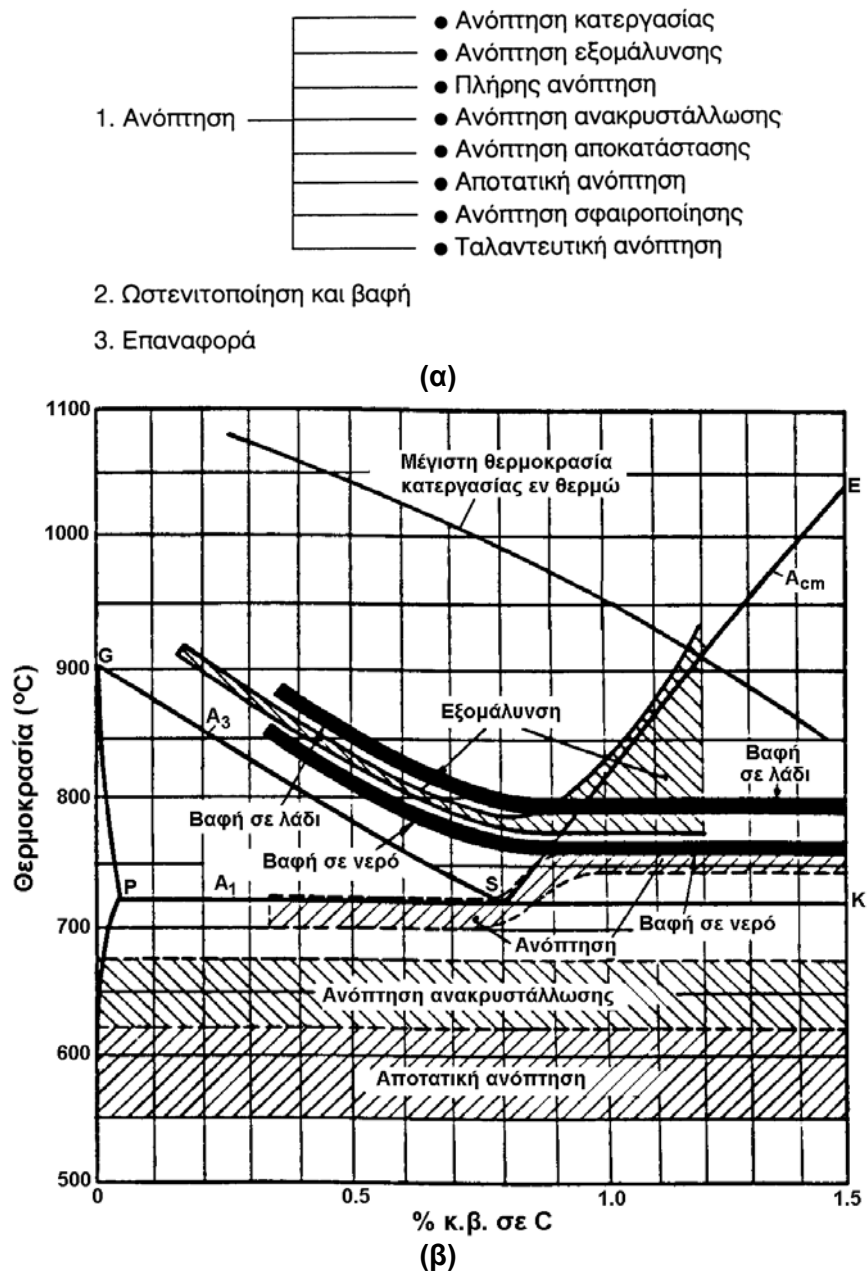


ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

ΑΝΟΠΤΗΣΗ - ΒΑΦΗ - ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ

ΓΕΝΙΚΑ

Στο Σχ. 1 παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα των θερμικών κατεργασιών που επιδέχονται οι χάλυβες και οι περιοχές θερμοκρασιών στο διάγραμμα Fe-C που αντιστοιχούν στις κατεργασίες αυτές.



Σχήμα 1. Θερμικές κατεργασίες χαλύβων
(α) Βασικές θερμικές κατεργασίες
(β) Περιοχές εφαρμογής τους στο διάγραμμα Fe-C

ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Είδος ανόπτησης	Θερμοκρασία θέρμανσης	Χρόνος παραμονής	Ψύξη	Αποτελέσματα
Ανόπτηση κατεργασίας	Συνήθως $\theta > \theta_{\text{ανακρυστάλλωσης}}$ (550-600° C)		Βραδεία απόψυξη	Εξάλειψη εσωτερικών τάσεων από ψυχρή κατεργασία Αύξηση ολκιμότητας
Ανόπτηση εξομάλυνσης	$A_{c3} + \theta$, $\theta = 55-85^\circ \text{ C}$ ή $A_{cm} + \theta$ ανάλογα με την $\pi(\text{C})$	~1h	Σχετικά γρήγορη ψύξη στον αέρα	Εκλέπτυνση των κόκκων χυτοχάλυβα ή υπερθερμανθέντα χάλυβα. Απόκτηση ομοιόμορφης κυτταροειδούς, λεπτοκρυσταλλικής φερριτοπερλιτικής δομής Εξαφάνιση ανισοτροπίας Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων
(Πλήρης) Ανόπτηση	$A_{c3} + \theta$, $\theta = 15-40^\circ \text{ C}$	Αρκετές h	Ψύξη μέσα στον κλίβανο με τον ίδιο ρυθμό θέρμανσης (~20° C/h)	Αποκατάσταση μικροδομής Βελτίωση αντοχής και δυσθραυστότητας χυτοχαλύβων Βελτίωση κατεργασιμότητας Εξάλειψη παραμενουσών τάσεων μετά από μηχανική κατεργασία εν θερμώ ή μετά από συγκόλληση Αύξηση μεγέθους ωστενιτικών κόκκων προς διευκόλυνση της μαρτενσιτικής βαφής
Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης	$\theta > \theta_{\text{ανακρυστάλλωσης}}$ και στην φερριτική περιοχή (600-700° C)		Ελεγχόμενη αργή απόψυξη στον αέρα	Εξάλειψη ιστού ενδοτράχυνσης στους εν ψυχρώ παραμορφωμένους χάλυβες Βελτίωση κατεργασιμότητας
Ανόπτηση αποκατάστασης	$\theta < \theta_{\text{ανακρυστάλλωσης}}$ και στην περιοχή 450-600° C		Αργή απόψυξη	Δεν μεταβάλλεται η μικρογραφική μορφή
Αποτακτική ανόπτηση	$\theta = 400-450^\circ \text{ C}$ στη φερριτική περιοχή		Αργή απόψυξη	Εξάλειψη παραμενουσών τάσεων Δεν μεταβάλλεται η μικρογραφική μορφή
Ανόπτηση σφαιροποίησης	Λίγο μικρότερη της A_{c1} (~700° C). Ενδεικτική τιμή: $A_{c1} - 50^\circ \text{ C}$.	~25h	Αργή απόψυξη σε φούρνο για πολλές ώρες (έως 25h)	Σφαιροποίηση σεμεντίτη Βελτίωση κατεργασιμότητας σε κοπή (μαλακότερο και ολκιμότερο υλικό)
Ταλαντευτική ανόπτηση	Περιοδικά μεταβαλλόμενη θέρμανση στην περιοχή $[A_{c1} - 50, A_{c1} + 50]$			Σφαιροποίηση σεμεντίτη

ΩΣΤΕΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Περιλαμβάνει:

1. Θέρμανση του χάλυβα με αργό ρυθμό μέχρι θερμοκρασία της τάξης των $A_{c3} + 50^\circ \text{ C}$ και κατά προτίμηση σε κλίβανο ελεγχόμενης ατμόσφαιρας (με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται αφενός η ανισοθερμία μεταξύ επιφάνειας και πυρήνα που προκαλεί πλαστική παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος και αφετέρου η επιφανειακή οξείδωση του χάλυβα που οδηγεί σε απώλεια υλικού και μείωση της $\pi(\text{C})$).
2. Παραμονή στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα (υπερβολικά μεγάλος χρόνος παραμονής μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη αύξηση του μεγέθους κόκκων (υπερθέρμανση)).

ΒΑΦΗ

Βαφή είναι η ταχύτατη απόψυξη του χάλυβα που έχει ήδη θερμανθεί σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία.

Σύγκριση με ανόπτηση

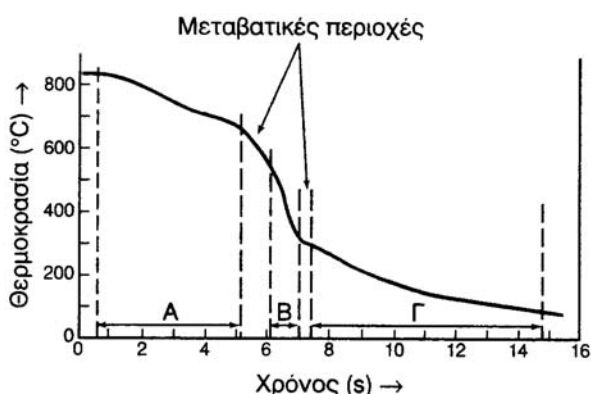
Η ανόπτηση οδηγεί σε φάσεις ισορροπίας φερρίτη και σεμεντίτη και στη μικρογραφική δομή του περλίτη, όπως ακριβώς προβλέπονται από το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Fe-C.

