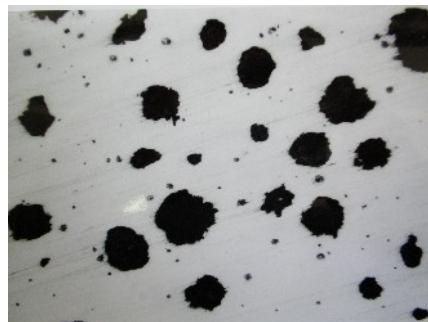


**Α.Τ.Ε.Ι ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
Σ.Τ.Ε.Φ. – Γ.Τ.Θ.Ε.**

Τεχνολογία Υλικών Οχημάτων

ΤΕΥΧΟΣ II

(ΤΜΗΜΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ)



**Παναγιώτης Ματζινός, Επιστημονικός Συνεργάτης
Χημικός Μηχανικός, MPhil, PhD**

Θεσσαλονίκη 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

9. ΔΙΜΕΡΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΑΝΘΡΑΚΑ (Fe-C)	2
9.1 ΓΕΝΙΚΑ	2
9.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΑΝΘΡΑΚΑ	3
9.3 ΚΑΝΟΝΑΣ ΤΟΥ ΜΟΧΛΟΥ	9
9.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Fe-C	10
10. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΔΟΜΗΣ ΧΑΛΥΒΩΝ	11
10.1 ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΧΑΛΥΒΩΝ	11
10.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ TTT (Time-Temperature-Transformation)	14
10.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ CCT (Continuous Cooling Transformation)	16
11. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	19
11.1 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ	19
11.1.1 ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	19
11.1.2 ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΑΝΑΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗΣ	20
11.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΩΝ	22
11.2.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	22
11.2.1.1 Ανοπτήσεις	22
11.2.1.2 Βαφή και επαναφορά (quenching and tempering)	25
11.2.1.4 Επιφανειακή βαφή (Φλογοβαφή-Επαγωγική βαφή)	30
11.2.2 ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	33
11.2.2.1 Ενανθράκωση	33
11.2.2.2 Εναζώτωση	36
11.2.2.3 Ενανθρακαζώτωση	37
11.2.3 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	38
11.2.4 ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	38
11.2.5 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ	38
11.2.6 ΕΜΒΑΠΤΟΤΗΤΑ (ΔΟΚΙΜΗ JOMINY)	39
11.3 ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΗ	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΑΙΜΕΡΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΑΝΘΡΑΚΑ (Fe-C)

9.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανικές κατασκευές συνήθως δεν είναι καθαρά σώματα ή τελείως ομοιογενή μίγματα, αποτελούμενα από μια φάση, αλλά είναι σώματα που περιέχουν διάφορες διακριτές φάσεις με διαφορετικές ιδιότητες. Έτσι και οι χάλυβες, που ουσιαστικά είναι κράματα σιδήρου-άνθρακα, αποτελούνται από ποικίλες φάσεις, οι οποίες ρυθμίζονται κατά την παραγωγή και επεξεργασία των και τους προσδίδουν αντίστοιχες τελικές ιδιότητες.

Ο όρος φάση αναφέρεται σε μια ομοιογενή περιοχή της ύλης, όπου τόσο η χημική σύσταση όσο και η κρυσταλλική δομή και συνεπώς και οι ιδιότητές της διατηρούνται οι ίδιες σε όλη της την έκταση. Οι φάσεις διαχωρίζονται μεταξύ τους με διεπιφάνειες, κατά μήκος των οποίων παρατηρείται μια ασυνεχής και απότομη μεταβολή των φυσικών ή/και χημικών χαρακτηριστικών του υλικού. Το σύνολο των φάσεων καθώς και των διαχωριστικών διεπιφανειών αποτελεί την μικροδομή ενός κράματος. Το επιμέρους δομικό στοιχείο μιας φάσης είναι ο κόκκος, όπου επιπρόσθετα, σε αυτό το τμήμα του στερεού, το κρυσταλλικό πλέγμα εκτείνεται χωρίς διακοπή (ίδια και συνεχής κρυσταλλική δομή). Ακόμη χρησιμοποιείται ο όρος σύστημα, ο οποίος αναφέρεται σε μια σειρά πιθανών κραμάτων, τα οποία αποτελούνται από τα ίδια συστατικά, αλλά δε γίνεται αναφορά στη σύσταση του κράματος, π.χ. το σύστημα σιδήρου-άνθρακα. Επιπλέον, τα μονοφασικά συστήματα καλούνται "ομοιογενή", ενώ συστήματα τα οποία αποτελούνται από δυο ή περισσότερες φάσεις καλούνται "ετερογενή συστήματα" ή "μίγματα". Αυτή είναι η περίπτωση για τα περισσότερα μεταλλικά κράματα.

Οι γραφικές παραστάσεις που περιγράφουν σε συντεταγμένες θερμοκρασίας-συγκέντρωσης, τις περιοχές ύπαρξης ή συνύπαρξης των φάσεων ενός συστήματος ονομάζονται διαγράμματα φάσεων και περιέχουν πληροφορίες σχετικά με:

1. την παρουσία, τον αριθμό και τη χημική σύσταση των υπαρχουσών φάσεων σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση και τη θερμοκρασία σε συνθήκες ισορροπίας (εξαιρετικά χαμηλή ταχύτητα απόψυξης).
2. τη διαλυτότητα σε στερεά κατάσταση ενός στοιχείου στο άλλο και
3. τη θερμοκρασία στην οποία ένα κράμα αρχίζει να τήκεται, καθώς και τις θερμοκρασιακές περιοχές στις οποίες πραγματοποιείται η στερεοποίηση και κρυστάλλωση ενός ψυχόμενου κράματος.

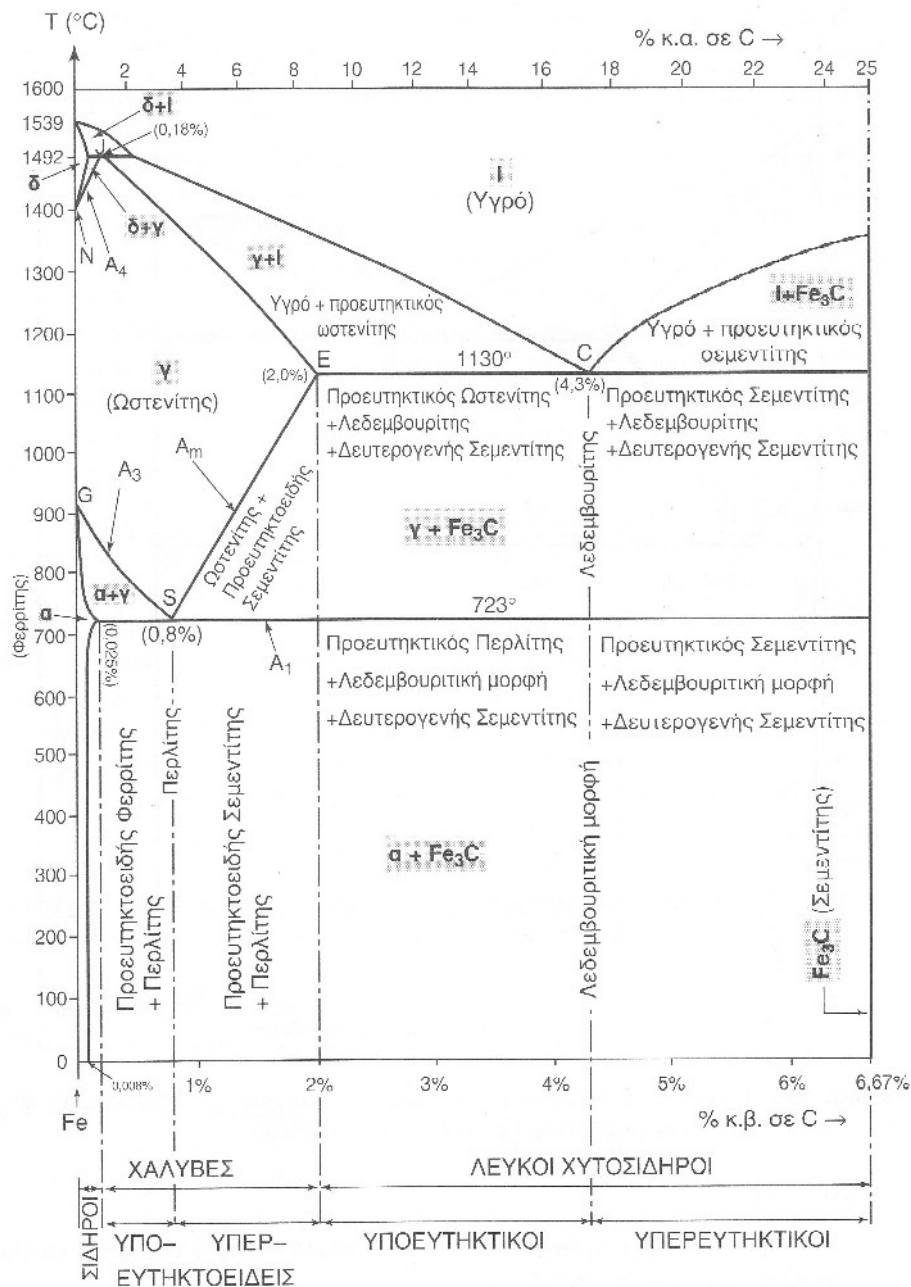
Αν και τα περισσότερα διαγράμματα φάσεων αναφέρονται σε καταστάσεις ισορροπίας, ωστόσο είναι χρήσιμα για την κατανόηση της ανάπτυξης και διατήρησης δομών μη ισορροπίας. Συχνά οι ιδιότητες που συνδέονται με δομές μη ισορροπίας είναι περισσότερο επιθυμητές από τις ιδιότητες των δομών ισορροπίας. Για παράδειγμα, το φαινόμενο σκλήρυνσης με κατακρήμνιση (Ενότητα 11.3).

Συγκεκριμένα μίγματα, συνδυασμοί διαφορετικών φάσεων, με διαφορετική αναλογία και διάταξη στο χώρο, καθώς και το μέγεθος των κόκκων, των επιμέρους δομικών στοιχείων

μιας φάσης, προσδιορίζουν τις φυσικές, μηχανικές, ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των χαλύβων και επιτρέπουν την ευρεία βιομηχανική τους χρήση.

9.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΑΝΘΡΑΚΑ

Στο Σχήμα 9.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων σιδήρου-άνθρακα. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι ο άνθρακας στους χάλυβες δε βρίσκεται ελεύθερος με τη μορφή γραφίτη, αλλά είτε βρίσκεται στο πλέγμα του σιδήρου σχηματίζοντας στερεό διάλυμα παρεμβολής, είτε σχηματίζει με το σίδηρο μια χημική ένωση, το καρβίδιο του σιδήρου ή σεμεντίτης (Fe_3C). Γι' αυτό στην πραγματικότητα το διάγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω είναι το μετασταθές διάγραμμα $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$.



Σχήμα 9.1: Μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$.

Το διάγραμμα αυτό δεν είναι διάγραμμα ισορροπίας, επειδή το καρβίδιο του σιδήρου που σχηματίζεται δεν είναι μια ένωση ισορροπίας, αλλά μετασταθής ένωση. Ωστόσο, επειδή ο ρυθμός αποσύνθεσης του σεμεντίτη είναι πολύ αργός, δηλαδή θα παραμείνει ως ένωση απεριόριστα σε θερμοκρασία δωματίου και δε θα μετασχηματισθεί σε σίδηρο και άνθρακα υπό μορφή γραφίτη, το διάγραμμα σιδήρου-καρβιδίου του σιδήρου είναι αυτό που ισχύει για πρακτικούς λόγους.

Το διάγραμμα περικλείεται από τον καθαρό σίδηρο στα αριστερά και από το καρβίδιο του σιδήρου στα δεξιά. Για λόγους ευκολίας η συγκέντρωση εκφράζεται ως ποσοστό % άνθρακα (%κ.β. C) και όχι ως ποσοστό % καρβιδίου του σιδήρου (%κ.β. Fe_3C). Τα καρβίδιο του σιδήρου έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα 6.67% κ.β. και συνεπώς το σημείο στα δεξιά του διαγράμματος αντιστοιχεί στο 100% Fe_3C .

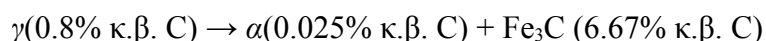
Στο διάγραμμα διακρίνονται τρεις περιοχές ως προς το ποσοστό του άνθρακα. Ο καθαρός σίδηρος ($\text{C} < 0.008\%$ κ.β.), οι χάλυβες ($0.008\% \text{ κ.β.} < \text{C} < 2.11\% \text{ κ.β.}$) και οι χυτοσίδηροι ($2.11 \text{ κ.β.} < \text{C} < 6.67\% \text{ κ.β.}$). Είναι αξιοσημείωτο ότι οι χυτοσίδηροι του εμπορίου σπάνια υπερβαίνουν το 4.5% κ.β. C. Ακόμη, διακρίνονται επιμέρους περιοχές στο ευτηκτοειδές και ευτηκτικό σημείο με συστάσεις 0.08% κ.β. C και 4.3% κ.β. C, αντίστοιχα.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες φάσεις και συστατικά που εμφανίζονται στο διάγραμμα ισορροπίας Fe- Fe_3C .

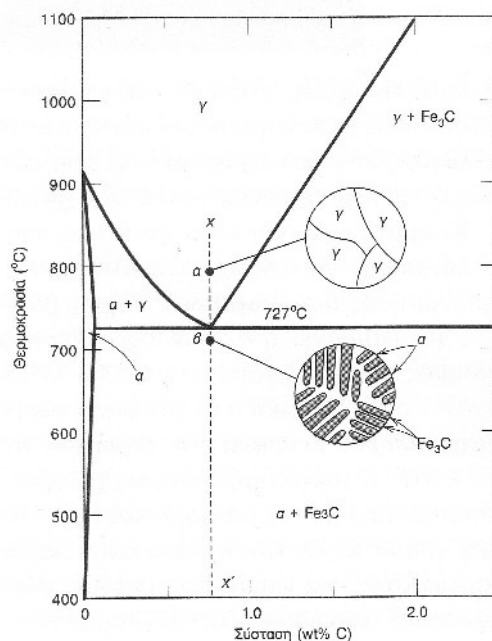
- Υγρή φάση (L): Υγρό διάλυμα C σε Fe.
- δ-φάση (δ-φερρίτης): Τυχαίο στερεό διάλυμα παρεμβολής C στο κυβικό χωροκεντρωμένο πλέγμα του Fe (BCC). Μέγιστη διαλυτότητα 0.1% κ.β. C στους 1492°C.
- γ-φάση (ωστενίτης): Τυχαίο στερεό διάλυμα παρεμβολής C στο κυβικό εδροκεντρωμένο πλέγμα του Fe (FCC). Μέγιστη διαλυτότητα 2.0% κ.β. C στους 1130°C.
- α-φάση (φερρίτης): Τυχαίο στερεό διάλυμα παρεμβολής C στο κυβικό χωροκεντρωμένο πλέγμα του Fe (BCC). Μέγιστη διαλυτότητα 0.025% κ.β. C στους 723°C.
- Καρβίδιο του σιδήρου ή σεμεντίτης (Fe_3C): Σκληρή και εύθραυστη μεσομεταλλική ένωση του C με το Fe, που κρυσταλλώνεται στο ορθορομβικό σύστημα. Περιέχει 6.67% κ.β. C.
- Περγλίτης ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$): Σύνθετη ευτηκτοειδής δομή αποτελούμενη από ομοιόμορφη εναλλαγή λεπτών στρωμάτων φερρίτη (88% κ.β.) και σεμεντίτη (12% κ.β.). Προϊόν του περλιτικού μετασχηματισμού. Δεν αποτελεί φάση αλλά μίγμα φάσεων α και Fe_3C .
- Λεδεμβουρίτης ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$): Σύνθετη ευτηκτική δομή αποτελούμενη από ομοιόμορφη εναλλαγή λεπτών στρωμάτων ωστενίτη και σεμεντίτη. Προϊόν του λεδεμβουριτικού μετασχηματισμού. Δεν αποτελεί φάση, αλλά ευτηκτικό μίγμα φάσεων και εμφανίζεται κυρίως κατά τη στερεοποίηση των χυτοσιδήρων.
- Λεδεμβουριτική μορφή (περγλίτης + Fe_3C): Σύνθετη δομή αποτελούμενη από περγλίτη και σεμεντίτη.

Παρατηρώντας στο διάγραμμα την ψύξη ενός κράματος από υψηλότερες σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (άξονας y), τα σημεία τομής της πορείας απόψυξης με τις καμπύλες του διαγράμματος σηματοδοτούν την έναρξη κάποιου μετασχηματισμού και τη δημιουργία κάποιας καινούριας φάσης στο ψυχόμενο κράμα. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα (άξονας x) συμβαίνουν διαφορετικοί μετασχηματισμοί, σύμφωνα με την ευτηκτοειδή ή ευτηκτική αντίδραση και έχοντας ως κυρίαρχα τα χαρακτηριστικά της μιας ή της άλλης. Μετά την ολοκλήρωση των μετασχηματισμών το κράμα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας.

Για το σύστημα σιδήρου-άνθρακα υπάρχει ένα ευτηκτοειδές σημείο με σύσταση 0.8% κ.β. C και σε θερμοκρασία 723°C. Η ευτηκτοειδής αντίδραση (περλιτικός μετασχηματισμός) είναι η ακόλουθη:

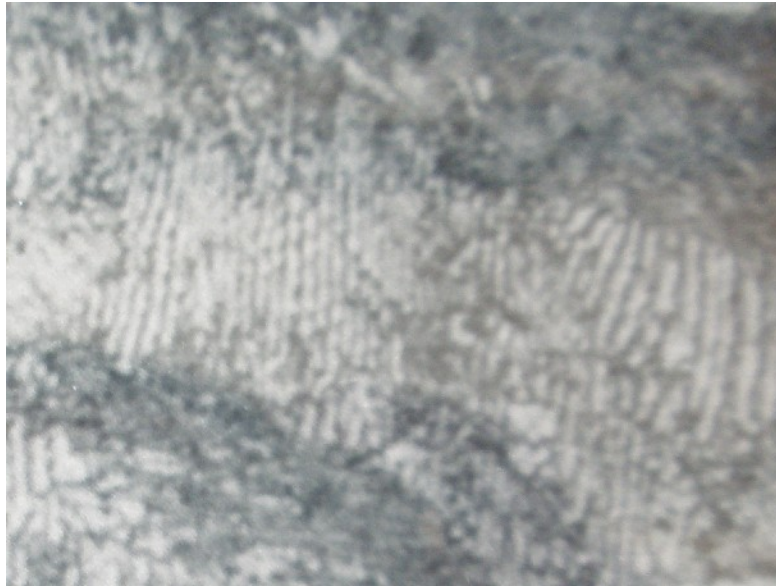


Κατά την απόψυξη η στερεά φάση γ (ωστενίτης) μετασχηματίζεται σε περλίτη δηλ., α σίδηρο (φερρίτης) (88% κ.β.) και σεμεντίτη (12% κ.β.). Στο σχήμα 9.2 παρουσιάζεται σχηματικά αυτή η δομή παρουσιάζεται σχηματικά, στο σημείο β, και ονομάζεται περλίτης, γιατί έχει τη μορφή του φορέα του μαργαριταριού (πέρλας).



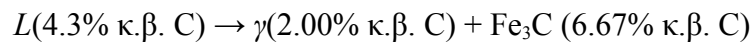
Σχήμα 9.2: Σχηματική αναπαράσταση των μικροδομών για ένα χάλυβα με ευτηκτοειδή σύσταση, πάνω και κάτω από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία.

Στο Σχήμα 9.3 παρουσιάζεται μια μικροφωτογραφία της δομής του περλίτη από οπτικό μικροσκόπιο με μεγέθυνση x600. Αν και ο περλίτης είναι ετερογενής, στην ουσία συμπεριφέρεται σαν ομοιογενές καθαρό σώμα.



Σχήμα 9.3: Μικροφωτογραφία όπου φαίνεται η μικροδομή του περλίτη, αποτελούμενη από εναλλασσόμενα λεπτά στρώματα φερρίτη (ανοιχτόχρωμη φάση) και σεμεντίτη (λεπτά στρώματα τα περισσότερα των οποίων εμφανίζονται σκούρα). Μεγέθυνση x1000. Στους χάλυβες ευτηκτοειδούς αναλογίας το 100% της δομής αποτελείται από περλίτη.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι για το σύστημα σιδήρου-άνθρακα υπάρχει ένα ευτηκτικό σημείο με σύσταση 4.30% κ.β. C και σε θερμοκρασία 1147°C. Η ευτηκτική αντίδραση είναι η ακόλουθη:



Κατά την απόψυξη το υγρό στερεοποιείται για να σχηματίσει το λεδεμβουρίτη, αποτελούμενο από εναλλασσόμενες πλάκες ωστενίτη και σεμεντίτη. Στην ευτηκτοειδή θερμοκρασία (723°C), λαμβάνει χώρα ο ευτηκτοειδής μετασχηματισμός, κατά τον οποίο ο ωστενίτης μετατρέπεται σε περλίτη. Η μικρογραφική μορφή που προκύπτει αποτελείται από περλίτη και σεμεντίτη και ονομάζεται λεδεμβουριτική μορφή.

