



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΔΟΜΗΣ, ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ HSLA

ΜΠΟΜΠΟΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Ν. Τσούβαλη, για την εμπιστοσύνη και την καθοριστική του βοήθεια στην ολοκλήρωση της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης ιδιαίτερω τους κ.κ. Μ. Σαμουηλίδη και Π. Καρύδη για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην τριμελή Εξεταστική Επιτροπή.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου παρείχαν καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα κατά την περίοδο εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας.

Μπόμπολης Ιωάννης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
1. Γενικά περί Χαλύβων	2
1.1 Ορισμός των Χαλύβων	2
1.2 Διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου - άνθρακα	3
1.3 Ωστενιτοποίηση χαλύβων	6
2. Χημική σύσταση και μικροδομή κοινών ανθρακούχων χαλύβων	9
2.1 Κραματικά στοιχεία	9
2.1.1 Μαγγάνιο (Mn), Πυρίτιο (Si)	9
2.1.2 Θείο (S), Φώσφορος (P)	9
2.1.3 Χρώμιο (Cr), Νικέλιο (Ni), Χαλκός (Cu), Κασσίτερος (Sn)	10
2.2 Μικροδομή χαλύβων	10
3. Γενικά περί κραματωμένων χαλύβων	12
3.1 Κατηγορίες κραματωμένων χαλύβων	12
4. Χάλυβες Υψηλής Αντοχής	13
4.1 Γενικά	13
4.2 Διαθεσιμότητα	14
4.3 Δράση κραματικών στοιχείων στους κραματωμένους χάλυβες	17
4.4 Δράση κραματικών στοιχείων στους Μικροκραματωμένους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής	17
4.5 Δράση των σουλφιδίων στους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής	20
4.6 Δράση του υδρογόνου στους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής	20
4.7 Κραματικά στοιχεία Χαλύβων Υψηλής Αντοχής	21
4.7.1 Φώσφορος	22
4.7.2 Μολυβδένιο	23
4.7.3 Μαγγάνιο	23
4.7.4 Χρώμιο	23
4.7.5 Πυρίτιο και Αλουμίνιο	23
4.7.6 Χαλκός	23
4.7.7 Νικέλιο	24
4.7.8 Βανάδιο, Τιτάνιο, Ζιρκόνιο	25
4.7.9 Βόριο	25
4.8 Μηχανικές ιδιότητες χαλύβων υψηλής αντοχής	28
4.8.1 Όριο διαρροής, εφελκυστική αντοχή	28

4.8.2 Δυσθραυστότητα (Notch Toughness) Χαλύβων Υψηλής Αντοχής	32
4.8.3 Αντοχή στη διάβρωση	35
4.8.4 Σχεδιασμός	35
4.8.5 Φθορά (Wear)	36
4.8.6 Διαμορφωσιμότητα (Formability)	38
4.9 Συγκολλησιμότητα και κοπή	40
4.9.1 Συγκολλήσεις	40
4.9.2 Κοπή με τόξο αερίου ή τόξο άνθρακα	44
4.9.3 Συγκόλληση με αντίσταση (resistance welding)	46
4.10 Κατεργασιμότητα (Machinability)	47
4.11 Εφαρμογές των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής	48
4.12 Οικονομική διάσταση και μελλοντικές τάσεις των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής	53
5. Κόπωση	55
5.1 Γενικά	55
5.2 Κόπωση των μετάλλων	55
5.3 Επιφάνεια θραύσεως λόγω κόπωσης	56
5.4 Μορφές ασκούμενων φορτίων που προκαλούν κόπωση	58
5.5 Δοκιμές Κόπωσης	61
5.5.1 Συνήθεις δοκιμές κόπωσης	64
5.6 Διάγραμμα S-N (Stress reversal curve S-N)	66
5.7 Θραύση λόγω κόπωσης	69
5.8 Παράγοντες που επηρεάζουν την κόπωση των μετάλλων	69
5.8.1 Σχεδιασμός	69
5.8.2 Ποιότητα επιφανείας (Surface finish)	70
5.8.3 Θερμοκρασία	71
5.8.4 Παραμένουσες τάσεις	71
5.8.5 Διάβρωση	71
6. Γενικά συμπεράσματα	73
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπό της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η παρουσίαση των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής (High Strength Low Alloy Steels, HSLA).

Εν πρώτης πραγματοποιείται μία γενική παρουσίαση των χαλύβων, της χημικής τους σύστασης, της μικροδομής τους καθώς και των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Ακολουθεί εκτενής παρουσίαση των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής και των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται η διαθεσιμότητα, η χημική σύσταση, η μικροδομή, οι μηχανικές ιδιότητες, η δυσθραυστότητα, η αντοχή σε διάβρωση, η αντοχή σε φθορά, η διαμορφωσιμότητα, η συμπεριφορά κατά τη συγκόλληση, καθώς και η κατεργασιμότητά τους. Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται παράθεση των συνήθων βιομηχανικών και εμπορικών εφαρμογών όπου απαντούν οι Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής. Για λόγους πληρότητας εξετάζεται η οικονομική διάσταση των χαλύβων αυτού του τύπου, καθώς και οι μελλοντικές εμπορικές τάσεις.

Στη συνέχεια εξετάζεται – σε έκταση που επιτρέπεται από το κύριο αντικείμενο της παρούσης Εργασίας – η κόπωση των μετάλλων – και ειδικότερα των χαλύβων – ως τύπος καταπόνησης. Ακολουθεί μία συνοπτική αναφορά στις δοκιμές κόπωσης, ενώ παράλληλα εξετάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των χαλύβων σε κόπωση.

Κλείνοντας, πραγματοποιείται μία επιγραμματική παράθεση των γενικών συμπερασμάτων που αφορούν στους Μικροκραματωμένους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής.

1. Γενικά περί Χαλύβων

Ο χάλυβας εν γένει θεωρείται ένα εκ των σημαντικότερων μετάλλων από την άποψη της διαθεσιμότητας, της χρησιμότητας, της αντοχής και του χαμηλού κόστους. Αυτά τα γνωρίσματα φαίνονται ξεκάθαρα στο εύρος των εφαρμογών όπου απαντά, καθώς και στο εύρος των μηχανικών και φυσικών του ιδιοτήτων. Πρακτικά, μέσω της κατάλληλης επιλογής συγκέντρωσης άνθρακα και κραματικών στοιχείων και μέσω των κατάλληλων θερμικών κατεργασιών, ο χάλυβας δύναται να γίνει είτε τόσο όλκιμος - ώστε να δίδει ακόμη και προϊόντα ψυχρής βαθιάς κοίλανσης, ιδιαίτερα σύνθετης γεωμετρίας όπως για παράδειγμα τμήματα αμαξωμάτων τροχοφόρων οχημάτων – είτε τόσο σκληρός – ώστε να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές αντίστασης σε φθορά. Επιπλέον, οι χάλυβες δύναται να επιδείξουν πολύ υψηλή αντοχή σε αυξημένα φορτία, σε κρούση, καθώς και στη θερμότητα, στη διάβρωση, στη χημική προσβολή κλπ.

Στη σύγχρονη εποχή παράγονται ετησίως σε παγκόσμια κλίμακα περίπου 800 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι χάλυβα, γεγονός που ενισχύεται και από το χαμηλό κόστος του. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το κόστος του χάλυβα στις ΗΠΑ στα μέσα της δεκαετίας του 1990 κυμαίνετο από 44cents/kg για τους κοινούς χάλυβες έως λίγα δολάρια για τους ακριβότερους τύπους (πχ χάλυβες εργαλείων). Εν γένει οι τιμές των χαλύβων δεν έχουν μεταβληθεί σημαντικά από τις αρχές της δεκαετίας του 1980.

1.1 Ορισμός των Χαλύβων

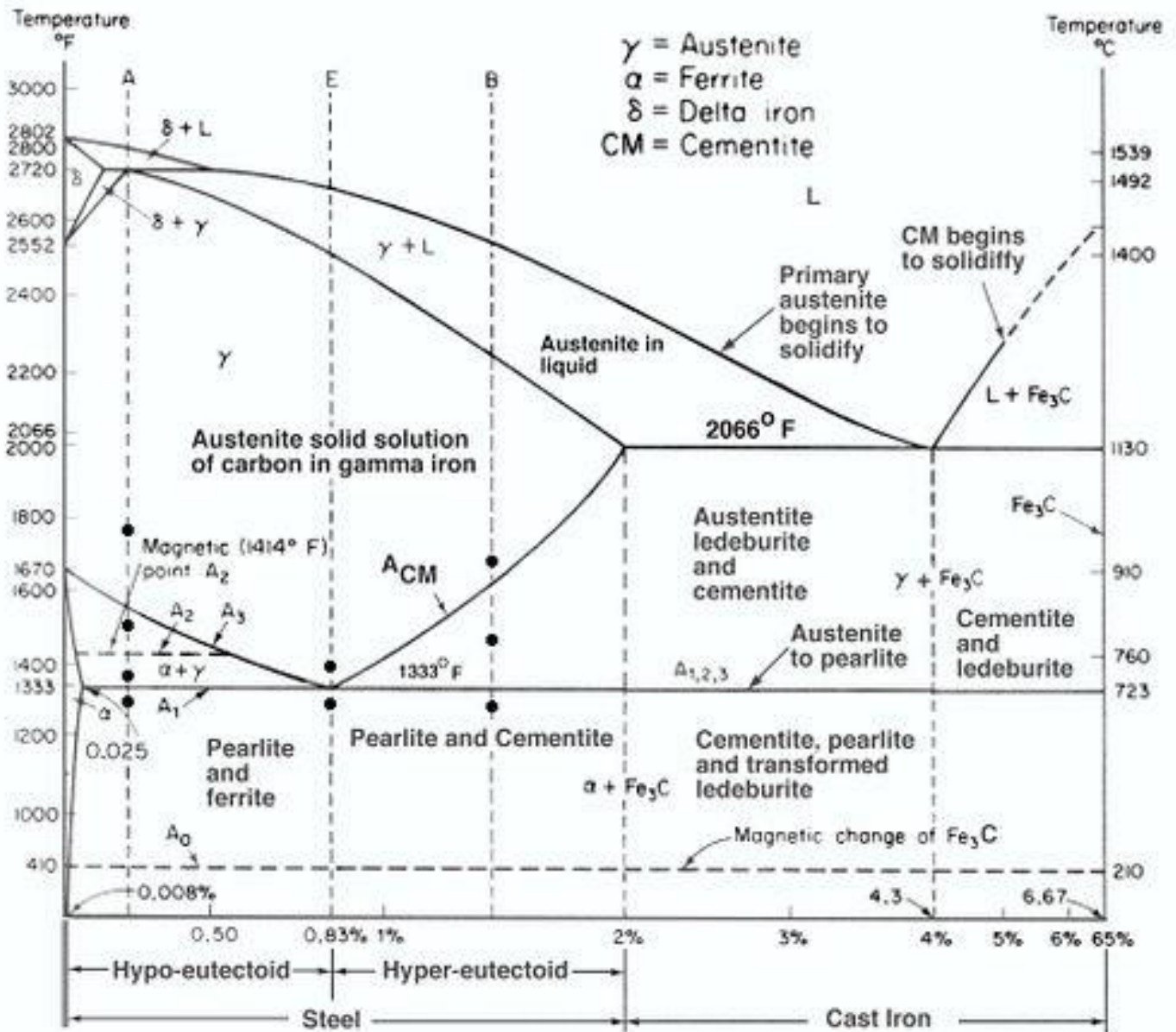
Ως χάλυβες ορίζονται τα κράματα του σιδήρου που έχουν ως κύριο κραματικό στοιχείο τον άνθρακα. Η περιεκτικότητα των χαλύβων σε C βρίσκεται στο εύρος 0.025 % έως 2.1 % κ.β. Ωστόσο, οι συνήθεις χάλυβες έχουν περιεκτικότητα άνθρακα που δεν υπερβαίνει το 1.5 % κ.β. Βάσει της περιεκτικότητάς τους σε C, οι χάλυβες διακρίνονται σε "υποευτηκτοειδείς" (0.025 – 0.8 % κ.β.), "ευτηκτοειδείς" (έως 0.8% κ.β.) και "υπερευτηκτοειδείς"

(0.8 έως 2.1 % κ.β.). Υπενθυμίζεται ότι η τιμή 2.1 % κ.β. αντιστοιχεί στη μέγιστη διαλυτότητα του άνθρακα στο γ-σίδηρο.

1.2 Διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου - άνθρακα

Η μικροδομή των χαλύβων, όπως και των κραμάτων του Fe εν γένει (σίδηροι, χάλυβες, χυτοσίδηροι), δίδεται από το "διφασικό διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου- άνθρακα", που καλείται και "μετασταθές διάγραμμα σιδήρου-σεμεντίτη". Ο σεμεντίτης - με μοριακό τύπο FeC - είναι το κυριότερο καρβίδιο του σιδήρου που απαντά στους χάλυβες.

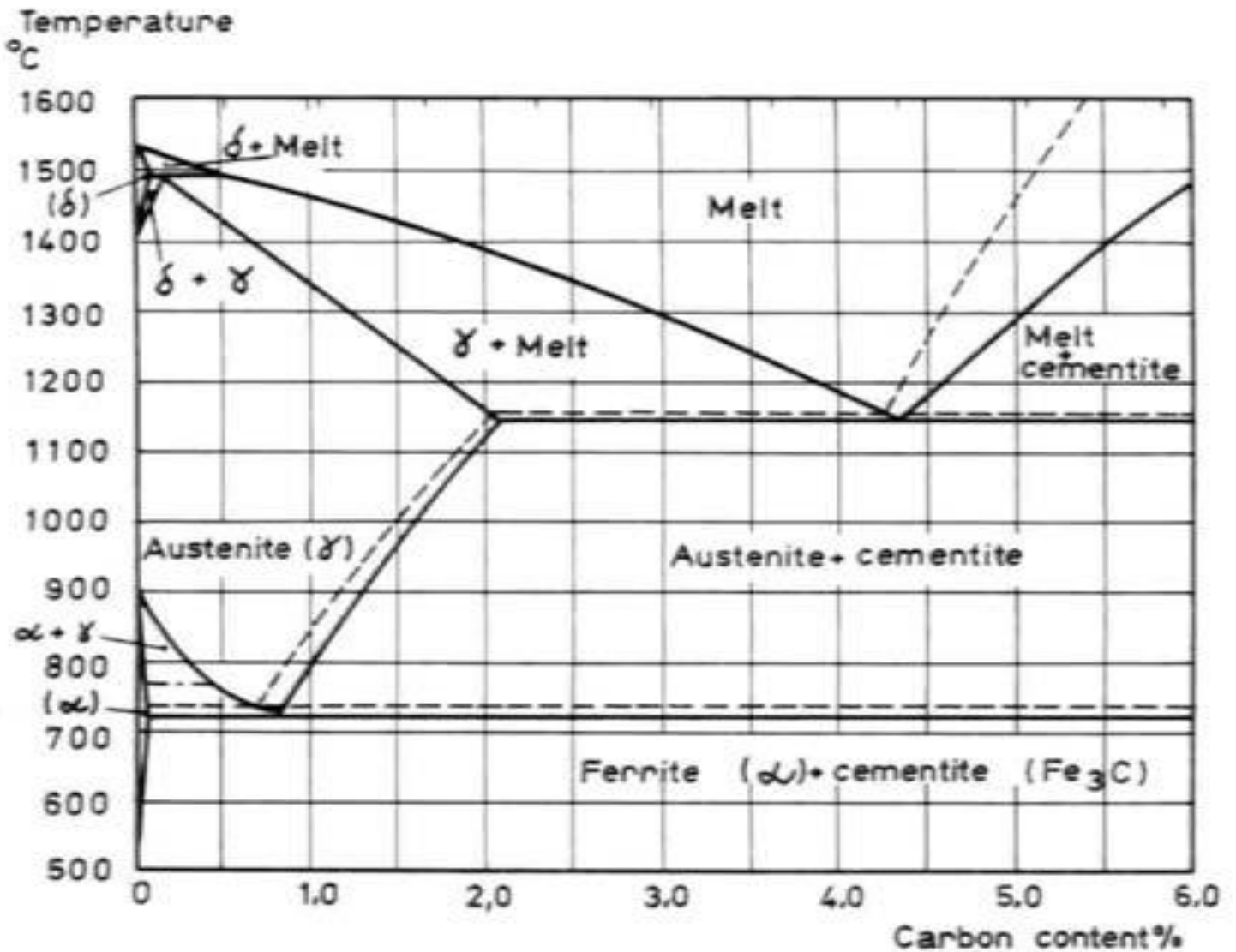
Το "μετασταθές διάγραμμα σιδήρου-σεμεντίτη" παρατίθεται στο ακόλουθο σχήμα 1.1 :



1.1 Μετασταθές διάγραμμα σιδήρου - σεμεντίτη

Πέραν του μετασταθούς διαγράμματος ισορροπίας σιδήρου-γραφίτη, για τους χάλυβες δύναται να ορισθεί και το "διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου-γραφίτη" που ομοιάζει αρκετά με το πρώτο. Ωστόσο, στη βιομηχανία δεν απαντούν χάλυβες που το ακολουθούν, καθώς λόγω της παρουσίας του γραφίτη θα ήταν μαλακοί και εύθραυστοι και συνεπώς ακατάλληλοι για χρήση. Επομένως η αξία του είναι κυρίως ακαδημαϊκή. Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται (με διακεκομμένη γραμμή) το "διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου-γραφίτη". Για λόγους σύγκρισης, παρατίθεται στο ίδιο διάγραμμα και η

καμπύλη του μετασταθούς διαγράμματος ισορροπίας σιδήρου-σεμεντίτη, σχήμα 1.2 (με συνεχή γραμμή):

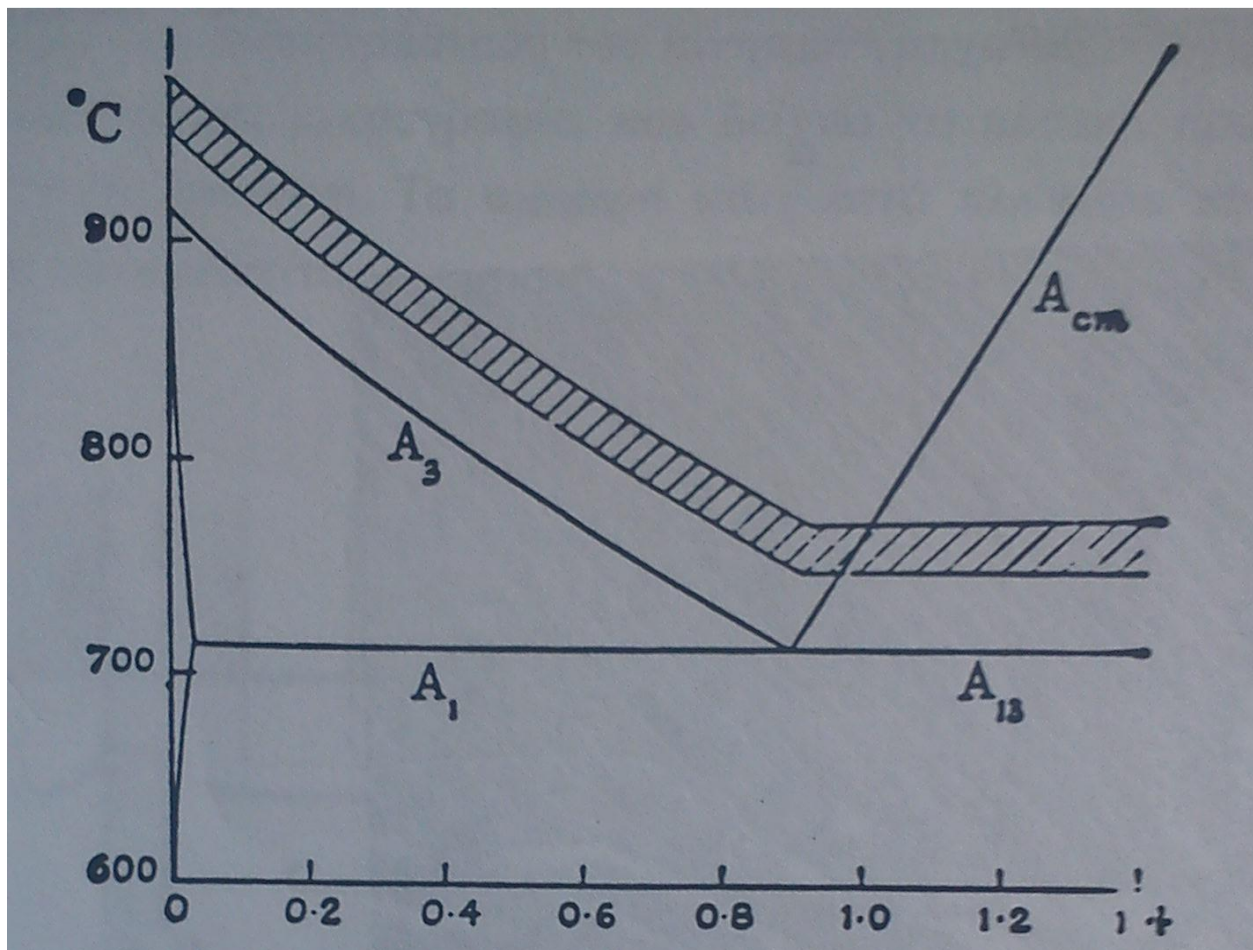


1.2 Διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου-γραφίτη (με διακεκομμένη γραμμή)
Ωστενιτοποίηση χαλύβων

1.3 Ωστενιτοποίηση χαλύβων

Κοινό χαρακτηριστικό των χαλύβων αποτελεί το γεγονός ότι κατά την απόψυξή τους από την κατάσταση τήγματος έως τις συνθήκες περιβάλλοντος, διέρχονται μέσα από τη μονοφασική περιοχή του ωστενίτη. Κατά την αντίστροφη διαδικασία, η αναθέρμανση στερεού χάλυβα σε δεδομένη θερμοκρασία, μετατρέπει ολόκληρη τη μάζα του σε ωστενίτη – θερμική κατεργασία γνωστή ως "ωστενιτοποίηση". Επισημαίνεται ότι ως "ωστενίτης" ορίζεται το στερεό διάλυμα άνθρακα σε γ-σίδηρο.

Η ωστενιτοποίηση επιτυγχάνεται μέσω θέρμανσης και παραμονής του χάλυβα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, αναλόγως της περιεκτικότητάς του σε άνθρακα. Το θερμοκρασιακό εύρος συναρτήσκει της %κ.β. περιεκτικότητας σε άνθρακα, παρατίθεται στο ακόλουθο σχήμα 1.3 :



1.3 Θερμοκρασιακό εύρος ωστενιτοποίησης χαλύβων, συναρτήσεως της %κ.β. περιεκτικότητας σε C

Επισημαίνεται πως στο ανωτέρω διάγραμμα, το διαγραμμισμένο χωρίο δίδει την πρακτική περιοχή ωστενιτοποίησης των συνήθων χαλύβων που χρησιμοποιούνται στην πράξη. Η ίδια περιοχή ωστενιτοποίησης χρησιμοποιείται και για την εξομάλυνση (normalizing) του χάλυβα. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες αποφεύγονται καθώς μεγεθύνουν υπερβολικά τους κόκκους, δίδοντας χονδρόκοκκη μικροδομή και συνεπώς υπονομεύοντας τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Η ωστενιτοποίηση αποτελεί στην ουσία μία διαδικασία χημικής ομογενοποίησης, καθώς η διάχυση που λαμβάνει χώρα αναιρεί το χημικό διαφορισμό που έλαβε χώρα κατά τη στερεοποίηση. Η διάρκεια της ωστενιτοποίησης κυμαίνεται από 30 min έως δύο ώρες.

