

Εξέλιξη της μικροδομής του χάλυβα 1.7709 μετά από θερμική κατεργασία επιβελτίωσης

Μεντής Χρήστος

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Σχολή Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Πανεπιστημιούπολη 2, Π. Ράλλη & Θηβών 250, Αιγάλεω-Αθήνα 12244, Ελλάδα

Περίληψη

Η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβδινων τεμαχίων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, απαιτεί πολλές φορές τη θερμική τους επεξεργασία. Έτσι, για την βέλτιστη απόδοσή τους στις δυσχερείς συνθήκες στις οποίες χρησιμοποιούνται, περνούν από τη διαδικασία της βαφής. Ο W.Nr.1.7709 είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα δομικού χάλυβα με εξαιρετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με άλλους κραματωμένους χάλυβες διαμόρφωσης, ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως έπειτα από βαφή και επαναφορά. Όμως, το διάγραμμα επαναφοράς του συγκεκριμένου χάλυβα δεν έχει σχεδιαστεί ακόμη, παρά το γεγονός ότι οι παραγωγοί χάλυβα παρέχουν όλες τις τεχνικές πληροφορίες σχετικά με τη θερμική κατεργασία του εκάστοτε χάλυβα. Για τους σκοπούς της εργασίας, ωστενιτοποιήθηκαν στους 960°C δώδεκα δοκίμια, τα οποία, μετά από 30 λεπτά, υποβλήθηκαν σε βαφή σε λάδι. Στη συνέχεια, υποβλήθηκαν σε επαναφορά για δύο ώρες σε θερμοκρασίες από 180 έως 650°C.

Κάποιες από τις θερμοκρασίες αυτές μπορούν να φανούν χρήσιμες στους χαλυβουργούς καθώς επιτρέπουν ορισμένους ιδιαίτερους μετασχηματισμούς κατά την επαναφορά. Το διάγραμμα επαναφοράς είναι μείζονος σημασίας για μεταλλουργούς καθώς αποτελεί οδηγό για τις σωστές παραμέτρους επαναφοράς, ούτως ώστε να ληφθούν οι προβλεπόμενες μηχανικές ιδιότητες και να υπολογιστεί η σκληρότητα των τεμαχίων.

Κατά το πείραμα, μετά τη φωτογράφιση δοκιμίων στο μικροσκόπιο, και με τη χρήση του προγράμματος Fiji, έγινε επεξεργασία των φωτογραφιών και ελήφθησαν νέες εικόνες με τα καρβίδια, χρωματισμένα και αριθμημένα. Με την επεξεργασία των δεδομένων από το Fiji, στο Excel, ελήφθησαν, τελικά, οι κατανομές των καρβιδίων για την εκάστοτε θερμοκρασία επαναφοράς.

Συγγραφικά δικαιώματα © 2023-2024 Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Λέξεις κλειδιά: χάλυβες, κατανομή σωματιδίων, αυτόματη ανάλυση εικόνας, χάλυβες κατασκευών



Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2023-2024

<http://mech.uniwa.gr/>

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η ΜΕΝΤΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ του ΣΤΕΦΑΝΟΥ, με αριθμό μητρώου 272017081 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα



Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2023-2024

<http://mech.uniwa.gr/>

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι εξεταστική επιτροπή:

α/α	Όνομα/Επώνυμο	Βαθμίδα/Ιδιότητα	Ψηφιακή υπογραφή
1	ΜΕΝΤΡΕΑ ΚΑΡΜΕΝ	ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ - ΕΙΣΗΓΗΤΡΙΑ	
2	ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ - ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ	
3	ΚΑΡΕΛΛΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ- ΑΓΑΘΟΚΛΗΣ	ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΕΔΙΠ	
4			

1	Εισαγωγή.....	5
1.1	Χάλυβες.....	5
1.1.1	Μέθοδοι Παρασκευής.....	5
1.1.1.1	Κλίβανος Ανοικτής Εστίας (Open Hearth Furnace).....	5
1.1.1.2	Βασικός Κλίβανος Οξυγόνου (Basic Oxygen Furnace - BOF).....	6
1.1.1.3	Κλίβανος Ηλεκτρικού Τόξου (Electric Arc Furnace - EAF).....	7
1.1.1.4	Επαγωγικός Κλίβανος (Induction Furnace - IF).....	9
1.1.1.5	Συνεχής Χύτευση (Continuous Casting).....	10
1.1.1.6	Μέθοδος ESR (Electro Slag Remelting).....	13
1.1.1.7	Κονιομεταλλουργία (Powder Metallurgy).....	15
1.1.1.8	Μέθοδοι Προσθετικής Κατεργασίας (Additive Manufacturing).....	17
1.1.2	Κραματοποιητικά Στοιχεία.....	22
1.1.3	Ατέλειες Δομής.....	24
1.1.4	Πρότυπα Χάλυβα.....	25
1.1.5	Ο χάλυβας 1.7709.....	26
1.2	Θερμικές Κατεργασίες.....	31
1.2.1	Ωστενιτοποίηση.....	31
1.2.2	Ανόπτηση.....	32
1.2.2.1	Ανόπτηση Αποκατάστασης (450-600°C).....	33
1.2.2.2	Αποτακτική Ανόπτηση (580-650°C).....	34
1.2.2.3	Ανόπτηση Κατεργασίας (550-650°C).....	34
1.2.2.4	Ανόπτηση Ανακρυστάλλωσης – Ανακρυστάλλωση (650-750°C).....	34
1.2.2.5	Ανόπτηση Σφαιροποίησης (~700°C).....	35
1.2.2.6	Ανόπτηση Εξομάλυνσης.....	35
1.2.2.7	Πλήρης Ανόπτηση.....	36
1.2.3	Βαφή.....	37
1.2.3.1	Μέσα βαφής - Δραστικότητα μέσω βαφής.....	39
1.2.3.2	Το Διάγραμμα Χρόνου-Θερμοκρασίας-Μετασχηματισμού (TTT).....	40
1.2.3.3	Παραμένον Ωστενίτης.....	41
1.2.3.4	Εμβαπτότητα.....	42
1.2.4	Επαναφορά (Ανόπτηση Επαναφοράς).....	44
2	Πειραματική Ανάλυση.....	46
2.1	Λείανση (Grinding).....	48
2.2	Στίλβωση (Polishing).....	49
2.3	Χημική Προσβολή (Etching).....	51
2.4	Μικροσκόπιο και Ανάλυση.....	53

1 Εισαγωγή

1.1 Χάλυβες

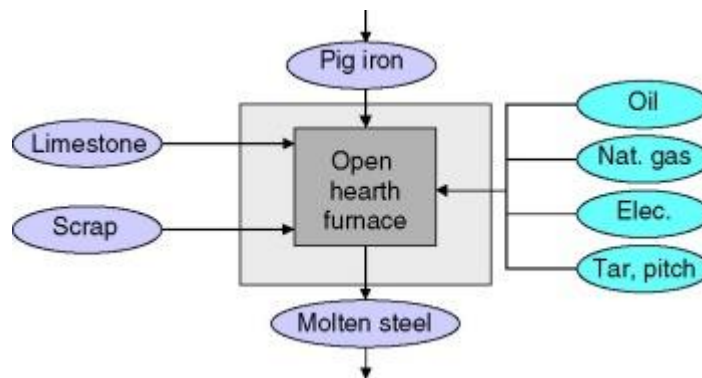
Οι χάλυβες, όπως είναι γνωστό, συνιστούν κράματα Fe-C, με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη ή ίση του 1.5% κ.β. Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, οι χάλυβες περιέχουν, ενίοτε σε μικρές ποσότητες, και ορισμένα άλλα στοιχεία κραμάτωσης, τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές τους ή και τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Ο χάλυβας είναι ένα ευρέως διαδεδομένο υλικό που βρίσκει ποικίλες βιομηχανικές εφαρμογές όπως την κατασκευαστική βιομηχανία, την αυτοκίνηση, την αεροναυπηγική και την ενέργεια. Με παραγωγή της τάξης των 1.8 δισεκατομμυρίων τόνων ανά τον πλανήτη το 2018, ο χάλυβας παραμένει το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στον κόσμο. Η παραγωγή χάλυβα αποτελείται από μια σύνθετη σειρά εργασιών οι οποίες μετατρέπουν ακατέργαστα υλικά σε προϊόντα χάλυβα υψηλής ποιότητας. Παρακάτω, θα αναλυθούν περαιτέρω οι διαφορετικές μέθοδοι κατασκευής χάλυβα που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία.

1.1.1 Μέθοδοι Παρασκευής

1.1.1.1 Κλίβανος Ανοικτής Εστίας (Open Hearth Furnace)

Οι κλίβανοι ανοικτής εστίας φορτώνονται αρχικά με παλαιοσίδηρο (scrap) και μικροποσότητες ασβεστόλιθου. Ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται ως παράγοντας αναγωγής. Έπειτα, το καύσιμο -συνήθως έλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο, πίσσα ή συνδυασμός μερικών από αυτά- αναφλέγεται για την τήξη του μίγματος (σχήμα 1). Καθώς το μίγμα υγροποιείται, στον κλίβανο προστίθεται αργός σίδηρος σε δόσεις και γίνεται εμφύσηση με οξυγόνο υψηλής καθαρότητας. Μετά από διάφορες μικροεργασίες, ο τηγμένος χάλυβας «εγκλωβίζεται» για περίπου 8 ώρες για την επιπλέον χημική μείωση του σιδήρου. (1)

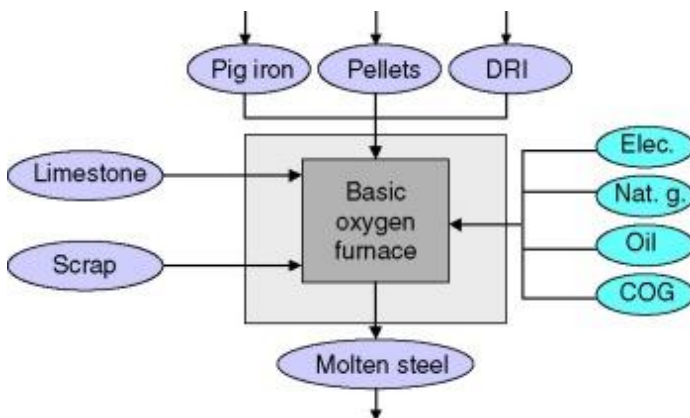


Σχήμα 1. Κλίβανος ανοικτής εστίας (1)

1.1.1.2 Βασικός Κλίβανος Οξυγόνου (Basic Oxygen Furnace - BOF)

Οι βασικοί κλίβανοι οξυγόνου (Basic Oxygen Furnaces - BOF) είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος παραγωγής χάλυβα ανά τον πλανήτη, αποτελώντας περίπου το 70% της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα. Η χρήση BOF περιλαμβάνει την τροφοδοσία του κλιβάνου με σιδηρομεταλλεύματα, κάρβουνο και ασβεστόλιθο, και την εμφύσηση οξυγόνου σε αυτόν για την εξάλειψη προσμείξεων όπως το θείο και ο φώσφορος. Όταν εξαλειφθούν οι προσμείξεις, ο τηγμένος σίδηρος εκχύεται σε έναν κάδο (ladle) χύτευσης και προστίθενται τα κραματικά στοιχεία για την παραγωγή του χάλυβα της επιθυμητής χημικής σύστασης.

Οι βασικοί κλίβανοι οξυγόνου χρησιμοποιούν αργό σίδηρο και μικροποσότητες παλαιοσιδήρου ως κύρια εισροή υλικού και συνήθως λιώνουν το φορτίο του κλιβάνου με αέρια οπτανθρακοποίησης, υψικαμίνου ή φυσικό αέριο. Οι βοηθητικές διαδικασίες τίθενται σε κίνηση με τη χρήση ηλεκτρισμού και καύσιμων ελαίων. Οι BOF έχουν τη δυνατότητα να ελαττώσουν τη διάρκεια της διαδικασίας σε λιγότερο από το ένα δέκατο αυτήν των κλιβάνων ανοικτής εστίας, επιτρέποντας την εξοικονόμηση ενέργειας για συγκεκριμένα μίγματα μετάλλων και σημαντική ελάττωση του κόστους ακόμα και αν τα υλικά είναι ακριβότερα. Παραταύτα, η μειωμένη ευελιξία τους στη χρήση του παλαιοσιδήρου επέφερε πλεονάσματα στην οικονομία, μείωση της τιμής του παλαιοσιδήρου και την ευκαιρία για την ανάπτυξη των κλιβάνων ηλεκτρικού τόξου. Οι κλίβανοι ηλεκτρικού τόξου χρησιμοποιήθηκαν, αρχικά, σε ολοκληρωμένες μονάδες παραγωγής κατά κύριο λόγο, καθώς η διαθεσιμότητα του παλαιοσιδήρου ήταν είτε ασθενής, είτε άφθονη. Σε έναν σημαντικό βαθμό, ο συνδυασμός του ευέλικτου ηλεκτρικού τόξου και των αποδοτικών βασικών κλιβάνων οξυγόνου, συνετέλεσε στο τέλος της χρήσης των κλιβάνων ανοικτής εστίας.(1)



Σχήμα 2. Βασικός κλίβανος οξυγόνου

1.1.1.3 Κλίβανος Ηλεκτρικού Τόξου (Electric Arc Furnace - EAF)

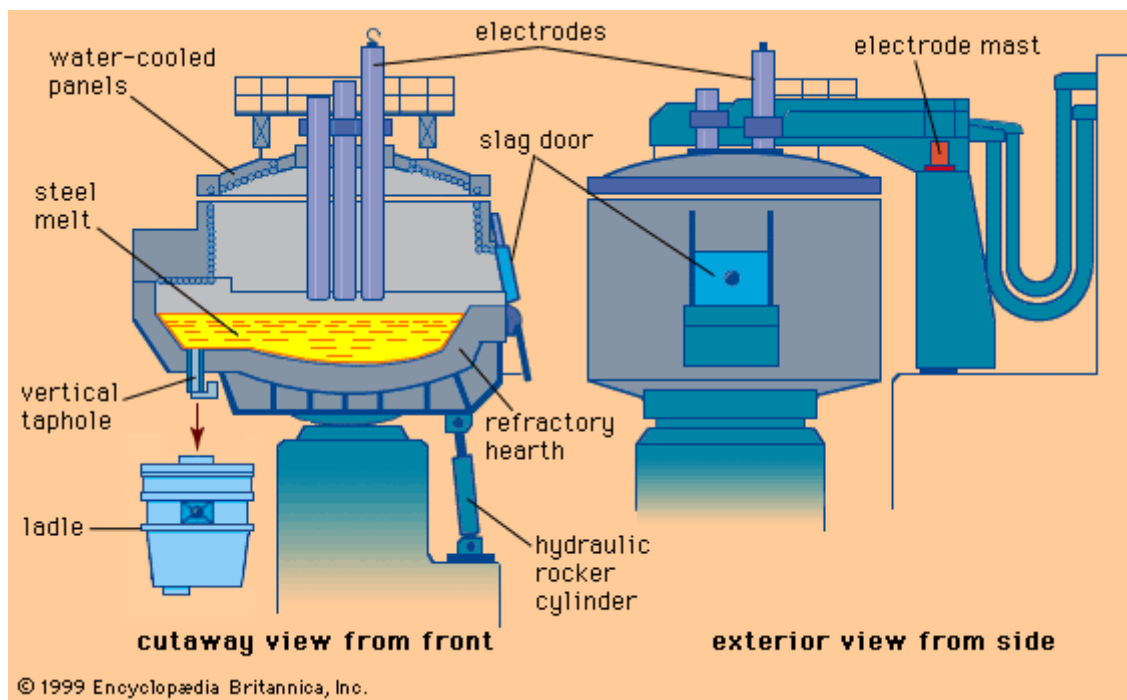
Η χρήση των κλιβάνων ηλεκτρικού τόξου έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μιας αποδοτικής συσκευής τήξης. Τα σύγχρονα σχέδια επικεντρώνονται στην αυξημένη χωρητικότητα του κλιβάνου. Η τήξη επιτυγχάνεται με την παροχή ενέργειας στο εσωτερικό του κλιβάνου. Αυτή η ενέργεια μπορεί να είναι ηλεκτρική ή χημική. Ο βασικός παράγοντας των διεργασιών τήξης είναι η ενέργεια τροφοδοτούμενη μέσω ηλεκτροδίων γραφίτη. Αρχικά, επιλέγεται χαμηλή τάση έως ότου τα ηλεκτρόδια να εισχωρήσουν στον παλαιοσίδηρο. Συνήθως, πάνω στο μίγμα τοποθετείται ελαφρύς παλαιοσίδηρος για να επιταχυνθεί η διείδυση. Περίπου το 15% του παλαιοσιδήρου λιώνεται κατά την αρχική περίοδο διείδυσης. Μετά από μερικά λεπτά, τα ηλεκτρόδια διειδύουν αρκετά βαθιά στον παλαιοσίδηρο ώστε επιτρέπουν την ανάπτυξη μακρέως τόξου υψηλής τάσης χωρίς να υπάρχει κίνδυνος για ζημιά μέσω ακτινοβολίας στο τοίχωμα του κλιβάνου. Το μακρύ τόξο μεγιστοποιεί την θερμότητα αυτού, καθώς μεταφέρει την ενέργεια στον παλαιοσίδηρο και στο μεταλλικό λουτρό στην εστία του κλιβάνου. (1)

Η έναρξη της διαδικασίας δημιουργεί ένα ασταθές τόξο, και παρατηρούνται ευρείες ταλαντώσεις στο ρεύμα, συνοδευόμενες από ταχείες κινήσεις των ηλεκτροδίων. Καθώς η θερμοκρασία στον κλίβανο αυξάνεται, το τόξο σταθεροποιείται. Καθώς το μεταλλικό λουτρό διαμορφώνεται, το τόξο γίνεται αρκετά σταθερό και η μέση εισαγόμενη ενέργεια αυξάνεται. (1)

Η χημική ενέργεια παρέχεται μέσω διαφόρων πηγών, μεταξύ των οποίων καυστήρες καυσίμου οξυγόνου και διατρητών οξυγόνου. Οι καυστήρες καυσίμου οξυγόνου καίνε φυσικό αέριο χρησιμοποιώντας οξυγόνο ή μια μίξη οξυγόνου και αέρα. Η θερμότητα μεταφέρεται στον παλαιοσίδηρο μέσω φλογών και αγωγής της θερμότητας από τα θερμά προϊόντα της ανάφλεξης. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσα στον παλαιοσίδηρο μέσω αγωγής. Μεγάλα τμήματα παλαιοσιδήρου χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να υγροποιηθούν στο λουτρό από ότι τα μικρότερα. Σε μερικές εργασίες, το οξυγόνο εισάγεται μέσω ενός αναλώσιμου σωλήνα φλογοβόλου αυλού για να κάψει τον παλαιοσίδηρο. Το οξυγόνο αντιδρά με τον θερμό παλαιοσίδηρο και καίει τον σίδηρο, παράγοντας έντονη θερμότητα για να καεί ο παλαιοσίδηρος. Μόλις παραχθεί το μεταλλικό λουτρό, το οξυγόνο μπορεί να εισρεύσει απευθείας στο λουτρό. Το οξυγόνο αντιδρά με διάφορα συστατικά στοιχεία του λουτρού όπως το αλουμίνιο (Al), το πυρίτιο (Si), το μαγγάνιο (Mn), ο φώσφορος (P), ο άνθρακας (C) και ο σίδηρος (Fe). Όλες αυτές οι αντιδράσεις είναι εξώθερμες και παρέχουν επιπλέον ενέργεια για την τήξη του παλαιοσιδήρου. Τα μεταλλικά οξειδία που σχηματίζονται καταλήγουν στη σκωρία. Η αντίδραση του οξυγόνου με τον άνθρακα παράγει μονοξείδιο του άνθρακα, το οποίο είτε καίγεται στον κλίβανο αν υπάρχει αρκετό οξυγόνο, ή αποβάλλεται μέσω του συστήματος άμεσης εκκένωσης, όπου καίγεται και μεταφέρεται στο σύστημα ελέγχου ρύπανσης. (1,2)

Μόλις λιώσει αρκετός παλαιοσίδηρος για να χωρέσει η δεύτερη δόση φορτίου, η διαδικασία φόρτωσης επαναλαμβάνεται. Μόλις λιώσει και η τελευταία δόση, τα πλευρικά τοιχώματα του κλιβάνου εκτίθενται σε έντονη ακτινοβολία από το τόξο, με αποτέλεσμα η τάση να μειώνεται. Εναλλακτικά, η δημιουργία μιας αφρώδους σκωρίας επιτρέπει στο τόξο να καλυφθεί. Αυτό προστατεύει το κέλυφος του κλιβάνου. Επιπλέον, μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας συγκρατείται στη σκωρία και μεταφέρεται στο λουτρό το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. (2)

Μόλις λιώσει πλήρως ο παλαιοσίδηρος, επιτυγχάνονται συνθήκες επίπεδου λουτρού. Σε αυτό το σημείο λαμβάνεται η θερμοκρασία του λουτρού και συλλέγεται δείγμα. Η ανάλυση της χημικής σύστασης του λουτρού επιτρέπει στη συσκευή τήξης να προσδιορίσει την ποσότητα του οξυγόνου που πρέπει να εμψυθηθεί κατά τη διάρκεια της ομογενοποίησης. Σε αυτό το σημείο, η συσκευή τήξης μπορεί επίσης να αρχίσει να ρυθμίζει τις προσθήκες κράματος. Οι ποσότητες αυτές οριστικοποιούνται μετά την περίοδο ομογενοποίησης. (1)

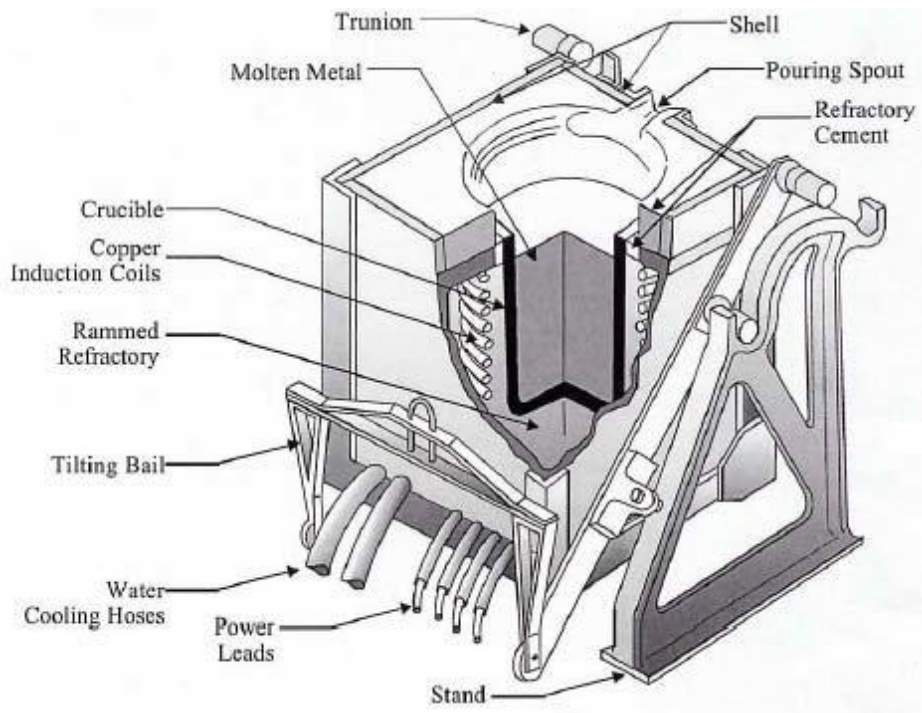


Σχήμα 3.Κλίβανος ηλεκτρικού τόξου (23)

1.1.1.4 Επαγωγικός Κλίβανος (Induction Furnace - IF)

Ο επαγωγικός κλίβανος αποτελείται από ένα μη-αγώγιμο κάδο που φέρει το μίγμα μετάλλων προς τήξη, περιτριγυρισμένο από ένα πηνίο χάλκινου καλωδίου. Ισχυρό εναλλασσόμενο ρεύμα ρέει διά μέσου του καλωδίου. Το πηνίο δημιουργεί ένα ταχέως αντιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που διαπερνά το μέταλλο. Το μαγνητικό πεδίο μεταφέρει στο εσωτερικό του μετάλλου κυκλικά ηλεκτρικά ρεύματα (δινορεύματα) μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Τα δινορεύματα που ρέουν μέσα από την ηλεκτρική αντίσταση του μεταλλικού όγκου, το θερμαίνουν μέσω θέρμανσης Joule. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά όπως ο σίδηρος, το υλικό μπορεί επίσης να θερμανθεί μέσω μαγνητικής υστέρησης, της αντιστροφής των μοριακών μαγνητικών διπόλων στο μέταλλο. Αφού λιώσει, τα δινορεύματα προκαλούν έντονη ανάδευση του τήγματος, εξασφαλίζοντας την καλή μίξη.(3)

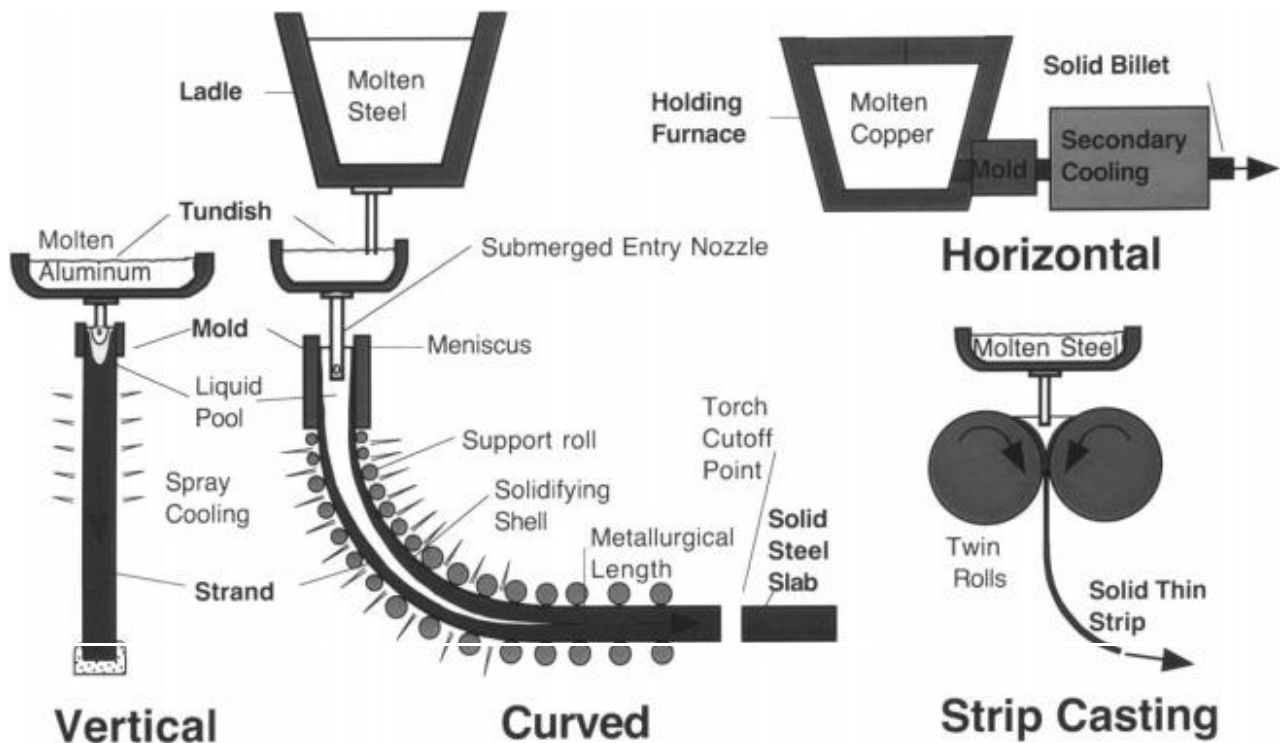
Ένα από τα πλεονεκτήματα της επαγωγικής θέρμανσης είναι ότι η θερμότητα παράγεται μέσα στο ίδιο το μίγμα του κλίβανου αντί να μεταφέρεται σε αυτό από κάποιο φλεγόμενο καύσιμο ή κάποια εξωτερική πηγή θερμότητας, πράγμα που μπορεί να είναι σημαντικό σε εφαρμογές όπου οι προσμείξεις είναι πρόβλημα.



Σχήμα 4. Επαγωγικός κλίβανος (3)

1.1.1.5 Συνεχής Χύτευση (Continuous Casting)

Η διαδικασία της συνεχούς χύτευσης για χάλυβες φαίνεται στο σχήμα 5A, ενώ η άνω περιοχή της μήτρας παρουσιάζεται στο σχήμα 5B. Κατά τη διαδικασία αυτή, μια ποσότητα τετηγμένου χάλυβα ρέει από τον κάδο χύτευσης στη μήτρα διαμόρφωσης του προϊόντος, διαμέσου ενός ενδιάμεσου δοχείου. Το δοχείο μπορεί να περιέχει αρκετό μέταλλο ώστε να παρέχει συνεχή ροή στη μήτρα, ακόμα και κατά την αλλαγή των κάδων που ανεφοδιάζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα μέσω της διαδικασίας παραγωγής χάλυβα. Ο κάδος μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως δοχείο ομογενοποίησης για να μετακινηθούν τυχόν ακαθαρσίες στο στρώμα της σκωρίας. Εάν στο προϊόν παραμείνουν ακαθαρσίες, υπάρχει πιθανότητα να σχηματιστούν ατέλειες στην επιφάνεια, όπως για παράδειγμα ακίδες, κατά τις κατεργασίες της έλασης. Μπορεί, επίσης, να υπάρξει τοπική συγκέντρωση εσωτερικών τάσεων, που οδηγεί στη μείωση της αντοχής σε κόπωση του προϊόντος. Για την παραγωγή προϊόντων υψηλότερης ποιότητας, ο υγρός χάλυβας πρέπει να προστατευτεί από έκθεση στον αέρα, μέσω ενός καλύματος σκωρίας πάνω από την υγρή επιφάνεια κάθε δοχείου, καθώς και με χρήση κεραμικών ακροφυσίων ανάμεσα στα δοχεία. Αν δεν γίνει αυτό, το οξυγόνο στον αέρα θα προκαλέσει χημική αντίδραση και οξείδωση στον χάλυβα.(4)



Σχήμα 5A -Διαδικασίες συνεχής χύτευσης(4)

Σημεία

Σχήμα 5B Μήτρα και ράουλα τυπικής διαδικασίας χύτευσης(4)

Αφού μπει στη μήτρα, ο τετηγμένος χάλυβας στερεοποιείται μέσω των υδροψυχωμένων τοιχωμάτων μιας χάλκινης μήτρας, ώστε να σχηματίσει ένα στερεό κέλυφος. Η μήτρα ταλαντώνεται κάθετα, ούτως ώστε να αποφευχθεί η προσκόλληση του κελύφους στα τοιχώματά της. Το κέλυφος εξάγεται συνεχώς από τη μήτρα, μέσω ράουλων-οδηγών στα κατώτερα μέρη της μηχανής με ρυθμό ή «ταχύτητα χύτευσης» που αντιστοιχεί στη ροή του εισρέοντος μετάλλου. Ο ρυθμός εισροής του τήγματος ρυθμίζεται περιορίζοντας το άνοιγμα του ακροφυσίου συναρτήσει του σήματος που επιστρέφει ένας αισθητήρας στάθμης στη μήτρα.(4)

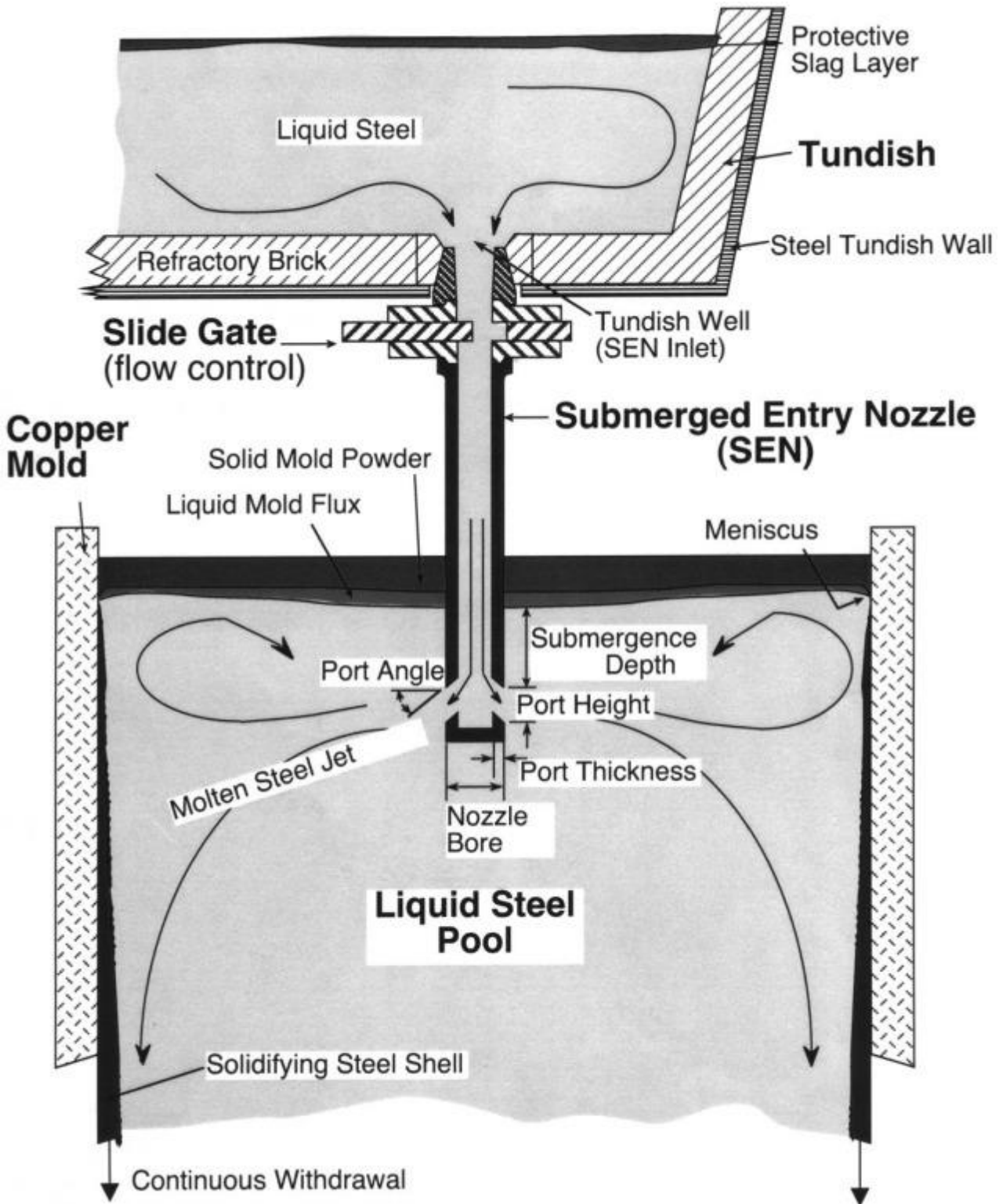
Το πιο σημαντικό μέρος της διαδικασίας είναι η αρχική στερεοποίηση της μπιγιέτας, ο οποίος βρίσκεται στο σημείο όπου το κέλυφος συναντά τη μήτρα και την υγρή επιφάνεια. Σε αυτό το σημείο, δημιουργείται η επιφάνεια του τελικού προϊόντος, και μπορεί να σχηματιστούν ατέλειες όπως επιφανειακές ρωγμές εάν υπάρξουν προβλήματα. Για να αποφευχθεί αυτό, προστίθενται έλαια που ρέουν στο κενό μεταξύ της μήτρας και του κελύφους. Σε συνδυασμό με τη λίπανση του σημείου επαφής, μια στρώση σκωρίας προστατεύει τον χάλυβα από τον αέρα, παρέχει θερμομόνωση και απορροφά τις ακαθαρσίες.

