357

16.1 Εισαγωγή	359
16.2 Συγκολλητικότητα των υλικών	360
16.3 Έλεγχος συγκολλήσεων	361
16.4 Συμβολισμοί συγκολλήσεων	363
16.5 Αυτογενείς συγκολλήσεις	363
16.6 Ετερογενείς συγκολλήσεις	382

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 17 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΦΘΟΡΑ 387

17.1 Γενικά περί φθοράς	389
17.2 Τύποι φθοράς	390
17.3 Κατηγορίες επιφανειακών κατεργασιών	393
17.4 Προετοιμασία της επιφάνειας των μετάλλων	397

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 18 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 403

18.1 Βασικές επιφανειακές κατεργασίες τροποποίησης	405
18.2 Βασικές επιφανειακές κατεργασίες απόθεσης υλικού (επικαλύψεις)..	409

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 19 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΥΓΙΕΙΝΗΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 425

19.1 Γενικά	427
19.2 Κανόνες ασφαλείας	429
19.3 Επαγγελματικές ασθένειες	432
19.4 Σήμανση	434
19.5 Τεχνικός Ασφαλείας	435
19.6 Θεσμικό πλαίσιο	436

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 439

Πίνακας του Joseph Wright (1734-1797)
με τίτλο
"The discovery of Phosphorus -
Η Ανακάλυψη του Φωσφόρου"



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σύνοψη ιστορική αναδρομή

1.2 Οι βασικές κατηγορίες υλικών - το “λειτουργικό τρίγωνο”



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να παρουσιασθεί μία σύντομη ιστορική αναδρομή της παρασκευής και χρήσης των κυριοτέρων μετάλλων
- ☒ Να γνωρίσετε τις βασικές κατηγορίες των υλικών
- ☒ Να κατανοήσετε την αλληλεπίδραση δομής-ιδιοτήτων-κατεργασιών των υλικών

1.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η χρήση των διαφόρων υλικών συνδέεται στενά με το ξεκίνημα του ανθρώπινου πολιτισμού. Ο άνθρωπος, από την αρχή της εμφάνισής του, άρχισε να χρησιμοποιεί διάφορα υλικά με τα οποία κατασκεύαζε εργαλεία και όπλα που ήταν απαραίτητα για την επιβίωσή του στη γη.

Τα πρώτα εργαλεία και όπλα, που είχε κατασκευάσει, ήταν είτε από ξύλα, είτε από πέτρες (λίθους), είτε από κόκαλα. Για να προστατεύεται από το κρύο ντυνόταν από δέρματα ζώων. Αυτά ήταν και τα πρώτα υλικά που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος και επειδή το σημαντικότερο εξ αυτών υπήρξε η πέτρα, η εποχή αυτή ονομάστηκε **λίθινη** και διήρκεσε μέχρι περίπου τις αρχές της 5ης χιλιετηρίδας π.Χ.

Τα μέταλλα τα ανακάλυψε αργότερα (περίπου 5000 π.Χ.). Μια από τις επικρατέστερες θεωρίες γύρω από την ανακάλυψη των μετάλλων, είναι αυτή που υποστηρίζει ότι μετά από μεγάλες πυρκαγιές έλιωναν τα μέταλλα, που υπήρχαν μέσα στα διάφορα πετρώματα, κι έτσι με αυτό τον τρόπο επιτυγχανόταν η εξαγωγή τους. Με αυτό τον τρόπο ενδέχεται ο άνθρωπος να ανακάλυψε το **χαλκό** (Cu). Η εποχή, που ακολουθεί την τελευταία περίοδο της λίθινης εποχής, χαρακτηρίζεται από την ευρεία χρήση του χαλκού και ονομάζεται **εποχή του χαλκού** (5000-3000 π.Χ.). Εκεί όπου δεν υπήρχε αυτοφυής χαλκός, ο άνθρωπος εξήγαγε χαλκό με αναγωγή σε υψηλή θερμοκρασία οξειδίων του χαλκού (απόσπαση του οξυγόνου από το οξείδιο), που βρίσκονταν σε διάφορα μεταλλεύματα και παρατήρησε ότι αυτό το νέο υλικό είχε μερικές χαρακτηριστικές και ταυτόχρονα πολύ χρήσιμες ιδιότητες. Ήταν εύπλαστο, δηλαδή μπορούσε να διαμορφωθεί εύκολα με στόχο τη μορφοποίησή του σε εργαλείο ή σε όπλο

(π.χ. με σφυρηλάτηση), χωρίς να παρουσιάσει ρωγμές ή να σπάσει.

Πάλι τυχαία, ίσως μετά από πυρκαγιά, έρρευσε από κάποια πετρώματα (μεταλλεύματα) ένα μεταλλικό υλικό, το οποίο έμοιαζε πολύ με το χαλκό, αλλά είχε πολύ ανώτερες μηχανικές ιδιότητες. Το υλικό αυτό ήταν κράμα χαλκού-κασσιτέρου (Cu-Sn) και ονομάστηκε **κρατέρωμα (μπρούντζος)**. Το κράμα αυτό ήταν πιο σκληρό και λιγότερο εύπλαστο από το χαλκό. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο και όπλο, αντικαθιστώντας το χαλκό. Η εποχή αυτή ονομάστηκε **εποχή του κρατερώματος** (3000-1000 π.Χ.). Ο άνθρωπος έφτιαχνε τον μπρούντζο με ανάμειξη χαλκού και κασσιτέρου και κατόπιν με τήξη. Ο κασσίτερος λαμβανόταν με αναγωγή κασσιτερούχων πετρωμάτων.

Το **σίδηρο** (Fe) ανακαλύπτει ο άνθρωπος αργότερα από τους διάφορους μετεωρίτες, που έπεφταν στη γη. Λόγω του μεγάλου σημείου τήξεως του σιδήρου (1538°C) σε σχέση με αυτό του χαλκού (1083°C), η διαμόρφωση του σιδήρου με σφυρηλάτηση παρουσίαζε μεγάλες δυσκολίες. Αυτός ήταν και ο κύριος λόγος για τον οποίο η χρησιμοποίηση του σιδήρου αναπτύχθηκε βραδύτατα. Όμως, ο σίδηρος εκτιμήθηκε ιδιαίτερα, όταν κατά την τήξη κάποιων σιδηρούχων μεταλλευμάτων (που περιείχαν άνθρακα 0,2-0,5%) παρήχθηκε **χάλυβας**. Παρατηρήθηκε ότι εργαλεία ή όπλα (ξίφη), που ήταν κατασκευασμένα από χάλυβα, αποκτούσαν εξαιρετική σκληρότητα, όταν στη διάπυρη (850°-900°C) κατάσταση εμβαπτιζόνταν σε νερό (**βαφή**). Η εποχή που ακολουθεί χαρακτηρίζεται από ολοένα αυξανόμενη χρησιμοποίηση του σιδήρου και του χάλυβα και ονομάστηκε **εποχή του σιδήρου** (1000 π.Χ. - σήμερα). Έτσι, αναπτύχθηκε σιγά-σιγά η μεταλλουργία του σιδήρου, καθώς και άλλων μετάλλων, όπως του χρυσού (Au), του αργύρου (Ag) και του μολύβδου (Pb).

Το 13ο μ.Χ. αι. εμφανίζεται και προοδεύει σημαντικά η Αλχημεία μέχρι το 17ο αι., οπότε και εμφανίζονται και οι πρώτες αρχές της Χημείας και η θεμελίωσή της από τον Lavoisier. Οι Αλχημιστές προσπαθούσαν να μετατρέψουν, με πολύπλοκες διεργασίες, ευτελέστερα μέταλλα σε χρυσό. Το αντιδραστήριο εκείνο, μέσω του οποίου θα επιτυγχανόταν τούτη η μετατροπή, το ονόμαζαν **φιλοσοφική λίθο**. Μέσω αυτής της πορείας έγιναν σημαντικές ανακαλύψεις από Αλχημιστές στην περιοχή της Χημείας και της Μεταλλουργίας. Μεγάλοι Αλχημιστές υπήρξαν, μεταξύ άλλων, ο Albertus Magnus, που ανακάλυψε το αρσενικό (As) περί το 1250 μΧ., ο Basile Valentine που έδωσε τον 17ο αιώνα οδηγίες για την παρασκευή αλάτων του αντιμονίου (Sb) και ο Hennig Brand που απομόνωσε το φωσφόρο (P) το 1669.

Η μεταλλουργία, και ειδικότερα η σιδηρομεταλλουργία, αποτέλεσε τη βάση της στρατιωτικής ισχύος. Το 1346 κατασκευάζονται στη Φλωρεντία

πυροβόλα από ορείχαλκο που χρησιμοποιούσαν σφαίρες από σφυρήλατο σίδηρο. Το 15 αι. κατασκευάζονται βόμβες από σίδηρο και σφαίρες από χυτοσίδηρο. Αλλά και η χρήση των μετάλλων για ειρηνικούς σκοπούς είναι μεγάλη (κατασκευές νομισμάτων, εργαλείων, αμαξών, δομικών κατασκευών, κ.λπ.).

Έτσι, παράλληλα με τις ανακαλύψεις της Χημείας, η Μεταλλουργία από τέχνη άρχισε σιγά-σιγά να θεμελιώνεται και να αποκτά διαστάσεις επιστήμης. Τα πρώτα επιστημονικά συγγράμματα πάνω στη μεταλλουργία ήσαν το βιβλίο του Γερμανού Agricola με τίτλο "De re Metallica" και του Ιταλού Beringuccio "Pyrotechnia", στα οποία παρουσιάζονται και καταγράφονται αναλυτικά πολλές βασικές χημικές και μεταλλουργικές διεργασίες της εποχής εκείνης (σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Η ανάπτυξη της μεταλλουργίας παρουσιάζεται στο "De Re Metallica" του Agricola, ένα από τα βασικότερα επιστημονικά συγγράμματα του 16ου αι.

Ο 19ος αι. χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη πρόοδο της μεταλλουργίας. Σημαντικότερες ανακαλύψεις αυτής της περιόδου υπήρξαν η παραγωγή χάλυβα με τη μέθοδο **Bessemer** και κατά τα τέλη του 19ου αι. η ανακάλυψη του ελαφρού μετάλλου **αλουμινίου** (Al), του οποίου τα κράματα αποτέλεσαν τη βάση της Αεροναυπηγικής και της Αυτοκινητοβιομηχανίας. Τα κράματα του αλουμινίου, του τιτανίου, κάποιοι ειδικοί χάλυβες, αλλά και τα προϊόντα της κονιομεταλλουργίας οδήγησαν στα εκπληκτικά αποτελέσματα της επιστήμης και της τεχνολογίας του διαστήματος.

Τέλος, υπάρχουν ακόμα πολλές τεχνικές ανάγκες τις οποίες δεν μπορούν να καλύψουν τα μέχρι τώρα μεταλλικά υλικά. Γι' αυτό και η έρευνα πάνω στον έλεγχο της δομής των υλικών για την απόκτηση των επιθυμητών ιδιοτήτων και στη σύνθεση νέων υλικών συνεχίζεται.

1.2 ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ - ΤΟ "ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΤΡΙΓΩΝΟ"

Τα υλικά χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες με βάση τη δομή τους:

- (α) **Μέταλλα - Κράματα.** Τέτοια υλικά είναι ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο σίδηρος, ο χάλυβας, ο χυτοσίδηρος, κ.λπ.
- (β) **Κεραμικά - Γυαλιά.** Παραδείγματα τεχνικών κεραμικών είναι η αλουμίνα (Al_2O_3), το οξείδιο του τιτανίου (TiO_2), το καρβίδιο του πυριτίου (SiC), το καρβίδιο του βολφραμίου (WC), το νιτρίδιο του βορίου (BN), το νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4), το διαμάντι, κ.λπ.
- (γ) **Πολυμερή ή Πλαστικά.** Παραδείγματα τεχνικών πολυμερών είναι το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE ή Teflon), το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυστυρένιο (PS), το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA), οι εποξικές ρητίνες, ο βακελίτης, κ.λπ.
- (δ) **Σύνθετα υλικά.** Αυτά αποτελούνται από δύο ή περισσότερες κατηγορίες υλικών. Παραδείγματα σύνθετων υλικών αποτελούν το οπλισμένο σκυρόδεμα (τσιμέντο + χαλίκια + βέργες σιδήρου), το fiberglass (πολυμερές ενισχυμένο με ίνες γυαλιού), τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γραφίτη (άνθρακα). Τα σύνθετα υλικά, εκτός του ότι είναι πολύ ελαφρά, έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή.

Το "λειτουργικό τρίγωνο" της τεχνολογίας των υλικών αποτελεί το σχήμα που δείχνει την αλληλεπίδραση μεταξύ της δομής, ιδιοτήτων και κατεργασιών των υλικών (σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Το "λειτουργικό τρίγωνο" της αλληλεπίδρασης δομής – ιδιοτήτων – κατεργασιών των υλικών

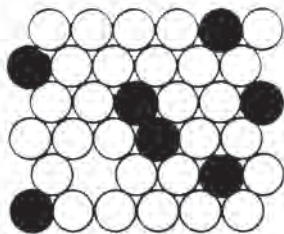
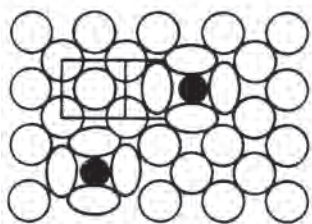
Έτσι λοιπόν, για να επιτύχουμε κάποιες επιθυμητές ιδιότητες σε ένα υλικό, πρέπει να επεμβούμε στη δομή του. Τις αλλαγές αυτές στη δομή τις προκαλούμε με τις κατάλληλες κατεργασίες. Π.χ., όταν θέλουμε να αυξήσουμε τη σκληρότητα ενός χάλυβα, πρέπει να προκαλέσουμε κάποιες συγκεκριμένες αλλαγές στη δομή του. Οι αλλαγές αυτές συντελούνται με τις θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης των χαλύβων (βαφή).



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 1ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Η χρήση των διαφόρων υλικών συνδέεται στενά με το ξεκίνημα του ανθρώπινου πολιτισμού. Η εποχή που ακολουθεί την τελευταία περίοδο της λίθινης εποχής, χαρακτηρίζεται από την ευρεία χρήση του χαλκού και ονομάζεται εποχή του χαλκού (5000-3000 π.Χ.). Ο άνθρωπος στη συνέχεια χρησιμοποιεί τον μπρούντζο ή κρατέρωμα που είναι κράμα χαλκού-κασσιτέρου. Το σίδηρο (Fe) ανακαλύπτει ο άνθρωπος αργότερα, από τους διάφορους μετεωρίτες που έπεφταν στη γη. Λόγω του μεγάλου σημείου τήξεως του σιδήρου (1538°C) σε σχέση με αυτό του χαλκού (1083°C), η διαμόρφωση του σιδήρου με σφυρηλάτηση παρουσίαζε μεγάλες δυσκολίες. Η εποχή που ακολουθεί χαρακτηρίζεται από ολοένα αυξανόμενη χρησιμοποίηση του σιδήρου και του χάλυβα και ονομάστηκε εποχή του σιδήρου (1000 π.Χ. - σήμερα).

- Τα πρώτα επιστημονικά συγγράμματα πάνω στη μεταλλουργία ήσαν το βιβλίο του Γερμανού Agricola με τίτλο "De re Metallica", και του Ιταλού Beringuccio "Pyrotechnia", στα οποία παρουσιάζονται και καταγράφονται αναλυτικά πολλές βασικές χημικές και μεταλλουργικές διεργασίες της εποχής εκείνης.
- Τα υλικά χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες με βάση τη δομή τους:
 - Μέταλλα - Κράματα
 - Κεραμικά - Γυαλιά
 - Πολυμερή ή Πλαστικά
 - Σύνθετα υλικά
- Υπάρχει μία στενή αλληλεπίδραση μεταξύ δομής, ιδιοτήτων και κατεργασιών των υλικών.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2

ΜΕΤΑΛΛΑ - ΚΡΑΜΑΤΑ

- 2.1 Γενικά
- 2.2 Κύριοι χημικοί δεσμοί
- 2.3 Δευτερεύοντες δεσμοί
- 2.4 Ορισμοί και ιδιότητες των μετάλλων
- 2.5 Η κρυσταλλική δομή των μετάλλων
- 2.6 Αλλοτροπία - Αλλοτροπικά μέταλλα
- 2.7 Κράματα - Βασικές έννοιες

2.8 Στερεά διαλύματα - Μεσομεταλλικές ενώσεις

2.9 Ανάπτυξη πολυκρυσταλλικής δομής



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να μάθετε και να κατανοήσετε τους κύριους και δευτερεύοντες χημικούς δεσμούς και τις κατηγορίες των υλικών στις οποίες εμφανίζονται
- ☒ Να μάθετε τα τρία βασικά κρυσταλλικά πλέγματα στα οποία κρυσταλλώνονται τα μέταλλα
- ☒ Να γίνει κατανοητό το φαινόμενο της αλλοτροπίας
- ☒ Να γίνουν κατανοητές οι έννοιες: κράμα, κόκκος, φάση, μικροδομή
- ☒ Να γίνουν κατανοητές οι έννοιες του στερεού διαλύματος και της μεσομεταλλικής ένωσης
- ☒ Να μάθετε τα στάδια ανάπτυξης ενός πολυκρυσταλλικού μετάλλου

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα μικρότερα σωματίδια της ύλης, που μπορούν να βρεθούν ελεύθερα και να διατηρούν τις ιδιότητες του σώματος στο οποίο ανήκουν, λέγονται **μόρια**. Τα ελάχιστα σωματίδια της ύλης, τα οποία προκύπτουν από περαιτέρω διάσπαση των μορίων με χημικό τρόπο, λέγονται **άτομα**. Το **άτομο** αποτελείται από τον πυρήνα που περιέχει τα **νετρόνια**, που είναι ουδέτερα, και τα **πρωτόνια** που είναι θετικά φορτισμένα. Άρα, συνολικά ο πυρήνας είναι θετικά φορτισμένος. Γύρω από τον πυρήνα κινούνται σε κυκλικές τροχιές, που ονομάζονται **στιβάδες**, τα **ηλεκτρόνια**, τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα. Το άτομο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Άρα ο αριθμός των ηλεκτρονίων ισούται με τον αριθμό των πρωτονίων.

Οι χημικοί δεσμοί χωρίζονται σε κύριους και δευτερεύοντες. Οι κύριοι δεσμοί είναι: **ιοντικός** (ή ετεροπολικός), **ομοιοπολικός** και **μεταλλικός**. Οι δευτερεύοντες δεσμοί είναι: ο **δεσμός Van der Waals** και ο **δεσμός υδρογόνου**.

2.2 ΚΥΡΙΟΙ ΧΗΜΙΚΟΙ ΔΕΣΜΟΙ

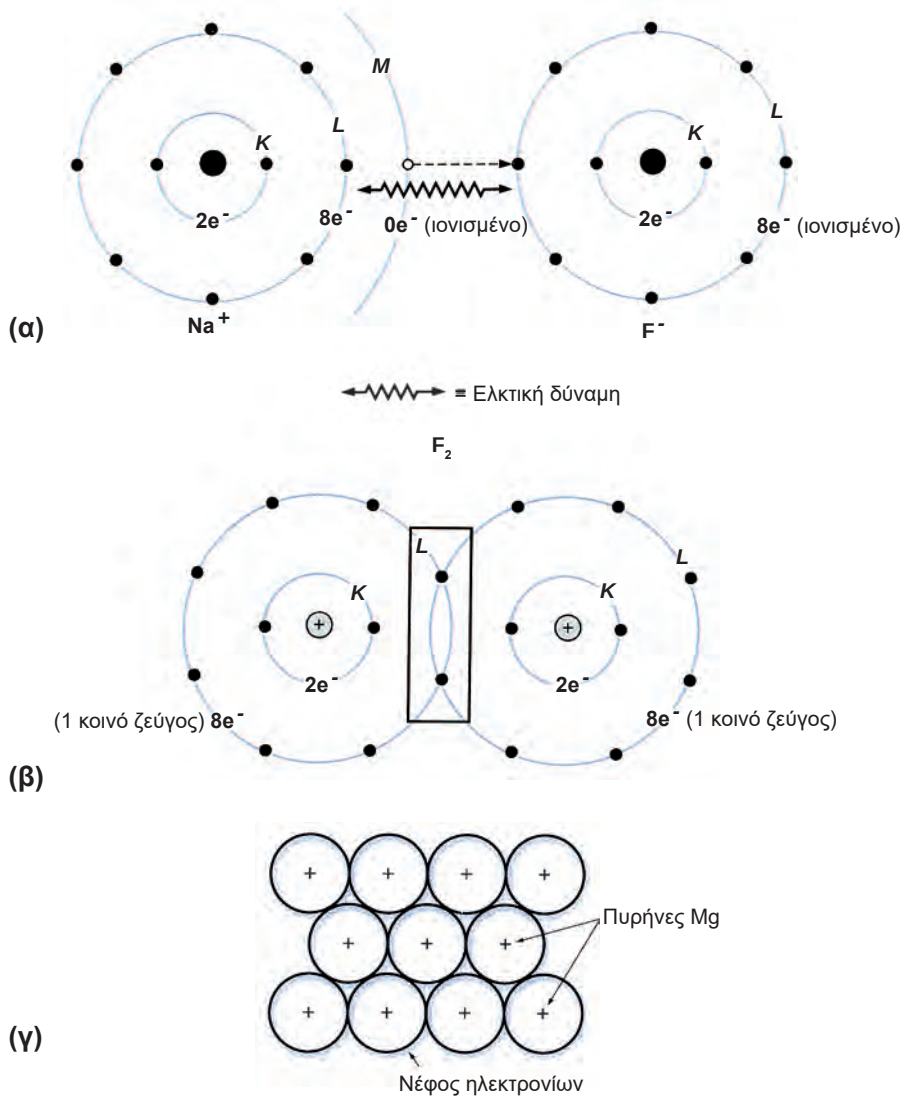
2.2.1 Ιοντικός δεσμός

Ο δεσμός αυτός χαρακτηρίζει αρκετά από τα ανόργανα στερεά σώματα (όπως π.χ. κεραμικά) και παρατηρείται στις ενώσεις ηλεκτροθετικών στοιχείων (μετάλλων) με ηλεκτραρνητικά στοιχεία (αμέταλλα). Τα ηλεκτροθετικά στοιχεία αποβάλλουν ηλεκτρόνια, τα οποία προσλαμβάνονται από τα ηλεκτραρνητικά στοιχεία με σκοπό την απόκτηση της δομής κάποιου ευγενούς αερίου, δηλαδή τη συμπλήρωση της εξωτερικής στιβάδας (στιβάδα σθένους) με **οκτώ** ή **δύο** ηλεκτρόνια. Αποτέλεσμα αυτής της **μεταφοράς ηλεκτρονίων** είναι να αποκτήσουν τα άτομα ηλεκτρικό φορτίο (αυτό που θα δώσει ηλεκτρόνια να φορτισθεί θετικά και αυτό που θα πάρει ηλεκτρόνια να φορτισθεί αρνητικά), δηλαδή να μετατραπούν σε **ιόντα**. Τα ιόντα αυτά, ως αντίθετα φορτισμένα (ετερώνυμα), έλκονται ηλεκτροστατικά και δημιουργούν τη χημική ένωση.

Π.χ. το NaF (φθοριούχο νάτριο) είναι μια ιοντική ένωση. Το νάτριο έχει στην εξωτερική του στιβάδα 1 e και το φθόριο 7 e. Το νάτριο δίνει στο φθόριο το 1 e και μένει με 8 e στην προηγούμενη στιβάδα, ενώ το φθόριο συμπληρώνει 8 e συνολικά στην εξωτερική του στιβάδα (δομή ευγενούς αερίου) (σχήμα 2.1α). Έτσι, δημιουργούνται θετικά ιόντα Na^+ και αρνητικά ιόντα F^- . Τα ιόντα αυτά έλκονται ηλεκτροστατικά (δυνάμεις **Coulomb**) δημιουργώντας την ένωση NaF. Ιοντικό δεσμό σχηματίζουν αρκετά κεραμικά υλικά, όπως το οξείδιο του μαγνησίου (MgO), η αλουμίνα (Al_2O_3) κ.λπ.

2.2.2 Ομοιοπολικός δεσμός

Το είδος αυτό του δεσμού το συναντάμε κυρίως στις οργανικές ενώσεις ή, γενικότερα, όπου υπάρχει μικρή διαφορά ηλεκτραρνητικότητας μεταξύ των στοιχείων που συμμετέχουν στο σχηματισμό της ένωσης, π.χ. σε ενώσεις, όπου και τα δυο στοιχεία είναι αμέταλλα όπως CO_2 , SO_2 , κ.λπ. Στην περίπτωση του ομοιοπολικού δεσμού δε γίνεται μεταφορά ηλεκτρονίων, αλλά **αμοιβαία συνεισφορά ηλεκτρονίων** των ατόμων, με στόχο τη δημιουργία κοινών ζευγών ηλεκτρονίων έτσι, ώστε να επιτυγχάνεται η δομή ενός ευγενούς αερίου. Π.χ., στο μόριο του φθορίου (F_2) κάθε άτομο δίνει και από 1 e σχηματίζοντας ένα κοινό ζεύγος e (σχήμα 2.1β). Έτσι, κάθε άτομο φθορίου έχει συμπληρώσει 8 e. Ομοιοπολικό δεσμό παρουσιάζουν αρκετά κεραμικά υλικά, όπως καρβίδιο του πυριτίου (SiC), νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4), διαμάντι και τα πολυμερή.



Σχήμα 2.1: Πρωτεύοντες χημικοί δεσμοί: (α) ιοντικός δεσμός στο φθοριούχο νάτριο (NaF), (β) ομοιοπολικός δεσμός στο μόριο του φθορίου (F₂) και (γ) μεταλλικός δεσμός στο μαγνήσιο (Mg): οι πυρήνες του μαγνησίου περιβάλλονται από το νέφος ηλεκτρονίων.

2.2.3 Μεταλλικός δεσμός

Ο δεσμός αυτός συναντάται στα μέταλλα και στα κράματα και δημιουργείται μεταξύ ηλεκτροθετικών στοιχείων του Περιοδικού Πίνακα των Στοιχείων.

ων (σχήμα. 2.2). Όσο περισσότερο αυξάνεται η ατομική ακτίνα (αυξάνεται ο αριθμός σειράς του Περιοδικού Πίνακα των Στοιχείων) και μειώνεται ο αριθμός ηλεκτρονίων της στιβάδας σθένους (μειώνεται ο αριθμός στήλης του Περιοδικού Πίνακα των Στοιχείων), τόσο περισσότερο χαλαρώνει η δύναμη συγκράτησης των ηλεκτρονίων της εξωτερικής στιβάδας των ατόμων, με αποτέλεσμα να μπορούν να διαφεύγουν από την “επήρεια” του πυρήνα και να μετακινούνται ελεύθερα σε ολόκληρη τη μάζα του μετάλλου. Τα ηλεκτρόνια αυτά ονομάζονται **ελεύθερα ηλεκτρόνια** και το σύνολο των ελεύθερων ηλεκτρονίων συνιστά το λεγόμενο **νέφος ηλεκτρονίων**. Το “σύνολο” αυτό των ηλεκτρονίων, το οποίο είναι αρνητικά φορτισμένο, ανήκει από κοινού σε όλα τα θετικά φορτισμένα ιόντα του μετάλλου (σχήμα 2.1γ).

Από το γεγονός της ύπαρξης νέφους ηλεκτρονίων, που κατανέμεται μεταξύ των θετικών ιόντων του μετάλλου, εξηγείται η υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα των μετάλλων. Επίσης, η **πλαστικότητα** (παράγραφος 3.8) των περισσοτέρων μετάλλων (δηλαδή η ικανότητα των μετάλλων να παραμορφώνονται πλαστικά) εξηγείται σε ατομικό επίπεδο με την ύπαρξη του μεταλλικού δεσμού. Κατά την επίδραση δυνάμεων πάνω στο μεταλλικό στερεό, τα άτομα μετακινούνται σε νέες θέσεις, οι οποίες είναι σταθερές, επειδή δε διαταράσσονται οι ηλεκτροστατικές έλξεις μεταξύ ατόμων - ελευθέρων ηλεκτρονίων.

2.3 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΕΣ ΔΕΣΜΟΙ

2.3.1 Δεσμός Van der Waals

Πρόκειται για ασθενείς δεσμούς που οφείλονται σε επίσης ασθενείς ηλεκτροστατικές δυνάμεις (έλξεις) μεταξύ δίπολων μορίων. Δίπολα μόρια υπάρχουν στη φύση και δημιουργούνται από την ανισοκατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στη χημική ένωση ή στο άτομο του στοιχείου (όπως π.χ. στο νέο, Ne), με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αρνητικού κέντρου (πόλου) και ενός θετικού κέντρου (πόλου). Οι δυνάμεις Van der Waals δρουν μεταξύ του θετικού πόλου του ενός μορίου και του αρνητικού πόλου του άλλου μορίου (σχήμα. 2.3α).

2.3.2 Δεσμός Υδρογόνου

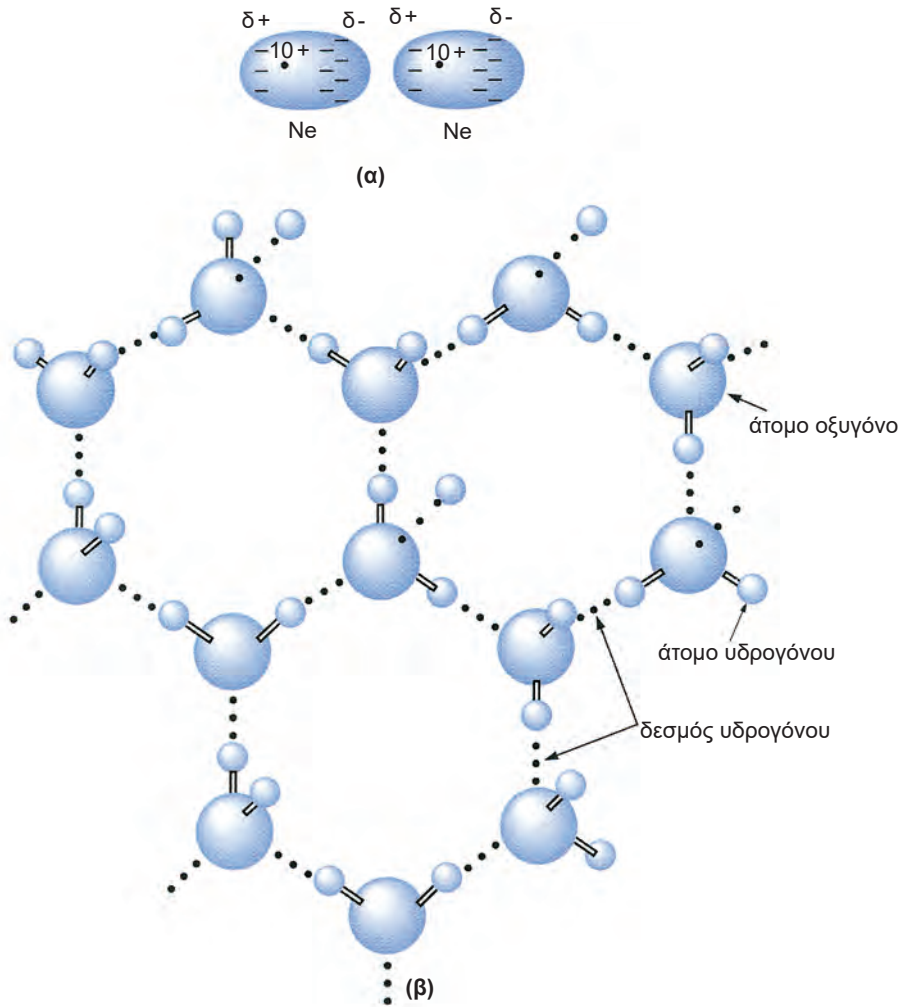
Πρόκειται για δεσμό οφειλόμενο σε ηλεκτροστατικές έλξεις μεταξύ του ατόμου του υδρογόνου (H) ενός μορίου και ενός άλλου ισχυρά ηλεκτραρνητικού ατόμου (F, O, N) του άλλου μορίου. Η μεταξύ των δυο μορίων σύνδεση, κατά τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω, λέγεται **διαμοριακή γέφυρα υδρογόνου** ή απλώς **δεσμός υδρογόνου**. Με την παρουσία του δεσμού υδρογόνου εξηγούνται σε πολλές περιπτώσεις τα υψηλά σημεία ζέσεως (βρασμού) και η διαλυτότητα κάποιων ουσιών σε ορισμένους διαλύτες (π.χ. αλκοόλες σε νερό). Δεσμοί υδρογόνου εμφανίζονται σε αρκετές περιπτώσεις πολυμερών υλικών. Στο σχήμα 2.3β απεικονίζεται ο δεσμός υδρογόνου στον πάγο.

2.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Τα χημικά στοιχεία διακρίνονται σε μέταλλα (περίπου 70 τον αριθμό) και σε αμέταλλα (περίπου 30 τον αριθμό). Αυτή η διάκριση οφείλεται στη διαφοροποίηση των ανωτέρω στοιχείων από άποψης χημικών και φυσικών ιδιοτήτων. Ο ηλεκτροθετικός χαρακτήρας των στοιχείων είναι αυξημένος στις πρώτες στήλες (Ομάδες) και στις τελευταίες σειρές (Περίοδοι) του Περιοδικού Πίνακα των Στοιχείων.

Έτσι, μέταλλο λέγεται κάθε υλικό, που λαμβάνεται από τα διάφορα μεταλλεύματα με τη χρησιμοποίηση διαφόρων μεταλλουργικών μεθόδων (πυρομεταλλουργία - υδρομεταλλουργία), παρουσιάζει μεταλλικό δεσμό και κατά κανόνα εμφανίζει τις παρακάτω ιδιότητες:

- ❖ βρίσκεται σε στερεά κατάσταση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, εκτός από τον υδράργυρο (Hg) που είναι υγρός
- ❖ έχει χαρακτηριστική μεταλλική λάμψη
- ❖ παρουσιάζει αργυροφαιό χρωματισμό, εκτός από το χαλκό (ερυθρός) και το χρυσό (κίτρινος)
- ❖ έχει σχετικά υψηλή πυκνότητα
- ❖ έχει σχετικά υψηλό σημείο τήξεως
- ❖ εμφανίζει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα



Σχήμα 2.3: Δευτερεύοντες δεσμοί: (α) Δεσμός *Van der Waals* μεταξύ δίπολων μορίων (Ne) και (β) δεσμός υδρογόνου στον πάγο.

- ❖ διαθέτει πλαστικότητα, δηλαδή είναι δυνατόν να μορφοποιηθεί εν ψυχρώ (χωρίς να θερμανθεί). Τα μέταλλα, ως γνωστό, είναι **ελατά** (μετατρέπονται εύκολα σε ελάσματα) και **όλκιμα** (μορφοποιούνται εύκολα σε σύρματα)
- ❖ έχει κρυσταλλική δομή

Υπάρχουν όμως και αμέταλλα, που παρουσιάζουν κάποιες ιδιότητες μετάλλων, όπως π.χ. ο άνθρακας, που είναι σχετικά καλός αγωγός του ηλεκτρισμού.



Υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία χημικών στοιχείων: τα **επαμφοτερίζοντα** ή τα **μεταλλοειδή**, που είναι λίγα σε αριθμό και από άποψης ιδιοτήτων βρίσκονται μεταξύ μετάλλων και αμετάλλων. Τέτοια στοιχεία είναι το γερμάνιο (Ge), πυρίτιο (Si), το βόριο (B), κ.λπ.

2.5 Η ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

2.5.1 Γενικότητες-ορισμοί

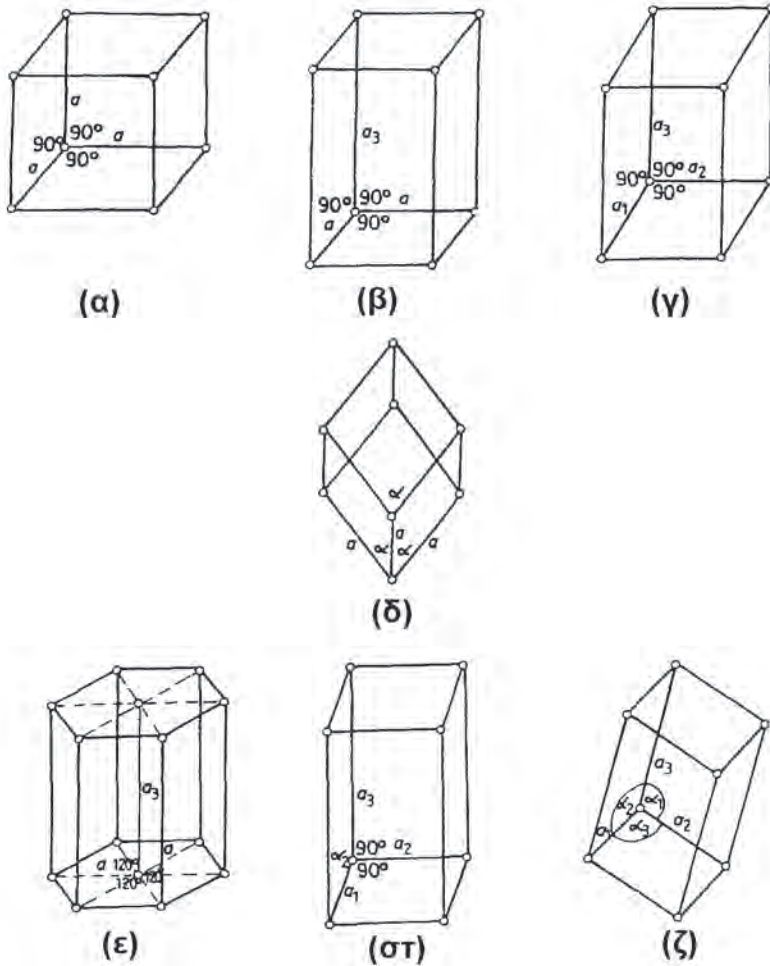
Τα στερεά σώματα διακρίνονται σε **άμορφα** και σε **κρυσταλλικά**. Τα σώματα τα οποία παρουσιάζουν κρυσταλλική δομή ονομάζονται κρυσταλλικά και αυτά που δεν εμφανίζουν κρυσταλλική δομή άμορφα. Τα μέταλλα και τα κράματα είναι κρυσταλλικά σώματα.

Η **κρυσταλλική δομή** ορίζεται ως μια διάταξη ατόμων στο χώρο, η οποία προκύπτει από την επανάληψη του στοιχειώδους κυττάρου στις τρεις διαστάσεις. **Στοιχειώδης κύτταρο** ονομάζεται το απλούστερο σύνολο ατόμων, το οποίο, επαναλαμβανόμενο στο χώρο, δίνει την κρυσταλλική δομή. Η ιδιότυπη αυτή διάταξη των ατόμων σε ένα κρυσταλλικό στερεό λέγεται **κρυσταλλικό πλέγμα**. Τα άτομα του στοιχειώδους κυττάρου και της κρυσταλλικής δομής παριστάνονται συνήθως με σφαίρες ορισμένης διαμέτρου.



Βασικά στοιχεία της κρυσταλλικής δομής είναι τα ακόλουθα:

- (α) Η **κυψελίδα** του κρυσταλλικού πλέγματος, δηλαδή η γεωμετρική διάταξη των ατόμων του στοιχειώδους κυττάρου.
- (β) Ο **αριθμός των ατόμων** (τ) σε κάθε στοιχειώδες κύτταρο.
- (γ) Η **ελάχιστη απόσταση** (δ) μεταξύ των κέντρων δυο γειτονικών ατόμων.
- (δ) Ο **αριθμός ατομικής πλήρωσης** ή το **ποσοστό συμπαγούς συσσωμάτωσης**. Είναι το ποσοστό που δείχνει τον όγκο των ατόμων προς τον όγκο της κυψελίδας (δείχνει πόσο "γεμάτο" είναι το εκάστοτε κρυσταλλικό πλέγμα). Η επιστήμη, που μελετά τις ιδιότητες των διαφόρων κρυσταλλικών πλεγμάτων, λέγεται **Κρυσταλλογραφία**.



Σχήμα 2.4: Τα επτά βασικά κρυσταλλικά συστήματα: (α) κυβικό, (β) τετραγωνικό, (γ) ορθορομβικό, (δ) ρομβοεδρικό, (ε) εξαγωνικό, (στ) μονοκλινές και (ζ) τρικλινές.

a_1 , a_2 και a_3 είναι οι διαστάσεις της κυψελίδας.

α_1 , α_2 και α_3 είναι οι διέδρες γωνίες της κυψελίδας.

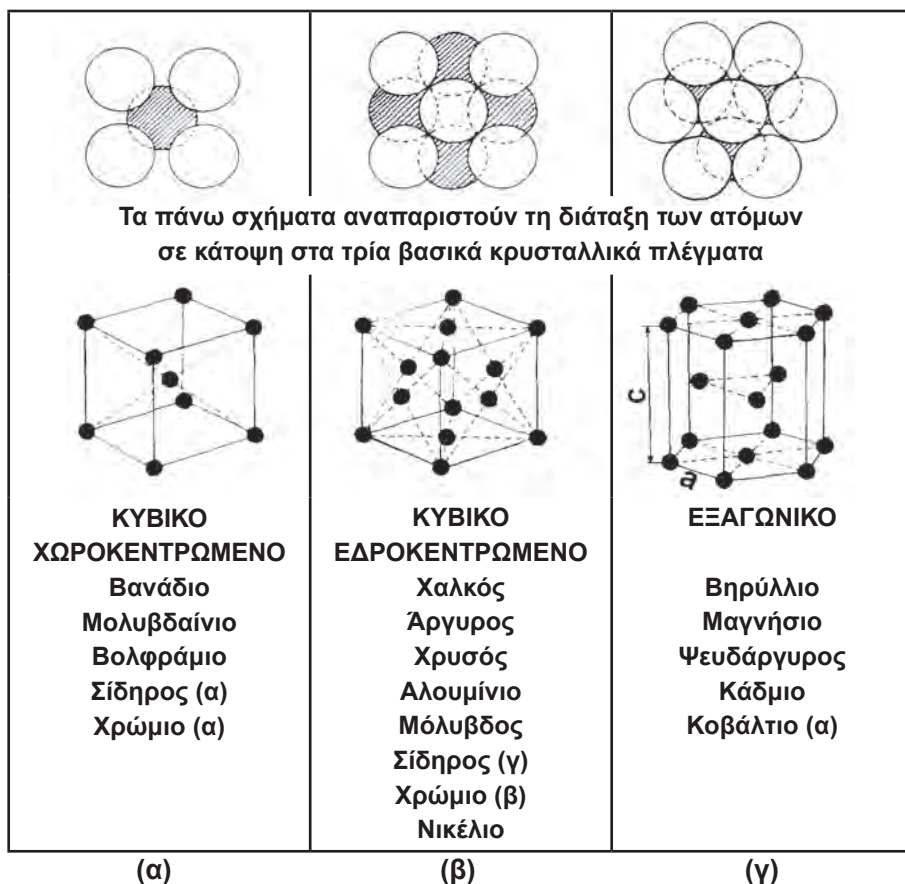
Τα κρυσταλλικά πλέγματα που παρουσιάζονται στη φύση είναι 14 στο σύνολό τους και έχουν ταξινομηθεί και παρουσιαστεί από τον Bravais. Τα 14 αυτά κρυσταλλικά πλέγματα ομαδοποιούνται σε επτά κρυσταλλικά συστήματα, δηλαδή σε επτά διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα στο χώρο. Στο σχήμα 2.4 απεικονίζονται και ονομάζονται τα επτά διαφορετικά κρυσταλλικά συστήματα.

Τα βασικά κρυσταλλικά πλέγματα, με βάση τα οποία κρυσταλλώνεται ένα μεγάλο ποσοστό των μετάλλων και τα οποία θα εξετασθούν λεπτομερώς, είναι τα ακόλουθα (σχήμα 2.5):

- (α) Το **κυβικό χωροκεντρωμένο** (κ.χ.)
- (β) Το **κυβικό εδροκεντρωμένο** (κ.ε..)
- (γ) Το **εξαγωνικό μεγίστης πυκνότητας** (ε.μ.π.)

2.5.2 Το κυβικό χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (κ.χ.)

Στην περίπτωση αυτής της κρυσταλλικής δομής, τα άτομα τοποθετούνται στις κορυφές της αντίστοιχης κυβικής κυψελίδας και ένα άτομο τοποθετείται στο κέντρο της κυψελίδας (σχήμα 2.5α).



Σχήμα 2.5: Τρία από τα σημαντικότερα κρυσταλλικά πλέγματα των μετάλλων και των κραμάτων τους: (α) κυβικό χωροκεντρωμένο (κ.χ.), (β) κυβικό εδροκεντρωμένο (κ.ε.) και (γ) εξαγωνικό μεγίστης πυκνότητας (ε.μ.π.).



Ο αριθμός ατόμων στη μοναδιαία κυψελίδα (τ) του χωροκεντρωμένου κυβικού είναι 2. Αυτό υπολογίζεται, αν ληφθούν υπόψη τα εξής:

- τα άτομα των κορυφών ανήκουν κατά το $1/8$ στην κυβική κυψελίδα, δηλαδή είναι συνολικά $8 \times (1/8) = 1$,
- το ένα άτομο του κέντρου ανήκει εξ ολοκλήρου στη μοναδιαία κυψελίδα

Ο αριθμός ατομικής πλήρωσης (δηλαδή η πυκνότητα) του στοιχειώδους κυττάρου είναι 68%.

Μερικά μέταλλα, που παρουσιάζουν κυβική χωροκεντρωμένη κρυσταλλική δομή, είναι ο α-σίδηρος (α -Fe), το χρώμιο (Cr), το μολυβδαίνιο (Mo), το βολφράμιο (W), κλπ.

2.5.3 Το κυβικό εδροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (κ.ε.)

Στον τύπο αυτό της κρυσταλλικής δομής, οκτώ άτομα είναι διατεταγμένα στις κορυφές της κυβικής κυψελίδας και έξι άτομα τοποθετούνται στα κέντρα των εδρών του κύβου (σχήμα 2.5β).



Μερικά βασικά χαρακτηριστικά του εδροκεντρωμένου κυβικού πλέγματος είναι τα ακόλουθα:

- (1) Ο αριθμός των ατόμων στο στοιχειώδες κύτταρο (τ) είναι 4. Αυτό προκύπτει, αν ληφθεί υπόψη ότι κάθε άτομο της κορυφής του κύβου ανήκει κατά το $1/8$ στο στοιχειώδες κύτταρο και κάθε άτομο κέντρου έδρας ανήκει κατά το $1/2$ στο στοιχειώδες κύτταρο.
- (2) Ο αριθμός ατομικής πλήρωσης είναι ίσος με 74%, δηλαδή το κ.ε. είναι πιο πυκνό σε άτομα και πιο "γεμάτο" από το κ.χ.

Μερικά βασικά μέταλλα εδροκεντρωμένης κυβικής δομής είναι το αλουμίνιο (Al), ο χαλκός (Cu), ο χρυσός (Au), το νικέλιο (Ni), κ.λπ.

2.5.4 Το εξαγωνικό μεγίστης πυκνότητας κρυσταλλικό πλέγμα (ε.μ.π.)

Στην περίπτωση αυτή, το στοιχειώδες κύτταρο είναι ένα ορθό πρίσμα, του οποίου η βάση είναι ένα κανονικό εξάγωνο. Τα άτομα τοποθετούνται στις κορυφές και στα κέντρα των εξαγωνικών βάσεων, καθώς και πάνω στο επίπεδο που τέμνει στη μέση το εξαγωνικό πρίσμα (σχήμα 2.5γ).



Μερικά βασικά χαρακτηριστικά του εξαγωνικού μεγίστης πυκνότητας:

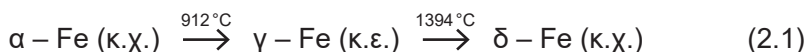
- (1) Ο αριθμός ατόμων στο στοιχειώδες κύτταρο (τ) είναι 6:
 - κάθε άτομο κορυφής εξαγώνου ανήκει κατά το $1/6$ στο στοιχειώδες κύτταρο ($12 \times 1/6 = 2$)
 - κάθε άτομο κέντρου βάσεως εξαγώνου ανήκει κατά το $1/2$ στο στοιχειώδες κύτταρο ($2 \times 1/2 = 1$)
 - κάθε άτομο, που βρίσκεται μέσα στην κυψελίδα, ανήκει εξ ολοκλήρου στο στοιχειώδες κύτταρο ($3 \times 1 = 3$).
- (2) Ο αριθμός ατομικής πλήρωσης του ε.μ.π. πλέγματος είναι ίσος με αυτό του κ.ε., δηλαδή 74%.
- (3) Ο λόγος c/a (ύψος κυψελίδας/πλευρά εξαγωνικής βάσης) είναι ίσος προς 1.633.

Μερικά βασικά εξαγωνικά μέταλλα είναι το α-τιτάνιο ($\alpha\text{-Ti}$), το μαγνήσιο (Mg), ο ψευδάργυρος (Zn), κ.λπ.

2.6. ΑΛΛΟΤΡΟΠΙΑ - ΑΛΛΟΤΡΟΠΙΚΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Πολλά στοιχεία κρυσταλλώνονται σε περισσότερες από μια κρυσταλλικές δομές κάτω από διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **αλλοτροπία**. Τα μέταλλα που εμφανίζουν το φαινόμενο της αλλοτροπίας ονομάζονται **αλλοτροπικά μέταλλα**.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αλλοτροπικού μετάλλου είναι ο σίδηρος. Ο σίδηρος μέχρι τους 912°C παρουσιάζει κυβικό χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (κ.χ.) και λέγεται **$\alpha\text{-Fe}$** . Στη θερμοκρασία αυτή μετασχηματίζεται σε σίδηρο με κυβικό εδροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (κ.ε.), που ονομάζεται **$\gamma\text{-Fe}$** . Η δομή του $\gamma\text{-Fe}$ είναι σταθερή μέχρι περίπου τους 1394°C , όπου μετασχηματίζεται σε χωροκεντρωμένη κυβική, που αποτελεί το λεγόμενο **$\delta\text{-Fe}$** . Ο $\delta\text{-Fe}$ είναι σταθερός μέχρι την τήξη του μετάλλου στους 1538°C . Οι μορφές αυτές του σιδήρου ($\alpha\text{-Fe}$, $\gamma\text{-Fe}$, $\delta\text{-Fe}$) ονομάζονται **αλλοτροπικές μορφές** του σιδήρου και κάθε μεταβολή από τη μια μορφή στην άλλη ονομάζεται **αλλοτροπικός μετασχηματισμός** ή **αλλοτροπική μεταβολή**. Η συνολική αλλοτροπική μεταβολή του σιδήρου παρουσιάζεται στην παρακάτω αντίδραση:



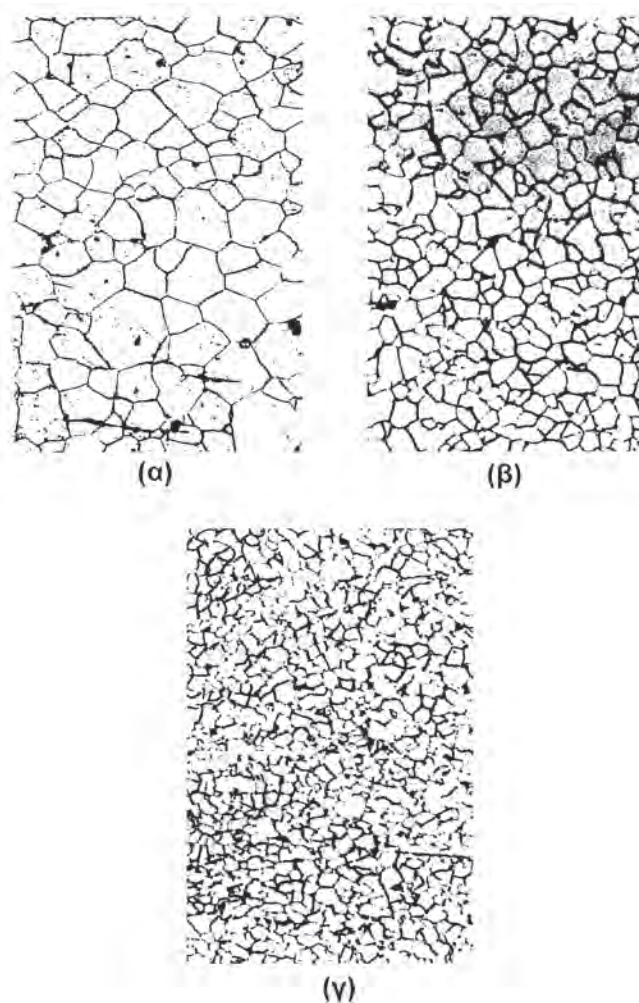
Επίσης, ένα άλλο παράδειγμα αλλοτροπίας εμφανίζεται στον άνθρακα. Οι αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα (αμέταλλο) είναι δύο:

- ο γραφίτης (εξαγωνική δομή)
- το διαμάντι (τετραεδρική δομή)

Η μετατροπή του γραφίτη σε διαμάντι (συνθετικό διαμάντι) δε γίνεται εύκολα. Απαιτούνται πολύ υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες και το ποσοστό μετατροπής είναι πολύ χαμηλό.

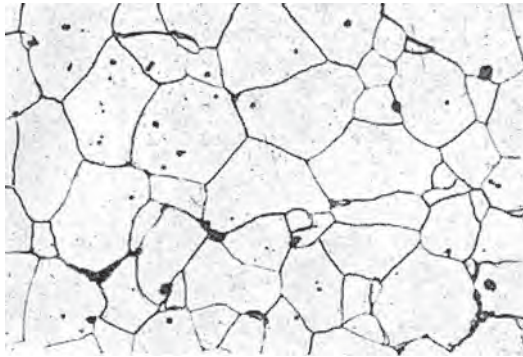
2.7 ΚΡΑΜΑΤΑ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Κράμα καλείται κάθε μείγμα δύο ή περισσότερων στοιχείων (Α,Β,..., κ.λπ.) από τα οποία το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του κράματος είναι ότι τα συστατικά του στοιχεία συμμετέχουν στη δημιουργία μίας ή περισσότερων κοινών κρυσταλλικών δομών, συνήθως με σύντηξη των στοιχείων του κράματος και ακόλουθη στερεοποίηση (πύξη). Η οπτική εμφάνιση ενός μετάλλου ή κράματος με τη βοήθεια μικροσκοπίου (π.χ. μεταλλογραφικού ή ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης), μετά από κατάλληλη προετοιμασία, είναι γνωστή με τον όρο **μικροδομή**. Συστατικά στοιχεία της **μικροδομής** είναι οι **φάσεις** και οι **κόκκοι**. **Κόκκος** ή **κρυσταλλίτης** ή απλώς **κρύσταλλος** είναι η δομική μονάδα των μεταλλικών υλικών και αποτελεί κάθε περιοχή του υλικού, που έχει προκύψει από την επανάληψη του στοιχειώδους κυττάρου στο χώρο, με τον ίδιο προσανατολισμό. Η δομή κόκκων είναι η συνηθέστερα συναντώμενη δομή, στην περίπτωση μετάλλων και κραμάτων, και προκύπτει από τη στερεοποίηση του υλικού μετά από τη χύτευση, με τους μηχανισμούς πυρηνοποίησης και ανάπτυξης, που θα αναπτυχθούν σε επόμενη παράγραφο. Το μέγεθος των κόκκων ενός υλικού είναι καθοριστικό για τις συναγόμενες μηχανικές του ιδιότητες. Έτσι, ένα λεπτόκοκκο υλικό έχει μεγαλύτερη σκληρότητα και μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με ένα χονδρόκοκκο υλικό. Στο σχήμα 2.6 απεικονίζεται μαλακός χάλυβας με πολύ μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα με διαφορετικά μεγέθη κόκκων.

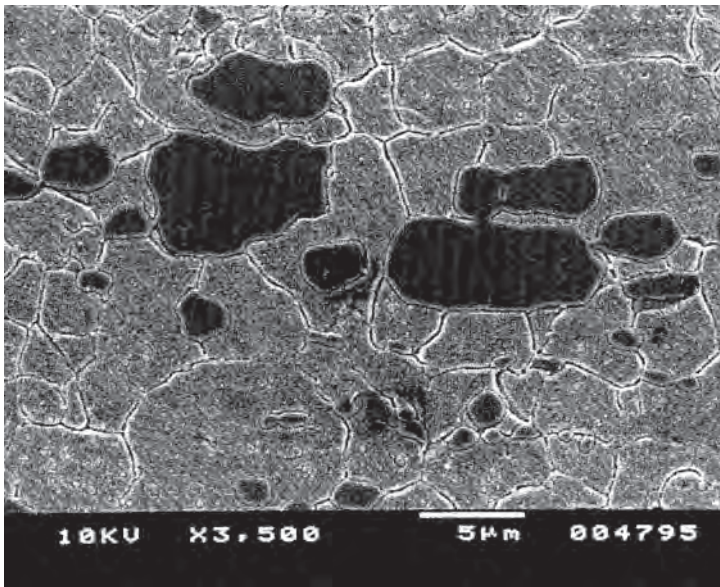


Σχήμα 2.6: Μικροδομές μαλακού χάλυβα, που διακρίνεται το διαφορετικό μέγεθος των κόκκων (Μεγέθυνση $\times 100$). Το μέγεθος των κόκκων μειώνεται από (α) προς (γ).

Φάση είναι μια ομογενής περιοχή υλικού. **Ομογενής** σημαίνει ότι έχει παντού την ίδια χημική σύσταση, την ίδια κρυσταλλική δομή και τις ίδιες ιδιότητες. Στην παρατήρηση ενός κράματος με οπτικό μικροσκόπιο, οι υπάρχουσες φάσεις ξεχωρίζουν μεταξύ τους λόγω της διαφορετικής τονικότητας (contrast) που τις χαρακτηρίζει. Η μικροδομή, άρα, ενός κράματος μπορεί να αποτελείται από πολλούς κόκκους, αλλά από μια φάση (σχήμα 2.7α) ή από δύο φάσεις (σχήμα 2.7β) ή από περισσότερες φάσεις. Σε κάθε κόκκο μπορεί να υπάρχουν μία ή περισσότερες φάσεις.



(α)



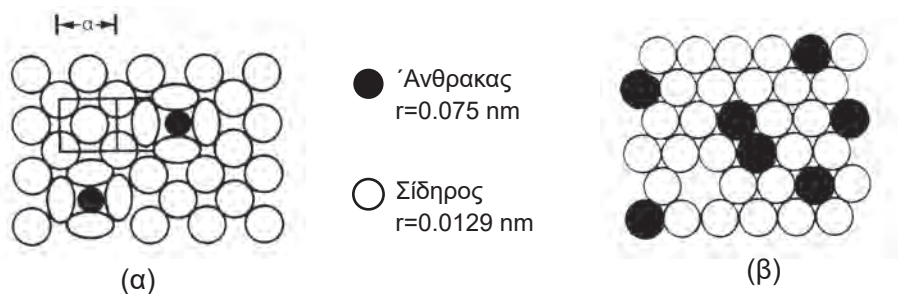
Σχήμα 2.7: (α) Μικροδομή μονοφασικού κράματος Fe, που διακρίνονται οι κόκκοι μίας μόνο φάσης (α-φάση) σε μεγέθυνση X500. (β) Μικροδομή διφασικού κράματος (χρωμιούχος χάλυβας): οι “γκρίζοι” κόκκοι είναι η α-φάση, ενώ οι “μαύροι” κόκκοι είναι η κ-φάση (καρβίδια του χρωμίου). (Φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, μεγέθυνση X3500).

2.8 ΣΤΕΡΕΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ - ΜΕΣΟΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ

Οι φάσεις συμβολίζονται διεθνώς με τα μικρά γράμματα του ελληνικού αλφαβήτου (α, β, γ, δ, ε, ζ, κ.λπ). Υπάρχουν δυο βασικά είδη φάσεων: τα **στερεά διαλύματα** και οι **μεσομεταλλικές ενώσεις**. Τα **στερεά διαλύματα** είναι ομογενή στερεά μείγματα, που αποτελούνται από το “μητρικό”

στοιχείο Α, που περιέχει σε διάλυση στο κρυσταλλικό του πλέγμα άτομα τουλάχιστον ενός στοιχείου Β (διαλυόμενο στοιχείο). Το στερεό διάλυμα έχει την κρυσταλλική δομή και παρόμοιες ιδιότητες με αυτές του καθαρού Α. Επίσης, τα στερεά διαλύματα έχουν ένα εύρος συστάσεων, που σχηματίζονται ανάλογα με τη διαλυτότητα του Β στοιχείου στο Α (Παράβαλε υγρά διαλύματα). Π.χ., ο α-φερρίτης, είναι στερεό διάλυμα α-Fe (κ.χ.) με C του οποίου η σύσταση κυμαίνεται από 0 – 0,02%. Οι τρόποι διατάξεως των διαφορετικών ατόμων των στοιχείων για το σχηματισμό των στερεών διαλυμάτων είναι δυο:

- (i) Με **παρεμβολή** ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα του μητρικού μετάλλου, όταν αυτά έχουν μικρό σχετικά μέγεθος (σχήμα 2.8α). Άτομα παρεμβολής (ενδόθετα άτομα) είναι συνήθως των εξής στοιχείων: H, O, C, N, B.
- (ii) Με **αντικατάσταση** ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα του μητρικού μετάλλου (σχήμα 2.8β). Τα διαλύματα αντικατάστασης επιτυγχάνονται στην περίπτωση μεγάλων σχετικά διαλυομένων στοιχείων.



Σχήμα 2.8: (α) Στερεό διάλυμα παρεμβολής Fe-C: τα “μαύρα” άτομα (C) είναι μικρότερου μεγέθους και παρεμβάλλονται μεταξύ των “λευκών” ατόμων (Fe) προκαλώντας παραμορφώσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα. (β) Στερεό διάλυμα αντικατάστασης: τα “μαύρα” άτομα τοποθετούνται σε θέσεις που κατείχαν προηγουμένως τα “λευκά” άτομα.

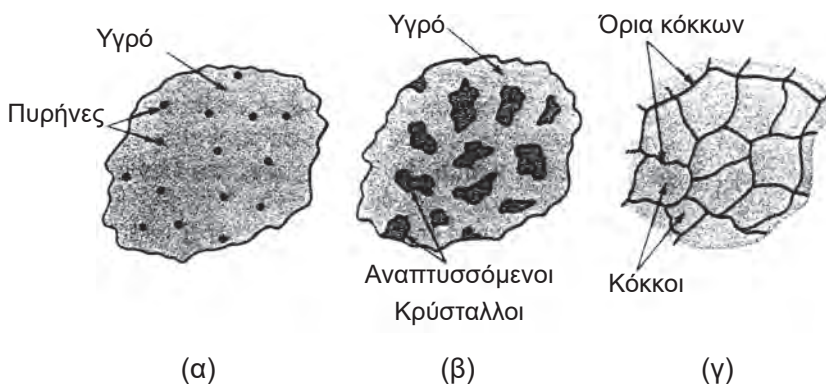
Αντίθετα οι **μεσομεταλλικές ενώσεις** είναι χημικές ενώσεις των στοιχείων Α, Β, τύπου $A_x B_y$ με καθορισμένη χημική σύσταση, όπου δεν υπάρχει η διάκριση μητρικού και διαλυόμενου στοιχείου. Η κρυσταλλική δομή και οι ιδιότητες των μεσομεταλλικών ενώσεων μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικές με αυτές των συστατικών τους στοιχείων. Στις περισσότερες των περιπτώσεων οι μεσομεταλλικές ενώσεις είναι πολύ σκληρές και πολύ ψαθυρές (εύθραυστες). Π.χ. ο σεμεντίτης (Fe_3C) έχει ακριβή χημική σύσταση 6,7% κ.β. C, βασικεντρωμένο ορθορομβικό κρυσταλλικό πλέγμα και είναι ένωση πολύ σκληρή και εύθραυστη.

2.9 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

Τα μέταλλα και κράματα που χρησιμοποιούνται στις διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές αποτελούνται από κόκκους ή κρυστάλλους, που δημιουργούνται πρωτογενώς κατά τη διαδικασία της πήξης (στερεοποίησης) μετά από τη χύτευση. Η δημιουργία της πολυκρυσταλλικής δομής περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- (α) πυρηνοποίηση
- (β) ανάπτυξη

Η **πυρηνοποίηση** είναι το στάδιο δημιουργίας **φύτρων** ή **εμβρύων κρυστάλλων**, όταν η θερμοκρασία είναι λίγο χαμηλότερη του σημείου πήξεως, που καταλαμβάνουν μικρό όγκο μέσα σε υγρό περιβάλλον. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, οι πυρήνες (φύτρα) αυξάνουν σε αριθμό και μέγεθος. Η **ανάπτυξη** τους συνεχίζεται μέχρι τα όριά τους να συγκρουσθούν και να καταλάβουν όλο τον όγκο του τήγματος, δημιουργώντας έτσι τους κόκκους του υλικού (σχήμα 2.9). Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα απόψυξης, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο αριθμός των αρχικών πυρήνων κρυστάλλωσης και άρα και ο τελικός αριθμός των κόκκων. Για ένα συγκεκριμένο όγκο υλικού, μεγάλος αριθμός πυρήνων κρυστάλλωσης σημαίνει ότι το τελικά δημιουργούμενο στερεό θα είναι **λεπτόκοκκο**. Στην αντίθετη περίπτωση, το στερεό θα έχει λίγους κόκκους και μεγάλου μεγέθους και ονομάζεται **χονδρόκοκκο**. Ένα **λεπτόκοκκο υλικό παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη μηχανική αντοχή** από ένα **χονδρόκοκκο**.



Σχήμα 2.9: Στάδια δημιουργίας πολυκρυσταλλικού υλικού: (α) έναρξη της πυρηνοποίησης, (β) ανάπτυξη των πυρήνων και (γ) τελική δομή του υλικού μετά το τέλος της στερεοποίησης.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 2ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Οι χημικοί δεσμοί χωρίζονται σε κύριους και δευτερεύοντες. Οι κύριοι δεσμοί είναι: ιοντικός (ή ετεροπολικός), ομοιοπολικός και μεταλλικός. Ενώ οι δευτερεύοντες δεσμοί είναι: ο δεσμός Van der Waals και ο δεσμός υδρογόνου.
- Ο ιοντικός δεσμός αυτός χαρακτηρίζει αρκετά από τα ανόργανα στερεά σώματα και παρατηρείται στις ενώσεις ηλεκτροθετικών στοιχείων (μετάλλων) με ηλεκτραρνητικά στοιχεία (αμέταλλα). Οι ιοντικές ενώσεις είναι αποτέλεσμα των ηλεκτροστατικών έλξεων που προκαλούνται από την ανταλλαγή ηλεκτρονίων και την δημιουργία ετερώνυμων φορτίων (iónτων).
- Στην περίπτωση του ομοιοπολικού δεσμού δε γίνεται μεταφορά ηλεκτρονίων, αλλά αμοιβαία συνεισφορά ηλεκτρονίων των ατόμων με στόχο τη δημιουργία κοινών ζευγών ηλεκτρονίων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η δομή ενός ευγενούς αερίου.
- Ο μεταλλικός δεσμός συναντάται στα μέταλλα και στα κράματα και δημιουργείται μεταξύ ηλεκτροθετικών στοιχείων (μετάλλων) του Περιοδικού Πίνακα των Στοιχείων.
- Ο δεσμός Van der Waals οφείλεται σε ασθενείς ηλεκτροστατικές δυνάμεις (έλξεις) μεταξύ διπόλων μορίων. Ο δεσμός υδρογόνου δημιουργείται λόγω των ηλεκτροστατικών έλξεων μεταξύ του ατόμου του υδρογόνου (H) ενός μορίου και ενός άλλου ισχυρά ηλεκτραρνητικού ατόμου (F, O, N) του άλλου μορίου (π.χ. μεταξύ μορίων H_2O).
- Μέταλλο, λέγεται κάθε υλικό, που λαμβάνεται από τα διάφορα μεταλλεύματα με τη χρησιμοποίηση διαφόρων μεταλλουργικών μεθόδων (πυρομεταλλουργία - υδρομεταλλουργία), παρουσιάζει μεταλλικό δεσμό και κατά κανόνα εμφανίζει τις παρακάτω ιδιότητες:
 - ✓ βρίσκεται σε στερεά κατάσταση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, εκτός από τον υδράργυρο (Hg) που είναι υγρός
 - ✓ έχει χαρακτηριστική μεταλλική λάμψη
 - ✓ παρουσιάζει αργυροφαιό χρωματισμό, εκτός από τον χαλκό (ερυθρός) και τον χρυσό (κίτρινος)

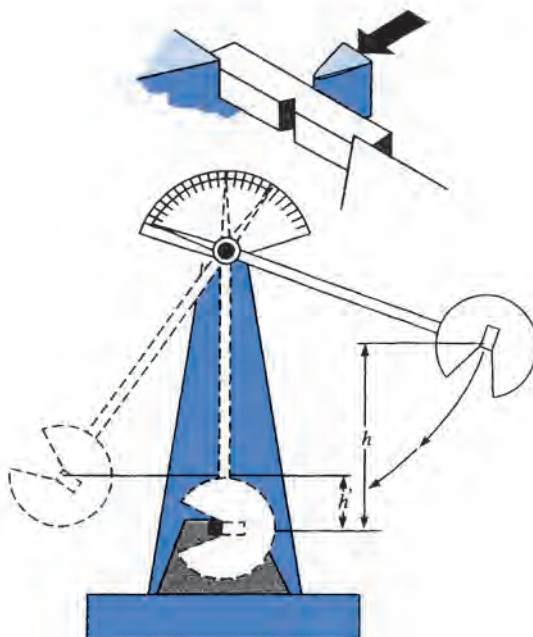
- ✓ σχετικά υψηλή πυκνότητα
 - ✓ σχετικά υψηλό σημείο τήξεως
 - ✓ υψηλή θερμική αγωγιμότητα
 - ✓ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
 - ✓ διαθέτουν πλαστικότητα, δηλαδή είναι δυνατόν να μορφοποιηθούν εν ψυχρώ (χωρίς να θερμανθούν)· τα μέταλλα ως γνωστό είναι ελατά (μετατρέπονται εύκολα σε ελάσματα) και όλκιμα (μορφοποιούνται εύκολα σε σύρματα)
 - ✓ κρυσταλλική δομή
- Η κρυσταλλική δομή ορίζεται ως μια διάταξη ατόμων στο χώρο, η οποία προκύπτει από την επανάληψη του στοιχειώδους κυττάρου στις τρεις διαστάσεις. Τα βασικά κρυσταλλικά πλέγματα, όμως, με βάση τα οποία κρυσταλλώνεται ένα μεγάλο ποσοστό των μετάλλων και τα οποία θα εξετασθούν λεπτομερώς είναι τα ακόλουθα:
 - (α) Το κυβικό χωροκεντρωμένο (κ.χ.)
 - (β) Το κυβικό εδροκεντρωμένο (κ.ε.)
 - (γ) Το εξαγωνικό μεγίστης πυκνότητας (ε.μ.π.)
 - Πολλά στοιχεία κρυσταλλώνονται σε περισσότερες από μια κρυσταλλικές δομές κάτω από διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αλλοτροπία. Τα μέταλλα που εμφανίζουν το φαινόμενο της αλλοτροπίας ονομάζονται αλλοτροπικά μέταλλα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αλλοτροπικού μετάλλου είναι ο σίδηρος.
 - Κράμα καλείται κάθε μείγμα δύο ή περισσότερων στοιχείων (Α,Β,..., κλπ.) από τα οποία το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του κράματος είναι ότι τα συστατικά του στοιχεία συμμετέχουν στη δημιουργία μίας ή περισσότερων κρυσταλλικών δομών, συνήθως με σύντηξη των στοιχείων του κράματος και ακόλουθη στερεοποίηση (πήξη). Η οπτική εμφάνιση ενός μετάλλου ή κράματος με τη βοήθεια μικροσκοπίου μετά από κατάλληλη προετοιμασία, είναι γνωστή με τον όρο μικροδομή. Συστατικά στοιχεία της μικροδομής είναι οι φάσεις και οι κόκκοι. Κόκκος ή κρυσταλλίτης ή, απλά, κρύσταλλος, είναι μια περιοχή του υλικού που έχει προκύψει από την επανάληψη του στοιχειώδους κυττάρου, στο χώρο, με τον ίδιο προσανατολισμό. Φάση είναι μια ομογενής περιοχή υλικού.

Υπάρχουν δυο βασικά είδη φάσεων: τα στερεά διαλύματα και οι μεσομεταλλικές ενώσεις.

- Τα μέταλλα και κράματα που χρησιμοποιούνται στις διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές αποτελούνται από κόκκους ή κρυστάλλους που δημιουργούνται πρωτογενώς κατά τη διαδικασία της πήξης (στερεοποίησης) μετά από τη χύτευση. Η δημιουργία της πολυκρυσταλλικής δομής περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

(α) πυρηνοποίηση

(β) ανάπτυξη



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- 3.1 Κατηγορίες μηχανικών δοκιμών
- 3.2 Σκληρότητα
- 3.3 Δυσθραυστότητα
- 3.4 Κόπωση
- 3.5 Ερπυσμός
- 3.6 Κατεργασιμότητα
- 3.7 Ελαστική παραμόρφωση μονοκρυστάλλου

3.8 Πλαστική παραμόρφωση μονοκρυστάλλου

3.9 Πλαστική παραμόρφωση πολυκρυσταλλικών υλικών

3.10 Κατεργασίες εν ψυχρώ: αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση

3.11 Κατεργασίες εν θερμώ



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να κατανοήσετε την έννοια της σκληρότητας των υλικών και τις διάφορες μεθόδους προσδιορισμού της
- ☒ Να κατανοήσετε τη δοκιμή της κρούσης και την έννοια της δυσθραυστότητας
- ☒ Να κατανοήσετε τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ όλκιμων και ψαθυρών υλικών και να αναφέρετε παραδείγματα
- ☒ Να κατανοήσετε την κόπωση και τον ερπυσμό
- ☒ Να κατανοήσετε την έννοια της κατεργασιμότητας των υλικών
- ☒ Να κατανοήσετε την αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση των μετάλλων
- ☒ Να μάθετε να διακρίνετε τις κατεργασίες των μετάλλων σε κατεργασίες εν ψυχρώ και εν θερμώ

3.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών είναι πολύ σημαντική, τόσο για την απευθείας χρήση τους σε μηχανολογικές κατασκευές, όσο και για την επιλογή του τρόπου διαμόρφωσής τους σε συγκεκριμένη γεωμετρία. Οι μηχανικές δοκιμές ή δοκιμασίες των υλικών έχουν ως σκοπό τον έλεγχο των μηχανικών τους ιδιοτήτων και χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- (α) στις καταστρεπτικές μεθόδους (άμεσοι μέθοδοι), στις οποίες απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου και
- (β) στις μη καταστρεπτικές μεθόδους (έμμεσοι μέθοδοι), στις οποίες δεν απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου.

Στην κατηγορία των δοκιμών με καταστροφή του δοκιμίου ανήκουν βασικά οι μηχανικές δοκιμές, που έχουν ως αντικειμενικό στόχο τον προσ-

διορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Τέτοιες δοκιμές είναι οι ακόλουθες:

- (α₁) δοκιμή εφελκυσμού και θλίψεως
- (α₂) δοκιμή σκληρότητας
- (α₃) δοκιμή κρούσης
- (α₄) δοκιμή κόπωσης
- (α₅) δοκιμή ερπυσμού

Η δοκιμή του εφελκυσμού έχει εξετασθεί αναλυτικά στην Αντοχή των Υλικών. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετασθούν οι ιδιότητες που ανταποκρίνονται στις δοκιμές (β), (γ), (δ) και (ε).

Στις μη καταστρεπτικές μεθόδους διαπιστώνεται αν το εξεταζόμενο τεμάχιο, όπως π.χ. ένα χυτό αντικείμενο ή η ραφή κάποιας συγκόλλησης άξονα ή δοχείου, περιέχει ρωγμές ή πόρους, που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, χωρίς όμως να καταστραφεί το εν λόγω τεμάχιο. Τέτοιες μέθοδοι είναι:

- (β₁) Υδροστατικές μέθοδοι ελέγχου μεταλλικών δοχείων, λεβήτων, κλπ.
- (β₂) Μαγνητικές δοκιμές ελέγχου ρωγμών μαγνητικών υλικών (π.χ. κοινοί χάλυβες, κράματα Fe-Ni, κ.λπ).
- (β₃) Δοκιμές με διεισδυτικά υγρά για τον εντοπισμό ρωγμών κυρίως σε μη μαγνητικά υλικά (π.χ. κράματα αλουμινίου, ανοξείδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες, κ.λπ).
- (β₄) Έλεγχος δομικών ατελειών (π.χ. μάκρο- και μικροπορώδες σε χυτά αντικείμενα) με υπερήχους, ραδιογραφία (ακτίνες γ), ακτινική ανάλυση (ακτίνες Χ).

3.2 ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

Σκληρότητα ενός υλικού είναι η αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στη διείδυση ενός ξένου σώματος που πιέζεται στην επιφάνεια του υλικού με κάποια συγκεκριμένη δύναμη και για ορισμένη χρονική διάρκεια. Θα μπορούσε μαθηματικά η σκληρότητα να εκφρασθεί ως εξής:

$$H = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

όπου P: η εφαρμοζόμενη δύναμη και
A: η επιφάνεια του αποτυπώματος

Το σώμα αυτό που επιχειρεί να διεisdύσει στο προς εξέταση υλικό ονομάζεται **διεisdυτής** ή **εντυπωτής**. Η αρχή λειτουργίας των περισσότερων δοκιμών σκληρότητας βασίζεται στη μέτρηση των διαστάσεων του αποτυπώματος, που δημιουργεί ο διεisdυτής στο υλικό. Αν το αποτύπωμα αυτό είναι μικρό, σημαίνει ότι το υλικό αντιστέκεται στη διείδυση και επομένως είναι σκληρό, ενώ αν το αποτύπωμα είναι μεγαλύτερο, το υλικό αντιστέκεται λιγότερο και επομένως είναι λιγότερο σκληρό.

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι σκληρομετρικής:

- **Brinell**
- **Rockwell**
- **Vickers**

3.2.1 Η δοκιμή Brinell

Κατά τη δοκιμή αυτή, ο διεisdυτής είναι σφαίρα από σκληρυμένο χάλυβα ή από καρβίδιο, με αποτέλεσμα να δημιουργεί σφαιρικό αποτύπωμα στο υλικό. Η εφαρμοζόμενη δύναμη αλλά και η διάμετρος της σφαίρας ποικίλλουν. Η τυποποιημένη μέθοδος Brinell χρησιμοποιεί σφαίρα διαμέτρου **10 mm**, φορτίο **3000 kp** και διάρκεια 30 sec. Η σκληρότητα κατά Brinell δίδεται από τον τύπο:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.2)$$

όπου P: η εφαρμοζόμενη δύναμη σε kp, (1 kp = 10 N)
D: η διάμετρος του διεisdυτή σε mm και
d: η διάμετρος του αποτυπώματος σε mm

Αν αντικατασταθούν τα εκάστοτε μεγέθη με τις σωστές μονάδες, το αριθμητικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την εξίσωση 3.2 έχει μονάδες kp/mm^2 ή απλώς HB.

Η δοκιμή Brinell εφαρμόζεται ευρέως σε **μαλακά** κυρίως υλικά με μεγάλη μεταλλουργική ανομοιογένεια.

3.2.2 Η δοκιμή Rockwell

Η δοκιμή αυτή βασίζεται στη μέτρηση του βάθους του αποτυπώματος (και όχι της διαμέτρου), που προκαλεί ο διεισδυτής κατά τη διάρκεια δύο φάσεων:

- (α) της προφορτίσεως, που χρησιμοποιείται μικρή δύναμη (10 kp) και
- (β) της φορτίσεως που χρησιμοποιείται μεγαλύτερη δύναμη, η οποία είναι καθορισμένη (100 ή 150 kp).

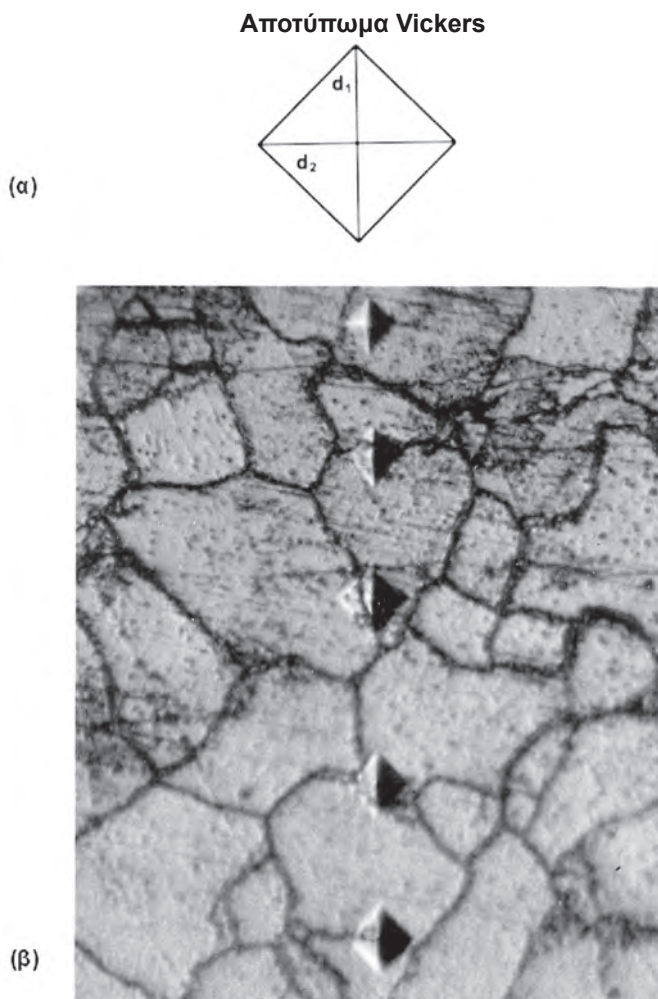
Σύμφωνα, τώρα, με το είδος του διεισδυτή και επιβαλλόμενων φορτίων και συνεπώς με τον τύπο του δοκιμαζόμενου υλικού, υπάρχουν δυο κυρίως ευρύτατα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι σκληρομέτρησης κατά Rockwell:

- **Rockwell C:** Χρησιμοποιείται ως διεισδυτής κώνος από διαμάντι, γωνίας 120° και άκρης με ακτίνα καμπυλότητας 0,02 mm. Κατά τη διάρκεια της προφορτίσεως, η εφαρμοζόμενη δύναμη είναι ίση με 10 kp και κατά τη διάρκεια της φορτίσεως είναι ίση με 150 kp. Η κλίμακα της σκληρότητας εκτείνεται από 20 έως 70 HRC (HRC: μονάδα σκληρότητας κατά Rockwell C). Πρέπει να σημειωθεί ότι η δοκιμή σκληρότητας κατά Rockwell C εφαρμόζεται ευρύτατα στην περίπτωση θερμικά κατεργασμένων χαλύβων και γενικότερα μετάλλων και κραμάτων μετά από κατεργασίες σκληρύνσεως (π.χ. βαμμένοι χάλυβες, επιφανειακά κατεργασμένοι χάλυβες, κράματα αλουμινίου μετά από γήρανση (ντουραλουμίνιο), κ.λπ.).

- **Rockwell B:** Χρησιμοποιείται ως διεισδυτής σφαίρα από σκληρυμένο χάλυβα, διαμέτρου $1/16$ in. (περίπου 1,59 mm). Η δύναμη προφορτίσεως είναι ίση με 10 kp και της φόρτισης είναι ίση με 100 kp. Η κλίμακά της ξεκινά από 35 HRB και φθάνει στα 100 HRB. Τα υλικά που μπορούν να σκληρομετρηθούν είναι κοινοί χάλυβες, ακατέργαστοι κραματωμένοι χάλυβες, κράματα χαλκού, κράματα αλουμινίου και γενικά υλικά που δεν έχουν υποστεί κατεργασίες σκληρύνσεως.

3.2.3 Η δοκιμή Vickers

Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιεί ως διεισδυτή πυραμίδα διαμαντιού, ανοίγματος 136° . Τα φορτία που εφαρμόζονται ξεκινούν από μερικά p και φθάνουν μέχρι κάποιες εκατοντάδες kp. Με τη διείσδυση της πυραμίδας, μέσα στο υλικό, δημιουργείται ένα τετραγωνικό αποτύπωμα στην ιδανικότερη περίπτωση. Στην πραγματικότητα, το αποτύπωμα που δημιουργείται είναι σχήματος ρόμβου και οφείλεται στη μικροσκοπική ανισοτροπία του υλικού (σχήμα 3.1α).



Σχήμα 3.1: (α) Μορφή αποτυπώματος κατά τη σκληρομέτρηση Vickers.
(β) Οπτική μικρογραφία διαδοχικών μικροσκληρομετρήσεων σε μαλακό χάλυβα (μεγέθυνση X400).

Η τιμή της σκληρότητας δίδεται μαθηματικά από τον τύπο:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} \quad (3.3)$$

όπου, P: η εφαρμοζόμενη δύναμη σε kp και

d: ο μέσος όρος των διαγωνίων $(=(d_1+d_2)/2)$ του αποτυπώματος (mm) (σχήμα 3.1α)

Το αριθμητικό αποτέλεσμα έχει μονάδες kp/mm^2 ή απλώς HV (HV: μονάδα σκληρότητας κατά Vickers). Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιείται για ένα μεγάλο εύρος υλικών (σκληρών και μαλακών) λόγω της ποικιλίας φορτίων που χρησιμοποιεί. Επίσης, λόγω του ρηχού αποτυπώματος που δημιουργεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί άνετα και στη σκληρομέτρηση πολύ λεπτών ελασμάτων (λαμαρίνες, φύλλα αλουμινίου). Η δυνατότητα χρήσης επίσης πολύ μικρών φορτίων (μάζας μερικών μόλις γραμμαρίων) κάνει τη μέθοδο Vickers κατάλληλη για μικροσκληρομέτρηση υλικών, η οποία είναι πολύ βασική για τη μελέτη της κατανομής της σκληρότητας, αλλά και για τη μέτρηση της σκληρότητας των διαφόρων φάσεων και συστατικών, που εμπεριέχονται μέσα στο υλικό. Οι διαστάσεις των μικροαποτυπωμάτων μετρούνται στο οπτικό μικροσκόπιο (σχήμα 3.1β).

Ο Πίνακας Π.3.1 παρουσιάζει συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των διαφόρων βασικών δοκιμών σκληρότητας.

Πίνακας Π.3.1: Γενικά χαρακτηριστικά δοκιμών σκληρότητας

Δοκιμή σκληρότητας	Διεισδυτής	Φορτίο	Χρήσεις
Brinell	σφαίρα βαμμένου χάλυβα, διαμέτρου 10mm (πρότυπη)	3000 kp (πρότυπη)	μαλακά υλικά υλικά και ανομοιογενή
Rockwell C	κώνος διαμαντιού, 120°, καμπυλότητας 0,02 mm,	προφόρτιση: 10 kp φόρτιση: 150 kp	σκληρά υλικά (βαμμένοι χάλυβες)
Rockwell B	σφαίρα βαμμένου χάλυβα 1/16 in.	προφόρτιση: 10 kp φόρτιση: 100 kp	μαλακά υλικά
Vickers	πυραμίδα διαμαντιού, 136°	μερικά p έως εκατοντάδες kp	σκληρά και μαλακά υλικά, λεπτά φύλλα



Η σκληρότητα ως μηχανική ιδιότητα συνδέεται και με άλλες μηχανικές ιδιότητες του υλικού: την αντοχή σε εφελκυσμό, την πλαστικότητα (επιμήκυνση κατά τη θραύση) και τη δυσθραυστότητα. Όταν αυξάνεται η σκληρότητα ενός υλικού, αυξάνεται η αντοχή του και μειώνονται η πλαστικότητα και η δυσθραυστότητά του. Άρα, ένα πολύ σκληρό υλικό είναι πολλές φορές και ψαθυρό (εύθραυστο).

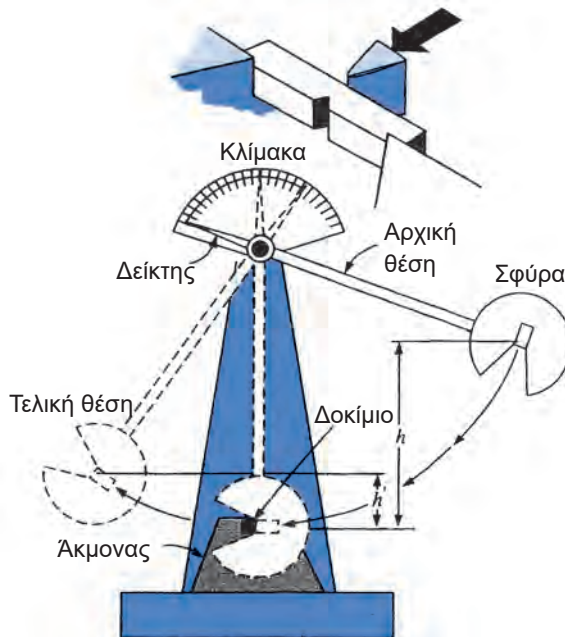
Μια προσεγγιστική σχέση που συνδέει τη σκληρότητα (H) με το όριο διαρροής (σ_{Δ}) είναι: $H = 3 \cdot \sigma_{\Delta}$.

3.3 ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ

Η δυσθραυστότητα είναι πολύ σημαντική ιδιότητα των υλικών. Ο έλεγχός της γίνεται μέσω τυποποιημένης δοκιμής κρούσης με τη βοήθεια μηχανής **εκκρεμούς σφύρας** (σχήμα 3.2). Οι διαφορετικοί τύποι δοκιμής είναι οι παρακάτω:

- δοκιμή Charpy
- δοκιμή Izod

Και οι δυο ανωτέρω τεχνικές βασίζονται στη μέτρηση του μηχανικού έργου, που χρειάζεται για τη θραύση ενός τυποποιημένων διαστάσεων δοκιμίου στο οποίο έχει γίνει κατάλληλη χαραγή σχήματος V. Στην περίπτωση της δοκιμής Charpy, το δοκίμιο συγκρατείται στα δύο του άκρα ως αμφίεριστος δοκός, ενώ στην περίπτωση της δοκιμής Izod, το δοκίμιο



Σχήμα 3.2: Παράσταση της κρούσης (μηχανή εκκρεμούς σφύρας). Το δοκίμιο συγκρατείται στα δύο του άκρα ως αμφίεριστος δοκός (δοκιμή CHARPY) και το κτύπημα γίνεται στη μέση.

είναι πακτωμένο από το ένα άκρο (πρόβολος). Το όργανο που χρησιμοποιείται ονομάζεται εκκρεμές και για τη θραύση του δοκιμίου χρησιμοποιεί μια βαριά σφύρα (σχήμα 3.2). Η διαφορά της δυναμικής ενέργειας μεταξύ της τελικής (ύψος h' από τη θέση του δοκιμίου) και της αρχικής θέσης της σφύρας (ύψος h από τη θέση του δοκιμίου) δίνει και το απαιτούμενο για τη θραύση μηχανικό έργο.

Το έργο, που καταναλώνεται για τη θραύση του δοκιμίου, προσδιορίζεται από τις θέσεις που παίρνει η σφύρα πριν και μετά τη θραύση του δοκιμίου. Η μηχανή δοκιμασίας σε κρούση έχει ένα δείκτη, που κινείται μαζί με τη σφύρα, ο οποίος μας δείχνει το έργο που καταναλώνεται κάθε φορά για τη θραύση του δοκιμίου. Η δυσθραυστότητα του δοκιμαζόμενου υλικού δίδεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\Delta E}{A_0} \quad (3.4)$$

όπου: ΔE : το απαιτούμενο για τη θραύση μηχανικό έργο, που είναι ανάλογο της υψομετρικής διαφοράς $h-h'$

A_0 : η διατομή του δοκιμίου

3.3.1 Όλκιμα και ψαθυρά υλικά

Ανάλογα με το ποσόν ενέργειας, που δαπανάται κατά τη θραύση στα πλαίσια της δοκιμής της κρούσης, τα τεχνικά υλικά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

(α) **όλκιμα υλικά** και

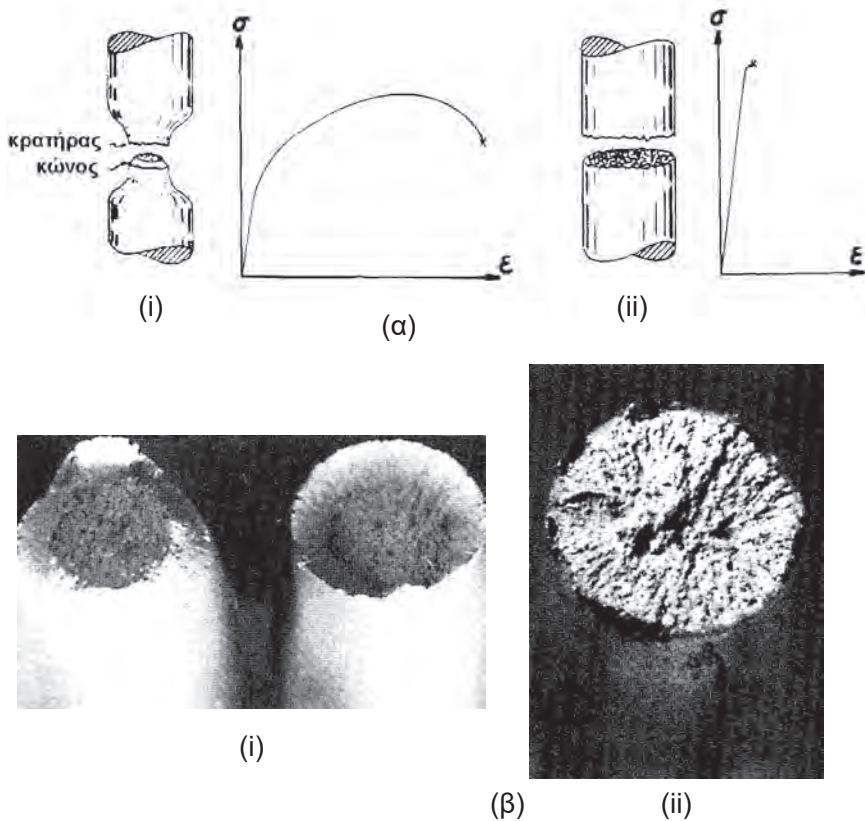
(β) **ψαθυρά υλικά**

Τα όλκιμα υλικά απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας ($> 100 \text{ J}$) κατά τις πρότυπες δοκιμές κρούσης, δηλαδή χαρακτηρίζονται από υψηλή **δυσθραυστότητα**. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των όλκιμων υλικών είναι η σημαντική πλαστική παραμόρφωση που προηγείται της θραύσης. Τα όλκιμα υλικά έχουν συνήθως μέτρια έως χαμηλή σκληρότητα και μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν εν ψυχρώ, είναι δηλαδή εύπλαστα και ευήλατα.

Οι επιφάνειες θραύσης ενός όλκιμου μετάλλου, μετά από δοκιμή εφελκυσμού, παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική μορφή “**κώνου-κρατήρα**”, ενώ η πλαστική παραμόρφωση, που προηγείται της θραύσης, διαπιστώνεται εύκολα με την παρουσία της στένωσης της διατομής (**λαιμός**), βλ. σχήμα 3.3α και β. Όλκιμα υλικά είναι τα περισσότερα καθαρά μέταλλα (Fe, Al, Cu, Pb) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως και αρκετά από τα κράματα, όπως π.χ. οι χάλυβες με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ο μπρούντζος (Cu-Sn),

ο ορείχαλκος (Cu-Zn), όταν δεν έχουν υποστεί κατεργασίες σκλήρυνσης.

Τα ψαθυρά (ή εύθραυστα) υλικά απορροφούν μικρά ποσά ενέργειας ($< 40-50 \text{ J}$) κατά την κρούση, χαρακτηρίζονται δηλαδή από μικρή σχετικά δυσθραυστότητα (απλούστερα “σπάζουν εύκολα”). Τα κεραμικά υλικά, το γυαλί, η γύψος κατατάσσονται σε αυτή την κατηγορία. Επίσης ορισμένα κράματα, όπως οι χάλυβες μεγάλης περιεκτικότητας σε άνθρακα μετά από σκλήρυνση (βαφή) και τα περισσότερα είδη χυτοσιδήρου, εμφανίζουν ψαθυρή συμπεριφορά. Σε αντίθεση με τα όλκιμα υλικά, τα ψαθυρά υλικά σπάζουν απότομα χωρίς καμία προειδοποίηση (δηλαδή χωρίς να έχει προηγηθεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση) και παρουσιάζουν μεγάλη, συνήθως, σκληρότητα. Γι’ αυτό το λόγο δε διαμορφώνονται εν ψυχρώ. Οι επιφάνειες θραύσης ενός ψαθυρού υλικού, μετά από δοκιμή εφελκυσμού, δεν παρουσιάζουν σημαντική παραμόρφωση, ενώ, μικροσκοπικά, χαρακτηρίζονται από κοκκώδη μορφολογία (σχήμα 3.3α και β).



Σχήμα 3.3: (α) Μορφή θραύσης και διάγραμμα σ - ϵ όλκιμου (i) και ψαθυρού υλικού (ii), (β) Επιφάνεια όλκιμης (i) και ψαθυρής θραύσης (ii).

Η τιμή της δυσθραυστότητας των υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη **χημική σύσταση** και την **κρυσταλλική δομή** του υλικού, αλλά και από την **θερμοκρασία**. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ορισμένα όλκιμα υλικά μπορούν να μετατραπούν σε ψαθυρά. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ψαθυροποίησης, λόγω χαμηλής θερμοκρασίας, εμφανίστηκε σε Βρετανικά πλοία που ταξίδευαν στο Νότιο Πόλο στις αρχές του 20ού αιώνα, όταν λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών, που επικρατούσαν, εμφανίσθηκαν κρίσιμες ρωγμές τόσο στη μηχανή, όσο και στις περιοχές συγκόλλησης των ελασμάτων των πλοίων.

3.4 ΚΟΠΩΣΗ

3.4.1 Η αντοχή σε κόπωση

Στην πράξη οι περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές δεν υφίστανται την επίδραση ενός χρονικά σταθερού φορτίου. Τις περισσότερες φορές ο τύπος και η τιμή του φορτίου μεταβάλλονται με το χρόνο. Έτσι, πολλά από τα τεχνικά υλικά υπόκεινται σε **χρονικά μεταβαλλόμενα φορτία** ή **τάσεις** στις διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές, στις οποίες συμμετέχουν ως λειτουργικά εξαρτήματα. Αυτές οι τάσεις, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, καταπονούν το υλικό σε εφελκυσμό και σε θλίψη και η μέγιστη τιμή της τάσης δεν ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού. Τέτοιες περιοδικές καταπονήσεις υφίστανται πολλά μεταλλικά εξαρτήματα, όπως ο διωστήρας στις μηχανές εσωτερικής καύσης, τα αμορτισέρ των αυτοκινήτων, τα πτερύγια των αεροσκαφών και πολλά άλλα.

Οι επαναλαμβανόμενες αυτές μηχανικές καταπονήσεις, που αναπτύσσονται σε υλικά - εξαρτήματα μηχανών και κατασκευών, πολύ συχνά οδηγούν, μετά από κάποιες συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, σε αστοχίες που είναι γνωστές ως αστοχίες λόγω **κόπωσης**. Πολύ απλά, **κόπωση** μπορεί να οριστεί ως η χαρακτηριστική χρονικά μεταβαλλόμενη καταπόνηση, η οποία μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού (θραύση από κόπωση). Το όριο διαρροής είναι μέτρο της λεγόμενης στατικής αντοχής του υλικού. Στην περίπτωση της κόπωσης, το αντίστοιχο όριο είναι κατώτερο του στατικού και αντιστοιχεί στη δυναμική αντοχή του υλικού.

Ας θεωρηθεί μία περιοδικά (κυκλικά) επαναλαμβανόμενη καταπόνηση που απεικονίζεται στο σχήμα 3.4α. Το συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζει τη χρονική μεταβολή της τάσης και δείχνει ότι το υλικό καταπονείται από μία μέγιστη θετική (εφελκυστική) τάση (σ_0) έως μία ελάχιστη αρνητική

(θλιπτική) τάση ($-\sigma_0$). Ο κύκλος ή περίοδος φόρτισης είναι ο χρόνος που απαιτείται για ένα πλήρη κύκλο εναλλαγής της τιμής της τάσης (από μέγιστη σε μέγιστη ή από ελάχιστη σε ελάχιστη τιμή). Μετά από περίοδο συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος φόρτισης (ή αριθμού κύκλου φορτίσεως) το υλικό αστοχεί (σπάει). Όσο μεγαλώνει η τιμή του εύρους της τάσης S , τόσο ελαττώνεται και ο αριθμός κύκλων (N), που πρέπει να συμπληρωθεί για την αστοχία του υλικού. Οι καμπύλες (ii) και (iii) του σχήματος 3.4α δείχνουν τη μεταβολή της τάσης S σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων (N), που αντιστοιχεί στην αστοχία του υλικού. Οι καμπύλες αυτές είναι γνωστές ως **διαγράμματα S-N**. Το διάγραμμα (ii) του σχήματος 3.4α δείχνει ότι υπάρχει ένα κατώτατο όριο τάσης S_0 , κάτω από το οποίο το υλικό αντέχει θεωρητικά σε άπειρο αριθμό κύκλων φορτίσεως, δηλαδή πρακτικά δε λαμβάνει χώρα αστοχία λόγω κόπωσης. Η τιμή της τάσης S_0 ονομάζεται **όριο κόπωσης**. Το διάγραμμα (ii) του σχήματος 3.4α ισχύει κυρίως για τα περισσότερα είδη χαλύβων. Η καμπύλη (iii) του σχήματος 3.4α, η οποία ισχύει για τα μη σιδηρούχα κράματα, δείχνει ότι, για κάθε τιμή της τάσης (όσο μικρή είναι αυτή), το υλικό μετά από πεπερασμένο αριθμό κύκλων φόρτισης οδηγείται σε θραύση λόγω κόπωσης.

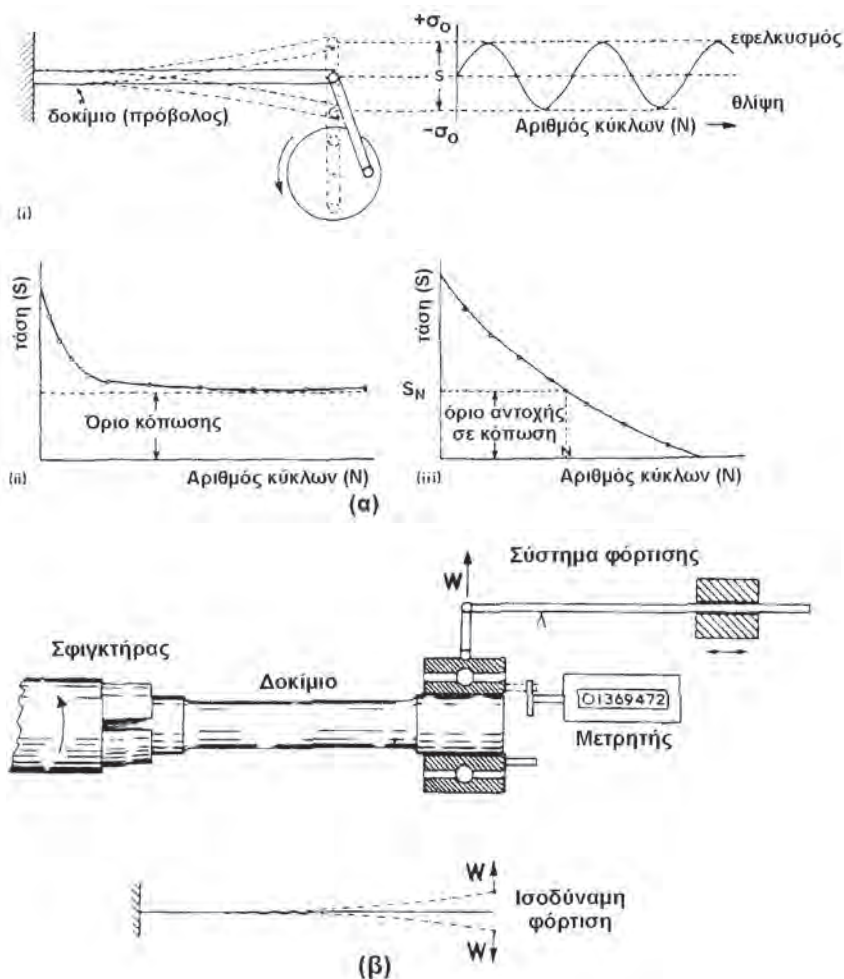
Άρα, ξεκινώντας από το όριο ζωής ενός μεταλλικού εξαρτήματος, το οποίο αντιστοιχεί σε έναν αριθμό κύκλων φόρτισης (N), μπορεί να ευρεθεί το **όριο αντοχής σε κόπωση** (S_N) (σχήμα 3.4α).

3.4.2 Η δοκιμή της κόπωσης

Οι μηχανές δοκιμής κόπωσης βασίζονται στη διάταξη του σχήματος 3.4β. Το δοκίμιο υπό μορφή προβόλου περιστρέφεται μέσω κατάλληλου σφιγκτήρα και φορτίζεται με κατακόρυφο φορτίο W στο ελεύθερο άκρο. Για κάθε περιστροφή 180° το φορτίο W αλλάζει φορά. Προκειμένου να καταρτισθεί το διάγραμμα S-N του υλικού, πραγματοποιούνται πολλές δοκιμές με διαφορετικό φορτίο W και υπολογίζεται για κάθε μία από αυτές ο αριθμός των κύκλων φόρτισης (N), που απαιτείται για την αστοχία (θραύση) του υλικού.

3.4.3 Μηχανισμός αστοχίας λόγω κόπωσης

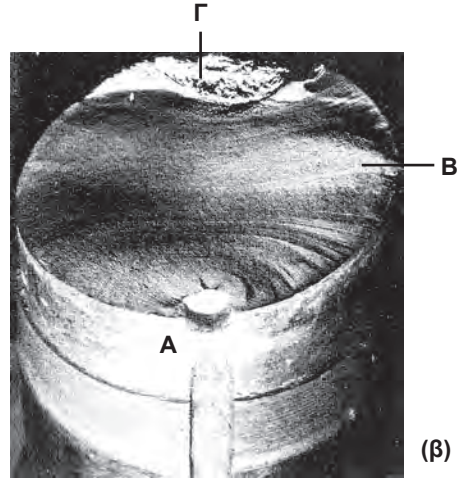
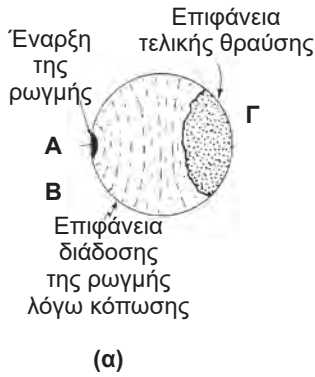
Η αστοχία λόγω κόπωσης έχει αφετηρία κάποια επιφανειακή ατέλεια του υλικού, όπως π.χ. από επιφανειακή ρωγμή, χαραγή, κ.λπ. Η ρωγμή που διαδίδεται λόγω κόπωσης δημιουργεί ραβδώσεις στην επιφάνεια φόρτισης του μετάλλου, που η κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε έναν κύκλο εναλλαγής της τάσης. Η επιφάνεια θραύσης λόγω κόπωσης περιλαμβάνει



Σχήμα 3.4: (α) (i) Δοκιμή κυκλικής μηχανικής καταπόνησης (κόπωσης) σε δοκίμιο τύπου προβόλου και (ii), (iii) καμπύλες S-N. (β) Λεπτομέρεια του δοκιμίου για την πραγματοποίηση της δοκιμής της κόπωσης.

συνήθως τρεις χαρακτηριστικές περιοχές (σχήμα 3.5α).

- την **περιοχή Α**, που είναι η περιοχή έναρξης της ρωγμής κόπωσης (συνήθως είναι μία επιφανειακή ατέλεια),
- την **περιοχή Β**, που αποτελεί την επιφάνεια διάδοσης της ρωγμής λόγω κόπωσης και η οποία έχει μορφολογία παρόμοια με την εξωτερική επιφάνεια αχιβάδας (σχήμα 3.5α και β). Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η περιοχή αυτή αποτελείται από **πολλαπλές ραβδώσεις**, ο



Σχήμα 3.5: (α) Μορφή επιφάνειας θραύσης από κόπωση (A: θέση έναρξης ρωγμής, B: επιφάνεια διάδοσης της ρωγμής λόγω της κόπωσης και Γ: επιφάνεια τελικής θραύσης). (β) Επιφάνεια θραύσης στροφαλοφόρου άξονα λόγω κόπωσης και (γ) επιφάνεια θραύσης χαλύβδινου άξονα, λόγω έντονης στρεπτικής κόπωσης.

αριθμός των οποίων δείχνει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης. Και τέλος,

- την **περιοχή Γ**, που αποτελεί την επιφάνεια τελικής θραύσης με χα-

ρακτηριστική κοκκώδη (τραχιά) μορφολογία, η οποία προκαλείται από την ασταθή διάδοση της ρωγμής γύρω από τα όρια των κόκκων του μετάλλου.

Η μορφολογία της επιφάνειας θραύσης από στρεπτική κόπωση χαλύβδινου άξονα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5γ.

Οι έντονες μηχανικές καταπονήσεις, αλλά και η παρουσία διαβρωτικών συνθηκών του περιβάλλοντος υποβοηθούν το φαινόμενο της κόπωσης με αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία πολλών υλικών. Ο ελλειπής σχεδιασμός μεταλλικών εξαρτημάτων (ύπαρξη γωνιών και γενικά εγκοπών) δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων και μείωση της αντοχής τους σε κόπωση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Η βελτίωση της αντοχής σε κόπωση επιτυγχάνεται με την εξάλειψη επιφανειακών ατελειών (υποψήφιος θέσεις έναρξης της ρωγμής) με λείανση, καθώς και με μεθόδους επιφανειακής σκλήρυνσης, όπως π.χ. με αμμοβολή - υαλοβολή, ενανθράκωση, εναζώωση, κ.λπ.

3.5 ΕΡΠΥΣΜΟΣ

Η πλαστική παραμόρφωση (ϵ) ενός υλικού ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης (σ), του χρόνου επιβολής της τάσης (t), καθώς και της θερμοκρασίας (T), ονομάζεται ερπυσμός (λέξη που προέρχεται από το ρήμα “έρπω”). Δηλαδή:

$$\epsilon = f(\sigma, t, T) \quad (3.5)$$

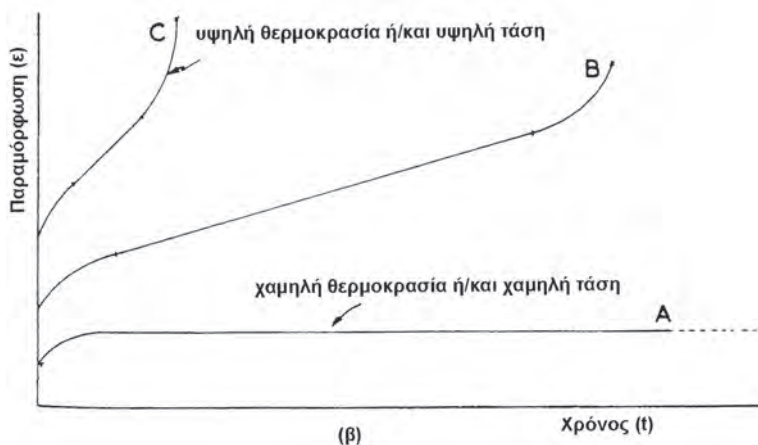
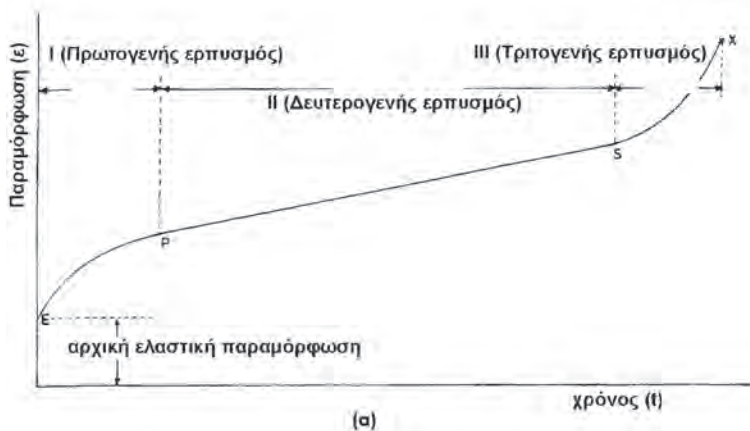
Πρακτικά, η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού αποκτά σημαντικές τιμές **σε υψηλές θερμοκρασίες** και πιο συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της τιμής **0,4 T_m** (T_m : το απόλυτο σημείο τήξεως του μετάλλου σε Kelvin = $\theta_m(^{\circ}\text{C}) + 273$). Μέταλλα με χαμηλό σημείο τήξεως εμφανίζουν ερπυσμό ακόμα και στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Π.χ. ο μόλυβδος (Pb) με $\theta_m = 327^{\circ}\text{C}$ ($T_m = 600\text{ K}$) παρουσιάζει ερπυσμό, διότι η απόλυτη θερμοκρασία περιβάλλοντος ισούται προς $\theta_{\text{περ}} = (273 + 25)\text{ K} = 298\text{ K}$ περίπου ίσο προς $0,5 T_m > 0,4 T_m$. Φύλλα μολύβδου στις στέγες των σπιτιών, καθώς και σωλήνες ύδρευσης από μόλυβδο, παρουσιάζουν το φαινόμενο του ερπυσμού ακόμα και στους -33°C ($= 0,4 T_m$).

Ο ερπυσμός όμως δεν παρατηρείται μόνο σε μέταλλα με σχετικά χαμηλό σημείο τήξεως. Παρατηρείται επίσης σε υλικά, τα οποία καταπονούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως π.χ. οι εναλλάκτες θερμότητας, οι αντιστάσεις κλιβάνων, τα εξαρτήματα στο εσωτερικό θαλάμων καύσης, οι

πτερωτές αεροστρόβιλων και ατμοστρόβιλων.

Το σχήμα 3.6α δείχνει τις τρεις διαφορετικές φάσεις ερπυσμού ενός μεταλλικού υλικού, με την πάροδο του χρόνου. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- (α) φάση πρωτογενούς ερπυσμού (EP),
- (β) φάση δευτερογενούς ερπυσμού (PS), που ο ρυθμός παραμόρφωσης παραμένει σταθερός,
- (γ) φάση τριτογενούς ερπυσμού, που χαρακτηρίζεται από ολοένα αυξανόμενο ρυθμό παραμόρφωσης έως την τελική θραύση του υλικού.



Σχήμα 3.6: (α) Καμπύλη ϵ - t ερπυσμού (I: πρωτογενής ερπυσμός, II: δευτερογενής ερπυσμός, III: τριτογενής ερπυσμός). (β) Μεταβολή καμπυλών ϵ - t ερπυσμού με αλλαγή της τάσης ή/και της θερμοκρασίας.

Αύξηση της θερμοκρασίας ή/και της τάσης μετατοπίζουν αριστερόστροφα τις καμπύλες ε - t (βλ. [σχήμα 3.6β](#)).

Οι δοκιμές του ερπυσμού συνίστανται στην εφαρμογή εφελκυστικών τάσεων κάτω από υψηλές θερμοκρασίες και στην ακριβή μέτρηση της παραμόρφωσης για μεγάλες χρονικές περιόδους. Γι' αυτό και ο προσδιορισμός της καμπύλης ε - t (ερπυσμού) ενός μεταλλικού υλικού θεωρείται επίπονη διαδικασία και απαιτεί όργανα μέτρησης υψηλής ακριβείας, όπως π.χ. επιμηκυνσιόμετρο, το οποίο να μην επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

3.6. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ

Η κατεργασιμότητα, ως ιδιότητα υλικών, είναι μία σύνθετη έννοια, η οποία ορίζεται ως η δυνατότητα (ευκολία ή δυσκολία) κατεργασίας, που παρουσιάζει ένα υλικό, προκειμένου από αυτό να κατασκευασθούν εξαρτήματα συγκεκριμένης γεωμετρίας. Η κατεργασία αυτή μπορεί να είναι κατεργασία διαμόρφωσης, κοπής, συγκόλλησης ή χύτευσης. Η παραπάνω έννοια της κατεργασιμότητας, ως γενική, μπορεί να διαιρεθεί σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το είδος της κατεργασίας που μας ενδιαφέρει:

(α) **Διαμορφωσιμότητα** καλείται η δυνατότητα ενός υλικού να διαμορφωθεί σε μία συγκεκριμένη γεωμετρία (έλασμα, φύλλο, σύρμα, κ.λπ.), μέσω κατεργασίας πλαστικής παραμόρφωσης. Όταν η κατεργασία αυτή αποβλέπει στη διαμόρφωση ελάσματος, τότε η δυνατότητα αυτή λέγεται **ελατότητα**, ενώ όταν αποβλέπει στη διαμόρφωση σύρματος, τότε λέγεται **ολκιμότητα**. Ειδικότερα, όσο μαλακό είναι ένα μέταλλο, τόσο πιο εύκολα μπορεί να διαμορφωθεί σε ελάσματα ή σε σύρματα, δηλαδή αυξάνεται η ελατότητα και η ολκιμότητά του αντίστοιχα.

(β) **Ευχυτότητα ή χυτευσιμότητα** καλείται η δυνατότητα ενός υλικού να διαμορφωθεί, μέσω χύτευσης, σε εξάρτημα συγκεκριμένης γεωμετρίας. Το σημείο τήξεως του μετάλλου, το ιξώδες και η επιφανειακή τάση του τήγματος του μετάλλου, καθώς και οι διάφορες προσμείξεις είναι παράγοντες, που επηρεάζουν σημαντικά την ευχυτότητα του μετάλλου.

(γ) **Συγκολλησιμότητα** καλείται η δυνατότητα συγκόλλησης ενός υλικού. Η καθαρότητα του μετάλλου και η χημική σύσταση του κράματος προς συγκόλληση είναι παράγοντες που άλλοτε επηρεάζουν

θετικά και άλλοτε αρνητικά τη συγκολλησιμότητα. Π.χ. χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα ($> 0,3\%$) εμφανίζουν ρωγμές κατά τη συγκόλληση και έτσι χαρακτηρίζονται από μικρή συγκολλησιμότητα, ενώ αντίθετα προσθήκες σε μαγγάνιο (Mn) έως 1% και πυρίτιο (Si) έως $0,3\%$ αυξάνουν τη ρευστότητα του τήγματος, καθώς και την αντίστασή του σε οξείδωση υψηλών θερμοκρασιών, αυξάνοντας έτσι τη συγκολλησιμότητα των χαλύβων.

(δ) Κατεργασιμότητα στην κοπή καλείται η δυνατότητα διαμόρφωσης, που παρουσιάζει ένα υλικό, μέσω κατεργασιών αποβολής υλικού (π.χ. τόννευση, φρεζάρισμα, πλάνιση, λείανση, κ.λπ.). Και σε αυτή την κατηγορία η χημική σύσταση και η δομή του υλικού παίζουν πρωτεύοντα ρόλο. Οι **χάλυβες ελευθέρας κοπής** (δηλαδή υψηλής κατεργασιμότητας στην κοπή), που περιέχουν μαγγάνιο (Mn) και θείο (S), παρουσιάζουν μεγάλη ευκολία κατά την κοπή, λόγω της ύπαρξης απομονωμένων σωματιδίων (**εγκλεισμάτων**) **σουλφιδίου του μαγγανίου (MnS)**.

3.7 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ

Μονοκρύσταλλος ή **μονοκρυσταλλικό υλικό** καλείται το υλικό εκείνο που αποτελείται από ένα μοναδικό κρύσταλλο ή κρυσταλλίτη. Ένα τέτοιο υλικό μπορεί να κατασκευασθεί με τεχνικές, στις οποίες απαιτούνται χαμηλοί ρυθμοί θέρμανσης και απόψυξης. Όπως είναι γνωστό από την Αντοχή των Υλικών, ένα μεταλλικό υλικό συνήθως μπορεί να καταπονηθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με την παραμόρφωση που τείνει να επιφέρει η επιβαλλόμενη τάση (σχήμα 3.7α). Έτσι, αναφέρεται ενδεικτικά η εφελκυστική καταπόνηση (**εφελκυσμός**), η θλιπτική καταπόνηση (**θλίψη**) και η διατμητική καταπόνηση (**διάτμηση** ή **στρέψη**). Τα περισσότερα εξαρτήματα ή στοιχεία μηχανών καταπονούνται σε πιο σύνθετες καταπονήσεις που αναλύονται σε απλούστερες, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Όταν η τάση διατηρηθεί κάτω από μία κρίσιμη τιμή (όριο ελαστικότητας) επιφέρει **ελαστικές παραμορφώσεις**, που εξαλείφονται μετά από την απόσυρση της δύναμης. Σε ατομικό επίπεδο οι εν λόγω τάσεις προκαλούν επιμήκυνση ή συμπίεση των ατομικών δεσμών, οι οποίες αντιστοιχούν στις παραμορφώσεις ελατηρίου (σχήμα 3.7β). Η τάση που προκαλεί μία τέτοια αντιστρεπτή (ελαστική) παραμόρφωση ακολουθεί το Νόμο του Hooke (βλ. Αντοχή των Υλικών):

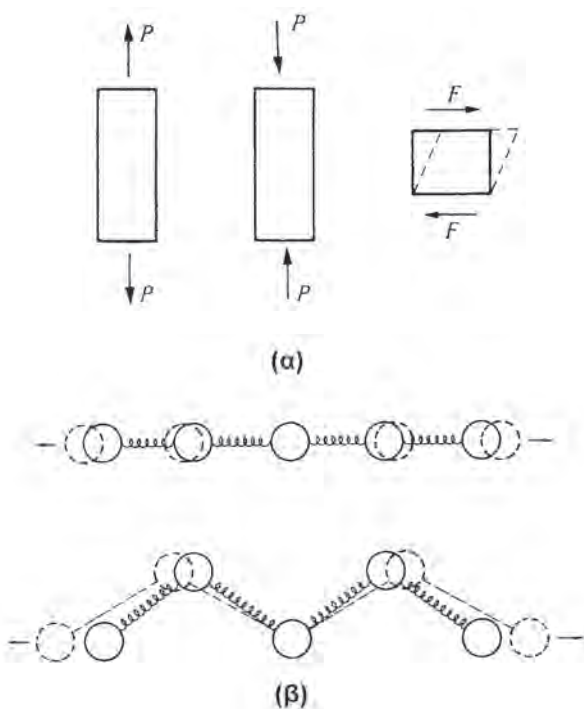
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.6)$$

όπου: E το μέτρο ελαστικότητας (Young) του υλικού.

Σε ένα μακροσκοπικό στερεό η επιβολή εφελκυστικής καταπόνησης δεν οδηγεί μόνο σε παραμορφώσεις κατά τη διεύθυνση της τάσης, αλλά και κάθετα προς αυτήν. Όταν η επιβαλλόμενη τάση τείνει να επιμηκύνει το υλικό (κατά τη διεύθυνση x), είναι λογικό να μεταβάλλεται το πλάτος (y) και το πάχος (z) του υλικού. Ο λόγος της επιμέρους παραμόρφωσης ως προς αυτή κατά τη διεύθυνση της τάσης λέγεται λόγος Poisson (ν):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (3.7)$$

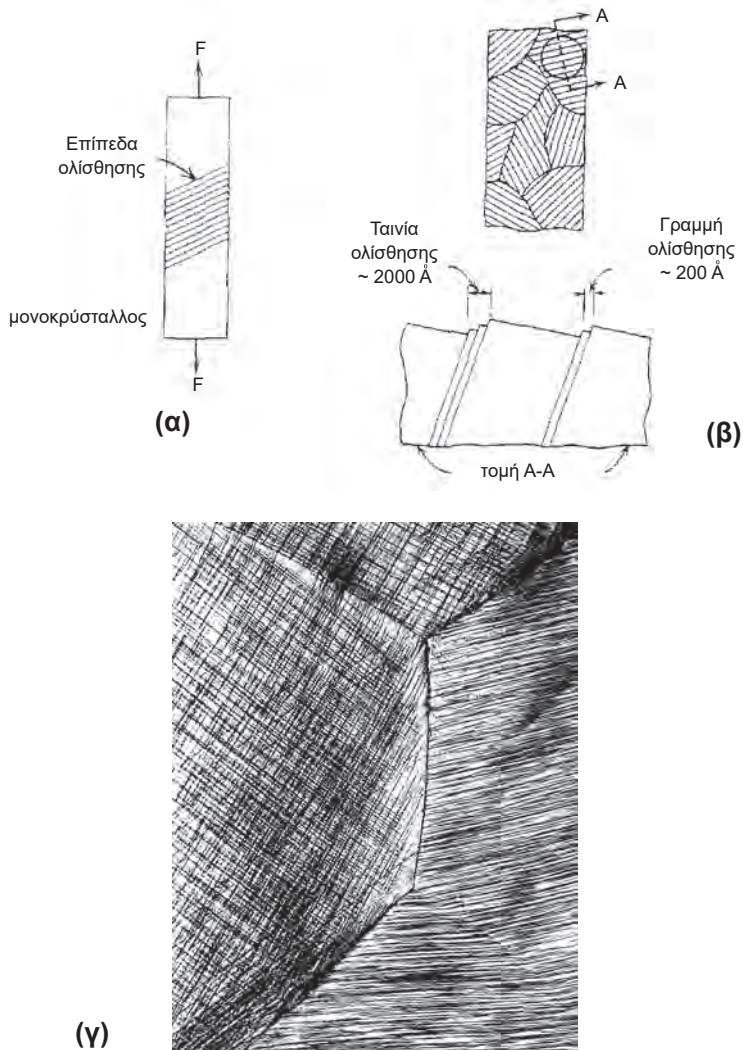
Το (-) πρόσημο τίθεται για να εξασφαλίσει τις θετικές τιμές του λόγου Poisson. Ο λόγος Poisson έχει συνήθως τιμή ίση προς 1/3 για τα μεταλλικά υλικά.



Σχήμα 3.7: (α) Βασικές μηχανικές καταπονήσεις: εφελκυσμός, θλίψη και διάτμηση. (β) Σχηματική αναπαράσταση της ελαστικής μηχανικής καταπόνησης σε ατομική κλίμακα.

3.8 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ

Στις κατεργασίες διαμόρφωσης σημαντικό ρόλο παίζει η πλαστική συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών. Η πλαστικότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να παραμορφωθεί μόνιμα κάτω από την επίδραση κάποιας τάσης. Ιεραρχικά θα εξετασθεί η πλαστική παραμόρφωση μονοκρυσταλλικών



Σχήμα 3.8: (α) Ολίσθηση κρυσταλλικών επιπέδων κατά την εφελκυστική καταπόνηση μονοκρυστάλλου, (β) Δημιουργία γραμμών και ταινιών ολίσθησης και (γ) μικροφωτογραφία πολυκρυσταλλικού μετάλλου (Al) στο οποίο έχουν σχηματισθεί ταινίες ολίσθησης (για κάθε κόκκο δημιουργείται ξεχωριστό “σετ” παραλλήλων μεταξύ τους γραμμών ολίσθησης). (Μεγέθυνση $\times 100$).

μετάλλων και ο μηχανισμός με τον οποίον προκαλείται. Η πλαστική παραμόρφωση ενός μονοκρυστάλλου κάτω από την επίδραση εφελκυστικής τάσης απεικονίζεται στο σχήμα 3.8α. Όταν η τάση που εφαρμόζεται υπερβεί το όριο ελαστικότητας του μονοκρυστάλλου, τότε λαμβάνει χώρα η διαδικασία της **ολίσθησης**.

Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, συγκεκριμένα επίπεδα ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος, τα οποία ονομάζονται κρυσταλλικά επίπεδα και παρουσιάζονται στο σχήμα 3.8β ως παράλληλες πλάκες, “γλιστρούν” κάτω από την επίδραση των διατμητικών τάσεων που δρουν πάνω σε αυτά. Για κάθε κόκκο (κρύσταλλο), οι διάφορες στρώσεις των ολισθαινόντων κρυσταλλικών επιπέδων δημιουργούν τις ταινίες ολίσθησης, οι οποίες στο μικροσκόπιο φαίνονται ως παράλληλες μεταξύ τους γραμμές (σχήμα 3.8γ). Τα κρυσταλλικά επίπεδα ολίσθησης είναι τα επίπεδα που παρουσιάζουν τη μέγιστη πυκνότητα ατόμων. Η διεύθυνση ολίσθησης των επιπέδων αυτών σχηματίζει γωνία 45° ως προς τον άξονα εφαρμογής της εφελκυστικής τάσης. Η διεύθυνση αυτή είναι η διεύθυνση εφαρμογής της μέγιστης ή κρίσιμης διατμητικής τάσης. Η τιμή της κρίσιμης διατμητικής τάσης (τ^*), στην οποία αντιστοιχούν οι πρώτες κρυσταλλογραφικές ολισθήσεις, ισούται με το μισό του ορίου διαρροής:

$$\sigma_{\Delta} = 2\tau^* \quad (3.8)$$

όπου: σ_{Δ} το όριο διαρροής



Ο τρόπος με τον οποίο δρουν οι διατμητικές τάσεις σε κάθε κρύσταλλο γίνεται αντιληπτός με την αντιστοίχιση του κρυστάλλου με το πακέτο χαρτιών τράπουλας. Εάν σπρώξουμε με μικρή δύναμη το πακέτο, τότε τα χαρτιά γλιστρούν το ένα πάνω στο άλλο παίρνοντας ανάλογη μορφή.

3.9 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα πολυκρυσταλλικά υλικά είναι αυτά που χρησιμοποιούνται στο μεγαλύτερο ποσοστό των βιομηχανικών εφαρμογών. Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμογή της τάσης (πάνω από μία κρίσιμη τιμή) προκαλεί πολλαπλές κρυσταλλογραφικές ολισθήσεις στους διάφορους κόκκους (κρυστάλλους) του μετάλλου. Οι ταινίες ολίσθησης αλλάζουν διεύθυνση από κόκκο σε κόκκο λόγω των διαφορετικών επιπέδων ολίσθησης. Η μετάδοση της παραμόρφωσης από κόκκο σε κόκκο δυσχεραίνεται λόγω της ύπαρξης των συνόρων των κόκκων και της αλλαγής διεύθυνσης των αντιστοίχων επιπέδων ολίσθησης. Έτσι, η παραμόρφωση που προκαλείται για μια συγκεκριμένη τιμή της τάσης είναι πολύ μικρότερη στην περίπτωση του πολυκρυσταλλικού υλικού απ' ό,τι στο μονοκρυσταλλικό υλικό.

Το όριο διαρροής, και άρα και η μηχανική αντοχή, ενός πολυκρυσταλλικού υλικού είναι αρκετά μεγαλύτερη από ό,τι στο αντίστοιχο μονοκρυσταλλικό. Π.χ., ο πολυκρυσταλλικός χαλκός έχει περίπου τριπλάσια μηχανική αντοχή σε σχέση με το μονοκρυσταλλικό χαλκό. Ο αριθμός, άρα και το μέγεθος των κόκκων του μετάλλου, επηρεάζουν άμεσα το όριο διαρροής και τη μηχανική αντοχή του. Το όριο διαρροής ενός πολυκρυσταλλικού υλικού συνδέεται με το μέγεθος των κόκκων (d) με την παρακάτω σχέση (**Νόμος Hall-Petch**):

$$\sigma_{\Delta, \text{πολ}} = \sigma_{\Delta, \text{μον}} + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (3.9)$$

όπου: $\sigma_{\Delta, \text{πολ}}$, το όριο διαρροής πολυκρυσταλλικού μετάλλου,
 $\sigma_{\Delta, \text{μον}}$, το όριο διαρροής του αντίστοιχου μονοκρυσταλλικού και
 k , σταθερά.

Ο Νόμος Hall-Petch δείχνει κάτι πολύ σημαντικό: τα λεπτόκοκκα υλικά έχουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή από ό,τι τα χονδρόκοκκα. Ο μηχανισμός πλαστικής παραμόρφωσης των υλικών εξηγείται αναλυτικά με τη θεωρία των διαταραχών.