Το πρώτο στάδιο που συνοδεύει κάποιον μετασχηματισμό φάσης είναι η πυρηνοποίηση της νέας φάσης και στη συνέχεια η ανάπτυξή της μέσω της διάχυσης των συστατικών της.

Ακόμη πρέπει να σημειωθεί ότι για το σύστημα σιδήρου-άνθρακα υπάρχουν οι παρακάτω χαρακτηριστικές θερμοκρασίες:

- Θερμοκρασία A_1 : Πρόκειται για τη θερμοκρασία του ευτηκτοειδούς σημείου (723°C).
- Θερμοκρασίες A_3 και A_m : Πρόκειται για τις θερμοκρασίες πλήρους ωστενιτοποίησης του χάλυβα (100% ωστενίτης). Ορίζονται από τις καμπύλες GS και SE.
- Θερμοκρασία A_0 : Πρόκειται για τη θερμοκρασία του σημείου Curie του σεμεντίτη (210°C).
- Θερμοκρασία A_2 : Πρόκειται για τη θερμοκρασία Curie του α -φερρίτη (770°C).
- Θερμοκρασία A_4 : Πρόκειται για τη θερμοκρασία μετασχηματισμού του ωστενίτη σε δ-φερρίτη. Ορίζεται από την καμπύλη NJ.

Από τις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες που αναφέρθηκαν προηγούμενα, πρέπει να τονισθεί ότι οι θερμοκρασίες A_1 , A_3 και A_m χρησιμοποιούνται στις θερμικές επεξεργασίες του χάλυβα.

Επειδή οι θερμοκρασίες A_1 , A_3 , A_m και A_4 παρουσιάζουν υστέρηση κατά τη θέρμανση ή απόψυξη, γι' αυτό χρησιμοποιούνται οι δείκτες c και r για να δηλώσουν τη θέρμανση και την απόψυξη αντίστοιχα π.χ. A_{r1} , A_{r3} , A_{rm} , A_{c1} , A_{c3} , A_{cm} .

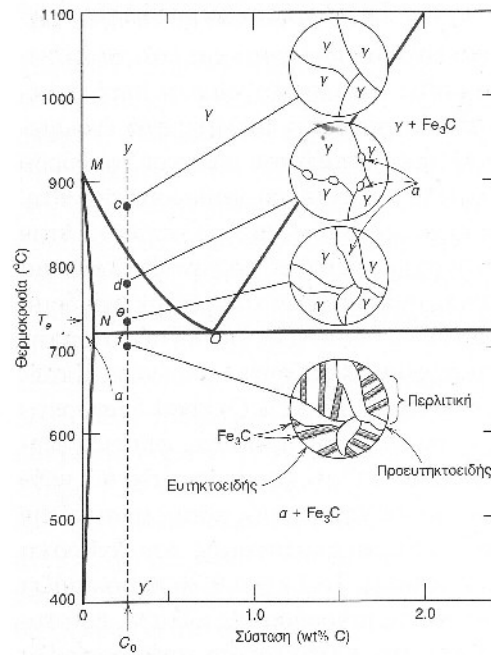
Στο διάγραμμα ισορροπίας άνθρακα-σιδήρου επίσης φαίνονται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες οι τρεις αλλοτροπικές μορφές του σιδήρου, γνωστές ως α -σίδηρος, γ -σίδηρος και δ -σίδηρος, είναι σταθερές.

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι αλλοτροπία είναι το φαινόμενο κατά το οποίο κάποιο χημικό στοιχείο κρυσταλλώνεται σε περισσότερες από μια κρυσταλλικές δομές κάτω από διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Η αλλαγή της κρυσταλλικής δομής έχει συνήθως ως συνέπεια τη μεταβολή των μηχανικών, ηλεκτρικών, μαγνητικών καθώς και άλλων ιδιοτήτων του υλικού.

Καθώς ο σίδηρος ψύχεται στους 1539°C κρυσταλλώνεται στο χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (BCC) ως δ -σίδηρος. Ψύχοντας στους 1394°C η κρυσταλλική του δομή αλλάζει σε εδροκεντρωμένη κυβική (FCC) ως γ -σίδηρος ή ωστενίτης και στους 912°C η κρυσταλλική του δομή γίνεται ξανά BCC ως α -σίδηρος, επίσης γνωστός ως φερρίτης.

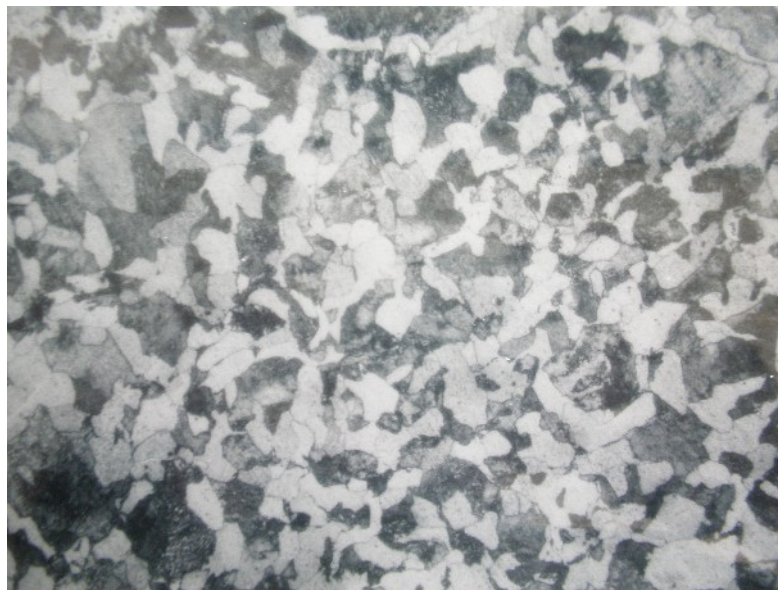
Τεχνικό ενδιαφέρον για τις θερμικές επεξεργασίες του χάλυβα ουσιαστικά παρουσιάζουν οι δυο αλλοτροπικές μορφές του σιδήρου: ο μαγνητικός α -σίδηρος και ο μη μαγνητικός γ -σίδηρος. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ισορροπίας άνθρακα-σιδήρου, το εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα του γ -σιδήρου παρουσιάζει μεγαλύτερη διαλυτότητα για τον άνθρακα, 2.0% κ.β. C στους 1130°C , από ότι το χωροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα του α -σιδήρου, 0.025% κ.β. C στους 723°C , επειδή διαθέτει μεγαλύτερα κενά στο πλέγμα του. Επίσης οι δυο αυτές αλλοτροπικές μορφές του σιδήρου παρουσιάζουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Ο α -σίδηρος είναι ένα αρκετά μαλακό μέταλλο, όπως και ο γ -σίδηρος. Όμως ο γ -σίδηρος παρουσιάζει πιο όλκιμη συμπεριφορά και διαθέτει μεγαλύτερο δυναμικό σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση. Αυτή η γ -φάση του σιδήρου χρησιμοποιείται Οι πιο κοινοί τύποι ανοξείδωτων χαλύβων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εξοπλισμού για τα νοσοκομεία και τη βιομηχανία τροφίμων, παρουσιάζουν τη δομή του γ -σιδήρου (ωστενιτική δομή).

Καθώς ένας χάλυβας με περιεκτικότητα σε άνθρακα, μεταξύ 0.025 και 0.8% κ.β. C, ο οποίος ορίζεται ως υποευτηκτοειδής, ψύχεται, η γ -φάση μετασχηματίζεται σε α και γ μόλις το κράμα φθάσει στη διαφασική περιοχή $\alpha+\gamma$. Καθώς ο χάλυβας φθάνει στην ευτηκτοειδή θερμοκρασία, η παραμένουσα γ φάση έχει την ευτηκτοειδή σύσταση και μετασχηματίζεται σε περλίτη (Σχήμα 9.4). Ο φερρίτης που σχηματίζεται πριν από τον ευτηκτοειδή μετασχηματισμό καλείται προευτηκτοειδής φερρίτης.



Σχήμα 9.4: Σχηματική αναπαράσταση των μικροδομών κατά την απόψυξη ενός χάλυβα με υποευτηκτοειδή σύσταση.

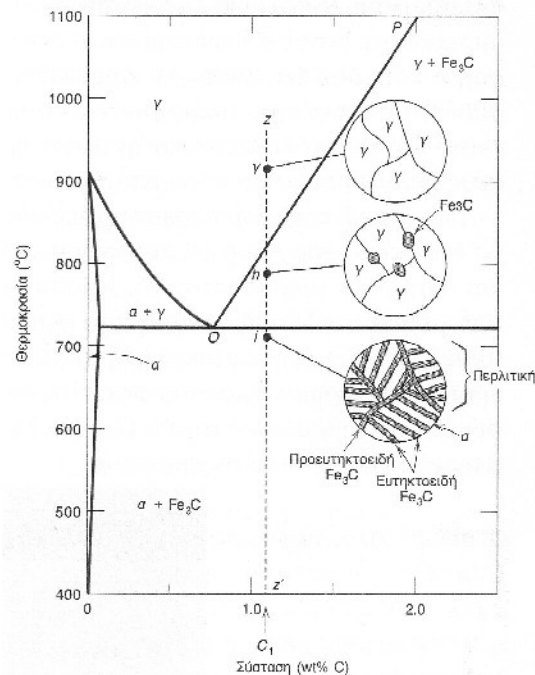
Στο Σχήμα 9.5 παρουσιάζεται η φερριτο-περλιτική δομή ενός χάλυβα με υποευτηκτοειδή σύσταση, 0.4% κ.β. C. Στη μικροφωτογραφία φαίνονται οι κόκκοι περλίτη και οι κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη.



Σχήμα 9.5: Μικροφωτογραφία ενός υποευτηκτοειδούς χάλυβα 0.4% κ.β. C, όπου φαίνεται η μικροδομή του αποτελούμενη από εναλλασσόμενα περλίτη και προευτηκτοειδή φερρίτη. Μεγέθυνση x200.

Αντίστοιχα, καθώς ένας χάλυβας με υπereυτηκτοειδή σύσταση, του οποίου η περιεκτικότητα σε άνθρακα βρίσκεται μεταξύ 0.8 και 2.0 % κ.β. C, ψύχεται η γ-φάση μετασχηματίζεται σε γ και Fe_3C μόλις το κράμα φθάσει στη διαφασική περιοχή $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$. Καθώς ο χάλυβας φθάνει στην ευτηκτοειδή θερμοκρασία, η παραμένουσα γ φάση έχει την

ευτηκτοειδή σύσταση και μετασχηματίζεται σε περλίτη. Συνεπώς σχηματίζεται μια δομή που αποτελείται από περλίτη και προευτηκτοειδή σεμεντίτη (Σχήμα 9.6).

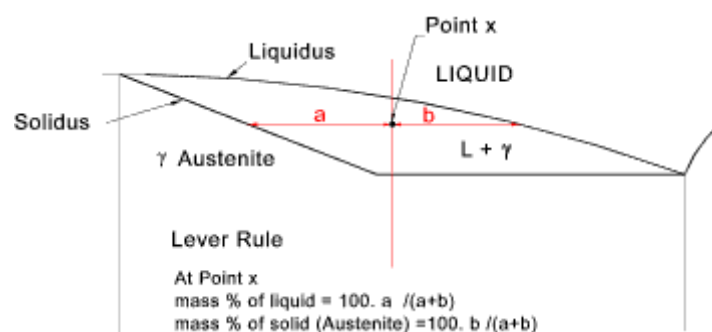


Σχήμα 9.6: Σχηματική αναπαράσταση των μικροδομών κατά την απόψυξη ενός χάλυβα με υπερευτηκτοειδή σύσταση.

9.3 ΚΑΝΟΝΑΣ ΤΟΥ ΜΟΧΛΟΥ

Ο προσδιορισμός των σχετικών ποσοτήτων των φάσεων σε οποιαδήποτε διφασική περιοχή πραγματοποιείται με την εφαρμογή του κανόνα του μοχλού.

Στο Σχήμα 9.7 παρουσιάζεται ο υπολογισμός των σχετικών ποσοτήτων των φάσεων γ (ωστενίτης) και L (υγρή φάση) σημείου χ στην διφασική περιοχή L+γ.



Σχήμα 9.7: Τμήμα του διαγράμματος φάσης Fe-Fe₃C, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των σχετικών ποσοτήτων των φάσεων γ (ωστενίτης) και L (υγρή φάση).

Εφαρμόζοντας τον κανόνα του μοχλού για το ευτηκτοειδές σημείο (0.80% κ.β. C στους 723°C, Σχήμα 9.1) έχουμε:

$$\begin{aligned} \text{κ.β.\% φερρίτης} &= 100(6.67-0.8)/(6.67-0.025)=88\% \\ \text{κ.β.\% σεμεντίτης} &= 100(0.8-0.025)/(6.67-0.025)=12\% \end{aligned}$$

9.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Fe-C.

Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στη μικροδομή και στις ιδιότητες των χαλύβων είναι πολύ σημαντική. Παρουσία κραματικών στοιχείων το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων σιδήρου-άνθρακα παραμορφώνεται, καθώς διευρύνονται ή συρρικνώνονται κάποιες από τις περιοχές του διαγράμματος. Ανάλογα με την επίδραση τους στη σταθεροποίηση των διάφορων φάσεων του διαγράμματος διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **γ-φερρογόνα**

Είναι τα στοιχεία που διευρύνουν την περιοχή του ωστενίτη, ελαττώνοντας τις θερμοκρασίες μετασχηματισμών A_1 και A_3 . Τέτοια στοιχεία είναι το Mn, το Ni και το Co. Σε υψηλές περιεκτικότητες σταθεροποιούν τον ωστενίτη σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

- **α-φερρογόνα**

Είναι τα στοιχεία που διευρύνουν τη περιοχή του φερρίτη αυξάνοντας τις θερμοκρασίες μετασχηματισμών. Τέτοια στοιχεία είναι: Cr, Si, Mo, Cu, W, V, Al, Ti, Nb.

- **Καρβιδιογόνα στοιχεία**

Είναι τα στοιχεία που έχουν την τάση δημιουργίας καρβιδίων. Τέτοια στοιχεία είναι τα ακόλουθα: Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Ti.

- **Γραφιτίζοντα στοιχεία**

Είναι τα στοιχεία που προκαλούν διάσπαση του σεμεντίτη σε σίδηρο και γραφίτη. Γενικώς εμποδίζουν τη δημιουργία των καρβιδίων. Τέτοια στοιχεία είναι: Si, Ni, Al.

- **Επίδραση στον ευτηκτοειδή μετασχηματισμό**

Η προσθήκη διάφορων κραματικών στοιχείων, όπως Ti, Mo, Si, Mn, Cr, Ni, κλπ. έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του ευτηκτοειδούς σημείου και της σύστασής του.

Η επίδραση των διάφορων κραματικών στοιχείων στη δομή και στις ιδιότητες των χαλύβων συνοψίζεται στον Πίνακα 12.3, Κεφ. 12.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

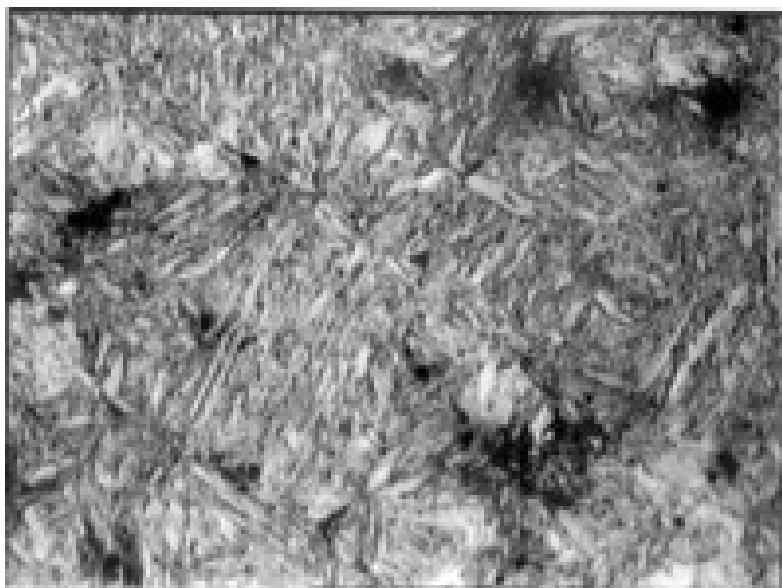
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΔΟΜΗΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

10.1 ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

Εκτός των ήδη αναφερθέντων μετασχηματισμών δηλ. του περλιτικού και του λεδεμβουριτικού, υπάρχει ένα ακόμη είδος μετασχηματισμού, που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην θερμική επεξεργασία των χαλύβων. Αυτός είναι ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός παρατηρήθηκε για πρώτη φορά κατά τη βίαια απόψυξη ωστενιτοποιημένου χάλυβα ($T > A_{c3}$ και A_{cm}), δηλαδή βαφή. Οφείλει το όνομά του στο κυριότερο συστατικό των βαμμένων χαλύβων, του μαρτενσίτη. Τόσο ο περλιτικός (ευτηκτοειδής) όσο και ο λεδεμβουριτικός μετασχηματισμός (ευτηκτικός) λαμβάνουν χώρα κατά την αργή απόψυξη ενός κράματος Fe-C σε στερεά κατάσταση. Περιλαμβάνουν διαδικασίες διάχυσης και χαρακτηρίζονται από πυρηνοποίηση και ανάπτυξη των νέων θερμοδυναμικά σταθερών φάσεων (φερρίτης, περλίτης, σεμεντίτης, λεδεμβουρίτης).

Οι χάλυβες, που έχουν προέλθει από την αργή απόψυξη ενός ωστενιτοποιημένου κράματος, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αποτελούνται από ένα μίγμα φερρίτη, περλίτη και σεμεντίτη, η αναλογία του οποίου εξαρτάται από την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα. Η ταχύτητα της απόψυξης είναι πολύ μικρή, ώστε να δοθεί αρκετός χρόνος στο κράμα για να πραγματοποιηθούν ανακατανομές ατόμων, με τη βοήθεια της διάχυσης, προκειμένου να σχηματισθούν οι νέες φάσεις με τρόπο ομαλό. Ως αποτέλεσμα προκύπτει ένα χάλυβας θερμοδυναμικά σταθερός και μαλακός.

Εάν η απόψυξη του ωστενιτοποιημένου χάλυβα λάβει χώρα βίαια και με μεγάλη ταχύτητα έως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε σχηματίζεται μια διαφορετική κρυσταλλική δομή, ο μαρτενσίτης. Ο μαρτενσίτης μπορεί να έχει δυο διαφορετικές μικροδομές, τη βελονοειδή και την πλακοειδή. Οι βελόνες ή τα πλακίδια είναι σκληρά και εύθραυστα, έχουν τυχαίο προσανατολισμό, που ενώ μπορεί να βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους ποτέ δεν αλληλοδιακόπτονται. (Σχήμα 10.1). Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι μια διεργασία χωρίς διάχυση και οι κρύσταλλοί του αναπτύσσονται κατά ένα ακαριαίο τρόπο ($\sim 10^{-7}$ s). Οι κρύσταλλοι του μαρτενσίτη είναι συνδεδεμένοι με το κρυσταλλικό πλέγμα και αναπτύσσονται σε επιλεγμένα επίπεδα και διευθύνσεις, έτσι ώστε να προκληθεί η μικρότερη δυνατή παραμόρφωση του πλέγματος. Λόγω της ξαφνικής απόψυξης, ο άνθρακας που βρίσκεται στο πλέγμα του ωστενίτη, δεν έχει τη δυνατότητα να απομακρυνθεί από το πλέγμα του νεοσχηματιζόμενου φερρίτη μέσω μηχανισμών διάχυσης, αλλά παγιδεύεται μέσα στο πλέγμα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η διαλυτότητα του άνθρακα στο φερρίτη είναι πολύ μικρότερη από τη διαλυτότητα του στον ωστενίτη, συμπεραίνεται ότι ο μαρτενσίτης είναι φερρίτης υπερκορεσμένος σε άνθρακα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής αστάθειας. Η περίσσεια του άνθρακα στρεβλώνει το κρυσταλλικό πλέγμα του φερρίτη, επιμηκύνοντας το πλέγμα κατά μήκος μιας διεύθυνσης, της c , με ταυτόχρονη μείωση στις άλλες δυο διευθύνσεις, μετατρέποντας το κυβικό χωροκεντρωμένο σε τετραγωνικό χωροκεντρωμένο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη



Σχήμα 10.1: Μικροφωτογραφία της δομής του μαρτενσίτη. Χάλυβας 0.35% κ.β C, απόψυξη σε νερό από 870°C. (<http://en.wikipedia.org>).

υψηλών εσωτερικών μηχανικών καταπονήσεων. Αφού ο μαρτενσίτης είναι φάση μη ισορροπίας δεν εμφανίζεται στο διάγραμμα άνθρακα-σιδήρου.

Ο μαρτενσίτης έχει μικρότερη πυκνότητα από τον ωστενίτη και συνεπώς κατά το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό υπάρχει μεταβολή του όγκου. Η μετασχηματισμένη περιοχή της ύλης παρουσιάζει μια αύξηση ~ 3% κ.ο.