Η βαφή οδηγεί σε φάσεις εκτός ισορροπίας και αποδίδει τις μικρογραφικές μεταβολές που συμβαίνουν στον χάλυβα μέσω του διαγράμματος CCT του χάλυβα.

Καμπύλη απόψυξης

Περιγράφει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του χάλυβα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της απόψυξης.

Τυπική μορφή μιας καμπύλης απόψυξης παρουσιάζεται στο Σχ. 2, όπου υφίστανται 3 διακεκριμένες περιοχές με χαρακτηριστικούς ρυθμούς απόψυξης $\Delta T/\Delta t$:



Σχήμα 2. Τυπική μορφή καμπύλης απόψυξης

Περιοχή Α

Η ταχύτητα απόψυξης είναι αργή λόγω της μικρής αγωγιμότητας των ατμών του υγρού ψύξης που σχηματίζονται στην επιφάνεια του χάλυβα.

Περιοχή Β

Η ταχύτητα απόψυξης είναι μεγάλη λόγω διάλυσης του στρώματος ατμών (εμφάνιση φαινομένου βρασμού του υγρού ψύξης στην ψυχόμενη μεταλλική επιφάνεια)

Περιοχή Γ

Η ταχύτητα απόψυξης είναι πολύ μικρή, η εξάτμιση του υγρού σταματά και η απαγωγή θερμότητας γίνεται μέσω του όγκου του υγρού.

Η ταχύτητα απόψυξης $\Delta T/\Delta t$ εξαρτάται από: το είδος του ψυκτικού μέσου, τη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου, τυχόν ταυτόχρονη ανάδυσή του, το μέγεθος-γεωμετρία-μάζα-κατάσταση επιφάνειας του ψυχόμενου χάλυβα.

Η δραστηριότητα του μέσου βαφής εκφράζεται μέσω ενός αριθμητικού συντελεστή H που χαρακτηρίζει την αποτελεσματικότητα του μέσου βαφής από απόψεως ταχύτητας απόψυξης.

$H=1$ τίθεται για τη δραστηριότητα ήρεμου ύδατος, θερμοκρασίας 20°C.

Η δραστηριότητα του ύδατος αυξάνεται με την προσθήκη αλάτων και μειώνεται με την προσθήκη γλυκερίνης ή σάπωνα ή Na_2SiO_3 .

$\text{max}H=5$ για υδατικό διάλυμα 15% NaCl .

Κατά σειρά φθίνουσας δραστηριότητας τα συνήθη λουτρά ψύξης ταξινομούνται ως εξής:

υδατικό διάλυμα άλατος, ύδωρ, τήγματα αλάτων, διαλύματα ελαίων, καθαρά έλαια, αέρας

Για αυξανόμενη θερμοκρασία ψυκτικού μέσου μειώνεται η ταχύτητα απόψυξης της επιφάνειας του μετάλλου.

Με αύξηση της θερμοκρασίας ψυκτικών ελαίων αυτά γίνονται πιο λεπτόρρευστα και ευνοούν αύξηση της ταχύτητας απόψυξης (αύξηση δραστηριότητας του ψυκτικού μέσου).

Η ταχύτητα ανάδευσης του ψυκτικού μέσου ευνοεί την αύξηση της ταχύτητας απόψυξης

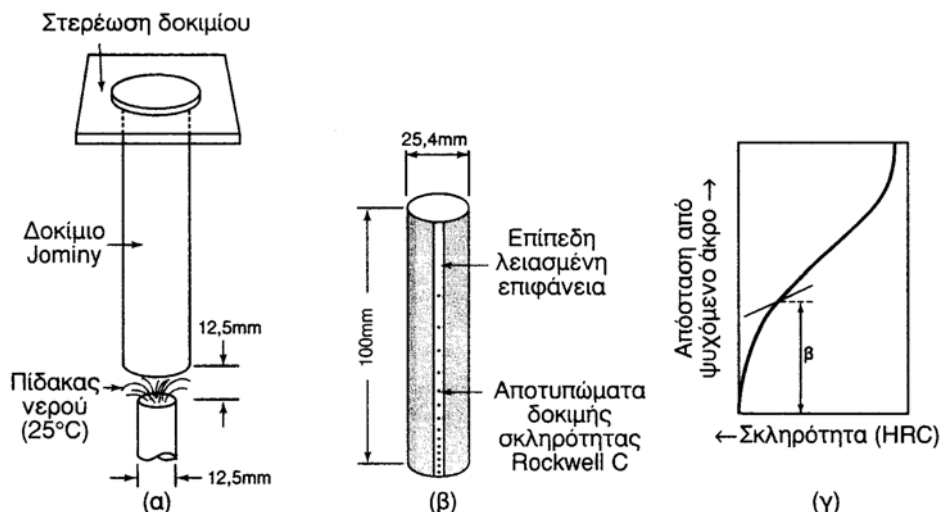
Γενικά:

"Η ταχύτητα απόψυξης είναι φθίνουσα συνάρτηση της μάζας του χάλυβα και αύξουσα συνάρτηση αύξουσα συνάρτηση της δραστηριότητας του λουτρού ψύξης και της απόστασης από το κ.β. του αντικειμένου".