Κάτω από την έξοδο της μήτρας, το λεπτό στερεοποιημένο κέλυφος (πάχους 6-20mm) λειτουργεί ως δοχείο για να στηρίξει το υπόλοιπο υγρό, το οποίο αναπληρώνει το εσωτερικό της μπιγιέτας. Ο χώρος ανάμεσα στα ράουλα υποστήριξης ψεκάζεται με νερό ή αέρα ούτως ώστε να ψυχθεί. Ο ρυθμός ροής ψεκάσματος ρυθμίζονται ώστε να ελέγχουν τη θερμοκρασία επιφάνειας της μπιγιέτας με την ελάχιστη δυνατή αναθέρμανση μέχρις ότου ο τετηγμένος πυρήνας να στερεοποιηθεί. Όταν το κέντρο στερεοποιηθεί εντελώς, η μπιγιέτα τεμαχίζεται σε πλινθώματα επιθυμητού μήκους, με τη χρήση φλόγιστρων οξυακετυλαίνιου.(4)

Κατά τη χύτευση μεγάλων εγκάρσιων διατομών, όπως είναι οι πλάκες, μια σειρά από ράουλα πρέπει να υποστηρίξουν το κέλυφος του μαλακού χάλυβα ανάμεσα στην έξοδο της μήτρας και το μεταλλουργικό μήκος, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα εξογκώματα λόγω της πίεσης του περιεχομένου τήγματος. Για το εξαναγκασμένο «ίσιωμα» της μπιγιέτας με τη μετάβαση από το κυρτό, στο ίσιο μέρος της διαδρομής (σχήμα 5B) χρειάζονται επιπλέον ράουλα. Εάν η υποστήριξη των ράουλων και η ευθυγράμμιση δεν είναι αρκετά, μπορεί να οδηγήσουν σε εσωτερικές ρωγματώσεις και διαχωρισμό. Αυτές οι ατέλειες θα υπάρχουν και στο τελικό προϊόν ακόμα και μετά από εκτεταμένη μορφοποίηση και άλλες εργασίες, οπότε είναι σημαντικό να ελέγχεται η διαδικασία της χύτευσης.

Η διαδικασία ξεκινάει φράζοντας το κάτω μέρος της μήτρας με μια ράβδο εκκίνησης. Αφού έχει στερεοποιηθεί αρκετό μέταλλο σαν να έχει γίνει συμβατική χύτευση στην κεφαλή της ράβδου, αυτή αποσύρεται σταδιακά προς τα κάτω, διαμέσου της μηχανής συνεχούς χύτευσης και αναπτύσσονται συνθήκες κατάστασης ισορροπίας. Έπειτα, η διαδικασία συνεχίζεται για μια περίοδο μίας ώρας μέχρι αρκετές εβδομάδες, οπότε και η παροχή χάλυβα σταματάει και η διαδικασία πρέπει να επανεκκινηθεί. Η μέγιστη ταχύτητα χύτευσης (1-8 m/min) ελέγχεται από το επιτρεπόμενο μήκος του υγρού πυρήνα και για να την αποφυγή προβλημάτων στην ποιότητα, που είναι γενικά μεγαλύτερα σε υψηλότερες ταχύτητες.

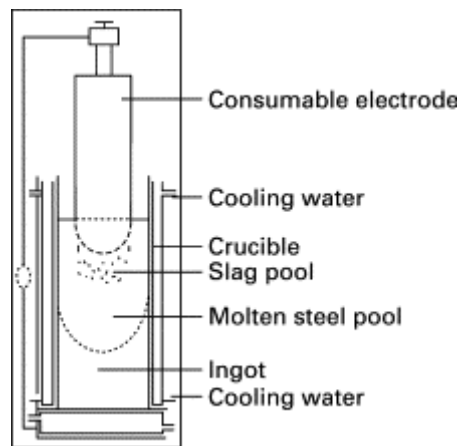
Αφού φύγει από το χυτήριο, ο χάλυβας αναθερμαίνεται σε μια ομοιόμορφη θερμοκρασία και ρολάρεται σε φύλλα, μπάρες, ράγες και άλλα σχήματα. Τα σύγχρονα χαλυβουργεία τοποθετούν τις εργασίες ρολαρίσματος κοντά στο χυτήριο για να εξοικονομούν την ενέργεια αναθέρμανσης.



Σχήμα 6. Μήτρα συνεχούς χύτευσης(4)

1.1.1.6 Μέθοδος ESR (Electro Slag Remelting)

Ο εξοπλισμός για την παραγωγή χάλυβα μέσω της οξειδωσης με ηλεκτροαγώγιμη σκωρία αποτελείται από ένα τροφοδοτικό μεγάλης χωρητικότητας και ένα υδρόψυκτο κάδο. Το σχήμα 7 δείχνει μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας ESR και η εικόνα 1 δείχνει μια εγκατάσταση ESR. Στη διαδικασία ESR, ένα ηλεκτρόδιο παρασκευάζεται με χύτευση ή σφυρηλάτηση μετά τη συμβατική διαδικασία τήξης, ομογενοποίησης και χύτευσης. Η τήξη των ηλεκτροδίων συμβαίνει στο καλούπι με θέρμανση που προκαλείται από την ηλεκτρική αντίσταση της σκωρίας. Ο καθαρισμός του υλικού συνεχίζεται καθώς πέφτουν τα σταγονίδια του υλικού του ηλεκτροδίου κατά την τήξη του. Το υλικό στερεοποιείται στον πυθμένα της δεξαμενής του τηγμένου υλικού. Με την εφαρμογή της διαδικασίας ESR μπορεί να βελτιωθεί η καθαρότητα του υλικού και η ομοιογένεια του πλινθώματος.(5) Ο σχηματισμός μακροδιαχωρισμού καταστέλλεται και η κατανομή των χημικών στοιχείων γίνεται πιο ομοιόμορφη σε σύγκριση με τα πλινθώματα που κατασκευάζονται με συμβατική χύτευση. Η σύνθεση της σκωρίας είναι ιδιαίτερα σημαντική στη διαδικασία ESR προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες. Προς το παρόν, η διαδικασία ESR χρησιμοποιείται συχνά για την παραγωγή σφυρήλατων ρότορων, κατασκευασμένων από εν θερμώ χάλυβες εργαλειών, όπως χάλυβες CrMoV και από βελτιωμένους CrMoV.(5)



Σχήμα 7. Εξοπλισμός ESR(5)



Εικόνα 1 Εγκατάσταση ESR(5)

1.1.1.7 Κονιομεταλλουργία (Powder Metallurgy)

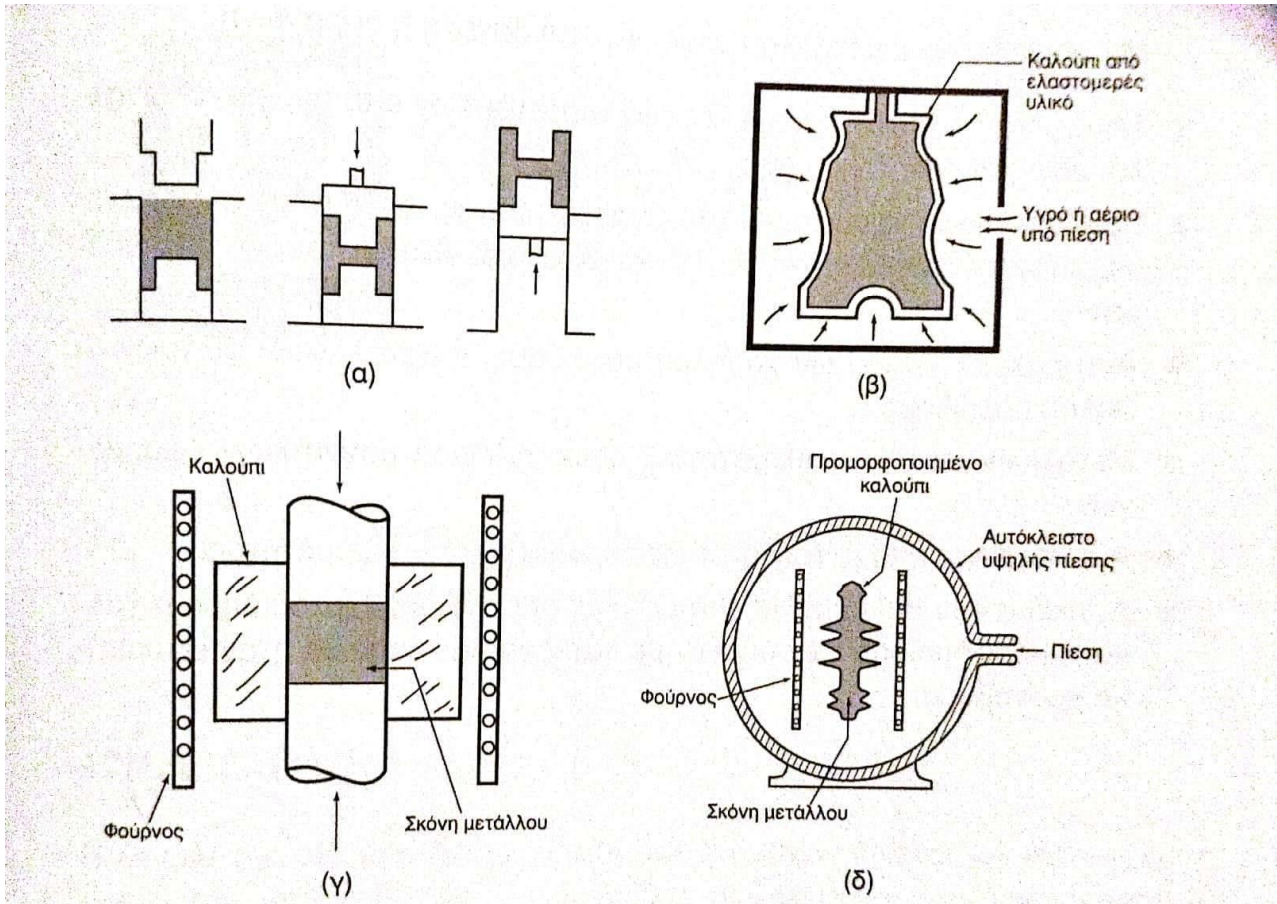
Η κονιομεταλλουργική διαδικασία της «συμπίεσης και πυροσυσσωμάτωσης» απαρτίζεται κατά κύριο λόγο από τρία απλά βήματα: ανάμειξη κόνεων (ή κονιοποίηση), συμπίεση σε μήτρα, και έψηση. Η συμπίεση της κόνεως στην μήτρα γίνεται συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου. Η πυροσυσσωμάτωση είναι η διαδικασία ενοποίησης ενός υλικού μέσω θερμότητας χωρίς την τήξη του. Αυτή γίνεται συνήθως σε ατμοσφαιρική πίεση και υπό προσεκτικά ελεγχόμενη ατμοσφαιρική σύσταση. Για την επίτευξη ειδικών ιδιοτήτων ή ενισχυμένης διαστασιακής ακρίβειας, ακολουθούν συνήθως δευτερεύουσες διαδικασίες όπως ανισόπαχη διαμορφωτική τύπωση ή θερμικές κατεργασίες.(6)

Η μεταλλική κόνις είναι συνήθως σίδηρος, αναμειγμένος κατά κύριο λόγο με λιπαντικό κεριά, άνθρακα, χαλκό και νικέλιο. Με αυτόν τον τρόπο, παράγονται ακριβή τεμάχια, ως επί το πλείστον πολύ κοντά στις διαστάσεις της μήτρας, αλλά με ποσοστό πορώδους περί το 5-10%, και κατ' επέκταση με ιδιότητες κατώτερες από αυτές του χάλυβα διαμόρφωσης. Η μέθοδοι κονιομεταλλουργίας χρησιμοποιούνται για την παραγωγή περίπου 1Mt/y δομικών στοιχείων των κραμάτων με βάση τον σίδηρο.(5,7)

Οι τεχνικές κονιομεταλλουργίας αφορούν τη μορφοποίηση ξηρών κόνεων και δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων σύνθετης γεωμετρίας. Ωστόσο, το κόστος κατασκευής του καλουπιού επιβαρύνει πολύ την τιμή του τελικού προϊόντος και, για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιούνται μόνο για μαζική παραγωγή.

Υπάρχουν τεχνικές στις οποίες το στάδιο της έψησης ακολουθεί το στάδιο της συμπίεσης και τεχνικές στις οποίες η έψηση πραγματοποιείται ταυτόχρονα με τη συμπίεση. Στην περίπτωση μορφοποίησης σε δύο στάδια, όταν εφαρμόζεται μονοαξονική πίεση, η τεχνική καλείται απλώς συμπίεση, ενώ όταν εφαρμόζεται τριαξονική πίεση, η τεχνική καλείται ισοστατική συμπίεση. Η έψηση των συμπιεσμάτων γίνεται σε κλιβάνους ειδικής ατμόσφαιρας. (8)

Πολλές φορές, κατά την πυροσυσσώματωση παρατηρείται αύξηση του μεγέθους των κόκκων, η οποία είναι ανεπιθύμητη. Στο πρόβλημα αυτό, ικανοποιητική απάντηση έχουν δώσει οι τεχνικές της θερμής συμπίεσης: συμπίεση εν θερμώ και ισοστατική συμπίεση εν θερμώ (hot isostatic pressing), κατά τις οποίες οι θερμοκρασίες έψησης, χαμηλότερες από αυτές της απλής πυροσυσσώματωσης, και η ταυτόχρονη συμπίεση, δίνουν προϊόν χαμηλού πορώδους και λεπτόκοκκης δομής.



Σχήμα 8 Τεχνικές κονιομεταλλουργίας. α) Απλή συμπίεση β) Ισοστατική συμπίεση γ) συμπίεση εν θερμώ και δ) ισοστατική συμπίεση εν θερμώ(8)

1.1.1.8 Μέθοδοι Προσθετικής Κατεργασίας (Additive Manufacturing)

Directed Energy Deposition

Η τεχνολογία Directed Energy Deposition (DED) δημιουργεί τρισδιάστατα μοντέλα μέσω της εναπόθεσης τήγματος σε στρώσεις. Αρχικά, το τήγμα είναι είτε σε μορφή σύρματος, είτε κόνιας. Το ακροφύσιο εναπόθεσης έχει πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας. Έτσι, προτιμάται η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου για την επιδιόρθωση τεμαχίων ή την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη μέθοδο είναι κατά κύριο λόγο μεταλλικά και σύνθετα, χωρίς να αποκλείεται η χρήση πολυμερών ή κεραμικών υλικών.(9)

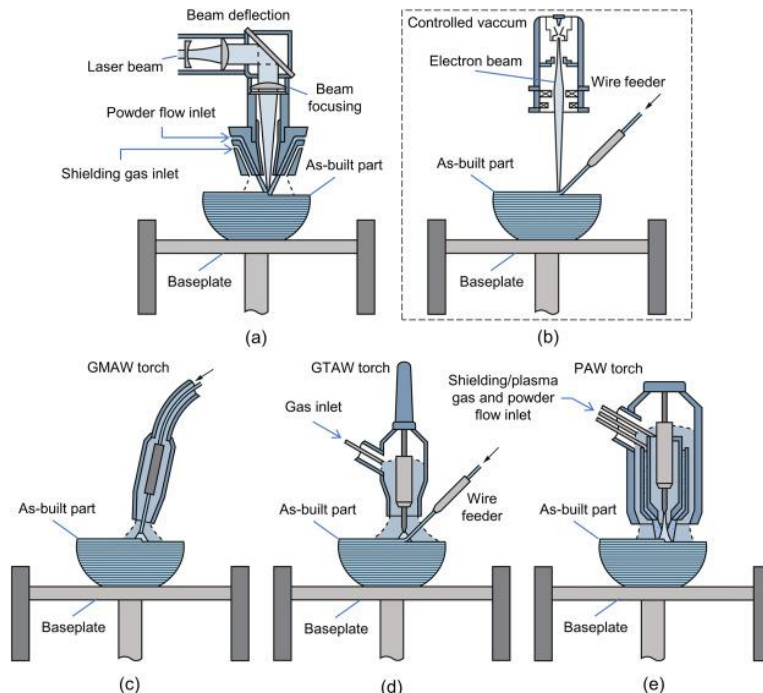
Κύρια πλεονεκτήματα της DED είναι η δυνατότητα ελέγχου της μικροδομής και του μεγέθους κόκκων του χρησιμοποιούμενου υλικού, επιτρέποντας την επιδιόρθωση τεμαχίων και την αυξημένη τους ποιότητα και λειτουργικότητα (10)

Ο περιορισμένος αριθμός υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι ένα από τα μειονεκτήματα της. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι τα μεγάλα ποσά ενέργειας που καταναλώνονται κατά τη χρήση της, αλλά και το σχετικά μεγάλο συνολικό κόστος της. Επίσης, υπάρχει ανάγκη διατήρησης της ισορροπίας μεταξύ ταχύτητας και ποιότητας επιφάνειας του τελικού τεμαχίου.

Επιπλέον, ο όγκος των παραγόμενων τεμαχίων είναι μεγαλύτερος σε σχέση με άλλες μεθόδους. Για αυτόν τον λόγο, πολλοί κατασκευαστές έχουν επιχειρήσει να υλοποιήσουν τεράστιες κατασκευές αφήνοντας ελάχιστα βήματα να ολοκληρωθούν μέσω συμβατικών αφαιρετικών μεθόδων.

Ανάλογα με τον τρόπο της εναπόθεσης του υλικού και την πηγή που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε περίπτωση οι τεχνολογίες DED χωρίζονται στις παρακάτω(11):

- Laser Direct Energy Deposition (LD-DED)
- Electron Beam Direct Energy Deposition (EB-DED)
- Gas Metal Arc Direct Energy Deposition (GMA-DED)
- Gas Tungsten Arc Direct Energy Deposition (GTA-DED)
- Plasma Arc Direct Energy Deposition (PA-DED)



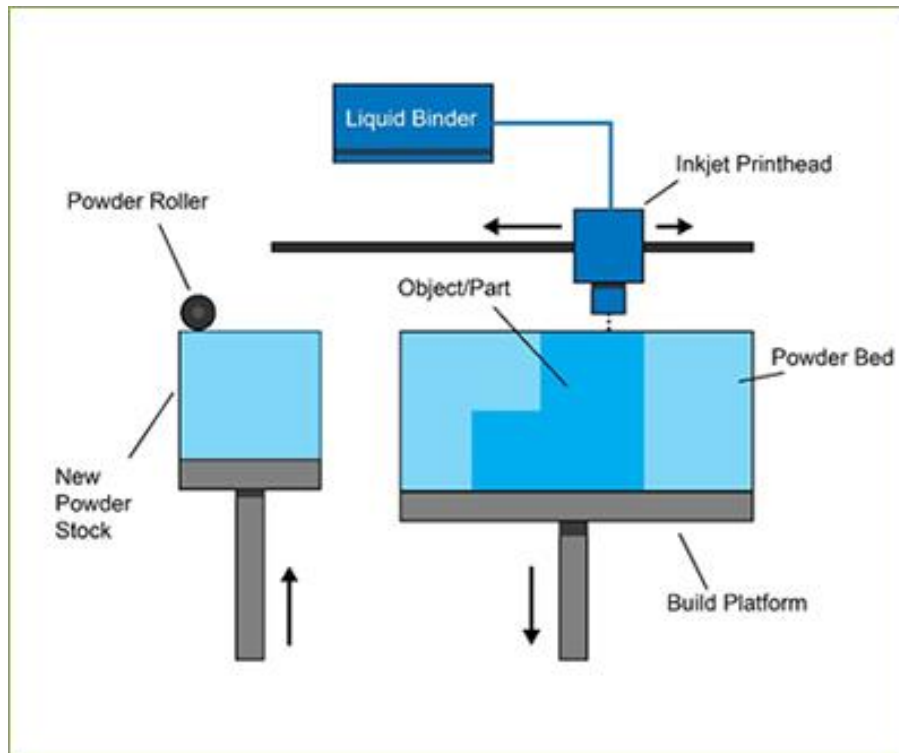
Σχήμα 9. Τεχνικές DED(11)

Binder Jetting

Η βασική αρχή αυτής της μεθόδου είναι η εναπόθεση του δεσμευτικού καταλύτη σε στρώσεις κονίας υλικού με την χρήση κατάλληλης διάταξης. Το τελικό προϊόν κατασκευάζεται έπειτα από πολλαπλά περάσματα. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτήν την μέθοδο είναι μέταλλα, πολυμερή, κεραμικά ή σύνθετα.

Λόγω της αρχής λειτουργίας αυτής της μεθόδου, οι ταχύτητες κατασκευής είναι μεγάλες και το μέγεθος των τεμαχίων δεν περιορίζεται ιδιαίτερα, κάτι που την καθιστά κατάλληλη για την μαζική παραγωγή τεμαχίων, καλουπιών και πρωτότυπων μοντέλων. Η τάση αυτή ενισχύεται από το σχετικά χαμηλό κόστος χρήσης της.

Η εναπόθεση του δεσμευτικού καταλύτη και των στρώσεων κονίας υλικού γίνεται στρατηγικά, μετά από κατάλληλους υπολογισμούς, ώστε να επιτευχθεί μια συμπαγής μορφή. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας η κονία του υλικού που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ανακυκλώνεται. Τα άρτι κατασκευασθέντα τεμάχια παραμένουν σε μια «πράσινη» εύθραυστη κατάσταση και συχνά χρειάζονται την κατάλληλη μετεπεξεργασία (σύντηξη, εισαγωγή τρίτων υλικών) για την ενδυνάμωση του τεμαχίου. (12)



Σχήμα 10. Διαδικασία Binder Jetting(12)

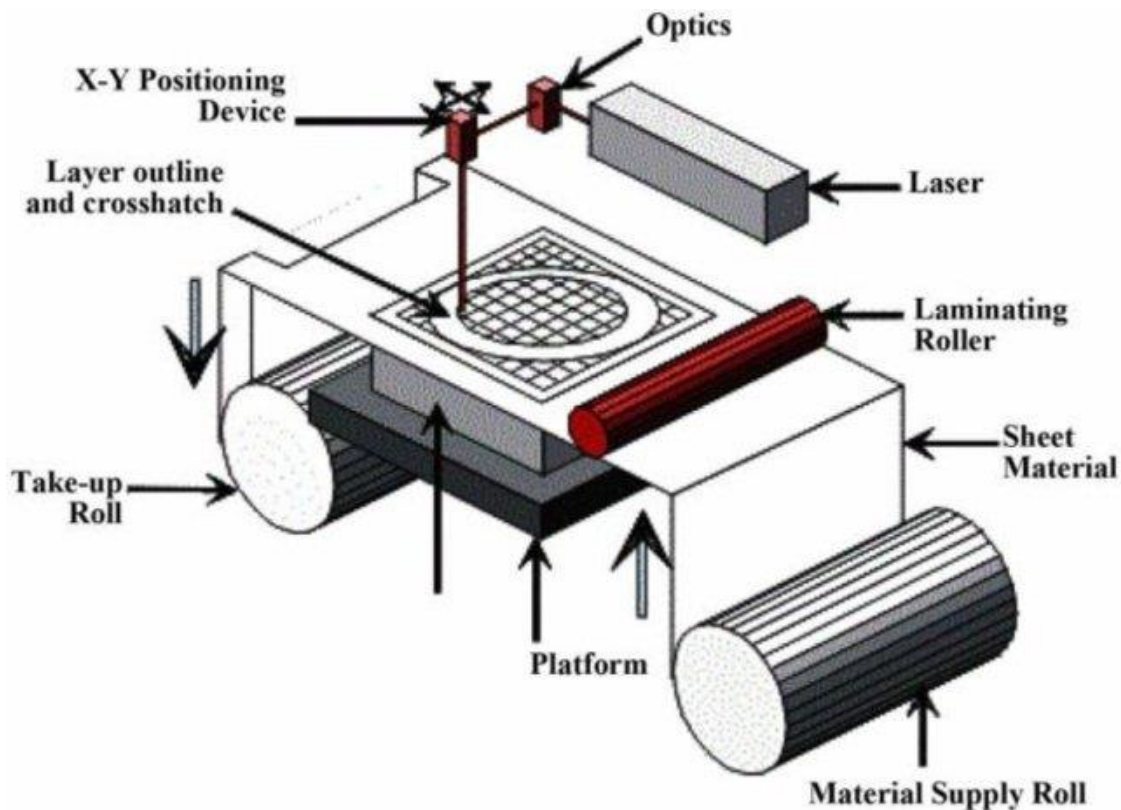
Sheet Lamination

Η ελασματοποίηση φύλλων είναι ένας τύπος προσθετικών κατεργασιών (3D Printing) που πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο ISO/ASTM 52900-2015 και είναι η διαδικασία δημιουργίας ενός εξαρτήματος στοιβάζοντας λεπτά φύλλα υλικού. Η μέθοδος ελασματοποίησης μπορεί να επιτυγχάνεται με συγκόλληση, συγκόλληση με υπερήχους, ετερογενείς ή αυτογενείς. Το τελικό σχήμα επιτυγχάνεται είτε με κοπή με λέιζερ, είτε με μηχανική κατεργασία CNC.

Η ελασματοποίηση φύλλων παράγει εξαρτήματα με την ελάχιστη ανάλυση της προσθετικής κατεργασίας. Ωστόσο, το χαμηλό της κόστος και ο μικρότερος χρόνος κατασκευής επιτρέπουν στους σχεδιαστές των προϊόντων να φτιάχνουν πρότυπα χαμηλής πιστότητας από τυποποιημένα και διαθέσιμα υλικά χαμηλού κόστους. Αυτή η μέθοδος είναι συμβατή με κεραμικά, φελλό, αφρό, μέταλλα, χαρτί, πολυμερή, καουτσούκ και ξύλο. Η τελική γεωμετρία εξαρτάται μόνο από το πάχος των φύλλων και τις δυνατότητες κατεργασίας της συσκευής που το επεξεργάζεται, ενώ η στιβαρότητα του τεμαχίου εξαρτάται από τον εκάστοτε καταλύτη που χρησιμοποιήθηκε. (13)

Η μέθοδος Sheet Lamination έχει επτά διαφορετικές εκδοχές οι οποίες είναι:

- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Selective Lamination Composite Object Manufacturing (SLCOM)
- Plastic Sheet Lamination (PSL)
- Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials (CAM-LEM)
- Selective Deposition Lamination (SDL)
- Composite Based Additive Manufacturing (CBAM)
- Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)



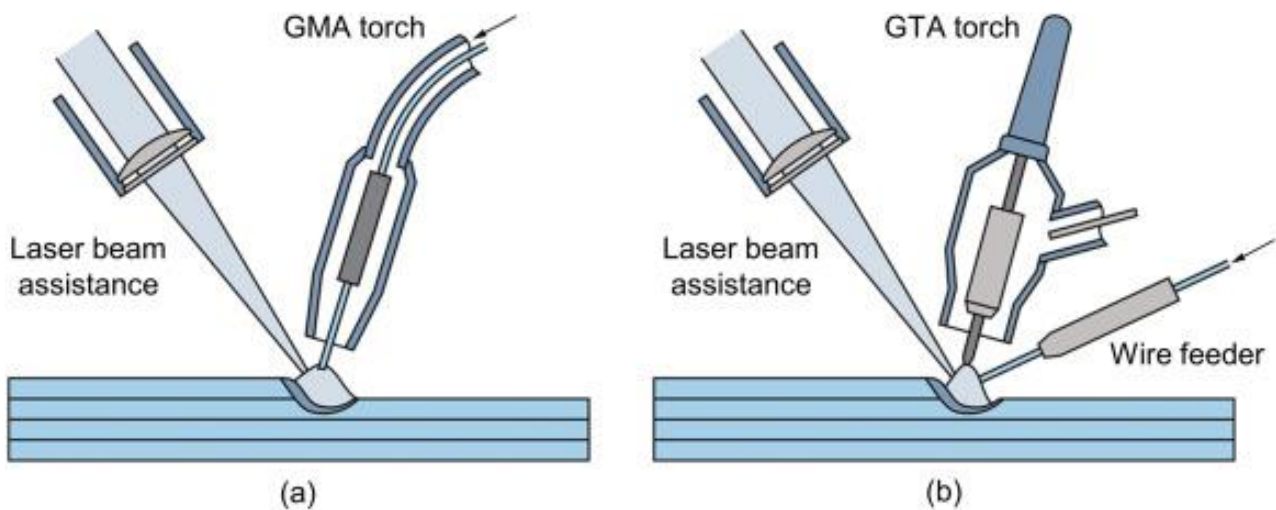
Σχήμα 11. Εξοπλισμός sheet lamination(13)

Metal Hybrid Additive Manufacturing

Οι διαδικασίες υβριδικών προσθετικών κατεργασιών (Hybrid Additive Manufacturing - HAM) χωρίζονται σε πολλές υποομάδες. Παρακάτω θα αναλυθούν οι υβριδικές προσθετικές κατεργασίες που περιλαμβάνουν την αφαίρεση υλικού και πολλαπλές θερμικές πηγές ενέργειας.(14)

- HAM μετάλλου με πολλαπλές πηγές ενέργειας

Η χρήση πολλαπλών πηγών ενέργειας στην ίδια διαδικασία είχε αρχικά ως σκοπό την υποβοήθηση των τεχνολογιών συγκόλλησης με laser, όσον αφορά διάφορες παραμέτρους με την εισαγωγή ηλεκτρικού τόξου (1). Η ιδέα εφαρμόστηκε τελικά σε μεθόδους προσθετικών κατεργασιών μετάλλων (MAM) για να αυξηθεί η σταθερότητα της διεργασίας μέσω της παροχής επιπλέον ενέργειας. Γενικά, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες ώστε τα παραπάνω να εφαρμοστούν σε ειδικότερες περιπτώσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις βελτιωμένες ιδιότητες των τεμαχίων που κατασκευάζονται από αυτές. (2)



Σχήμα 12. Διαδικασίες α) GMA-HAM β)GTA-HAM

- HAM μετάλλου με αφαιρετικές κατεργασίες

Οι HAM μετάλλου με αφαιρετικές κατεργασίες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- a. Εφαρμογή αφαιρετικών κατεργασιών σε στάδιο μετεπεξεργασίας για την επίτευξη των απαιτούμενων ανοχών και γεωμετρίας και της κατάλληλης ποιότητας επιφανείας.
- b. Ενσωμάτωση αφαιρετικών κατεργασιών κατά την διαδικασία κατασκευής με MAM, για την υλοποίηση τεμαχίων που υπό άλλες συνθήκες θα ήταν αδύνατο να κατασκευασθούν, κυρίως λόγω της γεωμετρίας τους.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της πρώτης κατηγορίας είναι η αφαίρεση του προφίλ «σκαλοπατιών» τεμαχίων που έχουν κατασκευαστεί με MAM:

Η δεύτερη κατηγορία επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών και την βελτίωση των ιδιοτήτων απλούστερων τεμαχίων. Σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή τεμαχίων αποκλειστικά με συμβατικές μεθόδους μπορεί να παρουσιάσει εμπόδια που οι τεχνικές HAM προσπερνούν.

Συμπερασματικά, η κατασκευή χάλυβα είναι μια σύνθετη και πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους παραγωγής προϊόντων χάλυβα υψηλής ποιότητας. Η χρήση αυτών των διαδικασιών εξαρτάται από την ποιότητα των ακατέργαστων υλικών, την ποιότητα των επιθυμητών χαλύβδινων προϊόντων και τις τελικές τους χρήσεις. Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της αλλά όλες εξυπηρετούν τον κοινό στόχο της παραγωγής χαλύβων.

Ως προς τη χημική τους σύσταση, οι χάλυβες διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες (σε παρένθεση αναφέρονται οι κωδικοί τους κατά την AISI)(8):

- Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες (1040,1045,1050,1060) και
- Κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες (420,440B,316,304,F44 κλπ.)

Ως προς τον σκοπό τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Χάλυβες διαμόρφωσης και
- Χυτοχάλυβες.

Ως προς τις χρήσεις τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Χάλυβες κατασκευών (4130,4145,8620)
(υποευτηκτοειδείς, νικελιούχοι, νικελιοχρωμιούχοι, χάλυβες Ni-Cr-Mo, χρωμιούχοι, χρωμιομολυβδαινιούχοι, κλπ)
- Εργαλειοχάλυβες (D3,A2,H13)
(χάλυβες αντοχής σε φθορά από τριβή, καλής δυσθραυστότητας, καλής εμβαπτότητας, αντοχής σε επαναφορά)
- Ανοξείδωτους (316, 304) ή πυρίμαχους χάλυβες (310) και
- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών
(μαλακοί μαγνήτες, μόνιμοι μαγνήτες, μη μαγνητικοί χάλυβες).

1.1.2 Κραματοποιητικά Στοιχεία

Είναι γνωστό ότι τα κραματοποιητικά στοιχεία διαμορφώνουν, μαζί με τις θερμικές και μηχανικές κατεργασίες, την μικροδομή και τις ιδιότητες ενός χάλυβα. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά οι κυριότερες επιδράσεις των κραματοποιητικών στοιχείων. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις, η επίδραση ενός κραματοποιητικού στοιχείου διαφοροποιείται από την παρουσία κάποιου άλλου. Η αλληλεπίδραση των κραματοποιητικών στοιχείων και η συνεργιστική τους δράση είναι ένα σύνθετο φαινόμενο, καθώς επηρεάζει τόσο την θερμοδυναμική, όσο και την κινητική των μετασχηματισμών των φάσεων. Για αυτόν τον λόγο, πρέπει να επισημανθεί ότι η μεμονωμένη περιγραφή για κάθε κραματοποιητικό στοιχείο υπόκειται στους προαναφερθέντες περιορισμούς.

Αρκετές φορές, οι ιδιότητες των κοινών χαλύβων δεν επαρκούν για ορισμένες εφαρμογές. Ο κοινός ανθρακούχος χάλυβας παρουσιάζει μικρή αντοχή σε μηχανική φθορά, διάβρωση, μικρή εμβαιότητα, ανεπαρκή δυσθραυστότητα ή ολκιμότητα. (15)

Άνθρακός (C): Είναι το σημαντικότερο συστατικό στοιχείο των χαλύβων, συμβάλλοντας εξαιρετικά στην ισχυροποίησή τους. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα αυξάνει τη σκληρότητα, την μηχανική αντοχή και την εμβαιότητα, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η ολκιμότητα, η δυσθραυστότητα και η συγκολλησιμότητα.

Μαγγάνιο (Mn): Υπάρχει στην πλειονότητα των χαλύβων, σε περιεκτικότητες πάνω από 0.2% και προστίθεται κατά κύριο λόγο με στόχο την αποθείωση, καθώς σχηματίζει σουλφίδια MnS. Ο σχηματισμός των σουλφιδίων αυτών ευνοεί την κατεργασιμότητα και την συγκολλησιμότητα του χάλυβα. Η προσθήκη Mn στον χάλυβα συμβάλλει επίσης στη σημαντική αύξηση της εμβαιότητάς του.

Πυρίτιο (Si): Είναι, μαζί με το αλουμίνιο, ένα από τα συστατικά που προστίθενται για την αποξείδωση του χάλυβα. Στους πλήρως καθησυχασμένους χάλυβες (killed steels) το Si φθάνει το 0.6%, ενώ στους ημικαθησυχασμένους (semi-killed steels) η περιεκτικότητα είναι μικρότερη. Υψηλότερες περιεκτικότητες σε Si έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της κατεργασιμότητας του χάλυβα.

Φώσφορος (P): Όταν υπάρχει σε ποσότητα μεγαλύτερη από κάποιο όριο, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ολκιμότητας και της δυσθραυστότητας, και ιδιαίτερα της αντοχής σε κρούση, κυρίως όμως σε χάλυβες βαφής και επαναφοράς. Αλλά, μπορεί να έχει και ευεργετικές συνέπειες, όπως για παράδειγμα στους χάλυβες μηχανουργικής κατεργασίας (free-machining steels), όπου κατά την τόννευση ή το φρεζάρισμα, διευκολύνεται ο διαμερισμός του αποβλίττου, και κατ' επέκταση βελτιώνεται η κατεργασιμότητά του.

Θείο (S): Προκαλεί σημαντική μείωση της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας, της αντοχής σε κρούση και της συγκολλησιμότητας. Επιπλέον, υποβαθμίζει την κατεργασιμότητα (κυρίως στην θερμοηλασία), ενώ η παρουσία του αυξάνει την τάση ρηγματώσεως κατά την βαφή των χαλύβων (quench cracking). Γενικά, οι χάλυβες τείνουν να περιέχουν S σε ποσοστό κάτω του 0.05%.