Πέραν των παραπάνω, η ωστενιτοποίηση συνιστά παράλληλα το πρώτο βήμα της πλειοψηφίας των θερμικών κατεργασιών. Μετά το πέρας της ακολουθεί απόψυξη του κράματος, η ταχύτητα της οποίας καθορίζει σημαντικά την τελική του μικροδομή. Η αργή απόψυξη επιτρέπει να λάβουν χώρα οι βραδείς μηχανισμοί διάχυσης των ατόμων και οδηγεί στα προϊόντα ισορροπίας που προβλέπονται από το διάγραμμα σιδήρου-σεμεντίτη. Αντιθέτως, η ταχεία απόψυξη ευνοεί το σχηματισμό φάσεων εκτός ισορροπίας, που δίδονται από διαφορετικά διαγράμματα – όπως τα διαγράμματα TTT (Time – Temperature - Transformation) και CCT (Continuous Cooling Transformation). Ενδεικτικά αναφέρεται ο σχηματισμός μαρτενσίτη, μίας φάσης που προκύπτει μέσω της ταχείας απόψυξης του χάλυβα (σε νερό, λάδι ή αέρα) - διαδικασία γνωστή ως "βαφή".

2. Χημική σύσταση και μικροδομή κοινών ανθρακούχων χαλύβων

Ως "Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες" (Plain carbon steels) ορίζονται οι εμπορικοί χάλυβες που περιγράφονται από το μετασταθές διάγραμμα σιδήρου-σεμεντίτη και η περιεκτικότητα των κραματικών τους στοιχείων – εξαιρουμένου του C - δεν υπερβαίνει το 1 – 1.5 & κ.β. Ακολούθως, αναφέρονται επιγραμματικά οι συνήθεις προσμίξεις που απαντούν σε αυτήν την κατηγορία χαλύβων, είτε ως κραματικά στοιχεία, είτε ως επιβλαβείς ακαθαρσίες.

2.1 Κραματικά στοιχεία

2.1.1 Μαγγάνιο (Mn), Πυρίτιο (Si)

Το μαγγάνιο και το πυρίτιο, είτε προστίθενται στους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες ως κραματικά στοιχεία, είτε προϋπάρχουν από την αποξειδωση του χάλυβα – μία διαδικασία που εντάσσεται στο πλαίσιο της μεταλλουργικής παραγωγής του χάλυβα. Εν γένει θεωρούνται επωφελείς προσμίξεις καθώς επιδρούν ευμενώς στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Απαντούν σε περιεκτικότητες που δεν υπερβαίνουν το 0.60% κ.β. και 0.30% κ.β. για το Mn και το Si αντιστοίχως.

2.1.2 Θείο (S), Φώσφορος (P)

Το θείο και ο φώσφορος συνιστούν επιβλαβείς ακαθαρσίες που προϋπάρχουν στις πρώτες ύλες από τις οποίες προέρχονται οι χάλυβες και ο σίδηρος εν γένει (μεταλλεύματα, scrap). Η πλήρης απομάκρυνσή τους από τη μάζα του μετάλλου είναι αδύνατη. Τόσο το θείο όσο και ο φώσφορος επηρεάζουν δυσμενώς τη θερμοψαθυρότητα του χάλυβα αυξάνοντας την κρίσιμη θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή θραύση. Για το λόγο αυτό η συγκέντρωση των εν λόγω στοιχείων στους συνήθεις κοινούς ανθρακούχους χάλυβες διατηρείται σε τιμές χαμηλότερες του 0.04 % κ.β.

έκαστο. Στους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες υψηλής ποιότητας, η συγκέντρωσή τους δύναται να πέσει χαμηλότερα από το 0.025 % κ.β.

2.1.3 Χρώμιο (Cr), Νικέλιο (Ni), Χαλκός (Cu), Κασσίτερος (Sn)

Το χρώμιο, το νικέλιο, ο χαλκός και ο κασσίτερος συνιστούν επιβλαβείς ακαθαρσίες που προέρχονται από την ανακύκλωση του χάλυβα. Εν γένει, η ανακύκλωση των μετάλλων και η χρήση των "παλαιομετάλλων" (scrap) ως πρώτη ύλη παραγωγής δευτερογενούς (ανακυκλωμένου) χάλυβα είναι ιδιαίτερος διαδεδομένη τις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Επεκτείνεται δε συνεχώς, έναντι της πρωτογενούς παραγωγής μετάλλων (λήψη από τα μεταλλεύματα) που έχει περιοριστεί σημαντικά. Στην περίπτωση της ανακύκλωσης των χαλύβων, τα Cr, Ni, Cu, Sn εμπεριέχονται στα παλαιομέταλλα σιδήρου προέρχονται κυρίως από καταστροφή πλοίων, οχημάτων οικιακά απόβλητα, ανοξείδωτους χάλυβες, ελαφρά κραματωμένους χάλυβες, γαλβανισμένες επιφάνειες και γενικότερα από πλήθος εξαρτημάτων που απαντούν στις βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές. Οι εν λόγω ακαθαρσίες συσσωρεύονται στη μάζα του χάλυβα και έχουν την τάση να αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου μέσω της ανακύκλωσης. Κάποιες εξ'αυτών και κυρίως εκείνες που είναι ευγενέστερες του σιδήρου – όπως ο χαλκός και το νικέλιο - δε δύναται να απομακρυνθούν κατά τη φάση της χαλυβοποίησης. Κατά συνέπεια στους σημερινούς χάλυβες η συγκέντρωσή τους είναι ιδιαίτερος αυξημένη, σε βαθμό που προκαλεί σοβαρά προβλήματα στη συγκολλησιμότητα, στη θερμή κατεργασία και στη δυσθραυστότητα του χάλυβα.

2.2 Μικροδομή χαλύβων

Η μικροδομή των χαλύβων στις συνθήκες περιβάλλοντος είναι συνάρτηση της χημικής τους σύστασης και των θερμομηχανικών κατεργασιών που έχουν υποστεί από την παραγωγή μέχρι τη λήψη του τελικού προϊόντος (ιστορικό). Η μικροδομή – και κυρίως το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων – επηρεάζει άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα. Εν γένει, επιθυμείται η

παρουσία μικρών κόκκων και κατά το δυνατόν «κυτταροειδούς» (ισοαξονικού) σχήματος (ώστε το υλικό να καθίσταται ισοτροπικό). Η παρουσία σκληρών φάσεων εκτός ισορροπίας - όπως ο μαρτενσίτης, πρέπει να αποφεύγονται στο εσωτερικό του υλικού, καθώς του προσδίδουν ψαθυρότητα.

Στους χάλυβες, στις συνθήκες περιβάλλοντος, απαντούν κυρίως κάποιες εκ των πέντε ακόλουθων φάσεων: Ο ωστενίτης (γ -Fe), ο φερρίτης (α -Fe), ο περλίτης, ο λεδεμβουρίτης και ο σεμεντίτης (Fe_3C). Πρόκειται για τις προβλεπόμενες από το διφασικό διάγραμμα ισορροπίας Fe-C. Οι εν λόγω φάσεις εμφανίζονται μόνο εφόσον η στερεοποίηση γίνεται αργά και σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Στην πράξη, ένας χάλυβας υφίσταται πλήθος θερμομηχανικών κατεργασιών μέχρι να λάβει την τελική εμπορεύσιμη μορφή του. Μπορεί να υποστεί βαφή (ταχεία απόψυξη) με αποτέλεσμα την εμφάνιση μαρτενσίτη, πλαστικές παραμορφώσεις (έλαση, ολκή κλπ), θερμικές κατεργασίες (ανόπτηση, επαναφορά) ή συνδυασμό αυτών.

Επιπλέον των παραπάνω, απαντούν και ενώσεις (κατακρημνίσματα) των κραματικών στοιχείων, ή άλλων προσμείξεων.

Η επίτευξη της επιθυμητής μικροδομής στους εμπορικούς χάλυβες, επιτυγχάνεται μέσω παρατεταμένης θέρμανσης του αρχικού προϊόντος σε θερμοκρασία λίγο υψηλότερη από τους $723\text{ }^\circ\text{C}$ (θερμοκρασία ωστενιτοποίησης) ώστε να μετατραπεί όλη του η μάζα σε ωστενίτη και εν συνεχεία να αποψυχθεί με ελεγχόμενο ρυθμό, ώστε να διέλθει από τις προβλεπόμενες από το διφασικό διάγραμμα ισορροπίας Fe-C καταστάσεις. Η αργή απόψυξη απαιτείται ώστε να δοθεί ο απαιτούμενος χρόνος στα άτομα και τα ιόντα να μετακινηθούν και να αναδιαταχθούν στις επιθυμητές κρυσταλλικές δομές. Η μετακίνηση γίνεται μέσω διάχυσης, καθώς το υλικό βρίσκεται σε στερεά κατάσταση.

3. Γενικά περί κραματωμένων χαλύβων

Οι κραματωμένοι χάλυβες εισήχθησαν στις διάφορες βιομηχανικές και επιστημονικές εφαρμογές, καθώς τα κραματικά στοιχεία που απαντούν στη μάζα τους (ως ιόντα σε θέσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα, ή ως κατακρημνίσματα), τους προσδίδουν μηχανικές ιδιότητες που δεν είναι διαθέσιμες στους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες. Οι τελευταίοι εμπεριέχουν κυρίως άνθρακα, πυρίτιο (έως 0.6 % κ.β.), μαγγάνιο (έως 1.65 % κ.β.) και σπανιότερα χαλκό (έως 0.6 % κ.β.).

3.1 Κατηγορίες κραματωμένων χαλύβων

Οι κυριότερες κατηγορίες κραματωμένων χαλύβων κατά φθίνουσα σειρά όγκου παραγωγής, είναι οι ακόλουθες:

- Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (High Strength Low Alloy Steels) – Διατίθενται σε κατάσταση θερμής ή ψυχρής έλασης.
- AISI (American Iron & Steel Institute) Alloy steels - Διατίθενται σε βαμμένη ή ανοπτημένη κατάσταση.
- Ανοξειδωτοι χάλυβες – Χυτοί ή σφυρήλατοι
- Χάλυβες ηλεκτρικών εφαρμογών (Electrical Steels) – Κυρίως σιδήρου/πυριτίου.
- Χάλυβες εργαλείων (Alloy tool steels).
- Μη-ανοξειδωτοι χάλυβες υψηλής θερμικής αντοχής (Nonstainless heat-resistant steels).

Πέραν των παραπάνω κατηγοριών, έχουν αναπτυχθεί και άλλοι τύποι κραματωμένων χαλύβων για εφαρμογές ιδιαίτερως δριμείων απαιτήσεων, όπως τα κράματα υψηλών θερμοκρασιών (High Temperature Alloys) και τα υλικά εργαλείων.

4. Χάλυβες Υψηλής Αντοχής

4.1 Γενικά

Ως χάλυβες υψηλής αντοχής (High-Strength Structural Steels) καλούνται αυτοί που έχουν ελάχιστο όριο διαρροής στο εύρος 276 – 690 MPa . Πρόκειται για χάλυβες με υψηλότερο όριο διαρροής συγκριτικά με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες (plain carbon steels) και διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

α) Τους περλιτικούς χάλυβες με ελάχιστο όριο διαρροής 276 – 345 MPa, γνωστούς με τις εμπορικές ονομασίες ως “Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (High-Strength)” ή ως “Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (HSLA)” κατά ASTM A242 ή SAE 950.

β) Τους υψηλής αντοχής κραματωμένους θερμικά κατεργασμένους χάλυβες (High-Strength heat treated alloy steels) που περιέχουν ελαφρώς υψηλότερη συγκέντρωση C και/ή κραματικών στοιχείων και ελάχιστο όριο διαρροής 483 – 690 MPa .

Όπως σε όλα τα κράματα, στους παραπάνω χάλυβες η χημική σύσταση και οι παρελθούσες θερμομηχανικές κατεργασίες επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες, το πεδίο εφαρμογών και τις μεθόδους παραγωγής τους.

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής πρωτοαναπτύχθηκαν κυρίως με σκοπό την επίτευξη υψηλής ειδικής αντοχής (αντοχή ανά μονάδα βάρους, strength-to-weight ratio), επιτρέποντας τη χρήση φορέων μικρότερης διατομής και βάρους, όπου αυτό απαιτείται. Ειδικότερα οι χάλυβες HSLA χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις μεταφορές (κατασκευή οχημάτων, πλοίων κλπ) για την ελαχιστοποίηση του ίδιου βάρους των μεταφορικών μέσων και συνεπώς τη μεγιστοποίηση του ωφέλιμου φορτίου.

Η δεύτερη κατηγορία αναπτύχθηκε για χρήση σε εφαρμογές όπου απαιτείτο η χρήση κατασκευαστικών χαλύβων υψηλής αντοχής χωρίς όμως να υπονομεύεται η συγκολλησιμότητά τους.

Πέραν των παραπάνω εφαρμογών, οι χάλυβες υψηλής αντοχής χρησιμοποιούνται και για την κατασκευή εξοπλισμού κατασκευών (construction machinery), εξοπλισμού διαχείρισης υλικών, κατασκευή γεφυρών και κτηρίων κλπ.

4.2 Διαθεσιμότητα

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής διατίθενται εν γένει στη μορφή ελασμάτων, πλακών, δοκών και ειδικών διατομών.

Η δεύτερη κατηγορία χαλύβων υψηλής αντοχής, διατίθεται στις ίδιες μορφές, ωστόσο διατίθενται και μη-θερμικά κατεργασμένα ημιτελικά προϊόντα έτοιμα προς περαιτέρω κατεργασία. Η λεπτομερής χημική σύστασή τους εν γένει καθορίζεται από τους παραγωγούς, με στόχο την επίτευξη των απαιτούμενων μηχανικών ιδιοτήτων για καθένα από τα διαθέσιμα τυποποιημένα πάχη διατομής.

Οι χάλυβες της πρώτης κατηγορίας, δεν υφίστανται περαιτέρω θερμομηχανικές κατεργασίες, πλην της αποτατικής ανόπτησης που ακολουθούν τις ψυχρές διαμορφώσεις. Οι χάλυβες της δεύτερης κατηγορίας, βασίζουν τη μηχανική τους αντοχή στην κατακρήμνιση, τη βαφή ή την επαναφορά που ενδεχομένως υφίστανται.

Στον ακόλουθο πίνακα 4.1 παρατίθεται το κόστος των διαφόρων τύπων χαλύβων υψηλής αντοχής. Για λόγους σύγκρισης, παρατίθεται και το κόστος των κοινών ανθρακούχων χαλύβων:

4.1 *Τυπικά κόστη χαλύβων υψηλής αντοχής και κοινών ανθρακούχων χαλύβων*

Minimum yield strength, MPa	Cost per 100 lb (~45 kg)		Cost per 1000 psi (~7 MPa)	
	Mill	Warehouse	min yield strength Mill	Warehouse
Plain Carbon Structural Steels				
207	\$ 6.25	\$ 8.25	20.8	27.5
High-Strength and High-Strength Low-Alloy Steels				
310 and 345 Steels 1 and 2, Table 3	7.30	9.50	16.2	21.1
Others	8.50	11.00	17.0	22.0
High-Strength Heat Treated Grades				
414	13.00	16.00	21.7	26.7
483	13.50	17.00	19.3	24.3
552	20.00	24.00	25.00	30.0
620	20.00	24.00	22.2	26.7
690	20.00	24.00	20.0	24.0

These approximate base prices for 12-gage hot rolled sheets include all charges for alloy content but do not include extras for size, quantity or other requirements

Στον ακόλουθο πίνακα 4.2, παρατίθενται οι χρήσεις των χαλύβων υψηλής αντοχής στα διάφορα πεδία εφαρμογής τους:

4.2 Κατανομή (στις ΗΠΑ) παραγόμενης ποσότητας Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής ανά κατηγορία εφαρμογής

Market Classification	Tons
Steel for further processing (a).....	2,778
Forgings (other than automotive).....	232
Bolts, nuts, rivets, screws.....	384
Warehouses and distributors (b)	25,100
Construction, including maintenance (c)	56,248
Contractor's products	6,938
Automotive	185,600
Rail Transportation (e)	73,497
Shipbuilding and marine Equipment	22,819
Aircraft	1,958
Oil and gas drilling equipment	306
Mining, quarrying and lumbering.....	4,147
Agricultural equipment	3,844
Machinery, industrial equipment And tools (f)	9,879
Appliances, utensils and cutlery (g)	119
Other domestic and commercial Equipment (h)	4,718
Containers (i)	6,171
Ordnance and other military	5,181
Export	11,498
Total	462,649

Source: Statistical Report of the American Iron and Steel Institute

4.3 Δράση κραματικών στοιχείων στους κραματωμένους χάλυβες

Η συνολική συγκέντρωση των κραματικών στοιχείων στους κραματωμένους χάλυβες, δύναται να φτάσει το 30 % κ.β. και σπανιότερα το 50 % κ.β. Ενδεικτικά παραδείγματα της ενίσχυσης των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του χάλυβα που συνεπάγεται η παρουσία των κραματικών στοιχείων, αποτελούν η αυξημένη αντίσταση σε διάβρωση των χαλύβων υψηλής συγκέντρωσης Cr, οι βελτιωμένες ηλεκτρικές ιδιότητες των πυριτιούχων χαλύβων, η αυξημένη αντοχή των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής και η βελτιωμένη σκληρυντική ικανότητα (hardenability) των χαλύβων AISI.

4.4 Δράση κραματικών στοιχείων στους Μικροκραματωμένους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής

Μέχρι τη δεκαετία του 1970, η αύξηση της μηχανικής αντοχής των χαλύβων, επιτυγχανόταν εν γένει μέσω των ακόλουθων διαδικασιών:

- Διασπορά κατακρημνισμάτων – κυρίως καρβιδίων – που πραγματοποιείτο μέσω βαφής και επαναφοράς. Η μέθοδος αυτή συνοδευόταν από προβλήματα κόστους και κολλησιμότητας (joining).
- Αυξάνοντας το ποσοστό του περλίτη. Η μέθοδος αυτή συνοδευόταν από προβλήματα ολκιμότητας και δυσθραυστότητας (toughness).
- Μέσω διαμόρφωσης εν ψυχρώ (ενδοτράχυνσης/κράτυνσης). Η μέθοδος αυτή συνοδευόταν από προβλήματα ολκιμότητας.

Με την πάροδο του χρόνου και καθώς η κατανόηση της προέλευσης των μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων βελτιωνόταν, εισήχθησαν νέοι μηχανισμοί παραγωγής χαλύβων χαμηλού κόστους που έφεραν τον επιθυμητό συνδυασμό ιδιοτήτων που απαιτούντο από τις παλιές και νέες εφαρμογές. Η

κυριότερη πρόοδος ήταν επίτευξη δημιουργίας λεπτόκοκκου φερρίτη, που επιτυγχάνεται μέσω ελεγχόμενης διασποράς λεπτών κατακρημνισμάτων – κυρίως καρβιδίων και καρβιδονιτρίδιων. Ο έλεγχος αφορά κυρίως το μέγεθος και τη χωρική κατανομή των κατακρημνισμάτων. Η παρουσία τους στα όρια των κόκκων ελέγχει την ανάπτυξη των τελευταίων κατά την ανακρυστάλλωση του υλικού.

Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται ταυτόχρονη βελτίωση της αντοχής (toughness) και της ολκιμότητας. Επιπρόσθετα, βελτίωση των μηχανισμών ελέγχου της χημικής σύστασης των χαλύβων, καθώς και αποτελεσματικότερος έλεγχος των διεργασιών έλασης, οδήγησε σε οικονομικούς και ελκυστικούς συνδυασμούς μηχανικών ιδιοτήτων, των χαλύβων θερμής έλασης (hot-rolled condition). Λόγω της χαμηλότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα, βελτιώθηκε η συγκολλησιμότητα και – σε κάποιες περιπτώσεις – η αντίσταση σε ατμοσφαιρική διάβρωση.

Οι διεργασίες που συμβάλλουν στην επίτευξη των παραπάνω επιθυμητών ιδιοτήτων, είναι κυρίως οι ακόλουθες:

1) Ελεγχόμενη έλαση : Η ελεγχόμενη έλαση χαλύβων με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα και άζωτο, που περιέχει βανάδιο (V), τιτάνιο (Ti), νιόβιο (Nb) και ζirkόνιο (Zr) στον ωστενίτη, παράγει πλήρως ανακρυσταλλωμένους λεπτούς κόκκους ωστενίτη. Ως γνωστόν, η παραμόρφωση κατά την έλαση φερρίτη/ ωστενίτη – και οποιοδήποτε μέταλλο εν γένει - παράγει επιμήκεις (pancake) κόκκους που προσδίδουν στο υλικό ανισοτροπία μηχανικών ιδιοτήτων, ενώ σε ακραίες περιπτώσεις δύνανται να προκαλέσουν και αποκόλληση (delamination). Η επιθυμητή λεπτόκοκκη ισοαξονική ("κυτταρική") μικροδομή του φερρίτη, επιτυγχάνεται μέσω της απόψυξης - και ενδεχομένως άλλων θερμικών κατεργασιών - που ακολουθεί την έλαση.

2) Επιταχυνόμενη απόψυξη μετά από ελεγχόμενη θερμή έλαση : Μέσω αυτής της διαδικασίας, παράγονται ισοαξονικού σχήματος κόκκοι φερρίτη, ενώ παράλληλα αποφεύγεται ο σχηματισμός βελονοειδούς φερρίτης. Ωστόσο,

κατά την απόψυξη αναπτύσσονται και τα κατακρημνίσματα (καρβονιτρίδια) με αποτέλεσμα απώλεια αντοχής του υλικού.

3) Η αρκετά ταχεία απόψυξη χαλύβων χαμηλής συγκέντρωσης άνθρακα (< 0.08 % κ.β.) και υψηλής σκληρυντικής ικανότητας, παράγει μπαινίτη χαμηλού C. Η επίτευξη ιδανικής αντοχής (toughness) σε αυτούς χάλυβες επιτυγχάνεται μέσω ελεγχόμενης έλασης.

4) Απλή επαναφορά : Η εξομάλυνση (normalizing) κάποιων υποκατηγοριών των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής, όπως για παράδειγμα αυτών που περιέχουν βανάδιο, συνεπάγεται την παραγωγή επαρκώς λεπτόκοκκης φερριτικής μικροδομής.

5) Ανόπτηση στην περιοχή $\alpha + \gamma$: Ανόπτηση στην περιοχή α -Fe + γ -Fe (intercritical range) του διφασικού διαγράμματος ισορροπίας φάσεων Σιδήρου – Άνθρακα, των χαλύβων που περιέχουν μικρή συγκέντρωση άνθρακα και μαγγάνιο της τάξεως του 1.5 % κ.β. και επακόλουθη ταχεία απόψυξη, δίδει μικροδομή συνιστάμενη από νησίδες μαρτενσίτη εντός της φερριτικής μήτρας. Αυτοί οι διφασικοί χάλυβες έχουν χαμηλό αρχικό όριο διαρροής αλλά μετά από πλαστική παραμόρφωση επιδεικνύουν έντονη ενδοτράχυνση (work hardening) και αυξανόμενη ολκιμότητα. Ενδείκνυνται για εφαρμογές μορφοποίησης (σφυρηλάτηση, βαθιά κοίλανση) όπου απαιτείται χαμηλό όριο διαρροής του αρχικού ελάσματος/πλάκας και πολύ υψηλή αντοχή του τελικού προϊόντος – όπως στην περίπτωση των τροχών των τροχοφόρων οχημάτων.

Σήμερα διατίθενται εκατοντάδες υποκατηγορίες Χαλύβων Υψηλής Αντοχής που αξιοποιούν τις παραπάνω ιδιότητες μεμονωμένα ή συνδυαστικά. Κάποιες εξ'αυτών προορίζονται για εφαρμογές γενικής χρήσης και διατίθενται ευρέως, ενώ κάποιες προστατεύονται από πατέντες των κατασκευαστών. Μεταξύ αυτών, απαντούν διάφοροι μικροκραματωμένοι φερριτο-περλιτικοί χάλυβες περιορισμένης περιεκτικότητας σε περλίτη, μπαινιτικοί χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, καθώς και διπλοφασικοί χάλυβες.