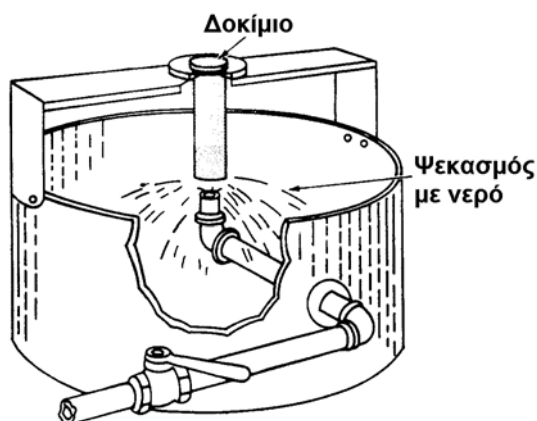
Εμβαπτότητα

Εμβαπτότητα βαμμένου χάλυβα είναι η ικανότητα σκλήρυνσής του μετά από τη βαφή, δηλαδή είναι η ικανότητα του χάλυβα να αναπτύσσει μαρτενσιτική δομή σε μεγάλο βάθος από την επιφάνειά του.

Πειραματικός προσδιορισμός εμβαιότητας (δοκιμή Jominy), βλ. Σχ. 3 και 4.



Σχήμα 3. Δοκιμή Jominy.



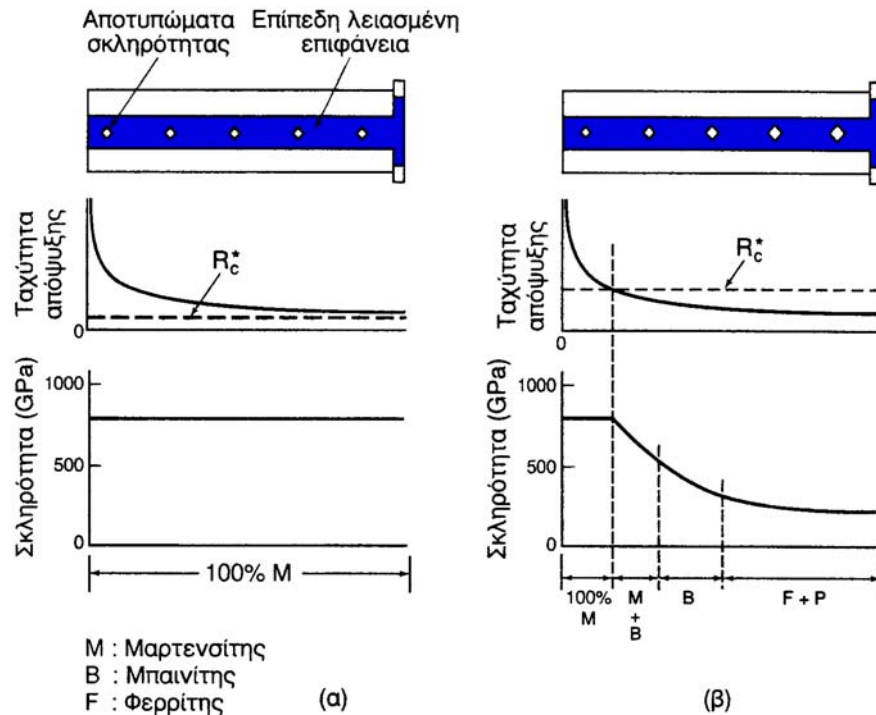
Σχήμα 4. Συσκευή Jominy

Λαδιασμία δοκιμής

1. Κυλινδρικό δοκίμιο μήκους 100 mm και διαμέτρου 25,4 mm υφίσταται πλήρη ωστενιτοποίηση μέσα σε κλίβανο.
2. Στη συνέχεια, το δοκίμιο τίθεται σε ειδική διάταξη (συσκευή Jominy) και το ένα άκρο του ψύχεται με πίδακα ύδατος, βλ. Σχ. 3(α) και 4. Το άκρο αυτό αποψύχεται ταχύτατα, ενώ η ταχύτητα απόψυξης μειώνεται συνεχώς στις διάφορες θέσεις κατά μήκος του δοκιμίου, όσο απομακρυνόμαστε από το ψυχόμενο άκρο.
3. Το δοκίμιο, όταν αποκτήσει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, σκληρομετρείται σε διάφορες θέσεις κατά μήκος μιας γενέτειράς του, βλ. Σχ. 3(β).
4. Τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης συναρτήσει της απόστασης από το ψυχόμενο άκρο παρουσιάζονται στο Σχ. 3(γ).