Ένα άλλο φαινόμενο, χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών, είναι η **ανισοτροπία**. Ένα υλικό, το οποίο θεωρείται ως ένα τρισδιάστατο στερεό σώμα, καλείται **ισότροπο**, όταν παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες (π.χ. μηχανικές) ανεξάρτητα ως προς τη διεύθυνση εξέτασής τους. Αν συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή εάν το υλικό παρουσιάζει διαφορετική (μηχανική) συμπεριφορά ως προς τις διάφορες διευθύνσεις, τότε

αυτό καλείται **ανισότροπο** και το φαινόμενο **ανισοτροπία**. Οι διάφορες μηχανικές κατεργασίες διαμόρφωσης εντείνουν το φαινόμενο της **ανισοτροπίας**, διότι παραμορφώνουν το υλικό πολύ περισσότερο ως προς μία διεύθυνση, αλλάζοντας τις ιδιότητές του σε σχέση με τις άλλες διευθύνσεις.

3.10 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΝ ΨΥΧΡΩ: ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ

Οι ψυχρές κατεργασίες ή κατεργασίες εν ψυχρώ πραγματοποιούνται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και αφορούν κυρίως κατεργασίες μαλακών μετάλλων, όπως π.χ. αλουμινίου, μολύβδου, κασσιτέρου. Όπως είναι γνωστό από τη δοκιμή εφελκυσμού (Βλ. Αντοχή των Υλικών), η δημιουργία κάποιας πλαστικής παραμόρφωσης σε ένα μεταλλικό υλικό οδηγεί στην αύξηση του ορίου διαρροής, δηλαδή στη σκλήρυνση του υλικού, η οποία είναι γνωστή ως **ενδοτράχυνση** ή **εργοσκλήρυνση**. Έτσι λοιπόν και οι μηχανικές εν ψυχρώ διαμορφώσεις οδηγούν σε εργοσκλήρυνση, με αποτέλεσμα να μειώνεται η περαιτέρω διαμορφωσιμότητα του υλικού και, πολλές φορές, λόγω της ανεπαρκούς ολκιμότητάς του να αστοχεί. Οι ψυχρές κατεργασίες διαμόρφωσης προκαλούν αυξημένες ατέλειες (διαταραχές) στην κρυσταλλική δομή του υλικού, οι οποίες είναι αποθηκευμένες με τη μορφή εσωτερικών τάσεων. Η δομή του κατεργασμένου υλικού αποτελείται από διαμήκεις κόκκους προσανατολισμένους κατά τη διεύθυνση της κατεργασίας. Απεικόνιση της δομής παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9α.

Η επίλυση των προβλημάτων, που δημιουργούνται λόγω της εν ψυχρώ παραμόρφωσης και δυσχεραίνουν την περαιτέρω κατεργασία, αλλά και τη λειτουργικότητα των υλικών, πραγματοποιείται με κατάλληλη θερμική κατεργασία που ονομάζεται **ανόπτηση**. Ανάλογα με τη θερμοκρασία ανόπτησης παρατηρούνται διάφορα στάδια αναφορικά με τις μεταβολές στις ιδιότητες και στη δομή του υλικού:

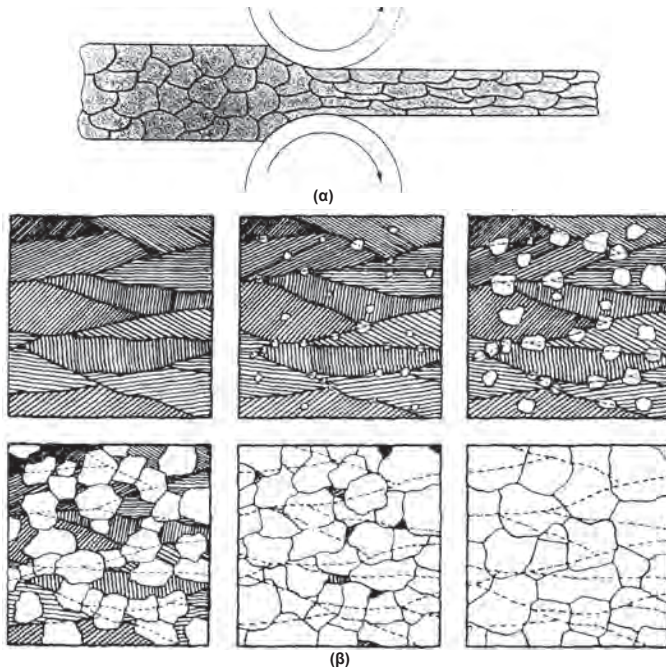
➡ **Στάδιο 1: Αποκατάσταση ή απόταση**

Αυτό το στάδιο πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια ανόπτησης σε χαμηλές θερμοκρασίες, η οποία ονομάζεται αποτατική ανόπτηση. Με την αποτατική ανόπτηση λαμβάνει χώρα ανακατανομή των αταξιών δομής (διαταραχών) και μείωση των εσωτερικών τάσεων. Η δομή του υλικού, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητές του, όπως είναι η σκληρότητα και το όριο διαρροής, δε μεταβάλλονται. Επειδή όμως με την αποκατάσταση βελτιώνεται η κατεργασιμότητα του υλικού, η διαδικασία μορφοποίησής του μπορεί να συνεχισθεί

περαιτέρω. Επίσης, λόγω της ανακούφισης των εσωτερικών τάσεων, που λαμβάνει χώρα κατά την αποτατική ανόπτηση, αυξάνει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων και η διάρκεια ζωής ενός υλικού κατά τη λειτουργία του. Έτσι π.χ. η αποτατική ανόπτηση σε ελασμένα εξαρτήματα ορειχάλκου επιφέρει αύξηση της αντίστασης έναντι της διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση (“εποχική θραύση”). Φαινόμενο εποχικής θραύσης παρατηρείται σε ορειχάλκινους κάλυκες σε περιόδους αυξημένης υγρασίας.

❖ Στάδιο 2: Ανακρυστάλλωση

Το στάδιο αυτό πραγματοποιείται, συνήθως, σε θερμοκρασίες ανόπτησης μεταξύ $1/3$ και $1/2$ της απόλυτης θερμοκρασίας τήξεως του υλικού (T_m). Κατά την ανακρυστάλλωση δημιουργούνται πυρήνες κρυστάλλωσης, οι οποίοι μεγαλώνουν σε βάρος των κρυστάλλων της αρχικής δομής, καταναλώνοντας την αποθηκευμένη ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης. Οι πυρήνες αυτοί αναπτύσσονται, αντικαθιστώντας τους κόκκους της αρχικής δομής με νέους απαραμόρφωτους κόκκους χωρίς προσανατολισμό. Η εξελικτική πορεία της ανακρυστάλλωσης που περιλαμβάνει τα στάδια πυρηνοποίησης και ανάπτυξης, φαίνεται στο σχήμα 3.9β.



Σχήμα 3.9: (α) Σχηματική αναπαράσταση της δομής του υλικού έπειτα από ψυχρή πλαστική παραμόρφωση. (β) Εξελικτική πορεία της πυρηνοποίησης και ανάπτυξης των πυρήνων κατά την ανακρυστάλλωση.

Η ανακραυστάλλωση πραγματοποιείται μονάχα, εάν το μέταλλο έχει υποστεί ψυχρή παραμόρφωση, το ποσοστό της οποίας θα πρέπει να υπερβαίνει μία κρίσιμη τιμή (**κρίσιμο ποσοστό παραμόρφωσης**). Αυτό ερμηνεύεται με το γεγονός ότι η αποθηκευμένη ενέργεια στο υλικό, λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, παίζει ρόλο **κινητήριας δύναμης** για την ανακραυστάλλωση. Άλλοι παράγοντες, που παίζουν σημαντικό ρόλο στη διεργασία της ανακραυστάλλωσης, είναι η **θερμοκρασία**, ο **χρόνος** και η **καθαρότητα του μετάλλου**. Υπάρχει μία συγκεκριμένη ελάχιστη θερμοκρασία ανακραυστάλλωσης, κάτω από την οποία είναι αδύνατη η ανάπτυξη των πυρήνων της νέας δομής. Όσο πιο μεγάλη είναι η θερμοκρασία, τόσο ταχύτερα γίνεται η ανάπτυξη των νέων πυρήνων, δηλαδή μειώνεται ο **χρόνος ανακραυστάλλωσης**. Η καθαρότητα του μετάλλου ευνοεί το φαινόμενο της ανακραυστάλλωσης, διότι έχει διαπιστωθεί ότι οι προσμείξεις εμποδίζουν την ανάπτυξη των πυρήνων. Έτσι, π.χ. το αλουμίνιο εμπορικής καθαρότητας (99,9% Al) ανακραυσταλλώνεται στους 150°C, ενώ το υπερκαθαρό αλουμίνιο (99,9999% Al) ανακραυσταλλώνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η ανακραυστάλλωση οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων:

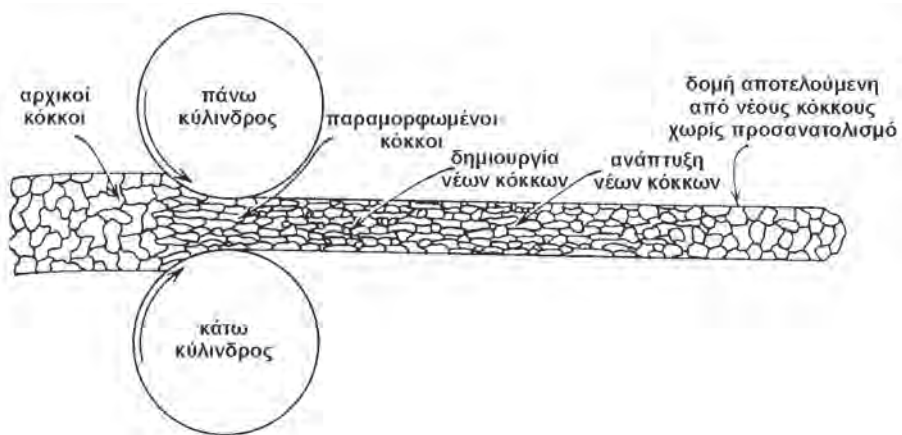
- Η σκληρότητα και το όριο διαρροής μειώνονται
- Η δυσθραυστότητα και η πλαστικότητα αυξάνονται

➡ **Στάδιο 3: Ανάπτυξη των κόκκων**

Είναι το επόμενο στάδιο της ανόπτησης, όταν ο χρόνος ή η θερμοκρασία υπερβούν τα όρια ανακραυστάλλωσης. Σε αυτή την περίπτωση οι κόκκοι του υλικού αναπτύσσονται γρήγορα και, αν η διάρκεια της ανόπτησης είναι ακόμα μεγαλύτερη, το υλικό που προκύπτει είναι εξαιρετικά χονδρόκοκκο και κατά συνέπεια εύθραυστο (υπέρμετρη ανάπτυξη των κόκκων).

3.11 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΝ ΘΕΡΜΩ

Οι εν θερμώ κατεργασίες λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία ανακραυστάλλωσης του μετάλλου ($0,5 T_m$) και έτσι οδηγούν σε δομές ανακραυστάλλωσης. Σχηματικά οι διάφορες ζώνες του μετάλλου κατά τη διάρκεια κατεργασίας εν θερμώ φαίνονται στο σχήμα 3.10. Οι περισσότερες βιομηχανικές κατεργασίες μορφοποίησης εξαρτημάτων ακριβείας και στοιχείων μηχανών (π.χ. από χάλυβα, ορείχαλκο, κ.λπ.) πραγμα-



Σχήμα 3.10: Σχηματική παράσταση της δομής του υλικού μετά από εν θερμώ πλαστική παραμόρφωση.

τοποιούνται σε υψηλή θερμοκρασία, διότι η ψυχρή διαμόρφωση γίνεται με μεγάλη δυσκολία λόγω της σκληρότητας του μετάλλου και μπορεί να προκαλέσει σημαντική ζημιά στο χρησιμοποιούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 3ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Οι βασικότερες μηχανικές δοκιμές των υλικών είναι οι ακόλουθες:
 - (α) δοκιμή εφελκυσμού και θλίψεως
 - (β) δοκιμή σκληρότητας
 - (γ) δοκιμή κρούσης
 - (δ) δοκιμή κόπωσης
 - (ε) δοκιμή ερπυσμού
- Σκληρότητα ενός υλικού, η αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στη διείσδυση ενός ξένου σώματος που πιέζεται στην επιφάνεια του υλικού με κατάλληλο τρόπο, και για ορισμένη χρονική διάρκεια. Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι σκληρομετρήσεως:

- ✓ Brinell
- ✓ Rockwell
- ✓ Vickers

- Η δυσθραυστότητα σχετίζεται με την ενέργεια που απορροφά ένα υλικό κατά τη θραύση και αποτελεί πολύ σημαντική ιδιότητα των υλικών. Ανάλογα με το ποσόν ενέργειας που δαπανάται κατά τη θραύση στα πλαίσια της δοκιμής της κρούσης, τα τεχνικά υλικά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

(α) όλκιμα υλικά και (β) ψαθυρά υλικά

- Κόπωση μπορεί να οριστεί ως η χαρακτηριστική χρονικά μεταβαλλόμενη καταπόνηση, που μπορεί μετά από κάποιο χρονικό διάστημα να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού (θραύση λόγω κόπωσης).
- Η πλαστική παραμόρφωση (ϵ) ενός υλικού ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης (σ), του χρόνου επιβολής της τάσης (t), καθώς και της θερμοκρασίας (T), ονομάζεται ερπυσμός. Πρακτικά, η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού αποκτά σημαντικές τιμές, σε υψηλές θερμοκρασίες και πιο συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της τιμής $0,4 T_m$ (T_m : το απόλυτο σημείο τήξεως του μετάλλου σε Kelvin).
- Η κατεργασιμότητα, ως ιδιότητα υλικών, είναι μία σύνθετη έννοια, η οποία ορίζεται ως η δυνατότητα (ευκολία ή δυσκολία) κατεργασίας που παρουσιάζει ένα υλικό (με χύτευση, διαμόρφωση, συγκόλληση, κοπή) προκειμένου από αυτό να κατασκευασθούν εξαρτήματα συγκεκριμένης γεωμετρίας.
- Μονοκρυσταλλός ή μονοκρυσταλλικό υλικό καλείται το υλικό εκείνο που αποτελείται από έναν μοναδικό κρύσταλλο ή κρυσταλλίτη. Ένα τέτοιο υλικό μπορεί να κατασκευασθεί με τεχνικές στις οποίες απαιτούνται χαμηλοί ρυθμοί θέρμανσης και απόψυξης.
- Όταν η τάση διατηρηθεί κάτω από μία κρίσιμη τιμή (όριο ελαστικότητας) επιφέρει ελαστικές παραμορφώσεις, όπου εξαλείφονται μετά από την απόσυρση της δύναμης. Η τάση που προκαλεί μία τέτοια αντιστρεπτή (ελαστική) παραμόρφωση ακολουθεί το Νόμο του Hooke.
- Στις κατεργασίες διαμόρφωσης σημαντικό ρόλο παίζει η πλαστική συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών. Η πλαστικότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να παραμορφωθεί μόνιμα κάτω από την επίδραση κάποιας τάσης. Η πλαστική παραμόρφωση σε επίπεδο κόκκου γίνεται με μηχανισμούς ολίσθησης κρυσταλλογραφικών επιπέδων. Η μετάδοση της παραμόρφωσης από κόκκο σε κόκκο δυσχεραίνεται λόγω της ύπαρξης

των συνόρων των κόκκων και της αλλαγής διεύθυνσης των αντιστοιχών επιπέδων ολίσθησης. Έτσι η παραμόρφωση που προκαλείται για μια συγκεκριμένη τιμή της τάσης είναι πολύ μικρότερη στην περίπτωση του πολυκρυσταλλικού υλικού απ' ό,τι στο μονοκρυσταλλικό υλικό. Το όριο διαρροής, και άρα και η μηχανική αντοχή, ενός πολυκρυσταλλικού υλικού είναι αρκετά μεγαλύτερη απ' ό,τι στο αντίστοιχο μονοκρυσταλλικό.

- Οι ψυχρές κατεργασίες ή κατεργασίες εν ψυχρώ πραγματοποιούνται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και αφορούν κυρίως κατεργασίες μαλακών μετάλλων, όπως π.χ. αλουμινίου, μολύβδου, κασσιτέρου. Η επίλυση των προβλημάτων που δημιουργούνται λόγω της εν ψυχρώ παραμόρφωσης και τα οποία δυσχεραίνουν την περαιτέρω κατεργασία, αλλά και τη λειτουργικότητα των υλικών πραγματοποιείται με κατάλληλη θερμική κατεργασία που ονομάζεται **ανόπτηση**. Ανάλογα με τη θερμοκρασία ανόπτησης παρατηρούνται διάφορα στάδια αναφορικά με τις μεταβολές στις ιδιότητες και στη δομή του υλικού:

Στάδιο 1: Αποκατάσταση ή απόταση

Στάδιο 2: Ανακρυστάλλωση

Στάδιο 3: Ανάπτυξη των κόκκων

- Οι εν θερμώ κατεργασίες λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του μετάλλου ($0,5 T_m$) και έτσι οδηγούν σε δομές ανακρυστάλλωσης. Οι περισσότερες βιομηχανικές κατεργασίες μορφοποίησης εξαρτημάτων ακριβείας και στοιχείων μηχανών (π.χ. από χάλυβα, ορείχαλκο, κλπ.) πραγματοποιούνται σε υψηλή θερμοκρασία, διότι η ψυχρή διαμόρφωση γίνεται με μεγάλη δυσκολία λόγω της σκληρότητας του μετάλλου και μπορεί να προκαλέσει σημαντική ζημιά στον χρησιμοποιούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό.



ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

❖ 1. Ράβδος από κράμα αλουμινίου υφίσταται σκληρομέτρηση σε τρία διαφορετικά σημεία επί της μίας της έδρας, με τη μέθοδο Brinell, χρησιμοποιώντας φορτίο $P = 62,5 \text{ kp}$ που επιδρά πάνω σε σφαιρικό διεισδυτή διαμέτρου $D = 2,5 \text{ mm}$. Η διάμετρος (d) των τριών αποτυπωμάτων, έπεται από μέτρηση με κατάλληλο μικροσκόπιο, λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές: $1,20 \text{ mm}$, $1,22 \text{ mm}$ και $1,19 \text{ mm}$.

(α) Να υπολογισθεί η σκληρότητα της ράβδου (σε HB ή kp/mm^2) που προκύπτει από το καθένα από τα τρία αποτυπώματα.

(β) Ποια είναι η μέση σκληρότητα της ράβδου αλουμινίου
(Απάντηση: (α) 52, 50 και 53 HB (β) 51,6 HB)

❖ 2. Η ελάχιστη απαιτούμενη σκληρότητα της επιφάνειας λεπίδας κοπτικού μαχαιριού είναι 750 HV . Η συγκεκριμένη λεπίδα κατασκευάζεται από χάλυβα, και προκειμένου να αποκτήσει τη σκληρότητα αυτή υφίσταται επιφανειακή σκλήρυνση. Έπειτα από 10000 ώρες λειτουργίας η επιφάνεια της λεπίδας υφίσταται σκληρομέτρηση Vickers προκειμένου να διαπιστωθεί εάν έχει υποστεί σημαντική φθορά. Μετά από κατάλληλη προεργασία πραγματοποιούνται δύο ενδεικτικές σκληρομετρήσεις με φορτίο 1 kp και προσδιορίζονται οι διαστάσεις των αποτυπωμάτων:

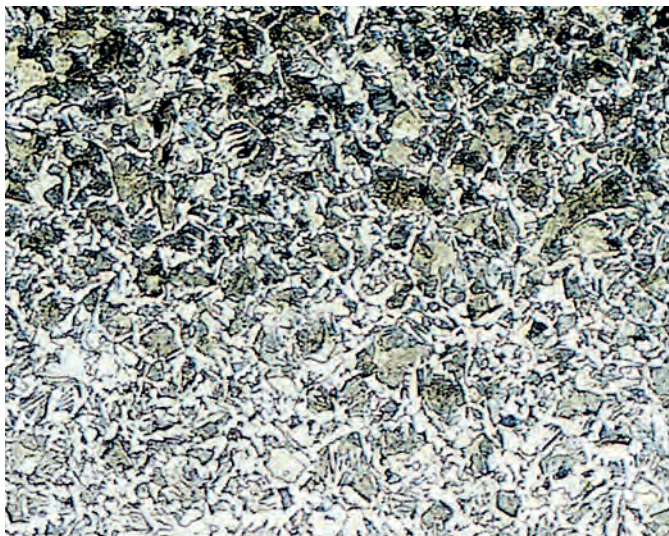
1η μέτρηση: $d_1 = 54 \text{ }\mu\text{m}$, $d_2 = 56 \text{ }\mu\text{m}$

2η μέτρηση: $d_1 = 57 \text{ }\mu\text{m}$, $d_2 = 59 \text{ }\mu\text{m}$

Με βάση τις τιμές της σκληρότητας που προκύπτουν από τις παραπάνω μετρήσεις, χρειάζεται ή όχι να πραγματοποιηθεί εκ νέου επιφανειακή σκλήρυνση προκειμένου να ανακτήσει η συγκεκριμένη λεπίδα την αρχική της σκληρότητα;

(Απάντηση: ναι, χρειάζεται)

Δομή υποευθηκτοειδούς χάλυβα



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4

ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ - ΑΝΘΡΑΚΑ

- 4.1 Διαγράμματα ισορροπίας των φάσεων
- 4.2 Το διμερές διάγραμμα φάσεων Fe-C
- 4.3 Βασικοί μετασχηματισμοί φάσεων στο διάγραμμα Fe-Fe₃C
- 4.4 Χυτοσίδηροι



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να κατανοήσετε την έννοια της ισορροπίας φάσεων
- ☒ Να μάθετε τα διάφορα είδη των διαγραμμάτων φάσεων
- ☒ Να αντλείτε πληροφορίες από τα διάγραμματα φάσεων, όπως για τη διαλυτότητα και τους μετασχηματισμούς φάσεων
- ☒ Να χρησιμοποιείτε τον κανόνα του μοχλού για τον προσδιορισμό των ποσοστών των φάσεων
- ☒ Να εξοικειωθείτε με τις φάσεις και τα συστατικά του διαγράμματος Fe-C
- ☒ Να μάθετε τους διάφορους μετασχηματισμούς φάσεων που αφορούν το διάγραμμα Fe-C
- ☒ Να μάθετε τα διάφορα είδη χυτοσιδήρων και τις εφαρμογές τους καθώς και να εντοπίζετε τις κυριότερες διαφορές ως προς τη δομή και τις ιδιότητές τους

4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ

Αν αφήσουμε ένα δοχείο γεμάτο με οινόπνευμα μέσα σε ένα δωμάτιο, θα παρατηρήσουμε μετά από λίγο ότι η στάθμη του οινόπνευματος έχει κατέβει σημαντικά. Η κάθοδος συνεχίζεται μέχρις ότου εξαντληθεί όλο το οινόπνευμα που υπάρχει στο δοχείο. Αν σκεπάσουμε αρχικά το δοχείο, τότε η στάθμη του οινόπνευματος θα κατέβει μέχρις ενός ορισμένου σημείου και από εκεί και έπειτα θα παραμείνει σταθερή. Στην πρώτη περίπτωση (“ανοιχτό” δοχείο), το οινόπνευμα εξατμίζεται και οι ατμοί του διασκορπίζονται στο δωμάτιο. Η εξάτμιση αυτή συνεχίζεται μέχρι να εξαντληθεί το οινόπνευμα που υπάρχει σε υγρή κατάσταση. Στη δεύτερη, όμως, περίπτωση (“κλειστό δοχείο”), η στάθμη του οινόπνευματος σε υγρή κατάσταση θα σταθεροποιείται. Το οινόπνευμα συνολικά εξατμίζεται μέχρις ενός ορι-

σμένου βαθμού, διότι οι ατμοί του δεν μπορούν να διασκορπισθούν στον περιβάλλοντα χώρο. Οι υπερκείμενοι του υγρού ατμοί βρίσκονται σε μία **δυναμική ισορροπία** με το υγρό: όσα μόρια αέριας φάσης συμπυκνώνονται (υγροποιούνται), τόσα μόρια υγρής φάσης εξατμίζονται στη μονάδα του χρόνου (δηλαδή οι ποσότητες της υγρής και της αέριας φάσης παραμένουν σταθερές). Το φυσικοχημικό αυτό φαινόμενο **καλείται ισορροπία φάσεων αερίου-υγρού**. Αντίστοιχα υπάρχει και **ισορροπία φάσεων υγρού-στερεού**, που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην εξέταση μεταλλικών συστημάτων και ιδιαίτερα των χαλύβων.

Τα διαγράμματα ισορροπίας των φάσεων ή απλούστερα διαγράμματα φάσεων είναι γραφικές παραστάσεις, που δείχνουν ποιες φάσεις είναι παρούσες σε ένα σύστημα, που αποτελείται από δυο ή παραπάνω στοιχεία, ανάλογα με τη χημική σύσταση, τη θερμοκρασία και την πίεση. Πρακτικά, η πίεση κάτω από την οποία εξετάζουμε τα διαγράμματα φάσεων είναι ίση με 1 atm. Τα διαγράμματα που θα εξετασθούν στη συνέχεια αφορούν συστήματα, αποτελούμενα από **δυο** χημικά στοιχεία, που ονομάζονται **διμερή διαγράμματα φάσεων**.

Τα διαγράμματα των φάσεων ισχύουν μόνο κάτω από προϋποθέσεις **ισορροπίας των φάσεων** σε κάθε χρονική στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι τόσο η ψύξη όσο και η θέρμανση, πρέπει να γίνονται **πολύ αργά**, ώστε να επιτυγχάνεται η ισορροπία των φάσεων. Όλοι οι μετασχηματισμοί φάσεων, που καταγράφονται στα διαγράμματα φάσεων, γίνονται επίσης πολύ αργά και η ταχύτητά τους αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ο κυρίαρχος μηχανισμός όλων αυτών των μετασχηματισμών είναι η **ατομική διάχυση**, δηλαδή η μετακίνηση των ατόμων σε αποστάσεις πολλαπλάσιες της διατομικής απόστασης με σκοπό την εξομάλυνση της χημικής σύστασης.

Οι πληροφορίες που μπορούν να εξαχθούν χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα φάσεων είναι οι ακόλουθες:

1. Το είδος των φάσεων που είναι παρούσες για ορισμένη θερμοκρασία και σύσταση σε κατάσταση ισορροπίας.
2. Η διαλυτότητα ενός στοιχείου σε ένα άλλο.
3. Η θερμοκρασία που αρχίζει η στερεοποίηση ενός τήγματος ή η τήξη ενός κράματος.

Περαιτέρω θα εξετασθούν τα δύο βασικότερα είδη διαγραμμάτων φάσεων:

- διάγραμμα πλήρους αναμειξιμότητας και
- ευτηκτικό διάγραμμα.

4.1.1 Διάγραμμα φάσεων πλήρους αναμειξιμότητας

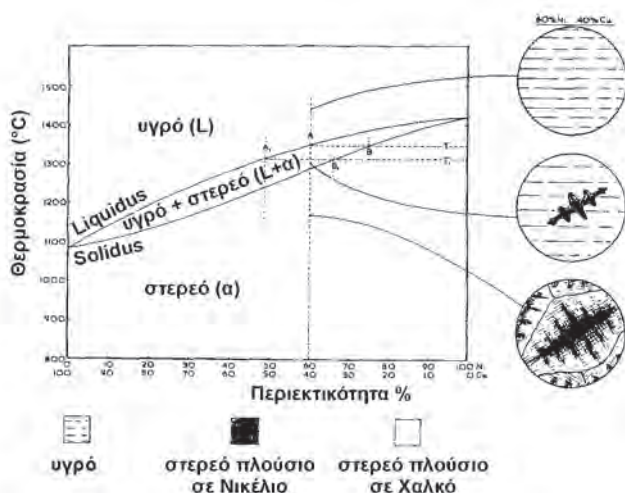
Σε μερικά διμερή μεταλλικά συστήματα παρουσιάζεται πλήρης αναμειξιμότητα (ή διαλυτότητα) τόσο στην υγρή, όσο και στη στερεά κατάσταση. Το διάγραμμα των φάσεων ενός τέτοιου συστήματος ονομάζεται **διάγραμμα φάσεων πλήρους αναμειξιμότητας** (π.χ. το διάγραμμα φάσεων Cu-Ni, σχήμα 4.1). Η μερική ή μη πλήρης αναμειξιμότητα σε στερεά κατάσταση, που θα μας απασχολήσει στην εξέταση των παρακάτω διαγραμμάτων φάσεων, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διακεκριμένων στερεών φάσεων. Η πλήρης αναμειξιμότητα δυο μεταλλικών στοιχείων Α και Β οδηγεί σε ομογενές κράμα σε ό,τι αφορά τη χημική σύσταση, την κρυσταλλική δομή και τις μηχανικές ιδιότητες.



*Η πλήρης αναμειξιμότητα ικανοποιείται, αν ικανοποιούνται και οι παρακάτω γνωστοί κανόνες (κανόνες **Hume-Rothery**)*

- 1. Η διαφορά των ακτινών των ατόμων δεν πρέπει να ξεπερνά το 15% (παράγοντας μεγέθους)*
- 2. Τα στοιχεία Α και Β πρέπει να παρουσιάζουν την ίδια κρυσταλλική δομή.*
- 3. Τα στοιχεία Α και Β πρέπει να έχουν ίδια σθένη.*
- 4. Τα στοιχεία Α και Β δεν πρέπει να έχουν μεγάλη διαφορά ηλεκτραρνητικότητας.*

Στο διάγραμμα φάσεων του σχήματος 4.1 υπάρχουν τρεις περιοχές φάσεων. Η περιοχή του τήγματος (L), η περιοχή του μείγματος του υγρού και του στερεού διαλύματος (L+α) και η περιοχή του στερεού διαλύματος (α). Σε κάθε διάγραμμα φάσεων η καμπύλη εκείνη, όπου το τήγμα αρχίζει να στερεοποιείται (πηρίζει), ονομάζεται **Liquidus** (ή αλλιώς η καμπύλη εκείνη, όπου το κράμα μετατρέπεται πλήρως σε υγρό) και η καμπύλη εκείνη, όπου το υγρό μετατρέπεται πλήρως σε στερεό, ονομάζεται **Solidus** (ή αλλιώς η καμπύλη εκείνη, όπου το κράμα αρχίζει να λιώνει).



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα φάσεων Cu-Ni. Στο διάγραμμα φαίνονται οι διαδοχικές φάσεις πήξης ενός κράματος 40% Cu - 60% Ni.

Κατά τη μελέτη των διαγραμμάτων φάσεων ανακύπτει το πρόβλημα της ευρέσεως του ποσοστού των υπαρχουσών φάσεων, όπως π.χ. όταν είμαστε μέσα στην ενδιάμεση διφασική περιοχή υγρού και στερεού, L+S (σχήμα 4.2α). Για να βρούμε το ποσοστό της υγρής και της στερεάς φάσης εργαζόμαστε ως εξής:

- Ανάλογα με τη θερμοκρασία (T) στην οποία θα μας ζητηθεί να βρούμε τα ποσοστά των φάσεων για μια ορισμένη χημική σύσταση (w_0), φέρουμε τη **γραμμή συνδέσεως**, που ενώνει το δεδομένο σημείο O με τις καμπύλες-όρια των καθαρών φάσεων LOS (σχήμα 4.2α).
- Η τομή της LOS με τις εν λόγω καμπύλες δίνει τις **χημικές συστάσεις των φάσεων** (% κ.β. σε B) που ισορροπούν (w_l , w_s).
- Εφαρμόζουμε τους τύπους:

$$B_s (\%) = 100 \cdot (w_0 - w_l) / (w_s - w_l) = 100 \cdot (LO)/(LS) \quad (4.1)$$

$$B_l (\%) = 100 \cdot (w_s - w_0) / (w_s - w_l) = 100 \cdot (OS)/(LS) = 100 - B_s \quad (4.2)$$

Τα B_s , B_l είναι τα ποσοστά της στερεής (s) και υγρής φάσης (l) αντίστοιχα και είναι γνωστά ως βάρη των φάσεων. Οι παραπάνω μαθηματικοί τύποι εξεύρεσης των διαφόρων φάσεων αποτελούν τον **κανόνα του μοχλού** (σχήμα 4.2α). Η ισορροπία φάσεων “ισοδυναμεί” με την ισορροπία της ράβδου LOS στο σημείο O και εφόσον ασκούνται στα άκρα της L και

Σ οι δυνάμεις B_s , B_l . Οι σχέσεις (4.1), (4.2) προκύπτουν με την εφαρμογή της εξίσωσης των ροπών των παραπάνω δυνάμεων:

$$B_s (OS) = B_l (LO) \text{ και } B_s + B_l = 100 \Rightarrow B_s / B_l = (OL)/(OS)$$

και σύμφωνα με τις ιδιότητες των αναλογιών προσθέτουμε τον αριθμητή στον παρονομαστή:

$$B_s / (B_l + B_s) = (OL) / (OS + OL) \text{ δηλαδή } B_s = 100 (OL)/(LS) \text{ και} \\ B_l = 100 - B_s = 100 (OS)/(LS)$$

□ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.1

Ένα κράμα Cu-Ni περιέχει 47% Cu και 53% Ni και βρίσκεται σε θερμοκρασία 1300°C (σχήμα 4.2β).

- (i) Ποιες οι φάσεις που περιέχονται στο κράμα και ποια η χημική τους σύσταση ;
- (ii) Ποια τα ποσοστά των φάσεων (βάρη των φάσεων) ;

Λύση

(i) Από το διάγραμμα φάσεων Cu-Ni του σχήματος 4.2β βρίσκουμε το σημείο O το οποίο αντιστοιχεί στη χημική σύσταση (53% Ni) και στη θερμοκρασία (1300°C). Βλέπουμε πως το O βρίσκεται μέσα στη διφασική περιοχή L+α, το οποίο σημαίνει ότι το συγκεκριμένο κράμα περιέχει σε αυτή τη θερμοκρασία δύο φάσεις:

την **υγρή φάση (L)** και τη **στερεή φάση (α)**.

Κατόπιν φέρουμε την ευθεία του μοχλού (οριζόντια γραμμή, παράλληλη στον άξονα της περιεκτικότητας), η οποία τέμνει τη liquidus και τη solidus στα σημεία A, B αντίστοιχα. Η περιεκτικότητα (σε % Ni) των σημείων A και B είναι η περιεκτικότητα (σε % Ni) της υγρής και στερεής φάσης αντίστοιχα. Άρα:

$$(\%Ni)_A = (\%Ni)_{\text{υγρής φάσης}} = 45 \text{ και}$$

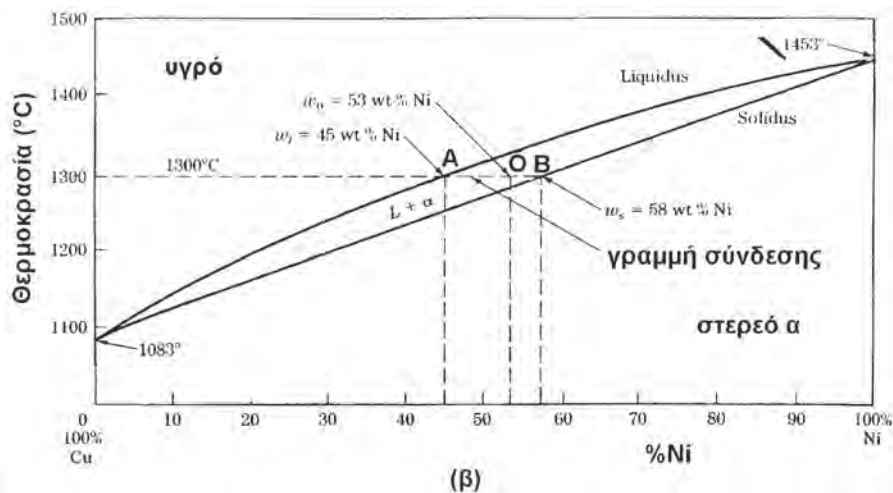
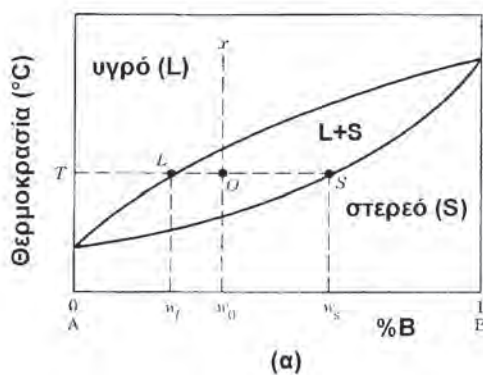
$$(\%Ni)_B = (\%Ni)_{\text{στερεής φάσης}} = 58$$

- (ii) Εφαρμόζουμε τον κανόνα του μοχλού στην ευθεία AOB:

$$B_l = 100 (OB)/(AB) = 100 \cdot (58-53)/(58-45) = 38 \% \text{ και } B_s = 100 - 38 = 62\%$$



Σημείωση: Τα τμήματα OB , AB κ.λπ. μπορούν να μετρηθούν και με τη βοήθεια κανόνα χωρίς να αλλάξει η αναλογία.



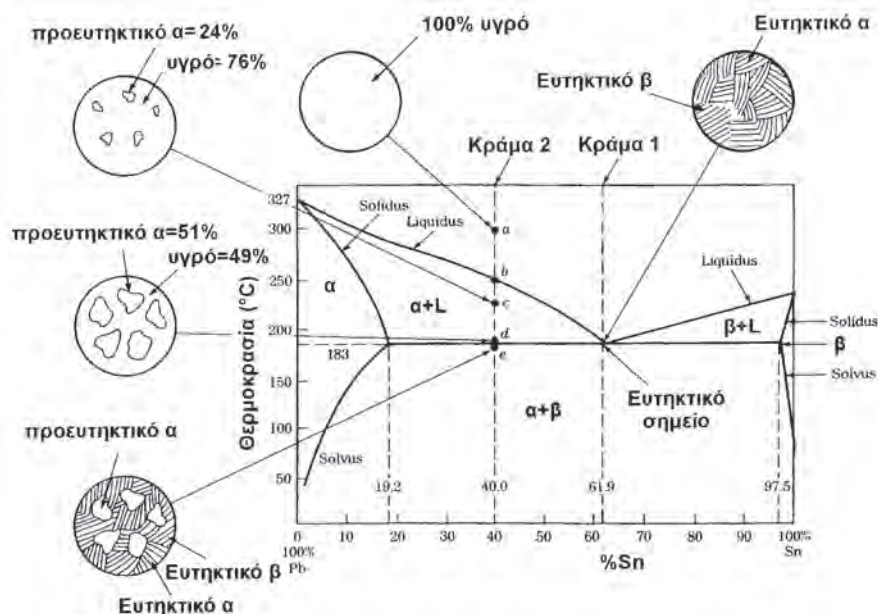
Σχήμα 4.2: (α) Διάγραμμα πλήρους αναμειξιμότητας δυο μετάλλων A και B και σχηματική παράσταση του κανόνα του μοχλού. (β) Διάγραμμα φάσεων Cu-Ni (βλ. Παράδειγμα 4.1).

4.1.2 Ευτηκτικό διάγραμμα φάσεων

Η πλήρης αναμειξιμότητα ή διαλυτότητα είναι η ιδανική περίπτωση στην τεχνολογία των μετάλλων, διότι αυτό συνεπάγεται ότι οποιαδήποτε αναλογία οδηγεί στην παρασκευή κράματος με ομογενή χαρακτηριστικά (χημική σύσταση, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες).

Πολλά διμερή συστήματα αποτελούνται από χημικά στοιχεία, που έχουν περιορισμένη διαλυτότητα το ένα στο άλλο, όπως π.χ. το σύστημα Pb-Sn (μόλυβδος-κασσίτερος). Οι περιοχές διαλυτότητας στο διάγραμμα φάσεων Pb-Sn (σχήμα 4.3) οριοθετούνται από τις ακραίες φάσεις α και β , που στην προκειμένη περίπτωση ονομάζονται **ακραία στερεά διαλύματα**. Η α φάση είναι το εμπλουτισμένο σε μόλυβδο στερεό διάλυμα με μέγιστη διαλυτότητα σε κασσίτερο 19,2% κ.β. στους 183°C. Η β φάση είναι το εμπλουτισμένο σε κασσίτερο στερεό διάλυμα και μπορεί να διαλύσει μόλυβδο έως 2,5% κ.β. στους 183°C. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται κάτω από τους 183°C, η αμοιβαία διαλυτότητα των στοιχείων ελαττώνεται επίσης και καθορίζεται από τις καμπύλες **Solvus** (σχήμα 4.3). Οι καμπύλες solvus δείχνουν τη μεταβολή της διαλυτότητας του ενός στοιχείου, μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του άλλου στοιχείου, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

Σε ευτηκτικό σύστημα, όπως αυτό του κατωτέρω σχήματος, υπάρχει μια συγκεκριμένη σύσταση κράματος, η οποία ονομάζεται **ευτηκτική ανα-**



Σχήμα 4.3: Διμερές ευτηκτικό διάγραμμα φάσεων Pb-Sn.

λογία, και έχει το εξής χαρακτηριστικό: **ένα κράμα με ευτηκτική σύσταση λιώνει στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία, η οποία ονομάζεται ευτηκτική θερμοκρασία**. Γι' αυτό το λόγο τα συστήματα αυτά ονομάστηκαν ευτηκτικά (*ευ-τήκω*), που σημαίνει ότι λιώνουν εύκολα. Το σημείο του διαγράμματος φάσεων που αντιστοιχεί στην ευτηκτική θερμοκρασία και σύσταση, ονομάζεται **ευτηκτικό σημείο**.

Εστω τήγμα (L) με χημική σύσταση ίση με την ευτηκτική (61,9 % κ.β. Sn). Κατά την αργή απόψυξή του, όταν φθάσει στην ευτηκτική θερμοκρασία (183°C), θα στερεοποιηθεί, αποβάλλοντας ταυτόχρονα κρυστάλλους α και β φάσεων. Πραγματοποιείται, δηλαδή, ο παρακάτω εξώθερμος μετασχηματισμός, που ονομάζεται **ευτηκτικός μετασχηματισμός** (αντίδραση):



Οι φάσεις α και β έχουν χημικές συστάσεις σε Sn 19,2% και 97,5% κ.β. αντίστοιχα. Επίσης, πρέπει να τονισθεί ότι η απόψυξη γίνεται **πολύ αργά**, ώστε οι φάσεις σε κάθε χρονική στιγμή να βρίσκονται σε **ισορροπία**. Στην ευτηκτική θερμοκρασία (183°C) οι φάσεις που ισορροπούν είναι τρεις (L, α, β), με αποτέλεσμα το ευτηκτικό σημείο να είναι σημείο **τριφασικής ισορροπίας**.



Σχήμα 4.4: Μορφή φυλλοειδούς ευτηκτικού (μεγέθυνση X2000)

Στην περίπτωση που, στο διάγραμμα του σχήματος 4.3, η υγρή φάση (L) αντικατασταθεί από μια στερεά (γ), τότε το διάγραμμα ονομάζεται **ευτηκτοειδές**. Σε αυτή την περίπτωση ισχύουν όλα τα ανωτέρω με τη μόνη διαφορά ότι αντί για φάση L υπάρχει στερεά φάση γ. Η χαρακτηριστική θερμοκρασία και σύσταση ονομάζονται ευτηκτοειδείς. Το ευτηκτοειδές μείγμα (α+β) σχηματίζεται κατά την αργή απόψυξη ευτηκτοειδούς γ μέσω



Απόψυξη ευτηκτικού τήγματος. Σε αυτή την περίπτωση το υγρό στερεοποιείται στην ευτηκτική θερμοκρασία, κατά την αντίδραση (4.3), αποβάλλοντας ταυτόχρονα τις φάσεις α και β. Οι φάσεις αυτές συνυπάρχουν σε κάθε μεμονωμένο κόκκο του κράματος, με αποτέλεσμα οι δημιουργούμενοι από τη στερεοποίηση κόκκοι να έχουν φυλλοειδή ή πλακοειδή μορφή (σχήμα 4.3, 4.4). Η αναλογία (τα ποσοστά) των φάσεων στους κόκκους του υλικού υπολογίζεται με βάση τον κανόνα του μοχλού.

Απόψυξη υποευτηκτικού τήγματος 40% Sn. Σε αυτή την περίπτωση το υγρό αρχίζει να στερεοποιείται σε υψηλότερη θερμοκρασία, η οποία προσδιορίζεται με την τομή της κατακόρυφης γραμμής abcde με την καμπύλη Liquidus. Το στερεό που δημιουργείται είναι η φάση α και, επειδή αποβάλλεται πριν φθάσουμε στην ευτηκτική θερμοκρασία, ονομάζεται **πρωτογενές ή προευτηκτικό α**. Η σύσταση του προευτηκτικού α δίδεται από τη Solidus, ενώ του υπόλοιπου υγρού από τη Liquidus. Στο σημείο e (ευτηκτική θερμοκρασία) το εναπομένον υγρό, το οποίο είναι ευτηκτικής σύστασης, στερεοποιείται με βάση την ευτηκτική αντίδραση (4.3), δίνοντας **ευτηκτικό α και β**. Άρα, τελικά το κράμα θα αποτελείται από ευτηκτικούς κόκκους (ευτηκτικό μείγμα α+β) και προευτηκτικούς α κόκκους. Αυτή θα είναι και η κατανομή των φάσεων α και β στην τελική μικροδομή (σχήμα 4.3).

Απόψυξη υπereυτηκτικού τήγματος 70% Sn. Ανάλογα, σε αυτή την περίπτωση η έναρξη της στερεοποίησης του υγρού θα δώσει προευτηκτικό β και τελικά το δημιουργούμενο κράμα θα αποτελείται από ευτηκτικούς κόκκους και προευτηκτικούς β κόκκους.

του ακόλουθου μετασχηματισμού φάσεων:



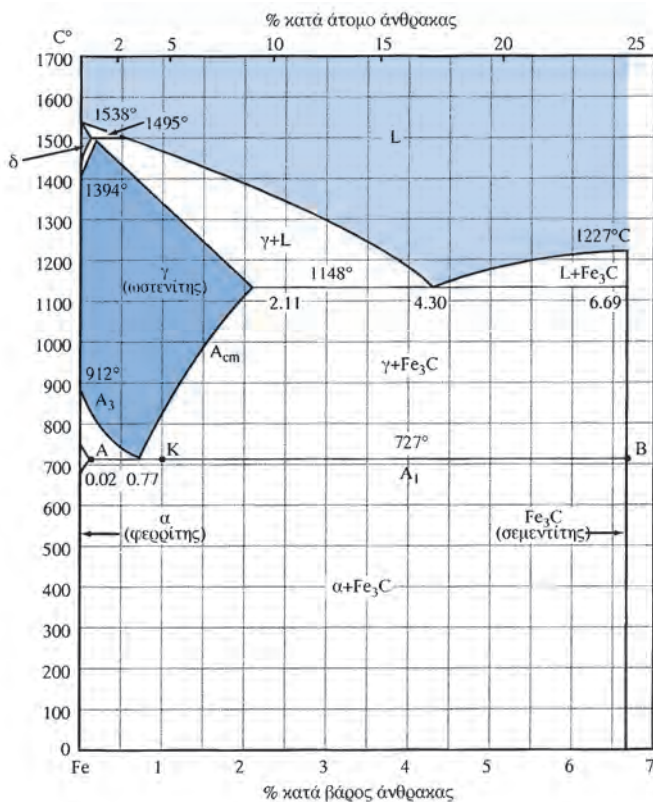
4.2 ΤΟ ΔΙΜΕΡΕΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ Fe-C.

Το διάγραμμα φάσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5. Πρακτικά, το διάγραμμα αυτό παρουσιάζει τεχνολογικό ενδιαφέρον για περιεκτικότητα σε C μέχρι 6,7%. Η σύσταση αυτή (6,7% C) αντιστοιχεί σε μια μεσομεταλλική (χημική) ένωση που ονομάζεται **σεμεντίτης** (ή καρβίδιο του σιδήρου) και έχει χημικό τύπο: **Fe₃C**. Γι' αυτό και πολλές φορές το εν λόγω διάγραμμα των φάσεων ονομάζεται και διάγραμμα Fe-Fe₃C ή μετασταθές διάγραμμα Fe-C.

Στο διάγραμμα φάσεων του σχήματος 4.5 φαίνονται τρεις περιοχές τε-

χνικών κραμάτων Fe-C με μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον:

- **σίδηροι**, με ποσοστό άνθρακα από 0-0,02%
- **χάλυβες**, με ποσοστό άνθρακα από 0,02-2%
- **χυτοσίδηροι**, με ποσοστό άνθρακα από 2-5%



Σχήμα 4.5: Το διμερές διάγραμμα φάσεων Fe-C.

Από το διάγραμμα φάσεων φαίνονται τέσσερις διαφορετικές στερεές φάσεις: **α-φερρίτης** ή απλώς **φερρίτης**, **ωστενίτης (γ)**, **σεμεντίτης (Fe₃C)** και **δ-φερρίτης**.

Φερρίτης (α): η φάση αυτή είναι στερεό διάλυμα παρεμβολής του α-Fe και είναι κρυσταλλωμένη στο κυβικό χωροκεντρωμένο σύστημα (κ.χ.), με διαλυμένο άνθρακα σε θέσεις παρεμβολής, σε ποσοστό μέχρι 0,02% στους 727°C. Η διαλυτότητα του C στον α-Fe μειώνεται στο 0,008% στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η σκληρό-

- Ωστενίτης (γ):** τητά του κυμαίνεται από 70-200 HV. πρόκειται για στερεό διάλυμα παρεμβολής του γ -Fe, που κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα (κ.ε.), με διαλυμένο άνθρακα σε πολύ μεγαλύτερα ποσοστά από ό,τι στο φερρίτη. Συγκεκριμένα, η περιεκτικότητα σε C του ωστενίτη μπορεί να φθάσει έως και 2,1% στους 1148°C.
- Σεμεντίτης (Fe_3C):** πρόκειται για μεσομεταλλική ένωση παρεμβολής. Το κρυσταλλικό του πλέγμα είναι ορθορομβικό, βασικεντρωμένο και η σύσταση σε C είναι απόλυτα καθορισμένη σε ποσοστό ίσον προς 6,7% κ.β. (25% κατά άτομο). Όπως οι περισσότερες μεσομεταλλικές ενώσεις, έτσι και το καρβίδιο του σιδήρου (σεμεντίτης) είναι ένωση πολύ σκληρή και εύθραυστη. Η σκληρότητά του κυμαίνεται από 850-1100 HV.
- δ-Φερρίτης:** πρόκειται για στερεό διάλυμα παρεμβολής του δ -Fe, που κρυσταλλώνεται στο χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (κ.χ.), με διαλυμένο C έως περίπου 0,09% στους 1495°C. Η διαλυτότητα του C στο δ -Fe είναι μεγαλύτερη από ό,τι στον α -Fe, λόγω της διαστολής της μοναδιαίας κυψελίδας που παρουσιάζεται με την άνοδο της θερμοκρασίας.

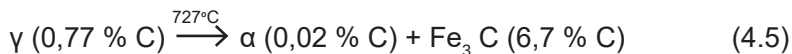
4.3 ΒΑΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΦΑΣΕΩΝ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Fe-Fe₃C

Οι βασικοί μετασχηματισμοί φάσεων που παρουσιάζουν ιδιαίτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον είναι:

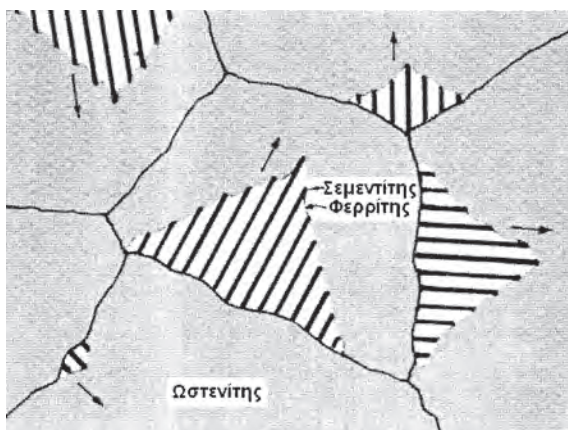
- ευτηκτοειδής μετασχηματισμός και
- ευτηκτικός μετασχηματισμός

4.3.2 Ευτηκτοειδής μετασχηματισμός

Ο μετασχηματισμός αυτός είναι ο μεγαλύτερης σημασίας στην περίπτωση της μελέτης των χαλύβων. Είναι ο μετασχηματισμός του ωστενίτη (0,77% C) σε φερρίτη (0,02% C) και σεμεντίτη (6,7% C), σε θερμοκρασία 727°C. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται **κάτω κρίσιμη θερμοκρασία** (A_1). Η αντίδραση αυτή παρίσταται ως εξής:



Όπως φαίνεται, η ανωτέρω αντίδραση, σε αντίθεση με τις προηγούμενες που εξετάστηκαν, λαμβάνει χώρα σε στερεή κατάσταση. Το μείγμα φερρίτη-σεμεντίτη, που παράγεται με βάση την ευτηκτοειδή αντίδραση, ονομάζεται **περλίτης** (σκληρότητα: 250-350 HV). Η ανάπτυξη του περλίτη, κατά την ψύξη, ξεκινά από τα σύνορα των κόκκων του ωστενίτη και εξελίσσεται με τη μορφή παράλληλων πλακών φερρίτη και σεμεντίτη μέχρις ότου διασπασθεί το 100% του ωστενίτη. Ο μηχανισμός ανάπτυξης φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 4.6. Ένας χάλυβας με σύσταση ίση προς 0,77% C λέγεται **ευτηκτοειδής χάλυβας** (διότι έχει σύσταση ίση με την ευτηκτοειδή) και αποτελείται από περλιτικούς κόκκους, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7α. Τα στάδια αλλαγής φάσεων κατά την απόψυξη ευτηκτοειδούς χάλυβα φαίνονται στο σχήμα 4.7α.



Σχήμα 4.6: Μηχανισμός ανάπτυξης του περλίτη

Ένας χάλυβας με σύσταση μικρότερη από την ευτηκτοειδή (<0.77% C) λέγεται **υποευτηκτοειδής χάλυβας**. Κατά την αργή απόψυξη ενός τέτοιου χάλυβα, ο ωστενίτης δε διατηρείται σταθερός μέχρι τους 727°C, αλλά ένα ποσοστό του διασπάται σε φερρίτη (α) κατά το πέρασμα στη διφασική περιοχή α+γ (σχήμα 4.7β). Ο φερρίτης αυτός, ο οποίος προέρχεται από τη μερική διάσπαση του ωστενίτη, πριν από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία, ονομάζεται **προευτηκτοειδής φερρίτης**. Όταν κατά την ψύξη φθάσουμε στην ευτηκτοειδή θερμοκρασία (727°C), ο εναπομένον ωστενίτης μετατρέπεται, σύμφωνα με την ευτηκτοειδή αντίδραση, σε περλίτη (ευτηκτο-

ειδές μείγμα φερρίτη και σεμεντίτη). Άρα ένας υποευτηκτοειδής χάλυβας αποτελείται από **προευτηκτοειδή φερρίτη** και **περλίτη** (σχήμα 4.7β). Η θερμοκρασία στην οποία ξεκινά η διάσπαση του ωστενίτη σε φερρίτη ονομάζεται **άνω κρίσιμη θερμοκρασία** (A_3). Όταν η σύσταση ενός χάλυβα σε άνθρακα είναι μεγαλύτερη από την ευτηκτοειδή ($>0,77\% \text{ C}$), τότε ο χάλυβας ονομάζεται **υπερευτηκτοειδής**. Κατά την αργή απόψυξη ενός τέτοιου χάλυβα και πάλι ο ωστενίτης δε διατηρείται σταθερός μέχρι τους 727°C , καθώς περνάμε κατά την ψύξη στη διφασική περιοχή $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ (σχήμα 4.7(γ)). Έτσι, ένα μέρος του αρχικού ωστενίτη θα διασπασθεί σε σεμεντίτη. Η μερική διάσπαση του ωστενίτη σε σεμεντίτη ξεκινά κάτω από τη **θερμοκρασία A_{cm}** . Ο σεμεντίτης αυτός, επειδή σχηματίζεται πριν από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία, ονομάζεται **προευτηκτοειδής σεμεντίτης**. Ο προευτηκτοειδής σεμεντίτης σχηματίζεται γύρω από τα όρια των κόκκων του ωστενίτη κατά την ψύξη. Ο εναπομείνας ωστενίτης διασπάται, όταν φθάσουμε στην ευτηκτοειδή θερμοκρασία, σε περλίτη. Επομένως, ένας υπερευτηκτοειδής χάλυβας αποτελείται από κόκκους περλίτη, στα όρια των οποίων υπάρχει προευτηκτοειδής σεμεντίτης (σχήμα 4.7γ).

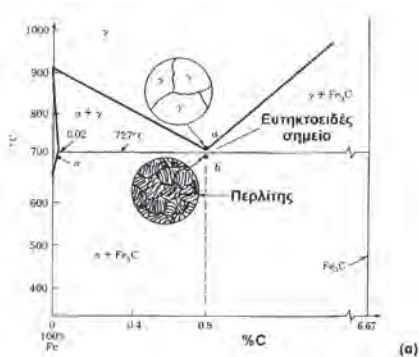
Για να βρεθεί το ποσοστό του περλίτη και της προευτηκτοειδούς φάσεως (φερρίτη ή σεμεντίτη), εφαρμόζεται ο κανόνας του μοχλού, μεταξύ της κατακόρυφης γραμμής που διέρχεται από την ευτηκτοειδή σύσταση ($0,77\% \text{ C}$) και της τομής της με την αντίστοιχη καμπύλη Solvus της ακραίας (προευτηκτοειδούς) φάσης (α ή Fe_3C).

Οι χάλυβες που περιέχουν, εκτός από άνθρακα, μικρά ποσοστά Mn (έως 1%) και πολύ χαμηλά ποσοστά S και P ($<0,05\%$) ονομάζονται **κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες** ή απλώς **ανθρακούχοι χάλυβες**. Στην περίπτωση που περιέχουν και άλλες προσμίξεις, με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους, ονομάζονται **κραματωμένοι χάλυβες**.

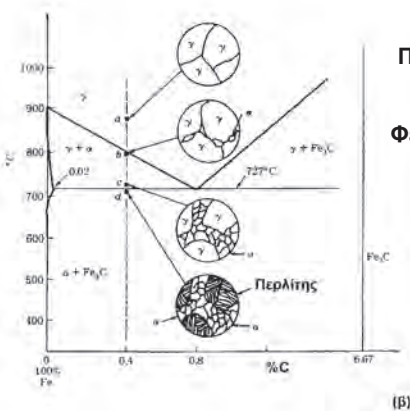
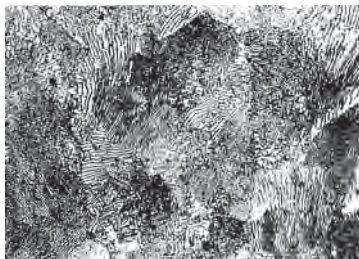
Άρα, συμπερασματικά οι ανθρακούχοι χάλυβες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- υποευτηκτοειδείς, $\text{C} < 0,77\%$
- ευτηκτοειδείς, $\text{C} = 0,77\%$ και
- υπερευτηκτοειδείς, $\text{C} > 0,77\%$

Οι κραματωμένοι χάλυβες θα εξετασθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

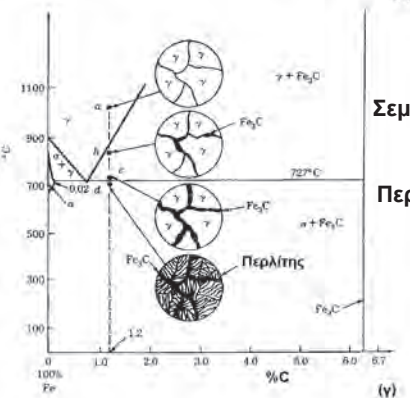
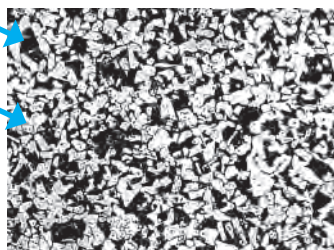


Περλίτης



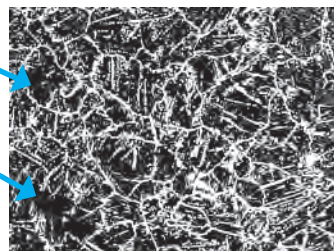
Περλίτης

Φερρίτης



Σεμεντίτης

Περλίτης



Σχήμα 4.7: (α) Απόψυξη χάλυβα ευτηκτοειδούς σύστασης - δομή ευτηκτοειδούς χάλυβα (κόκκοι περλίτη), X500 (β) απόψυξη χάλυβα υποευτηκτοειδούς σύστασης - δομή υποευτηκτοειδούς χάλυβα (κόκκοι φερρίτη και περλίτη), X250 και (γ) απόψυξη υπereυτηκτοειδούς χάλυβα - δομή υπereυτηκτοειδούς χάλυβα (σεμεντίτης στα όρια των κόκκων του περλίτη και κόκκοι περλίτη), X250.

□ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.2

Να προσδιορισθούν οι φάσεις και να υπολογισθούν τα ποσοστά τους σε ένα ανθρακούχο χάλυβα περιεκτικότητας 1,0 % C.

Λύση

Οι φάσεις που περιέχει ένας τέτοιος χάλυβας σε θερμοκρασία μικρότερη των 727°C είναι οι εξής δύο, όπως φαίνεται από το διάγραμμα φάσεων Fe-C (σχήμα 4.5): **φερρίτης (α)** και **σεμεντίτης (Fe₃C)**.

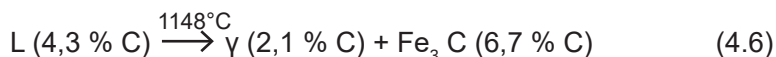
Τα ποσοστά των φάσεων υπολογίζονται με βάση τον κανόνα του μοχλού. (**Σημείωση:** Η εφαρμογή του κανόνα του μοχλού μπορεί να γίνει επί του οριζόντιου άξονα των συστάσεων χωρίς σημαντική αλλοίωση της ακριβείας). Έτσι, έχουμε λοιπόν:

$$B_{\text{φερ}} = 100 (KB)/(AB) = 100 (6.7-1)/(6.7-0.02) = 85 \% \text{ και}$$

$$B_{\text{σεμ}} = 100 - 85 = 15\%$$

4.3.1 Ευτηκτικός μετασχηματισμός

Ο μετασχηματισμός αυτός λαμβάνει χώρα στους 1148°C και αφορά τη στερεοποίηση υγρού 4,3% C, με ταυτόχρονη αποβολή δυο διαφορετικών φάσεων, του ωστενίτη (γ) και του σεμεντίτη (Fe₃C). Το μείγμα αυτό των φάσεων, που προκύπτει κατά τη στερεοποίηση υγρού 4,3% C, ονομάζεται **λεδεμβουρίτης** ή **λεδεμβουριτικό ευτηκτικό**. Η ευτηκτική αντίδραση παρουσιάζεται ακολούθως:



Ο ωστενίτης, που εμπεριέχεται μέσα στο λεδεμβουρίτη (=γ+σεμεντίτης), μετασχηματίζεται, κατά την αργή απόψυξη σε θερμοκρασία μικρότερη της ευτηκτοειδούς (A₁=727°C), σε περλίτη (ευτηκτοειδής μετασχηματισμός). Η συνολική μικρογραφική δομή, περλίτης και σεμεντίτης, που αποτελεί τους κρυστάλλους του πρώην λεδεμβουρίτη ονομάζεται **λεδεμβουριτική μορφή**. Ο ευτηκτικός μετασχηματισμός (ή ευτηκτική αντίδραση) έχει μεγάλη σημασία στη μελέτη των χυτοσιδήρων.

4.4 ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΙ

Οι χυτοσίδηροι είναι κράματα σιδήρου με άνθρακα σε ποσοστό 2-5%. Επίσης, περιέχουν κι άλλες προσμείξεις όπως πυρίτιο (Si), θείο (S) και φωσφόρο (P). Τα βασικά είδη χυτοσιδήρων είναι τα ακόλουθα:

- λευκός χυτοσίδηρος
- φαιός χυτοσίδηρος
- μαλακτός χυτοσίδηρος και
- χυτοσίδηρος σφαιροειδούς γραφίτη
- κραματωμένος χυτοσίδηρος

4.4.1 Λευκός χυτοσίδηρος.

Κατασκευάζεται απευθείας με χύτευση και περιέχει $Si < 0,7\%$ συνήθως. Η δομή του λευκού χυτοσιδήρου ποικίλλει ανάλογα με τη χημική του σύσταση:

(i) Υποευτηκτικός λευκός χυτοσίδηρος ($2 < C < 4,3\%$).

Η δομή του αποτελείται από περλίτη και λεδεμβουριτική μορφή.

(ii) Ευτηκτικός λευκός χυτοσίδηρος ($C = 4,3\%$).

Η δομή του αποτελείται εξ ολοκλήρου από λεδεμβουριτική μορφή.

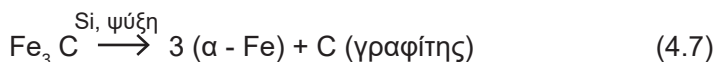
(iii) Υπερευτηκτικός λευκός χυτοσίδηρος ($C > 4,3\%$).

Περιέχει προευτηκτικό σεμεντίτη και λεδεμβουριτική μορφή.

Χαρακτηριστική μορφολογία υπereυτηκτικού λευκού χυτοσιδήρου φαίνεται στο σχήμα 4.8α. Οι λευκοί χυτοσίδηροι λαμβάνονται απευθείας από την υψικάμνο με σχετικά ταχεία απόψυξη. Οι λευκοί χυτοσίδηροι παρουσιάζουν μικρή κατεργασιμότητα κατά την κοπή ή/και τη λείανση. Η αντιπριβικότητα του λευκού χυτοσιδήρου είναι πολύ μεγάλη λόγω της υπάρξεως των καρβιδίων του σιδήρου (σεμεντίτη). Χρησιμοποιείται στην κατασκευή κυλίνδρων και σωμάτων ελάστρων, καθώς και εξαρτημάτων θραυστήρων και μύλων άλεσης.

4.4.2 Γκρίζος ή φαιός χυτοσίδηρος

Ο γκρίζος χυτοσίδηρος κατασκευάζεται και αυτός με χύτευση, αλλά το ποσοστό σε άνθρακα μπορεί να φθάνει στα επίπεδα του 4%, και του πυριτίου (Si) γύρω στα 3-4% (πάνω από 1%). Η ταχύτητα στερεοποίησης, που καθορίζεται από την ταχύτητα ψύξης, είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή του λευκού χυτοσιδήρου. Η δομή του αποτελείται από “φυλλίδια” γραφίτη μέσα σε φερρίτη ή σε περλίτη ή συννηθέστερα σε μείγμα φερρίτη-περλίτη (σχήμα 4.8β). Ο γραφίτης είναι μία μαλακή φάση, η οποία αποτελεί κρυσταλλική δομή του άνθρακα (εξαγωνική) και λόγω της “αιχμηρής” μορφής με την οποία κρυσταλλώνεται (**φυλλίδια**) ψαθυροποιεί το χυτοσίδηρο. Η ύπαρξη του πυριτίου, καθώς και η μικρή σχετικά ταχύτητα ψύξης, ευνοούν την αντίδραση της γραφίτισης του σεμεντίτη:



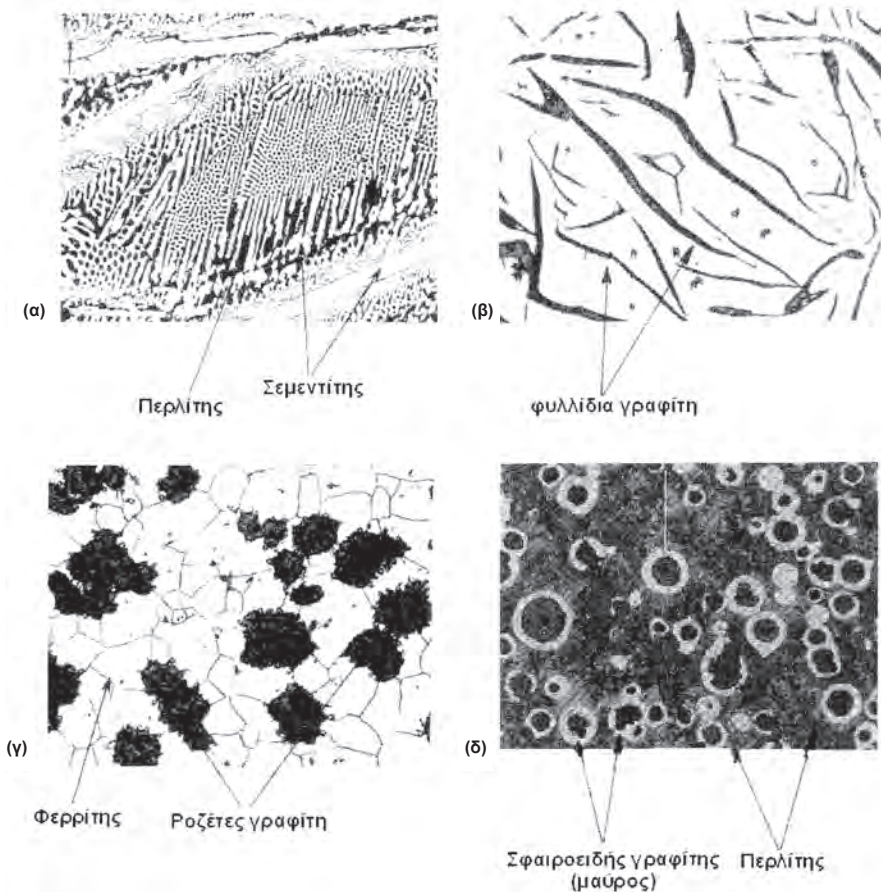
Ο φαιός χυτοσίδηρος έχει μεγάλη αντοχή στην τριβή, καλή κατεργασιμότητα στην κοπή, αλλά και μικρή δυσθραυστότητα, λόγω της ύπαρξης φυλλιδίων γραφίτη. Ο φαιός χυτοσίδηρος χαρακτηρίζεται από καλή ευχυτότητα (ρευστότητα) βάσει της οποίας κατασκευάζονται εξαρτήματα και κατασκευές πολύπλοκης γεωμετρίας. Χρησιμοποιείται στη βιομηχανία για την κατασκευή κεφαλών κυλίνδρων, πλακιδίων συμπλέκτη, βαρέων κιβωτίων ταχυτήτων, εμβόλων, εδράνων και ολισθητήρων εργαλειομηχανών.

4.4.3 Μαλακτός χυτοσίδηρος

Ο μαλακτός χυτοσίδηρος κατασκευάζεται από το λευκό χυτοσίδηρο με κατάλληλη θερμική κατεργασία (μαλακτοποίηση), όταν το ποσοστό σε Si είναι γύρω στο 1%. Η θερμική κατεργασία γίνεται σε θερμοκρασία 850-950°C και για μεγάλο χρονικό διάστημα, που κυμαίνεται από 10-100 ώρες, ώστε να διασπαστεί ο σεμεντίτης και να μετατραπεί σε γραφίτη και ωστενίτη. Ο γραφίτης στο μαλακό χυτοσίδηρο κρυσταλλώνεται με τη μορφή ασύμμετρου στρογγυλού συσσωματώματος, που καλείται **ροζέτα**. Μετά από αργή ψύξη, που ακολουθεί η δομή του μαλακού χυτοσιδήρου, καταλήγει να αποτελείται συνήθως από ροζέτες γραφίτη μέσα σε μήτρα φερρίτη ή φερρίτη-περλίτη. Ο μαλακτός χυτοσίδηρος, λόγω της δομής του, (σχήμα 4.8γ), παρουσιάζει καλή ευχυτότητα, καλή κατεργασιμότητα, μέτρια δυσθραυστότητα και αντοχή στη διάβρωση. Οι βασικές χρήσεις του μαλακού χυτοσιδήρου εντοπίζονται στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην κατασκευή εξαρτημάτων δικύκλων και γεωργικών μηχανημάτων.

4.4.4 Όλκιμος χυτοσίδηρος ή χυτοσίδηρος σφαιροειδούς γραφίτη

Αυτή η κατηγορία του χυτοσιδήρου είναι γνωστή και ως όλκιμος χυτοσίδηρος για τις καλές μηχανικές ιδιότητες και την καλή δυσθραυστότητα που επιδεικνύει. Το είδος αυτό του χυτοσιδήρου προέρχεται από το γκρίζο χυτοσίδηρο με προσθήκη Mg (μαγνησίου), όταν ακόμα είναι ρευστός. Το μαγνήσιο βοηθά κατά τη χύτευση να δημιουργηθεί ο γραφίτης σε σχήμα σφαιρικό (σχήμα 4.8δ), πράγμα που προσδίδει σε μεγάλο βαθμό την καλή πλαστικότητα και δυσθραυστότητα αυτού του χυτοσιδήρου. Επίσης, το πυρίτιο πρέπει να βρίσκεται σε μεγάλα επίπεδα, από 2-3%, προκειμένου να μη δημιουργηθεί σεμεντίτης κατά τη χύτευση. Η δομή αυτού του χυτοσιδήρου αποτελείται από σφαιρίδια γραφίτη μέσα σε μήτρα φερρίτη



Σχήμα 4.8: Δομές χυτοσιδηρών: (α) υπερευθηκτικός λευκός χυτοσίδηρος (μεγέθυνση X250), (β) φαιός χυτοσίδηρος (μεγέθυνση X100), (γ) μαλακτός χυτοσίδηρος (μεγέθυνση X250) και (δ) χυτοσίδηρος σφαιροειδούς γραφίτη (μεγέθυνση X100).

ή φερρίτη-περλίτη. Λόγω των βελτιωμένων μηχανικών του ιδιοτήτων, ο σφαιροειδής χυτοσίδηρος χρησιμοποιείται για την κατασκευή χυτοπρεσαριστών τεμαχίων, όπως σωμάτων αντλιών και βαλβίδων, επίσης αξόνων και ραούλων ελάστρων, κυλίνδρων αυτοκινήτων και γενικά εξαρτημάτων, που καταπονούνται σε κρουστικές ή/και εναλλασσόμενες φορτίσεις.

4.4.5 Κραματωμένοι χυτοσίδηροι

Είναι χυτοσίδηροι που περιέχουν προσμείξεις Cr, Mo, Ni οι οποίες βελτιώνουν τη σκληρότητα και την αντίσταση σε φθορά αλλά και την αντοχή σε κρούση, με αποτέλεσμα τη χρήση τους σε πιο απαιτητικές εφαρμογές: στην κατασκευή εργαλείων και εξαρτημάτων εξόρυξης μεταλλευμάτων, τύμπανων φρένων, δίσκων συμπλέκτη, ελατηρίων εμβόλων βενζινομηχανών, κ.λπ..



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 4ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Το διάγραμμα φάσεων Fe-C παρουσιάζει μεγάλο τεχνολογικό ενδιαφέρον. Στο διάγραμμα φάσεων απεικονίζονται τρεις περιοχές τεχνικών κραμάτων Fe-C, με μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον:
 - ✓ σίδηροι, με ποσοστό άνθρακα από 0-0,02%
 - ✓ χάλυβες, με ποσοστό άνθρακα από 0,02-2%
 - ✓ χυτοσίδηροι, με ποσοστό άνθρακα από 2-5%
- Από το διάγραμμα φάσεων φαίνονται τέσσερις διαφορετικές στερεές φάσεις:
 - α-φερρίτης ή απλά φερρίτης, ωστενίτης (γ), σεμεντίτης (Fe_3C) και δ-φερρίτης.
- Οι βασικοί μετασχηματισμοί φάσεων που παρουσιάζουν ιδιαίτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον είναι οι ακόλουθοι:
 - ✓ ευτηκτοειδής μετασχηματισμός και
 - ✓ ευτηκτικός μετασχηματισμός
- Ο ευτηκτοειδής μετασχηματισμός αυτός είναι ο μεγαλύτερης σημα-

σίας στην περίπτωση της μελέτης των χαλύβων. Είναι ο μετασχηματισμός του ωστενίτη (0,77% C) σε φερρίτη (0,02% C) και σεμεντίτη (6,7% C), σε θερμοκρασία 727°C. Το μίγμα φερρίτη-σεμεντίτη που παράγεται με βάση την ευτηκτοειδή αντίδραση ονομάζεται περλίτης (σκληρότητα: 250-350 HV). Η ανάπτυξη του περλίτη, κατά την ψύξη, ξεκινά από τα σύνορα των κόκκων του ωστενίτη και εξελίσσεται με τη μορφή παράλληλων πλακών φερρίτη και σεμεντίτη μέχρις ότου διασπασθεί το 100% του ωστενίτη. Ένας χάλυβας με σύσταση ίση προς 0,77% C, λέγεται ευτηκτοειδής χάλυβας (διότι έχει σύσταση ίση με την ευτηκτοειδή) και αποτελείται από περλιτικούς κόκκους. Ένας χάλυβας με σύσταση μικρότερη από την ευτηκτοειδή (<0,77% C), λέγεται υποευτηκτοειδής χάλυβας. Όταν η σύσταση ενός χάλυβα σε άνθρακα είναι μεγαλύτερη από την ευτηκτοειδή (>0,77% C), τότε ο χάλυβας ονομάζεται υπereυτηκτοειδής.

- Οι χάλυβες που περιέχουν εκτός από άνθρακα μικρά ποσοστά Mn (έως 1%) και πολύ χαμηλά ποσοστά S και P (<0,05%) ονομάζονται κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες ή απλά ανθρακούχοι χάλυβες. Στην περίπτωση που περιέχουν και άλλες προσμείξεις, με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους τότε ονομάζονται κραματωμένοι χάλυβες.
- Ο ευτηκτικός μετασχηματισμός αυτός λαμβάνει χώρα γύρω στους 1140°C και αφορά τη στερεοποίηση υγρού 4,3% C, με ταυτόχρονη αποβολή δυο διαφορετικών φάσεων, του ωστενίτη (γ) και του σεμεντίτη (Fe_3C). Το μίγμα αυτό των φάσεων που προκύπτει κατά τη στερεοποίηση υγρού 4,3% C, ονομάζεται λεδεμβουρίτης ή λεδεμβουριτικό ευτηκτικό. Ο ευτηκτικός μετασχηματισμός (ή ευτηκτική αντίδραση) έχει μεγάλη σημασία στη μελέτη των χυτοσιδήρων.
- Οι χυτοσίδηροι είναι κράματα σιδήρου με άνθρακα σε ποσοστό 2-5%. Επίσης περιέχουν κι άλλες προσμείξεις όπως πυρίτιο (Si), θείο (S) και φωσφόρο (P). Τα βασικά είδη χυτοσιδήρων είναι τα ακόλουθα:
 - ✓ λευκοί χυτοσίδηροι
 - ✓ φαιοί χυτοσίδηροι
 - ✓ μαλακοί χυτοσίδηροι
 - ✓ χυτοσίδηροι σφαιροειδούς γραφίτη
 - ✓ κραματώμενοι χυτοσίδηροι



ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

❖ 1. Κράμα 80% Cu-20% Ni χρησιμοποιείται για την κατασκευή σωλήνων που χρησιμοποιούνται σε θαλάσσιο περιβάλλον. Πόσα χιλιόγραμμα (kg) νικελίου (Ni) πρέπει να προστεθούν σε 120 kg χαλκού (Cu) για την κατασκευή του παραπάνω κράματος με χύτευση;

(Απάντηση: 30 kg)

❖ 2. Κράμα 70% Pb-30% Sn χρησιμοποιείται για την κατασκευή εδράνων. Με δεδομένο το διάγραμμα φάσεων Pb-Sn να προσδιορισθούν τα εξής:

(α) Η χημική σύσταση των φάσεων στους 100°C

(β) Τα ποσοστά των φάσεων στην παραπάνω θερμοκρασία

(Απάντηση: (α) φάση α (6% Sn και 94% Pb) και φάση β (99% Sn και 1% Pb), (β) 74% α και 26% β)

❖ 3. Ποια είναι τα ποσοστά φερρίτη και σεμεντίτη μέσα στον περλίτη;

(Βλ. διάγραμμα φάσεων Fe-C)

(Απάντηση: 89% φερρίτης, 11% σεμεντίτης)

❖ 4. Δίδεται ανθρακούχος χάλυβας με περιεκτικότητα 0,25% C. Με δεδομένο το διάγραμμα φάσεων Fe-C να βρεθούν

(α) η ελάχιστη θερμοκρασία διαλυτοποίησης του άνθρακα σε μία φάση του διαγράμματος Fe-C. Ποια είναι η φάση αυτή;

(β) τα ποσοστά των φάσεων σε θερμοκρασία 730°C.

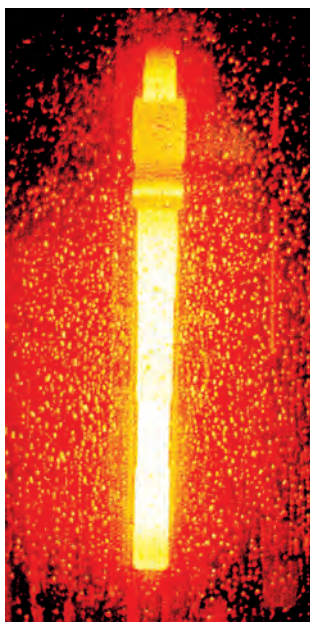
(Απάντηση: (α) ελάχιστη θερμοκρασία περίπου 800°C, (β) περίπου 31% ωστενίτης και 69 % φερρίτης)

❖ 5. Ανθρακούχος χάλυβας έχει σύσταση 0,5% C. Με δεδομένο το διάγραμμα φάσεων Fe-C να προσδιορισθούν τα εξής:

(α) Η χημική σύσταση των φάσεων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C).

(β) Τα ποσοστά των φάσεων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

(Απάντηση: φερρίτης (0,008% C) και σεμεντίτης (6,7% C), (β) 93% φερρίτης και 7% σεμεντίτης)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

- 5.1 Γενικά
- 5.2 Ανόπτηση
- 5.3 Θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης
- 5.4 Επαναφορά
- 5.5 Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες χαλύβων
- 5.6 Φούρνοι θερμικών κατεργασιών



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να μάθετε τα διάφορα είδη ανόπτησης χαλύβων, τους μετασχηματισμούς φάσεων που λαμβάνουν χώρα και τον σκοπό που εξυπηρετεί το καθένα από αυτά
- ☒ Να κατανοήσετε την θερμική κατεργασία της βαφής
- ☒ Να κατανοήσετε τους μετασχηματισμούς φάσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τη θέρμανση και απόψυξη στη βαφή
- ☒ Να κατανοήσετε το μηχανισμό σκλήρυνσης κατά τη βαφή
- ☒ Να κατανοήσετε τη θερμική κατεργασία της επαναφοράς και το σκοπό που εξυπηρετεί
- ☒ Να μάθετε τους μετασχηματισμούς φάσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την επαναφορά
- ☒ Να μάθετε πώς μεταβάλλονται οι μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων μετά από την επαναφορά
- ☒ Να μάθετε τις κυριότερες κατεργασίες επιφανειακής σκλήρυνσης των χαλύβων: ενανθράκωση, εναζώτωση, φλογοβαφή και επαγωγική βαφή

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Από αρχαιοτάτων χρόνων ήταν γνωστή η σκλήρυνση εργαλείων, αλλά και σπαθιών, με τη μέθοδο της θερμικής κατεργασίας της βαφής, η οποία εφαρμοζόταν σε σιδηρουργεία της Αθήνας (Χρυσούς Αιών του Περικλέους, 5ος π.Χ. αι.). Οι λεπίδες των περίτρωνων *Δαμασκηνών Σπαθιών* αποκτούσαν τρομερή σκληρότητα και συνάμα δυσθραυστότητα λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών θερμικών κατεργασιών βαφής και επαναφοράς (ανα-

θέρμανσης), που εφαρμόζαν οι τεχνίτες της εποχής εκείνης. Οι συνθήκες αυτές σκλήρυνσης παραμένουν ακόμα και σήμερα ανεξακρίβωτες. Οι θερμικές κατεργασίες αποτελούσαν βασικό τομέα τεχνολογικής προόδου της εποχής εκείνης, παρόλο που οι μηχανισμοί σκλήρυνσης ή εξασθένησης (μείωσης της σκληρότητας) ήσαν άγνωστοι.

Οι θερμικές κατεργασίες των μετάλλων σήμερα αποτελούν ένα από τα βασικότερα στάδια παραγωγής στη βαριά βιομηχανία και ειδικότερα στην κατασκευαστική βιομηχανία χάλυβα. Με τον όρο **θερμική κατεργασία** ορίζεται μία διεργασία, κατά την οποία το επεξεργαζόμενο τεμάχιο υφίσταται ένα συγκεκριμένο **θερμικό κύκλο** με τα ακόλουθα στάδια:

- (i) θέρμανση από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην επιθυμητή θερμοκρασία,
- (ii) παραμονή στην εν λόγω θερμοκρασία για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα,
- (iii) ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τα παραπάνω στάδια (i)-(iii) αποτελούν το γενικευμένο σχήμα μίας οποιασδήποτε θερμικής κατεργασίας.

Οι βασικές παράμετροι, οι οποίες διαφοροποιούν μεταξύ τους τις θερμικές κατεργασίες, είναι οι ακόλουθες:

- **Η θερμοκρασία**
- **Ο χρόνος παραμονής στην παραπάνω θερμοκρασία**
- **Ο ρυθμός απόψυξης**

Το μέσο ή περιβάλλον θέρμανσης (αέρας, τηγμένα άλατα), το μέσο απόψυξης (νερό, λάδι, αλατόνερο), αλλά και η μάζα του κατεργαζόμενου υλικού, είναι βασικά στοιχεία των θερμικών κατεργασιών, γιατί επηρεάζουν σημαντικά τις βασικές τους παραμέτρους. Οι σημαντικότερες οικογένειες θερμικών κατεργασιών χαλύβων είναι οι ακόλουθες:

- **Ανόπτηση**
- **Βαφή**
- **Επαναφορά**

Γενικά, η **ανόπτηση**, που εφαρμόζεται στους χάλυβες, έχει στόχο τη μείωση της σκληρότητας των εσωτερικών τάσεων, την αύξηση της πλαστικότητας και της κατεργασιμότητας, αλλά και την ομογενοποίηση της χημικής σύστασης χυτών, κυρίως, τεμαχίων. Η **βαφή** των χαλύβων έχει

στόχο τη σκλήρυνσή τους και η **επαναφορά**, η οποία εφαρμόζεται μετά από βαφή, έχει στόχο την ανάκτηση της δυσθραυστότητας μέσω μικρής μείωσης της σκληρότητας.

5.2 ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Η ανόπτηση θεωρείται θερμική κατεργασία με μικρή ταχύτητα απόψυξης, σε αντιδιαστολή με τη βαφή που θεωρείται θερμική κατεργασία με μεγάλη ταχύτητα απόψυξης. Τα πιο σημαντικά είδη ανόπτησης χάλυβα είναι τα ακόλουθα:

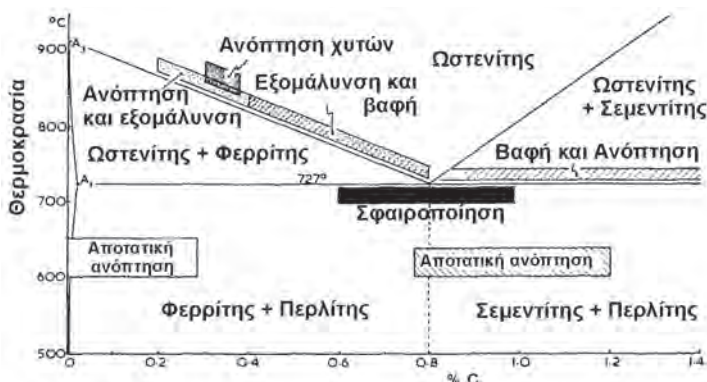
- (1) Ανόπτηση κατεργασίας,
- (2) Πλήρης ανόπτηση,
- (3) Ανόπτηση σφαιροποίησης,
- (4) Ανόπτηση εξομάλυνσης,
- (5) Ανόπτηση χυτοχάλυβα.

5.2.1 Ανόπτηση κατεργασίας

Η ανόπτηση κατεργασίας είναι η θέρμανση του χάλυβα για κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα, που πραγματοποιείται συνήθως σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία αναक्रυστάλλωσης (περίπου 500°C για το μαλακό χάλυβα) μεταξύ 550°C - 650°C και πολύ συχνά απαντάται και ως **αποτατική ανόπτηση** (σχήμα 5.1). Στόχος της είναι η εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων, που έχουν προέλθει από την ψυχρή μορφοποίηση του υλικού (έλαση, διέλαση, κ.λπ.). Ακολουθεί βραδεία απόψυξη του υλικού έως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ανόπτηση σε λίγο υψηλότερη θερμοκρασία (600 - 700°C) καλείται **ανόπτηση αναक्रυστάλλωσης**.

5.2.2 Πλήρης ανόπτηση ή απλώς ανόπτηση

Η πλήρης ανόπτηση είναι η θέρμανση του χάλυβα για κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα, που πραγματοποιείται συνήθως κατά 40 - 50°C πάνω από την A_3 για τους υποευτηκτοιδείς χάλυβες ή κατά 40 - 50°C πάνω από την A_1 (727°C) για τους υπερευτηκτοιδείς χάλυβες, ακολουθούμενη από αργή ψύξη μέσα στο φούρνο (σχήμα 5.1). Στόχος της πλήρους ανοπτήσε-



Σχήμα 5.1: Θερμοκρασιακά διαστήματα των πραγματοποιούμενων σε χάλυβες θερμικών κατεργασιών σε σχέση με το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-C.

ως είναι η αποκατάσταση της μικροδομής του χάλυβα, κάτω από συνθήκες ισορροπίας φάσεων, και η βελτίωση της κατεργασιμότητάς του.

Πολλές φορές, **από σφάλμα**, η ανοπτίση πραγματοποιείται σε υψηλές σχετικά θερμοκρασίες ($> 1100^{\circ}\text{C}$) και παρατηρείται τήξη των ακαθαρσιών στα όρια των κόκκων. Ο χάλυβας, μετά από αυτή την κατεργασία, λέγεται **καμένος** και θεωρείται ακατάλληλος για χρήση. Θεραπεία για τον καμένο χάλυβα δεν υπάρχει. Μία άλλη αστοχία, η οποία, όμως, επιδέχεται θεραπεία, είναι η **υπερθέρμανση** του χάλυβα. Σε αυτή την περίπτωση ο χάλυβας θερμαίνεται σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία (όχι τόσο υψηλή, ώστε να καεί) και για πολλή ώρα. Παρατηρείται δραματική αύξηση του μεγέθους των κόκκων, με αποτέλεσμα το υλικό να θεωρείται υπερβολικά **χονδρόκοκκο** και άρα και εύθραυστο. Για την άρση του παραπάνω ελαττώματος, απαιτείται θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από την A_3 για μικρό χρονικό διάστημα, και στη συνέχεια ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

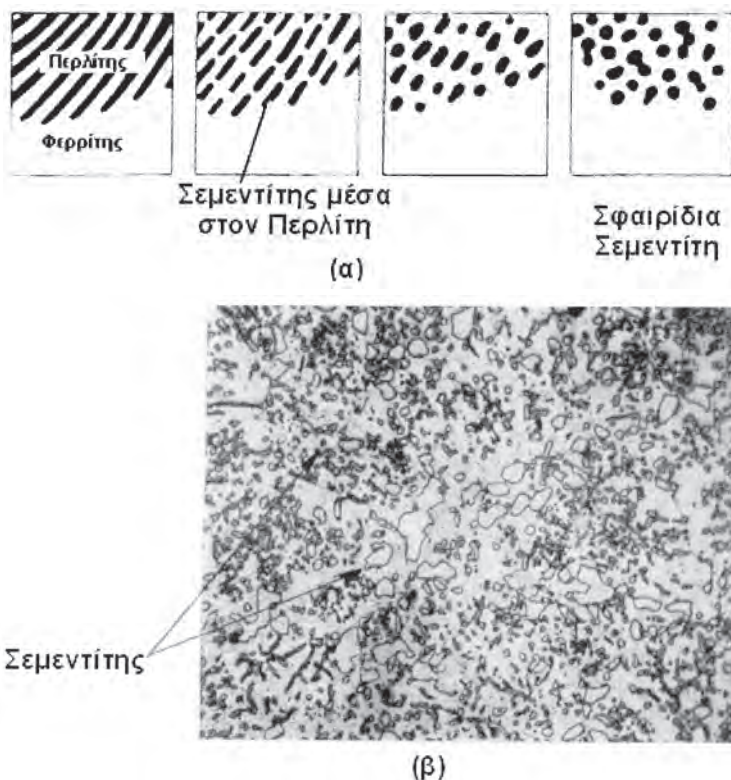
5.2.3 Ανοπτίση σφαιροποίησης

Πραγματοποιείται συνήθως σε ευτηκτοειδείς και υπερευτηκτοειδείς χάλυβες. Περιλαμβάνει τη θέρμανση του χάλυβα, κατά περίπου 50°C κάτω από την A_1 ($650-700^{\circ}\text{C}$), για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, συνήθως 25 ώρες (σχήμα 5.1). Κύριος στόχος της ανοπτίσης αυτής είναι η σφαιροποίηση του σεμεντίτη. Ο σεμεντίτης σε ένα υπερευτηκτοειδή χάλυβα βρίσκεται τόσο με τη μορφή φυλλιδίων μέσα στον περλίτη (ευτηκτοειδής σεμεντίτης), όσο και γύρω από τα όρια των κόκκων του περλίτη (προευτηκτοειδής σεμεντίτης).



Η διαδικασία της σφαιροποίησης του σχήματος 5.2α είναι αποτέλεσμα της **επιφανειακής τάσης**. Αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρείται, όταν ο υδράργυρος ενός θερμομέτρου χυθεί σε μία επίπεδη επιφάνεια: η συνοχή του θα διαλυθεί και θα δημιουργηθούν μικρές σφαίρες υδραργύρου.

Η δομή του σφαιροποιημένου χάλυβα αποτελείται από σφαιρικό σεμεντίτη μέσα σε μήτρα φερρίτη (σχήμα 5.2β). Η σφαιροποίηση του σεμεντίτη επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανία, με ανόπτηση σε αυξομειούμενη θερμοκρασία μεταξύ A_1-50 και A_1+50 (συνήθως μεταξύ $650-750^{\circ}\text{C}$), η οποία καλείται **ταλαντωτική ανόπτηση**. Η ανόπτηση σφαιροποίησης έχει ως στόχο τη βελτίωση της κατεργασιμότητας του υλικού στην κοπή (π.χ. τórνευση, λείανση, φρεζάρισμα κ.λπ.).



Σχήμα 5.2: (α) Σχηματική παράσταση του μηχανισμού σφαιροποίησης του σεμεντίτη μέσα στον περλίτη. (β) Οπτική μικρογραφία χάλυβα μετά από ανόπτηση σφαιροποίησης, $\times 500$.

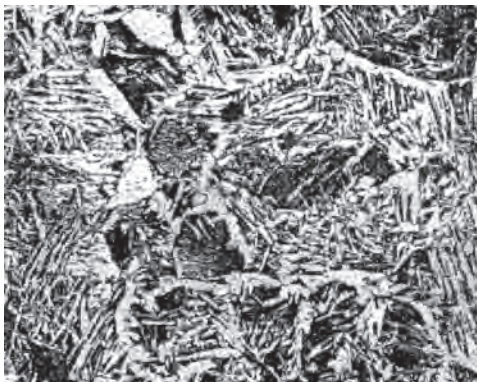
5.2.4 Εξομάλυνση

Η εξομάλυνση είναι παρόμοια με την πλήρη ανόπτηση και περιλαμβάνει τη θέρμανση του χάλυβα, σε θερμοκρασία περίπου 50°C πάνω από την A_3 , για κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα, ακολουθούμενη από γρήγορη σχετικά ψύξη στον αέρα, βλ. σχήμα 5.1 (η ταχύτητα ψύξης είναι πολύ πιο γρήγορη από ό,τι η αντίστοιχη ταχύτητα της πλήρους ανόπτησης). Ο κυριότερος στόχος της εξομάλυνσης είναι η μείωση του μεγέθους των κόκκων και των φυλλιδίων φερρίτη/σεμεντίτη μέσα στον περλίτη, με αποτέλεσμα την αύξηση της μηχανικής αντοχής και δυσθραυστότητας του χάλυβα. Άλλοι στόχοι που επιτυγχάνονται με την εξομάλυνση είναι οι ακόλουθοι:

- η εξάλειψη του διαφορισμού (διαφορισμός = συγκέντρωση των προσμείξεων στα όρια των κόκκων κατά τη χύτευση) σε χυτά τεμάχια.
- η εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων
- η βελτίωση της κατεργασιμότητας

5.2.5 Ανόπτηση χυτοχάλυβα

Κατά τη χύτευση σε τύπο από άμμο, λόγω της αργής απόψυξης που ακολουθεί, παρατηρείται ότι η δομή του χάλυβα (συνήθως με αρχική περιεκτικότητα 0,35% C), μετά από τη στερεοποίηση, αποτελείται από **χονδρούς κόκκους περλίτη και βελονοειδή φερρίτη** (τόσο στα όρια των κόκκων του περλίτη, όσο και κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων) δομή γνωστή ως **Widmanstätten** (σχήμα 5.3). Αντίστοιχη δομή έχει παρατηρηθεί και στους μετεωρίτες και από εκεί έχει πάρει και το όνομά της. Η δομή αυτή είναι προβληματική, λόγω της ψαθυρότητας που εμφανίζει, η οποία οφείλεται στους προσανατολισμένους βελονοειδείς φερριτικούς κρυστάλλους. Η άρση της παραπάνω μικροδομής γίνεται με κατάλληλη ανόπτηση. Η ανόπτηση αυτή περιλαμβάνει τη θέρμανση του τεμαχίου σε θερμοκρασία 40-50°C πιο πάνω από την A_3 και παραμονή για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, ακολουθούμενη από ψύξη μέσα στο φούρνο. Με την ανόπτηση πάνω από την άνω κρίσιμη θερμοκρασία επιτυγχάνεται διαλυτοποίηση του φερρίτη στον ωστενίτη και η ανάπτυξη λεπτών κυτάρων ωστενίτη, που μετά την ψύξη μετατρέπεται σε ανεξάρτητους κόκκους περλίτη και κόκκους φερρίτη.



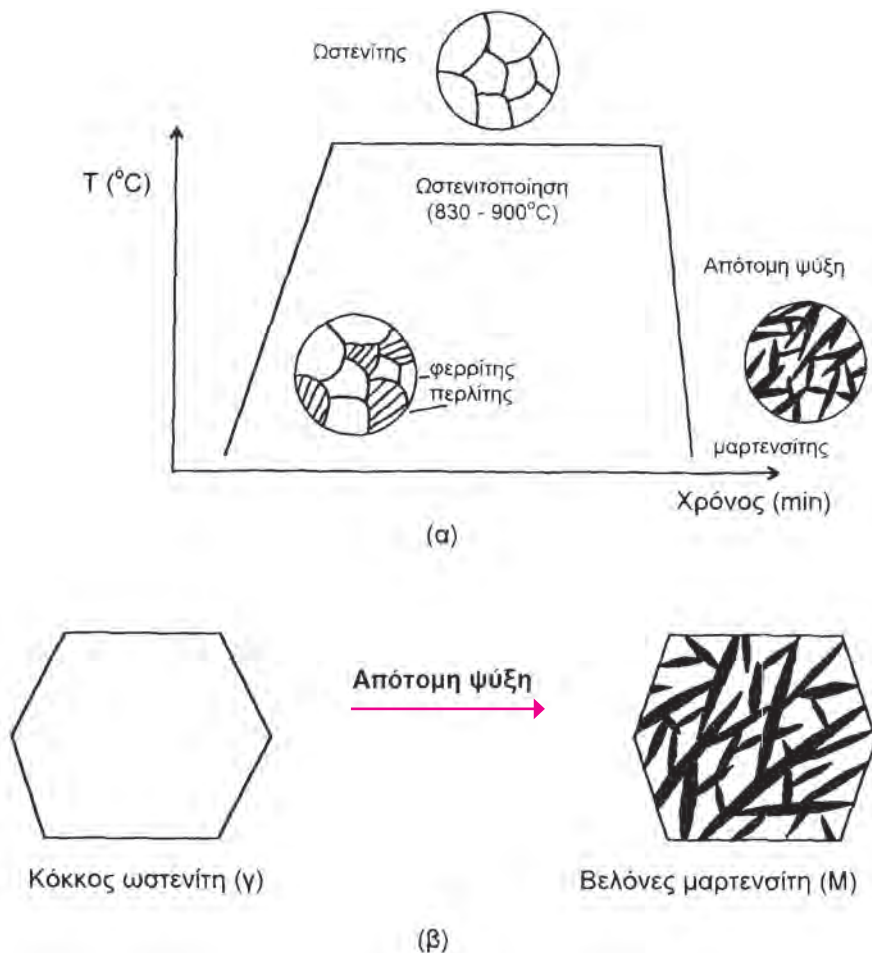
Σχήμα 5.3: Οπτική μικρογραφία της δομής Widmanstätten, X250.

5.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ

5.3.1 Βαφή

Απλή βαφή ή βαφή είναι η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, που περιλαμβάνει ένα στάδιο θέρμανσης και παραμονής του χάλυβα (**ωστενιτοποίηση**) σε θερμοκρασία ίδια με αυτή της πλήρους ανοπτήσεως ($A_3 + 50$ για υποευτηκτοειδείς και $A_1 + 50$ για υπερευτηκτοειδείς χάλυβες) και ένα ακόλουθο στάδιο **απότομης ψύξεως**, με εμβάπτιση του χάλυβα σε κάποιο μέσο ψύξεως (αλατόνερο, νερό, λάδι, αέρας). Στόχος της βαφής είναι η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα (σκληρότητα, αντοχή), που απαιτούνται για τη λειτουργία του (π.χ. εργαλεία κοπής, καλούπια διαμόρφωσης, κ.λπ.). Έτσι, ένας χάλυβας με αρχική σκληρότητα 150-250 HV μπορεί να αποκτήσει σκληρότητα πάνω από 750-800 HV, έπειτα από βαφή. Σχηματική παράσταση της θερμικής κατεργασίας της βαφής υποευτηκτοειδούς χάλυβα φαίνεται στο σχήμα 5.4α.

Η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης κυμαίνεται μεταξύ **830** και **900°C** για τους υποευτηκτοειδείς χάλυβες και σε αυτές τις θερμοκρασίες το υλικό παίρνει ένα “ανοιχτό πορτοκαλί” χρώμα λόγω πύρωσης. Οι υπερευτηκτοειδείς χάλυβες υφίστανται θέρμανση στους **750-780°C**, ενώ σε χάλυβες, που περιέχουν μεγάλα ποσοστά άλλων στοιχείων κραματοποίησης (π.χ. Cr, Mo, Ni, κ.λπ), η θέρμανση ενδέχεται να υπερβεί τους **1000-1050°C**. Ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής του υλικού στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως και μερικές ώρες, πράγμα που εξαρτάται από τη χημική σύσταση του χάλυβα, αλλά και από το μέγεθος του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Σχήμα 5.4: (α) Σχηματική παράσταση του θερμικού κύκλου και των αλλαγών δομής κατά τη βαφή. (β) Απλουστευμένος μηχανισμός του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.

Η ταχύτητα απόψυξης είναι καθοριστική τόσο για βαθμό σκλήρυνσης, όσο και για τις αστοχίες (ρωγματώσεις), που μπορούν να εμφανισθούν λόγω ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων. Όσο πιο απότομη είναι η ταχύτητα απόψυξης, τόσο αυξάνεται και η σκληρότητα του υλικού, με άμεσο όμως επακόλουθο τη δραματική μείωση της δυσθραυστότητας και με κίνδυνο την εμφάνιση ρωγμών. Η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται από τη δραστηριότητα του μέσου απόψυξης και αυξάνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά:

αέρας < λάδι < νερό < αλατόνερο

Η παραπάνω σειρά δραστικότητας του μέσου απόψυξης είναι σύμφωνη με την αύξηση του ρυθμού απαγωγής της θερμότητας. Έτσι, π.χ. η εμβάπτιση του διάπυρου μετάλλου στο νερό οδηγεί σε πιο βίαιη απαγωγή θερμότητας (και άρα σε πιο έντονη ψύξη) από ό,τι η εμβάπτισή του στο λάδι. Η ανάδευση του μέσου απόψυξης αυξάνει επιπλέον την ταχύτητα απόψυξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις ισχυρά κραματωμένων χαλύβων (π.χ. χαλύβων με μεγάλα ποσοστά Cr, Mo, W κ.λπ., όπως είναι οι εργαλειοχάλυβες ή οι ταχυχάλυβες) για να συντελεσθεί σκλήρυνση (βαφή) πρέπει το υλικό να αποψυχθεί σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του μηδενός με τη βοήθεια μέσου απόψυξης υγρού αζώτου (**κρυογενική βαφή**). Σύγχρονα ψυκτικά μέσα, όπως διαλύματα συνθετικών πολυμερών, τείνουν να αντικαταστήσουν το λάδι και προσδίδουν ελεγχόμενη ταχύτητα απόψυξης και προστασία από την οξείδωση.

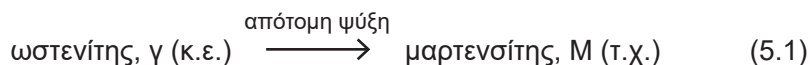
5.3.2 Μετασχηματισμοί φάσεων κατά τη βαφή

(α) Ωστενιτοποίηση

- (1) *Υποευτηκτοιδείς ή ευτηκτοιδείς χάλυβες*. Στο στάδιο αυτό παρατηρείται η αλλαγή της αρχικής δομής (φερρίτης-περλίτης ή περλίτης αντίστοιχα) σε ωστενίτη, λόγω θέρμανσης σε θερμοκρασία $T > A_3$ (σχήμα 5.4α).
- (2) *Υπερευτηκτοιδείς χάλυβες*. Παρατηρείται μόνο ο ευτηκτοιδής μετασχηματισμός του περλίτη προς ωστενίτη, ενώ ο σεμενίτης στα όρια των κόκκων παραμένει, λόγω θέρμανσης, σε θερμοκρασία $A_1 < T < A_3$.

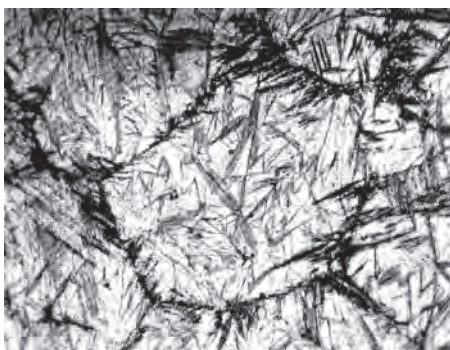
(β) Απόψυξη

Σε αυτό το στάδιο η μετατροπή που επιτυγχάνεται είναι αυτή του ωστενίτη. Σε περίπτωση γρήγορης απόψυξης (βαφής) ο ωστενίτης μετατρέπεται σε μία σκληρή και εύθραυστη φάση που είναι γνωστή ως **μαρτενσίτης**, η οποία κρυσταλλώνεται στο τετραγωνικό χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα. Ο εν λόγω μετασχηματισμός ονομάζεται **μαρτενσιτικός** και περιγράφεται ακολούθως:

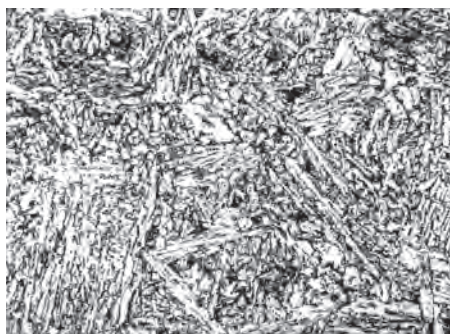


Ο μαρτενσίτης αναπτύσσεται σχεδόν ακαριαία (10^{-6} - 10^{-7} s) μέσα στους κόκκους του ωστενίτη με τη μορφή **πλακών ή βελονών**. Χαρακτηριστική μορφολογία του μαρτενσίτη παρουσιάζεται σε μικροφωτογραφία στο σχήμα 5.5α. Η σκληρότητα του μαρτενσίτη είναι πολύ μεγάλη (**500-1000 HV**) λόγω

αφενός της ανάπτυξης εντόνων εσωτερικών τάσεων και αταξιών κατά την απότομη ψύξη και αφετέρου του κορεσμού της κρυσταλλικής δομής του σε άνθρακα. Γι' αυτό πρακτικά δεν επιτυγχάνεται σκλήρυνση μέσω βαφής σε χάλυβες με ποσοστό σε άνθρακα μικρότερο από 0,2%. Ο σχηματισμός του μαρτενσίτη ξεκινά με την ψύξη του υλικού κάτω από μία χαρακτηριστική θερμοκρασία που ονομάζεται **θερμοκρασία έναρξης M_s** . Για να μετατραπεί όμως κατά 100% ο ωστενίτης σε μαρτενσίτη, πρέπει η ψύξη να συνεχισθεί μέχρι τη **θερμοκρασία τέλους M_f** ($M_s < M_f$). Τα σημεία M_s , M_f εξαρτώνται αποκλειστικά από τη χημική σύσταση του χάλυβα: χάλυβες με μεγάλο ποσοστό σε άνθρακα (>0.7%) ή/και ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες μπορεί να παρουσιάσουν $M_f < 0$. Εάν η ψύξη σταματήσει σε θερμοκρασία ενδιάμεσα των σημείων M_s , M_f , τότε η δομή του υλικού θα αποτελείται από **μαρτενσίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη**.



(α)



(β)

Σχήμα 5.5: Οπτικές μικρογραφίες που δείχνουν (α) μαρτενσίτη, X1000 και (β) μπαϊνίτη, X500.

Η μέτρια ταχύτητα απόψυξης οδηγεί σε δομή, η οποία αποτελείται από φερρίτη και σεμεντίτη και μοιάζει μορφολογικά και με τον περλίτη και με



Η μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη δεν πραγματοποιείται με διάχυση, λόγω της απότομης ψύξης που ακολουθεί την ωστενιτοποίηση. Ο μηχανισμός αυτής της μετατροπής στηρίζεται στη **διάτμηση**, δηλαδή στην εφαρμογή διατμητικών τάσεων στο κρυσταλλικό πλέγμα του ωστενίτη, με αποτέλεσμα τη βίαιη αλλαγή της κρυσταλλικής δομής από κυβική εδροκεντρωμένη (κ.ε.) σε τετραγωνική χωροκεντρωμένη (τ.χ.), χωρίς να αλλάξει το ποσοστό του διαλυμένου άνθρακα στη νέα φάση. Μερικά **βασικά χαρακτηριστικά** του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού σε αντιδιαστολή με το μηχανισμό διάχυσης είναι τα εξής:

- (1) Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι μετασχηματισμός “διάτμησης” και όχι “διάχυσης”. Δηλαδή δεν πραγματοποιείται με κλασικό μηχανισμό πυρηνοποίησης και ανάπτυξης.
- (2) Οι αποστάσεις που διανύουν τα άτομα είναι κλάσματα της διατομικής απόστασης, ενώ κατά τη διάχυση οι αποστάσεις αυτές είναι ακέραια πολλαπλάσια της διατομικής.
- (3) Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός μπορεί να γίνει και σε θερμοκρασία λίγο πιο πάνω από 0 K (απόλυτο μηδέν), ενώ ο μετασχηματισμός διάχυσης σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες και συγκεκριμένα πάνω από $0,3T_m$ (T_m = σημείο τήξεως του υλικού).
- (4) Η ταχύτητα διάχυσης 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 τάξης των 10^{-7} s.
- (5) Το ποσοστό του παραγόμενου μαρτενσίτη εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ξεκινά κάτω από μια θερμοκρασία έναρξης, 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 το χρόνο παραμονής στην εκάστοτε θερμοκρασία.
- (6) 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.
- (7) Η μαρτενσιτική δομή παρουσιάζει μεγάλη κρυσταλλογραφική συνάφεια με το μητρικό πλέγμα, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει κατά τη διάχυση.

τον μαρτενσίτη. Αυτή η ενδιάμεση δομή ονομάζεται **μπαινίτης** (σχήμα 5.5β). Ο μπαινίτης είναι λιγότερο σκληρός από το μαρτενσίτη (η σκληρότητα του μπαινίτη κυμαίνεται μεταξύ 350-550 HV) και παρουσιάζει μεγαλύτερη πλαστικότητα. Ο μπαινίτης, όπως και ο μαρτενσίτης, είναι δομές

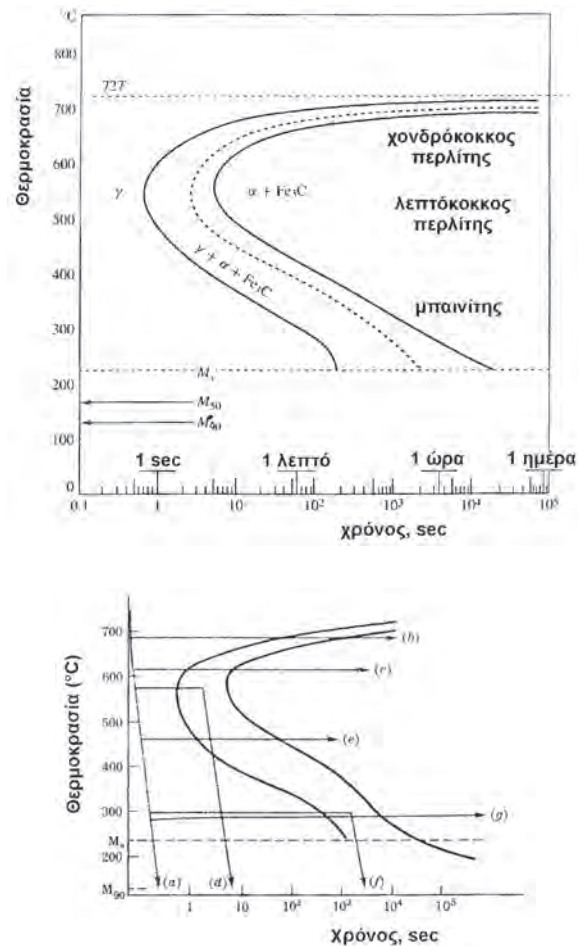
εκτός ισορροπίας και δεν επισημαίνονται από τα διαγράμματα φάσεων. Αργές αποψύξεις οδηγούν σε μετατροπή του ωστενίτη σε περλίτη, πράγμα το οποίο προβλέπεται από το διάγραμμα φάσεων Fe-C (ευτηκτοειδής μετασχηματισμός).

5.3.3 Το Διάγραμμα Χρόνου-Θερμοκρασίας -Μετασχηματισμού (TTT)

Οι γρήγορες θερμοκρασιακές μεταβολές, που λαμβάνουν χώρα κατά τη βαφή, οδηγούν στο σχηματισμό δομών εκτός ισορροπίας, όπως ο μαρτενσίτης ή/και ο μπαινίτης. Αυτές οι δομές δεν επισημαίνονται στο κλασικό διάγραμμα φάσεων Fe-C, διότι παρεμβαίνει η παράμετρος του **χρόνου**, που δεν υπάρχει στα διαγράμματα ισορροπίας φάσεων και είναι καθοριστική τόσο για τον μαρτενσιτικό, όσο και για το μπαινιτικό μετασχηματισμό. Ένα τέτοιο διάγραμμα, μεγάλης πρακτικής σημασίας, στο οποίο σκιαγραφούνται όλοι οι δυνατοί μετασχηματισμοί φάσεων με βάση και την παράμετρο του χρόνου, είναι το Διάγραμμα Χρόνου-Θερμοκρασίας-Μετασχηματισμού ή απλώς διάγραμμα TTT (Time-Temperature-Transformation). Τα διαγράμματα TTT είναι ημιλογαριθμικά διαγράμματα ως προς το χρόνο, έχουν άξονες θερμοκρασία (T) - $\log t$ και δείχνουν τη χρονική εξέλιξη του μετασχηματισμού του ωστενίτη, εάν παραμείνει σε μια σταθερή θερμοκρασία (κάτω από την ευτηκτοειδή) για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το σύνολο αυτό των σημείων για παρά πολλές θερμοκρασίες συνθέτει το TTT διάγραμμα. Κάθε χάλυβας έχει και το δικό του διάγραμμα TTT. Το σχήμα 5.6α δείχνει ένα τέτοιο διάγραμμα για έναν ευτηκτοειδή χάλυβα (0,77% C)



Οι καμπύλες μέσα στο TTT διάγραμμα λέγονται C-καμπύλες, λόγω σχήματος, και η πρώτη από αριστερά οριοθετεί την έναρξη του μετασχηματισμού διάχυσης του ωστενίτη σε περλίτη, ενώ καθώς προχωρούμε προς τα δεξιά το ποσοστό μετατροπής του ωστενίτη αυξάνεται. Άρα, κάθε καμπύλη προς τα δεξιά αντιστοιχεί σε ένα μεγαλύτερο ποσοστό μετατροπής του ωστενίτη από ό,τι η προηγούμενή της (η οποία βρίσκεται αριστερά). Η "**μύτη**" (το ακραίο σημείο) όλων αυτών των καμπυλών βρίσκεται περίπου πάνω στην ίδια οριζόντια ευθεία. Η περιοχή των καμπυλών, που βρίσκεται πάνω από τη μύτη, αντιστοιχεί στον περλίτη- το ανώτερο σημείο σε χονδρόκοκκο και το κατώτερο σε λεπτόκοκκο περλίτη- ενώ η προς τα κάτω περιοχή στο μπαινίτη (ανώτερο και κατώτερο). Για να επιτευχθεί ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, θα πρέπει να γίνει τόσο απότομα η απόψυξη, έτσι ώστε να μην κόψει τη μύτη των C-καμπυλών και να κατέβει κάτω από την οριζόντια γραμμή M_s . Για να έχουμε πλήρη μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, θα πρέπει η καμπύλη απόψυξης να κατέβει κάτω από την οριζόντια M_f . Το σχήμα 5.6β δείχνει τις διάφορες αλλαγές των φάσεων, ανάλογα με την ακολουθούμενη καμπύλη απόψυξης.



Σχήμα 5.6: (α) Διάγραμμα TTT για έναν ευτηκτοειδή χάλυβα. (β) Αλλαγές φάσεων σύμφωνα με την εκάστοτε καμπύλη αποψύξεως: (α) μαρτενσίτης πάνω από 90%, (β) χονδρόκοκκος περλίτης, (c) λεπτόκοκκος περλίτης, (d) περίπου 50% λεπτόκοκκος περλίτης και 50% μαρτενσίτης, (e) ανώτερος μπαινίτης, (f) περίπου 50% κατώτερος μπαινίτης και 50% μαρτενσίτης, (g) κατώτερος μπαινίτης.

Σημείωση: Με τα σύμβολα M_{50} και M_{90} χαρακτηρίζονται οι θερμοκρασίες που αντιστοιχούν σε 50% και 90% μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη αντίστοιχα.

5.3.4 Εμβαπτότητα

Με τον όρο εμβαπτότητα καλείται η ικανότητα σκλήρυνσης του υλικού μετά από τη βαφή. Αυτή εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η χημική σύσταση και το μέγεθος των κόκκων του χάλυβα, το μέγεθος του τεμαχίου και το μέσο απόψυξης. 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 απόψυξης.
- (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.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι:

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

Οι προσθήκες κραματικών στοιχείων (π.χ. Cr, Mo), η αύξηση του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη και η χρήση δραστικών μέσων απόψυξης αυξάνουν την εμβαπτότητα του χάλυβα. Η αύξηση, όμως, του μεγέθους του κατεργαζόμενου υλικού έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ανομοιογένειας κατά τη βαφή. Η επιφάνεια του τεμαχίου ψύχεται πιο γρήγορα, με αποτέλεσμα να σκληραίνει περισσότερο από ό,τι ο πυρήνας, ο οποίος ψύχεται με βραδύτερους ρυθμούς (**φαινόμενο μάζας**).

5.3.5 Κλιμακωτές βαφές

Κλιμακωτή βαφή καλείται η θερμική κατεργασία της οποίας η απόψυξη δεν είναι συνεχής, αλλά περιλαμβάνει ένα στάδιο παραμονής σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία, συνήθως μέσα σε κάποιο λουτρό τηγμένου άλατος (μεταξύ της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης και της θερμοκρασίας έναρξης M_s).

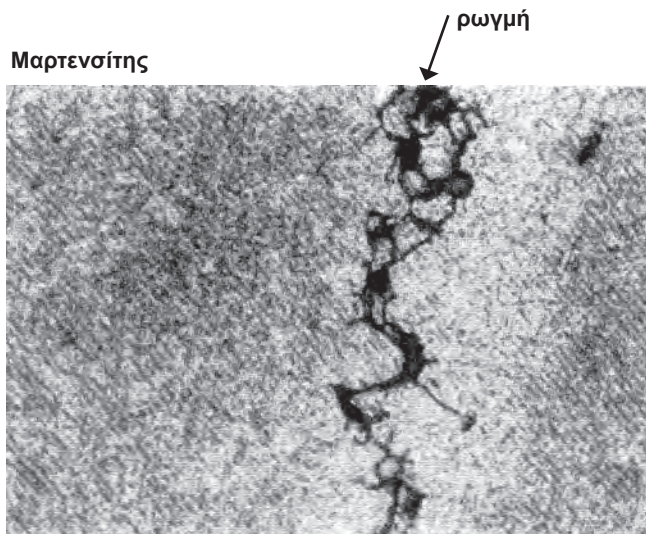
Οι κλιμακωτές βαφές χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία επεξεργασίας χάλυβα και ειδικότερα σε περιπτώσεις, που το κατεργαζόμενο τεμάχιο είναι μεγάλων διαστάσεων ή παρουσιάζει πολύπλοκη γεωμετρία.

5.3.6 Αστοχίες κατά τη βαφή

Αυτές είναι κυρίως ρωγμές και στρεβλώσεις οι οποίες οφείλονται στην ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων κατά τη βαφή. Οι εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται μπορεί να οφείλονται στους παρακάτω λόγους:

- (i) Στην απότομη ψύξη (θερμικές τάσεις)
- (ii) Στην αύξηση όγκου (εξόγκωση) που συνοδεύει το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό
- (iii) Στην ανομοιογενή θέρμανση - ψύξη που παρατηρείται σε τεμάχια μεγάλων ιδίως διαστάσεων.
- (iv) Σε ελλιπή σχεδιασμό του προς βαφήν αντικειμένου (π.χ. οι απότομες γωνίες μπορούν να οδηγήσουν σε συγκέντρωση τάσεων).
- (v) Σε σφάλματα θερμικών κατεργασιών. Μεγαλύτερη θερμοκρασία ή/και χρόνος παραμονής κατά την ωστενιτοποίηση μπορούν να οδηγήσουν σε ψαθυροποίηση. Η κακή επιλογή του μέσου απόψυξης (π.χ. νερό αντί για αέρα ή για λάδι) μπορεί, επίσης, να οδηγήσει σε ρωγματώσεις.

Όλες οι παραπάνω αστοχίες, οι οποίες εκδηλώνονται με ρωγματώσεις, δεν επιδέχονται θεραπεία. Το σχήμα 5.8 δείχνει μικρορωγμές, που έχουν αναπτυχθεί σε βαμμένο χάλυβα λόγω παρατεταμένης ωστενιτοποίησης.



Σχήμα 5.8: Οπτική μικρογραφία χρωμιομολυβδαινιούχου χάλυβα, όπου φαίνεται η ανάπτυξη μικρορωγμής μέσα στη μαρτενσιτική δομή (X400).

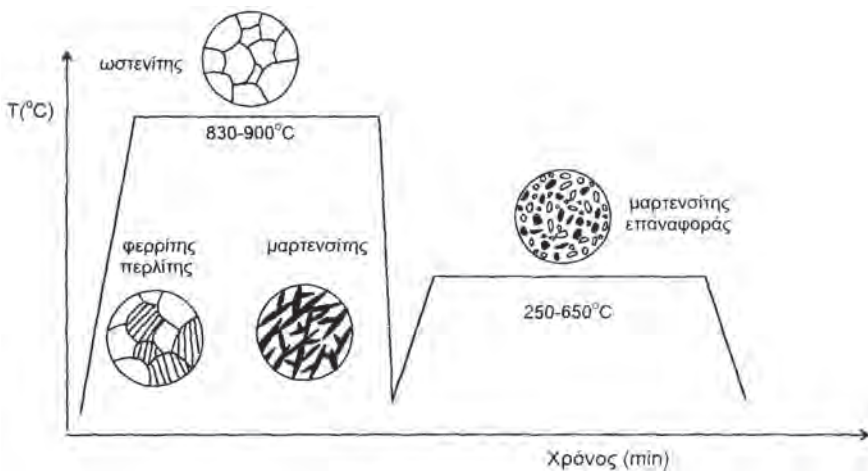
5.4 ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ

Ο μαρτενσίτης μετά από βαφή χαρακτηρίζεται από μεγάλη σκληρότητα αλλά και συνάμα από μικρή δυσθραυστότητα, με αποτέλεσμα το κατεργαζόμενο τεμάχιο να είναι ψαθυρό. Η βελτίωση της δυσθραυστότητας επιτυγχάνεται με την **επαναφορά**.

Επαναφορά καλείται η αναθέρμανση του χάλυβα μετά από τη βαφή σε θερμοκρασίες κάτω από την A_1 ($250-650^{\circ}\text{C}$) διάρκειας, μερικών ωρών, ακολουθούμενη από ήρεμη ψύξη (λάδι, αέρας ή μέσα στο φούρνο), βλ. σχήμα 5.9. Η επαναφορά έχει ως σκοπό τα ακόλουθα:

- την αύξηση της δυσθραυστότητας του χάλυβα με μικρή μείωση της αρχικής του σκληρότητας (σχήμα 5.10) και
- τη μετατροπή του υπολειπόμενου ωστενίτη (του ωστενίτη που δεν έχει μετασχηματισθεί σε μαρτενσίτη κατά τη βαφή) σε μαρτενσίτη.

Η όλη κατεργασία της βαφής και επαναφοράς του χάλυβα ονομάζεται **επιβελτίωση**.



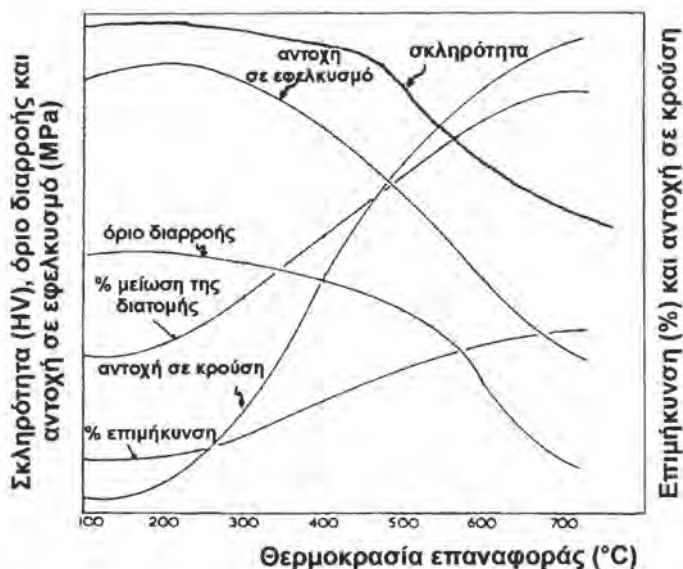
Σχήμα 5.9: Στάδια και αλλαγές φάσεων κατά την επιβελτίωση (βαφή-επαναφορά).

Κατά τη θέρμανση του βαμμένου τεμαχίου παρατηρούνται οι εξής μεταβολές:

- (1) Σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες ($< 250^{\circ}\text{C}$) τα άτομα του άνθρακα, που είναι εγκλωβισμένα μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη, διαχέονται έξω από αυτό κι ενώνονται με το σίδηρο σχηματίζοντας καρβίδια, με αποτέλεσμα να μειώνεται η περιεκτικότητα του μαρτενσίτη σε άνθρακα. Παράλληλα, μειώνονται επίσης οι εσωτερικές τάσεις

και η σκληρότητά του, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η δυσθραυστότητα.

- (2) Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες ($250^{\circ}\text{C} < T < 350^{\circ}\text{C}$) παρατηρείται μετασχηματισμός του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη ή μπαϊνίτη.
- (3) Με την άνοδο της θερμοκρασίας ($> 350^{\circ}\text{C}$) και την αύξηση του χρόνου επαναφοράς τα καρβίδια μεγαλώνουν σε μέγεθος (σύμφυτα καρβίδια) και σχηματίζουν σεμεντίτη, με αποτέλεσμα η σκληρότητα του χάλυβα να μειώνεται ακόμη περισσότερο.

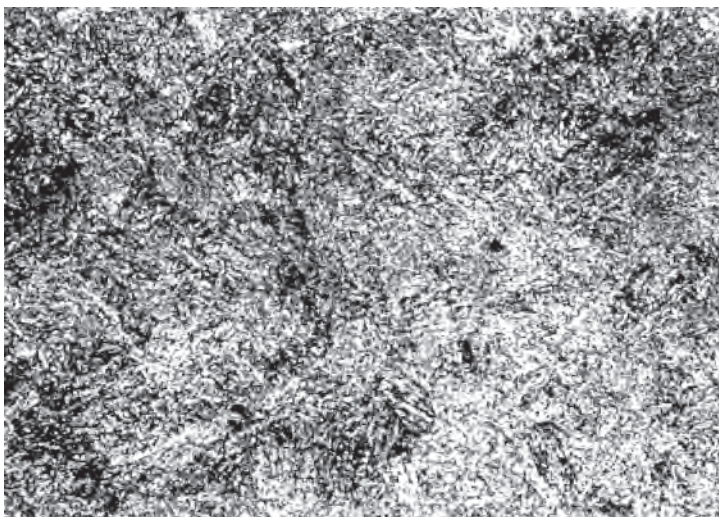


Σχήμα 5.10: Σχηματική παράσταση της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία επαναφοράς.

Η δομή του υλικού μετά την επαναφορά αποτελείται από μαρτενσίτη φτωχότερη σε άνθρακα (μικρότερης σκληρότητας) και καρβίδια. Η δομή αυτή καλείται **μαρτενσίτης από επαναφορά** (σχήμα 5.11).

- (4) Στην περίπτωση των ισχυρά κραματωμένων χάλυβων (π.χ. εργαλειοχάλυβες) παρατηρείται αύξηση της σκληρότητας, όταν πραγματοποιηθεί επαναφορά περί τους 550°C . Αυτό οφείλεται στο σχηματισμό καρβιδίων των κραματικών στοιχείων (π.χ. καρβιδίων του μολυβδαινίου και βολφραμίου). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **δευτερογενής σκλήρυνση**.

Η σκληρότητα των διάφορων χάλυβων ανάλογα με τη θερμική κατεργασία φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:



Σχήμα 5.11: Οπτική μικρογραφία χάλυβα μετά από επαναφορά (μαρτενσίτης από επαναφορά), X100.

Πίνακας Π.5.1: Σκληρότητα χαλύβων σε συνάρτηση με τη θερμική κατεργασία

Θερμική κατεργασία	Σκληρότητα (HV)
Ανόπτηση	100-250
Βαφή - Επαναφορά	500-1000
Μπαινιτική βαφή	300-500
Μπαινιτομαρτενσιτική βαφή	400-700

Σε κραματωμένους χάλυβες, κυρίως χρωμιονικελιούχους, υπάρχει ένα κρίσιμο θερμοκρασιακό διάστημα (συνήθως από 250°-400°C) εντός του οποίου δεν πρέπει να πραγματοποιείται επαναφορά, διότι έχει παρατηρηθεί μεγάλη μείωση της δυσθραυστότητας του χάλυβα. Αυτό συμβαίνει λόγω δημιουργίας ψαθυρών σωματιδίων γύρω από τα όρια των κόκκων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ψαθυροποίηση κατά την επαναφορά**.

5.5. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

Οι επιφανειακές θερμικές κατεργασίες έχουν ως στόχο τη βελτίωση (σκλήρυνση) της επιφάνειας των χαλύβων, διατηρώντας την ολκιμότητα του εσωτερικού. Βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στις κατεργασίες εργαλείων και καλουπιών διαμόρφωσης, σε εξαρτήματα εδράνων και ολισθητήρων, σε οδοντωτούς τροχούς και σε εξαρτήματα αυτοκινήτων (π.χ. εκκεντροφόρος άξονας), όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή σε φθορά και τριβή, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται και υψηλή δυσθραυστότητα.