Από όλες τις μικροδομές του χάλυβα, ο μαρτενσίτης είναι η πιο σκληρή, ανθεκτική αλλά και η πιο ψαθυρή μικροδομή. Προσδίδει στο χάλυβα αυξημένη σκληρότητα, υψηλότερη μέγιστη αντοχή και όριο διαρροής, που συνοδεύονται όμως από χαμηλή δυσθραυστότητα και έλλειψη πλαστικότητας. Σε αντίθεση με τους περλιτικούς χάλυβες, η σκληρότητα του μαρτενσίτη δεν θεωρείται ότι οφείλεται στη μικροδομή του. Αποδίδεται στην αποτελεσματική παρεμπόδιση της κίνησης των διαταραχών από τα άτομα παρεμβολής του άνθρακα, καθώς και στο μικρό αριθμό συστημάτων ολίσθησης, κατά μήκος των οποίων κινούνται οι διαταραχές, της χωροκεντρωμένης τετραγωνικής δομής.

Είναι αξιοσημείωτο ότι ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός δεν απαντάται μόνο στα κράματα σιδήρου-άνθρακα. Παρουσιάζεται και σε άλλα μέταλλα όπως κράματα νικελίου, χαλκού και σιδήρου καθώς και σε όλα τα αλλοτροπικά μέταλλα ό-πως το κοβάλτιο, το τιτάνιο, το ζirkόνιο και το λίθιο.

Συγκρίνοντας το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό με τους μετασχηματισμούς λόγω διάχυσης παρατηρούνται οι παρακάτω ιδιαιτερότητες:

- Ο όγκος του μετασχηματισθέντος υλικού εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και όχι από το χρόνο.
- Διατηρείται αμετάβλητη η χημική σύσταση της αρχικής φάσης, λόγω απουσίας του μηχανισμού της διάχυσης, με συνέπεια τα άτομα να μην έχουν χρόνο να μετακινηθούν και να παραμένουν στις θέσεις τους.
- Η ταχύτητα μετασχηματισμού είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και πραγματοποιείται ακόμη και σε κρυοστατικές συνθήκες (4K).
- Τα άτομα μετακινούνται σε μικρές αποστάσεις, της τάξης των ενδοατομικών αποστάσεων. Στους μετασχηματισμούς λόγω διάχυσης, η μετακίνηση είναι της τάξης 1-10⁶ της ενδοατομικής απόστασης.

- Τα άτομα μετακινούνται διαδοχικά και με ακριβή ακολουθία. Η μετακίνηση λόγω διάχυσης είναι τυχαία.

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός εκδηλώνεται κατά την απόψυξη, όταν ο ωστενίτης φθάσει τη θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_s) και αποσταθεροποιηθεί. Σε μια σταθερή θερμοκρασία κάτω από την M_s , ένα ποσοστό της ωστενιτικής φάσης μετασχηματίζεται ακαριαία σε μαρτενσίτη. Προκειμένου να συνεχισθεί ο μετασχηματισμός θα πρέπει να συνεχισθεί η ελάττωση της θερμοκρασίας. Ο μετασχηματισμός συνεχίζεται με σχηματισμό του μαρτενσίτη σε νέες περιοχές και όχι με ανάπτυξη των προηγούμενα σχηματισθέντων περιοχών, μέχρι τη θερμοκρασία τέλους του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_f). Μαρτενσίτης μπορεί επίσης να σχηματισθεί με την εφαρμογή τάσης. Αυτή η ιδιότητα συχνά εφαρμόζεται σε ειδικούς χάλυβες, γνωστούς ως TRIP (transformation induced plasticity steels). Επομένως μαρτενσίτης μπορεί να σχηματισθεί είτε με θερμική επεξεργασία είτε με εφαρμογή τάσης.

Προκειμένου να επιτύχουμε μαρτενσιτική βαφή θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω δυο όροι:

- Η ταχύτητα απόψυξης (V) να είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη ταχύτητα απόψυξης (V_c), χαρακτηριστική για κάθε χάλυβα ($V > V_c$).
- Η θερμοκρασία του μέσου απόψυξης να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού M_s .

Όταν η θερμοκρασία του μέσου απόψυξης είναι μικρότερη ή ίση της θερμοκρασίας του τέλους του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού M_f παρατηρείται πλήρης μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Ενώ στην περίπτωση που η θερμοκρασία του τέλους του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού M_f είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία του μέσου απόψυξης (για πολλούς υψηλά κραματωμένους χάλυβες ισχύει $M_f < 0^\circ\text{C}$), τότε παρατηρείται το φαινόμενο του ημιτελούς μετασχηματισμού και της παραμονής ενός ασταθούς ποσοστού μη μετασχηματισμένης ωστενιτικής φάσης.

Αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας του μαρτενσίτη, τη μεγαλύτερη στρέβλωση του κρυσταλλικού πλέγματος, τη δημιουργία μεγαλύτερων εσωτερικών τάσεων αλλά και τη μείωση της θερμοκρασίας έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού M_s . Επομένως υψηλό ποσοστό άνθρακα ($>0.8\%$ κ.β C) έχει ως αποτέλεσμα τον ημιτελή μετασχηματισμό του ωστενίτη και τη μείωση του τελικού ποσοστού μαρτενσίτη στο χάλυβα.

Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες απόψυξης σχηματίζεται μια διαφορετική κρυσταλλική δομή μεταξύ του περλίτη και του σεμεντίτη, ο μπαινίτης. Ο μπαινίτης αποτελεί συστατικό των χαλύβων και ανάλογα με τη θερμοκρασία και τις συνθήκες σχηματισμού του, η δομή του μπαινίτη καθώς και ο μπαινιτικός μετασχηματισμός παρουσιάζουν εντονότερα τα χαρακτηριστικά του περλίτη ή του μαρτενσίτη και των μετασχηματισμών τους, αντίστοιχα. Ο μπαινίτης που σχηματίζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες ονομάζεται ανώτερος μπαινίτης, ενώ ο μπαινίτης που σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ονομάζεται κατώτερος μπαινίτης. Αυτοί οι τύποι μπαινίτη, όπως και ο περλίτης, αποτελούνται από φάσεις φερρίτη και σεμεντίτη, η διευθέτηση των οποίων είναι πολύ διαφορετική από την εναλασσόμενη φυλλοειδή δομή που συναντάται στον περλίτη. Ο μπαινίτης διαθέτει υψηλή μηχανική αντοχή, σε συνδυασμό με καλή ολκιμότητα και υψηλή αντοχή σε κόπωση. Η μηχανική του αντοχή οφείλεται στη λεπτή διασπορά των κατακρημνισμάτων Fe_3C .

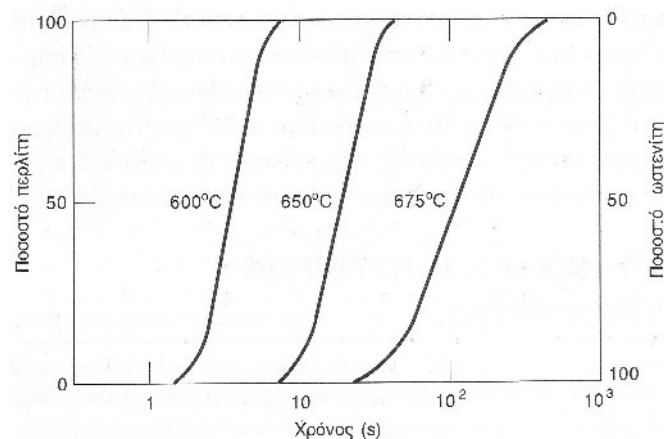
Ένα κοινό παράδειγμα εμφάνισης της μπαινιτικής δομής αποτελεί ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος. Κατά τη βαφή των ράβδων οπλισμού, στη εξωτερική επιφάνεια

σχηματίζεται μαρτενσίτης (ταχεία απόψυξη), αμέσως μετά μπαινίτης (ενδιάμεση ταχύτητα απόψυξης) και στο κέντρο φερρίτης-περλίτης (αργή απόψυξη).

10.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ TTT (Time-Temperature-Transformation)

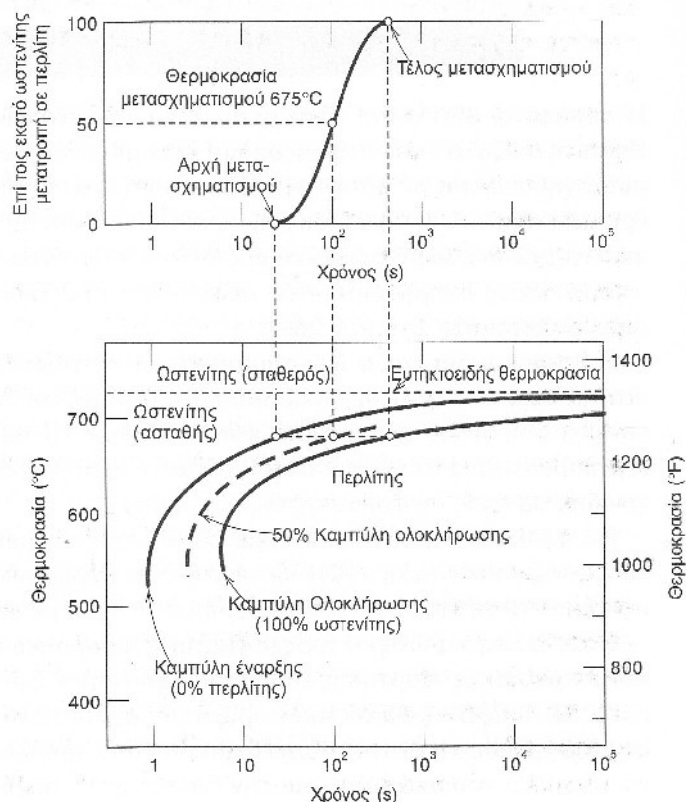
Τα διαγράμματα ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού, τα οποία είναι επίσης γνωστά ως μετασχηματισμοί χρόνου-θερμοκρασίας ή TTT (time-temperature-transformations) είναι διαγράμματα θερμοκρασίας συναρτήσει χρόνου (συνήθως σε λογαριθμική κλίμακα). Είναι χρήσιμα για την κατανόηση της κινητικής του μετασχηματισμού ενός κράματος, το οποίο αποψύχεται σε σταθερή θερμοκρασία. Στην περίπτωση των χαλύβων, τα διαγράμματα TTT παρουσιάζουν το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε άλλες φάσεις, γεγονός που μας επιτρέπει να καθορίσουμε τη σχέση μεταξύ θερμικής κατεργασίας και ανάπτυξης συγκεκριμένης μικροδομής. Τα διαγράμματα ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού δημιουργούνται από μετρήσεις του % ποσοστού μετασχηματισμού της μιας φάσης σε άλλη φάση (π.χ. του ωστενίτη σε περλίτη) συναρτήσει του λογαρίθμου του χρόνου (διάγραμμα τύπου-S).

Στο Σχήμα 10.2 παρουσιάζονται τρεις καμπύλες τύπου-S, που αναφέρονται στο % ποσοστό του μετασχηματισμού ωστενίτη σε περλίτη, ενός χάλυβα ευτηκτοειδούς σύστασης συναρτήσει του λογαρίθμου του χρόνου, σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες 600, 650 και 675°C.



Σχήμα 10.2: Επι τοις εκατό (%) ποσοστό μετασχηματισμού ωστενίτη σε περλίτη ενός χάλυβα ευτηκτοειδούς σύστασης (0.8% κ.β. C), συναρτήσει του λογαρίθμου του χρόνου, σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες 600, 650 και 675°C.

Ο τρόπος δημιουργίας των TTT διαγραμμάτων από τις καμπύλες τύπου-S παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.3. Για τη δημιουργία τους είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα σύνολο καμπυλών τύπου-S για όλη την περιοχή θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα ο μετασχηματισμός φάσεων.



Σχήμα 10.3: Δημιουργία ενός διαγράμματος ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού TTT από ένα διάγραμμα του % ποσοστού μετασχηματισμού του ωστενίτη σε περλίτη συναρτήσει του λογαρίθμου του χρόνου, ενός χάλυβα.

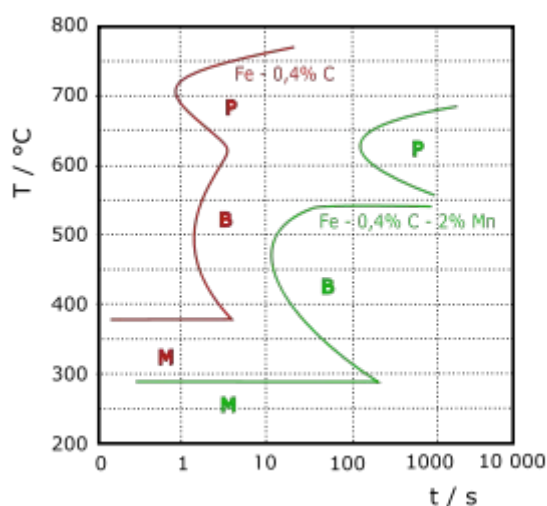
Για να κατανοηθεί το παραπάνω διάγραμμα, πρέπει να προσέξουμε ότι η ευτηκτοειδής θερμοκρασία (727°C) παρίσταται με μια οριζόντια γραμμή. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτή τη θερμοκρασία για όλους τους χρόνους υπάρχει μόνο σταθερός ωστενίτης. Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε περλίτη συμβαίνει μόνον όταν το κράμα ψυχθεί σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της ευτηκτοειδούς θερμοκρασίας. Οι συνεχείς καμπύλες που αντιστοιχούν στην έναρξη και το πέρας του μετασχηματισμού είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους και προσεγγίζουν την ευτηκτοειδή θερμοκρασία ασυμπτωματικά. Στο αριστερό τμήμα της καμπύλης έναρξης του μετασχηματισμού υπάρχει μόνο ωστενίτης (ο οποίος είναι ασταθής), ενώ στο δεξιό τμήμα της καμπύλης περάτωσης υπάρχει μόνο περλίτης. Στα ενδιάμεσα τμήματα ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε περλίτη βρίσκεται σε εξέλιξη και επομένως υπάρχουν και οι δυο δομές. Η διακεκομμένη καμπύλη αντιστοιχεί στο 50% του μετασχηματισμού.

Ο απαιτούμενος χρόνος για την έναρξη και το τέλος του μετασχηματισμού εξαρτάται από τη θερμοκρασία απόψυξης. Σε θερμοκρασίες λίγο μικρότερες της ευτηκτοειδούς για το 50% του μετασχηματισμού απαιτείται πολύς χρόνος, της τάξης των 10^5s , ενώ σε θερμοκρασίες απόψυξης πολύ χαμηλότερες της ευτηκτοειδούς π.χ στους 540°C , απαιτούνται μόλις 3s.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα διάγραμμα TTT ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού είναι έγκυρο μόνο για συγκεκριμένη σύσταση ενός κράματος και ότι για διαφορετικές συγκεντρώσεις τα διαγράμματα θα έχουν διαφορετική μορφή. Για παράδειγμα, το παραπάνω διάγραμμα είναι έγκυρο μόνο για χάλυβα ευτηκτοειδούς σύστασης.

Ένας πλήρης διάγραμμα TTT, εκτός από τον περλιτικό μετασχηματισμό, περιγράφει επίσης το μπαινιτικό καθώς και το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό.

Η παρουσία κραματικών στοιχείων όπως Cr, Ni, Mo, Mn και W μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στη θέση και τη μορφή των ισοθερμοκρασιακών διαγραμμάτων TTT. Στο Σχήμα 10.4 παρουσιάζονται τα ισοθερμοκρασιακά διαγράμματα για δυο χάλυβες: έναν με 0.4% κ.β. C και έναν με 0.4% κ.β. C + 2.0% κ.β. Mn. Η προσθήκη Mn έχει ως συνέπεια την μετατόπιση της «προεξοχής» της μετασχηματισμού ωστενίτη σε περλίτη/μπαϊνίτη σε μεγαλύτερους χρόνους, τη μείωση της θερμοκρασίας έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού καθώς και δημιουργίας μιας ανεξάρτητης «προεξοχής» μπαϊνίτη.



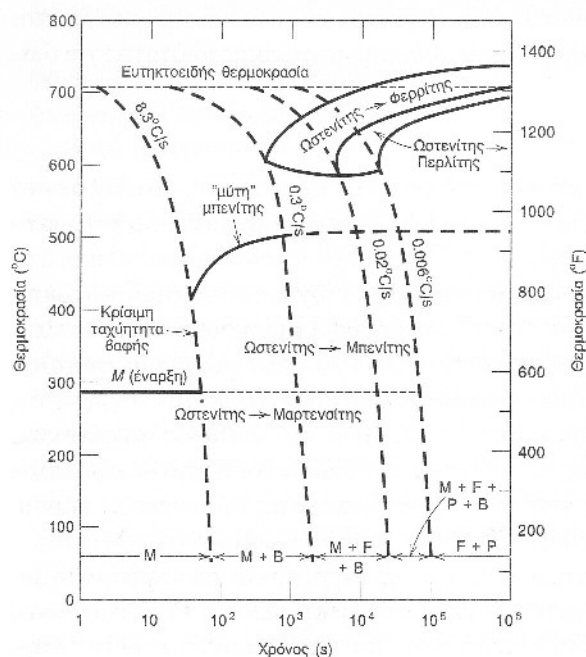
Σχήμα 10.4: TTT διάγραμμα για δυο χάλυβες: (1) 0.4% κ.β. C , (2) 0.4% κ.β. C + 2.0% κ.β. Mn. P=περλίτης, B=μπαϊνίτης και M=μαρτενσίτης.

10.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ CCT (Cooling Continuous Transformation)

Στις βιομηχανικές κατεργασίες, για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους, οι μετασχηματισμοί των κραμάτων και ιδιαίτερα των χαλύβων, επιτυγχάνονται κατά τη διάρκεια μιας συνεχούς απόψυξης περισσότερο ή λιγότερο ταχείας. Οι μετασχηματισμοί δομής κατά τη συνεχή απόψυξη ενός χάλυβα από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, είναι δυνατό να καταγραφούν βάσει μετρήσεων διαστολομετρίας, για διαφορετικές ταχύτητες απόψυξης. Τα σημεία έναρξης και τέλους των διάφορων μετασχηματισμών, καθώς το ποσοστό του μετασχηματισθέντος ωστενίτη, για κάθε τύπο χάλυβα συγκεντρώνονται σε ένα διάγραμμα, το οποίο καλείται συνεχές διάγραμμα CCT (Continuous Cooling Transformation). Τα διαγράμματα CCT χρησιμεύουν για την επιλογή της ταχύτητας απόψυξης, σε μια θερμική κατεργασία, έτσι ώστε το μέταλλο να αποκτήσει την απαιτούμενη τελική δομή.

Στο Σχήμα 10.5 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα μετασχηματισμού συνεχούς ψύξης για ένα κραματοχάλυβα (4340). Επίσης παρουσιάζονται διάφορες καμπύλες απόψυξης.

Ανάλογα με τις απαιτούμενες τελικές ιδιότητες επιλέγεται μια κατάλληλη ταχύτητα απόψυξης, που έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό συγκεκριμένης μικροδομής, που αντιστοιχεί στις επιθυμητές ιδιότητες.



Σχήμα 10.5: Διάγραμμα μετασχηματισμού συνεχούς απόψυξης, CCT για τον κραματωμένο χάλυβα 4340 και σε υπέρθεση διάφορες καμπύλες απόψυξης. Παρουσιάζεται η εξάρτηση της τελικής μικροδομής από τους μετασχηματισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την απόψυξη.

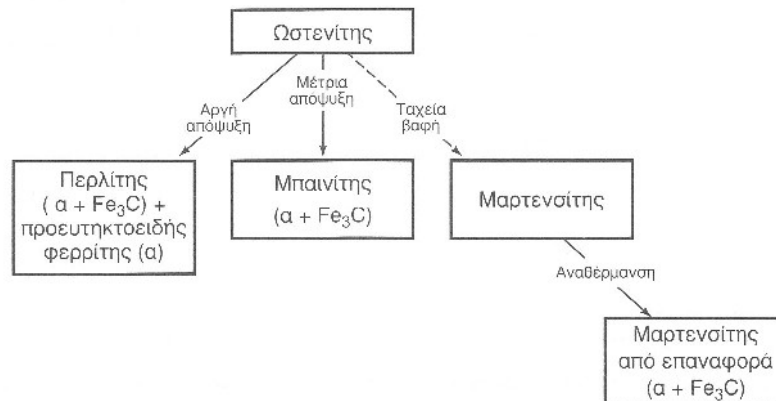
Για παράδειγμα, η επιλογή μιας ταχύτητας απόψυξης μεταξύ των ταχυτήτων 0.02°C/s και 0.006°C/s οδηγεί σε μια μικροδομή που αποτελείται από φερρίτη (F), περλίτη (P), μπαινίτη (M) και μαρτενσίτη. Η μικροδομή μπορεί ακόμη να περιέχει και ασταθή ωστενίτη, ανάλογα με το εάν έχει ξεπεραστεί ή όχι η θερμοκρασία τέλους του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, M_s . Στα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται σε μονάδες θερμικών κατεργασιών, σε κάθε σημείο τομής της καμπύλης απόψυξης με τις καμπύλες που ορίζουν την έναρξη και περάτωση των μετασχηματισμών, αναγράφεται επίσης το ποσοστό της κάθε φάσης, με συνέπεια να είναι γνωστή η ποσοστιαία σύσταση που αντιστοιχεί σε κάθε καμπύλη απόψυξης. Ακόμη στο τέλος κάθε καμπύλης απόψυξης αναγράφεται η τιμή της σκληρότητας, που χρησιμεύει ως μέτρο πρόβλεψης και σύγκρισης των μηχανικών ιδιοτήτων. Επομένως, κάθε μια ταχύτητα απόψυξης οδηγεί σε χάλυβα με διαφορετική σύνθεση φάσεων και διαφορετική μηχανική συμπεριφορά. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει επίσης να τονισθεί ότι μια ταχεία απόψυξη έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός λεπτόκοκκου υλικού, με υψηλή μηχανική αντοχή και ικανοποιητική ολκιμότητα, ενώ αντιθέτως μια απόψυξη με αργό ρυθμό οδηγεί σε χονδρόκοκκο υλικό με μειωμένες μηχανικές ιδιότητες.