Σε συναφείς των παραπάνω κατηγοριών, υπάγονται και οι αντιδιαβρωτικοί χάλυβες μακράς χρήσεως (weathering steels). Ενδεικτικά

αναφέρονται ο παντετατρισμαμένος χάλυβας "Cor - Ten A" (USS) του οποίου η υψηλή αντίσταση σε ατμοσφαιρική διάβρωση οφείλεται στην παρουσία μικρών ποσοστών χαλκού και φωσφόρου. Τα στοιχεία αυτά δρουν επίσης και ως κραματικά στοιχεία ενίσχυσης (solid solution hardening). Ο φώσφορος χρησιμοποιείται και μεμονωμένα για την αύξηση της αντοχής, επιφέροντας ωστόσο και μικρή μείωση της αντοχής (toughness).

4.5 Δράση των σουλφιδίων στους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής αποτελεί η παρουσία και ο έλεγχος του σχήματος των σουλφιδίων που απαντούν στη μάζα τους, καθώς και η επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες που αυτά επιφέρουν.

Το χαρακτηριστικότερο εξ'αυτών είναι το σουλφίδιο του μαγγανίου, MnS. Σε θερμοκρασία έλασης είναι όλκιμο και συνεπώς απαντά σε μορφή φλεβιδίων (stringers). Αυτό συνεπάγεται χαμηλή ολκιμότητα κατά τη διεύθυνση του πάχους (κάθετα στη διεύθυνση της έλασης).

Άλλα σουλφίδια, όπως το σουλφίδιο του ασβεστίου και του τιτανίου (CaS και TiS αντίστοιχα), λόγω της υψηλής αντοχής τους, διατηρούν το σφαιρικό/κυτταροειδές σχήμα τους κατά τη θερμή έλαση, προσδίδοντας στο χάλυβα ισοτροπικές μηχανικές ιδιότητες. Εν γένει, υπάρχει μία μεγάλη αγορά για την οικονομική αξιοποίηση αυτής της υποκατηγορίας Χαλύβων Υψηλής Αντοχής (inclusion – shape – controlled steels).

4.6 Δράση του υδρογόνου στους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής

Όσον αφορά το υδρογόνο, η παρουσία του ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, δύναται να οδηγήσει σε ρωγματώσεις ιδιαίτερα όταν αυξάνεται η μηχανική αντοχή του χάλυβα. Εάν η συγκέντρωσή του δεν μπορεί να ελεγχθεί κατά την κατεργασία του τήγματος (ladle treatment), ο συνδυασμός χαμηλής συγκέντρωσης άνθρακα και πυριτίου, ελέγχου του σχήματος των εγκλεισμάτων (Inclusion shape control), καθώς και η παρουσία

χαλκού άνω του 0.25 % κ.β., δύναται να ελαχιστοποιήσει τη μείωση της αντοχής (toughness).

4.7 Κραματικά στοιχεία Χαλύβων Υψηλής Αντοχής

Εν γένει, παρουσία κραματικών στοιχείων και απουσία μαρτενσιτικής και μπαινιτικής φάσης, η μέγιστη περιεκτικότητα σε άνθρακα που μπορεί να φέρουν οι χάλυβες υψηλής αντοχής, είναι περίπου 0.2 % κ.β.

Ο κύριος ρόλος των κραματικών στοιχείων είναι η μείωση της θερμοκρασίας που πραγματοποιείται ο περλιτικός μετασχηματισμός, με άμεση συνέπεια την παραγωγή λεπτόκοκκου περλίτη. Η παρουσία του λεπτόκοκκου περλίτη είναι ο κυριότερος παράγοντας που προσδίδει την υψηλή αντοχή σε αυτούς τους χάλυβες. Ως άμεση συνέπεια της παραγωγής του, είναι και η ισχυροποίηση της φερριτικής μήτρας. Σε αυτούς τους χαμηλής περιεκτικότητας σε C χάλυβες, τα καρβιδιογόνα κραματικά στοιχεία – όπως το Mn, Cr, Mo, V, είναι κατανεμημένα μεταξύ του φερρίτη και του σεμεντίτη. Η ενίσχυση της φερριτικής μήτρας επιτυγχάνεται μέσω της διάλυσης σε αυτήν στοιχείων όπως τα Si, Cu, Ni, P.

Στον ακόλουθο πίνακα 4.3, παρατίθενται ενδεικτικές τιμές συγκέντρωσης (% κ.β.) των κυρίων κραματικών στοιχείων των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής :

4.3 Τιμές συγκέντρωσης (% κ.β.) των κυρίων κραματικών στοιχείων των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής

Ενδεικτικές τιμές συγκέντρωσης των κυρίων κραματικών στοιχείων των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής

Στοιχείο	Εύρος συγκέντρωσης [% κ.β.]
Ανθρακας	0.10 – 0.25
Φώσφορος	0.03 – 0.15
Μολυβδένιο (όταν χρησιμοποιείται)	0.10 – 0.60
Μαγγάνιο	0.25 – 1.60
Πυρίτιο	0.05 – 0.90
Χαλκός	0 – 1.50
Χρώμιο	0 – 1.25
Νικέλιο	0 – 2.00

Ακολούθως αναφέρεται επιγραμματικά ο ρόλος καθενός εξ'αυτών:

4.7.1 Φώσφορος

Ο P χρησιμοποιείται εν γένει στους χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας C, για την πρόσδοση αντοχής (strength). Στους χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας C, επιφέρει εν ψυχρώ ψαθυρότητα (cold brittleness). Στους χυτοχάλυβες, η περιεκτικότητά του δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.25 % κ.β. προς αποφυγήν σχηματισμού ταινιοειδών φάσεων πολύ υψηλής συγκέντρωσης P, που επηρεάζουν δυσμενώς τις ιδιότητες του υλικού.

4.7.2 Μολυβδένιο

Το Mo χρησιμοποιείται εν γένει στους χάλυβες για την πρόσδοση αντοχής. Χρησιμοποιείται επίσης στους βαμμένους και ανοπτημένους χάλυβες για την πρόσδοση σκληρότητας, τη μείωση της τάσης εμφάνισης ψαθυρότητας υψηλής θερμοκρασίας (temper embrittlement), καθώς και την ενίσχυση των ιδιοτήτων του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες.

4.7.3 Μαγγάνιο

Το Mn αποτελεί το κυριότερο κραματικό στοιχείο για την πρόσδοση αντοχής στους χάλυβες υψηλής αντοχής. Είναι αποτελεσματικό όταν απαντά σε συγκέντρωση μεγαλύτερη του 1% κ.β.

4.7.4 Χρώμιο

Το Cr χρησιμοποιείται εν γένει στους χάλυβες για την πρόσδοση αντοχής. Σε υψηλές περιεκτικότητες (άνω του 0.5 % κ.β.) προσδίδει στο χάλυβα αντοχή στη διάβρωση λόγω σχηματισμού οξειδίου του Cr στην επιφάνειά του. Το οξείδιο του Cr παθητικοποιεί την επιφάνεια του χάλυβα.

4.7.5 Πυρίτιο και Αλουμίνιο

Τα Si και Al χρησιμοποιούνται στους χάλυβες εν γένει για τον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων και τη δημιουργία λεπτόκοκκου υλικού. Υψηλότερες συγκεντρώσεις πυριτίου χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της φερριτικής μήτρας. Η μέγιστη συγκέντρωση Si στους χάλυβες είναι της τάξεως του 0.9 % κ.β.

4.7.6 Χαλκός

Αρχικά ο Cu χρησιμοποιείτο στους χάλυβες σε συγκεντρώσεις της τάξεως του 0.2 % κ.β. για την αύξηση της αντίστασης στην ατμοσφαιρική

διάβρωση. Η αντιδιαβρωτική του δράση ενισχύεται παρουσία φωσφόρου. Αργότερα χρησιμοποιήθηκε για την αύξηση της αντοχής του χάλυβα.

Καθώς ο χαλκός οξειδώνεται δυσκολότερα από το σίδηρο, έχει την τάση να σχηματίζει στους χάλυβες υμένα Cu. Τα εν λόγω υμένα, σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, διαχέονται ανάμεσα στους κόκκους υπονομεύοντας τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Κατά τη θερμή έλαση δε, δύνανται να προκαλέσουν επιφανειακές ρωγμές στο χάλυβα. Για το λόγο αυτό η συγκέντρωσή του δε θα πρέπει να υπερβαίνει το 0.4 – 0.5 % κ.β. Στην περίπτωση που η συγκέντρωσή του βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα, θα πρέπει να συνοδεύεται από Ni με συγκέντρωση τουλάχιστον το ήμισυ αυτής του Cu.

Όταν η συγκέντρωση του χαλκού υπερβαίνει το 0.75 % κ.β. , δύναται να λαμβάνει χώρα κατακρήμνισή του όταν ο χάλυβας θερμανθεί σε θερμοκρασίες 510 – 607 °C αυξάνοντας σημαντικά την εφελκυστική του αντοχή και μειώνοντας ελαφρώς την ολκιμότητά του.

Χάλυβες με περιεκτικότητα σε χαλκό 1 % κ.β. έχουν εφελκυστική αντοχή αυξημένη κατά 69 – 138 MPa, ανεξάρτητα από την παρουσία άλλων κραματικών στοιχείων. Επιπλέον, επιδεικνύουν αυξημένη δυνατότητα μορφοποίησης (formability) σε υψηλή θερμοκρασία (solution-treated condition) και η κατακρήμνιση (και η συνεπαγόμενη σκλήρυνση) επιτυγχάνεται μετά τη μορφοποίηση του προϊόντος.

4.7.7 Νικέλιο

Το Ni χρησιμοποιείται ως ενισχυτικό όπως και ο χαλκός, αλλά δεν κατακρημνίζεται. Επιπλέον παρέχει προστασία από την ατμοσφαιρική διάβρωση, αλλά σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με το χαλκό. Λαμβάνεται κυρίως από την ανακύκλωση παλαιομετάλλων (scrap) και πολύ σπάνια ως πρωτογενές, λόγω του υψηλού του κόστους. Μαζί με το μολυβδαίνιο, συνιστούν τα ακριβότερα κραματικά στοιχεία των χάλυβων υψηλής αντοχής. Λόγω του κόστους του, χρησιμοποιείται παρουσία σημαντικής συγκέντρωσης Cu, που έχει την ίδια ακριβώς ενισχυτική δράση.

Το νικέλιο βελτιώνει επίσης τη δυσθραυστότητα (Notch toughness) σε χαμηλές θερμοκρασίες.

4.7.8 Βανάδιο, Τιτάνιο, Ζιρκόνιο

Τα V, Ti, Zr προστίθενται ως κραματικά στοιχεία στους χάλυβες υψηλής αντοχής σε χαμηλές – κυρίως – συγκεντρώσεις, για τον έλεγχο του μεγέθους του κόκκου.

4.7.9 Βόριο

Το B δεν έχει καμία ενισχυτική δράση στους χάλυβες θερμής έλασης, αλλά βελτιώνει σημαντικά τη σκληρυντική ικανότητα (hardenability). Ο χάλυβας πρέπει προηγουμένως να έχει αποξειδωθεί (deoxidize) πλήρως.

Στον ακόλουθο πίνακα 4.4 παρατίθεται η χημική σύσταση 25 τύπων κατασκευαστικού χάλυβα υψηλής αντοχής.

4.4 Τυπική χημική σύσταση Χαλύβων Υψηλής Αντοχής

Steels	C	Mn	P	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Other
Steels for Which Data Are Given in This Article (310 and 345 MPa minimum yield point)									
1	0.20	1.25	0.025	0.25	0.25	...	...	...	...
2	0.22	1.35	0.025	0.25	0.25	...	...	...	...
3	0.17	1.10	0.12	0.08	0.30	...	...	...	0.05 V
4	0.15	0.75	0.060	0.25	0.40	0.75	0.30	...	...
5	0.10	0.75	0.090	0.10	1.15	0.60	...	0.13	0.20 Al
Other High-Strength Low-Alloy Steels (310 and 345 MPa minimum yield point)									
6	0.15	0.75	0.080	0.25	0.35	0.75	0.25	0.30	...
7	0.08	0.65	0.025	0.08	0.15	...	...	...	0.04 V
8	0.20	1.10	0.025	0.25	0.25	...	...	...	0.04 V
9	0.14	1.05	0.025	0.20	0.25	...	...	...	0.04 V, 0.01 Ti
10	0.15 (a)	0.75	0.015	0.65	0.20	...	...	...	0.04 Zr
11	0.15 (a)	0.70	0.040	0.75	...	...	0.55	0.15	0.04 Zr
12	0.15	0.75	0.055	0.10	0.65	0.75	...	...	...
13	0.08	0.50	0.025	0.25	0.40	0.50	0.30	...	..
14	0.11	0.65	0.015	0.50	0.28	0.15	0.21	0.06	0.08 V, 0.01Ti
15	0.10	0.75	0.100	0.60	0.35	0.85	0.75	...	0.06 Zr
16	0.10	0.35	0.120	0.50	0.40	0.50	0.80	...	...
17	0.12	0.75	0.080	0.25	0.45	0.55	...	0.10	...
18	0.12	0.75	0.025	0.25	0.65	0.75	0.25	0.13	...
High-Strength Heat Treated Alloy Grades (379 and 1000 MPa minimum yield point)									
19	0.28(a)	1.50 (a)	0.025	0.25	...	...	...	0.15	...
20	0.28(a)	0.75	0.025	0.75	...	...	0.50	0.16	0.12 Zr
21	0.12	0.50	0.025	0.25	1.00	1.85	...	...	....
22	0.18	1.00	0.025	0.25	0.65	1.35	...	0.25	...
23	0.12	0.75	0.025	0.10	1.15	1.25	...	0.25	...
24	0.18	0.75	0.025	0.10	1.25	1.50	...	0.25	...
25	0.15	0.80	0.025	0.25	0.35	0.85	0.60	0.50	0.05 V, 0.004 B
(a) : May be lower to maintain the same strength in a smaller section size or to meet a lower level of specified strength.									

Οι τύποι 1 έως 18 είναι περλιτικοί Χάλυβες Υψηλής Αντοχής και Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής και χρησιμοποιούνται σε κατάσταση έλασης και σε κάποιες περιπτώσεις σε ανοπτημένη κατάσταση. Τα κραματικά στοιχεία σε αυτούς τους χάλυβες, προκαλούν μετασχηματισμό του

ωστενίτη σε λεπτόκοκκο περλίτη και φερρίτη κατά την απόψυξη από κατάσταση θερμής έλασης.

Οι τύποι 1 και 2, συνιστούν τους φθηνότερους και τους πλέον παραγόμενους χάλυβες υψηλής αντοχής. Είναι κατάλληλοι για εν ψυχρώ μορφοποίηση και επιδεικνύουν καλή συγκολλησιμότητα μέσω των συνήθων τύπων συγκόλλησης.

Οι τύποι 19 έως 25 παρέχονται σε κατάσταση θερμικής κατεργασίας. Εάν πρόκειται να υποβληθούν σε θερμή μορφοποίηση, υπόκεινται ξανά σε θερμική κατεργασία μετά τη μορφοποίηση.

Οι τύποι 21, 23 και 24 περιέχουν χαλκό σε ποσοστό μεγαλύτερο του 0.75 % κ.β. και ενισχύονται μέσω κατακρήμνισης. Μετά τη μορφοποίησή τους απαιτείται αποστατική ανόπτηση ή επαναφορά (tempering) για να αποκτήσουν την επιθυμητή αντοχή.

Οι τύποι 19, 20, 22 και 25 απαιτούν βαφή και επαναφορά (tempering) ώστε να αναπτύξουν δομή επαναφερμένου μαρτενσίτη και μπαινίτη, καθώς και υψηλή αντοχή, δυσθραυστότητα και συγκολλησιμότητα που συνεπάγεται αυτή.

4.8 Μηχανικές ιδιότητες χαλύβων υψηλής αντοχής

4.8.1 Όριο διαρροής, εφελκυστική αντοχή

Όλοι οι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής παράγονται με συγκεκριμένη ελάχιστη αντοχή, που ξεκινά από όριο διαρροής και εφελκυστική αντοχή της τάξεως των 345 psi και 483 MPa αντίστοιχα, σε μεγέθη έως 0.5 in.

Οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται συνήθως σε κατάσταση έλασης (as-rolled) και συνεπώς η μηχανική αντοχή τους μειώνεται σε προϊόντα παχύτερων διατομών, λόγω του χαμηλότερου ρυθμού απόψυξης στο εσωτερικό τους.

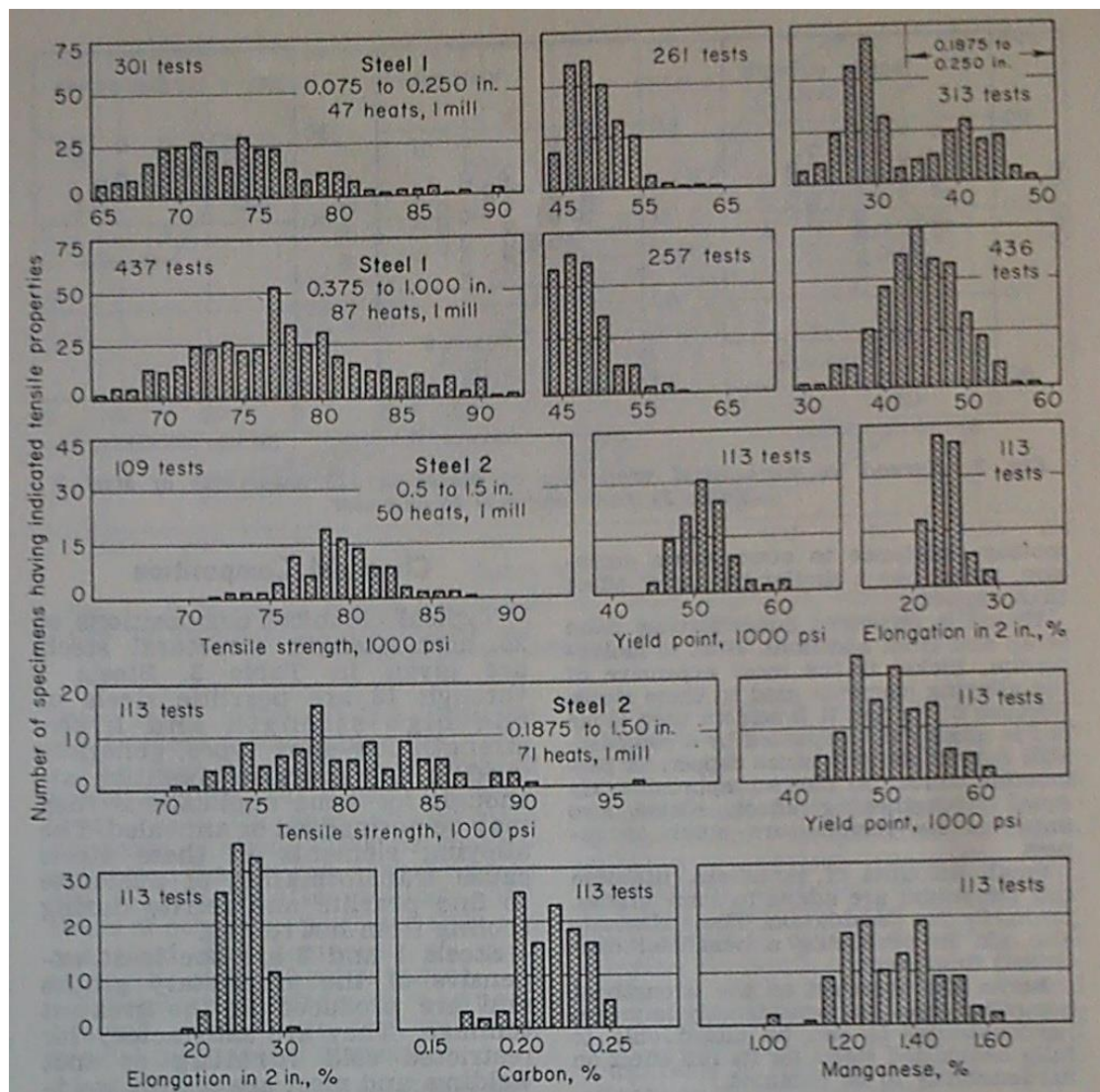
Στον ακόλουθο πίνακα 4.5 παρατίθενται οι μηχανικές ιδιότητες των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής και των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής – συγκεκριμένα των τύπων 1 έως 18 του παραπάνω πίνακα (5.6) – σε κατάσταση έλασης :

4.5 Ελάχιστες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής και των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής σε κατάσταση έλασης

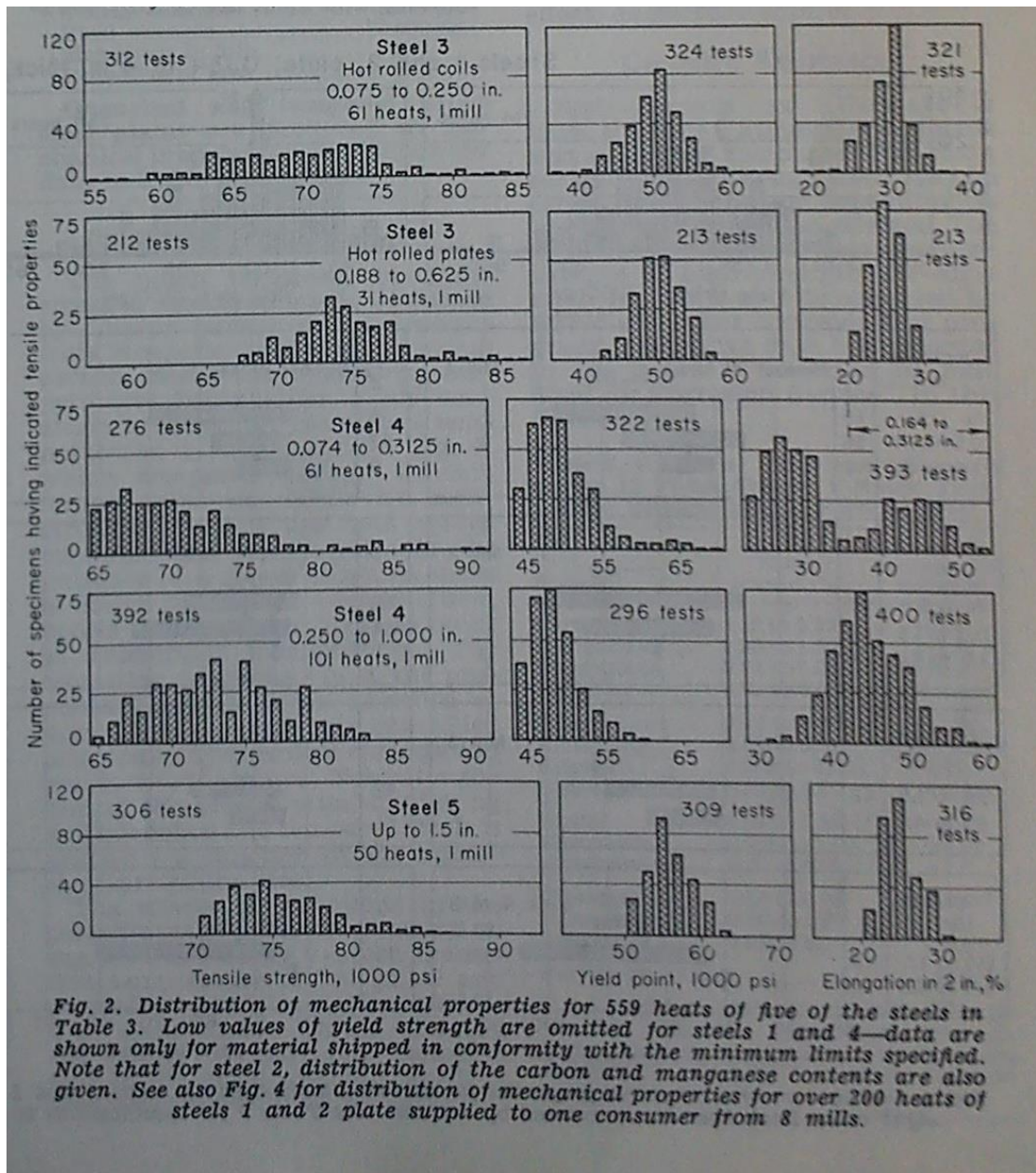
Property	Value
³/₄-In. Max Thickness	
Tensile strength, min, MPa	483
Yield point, min, MPa	345
Elongation in 8 in., min %	18
³/₄ to 1¹/₂ -In. Thickness	
Tensile strength, min, MPa	462
Yield point, min, MPa	324
Elongation in 8 in, min, %	19
1¹/₂ to 4 -In. Thickness	
Tensile strength, min, MPa	434
Yield point, min, MPa	290
Elongation in 8 in, min, %	19
Elongation in 2 in, min, %	24

Σε κατάσταση ανόπτησης ή επαναφοράς, καθώς και στην περίπτωση που ο χάλυβας πωλείται σε μορφή σπείρας (steel coil), οι παραπάνω τιμές της εφελκυστικής αντοχής και του ορίου διαρροής, είναι μειωμένες κατά περίπου 35 MPa.