Οι πιο καθιερωμένες βιομηχανικές επιφανειακές κατεργασίες είναι οι ακόλουθες:

5.5.1 Ενανθράκωση

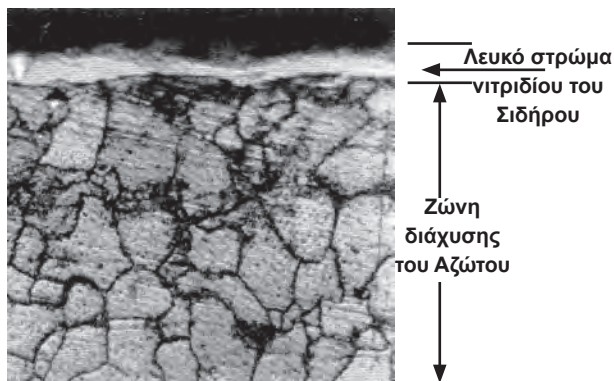
Καλείται ο εμπλουτισμός σε άνθρακα της επιφάνειας μαλακού χάλυβα (0,10-0,25%C) με θέρμανσή του πάνω από τη θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης (A_3), σε περιβάλλον κάποιου ενανθρακωτικού μέσου, είτε αερίου (π.χ. CH_4 , CO , CO_2) είτε υγρού (π.χ. τηγμένα άλατα $NaCN$, Na_2CO_3) είτε στερεού (π.χ. ξυλάνθρακας, $BaCO_3$, κ.λπ.). Το ενανθρακωτικό μέσο, διασπώμενο, απελευθερώνει άνθρακα, ο οποίος διαχέεται στην επιφάνεια του χάλυβα και διεισδύει έως κάποιας λεπτής στιβάδας. Μετά από τη θέρμανση ακολουθεί απότομη ψύξη (βαφή), η οποία οδηγεί σε σκλήρυνση μιας λεπτής επιφανειακής στιβάδας. Η ενανθράκωση βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στην επιφανειακή σκλήρυνση γραναζιών. Το βάθος της ενανθρακωμένης στιβάδας κυμαίνεται από 1 mm έως 3 mm περίπου και η σκληρότητά της μεταξύ 500 και 800 HV.

5.5.2 Εναζώτωση

Καλείται ο εμπλουτισμός της επιφάνειας του χάλυβα με άζωτο, που επιτυγχάνεται με θέρμανση περί τους $500^\circ C$, είτε σε αέριο περιβάλλον αμμωνίας (NH_3) είτε σε υγρό περιβάλλον (τηγμένα άλατα KCl , KCN), και έχει ως στόχο την επιφανειακή σκλήρυνση του υλικού. Ο μηχανισμός σκλήρυνσης οφείλεται στη δημιουργία επιφανειακού στρώματος νιτριδίων του σιδήρου (ενώσεων αζώτου με σίδηρο) κυρίως τύπου $Fe_{2-3}N$, Fe_4N και στερεού διαλύματος $Fe-N$ σε μεγαλύτερο βάθος λόγω της διάχυσης του αζώτου (σχήμα 5.12). Οι εναζωτωμένοι χάλυβες παρουσιάζουν αξιοσημείωτη αντίσταση σε φθορά-τριβή. Εργαλεία και μήτρες διαμόρφωσης υφίστανται εναζώτωση.

Συγκριτικά με την ενανθράκωση, η εναζώτωση γίνεται σε πολύ μικρότε-

ρο βάθος (0,5-1 mm) και η αποκτώμενη σκληρότητα είναι πολύ μεγαλύτερη (700 - 1300 HV). Επιπλέον, αποφεύγονται στρεβλώσεις και ρωγματώσεις λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας εναζώτωσης.



Σχήμα 5.12: Οπτική μικρογραφία εναζωτώμενου χάλυβα. Διακρίνεται η λευκή επιφανειακή στιβάδα, η οποία αποτελείται αποκλειστικά από νιτρίδιο του σιδήρου, ενώ και η υποκείμενη ζώνη είναι εμπλουτισμένη με άζωτο (μεγέθυνση X600).

5.5.3 Φλογοβαφή

Κατά τη φλογοβαφή ο χάλυβας θερμαίνεται επιφανειακά με τη βοήθεια φλόγας, που δημιουργείται από καύση μείγματος καυσίμου - οξυγόνου (π.χ. ασετυλίνη-οξυγόνο). Η θέρμανση πραγματοποιείται επιφανειακά και ακολουθείται από ψύξη, κατά την οποία συντελείται επιφανειακή βαφή. Φλογοβαφή συνιστάται σε αντικείμενα πολύπλοκης γεωμετρίας, σε χυτοσιδηρά εξαρτήματα και σε ορισμένες περιπτώσεις σε οδοντωτούς τροχούς.

5.5.4 Επαγωγική βαφή ή σκλήρυνση

Κατά την επαγωγική σκλήρυνση ή επιφανειακή σκλήρυνση με υψίσυχνα ρεύματα, το υλικό τοποθετείται κατάλληλα μέσα σε ένα πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής προκαλεί υψίσυχνα επαγωγικά ρεύματα, τα οποία διεισδύουν σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του υλικού, θερμαίνοντάς το ταυτόχρονα τοπικά. Η θέρμανση αυτή πάνω από την A_3 προκαλεί ωστενιτοποίηση της επιφανειακής στιβάδας του υλικού και κατόπιν ακολουθεί απότομη ψύξη (βαφή) για τη σκλήρυνση της επιφάνειας. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στη σκλήρυνση εξαρτημάτων απλής γεωμετρίας, ολισθητήρων εργαλειομηχανών, κ.λπ.

5.5.5 Επιφανειακή βαφή με δέσμη LASER

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το κατεργαζόμενο υλικό ακτινοβολείται με δέσμη laser υψηλής πυκνότητας ισχύος (περίπου 10^6 W/cm²) και στη συνέχεια ψύχεται στον αέρα (αυτοβαφή). Πριν την κατεργασία απαιτείται μια προεργασία βελτίωσης της απορροφητικής ικανότητας της επιφάνειας (π.χ. αμμοβολή, επικάλυψη με γραφίτη). Πρόκειται για μη συμβατική μέθοδο επιφανειακής σκλήρυνσης χαλύβων, η οποία παρουσιάζει όμως μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον εξαιτίας των παρακάτω πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις συμβατικές επιφανειακές κατεργασίες:

- μεγάλη συγκέντρωση ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας
- επίτευξη μεγάλης ταχύτητας απόψυξης στον αέρα (αυτοβαφή)
- ταχύτητα και αυτοματοποίηση της κατεργασίας
- δυνατότητα συνεχούς επεξεργασίας τεμαχίων
- δυνατότητα κατεργασίας επιφανειών πολύπλοκης γεωμετρίας

5.6 ΦΟΥΡΝΟΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Οι διάφορες κατηγορίες φούρνων θερμικών κατεργασιών προκύπτουν σύμφωνα με τα κριτήρια διάκρισης που χρησιμοποιούνται και που είναι τα παρακάτω:

- χρήση
- τρόπος λειτουργίας
- τρόπος παρεχόμενης ενέργειας
- ατμόσφαιρα

5.6.1 Διάκριση σύμφωνα με τη χρήση

Σε αυτή την περίπτωση, ανάλογα με την εκάστοτε θερμική κατεργασία για την οποία προορίζεται ο κάθε φούρνος, έχουμε τα παρακάτω βασικά είδη:

- (i) φούρνοι ανόπτησης
- (ii) φούρνοι βαφής
- (iii) φούρνοι επαναφοράς

- (iii) **φούρνοι επιφανειακών κατεργασιών (π.χ. ενανθράκωσης, εναζώτωσης)**

5.6.2 Διάκριση σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας

Σε αυτή την περίπτωση, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του φούρνου, υπάρχουν οι παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- (i) **Φούρνοι συνεχούς έργου.** Σε αυτή την κατηγορία πραγματοποιείται συνεχής ροή τεμαχίων μέσα στο φούρνο (π.χ. μέσω μεταφορικής ταινίας), πράγμα το οποίο είναι σύνηθες στην παραγωγή ομοίων εξαρτημάτων σε βιομηχανική κλίμακα (π.χ. ενανθράκωση οδοντωτών τροχών).
- (ii) **Φούρνοι διαλείποντος έργου.** Σε αντίθεση με την παραπάνω κατηγορία, εδώ η παραγωγή γίνεται με διακοπτόμενο τρόπο και κάθε φορά εισέρχεται στο φούρνο διαφορετικός αριθμός αντικειμένων προς κατεργασία, τα οποία είναι στις περισσότερες φορές ανάμοια μεταξύ τους.

5.6.3 Διάκριση σύμφωνα με τον τρόπο παρεχόμενης ενέργειας

- (i) **Φούρνοι καυσίμου.** Η ενέργεια προσδίδεται υπό τη μορφή θερμότητας, η οποία εκλύεται από την καύση καυσίμου (αέριο, υγρό, στερεό). Η μετάδοση θερμότητας γίνεται μέσω της επαφής των θερμών καυσαερίων με τα κατεργαζόμενα τεμάχια.
- (ii) **Ηλεκτρικοί φούρνοι.** Λειτουργούν με ηλεκτρικές αντιστάσεις από κατάλληλο πυρίμαχο υλικό (όπως π.χ. ανθρακοπυρίτιο, SiC), οι οποίες θερμαινόμενες ακτινοβολούν θερμότητα προς τα κατεργαζόμενα τεμάχια. Είναι η πιο συνήθης κατηγορία βιομηχανικών φούρνων.

5.6.4 Διάκριση σύμφωνα με την ατμόσφαιρα

- (i) **Φούρνοι αέρα.** Είναι η πιο απλή κατηγορία φούρνων. Σε αυτή την περίπτωση τα κατεργαζόμενα υλικά κινδυνεύουν από οξειδωση και απανθράκωση, λόγω του οξυγόνου της ατμόσφαιρας.
- (ii) **Φούρνοι αδρανούς ατμόσφαιρας.** Χρησιμοποιούν ρεύμα κάποιου ευγενούς αερίου (π.χ. He, Ar) για την προστασία των μετάλλων από την οξειδωση.
- (iii) **Φούρνοι τηγμένων αλάτων.** Χρησιμοποιούν λουτρά τηγμένων αλάτων (π.χ. κυανιούχων, χλωριούχων), τα οποία διατηρούνται σε σταθερή θερμοκρασία και προστατεύουν τα κατεργαζόμενα υλικά από την οξειδωση. Τέτοιοι φούρνοι χρησιμοποιούνται κυρίως για βαφή, επαναφορά και εναζώτωση.

- (iv) **Φούρνοι ρευστοστερεάς κλίνης.** Περιέχουν στερεά σκόνη (που αναδεύεται με τη βοήθεια κάποιου αερίου μείγματος), η οποία μέσω κατάλληλης χημικής αντίδρασης απελευθερώνει κατάλληλο στοιχείο (C, N κ.λπ.), το οποίο εμπλουτίζει την επιφάνεια του προς κατεργασία μετάλλου.
- (v) **Φούρνοι πλάσματος.** Με τη βοήθεια ηλεκτρικής εκκένωσης υψηλής τάσης ιονίζεται το αέριο της ατμόσφαιρας (π.χ. Ar) και μεταπίπτει στην κατάσταση του πλάσματος (το οποίο περιλαμβάνει κυρίως ιόντα αερίου, ιόντα μετάλλου και ηλεκτρόνια). Οι φούρνοι πλάσματος χρησιμοποιούνται για μοντέρνες επιφανειακές και θερμικές κατεργασίες, όπως είναι π.χ. η εναζώτωση πλάσματος.
- (vi) **Φούρνοι κενού.** Είναι φούρνοι που χρησιμοποιούνται για εξειδικευμένες επιφανειακές κατεργασίες, όπως είναι αυτές με δέσμες ιόντων (π.χ. επιφανειακές κατεργασίες με δέσμες ηλεκτρονίων).



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Η ανόπτηση θεωρείται θερμική κατεργασία με μικρή ταχύτητα απόψυξης σε αντιδιαστολή με τη βαφή που θεωρείται θερμική κατεργασία με μεγάλη ταχύτητα απόψυξης. Τα πιο σημαντικά είδη ανόπτησης χάλυβα είναι τα ακόλουθα:
 - (1) Ανόπτηση κατεργασίας
 - (2) Πλήρης ανόπτηση
 - (3) Ανόπτηση σφαιροποίησης
 - (4) Ανόπτηση εξομάλυνσης
 - (5) Ανόπτηση χυτοχάλυβα
- Η ανόπτηση κατεργασίας πραγματοποιείται σε χαμηλή σχετικά θερμοκρασία (600-700°C) και έχει ως στόχο την εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων που έχουν προέλθει από την ψυχρή μορφοποίηση του υλικού (έλαση, διέλαση, κλπ.). Η πλήρης ανόπτηση είναι η θέρμανση του χάλυβα για κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται συνήθως κατά 40-50°C πάνω από την A_3 , για

τους υποευτηκτοειδείς χάλυβες, ή κατά 40-50°C πάνω από την A_1 (727°C), για τους υπερευτηκτοειδείς χάλυβες, ακολουθούμενη από αργή ψύξη μέσα στο φούρνο. Η ψύξη που ακολουθεί είναι πολύ αργή και πραγματοποιείται συνήθως μέσα στο φούρνο. Στόχος της πλήρους ανοπτήσεως είναι η αποκατάσταση της μικροδομής του χάλυβα κάτω από συνθήκες ισορροπίας φάσεων και η βελτίωση της κατεργασιμότητάς του. Η σφαιροποίηση περιλαμβάνει τη θέρμανση του χάλυβα κατά περίπου 50°C κάτω από την A_1 (650-700°C), για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, συνήθως 25 h. Κύριος στόχος της ανόπτησης αυτής είναι η σφαιροποίηση του σεμεντίτη για την βελτίωση της κατεργασιμότητάς του στην κοπή. Η εξομάλυνση είναι παρόμοια με την πλήρη ανόπτηση, και περιλαμβάνει τη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία περίπου 50°C πάνω από την A_3 , για κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα, ακολουθούμενη από γρήγορη σχετικά ψύξη στον αέρα (η ταχύτητα ψύξης είναι πολύ πιο γρήγορη απ' ό,τι η αντίστοιχη ταχύτητα της πλήρους ανόπτησης). Ο κυριότερος στόχος της εξομάλυνσης είναι η μείωση του μεγέθους των κόκκων και των φυλλιδίων φερρίτη/σεμεντίτη μέσα στον περλίτη, με αποτέλεσμα την αύξηση της μηχανικής αντοχής και δυσθραυστότητας του χάλυβα. Άλλοι στόχοι που επιτυγχάνονται με την εξομάλυνση είναι οι ακόλουθοι:

- ✓ η εξάλειψη του διαφορισμού (διαφορισμός = συγκέντρωση των προσμείξεων στα όρια των κόκκων κατά τη χύτευση) σε χυτά τεμάχια.
 - ✓ η εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων
 - ✓ η βελτίωση της κατεργασιμότητας
- Η ανόπτηση χυτοχάλυβα περιλαμβάνει τη θέρμανση του τεμαχίου σε θερμοκρασία 40-50°C πιο πάνω από την A_3 και παραμονή για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, ακολουθούμενη από ψύξη μέσα στο φούρνο. Η ανόπτηση αυτή πραγματοποιείται προκειμένου να εξαλειφθεί η ψαθυρή δομή Widmanstätten.
 - Απλή βαφή ή βαφή είναι η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης που περιλαμβάνει ένα στάδιο θέρμανσης και παραμονής του χάλυβα (ωστενιτοποίηση) σε θερμοκρασία ίδια με αυτή της πλήρους ανοπτήσεως, ($A_3 + 50$ για υποευτηκτοειδείς και $A_1 + 50$ για υπερευτηκτοειδείς χάλυβες) και ένα ακόλουθο στάδιο απότομης ψύξεως, με εμβάπτιση του χάλυβα σε κάποιο μέσο ψύξεως (αλατόνερο, νερό, λάδι, αέρας). Στόχος της βαφής είναι η βελτίωση των μηχανικών ιδι-

οτήτων του χάλυβα (σκληρότητα, αντοχή), που απαιτούνται για τη λειτουργία του (π.χ. εργαλεία κοπής, καλούπια διαμόρφωσης, κλπ.). Έτσι ένας χάλυβας με αρχική σκληρότητα 150-250 HV μπορεί να αποκτήσει σκληρότητα πάνω από 750-800 HV, έπειτα από βαφή.

- Όσο πιο απότομη είναι η ταχύτητα απόψυξης τόσο αυξάνεται και η σκληρότητα του υλικού με άμεσο όμως επακόλουθο τη δραματική μείωση της δυσθραυστότητας και με κίνδυνο την εμφάνιση ρωγμών. Η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται από τη δραστικότητα του μέσου απόψυξης και αυξάνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά:

αέρας < λάδι < νερό < αλατόνερο

- Κατά την απότομη απόψυξη επιτυγχάνεται η μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Ο μαρτενσίτης αναπτύσσεται σχεδόν ακαριαία (10^{-6} - 10^{-7} s) μέσα στους κόκκους του ωστενίτη με τη μορφή πλακών ή βελόνων. Η σκληρότητα του μαρτενσίτη είναι πολύ μεγάλη (500-1000 HV) λόγω, αφενός, της ανάπτυξης εντόνων εσωτερικών τάσεων και αταξιών κατά την απότομη ψύξη και, αφετέρου, του κορεσμού της κρυσταλλικής δομής του σε άνθρακα.
- Με τον όρο εμβαπτότητα καλείται η ικανότητα σκλήρυνσης του υλικού μετά από τη βαφή. Αυτή εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η χημική σύσταση και το μέγεθος των κόκκων του χάλυβα, το μέγεθος του τεμαχίου και το μέσο απόψυξης. Η εμβαπτότητα προσδιορίζεται με την πρότυπη δοκιμή Jominy και εκφράζεται με τη βοήθεια των παρακάτω παραμέτρων:

(α) Κρίσιμο βάθος βαφής

(β) Κρίσιμη ταχύτητα βαφής

- Ο μαρτενσίτης μετά από βαφή χαρακτηρίζεται από μεγάλη σκληρότητα αλλά και συνάμα από μικρή δυσθραυστότητα, με αποτέλεσμα το κατεργαζόμενο τεμάχιο να είναι ψαθυρό. Η βελτίωση της δυσθραυστότητας επιτυγχάνεται με την επαναφορά. Επαναφορά καλείται η αναθέρμανση του χάλυβα μετά από τη βαφή σε θερμοκρασίες κάτω από την A_1 (250-650°C) διάρκειας μερικές ώρες, ακολουθούμενη από ήρεμη ψύξη (λάδι, αέρας ή μέσα στο φούρνο). Η επαναφορά έχει ως σκοπό τα ακόλουθα:

- ✓ την αύξηση της δυσθραυστότητας του χάλυβα με μικρή μείωση της αρχικής του σκληρότητας και

- ✓ τη μετατροπή του υπολειπόμενου ωστενίτη (του ωστενίτη που δεν έχει μετασχηματισθεί σε μαρτενσίτη κατά τη βαφή) σε μαρτενσίτη.

Η όλη κατεργασία της βαφής και επαναφοράς του χάλυβα ονομάζεται επιβελτίωση.

- Οι επιφανειακές θερμικές κατεργασίες (κατεργασίες επιφανειακής σκλήρυνσης) έχουν ως στόχο τη βελτίωση (σκλήρυνση) της επιφάνειας των χαλύβων, διατηρώντας την ολκιμότητα του εσωτερικού. Βρίσκουν δε μεγάλη εφαρμογή στις κατεργασίες εργαλείων και καλουπιών διαμόρφωσης, σε εξαρτήματα εδράνων και ολισθητήρων, σε οδοντωτούς τροχούς και σε εξαρτήματα αυτοκινήτων (π.χ. εκκεντροφόρος άξονας), όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή σε φθορά και τριβή, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται και υψηλή δυσθραυστότητα.
- Οι πιο καθιερωμένες βιομηχανικές επιφανειακές κατεργασίες είναι οι ακόλουθες:
 - ✓ Ενανθράκωση
 - ✓ Εναζώτωση
 - ✓ Φλογοβαφή
 - ✓ Επαγωγική βαφή
- Οι διάφορες κατηγορίες φούρνων θερμικών κατεργασιών προκύπτουν σύμφωνα με τα κριτήρια διάκρισης που χρησιμοποιούνται και που είναι τα παρακάτω:
 - ✓ χρήση
 - ✓ τρόπος λειτουργίας
 - ✓ τρόπος παρεχόμενης ενέργειας
 - ✓ ατμόσφαιρα
- Σε αυτή την περίπτωση, ανάλογα με την εκάστοτε θερμική κατεργασία για την οποία προορίζεται ο κάθε φούρνος έχουμε τα παρακάτω βασικά είδη:
 - (i) φούρνοι ανόπτησης
 - (ii) φούρνοι βαφής
 - (iii) φούρνοι επαναφοράς
 - (iv) φούρνοι επιφανειακών κατεργασιών (π.χ. ενανθράκωσης, εναζώτωσης)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

6

ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

- 6.1 Κατάταξη των χαλύβων
- 6.2 Τυποποίηση χαλύβων
- 6.3 Κραματωμένοι χάλυβες
- 6.4 Χάλυβες κατασκευών
- 6.5 Ανοξείδωτοι χάλυβες
- 6.6 Εργαλειοχάλυβες
- 6.7 Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να εξοικειωθείτε με τα διάφορα συστήματα τυποποίησης των χαλύβων και την αντίστοιχη ονοματολογία
- ☒ Να μάθετε τα διάφορα είδη χαλύβων ανάλογα με τη χημική τους σύσταση και τις προτεινόμενες εφαρμογές
- ☒ Να μάθετε την επίδραση πάνω στις ιδιότητες των χαλύβων στοιχείων κραμάτωσης όπως το χρώμιο, το νικέλιο, το μαγγάνιο, το βολφράμιο, το μολυβδαίνιο, το βανάδιο, κ.λπ.
- ☒ Να δίνετε παραδείγματα χρήσης ανοξειδωτων χαλύβων και εργαλειοχαλύβων

Τα τεχνικά μεταλλικά υλικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα **σιδηρούχα** και τα μη **σιδηρούχα**. Τα σιδηρούχα μεταλλικά υλικά περιλαμβάνουν κυρίως τους χάλυβες και τους χυτοσιδήρους (βλ. Παράγραφο 4.4.), ενώ τα μη σιδηρούχα περιλαμβάνουν κυρίως τα κράματα χαλκού, αλουμινίου, τιτανίου, μαγνησίου, ψευδαργύρου, μολύβδου, κ.λπ..

6.1 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Ανάλογα με τη χημική σύστασή τους οι χάλυβες μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

(i) **Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες.** Περιέχουν έως 1,0% Mn και ελάχιστα ποσοστά προσμείξεων θείου (S) και φωσφόρου (P) έως 0,05%. Πρόκειται για μαλακούς χάλυβες (για μικρή περιεκτικότητα C), οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένη συγκολλησιμότητα.

(ii) **Κραματωμένοι χάλυβες.**

- *Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες.* Περιέχουν προσμείξεις έως 2%. Τέτοιοι είναι οι δομικοί ή κατασκευαστικοί χάλυβες.

- *Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες.* Περιέχουν προσμείξεις από 2% έως 10%.
- *Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες.* Περιέχουν προσμείξεις πάνω από 10%. Τέτοιοι είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, οι ταχυχάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι χάλυβες μαρτενγήρανσης (Maraging) με μεγάλα ποσοστά βολφραμίου (W), βαναδίου (V), μολυβδαινίου (Mo), χρωμίου (Cr), νικελίου (Ni) και κοβαλτίου (Co).

Όσον αφορά τον προορισμό τους οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- (i) **Χάλυβες διαμόρφωσης.** Αυτοί υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση).
- (ii) **Χυτοχάλυβες.** Παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή “χελωνών”.

Όσον αφορά τη χρήση οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- (i) **Χάλυβες κατασκευών.** Είναι χάλυβες με μικρά, σχετικά ποσοστά κραματικών στοιχείων (συνήθως Mn, Cr) και χρησιμοποιούνται σε πλήθος κατασκευών, όπως π.χ. λέβητες, μεταλλικοί σκελετοί, κ.λπ., αλλά και σε στοιχεία μηχανών, όπως π.χ. άξονες, διωστήρες, βαλβίδες, ελατήρια, κ.λπ.
- (ii) **Ανοξείδωτοι χάλυβες.** Είναι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε Cr (>13%) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, που απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση, όπως π.χ. στη χημική βιομηχανία. Κατασκευές από ανοξείδωτο χάλυβα είναι σωλήνες, πτερωτές, δοχεία, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες και οτιδήποτε έρχεται σε επαφή με διαβρωτικό υγρό, καθώς επίσης σε ιατρικά εργαλεία (π.χ. χειρουργικά νυστέρια) και είδη οικιακής χρήσεως, όπως π.χ. είδη κουζίνας, μαχαιροπήρουνα, κ.λπ.
- (iii) **Εργαλειοχάλυβες.** Περιέχουν συνήθως μεγάλα ποσοστά κραματικών στοιχείων (W, Mo, Cr, V), τα οποία ευνοούν την αύξηση της σκληρότητας και της αντίστασης σε φθορά-τριβή. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κοπής (κοπτικά τόρνου, φρέζας, πλάνης, κ.λπ.) ή διαμόρφωσης (μήτρες, έμβολα, καλούπια χύτευσης και διαμόρφωσης).
- (iii) **Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών.** Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών ηλεκτρικών γεννητριών, μονίμων μαγνητών, κ.λπ.

6.2 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ

Η ονοματολογία των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα συστήματα τυποποίησης, όπως είναι το γερμανικό DIN, το αμερικάνικο AISI-SAE, το γαλλικό AFNOR και το αγγλικό BS. Παρακάτω, θα αναπτυχθεί η ονοματολογία των χαλύβων στα πιο συνήθη συστήματα, που είναι το γερμανικό DIN και το αμερικάνικο AISI-SAE.

6.2.1 Τυποποίηση κατά DIN

Η ονομασία ενός **κοινού ανθρακούχου χάλυβα** ξεκινά με το πρόθεμα **St** (από το γερμανικό Stahl που σημαίνει χάλυβας) και ακολουθεί ένας αριθμός, που δηλώνει την αντοχή αυτού του χάλυβα σε εφελκυσμό, μετρούμενη σε kp/mm^2 . Έτσι, ένας ανθρακούχος χάλυβας με αντοχή 700 N/mm^2 (δηλ. 70 kp/mm^2) συμβολίζεται, σύμφωνα με αυτήν την ονοματολογία, ως **St 70**. Παλαιότερα ακολουθούσαν και δύο ακόμη ψηφία που δήλωναν τα δύο τελευταία ψηφία του προτύπου DIN. Π.χ. ο συμβολισμός St 5011 δηλώνει χάλυβα αντοχής 50 kp/mm^2 (ή 500 N/mm^2), ο οποίος είναι τυποποιημένος σύμφωνα με το πρότυπο DIN 1611 (τα δύο πρώτα ψηφία, 16, αναφέρονται στους χάλυβες). Συνήθως, τον αριθμό που δηλώνει την αντοχή ακολουθεί ένα ψηφίο που αφορά την ποιότητα (1: συνήθεις απαιτήσεις, 2: μεγαλύτερες απαιτήσεις, 3: ειδικές απαιτήσεις). Π.χ. ο χάλυβας St 40-1 έχει αντοχή 400 N/mm^2 και ανήκει στην ποιότητα 1.

Στην περίπτωση **ανθρακούχων χαλύβων καλύτερης ποιότητας** ο συμβολισμός ξεκινά με το γράμμα **C** (που δηλώνει άνθρακα) και ακολουθεί η εκατοστιαία περιεκτικότητα σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100. Π.χ. ο χάλυβας **C 60** είναι ανθρακούχος χάλυβας με $60/100 = 0,60 \%$ κ.β. C. Στην περίπτωση των υπερκαθαρών χαλύβων (με εξαιρετικά χαμηλά ποσοστά ακαθαρσιών S, P) μεταξύ του C και της περιεκτικότητας παρεμβάλλεται το γράμμα K. Π.χ. ο προηγούμενος χάλυβας θα ονομαζόταν CK 60, αν η περιεκτικότητά του σε S και P ήταν πολύ χαμηλή. Όταν ο χάλυβας έχει υποστεί κάποια θερμική κατεργασία, χρησιμοποιούνται γράμματα του λατινικού αλφαβήτου: το E δηλώνει ενανθράκωση, το G ανόπτηση, το N εξομάλυνση και το V επιβελτίωση.

Στην περίπτωση των **κραματωμένων χαλύβων** προηγείται η περιεκτικότητα του άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100 και έπεται ο χημικός συμβολισμός για τα στοιχεία προσθήκης με τις περιεκτικότητες πολλαπλασιασμένες με κάποιο αριθμό:

Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	x 4
Al, Cu, Mo, Ti, V	x 10
P, S, N, C	x 100

□ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.1

Ποια είναι η χημική σύσταση των παρακάτω χαλύβων: 20 Cr 4 και 15 Cr Mo 86;

Λύση

Η περιεκτικότητα σε C του πρώτου χάλυβα είναι 20/100 %, δηλαδή 0,2% κ.β και η περιεκτικότητα του Cr είναι ίση προς 4/4, δηλαδή 1,0% κ.β.

Ο δεύτερος χάλυβας έχει $15/100 = 0,15$ % κ.β. C, $8/4 = 2\%$ κ.β. Cr και $6/10 = 0,6\%$ κ.β. Mo.

Στην περίπτωση που τα ποσοστά των προσμείξεων θα ξεπεράσουν το 5% τότε μπροστά από την ονομασία του χάλυβα μπαίνει το γράμμα X, ακολουθεί η περιεκτικότητα του άνθρακα επί 100, τα στοιχεία προσθήκης και οι περιεκτικότητές τους πολλαπλασιασμένες με τη μονάδα. Έτσι, π.χ. ο χάλυβας X 40 CrMo 124 περιέχει 0,40% C, 12% Cr και 4% Mo.

6.2.2 Τυποποίηση κατά AISI-SAE

Η ονοματολογία των ανθρακούχων και κραματωμένων χαλύβων κατά AISI-SAE περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία ΧΨΖΩ. Με τα δύο πρώτα ψηφία μπορεί να ευρεθεί (με τη βοήθεια πινάκων) το κύριο ή τα κύρια στοιχεία προσθήκης και τα ποσοστά τους στο χάλυβα. Τα δύο τελευταία ψηφία δείχνουν την περιεκτικότητα σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100. Το πρώτο ψηφίο των ανθρακούχων χαλύβων με μικρά ποσοστά προσμείξεων είναι 1.

Παρακάτω αναφέρονται μερικά παραδείγματα τυποποιημένων κατά AISI-SAE χαλύβων:

Ο χάλυβας AISI-1045 είναι ανθρακούχος με 0,45% C.

Ο χάλυβας AISI 1330 είναι χάλυβας με 1,60-1,90 % Mn και 0,30 % C.

Ο χάλυβας AISI-2340 είναι νικελιούχος με 3,5% Ni και 0,40% C.

Ο χάλυβας AISI-3430 είναι νικελιοχρωμιούχος με 3% Ni, 0,8% Cr και 0,30% C.

Η τυποποίηση των διαφόρων κατηγοριών χαλύβων κατασκευών, ανοξείδωτων και εργαλειοχαλύβων, αναφέρεται στις αντίστοιχες παραγράφους.

6.3 ΚΡΑΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

6.3.1 Επίδραση των στοιχείων προσθήκης

Τα στοιχεία τα οποία προστίθενται στο χάλυβα έχουν στόχο να βελτιώσουν τη δομή, τις μηχανικές του ιδιότητες, την αντοχή σε φθορά και διάβρωση. Ορισμένες από τις δράσεις των στοιχείων προσθήκης αναφέρονται παρακάτω:

- Σταθεροποίηση του φερρίτη (**α-φερρογόνα στοιχεία**): **Cr, Mo, W, V, Si**
- Σταθεροποίηση του ωστενίτη (**γ-φερρογόνα στοιχεία**): **Mn, Ni, Co**
- Τάση σχηματισμού καρβιδίων (**καρβιδιογόνα στοιχεία**):
Co<Fe< Mn<Cr<Mo<W<V<Ti
- Τάση διάσπασης καρβιδίων σε γραφίτη (**γραφιτίζοντα στοιχεία**): **Ni, Si, Al**
- Μετατόπιση των καμπυλών TTT προς τα δεξιά-**αύξηση της εμβαιότητας: μικρή για Mn,Cr, σημαντική για Ni και μεγάλη Mo,W,V**
- Βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση: **Cr, Ni, Si**
- Τάση εκλέπτυνσης των κόκκων: **V, Al**
- Αύξηση κατεργασιμότητας: **Mn**
- Αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας: **Si**

Οι ακαθαρσίες θείου και φωσφόρου πρέπει να διατηρούνται σε μικρά ποσοστά, διότι ψαθυροποιούν το χάλυβα. Αναλυτικά ο ρόλος για καθένα ξεχωριστά από τα βασικότερα στοιχεία προσθήκης παρουσιάζεται στον Πίνακα Π.6.1.

Πίνακας Π.6.1: Επίδραση κραματικών στοιχείων στο χάλυβα

Στοιχείο προσθήκης	Κατηγορία	Διαλυτότητα	Επίδραση
Ni (νικέλιο)	γ-φερρογόνο και γραφιτίζον	10% στον φερρίτη και άνευ ορίου στον ωστενίτη	Σημαντική αύξηση εμβαιπτότητας. Αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και της προστασίας από διάβρωση.
Cr (χρώμιο)	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	άνευ ορίου στον φερρίτη και 13% στον ωστενίτη	Μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας. Αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και της προστασίας από διάβρωση (ιδίως >13%)
Mn (μαγγάνιο)	γ-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	3% στον φερρίτη και άνευ ορίου στον ωστενίτη	Μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας. Αύξηση της κατεργασιμότητας σε κοπή (χάλυβες ελευθέρως κοπής). Μεγάλη αντοχή σε φθορά-τριβή για ποσοστά > 12% (χάλυβες Hadfield)
Mo (μολυβδαίνιο)	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	37% στον φερρίτη και 5% στον ωστενίτη	Μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας. Αύξηση της σκληρότητας, της αντοχής σε επαναφορά και της αντοχής σε φθορά-τριβή.
W (βολφράμιο)	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	33% στον φερρίτη και 6% στον ωστενίτη	Μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας, της σκληρότητας, της αντοχής σε επαναφορά και της αντοχής σε φθορά-τριβή.
V (βανάδιο)	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	άνευ ορίου στον φερρίτη και 1% στον ωστενίτη	Πολύ μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας. Προκαλεί τη μεγίστη αύξηση της σκληρότητας μετά από επαναφορά. Μεγάλη αύξηση της αντοχής σε φθορά-τριβή.
Co (κοβάλτιο)	γ-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	75% στον φερρίτη και άνευ ορίου στον ωστενίτη	Μείωση της εμβαιπτότητας. Προκαλεί σκλήρυνση με το σχηματισμό μεσομεταλλικών ενώσεων σε ειδικές κατηγορίες χαλύβων (χάλυβες Maraging)
Si (πυρίτιο)	α-φερρογόνο και γραφιτίζον	18,5% στον φερρίτη και 6% στον ωστενίτη	Μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας. Προστασία από διάβρωση. Χρήση σε ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές.

6.4 ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η κατάταξη κατά AISI-SAE, οι ιδιότητες και οι βασικές χρήσεις των χαλύβων κατασκευών φαίνονται στον Πίνακα Π.6.2. Από άποψη δομής, οι χάλυβες κατασκευών διακρίνονται σε: φερριτικούς, φερριτικούς/περλιτικούς, ωστενιτικούς και μαρτενσιτικούς.

Πίνακας Π.6.2: Βασικές κατηγορίες κραματωμένων χαλύβων κατασκευών και αντίστοιχες ιδιότητες - χρήσεις.

Κύρια σειρά (AISI-SAE)	Είδος χάλυβα	Ιδιότητες- χρήσεις
2000	Νικελιούχος	Αντοχή σε κόπωση, διάβρωση. Ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές.
3000	Νικελιοχρωμιούχος	Καλή εμβαπτότητα και αντοχή σε διάβρωση. Επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση. Κατασκευή διωστήρων, αξόνων, κλπ.
4000	Μολυβδαινιούχος	Καλή εμβαπτότητα. Σκληρότητα, αντίσταση στη φθορά και αντοχή στον ερπυσμό. Κατασκευή τμημάτων λεβήτων, αεριοστροβίλων, κλπ.
5000	Χρωμιούχος	Καλή εμβαπτότητα. Επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση. Κατασκευή λεπίδων, διωστήρων, ρουλεμάν, εκκέντρων, κλπ.
6000	Χρωμιοβαναδιούχος	Πολύ καλή εμβαπτότητα. Αύξηση της αντοχής σε φθορά-τριβή. Κατασκευή μαχαιριών, ψαλιδιών, λεπίδων, ελατηρίων βαλβίδων, κλπ.
7000	Βολφραμιοχρωμιούχος	Πολύ καλή εμβαπτότητα. Μεγάλη σκληρότητα και αντοχή στη φθορά-τριβή. Κατασκευή σιγέων, ψαλιδιών, λεπίδων, κλπ.
8000	Νικελιοχρωμιομολυβδαινιούχος	Πολύ καλή εμβαπτότητα. Επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή ατράκτων, σφυρήλατων αντικειμένων, κλπ.
9000	Πυριτιούχος	Μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών.

6.5 ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Είναι χάλυβες εξαιρετικής αντοχής στην οξείδωση και στη διάβρωση γενικότερα. Η αντοχή τους αυτή οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητά τους σε χρώμιο (Cr). Η περιεκτικότητά τους σε Cr κυμαίνεται από 12-30% κ.β.. Το Cr αντιδρά χημικά με το οξυγόνο του αέρα και δημιουργείται επιφανειακά το οξείδιο του χρωμίου, Cr_2O_3 , που προστατεύει το μέταλλο βάσης από την οξείδωση. Το φαινόμενο αυτό προστασίας ονομάζεται **παθητικοποίηση**.

Οι βασικοί ανοξείδωτοι χάλυβες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες (Βλ. Πίνακα Π.6.3):

- (α) **Μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες.** Περιέχουν χρώμιο 12-17% και άνθρακα 0,15-1% και μπορούν να σκληρυνθούν με τη θερμική κατεργασία της βαφής. Παράλληλα με την αντοχή στη διάβρωση, οι χάλυβες αυτοί έχουν και μεγάλη σκληρότητα λόγω του μαρτενσίτη που δημιουργείται κατά τη βαφή.

Πίνακας Π.6.3: Βασικοί ανοξείδωτοι χάλυβες και κύριες χρήσεις.

Είδος	AISI	C	Cr	Ni	Mo	Al	Ιδιότητες-χρήσεις
Μαρτενσιτικοί	410	<0,15	12	-	-	-	Μεγάλη σκληρότητα. Κατασκευές εργαλείων, εξαρτημάτων αντλιών, ψαλιδιών, κλπ.
	420	>0,15	13	-	-	-	
Φερριτικοί	405	0-0,08	13	-	-	0,2	Πυρίμαχοι και οξύμαχοι χάλυβες με χρήσεις στην χημική βιομηχανία, τη βιομηχανία τροφίμων και στην αρχιτεκτονική.
	430	0-0,12	17	-	-	-	
Ωστενιτικοί	304	0-0,08	19	9	-	-	Χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία, την βιομηχανία αυτοκινήτων, τη ναυπηγική και την αεροναυπηγική.
	316	0-0,08	17	12	2,5	-	
Σκλήρυνσης με κατακρήμνιση	361 17- 17PH	0,09	17	7	-	1,2	Παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Χρησιμοποιούνται ως δομικά στοιχεία αεροσκαφών.

(β) Φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες. Περιέχουν χρώμιο πάνω από 13% με αποτέλεσμα να σταθεροποιείται ο φερρίτης (α -Fe), μετά από τη θερμική κατεργασία. Λόγω της μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα, υπάρχει περίπτωση να σχηματισθούν καρβίδια του χρωμίου, σε περιορισμένη όμως κλίμακα.

(γ) Ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες. Περιέχουν χρώμιο 16-25%, νικέλιο 7-20% και μετά από ανόπτηση σχηματίζεται μονοφασικό ωστενιτικό κράμα (γ -Fe). Έχουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, σχετικά καλή μηχανική αντοχή και καλή κατεργασιμότητα.

(δ) Ανοξείδωτοι χάλυβες σκληρύνσεως δια κατακρημνίσεως. Εκτός από την υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο, περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία, όπως νικέλιο (Ni), ταντάλιο (Ta), νιόβιο (Nb), τιτάνιο (Ti), αλουμίνιο (Al) και η σκληρότητά τους προκύπτει κυρίως από μαρτενσιτικό μετασχηματισμό (βαφή) και κατακρήμνιση μεσομεταλλικών ενώσεων τύπου Ni_3Al , Ni_3Ti , Ni_3Nb .

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο ($> 20\%$) ψαθυροποιούνται με παρατεταμένη θέρμανση μεταξύ 550 και 800°C, λόγω κατακρήμνισης της σ-φάσης (FeCr), η οποία είναι πολύ σκληρή και εύθραυστη.

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες εμφανίζουν το φαινόμενο της **ευαισθητοποίησης** κατά τη θέρμανσή τους μέσα στο διάστημα 425-870°C (π.χ. κατά τη συγκόλληση). Στο θερμοκρασιακό αυτό διάστημα κατακρημνίζονται (σχηματίζονται) καρβίδια του χρωμίου, τύπου $Cr_{23}C_6$ και Cr_7C_3 , στα όρια των κόκκων του ωστενίτη. Η ζώνη γύρω από τα καρβίδια είναι ελαττωμένης περιεκτικότητας σε Cr και επομένως παρουσιάζει μειωμένη αντοχή σε διάβρωση. Έτσι, παρουσία οξέων ή άλλων διαβρωτικών μέσων, η ζώνη γύρω από τα καρβίδια ευαισθητοποιείται και διαβρώνεται με μεγάλους ρυθμούς, με αποτέλεσμα τη χαλάρωση της συνάφειας των ορίων των κόκκων. Η χαρακτηριστική αυτή περίπτωση διάβρωσης ονομάζεται **περικρυσταλλική διάβρωση** και οδηγεί σε περικρυσταλλική ψαθυρή θραύση του υλικού. Με αυτό το μηχανισμό εξηγείται και η φθορά και τελικά η αστοχία συγκολλημένων ανοξείδωτων τεμαχίων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Οι τρόποι πρόληψης της ευαισθητοποίησης είναι οι παρακάτω:

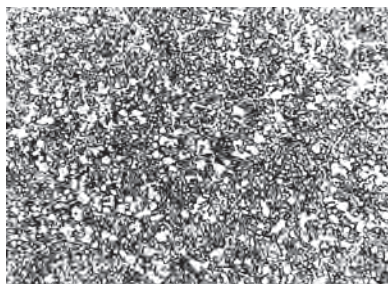
- μείωση του ποσοστού του άνθρακα κάτω από 0,03%
- αύξηση του ποσοστού του χρωμίου πάνω από 16%
- προσθήκη Nb, Ti τα οποία είναι περισσότερο καρβιδιογόνα από το χρώμιο και έτσι ευνοείται ο σχηματισμός των καρβιδίων τους σε σχέση με τα καρβίδια του χρωμίου

- θερμική κατεργασία με γρήγορη ψύξη για τη διαλυτοποίηση των καρβιδίων του χρωμίου ($>900^{\circ}\text{C}$) και διατήρησή τους στο στερεό διάλυμα (ωστενίτη) μετά από την ψύξη.

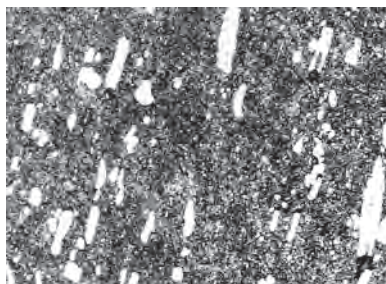
6.6 ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΕΣ

Οι εργαλειοχάλυβες είναι υλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, που απαιτείται υψηλή μηχανική αντοχή και κυρίως μεγάλη σκληρότητα και αντίσταση σε φθορά, όπως π.χ. κοπτικά εργαλεία, μήτρες διαμόρφωσης, έμβολα διέλασης, ράουλα έλασης. Η χρήση γίνεται πάντοτε μετά από θερμική κατεργασία βαφής-επαναφοράς (επιβελτίωση).

Τα κύρια κραματικά στοιχεία που συμβάλλουν στη μηχανική ενίσχυση είναι τα ακόλουθα: Ni, Cr, Mo, W, V, Mn, Si, Co. Βασικό χαρακτηριστικό των εργαλειοχαλύβων είναι η ύπαρξη **καρβιδίων**, (δηλ. ενώσεων μετάλλου-άνθρακα) είτε σφαιρικού σχήματος (π.χ. καρβίδια του μολυβδαινίου και βολφραμίου στους ταχυχάλυβες) είτε ακανόνιστου-μακρόστενου σχήματος (π.χ. καρβίδια του χρωμίου στους εργαλειοχάλυβες υψηλού ποσοστού άνθρακα και χρωμίου), βλ. σχήμα 6.1.



(α)



(β)

Σχήμα 6.1: Μικρογραφίες εργαλειοχαλύβων όπου διακρίνονται καρβίδια (λευκές περιοχές) (α) σφαιρικού τύπου σε ταχυχάλυβα M2 και (β) ακανόνιστου τύπου σε εργαλειοχάλυβα D2. (Μεγέθυνση X500)

Η παρουσία σκληρών καρβιδίων (1500-2500 HV) αυξάνει τη σκληρότητα του χάλυβα και την αντοχή σε φθορά-τριβή. Επιπλέον, σε ορισμένες κατηγορίες (**ταχυχάλυβες**) επιδρούν και στην εν θερμώ αντοχή. Κατά την καταπόνηση σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως π.χ. σε κοπή υψηλής ταχύτητας, σχηματίζονται νέα καρβίδια (δευτερογενή καρβίδια), αυξάνοντας τη σκληρότητα και την αντίσταση σε φθορά του εργαλείου (**δευτερογενής**

Πίνακας Π.6.4: Βασικές κατηγορίες εργαλειοχαλύβων κατά AISI-SAE

α/α	Σειρά κατά AISI-SAE	Βασικά χαρακτηριστικά
1	Σειρά W (Εργαλειοχάλυβες χαμηλής εμβαιπτότητας).	Οι κυριότερες προσθήκες είναι το Cr (0,20-0,50%), που συμβάλλει στην αύξηση της εμβαιπτότητας και της αντοχής στη φθορά, και το V για την εκλέπτυνση των κόκκων και τη βελτίωση της δυσθραυστότητας. Βάφονται στο νερό. Κύριες εφαρμογές: εργαλεία κοπής και επεξεργασίας ξύλου, μετάλλου, κλπ.
2	Σειρά S (Εργαλειοχάλυβες υψηλής αντοχής στην κρούση)	Κύριες προσθήκες: Si, Cr, W και δευτερευόντως Mo ή Ni. Κύριος ρόλος των παραπάνω προσμίξεων είναι η βελτίωση της εμβαιπτότητας και της αντοχής στη φθορά. Από αυτούς τους χάλυβες κατασκευάζονται εργαλεία και έδρανα που καταπονούνται σε κρουστικές φορτίσεις.
3	Σειρά O (Εργαλειοχάλυβες ψυχρής κατεργασίας, μέσης εμβαιπτότητας)	Κύριες προσθήκες: W, Mn, Cr, Mo. Βάφονται στο λάδι. Κύριες εφαρμογές συναντώνται στην κατασκευή εργαλείων και καλουπιών ψυχρής διαμόρφωσης.
4	Σειρά A (Εργαλειοχάλυβες μέτριας κραματοποίησης και υψηλής εμβαιπτότητας)	Κύριες προσθήκες: Cr, Mo, Mn, V. Βάφονται στον αέρα. Κύριες χρήσεις: εργαλεία υψηλής αντοχής σε φθορά-τριβή, κύλινδροι ελάσεως, κλπ.
5	Σειρά D (Εργαλειοχάλυβες υψηλού ποσοστού άνθρακα και χρωμίου)	Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα (1-2,35%) και Cr (12%). Δευτερεύουσες προσθήκες: W, Mo, Co, V. Κύρια ιδιότητα αυτών των χαλύβων είναι η εξαιρετικά υψηλή αντοχή στη φθορά-τριβή. Χρησιμοποιούνται ως εργαλεία ψυχρής διαμόρφωσης (π.χ. ράουλα ελάστρων).
6	Σειρά H (Εργαλειοχάλυβες θερμών κατεργασιών)	Κύριες προσθήκες: Cr, W, Mo, V. Χρησιμοποιούνται ως εργαλεία (μήτρες, καλούπια, έμβολα) θερμών κατεργασιών, όπως θερμή εξέλαση, θερμή σφυρηλάτηση, χύτευση, κλπ.
7	Σειρά T (Ταχυχάλυβες βολφραμίου)	Κύριες προσθήκες: W, Mo, Cr, V, Co. Παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα και αντοχή στη φθορά και αντέχουν επίσης και στη χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως κοπτικά εργαλεία: δράπανα, τρυπάνια, εργαλεία τórνευσης, φρεζαρίσματος.
8	Σειρά M (Ταχυχάλυβες μολυβδαινίου)	Κύριες προσθήκες: Mo, W, V, Co. Παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες με την παραπάνω σειρά. Εφαρμογές σε εργαλεία κοπής υψηλής ταχύτητας.
9	Σειρά P (Εργαλειοχάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα / χάλυβες καλουπιών χύτευσης πλαστικών)	Κύριες προσθήκες: Ni, Cr, V, Mo. Παρουσιάζουν μέτρια σκληρότητα και επίσης μέτρια αντίσταση σε φθορά-τριβή. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως καλούπια χύτευσης πλαστικών.

σκλήρυνση). Η ταξινόμηση των χαλύβων, σύμφωνα με το αμερικάνικο σύστημα AISI-SAE, παρουσιάζεται στον Πίνακα Π.6.4.

Η χημική σύσταση των βασικότερων τύπων εργαλειοχαλύβων που χρησιμοποιούνται στις μηχανουργικές κατεργασίες (Ο, Η, D, Μ, Τ) παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα Π.6.5:

Πίνακας Π.6.5: Χημική σύσταση των κυριότερων εργαλειοχαλύβων.

Σειρά AISI	Χάλυβας	C	Cr	Mo	W	V	Mn	Co
Σειρά Ο	O1	0,90	0,50	-	0,50	-	1,00	-
	O2	0,90	-	-	-	-	1,60	-
Σειρά Η	H11	0,35	5,00	1,50	-	0,40	-	-
	H13	0,35	5,00	1,50	-	1,00	-	-
	H23	0,30	12,00	-	12,00	-	-	-
	H26	0,50	4,00	-	18,00	1,00	-	-
	H42	0,60	4,00	5,00	6,00	2,00	-	-
Σειρά D	D2	1,50	12,00	1,00	-	1,00	-	-
	D3	2,25	12,00	-	-	-	-	-
	D4	2,25	12,00	1,00	-	-	-	-
	D5	1,50	12,00	1,00	-	-	-	3,00
Σειρά Μ	M1	0,85	4,00	8,50	1,50	1,00	-	-
	M2	1,00	4,00	5,00	6,00	2,00	-	-
	M4	1,30	4,00	4,50	5,50	4,00	-	-
	M7	1,00	4,00	8,75	1,75	2,00	-	-
Σειρά Τ	T1	0,75	4,00	-	18,00	1,00	-	-
	T15	1,50	4,00	-	12,00	5,00	-	5,00

6.7 ΧΑΛΥΒΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Αυτοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- (i) **Μαγνητικά μαλακοί χάλυβες.** Περιέχουν μεγάλο ποσοστό Si (4-5%) και έχουν τις εξής ιδιότητες: μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα και μικρές απώλειες ενέργειας από υστέρηση και δινορεύματα. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών για ηλεκτρικές γεννήτριες και κινητήρες.
- (ii) **Μαγνητικά σκληροί χάλυβες.** Τυπικοί μαγνητικοί σκληροί χάλυβες περιέχουν C (0,8-1,0%), Cr (0,6-9,0%), W (έως 6,0%) και Co (3,0 και 15%). Άλλα μαγνητικά υλικά, με βάση το σίδηρο, είναι κράματα Fe-Ni, Fe-Co και Fe-Ni-Co. Επίσης, τελευταία έχουν βελτιωθεί

οι ιδιότητές τους με προσθήκες Al, Cu και Ti, όπως είναι το κράμα 57Fe-12Co-9Al-16Ni-5Cu-1Ti (κράμα **Alnico**). Παρουσιάζουν μεγάλο βρόγχο υστέρησης και παραμένονσα μαγνητική επαγωγή (B_r) και χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως μόνιμοι μαγνήτες.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 6ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Τα τεχνικά μεταλλικά υλικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα σιδηρούχα και τα μη σιδηρούχα. Τα σιδηρούχα μεταλλικά υλικά περιλαμβάνουν κυρίως τους χάλυβες και τους χυτοσιδήρους, ενώ τα μη σιδηρούχα περιλαμβάνουν κυρίως τα κράματα χαλκού, αλουμινίου, τιτανίου, μαγνησίου, ψευδαργύρου, μολύβδου, κλπ.
- Ανάλογα με τη χημική σύστασή τους οι χάλυβες μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:
 - (i) Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες. Περιέχουν έως 1,0% Mn και ελάχιστα ποσοστά προσμίξεων θείου (S) και φωσφόρου (P) έως 0,05%. Πρόκειται για μαλακούς χάλυβες (για μικρή περιεκτικότητα C), οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένη συγκολλησιμότητα.
 - (ii) Κραματωμένοι χάλυβες.
 - ✓ Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμίξεις έως 2%. Τέτοιοι είναι οι δομικοί ή κατασκευαστικοί χάλυβες.
 - ✓ Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμίξεις από 2% έως 10%.
 - ✓ Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες. Τέτοιοι είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, οι ταχυχάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι χάλυβες μαρτενγήρανσης (Maraging) με μέγала ποσοστά σε βολφράμιο (W), βανάδιο (V), μολυβδαίνιο (Mo), χρώμιο (Cr), νικέλιο (Ni) και κοβάλτιο (Co).
- Όσον αφορά τον προορισμό τους οι χάλυβες διακρίνονται σε:
 - (i) Χάλυβες διαμόρφωσης. Αυτοί υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση).

- (ii) Χυτοχάλυβες. Παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή “χελωνών”.
- Όσον αφορά τη χρήση οι χάλυβες διακρίνονται σε:
 - (i) Χάλυβες κατασκευών. Είναι χάλυβες με μικρά, σχετικά ποσοστά κραματικών στοιχείων (συνήθως Mn, Cr) και χρησιμοποιούνται σε πλήθος κατασκευών, όπως π.χ. λέβητες, μεταλλικοί σκελετοί, κλπ. αλλά και σε στοιχεία μηχανών, όπως π.χ. άξονες, διωστήρες, βαλβίδες, ελατήρια, κλπ.
 - (ii) Ανοξείδωτοι χάλυβες. Είναι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε Cr (>13%) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση, όπως π.χ. στη χημική βιομηχανία. Κατασκευές από ανοξείδωτο χάλυβα είναι σωλήνες, πτερωτές, δοχεία, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες και οτιδήποτε έρχεται σε επαφή με διαβρωτικό υγρό, καθώς επίσης σε ιατρικά εργαλεία (π.χ. χειρουργικά νυστέρια) και είδη οικιακής χρήσεως, όπως π.χ. είδη κουζίνας, μαχαιροπήρουνα, κλπ.
 - (iii) Εργαλειοχάλυβες. Περιέχουν συνήθως μεγάλα ποσοστά κραματικών στοιχείων (W, Mo, Cr, V) τα οποία ευνοούν την αύξηση της σκληρότητας και της αντίστασης σε φθορά-τριβή. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κοπής (κοπτικά τόννου, φρέζας, πλάνης, κλπ) ή διαμόρφωσης (μήτρες, έμβολα, καλούπια χύτευσης και διαμόρφωσης).
 - (iv) Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών ηλεκτρικών γεννητριών, μονίμων μαγνητών, κλπ.
 - Τα στοιχεία τα οποία προστίθενται στο χάλυβα έχουν στόχο να βελτιώσουν τη δομή, τις μηχανικές του ιδιότητες, την αντοχή σε φθορά και διάβρωση. Ορισμένες από τις δράσεις των στοιχείων προσθήκης αναφέρονται παρακάτω:
 - ✓ Σταθεροποίηση του φερρίτη (α-φερρογόνα στοιχεία): Cr, Mo, W, V, Si
 - ✓ Σταθεροποίηση του ωστενίτη (γ-φερρογόνα στοιχεία): Mn, Ni, Co
 - ✓ Τάση σχηματισμού καρβιδίων (καρβιδιογόνα στοιχεία):

$$\text{Co} < \text{Fe} < \text{Mn} < \text{Cr} < \text{Mo} < \text{W} < \text{V} < \text{Ti}$$

- ✓ Τάση διάσπασης καρβιδίων σε γραφίτη (γραφιτίζοντα στοιχεία): Ni, Si, Al
 - ✓ Μετατόπιση των καμπύλων TTT προς τα δεξιά-αύξηση της εμβαπτότητας: μικρή για Mn,Cr, σημαντική για Ni και μεγάλη Mo,W,V
 - ✓ Βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση: Cr, Ni, Si
 - ✓ Τάση εκλέπτυνσης των κόκκων: V, Al
 - ✓ Αύξηση κατεργασιμότητας: Mn
 - ✓ Αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας: Si
- Οι ακαθαρσίες θείου και φωσφόρου πρέπει να διατηρούνται σε μικρά ποσοστά διότι ψαθυροποιούν το χάλυβα.

Τα κράματα του τιτανίου χρησιμοποιούνται
ευρύτατα στην κατασκευή αεροσκαφών



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

7

ΜΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

- 7.1 Κράματα Χαλκού
- 7.2 Κράματα Αλουμινίου
- 7.3 Κράματα Μαγνησίου
- 7.4 Κράματα Τιτανίου
- 7.5 Κράματα Νικελίου
- 7.6 Κράματα Ψευδαργύρου
- 7.7 Κράματα Μολύβδου



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να μάθετε τα διάφορα είδη κραμάτων χαλκού και τις κυριότερες χρήσεις αυτών
- ☒ Να κατανοήσετε τις βασικές αστοχίες του ορείχαλκου, εποχική ρωγμάτωση και αποψευδαργύρωση και τους τρόπους πρόληψής τους
- ☒ Να μάθετε τα βασικά είδη κραμάτων αλουμινίου και τις κυριότερες χρήσεις αυτών
- ☒ Να κατανοήσετε την θερμική κατεργασία σκλήρυνσης λόγω γήρανσης διαφόρων κραμάτων του αλουμινίου
- ☒ Να μάθετε τα διάφορα είδη και χρήσεις των κραμάτων μαγνησίου, τιτανίου, νικελίου, ψευδαργύρου και μολύβδου.

7.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΑΛΚΟΥ

Ο χαλκός είναι το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος είτε καθαρό είτε με τη μορφή κράματος (κρατέρωμα). Ο χαλκός ως καθαρό μέταλλο έχει κόκκινο χρώμα, κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο (κ.ε.) κρυσταλλικό πλέγμα και λιώνει στους 1083°C. Η πυκνότητά του είναι ίση με 8,9 g/cm³.

Παρουσιάζει μεγάλη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Επίσης, η ολκιμότητά του είναι τέτοια, ώστε να μπορεί να διαμορφωθεί εύκολα σε εξαρτήματα διαφόρων γεωμετριών, π.χ. σε ράβδους και σύρματα με διέλαση και σε φύλλα με έλαση. Ο καθαρός χαλκός χρησιμοποιείται ευρύτατα στην ηλεκτρολογία (κατασκευή συρμάτων, πυκνωτών), λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η καθαρότητα του χαλκού (>99,9%) είναι απαραίτητη προϋπόθεση για πολλές ηλεκτρολογικές εφαρμογές, εφόσον αυτή επιδρά θετικά στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η κατασκευή υπερκαθαρού χαλκού γίνεται είτε θερμικά (σε φούρνους τήξεως) είτε ηλεκτρολυτικά (**ηλεκτρολυτικός χαλκός**). Υπάρχει επίσης μία ποιότητα χαλκού υψηλών απαιτήσεων που ονομάζεται **χαλκός OFHC (Oxygen Free High Conductivity Copper/Χαλκός Ελεύθερος Οξυγόνου Υψηλής Αγωγιμότητας)**.

τητας). Ο χαλκός αυτός περιέχει μικρό ποσοστό φωσφόρου (0,05%) ο οποίος βοηθά στην **αποξείδωση** κατά τη χύτευση, δεσμεύοντας το οξυγόνο και δημιουργώντας στρώμα P_2O_5 . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή δημιουργίας Cu_2O κατά τη χύτευση, το οποίο παρουσία H_2 οδηγεί σε ψαθυροποίηση του μετάλλου.

Τα κράματα του χαλκού, λόγω των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν (ηλεκτρική-θερμική αγωγιμότητα, αντοχή στη διάβρωση, αντοχή στη φθορά-τριβή) και της αυξημένης διαμορφωσιμότητας (της δυνατότητας με την οποία μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν), χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική, στη μηχανολογία (κατασκευή εδράνων, κουζινέτων), στην κοσμηματοποιία, στην ωρολογοποιία, στην αρχιτεκτονική, στην κατασκευή εναλλακτών θερμότητας, κελυφών και καλύκων βλημάτων, κ.λπ.

Πολλές φορές, οι προσθήκες κραματικών στοιχείων στο χαλκό βελτιώνουν βασικές ιδιότητες, Π.χ. η προσθήκη ψευδαργύρου (Zn) βελτιώνει τη μηχανική αντοχή, η προσθήκη κασσιτέρου (Sn) βελτιώνει την αντοχή στη διάβρωση, η προσθήκη μολύβδου (Pb) την κατεργασιμότητα στην κοπή. Τα βασικά κράματα χαλκού είναι τα ακόλουθα:

- Κράμα Cu-Zn (**ορείχαλκος**)
- Κράμα Cu-Sn (**μπρούντζος**)
- Κράμα Cu-Al (**χαλκοαλουμίνιο**)
- Κράμα Cu-Ni (**χαλκονικέλιο**)

Άλλα κράματα είναι το χαλκοπυρίτιο (Cu-Si) και το χαλκοβηρύλλιο (Cu-Be). Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, διακρίνονται σε **χυτά κράματα** και **κράματα διαμόρφωσης**.

7.1.1 Κράματα Cu-Zn (Ορείχαλκοι)

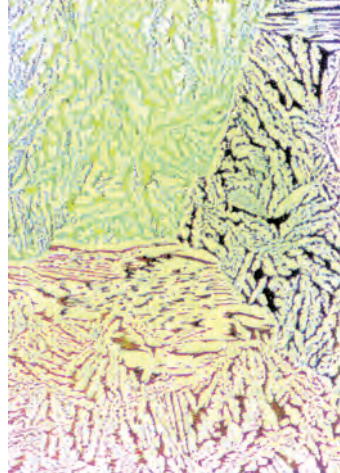
Η προσθήκη του ψευδαργύρου μέχρι ποσοστού 30% βοηθά στην αύξηση της μηχανικής αντοχής του κράματος. Αυξανόμενου επίσης του ποσοστού ψευδαργύρου, το χρώμα από κόκκινο γίνεται σταδιακά κίτρινο. Με αναλογία ψευδαργύρου 0-39% δημιουργείται **μονοφασικό κράμα φάσης α**, κυβικού εδροκεντρωμένου πλέγματος (α-ορείχαλκοι). Όταν ο ψευδάργυρος βρίσκεται σε ποσοστό 40-45%, τότε το κράμα είναι **διφασικό**, δηλαδή περιέχει δύο διαφορετικές **φάσεις α και β'** (α+β' ορείχαλκοι). Το ποσοστό του ψευδαργύρου δεν πρέπει να ξεπερνά το 45%, διότι σε μεγάλη αναλογία οδηγεί στο σχηματισμό εύθραυστων φάσεων και στην **ψαθυροποίηση** του υλικού.

Στην πράξη δηλαδή χρησιμοποιούνται δύο βασικά είδη ορείχαλκου:

- οι α-ορείχαλκοι ή μονοφασικοί ορείχαλκοι ($Zn < 39\%$), βλ. σχήμα 7.1α και
- οι α+β' ορείχαλκοι ή διφασικοί ορείχαλκοι ($Zn > 39\%$), βλ. σχήμα 7.1β.



(α)



(β)

Σχήμα 7.1: (α) Μικρογραφία μονοφασικού α-ορείχαλκου (67% Cu-33% Zn) και (β) μικρογραφία διφασικού α+β'-ορείχαλκου (60% Cu-40% Zn). (Μεγέθυνση X100).

Οι μονοφασικοί α-ορείχαλκοι διαμορφώνονται ευκολότερα εν ψυχρώ, ενώ οι διφασικοί α+β'-ορείχαλκοι διαμορφώνονται ευκολότερα εν θερμώ. Αυτό συμβαίνει, γιατί η β' φάση είναι σκληρή και εύθραυστη και μόνο με θέρμανση πάνω από τους 450°C μετατρέπεται στη β-φάση, η οποία είναι όλκιμη. Η σκληρότητα των ορειχάλκων ανάλογα με την κατεργασία (ανόπτηση, ψυχρή παραμόρφωση) κυμαίνεται από 60-180 HV.

Οι ορείχαλκοι με ποσοστό ψευδαργύρου μεγαλύτερο από 10% εμφανίζουν το φαινόμενο της **εποχικής ρωγμάτωσης**. Αυτό οφείλεται στην **εργοδιάβρωση**, δηλαδή στην ταυτόχρονη επίδραση της διάβρωσης γύρω από τα όρια των κόκκων (περικρυσταλλική), λόγω της υγρασίας της ατμόσφαιρας και των εσωτερικών τάσεων, που υπάρχουν σε ορειχάλκινα εξαρτήματα, έπειτα από κατάλληλη ψυχρή παραμόρφωση (π.χ. έλαση, βαθεία κοίλανση). Η εργοδιάβρωση αντιμετωπίζεται με ανόπτηση σε θερμοκρασία 250-300°C, μετά από την ψυχρή διαμόρφωση για την εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων.

Ένα άλλο συχνό φαινόμενο αστοχίας ορειχάλκινων εξαρτημάτων, π.χ. σωλήνων, που έρχονται σε επαφή με υγρό περιβάλλον, είναι η **αποψευδαργύρωση**. Αυτή είναι η σταδιακή διάλυση του ψευδαργύρου του

ορείχαλκου, μέσα σε υγρό, η οποία γίνεται αντιληπτή με την εμφάνιση “κρατήρων” στην επιφάνεια του μετάλλου. Αυτό οφείλεται στην **εκλεκτική διάβρωση** του ψευδαργύρου (ηλεκτρόλυση) έναντι του χαλκού, ο οποίος θεωρείται ευγενέστερο μέταλλο. Η αποψευδαργύρωση αντιμετωπίζεται με προσθήκη μικρών ποσοτήτων κασσιτέρου Sn (1%) ή αρσενικού, As (0,01 - 0,20%) μέσα στο κράμα. Η προσθήκη αλουμινίου σε ποσοστό περίπου 2% έχει θετική επίδραση στην αντοχή στη διάβρωση.

Η προσθήκη μολύβδου (Pb) στον ορείχαλκο σε ποσοστά έως 3% βελτιώνει την **κατεργασιμότητα του μετάλλου στην κοπή**. Πιο συγκεκριμένα, επειδή ο μολύβδος διασπείρεται υπό μορφή σφαιρικών σωματιδίων μέσα στη δομή του υλικού, βοηθά στη μείωση της τριβής και φθοράς του εργαλείου κοπής και στον κατατεμαχισμό των αποβλήτων της κοπής (δημιουργεί δηλ. ασυνεχές γρέζι).

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένοι βασικοί ορείχαλκοι (Gilding, ορείχαλκος καλύκων, Muntz, ορείχαλκος ναυαρχείου και ελευθέρας κοπής) με τη χημική σύσταση και τις βασικότερες χρήσεις τους (Πίνακας Π.7.1).

Πίνακας Π.7.1: Εμπορικοί ορείχαλκοι και βασικές χρήσεις.

Ονομασία	Cu	Zn	Pb	Sn	As	Χρήσεις
Μέταλλο Gilding	90	10	-	-	-	Κοσμηματοποιία, αρχιτεκτονική.
Ορείχαλκος καλύκων	70	30	-	-	-	Έχει την καλύτερη ολκιμότητα και παραμορφώνεται εύκολα με βαθεία κοίλανση (κυάθια, κελύφη, κάλυκες βλημάτων, κλπ.)
Μέταλλο Muntz	60	40	-	-	-	Ελάσσεται εν θερμώ για την κατασκευή σωλήνων, συμπυκνωτήρων, κλπ.
Ορείχαλκος Ναυαρχείου	70	29	-	0,95	0,05	Αυξημένη αντοχή στη διάβρωση και την αποψευδαργύρωση. Κλασικό μέταλλο σωλήνων και εναλλακτών θερμότητας.
Ορείχαλκος ελευθέρας κοπής	58	39	3,0	-	-	Αυξημένη κατεργασιμότητα στην κοπή. Κατασκευή μεγάλου αριθμού βιομηχανικών εξαρτημάτων με κοπή υψηλής ταχύτητας.

7.1.2 Κράματα Cu-Sn (Μπρούντζοι)

Περιέχουν κασσίτερο σε ποσοστά 7-18%. Συνήθως πρόκειται για μονοφασικά κράματα α-φάσης (κυβικού εδροκεντρωμένου πλέγματος), εφόσον η περιεκτικότητα σε κασσίτερο δεν ξεπερνά το 14%. Ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής τους, διακρίνονται σε κράματα χύτευσης και διαμόρφωσης. Παρουσιάζουν γενικά μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση και φθορά-τριβή σε σχέση με τους ορείχαλκους αλλά το κόστος τους είναι μεγαλύτερο, λόγω του ότι ο κασσίτερος είναι ακριβότερο μέταλλο απ' ό,τι ο ψευδάργυρος. Η σκληρότητα του μπρούντζου κυμαίνεται μεταξύ 60 και 210 HV.

Βασικά είδη μπρούντζου είναι τα ακόλουθα:

- (i) **Μπρούντζος φωσφόρου.** Ο φωσφόρος αποτελεί στοιχείο αποξείδωσης πριν από τη χύτευση. Επιπλέον, αυξάνει την αντοχή σε διάβρωση, τη μηχανική αντοχή και την αντοχή σε τριβή μέσω της δημιουργίας της ένωσης Cu_3P (ποσοστό φωσφόρου 0,1-1%). Από χυτό μπρούντζο φωσφόρου κατασκευάζονται **έδρανα** και **κουζινέτα** και γενικά στοιχεία που καταπονούνται σε τριβή.
- (ii) **Μπρούντζος ψευδαργύρου.** Περιέχει μικρές ποσότητες ψευδαργύρου (2-3%) προς αντικατάσταση του κασσιτέρου, κυρίως για λόγους οικονομίας. Επιπλέον ο ψευδάργυρος δρα ως αποξειδωτικό στοιχείο στα κράματα χύτευσης. Χυτοί μπρούντζοι ψευδαργύρου χρησιμοποιούνται στην **κατασκευή πυροβόλων** (88Cu-10Sn-2Zn), αλλά και **νομισμάτων** (95,5Cu-3Sn-1,5Zn).
- (iii) **Μπρούντζος μολύβδου.** Η προσθήκη μολύβδου (έως 3%) βελτιώνει την κατεργασιμότητα στην κοπή. Επίσης, το συγκεκριμένο είδος μπρούντζου χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία και αεροναυπηγική, καθώς και στην κατασκευή **εδράνων υψηλών απαιτήσεων**, που δέχονται μεγάλα φορτία ή/και η λίπανση είναι ανεπαρκής.

7.1.3 Κράματα Cu-Al (χαλκοαλουμίνιο)

Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση σε βιομηχανικό περιβάλλον, λόγω της αυθόρμητης δημιουργίας προστατευτικού στρώματος Al_2O_3 . Είναι μονοφασικά κράματα α-φάσης, όταν το ποσοστό Al δεν υπερβαίνει το 9%, ενώ είναι διφασικά α+γ₂, όταν το ποσοστό είναι 9-16%.

Τα **μονοφασικά κράματα** (Al<9%) διαμορφώνονται με κατεργασία εν ψυχρώ και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σωλήνων, εναλλακτών θερμότητας, καθώς και στην κοσμηματοποιία και στην κατασκευή διακοσμητικών αντικειμένων.

Τα **διφασικά κράματα** ($9\% < \text{Al} < 16\%$) διαμορφώνονται εν θερμώ ή με απευθείας χύτευση σε καλούπι ή στην άμμο. Τα κράματα διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία σε εφαρμογές που απαιτείται μεγάλη αντοχή σε διαβρωτική ατμόσφαιρα ή/και σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα κράματα χύτευσης χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αξόνων, πτερωτών, εδράνων, κ.λπ.

7.1.4 Κράματα Cu-Ni (χαλκονικέλιο)

Σε κάθε αναλογία Cu/Ni δημιουργείται μονοφασικό κράμα α-φάσης, που κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα. Το νικέλιο, σε ποσοστό μεγαλύτερο από 15%, αλλάζει το χρώμα του χαλκού από κόκκινο σε λευκό. Παρουσιάζει μεγάλη ολκιμότητα και έτσι μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί εν ψυχρώ με διάφορες τεχνικές, π.χ. έλαση, διέλαση, σφυρηλάτηση, κ.λπ.. Λόγω της ομοιογένειας που παρουσιάζει, με την ύπαρξη μίας μόνο φάσης σε κάθε αναλογία εμφανίζει **εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση** και μάλιστα κάτω από σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. θαλάσσιο περιβάλλον). Χρησιμοποιείται για την κατασκευή σωλήνων, εναλλακτών θερμότητας, όπου απαιτείται υψηλή αντοχή στη διάβρωση, καθώς και στην κοπή νομισμάτων.

7.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο, μαζί με το μαγνήσιο και το τιτάνιο, ανήκει στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων με πυκνότητα 2,7 έναντι του σιδήρου που είναι 7,8 g/cm³ και του χαλκού 8,9 g/cm³. Το αλουμίνιο και τα κράματά του εμφανίζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση λόγω της αυθόρμητης δημιουργίας επιφανειακού στρώματος Al₂O₃ που είναι λεπτό και αδιαπέραστο από το οξυγόνο, προστατεύοντας έτσι το υλικό από περαιτέρω οξείδωση και διάβρωση. Κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (κ.ε.) και λιώνει στους 661°C. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης μηχανικής αντοχής, που επιδεικνύει ως προς το βάρος του, καθίσταται βασικό δομικό στοιχείο σε κατασκευές, που απαιτείται υψηλή αντοχή και χαμηλό βάρος, όπως στην **αυτοκινητοβιομηχανία** και κυρίως την **αεροναυπηγική**.

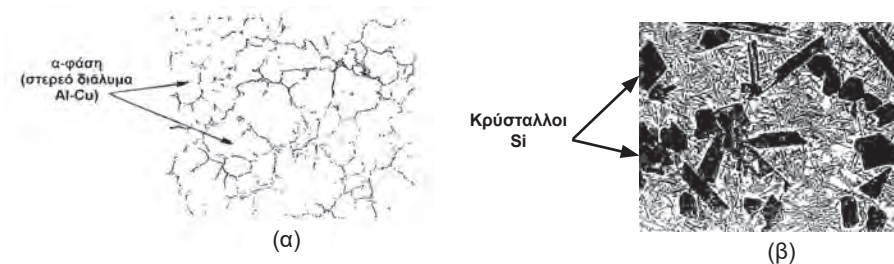
Τα διάφορα κράματα αλουμινίου διακρίνονται σε χυτά και διαμόρφωσης και τυποποιούνται σύμφωνα με την Α.Α. (Aluminium Association). Η τυποποίηση των κραμάτων γίνεται σύμφωνα με την κύρια πρόσμειξη τόσο στα χυτά, όσο και στα κράματα διαμόρφωσης. Οι διάφορες σειρές των κραμάτων αλουμινίου διαμόρφωσης φαίνονται στον Πίνακα Π.7.2. (Τα υπόλοιπα

Πίνακας Π.7.2: Σειρές κραμάτων αλουμινίου διαμορφώσεως και βασικές χρήσεις.

Σειρά	Κύρια πρόσμιξη	Θερμική κατεργασία	Χρήσεις
1000	Καθαρό αλουμίνιο > 99,00%	ΟΧΙ	Κατασκευή καλοριφέρ, εξαρτημάτων χημικών βιομηχανιών και βιομηχανιών τροφίμων και οικοδομικές εφαρμογές.
2000	Χαλκός (Cu)	ΝΑΙ	Δομικά εξαρτήματα αεροναυπηγικής και οχημάτων.
3000	Μαγγάνιο (Mn)	ΟΧΙ	Ίδια η χρήση με τη σειρά 1000, αλλά με περισσότερες απαιτήσεις σε μηχανική αντοχή.
4000	Πυρίτιο (Si)	ΟΧΙ	Σύρμα συγκολλήσεων, σκελετοί μικρών σκαφών θαλάσσης.
5000	Μαγνήσιο (Mg)	ΟΧΙ	Σε οικοδομικές εφαρμογές, στην κατασκευή σωλήνων και λεβήτων. Επίσης σε εφαρμογές θαλάσσης.
6000	Μαγνήσιο και πυρίτιο (Mg, Si)	ΝΑΙ	Σε σασί αυτοκινήτων και αεροσκαφών. Επίσης σε οικοδομικές εφαρμογές.
7000	Ψευδάργυρος και μαγνήσιο (Zn, Mg)	ΝΑΙ	Στην αεροναυπηγική, στην κατασκευή όπλων, βαλβίδων, σιδηροδρομικών εξαρτημάτων και αθλητικών ειδών.

τρία ψηφία, πλην του πρώτου, της τετραψήφιας ονομασίας των κραμάτων Al δηλώνουν την ειδική κατηγορία και τα όρια των περιεκτικοτήτων της κύριας πρόσμειξης). Η κωδικοποίηση των χυτών κραμάτων Al είναι αντίστοιχη αυτής των κραμάτων διαμόρφωσης.

Στο σχήμα 7.2 φαίνονται οι δομές δύο ευρύτατα χρησιμοποιούμενων



Σχήμα 7.2: (α) Δομή κράματος Al-Cu (σειρά 2000). Διακρίνονται κόκκοι της α-φάσης (κ.ε.) η οποία είναι το στερεό διάλυμα Al-Cu. (β) Δομή κράματος Al-Si (σειρά 4000). Διακρίνονται οι κρύσταλλοι Si (σκούρα φάση) μέσα σε ευτηκτικό Al-Si. (Μεγέθυνση X100).

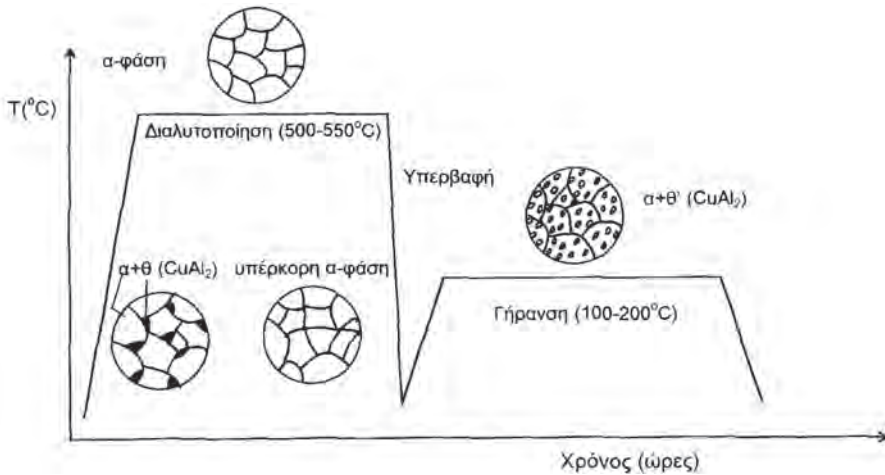
κραμάτων ΑΙ. Από τα παραπάνω κράματα αλουμινίου διαμόρφωσης (αλλά και στην περίπτωση των χυτών) διακρίνουμε τα κράματα που **επιδέχονται** και τα κράματα που **δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία**. Τα κράματα που επιδέχονται θερμική κατεργασία σκλήρυνσης αποκτούν σημαντική σκληρότητα και αντοχή και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων.

Τα κράματα χύτευσης κωδικοποιούνται αντίστοιχα με τα κράματα διαμόρφωσης (το πρώτο γράμμα της σειράς είναι ίδιο και στις δύο περιπτώσεις). Χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή χυτών εξαρτημάτων π.χ. αντλιών, εμβόλων, βαλβίδων, ζαντών αυτοκινήτων και λοιπών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροναυπηγική. Στην επόμενη παράγραφο ακολουθεί μία εφαρμογή θερμικής κατεργασίας σκλήρυνσης (στη σειρά 2000). Με την ίδια μεθοδολογία πραγματοποιείται η σκλήρυνση και στις υπόλοιπες σειρές.

7.2.1 Ένα σκληρό μη σιδηρούχο κράμα: Ντουραλουμίνιο

Ντουραλουμίνιο είναι κράμα ΑΙ- 4% Cu που ανήκει στη σειρά κραμάτων αλουμινίου διαμόρφωσης 2000 (π.χ. 2024). Η κατεργασία σκλήρυνσης που πραγματοποιείται σε ένα τέτοιο κράμα (όπως και στα υπόλοιπα κράματα αλουμινίου: 6000 και 7000) ονομάζεται **σκλήρυνση με κατακρήμνιση λόγω γήρανσης**. Η συγκεκριμένη θερμική κατεργασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- **Διαλυτοποίηση.** Η αρχική δομή τέτοιων κραμάτων αποτελείται από δύο φάσεις: κόκκους της α-φάσης και χονδρά σωματίδια της θ-φάσης (CuAl_2). Διαλυτοποίηση καλείται η θέρμανση σε θερμοκρασία 500-550°C, που πραγματοποιείται, προκειμένου να διαλυθεί πλήρως ο χαλκός στη α-φάση και έτσι να δημιουργηθεί μονοφασικό κράμα α-φάσης.
- **Υπερβαφή.** Μετά τη διαλυτοποίηση ακολουθεί απότομη ψύξη, η οποία σκοπό έχει να διατηρήσει την α-φάση και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η δομή αυτή είναι υπέρκορη σε χαλκό.
- **Γήρανση.** Είναι η παραμονή του κράματος για μεγάλο χρονικό διάστημα (100-500 ώρες) είτε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (**φυσική γήρανση**), είτε σε κάποια χαμηλή σχετικά θερμοκρασία, 100-200°C (**τεχνητή γήρανση**). Σκοπός της γήρανσης είναι η δημιουργία μίας μεταβατικής φάσης θ' (η οποία είναι πρόδρομος της θ) σε πολύ λεπτό διαμερισμό μέσα στην α-φάση. Τα λεπτά σωματίδια της θ'-φάσης (διαμέτρου μόλις μερικά angstrom ή το πολύ nm), διασκορπίζονται ομογενώς μέσα στην α-φάση μέσω μιας διεργασίας που ονομάζεται **κατακρήμνιση** και απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα προκειμένου



Σχήμα 7.3: Θερμική κατεργασία υπερβαφής και τεχνητής γήρανσης.

να επιτευχθεί. Η λεπτή αυτή διασπορά της θ'-φάσης οδηγεί σε κατακόρυφη αύξηση της μηχανικής αντοχής του υλικού.

Η θερμική κατεργασία της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση απεικονίζεται στο σχήμα 7.3. Η σκληρότητα του ντουραλουμινίου, έπειτα από σκλήρυνση, μπορεί να φθάσει και τα 500 HV, σκληρότητα πολύ υψηλή για κράμα αλουμινίου. Η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια και για τα άλλα κράματα Al που επιδέχονται σκλήρυνση με κάποιες αλλαγές στις θερμοκρασίες (σειρές 6000,7000). Η κατεργασία της σκλήρυνσης με υπερβαφή και γήρανση είναι παρόμοια (ως προς το θερμικό μέρος) με την κατεργασία βαφής και επαναφοράς.

Οι βασικές θερμικές κατεργασίες στα κράματα αλουμινίου επισημαίνονται με το γράμμα T που ακολουθεί τον κωδικό αριθμό του κράματος. Οι διάφοροι τύποι θερμικών κατεργασιών στα κράματα αλουμινίου συμβολίζονται ως εξής:

- T1: Ψύξη από τη θερμοκρασία θερμής διαμόρφωσης και φυσική γήρανση
- T2: Ψύξη από τη θερμοκρασία θερμής διαμόρφωσης, κατεργασία εν ψυχρώ και ακολούθως φυσική γήρανση
- T3: Διαλυτοποίηση, υπερβαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
- T4: Διαλυτοποίηση, υπερβαφή και φυσική γήρανση
- T5: Ψύξη από τη θερμοκρασία θερμής διαμόρφωσης και τεχνητή γήρανση
- T6: Διαλυτοποίηση, υπερβαφή και τεχνητή γήρανση

7.3 ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ

Το μαγνήσιο είναι ένα πολύ ελαφρό μέταλλο, πυκνότητας $1,7\text{g/cm}^3$, που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, που απαιτείται υψηλός λόγος, αντοχή/βάρος, (αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία). Έχει καλή αντοχή στη διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (στον αέρα) αλλά το προστατευτικό οξειδίο που δημιουργείται στην επιφάνεια είναι ασταθές, κυρίως κάτω από την παρουσία αλάτων.

Κρυσταλλώνεται στο εξαγωνικό μεγίστης πυκνότητας πλέγμα (ε.μ.π.) και λιώνει στους 650°C . Η ικανότητα παραμόρφωσής του εν ψυχρώ (έλαση, δέλαση) είναι σχετικά μειωμένη σε σχέση με άλλα μέταλλα (π.χ. αλουμίνιο). Σε υψηλότερες θερμοκρασίες ($>300^\circ\text{C}$) το μαγνήσιο εμφανίζει μεγαλύτερη πλαστικότητα. Όταν θερμανθεί στον αέρα σε υψηλή θερμοκρασία (800°C) καίγεται, παράγοντας εκτυφλωτική λάμψη. Έτσι λοιπόν, παλαιότερα, οι φωτογράφοι χρησιμοποιούσαν σκόνη μαγνησίου για την παραγωγή **φλας**.

Όπως και στα άλλα βιομηχανικά κράματα, έτσι και στα κράματα μαγνησίου υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες: τα κράματα **διαμόρφωσης** και τα κράματα **χύτευσης**. Η τήξη του μαγνησίου κατά τη χύτευση παρουσιάζει δυσκολίες, επειδή το μαγνήσιο καίγεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η προσθήκη θείου προστατεύει το μαγνήσιο, επειδή καίγεται και δημιουργεί αέριο διοξείδιο του θείου.

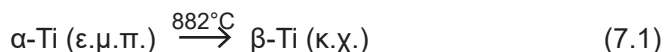
Τα κυριότερα κράματα του μαγνησίου είναι τα ακόλουθα:

- (i) **Κράματα Mg-Al-Zn.** Οι προσθήκες Al και Zn οδηγούν σε σκλήρυνση του κράματος (με κατακρήμνιση).
- (ii) **Κράματα Mg-Zr-Th.** Η προσθήκη ζirkονίου (Zr) βοηθά στη μείωση του μεγέθους των κόκκων, ενώ η προσθήκη θορίου (Th), καθώς και σπανίων γαιών (Ce, La), αυξάνει την αντοχή του υλικού σε **ερπυσμό**.

Βασικές χρήσεις των σφυρήλατων και χυτών κραμάτων Mg εντοπίζονται στην κατασκευή δομικών στοιχείων αυτοκινήτων και αεροσκαφών, όπως π.χ. τροχούς προσγείωσης, δοχεία πετρελαίου/λαδιού, πλαίσια στροφάλων, έμβολα μηχανών εσωτερικής καύσης.

7.4 ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Το τιτάνιο έχει πυκνότητα $4,5 \text{ g/cm}^3$ και ανήκει μαζί με το αλουμίνιο και το μαγνήσιο στα ελαφρά μέταλλα. Είναι αλλοτροπικό μέταλλο, δηλαδή αλλάζει η κρυσταλλική του δομή με τη θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, από εξαγωνικό μεγίστης πυκνότητας (α-φάση) μετατρέπεται στους 882°C σε κυβικό χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (β-φάση), σύμφωνα με την αντίδραση:



Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, λόγω του στρώματος TiO_2 , που δημιουργείται στην επιφάνεια, και λιώνει σε υψηλή θερμοκρασία (1660°C), ιδιότητα σύμφωνα με την οποία θεωρείται πυρίμαχο υλικό. Επιπλέον, παρουσιάζει σημαντική μηχανική αντοχή, πράγμα που το καθιστά ως το βασικό δομικό στοιχείο για την κατασκευή κινητήρων αεροπρωθούμενων αεροσκαφών (jet-engines). Π.χ. οι τέσσερις κινητήρες του αεροπλάνου τύπου Concorde περιέχουν 16 τόνους τιτανίου. Άρα, οι σημαντικότερες ιδιότητες του τιτανίου (και των κραμάτων του) είναι:

- χαμηλό ειδικό βάρος
- χημική αντοχή (μεγάλη αντοχή στη διάβρωση)
- πυριμαχικότητα (αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες)

Η κραματοποίηση του τιτανίου με διάφορα στοιχεία οδηγεί στη δημιουργία μονοφασικών κραμάτων α-φάσης (Al, C, O, N), β-φάσης (Mo, V, Nb), διφασικών κραμάτων α+β φάσης (που προκύπτουν με κατάλληλη ανάμειξη των παραπάνω στοιχείων) και ευτηκτικών κραμάτων (Fe, Cr, Mn, Si).

Καθαρό τιτάνιο (ή σπανιότερα κράμα τιτανίου-παλλαδίου) ή **μονοφασικό α-κράμα** λόγω της υψηλής αντοχής στη διάβρωση, καθώς και της καλής κατεργασιμότητας και συγκολλησιμότητας, χρησιμοποιείται ευρύτατα στη **χημική βιομηχανία** ως υλικό κατασκευής επενδύσεων, δοχείων και δεξαμενών που έρχονται σε επαφή με διαβρωτικά υγρά.

Τα **διφασικά α+β κράματα** τιτανίου (κυρίως κράματα Ti-Al-V) εμφανίζουν τις περισσότερες χρήσεις, διότι επιδέχονται θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης με κατακρήμνιση (υπερβαφή - γήρανση, ανάλογες με αυτές του ντουραλουμινίου). Λόγω της υψηλής τους μηχανικής αντοχής και χημικής αδράνειας, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην **αεροναυπηγική**, όπως π.χ. στην κατασκευή τμημάτων αεριωθούμενων κινητήρων και αεροσυμπιεστών, πτερυγίων αεροστροβίλων, αλλά και στην **ιατρική**, ως χειρουργικά εργαλεία, αλλά και υλικά προσθετικής (λάμες, εμφυτεύματα, κ.λπ.).

7.5 ΚΡΑΜΑΤΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

Το νικέλιο είναι μέταλλο μαγνητικό (όπως ο σίδηρος και το κοβάλτιο). Έχει πυκνότητα $8,9 \text{ g/cm}^3$ και λιώνει στους 1453°C . Το νικέλιο κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (κ.ε.). Το νικέλιο είναι αδρανές και παρουσιάζει έτσι εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση. Τα βασικά κράματα του νικελίου με μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον (μαζί με τις καθιερωμένες εμπορικές τους ονομασίες) είναι τα ακόλουθα:

(i) Κράματα Ni-Cu (Monel).

Είναι κράματα με σύσταση περίπου 70% Ni - 30% Cu, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην κατασκευή δοχείων και δεξαμενών στη χημική βιομηχανία. Επίσης χρησιμοποιούνται και στη ναυπηγική, π.χ. στην κατασκευή αξόνων προπελών πλοίων.

(ii) Κράματα Ni -Ti (Nitinol).

Σε μία συγκεκριμένη αναλογία 55% Ni - 45% Ti κατασκευάζονται ειδικά κράματα, που ονομάζονται κράματα μνήμης. Αυτά τα κράματα, μετά από κατάλληλη θερμομηχανική κατεργασία, παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική ιδιότητα ανάκτησης των αρχικών τους διαστάσεων. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές για την κατασκευή ειδικών διακοπών, συρμάτων, ενισχυμένων κατασκευών και ικανοποιούν απαιτήσεις της αεροδιαστημικής τεχνολογίας, όπως στην περίπτωση κατασκευής εξαρτημάτων κεραιών δορυφόρων.

(iii) Υπερκράματα.

Είναι κράματα Ni-Cr-Co-Mo-Ti-Al και Ni-Cr-Co-Fe-Mo-Ti-Al-W που σκληραίνουν σε μεγάλο βαθμό με κατάλληλες θερμικές κατεργασίες. Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και οξείδωση υψηλών θερμοκρασιών, καθώς επίσης και μεγάλη αντοχή στον ερπυσμό. Παρουσιάζουν εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων τόσο σε χημική, όσο και σε μηχανική αντοχή. Αντέχουν σε **επιθετικές** ατμόσφαιρες, όπου επικρατούν εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και έντονα οξειδωτικό περιβάλλον. Είναι δομικά στοιχεία για την κατασκευή εξαρτημάτων φούρνων, χημικών αντιδραστήρων με έντονα όξινο περιβάλλον, ηλεκτρικών αντιστάσεων, μηχανών και πτερυγίων αεριοστροβίλων, θαλάμων καύσεως, κ.λπ..

Μερικές χαρακτηριστικές κατηγορίες υπερκραμάτων Ni με τις αντίστοιχες καθιερωμένες εμπορικές τους ονομασίες και τις χημικές τους συστάσεις είναι οι ακόλουθες:

Inconel 700	:	Ni - 15 Cr - 9 Fe - 29 Co - 4 Mo - 2 Ti - 3 Al
Hasteloy C	:	Ni - 15 Cr - 5 Fe - 17 Mo - 4 W
Nimonic 75	:	Ni - 20 Cr - 0,4 Ti
Astroloy	:	Ni - 15 Cr - 15 Co - 5 Mo - 3 Ti - 4 Al

7.6 ΚΡΑΜΑΤΑ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ

Ο ψευδάργυρος κρυσταλλώνεται στο εξαγωνικό μεγίστης πυκνότητας (ε.μ.π.) και λιώνει στους 420°C. Ο καθαρός ψευδάργυρος έχει μέτριες μηχανικές ιδιότητες αλλά παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση στον αέρα, λόγω της δημιουργίας προστατευτικού ZnO στην επιφάνειά του. Έτσι, χρησιμοποιείται ευρύτατα σε οικοδομικές και ηλεκτρολογικές εφαρμογές, ως “θυσιαζόμενο” ηλεκτρόδιο για την προστασία από τη διάβρωση σε μεταλλικές κατασκευές. Επίσης, χρησιμοποιείται ως επικαλυπτικό υλικό λαμαρινών για την προστασία από διάβρωση (γαλβανισμένες και επιψευδαργυρωμένες λαμαρίνες).

Τα κράματα του ψευδαργύρου με το μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον είναι τα κράματα Zn-Al, γνωστά με την εμπορική ονομασία **Zamac**. Τα κράματα αυτά έχουν πολύ καλή ρευστότητα και γι' αυτόν κυρίως το λόγο κατασκευάζονται με χύτευση. Αυτά χρησιμοποιούνται ως εξαρτήματα πλυντηρίων, ραδιοφώνων, παιχνιδιών, χειρολαβών, πλαισίων, κ.λπ.

7.7 ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΟΛΥΒΔΟΥ

Ο μόλυβδος είναι από τα πιο βαριά μέταλλα με πυκνότητα 11,3 g/cm³ και κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (κ.ε.). Λιώνει στους 327°C και παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση. Διαμορφώνεται εύκολα με χύτευση και παρουσιάζει πολύ μεγάλη ολκιμότητα: μπορεί πολύ εύκολα να παραμορφωθεί με το χέρι. Παλαιότερα, από μόλυβδο κατασκευάζονταν νομίσματα, κοσμήματα και αργότερα οροφές κατοικιών. Σήμερα από μόλυβδο κατασκευάζονται συσσωρευτές, επενδύσεις δοχείων χημικών και θωρακίσεις αντιδραστήρων για προστασία από την ακτινοβολία γ και Χ. Τα βασικότερα κράματα μολύβδου είναι τα ακόλουθα:

(i) **Κράματα Pb-Sb**. Περιέχουν 7-12% Sb με αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σχαρών ηλεκτρικών συσσωρευτών.

- (ii) **Κράματα Pb-Sn.** Είναι κράματα με ποσοστό κασσιτέρου 20-50% και χρησιμοποιούνται, λόγω του χαμηλού σημείου τήξεως, ως συγκολλητικό υλικό για ψυχρές κολλήσεις, όπως η κασσιτεροκόλληση (καλάι).
- (iii) **Κράματα Pb-Sb-Sn.** Τα κράματα που περιέχουν 5-10% Sn και 5-20% Sb παρουσιάζουν πολύ καλή ευχυτότητα και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τυπογραφικών στοιχείων. Η σημαντικότερη ίσως κατηγορία αυτών των κραμάτων είναι κράματα Pb-Sn-Sb γνωστά ως **λευκά μέταλλα**. Υπάρχουν επίσης και λευκά μέταλλα με βάση τον κασσίτερο (babbits). Ονομάζονται λευκά μέταλλα, σε αντιδιαστολή με τα κόκκινα, που είναι τα κράματα του χαλκού, τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης στην κατασκευή εδράνων (π.χ. φωσφορούχος μπρούντζος). Τα λευκά μέταλλα μολύβδου περιέχουν 10% Sn και 15% Sb και έχουν μεγάλη αντοχή στη φθορά-τριβή λόγω της ύπαρξης των κρυστάλλων τύπου **SbSn** μέσα σε μαλακή μήτρα ευτηκτικού Pb-Sn. Τα λευκά μέταλλα χρησιμοποιούνται ως επενδύσεις εδράνων και κουζινέτων. Τα έδρανα αυτά αποτελούνται από μία στιβαρή χαλύβδινη βάση (χιτώνιο) και στην επιφάνεια αποτίθεται (π.χ. με χύτευση) το στρώμα του λευκού μετάλλου.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 7ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Ο χαλκός είναι το πρώτο μέταλλο του ανθρώπου που χρησιμοποιήθηκε είτε καθαρό είτε με τη μορφή κράματος (κρατέρωμα). Ο χαλκός ως καθαρό μέταλλο έχει κόκκινο χρώμα, κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο (κ.ε.) κρυσταλλικό πλέγμα και λιώνει στους 1083°C. Η πυκνότητά του είναι ίση με 8,9 g/cm³. Παρουσιάζει μεγάλη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Επίσης η ολκιμότητά του είναι τέτοια ώστε να μπορεί να διαμορφωθεί εύκολα σε εξαρτήματα διαφόρων γεωμετριών, π.χ. σε ράβδους και σύρματα με διέλαση σε φύλλα με έλαση. Ο καθαρός χαλκός χρησιμοποιείται ευρύτατα στην ηλεκτρολογία (κατασκευή συρμάτων, πυκνωτών), λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

- Τα κράματα του χαλκού λόγω των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν (ηλεκτρική-θερμική αγωγιμότητα, αντοχή στη διάβρωση, αντοχή στη φθορά-τριβή) και της αυξημένης διαμορφωσιμότητας (της δυνατότητας με την οποία μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν), χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική, στη μηχανολογία (κατασκευή εδράνων, κουζινέτων), στην κοσμηματοποιία, στην ωρολογοποιία, στην αρχιτεκτονική, στην κατασκευή εναλλακτών θερμότητας, κελυφών και καλύκων βλημάτων, κλπ.
- Πολλές φορές οι προσθήκες κραματικών στοιχείων στο χαλκό βελτιώνουν βασικές ιδιότητες Π.χ. η προσθήκη ψευδαργύρου (Zn) βελτιώνει τη μηχανική αντοχή, η προσθήκη κασσιτέρου (Sn) βελτιώνει την αντοχή στη διάβρωση, η προσθήκη μολύβδου (Pb) την κατεργασιμότητα στην κοπή. Τα βασικά κράματα χαλκού είναι τα ακόλουθα:
 - Κράμα Cu-Zn (ορείχαλκος)
 - Κράμα Cu-Sn (μπρούντζος)
 - Κράμα Cu-Al (χαλκοαλουμίνιο)
 - Κράμα Cu-Ni (χαλκονικέλιο)
- Άλλα κράματα είναι το χαλκοπυρίτιο (Cu-Si) και το χαλκοβηρύλλιο (Cu-Be). Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους διακρίνονται σε χυτά κράματα και κράματα διαμόρφωσης.
- Το αλουμίνιο μαζί με το μαγνήσιο και το τιτάνιο και ανήκει στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων με πυκνότητα 2,7 έναντι του σιδήρου που είναι 7,8 και του χαλκού 8,9 g/cm³. Το αλουμίνιο και τα κράματά του εμφανίζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση λόγω της αυθόρμητης δημιουργίας επιφανειακού στρώματος Al₂O₃ που είναι λεπτό και αδιαπέραστο από το οξυγόνο προστατεύοντας έτσι το υλικό από περαιτέρω οξείδωση και διάβρωση. Κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (κ.ε.) και λιώνει στους 661 °C. Επιπλέον λόγω της μεγάλης μηχανικής αντοχής που επιδεικνύει ως προς το βάρος του, το καθιστά βασικό δομικό στοιχείο σε κατασκευές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή και χαμηλό βάρος, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία και κυρίως την αεροναυπηγική. Οι κύριες προσμείξεις του αλουμινίου είναι Cu, Mn, Mg, Si και Zn.

Τα κράματα αλουμινίου χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

 - κράματα διαμόρφωσης και
 - κράματα χύτευσης
- Η κατεργασία σκλήρυνσης που πραγματοποιείται σε κράματα του αλουμινίου (όπως το ντουραλουμίνιο) λέγεται σκλήρυνση με κατα-

κρήμνιση λόγω γήρανσης. Η συγκεκριμένη θερμική κατεργασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Διαλυτοποίηση
 - Υπερβαφή
 - Γήρανση
- Το μαγνήσιο είναι ένα πολύ ελαφρό μέταλλο, πυκνότητας $1,7 \text{ g/cm}^3$, που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές που απαιτείται υψηλός λόγος αντοχή/βάρος (αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία). Έχει καλή αντοχή στη διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (στον αέρα) αλλά το προστατευτικό οξειδίο που δημιουργείται στην επιφάνεια είναι ασταθές, κυρίως κάτω από την παρουσία αλάτων. Κρυσταλλώνεται στο εξαγωνικό μεγίστης πυκνότητας πλέγμα (ε.μ.π.) και λιώνει στους 650°C . Η ικανότητα παραμόρφωσης εν ψυχρώ (έλαση, δέλαση) είναι σχετικά μειωμένη σε σχέση με άλλα μέταλλα (π.χ. αλουμίνιο). Σε υψηλότερες θερμοκρασίες ($>300^\circ\text{C}$) το μαγνήσιο εμφανίζει μεγαλύτερη πλαστικότητα. Όταν θερμανθεί στον αέρα σε υψηλή θερμοκρασία (800°C) καίγεται παράγοντας εκτυφλωτική λάμψη. Όπως και στα άλλα βιομηχανικά κράματα έτσι και στα κράματα μαγνησίου υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες: τα κράματα διαμόρφωσης και τα κράματα χύτευσης. Η τήξη του μαγνησίου κατά τη χύτευση παρουσιάζει δυσκολίες, επειδή το μαγνήσιο καίγεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η προσθήκη θείου προστατεύει το μαγνήσιο, επειδή καίγεται και δημιουργεί αέριο διοξείδιο του θείου.
 - Τα κυριότερα κράματα του μαγνησίου είναι τα ακόλουθα:
 - (i) Κράματα Mg-Al-Zn
 - (ii) Κράματα Mg-Zr-Th
 - Βασικές χρήσεις των σφυρήλατων και χυτών κραμάτων Mg εντοπίζονται στην κατασκευή δομικών στοιχείων αυτοκινήτων και αεροσκαφών, όπως π.χ. τροχούς προσγείωσης, δοχεία πετρελαίου/λαδιού, πλαίσια στροφάλων, έμβολα μηχανών εσωτερικής καύσης.
 - Το τιτάνιο έχει πυκνότητα $4,5 \text{ g/cm}^3$ και ανήκει μαζί με το αλουμίνιο και το μαγνήσιο στα ελαφρά μέταλλα. Είναι αλλοτροπικό μέταλλο, δηλαδή αλλάζει η κρυσταλλική του δομή με τη θερμοκρασία. Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, λόγω του στρώματος TiO_2 που δημιουργείται στην επιφάνεια και λιώνει σε υψηλή θερμοκρασία (1660°C), ιδιότητα σύμφωνα με την οποία θεωρείται πυρίμαχο υλικό. Επιπλέον παρουσιάζει σημαντική μηχανική αντοχή, πράγμα

που το καθιστά ως το βασικό δομικό στοιχείο για την κατασκευή κινητήρων αεριοπρωθούμενων αεροσκαφών (jet-engines).

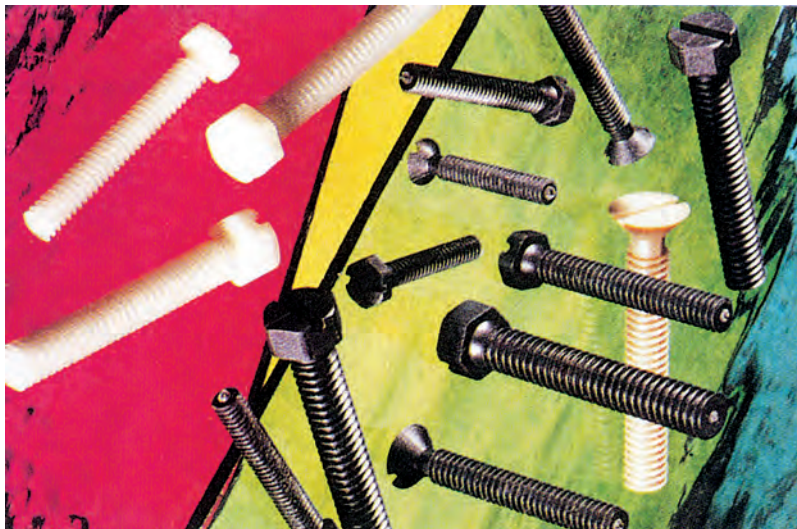
- Η κραματοποίηση του τιτανίου με διάφορα στοιχεία οδηγεί, στη δημιουργία μονοφασικών κραμάτων α-φάσης (Al, C, O, N), β-φάσης (Mo, V, Nb), διφασικών κραμάτων α+β φάσης και ευτηκτικών κραμάτων (Fe, Cr, Mn, Si).
- Καθαρό τιτάνιο (ή σπανιότερα κράμα τιτανίου-παλλαδίου), ή μονοφασικό α-κράμα λόγω της υψηλής αντοχής στη διάβρωση, καθώς και της καλής κατεργασιμότητας και συγκολλησιμότητας, χρησιμοποιείται ευρύτατα στη χημική βιομηχανία ως υλικό κατασκευής επενδύσεων, δοχείων και δεξαμενών που έρχονται σε επαφή με διαβρωτικά υγρά.
- Τα διφασικά α+β κράματα τιτανίου (κυρίως κράματα Ti-Al-V) εμφανίζουν τις περισσότερες χρήσεις, διότι επιδέχονται θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης με κατακρήμνιση (υπερβαφή - γήρανση, ανάλογες με αυτές του ντουραλουμινίου). Λόγω της υψηλής τους μηχανικής αντοχής και χημικής αδράνειας, χρησιμοποιούνται έτσι ευρύτατα στην αεροναυπηγική, όπως π.χ. στην κατασκευή τμημάτων αεριοπρωθούμενων κινητήρων και αεροσυμπιεστών, πτερυγίων αεροστροβίλων, αλλά και στην ιατρική, ως χειρουργικά εργαλεία αλλά και υλικά προσθετικής (λάμες, εμφυτεύματα, κλπ.).
- Το νικέλιο είναι μέταλλο μαγνητικό (όπως ο σίδηρος και το κοβάλτιο). Έχει πυκνότητα $8,9 \text{ g/cm}^3$ και λιώνει στους 1453°C . Το νικέλιο κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (κ.ε.). Το νικέλιο είναι αδρανές και παρουσιάζει έτσι εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση. Τα βασικά κράματα του νικελίου με μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον (μαζί με τις καθιερωμένες εμπορικές τους ονομασίες) είναι τα ακόλουθα:
 - (i) Κράματα Ni-Cu (Monel)
 - (ii) Κράματα Ni-Ti (Nitinol).
 - (iii) Υπερκράματα.
- Ο ψευδάργυρος κρυσταλλώνεται στο εξαγωνικό μεγίστης πυκνότητας (ε.μ.π.) και λιώνει στους 420°C . Ο καθαρός ψευδάργυρος έχει μέτριες μηχανικές ιδιότητες αλλά παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στην διάβρωση στον αέρα, λόγω της δημιουργίας προστατευτικού ZnO στην επιφάνειά του. Έτσι χρησιμοποιείται ευρύτατα σε οικοδομικές και ηλεκτρολογικές εφαρμογές, ως θυσιαζόμενο ηλεκτρόδιο για την προστασία από τη διάβρωση σε μεταλλικές κατασκευές. Επίσης χρησιμοποιείται ως επικαλυπτικό υλικό λαμαρίνων για την προστα-

σία από διάβρωση (γαλβανισμένες και επιψευδαργυρωμένες λαμαρίνες). Τα κράματα του ψευδαργύρου με το μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον είναι τα κράματα Zn-Al, γνωστά με την εμπορική ονομασία Zamac. Τα κράματα αυτά έχουν πολύ καλή ρευστότητα και γι' αυτόν κυρίως το λόγο κατασκευάζονται με χύτευση. Αυτά χρησιμοποιούνται ως εξαρτήματα πλυντηρίων, ραδιοφώνων, παιχνιδιών, χειρολαβών, πλαισίων, κλπ.

- Ο μόλυβδος είναι από τα πιο βαριά μέταλλα με πυκνότητα $11,3 \text{ g/cm}^3$ και κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα (κ.ε.). Λιώνει στους 327°C και παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση. Διαμορφώνεται εύκολα με χύτευση. Ωστόσο, παρουσιάζει πολύ μεγάλη ολκιμότητα: μπορεί πολύ εύκολα να παραμορφωθεί με το χέρι. Παλαιότερα, από μόλυβδο κατασκευάζονταν νομίσματα, κοσμήματα και αργότερα οροφές κατοικιών. Σήμερα από μόλυβδο κατασκευάζονται συσσωρευτές, επενδύσεις δοχείων χημικών και θωρακίσεις αντιδραστήρων για προστασία από την ακτινοβολία γ και X. Τα βασικότερα κράματα μολύβδου είναι τα ακόλουθα:

- (i) Κράματα Pb-Sb
- (ii) Κράματα Pb-Sn
- (iii) Κράματα Pb-Sb-Sn

Βίδες από σύνθετο υλικό μήτρας νάυλον (nylon) ενισχυμένο με ίνες γυαλιού



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

8

ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

- 8.1 Πολυμερή
- 8.2 Κεραμικά-Γυαλιά
- 8.3 Σύνθετα υλικά



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να μάθετε τα διάφορα δύο βασικά είδη αντιδράσεων πολυμερισμού
- ☒ Να μάθετε τις διάφορες κατηγορίες πολυμερών υλικών και τις βασικές τους διαφορές
- ☒ Να δίνετε παραδείγματα εφαρμογής βασικών πολυμερών υλικών
- ☒ Να μάθετε τις δύο βασικές κατηγορίες κεραμικών και να δίνετε αντίστοιχα παραδείγματα
- ☒ Να μάθετε συνοπτικά τα στάδια της διαδικασίας κατασκευής πορσελάνης
- ☒ Να μάθετε μερικά βασικά προηγμένα κεραμικά που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές εφαρμογές
- ☒ Να μάθετε τις διάφορες κατηγορίες συνθέτων υλικών και να δίνετε παραδείγματα και εφαρμογές από καθεμία κατηγορία

Στα μη μεταλλικά υλικά περιλαμβάνονται τα πολυμερή, τα κεραμικά και τα σύνθετα υλικά.

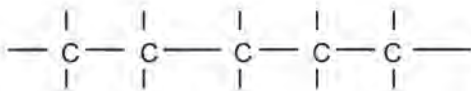
8.1 ΠΟΛΥΜΕΡΗ

8.1.1 Πολυμερή και πολυμερισμός

Τα πολυμερή είναι γνωστά ευρέως και ως πλαστικά, επειδή πολλά από αυτά είναι εύπλαστα, δηλαδή παραμορφώνονται εύκολα. Οι χρήσεις είναι πάρα πολλές εξαιτίας των μηχανικών, οπτικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν. Λόγω της μικρής πυκνότητας, που έχουν, η ειδική μηχανική αντοχή (αντοχή/πυκνότητα) είναι πολύ μεγάλη και έτσι χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή και παράλληλα μικρό βάρος (π.χ. αυτοκινητοβιομηχανία). Γενικά, όμως, τα πολυμερή υλικά παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ιδιοτήτων (μηχανικών, φυσικών, κ.λπ.) και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ειδών καθημερινής και οικιακής

χρήσης (πλαστικά έπιπλα, παιχνίδια, είδη σπορ, επενδύσεις, κόλλες, σακούλες, κ.λπ.), στην κλωστοϋφαντουργία (ίνες, υφάσματα), στην ηλεκτρονική (πλακέτες κυκλωμάτων, πλαίσια), στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυπηγική και αεροναυπηγική.

Πολυμερή είναι χημικές ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους οργανικής βάσης, και η δομική μονάδα τους είναι συνήθως η αλυσίδα ατόμων άνθρακα (Βλ. Οργανική Χημεία):



Στην περίπτωση των πολυμερών η αλυσίδα ατόμων άνθρακα έχει μεγάλο μήκος και ονομάζεται **μακρομοριακή αλυσίδα** ή **μακρομόριο**. Οι βασικοί χημικοί δεσμοί στα πολυμερή υλικά (-C-C-) είναι ομοιοπολικοί.

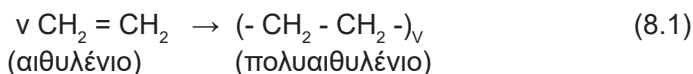
Ο σχηματισμός της μακρομοριακής αλυσίδας, άρα και των πολυμερών υλικών, πραγματοποιείται με χημική αντίδραση σύνδεσης πολλών “μικρών” ενώσεων, που ονομάζονται **μονομερή**. Στην περίπτωση που τα μονομερή δεν είναι όμοια μεταξύ τους, τότε το παραγόμενο πολυμερές ονομάζεται συμπολυμερές. Η διαδικασία σύνδεσης πολλών μονομερών (ομοίων ή ανόμοιων) για την παρασκευή πολυμερούς ονομάζεται **πολυμερισμός**. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες πολυμερισμού: ο **αλυσιδωτός** και ο **σταδιακός**.

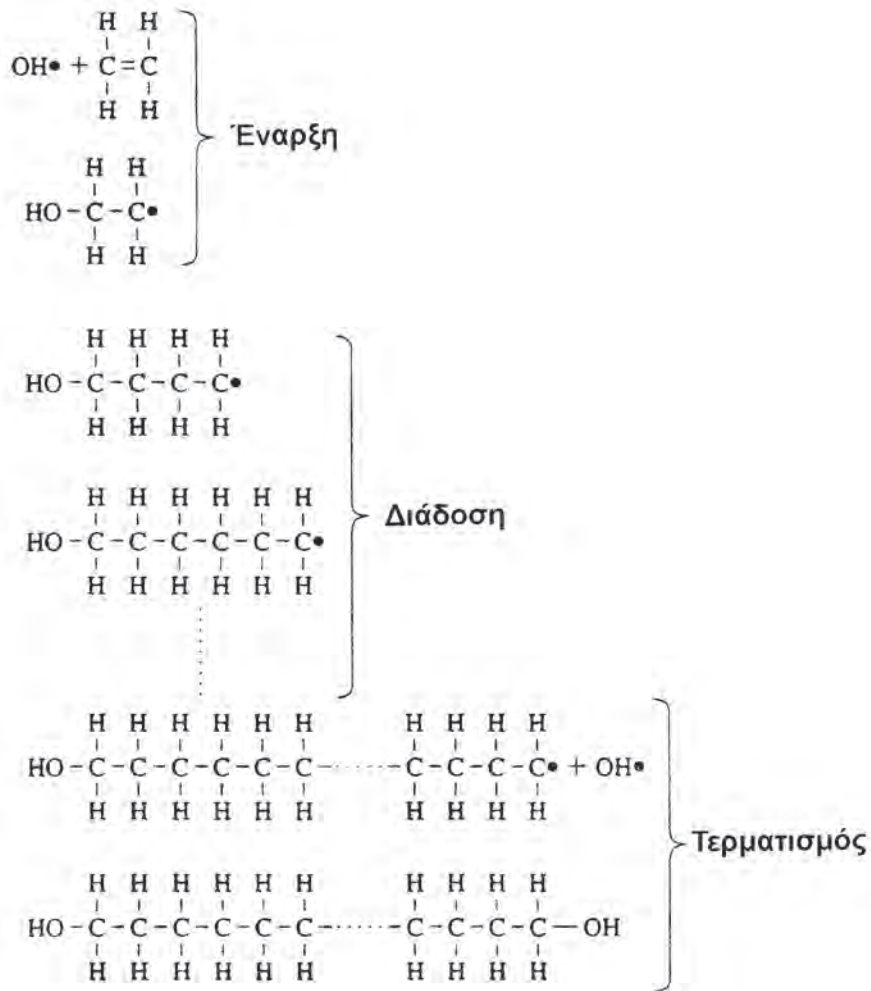
(i) Αλυσιδωτός πολυμερισμός

Ονομάζεται και **πολυπροσθήκη** και πρόκειται για γρήγορη αλυσιδωτή αντίδραση που έχει τρεις φάσεις:

- *Έναρξη*: παρουσία κάποιας ουσίας που ονομάζεται ενεργοποιητής με την οποία πραγματοποιείται η μετατροπή του διπλού δεσμού (=) σε απλό, καθιστώντας τον ως **ενεργό κέντρο** σύνδεσης.
- *Διάδοση*: Είναι η αντίδραση σύνδεσης και ανάπτυξης της μακρομοριακής αλυσίδας.
- *Τερματισμός*: είναι το στάδιο διακοπής της αλυσιδωτής αντίδρασης.

Το πολυαιθυλένιο (PE) παρασκευάζεται με αλυσιδωτό πολυμερισμό του οποίου η συνολική αντίδραση είναι η εξής:





Σχήμα 8.1: Φάσεις αλυσιδωτού πολυμερισμού πολυαιθυλενίου.

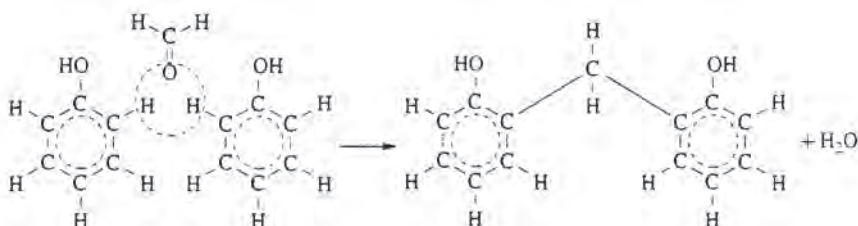
Ο αριθμός n δείχνει τον αριθμό των ανεξάρτητων μονομερών (αιθυλένιο) που συνδέονται, προκειμένου να δημιουργηθεί το πολυμερές (πολυαιθυλένιο). Οι διάφορες φάσεις της αλυσιδωτής αντίδρασης (8.1) παρουσιάζονται στο σχήμα 8.1. Το ρόλο του ενεργοποιητή, αλλά και αναστολέα του πολυμερισμού, παίζει η ελεύθερη ρίζα του υδροξυλίου ($\text{OH}\bullet$).

(ii) Σταδιακός πολυμερισμός.

Σε αντίθεση με τον αλυσιδωτό πολυμερισμό, ο σταδιακός πολυμερισμός (ή **πολυσυμπύκνωση**) είναι πολύ πιο αργή αντίδραση και πραγματοποιείται

μέσω πολλαπλών ανεξαρτήτων αντιδράσεων ζευγών μονομερών. Η αλληλεπίδραση των μονομερών συνοδεύεται από απόσπαση παραπροϊόντος (νερό ή αμμωνία), η οποία καλείται συμπύκνωση. Ένα τέτοιο παράδειγμα σταδιακού πολυμερισμού φαινόλης - φορμαλδεΐδης φαίνεται στο σχήμα 8.2. Το παραγόμενο συμπολυμερές φαινόλης-φορμαλδεΐδης (PF) είναι γνωστό με την ονομασία βακελίτης και χρησιμοποιείται σε πολλές ηλεκτρολογικές εφαρμογές.

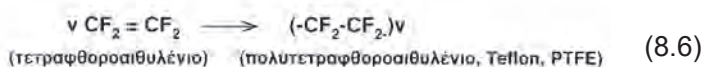
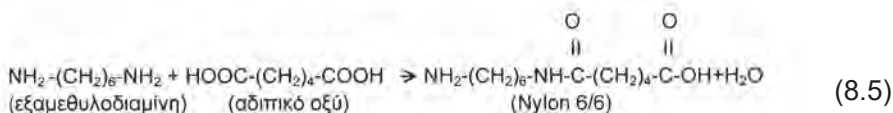
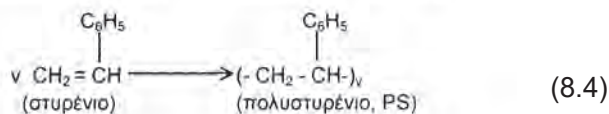
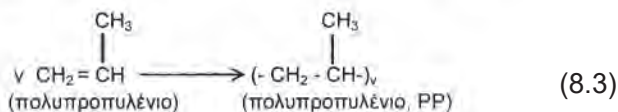
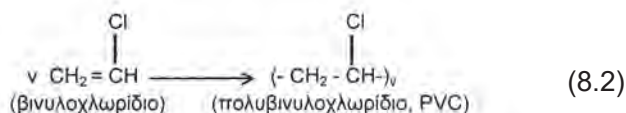
Φορμαλδεΐδη



Φαινόλες

Σχήμα 8.2: Σταδιακός πολυμερισμός φαινόλης-φορμαλδεΐδης.

Ορισμένα βασικά πολυμερή και οι συνολικές αντιδράσεις πολυμερισμού (είτε αλυσιδωτού είτε σταδιακού) φαίνονται παρακάτω:



Ως προς τις ιδιότητές τους υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες πολυμερών: τα **θερμοπλαστικά**, τα **θερμοσκληρυνόμενα** και τα **ελαστομερή**.

8.1.2 Θερμοπλαστικά

Είναι υλικά τα οποία κατά τη θέρμανση μαλακώνουν και παραμορφώνονται εύκολα, όπως και τα μέταλλα, ενώ κατά την ψύξη σκληραίνουν. Η ευκολία παραμόρφωσης κατά τη θέρμανση οφείλεται στην ευχέρεια ολίσθησης των μακρομορίων, τα οποία συγκρατούνται μεταξύ τους με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals. Τα θερμοπλαστικά ανακυκλώνονται (επανειλημμένες θερμάνσεις και μορφοποιήσεις). Βασικά θερμοπλαστικά και εφαρμογές τους φαίνονται στον Πίνακα Π.8.1.

Πίνακας Π.8.1: Βασικά θερμοπλαστικά πολυμερή και εφαρμογές

Πολυμερές	Τυπικές Εφαρμογές
Πολυαιθυλένιο (PE)	Υλικά συσκευασίας, φύλλα, μπουκάλια
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	Δάπεδα, μεμβράνες, σωλήνες
Πολυπροπυλένιο (PP)	Φύλλα, σωλήνες, καλύμματα
Πολυστυρένιο (PS)	Δοχεία, αφρώδη υλικά
Θερμοπλαστικός πολυεστέρας (PET, Dacron, Mylar)	Μαγνητικές ταινίες, ίνες, μεμβράνες
Ακρυλικά (PMMA, Lucite)	Παράθυρα, φακοί επαφής
Nylon	Ρουχισμός, σχοινιά, γρανάζια
Ακρυλονιτρίλιο-Βουταδιένιο-Στυρένιο (ABS)	βαλίτσες, τηλεφωνικές συσκευές
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (Teflon)	Υλικά στεγανοποίησης, έδρανα, φλάντζες

8.1.3.Θερμοσκληρυνόμενα

Παρουσιάζουν ακριβώς τις αντίθετες ιδιότητες με τα θερμοπλαστικά, δηλαδή κατά τη θέρμανση σκληραίνουν και παραμορφώνονται με δυσκολία. Αυτό είναι αποτέλεσμα της δημιουργίας ισχυρών δεσμών διασταύρωσης μεταξύ των μακρομορίων και της δημιουργίας δικτύου που καθιστά δύσκο-

λη τη μετακίνησή τους. Τυπικά θερμοσκληρυνόμενα και εφαρμογές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.8.2.

Πίνακας Π.8.2: Βασικά θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή και εφαρμογές.

Πολυμερές	Τυπικές Εφαρμογές
Πολιουρεθάνη	Φύλλα, σωλήνες, αφρώδη υλικά, ίνες
Φαινολικά (π.χ. βακελίτης)	Ηλεκτρολογικός/ηλεκτρονικός εξοπλισμός
Ρητίνη ουρίας-φορμαλδεΐδης	Πιάτα, ελάσματα
Θερμοσκληρυνόμενοι πολυεστέρες	Σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού (fiberglass), επικαλύψεις
Εποξικές ρητίνες	Κόλλες (π.χ. Araldite), σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού (fiberglass), επικαλύψεις

8.1.4 Ελαστομερή

Είναι ειδική κατηγορία πολυμερών στην οποία ανήκει το φυσικό και τεχνητό καουτσούκ (λάστιχο) και άλλα υλικά που παρουσιάζουν πολύ μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις. Από ελαστομερή υλικά υψηλών προδιαγραφών κατασκευάζονται και τα ελαστικά των αυτοκινήτων. Μία σημαντική διεργασία, η οποία τροποποιεί τις ιδιότητες των ελαστομερών κατά τρόπον ώστε να αυξάνεται η αντοχή τους σημαντικά και να διατηρείται σε ικανοποιητικά επίπεδα η ελαστική συμπεριφορά τους, είναι ο **βουλκανισμός**. Η διεργασία του βουλκανισμού, η οποία έγινε γνωστή από τον C. Goodyear (1800-1860), οδηγεί στη δημιουργία ισχυρών δεσμών διασταύρωσης και συνεπώς στην ενίσχυση του ελαστικού, η οποία ελέγχεται με την προσθήκη θείου (S) κατά τη θέρμανση. Όσο αυξάνεται η ποσότητα του θείου, τόσο αυξάνεται και η σκληρότητα του ελαστικού σε βάρος της ελαστικότητάς του. Μερικά βασικά ελαστομερή και εφαρμογές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.8.3.

Όλες οι κατηγορίες πολυμερών, κάτω από μία συγκεκριμένη θερμοκρασία, αποκτούν υαλώδη δομή και γίνονται σκληρά και εύθραυστα, όπως το γυαλί. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται **θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g)**.

Πίνακας Π.8.3: Βασικά ελαστομερή και εφαρμογές.

Ελαστομερές	Τυπικές Εφαρμογές
Πολυβουταδιένιο	Ελαστικά αυτοκινήτων
Πολυισοπρένιο	Ελαστικά αυτοκινήτων, έδρανα, φλάντζες
Πολυχλωροπρένιο	Έδρανα, πυράντοχα αφρώδη υλικά, μεταφορικές ταινίες
Σιλικόνη	Κόλλες, φλάντζες

8.1.5 Πρόσθετα

Είναι διάφορες ουσίες που αναμειγνυόμενες με διάφορα πολυμερή υλικά τροποποιούν συγκεκριμένες ιδιότητές τους. Τέτοια είναι:

- **Πλαστικοποιητές.** Συνήθως είναι πολυμερή μικρού μοριακού βάρους που προστίθενται για να κάνουν πιο μαλακό το συγκεκριμένο υλικό.
- **Πρόσθετα ενίσχυσης.** Προστίθενται για την αύξηση της μηχανικής αντοχής, της αντοχής σε φθορά, κλπ. Τέτοια είναι η κυτταρίνη, ο αμίαντος, το carbon black.
- **Σταθεροποιητές.** Είναι ουσίες που προστατεύουν τα πολυμερή από τη γήρανση που οδηγεί στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους (θερμική διάσπαση, φωτοξείδωση). Έτσι, π.χ. αντιοξειδωτικά πρόσθετα, που χρησιμοποιούνται για τα ελαστομερή, είναι κυρίως αμίνες, φαινόλες και ενώσεις του θείου.
- **Αντιπυρικά πρόσθετα (επιβραδυντές φλόγας).** Αυτά τα πρόσθετα καταπολεμούν τη διάδοση της φλόγας κατά την καύση των πολυμερών και είναι συνήθως αλογονούχες και φωσφορούχες ενώσεις.
- **Χρωστικές.** (α) Ανόργανες, συνήθως χρωστικές ουσίες, αδιάλυτες στο νερό (πιγμέντα): TiO_2 , $\text{Al}_4(\text{SiO}_4)_3$. (β) Οργανικά χρώματα διαφανούς υφής.

8.2 ΚΕΡΑΜΙΚΑ-ΓΥΑΛΙΑ

Η λέξη κεραμικό σημαίνει ετυμολογικά το υλικό εκείνο που παρασκευάζεται με ψήσιμο. Τα κεραμικά ήταν από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήσε ο άνθρωπος για την κατασκευή αγγείων, ποτηριών και ειδών καθημερινής χρήσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις κεραμικών παρουσιάζεται μειωμένα, έως καθόλου, ολκιμότητα και επίσης μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό. Η αντοχή στη θλίψη είναι μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο είδος του δεσμού που υπάρχει στα κεραμικά και που είναι είτε **ιοντικός** (Al_2O_3 , MgO) είτε **ομοιοπολικός** (SiC , Si_3N_4), αλλά και στην ύπαρξη μικρορωγμών και πόρων μέσα στη μάζα του κεραμικού. Τα κεραμικά και κυρίως τα τεχνικά (που βρίσκουν πολλές μηχανολογικές εφαρμογές) παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα που ξεκινά από 1000-1500 HV (π.χ. αλουμίνα, Al_2O_3) και μπορεί να φθάσει τα 5000-7000 HV (νιτρίδιο του βορίου, BN). Το διαμάντι, που αποτελεί τετραεδρική δομή του άνθρακα, θεωρείται κεραμικό υλικό και μάλιστα το πιο σκληρό που υπάρχει (8000 - 10000 HV). Επίσης, στην πλειοψηφία τους τα κεραμικά υλικά χαρακτηρίζονται από μικρή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα (μονωτικά υλικά).

Συνοψίζοντας, τα κεραμικά είναι ανόργανα υλικά, είτε κρυσταλλικά είτε άμορφα (γυαλί), η δομή των οποίων στηρίζεται στη δημιουργία ενώσεων δύο ή περισσότερων στοιχείων με ιοντικό ή/και ομοιοπολικό δεσμό. Οι ιδιότητές τους συνοψίζονται παρακάτω:

- Υψηλό σημείο τήξεως (πυριμαχικότητα)
- Μεγάλη σκληρότητα και αντοχή στη φθορά-τριβή
- Ευθραυστότητα
- Μεγάλη αντοχή σε θλίψη
- Αντοχή στην οξείδωση-διάβρωση
- Μικρή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα

Τα κεραμικά, ανάλογα με το χημικό τους τύπο, χωρίζονται στις εξής βασικές κατηγορίες:

- Οξείδια (π.χ. Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2)
- Καρβίδια (π.χ. SiC , WC , TiC , B_4C)
- Νιτρίδια (π.χ. Si_3N_4 , TiN , BN)

Εκτός από αυτές τις βασικές κατηγορίες υπάρχουν και άλλες δευτερεύουσες, όπως είναι τα πυριτίδια, τα βορίδια και τα φθορίδια. Ανάλογα

με τον προορισμό τους αλλά και τις συνθήκες χρήσεως, διακρίνουμε δύο μεγάλες κατηγορίες κεραμικών: τα **παραδοσιακά** και τα **προηγμένα κεραμικά**.