Η κρίσιμη ταχύτητα απόψυξης ή βαφής είναι εκείνη η ταχύτητα, που απαιτείται για 100% μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Επομένως στο διάγραμμα είναι εκείνη η ταχύτητα απόψυξης που εφάπτεται στην αριστερή πλευρά της «προεξοχής» του διαγράμματος.

Η παρουσία του άνθρακα και άλλων κραματικών στοιχείων, όπως Cr, Ni, Mo, Mn, Si και W μετατοπίζουν την προεξοχή του περλίτη και του μπαινίτη προς τα δεξιά, με συνέπεια την ελάττωση της κρίσιμης ταχύτητας βαφής, έτσι ώστε η θερμική κατεργασία να είναι πραγματοποιήσιμη πρακτικά. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι η κρίσιμη ταχύτητα απόψυξης του καθαρού σιδήρου είναι της τάξεως $\sim 10^5^{\circ}\text{C/s}$, ενώ μια μέση τιμή για κοινούς χάλυβες μηχανουργικών κατασκευών είναι $150\text{--}300^{\circ}\text{C/s}$. Αποτέλεσμα αυτής της μετατόπισης είναι ο σχηματισμός μαρτενσίτη με χαμηλότερες ταχύτητες απόψυξης και δυνατότητα ολόσωμης βαφής των εξαρτημάτων δηλ. σχηματισμού μαρτενσίτη και στον πυρήνα ενός εξαρτήματος.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονισθεί ότι στην πράξη σπάνια χρησιμοποιείται ένας βαμμένος χάλυβας. Μετά τη βαφή οι χάλυβες είναι σκληροί, ψαθυροί και εύθραυστοι. Για αυτό το λόγο, η διαδικασία βαφής ακολουθείται από τη διαδικασία επαναφοράς (Κεφάλαιο 11), δηλαδή τη θέρμανση του χάλυβα σε κατάλληλη θερμοκρασία, 250-650°C και κατάλληλο χρόνο, ώστε να μειωθεί η σκληρότητα και να αυξηθεί η ολκιμότητα και δυσθραυστότητα του χάλυβα μέχρι κάποιου σημείου συμβιβασμού.

Τέλος, στο Σχήμα 10.6, συνοψίζονται οι δυνατοί μετασχηματισμοί και οι αποκτώμενες μικροδομές κατά την απόψυξη του ωστενίτη. Ο περλίτης, ο μπαινίτης και ο μαρτενσίτης προκύπτουν από κατεργασίες συνεχούς αποψύξεως, ενώ ο μαρτενσίτης από επαναφορά από κατεργασία θέρμανσης σε σταθερή θερμοκρασία.



Σχήμα 10.6: Πιθανοί μετασχηματισμοί των χαλύβων κατά την απόψυξη του ωστενίτη. Τα συνεχή βέλη συμβολίζουν μετασχηματισμούς, που περιλαμβάνουν το φαινόμενο της διάχυσης, ενώ το διακεκομμένο βέλος υποδεικνύει το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, που συμβαίνει χωρίς διάχυση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα περισσότερα μεταλλικά υλικά σε κάποιο στάδιο της παραγωγής τους υφίστανται κάποιο είδος θερμικής κατεργασίας (heat treatment). Οι θερμικές κατεργασίες εκτελούνται για την επίτευξη μηχανικών ιδιοτήτων που είναι απαραίτητες σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Μια θερμική κατεργασία εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία, όσο και από το χρόνο παραμονής σε αυτή τη θερμοκρασία.

Οι κυριότερες θερμικές κατεργασίες οι οποίες θα αναπτυχθούν στη συνέχεια, είναι οι κατεργασίες ανόπτησης, οι θερμικές κατεργασίες των χαλύβων και η σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης (αλουμίνιο).

11.1 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η εν ψυχρώ πλαστική παραμόρφωση ενός πολυκρυσταλλικού μεταλλικού υλικού, έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της μικροδομής του υλικού και των ιδιοτήτων του, όπως αλλαγή του σχήματος των κόκκων, ανάπτυξη εσωτερικών μηχανικών τάσεων, αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών και αύξηση της σκληρότητας (σκλήρυνση με ενδοτράχυνση). Ακόμη, άλλες ιδιότητες, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η αντίσταση στη διάβρωση μπορούν να τροποποιηθούν ως συνέπεια της πλαστικής παραμόρφωσης.

Ο όρος ανόπτηση (annealing) χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει κάθε θερμική κατεργασία, η οποία συμβάλλει ώστε το μέταλλο να προσεγγίσει την κατάσταση ισορροπίας σε φυσικοχημικό επίπεδο ή σε επίπεδο δομής.

Κάθε θερμική κατεργασία ανόπτησης αποτελείται από τρία στάδια: (1) θέρμανση σε μια καθορισμένη θερμοκρασία, (2) παραμονή σε αυτήν τη θερμοκρασία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, και (3) ήρεμη απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Επειδή κατά την ανόπτηση λαμβάνουν χώρα διεργασίες διάχυσης, αυτή μπορεί να επιταχυνθεί με αύξηση της θερμοκρασίας.

Υπάρχουν δυο γενικές κατηγορίες ανόπτησης των μετάλλων και κραμάτων: η ανόπτηση αποκατάστασης και η ανόπτηση ανακρυστάλλωσης.

11.1.1 ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η ανόπτηση αποκατάστασης (recovery annealing) είναι μια θερμική κατεργασία κατά την οποία αποκαθίστανται ορισμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες που είχαν μεταβληθεί κατά τη ψυχρή κατεργασία του μετάλλου.

Η αποκατάσταση των μηχανικών ιδιοτήτων εκτελείται σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία, έτσι ώστε να επιταχυνθεί η διάχυση, αλλά πάντοτε σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του υλικού.

Μια πρώτη συνέπεια της ανόπτησης αποκατάστασης είναι η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υλικού, λόγω της μείωσης των σημειακών ατελειών της κρυσταλλικής δομής.

Κατά την ανόπτηση αποκατάστασης δεν υπάρχει σημαντική μείωση της πυκνότητας διαταραχών, αλλά απομάκρυνση και αναδιάταξή τους σε θέσεις χαμηλότερης ενέργειας.

Η θερμική κατεργασία που πραγματοποιείται σε θερμοκρασία χαμηλότερη της θερμοκρασίας αποκατάστασης και σκοπός της είναι η εξάλειψη των παραμενουσών τάσεων, που προήλθαν είτε από κατεργασίες πλαστικής παραμόρφωσης (κατεργασία με εργαλειομηχανές και λείανση) είτε από μη ομοιόμορφη ψύξη, καλείται αποτατική ανόπτηση.

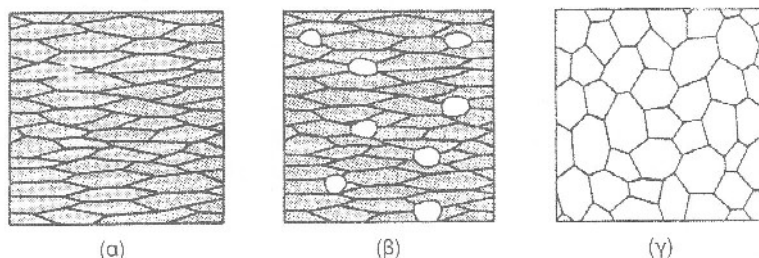
11.1.2 ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΑΝΑΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗΣ

Η ανόπτηση ανακρυστάλλωσης (recrystallization annealing) είναι μια θερμική κατεργασία που εκτελείται σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας αποκατάστασης. Εφαρμόζεται προκειμένου να αναιρεθούν τα αποτελέσματα της ψυχρηλασίας. Χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη των κρυστάλλων που υπέστησαν παραμόρφωση και την ανάπτυξη νέας κρυσταλλικής δομής.

Το φαινόμενο της ανακρυστάλλωσης συνοδεύεται από σημαντική μείωση της πυκνότητας των διαταραχών που σχηματίστηκαν κατά την ενδοτράχυνση του υλικού, γιατί οι διαταραχές απορροφώνται από τα όρια των νέων κόκκων.

Κατά τη διάρκεια της ανακρυστάλλωσης, εμφανίζονται αρχικά οι πυρήνες κρυστάλλωσης, οι οποίοι αναπτύσσονται ισοαξονικά μέχρι που να συναντήσουν ο ένας τον άλλο και ο αρχικός ιστός να αντικατασταθεί από ένα νέο, χωρίς παραμόρφωση κόκκων και με χαμηλή πυκνότητα διαταραχών.

Στο Σχήμα 11.1 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία της ανακρυστάλλωσης.



Σχήμα 11.1: Σχηματική αναπαράσταση τη ανακρυστάλλωσης: (α) Ανισότροπη δομή ψυχρηλατημένου μετάλλου, (β) Σχηματισμός πυρήνων νέων κόκκων, (γ) Σχηματισμός ισοαξονικών κόκκων μετά την πλήρη ανακρυστάλλωση του μετάλλου (ισότροπη δομή).

Το στάδιο της ανακρυστάλλωσης περατώνεται τη στιγμή της "συνάντησης" των ορίων των κόκκων, το οποίο ακολουθείται από το στάδιο της ανάπτυξης των κόκκων.

Ακόμη σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η διαδικασία της αποκατάστασης παρατηρείται ως το πρώτο στάδιο της διαδικασίας της ανακρυστάλλωσης.

Ως θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης ορίζεται η θερμοκρασία, στην οποία η ανακρυστάλλωση ολοκληρώνεται σε ορισμένο χρόνο (συνήθως μια ώρα).

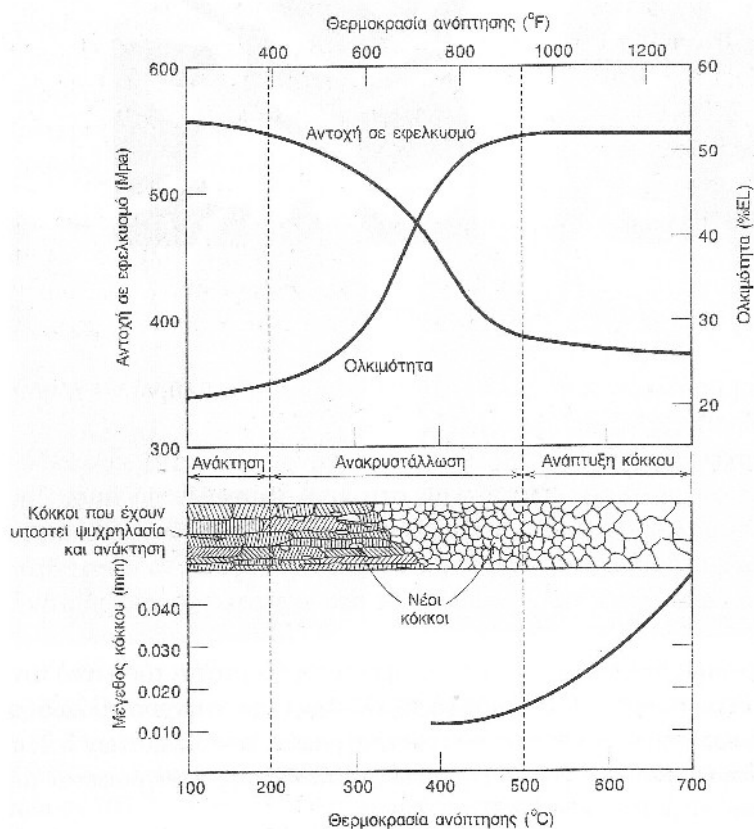
Η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης τυπικά είναι μεταξύ του 1/3 και 1/2 της απόλυτης θερμοκρασίας τήξης (T_m) ενός μετάλλου ή κράματος. Εξαρτάται από

παραμέτρους όπως, το ποσοστό της προηγθείσας ψυχρηλασίας και της καθαρότητας του μετάλλου.

Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της ψυχρηλασίας, τόσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, προσεγγίζοντας μια σταθερή ή οριακή τιμή σε υψηλές παραμορφώσεις.

Η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης είναι τόσο χαμηλότερη, όσο η καθαρότητα του μετάλλου είναι μεγαλύτερη. Η κραματοποίηση αυξάνει τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης. Ενώ για καθαρά μέταλλα η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης είναι $0.3T_m$, για μερικά εμπορικά κράματα μπορεί να φθάσει $0.7 T_m$.

Στο Σχήμα 11.2 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας ανόπτησης στις μηχανικές ιδιότητες, αντοχή σε εφελκυσμό και την ολκιμότητα, ενός κράματος ορείχαλκου που έχει υποστεί ψυχρηλασία. Ακόμη φαίνονται οι δομές των κόκκων που συναντιούνται στα διάφορα στάδια της διαδικασίας, καθώς και η μεταβολή του μεγέθους των κόκκων σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ανόπτησης. Η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του ορείχαλκου είναι $\sim 450^\circ\text{C}$.



Σχήμα 11.2: Μεταβολή της αντοχής σε εφελκυσμό και της ολκιμότητας σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ανόπτησης ενός κράματος ορείχαλκου. Ακόμη παρουσιάζεται η μεταβολή του μεγέθους των κόκκων σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία ανόπτησης. Σχηματική παρουσίαση των δομών των κόκκων κατά τη διάρκεια των σταδίων της ανάκτησης (αποκατάστασης), ανακρυστάλλωσης και ανάπτυξης των κόκκων.

Η διαδικασία της πλαστικής παραμόρφωσης συχνά πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, με μια διαδικασία που καλείται θερμή κατεργασία διαμόρφωσης (Ενότητα 8.2). Το μέταλλο παραμένει μαλακό και όλκιμο, επειδή δεν υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση και συνεπώς μπορεί να επιτευχθούν μεγάλες παραμορφώσεις.

11.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΩΝ

Οι διάφορες θερμικές κατεργασίες των χαλύβων έχουν σκοπό την αποτελεσματική βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη εξάλειψη των ανομοιογενειών της δομής του υλικού και την επίτευξη συγκεκριμένου συνδυασμού φάσεων, με συγκεκριμένη κοκκομετρία.

Επειδή η αύξηση της σκληρότητας, της αντοχής σε διαρροή και εφελκυσμό συνοδεύεται από μια ελάττωση της τιμής της δυσθραυστότητας και της ολκιμότητας, είναι αναγκαίο να βρεθεί ένας αποδεκτός συνδυασμός μεταξύ αυτών των ιδιοτήτων.

Η θερμική κατεργασία των διάφορων εξαρτημάτων με σκοπό την αύξηση του χρόνου ζωής τους αποτελεί μια από τις πιο συχνές εφαρμογές των θερμικών κατεργασιών.

Πιο συγκεκριμένα από τη θερμική κατεργασία των χαλύβων προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Αύξηση της αντοχής σε κρούση
- Αύξηση της αντοχής σε στρέψη και κάμψη
- Αύξηση της αντοχής σε κόπωση
- Αύξηση της αντοχής σε οξείδωση
- Εξασφάλιση της διαστασιακής σταθερότητας
- Βελτίωση της κατεργασιμότητας

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου θερμικής κατεργασίας ενός εξαρτήματος στηρίζεται σε παραμέτρους, όπως τη γεωμετρία του αντικειμένου, την κατανομή της μάζας του καθώς και τη χημική σύσταση του χάλυβα, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο (περιεκτικότητα άνθρακα και υπόλοιπων κραματικών στοιχείων).

Οι θερμικές κατεργασίες διακρίνονται σε καθαρά θερμικές, σε θερμοχημικές και σε θερμομηχανικές.

Τα κύριο στοιχείο των καθαρά θερμικών κατεργασιών είναι η θέρμανση και η απόψυξη των χαλύβων, χωρίς άλλες συμπληρωματικές εργασίες. Αντιθέτως οι θερμοχημικές κατεργασίες συνοδεύονται από εμπλουτισμό με κάποιο χημικό στοιχείο μέσω του μηχανισμού της διάχυσης, ενώ οι θερμομηχανικές συνοδεύονται από ταυτόχρονη μηχανική κατεργασία πλαστικής παραμόρφωσης.

11.2.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

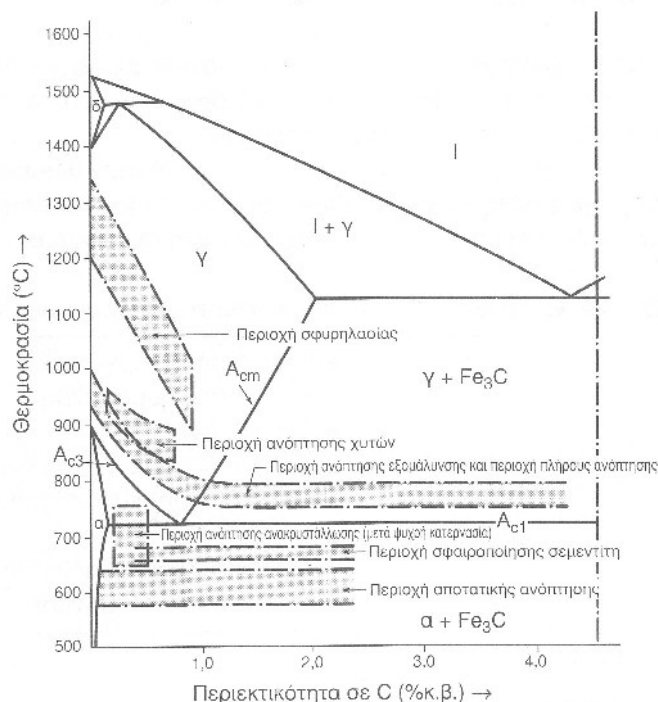
11.2.1.1 Ανοπτήσεις

Οι χάλυβες υποβάλλονται σε αρκετά διαφορετικά είδη ανοπτήσεων προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητές τους.

Στο Σχήμα 11.3 παρουσιάζεται μέρος του διαγράμματος ισορροπίας Fe-Fe₃C, όπου απεικονίζονται οι περιοχές εκτέλεσης των θερμικών κατεργασιών ανόπτησης μη κραματωμένων χαλύβων δηλ. κοινών ανθρακούχων χαλύβων.

Η οριζόντια γραμμή στην ευτηκτοειδή θερμοκρασία, η οποία συμβολίζεται με A_{e1}, οριοθετεί την **κατώτερη κρίσιμη θερμοκρασία**, κάτω από την οποία, σε κατάσταση ισορροπίας, όλος ο ωστενίτης (γ) έχει μετασχηματισθεί σε φερρίτη και σεμεντίτη (α+ Fe₃C). Οι καμπύλες A_{e3} και A_{cm} αναπαριστούν την **ανώτερη κρίσιμη**

Θερμοκρασία για υποευτηκτοειδείς (<0.8% κ.β. C) και υπereυτηκτοειδείς χάλυβες (>0.8% κ.β. C), αντίστοιχα, πάνω από την οποία υπάρχει μόνο η φάση του ωστενίτη.



Σχήμα 11.3: Περιοχή των χάλυβων του διαγράμματος ισορροπίας Fe-Fe₃C, όπου φαίνονται οι περιοχές των θερμικών κατεργασιών ανόπτησης μη κραματομένων χάλυβων.

• Ανόπτηση κατεργασίας

Η ανόπτηση κατεργασίας (process annealing) είναι μια θερμική κατεργασία, στην οποία υποβάλλεται ο χάλυβας προκειμένου να αναιρεθούν οι επιπτώσεις της ψυχρής κατεργασίας (έλαση), δηλαδή, να αυξηθεί η ολκιμότητά του μετάλλου, το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Η εφαρμογή της είναι πολύ κοινή σε διαδικασίες παραγωγής, έτσι ώστε να είναι δυνατή η συνέχιση της πλαστικής παραμόρφωσης χωρίς να επέλθει θραύση ή να απαιτείται η κατανάλωση υπερβολικών ποσών ενέργειας.

Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, είναι δυνατόν να συμβούν αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση.

Η επιφανειακή οξείδωση και η εξανθράκωση αποφεύγονται εάν η θερμοκρασία ανόπτησης παραμείνει χαμηλή ή εάν η διεργασία πραγματοποιηθεί σε προστατευτική (μη οξειδωτική) ατμόσφαιρα.

Επειδή γενικά είναι επιθυμητή η απόκτηση λεπτόκοκκης κρυσταλλικής δομής, η θερμική κατεργασία τερματίζεται εγκαίρως πριν συμβεί σημαντική αύξηση του μεγέθους των κόκκων.

• Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης

Η ανόπτηση ανακρυστάλλωσης (recrystallization annealing) εφαρμόζεται στους χάλυβες που έχουν υποστεί ψυχρή κατεργασία, προκειμένου να εξαιρεθεί ο ιστός της ενδοτράχυνσης (π.χ. σε λαμαρίνες μετά από ψυχρή έλαση). Ο χάλυβας θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία 650 έως 750°C (1...3h) πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσής του, και αποψύχεται ήρεμα και αργά στον αέρα.

- **Ανόπτηση αποκατάστασης**

Η ανόπτηση αποκατάστασης (recovery annealing) πραγματοποιείται για τους ίδιους λόγους που πραγματοποιείται και η ανόπτηση ανακρυστάλλωσης, αλλά η θέρμανση γίνεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, 450 έως 550°C (1...3h). Επιτυγχάνεται μερική μόνο αποκατάσταση ορισμένων φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα.

Η ανόπτηση αποκατάστασης δε μεταβάλλει την κρυσταλλική δομή του χάλυβα.

- **Αποτατική ανόπτηση**

Κατά την αποτατική ανόπτηση (stress relieving, light annealing) ο χάλυβας θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία 580 έως 650°C (1h) και στη συνέχεια ακολουθεί αργή απόψυξη. Στόχος της είναι η εξάλειψη των μηχανικών τάσεων που έχουν συσσωρευθεί στο υλικό κατά τα διάφορα στάδια παραγωγής του (είτε από κατεργασίες πλαστικής παραμόρφωση, π.χ. κατεργασία με εργαλειομηχανές και λείανση, είτε από μη ομοιόμορφη ψύξη π.χ συγκόλληση, χύτευση, είτε από ένα μετασχηματισμό φάσης, όπου η αρχική φάση έχει διαφορετική πυκνότητα από τις παραγόμενες). Η εξάλειψη των παραμενουσών τάσεων πραγματοποιείται μέσω της διάχυσης των ατόμων.

Στην περίπτωση που οι παραμένουσες τάσεις δεν απαλειφθούν είναι δυνατόν να προκληθεί στρέβλωση ή παραμόρφωση του αντικειμένου.

Η αποτατική ανόπτηση όπως και η ανόπτηση αποκατάστασης δε μεταβάλλει την κρυσταλλική δομή του χάλυβα.

- **Ανόπτηση εξομάλυνσης ή ομαλοποίησης**

Πολλές φορές, χάλυβες που έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση, όπως έλαση ή σφυρηλασία αποτελούνται από κόκκους οι οποίοι είναι σχετικά μεγάλοι, έχουν ακανόνιστο σχήμα καθώς και με σημαντική διακύμανση ως προς το μέγεθός τους. Επίσης αντικείμενα από χυτοχάλυβα αποτελούνται μετά τη χύτευση από κόκκους βελονοειδή φερρίτη και περλίτη, δομή που αποδίδει στο χάλυβα ευθραυστότητα.

Προκειμένου να δημιουργηθεί μια ομοιόμορφη, κυτταροειδής και λεπτοκρυσταλλική φερριτοπερλιτική δομή, εφαρμόζεται μια θερμική κατεργασία ανόπτησης που ονομάζεται ανόπτηση εξομάλυνσης (normalizing). Για το σκοπό αυτό, ο χάλυβας θερμαίνεται 30-50°C πάνω της άνω κρίσιμης θερμοκρασίας A_{c3} ή A_{cm} , αντίστοιχα με την περιεκτικότητά του σε άνθρακα, μέχρι να γίνει πλήρης ωστενιτοποίησή του (1...2h). Στη συνέχεια ακολουθεί αργή ψύξη στον ατμοσφαιρικό αέρα μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

- **Πλήρης ανόπτηση**

Η πλήρης ανόπτηση (full annealing) είναι μια θερμική κατεργασία που συχνά εφαρμόζεται σε χάλυβες χαμηλής και ενδιάμεσης περιεκτικότητας σε άνθρακα, οι οποίοι πρόκειται να υποστούν μηχανική επεξεργασία ή εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια κατεργασιών διαμόρφωσης ή κοπής.

Η πλήρης ανόπτηση από τεχνικής πλευράς μοιάζει με την ανόπτηση εξομάλυνσης. Λαμβάνει χώρα σε ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι η ανόπτηση εξομάλυνσης και η βασική τους διαφορά βρίσκεται στο χρόνο παραμονής και στην ταχύτητα απόψυξης. Ο χάλυβας παραμένει για αρκετές ώρες στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης (5...10h) και στη συνέχεια αποψύχεται εντός του φούρνου, δηλαδή, με την ίδια θερμοκρασία απόψυξης, όπως εκείνης του φούρνου

(20°C/ώρα). Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένας χάλυβας όλκιμος και μαλακός αποτελούμενος από χονδρόκοκκο περλίτη.

- **Ανόπτηση σφαιροποίησης**

Η ανόπτηση σφαιροποίησης (spherodising annealing) συνίσταται στην παρατεταμένη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από την ευτηκτοειδή A_{c1} (περίπου 700°C, 8...15h), στην περιοχή $\alpha + Fe_3C$ του διαγράμματος ισορροπίας, ακολουθούμενη από αργή απόψυξη μέσα στο φούρνο.

Αποτέλεσμα αυτής της κατεργασίας είναι η σφαιροποίηση του σεμεντίτη χωρίς κάποιο μετασχηματισμό φάσης. Οι χάλυβες που αποκτούν τη δομή του σφαιροποιημένου σεμεντίτη έχουν υψηλή ολκιμότητα και διαμορφώνονται ή επεξεργάζονται μηχανικά με μεγάλη ευκολία.

11.2.1.2 Βαφή και επαναφορά (quenching and tempering)

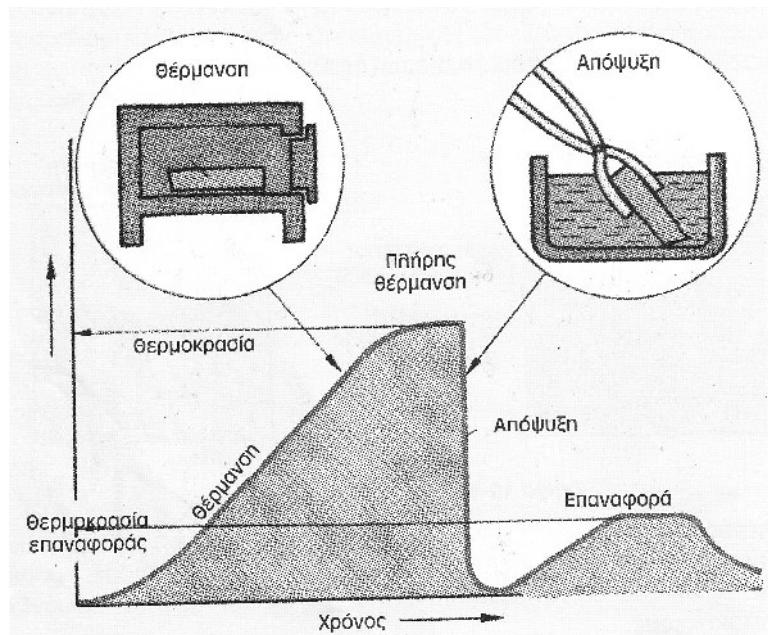
Βαφή είναι μια θερμική κατεργασία κατά την οποία ο ωστενιτοποιημένος χάλυβας αποψύχεται ταχύτατα με αποτέλεσμα το σχηματισμό μαρτενσίτη, σε αντίθεση με τις θερμικές κατεργασίες των ανοπτήσεων, στις οποίες η απόψυξη πραγματοποιείται με βραδύτερους ρυθμούς και καταλήγουν στο σχηματισμό των φάσεων ισορροπίας φερρίτη και σεμεντίτη και στη μικρογραφική δομή του περλίτη, όπως αυτές προβλέπονται από το διάγραμμα ισορροπίας Fe-C.

Σκοπός της βαφής είναι η σκλήρυνση και η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων καθώς και η αύξηση της ανθεκτικότητάς τους στη φθορά, με συνέπεια την επιμήκυνση του χρόνου ζωής των διάφορων εξαρτημάτων.

Η βαφή αποτελείται από δυο βασικά στάδια: την ωστενιτοποίηση και την ταχεία απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Επειδή όμως ο χάλυβας μετά τη βαφή είναι σκληρότατος, ψαθυρός και εύθραυστος, συχνά ακολουθεί και ένα τρίτο στάδιο η επαναφορά.

Αρχικά το εξάρτημα θερμαίνεται έως τη θερμοκρασία βαφής και παραμένει σε αυτή τη θερμοκρασία μέχρι να θερμανθεί σε όλο του το βάθος. Κατόπιν αποψύχεται με αποτέλεσμα ο χάλυβας να γίνεται σκληρός, αλλά και ψαθυρός και εύθραυστος. Για αυτόν το λόγο, το εξάρτημα θερμαίνεται ξανά μέχρι τη θερμοκρασία επαναφοράς και κατόπιν αποψύχεται στον αέρα. Έτσι, το εξάρτημα αποκτά την απαιτούμενη σκληρότητα (Σχήμα 11.4).



Σχήμα 11.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη βαφή και επαναφορά.

Παρακάτω περιγράφονται τα στάδια της ωστενιτοποίησης, της απόψυξης και της επαναφοράς.

• Ωστενιτοποίηση

Στους χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 0.8% (υποευτηκτοειδείς), η ωστενιτοποίηση περιλαμβάνει τη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία υψηλότερη κατά περίπου 50°C από την υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία A_{c3} με σκοπό τη δημιουργία 100% ωστενίτη στο χάλυβα. (Σχήμα 11.3).

Στους χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη από 0.8% (υπερευτηκτοειδείς), η ωστενιτοποίηση περιλαμβάνει επίσης τη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία υψηλότερη κατά περίπου 50°C από την κατώτερη κρίσιμη θερμοκρασία A_{c1} (723°C). Με την υπέρβαση της θερμοκρασίας A_{c1} ο περλίτης μετατρέπεται σε ωστενίτη, ενώ ο σεμεντίτης διαλύεται σταδιακά μεταξύ των γραμμών A_{c1} και A_{cm} . Πλήρης ωστενιτοποίηση συμβαίνει σε θερμοκρασία ανώτερη της A_{cm} (Σχήμα 11.3). Θέρμανση όμως στην καθαρά ωστενιτική περιοχή είναι ασύμφορη, γιατί στους χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα η ολοκλήρωση του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού δεν είναι δυνατή με τα συνήθη τεχνικά ψυκτικά μέσα, καθώς η θερμοκρασία τέλους του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι υπομηδενική.

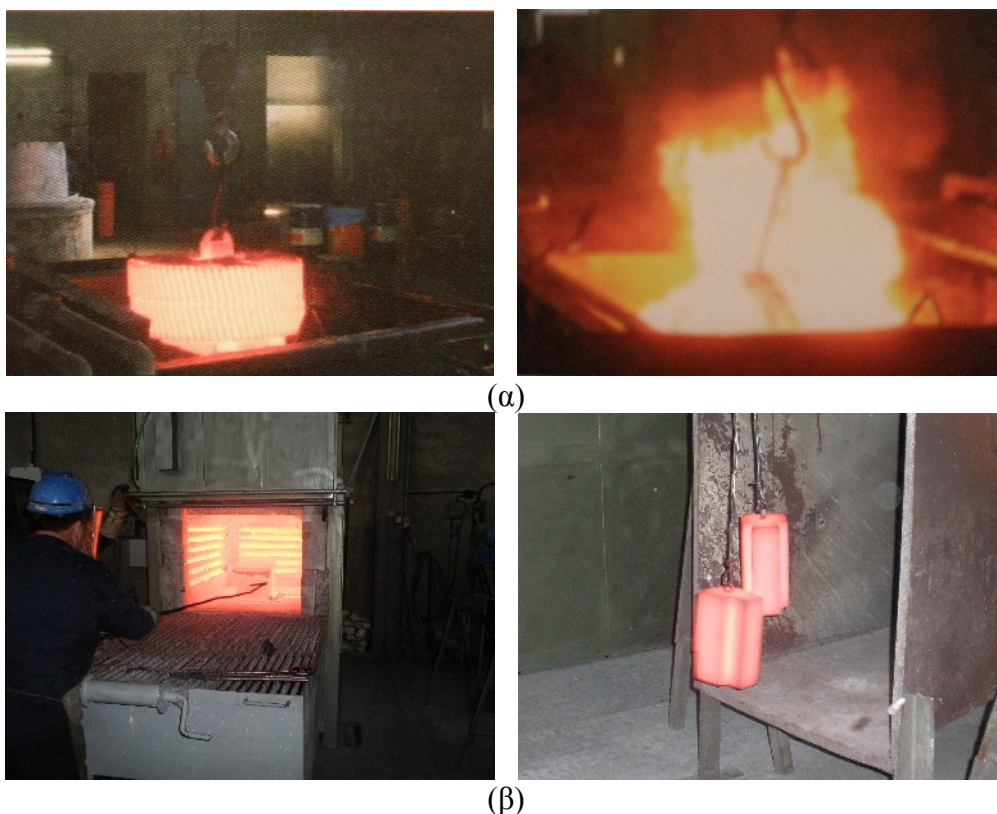
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί πλήρης μετατροπή του κράματος σε ωστενίτη, απαιτείται η παραμονή στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης να διαρκέσει αρκετό χρόνο, χωρίς όμως να προκληθεί ανεπιθύμητη αύξηση του μεγέθους των κόκκων. Επειδή εάν η δομή του ωστενίτη είναι λεπτόκοκκη και ομογενής, τότε και η τελική δομή είναι επίσης λεπτόκοκκη, παρουσιάζοντας τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες των λεπτοκρυσταλλικών υλικών.

Για την αποφυγή της οξείδωσης και της εξανθράκωσης (απώλεια άνθρακα) του χάλυβα κατά την ωστενιτοποίηση, τα εξαρτήματα τοποθετούνται είτε σε κλιβάνους με προστατευτική ατμόσφαιρα (π.χ. Ar , κενό), είτε σε τήγματα ουδέτερων αλάτων, είτε σε τήγματα ανθρακούχων αλάτων, όπου λόγω ισορροπίας δεν υπάρχει διάχυση του άνθρακα.

- **Απόψυξη**

Η ταχεία απόψυξη του αντικειμένου πραγματοποιείται με εμβάπτιση σε κατάλληλο ψυκτικό μέσο. Από την άποψη της ταχύτητας απόψυξης, τα συνηθέστερα μέσα απόψυξης με σειρά φθίνουσας δραστηριότητας είναι: το υδατικό διάλυμα άλατος, το νερό, το υδατικό συνθετικό διάλυμα (τύπου γαλακτώματος), τα τετηγμένα άλατα, το λάδι, ο βεβιασμένος αέρας και ο ατμοσφαιρικός αέρας.

Στο Σχήμα 11.6 παρουσιάζεται η απόψυξη μεταλλικών εξαρτημάτων σε δυο διαφορετικά μέσα ψύξης: (α) σε λάδι και (β) σε βεβιασμένο αέρα.



Σχήμα 11.5: Απόψυξη του χάλυβα (α) με εμβάπτιση σε λάδι και (β) με έκθεση σε βεβιασμένο αέρα.

Γενικά, η ταχύτητα απόψυξης ενός αντικειμένου εξαρτάται από το ρυθμό αποβολής της θερμότητας, ο οποίος είναι συνάρτηση του είδους του ψυκτικού μέσου, της θερμοκρασίας του, της ανάδευσής του, αλλά και του μεγέθους, της γεωμετρίας, της μάζας καθώς της κατάστασης της επιφάνειας του αντικειμένου.

Κατά την απόψυξη του ωστενίτη παρουσιάζονται μεταβολές όγκου, με συνέπεια τη δημιουργία εσωτερικών τάσεων. Οι μεταβολές όγκου οφείλονται στη διαστολή του υλικού λόγω της μετατροπής του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, καθώς και στη συστολή του υλικού λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας. Επίσης επιπλέον τάσεις αναπτύσσονται λόγω της ανομοιόμορφης ψύξης μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας, η οποία ψύχεται ταχύτερα, και του πυρήνα του αντικειμένου.

Συνεπώς κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός εξαρτήματος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων κατά την απόψυξη του καθώς και κατά ακόλουθη επαναφορά.

Για παράδειγμα, θα πρέπει να αποφεύγεται η απότομη αλλαγή διατομών καθώς και η ύπαρξη αιχμηρών γωνιών, γιατί σε αυτά τα σημεία είναι το πιο πιθανόν να εμφανισθούν ρηγματώσεις, λόγω της ανάπτυξης τάσεων.

Για την αποφυγή ανάπτυξης υψηλών εσωτερικών τάσεων συχνά στην πράξη η βαφή των χαλύβων δεν πραγματοποιείται σε ένα αλλά σε περισσότερα στάδια, γνωστή ως κλιμακωτή βαφή.

Κατά τη βαφή ενός σταδίου ο χάλυβας ψύχεται απευθείας σε ψυκτικό μέσο, του οποίου η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, M_s . Αντιθέτως στην κλιμακωτή βαφή, ο χάλυβας αποψύχεται αρχικά σε θερμοκρασία $T > M_s$ και ακολούθως εμβαπτίζεται στο λουτρό βαφής. Ανάλογα με τις αποκτώμενες μικροδομές, διακρίνουμε τη μαρτενσιτική, τη μπεινιτική και τη μπεινιτομαρτενσιτική βαφή.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η επιτυχία της βαφής ενός χάλυβα είναι η σύστασή του. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σκοπός της ταχείας απόψυξης του χάλυβα είναι ο σχηματισμός μαρτενσίτη. Ωστόσο, η ικανότητα ενός χάλυβα να μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη προσδιορίζεται από μια παράμετρο που ονομάζεται **εμβαπτότητα**. Η εμβαπτότητα δεν ταυτίζεται με τη σκληρότητα, αλλά αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας των χαλύβων να εμφανίζουν τη μαρτενσιτική δομή σε μεγάλο βάθος από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του αντικειμένου.

Για τον υπολογισμό της εμβαπτότητας χρησιμοποιείται μια τυποποιημένη διαδικασία, η **δοκιμή Jominy**, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω, στην Ενότητα 11.2.6.

• Επαναφορά-Επιβελτίωση

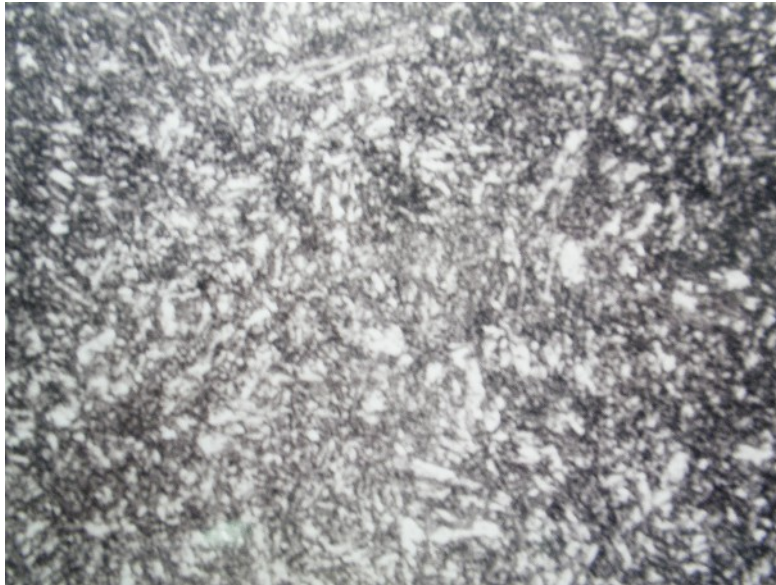
Μετά τη βαφή οι χάλυβες είναι σκληρότατοι και εύθραυστοι, λόγω των υψηλών εσωτερικών τάσεων, που μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις, ρωγμές και ταχεία θραύση. Για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι βαμμένοι χάλυβες υποβάλλονται σε επαναφορά, δηλαδή θερμαίνονται σε θερμοκρασία T , με $M_s < T < A_{c1}$ για συγκεκριμένο χρόνο ($\sim 2\text{h}-4\text{h}$), ώστε ο μαρτενσίτης να εξελιχθεί μερικώς στην κατάσταση ισορροπίας. Η δομή αυτή καλείται δομή επαναφοράς (Σχήματα 11.6 και 11.7).

Με τη διαδικασία της επαναφοράς η σκληρότητα του χάλυβα ελαττώνεται, ενώ αυξάνεται η δυσθραυστότητα και η ολκιμότητά του.

