

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Τμήμα Ναυπηγών μηχανολόγων μηχανικών



ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ FCAW ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΟΥ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ 316L ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (ROBOT)

Διπλωματική Εργασία ΚΑΛΑΪΤΖΟΓΛΟΥ ΔΙΑΓΟΡΑ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Β.Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

AOHNA 2008

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. ΠΑΝΤΕΛΗΣ , Καθηγητής Ε.Μ.Π. Β.Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ, Καθηγητής Ε.Μ.Π. Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ , Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

εργασία πραγματοποιήθηκε η Στην παρούσα μελέτη μετωπικής συγκόλλησης με τη μέθοδο FCAW (Flux Cored Arc Welding) ελασμάτων διαστάσεων 350x150 mm² από ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα τύπου AISI 316L, πάχους 8 mm. Τα μέταλλα ετοιμάστηκαν και συγκολλήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής των Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Е.М.П. Ως μέταλλο εναπόθεσης χρησιμοποιήθηκε κράμα ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα παρόμοιας χημικής σύστασης με το βασικό μέταλλο σε μορφή σύρματος, διαμέτρου 1,2 mm, ενώ το αέριο προστασίας ήταν το 82% Ar - 18% CO2 (EN 439 – M21). Κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας της συγκόλλησης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των θερμικών κύκλων της, με την χρήση θερμοστοιχείων τύποι Κ. Σε τομές συγκολλημένων δοκιμίων πραγματοποιήθηκε πλήρης μεταλλογραφική μελέτη και σληρομέτρηση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

1.1 Ορισμός Ανοξείδωτων Χαλύβων	6
1.2 Ιστορικά στοιχεία	7
1.3 Αντοχή στην διάβρωση	8
1.4 Κραματικά στοιχεία	9
1.4.1 Χρώμιο(Cr)	10
1.4.2 Νικέλιο(Ni)	10
1.4.3 Μαγγάνιο(Mn)	11
1.4.4 Πυρίτιο(Si)	12
1.4.5 Μολυβδαίνιο(Mo)	12
1.5 Στοιχεία που βοηθούν την δημιουργία καρβιδίων	12

2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ

2.1 Διαγράμματα φάσεων	15
2.1.1 Σύστημα Fe-Cr	15
2.1.2 Σύστημα Fe-Cr-C	16
2.1.3 Σύστημα Fe-Cr-Ni	19
2.2 Διαγράμματα δομής	22
2.2.1 Διάγραμμα Schaeffler	22
2.2.2 Διάγραμμα DeLong	24
2.2.3 Διάγραμμα WRC-1988 και 1992	25

3. ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΟΙ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

3.1 Εισαγωγή	29
3.2 Τυποποιημένα κράματα	30
3.3 Μεταλλογραφική δομή	34
3.4 Κατακρημνίσματα	37
3.5 Μηχανικές ιδιότητες	39
3.6 Μικροδομή ζώνης συγκολλήσεως	40
3.7 Διεπιφάνιες σε μονοφασικό μέταλλο συγκόλλησης	51
3.8 Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη	54
3.9 Μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων	56
3.10 Συγκολλησιμότητα	60

4. ΦΕΡΡΙΤΙΚΟΙ – ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΟΙ - DUPLEX ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

4.1 Φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες	63
4.1.1 Εισαγωγή	63
4.1.2 Τυποποιημένα κράματα	64
4.1.3 Μεταλλουργία των φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων	67
4.1.3.1 Επίδραση των κραματικών προσθηκών	
στη μικροδομή	68
4.1.3.2 Επίδραση του μαρτενσίτη	69
4.1.3.3 Φαινόμενα ψαθυροποίησης	69
4.1.4 Μηχανικές ιδιότητες	71
4.2 Μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες	72
4.2.1 Εισαγωγή	72

4.2.2 Τμποποιρμένα κοάματα	72
	74
4.2.3 Ιλεταλλουργία των μαρτενσιτικών ανοξειοώτων χαλυβών	74
4.3 Duplex ανοξείδωτοι χάλυβες	76
4.3.1 Εισαγώγή	76
4.3.2 Τυποποιημένα κράματα	77
4.3.3 Μεταλλουργία των duplex ανοξείδωτων χαλύβων	78
4.2.3.1 Ισορροπία φάσεων ωστενίτηφερρίτη	78
4.2.3.2 Αντιδράσεις κατακρήμνισης	80
4.3.4 Μηχανικές ιδιότητες	81

5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

5.1 Τεχνικές συγκόλλησης	83
5.1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή	83
5.1.2 Συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW)	83
5.1.3 Συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία	
αερίου (GTAW)	86
5.1.4 Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία	
αερίου (GMAW)	88
5.2 Επιλογή μεθόδων συγκόλλησης	92
5.3 Χρήση των διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης στη ναυπηγική	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	97

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6. Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ Η ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ	-
6.1 Εισαγωγή1	103
6.2 Σύσταση δοκιμίων	103
6.3 Πειραματική διάταξη	104
6.4 Συνθήκες συγκόλλησης	106
7. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	
7.1 Ο θερμικός κύκλος της συγκόλλησης1	112
7.2 Θερμοστοιχεία τύπου Κ	113
7.3 Τα αποτελέσματα της μετρητικής διάταξης των θερμοστοιχείων 1	114
8. ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ - ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ	
8.1 Εισαγωγή1	116
8.2 Προετοιμασία δοκιμίων1	116
8.2.1 Εγκιβωτισμός1	116
8.2.2 Λείανση	117
8.2.3 Στίλβωση	117
8.2.4 Χημική προσβολή	117
8.2.5 Οπτικό μικροσκόπιο	118
8.3 Διανοάμματα WRC-1992 & Schaeffler	118
8.4 Μελέτη μικροδομής μέσω οπτικού μικροσκοπίου	121
8.4.1 Μέταλλο βάσης (Μ.Β.)	121

8.4.2 Θερμικά επηρεαζόμενη βάση (ΘΕΖ)	123
8.4.3 Μέταλλο συγκόλλησης (Μ.Σ.)	125
8.4 Σκληρομερτήσεις	127
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	130

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Е.М.П.



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1⁰

«ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ»

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΣ ΤΟΞΟΥ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

1.1 Ορισμός Ανοξείδωτων Χαλύβων

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες είναι μια μεγάλη κατηγορία χαλύβων με δύο βασικά γνωρίσματα:

 Είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, συγκριτικά με τους άλλους χάλυβες.

 Περιέχουν χρώμιο σε αναλογία άνω του 12% κ.β. και μία μεγάλη και σπουδαία κατηγορία απ' αυτούς νικέλιο.

Η σπουδαιότητά τους πηγάζει από τις αντιδιαβρωτικές και αντιοξειδωτικές τους ιδιότητες σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες τους καθιστούν κατάλληλους για πλήθος εφαρμογών, από τη ναυπηγική έως και εξειδικευμένες εφαρμογές στη βιομηχανία.

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν αντίσταση στην οξείδωση (α) σε υγρό, και

(β) σε ξηρό περιβάλλον.

Διαβρωτικό περιβάλλον είναι ακόμη και οι συνηθισμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες, και είναι γνωστό ότι οι κοινοί χάλυβες και τα περισσότερα μέταλλα σκουριάζουν μετά από σύντομη ή παρατεταμένη παραμονή στην ατμόσφαιρα. Η διαβρωτική δράση του περιβάλλοντος εντείνεται κοντά στη θάλασσα, όπου η ατμόσφαιρα είναι φορτωμένη με υγρασία και χλωριόντα.

Έντονες διαβρωτικές συνθήκες συναντούμε όταν ένα αντικείμενο βυθίζεται και παραμένει μέσα σε διαβρωτικά διαλύματα και υγρά, π.χ.: θαλασσινό νερό, οργανικά ή ανόργανα υγρά και λύματα της χημικής βιομηχανίας.

Ένα διαβρωτικό περιβάλλον είναι αυτό που δημιουργείται με τη συνέργια υψηλών θερμοκρασιών, όπως συμβαίνει στα εξαρτήματα των καμίνων και των πετροχημικών εγκαταστάσεων, τα οποία υπόκεινται στη διαβρωτική και οξειδωτική δράση ατμόσφαιρας που περιέχει οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, θείο κλπ. Ενδεχομένως διάβρωση προκαλείται από συμπύκνωση ατμών που περιέχουν θειικό οξύ, όταν η θερμοκρασία κατεβαίνει στη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας- κάτω από το σημείο δρόσου.

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως παραγωγή ενεργείας, παραγωγή χημικών, παραγωγή χαρτιού, ενώ στην καθημερινή χρήση τους συναντάμε σε εξαρτήματα κουζίνας, αυτοκινήτων κλπ. Επίσης, γίνεται χρήση των ανοξείδωτων χαλύβων και σε νοσοκομειακές εφαρμογές και σε φαρμακοβιομηχανίες, λόγω των καλών ιδιοτήτων του σε κρυογενετικές θερμοκρασίες.

Οι περισσότεροι ανοξείδωτοι χάλυβες μπορούν να συγκολληθούν, όμως αρκετοί απαιτούν ειδικές διαδικασίες. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η συγκόλληση έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μεταβολή της μικροδομής του μετάλλου συγκόλλησης και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (Θ.Ε.Ζ.) σε σχέση με το βασικό μέταλλο. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει αλλαγή φάσεων, σχηματισμό διαμεταλλικών ενώσεων, αυξομείωση του μεγέθους των κόκκων, διαχωρισμό των ακαθαρσιών από το κράμμα και άλλες αντιδράσεις. Γενικά αυτό οδηγεί στην υποβάθμιση, σε κάποιο βαθμό, της μηχανικής συμπεριφοράς και πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό και την κατασκευή.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η πρόσθεση χρωμίου (Cr) στους χάλυβες και τα γνωστά ευρηματικά αποτελέσματα στην αντοχή στην διάβρωση αυτών οφείλονται γενικά στον γάλλο Berthiner. Ο Berthiner το 1821 δημιούργησε ένα χρωμιούχο κράμα με 1,1% κ.β. Cr, το οποίο συνιστούσε σε καλλιτεχνικές εφαρμογές.

Τα πρώτα πειράματα με αυτούς τους χάλυβες ανέδειξαν ότι με αυξημένα ποσοστά χρωμίου η δυνατότητα διαμόρφωσης αυτών των χαλύβων περιοριζόταν δραματικά. Αυτό οφειλόταν στο υψηλό ποσοστό άνθρακα που περιείχαν αυτά τα αρχικά κράματα και έτσι το ενδιαφέρον για αυτούς μειώθηκε μέχρι την αρχή του 20^{ου} αιώνα. Το ενδιαφέρον για χάλυβες ανθεκτικούς στη διάβρωση αναθερμάνθηκε ανάμεσα στο 1900 με 1915 και αρκετοί μεταλλουργοί, θεωρείται ότι ανακάλυψαν τέτοιου είδους κράματα. Ο καταλύτης σε αυτή τη δραστηριότητα ήταν η ανακάλυψη το 1987 του γερμανού Goldschmindt μίας τεχνικής για την παραγωγή χρωμιούχων κραμάτων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Αργότερα ο Guillet το 1904, ο Portevin το 1904 και ο Giesen το 1909 δημοσίευσαν εργασίες περιγράφοντας την μικροδομή και τις ιδιότητες του 13% κ.β. Cr μαρτενσιτικού ανοξείδωτου χάλυβα και του 17% κ.β. Cr φερριτικού ανοξείδωτου χάλυβα. Το 1909 ο Guillet δημοσίευσε ακόμα μια μελέτη για χρωμιούχους - νικελιούχους χάλυβες που ήταν πρόγονοι των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων. Κάτι ακόμα που επέτρεψε την ευρεία παραγωγή των ανοξείδωτων χαλύβων ήταν οι φούρνοι άμεσου ηλεκτρικού τόξου. Αυτές οι εργαστηριακές μελέτες δημιούργησαν ενδιαφέρον για ανοξείδωτους χάλυβες σε βιομηχανικές εφαρμογές και από το 1910-1915 κατεβλήθη προσπάθεια για να γίνει εμπορική εφαρμογή τους. Η πρώτη πραγματική εμπορική εφαρμογή τους έγινε από τον Harry Brearly ο οποίος ήταν μεταλλουργός και χύτευσε τον πρώτο εμπορικό ανοξείδωτο χάλυβα.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ:

- 1821: Ο Γάλλος Berthiner πειραματίζεται με προσθίκη Cr στον χάλυβα.
- 1897: Ο Γερμανός Goldschmindt ανακαλύπτει μίας τεχνικής για την παραγωγή Cr κραμάτων με χαμηλή περιεκτικότητα σε C.
- 1904-1909: 13% κ.β. και 17% κ.β. Cr κράματα παράγονται στη Γαλλία και στην Γερμανία.
- 1913: Ο Άγγλος Brearly χυτεύει την πρώτη εμπορική ράβδο ανοξείδωτου χάλυβα. Χύτευση Νο 1008, 20 Αυγούστου.
- 1916: Δίπλωμα ευρεσιτεχνίας των Η.Π.Α. για 9-16% κ.β. Cr χάλυβες με λιγότερο από 0,7% κ.β. C.

Τέλος, μόλις το 1970 η παραγωγή των ανοξείδωτων χαλύβων έγινε ευρείας εφαρμογής με τις τεχνικές της απανθράκωσης σε ατμόσφαιρα Αργού με Οξυγόνο (argon-oxygen, A.O.D) και της απανθράκωσης υπό κενό με Οξυγόνο (vacuum-oxygen, V.O.D.). Πλέον οι ανοξείδωτοι χάλυβες παράγονται σε διάφορα σχήματα, μεγέθη και υπάρχει στην πραγματικότητα απεριόριστος αριθμός κραμάτων καθημερινής χρήσης. Μερικά κράματα, όπως τα φερριτικά και τα Duplex, έχουν κάποιους περιορισμούς στην επεξεργασία τους, αλλά οποιοδήποτε σχήμα μπορεί να παραχθεί με τις τεχνικές της χύτευσης και της διαμόρφωσης εν ψυχρώ ή εν θερμώ.

<u>1.3</u> <u>ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ</u>

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι ανοξείδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται λόγω της αντοχής τους στη διάβρωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Από τη φύση τους οι χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε Cr δεν φθείρονται με τον γενικό τρόπο διάβρωσης, όπως οι Cr-Mn χάλυβες που διαβρώνονται με χαμηλά κραματικά στοιχεία στην επιφάνειά τους. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες υφίστανται άλλων ειδών διαβρώσεις και η επιλογή τους πρέπει να γίνεται προσεκτικά με βάση το περιβάλλον λειτουργίας τους. Μια σύντομη περιγραφή των μηχανισμών διάβρωσης που σχετίζονται με τις συγκολλήσεις των ανοξείδωτων χαλύβων θα αναπτυχθεί σε αυτό το σημείο.

Δύο είναι οι μορφές τοπικής διάβρωσης που εμφανίζονται στους ανοξείδωτους χάλυβες. Η διάβρωση με βελονισμούς και η διάβρωση χαραγής. Μηχανικά είναι παρόμοιες και συντελούν σε ισχυρά τοπική προσβολή.

Η διάβρωση με βελονισμούς σχετίζεται με την τοπική κατάρρευση του παθητικού προστατευτικού στρώματος οξειδίου του χρωμίου και συνήθως συνδέεται με κάποια μεταλλουργικά χαρακτηριστικά όπως τα όρια των κόκκων ή τη δημιουργία μεσομεταλλικών ενώσεων [44]. Όταν υπάρξει αυτή η κατάρρευση, προκύπτει διάβρωση του μετάλλου και μικρές οπές εμφανίζονται στην επιφάνειά του. Με την πάροδο του χρόνου η χημεία του στερεού διαλύματος μέσα στην οπή αλλάζει και γίνεται προοδευτικά πιο ενεργή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα γρήγορη ένωση των οπών, που τελικά οδηγεί στην καθολική αστοχία. Οι οπές τέτοιου τύπου είναι κρίσιμες επειδή μόνο μία μικρή ρωγμή αρκεί ώστε να υπάρξει σύντομα αστοχία στην επιφάνεια.

Η διάβρωση χαραγής έχει παρόμοιο μηχανισμό αλλά δεν απαιτεί την παρουσία μεταλλουργικού χαρακτηριστικού για την έναρξή της. Αντίθετα, η διάβρωση χαραγής εμφανίζεται μεταξύ επιφανειών, όπου υπάρχει μεταβολή του στερεού διαλύματος (π.χ. κοχλιωτές κατασκευές). Αυτού του είδους η διάβρωση είναι συνηθισμένη σε κοχλιωτές κατασκευές όπου ο χώρος ανάμεσα στον κοχλία (επάνω μέρος) και στην επιφάνεια μπορεί να δημιουργήσει τις κατάλληλες συνθήκες.

Και οι δύο τύποι διάβρωσης που αναφέρθηκαν παραπάνω προκύπτουν όταν το κράμα του ανοξείδωτου χάλυβα βρεθεί σε διαβρωτικό περιβάλλον, όπως π.χ. διαλύματα που περιέχουν ιόντα χλωρίου (χλωριόντα) στα οποία ανήκει και το θαλασσινό νερό. Η κατεργασία της συγκόλλησης μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό μικροδομών που επιταχύνουν τη διάβρωση με βελονισμό ή δημιουργούν χαραγές που προκαλούν τοπική διάβρωση. Επίσης, αν δεν αφαιρεθούν τα οξείδια που δημιουργούνται κατά τη διάβρωση. Επίσης, αν δεν αφαιρεθούν τα οξείδια που δημιουργούνται κατά τη διάβρωση. Επίσης, αν δεν αφαιρεθούν τα οξείδια που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της συγκόλληση, μπορεί να μειωθεί η αντοχή σε διάβρωση εντός ορισμένων διαβρωτικών μέσων. Ο πιο συνηθισμένος από όλους τους μηχανισμούς διάβρωσης των συγκολλημένων ανοξείδωτων χαλύβων, ο οποίος έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών δημοσιεύσεων και ερευνών, είναι η περικρυσταλλική διάβρωση και το συσχετιζόμενο με αυτήν φαινόμενο που είναι γνωστό ως *ρωγμάτωση από διάβρωση* με μηχανική καταπόνηση (S.C.C.). Αυτή η μορφή διάβρωσης εμφανίζεται κυρίως στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (Θ.Ε.Ζ.) των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων και προκύπτει από μία μεταλλουργική κατάσταση που ονομάζεται ευαισθητοποίηση. Η ευαισθητοποίηση συμβαίνει όταν στα όρια των κόκκων κατακρημνίζονται καρβίδια πλούσια σε χρώμιο, με αποτέλεσμα την τοπική μείωση του ποσοστού του χρωμίου σε ποσοστό μικρότερο του 12% κ.β., το οποίο συντελεί σε μη επαρκές ποσοστό για τη δημιουργία του προστατευτικού στρώματος του οξειδίου του χρωμίου και συνεπώς την τοπική διάβρωση. Ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση μπορεί να προκύψει επίσης και σε κοινούς ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες (όπως ο 304L και ο 316L, που ο τελευταίος είναι και το προς μελέτη βασικό μέταλλο σε αυτή την εργασία), χωρίς να υπάρχει σχέση με τα όρια των κόκκων. Η παρουσία ιόντων χλωρίου σε σταθερή η εναλλασσόμενη καταπόνηση επιτείνει αυτόν τον τύπο διάβρωσης.

<u>1.4</u> ΚΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες περιέχουν κραματικά στοιχεία (διαφορετικά από Cr-C-Ni) τα οποία χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή σε διάβρωση ή για να καθορίσουν την μικροδομή. Σε αυτό το σημείο θα αναφέρουμε τα κυριότερα κραματικά στοιχεία.

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες είναι κράματα του σιδήρου (Fe) με περιεκτικότητα σε Fe από 50-80% κατά βάρος. Τα κύρια κραματικά στοιχεία των ανοξείδωτων χαλύβων είναι Cr-C για τους μαρτενσιτικούς, φεριτικούς και με την προσθήκη Ni για τους ωστενιτικούς και τους douplex. Όλοι οι ανοξείδωτοι χάλυβες περιέχουν μαγκάνιο (Mn) και πυρίτιο (Si) σαν ειδικά πρόσθετα. Άλλα κραματικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι το μολυβδένιο (Mo), το Νιόβιο (Ni), το τιτάνιο (Ti), το αλουμίνιο (Al), ο χαλκός (Cu), το άζωτο (N) και άλλα ώστε να βελτιωθεί η επεξεργασιμότητα, οι ιδιότητες (όπως η αντοχή σε διάβρωση) ή να επηρεαστεί η μικροδομή. Ακαθαρσίες που συνήθως βρίσκονται στους ανοξείδωτους χάλυβες είναι Ν, Ο, S, P. Όλα τα παραπάνω κραματικά στοιχεία και οι ακαθαρσίες επιδρούν στη συγκολλησιμότητα και στις ιδιότητες του κράματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις η περιεκτικότητα αυτών των στοιχείων στο βασικό μέταλλο ελέγχεται από την προδιαγραφή του υλικού ώστε να είναι σίγουρο ότι ο χάλυβας θα συμπεριφερθεί όπως αναμένεται. Παρακάτω θα δούμε πώς επιδρούν αυτά τα στοιχεία στις ιδιότητες και συμπεριφορά των ανοξείδωτων χαλύβων.

1.4.1 XPΩMIO (Cr):

Το Cr προστίθεται κυρίως για να προσδώσει αντοχή σε διάβρωση στον χάλυβα. Είναι πολύ αποτελεσματικό σε οξειδωτικά περιβάλλοντα, όπως π.χ. νιτρικό οξύ. Με την πρόσθεση του Cr σχηματίζεται το (FeCr)2O3 οξείδιο στην επιφάνεια του χάλυβα. Η παρουσία του Cr αυξάνει τη σταθερότητα του οξειδίου λόγω της πολύ μεγαλύτερης έλξης που έχει με το οξυγόνο από ότι έχει ο Fe. Όταν το ποσοστό Cr ξεπεράσει το 12% κατά βάρος, ο χάλυβας ανοξείδωτος σε συνθήκες περιβάλλοντος. Υψηλότερες θεωρείται περιεκτικότητες Cr μπορεί να απαιτηθούν για να είναι σταθερό το οξείδιο σε πιο διαβρωτικά περιβάλλοντα. Το Cr προωθεί επίσης το σχηματισμό του φερρίτη. Τα κράματα Fe-Cr που περιέχουν παραπάνω από 12% κατά βάρος Cr είναι πλήρως φερριτικά. Στα κράματα Fe-Cr-Ni-C η αύξηση του Cr θα προκαλέσει τον σχηματισμό περισσότερου φερρίτη και μετασχηματισμό σε μαρτενσιτικά, ωστενιτικά και duplex κράματα. Στα φερριτικά κράματα το Cr είναι το πρωτεύον κραματικό στοιχείο που σταθεροποιεί την φερριτική μικροδομή. Το Cr, είναι επίσης και ισχυρός παράγοντας σχηματισμού καρβιδίων. Το πιο κοινό χρωμιούχο καρβίδιο είναι το Μ23C6, όπου το Μ συμβολίζει κυρίως το Cr αλλά μπορεί να υπάρχει και παρουσία σιδήρου (Fe) ή και μολυβδαίνιου (Μο). Αυτό το καρβίδιο βρίσκετε στους περισσότερους ανοξείδωτους χάλυβες. Είναι επίσης δυνατό να σχηματιστεί ένα άλλο καρβίδιο, το Cr₇C₃, αν και αυτό είναι κάπως πιο σπάνιο. Άλλα σύνθετα καρβίδια και καρβονιτρίδια όπως το M23(CN)6 είναι επίσης δυνατό να σχηματιστούν. Το Cr συνδυάζεται επίσης με το N και σχηματίζει νιτρίδια. Το πιο κοινό είναι το Cr2N το οποίο παρατηρείται στους φερριτικούς και στους duplex. Το Cr είναι επίσης ένα σημαντικό πρόσθετο για τον σχηματισμό μεσομεταλλικών ενώσεων, πολλά από τα οποία προσδίδουν ευθραυστότητα στους ανοξείδωτους χάλυβες. Το πιο κοινό είναι η σ-φάση, η οποία στο σύστημα Fe-Cr είναι ένα μίγμα Fe-Cr που σχηματίζεται κάτω από τους 815°C. Η σ-φάση μπορεί να δημιουργηθεί πρακτικά σε οποιονδήποτε ανοξείδωτο χάλυβα αλλά τείνει να είναι πιο κοινή στους υψηλής περιεκτικότητας σε Cr ωστενιτικους, φερριτικούς και duplex ανοξείδωτους χάλυβες.

Από άποψη μηχανικής αντοχής το Cr προσδίδει κάποιο βαθμό αντοχής στο κράμα στην στερεά του φάση επειδή επηρεάζει την κρυσταλλικη μικροδομή. Υψηλή περιεκτικότητα σε Cr, στα φερριτικά κράματα, μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλή ευθραυστότητα και χαμηλή δυνατότητα κατεργασίας, ιδιαίτερα όταν συνυπάρχει C και N. Φερριτικά κράματα με υψηλή περιεκτικότητα Cr πρέπει να κατεργάζονται με ιδιαίτερη προσοχή ή ο C και το N να έχουν μειωθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα ώστε να υπάρχει αποδεκτή μηχανική αντοχή σε συγκόλληση.

1.4.2 ΝΙΚΕΛΙΟ (Ni):

Η κύρια λειτουργία του Νι είναι να προωθεί την ωστενιτική φάση ώστε να παραχθούν ωστενιτικοί (Α) ή ωστενιτικοί-φερριτικοί (ΑF) χάλυβες. Προσθέτοντας αρκετή ποσότητα Νι το πεδίο της ωστενιτικής φάσης επεκτείνεται ώστε ο ωστενίτης να είναι σταθερός σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή και παρακάτω. Το Νι δεν βοηθάει στον σχηματισμό

καρβιδίων και γενικά δεν προάγει τον σχηματισμό μεσομεταλλικών ενώσεων. Επίσης, υπάρχει ένδειξη ότι η παρουσία του στο κράμα επηρεάζει την κινητικότητα των κατακρημνίσεων, όπως έχουν αναφέρει και ο Peckner P. και Bernstein [1]. Η παρουσία Ni σε φερριτικά κράματα βελτιώνει γενικά την αντίσταση σε διάβρωση, ειδικά σε περιβάλλοντα όπως αυτό του Θειικού οξέως. Εντούτοις το Νί σχετίζετε με τη μείωση της αντοχής σε ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση. Η εργασία του Copson H.R. [2] δείχνει καθαρά μείωση της αντοχής σε ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση σε διαβρωτικό περιβάλλον που περιέχει χλώριο όταν προστεθεί Ni σε ένα κράμα Fe-20Cr. Η εργασία του Copson [2] δείχνει ότι η χαμηλότερη αντοχή σε ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση προκύπτει στην περιοχή 8-12% κατά βάρος Νί και αυξάνεται είτε με αύξηση είτε με μείωση του Νί έξω από αυτή την περιοχή. Το Νί αυξάνει την αντοχή στην στερεά κατάσταση και βελτιώνει την ελαστικότητα τόσο στα μαρτενσιτικά όσο και στα φερριτικά κράματα. Πρόσθεση μέχρι 2% Νί στα υψηλής περιεκτικότητας Cr φερριτικά κράματα μπορεί να μειώσει δραστικά την θερμοκρασία επεξεργασίας του υλικού (χωρίς θραύση).

1.4.3 ΜΑΓΓΑΝΙΟ (Mn):

Το Μη προστίθεται γενικά σε κάθε ανοξείδωτο χάλυβα. Στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες η περιεκτικότητά του κυμαίνεται συνήθως από 1 έως 2% κατά βάρος. Στους φερριτικούς και μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες συνήθως υπάρχει σε λιγότερο από 1% κατά βάρος. Ιστορικά προστέθηκε για να μην συμβεί ψαθυροποίηση της επιφάνειας κατά την χύτευση. Αυτή δημιουργεί μια μορφή ρωγματώσεων κατά τη στερεοποίηση, που σχετίζεται με τον σχηματισμό εύτηκτων στοιχείων χαμηλού σημείου τήξης Fe-S. Επειδή το Mn έλκεται πολύ πιο εύκολα με το S από ότι ο Fe, η πρόσθεση Mn και ο σχηματισμός σταθερών ενώσεων θείου αντιμετωπίζει ικανοποιητικά το πρόβλημα της ψαθυροποίησης. Το Μη θεωρείται γενικά ότι βοηθάει στον σχηματισμό ωστενιτικών στοιχείων, αν και ο βαθμός αυτής της βοήθειας εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε Νί. Είναι πολύ αποτελεσματικό στη σταθεροποίηση του ωστενίτη σε χαμηλές θερμοκρασίες, ώστε να μην γίνει μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Η τάση του για διατήρηση του ωστενίτη σε υψηλές θερμοκρασίες εξαρτάται από την πλήρη σύνθεση του κράματος. Στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες όπως τον 304, φαίνεται να έχει μικρή επίδραση στη διατήρηση του ωστενίτη ενάντια στον φερρίτη. Το Μη χρησιμοποιείται σε ειδικά κράματα για να αυξήσει την διαλυτότητα του αζώτου (Ν) στην ωστενιτική φάση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού είναι η μελέτη των Wentrup και Reif [3], που έδειξε πως η προσθήκη 15% κ.β. Μη σε κράματα Fe-20Cr αυξάνει την διαλυτότητα του N από 0,25% κ.β. σε 0,4% κ.β.

Η επίδραση του Μn στις μηχανικές ιδιότητες είναι ελάχιστες. Προσθέτει κάποια μικρή αύξηση στην αντοχή του κράματος στη στερεά φάση και έχει μικρή επίδραση στην ευθραυστότητα.

<u>1.4.4</u> ПҮРІТІО (Si):

Το Si υπάρχει επίσης σχεδόν σε όλους τους ανοξείδωτους χάλυβες και προστίθεται κυρίως για την ελαχιστοποίηση των οξειδίων κατά την τήξη. Στα περισσότερα κράματα η περιεκτικότητά του κυμαίνεται από 0,3 έως 0,6% κατά βάρος. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλουμίνιο (AI) για τον περιορισμό των οξειδίων αλλά αυτό είναι εξαιρετικά σπάνιο στους ανοξείδωτους χάλυβες. Έχει βρεθεί ότι βελτιώνει την αντοχή σε διάβρωση όταν η περιεκτικότητά του είναι από 4% έως 5% κατά βάρος. Και προστίθεται σε κάποια κράματα αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες από 1% έως 3% κατά βάρος για να μην σχηματιστούν οξείδια λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Ο ρόλος του Si στον σχηματισμό φερρίτη ή ωστενίτη δεν είναι ξεκάθαρος. Σε ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες μέχρι 1% κ.β. σε Si φαίνεται να μην έχει επίδραση στην ισορροπία των φάσεων, αλλά υψηλότερες περιεκτικότητες φαίνεται να προωθούν την φερριτική φάση. Στους φερριτικούς και μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες το Si φαίνεται να βοηθάει στον σχηματισμό του φερρίτη. Το Si σχηματίζει έναν αριθμό ενώσεων με τον Fe (FeSi, Fe2Si, Fe3Si, Fe5Si3) και (Cr3Si) διμεταλλικές ενώσεις που όλες αυξάνουν την ευθραυστότητα του κράματος. Αυξάνουν επίσης την περιοχή σχηματισμού σ-φάσης, όπως αναφέρει εκτενώς ο Kubaschewski [4].