8.2.1 Παραδοσιακά κεραμικά

Παραδοσιακά λέγονται τα κεραμικά υλικά που παρασκευάζονται από φθινές πρώτες ύλες που βρίσκονται σε μεγάλη αφθονία στη γη (άμμος, χώμα) και συνιστούν προϊόντα ευρείας χρήσεως (πιάτα, τούβλα, κεραμίδια, τζάμια, κ.λπ.). Ορισμένα βασικά παραδοσιακά κεραμικά παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.8.4.

Πίνακας Π.8.4: Παραδοσιακά κεραμικά και εφαρμογές

Κεραμικό	Εφαρμογές
Γυαλί (με βάση το SiO_2)	Τζάμια, είδη κουζίνας, επισματώσεις, εφυαλώματα, κλπ.
Πηλός, άργιλος, (π.χ. καολινίτης $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	Πήλινα αγγεία, τούβλα, αποχετευτικοί αγωγοί, πιατικά
Τσιμέντο, ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)	οικοδομικά υλικά, σκυρόδεμα
Πυρίμαχα (MgO , CaO , SiO_2)	πυρότουβλα, καλούπια, χωνευτήρια
Πορσελάνη	Πιάτα, βάζα, διακοσμητικά είδη, οδοντιατρικά υλικά, ηλεκτροτεχνικά υλικά

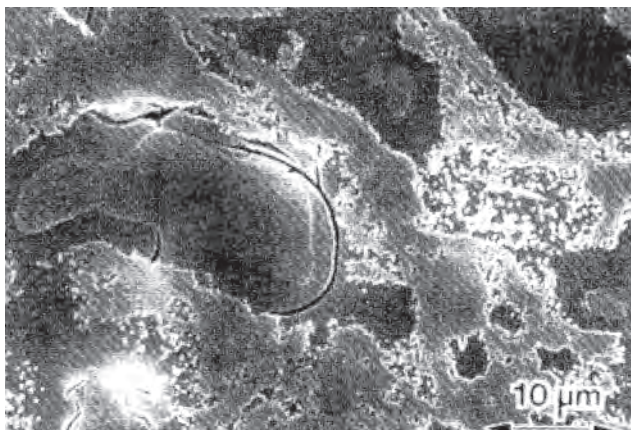
Τα βασικά συστατικά στα περισσότερα παραδοσιακά κεραμικά, όπως η **πορσελάνη**, είναι τα ακόλουθα:

(i) **Πυριτία ή οξείδιο του πυριτίου (SiO_2)**. Οι κόκκοι της πυριτίας είναι το βασικό συστατικό της πορσελάνης (επίσης και άλλων παραδοσιακών κεραμικών), αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και δημιουργούν το “**σκελετό**” του κεραμικού.

(ii) **Αργίλος (ή πηλός)**. Είναι κυρίως στερεό φυλλώδους δομής και αργιλοπυριτικής σύστασης. Μία κλασική άργιλος που συναντάται στην πορσελάνη είναι ο καολίνης ή καολινίτης ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Προσδίδει στο κεραμικό πλαστικότητα και ευκολία διαμόρφωσης πριν από την έψηση (ψήσιμο). Η **πλαστικότητα** της άργιλου, μετά από ανάμειξη με νερό, οφείλεται στις ηλεκτροστατικές απώσεις με-

ταξύ των κεραμικών σωματιδίων. Σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες (400- 500°C) υφίσταται απομάκρυνση του νερού (αφυδάτωση).

(iii) **Αστρίος.** Είναι αργιλοπυριτικό υλικό (ορυκτό) με οξειδία του νατρίου ή/και του καλίου ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$). Έχει χαμηλό σημείο τήξεως και λιώνει αντιδρώντας με τους κόκκους της αργίλου και με ένα μέρος των κόκκων SiO_2 , δημιουργώντας μία υαλώδη φάση μεταξύ των βασικών πυριτικών κόκκων (1000-1300°C), μειώνοντας το πορώδες και ενισχύοντας τους συνδέσμους των κεραμικών κόκκων. Η **ημιδιαφάνεια** είναι μια χαρακτηριστική οπτική ιδιότητα της πορσελάνης που οφείλεται στην ύπαρξη της υαλώδους φάσης μεταξύ των κόκκων. Χαρακτηριστική δομή της πορσελάνης φαίνεται στο σχήμα 8.3.



Σχήμα 8.3: Χαρακτηριστική δομή της πορσελάνης αποτελούμενη από μερικώς διαλυμένους κόκκους πυριτίας συνδεδεμένους με υαλώδη φάση.

Η κατασκευή ειδών από πορσελάνη και πηλό (είδη αγγειοπλαστικής) περιλαμβάνει, εκτός από τα βασικά στάδια της μορφοποίησης και της έψησης, και ένα στάδιο **εφυάλωσης** δηλαδή δημιουργίας μίας λεπτής επιφανειακής επίστρωσης από γυαλί με σκοπό την αδιαβροχοποίηση του κεραμικού και την αύξηση της αντοχής σε φθορά-τριβή. Ένα επίσης σημαντικό παραδοσιακό κεραμικό είναι το **τσιμέντο Portland** ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), το οποίο χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό. Παρασκευάζεται με έψηση των πρώτων υλών, σε θερμοκρασία περίπου 1600°C, μέσα σε περιστροφική κάμινo, με αποτέλεσμα τη δημιουργία του λεγόμενου **κλίνκερ**. Στο κλίνκερ γίνονται διάφορες προσθήκες για τη βελτίωση της αντοχής του και της ικανότητας σκλήρυνσης με το νερό (π.χ. γύψος $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Η βασική ιδιότητα του κλίνκερ (άρα και του τσιμέντου) είναι η σκλήρυνση με

την **ενυδάτωση**. Η ενυδάτωση προκαλεί διάφορες αντιδράσεις που, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, οδηγούν στη δημιουργία σκληρών φάσεων μέσα στο τσιμέντο.

Μεταξύ των παραδοσιακών κεραμικών εντάσσεται και το **γυαλί**. Το γυαλί παρασκευάζεται με τήξη των πρώτων υλών (άστριοι, MgCO_3 , Na_2CO_3 , CaCO_3 , SiO_2) σε υψηλές θερμοκρασίες (περίπου 1600°C). Μετά τη χύτευση ακολουθεί ένα στάδιο ανόπτησης που έχει σκοπό την άμβλυνση των εσωτερικών τάσεων και την αύξηση της δυσθραυστότητας του γυαλιού. Βασικοί τύποι γυαλιών είναι:

- **Γυαλιά νατρίου-ασβεστίου ($\text{Na}_2\text{O-CaO-SiO}_2$)**. Είναι τα πιο συνήθη γυαλιά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή υαλοπινάκων, τζαμιών παραθύρων, καθρεπτών, κ.λπ.
- **Βοριοπυριτικά γυαλιά ($\text{B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-SiO}_2$)**. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή και δυσθραυστότητα. Επίσης, αντέχουν στα θερμικά σοκ. Από αυτή την κατηγορία κατασκευάζονται πυρίμαχα γυαλιά, pyrex, ειδικά τζάμια, κ.λπ.
- **Πυριτία (SiO_2)**. Είναι γυαλί υψηλών απαιτήσεων και με μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 1000°C). Κατασκευάζονται χωνευτήρια, παράθυρα φούρνων, κ.λπ.

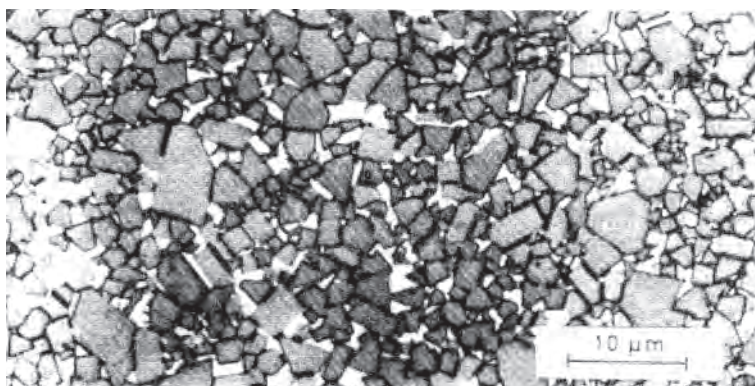
8.2.2 Προηγμένα κεραμικά

Βρίσκουν πολλές εφαρμογές στη σύγχρονη τεχνολογία, λόγω των σημαντικών μηχανικών, ηλεκτρομαγνητικών και χημικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν. Ο Πίνακας Π.8.5 συνοψίζει μερικούς από τους βασικότερους αντιπροσώπους των προηγμένων κεραμικών.

Το σχήμα 8.4 δείχνει τη μικροδομή ενός κεραμικού εργαλείου κοπής που αποτελείται από κόκκους καρβιδίου του βολφραμίου (WC) μέσα σε κοβάλτιο (Co).

Πίνακας Π.8.5: Προηγμένα κεραμικά και εφαρμογές

Κατηγορία/Κεραμικό	Ιδιότητες - Εφαρμογές
Τεχνικά κεραμικά - καρβίδια (WC , TiC , SiC , B_4C) - νιτρίδια (TiN , Si_3N_4 , BN) - οξειδία (Al_2O_3 , ZrO_2) - οξυνιτρίδια ($Si-Al-O-N$)	Μεγάλη σκληρότητα και αντοχή στη φθορά-τριβή. Κατασκευή εργαλείων κοπής, εδράνων, τριβών, παξιμαδιών, ακροφυσίων, εξαρτημάτων μηχανών εσωτερικής καύσης, αεριοστροβίλων, κλπ.
Ηλεκτροκεραμικά - Al_2O_3 , ZnO , $BaTiO_3$, $PbZrO_3$,	Ηλεκτρομονωτικές ιδιότητες, πιεζοηλεκτρικό και σιδηροηλεκτρικό φαινόμενο. Κατασκευή μονωτήρων (μπουζί), αισθητήρων.
Μαγνητικά κεραμικά - Fe_3O_4 , $NiFe_2O_4$	Μαγνητικές ιδιότητες. Κατασκευή μαγνητών, πυρήνων, κλπ.
Υπεραγώγιμα κεραμικά - $YBa_2Cu_3O_7$, $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	Μηδενική αντίσταση σε θερμοκρασία υγρού αζώτου. Κατασκευή συρμάτων, πηνίων, ηλεκτρογεννητριών, αισθητήρων, αιωρούμενων μαγνητικά τρένων, κλπ.
Καταλύτες - Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$	Προσροφητικές ιδιότητες, καταλυτικές ιδιότητες. Χρήση στην χημική και πετροχημική βιομηχανία και στους καταλύτες αυτοκινήτων.
Βιοκεραμικά - Υδροξυαπατίτης $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ - TiN - Al_2O_3 , ZrO_2	Συμβατότητα με τον ανθρώπινο οργανισμό (βιοσυμβατότητα). Ιατρικές εφαρμογές: εμφυτεύματα ορθοπεδικά, οδοντιατρικά, κλπ.

**Σχήμα 8.4:** Μικροδομή κεραμικού εργαλείου που αποτελείται από WC μέσα σε μήτρα κοβαλτίου (Co).

Τα παραπάνω κεραμικά παρασκευάζονται συνήθως με συμπίεση και πυρσοσσωμάτωση που αποτελούν βασικές διεργασίες της Κονιομεταλλουργίας (βλ. κεφάλαιο 13).

Εκτός από τη συμπαγή τους μορφή, τα προηγμένα κεραμικά χρησιμοποιούνται και υπό τη μορφή **επικαλύψεων** πάνω σε μεταλλικά επιστρώματα (π.χ. TiN πάνω σε χάλυβα, ZrO₂ πάνω σε χυτοσίδηρο, κ.λπ.) για την κατασκευή ανθεκτικών στη φθορά-τριβή, αλλά και διάβρωση εξαρτημάτων όπως: εργαλεία κοπής, καλούπια, έμβολα έδρανα, κινητήρες, κ.λπ..

8.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

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

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

- **Σύνθετα υλικά με διασπορά σωματιδίων.** Ένα παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι το σύνθετο πολυστυρενίου-ελαστομερούς. Το σύνθετο αυτό υλικό περιέχει σε διασπορά σωματίδια λάστιχου μέσα σε μήτρα πολυστυρενίου και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πλαστικότητας του αρχικά ψαθυρού πολυστυρενίου. Ένα άλλο παράδειγμα είναι το αλουμίνιο με διεσπαρμένους κόκκους καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Λόγω των κεραμικών κόκκων (SiC), το υλικό συνδυάζει υψηλή σκληρότητα και ολκιμότητα λόγω της μήτρας αλουμινίου.
- **Σύνθετα υλικά με ίνες.** Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου σύνθετου υλικού είναι πολυμερές (φαινολικά, πολυεστέρες, εποξικές ρητίνες) ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (fiberglass). Ένα τέτοιο σύνθετο υλικό παρουσιάζει μεγάλη μηχανική, χημική αντοχή και δυσθραυστότητα σε συνδυασμό με τη μικρή πυκνότητα. Χρησιμοποιείται σε αεροναυπηγικές-ναυπηγικές εφαρμογές και στη χημική βιομηχανία για την κατασκευή δοχείων που περιέχουν διαβρωτικά υγρά. **Πολυμερή με ίνες Kevlar** (είναι η εμπορική ονομασία κάποιου πολυαμιδίου που παρασκεύασε η εταιρεία DuPont) ή άνθρακα είναι σύνθετα

υλικά με μεγάλη αντοχή στην κρούση. Βρίσκουν εφαρμογές στην κατασκευή αμαξωμάτων αγωνιστικών αυτοκινήτων, τριβέων και εδράνων και γενικά στοιχείων μηχανών, που καταπονούνται κάτω από έντονες συνθήκες (μηχανικές-θερμικές).

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

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

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

Τα προηγμένα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας χρησιμοποιούνται ως υλικά υψηλών προδιαγραφών στη ναυπηγική, αεροναυπηγική και αυτοκινητοβιομηχανία, αλλά και στην κατασκευή εδράνων, τριβέων, οδοντωτών τροχών και άλλων στοιχείων μηχανών, που εκτός της μηχανικής αντοχής παίζει σπουδαίο ρόλο και η ελαχιστοποίηση του βάρους της κατασκευής. Τα προηγμένα σύνθετα κεραμικής ή μεταλλικής μήτρας χρησιμοποιούνται για την κατασκευή στοιχείων μηχανών εσωτερικής καύσης, αεροστροβίλων αλλά και εργαλείων (cermet WC/Co) και γενικά εξαρτημάτων, που απαιτείται να αντέχουν σε έντονες μηχανικές καταπονήσεις και σε διαβρωτικό περιβάλλον. Ορισμένες βασικές κατηγορίες προηγμένων σύνθετων υλικών παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.8.6.

Πίνακας Π.8.6: Προηγμένα σύνθετα υλικά και εφαρμογές

Κατηγορία σύνθετου υλικού	Εφαρμογές
Πολυμερικής μήτρας - ίνες Kevlar / εποξική ρητίνη - ίνες γραφίτη / πολυεστέρας	Αεροναυπηγική-ναυπηγική, είδη σπορ Αεροναυπηγική-αυτοκινητοβιομηχανία
Μεταλλικής μήτρας - Al_2O_3 / Al - SiC / Al - SiC / Cu - WC / Co (cermet)	Κατασκευή εμβόλων ΜΕΚ Έδρανα, τριβείς Προπέλες, πτερωτές Εργαλεία κοπής
Κεραμικής μήτρας - ίνες άνθρακα / άνθρακας - ίνες SiC / Si_3N_4 - SiC / γυαλί	Αεροναυπηγική-αεροδιαστημική Θερμομονωτικά υλικά Αντιτριβικές εφαρμογές



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 8ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Τα πολυμερή είναι γνωστά ευρέως και ως πλαστικά, επειδή πολλά από αυτά είναι εύπλαστα, δηλαδή παραμορφώνονται εύκολα. Οι χρήσεις είναι πάρα πολλές εξαιτίας των μηχανικών, οπτικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν. Λόγω της μικρής πυκνότητας που έχουν, η ειδική μηχανική αντοχή (αντοχή/πυκνότητα) είναι πολύ μεγάλη και έτσι χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή και παράλληλα μικρό βάρος (π.χ. αυτοκινητοβιομηχανία). Γενικά, όμως τα πολυμερή υλικά παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ιδιοτήτων (μηχανικών, φυσικών, κλπ.) και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ειδών καθημερινής και οικιακής χρήσεως (πλαστικά έπιπλα, παιχνίδια, είδη σπορ, επενδύσεις, κόλλες, σακκούλες, κλπ.), στην κλωστοϋφαντουργία (ίνες, υφάσματα), στην ηλεκτρονική (πλακέτες κυκλωμάτων, πλαίσια), στην αυτοκινητοβιομηχανία και τη ναυπηγική και αεροναυπηγική. Η διαδικασία σύνδεσης πολλών μονομερών (ομοίων ή ανομοίων) για την παρασκευή πολυμερούς ονομάζεται πολυμερισμός. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες πολυμερισμού: ο αλυσιδωτός και ο σταδιακός. Ως προς τις

ιδιότητές τους υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες πολυμερών: τα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα και τα ελαστομερή.

- Η λέξη κεραμικό σημαίνει ετυμολογικά το υλικό εκείνο που παρασκευάζεται με ψήσιμο. Τα κεραμικά ήταν από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος για την κατασκευή αγγείων, ποτηριών και ειδών καθημερινής χρήσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις κεραμικών παρουσιάζεται μειωμένη έως καθόλου ολκιμότητα και επίσης μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό. Η αντοχή στη θλίψη είναι μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο είδος του δεσμού που υπάρχει στα κεραμικά, και που είναι είτε ιοντικός (Al_2O_3 , MgO) είτε ομοιοπολικός (SiC , SiO_2) αλλά και στην ύπαρξη μικρορωγμών και πόρων μέσα στη μάζα του κεραμικού. Τα κεραμικά και κυρίως τα τεχνικά (που βρίσκουν πολλές μηχανολογικές εφαρμογές) παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα που ξεκινά από 1000-1500 HV (π.χ. αλουμίνα, Al_2O_3) και μπορεί να φθάσει τα 5000-7000 HV (νιτρίδιο του βορίου, BN). Το διαμάντι που αποτελεί τετραεδρική δομή του άνθρακα, θεωρείται κεραμικό υλικό και μάλιστα το πιο σκληρό που υπάρχει (8000 - 10000 HV). Επίσης στην πλειοψηφία τους τα κεραμικά υλικά χαρακτηρίζονται από μικρή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα (μονωτικά υλικά).
- Συνοψίζοντας τα κεραμικά είναι ανόργανα υλικά, είτε κρυσταλλικά είτε άμορφα (γυαλί), η δομή των οποίων στηρίζεται στη δημιουργία ενώσεων δύο ή περισσότερων στοιχείων με ιοντικό ή/και ομοιοπολικό δεσμό. Οι ιδιότητές τους συνοψίζονται παρακάτω:
 - ✓ Υψηλό σημείο τήξεως (πυριμαχικότητα)
 - ✓ Μεγάλη σκληρότητα και αντοχή στη φθορά-τριβή
 - ✓ Ευθραυστότητα
 - ✓ Μεγάλη αντοχή σε θλίψη
 - ✓ Αντοχή στην οξείδωση-διάβρωση
 - ✓ Μικρή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα
- Τα κεραμικά ανάλογα με το χημικό τους τύπο χωρίζονται στις εξής βασικές κατηγορίες:
 - ✓ Οξείδια (π.χ. Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2)
 - ✓ Καρβίδια (π.χ. SiC , WC , TiC , B_4C)
 - ✓ Νιτρίδια (π.χ. Si_3N_4 , TiN , BN)
- Εκτός από αυτές τις βασικές κατηγορίες υπάρχουν και άλλες δευτερεύουσες, όπως είναι τα πυριτίδια, τα βορίδια και τα φθορίδια. Ανάλογα με τον προορισμό τους αλλά και τις συνθήκες χρήσεως διακρίνουμε

δύο μεγάλες κατηγορίες κεραμικών: τα παραδοσιακά και τα προηγμένα κεραμικά.

- Σύνθετα καλούνται τα υλικά που κατασκευάζονται από δύο διαφορετικά υλικά προκειμένου να αποκτήσουν βελτιωμένες ιδιότητες (μηχανικές, ηλεκτρικές). Μία απλή περίπτωση παραδοσιακού σύνθετου υλικού είναι οι κολόνες οπλισμένου σκυροδέματος (μπετόν αρμέ). Κάθε σύνθετο υλικό αποτελείται από το υλικό της μήτρας και από το ενισχυτικό υλικό. Ανάλογα με τη μορφή του ενισχυτικού υλικού υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες σύνθετου υλικού:

(1) Σύνθετα υλικά με διασπορά σωματιδίων

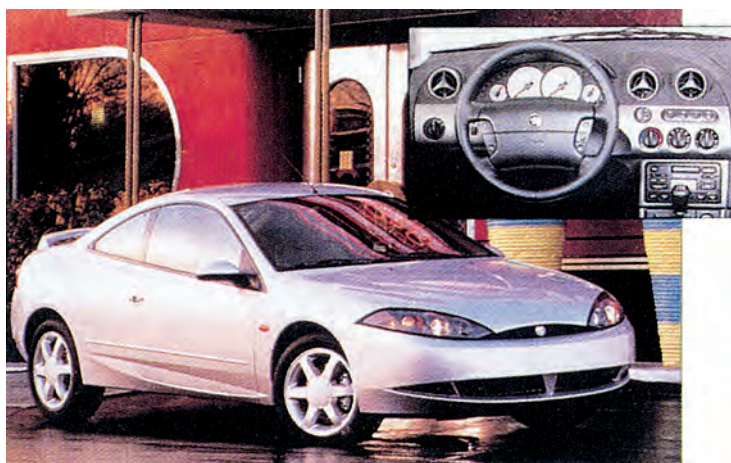
(2) Σύνθετα υλικά με ίνες

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

(1) Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας

(2) Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας

(3) Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

9

ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ

- 9.1 Η διαδικασία επιλογής υλικών
- 9.2 Υλικά και βιομηχανική παραγωγή
- 9.3 Παραδείγματα περιπτώσεων επιλογής υλικών



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να μάθετε τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού προϊόντων
- ☒ Να μάθετε να ξεχωρίζετε τις πρωτογενείς από τις δευτερογενείς κατεργασίες
- ☒ Να αναφέρετε μερικά παραδείγματα υποκατάστασης υλικών

9.1 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

Η διαδικασία επιλογής υλικών είναι ίσως το κρισιμότερο βήμα που πρέπει να κάνει ο μηχανικός προτού να προχωρήσει στην υλοποίηση μίας κατασκευής, η οποία πρέπει να λειτουργεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες με ένα συγκεκριμένο τρόπο και να επιδεικνύει την κατάλληλη αντοχή. Για κάθε κατασκευή υπάρχουν κάποιες συγκεκριμένες οδηγίες σχετικά με τις ιδιότητες που πρέπει να έχει, προκειμένου να είναι αξιόπιστη και λειτουργική. Αυτές οι οδηγίες είναι επίσημες και ονομάζονται **πρότυπα** ή **προδιαγραφές**. Οι προδιαγραφές εκδίδονται από οργανισμούς τυποποίησης, όπως είναι η ASTM (American Society for Testing and Materials), η BS (British Standards) και σε ορισμένες περιπτώσεις ο ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης). Επίσης, σε ό,τι αφορά τις προδιαγραφές, σημαντικό ρόλο παίζει ο λεγόμενος **συντελεστής ασφαλείας**. Ο συντελεστής ασφαλείας είναι ο λόγος της τιμής της πραγματικής ιδιότητας ενός υλικού (π.χ. μηχανική αντοχή, σ) ως προς την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της με βάση τις απαιτήσεις της κατασκευής ($\sigma_{\text{επ}}$):

$$n = \sigma / \sigma_{\text{επ}} > 1 \quad (9.1)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι καθαρός αριθμός και παίρνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας καθορίζεται κυρίως με κριτήριο τη σοβαρότητα της ζημιάς, που μπορεί να προκαλέσει τυχόν αστοχία της κατασκευής. Π.χ. ο συντελεστής ασφαλείας υλικού κατασκευής κρεμάστρας ρούχων είναι πολύ μικρότερος από το συντελεστή ασφαλείας του υλικού κατασκευής ενός αεριωθούμενου κινητήρα (jet) αεροπλάνου.

Η λανθασμένη επιλογή υλικού μπορεί να αποβεί μοιραία και να οδηγήσει ακόμη και στην απώλεια ανθρωπίνων ζωών. Π.χ. η εξέλιξη των υλικών που χρησιμοποιεί η αυτοκινητοβιομηχανία και αεροναυπηγική είναι ραγδαία προκειμένου να αποφευχθούν πρόωρες αστοχίες και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής τους (σύνθετα υλικά στο αμάξωμα, αντιδιαβρωτικές επικαλύψεις, επιφανειακή σκλήρυνση μετάλλων, που καταπονούνται επιφανειακά, βελτίωση ελαστικών).

Η επιλογή υλικών είναι ένα σύνθετο και δύσκολο βήμα το οποίο απαιτεί τη γνώση των παραμέτρων σχεδιασμού του εξαρτήματος ή της κατασκευής, οι οποίες εντοπίζονται στις παρακάτω περιοχές:

- Προδιαγραφές
- Ιδιότητες υλικών (μηχανικές, χημικές, ηλεκτρικές)
- Δευτερογενείς κατεργασίες (συγκολλήσεις, κοπές, ανοπτήσεις, επικαλύψεις, κ.λπ)
- Κόστος επεξεργασίας
- Διαθεσιμότητα υλικών
- Περιβάλλον λειτουργίας
- Χρόνος ζωής υλικών
- Τήρηση περιβαλλοντικής νομοθεσίας.

Η διαδικασία επιλογής υλικών και κατεργασιών είναι ένας από τους βασικότερους τομείς του βιομηχανικού σχεδιασμού όπως φαίνεται στο σχήμα 9.1. Η έρευνα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών και του κόστους παραγωγής τους είναι συνεχής, προκειμένου να κατασκευαστούν εξαρτήματα και στοιχεία μηχανών με μεγαλύτερη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής.

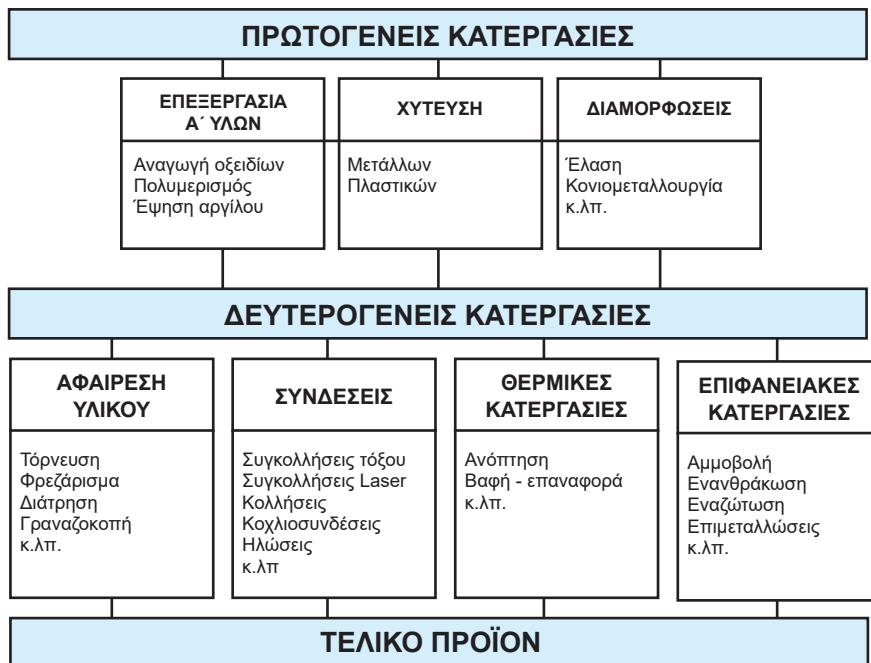
Λόγω του ευρέως φάσματος υλικών και αντιστοίχων παραμέτρων υλικών και δευτερογενών κατεργασιών, είναι διαδεδομένη πλέον η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών στη διαδικασία σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων γύρω από την επιλογή υλικών και κατάλληλων κατεργασιών.



Σχήμα 9.1: Παράμετροι σχεδιασμού προϊόντος οι οποίες οδηγούν στην επιλογή υλικού κατασκευής.

9.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανική παραγωγή υλικών διακρίνεται σε **πρωτογενή** και **δευτερογενή**. Στην πρωτογενή παραγωγή ανήκουν οι πρωτογενείς κατεργασίες, που περιλαμβάνουν την επεξεργασία της πρώτης ύλης μέχρι και τη διαμόρφωση του υλικού σε συγκεκριμένες γεωμετρίες. Στη δευτερογενή παραγωγή περιλαμβάνονται όλες εκείνες οι κατεργασίες, που δίνουν στο υλικό τις τελικές του διαστάσεις και το καθιστούν ικανό να ανταποκριθεί στις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής ή της κατασκευής στην οποία αποτελεί και βασικό εξάρτημα. Η συνολική παραγωγική διαδικασία (πρωτογενής και δευτερογενής) των υλικών φαίνεται στο σχήμα 9.2.



Σχήμα 9.2: Πρωτογενείς και δευτερογενείς κατεργασίες παραγωγής υλικών.

9.2.1 Πρωτογενείς κατεργασίες

- (i) **Χημική επεξεργασία των πρώτων υλών.** Περιλαμβάνονται κυρίως φυσικές και χημικές διεργασίες κατά τις οποίες μετατρέπεται η πρώτη ύλη έτσι, ώστε να οδηγήσει στην παρασκευή του εκάστοτε υλικού. Π.χ. η εξαγωγή των μετάλλων από τα μεταλλεύματα, όπως είναι η αναγωγή των οξειδίων του σιδήρου σε σίδηρο στην υψικάμνο για την παραγωγή χυτοσιδήρου και χάλυβα ή η ηλεκτρολυτική αναγωγή της αλουμίνας σε αλουμίνιο. Επίσης, ο πολυμερισμός, όπως π.χ. η διαδικασία παρασκευής πολυαιθυλενίου από αιθυλένιο, αποτελεί πρωταρχική διαδικασία παραγωγής.
- (ii) **Χύτευση.** Είναι η πιο ευρείας εφαρμογής πρωτογενής κατεργασία για μεταλλικά υλικά. Κατά τη χύτευση συνήθως το μέταλλο μορφοποιείται σε πλίνθωμα (χελώνα) με τήξη σε κατάλληλο καμίνι και στη συνέχεια με απόχυση του τήγματος σε τύπο (άμμος, καλούπι).
- (iii) **Διαμορφώσεις.** Είναι όλες οι πρωτογενείς κατεργασίες, οι οποίες πραγματοποιούνται είτε εν ψυχρώ είτε εν θερμώ, κατά τις οποίες το υλικό αποκτά ένα συγκεκριμένο σχήμα μέσω πλαστικής παραμόρφωσης (ράβδοι, μπιγιέτες, ελάσματα). Επίσης, στην περιοχή των δια-

μορφώσεων εντάσσονται και οι μέθοδοι της **κονιομεταλλουργίας**, δηλαδή των διεργασιών μορφοποίησης κόνεων μετάλλων ή κεραμικών υλικών, όπως π.χ. είναι η κατασκευή κοπτικών εργαλείων από καρβίδιο του βολφραμίου (WC).

9.2.3 Δευτερογενείς κατεργασίες

- (i) **Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού.** Περιλαμβάνουν όλες εκείνες τις μηχανουργικές κατεργασίες κατά τις οποίες αφαιρείται μάζα του υλικού, προκειμένου να επιτευχθούν οι τελικές διαστάσεις του εξαρτήματος, όπως π.χ. τόννευση, φρεζάρισμα, πλάνιση, λείανση, κ.λπ.. Μαζική παραγωγή εξαρτημάτων συγκεκριμένης γεωμετρίας, όπως π.χ. πείρων, εδράνων, αξόνων, κ.λπ. γίνεται σε σύγχρονες αυτόματες εργαλειομηχανές, οι οποίες είναι γνωστές ως **εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση (CNC)**.
- (ii) **Συνδέσεις.** Είναι όλες οι κατεργασίες σύνδεσης υλικών, που αποτελούν ένα μέρος μίας κατασκευής ή ένα στοιχείο μηχανής, οι οποίες επιτυγχάνονται είτε με σύντηξη, είτε με θέρμανση είτε με συμπίεση των επιμέρους υλικών (π.χ. οξυγονοκόλληση, ηλεκτροσυγκόλληση, συγκόλληση με τριβή, κ.λπ.). Επίσης, μεταξύ των μεθόδων σύνδεσης υλικών ανήκουν οι ηλώσεις, κοχλιώσεις (μη μόνιμες συνδέσεις) και οι κολλήσεις με τη βοήθεια κόλλας.
- (iii) **Θερμικές κατεργασίες.** Είναι απαραίτητες για την απόκτηση της τελικής σκληρότητας και της αντοχής του υλικού. Έτσι, υπάρχουν οι θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης (βαφή-επαναφορά χαλύβων, γήρανση αλουμινίου) και οι θερμικές κατεργασίες που οδηγούν σε μείωση των εσωτερικών τάσεων ή ακόμα και της σκληρότητας του υλικού (ανόπτηση). Λεπτομερής αναφορά πάνω στις θερμικές κατεργασίες χαλύβων γίνεται στο Κεφάλαιο 5.
- (iv) **Επιφανειακές κατεργασίες.** Είναι το τελικό στάδιο επεξεργασίας του υλικού πριν από τη χρήση του ως στοιχείο κάποιας μηχανής ή κατασκευής. Αφορά κυρίως περιπτώσεις υλικών, που καταπονούνται σε τριβή ή/και λειτουργούν σε διαβρωτικό περιβάλλον. Τέτοιες κατεργασίες είναι:
 - **Μηχανικές.** Εδώ ανήκει η αμμοβολή και η σφαιροβολή.
 - **Θερμοχημικές.** Τέτοιες κατεργασίες είναι η εναζώτωση και η ενανθράκωση.

- **Θερμικές.** Όπως είναι η φλογοβαφή και η επαγωγική βαφή, η βαφή με laser.
- **Επιστρώσεις.** Εδώ ανήκουν οι ηλεκτρολυτικές επιστρώσεις (επιχρωμίσωση, επινικέλωση), ο γαλβανισμός, η επικασσιτέρωση, οι κεραμικές επιστρώσεις (π.χ. με ψεκασμό πλάσματος, με φυσική ή χημική εναπόθεση ατμών), κλπ.
- **Οργανικές επικαλύψεις.** Η εφαρμογή κάποιου αντιδιαβρωτικού πλαστικού χρώματος πάνω σε μεταλλικές επιφάνειες.

9.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

9.3.1 Υποκατάσταση μετάλλων με πολυμερή

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

9.3.2 Υποκατάσταση μετάλλων με σύνθετα υλικά

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

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

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό ως εμφυτεύματα (π.χ. ορθοπεδικοί σύνδεσμοι, οδοντιατρικά πρόσθετα) πρέπει, εκτός της μηχανικής αντοχής τους και του μικρού βάρους, να χαρακτηρίζονται από **βιοσυμβατότητα**. Δηλαδή θα πρέπει να έχουν μεγάλη αντοχή στην οξείδωση και διάβρωση και να μην υποβαθμίζονται οι μηχανικές τους ιδιότητες μέσα στα υγρά του ανθρώπινου σώματος (π.χ. αίμα). Από μεταλλικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως κράματα του τιτανίου και συγκεκριμένα το Ti-6% Al-4% V, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη μηχανική αντοχή, αντοχή σε διάβρωση και μικρή πυκνότητα. Το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA) είναι ένα πολυμερές, το οποίο χρησιμοποιείται και αυτό σε ορθοπεδικά εμφυτεύματα, σε συνδυασμό με μεταλλικά υλικά, λόγω της μεγάλης αντοχής στην οξείδωση, της μικρής του πυκνότητας και της μεγάλης του αντίστασης σε φθορά-τριβή.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 9ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Η διαδικασία επιλογής υλικών είναι το τελικό βήμα που πρέπει να κάνει ο μηχανικός προτού προχωρήσει στην υλοποίηση μιας κατασκευής η οποία πρέπει να λειτουργεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες με ένα συγκεκριμένο τρόπο και να επιδεικνύει την κατάλληλη αντοχή. Για κάθε κατασκευή υπάρχουν κάποιες συγκεκριμένες οδηγίες σχετικά με τις ιδιότητες που πρέπει να έχει προκειμένου να είναι αξιόπιστη και λειτουργική. Αυτές οι οδηγίες είναι επίσημες και ονομάζονται πρότυπα ή προδιαγραφές.

Η επιλογή υλικών είναι ένα σύνθετο και δύσκολο βήμα το οποίο προαπαιτεί τη γνώση των παραμέτρων σχεδιασμού του εξαρτήματος ή της κατασκευής οι οποίες εντοπίζονται στις παρακάτω περιοχές:

- ✓ Προδιαγραφές
- ✓ Ιδιότητες υλικών (μηχανικές, χημικές, ηλεκτρικές)
- ✓ Δευτερογενείς κατεργασίες (συγκολλήσεις, κοπές, ανοπτήσεις, επικαλύψεις, κλπ)
- ✓ Κόστος επεξεργασίας

- ✓ Διαθεσιμότητα υλικών
 - ✓ Περιβάλλον λειτουργίας
 - ✓ Χρόνος ζωής υλικών
 - ✓ Δυνατότητα ανακύκλωσης
 - ✓ Τήρηση περιβαλλοντικής νομοθεσίας
- Η βιομηχανική παραγωγή υλικών διακρίνεται σε πρωτογενή και δευτερογενή. Στην πρωτογενή παραγωγή ανήκουν οι πρωτογενείς κατεργασίες όπου περιλαμβάνουν την επεξεργασία της πρώτης ύλης μέχρι και την διαμόρφωση του υλικού σε συγκεκριμένες γεωμετρίες. Στη δευτερογενή παραγωγή περιλαμβάνονται όλες εκείνες οι κατεργασίες που δίνουν στο υλικό τις τελικές του διαστάσεις και το καθιστούν ικανό να ανταποκριθεί στις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής ή κατασκευής της οποίας αποτελεί βασικό εξάρτημα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΧΥΤΕΥΣΗ

- 10.1 Γενικά
- 10.2 Μοντέλα - ορολογία χύτευσης
- 10.3 Μέθοδοι χύτευσης
- 10.4 Προβλήματα κατά τη χύτευση
- 10.5 Χύτευση σε καλούπια μιας χρήσης
- 10.6 Χύτευση με καλούπια πολλαπλών χρήσεων



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να γνωρίσετε τις μεθόδους χύτευσης των υλικών, τις εφαρμογές και τις δυνατότητές τους.
- ☒ Να γνωρίσετε πώς φτιάχνεται ένα καλούπι και τα μέρη από τα οποία αποτελείται.
- ☒ Να γνωρίσετε πώς επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος χύτευσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση.

10.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η χύτευση είναι μία από τις πιο παλιές μεθόδους διαμόρφωσης που ανακάλυψε ο άνθρωπος. Στη χύτευση, λιωμένο μέταλλο χύνεται σε ένα καλούπι (βλέπε [σχήμα 10.1](#)), το οποίο συνήθως είναι φτιαγμένο από άμμο ή από μέταλλο και έχει κοιλότητα ενός συγκεκριμένου σχήματος. Το υλικό στη συνέχεια ψύχεται, το καλούπι αφαιρείται και έτσι δημιουργείται το χυτό προϊόν. Η χύτευση πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 3.500 π.Χ. στη Μεσοποταμία και χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή χάλκινων εξαρτημάτων, κυρίως επίπεδων, με καλούπια από πέτρα ή ψημένο πηλό. Γύρω στο 2.000 π.Χ. η χύτευση εξελίχθηκε περισσότερο. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν πυρήνες από ψημένο πηλό (αντίστοιχες με τις σημερινές “καρδιές”), για να φτιάχνονται εσωτερικές κοιλότητες μέσα στα χυτά.



Σχήμα 10.1: Χύτευση

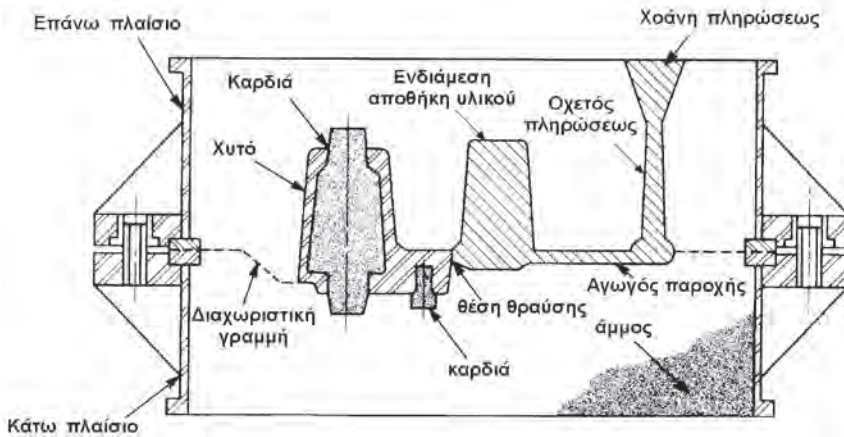
Η τεχνολογία της χύτευσης εξελίχθηκε στη συνέχεια από τους Κινέζους γύρω στο 1.500 π.Χ.. Οι Κινέζοι, παρά το ότι δεν είχαν χρησιμοποιήσει μέχρι τότε τη χύτευση, την υιοθέτησαν και την ανέπτυξαν, ιδιαίτερα στον τομέα του καλουπιού. Η αρχαιολογική σκαπάνη έχει ανακαλύψει καλούπια κατασκευασμένα με ξεχωριστή τέχνη. Οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν διαιρετά καλούπια με πολλά εξαρτήματα που προσδένονταν μεταξύ τους (μέχρι και τριάντα). Εκτός από τους Κινέζους, ιδιαίτερη τέχνη στη χύτευση παρουσίασαν και οι Ινδοί, που χύτευαν χαλκό και μπρούντζο για εργαλεία, όπλα, σκεύη κ.λπ.. Τέλος, η χύτευση του σιδήρου πρωτοεμφανίστηκε γύρω στα 1000 π.Χ. στη Συρία και στην Περσία.

Σήμερα η χύτευση είναι μία από τις σημαντικότερες κατεργασίες μορφοποίησης προϊόντων. Υπάρχουν ειδικές μονάδες για την παραγωγή χυτών αντικειμένων, που ονομάζονται **χυτήρια** και που παράγουν μεταλλικά προϊόντα, σχεδόν στην τελική τους μορφή. Τα προϊόντα της χύτευσης ποικίλλουν σε υλικά (χρησιμοποιούνται κυρίως μέταλλα), σε πολυπλοκότητα και διαστάσεις. Αρχίζουν από λίγα χιλιοστά και βάρος μερικά κλάσματα του γραμμαρίου, όπως είναι τα δοντάκια των φερμουάρ, και καταλήγουν σε μεγέθη που πλησιάζουν τα 10 m και βάρη μερικών τόνων, όπως είναι οι προπέλες των υπερωκεανίων. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μεταλλικά υλικά είναι ο χυτοσίδηρος, ο χάλυβας, το αλουμίνιο, ο μπρούντζος, ο ορείχαλκος, το μαγνήσιο και τα κράματα του ψευδαργύρου. Με τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι χύτευσης. Μία κατηγοριοποίηση βασίζεται στο είδος του καλουπιού. Έτσι, η χύτευση διακρίνεται σε:

- ➡ **Χύτευση σε καλούπια μίας χρήσης** (χύτευση σε άμμο, γύψο, κεραμικό καλούπι κ.λπ.). Τα καλούπια σε αυτού του τύπου τη χύτευση καταστρέφονται προκειμένου να αποκαλυφθεί το χυτό.
- ➡ **Χύτευση σε καλούπια πολλαπλών χρήσεων** (χύτευση με βαρύτητα, υπό πίεση, φυγοκεντρική χύτευση κ.λπ.). Τα καλούπια σε αυτού του τύπου τη χύτευση χρησιμοποιούνται για πολλές συνεχόμενες χυτεύσεις.

10.2 ΜΟΝΤΕΛΑ - ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Ένα τυπικό καλούπι για χύτευση σε υγρή άμμο (πράσινη), στο οποίο φαίνεται η βασική ορολογία των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα είδη χύτευσης, παρουσιάζεται στο σχήμα 10.2. Τα καλούπια, που είναι ο σημαντικότερος παράγοντας σε μία χύτευση, τις περισσότερες φορές, αλλά όχι πάντα, είναι διαιρετά και αποτελούνται από δύο μέρη. Εξαιρέση αποτελεί η χύτευση με μοντέλα από κερί ή θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη, που εκεί χρησιμοποιείται ένα ολόσωμο καλούπι, καθώς και η χύτευση με μήτρα και γενικά όλες οι χυτεύσεις που επαναχρησιμοποιούν τα καλούπια. Σε αυτές τις χυτεύσεις χρησιμοποιούνται καλούπια ή μήτρες με περισσότερα από δύο μέρη προκειμένου να χυτευθούν πολύπλοκα αντικείμενα.



Σχήμα 10.2: Τομή καλουπιού για χύτευση σε άμμο

Για να δοθεί στην κοιλότητα του καλουπιού το κατάλληλο σχήμα, ώστε να χυτευθεί το υλικό και να παραχθεί το χυτό, χρησιμοποιούνται τα **μοντέλα**. Τα μοντέλα είναι πιστά αντίγραφα του προϊόντος που πρόκειται να παραχθεί. Συνήθως κατασκευάζονται από ξύλο (λόγω του χαμηλού του κόστους), μέταλλο, γύψο ή συνθετικές ρητίνες. Τα μεταλλικά μοντέλα έχουν μεγάλο κόστος παραγωγής και κατασκευάζονται από αλουμίνιο, μπρούντζο, χυτοσίδηρο κ.λπ..

Ανάλογα με το υλικό, που πρόκειται να χυτευθεί, πρέπει να υπολογισθεί η συστολή που θα συμβεί στο μέταλλο μετά την απόψυξη. Η συστολή αυτή, που εκτείνεται προς όλες τις κατευθύνσεις, εξαρτάται από το υλικό και από τον όγκο του χυτού και πρέπει να ληφθεί υπόψη στη δημιουργία του μοντέλου, ώστε το τελικό χυτό να είναι στις διαστάσεις που προβλέπονται από το μηχανολογικό σχέδιο. Έτσι, τα μοντέλα φτιάχνονται λίγο μεγαλύτερα από το χυτό που θέλουμε να παραχθεί.

Στις περισσότερες διαδικασίες χύτευσης χρησιμοποιούνται **πυρήνες ή καρδιάς**, που είναι φτιαγμένες από άμμο ή μέταλλο, μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού, για να δημιουργήσουν εσωτερικές διαμορφώσεις στο χυτό. Κάθε καλούπι διαθέτει επίσης ένα σύστημα καναλιών για να κατανεμηθεί το λιωμένο μέταλλο και κατακόρυφους αγωγούς για τροφοδοσία. Ιδιαίτερα για τα κομμάτια που έχουν μεγάλο όγκο, χρησιμοποιούνται στα καλούπια **ενδιάμεσες αποθήκες υλικού**. Ο ρόλος των αποθηκών αυτών είναι πολύ σημαντικός, γιατί στις περιπτώσεις μεγάλων κομματιών δημιουργούνται κενά στο χυτό από τη στερεοποίηση των εξωτερικών επιφανειών πριν από το εσωτερικό του χυτού. Με τη χρήση τους, τα σφάλματα στερεοποίησης δημιουργούνται σε αυτές και το χυτό παραμένει χωρίς κενά. Σημαντικό ρόλο παίζουν οι ενδιάμεσες αποθήκες, όταν πρόκειται να χυτευθούν πολύ καθαρά μέταλλα, μια και μαζεύονται σε αυτές οι τυχόν ακαθαρσίες, ενώ το χυτό παραμένει καθαρό.

10.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Οι μέθοδοι χύτευσης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι πολλές και εμφανίζονται με πολλές παραλλαγές. Στον Πίνακα Π.10.1 παρουσιάζονται οι βασικότερες μέθοδοι χύτευσης με σύντομη περιγραφή και χαρακτηριστικά, ενώ αναλύονται περισσότερο στα επόμενα κεφάλαια.

10.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ

Τα προβλήματα που εμφανίζονται συχνά στη χύτευση σχετίζονται κυρίως με σφάλματα στη δημιουργία του καλουπιού, στη σχεδίαση του μοντέλου και των καρδιών, στην τοποθέτηση των οχετών εισόδου ή των ενδιάμεσων αποθηκών λιωμένου υλικού, στη διαδικασία της χύτευσης κ.λπ.. Τα σφάλματα αυτά δημιουργούν ελαττώματα στα χυτά αντικείμενα, που συνήθως είναι:

- **Ρωγμές** που προέρχονται από τη συρρίκνωση του υλικού του χυτού λόγω συστολής κατά την απόψυξη.
- **Εγκλείσματα** από οξείδια που παραμένουν στο χυτό.
- **Σπηλαιώσεις** που οφείλονται στην παρουσία αερίων στο μέταλλο κατά τη στερεοποίηση.

Πίνακας Π.10.1: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικότερων μεθόδων χύτευσης

Χύτευση		Περιγραφή	Υλικά	Σύνηθες μέγεθος
νέα χρήση του μοντέλου και καταστροφή του καλουπιού	...σε άμμο	το καλούπι κατασκευάζεται από άμμο γύρω από ξύλινο ή μεταλλικό μοντέλο.	όλα τα κοινά υλικά	από μικρά κομμάτια έως εξαιρετικά μεγάλα
	...σε κέλυφος	Το καλούπι κατασκευάζεται από άμμο και ρητίνη που σκληραίνει τοπικά γύρω από θερμαινόμενο μοντέλο.	κυρίως σιδηρούχα υλικά, χαλκός και αλουμίνιο	μικρά κομμάτια έως 45 Kg
	...σε γύψο	το καλούπι γίνεται με εμφύσηση σε γύψο. Το καλούπι ψήνεται, αφού βγει το μοντέλο.	κυρίως αλουμίνιο και χαλκός	μικρά κομμάτια έως 45 Kg
	...σε κεραμικό καλούπι	το καλούπι γίνεται με εμφύσηση σε πυρίμαχα υλικά.	όλα τα κοινά υλικά	από μικρά κομμάτια έως εξαιρετικά μεγάλα
νέα χρήση του καλουπιού	...σε μήτρα	Το καλούπι είναι μεταλλικό. Το λιωμένο μέταλλο συμπιέζεται σε μήτρα με μεγάλη πίεση.	κυρίως ψευδάργυρος, μαγνήσιο, αλουμίνιο και μερικοί χάλυβες	μικρά κομμάτια έως περίπου 23 Kg
	...με χαμηλή πίεση	Το λιωμένο μέταλλο ρέει μέσα στο καλούπι με χαμηλή πίεση.	κυρίως αλουμίνιο	μικρά κομμάτια έως περίπου 23 Kg
	...σε μόνιμο καλούπι	Το καλούπι είναι μεταλλικό και χωρισμένο σε δύο τμήματα. Το λιωμένο μέταλλο ρέει στο καλούπι με τη βαρύτητα.	κυρίως μη σιδηρούχα υλικά	0,5-23 kg
	...φυγοκεντρική	Η χύτευση γίνεται σε περιστρεφόμενο καλούπι μέσω της φυγόκεντρης δύναμης.	τα περισσότερα μέταλλα	Μεγάλα, πάνω από 45 Kg
	...σφυρηλάτησης	Το λιωμένο μέταλλο συμπιέζεται σε μήτρα από ένα έμβολο, όπως στη σφυρηλάτηση.	Κυρίως μη σιδηρούχα υλικά	μέχρι 4 Kg
καταστροφή του καλουπιού και καταστροφή του μοντέλου	... με την τεχνική του χαμένου κεριού	Το μοντέλο κατασκευάζεται από κερί ή πλαστικό και λιώνει δημιουργώντας το καλούπι.	χάλυβες, μη σιδηρούχα μέταλλα	πολύ μικρά, περίπου 2 Kg
	... με εξατμιζόμενο μοντέλο	Το μοντέλο κατασκευάζεται από πολυστυρένιο και εξατμίζεται, όταν έρθει σε επαφή με το λιωμένο μέταλλο.	όλα τα μέταλλα, κυρίως σίδηρος	πολύ μικρά, 2 Kg και πάνω

● Ασυνέχειες στο χυτό.

Ο έλεγχος των χυτών γίνεται χρησιμοποιώντας μη καταστροφικές μεθόδους. Μία από αυτές τις μεθόδους είναι η **ραδιογραφία** με τη βοήθεια της οποίας ελέγχεται η συνέχεια και η ομοιομορφία του υλικού, του χυτού αντικειμένου. Στη ραδιογραφία, προσπίπτουν ακτίνες Χ στα χυτά, η μεταβολή της έντασης των οποίων καταγράφεται σε φωτογραφικό φιλμ. Οι ατέλειες που μπορούν να διαπιστωθούν, πρέπει να έχουν μέγεθος μεγαλύτερο του 2% του πάχους του ελεγχόμενου χυτού αντικειμένου.

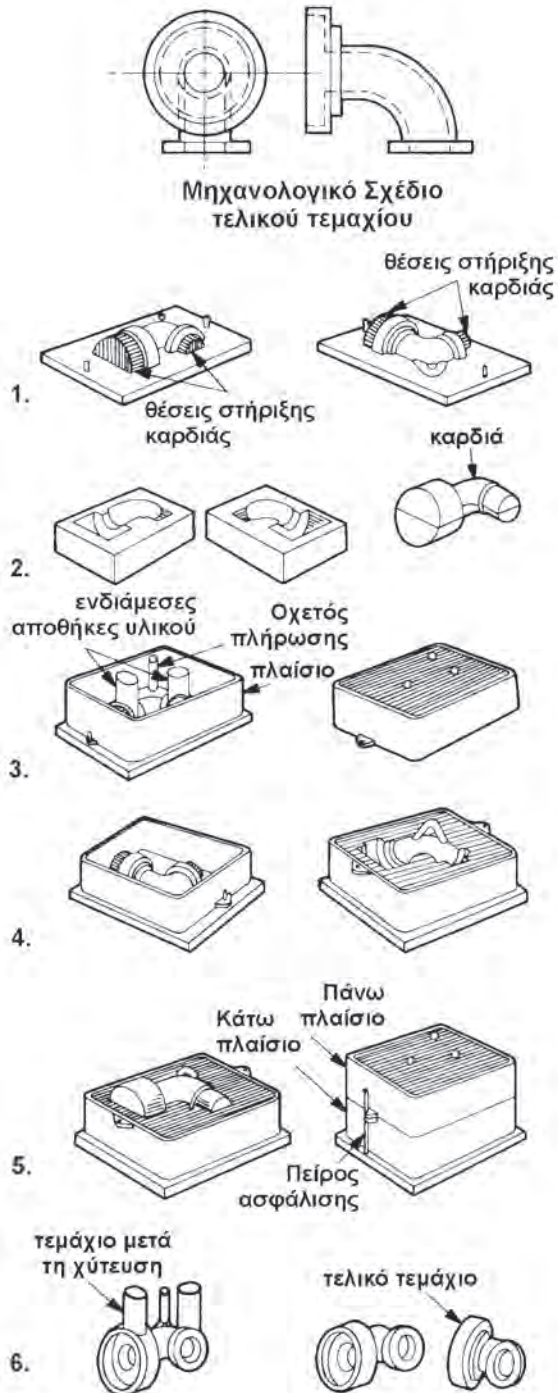
10.5 ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΜΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ

10.5.1 Χύτευση σε άμμο

Η χύτευση σε άμμο είναι η παραδοσιακή μέθοδος χύτευσης, η οποία χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες. Ακόμα και σήμερα, μεγάλο ποσοστό της παραγωγής χυτών αντικειμένων πραγματοποιείται με αυτή τη μέθοδο. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την άμμο (SiO_2) για τη δημιουργία του καλουπιού, εκμεταλλευόμενη το μικρό της κόστος και την αντίστασή της στις υψηλές θερμοκρασίες. Η άμμος συνήθως χρησιμοποιείται αναμεμειγμένη με διάφορα πρόσθετα που αυξάνουν ακόμα τις ιδιότητές της. Τέτοια πρόσθετα είναι η άργιλος που χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό και το νερό. Ένα τυπικό παράδειγμα χύτευσης σε άμμο φαίνεται στο σχήμα 10.3. Στο σχήμα αυτό διακρίνονται τα στάδια στα οποία πραγματοποιείται η χύτευση αυτή.

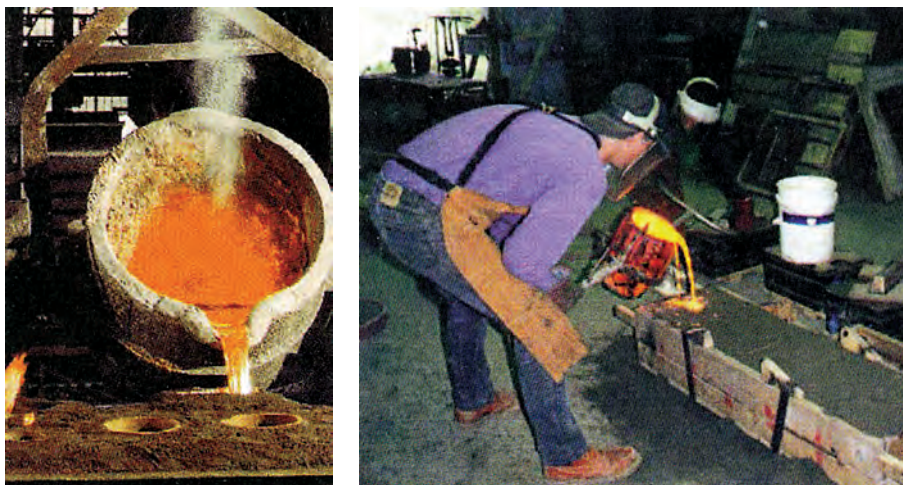
Η πρώτη εργασία στη χύτευση με άμμο είναι η δημιουργία του **μοντέλου** (βήμα 1 του σχήματος). Το μοντέλο είναι αντίγραφο του τεμαχίου που πρόκειται να χυτευθεί και φτιάχνεται κυρίως από ξύλο ή μέταλλο, ανάλογα με τον αριθμό των χυτεύσεων που θα γίνουν και το μέγεθος του χυτού. Μοντέλα από ξύλο έχουν μικρό κόστος και είναι ιδανικά για λίγες χυτεύσεις. Συνήθως φτιάχνονται από ξύλο καρυδιάς ή βελανιδιάς και γενικά από ξύλα που εύκολα υφίστανται κατεργασία. Τα μεταλλικά μοντέλα έχουν μεγαλύτερο κόστος και φτιάχνονται από αλουμίνιο, χυτοσίδηρο και μπρούντζο, ενώ μοντέλα φτιάχνονται και από συνθετικές ρητίνες, γύψο κ.λπ..

Για την περίπτωση που το αντικείμενο που πρόκειται να χυτευθεί έχει εσωτερική κοιλότητα, χρησιμοποιείται η **καρδιά**, δηλαδή ένας πυρήνας που θα παραμείνει κατά τη διάρκεια της χύτευσης μέσα στο καλούπι και θα εξασφαλίσει τη διαμόρφωση της κοιλότητας. Οι καρδιές μπορούν να είναι κι αυτές από άμμο και φτιάχνονται σε ειδικά, για το σκοπό αυτό, πλαίσια (βήμα 2). Η κατασκευή των καρδιών απαιτεί και αυτή ιδιαίτερη προσοχή ως προς τις διαστάσεις και τη μορφή και περιλαμβάνει, εκτός από την καρδιά, και τα σημεία στήριξής της στο καλούπι. Στο βήμα 3 φαίνεται το πάνω πλαίσιο του καλουπιού, στο οποίο έχει τοποθετηθεί το μισό μοντέλο, ο **οχετός πλήρωσης** και οι **ενδιάμεσες αποθήκες υλικού**. Οι ενδιάμεσες αποθήκες υλικού εκτός από την αποφυγή δημιουργίας κενών στο χυτό, όπως ήδη αναφέρθηκε, παίζουν εδώ και το ρόλο των εξαεριστικών, για να απάγονται τα αέρια που δημιουργούνται κατά τη χύτευση. Στη διπλανή εικόνα στο βήμα 3 φαίνεται το ίδιο πλαίσιο, αφού συμπληρώθηκε με άμμο και κατόπιν αφαιρέθηκαν με προσοχή το μοντέλο από τη βάση, οι αποθή-



Σχήμα 10.3: Χύτευση σε άμμο

κες και ο οχετός πλήρωσης. Στο βήμα 4 διαμορφώνεται αντίστοιχα το κάτω πλαίσιο με το άλλο μισό μοντέλο, ενώ στο βήμα 5 τοποθετείται η καρδιά στο κάτω πλαίσιο και συμπληρώνεται το καλούπι με το πάνω πλαίσιο. Τέλος, μετά τη χύτευση (βλ. σχήμα 10.4), την απόψυξη και τον καθαρισμό,



Σχήμα 10.4: Χύτευση σε καλούπι από άμμο

στο βήμα 6 φαίνεται το τελικό τεμάχιο πριν και μετά την αφαίρεση των δύο ενδιάμεσων αποθηκών και του οχετού πλήρωσης.

Όλα τα στάδια που προαναφέρθηκαν απαιτούν λεπτούς χειρισμούς και επιδεξιότητα από τον τεχνίτη που πραγματοποιεί τη χύτευση. Ειδικά η κατασκευή του μοντέλου απαιτεί μεγάλη επιδεξιότητα μια και πρέπει να έχει προβλεφθεί να απομακρύνεται εύκολα, χωρίς να καταστρέφει το αποτύ-



Σχήμα 10.5: Κατασκευή καρδιών

πωμα στην άμμο, καθώς και η συστολή που θα υποστεί το τεμάχιο μετά την απόψυξή του. Αντίστοιχη επιδεξιότητα απαιτείται και στην κατασκευή των πυρήνων (καρδιών). Στο σχήμα 10.5 φαίνεται η κατασκευή μιας καρδιάς από δύο τμήματα και μιας ολόσωμης καρδιάς, με τη βοήθεια καλουπιών από ξύλο.

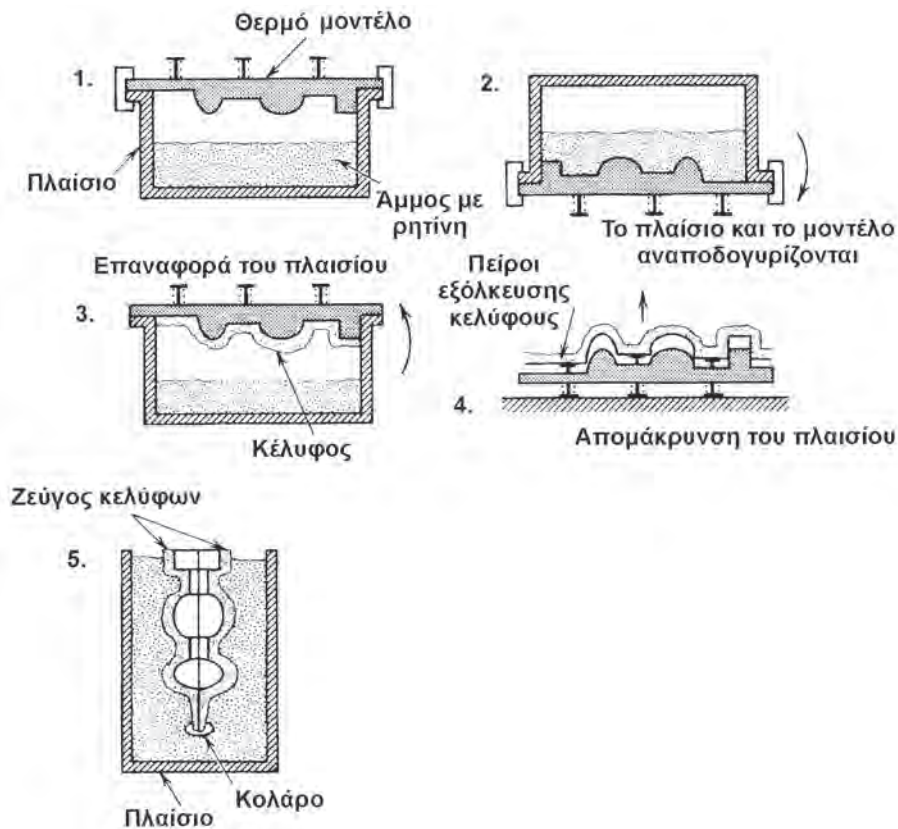
Η άμμος που χρησιμοποιείται στη χύτευση χαρακτηρίζεται από το μέγεθος των κόκκων της. Έτσι, για μεγάλα κομμάτια χρησιμοποιείται η χονδρόκοκκη άμμος, ενώ λεπτόκοκκη άμμος χρησιμοποιείται για χύτευση μικρών αντικειμένων. Επίσης, η άμμος μπορεί να είναι υγρή (πράσινη) για τη χύτευση μικρών αντικειμένων, ενώ για τη χύτευση μεγαλύτερων χρησιμοποιείται άμμος αποξηραμένη σε φούρνους. Για τη δημιουργία των καλουπιών με άμμο, χυτών ιδιαίτερα μεγάλων διαστάσεων, χρησιμοποιείται ειδική μηχανή τροφοδοσίας της άμμου, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.6.



Σχήμα 10.6: Μηχανική τροφοδοσία άμμου σε καλούπι

10.5.2 Χύτευση κελύφους

Η μέθοδος αυτή πρωτοεμφανίστηκε κατά τη διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου. Στη μέθοδο αυτή το υλικό από το οποίο φτιάχνεται το καλούπι είναι λεπτή άμμος και 2,5-4% θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη. Το μοντέλο είναι μεταλλικό και θερμαίνεται σε θερμοκρασία 175-270°C. Η διαδικασία της χύτευσης κελύφους ακολουθεί πέντε στάδια που περιγράφονται παρακάτω και φαίνονται στο σχήμα 10.7.



Σχήμα 10.7: Χύτευση κελύφους

Τα στάδια αυτά είναι:

1. Το μείγμα από την άμμο και τη θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη τοποθετείται σε ένα πλαίσιο που σκεπάζεται από πάνω με το θερμό μεταλλικό μοντέλο (εικόνα 1). Το πλαίσιο αναποδογυρίζεται και η άμμος πέφτει πάνω στο μοντέλο (εικόνα 2). Η θερμότητα του μοντέλου σκληραίνει τοπικά μία περιοχή πάχους περίπου 3,2 mm από την άμμο και τη ρητίνη και δημιουργεί το κέλυφος.
2. Το πλαίσιο γυρίζεται στην αρχική του θέση, η άμμος πέφτει στη βάση του πλαισίου και το κέλυφος παραμένει με το μοντέλο (εικόνα 3). Το μοντέλο μαζί με το κέλυφος τοποθετούνται σε φούρνο για μερικά λεπτά, ώστε το κέλυφος να σκληρυνθεί καλύτερα και να λάβει την τελική του μορφή.
3. Το κέλυφος απομακρύνεται από το μοντέλο (εικόνα 4).

4. Δύο ίδια τμήματα του κελύφους ενώνονται και δημιουργούν το καλούπι (εικόνα 5).
5. Το καλούπι που δημιουργήθηκε με τον τρόπο αυτό, τοποθετείται σε ένα πλαίσιο με άμμο για υποστήριξη του κελύφους κατά τη χύτευση.

Στη μέθοδο αυτή, η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στις διαστάσεις του χυτού είναι μόνο μερικά εκατοστά του χιλιοστού. Αυτό οφείλεται στη σχεδόν μηδενική συρρίκνωση που υφίσταται το κέλυφος.

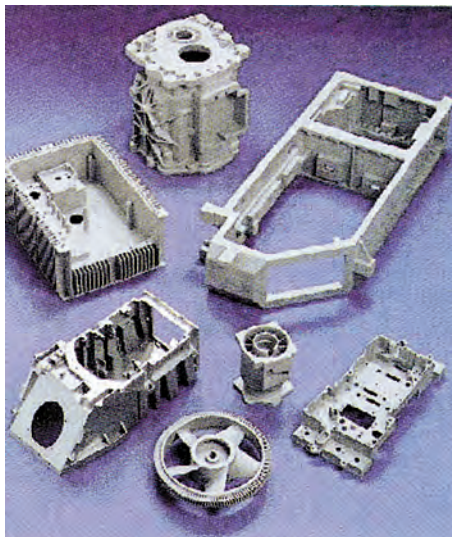
10.5.3 Χύτευση με εξαμιζόμενο μοντέλο

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που γίνεται μικρός αριθμός χυτεύσεων. Στις περιπτώσεις αυτές, το κόστος κατασκευής των μοντέλων γίνεται ιδιαίτερα υψηλό. Έτσι, με τη μέθοδο αυτή, κατασκευάζονται μοντέλα από πολυστυρένιο, γύρω από τα οποία τοποθετείται άμμος και δημιουργείται το καλούπι. Το μοντέλο παραμένει μέσα στο καλούπι και όταν έρθει σε επαφή με το λιωμένο μέταλλο εξαμιζείται, δημιουργώντας έτσι την κοιλότητα του καλουπιού. Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να χυτευθούν αρκετά πολύπλοκα αντικείμενα με μικρό κόστος.

10.5.4 Χύτευση σε γύψο

Σε αυτή τη μέθοδο χύτευσης, το καλούπι είναι φτιαγμένο από γύψο με πρόσθετα, όπως είναι ίνες αμιάντου, ορυκτά του μαγνησίου και του πυριτίου. Τα υλικά αυτά αναμειγνύονται με νερό και το διάλυμα χύνεται και περιβάλλει το μοντέλο. Όταν το διάλυμα στερεοποιηθεί, απομακρύνεται το μοντέλο και το καλούπι, αφού ξηραίνεται σε θερμοκρασία 200°C περίπου, είναι έτοιμο για τη χύτευση. Επειδή το καλούπι από γύψο αντέχει μέχρι τη θερμοκρασία των 1200°C, η μέθοδος χύτευσης με γύψο χρησιμοποιείται μόνο για χύτευση αλουμινίου, μαγνησίου, ψευδαργύρου και κραμάτων του χαλκού.

Η χύτευση με γύψο δίνει πολύ καλή επιφάνεια του χυτού και λόγω της μικρής συρρίκνωσης του καλουπιού δίνει πολύ μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις. Έτσι η μέθοδος αυτή και η μέθοδος χύτευσης με την τεχνική του χαμένου κεριού και της χύτευσης σε κεραμικό καλούπι (που περιγράφονται παρακάτω) είναι γνωστές ως μέθοδοι **χύτευσης ακριβείας**. Στο σχήμα 10.8 φαίνονται χυτά αντικείμενα που παρήχθησαν με χύτευση σε γύψο.



Σχήμα 10.8: Παραδείγματα χυτών αντικειμένων από χύτευση σε γύψο

10.5.5 Χύτευση σε κεραμικό καλούπι

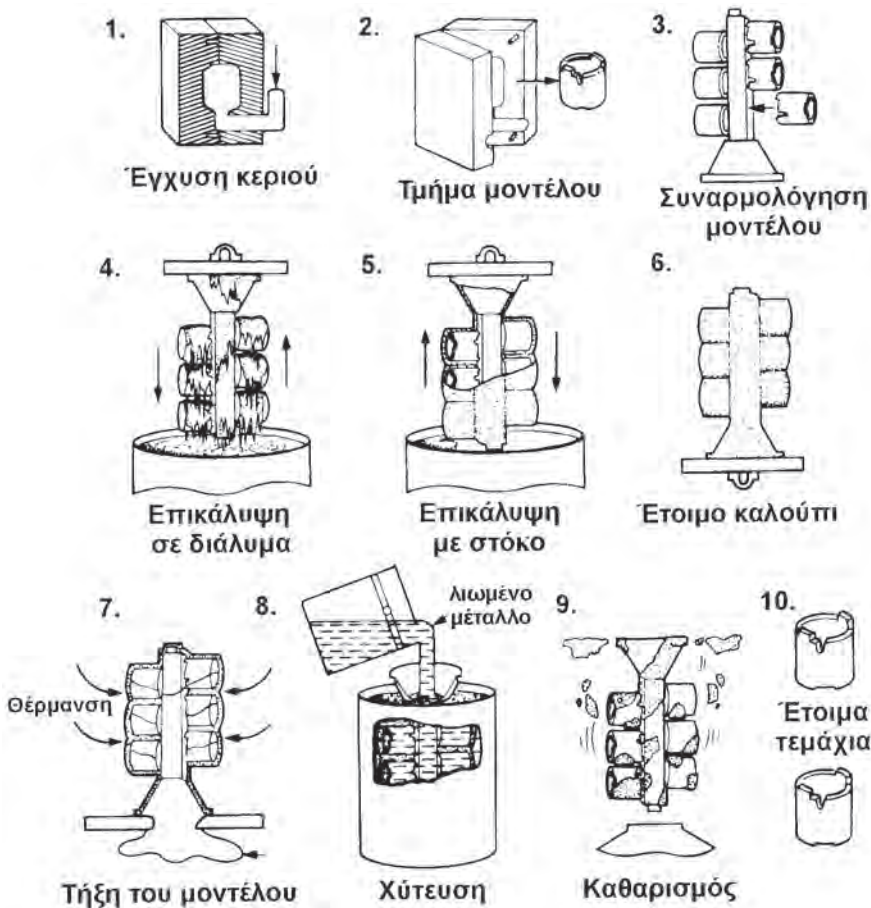
Η χύτευση σε κεραμικό καλούπι δε διαφέρει πολύ από τη χύτευση σε γύψο. Η ουσιαστική διαφορά βρίσκεται στα υλικά που χρησιμοποιούνται για το καλούπι. Το αντίστοιχο διάλυμα, που χύνεται γύρω από το μοντέλο για να δημιουργηθεί το καλούπι, είναι από ανθεκτικά υλικά στις υψηλές θερμοκρασίες, όπως το οξείδιο του Αλουμινίου (Al_2O_3), το οξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και το ορυκτό ζirkον (ZrSiO_4). Τα υλικά αυτά δίνουν τη δυνατότητα χύτευσης μετάλλων και κραμάτων με υψηλό σημείο τήξης, όπως είναι τα σιδηρούχα κράματα.

Η μέθοδος αυτή έχει σχετικά μεγάλο κόστος, αλλά δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ποιότητα της επιφάνειας του χυτού και στην ακρίβεια των διαστάσεών του.

10.5.6 Χύτευση με την τεχνική του χαμένου κεριού

Η χύτευση με την τεχνική του χαμένου κεριού είναι από τις πιο παλιές μεθόδους χύτευσης που χρησιμοποιήθηκαν. Στη μέθοδο αυτή το μοντέλο κατασκευάζεται από κερί ή πλαστικό και καταστρέφεται σε κάθε χύτευση. Στο σχήμα 10.9 φαίνονται τα στάδια της μεθόδου.

1. Το μοντέλο φτιάχνεται σε διαιρούμενο καλούπι με έγχυση κεριού ή πλαστικού.
2. Το μοντέλο απομακρύνεται από το καλούπι του.
3. Δημιουργείται το συνολικό μοντέλο της χύτευσης.



Σχήμα 10.9: Χύτευση με την τεχνική του χαμένου κεριού.

4. Το μοντέλο βυθίζεται μερικές φορές σε διάλυμα πυρίμαχων υλικών, όπως είναι η άμμος και συνδετικών υλικών, όπως το πυριτικό αιθύλιο και το πυριτικό νάτριο. Αφού κάθε φορά ξηραθεί το στρώμα της επικάλυψης, το μοντέλο ξαναβυθίζεται στο διάλυμα, ώστε να αυξηθεί το πάχος της επικάλυψης (3 έως 6mm).
5. Το μοντέλο βυθίζεται σε στόκο και επικαλύπτεται με αυτόν.
6. Το έτοιμο μοντέλο.
7. Το επικαλυμμένο μοντέλο τοποθετείται σε φούρνο γύρω στους 1100°C, όπου λιώνει το κερί ή το πλαστικό και απομένει το έτοιμο καλούπι.
8. Πραγματοποιείται η χύτευση (βλ. σχήμα 10.10).

9. Το καλούπι καθαρίζεται σπάζοντας την επικάλυψη.
10. Έτοιμα χυτά κομμάτια, αφού αφαιρεθούν οι αγωγοί τροφοδοσίας και η χοάνη πληρώσεως.

Με τη μέθοδο αυτή κατασκευάζονται σύνθετα κομμάτια που είναι δύσκολο ή αντισοικονομικό να κατασκευασθούν με άλλη μέθοδο χύτευσης. Τυπικά παραδείγματα είναι: υδραυλικές βάνες, πτερύγια αεροστροβίλων κ.λπ..

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, η μέθοδος με την τεχνική του χαμένου κεριού έχει αρκετά πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα. Αυτοματοποιείται εύκολα, ιδιαίτερα για παραγωγή πολύ μικρών αντικειμένων και έτσι έχει χαμηλό κόστος. Από την άλλη μεριά απαιτεί πολλές διαφορετικές φάσεις για την πραγματοποίησή της και γι' αυτό δεν είναι προτιμότερη από τη χύτευση σε άμμο, εκτός από την περίπτωση που τα χυτά κομμάτια πρέπει να έχουν μεγάλη ακρίβεια και καλή τελική επιφάνεια. Ως κανόνας, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους που δίνουν καλή ακρίβεια σε διαστάσεις και ποιότητα επιφάνειας, η χύτευση με την τεχνική του χαμένου κεριού προτιμάται για παραγωγή σύνθετων αντικειμένων σε μικρές διαστάσεις. Αντίθετα, η χύτευση σε κέλυφος προτιμάται για παραγωγή απλών αντικειμένων με μεγάλες όμως διαστάσεις.

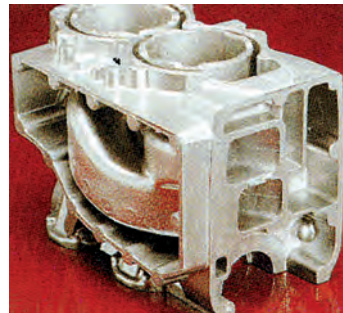
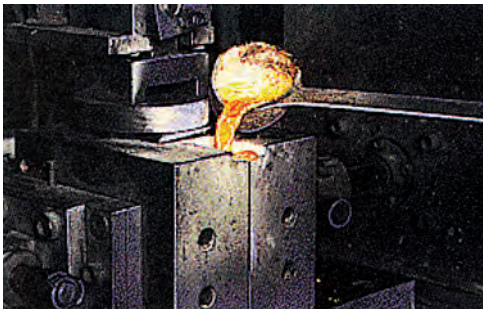


Σχήμα 10.10: Χύτευση σε καλούπι που κατασκευάζεται με την τεχνική του χαμένου κεριού.

10.6 ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ

10.6.1 Χύτευση σε μόνιμο καλούπι

Στη μέθοδο αυτή το καλούπι είναι κατασκευασμένο, ανάλογα με το υλικό που θα χυτευθεί, από χυτοσίδηρο, χάλυβα, μπρούντζο ή πυρίμαχα κράματα μετάλλων. Το καλούπι είναι χωρισμένο σε δύο τμήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.11 και κλείνει με μηχανικό τρόπο. Μετά την εισαγωγή του λιωμένου μετάλλου, το καλούπι ανοίγει και το χυτό απομακρύνεται. Η παροχή του λιωμένου μετάλλου γίνεται με βαρύτητα σε αντίθεση με τη **χύτευση σε μήτρα**, όπου το λιωμένο μέταλλο αναγκάζεται να εισέλθει στο καλούπι με πίεση. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για μη σιδηρούχα κράματα, μόλυβδο, ψευδάργυρο, κράματα μαγνησίου, μπρούντζο και χυτοσίδηρο και έχει πλεονέκτημα τη μεγάλη της παραγωγικότητα. Τυπικά παραδείγματα προϊόντων που παράγονται με αυτή τη μέθοδο είναι: έμβολα μηχανών εσωτερικής καύσης, block κυλίνδρων για συμπίεστρες ψυγείων, εξαρτήματα γραφομηχανών από αλουμίνιο κ.λπ.. Στο σχήμα 10.11 φαίνεται η διαδικασία χύτευσης σε μόνιμο καλούπι, καθώς και ένα προϊόν από χύτευση με αυτή τη μέθοδο.



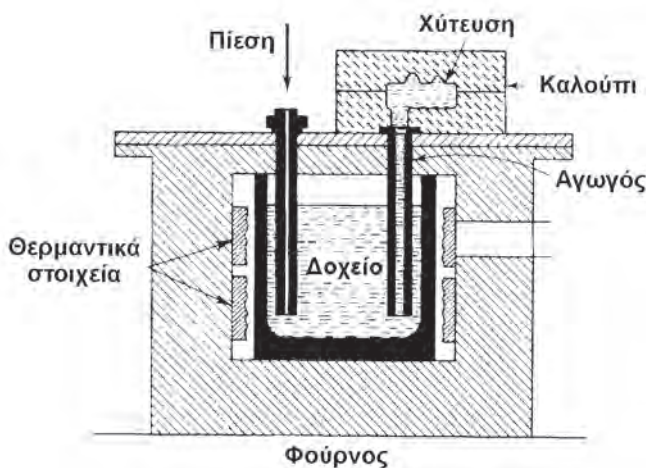
Σχήμα 10.11: Χύτευση σε μόνιμο καλούπι

Η χύτευση σε μόνιμο καλούπι γίνεται συνήθως χειροκίνητα, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται και με μηχανικό τρόπο. Στην περίπτωση αυτή το καλούπι μεταφέρεται σε διάφορες θέσεις εργασίας για καθαρισμό, τοποθέτηση των καρδιών, κλείσιμο, ψύξη, άνοιγμα και απομάκρυνση του χυτού.

10.6.2 Χύτευση με χαμηλή πίεση

Η χύτευση με χαμηλή πίεση διαφέρει από τη χύτευση σε μόνιμο καλούπι στη διαδικασία εισόδου του λιωμένου μετάλλου. Το λιωμένο μέταλλο βρίσκεται σε ειδικό δοχείο που θερμαίνεται συνεχώς και αναγκάζεται να

εισέλθει στο καλούπι μέσω πίεσης, η οποία παραμένει μέχρι το υλικό να στερεοποιηθεί. Μόλις σταματήσει η πίεση, το χυτό απομακρύνεται, ενώ το παραμένον λιωμένο μέταλλο στον αγωγό επιστρέφει στο δοχείο. Στο σχήμα 10.12 φαίνεται η διαδικασία της μεθόδου αυτής.



Σχήμα 10.12: Χύτευση με χαμηλή πίεση

Η μέθοδος αυτή δίνει μεσαίας τάξης ποιότητα επιφάνειας στο χυτό και διαστατική ακρίβεια. Χρησιμοποιείται για τη χύτευση αλουμινίου σε γύψινα καλούπια και χυτοσιδήρου. Παραλλαγή της μεθόδου αυτής είναι η **ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΚΕΝΟ**. Στη μέθοδο αυτή, η άμμος συγκρατείται στο καλούπι με τη βοήθεια κενού. Τα δύο τμήματα του καλουπιού επικαλύπτονται με λεπτό στρώμα πλαστικού, ώστε να διατηρείται το κενό αυτό. Τα μοντέλα στη μέθοδο αυτή κατασκευάζονται, όπως και στις προηγούμενες μεθόδους.

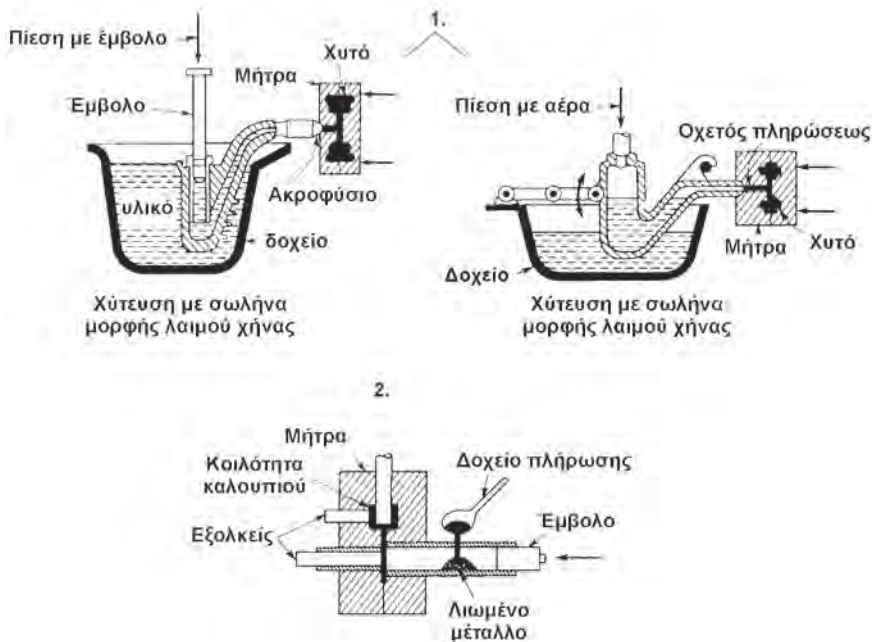
10.6.3 Χύτευση σε μήτρα

Η χύτευση σε μήτρα μοιάζει με τη χύτευση σε μόνιμο καλούπι και σε χαμηλή πίεση. Στη μέθοδο αυτή ασκείται πίεση στο λιωμένο μέταλλο που βρίσκεται σε ένα δοχείο, ώστε να γεμίσει ταχύτατα την κοιλότητα μίας μήτρας. Οι μήτρες αυτές κατασκευάζονται από χαλυβοκράματα ή ανθρακούχους χάλυβες, ανάλογα του υλικού που πρόκειται να χυτευθεί. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- η μεγάλη της παραγωγικότητα. Η παραγωγή μπορεί να φτάσει τα 1000 κομμάτια την ώρα, ανάλογα με το σχήμα και το μέγεθος του κομματιού που θα χυτευθεί,
- μεγάλη διαστατική ακρίβεια και καλή ποιότητα επιφάνειας στα χυτά,

- χυτά με αυξημένη μηχανική αντοχή και
- πολύ μικρή συρρίκνωση λόγω συστολής στο χυτό, που οφείλεται στην πίεση που ασκείται κατά τη χύτευση και τη στερεοποίηση.

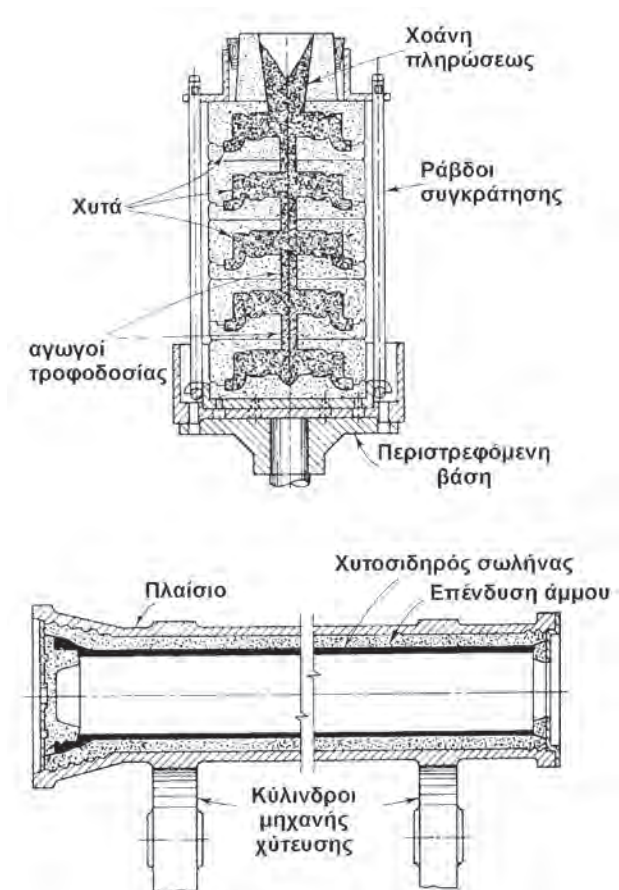
Η χύτευση σε μήτρα εμφανίζεται σε δύο βασικούς τύπους, στη χύτευση, όπου το λιωμένο μέταλλο βρίσκεται σε θερμό θάλαμο μέσα στη μηχανή χύτευσης (που λέγεται **χυτόπρεσα**), και στη χύτευση, όπου το λιωμένο μέταλλο λιώνει εκτός της μηχανής χύτευσης και τοποθετείται σε θάλαμο, όπου συμπιέζεται και οδηγείται στη μήτρα. Στο σχήμα 10.13 φαίνονται οι δύο αυτές μέθοδοι. Στις δύο πρώτες εικόνες του σχήματος, το λιωμένο μέταλλο μεταφέρεται στην κοιλότητα του καλουπιού με τη βοήθεια πίεσης που ασκείται από ένα έμβολο ή με πίεση από αέρα και μέσω ενός αγωγού σε μορφή “λαιμού χήνας”. Η μέθοδος αυτή λέγεται και **μέθοδος θερμού θαλάμου**. Στη χύτευση της εικόνας 2 το λιωμένο μέταλλο μεταφέρεται με δοχείο και χύνεται στο εσωτερικό ενός αγωγού. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια εμβόλου, το λιωμένο μέταλλο συμπιέζεται και γεμίζει τη μήτρα. Η μέθοδος αυτή λέγεται και **μέθοδος ψυχρού θαλάμου**. Και στις δύο προαναφερόμενες περιπτώσεις, το έτοιμο χυτό απομακρύνεται με κατάλληλους εξολκείς και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 10.13: Χύτευση σε μήτρα

10.6.4 Φυγοκεντρική χύτευση

Στη φυγοκεντρική χύτευση χύνεται, με σταθερή παροχή, λιωμένο μέταλλο σε ένα περιστρεφόμενο μεταλλικό καλούπι. Οι φυγόκεντρες δυνάμεις, που αναπτύσσονται με την περιστροφή, οδηγούν το λιωμένο μέταλλο στην εσωτερική επιφάνεια του καλούπιού. Με αυτή τη μέθοδο μπορούν να κατασκευασθούν χυτοσιδηροί σωλήνες μεγάλων διαμέτρων, κύλινδροι και γενικά τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος, η καλή ποιότητα του χυτού και η οικονομία στο υλικό, μια και δε χρησιμοποιούνται αγωγοί πληρώσεως, ενδιάμεσες αποθήκες κ.λπ.. Η οικονομία που γίνεται στο υλικό φθάνει το 40%. Στο σχήμα 10.14 φαίνονται, η κατακόρυφη και οριζόντια φυγοκεντρική χύτευση. Από την κατακόρυφη χύτευση του σχήματος προκύπτει μία δέσμη τροχών (ζάντες), ενώ από την οριζόντια ένας χυτοσιδηρός σωλήνας.



Σχήμα 10.14: Κατακόρυφη και οριζόντια φυγοκεντρική χύτευση

10.6.5 Χύτευση σφυρηλάτησης

Η χύτευση με σφυρηλάτηση είναι σχετικά νέα μέθοδος χύτευσης και πρωτοεμφανίστηκε στη δεκαετία του '60. Η μέθοδος αυτή μοιάζει με τη σφυρηλάτηση, επειδή χρησιμοποιείται μία μήτρα στην οποία μέσα χύνεται το λιωμένο μέταλλο, ένα έμβολο που διαμορφώνει το υλικό με πίεση (όπως στη σφυρηλάτηση) και ένας εξολκέας για να απομακρύνει το χυτό. Στο σχήμα 10.15 φαίνονται οι φάσεις της μεθόδου.



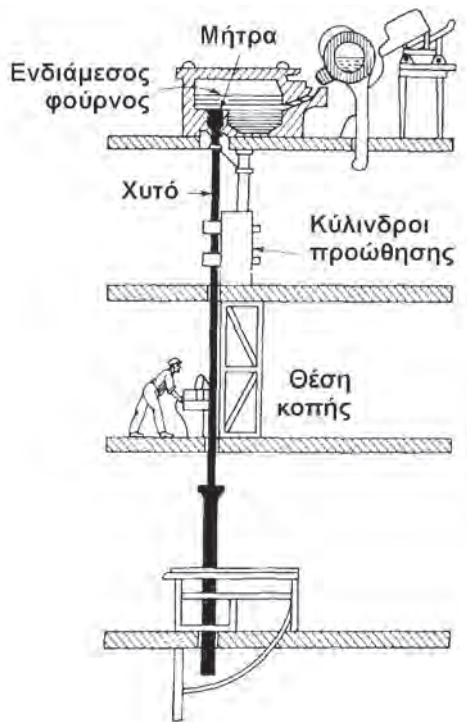
Σχήμα 10.15: Χύτευση σφυρηλάτησης

10.6.6 Συνεχής Χύτευση

Στη συνεχή χύτευση εισέρχεται λιωμένο μέταλλο από το ένα άκρο ενός καλούπιού, που είναι ανοικτό και από τις δύο άκρες, ψύχεται απότομα και εξέρχεται στερεοποιημένο από το άλλο άκρο του καλούπιού, έχοντας μία συγκεκριμένη μορφή. Υλικά που χυτεύονται με αυτή τη διαδικασία είναι ο χαλκός, ο μπρούντζος, το αλουμίνιο και σε ειδικές περιπτώσεις χάλυβας, χυτοσίδηρος κ.λπ..

Μία τυπική διαδικασία συνεχούς χύτευσης φαίνεται στο σχήμα 10.16. Το υλικό χύνεται μέσα στο καλούπι ή σε μήτρα από ένα ενδιάμεσο φούρνο. Το πάνω μέρος του καλούπιού ψύχεται με ψεκασμό νερού, ώστε το λιωμένο μέταλλο να ψύχεται και να στερεοποιείται γρήγορα. Το στερεό πλέον μέταλλο απομακρύνεται συνεχώς με τη βοήθεια περιστρεφόμενων κυλίνδρων και κόβεται στο μήκος που είναι επιθυμητό. Η διαδικασία ξεκινά με μια αρχική ράβδο στην οποία χύνεται το πρώτο μέταλλο.

Η συνεχής χύτευση χρησιμοποιείται για παραγωγή τυποποιημένων ράβδων διαφόρων διατομών, είτε αυτές είναι κοίλες είτε γεμάτες. Οι διαστάσεις μπορούν να κυμαίνονται από μερικά mm σε διάμετρο, έως περίπου 250mm, ενώ το μήκος των ράβδων που παράγονται φθάνει τα 6m. Οι μήτρες ή τα καλούπια που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένα από χαλκό ή γραφίτη, είναι απλά στην κατασκευή τους και οικονομικά.



Σχήμα 10.16: Συνεχής χύτευση



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 10ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Η χύτευση είναι μία από τις παλαιότερες μεθόδους μορφοποίησης προϊόντων. Σήμερα με τη χύτευση παράγονται προϊόντα από διάφορα υλικά, συνήθως πολύ κοντά στην τελική τους μορφή.
- Η χύτευση πραγματοποιείται σε καλούπια που έχουν εσωτερικές κοιλότητες, που δημιουργούνται από ξύλινα ή μεταλλικά μοντέλα. Στις περισσότερες διαδικασίες χύτευσης χρησιμοποιούνται πυρήνες ή καρδιές, που είναι φτιαγμένες από άμμο ή μέταλλο, μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού, για να δημιουργήσουν εσωτερικές διαμορφώσεις στο χυτό. Κάθε καλούπι διαθέτει επίσης ένα σύστημα καναλιών για να καταναμευθεί το λιωμένο μέταλλο και κατακόρυφους αγωγούς για τροφοδοσία του λιωμένου μετάλλου. Ιδιαίτερα για τα κομμάτια που έχουν μεγάλο όγκο, χρησιμοποιούνται στα καλούπια ενδιάμεσες αποθήκες υλικού.

- Οι μέθοδοι χύτευσης διακρίνονται σε εκείνες στις οποίες καταστρέφεται το καλούπι ώστε να αποκαλυφθεί το χυτό και σε εκείνες στις οποίες το καλούπι χρησιμοποιείται πολλές φορές.
- Οι κυριότερες μέθοδοι χύτευσης σε καλούπια μίας χρήσης είναι: η χύτευση σε άμμο, η χύτευση σε κέλυφος, η χύτευση με εξαμιζόμενο μοντέλο, η χύτευση σε γύψο, η χύτευση σε κεραμικό καλούπι και η χύτευση με την τεχνική του χαμένου κεριού.
- Οι κυριότερες μέθοδοι χύτευσης με καλούπια πολλαπλών χρήσεων είναι: η χύτευση σε μόνιμο καλούπι, η χύτευση με χαμηλή πίεση, η χύτευση σε μήτρα, η φυγοκεντρική χύτευση, η χύτευση σφυρηλάτησης και η συνεχής χύτευση.
- Η κατάλληλη μέθοδος χύτευσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το υλικό που θα χυτευθεί, το μέγεθος του χυτού που θα παραχθεί, η πολυπλοκότητα της μορφής του χυτού, κ.λπ..
- Τα προβλήματα που εμφανίζονται συχνά στη χύτευση σχετίζονται κυρίως με σφάλματα στη δημιουργία του καλουπιού, στη σχεδίαση του μοντέλου και των καρδιών, στην τοποθέτηση των οχετών εισόδου ή των ενδιάμεσων αποθηκών λιωμένου υλικού, στη διαδικασία της χύτευσης, κ.λπ..



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

11

ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ

- 11.1 Γενικά περί κονιομεταλλουργίας
- 11.2 Στάδια της κονιομεταλλουργίας
- 11.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κονιομεταλλουργίας
- 11.4 Εφαρμογές της κονιομεταλλουργίας



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να μάθετε τα διάφορα στάδια παραγωγής προϊόντων με τις μεθόδους της Κονιομεταλλουργίας.
- ☒ Να κατανοήσετε τις φάσεις συμπίεσης.
- ☒ Να κατανοήσετε τη διεργασία της πυροσυσσωμάτωσης.
- ☒ Να δίνετε παραδείγματα προϊόντων που παράγονται με τις μεθόδους της Κονιομεταλλουργίας.

11.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

Με τον όρο **Κονιομεταλλουργία** εννοούμε το σύνολο των τεχνικών, σύμφωνα με τις οποίες πραγματοποιείται η μορφοποίηση εξαρτημάτων, χρησιμοποιώντας σκόνες των πρώτων υλών, οι οποίες δε λιώνουν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Η κονιομεταλλουργία αποτέλεσε, από αρχαιοτάτων χρόνων, βασική μέθοδο κατασκευής κεραμικών δοχείων, αμφορέων και άλλων αντικειμένων, ξεκινώντας από πηλό. Τα πρώτα βιομηχανικά προϊόντα κονιομεταλλουργίας κατασκευάστηκαν το 1829 από τον Wollaston, ο οποίος μορφοποίησε τα πρώτα χωνευτήρια πλατίνας για τη χημική βιομηχανία και βιοτεχνία, ξεκινώντας από σκόνη πλατίνας. Το υψηλό σημείο τήξεως της πλατίνας (1772°C) καθιστά δύσκολη και με υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις (μεγάλη κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση και τήξη της σκόνης) τη διαμόρφωση προϊόντων πλατίνας με χύτευση.

Τα πιο συνήθη, στη βιομηχανική πρακτική, στάδια της κονιομεταλλουργίας είναι τα ακόλουθα:

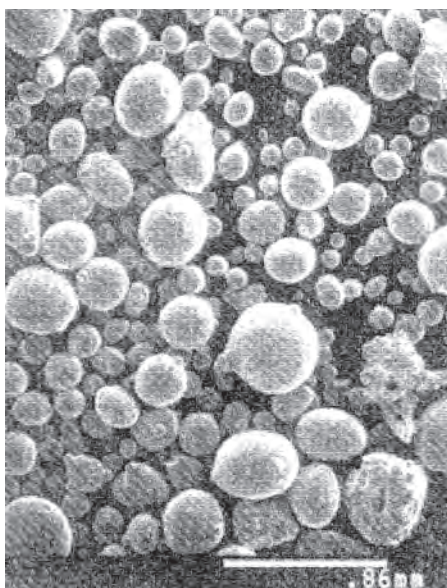
- (1) **Παραγωγή κόνεων των πρώτων υλών**, κατάλληλου μεγέθους και σχήματος.
- (2) **Ανάμειξη κόνεων των συστατικών** του προς μορφοποίηση εξαρτήματος.
- (3) **Συμπίεση του μείγματος κόνεων**, είτε εν ψυχρώ είτε εν θερμώ για τη δημιουργία πορώδους συμπίεσματος.

- (4) **Πυροσυσσωμάτωση**, δηλαδή έψηση του πορώδους συμπιέσματος σε θερμοκρασία κατώτερη του σημείου τήξεως του πιο δύστηκτου συστατικού.

11.2 ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

11.2.1 Παραγωγή κόνεων

Η πρωτογενής παραγωγή των μεταλλικών ή κεραμικών κόνεων γίνεται με φυσικές ή χημικές μεθόδους. Στις **φυσικές μεθόδους** περιλαμβάνονται κυρίως οι μέθοδοι ψεκασμού σκόνης σε υγρή φάση, μέσα σε υγρά ή αέρια, που λειτουργούν ως μέσα μεταφοράς της και χρησιμοποιείται κυρίως για μεταλλικές σκόνες (π.χ. μόλυβδος, ψευδάργυρος, αλουμίνιο, τιτάνιο). Οι κόκκοι της παραγόμενης σκόνης έχουν σφαιρικό σχήμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 11.1.



Σχήμα 11.1: Μικρογραφία σκόνης τιτανίου παραχθείσας με ψεκασμό μέσα σε ρεύμα αέρα.

Οι **χημικές μέθοδοι** είναι οι ακόλουθες:

- **Αναγωγή οξειδίων των μετάλλων με θέρμανση σε κατάλληλη ατμόσφαιρα** (υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα). Παραδείγματα τέτοιων

υλικών είναι το βολφράμιο, το μολυβδαίνιο, ο σίδηρος και το νικέλιο.

- *Ηλεκτρολυτική αναγωγή* οξειδίων ή υδροξειδίων ή αλάτων του μετάλλου για την παρασκευή πολύ καθαρών κόνεων (π.χ. ηλεκτρολυτική μετατροπή της αλουμίνας σε καθαρό αλουμίνιο).
- *Καταβύθιση* κόνεων μετάλλων από διαλύματα αλάτων τους (π.χ. σκόνες νικελίου, χαλκού).

11.2.2 Ανάμειξη των κόνεων

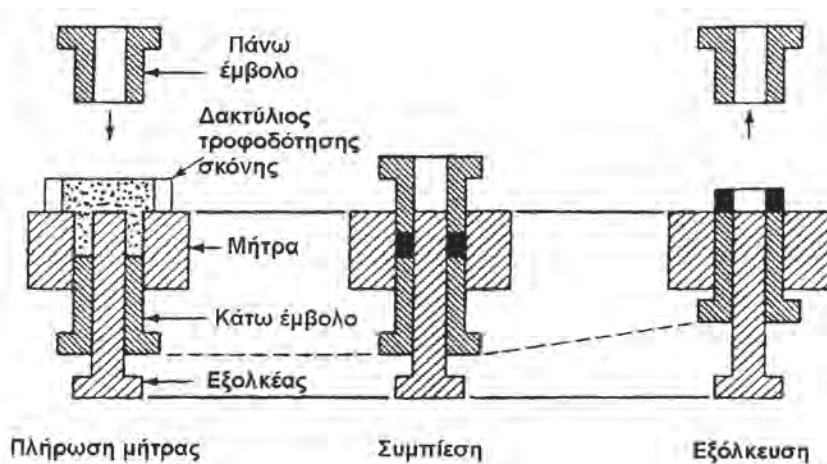
Η ανάμειξη των κόνεων γίνεται στην περίπτωση που το προς κατασκευή προϊόν κονιομεταλλουργίας αποτελείται από δύο και περισσότερα συστατικά. Η ανάμειξη των κόνεων γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλου διαλύτη, συνήθως οργανικής φύσεως, π.χ. παραφίνη, γλυκερίνη, για την επίτευξη ομοιογένειας και για τη μείωση της τριβής μεταξύ των σωματιδίων της σκόνης και του εργαλείου μορφοποίησης (π.χ. έμβολο, μήτρα).

11.2.3 Συμπίεση κόνεων

Σε αυτό το στάδιο το μείγμα των κόνεων διαβιβάζεται σε καλούπι (μήτρα) στο οποίο επιβάλλεται με τη βοήθεια εμβόλου κατάλληλη πίεση, έτσι ώστε να δημιουργηθεί συμπαγές υλικό το οποίο ονομάζεται συμπίεσμα. Το συμπίεσμα που προκύπτει έχει πόρους (πορώδες) και άρα η πυκνότητά του είναι μικρότερη από τη θεωρητική πυκνότητα της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται. Η διαμόρφωση του συμπίεσματος γίνεται με κατάλληλης υδραυλικής πρέσες ή πρέσες εκκέντρου με πιέσεις που ξεπερνούν τα 1500 MPa.

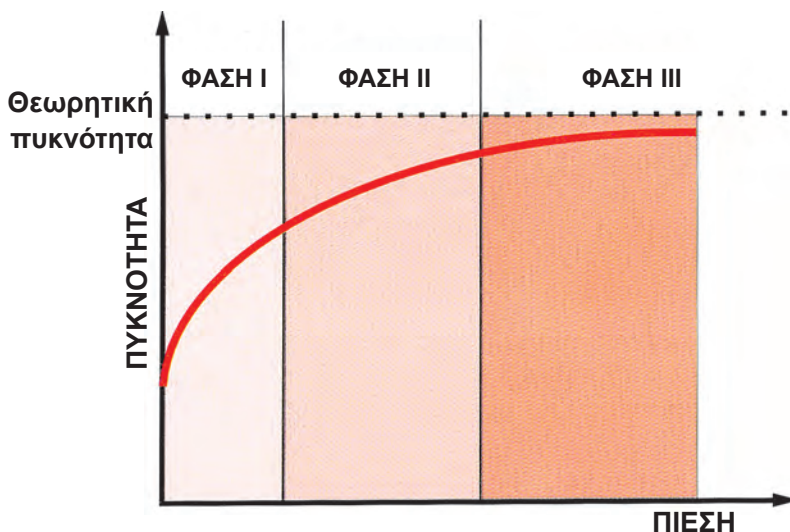
Στο σχήμα 11.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα συμπίεσης σκόνης χαλκού για την κατασκευή εδράνου ολίσθησης. Αρχικά πραγματοποιείται η τροφοδοσία της σκόνης και η στάθμισή της μέσα στην κοιλότητα της μήτρας. Στη συνέχεια γεμίζει με σκόνη η κοιλότητα του άνω εμβόλου και ακολουθεί η συμπίεση. Τέλος, ακολουθεί η εξόλκευση του συμπίεσματος.

Η συμπίεση των κόνεων μπορεί να γίνει εν ψυχρώ (ψυχρή συμπίεση) ή εν θερμώ (θερμή συμπίεση). Η κοκκομετρία και το σχήμα της σκόνης παίζει σπουδαίο ρόλο στο πορώδες. Έτσι, π.χ., σκόνες μικρού μεγέθους κόκκων δίνουν συμπίεσματα μικρότερης πυκνότητας (μεγαλύτερου πορώδους) σε σχέση με σκόνες μεγαλύτερου μεγέθους κόκκων. Οι διαδοχικές φάσεις της συμπίεσης της σκόνης, με την αύξηση της πίεσης, είναι οι ακόλουθες (βλέπε σχήμα 11.3):



Σχήμα 11.2: Διαδικασία συμπίεσης σκόνης χαλκού για την κατασκευή εδράνου ολίσθησης.

- Φάση I: Αναδιάταξη των κόκκων της σκόνης. Μικρή αύξηση της πυκνότητας.
- Φάση II: Πλαστική παραμόρφωση ή/και θραύση των κόκκων της σκόνης που οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της πυκνότητας.
- Φάση III: Μείωση του πορώδους με περαιτέρω ψυχρή παραμόρφωση με ή χωρίς θραύση των κόκκων.

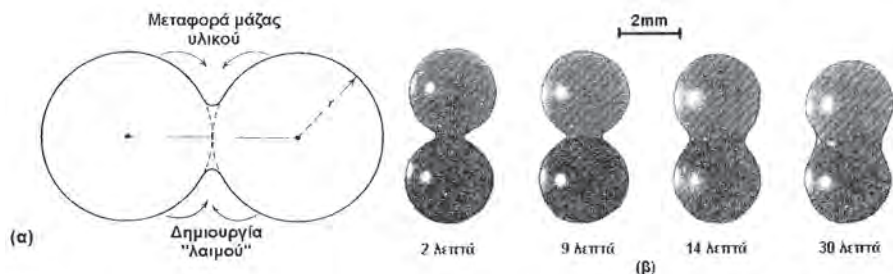


Σχήμα 11.3: Διάγραμμα συμπίεσης τυπικό για μεταλλική σκόνη στο οποίο φαίνονται οι διάφορες φάσεις συμπίεσης.

11.2.4 Πυροσυσσωμάτωση

Είναι η θερμική κατεργασία (έψηση ή απλώς ψήσιμο) που ακολουθεί τη συμπίεση, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το πορώδες του συμπίεσματος. Το συμπίεσμα μετά από την πυροσυσσωμάτωση χαρακτηρίζεται από μεγάλη πυκνότητα, η οποία είναι πολύ κοντά στη θεωρητική πυκνότητα του υλικού. (**Θεωρητική πυκνότητα** είναι η πυκνότητα που προκύπτει από τη διευθέτηση των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού και ισχύει για υλικό με μηδενικό πορώδες). Η πυροσυσσωμάτωση γίνεται μέσα σε ειδικούς φούρνους και πραγματοποιείται σε θερμοκρασία χαμηλότερη του σημείου τήξεως του πιο δύστηκτου υλικού. Η θερμοκρασία της πυροσυσσωμάτωσης μπορεί να φθάσει και τους 1500-1600°C, στην περίπτωση κεραμικών υλικών (καρβίδια, νιτρίδια), ενώ η διάρκειά της κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες.

Κατά την πυροσυσσωμάτωση πραγματοποιείται διάχυση ατόμων μεταξύ των ορίων των κόκκων, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί “λαιμός” και έτσι να γίνει πιο έντονη η σύνδεσή τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 11.4α. Η χρονική εξέλιξη της πυροσυσσωμάτωσης φαίνεται στο σχήμα 11.4β. Η συγκόλληση των κόκκων οδηγεί σε μείωση του μεταξύ τους κενού χώρου (πορώδους) και άρα σε επακόλουθη αύξηση της πυκνότητας. Η κινητήρια δύναμη για τη συγκόλληση των κόκκων είναι η **τριχοειδής πίεση** που αναπτύσσεται στις επιφάνειες επαφής των κόκκων και η οποία τείνει να μειώσει την επιφανειακή ενέργεια του υλικού.



Σχήμα 11.4: α) Σχηματική παράσταση της σύνδεσης μεταξύ δύο κόκκων κατά την πυροσυσσωμάτωση. β) Εξέλιξη της σύνδεσης μεταξύ δύο κόκκων σκόνης κατά την πυροσυσσωμάτωση.

Η πυροσυσσωμάτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί παράλληλα με εφαρμογή πίεσης για πιο δραστήρια μείωση του πορώδους.

11.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

Η Κονιομεταλλουργία παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- ✓ Εφαρμόζεται στην περίπτωση μορφοποίησης δύστηκτων υλικών (μετάλλων και κεραμικών), επειδή δεν απαιτείται τήξη των συστατικών της σκόνης.
- ✓ Είναι η πλέον κατάλληλη για την μορφοποίηση υλικών που διασπώνται ή οξειδώνονται με την τήξη τους (καρβίδια, νιτρίδια).
- ✓ Δεν υπάρχει κίνδυνος διάλυσης αερίων ή εισαγωγής ακαθαρσιών, όπως συμβαίνει στη χύτευση.
- ✓ Δεν καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας, διότι δεν απαιτείται τήξη του υλικού.
- ✓ Το εξαρτήματα κονιομεταλλουργίας διαμορφώνονται στην τελική τους γεωμετρία, χωρίς μεγάλες μεταβολές όγκου, όπως π.χ. η συρρίκνωση που παρατηρείται στα χυτά.
- ✓ Η ποιότητα της επιφάνειας είναι ικανοποιητική και δεν απαιτείται, τις περισσότερες φορές, κατεργασία αποπεράτωσης (π.χ. λείανση).

Εμφανίζει επίσης τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- ✓ Λόγω των υψηλών πιέσεων που εφαρμόζονται (ιδίως στην περίπτωση μορφοποίησης κεραμικών) απαιτούνται υψηλής αντοχής καλούπια και έμβολα μορφοποίησης.
- ✓ Η πυροσυσσωμάτωση μπορεί να είναι χρονοβόρος διαδικασία (μπορεί να διαρκέσει ίσως και αρκετές ώρες).
- ✓ Στα προϊόντα της κονιομεταλλουργίας υπάρχει πάντοτε ένα μικρό ποσοστό πορώδους με αρνητικά αποτελέσματα στη συνολική αντοχή του υλικού.

11.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

Οι κατεργασίες της Κονιομεταλλουργίας εφαρμόζονται για την κατασκευή πληθώρας βιομηχανικών εξαρτημάτων:

- Κεραμικών υλικών, κυρίως κοπτικών εργαλείων από καρβίδια, αλλά και άλλων στοιχείων μηχανών, όπως π.χ. τριβέων, εδράνων, οδοντωτών τροχών κ.λπ..
- Πορωδών υλικών, όπως π.χ. φίλτρων.
- Αυτολιπαινόμενων εδράνων με συγκεκριμένο πορώδες.
- Νημάτων και αντιστάσεων από δύστηκτα και πυρίμαχα μέταλλα, όπως π.χ. βολφραμίου, τανταλίου, μολυβδαινίου, νιοβίου κ.λπ..
- Εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας, των οποίων η κατασκευή με συμβατικές κατεργασίες θα ήταν ασύμφορη και χρονοβόρος.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 11ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Με τον όρο Κονιομεταλλουργία εννοούμε το σύνολο των τεχνικών σύμφωνα με τις οποίες πραγματοποιείται η μορφοποίηση εξαρτημάτων χρησιμοποιώντας σκόνες των πρώτων υλών οι οποίες δε λιώνουν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Τα πιο συνήθη στη βιομηχανική πρακτική στάδια της κονιομεταλλουργίας είναι τα ακόλουθα:

- (1) Παραγωγή κόκκων των πρώτων υλών, κατάλληλου μεγέθους και σχήματος. Η πρωτογενής παραγωγή των μεταλλικών ή κεραμικών κόκκων γίνεται με φυσικές ή χημικές μεθόδους.
- (2) Ανάμειξη κόκκων των συστατικών του προς μορφοποίηση εξαρτήματος.
- (3) Συμπύεση του μείγματος κόκκων είτε εν ψυχρώ είτε εν θερμώ, οδηγεί στη δημιουργία πορώδους συμπίεσματος.
- (4) Πυροσυσσωμάτωση, δηλαδή έψηση του πορώδους συμπίεσματος σε θερμοκρασία κατώτερη του σημείου τήξεως του πιο δύστηκτου συστατικού.

- Οι διαδοχικές φάσεις της συμπίεσης της σκόνης, με την αύξηση της πίεσης είναι οι ακόλουθες:
 - Φάση Ι: Αναδιάταξη των κόκκων της σκόνης. Μικρή αύξηση της πυκνότητας.
 - Φάση ΙΙ: Πλαστική παραμόρφωση ή/και θραύση των κόκκων της σκόνης που οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της πυκνότητας.
 - Φάση ΙΙΙ: Μείωση του πορώδους με περαιτέρω ψυχρή παραμόρφωση με ή χωρίς θραύση των κόκκων.
- Η πυροσυσσωμάτωση είναι η θερμική κατεργασία (έψηση ή απλά ψήσιμο) που ακολουθεί τη συμπίεση προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το πορώδες του συμπίεσματος. Το συμπίεσμα μετά από την πυροσυσσωμάτωση χαρακτηρίζεται από μεγάλη πυκνότητα η οποία είναι πολύ κοντά στη θεωρητική πυκνότητα του υλικού. (Θεωρητική πυκνότητα είναι η πυκνότητα που προκύπτει από τη διευθέτηση των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού και ισχύει για υλικό με μηδενικό πορώδες).
- Οι κατεργασίες της κονιομεταλλουργίας εφαρμόζονται για την κατασκευή πληθώρας βιομηχανικών εξαρτημάτων:
 - Κεραμικών υλικών, κυρίως κοπτικών εργαλείων από καρβίδια, αλλά και άλλων στοιχείων μηχανών, όπως π.χ. τριβένων, εδράνων, οδοντωτών τροχών, κ.λπ..
 - Πορωδών υλικών, όπως π.χ. φίλτρων.
 - Αυτολιπαινόμενων εδράνων με συγκεκριμένο πορώδες.
 - Νημάτων και αντιστάσεων από δύστηκτα και πυρίμαχα μέταλλα, όπως π.χ. βολφραμίου, τανταλίου, μολυβδαινίου, νιόβιου, κ.λπ..
 - Εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας, των οποίων η κατασκευή με συμβατικές κατεργασίες θα ήταν ασύμφορη και χρονοβόρος.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

12

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

- 12.1 Γενικά
- 12.2 Πλαστική παραμόρφωση
- 12.3 Παραμόρφωση εν θερμώ και εν ψυχρώ
- 12.4 Είδη μηχανικών διαμορφώσεων
- 12.5 Πρέσες



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να γνωρίσετε τις μεθόδους μορφοποίησης των υλικών και τις δυνατότητές τους.
- ☒ Να γνωρίσετε πώς γίνεται η παραμόρφωση των υλικών και πώς επιδρούν στην παραμόρφωση αυτή τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του υλικού.
- ☒ Να γνωρίσετε την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στις μηχανικές διαμορφώσεις.
- ☒ Να γνωρίσετε τις πρέσες, τα είδη και τις εφαρμογές τους στις μηχανικές διαμορφώσεις.

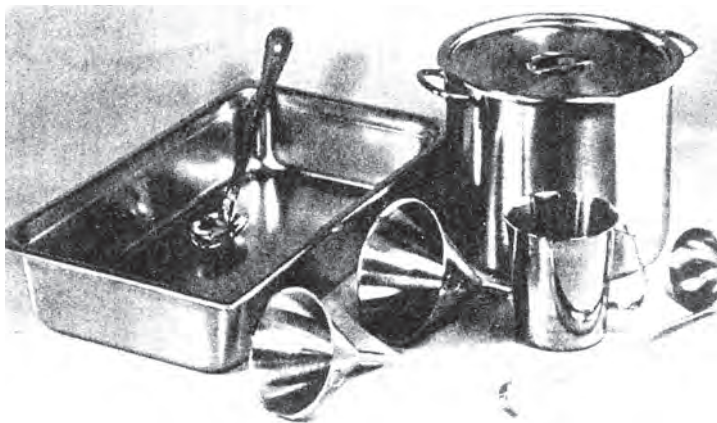
12.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μηχανουργικές κατεργασίες είναι οι τρόποι και οι μέθοδοι που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος για να δώσει μορφή σε υλικά και να φτιάξει προϊόντα από πρώτες ύλες. Κάθε τέτοιο προϊόν, που μπορεί να είναι από ένα απλό μαγειρικό σκεύος έως εξαρτήματα αεροσκαφών, έχει πάρει την τελική του μορφή με κάποια ή με συνδυασμό κάποιων κατεργασιών μορφοποίησης. Τέτοιες κατεργασίες μορφοποίησης είναι:

- ◆ **η αρχέγονη μορφοποίηση** (χύτευση ή κονιομεταλλουργία),
- ◆ **η μορφοποίηση με αφαίρεση υλικού** (τόρνευση, φρεζάρισμα, διάτρηση, πλάνιση, λείανση, κ.ά),
- ◆ **η μορφοποίηση με παραμόρφωση** (απότμηση, κοίλανση, κάμψη, σφυρηλασία, έλαση, κ.ά),
- ◆ **η μορφοποίηση με προσθήκη** (συγκόλληση, επικάλυψη, κ.ά).

Τα διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα παίρνουν την αρχική τους μορφή κατά κανόνα με μεθόδους μορφοποίησης (ιδιαίτερα χύτευση) χωρίς αφαίρεση υλικού, αφήνοντας μικρή ποσότητα υλικού για την τελική κατεργασία. Η τελική κατεργασία στη διαμόρφωση ενός εξαρτήματος μπορεί να επιτευχθεί κυρίως με μεθόδους αφαίρεσης υλικού, μια και προκύπτει με

τέτοιες κατεργασίες μεγαλύτερη ακρίβεια στις διαστάσεις και καλύτερη ποιότητα επιφάνειας. Με τη μορφοποίηση με παραμόρφωση επιτυγχάνεται η διαμόρφωση ενός προϊόντος χωρίς μεγάλη απώλεια υλικού. Στο σχήμα 12.1 φαίνονται διάφορα αντικείμενα, που έχουν παραχθεί με κατεργασίες διαμόρφωσης.



Σχήμα 12.1: Αντικείμενα που έχουν παραχθεί με διαδικασίες διαμόρφωσης

Με τις κατεργασίες διαμόρφωσης συνήθως παράγονται προϊόντα κοντά στην τελική μορφή τους. Τέλος, με τις κατεργασίες με προσθήκη (συνδέσεις, κολλήσεις, κ.λπ.), παράγονται προϊόντα από διαφορετικά εξαρτήματα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους είτε μόνιμα (συγκολλήσεις, κολλήσεις) είτε προσωρινά (κοχλιοσυνδέσεις).

12.2 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Οι σημαντικότερες αλλαγές στις διαδικασίες μορφοποίησης των μετάλλων έγιναν τον 18° και 19° αιώνα, που άρχισαν να υιοθετούνται οι μηχανικές διεργασίες. Η ανάπτυξη αυτή της τεχνολογίας διαμορφώσεως των μετάλλων είχε ως αποτέλεσμα την έρευνα σε νέα υλικά, στα οποία μπορούσαν να εφαρμοσθούν οι νέες τεχνικές και αντίστοιχα την ανακάλυψη νέων υλικών που οδήγησε στην ανάπτυξη νέων μεθόδων διαμόρφωσης.

Κατά τη διαμόρφωση, το μέταλλο παραμορφώνεται. Αυτό έχει ως συνέπεια ότι η ανάλυση της διαδικασίας της διαμόρφωσης απαιτεί την ανάλυση των **τάσεων** και των **παραμορφώσεων**. (βλ. Αντοχή των Υλικών). Η τάση, που είναι η ανά μονάδα επιφάνειας δύναμη, ορίζεται ως το διάνυσμα σε ένα σημείο μίας διατομής με μέτρο ίσο με τη δύναμη προς την επιφάνεια. Οι τιμές των τάσεων, ορθών ή διατμητικών, είναι καθοριστικές για

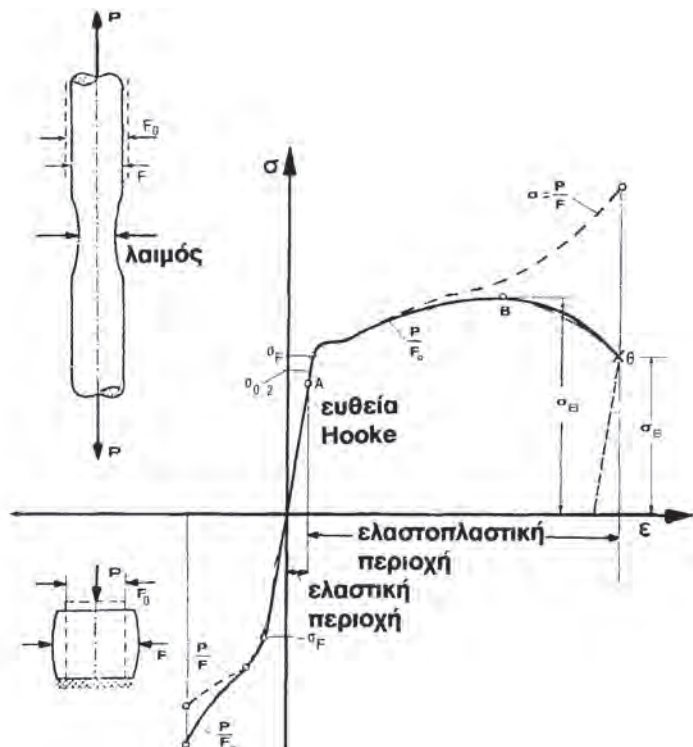
την επιλογή του κατάλληλου υλικού σε κάποια μηχανολογική κατασκευή. Η μέγιστη ορθή τάση αποτελεί κριτήριο ελέγχου για τα ψαθυρά υλικά, μια και αυτά σπάνε κάθετα στη διεύθυνση της ορθής τάσης. Αντίθετα η μέγιστη διατμητική τάση λαμβάνεται ως κριτήριο για τα όλκιμα υλικά που διαρρέουν πριν αστοχήσουν.

12.2.1 Παραμορφώσεις

Παραμόρφωση σε ένα στερεό σώμα είναι το σύνολο των μετατοπίσεων όλων των σημείων ενός σώματος, που οδηγούν σε αλλαγή της γεωμετρίας του. Αντίστοιχα με τις τάσεις, στις παραμορφώσεις διακρίνουμε τις ορθές παραμορφώσεις, που συμβολίζονται με το γράμμα ϵ και εκφράζουν την ανά μονάδα μήκους επιμήκυνση ή βράχυνση μιας στοιχειώδους ευθείας του σώματος, και τις διατμητικές παραμορφώσεις που συμβολίζονται με το γράμμα τ και εκφράζουν τη στρέβλωση της γωνίας, που σχηματίζουν δύο αρχικά κάθετες μεταξύ τους ευθείες.

Στο σχήμα 12.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα των τάσεων και των παραμορφώσεων για την περίπτωση ενός κοινού χάλυβα. Το διάγραμμα αυτό προκύπτει από το πείραμα εφελκυσμού. Όπως παρατηρείται από το σχήμα, διακρίνονται δύο κύριες περιοχές, η ελαστική και η ελαστοπλαστική περιοχή. Στην ελαστική περιοχή, η οποία οριοθετείται από το όριο αναλογίας σ_A , ισχύει ο νόμος του **Hooke**, όπου η τάση και η παραμόρφωση έχουν μεταξύ τους την παρακάτω γραμμική σχέση:

$$\sigma = \epsilon \cdot E \quad (12.1)$$



Σχήμα 12.2: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων

όπου με **E** συμβολίζεται το **μέτρο ελαστικότητας** ή **μέτρο του Young**, το οποίο για κάθε υλικό έχει διαφορετική αλλά σταθερή τιμή (για το χάλυβα $E = 1.85 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ έως $2.15 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$). Στον πίνακα Π.12.1 παρουσιάζονται για διάφορα υλικά τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας και διάφορες άλλες χαρακτηριστικές σταθερές.

Στο πείραμα του εφελκυσμού εφαρμόζεται αξονική δύναμη σε ένα δοκίμιο προδιαγραμμένης γεωμετρίας. Η αξονική δύναμη επιφέρει μια τριαξονική κατάσταση παραμόρφωσης, όπου οι εγκάρσιες παραμορφώσεις είναι ανάλογες με την αντίστοιχη αξονική, με συντελεστή αναλογίας το **λόγο του Poisson** ή αλλιώς "σταθερά εγκάρσιας παραμόρφωσης", που για διάφορα υλικά παρουσιάζεται επίσης στον πίνακα Π.12.1.

Στην ελαστική περιοχή, το υλικό συμπεριφέρεται αναλογικά και ελαστικά, πράγμα που σημαίνει πως η παραμόρφωση είναι **ανάλογη** της αναπτυσσόμενης τάσης και ταυτόχρονα είναι **ελαστική**, δηλαδή το σώμα επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Η ελαστικότητα αυτή συνεχίζεται για λίγο ακόμα, πέρα από την ελαστική περιοχή και το όριο αναλογίας μέχρι το όριο ελαστικότητας, και στο δοκίμιο δεν παρατηρούνται μόνιμες παραμορ-

Πίνακας Π.12.1: Χαρακτηριστικές σταθερές υλικών

Υλικό	Σύμβολο	Ειδικό βάρος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [g/cm ³]	Μέτρο ελαστικότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος E [10 ⁴ Nmm ⁻²]	Σταθερά εγκάρσιας παραμόρφωσης ή Λόγος του Poisson ν	Σταθερά θερμικής διαστολής μεταξύ 0° και 100° C α [10 ⁻⁶ /°C]
Αλουμίνιο	Al	2,70	7,2	0,34	24,0
Μόλυβδος	Mb	11,35	1,7	0,44	29,0
Σίδηρος	Fe	7,86	21,6	0,28	12,0
Χάλυβας	-	7,85	21,0	0,28	11,0
Χυτοσίδηρος	-	7,10 - 7,30	7,5 - 13,0	0,24 - 0,26	9,0
Χρυσός	Au	19,3	8,1	0,42	14,0
Χαλκός	Cu	8,93	12,6	0,35	16,2
Μπρούτζος	-	8,73	11,1	0,35	17,0
Μαγνήσιο	Mg	1,74	4,5	0,28	26,0
Νικέλιο	Ni	8,90	20,5	0,31	13,0
Ορείχαλκος	-	8,30 - 8,50	9,0 - 10,0	0,38	18,0 - 19,0
Ψευδάργυρος	Zn	7,13	4,0 - 13,0	0,20 - 0,30	26,0
Κασσίτερος	Sn	7,30	5,6	0,33	27,0
Άργυρος	Ag	10,50	8,1	0,37	20,0
Μπετόν	-	1,50 - 2,40	2,5 - 4,5	0,20	12,0
Γυαλί	-	2,20 - 2,60	4,0 - 10,0	0,19 - 0,28	3,0 - 10,0

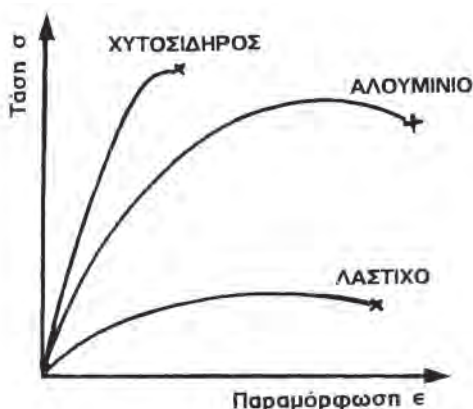
φώσεις. Μετά από αυτή την τάση σ_F το δοκίμιο παρουσιάζει μόνιμες παραμορφώσεις και δεν επανέρχεται πλέον στην αρχική του κατάσταση. Ως όριο διαρροής λαμβάνεται ένα τεχνητό μέγεθος, που αντιστοιχεί σε εκείνη την τάση που επιφέρει μία μετρήσιμη μόνιμη παραμόρφωση. Έτσι, το $\sigma_{0,2}$ που χρησιμοποιείται συχνά, είναι εκείνη η τάση που επιφέρει στο δοκίμιο μόνιμη παραμόρφωση $\epsilon=0,002$ ή 0,2%.

Με την αύξηση της τάσης πέρα από το όριο διαρροής, το δοκίμιο συνεχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά μέχρι το όριο θραύσης σ_B , όπου η τάση μειώνεται ενώ η παραμόρφωση συνεχίζεται. Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται μέχρι την τάση θραύσης σ_θ .

12.2.2 Ενδοτράχυνση

Στο σχήμα 12.3 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης για την περίπτωση τριών χαρακτηριστικών υλικών, του χυτοσίδηρου, του αλουμινίου και του λάστιχου. Από το σχήμα γίνεται φανερό πως σε μερικά υλικά η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή γίνεται πολύ ομαλά, χωρίς να εμφανίζεται έντονα το όριο διαρροής. Η αιτία αυτής της συμπεριφοράς είναι η **ενδοτράχυνση** που ξεκινά ιδιαίτερα νωρίς γι' αυτά τα υλικά.