Χρώμιο (Cr): Είναι ένα ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο, τα καρβίδια του οποίου αυξάνουν την σκληρότητα και τις αντιτριβικές ιδιότητες του χάλυβα. Για αυτόν τον λόγο, συναντάται στους εργαλειοχάλυβες. Το χρώμιο αυξάνει επίσης την εμβαιότητα καθώς και την αντοχή σε οξείδωση και διάβρωση. Μαζί με το νικέλιο αποτελούν τα σημαντικότερα κραματικά στοιχεία των ανοξείδωτων και των πυρίμαχων χαλύβων. Σε ποσοστά άνω του 12% παράγονται οι ανοξείδωτοι χάλυβες.

Νικέλιο (*Ni*): Προσδίδει ολκιμότητα και αυξάνει την δυσθραυστότητα των χαλύβων, ενώ προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας μεταβάσεως από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά θραύσεως (κρυογονικοί χάλυβες). Σε περιεκτικότητες άνω του 7% σταθεροποιεί την ωστενιτική δομή σε θερμοκρασία δωματίου, καθιστώντας το ένα σημαντικότερο στοιχείο των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.

Μολυβδαίνιο (*Mo*): Πρόκειται για ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο που αυξάνει ταυτόχρονα την εμβαιμότητα των χαλύβων. Τα καρβίδια του *Mo* σχηματίζονται κατά την επαναφορά μετά τη βαφή και προκαλούν την δευτερογενή σκλήρυνση του χάλυβα. Η προσθήκη *Mo* στους ανοξείδωτους χάλυβες οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της αντοχής σε διάβρωση.

Βολφράμιο (*W*), Βανάδιο (*V*), Τιτάνιο (*Ti*) και Νιόβιο (*Nb*): Είναι, και αυτά, καρβιδιογόνα στοιχεία, τα οποία συντελούν στην αύξηση της σκληρότητας και της μηχανικής αντοχής με τον σχηματισμό καρβιδίων ενώ ταυτόχρονα περιορίζουν την ανάπτυξη των κόκκων σε υψηλές θερμοκρασίες. Για τους λόγους αυτούς, συναντώνται στους εργαλειοχάλυβες για την κατασκευή κοπτικών και διαμορφωτικών εργαλείων. Τα *V*, *Nb*, *Ti* αποτελούν κύρια συστατικά των ελαφρώς κραματωμένων χαλύβων υψηλής αντοχής (HSLA steels).

Άζωτο (*N*): Μαζί με τον άνθρακα, είναι τα κραματικά στοιχεία παρεμβολής στους χάλυβες. Το *N* αυξάνει τη σκληρότητα και την μηχανική αντοχή, ενώ παράλληλα μειώνει την ολκιμότητα. Χρησιμοποιείται στους χάλυβες εναζωτώσεως για την αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας. Στους πλήρως καθησυχασμένους χάλυβες (αποξείδωση με *Al*) σχηματίζει διασπορά νιτριδίων *AlN*, τα οποία παρεμποδίζουν την ανάπτυξη των κόκκων.

Κοβάλτιο (*Co*): Πρόκειται για το μοναδικό στοιχείο που μειώνει την εμβαιμότητα των χαλύβων, δεν σχηματίζει καρβίδια και έχει, εν γένει, μικρή επίδραση στην σκληρότητα του χάλυβα. Η κύρια δράση του είναι να παρεμποδίζει την αποκατάσταση των αταξιών και την ανάπτυξη των κόκκων κατά την ανόπτηση ή την επαναφορά του χάλυβα. Έτσι, συμβάλει στην διατήρηση της μηχανικής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, και χρησιμοποιείται σε ταχυχάλυβες, διαμορφωτικά εργαλεία καθώς και σε πυρίμαχους χάλυβες.

Το ποσοστό *C* στους κραματωμένους χάλυβες δεν υπερβαίνει, στην πράξη, το 1.5%, ενώ τα συνήθη στοιχεία προσθήκης είναι: *Ni*, *Mn*, *Cr*, *Si* και *Mo* (κύριες προσθήκες) και *V*, *W*, *Cu*, *Ti*, *Al*, *B*, *Pb*, *Nb* (δευτερεύουσες προσθήκες). Οι κραματωμένοι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Ελαφρά κραματωμένους ή μικροκραματωμένους, όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μικρότερο του 2%
- Μετρίως κραματωμένους, με ποσοστό στοιχείων προσθήκης από 2% έως 10%
- Ισχυρά κραματωμένους, όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μεγαλύτερο του 10%

Κάποιες από τις κύριες εφαρμογές κραματωμένων χαλύβων είναι οι εξής:

- Μαγγανιούχοι (1330, 1340): Κατασκευή αξόνων ατράκτων, ελκυστήρων, και γενικότερα όπου απαιτείται υψηλότερη αντοχή από αυτή των κοινών ανθρακούχων χαλύβων.
- Μολυβδαινιούχοι (4037): Για την κατασκευή των αξόνων των πίσω τροχών των αυτοκινήτων.
- Χρωμιομολυβδαινιούχοι (4130, 4140): Σε σχέση με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες παρουσιάζουν αυξημένη εμβαιμότητα, μηχανική αντοχή και αντοχή σε φθορά. Επιδέχονται βαφής σε λάδι και χρησιμοποιούνται για αεροναυπηγικές κατασκευές, άξονες αυτοκινήτων και δοχεία υψηλής πίεσης.
- Πυριτιούχοι (9260): Χρησιμοποιείται για την κατασκευή ελασμάτων.

Γενικά, οι προσθήκες κρυστατοποιητικών στοιχείων βελτιώνουν αυτές τις ιδιότητες ποικιλοτρόπως και ακολούθως:

- Σκλήρυνση του χάλυβα με τη δημιουργία στερεού διαλύματος.
- Σχηματισμός καρβιδίων (προσθήκη καρβιδιογόνων στοιχείων).
- Υποβοήθηση αποβολής του άνθρακα από το πλέγμα του σιδήρου, σε μορφή γραφίτη.
- Μεταβολή της κρίσιμης ταχύτητας βαφής.
- Βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση.
- Επίδραση της ανάπτυξης των κόκκων.
- Βελτίωση της κατεργασιμότητας.

1.1.3 Ατέλειες Δομής

Οι κρύσταλλοι δεν είναι ποτέ τέλειοι, ανεξάρτητα από το αν είναι μεταλλικοί ή όχι. Οι ατέλειές τους επηρεάζουν αρκετές ιδιότητες των υλικών κατασκευής όπως την πλαστικότητα των μετάλλων, την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ημιαγωγών, την ταχύτητα διάχυσης των ατόμων στα μεταλλικά κράματα και τη διάβρωση των μετάλλων.

Έχει αποδειχθεί ότι η γνώση της δομής των μετάλλων και του είδους των δεσμών μεταξύ των ατόμων, δεν επαρκούν για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τιμών των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Ο θεωρητικός υπολογισμός τους είναι ανακριβής καθώς, στην πραγματικότητα, οι κρύσταλλοι περιέχουν ευμετακίνητες ατέλειες. Όσο ευκολότερα μετακινούνται οι ατέλειες αυτές (διαταραχές), τόσο πιο εύκολα πραγματοποιείται η πλαστική παραμόρφωση των κρυστάλλων. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι διαταραχές είναι φορείς των μηχανικών παραμορφώσεων όπως τα ηλεκτρόνια του ηλεκτρικού φορτίου.

Οι ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος κατατάσσονται, σύμφωνα με τη γεωμετρία και τη μορφή τους σε τέσσερις κατηγορίες(8):

- Ατέλειες μηδενικής διάστασης ή σημειακές ατέλειες.

Πρόκειται για τα κενά, για τα ένθετα άτομα παρεμβολής και αντικατάστασης

- Ατέλειες μίας διάστασης ή γραμμικές ατέλειες.

Πρόκειται για τις επονομαζόμενες διαταραχές.

- Ατέλειες δύο διαστάσεων ή επίπεδες ατέλειες.

Πρόκειται για τις διδυμίες, τα σφάλματα επιστοίβασης και τα όρια των κόκκων

- Ατέλειες τριών διαστάσεων

Ως ατέλειες τριών διαστάσεων χαρακτηρίζονται οι πόροι, οι ρωγμές, τα ξένα εγκλείσματα και τα κατακρημνίσματα.

1.1.4 Πρότυπα Χάλυβα

DIN (Deutsches Institut für Normung)

Τα αρχικά DIN ήταν ακρωνύμιο του Deutsch Industriennorm (German Industry Standard) αλλά πλέον αντιπροσωπεύει το Deutsches Institut für Normung. Για την ταξινόμηση των χαλύβων χρησιμοποιούνται γράμματα και αριθμοί. Τα γράμματα υποδηλώνουν το είδος του χάλυβα, την τεχνική χύτευση, τα κραματοποιητικά υλικά και τις συνθήκες κατεργασίας, ενώ οι αριθμοί δείχνουν το υλικό του χάλυβα, την περιεκτικότητα σε άνθρακα και την αντοχή σε εφελκυσμό. (βλ. Παράρτημα)(16)

AISI-SAE (American Iron and Steel Institute – The Society of Automotive Engineers)

Το σύστημα AISI-SAE χρησιμοποιεί αριθμούς για να προσδιορίσει την σύσταση των χαλύβων. Το πρώτο ψηφίο αφορά την κατηγορία στην οποία ανήκει ο χάλυβας(17)

- 1 – ανθρακούχος χάλυβας
- 2 – νικελιούχος χάλυβας
- 3 – νικελιοχρωμιούχος χάλυβας
- 4 – μολυβδαινιούχος χάλυβας
- 5 – χρωμιούχος χάλυβας
- 6 – χρωμιοβαναδιούχος χάλυβας
- 7 – χάλυβας βολφραμίου/χρωμίου
- 9 – μαγγανιοπυριτιούχοι χάλυβες

Στην περίπτωση των απλών κραματοποιημένων χαλύβων, το δεύτερο ψηφίο υποδεικνύει προσεγγιστικά το ποσοστό του κύριου κραματοποιητικού στοιχείου. Συνήθως τα τελευταία ψηφία δίνουν την μέση ποσότητα άνθρακα σε «βαθμούς» ή εκατοστά του 1%. (βλ. Παράρτημα)

EN 10027-1:2005 (European Standard)

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο, τα ονόματα των χαλύβων χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες(18):

Κατηγορία 1: Χάλυβες που προσδιορίζονται ανάλογα με τις εφαρμογές τους, τις μηχανικές τους ιδιότητες και φυσικές ιδιότητες. (βλ. Παράρτημα)

Κατηγορία 2: Χάλυβες που προσδιορίζονται ανάλογα με την χημική τους σύσταση. (βλ. Παράρτημα)

1.1.5 Ο χάλυβας 1.7709

Ο χάλυβας με W.Nr. 1.7709 είναι ένας ελαφρά κραματωμένος χάλυβας (~4% κραματοποιητικά στοιχεία). Η χημική του ονομασία κατά το Euronorm Standard 10269 (EN) είναι 21CrMoV5-7. Η τυπική χημική σύσταση του χάλυβα είναι η εξής :

Chemical composition % of steel 21CrMoV5-7 (1.7709): EN 10269-1999									
C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V	Al
0.17 - 0.25	max 0.4	0.4 - 0.8	max 0.6	max 0.03	max 0.03	1.2 - 1.5	0.55 - 0.8	0.2 - 0.35	max 0.03

Πίνακας 1. Χημική σύσταση του χάλυβα 1.7709

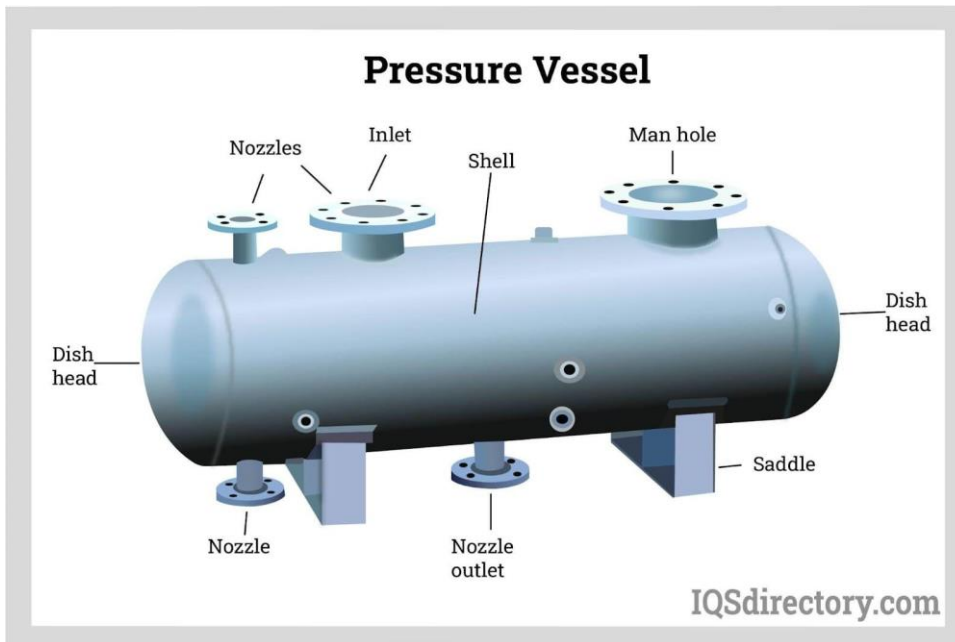
Σε σύγκριση με άλλους χάλυβες ίδιας χρήσης έχει πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (33W/mK), αλλά υψηλό ενεργειακό και οικονομικό κόστος κατασκευής. Έχει επίσης καλή αντοχή σε διάβρωση και είναι κατάλληλος για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες (εώς 550°C).

Στην σημερινή βιομηχανία βρίσκει εφαρμογές σε συνδέσεις εξαρτημάτων θερμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας, σε κατασκευές ροτόρων θερμικών στροβιλομηχανών, αξόνων υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, μπουλονιών, οδοντωτών τροχών και κινητήριων αξόνων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε γεωτρητικές εφαρμογές μέχρι και κάτω των 2000m (πχ. για γεωτρήσεις πετρελαίου).

Μέσω βαφής, τα κραματοποιητικά του στοιχεία (χρώμιο, μολυβδαίνιο και βανάδιο) προσφέρουν βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό και αυξημένο όριο διαρροής, ικανοποιητική πλαστικότητα και δυσθραυστότητα και εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση, θερμικά φορτία και φθορά. Ο χάλυβας χρησιμοποιείται εκτενώς στην κατασκευή εξαρτημάτων πλοίων, οχημάτων, αεροπλάνων, ραγών, γεφυρών, και εργαλειομηχανών(19). Χρησιμοποιείται επίσης συχνά στην κατασκευή εξαρτημάτων διαφόρων σχημάτων και διαστάσεων τα οποία επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών όπως συνδέσεις αεροστροβίλων, περίπλοκες ατράκτους, δοχεία πίεσης, κ.α.(20)

Κάποιες από τις βασικές χρήσεις του χάλυβα 1.7709 είναι:

Δοχεία πίεσης: ο χάλυβας 1.7709 χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή δοχείων πίεσης για χρήση σε μονάδες παραγωγής ενέργειας και χημικής κατεργασίας και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.



Σχήμα 13. Δοχείο πίεσης

Ατμοστρόβιλοι: οι ιδιότητες του χάλυβα 1.7709 σε υψηλές θερμοκρασίες τον καθιστούν ιδανικό υλικό για χρήση στην κατασκευή εξαρτημάτων ατμοστρόβιλων όπως πτερύγια, άξονες και επιστρώσεις.



Εικόνα 2. Πτερύγια ατμοστρόβιλου

Εφαρμογές στην αεροναυπηγική: ο χάλυβας 1.7709 χρησιμοποιείται στη βιομηχανία της αεροναυπηγικής για την κατασκευή εξαρτημάτων όπως κομμάτια μηχανών, εξαρτήματα εξοπλισμού προσγείωσης (φρένα) και δομικά εξαρτήματα(20).



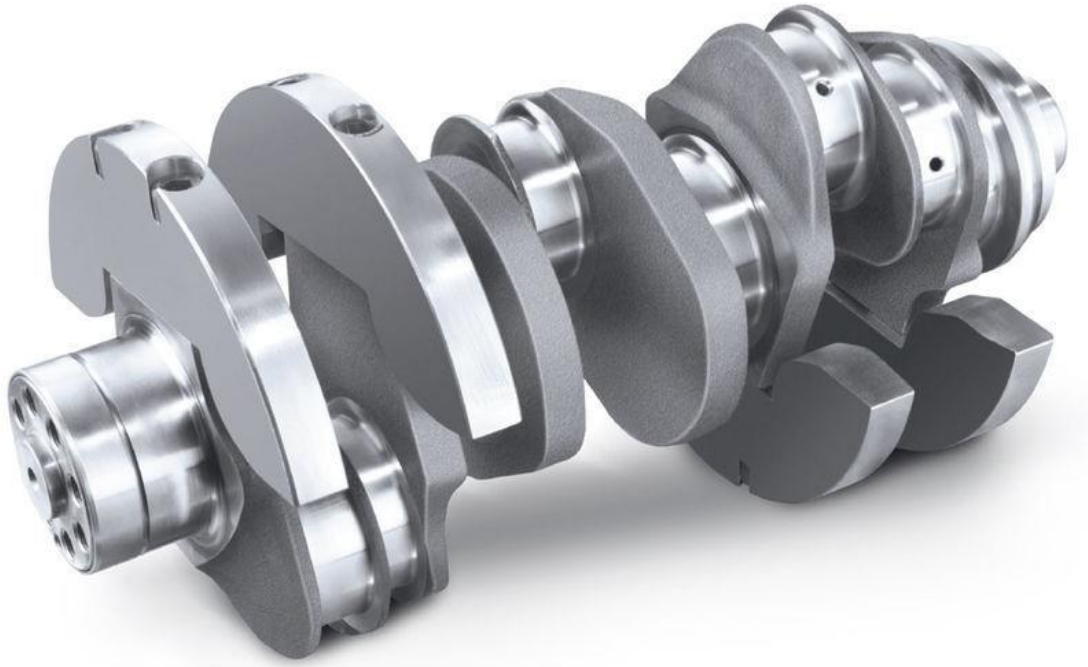
Εικόνα 3. Εξοπλισμός προσγείωσης

Βιομηχανία καυσίμων και πετρελαίου: ο χάλυβας 1.7709 χρησιμοποιείται στη βιομηχανία καυσίμων και πετρελαίου για την κατασκευή εξαρτημάτων όπως κεφαλές τρυπανιών, εξοπλισμό γεωτρήσεων και σωληνώσεις. (20)



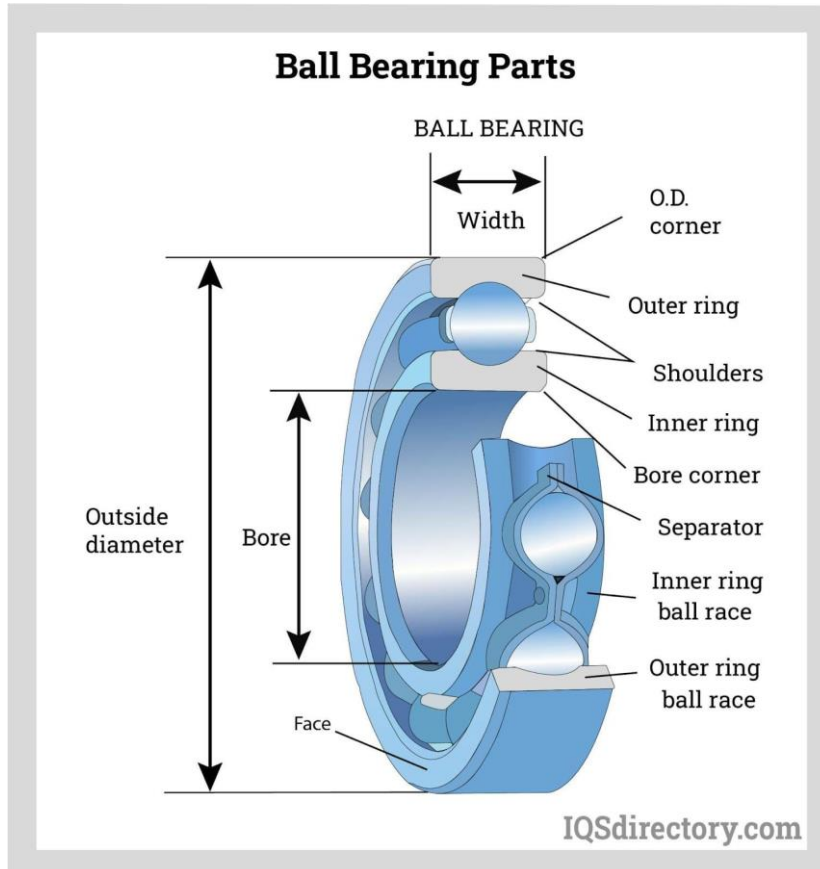
Εικόνα 4. Εξοπλισμός γεωτρήσεως

Αυτοκινητοβιομηχανία: ο χάλυβας 1.7709 χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή εξαρτημάτων όπως στροφαλοφόρους άξονες, διωστήρες και οδοντωτούς τροχούς.



Εικόνα 5. Στροφαλοφόρος άξονας

Βιομηχανία εργαλειομηχανών: ο χάλυβας 1.7709 χρησιμοποιείται στη βιομηχανία εργαλειομηχανών για την κατασκευή εξαρτημάτων όπως οδοντωτούς τροχούς, άξονες και έδρανα κύλισης.



Σχήμα 14. Έδρανο κύλισης

1.2 Θερμικές Κατεργασίες

Η παραγωγή στη βαριά βιομηχανία, και ειδικότερα στην κατασκευαστική βιομηχανία, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις θερμικές κατεργασίες των κραμάτων χάλυβα που χρησιμοποιούνται. Με τον όρο θερμική κατεργασία προσδιορίζουμε μια διεργασία, κατά την οποία ένα τεμάχιο υφίσταται τον ακόλουθο θερμικό κύκλο(8):

1. Αύξηση της θερμοκρασίας του από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε μια επιθυμητή θερμοκρασία ομογενοποίησης,
2. Διατήρηση της εν λόγω θερμοκρασίας για ορισμένο χρονικό διάστημα, και
3. Επαναφορά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

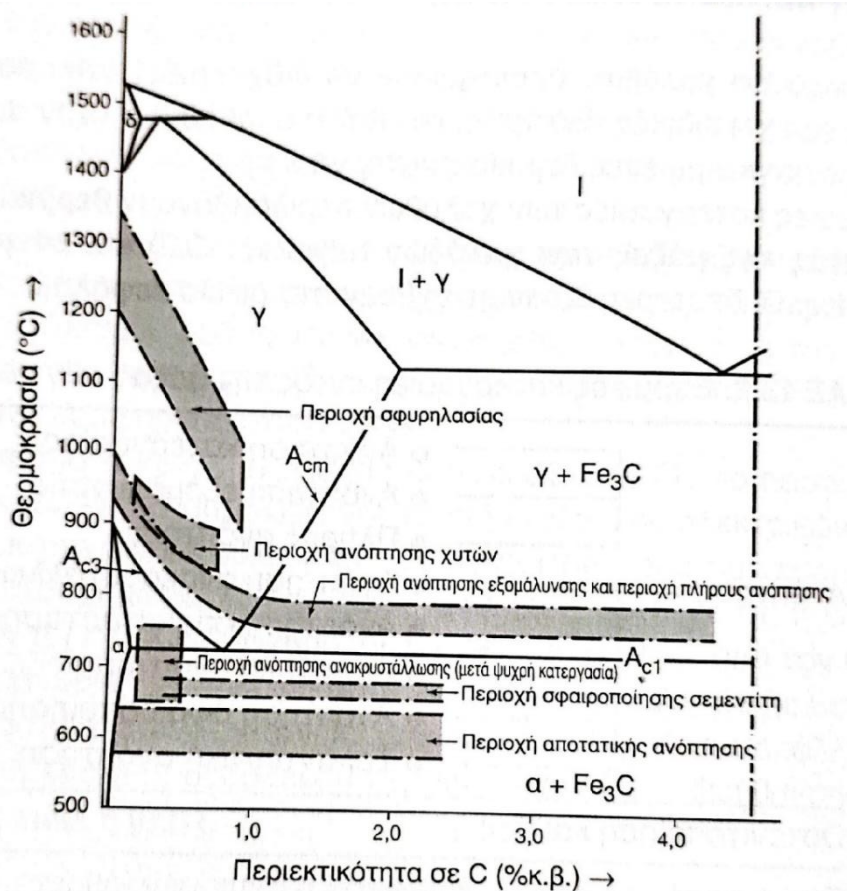
Οι θερμικές κατεργασίες, διαφοροποιούνται σύμφωνα με τρεις παραμέτρους:

- i. Τη θερμοκρασία,
- ii. Τον χρόνο παραμονής του τεμαχίου σε αυτήν, και
- iii. Τον ρυθμό απόψυξης.

Τα μέσα θέρμανσης και απόψυξης, καθώς και η μάζα του τεμαχίου, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις βασικές παραμέτρους των θερμικών κατεργασιών. Οι θερμικές κατεργασίες χάλυβων έχουν ως κύριες κατηγορίες την ανόπτηση, τη βαφή και την επαναφορά.

Με την ανόπτηση στους χάλυβες, επιτυγχάνεται μείωση της σκληρότητας των εσωτερικών τάσεων, αύξηση της κατεργασιμότητας και της πλαστικότητας, καθώς και ομογενοποίηση της χημικής σύστασης χυτών τεμαχίων, ενώ με τη βαφή σκληραίνουν, καταλήγοντας στο στάδιο της επαναφοράς όπου ανακτάται η δυσθραυστότητα μέσω μείωσης της σκληρότητας.

1.2.1 Ωστενιτοποίηση



Σχήμα 15. Θερμοκρασιακές περιοχές κατεργασιών χάλυβα (8)

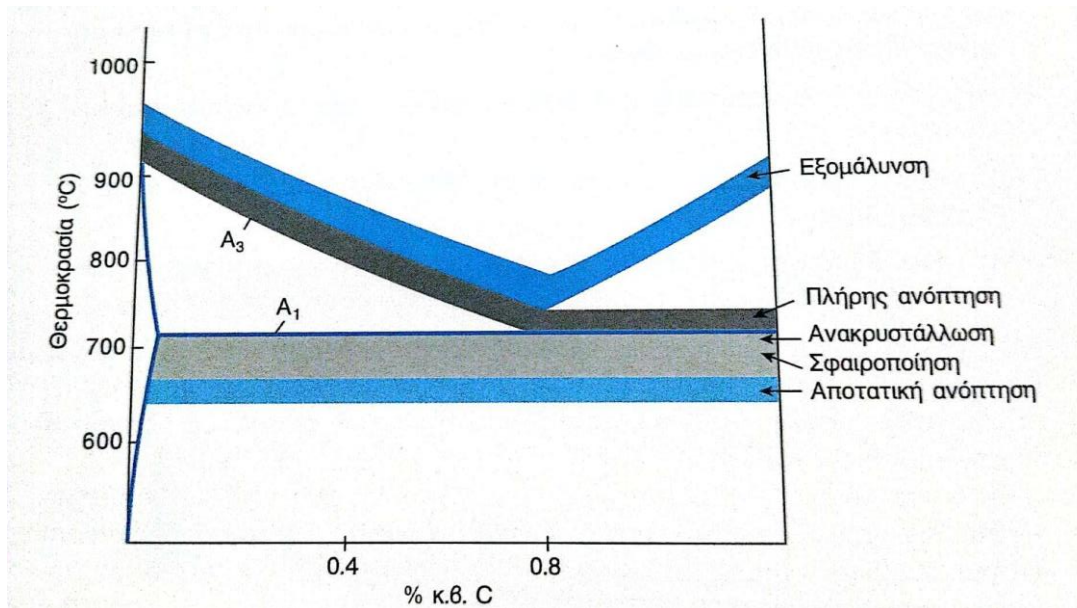
Η ωστενιτοποίηση περιλαμβάνει τη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία περίπου 50°C

υψηλότερη της υψηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας, η οποία στους κοινούς χάλυβες οριοθετείται από την καμπύλη A_{c3} .

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί πλήρης μετατροπή του κράματος σε ομογενή ωστενίτη, πρέπει να παραμείνει στην επιθυμητή θερμοκρασία για αρκετό χρόνο, χωρίς όμως να οδηγηθεί σε ανεπιθύμητη αύξηση του μεγέθους των κόκκων του (υπερθέρμανση). Σε τεμάχια σχετικά μεγάλης μάζας, κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, παρατηρείται διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του εσωτερικού αυτών. Αυτό μπορεί να προκαλέσει πλαστική παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος του ωστενίτη. Κατά συνέπεια, θα πρέπει η διαδικασία της θέρμανσης να γίνεται με βραδύτερο ρυθμό, όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή του χάλυβδινου αντικειμένου. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, για να επιτευχθεί η ωστενιτοποίηση, ο χάλυβας οξειδώνεται, με αποτέλεσμα να υπάρχει απώλεια επιφανειακού υλικού και ελάττωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα (εξανθράκωση). Τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίζονται με θέρμανση σε φούρνους ελεγχόμενης ατμόσφαιρας.(8)

1.2.2 Ανόπτηση

Το σύνολο των θερμικών κατεργασιών οι οποίες συμβάλλουν ώστε ένα μέταλλο να προσεγγίζει την κατάσταση ισορροπίας του σε φυσικοχημικό επίπεδο ή σε επίπεδο μικροδομής περιγράφονται ως ανοπτήσεις. Οι χάλυβες υποβάλλονται σε πολλών ειδών ανοπτήσεις προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητες τους.



Σχήμα 16. Θερμοκρασιακές περιοχές ανοπτήσεων χάλυβων(15)

1.2.2.1 Ανόπτηση Αποκατάστασης (450-600°C)

Κατά την ανόπτηση αποκατάστασης, ορισμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, που είναι πιθανό να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια της ψυχρής κατεργασίας, αποκαθίστανται, χωρίς κάποια ουσιαστική αλλαγή στην κρυσταλλική δομή του μετάλλου.(8)

Η αποκατάσταση των μηχανικών ιδιοτήτων πραγματοποιείται σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία, προκειμένου να διευκολυνθεί η διάχυση σε στερεά κατάσταση, αλλά πάντοτε σε θερμοκρασία χαμηλότερη της χαρακτηριστικής θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του υλικού.

Γενικά, τα μέταλλα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

A) Τα μέταλλα με μικρή ή μέση ενέργεια σφαλμάτων επιστοίβασης (Y_s). Στην περίπτωση αυτή, οι διαταραχές δεν αναρριχώνται εύκολα, με αποτέλεσμα οι μηχανικές τους ιδιότητες να μην μεταβάλλονται, παρά μόνο μέσω της ανακρυστάλλωσης, όπως συμβαίνει με τον χαλκό (Cu), το νικέλιο (Ni), κ.λ.π.

B) Τα μέταλλα με μεγάλη τιμή σφαλμάτων επιστοίβασης (Y_s). Σε αυτήν την περίπτωση, πραγματοποιείται εύκολα σημαντική ανακατανομή των διαταραχών, καθώς και αξιοσημείωτη αποκατάσταση των μηχανικών ιδιοτήτων, πριν την ανακρυστάλλωση, όπως συμβαίνει με τον α -Fe και το αλουμίνιο (Al).

Με λίγα λόγια, ο βαθμός της επιτυγχανόμενης αποκατάστασης των διαφόρων ιδιοτήτων, σε δεδομένη θερμοκρασία, είναι συνάρτηση της διάρκειας παραμονής στη θερμοκρασία αυτή, της έκτασης της πρότερης πλαστικής παραμόρφωσης και του αρχικού μεγέθους των κόκκων.

1.2.2.2 Αποτατική Ανόπτηση (580-650°C)

Κατά την αποτατική ανόπτηση, το κράμα θερμαίνεται εντός της φερριτικής περιοχής, 580-650°C, και, στη συνέχεια, υφίσταται αργή απόψυξη.(8)

Λόγω της συντελούμενης διάχυσης των ατόμων, εξαιτίας της βραδείας μεταβολής των θερμοκρασιών, πραγματοποιείται μείωση ή τέλεια εξάλειψη των εσωτερικών μηχανικών τάσεων οι οποίες είχαν συσσωρευτεί κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής κατεργασίας και παραγωγής των χαλύβων.

Η ανόπτηση αποκατάστασης και η αποτατική ανόπτηση δεν μεταβάλλουν τη μικρογραφική μορφή των χαλύβων.

1.2.2.3 Ανόπτηση Κατεργασίας (550-650°C)

Η ανόπτηση κατεργασίας είναι μια θερμική κατεργασία, στην οποία υποβάλλεται το μέταλλο προκειμένου να αναιρεθούν οι επιπτώσεις της ψυχρής κατεργασίας, δηλαδή να αυξηθεί η ολκιμότητα του μετάλλου που έχει υποστεί σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Η ανόπτηση κατεργασίας εφαρμόζεται ώστε να είναι δυνατή η συνέχιση της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού, χωρίς να υποστεί θραύση και χωρίς να καταναλωθούν υπερβολικές ποσότητες ενέργειας. Κατά τη διάρκεια αυτής της κατεργασίας, θα συμβεί αποκατάσταση και πιθανώς ανακρυστάλλωση.(8)

Η οξείδωση της επιφάνειας αποφεύγεται διατηρώντας τη θερμοκρασία της ανόπτησης σε χαμηλά επίπεδα, ή με κατεργασία σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα.

1.2.2.4 Ανόπτηση Ανακρυστάλλωσης – Ανακρυστάλλωση (650-750°C)

Η ανόπτηση ανακρυστάλλωσης πραγματοποιείται σε θερμοκρασία υψηλότερη από αυτήν της ανόπτησης αποκατάστασης. Συχνά, αναφέρεται με τον όρο «πρωτογενής ανακρυστάλλωση» και χαρακτηρίζεται από την αναγέννηση (ανάπλαση) των κρυστάλλων που υπέστησαν ψυχρή παραμόρφωση (ενδοτράχυνση) και τη δημιουργία ενός νέου ιστού κόκκων.(8)

Το φαινόμενο αυτό συνοδεύεται από σημαντική μείωση της πυκνότητας των διαταραχών: από 10^{10} - 10^{13} cm/cm³, στην κατάσταση ενδοτράχυνσης, σε 10^7 cm/cm³, διότι οι διαταραχές απορροφώνται από τα όρια των κόκκων του νέου ιστού.

Κατά τη διάρκεια της ανακρυστάλλωσης, εμφανίζονται αρχικά πυρήνες κρυστάλλωσης διαφορετικού προσανατολισμού, οι οποίοι, καθώς αναπτύσσονται, αλληλοσυναντιούνται, μέχρις ότου ολόκληρος ο αρχικός ιστός του μετάλλου να αντικατασταθεί από έναν νέο, αποτελούμενο από μη κοινά προσανατολισμένους και μη παραμορφωμένους κόκκους ίδιας περίπου διαμέτρου.

Το στάδιο της ανακρυστάλλωσης περατώνεται τη στιγμή της «συνάντησης» των ορίων των κόκκων του νέου ιστού, όπου αρχίζει το στάδιο της ανάπτυξης των κόκκων και εφαρμόζεται στους εν ψυχρώ παραμορφωθέντες χάλυβες, προκειμένου να εξαλειφθεί ο ιστός της ενδοτράχυνσης και να γίνει δυνατή η περαιτέρω κατεργασία μορφοποίησης.(8)

1.2.2.5 Ανόπτηση Σφαιροποίησης (~700°C)

Η ανόπτηση σφαιροποίησης γίνεται με τη θέρμανση του χάλυβα ταλαντωτικά σε θερμοκρασία περίξ της ευτηκτοειδούς θερμοκρασίας Ac1, και στη συνέχεια την αργή απόψυξη του μέσα στο φούρνο για πολλές ώρες (έως και 25 ώρες).