Το Si είναι γνωστό ότι διαχωρίζεται κατά τη στερεοποίηση, έχοντας ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό ευτηκτικών ενώσεων χαμηλού σημείου τήξης, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με το Ni, όπως αναφέρουν και οι Dahl, Duren και Musch [5]. Για αυτούς τους λόγους συνήθως χρησιμοποιείται σε περιεκτικότητα μικρότερη του 1% κατά βάρος.

Το Si είναι γνωστό ότι βελτιώνει την ροή του ρευστοποιημένου σιδήρου, για αυτόν τον λόγο μπορεί να προστεθεί σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε μέταλλα συγκόλλησης (fillers). Κάποιοι ανοξείδωτοι χάλυβες, ιδιαίτερα τα ωστενιτικά κράματα, τείνουν να είναι πολύ παχύρρευστα στην υγρή φάση και η πρόσθεση Si βελτιώνει σημαντικά την ρευστότητά τους.

<u>1.4.5</u> ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟ (Mo):

Το Μο προστίθεται σε κάποιους ανοξείδωτους χάλυβες έχοντας διαφορετικές επιδράσεις ανάλογα με τον τύπο του κράματος. Για τα φερριτικά, ωστενιτικά και duplex κράματα προστίθεται Μο μέχρι 6% κατά βάρος (ή και περισσότερο στα υπερ-ωστενιτικά) για να βελτιώσει την αντίσταση σε διάβρωση, ιδιαίτερα στον σχηματισμό διάβρωσης με βελονισμούς και διάβρωσης χαραγής. Στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες το Μο επίσης αυξάνει την αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού είναι η μελέτη των Peckner και Bernstein [1], όπου η πρόσθεση 2% κ.β. Μο στον τυποποιημένο 18Cr-8Ni ανοξείδωτο χάλυβα έχει ως αποτέλεσμα 40% αύξηση αντοχής σε θραύση στους 760°C. Αυτό όμως, μπορεί να έχει και αρνητικό αποτέλεσμα, επειδή τα κράματα που περιέχουν Μο είναι πιο δύσκολο να διαμορφωθούν εν θερμώ. Μερικοί από τους μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες περιέχουν Μο για τον σχηματισμό καρβιδίων. Η πρόσθεση μόλις 0,5% κ.β. Μο αυξάνει τα χαρακτηριστικά σκληρύνσεως του χάλυβα, έχοντας ως αποτέλεσμα υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό σε θερμοκρασία δωματίου και βελτιωμένες σε υψηλές θερμοκρασίες. Το Μο βοηθά τον σχηματισμό φερρίτη και η παρουσία του βοηθάει στο να μειωθούν οι παραμένουσες τάσεις. Αυτό όμως, μπορεί να είναι πρόβλημα στα μαρτενσιτικά κράματα όπου η ύπαρξη φερρίτη σε θερμοκρασία δωματίου μπορεί να μειώσει την αντοχή και την ικανότητα μορφοποίησης εν ψυχρώ.

1.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΒΟΗΘΟΥΝ ΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΡΒΙΔΙΩΝ

Εκτός από το Cr και το Mo, ένας αριθμός άλλων στοιχείων προστίθεται στους ανοξείδωτους χάλυβες για να βοηθήσει στον σχηματισμό καρβιδίων. Σε αυτά τα στοιχεία περιέχεται το: Νιόβιο, το Τιτάνιο, το Βολφράμιο, το Ταντάλιο και το Βανάδιο. Το Νιόβιο και το Τιτάνιο προστίθενται στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες ώστε να προσδώσουν σταθερότητα στον άνθρακα και να αποφευχθεί η περικρυσταλλική διάβρωση. Και τα δυο αυτά στοιχεία σχηματίζουν ένα MC καρβίδιο, το οποίο δεν διασπάται κατά την τήξη και τη θερμική κατεργασία, αποτρέποντας έτσι τον σχηματισμό M₂₃C₆ (πλούσιο σε Cr) το οποίο προστίθενται σε κάποιους ειδικούς ανοξείδωτους χάλυβες κυρίως για να προσδώσουν αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία, με τον σχηματισμό διάσπαρτων μικρών καρβιδίων. Αυτά τα στοιχεία τείνουν να βοηθήσουν τον σχηματισμό φερρίτη στη μικροδομή επειδή δεσμεύουν τον άνθρακα και απενεργοποιούν αποτελεσματικά τον σχηματισμό ωστενίτη.

Е.М.П.



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2⁰

«ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ»

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΣ ΤΟΞΟΥ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

2.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ

Διαγράμματα ισορροπίας φάσεων χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις μετατροπές φάσεων και τις ισορροπίες φάσεων στους ανοξείδωτους χάλυβες. Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφούν τα συστήματα φάσεων Fe-Cr, Fe-Cr-C και Fe-Cr-Ni. Ο σκοπός είναι να δώσουν στον αναγνώστη αυτής της διπλωματικής εργασίας γνώση των βασικών διαγραμμάτων ισορροπίας που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της μικροδομής σε διάφορα κράματα ανοξείδωτων χαλύβων. Αυτά τα διαγράμματα αποτελούν προσέγγιση της πραγματικής μικροδομής που αναπτύσσεται στις συγκολλήσεις, που μπορεί να είναι λίγο διαφορετική για δύο λόγους:

- 1^{ον} Γιατί οι ανοξείδωτοι χάλυβες του βασικού μετάλλου και του μετάλλου συγκόλλησης περιέχουν συνήθως πολλά κραματικά στοιχεία, τα οποία δεν μπορούν να απεικονιστούν στα τυποποιημένα φασικά διαγράμματα
- 2^{ον} Τα φασικά διαγράμματα στηρίζονται σε συνθήκες ισορροπίας, ενώ η απότομη θέρμανση και σχετικά ταχεία απόψυξη που συμβαίνει κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης οδηγεί σε μη ισορροπημένες καταστάσεις.

2.1.1 ΣΥΣΤΗΜΑ Fe - Cr:



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-Cr (από το Metal Handbook [6]).

Το φασικό διάγραμμα Fe-Cr του Σχήματος 2.1 είναι το αρχικό σημείο για να περιγραφούν οι φάσεις του ανοξείδωτου χάλυβα επειδή το Cr είναι το πρωτεύον κραματικό στοιχείο. Σημειώνεται ότι υπάρχει πλήρης διαλυτότητα του Cr στον Fe σε υψηλές θερμοκρασίες και η στερεοποίηση όλων των κραμάτων Fe-Cr γίνεται φερριτικά. Η περιοχή στερεοποίησης των κραμάτων Fe-Cr είναι πολύ στενή. Για χαμηλές συγκεντρώσεις Cr υπάρχει μία περιοχή ωστενιτική σε θερμοκρασίες από 912-1394°C, η οποία ονομάζετε βρόγχος *ωστενίτη* ή περιοχή-γ (στο διάγραμμα ονομάζεται ως Gamma Loop). Κράματα με περισσότερο από 12,7% κ.β. Cr είναι πλήρως φερριτικά σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ αυτά με λίγο λιγότερο από 12,7% κ.β. Cr θα σχηματίσουν κάποιον ωστενίτη σε θερμοκρασίες μέσα στο βρόγχο ωστενίτη. Κράματα με λιγότερο από 12% κ.β. Cr θα είναι πλήρως ωστενιτικά σε θερμοκρασίες μέσα στο βρόγχο ωστενίτη. Εάν υπάρξει γρήγορη ψύξη, αυτός ο ωστενίτης μπορεί να μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη. Στις χαμηλές θερμοκρασίες εμφανίζεται μια άλλη φάση, η σ-φάση στο σύστημα Fe-Cr, αυτή η φάση έχει μια στοιχειομετρία Fe-Cr και τετραγωνική κρυσταλλική δομή. Η σ-φάση σχηματίζεται συνήθως σε κράματα που περιέχουν πάνω από 20% κ.β. Cr. Επειδή η σ-φάση σχηματίζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, η κινητική του σχηματισμού της είναι αργή και απαιτείται αρκετός χρόνος παραμονής του κράματος σε θερμοκρασίες από 600 έως 800°C. Ακόμα, επειδή η σ-φάση είναι σκληρή και ψαθυρή, η παρουσία της σε ανοξείδωτους χάλυβες συνήθως δεν είναι επιθυμητή. Το διάγραμμα περιέχει επίσης μια οριζόντια διακεκομμένη γραμμή ανάμεσα στην περιοχή της (σ) και της (α) φάσης στους 475°C. Ένα φαινόμενο γνωστό ως ευθραυστότητα των 475°C προκύπτει από τον σχηματισμό ενώσεων, υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο, μέσα στη φερριτική μήτρα. Αυτές οι ενώσεις ονομάζοντε α-τόνος, η α-prime (ά : στο διάγραμμα). Σύμφωνα με τη μελέτη των Peckner και Bernstein [1], στην πραγματικότητα σχηματίζονται σε θερμοκρασίες από 400-540°C και φαίνεται να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην ευθραυστότητα των κραμάτων που περιέχουν περισσότερο από 14% κ.β Cr. Ο σχηματισμός του α-τόνος (ά) είναι επίσης αρκετά αργός στα κράματα Fe-Cr, αλλά ο ρυθμός σχηματισμού του μπορεί να επιταχυνθεί με προσθήκη κραματικών στοιχείων.

<u>2.1.2</u> ΣΥΣΤΗΜΑ Fe – Cr - C:

Η προσθήκη C στο σύστημα Fe-Cr αλλάζει σημαντικά και κάνει πιο πολύπλοκη την ισορροπία των φάσεων. Επειδή ο C βοηθάει στο σχηματισμό ωστενίτη, θα μεγαλώσει την περιοχή του βρόγχου ωστενίτη επιτρέποντας στον ωστενίτη να είναι σταθερός σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες για πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις Cr. Τα αποτελέσματα του C στην μεγέθυνση του ωστενίτη φαίνονται στο Σχήμα (2.2):



Σχήμα 2.2: Επίδραση του άνθρακα στην επέκταση της περιοχής του ωστενίτη. (Από Baerlachen κ.α. [7].)

Αξίζει να σημειωθεί ότι, ακόμα και μικρές προσθήκες C, έχουν ως αποτέλεσμα τη δραματική μεγέθυνση του βρόγχου ωστενίτη. Αυτό είναι σημαντικό για την παραγωγή των μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων, γιατί για να σχηματιστεί μαρτενσίτης κατά την ψύξη πρέπει να είναι ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας στις υψηλές θερμοκρασίες. Για φερριτικά κράματα ο βρόγχος ωστενίτη πρέπει να ελεγχθεί ώστε να σχηματιστεί λίγος ή και καθόλου ωστενίτης στις υψηλές θερμοκρασίες. Για να απεικονιστεί το σύστημα Fe-Cr-C σε συνάρτηση με την θερμοκρασία είναι απαραίτητο κάποιο από τα στοιχεία να έχει σταθερή τιμή. Με αυτό τον τρόπο ψευδοδυαδικά διαγράμματα φάσεων (isopleth) μπορεί να σχεδιαστούν. Αυτά τα διαγράμματα λέγονται ψευδοδυαδικά επειδή αναπαριστούν σε δύο διαστάσεις ένα σύστημα τριών διαστάσεων με σταθερή τη μία μεταβλητή. Λόγω αυτού, τα διαγράμματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο όπως τα δυαδικά διαγράμματα. Παραδείγματος χάρη, οι οριακές γραμμές δεν μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των φάσεων σε ένα ψεύδοδυαδικο διάγραμμα επειδή το διάγραμμα έχει και «βάθος». Παρόλα αυτά είναι πολύ χρήσιμα για να κατανοηθεί η ισορροπία των φάσεων και οι φασικοί μετασχηματισμοί σε ένα σύστημα τριών στοιχείων.

Δύο ψεύδοδυαδικα διαγράμματα (a) για 13% κ.β. Cr, και (b) για 17% κ.β. Cr με μεταβλητή περιεκτικότητα σε C φαίνονται στο Σχήμα 2.3.



Fe-Cr-C pseudobinary diagram at (*a*) 13% and (*b*) 17% chromium. Σχήμα 2.3: Fe-Cr-C Ψευτοδυαδικά διαγράμματα για (α) 13% Cr και (β) 17% Cr. (από Castro Tricot [8])

Το διάγραμμα τώρα είναι πολύ πιο σύνθετο από το απλό διάγραμμα Fe-Cr, κυρίως λόγω της πρόσθεσης C που επέφερε δύο με τρεις νέες φάσεις. Επίσης, λόγω της πρόσθεσης του C δύο καινούργια καρβίδια (CrFe)₂₃C₆ (C₁ στο διάγραμμα) και (CrFe)₇C₃ (C₂ στο διάγραμμα) φαίνονται τώρα στο διάγραμμα.

Για φερριτικούς και μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε Cr, το ψευτοδυαδικό διάγραμμα (a) με 13% κ.β. Cr μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει την ισορροπία των φάσεων και την μικροδομή. Σε πολύ μικρές περιεκτικότητες σε C (λιγότερο από 0,1% κ.β. C) τα κράματα είναι πλήρως φερριτικά σε υψηλή θερμοκρασία. Εάν ψυχθεί αρκετά γρήγορα, το κράμα θα παραμείνει κυρίως φερριτικό. Για το διάγραμμα (a) με 13% κ.β. Cr αυτή είναι η βάση για τους χαμηλής περιεκτικότητας Cr ανοξείδωτους χάλυβες, όπως ο τύπος 409.

Για περιεκτικότητες σε C μεγαλύτερη από 1% κ.β. θα σχηματιστεί ωστενίτης σε υψηλές θερμοκρασίες και μείγμα ωστενίτη και φερρίτη θα υπάρχει σε θερμοκρασίες λίγο χαμηλότερες από το σημείο τήξης. Με την ψύξη η δομή θα γίνει πλήρως ωστενιτική σε θερμοκρασίες κάτω από τους 1200°C. Εάν ο ρυθμός ψύξης είναι αρκετά γρήγορος, αυτός ο ωστενίτης θα μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη. Αυτή είναι η βάση για τους χαμηλής περιεκτικότητας Cr μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, όπως ο τύπος 410. Σε χαμηλότερες περιεκτικότητες σε C (π.χ. 0,05% κ.β. C) μείγμα ωστενίτη και φερρίτη θα υπάρχει στις υψηλές θερμοκρασίες, έχοντας ως αποτέλεσμα μια μικροδομή που περιέχει φερρίτη και μαρτενσίτη εφόσον γίνει γρήγορη ψύξη. Αυτές οι μικροδομές δεν είναι συνήθως επιθυμητές επειδή δεν έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες.

Σε μεγαλύτερα επίπεδα Cr στο σύστημα Fe-Cr-C η περιοχή της φερριτικής φάσεως μεγαλώνει ενώ η περιοχή της ωστενιτικής φάσης συρρικνώνεται όπως φαίνεται στην εικόνα (b) του παραπάνω διαγράμματος φάσεων Fe-Cr-C. Αυτό προέρχεται από την ιδιότητα του Cr να προάγει την παραγωγή φερρίτη. Ως αποτέλεσμα, ο φερρίτης που σχηματίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες είναι πολύ πιο σταθερός, και μεγαλύτερα ποσοστά C απαιτούνται για να σχηματιστεί ωστενίτης σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό το διάγραμμα είναι η βάση για τους μεσαίας περιεκτικότητας Cr φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, όπως ο τύπος 430 και τους μεσαίας περιεκτικότητας Cr υψηλής σε C μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, όπως ο 440.

2.1.3 ΣΥΣΤΗΜΑ Fe-Cr-Ni:

Πρόσθεση Ni στο σύστημα Fe-Cr επίσης επεκτείνει την περιοχή της ωστενιτικής φάσης και επιτρέπει στον ωστενίτη να είναι σταθερή φάση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό το τετραξονικό σύστημα (Fe-Cr-Ni-Θερμοκρασία) είναι η βάση για τους ωστενιτικούς και Duplex ανοξείδωτους χάλυβες. Υπάρχουν διαγράμματα για το σύστημα Fe-Cr-Ni για την υγρή και την στερεή φάση, όπως αυτά του Σχήματος 2.4.

Τα διαγράμματα αυτά (Σχήμα 2.4) μπορεί να χρησιμοποιηθούν ώστε να προβλεφθεί η συμπεριφορά στερεοποίησης των κραμάτων βλέποντας τις επιφάνειες στερεοποίησης και υγροποίησης, οι οποίες καθορίζουν την έναρξη και το πέρας της στερεής και υγρής φάσης αντίστοιχα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η επιφάνεια υγροποίησης είναι μια συμπαγής μαύρη γραμμή που ξεκινά κοντά από τη υψηλή περιεκτικότητα σε Fe του τριγώνου προς την πλευρά του Cr. Αυτή η γραμμή διαχωρίζει τα κράματα που στερεοποιούνται κυρίως φερριτικά (πάνω και προς τα αριστερά) από τα κράματα που στερεοποιούνται κυρίως ωστενιτικά. Περίπου στο 48%Cr - 44%Ni - 8%Fe υπάρχει ένα ευτηκτικό σημείο. Η επιφάνεια στερεοποίησης έχει δύο μαύρες γραμμές που ξεκινούν κοντά από την υψηλή περιεκτικότητα σε Fe και κινούνται προς το δεξί μέρος του διαγράμματος Fe-Cr-Ni. Ανάμεσα σε αυτές τις δύο γραμμές ωστενίτης και φερρίτης συνυπάρχουν. Αυτή η περιοχή διαχωρίζει την φερριτική από την ωστενιτική φάση κάτω από την γραμμή στερεοποίησης. Αυτές οι γραμμές τερματίζουν στο ευτηκτικό σημείο που αναφέραμε παραπάνω. Τα βέλη σε αυτές τις γραμμές παριστάνουν την κατεύθυνση μείωσης της θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.4: Διαγράμματα Fe-Cr-Ni υγρής και στερεής φάσης (από το Metal Handbook [6]).

Παίρνοντας τώρα σταθερή περιεκτικότητα Fe από τα παραπάνω τριγωνικά διαγράμματα, από την υγροποίηση μέχρι την θερμοκρασία δωματίου, ένα ψευδοδυαδικό διάγραμμα φάσεων Fe-Cr-Ni μπορεί να σχηματιστεί. Δύο τέτοια διαγράμματα έχουν κατασκευαστεί στο (a) 70% κ.β. Fe και (b) 60% κ.β. Fe και παρατίθενται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: ψευτοδυαδικά διάγραμμα φάσεων Fe-Cr-N με σταθερή περιεκτικότητα Fe (α) 70% Fe και (β) 60% Fe (από Lippold Savage [9]).

Επειδή αυτό είναι ένα σύστημα τεσσάρων αξόνων, τα πεδία των φάσεων υπάρχουν σε τρεις διαστάσεις, με αποτέλεσμα τρισδιάστατα πεδία να μην μπορούν να απεικονιστούν σε διδιάστατο σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί η μικρή τριγωνική περιοχή ανάμεσα στη γραμμή στερεοποίησης και στη γραμμή υγροποίησης. Αυτή είναι μια περιοχή όπου συνυπάρχει ωστενίτης, φερρίτης μαζί με υγρή φάση και διαχωρίζει τα κράματα που στερεοποιούνται ως ωστενιτικα (αριστερά) από αυτά που στερεοποιούνται φερριτικά. Στην στερεά φάση ο φερρίτης είναι σταθερός σε υψηλές θερμοκρασίες για περιεκτικότητα Cr πάνω από 20% κατά βάρος. Όσο η θερμοκρασία μειώνεται, αυτός ο φερρίτης θα μετασχηματιστεί μερικώς σε ωστενίτη στην περιοχή 20-25% κ.β.. Κράματα που στερεοποιούνται ως ωστενίτες (αριστερά από το τρίγωνο τριών φάσεων) παραμένουν ως ωστενίτες μέχρι να κρυώσουν σε θερμοκρασία δωματίου. Κράματα που στερεοποιούνται ως φερρίτες με συνθέσεις λίγο δεξιότερα από το τρίγωνο τριών φάσεων, καθώς ψύχονται περνούν μέσα από τη διφασική ωστενιτική-φερριτική περιοχή. Σε συνθέσεις δεξιότερα του τριγώνου τριών φάσεων (υψηλές περιεκτικότητες Cr/Ni) ο φερρίτης γίνεται προοδευτικά σταθερός μέχρι που τελικά γίνεται πλήρης φερριτική δομή προς το δεξί άκρο του κάθε διαγράμματος. Αυτά τα διαγράμματα θα αναφερθούν και παρακάτω για να εξηγήσουμε τους μετασχηματισμούς φάσεως και τη μικροδομή στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

2.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΟΜΗΣ

Τα τελευταία 75 χρόνια πολλές προσπάθειες έγιναν ώστε να μπορέσει να προβλεφθεί η σύσταση του μετάλλου που θα προκύψει μετά από μία συγκόλληση (μέταλλο συγκολλήσεως). Σημαντικά διαγράμματα και συναρτήσεις αναπτύχθηκαν βασιζόμενα στη χημική σύσταση των κραμάτων. Τα σημαντικότερα και πλέον χρησιμοποιούμενα θα αναπτυχθούν περιληπτικά σε αυτό το κεφάλαιο.

2.2.1 Διάγραμμα Schaeffler

Ο Anton Schaeffler [32], είχε συνειδητοποιήσει από το 1944 ότι μπορούσε να γίνει πρακτική χρήση κάποιων θεμελιωδών διαγραμμάτων για την πρόβλεψη της μικροδομής των χρωμιούχων – νικελιούχων κραμάτων. Η έρευνα του επικεντρώθηκε στον συνδυασμό πληροφοριών που θα μπορούσαν να αναπτύξουν ένα τέτοιο διάγραμμα, που θα επέτρεπε την πρόγνωση της μικροδομής του μετάλλου συγκόλλησης, βάσει της χημικής του σύστασης. Το διάγραμμα που ανέπτυξε είναι συναρτήσει του χρωμίου (Cr) και του νικελίου (Ni) (άξονες X-Ψ) και έχουν διαχωριστεί σε αυτό περιοχές ανάλογα με τις μικροδομές που θα προκύψουν. Τα στοιχεία που προάγουν τη δημιουργία του φερρίτη περιέχονται στο ισοδύναμο του χρωμίου (Cr_{eq}), ενώ τα στοιχεία που προάγουν τον ωστενίτη περιέχονται στο ισοδύναμο του νικελίου

(Ni_{eq}). Ένα από τα πρώτα διαγράμματα του Schaeffler (1947) είναι αυτό του Σχήματος 2.6.



Με αυτό το διάγραμμα έγινε μία μεγάλη πρόοδος για την πρόβλεψη της μικροδομής και πυροδότησε νέες έρευνες, με αποτέλεσμα την δημιουργία νέων και βελτιωμένων τέτοιων διαγραμμάτων.

Ο Schaeffler βάσισε τους πολλαπλασιαστικούς συντελεστές για τον υπολογισμό των ισοδύναμων συναρτήσεων σε προηγούμενες έρευνες και στην δικιά του εμπειρία. Υπέθεσε τιμές 2,5 για το Πυρίτιο (Si), 1,8 για το Μολυβδαίνιο (Mo) και 2,0 για το Νικέλιο (Ni) βάσει των δικών του ερευνών και σε μελέτες των Thielemann, Campbell και Thomas. Έτσι κατέληξε στην παρακάτω συνάρτηση για το ισοδύναμο του Νικελίου (Ni_{eq}):

Ni_{eq}= Ni+0,5*Mn+30*C

Ενώ για το ισοδύναμο του Χρωμίου (Cr_{eq}) έχουμε:

Cr_{ea}= Cr+2,5*Si+1,8*Mo+2*Nb

Επιπρόσθετα ο Schaeffler δημιούργησε μια νέα συνάρτηση για τα όρια των φάσεων μεταξύ πλήρως ωστενιτικών κραμάτων και κραμάτων που περιέχουν ωστενίτη και φερρίτη. Η συνάρτηση αυτή ονομάστηκε συνάρτηση ωστενιτικής σταθερότητας (austenite stability equation) και δίνεται από τον τύπο:

Ni_{eq}= 12+(Cr_{eq}-16)²/12

Όπου Ni_{eq} το ισοδύναμο του Νικελίου και Cr_{eq} το ισοδύναμο του Χρωμίου όπως τα υπολογίζουμε από τις παραπάνω εξισώσεις.

Το 1948 ο Schaeffler βελτίωσε το διάγραμμά του [33] και τα όρια ωστενίτη – φερρίτη έγιναν ευθείες γραμμές. Με αυτό τον τρόπο έγινε ευκολότερη η πρόγνωση της μικροδομής του μετάλλου συγκόλλησης, προσθέτοντας περισσότερες ισοφερριτικές γραμμές στην αρχική διφασική περιοχή (ωστενίτη - φερρίτη). Οι ισοδύναμες συναρτήσεις χρωμίου, νικελίου παρέμειναν οι ίδιες. Το διάγραμμα του 1948 φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Το 1949 φτιάχτηκε το τελικό διάγραμμα [34], όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8., που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα.



2.2.2 Διάγραμμα DeLong

Το 1956 ο DeLong [35], για πρώτη φορά δημιούργησε διαγράμματα για συγκεκριμένους τύπους χάλυβα της σειράς 300. Η μεγαλύτερη ακρίβεια που παρείχε επέτρεψε καλύτερη πρόβλεψη του φερριτικού περιεχομένου του μετάλλου συγκόλλησης των ωστενιτικών χαλύβων. Ερευνήθηκε επίσης η επίδραση του Αζώτου (Ν) στη συγκόλληση, το οποίο είχε ισχυρή επιρροή στον φερρίτη. Το αρχικό διάγραμμα του DeLong φαίνεται στο Σχήμα 2.9.



Η κύρια διαφορά του διαγράμματος του DeLong με το αντίστοιχο του Schaeffler, είναι στο ισοδύναμο του Νικελίου (Ni_{eq}) και την προσθήκη του αζώτου μέσα στη συνάρτηση. Η καινούρια συνάρτηση για το ισοδύναμο του Νικελίου (Ni_{eq}) του DeLong δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

Ni_{eq}= Ni+0,5*Mn+30*C+30*N

To 1973 έγιναν κάποιες περαιτέρω τροποποιήσεις στο διάγραμμα του DeLong. Το νέο διάγραμμα [36] φαίνεται στο Σχήμα 2.10.



Η κύρια αλλαγή είναι η προσθήκη του *φερριτικού αριθμού* (ferrite number «FN») στις καμπύλες του διαγράμματος. Ο φερριτικός αριθμός (FN) βασίζεται σε μαγνητικές μετρήσεις, που υπολογίζουν το ποσοστό του φερρίτη με μαγνητικό τρόπο, λόγω του ότι ο BCC φερρίτης είναι μαγνητικό υλικό, ενώ ο FCC ωστενίτης δεν είναι. Το FN δεν ταυτίζετε απόλυτα με το ποσό του φερρίτη στο μέταλλο (μολονότι σε χαμηλούς αριθμούς FN, μικρότερως του 12, είναι σχεδόν ίσοι).

Ο φερριτικός αριθμός (FN) ήταν μία σπουδαία ανακάλυψη και γι αυτό υιοθετήθηκε και από το Welding Research Council (WRC) το 1973 [38].

<u>2.2.3</u> Διάγραμμα WRC-1988 και 1992

Στα μέσα του 1980 η Welding Research Council Subcommittee (WRC) άρχισε περαιτέρω έρευνες για την βελτιστοποίηση και επέκταση των διαγραμμάτων Schaeffler και DeLong, έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια της πρόγνωσης φερρίτη στα ανοξείδωτα μέταλλα συγκόλλησης. Το 1988 σε μία μελέτη του Siewert [39], προτάθηκε ένα καινούριο διάγραμμα που κάλυπτε μια εκτεταμένη περιοχή συνθέσεων (FN από 0 έως 100) σε σύγκριση με το διάγραμμα DeLong (FN από 0 έως 18). Αυτό το διάγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 2.11.



Αυτό το διάγραμμα δημιουργήθηκε από μία βάση δεδομένων 950 περίπου συγκολλήσεων που πραγματοποιήθηκαν από κατασκευαστές ηλεκτροδίων και ερευνητικά ιδρύματα. Πολλές γραμμικές παρεμβολές και άλλες στατιστικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν μπορεί να βρεθούν στην αναλυτική μελέτη [40]. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του διαγράμματος είναι το ότι οι χημικές αναλύσεις έγιναν από διαφορετικές πηγές, σε αντίθεση με παλαιότερα διαγράμματα. Για αυτό τον λόγο το WRC-1988 διάγραμμα θεωρείται ότι δεν περιέχει λάθη χημικών αναλύσεων.

Οι νέες ισοδύναμες συναρτήσεις Νικελίου και Χρωμίου που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται παρακάτω. Αξιοσημείωτο είναι η αφαίρεση του Μαγκάνιου (Mn) από την ισοδύναμη συνάρτηση τουΝί.

> Cr_{eq}= Cr+Mo+0,7*Nb Ni_{eq}= Ni+35*C+20*N

Μετά από την υιοθέτηση του διαγράμματος WRC-1988, αυτό αξιολογήθηκε και σχολιάστηκε. Ο Kotecki [41] χρησιμοποίησε ανεξάρτητα δεδομένα από 200 συγκολλήσεις για να επιβεβαιώσει την καλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης του διαγράμματος WRC-1988 από αυτό του DeLong.

Εν συνεχεία, η επίδραση του χαλκού (Cu) στην περιεκτικότητα του φερρίτη προκάλεσε το ενδιαφέρον των επιστημόνων λόγο της αυξημένης χρήσης Duplex ανοξείδωτων χαλύβων που μπορεί να περιέχουν έως και 2% κ.β. χαλκό. Ο Lake [42] απέδειξε ότι η προσθήκη κάποιου συντελεστή χαλκού στην ισοδύναμη εξίσωση νικελίου (Ni_{eq}) θα βελτίωνε σημαντικά την πρόβλεψη του φερριτικού αριθμού (FN) όταν ο χαλκός αποτελεί σημαντικό ποσοστό του κράματος. Πρότεινε μία τιμή από 0,25 έως 0,30 για τον συντελεστή του χαλκού (Cu).