Η **ενδοτράχυνση** ή **εργοσκλήρυνση** είναι ένα χαρακτηριστικό φαινό-



Σχήμα 12.3: Συμπεριφορά διαφόρων υλικών

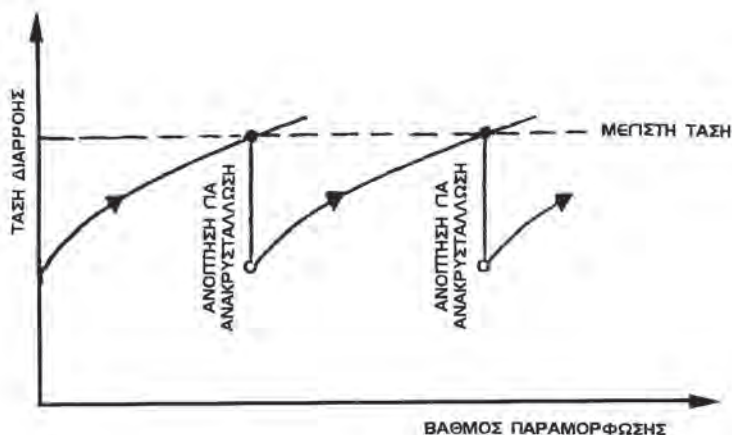
μενο των υλικών, κατά το οποίο η συνεχής αύξηση της παραμόρφωσης απαιτεί ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση της τάσης. Το υλικό, το οποίο αναγκάζεται σε παραμόρφωση, αυξάνει την αντίστασή του σε κάθε προσπάθεια αύξησης του ποσού της παραμόρφωσης. Η εργοσκλήρυνση, όπως παρουσιάστηκε, είναι μια διαδικασία, η οποία αντιτίθεται στην παραμόρφωση. Υπάρχουν όμως άλλες διαδικασίες με τη βοήθεια των οποίων επιτυγχάνονται αντίθετα με την εργοσκλήρυνση αποτελέσματα.

12.2.3 Επίδραση συνθηκών παραμόρφωσης

Η επίδραση της θερμοκρασίας στο όριο παραμόρφωσης ενός υλικού είναι πολύ σημαντική. Σε πολλά εξαρτήματα διαφόρων υλικών παρουσιάζεται ένα ανώτερο όριο παραμόρφωσης πέρα από το οποίο το εξάρτημα θα ραγίσει ή θα σπάσει. Με την αύξηση όμως της θερμοκρασίας, μπορούν να ενεργοποιηθούν διεργασίες αποκατάστασης ή διευθέτησης των αταξιών του υλικού, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα παραπέρα παραμόρφωσης. Συχνά, το προς παραμόρφωση εξάρτημα θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία ανοπτήσεως, πιο πάνω από τη θερμοκρασία αναक्रυστάλλωσης και διατηρείται σε αυτή για ορισμένο χρονικό διάστημα. Η ανόπτηση αυτή, στην οποία υποβάλλεται, έχει ως συνέπεια να σχηματίζονται νέοι απαμορφωτοί κόκκοι στο υλικό και ταυτόχρονα να εξαφανίζεται ή να επανιδιευθετείται μεγάλος αριθμός αταξιών, ενώ δημιουργούνται καινούριες με μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο.

Στο τέλος της ανόπτησης, λόγω των παραπάνω, το εξάρτημα μπορεί να δεχθεί επιπλέον σοβαρή παραμόρφωση, ενώ όλη η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί και άλλες φορές. Στο σχήμα 12.4 παρουσιάζεται αυτή η επίδραση της διαδικασίας της ανόπτησης στη δυνατότητα παραμόρφωσης. Όπως φαίνεται από το σχήμα, οι ενδιάμεσες ανοπτήσεις και παρα-

μορφώσεις δίνουν τη δυνατότητα μεγάλης συνολικής παραμόρφωσης, χωρίς όμως να έχει ξεπεραστεί το ανώτερο επιτρεπτό όριο.



Σχήμα 12.4: Επίδραση της ανόπτησης στην επιτρεπόμενη παραμόρφωση

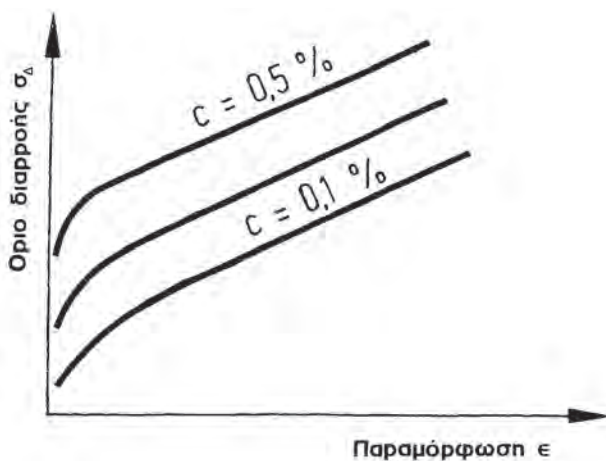
Γενικά, η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα υλικό επιφέρει τη μείωση του ορίου διαρροής, ιδιαίτερα σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, όπου και εκτελούνται οι κατεργασίες διαμορφώσεως των μετάλλων εν θερμώ. Ταυτόχρονα, τις περισσότερες φορές, με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται η ολκιμότητα του μετάλλου, ενώ το όριο ελαστικότητάς του μειώνεται. Η διαμόρφωση των μετάλλων εν θερμώ προαπαιτεί τη βέλτιστη επιλογή της θερμοκρασίας εκτέλεσης της διεργασίας, θερμοκρασία που πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται σημαντική πτώση του ορίου διαρροής σε συνδυασμό με επαρκή ολκιμότητα.

Ανάλογα με το διαμορφούμενο μέταλλο αλλά και τις συνθήκες εκτέλεσης της διεργασίας διαμόρφωσης, το μέταλλο παραμορφώνεται με διαφορετική ταχύτητα. Η επίδραση αυτής της ταχύτητας επί του ορίου διαρροής είναι σημαντική σε υψηλές θερμοκρασίες. Στο σχήμα 12.5 παρουσιάζεται η επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης ανάλογα με τη θερμοκρασία, στο όριο διαρροής του υλικού. Από το σχήμα γίνεται φανερό πως η αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης συνεπάγεται αύξηση του ορίου διαρροής, άρα και της μέγιστης αντοχής του υλικού.

Η επίδραση της περιεκτικότητας άνθρακα στους χάλυβες στο όριο διαρροής τους είναι εξίσου σημαντική. Στο σχήμα 12.6 παρουσιάζεται η σχέση ορίου διαρροής - παραμόρφωσης για χάλυβες διαφόρων περιεκτικοτήτων σε άνθρακα. Από το σχήμα γίνεται φανερό πως όσο πιο μεγάλη είναι η περιεκτικότητα σε άνθρακα σε ένα χάλυβα, τόσο μεγαλύτερο είναι το όριο διαρροής του.



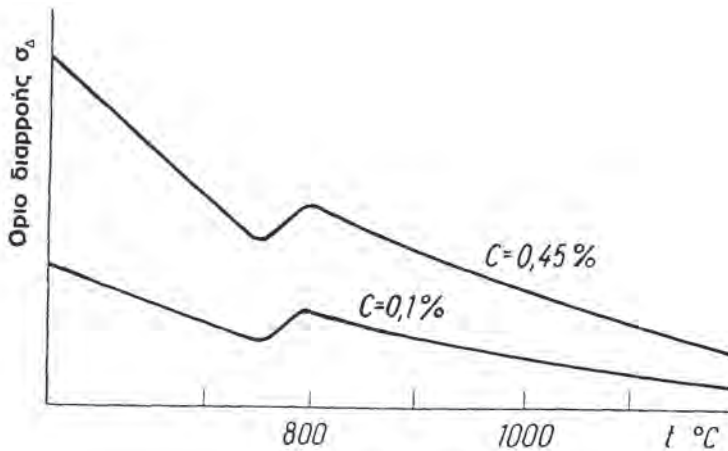
Σχήμα 12.5: Επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης στο όριο διαρροής



Σχήμα 12.6: Επίδραση περιεκτικότητας σε C στο όριο διαρροής χαλύβων σε σχέση με την παραμόρφωση

Η επίδραση της περιεκτικότητας σε άνθρακα για χάλυβες στο όριο διαρροής τους, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, φαίνεται στο σχήμα 12.7. Στο σχήμα αυτό μπορεί να παρατηρηθεί πως, αυξανόμενης της θερμοκρασίας, το όριο διαρροής μειώνεται σημαντικά μέχρι τους 750°C, ενώ για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η μείωση δεν είναι τόσο σημαντική. Επίσης, οι χάλυβες με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άνθρακα στην ίδια θερμοκρασία

έχουν και μεγαλύτερο όριο διαρροής, γεγονός που είχε διαπιστωθεί και από το σχήμα 12.6.



Σχήμα 12.7: Επίδραση περιεκτικότητας σε C στο όριο διαρροής χαλύβων σε συνάρτηση της θερμοκρασίας τους

12.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΝ ΘΕΡΜΩ ΚΑΙ ΕΝ ΨΥΧΡΩ

Οι μηχανικές διαμορφώσεις πραγματοποιούνται εν θερμώ ή εν ψυχρώ. Η διαφορά στις δύο αυτές περιπτώσεις είναι η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το υλικό πριν δεχθεί τη δύναμη παραμόρφωσης. Έτσι, αν το υλικό βρίσκεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσής του, τότε λέμε ότι η παραμόρφωση γίνεται **εν ψυχρώ**, ενώ αντίστροφα σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης λέμε ότι γίνεται **εν θερμώ**. Για τα περισσότερα μέταλλα, η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης βρίσκεται περίπου στο μισό της θερμοκρασίας στην οποία το υλικό λιώνει, δηλαδή τη θερμοκρασία τήξης.

Οι δύο αυτές περιπτώσεις κατεργασιών διαμόρφωσης παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Πλεονεκτήματα εν θερμώ

- ✓ Επειδή το υλικό βρίσκεται πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης δε σκληραίνει από την επίδραση του φορτίου παραμόρφωσης.
- ✓ Σε υψηλές θερμοκρασίες το όριο διαρροής του υλικού είναι μικρότερο και κατά συνέπεια το υλικό μπορεί να παραμορφωθεί εντονότερα.

- ✓ Επειδή η αντοχή σε διάτμηση μειώνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, για την ίδια παραμόρφωση στην εν θερμώ διαμόρφωση απαιτείται λιγότερη δύναμη από ό,τι στην εν ψυχρώ.

Μειονεκτήματα εν θερμώ

- Μερικά μέταλλα δεν μπορούν να διαμορφωθούν εν θερμώ, επειδή σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν ευθραυστότητα.
- Λόγω της διαστολής, που γίνεται από τη θερμοκρασία, δεν μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις. Ο έλεγχος σε αυτή την περίπτωση της θερμοκρασίας του κομματιού που παραμορφώνεται είναι δύσκολος.
- Η συγκράτηση του τεμαχίου που είναι σε υψηλές θερμοκρασίες είναι δύσκολη.

Πλεονεκτήματα εν ψυχρώ

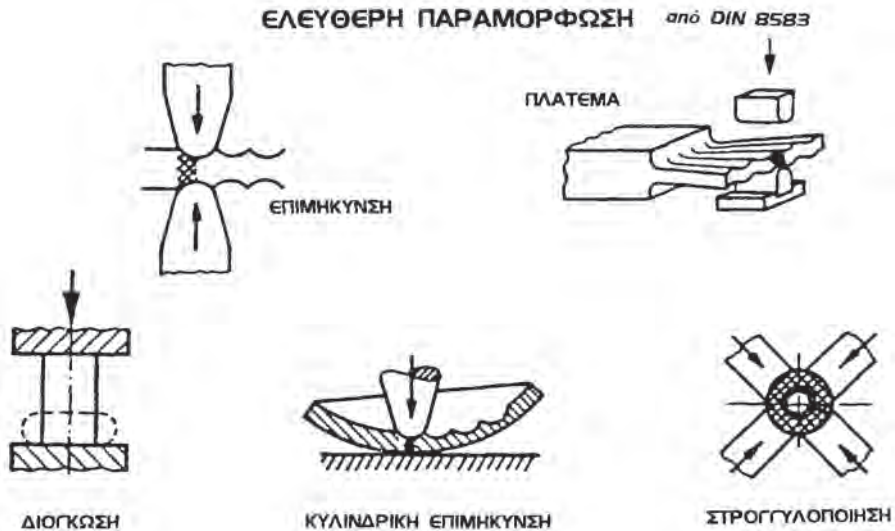
- ✓ Η εν ψυχρώ παραμόρφωση αυξάνει την αντοχή και την επιφανειακή σκληρότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
- ✓ Αφού δεν υπάρχουν υψηλές θερμοκρασίες, δεν παρουσιάζονται οξειδία στην επιφάνεια του τεμαχίου, με αποτέλεσμα η ποιότητα της επιφάνειάς του να είναι καλύτερη.
- ✓ Επιτυγχάνεται καλύτερη ακρίβεια στις τελικές διαστάσεις.
- ✓ Είναι εύκολος ο χειρισμός και η συγκράτηση των τεμαχίων.

Μειονεκτήματα εν ψυχρώ

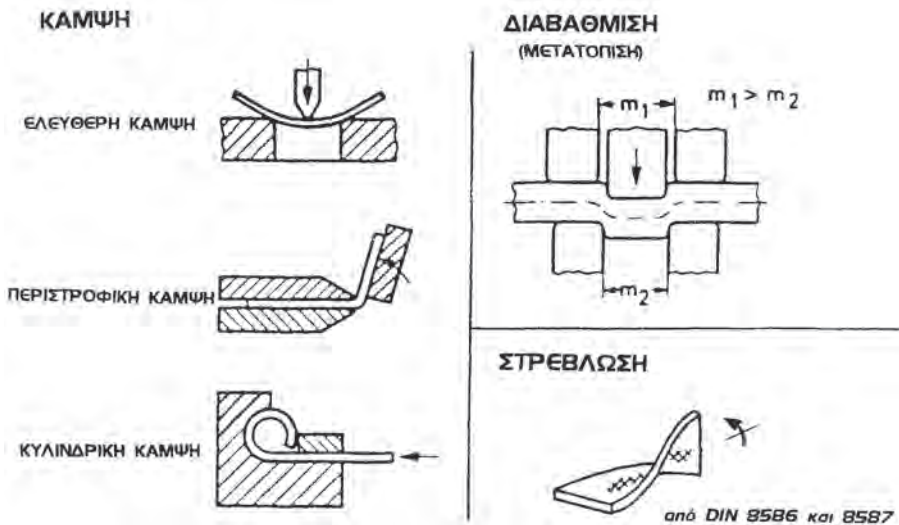
- Το υλικό έχει υψηλό όριο διαρροής και απαιτεί περισσότερο φορτίο για να παραμορφωθεί.
- Το υλικό με την εν ψυχρώ παραμόρφωση ενδοτραχύνεται, δηλαδή αντιστέκεται στην περαιτέρω παραμόρφωσή του. Περισσότερη παραμόρφωση μπορεί να γίνει, αφού προηγηθεί ανόπτηση και με αυτό τον τρόπο μείωση του ορίου διαρροής.
- Διάφορα εύθραυστα υλικά δε μπορούν να διαμορφωθούν εν ψυχρώ.

12.4 ΕΙΔΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

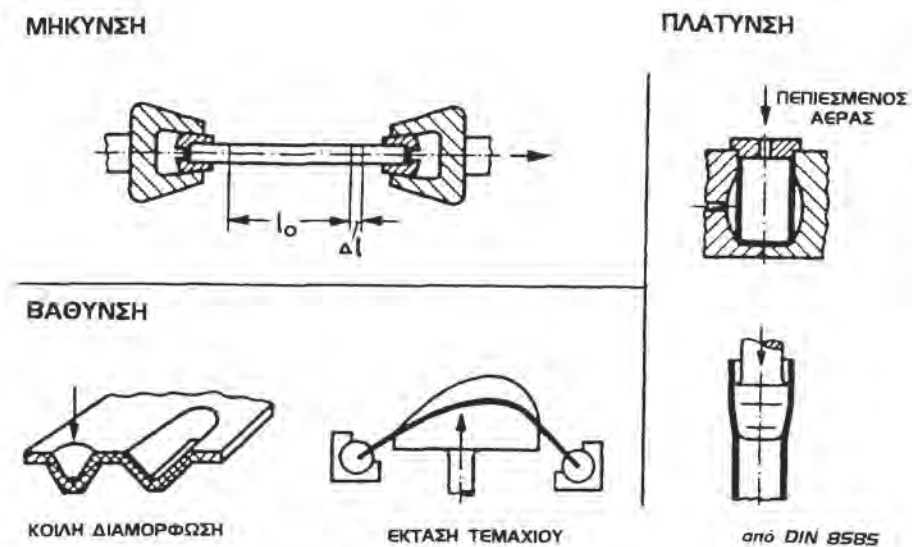
Διάφορα είδη μηχανικών διαμορφώσεων παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Οι μέθοδοι αυτοί αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια ξεχωριστά.



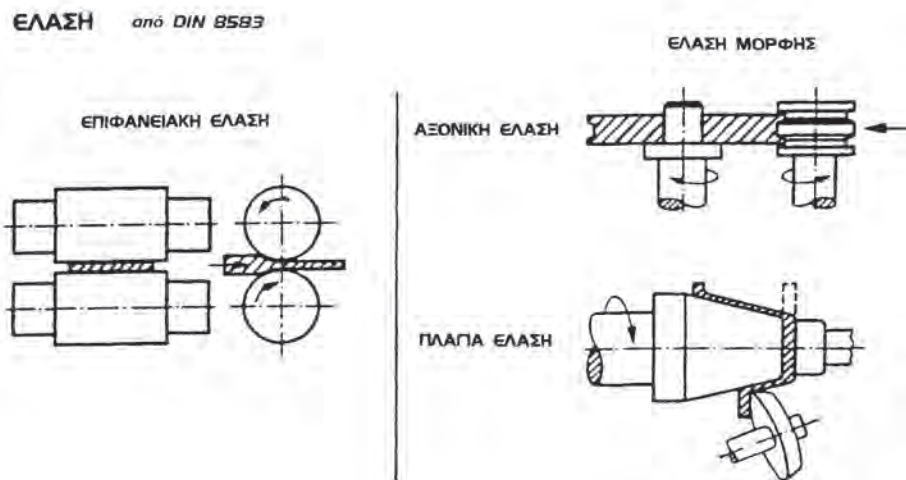
Σχήμα 12.8: Ελεύθερη παραμόρφωση



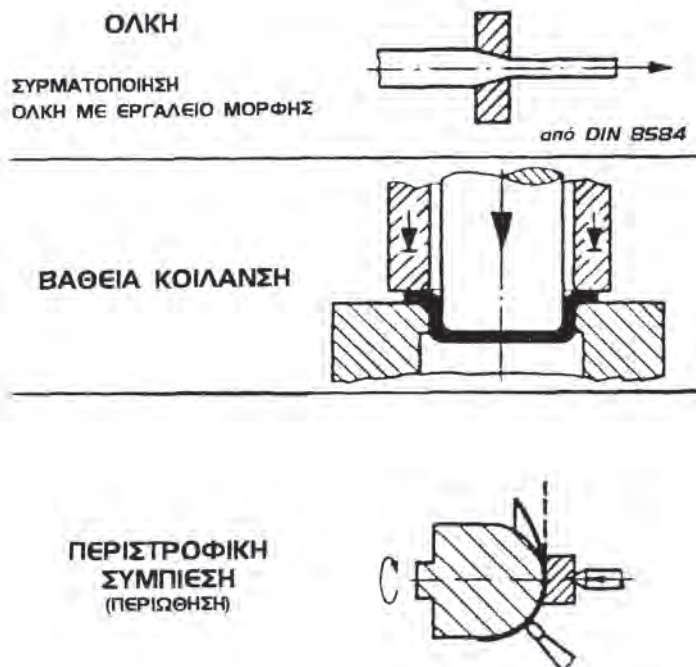
Σχήμα 12.9: Κάμψη, διαβάθμιση, στρέβλωση



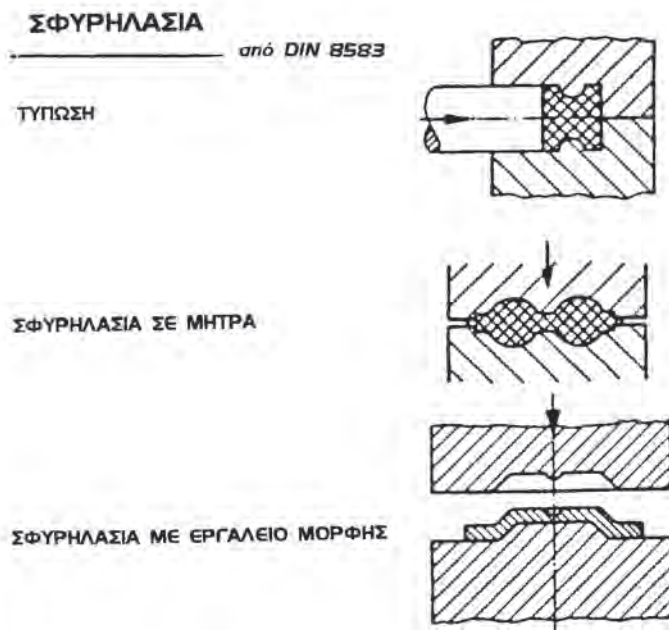
Σχήμα 12.10: Μήκυνση, Βάθυνση, Πλάτυνση



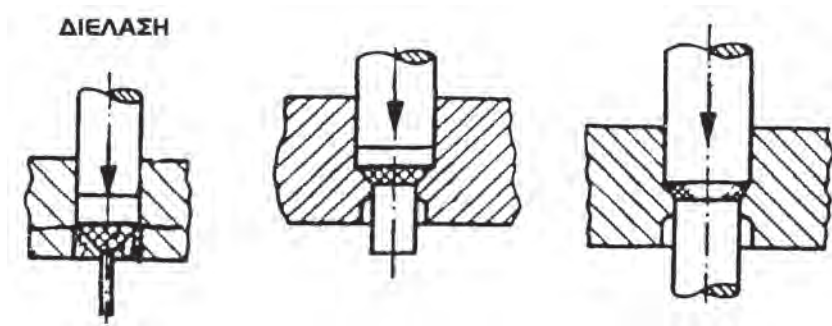
Σχήμα 12.11: Έλαση



Σχήμα 12.12: Ολκή, Βαθεία κοίλανση, Περίωθηση



Σχήμα 12.13: Σφυρηλασία



Σχήμα 12.14: Διέλαση ή Εξώθηση

12.5 ΠΡΕΣΕΣ

Οι πρέσες είναι μηχανήματα τα οποία, χρησιμοποιώντας μηχανική ή υδραυλική ενέργεια, πραγματοποιούν τις μηχανικές διαμορφώσεις. Οι πρέσες διακρίνονται ανάλογα με τον τύπο του πλαισίου, την απόδοσή τους, την πηγή ενέργειας κ.λπ..

12.5.1 Πηγή ενέργειας

Οι πρέσες για παραμόρφωση μπορεί να είναι **μηχανικές** ή **υδραυλικές**. Στις μηχανικές πρέσες ένας στρόφαλος χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας, ενώ στις υδραυλικές πρέσες ένα ή περισσότερα έμβολα δίνουν την ενέργεια για την παραμόρφωση. Οι βασικές διαφορές ανάμεσα στα δύο αυτά είδη πρεσών είναι:

- Οι υδραυλικές πρέσες εξασκούν σταθερή δύναμη ανά εμβολισμό, ενώ στις μηχανικές πρέσες η δύναμη εξαρτάται από την εκάστοτε θέση του διωστήρα.
- Στις υδραυλικές πρέσες το μήκος εμβολισμού μπορεί να ορισθεί εύκολα και με ακρίβεια, κάτι που δε συμβαίνει στις μηχανικές πρέσες.
- Η ταχύτητα εμβολισμού στις υδραυλικές πρέσες μπορεί να ορισθεί μέσα σε ένα μεγάλο εύρος, ενώ στις μηχανικές πρέσες περιορίζεται από τον τύπο του κιβωτίου ταχυτήτων.
- Οι υδραυλικές πρέσες δεν μπορούν να υπερφορτωθούν και να υποστούν ζημιές. Όταν η δύναμη που εξασκείται ξεπεράσει μία οριακή τιμή, η υδραυλική πρέσα σταματά, ενώ η μηχανική πρέσα, αν δε διαθέτει ειδική διάταξη για υπερφόρτωση, κινδυνεύει να υποστεί σοβαρές ζημιές.

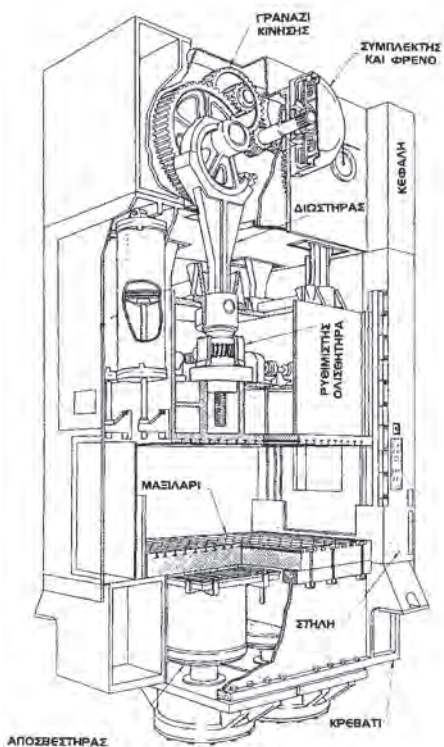
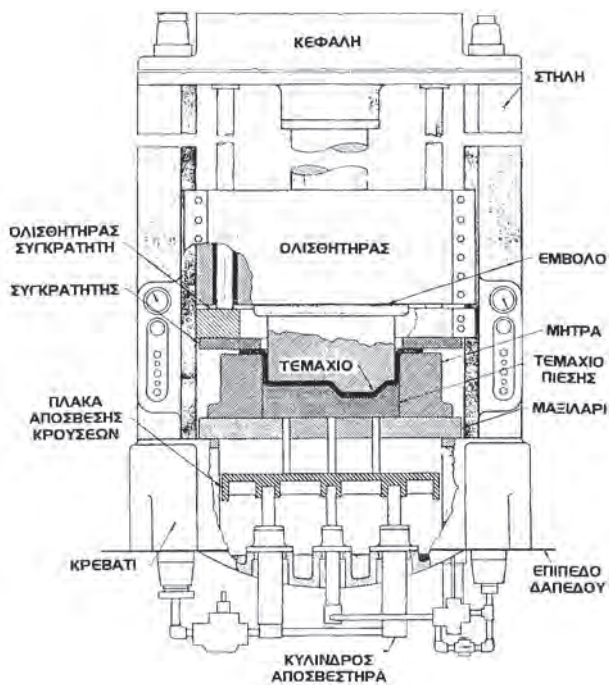
- Οι μηχανικές πρέσες επανέρχονται γρήγορα και είναι καλύτερες για μεγάλη παραγωγικότητα, σε αντίθεση με τις υδραυλικές πρέσες, που παρουσιάζουν καθυστερήσεις.
- Επειδή η μηχανική ενέργεια αποθηκεύεται στο στρόφαλο, οι μηχανικές πρέσες χρησιμοποιούν μικρότερο κινητήρα. Σε αρκετές εφαρμογές το μέγεθος του κινητήρα που απαιτείται για μία υδραυλική πρέσα είναι 2,5 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της ισοδύναμης μηχανικής πρέσας.
- Η ταχύτητα του εμβόλου στις μηχανικές πρέσες είναι μεγαλύτερη, με συνέπεια οι μηχανικές πρέσες να είναι πιο αποδοτικές στην απότμηση και διάτρηση, που απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλο κρουστικό φορτίο. Αντίστοιχα, στις υδραυλικές πρέσες παρουσιάζεται ο κίνδυνος, λόγω του μεγάλου κρουστικού φορτίου, να υποστεί βλάβη το υδραυλικό σύστημα.

Στο σχήμα 12.15 παρουσιάζονται μία μηχανική και μία υδραυλική πρέσα αντίστοιχα.

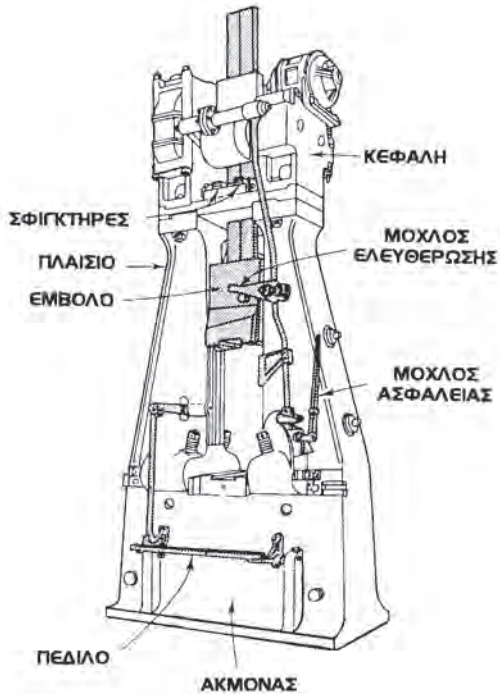
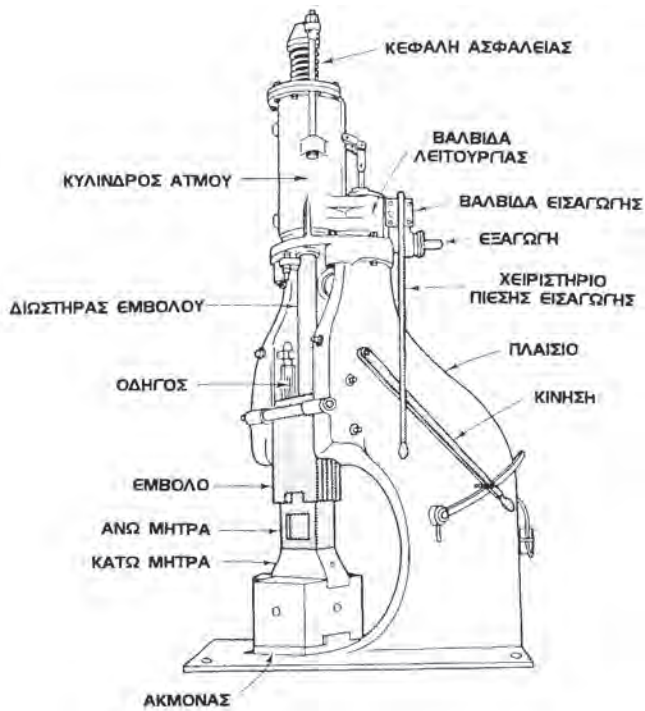
12.5.2 Τύπος πλαισίου

Οι πρέσες, σε σχέση με τη γεωμετρία του πλαισίου από το οποίο αποτελούνται, διακρίνονται κυρίως σε δύο είδη, τις πρέσες διακένου ή C-πρέσες και τις ευθείες πρέσες. Στο σχήμα 12.16 παρουσιάζονται μία πρέσα διακένου και μία ευθεία πρέσα αντίστοιχα.

- Οι πρέσες διακένου θυμίζουν από πλάγια το λατινικό γράμμα C και έχουν το πλεονέκτημα ότι διαθέτουν άμεση πρόσβαση στο χώρο τοποθέτησης της μήτρας από εμπρός, αλλά και από τις δύο πλαϊνές πλευρές.
- Οι ευθείες πρέσες αποτελούνται από βάση και δύο κάθετες κολόνες που δένονται με την κεφαλή.

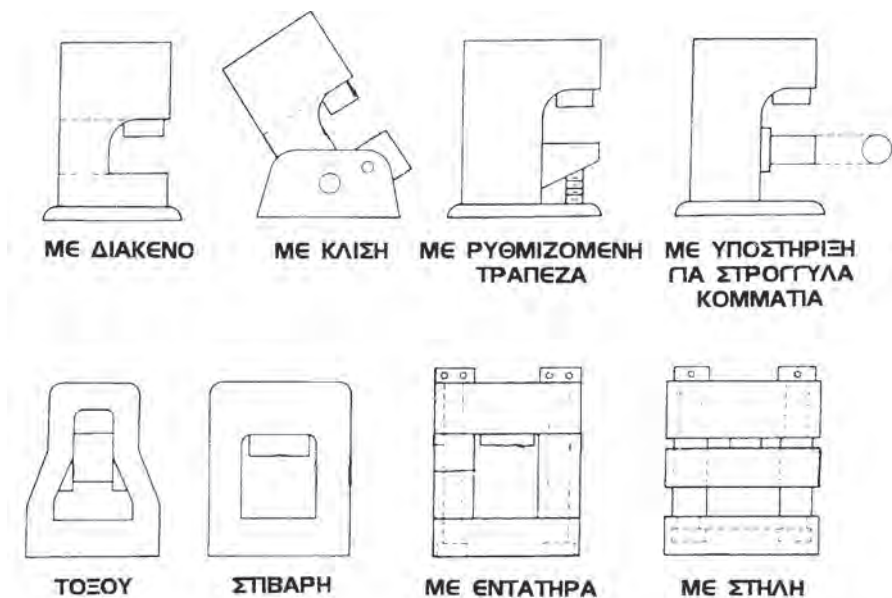


Σχήμα 12.15: Μηχανική και υδραυλική πρέσα



Σχήμα 12.16: Πρέσα διακένου και ευθεία πρέσα

Μία πιο ειδική κατηγοριοποίηση των πρεσών παρουσιάζεται στο σχήμα 12.17, που φαίνονται διάφοροι τύποι πρεσών σε σχέση με το πλαίσίό τους.



Σχήμα 12.17: Τύποι πρεσών με βάση τον τύπο του πλαισίου τους.

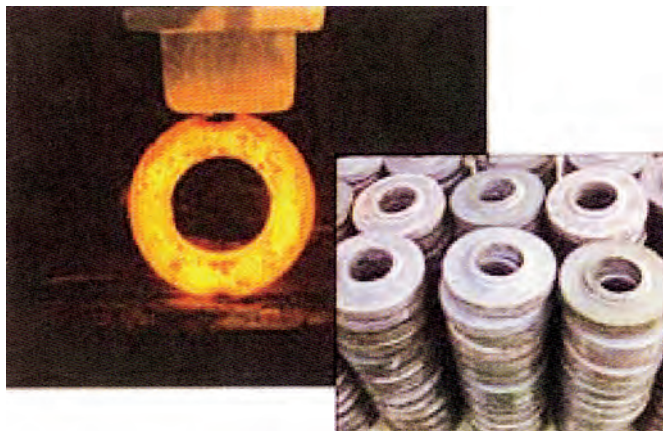
Εκτός από την ήδη αναφερθείσα κατηγοριοποίηση υπάρχουν και άλλα είδη πρεσών, όπως οι ατμόσφυρες, οι πρέσες με δυνατότητα κλίσης κ.λπ..



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 12ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Μηχανουργικές κατεργασίες είναι οι τρόποι και οι μέθοδοι που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος για να δώσει μορφή σε υλικά και να φτιάξει προϊόντα από πρώτες ύλες. Από αυτές τις μηχανουργικές κατεργασίες, οι κατεργασίες διαμόρφωσης έχουν ως σκοπό τη μορφοποίηση αντικειμένων σχεδόν στην τελική τους μορφή, χωρίς όμως αφαίρεση υλικού.
- Τα διάφορα υλικά συμπεριφέρονται στις κατεργασίες διαμόρφωσης με διαφορετικό τρόπο που έχει σχέση με τις μηχανικές κυρίως ιδιότητές τους.

- Οι μηχανικές διαμορφώσεις πραγματοποιούνται εν θερμώ ή εν ψυχρώ. Η διαφορά στις δύο αυτές περιπτώσεις είναι η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το υλικό πριν δεχθεί τη δύναμη παραμόρφωσης. Έτσι, αν το υλικό βρίσκεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αναक्रυστάλλωσής του, τότε λέμε ότι η παραμόρφωση γίνεται **εν ψυχρώ**, ενώ αντίστοιχα σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τη θερμοκρασία αναक्रυστάλλωσης λέμε ότι γίνεται **εν θερμώ**. Η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα υλικό επιφέρει τη μείωση του ορίου διαρροής, ιδιαίτερα σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία αναक्रυστάλλωσης, όπου και εκτελούνται οι κατεργασίες διαμορφώσεως των μετάλλων εν θερμώ. Ταυτόχρονα, τις περισσότερες φορές, με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται η ολκιμότητα του μετάλλου, ενώ το όριο ελαστικότητάς του μειώνεται.
- Η αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης έχει ως συνέπεια την αύξηση του ορίου διαρροής, άρα και της μέγιστης αντοχής του υλικού. Αντίστοιχα όσο πιο μεγάλη είναι η περιεκτικότητα σε άνθρακα σε ένα χάλυβα, τόσο μεγαλύτερο είναι το όριο διαρροής του.
- Οι πρέσες είναι μηχανήματα τα οποία, χρησιμοποιώντας μηχανική ή υδραυλική ενέργεια, πραγματοποιούν τις μηχανικές διαμορφώσεις. Οι πρέσες για παραμόρφωση μπορεί να είναι **μηχανικές** ή **υδραυλικές**. Στις μηχανικές πρέσες ένας στρόφαλος χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας, ενώ στις υδραυλικές πρέσες ένα ή περισσότερα έμβολα δίνουν την ενέργεια για την παραμόρφωση.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

13

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ

13.1 Σφυρηλασία

13.2 Έλαση

13.3 Εξώθηση ή Διέλαση



Επιδιωκόμενοι στόχοι:



Να γνωρίσετε τα είδη της σφυρηλασίας και τις εφαρμογές τους.



Να γνωρίσετε πώς πραγματοποιείται η έλαση, τα είδη της έλασης και τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την κατεργασία αυτή.



Να γνωρίσετε πώς πραγματοποιείται η εξώθηση, τις εφαρμογές της και τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την κατεργασία αυτή.

13.1 ΣΦΥΡΗΛΑΣΙΑ

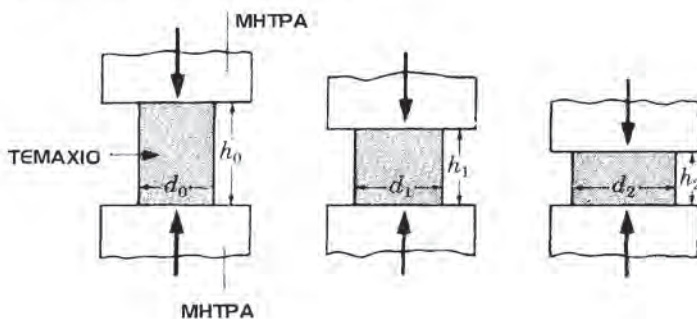
Η **σφυρηλασία** είναι από τις πιο παλιές κατεργασίες διαμόρφωσης. Πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 5000 π.Χ. και χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή πλατιών αντικειμένων ποικίλων μορφών από διάφορα μέταλλα. Σήμερα η σφυρηλασία χρησιμοποιείται ευρέως για παραγωγή ή διαμόρφωση διαφόρων εξαρτημάτων, χαρακτηριστικά παραδείγματα των οποίων είναι οι οδοντωτοί τροχοί, τα εργαλεία χειρός, οι κεφαλές των κοχλιών και μία σειρά από αντικείμενα για μηχανές ή μεταφορικές διατάξεις.

Η σφυρηλασία μπορεί να εκτελεσθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οπότε καλείται **ψυχρή** σφυρηλασία, είτε σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οπότε λέγεται **θερμή** σφυρηλασία. Το πεδίο των θερμοκρασιών κατεργασίας για κάθε περίπτωση δίδεται, όπως ήδη έχει περιγραφεί, σε σχέση με το σημείο τήξεως του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Έτσι, η ψυχρή σφυρηλάτηση πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες μικρότερες από $0.3T_m$, όπου T_m το σημείο τήξεως του κατεργαζόμενου υλικού [σε Κέλβιν]. Αντίστοιχα, η θερμή σφυρηλάτηση πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από $0.6T_m$, ενώ το διάστημα από $0.3T_m$ - $0.6T_m$ αντιπροσωπεύει μία ενδιάμεση κατάσταση. Επισημαίνεται ότι η θερμοκρασία αναक्रυστάλλωσης για τα μέταλλα είναι περίπου στο $0.5T_m$.

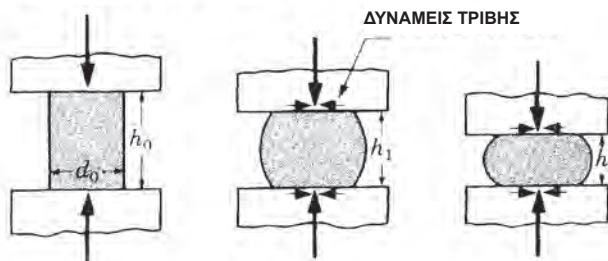
Η πιο απλή μορφή σφυρηλασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια βαριά, σφύρα και αμόνι, τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για αιώνες από τους σιδηρουργούς. Σήμερα συνήθως χρησιμοποιείται κατάλληλη πρέσα και μήτρα για τη σφυρηλασία.

Η σφυρηλασία σε πρέσες γίνεται είτε σε ανοικτές είτε σε κλειστές μήτρες. Στην απλούστερη μορφή σφυρηλάτησης με ανοικτή μήτρα, πιέζεται ένα κυλινδρικό τεμάχιο ανάμεσα σε δύο επίπεδες μήτρες και με αυτό τον τρόπο μειώνεται το ύψος του. Στο σχήμα 13.1 παρουσιάζεται στοιχειωδώς η τεχνική της σφυρηλασίας με ανοικτή μήτρα. Η αναπτυσσόμενη καμπύλωση του τεμαχίου στην κυλινδρική επιφάνεια δίνει στο τεμάχιο το σχήμα βαρελιού.

ΙΔΕΑΤΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

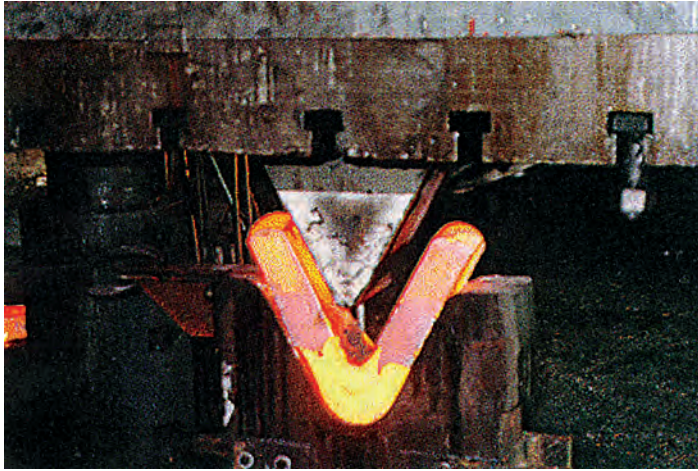


ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΤΡΙΒΗ



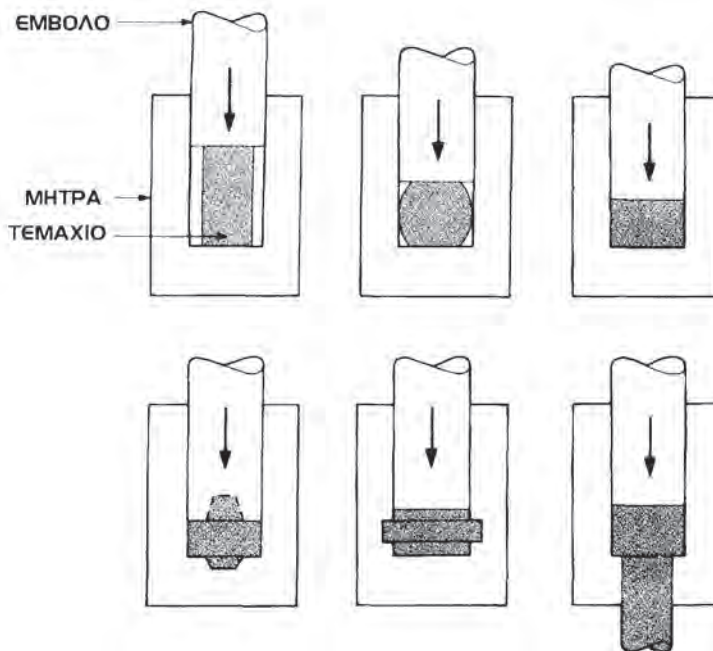
Σχήμα 13.1: Θεωρητική και εφαρμοσμένη σφυρηλασία σε ανοικτή μήτρα

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, ένας συμπαγής κύλινδρος παραμορφώνεται, όπως δείχνει το πάνω μέρος του σχήματος 13.1. Η παραμόρφωση αυτή, που δε λαμβάνει υπόψη τις τριβές του τεμαχίου με τη μήτρα, λέγεται ομογενής. Κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης αυτής, η οποιαδήποτε μείωση στο ύψος έχει ως συνέπεια αντίστοιχη αύξηση στη διάμετρο. Η παραμόρφωση αυτή, που θεωρείται ιδανική, στηρίζεται στο γεγονός ότι ο όγκος του παραμορφώμενου τεμαχίου παραμένει σταθερός. Μία περίπτωση σφυρηλασίας σε ανοικτή μήτρα φαίνεται στο σχήμα 13.2. Η σφυρηλασία του τεμαχίου της φωτογραφίας θυμίζει την κάμψη εν θερμώ.



Σχήμα 13.2: Σφυρηλασία με ανοικτή μήτρα

Αντίστοιχα με τις ανοικτές μήτρες, οι κλειστές μήτρες σφυρηλασίας παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τεχνική της κατεργασίας. Στο σχήμα 13.3 παρουσιάζεται η βασική τεχνική μιας σφυρηλασίας με κλειστή μήτρα.

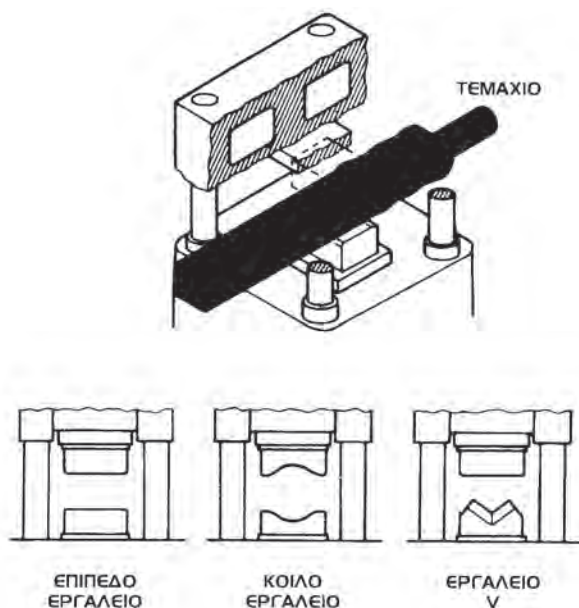


Σχήμα 13.3: Σφυρηλασία με κλειστή μήτρα

Από το σχήμα 13.3 γίνεται φανερό πως κατά τη σφυρηλασία σε κλειστές μήτρες το κατεργαζόμενο υλικό περιβάλλεται από τη μήτρα και το έμβολο έτσι, ώστε να μην υπάρχει περίσσειμα υλικού. Στην περίπτωση αυτή καθίσταται αναγκαίος ο ακριβής υπολογισμός της ποσότητας του υλικού, που πρόκειται να παραμορφωθεί, ώστε να παραχθεί το επιθυμητό αντικείμενο. Μικρότερη ποσότητα του υλικού εμποδίζει το ολικό γέμισμα της μήτρας, ενώ υπερβολική ποσότητα υλικού οδηγεί σε πρόωρη αστοχία της μήτρας ή αυτή σφηνώνει και μπλοκάρει κατά τη λειτουργία.

13.1.1 Σφυρηλασία σε ανοικτές μήτρες

Η σφυρηλασία σε ανοικτές μήτρες αποτελεί μία από τις πρώτες κατεργασίες διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο και για πολλούς αιώνες αποτελούσε τη μόνη μορφή σφυρηλασίας. Σήμερα η μορφή των εργαλείων γι' αυτή την κατεργασία ποικίλλει ανάλογα με το επιθυμητό σχήμα του τελικού τεμαχίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 13.4.



Σχήμα 13.4: Τύποι από ανοικτές μήτρες

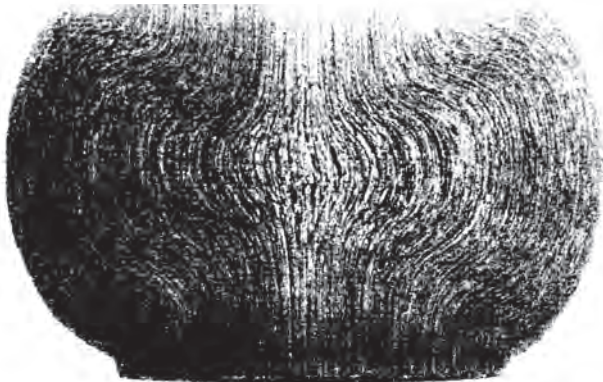
Κατά τη σφυρηλάτηση με ανοικτές μήτρες, η εκατοστιαία μείωση στο ύψος του τεμαχίου προκύπτει από τη σχέση:

$$\text{εκατοστιαία μείωση του ύψους: } \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% \quad (13.1)$$

Η μείωση αυτή στην περίπτωση ιδανικής παραμόρφωσης μεταφέρεται, όπως προαναφέρθηκε, σε αντίστοιχη μείωση διαμέτρου. Στην πραγματική κατεργασία το κατεργαζόμενο τεμάχιο αναπτύσσεται σε ένα βαρελοειδές σχήμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 13.5. Το σχήμα αυτό λαμβάνεται από το τεμάχιο κυρίως, λόγω των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται στις επιφάνειες επαφής μεταξύ τεμαχίου και μήτρας, δυνάμεις οι οποίες αντιτίθενται στην προς τα έξω ροή του κατεργαζόμενου υλικού. Το ίδιο βαρελοειδές σχήμα μπορεί να δημιουργηθεί και στην περίπτωση σφυρηλάτησης θερμού υλικού σε κρύες μήτρες. Το υλικό κοντά στην επαφή με τη μήτρα κρυώνει πολύ γρήγορα, ενόσω το υπόλοιπο υλικό παραμένει ζεστό. Επειδή το όριο διαρροής του υλικού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, το ζεστό υλικό στο κέντρο του τεμαχίου διαρρέει πιο εύκολα, ενώ το κρύο υλικό στα σύνορα με τις μήτρες ανθίσταται περισσότερο στην παραμόρφωση.

Η παραμόρφωση κατά την κατεργασία αυτή δε γίνεται ομοιόμορφα στο υλικό, όπως φαίνεται στην τομή ενός τεμαχίου στο σχήμα 13.5. Η διαφοροποίηση της διάστασης της κάτω με την πάνω επιφάνεια οφείλεται στο ότι η κάτω επιφάνεια έρχεται σε επαφή με την κρύα μήτρα, πριν ακόμα εξελιχθεί η κατεργασία και έτσι κρυώνει γρηγορότερα από την πάνω επιφάνεια.

ΠΑΝΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ



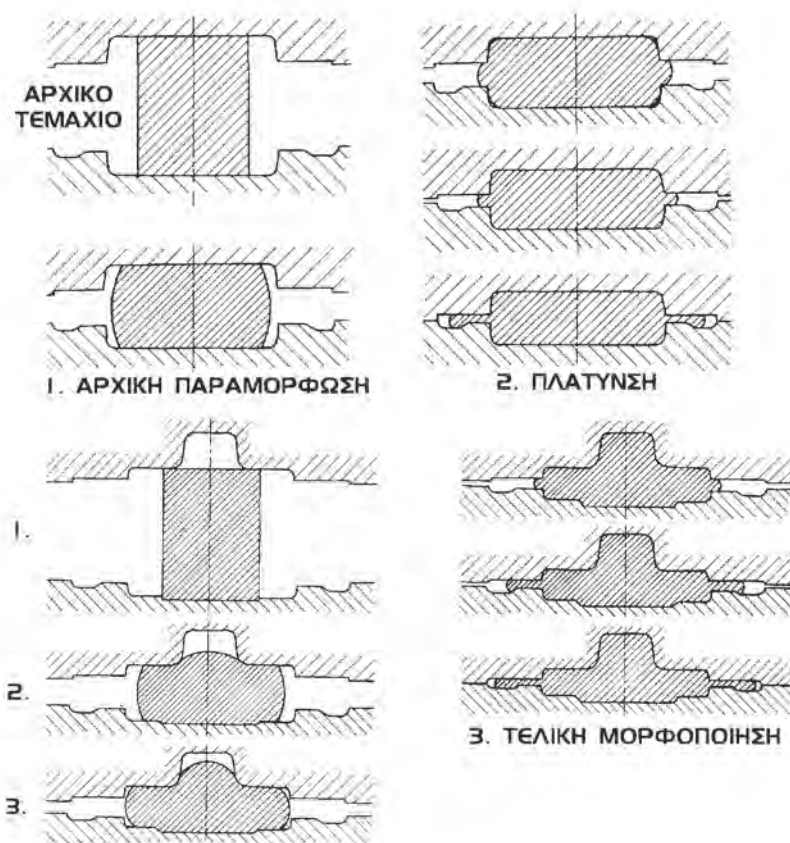
ΚΑΤΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΛΟΓΩ ΤΑΧΥΤΕΡΗΣ ΨΥΞΗΣ

Σχήμα 13.5: Βαρελοειδές σχήμα τεμαχίου μετά από παραμόρφωση σε ανοικτή μήτρα

Κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης οι δύο αυτές επιφάνειες έχουν διαφορετική θερμοκρασία, άρα και διαφορετικό όριο διαρροής. Η πιο κρύα κάτω επιφάνεια αντιστέκεται περισσότερο στην παραμόρφωση και έτσι παραμορφώνεται λιγότερο.

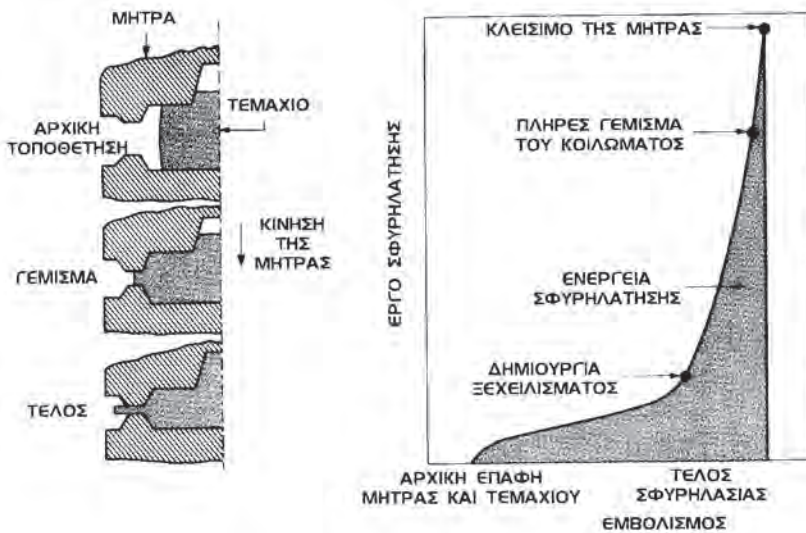
13.1.2 Σφυρηλασία σε κλειστές μήτρες

Κατά τη σφυρηλασία σε κλειστές μήτρες είναι αναγκαίος ο ακριβής υπολογισμός του υλικού που πρόκειται να παραμορφωθεί, μια και οι κλειστές μήτρες περιβάλλουν πλήρως το υλικό χωρίς να αφήνουν περίσσειμα. Σε μία ενδιάμεση περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιούνται κλειστές μήτρες, οι οποίες να αφήνουν ένα μικρό διάκενο για το ξεχείλισμα του περισσεύματος του υλικού. Το περίσσειμα αυτό στη συνέχεια αφαιρείται με κάποια από τις κλασικές μηχανουργικές κατεργασίες (π.χ. με απότμηση). Η διαδικασία παραμόρφωσης με σφυρηλασία σε κλειστές μήτρες ακολουθεί τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο το υλικό παραμορφώνεται παίρνοντας ένα αρχικό βαρελοειδές σχήμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 13.6. Στη συνέχεια της κίνησης της μήτρας, το υλικό πλαταίνει και στο τελικό στάδιο παίρνει τη μορφή που επιδιώκεται από τις αντίστοιχες διαμορφώσεις της μήτρας.



Σχήμα 13.6: Στάδια σφυρηλασίας σε κλειστές μήτρες

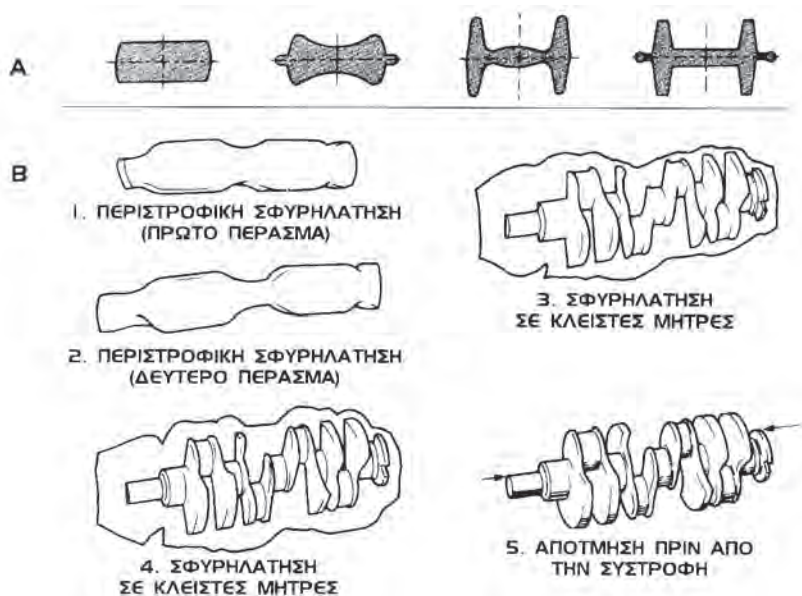
Στο σχήμα 13.7 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα έργου - εμβολισμού για κλειστές μήτρες με διάκενο για το ξεχειλίσμα του υλικού. Από το διάγραμμα μπορεί να παρατηρηθεί η ραγδαία αύξηση του φορτίου μετά τη δημιουργία του ξεχειλίσματος. Σε σφυρηλασία εν θερμώ το ξεχειλίσμα απαιτεί υψηλά φορτία για την παραμόρφωσή του, μια και είναι λεπτό και ταυτόχρονα πιο κρύο από την κύρια μάζα του υλικού.



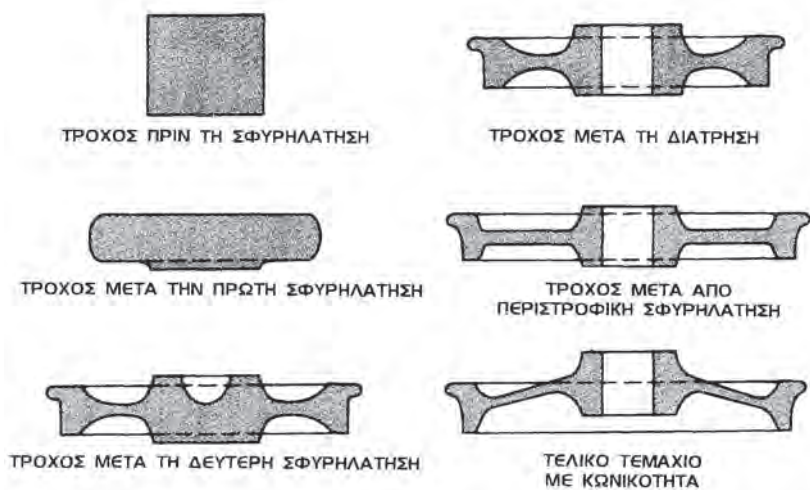
Σχήμα 13.7: Διάγραμμα έργου-εμβολισμού σε σφυρηλασία με κλειστές μήτρες

13.1.3 Διάφορες κατεργασίες με σφυρηλασία

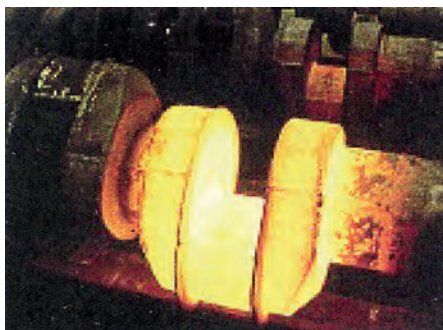
Εκτός από τη γενική ταξινόμηση των μεθόδων σφυρηλασίας, που ήδη περιγράφηκε, διάφορες κατεργασίες με σφυρηλάτηση αντιμετωπίζονται ως ξεχωριστές, λόγω της ιδιαιτερότητας του τρόπου σφυρηλάτησης ή της μορφής του τελικού προϊόντος. Τέτοιες σφυρηλατήσεις εμφανίζονται πολλές φορές ως ξεχωριστές μέθοδοι σφυρηλάτησης, όπως είναι η σφυρηλάτηση κεφαλής κοχλιών, η σφυρηλάτηση με ταυτόχρονη διάτρηση κ.λπ.. Στα σχήματα 13.8-13.10 παρουσιάζονται κλασικές εφαρμογές σφυρηλάτησης, όπως είναι η σφυρηλάτηση τυποποιημένης δοκού, στροφαλοφόρου άξονα κ.λπ..



Σχήμα 13.8: Σφυρηλάτηση δοκού τυποποιημένης διατομής Η και στροφαλοφόρου άξονα ΜΕΚ

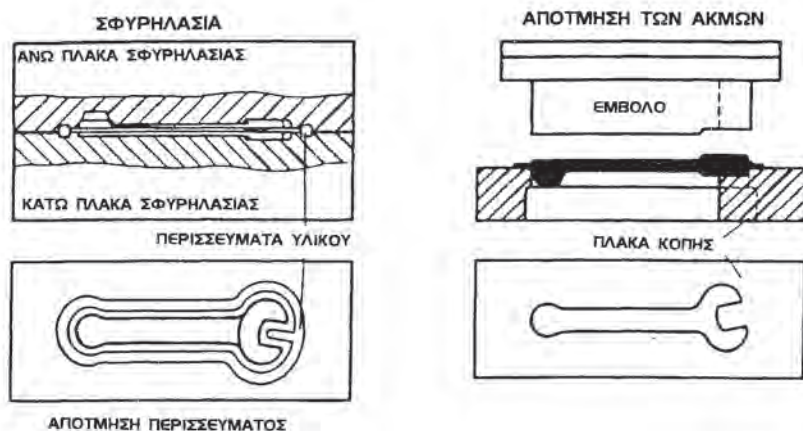


Σχήμα 13.9: Σφυρηλάτηση τροχού σιδηροδρόμου



Σχήμα 13.10: Σφυρηλάτηση στροφαλοφόρου άξονα

Στις περισσότερες από τις μηχανουργικές κατεργασίες διαμόρφωσης το τελικό προϊόν προκύπτει μετά και από άλλες κατεργασίες, διαμόρφωσης ή κοπής. Στο σχήμα 13.11 φαίνεται η απότμηση του περισσεύματος γύρω από ένα γερμανικό κλειδί που έχει προέλθει από σφυρηλασία.



Σχήμα 13.11: Σφυρηλάτηση κλειδιού

13.1.4 Μήτρες σφυρηλάτησης

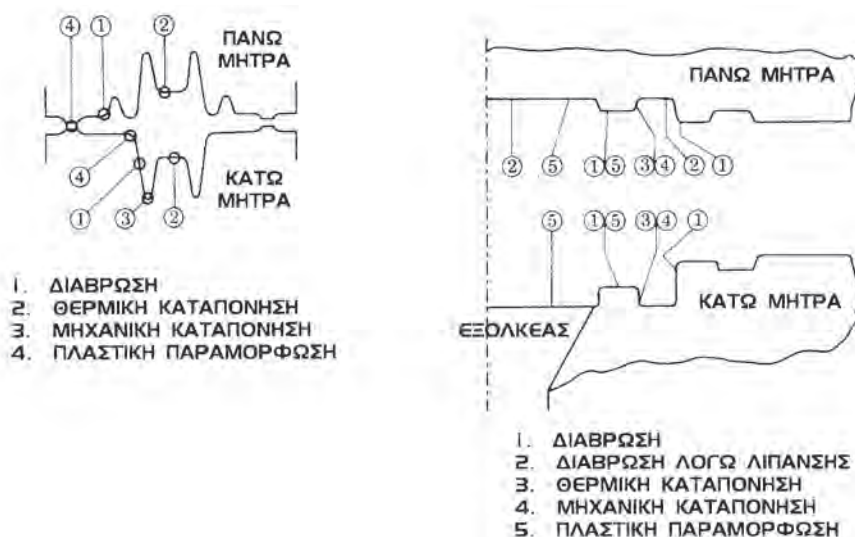
Ο σχεδιασμός των μητρών σφυρηλάτησης απαιτεί πολύ καλή γνώση της αντοχής και ολκιμότητας του υλικού, της συμπεριφοράς του στις υψηλές θερμοκρασίες και τα χαρακτηριστικά τριβής του. Στο σχεδιασμό των μητρών, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η παραμόρφωσή τους κάτω από υψηλά φορτία σφυρηλασίας, ιδιαίτερα αν οι απαιτήσεις της κατεργασίας για διαστατική ακρίβεια είναι υψηλές. Ο σημαντικότερος κανόνας για το σχεδιασμό των μητρών είναι ότι το κατεργαζόμενο υλικό ρέει πά-

να προς την κατεύθυνση της μικρότερης αντίστασης. Στην πράξη γίνεται προσπάθεια, ώστε η κατανομή του υλικού να είναι τέτοια, που να γίνεται βέλτιστα, όσο είναι δυνατόν, το γέμισμα των καμπυλοτήτων της μήτρας. Για να επιτυγχάνεται αυτό, χρησιμοποιούνται ενδιάμεσες σφυρηλατήσεις για την παραγωγή ενός προϊόντος, όπως φάνηκε στα σχήματα 13.8 και 13.9. Η επιλογή των ενδιάμεσων σταδίων απαιτεί μεγάλη εμπειρία στο σχεδιασμό μητρών, καθώς και ακριβή υπολογισμό του όγκου του υλικού που θα παραμορφωθεί. Σήμερα, προγράμματα σε Η/Υ είναι σε θέση να αναπτύσσουν και να επεξεργάζονται τέτοιους υπολογισμούς. Επειδή οι μήτρες σφυρηλασίας, ειδικά οι μεγάλοι μεγέθους, εργάζονται κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, οι γενικές απαιτήσεις από το υλικό τους είναι:

- ✓ διατήρηση της αντοχής και σκληρότητας κάτω από υψηλές θερμοκρασίες,
- ✓ αντοχή στις μηχανικές και θερμικές στιγμιαίες καταπονήσεις (sock),
- ✓ αντοχή σε φθορά (ιδιαίτερα με απόξεση).

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού κατά περίπτωση εξαρτάται, εκτός των παραπάνω, και από το μέγεθος που θα έχει η μήτρα, τη σύσταση και τις ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού, την πολυπλοκότητα του αντικειμένου, που πρόκειται να παραχθεί, τη θερμοκρασία λειτουργίας, το είδος της κατεργασίας, το κόστος του υλικού της μήτρας και το πλήθος των σφυρηλατήσεων που πρόκειται να γίνουν. Συνήθως οι μήτρες αστοχούν, λόγω ακατάλληλης θερμικής επεξεργασίας τους, κακού σχεδιασμού, υπερθέρμανσης, υπερβολικής φθοράς και υπερκαταπόνησης. Για την αποφυγή αστοχιών, λόγω υψηλών θερμικών καταπονήσεων, συνήθως οι μήτρες προθερμαίνονται σε 150 °C έως 260 °C.

Ένας ακόμη παράγοντας με σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της σφυρηλάτησης είναι η λίπανση, μια και επιδρά στη φθορά και στην τριβή στις μήτρες και κατά συνέπεια στη ροή του μετάλλου μέσα στις κοιλότητές τους. Το λιπαντικό ακόμα λειτουργεί ως εμπόδιο για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ζεστού αντικειμένου προς κατεργασία και των αντίστοιχα κρύων μητρών, με αποτέλεσμα τον επιθυμητό χαμηλό ρυθμό ψύξης του αντικειμένου. Ένας άλλος σημαντικός ρόλος του λιπαντικού είναι ότι εμποδίζει την εμπλοκή της μήτρας και του τεμαχίου, ενώ ταυτόχρονα προστατεύει τη μήτρα από τη φθορά. Τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται στην ψυχρή σφυρηλάτηση είναι κυρίως ορυκτέλαια, ενώ στην εν θερμώ σφυρηλάτηση χρησιμοποιούνται συνήθως λιπαντικά με γραφίτη. Η φθορά στις μήτρες μπορεί να αναπτύσσεται με διάφορους μηχανισμούς. Στο σχήμα 13.12 παρουσιάζονται είδη φθοράς και αντίστοιχα οι θέσεις που αναπτύσσονται για μία περίπτωση μορφής σφυρηλάτησης.



Σχήμα 13.12: Φθορά σε μήτρες σφυρηλασίας

13.2 ΕΛΑΣΗ

13.2.1 Γενικά

Η **έλαση**, η οποία πρωτοχρησιμοποιήθηκε γύρω στα 1500 μ.Χ., είναι μία κατεργασία διαμόρφωσης, η οποία έχει ως σκοπό τη μείωση του πάχους ή την αλλαγή της διατομής ενός τεμαχίου. Αυτό επιτυγχάνεται, στη γενική περίπτωση, μέσω της αναγκαστικής διέλευσης του τεμαχίου ανάμεσα σε δύο περιστρεφόμενους κυλίνδρους. Η πιο απλή μορφή έλασης είναι η επίπεδη ή στρωτή έλαση, που τα παραγόμενα προϊόντα είναι επίπεδες πλάκες και ελάσματα, προϊόντα που χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευαστική Βιομηχανία. Με την επίπεδη έλαση, τα προς κατεργασία ελάσματα μειώνουν αισθητά το πάχος τους. Η έλαση μορφής αναγκάζει το προϊόν, μετά την έξοδό του από τους κυλίνδρους, να έχει μία καινούρια γεωμετρία. Με τέτοια έλαση παράγονται δοκοί τυποποιημένης διατομής. Τέλος, η περιστροφική έλαση δημιουργεί κυκλικά τεμάχια.

Η έλαση πραγματοποιείται σε ειδικές εργαλειομηχανές που ονομάζονται **έλαστρα**. Τα έλαστρα χαρακτηρίζονται ανάλογα με τον αριθμό των κυλίνδρων (απλά, τριέλαστρα, τετραέλαστρα, κ.λπ.), καθώς και με τη δυνατότητα αντιστροφής της φοράς περιστροφής των κυλίνδρων τους (**συνεχή έλαστρα**, για κίνηση στην ίδια φορά περιστροφής και **αναστρεπτά έλαστρα**, όταν υπάρχει δυνατότητα αλλαγής της φοράς). Στο σχήμα 13.13 φαίνεται ένα τετραπλό έλαστρο ψυχρής έλασης.



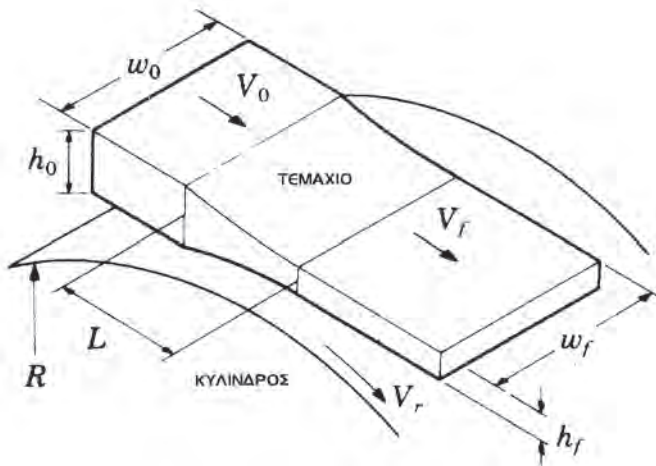
Σχήμα 13.13: Τετραπλό έλαστρο ψυχρής έλασης (Hellenic Steel)

Στα έλαστρα, σαν κι αυτό του σχήματος 13.13, οδηγούνται ελάσματα προκειμένου να μειωθεί το πάχος τους. Η μείωση αυτή μπορεί να κυμαίνεται από 25 έως 90% του αρχικού πάχους. Τα ελάσματα σε ρολλούς, αφού έχουν αποξειδωθεί (απομακρύνονται τα τυχόν οξείδια με διέλευση της λαμαρίνας από δεξαμενές θερμού υδροχλωρικού οξέος), λιπαίνονται με ειδικά έλαια και στη συνέχεια οδηγούνται στα έλαστρα. Η έλαση σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιείται με παρουσία ψυκτικών μέσων (γαλακτώματα). Μετά την έλαση οι ρόλλοι λαμαρίνας οδηγούνται σε επόμενες κατεργασίες (ανόπτηση, επιφανειακή έλαση, επιμεταλλώσεις, κ.λπ.).

Στο σχήμα 13.14 παρουσιάζεται η έλαση ενός τεμαχίου με επίπεδη έλαση. Στο σχήμα αυτό φαίνεται μία ταινία πάχους h_0 να εισέρχεται στο διάκενο μεταξύ των δύο κυλίνδρων και να μειώνει το πάχος της σε h_1 με την περιστροφή και την ταυτόχρονη συμπίεση.

Η επιφανειακή ταχύτητα του κυλίνδρου είναι V_r . Προκειμένου να διατηρηθεί σταθερός ο ρυθμός του όγκου που ρέει, η ταχύτητα του τεμαχίου πρέπει να μεγαλώνει όσο αυτό κινείται μέσα στο διάκενο των δύο κυλίνδρων. Στο τέλος του διαύλου η ταχύτητα είναι V_f . Επειδή η ταχύτητα του κυλίνδρου V_r παραμένει σταθερή, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ολίσθηση ανάμεσα στους κυλίνδρους και το τεμάχιο.

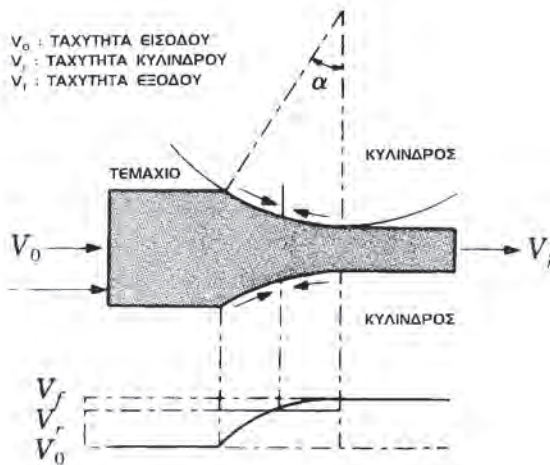
Σε όλο το τόξο επαφής κυλίνδρου και τεμαχίου υπάρχει ένα σημείο στο οποίο οι δύο ταχύτητες, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής του κυλίνδρου V_r και η ταχύτητα κίνησης του τεμαχίου, είναι ίσες. Το σημείο αυτό καλείται **ουδέτερο σημείο**. Αριστερά από αυτό το σημείο ο κύλινδρος κινείται



Σχήμα 13.14: Επίπεδη έλαση

γρηγορότερα από το τεμάχιο και δεξιά από το ουδέτερο σημείο το τεμάχιο κινείται γρηγορότερα από τον κύλινδρο.

Οι δυνάμεις τριβής, που αναπτύσσονται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά τη διάρκεια της έλασης, φαίνονται στο σχήμα 13.15. Οι δυνάμεις αυτές αλλάζουν φορά γύρω από το ουδέτερο σημείο, μια και εκεί αλλάζει η σχετική ταχύτητα, άρα και η σχετική κίνηση τεμαχίου και κυλίνδρου.



Σχήμα 13.15: Δυνάμεις τριβής στην έλαση

Μετά από το ουδέτερο σημείο το τεμάχιο κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα από τον κύλινδρο και έτσι οι δυνάμεις τριβής, που πάντα αντιστέκονται

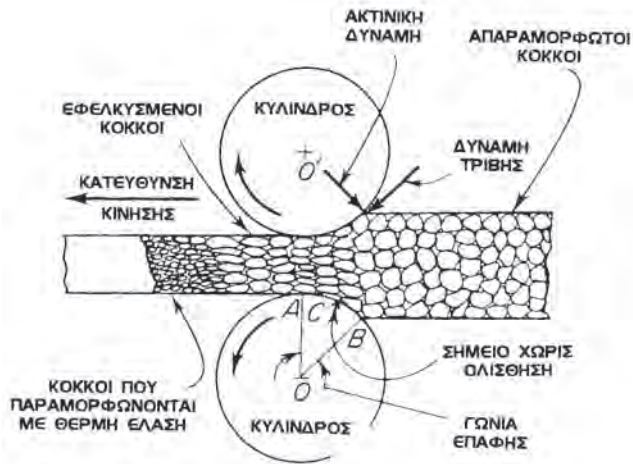
στην κίνηση, έχουν φορά προς τα πίσω. Αντίστοιχες δυνάμεις τριβής φαίνονται και στο σχήμα 13.1 στη σφυρηλάτηση, που λόγω της εκεί συμμετρίας είναι ίσες μεταξύ τους. Στην έλαση οι δυνάμεις τριβής, πριν από το ουδέτερο σημείο, πρέπει να είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μετά το σημείο αυτό, ώστε να πραγματοποιείται η έλαση. Στο σχήμα 13.16 φαίνεται η θέση του ουδέτερου σημείου N.



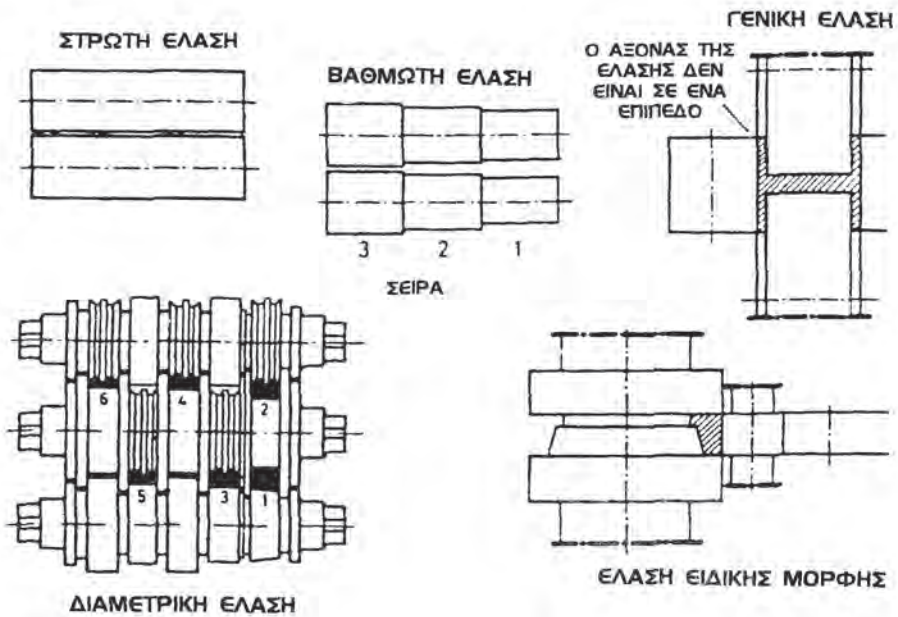
Σχήμα 13.16: Ουδέτερο σημείο

Κατά την έλαση, το υλικό που αναγκάζεται να περάσει μέσα από τους δύο κυλίνδρους συμπιέζεται και παραμορφώνεται, όπως φαίνεται και στο σχήμα 13.17. Η συμπίεση αυτή διαφοροποιεί το μέγεθος των κόκκων του υλικού, εφελκύνοντάς τους και δίνοντάς τους μακρόστενο σχήμα κατά τη διεύθυνση της κίνησης του ελάσματος.

Η έλαση μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς τρόπους και αντίστοιχα ορίζονται τα είδη της έλασης. Στο σχήμα 13.18 φαίνονται τα βασικά είδη έλασης, τα κυριότερα εκ των οποίων είναι η στρωτή έλαση και η έλαση μορφής. Στη στρωτή έλαση το υλικό μειώνει το πάχος του, ενώ στην έλαση μορφής το υλικό παίρνει ένα συγκεκριμένο σχήμα. Η βαθμωτή έλαση είναι μια διαδοχική στρωτή έλαση που το υλικό διαδοχικά μειώνει το πάχος του. Στη γενική έλαση η παραμόρφωση πραγματοποιείται σε περισσότερα του ενός επίπεδα, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Τέλος, στη διαμετρική έλαση το υλικό αναγκάζεται να περάσει από διαδοχικές φάσεις και παίρνει μία νέα μορφή σε κάθε μία.



Σχήμα 13.17: Ουδέτερο σημείο

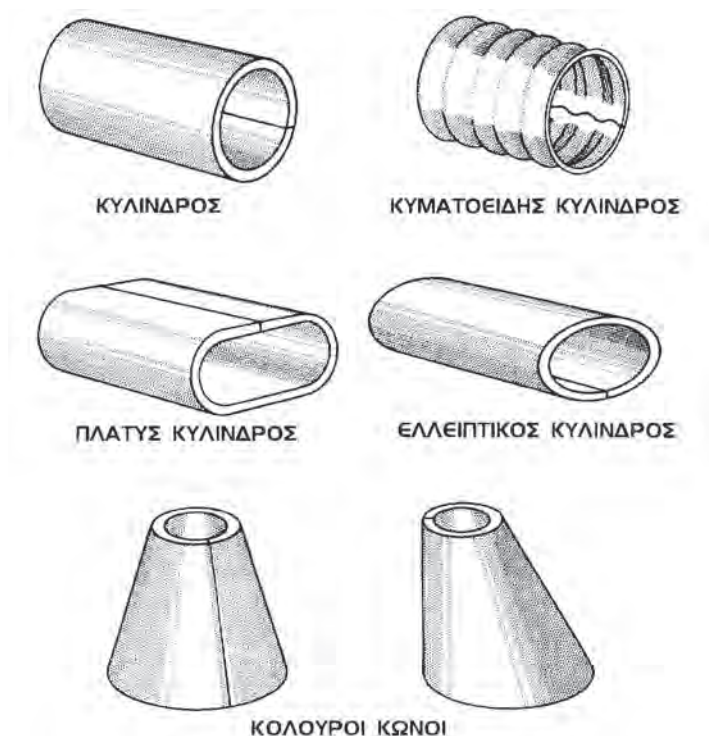


Σχήμα 13.18: Μορφές έλασης

13.2.2 Περιστροφική έλαση

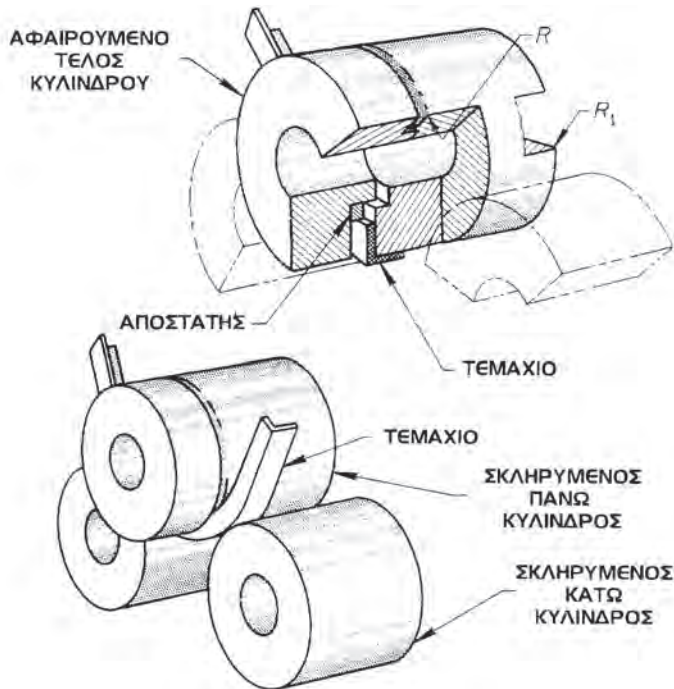
Στην περιστροφική έλαση μορφοποιούνται πλάκες, ελάσματα, δοκοί, σωλήνες κ.λπ. σε διάφορα σχήματα, με την αναγκαστική διέλευση και συμπίεση μέσα από τρεις κυλίνδρους, που βρίσκονται σε κατάλληλη απόσταση. Το πάχος των προς διαμόρφωση αντικειμένων κυμαίνεται από 1,5mm έως 250mm και σε μερικές εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να πλησιάζει και τα 300mm. Το μέγιστο πάχος κατά περίπτωση, που μπορεί να διαμορφωθεί, εξαρτάται από την ισχύ του εκάστοτε ελαστρου. Αντίστοιχα, το ελάχιστο πάχος εξαρτάται από την αντίστοιχη συσκευή συγκράτησης. Γενικά, κάθε έλασμα που μπορεί να συγκρατηθεί, αντίστοιχα μπορεί να διαμορφωθεί με περιστροφική έλαση.

Στο σχήμα 13.19 παρουσιάζονται διάφορες μορφές αντικειμένων που μπορούν να παραχθούν με περιστροφική έλαση. Τα αντικείμενα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως σε δοχεία διαφόρων τύπων, μεταφοράς, πίεσης, συλλέκτες και σε πολλές άλλες εφαρμογές.



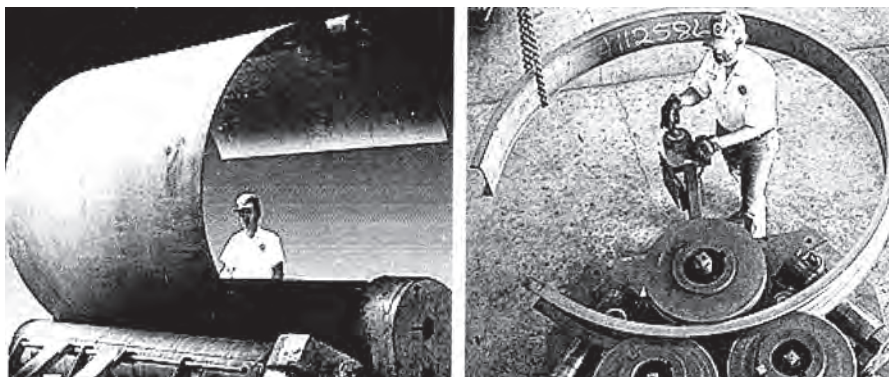
Σχήμα 13.19: Παραδείγματα αντικειμένων που παράγονται από περιστροφική έλαση

Στην περιστροφική έλαση χρησιμοποιούνται κατά κανόνα έλαστρα με οριζόντιους κυλίνδρους. Τα έλαστρα με κάθετους κυλίνδρους παρουσιάζουν δυσκολίες στη συγκράτηση κυρίως πλατιών αντικειμένων. Στο σχήμα 13.20 παρουσιάζονται οι κύλινδροι για περιστροφική έλαση μίας τυποποιημένης δοκού L. Ο πάνω κύλινδρος είναι διαιρούμενος και διαθέτει εγκοπή για τη διέλευση της μίας από τις δύο πλευρές της γωνίας. Μέσω κατάλληλου αποστάτη το πλάτος της εγκοπής μπορεί να αυξομειώνεται έτσι, ώστε να αλλάζει το μέγεθος της διαμορφούμενης δοκού.



Σχήμα 13.20: Έλαση δοκού τύπου L

Στο αντίστοιχο σχήμα 13.21 φαίνονται δύο φωτογραφίες από περιστροφική έλαση λαμαρίνας σε μηχανή με κυλίνδρους και έλαση τυποποιημένης διατομής.



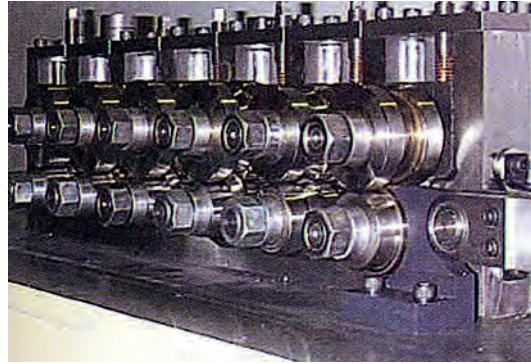
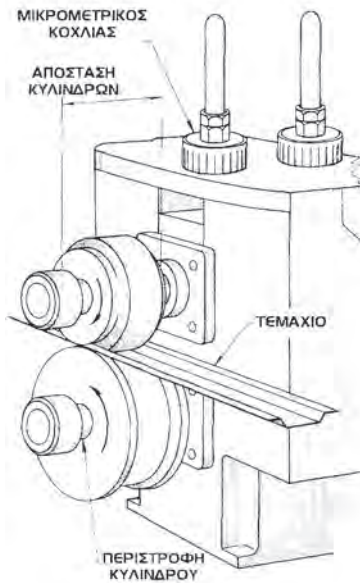
Σχήμα 13.21: Παραδείγματα περιστροφικής έλασης

13.2.3 Έλαση μορφής

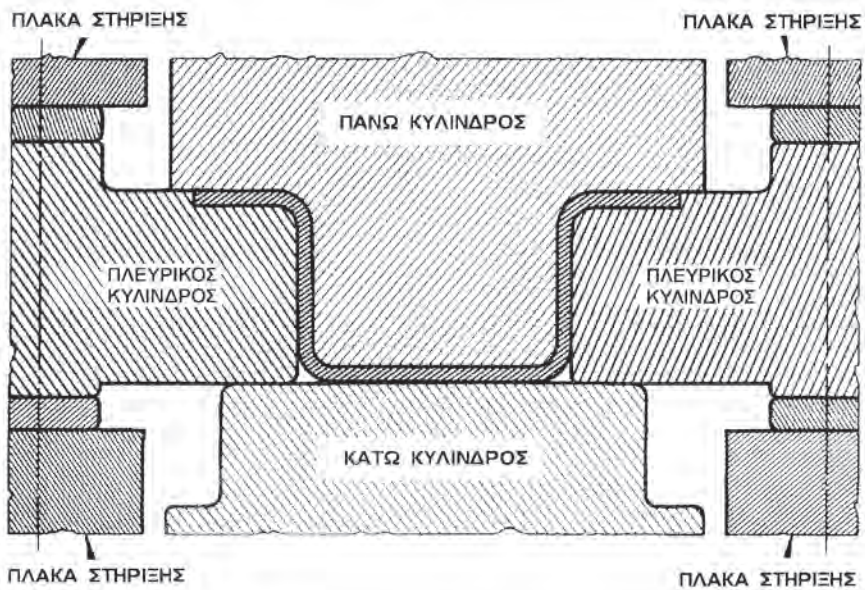
Η έλαση μορφής είναι μία διαδικασία μορφοποίησης μεταλλικών ελασμάτων σε επιθυμητό σχήμα, με ομοιόμορφη διατομή. Στην έλαση μορφής χρησιμοποιούνται ειδικές εργαλειομηχανές για παραμόρφωση, που αποτελούνται από διαδοχικές θέσεις για παραμόρφωση. Κάθε θέση παραμόρφωσης περιλαμβάνει δύο ή περισσότερους περιστρεφόμενους κυλίνδρους και, μέσω της διέλευσης του τεμαχίου ανάμεσά τους, δίδεται η επιθυμητή μορφή στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Στο σχήμα 13.22 φαίνονται ένα έλαστρο για έλαση μορφής με μία θέση παραμόρφωσης και αντίστοιχα ένα έλαστρο με διαδοχικές θέσεις παραμόρφωσης. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο αναγκάζεται να περάσει ανάμεσα από τους περιστρεφόμενους κυλίνδρους και με αυτό τον τρόπο δημιουργείται η διατομή του σχήματος. Για τη ρύθμιση του ελαστρου με μία θέση παραμόρφωσης (αριστερά), ώστε να μπορεί να παραμορφώνει ελάσματα διαφορετικού πάχους, ο πάνω κύλινδρος είναι κινητός. Η σχετική απόσταση ρυθμίζεται μέσω ενός μικρομετρικού κοχλίου.

Για την περίπτωση βαριών κατεργασιών έλασης, δηλαδή με διάμετρο κυλίνδρων από 150mm μέχρι και 400mm, χρησιμοποιούνται έλαστρα με υποστήριξη των αξόνων περιστροφής. Πολλές διαδικασίες έλασης μορφής μπορούν να πραγματοποιούνται πιο ικανοποιητικά, όταν τοποθετούνται πρόσθετοι κύλινδροι υποστήριξης, είτε μεταξύ θέσεων περιστροφής, είτε δίπλα από τους κύριους κυλίνδρους παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 13.23.

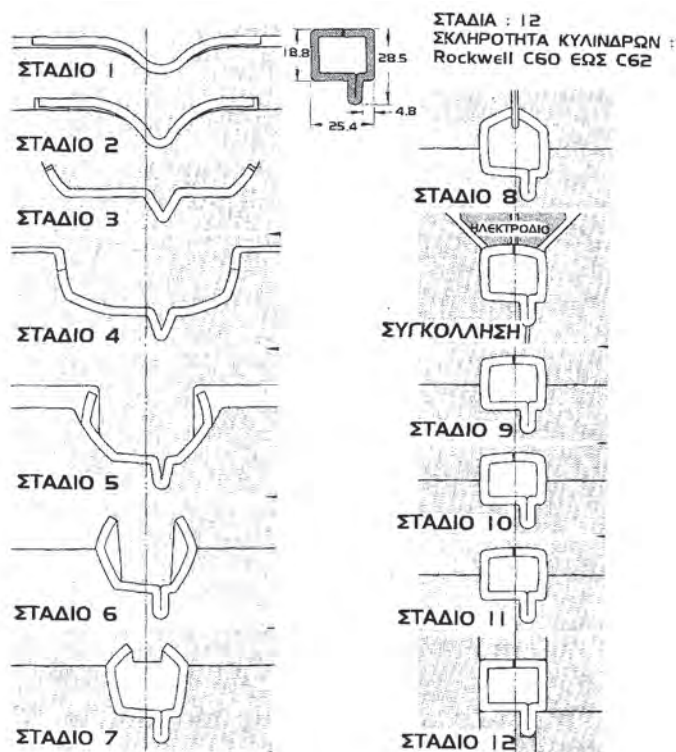
Συνήθως, κατά τη διαδικασία της έλασης το κατεργαζόμενο τεμάχιο μορφοποιείται σε μία σειρά διαδοχικών ελαστρων μέχρι την τελική παραμόρφωσή του στην επιθυμητή μορφή. Στο σχήμα 13.24 φαίνονται οι 12



Σχήμα 13.22: Έλαστρα με μία και διαδοχικές θέσεις παραμόρφωσης



Σχήμα 13.23: Κύλινδροι υποστήριξης



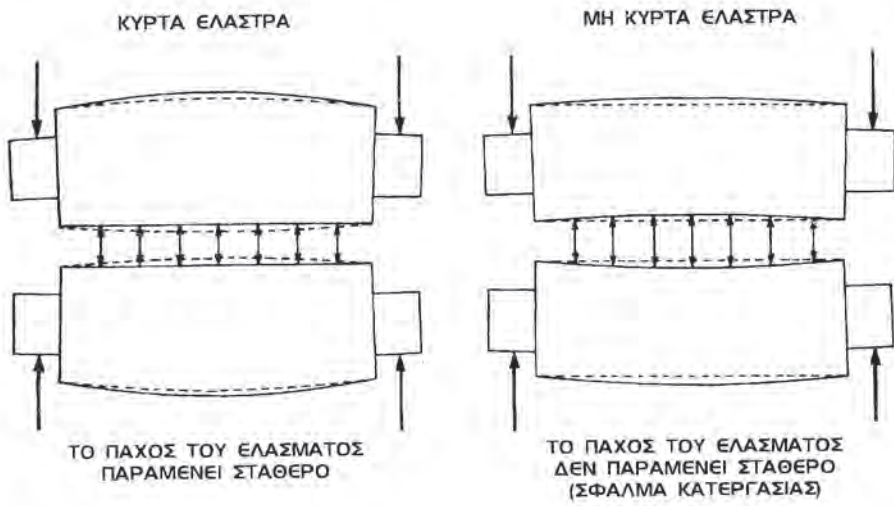
Σχήμα 13.24: Διαδοχική έλαση

διαδοχικές θέσεις παραμόρφωσης ενός επίπεδου ελάσματος, ώστε να προκύψει η τελική μορφή. Η ταχύτητα μετακίνησης του ελάσματος είναι περίπου 15m/min ενώ, όπως φαίνεται και στο σχήμα, εκτός της έλασης εκτελείται ταυτόχρονα και συγκόλληση ανάμεσα στα στάδια 8 και 9.

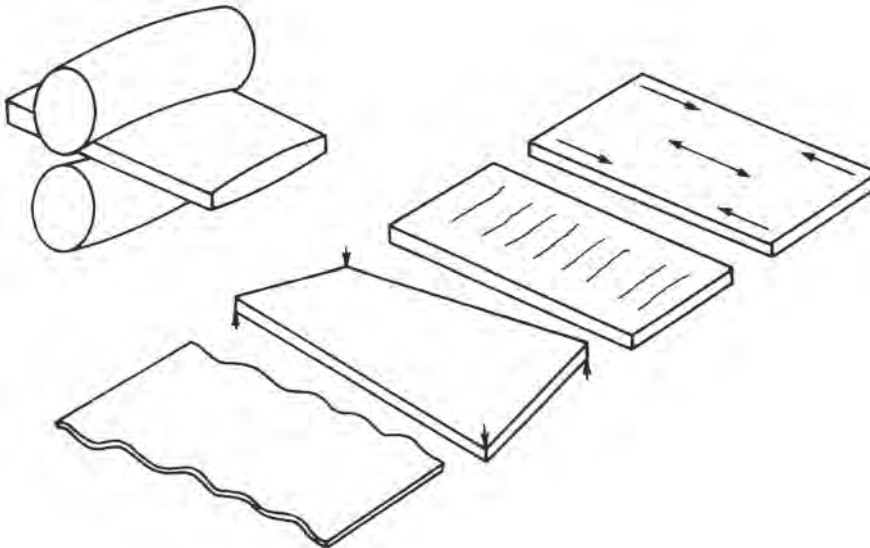
13.2.4 Προβλήματα κατά την έλαση

Προκειμένου να αντιμετωπίζεται η κάμψη των κυλίνδρων λόγω του μεγάλου βάρους τους, οι κύλινδροι διαμορφώνονται με συγκεκριμένη κύρτωση. Η κάμψη των κυλίνδρων οδηγεί σε σημαντικές διαφορές στο πάχος του παραγόμενου ελάσματος. Στο σχήμα 13.25 παρουσιάζεται η κύρτωση των κυλίνδρων και τα αποτελέσματα όσον αφορά το πάχος του ελάσματος στην έξοδο, για την περίπτωση που χρησιμοποιείται κύρτωση ή όχι.

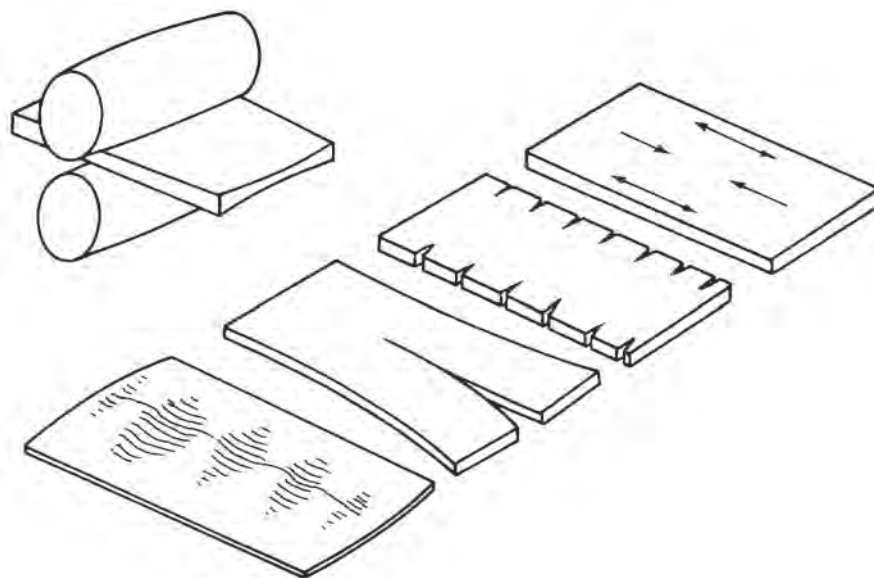
Ο βαθμός κύρτωσης εξαρτάται από το πάχος του ελάσματος που θα διαμορφωθεί, από το όριο διαρροής του υλικού και τη μείωση του πάχους του ελάσματος που πρόκειται να επιτευχθεί. Σε περίπτωση που δεν προσδιορισθεί σωστά η κύρτωση των κυλίνδρων έλασης, το έλασμα που μορφοποιείται παρουσιάζει ατέλειες, σπασίματα ή παραμορφώσεις, όπως φαίνονται στα σχήματα 13.26 και 13.27.



Σχήμα 13.25: Κύρτωση κυλίνδρων



Σχήμα 13.26: Ατέλειες στο προϊόν έλασμα από μικρότερη κύρτωση



Σχήμα 13.27: Ατέλειες στο προϊόν έλασμα από μεγαλύτερη κύρτωση

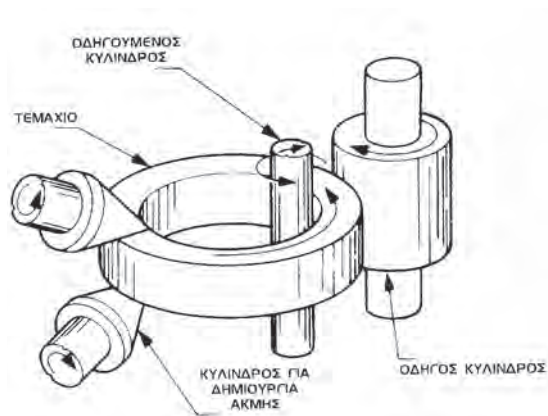
13.2.5 Ειδικές περιπτώσεις έλασης

Εκτός από τις γενικές περιπτώσεις της έλασης επίπεδου ελάσματος και της έλασης μορφής, υπάρχουν διάφοροι άλλοι ειδικοί τύποι έλασης, όπως είναι η έλαση δακτυλίου, η δημιουργία σπειρώματος με έλαση, η έλαση σωλήνων κ.λπ.. Όλοι αυτοί οι τύποι έλασης βασίζονται γενικά στην ίδια αρχή λειτουργίας, αλλά η μορφή και η γεωμετρία του τελικού προϊόντος τις διαφοροποιεί ως προς τη γενική μορφή έλασης ελάσματος. Ειδικά η έλαση σπειρώματος θα περιγραφεί σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

Έλαση δακτυλίου

Κατά την κατεργασία αυτή ένας μικρής διαμέτρου και μεγάλου πάχους δακτύλιος διαμορφώνεται σε ένα νέο δακτύλιο μεγαλύτερης διαμέτρου με μικρότερη διατομή. Αυτό επιτυγχάνεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 13.28, με την τοποθέτηση του αρχικού δακτυλίου ανάμεσα σε δύο κυλίνδρους, ο ένας εκ των οποίων είναι και ο οδηγός κύλινδρος.

Η μείωση του πάχους επιτυγχάνεται με τη συνεχή μετακίνηση του οδηγούμενου κυλίνδρου, πλησιάζοντας τον οδηγό κύλινδρο. Αυτή η μείωση του πάχους αντισταθμίζεται με την ανάλογη αύξηση της διαμέτρου του δακτυλίου. Τυπικές εφαρμογές της μεθόδου που περιγράφηκε αποτελούν η κατασκευή μεγάλων δακτυλίων για πυραύλους, τουρμπίνες, φλάντζες κ.λπ..

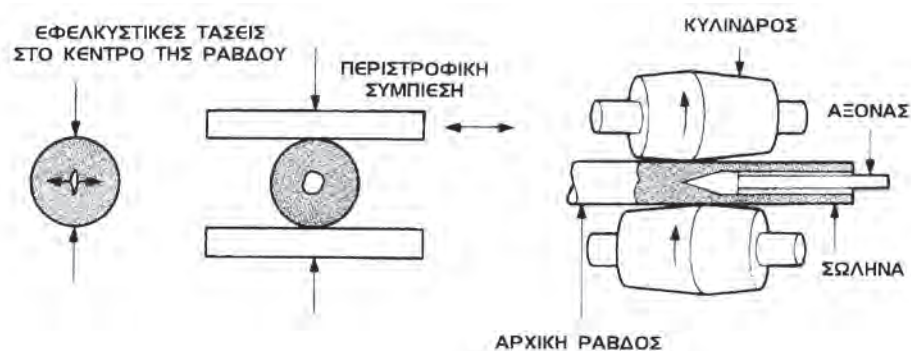


Σχήμα 13.28: Έλαση δακτυλίου

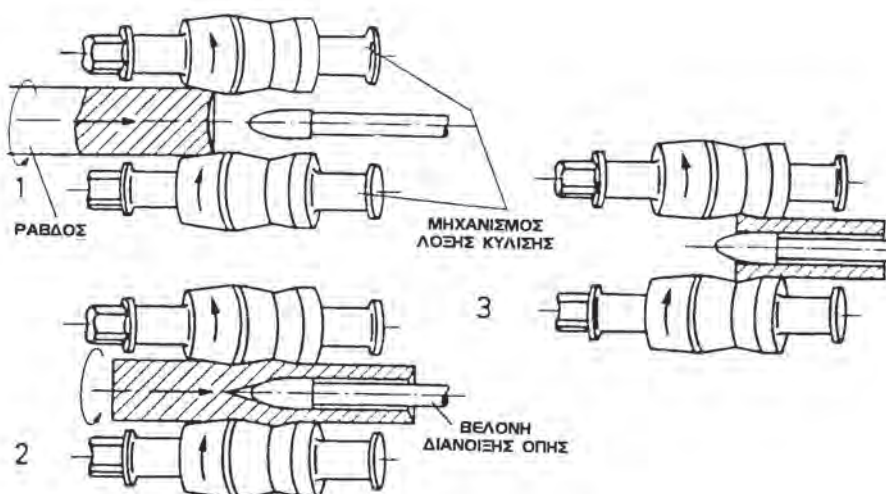
Έλαση σωλήνων

Η παραγωγή σωλήνων χωρίς ραφή μπορεί να πραγματοποιηθεί με παραμόρφωση με έλαση, όπως φαίνεται στο [σχήμα 13.29](#). Η κατεργασία αυτή, η οποία γίνεται εν θερμώ, στηρίζεται στην παρατήρηση ότι, όπως φαίνεται στο αριστερό τμήμα του σχήματος 13.29, όταν μία κυκλική διατομή υφίσταται ακτινική πίεση, τότε αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις στο κέντρο της διατομής. Αντίστοιχα, όταν μία ράβδος υφίσταται συνεχή κυκλική πίεση, τότε αρχίζει να εμφανίζεται μια κοιλότητα στο κέντρο της ράβδου. Με αυτή τη μεθοδολογία γίνεται παραγωγή σωλήνων από το 1880, μεθοδολογία που ονομάστηκε Mannesmann και αντίστοιχα πήραν το όνομά τους οι σωλήνες χωρίς ραφή. Στο δεξί τμήμα του σχήματος 13.29 φαίνεται η διαδικασία αυτή. Οι άξονες των δύο κυλίνδρων είναι λοξά ως προς τον άξονα του σωλήνα ώστε να δημιουργείται σε αυτό συνεχής πίεση μέσω της περιστροφής.

Ταυτόχρονα με την έλαση εισέρχεται ένας άξονας κατά μήκος του άξονα του σωλήνα, ώστε να διαμορφωθεί η εσωτερική κοιλότητά του, όπως φαίνεται και στο [σχήμα 13.30](#). Επειδή κατά την κατεργασία αυτή το υλικό υφίσταται ισχυρές παραμορφώσεις, είναι απαραίτητο το υλικό αυτό να είναι υψηλής ποιότητας και η αρχική ράβδος απαλλαγμένη από ατέλειες.



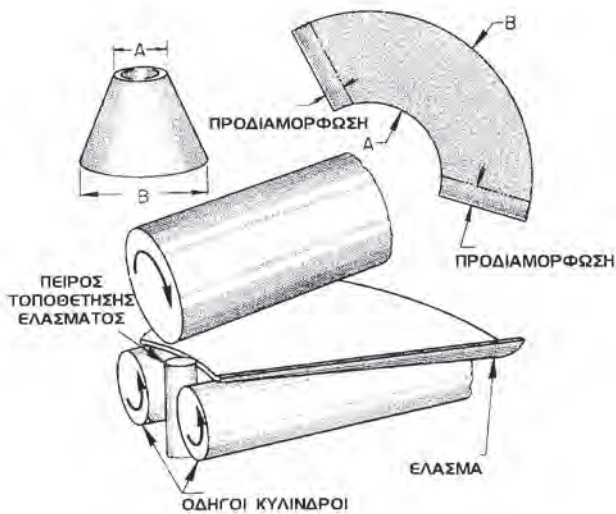
Σχήμα 13.29: Παραγωγή σωλήνων χωρίς ραφή (Mannesmann)



Σχήμα 13.30: Παραγωγή σωλήνων χωρίς ραφή (Mannesmann)

Έλαση κώνου

Η διαμόρφωση ελασμάτων σε κώνο μπορεί να πραγματοποιηθεί με παραμόρφωση με έλαση, όπως φαίνεται στο [σχήμα 13.31](#). Η διαμόρφωση αυτή έχει σημαντικές διαφορές από την αντίστοιχη διαμόρφωση κυλίνδρου. Το έλασμα στη διαμόρφωση κυλίνδρου είναι ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και η έλαση πραγματοποιείται σε κατεύθυνση κάθετη με τους κυλίνδρους. Για τη μορφοποίηση κώνου χρησιμοποιείται καμπύλο έλασμα, στο οποίο προδιαμορφώνονται τα άκρα, ενώ χρειάζεται και πείρος για τη σωστή τοποθέτηση του ελάσματος και τη διαμόρφωση των βάσεων του κώνου.



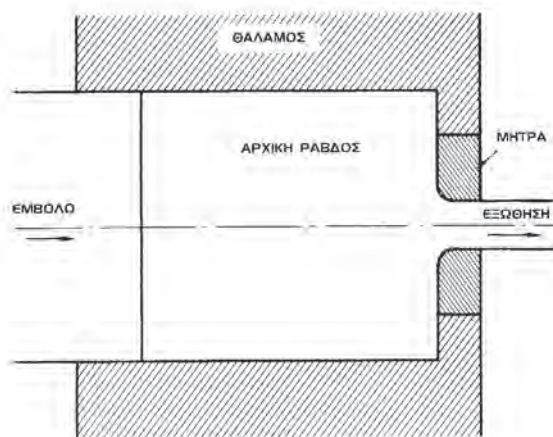
Σχήμα 13.31: Παραγωγή κώνων με έλαση

13.3 ΕΞΩΘΗΣΗ Ή ΔΙΕΛΑΣΗ

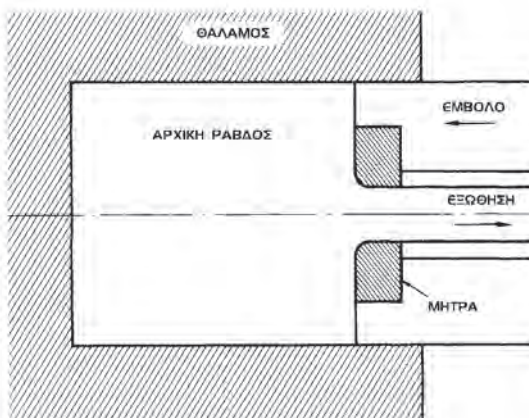
13.3.1 Γενικά

Η **εξώθηση** είναι μία τεχνική μορφοποίησης μετάλλων, η οποία χρονολογείται από το 1800, όταν άρχισε η παραγωγή σωλήνων χωρίς ραφή. Στη μέθοδο αυτή, μία συμπαγής ράβδος τοποθετείται και περιβάλλεται από ένα θάλαμο, ενώ ταυτόχρονα αναγκάζεται να κινηθεί προς το τέρμα του θαλάμου, όπου υπάρχει μήτρα με άνοιγμα μικρότερης διατομής από το οποίο και αναγκάζεται να διέλθει. Μαλακά υλικά μπορούν να παραμορφωθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ενώ σκληρότερα υλικά, που έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην παραμόρφωση, θερμαίνονται σε ανάλογη κατά περίπτωση θερμοκρασία. Η εξώθηση ως διαδικασία μορφοποίησης χρησιμοποιείται ευρέως και στα πλαστικά, όπως θα φανεί στο κεφάλαιο 15.

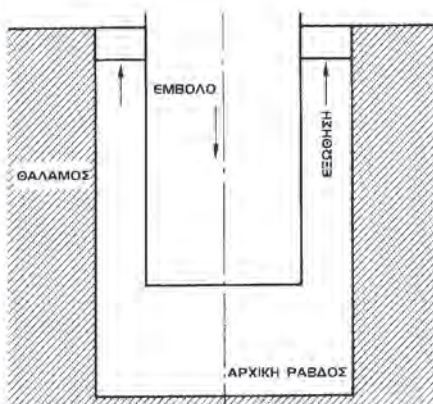
Ανάλογα με τη μέθοδο εξώθησης διακρίνονται πέντε διαφορετικά είδη εξώθησης. Στα σχήματα 13.32 έως 13.36 παρουσιάζονται αυτά τα πέντε διαφορετικά είδη.



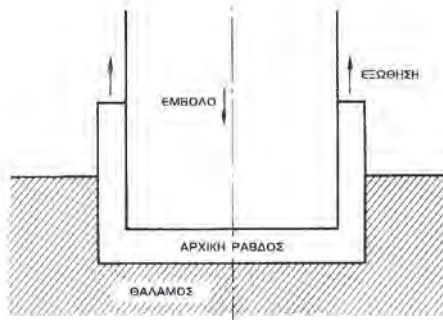
Σχήμα 13.32: Άμεση εξώθηση



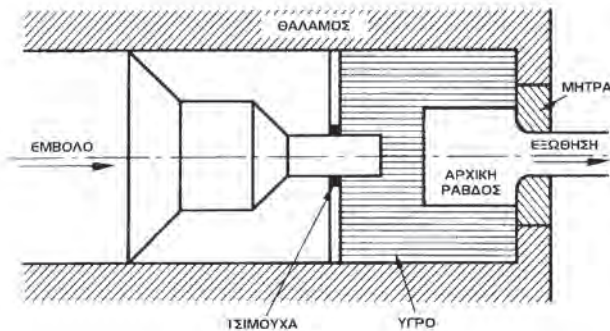
Σχήμα 13.33: Έμμεση εξώθηση



Σχήμα 13.34: Εξώθηση προς τα πίσω



Σχήμα 13.35: Εξώθηση με κρούση



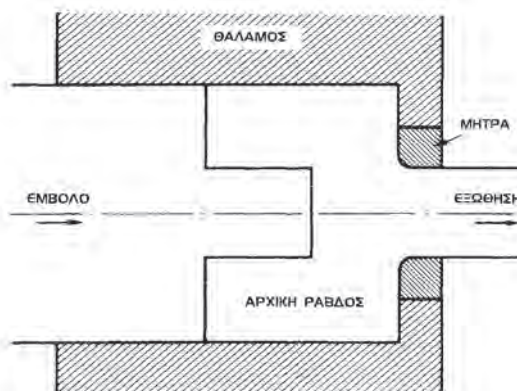
Σχήμα 13.36: Υδροστατική εξώθηση.

Αναλυτικά περιγράφονται παρακάτω οι πέντε μέθοδοι εξώθησης:

- ✓ Η **άμεση εξώθηση** είναι εκείνη η διεργασία που η ροή του μετάλλου, διαμέσου του ανοίγματος της μήτρας, γίνεται στην ίδια κατεύθυνση με την κίνηση του εμβόλου που το πιέζει. Το έμβολο σε αυτή την περίπτωση έχει διάμετρο ίδια με την τρύπα του θαλάμου στον οποίο εισάγεται το υλικό.
- ✓ Στην **έμμεση εξώθηση** το έμβολο έχει, όπως και στην άμεση εξώθηση, την ίδια διάμετρο με την τρύπα του θαλάμου, αλλά όμως είναι κοίλο, διαθέτει δηλαδή εσωτερική οπή από όπου και διέρχεται το παραμορφούμενο υλικό. Το υλικό στην περίπτωση αυτή ρέει στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης του εμβόλου.
- ✓ Στην **εξώθηση προς τα πίσω** το έμβολο είναι μικρότερης διαμέτρου από τη διάμετρο του θαλάμου, ενώ το τελικό τεμάχιο διαμορφώνεται από τη ροή του υλικού γύρω από το έμβολο. Συνήθως, στην εξώθηση προς τα πίσω η κατεργασία γίνεται εν θερμώ.

- ✓ Η **εξώθηση με κρούση** είναι παρόμοια με την προς τα πίσω εξώθηση, αλλά πραγματοποιείται με μεγαλύτερες ταχύτητες και σε πολύ μικρότερες θερμοκρασίες. Το προϊόν μετά την εξώθηση δεν απαιτεί υποστήριξη και ως εκ τούτου ο θάλαμος είναι δυνατόν να γίνεται πολύ μικρότερος.
- ✓ Στην **υδροστατική εξώθηση** τη δύναμη εξώθησης δίνει ένα ρευστό που συμπιέζεται.

Όλες οι μέθοδοι πλην της υδροστατικής εξώθησης, μπορούν να συνδυασθούν μεταξύ τους και το τελικό προϊόν να παράγεται με μία σύνθετη μέθοδο. Στο σχήμα 13.37 φαίνεται συνδυασμός εξώθησης προς τα πίσω και άμεσης εξώθησης.

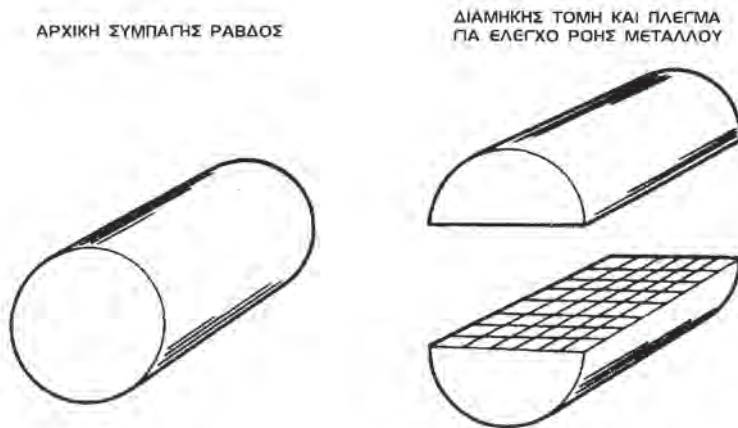


Σχήμα 13.37: Συνδυασμός άμεσης και προς τα πίσω εξώθησης

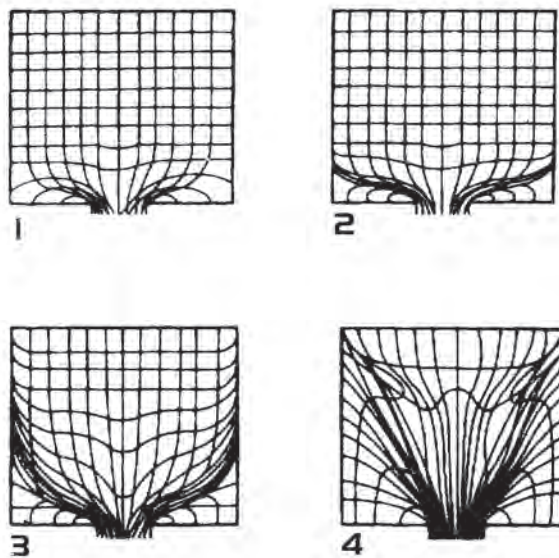
13.3.2 Ροή μετάλλου στην εξώθηση

Επειδή το αρχικό τεμάχιο αναγκάζεται να περάσει από μία μήτρα με ταυτόχρονη μείωση της διατομής του, η ροή του υλικού είναι ένας σπουδαίος παράγοντας σε όλη τη διεργασία της εξώθησης. Ένας απλός τρόπος έρευνας του τρόπου της ροής του μετάλλου είναι η κοπή του αρχικού τεμαχίου κατά μήκος και το σημάδεμα με ένα κάρναβο της μίας εκ των δύο επιφανειών της τομής, όπως φαίνεται στο σχήμα 13.38. Στη συνέχεια, τοποθετούνται και τα δύο κομμάτια στο θάλαμο και εκτελείται η εξώθηση. Το νέο πλέγμα, που δημιουργείται στο προϊόν της εξώθησης, δείχνει την πορεία της ροής του κατεργαζόμενου υλικού.

Στο σχήμα 13.39 παρουσιάζονται τέσσερα διαφορετικά πλέγματα ροής του υλικού σε μία άμεση εξώθηση.



Σχήμα 13.38: Έλεγχος ροής μετάλλου



Σχήμα 13.39: Τύποι ροής μετάλλου

Στο σχήμα 13.39 οι τέσσερις τύποι με διαφορετικά πλέγματα ροής του μετάλλου σε άμεση εξώθηση και με τετράγωνη διατομή της μήτρας οφείλονται σε διαφορετικές συνθήκες τριβής του υλικού με τη μήτρα και το θάλαμο. Έτσι παρακάτω, κατά περίπτωση του σχήματος, περιγράφονται οι συνθήκες δημιουργίας κάθε πλέγματος ροής:

- Πλέγμα ροής 1:** Είναι η πιο ομογενής ροή που μπορεί να παρουσιασθεί και δημιουργείται όταν δεν υπάρχει τριβή στα όρια ανάμεσα σε τεμάχιο - θάλαμο - μήτρα. Αυτός ο τύπος ροής υλικού παρουσιάζεται κυρίως, όταν η λίπανση είναι πολύ αποτελεσματική ή σε έμμεση εξώθηση.
- Πλέγμα ροής 2:** Παρουσιάζεται όταν δεν υπάρχει τριβή του υλικού με το θάλαμο ή υπάρχει πολύ μικρή, αλλά υπάρχει τριβή ανάμεσα στο τεμάχιο και τη μήτρα. Στην περίπτωση αυτή, κατά τη διάρκεια της εξώθησης, ένας μικρός όγκος του υλικού παραμένει στις γωνίες σε ακινησία (νεκρή ζώνη).
- Πλέγμα ροής 3:** Παρουσιάζεται όταν υπάρχει έντονη τριβή του υλικού σε όλες τις επιφάνειες με το θάλαμο και τη μήτρα. Στην περίπτωση αυτή, κατά την διάρκεια της εξώθησης, δημιουργείται μία ζώνη υψηλής διάτμησης που μοιάζει με χοάνη. Αντίστοιχα, η νεκρή ζώνη παρουσιάζεται ιδιαίτερα αυξημένη.
- Πλέγμα ροής 4:** Η περίπτωση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερα ανομοιογενή ροή. Η ζώνη διάτμησης μεταφέρεται αρκετά προς τα πίσω λόγω έντονης τριβής του υλικού με το θάλαμο και αντίστοιχα καθυστέρηση της ροής κοντά σε αυτές τις περιοχές μεγάλης τριβής. Το υλικό κοντά στο κέντρο του τεμαχίου κινείται ευκολότερα και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας μεγάλης νεκρής ζώνης.

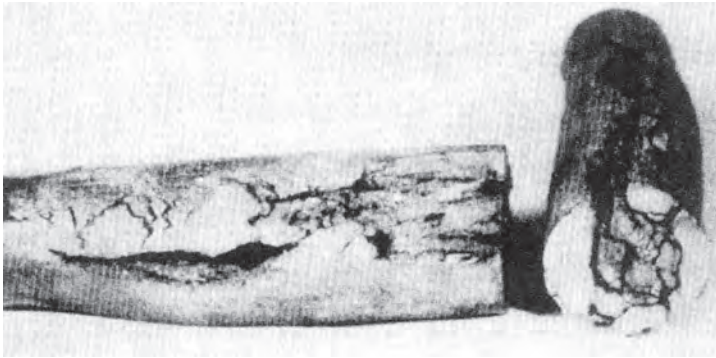
13.3.3 Προβλήματα στην εξώθηση

Οι ατέλειες που μπορούν να παρουσιαστούν κατά τη διάρκεια της διεργασίας της εξώθησης είναι κυρίως τριών ειδών: επιφανειακές θραύσεις, εσωτερικές θραύσεις και σφάλματα αναρρόφησης υλικού.

Επιφανειακές θραύσεις

Σε περίπτωση που η θερμοκρασία εξώθησης, η τριβή ή η ταχύτητα εξώθησης του τεμαχίου είναι αρκετά μεγάλες, η επιφανειακή θερμοκρασία αυξάνεται σημαντικά και μπορεί να οδηγήσει σε θραύσεις της επιφάνειας του τεμαχίου. Το γεγονός αυτό συμβαίνει κυρίως σε κράματα αλουμινίου, μαγνησίου και ψευδαργύρου, αλλά και σε κράματα άλλων μετάλλων, όπως του μολυβδαίνιου.

Στο σχήμα 13.40 παρουσιάζεται μια ράβδος από κράμα Μολυβδαίνιου, το οποίο υπέστη κατεργασία εξώθησης σε θερμοκρασία 2200 °C. Οι επιφανειακές θραύσεις μπορούν να αποφευχθούν με χρησιμοποίηση μικρότερων θερμοκρασιών και ταχυτήτων κατά την εξώθηση.

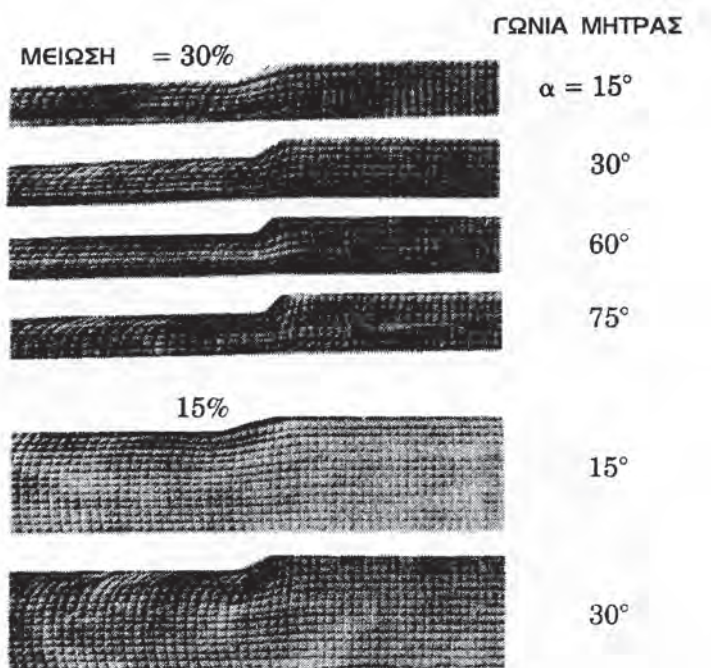


Σχήμα 13.40: Επιφανειακές θραύσεις κατά την εξώθηση

Εσωτερικές θραύσεις

Το κέντρο σε προϊόντα εξώθησης αναπτύσσει πολλές φορές ρωγμές που οδηγούν σε θραύσεις. Αυτές οι θραύσεις είναι χαρακτηριστικές στην κατάσταση της υδροστατικής εφελκυστικής τάσης στην κεντρική γραμμή της ζώνης παραμόρφωσης. Μελέτες έχουν αποδείξει πως οι πιο σημαντικές παράμετροι, που επηρεάζουν την παρουσία εσωτερικών θραύσεων, είναι η γωνία της μήτρας, ο βαθμός εξώθησης, που αντιπροσωπεύει τη μείωση της διατομής του κατεργαζόμενου τεμαχίου, και η τριβή.

Στο σχήμα 13.41 παρουσιάζονται διάφορα είδη παραμόρφωσης μίας ράβδου από εξώθηση με διάφορες γωνίες μήτρας και βαθμό εξώθησης. Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα δείχνουν πως, για την ίδια μείωση της διατομής, μεγαλύτερη γωνία μήτρας οδηγεί σε περισσότερο ανομοιογενή παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



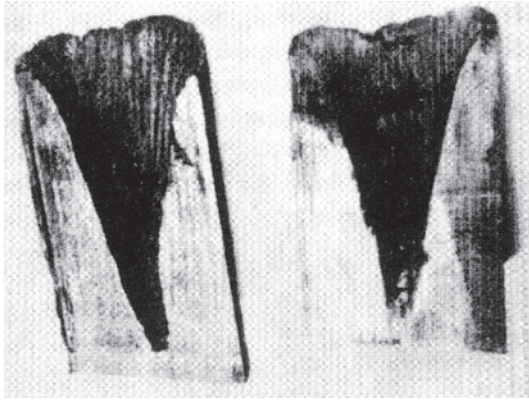
Σχήμα 13.41: Επίδραση της γωνίας της μήτρας στην παραμόρφωση κατά την εξώθηση

Εκτός από τη γωνία της μήτρας επιδρά στην παρουσία εσωτερικών ρωγμών και το μήκος επαφής του τεμαχίου με τη μήτρα.

Σφάλματα αναρρόφησης υλικού

Όπως περιγράφηκε στο σχήμα 13.39, υπάρχει περίπτωση, σε συνθήκες έντονης τριβής του τεμαχίου με το θάλαμο, καθώς και κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, να παρουσιασθεί το φαινόμενο που το υλικό του τεμαχίου να παραμορφώνεται με πολύ διαφορετική ταχύτητα από την επιφάνεια στο κέντρο. Ταυτόχρονα, δημιουργείται μία κίνηση τύπου χοάνης που παρασύρει οξείδια και ακαθαρσίες από την επιφάνεια του τεμαχίου στο κεντρικό του τμήμα, με συνέπεια ατέλειες του παραγόμενου προϊόντος. Στο [σχήμα 13.42](#) παρουσιάζεται ένα τέτοιο σφάλμα από αναρρόφηση υλικού.

Προκειμένου να αποφεύγονται σφάλματα από αναρρόφηση υλικού, πρέπει να γίνεται προσπάθεια ομογενοποίησης της παραμόρφωσης του υλικού με έλεγχο της τριβής και ελαχιστοποίηση της θερμοκρασίας κατεργασίας.



Σχήμα 13.42: Σφάλματα εξώθησης λόγω αναρρόφησης υλικού



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 13ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Οι Μηχανικές διαμορφώσεις συμπαγούς υλικού είναι η σφυρηλασία, η έλαση και η εξώθηση.
- Η σφυρηλασία είναι από τις πιο παλιές κατεργασίες διαμόρφωσης και χρησιμοποιείται ευρέως για παραγωγή ή διαμόρφωση διαφόρων εξαρτημάτων. Η σφυρηλασία μπορεί να εκτελεσθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οπότε καλείται ψυχρή σφυρηλασία, είτε σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οπότε λέγεται θερμή σφυρηλασία. Η πιο απλή μορφή σφυρηλασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με μία βαριά, σφύρα και αμόνι, τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για αιώνες από τους σιδηρουργούς. Σήμερα συνήθως χρησιμοποιείται κατάλληλη πρέσα και μήτρα για τη σφυρηλασία.
- Η σφυρηλασία σε πρέσες γίνεται είτε σε ανοικτές είτε σε κλειστές μήτρες. Ο σχεδιασμός των μητρών σφυρηλάτησης απαιτεί πολύ καλή γνώση της αντοχής και ολκιμότητας του υλικού που θα διαμορφωθεί, της συμπεριφοράς του στις υψηλές θερμοκρασίες και τα χαρακτηριστικά τριβής του. Επειδή οι μήτρες σφυρηλασίας, ειδικά οι μεγάλου μεγέθους, εργάζονται κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, οι γενικές απαιτήσεις από το υλικό τους είναι: διατήρηση της αντοχής και σκληρότητας κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, αντοχή στις μηχανικές και θερμικές στιγμιαίες καταπονήσεις και αντοχή σε φθορά (ιδιαίτερα με απόξεση).