Με την κατεργασία αυτή, επιτυγχάνεται η σφαιροποίηση του σεμεντίτη. Ο σφαιροποιημένος σεμεντίτης, αν δεν υποστεί μετασχηματισμό φάσης, βελτιώνει την κατεργασιμότητα του χάλυβα, λόγω αλλαγής της γεωμετρίας του και διασποράς του. (8)

1.2.2.6 Ανόπτηση Εξομάλυνσης

Πολλές φορές, η δομή των υποευτηκτοειδών χαλύβων, όπως για παράδειγμα των χυτοχαλύβων, αποτελείται από κόκκους φερρίτη βελονοειδούς μορφής και περλίτη. Η μικρογραφική αυτή μορφή, προσδίδει στο χάλυβα ευθραυστότητα. (8)

Η κατεργασία της ανόπτησης εξομάλυνσης εφαρμόζεται προκειμένου να δημιουργηθεί ομοιομορφή, κυτταροειδής και λεπτοκρυσταλλική φερριτοπερλιτική δομή. Για τον σκοπό αυτό, ο χάλυβας **θερμαίνεται κατά 55-85°C πάνω από την άνω κρίσιμη θερμοκρασία** Ac3 ή Ac_m, που εξαρτάται από την % κ.β. συγκέντρωση σε άνθρακα (C) με σκοπό την πλήρη ωστενιτοποίησή του. Η κατεργασία περατώνεται με ψύξη στον αέρα, μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Καθ' αυτόν τον τρόπο μειώνονται ή εξαφανίζονται οι ανισοροπίες των ιδιοτήτων του χάλυβα και βελτιώνονται οι μηχανικές του ιδιότητες. Πολλές φορές, λόγω της σχετικά μεγάλης ταχύτητας απόψυξης, οι υποευτηκτοειδείς χάλυβες που υφίστανται ανόπτηση εξομάλυνσης, παρουσιάζουν ομοιογενή, λεπτόκοκκο περλίτη, χωρίς σχηματισμό προευτηκτοειδούς φερρίτη.

Για τους υπερευτηκτοειδείς χάλυβες, η ανόπτηση εξομάλυνσης εφαρμόζεται προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη διασπορά του σεμεντίτη.

Η κύρια βιομηχανική εφαρμογή της ανόπτησης εξομάλυνσης είναι η εκλέπτυνση των κόκκων αντικειμένων από χυτοχάλυβα, ή από τυχόν υπερθεμανθέντα χάλυβα, που κατά το στάδιο της ωστενιτοποίησης, υπέστη υπερβολική αύξηση του μεγέθους των ωστενιτικών κόκκων.

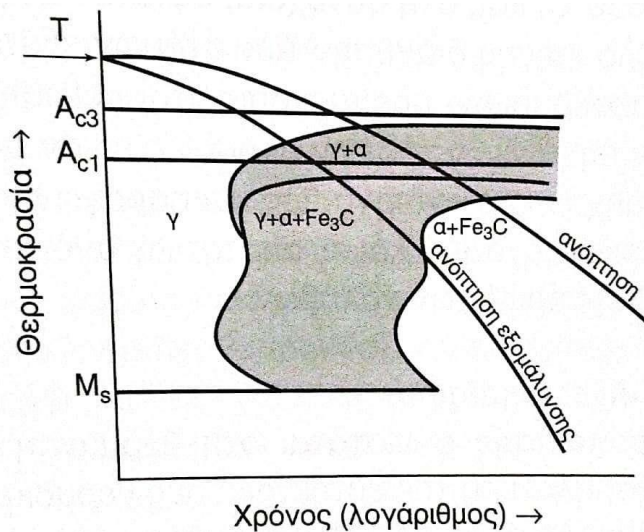
1.2.2.7 Πλήρης Ανόπτηση

Από τεχνικής άποψης, η πλήρης ανοπτηση ή απλώς ανόπτηση, μοιάζει με την ανόπτηση εξομάλυνσης. Εφαρμόζεται στους χάλυβες χαμηλής έως μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα, οι οποίοι πρόκειται να υποστούν πλαστική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια κατεργασιών μορφοποίησης ή κοπής.(8)

Το κράμα ωστενιτοποιείται, με **θέρμανση κατά 15-40°C υψηλότερα της καμπύλης Ac3**, μέχρι να αποκατασταθεί πλήρης ισορροπία (ωστενιτοποίηση). Τέλος, παραμένει για αρκετές ώρες μέσα σε φούρνο, όπου αποψύχεται μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, με την ίδια ταχύτητα απόψυξης με αυτήν του φούρνου (~20°C ανά ώρα). Μετά την κατεργασία, οι κόκκοι του περλίτη είναι μεγαλύτερου μεγέθους και πιο τραχείς, ο χάλυβας όμως είναι μαλακός και όλκιμος.

Η πλήρης ανόπτηση είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, αλλά χρησιμοποιείται προκειμένου:

- Ο χάλυβας να αποκτήσει καλή κατεργασιμότητα, που να επιτρέπει τη συνέχιση της κατεργασίας διαμόρφωσης ή κοπής,
- Οι χυτοχάλυβες να αποκτήσουν ομοιογενή μικροδομή και να βελτιωθεί η αντοχή τους και, να αυξηθεί η δυσθραυστότητα τους,
- Να εξαλειφθούν οι εσωτερικές μηχανικές τάσεις, μετά από εν θερμώ μηχανική κατεργασία του χάλυβα ή μετά από συγκόλληση, και

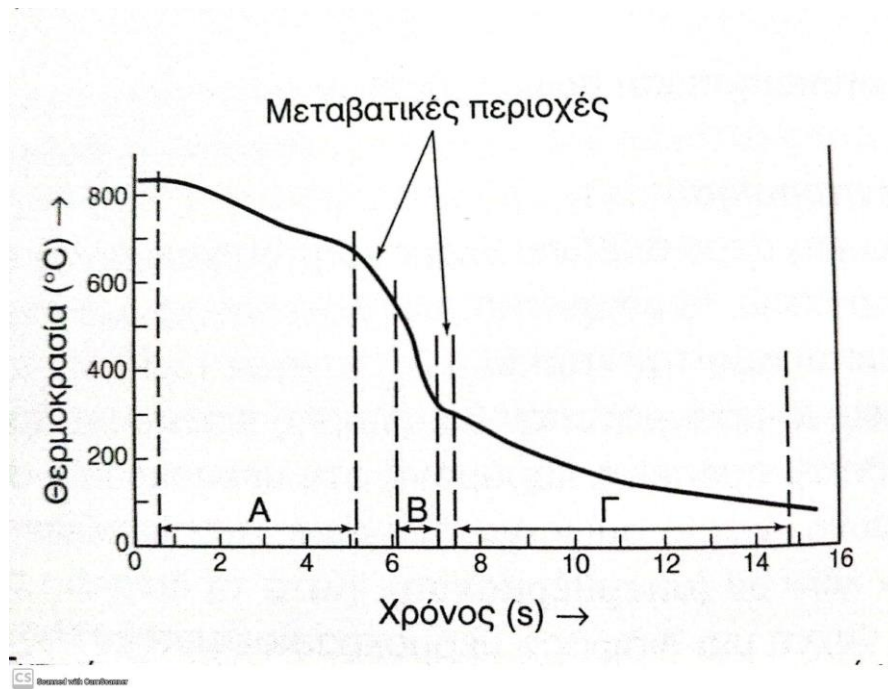


Σχήμα 17. Διάγραμμα IT περιοχών ανοπτήσεων χάλυβων (8)

1.2.3 Βαφή

Η θερμική κατεργασία της ανόπτησης, μετά το πέρας της απόψυξης, που πραγματοποιείται είτε στο περιβάλλον είτε, πολύ πιο χρονοβόρα, μέσα σε φούρνο, καταλήγει στις φάσεις ισορροπίας του φερρίτη και του σεμεντίτη και στη μικρογραφική δομή του περλίτη, όπως αυτές δίνονται από το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Fe-C. Εάν η απόψυξη πραγματοποιηθεί με πολύ ταχύτερους ρυθμούς (όπως για παράδειγμα σε κάποιο υγρό μέσο), τα λαμβανόμενα προϊόντα είναι φάσεις εκτός ισορροπίας. Η κατεργασία αυτής της ταχύτερης απόψυξης, ονομάζεται βαφή του χάλυβα.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η ταχύτητα απόψυξης ($\Delta T/\Delta t$) μεταβάλλεται διαρκώς κατά την απόψυξη, και διακρίνονται τρεις κύριες περιοχές, οφειλόμενες στον διαφορετικό τρόπο απαγωγής της θερμότητας:(8)



Σχήμα 18 Περιοχές απόψυξης (8)

Περιοχή Α

Η θερμοκρασία είναι τόσο υψηλή, ώστε το μέσο απόψυξης (υγρό συνήθως) εξατμίζεται ακαριαία μόλις έρθει σε επαφή με τη μεταλλική επιφάνεια, σχηματίζοντας συγχρόνως ένα λεπτό στρώμα ατμών γύρω από αυτήν, μέσα από το οποίο πραγματοποιείται η ψύξη με αγωγή και ακτινοβολία. Η ταχύτητα απόψυξης είναι αργή, (μικρή κλίση της εφαπτομένης $\Delta T/\Delta t$) λόγω της μικρής αγωγιμότητας των ατμών.

Περιοχή Β

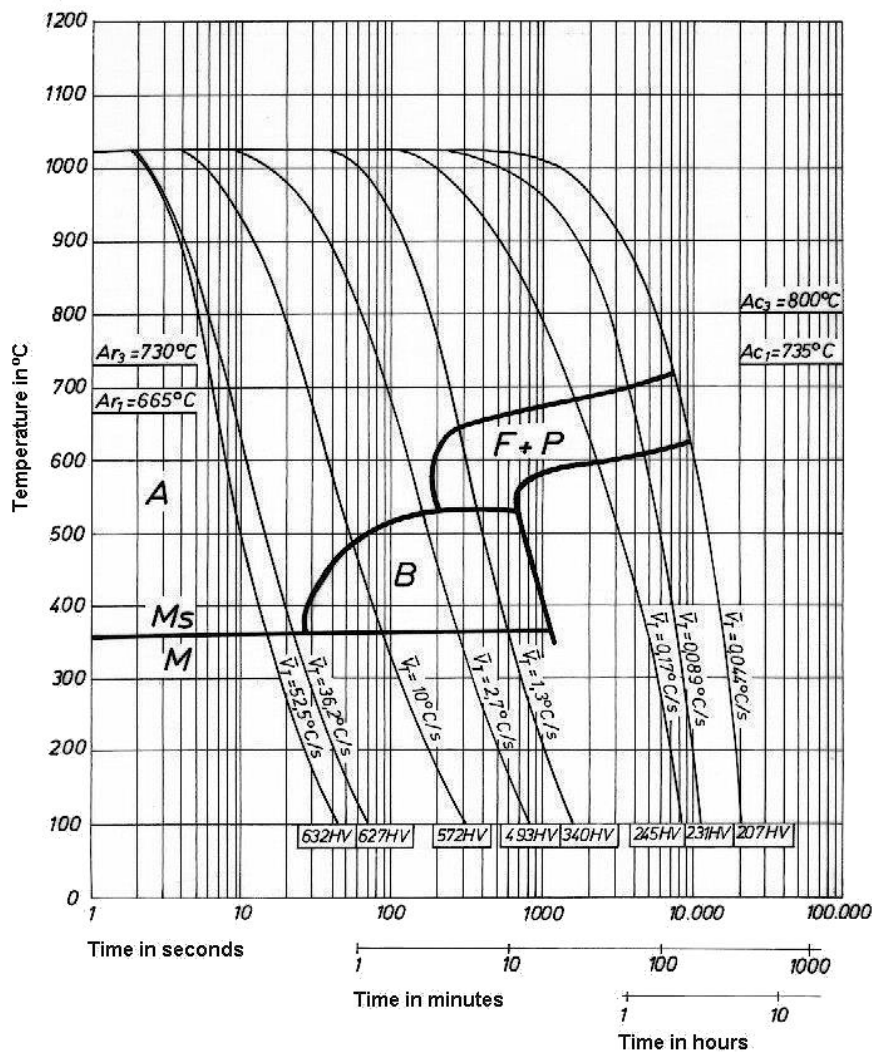
Το στρώμα ατμών σχεδόν διαλύεται. Το μέσο απόψυξης εμφανίζει έντονα το φαινόμενο του βρασμού λόγω της επαφής του με την ψυχόμενη μεταλλική επιφάνεια. Η απαγωγή της θερμότητας γίνεται ταχύτατα, άρα η ταχύτητα της απόψυξης είναι μεγάλη.

Περιοχή Γ

Όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας του μετάλλου φτάσει στη θερμοκρασία βρασμού του ψυκτικού υγρού, η εξάτμιση του υγρού σταματά και η ψύξη συνεχίζεται με απαγωγή διαμέσου του όγκου του υγρού. Η ταχύτητα απόψυξης, κατά το στάδιο αυτό, είναι μικρότερη από τις προηγούμενες.

Γενικά, η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται, εκτός από τον τρόπο απαγωγής της θερμότητας, και από το είδος του ψυκτικού μέσου, τη θερμοκρασία του, την ενδεχόμενη ανάδευσή του, αλλά και από το μέγεθος, τη γεωμετρία, τη μάζα και την κατάσταση της επιφάνειας του μετάλλου.

Η θερμοκρασία έναρξης σχηματισμού του μαρτενσίτη και η θερμοκρασία ολοκλήρωσής του μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού του περιεχόμενου άνθρακα και για αυτό οι χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα πρέπει να ψυχθούν σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 0°C.(21)



Σχήμα 19 Διάγραμμα IT διαφόρων ρυθμών αποψύξεων(21)

1.2.3.1 Μέσα βαφής - Δραστικότητα μέσων βαφής

Για την αποφυγή έντονων παραμορφώσεων στα μέταλλα, καθώς και την πρόληψη ανεπιθύμητων μετασηματισμών τους, ένα ιδανικό ψυκτικό μέσο θα έπρεπε να επιβάλλει συγχρόνως μικρή ταχύτητα απόψυξης στην περιοχή Γ και μεγάλη στην περιοχή Α. Όμως, καθώς αυτού του είδους τα ψυκτικά μέσα δεν υπάρχουν, ως επόμενες επιλογές ξεχωρίζουν το νερό και τα οργανικά διαλύματα αλάτων, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη ταχύτητα απόψυξης σε όλες τις περιοχές. Μια επιπλέον επιλογή αποτελούν μερικά ειδικά λάδια, με μεγαλύτερη έκταση της περιοχής Α και μικρότερη περιοχή Β.(8)

Αναλόγως της ταχύτητας απόψυξης, η αποτελεσματικότητα του εκάστοτε μέσου βαφής δίνεται από έναν αριθμητικό συντελεστή. Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται δραστικότητα του μέσου βαφής (H), είναι αύξουσα συνάρτηση της ταχύτητας απόψυξης που παρουσιάζει το μέσο και έχει χαρακτηριστική τιμή για το καθένα. Αυτή η τιμή εξαρτάται από το αν η διαδικασία της απόψυξης περιλαμβάνει την ανάδευση του μέσου. Το νερό, σε ηρεμία, στους 20°C έχει δραστικότητα ίση με τη μονάδα (H=1). Αυτός ο συντελεστής αυξάνεται αν προστεθούν άλατα (NaCl, Na₂CO₃, NH₄Cl), ενώ με την προσθήκη σαπουνιού, γλυκερίνης ή Na₂SiO₃, ο συντελεστής ελαττώνεται.

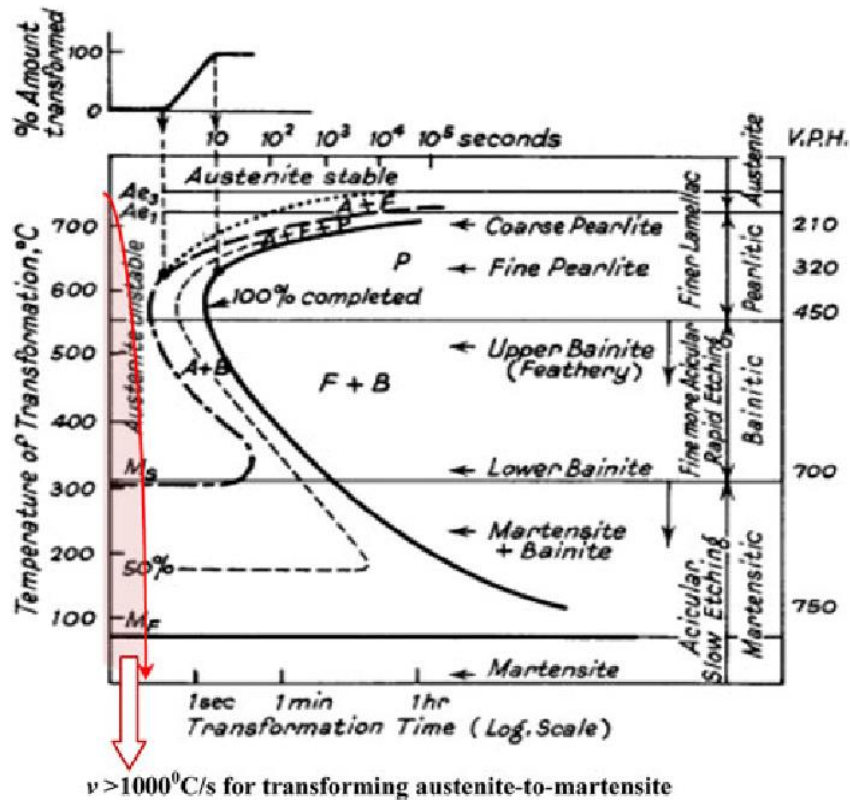
Πρακτικά, η μέγιστη τιμή του συντελεστή δραστικότητας είναι το 5, και εμφανίζεται σε υδατικά διαλύματα άλατος (15% NaCl), όμως σε θεωρητικό επίπεδο, αυτός τείνει στο άπειρο. Ένα ψυκτικό μέσο αυτού του επιπέδου θα επέτρεπε την ιδανική βαφή του χάλυβα, δηλαδή τη βαφή κατά την οποία η ταχύτητα απαγωγής της θερμότητας από τη μεταλλική επιφάνεια, διαμέσου του λουτρού, είναι άπειρη. Αυτό σημαίνει ότι προκαλείται ακαριαία απόψυξη του δοκιμίου, από πολύ υψηλή θερμοκρασία στη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου.

Η φθίνουσα σειρά συντελεστών δραστικότητας των ψυκτικών μέσων είναι: αλατούχο υδατικό διάλυμα, H₂O, τήγματα ή υγρά άλατα, διαλύματα λαδιών, καθαρά λάδια, ατμοσφαιρικός αέρας ή ελεγχόμενη ατμόσφαιρα (πίνακας XX.XX).

ΜΕΣΟ ΒΑΦΗΣ	ΣΕ ΗΡΕΜΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	ΙΣΧΥΡΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	ΙΣΧΥΡΟΤΑΤΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ
Αέρας	0,02	-	-	-
Λάδι	0,30	0,40	0,80	1,00
Νερό	1,00	1,30	2,00	4,00
Υδατικό διάλυμα άλατος	2,00	-	-	5,00
Ιδανικό ψυκτικό μέσο	∞	-	-	-

Πίνακας 2. Μέσα βαφής και οι ιδιότητες τους

1.2.3.2 Το Διάγραμμα Χρόνου-Θερμοκρασίας-Μετασηματισμού (TTT)



Σχήμα 20. TTT Διάγραμμα για χάλυβα 0.65%C (24)

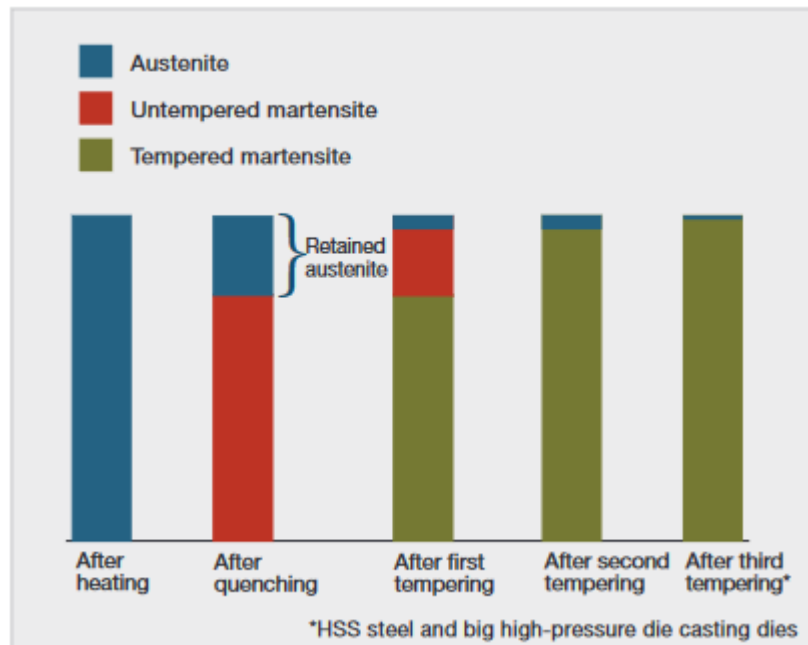
Οι γρήγορες μεταβολές της θερμοκρασίας κατά τη βαφή, σχηματίζουν δομές εκτός ισορροπίας, όπως ο μαρτενσίτης και ο μπαινίτης. Αυτές οι δομές δεν επισημαίνονται στο κλασικό διάγραμμα φάσεων Fe-C, διότι η παράμετρος του χρόνου, που δεν εμφανίζεται στα διαγράμματα ισορροπίας φάσεων, έχει μεγάλη σημασία για τον μαρτενσιτικό και τον μπαινιτικό μετασηματισμό. Ένα διάγραμμα μεγάλης πρακτικής σημασίας στο οποίο δίνονται όλοι οι δυνατοί μετασηματισμοί φάσεων με βάση και τον χρόνο, είναι το Διάγραμμα Χρόνου - Θερμοκρασίας - Μετασηματισμού ή απλώς διάγραμμα TTT (Time-Temperature-Transformation). Τα διαγράμματα TTT είναι ημιλογαριθμικά διαγράμματα ως προς το χρόνο, έχουν άξονες τη θερμοκρασία (T) και την λογαριθμική τιμή $\log t$, και δείχνουν τη χρονική εξέλιξη του μετασηματισμού του ωστενίτη. Εάν παραμείνει σε μια σταθερή θερμοκρασία (κάτω από την ευτηκτοειδή) για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το σύνολο αυτών των σημείων για παρά πολλές θερμοκρασίες συνθέτει το διάγραμμα IT. Εάν η απόψυξη έχει διαφορετικό ρυθμό μείωσης θερμοκρασίας, τότε τα διαγράμματα TTT που δημιουργούνται ονομάζονται CCT. Κάθε χάλυβας έχει τα δικά του διαγράμματα CCT και IT.(21)

1.2.3.3 Παραμένον Ωστενίτης

Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη συνοδεύεται από αλλαγή του όγκου του. Κατά τη βαφή, τα αρχικά πλακίδια του μαρτενσίτη που σχηματίζονται, περιβάλλονται από ωστενιτική δομή, που πρέπει να παραμορφωθεί για να προσαρμοστεί στη χαμηλότερη πυκνότητα του μαρτενσίτη. Κατά το μετασχηματισμό και την αύξηση του μαρτενσίτη, οι νησίδες ωστενίτη που μένουν να σχηματιστούν, περιβάλλονται από μαρτενσιτική δομή οι οποία λόγω των εφαρμοζόμενων δυνάμεων του μετασχηματισμού, εργοσκληραίνεται και σταθεροποιείται χωρίς να μετασχηματίζεται. Δεδομένου ότι ο μαρτενσίτης προβάλλει αντίσταση στον μετασχηματισμό, είτε ρωγματώνεται, είτε ο ωστενίτης παραμένει παγιδευμένος στη μαρτενσιτική δομή. Αυτός ο ωστενίτης λέγεται παραμένον ωστενίτης (retained austenite) και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην απόδοση του χάλυβα με συγκεκριμένες εφαρμογές (ρηγματώσεις).

Κατά την επαναφορά, ο μαρτενσίτης γίνεται πιο όλκιμος και η σκληρότητά του μειώνεται. Μετά την επαναφορά, κατά την ψύξη από το Ms σε Mf, ο παραμένον ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη.(8)

Μετά την επιβελτίωση, ο χάλυβας περιέχει ένα ποσοστό σκληρού και ψαθυρού μαρτενσίτη. Σε αυτό το στάδιο, απαιτείται επιπλέον μια επαναφορά που θα εξαλείψει το μαρτενσίτιτικό προϊόν του παραμένοντα ωστενίτη. Το πρόβλημα αυτό αφορά κυρίως τους χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα.



Σχήμα 21. Ποσοστό παραμένοντος ωστενίτη. (25)

1.2.3.4 Εμβαπτότητα

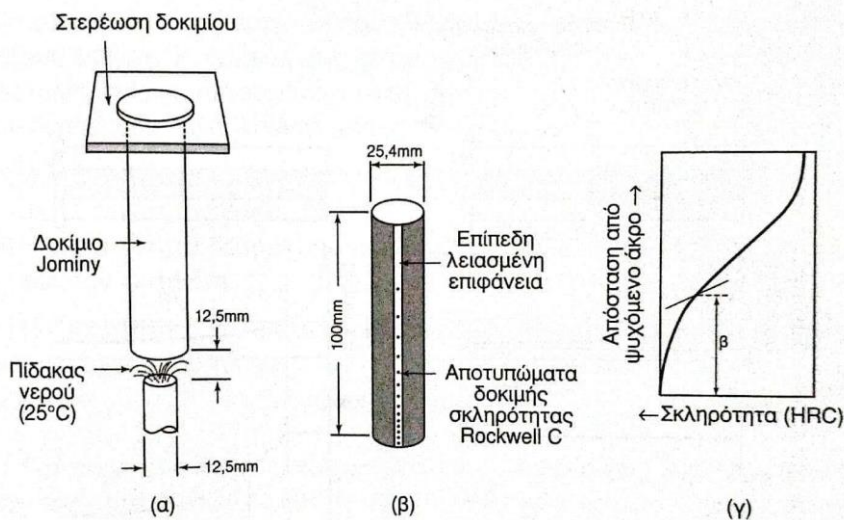
Οι χάλυβες γίνονται σκληρότεροι και ανθεκτικότεροι μετά από τη βαφή και την επαναφορά. Προκειμένου να επιτευχθούν οι βέλτιστες ιδιότητές τους, θα πρέπει η βαφή να πραγματοποιηθεί σε ταχύτητα μεγαλύτερη της κρίσιμης ταχύτητας απόψυξης (της ελάχιστης δυνατής ταχύτητας απόψυξης ώστε να μην υπάρχουν ανεπιθύμητες παραμορφώσεις) έτσι ώστε η καμπύλη της απόψυξης να αποφύγει τη «μύτη» των καμπυλών μετασχηματισμού των διαγραμμάτων TTT και ο χάλυβας να αποκτήσει 100% μαρτενσιτική μικροδομή.

Είναι γνωστό όσο περισσότερος άνθρακας περιέχεται στον χάλυβα, τόσο μειώνεται η ταχύτητα του μετασχηματισμού λόγω της διάχυσης. Η κρίσιμη ταχύτητα απόψυξης μειώνεται από 10^5C/sec για τον καθαρό Fe, σε $\sim 200\text{C/sec}$ για χάλυβα με 0.8% κ.β. σε άνθρακα.

Η ταχύτητα του μετασχηματισμού είναι ανάλογη του αριθμού των πυρήνων που σχηματίζονται στη μονάδα της επιφάνειας ανά δευτερόλεπτο. Δεδομένου ότι τα όρια των κόκκων αποτελούν ευνοϊκές θέσεις πυρηνοποίησης, ένας λεπτόκοκκος χάλυβας παράγει περισσότερους πυρήνες από έναν χονδρόκοκκο. Επομένως, ο λεπτόκοκκος χάλυβας θα μετασχηματίζεται ταχύτερα από έναν χονδρόκοκκο και, κατά συνέπεια, θα έχει υψηλότερη τιμή κρίσιμης ταχύτητας βαφής. Η βαφή και η επαναφορά αφορά κυρίως στους χάλυβες που περιέχουν περισσότερο από 0.2% κ.β. άνθρακα.

Είναι γνωστό ότι οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των διαγραμμάτων TTT μετατοπίζονται προς τα δεξιά στους κραματωμένους χάλυβες, επιτρέποντας, σε πολλούς από αυτούς, να εμφανίζουν υψηλές τιμές εμβαπτότητας, δηλαδή της ικανότητας να εμφανίζουν τη μαρτενσιτική δομή σε μεγάλο βάθος από την επιφάνεια, ακόμα και όταν η απόψυξη πραγματοποιείται στον αέρα. Μετά από μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, το μεταλλικό αντικείμενο υφίσταται επαναφορά, ούτως ώστε να αποκτήσει τον επιθυμητό συνδυασμό αντοχής και σκληρότητας. (8)

Η εμβαπτότητα προσδιορίζεται πειραματικά. Για αυτόν τον σκοπό χρησιμοποιείται η δοκιμή Jominy.



Σχήμα 22. Δοκιμή Jominy (8)

Ένα κυλινδρικό μεταλλικό δοκίμιο μήκους 100mm και διαμέτρου 25.4mm θερμαίνεται σε φούρνο, ώστε να επέλθει πλήρης ωστενιτικός μετασχηματισμός και να διαλυθούν πλήρως όλα τα στοιχεία κραμάτωσης. Μόλις βγει από τον φούρνο, τοποθετείται στη συσκευή Jominy, ένα ειδικό εργαλείο, με τρόπο τέτοιο ώστε το ένα του άκρο να ψύχεται με πίδακα νερού. Η επιφάνεια του άκρου αυτού ψύχεται ταχύτατα, αλλά όλες οι άλλες διατομές που είναι παράλληλες προς αυτήν του άκρου, και πάνω από αυτήν αποψύχονται με προοδευτικά βραδύτερους ρυθμούς. Όταν όλο το κυλινδρικό δοκίμιο φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μετράται η σκληρότητα κατά μήκος μιας γενέτειρας του κυλινδρικού δοκιμίου.

Ένας χάλυβας υψηλής εμβαπτότητας παρουσιάζει σταθερή τιμή υψηλής σκληρότητας σε όλο το μήκος του δοκιμίου διότι η ταχύτητα απόψυξης, ακόμη και στο μη-ψυχόμενο άκρο του

δοκιμίου, είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης ταχύτητας βαφής (R_c^*). Συνεπώς, υπάρχει πλήρης μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη σε όλο το δοκίμιο.

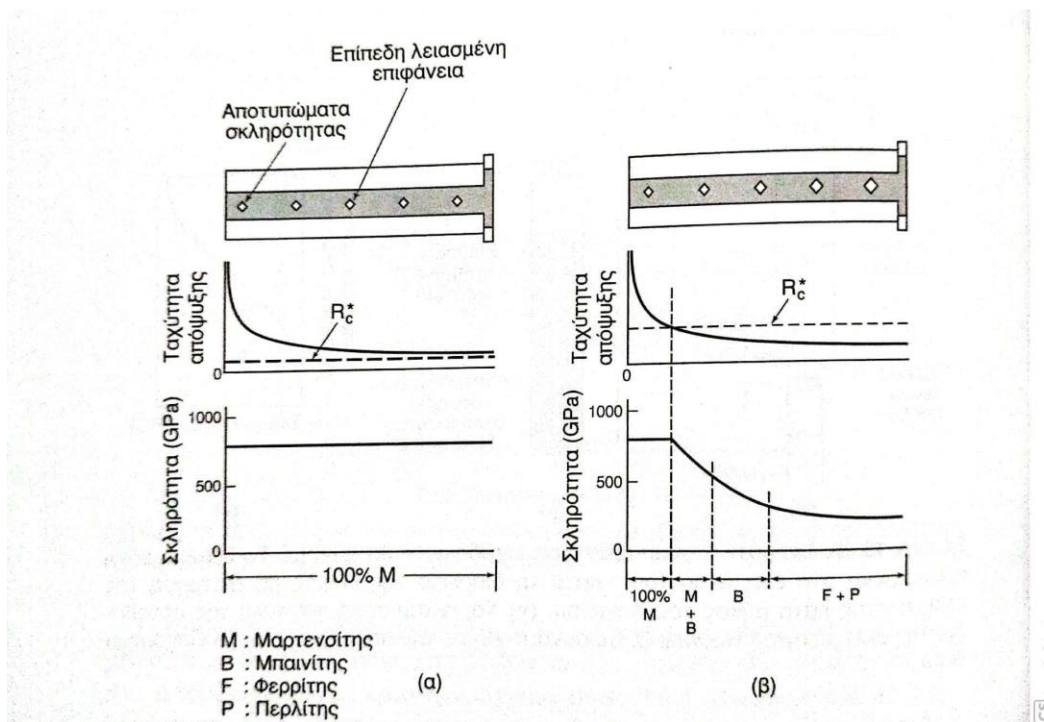
Για χάλυβες μέτριας εμβαπτότητας τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά. Η ταχύτητα απόψυξης παραμένει μεγαλύτερη της κρίσιμης ταχύτητας απόψυξης, μόλις λίγα εκατοστά μακρύτερα από την ψυχόμενη επιφάνεια. Μόλις η ταχύτητα απόψυξης γίνει μικρότερη της κρίσιμης, ο ωστενίτης του χάλυβα αρχίζει να μετασχηματίζεται σε μπαινίτη, ενώ κοντά στο απέναντι από το ψυχόμενο άκρο, εμφανίζεται η φερριτοπερλιτική δομή, καθώς η σκληρότητα ελαττώνεται συνεχώς.

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 μετά τη βαφή, εμφανίζει μεγάλο βάθος βαφής. Για οποιονδήποτε δεδομένο χάλυβα, η εμβαπτότητα και το βάθος βαφής εξαρτώνται από τη μάζα του χάλυβδινου αντικειμένου και από τη δραστηριότητα του μέσου απόψυξης. (8)

Η εμβαπτότητα εξαρτάται, επίσης, από το είδος του χάλυβα. Οι προσθήκες στον κοινό χάλυβα μετατοπίζουν τις καμπύλες IT και CCT προς τα δεξιά, πράγμα που σημαίνει ότι η κρίσιμη ταχύτητα της μαρτενσιτικής βαφής (V_c) ελαττώνεται και, επομένως, το βάθος βαφής αυξάνεται. Η αύξηση της διαμέτρου των κόκκων του ωστενίτη (δ) προκαλεί, επίσης, μετατόπιση των καμπυλών TTT και CCT προς τα δεξιά. Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι:

- A) Η εμβαπτότητα ενός χάλυβα είναι μεγαλύτερη για χάλυβα μικρής κρίσιμης ταχύτητας βαφής (V_c) και
- B) Η εμβαπτότητα δεδομένου χάλυβα αυξάνεται, με την αύξηση των κόκκων του ωστενίτη.



Σχήμα 23 Αποτελέσματα διαδικασίας Jominy

1.2.4 Επαναφορά (Ανόπτηση Επαναφοράς)

Η επαναφορά των βαμμένων χαλύβων είναι αναγκαία, διότι αυτοί σε μαρτενσιτική κατάσταση είναι σκληρότατοι και εύθραυστοι, λόγω των υψηλών εσωτερικών τάσεων. Υπό αυτές τις συνθήκες, αυτοί οι χάλυβες δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν. Για αυτόν τον λόγο, οι βαμμένοι μαρτενσιτικοί χάλυβες θερμαίνονται σε θερμοκρασία T , με $M_f < T < A$ και για χρόνο t , ώστε ο μαρτενσίτης να εξελιχθεί μερικώς στην κατάσταση ισορροπίας. Η δομή αυτή καλείται μαρτενσίτης από επαναφορά ή επαναφερόμενος μαρτενσίτης. Με τον τρόπο αυτό, η αποκτηθείσα, κατά τη βαφή, σκληρότητα του χάλυβα ελαττώνεται, ενώ αυξάνονται η δυσθραυστότητα και η ολκιμότητα του.