Το 1992 οι Kotecki και Siewert [43], προτείνουν ένα νέο διάγραμμα παρόμοιο με εκείνο του 1988 που όμως περιέχει και έναν συντελεστή 0,25 για τον χαλκό στην εξίσωση ισοδύναμου του νικελίου. Αυτή η εξίσωση φαίνεται παρακάτω:

Ni_{eq}= Ni+35*C+20*N+0,25*Cu



Το καινούριο διάγραμμα WRC-1992 φαίνεται στο Σχήμα 2.12.

Σχήμα 2.12: Διάγραμμα WRC - 1992 [43].

Αναγνωρίζοντας ότι το διάγραμμα WRC-1992 είχε περιορισμένη περιοχή πρόβλεψης σε σχέση με εκείνη του διαγράμματος του Schaeffler, πρότειναν επίσης μία εκτεταμένη περιοχή του διαγράμματος ώστε να μπορούν να προβλεφθούν και οι συγκολλήσεις ανόμοιων μετάλλων με τον φερριτικό αριθμό (FN).

Μέχρι και σήμερα το διάγραμμα WRC-1992 είναι το πιο αξιόπιστο και ακριβές διαθέσιμο διάγραμμα για πρόβλεψη του φερριτικού αριθμού (FN) στα ωστενιτικά και duplex ανοξείδωτα μέταλλα συγκόλλησης. Είναι ευρέως αποδεκτό και περιέχεται σε αρκετούς διεθνείς κανονισμούς.

Е.М.П.



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3⁰

«ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΟΙ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ»

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΣ ΤΟΞΟΥ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

<u>3.1</u> ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες αντιπροσωπεύουν τη μεγαλύτερη οικογένεια από τους ανοξείδωτους χάλυβες και παράγονται σε μαζικές ποσότητες. Έχουν καλή αντίσταση σε διάβρωση υπό διάφορες συνθήκες του περιβάλλοντός τους. Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες έχουν αντίστοιχη αντοχή με τους χάλυβες μέτριου ποσοστού άνθρακα ξεκινώντας από τα 250 MPa χωρίς ειδικά πρόσθετα ή θερμικές κατεργασίες. Έχουν ακόμα καλές ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες, πράγμα που τους κάνει χρήσιμους σε κρυογενετικές εφαρμογές. Η θερμοκρασία επεξεργασίας τους φτάνει μέχρι και τους 760°C ή και παραπάνω, αλλά η αντοχή και η οξείδωτοι χάλυβες μπορούν να επεξεργαστούν και να αποκτήσουν καλύτερες ιδιότητες με εν ψυχρώ κατεργασία. Συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές.

Τα κραματικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι το Ni (πάνω από 8%), καθώς επίσης και C, N, Cu. O άνθρακας προστίθεται επειδή βελτιώνει την αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες. Το άζωτο χρησιμοποιείτε σε μερικά κράματα βελτιώνοντας την αντοχή, κυρίως σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες έχουν γενικά καλή αντοχή σε κόπωση. Είναι πιο ακριβοί από τους μαρτενσιτικούς και φτηνότεροι από τους χρωμιούχους φερριτικούς, λόγω της υψηλής τιμής των πρόσθετων στοιχείων. Εκτός, όμως από το κόστος τους, παρέχουν μερικά πλεονεκτήματα, όπως μορφοποίηση και συγκολλησιμότητα, σε σχέση τους άλλους ανοξείδωτους χάλυβες.

Ενώ υπάρχει μια πολύ μεγάλη ποικιλία από ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, η σειρά 300 είναι η πιο παλαιά και ευρέως χρησιμοποιούμενη. Τα πιο πολλά κράματα από αυτήν είναι βασισμένα στο 18Cr-8Ni σύστημα, με προσθήκη και άλλων στοιχείων για απόκτηση συγκεκριμένων ιδιοτήτων. Ο τύπος 304 είναι ο πιο διαδεδομένος. Ο *τύπος 316*, όπου είναι και ο προς μελέτη χάλυβας, περιέχει 2% Μο. Οι τύποι "L" όπου έχουν χαμηλότερο ποσοστό άνθρακα, έγιναν ευρέως γνωστοί το 1960-70 με το A.O.D. (argonoxygen decaburization). Αυτό τους ανέδειξε αρκετά επειδή μειώθηκε συμαντικά η διαφορά κόστους μεταξύ των απλών και του "L" τύπου.

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες έχουν ένα πολύ μεγάλο φάσμα εφαρμογών. Μερικές από αυτές είναι σε κτήρια, κουζίνες κ.λ.π.. Δεν είναι γνωστοί μόνο για την αντίσταση σε διάβρωση αλλά και για την πολύ καλή διαμορφωσιμότητα τους και την αντοχή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (μεγαλύτερη και από τους 1000°C).

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνηθισμένοι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες δεν είναι η καλύτερη επιλογή για έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα όπως το θαλασσινό νερό, ή τα χλωριούχα περιβάλλοντα. Αυτό οφείλετε στην ευκολία δημιουργίας ρωγμών λόγω μηχανικής καταπόνησης, ένα φαινόμενο που βασανίζει το βασικό μέταλλο και τη Θ.Ε.Ζ.. Προσοχή θα πρέπει να δίνεται όταν επιλεγεί συγκεκριμένος ανοξείδωτος χάλυβας που θα βρίσκεται κάτω από τέτοιες συνθήκες.

<u>3.2</u> ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΚΡΑΜΑΤΑ</u>

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες χωρίζονται σε δύο σειρές, την 200 και την 300 σύμφωνα με το American Iron Steel Institute (A.I.S.I.).

- Η σειρά 200 έχει υψηλά επίπεδα άνθρακα, μαγνησίου και αζώτου και τα κράματά της χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις όπου απαιτείται αντίσταση σε γαλβανική διάβρωση. Αυτά τα κράματα έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο, σε σύγκριση με τη σειρά 300, ώστε να ισορροπήσουν τη μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα και αζώτου.
- Η σειρά 300 είναι η πιο διαδεδομένη από τους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες και η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη.

Πίνακας 3.1: Σύσταση κοινών σφυρήλατων ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.

			· .				Composition (w	vt%)ª			
Туре	UNS No.	С	Mn	Р	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Other
201	S20100	0.15	5.5-7.5	0.06	0.03	1.0	16.0-18.0	3.5-5.5		0.25	
302	S30200	0.15	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	8.0-10.0			
304	S30400	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0 - 10.5			
304L	S30403	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-12.0			_
304H	S30409	0.04-0.1	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-10.5	_	<u>-</u>	
308	\$30800	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	19.0-21.0	10.0-12.0		· ·	_
309	S30900	0.20	2.0	0.045	0.03	1.0	22.0-24.0	12.0-15.0			
310	S31000	0.25	2.0	0.045	0.03	1.0	24.0-26.0	19.0-22.0	_	-	
316	S31600	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0		
316L	S31603	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0		
317	S31700	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	11.0-15.0	3.0-4.0		
321	S32100	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	9.0-12.0			Ti: 5 × C-0.
30	\$33000	0.10	2.0	0.045	0.03	0.75-1.5	17.0-20.0	34.0-37.0			
347	S34700	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	9.0-13.0		_	Nb: 10 × C-1

Τα πιο σημαντικά κράματα παρατίθενται στον Πίνακα 3.1.

Όπου τα ψηφία στο τέλος του ονόματος τους σημαίνουν:

- "L": Αυτά τα κράματα έχουν βελτιωμένη αντίσταση σε διαβρωτικό περιβάλλων. Είναι low-carbon, δηλαδή η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα είναι περίπου 0,03%
- "Η": Έχουν 0,1% κατά βάρος άνθρακα και χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες μιας και έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε τέτοιες θερμοκρασίες τόσο από τους απλούς ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, όσο και από τους "L"

"N": Έχουν πρόσθετα αζώτου σε υψηλά ποσοστά 0,2% κατά βάρος, και ακόμα περισσότερο σε κράματα με υψηλή περιεκτικότητα σε μαγγάνιο (το Mn αυξάνει την απορρόφηση του αζώτου στην ωστενιτική φάση). Το υψηλό άζωτο βελτιώνει την αντοχή και την αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς.

Τα κράματα που περιέχουν Τιτάνιο (Ti) και Νιόβιο (Nb), όπως ο 321 και ο 347, είναι γνωστά και ως σταθεροποιημένα (stabilized) αφού η προσθήκη αυτών των δύο στοιχείων σταθεροποιεί το κράμα ενάντια στη δημιουργία σχηματισμού M₂₃C₆ καρβιδίου χρωμίου. Επειδή το τιτάνιο και το Νιόβιο δημιουργούν MC καρβίδια σε υψηλές θερμοκρασίες, η δημιουργία καρβιδίων με υψηλό ποσοστό χρωμίου περιορίζεται. Η προσθήκη αυτών των στοιχείων σταιάβάρος μειώνει αποτελεσματικά την πιθανότητα να υπάρχει άνθρακας στη μήτρα και κάνει πιο δύσκολη τη δημιουργία καρβιδίων χρωμίου. Αυτό με τη σειρά του μειώνει τη δυνατότητα ευαισθητοποίησης που θα μπορούσε να οδηγήσει σε περικρυσταλλική διάβρωση των ωστενιτικών κραμάτων.

Στη συνέχεια θα παρατεθούν ωστενιτικά ανοξείδωτα μέταλλα συγκόλλησης (filler), Πίνακας 3.2. Αυτός ο πίνακας χωρίζεται σε τρία μέρη ανάλογα, με τον τρόπο συγκόλλησης.

- Το 1° μέρος (AWS A5.4) είναι για S.M.A.W.συγκολλήσεις
- Το 2[°] μέρος (AWS A5.9) είναι για G.T.A.W. και G.M.A.W. συγκολλήσεις
- Το 3° μέρος (AWS A5.22) είναι για <u>F.C.A.W.</u> συγκολλήσεις (που είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε στο εργαστήριο).

	Other		I			ļ	ł	1	1	ł	I	I	ł	I	I	Nb: 8 × C-1.00			I	I	I	1	ľ	ł	1	ł	(continued)
	z		0.10-0.30			I	ł	I	1		I	I	I	1	I	ļ	0.00	WS A5.9	0.10-0.30	1	I	1	ł	1	I	۱	.*
	Mo		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	2.0 - 3.0	2.0-3.0	2.0-3.0	3.0-4.0	3.0-4.0	0.75	0.75		ips from AV	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
vt%)ª	Ni	S A5.4	5.5-7.0	9.0-11.0	9.0-11.0	9.0-11.0	12.0-14.0	12.0-14.0	20.0-22.5	11.0-14.0	11.0-14.0	11.0-14.0	12.0-14.0	12.0-14.0	33.0-37.0	9.0-11.0		trodes, and Str	5.5-7.0	9.0-11.0	9.0-11.0	9.0-11.0	9.0-11.0	9.0-11.0	12.0-14.0	12.0-14.0	
Composition (v	ბ	odes from AW	19.0-21.5	18.0-21.0	18.0-21.0	18.0-21.0	22.0-25.0	22.0-25.0	25.0-28.0	17.0-20.0	17.0-20.0	17.0-20.0	18.0-21.0	18.0-21.0	14.0-17.0	18.0-21.0		al-Corea Eleci	19.0-21.5	19.5-22.0	19.5-22.0	19.5-22.0	19.5-22.0	19.5-22.0	23.0-25.0	23.0-25.0	
Ű	Si	overed Electi	1.00	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.75	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.90	1.0	Tubular Mar	тытаг мен	1.00	0.30-0.65	0.30-0.65	0.30-0.65	0.65-1.00	0.65-1.00	0.30-0.65	0.30-0.65	
	si	Part 1: C	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Dodo	are roas,	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
	٩.		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	a aporto	ciroaes, D	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
	Mn		8.0-10.0	0.5-2.5	0.5-2.5	0.5-2.5	0.5-2.5	0.5-2.5	1.0 - 2.5	0.5-2.5	0.5-2.5	0.5-2.5	0.5-2.5	0.5-2.5	1.0 - 2.5	0.5-2.5	. Rave Ele.	Dare Lie	8.0-10.0	1.0 - 2.5	1.0 - 2.5	1.0 - 2.5	1.0 - 2.5	1.0 - 2.5	1.0-2.5	1.0-2.5	
	υ		0.06	0.08	0.04-0.08	0.04	0.15	0.04	0.08 - 0.20	0.08	0.04-0.08	0.04	0.08	0.04	0.18-0.25	0.08	Post ?	1 1111 1	0.05	0.08	0.04 - 0.08	0.03	0.08	0.03	0.12	0.03	
	UNS No.		W32310	W30810	W30810	W30813	W30910	W30917	W31010	W31610	W31610	W31613	W31710	W31713	W88331	W34710			S21980	S30880	S30880	S30883	S30881	S30888	S30980	S30983	
	Type		219	308	308H	308L	309	309L	310	316	316H	316L	317	317L	330	347			219	308	308H	308L	308Si	308LSi	309	309L	

Πίνακας 3.2: Ταξινόμηση AWS μετάλλου πλήρωσης ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων (συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα).

$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	D-25 0.03 0.03 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.06 0.05 0.06 0.05 0.06 0.06 0.03 <th0.03< th=""> 0.03 0.03 <th< th=""><th></th><th>C C</th><th>Mn 10-25</th><th>P</th><th>S</th><th>Si</th><th>Cr Cr</th><th>Ni 12 0 14 0</th><th>Mo</th><th>N</th><th>Other</th></th<></th0.03<>		C C	Mn 10-25	P	S	Si	Cr Cr	Ni 12 0 14 0	Mo	N	Other
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.03		1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75		1
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.08-0.15		1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	25.0-28.0	20.0-22.5	0.75	I	
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0:08		1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	I	1
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.04-0.08		1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0		I
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.03		1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	18.0-20.0	11.0 - 14.0	2.0-3.0	ŀ	I
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.08		1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	I	I
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.03		1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	18.0-20.0	11.0 - 14.0	2.0-3.0		1
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.08		1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	18.5-20.5	13.0-15.0	3.0-4.0	١	l
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.03	-	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	18.5-20.5	13.0-15.0	3.0-4.0	١	I
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.18-0.25	_	.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	15.0-17.0	34.0-37.0	0.75	I	I
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	0.08 1	Г	.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	19.0-21.5	9.0-11.0	0.75	١	Nb: 10×C-1.0
Part 3: Gas-Shielded Flux-Cored Electrodes from AWS A5.22 ⁶ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-22.0.25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $11.0-14.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $17.0-20.0$ $11.0-14.0$ $2.0-3.0$ $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $17.0-20.0$ $11.0-14.0$ $2.0-3.0$ $$ $$ $5-2.5$ 0.04	Part 3: Gas-Shielded Flux-Cored Electrodes from AWS A5.22 ⁶ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $11.0-14.0$ 0.5 $ 5-2.5 0.04 0.03 1.0 17.0-20.0 11.0-14.0 2.0-3.0 $	0.08 1	-	.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	19.0-21.5	9.0-11.0	0.75	. 1	Nb: 10×C-1.0
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5-2.5 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ 5-2.5 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ 5-2.5 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ 5-2.5 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ 5-2.5 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ $$ 5-2.5 0.04 0.03 1.0 $22.0-28.0$ $20.0-22.5$ 0.5 $$ $$ 5-2.5 0.04 0.03 1.0 $17.0-20.0$ $11.0-14.0$ $2.0-3.0$ $$ $$ 5-2.5 0.04 0.03 1.0 $17.0-20.0$ $11.0-14.0$ $2.0-3.0$ $$ $$ 5-2.5 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$			ł	² art 3: Gc	1s-Shielde	ed Flux-Core	l Electrodes fi	om AWS A5.22 ⁰			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5-2.5 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ $$ 012.5 0.03 1.0 $22.0-22.0$ $11.0-14.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $17.0-20.0$ $11.0-14.0$ $2.0-3.0$ $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04	0.08 0	0	5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	I	
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5-2.5 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ 02.5 0.03 1.0 $22.0-28.0$ $20.0-22.5$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $17.0-20.0$ $11.0-14.0$ $2.0-3.0$ $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $17.0-20.0$ $11.0-14.0$ $2.0-3.0$ $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ <	0.04 0	0	5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5		I
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5-2.5 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$ $6-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $22.0-28.0$ $20.0-22.5$ 0.5 $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $17.0-20.0$ $11.0-14.0$ $2.0-3.0$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $17.0-20.0$ $11.0-14.0$ $2.0-3.0$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$ 0.5 $$ $$ $5-2.5$ 0.04 0.03 1.0 $18.0-21.0$ $9.0-11.0$	0.04-0.08 0	0	5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	ļ	1
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5-2.5 0.04 0.03 1.0 $22.0-25.0$ $12.0-14.0$ 0.5 $$	0.10 0	0	.5-2.5	0.04	0.03	1.0	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	١	I
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.04	0).5-2.5	0.04	0.03	1.0	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	I	-
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5-2.5 0.04 0.03 1.0 17.0-20.0 11.0-14.0 2.0-3.0 5-2.5 0.04 0.03 1.0 17.0-20.0 11.0-14.0 2.0-3.0 - 5-2.5 0.04 0.03 1.0 17.0-20.0 11.0-14.0 2.0-3.0 - - 5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 12.0-14.0 3.0-4.0 - - 5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 9.0-11.0 0.5 - Nb: 8 × C-1.0 5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 9.0-11.0 0.5 - Nb: 8 × C-1.0 6ctrodes are also included in the AWS A5.22 standard. They have virtually identical composition limits to those of the gas-shielded - -	0.20	_	.0-2.5	0.03	0.03	1.0	25.0-28.0	20.0-22.5	0.5	I	١
.5-2.5 0.04 0.03 1.0 17.0-20.0 11.0-14.0 2.0-3.0 .5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 12.0-14.0 3.0-4.0 .5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 9.0-11.0 0.5 Nb: 8×C-1.0	5-2.5 0.04 0.03 1.0 17.0-20.0 11.0-14.0 2.0-3.0 - - 5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 12.0-14.0 3.0-4.0 - - - 5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 9.0-11.0 0.5 - Nb: 8 × C-1.0 5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 9.0-11.0 0.5 - Nb: 8 × C-1.0 5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 9.0-11.0 0.5 - Nb: 8 × C-1.0 6 ctrodes are also included in the AWS A5.22 standard. They have virtually identical composition limits to those of the gas-shielded	0.08 0	0	.5-2.5	0.04	0.03	1.0	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0		
.5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 12.0-14.0 3.0-4.0	5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 12.0-14.0 3.0-4.0 5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 9.0-11.0 0.5 Nb: 8 × C-1.0 5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 9.0-11.0 0.5 Nb: 8 × C-1.0 6ctrodes are also included in the AWS A5.22 standard. They have virtually identical composition limits to those of the gas-shielded	0.04 0	0	.5-2.5	0.04	0.03	1.0	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	۱	ł
.5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 9.0-11.0 0.5 - Nb: 8×C-1.0	5-2.5 0.04 0.03 1.0 18.0-21.0 9.0-11.0 0.5 — Nb: 8 × C-1.0 ctrodes are also included in the AWS A5.22 standard. They have virtually identical composition limits to those of the gas-shielded	0.04	<u> </u>).5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	12.0-14.0	3.0-4.0	1	I
	ectrodes are also included in the AWS A5.22 standard. They have virtually identical composition limits to those of the gas-shielded	0.08	<u> </u>	.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	I	Nb: 8 × C-1.0

Πίνακας 3.2 (συν.): Ταξινόμηση AWS μετάλλου πλήρωσης ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.
3.3 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΟΜΗ

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες παράγονται και επεξεργάζονται θερμικά ώστε η μικροδομή τους να είναι πρωταρχικά ωστενιτική. Από εκεί και πέρα, ανάλογα με τα α-φερρογόνα η β-φερρογόνα στοιχεία που περιέχουν, θα έχουμε μια πλήρως ωστενιτική μικροδομή ή ωστενιτική και φερριτική μαζί. Δύο χαρακτηριστικές φωτογραφίες αυτών είναι του Σχήματος 3.1.



Σχήμα 3.1: Μικροδομή ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα τύπου 304, (α) πλήρως ωστενιτική, (β) ωστενιτική και φερριτική.

Στην μία περίπτωση, (a) η μικροδομή αποτελείται από πλήρως ωστενιτική δομή. Στην άλλη περίπτωση, (b) υπάρχει και φερρίτης που δημιουργείται σε υψηλές θερμοκρασίες (δ-φερρίτης) κατά τη διεύθυνση της έλασης. Αυτά τα στοιχεία προέρχονται κυρίως από το χρώμιο κατά την διαδικασία της στερεοποίησης ή θερμικών κατεργασιών (το ποσοστό του όμως παραμένει μικρότερο από 2-3% κατά βάρος). Αυτή η παρουσία του φερρίτη αν και δεν επηρεάζει πάρα πολύ, είναι αιτία να μειωθεί η ελαστικότητα και η επεξεργασιμότητα του ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα. Επίσης, κάτι που μας ενδιαφέρει, είναι η διευκόλυνση που παρέχει η παρουσία φερρίτη στη δημιουργία M₂₃C₆ καρβιδίων και σ-φάσης.

Η συμπεριφορά μετασχηματισμού των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων μπορεί να περιγραφεί με βάση το Σχήμα 3.2, το διάγραμμα Fe-Cr-Ni:



(Από τους Lippold και Savage [9]).

*Σε αυτό το διάγραμμα θα αναφερθούμε πολλές φορές και σε επόμενα κεφάλαια της διπλωματικής.

Η αρχική στερεοποίηση των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων μπορεί να προκύψει είτε ωστενιτική είτε φερριτική. Ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο αυτών αρχικών φάσεων στερεοποίησης είναι περίπου στο 18%Cr-12%Ni. Σε μεγαλύτερα ποσοστά Cr – Ni η αρχική στερεοποίηση γίνεται σαν δ-φερρίτης, και σε χαμηλότερες περιεκτικότητες σαν ωστενίτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει μια μικρή τριγωνική περιοχή θερμοκρασιών στερεοποίησης, μέσα στην οποία συνυπάρχουν ωστενιτική – φερριτική – υγρή φάση. Κράματα που στερεοποιούνται ωστενιτικά προς τα αριστερά αυτής της περιοχής είναι σταθερά ως ωστενίτες κατά την απόψυξη σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Εντούτοις, όταν κράματα στερεοποιούνται ως φερρίτες μπορεί να είναι πλήρως φερριτικά ή να αποτελούνται από μείγμα φερρίτη – ωστενίτη στο τέλος της στερεοποίησης. Λόγω της κλίσης των γραμμών "solvus" όλος, ή ο περισσότερος φερρίτης μετασχηματίζεται σε ωστενίτη κάτω από ισορροπημένες συνθήκες ψύξης. Για τις γρήγορες συνθήκες ψύξης που υπάρχουν κατά τη συγκόλληση, αυτός ο μετασχηματισμός μειώνεται και κάποιο ποσοστό φερρίτη θα παραμείνει στη μικροδομή.

Οι επιδράσεις των άλλων στοιχείων του κράματος στις φάσεις των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων δεν θα αναπτυχθούν σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Θα αναφέρουμε απλώς σε διαγράμματα φάσεων που έχουν υπολογιστή θερμοδυναμικά (με πρόγραμμα υπολογιστή, π.χ. ThermCalc). Παράδειγμα αυτού είναι ένα "Fe-18Cr-10Ni-1.5Mn-0.5Si-0.04N" κράμα με μεταβλητή περιεκτικότητα σε άνθρακα και ένα "Fe-10Ni-1.5Mn-0.5Si-0.04N" με μεταβλητή περιεκτικότητα χρωμίου που φαίνονται στα διαγράμματα του Σχήματος 3.3.



Σχήμα 3.3: Διαγράμματα φάσεων που έχουν υπολογιστή θερμοδυναμικά (με πρόγραμμα υπολογιστή,(ThermCalc) (α) Fe-18Cr-10Ni-1.5Mn-0.5Si-0.04N, με μεταβλητό C, (b) Fe-10Ni-1.5Mn-0.5Si-0.04C-0.04N, με μεταβλητό Cr.

<u>3.4</u> ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

Μία ποικιλία κατακρημνισμάτων μπορεί να υπάρχει στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες και εξαρτάται από τη σύσταση και τη θερμική επεξεργασία. Μία κατάσταση αυτών των κατακρημνισμάτων, της δομής τους και της στοιχειομετρίας τους δίνεται στον Πίνακα 3.3.

Precipitate	Crystal Structure	Lattice Parameters (nm)	Stoichiometry
MC	FCC	a = 0.424-0.447	TiC, NbC
M ₆ C	Diamond cubic	a = 1.062-1.128	(FeCr) ₃ Mo ₃ C, Fe ₃ Nb ₃ C, Mo ₅ SiC
M ₂₃ C ₆	FCC	a = 1.057-1.068	(Cr,Fe) ₂₃ C ₆ , (Cr,Fe,Mo) ₂₃ C ₆
NbN	FCC	a = 0.440	NbN
Z phase	Tetragonal	a = 0.307, c = 0.7391	CrNbN
Sigma phase	Tetragonal	a = 0.880, c = 0.454	Fe-Ni-Cr-Mo
Laves phase (η)	Hexagonal	a = 0.473, c = 0.772	Fe ₂ Mo, Fe ₂ Nb
Chi phase (χ)	BCC	a = 0.8807 - 0.8878	Fe36Cr12M010
G phase	FCC	a = 1.12	Ni16Nb6Si2 Ni16Ti6Si2
R	Hexagonal	a = 1.0903, c = 1.9342	Mo-Co-Cr
	Rhombohedral	$a = 0.9011 \alpha = 74^{\circ}27.5'$	Mo-Co-Cr
ε Nitride (Cr ₂ N)	Hexagonal	a = 0.480, c = 0.447	Cr ₂ N
Ni ₃ Ti	Hexagonal	a = 0.9654, c = 1.5683	NiaTi
Ni ₃ (Al,Ti)	FCC	a = 0.681	Ni ₃ Al

Πίνακας 3.3: Δομή και στοιχειομετρία κατακρημνισμάτων που μπορεί να υπάρξουν στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

Καρβίδια υπάρχουν στην πραγματικότητα σε κάθε ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα επειδή το χρώμιο είναι ένα ισχυρό καρβιδιογόνο στοιχείο. Υπάρχουν και άλλα καρβιδιογόνα στοιχεία όπως το Mo, N, Τί που προάγουν την δημιουργία καρβιδίων. Η διαδικασία της δημιουργίας των καρβιδίων λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο σχηματισμού τους και τη θερμοκρασιακή περιοχή της δημιουργίας τους είναι αρκετά σύνθετη. Ακαθαρσίες καρβιδίων Μ23C6 μελετήθηκαν ιδιαίτερα επειδή επηρεάζουν την αντίσταση σε διάβρωση. Όπως φαίνεται και στην Σχήμα 3.5, αυτά τα καρβίδια σχηματίζονται πολύ γρήγορα μέσα στην κρυσταλλική δομή σε θερμοκρασίες 700-900°C. Σε ελαφρά μεγαλύτερους χρόνους η παρουσία αυτών στα όρια των κόκκων μπορεί να οδηγήσει σε περικρυσταλλική διάβρωση εάν υπάρχει έκθεση σε ορισμένα περιβάλλοντα. Αυτή η αντίδραση ενισχύεται σε κράματα που έχουν επεξεργασθεί εν ψυχρώ. Φάσεις σ, χ, η, γ και Laves μπορεί επίσης να σχηματιστούν σε ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες και ιδιαίτερα σε αυτούς που περιέχουν επιπρόσθετα Mo, Nb, Τί. Τυπικά αυτές οι φάσεις σχηματίζονται μετά από μακρόχρονη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες και έχουν ως αποτέλεσμα την ευθραυστότητα του χάλυβα.



Σχήμα 3.4: Κατακρήμνιση καρβιδίων M₂₃C₆ σε ανοξείδωτο χάλυβα τύπου 304 με 0.05%κβ C.

Ένα παράδειγμα της επίδρασης της σ-φάσης στην ευθραυστότητα των Fe-Cr-Ni κραμάτων φαίνεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Επίδρασης της σ-φάσης στη δυσθραυστότητα των Fe-Cr-Ni κραμάτων.

<u>3.5</u> ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι μηχανικές ιδιότητες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων δίνονται στον Πίνακα 3.4.

	Tensile S	Strength	Yield St	rength	Elongation	Reduction in Area (%)	
Alloy	MPa	ksi	MPa	ksi	(%)		
302	515	75	205	30	40	50	
304	515	75	205	30	40	50	
304L	480	70	170	25	40	50	
308	515	75	205	30	40	50	
309	515	75	205	30	40	50	
310	515	75	205	30	40	50	
316	515	75	205	30	40	50	
316L	480	70	170	25	40	50	
317	515	75	205	30	40	50	
321	515	75	205	30	40	50	
330	480	70	205	30	30	_	
347	515	75	205	30	40	50	

Πίνακας 3.4: Μηχανικές ιδιότητες θερμοκρασίας δωματίου σφυρήλατων ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.

Στον Πίνακα 3.4 αναφέρονται οι μηχανικές ιδιότητες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων. Η αντοχή των χαλύβων αυτών βελτιώνεται σημαντικά με ψυχρή κατεργασία. Όμως γενικά δεν μπορούν να αυξήσουν την αντοχή τους με κατακρήμνιση. Ορισμένα ειδικά κράματα που περιέχουν μεγαλύτερα ποσοστά Νi και Ti, αυξάνουν την αντοχή τους με κατακρήμνιση Ni₃(Al, Ti), γεγονός που συναντάται συχνά σε υπερκράματα νικελίου. Επίσης είναι δυνατός ο σχηματισμός μαρτενσίτη σε ορισμένους τύπους ωστενιτικών χαλύβων, που όμως συμβαίνει υπό ειδικές συνθήκες. Ο μαρτενσίτης έχει παρατηρηθεί σε κράματα που έχουν υποστεί ψυχρή κατεργασία ή όταν τα υλικά ψύχονται σε κρυογενικές θερμοκρασίες [1,9].