- Η έλαση είναι μία κατεργασία διαμόρφωσης, η οποία έχει ως σκοπό τη μείωση του πάχους ή την αλλαγή της διατομής ενός τεμαχίου. Αυτό επιτυγχάνεται, στη γενική περίπτωση, μέσω της αναγκαστικής διέλευσης του τεμαχίου ανάμεσα σε δύο περιστρεφόμενους κυλίνδρους. Η έλαση πραγματοποιείται σε ειδικές εργαλειομηχανές που ονομάζονται έλαστρα. Τα έλαστρα χαρακτηρίζονται ανάλογα με τον αριθμό των κυλίνδρων (απλά, τριέλαστρα, τετραέλαστρα, κ.λπ.).
- Στην εξώθηση μία συμπαγής ράβδος τοποθετείται και περιβάλλεται από ένα θάλαμο, ενώ ταυτόχρονα αναγκάζεται να κινηθεί προς το τέρμα του θαλάμου, όπου υπάρχει μήτρα με άνοιγμα μικρότερης διατομής από το οποίο και αναγκάζεται να διέλθει. Με τη μέθοδο αυτή διαμορφώνονται μαλακά υλικά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ενώ σκληρότερα υλικά, που έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην παραμόρφωση, θερμαίνονται σε ανάλογη κατά περίπτωση θερμοκρασία.
- Τα είδη της εξώθησης είναι: η άμεση εξώθηση, η έμμεση εξώθηση, η εξώθηση προς τα πίσω, η εξώθηση με κρούση και η υδροστατική εξώθηση.
- Οι ατέλειες που μπορούν να παρουσιαστούν κατά τη διάρκεια της διεργασίας της εξώθησης είναι κυρίως τριών ειδών: επιφανειακές θραύσεις, εσωτερικές θραύσεις και σφάλματα αναρρόφησης υλικού.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

- 14.1 Απότμηση
- 14.2 Βαθεία κοίλανση
- 14.3 Κάμψη
- 14.4 Περιώθηση



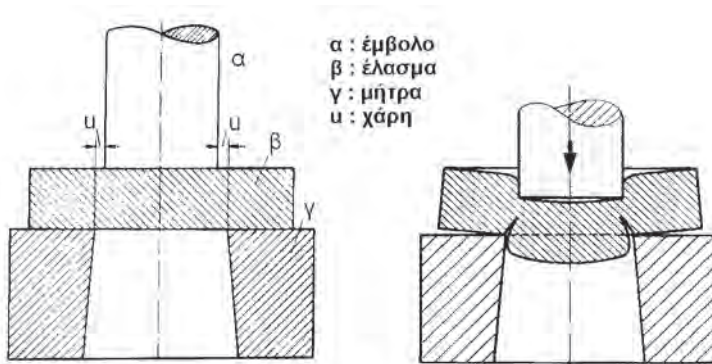
Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να γνωρίσετε πώς γίνεται η κατεργασία της απότμησης και ποια είναι τα στάδια με τα οποία εξελίσσεται.
- ☒ Να υπολογίζετε το σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης που αντιστοιχεί στη θέση που δένεται το έμβολο στην πρέσα.
- ☒ Να γνωρίσετε τι είναι και πώς πραγματοποιείται η βαθεία κοίλανση.
- ☒ Να προσδιορίζετε το απαιτούμενο έλασμα για τη διαμόρφωση ενός αντικειμένου με βαθεία κοίλανση.
- ☒ Να γνωρίσετε τα είδη της κάμψης των ελασμάτων και τις εργαλειο-μηχανές που την πραγματοποιούν.
- ☒ Να γνωρίσετε τι είναι και πώς πραγματοποιείται η περιώθηση.

14.1 ΑΠΟΤΜΗΣΗ

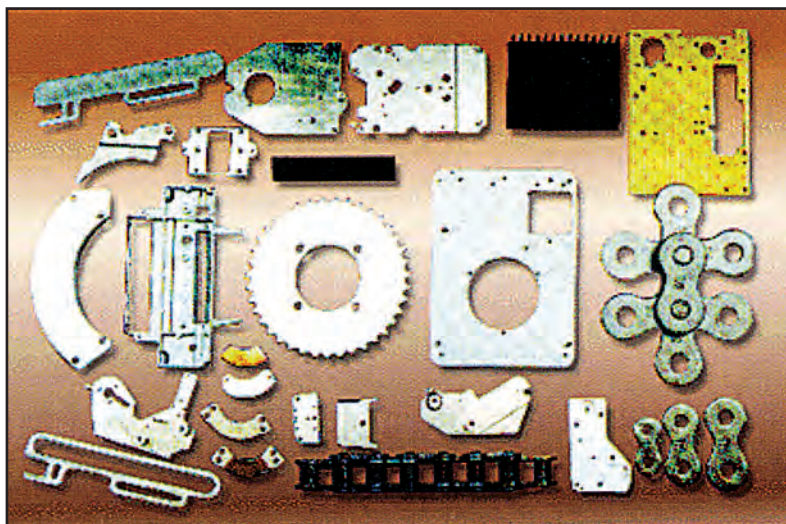
14.1.1 Γενικά

Η **απότμηση** είναι η κατεργασία διαμόρφωσης κατά την οποία αποχωρίζεται μέρος από το υλικό ενός ελάσματος μέσω ενός κατάλληλου εργαλείου. Το κοπτικό εργαλείο, το οποίο κάνει την απότμηση, είναι δεμένο σε μία πρέσα έκκεντρου ή σπανιότερα σε υδραυλική πρέσα και μέσω αυτής κινείται και συγκρούεται με το έλασμα, κόβοντας από αυτό κομμάτι συγκεκριμένης μορφής. Στο σχήμα 14.1 φαίνεται ένα εργαλείο απότμησης, το οποίο ονομάζεται και **έμβολο** (α), το έλασμα (β) που είναι το **κατεργαζόμενο τεμάχιο** και η ακίνητη **μήτρα** (γ) στην οποία πιέζεται το έλασμα. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται το διάκενο ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα που ονομάζεται **χάρη** (υ).



Σχήμα 14.1: Απότμηση

Η απότμηση ως κατεργασία διαμόρφωσης δεν παράγει απόβλιπτο (γρέζι), ενώ το τελικό προϊόν μπορεί να είναι είτε το διάτρητο έλασμα είτε τα κομμάτια που κόβονται. Στο σχήμα 14.2 φαίνονται εξαρτήματα που έχουν παραχθεί με τη διαδικασία της απότμησης.



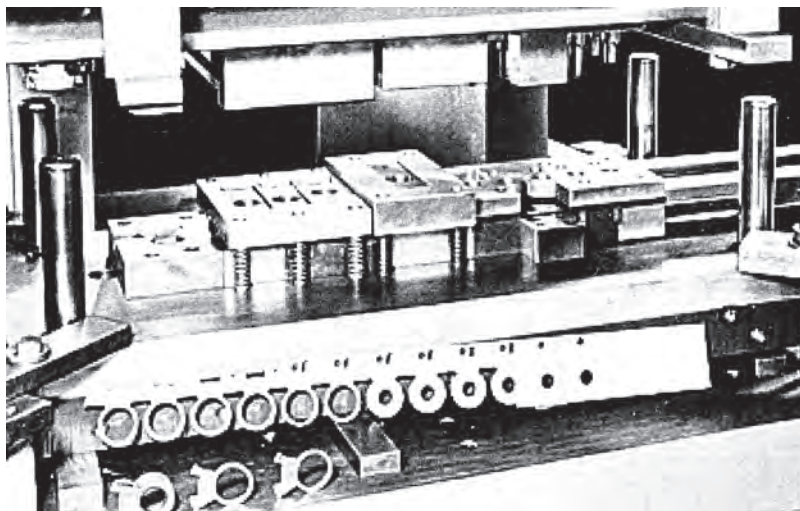
Σχήμα 14.2: Τεμάχια που έχουν παραχθεί με απότμηση

Η κατεργασία αυτή μοιάζει με τη χρήση του ζουμπά για να ανοίγονται τρύπες με το χέρι (κυκλικές, ορθογωνικές, τριγωνικές και άλλες) σε λεπτά ελάσματα, σε δέρμα, χαρτί και άλλα υλικά. Το έμβολο της απότμησης μπορεί να είναι κοίλο εσωτερικά, όπως είναι ο κοίλος ζουμπάς ή σγρόπια. Στην καθημερινή πράξη, η απότμηση ως διαδικασία εμφανίζεται σε πολλές μορ-

φές στην κουζίνα της νοικοκυράς. Απότμηση γίνεται, όταν οι νοικοκυρές χρησιμοποιούν φόρμες διαφόρων σχημάτων (αστέρια, τετράγωνα, κ.λπ.), για να κόψουν κομμάτια από ζύμη και να φτιάξουν μπισκότα. Απότμηση επίσης γίνεται, όταν με ειδικό εργαλείο οι νοικοκυρές κόβουν κομμάτια από τυρί, ψωμί, σαλάμι κ.λπ, για να φτιάξουν καναπεδάκια.

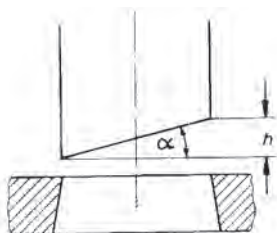
14.1.2 Η διαδικασία της απότμησης

Στην απότμηση το έμβολο και η μήτρα μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα, ανάλογα με την απότμηση που πρόκειται να γίνει. Μπορούν να έχουν διατομή κυκλική ή οποιουδήποτε άλλου κλειστού σχήματος. Στο σχήμα 14.3 φαίνεται μια μήτρα απότμησης με έμβολα διαφόρων διατομών και το αντίστοιχο τεμάχιο που προκύπτει από την κατεργασία.



Σχήμα 14.3: Μήτρα, έμβολα και τεμάχιο στην απότμηση

Το έμβολο, που κάνει την απότμηση, δεν είναι απαραίτητο να έχει την επιφάνεια πίεσης κάθετα προς τον άξονά του, όπως φαίνεται στο σχήμα 14.4. Σε αυτή την περίπτωση, η γωνία κλίσης α δεν πρέπει να ξεπερνά τις 5° , ενώ το ύψος h πρέπει να είναι από 0,6 έως 0,9 του πάχους του ελάσματος που πρόκειται να κοπεί. Αντίστοιχα, μπορεί και η μήτρα να έχει ειδική διαμόρφωση ή επιφάνεια πίεσης με κλίση.



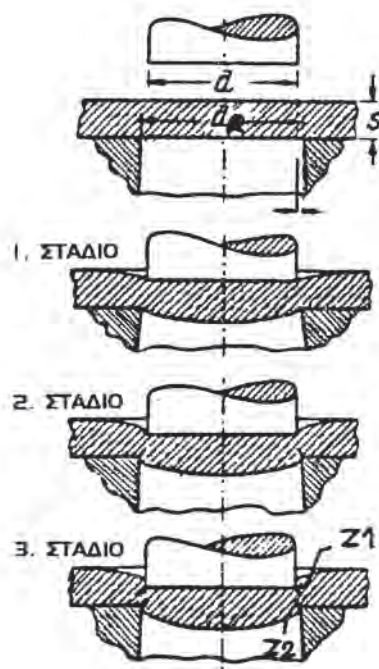
Σχήμα 14.4: Έμβολο με επιφάνεια πίεσης υπό κλίση

Η διαδικασία της απότμησης ακολουθεί τρία στάδια, τα οποία είναι:

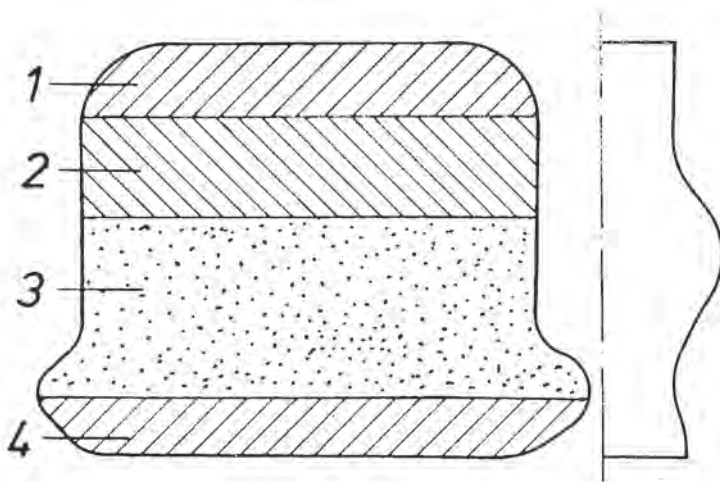
- 1ο στάδιο:** το έλασμα συμπιέζεται ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα. Οι κόψεις του εμβόλου και της μήτρας διεισδύουν ελαφρά μέσα στο υλικό. Εδώ η συμπίεση του υλικού είναι ακόμα ελαστική και αν η διαδικασία σταματήσει το έλασμα επανέρχεται στην αρχική του μορφή.
- 2ο στάδιο:** το έμβολο εισέρχεται αρκετά στο υλικό, ενώ η μήτρα εισέρχεται λιγότερο. Στη φάση αυτή το έλασμα έχει πλέον παραμορφωθεί πλαστικά, μέσω της διάτμησης, που πραγματοποιείται από το έμβολο και τη μήτρα.
- 3ο στάδιο:** εμφανίζονται μία ή δύο ρωγμές πάνω και κάτω στο έλασμα. Οι ρωγμές αυτές όσο συνεχίζεται η κατεργασία, δηλαδή το έμβολο συνεχίζει να κατεβαίνει, επεκτείνονται μέχρι τη συνάντησή τους, οπότε γίνεται και η τελική απότμηση του τεμαχίου από το έλασμα.

Στο σχήμα 14.5 που ακολουθεί φαίνονται τα τρία αυτά στάδια της απότμησης.

Η μορφή της επιφάνειας που προκύπτει μετά την απότμηση έχει άμεση σχέση με τα στάδια της διαδικασίας, που περιγράψαμε παραπάνω. Στο σχήμα 14.6 φαίνονται οι τέσσερις ζώνες στις οποίες διακρίνεται η επιφάνεια αποχωρισμού του τεμαχίου. Οι ζώνες αυτές που παρουσιάζουν χαρακτηριστική μορφή είναι:



Σχήμα 14.5: Στάδια απότμησης



Σχήμα 14.6: Ζώνες επιφάνειας απότμησης

1η - 4η ζώνη: προκύπτει από την ελαστική συμπίεση του υλικού στο 1ο στάδιο της κατεργασίας και από την ελαφρά πλάγια εκτό-

πισή του κατά την είσοδο του εμβόλου και την αντίσταση της μήτρας. Στη ζώνη αυτή τα άκρα είναι στρογγυλεμένα.

2η ζώνη: πρόκειται για λεία και γυαλιστερή περιοχή, η οποία έχει προέλθει από την πλαστική διάτμηση που έχει υποστεί το υλικό κατά την διείσδυση του εμβόλου στο 2ο στάδιο της κατεργασίας.

3η ζώνη: προκύπτει από τη θραύση του υλικού στο 3ο στάδιο της κατεργασίας. Στη ζώνη αυτή η επιφάνεια είναι πιο άγρια, ενώ συνοδεύεται πάντα και από μία χαρακτηριστική προεξοχή που προέκυψε από τη θραύση.

14.1.3 Δυνάμεις στην απότμηση

Η ταχύτητα με την οποία εκτελείται η κατεργασία της απότμησης είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιφάνεια που προκύπτει, αλλά και για την απαιτούμενη δύναμη για την απότμηση. Η αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη αύξηση του ορίου διαρροής του παραμορφούμενου υλικού και κατά συνέπεια την ενίσχυση της αντοχής του, δηλαδή τελικά την αύξηση της αντίστασής του στην παραμόρφωση. Έτσι, η απαιτούμενη δύναμη σε μια τέτοια περίπτωση, άρα και η ισχύς της εργαλειομηχανής που θα την εξασκήσει, είναι μεγαλύτερη, η επιφάνεια όμως που προκύπτει παρουσιάζεται καλύτερη. Οι δυνάμεις που εμφανίζονται στην απότμηση κατανέμονται σε όλη την επιφάνεια του εμβόλου και έτσι η μέση δύναμη της απότμησης μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση (14.1). Στη σχέση αυτή το άθροισμα $L_1 + L_2 + \dots + L_N$ είναι η περίμετρος του κομματιού που πρόκειται να κοπεί.

$$F_a = s \cdot \tau_a (L_1 + L_2 + \dots + L_N) \quad (14.1)$$

όπου: F_a : η μέση δύναμη απότμησης [kp].

τ_a : η αντοχή απότμησης [kp/mm²]. Αυτή υπολογίζεται από το όριο θραύσεως σε εφελκυσμό σ_B του υλικού, μέσω του πίνακα Π.14.1 από τη σχέση διαμέτρου εμβόλου d και πάχους ελάσματος s .

N : το πλήθος των τμημάτων της περιμέτρου απότμησης.

L_i : τα μήκη των N τμημάτων της περιμέτρου [mm].

s : το πάχος του ελάσματος [mm].

Πίνακας Π.14.1: Σχέσεις υπολογισμού αντοχής απότμησης

d/s	Αντοχή απότμησης τ_a	
d/s > 2	$\tau_a = (0.7 \text{ έως } 0.9) \cdot \sigma_B$	
d/s < 2	$d = (1.5 \text{ έως } 2.0) \cdot s$ $d = (1.0 \text{ έως } 1.5) \cdot s$ $d = (0.7 \text{ έως } 1.0) \cdot s$	$\tau_a \approx 1.25 \cdot (0.7 \text{ έως } 0.9) \cdot \sigma_B$ $\tau_a \approx 1.90 \cdot (0.7 \text{ έως } 0.9) \cdot \sigma_B$ $\tau_a \approx 2.50 \cdot (0.7 \text{ έως } 0.9) \cdot \sigma_B$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Να υπολογισθεί η δύναμη απότμησης που χρειάζεται, για να κοπεί από μία λαμαρίνα πάχους 3 mm από χάλυβα St1303 με όριο θραύσης $\sigma_B=270 \text{ N/mm}^2$ ένα τεμάχιο κυκλικής διατομής με ακτίνα $R=30 \text{ mm}$.

Λύση

Σύμφωνα με τον τύπο 14.1 η δύναμη που απαιτείται για την απότμηση είναι:

$$F = s \cdot \tau_a \cdot \Pi, \text{ όπου } \Pi \text{ η περίμετρος του κομματιού που θα κοπεί.}$$

Το τεμάχιο που θα κοπεί έχει κυκλική μορφή, άρα η περίμετρος του Π είναι ίση με $2\pi R$, όπου R η ακτίνα του τεμαχίου.

Έτσι:

$$\Pi = 2 \cdot 3,14 \cdot 30 = 188,4 \text{ mm.}$$

Το έλασμα, όπως δίδεται στην άσκηση, έχει πάχος 3 mm. Αυτό που μένει να προσδιορισθεί είναι η αντοχή σε απότμηση του υλικού που θα υπολογισθεί από τον Πίνακα Π.14.1. Επειδή $d/s = 30/3 = 10$ δηλαδή μεγαλύτερο από το 2, τότε για τ_a παίρνουμε περίπου το 0,8 του σ_B .

Έτσι,

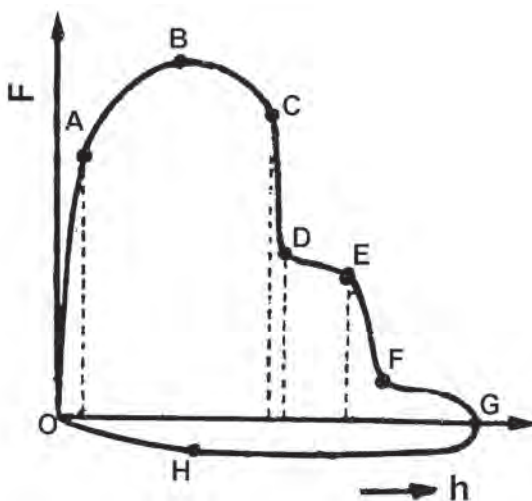
$$\tau_a = 0,8 \cdot 270 \text{ N/mm}^2 = 216 \text{ N/mm}^2.$$

Τελικά, αντικαθιστώντας στον αρχικό τύπο 14.1, έχουμε για τη δύναμη απότμησης:

$$F = s \cdot \tau_a \cdot \Pi \Rightarrow F = 3 \cdot 216 \cdot 188,4 \text{ N} \Rightarrow \mathbf{F = 122083 \text{ N}} \text{ ή περίπου } \mathbf{F = 122 \text{ kN}}$$

14.1.4 Ο κύκλος της απότμησης

Η δύναμη της απότμησης, σε συνάρτηση με τη μετατόπιση του εμβόλου, παρουσιάζεται ως διάγραμμα στο σχήμα 14.7. Οι επιμέρους περιοχές του διαγράμματος αντιστοιχούν σε διαφορετικές φάσεις της κατεργασίας, ενώ η αρνητική περιοχή της δύναμης, κάτω από τον άξονα h , αντιπροσωπεύει την επιστροφή του εμβόλου.



Σχήμα 14.7: Κύκλος απότμησης

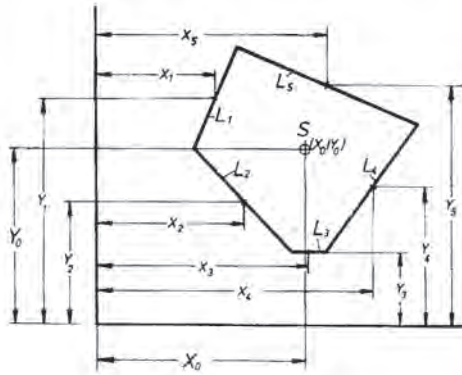
Όπως φαίνεται στο σχήμα 14.7, ο κύκλος της απότμησης διακρίνεται βασικά σε δύο περιοχές σε σχέση με τη διαδρομή του εμβόλου. Έτσι, φαίνονται η ενεργός και η νεκρά διαδρομή του εμβόλου, που αντιστοιχούν σε θετική ή αρνητική δύναμη απότμησης. Η θέση **A** στο διάγραμμα αντιστοιχεί στο τέλος της ελαστικής παραμόρφωσης, δηλαδή στο τέλος του 1ου σταδίου και στην αρχή της πλαστικής παραμόρφωσης με συνεχή μείωση της επιφάνειας απότμησης, ενώ η θέση **B** στο διάγραμμα αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη τιμή της δύναμης απότμησης. Στην περιοχή ανάμεσα στις θέσεις **C** και **D** αναπτύσσονται ρωγμές στο κατεργαζόμενο υλικό, χωρίς πλέον αυτό να υφίσταται σημαντική πλαστική παραμόρφωση, ενώ μετά τη θέση **D** αναπτύσσεται ισχυρή τριβή ανάμεσα στο έμβολο, τη μήτρα και το τεμάχιο. Η πλήρης απότμηση του τεμαχίου επιτυγχάνεται στην θέση **F**, ενώ στη συνέχεια για την επιστροφή του εμβόλου απαιτείται νέα δύναμη για την έξοδό του από το έλασμα.

14.1.5 Σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης

Για να επιτυγχάνουμε ομοιόμορφη καταπόνηση του εμβόλου στην απότμηση, πρέπει αυτό να δένεται πάνω στο κέντρο βάρους των γραμμών

(γραμμικό κέντρο βάρους) του περιγράμματος που πρόκειται να κόψει. Όταν το κομμάτι που κόβεται δεν έχει συμμετρική μορφή, που τότε είναι γνωστό το κέντρο βάρους του, είναι απαραίτητο να προσδιορισθεί η θέση που θα δεθεί το έμβολο της απότμησης και που θα είναι το σημείο εφαρμογής της συνισταμένης δύναμης απότμησης.

Ο λόγος που πρέπει να γίνει αυτό είναι, διότι πρέπει να αποφύγουμε το έμβολο να δεθεί ασύμμετρα ως προς την επιφάνεια που θα κόψει, γιατί τότε το έμβολο θα καταπονείται ανομοιόμορφα και θα σπάσει ή θα φθαρεί πολύ γρήγορα. Στο σχήμα 14.8 παρουσιάζεται ο αναλυτικός τρόπος προσδιορισμού του σημείου εφαρμογής της δύναμης, το οποίο ταυτίζεται με το κέντρο βάρους της περιμέτρου του σχήματος.



Σχήμα 14.8: Υπολογισμός σημείου εφαρμογής δύναμης απότμησης

Για τη γενική περίπτωση του σχήματος 14.8, το κέντρο βάρους του σχήματος, άρα και το σημείο εφαρμογής της δύναμης, προκύπτει από τις σχέσεις:

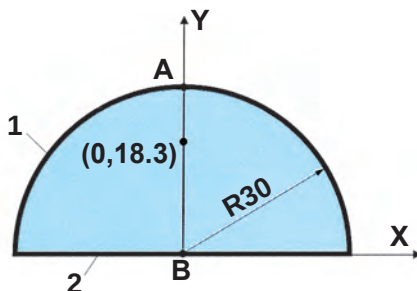
$$x_0 = \frac{L_1 \cdot x_1 + L_2 \cdot x_2 + L_3 \cdot x_3 + L_4 \cdot x_4 + L_5 \cdot x_5}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5} \quad (14.2)$$

$$y_0 = \frac{L_1 \cdot y_1 + L_2 \cdot y_2 + L_3 \cdot y_3 + L_4 \cdot y_4 + L_5 \cdot y_5}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5}$$

όπου L_i : τα μήκη των επιμέρους τμημάτων,
 x_i : οι Χ συντεταγμένες των μέσων των τμημάτων,
 y_i : οι Υ συντεταγμένες των μέσων των τμημάτων,
 i : τα επιμέρους τμήματα που αποτελούν το σχήμα,
 $S(x_0, y_0)$: το σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης.

□ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Ζητείται το σημείο στο οποίο πρέπει να δεθεί το έμβολο απότμησης για να κοπεί το παρακάτω σχήμα από μια λαμαρίνα.



Σχήμα 14.9: Εφαρμογή

Λύση

Επειδή το σχήμα δεν είναι συμμετρικό ως προς όλους τους άξονες, ώστε να δεθεί το έμβολο στο κέντρο του, πρέπει να προσδιορισθεί το γραμμικό κέντρο βάρους του σχήματος. Έτσι, διαλέγω ένα σύστημα συντεταγμένων X-Y, έστω στο κέντρο του τόξου, δηλαδή στο σημείο B.

Το σχήμα αποτελείται από ένα τόξο (1) που είναι ημικύκλιο και ένα ευθύγραμμο τμήμα (2). Πρέπει να υπολογισθούν τα μήκη του τόξου και του ευθύγραμμου τμήματος, καθώς και οι συντεταγμένες X και Y των μέσων τους.

Τόξο (1)

Το μήκος του είναι ίσο με το μισό του μήκους όλης της περιφέρειας γιατί είναι ημικύκλιο.

Έτσι $L_1 = \pi \cdot R = 3,14 \cdot 30 \text{ mm}$. Άρα $L_1 = 94,2 \text{ mm}$.

Το μέσο του τόξου είναι το σημείο A και έχει συντεταγμένες:

$$X_1 = 0 \text{ και } Y_1 = 30.$$

Ευθύγραμμο τμήμα (2)

Το μήκος του είναι ίσο με 60 mm επειδή είναι η διάμετρος του ημικυκλίου, έτσι $L_2 = 60 \text{ mm}$.

Το μέσο του ευθύγραμμου τμήματος είναι το σημείο B και έχει συντεταγμένες:

$$X_2 = 0 \text{ και } Y_2 = 0.$$

Έτσι, γνωρίζοντας τα μήκη και τα κέντρα των γραμμών του περιγράμ-

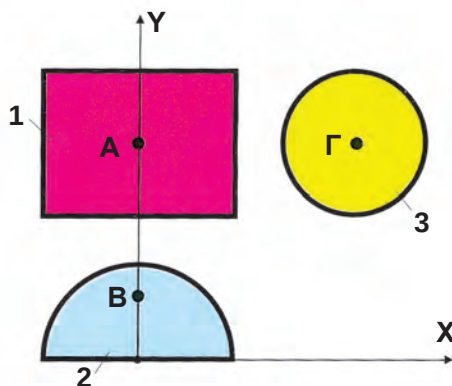
ματος του κομματιού που πρόκειται να κοπεί, αντικαθιστούμε στους τύπους (14.2) και βρίσκουμε το γραμμικό κέντρο βάρους του σχήματος που είναι και το σημείο από το οποίο πρέπει να περνά ο άξονας του εμβόλου που θα κάνει την απότμηση.

$$x_0 = \frac{L_1 \cdot x_1 + L_2 \cdot x_2}{L_1 + L_2} = \frac{94,2 \cdot (0) + 60 \cdot 0}{94,2 + 60} = \frac{0}{154,2} = 0$$

$$y_0 = \frac{L_1 \cdot y_1 + L_2 \cdot y_2}{L_1 + L_2} = \frac{94,2 \cdot 30 + 60 \cdot 0}{94,2 + 60} = \frac{2826}{154,2} = 18,3 \text{ mm}$$

Το κέντρο βάρους λοιπόν είναι πάνω στον άξονα Υ στο σημείο (0 , 18,3). Από εκεί πρέπει να περνά ο άξονας του εμβόλου που θα κάνει την απότμηση.

Στην περίπτωση που το έμβολο της απότμησης πρέπει να κόψει παραπάνω από ένα κλειστά σχήματα την ίδια στιγμή, η μέθοδος υπολογισμού του σημείου εφαρμογής της δύναμης απότμησης, δηλαδή της θέσης που θα δεθεί το έμβολο στην πρέσα, αλλάζει. Στην περίπτωση αυτή ισχύουν αντίστοιχοι τύποι με τις σχέσεις 14.2, αλλά στη θέση των συντεταγμένων των μέσων τοποθετούνται οι συντεταγμένες των κέντρων βάρους κάθε σχήματος, ενώ στη θέση των μηκών των τμημάτων L τοποθετούνται οι περίμετροι U κάθε σχήματος. Στο σχήμα 14.10 παρουσιάζεται ο αναλυτικός τρόπος προσδιορισμού του σημείου εφαρμογής της δύναμης για την περίπτωση ταυτόχρονης κοπής τριών σχημάτων.



Σχήμα 14.10: Ταυτόχρονη κοπή πολλών σχημάτων

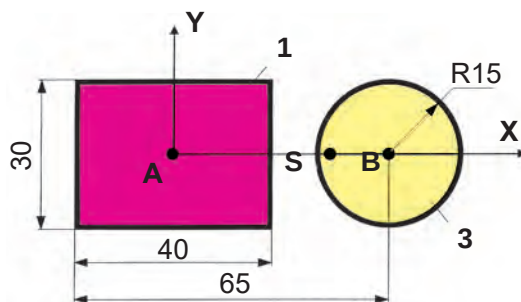
Στην περίπτωση αυτή οι σχέσεις που δίνουν το κέντρο βάρους είναι οι σχέσεις 14.3, όπου U_1 η περίμετρος του 1ου σχήματος, U_2 του δεύτερου κ.λπ.. Αντίστοιχα το x_1 είναι η συντεταγμένη X του γραμμικού κέντρου βάρους του 1ου σχήματος, η x_2 του δεύτερου, κ.λπ..

$$x_0 = \frac{U_1 \cdot x_1 + U_2 \cdot x_2 + U_3 \cdot x_3}{U_1 + U_2 + U_3}$$

$$y_0 = \frac{U_1 \cdot y_1 + U_2 \cdot y_2 + U_3 \cdot y_3}{U_1 + U_2 + U_3}$$
(14.3)

□ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Ζητείται το σημείο εφαρμογής της δύναμης για την απότμηση των διαμορφώσεων του σχήματος 14.11.



Σχήμα 14.11: Εφαρμογή

Λύση

Επειδή το σχήμα αποτελείται από δύο επιμέρους σχήματα, το σημείο εφαρμογής της δύναμης θα προκύψει ως το κέντρο βάρους και των δύο σχημάτων μαζί. Για τον υπολογισμό αυτό απαιτούνται οι περιμέτροι των δύο σχημάτων (U_1 και U_2) και οι συντεταγμένες των κέντρων των δύο σχημάτων, δηλαδή οι συντεταγμένες των σημείων A και B.

Έτσι έχουμε:

- περίμετρος του 1ου σχήματος $U_1 = 2 \cdot 30 + 2 \cdot 40 = 140 \text{ mm}$
- περίμετρος του 2ου σχήματος $U_2 = 2\pi R = 2 \cdot 3,14 \cdot 15 = 94,2 \text{ mm}$
- συντεταγμένες του κέντρου του 1ου σχήματος (σημείο A): $x_1 = 0$ και $y_1 = 0$, μια και το σύστημα συντεταγμένων έχει το κέντρο του στο σημείο A.
- συντεταγμένες του κέντρου του 2ου σχήματος (σημείο B): $x_2 = 45$ και $y_2 = 0$, μια και το σύστημα συντεταγμένων έχει το κέντρο του στο σημείο A.

Με αντικατάσταση στις σχέσεις (14.3) προκύπτουν οι σχέσεις:

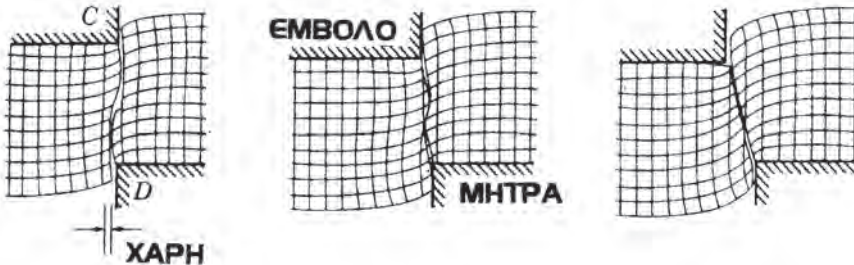
$$x_0 = \frac{U_1 \cdot x_1 + U_2 \cdot x_2}{U_1 + U_2} = \frac{40 \cdot 0 + 94,2 \cdot 45}{40 + 94,2} = \frac{4239}{134,2} = 31,6$$

$$y_0 = \frac{U_1 \cdot y_1 + U_2 \cdot y_2}{U_1 + U_2} = \frac{40 \cdot 0 + 94,2 \cdot 0}{40 + 94,2} = \frac{0}{134,2} = 0$$

Τελικό αποτέλεσμα είναι ότι το σημείο εφαρμογής της δύναμης απότμησης S έχει συντεταγμένες $x_0 = 31,6$ mm και $y_0 = 0$ mm. Το ότι η συντεταγμένη y του γραμμικού κέντρου βάρους και των δύο σχημάτων είναι 0, δηλαδή το κέντρο βάρους είναι πάνω στον άξονα X, ήταν αναμενόμενο, μια και τα δύο σχήματα είναι συμμετρικά ως προς τον άξονα αυτό.

14.1.6 Χάρη της απότμησης

Όπως φάνηκε στο σχήμα 14.1, ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα απαιτείται να αφεθεί ένα προκαθορισμένο διάκενο το οποίο ονομάζεται **χάρη**. Η εκλογή της σωστής χάρης έχει σημαντική επίδραση στην απότμηση. Για διάφορα μεγέθη της επιλεγόμενης χάρης, στο σχήμα 14.12 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του κατεργαζόμενου υλικού. Στην πράξη το μέγεθος της χάρης κυμαίνεται από 2 έως 10% του πάχους του ελάσματος που θα κοπεί.



Σχήμα 14.12: Επίδραση της χάρης στην παραμόρφωση του υλικού

Το μέγεθος της χάρης **u** μπορεί να προσεγγιστεί από εμπειρικές εξισώσεις ανάλογα με το πάχος του ελάσματος. Στον πίνακα Π.14.2 φαίνονται οι σχέσεις αυτές με τις οποίες μπορεί να υπολογισθεί η χάρη, όπου τ_a η αντοχή απότμησης σε [Kp/mm²] και **s** το πάχος του ελάσματος σε [mm].

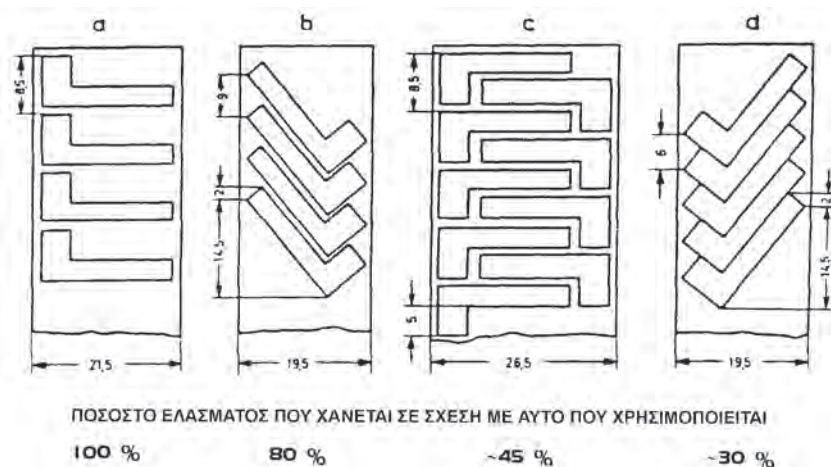
Πίνακας Π.14.2: Σχέσεις προσδιορισμού της χάρης απότμησης.

Πάχος ελάσματος s	Χάρη u
$s < 3$ mm	$u = 0,007 \cdot s \cdot \sqrt{\tau_a}$
$s > 3$ mm	$u = (0,007 \cdot s - 0,005) \cdot \sqrt{\tau_a}$

14.1.7 Συντελεστής εκμετάλλευσης του υλικού

Ο **συντελεστής εκμετάλλευσης** του υλικού σε μια απότμηση συμβολίζεται με ξ και είναι ο λόγος του εμβαδού του τεμαχίου προς το εμβαδόν του διατιθέμενου ελάσματος. Ο συντελεστής αυτός, που χαρακτηρίζει την κατεργασία απότμησης, επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος, ώστε να γίνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της επιφάνειας του ελάσματος. Ταυτόχρονα, οι διαστάσεις του ελάσματος δεν πρέπει να είναι πολύ οριακές με τις διαστάσεις της απότμησης. Η περίμετρος της απότμησης πρέπει να απέχει κάποια ελάχιστη απόσταση από το περίγραμμα του τεμαχίου, καθώς και από το περίγραμμα του γειτονικού σχήματος. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται κυρίως από το υλικό του τεμαχίου και από το πάχος του.

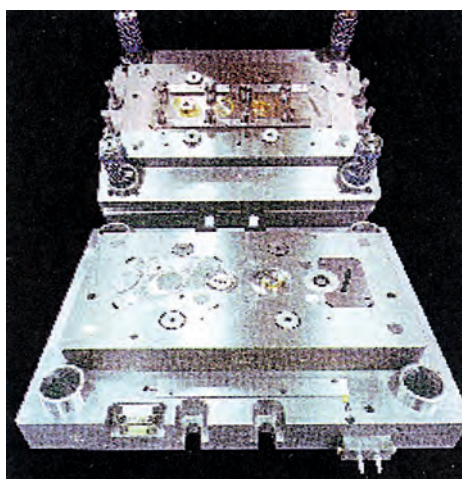
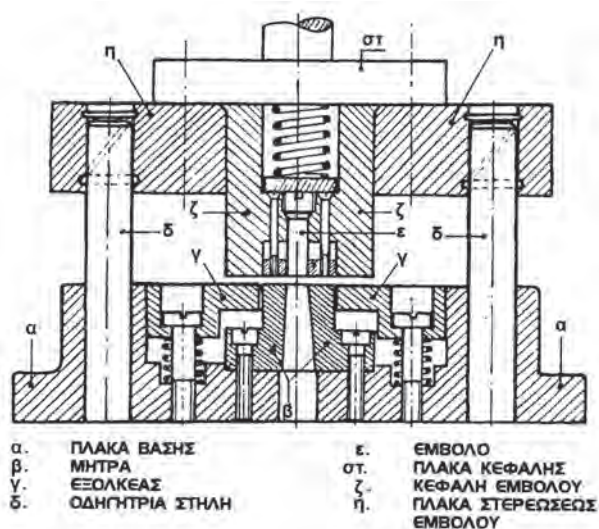
Προκειμένου ο συντελεστής εκμετάλλευσης του υλικού να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος, ώστε να μην πετιέται μεγάλη ποσότητα του υλικού, απαιτείται όσο το δυνατόν καλύτερος προγραμματισμός της απότμησης που θα γίνει. Στο **σχήμα 14.13** φαίνεται η εκμετάλλευση ενός υλικού ανάλογα με τον προσανατολισμό των τεμαχίων που θα κοπούν. Είναι φανερό ότι όσο καλύτερα τοποθετούνται τα κομμάτια, δηλαδή όσο καλύτερα σχεδιάζεται ο τρόπος που θα γίνει η απότμηση, τόσο λιγότερο υλικό χάνεται και μειώνεται αντίστοιχα το κόστος της κατεργασίας.



Σχήμα 14.13: Βέλτιστη τοποθέτηση τεμαχίων προς απότμηση για οικονομία στο υλικό

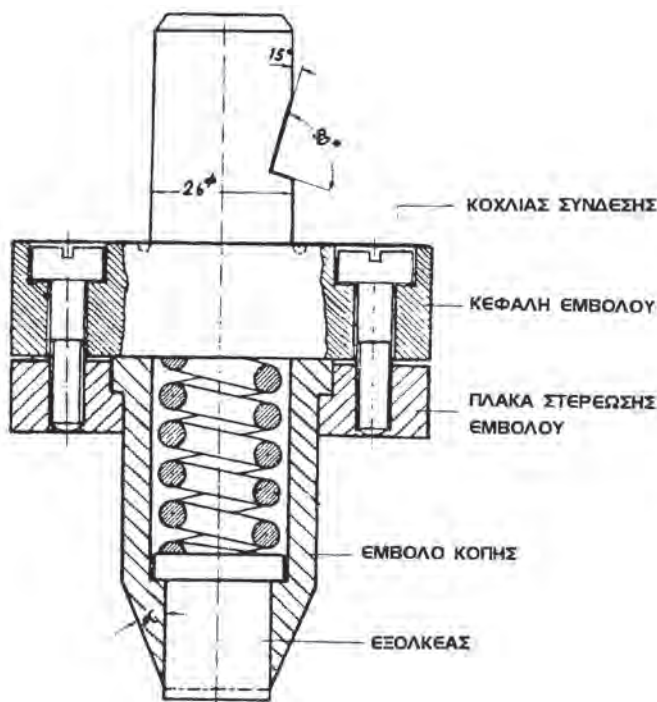
14.1.8 Εργαλεία απότμησης

Τα εργαλεία απότμησης (έμβολα και μήτρες) κατασκευάζονται από σκληρά υλικά με σκληρότητα πάνω από 60 HRC. Τέτοια υλικά είναι οι χάλυβες 90Cr3, 90MnV8, 105WCr6, 105CrMoV5 κ.λπ.. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες κατασκευής εργαλείων απότμησης, οι οποίες εξαρτώνται από τη χρήση του εκάστοτε εργαλείου. Χαρακτηριστικά τέτοια εργαλεία φέρουν οδηγήτριες στήλες ή οδηγήτρια πλάκα, προκειμένου να κατεργασθούν μεγάλες ποσότητες, ενώ εργαλεία χωρίς οδήγηση χρησιμοποιούνται για μικρές παρτίδες απότμησης. Στο σχήμα 14.14 παρουσιάζεται ένα εργαλείο απότμησης με οδηγήτριες στήλες. Στο εργαλείο αυτό η κίνηση που μεταδίδεται από την πρέσα, κινεί την πλάκα στερεώσεως του εμβόλου **η** και την κεφαλή του εμβόλου **ζ**. Η κίνηση αυτή οδηγείται με τη βοήθεια των κατακόρυφων στηλών **δ**. Καθώς η κεφαλή του εμβόλου πιέζει το έλασμα, ο εξολκέας **γ** υποχωρεί προς τα κάτω, συμπιέζοντας τα ελατήρια που βρίσκονται στους οδηγούς κοχλίες του. Ταυτόχρονα, πραγματοποιείται η απότμηση από το έμβολο **ε** με τη βοήθεια της μήτρας **β**. Το έμβολο υποχωρεί με την κοπή και συμπιέζει το ελατήριό του, ώστε τη στιγμή της απομάκρυνσης της κεφαλής προς τα πάνω, το ελατήριο να εκτονωθεί και να διώξει το έλασμα ή το κομμένο κομμάτι από το έμβολο. Αντίστοιχα, τη στιγμή της απομάκρυνσης, ο εξολκέας με την βοήθεια των ελατηρίων του που είχαν συμπιεστεί, ανεβαίνει προς τα πάνω και ελευθερώνει το έλασμα.



Σχήμα 14.14: Εργαλείο απότμησης με οδηγήτριες στήλες

Στο σχήμα 14.15 παρουσιάζεται αντίστοιχα ένα εργαλείο απότμησης χωρίς οδήγηση. Ο εξολκέας που διακρίνεται στο σχήμα πετά έξω από το εργαλείο το κομμάτι που κόβεται, μέσω του ελατηρίου στο οποίο είναι συνδεδεμένος.



Σχήμα 14.15: Εργαλείο απότμησης

14.1.9 Έργο απότμησης

Το έργο κατά την απότμηση, το οποίο πρέπει να δοθεί από την εργαλειομηχανή, έχει άμεση σχέση με τη δύναμη κοπής. Το έργο απότμησης προσδιορίζεται από την καμπύλη της δύναμης κοπής συναρτήσει της διαδρομής απότμησης, όπως δόθηκε στο σχήμα 14.6. Προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό του έργου απότμησης είναι:

$$W_a = \frac{x \cdot F_a \cdot h_a}{1000} \quad (14.4)$$

όπου : W_a : έργο απότμησης [kr · m]

F_a : δύναμη απότμησης [kr]

x : συντελεστής διόρθωσης από 0,3 έως 0,5

h_a : διαδρομή απότμησης που δίδεται από τη σχέση:

$$h_a = (2,0 \text{ έως } 2,5) \cdot s \quad (14.5)$$

14.2 ΒΑΘΕΙΑ ΚΟΙΛΑΝΣΗ

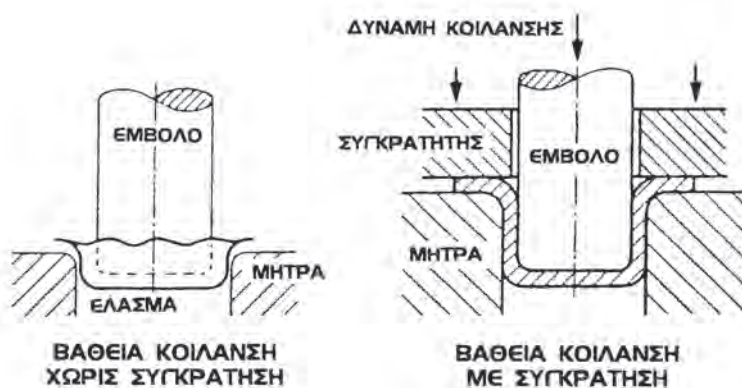
14.2.1 Γενικά

Η **βαθεία κοίλανση** είναι η κατεργασία κατά την οποία διαμορφώνεται ένα επίπεδο έλασμα σε κοίλο, μέσω ενός κατάλληλου εργαλείου. Η βαθεία κοίλανση, που άρχισε να εφαρμόζεται γύρω στα 1700, έχει γίνει σήμερα μία από τις σημαντικότερες κατεργασίες διαμόρφωσης. Στο σχήμα 14.16 φαίνονται προϊόντα που έχουν παραχθεί με τη μέθοδο της βαθείας κοίλανσης.



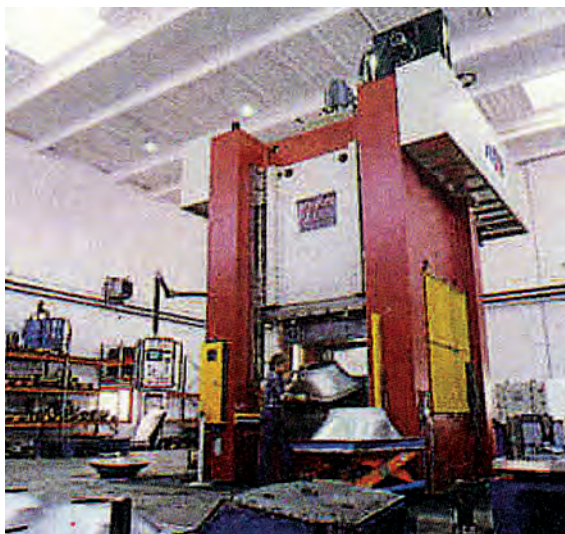
Σχήμα 14.16: Προϊόντα βαθείας κοίλανσης

Με τη βαθεία κοίλανση παράγεται μία ποικιλία μεταλλικών προϊόντων, κυρίως κυλινδρικού σχήματος, όπως είναι τα μαγειρικά σκεύη. Στο σχήμα 14.17 παρουσιάζεται μία στοιχειώδης διάταξη βαθείας κοίλανσης χωρίς ή και με συγκράτηση, όπου διακρίνονται το έλασμα που διαμορφώνεται, το έμβολο, η μήτρα και στη δεύτερη περίπτωση ο συγκρατητής. Το έμβολο της κοίλανσης κινείται προς το έλασμα, ενώ ταυτόχρονα ο συγκρατητής συγκρατεί το έλασμα στη θέση του για να μην παρασυρθεί στο εσωτερικό της μήτρας. Η κίνηση του εμβόλου που πραγματοποιείται μέσω μιας πρέσας, έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση του ελάσματος το οποίο παίρνει την κοίλη μορφή. Το έμβολο στην περίπτωση του σχήματος είναι κυλινδρικό και αντίστοιχα το τελικό τεμάχιο έχει σχήμα σαν ανάποδο καπέλο. Για την περίπτωση που το ύψος του τελικού τεμαχίου είναι μικρό, σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του, τότε η κοίλανση μπορεί να γίνεται χωρίς συγκράτηση.



Σχήμα 14.17: Διάταξη βαθείας κοίλανσης χωρίς και με συγκράτηση.

Η κοίλανση, όπως αναφέρθηκε, πραγματοποιείται σε πρέσες. Το τεμάχιο που πρόκειται να διαμορφωθεί, ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού του, μπορεί να βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είτε σε μεγαλύτερη θερμοκρασία (συνήθως πάνω από 350 °C). Η κοίλανση στις δύο αυτές περιπτώσεις λέγεται κοίλανση εν ψυχρώ και κοίλανση εν θερμώ αντίστοιχα. Ιδιαίτερα για υλικά που είναι δύσκολα να διαμορφωθούν, όπως είναι τα κράματα του τιτανίου, χρησιμοποιείται κοίλανση εν θερμώ. Στην περίπτωση αυτή, το έλασμα που θα διαμορφωθεί, θερμαίνεται τοπικά ή ολόκληρο, ενώ ταυτόχρονα θερμαίνεται και η μήτρα. Στο σχήμα 14.18 φαίνεται μία πρέσα η οποία πραγματοποιεί κοίλανση εν ψυχρώ.



Σχήμα 14.18: Πρέσα που πραγματοποιεί κοίλανση

14.2.2 Λόγος κοίλανσης

Για την απλή περίπτωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 14.17, της κοίλανσης δηλαδή ενός κυκλικού ελάσματος (δίσκος) πάχους s και διαμέτρου D σε κοίλο κυάθιο (ή κύπελο) διαμέτρου d , ονομάζεται **λόγος κοίλανσης** β ο λόγος της αρχικής με την τελική διάμετρο, δηλαδή:

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (14.6)$$

Αρκετές φορές στη βαθεία κοίλανση ενός ελάσματος η απευθείας παραμόρφωσή του στην τελική μορφή δεν είναι δυνατή, μια και το υλικό που παραμορφώνεται δεν αντέχει αυτή τη βίαιη αλλαγή της μορφής του και ραγίζει ή σπάει. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται αρκετές διαδοχικές κοιλάνσεις, οι οποίες ονομάζονται **ανακοιλάνσεις** και το έλασμα παίρνει την τελική του μορφή μετά από ενδιάμεσες μορφές. Στο σχήμα 14.19 φαίνονται οι ενδιάμεσες κοιλάνσεις που πραγματοποιούνται για την κατασκευή ενός κάλυκα.



Σχήμα 14.19: Ανακοιλάνσεις.

Ο λόγος κοίλανσης για κάθε μία από τις ενδιάμεσες φάσεις προκύπτει από τον τύπο (14.6). Έτσι, οι ενδιάμεσοι λόγοι κοίλανσης είναι:

$$\beta_0 = \frac{D}{d_0}, \quad \beta_1 = \frac{d_0}{d_1}, \quad \beta_2 = \frac{d_1}{d_2}, \dots, \beta_n = \frac{d_{n-1}}{d_n} \quad (14.7)$$

Ο συνολικός θεωρητικός λόγος κοίλανσης, που αντιστοιχεί στη σχέση (14.6), προκύπτει από το γινόμενο των επί μέρους λόγων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\beta_1 = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_n = \frac{D}{d_0} \cdot \frac{d_0}{d_1} \cdot \dots \cdot \frac{d_{n-1}}{d_n} = \frac{D}{d_n} = \frac{D}{d} \quad (14.8)$$

Ως λόγος κοίλανσης συναντάται και ο λόγος του ύψους του κυπέλλου ή κυπέλλου ως προς τη διάμετρό του. Ο λόγος αυτός όσο μεγαλώνει, δηλαδή όσο μεγαλύτερο ύψος έχει το τελικό κύπελλο ως προς την τελική διάμετρο, τόσο δυσκολότερη είναι και η απαιτούμενη κοίλανση. Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων, γίνονται οι προαναφερθείσες διαδοχικές ανακοιλάνσεις του ελάσματος, οι οποίες συνοδεύονται συνήθως από ανόπτηση, ώστε το διαμορφούμενο υλικό να μαλακώσει για να δεχθεί την επόμενη κοίλανση. Τέτοιες διαδικασίες είναι γενικά αντισοικονομικές και γίνεται προσπάθεια να αποφεύγονται.

Ο λόγος κοίλανσης β , σε οποιαδήποτε από τις ενδιάμεσες φάσεις ή τη μία και μοναδική φάση, απαιτείται να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος, γεγονός που ισοδυναμεί με μεγαλύτερη παραμόρφωση, άρα αποδοτικότερη κατεργασία κατά την κοίλανση. Ο λόγος β δεν μπορεί όμως να παίρνει οποιεσδήποτε μεγάλες τιμές. Η οριακή του τιμή εξαρτάται από τη γεωμετρία του εργαλείου κοίλανσης, από το κατεργαζόμενο υλικό, την πίεση συγκράτησης, την επιθυμητή διάμετρο d και το πάχος του ελάσματος s .

Για συνηθισμένα κατεργαζόμενα υλικά, όπως ο χάλυβας St1203 και χωρίς ενδιάμεση ανόπτηση, ο επιτρεπόμενος λόγος κοίλανσης δίδεται από τη σχέση:

$$\beta_{\text{επ}} = 2 - \frac{1,1}{1000} \cdot \frac{d}{s} \quad (14.9)$$

Για εξαιρετικά κατεργαζόμενα υλικά, όπως ο χάλυβας St1303 και χωρίς ενδιάμεση ανόπτηση, ο επιτρεπόμενος λόγος κοίλανσης δίδεται από τη σχέση:

$$\beta_{\text{επ}} = 2,15 - \frac{d}{1000 \cdot s} \quad (14.10)$$

Για την περίπτωση που χρησιμοποιείται ανόπτηση του ελάσματος πριν την επόμενη κοίλανση, ο λόγος κοίλανσης μπορεί να αυξηθεί κατά 20%. Στον πίνακα Π.14.3 παρουσιάζονται μέσοι επιτρεπόμενοι λόγοι κοίλανσης ανάλογα με το λόγο d/s , για συνήθη υλικά.

Πίνακας Π.14.3: Τιμές επιτρεπόμενου λόγου κοίλανσης συνηθισμένων υλικών

d/s	30	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
$\beta_{\text{επ}}$	2.10	2.05	2.00	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.70	1.65	1.60	1.50

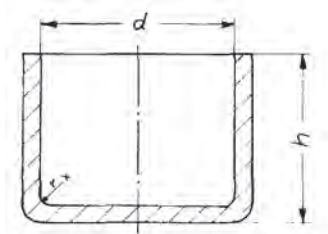
Για τις επόμενες φάσεις, πλην της πρώτης, ειδικά χαλύβδινων ελασμάτων, ο λόγος κοίλανσης β κυμαίνεται μεταξύ 1,2 και 1,3 αν δεν μεσολαβεί ανόπτηση.

14.2.3 Ανάπτυγμα ελάσματος

Προκειμένου να παραχθεί ένα προϊόν με βαθεία κοίλανση, πρέπει να υπολογισθεί η διάμετρος του αρχικού ελάσματος που θα τοποθετηθεί στην πρέσα για να κοιλανθεί. Για τον υπολογισμό αυτό θεωρείται ότι κατά την κοίλανση δε μεταβάλλεται το πάχος του ελάσματος και ότι η επιφάνεια του αρχικού ελάσματος είναι ίση με την αντίστοιχη του τελικού τεμαχίου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται παραδείγματα υπολογισμού του αναπτύγματος τεμαχίων απλών μορφών.

Απλό κυλινδρικό τεμάχιο ($r < 10\text{mm}$)

Για το τεμάχιο του σχήματος 14.20, με ακτίνα καμπυλότητας στη βάση του μικρότερη από 10mm, προκύπτει από την ισότητα της αρχικής και τελικής επιφάνειας η διάμετρος του αρχικού ελάσματος.



Σχήμα 14.20: Κυλινδρικό τεμάχιο ($r < 10\text{mm}$)

Η σχέση που εκφράζει την αρχική διάμετρο εξάγεται από την ισότητα: “Αρχική επιφάνεια ελάσματος = τελική επιφάνεια τεμαχίου”. Η αρχική επιφάνεια του ελάσματος είναι η επιφάνεια του κύκλου του αρχικού ελάσματος, μια και το αρχικό έλασμα είναι ένας κυκλικός δίσκος. Η τελική επιφάνεια του τεμαχίου για την περίπτωση του σχήματος 14.20 είναι το άθροισμα της επιφάνειας του πλάτους του κυαθίου, που είναι κύκλος διαμέτρου d , συν την κυλινδρική επιφάνεια του κυαθίου. Η ισότητα των δύο επιφανειών, αρχικής και τελικής, φαίνεται στη σχέση:

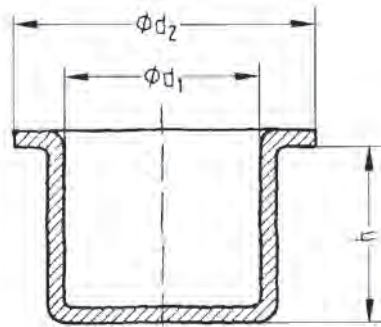
$$\frac{D^2 \cdot \pi}{4} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} + d \cdot \pi \cdot h \quad \text{από την οποία τελικά προκύπτει:}$$

$$D = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} \quad (14.11)$$

όπου : **D** : η διάμετρος του αρχικού ελάσματος σε mm,
d : η εσωτερική διάμετρος του κυαθίου σε mm,
h : το ύψος του κυαθίου σε mm.

Κυλινδρικό τεμάχιο με χείλος

Για το τεμάχιο του σχήματος 14.21, με ακτίνα καμπυλότητας στη βάση του μικρότερη από 10mm και με χείλος στο πάνω μέρος, προκύπτει από την ισότητα της αρχικής και τελικής επιφάνειας η διάμετρος του αρχικού ελάσματος.



Σχήμα 14.21: Κυλινδρικό τεμάχιο με χείλος

Η σχέση που εκφράζει την αρχική διάμετρο προκύπτει από την ισότητα:

$$\frac{D^2 \cdot \pi}{4} = \frac{d_1^2 \cdot \pi}{4} + d_1 \cdot \pi \cdot h + (d_2^2 - d_1^2) \cdot \frac{\pi}{4}$$

όπου το πρώτο μέλος είναι η κυκλική επιφάνεια του αρχικού δίσκου, ενώ το δεύτερο μέλος είναι το άθροισμα των τριών επιμέρους επιφανειών του τεμαχίου, δηλαδή ο κυκλικός πάτος, η κυλινδρική επιφάνεια και ο δακτύλιος που αποτελεί το χείλος του τεμαχίου. Από την παραπάνω ισότητα προκύπτει:

$$\frac{D^2 \cdot \pi}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h + d_2^2 - d_1^2) \quad \text{και τελικά:}$$

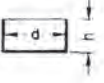
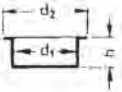
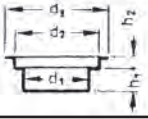
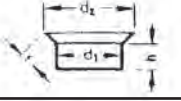
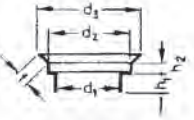
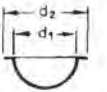
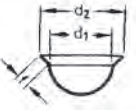
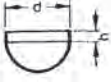
$$D = \sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$$

όπου: **D** : η διάμετρος του αρχικού ελάσματος σε mm,
d₁ : η εσωτερική διάμετρος του κυαθίου σε mm,
d₂ : η διάμετρος του χείλους του κυαθίου σε mm,
h : το ύψος του κυαθίου σε mm.

Παραδείγματα τελικών τεμαχίων με αντίστοιχα την αρχική διάμετρο από

την οποία προήλθαν φαίνονται στον Πίνακα Π.14.4. Οι διάμετροι του πίνακα έχουν προκύψει σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προαναφέρθηκε.

Πίνακας Π.14.4: Σχέσεις προσδιορισμού διαμέτρου αρχικού ελάσματος

	$\sqrt{d^2 + 4dh}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4d_1h}$
	$\sqrt{d_3^2 + 4(d_1h_1 + d_2h_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4d_1h + 2f \cdot (d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4(d_1h_1 + d_2h_2) + 2f(d_2 + d_3)}$
	$\sqrt{2d^2} = 1.4d$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$
	$1.4\sqrt{d_1^2 + f(d_1 + d_2)}$
	$1.4\sqrt{d^2 + 2dh}$

14.2.4 Δύναμη κοίλανσης

Η δύναμη κοίλανσης για την περίπτωση κυλινδρικής κοίλανσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_z = U \cdot s \cdot \sigma_B \cdot n = d \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_B \cdot n \quad (14.12)$$

όπου: F_z : Δύναμη κοίλανσης [N],
 U : Περίμετρος του εμβόλου [mm],
 d : Διάμετρος του εμβόλου [mm],
 s : πάχος ελάσματος [mm],
 σ_B : Όριο θραύσης του διαμορφούμενου υλικού [N/mm²],
 n : Συντελεστής διόρθωσης που εξαρτάται από το λόγο κοίλανσης και την κατεργασία.

Οι τιμές του συντελεστή διόρθωσης για συνήθη υλικά και ανάλογα το λόγο κοίλανσης β και το λόγο d/s , δίδονται στον Πίνακα Π.14.5.

Πίνακας Π.14.5: Συντελεστής διόρθωσης n

$\beta \backslash d/s$	50	100	200	300	400	500	600
1,2	0,21	0,22	0,25	0,30	0,36	0,45	0,58
1,4	0,42	0,44	0,50	0,60	0,71	0,89	1,14
1,6	0,63	0,68	0,76	0,90	1,08	1,30	-
1,8	0,85	0,90	1,02	1,18	1,40	-	-
2,0	1,05	1,12	1,29	1,45	-	-	-
2,1	1,15	1,25	1,40	-	-	-	-

Η σχέση 16.8 προσδιορίζει τη δύναμη κατά την πρώτη φάση κοίλανσης. Για τις επόμενες φάσεις, η δύναμη προσδιορίζεται με την προσαύξηση κατά το μισό της δύναμης της προηγούμενης φάσης. Έτσι, στη δεύτερη φάση, δηλαδή την πρώτη ανακοίλανση και για την περίπτωση κυλινδρικού τεμαχίου, η δύναμη κοίλανσης θα δίδεται από τη σχέση:

$$F_{z2} = \frac{F_z}{2} + d_1 \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_B \cdot n \quad (14.13)$$

όπου d_1 : η διάμετρος του εμβόλου της πρώτης ανακοίλανσης,
 F_z : η δύναμη κοίλανσης της πρώτης φάσης και
 n : ο συντελεστής διόρθωσης.

Αντίστοιχα, στη δεύτερη ανακοίλανση και για την περίπτωση κυλινδρικού τεμαχίου, η δύναμη κοίλανσης θα δίδεται από τη σχέση:

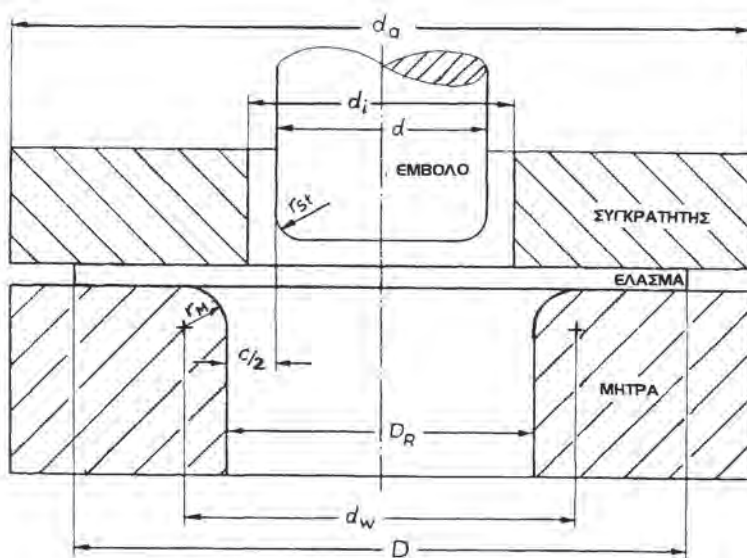
$$F_{z3} = \frac{F_{z2}}{2} + d_2 \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_B \cdot n \quad (14.14)$$

όπου d_2 : η διάμετρος του εμβόλου της δεύτερης ανακοίλανσης και

F_{z2} : η δύναμη κοίλανσης της αμέσως προηγούμενης φάσης, δηλαδή της πρώτης ανακοίλανσης.

Δύναμη συγκράτησης ελάσματος

Το προς κοίλανση έλασμα συγκρατείται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας από την πλάκα συγκράτησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 14.22. Η πλάκα συγκράτησης εφαρμόζει την ελάχιστη απαιτούμενη δύναμη, ώστε να πραγματοποιείται η κοίλανση χωρίς να δημιουργούνται πτυχώσεις στο κατεργαζόμενο υλικό.



Σχήμα 14.22: Χαρακτηριστικά συγκράτησης

Η μέση δύναμη συγκράτησης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_N = p \cdot A_N \quad (14.15)$$

όπου: F_N : δύναμη συγκράτησης σε [N],

p : πίεση συγκράτησης σε [N/mm²],

A_N : επιφάνεια συγκράτησης σε [mm²].

Η μέση πίεση συγκράτησης p για την πρώτη φάση δίδεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$p = \left[(\beta_1 - 1)^2 + \frac{d}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{\sigma_B}{400} \quad (14.16)$$

όπου: p : πίεση συγκράτησης σε $[N/mm^2]$,
 β_1 : λόγος κοίλανσης,
 d : διάμετρος εμβόλου σε $[mm]$,
 s : πάχος ελάσματος σε $[mm]$,
 σ_B : όριο θραύσης διαμορφούμενου υλικού σε $[N/mm^2]$.

Η επιφάνεια συγκράτησης υπολογίζεται γεωμετρικά με τη βοήθεια του σχήματος 14.22, ως κυκλικός δακτύλιος με διαμέτρους D και d_w :

$$A_v = (D^2 - d_w^2) \cdot \frac{\pi}{4} = \left[D^2 - (D_R + 2r_M)^2 \right] \cdot \frac{\pi}{4} \quad (14.17)$$

όπου: A_N : επιφάνεια συγκράτησης σε $[mm^2]$,
 d_w : διάμετρος κέντρων καμπυλών μήτρας σε $[mm]$, που δίδεται από τη σχέση:

$$d_w = d_i + 2 \cdot r_M \quad (14.18)$$

όπου: $r_M = 0,035 \cdot [50 + (D - d)] \cdot \sqrt{s}$
 d_i : εσωτερική διάμετρος του συγκρατητή σε $[mm]$,
 r_M : ακτίνα καμπυλότητας μήτρας σε $[mm]$,
 D : διάμετρος ελάσματος σε $[mm]$,
 D_R : εσωτερική διάμετρος μήτρας σε $[mm]$.

Συνολική δύναμη και έργο κοίλανσης

Η συνολική δύναμη κοίλανσης εξαρτάται από το είδος της πρέσας, αν είναι δηλαδή διπλής ή απλής ενέργειας. Στην περίπτωση της πρέσας διπλής ενέργειας η δύναμη της κοίλανσης και η δύναμη συγκράτησης επιβάλλονται ανεξάρτητα. Έτσι, για την επιλογή μιας τέτοιας πρέσας προδιαγράφονται οι δύο διαφορετικές δυνάμεις F_z και F_N . Αντίστοιχα, για την περίπτωση πρέσας απλής ενέργειας η συνολική δύναμη προκύπτει από το άθροισμα των δυνάμεων κοίλανσης και συγκράτησης, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$F_{ολ} = F_z + F_N \quad (14.19)$$

Η δύναμη κοίλανσης F_z συναρτήσει της ενεργού διαδρομής του εμβόλου h παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 14.23.



Σχήμα 14.23: Δύναμη κοίλανσης

Το έργο κοίλανσης για πρέσα διπλής ενέργειας δίδεται από τη σχέση:

$$W = F_z \cdot x \cdot h \quad (14.20)$$

ενώ για πρέσα απλής ενέργειας, το έργο κοίλανσης δίδεται από τη σχέση:

$$W = (F_z \cdot x + F_N) \cdot h \quad (14.21)$$

όπου: W : έργο κοίλανσης σε [Nmm],

x : συντελεστής έργου κοίλανσης από 0,5 έως 0,8 και

h : ενεργός διαδρομή εμβόλου σε [mm],

14.2.5 Χάρη κοίλανσης

Η χάρη κοίλανσης μεταξύ του εμβόλου και της μήτρας, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$c = 2 \cdot s \cdot \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (14.22)$$

όπου: c : χάρη κοίλανσης σε [mm],

s : πάχος ελάσματος σε [mm],

D : διάμετρος ελάσματος σε [mm],

d : διάμετρος εμβόλου σε [mm],

ενώ πιο ακριβής υπολογισμός προκύπτει από τη σχέση:

$$c = s + k \cdot \sqrt{s} \quad (14.23)$$

όπου: **c** : χάρη κοίλανσης σε [mm],
s : πάχος ελάσματος σε [mm],
k : συντελεστής σε [mm]

Ο συντελεστής **k** για διάφορα υλικά δίδεται από τον πίνακα Π.14.6.

Πίνακας Π.14.6: Συντελεστής προσδιορισμού χάρης κοίλανσης

Υλικό	Χάλυβας	Πυρίμαχα κράματα	Αλουμίνιο	Μη σιδηρούχα μέταλλα ή κράματα
k	0,07	0,2	0,02	0,04

14.2.6 Διαδικασία κοίλανσης

Κατά την κοίλανση, όπως αναφέρθηκε, ένα επίπεδο έλασμα διαμορφώνεται σε κυλινδρικό ή ορθογωνικό κυάθιο ή κύπελλο με τη βοήθεια κατάλληλου εμβόλου και μήτρας. Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την κατεργασία είναι οι ακόλουθοι:

- ✓ οι ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού,
- ✓ ο λόγος της διαμέτρου του ελάσματος προς τη διάμετρο του εμβόλου,
- ✓ η χάρη ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα,
- ✓ η καμπυλότητα στα άκρα του εμβόλου και της μήτρας,
- ✓ η δύναμη συγκράτησης,
- ✓ η τριβή και η λίπανση κατά την κοίλανση,
- ✓ η ταχύτητα της κοίλανσης.

Κατά τη διάρκεια της κοίλανσης στο έλασμα ασκούνται εφελκυστικές κυρίως τάσεις. Το έλασμα περιλαμβάνει ουσιαστικά τρεις κύριες περιοχές, οι οποίες μετέχουν στην κοίλανση με διαφορετικό τρόπο. Οι περιοχές αυτές είναι:

- ✓ Το μέρος του ελάσματος που έρχεται σε επαφή με τη μήτρα. Το τμήμα αυτό υφίσταται συνεχή ολκή κατά την κοίλανση και, καθώς διέρχεται από το χείλος της μήτρας, υφίσταται πλαστική κάμψη και λεπταίνει.
- ✓ Το μέρος του ελάσματος που δεν έρχεται σε επαφή ούτε με τη μήτρα ούτε με το έμβολο. Το τμήμα αυτό κυρίως εφελκύεται μεταξύ μήτρας και εμβόλου, ενώ μέρος του ολισθαίνει και κάμπτεται προς το μέρος του χείλους της μήτρας ή του εμβόλου.

- ✓ Το μέρος του ελάσματος που βρίσκεται σε επαφή με το έμβολο και που αποτελεί τον πάτο του κυάθιου. Το τμήμα αυτό, ανάλογα με τις συνθήκες τριβής, τεντώνει και ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του εμβόλου.

Συνολικά τα διάφορα τμήματα του ελάσματος υφίστανται:

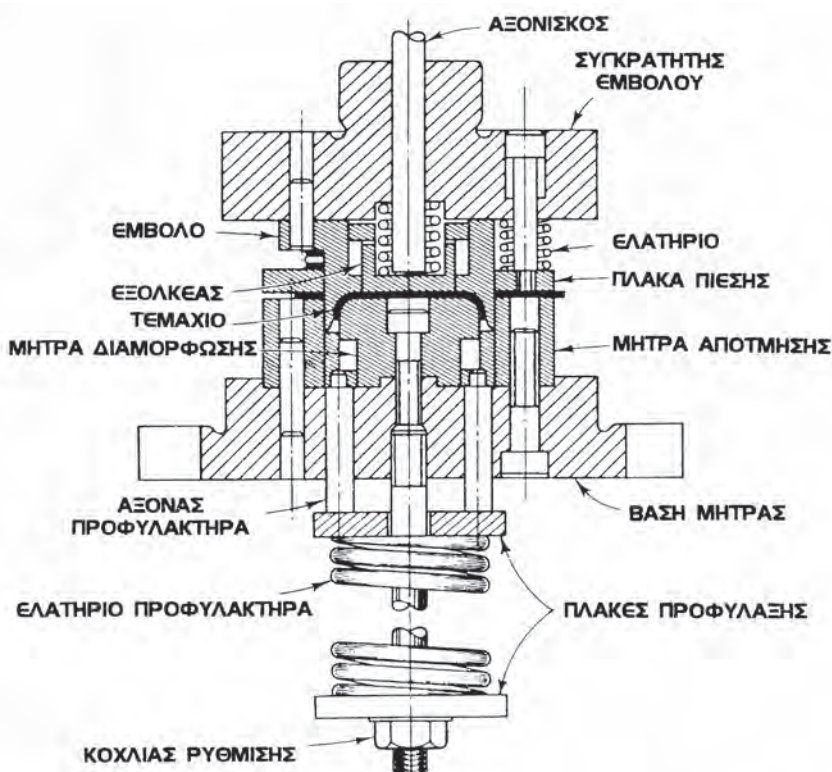
- ◆ το έλασμα μεταξύ μήτρας και συγκρατητή, **ακτινική ολκή**,
- ◆ το έλασμα στο χείλος της μήτρας, **κάμψη** και **ολίσθηση**,
- ◆ το έλασμα ανάμεσα στη μήτρα και το έμβολο, **εφελκυσμό**,
- ◆ το έλασμα στο καμπύλο μέρος του εμβόλου, **κάμψη** και **ολίσθηση**,
- ◆ το έλασμα στην επιφάνεια πίεσης του εμβόλου, **έκταση** και **ολίσθηση**.

Εργαλεία βαθείας κοίλανσης

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για βαθεία κοίλανση μπορούν να ταξινομηθούν γενικά στους παρακάτω τρεις τύπους:

- ◆ *εργαλεία απλής ενέργειας*,
- ◆ *εργαλεία διπλής ενέργειας*,
- ◆ *σύνθετα εργαλεία*

Τα εργαλεία απλής ενέργειας αποτελούνται από τη μήτρα και το έμβολο. Σε αντίθεση με τα διπλής ενέργειας, τα εργαλεία αυτά δε φέρουν συγκρατητή. Στα εργαλεία διπλής ενέργειας υπάρχει συγκρατητής και τα εργαλεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρέσες απλής και διπλής ενέργειας. Τα σύνθετα εργαλεία συνδυάζουν περισσότερες από μία δυνατότητες κατεργασιών, όπως είναι η απότμηση κ.λπ.. Στο σχήμα 14.24 παρουσιάζεται ένα σύνθετο εργαλείο κοίλανσης και απότμησης, όπου διακρίνεται το έμβολο, η μήτρα, ο συγκρατητής και το διαμορφούμενο έλασμα. Το εργαλείο αυτό κόβει το έλασμα μέσω του εμβόλου απότμησης και ταυτόχρονα το ίδιο έμβολο διαμορφώνει, με τη βοήθεια της μήτρας, την κοίλη μορφή του τελικού τεμαχίου. Στο σχήμα φαίνεται ένα κεντρικό ελατήριο με κοχλία ρύθμισης, με τη βοήθεια του οποίου ρυθμίζεται με ακρίβεια η δύναμη για τη συγκράτηση του ελάσματος.



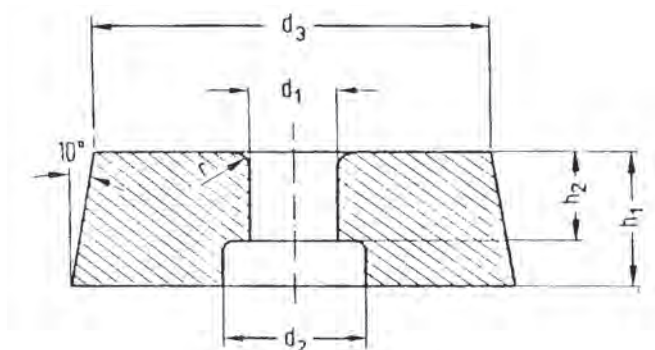
Σχήμα 14.24: Σύνθετο εργαλείο κοίλανσης

Υλικά τα οποία συνιστώνται για την κατασκευή εργαλείων κοίλανσης ιδιαίτερα του εμβόλου και της μήτρας, φαίνονται στον πίνακα Π.14.7.

Πίνακας Π.14.7: Υλικά εργαλείων κοίλανσης

Κωδικός χάλυβα κατά DIN 17007	Χάλυβας κατά DIN 17006	Σκληρότητα HRC	Έμβολο	Μήτρα
1540	C100W1	63	✓	✓
2056	90Cr3	63	✓	✓
2842	90MnV8	62	✓	✓
2363	105CrMoV5-1	63	✓	✓
2436	210CrW12	62	✓	✓

Αντίστοιχα στον πίνακα Π.14.8 παρουσιάζονται τυποποιημένες μήτρες κοίλανσης, σύμφωνα με την τυποποίηση DIN 323. Στον πίνακα δίδονται τυποποιημένες διαστάσεις της μήτρας κοίλανσης, σύμφωνα με το σχήμα 14.25.



Σχήμα 14.25: Τυποποιημένη μήτρα κοίλανσης

Πίνακας Π.14.8: Τυποποιημένες μήτρες κοίλανσης

Διάμετρος ελάσματος D[mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]
18,5	10,0	13,0	50,0	20,0	10,0
22,0	12,5	16,0	50,0	20,0	10,0
29,0	16,0	20,0	50,0	25,0	13,0
36,0	20,0	24,0	63,0	25,0	13,0
45,5	25,0	29,0	63,0	25,0	13,0
58,0	31,5	38,0	80,0	32,0	16,0
73,0	40,0	46,0	80,0	32,0	16,0
90,0	50,0	56,0	100,0	32,0	16,0
116,0	63,0	70,0	125,0	32,0	20,0
145,0	80,0	88,0	160,0	40,0	20,0
180,0	100,0	108,0	200,0	40,0	20,0
225,0	125,0	132,0	250,0	40,0	25,0
290,0	160,0	168,0	315,0	40,0	25,0
360,0	200,0	208,0	400,0	50,0	25,0
455,0	250,0	258,0	500,0	50,0	32,0
580,0	315,0	328,0	630,0	63,0	32,0
725,0	400,0	408,0	800,0	63,0	32,0

Ταχύτητα κοίλανσης

Η χρησιμοποιούμενη ταχύτητα κοίλανσης εξαρτάται από το διαμορφούμενο υλικό, τη γεωμετρία του τεμαχίου καθώς και από το είδος της πρέσας. Γενικές τιμές για την ταχύτητα κοίλανσης για διάφορα υλικά δίδονται στον πίνακα Π.14.9. Οι τιμές του πίνακα ισχύουν με την προϋπόθεση πως η κοίλωση διενεργείται με ιδανικές συνθήκες, δηλαδή:

- ♦ το κατεργαζόμενο υλικό είναι κατάλληλο,

- ◆ το τεμάχιο είναι συμμετρικό,
- ◆ υπάρχει επαρκής λίπανση,
- ◆ η πίεση συγκράτησης είναι ελεγχόμενη
- ◆ η κατάσταση της πρέσας είναι άριστη.

Αν κάποια από τις παραπάνω προϋποθέσεις δεν ισχύει, μειώνεται ανάλογα η ταχύτητα κοίλανσης. Αν δεν ισχύουν οι περισσότερες από τις προϋποθέσεις, η ταχύτητα κοίλανσης λαμβάνεται 8 έως 10 m/min. Επισημαίνεται ότι όσο πιο πολύπλοκο είναι το σχήμα του τεμαχίου, τόσο πιο μικρή πρέπει να είναι και η ταχύτητα της κοίλανσης.

Πίνακας Π.14.9: Ταχύτητα κοίλανσης [m/min]

Υλικό	Πρέσα απλής ενέργειας	Πρέσα διπλής ενέργειας
Συνήθης χάλυβας	17	11-17
Χάλυβας με φθειρόμενες επιφάνειες από σκληρομέταλλο	-	20
Ανοξείδωτος χάλυβας	-	6-9
Ορείχαλκος	60	30
Χαλκός	45	25
Αλουμίνιο	53	30
Κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής	-	9-12
Ψευδάργυρος	45	12

Λίπανση κατά την κοίλανση

Ανάλογα με το διαμορφούμενο υλικό και το λόγο κοίλανσης, επιλέγεται το κατάλληλο λιπαντικό για τη διαδικασία της κοίλανσης. Το λιπαντικό αυτό χρησιμοποιείται για να υπερνικηθούν οι τριβές και οι πιθανές συγκολλήσεις του υλικού του τεμαχίου στο έμβολο ή στη μήτρα. Για ελάσματα από χάλυβα προτείνονται τα παρακάτω λιπαντικά:

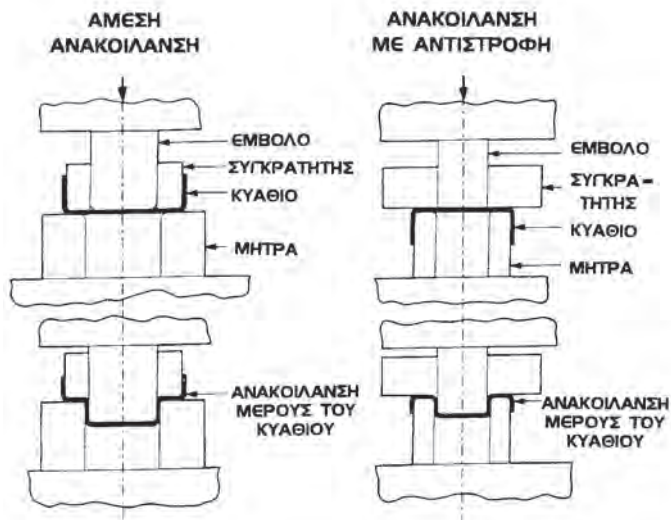
- ◆ για μείωση της διαμέτρου μικρότερη του 10%: **Ορυκτέλαιο ή υδαρές διάλυμα σαπουνιού,**
- ◆ για μείωση της διαμέτρου περίπου 25%: **Γαλακτώματα,**
- ◆ για μείωση της διαμέτρου μεγαλύτερη του 50%: συνιστάται προσβολή του ελάσματος με φωσφορικό οξύ, ώστε να δημιουργηθεί στρώμα φωσφορικού σιδήρου το οποίο μειώνει τις τριβές. Η διαδικασία αυτή καλείται **φωσφάτωση.**

Για διάφορα κατεργαζόμενα υλικά προτείνονται αντίστοιχα τα παρακάτω λιπαντικά:

- ◆ **ανοξείδωτοι χάλυβες:** χλωριωμένα έλαια,
- ◆ **πυρίμαχοι χάλυβες:** λιπαρά έλαια ή έλαια υψηλής πίεσης,
- ◆ **κράματα αλουμινίου:** διάφορα ορυκτέλαια,
- ◆ **κράματα χαλκού:** για μείωση διαμέτρου περίπου 10%: γαλάκτωμα ή ορυκτέλαιο, για μείωση διαμέτρου από 10% έως 30%: γαλάκτωμα με πρόσθετα ή ορυκτέλαιο με προσθήκη λιπαρού ελαίου ή υδαρές διάλυμα σαπουνιού, για μείωση διαμέτρου από 30% έως 50%: διάλυμα σαπουνιού με προσθήκη λιπαρής αλοιφής ή λιπαρό έλαιο με ελεύθερο λιπαρό οξύ, για μείωση διαμέτρου πάνω από 50%: στεγνό σαπούνι ή ορυκτέλαιο με λιπαρό έλαιο.

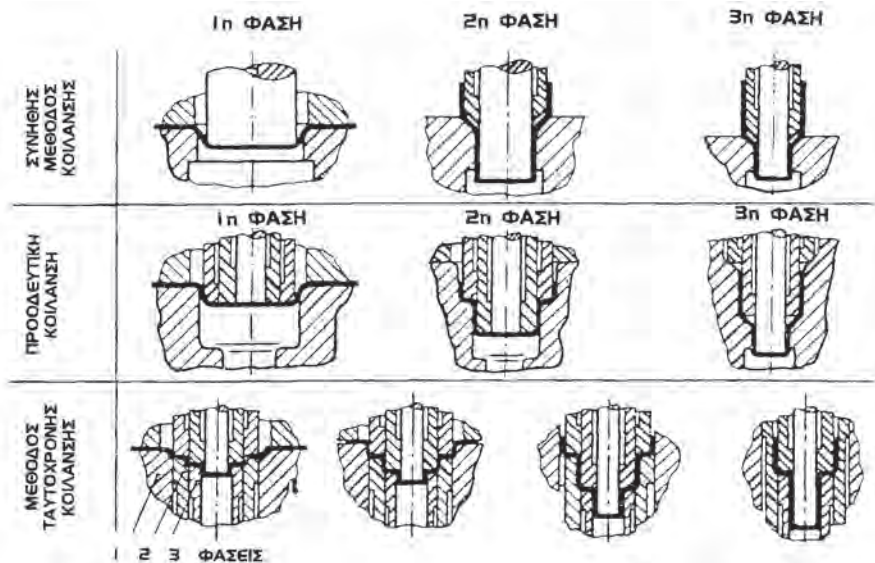
Ανακοίλανση

Κατά την κοίλανση, όπως περιγράφηκε, ο λόγος κοίλανσης β, δηλαδή ο λόγος της διαμέτρου του ελάσματος προς τη διάμετρο του τεμαχίου, δε μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Σε περίπτωση που ο λόγος κοίλανσης ξεπερνά την επιτρεπόμενη τιμή του, είναι απαραίτητο η κοίλανση να γίνει σε διαδοχικές φάσεις με μικρότερο λόγο κοίλανσης. Ανάμεσα στις φάσεις αυτές είναι δυνατή η ανόπτηση του κατεργαζόμενου υλικού, η οποία αφενός αυξάνει το κόστος της κατεργασίας, αφετέρου επιτρέπει τη χρησιμοποίηση μεγαλύτερου λόγου κοίλανσης. Οι ανακοιλάνσεις που αναφέρθηκαν μπορεί να είναι **άμεσες ή με αντιστροφή**. Η ουσιαστική διαφορά των δύο μεθοδολογιών είναι πως στην ανακοίλανση με αντιστροφή το έλασμα γυρίζει μέσα-έξω και η μέχρι πριν εξωτερική επιφάνεια, μετά την ανακοίλανση, γίνεται εσωτερική. Οι δύο μέθοδοι ανακοίλανσης που προαναφέρθηκαν, δηλαδή η **άμεση ανακοίλανση** και η **ανakoίλανση με αντιστροφή**, παρουσιάζονται στο σχήμα 14.26.



Σχήμα 14.26: Είδη ανακρίανσης

Οι ανακρίανσεις αποτελούν ξεχωριστές φάσεις για τη δημιουργία της τελικής μορφής ενός προϊόντος και μπορούν να πραγματοποιούνται ξεχωριστά η κάθε μία με προοδευτική κρίανση είτε ταυτόχρονα. Στο σχήμα 14.27 φαίνονται οι τρεις αυτές περιπτώσεις ανακρίανσεων. Στην περίπτωση της συνήθους κρίανσης, το τεμάχιο τοποθετείται σε διαφορετικές



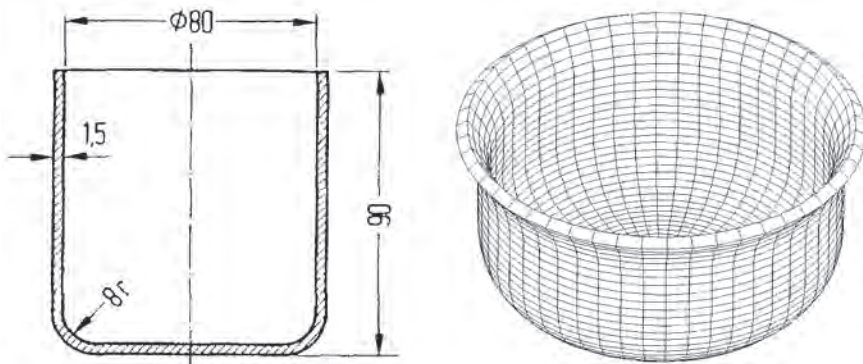
Σχήμα 14.27: Μέθοδοι ανακρίανσης

θέσεις εργασίας κάθε φορά. Στην προοδευτική κοίλανση το τεμάχιο παραμορφώνεται και παίρνει κάθε φορά τη μορφή της ενδιάμεσης φάσης από την κίνηση ξεχωριστών τμημάτων του εργαλείου. Στην ταυτόχρονη κοίλανση τα διάφορα τμήματα του εργαλείου κινούνται, διαμορφώνοντας και τις τρεις φάσεις ταυτόχρονα.

14.2.7 Εφαρμογή

Πρόκειται να κατασκευασθεί το κυλινδρικό κυάθιο του σχήματος 14.28 από χάλυβα St1303 με όριο θραύσης $\sigma_B = 270 \text{ N/mm}^2$. Ζητούνται:

- ◆ η διάμετρος του αρχικού ελάσματος D ,
- ◆ ο λόγος κοίλανσης β ,
- ◆ η δύναμη κοίλανσης F_z στην πρώτη φάση κοίλανσης (...αν υπάρχουν πολλές φάσεις),
- ◆ η χάρη κοίλανσης c ,



Σχήμα 14.28: Εφαρμογή στην κοίλανση

- α. Η **διάμετρος του αρχικού ελάσματος** θα προκύψει από την ισότητα της αρχικής και τελικής επιφάνειας, σύμφωνα με τη σχέση (14.11). Έτσι:

$$D = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} \Rightarrow$$

$$D = \sqrt{80^2 + 4 \cdot 80 \cdot 90} \Rightarrow$$

$$D \approx 188 \text{ mm}$$

- β. Ο **λόγος κοίλανσης** θα προκύψει ως το κλάσμα της αρχικής με την τελική διάμετρο, όπως ορίστηκε στη σχέση (14.6). Έτσι:

$$\beta = \frac{D}{d} = \frac{188}{80} \text{ mm} \Rightarrow$$

$$\beta = 2,35$$

Ο λόγος κοίλανσης που προέκυψε είναι μεγάλος. Σύμφωνα με τον πίνακα Π.14.3 ο επιτρεπόμενος λόγος κοίλανσης δίδεται σε σχέση με το λόγο d/s και είναι:

$$\frac{d}{s} = \frac{80 \text{ mm}}{1,5 \text{ mm}} = 53,3 \Rightarrow \text{από Πίνακα Π.14.3}$$

$$\beta_{\text{ΕΠ}} = 2,05$$

Εφόσον ο μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος κοίλανσης είναι $\beta_{\text{ΕΠ}} = 2,05$ και από τον υπολογισμό προκύπτει $\beta = 2,35$ σημαίνει πως η διαδικασία της κοίλανσης πρέπει να χωρισθεί σε περισσότερες από μία φάσεις. Ο αριθμός των φάσεων και οι ενδιάμεσοι λόγοι κοίλανσης και διάμετροι προκύπτουν διαδοχικά από τον επιτρεπόμενο λόγο κοίλανσης. Έτσι:

$$\beta_{\text{ΕΠ}} = 2,05 \Rightarrow \frac{D}{\beta_{\text{ΕΠ}}} = \frac{188 \text{ mm}}{2,05} \Rightarrow$$

$$d_1 = 91,7 \text{ mm}$$

Επειδή το έλασμα είναι χαλύβδινο, στη δεύτερη φάση ο λόγος κοίλανσης πρέπει να είναι από 1,2 έως 1,3 όπως έχει αναφερθεί. Ο λόγος κοίλανσης β_1 θα είναι:

$$\beta_1 = \frac{d_1}{d_2} = \frac{91,7 \text{ mm}}{80 \text{ mm}} = 1,15$$

Ο λόγος κοίλανσης 1,15 δεν είναι ανάμεσα στο 1,2 και 1,3 αλλά είναι πολύ κοντά και από την ασφαλή πλευρά, οπότε γίνεται αποδεκτός. Έτσι, η κατεργασία θα γίνει σε δύο φάσεις με τα εξής χαρακτηριστικά για κάθε φάση:

φάση κοίλανσης	αρχική διάμετρος [mm]	τελική διάμετρος [mm]	λόγος κοίλανσης
1η	D=188mm	$d_1=91,7\text{mm}$	2,05
2η	$d_1=91,7\text{mm}$	$d_2=80\text{mm}$	1,15

γ. **Η δύναμη κοίλανσης** στην πρώτη φάση δίδεται από τη σχέση (14.16):

$$F_z = d \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_B \cdot n$$

όπου: F_z : Δύναμη κοίλανσης [N],
 d : Διάμετρος του εμβόλου [mm],
 s : πάχος ελάσματος [mm],
 σ_B : Όριο θραύσης διαμορφούμενου υλικού [N/mm²],
 n : Συντελεστής διόρθωσης που εξαρτάται από το λόγο κοίλανσης και την κατεργασία.

Ο συντελεστής n δίδεται σε σχέση με το λόγο d/s και το λόγο κοίλανσης. Για τιμή του $\beta=2,05$ και του $d/s=53,3$, προκύπτει:

$$n \approx 1,07$$

Τότε η δύναμη κοίλανσης ισούται με:

$$F_z = d_1 \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_B \cdot n = 91,7 \text{ mm} \cdot \pi \cdot 1,5 \text{ mm} \cdot 270 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,07 \Rightarrow$$

$$F_z = 127900 \text{ N} \Rightarrow F_z = 127,9 \text{ kN}$$

δ. **Η χάρη κοίλανσης** προκύπτει από τη σχέση (14.22):

$$c = 2 \cdot s \cdot \sqrt{\frac{D}{d}}$$

όπου: c : χάρη κοίλανσης σε [mm],
 s : πάχος ελάσματος σε [mm],
 D : διάμετρος ελάσματος σε [mm],
 d : διάμετρος εμβόλου σε [mm],

αντικαθιστώντας τα δεδομένα της 1ης φάσης κοίλανσης, όπου η διάμετρος του εμβόλου είναι η d_1 προκύπτει:

$$c = 2 \cdot s \cdot \sqrt{\frac{D}{d_1}} = 2 \cdot 1,5 \text{ mm} \cdot \sqrt{\frac{188 \text{ mm}}{91,7 \text{ mm}}} \Rightarrow$$

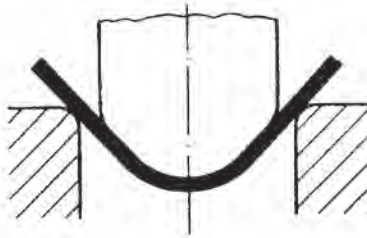
$$c = 4,29$$

Επισημαίνεται ότι η χάρη c αντιστοιχεί στη συνολική διαφορά στις διαμέτρους εμβόλου και απόστασης των κέντρων καμπυλότητας της μήτρας, όπως φαίνεται στο σχήμα 14.22.

14.3 ΚΑΜΨΗ

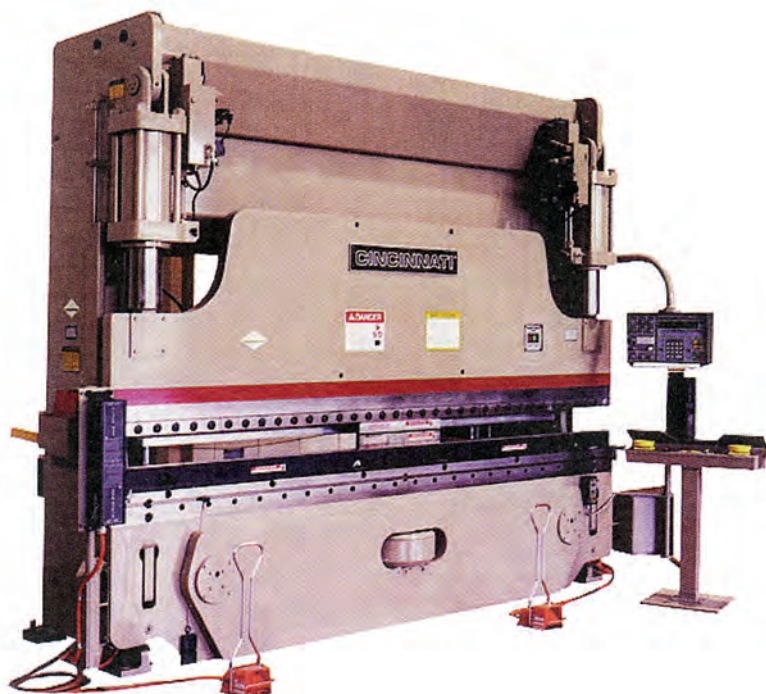
14.3.1 Γενικά

Η **κάμψη** είναι μία από τις πιο συνήθεις κατεργασίες διαμόρφωσης. Κατά την κάμψη το διαμορφούμενο έλασμα παραμορφώνεται, είτε για να πάρει κατάλληλο σχήμα είτε για να αυξηθεί η στιβαρότητά του. Ένα επίπεδο έλασμα έχει μικρότερη στιβαρότητα από το ίδιο έλασμα λυγισμένο σε τετράγωνη διατομή. Η κάμψη μπορεί να γίνεται είτε ελεύθερη, είτε με τη βοήθεια μηχανικών μέσων. Στο σχήμα 14.29 παρουσιάζεται η **ελεύθερη κάμψη**, που ένα έλασμα κάμπτεται από ένα έμβολο, στηριζόμενο σε δύο σημεία.



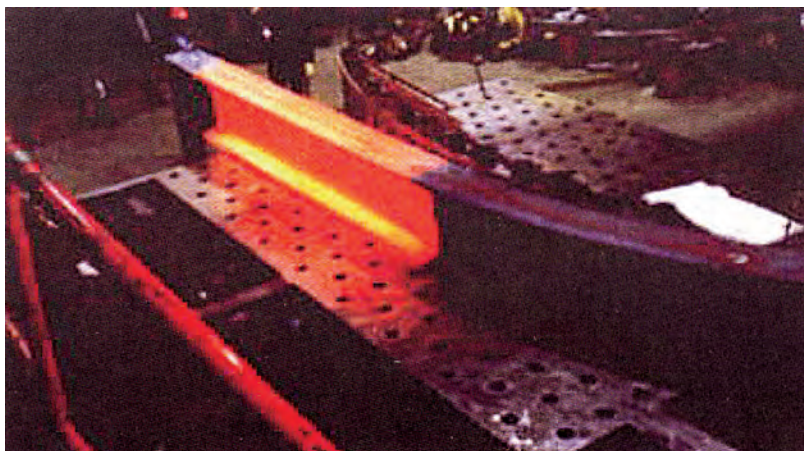
Σχήμα 14.29: Ελεύθερη κάμψη

Οι εργαλειομηχανές, στις οποίες εκτελείται κάμψη, είναι οι **στράντζες** και οι **στραντζόπρεςες**. Οι στράντζες που απαντώνται χειροκίνητες και μηχανοκίνητες, χρησιμοποιούνται συνήθως για μεμονωμένα τεμάχια και μικρή παραγωγή. Σε αντίθεση, οι στραντζόπρεςες χρησιμοποιούνται για μεγάλη παραγωγή τεμαχίων. Στο σχήμα 14.30 φαίνεται μια σύγχρονη, ψηφιακά καθοδηγούμενη, στραντζόπρεσα.



Σχήμα 14.30: C.N.C. Στραντζόπρεσα

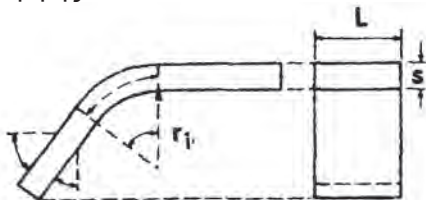
Η κάμψη, όπως και οι περισσότερες μηχανουργικές κατεργασίες διαμόρφωσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί εν θερμώ ή εν ψυχρώ, ανάλογα με το υλικό που παραμορφώνεται και το είδος της κάμψης. Στο σχήμα 14.31 φαίνεται η εν θερμώ διαμόρφωση μίας τυποποιημένης δοκού τύπου U.



Σχήμα 14.31 Κάμψη εν θερμώ

14.3.2 Μηχανισμός κάμψης

Στην κάμψη η ορολογία που χρησιμοποιείται φαίνεται στο σχήμα 14.32. Στο σχήμα αυτό διακρίνονται η γωνία κάμψης r_i , το πάχος του ελάσματος s και το μήκος της κάμψης L .



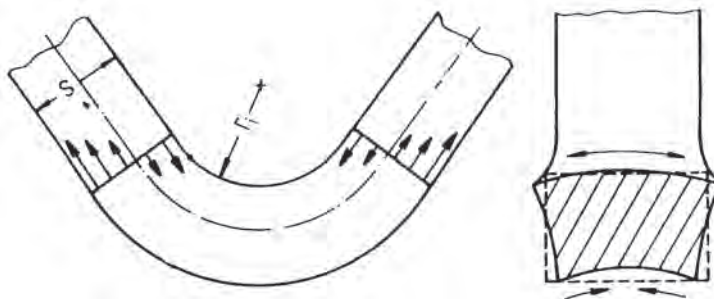
Σχήμα 14.32: Ορολογία κάμψης

Κατά τη διάρκεια της κάμψης το εξωτερικό τμήμα του ελάσματος καταπονείται σε εφελκυσμό, ενώ το εσωτερικό σε θλίψη. Θεωρητικά οι δύο αυτές τάσεις είναι ίσες σε μέγεθος και δίδονται από την εξίσωση:

$$\sigma_{εξ} = \sigma_{εσ} = \frac{1}{\left(\frac{2 \cdot r_i}{s}\right) + 1} \quad (14.24)$$

όπου: $\sigma_{εσ}$: η τάση εξωτερικά του τεμαχίου,
 $\sigma_{εξ}$: η τάση εσωτερικά του τεμαχίου,
 r_i : η ακτίνα κάμψης σε mm,
 s : το πάχος του ελάσματος σε mm.

Οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις, που προαναφέρθηκαν, παρουσιάζονται στο σχήμα 14.33. Ο άξονας ανάμεσα στο εσωτερικό τμήμα που θλίβεται και στο εξωτερικό τμήμα που εφελκύεται, ονομάζεται **ουδέτερος άξονας της κάμψης**. Η τάση πάνω στον άξονα αυτό είναι μηδέν.



Σχήμα 14.33: Τάσεις κατά την κάμψη

Η ελάχιστη ακτίνα της κάμψης r_i , που μπορεί να επιτευχθεί δίδεται από τη σχέση 14.25.

$$r_{imin} = s \cdot \lambda \quad (14.25)$$

όπου: r_{imin} : η μικρότερη δυνατή ακτίνα κάμψης σε mm,

s : το πάχος του ελάσματος σε mm,

λ : συντελεστής που εξαρτάται από το κατεργαζόμενο υλικό.

Ο συντελεστής λ δίδεται για διάφορα υλικά στον πίνακα Π.14.10

Πίνακας Π.14.10: Τιμές συντελεστή λ

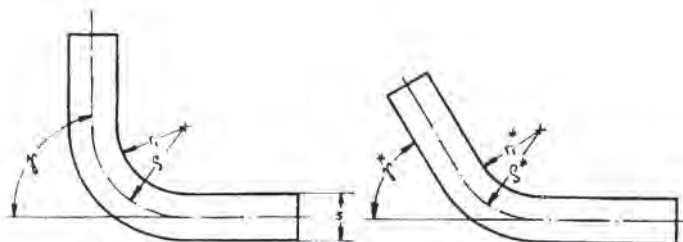
	Επαναφορά		Σκλήρυνση (αύξηση αντοχής)	
	λοξή	κατά μήκος	λοξή	κατά μήκος
Al	0,01	0,3	0,3	0,8
Cu	0,01	0,3	1,0	2,0
Ms67, Ms72	0,01	0,3	0,4	0,8
St13-3	0,01	0,4	0,4	0,8
C15-20	0,1	0,5	0,5	1,0
C35-40	0,3	0,8	0,8	1,5

Η ακτίνα της κάμψης δεν μπορεί να γίνει μικρότερη από την ελάχιστη που υπολογίζεται από τη σχέση (14.26). Ισχύει δηλαδή:

$$r_i \geq r_{imin} \quad (14.26)$$

Επαναφορά μετά από κάμψη

Το μέγεθος της επαναφοράς μετά από την κάμψη εξαρτάται κυρίως από το όριο διαρροής του υλικού του ελάσματος, από την ακτίνα και το είδος της κάμψης. Στο σχήμα 14.34 παρουσιάζεται έλασμα πριν και μετά την επαναφορά.

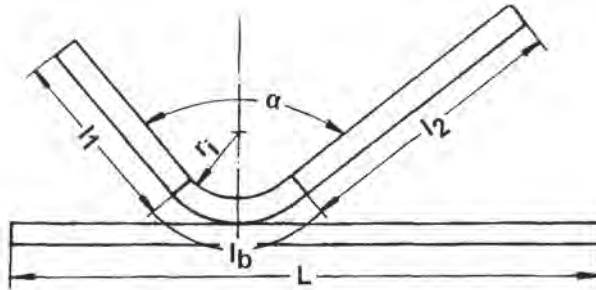


Σχήμα 14.34: Επαναφορά στην κάμψη

Ανάπτυγμα ελάσματος

Το ανάπτυγμα ενός ελάσματος, που έχει υποστεί κάμψη με συγκεκριμένη ακτίνα κάμψης r_i και που αποτελείται από δύο ευθύγραμμα τμήματα και ένα τόξο, όπως φαίνεται στο σχήμα 14.35, δίδεται από τη σχέση:

$$L = l_1 + l_b + l_2 \quad (14.27)$$



Σχήμα 14.35: Ανάπτυγμα ελάσματος

Στη σχέση (14.27) το συνολικό μήκος συμβολίζεται με L , ενώ αντίστοιχα με l_1 και l_2 συμβολίζονται τα μήκη των ευθύγραμμων τμημάτων του ελάσματος και με l_b το μήκος του τόξου. Το μήκος του τόξου l_b δίδεται από τη σχέση:

$$l_b = \frac{\pi \cdot \alpha}{180^\circ} \left(r_i + \frac{e \cdot s}{2} \right) \quad (14.28)$$

όπου: α : η γωνία της κάμψης σε μοίρες,
 r_i : η ακτίνα κάμψης σε mm,
 s : το πάχος του ελάσματος σε mm,
 e : συντελεστής διόρθωσης, ο οποίος εξαρτάται από το πάχος του ελάσματος και την ακτίνα της κάμψης.

Η τελική σχέση, που εκφράζει το συνολικό μήκος του αναπτύγματος, προκύπτει από τις σχέσεις (14.27) και (14.28) και είναι:

$$L = l_1 + \frac{\pi \cdot \alpha}{180^\circ} \left(r_i + \frac{e \cdot s}{2} \right) + l_2 \quad (14.29)$$

Στον πίνακα Π.14.11 δίδονται τιμές του συντελεστή διόρθωσης σε σχέση με το πάχος του ελάσματος και την ακτίνα της κάμψης,

Πίνακας Π.14.11: Τιμές συντελεστή διόρθωσης e

r_i/s	5,0	3,0	2,0	1,2	0,8	0,5
e	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5

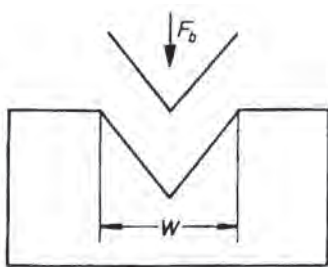
14.3.3 Δύναμη κάμψης

Η απαραίτητη δύναμη για την κάμψη F_b , εξαρτάται ουσιαστικά από το είδος της κάμψης. Έτσι στις επόμενες παραγράφους δίδονται οι σχέσεις προσδιορισμού της δύναμης κάμψης κατά περίπτωση.

Κάμψη με σφύρα τύπου V

Στο σχήμα 14.36 παρουσιάζεται μία σφύρα σχήματος V και μια φωτογραφία από κάμψη σε στραντζόπρεσα με σφύρα τέτοιου σχήματος. Η δύναμη κάμψης στην περίπτωση αυτή προκύπτει από τη σχέση:

$$F_b = \frac{1,2 \cdot b \cdot s^2 \cdot \sigma_B}{w} \quad (14.30)$$

**Σχήμα 14.36:** Σφύρα V

όπου: F_b : η δύναμη κάμψης σε N,
 b : πλάτος ελάσματος σε mm,
 s : το πάχος του ελάσματος σε mm,
 σ_B : όριο θραύσης σε εφελκυσμό σε N/mm²,
 w : διάστημα κάμψης σε mm,
 r_i : η ακτίνα κάμψης σε mm,
 r_{imin} : η ελάχιστη ακτίνα κάμψης σε mm,

Το διάστημα κάμψης w λαμβάνεται:

$$\begin{aligned} w &= 5 \cdot r_i \text{ για } r_i > r_{imin} \\ w &= 7 \cdot r_i \text{ για } r_i > r_{imin} \end{aligned} \quad (14.31)$$

Κάμψη με σφύρα τύπου U

Αντίστοιχα με την σφύρα και την κάμψη τύπου V, η δύναμη κάμψης για την περίπτωση της σφύρας τύπου U δίδεται από τη σχέση:

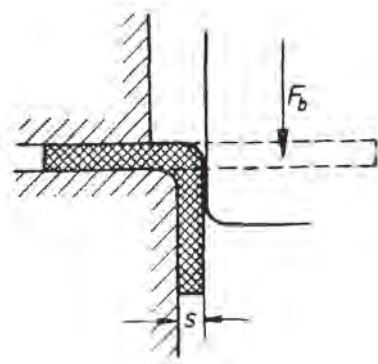
$$F_b = 0,4 \cdot s \cdot b \cdot \sigma_B \quad (14.32)$$

όπου: F_b , το πάχος του ελάσματος s και το διάστημα κάμψης w .

Κάμψη σκέλους

Στο σχήμα 14.37 παρουσιάζεται η διαδικασία μονόπλευρης κάμψης ή κάμψης σκέλους. Η δύναμη κάμψης στην περίπτωση αυτή προκύπτει από τη σχέση:

$$F_b = 0,2 \cdot s \cdot b \cdot \sigma_B \quad (14.33)$$



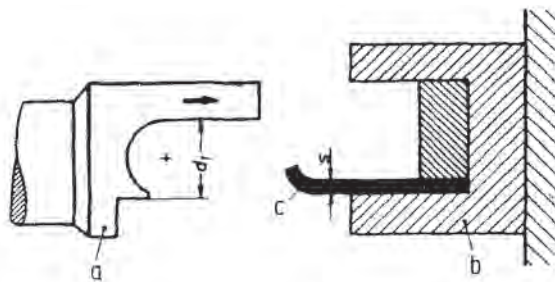
Σχήμα 14.37: Κάμψη σκέλους

Κυλινδρική κάμψη

Στο σχήμα 14.38 παρουσιάζεται η διαδικασία κυλινδρικής κάμψης. Η δύναμη κάμψης στην περίπτωση αυτή προκύπτει από τη σχέση:

$$F_b = \frac{0,7 \cdot s^2 \cdot b \cdot \sigma_B}{d_1} \quad (14.34)$$

όπου d_1 η διάμετρος του εμβόλου. Στο σχήμα 14.38 με a χαρακτηρίζεται το έμβολο, με b η μήτρα, ενώ ως c χαρακτηρίζεται το έλασμα που κάμπτεται.



Σχήμα 14.38: Κυλινδρική κάμψη

14.3.3 Έργο κάμψης

Το έργο κατά την κάμψη εξαρτάται από το είδος της κάμψης. Για κάθε περίπτωση η σχέση που εκφράζει το απαιτούμενο έργο κάμψης είναι:

$$W = x \cdot F_b \cdot h \quad (14.35)$$

όπου x συντελεστής, εξαρτώμενος από τη μέθοδο κάμψης.

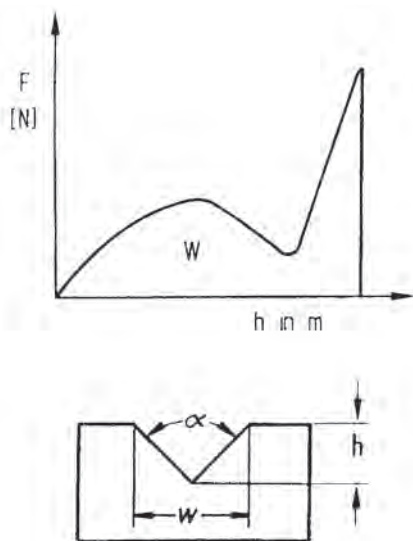
Έργο σε κάμψη με σφύρα μορφής V

Στην περίπτωση της κάμψης με σφύρα μορφής V το έργο που απαιτείται για την κάμψη ενός ελάσματος εκφράζεται με το εμβαδόν που περικλείει η καμπύλη της δύναμης συναρτήσει του ύψους της κάμψης h . Στο σχήμα 14.39 παρουσιάζεται η καμπύλη της δύναμης συναρτήσει του ύψους h .

Ο συντελεστής κάμψης σε αυτή την περίπτωση ισούται με $1/3$ και το έργο κάμψης δίδεται από τη σχέση:

$$W = \frac{1}{3} \cdot F_b \cdot h \quad (14.36)$$

όπου W σε Nm.



Σχήμα 14.39: Διάγραμμα δύναμης - ύψους h

Το ύψος κάμψης h δίδεται αντίστοιχα από τον τύπο:

$$h = \frac{\frac{w}{2}}{\varepsilon \varphi \frac{\alpha}{2}} \quad (14.37)$$

Έργο σε κάμψη με σφύρα μορφής U

Αντίστοιχα με την κάμψη μορφής V, το έργο κάμψης μορφής U προσδιορίζεται από τη σχέση (14.35). Ο συντελεστής κάμψης x σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται ίσος με $2/3$, ενώ το ύψος κάμψης h ίσο με 4 φορές το πάχος του ελάσματος. Έτσι, η σχέση (14.35) μετατρέπεται στη σχέση:

$$W = x \cdot F_b \cdot h = 1,06 \cdot s^2 \cdot b \cdot \sigma_B \quad (14.38)$$

Για την περίπτωση που χρησιμοποιείται συγκράτηση κατά την κάμψη του ελάσματος, το έργο κάμψης προκύπτει από τη σχέση:

$$W = (x \cdot F_b + F_G) \cdot h \quad (14.39)$$

όπου: F_b : η δύναμη κάμψης σε N,
 F_G : η δύναμη συγκράτησης σε N,
 x : ο συντελεστής κάμψης,
 h : το ύψος κάμψης σε mm,

Λαμβάνοντας ως δύναμη συγκράτησης

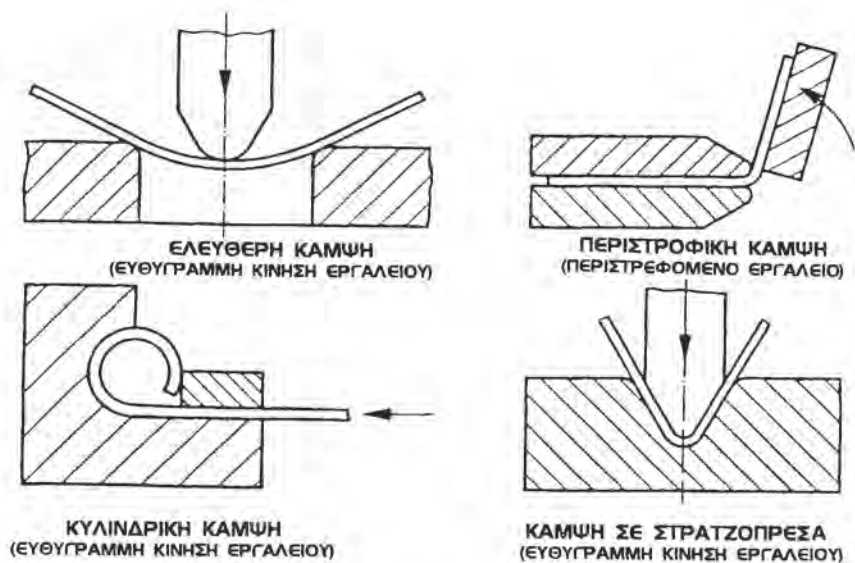
$$F_G = 0,25 \cdot F_b \quad (14.40)$$

προκύπτει έργο κάμψης που δίδεται από τη σχέση:

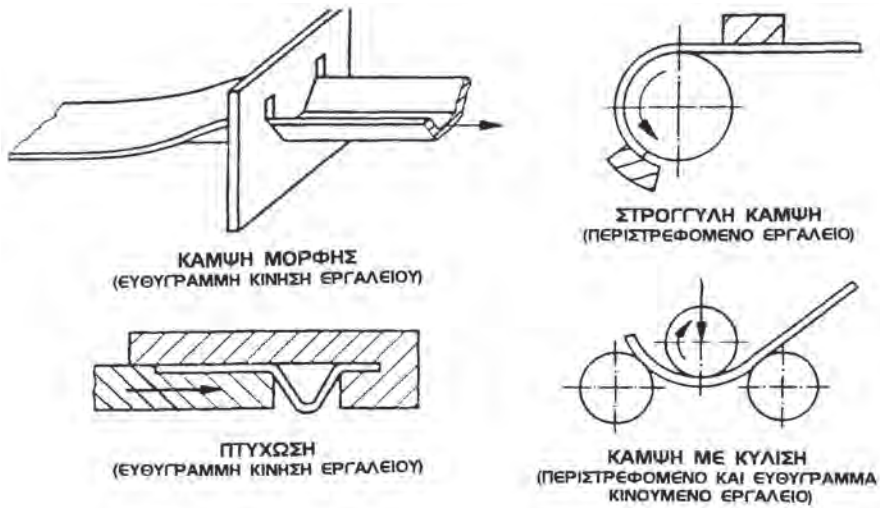
$$W = 2,4 \cdot s^2 \cdot b \cdot \sigma_B \quad (14.41)$$

14.3.4 Είδη κάμψης

Η κάμψη, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται, διακρίνεται κυρίως στα είδη που παρουσιάζονται στα σχήματα 14.40 και 14.41.

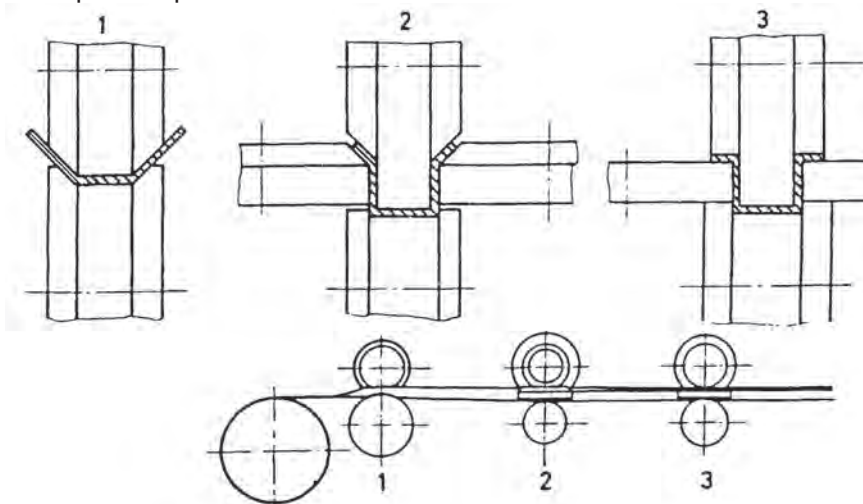


Σχήμα 14.40: Είδη κάμψης I



Σχήμα 14.41: Είδη κάμψης II

Εκτός των προαναφερομένων, ευρεία εφαρμογή παρουσιάζει η κάμψη μορφής με περιστρεφόμενα εργαλεία. Μία τέτοια διαδικασία, με τρία περιστρεφόμενα εργαλεία μορφής για τη δημιουργία συγκεκριμένης διατομής από αρχικό επίπεδο έλασμα, παρουσιάζεται στο [σχήμα 14.42](#). Διακρίνονται στο σχήμα οι κύλινδροι που πραγματοποιούν την κάμψη τραβώντας το έλασμα, ώστε αυτό να περάσει από το διάκενό τους, καθώς και οι κύλινδροι υποστήριξης για τη φάση 2 και 3, που υποστηρίζουν το έλασμα από τα πλάγια. Η διαδικασία αυτή μοιάζει πολύ με την έλαση που θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

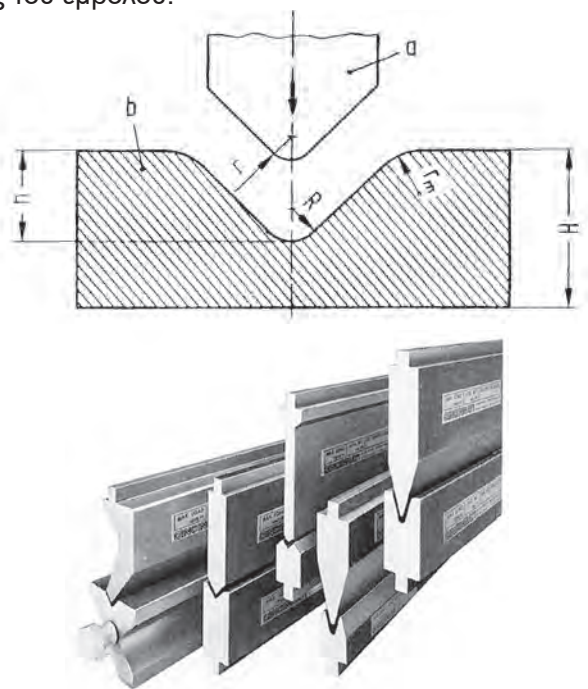


Σχήμα 14.42: Κάμψη μορφής με περιστρεφόμενα εργαλεία

14.3.5 Εργαλεία κάμψης

Εργαλείο κάμψης μορφής V

Το εργαλείο για την κάμψη αποτελείται από τη σφύρα, δηλαδή το έμβολο, και από την μήτρα. Η γεωμετρία του εργαλείου, καθώς και διάφορα εργαλεία αυτού του τύπου, παρουσιάζονται στο [σχήμα 14.43](#), που διακρίνονται οι χαρακτηριστικές ακτίνες των καμπυλοτήτων του εμβόλου και της μήτρας, όπως και το ύψος κάμψης h , που ουσιαστικά αποτελεί το βάθος της διαμόρφωσης του εμβόλου.



Σχήμα 14.43: Εργαλεία κάμψης V

Ανάμεσα στα επιμέρους χαρακτηριστικά του εργαλείου ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$r_m = 2,5 \cdot s \quad (14.42)$$

$$R = 0,7 \cdot (r + s)$$

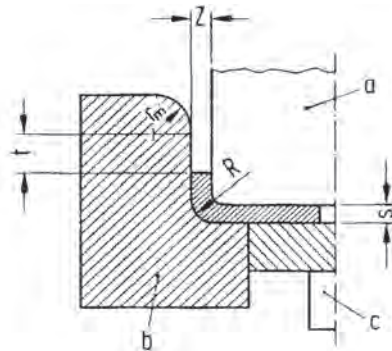
Ιδιαίτερα το ύψος κάμψης h εξαρτάται από το πάχος s του ελάσματος, που πρόκειται να καμφθεί, ενώ αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο συνολικό ύψος H της μήτρας. Στον [πίνακα Π.14.12](#) παρουσιάζονται τυποποιημένα ύψη κάμψης.

Πίνακας Π.14.12: Ύψος κάμψης και ύψος μήτρας συναρτήσει του πάχους του ελάσματος

h	4	7	11	15	18	22	25	28
s	1	2	3	4	5	6	7	8
H	20	30	40	50	55	65	70	80

Εργαλείο κάμψης μορφής U

Το εργαλείο για την κάμψη τύπου U αποτελείται από τη σφύρα (α) δηλαδή το έμβολο, από τη μήτρα (b) και από τον εξολκέα (c). Η γεωμετρία του εργαλείου παρουσιάζεται στο σχήμα 14.44, όπου διακρίνονται οι χαρακτηριστικές ακτίνες των καμπυλοτήτων της μήτρας, όπως και το ευθύγραμμο τμήμα της μήτρας μήκους t και η χάρη ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα Z .



Σχήμα 14.44: Εργαλείο κάμψης U

Η ακτίνα της καμπυλότητας του χείλους της μήτρας, δίδεται από τη σχέση:

$$r_m = 2,5 \cdot s \quad (14.43)$$

Ιδιαίτερα η απόσταση t εξαρτάται από το πάχος s του ελάσματος που πρόκειται να καμφθεί. Στον πίνακα Π.14.13 παρουσιάζονται προτεινόμενα μήκη t για διάφορα πάχη ελάσματος.

Πίνακας Π.14.13: Απόσταση t συναρτήσει του πάχους του ελάσματος

t	3	4	5	6	8	10	15	20
s	1	2	3	4	5	6	7	8

Η χάρη Z ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα μπορεί να κυμανθεί ανάμεσα στις τιμές:

$$\alpha_{\max} = s_{\max} \quad (17.21)$$

$$Z_{\min} = s_{\max} - s \cdot n$$

όπου $s_{\max}$ το μέγιστο πάχος ελάσματος και n συντελεστής εξαρτώμενος από το πάχος του ελάσματος s . Ο συντελεστής n για την περίπτωση, όπου το ευθύγραμμο τμήμα του ελάσματος, δηλαδή το l_1 ή l_2 του σχήματος 14.35, είναι από 25 έως 100 mm, δίδεται στον πίνακα Π.14.14 συναρτήσει του πάχους του ελάσματος s .

Πίνακας Π.14.4: Συντελεστής n συναρτήσει του πάχους του ελάσματος

n	0,15	0,10	0,10	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06
s	1	2	3	4	5	6	7	8

Αντίστοιχα, η ακτίνα καμπυλότητας R του βάθους της μήτρας προκύπτει από τη σχέση:

$$R = 0,7 \cdot (r + s) \quad \text{ή} \quad R = 0 \quad (14.45)$$

14.3.6 Υλικά εργαλείων κάμψης

Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή εργαλείων κάμψης, φαίνονται στον πίνακα Π.14.15

Πίνακας Π.14.15: Υλικά κατασκευής εργαλείων κάμψης

Υλικό No	Ονοματολογία κατά DIN	Σκληρότητα HRC	Έμβολο	Μήτρα
1550	C 110 W 1	60	✓	✓
2056	90 Cr 3	64	✓	✓
2842	90 Mn V 8	62	✓	✓

14.3.7 Εφαρμογή

Για την περίπτωση κάμψης μορφής V ενός ελάσματος από μαλακό χάλυβα St1303, πλάτους $b=35\text{mm}$ και πάχους $s=2\text{mm}$, με ακτίνα κάμψης $r_i=10\text{mm}$, μήκη των σκελών $l_1=20\text{mm}$ και $l_2=30\text{mm}$ και αντίστοιχα γωνία κάμψης $\alpha=90^\circ$, ζητούνται:

- ◆ Το συνολικό μήκος του αναπτύγματος L ,
- ◆ Η ελάχιστη δυνατή ακτίνα $r_{\min}$,
- ◆ Το διάστημα κάμψης w ,
- ◆ Η δύναμη κάμψης F_b ,
- ◆ Το έργο κάμψης W .

Το όριο θραύσης σε εφελκυσμό του υλικού είναι: $\sigma_B = 400 \text{ N/mm}^2$

α. Το συνολικό μήκος δίδεται από τη σχέση (14.29):

$$L = l_1 + \frac{\pi \cdot \alpha}{180^\circ} \left(r_i + \frac{e \cdot s}{2} \right) + l_2$$

αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\begin{aligned} L &= l_1 + \frac{\pi \cdot \alpha}{180^\circ} \left(r_i + \frac{e \cdot s}{2} \right) + l_2 = \\ &= 20 \text{ mm} + \frac{\pi \cdot 90^\circ}{180^\circ} \left(10 \text{ mm} + \frac{1 \cdot 2 \text{ mm}}{2} \right) + 30 \text{ mm} = 67,27 \text{ mm} \end{aligned}$$

Το e είναι ίσο με 1, όπως προκύπτει από τον πίνακα Π.14.11, μια και $r_i / s = 10 \text{ mm} / 2 \text{ mm} = 5$

β. Η ελάχιστη δυνατή ακτίνα r_{imin} προκύπτει από τη σχέση (14.25):

$$r_{imin} = s \cdot \lambda$$

αντικαθιστώντας από τον πίνακα Π.14.10 την τιμή του συντελεστή λ , προκύπτει με $\lambda = 0,01$

$$r_{imin} = s \cdot \lambda = 2 \text{ mm} \cdot 0,01 \Rightarrow r_{imin} = 0,02 \text{ mm}$$

γ. Το διάστημα κάμψης w προκύπτει από τη σχέση (14.31):

$$w = 5 \cdot r_i = 5 \cdot 10 \text{ mm} \Rightarrow w = 50 \text{ mm},$$

μια και $r_i > r_{imin}$

δ. Η δύναμη κάμψης προκύπτει από τη σχέση (14.30) για την περίπτωση κάμψης με σφύρα μορφής V. Έτσι:

$$F_b = \frac{1,2 \cdot b \cdot s^2 \cdot \sigma_B}{w} = \frac{1,2 \cdot 35 \text{ mm} \cdot (2 \text{ mm})^2 \cdot 400 \text{ N/mm}^2}{50 \text{ mm}} \Rightarrow F_b = 1344 \text{ N}$$

ε. Το έργο της κάμψης προκύπτει από τη σχέση (14.36), λαμβάνοντας υπόψη ότι το ύψος της κάμψης h προκύπτει αντίστοιχα από τη σχέση (14.37). Έτσι:

$$h = \frac{\frac{w}{2}}{\varepsilon\varphi \frac{\alpha}{2}} = \frac{\frac{50 \text{ mm}}{2}}{\varepsilon\varphi 45^\circ} \Rightarrow h = \frac{50 \text{ mm}}{2} \Rightarrow h = 25 \text{ mm}$$

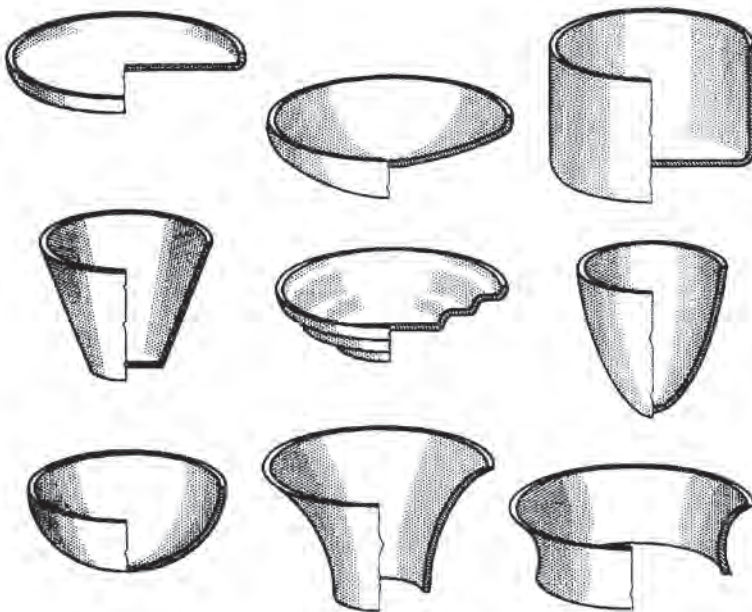
και:

$$W = \frac{1}{3} \cdot F_b \cdot h = \frac{1}{3} \cdot 1344 \text{ N} \cdot 25 \text{ mm} = \frac{1}{3} \cdot 1344 \text{ N} \cdot 0,025 \text{ m} \Rightarrow W = 11,1 \text{ Nm}$$

14.4 ΠΕΡΙΩΘΗΣΗ

14.4.1 Γενικά

Η **περιώθηση** (λέγεται και **μασγαλάρισμα**), είναι μια τεχνική μορφοποίησης ελασμάτων ή σωλήνων σε κυλίνδρους χωρίς ραφή, κώνους, ημισφαίρια ή άλλα κυκλικά σχήματα. Η μορφοποίηση με περιώθηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό περιστροφής και ταυτόχρονης εφαρμογής δύναμης, δηλαδή μία διαδικασία που μοιάζει πολύ με την τόννευση. Στο σχήμα 14.45 παρουσιάζονται τυπικά αντικείμενα που έχουν παραχθεί με περιώθηση. Τα αντικείμενα αυτά είναι συμμετρικά ως προς άξονα και έχουν ως βασικό σχήμα κύλινδρο, κώνο ή γενικά ένα θόλο.