Στις ακόλουθες εικόνες 4.6 και 4.7 παρατίθενται οι μηχανικές ιδιότητες (όριο διαρροής, εφελκυστική αντοχή) πέντε εκ των παραπάνω Χαλύβων Υψηλής Αντοχής και Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής :



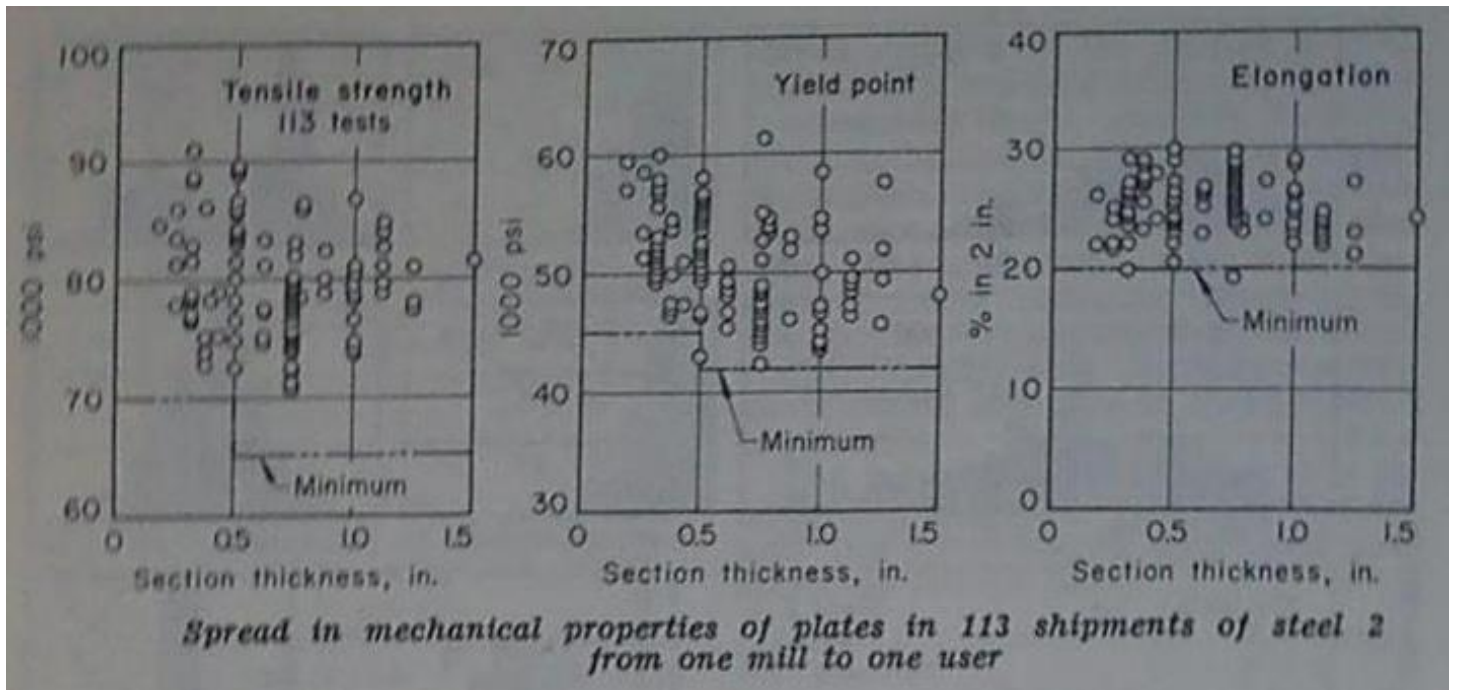
4.6 Μηχανικές ιδιότητες χαλύβων 1 & 2



4.7 Μηχανικές ιδιότητες χαλύβων 3, 4 & 5

Το εύρος των τιμών αποδίδονται κυρίως στη διαφοροποίηση του μεγέθους των διατομών των δοκιμών, στις προγενέστερες θερμικές κατεργασίες που έχουν υποστεί, καθώς και σε άλλες μεταβλητές των πειραματικών δοκιμών.

Η επίδραση του πάχους στην κατανομή των μηχανικών ιδιοτήτων, φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα 4.8, που παρουσιάζει διαγράμματα που ελήφθησαν από 113 δείγματα, προερχόμενα από μία έλαση:



4.8 Επίδραση του πάχους ελάσματος Χάλυβα Υψηλής Αντοχής στην κατανομή των μηχανικών του ιδιοτήτων

Όσον αφορά τους θερμικώς κατεργασμένους χάλυβες υψηλής αντοχής, αυτοί διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες:

- Σε αυτούς που περιέχουν χαλκό σε ποσοστό άνω του 0.75 % κ.β. και μέσω κατακρήμνισης (με επαναθέρμανση μετά την έλαση, σε θερμοκρασία 510 – 607 °C) επιτυγχάνουν όριο διαρροής 483 MPa και εφελκυστική αντοχή 538 MPa.
- Σε χάλυβες άλλης σύστασης που μέσω βαφής και επαναφοράς επιτυγχάνουν όριο διαρροής άνω των 620 MPa .

Οι μηχανικές ιδιότητες των βαμμένων και ανοπτημένων χαλύβων υψηλής αντοχής, παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα 4.9 :

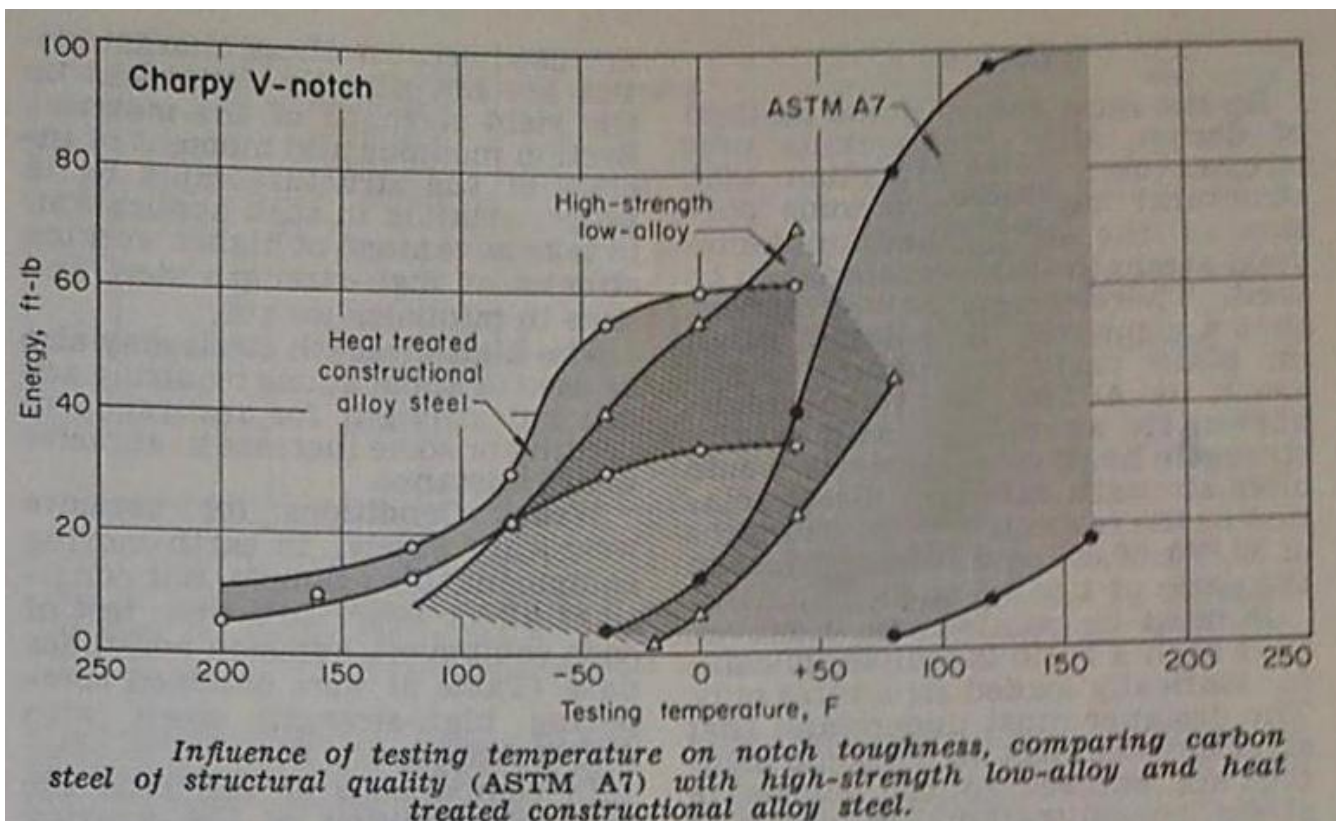
4.9 Τυπικές ελάχιστες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων βαμμένων και ανοπτημένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής

Property	Value
3/16 to 2¹/₂-In. Thickness	
Tensile strength, min, psi	793
Yield point, min, psi	690
Elongation in 2 in., min, %	18
Reduction of area, min, %	50
1/2 to 4-In. Thickness	
Tensile strength, min, psi	724
Yield point, min, psi	621
Elongation in 2 in., min, %	16
Reduction of area, min, %	45
NOTE: About 45% of these steels are produced in thickness up to ³ / ₄ in.	

4.8.2 Δυσθραυστότητα (Notch Toughness) Χαλύβων Υψηλής Αντοχής

Οι κατασκευαστικοί Χάλυβες Υψηλής Αντοχής επιδεικνύουν μεγαλύτερη δυσθραυστότητα – βάσει των συνήθων μεθόδων μέτρησής της (δοκιμή Charpy, Drop-weight test) συγκριτικά με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες κατασκευών. Επιπλέον, παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμοκρασία μετάπτωσης (transition temperature) συγκριτικά με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες.

Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζεται η συμπεριφορά σε κρούση – μέσω δοκιμής Charpy (Charpy V-notch impact test) – του Μικροκραματωμένου Χάλυβα Υψηλής Αντοχής ASTM A7, σε διάφορες θερμοκρασίες. Για λόγους σύγκρισης, παρατίθεται ενδεικτικά και η συμπεριφορά σε κρούση κοινών θερμικώς κατεργασμένων κατασκευαστικών χαλύβων, σχήμα 4.10 :



4.10 Συμπεριφορά σε κρούση (Charpy V-notch impact test) του Μικροκραματωμένου Χάλυβα Υψηλής Αντοχής ASTM A7 και των κοινών θερμικώς κατεργασμένων κατασκευαστικών χαλύβων, σε διάφορες θερμοκρασίες

Επισημαίνεται πως στους χάλυβες σε κατάσταση έλασης και εξομάλυνσης (normalized), η θερμοκρασία μετάπτωσης ελέγχεται κυρίως μέσω της χημικής σύστασης του χάλυβα και του μεγέθους των φερριτικών κόκκων.

Στον ακόλουθο πίνακα 4.11 παρατίθεται η επίδραση διαφόρων κραματικών στοιχείων, στη θερμοκρασία μετάπτωσης ενός περλιτικού χάλυβα, κατά τη δοκιμή 15 ft·lb Charpy V-notch:

4.11 Επίδραση διαφόρων κραματικών στοιχείων στη θερμοκρασία μετάπτωσης ενός περλιτικού χάλυβα, κατά τη δοκιμή Charpy V-notch

Element	Range covered, %	Transition temperature change (a)
Carbon	0,12 to 0,32	+3,0
Manganese	0,20 to 1,50	-1,0
Phosphorus	0,01 to 0,06	+10,0
Sulfur	0,02 to 0,05	None
Silicon	0,02 to 0,20	-3,0
Aluminum	0,00 to 0,06	Beneficial
Nitrogen	0,003 to 0,022	+33,0
Copper	0,03 to 2,00	+0,40
Nickel	0,04 to 2,50	-0,45
Chromium	0,005 to 1,00	+0,50
Molybdenum	0,00 to 0,29	+1,8
Titanium	0,00 to 0,08	+5,0
Vanadium	0,00 to 0,05	Nil
Zirconium	0,05 to 0,15	+6,0
Ferrite grain size	.....	-25,0 (b)

(a) Change (F) in 15 ft-lb Charpy V-notch transition temperature for each 0,01% increase in element. (b) For each increase of one ASTM number (decrease in grain size).

Η σκληρότητα στους βαμμένους, ανοπτημένους και σκληρυμένους μέσω κατακρήμνισης χάλυβες, είναι εν γένει συνάρτηση της μικροδομής. Εν γένει, στους χάλυβες, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, τόσο χαμηλότερη είναι και η θερμοκρασία μετάπτωσης.

Στην περίπτωση των χαμηλού C ανοπτημένων μαρτενσιτικών χαλύβων και των χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας μπαινίτη, η σκληρότητα ελέγχεται μέσω κραματικών στοιχείων που ελέγχουν τη μικροδομή.

4.8.3 Αντοχή στη διάβρωση

Η αντίσταση των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής στην ατμοσφαιρική διάβρωση, αποτελεί συνάρτηση κυρίως της χημικής τους σύστασης. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η αντιδιαβρωτική τους αντίσταση είναι υψηλότερη αυτής που επιδεικνύουν οι κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες.

4.8.4 Σχεδιασμός

Εν γένει, κατά τη συμβατική σχεδίαση μιας μεταλλικής κατασκευής, οι τιμές των τάσεων λειτουργίας, είναι σε κάθε περίπτωση ένα κλάσμα της επιτρεπόμενης αντοχής του υλικού – που ταυτίζεται με το ελάχιστο όριο διαρροής.

Από αυτήν τη θεμελιώδη και θεωρητική σκοπιά, οι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής επιδεικνύουν έως και τριπλάσια αντοχή (έως 690 MPa όριο διαρροής), συγκριτικά με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες (πχ ASTM A7, με όριο διαρροής 228 MPa).

Αυτή η θεώρηση ωστόσο, συμπίπτει με την πραγματικότητα μόνο στην περίπτωση στατικής φόρτισης. Στις κατασκευές που υπόκεινται σε δυναμικές καταπονήσεις, παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων στις περιοχές υψηλής ονομαστικής τάσης. Σε αυτές τις περιοχές, η αντοχή σε κόπωση είναι σημαντικότερη από το όριο διαρροής.

Η συγκέντρωση τάσεων επηρεάζει εντονότερα τους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής, σε σχέση με τους κοινούς ανθρακούχους. Η παρουσία ενώσεων ή εγκοπών δύναται να υπονομεύσει την αντοχή των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής σε τέτοιο βαθμό, ώστε στη σχεδίαση να πρέπει να ληφθεί στα ίδια επίπεδα με αυτήν των κοινών ανθρακούχων χαλύβων. Αυτό εξαρτάται από της συγκέντρωσης τάσεως, καθώς και από το βαθμό και τον τύπο της φόρτισης.

Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι ένας περλιτικός Μικροκραματωμένος Χάλυβας Υψηλής Αντοχής επιδεικνύει όριο διαρροής 45% έως 75% εν

συγκρίσει με τον κοινό ανθρακούχο χάλυβα ASTM A7, αλλά το όριο κόπωσης του (fatigue limit) είναι μόλις 10% έως 25% υψηλότερο από αυτό του ASTM A7 .

Η συγκέντρωση τάσεων δύναται να οφείλεται σε κακό σχεδιασμό, σε συγκολλημένες ή ηλωμένες (riveted) ενώσεις, αιχμηρές ακμές, γωνίες μικρής καμπυλότητας, εγκοπές, μικρορωγμές λόγω λυγισμού, σφάλματα συγκολλήσεων και άλλου είδους ατέλειες.

Στην περίπτωση κατασκευών που η δυσκαμψία (stiffness) και οι παραμορφώσεις (deflection) είναι πρωτεύουσας σημασίας, θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη όλες οι τυπικές παράμετροι που τις επηρεάζουν (ροπές αδρανείας της διατομής, μέτρο ελαστικότητας και διάτμησης) ώστε να αξιοποιηθούν στο έπακρο οι ιδιαίτερες μηχανικές ιδιότητες των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής και κατά συνέπεια να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του βάρους των κατασκευών.

Κλείνοντας, θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής δύνανται να χρησιμοποιηθούν και σε περιπτώσεις που απαιτείται πέραν της μηχανικής αντοχής και αντοχή στην επιφανειακή φθορά λόγω τριβής (abrasive wear resistance) και εγχάραξη (denting).

4.8.5 Φθορά (Wear)

Οι συνθήκες φθοράς στις οποίες εκτίθεται ένα μεταλλικό σώμα, ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή του. Στον ακόλουθο πίνακα 4.12 παρατίθενται για λόγους σύγκρισης η αντίσταση σε φθορά τριβής (abrasive wear resistance) Χαλύβων Υψηλής Αντοχής (όπως κατηγοριοποιήθηκαν σε παραπάνω πίνακα) και ενός κοινού ανθρακούχου χάλυβα ASTM A283-Grade B, που χρησιμοποιούνται σε εξοπλισμό μετακίνησης εδαφών (σκαπτικές και μεταφορικές μηχανές):

4.12 Σύγκριση αντίστασης σε φθορά τριβής

Αντίσταση σε φθορά τριβής (abrasive wear resistance) Χαλύβων Υψηλής Αντοχής και ενός κοινού ανθρακούχου χάλυβα ASTM A283-Grade B, που χρησιμοποιούνται σε εξοπλισμό μετακίνησης εδαφών (σκαπτικές και μεταφορικές μηχανές)

Τύπος χάλυβα	Ελάχιστη εφελκυστική αντοχή [psi]	Σκληρότητα [Brinell]	Απώλεια μάζας [oz/sq.in./h]	Ρυθμός φθοράς
A283, grade B	27000	126	0.000197	1.00
No. 2 *	55000	156	0.000183	1.07
No. 20 *	50000	217	0.000215	0.91
No. 19 *	90000	255	0.000160	1.23
No. 25 *	90000	262	0.000169	1.16

* Βάσει της κατηγοριοποίησης των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής που έγινε σε προηγούμενη παράγραφο του παρόντος (Πίνακας 1: Τυπική χημική σύσταση Χαλύβων Υψηλής Αντοχής)

oz: ounce (ουγκιά) ≈ 0.03 kg, 1 psi ≈ 6894.76 Pa

Εν γένει, η συμπεριφορά ενός χάλυβα σε φθορά εξαρτάται άμεσα από την αρχική κατάσταση της προς φθορά επιφάνειας, καθώς και από τη μικροδομή του υλικού (παρουσία σκληρών ή μαλακών φάσεων). Γενικότερα, η αυξημένη παρουσία φερρίτη συνεπάγεται αυξημένο ρυθμό φθοράς. Επισημαίνεται ότι οι χαμηλοί ρυθμοί φθοράς - εκφραζόμενοι σε ρυθμό μεταβολής της μάζας του δοκιμίου – που παρατίθενται στον παραπάνω πίνακα, αποδίδονται στη μικρή διάρκεια των τυποποιημένων δοκιμών. Σε δοκιμές μακρύτερης διάρκειας, οι τιμές είναι υψηλότερες και επιπλέον φαίνεται εντονότερα η αυξημένη αντίσταση των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής.

4.8.6 Διαμορφωσιμότητα (Formability)

Εν γένει, οι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής και οι Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής δύνανται να μορφοποιηθούν εν ψυχρώ και να καμφθούν (angle bent). Ωστόσο, η μορφοποίηση και ο λυγισμός τους, είναι εν γένει δυσκολότερες συγκριτικά με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες, λόγω του υψηλότερου ορίου διαρροής και της χαμηλότερης ολκιμότητάς τους. Συνεπώς για την επίτευξη πλαστικής διαμόρφωσης απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς, μεγαλύτερες ακτίνες καμπυλότητας, αυξημένα διάκενα μήτρας και μεγαλύτερα περιθώρια για ελαστική επαναφορά του υλικού.

Στην περίπτωση μορφοποίησης ή κάμψης θερμικώς κατεργασμένων χαλύβων, απαιτείται προηγουμένως απομάκρυνση των επιφανειακών ανωμαλιών (μέσω λείανσης), ώστε να αποφευχθεί η αστοχία κατά το λυγισμό σε μικρές ακτίνες καμπυλότητας.

Στην περίπτωση που η μορφοποίηση γίνεται σε προϊόντα έλασης (ανισοτροπική δομή, επιμηκών κόκκων), θα πρέπει – κατά το δυνατόν – ο άξονας της κάμψης / λυγισμού να είναι κάθετος προς τη διεύθυνση της έλασης (που συμπίπτει με τη μεγάλη διάσταση των επιμηκών κόκκων).

Η διαμορφωσιμότητα των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής εξαρτάται άμεσα από τη χημική τους σύσταση. Στον ακόλουθο πίνακα 4.13, παρατίθενται οι ελάχιστες επιτρεπόμενες ακτίνες καμπυλότητας διαφόρων τύπων ανοπτημένων και βαμμένων Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής ως συνάρτηση του πάχους του ελάσματος:

4.13 Ελάχιστες επιτρεπόμενες ακτίνες καμπυλότητας συναρτήσει του πάχους ελάσματος

Πάχος, t (in)	Ελάχιστη εφελκυστική αντοχή (Mpa)		
	310	345	690
έως 1/16	0.5t	1t	...
1/16 έως 1/4	1t	2t	...
1/4 έως 1/2	2t	3t	2t

Οι παραπάνω τιμές αφορούν λυγισμό με τον άξονα λυγισμού κάθετο προς τη διεύθυνση της έλασης. Τιμές ακτίνας καμπυλότητας μικρότερες από τις παραπάνω, συνεπάγονται αυξημένη πιθανότητα αστοχίας (θραύση, ρωγματώσεις κλπ).

Για πάχη ελασμάτων μεγαλύτερα του 0.5 in (=12.7 mm) ενδείκνυται η εφαρμογή θερμής διαμόρφωσης.

Η διαμόρφωση εν θερμώ, επιβάλλεται επιπλέον και στις περιπτώσεις που η επιθυμητή γεωμετρία του τελικού προϊόντος είναι πολύπλοκη, καθώς και σε περιπτώσεις που εμπεριέχονται πολύ μικρές ακτίνες καμπυλότητας.

Οι Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής δύνανται να διαμορφωθούν εν θερμώ σε θερμοκρασία άνω των 649 °C. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που απαιτείται μέγιστη διαμορφωσιμότητα, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές βαθιάς κοίλανσης, συνίστανται θερμοκρασίες στο εύρος 843 έως 900 °C. Η επακόλουθη απόψυξη σε ακίνητο αέρα επαναφέρει τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα σε κατάσταση έλασης, χωρίς να απαιτούνται περαιτέρω θερμικές κατεργασίες.

Τα ελάσματα, οι πλάκες, οι ράβδοι (bars) και οι μπιγιέτες (billets) των βαμμένων και ανοπτημένων τύπων, δύνανται να διαμορφωθούν και να σφυρηλατηθούν εν θερμώ στο θερμοκρασιακό εύρος 871 έως 982 °C. Για τους βαμμένους ή ανοπτημένους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής, απαιτείται βαφή και επαναφορά μετά το πέρας της μορφοποίησης, ώστε να επανακτήσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες.

4.9 Συγκολλησιμότητα και κοπή

4.9.1 Συγκολλήσεις

Οι Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής δύνανται να συγκολληθούν απ'ευθείας (διατίθενται προϊόντα σε κατάσταση προς συγκόλληση) μέσω οποιασδήποτε μεθόδου συγκόλλησης με τόξο, που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση κοινών ανθρακούχων χαλύβων. Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητάς τους σε C, οι Μικροκραματωμένοι χάλυβες δεν υφίστανται σκλήρυνση στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, εν αντιθέσει προς τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες.