<u>3.6</u> ΜΙΚΟΔΟΜΗ ΖΩΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΣ

Η μικροδομή της ζώνης συγκολλήσεως (fusion zone) του ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι, ή φερριτική, ή ωστενιτική. Το αν θα στερεοποιηθεί φερριτικά ή ωστενιτικά εξαρτάται από τη σύνθεσή του. Μια μικρή αλλαγή στην περιεκτικότητα κάποιου κράματος είναι ικανή για τη μετατροπή του από φερριτική σε ωστενιτική στερεοποίηση και αντίστροφα. Επίσης, περαιτέρω μεταβολές μπορεί να πραγματοποιηθούν κατά την στερεοποίηση του διαλύματος ώσπου να φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες κατά τη στερεοποίησή τους από τη συγκόλληση έχουν τέσσερις πιθανές μικροδομές, όπως εμφανίζονται στον Πίνακα 3.5.

Solidification Type	Reaction	Microstructure
A	$L \rightarrow L + A \rightarrow A$	Fully austenitic, well-defined solidification structure
AF	$L \rightarrow L + A \rightarrow L + A +$ (A + F) _{ent} $\rightarrow A + F_{ent}$	Ferrite at cell and dendrite boundaries
FA	$L \rightarrow L + F \rightarrow L + F +$ (F + A) _{medium} $\rightarrow F + A$	Skeletal and/or lathy ferrite resulting from ferrite-to-austenite transformation
F	$L \rightarrow L + F \rightarrow F \rightarrow F + A$	Acicular ferrite or ferrite matrix with grain boundary austenite and Widmanstätten side plates

Πίνακας 3.5: Μικροδομή της ζώνης συγκολλήσεως του ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα.

όπου:

Α: Αμιγώς Ωστενιτική

ΑF: Κυρίως Ωστενιτική με μικρό ποσοστό Φερρίτη

FA: Κυρίως Φερριτική με μικρό ποσοστό Ωστενίτη

F: Αμιγώς Φερριτική

Αυτές φαίνονται αναλυτικότερα στο Fe-Cr-Ni διάγραμμα του Σχήματος 3.6.



Relationship of solidification type to the pseudobinary phase diagram.

Σχήμα 3.6: Ψευδοδιμερές διάγραμμα Fe-Cr-N με τις περιοχές μικροδομών στερεοποίησης.

*Σε αυτό το διάγραμμα θα αναφερθούμε πολλές φορές σε αυτό το κεφάλαιο της διπλωματικής.

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στους τέσσερις αυτούς τύπους στερεοποίησης αναλυτικότερα.

ΤΥΠΟΣ Α: Πλήρως Ωστενιτική.

Όταν κατά τη στερεοποίηση έχουμε αρχικά δημιουργία ωστενίτη, τότε δύο μικροδομές είναι δυνατό να πάρουμε στο μέταλλο συγκόλλησης, τύπου A ή AF. Av η μικροδομή είναι πλήρως ωστενιτική στο τέλος της στερεοποίησης (συγκόλλησης), τότε θα παραμείνει ωστενιτική και μετά την επαναφοράς του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και θα έχει μία σαφή δομή όταν το δούμε μεταλλογραφικά. Αυτή ορίζεται ως πλήρως ωστενιτική στερεοποίηση και παραστατικά φαίνεται στο Σχήμα 3.7, ενώ η μεταλλογραφική της μορφή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 3.7: Παραστατική μορφή στερεοποίηση Τύπου Α της ζώνης συγκολλήσεως . (Από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).



Σχήμα 3.8: Μεταλλογραφική μορφή στερεοποίηση Τύπου Α της ζώνης συγκολλήσεως . (Από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).

Σε αυτό το σημείο παρατηρούμε ότι οι κόκκοι και οι δενδρίτες που φαίνονται με το μικροσκόπιο είναι εύκολα παρατηρίσιμοι. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό της μικροδομης του «τύπου Α» και οφείλετε στον διαχωρισμό των κραματικών στοιχείων και των στοιχείων ακαθαρσίας που υπάρχουν κατά τη διαδικασία στερεοποίησης και τη σχετικά χαμηλή δυνατότητα διάχυσης που έχουν αυτά τα στοιχεία σε υψηλές θερμοκρασίες, που δεν επιτρέπουν τον σχηματισμό της κρυσταλλικής δομής που θα αναπτύσσονταν υπό κανονικές συνθήκες κατά την στερεοποίηση. Σε κράματα όπως οι 304 και 316 ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες έχει παρατηρηθεί ότι, όταν στερεοποιούνται κατά τον «τύπο Α», το Cr και το Mo που περιέχουν συγκεντρώνεται στα όρια των κόκκων (κυψέλες) και των δενδριτών.

ΤΥΠΟΣ AF: Κυρίως Ωστενιτική με μικρό ποσοστό Φερρίτη.

Εάν κάποια φερριτική δομή εμφανιστεί στο τέλος της αρχικής ωστενιτικής στερεοποίησης, τότε έχουμε στερεοποίηση «τύπου AF». Αυτό συμβαίνει εάν επαρκή στοιχεία που προωθούν τον σχηματισμό του φερρίτη (κυρίως Cr και Mo) παρευρίσκονται στα όρια τω κόκκων κατά τη στερεοποίηση. Αυτό συμβαίνει μέσω μίας εύτηκτης αντίδρασης και αντιπροσωπεύεται στο διάγραμμα των φάσεων (Σχήματα 3.2 και 3.6) από την τριγωνική περιοχή όπου συνυπάρχουν οι τρεις φάσεις (ωστενιτική-φεριτική-υγρή). Ο φερρίτης που σχηματίζεται στα όρια των κόκκων είναι σχετικά σταθερός και δεν μετατρέπεται σε ωστενίτη κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης της συγκόλλησης, όπου το μέταλλο επανέρχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, λόγο του ότι υπερτερούν τα στοιχεία που προωθούν τον σχηματισμό του φερρίτη. Αυτή ορίζεται ως κυρίως Ωστενιτική στερεοποίηση με μικρό ποσοστό φερρίτη και παραστατικά φαίνεται στο Σχήμα 3.9, ενώ η μεταλλογραφική της μορφή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.9: Παραστατική μορφή στερεοποίηση Τύπου ΑF της ζώνης συγκολλήσεως . (Από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).



Σχήμα 3.10: Μεταλλογραφική μορφή στερεοποίηση Τύπου ΑF της ζώνης συγκολλήσεως . (Από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).

ΤΥΠΟΣ FA: Κυρίως Φερριτική με μικρό ποσοστό Ωστενίτη.

Όταν η στερεοποίηση γίνεται κυρίως φερριτικά, υπάρχουν δύο πιθανές δομές, η Skeletal και η Lathy. Εάν σχηματίζεται κάποιος ωστενίτης στα άκρα της στερεοποίησης ονομάζεται τύπου FA. Αυτός ο ωστενίτης σχηματίζεται μέσω περιτικτικής – ευτηκτικής αντίδρασης (peritectic-eutectic reaction) κατά την λήξη της στερεοποίησης και εμφανίζεται στα άκρα του φερρίτη. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει από: David [11], Leone – Kerr [12], Lippold – Savage [9], Katayama [10] και άλλους, έχουν καταγραφεί οι παρακάτω τροποποιήσεις κατά τη στερεοποίηση, ώστε να έχουμε στερεοποίηση τύπου FA.

 Κατά το τέλος της αρχικής στερεοποίησης του φερρίτη μετά από τη συγκόλληση, μία περιτηκτική – ευκτητική αντίδραση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ωστενίτη κατά μήκος των κόκκων του φερρίτη και δενδροειδών ορίων. Αυτή η αντίδραση προκύπτει μέσα και κατά μήκος του τριγώνου που περιέχει τις τρεις φάσης (F-A-υγρή) του διαγράμματος φάσεων (σχήμα 3.2 και 3.6). Καλείται περιτηκτική – ευτηκτική αντίδραση επειδή εξαρτάται από την περιεκτικότητα του κράματος και το αποτέλεσμα της μπορεί να είναι από περιτηκτική αντίδραση στο σύστημα Fe-Cr-Ni.



Σχήμα 3.11: (α) σχεδιάγραμμα υγρής φάσης, (β) σχεδιάγραμμα στερεής φάσης σε ένα τριαδικό Fe-Cr-Ni σύστημα (από το ASM Metals Handbook [13]) .

2. Όταν ολοκληρωθεί η στερεοποίηση, η μικροδομή αποτελείται από πρωτογενείς δενδρίτες φερρίτη με ένα λεπτό στρώμα ωστενίτη ανάμεσα τους. Το ποσοστό του ωστενίτη που υπάρχει εξαρτάτε από τις συνθήκες στερεοποίησης και τον λόγο των ισοδύναμων Creq προς Nieq (Creq/Nieq). Όσο ο λόγος αυτός αυξάνει, τόσο το ποσοστό του ωστενίτη μειώνεται, έως ότου η στερεοποίηση είναι τελείως φερριτική. Στο σημείο αυτό η στερεοποίηση αλλάζει από τύπου FA σε τύπου F.

3. Όσο το συγκολλημένο μέταλλο (δ-φερρίτης και ωστενίτης) ψύχεται, ο φερρίτης γίνεται προοδευτικά ασταθής, ενώ ο ωστενίτης αρχίζει να καταναλώνει τον φερρίτη μέσω μίας αντίδρασης διάχυσης. Πλέων είναι γενικά αποδεκτό ότι η διάχυση μέσω των ορίων ωστενίτη – φερρίτη ελέγχει τον ρυθμό και την φύση αυτής της αντίδρασης.

4. Όταν ο ρυθμός ψύξης είναι σχετικά χαμηλός και / ή ο λόγος Cr_{eq}/Ni_{eq} είναι χαμηλός αλλά εντός της περιοχής FA στο διάγραμμα των φάσεων (Σχήμα 3.2), προκύπτει φερριτική μορφολογία. Αυτό είναι πλεονέκτημα του ωστενίτη να καταναλώνει τον φερρίτη έως ότου ο φερρίτης να είναι αρκετά εμπλουτισμένος σε στοιχεία που εξασφαλίζουν τη σταθερότητα του (κυρίως Cr και Mo) και πτωχός σε στοιχεία που εξασφαλίζουν την σταθερότητα του ωστενίτη ιστενίτη (κυρίως Ni, C, N) και σταθεροποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες όπου η διάχυση περιορίζεται. Αυτή η μικροδομή είναι χαρακτηριστική (Skeletal ferrite) και φαίνεται στα Σχήματα 3.12 και 3.13.



Σχήμα 3.12: Μεταλλογραφική μορφή στερεοποίηση Τύπου FA (Skeletal) της ζώνης συγκολλήσεως, (από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).



Σχήμα 3.13: Παραστατική μορφή στερεοποίηση Τύπου FA (Skeletal) της ζώνης συγκολλήσεως, (από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).

5. Όταν ο ρυθμός ψύξεως είναι υψηλός και / ή ο λόγος Cr_{eq}/Ni_{eq} αυξάνεται μέσα στην περιοχή FA του διαγράμματος φάσεων (σχήμα 3.6), μια νέα (lathy) φερριτική μορφή προκύπτει. Αυτή η μορφή προκύπτει αντί της σκελετικής (Skeletal morphology που περιγράψαμε στο 4° βήμα) λόγω της περιορισμένης δυνατότητας διάχυσης κατά τη μετατροπή φερρίτη σε ωστενίτη. Όταν οι αποστάσεις διάχυσης μειώνονται, τότε είναι πιο αποτελεσματική – γρήγορη η τροποποίηση, γιατί τα πιο πυκνά δομημένα laths έχουν ως αποτέλεσμα ένα παραμένον φερριτικό μοτίβο που κόβεται κατά μήκος της αρχικής δενδροειδούς δομής ή της κατεύθυνσης ανάπτυξης των κόκκων. Αυτή η μικροδομή φαίνεται στα Σχήματα 3.14 και 3.15.



Σχήμα 3.14: Μεταλλογραφική μορφή στερεοποίηση Τύπου FA (Lathy) της ζώνης συγκολλήσεως, (από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).

6. Όταν η στερεοποίηση γίνεται εξαιρετικά γρήγορα, όπως π.χ. κατά την κοπή με λέιζερ (laser) ή τη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam welding), μια πλήρης μετατροπή από φερρίτη σε ωστενίτη μπορεί να είναι δυνατή λόγο της μαζικής μετατροπής χωρίς διάχυση. Μια αλλαγή στον αρχικό τρόπο στερεοποίησης από ωστενίτη σε φερρίτη μπορεί επίσης να προκύψει με ταχεία απόψυξη, ή στερεοποίηση.



Σχήμα 3.15: Παραστατική μορφή στερεοποίηση Τύπου FA (Lathy) της ζώνης συγκολλήσεως, (από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).

ΤΥΠΟΣ F: Πλήρως Φερριτική.

Εάν η στερεοποίηση γίνει πλήρως φεριτική, ονομάζεται τύπου F. Σε αυτή την περίπτωση η μικροδομή είναι πλήρως φεριτική στο τέλος της στερεοποίησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, όταν το μέταλλο της συγκόλλησης ψυχθεί και βρεθεί κάτω από την καμπύλη του φερρίτη (ferrite solvus στο διάγραμμα), κανονικά θα έπρεπε να αρχίσει και ο σχηματισμός μικρής ποσότητας ωστενίτη στα όρια των κόκκων του φερρίτη Επειδή όμως η δομή ήταν πλήρως φερριτική κατά τη στερεοποίησή του η διάχυση περιορίζει την επέκταση των κόκκων του ωστενίτη και επομένως όταν η στερεοποίηση αρχίσει, η μικροδομή αποτελείται από σχεδόν ομογενείς κόκκους φερρίτη. Ο βαθμός τροποποίησης του ωστενίτη εξαρτάται και εδώ από τον λόγο Cr/Ni και τον ρυθμό ψύξης.

Σε χαμηλές τιμές λόγου Cr_{eq}/Ni_{eq}, αλλά μέσα στην περιοχή F (στο διάγραμμα φασών Σχήμα 3.6), η μετατροπή – μετασχηματισμός αρχίζει σε υψηλότερη θερμοκρασία, και σε σχετικά χαμηλούς ρυθμούς ψύξης, μεγάλο μέρος του φερρίτη καταναλώνεται. Με υψηλότερους ρυθμούς ψύξης η διάχυση περιορίζεται και ο ωστενίτης δεν καταναλώνει τόσο πολύ φερρίτη.

Αντίστοιχα όταν ο λόγος Cr_{eq}/Ni_{eq} αυξάνετε μέσα στην περιοχή F (στο διάγραμμα φάσεων, Σχήμα 3.6), το διάλυμα του φερρίτη καταπιέζετε και η τροποποίηση γίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Και στις δύο περιπτώσεις θα προκύψουν μέταλλα συγκόλλησης με υψηλή περιεκτικότητα σε φερρίτη.

Η μικροδομή που προκύπτει ως αποτέλεσμα στερεοποίησης τύπου F είναι φερριτικός ανοξείδωτος χάλυβας και εξαρτάται από την σύνθεση του κράματος, αλλά και από τον ρυθμό ψύξεις.

1. Σε χαμηλούς λόγους Cr_{eq}/Ni_{eq}, εντός όμως της περιοχής F, δημιουργείται μία νέα βελονοειδής (acicular) δομή φερρίτη ανάμεσα στους κόκκους του φερρίτη. Αυτή η δομή φαίνεται στο σχήμα 3.16



Σχήμα 3.16: Παραστατική μορφή στερεοποίηση Τύπου F (acicular) της ζώνης συγκολλήσεως, (από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν συνεχείς ωστενιτικές δομές στα όρια του αρχικού φερρίτη και ότι ο βελονοειδής φερρίτης δεν περιέχεται πλέον στα όρια των αρχικών δενδριτών. Αυτό γίνεται επειδή δεν υπάρχει ωστενίτης ανάμεσα στους κόκκους του φερρίτη κατά τη στερεοποίηση τύπου F. Η δομή αυτή είναι πλήρως φερριτική στη στερεά μορφή προτού αρχίσει η μετατροπή σε ωστενίτη. Όταν το τήγμα ψυχθεί και βρεθεί κάτω από την καμπύλη του φερρίτη (ferrite solvus) του διαγράμματος φάσεων (Σχήμα 3.6), σχηματίζεται αρχικά ωστενίτης στα όρια των κόκκων του φερρίτη αλλά το μέτωπο τροποποίησης διασπάται (σταματά) και παράλληλες βελόνες ωστενίτη σχηματίζονται μέσα στον φερρίτη. Όπως και στην περίπτωση στερεοποίησης τύπου FA, ο περιορισμός την εκτεταμένης διάχυσης σε χαμηλότερες αποστάσεις. Αυτό παράγει τη δομή που φαίνεται στο Σχήμα 3.16.

2. Σε μεγαλύτερους λόγους Cr/Ni (εφόσον έχουμε τον ίδιο ρυθμό ψύξης), η μικροδομή θα αποτελείται από κόκκους φερρίτη με όρια κόκκων ωστενίτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17 και 3.18.



Σχήμα 3.17: Παραστατική μορφή στερεοποίηση Τύπου F της ζώνης συγκολλήσεως. (Από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).



Σχήμα 3.18: Μεταλλογραφική μορφή στερεοποίηση Τύπου F της ζώνης συγκολλήσεως. (Από τους Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A. [10]).

Πρακτικά η στερεοποίηση τύπου F είναι εξαιρετικά σπάνια σε συγκολλησεις ανοξείδωτων ωστενιτικών χαλύβων. Τα περισσότερα κράματα είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε η στερεοποίηση που προκύπτει να είναι τύπου FA όταν συγκολλούνται με μέταλλα που περιέχουν φερρίτη από 5 έως 20 FN (ferrite number). Μόνο ειδικά κράματα μετάλλων όπως το 309LMo και το 312 (30Cr-10Ni), είναι αναμενόμενο να έχουν μικροδομές με μεγάλο ποσοστό φερρίτη.

<u>3.7</u> <u>ΔΙΕΠΙΦΑΝΙΕΣ ΣΕ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΜΕΤΑΛΛΟ</u> ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η φύση των διαφόρων ορίων ή διεπιφανειών που υπάρχουν στο μέταλλο συγκόλλησης ανοξείδωτων χαλύβων, διότι τα περισσότερα από τα ελαττώματα που σχετίζονται με την ζώνη τήξης, τόσο κατά τη κατασκευή όσο και κατά τη συντήρηση, σχετίζονται με αυτά τα όρια. Τα όρια αυτά στερεοποιούνται κατά Α ή ΑF τύπο, επειδή η δομή της στερεοποίησης είναι καθαρός εμφανείς μετά από λείανση και παρατήρηση με μικροσκόπιο. Τουλάχιστον τρείς διαφορετικοί τύποι ορίων μπορούν να παρατηρηθούν μεταλλογραφικά. Αυτοί φαίνονται στο Σχήμα 3.19 και αναπτύσσονται στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 3.19: Σχηματική απεικόνιση των τριών ορίων σε μέταλλο συγκόλλησης που αρχικά έχει στερεοποιηθεί ως ωστενίτης (τύπος Α ή ΑF).

1. ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΟΚΚΩΝ 2^{ας} ΤΑΞΕΩΣ (S.S.G.B.)

Οι διεπιφάνειες στερεοποίησης κόκκων 2^{ας} τάξεως (SOLIDIFICATION SUBGRAIN BOUNDARIES - S.S.G.Bs) παριστάνουν τη μικρότερη δομή που μπορεί να παρατηρηθεί με οπτικό μικροσκόπιο. Αυτοί οι κόκκοι συνήθως παριστάνουν κόκκους ή δενδρίτες και τα όρια που διαχωρίζουν παράπλευρους κόκκους είναι γνωστά ως διεπιφάνειες στερεοποίησης κόκκων 2^{ας} τάξεως (S.S.G.B.). Αυτά τα όρια είναι απόδειξη της μικροδομής γιατί η σύστασή τους είναι διαφορετική από αυτή της γενικής μικροδομής. Υπάρχει μικρή ενδοκρυσταλλική παραμόρφωση κατά μήκος του S.S.G.B. και αυτά τα όρια χαρακτηρίζονται κρυσταλλογραφικά ως όρια μικρής γωνίας. Η μικρή αυτή παραμόρφωση προς κάποια κρυσταλλογραφική κατεύθυνση. Αυτές οι κατευθύνσεις είναι αρκετές στους ανοξείδωτους χάλυβες και για αυτό είναι μικρή και η παραμόρφωση.

2. ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΟΚΚΩΝ (S.G.B.)

στερεοποίησης κόκκων (SOLIDIFICATION GRAIN Οι διεπιφανειες BOUNDARIES -S.G.Bs) είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης λεπτών κόκκων, ή ομάδων γειτονικών κόκκων. Επομένως, τα S.G.B. είναι άμεσο αποτέλεσμα της ανταγωνιστικής ανάπτυξης που προκύπτει κατά τη στερεοποίηση μέσα στο τήγμα της συγκόλλησης. Επειδή κάθε μία από της ομάδες, ή λεπτούς κόκκους, έχει μία διαφορετική κατεύθυνση ανάπτυξης και προσανατολισμό, η διεπιφάνια που προκύπτει είναι ένα όριο με μεγάλες γωνιακές αλλαγές κατεύθυνσης. Αυτά συνήθως καλούνται όρια κόκκου μεγάλης γωνίας (high-angle grain boundaries). Αυτά τα S.G.B. εμφανίζουν επίσης ανωμαλίες στην περιεκτικότητα που προκύπτουν από την αναδιάταξη του τήγματος κατά τη στερεοποίηση. Οι ανωμαλίες αυτές μπορεί να οδηγήσουν στον σχηματισμό στρωμάτων χαμηλής τήξης κατά μήκος των S.G.B. το οποίο μπορεί να δημιουργήσουν ρωγματώσεις συγκόλλησης. Οποτεδήποτε προκληθούν ρηγματώσεις συγκόλλησης σε ανοξείδωτο χάλυβα, αυτές είναι συνήθως κατά μήκος των S.G.B.

3. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΜΕΝΕΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΚΟΚΚΩΝ (M.G.B.)

Ονομάζονται οι διεπιφάνειες των κόκκων που έχουν μετακινηθεί (*MIGRATED GRAIN BOUNDARIES - M.G.B.s*). Τα όρια που σχηματίζονται κατά το τέλος της στερεοποίησης μπορεί να έχουν και S.G.B. και M.G.B. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατό για ένα κρυσταλλογραφικό στοιχείο του S.G.B. να μετατοπιστεί από το στοιχείο που το περιείχαι. Αυτό το νέο όριο που ορίζεται από τους μετατοπισμένου κόκκους ορίζεται ως M.G.B. Η οδηγός δύναμη για τη μετατόπιση είναι η ίδια όπως η δύναμη μεγένθισης του κόκκου στα βασικά μέταλλα για να χαμηλώσουν ενεργειακά. Το αρχικό S.G.B. είναι αρκετά ελικοειδές (όπως παρατηρούμε και στο Σχήμα 3.19) επειδή σχηματίζεται από τη διεπιφάνεια δύο κοντινών κόκκων ή δενδριτών. Το κρυσταλλογραφικό όριο μπορεί να χαμηλώσει την ενέργειά του, τείνοντας να γίνει πιο ομαλό (δηλαδή ευθύ) και κατά την διαδικασία αυτή ξεφεύγει από το αρχικό S.G.B.. Μεγαλύτερη μετατόπιση πολλών στρώσεων. Επειδή το

M.G.B. κρατά την κρυσταλλική γωνία του S.G.B., συνήθως έχει μια μεγάλη γωνία απόκλισης, μεγαλύτερη από 30°.

Η περιεκτικότητα του ορίου διαφεύγει τοπικά και εξαρτάται από την περιεκτικότητα της δομής στην οποία έχει βρεθεί.

Τα Μ.G.B. συνήθως εμφανίζονται σε πλήρως ωστενιτικά μέταλλα συγκόλλησης. Όταν το μέταλλο συγκόλλησης στερεοποιείται κατά τύπο AF σχηματίζεται φερρίτης προς το τέλος της στερεοποίησης κατά μήκος των S.S.G.B. και S.G.B.. Αυτός ο φερρίτης είναι αποτελεσματικός δείκτης του κρυσταλλογραφικού στοιχείου του S.G.B. και επομένως δεν επιτρέπει την μετατόπιση μακριά από το S.G.B.. Έτσι Μ.G.B. δεν δημιουργούνται επειδή δεν μπορούν να δημιουργηθούν μεγάλης γωνίας κρυσταλλογραφικά όρια.

Σαν παράδειγμα μίας τέτοιου τύπου διεπιφάνειας σε μονοφασικό μέταλλο 304L παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20: Ζώνη συγκόλλησης χάλυβα τύπου 304L που έχει στερεοποιηθεί κατά «τύπο Α».

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακριβής απόσταση μετατόπισης του M.G.B. είναι μόλις 5-6 μm από το S.G.B. και ότι ξεκινάει από το κέντρο των λεπτών κόκκων στερεοποίησης.

Όταν η στερεοποίηση είναι τύπου FA ή F, σχηματίζονται επίσης όρια S.S.G.B. και S.G.B., αλλά δεν είναι απαραίτητα εμφανή στην μικροδομή. Αυτό γίνετε για τρεις λόγους:

- Διαχωρισμός κατά την φερριτιική στερεοποίηση δεν είναι τόσο εμφανής όσο κατά την ωστενιτική.
- Διάχυση σε υψηλές θερμοκρασίες είναι πολυ πιο γρήγορη στους φερρίτες παρά στους ωστενίτες (της τάξεως του 100).

 Ο μετασχηματισμός φερρίτη σε ωστενίτη τείνει να φέρει οποιαδήποτε ανωμαλία στερεοποίησης στον φερρίτη.

Τα M.G.B. τυπικά δεν παρατηρούνται σε συγκολλημένα μέταλλα που στερεοποιήθηκαν με τύπο F ή FA. Αν και πρέπει θεωρητικά να υπάρχουν, είναι πρακτικά αδύνατο να διαχωριστούν από τα όρια φερρίτη – ωστενίτη.

<u>3.8</u> ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΖΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ

Η φύση της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (Θ.Ε.Ζ.) εξαρτάται από τη σύνθεση και τη μικροδομή του βασικού μετάλλου. Οι ακόλουθες μεταλλουργικές αντιδράσεις μπορεί να προκύψουν στη Θ.Ε.Ζ. των ωστενιτικών κραμάτων.

1. ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΚΚΟΥ

Οι περισσότεροι ανοξείδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες πριν συγκολληθούν έχουν ανοπτηθεί ή προέρχονται από θερμή έλαση και έτσι η αύξηση του κόκκου είναι συνήθως περιορισμένη. Εξαίρεση αποτελούν οι συγκόλλησης με πολύ υψηλή θερμοκρασία. Κάποια ορισμένη αύξηση των ορίων των κόκκων μπορεί να παρατηρηθεί, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι μεγάλη. Σε βασικά μέταλλα που έχουν σκληρυνθεί με κατεργασία εν ψυχρώ, ανακρυστάλλωση και μεγένθυση του κόκκου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση της σκληρότητας του ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα.

2. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΦΕΡΡΙΤΗ

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.2 και 3.6, κράματα τα οποία είναι στο δεξιό άκρο της πλήρους ωστενιτικής περιοχής στερεοποίησης, θα δημιουργήσουν φερρίτη αν θερμανθούν σε θερμοκρασίες λίγο παρακάτω από την θερμοκρασία υγροποίησης. Όσο υψηλότερος είναι ο λόγος Cr_{eq}/Ni_{eq} του κράματος, τόσο περισσότερος φερρίτης θα σχηματιστεί. Συνήθως ο φερρίτης σχηματίζεται στα όρια των κόκκων, όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 3.21.

Ο σχηματισμός του φερρίτη στα όρια των κόκκων της Θ.Ε.Ζ. εμποδίζει την αύξηση του κόκκου και ελαχιστοποιεί την πιθανότητα δημιουργίας ρωγμών υγροποίησης στη Θ.Ε.Ζ.. Το ποσοστό του σχηματιζόμενου φερρίτη είναι συνήθως μικρό επειδή ο ωστενιτικός – φερρίτικός μετασχηματισμός είναι σχετικά αργός και η Θ.Ε.Ζ. κρυώνει αρκετά γρήγορα. Είναι, επίσης δυνατό κάποιος από τον φερρίτη που δημιουργήθηκε όσο υπήρχε υψηλή θερμοκρασία να μετασχηματιστεί ξανά σε ωστενίτη κατά τη ψύξη.



Σχήμα 3.21: Φερρίτης στα όρια των κόκκων στην Θ.Ε.Ζ. του 304L ανοξείδωτου χάλυβα.

3. ΑΚΑΘΑΡΣΙΕΣ

Επειδή η Θ.Ε.Ζ. θερμαίνεται σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν την θερμοκρασία τήξης του κράματος, πολλές από της ακαθαρσίες που υπάρχουν στο βασικό μέταλλο μπορεί να διαλυθούν. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στον υπερκορεσμό της ωστενιτική μήτρας κατά την ψύξη, έχοντας ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό διαφόρων ακαθαρσιών. Καρβίδια ή νιτρίδια είναι οι συνηθέστερες ακαθαρσίες που σχηματίζονται στη Θ.Ε.Ζ. στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες. Συνήθως σχηματίζονται στα όρια των κόκκων, ή στις διεπιφάνιες φερρίτη – ωστενίτη (εάν υπάρχει φερρίτης). Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται οι θερμοκρασίες στις οποίες τα καρβίδια και τα νιτρίδια είναι σταθερά. Αν και δεν έχει αποδεικθεί μεταλλογραφικά, φαίνεται ότι αυτές οι ακαθαρσίες υπάρχουν στη Θ.Ε.Ζ. των περισσοτέρων ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων. Το μέγεθος, η μορφολογία και η διατομή τους εξαρτάται από την περιεκτικότητα του κράματος και τον κύκλο θέρμανσης της Θ.Ε.Ζ. Υπερβολικά πλούσιες σε Cr ακαθαρσίες καρβιδίων μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της αντοχής σε διάβρωση.

4. ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΑ ΟΡΙΑ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ

Τοπική υγροποίηση στα όρια των ωστενιτικών κόκκων μπορεί επίσης να πρόκυψει. Αυτό συνήθως συμβαίνει από τις ακαθαρσίες που υπάρχουν στα όρια των κόκκων, που μειώνουν τη θερμοκρασία υγροποίησης. Κράματα που περιέχουν τιτάνιο και νιόβιο και τα οποία σχηματίζουν MC καρβίδια πλούσια σε αυτά τα μέταλλα, μπορεί να προκαλέσουν υγροποίηση γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμή. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και με επικαθίσεις φωσφόρου και θείου στα όρια των κόκκων.

3.9 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Οι μηχανικές ιδιότητες των συνήθων ωστενιτικών ανοξείδωτων μετάλλων συγκόλλησης φαίνονται στον Πίνακα 3.6.