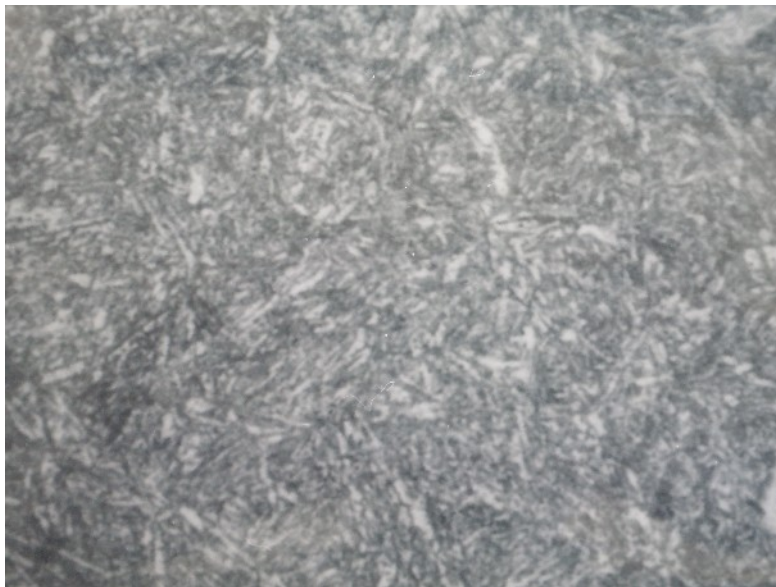
Η επαναφορά των κραματοχαλύβων με υψηλό ποσοστό κραματικών στοιχείων συνήθως πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 500 έως 650°C, ενώ η επαναφορά των ανθρακούχων χαλύβων ή χαλύβων με μικρό ποσοστό κραματικών στοιχείων συνήθως πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 200 έως 350°C.

Ο μαρτενσίτης δεν αποτελεί φάση ισορροπίας, αλλά βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής αστάθειας. Κατά τη διάρκεια της επαναφοράς ο μαρτενσίτης απορρίπτει την περίσσεια του άνθρακα και μετατρέπεται σε φερρίτη και καρβίδια του σιδήρου και συνεπώς αποκαθίσταται ένα μέρος της θερμοδυναμικής ισορροπίας του κράματος.

Οι δομές που λαμβάνονται κατά την επαναφορά του μαρτενσίτη εξαρτώνται κυρίως από τη θερμοκρασία επαναφοράς και από το χρόνο παραμονής (λιγότερο) σε αυτήν.



Σχήμα 11.6: Μικροφωτογραφία της δομής του μαρτενσίτη από επαναφορά. Χάλυβας 0.4% κ.β. C, σκληρότητα 30 HRC, μεγέθυνση 1000x.



Σχήμα 11.7: Μικροφωτογραφία της δομής του μαρτενσίτη από επαναφορά. Χάλυβας 0.8% κ.β. C, σκληρότητα 50 HRC, μεγέθυνση 1000x.

Μετά την απόψυξη υπάρχει μαρτενσίτης, μια βελονοειδής δομή στην οποία τα άτομα του άνθρακα παραμένουν στο κρυσταλλικό πλέγμα και το παραμορφώνουν. (Ενότητα 10.1, κεφ. 10). Κατά τη διάρκεια της επαναφοράς ο μαρτενσίτης απορρίπτει την περίσσεια του άνθρακα και μετατρέπεται σε φερρίτη και καρβίδια.

Οι αλλαγές και οι δομές που λαμβάνουν χώρα στις διάφορες θερμοκρασίες επαναφοράς ενός κοινού ανθρακούχου χάλυβα με 0.6% κ.β. C είναι οι εξής:

- 1) Στους 150°C, άτομα άνθρακα φεύγουν από το πλέγμα του μαρτενσίτη και ο μαρτενσίτης μετασχηματίζεται σε υπομικροσκοπική κλίμακα, τείνοντας προς τη κυβική δομή του φερρίτη, ενώ ταυτόχρονα σχηματίζεται

υπομικροσκοπικός σεμεντίτης. Η σκληρότητα ελαττώνεται ελαφρά από 780 HV (63.3 HRC) στους 700 HV (60.1 HRC).

- 2) Στους 300°C, ο μεταχηματισμός του μαρτενσίτη συνεχίζεται και η δομή του γίνεται παρόμοια με τη δομή του φερρίτη, ενώ τα καρβίδια (σεμεντίτης) αποβάλλονται υπό τη μορφή λεπτότατων κόκκων. Η σκληρότητα ελαττώνεται περαιτέρω στους 510 HV (49.8 HRC).
- 3) Στους 450°C, ο μαρτενσίτης μετασχηματίζεται σε φερρίτη και σεμεντίτη. Η σκληρότητα ελαττώνεται περαιτέρω στους 385 HV (39.3 HRC).
- 4) Στους 600°C, λαμβάνεται φερρίτης και σεμεντίτης υπό τη μορφή σφαιριδίων. Η σκληρότητα μειώνεται στους 270 HV (25.6 HRC). Αυτή δομή καλείται μικρογραφική δομή από επαναφορά.
- 5) Στους 700°C, έχουμε τη μικρογραφική δομή του περλίτη. Παράταση του χρόνου επαναφοράς έχει ως αποτέλεσμα τη σφαιροποίηση του σεμεντίτη μέσα στους κόκκους του περλίτη.

Η συνδυασμένη διαδικασία βαφής και επαναφοράς ονομάζεται επιβελτίωση.

Στον Πίνακα 11.1 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που πραγματοποιούνται ορισμένες θερμικές κατεργασίες μερικών χαλύβων επιβελτιώσεως.

Πίνακας 11.1: Θερμοκρασίες εκτέλεσης θερμικών κατεργασιών μερικών χαλύβων επιβελτιώσεως.

Χάλυβας	Ανόπτηση σφαιροποίησης, (°C)	Ανόπτηση εξομάλυνσης, (°C)	Βαφή και επαναφορά (επιβελτίωση)	
			Βαφή (λάδι), (°C)	Επαναφορά, (°C)
Ck 35	650-700	880-910	870-900	550-660
34Cr4	650-700	820-850	810-840	550-660
34CrMo4	650-700	850-880	830-860	540-680

11.2.1.3 Επιφανειακή βαφή (Φλογοβαφή-Επαγωγική βαφή)

Οι θερμικές κατεργασίες που έχουν περιγραφεί μέχρι αυτό το σημείο αφορούν ολόκληρη τη μάζα των χαλύβδινων αντικειμένων και επηρεάζουν την κρυσταλλική δομή και τις ιδιότητες όλου του υλικού.

Εκτός από τις θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας των χαλύβων, ιδιαίτερο βιομηχανικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι θερμικές τεχνικές επιφανειακής βαφής.

Οι πιο κοινές μέθοδοι επιφανειακής βαφής (surface hardening) των χαλύβων είναι η φλογοβαφή (flame hardening) και η επαγωγική βαφή (induction hardening).

Η επιφανειακή βαφή των χαλύβων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας σκληρής και ανθεκτικής στη φθορά επιφάνειας, ενώ ο πυρήνας του αντικειμένου παραμένει συνεκτικός και όλκιμος. Εφαρμόζεται σε αντικείμενα και εξαρτήματα, που η εξωτερική τους επιφάνεια πρέπει να είναι ανθεκτική στη φθορά, ενώ ταυτόχρονα υφίστανται κρουστικές και εναλλασσόμενες φορτίσεις π.χ. άτρακτοι, πείροι, οδοντωτοί τροχοί, ράουλα και γλίστρες (Σχήμα 11.8).

Οι τεχνικές επιφανειακής βαφής συνίστανται στην ωστενιτοποίηση επιφανειακών μόνο στρωμάτων του υλικού, με τοπική θέρμανση σε θερμοκρασία υψηλότερη της A_{c3} , ακολουθούμενη από απόψυξη, ενώ ο πυρήνας του υλικού παραμένει ψυχρός.

Με τη βαφή το επιφανειακό στρώμα του υλικού αποκτά μαρτενσιτική δομή, ενώ στην υπόλοιπη μάζα του υλικού δε συμβαίνει κανένας μετασχηματισμός δομής.



Σχήμα 11.8: Εγκάρσια τομή δοντιού οδοντωτού τροχού, κατόπιν επαγωγικής βαφής ή φλογοβαφής, στην οποία φαίνεται το βάθος σκλήρυνσης (~ 7 mm). Για να αναδειχθεί το βάθος σκλήρυνσης πραγματοποιήθηκε αμμοβολή με γυάλινα σφαιρίδια. Σκληρότητα min 50 HRC (επαναφορά για μια ώρα στους 350°C).

Ως βάθος βαφής κατά σύμβαση ορίζεται, το πάχος του επιφανειακού στρώματος, η σκληρότητα του οποίου φθάνει σε 550HV (52.3 HRC).

Για να είναι όμως δυνατός ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι απαραίτητο ένα ελάχιστο ποσοστό άνθρακα. Επίσης το ποσοστό αυτό δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα μέγιστο όριο, έτσι ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος δημιουργίας ρηγματώσεων, λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια μεταξύ της μάζας του υλικού που μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη και της μάζας του υλικού, που δε συμμετέχει στη βαφή. Εμπειρικά έχει βρεθεί ότι χάλυβες με ποσοστό άνθρακα από 0.35% κ.β C έως 0.50% κ.β C είναι κατάλληλοι για επιφανειακή σκλήρυνση. Η φλογοβαφή και η επαγωγική βαφή κυρίως εφαρμόζονται σε χάλυβες επιβελτιώσεως π.χ. Werkst. Nr. 1.7225 ή 1.6582 καθώς και σε κοινούς ανθρακούχους χάλυβες π.χ. Werkst. Nr. 1.1730 ή 1.1221. Μετά την επιφανειακή βαφή ακολουθεί επαναφορά.

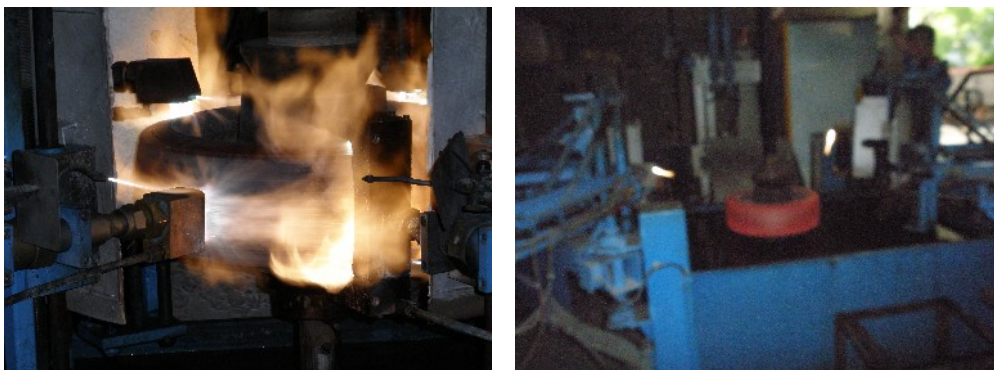
Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η αυξημένη αντοχή σε κόπωση των επιφανειακά επεξεργασμένων εξαρτημάτων οφείλεται στην εισαγωγή θλιπτικών τάσεων στη επιφάνειά τους, λόγω της διαφοράς τάσεων μεταξύ της επιφάνειας και του πυρήνα.

• Φλογοβαφή

Κατά τη φλογοβαφή ο χάλυβας θερμαίνεται επιφανειακά με τη βοήθεια φλόγας που προέρχεται από την καύση μίγματος οξυγόνου και αερίου, ασετυλίνη ή φυσικό αέριο. Η θερμαντική ισχύς ανά μονάδα κατεργαζόμενης επιφάνειας είναι της τάξης των 1.500 W/cm² (Σχήμα 11.9).

Ανάλογα με τη γεωμετρία του αντικειμένου, είτε ο καυστήρας κινείται κατά μήκος της κατεργαζόμενης επιφάνειας, είτε το αντικείμενο περιστρέφεται μεταξύ περιμετρικά τοποθετημένων καυστήρων. Οι καυστήρες συνήθως κατασκευάζονται από κράματα χαλκού. Μετά την ωστενιτοποίηση της επιφάνειας, ολόκληρο το αντικείμενο εμβαπτίζεται σε λουτρό ψυκτικού μέσου (υδατικό συνθετικό διάλυμα ή λάδι). Στην περίπτωση κινούμενου καυστήρα, αυτός ακολουθείται από καταιωτιστήρα άφλεκτου ψυκτικού υγρού (υδατικό συνθετικό διάλυμα).

Το βάθος σκλήρυνσης συνήθως κυμαίνεται από 2 έως 10 mm. Η μέθοδος αυτή κυρίως χρησιμοποιείται για τη βαφή μεγάλων και ογκωδών εξαρτημάτων συμμετρικής γεωμετρίας, όπως άξονες, πείροι, γρανάζια μεγάλου modul, οδοντωτοί τροχοί (sprockets), ράουλα, κλπ.



Σχήμα 11.9: Στιγμιότυπο από τη φλογοβαφή ράουλου. Μετά την ωστενιτοποίηση της επιφάνειας του εμβαπτίζεται σε δεξαμενή ψυκτικού μέσου.

- **Επαγωγική βαφή**

Κατά την επαγωγική βαφή ο χάλυβας τοποθετείται στο εσωτερικό ενός πηνίου, οι σπείρες του οποίου διαρρέονται από ρεύμα υψηλής συχνότητας, από μερικά kHz έως μερικά MHz. Η θέρμανση επιτυγχάνεται μέσω μαγνητικής επαγωγής. Η παρεχόμενη θερμαντική ισχύς είναι της τάξης των 20.000 W/cm^2 (Σχήμα 11.10).



Σχήμα 11.10: Στιγμιότυπο από την επαγωγική βαφή πείρου. Το πηνίο ακολουθείται από καταιωστήρα ψυκτικού υγρού.

Όταν εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης διαρρέει τις σπείρες του πηνίου/επαγωγέα δημιουργείται ισχυρό μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει στην επιφάνεια του αντικειμένου δινορεύματα Foucault, τα οποία θερμαίνουν την επιφάνεια του αντικειμένου, σύμφωνα με το νόμο του Joule. Το βάθος διείσδυσης αυτών των ρευμάτων μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας του ρεύματος. Το βάθος βαφής κυμαίνεται από 0.3 mm (2.500 kHz) έως 20 mm (0.5 kHz).

Στην επαγωγική βαφή συνήθως το πηνίο, που «αγκαλιάζει» το αντικείμενο, κινείται κατά μήκος του αντικειμένου, ακολουθούμενο από καταιωστήρα ψυκτικού υγρού. Ακόμη υπάρχει η περίπτωση που το αντικείμενο διέρχεται με ομαλή ταχύτητα μέσα από το πηνίο.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως για τη βαφή εξαρτημάτων μικρών διαστάσεων, αλλά μεγάλου αριθμού (αξονάκια, πείροι, γρανάζια μικρού modul, βαλβίδες, ασφάλειες, κλπ.).

Στο Σχήμα 11.11 παρουσιάζονται εξαρτήματα βαμμένα με επαγωγική βαφή.



Σχήμα 11.11: (α) Σκλήρυνση σε καρέ οδηγού άξονα ανεμιστήρα οχήματος (32-38 HRC, βάθος βαφής 0.5mm), (β) σκλήρυνση των δυο άκρων πείρου με επαγωγική βαφή.

11.2.2 ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Σε πολλές εφαρμογές οι θερμικές κατεργασίες των χαλύβων συνοδεύονται από εμπλουτισμό της επιφάνειάς τους με κάποιο χημικό στοιχείο (C, N, Cr, B, Al, Zn και Si), μέσω του μηχανισμού της διάχυσης. Σε αυτές τις κατεργασίες αλλάζει η χημική σύσταση της επιφάνειας του χάλυβα και ονομάζονται θερμοχημικές μέθοδοι κατεργασίας των χαλύβων-εμποτισμοί.

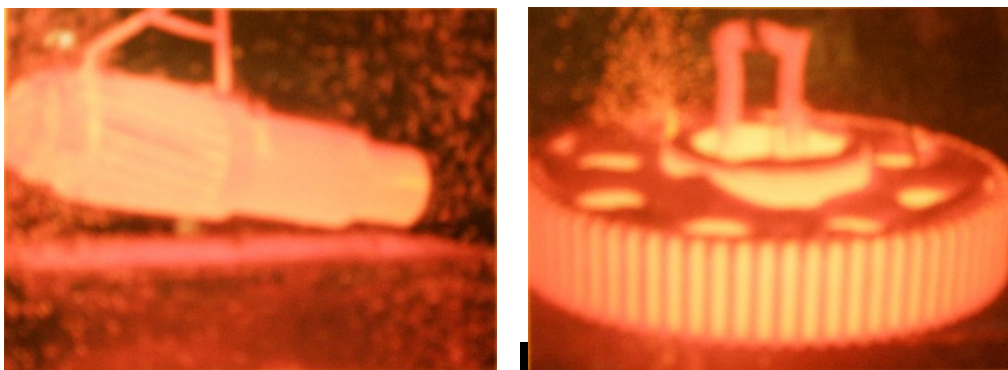
Παρακάτω αναπτύσσονται οι κυριότερες θερμοχημικές τεχνικές επιφανειακής σκλήρυνσης των χαλύβων.

11.2.2.1 Ενανθράκωση

Στη βαφή με ενανθράκωση (case hardening), χάλυβας με μικρό ποσοστό άνθρακα (0.1-0.25%) θερμαίνεται, παρουσία ενανθρακωτικού μέσου, σε θερμοκρασία ωστενιτοποίησης (900-950°C). Καθώς το ενανθρωτικό μέσο αποσυντίθεται ελευθερώνει άτομα άνθρακα, τα οποία διαχέονται στο πλέγμα του ωστενίτη, μέχρι την τιμή της μέγιστης διαλυτότητας σε αυτόν (~ 1.5% κ.β. C στους 950°C), με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό της επιφανειακής στιβάδας του χάλυβα με άνθρακα. Στη συνέχεια ακολουθεί ψύξη, όπως ακριβώς και στην κλασσική βαφή.

Με την ενανθράκωση (carburizing) έχουμε ένα αντικείμενο με βαμμένη, σκληρή εξωτερική στιβάδα, πλούσια σε άνθρακα και άβαφο, όλκιμο και συνεκτικό πυρήνα.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως για την επιφανειακή σκλήρυνση εξαρτημάτων όπως γρανάζια, άξονες μετάδοσης κίνησης, τροχοί αλυσοκινήσεως, σφήνες, οδηγοί, μειωτήρες, κ.α. (Σχήμα 11.12). Συνήθεις χάλυβες ενανθρακώσεως είναι οι χάλυβες Werkst. Nr. 1.5919, 1.6587, κ.α



Σχήμα 11.12: Επιφανειακή σκλήρυνση εξαρτημάτων με ενανθράκωση.

Το ενανθρακωτικό μέσο αποτελείται από ένα υλικό υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, το οποίο μπορεί να είναι αέριο, υγρό ή στερεό.

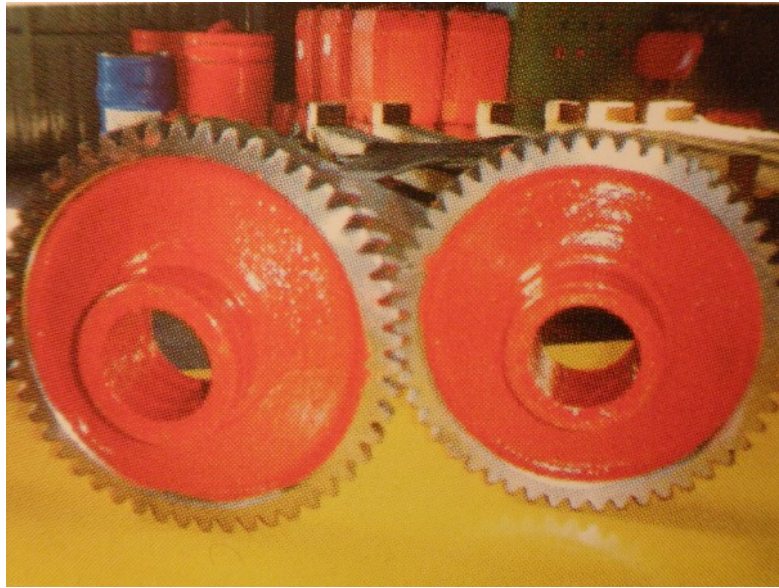
Στην αέρια ενανθράκωση, ο άνθρακας ελευθερώνεται από ένα αέριο, όπως το μεθάνιο, το προπάνιο ή το φυσικό αέριο, στην υγρή ενανθράκωση χρησιμοποιούνται λουτρά τετηγμένων ανθρακούχων αλάτων (κυανιούχο νάτριο, NaCN και χλωριούχο βάριο, BaCl_2), ενώ στη στερεά ενανθράκωση χρησιμοποιούνται κόκκοι στερεού άνθρακα.

Γενικά, η στερεά ενανθράκωση προσφέρεται για την επεξεργασία ογκωδών και μεμονωμένων αντικειμένων. Αντιθέτως η αέρια και υγρή ενανθράκωση είναι ταχύτερες και υπάρχει δυνατότητα αυτοματοποίησής τους. Συγκρίνοντας την αέρια με την υγρή ενανθράκωση, ταχύτερη είναι η υγρή λόγω της υψηλότερης δραστηριότητας των αλάτων. Ακόμη προσφέρει τη δυνατότητα ταυτόχρονης επεξεργασίας αντικειμένων διαφορετικής γεωμετρίας και διαφορετικού επιθυμητού βάθους βαφής στον ίδιο κλίβανο (Σχήμα 11.13).



Σχήμα 11.13: Υγρή ενανθράκωση: (α) θέρμανση σε λουτρό τετηγμένων ανθρακούχων αλάτων, (β) απόψυξη με εμβάπτιση σε λάδι.