Παρατηρήσεις

- (α) Υψηλή εμβαιότητα συνοδεύεται από σταθερή υψηλή σκληρότητα και ταχύτητα απόψυξης μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα απόψυξης R_c^* σ' όλο το μήκος του δοκιμίου, βλ. Σχ. 5(α).
- (β) Μέτρια ή χαμηλή εμβαιότητα παρουσιάζει τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε μικρό μήκος από το ψυχόμενο άκρο, βλ. Σχ. 5(β).



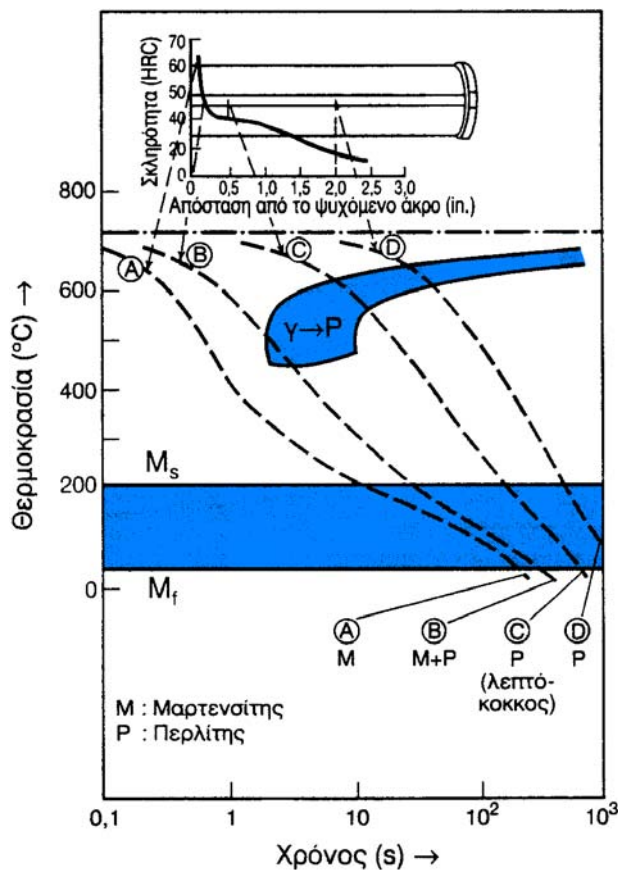
Σχήμα 5. Αποτελέσματα δοκιμής Jominy σε χάλυβες
(α) Μεγάλης εμβαπτότητας
(β) Μικρής εμβαπτότητας

Βάθος βαφής, β κατά τη δοκιμή Jominy είναι η απόσταση από το ψυχόμενο άκρο του δοκιμίου, στην οποία έχει γίνει μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη κατά 50% και αντιστοιχεί περίπου στο σημείο καμπής της καμπύλης σκληρομέτρησης του Σχ. 3(γ). Μεγάλο βάθος βαφής σημαίνει υψηλή εμβαπτότητα.

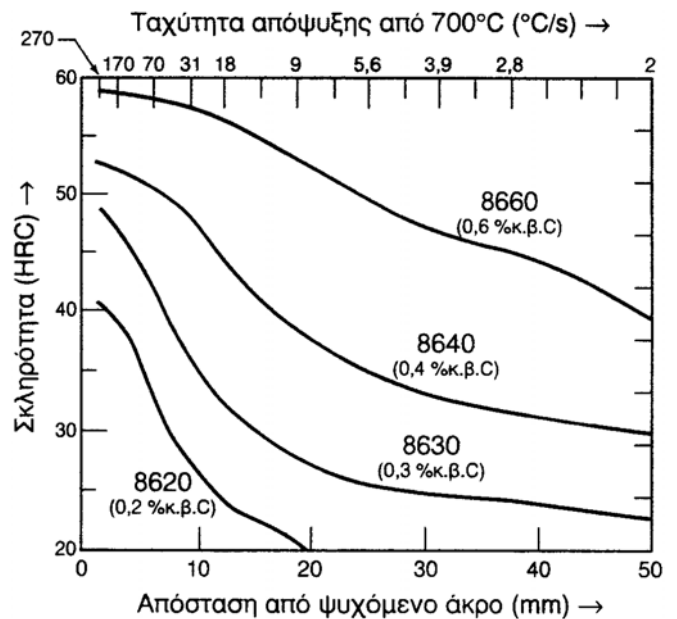
Παράγοντες που επηρεάζουν βάθος βαφής και εμβαπτότητα