	Tensile S	Strength	Florention		
Туре	MPa	ksi	(%)		
219	620	90	15		
308	550	80	35		
308H	550	80	35		
308L	520	75	35		
309	550	80	30		
309L	520	75	30		
310	550	80	30		
316	520	75	30		
316H	520	75	30-1-		
316L	480	70	30		
317	550	80	30		
317L	520	75	30		
330	520	75	25		
347	520	75	30		

Πίνακας 3.6: Μηχανικές ιδιότητες συνήθων ωστενιτικών ανοξείδωτων μετάλλων
συγκόλλησης

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες συνήθως συγκολλούνται σε ανοπτημένη κατάσταση. Σε όλες τις περιπτώσεις μειώνεται η σκληρότητα της Θ.Ε.Ζ. είτε λόγω της μεγέθυνσης του κόκκου, είτε λόγο ανακρυστάλλοσης. Επομένως όταν γίνονται δοκιμές εφελκυσμού σε συγκολλημένα δοκίμια η αστοχία συνήθως εμφανίζεται στη Θ.Ε.Ζ. παρά στο σημείο συγκόλλησης. Η παρουσία φερρίτη στο μέταλλο συγκόλλησης ενεργεί ως δευτερογενής ενισχυτικός παράγοντας και αυξάνει την αντοχή σε σχέση με την αντοχή του βασικού μετάλλου.

Μερικές τιμές αντοχής μετάλλων συγκόλλησης φαίνονται στον Πίνακα 3.7.

	Orientation	Yield S	trength	Tensile	Strength	Flongation	Reduction in	
Material	or Condition	MPa	ksi	MPa	ksi	(%)	Area (%)	
308L	Transverse	452	65.6	605	87.7	55.5	75.3	
308L	Longitudinal	450	65.3	595	86.3	59.8	73.7	
219	Transverse	617	89.5	807	117.0	45.1	62.3	
219	Longitudinal	600	87.0	811	117.6	48.4	61.5	
312	Transverse	592	85.8	752	109.0	14.6	23.1	
312	Longitudinal	607	88.0	774	112.2	24.9	31.0	
304	Annealed plate	241	35	565	82	60	70	

Πίνακας 3.7: Τιμές αντοχής ωστενιτικών μετάλλων συγκόλλησης.

"Type 308L = FN 12, Nitronic 40 (Type 219) = FN 4, Type 312 = FN 30. Weld metal pads made with GTAW, cold wire feed process.

Η επίδραση του φαινομένου του σχηματισμού του φερρίτη στις μηχανικές ιδιότητες του E308-16 σε μία ευρεία περιοχή θερμοκρασιών έχει μελετηθεί από τους Hauser και Van Echo [14]. Αξιολόγησαν, με βάση το Ferrite number (FN) από: (α) πολύ μικρό, 2FN, (β) μικρό, 6FN, (γ) μεσαίο, 10FN και (δ) υψηλό, 16FN, τον σχηματισμό φερρίτη σε θερμοκρασίες από 25 έως 650 °C. Τα αποτελέσματά τους φαίνονται στον Πίνακα 3.8.

Tem	peratur	e		Yiel Stre	ld ngth	Tens	sile ngth	Flongation	Reduction
°C	°F	FN	Orientation	MPa	ksi	MPa	ksi	(%)	in Area (%)
27	80	2	L	434	62.9	605	87.7	40.0	50.9
-			- T	472	68.4	628	91.0	35.8	40.7
		6	L	425	61.6	596	86.3	48.0	51.1
			т	490	71.0	642	93.1	40.8	44.9
		10	L	438	63.4	622	90.2	48.5	53.4
			т	458	66.3	628	91.0	49.3	46.3
		16	L	470	68.1	660	95.7	42.0	42.7
			т	529	76.7	689	99.8	41.0	48.2
260	500	2	Т	368	53.4	485	70.3	22.8	40.1
		6	Т	373	54.0	501	72.6	25.3	46.4
		10	Т	385	55.8	504	73.0	25.5	48.8
		16	т	406	58.9	541	78.4	24.3	45.4
482	900	2	T	339	49.1	465	67.4	27.3	44.1
		6	Т	323	46.8	467	67.7	25.3	39.8
		10	Т	339	49.1	471	68.3	27.5	40.3
		16	т	351	50.9	505	73.2	24.8	38.9
593	1100	2	L	278	40.3	382	55.3	26.3	51.0
			Т	288	41.7	382	55.3	24.3	39.2
		6	L	275	39.8	362	52.4	29.3	50.7
			Т	295	42.8	382	55.4	22.8	47.5
		10	L	277	40.1	348	50.4	28.3	54.1
			Т	293	42.5	381	55.2	23.8	47.7
		16	L	295	42.7	366	53.0	27.5	48.1
			T	297	43.0	376	54.5	23.0	40.9
549	1200	2	Т	255	37.0	324	46.9	29.0	44.1
		6	Т	255	37.0	324	46.9	29.0	44.1
		10	Т	251	36.4	296	42.9	29.7	54.1
		16	Т	273	39.6	329	47.7	29.3	43.5

Πίνακας 3.8: Η επίδραση του φαινομένου του σχηματισμού του φερρίτη στις μηχανικές ιδιότητες του E308-16.

Αξιοσημείωτη είναι η αύξηση περιεκτικότητας σε φερρίτη του μέταλλου συγκόλλησης, που έχει ως αποτέλεσμα μια αύξηση της αντοχής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε μικρότερο βαθμό σε αυξημένες θερμοκρασίες. Επίσης μελέτησαν το φαινόμενο του σχηματισμού φερρίτη στο μέταλλο συγκόλλησης (filer: E308-16) στην αντοχή του μετάλλου στους 540-590-650 °C. Αυτά τα δεδομένα συνοψίζονται στο Σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.22: Αντοχή του τύπου 308 ωστενιτικου μετάλλου συγκολλήσεως συναρτήσει της περιεκτικότητας σε φερρίτη.

Αυτό πραγματοποιήθηκε με μία παράμετρο (την Larsone - Miller) που επιτρέπει τον χρόνο και την θερμοκρασία να απεικονιστούν στο ίδιο διάγραμμα. Σημαντικό είναι ότι μεσαία και υψηλά επίπεδα φερρίτη τείνουν να μειώσουν τη ζωή μέχρι τη θραύση. Αυτή η παρατήρηση είναι παρόμοια με αυτήν του Thomas [15], που παρατήρησε ότι στον ανοξείδοτο χάλυβα 316, μη συνεχείς επικαθίσεις φερρίτη 10FN έχουν ως αποτέλεσμα ταχύτερη αστοχία λόγω της δημιουργίας ρωγματώσεων στην διεπιφάνια φερρίτη - ωστενίτη. Ο Thomas πρότεινε ότι το 5FN στο απόθεμα της συγκόλλησης είναι ιδανικό επειδή δεν μπορεί να υπάρχει συνεχές φερρίτικο δίκτυο και έτσι εξασφαλίζετε η αντίσταση σε ρωγματώσεις στη περιοχή συγκόλλησης.

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες είναι εξαιρετικό υλικό για κατασκευές σε κρυογενετικές θερμοκρασίες, επειδή εμφανίζουν καλή αντοχή και ελαστικότητα σε αυτές τις θερμοκρασίες. Το φαινόμενο του περιεχόμενου φερρίτη του μετάλλου συγκόλλησης σε κρυογενετικές ιδιότητες έγινε αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας, επειδή η παρουσία φερρίτη τείνει να ελαττώσει την ελαστικότητα.

Αυτό το φαινόμενο φαίνεται στο Σχήμα 3.23 και τον Πίνακα 3.9, για ωστενιτικά ανοξείδωτα μέταλλα συγκόλλησης δοκιμασμένα σε θερμοκρασίες υγρού ηλίου.



Σχήμα 3.23: Επίδραση του φερριτικού αριθμού (FN) στην κρυογενετική αντοχή θραύσης του ωστενιτικού 316L μέταλλου συγκόλησης.

Filler or	Base	Welding	Ferrite	K _{1C} Fracture	Toughness
Metal		Processa	Number ^b	MPa · m ^{1/2}	ksi · in ^{1/2}
304L		a s <u>an an</u> an an a	1997 - <u></u>	211	192
316LN		nd <u>(Afri</u> ger Land		224	204
316L		SMAW	0.1	179	162
316L	C	SMAW	0.8	177	161
316L		SMAW	4.1	141	128
316L		SMAW	8.5	108	98
316L		SMAW	10.1	98	90
316L		SAW	4.7	132	121
316L		GMAW	NR	163	148
316L		GTAW	5.0	272	247
308L		GMAW	NR	167	152
308L		GMAW	NR	133	121
308L		SMAW	NR	156	142
308L		FCAW	8.2	79	72

Πίνακας 3.9: Αντοχή σε θραύση στους 4°C για ωστενικικά κυρίως μέταλλα και μέταλλα συγκόλλησης.

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 3.23 και τον Πίνακα 3.9, για ωστενιτικά ανοξείδωτα μέταλλα συγκόλλησης δοκιμασμένα σε θερμοκρασίες υγρού ηλίου με μέθοδο συγκόλλησης SMAW σε ανοξείδοτο χάλυβα 316L μία αύξηση του ποσοστού απόθεσης φερρίτη μειώνει ξεκάθαρα την αντοχή. Για μεθόδους συγκόλλησης όπως η GTAW και η GMAW, η αντοχή είναι ανώτερη απ΄ ότι στο SMAW και SAW για το ίδιο ποσοστό φερρίτη, λόγω του μειωμένου οξυγόνου στις αποθέσεις από το προστατευτικό αέριο.

3.10 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΙΜΟΤΗΤΑ

Αν και τα ωστενιτικά κράματα θεωρείται ότι συγκολλούνται εύκολα, εντούτοις εμφανίζονται κάποια προβλήματα εάν δεν ληφθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις. Θερμή ρωγμάτωση στο μέταλλο συγκόλλησης (Weld solidification cracking) αλλά και Ρωγμάτωση υγρής κατάστασης (Liquation cracking) μπορεί να προκύψουν. Αυτό εξαρτάται κυρίως από την σύνθεση του βασικού μετάλλου και του μετάλλου συγκόλλησης, καθώς και από το ποσοστό των ακαθαρσιών.

Θερμή ρωγμάτωση στο μέταλλο συγκόλλησης (Weld solidification cracking) μπορεί να υπάρξει ένα σημαντικό πρόβλημα για τους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες. Η δημιουργία τέτοιων ρωγμών εξαρτάτε κυρίως από την σύνθεση του μετάλλου συγκόλλησης. Μέταλλα συγκόλλησης που έχουν στερεοποιηθεί πλήρως ωστενιτικά (τύπος «A»), είναι και τα πιο ευπαθή. Σε αντίθεση τα μέταλλα συγκόλλησης που έχουν στερεοποιηθεί κυρίως φερριτικά με μικρό ποσοστό ωστενίτη (τύπος «FA») δεν εμφανίζουν τέτοια προβλήματα. Επιπρόσθετα, η παρουσία υψηλών ποσοστών ακαθαρσιών (ιδιαιτέρως θείου και φωσφόρου) επιδεινώνουν το πρόβλημα των ρωγμών σε μέταλλα συγκόλλησης τύπου Α και AF.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων ρωγμών σε μέταλλο συγκόλλησης τύπου Α παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.24.



Σχήμα 3.24: Weld solidification cracks σε πλήρως ωστενιτικό μέταλλο συγκόλλησης (FN 0).

Ένα άλλο είδος ρωγμάτωσης είναι η Ρωγμάτωση υγρής κατάστασης (Liquation Cracking). Αυτές παρατηρούνται στο μέταλλο συγκόλλησης σε συγκολλήσεις πολλών περασμάτων (multipass) κατά μήκος των SGB και MGB (βλέπε Κεφ. 3.7). Τα ωστενιτικά μέταλλα συγκόλλησης είναι τα πιο επιρρεπή σε τέτοιου είδους ρωγμές, ενώ τα μέταλλα συγκόλλησης που περιέχουν αρκετό ποσοστό φερρίτη (μεταξύ FN 2 και FN 6) γενικά δεν

εμφανίζουν ρωγμάτωση υγρής κατάστασης. Όπως έχει μελετηθεί και από τον Thomas [30,31], τέτοιου είδους ρωγμές μπορεί να δημιουργηθούν και στη ΘΕΖ λόγω σχηματισμού υγρής φάσης στα όρια των κόκκων, στην ζώνη μερικής τήξης, που δημιουργείται γύρω από την περιοχή συγκολλήσεως.

Παρά την καλή αντίσταση σε διάβρωση, οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες μπορεί να εμφανίσουν τοπική διάβρωση στα όρια των κόκκων της Θ.Ε.Ζ. ή στις περιοχές συγκέντρωσης φορτίων (μέσα ή γύρω από την περιοχή συγκόλλησης). Επειδή πολλά από τα μέταλλα συγκόλλησης περιέχουν φερρίτη μπορεί να προκύψει και ενδιάμεση θερμοκρασία δυσθραυστότητας λόγο της σ-φάσης και του σχηματισμού καρβιδίων. Όπως και με τα φερρίτικά κράματα η αντίδραση σχηματισμού σ-φάσης είναι σχετικά αργή και για αυτό η δυσθραυστότητα από σ-φάση είναι συνήθως ένα πρόβλημα συντήρησης και όχι ένα κατασκευαστικό μειονέκτημα. Εντούτοις μπορεί να προκύψει κατά την συγκόλληση πολλών περασμάτων μεγάλων αντικειμένων ή πλατιάς ραφής, όπου οι ρυθμοί ψύξης είναι εξαιρετικά αργοί.

Е.М.П.



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4⁰

«ΦΕΡΡΙΤΙΚΟΙ – ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΟΙ - DUPLEX ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ»

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΣ ΤΟΞΟΥ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

4.1 ΦΕΡΡΙΤΙΚΟΙ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

<u>4.1.1</u> ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες ονομάζονται έτσι λόγν της φερριτικής δομής που έχει ο χρωμιούχος χάλυβας. Αυτά τα κράματα παρουσιάζουν καλή αντίσταση σε διάβρωση με μηχανική καταπόνηση, διάβρωση με βελονισμό διάβρωση χαραγής (κυρίως σε χλωριούχο και περιβάλλων). Χρησιμοποιούνται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών όπου η αντίσταση σε διάβρωση είναι μεγαλύτερης σημασίας από τις μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, δυσθραυστότητα κλπ.). Οι χαμηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες (10,5 - 12,5% κ.β.) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως εξατμίσεις μηχανημάτων εσωτερικής καύσης και παρουσιάζουν πολύ καλή αντίσταση στη διάβρωση. Σε πιο ισχυρά περιβάλλοντα διάβρωσης χρησιμοποιούνται οι μέσης και υψηλής περιεκτικότητας φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες.

Ιστορικά οι φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες είχαν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε τεράστιες ποσότητες σε εφαρμογές όμως που δεν χρειαζόταν συγκόλληση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού είναι OI μέσης περιεκτικότητας χρωμίου φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες που χρησιμοποιήθηκαν στην αυτοκινητοβιομηχανία και σε άλλες εφαρμογές όπως αρχιτεκτονική και διακοσμητική. Στις αρχές της δεκαετίας του '80 η χρήση των χαμηλής (και μέσης) περιεκτικότητας σε Cr φερριτικών ανοξείδωτων χάλυβων για συστήματα εξατμήσεων παρουσίασε φοβερή αύξηση. Όταν οι σωλήνες αυτοί όμως άρχισαν να συγκολλούνται, τότε η συγκολλησιμότητα των φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων άρχισε να χρίζει προσοχής. Με την πάροδο του χρόνου κάποιοι χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε Cr κατασκευάστηκαν για χρήση υπό απαιτητικές συνθήκες (π.χ. χημικά περιβάλλοντα). Αυτά τα κράματα παρέχουν υψηλότερη αντίσταση σε διάβρωση από τους ωστενιτικούς ή τους μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες. Παρόλα αυτά είναι ιδιαίτερα ακριβοί και δύσκολο να επεξεργαστούν.

Μεταλλουργικά οι συγκολλήσεις σε αυτά τα κράματα είναι κυρίως φερριτικές αν και μπορεί να υπάρξει μαρτενσίτης κάτω από ορισμένες συνθήκες. Επίσης ο σχηματισμός καρβιδίων και νιτριδίων είναι σύνηθες φαινόμενο. Το κύριο πρόβλημα στη συγκόλληση των φερριτικών ανοξείδωτων κραμάτων είναι να διατηρηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό η αντοχή και η ελαστικότητα μετά τη συγκόλληση.

4.1.2 ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

Μέσα στον χρόνο οι φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες αναπτύχθηκαν σε τρεις γενιές.

Η πρώτη γενιά αυτών ήταν μέσης περιεκτικότητας σε Cr και σχετικά υψηλής σε C. Αυτοί οι χάλυβες δεν είναι 100% φερριτικοί επειδή σχηματίζουν κάποιο ωστενίτη στην δομή τους κατά τη στερεοποίηση και την ψύξη όταν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο ωστενίτης που υπάρχει στις υψηλές θερμοκρασίες μετατρέπεται σε μαρτενσίτη κατά την ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η δεύτερη γενιά φερριτικών ανοξείδωτων κραμάτων αναπτύχθηκε ώστε να ελαχιστοποιήσει τον σχηματισμό μαρτενσίτη και να βελτιώσει την συγκολλητότητα. Έχουν μικρότερη περιεκτικότητα σε C και συχνά περιέχουν σταθεροποιητικά στοιχεία (όπως το Ti) τα οποία συνδέονται με τον άνθρακα C και το άζωτο N, βοηθώντας έτσι στην σταθερότητα του φερρίτη.

Τα κράματα *τρίτης* γενιάς έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε Cr, χαμηλά επίπεδα C και N, καθώς και χαμηλή περιεκτικότητα ακαθαρσιών. Αυτά τα κράματα συχνά αναπτύσσονται για συγκεκριμένες εφαρμογές με διάφορα εμπορικά ονόματα. Τα υψηλής καθαρότητας κράματα των φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων έχουν άριστη αντοχή σε διάβρωση και ικανοποιητική αντοχή σε ολκιμότητα. Όταν συγκολλούνται τέτοια κράματα υψηλής καθαρότητας ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται ώστε να μην ενσωματωθούν ανεπιθύμητα στοιχεία (όπως N και O) και να ελαχιστοποιηθεί η μεγένθυση των κόκκων. Οι περιεκτικότητες διαφόρων φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων δίνονται στον Πίνακα 4.1.

		'				,								
	UNS							Composit	tion (wt%)					
Type	No.	υ	Mn	Ъ	s	Si	Cr	Ņ	Mo	z	õ	W	F	ЯР
							First General	tion (Steels	with Frée Co	arbon)				
405	SADSOD	0.08	1 00	0.040	0.030	100	11 5-14 5	0.60		ł		010 030		
120	CODD SAROOD	0.10	001	0.040	0.020	8	16.019.0	20.0			·	000000000	I	I
434	S43400	0.12	001	0.040	0000	8,1	16.0-18.0	2	0.75-1.25					1
	0000773	1000	001			8	0.00 0.01	500	C-1-1-1-1-1	I			I	I
744	007646	07-0	00.1	0400	0.010	8.1	0.02-0.02	25.0	1	1	l		I	I
044	000++0	N7-N	001	0+0-0	000.0	0.1	0.12-0.62	c/ '0	I	C7.0		1	I	I
						Seco	nd Generation	(Steels with	Strong Carl	vide Form	ers)			
- Hereit														
409	S40900	0.08	1.00	0.045	0.030	1.00	10.50-11.75	0.50	I	Ì	I	I	$6 \times C - 0.75$	I
409°	S40910	0.030	1.00	0.040	0.020	1.00	10.5-11.7	0.50	I	0:030	l	I	$6 \times C - 0.50$	0.17
409°	S40920	0.030	1.00	0.040	0.020	1.00	10.5-11.7	0.50	I	0:030	1	1	8 × (C + N) min.	0.10
													0.15-0.50	ł
409°	S40930	0.030	1.00	0.040	0.020	1.00	10.5-11.7	0.50	Í	0.030	I	I	0.05 min.	
													$T_1 + N_0 =$	
													$[0.08 + 8 \times$	
													(C + N)] – 0.75	
436	S43600	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0	1	0.75-1.25	ł	I	1	I	5 × C – 0.80
439	S43035	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	17.0-19.0	0.50	I	0.030		I	0.15[0.20 +	1
		-											4(C+N)] - 1.10	
468°	S46900	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	18.0-20.0	0.50	ŀ	0.030	1	1	0.07-0.3	0.10-0.60
	SND							Compositi	ion (wt%)					
Type	No.	J	Mn	Р	s	Si	ŗ	N	Mo	z	õ	AI	щ	£
				Ľ.	hird Gen	teration	(Steels with Ve.	ry Low Car	bon and/or	Strong Ca	rbide Fo	rners)		
444	S44400	0.025	1.00	0.040	0:030	1.00	17.5-19.5	1.00	1.75-2.00	0.035	I	1	Ti + Nb = [0.20 +	I
XM-27	S44627	0.010	0.40	0.020	0.020	0.40	25.0-27.5	0.50	0.75-1.50	200	200		4(C + N)] - 0.80	000
25-4-4	S44635	0.005	1 00	0.040	0.020	25.0	0 20 2 70	2 4 5 5 5 5		CT0'0	07-0	1	1	02.0-0.0
			6.1	0400	0000	0.0	0.02-0.42	0.4-0.5	3.4-0.5	0.035	I	I	Ti + Nb = [0.20 + 46C + Nb = 0.20 + 46C + Nb = 0.00	I
29-4	S44700	0.010	0.30	0.025	0.020	0.20	28.0-30.0	0.15	3.5-4.2	0.020	0.15	1		I
29-4C	S44735	0:030	1.00	0.040	0.030	1.00	28.0-30.0	1.00	3.6-4.2	0.045	١	I	Ti + Nb = 0.20-1.00	1
29-4-2	S44800	0.010	0.30	0.025	0.020	0.20	28.0-30.0	2.00-2.5(0 3.5-4.2	0.020	0.15	1	Ti + Nb = 6 (C + N) m	'ë I
C		CITAL A	11 10											

Πίνακας 4.1: Σύσταση κοινών σφυρήλατων φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλά από αυτά τα κράματα έχουν ονομασίες 4XX, παρόμοιες με αυτές των μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων, αν και η μικροδομή και οι ιδιότητες τους είναι φερριτικές.

Τα περισσότερα από τα αναλώσιμα που χρησιμοποιούνται με τους φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες έχουν συνθέσεις όμοιες με τα μέταλλα βάσης τους. Ένας τέτοιος πίνακας με φερριτικά ανοξείδωτα ηλεκτροδίων (αναλώσιμα) είναι ο Πίνακας 5.2.

	¶N	0.50-1.50	5	$10 \times C - 0.75$	5	I	0.50-1.50	I	Ι
	ц	1	$10 \times C - 1$	1	$10 \times C - 1$	I	1	1	I
	õ	0.75	0.75	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	4
0	Mo	0.75	0.50	0.50	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75-1.50
on (wt%	ïZ	0.6	0.0	0.0	0.60	0.6	0.6	0.6	4
Compositic	Ċ	11.0-14.0	10.5-13.5	10.5-13.5	10.5-13.5	15.0-18.0	15.0-18.0	15.5-17.0	25.0-27.5
	Si	06.0	0.8	1.0	1.0	0.9	0.90	0.5	0.4
	s	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
	Р	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02
	Mn	1.0	0.8	0.8	0.80	1.0	1.0	0.6	0.4
	J	0.03	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.015
SNIT	No.	I	S40900	S40940	W41031	W43010	I	S43080	S44687
- -	Classification	E409Nb-XX	ER409	ER409Cb	E409TX-X	E430-XX	E430Nb-XX	ER430	ER446LMo

Πίνακας 4.2: Ταξινόμηση AWS μετάλλου πλήρωσης φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων.

Τα φερριτικά ανοξείδωτα κράματα όμως μπορούν επίσης να συγκολληθούν χρησιμοποιώντας και ωστενιτικά ηλεκτρόδια. Αυτός ο συνδυασμός έχει σαν αποτέλεσμα μέταλλο συγκόλλησης που περιέχει μείγμα ωστενίτη και φερρίτη. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η αντοχή και η δυνατότητα κατεργασίας του μετάλλου συγκόλλησης. Εν τούτοις, σε φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες τρίτης γενιάς η επιλογή του ωστενιτικού μέταλλου συγκόλλησης πρέπει να γίνεται με προσοχή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες τρίτης γενιάς έχουν πολύ καλή αντίσταση σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση σε χλωριούχο περιβάλλον, πράγμα που δεν έχουν πολλά από τους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες και τα ηλεκτρόδια τους.

4.1.3 ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΦΕΡΡΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Η μεταλλουργία των φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων έχει μελετηθεί εντατικά από τις αρχές της δεκαετίας του 1940.

Το τριμερές σύστημα Fe-Cr-C [16] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή του μετασχηματισμού των φάσεων που προκύπτουν στα φερριτικά κράματα. Το ψευδοδιμερές διάγραμμα με περιεκτικότητα σε Cr 17% κατά βάρος είναι χρήσιμο για την απεικόνιση και την περιγραφή της μεταλλουργίας των κραμάτων αυτών. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται το ψευδοδιμερές διάγραμμα, όπου η διακκεκομένη γραμμή αντιστοιχεί σε περιεκτικότητα 0,05% κατά βάρος σε C. Η σύνθεση αυτή προσεγγίζει το κράμα 430, μέσης περιεκτικότητας σε Cr.

Με πρώιμη αρχική στερεοποίηση προκύπτει δομή φερριτική και το διάγραμμα προβλέπει ότι η τελική μικροδομή θα είναι επίσης φερριτική στο τέλος της στερεοποίησης. Θα παραμείνει φερριτική σε στερεά κατάσταση μέχρι την ψύξη λίγο χαμηλότερα από τους 1100⁰C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες θα προκύψει μερικός μετασχηματισμός σε ωστενίτη, και σε λίγο χαμηλότερες θερμοκρασίες θα σχηματιστούν κάποια καρβίδια Cr₂₃C₆. Κατά την ψύξης, ο ωστενίτης θα μετασχηματιστεί σε φερρίτη και καρβίδια και η τελική δομή θα είναι μίγμα φερρίτη και καρβιδίων.



Σχήμα 4.1: Ψευδοδιμερές διάγραμμα φάσεων 17% Cr.

4.1.3.1 Επίδραση των κραματικών προσθηκών στη μικροδομή:

Το άζωτο παρίσταται στους φερριτικούς χάλυβες περισσότερο ως ακαθαρσία και λιγότερο ως προσθήκη και έχει επίδραση όμοια με τον C στην προώθηση του ωστενίτη. Η μείωση του C και του N σε πολύ χαμηλά επίπεδα (μικρότερα από 100 ppm) ή η προσθήκη κραματικών στοιχείων που προωθούν τον σχηματισμό του φερρίτη, είναι απαραίτητη για τη διατήρηση μιας βασικής φερριτικής μικροδομής σε χάλυβες χαμηλού και μεσαίου Cr.

Στα στοιχεία προώθησης του φερρίτη που προστίθενται στους φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες περιλαμβάνονται το Si, το Ti, το Nb, το Mo και το Al. Το Ti και το Nb είναι χρήσιμα σε μικρές ποσότητες εξαιτίας της μεγάλης χημικής συγγένειας με τον C και το N, ενώ το Al είναι αποτελεσματικό σε συνδυασμό με το N. Το Al προστίθεται επίσης για τη βελτίωση της αντοχής σε οξείδωση, ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες. Το Mo βελτιώνει την αντοχή κυρίως σε βελονοειδή διάβρωση.

Το μαγνήσιο προστίθεται για τον έλεγχο του S και επομένως τη βελτίωση της χυτευσιμότητας και των χαρακτηριστικών σε θερμή εργασία. Το Ni και ο Cu δεν προστίθενται γενικά στα φερριτικά κράματα, αν και μικρά ποσά Ni μπορεί να είναι αποτελεσματικά στη βελτίωση της αντοχής εγκοπών.

4.1.3.2 Επίδραση του μαρτενσίτη:

Υπό κανονικές θερμομηχανικές συνθήκες, ο ωστενίτης που σχηματίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες μετατρέπεται σε μαρτενσίτη κατά την απόψυξη. Μόνο με πολύ αργή απόψυξη ή με ισόθερμη κράτυνση σε θερμοκρασίες ελάχιστα πιο χαμηλές από τη solvus του ωστενίτη, θα μετατραπεί ο ωστενίτης σε φερρίτη και καρβίδια. Ο μαρτενσίτης στους φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες έχει ευεργετική και επιβλαβή επίδραση. Υπάρχουν ισχυρισμοί ότι η παρουσία του μαρτενσίτη προωθεί τη ψαθυροποίηση λόγω παρουσίας υδρογόνου, αν και υπάρχουν λίγα στοιχεία στη βιβλιογραφία που το υποστηρίζουν αυτό.

Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα του κράματος και του όγκου του μαρτενσίτη, ο μαρτενσίτης που σχηματίζεται στους φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε C και η σκληρότητα του μαρτενσίτη κυμαίνεται γενικά σε επίπεδα χαμηλότερα από 30 HRC. Σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου ο ωστενίτης είναι σταθερός, ο C θα μεταπηδήσει από τον φερρίτη στον μαρτενσίτη, εξαιτίας της μεγαλύτερης διαλυτότητάς του στον ωστενίτη.

Η παρουσία του μαρτενσίτη σε χαμηλού Cr ανοξείδωτους χάλυβες έχει συσχετιστεί με μείωση στην αντοχή σε διάβρωση [17].

4.1.3.3 Φαινόμενα ψαθυροποίησης:

Βάσει ερευνών του Thielsh [18] και του Demo [19], υπάρχουν τρία φαινόμενα ψαθυροποίησης που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων:

1° Ψαθυροποίηση στους 475°C:

Κράματα Fe-Cr που περιέχουν από 15 έως 70% κατά βάρος Cr, ψαθυροποιούνται όταν θερμαίνονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 425 και 550°C. Η βασική θεωρία συνδέει την αρχή της ψαθυροποίησης με τον σχηματισμό ενός καρβιδίου σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 550°C, εξαιτίας της μη διαλυτότητας του Cr στον Fe στο Fe-Cr διάγραμμα. Τα κράματα σε θερμοκρασίες μικρότερες από 550°C σχηματίζουν φερρίτη πλούσιο σε χρώμιο α΄ και φερρίτη πλούσιο σε σίδηρο α [1, 9].