Τα συνήθη ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής είναι τα E60. Στην περίπτωση που απαιτούνται συνδέσεις υψηλής αντοχής, ενδείκνυται η χρήση ηλεκτροδίων τύπου E70, ή άλλα ακόμη υψηλότερων μηχανικών ιδιοτήτων.

Στην περίπτωση Χαλύβων Υψηλής Αντοχής με αυξημένες συγκεντρώσεις C και Mn – και ιδιαίτερα σε προϊόντα μεγάλου πάχους – απαιτείται προθέρμανση των προς συγκόλληση σωμάτων ή χρήση μεθόδων συγκόλλησης χαμηλού υδρογόνου, ή συνδυασμός αυτών.

Γενικότερα οι μέθοδοι συγκόλλησης χαμηλού υδρογόνου είναι η επιβεβλημένη μέθοδος συγκόλλησης θερμικώς κατεργασμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής. Η υψηλότερη συγκέντρωση κραματικών στοιχείων σε αυτούς τους χάλυβες συνεπάγεται σκλήρυνση της θερμικώς επηρεασμένης ζώνης.

Η αυξημένη παρουσία υδρογόνου σε Χάλυβες Υψηλής Αντοχής, συνεπάγεται την εμφάνιση ρωγματώσεων (underbead cracking) κυρίως λόγω των αεροστατικών τάσεων που ασκούν τα μόρια του H στη μάζα του χάλυβα, που προστίθενται στις τάσεις λόγω συρρίκνωσης του υλικού και στις τάσεις λόγω ωστενίτη – μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.

Εν γένει, για τη συγκόλληση θερμικώς κατεργασμένων κραματωμένων χαλύβων, ενδείκνυται ηλεκτρόδια χαμηλού υδρογόνου, κλάσεων E70 (ελάχιστη αντοχή εφελκυσμού 483 MPa) έως E120 (ελάχιστη αντοχή εφελκυσμού 827 MPa), αναλόγως της επιθυμητής αντοχής σχεδιασμού.

Τα ηλεκτρόδια E70 χρησιμοποιούνται όταν δεν απαιτείται ιδιαίτερα υψηλή αντοχή στην κόλληση, δηλαδή όταν οι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής χρησιμοποιούνται σε κάποια εφαρμογή λόγω της υψηλής αντίστασής τους σε φθορά (antidenting και wear-resisting properties).

Τα ηλεκτρόδια κλάσεως E120 χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται η μέγιστη μηχανική αντοχή. Ωστόσο, η ελαφρώς αυξημένη μηχανική αντοχή της κόλλησης (συγκριτικά με την υπόλοιπη μάζα του χάλυβα) καθώς και η δυσκολία χειρισμού που επιδεικνύουν, καθιστούν την αμέσως χαμηλότερη κλάση E110 την ιδανική επιλογή για τέτοιες εφαρμογές.

Στις περιπτώσεις που η περιοχή της συγκόλλησης πρόκειται να υποστεί αποτακική ανόπτηση, πρέπει να αποφεύγεται η χρήση ηλεκτροδίων που περιέχουν βανάδιο, καθώς αυτό κατακρημνίζεται - υπό μορφή καρβιδίων - κατά τη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία χαμηλότερη της κρίσιμης. Η κατακρήμνιση ανεβάζει τη θερμοκρασία μετάπτωσης (transition temperature) του μετάλλου συγκόλλησης.

Στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται συγκόλληση Χαλύβων Υψηλής Αντοχής μέσω τεχνικής βυθιζόμενου τόξου ή αδρανούς αερίου (MIG-MAG, TIG κλπ), επιτρέπεται η χρήση των κοινών ηλεκτροδίων-συρμάτων, συλλιπασμάτων (fluxes) και αδρανών αερίων που χρησιμοποιούνται και για τη συγκόλληση κοινών ανθρακούχων χαλύβων.

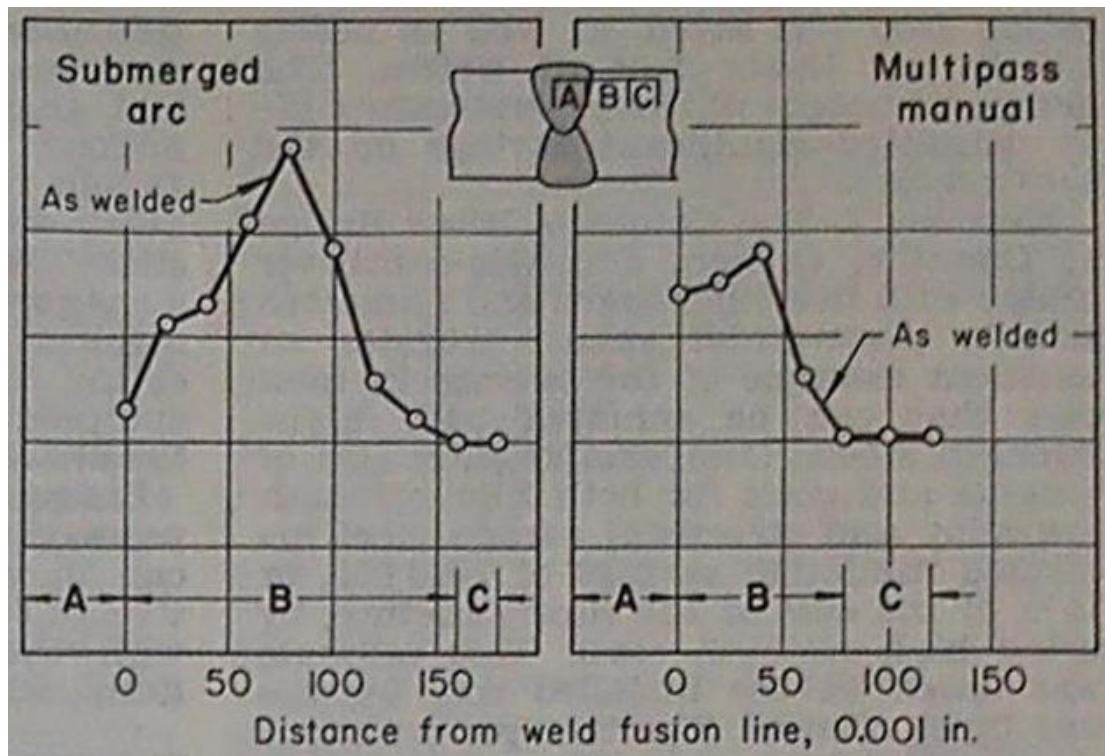
Οι συγκολλήσεις βυθιζόμενου τόξου και αδρανών αερίων, δίδουν εν γένει κολλήσεις με ελάχιστο όριο διαρροής της τάξεως των 80000 psi, που επιδεικνύουν μειωμένη ολκιμότητα. Συνεπώς, σε εφαρμογές στις οποίες απαιτείται υψηλή αντοχή και υψηλή ολκιμότητα, οι μέθοδοι αυτές πρέπει να αποφεύγονται.

Η ολκιμότητα και η σκληρότητα (toughness) των θερμικώς κατεργασμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής εξαρτάται – μεταξύ άλλων – και από τον τύπο του μαρτενσίτη που απαντά στη δομή του. Συνεπώς η παροχή θερμότητας κατά τη συγκόλληση (q), ο ρυθμός απόψυξης, καθώς και η ενδεχόμενη προθέρμανση πρέπει να εκτελούνται με τρόπο ώστε να μη

λαμβάνουν χώρα μετασχηματισμοί φάσεων και να διατηρείται ο υπάρχων τύπος μαρτενσίτη.

Επισημαίνεται πως σε περιπτώσεις πολύ υψηλής παροχής q – όπως κατά τη συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου ή κατά τη συγκόλληση παρουσία αδρανούς αερίου - και βραδείας απόψυξης, ευνοείται η ανάπτυξη φερρίτη και περλίτη. Για το λόγο αυτό, για τη συγκόλληση ελασμάτων θερμικώς κατεργασμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής, με πάχος μικρότερο της μισής ίντσας, όταν η μέγιστη μηχανική αντοχή είναι το ζητούμενο, οι μέθοδοι συγκόλλησης βυθιζόμενου τόξου και συγκόλλησης παρουσία αδρανούς αερίου, πρέπει να αποφεύγονται.

Στην παρακάτω εικόνα 4.14, παρατίθεται η μεταβολή της σκληρότητας πλάκας πάχους 1.5 in Χάλυβα Υψηλής Αντοχής ("Τύπος 25" - βλ. Πίνακα 4.4) συναρτήσει της απόστασης από τη ΘΕΖ (θερμικώς επηρεασμένη ζώνη), για δύο τύπους συγκόλλησης (αυτόματη βυθιζόμενου τόξου ενός πάσου και χειροκίνητη πολλαπλών πάσων). Οι τιμές δίδονται συναρτήσει της απόστασης από τη διεπιφάνεια συγκόλλησης-μετάλλου βάσεως, για μία απόσταση που καλύπτει το πλάτος της ΘΕΖ :



4.14 Μεταβολή της σκληρότητας πλάκας Χάλυβα Υψηλής Αντοχής ("Τύπος 25") συναρτήσει της απόστασης από τη ΘΕΖ, για δύο τύπους συγκόλλησης (αυτόματη βυθιζόμενου τόξου ενός πάσου και χειροκίνητη πολλαπλών πάσων)

Παρατηρώντας τα δεδομένα των παραπάνω διαγραμμάτων, δύναται να εξαχθούν διάφορα συμπεράσματα. Στο ήμισυ του εξεταζόμενου πλάτους, σε απόσταση 0.075 in από τη διεπιφάνεια συγκόλλησης-μετάλλου, το δοκίμιο που υπεβλήθη σε συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου εμφάνισε τη μέγιστη τιμή σκληρότητας, ίση με 390 Bhn, κυρίως λόγω της χαμηλής αρχικής θερμοκρασίας του δοκιμίου και την απουσία θερμικής κατεργασίας μετά τη συγκόλληση. Το δοκίμιο που υπεβλήθη σε χειροκίνητη συγκόλληση πολλών πάσων, εμφάνισε μέγιστη σκληρότητα ίση με 340 Bhn, τιμή σαφώς πιο επιθυμητή. Η χαμηλότερη τιμή αποδίδεται κυρίως στην αυξημένη παραμένουσα θερμότητα λόγω του μεγάλου αριθμού των πάσων.

Επισημαίνεται πως οι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής "Τύπου 25" έχουν ελάχιστο όριο διαρροής 690 MPa και ελάχιστη εφελκυστική αντοχή 793 MPa . Πρόκειται για έναν από τους ισχυρότερους τύπους δομικών χαλύβων.

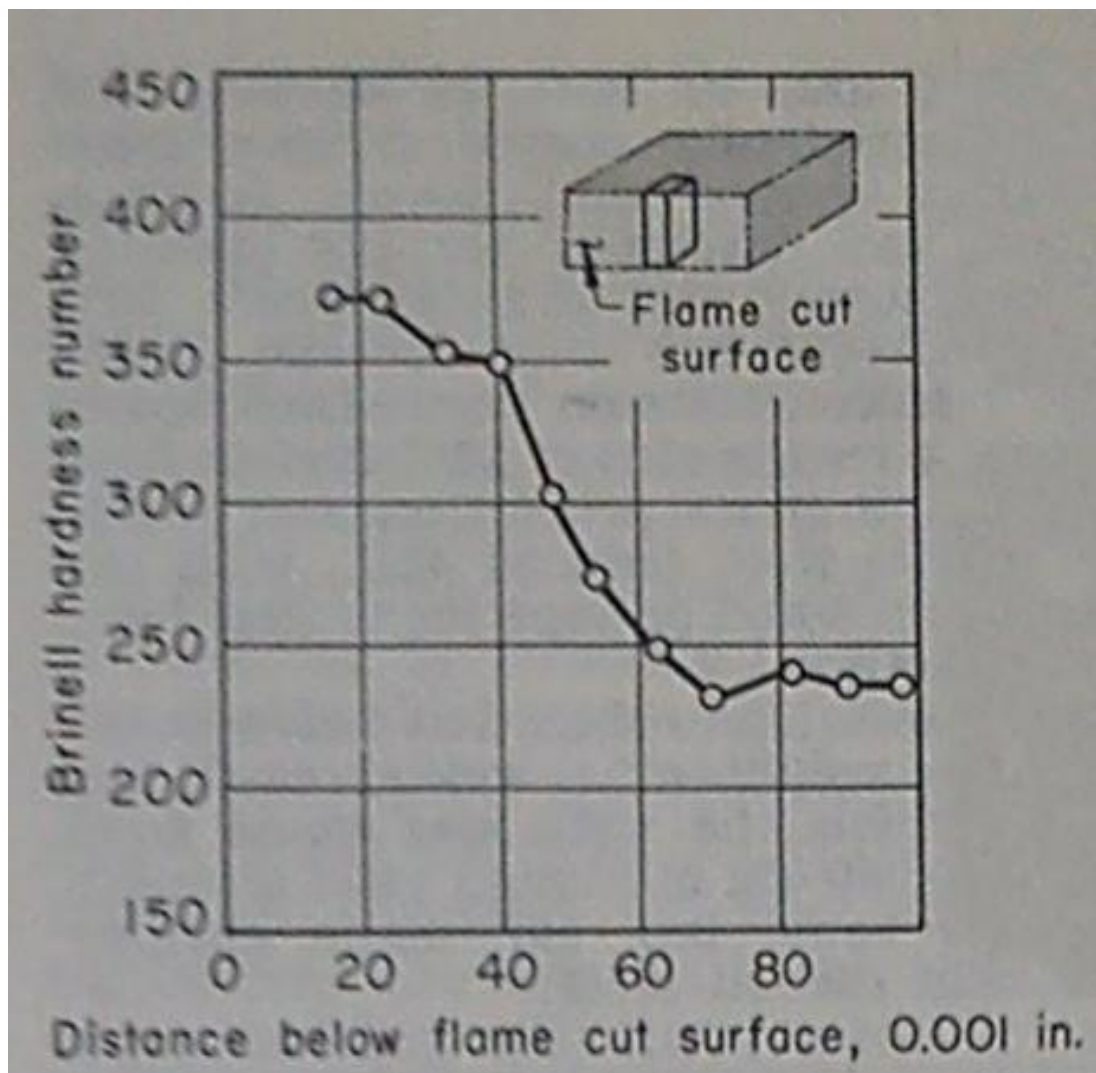
Χάλυβες Υψηλής Αντοχής με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άνθρακα από τον "Τύπο 25", όπως οι χάλυβες "Τύπου 19 & 20", εμφανίζουν υψηλότερες τιμές σκληρότητας στη ΘΕΖ συγκριτικά με αυτές των παραπάνω διαγραμμάτων.

4.9.2 Κοπή με τόξο αερίου ή τόξο άνθρακα

Οι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής "Τύπου 1 έως 18" δύνανται να υποβληθούν σε κοπή μέσω τόξου αερίου ή τόξου άνθρακα. Λόγω της χαμηλής σκληρότητάς τους – που οφείλεται στη χαμηλή περιεκτικότητα σε C και κραματικά στοιχεία – δεν επιδεικνύουν μεγάλη αύξηση στη σκληρότητα των ακμών κοπής (edge hardness). Αντιθέτως, οι χάλυβες "Τύπου 19 έως 25" εμφανίζουν υψηλότερη σκληρότητα στις ακμές κοπής, λόγω της υψηλότερης σκληρότητάς τους.

Η σκλήρυνση οφείλεται στη βαφή που λαμβάνει χώρα μετά την αποβολή της θερμότητας που παράγεται κατά τη διεργασία της κοπής.

Στην ακόλουθη εικόνα 4.15, το διάγραμμα που παρατίθεται παρουσιάζει τη μεταβολή της σκληρότητας συναρτήσει του βάθους από την επιφάνεια κοπής, για χαλύβδινη πλάκα "Τύπου 25", πάχους 1.5 in, που έχει υποστεί φλογοκοπή (flame cut):



4.15 Μεταβολή της σκληρότητας συναρτήσεσι του βάθους από την επιφάνεια κοπής, για χαλύβδινη πλάκα "Τύπου 25", πάχους 1.5 in, που έχει υποστεί φλογοκοπή (flame cut)

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η σκληρότητα σε βάθος 0.018 in είναι της τάξεως των 375 Bhn, ενώ σε ακόμη μικρότερα βάθη, λαμβάνει σαφώς μεγαλύτερες τιμές.

Χαλύβδινα τεμάχια που παρουσιάζουν τόσο υψηλή σκληρότητα στην περιοχή των ακμών κοπής, δεν είναι έτοιμα προς μορφοποίηση ή κατεργασία.

Για να μειωθεί η σκλήρυνση των ακμών κοπής, απαιτείται, είτε προθέρμανση του προς κοπή τεμαχίου – ώστε να μειωθεί η μεταφορά

θερμότητας κατά την απόψυξη και συνεπώς η πιθανότητα να λάβει χώρα βαφή – είτε ανόπτηση μετά την κοπή.

Εναλλακτικά, η σκληρυμένη περιοχή δύναται να αφαιρεθεί, μέσω ακονίσματος (grinding) των ακμών.

4.9.3 Συγκόλληση με αντίσταση (*resistance welding*)

Όλοι οι Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής – με εξαίρεση τους "Τύπους 1 & 2", μπορούν να συγκολληθούν μέσω των συνήθων μεθόδων συγκόλλησης με αντίσταση (spot, roll spot, seam, flash & projection welding).

Ιδανική συμπεριφορά σε συγκόλληση παρουσιάζουν οι χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη του 0.15 %.

Οι "Τύποι 1 & 2" με ελάχιστο όριο διαρροής άνω των 345 MPa, δύνανται να συγκολληθούν μέσω αντίστασης. Απαιτείται ωστόσο προθέρμανση ή θερμική κατεργασία μετά τη συγκόλληση, ώστε να περιοριστεί η αύξηση της σκληρότητας στη ΘΕΖ.

Οι "Τύποι 19 έως 25" δύνανται να συγκολληθούν μόνο με μία από τις παραπάνω υποκατηγορίες (flash welding), καθώς οι υπόλοιπες (spot, seam & projection welding) ενδείκνυνται κυρίως για μικρά πάχη – της τάξεως του πάχους ενός ελάσματος.

Ειδικά η σημειακή συγκόλληση αντίστασης (spot welding), δημιουργεί συνδέσεις μεγάλης αντοχής που αποτελεί συνάρτηση κυρίως του αριθμού των σημείων.

Ενδεικτικά, στον ακόλουθο πίνακα 4.16, παρατίθεται η μηχανική αντοχή σημειακών συνδέσεων – ενός σημείου – τεσσάρων διαφορετικών χαλύβων "Τύπου 4, 10, 15 & 16". Πιο συγκεκριμένα, δίδονται το όριο διαρροής, το όριο διάτμησης και η ολκιμότητα της σύνδεσης. Η τελευταία εκφράζεται από το λόγο εφελκυστικής αντοχής προς διατμητική αντοχή:

4.16 Μηχανική αντοχή σημειακών συνδέσεων ενός σημείου Χαλύβων
Υψηλής Αντοχής

Steel (a)	Tensile strength, MPa	Shear strength MPa	Ratio of tensile to shear
4	78.60	388.86	0.202
10	78.32	408.86	0.192
15	82.74	439.20	0.189
16	79.98	310.95	0.268

4.10 Κατεργασιμότητα (Machinability)

Η αυξημένη μηχανική αντοχή και η χημική σύσταση των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής δε δημιουργούν προβλήματα κατά την κατεργασία αφαίρεσης υλικού (machining), κατά τη σφυρηλάτηση / κοίλανση και κατά την απότμησή (shearing) τους. Απεναντίας, συγκριτικά με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες, επιδεικνύουν καλύτερη συμπεριφορά κατά την κατεργασία – βελτιωμένη ποιότητα επιφανείας ("φινίρισμα") και μειωμένη παρουσία διατμητικών φαινομένων στις κατεργασμένες περιοχές – που αποδίδεται στην αυξημένη μηχανική αντοχή του φερρίτη των Μικροκραματωμένων Χαλύβων.

Η κατεργασιμότητα των βαμμένων και ανοπτημένων τύπων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής, είναι αρκετά μειωμένη και κυμαίνεται σε επίπεδα 60% και 80 % σε σχέση με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες και τους Μικροκραματωμένους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αυξημένη σκληρότητα και στην ισχυρή παρουσία μαρτενσιτικής δομής σε αυτούς τους χάλυβων.

Η ισχύς που απαιτείται για τη σφυρηλάτηση και την απότμηση θερμικώς κατεργασμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής, είναι περίπου η διπλάσια αυτής που απαιτείται στους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες. Εν γένει, δύνανται να υποστούν απότμηση πλάκες πάχους έως 1 in και να σφυρηλατηθούν πλάκες πάχους έως ½ in από θερμικώς κατεργασμένους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής.

4.11 Εφαρμογές των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής

Η βασικότερη ιδιότητα των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής είναι η πολύ υψηλή ειδική αντοχή τους, εκφρασμένη ως λόγος αντοχής προς βάρος (strength-to-weight ratio). Για το λόγο αυτό, απαντούν σε ένα πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών, είτε ως στατικά δομικά στοιχεία σε στατικές κατασκευές, είτε σε κινούμενες κατασκευές, όπως αμαξοστοιχίες, φορτηγά, λεωφορεία, μονάδες μεταφοράς/χειρισμού υλικών, εξορυκτικό εξοπλισμό, σκαπτικές μηχανές (earth moving machining) και γενικότερα σε εφαρμογές που απαιτείται χαμηλό βάρος και – συνεπώς – χαμηλό κόστος. Επισημαίνεται ότι το κέρδος λόγω μικρότερης μάζας υλικού αντισταθμίζει το αυξημένο κόστος των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής συγκριτικά με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες.

Στις ακόλουθες παραγράφους αναφέρονται επιγραμματικά κάποιες τυπικές εφαρμογές Χαλύβων Υψηλής Αντοχής.

Κατασκευή γεφυρών

Σε πολλές γέφυρες και συναφείς κατασκευές, απαντούν τμήματα-φορείς από Χάλυβες Υψηλής Αντοχής, διαφόρων υποκατηγοριών. Η κύρια συνεισφορά τους είναι η σημαντική μείωση του χρησιμοποιούμενου υλικού λόγω αντικατάστασης κοινών κατασκευαστικών χάλυβων από μικρότερες ποσότητες Χαλύβων Υψηλής Αντοχής. Το κέρδος σε κόστος υλικού, είναι της τάξεως των δεκάδων χιλιάδων δολαρίων. Η μείωση του βάρους είναι εξίσου σημαντική, όχι μόνο για οικονομικούς λόγους, αλλά και για κατασκευαστικούς (μεταφορά τμημάτων, ανύψωση τμημάτων, συναρμολόγηση τμημάτων κλπ) και λειτουργικούς (δυναμικά φαινόμενα κλπ) λόγους.

Στις ακόλουθες εικόνες παρατίθενται ενδεικτικά τρεις γνωστές γέφυρες που συνίστανται εν μέρει από Μικροκραματωμένους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής:



4.17 Χαλύβδινη γέφυρα *Burlington Skyway*, *Ontario*, *Canada*



4.18 Χαλύβδινη γέφυρα *Columbia river bridge, Umatilla, Oregon, USA*



4.19 Χαλύβδινη γέφυρα Carquinez Strait bridge San Francisco bay, USA

Κατασκευή οχημάτων

Οι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τροχοφόρων επιβατηγών και μεταφορικών οχημάτων, αλλά και την κατασκευή αμαξοστοιχιών.