- Είναι φθίνουσα συνάρτηση της μάζας του χαλύβδινου τεμαχίου.
- Είναι αύξουσα συνάρτηση της δραστηριότητας του λουτρού ψύξης.
- Είναι φθίνουσα συνάρτηση της κρίσιμης ταχύτητας βαφής V_c , που αντιστοιχεί στην καμπύλη απόψυξης που εφάπτεται στην "μύτη" του διαγράμματος CCT (κραματικές προσθήκες στον χάλυβα μετατοπίζουν τις καμπύλες CCT και TTT προς τα δεξιά και οδηγούν σε μείωση της V_c).
- Είναι αύξουσα συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη δ (αύξηση του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη μετατοπίζουν επίσης τις καμπύλες CCT και TTT προς τα δεξιά).

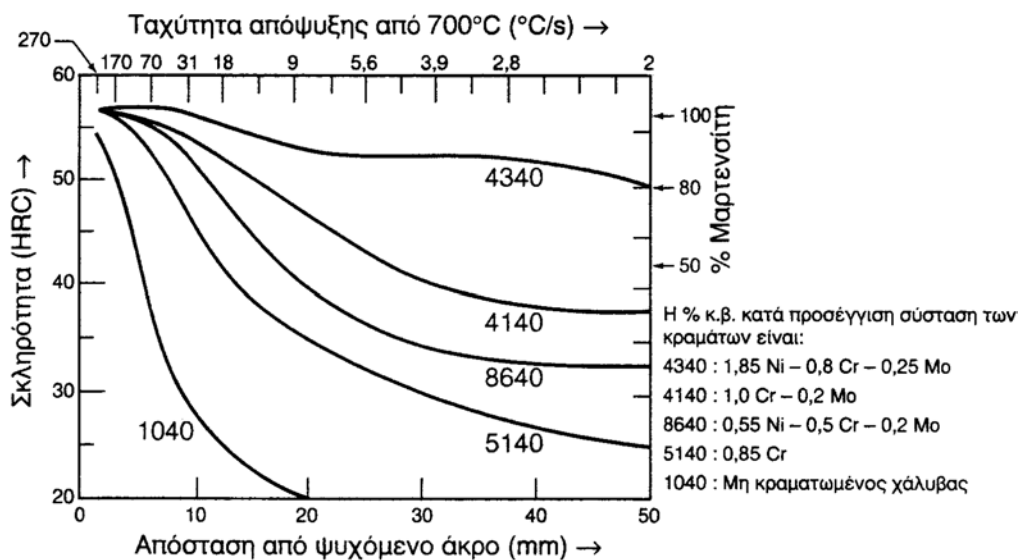
Χαρακτηριστικά παραδείγματα μεταβολής της εμβαπτότητας συναρτήσει των διαφόρων παραγόντων που την επηρεάζουν παρουσιάζονται στα Σχ. 6-8.



Σχήμα 6. Εξάρτηση της εμβαπτότητας από τις καμπύλες συνεχούς απόψυξης κοινού ευθηκτοειδούς χάλυβα.