Ο ρυθμός και ο βαθμός της ψαθυροποίησης είναι συνάρτηση του κράματα Cr περιεχόμενου Cr. Тα υψηλής περιεκτικότητας σε ψαθυροποιούνται σε χαμηλότερους χρόνους και σε ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες [26]. Τα κράματα χαμηλής περιεκτικότητας δεν επηρεάζονται εύκολα από την ψαθυροποίηση των 475°C. Γενικά απαιτούνται χρόνοι γήρανσης τουλάχιστον 100 ώρες για να προκαλέσουν ψαθυροποίηση σε κράματα χαμηλής και ενδιάμεσης περιεκτικότητας σε Cr [20]. Τα κράματα υψηλής περιεκτικότητας εμφανίζουν μείωση της ολκιμότητας και της αντοχής σε πολύ μικρότερους χρόνους. Κραματικές προσθήκες όπως το Mo, το Nb, το Τι επιταχύνουν την έναρξη της ψαθυροποίησης.

Η ψυχρή κατεργασία προώθεί την κατακρήμνιση α-prime (ά-άλφα τόνος) με συνέπεια να επιταχύνει την έναρξη της ψαθυροποίησης. Η ψαθυροποίηση των 475⁰C έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της αντοχής σε διάβρωση [21], εξαιτίας πιθανώς της επιλεκτικής επίθεσης στον φερρίτη πλούσιου σε Fe. Η ψαθυροποίηση μπορεί να περιοριστεί και οι μηχανικές και
οι αντιδιαβρωτικές ιδιότητες να βελτιωθούν και να αποκατασταθούν με θέρμανση σε εύρος θερμοκρασιών 550-600⁰C για περιορισμένο χρόνο. Υπερβολικός χρόνος παραμονής σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος προκαλεί ψαθυροποίηση φάσης σ.

2° Κατακρήμνιση φάσης σ:

Η φάση σ σχηματίζεται στα κράματα Fe-Cr που περιέχουν από 20 έως 70% κατά βάρος χρώμιο με παρατεταμένη έκθεση σε θερμοκρασίες από 500 έως 800°C. Κράματα με υψηλές συγκεντρώσεις χρωμίου είναι περισσότερο επιρρεπή στον σχηματισμό φάσης σ και ο ρυθμός του σχηματισμού είναι ταχύτερος. Σε κράματα που περιέχουν λιγότερο από 20% κατά βάρος Cr, ο σχηματισμός φάσης σ απαιτεί εκατοντάδες ώρες έκθεσης στις κρίσιμες θερμοκρασίες. Στα κράματα υψηλού χρωμίου ο σχηματισμός απαιτεί την έκθεση στο εύρος των κρίσιμων θερμοκρασιών για λίγες μόνο ώρες [22]. Οι κραματικές προσθήκες όπως το Mo, το Ni, το Si και το Mn μεταθέτουν τον σχηματισμό σ φάσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες, χαμηλότερες συγκεντρώσεις Cr και μικρότερους χρόνους. Οι κατεργασίες εν ψυχρό επιταχύνουν τον σχηματισμό σ φάσης. Η επιβλαβής επίδραση της κατακρήμνισης μπορεί να περιοριστεί με θέρμανση για μικρό χρονικό διάστημα σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 800°C.

3° Ψαθυροποίηση υψηλής θερμοκρασίας (Ψ.Υ.Θ.):

Η ψαθυροποίηση υψηλής θερμοκρασίας (high temperature embrittlement-HTE) είναι αποτέλεσμα μεταλλουργικών αλλαγών που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της παραμονής σε θερμοκρασίες περίπου 0,7T_m (T_m: θερμοκρασία τήξης). Συμβαίνει κατά τη διάρκεια θερμο-μηχανικών διαδικασιών ή συγκόλλησης. Η έκθεση σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση της αντοχής σε διάβρωση [23]. Ο βαθμός ψαθυροποίησης επηρεάζεται από τη σύσταση του κράματος και κυρίως την περιεκτικότητα σε Cr και το μέγεθος των κόκκων. Τα κράματα χαμηλού Cr δεν είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε ΨΥΘ.

Τα δύο πρώτα φαινόμενα ψαθυροποίησης αποτελούν πρόβλημα στις συγκολλήσεις, καθώς η ψαθυροποίηση συνήθως συνδέεται με μεγάλους χρόνους έκθεσης σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες. Ως συνέπεια, η ψαθυροποίηση ενδιάμεσων θερμοκρασιών των συγκολλημένων ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων είναι ανεξάρτητη από τη μέθοδο ή διαδικασία συγκόλλησης. Και τα δύο αυτά φαινόμενα επιταχύνονται καθώς το ποσοστό χρωμίου του κράματος ή του μετάλλου εναπόθεσης αυξάνεται.

Η μείωση των μηχανικών ή και των ιδιοτήτων διάβρωσης ή η αστοχία των συγκολλημένων φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων, συνδέεται σχεδόν αποκλειστικά με ψαθυροποίηση υψηλών θερμοκρασιών (ΨΥΘ), ευαισθητοποίηση εγκοπής ή με συνδυασμό τους.

4.1.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μικροδομή των φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων είναι πλήρως φερριτική από το σημείο τήξης ως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ως αποτέλεσμα η σκλήρυνση με μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη δεν είναι δυνατή ή έχει αμελητέα επίδραση εξαιτίας του μικρού ποσοστού μαρτενσίτη που σχηματίζεται. Μικρή αύξηση της αντοχής μπορεί να επιτευχθεί με σκλήρυνση στερεάς κατάστασης, ειδικά με C και H, αν και η επίδραση είναι εμφανής μόνο σε κράματα υψηλού Cr, όπου τα αυξημένα ποσοστά δεν προωθούν τον σχηματισμό μαρτενσίτη. Στην πράξη η περισσότερο διαδεδομένη μέθοδος αύξησης της αντοχής των φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων είναι η ψυχρή κατεργασία [24].

Στον Πίνακα 4.3 φαίνονται οι ιδιότητες για επίπεδα και πολύ λεπτά φύλλα φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων, τα οποία έχουν υποστεί ανόπτηση εντός του ενδεδειγμένου εύρους θερμοκρασίας και κατόπιν έχουν ψυχθεί στον αέρα ή σε νερό.

	UNS	Mini Tensile	mum Strength	Minia Yield S	num trength	Minimum Florentian	Maxim	um Hardness
Турс	No.	MPa	ksi	MPa	ksi	in 50 mm (2 in.) (%)	Brinell	Rockwell B
405	S40500	415	60	170	25	20.0	170	88
409	S40900*	380	55	170	25	20	179	99
430	S43000	450	65	205	30	22.0	183	80
434	S43400	450	65	240	35	22.0		80
436	S43600	450	65	240	35	22.0		80
439	S43035	415	60	205	30	22.0	193	80
442	S44200	450	65	275	40	20.0	217	09
444	S44400	415	60	275	40	20.0	217	90
446	S44600	450	65	275	40	20.0	217	90
468	S46800	415	60	205	30	22.0	#11	00
XM-27	S44627	450	65	275	40	22.0	197	50
25-4-4	\$44635	620	90	515	75	20.0	260	204
29-4	S44700	550	BO	415	60	20.0	209	20
29-4C	\$44735	550	80	415	60	18.0	245	20
29-4-2	S44800	550	80	415	60	20.0	223	20*

Πίνακας 4.3: Μηχανικές ιδιότητες για σφυρήλατους φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

4.2 ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΟΙ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

<u>4.2.1</u> ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες βασίζονται στο σύστημα Fe-Cr-C. Σχηματίζουν, με αλλοτροπικό μετασχηματισμό, από ωστενίτη μαρτενσίτη υπό τις περισσότερες θερμομηχανικές διαδικασίες, εκτός από την περίπτωση που η ψύξη είναι πολύ αργή. Αυτοί οι χάλυβες είναι γενικά σκληρυνόμενοι στον αέρα, γιατί όταν εξάγονται από το φούρνο με ωστενιτική δομή, η ψύξη σε αέρα είναι πολύ γρήγορη ώστε τελικώς να παραχθεί μαρτενσίτης. Οι συνήθεις ρυθμοί ψύξης για τις συγκολλήσεις είναι επίσης ικανοποιητικά ταχείς για την παραγωγή κυρίως μαρτενσιτικών μικροδομών μετάλλου συγκόλλησης και θερμικά επηρεασμένης ζώνης.

Η αντοχή σε διάβρωση των μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων δεν είναι τόσο καλή όσο των υπόλοιπων ανοξείδωτων χαλύβων, εξαιτίας του σχετικά χαμηλού επιπέδου Cr (12 ως 14%) και του υψηλού επιπέδου C. Επιλέγονται κυρίως για εφαρμογές σε κανονικές συνθήκες ατμόσφαιρας, όπου απαιτείται ένας συνδυασμός υψηλής αντοχής και αντοχής σε διάβρωση. Επίσης, το χαμηλό ποσοστό Cr και η χαμηλή περιεκτικότητα σε στοιχεία κραμάτωσης καθιστούν τους μαρτενσιτικούς χάλυβες οικονομικότερους από τα υπόλοιπα είδη ανοξείδωτων χαλύβων.

Κοινές εφαρμογές μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων περιλαμβάνουν τη χρήση τους σε σωλήνες μεταφοράς ατμού και αερίων, σε πτερύγια τουρμπίνων αεροσκαφών που λειτουργούν σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες, σε πτερύγια υδροστροβίλων, σε σωλήνες και βαλβίδες για μεταφορά και διύλιση πετρελαίου. Οι υπερμαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες χαμηλού C χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε σωληνογραμμές λαδιού και αερίων. Οι κατηγορίες υψηλού χρωμίου και υψηλού C χρησιμοποιούνται για την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων, οικιακών εργαλίων, ατράκτων και κιβωτίων ταχυτήτων.

Οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες δεν χρησιμοποιούνται γενικά πάνω από τους 650°C, εξαιτίας της υποβάθμισης των μηχανικών τους ιδιοτήτων και της αντοχής σε διάβρωση. Λόγω του σχηματισμού μη επανεφερμένου μαρτενσίτη κατά την ψύξη μετά τη συγκόλληση, τα μαρτενσιτικά κράματα θεωρούνται τα λιγότερα συγκολλήσιμα από τα υπόλοιπα ανοξείδωτα.

4.2.2 ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

Οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες μπορούν να υποδιαιρεθούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το πόσο επιρρεπείς είναι σε ρωγμάτωση υδρογόνου

ή ψυχρή ρωγμάτωση. Η υποδιαίρεση βασίζεται στην περιεκτικότητα σε άνθρακα, καθώς αυτή καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη σκληρότητα του μαρτενσίτη σε δεδομένες συνθήκες συγκόλλησης, η οποία επηρεάζει άμεσα την πιθανότητα ψυχρής ρωγμάτωσης.

Η ευνοϊκότερη κατηγορία περιλαμβάνει χάλυβες με περιεκτικότητα σε C 0,06% ή μικρότερη, η οποία περιορίζει τη μέγιστη σκληρότητα σε 35 Rockwell C (HRC) [21].

Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από χάλυβες με περιεχόμενο σε C από 0,06% έως 0,3% κατά βάρος. Η σκληρότητα των συγκολλημένων χαλύβων αυτής της κατηγορίας κυμαίνεται από 33 έως 55 περίπου HRC, και έχει αυξημένο κίνδυνο ρωγμάτωσης και υψηλότερες απαιτήσεις προθέρμανσης έως τους 315°C.

Η τρίτη κατηγορία αποτελείται από χάλυβες με C περισσότερο από 0,3% κατά βάρος και σκληρότητα κατόπιν συγκόλλησης από 55 έως 65 HRC. Η κατηγορία αυτή απαιτεί ειδικές συνθήκες για συγκόλληση χωρίς ρωγμάτωση.

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μαρτενσιτικών κραμάτων, με περιεκτικότητα Cr μεταξύ 11,5 και 18%. Οι περισσότερες κατηγορίες περιέχουν C σε ποσοστά από 0,1 έως 0,25% κατά βάρος. Μερικά κράματα περιέχουν μικρές προσθήκες Mo, V και W για την αύξηση της αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες με τον σχηματισμό σταθερών καρβιδίων. Η προσθήκη Ni βελτιώνει επίσης την αντοχή. Οι χάλυβες 440 περιέχουν υψηλά επίπεδα C και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή σκληρότητα, αντίσταση σε τριβή και αντοχή σε διάβρωση.

Στον Πίνακα 4.4 φαίνονται ορισμένοι από τους κυριότερους σφυρήλατους και χυτούς μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

	UNS		Composition (wt%) ^a							
Туре	No.	С	Cr	Mn	Si	Ni	Other			
403	S40300	0.15	11.5-13.0	1.00	0.50	_				
410	S41000	0.15	11.5-13.5	1.00	1.00	_				
410NiMo	S41500	0.05	11.4-14.0	0.50 - 1.00	0.60	3.5-5.5	0.50-1.00 Mo			
414	S41400	0.15	11.5-13.5	1.00	1.00	1.25-2.50				
416	S41600	0.15	12.0-14.0	1.25	1.00		0.15 S min., 0.6 Mo			
420	S42000	0.15 min	12.0-14.0	1.00	1.00	·	_			
422	S42200	0.20-0.25	11.5-13.5	1.00	0.75	0.5 - 1.0	0.75-1.25Mo, 0.75-			
							1.25W, 0.15-0.3V			
431	S43100	0.20	15.0-17.0	1.00	1.00	1.25 - 2.50	· · · ·			
440A	S44002	0.60-0.75	16.0-18.0	1.00	1.00		0.75 Mo			
440B .	S44003	0.75-0.95	16.0-18.0	1.00	1.00	<u> </u>	0.75 Mo			
440C	S44004	0.95 - 1.20	16.0-18.0	1.00	1.00		0.75 Mo			
CA-15	_	0.15	11.5-14.0	1.00	1.50	1.00	0.50 Mo			
CA-6NM		0.06	11.5-14.0	1.00	1.00	3.5-4.5	0.40-1.0 Mo			

Πίνακας 4.4: Σύσταση κοινών χυτών και σφυρήλατων μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.

Είναι συχνά επιθυμητή η συγκόλληση μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων με υλικά εναπόθεσης της ίδιας ή παρόμοιας σύστασης, έτσι ώστε η αντοχή που προκύπτει να είναι ίδια με του μετάλλου βάσης. Ωστόσο δεν υπάρχουν για όλα τα μέταλλα βάσης υλικά ίδιας σύνθεσης, σύμφωνα με τις προδιαγραφές μετάλλου προσθήκης κατά AWS (American Welding Society). Ο Πίνακας 4.5 δείχνει τις κατηγορίες μετάλλου προσθήκης κατά AWS και για ποιες κατηγορίες ανοξείδωτων μαρτενσιτικών χαλύβων είναι κατάλληλο το μέταλλο προσθήκης. Υπάρχουν επίσης πολλά μέταλλα προσθήκης μη κατηγοριοποιημένα, περισσότερο στη μορφή παραγεμισμένων σωληνοειδών συρμάτων για συγκόλληση βυθισμένου τόξου. Σε ορισμένες εφαρμογές είναι επιθυμητή η επιλογή ωστενιτικού μετάλλου προσθήκης για μαρτενσιτικά μέταλλα βάσης, ειδικά στην περίπτωση που πρέπει να ληφθεί υπόψη ρωγμάτωση υδρογόνου του μετάλλου συγκόλλησης, καθώς ο ωστενίτης έχει μεγαλύτερη διαλυτότητα σε υδρογόνο και δεν είναι επιρρεπής σε ρωγμάτωση υδρογόνου.

AWS	UNS							
Classification	No.	с	Cr	Mn	Si	Ni	Мо	Base Metal
E410-XX	W41010	0.12	11.0-13.5	1.0	0.90	0.7	0.75	410, CA-15
ER410	S41080	0.12	11.5-13.5	0.6	0.5	0.6	0.75	410, CA-15
E410TX-X	W41031	0.12	11.0-13.5	0.60	1.0	0.60	0.5	410, CA-15
E410NiMo-XX	W41016	0.06	11.0-12.5	1.0	0.90	4.0-5.0	0.40-0.70	410NiMo, CA-6NM
ER410NiMo	S41086	0.06	11.0-12.5	0.6	0.5	4.0-5.0	0.4-0.7	410NiMo, CA-6NM
E410NiMoTX-X	W41036	0.06	11.0-12.5	1.0	1.0	4.0-5.0	0.40-0.70	410NiMo, CA-6NM
ER420	S42080	0.25-0.40	12.0-14.0	0.6	0.5 .	0.6	0.75	420

Πίνακας 4.5: Ταξινόμηση AWS μετάλλου πλήρωσης μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.

Η διαλυτότητα του ωστενιτικού μετάλλου συγκόλλησης εντός του μαρτενσιτικού μετάλλου βάσης, έχει συχνά ως αποτέλεσμα μια μικροδομή δύο φάσεων ωστενίτη και φερρίτη, η οποία θα είναι λιγότερο σκληρή από το μέταλλο βάσης εάν δεν βρίσκεται το μέταλλο βάσης σε κατάσταση επαναφοράς.

Τα μέταλλα προσθήκης που περιέχουν μεγάλη ποσότητα Νi είναι μεταλλουργικώς συμβατά με τα μαρτενσιτικά κράματα και καταλήγουν σε πλήρως ωστενιτική ραφή εάν είναι μικρή η διαλυτότητα του μετάλλου βάσης. Γενικά, χρησιμοποιούνται μέταλλα προσθήκης και βάσης της ίδιας σύστασης, εξαιτίας της αντοχής που επιτυγχάνεται. Ανόμοια μέταλλα προσθήκης χρησιμοποιούνται σε συνδέσεις μαρτενσιτικών και ωστενιτικών κραμάτων όπου είναι επιθυμητό να υπάρχει μεταβολή του συντελεστή θερμικής διαστολής ή όπου η αντοχή του μετάλλου συγκόλλησης απαιτείται να είναι μεγάλη.

4.2.3 ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Στο Σχήμα 2.2, Κεφ.2 (Επίδραση του άνθρακα στην επέκταση της περιοχής του ωστενίτη) η κρυσταλλική δομή της κυβικής χωροκεντρωμένης (BCC)

φερριτικής φάσης είναι σταθερή σε ένα μεγάλο εύρος σύστασης και θερμοκρασίας. Σε συγκεντρώσεις χαμηλού Cr, λιγότερο από 12% κατά βάρος, σχηματίζεται ωστενίτης με Κυβική Εδοκεντρωμένη Κρυσταλλική Δομή(FCC) από το φερρίτη μέχρι την ψύξη σε στερεά κατάσταση. Η περιοχή του διαγράμματος φάσεων στην οποία ο ωστενίτης είναι σταθερός αναφέρεται βρόχος γ. Υπό συνθήκες ισορροπίας ψύξης, ο ωστενίτης που σχηματίζεται στο βρόχο γ θα μετασχηματιστεί ξανά σε φερρίτη, αλλά υπό ταχύτερους ρυθμούς ψύξης ο ωστενίτης θα σχηματίσει μαρτενσίτη.

Οι περισσότεροι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία, συνήθως C, που όπως έχει αναφερθεί, διαστέλλει το βρόχο γ και επομένως προωθεί τον σχηματισμό ωστενίτη και διευκολύνει το μετασχηματισμό σε μαρτενσίτη.

Υπό συνήθεις συνθήκες ψύξης της συγκόλλησης, ο ωστενίτης που υπάρχει σε υψηλές θερμοκρασίες θα μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη. Πολλοί από τους μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες περιέχουν κάποιο ποσοστό φερρίτη υψηλής θερμοκρασίας στη μαρτενσιτική μήτρα.

Σε υψηλές περιεκτικότητες άνθρακα, η ωστενιτική φάση (βρόχος) διευρύνεται, προωθώντας πλήρως μαρτενσιτικές δομές. Η υψηλή περιεκτικότητα C έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό σκληρού και εύθραυστου μαρτενσίτη που είναι επιρρεπής σε ρωγμάτωση υδρογόνου και πιθανή ψαθυρή θραύση.

Στον Πίνακα 5.3, φαίνονται οι μηχανικές ιδιότητες για διάφορους μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

Οι υπερμαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάστηκαν τη δεκαετία του 1990 ως εναλλακτικές λύσεις των ωστενιτικών και των διπλών σε υποβρύχιες εφαρμογές σωληνώσεων. Αυτή η κατηγορία έχει συγκρίσιμες ιδιότητες και μεγαλύτερη συγκολλησιμότητα από τους συνήθεις μαρτενσιτικούς χάλυβες. Εξαιτίας του σχετικά μικρού ποσοστού κραμάτωσης είναι οικονομικότεροι από τους ωστενιτικούς και τους διπλούς.

		Tensile S	Strength	Yield St	Elongation	
Туре	Condition	MPa	ksi	MPa	ksi	(%)
403	Annealed	485	70	275	40	20
105	Intermediate temper	690	100	550	80	15
	Hard temper	825	120	620	90	12
410	Annealed	485	70	275	40	20
Intern	Intermediate temper	690	100	550	80	15
	Hard temper	825	120	620	90	12
420	Annealed	690	100			15
420	Tempered at 204°C (400°F)	1720	250	1480	215	8
431	Annealed	760	110			
451	Intermediate temper	795	115	620	90	15
	Hard temper	1210	175	930	135	13
440C	Annealed	760	110	450	65	14
-100	Tempered at 315°C (600°F)	1970	285	1900	275	2

Πίνακας 4.6: Μηχανικές ιδιότητες για τους μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

4.3 DUPLEX ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

<u>4.3.1</u> ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι duplex ανοξείδωτοι χάλυβες έχουν μικροδομή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά το ήμισυ φερριτική και κατά το ήμιση ωστενιτική. Είναι γνωστοί από το 1930 [26]. Χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή σε διάβρωση. Η συγκολλησιμότητα και η αντίσταση σε διάβρωση των χαλύβων αυτών έχει βελτιωθεί με την πάροδο των χρόνων, λόγω της ερμηνείας του σημαντικού ρόλου του αζώτου ως στοιχείο πρόσμιξης [26].

Οι duplex ανοξείδωτοι χάλυβες έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε φερρίτη από τους ωστενιτικούς χάλυβες, επομένως είναι περισσότερο φερρομαγνητικοί, έχουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και χαμηλότερη θερμική διαστολή. Έχουν καλύτερη συμπεριφορά από τους κοινούς χάλυβες σε διαβρωτικά περιβάλλοντα και έχουν συγκρίσιμες αντοχές.

Δεν συνιστώνται για εφαρμογές που η θερμοκρασία τους υπερβαίνει τους 280°C, διότι σχηματίζουν καρβίδια ευθραυστοποίησης σε χαμηλές θερμοκρασίες. Είναι ακριβότεροι από τους ωστενιτικούς χάλυβες, όχι τόσο για το κόστος των κραματικών στοιχείων, αλλά εξαιτίας του κόστους επεξεργασίας του χυτού τεμαχίου για την τελική διαμόρφωσή του σε φύλλο, έλασμα ή σωληνοειδή τεμάχια. Στις εφαρμογές τους παρέχουν μείωση του βάρους των κατασκευών. Αντικαθιστούν επίσης κάποια κράματα βάσης Νi, λόγω χαμηλότερου κόστους.

Οι duplex χάλυβες έχουν σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή από τους ωστενιτικούς. Είναι επίσης σκληρότεροι και περισσότερο κατάλληλοι για εφαρμογές όπου απαιτείται μείωση των εκδορών της επιφάνειας και αντοχή σε διάβρωση. Οι περισσότεροι duplex χάλυβες είναι αρκετά όλκιμοι, ωστόσο σε χαμηλές θερμοκρασίες μεταβαίνουν από όλκιμη σε ψαθυρή συμπεριφορά, έτσι ώστε δεν χρησιμοποιούνται σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Οι θερμοκρασίες εφαρμογών των duplex ανοξείδωτων χαλύβων είναι από -40 έως 280°C.

Η θερμική διαστολή των duplex χαλύβων είναι παραπλήσια με των κοινών χαλύβων και των ελαφρά κραματωμένων χαλύβων. Ως αποτέλεσμα της ομοιότητας αυτής, έχουν εφαρμογές, όπως για παράδειγμα δοχεία πίεσης, όπου συνδυάζονται με κοινούς χάλυβες. Ωστόσο, λόγω της κατακρήμνισης καρβιδίων σε χαμηλές θερμοκρασίες, η εφαρμογή τους σε περιπτώσεις που απαιτούν ανακούφιση θερμικών τάσεων είναι γενικά ακατάλληλη.

4.3.2 ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

Ο Πίνακας 4.7 περιέχει τους τύπους κραμάτων των duplex ανοξείδωτων χαλύβων. Είναι αξιοσημείωτο ότι δύο από αυτά τα κράματα, τα 329 και CD4MCu, δεν εμφανίζουν απαίτηση περιεκτικότητας σε N κατά ASTM A240 και ASTM A890, αντίστοιχα. Τα κράματα αυτά αναπτύχθηκαν, πριν ανακαλυφθεί η σημαντικότητα του αζώτου και θεωρούνται δύσκολα συγκολλήσιμα. Η προσθήκη N αναφέρεται σήμερα στους ASTM κανονισμούς (UNS S32950 και CD4MCuN αντίστοιχα), για βελτίωση της συγκολλησιμότητας και της αντοχής σε διάβρωση.

Πίνακας 4.7: Σύστασι	η διπλών φερριτικών-ωστενιτικώ\	/ ανοξείδωτων χαλύβων.
----------------------	---------------------------------	------------------------

	UNS	Composition (wt%)*										
Туре	No.*	С	Mn	Р	S	Si	Cr	Ni	Мо	N	Cu	w
-	S32201	0.030	4.0-6.0	0.040	0.030	1.00	19.5-21.5	1.00-3.00	0.60	0.05-0.17	1.00	
2304	S32304	0.030	2.50	0.040	0.030	1.00	21.5-24.5	3.0-5.5	0.05-0.60	0.05-0.20	0.05-0.60	8000
22054	S31803	0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20	_	
2205"	S32205	0.030	2.00	0S.030	0.020	1.00	22.0-23.0	4.5-6.5	3.0-3.5	0.14-0.20		
329	\$32900	0.08	1.00	0.040	0.030	0.75	23.0-28.0	2.0-5.00	1.00-2.00			
-	\$32950	0.030	2.00	0.035	0.010	0.60	26.0-29.0	3.5-5.2	1.00-2.50	0.15-0.35		
8.005	S31260	0.03	1.00	0.030	0.030	0.75	24.0-26.0	5.5-7.5	2.5-3.5	0.10-0.30	0.20-0.80	0.10-0.50
-	\$32520	0.030	1.50	0.035	0.020	0.80	24.0-26.0	5.5-8.0	3.0-4.0	0.20-0.35	0.50-2.00	
CD4MCu	-	0.04	1.00	0.04	0.04	1.00	24.5-26.5	4.75-6.00	1.75-2.25		2.75-3.25	
CD4MCuN	-	0.04	1.00	0.04	0.04	1.00	24.5-26.5	4.7-6.0	1.7-2.3	0.10-0.25	2.7-3.3	
255	\$32550	0.04	1.50	0.040	0.030	1.00	24.0-27.0	4.5-6.5	2.9-3.9	0.10-0.25	1.50-2.50	1000
2507	S32750	0.030	1.20	0.035	0.020	0.80	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32	0.50	
-	\$32760	0.030	1.00	0.030	0.010	1.00	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-4.0	0.20-0.30	0.50-1.00	0.50-1.00
CD3M- WCuN	-	0.03	1.00	0.030	0.025	1.00	24.0-26.0	6.5-8.5	3.0-4.0	0.20-0.30	0.5-1.0	0.5-1.0

Τα αναλώσιμα της συγκόλλησης επιλέγονται με σκοπό τη δημιουργία σωστής ισορροπίας φάσεων στην επικάλυψη της συγκόλλησης και την παροχή αντίστασης σε διάβρωση τουλάχιστον ίσης με το μέταλλο βάσης. Κατά την επιλογή του μετάλλου προσθήκης συνήθως προτιμώνται εκείνα τα οποία έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε Νι από το μέταλλο βάσης για την προώθηση του σχηματισμού ωστενίτη, κατά τη διάρκεια ταχείας ψύξης που συνοδεύει τη συγκόλληση. Ένα παράδειγμα αποτελεί το μέταλλο προσθήκης AWS ER/E 2209, το οποίο περιέχει 9% νικέλιο και χρησιμοποιείται τυπικά για μέταλλα βάσης, όπως τα 2304 και 2205 τα οποία περιέχουν 5% νικέλιο. Στον Πίνακα 4.8 φαίνονται οι συνθέσεις ορισμένων μετάλλων πλήρωσης κατά AWS.

		Composition (wt%)*										
Class	Source	С	Mn	P	8	Si	Cr	Ni	Мо	N	Cu	W
E2209-XX	A5.4	0.04	0.5-2.0	0.04	0.03	1.00	21.5-23.5	85-105	25.15	0.08.0.20	0.75	
ER2209	A5.9	0.03	0.50-2.0	0.03	0.03	0.90	21.5-23.5	7.5-9.5	25.35	0.08-0.20	0.75	
E2209TX-X	A5.22	0.04	0.5-2.0	0.04	0.03	1.0	21.0-24.0	7.5-10.0	2540	0.08-0.20	0.75	
E2552-XX	A5.4	0.04	1.0	0.04	0.03	1.00	24.0-27.0	40-60	15-25	0.08-0.20	0.3	
E2553-XX	A5.4	0.06	0.5-1.5	0.04	0.03	1.00	24.0-27.0	65-85	29.30	0.08-0.22	2.3-3.3	MUNIC
E2553TX-X	A5.22	0.04	0.5-1.5	0.04	0.03	0.75	24.0-27.0	85-105	20.30	0.10-0.25	1.5-2.5	
ER2553	A5.9	0.04	1.5	0.04	0.03	1.0	24.0-27.0	45-65	20.30	0.10-0.20	1.5-2.5	
E2593-XX	A5.4	0.04	0.5-2.5	0.04	0.03	1.00	24.7-27.0	85-110	20.10	0.10-0.25	1.3-2.3	
E2594-XX	A5.4	0.04	0.5-2.0	0.04	0.03	1.00	24.0-27.0	8.0-10.5	3.5-4.5	0.08-0.25	0.75	_

Πίνακας 4.8: Σύσταση μετάλλου πλήρωσης συγκόλλησης διπλών ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.

Τα μέταλλα προσθήκης με αυξημένη περιεκτικότητα σε Ni, τα οποία δεν αναφέρονται στους κανονισμούς μετάλλων προσθήκης, είναι διαθέσιμα με διάφορες εμπορικές ονομασίες για τη συνένωση νεότερων υψηλά κραματωμένων μετάλλων βάσης (ονομάζονται surer-duplex κράματα, όπως το κράμα 2507). Υψηλά κραματωμένα ωστενιτικά μέταλλα προσθήκης, όπως τα 309L, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανόμοιες ενώσεις με ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες. Τα κράματα βάσης Ni επιλέγονται για εφαρμογές που απαιτείται πολύ μεγάλη αντοχή σε διάβρωση.