Εάν κάποια τμήματα της επιφάνειας δεν πρέπει να ενανθρακωθούν, τότε επικαλύπτονται με αντιδιαχυτική επικάλυψη (π.χ. ηλεκτρολυτικό χαλκό), η οποία εμποδίζει τη διάχυση των ατόμων του άνθρακα στα σημεία αυτά (Σχήμα 11.14). Αυτή η δυνατότητα υπάρχει στην περίπτωση της αέριας και στερεάς ενανθράκωσης, αλλά όχι στην υγρή ενανθράκωση, λόγω της αυξημένης χημικής δραστηριότητας των τετηγμένων αλάτων.



Σχήμα 11.14: Εξαρτήματα προς τοπική ενανθράκωση. Οι επικαλυμμένες περιοχές προστατεύονται από τη διάχυση του άνθρακα και δεν ενανθρακώνονται.

Το βάθος ενανθρακώσεως μπορεί να φθάσει έως τα 6.4 mm, αλλά συνήθως δεν υπερβαίνει τα 3.0 mm. Ως βάθος ενανθρακώσεως ορίζεται εκείνο το βάθος, στο οποίο μετά τη βαφή η σκληρότητα του χάλυβα ανέρχεται σε 550HV (52.3 HRC).

Στο σχήμα 11.15 παρουσιάζονται εξαρτήματα που έχουν κατεργαστεί με ενανθράκωση.



Σχήμα 11.15: Επιφανειακή σκλήρυνση πείρου και δακτυλίου με ενανθράκωση (61.0 HRC και 55.0 HRC αντίστοιχα).

11.2.2.2 Εναζώτωση

Όταν οι απαιτήσεις για αντοχή σε φθορά και τριβή είναι υψηλές, και η σκληρότητα λόγω του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού δεν είναι αρκετή, τότε εφαρμόζεται μια άλλη τεχνική επιφανειακής σκλήρυνσης των χαλύβων, η εναζώτωση.

Η εναζώτωση είναι μια θερμοχημική κατεργασία εμπλουτισμού της επιφάνειας του χάλυβα με άζωτο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας σκληρής επιφανειακής στιβάδας (case hardening), βάθους έως 1mm.

Κατά την εναζώτωση, το άζωτο διαχέεται στο πλέγμα της α-φάσης του σιδήρου, σε θερμοκρασία 500-580°C, και οδηγεί στο σχηματισμό κατακρημνισμάτων ή συνεχούς στρώματος νιτριδίων (Fe_2N , Fe_3N , Fe_4N), ή καρβονιτριδίων ($\text{Fe}_x\text{N}_y\text{C}_z$), αυξάνοντας την επιφανειακή σκληρότητα του χάλυβα σε 400 έως 1000HV.

Η εναζωτωμένη ζώνη αποτελείται από δυο επιμέρους περιοχές, την περιοχή ενώσεων και την περιοχή διάχυσης. Η περιοχή ενώσεων αποτελείται από τις σχηματιζόμενες ενώσεις του αζώτου και εκτείνεται σε βάθος 30 μm , ενώ η σκληρότητά της μπορεί να φθάσει έως και 2000HV. Στη συνέχεια της περιοχής ενώσεων εκτείνεται η περιοχή διάχυσης, στην οποία τα άτομα του αζώτου διαχέονται στο πλέγμα του φερρίτη, σχηματίζοντας στερεό διάλυμα καθώς και μικρό ποσοστό νιτριδίων. Το πάχος της φθάνει έως 1.0 mm, ενώ η σκληρότητά της μπορεί να φθάσει έως 500HV. Η επιφανειακή σκληρότητα του χάλυβα προέρχεται από το συνδυασμό των σκληροτήτων των δυο περιοχών.

Εκτός της αύξησης της σκληρότητας, ο σχηματισμός νιτριδίων προκαλεί διόγκωση και στρέβλωση του κρυσταλλικού πλέγματος του σιδήρου, με συνέπεια την εισαγωγή θλιπτικών τάσεων, οι οποίες αυξάνουν την αντοχή του χάλυβα σε κόπωση.

Σύμφωνα με την κατάσταση του αζωτούχου μέσου που χρησιμοποιείται, η κατεργασία διακρίνεται σε αέρια (500°C), σε εναζώτωση τετηγμένων αλάτων (580°C) και εναζώτωση πλάσματος (450°C).

Στην αέρια εναζώτωση συνήθως χρησιμοποιείται NH_3 , στη υγρή αζωτούχα άλατα, όπως τα κυανιούχα, ενώ στη εναζώτωση πλάσματος, N_2 . Κατά την υγρή εναζώτωση, τα άλατα προσφέρουν επίσης άνθρακα μετατρέποντας τη διεργασία τετηγμένων αλάτων σε διεργασία ενανθρακαζώτωσης. Η υγρή και η αέρια εναζώτωση παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των αντίστοιχων διεργασιών ενανθράκωσης, ενώ η εναζώτωση πλάσματος, αν και δαπανηρότερη τελευταία κερδίζει έδαφος, λόγω της πολύ καλύτερης ποιότητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας και ακριβούς ρύθμισης του βάθους και του βαθμού σκλήρυνσης.

Κυρίως οι χάλυβες, αλλά επίσης το τιτάνιο το αλουμίνιο και το μολυβδαίνιο μπορεί να υποστούν εναζώτωση.

Σε εναζώτωση μπορεί να υποβληθούν όλα τα είδη των χαλύβων και χυτοσιδήρων, ανεξάρτητα από τη χημική τους σύσταση. Ωστόσο, η παρουσία κραματικών στοιχείων όπως Al, Cr, Mo και Ti, τα οποία σχηματίζουν επιπλέον νιτρίδια, προκαλεί επιπρόσθετη αύξηση της σκληρότητας και του βάθους εναζώτωσης.

Ιδανικά η εναζώτωση θα πρέπει να ακολουθεί τη βαφή και επαναφορά ενός χάλυβα, και να λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασίας επαναφοράς.

Ακόμη αξίζει να σημειωθεί, ότι η επιφανειακή σκληρότητα των εναζωτωμένων χαλύβων διατηρείται έως και τους 500°C, ενώ οι ενανθρακωμένοι χάλυβες παρουσιάζουν μείωση των ιδιοτήτων τους από τους 200°C.

Επειδή η εναζώτωση πραγματοποιείται σε χαμηλή θερμοκρασία, η ταχύτητα διάχυσης του αζώτου είναι σχετικά μικρή, με αποτέλεσμα η ζώνη εναζώτωσης να

είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ζώνη ενανθράκωσης, ενώ ο χρόνος επεξεργασίας μεγαλύτερος.

Τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν γρανάζια, εκκεντροφόρους άξονες, στοφαλοφόρους άξονες, τμήματα βαλβίδων, κοχλίες εκβολέων (extruders), εργαλεία χύτευσης υπό πίεση, μήτρες σφυρηλάτησης, μήτρες εκβολής (extrusion), εργαλεία καλουπιών μορφοποίησης πλαστικών και καλούπια έγχυσης πλαστικών (injection).

11.2.2.3 Ενανθρακαζώτωση

Με την ενανθρακαζώτωση επιτυγχάνεται ταυτόχρονη ενανθράκωση και εναζώτωση της επιφανειακής στιβάδας του χάλυβα. Συνήθως ως πηγή αζώτου και άνθρακα χρησιμοποιείται μείγμα NH_3 και CO .

Κατά την επεξεργασία άτομα άνθρακα και αζώτου διαχέονται σε παραπλεγματικές θέσεις (άτομα παρεμβολής), σε θερμοκρασία $\sim 850^\circ\text{C}$, σημαντικά υψηλότερη από τη θερμοκρασία εναζώτωσης, $\sim 530^\circ\text{C}$, (έτσι ώστε να διαλυθεί ο άνθρακας στον ωστενίτη), αλλά ελαφρά μικρότερη από τη θερμοκρασία ενανθράκωσης, $\sim 950^\circ\text{C}$. Οι χρόνοι επεξεργασίας είναι επίσης μικρότεροι. Η ενανθρακαζώτωση είναι πιο οικονομική από την ενανθράκωση και επιπλέον μειώνονται οι στρεβλώσεις κατά την απόψυξη. Η χαμηλότερη θερμοκρασία επιτρέπει την απόψυξη σε λάδι ή ακόμη και σε βεβιασμένο αέρα.

Τυπικά το βάθος της ενανθρακαζώτωσης κυμαίνεται από 0.07 mm έως 0.5 mm. Μπορεί ακόμη να φθάσει έως 0.75 mm. Γενικά με την ενανθρακαζώτωση επιτυγχάνεται υψηλότερη σκληρότητα από ότι με την ενανθράκωση, 55-62 HRC.

Μπορεί ακόμη να γίνει συνδυασμός ενανθράκωσης και ενανθρακαζώτωσης.

Τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν δόντια γραναζιών, άξονες, πείρους, ρουλεμάν, ροδέλες, δίσκους συμπλέκτη οχημάτων, εργαλεία και καλούπια.

Στο Σχήμα 11.16 παρουσιάζεται ένα κόμπλερ αντλίας οχημάτων το οποίο υποβλήθηκε σε ενανθρακαζώτωση.



Σχήμα 11.16: Επιφανειακή σκλήρυνση κόμπλερ αντλίας με ενανθρακαζώτωση (min 40 HRC, βάθος βαφής 0.25 mm – 0.65 mm).

11.2.3 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι θερμομηχανικές μέθοδοι επεξεργασίας, συνδυάζουν την κατεργασία πλαστικής παραμόρφωσης και μορφοποίησης με τη θερμική κατεργασία του μετάλλου.

Η θερμότητα η οποία χρησιμοποιείται για να θερμάνει το αντικείμενο στη θερμοκρασία μορφοποίησης, χρησιμοποιείται επίσης για την πραγματοποίηση της θερμικής κατεργασίας, με συνέπεια την εξοικονόμηση ενέργειας.

Από τις θερμομηχανικές μεθόδους επεξεργασίας, οι πιο διαδεδομένες είναι η έλαση και η σφυρηλασία.

Στην περίπτωση της έλασης, οι συνήθεις θερμικές κατεργασίες έχουν ως στόχο την παραγωγή λεπτόκοκης κρυσταλλικής δομής ή τον έλεγχο του αριθμού καθώς και του ποσοστού των διάφορων φάσεων π.χ. φερρίτη, περλίτη, μπαϊνίτη, μαρτενσίτη (για χάλυβες), τη σκλήρυνση με κατακρήμνιση, κλπ.

Στη περίπτωση της σφυρηλασίας, η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η σφυρηλασία του χάλυβα σε θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, ακολουθούμενη από κλιμακωτή βαφή και επαναφορά, με ποικίλες διαφοροποιήσεις, όσον αφορά τις θερμοκρασίες και τους χρόνους παραμονής.

11.2.4 ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Εκτός από τις παραπάνω θερμικές κατεργασίες υπάρχουν και άλλες μέθοδοι βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων, που αφορούν είτε την επιφάνεια, είτε όλο το σώμα του αντικειμένου.

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένες από αυτές:

- 1) Απόλυτα τοπική ενανθράκωση ή βαφή, όπου η θέρμανση επιτυγχάνεται με δέσμη laser ή ηλεκτρονίων ή επιφανειακή τριβή.
- 2) Εμποτισμός με την τεχνική εμφύτευσης ιόντων (N, Cr, Mo, Ti, B, C, κλπ.).
- 3) Άλλες θερμοχημικές τεχνικές εμποτισμού, όπως εναργιλίωση (Al), εγχρωμίωση (Cr), ενσίλικωση (Si), βορίωση (B), σεραρδίωση (Zn).
- 4) Κρυογενική επεξεργασία χαλύβων με υψηλό ποσοστό άνθρακα.
- 5) Απόψυξη του χάλυβα κατά τη βαφή σε πρέσα, προς αποφυγή στρεβλώσεων.

11.2.5 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Κατά τη θερμική κατεργασία των χαλύβων μπορεί να εμφανισθούν αστοχίες όπως, αλλαγή στις διαστάσεις του αντικειμένου, στρέβλωσή του ή ακόμη και εμφάνιση ρωγμών. Επιπλέον, άλλες πιθανές αστοχίες αποτελούν η ύπαρξη ανομοιογένειας στη δομή του επεξεργασμένου χάλυβα, η ανεπαρκής βαφή (μικρό βάθος βαφής, χαμηλή σκληρότητα), η εξανθράκωση, κλπ.

Οι αστοχίες αυτές μπορεί να οφείλονται, είτε στη διαδικασία της θερμικής κατεργασίας του υλικού, είτε στο ίδιο το υλικό.

Κατά τη θερμική κατεργασία, λανθασμένη επιλογή θερμοκρασίας, χρόνου παραμονής, ταχύτητας απόψυξης, επιλογή ακατάλληλης μεθόδου θερμικής κατεργασίας για τη συγκεκριμένη ποιότητα χάλυβα ή τη συγκεκριμένη γεωμετρία, εσφαλμένος τρόπος εμβάπτισης, που οδηγεί σε ανομοιογενή ψύξη, έχουν ως συνέπεια τη λανθασμένη ρύθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού και την απόρριψή του.

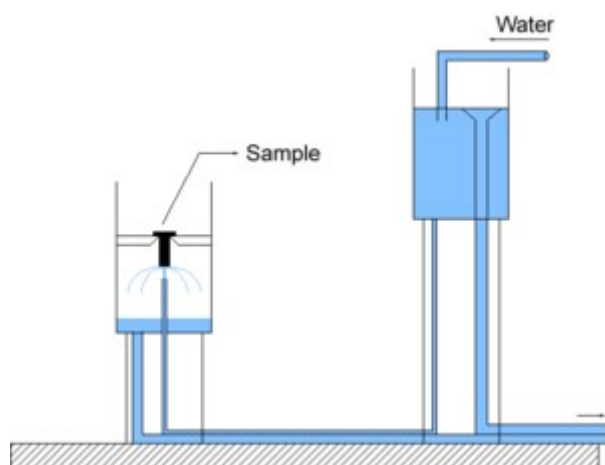
Σε πολλές περιπτώσεις όμως, οι αστοχίες δεν οφείλονται στη διαδικασία της θερμικής κατεργασίας, αλλά σε αιτίες όπως, λάθη που αφορούν το υλικό (ανομοιογένεια χημικής σύστασης, παρουσία πόρων και τοπικοί διαφορισμοί χημικής

σύστασης και ακαθαρσιών σε χυτά, που οδηγούν σε ανομοιόμορφη ψύξη κατά τη βαφή), λάθη σχεδιασμού (γωνιώδεις ακμές, απότομες μεταβολές της διατομής, που λειτουργούν ως σημεία συγκέντρωσης εσωτερικών τάσεων, με αποτέλεσμα την εκδήλωσή τους κατά το στάδιο της θέρμανσης και την πρόκληση στρεβλώσεων), λάθη κατεργασίας (έντονη μηχανουργική κατεργασία, που επίσης οδηγεί στο σχηματισμό υψηλών εσωτερικών τάσεων), κλπ. Σε αυτές τις περιπτώσεις ακόμη και εάν εκτελεστεί άρτια η θερμική κατεργασία, η εμφάνιση αστοχιών και ανωμαλιών είναι αναπόφευκτη.

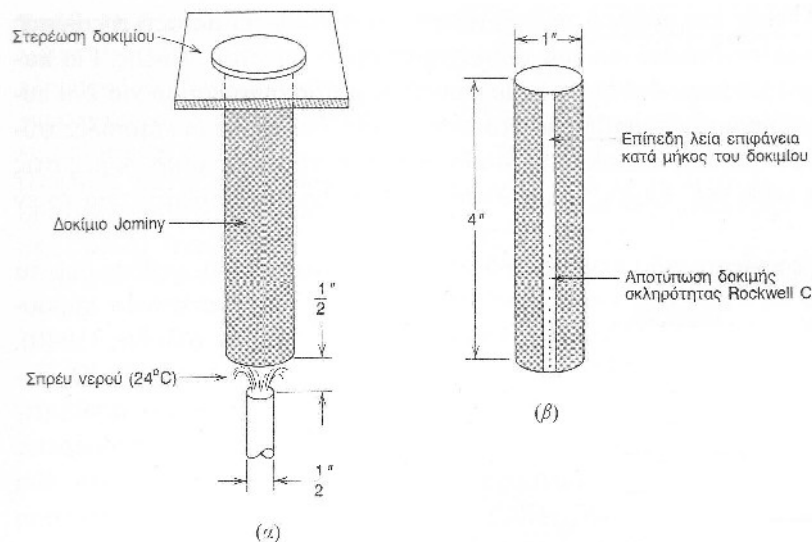
11.2.6 ΕΜΒΑΠΤΟΤΗΤΑ (ΔΟΚΙΜΗ JOMINY)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η **εμβαπτότητα** (hardenability) ενός χάλυβα είναι μια παράμετρος που σχετίζεται με τη δυνατότητά του να μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη, κατά την ταχεία απόψυξή του. Η εμβαπτότητα δεν ταυτίζεται με τη σκληρότητα (hardness), αλλά αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας του χάλυβα να εμφανίζει τη μαρτενσιτική δομή σε μεγάλο βάθος από την επιφάνεια ψύξης προς το εσωτερικό του αντικειμένου.

Για τον υπολογισμό της εμβαπτότητας χρησιμοποιείται μια τυποποιημένη διαδικασία, η **δοκιμή Jominy**. Σε αυτή τη διαδικασία, όλοι οι παράγοντες, εκτός της σύστασης του κράματος, που επηρεάζουν το βάθος στο οποίο το δοκίμιο σκληραίνει, όπως μέγεθος, γεωμετρία, μέσο απόψυξης, κλπ., παραμένουν σταθεροί. Ένα κυλινδρικό δοκίμιο μήκους 100mm (4.0 in) και διαμέτρου 25.4mm θερμαίνεται σε φούρνο, ώστε να επέλθει πλήρης ωστενιτικός μετασχηματισμός. Αμέσως μετά από την απομάκρυνση του δοκιμίου από το φούρνο, αυτό τοποθετείται σε ειδική διάταξη όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.17, έτσι ώστε το κάτω άκρο να ψύχεται με πίδακα νερού. Με αυτόν τον τρόπο ο ρυθμός ψύξης είναι μέγιστος στο κάτω άκρο και ελαττώνεται με την απόσταση από αυτό το σημείο κατά μήκος του δοκιμίου. Αφού το δοκίμιο ψυχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μετρείται η σκληρότητα κατά μήκος μιας γενέτειράς του (Σχήμα 11.18).

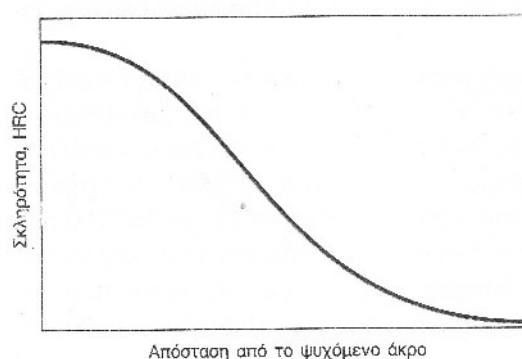


Σχήμα 11.17: Συσσκευή Jominy.



Σχήμα 11.18: Σχηματική αναπαράσταση της δοκιμής Jominy. (α) Στερέωση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της ψύξης. (β) Μέτρηση της σκληρότητας κατά μήκος του δοκιμίου.

Η γραφική παράσταση της σκληρότητας ως συνάρτηση της απόστασης από το ψυχόμενο άκρο του δοκιμίου αποτελεί την καμπύλη εμβαπτότητας. Στο Σχήμα 11.19 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική καμπύλη εμβαπτότητας. Το ψυχόμενο άκρο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σκληρότητα, και συνήθως για τους περισσότερους χάλυβες σε αυτό το άκρο, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται 100% σε μαρτενσίτη. Ο ρυθμός ψύξης μειώνεται με την απόσταση από το ψυχόμενο άκρο και το ίδιο συμβαίνει με τη σκληρότητα. Με την ελάττωση του ρυθμού ψύξης υπάρχει περισσότερος χρόνος για τη διάχυση του άνθρακα και το σχηματισμό των πιο μαλακών φάσεων του μαινίτη και του περλίτη. Επομένως ένας χάλυβας υψηλής εμβαπτότητας διατηρεί υψηλές τιμές σκληρότητας για μεγαλύτερες αποστάσεις από έναν χάλυβα χαμηλής εμβαπτότητας. Κάθε χάλυβας έχει τη δική του μοναδική καμπύλη εμβαπτότητας.

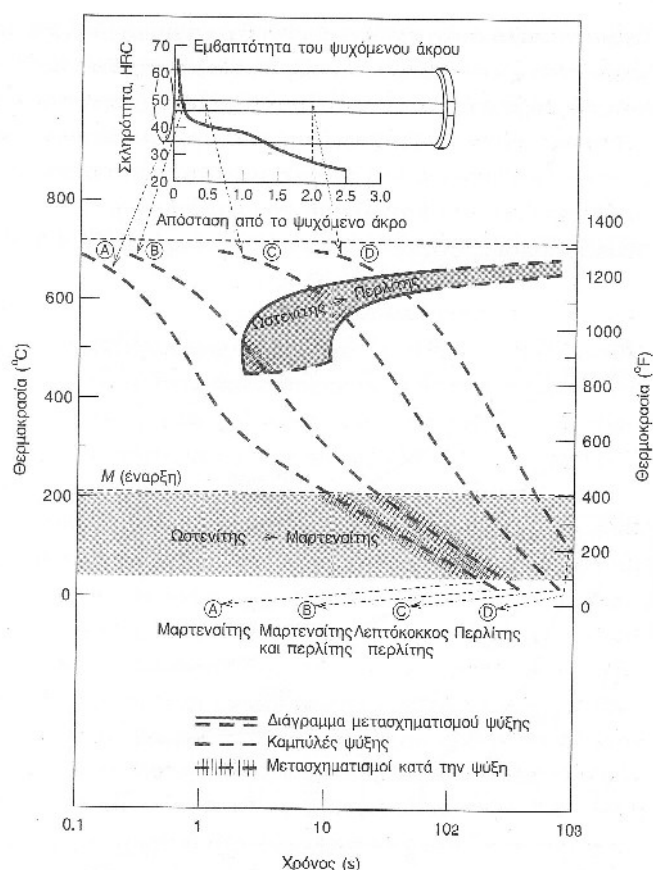


Σχήμα 11.19: Τυπικό διάγραμμα εμβαπτότητας.