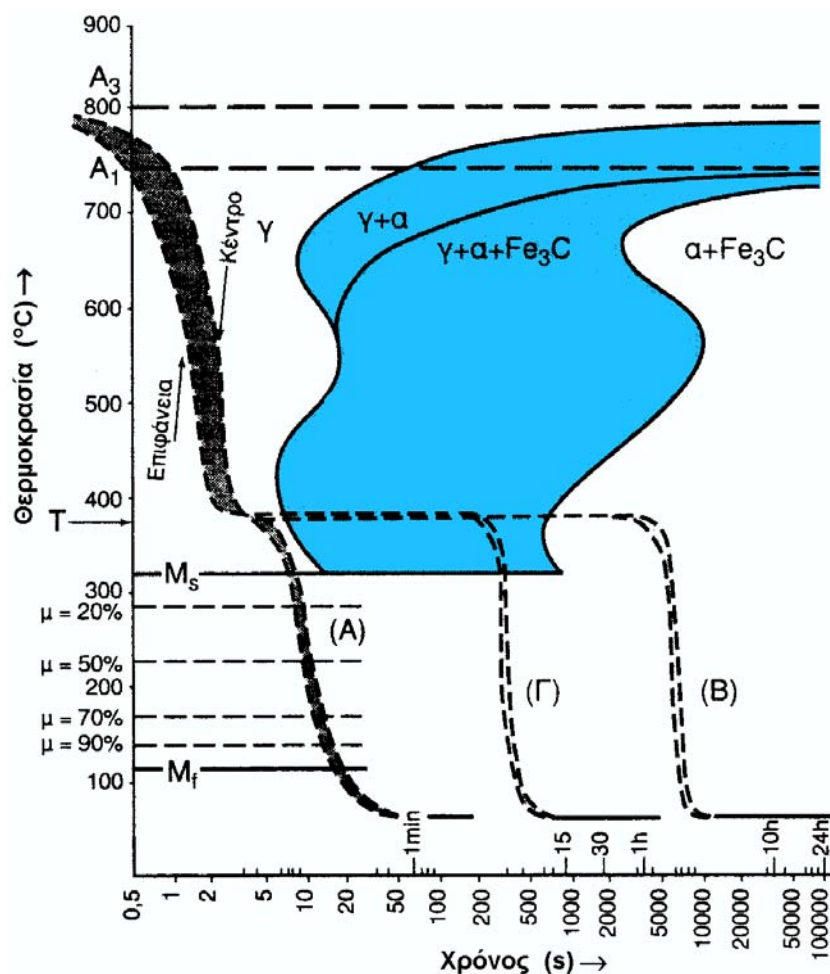


Σχήμα 7. Καμπύλες εμβαπτότητας για χάλυβες της σειράς 8600 με διαφορετικό π(C).



Σχήμα 8. Εξάρτηση της εμβαπτότητας χάλυβα με π(C)=0,4% από το ποσοστό κραμάτωσης

Τεχνικές βαφής χαλύβων (Σχ. 9)



Σχήμα 9. Τεχνικές βαφής χαλύβων

Η βαφή γίνεται συνήθως σε περισσότερα του ενός στάδια. Στην περίπτωση αυτή ονομάζεται *κλιμακωτή βαφή*.

Ανάλογα με τις αποκτώμενες τελικές δομές διακρίνουμε:

- (α) *Κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή.*
- (β) *Κλιμακωτή μπαινιτική βαφή.*
- (γ) *Κλιμακωτή μπαινιτομαρτενσιτική βαφή.*

ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ

Αναγκαία θερμική κατεργασία που εφαρμόζεται στους βαμμένους χάλυβες προς εξάλειψη των δυσάρεστων συνεπειών από το σχηματισμό μαρτενσίτη.

Συνίσταται σε θέρμανση σε θερμοκρασία $T \in [M_s, A_1]$ επί χρονικό διάστημα t .

Αποτέλεσμα της επαναφοράς είναι η μερική μετάπτωση του μαρτενσίτη σε κατάσταση ισορροπίας. Η νέα δομή ονομάζεται *μαρτενσίτης από επαναφορά* και σημειώνεται μείωση της σκληρότητας και αύξηση δυσθραυστότητας και ολκιμότητας του χάλυβα.

Οι αποκτώμενες δομές κατά την επαναφορά εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και τον χρόνο της κατεργασίας.

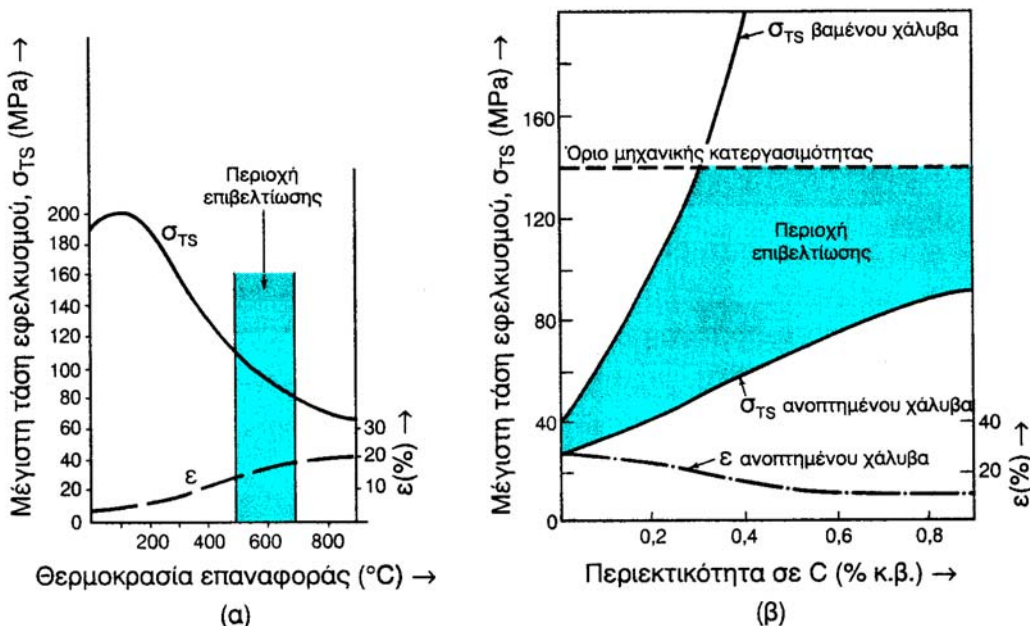
Επαναφορά κοινών χαλύβων :