4.3.3 ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ DUPLEX ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

4.3.3.1 Ισορροπία φάσεων ωστενίτη-φερρίτη:

Οι διπλοί ανοξείδωτοι χάλυβες βασίζονται στον συνδυασμό των στοιχείων Fe-Cr-Ni-N. Η χημική σύσταση των χαλύβων αυτών προσαρμόζεται κατάλληλα ώστε η μικροδομή να αποτελείται από 50% ωστενίτη και 50% φερρίτη. Ωστόσο, όλοι οι διπλοί ανοξείδωτοι χάλυβες στερεοποιούνται ως 100% φερριτικοί και εξαρτάται από τον μερικό μετασχηματισμό στερεάς κατάστασης αν θα αποκτήσει την ισορροπημένη αυτή μικροδομή. Το Ν προστίθεται μερικές φορές για την επιτάχυνση του σχηματισμού του ωστενίτη και τη σταθεροποίησή του και επίσης για την αύξηση της αντοχής σε διάβρωση με οπές. Το Mo, το W και/ή ο Cu προστίθενται σε ορισμένα κράματα για την αύξηση της αντοχής σε διάβρωση.

Οι διπλοί ανοξείδωτοι χάλυβες έχουν γενικά μεγαλύτερη αναλογία στοιχείων προώθησης του φερρίτη έναντι των στοιχείων προώθησης του ωστενίτη. Σε αυτό οφείλεται το γεγονός ότι στερεοποιούνται ως 100% φερριτικοί.

Το Σχήμα 4.2 υποδεικνύει ότι τα κράματα στα οποία το WRC-1992 ισοδύναμο χρωμίου ισούται με περίπου 1,85 φορές με το ισοδύναμο Νi ή περισσότερο, στερεοποιούνται ως 100% φερριτικοί. Οι λόγοι αυτοί για τους διπλούς ανοξείδωτους χάλυβες είναι μεταξύ 2,25 και 3,5. Σε υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από τη γραμμή solvus του φερρίτη), το κράμα παραμένει 100% φερριτικό. Ο ωστενίτης μπορεί να πυρηνοποιηθεί και να αναπτυχθεί κάτω από τη solvus του φερρίτη.



Σχήμα 4.2: Περιοχή υψηλής θερμοκρασίας του ψευδοδιμερούς διαγράμματος φάσεων για τους διπλούς ανοξείδωτους χάλυβες. Η σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει το εύρος για τα εμπορικά κράματα.

Η ανόπτηση και οι θερμές κατεργασίες των χαλύβων αυτών μπορεί να πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασίες κάτω από τη solvus φερρίτη, όπου ο φερρίτης και ο ωστενίτης συνυπάρχουν σε ισορροπία. Με τον έλεγχο της θερμοκρασίας επεξεργασίας και του ρυθμού ψύξης από τη θερμοκρασία αυτή, η αναλογία και η κατανομή του φερρίτη και του ωστενίτη μπορεί να ελεγχθεί.

Καθώς η θερμοκρασία ανόπτησης ή θερμής εργασίας μειώνεται, η μικροδομή σε ισορροπία θα περιέχει προοδευτικά περισσότερο ωστενίτη από φερρίτη. Υπό συνθήκες ισορροπίας, τα στοιχεία προώθησης του φερρίτη (Cr, Mo, W) συγκεντρώνονται με διάχυση στον ωστενίτη. Ταυτόχρονα, τα στοιχεία προώθησης του ωστενίτη (Ni, C, N, Cu) συγκεντρώνονται με διάχυση στον ωστενίτη. Το φαινόμενο αυτό έχει μελετηθεί από τους Ogawa και Koseki [27]. Με τη μείωση της θερμοκρασίας η σύσταση σε φερρίτη και ωστενίτη αλλάζει διαρκώς, σύμφωνα με τις συστάσεις των γραμμών solvus. Ταυτόχρονα η διάχυση επιβραδύνεται με μείωση της θερμοκρασίας. Σε κάποια θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ψύξης, οι συστάσεις και η ισορροπία φάσεων αυτή τη δεδομένη στιγμή παγιώνονται στο κράμα, σαν το κράμα να βάφεται από τη θερμοκρασία αυτή και μετά.

Η «αποτελεσματική θερμοκρασίας βαφής», προτάθηκε από τους Vitek και David [28]. Στους διπλούς ανοξείδωτους χάλυβες αν η «αποτελεσματική θερμοκρασίας βαφής» είναι υψηλή (θερμοκρασίες πλησίον της γραμμής solvus φερρίτη), στην ισορροπία φάσεων θα υπάρχει περισσότερο φερριτική μικροδομή. Εάν η θερμοκρασία βαφής είναι κάτω από τη γραμμή solvus του φερρίτη, θα σχηματιστεί περισσότερο ωστενίτης. Η θερμή κατεργασία επιταχύνει τη διάχυση, έτσι ώστε αποκτάται ευκολότερα μια χαμηλότερη αποτελεσματική θερμοκρασία βαφής για τους σφυρήλατους ανοξείδωτους χάλυβες από ότι για τους χυτούς ή για τις συγκολλήσεις. Οι χυτοί διπλοί χάλυβες αποκτούν τη μικροδομή τους στη θερμοκρασία περιβάλλοντος με ανόπτηση σε θερμοκρασία 1040°C ή και μεγαλύτερη, η οποία ακολουθείται από βαφή [29]. Στην πράξη, η θερμοκρασία ανόπτησης ή θερμής κατεργασίας επιλέγεται όσο το δυνατό χαμηλότερη αλλά και επαρκώς υψηλή για τη διάλυση φάσεων κατακρήμνισης [26].

4.3.3.2 Αντιδράσεις κατακρήμνισης:

Η καμπυλότητα της διφασικής περιοχής φερρίτη και ωστενίτη του Σχήματος 4.3, υποδεικνύει ότι θα σχηματιστεί περισσότερος ωστενίτης εις βάρος του φερρίτη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες θερμής εργασίας ή ανόπτησης. Ωστόσο επιβάλλεται ένα χαμηλότερο όριο σε αυτές τις θερμοκρασίες από την εμφάνιση ανεπιθύμητων κατακρημνισμάτων στη μήτρα φερρίτη.

Λόγω της ποικιλίας των κραματικών στοιχείων στους διπλούς ανοξείδωτους χάλυβες, μπορεί να προκύψει ένας αριθμός αντιδράσεων κατακρήμνισης σε ένα εύρος θερμοκρασιών χαμηλότερο από 1000⁰C. Όλες οι αντιδράσεις κατακρήμνισης εξαρτώνται από το χρόνο και τη θερμοκρασία. Πολλά από αυτά τα κατακρημνίσματα ευθραυστοποιούν τους duplex ανοξείδωτους χάλυβες και πρέπει να αποφεύγονται. Περιλαμβάνονται οι φάσεις σ, χ και α΄ καθώς και τα νιτρίδια του χρωμίου.



Σχήμα 4.3: Σχηματισμός καρβιδίων για τους duplex ανοξείδωτους χάλυβες.

Επίσης, η προσθήκη ή τα αυξημένα επίπεδα Cr, Mo και W τείνουν να επιταχύνουν το σχηματισμό κατακρημνισμάτων, ιδιαίτερα τις φάσεις χ και σ. Οι αντιδράσεις κατακρήμνισης χαμηλότερων θερμοκρασιών περιορίζουν τη χρήση των διπλών ανοξείδωτων χαλύβων σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 280°C.

4.3.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι απαιτήσεις για αντοχή σε εφελκυσμό για σφυρήλατους ανοξείδωτους χάλυβες συμπεριλαμβάνονται στις προδιαγραφές ASMT A240 και για χυτούς στις προδιαγραφές ASMT A890. Οι ελάχιστες απαιτήσεις αναφέρονται στον Πίνακα 4.9. Τα κράματα που περιέχουν υψηλότερα επίπεδα Cr και N, οι super-duplex ανοξείδωτοι χάλυβες, έχουν υψηλότερη αντοχή από τα κοινά κράματα, όπως για παράδειγμα το κράμα 2205.

	UNS	Tensile	Strength	Yield Str	ength ^a	Elongation
Type	No."	MPa	ksi	MPa	ksi	(%)
_	\$32201	620	90	450	65	25.0
2304	\$32304	600	87	400	58	25.0
2205*	\$31803	620	90	450	65	25.0
2205	\$32205	620	90	450	65	25.0
329	\$32900	620	90	485	70	15.0
_	\$32950	690	100	485	70	15.0
-	\$31260	690	100	485	70	20.0
_	\$32520	770	112	550	80	25.0
CD4MCa	_	690	100	485	70	16
CD4MCaN	_	690	100	485	70	16
255	\$32550	760	110	550	80	15.0
2507	\$32750	795	116	550	80	15.0
-	\$32760	750	108	550	80	25.0
CD3M- WCuN	-	690	100	450	65	25

Πίνακας 4.9: Μηχανικές ιδιότητες για τους διπλούς ανοξείδωτους χάλυβες.

Е.М.П.



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5⁰

«ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ»

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΣ ΤΟΞΟΥ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

<u>5.1</u> ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

5.1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

- 1881: Πραγματοποιείται στην Γαλλία η πρώτη χρήση ηλεκτρικού τόξου μεταξύ ηλεκτροδίων άνθρακα για τήξη μετάλλων, από τον Moissan.
- 1885: Έκδοση Γερμανικού διπλόματος ευρεσιτεχνίας για συγκόλληση με ηλεκτρόδιο άνθρακα, στο όνομα Bernardos στην Ρωσία.
- 1892: Πειράματα συγκόλλησης με μεταλλικά ηλεκτρόδια, απο Slavianoff στην Ρωσία.
- 1895: Ανακάλυψη καυστήρα οξυγόνου ασετυλίνης, από Le Chatellier στην Γαλλία.
- 1907: Πρώτη χρήση επενδεδυμένων ηλεκτροδίων, από Kjellberg στην Σουιδία.
- 1930: Συγκόλληση βυθισμένου τόξου στις ΗΠΑ, Συγκόλληση με προστασία αερίου και ηλεκτρόδιο βολφραμίου στις ΗΠΑ.
- 1948: Συγκόλληση με προστασία αερίου και μεταλλικό ηλεκτρόδιο GMAW, στις ΗΠΑ.
- 1950: Αυτόματη κατακόρυφη συγκόλληση electroslag, στην Ρωσία.
- 1955: Κοπή με τόξο πλάσματος, στις ΗΠΑ.

5.1.2 Συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (Shielded Metal Arc Welding-SMAW)

Η συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1 και απαιτεί τον έλεγχο των εξής μεταβλητών: της ταχύτητας κίνησης του ηλεκτροδίου, της έντασης του ρεύματος και της τάσης του τόξου.



Σχήμα 5.1: Συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW), (α) διάγραμμα της μεθόδου, (β) απεικόνιση της περιοχής συγκολλήσεως.

Η συγκόλληση γίνεται με συνεχές ρεύμα με ορθή ή ανάστροφη πολικότητα. Τα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια ταξινομούνται από τους εθνικούς οργανισμούς τυποποίησης ή τα ινστιτούτα συγκόλλησης ανάλογα με την αντοχή τους, το είδος επένδυσης, τα χαρακτηριστικά εφαρμογής και τα στοιχεία κράματος.

Ο ρόλος της επένδυσης των ηλεκτροδίων συνοψίζεται στα παρακάτω σημεία:

A) Παρέχει προστασία από ανεπιθύμητα αέρια, κυρίως O₂, N₂, H₂ με τη δημιουργία προστατευτικού παραπετάσματος αερίων (CO₂, H₂O) γύρω από το τόξο.

B) Πραγματοποιείται χημική αντίδραση της τηγμένης σκουριάς με το βασικό μέταλλο για την αφαίρεση των μη επιθυμητών O₂ και H₂ (προσθήκη Si, Mn στην επένδυση για το πρώτο και CaF για το δεύτερο).

Γ) Παρέχει προστασία στο τηγμένο μέταλλο.

Για την επιτυχία των σκοπών αυτών χρησιμοποιούνται διάφορα είδη επενδύσεων (fluxes).

To O_2 και το N_2 στην περίπτωση A προέρχονται από τον αέρα και το H_2 από τη διάσπαση της υγρασίας.

Το οξυγόνο προκαλεί οξείδωση των συστατικών που έχουν μεγάλη χημική συγγένεια με το οξυγόνο. Στους ανοξείδωτου χάλυβες, εκτός από το χρώμιο, υπάρχουν και άλλα ευοξείδωτα στοιχεία, όπως το τιτάνιο, το αργίλιο, το πυρίτιο. Τα οξείδια έχουν σημείο τήξης πολύ υψηλό και στα σημεία όπου αποτίθενται εμποδίζουν τη διαβροχή του μετάλλου βάσης από το μέταλλο συγκόλλησης. Προκύπτουν έτσι ασυνέχειες οι οποίες συχνά επικοινωνούν με τον αέρα και, λόγω του διαφορικού αερισμού, γίνονται εστίες έντονης τοπικής διάβρωσης. Ταυτόχρονα μειώνεται η μηχανική αντοχή. Το άζωτο επιδρά αρνητικά κυρίως στους φερριτικούς χάλυβες. Στους ωστενιτικούς και τους μαρτενσιτικούς χάλυβες το άζωτο δεν είναι κατά κανόνα βλαβερό, σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις είναι και επιθυμητό, ως γ- φερρογόνο (ισοδύναμο του νικελίου).

Το υδρογόνο δεν έχει καμία επίδραση στους ωστενιτικούς χάλυβες, διότι ο ωστενίτης έχει την ευχέρεια να το διαλύει. Στους φερριτικούς πρέπει να αποφεύγεται και στους μαρτενσιτικούς είναι πολύ βλαβερό.

Το μέταλλο συγκόλλησης στους ανοξείδωτους χάλυβες εκλέγεται ώστε να έχει την ίδια ή παραπλήσια σύνθεση με το μέταλλο βάσης. Αυτό γίνεται για να διατηρούνται οι αντιδιαβρωτικές ιδιότητες του μετάλλου βάσης.

Επειδή κατά τη συγκόλληση υπάρχει απώλεια ενός ποσοστού ευοξείδωτων στοιχείων, κυρίως χρωμίου στη σκουριά, οι κατασκευαστές των ηλεκτροδίων ρυθμίζουν τη μέση σύνθεση λαμβάνοντας υπόψη και την απώλεια. Το επιπλέον χρώμιο προστίθεται συνήθως στο συλλίπασμα υπό μορφή σιδηροχρωμίου σε σκόνη. Σε μορφή σκόνης προστίθεται στο συλλίπασμα και το Μο, ενώ ο πυρήνας του ηλεκτροδίου είναι σύρμα από κοινή ποιότητα ανοξείδωτου χάλυβα.

Το πρόβλημα που παρατηρείται με τα ηλεκτρόδια αυτού του τύπου είναι ότι για την ίδια διάμετρο μπορούν να δεχθούν εντάσεις κατά 30% μικρότερες από τα κοινά ηλεκτρόδια μαλακού χάλυβα, κι αυτό οδηγεί σε μειωμένη ταχύτητα τήξης και επομένως παραγωγικότητα.

Αυτό οφείλεται στο ότι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, και ιδιαίτερα οι ωστενιτικοί, παρουσιάζουν χαμηλή ειδική αγωγιμότητα και αν χρησιμοποιηθούν εντάσεις ρεύματος όπως στην περίπτωση των κοινών χαλύβων, το ηλεκτρόδιο θερμαίνεται, ερυθροπυρώνεται σε όλο του το μήκος και καταστρέφεται.

Για να επιτευχθούν εντάσεις ισοδύναμες προς αυτές που επιτυγχάνονται με ηλεκτρόδια κοινών χαλύβων της ίδιας διαμέτρου, ορισμένοι κατασκευαστές κατασκεύασαν ηλεκτρόδια με πυρήνα από μαλακό χάλυβα και πρόσθεσαν όλα τα κραματικά στοιχεία στην πάστα των ηλεκτροδίων. Στην περίπτωση αυτή, το μέταλλο συγκόλλησης παρουσιάζει ετερογένεια, σε μικροσκοπική κλίμακα, λόγω ανεπαρκούς ανάμιξης. Μερικές φορές γδέρνεται τοπικά το συλλίπασμα από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, κι αυτό προκαλεί στιγμιαία απόθεση κοινού χάλυβα. Το ίδιο συμβαίνει και με τις εκτινάξεις του πυρήνα που είναι κοινός χάλυβας και δημιουργεί στην απόθεση ευπαθή σημεία στη διάβρωση.

Έχουν χρησιμοποιηθεί όλοι οι τύποι συλλιπάσματος για την επένδυση, τελικά όμως επικράτησαν τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου και τα βασικά, τα οποία προσφέρουν δυνατότητα συγκόλλησης σε κάθε θέση.

Τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου χρησιμοποιούνται με συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ τα βασικά με συνεχές και με ανάστροφη πολικότητα. Η ανάστροφη πολικότητα εκλέγεται για να αυξήσει το ρυθμό τήξης του ηλεκτροδίου, αν και η πολικότητα αυτή μειώνει τη διείσδυση.

Οι μηχανές συγκόλλησης διακρίνονται σε συνεχούς ρεύματος και εναλλασσόμενου ρεύματος

Η πιο γνωστή και ευρύτατα χρησιμοποιούμενη σήμερα μέθοδος μηχανοποίησης της συγκόλλησης με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια είναι η συγκόλληση βαρύτητας. Στον απλούστερο τύπο συσκευής, η τσιμπίδα με το ηλεκτρόδιο υποστηρίζεται από τα προς συγκόλληση ελάσματα (Σχήμα 5.2). Καθώς το ηλεκτρόδιο αναλίσκεται, η τσιμπίδα ολισθαίνει σε οδηγό υπό την επίδραση της βαρύτητας. Λόγω της κλίσης του οδηγού, η ολίσθηση αυτή

συνοδεύεται και από μια συνιστώσα της κίνησης κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης. Για την οικονομικότητα της μεθόδου απαιτούνται ηλεκτρόδια μεγάλου μήκους. Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρύτατα στη ναυπηγική για επίπεδες- μετωπικές αυχενικές συγκολλήσεις.



Schematic apparatus

Σχήμα 5.2: (1) Τσιμπίδα, (2) Ολισθητήρας, (3) άρθρωση, (4) βίδα συγκράτησης, (5) πόδι, (6) οδηγός ολίσθησης, (7) οδηγός, (8) κοχλίας ρύθμισης οδηγού, (9) καλώδιο παροχής ρεύματος.

5.1.3 Συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (Gas Tungsten Arc welding, GTAW)

Είναι η μέθοδος συγκόλλησης, που ονομάζεται επίσης και TIG που χρησιμοποιεί αδρανές αέριο για την προστασία της συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα. Το διάγραμμα της μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Το χρησιμοποιούμενο ηλεκτρόδιο είναι από μη τηκόμενο βολφράμιο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και προστιθέμενο μέταλλο.





Η συγκόλληση γίνεται με εναλλασσόμενο (A.C.) και με συνεχές ρεύμα (D.C.). Στην περίπτωση χρήσης D.C. μπορεί να έχουμε ορθή (straight polarity d.c.s.p.) ή ανάστροφη (reverse polarity, d.c.r.p.) πολικότητα (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4: Συγκόλληση με συνεχές ρεύμα (α) ορθή τάση, (β) με ανάστροφη πολικότητα, με εναλλασσόμενο ρεύμα (γ).

Η κατανομή της θερμότητας στο ηλεκτρικό τόξο είναι για την άνοδο (+) 80%, για την κάθοδο(-) 5% και η μεταφορά από αέριο 15%. Επομένως, για τα περισσότερα μέταλλα χρησιμοποιείται η ορθή πολικότητα. Εξαίρεση αποτελεί το αλουμίνιο, όπου χρησιμοποιείται ανάστροφη πολικότητα για να επιτευχθεί καθοδικός καθορισμός. Εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται με υψηλή συχνότητα και υψηλή τάση για τη βελτίωση της ευστάθειας του τόξου. Αέρια προστασίας που χρησιμοποιούνται είναι το αργό, που είναι συνηθέστερο λόγω χαμηλής τιμής, και το ήλιο, που απαιτεί μεγάλη τάση τόξου και προκαλεί μεγαλύτερη διείσδυση, οπότε χρησιμοποιείται σε παχιά ελάσματα. Στους ωστενιτικούς χάλυβες μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη διείσδυση με αύξηση της τάσης του τόξου, προσθέτοντας στο αργό μέχρι 10% Η₂. Στους άλλους χάλυβες η ύπαρξη υδρογόνου απαγορεύεται.

Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε:

(α) καθαρού βολφραμίου (EWP)

(β) βολφραμίου με 1-2% θόριο (EWTh-1, EWTh-2)

(γ) βολφραμίου με 0,15-0,40% ζιρκόνιο (EWZr)

(δ) καθαρού βολφραμίου με εξωτερικό λεπτό κέλυφος από κράμα βολφραμίου και 1-2% θορίου (EWTh-3)

Από τους παραπάνω τύπους τα EWP είναι τα φθηνότερα, ενώ τα θοριομένα είναι τα καλύτερα. Τα τελευταία παρουσιάζουν μεγαλύτερη εκπομπή ηλεκτρονίων, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μεγαλύτερη αντίσταση σε απορρόφηση ακαθαρσιών από το περιβάλλον. Ακόμη με τα ηλεκτρόδια αυτά είναι πιο εύκολο το άναμμα του τόξου, ενώ και το ίδιο το τόξο είναι σταθερότερο.

Στην GTAW η μηχανή συγκόλλησης έχει συνήθως χαρακτηριστική σταθερού ρεύματος. Σε ημιαυτόματες συγκολλήσεις σωληνώσεων με GTAW έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία συνεχές ρεύμα ορθής πολικότητας (αρνητικό ηλεκτρόδιο) σε παλμούς. Με τον τρόπο αυτό η περιμετρική συγκόλληση μπορεί να γίνει χωρίς τη συνεχή ρύθμιση των παραμέτρων συγκόλλησης.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι πιστολιών συγκόλλησης, ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή. Από αυτά άλλα είναι υδρόψυκτα και άλλα αερόψυκτα, ενώ μερικά φέρουν και βαλβίδες για τη ρύθμιση της παροχής του αερίου προστασίας.

Η τεχνική GTAW δίνει άριστες συγκολλήσεις, αλλά σχετικά ακριβές. Ενδείκνυται για συγκόλληση σε μικρά και σε μεγάλα πάχη. Μηχανοποιημένη και αυτόματη χρησιμοποιείται για την κατασκευή σωλήνων από ανοξείδωτο χάλυβα με ραφή.

5.1.4 Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW)

Σε αυτή τη μέθοδο συγκόλλησης χρησιμοποιείται προστασία αερίου και η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από το ηλεκτρικό τόξο που σχηματίζεται μεταξύ ενός τηκόμενου ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων.

Η μέθοδος αυτή όταν πρωτοεμφανίστηκε, θεωρείτο ως μέθοδος υψηλής πυκνότητας ρεύματος. Βασικός της σκοπός ήταν η συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου και ονομάστηκε MIG (Metal Inert Gas). Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν και ρεύματα χαμηλής πυκνότητας και παλλόμενο συνεχές ρεύμα και χρησιμοποιήθηκε σε συγκολλήσεις και άλλων μετάλλων. Για την προστασία του μετάλλου χρησιμοποιήθηκαν και ενεργά αέρια, κυρίως CO₂. Αποτέλεσμα αυτών ήταν η μετονομασία της σε GMAW, που είναι ευρύτερος όρος και το διάγραμμα της μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (GMAW), (α) διάγραμμα της μεθόδου, (β) απεικόνιση της περιοχής συγκολλήσεως.

Η συγκόλληση πραγματοποιείται με συνεχές ρεύμα, με ορθή και ανάστροφη πολικότητα. Με ορθή πολικότητα υπάρχει μεταφορά υλικού με σταγόνες, ενώ με ανάστροφη πολικότητα συμβαίνει μεταφορά υλικού με σταγονίδια. Στο μαλακό χάλυβα με ανάστροφη πολικότητα και με χρήση αργού, συμβαίνει μετατροπή της μεταφοράς υλικού από σταγόνες σε σταγονίδια, σε συγκεκριμένη τιμή του ρεύματος Ι_{tr}, η οποία ονομάζεται τιμή μετάβασης.

Επίσης, το προστιθέμενο μέταλλο μεταφέρεται με τεχνική βύθισης ή βραχυκύκλωσης, η οποία αναπτύχθηκε για να γίνει δυνατή η συγκόλληση σε πολύ λεπτά ελάσματα και σε όλες τις θέσεις, χωρίς τη χρήση αδρανών αερίων προστασίας. Οι εντάσεις και οι τάσεις ρεύματος που χρησιμοποιούνται είναι μικρές. Μεταξύ του ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση μετάλλων υπάρχει βολταϊκό τόξο. Μεταφορά υλικού γίνεται μόνο κατά τη διάρκεια επαφής του ηλεκτροδίου με το τηγμένο μέταλλο, που συμβαίνει 20 έως 200 φορές το δευτερόλεπτο.

Τα αέρια προστασίας που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις των μετάλλων φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Στις συγκολλήσεις ανοξείδωτων χαλύβων, το οξυγόνο που χρησιμοποιείται ως αέριο προστασίας, στοχεύει στην καλύτερη διείσδυση. Ακόμη το οξυγόνο είναι ευνοϊκό στην περίπτωση των ωστενιτικών χαλύβων με χαμηλό άνθρακα, επειδή εμποδίζει την ενανθράκωση. Οι περιεκτικότητες οξυγόνου που χρησιμοποιούνται είναι μεταξύ 2 και 10%.

Πίνακας 5.1: Αέρια προστασίας	; για συγκολλήσεις GMAW.
-------------------------------	--------------------------

Μέταλλο	Αέριο προστασίας
Αλουμίνιο	Αργό, για μικρά πάχη (έως 25 mm)
	Μίγμα 75% He, 25% Ar, για πάχη από 25 έως 76 mm.
	Μίγμα 90% He, 10% Ar, για πολύ μεγάλα πάχη
Μαλακός χάλυβας	Μίγμα Ar, 5% Ο ₂
	Για μεταφορά με βύθιση Ar, 25% O ₂ , για πάχη μικρότερα
	από 3,2 mm, Ar,50% CO ₂ για μεγαλύτερα πάχη, ή σκέτο
	CO₂ για μεγαλύτερη διείσδυση
Ανοξείδωτος	Μίγμα Ar με 1-2% Ο ₂
χάλυβας	Για μεταφορά με βύθιση μίγμα 90% He, 7,5% Ar, 2,5%
	CO ₂ .

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η επίδραση του αερίου προστασίας στην όψη και τη διείσδυση της συγκόλλησης.



Σχήμα 5.6: Επίδραση του αερίου προστασίας στη διείσδυση της συγκόλλησης.

Στη συγκόλληση GMAW με προστασία αδρανούς αερίου, τα συμπαγή ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται, έχουν συνήθως την ίδια σύνθεση με το προς συγκόλληση βασικό μέταλλο. Όταν το χρησιμοποιούμενο αέριο είναι ενεργό (π.χ. μίγμα με O₂ και CO₂), τότε είναι απαραίτητη η προσθήκη αποξειδωτικών, κυρίως Si και Mn, στο κράμα του ηλεκτροδίου. Οι πιο συνηθισμένες χρησιμοποιούμενες διάμετροι ηλεκτροδίων είναι από 1,02 έως 1,59 mm, αλλά υπάρχουν και ηλεκτρόδια μικρότερων (μέχρι 0,5 mm) και μεγαλύτερων (μέχρι 3,18 mm) διαμέτρων.

Η τεχνική GMAW χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση ανοξείδωτων χαλύβων.

Τα πιστόλια συγκόλλησης χρησιμοποιούνται για χειροκίνητη και ημιαυτόματη συγκόλληση. Επειδή το ηλεκτρόδιο προωθείται συνεχώς κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, το πιστόλι πρέπει να διαθέτει μια ολισθαίνουσα ηλεκτρική επαφή (σωλήνας επαφής) για τη διοχέτευση του ρεύματος. Πρέπει επίσης να διαθέτει ακροφύσιο για την παροχή του αερίου προστασίας. Η ψύξη του πιστολιού γίνεται ή με το αέριο προστασίας ή με κλειστό κύκλωμα νερού ή και με τα δύο. Επειδή η GMAW είναι μέθοδος συγκόλλησης με πολύ υψηλή πυκνότητα έντασης ρεύματος, αν χρησιμοποιηθεί μηχανή συγκόλλησης, απαιτείται σταθερή ή ελαφρά ανερχόμενη τάση. Επίσης, το συνεχές ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται με σταθερή ταχύτητα.

Μια νεότερη εξέλιξη στον τομέα των μηχανών είναι οι μηχανές παλλόμενου ρεύματος, οι οποίες παρέχουν δύο επίπεδα έντασης ρεύματος. Το σταθερό ρεύμα χαμηλής έντασης δεν είναι σε θέση να προκαλέσει μεταφορά του τηκόμενου υλικού σε σταγονίδια. Το ρεύμα υψηλότερης έντασης, υπό μορφή παλμών, υπερτίθεται στο πρώτο. Η μέγιστη τιμή του συνολικού ρεύματος είναι υψηλότερη της τιμής μετάβασης, οπότε η μεταφορά γίνεται με ψεκασμό. Σημαντικό πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι η επιθυμητή μεταφορά με ψεκασμό γίνεται με αποδοτικότερη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Εξέλιξη αυτών των μηχανών συγκόλλησης αποτελούν οι μηχανές synergic pulsed MIG.

Υπάρχουν παραλλαγές της μεθόδου GMAW, δύο από τις σημαντικότερες είναι οι εξής:

Α) Χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων

Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως FCAW (Flux Cored Arc Welding-Συγκόλληση τόξου με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων). Το βασικό χαρακτηριστικό της είναι ότι τα ηλεκτρόδια είναι μεν μεταλλικά αλλά σωληνοειδή που στο εσωτερικό τους (πυρήνα) περιέχουν σκόνη, παρόμοια με εκείνη των επενδυμένων ηλεκτροδίων. Η συγκόλληση γίνεται με ή χωρίς αέριο προστασίας. Στην τελευταία περίπτωση το αέριο είναι συνήθως CO₂ (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7: Συγκόλληση με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων (FCAW).