Οι δομές που λαμβάνονται κατά την επαναφορά του μαρτενσίτη εξαρτώνται από τον χρόνο και τη θερμοκρασία της κατεργασίας. Οι δομές που προκύπτουν μετά την επαναφορά εξαρτώνται από την επιλογή της θερμοκρασίας επαναφοράς και το υλικό. Έτσι στους ανθρακοχάλυβες η επαναφορά περιλαμβάνει 4 στάδια:

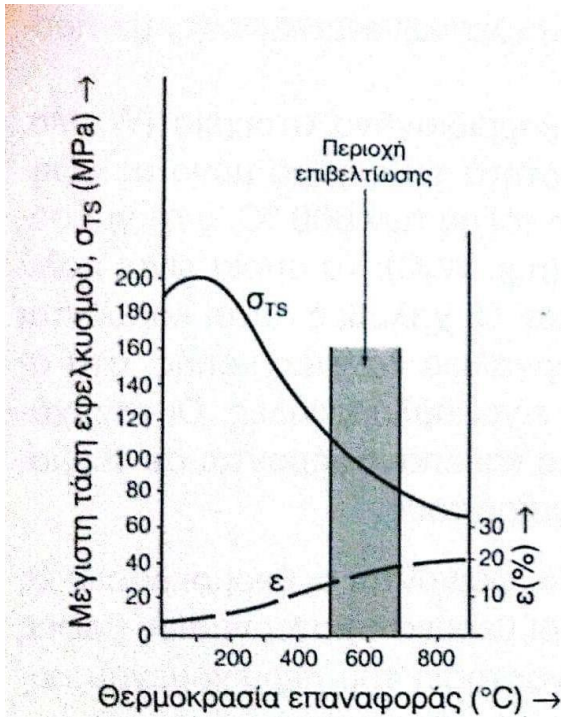
Στάδιο 1: Καθίζηση ϵ -καρβιδίου και μείωση της τετραγωνικότητας του μαρτενσίτη (εως τους 250°C)

Στάδιο 2: Μετασχηματισμός του παραμένουσα ωστενίτη σε φερρίτη και σεμεντίτη ($200-300^\circ\text{C}$)

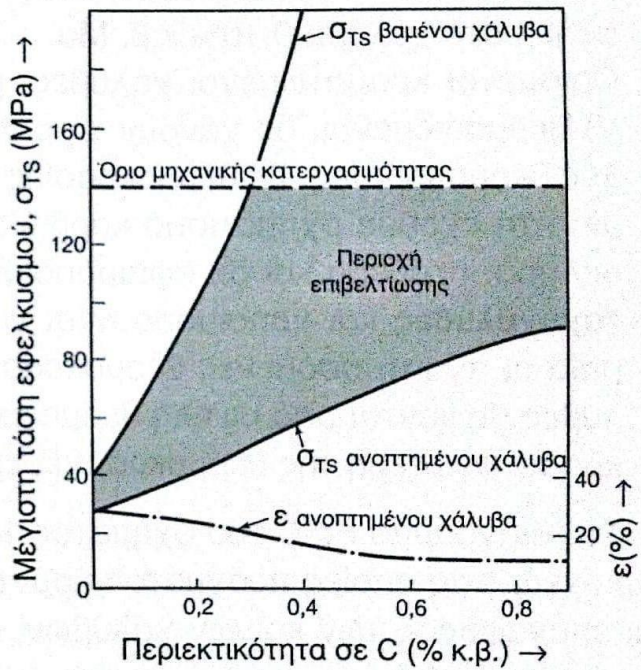
Στάδιο 3: Αντικατάσταση του ϵ -καρβιδίου από σεμεντίτη, απώλεια τετραγωνικότητας του μαρτενσίτη ($200-350^\circ\text{C}$)

Στάδιο 4: Διεύρυνση και σφαιροποίηση διασποράς σεμεντίτη, ανακρυστάλλωση του φερρίτη (πάνω από τους 350°C)

Στο σχήμα 24Α, δίνεται η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων κοινού χάλυβα, συναρτήσει της θερμοκρασίας επαναφοράς και στο σχήμα 24Β, η ίδια μεταβολή συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άνθρακα. Στα σχήματα αυτά, ως περιοχή επιβελτίωσης, ορίζεται η θερμοκρασιακή περιοχή όπου σημειώνεται σημαντική αύξηση της δυσθραυστότητας. Πρακτικά, η περιοχή επιβελτίωσης περιορίζεται προς τα πάνω από την ευθεία της μέγιστης σκληρότητας, για την οποία η κατεργασιμότητα του χάλυβα καθίσταται απαγορευτική.



Σχήμα 24Α Μεταβολή μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα συναρτήσει θερμοκρασίας επαναφοράς



Σχήμα 24Β Μεταβολή μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα συναρτήσει περιεκτικότητας σε C%

Ορισμένοι κραματωμένοι χάλυβες διατηρούν κατά την επαναφορά την υψηλή τους σκληρότητα, ιδιότητα η οποία καλείται αντοχή σε επαναφορά. Για παράδειγμα, οι χρωμιούχοι χάλυβες διατηρούν την υψηλή τους σκληρότητα ως τους 500°C, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η ελάττωση της τιμής της είναι μικρότερη από αυτή των κοινών χάλυβων. Γενικά, χάλυβες που περιέχουν καρβιδιογόνα στοιχεία, εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε επαναφορά, διατηρούν τη σκληρότητά τους, ενώ, ταυτόχρονα, γίνονται ολκιμότεροι. Αυτό οφείλεται στην κατακρήμνιση των καρβιδίων των κραματικών προσθηκών κατά την επαναφορά.

Οι κραματωμένοι χάλυβες, κυρίως οι μαγγανιούχοι (11-14% Mn), μετά από βαφή, επαναφορά και βραδεία απόψυξη, καθίστανται εύθραυστοι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η συμπεριφορά αυτή καλείται ανωμαλία ευθραυστότητας από επαναφορά. Το φαινόμενο συνδέεται με την κατακρήμνιση λόγω γήρανσης και δεν εμφανίζεται, όταν την επαναφορά ακολουθεί ταχύτατη απόψυξη. Κατά τη βραδεία απόψυξη, κατακρημνίζονται καρβίδια και νιτρίδια των κραματικών στοιχείων, τα οποία είναι διαλυμένα σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 430°C. Με την ταχεία απόψυξη, τα καρβίδια παραμένουν διαλυμένα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ένταση του φαινομένου ελαττώνεται επίσης με προσθήκη στον χάλυβα 0,10% κ.β. Mo.(8)

Οι κραματωμένοι χάλυβες, με καρβιδιογόνα στοιχεία (W, Mo, V), δεν χάνουν τη σκληρότητά τους καθώς θερμαίνονται, παρά μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε θερμοκρασίες της τάξης των 600°C, αντί για σεμεντίτη έχουμε σχηματισμό καρβιδίων (π.χ. W₂C), τα οποία είναι πολύ σκληρά, σταθερά και δε σφαιροποιούνται. Οι χάλυβες αυτοί καλούνται ταχυχάλυβες και χρησιμοποιούνται για εργαλεία ταχείας κοπής, στα οποία οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές. Οι ταχυχάλυβες σκληραίνουν σε υψηλή θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και επαναφέρονται σε θερμοκρασία ανώτερη της θερμοκρασίας λειτουργίας τους.(8)

2 Πειραματική Ανάλυση

Σκοπός του παρόντος πειράματος ήταν η επεξεργασία δοκιμίων ώστε να καταστεί δυνατή η ανάλυση της μικροδομής τους, και πιο συγκεκριμένα η καταμέτρηση των καρβιδίων τους, το μέγεθος και οι αποστάσεις μεταξύ τους. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δώδεκα (12) δοκίμια, κατασκευασμένα από χάλυβα 1.7709, τα οποία έχουν υποστεί βαφή και επαναφορά σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιήθηκαν για την επαναφορά ήταν:



Εικόνα 6 Δοκίμια προ επεξεργασίας

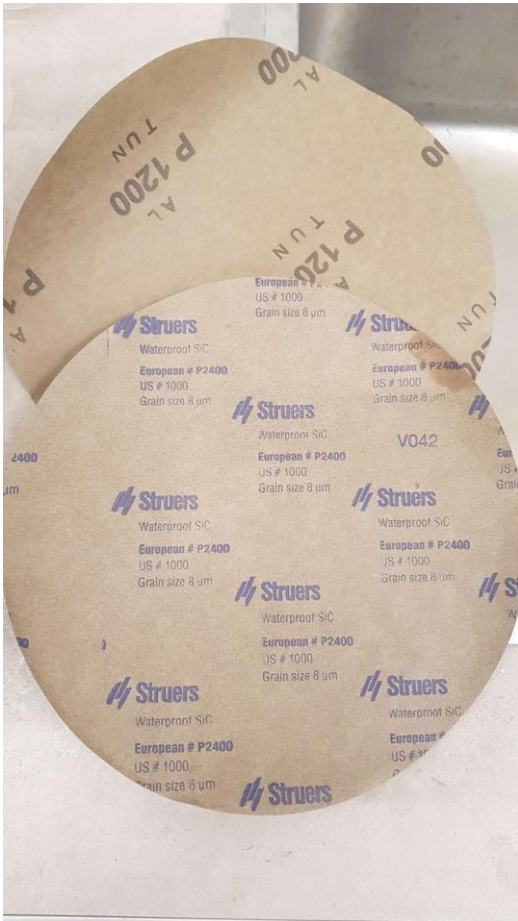
Η επεξεργασία προς μεταλλογραφική ανάλυση των δοκιμίων έγινε μέσω των διαδικασιών της λείανσης (grinding), της στίλβωσης (polishing) και της χημικής προσβολής (etching), σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο ASTM E3-11



Εικόνα 7 Δοκίμια κατόπιν επεξεργασίας

2.1 Λείανση (Grinding)

Κατά τη διαδικασία της λείανσης, πιέζεται, για 60 δευτερόλεπτα περίπου, το κυλινδρικό δοκίμιο, και από τις δύο πλευρές, σε ένα περιστρεφόμενο, συνεχώς ψεκαζόμενο με νερό, βάση, πάνω στην οποία έχει τοποθετηθεί χαρτί λείανσης με κόκκους SiC. Για το συγκεκριμένο πείραμα η βάση που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Buehler Metaserv, ενώ το χαρτί λείανσης ήταν από καρβίδιο πυριτίου (SiC), τραχύτητας 240-2400 (240,320,600,800,1000,1200,2400) και διαμέτρου 300mm, τα οποία περιστρέφονταν με ταχύτητα 220rpm.



Εικόνα 8 Χαρτί λείανσης



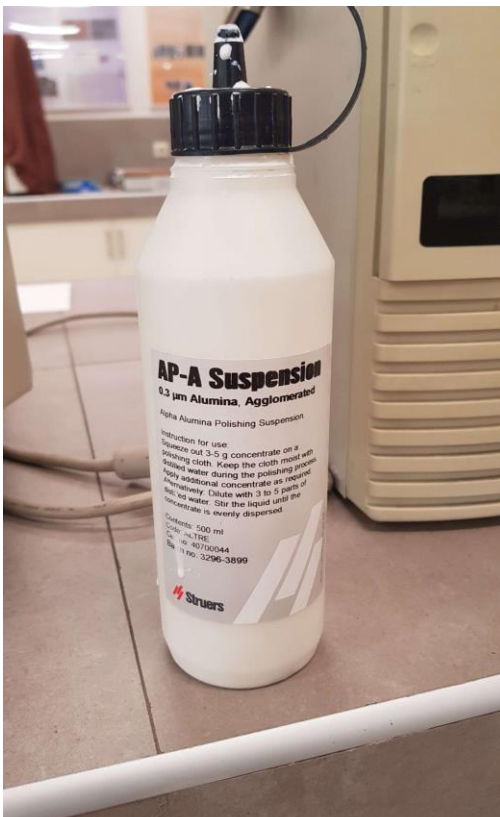
Εικόνα 9 Βάση λείανσης Buehler Metaserv



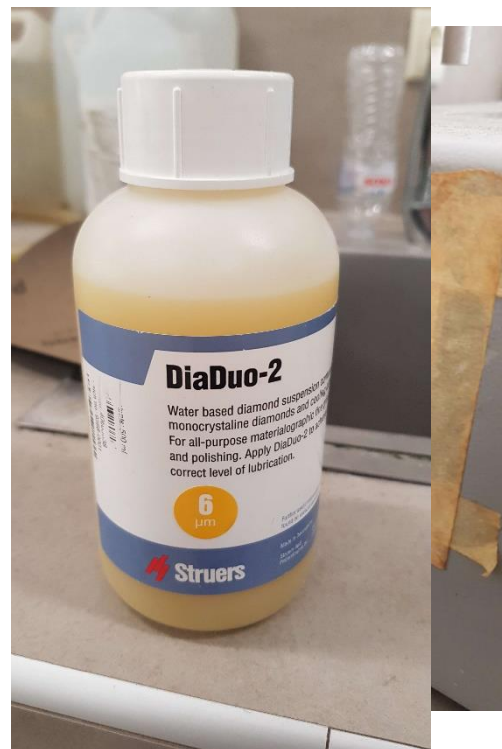
Εικόνα 10 Πληροφορίες βάσης λείανσης

2.2 Στίλβωση (Polishing)

Η διαδικασία της στίλβωσης δεν διαφέρει πολύ από αυτήν της λείανσης, όμως αυτήν τη φορά προτού τοποθετηθεί το δοκίμιο στη βάση, χρησιμοποιείται αώρημα διαμαντιού με βάση το νερό (DiaDuo, τραχύτητας 6μm-1μm) μαζί με ψυκτικό λιπαντικό ή κάποιο αώρημα αλουμίνας (Al_2O_3 , τραχύτητας 0.3μm) μαζί με πίδακα νερού ως λιπαντικό. Μετά την διαδικασία της στίλβωσης, προκειμένου να καθαριστεί η επιφάνεια του δοκιμίου από υπολείμματα μικροσωματιδίων, χρησιμοποιείται, ένας πίδακας μεθανόλης, ακολουθούμενος από καθαρισμό με βαμβάκι και αέρα. Για το συγκεκριμένο πείραμα, το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Struers Knuthrotor, SN 1445569, στις 250 στροφές (250rpm).



Εικόνα 11 Αιώρημα αλουμίνας



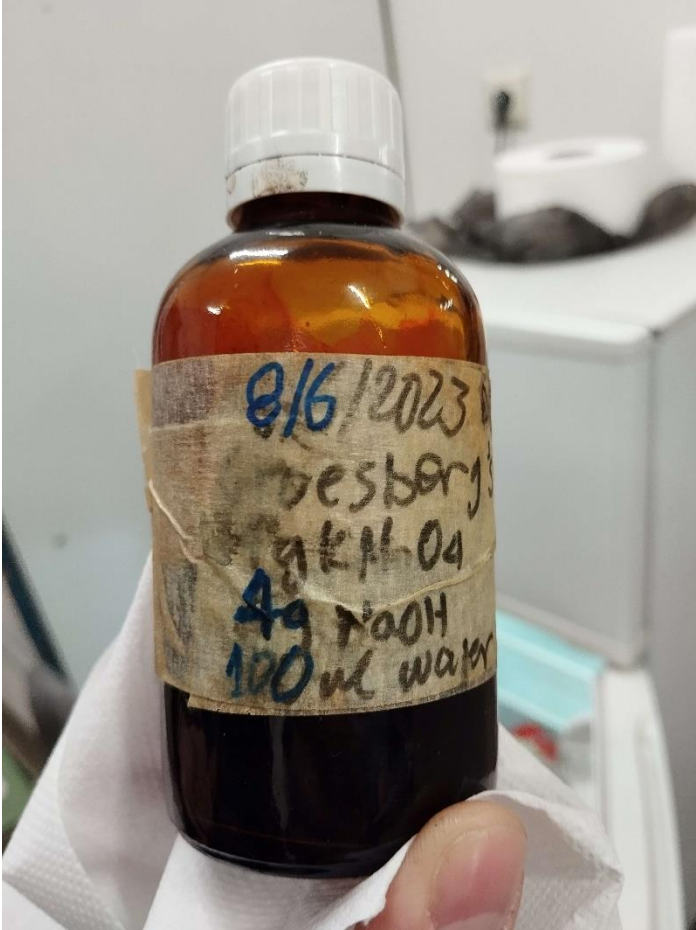
Εικόνα 12. Αιώρημα διαμαντιού μεγέθους 6μm



Εικόνα 13. Βάση λείανσης Struers Knuthrotor

2.3 Χημική Προσβολή (Etching)

Η διαδικασία της χημικής προσβολής είναι σημαντικό να γίνει αμέσως μετά από αυτήν της στίλβωσης, καθώς η επιφάνεια του μετάλλου καθίσταται ευαίσθητη και η οξείδωσή της γίνεται ραγδαία. Κατά τη χημική προσβολή, τοποθετείται τη στίλβωμένη πλευρά του μετάλλου σε κατάλληλο αντιδραστήριο (Groesbeck's, αποτελούμενο από 4g KMnO_4 , 4g NaOH και 100ml H_2O) για να επισημάνει τη θέση των καρβιδίων. Εν συνεχεία, είναι σημαντικό τα δοκίμια να παρατηρηθούν άμεσα στο μικροσκόπιο, ώστε να μην υπάρξουν αλλοιώσεις (deterioration) στις επιφάνειές τους.



Εικόνα 14α Αντιδραστήριο Groesbeck's

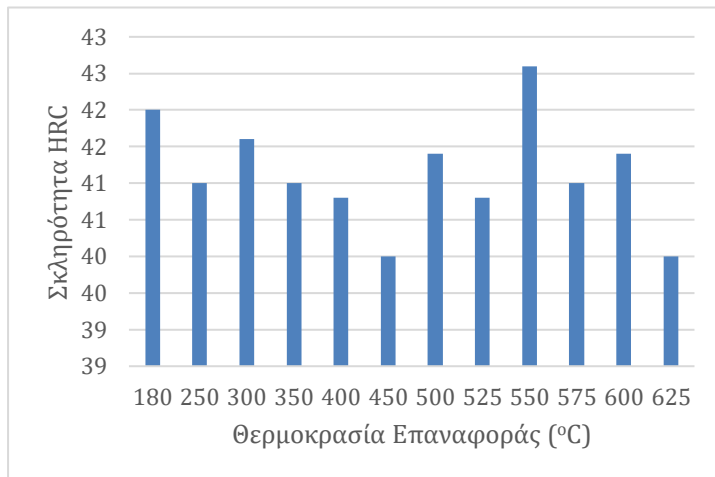
2.4 Σκληρομέτρηση

Εν συνεχεία, έγινε σκληρομέτρηση των δοκιμίων κατά το πρότυπο ASTM E18, στο σκληρόμετρο Innovatest 600 Series. Η σκληρομέτρηση έγινε με διαμαντένιο κωνικό διεισδυτή και τα αποτελέσματα είναι σε κλίμακα Rockwell C.

A/A Δοκιμίου	Θερμοκρασία Επαναφοράς (°C)	Σκληρότητα (HRC)				
1	180	42	41	42	43	42
2	250	41	41	41	41	41
3	300	41	41	41	43	42
4	350	41	42	42	38	42
5	400	41	40	41	41	41
6	450	40	40	40	40	40
7	500	42	41	42	41	41
8	525	40	41	41	41	41
9	550	42	43	43	43	42
10	575	41	41	41	41	41
11	600	40	42	41	42	42
12	625	40	40	40	40	40

Πίνακας 3 Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης

Παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο μια αύξηση της σκληρότητας στις θερμοκρασίες επαναφοράς 180°C, 300°C, 500°C και 550°C, όπως θα εξηγηθεί και παρακάτω.



Σχήμα 24β. Μέσος όρος σκληρότητας δοκιμίων



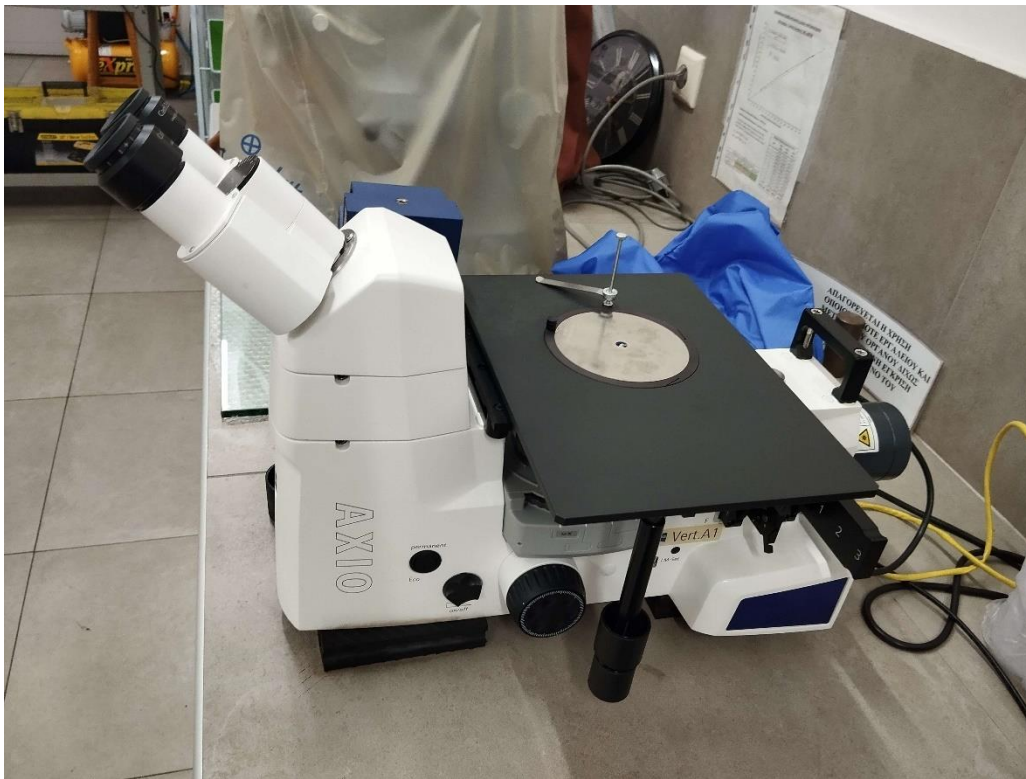
Εικόνα 14β Σκληρόμετρο Innovatest 600 Series

2.5 Μικροσκόπιο και Ανάλυση

Στο μικροσκόπιο, φωτογραφίζονται τα δοκίμια. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται φωτογραφίες δέκα (10) πεδίων από το κάθε δοκίμιο στην μεγέθυνση $\times 1000$ με μέγεθος πεδίου $40 \times 50 \mu\text{m}$ περίπου. Μετά τη λήψη των φωτογραφιών από το μικροσκόπιο (Zeiss Axio Vert.A1), και με τη χρήση της εντολής Auto Threshold Plugin και των αλγορίθμων Triangle και Yen στο πρόγραμμα Fiji, έγινε μετατροπή της ληφθείσας εικόνας σε ασπρόμαυρη.

Για την ανάλυση των σωματιδίων, χρησιμοποιήθηκε η εντολή Analyze, με αντίστοιχες παραμετροποιήσεις άνω και κάτω ορίων του εμβαδού και της κυκλικότητας των καρβιδίων για τις διαφορετικές θερμοκρασίες επαναφοράς. Μέσω αυτής της διαδικασίας, το Fiji δίνει τις συντεταγμένες, τον αριθμό και το εμβαδόν του συνόλου των εντοπισθέντων καρβιδίων.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα εισήχθησαν στο MatLab, και μέσω κώδικα (από τον κ. Κωνσταντίνο Γερτό, Παράρτημα Κ) ελήφθησαν η απόσταση των τεσσάρων πλησιέστερων γειτονικών καρβιδίων και η σχετική συχνότητα της εμφάνισής τους για κάθε εύρος αποστάσεων σε μm . Τέλος, μέσω Excel υπολογίσθηκαν μέσες τιμές των αποτελεσμάτων και δημιουργήθηκαν διαγράμματα κατανομών που τις παρουσιάζουν.

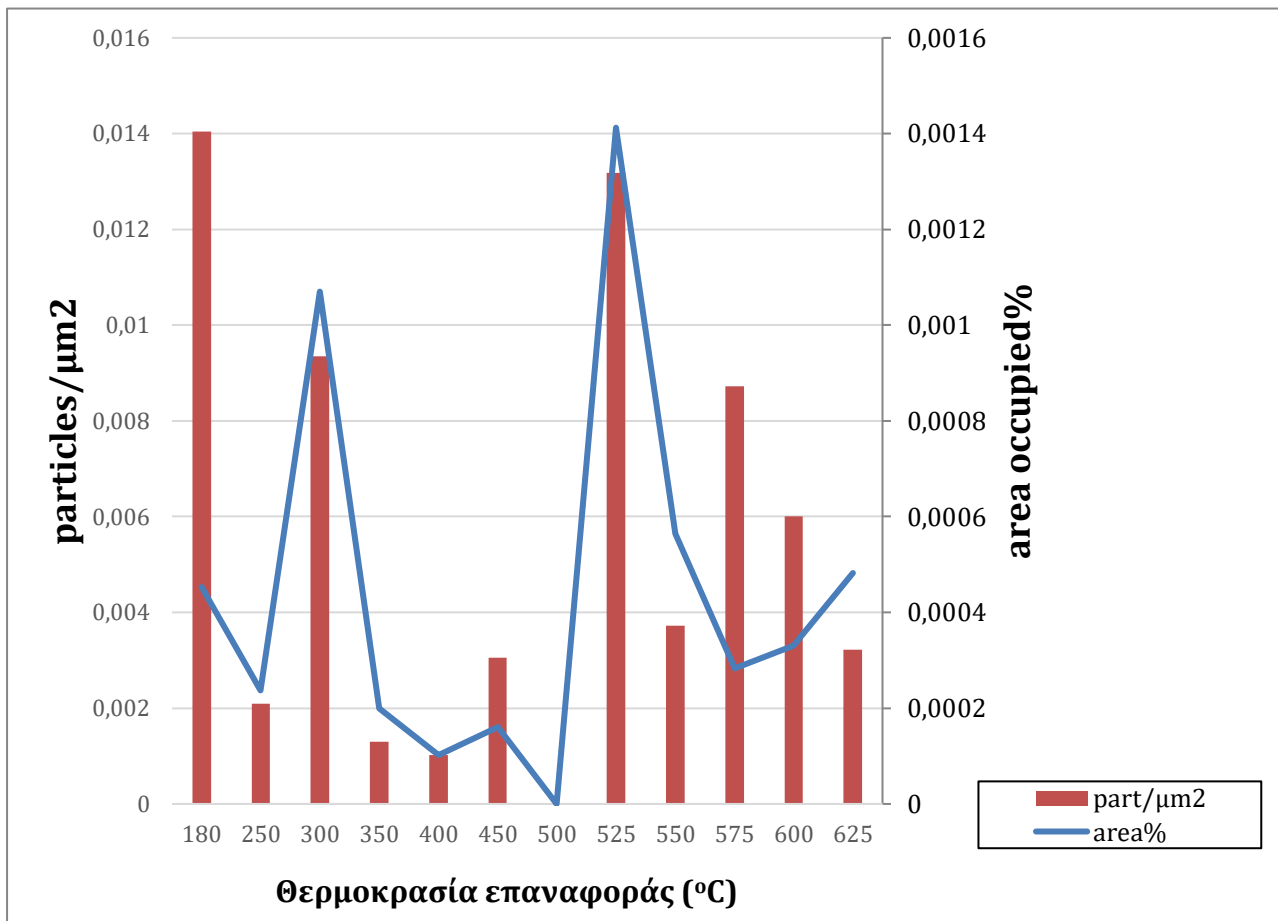


Εικόνα 15. Μικροσκόπιο Axio Vert. A1

3 Αποτελέσματα & Συμπεράσματα

Όπως ήταν αναμενόμενο και φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, η πυκνότητα και το μέγεθος των καρβιδίων, αλλάζει μαζί με τη θερμοκρασία επαναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή των εμβαδών των καρβιδίων μικραίνει με την αύξηση της θερμοκρασίας επαναφοράς, και τα διαγράμματα των κατανομών παρουσιάζουν την αναμενόμενη εικόνα.

Κατά την επαναφορά στους 180°C (Δοκίμιο #1) και στους 300°C (Δοκίμιο #3) αντίστοιχα παρατηρείται αύξηση στην πυκνότητα των καρβιδίων. Για την επαναφορά στους 180 °C, αυτό οφείλεται στην κατακρήμνιση του μετασταθούς ε-καρβιδίου του σιδήρου κατά το 1^ο στάδιο επαναφοράς. Αντίστοιχα, στην μετατροπή του ε-καρβιδίου σε σεμεντίτη οφείλεται η αύξηση της πυκνότητας των καρβιδίων στους 300 °C κατά το 3^ο στάδιο επαναφοράς.

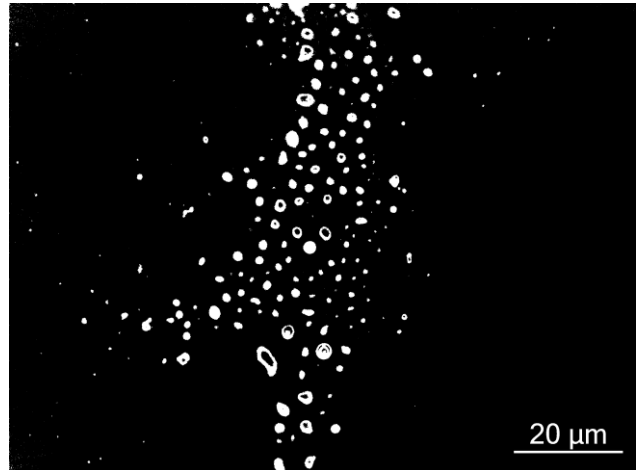
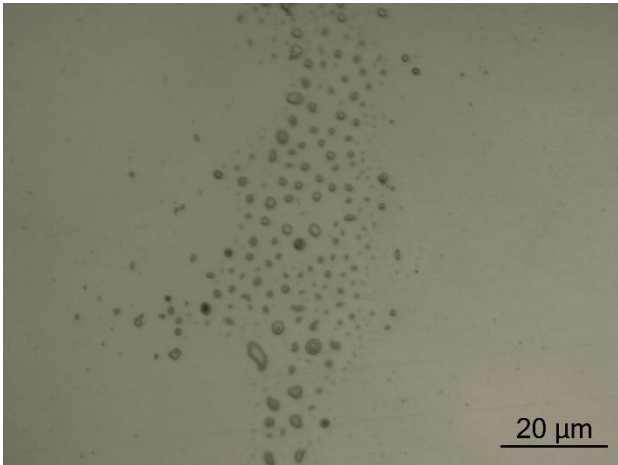


Σχήμα 25 Πυκνότητα καρβιδίων

Κατά την επαναφορά στους 525°C και στους 575 °C παρατηρείται επίσης αύξηση των κατακρημιζόμενων καρβιδίων, η οποία οφείλεται στην κατακρήμνιση των καρβιδίων Cr, Mo και V. Η διαφοροποίηση στη θερμοκρασία οφείλεται στην διαφορετική τάση σχηματισμού καρβιδίων του άνθρακα με τα τρία αυτά κραματοποιητικά στοιχεία. Έτσι, στην χαμηλότερη θερμοκρασία έχουν σχηματιστεί καρβίδια Cr και V και στην υψηλότερη έχουν σχηματιστεί καρβίδια V και Mo (22)

Μικροσκοπικά, μέσω της πυκνότητας των κατακρημιζόμενων καρβιδίων αλλά και μακροσκοπικά μέσω τήρησης σκληρότητας σε παλαιότερη δημοσιευμένη εργασία (19) διαπιστώνεται το διπλό σημείο κατακρήμνισης μετά από βαφή και επαναφορά του συγκεκριμένου υλικού.

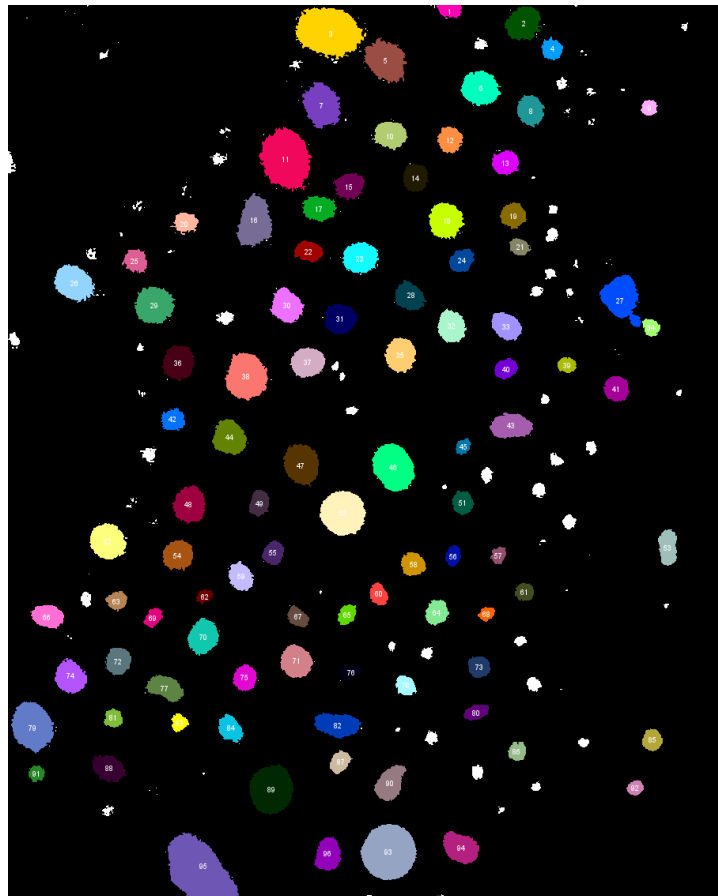
Από την άλλη, στο έβδομο δοκίμιο, με θερμοκρασία επαναφοράς 500°C, δεν υπήρχαν αρκετά δεδομένα ώστε να γίνει επεξεργασία της εικόνας και να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα.



Εικόνα 16α Δοκίμιο #8, θερμοκρασία επαναφοράς 525°C

Εικόνα 16β Δοκίμιο #8 Κατόπιν επεξεργασίας στο Fiji (binarized)

Καρβίδια σε x1000 μεγέθυνση



Εικόνα 16γ Δοκίμιο #8, Πεδίο 40x50μm, χρωματισμός καρβιδίων μέσω fiji

3.1 Μελλοντικές Ενέργειες

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, μπορούν να συντελέσουν στην εξέλιξη της κατανόησης των ιδιοτήτων των χαλύβων. Έχει βέβαια αρκετά σημεία τα οποία χρήζουν βελτίωσης. Συγκεκριμένα:

1. Να προσδιοριστεί ο αριθμός και η πυκνότητα καρβιδίων μετά από επαναφορά στους 500°C
2. Διαπιστώνεται μία μετατόπιση στις θερμοκρασίες κατακρήμνισης μεταξύ των μικροσκοπικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων μέσω σκληρομέτρησης. Θα πρέπει να γίνει μικροσκληρομέτρηση ώστε να επαληθευτούν οι διαφορές αλλά και να βελτιωθεί η διαδικασία καταμέτρησης των καρβιδίων. Μέχρι την έως τώρα διαδικασία σίγουρα καταγράφεται η τάση σχηματισμού καρβιδίων σε δεδομένη θερμοκρασία επαναφοράς.
3. Μελέτη των κατανομών μεγέθους των καρβιδίων σε κάθε θερμοκρασία επαναφοράς ώστε να προσδιοριστεί η προέλευση τους.

4 Παράρτημα

EN 10027-1:2005 (E)

Table 1 — Structural steels

Principal symbols		Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products				
G S n n n an		+an +an		a				
Principal symbols		Additional symbols						
Letter	Mechanical property	For steel				For steel product		
		Group 1 ^b			Group 2 ^{c,d}			
G = steel casting (where necessary) S = structural steel	nnn = specified minimum yield strength ^e in MPa ^f for the smallest thickness range	Impact property		Test temperature	C = Special cold forming D = Hot dip coating E = Enamelling F = Forgings H = Hollow section L = Low temperature M = Thermomechanically rolled N = Normalised or normalised rolled P = Sheet piling Q = Quenched and tempered S = Ship building T = Tubes W = Weather resistant an = Chemical symbol of specified additional elements, e.g. Cu, together, where necessary, with a single digit representing 10 x the average (rounded to 0,1%) of that specified range of the content of that element	Tables 16, 17 and 18		
		Energy Joules (J)					°C	
		27J	40J	60J			20	
		JR	KR	LR			0	
		J0	K0	L0			-20	
		J2	K2	L2			-30	
		J3	K3	L3			-40	
		J4	K4	L4			-50	
		J5	K5	L5			-60	
		J6	K6	L6				
		A = Precipitation hardening						
		M = Thermomechanically rolled						
N = Normalised or normalised rolled								
Q = Quenched and tempered								
G = Other characteristics followed, where necessary by 1 or 2 digits								

^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters.
^b Symbols A, M, N and Q in Group 1 apply to fine grain steels.
^c Symbols of Group 2, other than chemical symbols, may be suffixed by one or two digits in order to distinguish between qualities in accordance with the relevant product standard.
^d If two of the symbols of this Group are needed the chemical symbol shall be the last one.
^e The term "yield strength" refers to upper or lower yield strength (R_{eH}) or (R_{eL}) or proof strength (R_p), or proof strength total extension (R_t) depending on the requirement specified in the relevant product standard.
^f 1 MPa = 1 N/mm².

Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 06:41:34 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

Table 1 (continued)

Examples of steel names for structural steels	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN 10025-2	S235JR S355JR S355J0 S355J2 S355K2 S450J0
EN 10025-3	S355N S355NL
EN 10025-4	S355M S355ML
EN 10025-5	S235J0W S235J2W S355J0WP S355J2WP S355J0W S355J2W S355K2W
EN 10025-6	S460Q S460QL S460QL1
EN 10149-2	S355MC
EN 10149-3	S355NC
EN 10210-1	S355J2H
EN 10248-1	S355GP
EN 10326	S350GD S350GD+Z

EN 10027-1:2005 (E)

Table 2 — Steels for pressure purposes

Principal symbols		Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products	
G P n n n		an		+an + an	
Principal symbols		Additional symbols			
Letter	Mechanical property	For steel		For steel products	
		Group 1 ^b	Group 2 ^c		
G = steel casting (where necessary) P = steels for pressure purposes	nnn = specified minimum yield strength ^d in MPa ^e for the smallest thickness range	B = Gas bottles M = Thermomechanically rolled N = Normalised or normalised rolled Q = Quenched and tempered S = Simple pressure vessels T = Tubes G = Other characteristics followed, where necessary, by 1 or 2 digits	H = High temperature L = Low temperature R = Room temperature X = High and low temperature	Tables 16, 17 and 18	

^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters.

^b Symbols M, N and Q in group 1 apply to fine grain steels.

^c Symbols of group 2, other than chemical symbols, may be suffixed by one or two digits in order to distinguish between qualities in accordance with the relevant product standard.

^d The term "yield strength" refers to upper or lower yield strength (R_{eH}) or (R_{eL}) or proof strength (R_p), or proof strength total extension (R_t) depending on the requirement specified in the relevant product standard.

^e 1 MPa = 1 N/mm².

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN 10028-2	P265GH
EN 10028-3	P355NH
EN 10028-5	P355M P355ML1
EN 10028-6	P355Q P355QH P355QL1
EN 10120	P265NB
EN 10207	P265S
EN 10213-2	GP240GR GP240GH

Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 06:41:34 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

Table 3 — Steels for line pipe

Principal symbols		Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products	
L		n n n		an +an + an ^a	
Principal symbols		Additional symbols			
Letter	Mechanical property	For steel		For steel products	
		Group 1 ^b	Group 2		
L= steels for line pipe	nnn = specified minimum yield strength ^c in MPa ^d for the smallest thickness range	M = Thermomechanically rolled N = Normalised or normalised rolled Q = Quenched and tempered G = Other characteristics followed, where necessary by 1 or 2 digits	a = class requirement followed, where necessary, by one digit	Tables 16, 17 and 18	
^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters. ^b Symbols M, N and Q in group 1 apply to fine grain steels. ^c The term "yield strength" refers to upper or lower yield strength (R_{eH}) or (R_{eL}) or proof strength (R_p), or proof strength total extension (R_t) depending on the requirement specified in the relevant product standard. ^d 1 MPa = 1 N/mm ² .					

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN 10208-1	L360GA
EN 10208-2	L360NB L360QB L360MB

Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 06:41:34 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

EN 10027-1:2005 (E)

Table 4 — Steels for engineering

Principal symbols		Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products	
G	E	n	n	n	an ^a
Principal symbols		Additional symbols			
Letter	Mechanical property	For steel		For steel products	
		Group 1	Group 2		
G= steel casting (where necessary) E= engineering steels	nnn = specified minimum yield strength ^b in MPa ^c for the smallest thickness range	G = other characteristics followed, where necessary by 1 or 2 digits or in case where impact properties are specified the rules of Table 1 Group 1 shall be applied	C = suitability for cold drawing	Table 18	
^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters. ^b The term "yield strength" refers to upper or lower yield strength (R_{eH}) or (R_{eL}) or proof strength (R_p), or proof strength total extension (R_t) depending on the requirement specified in the relevant product standard. ^c 1 MPa = 1 N/mm ² .					

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN 10025-2	E295 E295GC E335 E360
EN 10293	GE240
EN 10296-1	E355K2

Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 06:41:34 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

Table 5 — Steels for reinforcing concrete

Principal symbols		Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products	
B		n n n		an +an + an ^a	
Principal symbols		Additional symbols			
Letter	Mechanical property	For steel		For steel products	
		Group 1	Group 2		
B = steels for reinforcing concrete	nnn = characteristic yield strength ^b in MPa ^c for the smallest dimensional range	a = ductility class followed, where necessary, by 1 or 2 digits	-	Table 18	
^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters. ^b The term "yield strength" refers to upper or lower yield strength (R_{eH}) or (R_{eL}) or proof strength (R_p), or proof strength total extension (R_t) depending on the requirement specified in the relevant product standard. ^c 1 MPa = 1 N/mm ² .					

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
No standard available	B500A

Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 06:41:34 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

EN 10027-1:2005 (E)

Table 6 — Steels for prestressing concrete

Principal symbols		Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products	
Y	n	n	n	n	an +an + an
Principal symbols		Additional symbols			
Letter	Mechanical property	For steel		For steel products	
		Group 1 ^b		Group 2	
Y = steels for prestressing concrete	nnnn = ^c nominal tensile strength (R_m) in MPa ^d	C = Cold drawn wire	H = Hot rolled bars or hot rolled and processed bars	Q = Quenched and tempered wire	S = Strand
		G = Other characteristics followed, where necessary by 1 or 2 digits			Table 18
^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters. ^b Symbols of group 1 may be suffixed by one or two digits in order to distinguish between qualities in accordance with the relevant product standard. ^c Where tensile strength is specified by 3 digits the first digit shall be zero. ^d 1 MPa = 1/Nmm ² .					

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
prEN 10138-2	Y1770C
prEN 10138-3	Y1770S7
prEN 10138-4	Y1230H

Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 06:41:34 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

Table 7 — Steels for or in the form of rails

Principal symbols		Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products	
R		n n n n		an +an + an ^a	
Principal symbols		Additional symbols			
Letter	Mechanical property	For steel		For steel products	
		Group 1	Group 2		
R = steel for or in the form of rails	nnn = specified minimum Brinell Hardness (HBW)	Cr = Chromium alloyed Mn = High manganese content an = Chemical symbol of specified additional elements, e.g. Cu, together, where necessary, with a single digit representing 10 x the average (rounded to 0.1%) of that specified range of the content of that element G = Other characteristics followed where necessary, by 1 or 2 digits	HT = Heat treated LHT = Low alloy, heat treated Q = Quenched and tempered	-	
^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters.					

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN 13674-1	R320Cr

EN 10027-1:2005 (E)

Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 06:41:34 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

Table 8 — Flat products for cold forming (except those in Table 9)

Principal symbols		Additional symbols for steel	Additional symbols for steel products	
D a n n		an	+an + an..... ^a	
Principal symbols		Additional symbols		
Letter	Mechanical property	For steel		For steel products
		Group 1 ^b	Group 2	
D = flat products for cold forming	Cnn = cold rolled followed by 2 symbols ^c Dnn = hot rolled for direct cold forming followed by 2 symbols ^c Xnn = product where rolled condition are not specified followed by 2 symbols ^c	D = for hot dip coating ED = for direct enamelling EK = for conventional enamelling H = for hollow sections T = for tubes an = chemical symbol of special additional element, e.g. Cu, together, where necessary, with a single digit representing 10 x the average (rounded to 0.1%) of that specified range of the content of that element G = other characteristics followed, where necessary, by 1 or 2 digits	-	Tables 17 and 18
^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters. ^b Symbols of group 1, other than chemical symbols, may be suffixed by one or two digits in order to distinguish between qualities in accordance with the relevant product standard. ^c These symbols are assigned by the responsible body (see 4.3) in order to characterize the steel.				

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN 10111	DD14
EN 10130	DC04
EN 10152	DC03+ZE
EN 10209	DC04EK
EN 10327	DX51D+Z

Table 9 — High strength steel flat products for cold forming

Principal symbols		Additional symbols for steel	Additional symbols for steel products	
H a n n n		an	+an + an	
H a T n n n (n)				
Principal symbols		Additional symbols		
Letter	Mechanical property	For steel		For steel products
		Group 1 ^b	Group 2 ^b	
H = flat products of high strength for cold forming	Cnnn = cold rolled followed by specified minimum yield strength ^c in MPa ^d	B = Bake hardening	D = for hot dip coating	Table 17
	Dnnn = hot rolled for direct cold forming followed by specified minimum yield strength ^c in MPa ^d	C = Complex-phase		
	Xnnn = product where the rolling condition is not specified followed by specified minimum yield strength ^c in MPa ^d	I = Isotropic		
	CTnnn(n) = cold rolled followed by specified minimum tensile strength in MPa ^d	LA = Low alloyed		
	DTnnn(n) = hot rolled for direct cold forming followed by specified minimum tensile strength in MPa ^d	M = Thermomechanically rolled		
	XTnnn(n) = product where the rolling condition is not specified followed by specified minimum tensile strength in MPa ^d	P = With phosphorus		
		T = TRIP (Transformation Induced Plasticity)		
		X = Dual phase		
		Y = Interstitial free		
		G = Other characteristics followed, where necessary, by 1 or 2 digits		

^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters.
^b symbols of group 1 and 2, may be suffixed by one or two digits in order to distinguish between qualities in accordance with the relevant product standard.
^c The term "yield strength" refers to upper or lower yield strength (R_{eH}) or (R_{eL}) or proof strength (R_p), or proof strength total extension ($R_{t0.2}$) depending on the requirement specified in the relevant product standard.
^d 1 MPa = 1 N/mm².

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
	HC400LA
prEN 10336	HXT450X

Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 06:41:34 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

EN 10027-1:2005 (E)

Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 06:41:34 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

Table 10 — Tin mill products (steel products for packaging)

Principal symbols		Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products	
T H n n n		+an + an		a	
T S n n n					
Principal symbols		Additional symbols			
Letter	Mechanical property	For steel		For steel products	
		Group 1	Group 2		
T = tin mill products (steel products for packaging)	Hnnn = nominal yield strength (<i>Re</i>) in MPa ^b for continuous annealed grades Snnn = nominal yield strength (<i>Re</i>) in MPa ^b for batch annealed grades	-	-	Tables 17 and 18	
				NOTE. No symbol is assigned to blackplate	
^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters.					
^b 1 MPa = 1 N/mm ² .					

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN 10202	TH550 TS550

Table 11 — Electrical steels

Principal symbols		Additional symbols	
M	n	n	n
-	n	n	a
Principal symbols		Additional symbols	
Letter	Property	Type of product	Additional symbols
M = electrical steel	nnn(n) = max specified loss in W/kg x 100 nn = 100 x nominal thickness in mm A hyphen shall separate the two properties	For magnetic polarization at 50Hz of 1,5 Tesla: A = non-oriented D = non-alloy semi-finished (not finally annealed) E = alloy semi-finished (not finally annealed) For magnetic polarization at 50Hz of 1,7 Tesla: P = high permeability grain oriented S = conventional grain oriented	-
^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters.			

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN 10106	M400-50A
EN 10107	M140-30S
EN 10126	M660-50D
EN 10165	M390-50E

Table 12 - Non-alloy steels (except free cutting steels) with an average manganese content < 1 %

Principal symbols		Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products	
G	C	n	n	n	an +an +an
Principal symbols		Additional symbols			
Letter	Carbon content ^b	For steel		For steel products	
		Group 1 ^{c d}	Group 2		
G = steel casting (where necessary) C = carbon	nnn = 100 x specified average carbon percentage content Where the carbon content is not specified by a range, a suitably representative value shall be selected by the responsible body (see 4.3)	C = for cold forming, e.g. cold heading, cold extrusion D = for wire drawing E = with specified max sulphur content R = with specified sulphur content range S = for springs U = for tools W = for welding rod G = other characteristics followed where necessary by, 1 or 2 digits	an =chemical symbol of special additional element(s), e.g. Cu, together, where necessary, with a single digit representing 10 x the average (rounded to 0,1%) of that specified range of the content of that element	Table 18	

^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters.
^b To distinguish between two similar steel grades, the number indicating carbon content may be increased by 1.
^c Symbols of group 1, other than E and R, may be suffixed by one or two digits in order to distinguish between qualities in accordance with the relevant product standard.
^d The symbols E and R of group 1 may be followed by 1 digit representing 100 x the maximum or average sulphur content rounded to the nearest 0,01 %.

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN 10016-2	C20D
EN 10016-3	C2D1
EN 10016-4	C20D2
EN 10083-1	C35E C35R
EN 10083-2	C35
EN 10132-4	C85S
EN 10263-2	C8C

Table 13 — Non-alloy steels with an average manganese content ≥ 1 %, non-alloy free-cutting steels and alloy steels (except high speed steels) where the content, by weight, of every average alloying element is < 5 %

Principal symbols			Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products										
G	n	n	n	a ..	n-n ..	+an +an									
Principal symbols			Additional symbols												
Letter	Carbon content ^b	Alloying elements	For steel		For steel products										
			Group 1	Group 2											
G = steel casting (where necessary)	nnn = 100 x specified average carbon percentage content. Where the carbon content is not specified by a range, a suitably representative value shall be selected by the responsible body (see 4.3)	a = chemical symbols indicating alloying elements ^c that characterise the steel followed by: n-n = numbers, separated by hyphens, representing respectively the average percentage content of the elements multiplied by the following factors	-	-	Tables 16 and 18										
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Factor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cr, Co, Mn, Ni, Si, W</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Ce, N, P, S</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>1000</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Factor	Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4	Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10	Ce, N, P, S	100	B	1000			
Element	Factor														
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4														
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10														
Ce, N, P, S	100														
B	1000														

^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters.
^b To distinguish between two similar steel grades, the number indicating carbon content may be increased by 1.
^c The sequence of symbols shall be in decreasing order of the values of the average percentage content; where the values of contents are the same for two or more elements, the corresponding symbols shall be indicated in alphabetical order.

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN 10028-2	13CrMo4-5
EN 10028-4	13MnNi6-3
EN 10083-1	28Mn6
EN 10083-3	27MnCrB5-2
EN 10087	11SMnPb30

Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 06:41:34 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

Table 14 — Stainless steels and other alloy steels (except high speed steels) where the average content by weight of at least one alloying element is $\geq 5\%$

Principal symbols			Additional symbols for steel		Additional symbols for steel products	
G	X	n	n	n	a ...	n-n...
			an.....		+an +an	
^a						
PM	X	n	n	n	a ...	n-n...
Principal symbols			Additional symbols			
Letter	Carbon content ^b	Alloying elements	For steel ^d		For steel products	
			Group 1	Group 2		
<p>G = steel casting (where necessary)</p> <p>PM = powder metallurgy (where necessary for tool steel)</p> <p>X = the average content of at least one alloying element $\geq 5\%$</p>	<p>nnn = 100 x specified average carbon percentage content. Where the carbon percentage content is not specified by a range, a suitable representative value shall be selected by the responsible body (see 4.3)</p>	<p>a = chemical symbols indicating alloying elements ^c that characterize the steel followed by:</p> <p>n-n = numbers, separated by hyphens representing respectively the average percentage of the elements rounded to the nearest integer</p>	<p>a = chemical symbol, separated by a hyphen, indicating an alloying element that characterizes the steel and whose content is in the range of 0,20 % up to 1,0 % followed by:</p> <p>n = 10 x specified average content for the alloying element</p>	<p>Tables 16 and 18</p>		
<p>^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters.</p> <p>^b To distinguish between two similar steel grades, the number indicating carbon content may be increased by 1.</p> <p>^c The sequence of symbols shall be in decreasing order of the values of the average percentage content; where the values of contents are the same for two or more elements, the corresponding symbols shall be indicated in alphabetical order.</p> <p>^d An example is given for a steel having high nitrogen content (see below).</p>						

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN ISO 4957	X100CrMoV 5
	X38CrMoNb16
EN 10088-2	X10CrNi18-8
	X6CrMoNb17-1
	X5CrNiCuNb16-4
No standard available	X30NiCrN15-1-N5

Table 15 — High speed steels

Principal symbols		Additional symbols for steel	Additional symbols for steel products	
PM	HS	n-n	a (a)	+an +an
Principal symbols		Additional symbols		
Letter	Alloy element content	For steel		For steel products
		Group 1	Group 2	
PM = powder metallurgy (where necessary) HS = high speed steel	n-n = numbers ^b , separated by hyphens, indicating percentage content of alloy elements in the following order: - tungsten (W) - molybdenum (Mo) - vanadium (V) - cobalt (Co)	a (a) = chemical symbol(s) of the element(s) with higher content (in case of same steel grade)	-	Table 18
^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters. ^b Each number represents the average percentage content of the respective element rounded to the nearest integer.				

Examples of steel names	
Standard	Steel name according to EN 10027-1
EN ISO 4957	HS2-9-1-8 HS6-5-2 HS6-5-2C

Table 1: The SAE/AISI steel numbering designation system

Carbon steels	10XX	Plain carbon, Mn 1.00% max
	11XX	Resulfurized free machining
	12XX	Resulfurized/rephosphorized free machining
	15XX	Plain carbon, Mn 1.00-1.65%
Manganese steels	13XX	Mn 1.75%
Nickel steels	23XX	Ni 3.50%
	25XX	Ni 5.00%
Nickel-chromium steels	31XX	Ni 1.25%, Cr 0.65-0.80%
	32XX	Ni 1.75%, Cr 1.07%
	33XX	Ni 3.50%, Cr 1.50-1.57%
	34XX	Ni 3.00%, Cr 0.77%
Molybdenum steels	40XX	Mo 0.20-0.25%
	44XX	Mo 0.40-0.52%
Chromium-molybdenum steels	41XX	Cr 0.50-0.95%, Mo 0.12-0.30%
Nickel-chromium-molybdenum steels	43XX	Ni 1.82%, Cr 0.50-0.80%, Mo 0.25%
	47XX	Ni 1.05%, Cr 0.45%, Mo 0.20-0.35%
Nickel-molybdenum steels	46XX	Ni 0.85-1.82%, Mo 0.20-0.25%
	48XX	Ni 3.50%, Mo 0.25%
Chromium steels	50XX	Cr 0.27-0.65%
	51XX	Cr 0.80-1.05%
	50XXX	Cr 0.50%, C 1.00% min
	51XXX	Cr 1.02%, C 1.00% min
	52XXX	Cr 1.45%, C 1.00% min
Chromium-vanadium steels	61XX	Cr 0.60-0.95%, V 0.10-0.015%
Tungsten-chromium steels	72XX	W 1.75%, Cr 0.75%
Nickel-chromium-molybdenum steels	81XX	Ni 0.30%, Cr 0.40%, Mo 0.12%
	86XX	Ni 0.55%, Cr 0.50%, Mo 0.20%
	87XX	Ni 0.55%, Cr 0.50%, Mo 0.25%
	88XX	Ni 0.55%, Cr 0.50%, Mo 0.35%
Silicon-manganese steels	92XX	Si 1.40-2.00%, Mn 0.65-0.85%, Cr 0-0.65%
Nickel-chromium-molybdenum steels	93XX	Ni 3.25%, Cr 1.20%, Mo 0.12%
	94XX	Ni 0.45%, Cr 0.40%, Mo 0.12%
	97XX	Ni 0.55%, Cr 0.20%, Mo 0.20%
	98XX	Ni 1.00%, Cr 0.80%, Mo 0.25%

Iron and steel standards in English

Standards available in English, including those not included in Handbooks 401 to 405, which are relevant to the manufacture, processing and use of iron and steel (except dimensional standards) and related ISO Standards and European Standards (as of January 2006)

DIN Standards

DIN Hdbk	DIN	Date of issue	Title	Correlation with
402	488-1	1984-09	Reinforcing steel – Grades, properties and marking	DIN EN 10080 ISO 6935-1 ISO 6935-2
402	488-6	1986-06	Reinforcing steel – Inspection	DIN EN 10080 ISO 10144
	488-7	1986-06	Reinforcing steel – Verification of weldability of reinforcing steel bars – Test procedure and evaluation	DIN EN 10080
	536-1	1991-09	Crane rails – Dimensions, static values and steel grades for crane rails with type A bottom flange	
	536-2	1974-12	Crane rails, type F (flat) – Dimensions, static values and steel grades	
401	1599	1980-08	Identification marking of steel	
	1615	1984-10	Normal-duty, welded, circular unalloyed steel tubes – Technical delivery conditions	
	1623-2	1986-02	Cold reduced structural steel sheet and strip – Technical delivery conditions	ISO 4997
401	4000-23	1988-12	Tabular layouts of article characteristics for iron and steel	
	5512-1	1997-05	Steel for use in rail vehicle construction – Hot rolled unalloyed and weatherproof structural steels	
	5512-2	1997-05	Steel for use in rail vehicle construction – Unalloyed steel flats up to 3 mm thick	
	5512-3	1991-01	Steel for use in rail vehicle construction – Stainless steel flats	
	5512-4	1997-05	Steel for use in rail vehicle construction – Fine-grain structural steel	
	5902	1995-11	Fishplates for flat bottom rails – Dimensions and materials	ISO 6305-1
	5904	1995-11	Steel sleepers for flat bottom rails – Dimensions, static parameters and materials	ISO 6305-3
	5906	1995-10	Rail clips for grooveless flat bottom rails – Dimensions and material	ISO 6305-2
	15400	1990-06	Lifting hooks – Mechanical properties, lifting capacity, stresses and materials	
404	17021-1	1976-02	Heat treatment of ferrous materials – Steel selection according to hardenability	
404	17022-1	1994-10	Heat treatment of ferrous materials – Hardening and tempering	

DIN Hdbk	DIN	Date of issue	Title	Correlation with
404	17022-2	1986-06	Heat treatment of ferrous materials – Heat treatment methods – Hardening and tempering of tools	
404	17022-3	1989-04	Heat treatment of ferrous materials – Case hardening	
	17115	1987-02	Steel for welded round steel chains – Technical delivery conditions	
	17122	1978-03	Steel conductor rails for electric traction – Technical delivery conditions	
	17405	1979-09	Soft magnetic materials for d.c. relays – Technical delivery conditions	
405	17440	2001-03	Technical delivery conditions for stainless steel drawn wire	
405	17455	2002-99	Welded circular stainless steel tubes for general purposes – Technical delivery conditions	
405	17456	1999-02	Seamless circular stainless steel tubes for general purposes – Technical delivery conditions	
405	17470	1984-10	Heating conductor alloys – Technical delivery conditions for round and flat wire	

DIN EN Standards

DIN Hdbk	DIN EN	Date of issue	Title	Correlation with
403	39	2001-11	Loose steel tubes for tube and coupler scaffolds – Technical delivery conditions	
401	1559-1	1997-08	Founding – Technical conditions of delivery – Part 1: General	ISO 4990
401	1559-2	2000-04	Founding – Technical conditions of delivery – Part 2: Additional requirements for steel castings	ISO 4990
401	1560	1997-08	Founding – Designation system for cast iron – Material symbols and material numbers	
401	10001	1991-03	Definition and classification of pig iron	ISO 9147
404	10016-1	1995-04	Unalloyed steel rod for drawing and/or cold rolling – Part 1: General requirements	ISO 16120-1
404	10016-2	1995-04	Unalloyed steel rod for drawing and/or cold rolling – Part 2: Specific requirements for general purpose rod	ISO 16120-2
404	10016-3	1995-04	Unalloyed steel rod for drawing and/or cold rolling – Part 3: Specific requirements for rimmed and substitute rimmed low carbon steel rod	ISO 16120-3
404	10016-4	1995-04	Unalloyed steel rod for drawing and/or cold rolling – Part 4: Specific requirements for rod for special applications	ISO 16120-4
401	10020	2000-07	Definition and classification of steel	ISO 4948-1, ISO 4948-2

DIN Hdbk	DIN EN	Date of issue	Title	Correlation with
401	10021	1993-12	General technical delivery conditions for steel and steel products	ISO 404
402	10025-1	2005-02	Hot rolled products of structural steels – Part 1: General technical delivery conditions	ISO 630 ISO 1052 ISO 4995 ISO 6316
402	10025-2	2005-04	Hot rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels	ISO 630 ISO 1052 ISO 4995 ISO 6316
402	10025-3	2005-02	Hot rolled products of structural steels – Part 3: Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels	ISO 4950-2 ISO 4951-2
402	10025-4	2005-04	Hot rolled products of structural steels – Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels	ISO 4950-2 ISO 4951-3
402	10025-5	2005-02	Hot rolled products of structural steels – Part 5: Technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance	ISO 4952 ISO 5952
402	10025-6	2005-02	Hot rolled products of structural steels – Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition	ISO 4950-3
401	10027-1	1992-09	Designation systems for steels – Part 1: Steel names and principal symbols	ISO/TR 4949
401	10027-2	1992-09	Designation systems for steel – Part 2: Numerical system	
403	10028-1	2003-09	Flat products made from steel for pressure purposes – Part 1: General requirements	ISO 9328-1
403	10028-2	2003-09	Flat products made from steel for pressure purposes – Part 2: Unalloyed and alloy steels with elevated temperature properties	ISO 9328-2
403	10028-3	2003-09	Flat products made from steel for pressure purposes – Part 3: Weldable, normalized, fine grain steels	ISO 9328-4
403	10028-4	2003-09	Steel flats for pressure purposes – Part 4: Nickel alloy steels with low temperature toughness	ISO 9328-2
403	10028-5	2003-09	Steel flats for pressure purposes – Part 5: Weldable fine grain steels, thermomechanically rolled	
403	10028-6	2003-10	Steel flats for pressure purposes – Part 6: Weldable fine grain steels, quenched and tempered	ISO 9328-4
403, 405	10028-7	2000-06	Flat products made of steels for pressure purposes – Part 7: Stainless steels	DIN 17460, ISO 9328-5
401	10052	1994-01	Vocabulary of heat treatment terms for ferrous products	ISO 4885
401	10079	1993-02	Definition of steel products	ISO 6929

DIN Hdbk	DIN EN	Date of issue	Title	Correlation with
404	10083-1	1996-10	Quenched and tempered steels – Part 1: Technical delivery conditions for high-grade steels	ISO 683-1
404	10083-2	1996-10	Quenched and tempered steels – Part 2: Technical delivery conditions for unalloyed quality steels	ISO 683-1
404	10083-3	1996-02	Quenched and tempered steels – Part 3: Technical delivery conditions for boron steels	ISO/TR 11637
404	10084	1998-06	Case hardening steel – Technical delivery conditions	ISO 683-11
404	10085	2001-07	Nitriding steels – Technical delivery conditions	ISO 683-10
404	10087	1999-01	Free-cutting steels – Technical delivery conditions for semi-finished products, hot-rolled bars and rods	ISO 683-9
405	10088-1	1995-08	Stainless steels – Part 1: List of stainless steels	ISO/TR 15510
405	10088-2	1995-08	Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for general purpose sheet/plate and strip	
405	10088-3	1995-08	Stainless steels – Part 3: Technical delivery conditions for general purpose semi-finished products, bars, rod and sections	
404	10089	2003-04	Hot rolled steels for quenched and tempered springs – Technical delivery conditions	ISO 683-14
405	10090	1998-03	Valve steels and alloys for internal combustion engines	ISO 683-15
405	10095	1999-05	Heat resisting steels and nickel alloys	ISO 4955
	10106	1996-02	Cold rolled non-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully processed state	IEC 404-8-4
	10107	1996-02	Grain-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully processed state	IEC 404-8-7
402	10111	1998-03	Continuously hot rolled low carbon steel sheet and strip for cold forming – Technical delivery conditions	ISO 3573
403	10120	1997-01	Steel sheet and strip for welded gas cylinders	ISO 4978
	10126	1996-02	Cold rolled electrical unalloyed steel sheet and strip delivered in the semi-processed state	IEC 404-8-3
402	10130	1999-02	Cold-rolled low carbon steel flat products for cold forming – Technical delivery conditions (includes Amendment A1:1998)	ISO 3574, ISO 14590
404	10132-1	2000-05	Cold-rolled narrow steel strip for heat treatment – Technical delivery conditions – Part 1: General	ISO 4960
404	10132-2	2000-05	Cold-rolled narrow steel strip for heat treatment – Technical delivery conditions – Part 2: Case hardening steels	
404	10132-3	2000-05	Cold-rolled narrow steel strip for heat treatment – Technical delivery conditions – Part 3: Steels for quenching and tempering	

DIN Hdbk	DIN EN	Date of issue	Title	Correlation with
404	10132-4	2000-05	Cold-rolled narrow steel strip for heat treatment – Technical delivery conditions – Part 4: Spring steels and other applications	ISO 4960
402	10139	1997-12	Cold rolled uncoated mild steel narrow strip for cold forming – Technical delivery conditions	ISO 6932
402	10142	2000-07	Continuously hot-dip galvanized mild steel sheet and strip for cold forming – Technical delivery conditions (including Amendment A1:1995)	ISO 3575
402	10147	2000-07	Continuously hot-dip galvanized sheet and strip made from structural steel – Technical delivery conditions	ISO 4998
402	10149-1	1995-11	Hot-rolled flat products made of high yield strength steel for cold forming – Part 1: General delivery conditions	
402	10149-2	1995-11	Hot-rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming – Part 2: Delivery conditions for thermo-mechanically rolled steels	ISO 6930-1
402	10149-3	1995-11	Hot-rolled products made of high yield strength steels for cold forming – Part 3: Delivery conditions for thermomechanically rolled steels	ISO 6930-2
405	10151	2003-02	Stainless steel strip for springs – Technical delivery conditions	ISO 6931-2
402	10152	2003-08	Electrolytically zinc coated cold rolled steel flats – Technical delivery conditions	ISO 5002
401	10160	1999-09	Ultrasonic testing of steel flat product of thickness equal to or greater than 6 mm (reflection method)	
401	10163-1	2005-03	Technical delivery conditions for the surface condition of hot rolled steel plate, wide flats and sections – Part 1: General requirements	ISO 7788
401	10163-2	2005-03	Technical delivery conditions for the surface condition of hot rolled steel plate, wide flats and sections – Part 2: Plate and wide flats	ISO 7788
401	10163-3	2005-03	Technical delivery conditions for the surface condition of hot rolled steel plate, wide flats and sections – Part 3: Sections	
402	10164	2005-03	Steel products with improved deformation properties perpendicular to the surface of the product – Technical delivery conditions	ISO 7788
	10165	1996-02	Cold rolled electrical alloyed steel sheet and strip delivered in the semi-processed state	IEC 404-8-2
401	10168	2004-09	Steel products – Inspection documents – List of information and description	
402	10169-1	2004-04	Continuously organic coated (coil coated) steel flat products – Part 1: General information (definitions, materials, tolerances, test methods)	

DIN Hdbk	DIN EN	Date of issue	Title	Correlation with
402	10169-3	2003-09	Continuously organic coated (coil coated) steel flat products – Part 3: Products for building interior applications	
402	10202	2001-07	Cold rolled electrolytic steel with chromium/chromium oxide coating	ISO 11949 ISO 11950
401	10204	2005-01	Inspection documents for metallic products (includes Amendment A 1:1995)	ISO 10474
402	10205	1992-01	Cold rolled blackplate in coil form for the production of tinplate or electrolytic steel products with chromium/chromium oxide coating	ISO 11951
403	10207	1997-09	Steels for simple pressure vessels – Technical delivery conditions for plate, strip and bars (includes Amendment A 1:1997)	
403	10208-1	1998-02	Technical delivery conditions for steel pipes for use with combustible fluids – Part 1: Pipes of requirements class A	ISO 3183-1
402	10208-2	1996-08	Technical delivery conditions for steel pipes for use with combustible fluids – Part 2: Pipes of requirements class B	ISO 3183-2
402	10209	1996-05	Continuously hot dip refined steel sheet and strip with zinc-aluminium-coating (ZA) – Technical delivery conditions	ISO 5001
402	10210-1	1994-09	Hot worked hollow sections for structural steelwork made from unalloyed structural steel or fine grain structural steel – Part 1: Technical delivery conditions	
403	10213-1	1996-01	Technical delivery conditions for steel castings for pressure vessels – Part 1: General	ISO 4991
403	10213-2	1996-01	Technical delivery conditions for steel castings for pressure vessels – Part 2: Steel grades for service at ambient temperature and elevated temperature	ISO 4991
403	10213-3	1996-01	Technical delivery conditions for steel castings for pressure vessels – Part 3: Steel grades for service at low temperatures	DIN 17182, ISO 4991
405	10213-4	1996-01	Technical delivery conditions for steel castings for pressure vessels – Part 4: Austenitic and austenitic-ferritic steel	ISO 4991
403	10216-1	2004-07	Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 1: Non-alloy steel tubes with specified room temperature properties	ISO 9329-1
403	10216-2	2004-07	Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties	ISO 9329-2

DIN Hdbk	DIN EN	Date of issue	Title	Correlation with
403	10216-3	2004-07	Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 3: Alloy fine grain steel tubes	
403	10216-4	2004-07	Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 4: Non-alloy and alloy steel tubes with specified low temperature properties	ISO 9329-3
405	10216-5	2004-11	Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 5: Stainless steel tubes	ISO 9329-4
403	10217-1	2005-04	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 1: Non-alloy steel tubes with specified room temperature properties	ISO 9330-1
403	10217-2	2005-04	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Electric welded non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties	ISO 9330-2
403	10217-3	2005-04	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 3: Alloy fine grain steel tubes	
403	10217-4	2005-04	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 4: Electric welded non-alloy steel tubes with specified low temperature properties	ISO 9330-3
403	10217-5	2005-04	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 5: Submerged arc welded non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties	ISO 9330-4
403	10217-6	2005-04	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 6: Submerged arc welded non-alloy steel tubes with specified low temperature properties	ISO 9330-5
405	10217-7	2005-05	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 7: Stainless steel tubes	ISO 9330-6
401	10218-1	1994-05	Steel wire and wire products – General – Part 1: Test methods	
402	10219-1	1997-11	Cold formed structural hollow sections of unalloyed and fine grain structural steels – Part 1: Technical delivery conditions	
401	10221	1996-01	Surface quality classes of hot rolled steel bars and wire rod of circular cross section – Technical delivery conditions	ISO 9443
403	10222-1	2002-07	Steel forgings for pressure purposes – Part 1: General requirements for open die forgings	ISO 9327-1

DIN Hdbk	DIN EN	Date of issue	Title	Correlation with
403	10222-2	2000-04	Steel forgings for pressure purposes – Part 2: Ferritic and martensitic steels with specified elevated temperature properties (includes Corrigendum AC:2000)	ISO 9327-2
403	10222-3	1999-02	Steel forgings for pressure purposes – Part 3: Nickel steels with specified low temperature properties	ISO 9327-3
403	10222-4	2001-12	Steel forgings for pressure purposes – Part 4: Weldable fine grain steels with high proof strength (includes Amendment A1:2001)	ISO 9327-4
405	10222-5	2000-02	Steel forgings for pressure purposes – Part 5: Martensitic, austenitic and austenitic-ferritic stainless steels	ISO 9327-5
403	10224	2005-12	Non-alloy steel tubes and fittings for the conveyance of water and other aqueous liquids – Technical delivery conditions	ISO 559
402	10225	2002-01	Weldable structural steels for fixed offshore structures – Technical delivery conditions	ISO 9327-5
401	10229	1998-11	Evaluation of resistance of steel products to hydrogen induced cracking (HIC)	
402	10238	1996-11	Automatically blast-cleaned and automatically pre-fabrication-primed structural steel products	
402	10248-1	1995-08	Hot rolled non-alloy steel sheet piling – Part 1: Technical delivery conditions	
402	10249-1	1995-08	Cold formed non-alloy steel sheet piling – Part 1: Technical delivery conditions	
404	10250-1	1999-12	Open die steel forgings for general purposes – Part 1: General requirements	DIN EN 10083-1, DIN EN 10083-2
404	10250-2	1999-12	Open die steel forgings for general engineering purposes – Part 2: Non-alloy quality and special steels	DIN EN 10083-1, DIN EN 10083-2
404	10250-3	1999-12	Open die steel forgings for general engineering purposes – Part 3: Alloy special steels	DIN EN 10083-1
404, 405	10250-4	2000-02	Open die steel forgings for general engineering purposes – Part 4: Stainless steels	
401	10254	2000-04	Steel closed die forgings – General technical delivery conditions	
403	10255	2004-11	Non-alloy steel tubes suitable for welding and threading – Technical delivery conditions	
403	10256	2000-07	Non-destructive testing of steel tubes – Qualification and competence of level 1 and 2 non-destructive testing personnel	ISO 11484
404	10263-1	2002-02	Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion – Part 1: General technical delivery conditions	ISO 4954