Στον ακόλουθο πίνακα 4.20, παρατίθεται για λόγους σύγκρισης το βάρος ενός βαγονιού αμαξοστοιχίας (box car) μήκους 12 m (40 ft), κατασκευασμένου εξ' ολοκλήρου από κοινό ανθρακούχο χάλυβα, καθώς και το βάρος του ίδιου βαγονιού, με το κέλυφός του κατασκευασμένου από Μικροκραματωμένο Χάλυβα Υψηλής Αντοχής ελάχιστου ορίου διαρροής 345 MPa . Για λόγους πληρότητας της σύγκρισης, παρατίθεται και το βάρος μόνο του κελύφους του κάθε βαγονιού:

4.20 Βάρος βαγονιού αμαξοστοιχίας μήκους 12 m κατασκευασμένου από κοινό ανθρακούχο χάλυβα και βάρος του ίδιου βαγονιού με το κέλυφός του κατασκευασμένου από HSLA

Steel		Weight, t
	Complete Car	
Mild carbon steel		20.91
High-strength low-alloy steel		16.15
	Car Shell Only	
Mild carbon steel		12.27
High-Strength low-alloy steel		7.55

Μία άλλη παρόμοια εφαρμογή, αποτελούν οι τροχοφόρες πλατφόρμες-οχήματα μεταφοράς (trailer). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την κατασκευή χαμηλών τροχοφόρων πλατφόρμων μεταφοράς βαρέος εξοπλισμού, η αντικατάσταση τμημάτων κοινού χάλυβα από τμήματα Χαλύβων Υψηλής Αντοχής, δύνатаι να επιτύχει εξοικονόμηση βάρους του οχήματος της τάξεως των 1100 kg (2500 lb).

Οι κύριες δοκοί μίας τέτοιας κατασκευής από κοινό ανθρακούχο χάλυβα κατασκευών, έχουν ίδιον βάρος της τάξεως των 230 kg/m (152 lb/ft). Οι δοκοί διατομής "I" από Χάλυβα Υψηλής Αντοχής που τους αντικαθιστούν, έχουν

βάρος της τάξεως των 124 kg/m (82 lb/ft). Αντίστοιχες αναλογίες βαρών ισχύουν και για άλλα μέρη της κατασκευής (πλάκες, bolsters , outriggers κλπ).

Κατασκευές υψηλής αντοχής σε φθορά

Όπως προαναφέρθηκε, οι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής επιδεικνύουν πολύ υψηλή αντοχή σε μηχανική φθορά. Μία τυπική εφαρμογή όπου απαντούν, είναι η κατασκευή αναμικτήρων σκυροδέματος (concrete mixers). Πιο συγκεκριμένα, Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τυμπάνων (κέλυφος, λεπίδες και θύρες τυμπάνου), καθώς και για την κατασκευή του πλαισίου στήριξης, προσδίδοντας στην όλη κατασκευή, υψηλή αντοχή σε μηχανική φθορά, υψηλή μηχανική αντοχή και χαμηλό βάρος.

Για τη συγκεκριμένη απαίτηση, οι ανθρακούχοι χάλυβες "Τύπου 8, 10 & 12" δύνανται να αντικατασταθούν από τους πολύ ανθεκτικότερους σε φθορά Μικροκραματωμένους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής "Τύπου 10, 12 & 14".

Μία συναφής εφαρμογή όπου απαιτείται μειωμένο βάρος και υψηλή αντοχή σε φθορά, είναι η κατασκευή ταινιών μεταφοράς (conveyor) εδαφικών υλικών και ορυκτών υλών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η χρήση Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής για την κατασκευή ταινίας μεταφοράς άνθρακα, επιτυγχάνει βάρος του κάθε τμήματος της ταινίας, της τάξεως των 82 kg - έναντι 110 kg στην περίπτωση χρήσεως κοινών χαλύβων.

4.12 Οικονομική διάσταση και μελλοντικές τάσεις των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής

Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η κατάλληλη εφαρμογή Χαλύβων Υψηλής Αντοχής συνεπάγεται εξοικονόμηση χρηματικών πόρων.

Στην περίπτωση κατασκευών στατικών καταπονήσεων, το αρχικό κόστος θα πρέπει να είναι υψηλό ώστε να δικαιολογείται το υψηλό αρχικό κόστος των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής.

Στην περίπτωση κινητών κατασκευών, το υψηλό αρχικό κόστος των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής, αντισταθμίζεται κατά τη διάρκεια του συνολικού χρόνου ζωής της κατασκευής.

Οι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής και ιδιαίτερος οι κατηγορίες με όριο διαρροής της τάξεως των 345 MPa, χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πλήθος εφαρμογών. Νεότερες εφαρμογές εμφανίζονται, βασισμένες στα υψηλά όρια διαρροής που φτάνουν τα 690 MPa . Μελλοντικά, θα απαιτηθούν βελτιώσεις στη σχεδίαση και στις κατασκευαστικές τεχνικές, ώστε να αξιοποιηθούν οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.

5. Κόπωση

5.1 Γενικά

Κόπωση καλείται η προοδευτικά επερχόμενη και εντοπισμένη αστοχία ενός υλικού το οποίο υποβάλλεται σε ταχεία περιοδικώς μεταβαλλόμενη φόρτιση. Το φαινόμενο προκαλεί εμφάνιση ρωγμών και τελικώς θραύση μετά από ένα δεδομένο αριθμό επαναλήψεων της φόρτισης (εναλλασσόμενη φόρτιση-αποφόρτιση). Η κόπωση θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνη για τις μεταλλικές κατασκευές, καθώς η θραύση επέρχεται σε απόλυτη τιμή τάσεως χαμηλότερη του ορίου θραύσεως και του ορίου διαρροής.

5.2 Κόπωση των μετάλλων

Εν γένει, ένα μεγάλο ποσοστό – άνω του 75% - των αστοχιών που παρατηρούνται σε μεταλλικά μηχανολογικά εξαρτήματα αποδίδεται στην αστοχία λόγω κόπωσης. Συνεπώς, καθώς η απόδοση των μηχανολογικών εξαρτημάτων αναβαθμίζεται συνεχώς, η ανάγκη κατανόησης των μηχανισμών που διέπουν το φαινόμενο της κόπωσης, καθίσταται ιδιαίτερα επιτακτική.

Κατά τη λειτουργία τους, πολλά μηχανολογικά μέρη υφίστανται χιλιάδες έως και εκατομμύρια μεταβολές των ασκούμενων τάσεων, κατά τη διάρκεια του συνολικού χρόνου ζωής τους.

Ένα υλικό που υφίσταται μηχανική τάση σταθερού μέτρου που εφαρμόζεται και απομακρύνεται με εναλλασσόμενο (χρονικά) τρόπο σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων, ή ένα υλικό που υφίσταται μονίμως μία μηχανική τάση μεταβαλλόμενου – μεταξύ δύο ακραίων τιμών – μέτρου, θα υποστεί θραύση σε τιμή τάσεως πολύ χαμηλότερη από την ονομαστική εφελκυστική του αντοχή. Αυτή η μορφή αστοχίας καλείται «αστοχία λόγω κόπωσης» (fatigue failure).

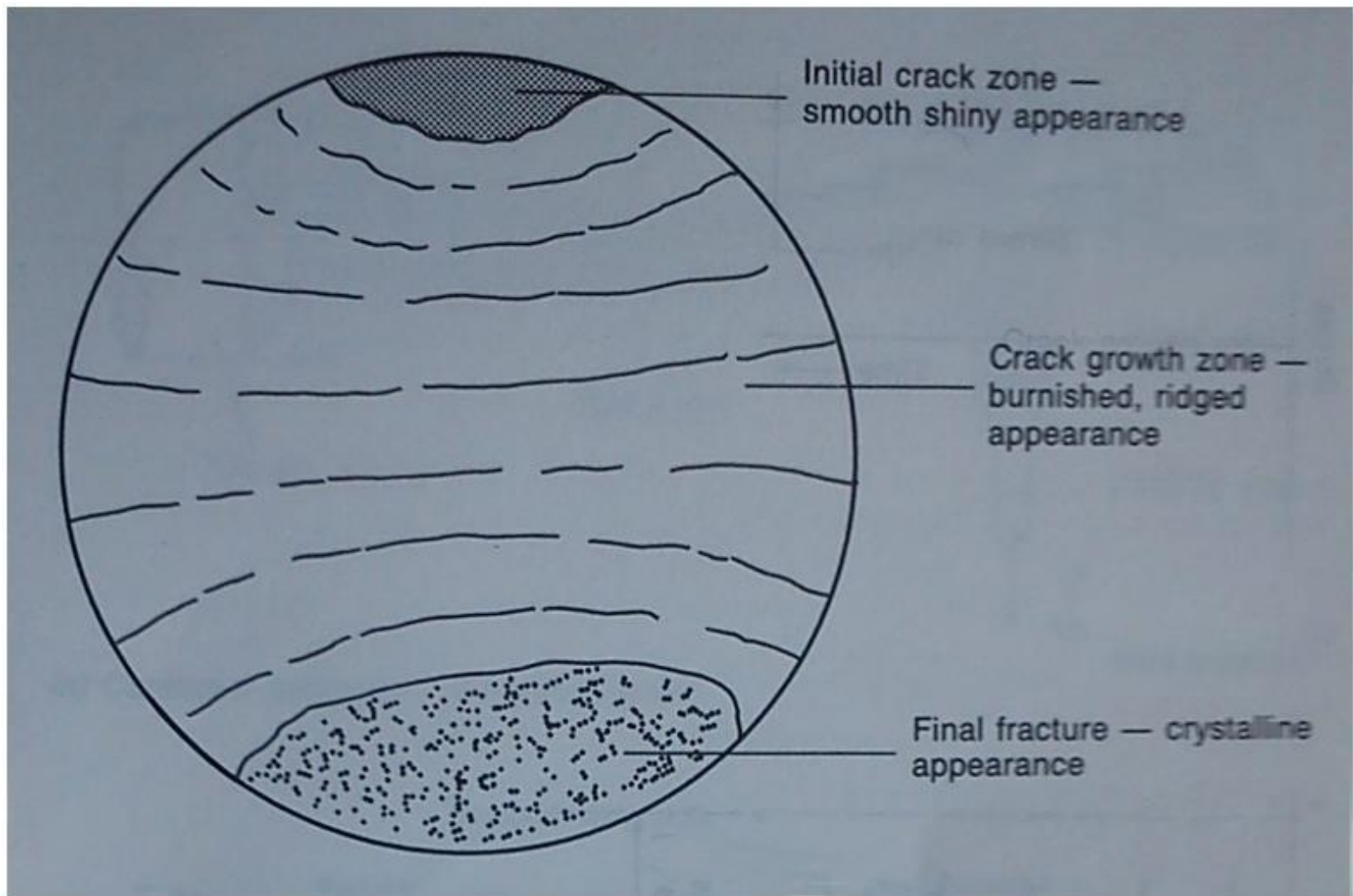
Η εναλλασσόμενη φύση της φόρτισης, οφείλεται στις συνθήκες λειτουργίας του εξαρτήματος. Ακολούθως, παρατίθενται ενδεικτικά κάποιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις κόπωσης:

- Κόπωση υφίσταται ένας άξονας μετάδοσης κίνησης ενός τροχοφόρου οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας περιστρέφεται ενώ παράλληλα κάμπτεται λόγω ιδίου βάρους. Συνεπώς, τμήματα της μάζας του υφίστανται εναλλάξ – λόγω της περιστροφής – εφελκυσμό και θλίψη.
- Κόπωση υφίστανται τα ελατήρια των βαλβίδων ενός εμβολοφόρου κινητήρα εσωτερικής καύσης λόγω κάμψεως (flexing) που οφείλεται στην εναλλασσόμενη βράχυνση και επαναφορά.
- Κόπωση υφίστανται οι άξονες (ημιαξόνια, άξονες μετάδοσης) των τροχοφόρων οχημάτων, καθώς δέχονται κραδασμούς που οφείλονται προκαλούνται από την τραχύτητα του οδοστρώματος.

Η αστοχία λόγω κόπωσης προκαλείται συνήθως λόγω κάποιας ρωγμάτωσης (fatigue crack) που ξεκινά από κάποια συγκέντρωση τάσεων. Η συγκέντρωση τάσεων δύναται να παρατηρηθεί σε περιοχές όπως, αιχμηρές ακμές (incipient crack), σημάδια μηχανουργικής κατεργασίας, ή επιφανειακές ρωγμές λόγω ελαττωματικής θερμικής κατεργασίας.

5.3 Επιφάνεια θραύσεως λόγω κόπωσης

Στην πλειοψηφία των θραύσεων που προκαλούνται από κόπωση, παρατηρείται μία χαρακτηριστική μορφή επιφάνειας θραύσεως. Στην ακόλουθη εικόνα 5.1, παρατίθεται σχηματικά μία τυπική επιφάνεια θραύσεως λόγω κόπωσης:



5.1 Τυπική επιφάνεια θραύσεως λόγω κόπωσης

Το σημείο εκκίνησης (point of origin) της αστοχίας διακρίνεται ως μία στιλπνή (smooth), επίπεδη, ελλειπτική περιοχή, στο άνω τμήμα της παραπάνω σχηματικής απεικόνισης.

Γύρω από αυτή εκτείνεται μία εκτεταμένη γυαλιστερή (burnished) ζώνη με ραβδώσεις. Αυτή η μορφολογία δημιουργείται από το τρίψιμο των επιφανειών θραύσεως που δημιουργούνται και εξαπλώνονται καθώς διαδίδεται – λόγω των εναλλασσόμενων φορτίσεων – η ρωγμή.

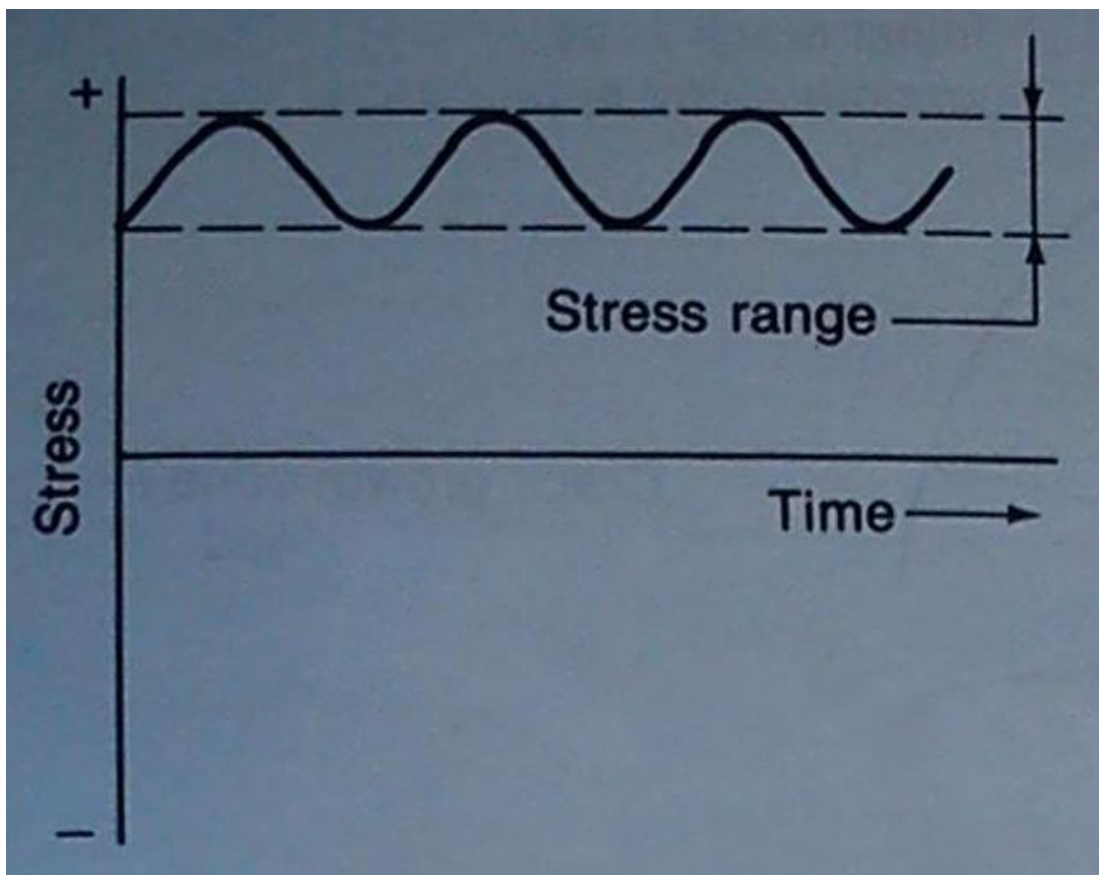
Η διάδοση της ρωγμής μειώνει συνεχώς την ενεργή διατομή του σώματος. Όταν η τιμή της διατομής λάβει μία κρίσιμη τιμή, το εξάρτημα δε δύναται πλέον να αντέξει τα φορτία σχεδίασης και συνεπώς θα αστοχήσει ακαριαία, αφήνοντας μία επιφάνεια θραύσεως "κρυσταλλικής μορφής". Η "κρυσταλλική" αυτή μορφή είναι ενδεικτική της ψαθυρής θραύσης και

οφείλεται στην πολύ υψηλή ταχύτητα πραγματοποίησης της τελικής θραύσεως. Η επιφάνεια της τελικής θραύσεως διακρίνεται στην κατώτατο τμήμα της παραπάνω σχηματικής απεικόνισης.

5.4 Μορφές ασκούμενων φορτίων που προκαλούν κόπωση

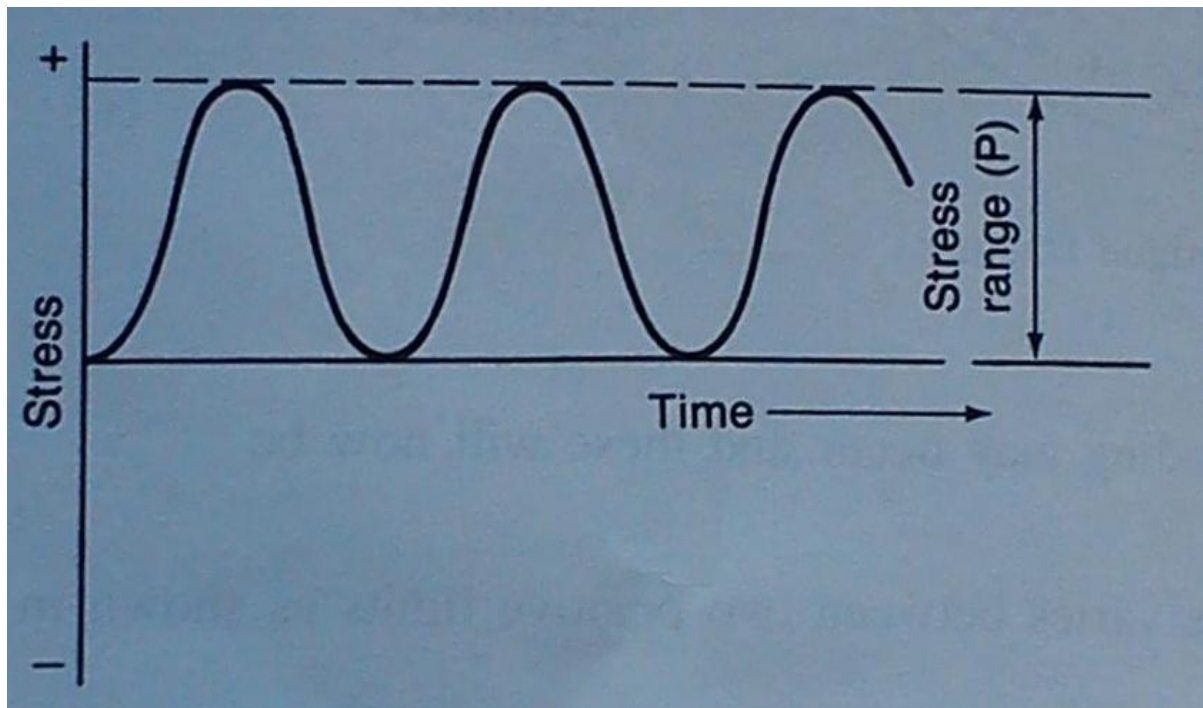
Η κόπωση των μετάλλων δύναται να προκληθεί από ποικίλων μορφών φορτία, που αποτελούν εν γένει τριγωνομετρικές συναρτήσεις του χρόνου. Ακολουθως, παρατίθενται επιγραμματικά οι τρεις τυπικότερες εξ'αυτών:

Κυμαινόμενη φόρτιση (Fluctating load) : Πρόκειται για χρονικώς μεταβαλλόμενη φόρτιση ημιτονοειδούς μορφής, με μέτρο που μεταβάλλεται εντός ενός δεδομένου εύρους τιμών (ελάχιστη και μέγιστη τιμή). Η μορφή της, διακρίνεται στο ακόλουθο σχήμα 5.2 :



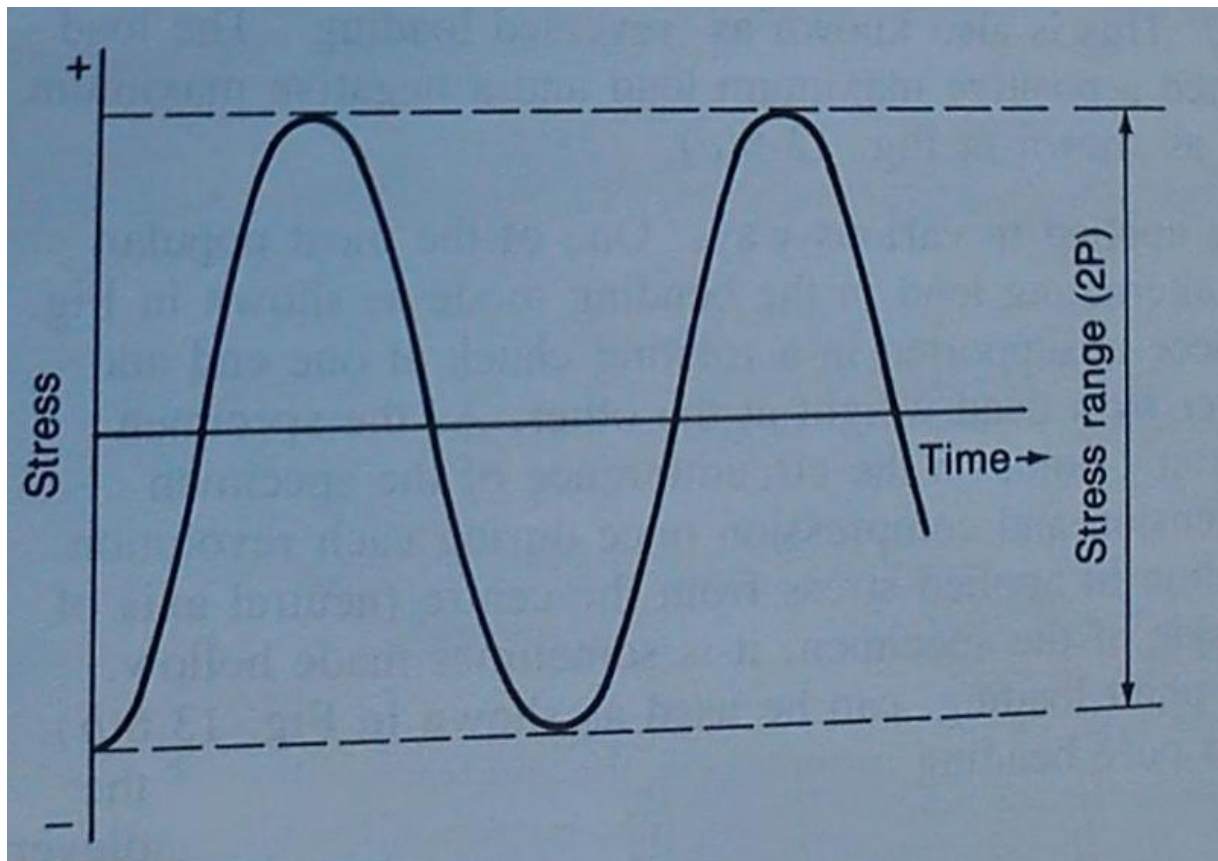
5.2 Κυμαινόμενη φόρτιση (Fluctating load)

Παλλόμενη φόρτιση (Pulsating load) : Καλείται αλλιώς και "Επαναλαμβανόμενη φόρτιση" ("Repeated load"). Πρόκειται για χρονικώς μεταβαλλόμενη φόρτιση ημιτονοειδούς μορφής, με μέτρο που μεταβάλλεται μεταξύ του μηδέν και μίας θετικής τιμής. Η μορφή της, διακρίνεται στο ακόλουθο σχήμα 5.3 :



5.3 Παλλόμενη φόρτιση (Pulsating load)

Εναλλασσόμενη φόρτιση (Alternating load) : Καλείται αλλιώς και "Αντίστροφη φόρτιση" ("Reversed loading"). Πρόκειται για χρονικώς μεταβαλλόμενη φόρτιση ημιτονοειδούς μορφής, με μέτρο που μεταβάλλεται μεταξύ μίας μέγιστης θετικής και μίας ελάχιστης αρνητικής τιμής. Η μορφή της, διακρίνεται στο ακόλουθο σχήμα 5.4 :



5.4 Εναλλασσόμενη φόρτιση (Alternating load)

5.5 Δοκιμές Κόπωσης

Οι πρώτες πειραματικές μελέτες για τη συμπεριφορά των μετάλλων σε κόπωση πραγματοποιήθηκαν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα από τον Wöhler. Με την ανάπτυξη του οπτικού μικροσκοπίου, των ακτινών Χ και του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, η κόπωση ερευνήθηκε εκτενώς. Ωστόσο, ακόμη και σήμερα η εκτίμηση της διάρκειας ζωής των κατασκευών που υφίστανται κόπωση, βασίζεται στη στατιστική.