- *Θέρμανση στους 80-160°C:* Σχηματίζεται μία φάση πλούσια σε C που λέγεται *ε-καρβίδιο*. Η περιεκτικότητα του μαρτενσίτη σε C μειώνεται κατά 30% περίπου και σημειώνεται ελαφρά μείωση της σκληρότητας.
- *Θέρμανση στους 160-400°C:* Οδηγεί στο μετασχηματισμό του μαρτενσίτη σε σεμεντίτη και λεπτόκοκκο φερρίτη. Η σκληρότητα μειώνεται δραστικά.

- Παρατεταμένη θέρμανση στους $400-700^{\circ}\text{C}$ οδηγεί διαδοχικά:
Στους 450°C : Σχηματισμός δευτερογενούς τροοσίτη (φερρίτης+σεμεντίτης) και περαιτέρω μείωση της σκληρότητας.
Στους 600°C : Σχηματισμός σορμπίτη (φερρίτης και σφαιρίδια σεμεντίτη) και περαιτέρω μείωση της σκληρότητας.
Σε υψηλότερη θερμοκρασία σχηματίζεται πλακοειδής περλίτης με τάση του σεμεντίτη προς σφαιροποίηση μέσα στους κόκκους περλίτη.

Περιοχή επιβελτίωσης είναι η θερμοκρασιακή περιοχή, στην οποία σημειώνεται σημαντική αύξηση της δυσθραυστοτητας του χάλυβα μετά από επαναφορά.

Στο Σχ. 10 παρουσιάζεται η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων κοινών χαλύβων μετά από επαναφορά, καθώς επίσης και η επίδραση της $\pi(\text{C})$.

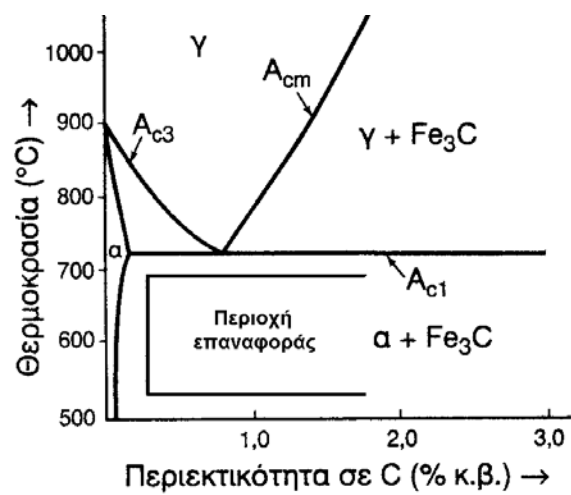


Σχήμα 10. (α) Μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων κοινού χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας επαναφοράς, (β) Μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων κοινών χαλύβων συναρτήσει της $\pi(\text{C})$.

Επαναφορά ισχυρά κραματωμένων χαλύβων :

- Χάλυβες που περιέχουν καρβιδιογόνα στοιχεία εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε επαναφορά, διατηρούν τη σκληρότητά τους και συγχρόνως γίνονται ολκιμότεροι (χρωμιούχοι χάλυβες). Τούτο οφείλεται στην κατακρήμνιση καρβιδίων των προσθηκών κατά την επαναφορά.
- Ορισμένοι κραματωμένοι χάλυβες (μαγγανιούχοι) μετά από επαναφορά και βραδεία απόψυξη παρουσιάζονται εύθραυστοι στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (ανωμαλία ευθραυστότητας από επαναφορά). Το φαινόμενο οφείλεται στην κατακρήμνιση καρβιδίων και νιτριδίων των κραματικών στοιχείων που υπάρχουν εν διαλύσει στη θερμοκρασία επαναφοράς. Σε ταχεία απόψυξη μετά την επαναφορά το φαινόμενο δεν παρατηρείται.
- Ορισμένοι κραματωμένοι χάλυβες με W, Mo, V θερμαίνονται δεν χάνουν τη σκληρότητά τους μέχρι τους 600°C περίπου (αντί για σεμεντίτη σχηματίζονται καρβίδια σκληρά και σταθερά που δεν σφαιροποιούνται). Οι χάλυβες αυτοί ονομάζονται ταχυχάλυβες και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κοπτικών εργαλείων.

Στο Σχ. 11 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή περιοχή επαναφοράς των κοινών χαλύβων.



Σχήμα 11. Θερμοκρασιακή επαναφορά κοινών χαλύβων