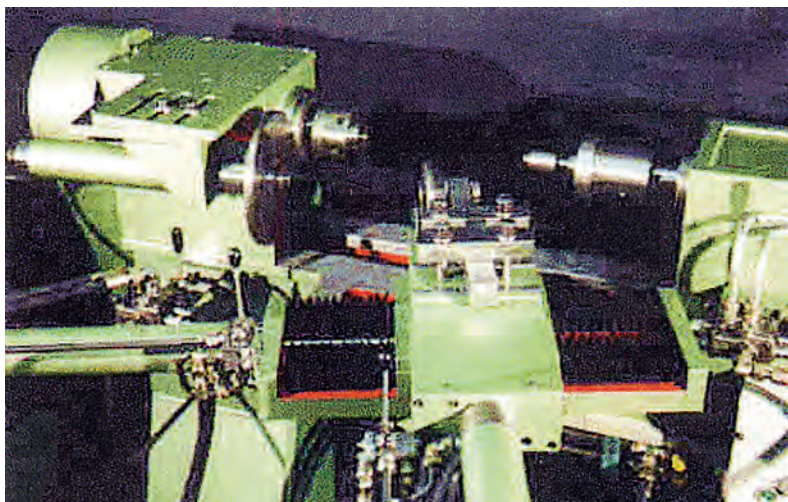
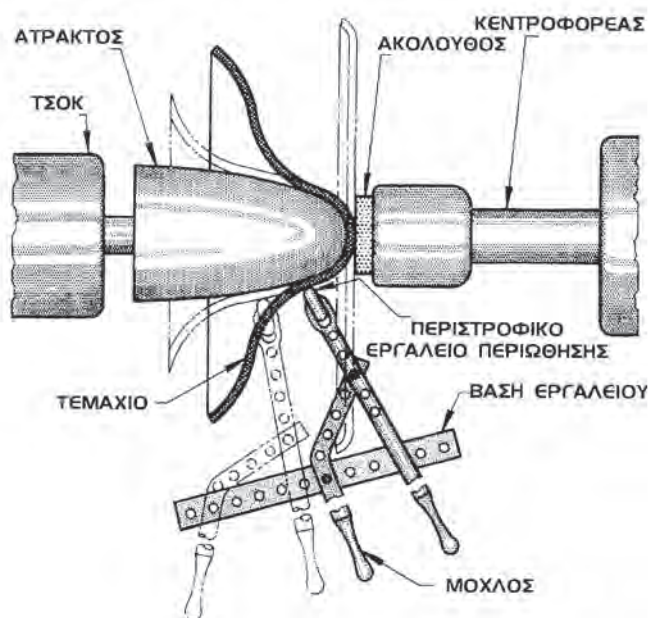
Σχήμα 14.45: Προϊόντα περιώθησης

Γενικά, η περιώθηση διακρίνεται σε χειροκίνητη ή μηχανική και αντίστοιχα η κίνηση του εργαλείου διαμόρφωσης γίνεται χειροκίνητα ή με μηχανικό τρόπο. Πιο ειδικά η περιώθηση διακρίνεται σε τρία είδη: συμβατική, διατμητική και περιώθηση σωλήνων.

14.4.2 Συμβατική περιώθηση

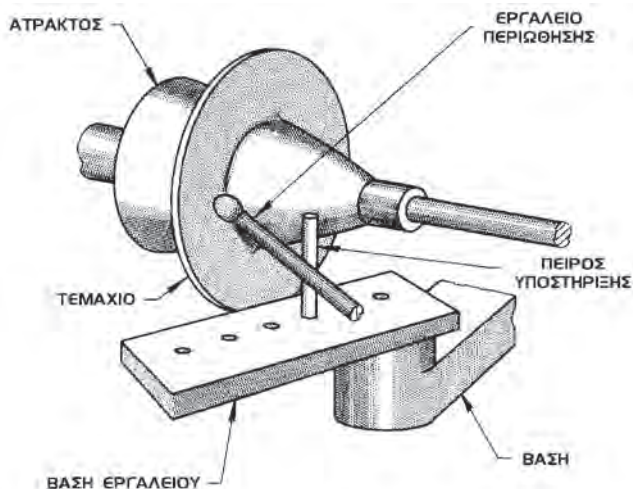
Σε αυτή τη διαδικασία ένα προδιαμορφωμένο κυκλικό ή επίπεδο έλασμα συγκρατείται πάνω σε ειδικής μορφής περιστρεφόμενο άξονα. Με ένα ειδικό δύσκαμπτο εργαλείο, το οποίο μπορεί να είναι και περιστρεφόμενο, δίδεται με πίεση το σχήμα του άξονα στο έλασμα. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε διαδοχικές φάσεις και απαιτεί σημαντική επιδεξιότητα από το χειριστή. Η διαδικασία της περιώθησης είναι πολύ οικονομική, κυρίως για την κατασκευή κωνικών ή γενικών καμπύλων μορφών, μια και με όποια άλλη διαδικασία το κόστος και η δυσκολία παραγωγής είναι αρκετά μεγαλύτερα.

Η συμβατική περιώθηση μπορεί να κατεργασθεί αντικείμενα διαμέτρου μέχρι και 6m και πραγματοποιείται συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Υπάρχουν ειδικές περιπτώσεις μετάλλων με μικρή ολκιμότητα στις οποίες απαιτείται η παραμόρφωση να γίνεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Στο σχήμα 14.46 παρουσιάζεται η διαδικασία συμβατικής περιώθησης με χειροκίνητο εργαλείο, καθώς και μία εργαλειομηχανή για μηχανική περιώθηση. Μέσω των δύο μοχλών στη χειροκίνητη περιώθηση, ο χειριστής εφαρμόζει την απαιτούμενη πίεση στο υπό παραμόρφωση έλασμα. Το εργαλείο περιώθησης του σχήματος είναι περιστροφικό στην άκρη του.



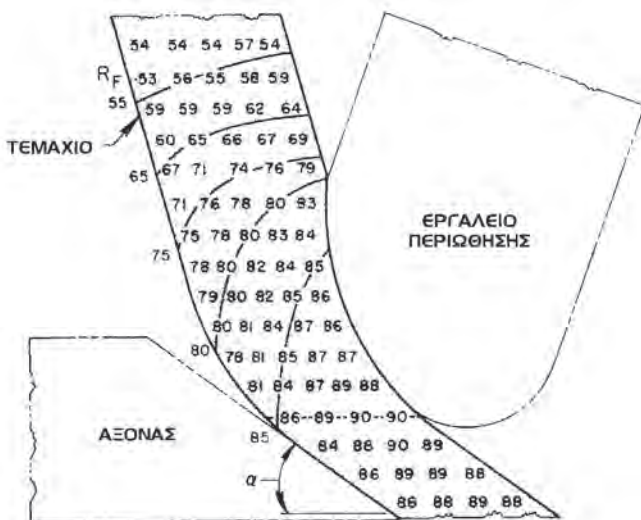
Σχήμα 14.46: Χειροκίνητη και μηχανική περιώθηση

Αντίστοιχα στο σχήμα 14.47 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός για τη διαδικασία της περιώθησης. Το εργαλείο σε αυτή την περίπτωση δεν είναι περιστροφικό.



Σχήμα 14.47: Εξοπλισμός περιώθησης

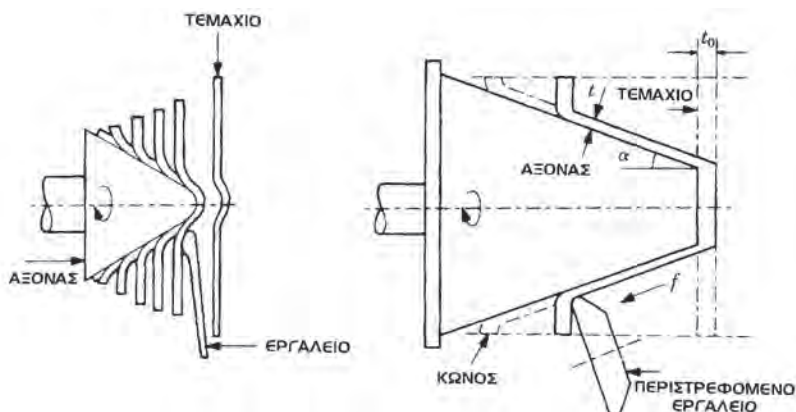
Το έλασμα που διαμορφώνεται με περιώθηση λεπταίνει ενώ ταυτόχρονα σκληραίνει επιφανειακά. Στο σχήμα 14.48 φαίνεται η τιμή της σκληρότητας κατά Rockwell F, στο υλικό ενός ελάσματος που διαμορφώνεται με περιώθηση.



Σχήμα 14.48: Σκληρότητα ελάσματος που διαμορφώνεται με περιώθηση

14.4.3 Διατμητική περιώθηση

Σε αυτή τη διαδικασία διαμορφώνεται ένα προδιαμορφωμένο κυκλικό ή επίπεδο έλασμα σε συμμετρικό ως έναν άξονα σχήμα, κωνικό ή γενικής καμπύλης. Η διαφορά με τη συμβατική περιώθηση είναι ότι η διάμετρος του τελικού τεμαχίου παραμένει ίδια με την αρχική διάμετρο του ελάσματος. Στο σχήμα 14.49 φαίνεται η διαφορά ανάμεσα στη συμβατική και τη διατμητική περιώθηση.

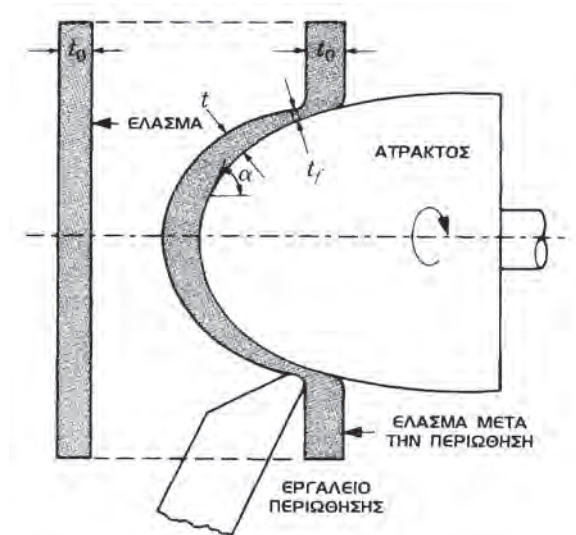


Σχήμα 14.49: Συμβατική και διατμητική περιώθηση

Το πάχος t του τελικού τεμαχίου μικραίνει στη διατμητική περιώθηση και μάλιστα είναι ίσο με $t = t_0$ ημα, όπου t_0 το αρχικό πάχος του ελάσματος και α η γωνία του άξονα, όπως φαίνεται στο σχήμα 14.49.

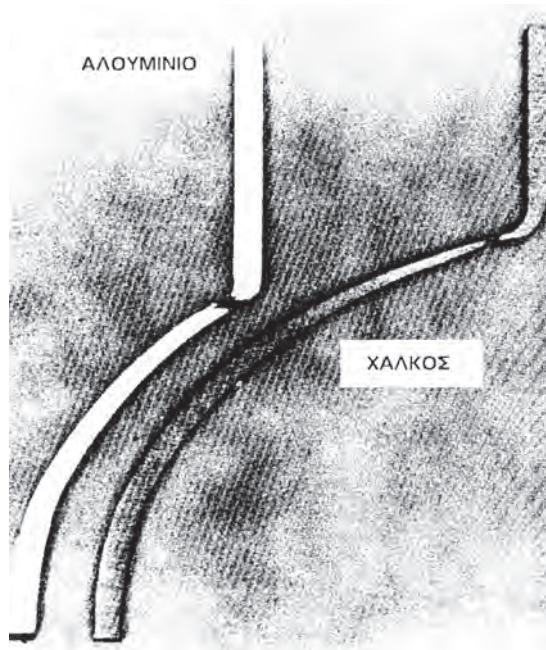
Στη διατμητική περιώθηση παίζει ιδιαίτερο ρόλο η δυνατότητα του κατεργαζόμενου υλικού να παραμορφωθεί σύμφωνα με την κατεργασία, αλλά να μη δημιουργηθούν ρωγμές ή θραύσεις. Για κάθε υλικό υπάρχει ένα ελάχιστο πάχος, στο οποίο μπορεί το έλασμα να διαμορφωθεί χωρίς να σπάσει. Για τον προσδιορισμό της ικανότητας για περιώθηση, γίνεται δοκιμή περιώθησης του υλικού. Στη δοκιμή αυτή ένα κυκλικό δοκίμιο παραμορφώνεται με περιώθηση πάνω σε ελλειπτικό άξονα, όπως φαίνεται στο σχήμα 14.50. Σε κάποιο πάχος t_f το έλασμα θραύεται και αυτό το πάχος αντιπροσωπεύει το μέγιστο δυνατό πάχος που μπορεί να επιτευχθεί. Η μέγιστη σμίκρυνση δίδεται από τον τύπο:

$$\frac{t_0 - t_f}{t_0} \cdot 100\%$$



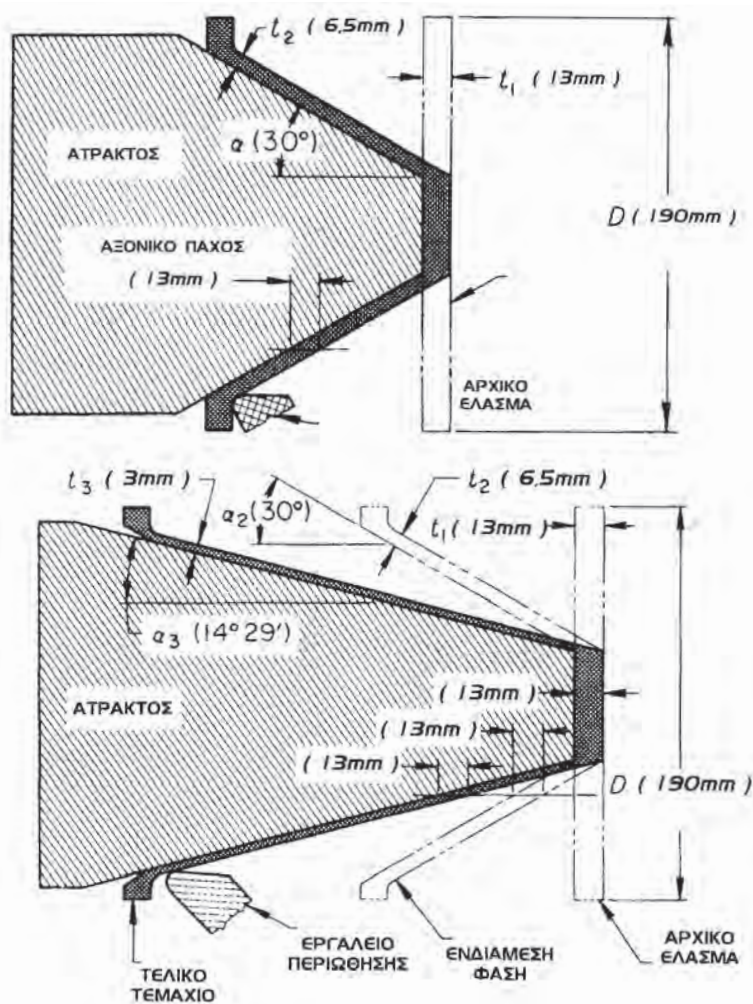
Σχήμα 14.50: Δοκιμή περιώθησης

Στο σχήμα 14.51 φαίνονται τα αποτελέσματα από δοκιμή περιώθησης σε αλουμίνιο και χαλκό.



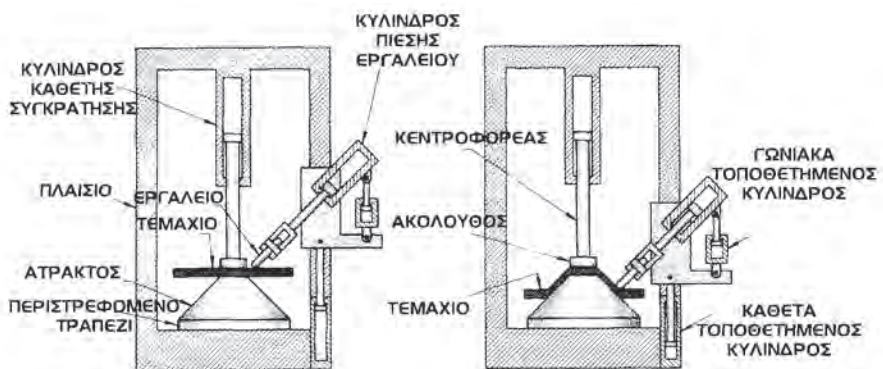
Σχήμα 14.51: Δοκιμή περιώθησης σε αλουμίνιο και χαλκό

Η διατμητική περιώθηση μπορεί να πραγματοποιηθεί, ανάλογα με το διαμορφούμενο υλικό και τη γωνία του άξονα διαμόρφωσης, σε ένα ή περισσότερα στάδια. Στο σχήμα 14.52 παρουσιάζονται διαδικασίες διαμόρφωσης σε ένα και δύο στάδια αντίστοιχα.



Σχήμα 14.52: Περιώθηση σε ένα και σε δύο στάδια

Η περιώθηση, όπως έχει ήδη περιγραφεί, μπορεί να επιτευχθεί εκτός από το χειροκίνητο τρόπο και με μηχανικό. Στο σχήμα 14.53 φαίνεται η διαδικασία περιώθησης σε ειδική μηχανή.

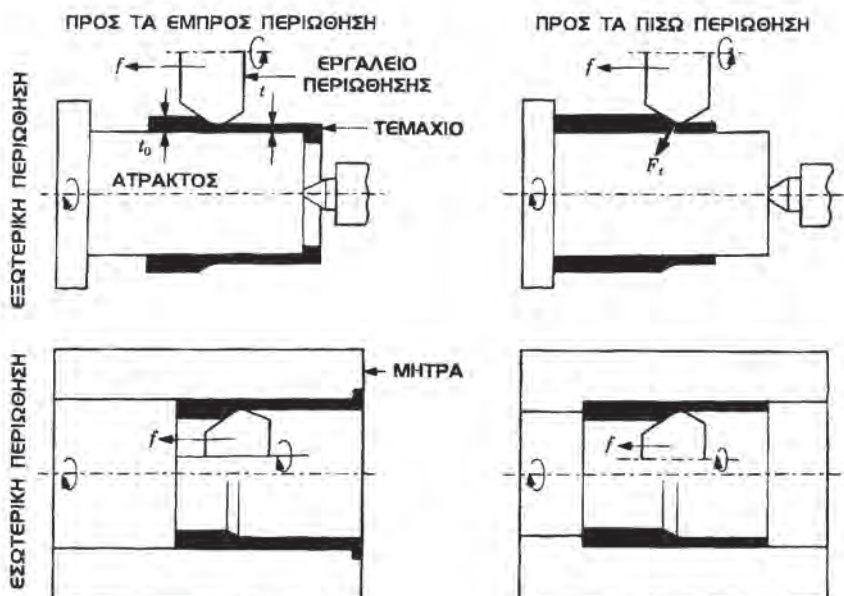


Σχήμα 14.53: Μηχανική περιώθηση

14.4.4 Περιώθηση σωλήνων

Σε αυτή τη διαδικασία, σωλήνες μικραίνουν στο πάχος με την πίεση περιστροφικών εργαλείων. Η διαδικασία περιώθησης σωλήνων μπορεί να εκτελείται είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά. Η περιώθηση σωλήνων μπορεί επίσης να εκτελείται προς τα εμπρός ή προς τα πίσω, κάτι ανάλογο δηλαδή με την άμεση και προς τα πίσω εξώθηση. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένας λεπτότερος, από τον αρχικό, σωλήνας, ο οποίος όμως έχει αυξηθεί στο μήκος. Η περιώθηση σωλήνων χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή εξαρτημάτων αυτοκινήτων, σκαφών, πυραύλων και ρουκετών.

Στο σχήμα 14.54 φαίνονται οι τέσσερις παραλλαγές περιώθησης σωλήνων. Η δυνατότητα για περιώθηση προσδιορίζεται, όπως και στην διαμητική περιώθηση, με παρόμοια δοκιμή.



Σχήμα 14.54: Παραλλαγές περιώθησης σωλήνων



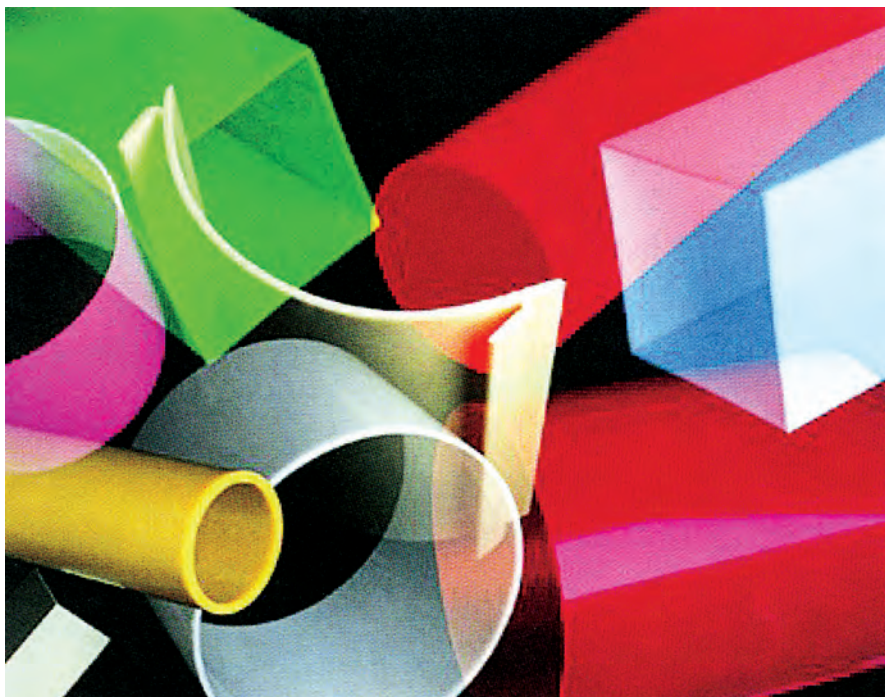
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 14ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Η απότμηση είναι η κατεργασία διαμόρφωσης κατά την οποία αποχωρίζεται μέρος από το υλικό ενός ελάσματος μέσω ενός κατάλληλου εργαλείου. Το κοπτικό εργαλείο, το οποίο κάνει την απότμηση, είναι δεμένο σε μία πρέσα εκ-κεντρου ή σπανιότερα σε υδραυλική πρέσα και μέσω αυτής κινείται και συγκρούεται με το έλασμα, κόβοντας από αυτό κομμάτι συγκεκριμένης μορφής.
- Για να επιτυγχάνουμε ομοιόμορφη καταπόνηση του εμβόλου στην απότμηση, πρέπει αυτό να δένεται πάνω στο κέντρο βάρους των γραμμών (γραμμικό κέντρο βάρους) του περιγράμματος που πρόκειται να κόψει. Όταν το κομμάτι που κόβεται δεν έχει συμμετρική μορφή, που τότε είναι γνωστό το κέντρο βάρους του, είναι απαραίτητο να προσδιορισθεί η θέση που θα δεθεί το έμβολο της απότμησης και που θα είναι το σημείο εφαρμογής της συνισταμένης δύναμης απότμησης.

- Ο συντελεστής εκμετάλλευσης του υλικού σε μία απότμηση συμβολίζεται με ξ και είναι ο λόγος του εμβαδού του τεμαχίου προς το εμβαδόν του διατιθέμενου ελάσματος. Ο συντελεστής αυτός, που χαρακτηρίζει την κατεργασία απότμησης, επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος, ώστε να γίνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της επιφάνειας του ελάσματος.
- Η βαθεία κοίλανση είναι η κατεργασία κατά την οποία διαμορφώνεται ένα επίπεδο έλασμα σε κοίλο, μέσω ενός κατάλληλου εργαλείου. Η βαθεία κοίλανση πραγματοποιείται σε πρέσες. Το τεμάχιο που πρόκειται να διαμορφωθεί, ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού του, μπορεί να βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είτε σε μεγαλύτερη θερμοκρασία (συνήθως πάνω από 350 °C). Η κοίλανση στις δύο αυτές περιπτώσεις λέγεται κοίλανση εν ψυχρώ και κοίλανση εν θερμώ αντίστοιχα.
- Λόγος κοίλανσης β είναι ο λόγος της αρχικής διαμέτρου του ελάσματος προς την τελική διάμετρό του. Ο λόγος αυτός όσο μεγαλώνει, τόσο δυσκολότερη είναι και η απαιτούμενη κοίλανση.
- Αρκετές φορές στη βαθεία κοίλανση ενός ελάσματος η απευθείας παραμόρφωσή του στην τελική μορφή δεν είναι δυνατή, μια και το υλικό που παραμορφώνεται δεν αντέχει αυτή τη βίαιη αλλαγή της μορφής του και ραγίζει ή σπάει. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται αρκετές διαδοχικές κοιλάνσεις, οι οποίες ονομάζονται ανακοιλάνσεις και το έλασμα παίρνει την τελική του μορφή μετά από ενδιάμεσες μορφές.
- Η ταχύτητα κοίλανσης εξαρτάται από το διαμορφούμενο υλικό, τη γεωμετρία του τεμαχίου καθώς και από το είδος της πρέσας.
- Οι ιδανικές συνθήκες σε μία κοίλανση είναι όταν: το κατεργαζόμενο υλικό είναι κατάλληλο, το τεμάχιο είναι συμμετρικό, υπάρχει επαρκής λίπανση, η πίεση συγκράτησης είναι ελεγχόμενη και η κατάσταση της πρέσας είναι άριστη.
- Η κάμψη είναι μία από τις πιο συνήθεις κατεργασίες διαμόρφωσης. Κατά την κάμψη το διαμορφούμενο έλασμα παραμορφώνεται, είτε για να πάρει κατάλληλο σχήμα είτε για να αυξηθεί η στιβαρότητά

του. Η κάμψη μπορεί να γίνεται είτε ελεύθερη, είτε με τη βοήθεια μηχανικών μέσων. Οι εργαλειομηχανές, στις οποίες εκτελείται η κάμψη, είναι οι στράντζες και οι στραντζόπρες. Οι στράντζες που απαντώνται χειροκίνητες και μηχανοκίνητες, χρησιμοποιούνται συνήθως για μεμονωμένα τεμάχια και μικρή παραγωγή. Σε αντίθεση, οι στραντζόπρες χρησιμοποιούνται για μεγάλη παραγωγή τεμαχίων.

- Η **περιώθηση** είναι μία τεχνική μορφοποίησης ελασμάτων ή σωλήνων σε κυλίνδρους χωρίς ραφή, κώνους, ημισφαίρια ή άλλα κυκλικά σχήματα. Η μορφοποίηση με περιώθηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό περιστροφής και ταυτόχρονης εφαρμογής δύναμης, δηλαδή μία διαδικασία που μοιάζει πολύ με την τórνευση. Γενικά, η περιώθηση διακρίνεται σε χειροκίνητη ή μηχανική και αντίστοιχα η κίνηση του εργαλείου διαμόρφωσης γίνεται χειροκίνητα ή με μηχανικό τρόπο. Πιο ειδικά η περιώθηση διακρίνεται σε τρία είδη: συμβατική, διατμητική και περιώθηση σωλήνων.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

15

ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

- 15.1 Διαμόρφωση σπειρώματος
- 15.2 Αποτύπωση
- 15.3 Ολκή
- 15.4 Διαμόρφωση σωλήνων
- 15.5 Υψηλού ρυθμού ενέργειας παραμορφώσεις
- 15.6 Ψαλιδισμός
- 15.7 Διαμορφώσεις πλαστικών



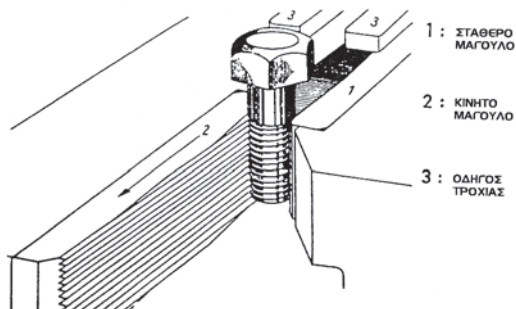
Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να γνωρίσετε τις ειδικές μεθόδους μορφοποίησης, όπως είναι η διαμόρφωση σπειρώματος, η αποτύπωση, η ολκή, η διαμόρφωση σωλήνων, ο ψαλιδισμός και οι υψηλού ρυθμού ενέργειας διαμορφώσεις.
- ☒ Να γνωρίσετε τις μεθόδους διαμόρφωσης των πλαστικών.

Εκτός από τις μεθόδους παραμόρφωσης, που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, υπάρχουν και άλλες, που χαρακτηρίζονται κυρίως από την ιδιαιτερότητα είτε της μεθοδολογίας είτε του τελικού προϊόντος. Τις περισσότερες φορές οι μέθοδοι που θα περιγραφούν παρακάτω είναι παρόμοιες ή συνδυασμοί αυτών, που έχουν ήδη περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια.

15.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΠΕΙΡΩΜΑΤΟΣ

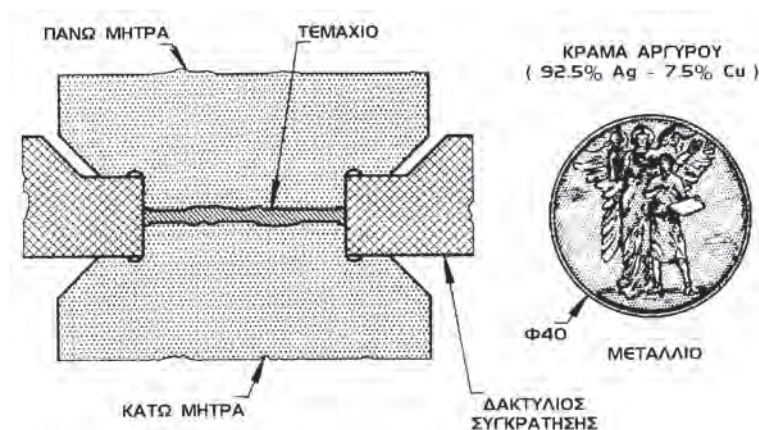
Η διαμόρφωση σπειρώματος πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατά τη διεργασία αυτή μία ράβδος περνά ανάμεσα από δύο περιστρεφόμενες μήτρες ή δύο επίπεδες μήτρες που κινούνται επάλληλα. Στο σχήμα 15.1 φαίνεται η διαδικασία μορφοποίησης σπειρώματος από μία κινούμενη μήτρα και μία σταθερή. Ο ρυθμός παραγωγής σε αυτή τη διαδικασία είναι πολύ υψηλός και εξαρτάται από τη διάμετρο του σπειρώματος. Για περίπου διάμετρο 25mm ο ρυθμός διαμόρφωσης είναι περίπου ένα σπείρωμα το δευτερόλεπτο. Διαμόρφωση σπειρώματος γίνεται επίσης με περιστρεφόμενες μήτρες, δηλαδή με διαδικασία όπως στην έλαση.



Σχήμα 15.1: Σπείρωμα με επίπεδες μήτρες

15.2 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ

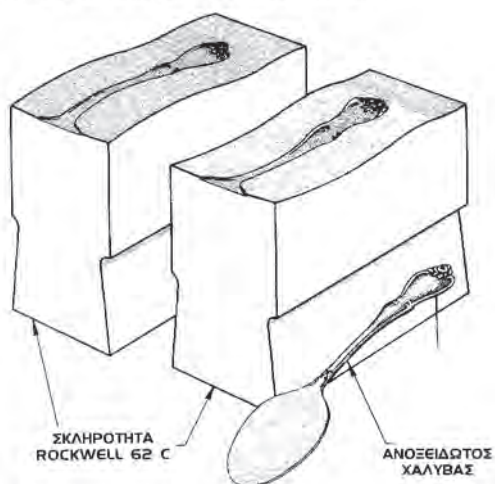
Η αποτύπωση αποτελεί ειδική περίπτωση της σφυρηλάτησης με κλειστές μήτρες. Χρησιμοποιείται κυρίως για παραγωγή νομισμάτων, μεταλλίων κ.λπ., που όλο το υλικό διαμορφώνεται σε μια κλειστή κοιλότητα. Η πίεση που εξασκείται πρέπει να είναι 5-6 φορές μεγαλύτερη από την τάση διαρροής του υλικού, ώστε να παράγονται με ακρίβεια οι λεπτομέρειες. Οι Ρωμαίοι με τέτοια απλά εργαλεία κατασκεύαζαν νομίσματα περίπου το 700 π.Χ. Στο σχήμα 15.2 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής μεταλλίου με αποτύπωση.



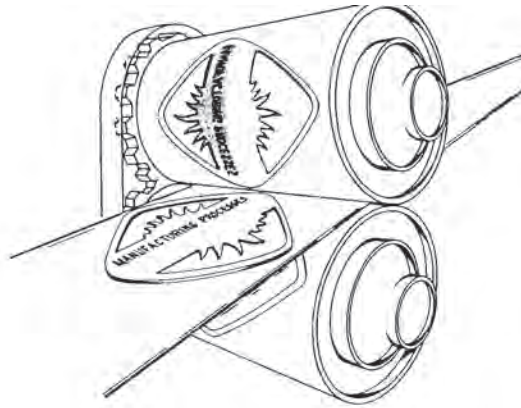
Σχήμα 15.2: Διαμόρφωση μεταλλίων

Με την ίδια διαδικασία παρασκευάζονται είδη κουζίνας, όπως μαχαίρια, πιρούνια κ.λπ. με λεπτή σχεδίαση. Στο σχήμα 15.3 παρουσιάζονται οι μήτρες για τη διαμόρφωση κουταλιών. Αντίστοιχα στο σχήμα 15.4 φαίνεται η διαδικασία αποτύπωσης φίρμας σε έλασμα κονσέρβας.

ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ ΜΗΤΡΑΣ : 10.000.000 ΤΕΜΑΧΙΑ



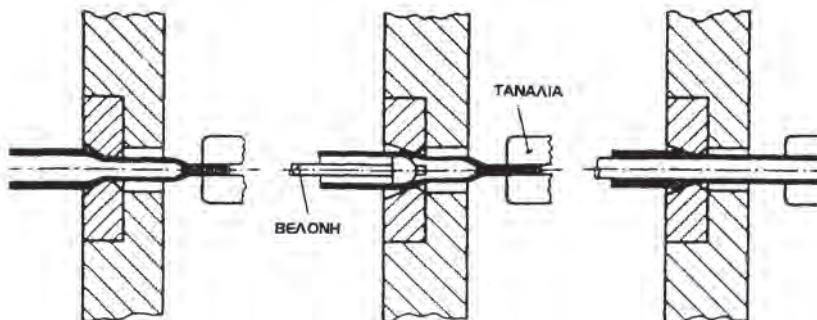
Σχήμα 15.3: Διαμόρφωση κουταλιών



Σχήμα 15.4: Αποτύπωση φίρμας

15.3 ΟΛΚΗ

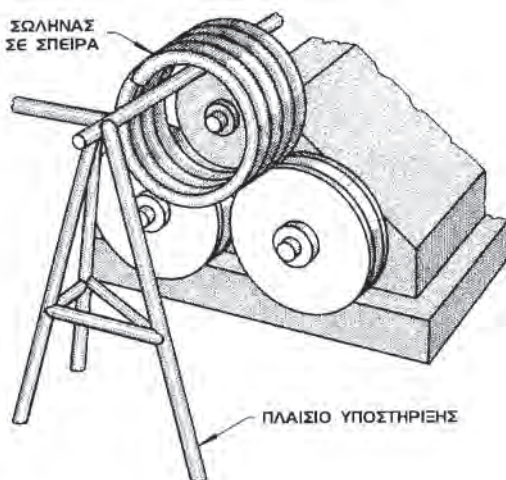
Η ολκή αποτελεί παραλλαγή της εξώθησης. Κατά την εξώθηση το τεμάχιο αναγκάζεται να περάσει από μία μήτρα που βρίσκεται στο τέλος ενός θαλάμου. Η πίεση εφαρμόζεται με έμβολο, το οποίο σπρώχνει το τεμάχιο που τελικά παραμορφώνεται, διερχόμενο από το στενότερο άνοιγμα της μήτρας. Στην ολκή η διαδικασία παραμόρφωσης είναι η ίδια, μόνο που το τεμάχιο τραβιέται από μπροστά με ειδικό σφιγκτήρα. Στο [σχήμα 15.5](#) φαίνεται μία διαδικασία ολκής για την ελάττωση της διαμέτρου ενός σωλήνα. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή σύρματος (συρματοποίηση).



Σχήμα 15.5: Ολκή

15.4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΩΛΗΝΩΝ

Η κάμψη των σωλήνων αποτελεί μία πιο ειδική εφαρμογή της κάμψης. Μπορεί να θεωρηθεί ιδιαίτερη εφαρμογή, μια και η χρήση των σωληνώσεων στις κατασκευές είναι πολύ διαδεδομένη. Στο σχήμα 15.6 φαίνεται η διαδικασία περιστροφικής κάμψης σωλήνων. Τέτοιες διαδικασίες παραμόρφωσης των σωλήνων υπάρχουν αρκετές και αντίστοιχα πολλές συσκευές για την παραμόρφωση αυτή.



Σχήμα 15.6: Κάμψη σωλήνων

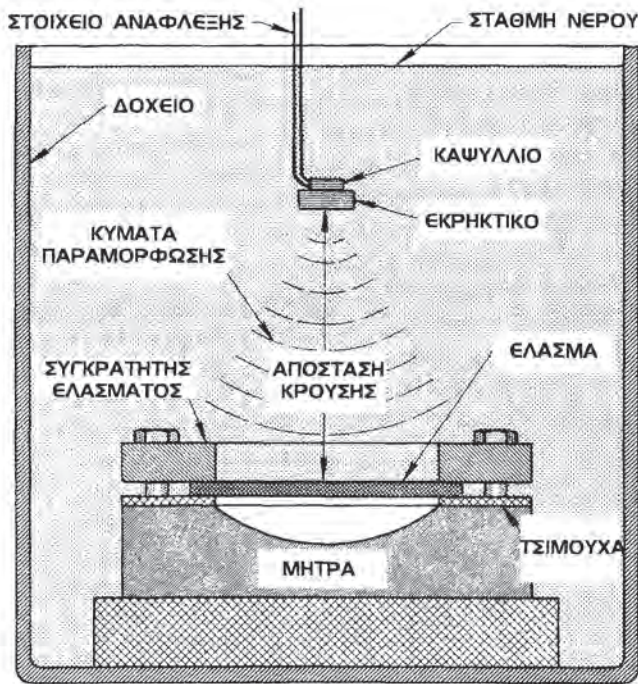
Η βασική αρχή για τις παραμορφώσεις των σωλήνων είναι αντίστοιχη με τις παραμορφώσεις ράβδων, όπως έχει ήδη περιγραφεί. Ιδιομορφία όμως για την κάμψη των σωλήνων αποτελεί η ανάγκη, που εμφανίζεται συχνά, για εσωτερική υποστήριξη του σωλήνα κατά την κάμψη.

15.5 ΥΨΗΛΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Η παραμόρφωση υψηλού ρυθμού ενέργειας προϋποθέτει τη χρήση εκρηκτικού μέσου για τη δημιουργία της απαιτούμενης δύναμης. Η εκρηκτική παραμόρφωση αλλάζει το σχήμα και τη μορφή σε ένα έλασμα, με στιγμιαία υψηλή πίεση που δημιουργείται από την έκρηξη ενός εκρηκτικού.

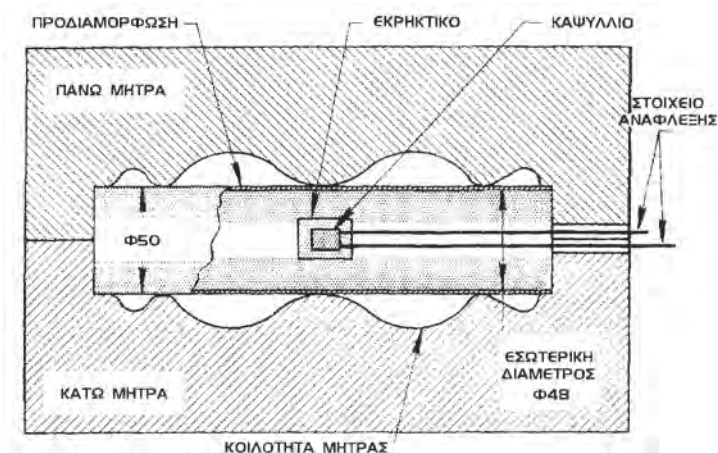
Η εκρηκτική παραμόρφωση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ανοικτό ή κλειστό σύστημα. Στο σχήμα 15.7 παρουσιάζεται ένα ανοικτό σύστημα για εκρηκτική διαμόρφωση ελάσματος. Διακρίνονται στο σχήμα το δοχείο νερού μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η διαμόρφωση, καθώς και το κύμα

κρούσης από την έκρηξη το οποίο και παραμορφώνει το έλασμα.



Σχήμα 15.7: Ανοικτό σύστημα εκρηκτικής διαμόρφωσης ελάσματος

Αντίστοιχα στο σχήμα 15.8 παρουσιάζεται ένα κλειστό σύστημα εκρηκτικής παραμόρφωσης. Η έκρηξη σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιείται στο εσωτερικό ενός σωλήνα, ο οποίος και αναγκάζεται από το ωστικό κύμα να παραμορφωθεί και να πάρει το σχήμα της μήτρας που το περιβάλλει.

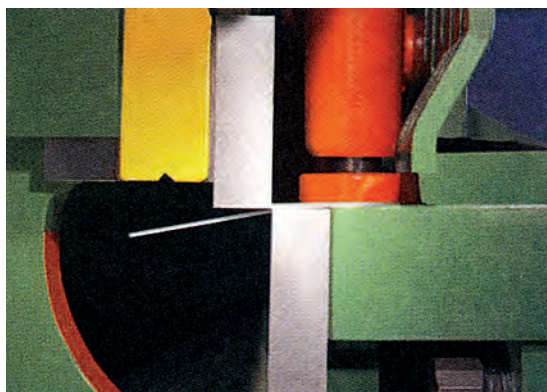
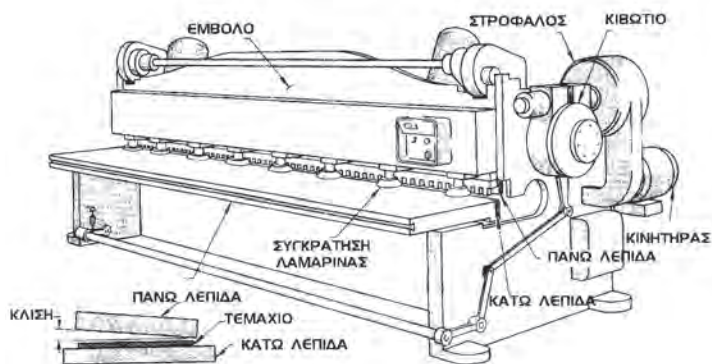


Σχήμα 15.8: Κλειστό σύστημα εκρηκτικής διαμόρφωσης ελάσματος

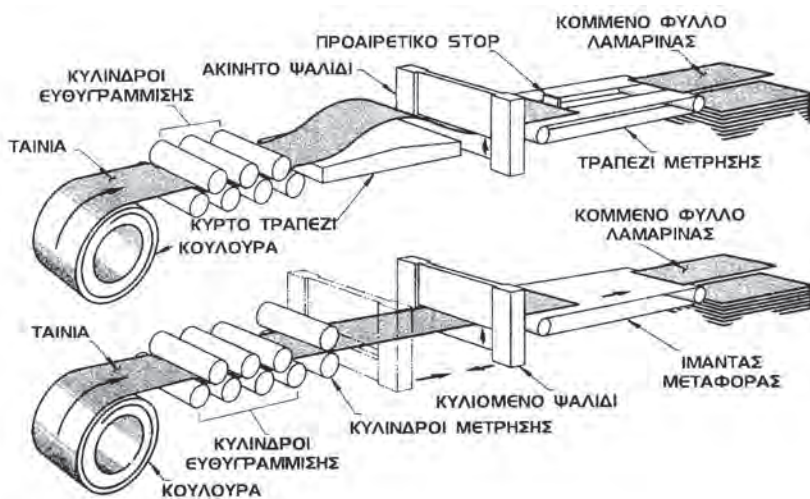
15.6 ΨΑΛΙΔΙΣΜΟΣ

Ο ψαλιδισμός αποτελεί μία διαδικασία παραμόρφωσης που έχει μεγάλη εφαρμογή στην κοπή λαμαρινών. Υπάρχουν ειδικές εργαλειομηχανές για την κοπή αυτή, οι οποίες χρησιμοποιούν ευθύγραμμο ή περιστροφικά μαχαίρια. Συνήθως, για ορθογώνια ή τετράγωνα, για τρίγωνα και γενικά για σχήματα που περιλαμβάνουν ευθείες γραμμές, χρησιμοποιούνται τα ψαλίδια με ευθύγραμμες λεπίδες, ενώ αντίστοιχα για κυκλικές διαμορφώσεις προτιμώνται εκείνα με περιστροφή του κοπτικού. Στο σχήμα 15.9 φαίνεται ένα ηλεκτρικό ψαλίδι για την κοπή λαμαρινών, καθώς και η διαδικασία κοπής λαμαρίνας. Αντίστοιχα με τα ηλεκτρικά, υπάρχουν και χειροκίνητα μηχανικά ψαλίδια, τα οποία όμως δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν μεγάλα πάχη λαμαρινών.

Για την κοπή λαμαρινών σε φύλλα από κουλούρα, χρησιμοποιούνται σταθμοί εργασίας που περιλαμβάνουν ταινίες μεταφοράς, ψαλίδια και τραπέζια μέτρησης ή συγκέντρωσης του υλικού. Στο σχήμα 15.10 παρουσιάζονται δύο τέτοιοι σταθμοί με ακίνητο ή κινητό το ψαλίδι. Οι κύλινδροι που χρησιμοποιούνται αμέσως μετά το ξετύλιγμα της κουλούρας έχουν σκοπό την ευθυγράμμιση της λαμαρίνας.



Σχήμα 15.9: Ψαλιδισμός - Ηλεκτρικό ψαλίδι



Σχήμα 15.10: Σταθμός κοπής λαμαρινών

15.7 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

Διαμόρφωση των πλαστικών είναι η μορφοποίηση των συστατικών τους σε ένα πλαστικό αντικείμενο. Παρά το ότι ακούγεται αρκετά απλό, η διαμόρφωση των πλαστικών είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Υπάρχουν πολλές τεχνικές για τη διαμόρφωση των πλαστικών αλλά οι σημαντικότερες είναι οι παρακάτω:

- Χύτευση με συμπίεση
- Χύτευση με συμπίεση και έγχυση
- Χύτευση με έγχυση
- Χύτευση με εμφύσηση ή φύσημα
- Χύτευση με εξώθηση
- Θερμοδιαμόρφωση

Παρακάτω περιγράφονται οι διαδικασίες αυτές.

15.7.1 Χύτευση με συμπίεση

Η χύτευση με συμπίεση είναι η πιο παλιά μέθοδος διαμόρφωσης πλαστικών, μια και μοιάζει με την απλή τεχνική της χύτευσης που χρησιμοποιείται επίσης από τα πολύ παλιά χρόνια. Η διαδικασία χρησιμοποιεί ένα καλούπι, που είναι χωρισμένο στα δύο, το αρνητικό ή μήτρα και το θετικό ή έμβολο. Το υλικό που πρόκειται να διαμορφωθεί τοποθετείται μέσα στο καλούπι και θερμαίνεται με τη βοήθεια θερμικών στοιχείων, που μπορούν να είναι αντιστάσεις ή σωλήνες που περνά ζεστό νερό. Το τελικό τεμάχιο προκύπτει μετά από συμπίεση του πλαστικού από το έμβολο στη μήτρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 15.11.

Η μέθοδος αυτή, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες, δεν απαιτεί το υλικό να μεταφερθεί και να γεμίσει το καλούπι και το τελικό αποτέλεσμα και η ποιότητα του προϊόντος εξαρτώνται από τρεις μεταβλητές, το χρόνο, τη θερμοκρασία και την πίεση. Κλασικά προϊόντα που παράγονται με αυτή τη μέθοδο είναι πλαστικά πιατικά, ηλεκτρικά εξαρτήματα, κ.λπ..

Παλαιότερα, η διαδικασία της χύτευσης με συμπίεση ήταν αρκετά αργή, επειδή οι μηχανές στις οποίες γινόταν είχαν σχεδιασθεί για χειροκίνητη τοποθέτηση του υλικού και απομάκρυνση του τεμαχίου. Όπως στις περισσότερες μηχανουργικές κατεργασίες, έτσι και στην περίπτωση αυτή, οι μηχανές σήμερα που κάνουν χύτευση με συμπίεση είναι αυτόματες και προθερμαίνουν το υλικό που θα συμπιεσθεί, το τοποθετούν με ακρίβεια στη μήτρα, εκτελούν τη συμπίεση και τέλος απομακρύνουν το έτοιμο προϊόν.



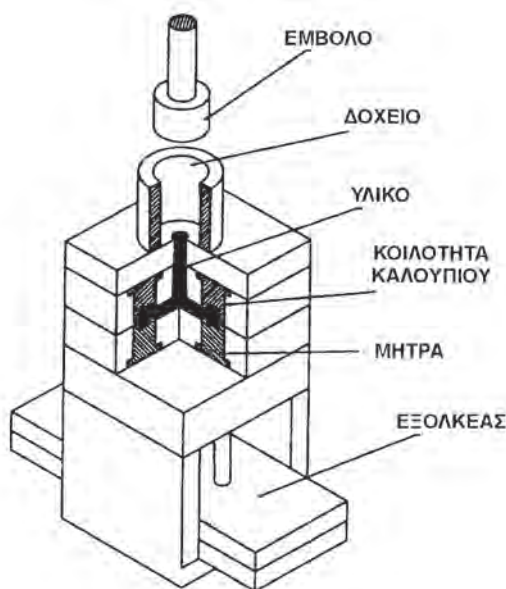
Σχήμα 15.11: Χύτευση με συμπίεση

Τα βήματα που γίνονται σε μία χύτευση με συμπίεση είναι:

- Ανοίγει η μήτρα.
- Το υλικό τοποθετείται στην κοιλότητα της μήτρας.
- Το καλούπι κλείνει και το πλαστικό συμπιέζεται.
- Το καλούπι ανοίγει προσεκτικά και αμέσως κλείνει, ώστε να αφήσει τα διάφορα αέρια να απομακρυνθούν.
- Ανοίγει η μήτρα.
- Το έτοιμο κομμάτι απομακρύνεται.

15.7.2 Χύτευση με συμπίεση και έγχυση

Η χύτευση με συμπίεση και έγχυση έχει πολλές ομοιότητες με τη χύτευση με συμπίεση και οι περισσότερες από τις μηχανές που εκτελούν την πρώτη κατεργασία μπορούν με λίγες αλλαγές να εκτελούν και τη δεύτερη. Στη συμπίεση με έγχυση το υλικό προθερμαίνεται σε ένα αρχικό θάλαμο και συμπιεζόμενο μεταφέρεται από ένα σύστημα καναλιών στο καλούπι που είναι κλειστό. Στο σχήμα 15.12 φαίνεται η διαδικασία της χύτευσης με έγχυση.



Σχήμα 15.12: Χύτευση με συμπίεση και έγχυση

Οι σημαντικές διαφορές ανάμεσα στην χύτευση με συμπίεση και έγχυση και στη χύτευση με συμπίεση είναι οι εξής:

Στη χύτευση με συμπίεση και έγχυση,

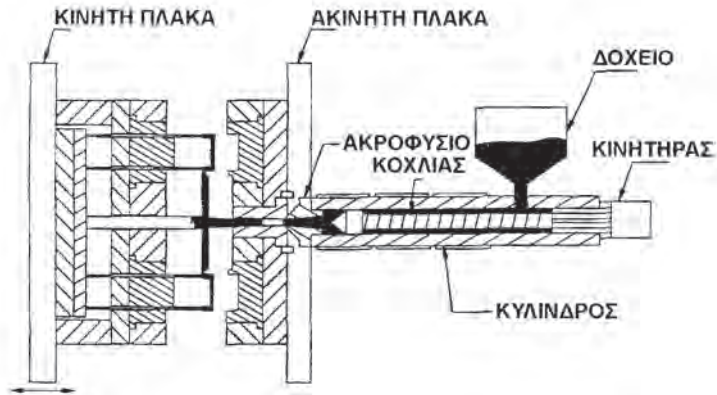
- το υλικό τοποθετείται σε δοχείο και όχι κατευθείαν στο καλούπι,
- το υλικό συμπίεζεται με τη βοήθεια εμβόλου, ώστε να μεταφερθεί μέσα στο καλούπι,
- η διαδικασία γίνεται γρηγορότερα,
- δεν παρουσιάζεται περίσσειμα του υλικού (προέκταμα), γιατί το καλούπι είναι κλειστό όταν μπαίνει το υλικό,
- χάνεται υλικό στον αγωγό εγχύσεως.

Τυπικά παραδείγματα προϊόντων από χύτευση με συμπίεση και έγχυση είναι ηλεκτρικοί διακόπτες, χερούλια από μαγειρικά σκεύη, κ.λπ..

15.7.3 Χύτευση με έγχυση

Η χύτευση με έγχυση είναι η πιο διαδεδομένη διαδικασία μορφοποίησης θερμοπλαστικών ειδικά για μαζικές παραγωγές προϊόντων. Η μέθοδος αυτή πρωτοεμφανίστηκε στη Γερμανία πριν από το 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο. Στη μέθοδο αυτή το υλικό λιώνει σε κατάλληλο δοχείο και στη συνέχεια

χύνεται υπό πίεση στη μήτρα όπου στεροποιείται. Στο σχήμα 15.13 παρουσιάζεται μία διάταξη χύτευσης με έγχυση. Τη μεταφορά του λιωμένου υλικού μπορεί να την κάνει ένας κοχλίας, όπως στο σχήμα, ή ένα έμβολο.

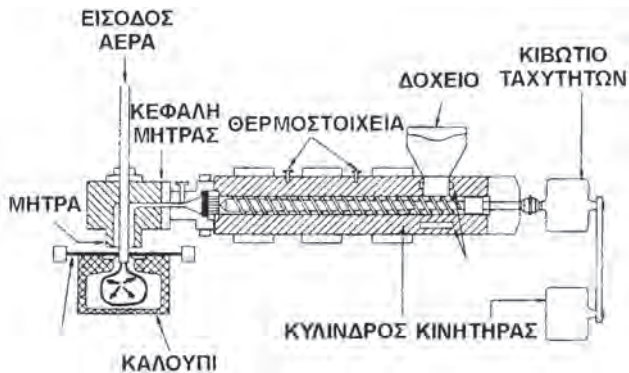


Σχήμα 15.13: Χύτευση με έγχυση

Τυπικά παραδείγματα αντικειμένων που παράγονται με χύτευση με έγχυση είναι τα καλύμματα υπολογιστών ή εκτυπωτών, σκελετοί γυαλιών, καλύμματα από φώτα αυτοκινήτων, σόλες αθλητικών παπουτσιών, κ.λπ..

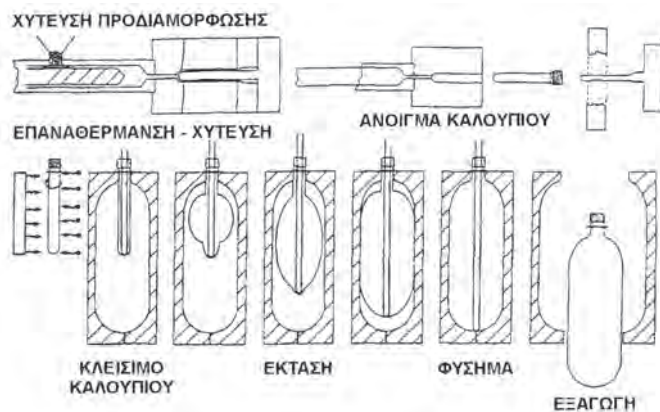
15.7.4 Χύτευση με εμφύσηση

Η χύτευση με εμφύσηση ή φύσημα χρησιμοποιείται για την παραγωγή κυρίως προϊόντων με λεπτά τοιχώματα, όπως είναι τα διάφορα πλαστικά μπουκάλια, παιχνίδια, πλαστικά δοχεία κ.λπ.. Η διαδικασία είναι παρόμοια με τη χύτευση με έγχυση, μόνο που στο τέλος που κλείνει το καλούπι δι-οχετεύεται αέρας υπό πίεση στο εσωτερικό του σωλήνα και το πλαστικό παίρνει το σχήμα του καλουπιού, όπως φαίνεται στο σχήμα 15.14.



Σχήμα 15.14: Χύτευση με εμφύσηση

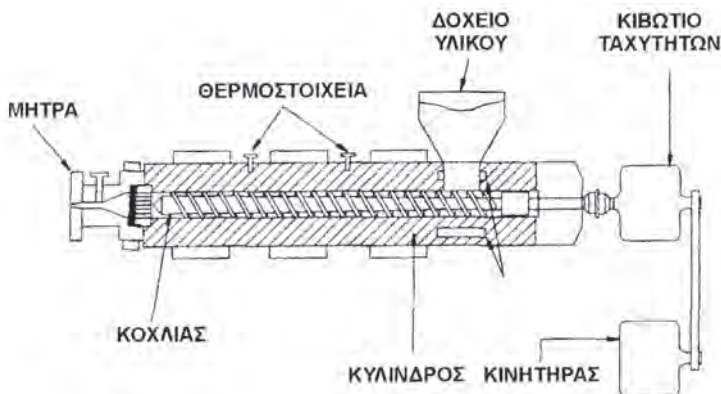
Η διαδικασία γίνεται σε δύο φάσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 15.15. Το πλαστικό προδιαμορφώνεται σε στενό σωλήνα, πριν διαμορφωθεί τελικά στη φιάλη του σχήματος μέσω του πεπιεσμένου αέρα.



Σχήμα 15.15: Φάσεις της χύτευσης με εμφύσηση

15.7.5 Χύτευση με εξώθηση

Η χύτευση με εξώθηση δίνει τη δυνατότητα παραγωγής προϊόντων με μεγάλο μήκος και σταθερή διατομή. Με τη μέθοδο αυτή παρασκευάζονται πλαστικοί σωλήνες, πλαστικές ράβδοι σε διάφορες διατομές κ.λπ.. Η διαδικασία της χύτευσης με εξώθηση είναι αντίστοιχη με τη χύτευση με έγχυση. Το υλικό μεταφέρεται πάλι μέσω ενός κοχλίου, πλαστικοποιείται από τη θερμότητα (η πρώτη ύλη, που είναι κόκκοι θερμοπλαστικών υλικών, γίνεται εύπλαστη και ομοιογενής) και αναγκάζεται να περάσει από μία μήτρα συγκεκριμένης διατομής. Η ροή του πλαστικού είναι συνεχής και το υλικό, καθώς βγαίνει από τη μήτρα, ψύχεται με νερό ή αέρα και σκληραίνει. Στο σχήμα 15.16 φαίνεται η διαδικασία χύτευσης με εξώθηση.



Σχήμα 15.16: Χύτευση με εξώθηση

15.7.6 Θερμοδιαμόρφωση

Η θερμοδιαμόρφωση είναι μια διαδικασία με την οποία παράγονται προϊόντα μέσω θέρμανσης και πίεσης μίας πλάκας πλαστικού σε αντίστοιχη μήτρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 15.17. Όπως φαίνεται από το σχήμα, η διαδικασία αυτή μοιάζει αρκετά με τη βαθεία κοίλανση των μεταλλικών τεμαχίων. Τα πλεονεκτήματα της θερμοδιαμόρφωσης είναι το χαμηλό κόστος και ο γρήγορος χρόνος τοποθέτησης και εξόδου του τεμαχίου από τη θέση διαμόρφωσης.



Σχήμα 15.17: Θερμοδιαμόρφωση

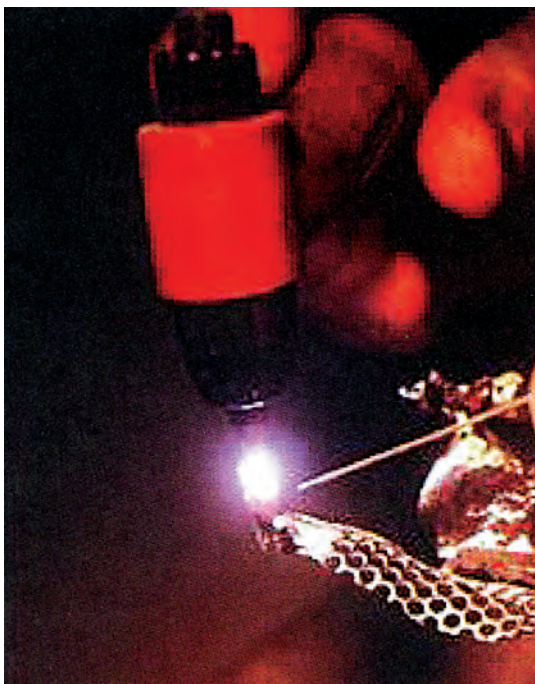
Η θερμοδιαμόρφωση λόγω του χαμηλού κόστους της είναι ιδανική για την ανάπτυξη πρωτοτύπων. Παραδείγματα χρησιμοποίησής της είναι για την παραγωγή εσωτερικών πλαστικών των αυτοκινήτων, για ιατρικό εξοπλισμό, για διάφορα βιομηχανικά είδη κ.λπ..



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 15ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Κατά τη διαμόρφωση σπειρώματος μία ράβδος περνά ανάμεσα από δύο περιστρεφόμενες μήτρες ή δύο επίπεδες μήτρες που κινούνται επάλληλα και δημιουργείται πάνω της σπείρωμα.
- Η αποτύπωση αποτελεί ειδική περίπτωση της σφυρηλάτησης με κλειστές μήτρες. Χρησιμοποιείται κυρίως για παραγωγή νομισμάτων, μεταλλίων κ.λπ..

- Η ολική αποτελεί παραλλαγή της εξώθησης. Κατά την εξώθηση το τεμάχιο αναγκάζεται να περάσει από μία μήτρα που βρίσκεται στο τέλος ενός θαλάμου. Η πίεση εφαρμόζεται με έμβολο, το οποίο σπρώχνει το τεμάχιο που τελικά παραμορφώνεται, διερχόμενο από το στενότερο άνοιγμα της μήτρας. Στην ολική η διαδικασία παραμόρφωσης είναι η ίδια, μόνο που το τεμάχιο τραβιέται από μπροστά με ειδικό σφιγκτήρα.
- Η εκρηκτική παραμόρφωση αλλάζει το σχήμα και τη μορφή σε ένα έλασμα, με στιγμιαία υψηλή πίεση που δημιουργείται από την έκρηξη ενός εκρηκτικού.
- Ο ψαλιδισμός αποτελεί μία διαδικασία παραμόρφωσης που έχει μεγάλη εφαρμογή στην κοπή λαμαρινών. Υπάρχουν ειδικές εργαλειομηχανές για την κοπή αυτή, οι οποίες χρησιμοποιούν ευθύγραμμο ή περιστροφικά μαχαίρια.
- Διαμόρφωση των πλαστικών είναι η μορφοποίηση των συστατικών τους σε ένα πλαστικό αντικείμενο. Οι σημαντικότερες μέθοδοι μορφοποίησης των πλαστικών είναι: η χύτευση με συμπίεση, η χύτευση με συμπίεση και έγχυση, η χύτευση με έγχυση, η χύτευση με εμφύσηση ή φύσημα, η χύτευση με εξώθηση και η θερμοδιαμόρφωση.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 16

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΓΚΟΛΗΣΕΩΝ

- 16.1 Εισαγωγή
- 16.2 Συγκολλητικότητα των υλικών
- 16.3 Έλεγχος συγκολλήσεων
- 16.4 Συμβολισμοί συγκολλήσεων
- 16.5 Αυτογενείς συγκολλήσεις
- 16.6 Ετερογενείς συγκολλήσεις



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να γνωρίσετε τις μεθόδους συγκόλλησης των υλικών, τις εφαρμογές και τις δυνατότητές τους.
- ☒ Να γνωρίσετε πότε χρησιμοποιείται κάθε μια από τις μεθόδους συγκόλλησης.
- ☒ Να γνωρίσετε ποια μέτρα ασφαλείας πρέπει να λαμβάνονται ανά μέθοδο.

16.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συγκολλήσεις ανήκουν στην κατηγορία των μόνιμων συνδέσεων ανάμεσα σε τεμάχια. Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της θερμότητας, είναι σύνδεση κρυσταλλική και έχει στόχο το τελικό τεμάχιο να έχει την ίδια αντοχή με τα αρχικά κομμάτια. Από την εποχή της αρχαιότητας εμφανίζονταν διαδικασίες συγκόλλησης, που βασίζονταν κυρίως στη μέχρι τότε γνώση των υλικών. Έτσι, η συγκόλληση με χύτευση καθιερώθηκε από τους αρχαίους χρόνους ως η κύρια μορφή σύνδεσης και επισκευής σπασμένων κατασκευών από μπρούντζο ή χυτοσίδηρο. Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η συγκόλληση σε κάμινο (καμινοσυγκόλληση), η κασσιτεροκόλληση, που χρησιμοποιείται μέχρι τις μέρες μας, ιδιαίτερα στη λευκοσιδηρουργία, η μπρουτζοκόλληση κ.λπ.. Η πιο κλασική μέθοδος συγκόλλησης, που είναι η συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη, εμφανίστηκε στην αρχή του εικοστού αιώνα. Από τότε πολλές διαφορετικές μέθοδοι έχουν ανακαλυφθεί και προσφέρονται για την πραγματοποίηση πολύπλοκων προϊόντων. Η λίστα με τα αντικείμενα ή προϊόντα, που έχουν συγκολλητά μέρη είναι ατελείωτη και περιλαμβάνει από στοιχεία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μέχρι πλοία, μηχανές αεριοθούμενων, αυτοκίνητα, γέφυρες, μεταλλικά έπιπλα, κτίρια με μεταλλικό σκελετό κ.λπ..

Μία κατηγοριοποίηση των συγκολλήσεων τις κατατάσσει σε δύο κατηγορίες, τις **αυτογενείς συγκολλήσεις** και τις **ετερογενείς συγκολλήσεις**. Στις αυτογενείς συγκολλήσεις απαιτείται τοπικά λιώσιμο των προς συγκόλληση τεμαχίων και τοποθέτηση ή όχι ενός συγκολλητικού μέσου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συγκολλήσεων είναι η οξυγονοσυγκόλληση, η ηλεκτροσυγκόλληση, η συγκόλληση με αντίσταση, με Laser κ.λπ..

Στις ετερογενείς συγκολλήσεις δε χρειάζεται τοπική τήξη των αντικειμένων, που θα συγκολληθούν, παρά μόνο θέρμανση και εναπόθεση λιωμένου συγκολλητικού υλικού. Τέτοιες συγκολλήσεις είναι η κασσιτεροκόλληση, η μπρουντζοκόλληση κ.λπ..

Οι συγκολλήσεις ως μέσο σύνδεσης αντικατέστησαν όλες τις μεθόδους λυόμενων συνδέσεων (κοχλιοσυνδέσεις, ηλώσεις), εκεί βέβαια που δε χρειαζόταν η σύνδεση να είναι λυόμενη. Για την παραγωγή σύνθετων κατασκευών, οι συγκολλήσεις αντικατέστησαν την πολύ δαπανηρότερη χύτευση. Τα πλεονεκτήματα των συγκολλήσεων απέναντι στη χύτευση είναι: οικονομία στο υλικό, μικρότερο κόστος και πραγματοποίηση σύνθετων κατασκευών, που με τη χύτευση είναι αδύνατες ή πολύ δύσκολες. Μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι συγκολλήσεις σχετίζονται κυρίως με τη συγκολλητικότητα των υλικών, δηλαδή την ιδιότητα ενός υλικού να μπορεί να συγκολληθεί.

16.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η συγκολλητικότητα των υλικών εξαρτάται από τη χημική τους σύνθεση και την κρυσταλλική τους δομή. Σχετικά με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά ισχύουν τα εξής:

16.2.1 Κράματα σιδήρου - άνθρακα

Η συγκολλητικότητα των χαλύβων εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα (C). Όσο λιγότερο άνθρακα έχει ένας χάλυβας, τόσο πιο μεγάλη συγκολλητικότητα έχει, δηλαδή συγκολλάται πιο εύκολα. Ανώτερο όριο περιεκτικότητας σε άνθρακα για εύκολη συγκόλληση είναι το 0,25%. Αν ένας χάλυβας έχει περιεκτικότητα πάνω από το 0,25% σε άνθρακα, τότε η συγκόλληση δεν μπορεί να είναι επιτυχής παρά μόνο κάτω από ειδικές συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή, περιοχές της ραφής της συγκόλλησης υφίστανται βαφή, χάνουν τη μηχανική αντοχή τους και ψαθυροποιούνται. Οι χάλυβες αυτοί, με όριο άνθρακα πάνω από το 0,25%, μπορούν να συγκολληθούν, αν προθερμανθούν. Η προθέρμανση αυτή εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα και φθάνει μέχρι τους 425°C για χάλυβες με περιεκτικότητα 0,8% σε άνθρακα. Αντίστοιχα με τους ανθρακούχους χάλυβες, οι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε Si, Mn, S και P, δεν μπορούν να συγκολληθούν εύκολα και μόνο κάτω από ειδικές συνθήκες. Αντίθετα, οι χάλυβες με προσμείξεις Cu, Ni, Cr, Mo και V, δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα συγκόλλησης, εκτός αν όλες οι προσμείξεις ξεπερνάνε το 10%. Στον Πίνακα 16.1 παρουσιάζονται κοινά κράματα σιδήρου – άνθρακα και η δυνατότητα συγκόλλησής τους.

Πίνακας 16.1: Συγκολλητικότητα κραμάτων σιδήρου – άνθρακα

Κατηγορία υλικού	Εύκολη συγκόλληση	Συγκόλληση σε ειδικές συνθήκες
Κοινοί χάλυβες κατασκευών	St33, St34, St37, St42, St46, St52	St50, St60, St70
Χάλυβες επιβελτιώσεως	C22, Ck22, 25CrMo4	-
Χάλυβες ενανθράκωσης	C10, Ck10, C15, Ck15	Αυτοί που περιλαμβάνουν προσθήκες σε Cr, Ni, Mo
Χυτοχάλυβες	πρέπει %C <0,25% και άθροισμα προσθηκών < 10%	Ανοξείδωτοι χυτοχάλυβες
Χυτοσίδηροι	Λευκοί μαλακτικοποιημένοι	Όλοι οι υπόλοιποι χυτοσίδηροι

16.2.2 Μη σιδηρούχα κράματα μετάλλων

Τα κράματα του χαλκού και του αλουμινίου μπορούν εύκολα να συγκολληθούν. Εξαιρούνται τα κράματα του αλουμινίου με πάνω από 5% μαγνήσιο και οι ορείχαλκοι με υψηλό ποσοστό ψευδαργύρου.

16.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Ο έλεγχος των συγκολλήσεων είναι απαραίτητος προκειμένου να διαπιστωθεί αν η συγκόλληση έχει την απαιτούμενη μηχανική αντοχή. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να γίνει με μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, όπου εξετάζεται το δοκίμιο ή η ραφή χωρίς όμως να καταστραφεί, και με μεθόδους, όπου υποβάλλονται έτοιμα προϊόντα σε ανάλογες φορτίσεις, με αποτέλεσμα την καταστροφή τους μετά τον έλεγχο.

16.3.1 Μη καταστροφικές μέθοδοι

Οι δοκιμές αυτές δεν καταστρέφουν το υπό εξέταση αντικείμενο και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες, ιδιαίτερα ο έλεγχος με ακτίνες Χ και γ. Αναλυτικά παρακάτω φαίνονται οι μη καταστροφικές μέθοδοι ελέγχου των συγκολλήσεων:

- **Μηχανικός έλεγχος:** Τα δοκίμια υποβάλλονται σε καταπονήσεις μεγαλύτερες από τις συνθήκες λειτουργίας τους και ελέγχεται η αντοχή τους.
- **Οπτικός Έλεγχος:** Ελέγχονται με το μάτι ή με όργανα, το πάχος της ραφής μίας συγκόλλησης, τυχόν ρωγμές κ.λπ..
- **Έλεγχος με ηλεκτρική αγωγιμότητα:** Βασίζεται στη διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας λόγω σφαλμάτων στη συγκόλληση. Είναι σχετικά αναξιόπιστη μεθοδολογία.

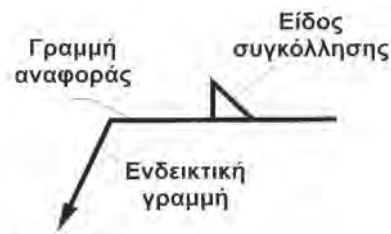
- **Έλεγχος με φθορισμό:** Αλείφεται η ραφή της συγκόλλησης με θειούχο ψευδάργυρο, που είναι φθορίζον υλικό, και στη συνέχεια, αφού σκουπισθεί η επιφάνεια, φωτίζεται και έτσι μπορεί να παρατηρηθούν ρωγμές, πόροι κ.λπ., στα οποία ο θειούχος ψευδάργυρος παραμένει και λάμπει.
- **Μαγνητικός έλεγχος:** Τοποθετούνται χαλύβδινα κομμάτια σε μαγνητικό πεδίο και από τη συνέχεια των μαγνητικών γραμμών φαίνεται αν υπάρχει ή όχι ανωμαλία στη συγκόλληση.
- **Έλεγχος με υπερήχους:** Μία δέσμη υπερήχων προσπίπτει στην ραφή της συγκόλλησης και ανακλάται. Σε περίπτωση που υπάρχει εσωτερικά στη ραφή κάποιο ελάττωμα, αυτό εντοπίζεται, επειδή η ανάκλαση του υπερήχου διακόπτεται και δεν είναι συνεχής. Η μέθοδος αυτή είναι από τις πιο αξιόπιστες αλλά απαιτεί ειδική προετοιμασία.
- **Έλεγχος με ακτίνες Χ:** Τα ελαττώματα της συγκόλλησης μεταφράζονται σε σκιές πάνω σε φιλμ μετά από προσβολή από ακτίνες Χ.
- **Έλεγχος με ακτίνες γ:** Οι ακτίνες γ έχουν πολύ μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα από τις αντίστοιχες ακτίνες Χ. Σε αυτή την περίπτωση επίσης τα ελαττώματα της συγκόλλησης μεταφράζονται σε σκιές πάνω σε φιλμ μετά από προσβολή από ακτίνες γ.

16.3.2 Καταστροφικές δοκιμές

Οι καταστροφικές δοκιμές έχουν αποτέλεσμα την καταστροφή του συγκολλητού αντικειμένου. Έτσι, για παράδειγμα, ο έλεγχος της αντοχής ενός συγκολλητού δοχείου πίεσης γίνεται με υδραυλική πίεση μέχρι την καταστροφή του δοχείου. Αν η καταστροφή προέλθει από θραύση των τοιχωμάτων του, εκτός της περιοχής της συγκόλλησης, τότε η συγκόλληση είναι ικανοποιητική. Αντίστοιχες δοκιμές γίνονται και σε τμήματα ενός συγκολλητού αντικειμένου. Οι κυριότερες δοκιμές που μπορεί να γίνουν σε δοκίμια συγκολλητού αντικειμένου είναι η δοκιμή εφελκυσμού, κρούσης, λυγισμού και σκληρότητας. Οι δοκιμές αυτές δε διαφέρουν από τις αντίστοιχες κλασικές δοκιμές μηχανικής αντοχής.

16.4 ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Οι συγκολλήσεις συμβολίζονται στο Μηχανολογικό σχέδιο σύμφωνα με τον κανονισμό DIN 1912. Για την περιγραφή μίας συγκόλλησης χρησιμοποιείται το σύμβολο του σχήματος 16.1, το οποίο τοποθετείται στο μηχανολογικό σχέδιο οριζόντια (μόνον όταν αυτό δεν είναι δυνατόν, τοποθετείται και κάθετα), ώστε το βέλος του να δείχνει τη θέση συγκόλλησης.



Σχήμα 16.1: Σύμβολο συγκόλλησης

Στο σύμβολο συγκόλλησης τοποθετείται το είδος της συγκόλλησης που πρέπει να γίνει, δηλαδή το σχήμα της ραφής συγκόλλησης. Στο σχήμα 16.2 φαίνονται τα βασικά σύμβολα των ειδών συγκόλλησης.

16.5 ΑΥΤΟΓΕΝΕΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

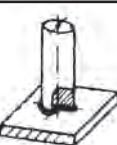
16.5.1 Συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη

Η συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη (οξυγονοσυγκόλληση ή οξυγονοκόλληση) πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση μεταλλικών ελασμάτων ή δοκών, ράβδων, σωλήνων κ.λπ. Η οξυγονοκόλληση είναι μία αυτογενής συγκόλληση, γιατί πραγματοποιείται μέσω της τήξης των άκρων των δύο προς συγκόλληση τεμαχίων και με προσθήκη ή όχι συγκολλητικού υλικού.

Συσκευές – όργανα

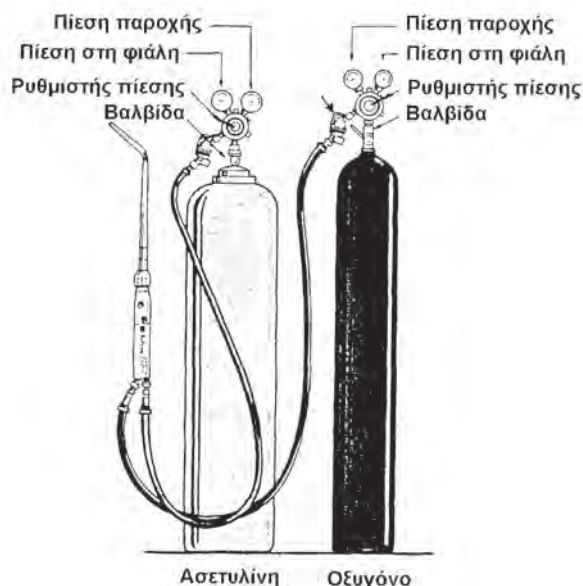
Η απαραίτητη θερμότητα για το λιώσιμο των άκρων των δύο προς συγκόλληση τεμαχίων παράγεται με τη βοήθεια του οξυγόνου (O_2) και της ασετυλίνης (C_2H_2). Το οξυγόνο που είναι αέριο, άχρωμο, άγευστο, άοσμο και διατηρεί την καύση, καίει την ασετυλίνη, που είναι επίσης αέριο άχρωμο, μη τοξικό με δυσάρεστη οσμή και εύφλεκτο. Και τα δύο αυτά αέρια τοποθετούνται σε φιάλες, όπως φαίνεται στο σχήμα 16.3, οι οποίες είναι σημαδεμένες με χαρακτηριστικά χρώματα για να αναγνωρίζεται το περιεχόμενό τους (μπλε για το οξυγόνο και κίτρινο για την ασετυλίνη). Άλλο στοιχείο

α/α	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ	ΣΥΜΒΟΛΟ
1	ΡΑΦΗ ΜΕ ΑΝΑΔΙΠΛΩΜΕΝΕΣ ΑΚΜΕΣ ΚΑΤΑ 90°		
2	ΡΑΦΗ Ι		
3	ΡΑΦΗ V		
4	ΡΑΦΗ HV		
5	ΡΑΦΗ Υ		
6	ΡΑΦΗ ΗΥ		
7	ΡΑΦΗ U		
8	ΡΑΦΗ ΗU (J)		
9	ΔΙΕΥΡΥΝΣΗ ΑΠΟΛΗΞΗΣ ΡΑΦΗΣ		
10	ΑΠΛΗ ΕΞΩΡΑΦΗ		

α/α	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ	ΣΥΜΒΟΛΟ
11	ΡΑΦΗ ΟΠΗΣ		
			
12	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΡΑΦΗ		
			
13	ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΡΑΦΗ		
			
14	ΙΣΟΣΚΕΛΗΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗΣ ΡΑΦΗ		
15	ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗΣ ΡΑΦΗ		
16	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΡΑΦΗ ΜΕΤΩΠΟΥ		
17	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΡΑΦΗ		
			
18	ΚΕΚΛΙΜΕΝΗ ΡΑΦΗ		
19	ΡΑΦΗ ΜΕ ΑΝΑΔΙΠΛΩΜΕΝΕΣ ΑΚΜΕΣ ΚΑΤΑ 180°		
20	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΡΑΦΗ		

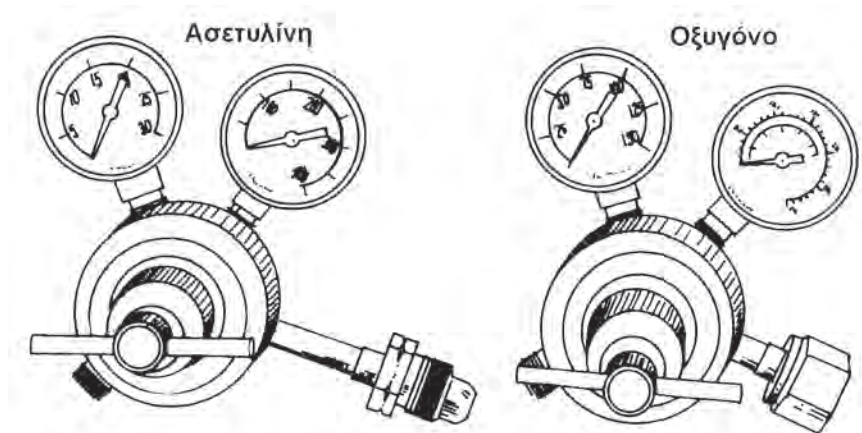
Σχήμα 16.2: Σύμβολα ειδών συγκόλλησης

χαρακτηριστικό αναγνώρισης του περιεχομένου είναι ο διαφορετικός ήχος που κάνουν οι δύο φιάλες, όταν χτυπηθούν ελαφρά με κάποιο μεταλλικό αντικείμενο. Η φιάλη του οξυγόνου κάνει ένα χαρακτηριστικό ήχο σαν καμπάνα (περιέχει οξυγόνο υπό πίεση), ενώ η φιάλη της ασετυλίνης κάνει υπόκωφο ήχο. Ο ήχος της φιάλης της ασετυλίνης οφείλεται στο πορώδες υλικό που χρησιμοποιείται για να συγκρατεί την ακετόνη, η οποία είναι απαραίτητη για να διαλυθεί σε αυτή η ασετυλίνη (η ασετυλίνη υπό πίεση είναι εκρηκτική και γι' αυτό διαλύεται στις φιάλες μέσα σε υγρή ακετόνη).



Σχήμα 16.3: Εξοπλισμός οξυγονοκόλλησης

Προκειμένου το οξυγόνο και η ασετυλίνη να χρησιμοποιηθούν και επειδή βρίσκονται σε πίεση (15 ατμ. το οξυγόνο και 150 ατμ. η ασετυλίνη), μετά τις φιάλες χρησιμοποιούνται εκτονωτές, δηλαδή όργανα που ρίχνουν την πίεση. Η πίεση που έχει κάθε αέριο στη φιάλη, αλλά και η πίεση της παροχής του, μετά τη μείωση από τον εκτονωτή, φαίνονται σε δύο μανόμετρα που έχει πάνω κάθε φιάλη, το μανόμετρο υψηλής πίεσης (για τη φιάλη) και το μανόμετρο χαμηλής πίεσης (για την παροχή). Στο σχήμα 16.4 φαίνονται συστήματα μανομέτρων – εκτονωτή για φιάλες ασετυλίνης και οξυγόνου αντίστοιχα.



Σχήμα 16.4: Μανοεκτονωτές

Μετά την έξοδό τους από τους μανοεκτονωτές, τα αέρια οδηγούνται προς τη θέση καύσης μέσω εύκαμπτων ελαστικών σωλήνων (μπλε ή γκρι για το οξυγόνο και κόκκινο για την ασετυλίνη). Η στεγανοποίηση των συνδέσεων των σωλήνων και των μανοεκτονωτών με τις φιάλες είναι ιδιαίτερα σημαντική και απαιτεί μεγάλη προσοχή. Οι συνδέσεις πρέπει να ελέγχονται ως εξής:

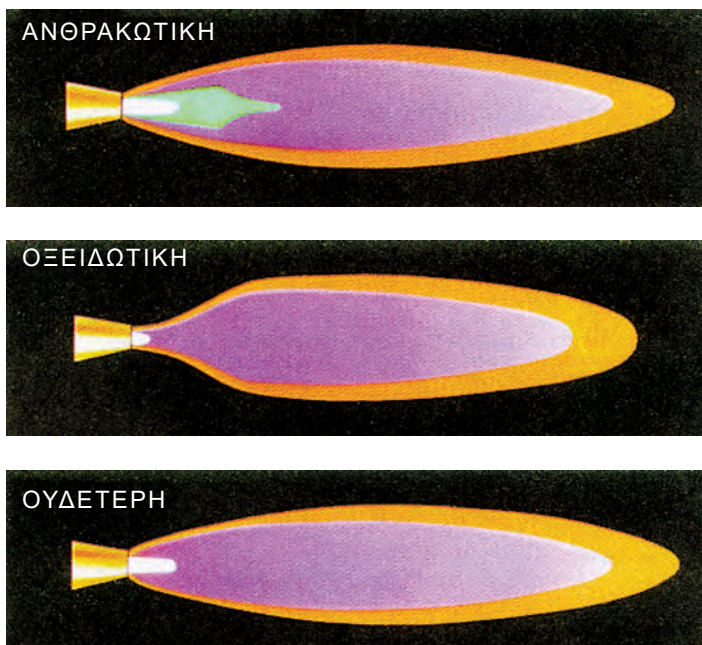
- Η διαρροή οξυγόνου ακούγεται, μια και το αέριο αυτό είναι αποθηκευμένο υπό πίεση.
- Η διαρροή ασετυλίνης διαπιστώνεται από τη μυρωδιά.
- Και στις δύο περιπτώσεις η διαρροή μπορεί να γίνει αντιληπτή με τη χρήση σαπουνάδας πάνω στις συνδέσεις. Αν δημιουργούνται φυσαλίδες, σημαίνει πως υπάρχει διαρροή κάποιου αερίου.

Το εξάρτημα εκείνο στο οποίο συναντώνται τα δύο αέρια είναι ο καυστήρας, στον οποίο συνδέονται οι δύο ελαστικοί σωλήνες τροφοδοσίας των αερίων. Στο σχήμα 16.5 φαίνεται σε τομή ένας καυστήρας οξυγονοκόλλησης. Το άκρο του καυστήρα, που είναι το μπεκ, μπορεί να είναι πολλών μεγεθών με διαφορετική διάμετρο οπής. Η Ευρωπαϊκή τυποποίηση για τα μπεκ ορίζει ένα χαρακτηριστικό αριθμό για κάθε μπεκ (πχ. 70), που αντιστοιχεί σε ωριαία παροχή ασετυλίνης 70 κυβικές παλάμες [dm^3].



Σχήμα 16.5: Καυστήρας οξυγονοκόλλησης

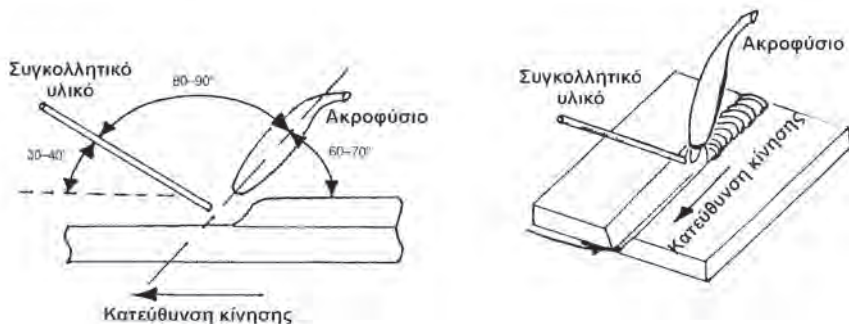
Στον καυστήρα γίνεται η ανάμειξη του οξυγόνου με την ασετυλίνη και παράγεται η φλόγα. Η σωστή αναλογία οξυγόνου και ασετυλίνης ρυθμίζει και την ποιότητα της φλόγας, η οποία δεν πρέπει να έχει περισσότερο οξυγόνο (οξειδωτική φλόγα) ούτε περισσότερο ασετυλίνη (αναγωγική ή ανθρακωτική). Στο σχήμα 16.6 φαίνονται οι τρεις περιπτώσεις φλόγας, ανθρακωτική, οξειδωτική και ουδέτερη.



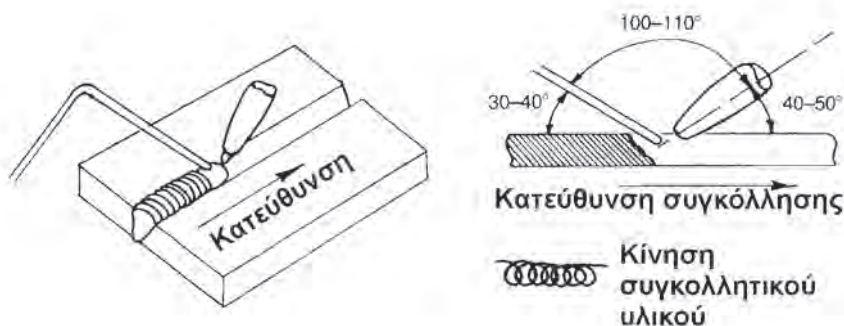
Σχήμα 16.6: Είδη φλόγας οξυγονοκόλλησης

Τεχνική της Οξυγονοκόλλησης

Η τεχνική της οξυγονοκόλλησης, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο πρέπει να γίνει η συγκόλληση, εξαρτάται κυρίως από το πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων. Οι βασικοί τρόποι συγκόλλησης με οξυγονοασετυλίνη καθορίζονται από την κίνηση του καυστήρα. Έτσι, υπάρχει συγκόλληση από τα αριστερά και συγκόλληση από τα δεξιά. Στο σχήμα 16.7 φαίνεται η συγκόλληση από τα αριστερά, ενώ στο σχήμα 16.8 φαίνεται η συγκόλληση από τα δεξιά.



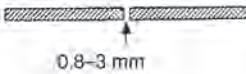
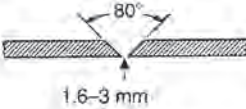
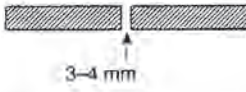
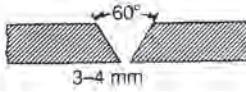
Σχήμα 16.7: Οξυγονοκόλληση από αριστερά



Σχήμα 16.8: Οξυγονοκόλληση από δεξιά

Όπως φαίνεται στα δύο σχήματα, η κίνηση του καυστήρα είναι πάντα σταθερή σε μία κατεύθυνση και για τη μέθοδο από αριστερά ο καυστήρας κινείται από δεξιά προς τα αριστερά, ενώ για τη μέθοδο από δεξιά ο καυστήρας κινείται από αριστερά προς τα δεξιά. Η σημαντικότερη διαφορά είναι ότι το συγκολλητικό υλικό στην πρώτη μέθοδο προηγείται του καυστήρα, ενώ στη δεύτερη μέθοδο ακολουθεί. Η συγκόλληση από αριστερά χρησιμοποιείται περισσότερο από την αντίστοιχη από δεξιά. Χρησιμοποιείται συνήθως για συγκολλήσεις ελασμάτων με πάχος έως 3mm, ενώ η συγκόλληση από τα δεξιά χρησιμοποιείται για ελάσματα μεγαλύτερου

πάχους, από 5 έως 13mm περίπου. Στο σχήμα 16.9 φαίνονται πού χρησιμοποιούνται οι δύο μέθοδοι συγκόλλησης, ποια πρέπει να είναι η προετοιμασία των ελασμάτων που θα συγκολληθούν, καθώς και η διάμετρος του συγκολλητικού υλικού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Πάχος ελάσματος	Διάμετρος συγκολλητικού υλικού	Προετοιμασία ακμών ελασμάτων	Μέθοδος συγκόλλησης
0.9-1.6 mm	1.5 mm		Από αριστερά
3 mm	1.5 έως 3.2 mm		
3 - 4 mm	3.2 mm		
5 - 8 mm	3.2 mm		Από δεξιά
13 mm	6 mm		

Σχήμα 16.9: Δεδομένα οξυγονοκόλλησης

Για συγκόλληση ελασμάτων πάχους μικρότερου των 1,6 mm απαιτείται ανασήκωμα των άκρων των ελασμάτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 16.9. Αντίστοιχα, για τα άλλα πάχη φαίνονται στο σχήμα τα διάκενα που πρέπει να αφεθούν ή οι λοξοτομές που πρέπει να γίνουν.

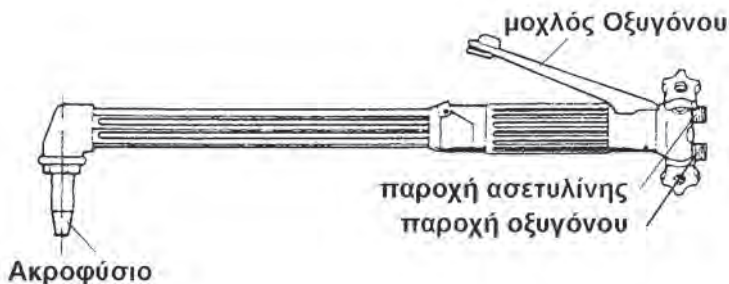
Η πίεση λειτουργίας των αερίων ρυθμίζεται από τον εκτονωτή σύμφωνα με το πάχος των ελασμάτων που θα συγκολληθούν. Αντίστοιχα, από την πίεση και το ακροφύσιο που θα χρησιμοποιηθεί, προκύπτει η κατανάλωση των αερίων. Στον Πίνακα Π.16.2 φαίνονται τιμές της πίεσης των αερίων ανάλογα με το πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων, καθώς και η κατανάλωση των αερίων.

Πίνακας Π.16.2: Τιμές πίεσης λειτουργίας και κατανάλωση αερίων

Πάχος ελάσματος [mm]	Πίεση λειτουργίας [bar]		Κατανάλωση αερίων [λίτρα/ώρα]	
	Ασετυλίνη	Οξυγόνο	Ασετυλίνη	Οξυγόνο
0,9	0,14	0,14	85	85
1,2	0,14	0,14	110	110
2	0,21	0,21	170	170
2,6	0,21	0,21	200	200
3,2	0,21	0,21	250	250
4	0,21	0,21	280	280
5	0,28	0,28	400	400

Οξυγονοκοπή

Η φλόγα της οξυγονοασετυλίνης χρησιμοποιείται και για κοπή ελασμάτων. Ο καυστήρας που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ειδικός και ονομάζεται **οξυγονοκόφτης**. Ο οξυγονοκόφτης, που φαίνεται στο σχήμα 16.10, περιλαμβάνει ένα ακόμα αγωγό για παροχή καθαρού οξυγόνου που χρησιμοποιείται για τη στιγμιαία οξείδωση του σιδήρου, που θα προκαλέσει την κοπή (η οξυγονοκοπή χρησιμοποιείται μόνο στα σιδηρούχα υλικά). Στην πράξη θερμαίνεται το έλασμα μέσω της φλόγας της οξυγονοασετυλίνης και καθώς πυρώνεται τροφοδοτείται καθαρό οξυγόνο. Το οξυγόνο αυτό οξειδώνει το σίδηρο που περιέχεται στο έλασμα και παράγει την κοπή. Η θερμότητα από την κοπή είναι ικανή να διατηρεί την ερυθροπύρωση του ελάσματος, ώστε να μη χρειάζεται στη συνέχεια θέρμανση μέσω της οξυγονοασετυλίνης. Η φλόγα δηλαδή της οξυγονοασετυλίνης χρησιμοποιείται μόνο για να ξεκινήσει η κοπή.

**Σχήμα 16.10:** Οξυγονοκόφτης

Η κοπή με οξυγόνο μπορεί να γίνεται είτε με το χέρι είτε μηχανικά. Υπάρχουν ειδικές εργαλειομηχανές κοπής ελασμάτων που πραγματοποιοι-

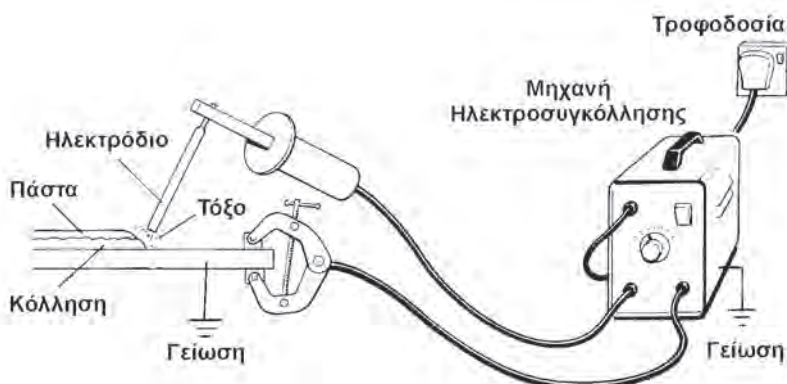
ούν κοπή με οξυγόνο και μάλιστα οι πιο σύγχρονες από αυτές καθοδηγούνται από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στο σχήμα 16.11 φαίνεται η κοπή με οξυγόνο σε μία εργαλειομηχανή με τέσσερις θέσεις κοπής.



Σχήμα 16.11: Κοπή με Οξυγόνο

16.5.2 Συγκόλληση τόξου

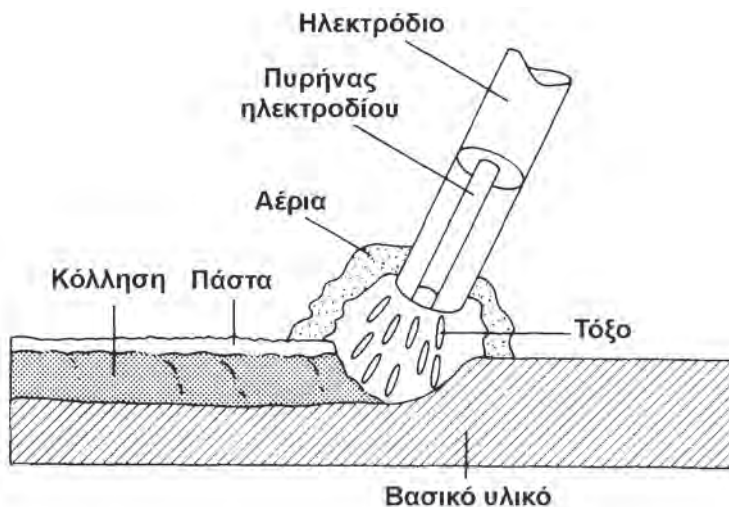
Η συγκόλληση τόξου ή ηλεκτροσυγκόλληση στηρίζεται στη δημιουργία ενός ηλεκτρικού τόξου ανάμεσα στο κομμάτι, που θέλουμε να κολληθεί, και σε ένα ηλεκτρόδιο, που είναι ταυτόχρονα και συγκολλητικό μέσο. Για να γίνει αυτό, το ηλεκτρόδιο και το κομμάτι συνδέονται με τους ακροδέκτες μίας γεννήτριας ηλεκτρικού ρεύματος. Στην πράξη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 16.12, χρησιμοποιούνται ειδικές μηχανές που λέγονται μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης, οι οποίες χρησιμοποιούν συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα και παράγουν το ηλεκτρικό τόξο.



Σχήμα 16.12: Διάταξη ηλεκτροσυγκόλλησης

Η διαδικασία της συγκόλλησης φαίνεται στο σχήμα 16.13. Λόγω του ηλεκτρικού τόξου, αναπτύσσεται μεγάλη θερμοκρασία στη θέση κόλλησης, γύρω στους 4000 °C. Στη θερμοκρασία αυτή το μέταλλο που συγκολλάται λιώνει, ενώ από πάνω του δημιουργείται ένα στρώμα αερίων, που προέρχονται από την επένδυση του ηλεκτροδίου. Ταυτόχρονα με τη δημιουργία των αερίων, δημιουργείται πάνω από τη ραφή μία πάστα, επίσης από την επένδυση του ηλεκτροδίου. Η πάστα αυτή βοηθά στην τήξη του μετάλλου και εμποδίζει τη γρήγορη απόψυξη, που θα είχε συνέπεια να βαφεί η ραφή.

Η ραφή συγκόλλησης προκύπτει από το λιωμένο μέταλλο που συγκολλάται και από λιωμένο μέταλλο του πυρήνα του ηλεκτροδίου. Ο συγκολλητής, για να ξεκινήσει τη διαδικασία συγκόλλησης, χτυπά ή τρίβει το ηλεκτρόδιο πάνω στο προς συγκόλληση τεμάχιο και στη συνέχεια το σηκώνει, διατηρώντας από και πέρα μία σταθερή απόσταση.



Σχήμα 16.13: Διαδικασία ηλεκτροσυγκόλλησης

Συσκευές – όργανα

Οι μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ή συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα και χαρακτηρίζονται από την ένταση του ρεύματος, που μπορούν να δώσουν, και την τάση του ρεύματος για το ξεκίνημα του τόξου (τάση εν κενώ). Η ένταση της συγκόλλησης ρυθμίζεται από ροοστάτες που βρίσκονται πάνω στις μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης, ενώ για κάθε ένταση ρεύματος προτείνεται και αντίστοιχο ηλεκτρόδιο. Επισημαίνεται ότι, με τη χρήση του ίδιου ηλεκτροδίου, η ένταση του ρεύματος πρέπει να αυξάνεται, όσο το πάχος των ελασμάτων που θα κολληθούν είναι μεγαλύτερο.

Τα συνήθη ηλεκτρόδια έχουν επένδυση που είναι κράμα διαφόρων οργανικών και ορυκτών συστατικών, ενώ ο πυρήνας τους είναι από μαλακό χάλυβα. Υπάρχουν και άλλα ηλεκτρόδια με πυρήνες από χαλυβοκράματα, χυτοσίδηρο κ.λπ., αλλά δε χρησιμοποιούνται συχνά και μόνο για ειδικές περιπτώσεις. Τα ηλεκτρόδια κυκλοφορούν σε πολλά μεγέθη με διαφορετικό μήκος και διάμετρο, όπως και με διαφορετικό πάχος επένδυσης. Στον Πίνακα Π.16.3 φαίνονται διάφορα μεγέθη ηλεκτροδίων και η ένταση του ρεύματος που πρέπει να χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση.

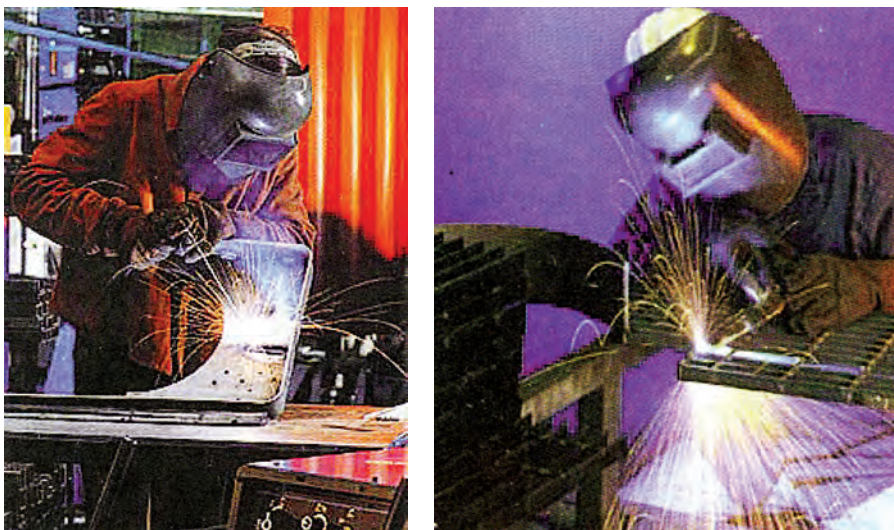
Πίνακας Π.16.3: Στοιχεία ηλεκτροδίων

Διάμετρος ηλεκτροδίου [mm]	Μήκος ηλεκτροδίου [mm]	Ένταση ρεύματος [A]
1,6	250	25
2,0	350	45
2,5	350	65
3,5	450	115
4,0	450	145
5,0	450	215
6,0	450	265
6,3	450	285
7,0	450	320
8,0	450	360

Τα ηλεκτρόδια έχουν τυποποιηθεί ως προς τα χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με Ευρωπαϊκά και άλλα διεθνή πρότυπα. Στην ετικέτα του κουτιού, στα οποία είναι συσκευασμένα τα ηλεκτρόδια, γράφονται με τη σειρά σύμβολα που χαρακτηρίζουν συγκεκριμένες ιδιότητες του ηλεκτροδίου.

Τεχνική της Ηλεκτροσυγκόλλησης

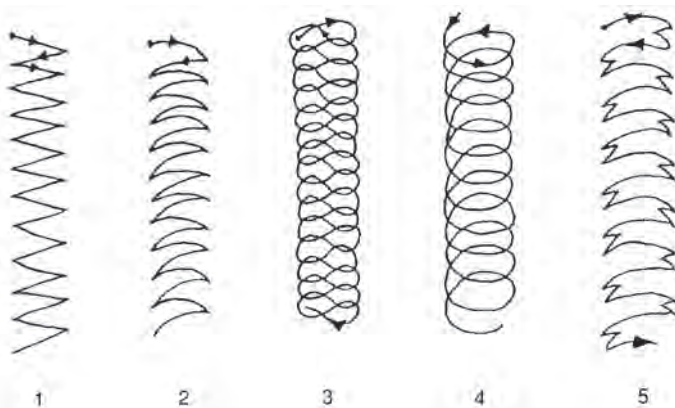
Η ηλεκτροσυγκόλληση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ορισμένα βασικά εξαρτήματα προστασίας. Αυτά είναι η μάσκα, που προστατεύει τα μάτια από τη λάμψη του ηλεκτρικού τόξου (δηλαδή από τις υπέρυθρες και υπεριώδεις ακτίνες που καταστρέφουν τον αμφιβληστροειδή του ματιού), τα γάντια, που προστατεύουν τα χέρια από πιθανά εγκαύματα και την ακτινοβολία, και η ποδιά που προστατεύει αντίστοιχα το υπόλοιπο σώμα. Στο σχήμα 16.14 φαίνονται δύο συγκολλητές να πραγματοποιούν αντίστοιχες συγκολλήσεις, φορώντας τον απαιτούμενο εξοπλισμό.



Σχήμα 16.14: Εξοπλισμός ηλεκτροσυγκόλλησης

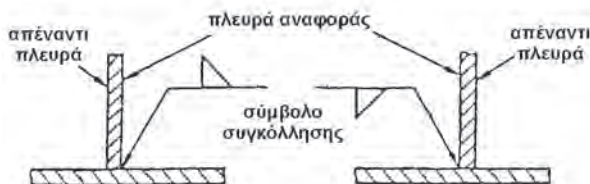
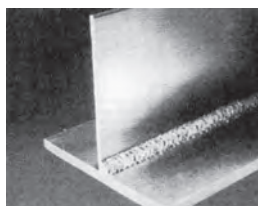
Εκτός από τον παραπάνω βασικό εξοπλισμό, στην ηλεκτροσυγκόλληση χρησιμοποιούνται περικνημίδες για τα πόδια και μανσέτες για τα χέρια. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο αερισμός που πρέπει να υπάρχει στο χώρο εργασίας, ώστε να μην εισπνέονται από το συγκολλητή τα διάφορα αέρια που προκύπτουν από την συγκόλληση.

Κατά τη διάρκεια της ηλεκτροσυγκόλλησης και ανάλογα με το είδος της ραφής που επιθυμούμε, πρέπει να μετακινείται το ηλεκτρόδιο πραγματοποιώντας συγκεκριμένες κινήσεις. Στο σχήμα 16.15 φαίνονται μερικά είδη τέτοιων συνηθισμένων κινήσεων. Από τις κινήσεις αυτές, η κίνηση 2 είναι η πιο συνηθισμένη, ενώ γενικά ισχύει ότι κάθε συγκολλητής έχει τη δικιά του κίνηση που προτιμά.



Σχήμα 16.15: Κινήσεις στην ηλεκτροσυγκόλληση

Οι συνηθισμένες συγκολλήσεις, που γίνονται με ηλεκτροσυγκόλληση, είναι οι μετωπικές ραφές και οι εξωραφές. Η προετοιμασία που πρέπει να γίνει στα ελάσματα πριν την ηλεκτροσυγκόλληση διαφέρει ανάμεσα στα δύο είδη, ενώ εξαρτάται και από τα πάχη των ελασμάτων. Οι εξωραφές είναι συγκολλήσεις ελασμάτων καθέτως μεταξύ τους σε αντίθεση με τις μετωπικές ραφές, που, όπως το λέει και η λέξη, είναι συγκολλήσεις κατά πρόσωπο. Στο σχήμα 16.16 φαίνεται μία εξωραφή, καθώς και ο τρόπος συμβολισμού της στο Μηχανολογικό σχέδιο. Όπως φαίνεται στο σχήμα, το σύμβολο της συγκόλλησης τοποθετείται με το βέλος να δείχνει τη θέση συγκόλλησης. Σε περίπτωση που η συγκόλληση είναι από την απέναντι πλευρά, από αυτή που δείχνει το βέλος, το σύμβολο του είδους της συγκόλλησης τοποθετείται αντεστραμμένο, όπως φαίνεται στη δεύτερη περίπτωση εξωραφής του σχήματος.



Σχήμα 16.16: Εξωραφή

16.5.3 Ηλεκτροσυγκόλληση σε αδρανή ατμόσφαιρα

Οι συγκολλήσεις με αδρανή ατμόσφαιρα εξασφαλίζουν τη μόνωση της θέσης συγκόλλησης από τον αέρα, δηλαδή ουσιαστικά από το οξυγόνο και το άζωτο που επηρεάζουν τη συγκόλληση. Για τη μόνωση αυτή χρησιμοποιούνται τα αέρια Αργό (Ar) και Ήλιο (He). Από τα δύο αυτά αέρια χρησιμοποιείται περισσότερο το αργό, γιατί η παραγωγή του έχει μικρότερο κόστος.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ηλεκτροσυγκόλλησης σε αδρανή ατμόσφαιρα σε σχέση με την απλή ηλεκτροσυγκόλληση είναι:

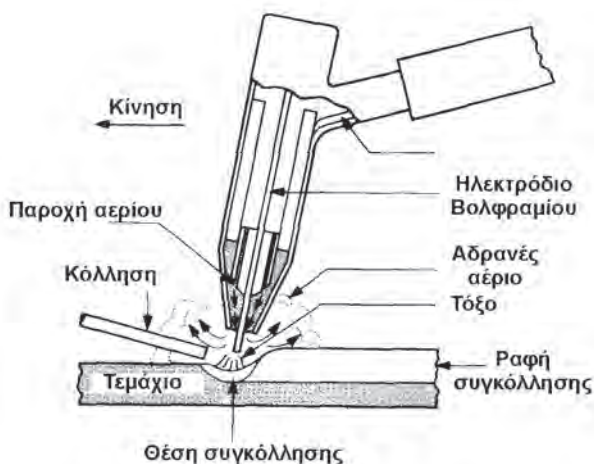
- Σταθερό ηλεκτρικό τόξο και εύκολη συγκόλληση,
- Ραφές συγκόλλησης με υψηλή μηχανική αντοχή,
- Μικρές παραμορφώσεις λόγω θέρμανσης,
- Απουσία επιβλαβών αναθυμιάσεων.

Η ηλεκτροσυγκόλληση σε αδρανή ατμόσφαιρα γίνεται με τρεις μεθόδους, τη μέθοδο **T.I.G.** (δίστηκτο ηλεκτρόδιο και αέριο αργό), τη μέθοδο **M.I.G.** (καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο και αέριο αργό) και τη μέθοδο **M.A.G.** (καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο και ανθρακικά αέρια).

Μέθοδος T.I.G

Στην ηλεκτροσυγκόλληση T.I.G. (**Tungsten Inert Gas**) το ηλεκτρόδιο είναι από Βολφράμιο (W) και προκειμένου να αυξηθούν οι ηλεκτρικές του ιδιότητες προστίθενται Θόριο (Th) και Ζιρκόνιο (Zr). Το ηλεκτρόδιο δεν καταναλίσκεται, δηλαδή συμμετέχει στη συγκόλληση μόνο για να διατηρεί το ηλεκτρικό τόξο. Στο σχήμα 16.17 φαίνεται μία διάταξη συγκόλλησης με T.I.G.. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ως αδρανές αέριο το Αργό ή το Ήλιο ή μείγμα των δύο αερίων.

Προκειμένου η συγκόλληση με τη μέθοδο T.I.G. να είναι επιτυχής, πρέπει τα κομμάτια που θα συγκολληθούν να είναι καθαρά και απαλλαγμένα από ακαθαρσίες. Η κόλληση που φαίνεται στο σχήμα επιλέγεται από ενώσεις των υλικών που πρόκειται να συγκολληθούν. Σε πολλές περιπτώσεις όμως η συγκόλληση πραγματοποιείται χωρίς κόλληση και μόνο με την τήξη των υλικών που πρόκειται να συγκολληθούν. Η μέθοδος T.I.G. χρησιμοποιείται για συγκόλληση των περισσότερων μετάλλων. Ιδιαίτερη εφαρμογή είναι η συγκόλληση λεπτών αντικειμένων λόγω της εξαιρετικής ποιότητας συγκόλλησης και της ποιότητας της τελικής επιφάνειας.



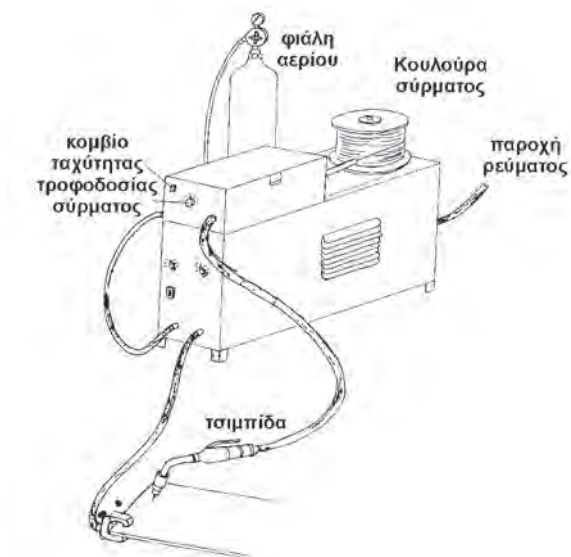
Σχήμα 16.17: Συγκόλληση T.I.G.

Μέθοδος M.I.G.

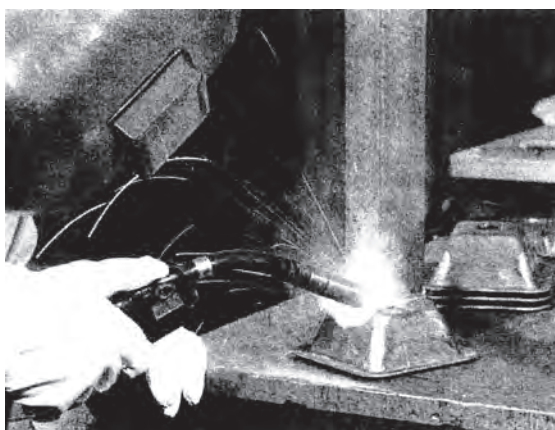
Στην ηλεκτροσυγκόλληση M.I.G. (**Metal Inert Gas**) το ηλεκτρόδιο αποτελεί και το συγκολλητικό υλικό. Το ηλεκτρόδιο δηλαδή καταναλίσκεται και τροφοδοτείται στη συγκόλληση από μία κουλούρα σύρματος. Το αέριο που χρησιμοποιείται είναι αργό ή μείγμα αργού με άλλα αδρανή αέρια. Το ηλεκτρόδιο στη συγκόλληση M.I.G. συνδέεται στο θετικό πόλο, σε αντίθεση με το ηλεκτρόδιο στη μέθοδο T.I.G., που συνδέεται στον αρνητικό πόλο και έτσι λιώνει ευκολότερα.

Μέθοδος M.A.G

Στην ηλεκτροσυγκόλληση M.A.G. (**Metal Active Gas**) χρησιμοποιούνται ανθρακικά αέρια (διοξείδιο του άνθρακος CO_2) ή μείγμα ανθρακικών αερίων και αργού. Το συγκολλητικό υλικό είναι σύρμα κυρίως από μαγγάνιο και πυρίτιο, ενώ περιέχει και πρόσθετα άλλων μετάλλων. Στο σχήμα 16.18 φαίνεται η διάταξη της συγκόλλησης M.A.G. και στο σχήμα 16.19 φαίνεται ένας συγκολλητής που πραγματοποιεί μία M.A.G. κόλληση.



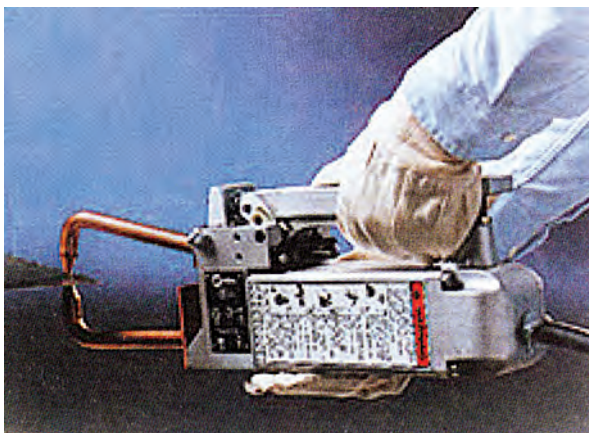
Σχήμα 16.18: Διάταξη συγκόλλησης M.A.G.



Σχήμα 16.19: Συγκόλληση M.A.G.

16.5.4 Ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση (ηλεκτροπόντα)

Η ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση είναι αυτογενής συγκόλληση, η οποία δε χρησιμοποιεί συγκολλητικό υλικό. Τα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν θερμαίνονται συμπιεζόμενα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων και συγκολλώνται. Στο σχήμα 16.20 φαίνεται η διάταξη μίας φορητής μηχανής συγκόλλησης με αντίσταση.



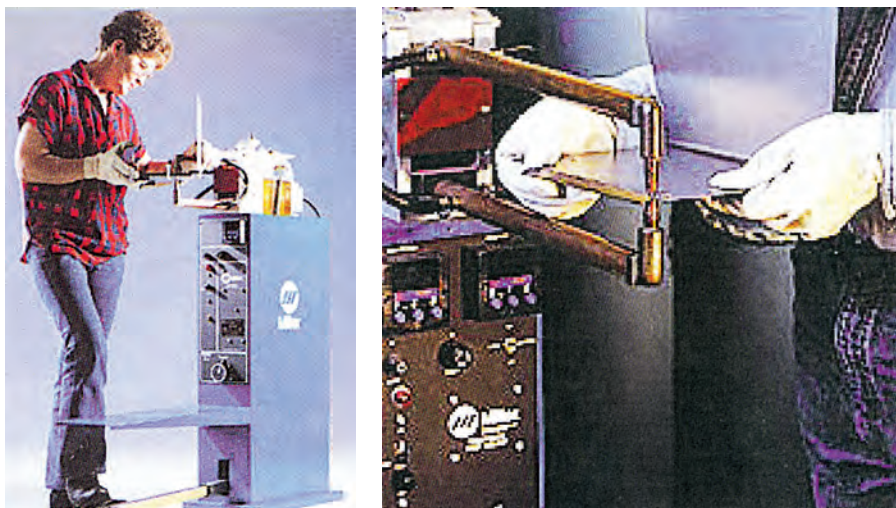
Σχήμα 16.20: Φορητή συσκευή συγκόλλησης με αντίσταση

Για τη συγκόλληση με αντίσταση σημαντικό ρόλο παίζουν ο χρόνος συγκόλλησης και η πίεση που ασκείται από τα ηλεκτρόδια. Ανάλογα με τα υλικά που πρόκειται να συγκολληθούν και το πάχος τους, επιλέγονται και οι συνθήκες αυτές της συγκόλλησης. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση είναι συνήθως από καθαρό χαλκό σε διάφορες μορφές (βλ. σχήμα 16.21).



Σχήμα 16.21: Ηλεκτρόδια συγκόλλησης με αντίσταση

Η πιο γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μηχανή για ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση είναι η **ηλεκτροπόντα**. Οι ηλεκτροπόντες που κυκλοφορούν είναι συνήθως σταθερές και ποδοκίνητες, ενώ υπάρχουν και φορητές, όπως στο σχήμα 16.20. Στο σχήμα 16.22 φαίνεται μια σταθερή ποδοκίνητη ηλεκτροπόντα και η διαδικασία συγκόλλησης.



Σχήμα 16.22: Συγκόλληση σε ηλεκτροπόντα

Η **πίεση** που ασκείται από τα ηλεκτρόδια, η **ένταση του ρεύματος** και ο **χρόνος** που διαρκεί η ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση είναι, όπως αναφέρθηκε, σημαντικοί παράγοντες για την ποιότητα της συγκόλλησης. Η πίεση έχει σκοπό να δημιουργήσει καλή επαφή ανάμεσα στα συγκολλώμενα τεμάχια και γι' αυτό τα τεμάχια που παρουσιάζουν ανωμαλίες ή ακαθαρσίες πρέπει να συγκολλώνονται κάτω από μεγάλη πίεση. Η ένταση του ρεύματος πρέπει να είναι τέτοια, ώστε τα υλικά που πρέπει να συγκολληθούν να φθάσουν στην απαραίτητη θερμοκρασία, ενώ ο χρόνος της συγκόλλησης εξαρτάται κυρίως από το υλικό των τεμαχίων. Στην ουσία υπάρχει αλληλεπίδραση των τριών παραγόντων της συγκόλλησης και η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών συγκόλλησης γίνεται από την εμπειρία ή συμβουλευόμενοι ειδικούς πίνακες, όπως ο Πίνακας Π.16.4.

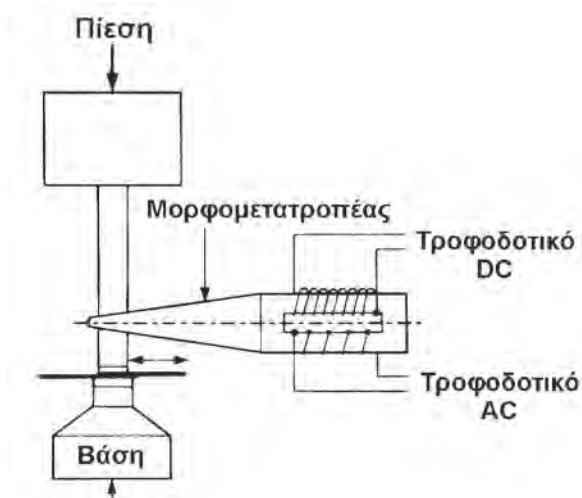
Πίνακας Π.16.4: Συνθήκες συγκόλλησης σε ηλεκτροπόντα

Πάχος τεμαχίου [mm]	Ένταση ρεύματος [A]	Χρόνος [sec]	Πίεση [Kg]
1	5000-8800	0,1-0,4	90-270
1,5	6200-10600	0,2-0,7	140-380
2	7500-12000	0,3-1	195-500
2,5	8200-13500	0,4-1,5	250-640
3	9600-15000	0,6-2	275-790
4	9800-18000	1-3,5	320-1250
5	12000-22000	1,3-4,5	450-1700

16.5.5 Άλλες μέθοδοι συγκολλήσεων

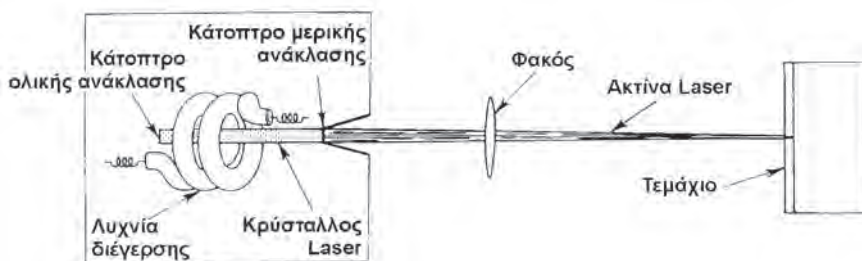
Υπέρηχοι

Η συγκόλληση με υπερήχους πρωτοεμφανίστηκε στα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Η συγκόλληση αυτή χρησιμοποιείται για τη σύνδεση μετάλλων, όπως είναι ο χαλκός, το νικέλιο, το αλουμίνιο κ.λπ.. Στη συγκόλληση με υπερήχους τα τεμάχια συνδέονται μεταξύ τους μέσω πίεσης με ταυτόχρονη ταλάντωση υψηλής συχνότητας. Η ταλάντωση αυτή προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στη θέση συγκόλλησης και η πίεση ανάμεσα στα κομμάτια δημιουργεί την τελική σύνδεση. Στο σχήμα 16.23 φαίνεται η διαδικασία συγκόλλησης με υπερήχους.

**Σχήμα 16.23: Συγκόλληση με υπερήχους**

Laser

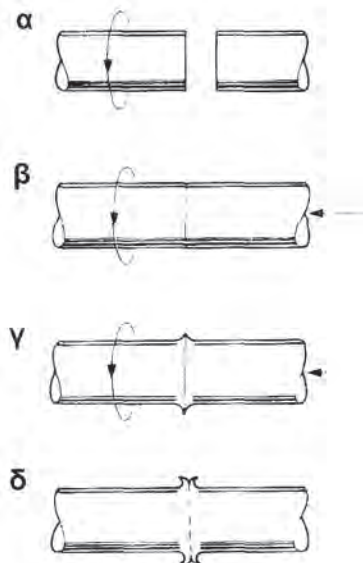
Η συγκόλληση με Laser πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 1950. Η συγκόλληση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται, όταν μία δέσμη ακτίνων Laser προσπίπτει πάνω στα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν. Στο σχήμα 16.24 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής της ακτίνας Laser και η συγκόλληση.



Σχήμα 16.24: Συγκόλληση με Laser

Τριβή

Στη συγκόλληση με τριβή δύο τεμάχια συγκολλώνονται με τη βοήθεια της θερμότητας, που παράγεται από την τριβή του ενός πάνω στο άλλο. Στην πράξη, το ένα από τα δύο τεμάχια περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα και συμπιέζεται πάνω στο τεμάχιο που θα συγκολληθεί. Οι μεταξύ τους επιφάνειες τρίβονται έντονα, θερμαίνονται μέχρι τη θερμοκρασία συγκόλλησης και τότε η περιστροφή σταματά. Με τη συνεχιζόμενη πίεση ανάμεσα στα δύο κομμάτια επιτυγχάνεται η συγκόλληση. Αυτή η μέθοδος έχει βρει εφαρμογές στη συγκόλληση των κοπτικών πλακιδίων σε μανέλες κοπτικών εργαλείων, συγκόλληση ράβδων κ.λπ.. Στο σχήμα 16.25 φαίνεται η διαδικασία συγκόλλησης ράβδων με τριβή. Η διαδικασία που φαίνεται στο σχήμα περιλαμβάνει: α) περιστροφή της μίας ράβδου, β) περιστροφή της πρώτης ράβδου και ταυτόχρονη συμπίεση της δεύτερης ράβδου πάνω στην περιστρεφόμενη, γ) επίτευξη της θερμοκρασίας συγκόλλησης και δ) προκύπτει η συγκόλληση των ράβδων.



Σχήμα 16.25: Συγκόλληση με τριβή

Πλάσμα

Η συγκόλληση με πλάσμα, που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά γύρω στο 1960, μοιάζει πολύ με την συγκόλληση T.I.G. Σε αυτού του τύπου τη συγκόλληση σχηματίζεται τόξο πλάσματος, μεταξύ ενός ηλεκτροδίου, το οποίο δεν καταναλίσκεται, και του μετάλλου που θα συγκολληθεί. Η μέθοδος αυτή, επειδή το τόξο πλάσματος αναπτύσσει μεγάλες θερμοκρασίες, δημιουργεί βαθύτερες ραφές από τις αντίστοιχες της συγκόλλησης TIG.

16.5.6 Συγκόλληση πλαστικών

Η συγκόλληση των πλαστικών μοιάζει αρκετά με τη συγκόλληση των μετάλλων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στηρίζονται στην πίεση των δύο συγκολλώμενων πλαστικών τεμαχίων με παράλληλη θέρμανση των άκρων τους. Στην περίπτωση της συγκόλλησης πλαστικών, τα υλικά δελιώνουν, ενώ χρησιμοποιείται σε μερικές περιπτώσεις και συγκολλητικό υλικό σε μορφή ράβδου μικρής διατομής.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η συγκόλληση με τριβή, που εφαρμόζεται κυρίως σε ράβδους πλαστικών, η συγκόλληση με θέρμανση και πίεση, με ταυτόχρονη εφαρμογή συγκολλητικού υλικού, και άλλες.

16.6 ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Οι ετερογενείς συγκολλήσεις διακρίνονται σε μαλακές και σκληρές. Στις μαλακές συγκολλήσεις η θερμοκρασία συγκόλλησης είναι πολύ χαμηλότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία που χρησιμοποιείται στις σκληρές συγκολλήσεις. Οι ετερογενείς συγκολλήσεις χρησιμοποιούνται συνήθως για τη συγκόλληση τεμαχίων από διαφορετικά υλικά.

16.6.1 Μαλακές συγκολλήσεις

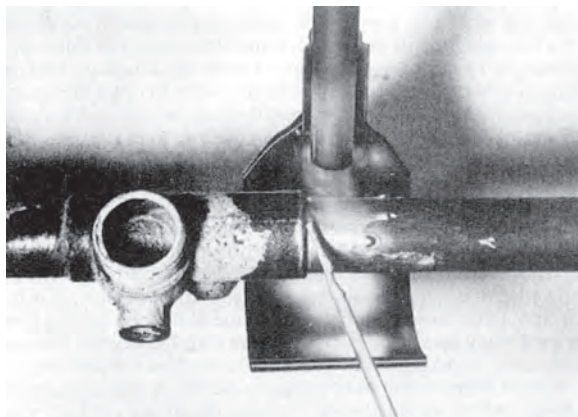
Οι μαλακές συγκολλήσεις διακρίνονται για τη χαμηλή θερμοκρασία συγκόλλησης. Για να γίνει μία τέτοια συγκόλληση, χρησιμοποιείται ως συγκολλητικό υλικό κράμα κασσίτερου και μόλυβδου. Η θερμότητα, που χρειάζεται για να λιώσει το συγκολλητικό υλικό, παρέχεται από καμινέτο ή κολλητήρι ή άλλες πηγές. Μαλακές συγκολλήσεις είναι η κασσιτεροκόλληση, η μολυβδοκόλληση και άλλες, αλλά σημαντικότερη είναι η κασσιτεροκόλληση.

Κασσιτεροκόλληση

Η κασσιτεροκόλληση χρησιμοποιεί ως συγκολλητικό υλικό ένα κράμα κασσίτερου (Sn) και μόλυβδου (Pb). Ανάλογα με την περιεκτικότητα καθενός

από τα δύο συστατικά, κυκλοφορούν στο εμπόριο διάφορα είδη κολλήσεων. Για τα είδη της κόλλησης ισχύει ο κανόνας ότι, όσο πιο μεγάλη είναι η περιεκτικότητα σε κασσίτερο στην κόλληση, τόσο πιο πολύ αυξάνει η ρευστότητα της κόλλησης και μειώνεται η θερμοκρασία τήξης της.

Η κασσιτεροκόλληση χρησιμοποιείται ευρέως από τους λευκοσιδηρουργούς και τους υδραυλικούς για την συγκόλληση σωλήνων κ.λπ.. Στο σχήμα 16.26 φαίνεται μια κασσιτεροκόλληση μολυβδοσωλήνων.



Σχήμα 16.26: Κασσιτεροκόλληση

Στην κασσιτεροκόλληση η θέρμανση των τεμαχίων που πρόκειται να συγκολληθούν γίνεται μέσω καμινέτου, φλόγας οξυγονοασετυλίνης ή χρησιμοποιούνται ειδικά κολλητήρια, τα οποία μπορεί να είναι ηλεκτρικά ή να θερμαίνονται με τη βοήθεια φωταερίου, καμινέτου κ.λπ.. Προκειμένου να συγκολληθούν δύο τεμάχια με κασσιτεροκόλληση, πρέπει να είναι απαλλαγμένα από τυχόν σκουριές ή ακαθαρσίες. Ο καθαρισμός των επιφανειών γίνεται με μηχανικό τρόπο, χρησιμοποιώντας βούρτσα, λίμα, τρόχισμα, κ.λπ., και με χημικό τρόπο, χρησιμοποιώντας ειδικά για το σκοπό αυτό χημικά, σε μορφή αλοιφής ή σκόνης. Τέτοια χημικά είναι το υδροχλωρικό οξύ (χρησιμοποιείται σε επιψευδαργυρωμένες επιφάνειες), ο χλωριούχος ψευδάργυρος, που χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές, και το κολοφώνιο (κυρίως σε ηλεκτρικές εφαρμογές και εκεί που υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης).