DIN Hdbk	DIN EN	Date of issue	Title	Correlation with
404	10263-2	2002-02	Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion – Part 2: Technical delivery conditions for steels not intended for heat treatment after cold working	ISO 4954
404	10263-3	2002-02	Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion – Part 3: Technical delivery conditions for case hardening steels	ISO 4954
404	10263-4	2002-02	Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion – Part 4: Technical delivery conditions for steels for quenching and tempering	ISO 4954
404, 405	10263-5	2002-02	Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion – Part 5: Technical delivery conditions for stainless steels	ISO 4954
	10264-1	2002-06	Steel wire and wire products – Steel wire for ropes – Part 1: General requirements	ISO 2332
	10264-2	2002-06	Steel wire and wire products – Steel wire for ropes – Part 2: Cold drawn non alloyed steel wire for ropes for general applications	ISO 2332
	10264-3	2003-02	Steel wire and wire products – Steel wire for ropes – Part 3: Round and shaped non alloyed steel wire for high duty applications	
	10264-4	2002-11	Steel wire and wire products – Steel wire for ropes – Part 4: Stainless steel wire	
	10265	1996-01	Magnetic materials – Specification for steel sheet and strip with specified mechanical properties and magnetic permeability	IEC 404-8-5
401	10266	2003-12	Steel tubes, fittings and structural hollow sections – Symbols and definition of terms for use in product standards	ISO 3545-1 ISO 3545-2 ISO 3545-3
404	10267	1998-02	Ferritic-pearlitic engineering steel for precipitation hardening from hot working temperatures	ISO 11692
402	10268	1999-02	Cold-rolled flat products made of high yield strength micro-alloyed steel for cold forming – General delivery conditions	ISO 13887
403, 405	10269	1999-11	Steels and nickel alloys for fasteners with specified elevated and/or low temperature properties	
404	10270-1	2001-12	Steel wire for mechanical springs – Part 1: Patented cold drawn unalloyed spring steel wire	ISO 8458-1, ISO 8458-2
404	10270-2	2001-12	Steel wire for mechanical springs – Part 2: Oil hardened and tempered spring steel wire	ISO 8458-1, ISO 8458-3
404, 405	10270-3	2001-08	Steel wire for mechanical springs – Part 3: Stainless spring steel wire	ISO 6931-1
402	10271	1998-12	Electrolytically zinc-nickel (ZN) coated steel flat products – Technical delivery conditions	

DIN Hdbk	DIN EN	Date of issue	Title	Correlation with
403, 405	10272	2001-01	Stainless steel bars for pressure purposes	
403	10273	2000-04	Hot rolled weldable steel bars for pressure purposes with specified elevated temperature properties	
404	10277-1	1999-10	Bright steel products – Technical delivery conditions – Part 1: General	ISO 683-18
404	10277-2	1999-10	Bright steel products – Technical delivery conditions – Part 2: Steels for general engineering purposes	ISO 683-18
404	10277-3	1999-10	Bright steel products -Technical delivery conditions – Part 3: Free-cutting steels	ISO 683-9
404	10277-4	1999-10	Bright steel products – Technical delivery conditions – Part 4: Case-hardening steels	ISO 683-18
404	10277-5	1999-10	Bright steel products – Technical delivery conditions – Part 5: Steels for quenching and tempering	ISO 683-18
405	10283	1998-12	Corrosion-resistant steel castings	ISO 11972
402	10292	2005-03	Continuously hot-dip coated strip and sheet of steel with higher yield strength for cold forming – Technical delivery conditions	
404	10293	2005-06	Steel castings for general engineering uses	ISO 3755 ISO 14737
405	10295	2003-01	Heat resistant steel castings	ISO 11973
404	10296-1	2004-02	Welded circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions – Part 1: Non-alloy and alloy steel tubes	
404	10297-1	2003-06	Seamless circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions – Part 1: Non-alloy and alloy steel tubes	
405	10302	2002-09	Creep resisting steels, nickel and cobalt alloys	
	10303	2001-07	Thin magnetic steel sheet and strip for use at medium frequencies	
	10304	2001-07	Magnetic materials (iron and steel) for use in relays	
28, 404	10305-1	2003-02	Steel tubes for precision applications – Technical delivery conditions – Part 1: Seamless cold drawn tubes	ISO 3304
28, 404	10305-2	2003-02	Steel tubes for precision applications – Technical delivery conditions – Part 2: Welded cold drawn tubes	ISO 3305
28, 404	10305-3	2003-02	Steel tubes for precision applications – Technical delivery conditions – Part 3: Welded cold sized tubes	ISO 3306

DIN Hdbk	DIN EN	Date of issue	Title	Correlation with
403	10305-4	2003-10	Steel tubes for precision applications – Technical delivery conditions – Part 4: Seamless cold drawn tubes for hydraulic and pneumatic power systems	
28, 404	10305-5	2003-08	Steel tubes for precision applications – Technical delivery conditions – Part 5: Welded and cold size square and rectangular tubes	
403	10305-6	2005-08	Steel tubes for precision applications – Technical delivery conditions – Part 6: Welded cold drawn tubes for hydraulic and pneumatic power systems	
401	10306	2002-04	Iron and steel – Ultrasonic testing of H beams with parallel flanges and IPE beams	
401	10307	2002-03	Non-destructive testing – Ultrasonic testing of austenitic and austenitic-ferritic stainless steels flat products of thickness equal to or greater than 6 mm (reflection method)	
401	10308	2002-03	Non-destructive testing – Ultrasonic testing of steel bars	
405	10312	2005-12	Welded stainless steel tubes for the conveyance of water and other aqueous liquids – Technical delivery conditions	
401	10314	2003-04	Method for the derivation of minimum values of proof strength of steel at elevated temperatures	
404	10323	2004-11	Steel wire and wire products – Bead wire	ISO 16650
404	10324	2004-11	Steel wire and wire products – Hose reinforcement wire	ISO/DIS 23717
402	10326	2004-09	Continuously hot-dip coated strip and sheet of structural steels – Technical delivery conditions	ISO 4998 ISO 5000 ISO 9364 ISO14788
402	10327	2004-09	Continuously hot-dip coated strip and sheet of low carbon steels for cold forming – Technical delivery conditions	
	13674-1	2003-12	Railway applications – Track; Rail – Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above	

DIN EN ISO and DIN ISO Standards

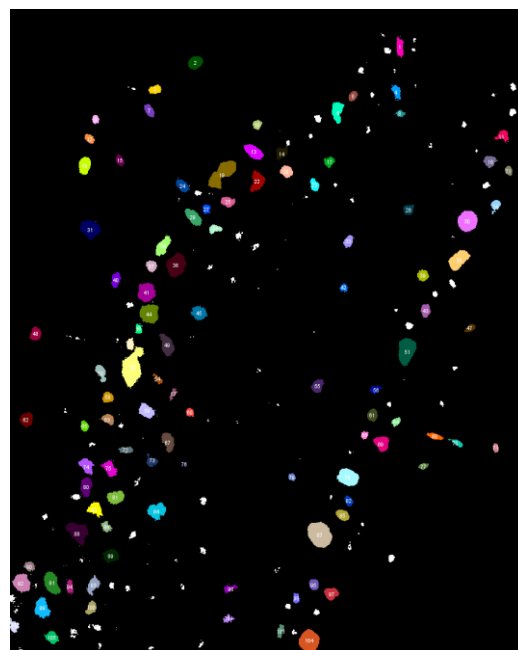
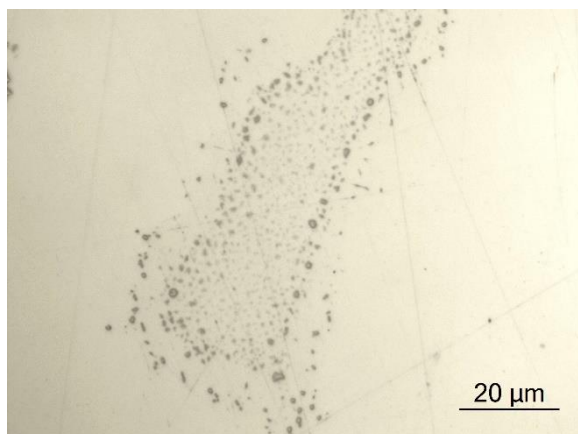
DIN Hdbk	DIN EN ISO	Date of issue	Title	Correlation with
401	377	1997-10	Steel and steel products – Location and preparation of test pieces for mechanical testing (ISO 377:1997)	ISO 377
404	683-17	2000-04	Heat-treated steels, alloy steels and free-cutting steels – Part 17: Ball and roller bearing steels (ISO 683-17:1999)	ISO 683-17

DIN Hdbk	DIN EN ISO	Date of issue	Title	Correlation with
401	3887	2003-10	Steels – Determination of depth of decarburization	ISO 3887
404	4957	2001-02	Tool steels (ISO 4957:1999)	ISO 4957
405	7153-1	2001-02	Surgical instruments – Metallic materials – Part 1: Stainless steel	ISO 7153-1
401	14284	2003-02	Steel and iron – Sampling and preparation of samples for the determination of chemical composition	ISO 14284
401	15630-1	2002-09	Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 1: Reinforcing bar, wire rod and wire	ISO 15630-1
401	15630-2	2002-09	Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 2: Welded fabric	ISO 15630-2
401	15630-3	2002-09	Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 3: Prestressing steels	ISO 15630-3
405	DIN ISO 5832-1	2000-08	Implants for surgery – Metallic materials – Part 1: Wrought stainless steel	ISO 5832-1

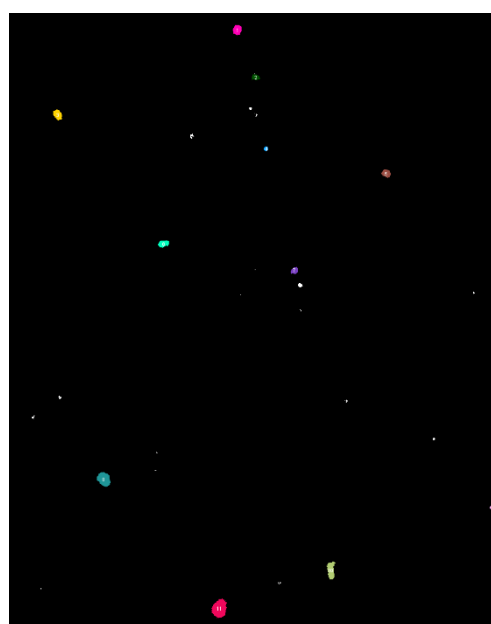
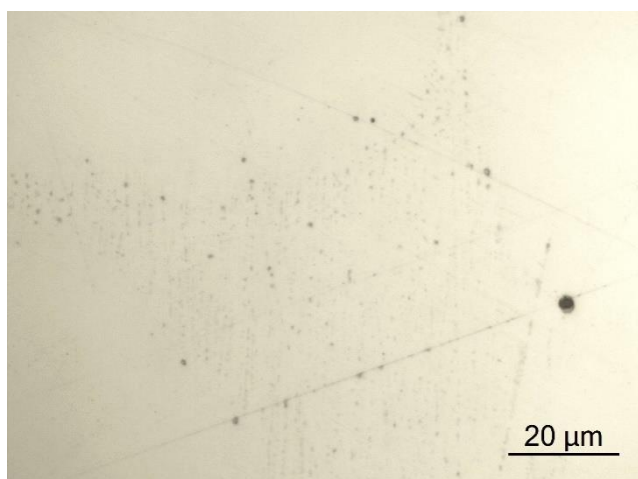
Licensed Copy: sheffieldun sheffieldun, na, Thu Sep 21 08:50:47 BST 2006, Uncontrolled Copy, (c) BSI

Table 1. Steel groups		Alloy steels											
Non-alloy steels		Special steels		Quality steels		Special steels		Alloy steels		Special steels			
Base steels		Special steels		Quality steels		Special steels		Alloy steels		Special steels			
Nr													
0	00 Base steels		10 Steels with special physical properties			20 Cr		30 Miscellaneous steels	40 Stainless steel with $\geq 2.5\%$ Ni without Mo, Nb and Ti	50 Mn-Si-Cu	60 Cr-Ni with $\geq 2.0 < 3.0\%$ Cr	70 Cr Cr-B	80 Cr-Si-Mo Cr-Si-Mn-Mo Cr-Si-Mo-V Cr-Si-Mn-Mo-V
1		01 91 General structural steels with $R_{p0.2} < 500 \text{ N/mm}^2$	11 Structural, pressure vessel and engineering steels with $C < 0.50\%$			21 Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-Si		31 High speed steel with Co	41 Stainless steel with $\geq 2.5\%$ Ni and Mo but without Nb and Ti	51 Mn-Si Mn-Cr	61	71 Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-B Cr-Si-Mn	81 Cr-Si-V Cr-Mo-V Cr-Si-Mn-V
2		02 92 Other structural steels not intended for heat treatment with $R_{p0.2} < 500 \text{ N/mm}^2$	12 Structural, pressure vessel and engineering steels with $C \geq 0.50\%$			22 Cr-V Cr-V-Si Cr-V-Mn Cr-V-Mn-Si		32 High speed steel with Co	42	52 Mn-Cu Mn-V Si-V Mn-Si-V	62 Ni-Si Ni-Mo Ni-Cu	72 Cr-Mo with $< 0.35\%$ Mo Cr-Mo-B	82 Cr-Mo-W Cr-Mo-W-V
3		03 93 Steels with average $C < 0.15\%$ or $R_{p0.2} < 400 \text{ N/mm}^2$	13 Structural pressure vessel and engineering steels with special requirements			23 Cr-Mo Cr-Mo-V Mo-V		33 High speed steel without Co	43 Stainless steel with $\geq 2.5\%$ Ni without Mo, Nb and Ti	53 Mn-Ti Si-Ti	63 Ni-Mo Ni-Mo-Mn Ni-Mo-Cu Ni-Mo-V Ni-Mn-V	73 Cr-Mo with $\geq 0.35\%$ Mo	83
4		04 94 Steels with average $C \geq 0.15\%$ or $R_{p0.2} \geq 400$ or $R_{p0.2} < 500 \text{ N/mm}^2$	14			24 W Cr-W		34	44 Stainless steel with $\geq 2.5\%$ Ni with Mo but without Nb and Ti	54 Mo Nb, Ti, V, W	64	74	84 Cr-Si-Ti Cr-Mn-Ti Cr-Si-Mn-Ti
5		05 95 Steels with average $C \geq 0.25\%$ or $R_{p0.2} \geq 500$ or $R_{p0.2} < 700 \text{ N/mm}^2$	15 Tool steel			25 W-V Cr-W-V		35 Bearing steels	45 Stainless steels with special additions	55 Mn-B $< 1.05\%$ Mn	65 Cr-Ni-Mo with $< 0.4\%$ Mo + $\geq 2.0 < 3.5\%$ Ni	75 Cr-V with $< 2.0\%$ Cr	85 Normalizing steels
6		06 96 Steels with average $C \geq 0.50\%$ or $R_{p0.2} \geq 700 \text{ N/mm}^2$	16 Tool steel			26 W excluding groups 24, 25 and 27		36 Materials with special magnetic properties without Co	46 Chemical resistant and high temp Ni alloys	56 Ni	66 Cr-Ni-Mo with $< 0.4\%$ Mo + $\geq 2.0 < 3.5\%$ Ni	76 Cr-V with $\geq 2.0\%$ Cr	86
7		07 97 Steels with higher P or S content	17 Tool steel			27 With Ni		37 Materials with special magnetic properties and with Co	47 Heat resistant steels with $< 2.5\%$ Ni	67 Cr-Ni with $< 1.0\%$ Cr	67 Cr-Ni-Mo with $< 0.4\%$ Mo + $\geq 3.5 < 5.0\%$ Ni, or $\geq 0.4\%$ Mo	77 Cr-Mo-V	87 Steels not for heat treatment by user
8			18 Tool steel			28 Other		38 Materials with special physical properties without Ni	48 Heat resistant steels with $\geq 2.5\%$ Ni	68 Cr-Ni with $\geq 1.0 < 1.5\%$ Cr	68 Cr-Ni-V Cr-Ni-W Cr-Ni-W	78	88 High strength weldable steels not intended for heat treatment by user
9			19			29		39 Materials with special physical properties and with Ni	49 Materials with elevated temperature properties	59 Cr-Ni with $\geq 1.5 < 2.0\%$ Cr	69 Cr-Ni except groups 57 to 68	79 Cr-Mn-Mo Cr-Mn-Mo-V	89 High strength weldable steels not intended for heat treatment by user

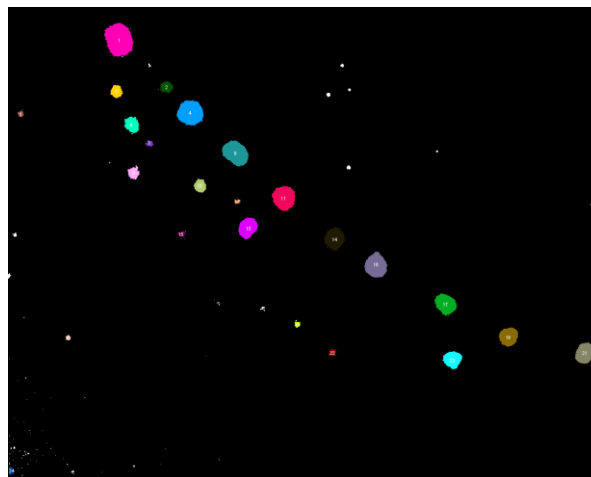
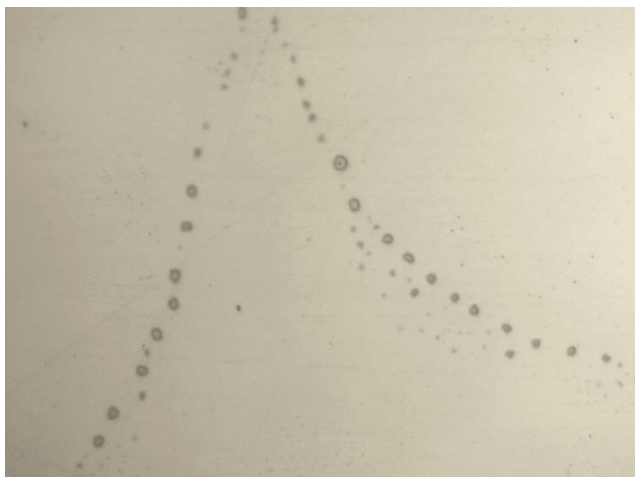
NOTE 1: The classification of steel groups is in accordance with the classification of steels in EN 10020.
NOTE 2: The following information is provided in the boxes of the table:
(a) steel group number, in upper left hand side.
(b) principal characteristic of the steel group.
(c) $R_{p0.2}$ = tensile strength.
The limiting values for the chemical composition and tensile strength ($R_{p0.2}$) are for guidance only.



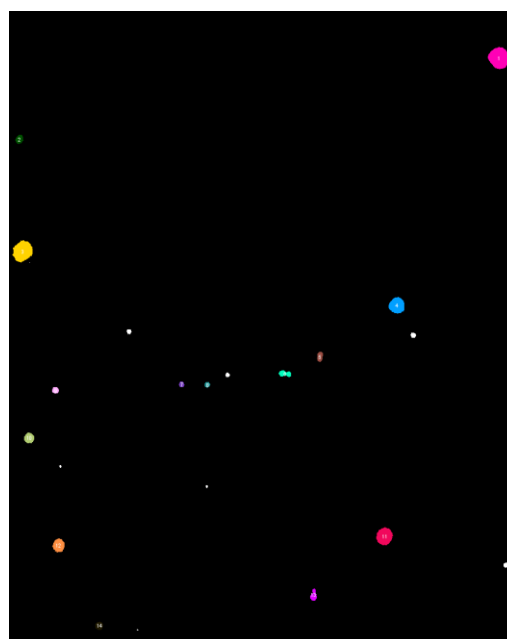
Εικόνα Π1. Επαναφορά στους 180°C



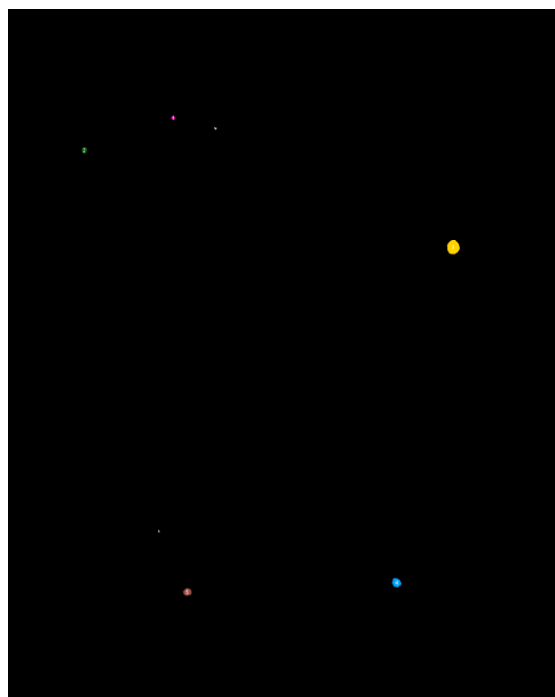
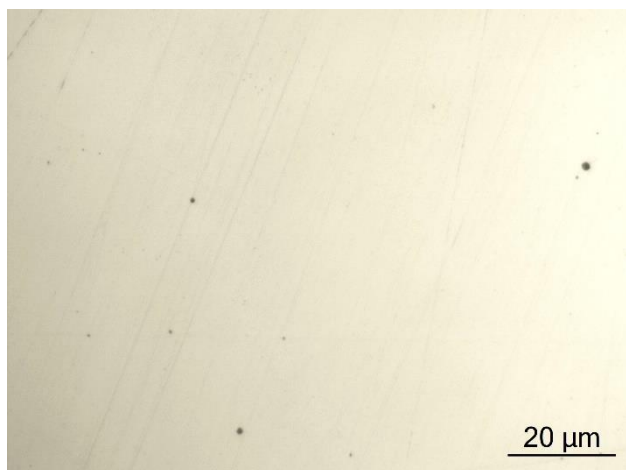
Εικόνα Π2. Επαναφορά στους 250°C



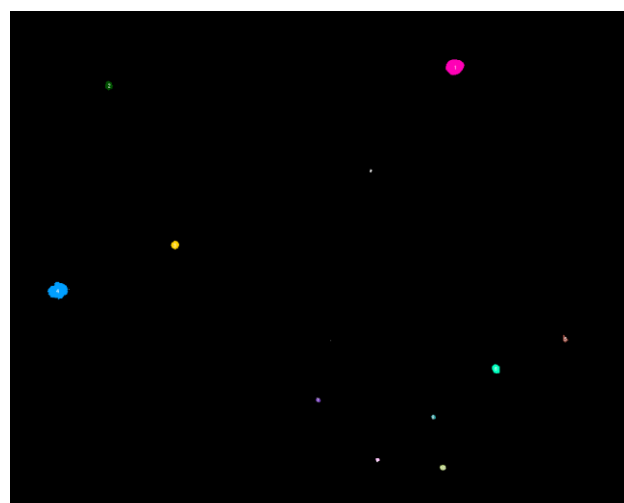
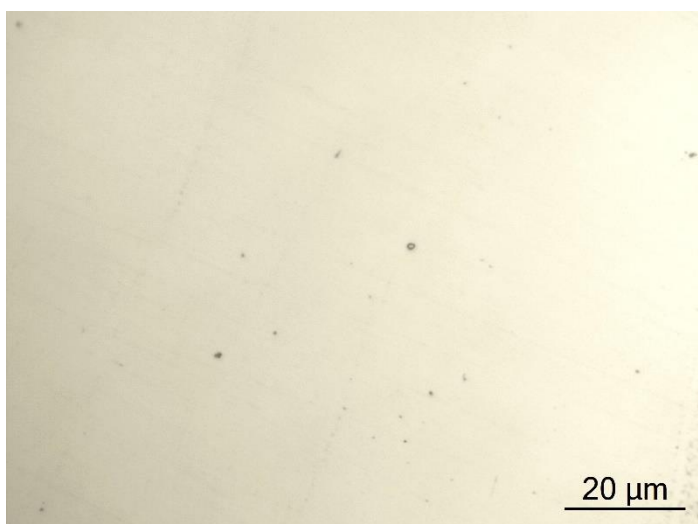
Εικόνα Π3. Επαναφορά στους 300°C



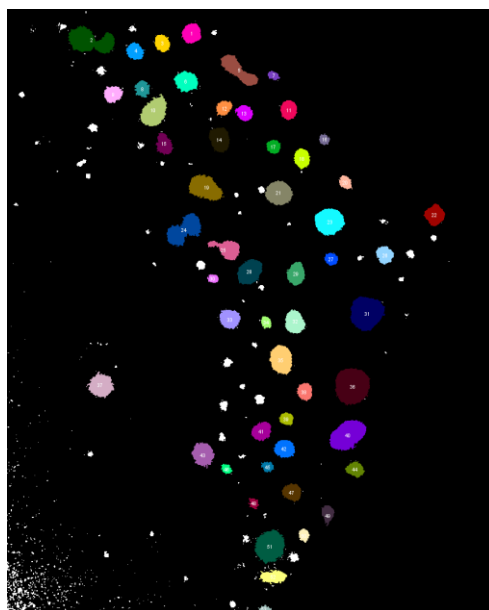
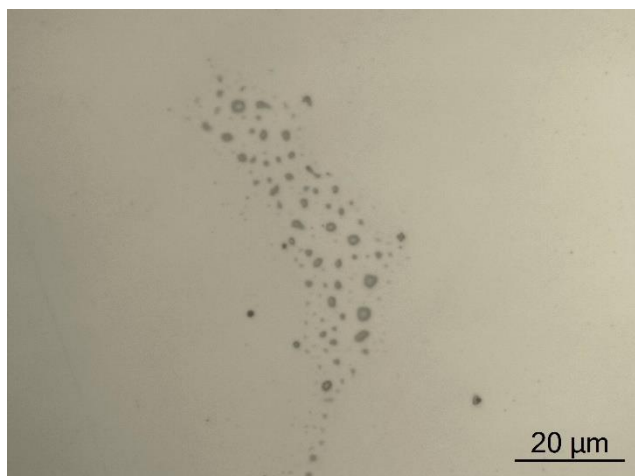
Εικόνα Π4. Επαναφορά στους 350°C



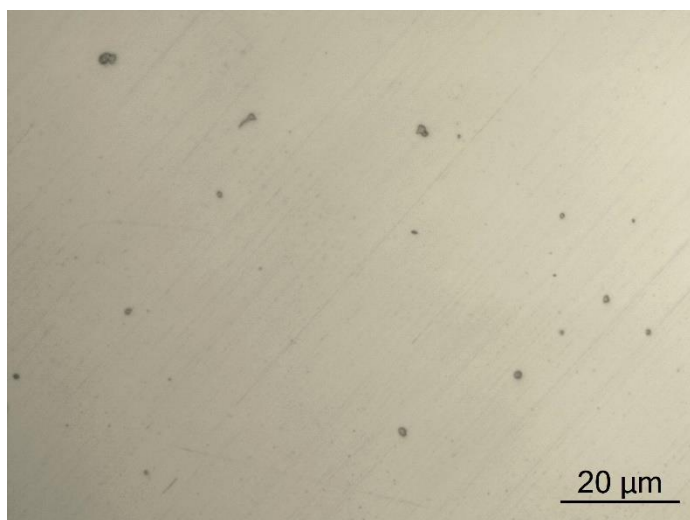
Εικόνα Π5. Επαναφορά στους 400°C



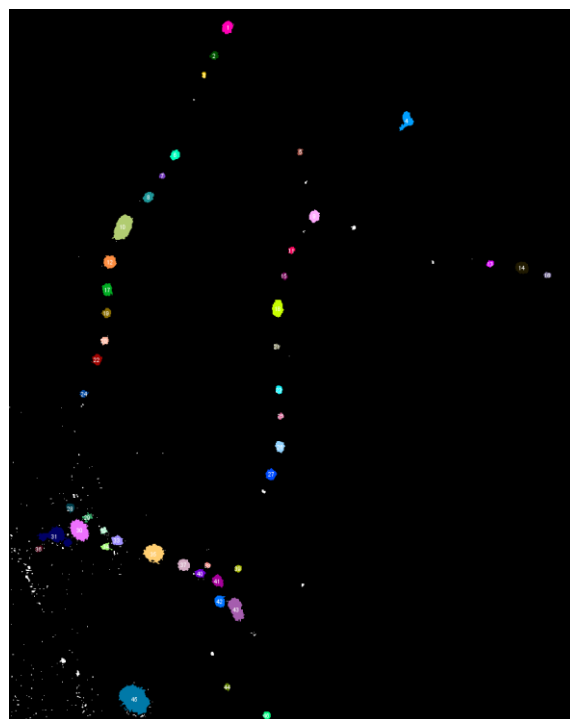
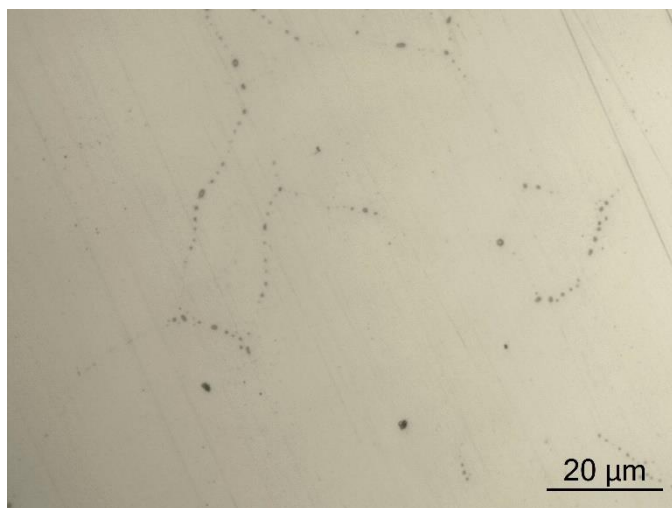
Εικόνα Π6. Επαναφορά στους 450°C



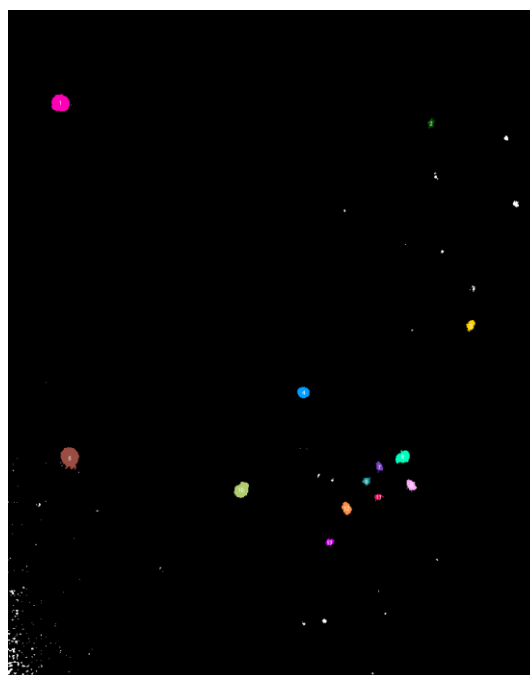
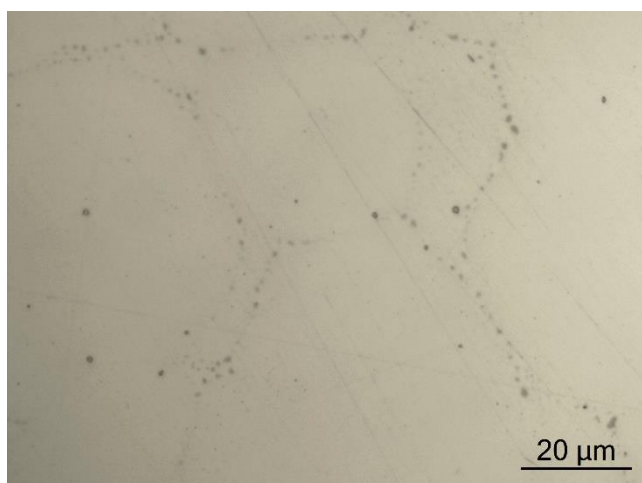
Εικόνα Π8. Επαναφορά στους 525°C



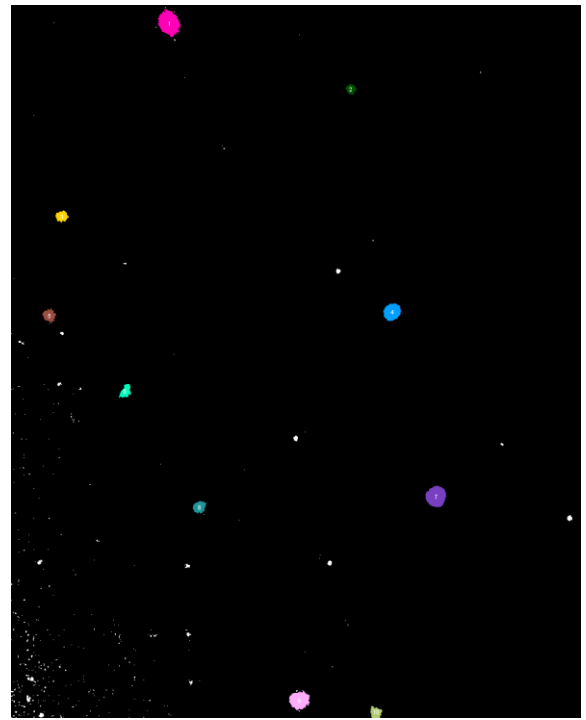
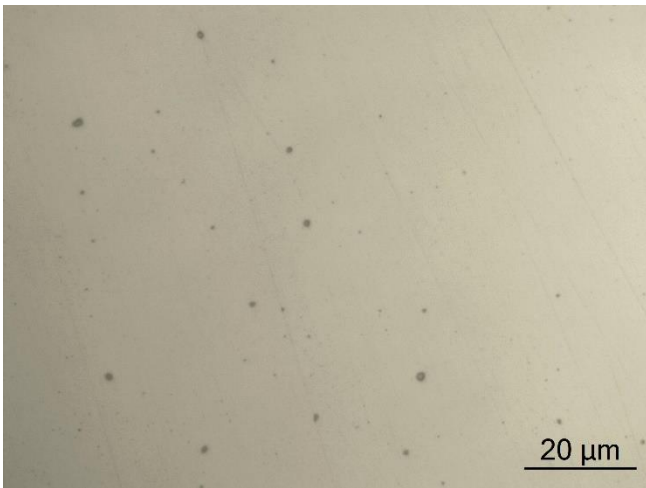
Εικόνα Π9. Επαναφορά στους 550°C