Ως **βάθος βαφής (β)**, κατά τη δοκιμή Jominy, ορίζεται η απόσταση από το ψυχόμενο άκρο του δοκιμίου, στην οποία ο ωστενίτης έχει μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη κατά 50%. Το βάθος βαφής αντιστοιχεί, περίπου στο σημείο καμψής της καμπύλης εμβαπτότητας.

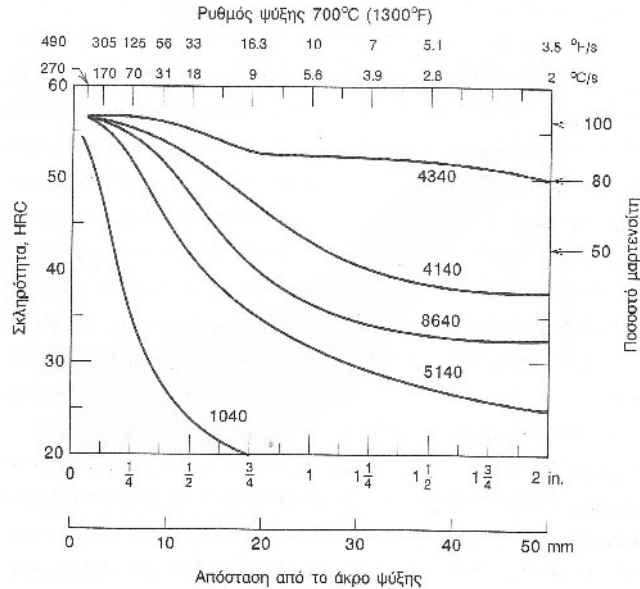
Ένας χάλυβας έχει καλή εμβαπτότητα όταν εμφανίζει μεγάλο βάθος βαφής.

Στο Σχήμα 11.20 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ της καμπύλης εμβαπτότητας και των καμπυλών συνεχούς απόψυξης (CCT) ενός κοινού χάλυβα ευτηκτοειδούς σύστασης. Παρουσιάζονται οι ρυθμοί απόψυξης για τέσσερις θέσεις (A, B, C, D) που απέχουν διαφορετικές αποστάσεις από το ψυχόμενο άκρο, καθώς και οι αντίστοιχες μικροδομές στις οποίες καταλήγει η κάθε μία.



Στο Σχήμα 11.21 παρουσιάζονται οι καμπύλες εμβαπτότητας για πέντε διαφορετικές ποιότητες χάλυβα, καθένας από τους οποίους περιέχει 0.4% κ.β. άνθρακα, αλλά διαφορετικές ποσότητες άλλων κραματικών στοιχείων. Το ένα δοκίμιο είναι κοινός ανθρακούχος χάλυβας, 1040, ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα 4140, 4340, 5140 και 8640 είναι κράματα χάλυβα. Οι συστάσεις των κραμάτων παρατίθενται στο σχήμα. Η σημασία των αριθμητικών συμβολισμών εξηγείται στο 12^ο κεφάλαιο.

41



Σχήμα 11.21: Καμπύλες εμβαπτότητας για πέντε διαφορετικές ποιότητες χάλυβα, που ο καθένας περιέχει 0.4 % κ.β. άνθρακα. Προσεγγιστικά οι συστάσεις των κραμάτων είναι: 4340 – 1.85 Ni, 0.80 Cr, 0.26 Mo, 4140-1.0 Cr, 0.20 Mo, 8640-0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.20 Mo, 5140-0.85 Cr, 1040-μη κραματωμένος χάλυβας.

συναρτήσει της ταχύτητας απόψυξης, γίνεται επίσης φανερό ότι όταν η ταχύτητα είναι περίπου 270°C/sec, σχηματίζεται 100% μαρτενσίτης σε όλους τους χάλυβες. Ωστόσο για ταχύτητες απόψυξης μικρότερες από περίπου 70°C/sec και σε απόσταση περίπου 6.4 mm από το ψυχόμενο άκρο, η δομή του μη κραματωμένου χάλυβα 1040 είναι κυρίως περλιτική με ένα ποσοστό προευνθηκτοειδή φερρίτη, ενώ η δομή των τεσσάρων κραματωμένων χαλύβων αποτελείται κυρίως από μαρτενσίτη και μπαινίτη. Το ποσοστό του σχηματιζόμενου μπαινίτη αυξάνεται με τη μείωση της ταχύτητας απόψυξης.

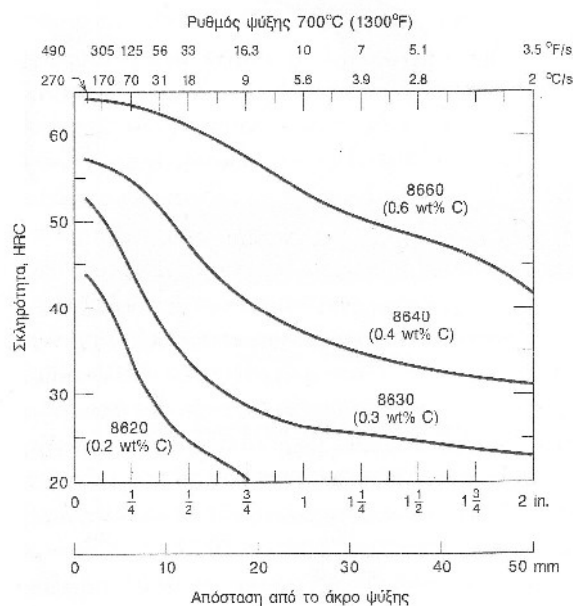
Η διαφορετική εμβαπτότητα των πέντε χαλύβων ερμηνεύεται από την παρουσία των στοιχείων προσθήκης νικελίου, Ni, χρωμίου, Cr και μολυβδαινίου, Mo. Αυτά τα κραματικά στοιχεία επιβραδύνουν τις αντιδράσεις μετασχηματισμού ωστενίτη → περλίτη/μπαινίτη, γεγονός που επιτρέπει το σχηματισμό περισσότερου μαρτενσίτη, για συγκεκριμένη ταχύτητα απόψυξης, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη σκληρότητα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.22 οι καμπύλες εμβαπτότητας εξαρτώνται όχι μόνο από την παρουσία κραματικών στοιχείων, αλλά επίσης και από την περιεκτικότητα σε άνθρακα. Παρατηρείται ότι η σκληρότητα σε κάθε θέση μέτρησης της δοκιμής Jominy αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα.

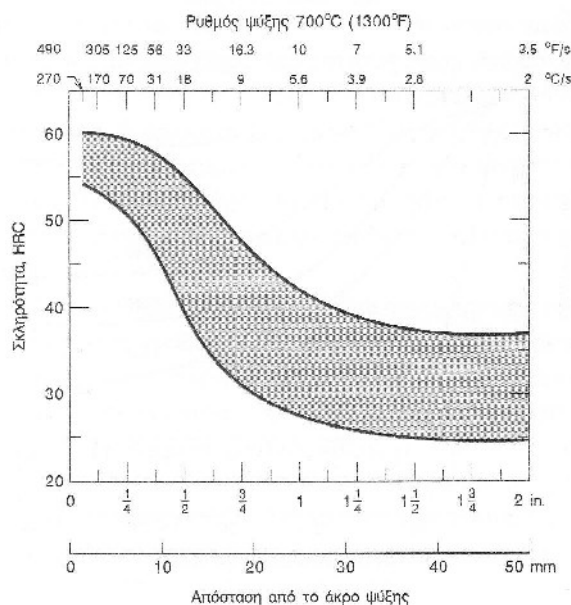
Εκτός από την παρουσία κραματικών στοιχείων και την περιεκτικότητα σε άνθρακα, η εμβαπτότητα ενός χάλυβα εξαρτάται επίσης και από το μέγεθος των κόκκων του ωστενίτη. Αύξηση των κόκκων του ωστενίτη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εμβαπτότητας.

Ακόμη, κατά τη βιομηχανική παραγωγή των χαλύβων υπάρχει πάντα μια διακύμανση στη σύσταση και το μέσο μέγεθος κόκκου από παρτίδα σε παρτίδα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας διασποράς στις μετρήσεις εμβαπτότητας. Για αυτό το λόγο συχνά για χάλυβες που προορίζονται για σκλήρυνση (π.χ. 8640H) δίνονται διαγράμματα εμβαπτότητας, τα οποία αναπαρίστανται γραφικά ως μια ζώνη με σύνορα τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές σκληρότητας. Η καμπύλη εμβαπτότητας ενός

κράματος θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στα όρια μιας συγκεκριμένης ζώνης. Στο Σχήμα 11.23 παρουσιάζεται η ζώνη εμβαπτότητας για ένα χάλυβα 8640.



Σχήμα 11.22: Καμπύλες εμβαπτότητας για τέσσερις χάλυβες της σειράς 8600, με διαφορετική περιεκτικότητα σε άνθρακα.



Σχήμα 11.23: Η ζώνη εμβαπτότητας για ένα χάλυβα 8640H, όπου φαίνονται το μέγιστο και ελάχιστο όριο. Το σύμβολο H υποδηλώνει ότι ο χάλυβας προορίζεται για επιβελτίωση και ότι η καμπύλη εμβαπτότητάς του θα βρίσκεται μέσα στα όρια συγκεκριμένης ζώνης.

Επίσης, είναι αξιοσημείωτο ότι η εμβαπτότητα ενός κράματος είναι μια ιδιότητα που σχετίζεται με τη δυνατότητα συγκόλλησης του. Στην πραγματικότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ευκολία συγκόλλησης του κράματος.

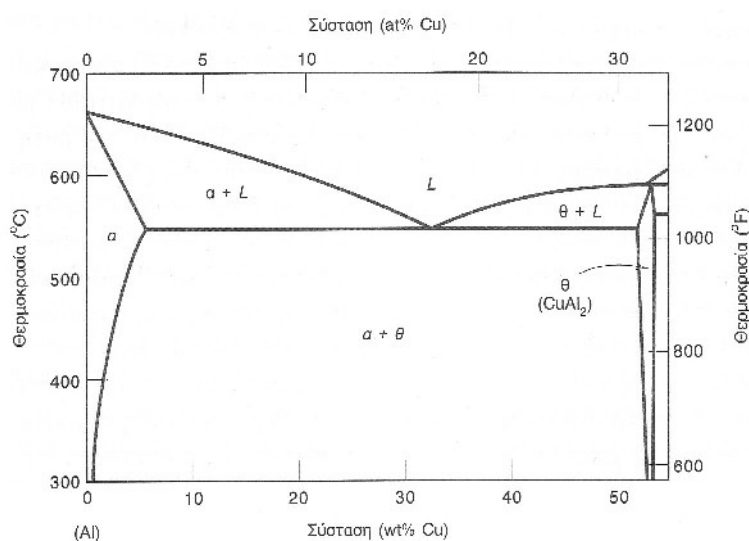
11.3 ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΗ

Η σκλήρυνση με κατακρήμνιση, η οποία επίσης καλείται σκλήρυνση μέσω γήρανσης, είναι μια θερμική κατεργασία που χρησιμοποιείται για να αυξήσει την αντοχή και τη σκληρότητα μαλακών και όλκιμων υλικών, όπως κραμάτων του αλουμινίου, μαγνησίου, νικελίου και τιτανίου, καθώς και μερικών ανοξείδωτων χαλύβων. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με το σχηματισμό εξαιρετικά μικρών και ομοιόμορφα διασκορπισμένων σωματιδίων μιας δεύτερης φάσης, εντός της αρχικής φάσης, τα οποία εμποδίζουν την κίνηση των διαταραχών ή ατελειών μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Επειδή όμως η ικανότητα των μετάλλων να παραμορφώνονται πλαστικά, οφείλεται κυρίως στην κίνηση των διαταραχών, η παρεμπόδιση της κίνησής τους, έχει ως αποτέλεσμα τη σκλήρυνση του υλικού.

Η όλη διαδικασία ονομάζεται σκλήρυνση με κατακρήμνιση και τα μικρά σωματίδια της νέας φάσης κατακρημνίσματα. Ο όρος σκλήρυνση μέσω γήρανσης χρησιμοποιείται επίσης για να προσδιορίσει, ότι η διαδικασία της σκλήρυνσης εξελίσσεται χρονικά, καθώς το κράμα «γερνά».

Η σκλήρυνση με κατακρήμνιση εφαρμόζεται κυρίως σε κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής. Αν και υπάρχουν πολλά τέτοια κράματα, κλασσικό παράδειγμα σκλήρυνσης με κατακρήμνιση αποτελεί η σκλήρυνση του ντουραλουμινίου, το οποίο ανήκει στη σειρά κραμάτων Al-Cu (σειρά 2000), με περιεκτικότητα περίπου 4 % κ.β. Cu.

Στο Σχήμα 11.24 παρουσιάζεται το διάγραμμα φάσεων αλουμινίου-χαλκού στην πλευρά που είναι πλούσια σε αλουμίνιο.



Σχήμα 11.24: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων αλουμινίου-χαλκού.

Σύμφωνα με το διάγραμμα φάσεων, για ένα κράμα αλουμινίου-χαλκού με 4% κ.β. χαλκό (ντουραλουμίνιο), σε θερμοκρασία 500-580°C, υπάρχει μόνο μια φάση, που καλείται α. Η φάση α είναι ένα στερεό διάλυμα αντικατάστασης, που σχηματίζεται από τη διάλυση χαλκού σε αλουμίνιο. Σε θερμοκρασία μικρότερη των 500°C, το κράμα εισέρχεται στη διφασική περιοχή α+CuAl₂. Η μεσομεταλλική ένωση CuAl₂ καλείται φάση θ. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, με αργό ρυθμό, από τους 500°C σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η περιεκτικότητα του στερεού διαλύματος α σε χαλκό γίνεται μικρότερη. Ο χαλκός που περισσεύει αντιδρά με το αλουμίνιο σχηματίζοντας τη μεσομεταλλική ένωση CuAl₂,

η οποία κατακρημνίζεται υπό τη μορφή μεγάλων σωματιδίων, στα όρια των κόκκων καθώς και μέσα στους κόκκους (Σχήμα 11.25α). Επειδή τα σωματίδια είναι τοποθετημένα το ένα μακριά από το άλλο, δεν αποτελούν εμπόδιο στην μετακίνηση των διαταραχών, και για αυτό το σχηματιζόμενο κράμα είναι μαλακό.

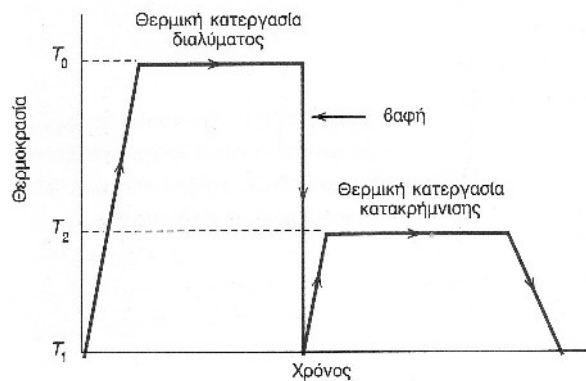


Σχήμα 11.25: Κρυσταλλική δομή του κράματος Al-Cu (4% κ.β. Cu). (α) Μετά από αργή απόψυξη από τους 550°C, (β) Μετά από κατακρήμνιση μέσω γήρανσης.

Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος που προέρχεται από ήρεμη απόψυξη μπορεί να βελτιωθούν με μια θερμική κατεργασία, η οποία περιλαμβάνει τρία στάδια.

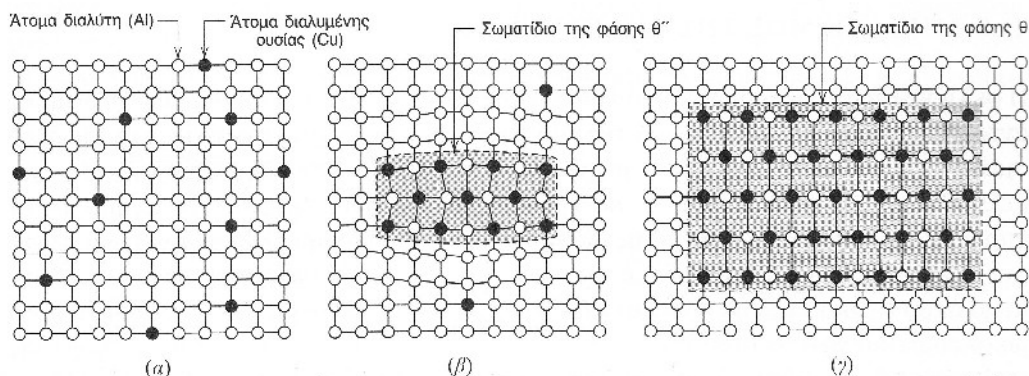
- **Θερμική κατεργασία διαλύματος:** Θέρμανση του κράματος στους 550°C και αναμονή, γεγονός που επιτρέπει την πλήρη διάλυση του χαλκού στη φάση α. Σκοπός αυτού του βήματος είναι ο σχηματισμός ενός ομογενούς στερεού διαλύματος στο οποίο έχουν διαλυθεί όλες οι φάσεις.
- **Απόψυξη (βαφή):** Ταχεία απόψυξη σε νερό ή υδατικό συνθετικό διάλυμα, έτσι ώστε να αποφευχθεί η κατακρήμνιση της μεσομεταλλικής ένωσης CuAl₂. Το στερεό διάλυμα, φάσης α, που σχηματίζεται με τη θερμική κατεργασία διαλύματος πρέπει να ψυχθεί αρκετά γρήγορα έτσι ώστε να πάρουμε ένα υπέρκορο σε Cu στερεό διάλυμα φάσης α, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το οποίο θα είναι κατάλληλο για επακόλουθη σκλήρυνση με γήρανση (κατακρήμνιση). Το στερεό διάλυμα εάν παραμείνει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μετά από 3-4 ημέρες αρχίζει να αποκτά μεγαλύτερη σκληρότητα και αντοχή σε εφελκυσμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπομικροσκοπικά σωματίδια CuAl₂ κατακρημνίζονται με την πάροδο του χρόνου, γιατί το υπέρκορο στερεό διάλυμα α, είναι ενεργειακά ασταθές. Τα υπομικροσκοπικά αυτά σωματίδια κατανέμονται σε όλη τη μάζα του κράματος (Σχήμα 11.25β), παρεμποδίζοντας την μετακίνηση των διαταραχών, με αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σκλήρυνση με κατακρήμνιση μέσω φυσικής γήρανσης.
- Στην πράξη η γήρανση επιταχύνεται με την επαναθέρμανση του σχηματιζόμενου, μετά την ταχεία απόψυξη, στερεού υπέρκορου διαλύματος, φάσης α, στους περίπου 150°C για αρκετές ώρες. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η κατακρήμνιση των σωματιδίων CuAl₂ με τεχνητή γήρανση. Το σχηματιζόμενο κράμα είναι αρκετά λεπτόκοκκο, σκληρό και βρίσκει εφαρμογή στην αεροναυπηγική.

Τα τρία στάδια της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση: θερμική κατεργασία διαλύματος, βαφή και γήρανση, απεικονίζονται σχηματικά στο Σχήμα 11.26.



Σχήμα 11.26: Σχηματικό διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου των τριών σταδίων της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση: θερμική κατεργασία διαλύματος, βαφή (ταχεία απόψυξη και θερμική κατεργασία κατακρήμνισης).

Τέλος, στο Σχήμα 11.27 παρουσιάζονται σχηματικά τα στάδια σχηματισμού της φάσης ισορροπίας θ . Κατά την ανάπτυξη της φάσης θ , σχηματίζονται διάφορες μεταβατικές φάσεις. Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων αυτών των μεταβατικών φάσεων, έδειξε ότι η μέγιστη ισχύς συμπίπτει με τη φάση θ'' , η οποία διατηρεί πλεγματική συνέχεια με το μητρικό κρυσταλλικό πλέγμα. Η συνεχιζόμενη αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων και η ανάπτυξη της φάσης θ , οδηγεί σε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος (υπεργήρανση).



Σχήμα 11.27: Σχηματική αναπαράσταση των διάφορων σταδίων σχηματισμού της φάσης ισορροπίας θ . (α) Υπέρκορο στερεό διάλυμα α , (β) Ενδιάμεσο κατακρήμνισμα φάσης θ'' , (γ) Η φάση ισορροπίας θ , εντός της μητρικής φάσης α , η οποία δε διατηρεί τη πλεγματική συνέχεια με το μητρικό πλέγμα.