Μολυβδοκόλληση

Η μολυβδοκόλληση γίνεται συνήθως χωρίς συγκολλητικό υλικό, επειδή χρησιμοποιείται κυρίως για συγκόλληση μολύβδινων τεμαχίων. Ως συγκολλητικό υλικό χρησιμοποιείται το ίδιο το υλικό των κομματιών που θα συγκολληθούν. Προκειμένου τα μολύβδινα κομμάτια να συγκολληθούν,

θερμαίνονται με φλόγα υδρογόνου ή προπανίου σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του μολύβδου (327°C).

16.6.2 Σκληρές συγκολλήσεις

Οι σκληρές συγκολλήσεις, σε αντίθεση με τις μαλακές, πραγματοποιούνται σε μεγάλες θερμοκρασίες (600 έως 900°C). Χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση όλων των συνηθισμένων μετάλλων πλην του αλουμινίου. Μεγάλη εφαρμογή έχουν σε συγκολλήσεις χάλκινων εξαρτημάτων ή εξαρτημάτων από κράματα του χαλκού. Οι σημαντικότερες σκληρές συγκολλήσεις είναι η μπρουντζοκόλληση και η ασημοκόλληση.

Μπρουντζοκόλληση

Η μπρουντζοκόλληση χρησιμοποιεί ως κόλληση κράμα χαλκού (Cu) και ψευδαργύρου (Zn), παρά το γεγονός ότι ο μπρούντζος είναι κράμα χαλκού και κασσιτέρου. Το συγκολλητικό υλικό λιώνει μέσω θέρμανσης σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία τήξης των προς συγκόλληση τεμαχίων και απλώνει στις επιφάνειες που θα συγκολληθούν. Για να υπάρξει μεγαλύτερη πρόσφυση του συγκολλητικού υλικού χρησιμοποιείται βόρακας ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 10\text{H}_2\text{O}$). Η θέρμανση των κομματιών και του συγκολλητικού υλικού εξασφαλίζεται με καμινέτα, φλόγα οξυγονοασετυλίνης, φωταερίου κ.λπ.. Στο σχήμα 16.27 φαίνεται μια διαδικασία μπρουντζοκόλλησης, καθώς και η μπρουντζοκόλληση ενός κοπτικού πλακιδίου πάνω σε τρυπάνι.



Σχήμα 16.27: Μπρουντζοκόλληση

Ασημοκόλληση

Στην ασημοκόλληση χρησιμοποιείται συγκολλητικό υλικό που περιέχει άργυρο (Ag), χαλκό (Cu), ψευδάργυρο (Zn), κασσίτερο (Sn) και κάδμιο (Cd). Όσο πιο πολύ άργυρο περιέχει η κόλληση, τόσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία τήξης της κόλλησης. Οι κολλήσεις της ασημοκόλλησης περιέχουν

τουλάχιστον 8% άργυρο και κυκλοφορούν στο εμπόριο σε μορφή σύρματος, ελάσματος ή σε μορφή σκόνης.

Όπως και στις άλλες ετερογενείς συγκολλήσεις, έτσι και στην ασημοκόλληση, χρησιμοποιούνται ως θερμαντικά μέσα καμινέτα ή φλόγα της οξυγονοασετυλίνης, του φωταερίου κ.λπ.. Η ασημοκόλληση έχει πολλές εφαρμογές στην κοσμηματοποιία και στα ηλεκτρονικά παρά το κόστος της που είναι μεγάλο λόγω της παρουσίας του αργύρου.

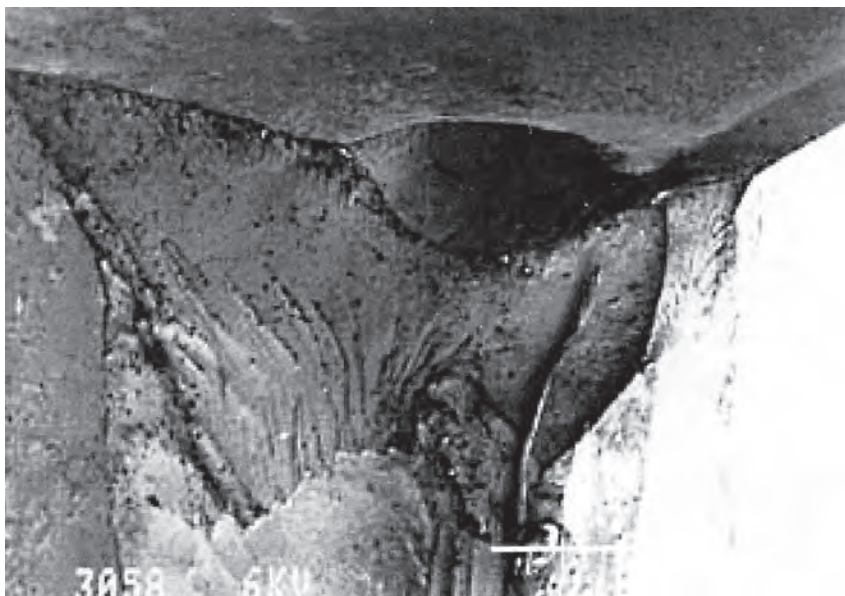


ΠΕΡΙΛΗΨΗ 16ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Οι συγκολλήσεις ανήκουν στην κατηγορία των μόνιμων συνδέσεων ανάμεσα σε τεμάχια. Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της θερμότητας, είναι σύνδεση κρυσταλλική και έχει στόχο το τελικό τεμάχιο να έχει την ίδια αντοχή με τα αρχικά κομμάτια. Η συγκολλητικότητα των υλικών εξαρτάται από τη χημική τους σύνθεση και την κρυσταλλική τους δομή.
- Οι συγκολλήσεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις αυτογενείς συγκολλήσεις και τις ετερογενείς συγκολλήσεις. Στις αυτογενείς συγκολλήσεις απαιτείται τοπικά λιώσιμο των προς συγκόλληση τεμαχίων και τοποθέτηση ή όχι ενός συγκολλητικού μέσου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συγκολλήσεων είναι η οξυγονοσυγκόλληση, η ηλεκτροσυγκόλληση, η συγκόλληση με αντίσταση, με Laser κ.λπ.. Στις ετερογενείς συγκολλήσεις δε χρειάζεται τοπική τήξη των αντικειμένων, που θα συγκολληθούν, παρά μόνο θέρμανση και εναπόθεση λιωμένου συγκολλητικού υλικού. Τέτοιες συγκολλήσεις είναι η κασσιτεροκόλληση, η μπруντζοκόλληση κ.λπ..
- Οι συγκολλήσεις με αδρανή ατμόσφαιρα εξασφαλίζουν τη μόνωση της θέσης συγκόλλησης από τον αέρα, δηλαδή ουσιαστικά από το οξυγόνο και το άζωτο που επηρεάζουν τη συγκόλληση. Για τη μόνωση αυτή χρησιμοποιούνται τα αέρια Αργό (Ar) και Ήλιο (He). Τέτοιες συγκολλήσεις είναι οι συγκολλήσεις με τις μεθόδους T.I.G, M.I.G. και M.A.G.
- Οι ετερογενείς συγκολλήσεις διακρίνονται σε μαλακές και σκληρές. Στις μαλακές συγκολλήσεις η θερμοκρασία συγκόλλησης είναι πολύ χαμηλότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία που χρησιμοποιείται στις σκληρές συγκολλήσεις. Μαλακές συγκολλήσεις είναι η κασσιτεροκόλ-

ληση, η μολυβδοκόλληση και άλλες, ενώ οι σημαντικότερες σκληρές συγκολλήσεις είναι η μπrouντζοκόλληση και η ασημοκόλληση.

- Ο έλεγχος των συγκολλήσεων είναι απαραίτητος προκειμένου να διαπιστωθεί αν η συγκόλληση έχει την απαιτούμενη μηχανική αντοχή. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να γίνει με μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, όπου εξετάζεται το δοκίμιο ή η ραφή χωρίς όμως να καταστραφεί, και με μεθόδους, όπου υποβάλλονται έτοιμα προϊόντα σε ανάλογες φορτίσεις, με αποτέλεσμα την καταστροφή τους μετά τον έλεγχο.



Φθορά κοπτικού εργαλείου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 17

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΦΘΟΡΑ

- 17.1 Γενικά περί φθοράς
- 17.2 Τύποι φθοράς
- 17.3 Κατηγορίες επιφανειακών κατεργασιών
- 17.4 Προετοιμασία της επιφάνειας των μετάλλων



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να κατανοήσετε τους διαφόρους τύπους φθοράς των υλικών και να δίνετε συγκεκριμένα παραδείγματα.
- ☒ Να μάθετε τις βασικές κατηγορίες επιφανειακών κατεργασιών.
- ☒ Να μάθετε τις βασικότερες μεθόδους καθαρισμού της επιφάνειας των μετάλλων.

17.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΦΘΟΡΑΣ

Η φθορά αποτελεί σημαντικό παράγοντα υποβάθμισης εξαρτημάτων και στοιχείων μηχανών με σοβαρές συνέπειες στη λειτουργία μίας εγκατάστασης. Υπερβολική φθορά οδηγεί σε αναγκαστική διακοπή της λειτουργίας της εγκατάστασης, με σκοπό την επισκευή ή/και την αντικατάσταση του εξοπλισμού που έχει φθαρεί, με αντίστοιχες οικονομικές συνέπειες. Πληθώρα περιπτώσεων φθοράς παρατηρείται στις διάφορες κατεργασίες διαμόρφωσης μεταξύ των κατεργαζόμενων τεμαχίων και των διαφόρων εργαλείων διαμόρφωσης (έμβολα, μήτρες, κύλινδροι έλασης κ.λπ.). Επίσης, φθορά παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευών και μηχανών στις οποίες υπάρχουν συνεργαζόμενα μέρη, όπως π.χ. έδρανα ολίσθησης/κύλισης, οδοντωτοί τροχοί (γρανάζια), τροχαλίες με ταινίες ή αλυσίδες, έμβολα και χιτώνια σε κυλίνδρους μηχανών εσωτερικής καύσης, έκκεντρα και ωστήρια εκκέντρων, αλλά και σε άλλες περιπτώσεις, όπως σε υδραυλικές εγκαταστάσεις και σωληνώσεις που μεταφέρουν ρευστά, στερεά ή μείγματα ρευστών/στερεών, τα οποία επεξεργάζονται σε χημικές βιομηχανίες. Επίσης, η φθορά δεν αποτελεί μονάχα φαινόμενο μείζονος τεχνολογικής σημασίας, αλλά πολλές φορές και ιατρικής, όπως στην περίπτωση επαφής και κίνησης οστών που συνδέονται στις αρθρώσεις του ανθρώπινου σώματος.

Η **φθορά** ορίζεται ως η διεργασία προοδευτικής απομάκρυνσης υλικού μεταξύ δύο σωμάτων, τα οποία βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση. Η αλληλεπίδραση αυτή μεταξύ των δύο σωμάτων μπορεί να είναι είτε μηχανικής είτε χημικής φύσης, είτε μεικτή (μηχανική και χημική). Η φθορά, όταν δεν είναι επιθυμητή, αποτελεί ζημιογόνο φαινόμενο, που οδηγεί σε

αλλαγές στις διαστάσεις των υλικών, που βρίσκονται σε επαφή, στην πρόκληση ταλαντώσεων και θορύβου. Στην περίπτωση των κατεργασιών με αφαίρεση υλικού (τόρνευση, φρεζάρισμα κ.λπ.), η φθορά του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι επιθυμητή, προκειμένου να επιτευχθεί η κατασκευή κάποιου συγκεκριμένου εξαρτήματος. Αντιθέτως, η φθορά των κοπτικών εργαλείων είναι ανεπιθύμητο φαινόμενο, λόγω της μείωσης της κοπτικής ικανότητας των εργαλείων και της χειροτέρευσης της ποιότητας της επιφάνειας των κατεργαζόμενων τεμαχίων.

Η φθορά των υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την **τριβή** και τις **μηχανικές ιδιότητες** (κυρίως **σκληρότητα, πλαστικότητα**) των εφαιπτομένων επιφανειών. Η κατάλληλη μείωση του συντελεστή τριβής (που είναι ο λόγος της οριζόντιας εφαιπτομενικής δύναμης προς την κατακόρυφη δύναμη που ασκούνται στο ίδιο σώμα), αλλά και η αύξηση της σκληρότητας της μίας ή και των δύο συνεργαζόμενων επιφανειών μπορεί να οδηγήσει σε ελαχιστοποίηση της φθοράς. Οι βασικές μεθοδολογίες επίτευξης των παραπάνω είναι:

- Κατάλληλη επιλογή υλικών που να αντέχουν στη φθορά,
- Λείανση των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή,
- Προσθήκη κατάλληλου λιπαντικού μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών (λίπανση),
- Επιφανειακές κατεργασίες.

17.2 ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΑΣ

Οι βασικοί τύποι φθοράς συνοψίζονται παρακάτω:

- (i) **Φθορά πρόσφυσης**
- (ii) **Φθορά εκτριβής**
- (iii) **Φθορά επιφανειακής κόπωσης**
- (iv) **Μηχανική διαβρωτική φθορά**
- (v) **Οξειδωτική φθορά**

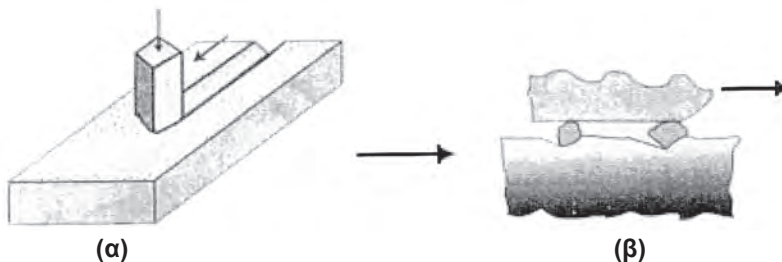
Κατά τη **φθορά πρόσφυσης** δημιουργούνται δεσμοί πρόσφυσης μεταξύ των δύο σωμάτων (τα οποία έχουν συνήθως παρόμοια σκληρότητα) και λόγω της σχετικής τους κίνησης προκαλούνται αποκολλήσεις και απόβλιττα φθοράς (σχήμα 17.1). Η τοπική αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει τοπικές συγκολλήσεις ή ακόμα και τήξη σε σημεία έντονης

τριβής, με αποτέλεσμα τη δυσχέρεια ή ακόμα και τη διακοπή της κίνησης. Περιπτώσεις φθοράς πρόσφυσης συναντώνται σε εκκεντροφόρους άξονες, σε γρανάζια, σε έμβολα και δακτυλίους εμβόλων, σε ολισθητήρες, σε καλούπια διαμόρφωσης κ.λπ..



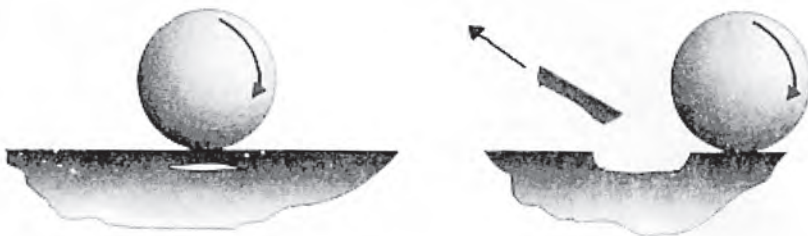
Σχήμα 17.1: Σχηματική παράσταση της φθοράς πρόσφυσης

Η **φθορά εκτριβής** παρατηρείται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το ένα από τα δύο σώματα σε επαφή (ή τα προκαλούμενα απόβλιττα) έχει πολύ μεγαλύτερη σκληρότητα από το άλλο (σχήμα 17.2). Η απώλεια υλικού οφείλεται, κυρίως, είτε στην πλαστική παραμόρφωση είτε στην απόξεση και λείανση της πιο μαλακής επιφάνειας κατά τρόπο παρόμοιο με τις κατεργασίες κοπής (λείανση, τόννευση κ.λπ.).



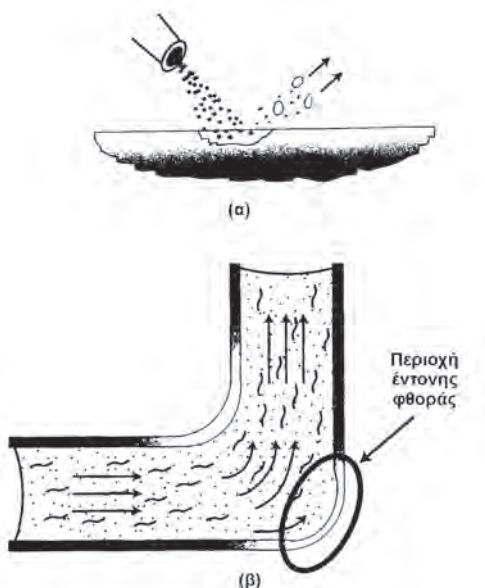
Σχήμα 17.2: Σχηματική παράσταση της φθοράς εκτριβής. (α) Το εργαλείο κοπής αποτελεί τη σκληρή επιφάνεια και προκαλεί αυλακώσεις στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. (β) Τα απόβλιττα φθοράς είναι τα σκληρά σωματίδια που παραμορφώνουν πλαστικά την ανταγωνιστική επιφάνεια.

Η **φθορά επιφανειακής κόπωσης** οφείλεται στην επαναλαμβανόμενη ολίσθηση ή κύλιση των συνεργαζόμενων επιφανειών. Αυτή οδηγεί στη δημιουργία ρωγμών κάτω από την επιφάνεια επαφής και κατά συνέπεια στην αποκόλληση υλικού (σχήμα 17.3). Είναι συνηθής τύπος φθοράς που παρατηρείται μεταξύ των σφαιρών και της αύλακας δακτυλίου ένσφαιρων τριβέων (ρουλμάν).



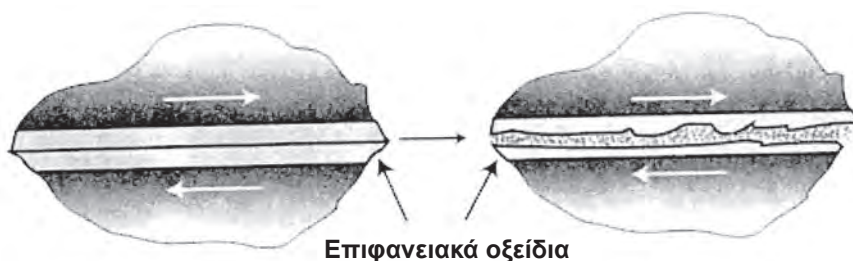
Σχήμα 17.3: Σχηματική παράσταση της φθοράς επιφανειακής κόπωσης.

Η **μηχανική διάβρωση** παρατηρείται σε περιπτώσεις πρόσκρουσης στερεών σωματιδίων ή/και υγρών πάνω στην επιφάνεια του υλικού. Είναι η κλασική περίπτωση φθοράς που παρατηρείται κατά την αμμοβολή (σχήμα 17.4α). Επίσης, υποπερίπτωση της μηχανικής διάβρωσης είναι η **σπηλαίωση** που παρατηρείται σε πτερωτές αντλιών, λόγω της δημιουργίας φυσαλίδων πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου. Η μηχανική διάβρωση είναι έντονη σε υδραυλικές εγκαταστάσεις και συστήματα επεξεργασίας στερεών και υγρών/στερεών στη χημική βιομηχανία (τσιμεντοβιομηχανία, βιομηχανία κεραμικών, ηλεκτροπαραγωγικές εγκαταστάσεις καύσεως λιγνίτη κ.λπ.), βλ. σχήμα 17.4β.



Σχήμα 17.4: Σχηματική παράσταση της μηχανικής διάβρωσης, (α) λόγω πρόσκρουσης στερεών σωματιδίων πάνω στην επιφάνεια του υλικού (π.χ. αμμοβολή) και (β) λόγω της ροής μειγμάτων υγρών/στερεών.

Η οξειδωτική φθορά είναι αποτέλεσμα της επίδρασης του περιβάλλοντος πάνω στις επιφάνειες των συνεργαζόμενων υλικών (σχήμα 17.5). Η παρουσία οξυγόνου οδηγεί στο σχηματισμό στρωμάτων οξειδίου πάνω στις τριβόμενες επιφάνειες. Το φαινόμενο της οξείδωσης εντείνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και του ποσοστού υγρασίας του περιβάλλοντος. Το στρώμα του οξειδίου σε αρκετές περιπτώσεις οδηγεί σε χαμηλές ταχύτητες φθοράς, λόγω των λιπαντικών ιδιοτήτων που επιδεικνύει, μειώνοντας το συντελεστή τριβής.



Σχήμα 17.5: Σχηματική παράσταση της οξειδωτικής φθοράς.

Τη μελέτη των φαινομένων της φθοράς της τριβής και της λίπανσης μεταξύ των διαφόρων υλικών τη διαπραγματεύεται η επιστημονική περιοχή της **Τριβολογίας**.

17.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Οι **επιφανειακές κατεργασίες** αποσκοπούν κυρίως στην αύξηση της αντίστασης του υλικού σε **φθορά, κόπωση, οξείδωση και διάβρωση**. Επίσης, ένα μέρος των επιφανειακών κατεργασιών πραγματοποιείται για λόγους αισθητικής και διακόσμησης (διακοσμητικός χρωματισμός μετάλλων με πλαστικά, βερνίκια κ.λπ.). Οι επιφανειακές κατεργασίες των υλικών διακρίνονται στις εξής δύο μεγάλες κατηγορίες:

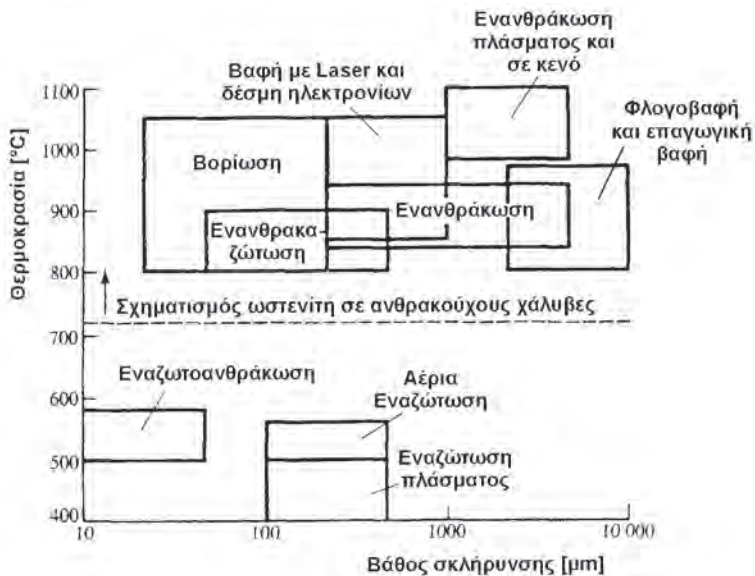
(1) Κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας κατά τις οποίες δεν αποτίθεται υλικό πάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Στις κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας υπάρχει περίπτωση να μεταβληθεί η κρυσταλλική δομή της επιφάνειας ή η χημική της σύσταση ή και τα δύο. Οι κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας χωρίζονται στις παρακάτω υποκατηγορίες:

- *επιφανειακές μηχανικές κατεργασίες* (προσθήκη εσωτερικών τάσεων στην επιφάνεια του υλικού χωρίς να αλλάζει η κρυσταλλική δομή και η χημική σύσταση).
- *επιφανειακές θερμικές κατεργασίες* (αλλάζει η κρυσταλλική δομή, δεν αλλάζει η χημική σύσταση).
- *επιφανειακές θερμικές κατεργασίες με αλλαγή της χημικής σύστασης* (θερμοχημικές κατεργασίες ή κατεργασίες διάχυσης).

Οι διάφορες τεχνικές τροποποίησης της επιφάνειας παρουσιάζονται, κατά κατηγορία, στον πίνακα Π.17.1. Η επίδραση της επιφανειακής κατεργασίας πάνω στις μηχανικές - χημικές ιδιότητες του υλικού (π.χ. αύξηση της σκληρότητας, μεταβολή της χημικής σύστασης) φθάνει έως ένα ορισμένο βάθος από την επιφάνεια του υλικού. Το βάθος αυτό για κάθε κατεργασία ποικίλλει, ανάλογα με τις αντίστοιχες παραμέτρους, όπως είναι η χρονική διάρκεια της κατεργασίας, το περιβάλλον και το εκάστοτε υλικό. Έτσι, στην περίπτωση των χαλύβων, το βάθος της εναζώτωσης είναι συνήθως από 100-500 μm, ενώ της φλογοβαφής και της επαγωγικής βαφής μπορεί να φθάσει και τα 10 mm, βλ. σχήμα 17.6. Στο εν λόγω σχήμα φαίνονται και τα διαστήματα των θερμοκρασιών στα οποία εξελίσσονται οι παραπάνω κατεργασίες. Μερικές πραγματοποιούνται πάνω από τη θερμοκρασία σχηματισμού του ωστενίτη και άλλες κάτω από αυτήν.

Πίνακας Π.17.1: Βασικά είδη κατεργασιών τροποποίησης της επιφάνειας

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	- Σφαιροβολή, αμμοβολή (επιφανειακή ενδοτράχυνση με πτώση σωματιδίων) - Επιφανειακή έλαση (επιφανειακή ενδοτράχυνση με έλαση)
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	- Φλογοβαφή (επιφανειακή βαφή με τη βοήθεια φλόγας) - Επαγωγική βαφή (επιφανειακή βαφή με επαγωγικά ρεύματα) - Βαφή με δέσμη laser (υπερταχεία βαφή με ακτινοβολία laser) - Βαφή με δέσμη ηλεκτρονίων (ταχεία βαφή με δέσμη ηλεκτρονίων)
ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	- Ενανθράκωση (εμπλουτισμός σε άνθρακα και στη συνέχεια βαφή)
(ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ή ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΙ)	- Εναζώτωση (εμπλουτισμός σε άζωτο) - Ενανθρακαζώτωση (εμπλουτισμός σε άνθρακα και άζωτο και στη συνέχεια βαφή) - Εναζωτανθράκωση (εμπλουτισμός σε άνθρακα αλλά κυρίως σε άζωτο) - Ενδοκυάνωση (εμπλουτισμός σε άνθρακα και άζωτο και στη συνέχεια βαφή) - Εγχρωμίωση (εμπλουτισμός σε χρώμιο) - Εναργιλίωση (εμπλουτισμός σε αλουμίνιο) - Ενσιλίκωση (εμπλουτισμός σε πυρίτιο) - Βορίωση (εμπλουτισμός σε βόριο) - Σεραδίωση (εμπλουτισμός σε ψευδάργυρο) - Βαναδίωση (εμπλουτισμός σε βανάδιο) - Εμφύτευση ιόντων (εμπλουτισμός σε χρώμιο, νικέλιο, μολυβδαίνιο κ.λπ.)



Σχήμα 17.6: Όρια θερμοκρασίας και βάθους σκλήρυνσης για διάφορες επιφανειακές κατεργασίες τροποποίησης.

(2) Κατεργασίες με απόθεση υλικού (επιστρώσεις ή επικαλύψεις).

Είναι οι επιφανειακές κατεργασίες στις οποίες λαμβάνει χώρα η απόθεση υλικού (με μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά ή/και τη διάβρωση) στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου, δηλαδή η δημιουργία κάποιας επικάλυψης. Οι κατεργασίες με απόθεση υλικού χωρίζονται στις παρακάτω υποκατηγορίες:

- *επικαλύψεις ή επιμεταλλώσεις με εμβάπτιση*, στις οποίες το υλικό εμβάπτιζεται μέσα σε λουτρό τηγμένου μετάλλου (επιψευδαργύρωση, επικασσιτέρωση).
- *ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις ή επιμεταλλώσεις*, στις οποίες το επίστρωμα (συνήθως χρώμιο, νικέλιο, χαλκός, κάδμιο) σχηματίζεται πάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου με κατάλληλη ηλεκτρόλυση.
- *χημικές επικαλύψεις*, όπως είναι η φωσφάτωση και η επινικέλωση.
- *επιμεταλλώσεις με συγκόλληση*, στις οποίες το υλικό αποτίθεται μέσω χρήσης κατάλληλου ηλεκτροδίου (π.χ. απόθεση στελλίτη) ή με ψυχρή συνέλαση.
- *επικαλύψεις με θερμικό ψεκασμό*, στις οποίες το επίστρωμα δημιουργείται με ψεκασμό τηγμένου υλικού (μετάλλου ή κεραμικού).
- *επικαλύψεις με ακτινοβολία laser* στις οποίες πραγματοποιείται ταυτόχρονος ψεκασμός σκόνης υλικού ή έχει προαποτεθεί σκόνη στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

- επικαλύψεις μικρού πάχους και μεγάλης αντίστασης σε φθορά, με φυσική ή χημική εναπόθεση ατμών (*Physical Vapour Deposition, PVD / Chemical Vapour Deposition, CVD*).
- οργανικές επικαλύψεις με πλαστικά χρώματα για προστασία από τη διάβρωση.
- επισμάλτωση είναι η επικάλυψη των μετάλλων με στερεά εφυαλώματα (σμάλτα), βοριοπυριτικής σύστασης, για βελτίωση της αντοχής στη διάβρωση.

Οι διάφορες τεχνικές επικάλυψης της επιφάνειας παρουσιάζονται στον πίνακα Π.17.2. Το πάχος των επικαλύψεων ποικίλλει, όπως φαίνεται στο σχήμα 17.7. Οι ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις και οι επικαλύψεις με θερμικό ψεκασμό φθάνουν σε πάχος ορισμένων χιλιοστών, ενώ οι επικαλύψεις με εναπόθεση ατμών (PVD, CVD) κυμαίνονται από 1 έως 10 μm .

Πίνακας Π.17.2: Βασικά είδη κατεργασιών με απόθεση υλικού (επικαλύψεις)

ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΜΕ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ	- Γαλβάνισμα (επιψευδαργύρωση) - Γάνωμα (επικασσιτέρωση)
ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ	- Επιχρωμίωση - Επινικέλωση - Επικαδμίωση - Επιχάλκωση - Επιψευδαργύρωση - Επικασσιτέρωση
ΧΗΜΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ	- Φωσφάτωση (σχηματισμός φωσφορικού άλατος του μετάλλου) - Χημική επινικέλωση («χημικό νίκελ»)
ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΜΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ	- Απόθεση υλικού με τη βοήθεια ηλεκτρικού τόξου, φλόγας κλπ (π.χ. απόθεση στελλίτη) - Συνέλαση του τεμαχίου και του φύλλου επικαλύψεώς του - Εκρηκτική συγκόλληση (συγκόλληση, με τη βοήθεια εκτόνωσης εκρηκτικής ύλης, λεπτού φύλλου υλικού πάνω στο κατεργαζόμενο τεμάχιο)
ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΟ ΨΕΚΑΣΜΟ	- Ψεκασμός φλόγας - Ψεκασμός με ηλεκτρικό τόξο - Ψεκασμός πλάσματος - Ψεκασμός με εκρηκτική εκτόνωση
ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER	- επικάλυψη με laser με προσπάθηση σκόνης - επικάλυψη με laser και ταυτόχρονο ψεκασμό σκόνης
ΦΥΣΙΚΗ / ΧΗΜΙΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΤΜΩΝ (PVD, CVD)	- Φυσική Εναπόθεση Ατμών (δημιουργία λεπτών επιστρώσεων με εξαγωγή του υλικού επικάλυψης) - Χημική Εναπόθεση Ατμών (δημιουργία λεπτών επιστρώσεων μέσω κατάλληλων χημικών αντιδράσεων σε αέρια φάση)
ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΜΕ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΧΡΩΜΑΤΑ	- Επικαλύψεις με ακρυλικά χρώματα - Επικαλύψεις με φαινολικά χρώματα - Επικαλύψεις με εποξικά χρώματα
ΕΠΙΣΜΑΛΤΩΣΗ	- Επικάλυψη των μετάλλων με σμάλτο



Σχήμα 17.7: Μεταβολή του πάχους επικάλυψης για διάφορες κατεργασίες με απόθεση υλικού

17.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Πριν από οποιαδήποτε επιφανειακή κατεργασία προηγείται σχολαστικός καθαρισμός της επιφάνειας του μετάλλου, ο οποίος είναι απαραίτητος για την καλή συνάφεια της προστατευτικής επικάλυψης. Ο καθαρισμός αυτός έχει σκοπό την απομάκρυνση ξένων ουσιών από τη μεταλλική επιφάνεια όπως:

- λίπη, γράσα,
- φθαρμένα χρώματα,
- οξείδια και σκουριές.

Οι βασικοί καθαρισμοί των μεταλλικών επιφανειών είναι οι ακόλουθοι:

- μηχανικός καθαρισμός,
- καθαρισμός με ακουστικά κύματα και υπερήχους,
- χημικός και ηλεκτρολυτικός καθαρισμός.

17.4.1 Μηχανικός καθαρισμός

Ο μηχανικός καθαρισμός ενδείκνυται, όταν οι ξένες ουσίες στην επιφάνεια του μετάλλου είναι στερεές. Ο απλούστερος μηχανικός καθαρισμός είναι αυτός που πραγματοποιείται με το χέρι, με μεταλλικό σύρμα ή/και με “χονδρό” σμυριδόπανο. Ο καλύτερος όμως μηχανικός καθαρισμός επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της αμμοβολής. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο,

απομακρύνονται οι ξένες ουσίες (οξειδία, σκουριές) με εκτόξευση πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου ψηγμάτων πυριτικής άμμου ή κουρουνδίου (Al_2O_3) ή ακόμα και σφαιριδίων από σκληρό χάλυβα. Μετά από την αμμοβολή ακολουθείται λείανση της επιφάνειας, όπου αυτό είναι επιθυμητό.

17.4.2 Καθαρισμός με ακουστικά κύματα και υπερήχους

Το προς καθαρισμό μέταλλο εμβαπτίζεται μέσα σε κατάλληλο οργανικό διαλύτη (τριχλωροαιθυλένιο) και δέχεται την επίδραση υψίσυχων ακουστικών κυμάτων ή υπερήχων. Λόγω της διάδοσης των ακουστικών κυμάτων μέσα στο υγρό, δημιουργούνται μικροσκοπικές φυσαλίδες οι οποίες “σπάνε” πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου. Στα σημεία κατάρρευσης των φυσαλίδων απελευθερώνεται πίεση, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση των ακαθαρσιών οργανικής υφής (λίπη, γράσα, μουντζούρα).

17.4.3. Χημικός και ηλεκτρολυτικός καθαρισμός

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις καθαρισμού:

- καθαρισμός οργανικών ακαθαρσιών (λίπη, γράσα, χρώματα),
- καθαρισμός οξειδίων (αποσκωρίωση).

Απομάκρυνση οργανικών ακαθαρσιών (απολίπανση)

Πραγματοποιείται με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους:

- (i) *Αλκαλικός καθαρισμός.* Χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα φωσφορικών, ανθρακικών αλάτων και καυστικής σόδας. Η χρήση γίνεται εν θερμώ, 70-100°C. Το υλικό εμβαπτίζεται μέσα στο διάλυμα ή υφίσταται καθαρισμό δια ψεκασμού, αν είναι μεγάλων διαστάσεων.
- (ii) *Καθαρισμός με υγρό διαλυτικό μέσο.* Χρησιμοποιούνται χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, όπως τετραχλωράνθρακας, τριχλωροαιθυλένιο, σε θερμοκρασίες 30-60°C. Ο καθαρισμός του υλικού γίνεται πάλι είτε με εμβάπτιση είτε με ψεκασμό.
- (iii) *Καθαρισμός με ατμούς τριχλωροαιθυλενίου.* Ο καθαρισμός (ή απολίπανση) γίνεται κατά τη συμπύκνωση ατμών τριχλωροαιθυλενίου πάνω στη μεταλλική επιφάνεια.
- (iv) *Καθαρισμός με διάλυμα οξέος.* Πραγματοποιείται με όξινα υδατικά διαλύματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις το διάλυμα που χρησιμοποιείται για ανθρακούχους χάλυβες είναι αραιό διάλυμα υδροχλωρικού οξέος ή θειικού οξέος. Στην περίπτωση των ανοξείδωτων χαλύβων χρησιμοποιείται κατάλληλο διάλυμα νιτρικού και υδροφθορικού οξέος. Η διεργασία καθαρισμού πραγματοποιείται

παρουσία κατάλληλης ουσίας (**αναστολέας**) που παρεμποδίζει την οξειδωση του μετάλλου από τα οξέα. Ο καθαρισμός πραγματοποιείται είτε με εμβάπτιση είτε με ψεκασμό.

Καθαρισμός οξειδίων (αποσκωρίωση)

Πραγματοποιείται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- (i) *Καθαρισμός με διάλυμα οξέος.* Το συνηθέστερο μέσο καθαρισμού οξειδίων είναι διάλυμα θειικού οξέος περιεκτικότητας 5-15% σε θερμοκρασία 50-100°C. Για χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα χρησιμοποιείται διάλυμα υδροχλωρικού οξέος 5-20% σε θερμοκρασία 30-70°C.
- (ii) *Καθαρισμός με ηλεκτρόλυση.* Οι διάφοροι χάλυβες περιέχουν οξείδια (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) λόγω διάβρωσης, όχι μόνο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά και σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου λαμβάνουν χώρα οι διαμορφώσεις εν θερμώ (π.χ. σφυρηλασία εν θερμώ) και οι θερμικές κατεργασίες. Τα οξείδια υψηλών θερμοκρασιών είναι δύσκολο να αφαιρεθούν με μία απλή χημική μέθοδο με διάλυμα οξέος. Ο δραστικότερος τρόπος αφαίρεσής τους πραγματοποιείται με ηλεκτρολυτική μέθοδο. Χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης διάλυμα θειικού οξέος 8-15%. Κατά την ηλεκτρόλυση λαμβάνει χώρα έκλυση αερίου υδρογόνου και αναγωγή των οξειδίων του σιδήρου. Η ηλεκτρολυτική μέθοδος εφαρμόζεται ως πρώτο βασικό στάδιο σε εγκαταστάσεις επικασσιτέρωσης και επιψευδαργύρωσης.
- (iii) *Καθαρισμός σε λουτρό τηγμένων αλάτων.* Χρησιμοποιείται λουτρό μείγματος 80% NaOH, 15% NaNO_3 και 5% NaCl, όπου εμβάπτιζεται το προς καθαρισμό μέταλλο. Πολλές φορές πραγματοποιείται ταυτόχρονα και ηλεκτρόλυση, με ηλεκτρολύτη το μείγμα αλάτων στους 480°C.

Στη συνέχεια θα αναπτυχθούν μερικές από τις κυριότερες επιφανειακές κατεργασίες (τροποποίησης της επιφάνειας και απόθεσης υλικού) που χρησιμοποιούνται ως τελικό στάδιο στην κατασκευή εξαρτημάτων και στοιχείων μηχανών από χάλυβα.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 17ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Η φθορά ορίζεται ως η διεργασία προοδευτικής απομάκρυνσης υλικού, μεταξύ δύο σωμάτων τα οποία βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση. Οι βασικοί τύποι φθοράς συνοψίζονται παρακάτω:
 - ◆ Φθορά πρόσφυσης
 - ◆ Φθορά εκτριβής
 - ◆ Φθορά επιφανειακής κόπωσης
 - ◆ Μηχανική διαβρωτική φθορά
 - ◆ Οξειδωτική φθορά
- Οι επιφανειακές κατεργασίες των υλικών διακρίνονται στις εξής δύο μεγάλες κατηγορίες:
 - (1) Κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας, κατά τις οποίες δεν αποτίθεται υλικό πάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Οι κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας χωρίζονται στις παρακάτω υποκατηγορίες:
 - επιφανειακές μηχανικές κατεργασίες,
 - επιφανειακές θερμικές κατεργασίες,
 - επιφανειακές θερμικές κατεργασίες με αλλαγή της χημικής σύστασης.
 - (2) Κατεργασίες με απόθεση υλικού (επιστρώσεις ή επικαλύψεις). Είναι οι επιφανειακές κατεργασίες στις οποίες λαμβάνει χώρα η απόθεση υλικού (με μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά ή/και τη διάβρωση) στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου, δηλαδή η δημιουργία κάποιας επικάλυψης. Οι κατεργασίες με απόθεση υλικού χωρίζονται στις παρακάτω υποκατηγορίες:
 - επικαλύψεις ή επιμεταλλώσεις με εμβάπτιση,
 - ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις ή επιμεταλλώσεις,
 - χημικές επικαλύψεις,
 - επιμεταλλώσεις με συγκόλληση,

- επικαλύψεις με θερμικό ψεκασμό,
 - επικαλύψεις με ακτινοβολία *laser*,
 - επικαλύψεις μικρού πάχους και μεγάλης αντίστασης σε φθορά, με φυσική ή χημική εναπόθεση ατμών (*Physical Vapour Deposition, PVD / Chemical Vapour Deposition, CVD*),
 - οργανικές επικαλύψεις,
 - επισμάλτωση.
- Πριν από οποιαδήποτε επιφανειακή κατεργασία προηγείται σχολαστικός καθαρισμός της επιφάνειας του μετάλλου, ο οποίος είναι απαραίτητος για την καλή συνάφεια της προστατευτικής επικάλυψης. Ο καθαρισμός αυτός έχει σκοπό την απομάκρυνση ξένων ουσιών από τη μεταλλική επιφάνεια όπως:
 - λίπη, γράσσα,
 - φθαρμένα χρώματα,
 - οξειδία και σκουριές.
 - Οι βασικοί καθαρισμοί των μεταλλικών επιφανειών είναι οι ακόλουθοι:
 - μηχανικός καθαρισμός,
 - καθαρισμός με ακουστικά κύματα και υπερήχους,
 - χημικός και ηλεκτρολυτικός καθαρισμός.



Εξοπλισμός για χημική εναπόθεση ατμών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

18

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

- 18.1 Βασικές επιφανειακές κατεργασίες τροποποίησης
- 18.2 Βασικές επιφανειακές κατεργασίες απόθεσης υλικού (επικαλύψεις)



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να κατανοήσετε τις σπουδαιότερες κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας (μηχανικές, θερμοχημικές).
- ☒ Να κατανοήσετε τις σπουδαιότερες επιφανειακές κατεργασίες με απόθεση υλικού (επικαλύψεις με εμβάπτιση, ηλεκτρολυτικές, χημικές, επικαλύψεις με θερμικό ψεκασμό, κ.λπ.).
- ☒ Να δίνετε σχετικά παραδείγματα και εφαρμογές επιφανειακών κατεργασιών.

18.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ

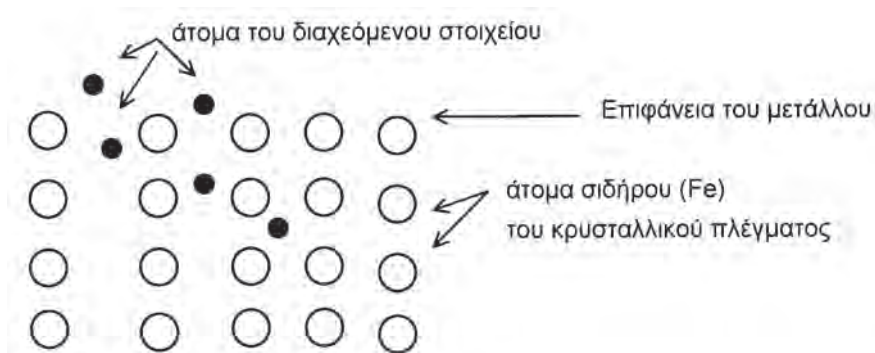
18.1.1 Μηχανικές Κατεργασίες

Η **σφαιροβολή** είναι η πιο σημαντική από τις επιφανειακές μηχανικές κατεργασίες. Η τεχνική οδηγεί σε επιφανειακή σκλήρυνση του υλικού σε βάθος, που κυμαίνεται από 100 έως 250 μm και που προκαλείται από την εκτόξευση ή την ελεύθερη πτώση σφαιριδίων (από κεραμικό ή από μέταλλο ή από γυαλί) πάνω στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Η γωνία πρόσκρουσης των σφαιριδίων με την επιφάνεια του υλικού είναι συνήθως 90° . Η κινητική ενέργεια που αποκτούν τα σφαιρίδια κατά την πρόσκρουση και η διάμετρος των σφαιριδίων (d) είναι παράμετροι της κατεργασίας, που επηρεάζουν άμεσα τη σκληρότητα της επιφάνειας του υλικού και το βάθος σκλήρυνσης. Η επιφανειακή σκλήρυνση είναι αποτέλεσμα της επιφανειακής πλαστικής παραμόρφωσης (ενδοτράχυνσης), που προκαλείται στο κατεργαζόμενο υλικό λόγω της πρόσκρουσης. Αυτή η επιφανειακή ενδοτράχυνση οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας και του ορίου διαρροής στην επιφάνεια του υλικού, με αποτέλεσμα και την αύξηση της αντοχής σε κόπωση και σε φθορά.

Η **αμμοβολή** είναι παρόμοια με τη σφαιροβολή, αλλά, επιπλέον, χρησιμοποιείται και για τον καθαρισμό της επιφάνειας των μετάλλων από οξειδία. Εφαρμογές της σφαιροβολής και της αμμοβολής απαντώνται σε εξαρτήματα που καταπονούνται σε φθορά ή/και σε κόπωση, όπως είναι ελατήρια, αμορτισέρ αυτοκινήτων κ.λπ..

18.1.2 Θερμοχημικές Κατεργασίες

Οι θερμοχημικές κατεργασίες οδηγούν σε βελτίωση των ιδιοτήτων του υλικού (σκληρότητα, αντοχή σε φθορά, αντοχή σε διάβρωση) μέσω της επιφανειακής κραματοποίησής του με ένα ή περισσότερα χημικά στοιχεία. Η κραματοποίηση ή ο εμπλουτισμός της επιφάνειας του υλικού γίνεται με τη διείσδυση των ατόμων των εν λόγω στοιχείων σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια του υλικού (το οποίο κυμαίνεται από μερικά μm έως μερικά mm). Η διείσδυση αυτή, που πραγματοποιείται με μετακίνηση ατόμων μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του κατεργαζόμενου υλικού, ονομάζεται διάχυση (σχήμα 18.1). Γι' αυτό και οι θερμοχημικές κατεργασίες ονομάζονται και **κατεργασίες διάχυσης ή εμποτισμοί**. Έτσι, π.χ., η ενανθρακίζωση είναι κατεργασία διάχυσης άνθρακα και αζώτου, η εναργιλίωση είναι κατεργασία διάχυσης αλουμινίου, η εγχρωμίωση χρωμίου, η βορίωση βορίου κ.λπ..



Σχήμα 18.1: Σχηματική παράσταση της διάχυσης ατόμων μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου κατά τη διάρκεια θερμοχημικής κατεργασίας

Ενδοκυάνωση

Η ενδοκυάνωση (ή υγρή ενανθρακίζωση) πραγματοποιείται σε λουτρά τηγμένων αλάτων, που περιέχουν περίπου 30% κυανιούχο νάτριο (NaCN), 40% ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3) και 30% χλωριούχο νάτριο (NaCl), και σε θερμοκρασίες μεταξύ 760 και 870°C. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας πραγματοποιείται εμπλουτισμός, δηλαδή αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα και άζωτο με διάχυση σε μικρό βάθος από την επιφάνεια (30-50 μm), λόγω της ταυτόχρονης διάχυσης των ατόμων άνθρακα και αζώτου μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού. Την ενδοκυάνωση ακολουθεί βαφή, η οποία οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειας του χάλυβα. Η ενδοκυάνωση εφαρμόζεται σε χάλυβες με μικρή αρχική περιεκτι-

κότητα σε άνθρακα. Η ενδοκυάνωση είναι πολύ επικίνδυνη κατεργασία λόγω της ύπαρξης κυανίου, το οποίο είναι δραστικότατο δηλητήριο. Οι εγκαταστάσεις ενδοκυάνωσης πρέπει να είναι εξοπλισμένες με συστήματα απαγωγής αερίων για την αποφυγή εισπνοής τους από τον άνθρωπο.

Εναργιλίωση

Πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μεταξύ 800 και 1000°C σε κατάλληλο φούρνο με σκόνη αλουμινίου (Al) και χλωριούχου αμμωνίου (NH₄Cl). Σε υψηλές θερμοκρασίες παράγεται χλωριούχο αργίλιο (AlCl₃), που είναι πτητικό (εξατμίζεται εύκολα) και το οποίο αντιδρώντας με το σίδηρο παράγει ατομικό αλουμίνιο, που διαχέεται στην επιφάνεια του χάλυβα:



Το μέγιστο βάθος της εναργιλίωσης φθάνει το 1 mm για διάρκεια κατεργασίας 40-50 ώρες. Οι χάλυβες εναργιλίωσης έχουν μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,08-0,2% κ.β. Η εναργιλίωση προσδίδει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση σε θερμοκρασίες μέχρι 750°C λόγω της δημιουργίας Al₂O₃ στην επιφάνεια του χάλυβα. Η εναργιλίωση εφαρμόζεται σε εξαρτήματα που απαιτείται να επιδεικνύουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση, όπως π.χ. σε σχάρες φούρνων θερμικών κατεργασιών, σε σωλήνες θερμού ατμού, σε σερπαντίνες κ.λπ..

Εγχρωμίωση

Η εγχρωμίωση είναι κατεργασία διάχυσης χρωμίου (Cr) για αύξηση της αντοχής σε διάβρωση κυρίως σε περιβάλλον νιτρικού οξέος (HNO₃). Πραγματοποιείται σε θερμοκρασία 1300-1400°C παρουσία σκόνης χρωμίου και το βάθος διάχυσης μπορεί να φθάσει έως και 1 mm. Εφαρμόζεται σε χαλύβδινα εξαρτήματα με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα (έως 0,2%), τα οποία βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε χημικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας νιτρικού οξέος.

Ενσιλίκωση

Η ενσιλίκωση είναι κατεργασία διάχυσης πυριτίου (Si), η οποία προσδίδει στο χάλυβα υψηλή αντοχή στη φθορά και στη διάβρωση μέχρι τους 1000°C. Πραγματοποιείται μέσα σε φούρνο σε θερμοκρασία 930-1010°C παρουσία σκόνης καρβιδίου του πυριτίου (SiC) ή χλωριούχου πυριτίου (SiCl₄) σε ατμόσφαιρα χλωρίου. Το χλώριο επιδρά πάνω στη σκόνη και διασπώντας την παράγει καθαρό πυρίτιο, το οποίο διαχέεται στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η χρονική διάρκεια της κατεργασίας

είναι περίπου δύο ώρες και το βάθος της ενσιλίκωσης κυμαίνεται από 0,1 έως 2,5 mm. Η ενσιλίκωση εφαρμόζεται σε στοιχεία μηχανών, που απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση σε υψηλή θερμοκρασία, όπως π.χ. σε εξαρτήματα αντλιών αυτοκινήτων, βαλβίδες, κυλίνδρους ΜΕΚ, εξαρτήματα εγκαταστάσεων επεξεργασίας πετρελαίου κ.λπ..

Βορίωση

Η βορίωση είναι μία από τις πιο σημαντικές κατεργασίες διάχυσης. Οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της σκληρότητας, της αντοχής σε φθορά, αλλά και της διάβρωσης σε περιβάλλον οξέων. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο μαζί με τη σκόνη βορίου τοποθετείται σε φούρνο σε θερμοκρασία μεταξύ 815-980°C. Το βάθος διάχυσης του βορίου μέσα στο χάλυβα κυμαίνεται από 25 μέχρι 125 μm για χρονική διάρκεια κατεργασίας από 15 λεπτά έως 10 ώρες. Το στρώμα της βορίωσης περιέχει βορίδια του σιδήρου (ενώσεις σιδήρου με το βόριο), FeB και Fe_2B , και η σκληρότητά του κυμαίνεται από 1500 έως 2000 HV.

Η βορίωση γίνεται σε πολλά είδη χαλύβων: σε απλούς ανθρακούχους, σε ανοξείδωτους, καθώς και σε εργαλειοχάλυβες. Στο [σχήμα 18.2](#) φαίνεται φωτογραφία απλού ανθρακούχου χάλυβα έπειτα από βορίωση. Το στρώμα της βορίωσης ξεχωρίζει από τη χαρακτηριστική οδοντωτή του μορφή.



Σχήμα 18.2: Δομή απλού ανθρακούχου χάλυβα μετά από κατεργασία βορίωσης (μεγέθυνση X50)

Οι εφαρμογές της βορίωσης απαντώνται σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε φθορά και διάβρωση:

- ◆ γρανάζια αντλιών λαδιού σε ντηζελοκίνητες ΜΕΚ.
- ◆ ακροφύσια και εγχυτήρες καυστήρων υψηλής πίεσης στη χημική βιομηχανία.
- ◆ βίδες, αντεπίστροφες βάννες διαβρωτικών ρευστών και κύλινδροι εξώθησης σύνθετων πολυμερών υλικών ενισχυμένων με γυαλί.
- ◆ βαλβίδες ασφαλείας.
- ◆ εξαρτήματα μεταφοράς ρευστών/στερεών μειγμάτων στη βιομηχανία πετρελαίου.

Βασικές κατεργασίες επιφανειακής τροποποίησης χαλύβων, όπως ενανθράκωση, εναζώτωση, φλογοβαφή, επαγωγική βαφή και βαφή με laser, έχουν παρουσιασθεί συνοπτικά στην παράγραφο 5.5.

18.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ (ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ)

18.2.1 Επικαλύψεις με εμβάπτιση

Γαλβάνισμα (επιψευδαργύρωση με εμβάπτιση)

Η κατεργασία αυτή πραγματοποιείται στο σίδηρο ή σε μαλακό χάλυβα και πραγματοποιείται μέσω εμβάπτισης του κατεργαζόμενου υλικού σε λουτρό τηγμένου ψευδαργύρου (Zn) σε θερμοκρασία 450-460°C για μικρό χρονικό διάστημα. Το σύνηθες πάχος της επικαλύψης είναι 50-75 μm και αποτελείται από καθαρό ψευδάργυρο (στην επιφάνεια του υλικού) και μεσομεταλλικές ενώσεις σιδήρου-ψευδαργύρου, συνήθως $FeZn_3$ και $FeZn_7$. Το γαλβάνισμα προσδίδει στο χάλυβα μεγάλη αντοχή στην οξείδωση στον αέρα, με αποτέλεσμα να συναντά πολλές εφαρμογές. Λαμαρίνες και φύλλα σιδήρου ή χάλυβα για τις στέγες των σπιτιών, σύρματα, πλαίσια κ.λπ..

Γάνωμα (επικασσιτέρωση με εμβάπτιση)

Η κατεργασία αυτή είναι παρόμοια με το γαλβάνισμα. Εφαρμόζεται σε εξαρτήματα από σίδηρο ή μαλακό χάλυβα με εμβάπτισή τους σε λουτρό τηγμένου κασσιτέρου (Sn) σε θερμοκρασία 280-300°C. Το επίστρωμα κασσιτέρου το οποίο έχει στιλπνή (γυαλιστερή) όψη, προφυλάσσει το σίδηρο από την οξείδωση στον αέρα και από τη διάβρωση παρουσία οργανικών οξέων. Γι' αυτό το λόγο, η επικασσιτέρωση με εμβάπτιση έχει πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων και την κονσερβοποιία. Δοχεία τροφίμων, λαδιού, γάλακτος και κουτιά κονσερβών κατασκευάζονται από επικασσιτερωμένο σίδηρο (λευκοσίδηρος).

18.2.2 Ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις

Οι ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις βασίζονται στη διεργασία της ηλεκτρόλυσης, βάσει της οποίας ιόντα μετάλλου υφίστανται αναγωγή και αποτίθενται στην κάθοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο), κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το διάλυμα των ιόντων αυτών (βλ. Χημεία). Το διάλυμα συνδέεται με την πηγή μέσω ενός θετικού (άνοδος) και ενός αρνητικού πόλου (κάθοδος). Το κλειστό κύκλωμα, πηγή ρεύματος - διάλυμα, στο οποίο πραγματοποιούνται αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής, με τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, ονομάζεται ηλεκτρολυτικό λουτρό ή κελλί. Η ηλεκτρόλυση υπακούει στους νόμους του Faraday:

- (1) Η μάζα του μετάλλου που αποτίθεται στην κάθοδο είναι ανάλογη του ηλεκτρικού φορτίου που διέρχεται μέσα από το διάλυμα.
- (2) Ο λόγος των μαζών των μετάλλων που αποτίθενται με διέλευση ίσου φορτίου, ισούται με το λόγο των γραμμοϊσοδυνάμων τους (1 γραμμοϊσοδύναμο = 1 g-eq = Ατομικό Βάρος του μετάλλου σε γραμμάρια / σθένος).

Οι παραπάνω νόμοι συμπυκνώνονται στην παρακάτω εξίσωση, η οποία δίνει τη μάζα (m) σε g του αποτιθεμένου μετάλλου:

$$m = \alpha \cdot (AB) \cdot I \cdot t / n \cdot F \quad (18.2)$$

όπου α : η απόδοση του ρεύματος (συνήθως 0,9 δηλαδή 90%),

(AB) : το ατομικό βάρος του μετάλλου,

I : η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (A),

t : η χρονική διάρκεια της ηλεκτρόλυσης (sec)

n : το σθένος του μετάλλου,

F : σταθερή Faraday ή ηλεκτρικό ισοδύναμο (F= 96.500 Coulomb).

Το υλικό που πρέπει να επιμεταλλωθεί είναι ο αρνητικός πόλος του ηλεκτρολυτικού κελλιού (κάθοδος). Η απόθεση του μετάλλου στην κάθοδο είναι μία αντίδραση αναγωγής, η γενική μορφή της οποίας είναι η εξής:



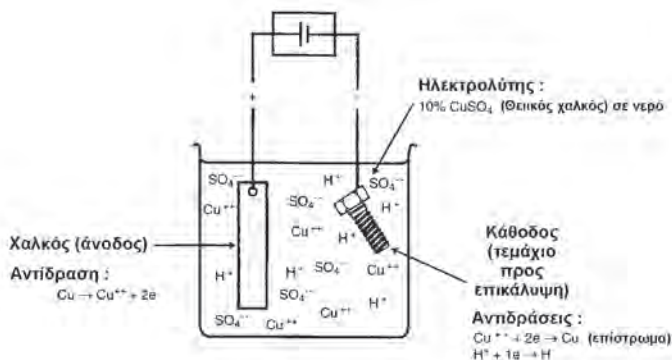
Επικαδμίωση

Πραγματοποιείται μέσα σε διάλυμα κυανιούχου καδμίου ($Cd(CN)_2$), κυα-

νιούχου νατρίου (NaCN), καυστικής σόδας (NaOH) και θειικού νικελίου (NiSO_4). Η απόθεση του καδμίου (Cd) είναι σπλιπνή και ενδείκνυται σε περιπτώσεις που απαιτείται αντοχή στη διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Επιχάλκωση

Η επικάλυψη χαλκού (Cu) πάνω σε μαλακό χάλυβα βελτιώνει την αντίσταση σε διάβρωση, αλλά αμαυρώνεται, όταν βρεθεί σε περιβάλλον θειικού οξέος. Γι' αυτό, συνήθως πάνω στην επίστρωση του χαλκού αποτίθεται ένα λεπτό στρώμα νικελίου (Ni). Ένα τυπικό διάλυμα για την ηλεκτρολυτική επιχάλκωση περιέχει στερεό θειικό χαλκό (CuSO_4) μέσα σε διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_4). Σχηματική παράσταση της ηλεκτρολυτικής επιχάλκωσης φαίνεται στο σχήμα 18.3.



Σχήμα 18.3: Ηλεκτρολυτικό κελί επιχάλκωσης

Επινικέλωση

Η επινικέλωση χρησιμοποιείται για αύξηση της αντοχής του μετάλλου από την οξείδωση, αλλά και για διακοσμητικούς σκοπούς. Πραγματοποιείται σε διάλυμα με κύριο συστατικό το θειικό νικέλιο (NiSO_4) και το πάχος της επίστρωσης κυμαίνεται από 25-50 μm . Η επινικέλωση πραγματοποιείται σε χάλυβες, κράματα χαλκού και αλουμινίου.

Επιχρωμίσωση

Η επιχρωμίσωση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε για διακοσμητικούς λόγους (διακοσμητική επιχρωμίσωση) είτε για προστασία από τη φθορά και διάβρωση (σκληρή επιχρωμίσωση). Η διακοσμητική επιχρωμίσωση γίνεται σε μικρά πάχη (2-3 μm) πάνω από στρώμα νικελίου πάχους 10-50 μm . Το χρώμιο (Cr) προσδίδει στην επιφάνεια γυαλιστερή όψη, λόγω όμως του μικρού πάχους η αντίσταση σε φθορά είναι μικρή. Για μεγαλύτερα πάχη χρωμίου (10-500 μm) λαμβάνονται επιστρώματα με μεγάλη αντίσταση σε

φθορά και διάβρωση (σχήμα 18.4). Τότε, η εν λόγω επιμετάλλωση ονομάζεται σκληρή επιχρωμίωση. Είναι η κυριότερη ηλεκτρολυτική μέθοδος από άποψη σκληρότητας και αντίστασης σε φθορά. Εφαρμόζεται για αναγόμωση φθαρμένων μετάλλων, σε εργαλεία, σε κυλίνδρους ΜΕΚ, σε έμβολα, κ.λπ.. Η επιχρωμίωση πραγματοποιείται σε διάλυμα χρωμικού οξέος και θειικού οξέος.

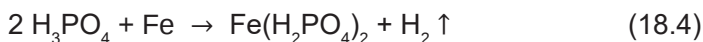


Σχήμα 18.4: Επίστρωση χρωμίου μεγάλου πάχους (σκληρό χρώμιο) σε ανθρακούχο χάλυβα (μεγέθυνση X50)

18.2.3 Χημικές επικαλύψεις

Φωσφάτωση

Η φωσφάτωση είναι η δημιουργία φωσφορικού άλατος του σιδήρου στην επιφάνεια του μετάλλου μέσω χημικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα μέσα σε αραιό διάλυμα φωσφορικού οξέος (H_3PO_4):

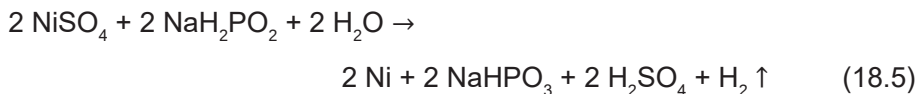


Η φωσφορική επιφανειακή στιβάδα έχει πάχος 10-20 μm και παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση. Η αντοχή στη διάβρωση αυξάνεται με την εμβάπτιση του υλικού σε κατάλληλο λάδι (παραφινέλαιο) και του δίνει παράλληλα σκούρα και γυαλιστερή επιφάνεια. Η φωσφάτωση αποτελεί επίσης και υπόβαθρο για την περαιτέρω επικάλυψη του υλικού με πλαστικά χρώματα και βερνίκια. Εφαρμόζεται σε φύλλα (λαμαρίνες) και ελάσματα σιδήρου και μαλακού χάλυβα.

Χημική Επινικέλωση (“χημικό νίκελ”)

Είναι η επινικέλωση, η οποία πραγματοποιείται χωρίς την επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρολυτική επινικέλωση). Η χημική επινικέλωση

είναι μία χημική αντίδραση που καταλύεται από την επιφάνεια του προς επικάλυψη υλικού. Πραγματοποιείται μέσα σε διάλυμα θειικού νικελίου και υποφωσφορώδους νατρίου με κατάλληλη ρύθμιση του pH (οξύτητα) του διαλύματος. Η συνολική αντίδραση που οδηγεί στο σχηματισμό επιφανειακού στρώματος νικελίου είναι η ακόλουθη:

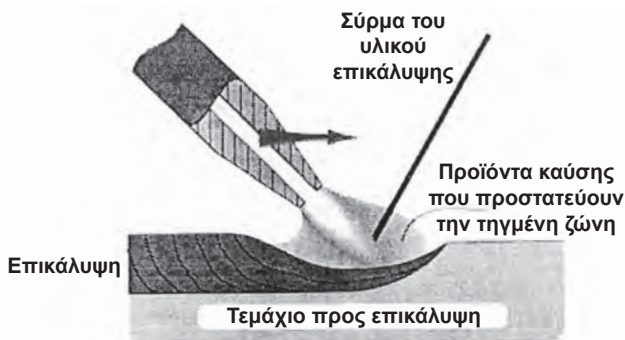


Τα βασικά πλεονεκτήματα της χημικής επινικέλωσης έναντι της ηλεκτρολυτικής είναι ότι δεν απαιτείται η επιφάνεια του προς επικάλυψη υλικού να είναι αγωγίμη και ότι είναι δυνατή η ομοιόμορφη κάλυψη επιφανειών μεγαλύτερης πολυπλοκότητας. Έτσι, είναι εφικτή η επιμετάλλωση και μη αγωγίμων υλικών, όπως π.χ. πλαστικών. Η χημική επινικέλωση οδηγεί σε επικαλύψεις μικρού πάχους (10-20 μm), σκληρότητας 400-500 HV, οι οποίες επιδεικνύουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση.

18.2.4 Επικαλύψεις με συγκόλληση

Απόθεση υλικού με τη βοήθεια ηλεκτρικού τόξου ή φλόγας

Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, το υλικό της επικάλυψης αποτίθεται με τη βοήθεια κάποιας τεχνικής συγκόλλησης, είτε μέσω δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου (ηλεκτροσυγκόλληση), είτε με τη βοήθεια φλόγας καυσίμου-οξυγόνου (οξυγονοκόλληση). Είναι μέθοδος που αυτοματοποιείται εύκολα και οδηγεί σε επιστρώματα μεγάλου πάχους (750 μm έως μερικών χιλιοστών). Με αυτή τη μέθοδο αποτίθεται στελλίτης (σκληρό κράμα Co-Cr-W-C) σε επιφάνειες κοπτικών καλουπιών και λεπίδων. Σχηματική παράσταση της απόθεσης με τη βοήθεια φλόγας καυσίμου-οξυγόνου παρουσιάζεται στο σχήμα 18.5.



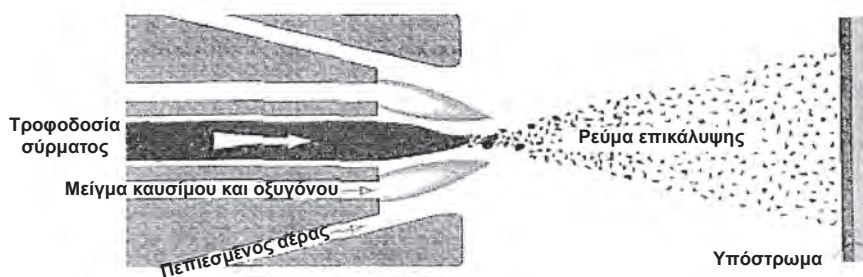
Σχήμα 18.5: Απόθεση υλικού με τη βοήθεια φλόγας καυσίμου-οξυγόνου

18.2.4 Επικαλύψεις με θερμικό ψεκασμό

Είναι μία από τις δημοφιλέστερες τεχνικές επικάλυψης, η οποία οδηγεί σε επιστρώματα με μεγάλη σκληρότητα, αντοχή στη φθορά και στη διάβρωση. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, το υλικό επικάλυψης εισέρχεται σε μία ζώνη υψηλής θερμοκρασίας, όπου λιώνει (είτε μερικώς είτε ολοκληρωτικά) και εκτοξεύεται με μεγάλη ταχύτητα πάνω στο υπόστρωμα (τεμάχιο προς επικάλυψη). Οι σταγόνες του υλικού αυτού προσκρούουν πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος και στη συνέχεια στερεοποιούνται απότομα. Η σύνδεση επιστρώματος-υποστρώματος είναι μηχανικής φύσης. Το υλικό επικάλυψης έχει τη μορφή σύρματος ή σκόνης. Οι συνηθέστερες κατηγορίες θερμικού ψεκασμού είναι οι ακόλουθες:

Ψεκασμός φλόγας

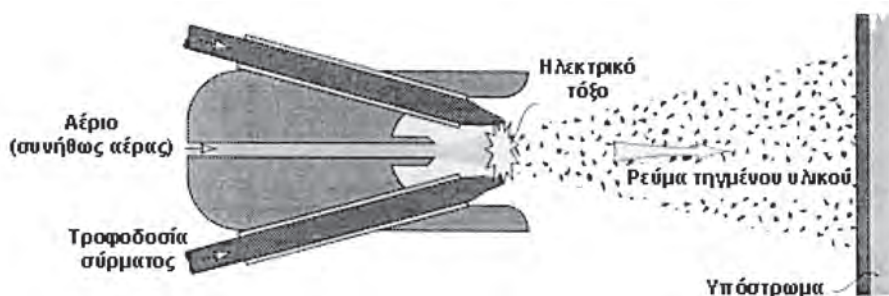
Η ζώνη υψηλής θερμοκρασίας προέρχεται από τη φλόγα που δημιουργείται κατά την καύση μείγματος οξυγόνου-ασετυλίνης (σχήμα 18.6). Η θερμοκρασία της φλόγας κυμαίνεται μεταξύ 3000-5000°C. Το υλικό επικάλυψης τροφοδοτείται υπό μορφή σύρματος, το οποίο λιώνει και επιταχύνεται, υποβοηθούμενο από παροχή πεπιεσμένου αέρα. Χρησιμοποιείται για το σχηματισμό αντιδιαβρωτικών επικαλύψεων σε δοχεία και δεξαμενές στη χημική βιομηχανία.



Σχήμα 18.6: Σχηματική παράσταση του ψεκασμού φλόγας

Ψεκασμός ηλεκτρικού τόξου

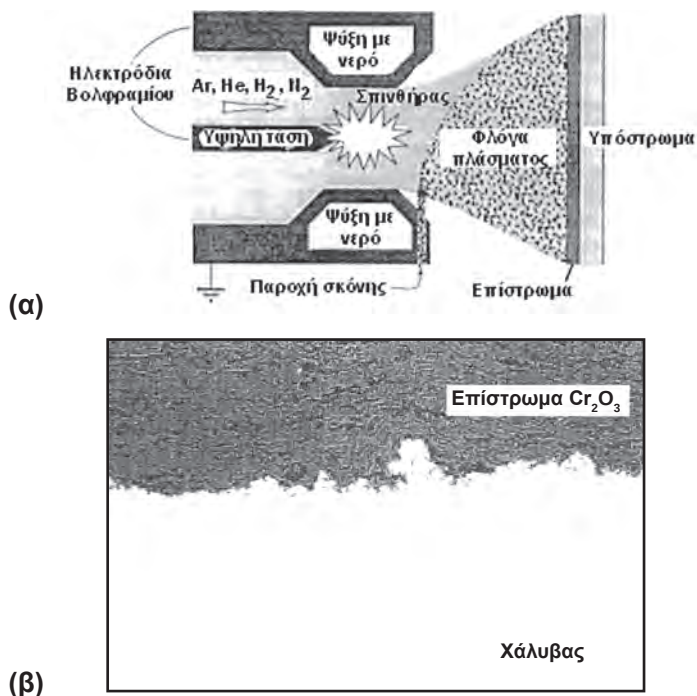
Σε αυτή την περίπτωση η ζώνη υψηλής θερμοκρασίας δημιουργείται από ηλεκτρικό τόξο μεταξύ δύο συγκλινόντων ηλεκτροδίων (σχήμα 18.7). Η θερμοκρασία του τόξου κυμαίνεται μεταξύ 4000-5000°C. Το υλικό των ηλεκτροδίων λιώνει και επιταχύνεται προς το υπόστρωμα με τη βοήθεια αερίου υπό πίεση. Με την τεχνική αυτή παράγονται επιστρώματα από το ίδιο μέταλλο (π.χ. χαλκός) ή από δύο διαφορετικά μέταλλα (π.χ. χαλκός και ανοξείδωτος χάλυβας) πάνω σε έδρανα, τριβείς κ.λπ..



Σχήμα 18.7: Σχηματική παράσταση του ψεκασμού με ηλεκτρικό τόξο.

Ψεκασμός πλάσματος

Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο υψηλής τάσης (μεταξύ δύο ηλεκτροδίων βολφραμίου), το οποίο στη συνέχεια προκαλεί ιονισμό του εισερχόμενου αερίου μείγματος (Ar , He , H_2 , N_2), βλ. [σχήμα 18.8α](#). Ο ιονισμός αυτός οδηγεί στη δημιουργία μίας κατάστασης **πλάσματος** υψηλής θερμοκρασίας $5000\text{--}40000^\circ\text{C}$. Το υλικό επικάλυψης τροφοδοτείται με τη μορφή σκόνης, που λιώνει, καθώς περνά μέσα από τη φλόγα του πλάσματος και στη συνέχεια εκσφενδονίζεται προς το υπόστρωμα, υποβοηθούμενη από την ταχεία εκτόνωση του αερίου. Το επίστρωμα που δημιουργείται έχει καλύτερη σύνδεση με το υπόστρωμα και μικρότερο πορώδες σε σχέση με τις άλλες τεχνικές θερμικού ψεκασμού. Η τεχνική του ψεκασμού πλάσματος χρησιμοποιείται ευρύτατα στη δημιουργία επικαλύψεων από σκληρά κεραμικά υλικά (οξείδια, καρβίδια και νιτρίδια) για τη βελτίωση κυρίως της σκληρότητας, της αντοχής σε φθορά και της αντοχής σε θερμικά σοκ. Έμβολα, έδρες βαλβίδων, έδρανα, κινητήρες αεριοπρωθούμενων μηχανών, γεωργικά εργαλεία και εργαλεία εξόρυξης είναι εξαρτήματα των οποίων αυξάνεται σημαντικά η αντίσταση σε φθορά μετά από ψεκασμό πλάσματος κατάλληλης κεραμικής σκόνης. Στο [σχήμα 18.8β](#) φαίνεται επίστρωμα οξειδίου του χρωμίου (Cr_2O_3), που έχει αποτεθεί με την τεχνική του ψεκασμού πλάσματος πάνω σε χάλυβα.



Σχήμα 18.8: (α) Σχηματική παράσταση του ψεκασμού πλάσματος. (β) Επίστρωμα οξειδίου του χρωμίου (Cr_2O_3) πάνω σε χάλυβα με τη μέθοδο του ψεκασμού πλάσματος (μεγέθυνση X75)

18.2.5 Επικαλύψεις με ακτινοβολία laser

Οι κατεργασίες επικάλυψης με ακτινοβολία laser μεγάλης ισχύος (10^4 - 10^6 W/cm²) οδηγούν σε επιστρώματα πάχους 0,5-2,0 mm. Σχετικά με την τροφοδοσία του υλικού επικάλυψης (σκόνη κεραμικού ή μετάλλου) υπάρχουν δύο βασικές παραλλαγές της τεχνικής αυτής:

- επικάλυψη με προαπόθεση σκόνης στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου (σχήμα 18.9α),
- επικάλυψη με ταυτόχρονο ψεκασμό σκόνης από κατάλληλο ακροφύσιο (σχήμα 18.9β).

Στην πρώτη περίπτωση η δέσμη laser σαρώνει την επιφάνεια του υλικού, λιώνοντας τη προαποτεθείσα σκόνη και προκαλώντας ανάμειξη του υλικού της σκόνης με το υπόστρωμα, οδηγώντας έτσι σε επίστρωμα με ισχυρή πρόσφυση με το υπόστρωμα (σχήμα 18.9α). Στη δεύτερη περίπτωση, η δέσμη laser προκαλεί την τήξη της επιφάνειας του μετάλλου μέσα στην οποία καταλήγει και ενσωματώνεται το ψεκαζόμενο υλικό (σχήμα

μα 18.9β). Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της δεύτερης τεχνικής σε σχέση με την πρώτη είναι τα εξής:

- επαναληψιμότητα,
- εύκολη αυτοματοποίηση,
- κατεργασία επιφανειών με πολύπλοκη γεωμετρία.

Οι επικαλύψεις με laser χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ανθεκτικών σε φθορά επιστρωμάτων σε εργαλεία, έμβολα και καλούπια διαμόρφωσης και κοπή, σε πτερύγια αεροστροβίλων, σε εργαλεία εξόρυξης κ.λπ..

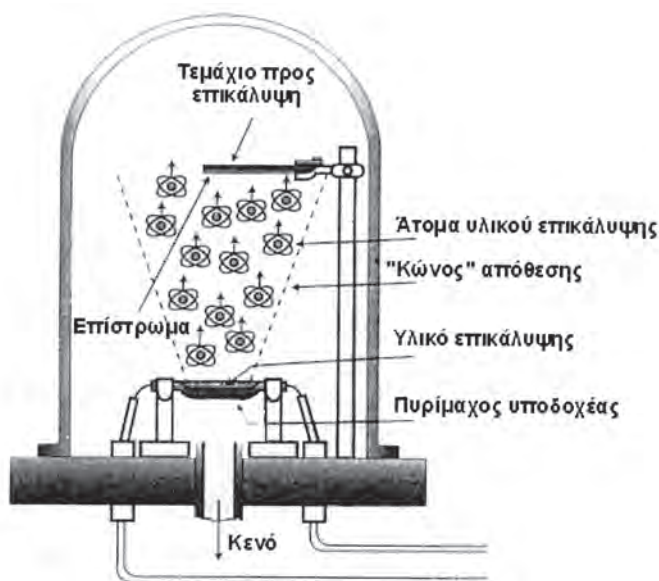


Σχήμα 18.9: Τεχνικές επικάλυψης με δέσμη laser: (α) με προαπόθεση σκόνης και (β) με ταυτόχρονο ψεκασμό σκόνης

18.2.6 Επικαλύψεις με φυσική/χημική εναπόθεση ατμών (PVD/CVD)

Φυσική εναπόθεση ατμών (PVD)

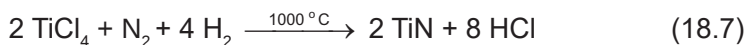
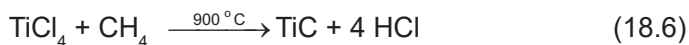
Η γενική αρχή των μεθόδων φυσικής εναπόθεσης ατμών (Physical Vapour Deposition/PVD) είναι ο σχηματισμός λεπτών επιστρωμάτων με **συμπύκνωση των ατμών** του αποτιθέμενου υλικού πάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου (υποστρώματος). Η πιο συνήθης τεχνική φυσικής εναπόθεσης ατμών είναι η μέθοδος της εξάχνωσης του υλικού επικάλυψης με τη βοήθεια κάποιας πηγής θέρμανσης (με ηλεκτρική αντίσταση ή με δέσμη ηλεκτρονίων) μέσα σε θάλαμο κενού, βλ. σχήμα 18.10. Οι ατμοί του υλικού επικάλυψης προσπίπτουν στην επιφάνεια του υποστρώματος, όπου και συμπυκνώνονται. Η μέθοδος αυτή οδηγεί σε λεπτά επιστρώματα (1-10 μm) με πολύ χαμηλό πορώδες και εξαιρετική αντίσταση στη φθορά και διάβρωση. Εφαρμόζεται σε κοπτικά εργαλεία, σε πτερωτές αεροστροβίλων, σε βιοϊατρικά εμφυτεύματα κ.λπ..

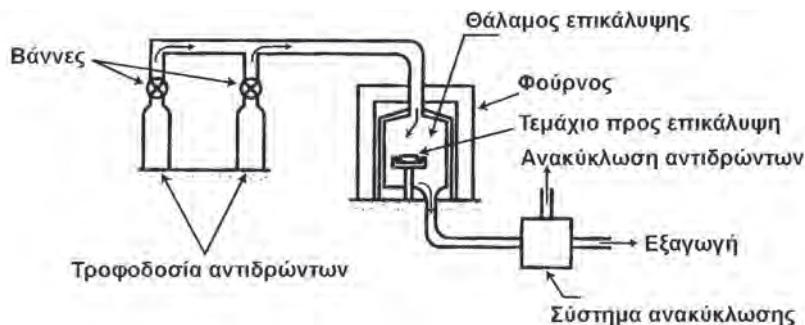


Σχήμα 18.10: Σχηματική παράσταση της φυσικής εναπόθεσης ατμών (PVD)

Χημική εναπόθεση ατμών (CVD)

Στη χημική εναπόθεση ατμών το επίστρωμα σχηματίζεται με κατάλληλη ετερογενή χημική αντίδραση αερίων πάνω στην επιφάνεια του στερεού υποστρώματος. Σχηματική παράσταση της διάταξης χημικής εναπόθεσης ατμών φαίνεται στο **σχήμα 18.11**. Με τη μέθοδο αυτή λαμβάνονται κεραμικά επιστρώματα μεγάλης σκληρότητας και εξαιρετικής αντίστασης στη φθορά. Τέτοια επιστρώματα εφαρμόζονται πάνω στην επιφάνεια κοπτικών εργαλείων για μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά κατά την κοπή (τόρνευση, πλάνιση κ.λπ.). Τέτοια επιστρώματα είναι το καρβίδιο του τιτανίου (TiC) και το νιτρίδιο του τιτανίου (TiN). Οι χημικές αντιδράσεις σχηματισμού TiC και TiN κατά τη χημική εναπόθεση ατμών είναι οι εξής:





Σχήμα 18.11: Διάταξη χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD)



ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

- ❖ Λεπτό έλασμα από μαλακό χάλυβα (διαστάσεις μίας έδρας = $5 \times 1 \text{ cm}^2$) υφίσταται ηλεκτρολυτική επιχάλκωση μέσα σε διάλυμα CuSO_4 και από τις δύο έδρες του. Η ένταση ρεύματος (I) που χρησιμοποιείται για την συγκεκριμένη επιμετάλλωση είναι ίση με 1 A ενώ η διάρκεια της (t) είναι 2 ώρες. Να προσδιορισθεί το συνολικό πάχος της επιχάλκωσης. Δίδονται:

- απόδοση ρεύματος (α) = 0,90
- AB χαλκού = 63,5
- σθένος χαλκού (n) = 2
- πυκνότητα χαλκού (ρ) = $8,9 \text{ g/cm}^3$

(Απάντηση: $240 \text{ }\mu\text{m}$)

- ❖ Χαλύβδινος κυλινδρικός τριβέας υφίσταται σκληρή επιχρωμίσωση μέσα σε λουτρό χρωμικού οξέος. Το απαιτούμενο πάχος της επιχρωμίσωσης είναι 0,1 mm για συνολική επιφάνεια επικάλυψης $64,3 \text{ cm}^2$. Αν η χρησιμοποιούμενη ένταση ρεύματος είναι 19,3 A να βρεθεί ο χρόνος που απαιτείται για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης επιμετάλλωσης. Δίδονται:

- απόδοση ρεύματος (α) = 0,2
- AB χρωμίου = 52
- σθένος χρωμίου (n) = 3
- πυκνότητα χρωμίου (ρ) = $7,19 \text{ g/cm}^3$

(Απάντηση: 1,85 ώρες)



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 18ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- **Βασικές επιφανειακές κατεργασίες τροποποίησης Μηχανικές Κατεργασίες**

Σφαιροβολή

Η σφαιροβολή είναι η πιο σημαντική από τις επιφανειακές μηχανικές κατεργασίες. Η τεχνική οδηγεί σε επιφανειακή σκλήρυνση του υλικού σε βάθος που κυμαίνεται από 100 έως 250 μm , που προκαλείται από την εκτόξευση ή την ελεύθερη πτώση σφαιριδίων (από κεραμικό ή από μέταλλο ή από γυαλί), πάνω στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Εφαρμογές της σφαιροβολής και της αμμοβολής απαντώνται σε εξαρτήματα που καταπονούνται σε φθορά ή/και σε κόπωση όπως είναι ελατήρια, αμορτισέρ αυτοκινήτων, κ.λπ..

- **Θερμοχημικές Κατεργασίες**

Οι **θερμοχημικές κατεργασίες** οδηγούν σε βελτίωση των ιδιοτήτων του υλικού (σκληρότητα, αντοχή σε φθορά, αντοχή σε διάβρωση) μέσω της **επιφανειακής κραματοποίησής** του με ένα ή περισσότερα χημικά στοιχεία.

- Ενδοκυάνωση

Η ενδοκυάνωση (ή υγρή ενανθρακάζωση) πραγματοποιείται σε λουτρά τηγμένων αλάτων που περιέχουν περίπου 30% κυανιούχο νάτριο (NaCN), 40% ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3) και 30% χλωριούχο νάτριο (NaCl) και σε θερμοκρασίες μεταξύ 760 και 870°C. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας πραγματοποιείται εμπλουτισμός, δηλαδή αύξηση της περιεκτικότητας, σε άνθρακα και άζωτο με διάχυση σε μικρό βάθος από την επιφάνεια (30-50 μm).

- Εναργιλίωση

Πραγματοποιείται εμπλουτισμός της επιφάνειας σε αλουμίνιο, σε θερμοκρασία μεταξύ 800 και 1000°C σε κατάλληλο φούρνο με σκόνη αλουμινίου (Al) και χλωριούχου αμμωνίου (NH_4Cl).

- Εγχρωμίωση

Η εγχρωμίωση είναι κατεργασία διάχυσης χρωμίου (Cr) για αύξηση της αντοχής σε διάβρωση κυρίως σε περιβάλλον νιτρικού οξέος (HNO_3).

- Ενσιλίκωση

Η ενσιλίκωση είναι κατεργασία διάχυσης πυριτίου (Si) η οποία προσδί-

δει στο χάλυβα υψηλή αντοχή στη φθορά και στη διάβρωση μέχρι τους 1000°C.

- Βορίωση

Η βορίωση είναι μια από τις πιο σημαντικές κατεργασίες διάχυσης. Οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της σκληρότητας, της αντοχής σε φθορά αλλά και της διάβρωσης σε περιβάλλον οξέων. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο μαζί με τη σκόνη βορίου τοποθετείται σε φούρνο σε θερμοκρασία μεταξύ 815-980°C. Η τελική σκληρότητα της επιφάνειας κυμαίνεται από 1500 έως 2000 HV.

● **Βασικές επιφανειακές κατεργασίες απόθεσης υλικού (επικαλύψεις) *Επικαλύψεις με εμβάπτιση***

- Γαλβάνισμα (επιψευδαργύρωση με εμβάπτιση)

Η κατεργασία αυτή πραγματοποιείται στο σίδηρο ή σε μαλακό χάλυβα και πραγματοποιείται μέσω εμβάπτισης του κατεργαζόμενου υλικού σε λουτρό τηγμένου ψευδαργύρου (Zn) σε θερμοκρασία 450-460°C για μικρό χρονικό διάστημα.

- Γάνωμα (επικασσιτέρωση με εμβάπτιση)

Η κατεργασία αυτή είναι παρόμοια με το γαλβάνισμα. Εφαρμόζεται σε εξαρτήματα από σίδηρο ή μαλακό χάλυβα με εμβάπτισή τους σε λουτρό τηγμένου κασσιτέρου (Sn) σε θερμοκρασία 280-300°C.

Ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις

Οι ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις βασίζονται στην διεργασία της ηλεκτρόλυσης, με βάση την οποία ιόντα μετάλλου υφίστανται αναγωγή και αποτίθενται στην κάθοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το διάλυμα των ιόντων αυτών (βλ. Χημεία). Το διάλυμα συνδέεται με την πηγή μέσω ενός θετικού (άνοδος) και ενός αρνητικού πόλου (κάθοδος). Το κλειστό κύκλωμα πηγή ρεύματος - διάλυμα, στο οποίο πραγματοποιούνται αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής, με τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, ονομάζεται **ηλεκτρολυτικό λουτρό** ή **κελλί**. Η ηλεκτρόλυση υπακούει τους νόμους του **Faraday**. Βασικές ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις είναι η επινικέλωση, η επιχάλκωση και η επιχρωμίωση.

Χημικές επικαλύψεις

- Φωσφάτωση

Η φωσφάτωση είναι η δημιουργία φωσφορικού άλατος του σιδήρου

στην επιφάνεια του μετάλλου μέσω χημικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα μέσα σε αραιό διάλυμα φωσφορικού οξέος (H_3PO_4).

- Χημική Επινικέλωση (“χημικό νίκελ”)

Είναι η επινικέλωση η οποία πραγματοποιείται χωρίς την επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρολυτική επινικέλωση). Η χημική επινικέλωση είναι μία χημική αντίδραση που καταλύεται από την επιφάνεια του προς επικάλυψη υλικού.

Επικαλύψεις με συγκόλληση

Απόθεση υλικού με τη βοήθεια ηλεκτρικού τόξου ή φλόγας

Σύμφωνα με αυτή την τεχνική το υλικό της επικάλυψης αποτίθεται με τη βοήθεια κάποιας τεχνικής συγκόλλησης, είτε μέσω δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου (ηλεκτροσυγκόλληση), είτε με τη βοήθεια φλόγας καυσίμου-οξυγόνου (οξυγονοκόλληση).

Επικαλύψεις με θερμικό ψεκασμό

Είναι μία από τις δημοφιλέστερες τεχνικές επικάλυψης η οποία οδηγεί σε επιστρώματα με μεγάλη σκληρότητα, αντοχή στη φθορά και στη διάβρωση. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική το υλικό επικάλυψης εισέρχεται σε μία ζώνη υψηλής θερμοκρασίας, όπου λιώνει (είτε μερικώς είτε ολοκληρωτικά) και εκτοξεύεται με μεγάλη ταχύτητα πάνω στο υποστρώμα (τεμάχιο προς επικάλυψη). Οι σταγόνες του υλικού αυτού προσκρούουν πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος και στη συνέχεια στερεοποιούνται απότομα. Η σύνδεση επιστρώματος-υποστρώματος είναι μηχανικής φύσης. Το υλικό επικάλυψης έχει τη μορφή σύρματος ή σκόνης. Οι συνηθέστερες κατηγορίες θερμικού ψεκασμού είναι οι ακόλουθες:

- **Ψεκασμός φλόγας,**
- **Ψεκασμός ηλεκτρικού τόξου,**
- **Ψεκασμός πλάσματος.**

Επικαλύψεις με ακτινοβολία laser

Οι κατεργασίες επικάλυψης με ακτινοβολία laser μεγάλης ισχύος (10^4 - 10^6 W/cm²) οδηγούν σε επιστρώματα πάχους 0,5-2,0 mm. Σχετικά με την τροφοδοσία του υλικού επικάλυψης (σκόνη κεραμικού ή μετάλλου) υπάρχουν δύο βασικές παραλλαγές της τεχνικής αυτής:

- επικάλυψη με προαπόθεση σκόνης στην επιφάνεια του κατεργαζομένου τεμαχίου,

- επικάλυψη με ταυτόχρονο ψεκασμό σκόνης από κατάλληλο ακροφύσιο.

Φυσική εναπόθεση ατμών (PVD)

Η γενική αρχή των μεθόδων φυσικής εναπόθεσης ατμών (Physical Vapour Deposition/PVD) είναι ο σχηματισμός λεπτών επιστρωμάτων με **συμπύκνωση των ατμών** του αποτιθέμενου υλικού πάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου (υποστρώματος). Η πιο συνήθης τεχνική φυσικής εναπόθεσης ατμών είναι η μέθοδος της εξάχνωσης του υλικού επικάλυψης με τη βοήθεια κάποιας πηγής θέρμανσης (με ηλεκτρική αντίσταση ή με δέσμη ηλεκτρονίων) μέσα σε θάλαμο κενού.

Χημική εναπόθεση ατμών (CVD)

Στη χημική εναπόθεση ατμών το επίστρωμα σχηματίζεται με κατάλληλη ετερογενή χημική αντίδραση αερίων πάνω στην επιφάνεια του στερεού υποστρώματος. Με τη μέθοδο αυτή λαμβάνονται κεραμικά επιστρώματα μεγάλης σκληρότητας και εξαιρετικής αντίστασης στη φθορά. Τέτοια επιστρώματα εφαρμόζονται πάνω στην επιφάνεια κοπτικών εργαλείων για μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά κατά την κοπή (τόρνευση, πλάνιση, κ.λπ.).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

19

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΥΓΙΕΙΝΗΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

- 19.1 Γενικά**
- 19.2 Κανόνες ασφαλείας**
- 19.3 Επαγγελματικές ασθένειες**
- 19.4 Σήμανση**
- 19.5 Τεχνικός Ασφαλείας**
- 19.6 Θεσμικό πλαίσιο**



Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- ☒ Να γνωρίζετε τι είναι εργασιακό ατύχημα και πώς πρέπει να αποφεύγεται.
- ☒ Να γνωρίζετε τους γενικούς και ειδικούς κανόνες ασφαλείας και τα προστατευτικά μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται κατά περίπτωση.
- ☒ Να γνωρίζετε το θεσμικό πλαίσιο για την υγιεινή και ασφάλεια καθώς και τον ρόλο του τεχνικού ασφαλείας.

19.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η Ασφάλεια Εργασίας περιλαμβάνει όλες εκείνες τις δραστηριότητες που αντιδρούν στη δημιουργία επικίνδυνων καταστάσεων για τη σωματική ακεραιότητα και υγεία κάθε εργαζομένου. Η ασφάλεια εργασίας πρέπει να έχει πρωταρχικό ρόλο σε κάθε δραστηριότητα που αναπτύσσει ο άνθρωπος, είτε ως επαγγελματίας είτε ως ερασιτέχνης.

Πριν από το 2^ο Παγκόσμιο πόλεμο, η ασφάλεια για την εργασία περιοριζόταν στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη προφύλαξη του εξοπλισμού και όχι τόσο του ίδιου του ανθρώπου. Μετά το 1960 άρχισαν να ενεργοποιούνται διαδικασίες που περιελάμβαναν την υγιεινή και ασφάλεια του εργαζομένου. Από τότε μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι και έχουν ορισθεί διαδικασίες για την ασφάλεια, κάτω από νομοθετικά πλαίσια, τα οποία οι επιχειρήσεις που απασχολούν εργαζομένους, αλλά και οι ίδιοι οι εργαζόμενοι, πρέπει να τηρούν ευλαβικά.

Η προφύλαξη του εργαζομένου από τους **επαγγελματικούς κινδύνους** περιλαμβάνει την αποφυγή:

- ✓ του εργασιακού ατυχήματος,
- ✓ της εμφάνισης επαγγελματικών ασθενειών και
- ✓ της πρόωρης φθοράς του ανθρώπινου οργανισμού.

Η σημασία της αποφυγής των επαγγελματικών κινδύνων φαίνεται από στατιστικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στη χώρα μας αλλά και

διεθνώς. Μετρήσεις του 1993 δείχνουν πως, περίπου 40.000 εργασιακά ατυχήματα, γίνονται στη χώρα μας ετησίως από τα οποία περίπου 120 είναι θανατηφόρα. Οι αριθμοί αυτοί διαφοροποιούνται από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τον πληθυσμό αλλά και το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο σχετικά με την ασφάλεια της εργασίας. Οι αντίστοιχοι αριθμοί για τις Η.Π.Α. ήταν για το 1993 2.200.000 εργασιακά ατυχήματα, εκ των οποίων τα 14.000 θανατηφόρα. Από τις παραπάνω στατιστικές μελέτες φαίνεται για άλλη μία φορά η σπουδαιότητα θέσπισης και τήρησης κανόνων για την ασφάλεια και την προστασία των εργαζομένων.

Είναι γνωστό ότι σε όλες τις μορφές δραστηριοποίησης του ανθρώπου ο κίνδυνος ατυχήματος είναι υπαρκτός. Ιδιαίτερα η εργασία συνυπάρχει με τον επαγγελματικό κίνδυνο. Ο ρόλος της ασφάλειας σε αυτή την περίπτωση είναι να καταγράψει τους κινδύνους και να εξασφαλίσει την πρόληψη των εργασιακών ατυχημάτων. Το **εργασιακό ατύχημα** είναι ένα ξαφνικό γεγονός, εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της εργασίας και είναι αποτέλεσμα της. Το εργασιακό ατύχημα μπορεί να γίνει είτε εντός των στενών ορίων πραγματοποίησης της εργασίας (π.χ. ένας συγκολλητής να καεί από τη φλόγα οξυγονοασετυλίνης) είτε και εκτός των στενών ορίων πραγματοποίησης της εργασίας (π.χ. τραυματισμός διερχόμενου από εργοτάξιο).

Η **πρόληψη των εργασιακών ατυχημάτων** συνίσταται δηλαδή στη λήψη μέτρων, ώστε να μειώνεται η πιθανότητα εκδήλωσης εργασιακού ατυχήματος. Το εργασιακό ατύχημα φέρει στον παθόντα πόνο, πιθανές μόνιμες σωματικές βλάβες, ψυχική φθορά, απώλεια αμοιβών κ.λπ., αν βέβαια δεν οδηγήσει σε απώλεια ζωής. Εκτός των παραπάνω, το εργασιακό ατύχημα έχει επιπτώσεις και στην επιχείρηση. Τέτοιες επιπτώσεις μπορούν να είναι: το οικονομικό κόστος λόγω αποζημιώσεων, η απώλεια εμπιστοσύνης από τους εργαζομένους, η καταστροφή του εξοπλισμού, διοικητικές κυρώσεις κ.λπ.. Το εργασιακό ατύχημα, όπως ήδη φάνηκε, έχει ποικίλες επιπτώσεις, τόσο στο κοινωνικό σύνολο, όσο και στην Εθνική Οικονομία.

Οι συνήθεις αιτίες για τις οποίες συμβαίνουν τα εργασιακά ατυχήματα σχετίζονται, τόσο με τον ανθρώπινο παράγοντα, όσο και με τις συνθήκες του εργασιακού περιβάλλοντος. Στατιστικές μελέτες, όμως, έδειξαν πως το 85% περίπου των εργασιακών ατυχημάτων οφείλεται στον ανθρώπινο παράγοντα. Αυτό ήδη σημαίνει ότι τα περισσότερα ή όλα από αυτά τα ατυχήματα θα μπορούσαν να μην είχαν γίνει ποτέ.

Οι πράξεις των εργαζομένων που συνήθως γίνονται αιτίες για ένα εργασιακό ατύχημα οφείλονται κυρίως στους παρακάτω λόγους:

- ◆ απειρία,

- ◆ βιασύνη, αφηρημάδα, αμέλεια,
- ◆ κακή υγεία,
- ◆ άγνοια του κινδύνου, υπερβολική αυτοπεποίθηση.

Οι εργασιακές συνθήκες αντίστοιχα που μπορούν να οδηγήσουν σε εργασιακό ατύχημα μπορούν να είναι:

- ◆ ανθυγιεινός χώρος (κακός φωτισμός, κακός αερισμός, έλλειψη θέρμανσης κ.λπ.),
- ◆ ελαττωματικές εγκαταστάσεις,
- ◆ ελαττωματικά ή φθαρμένα εργαλεία,
- ◆ έλλειψη τάξης.

Τέλος, μία κατηγορία εργασιακών ατυχημάτων μπορεί να οφείλεται σε απρόβλεπτα αίτια που προέρχονται κυρίως από φυσικές καταστροφές.

19.2 ΚΑΝΟΝΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Η πρόληψη των εργασιακών ατυχημάτων απαιτεί την πειθαρχία των εργαζομένων σε **ειδικούς κανόνες**, που σχετίζονται με το συγκεκριμένο χώρο της εργασίας τους, αλλά και με την ίδια την εργασία που πραγματοποιούν. Έτσι, οι συνθήκες ασφαλείας διαφοροποιούνται, για παράδειγμα, ανάμεσα σε ένα χυτήριο ή ένα μηχανουργείο, αλλά υπάρχουν και **γενικοί κανόνες** που ισχύουν σε όλες τις περιπτώσεις. Τέτοιοι γενικοί κανόνες συνοψίζονται παρακάτω:

- ◆ Πρέπει να υπάρχει καθαριότητα και τάξη στην εργασία.
- ◆ Πρέπει να χρησιμοποιούνται τα ατομικά μέσα προστασίας ανά περίπτωση.
- ◆ Πρέπει να χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα εργαλεία κατά περίπτωση εργασίας.
- ◆ Πρέπει να αποφεύγεται η χρήση μηχανημάτων ή εξοπλισμού χωρίς γνώση.
- ◆ Πρέπει να τηρούνται πιστά οι οδηγίες στις σημάνσεις των χώρων εργασίας.
- ◆ Πρέπει να αποφεύγονται ενέργειες που εγκυμονούν κινδύνους (αστεία, χειρονομίες κ.λπ.).

Στις επόμενες παραγράφους επισημαίνονται οι ειδικοί κανόνες και τα μέτρα προστασίας που απαιτούνται, για τους χώρους παραγωγής με μηχανικές διαμορφώσεις και διαμορφώσεις υλικών.

19.2.1 Κανόνες ασφαλείας σε διαμορφώσεις μετάλλων

Τα ατυχήματα σε μηχανουργεία που πραγματοποιούν εργασίες διαμόρφωσης σχετίζονται κυρίως με τα ατυχήματα που πραγματοποιούνται σε πρέσες. Τα ατυχήματα αυτά είναι τις περισσότερες φορές πολύ σοβαρά και έχουν ως αποτέλεσμα μόνιμες σωματικές βλάβες και ακρωτηριασμούς.

Στις εργασίες σε **πρέσες** πρέπει να λαμβάνονται τα παρακάτω μέτρα ασφαλείας:

- ◆ Να τοποθετούνται τα ειδικά προστατευτικά (προφυλακτήρες), που εμποδίζουν τα χέρια του εργαζομένου να πλησιάσουν την περιοχή εργασίας της πρέσας.
- ◆ Να τοποθετούνται ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις (φωτοηλεκτρικά κύτταρα), που σταματούν ή εμποδίζουν την κίνηση του εμβόλου της πρέσας, όταν ένα αντικείμενο παρεμβληθεί στο χώρο εργασίας της.
- ◆ Να καλύπτονται τα τυχόν κινούμενα μέρη της πρέσας.
- ◆ Να χρησιμοποιούνται λαβίδες για την τοποθέτηση των προς κατεργασία τεμαχίων, όπου αυτό είναι δυνατόν, ώστε τα χέρια του χειριστή να είναι μακριά από τη θέση εργασίας.

Στις εργασίες σε στράντζες, κορδονιέρες και γενικά στα **μηχανήματα κάμψης ελασμάτων**, πρέπει να λαμβάνονται αντίστοιχα μέτρα ασφαλείας με αυτά των πρεσών. Και σε αυτή την περίπτωση τα χέρια του χειριστή, που τοποθετεί τα ελάσματα, πρέπει να προφυλάσσονται από τη θέση κάμψης με κατάλληλους προφυλακτήρες και ταυτόχρονα να είναι ντυμένα με γάντια για την αποφυγή τραυματισμών από τις λαμαρίνες ή τα γρέζια.

Σε **εργασίες διαμόρφωσης εν θερμώ** ή σε **χυτήρια**, οι κίνδυνοι αυξάνονται λόγω της μεγάλης θερμότητας που αναπτύσσεται στα προς κατεργασία τεμάχια. Ειδικοί κανόνες ασφαλείας ισχύουν για την προστασία από τα εγκαύματα. Τα θερμά τεμάχια πρέπει να τοποθετούνται σε ειδικά σημειασμένο χώρο και να μεταφέρονται με μεγάλη προσοχή. Ο χώρος γενικά, όπου θερμαίνονται αντικείμενα για εν θερμώ διαμόρφωση ή λιώνονται υλικά για χύτευση, θα πρέπει να αερίζεται καλά, ώστε να απομακρύνονται τυχόν καπνοί και αέρια. Η ένδυση των εργαζομένων θα πρέπει να περιλαμβάνει ειδικά παπούτσια ασφαλείας για αποφυγή τραυματισμών από

πτώσεις αντικειμένων, καθώς και δερμάτινη ποδιά για αποφυγή εγκαυμάτων από εκτοξευόμενα κομμάτια των τεμαχίων (σκουριές, κ.λπ.).

19.2.2 Κανόνες ασφαλείας σε συγκολλήσεις

Ανάλογα με τις εργασίες συγκόλλησης που πραγματοποιούνται, ένας συγκολλητής κινδυνεύει να πάθει εργασιακό ατύχημα κυρίως από:

- ◆ Τα αέρια της συγκόλλησης και τη φλόγα για την περίπτωση της οξυγονοσυγκόλλησης.
- ◆ Το ηλεκτρικό ρεύμα για την περίπτωση της ηλεκτροσυγκόλλησης.
- ◆ Τις ακτινοβολίες που προσβάλλουν τον αμφιβληστροειδή του ματιού και που προέρχονται από τα ηλεκτρικά κυρίως τόξα.

Ειδικά για την περίπτωση συγκόλλησης με φλόγα οξυγονοασετυλίνης πρέπει να λαμβάνονται τα παρακάτω μέτρα:

- Ασφαλής μεταφορά των φιαλών οξυγόνου και ασετυλίνης και τοποθέτησή τους μακριά από πηγές θερμότητας.
- Έλεγχος διαρροών των αερίων, πάντα με σαπουνάδα και ποτέ με φλόγα. Σε περίπτωση διαρροής, που προκειμένου για την ασετυλίνη γίνεται αντιληπτή από την μυρωδιά, πρέπει αμέσως να αερισθεί ο χώρος, μια και η ασετυλίνη με τον ατμοσφαιρικό αέρα δημιουργεί σε ποσοστό 2,3 %, εκρηκτικό μείγμα.
- Έλεγχος με το τέλος κάθε εργασίας αν η παροχή των αερίων είναι κλειστή.
- Συντήρηση και καθαρισμός των μανοεκτονωτών.
- Διατήρηση των σωλήνων των αερίων σε καλή κατάσταση, αντικατάσταση των φθαρμένων και χρησιμοποίηση των ειδικών γι' αυτό το σκοπό σωλήνων με τον κατάλληλο χρωματισμό αναγνώρισης.
- Διατήρηση των μπεκ σε καλή κατάσταση και σωστή χρήση τους για κάθε περίπτωση συγκόλλησης.
- Σωστή ένδυση του οξυγονοσυγκολλητή, που αποτελείται από τα σκούρα γυαλιά ασφαλείας, γάντια, δερμάτινη ποδιά, παπούτσια ασφαλείας και κάλυμμα για το κεφάλι.
- Στην ακραία περίπτωση της φλογοεπιστροφής πρέπει να κλεισθεί αμέσως η βαλβίδα της ασετυλίνης και μετά η βαλβίδα του οξυγόνου.

Στις εργασίες ηλεκτροσυγκόλλησης πρέπει πρώτα να αποφεύγονται οι κίνδυνοι που προέρχονται από το ηλεκτρικό ρεύμα. Τα ατυχήματα με ηλεκτρικό ρεύμα είναι γενικά σπάνια (ποσοστό 1 έως 2%), απαιτείται όμως ιδιαίτερη προσοχή, γιατί τέτοια ατυχήματα μπορούν να αποβούν μοιραία για τον εργαζόμενο. Έτσι, απαιτείται προσοχή σε όλες τις ηλεκτρικές συνδέσεις και μονώσεις, διατήρηση όλων των καλωδίων σε καλή κατάσταση και απαραίτητα γείωση σε όλους τους ρευματολήπτες και ρευματοδέκτες. Ειδικά για την περίπτωση της ηλεκτροσυγκόλλησης πρέπει να λαμβάνονται τα παρακάτω μέτρα:

- ◆ Προσοχή στα φθαρμένα καλώδια, γιατί προκαλούν ηλεκτροπληξία ή φωτιές.
- ◆ Προσοχή στη χρήση της τσιμπίδας και την επαφή της με μη μονωτικά υλικά. Η τσιμπίδα πρέπει να τοποθετείται σε μονωτική βάση, όταν δε χρησιμοποιείται.
- ◆ Προσοχή στις συσκευές συγκράτησης ή μεταφοράς των προς συγκόλληση τεμαχίων.
- ◆ Προσοχή στις αναθυμιάσεις που προκύπτουν από την ηλεκτροσυγκόλληση, απαιτείται τεχνητός εξαερισμός.
- ◆ Χρησιμοποίηση μονωτικών επιφανειών στις βάσεις που στέκεται ο συγκολλητής.
- ◆ Σωστή ένδυση του ηλεκτροσυγκολλητή που αποτελείται από την ειδική μάσκα, γάντια, δερμάτινη ποδιά, και παπούτσια ασφαλείας.

Σε κάθε περίπτωση στους χώρους συγκολλήσεων πρέπει να υπάρχουν τα κατάλληλα πυροσβεστικά μέτρα για την αντιμετώπιση τυχόν πυρκαγιών.

19.3 ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΕΣ ΑΣΘΕΝΕΙΕΣ

Επαγγελματικές ασθένειες είναι εκείνες οι ασθένειες που προκαλούνται από τις ιδιαίτερες κάθε φορά συνθήκες εργασίας του εργαζομένου. Οι ασθένειες αυτές είναι ξεχωριστές για κάθε κατηγορία εργαζομένων και τις περισσότερες φορές λειτουργούν αθροιστικά, δηλαδή μία κατάσταση συνεχώς επιδεινώνεται από τη διαρκή έκθεση του εργαζομένου σε χώρους και υπό συνθήκες που δεν εξασφαλίζουν την υγιεινή. Έτσι, για παράδειγμα, συνηθέστερη ασθένεια στα χυτήρια, και γενικά εκεί που υπάρχουν

υψηλές θερμοκρασίες, είναι η θερμοπληξία, ενώ αντίστοιχα χώροι με αυξημένη υγρασία προκαλούν χρόνια αναπνευστικά προβλήματα, βρογχίτιδες κ.λπ.. Σε κάθε περίπτωση εργασίας, που εγκυμονεί τον κίνδυνο της επαγγελματικής ασθένειας, υπάρχουν τα μέσα και τρόποι για να προστατευθεί ο εργαζόμενος και πρέπει να εφαρμόζονται.

Οι κυριότερες πηγές των επαγγελματικών ασθενειών είναι:

- ◆ Ο **θόρυβος** που αποτελεί πρόβλημα του σύγχρονου ανθρώπου με σοβαρές επιπτώσεις στην ακοή αλλά και στο νευρικό του σύστημα. Ειδικά ο θόρυβος που παράγεται από μηχανήματα αντιμετωπίζεται με ειδικές ωτοασπίδες και με ηχομόνωση των πηγών παραγωγής θορύβου.
- ◆ Η **σκόνη**, ιδιαίτερα εκείνη που προέρχεται από μέταλλα στα χυτήρια ή ορυχεία και από φυτικές ίνες, όπως είναι στα κλωστήρια και υφαντήρια, που προκαλεί παθήσεις του αναπνευστικού. Οι παθήσεις αυτές είναι ιδιαίτερες σοβαρές γι' αυτό πρέπει ο εξαερισμός των χώρων, που συσσωρεύεται σκόνη, να είναι πολύ καλός. Στις περισσότερες περιπτώσεις επιβάλλεται ο μηχανικός εξαερισμός. Εκτός του αερισμού πρέπει, αναλόγως των περιπτώσεων, να χρησιμοποιούνται μάσκες ή προσωπίδες. Επίσης σε κάθε περίπτωση επιβάλλεται η παρακολούθηση της συσσώρευσης σκόνης στους επικίνδυνους χώρους με σχετικές μετρήσεις.
- ◆ Η **ακτινοβολία**, που προκύπτει από μηχανήματα που χρησιμοποιούν ραδιενεργά υλικά, είναι επίσης ιδιαίτερα επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία. Τέτοια μηχανήματα είναι εκείνα των μεταλλογραφικών ελέγχων και των ακτινογραφιών που γίνονται σε τεμάχια (π.χ. των συγκολλήσεων). Ανάλογα με την κάθε περίπτωση, οι εργαζόμενοι πρέπει να φορούν τις ειδικές στολές και να τηρούν τα προβλεπόμενα μέτρα ασφαλείας (π.χ. ειδικά χωρίσματα κ.λπ.)

Άλλες επαγγελματικές ασθένειες οφείλονται στα διάφορα **αέρια** και γενικά σε αναθυμιάσεις που δημιουργούνται από κατεργασίες υλικών (συγκολλήσεις, χύτευση κ.λπ.), από την **υγρασία**, τις **δονήσεις**, τον **κακό φωτισμό** κ.λπ..

19.4 ΣΗΜΑΝΣΗ

Η σήμανση στους χώρους εργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική ενέργεια ασφάλειας. Η σήμανση μπορεί να είναι απαγορευτική, προειδοποιητική, υποχρέωσης και σήμανση διάσωσης. Τα **απαγορευτικά σήματα** συνήθως βρίσκονται μέσα σε ένα κόκκινο περιθώριο, που στο λευκό εσωτερικό του είναι ζωγραφισμένη με μαύρο χρώμα η ενέργεια που απαγορεύεται. Τα σήματα αυτά θυμίζουν τα αντίστοιχα σήματα του κώδικα οδικής κυκλοφορίας. Στο σχήμα 19.1 φαίνονται μερικά κλασικά σήματα απαγόρευσης.



Απαγορεύεται
η χρήση φωτιάς



Απαγορεύεται
η διέλευση

Σχήμα 19.1: Σήματα απαγόρευσης

Τα **προειδοποιητικά σήματα** προειδοποιούν για πιθανό κίνδυνο. Είναι συνήθως τριγωνικά με μαύρες πλευρές και κίτρινο εσωτερικό, στο οποίο είναι ζωγραφισμένη μία παράσταση, που σχετίζεται με τον κίνδυνο που προειδοποιεί. Στο σχήμα 19.2 φαίνονται μερικά κλασικά σήματα προειδοποίησης.



Κίνδυνος
Ηλεκτροπληξίας



Προσοχή
Τοξικά υλικά

Σχήμα 19.2: Σήματα προειδοποίησης

Τα **σήματα υποχρέωσης** υποχρεώνουν τους εργαζόμενους να πράξουν αυτό που υποδεικνύει το σήμα, για παράδειγμα, να φορούν προστατευτικά γυαλιά στον τροχό. Τα σήματα αυτά είναι συνήθως κυκλικά, χρώματος ανοιχτού μπλε και ζωγραφισμένη με άσπρο χρώμα η υποχρεωτική υπόδειξη. Στο σχήμα 19.3 φαίνονται μερικά σήματα υποχρέωσης.



Χρήση γυαλιών



Χρήση ωτοασπίδων

Σχήμα 19.3: Σήματα υποχρέωσης

Τέλος τα **σήματα διάσωσης** υποδεικνύουν τις θέσεις διάσωσης ή τις κατευθύνσεις προς τις οποίες πρέπει να κινηθεί ο εργαζόμενος για να οδηγηθεί σε ασφαλή περιοχή. Τα σήματα αυτά συνήθως είναι παραλληλόγραμμα σε πράσινο χρώμα, έχοντας την υπόδειξη ζωγραφισμένη με άσπρο χρώμα. Στο σχήμα 19.4 φαίνονται μερικά σήματα διάσωσης.



Προς σταθμό
Α' Βοηθειών



Έξοδος διάσωσης
αριστερά

Σχήμα 19.4: Σήματα διάσωσης

19.5 ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Ο Τεχνικός ασφαλείας είναι ένας ενδιαμέσος κρίκος ανάμεσα στους εργαζομένους και στην εργοδοσία στα ζητήματα ασφάλειας. Οι προτάσεις του προς τη διεύθυνση του εκάστοτε εργασιακού χώρου αποσκοπούν στο να δημιουργήσουν συνθήκες ασφάλειας και υγιεινής για τους εργαζομένους. Πολλές φορές, ο ενδιαμέσος ρόλος του Τεχνικού ασφαλείας δημιουργεί στους εργαζομένους την εικόνα ότι αυτός προσπαθεί να υλοποιήσει την όποια πολιτική ασφάλειας υιοθετεί η εργοδοσία. Από την άλλη μεριά, η εργοδοσία πολλές φορές υποπτεύεται τον Τεχνικό ασφαλείας για υπερβολικό ζήλο προστασίας των εργαζομένων. Η πραγματικότητα είναι ότι η θέση του Τεχνικού Ασφαλείας αποτελεί μια νευραλγική θέση, η οποία απαιτεί ιδιαίτερες ικανότητες, σπουδές και υψηλό αίσθημα ευθύνης.

Ο Τεχνικός Ασφαλείας έχει ως σκοπό να:

- ✓ Ελέγχει την τήρηση των κανόνων ασφαλείας στις εγκαταστάσεις της επιχείρησης και να κοινοποιεί συστάσεις για περιπτώσεις που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής ή παρουσιάζουν παραλείψεις.
- ✓ Παρέχει τεχνικές συμβουλές σε θέματα πολιτικής ασφάλειας.
- ✓ Εκπονεί προγράμματα επιμόρφωσης των εργαζομένων και των διευθύνσεων σε θέματα εργασιακής υγιεινής και ασφάλειας.
- ✓ Καταγράφει τυχόν εργασιακά ατυχήματα και ανακοινώνει στατιστικά συμπεράσματα σχετικά με την ασφάλεια στον εργασιακό χώρο.
- ✓ Μελετά και ερευνά τα αίτια τυχόν εργασιακών ατυχημάτων.
- ✓ Επιλέγει μέτρα προστασίας των εργαζομένων ανάλογα με τον εργασιακό τους χώρο και την εργασία που πραγματοποιούν.
- ✓ Συνεργάζεται με άλλους φορείς, κλαδικούς ή τοπικούς, για θέματα υγιεινής και ασφάλειας.
- ✓ Εκπροσωπεί την εταιρία σε θέματα υγιεινής και ασφάλειας.

19.6 ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Από το 1920 ξεκίνησε στο Ελληνικό κράτος η δημιουργία νομοθετημάτων που καλύπτουν τομείς της ασφάλειας και υγιεινής των εργαζομένων. Από τότε μέχρι σήμερα έχει δημιουργηθεί μια μεγάλη σειρά νομοθετημάτων για γενικούς ή ειδικούς κανόνες ασφαλείας. Για παράδειγμα το Π.Δ. 95/78 που δημοσιεύθηκε στο Φ.Ε.Κ. (Φύλλο Εφημερίδας της Κυβερνήσεως) 47/Α/31-3-78, “περί μέτρων υγιεινής και ασφάλειας των απασχολουμένων εις εργασίας συγκολλήσεων”.

Οι φορείς του Ελληνικού κράτους που είναι υπεύθυνοι στον τομέα της υγιεινής και ασφάλειας των εργαζομένων, είναι το Υπουργείο Εργασίας και το Υπουργείο Βιομηχανίας. Το Υπουργείο Εργασίας ελέγχει μαζί με τα κατά τόπους γραφεία Επιθεώρησης Εργασίας, την τήρηση και εφαρμογή των κανονισμών που ισχύουν, ενώ το Υπουργείο Βιομηχανίας ελέγχει τις βιομηχανικές και παραγωγικές εγκαταστάσεις και έμμεσα συμβάλλει στην ασφάλεια. Τέλος, το Ι.Κ.Α. (Ίδρυμα Κοινωνικών Ασφαλίσεων) φροντίζει για την περίθαλψη των εργαζομένων από εργασιακά ατυχήματα, ελέγχοντας τις σχετικές διαδικασίες. Σε κάθε περίπτωση εργασιακού ατυχήματος ο εργοδότης είναι υποχρεωμένος να ενημερώσει σχετικά την Επιθεώρηση Εργασίας. Για τον έλεγχο πιθανών αστικών ευθυνών, ο εργοδότης είναι υποχρεωμένος να ενημερώσει και την τοπική Αστυνομία.

Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα, στη λογική της σύγκλισης όλων των διαφορετικών πολιτικών των κρατών-μελών (πολιτική για την οικονομία κ.λπ.), αναζητεί συνεχώς, με σχετικές αποφάσεις, τη σύγκλιση και στον τομέα της υγιεινής και ασφάλειας. Από το 1974 μέχρι σήμερα έχουν ληφθεί αρκετές σχετικές αποφάσεις. Η δυσκολία που υπάρχει στην εξασφάλιση της ενιαίας πολιτικής ασφάλειας έγκειται στη διαφορετικότητα της νοοτροπίας και της πρακτικής των πολιτών των κρατών – μελών. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στη μεμονωμένη και αποσπασματική αντιμετώπιση του προβλήματος της υγιεινής και ασφάλειας από κάθε κράτος – μέλος ξεχωριστά, με προφανή αποτελέσματα, ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις των πολυεθνικών εταιριών, που διατηρούν παραγωγικές μονάδες σε διάφορες χώρες. Τα τελευταία χρόνια επιχειρείται μία καλύτερη προσέγγιση όλων των κρατών – μελών, τα αποτελέσματα της οποίας αναμένεται να φανούν στο εγγύς μέλλον.

Το 1985 ψηφίσθηκε από το Ελληνικό κράτος ο νόμος 1568/85 για την “Υγιεινή και Ασφάλεια των εργαζομένων”. Ο νόμος αυτός ήταν αποτέλεσμα μίας προσπάθειας για τη συγκέντρωση της μέχρι τότε διάσπαρτης νομοθεσίας σχετικά με την ασφάλεια. Με το νόμο αυτό έγινε ένα σημαντικό βήμα προσέγγισης της κοινής Ευρωπαϊκής πολιτικής σε θέματα υγιεινής και ασφάλειας των εργαζομένων. Έτσι, καθιερώθηκε ο σημαντικός ρόλος του **Τεχνικού Ασφαλείας** και του **Γιατρού εργασίας**, αλλά και σε περιπτώσεις επιχειρήσεων με πάνω από 50 εργαζόμενους προβλέφθηκε η σύσταση **Επιτροπής Υγιεινής και Ασφάλειας των Εργαζομένων** (ΕΥΑΕ). Από τότε ψηφίσθηκαν και άλλοι νόμοι για την προσέγγιση με την Ευρωπαϊκή Κοινότητα σε θέματα πολιτικής υγιεινής και ασφάλειας εργασίας. Τελευταίο νομοθέτημα αποτελεί το Π.Δ. 105/1995, που καθορίζει τις ελάχιστες προδιαγραφές για τη σήμανση ασφαλείας και υγείας στην εργασία και για τη χρήση του εξοπλισμού με ασφάλεια, σύμφωνα με τις οδηγίες της ΕΟΚ 92/58 και 89/655.

Σε εθνικό επίπεδο λειτουργεί κεντρικό όργανο με την ονομασία “**Συμβούλιο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας**” (ΣΥΑΕ), στο οποίο συμμετέχουν εκπρόσωποι των εργαζομένων, των εργοδοτών, των σχετικών Υπουργείων (Εργασίας, Βιομηχανίας, Υγείας και Πρόνοιας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων), του Τ.Ε.Ε. (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος), του Πανελληνίου Ιατρικού Συλλόγου, καθώς και η ένωση Ελλήνων Χημικών. Το όργανο αυτό έχει σκοπό τη γνωμοδότηση σε θέματα υγιεινής και ασφάλειας και την εισήγηση σχετικών νομοθετημάτων. Σε τοπικό επίπεδο λειτουργούν στις νομαρχίες οι **Νομαρχιακές Επιτροπές Υγιεινής και Ασφάλειας των Εργαζομένων**, στις οποίες προεδρεύουν οι Νομάρχες και έχουν ως μέλη τον Επιθεωρητή Εργασίας, εκπροσώπους των εργαζομένων και των ερ-

γοδοτών, καθώς και εκπρόσωπο από το Υπουργείο Υγείας, Πρόνοιας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων.

Τέλος, πρέπει να τονισθεί ότι, άσχετα με το θεσμικό καθεστώς που ούτως ή άλλως δημιουργεί ασφαλείς συνθήκες, αλλά δεν προστατεύει τον εργαζόμενο από το δικό του λάθος, η ασφάλεια της εργασίας και η πρόληψη του εργασιακού ατυχήματος αποτελούν καθήκον και υποχρέωση όλων απέναντι στον εαυτό μας, στην οικογένειά μας και στους συναδέλφους μας.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ 19ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Η ασφάλεια εργασίας πρέπει να έχει πρωταρχικό ρόλο σε κάθε δραστηριότητα που αναπτύσσει ο άνθρωπος, είτε ως επαγγελματίας είτε ως ερασιτέχνης.
- Κάθε εργαζόμενος υποχρεούται να γνωρίζει και να συμμορφώνεται με γενικούς κανόνες ασφαλείας, όπως είναι: η καθαριότητα και η τάξη στην εργασία, η χρήση κατά περίπτωση των ατομικών μέσων προστασίας, η χρήση των κατάλληλων εργαλείων, η τήρηση των οδηγιών της σήμανσης στους χώρους εργασίας κ.λπ..
- Κάθε εργαζόμενος υποχρεούται να γνωρίζει και να συμμορφώνεται με τους ειδικούς κανόνες ασφαλείας που ισχύουν για τον συγκεκριμένο χώρο δουλειάς του.
- Ο Τεχνικός ασφαλείας είναι ένας ενδιάμεσος κρίκος ανάμεσα στους εργαζομένους και στην εργοδοσία στα ζητήματα ασφαλείας. Οι προτάσεις του, προς τη διεύθυνση του εκάστοτε εργασιακού χώρου, αποσκοπούν στο να δημιουργήσουν συνθήκες ασφαλείας και υγιεινής για τους εργαζομένους.
- Η Ελληνική Πολιτεία και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν θεσπίσει σειρά νομοθετημάτων για γενικούς ή ειδικούς κανόνες ασφαλείας. Ο κάθε εργαζόμενος μπορεί να παίρνει σχετικές πληροφορίες από τους εποπτευόμενους φορείς της Πολιτείας, για την Υγιεινή και Ασφάλεια της εργασίας, που είναι το Υπουργείο Εργασίας και το Υπουργείο Βιομηχανίας.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αεράκη Ζ., *Τεχνολογία Συγκολλήσεων*, Σημειώσεις Τμήματος Μηχανολογίας ΤΕΙ Ηρακλείου – 1995

Αντωνιάδη Α., *Μηχανικές Διαμορφώσεις*, Σημειώσεις, ΤΕΙ Σερρών 1996

Αντωνιάδη Α., Σημειώσεις Τμήματος Μηχανολογίας ΤΕΙ Σερρών – 1996

Γραικούσης Ρ., *Στοιχεία Μηχανών – τόμος Ι*, Εκδ. Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, 1984

Ιορδανίδη Π. – Μπέρου Π., *Υγιεινή και Ασφάλεια Εργαζομένων*, Ίδρυμα Ευγενίδη, 1988

Καρακώστα Θ. – Νιάρχου Ν., *Τεχνολογία Μηχανουργικών Υλικών*

Κάτσικα Ν. – Κοτσανάδα Χ., *Στοιχεία συγκολλήσεων*, Αθήνα, 1987

Κερμανίδη Θ., *Αντοχή Υλικών, τόμος 1*, Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη, 1983

Κονοφάγου Κ., *Μεταλλογνωσία, Τόμοι Ι-ΙΙΙ*, Αθήνα, 1967

Μάμαλη Α.Γ., *Κατεργασίες των υλικών*, Ε.Μ.Π., 1992

Μάρκου Α., *Εργαστηριακές Ασκήσεις Μηχανολογικού Εργαστηρίου Ι*

Μπάχα Γ., *Βοηθός συγκολλητού*, Εκδόσεις Ν. Σταυριδάκης & Υιός

Μπουζάκη Κ.Δ., *Σημειώσεις για το μάθημα “Μηχανουργικές Κατεργασίες ΙΙΙ”*, Τμήμα Μηχανολόγων Α.Π.Θ., 1996

Μπουζάκη Κ.Δ., *Κανονισμοί Μηχανολογικού Σχεδίου*, Εκδ. Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, 1985

Πανόπουλου Γ., *Εισαγωγική Προσέγγιση στη Μηχανική Ασφάλεια*, Εκδόσεις Φοίβος, 1993

Πανταζόπουλου Γ., *Τεχνολογία Υλικών*, Σημειώσεις για το ΙΕΚ Αθηνών, Αθήνα 1994.

Παντελή Δ.Ι., *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.

Πετρόπουλου Π.Γ., *Μαθήματα Μηχανουργικής Τεχνολογίας (τεύχος Ι)*, Εκδ. Γιαχούδη - Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, 1986

Πετρόπουλου Π.Γ., *Μηχανουργική Τεχνολογία - Εργαστήριο Ι*, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1991

Πετρόπουλου Π.Γ., *Μεταλλουργία*, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1997

Σταύρου Σ., *Οργάνωση και Προστασία της Εργασίας*, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 1993

Χρυσουλάκη Γ.Δ. – Παντελή Δ.Ι., *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ableson & Pateman, *Metalworking*, Addison-Wesley Publishing Company, 1984

Ableson & Pateman, *Metalworking*, McGraw-Hill, Sydney, 1974

Agricola Georgius, *De Re Metallica*, ed. Dover 1950.

Amstead B.H. – Ostwald P.F. – Begeman M.L., *Manufacturing Processes*, John Wiley & Sons, Singapore, 1987

Atlas Metallographique de Microstructures Types, Ed. Techn. de la Fonderie, Paris.

Balbi M. – Mor F. – La Vecchia G.M. – Doni D., *Utilizzo del processo plasma spray per l'ottenimento di rivestimenti autolubrificanti*, *La Metallurgia Italiana*, Τεύχος Φεβρουαρίου 1996, σελ. 113-120.

Bauerle D., *Laser Processing and Chemistry - 2nd ed*, Springer, 1996.

Beddoes J. – Bibby M.J., *Principles of Metal Manufacturing Processes*, Edward Arnold 1999.

Charles J.A. – Crane F.A.A. – Furness J.A.G., *Selection and Use of Engineering Materials - 3rd ed.*, Butterworth-Heinemann, 1997

Chiang Y.M. – Birnie D. – Kingery W.D., *Physical Ceramics-Principles for Ceramic Science and Engineering*, ed. Wiley 1997

DeGarmo E.P., *Materials and processes in manufacturing*, Macmillan Publ. Company, NY, 1984

Doyle Lawrence E., *Manufacturing Processes and Materials for Engineers*
Prentice-Hall, New Jersey, 1985

Flinn R.A. – Trojan P.K., *Engineering Materials and Their Applications*,
4th ed., ed. Wiley 1995.

Forming - SME, Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Vol 2.

Geary D., *The Welder's Bible*, Tab Books – Div. of McGraw-Hill, Inc., 1993

Gibson S. – Smith A., *Basic Welding*, Macmillan Press Ltd. - 1983

Higgins R.A., *Engineering Metallurgy - Applied Physical Metallurgy*, 6th
ed., ed. Edward Arnold, London 1993.

Hofner K.H., *Verfahren der Umformtechnik*, Carl Hanser Verlag,
Muenchen, 1969

Hosford William F. – Caddell Robert M., *Metal Forming: Mechanics and
Metallurgy*, Prentice-Hall, 1983

Hutchings I.M., *Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials*,
Edward Arnold eds., London, 1992

Kalpakjian Serope, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*,
McGraw-Hill, Sydney, 1974

Metals Handbook - Vol 4. Forming, American Society for Metals, 1973

Mihaly K., *Fizikai Metallurgia*, MVAE, Budapest 1990.

Minkoff I., *Materials Processes*, Springer Verlag - 1992

Niebel Benjamin W. – Draper Alan B. – Wysk Richard A., *Modern
Manufacturing Process Engineering*, McGraw-Hill, Singapore, 1989
Prentice-Hall, New Jersey, 1985

Rao P.N., *Manufacturing Technology*, Tata McGraw Hill, N. Delhi, 1987

Riege Martin, *Werkzeuge zum Blechschneiden und Blechumformen*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1979

Shackelford J.F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, 4th ed., ed. Prentice-Hall 1996.

Sivarajan V., *Production Technology*, VK Publishers, India, 1983

Smith W.F., *Foundations of Materials Science and Engineering*, 2nd ed., ed. McGraw-Hill 1993.

Spur G., *Handbuch der Fertigungstechnik – Band 1 – Urformen*, Carl Hanser Verlag, Wien, 1981

Stachowiak G.W. – Batchelor A.W., *Engineering Tribology*, Elsevier, 1993

Steen W.M., *Laser Material Processing - 2nd ed.*, Springer, 1998.

Stewart K., *Boronizing protects metals against wear*, *Advanced Materials and Processes*, Τεύχος Μαρτίου 1997, σελ. 23-25.

Tschaetsch Heinz, *Taschenbuch Umformtechnik*, Carl Hanser Verlag, Muenchen Wien, 1977

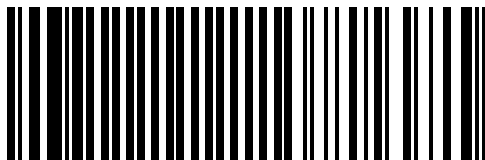
Yanagida H. – Koumoto K. – Miyayama M., *The Chemistry of Ceramics*, ed. Wiley and Maruzen 1996

Williams J.A., *Engineering Tribology*, Oxford eds., Oxford, 1996

Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του νόμου 1129 της 15/21 Μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946,108, Α').

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας, Θρησκευμάτων και Αθλητισμού / ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.

Κωδικός βιβλίου: 0-24-0047
ISBN Set 978-960-06-3171-5
Τ.Β´ 978-960-06-3173-9



(01) 000000 0 24 0047 1