Εικόνα Π10. Επαναφορά στους 575 °C



Εικόνα Π11. Επαναφορά στους 600 °C



Εικόνα Π12. Επαναφορά στους 625 °C

```

1  %INSTRUCTIONS: make sure the csv with the coordinates is in the
2  %same directory as the code file then run the code and follow
3  %instructions shown in the command window!!
4
5  %INPUT: fname,R,maxDist [run code, then give informations when asked]
6  %fname is the name of the csv file containing the centroid coordinates
7  %x,y positions must be in the last 2 columns
8  %works for any amount of positions
9  %R is how many subdivisions the points will be
10 % distributed to.[int]
11 %maxDist is the maximum mean distance shown in the answer.[float]
12 % same units as the input array
13
14 %OUTPUT: A, *filename*_avg.txt
15 %A is an answer array.
16 %column 1 is the distance range[from"previous distance"
17 % up to "displayed distance"]
18 %column 2 is the number of centroids with the corresponding mean
19 % neighbor distance,[how many have avgDistance in this range]
20 %column 3 is the percentage of the centroids that belong to the
21 % corresponding distance range.[ratio, multiply by 100 to get %]
22 %*filename*_ avg.csv is a csv file with the data from array A
23
24 %INPUT-----
25 clc
26 %get filename
27 fname=input("input the name of the .csv file with the positions [without ".csv" at the
28 end] : ","s");
29 [xyId,errMsg]=fopen(strcat(fname,".csv"));
30 BBB=zeros(0,2);
31 %csv to array
32 posArray=dlmread(strcat(fname,".csv"),",",1,0);
33 posArray=posArray(:,end-1:end);
34 fclose("all");
35 disp(" X Y");
36 disp(posArray(1:2,:));
37 disp("[...] [...]");
38 if size(posArray,1)<5
39 disp("WARNING : need at least 5 centroid positions to display accurate data!")
40 end
41 maxDist=input("input maximum mean distance : ");
42 R=input("input the number of mean distance subdivisions[int] : ");
43
44 %OUTPUT-----
45 %create ans
46 A=zeros(R,3);
47 A(:,1)= maxDist/R:maxDist/R:maxDist;
48 sz=size(posArray);
49 %for each point
50 for i=1:sz(1,1)
51 %find 4 closest distances
52 closest=zeros(1,4);
53 for j=1:sz(1,1)
54 D=posArray(i,:)-posArray(j,:);
55 a2=sqrt(D(1,1)^2+D(1,2)^2);
56 if a2~=0
57 for k=1:4
58 if closest(1,k)==0
59 closest(1,k)=a2;
60 break
61 elseif closest(1,k)>a2
62 for m=3:-1:k
63 closest(1,m+1)=closest(1,m);
64 end
65 closest(1,k)=a2;
66 break;
67 end
68 end
69 end

```

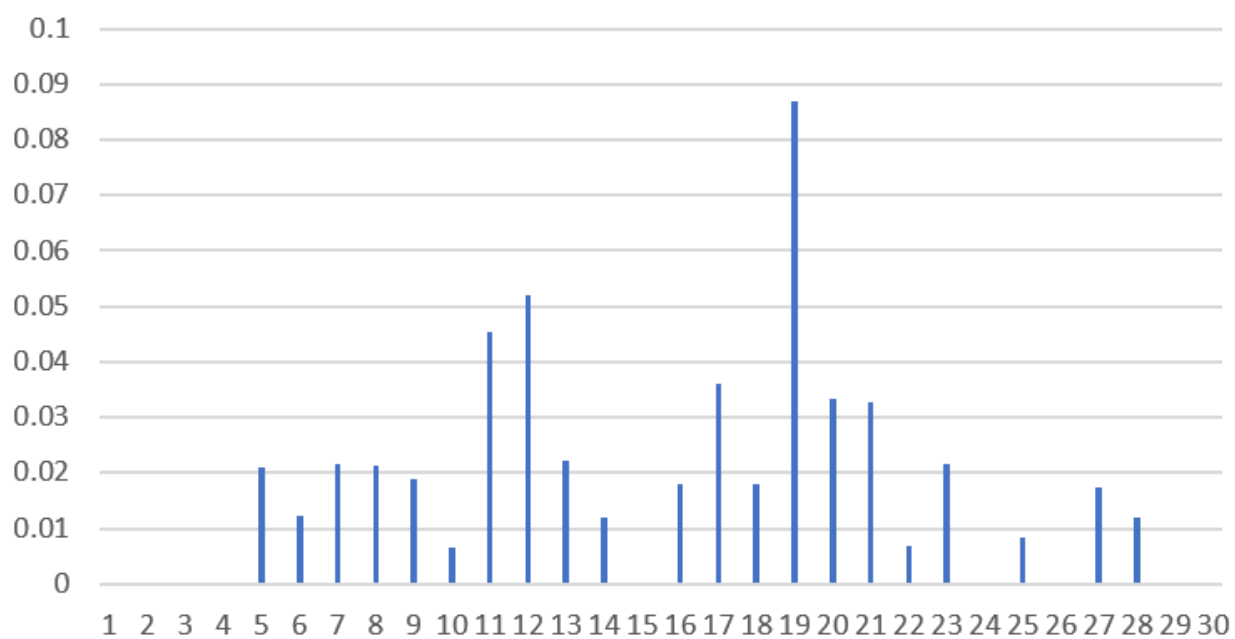
```
70     end
71     %find avg of those 4
72     %put point in corresponding collumn
73     avg=mean(closest);
74     for n=1:R
75         if avg<A(n,1)
76             A(n,2)=A(n,2)+1;
77             break;
78         end
79     end
80     end
81
82 end
83
84
85 for p=1:R
86     A(p,3)=A(p,2)/sz(1,1);
87 end
88 %clc
89 disp("avg range||#of centroids||fraction of centroids");
90 disp(A);
91 resfname=strcat(fname," avg.csv");
92 mm=fopen(resfname,"w");
93 if mm==-1
94     mm=fopen(resfname,"a");
95     disp(strcat("a new file [",resfname,"] has been created to store results"));
96 end
97
98 dlmwrite(resfname,A);
99 fclose("all");
```

Παράρτημα Κ

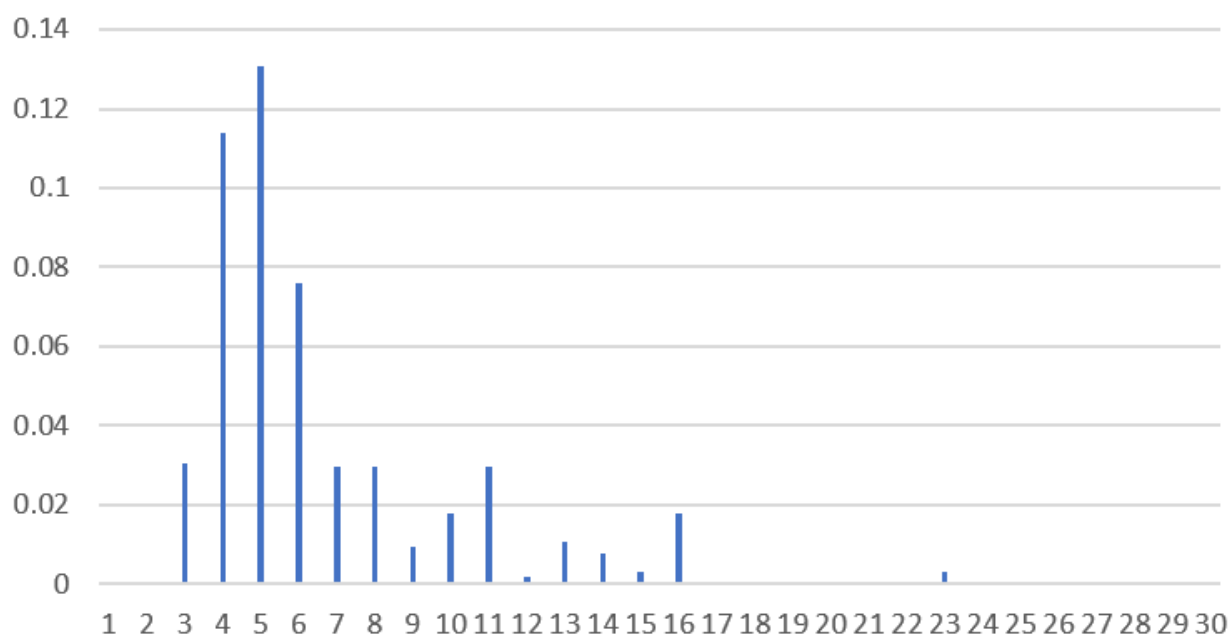
ΔΟΚΙΜΙΟ #1



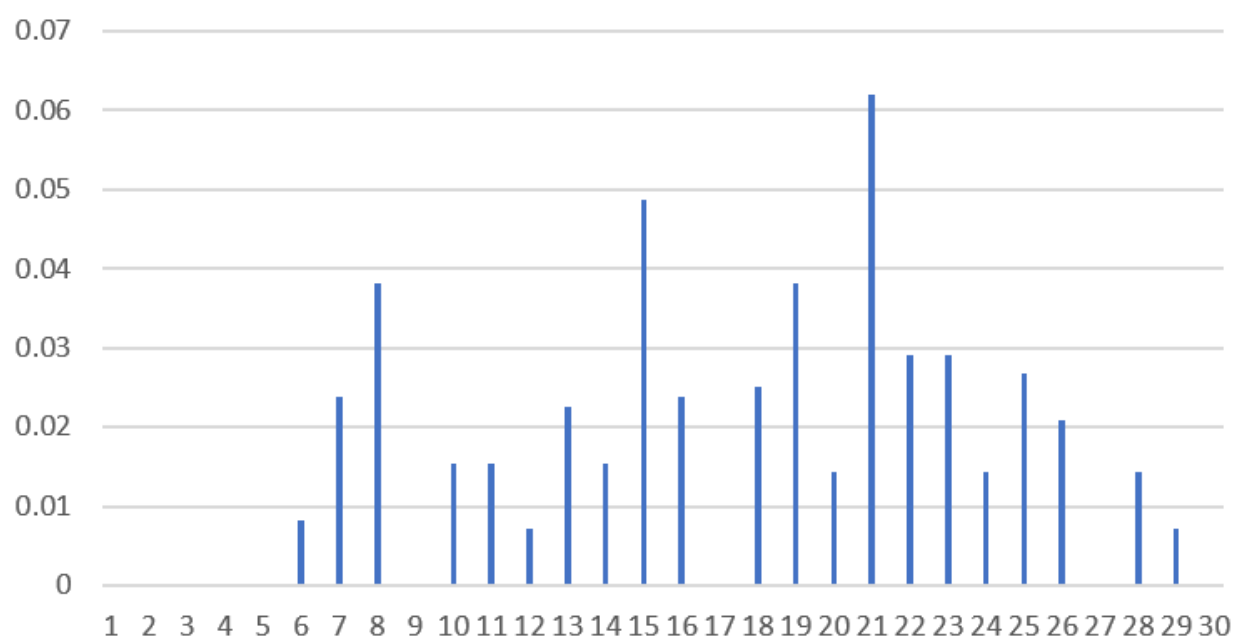
ΔΟΚΙΜΙΟ #2



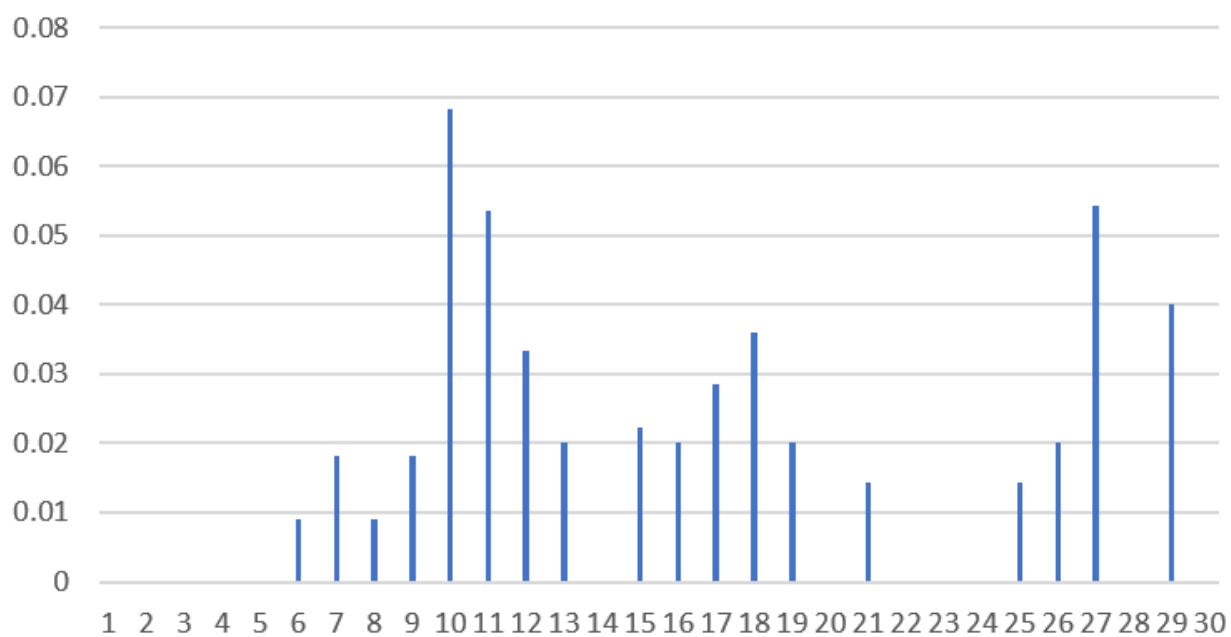
ΔΟΚΙΜΙΟ #3



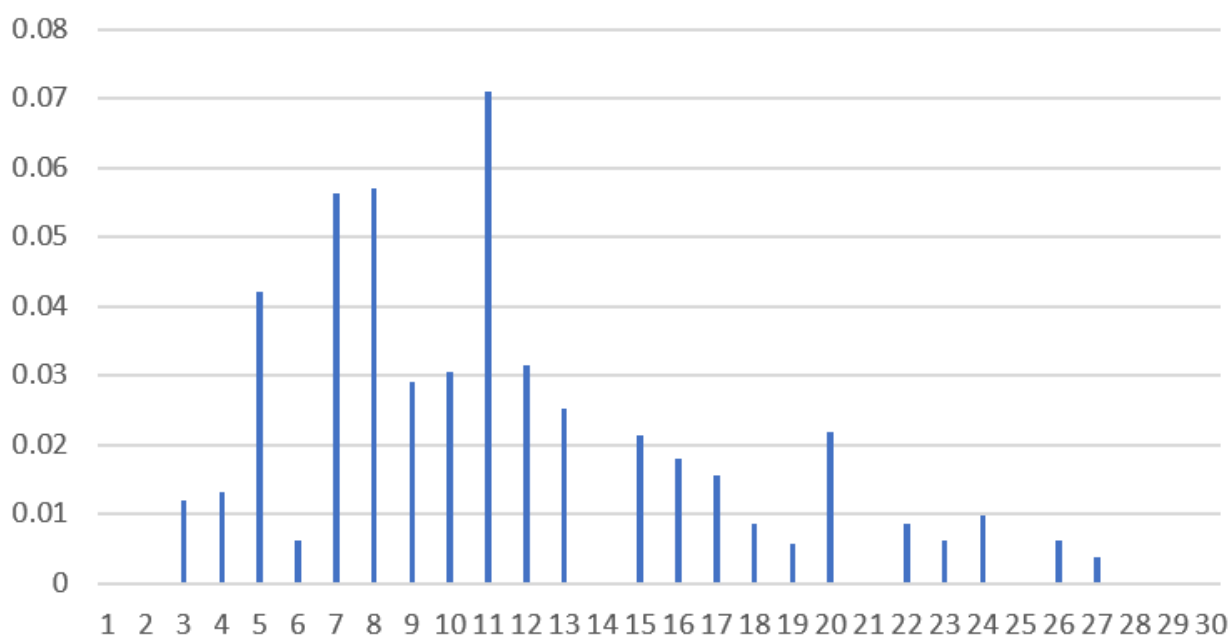
ΔΟΚΙΜΙΟ #4



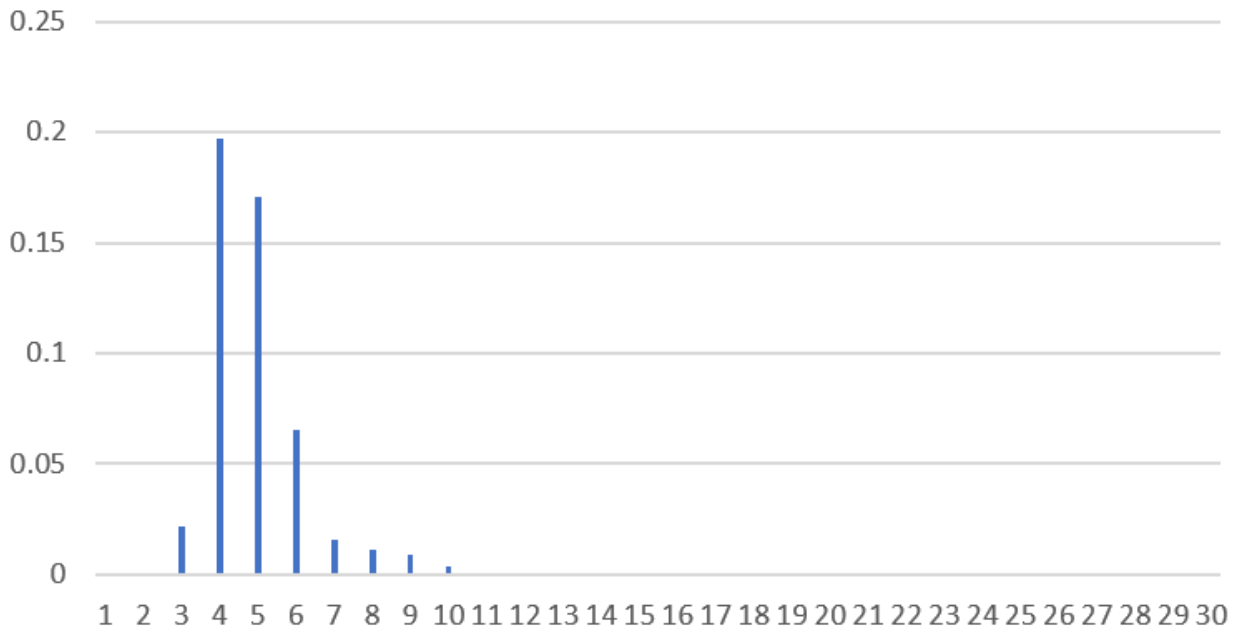
ΔΟΚΙΜΙΟ #5



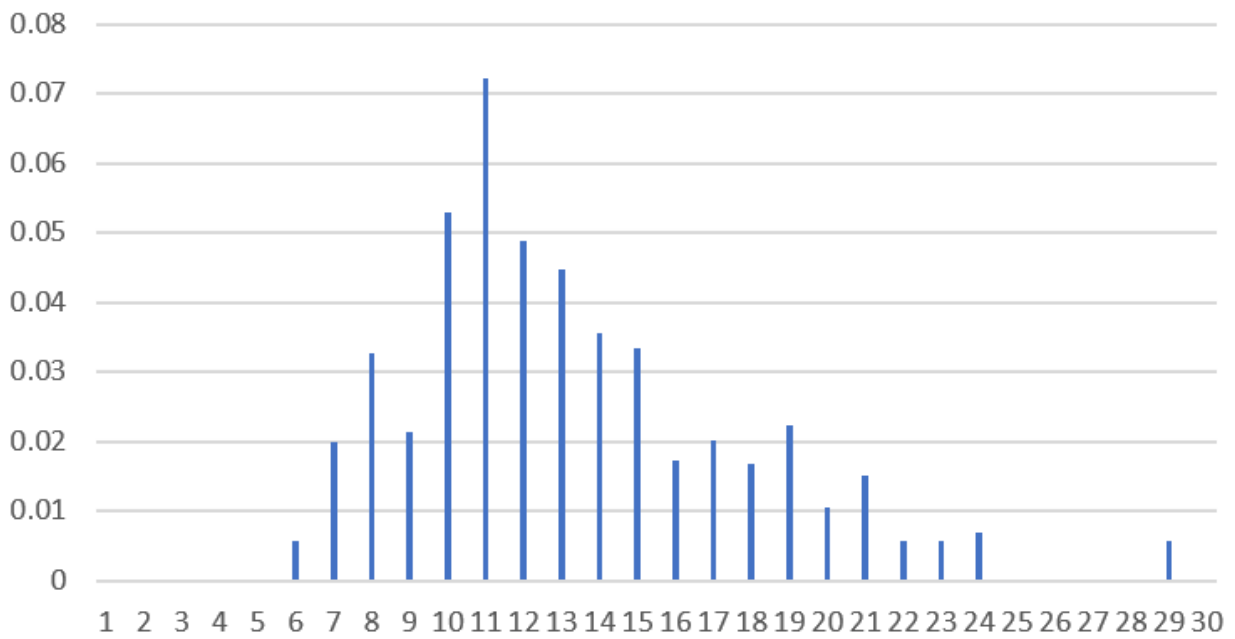
ΔΟΚΙΜΙΟ #6



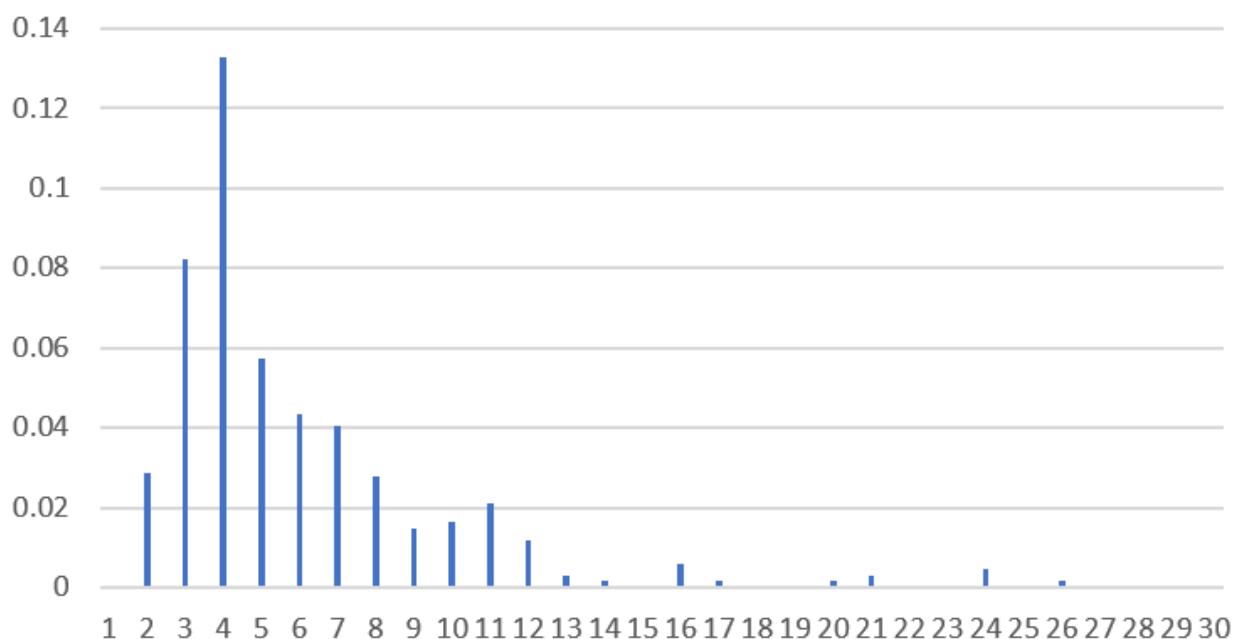
ΔΟΚΙΜΙΟ #8



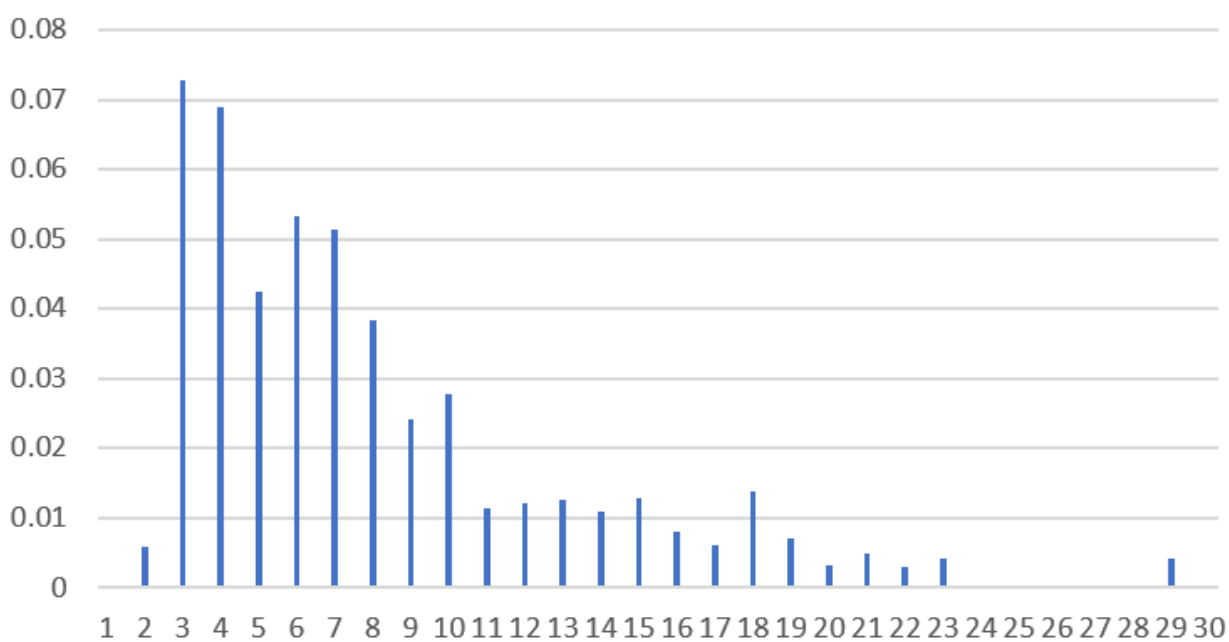
ΔΟΚΙΜΙΟ #9



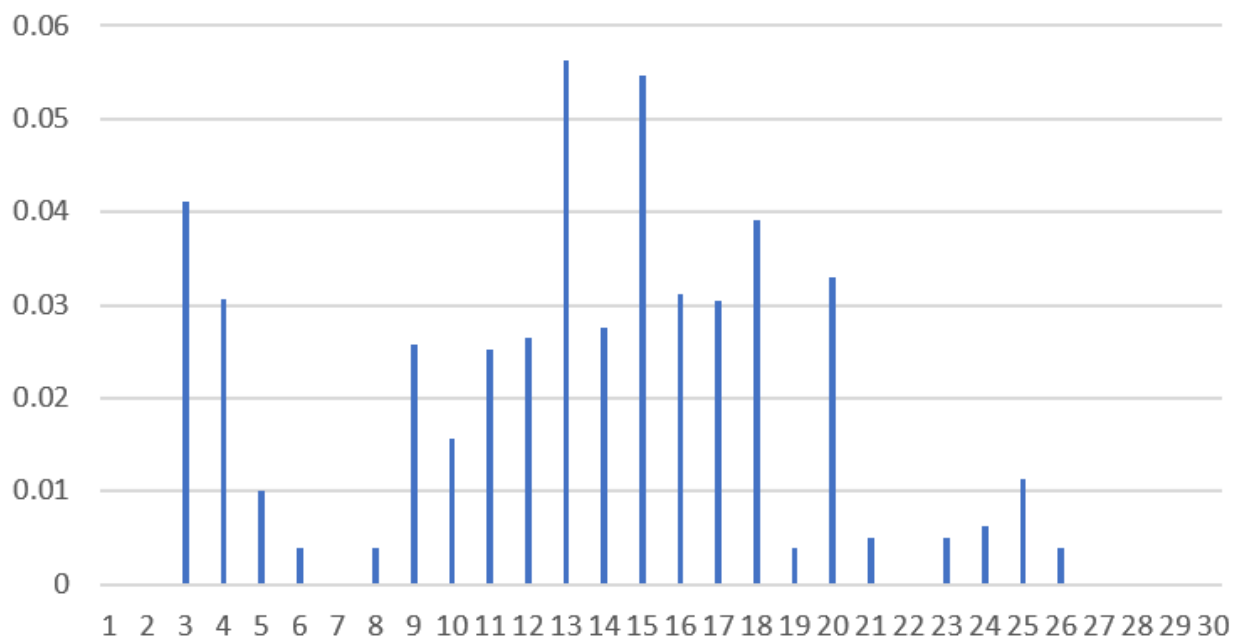
ΔΟΚΙΜΙΟ#10

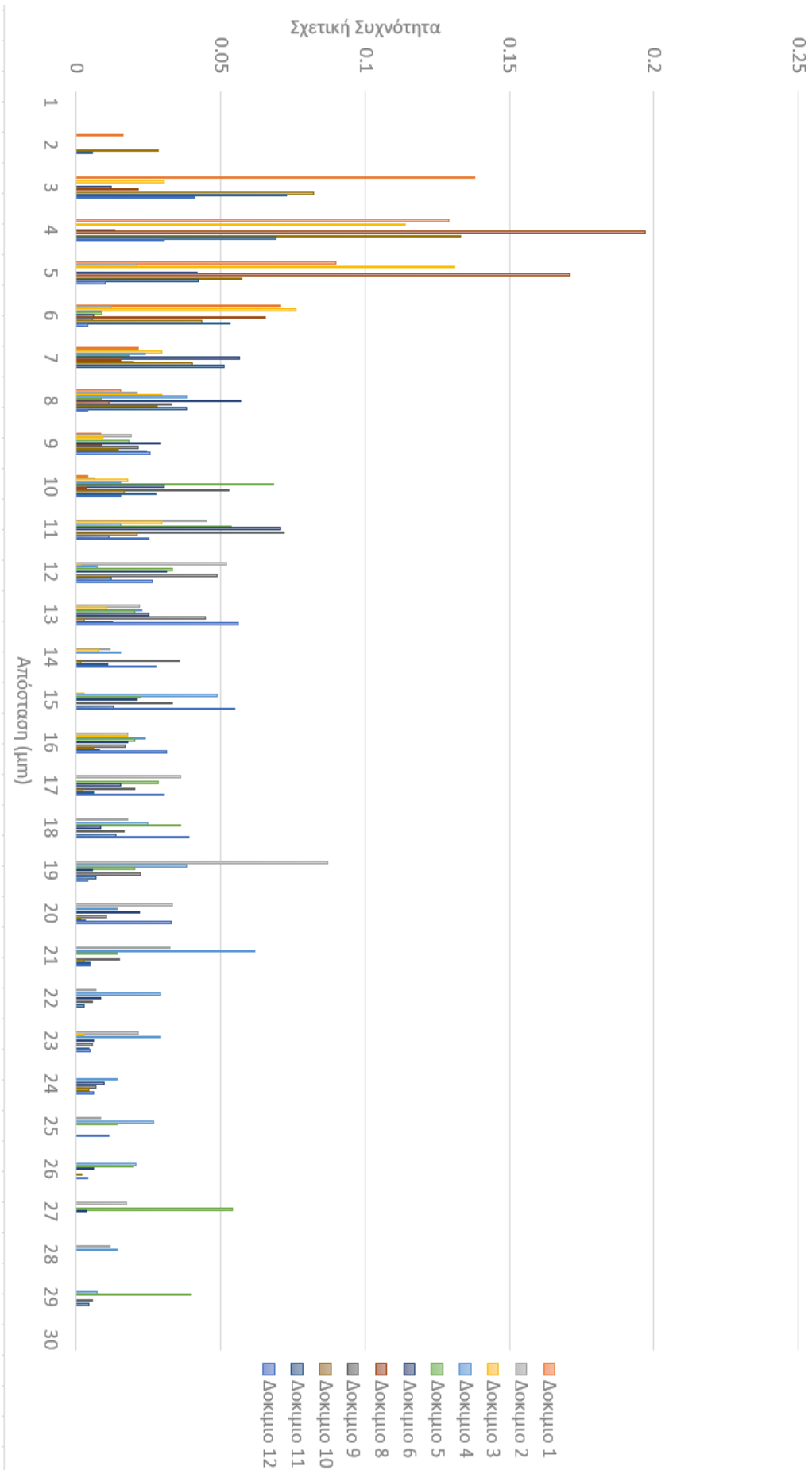


ΔΟΚΙΜΙΟ#11



ΔΟΚΙΜΙΟ#12





5 Βιβλιογραφία

1. Ruth M. Steel Production and Energy. In: Cleveland CJ, editor. Encyclopedia of Energy [Internet]. New York: Elsevier; 2004. p. 695–706. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B012176480X003715>
2. Singh R. Chapter 5 - Production of Steel. In: Singh R, editor. Applied Welding Engineering (Second Edition) [Internet]. Second Edition. Butterworth-Heinemann; 2016. p. 37–55. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128041765000050>
3. Gandhewar V, Bansod S, Borade A. Induction Furnace -A Review. International Journal of Engineering and Technology. 2011 Feb;3.
4. Thomas BG. Continuous Casting. In: Buschow KHJ, Cahn RW, Flemings MC, Ilschner B, Kramer EJ, Mahajan S, et al., editors. Encyclopedia of Materials: Science and Technology [Internet]. Oxford: Elsevier; 2001. p. 1595–8. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080431526002849>
5. Tanaka Y. Production of creep-resistant steels for turbines. Creep-Resistant Steels. 2008;174–214.
6. HG P, Xavior A. Processing of Graphene/CNT-Metal Powder. In 2018.
7. Torralba JM. Improvement of Mechanical and Physical Properties in Powder Metallurgy. Comprehensive Materials Processing. 2014 Jan 1;3:281–94.
8. Δημήτρης Ι. Παντελής, Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης. Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών. 2η. Αθήνα: Α. Παπασωτηρίου και ΣΙΑ ΙΚΕ; 2008.
9. Badiru AB, Valencia V V., Liu D. Additive manufacturing handbook : product development for the defense industry [Internet]. [cited 2024 Feb 26]. Available from: <https://www.routledge.com/Additive-Manufacturing-Handbook-Product-Development-for-the-Defense-Industry/Badiru-Valencia-Liu/p/book/9780367871215>
10. Badiru AB, Valencia V V., Liu D. Additive manufacturing handbook : product development for the defense industry [Internet]. [cited 2024 Feb 26]. Available from: <https://www.routledge.com/Additive-Manufacturing-Handbook-Product-Development-for-the-Defense-Industry/Badiru-Valencia-Liu/p/book/9780367871215>
11. Molitch-Hou M. Overview of additive manufacturing process. Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications. 2018 Jan 1;1–38.
12. Binder Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University [Internet]. [cited 2024 Feb 26]. Available from: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
13. What is Sheet Lamination, its types and application [Internet]. [cited 2024 Feb 26]. Available from: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>
14. Pragana JPM, Sampaio RFV, Bragança IMF, Silva CMA, Martins PAF. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering. 2021 May 1;2:100032.
15. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος. Φυσική Μεταλλουργία. Αθήνα: Τζιόλα; 2007.
16. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN Handbook 402. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2006.
17. HYDE Industrial Blade Solutions. SAE & AISI Steel Identification System. 54 Eastford Rd., Southbridge, MA 01550;
18. CEN. Designation systems for steels - Part 2: Steel numbers. rue de Stassart 36, B-1050 Brussels; 1992.
19. Mantzoukas J, Papageorgiou D, Medrea C, Stergiou C. Hardness behavior of W. Nr. 1.7709 steel, oil quenched and tempered between 475°C and 575°C. MATEC Web of Conferences. 2021 Feb;349:2005.
20. 21CrMoV5-11 | 21CrMoV5-7 Steel - Halden Steel [Internet]. [cited 2024 Feb 26]. Available from: <https://www.round-bars.com/products/21crmov5-11-21crmov5-7-steel/>
21. Donald R. Askeland, Wendelin J. Wright. Υλικά, Δομή, Ιδιότητες & Τεχνολογικές Εφαρμογές. 7th ed. Πανδώρα Ψυλλάκη, editor. 2020.
22. Pello Jimbert MIJRFM. CARBIDE DISTRIBUTION BASED ON AUTOMATIC IMAGE ANALYSIS FOR CRYOGENICALLY TREATED TOOL STEELS. Materials and Technology. 2017;51(4):609–11.
23. Jack Nutting, Edward F. Wente, E.F. Wondris. Steel . In: Britannica. 2023.
24. Kartono A, Tofany N, Ahmad PIDMF, Mamat M, Husain M. Applications of Crank-Nicolson method with ADI in laser transformation hardening. Heat and Mass Transfer. 2012 Mar;48.
25. Uddeholm. Heat Treatment of Uddeholm tool steels. Uddeholm Heat Treatment Brochure. 2017.