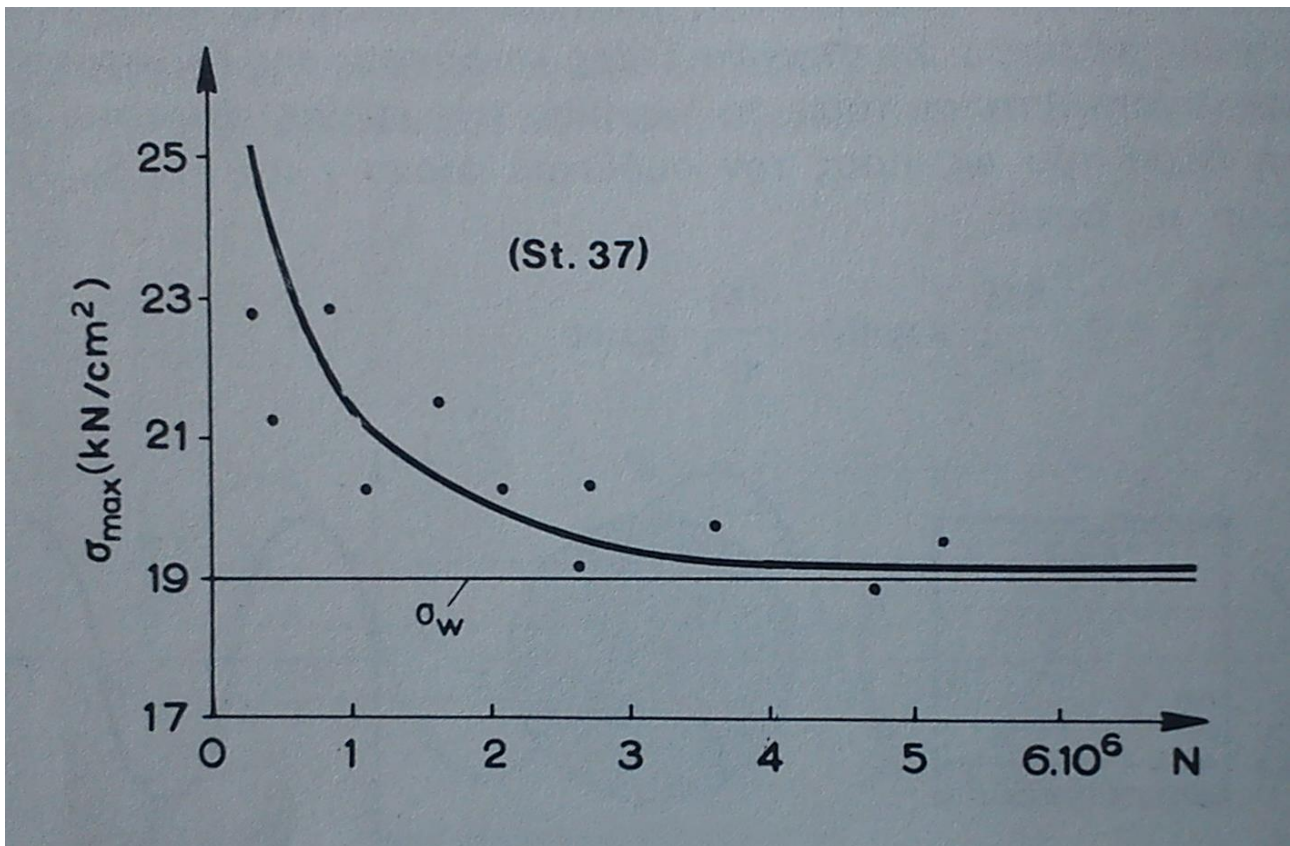
Στην απλούστερη μορφή της δοκιμής κόπωσης η εφαρμοζόμενη τάση αποτελεί τριγωνομετρική συνάρτηση του χρόνου. Η συνήθης τάξη μεγέθους των περιόδων (επαναλήψεων) της επαναλαμβανόμενης φόρτισης είναι 100 – 10000 επαναλήψεις.

Το υπό εξέταση σύστημα είναι συνήθως μία κυλινδρική ράβδος που στρέφεται περί τον άξονά της. Λόγω ιδίου βάρους η ράβδος λυγίζει και συνεπώς ένα τυχαίο σημείο της μεταβαίνει διαδοχικά από τη θλιβόμενη στην εφελκυσόμενη περιοχή της ράβδου, με αποτέλεσμα η τάση που υφίσταται να μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο.

Ο υπολογισμός της αντοχής του υλικού σε κόπωση επιτυγχάνεται μέσω της ακόλουθης διαδικασίας:

Ένας αριθμός όμοιων δοκιμών από το εν λόγω υλικό υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη καταπόνηση με την ίδια πάντα περίοδο αλλά με διαφορετική μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση. Έτσι υπολογίζεται ο αριθμός των περιόδων φόρτισης N που απαιτείται για να θραυστεί το εκάστοτε δοκίμιο που υφίσταται την αντίστοιχη φόρτιση. Βάσει των εξαγόμενων αποτελεσμάτων τιμών (μέγιστης εφαρμοζόμενης τάσεως σ_{max} – Αριθμού επαναλήψεως N), χαράσσεται η καμπύλη αντοχής σε κόπωση του υλικού, γνωστή και ως «καμπύλη Wöhler» ή καμπύλες «S-N».

Στην ακόλουθη εικόνα 5.5, παρατίθεται ένα διάγραμμα S-N για χάλυβα St. 37 :



5.5 Διάγραμμα S-N χάλυβα St. 37

Η παραπάνω καμπύλη χαράσσεται από αποτελέσματα χαλύβδινων δοκιμίων που υφίστανται εναλλασσόμενη (ημιτονοειδώς ως προς το χρόνο) τάση μέγιστης τιμής $\pm \sigma_1$, δηλαδή $\sigma_{\min} = -\sigma_1$ και $\sigma_{\max} = +\sigma_1$. Παρατηρείται ότι ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων της φόρτισης που επιφέρει τη θραύση (N), αυξάνεται όσο μειώνεται η απόλυτη τιμή σ_1 . Επιπλέον, όσο το $N \rightarrow \infty$, η καμπύλη S(N) τείνει ασυμπτωτικά σε μία τιμή $S = \sigma_w$. Συνεπώς, για μία δεδομένη τιμή της σ_1 , η διάρκεια ζωής του δοκιμίου απειρίζεται και η θραύση από κόπωση καθίσταται αδύνατη. Αυτή η τάση καλείται όριο κόπωσης του υλικού και αφορά συγκεκριμένη διαδικασία φόρτισης. Η τιμή σ_w προσεγγίζεται πρακτικώς σε μία τιμή $N = N_1$ που για τα συνήθη μεταλλικά κράματα έχει την ακόλουθη τάξη μεγέθους :

Χάλυβες : $N_1 \approx 4 \cdot 10^6$

Κράματα Al : $N_1 \approx 400 \cdot 10^6$

Χυτοχάλυβες : $N_1 \approx 10 \cdot 10^6$

Στην περίπτωση που στην εναλλασσόμενη φόρτιση προστεθεί και ένα σταθερό φορτίο (πχ ίδιον βάρος ή ένα αξονικό φορτίο), τότε η μέση τάση που υφίσταται το υπό εξέταση σώμα είναι μη μηδενική και η καμπύλη μετατοπίζεται κατακόρυφα.

Για την αποφυγή εμφάνισης φαινομένων πλαστικότητας, πρέπει σε κάθε περίπτωση η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση στο δοκίμιο, να είναι μικρότερη του ορίου διαρροής.

Τα σημεία (S,N) του παραπάνω διαγράμματος είναι ενδεικτικά της διασποράς που παρατηρείται στα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης. Γενικότερα στη μελέτη της κόπωσης η στατική υπεισέρχεται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό συγκριτικά με τις υπόλοιπες καταπονήσεις.

Οι συνήθεις παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση εν γένει, είναι η διακύμανση του φορτίου, η συγκέντρωση τάσεων, η συχνότητα φόρτισης, οι διαστάσεις του δοκιμίου και οι συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, διαβρωτικό περιβάλλον) . Η συγκέντρωση τάσεων μπορεί να προκληθεί και από επιφανειακές ατέλειες, συνεπώς η χαμηλή ποιότητα επιφανείας και το σχήμα των δοκιμίων (παρουσία εγκοπών, ακμών κλπ) δύνανται να επηρεάζουν δυσμενώς την αντοχή σε κόπωση.

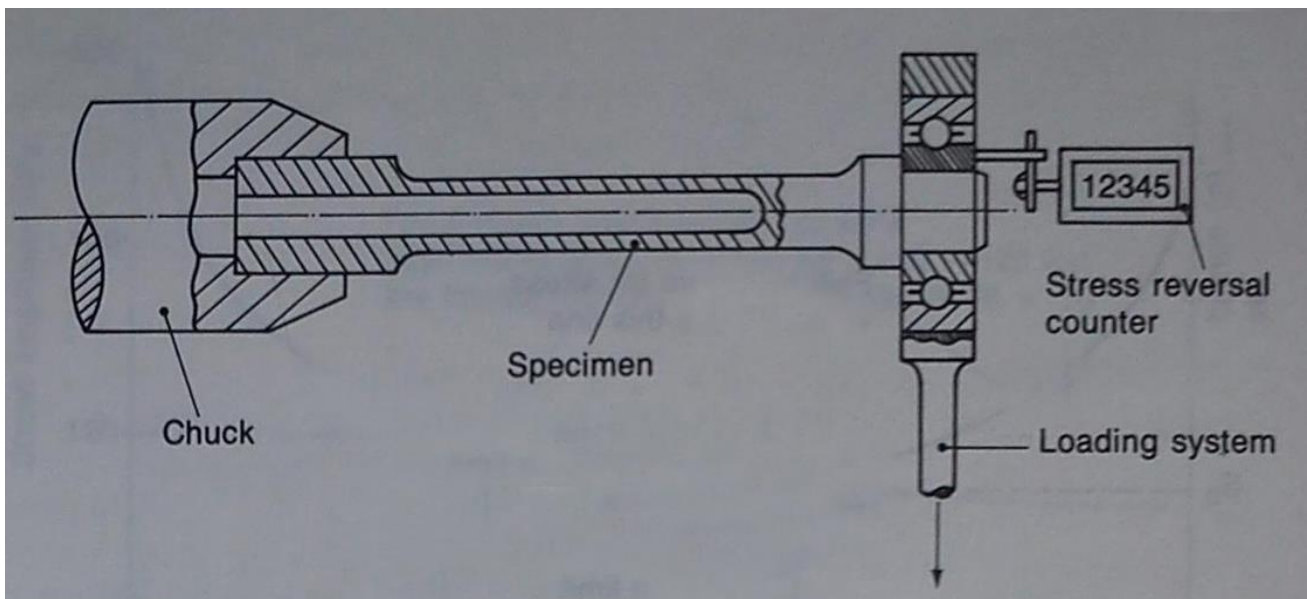
Συνήθη συστήματα – σώματα όπου παρατηρείται κόπωση είναι οι περιστρεφόμενες άτρακτοι, οι κατασκευές που εκτίθενται σε χρονικά μεταβαλλόμενη ροή ρευστών (ανέμου, υδάτων), τα πλοία και τα αεροσκάφη λόγω των δονήσεων από του κινητήρες, σώματα υπό ταλάντωση.

5.5.1 Συνήθεις δοκιμές κόπωσης

Η συμπεριφορά των υλικών σε κόπωση μελετάται μέσω πειραματικών δοκιμών. Τα δοκίμια υποβάλλονται σε αξονική, καμπτική, στρεπτική ή σύνθετη επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Η φόρτιση δύναται να είναι μεταβαλλόμενη συναρτήσει του χρόνου, είτε κατά τη διεύθυνση (εφελκυσμός – θλίψη – εφελκυσμός), είτε κατά μέτρο, είτε και τα δύο.

Εν γένει, διατίθεται πλήθος δοκιμών συμπεριφοράς ενός υλικού σε κόπωση. Η διατιθέμενη πληθώρα, αφορά τόσο την πειραματική διάταξη όσο και τη μορφή του ασκούμενου φορτίου.

Μία εκ των συνηθέστερων μεθόδων, γνωστή ως " Cantilever loading ", αποτελεί η εφαρμογή εναλλασσόμενου φορτίου σε δοκίμιο που υφίσταται λυγισμό. Η συγκεκριμένη διάταξη απεικονίζεται σχηματικά στην ακόλουθη εικόνα 5.6 :

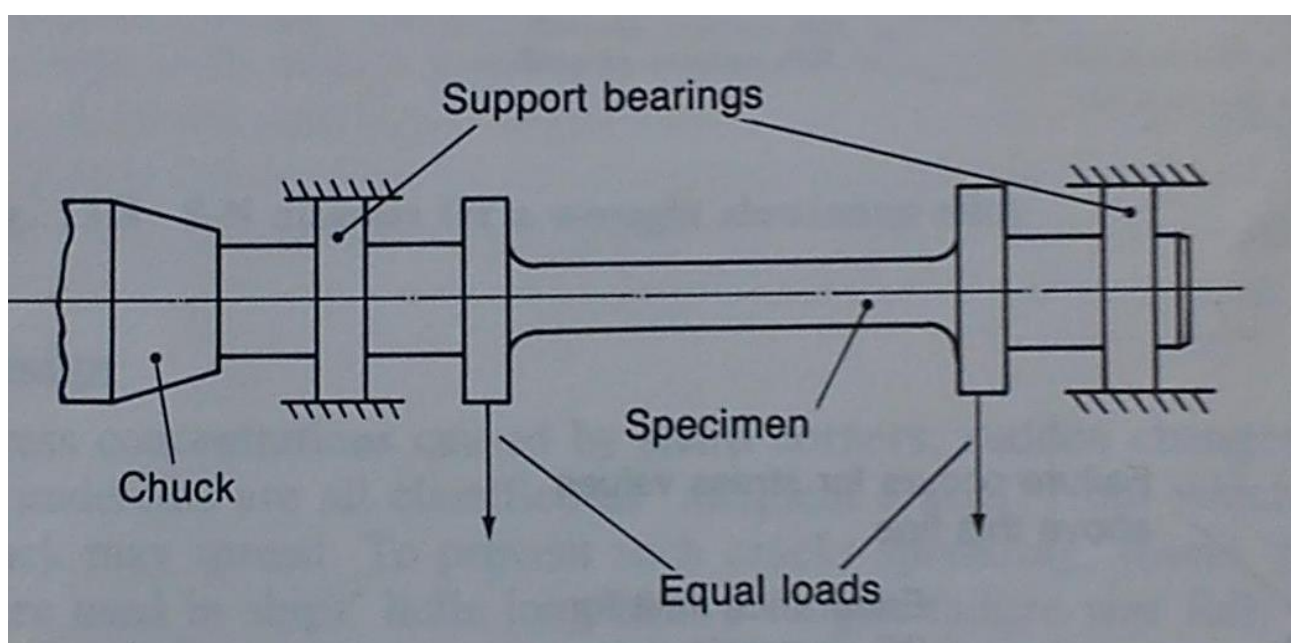


5.6 Δοκιμή κόπωσης "Cantilever loading"

Στη συγκεκριμένη διάταξη το δοκίμιο προσδένεται στο ένα του άκρο σε περιστρεφόμενο σφικτήρα και στο ελεύθερο άκρο του προσδένεται κατακόρυφο φορτίο σταθερού μέτρου. Συνεπώς το δοκίμιο συμπεριφέρεται ως καμπτόμενη δοκός. Καθώς το δοκίμιο κάμπτεται και περιστρέφεται

ταυτόχρονα, όλα τα σημεία της περιφέρειάς του υφίστανται τάση που εναλλάσσεται από εφελκόμενη σε θλιβόμενη, εφόσον η κυρτή πλευρά τανύεται και η κοίλη θλίβεται. Για να επιτευχθεί μείωση στην απόκλιση της εφαρμοζόμενης τάσης από το κέντρο (ουδέτερος άξονας λυγισμού) προς το εξωτερικό του δοκιμίου, επιλέγεται κοίλο (μη συμπαγές) δοκίμιο.

Μία εξίσου διαδεδομένη δοκιμή συμπεριφοράς ενός υλικού σε κόπωση, αποτελεί η "φόρτιση τεσσάρων σημείων" ("four - point loading" ή "beam loading"). Η διάταξη της εν λόγω δοκιμής απεικονίζεται σχηματικά στην ακόλουθη εικόνα 5.7 :



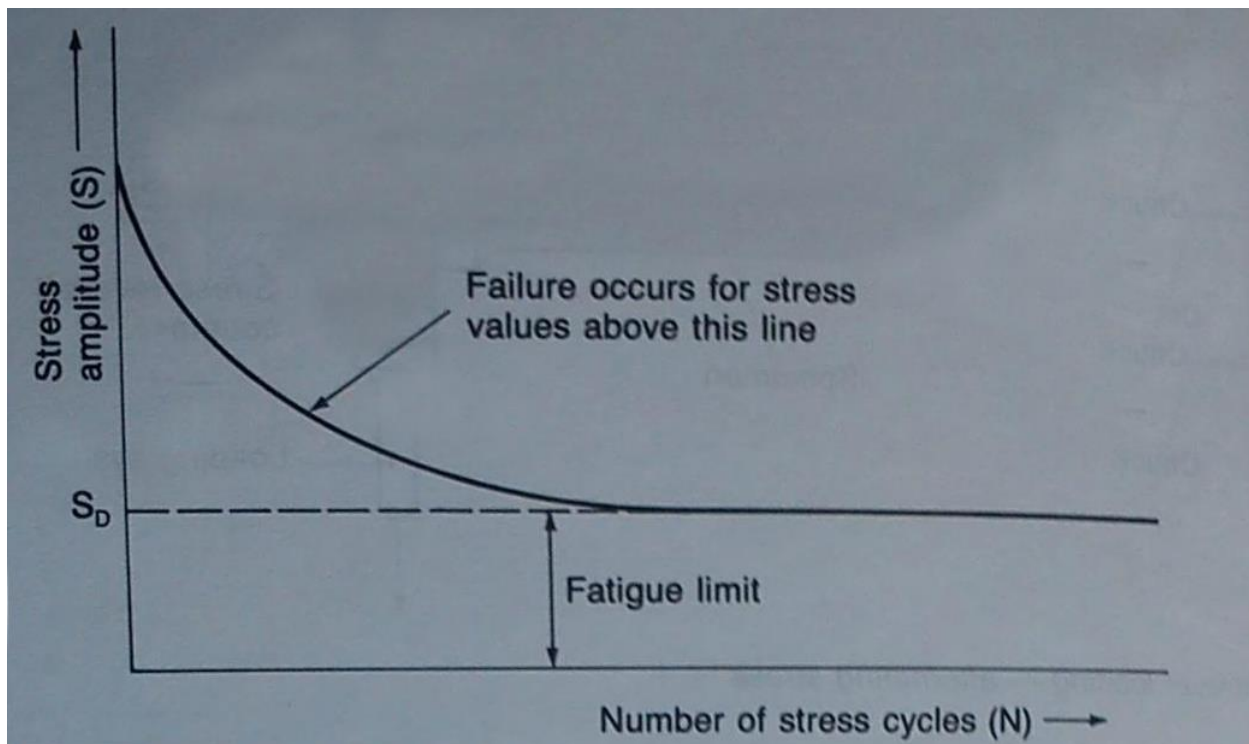
5.7 Δοκιμή κόπωσης "Four - point loading"

Η συγκεκριμένη διάταξη παρέχει το πλεονέκτημα της απαλοιφής των διαμηθικών τάσεων που απαντούν στο δοκίμιο της δοκιμής "Cantilever loading", με αποτέλεσμα το κεντρικό τμήμα του δοκιμίου να δέχεται μόνο καμπτική ροπή. Η μηχανή της δοκιμής "four - point loading" φέρει μετρητική διάταξη (στροφόμετρο) που μετρά τον αριθμό των εναλλαγών τάσεως, καθώς και μηχανισμό που σταματά την περιστροφή του δοκιμίου όταν αυτό αστοχήσει.

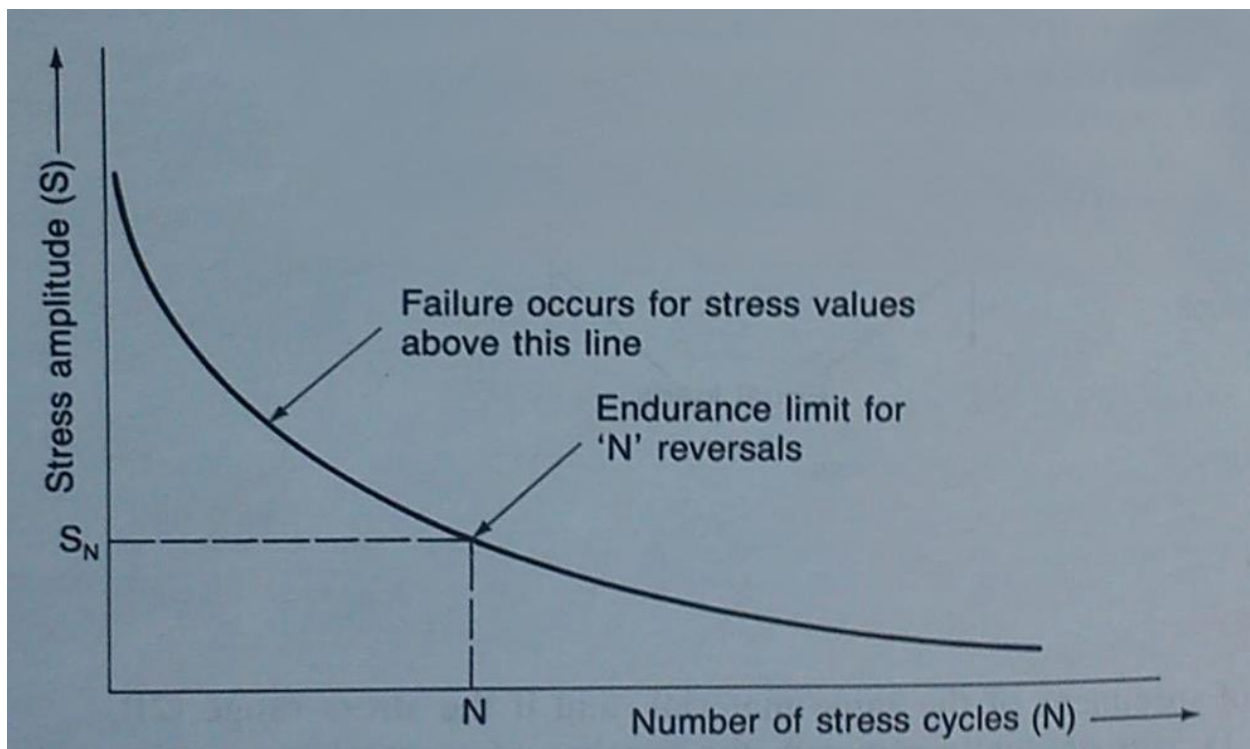
5.6 Διάγραμμα S-N (Stress reversal curve S-N)

Το διάγραμμα S – N προκύπτει από δεδομένα που λαμβάνονται από μεγάλο πλήθος δοκιμών, στις οποίες υποβάλλεται αντίστοιχα μεγάλο πλήθος δοκιμίων του ίδιου (του προς εξέτασιν) υλικού. Σε αυτές τις δοκιμές, το εύρος τιμών των – τριγωνομετρικώς εναλλασσόμενων – εφαρμοζόμενων τάσεων (S), μειώνεται σταδιακά. Η μεταβλητή "N" συμβολίζει τον αριθμό των περιστροφών (εναλλαγών τάσης) που απαιτούνται για να προκαλέσουν αστοχία λόγω κόπωσης, όταν το δοκίμιο υφίσταται συγκεκριμένη τάση εύρους S.

Στις δύο ακόλουθες εικόνες 5.8 και 5.9, παρατίθενται δύο τυπικής μορφής διαγράμματα S – N, που ελήφθησαν από δοκίμια τυπικού χάλυβα και τυπικού μη-σιδηρούχου κράματος:



5.8 Διάγραμμα S – N τυπικού χάλυβα



5.9 Διάγραμμα $S - N$ τυπικού μη – σιδηρούχου κράματος

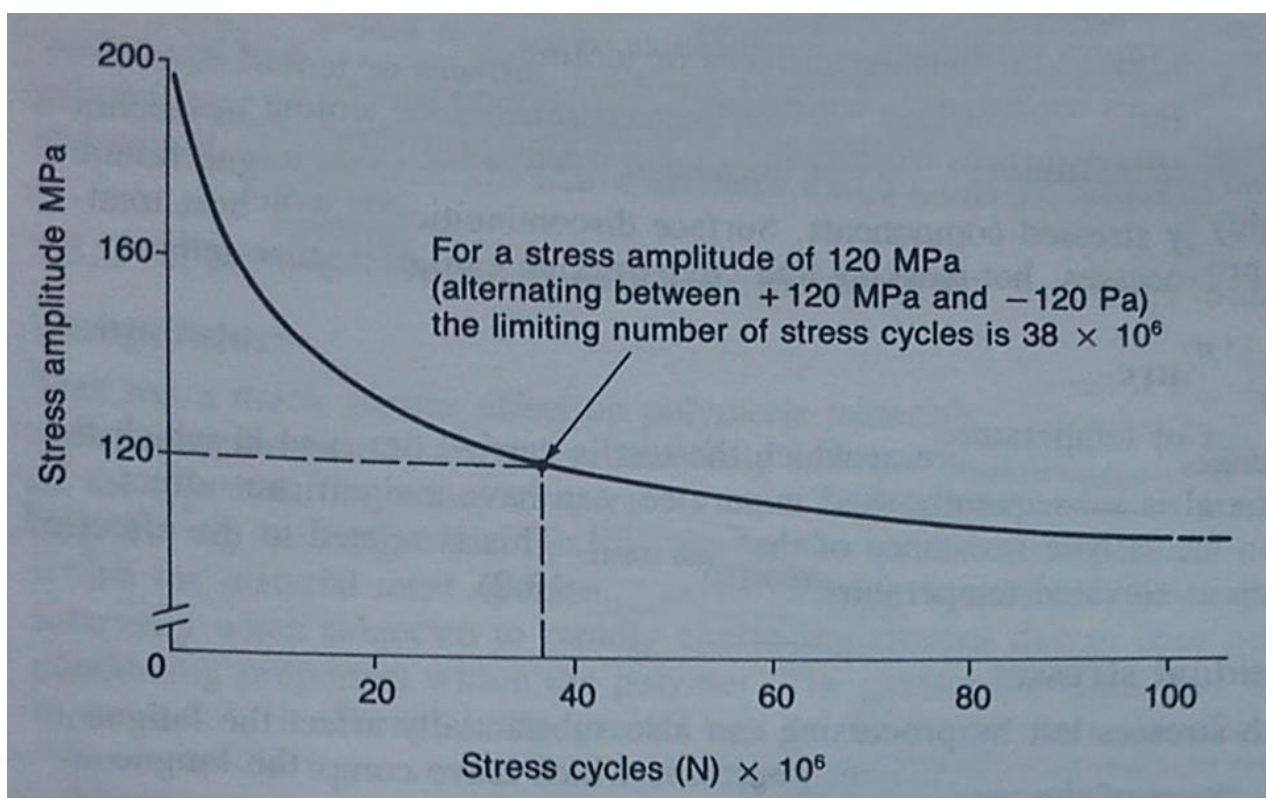
Η τιμή S_D στην οποία συγκλίνει ασυμπτωτικά η καμπύλη $S(N)$ του χάλυβα, καλείται "όριο κοπώσεως" (Fatigue limit) και είναι η τιμή **εύρους** της εφαρμοζόμενης τάσης, για την οποία το δοκίμιο δεν αστοχεί ποτέ, ακόμη και όταν ο αριθμός των περιστροφών (N) απειρίζεται. Επειδή η φύση της δοκιμής δεν επιτρέπει πρακτικά τον απειρισμό των εναλλαγών, ως αντοχή σε κόπωση λαμβάνεται η τιμή του S για την οποία δεν έχει επέλθει αστοχία μετά από 107 εναλλαγές τάσης.

Για κάποια υλικά, όπως τα μη-σιδηρούχα κράματα, το όριο κοπώσεως δεν είναι πρακτικώς εφαρμόσιμο. Για αυτά τα υλικά εισάγεται το "όριο αντοχής" (Endurance limit) S_N . Αυτό προσδιορίζει το μέγιστο **πλάτος** εφαρμοζόμενης τάσης που δύναται να αντέξει το δοκίμιο, για N εναλλαγές τάσης. Στην ουσία πρόκειται για την εκάστοτε τιμή του S (που αντιστοιχεί σε μία αντίστοιχη τιμή N), που ανήκει στην καμπύλη $S(N)$.

Οι καμπύλες $S(N)$ των μη-σιδηρούχων κραμάτων, έχουν εν γένει τη μορφή που διακρίνεται στην παραπάνω εικόνα. Καθώς αυτά τα υλικά απαντούν σε κρίσιμες εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας, η μέριμνα που δίδεται

στη συμπεριφορά τους σε κόπωση, είναι αυξημένη. Ενδεικτικά αναφέρονται τα ελαφρά κράματα που χρησιμοποιούνται ως υλικό κατασκευής τμημάτων αεροναυπηγικών κατασκευών. Τα τμήματα αυτά, λόγω του κρίσιμου ρόλου που επιτελούν, αντικαθίστανται σε ένα δεδομένο αριθμό ωρών πτήσεως, που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο αριθμό εναλλαγών φόρτισης – ακόμη και όταν δεν υπάρχουν ορατά σημάδια φθοράς.

Ακολούθως, παρατίθεται ένα τυπικό διάγραμμα S-N ενός εμπορικού κράματος αλουμινίου ("duralumin"):



5.10 Διάγραμμα S – N κράματος Al ("duralumin")

Όπως παρατηρείται, στην περίπτωση του "duralumin", για πλάτος εφαρμοζόμενης τάσης 120 MPa, το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο κύκλων (εναλλαγών) προς αποφυγήν αστοχίας λόγω κόπωσης, είναι $S_N (S=120 \text{ MPa}) = 38 \cdot 10^6$ κύκλοι.

Συνοψίζοντας θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα ακριβή αποτελέσματα S, N που συνιστούν τις καμπύλες S-N ενός υλικού, εξαρτώνται άμεσα από τον τύπο της μηχανής και τη γενικότερη διάταξη που χρησιμοποιείται κατά τις

δοκιμές. Ωστόσο, παρεμφερείς συνθήκες δοκιμών δίδουν παρεμφερή αποτελέσματα και εν γένει οι καμπύλες $S(N)$ της πλειοψηφίας των μεταλλικών υλικών, είναι της παραπάνω μορφής.

5.7 Θραύση λόγω κόπωσης

Η αστοχία ξεκινά με την εμφάνιση μίας μικρορωγμής σε κάποια ατέλεια του μετάλλου. Η ατέλεια ενδεχομένως να αποτελεί θέση συγκέντρωσης τάσεως λόγω γεωμετρίας (πχ εγκοπή ή ακμή), ατέλεια κατεργασίας κλπ. Η μικρορωγμή διαδίδεται και μεγεθύνεται σε κάθε κύκλο φόρτισης.

Συνήθως η επιφάνεια θραύσεως από κόπωση έχει τα χαρακτηριστικά της όλκιμης θραύσης, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που λαμβάνει χώρα. Σπανιότερα, η κόπωση δύναται να προκληθεί και από εσωτερικές και μη ορατές ρωγμές που διαδίδονται στο σώμα και μειώνουν την ενεργή (μη ρωγματωμένη) διατομή του, προκαλώντας ξαφνική θραύση όταν αυτή λάβει μία κρίσιμη τιμή. Σε αυτήν την περίπτωση η επιφάνεια θραύσεως είναι κατά κανόνα η τυπική της ψαθυρής θραύσης.

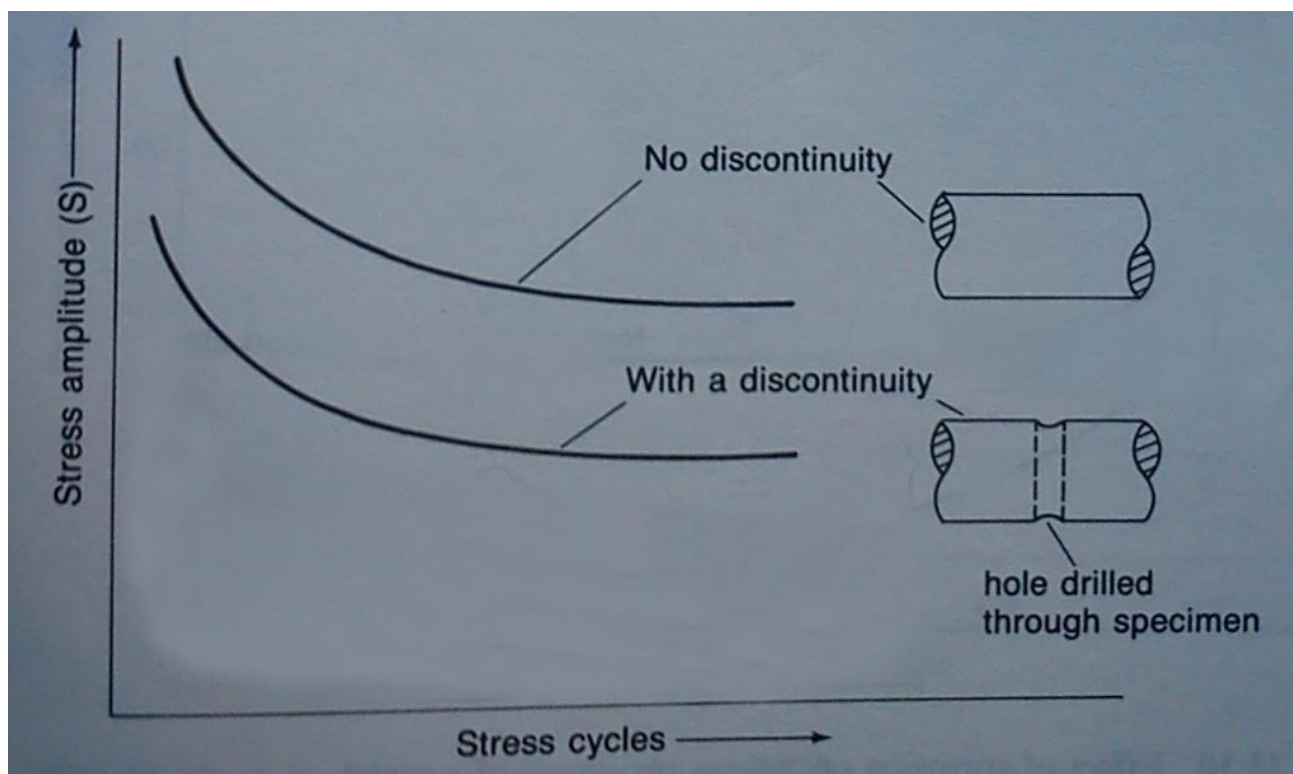
5.8 Παράγοντες που επηρεάζουν την κόπωση των μετάλλων

Υπάρχει ένα πλήθος παραγόντων που επηρεάζει την αντοχή των μετάλλων σε κόπωση. Ακολούθως, παρατίθενται επιγραμματικά οι κυριότεροι εξ'αυτών:

5.8.1 Σχεδιασμός

Η παρουσία σε ένα μεταλλικό σώμα οξείων γεωμετρικών χαρακτηριστικών (οξείες γωνίες και ακμές), απότομων μεταβολών της διατομής και γεωμετρικών εσοχών (undercuts), προκαλεί συγκεντρώσεις τάσεως στο περιβάλλον αυτών των χαρακτηριστικών. Αυτές οι συγκεντρώσεις τάσεως αποτελούν εν δυνάμει γενεσιουργά αίτια ρωγμών (incipient cracks), από τις οποίες δύναται να διαδοθεί μία ρωγμή κόπωσης.

Στην ακόλουθη εικόνα 5.11, διακρίνεται σαφώς η δυσμενής επίδραση της παρουσίας ατελειών στην αντοχή των μετάλλων σε κόπωση. Πιο συγκεκριμένα, παρατίθεται η μεταβολή του διαγράμματος S-N σε ένα χαλύβδινο δοκίμιο, λόγω της παρουσίας ασυνέχειας στη μάζα του (υπό μορφή διαμπερούς οπής, που αναπτύσσεται σε διεύθυνση εγκάρσια ως προς το διαμήκη άξονα συμμετρίας του κυλινδρικού δοκιμίου) :



5.11 Επίδραση ασυνέχειας στη συμπεριφορά ενός μετάλλου σε κόπωση

Παρατηρείται ότι η παρουσία της μικρής οπής διαμέσου του χαλύβδινου δοκιμίου, συνεπάγεται συγκέντρωση τάσεων που δύναται να μειώσει το "όριο αντοχής" SN κατά ένα τρίτο.

5.8.2 Ποιότητα επιφανείας (Surface finish)

Εν γένει, εκδορές ή σημάδια εργαλείων μηχανουργικής κατεργασίας σε επιφάνειες υψηλής ποιότητας ("φινιρίσματος") εξαρτημάτων συνιστούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων. Αυτές οι συγκεντρώσεις τάσεων, δύνανται να οδηγήσουν σε αστοχία λόγω κόπωσης, ιδιαίτερα εάν τα εν λόγω

εξαρτήματα λειτουργούν υπό καθεστώς αυξημένων τάσεων. Ομοίως, επιφανειακές ασυνέχειες που είναι αποτέλεσμα θερμικών κατεργασιών και μηχανικών μορφοποιήσεων (εν ψυχρώ ή εν θερμώ), δύνανται να αποτελέσουν επίσης αιτία αστοχίας λόγω κόπωσης.

5.8.3 Θερμοκρασία

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιείται μία δοκιμή συμπεριφοράς σε κόπωση, καθώς και της θερμοκρασίας λειτουργίας ενός εξαρτήματος, δύνανται να έχουν μεγάλη επίδραση στην αντίσταση ενός υλικού σε κόπωση. Αυτή η επίδραση σχετίζεται κυρίως με το φαινόμενο του ερπυσμού (creep) των μετάλλων στις υψηλές θερμοκρασίες.

5.8.4 Παραμένουσες τάσεις

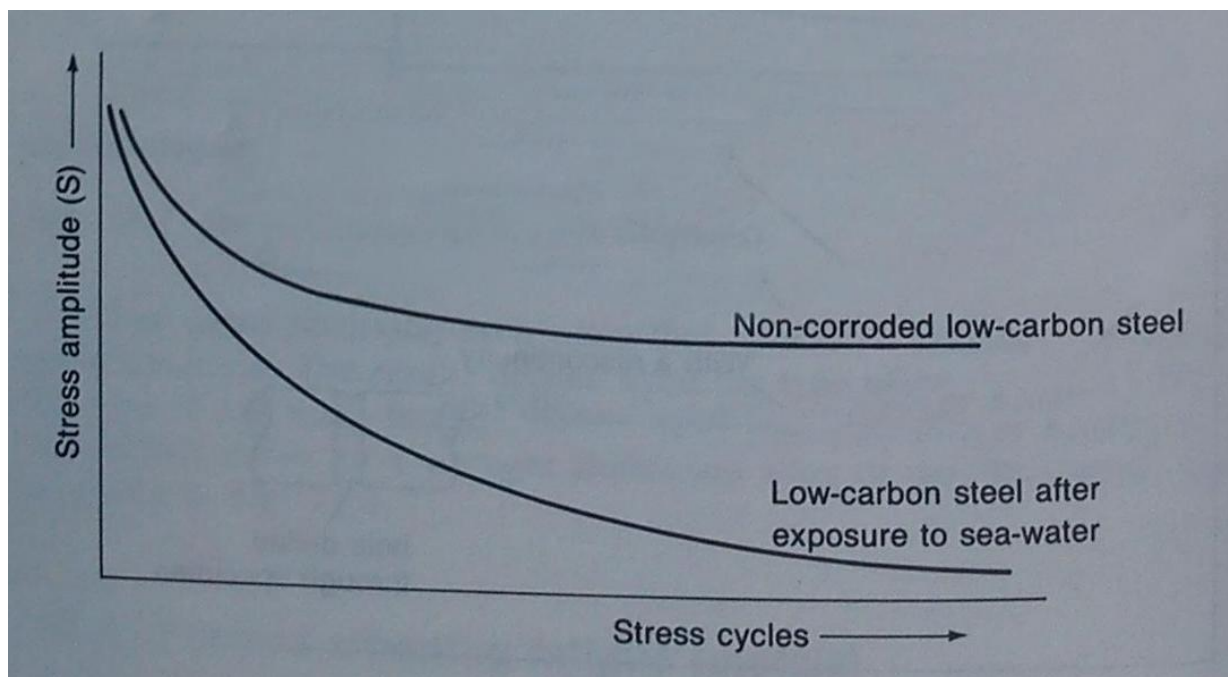
Οι παραμένουσες τάσεις που απαντούν στη μάζα ενός μεταλλικού εξαρτήματος ως αποτέλεσμα παλαιότερων (θερμομηχανικών) κατεργασιών, δύνανται να επηρεάσουν σημαντικά την αντίστασή του σε κόπωση. Εν γένει, κατεργασίες που αφήνουν θλιπτικές παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια του σώματος, βελτιώνουν την αντίστασή του σε κόπωση. Αντιθέτως, κατεργασίες που αφήνουν εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις στην επιφάνειά του, μειώνουν την αντίστασή του σε κόπωση. Στη δεύτερη περίπτωση, μία κατάλληλη αποτατική κατεργασία, όπως η αποτατική ανόπτηση, δύναται να εξουδετερώσει και να απομακρύνει τις εσωτερικές τάσεις.

5.8.5 Διάβρωση

Η διάβρωση ενός μετάλλου μπορεί να λάβει χώρα σε διάφορες συνθήκες (λειτουργίας, ή αποθήκευσης) και να αφορά, είτε ατμοσφαιρική διάβρωση, είτε οξειδωση λόγω υψηλής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μίας θερμικής κατεργασίας, είτε λόγω αλάτων (saline attack) στην περίπτωση θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Η επίδραση της διάβρωσης ενός μετάλλου στην αντοχή του σε κόπωση είναι ιδιαίτερα έντονη. Στην ακόλουθη εικόνα 5.12, παρατίθενται σχηματικά οι

καμπύλες S-N ενός κοινού ανθρακούχου χάλυβα πριν και μετά την έκθεσή του σε θαλασσινό νερό:



5.12 Επίδραση της διάβρωσης στην αντίσταση ενός μετάλλου σε κόπωση

Όπως διακρίνεται, πριν την έκθεσή του μετάλλου στο θαλασσινό νερό, η καμπύλη S(N) συνέκλινε σαφώς σε ένα όριο κοπώσεως S_D κάτω από το οποίο η κόπωση δε θα δύνατο να λάβει χώρα. Ωστόσο, μετά την έκθεσή του στο νερό, δε δύναται να προσδιοριστεί σαφώς κάποιο όριο κοπώσεως και απαιτείται προσδιορισμός ενός όριο αντοχής" (Endurance limit) S_N .

Επιπλέον, μετά την έκθεση στο θαλάσσιο περιβάλλον, παρατηρείται δραστική μείωση των τιμών του εύρους της εναλλασσόμενης τάσης S, για δεδομένη τιμή εναλλαγών N.

Επιφανειακή κατεργασία γαλβανισμού (επιψευδαργύρωση) του μετάλλου, βάψιμο πριν την έκθεσή του σε θαλάσσιο περιβάλλον και εφαρμογή αντιδιαβρωτικών μεθόδων εν γένει, δύναται να αποτρέψουν τη διάβρωση και να επαναφέρουν τα τυπικά χαρακτηριστικά κόπωσης στο υλικό.

6. Γενικά συμπεράσματα

Από τα παραπάνω, προκύπτουν κάποια γενικά συμπεράσματα που αφορούν τους Μικροκραματωμένους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής και ερμηνεύουν επαρκώς την υψηλή βιομηχανική τους σημασία, καθώς και το εύρος του πεδίου εφαρμογής τους.

Οι Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής συνιστούν μία κατηγορία χαλύβων με αξιοσημείωτες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες αποδίδονται στην παρουσία και δράση των κραματικών στοιχείων που απαντούν στη μάζα τους και κυρίως στο πυρίτιο, στο μαγγάνιο και στο χαλκό. Οι χάλυβες αυτού του τύπου επιδεικνύουν όριο διαρροής που δύναται να υπερβεί τα 758 MPa .

Πέραν των παραπάνω χαρακτηριστικών, οι Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής επιδεικνύουν εν γένει πολύ υψηλή ειδική αντοχή, εξαιρετική συγκολλησιμότητα – που οφείλεται στη μειωμένη συγκέντρωση άνθρακα – πολύ υψηλή αντοχή σε μηχανική φθορά, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση.

Οι παραπάνω ιδιότητες τους καθιστούν την ενδεδειγμένη επιλογή για πλήθος εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων και των ναυπηγικών.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

"Kirk – Othmer Encyclopedia of chemical technology, Vol.22", John Willey & Sons

Γ.Δ. Παπαδημητρίου, "Γενική Μεταλλογνωσία II - Τα Κράματα", Ε.Μ.Π., Αθήνα 1993

"Metals Handbook – Vol.8: Metallography, Structures and Phase diagrams", ASM

"Metals Handbook – Vol.1: Properties and selection of metals", ASM

R. L. Timings, "Engineering Materials, Vol.1", Longman Group,UK, 1989

Ε.Γ. Μαρκέτος, "Τεχνική Μηχανική Τόμος II - Αντοχή των Υλικών", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1998

<http://www.asminternational.org/>

<http://www.astm.org/>

W.W. Bose-Filho, A.L.M. Carvalho, M. Strangwood, "Effects of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds", Materials Characterization 2006

Kwai S. Chan, Yi-Ming Pan, David Davidson, R. Craig McClung, "Fatigue crack growth mechanisms in HSLA-80 steels", Materials Science and Engineering, 1996

Espen Wold, "High strength low alloy (HSLA) cold forming steels" Materials & Design, 1990

P.K. Ray, R.I. Ganguly, A.K. Panda , "Optimization of mechanical properties of an HSLA-100 steel through control of heat treatment variables" , Materials Science and Engineering, 2002

V.S.R. Murti, Y.R. Sastry, V.G.N. Rao, G.M. Reddy. "Some studies on the service weldability of HSLA steels using 18Cr, 8Ni, 6Mn type austenitic electrodes", Journal of Materials Processing Technology, 1993

S. Mohan, Ved Prakash, J.P. Pathak, "Wear characteristics of HSLA steel", Wear, 2002