Σε σχέση με την κλασική GMAW, η μέθοδος αυτή παρέχει μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης, μεγαλύτερη διείσδυση και τη δυνατότητα συγκόλλησης σκουριασμένων υλικών ή κραμάτων με προστασία CO₂. Παρουσιάζει όμως, μεγαλύτερη κατανάλωση αερίου, χαμηλότερη απόδοση και το πρόβλημα της αφαίρεσης της σκουριάς.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η FCAW είναι η μέθοδος συγκόλλησης που λειτουργεί το ρομπότ και χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων.

B) Συγκόλληση στενού διακένου (Narrow Gap Welding)

Με την παραλλαγή αυτή της GMAW είναι δυνατή η συγκόλληση πολύ παχέων ελασμάτων (μέχρι και 400 mm) φερρομαγνητικών υλικών με ανοιχτή συμβολή ή τύπου V πολύ μικρής γωνίας. Τα ελάσματα τοποθετούνται έτσι ώστε το διάκενο στη ρίζα τους να είναι 6 με 10 mm μόνο, ανεξάρτητα από το πάχος τους. Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Ιαπωνία, όπου έχουν αναπτυχθεί τουλάχιστον 8 διαφορετικά συστήματα. Κοινό χαρακτηριστικό αυτών είναι ότι το τόξο πάλλεται και κάμπτεται προς την κατεύθυνση των τοιχωμάτων των ελασμάτων για την επίτευξη καλύτερης τήξης.

Κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η οικονομικότητα, η δημιουργία χαμηλότερων παραμενουσών τάσεων και η βελτιωμένη δυσθραυστότητα της συγκόλλησης. Σημαντικό μειονέκτημα είναι η δυσκολία να επιδιορθωθούν τυχόν σφάλματα.

5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Δεν υπάρχει ακόμα σήμερα κάποιο αναλυτικό σύστημα που να βοηθάει το μηχανικό στην επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου συγκόλλησης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Έτσι στις περισσότερες περιπτώσεις η επιλογή βασίζεται κυρίως στην εμπειρία. Στη παράγραφο αυτή περιγράφονται συνοπτικά ορισμένοι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου συγκόλλησης.

Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει στοιχεία σύγκρισης των ακόλουθων μεθόδων συγκόλλησης: με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, βαρύτητας, βυθισμένου τόξου, electroslag/electrogas, με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (GMAW) και με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW). Η σύγκριση γίνεται με βάση την ταχύτητα παραγωγής, το κόστος εγκατάστασης, τη δυσθραυστότητα του μετάλλου συγκόλλησης και τις θέσεις συγκόλλησης. Ο πίνακας παραθέτει ακόμα μερικά χαρακτηριστικά των μεθόδων αυτών.

	Με επενδεδυ- μένα ηλε- κτρόδια	Βαρύτητας	Βυθισμένου τόξου	Electroslag/ Electrogas	GMAW	GTAN	
Ταχύτητα παραγωγής	5	3	2	1 (υψηλότερη)	4	6 (χαμηλότερη)	
Κόστος Εγκατάστασης	1 (χαμηλότερο)	2	5	6 (υψηλότερο)	4	3	
Δυσθραυστότητα Μετάλλου Συγκόλλησης	3 (με ηλεκτρό- δια χαμηλού υδρογόνου	4	5	6 (χειρότερη)	2	1 (καλύτερη)	
θέσεις Συγκόλλησης	όλες	Επίπεδη και επίπε- δη μετωπι- κη	Επίπεδη	Κατακόρυφη	όλες	όλες	
	Η πιο ευέλι- κτη μέθοδος	Δεν απαι- τεί ικανό- τητες συ- γκολλητή	Παρέχει τη μεγαλύτερη παραγωγι- κότητα	Δεν απαιτούν ακρίβεια στη διαμόρφωση των ακμών	Παρέχουν μεγάλη ευκο- λία στο άναμμα του τόξου (σχετικά εύκολή η αυτοματοποίησή τους)		
		I		Επίδραση του ανέμου στη μέθοδο electrogas	Σημαντική ανέμου	επίδραση του	

Πίνακας 5.2: Σύγκριση διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης.

Η σύγκριση ως προς την ταχύτητα παραγωγής γίνεται με αριθμητικούς δείκτες: το 1 σημαίνει την υψηλότερη και το 6 τη χαμηλότερη. Από τον πίνακα φαίνεται ότι οι αυτόματες κατακόρυφες μέθοδοι συγκόλλησης (electroslag/electrogas) παρέχουν τη μέγιστη ταχύτητα παραγωγής, είναι επομένως οι πιο αποτελεσματικές για συγκόλληση παχιών ελασμάτων (μόνο στην κατακόρυφη θέση). Όμως και η μέθοδος βυθισμένου τόξου, παρέχει υψηλή ταχύτητα παραγωγής, αλλά αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για συγκόλληση κατά συμβολή στην επίπεδη θέση.

Το Σχήμα 5.8 παριστάνει τη σχέση μεταξύ πάχους ελάσματος και διάρκειας ηλεκτρικού τόξου (arc time), υποθέτοντας ότι το τόξο λειτουργεί συνεχώς. Από το σχήμα φαίνεται ότι η μέθοδος βυθισμένου τόξου είναι πολύ πιο αποδοτική από τις μεθόδους με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (manual welding) και GMA με προστασία CO₂. Αυτό οφείλεται κυρίως στη χρήση υψηλής έντασης ρεύματος, που έχει ως αποτέλεσμα υψηλό ρυθμό απόθεσης μετάλλου συγκόλλησης.

Συγχρόνως, επειδή προκαλείται και μεγάλη διείσδυση, είναι δυνατή η μείωση της επιφάνειας της διατομής της ένωσης (joint sectional area), άρα και της ποσότητας του προστιθέμενου μετάλλου συγκόλλησης. Τέλος, σημειώνεται ότι η μέθοδος GTAW είναι τόσο αργή, ώστε σπάνια χρησιμοποιείται σε συγκολλήσεις της μεταλλικής κατασκευής του σκάφους.



Σχήμα 5.8: Σχέση πάχους ελάσματος και διάρκειας τόξου για διάφορες μεθόδους συγκόλλησης.

 Κόστος εγκατάστασης. Η συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια απαιτεί το χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης, ενώ οι μέθοδοι που απαιτούν τη χρήση ημι-αυτοποιημένων μηχανών, όπως για παράδειγμα η μέθοδος βυθισμένου τόξου, το μεγαλύτερο.

• Μηχανικές ιδιότητες. Θεωρώντας ότι γίνεται χρήση των σωστών συνθηκών συγκόλλησης, όλες οι μέθοδοι συγκόλλησης μπορούν να παράγουν ενώσεις με ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες (τάση διαρροής, όριο εφελκυσμού και επιμήκυνση) εάν εφαρμοστούν σε συνηθισμένα κατασκευαστικά υλικά. Η επίτευξη όμως επαρκούς δυσθραυστότητας δεν είναι πάντοτε δυνατή, ειδικότερα όταν πρόκειται να συγκολληθούν ελάσματα από χάλυβες υψηλής αντοχής που έχουν υψηλά επίπεδα δυσθραυστότητας που τα απέκτησαν με θερμικές κατεργασίες. Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός απόθεσης μετάλλου σε μια μέθοδο συγκόλλησης, τόσο χαμηλότερη είναι η δυσθραυστότητα του μετάλλου συγκόλλησης. Έτσι, για παράδειγμα, είναι πιθανή η αναγκαστική χρήση της μεθόδου GTAW σε συγκολλήσεις χαλύβων πολύ υψηλής αντοχής.

• Ειδικά χαρακτηριστικά. Η μέθοδος συγκόλλησης με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια είναι η πιο ευέλικτη, και γι' αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές.

Η συγκόλληση βαρύτητας απαιτεί ελάχιστες ικανότητες συγκολλητή.

Οι κατακόρυφες μέθοδοι συγκόλλησης δεν απαιτούν ιδιαίτερη ακρίβεια στη διαμόρφωση των ακμών των προς συγκόλληση ελασμάτων. Αυτό αποτελεί και ένα από τους σημαντικότερους λόγους, για τους οποίους οι μέθοδοι αυτοί βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στη συγκόλληση μεταξύ τους, μεγάλων τομέων του σκάφους.

Οι μέθοδοι με προστασία αερίου (GMAW και GTAW) δεν παράγουν σκουριά (slag) και παρέχουν μεγάλη ευκολία στο άναμα του τόξου. Για το

λόγο αυτό είναι σχετικά εύκολο να συμπεριληφθούν σε ένα αυτόματο σύστημα παραγωγής. Ένα εγγενές πρόβλημα, όμως σε όλες τις μεθόδους με προστασία αερίου (GMAW, GTAW) είναι η ευπάθεια τους σε άνεμο. Όταν επομένως γίνεται χρήση των μεθόδων αυτών στο ύπαιθρο, πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για την προστασία του ηλεκτρικού τόξου από τον άνεμο.

Συνολική ανάλυση κόστους. Το συνολικό κόστος αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα στην εκλογή της κατάλληλης μεθόδου συγκόλλησης.
 Πρέπει, επομένως να λαμβάνονται πάντα υπόψη τα ακόλουθα:

α) Το κόστος εγκατάστασης και η αποτίμησή του.

β) Το κόστος των υλικών

γ) Η ταχύτητα παραγωγής και το απαιτούμενο εργατικό δυναμικό

δ) Η πιθανότητα έμμεσης μείωσης του κόστους με απλοποίηση της διαδικασίας παραγωγής (πχ. Χρήση της μονόπλευρης συγκόλλησης με τη μέθοδο βυθισμένου τόξου).

5.3 <u>ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΤΗ</u> <u>ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ</u>

Κατά τη διάρκεια της ανέγερσης ενός σκάφους χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης για τους τομείς και τους υποτομείς. Η συγκόλληση αυτών των τομέων και υποτομέων θα δώσει το μεταλλικό σκελετό του σκάφους.

Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει ένα παράδειγμα χρήσης μεθόδων συγκόλλησης κατά την ανέγερση πλοίων στην Ιαπωνία.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχει σημαντική τάση για αυτοματοποίηση των μεθόδων συγκόλλησης.

Πίνακας 5.3: Παράδειγμα χρήσης μεθόδων συγκόλλησης	ς στα διάφορα στάδια της ανέγερσης
πλοίων.	

Στάδιο	Κατασκευαστικό Στοιχείο	Είδος Ενωσης	Χρησιμοποιούμενη Μέθοδος Συγκόλλη- σης		
Συναρμολόγηση	Κατασκευή	Κατά συμβολή	• βυθισμένου τόξου		
υποτομέων (sub-assembly)	εσωτερικού γάστρας	Αυχενική	• βαρύτητας • GMAW (με CO ₂)		
ж.	Επίπεδα ελάσματα Κατά συμβολή		• μονόπλευρη		
Συναρμολόγηση τομέων (assembly)	Καμπύλα Κατά συμβολή ελάσματα		 μονόπλευρη GMAW GO2, CO2+Ar) 		
	Εσωτερικό γάστρας	 βαρύτητας GMAW (CO₂) 			
		Κατά συμβολή (επίπεδη)	 μονόπλευρη GMAW (CO₂, CO₂+Ar) 		
Τελική συναρμολόγηση (final assembly)	Εξωτερικά ελάσματα	Κατά συμβολή (κατακόρυφη)	 electroslag GMAW GCO₂, CO₂+Ar) 		
		Κάτά συμβολή · βυθισμένου (μετωπική) · GMAW (CO ₂)			
	Εσωτερικό	Κατά συμβολή (κατακόρυφη)	 electroslag ανα- λισκομένου οδη- γού 		
	γάστρας	Κατά συμβολή (επίπεδη)	• βυθισμένου τόξου • GMAW (CO _z)		

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

- [1] Peckner D., Bernstein I. 1977, *Handbook of stainless steels* ,McGraw-Hill, New York.
- [2] Copson H.R. 1959, *Physical Metallurgy of stress-corrosion fracture*, Interscience, New York (p. 126).
- [3] Wentrup H., Reif O. 1949, Archiv fuer das eisenhuettenwesen.
- [4] Kubaschewski O. 1982, *Iron: Binary phase diagrams*, Springer-Verlag, New York.
- [5] Dahl W., Duren C., Musch H., 1973, Stahl und Eisen.
- [6] ASM Metals handbook 8th edition.
- [7] Baerlachen E. 1958, Investigations concerning the transformation behaviour, notched impact toughness, and susceptibility to intercrystalline corrosion of iron-chromium alloys with chromium contents to 30%, *Stahl un Eisen*, 81(12), March.
- [8] Castro R., Tricot R., 1962, Etudes des transformation isothermes dans les aciers inoxydables semi-ferritiques a 17% de chrome, *Memoires Scientifiquens de la Revune de Metallurgia*.
- [9] Lippold J., Savage W., 1979, Solidification of austenitic stainless steel weld-ments, *Welding Journal*.
- [10] Katayama S., Fujimoto T., Matsunawa A., 1985, Correlation among solidification process, microstructure, microsegregation and solidification cracking susceptibility in stainless steel weld metals, *Transactions of JWRI*.
- [11] David S., 1981, Ferrite morphology and variation i9n ferrite content in austenitic stainless steel welds. *Welding Journal*.
- [12] Leone G., Kerr H., 1982. The ferrite to austenite transformation in stainless steels, *Welding Journal*.
- [13] ASM Metals Handbook, 8th edition, vol.8 (p:424)
- [14] Hauser D., Van Echo J., 1982, Effects of ferrite content in austenitic stainless steel welds. *Welding Journal*.
- [15] Thomas R. G., 1978, The effect of delta ferrite on the creep rupture properties of austenitic weld metals. *Welding Journal*.

- [16] Payson P., and Savage, C. H., 1944. Martensite reactions in low alloy steels. *Transactions of the American Society for Metals*.
- [17] Thomas R., and Apps, R. L., 1980. Weld heat-affected zone properties of AISI 409 ferritic stainless steel, in Toughness of Ferritic Stainless Steels, ASTM STP 706, R. A. Lula, ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohochen, PA, pp. 161-183.
- [18] Thielsch H., 1951. Physical and welding metallurgy of chromium stainless steel, Welding Journal, 30(5):209s-250s.
- [19] Demo J. J., 1977. Structure and constitution of wrought ferritic stainless steels, in Handbook of Stainless Steels, D. Peckner and I. M. Bernstein, eds., McGraw-Hill, New York.
- [20] Howard R. D., Martin J. W., Evans T. N., and Fairhurst, D., 2003. Experience with 13% Cr martensitic stainless steels in the oil and gas industry, Paper PO358, Stainless Steel Word, 2003, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands.
- [21] Bandel G., and Tofaute W., 1941. Arch. Eisenhut., 15(7):307.
- [22] Shortsleeve F. J., and Nicholson M. E., 1951. Transformations in ferritic chromium steels between 1100 and 1500^oF (595 and 815^oC), Trans. ASM, 43:142-156.
- [23] Lacombe, P., Baroux, B., and Beranger, G., eds. 1993. Stainless Steels, Les Editions de Physique, Les Ulis, France.
- [24] Lacombe P., Baroux B., and Beranger G., eds. 1993. Stainless Steels, Les Editions de Physique, *Les Ulis*, France.
- [25] Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, by John C. Lippold and Damian J. Kotecki, p. 57, 2005.
- [26] Charles, J. 1991. Super duplex stainless steels: structure and properties, in Duplex Stainless Steels '91, Vol1, Les Editions de Physique, Les Ulis, France, pp. 3-48.
- [27] Ogawa, T., and Koseki, T. 1989. Effect of composition profiles on metallurgy and corrosion behaviour of duplex stainless steel weld metals, *Welding Journal*, 68(5):181s-191s.
- [28] Vitek, J. M., and David, S. A. 1985. The concept of an effective quench temperature and its use in studying elevated-temperature microstructures, *Metallurgical Trasactions A*, 16A(8):1521-1523.

- [29] ASTM., 1999. Standard Specification for Castings, Iron-Chromium-Nikel-Molybdenum Corrosion Resistant, Duplex (Austenitic/Ferritic) for General Application, ASTM A890/A890M-99, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [30] Thomas, R. D., 1984. HAZ cracking in thick sections of austenitic stainless steels 1, *Welding Journal*, 62(12):24-32.
- [31] Thomas, R. D., 1984. HAZ cracking in thick sections of austenitic stainless steels 2, *Welding Journal*, 62(12):355s-368s.
- [32] Schaeffler, A. L., 1947. Selection of austenitic electrodes for welding dissimilar metals, *Welding Journal*.
- [33] Schaeffler, A. L., 1948. Welding dissimilar metals with stainless electrodes, *Iron Age.*
- [34] Schaeffler, A. L., 1949. Constitution diagram for stainless steel weld metal, Metal Progress.
- [35] DeLong, W. T., 1956. Measurement and calculating of ferrite in stainless steel weld metal, *Welding Journal.*
- [36] Long, C. J., and DeLong, W. T., 1973. The ferrite content of austenitic stainless steel metal, *Welding Journal*.
- [38] DeLong, W. T., 1973. Calibration procedure for instruments to measure the delta ferrite content of austenitic stainless steel weld metal, *Welding Journal.*
- [39] Siewert, T. A., and McCowan C.N., 1988. Ferrite number prediction to 100 FN in stainless steal weld metal, *Welding Journal.*
- [40] Siewert, T. A., and McCowan C.N., 1989. Stainless steel weld metal: Prediction of ferrite content, WRC Bulleting 324, Welding Research Council, New York, April.
- [41] Kotecki, D.J., 1988. Verification of the NBS-CSM ferrite diagram, IIW Document II-C-834-888, American Council of International Institute of Welding, Miami.
- [42] Lake, F.B., 1990. Effect of Cu on stainless steel weld metal ferrite content, paper present at AWS Annual Convention.
- [43] Kotecki, D.J., Siewert, T. A., 1992. WRC-1992 constitution diagram for satinless steel weld metals: a modification of the WRC-1988 diagram, welding Journal.
- [44] Παντελής Δ., Χρυσουλάκης Γ., 1996. Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, Παπασωτηρίου, σελ: 263-267.

[45] Παπάζογλου Β.Ι., Παπαδημητρίου Γ., 1994. Επιστήμη και τεχνική των συγκολλήσεων, *ΝΤUA*.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Е.М.П.



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6⁰

«Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ Η ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ»

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΣ ΤΟΞΟΥ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

<u>6.1</u> ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μελέτη μετωπικής συγκόλλησης με τη μέθοδο τόξου με παραγεμισμένα ηλεκτροδια FCAW (Flux Cored Arc Welding) ελασμάτων διαστάσεων 350x150 mm² από ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα τύπου AISI 316L, πάχους 8 mm. Τα ελάσματα ετοιμάστηκαν και συγκολλήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Ως μέταλλο εναπόθεσης χρησιμοποιήθηκε κράμα ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα παρόμοιας χημικής σύστασης με το βασικό μέταλλο σε μορφή σύρματος, διαμέτρου 1,2 mm, ενώ το αέριο προστασίας ήταν το 82% Ar - 18% CO2 (EN 439 – M21). Κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας της συγκόλλησης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των θερμικών κύκλων της, με την χρήση θερμοστοιχείων τύποι Κ. Σε εγκάρσιες τομές των συγκολλημένων δοκιμίων πραγματοποιήθηκε πλήρης μεταλλογραφική μελέτη και σληρομέτρηση.

<u>6.2</u> ΣΥΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως μέταλλο βάσης είναι ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας 316L. Ο 316L, η χαμηλού άνθρακα (0,03%) έκδοση του ανοξείδωτου 316 (0,08%), είναι ανθεκτικός στην κατακρήμνιση καρβιδίων στα όρια των κόκκων του. Το γεγονός αυτό τον καθιστά κατάλληλο για συγκολλήσεις μεγάλου πάχους (>6 mm). Η ωστενιτική δομή δίνει στον 316L σημαντικές μηχανικές ιδιότητες. Η τυπική % κατά βάρος χημική σύσταση του χάλυβα αυτού δίνεται στον Πίνακα 6.1.

	С	Cr	Mn	Ni	Si	Мо	S	Р
316L	0.024	16.97	1.39	10.09	0.38	2.02	0.004	0.032

Πίνακας 6.1: Χημική σύσταση (%κ.β.) του ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 316L.

Στον Πίνακα 6.2 που ακολουθεί, δίνονται οι μηχανικές ιδιότητες του ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 316L.

Χάλυβας	Όριο θραύσης (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Επιμήκυνση (%)	Σκληρότητα (HV)	
316L	>485	195	40	167	

Πίνακας 6.2: Μηχανικές ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα 316L.

Το καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο της μεθόδου FCAW (Συγκόλληση με Παραγεμισμένα Ηλεκτρόδια) ήταν σε μορφή σύρματος (EN 12073 - T 19 12 3 L R M (C) 3) με διάμετρο 1,2 mm, το αέριο προστασίας ήταν το 82% Ar + 18% CO2 (EN 439 – M21). Η σύσταση του μετάλλου εναπόθεσης φαίνεται στον Πίνακα 6.3.

	С	Cr	Mn	Ni	Si	Мо	Cu	S	Р
ΜΕΤΑΛΛΟ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ	0.029	19.07	1.38	11.94	0.78	2.60	0.17	0.008	0.022

Πίνακας 6.3: Χημική σύσταση (%κ.β.) του μετάλλου εναπόθεσης.

6.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη (εξοπλισμός), την οποία χρησιμοποιήσαμε για τη συγκόλληση των ελασμάτων, αποτελείται από τις παρακάτω συσκευές:

1. Κονσόλα ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα.



2. Ρομποτικό βραχίονα, του οίκου «IGM Robotersysteme» με 6 βαθμούς ελευθερίας, για τη μετακίνηση της τσιμπίδας στο χώρο κατά τους άξονες x, y, z.



3. Μηχανή συγκόλλησης GMAW του οίκου «IGM».



4. Τσιμπίδα για τη δημιουργία του τόξου της συγκόλλησης.
5. Τροφοδότη σύρματος και σύστημα διεύθυνσής του με ράουλα, συνδεδεμένο με το βραχίονα και την τσιμπίδα.



6. Αέριο προστασίας σύνθεσης 82% Ar + 18% CO2 (EN 439 – M21).



Η τσιμπίδα για τη συγκόλληση FCAW είναι συνδεδεμένη με τον ρομποτικό βραχίονα και χρησιμοποιείται για τη διαδικασία έναυσης του τόξου, τη διακοπή του, καθώς και για τον έλεγχο της παροχής του προστατευτικού αερίου. Η κίνηση της τσιμπίδας στον χώρο πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ρομποτικού βραχίονα. Έτσι, μπορούμε εύκολα και με μεγάλη ακρίβεια να επιλέξουμε την ταχύτητα προώθησης του τόξου πλάσματος που επιθυμούμε (ταχύτητα κίνησης τσιμπίδας), καθώς και την αναγκαία απόσταση της τσιμπίδας (ακροφυσίου) από την επιφάνεια κατεργασίας. Τόσο η ταχύτητα

προώθησης του τόξου, όσο και η απόσταση του ακροφυσίου από την επιφάνεια κατεργασίας επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία της συγκόλλησης (ανήκουν στις παραμέτρους της).

Η γεννήτρια του ρεύματος, η οποία όπως αναφέραμε είναι η ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται και για συγκολλήσεις με τη μέθοδο GMAW, παράγει το ρεύμα για το τόξο. Η ρύθμιση της έντασης, που αποτελεί παράμετρο λειτουργίας, γίνεται από την κονσόλα ελέγχου του ρομπότ. Για προστατευτικό αέριο χρησιμοποιήσαμε μείγμα Ar και CO₂ με ποσοστά 82% - 18% αντίστοιχα.

<u>6.4</u> ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Για την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών συγκόλλησης έγιναν δοκιμαστικές συγκολλήσεις (bead on plate). Σκοπός των δοκιμών ήταν η εύρεση των βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης, ώστε η κύρια συγκόλληση να πραγματοποιηθεί με τις καλύτερες συνθήκες. Οι δοκιμές αποδείχτηκαν δύσκολες μιας και ήταν η πρώτη φορά που θα χρησιμοποιείτο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας σε συγκόλληση στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Το ίδιο ίσχυε και με το καινούριο ρομπότ συγκολλήσεως. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται χαρακτηριστικά κάποιες από τις δοκιμές που έγιναν πριν από τις συγκολλήσεις.



Σχήμα 6.1 (α): Δοκιμές bead on plate σε μέταλλο βάσης 316L.



Σχήμα 6.1 (β): Δοκιμές bead on plate σε μέταλλο βάσης 316L.

Τα δύο ελάσματα του χάλυβα 316L έχουν πάχος 8 mm και διαστάσεις 350x150 mm². Τα δοκίμια αυτά οδηγήθηκαν στο μηχανουργείο, όπου και δημιουργήθηκε λοξοτομή στα προς συγκόλληση άκρα (δηλαδή στα άκρα των 350 mm).



Σχήμα 6.2: Γεωμετρία της συγκόλλησης με λοξοτομή τύπου V.

Επίσης, δημιουργήθηκαν 5 οπές διαμέτρου 3 mm και βάθους 4 mm στην επιφάνια του ενός ελάσματος. Οι οπές αυτές ήταν σε αποστάσεις 15, 25, 35, 55, 75 mm από το προς συγκόλληση άκρο και όλες οι οπές έγιναν στον κεντρικό άξονα του ελάσματος. Σκοπός των οπών είναι η τοποθέτηση θερμοστοιχείων τύπου Κ για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στα σημεία αυτά κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Το πρώτο έλασμα του ανοξείδωτου χάλυβα 316L (με τις οπές για τα θερμοστοιχεία) και ένα άλλο έλασμα 316L (χωρίς οπές), τοποθετούνται στο μεταλλικό τραπέζι της συγκόλλησης με τα λοξοτομημένα άκρα σε μικρή απόσταση μεταξύ τους (2mm). Στη συνέχεια, γίνεται συγκόλληση σε δύο σημεία (ποντάρισμα), ώστε οι πλάκες να συγκρατιούνται μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης των θερμοστοιχείων και να είναι σταθερές κατά την ώρα της συγκόλλησης (Σχήμα 6.3).





Σχήμα 6.3: Πειραματική διάταξη συγκόλλησης χάλυβα τύπου 316L.

Οι συνθήκες συγκόλλησης είχαν ως εξής:

		8,0 mm R 8,0 mm R R R	→ 60° ↔ 3,0 mm		
Τάση (V)	Ένταση (A)	Ταχύτητα (cm/min)	Παροχή Αερίου Προστασίας (l/min)	Στρώσεις	
24	160	30	18	3	

Πίνακας 6.4: Συνθήκες μετωπικής συγκόλλησης.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μέθοδος συγκόλλησης που θα χρησιμοποιηθεί είναι η συγκόλληση με σωληνωτά ηλεκτρόδια (Flux Cored Arc Welding, FCAW). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης του ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα 316L, περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

1. Τοποθέτηση των ενωμένων ελασμάτων (η ένωση έγινε κατά την προετοιμασία) στο μεταλλικό τραπέζι της συγκόλλησης. Το ένα από τα δύο ελάσματα, ανάλογα με το πού θέλουμε να γίνουν οι μετρήσεις, πακτώνετε στο τραπέζι με σφικτήρες. Η πάκτωση γίνεται πάντα στο έλασμα, το οποίο φέρει τις οπές για τα θερμοστοιχεία. Κάτω από τα ελάσματα τοποθετείται κεραμική επικαλύπτρα για την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας της ρίζας της συγκόλλησης.

2. Τοποθέτηση των θερμοστοιχείων στον πακτωμένο χάλυβα, μέσα στις προκαθορισμένες οπές. Η συγκράτηση των θερμοστοιχείων στην επιφάνεια του ελάσματος έγινε με ειδική κεραμική πάστα, η οποία στερεοποιείται σε κάποιο χρονικό διάστημα από την εφαρμογή της (Σχήμα 6.3).

3. Έλεγχος της θέσης και του σχήματος του ηλεκτροδίου. Τοποθέτηση του ακροφυσίου της τσιμπίδας στην επιθυμητή απόσταση, μέσω της κονσόλας ελέγχου του ρομπότ, και τελικός έλεγχος αν και οι υπόλοιπες παράμετροι λειτουργίας του τόξου είναι αυτές που θέλουμε (ένταση ρεύματος, προώθησης). παροχή αερίου, ταχύτητα Mε тη βοήθεια TOU αυτοματοποιημένου συστήματος (ρομποτικός βραχίονας) η κίνηση της τσιμπίδας περιορίζεται μέσα στα όρια της προς συγκόλληση επιφάνειας, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της κατεργασίας το τόξο να μην εξέλθει εκτός αυτών των ορίων.

4. Τέλος, η περιοχή της συγκόλλησης σαρώνεται από το τόξο. Πραγματοποιείται ταχεία τήξη τόσο του ηλεκτροδίου, όσο και μέρους των μετάλλων βάσης με αποτέλεσμα την ανάμειξή τους και τη δημιουργία του μετάλλου συγκόλλησης. Μετά το τέλος της σάρωσης η τσιμπίδα απομακρύνεται και η συγκόλληση αφήνεται στο περιβάλλον να ψυχθεί.

E.M.II.



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7⁰

«ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ»

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΣ ΤΟΞΟΥ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

7.1 <u>Ο ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ</u>

Θερμικός κύκλος ενός συγκεκριμένου σημείου στη γειτονιά μιας συγκόλλησης, λέγεται η μεταβολή της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος μέχρι ένα μέγιστο και πάλι μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Το σημείο μπορεί να βρίσκεται στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό του ελάσματος. Είναι φανερό, ότι ανάλογα με την απόσταση του σημείου από τη συγκόλληση, υπάρχει και ένας διαφορετικός θερμικός κύκλος. Κατά κανόνα σ' ένα θερμικό κύκλο διακρίνουμε: την περίοδο της θέρμανσης, τη μέγιστη θερμοκρασία που αποκτά το σημείο σ' όλη τη διάρκεια της συγκόλλησης, και την περίοδο απόψυξης. Επίσης, συγκρατούμε τη χρονική διάρκεια, που το σημείο έχει θερμοκρασία ανώτερη μιας (κατά περίπτωση) χαρακτηριστικής τιμής.

Οι θερμικοί κύκλοι των διαφόρων σημείων της συγκόλλησης έχουν μεγάλη σημασία, γιατί αποτελούν πραγματικές θερμικές κατεργασίες, από τις οποίες εξαρτάται η μικρογραφική δομή και οι μηχανικές ιδιότητες του προς συγκόλληση υλικού. Έτσι, για τους χάλυβες, η ταχύτητα θέρμανσης, η μέγιστη αποκτώμενη θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής σε αυτή, είναι καθοριστικοί παράγοντες για τα φαινόμενα ομογενοποίησης με διάχυση και για την αύξηση του μεγέθους των κόκκων. Στη συνέχεια, η ταχύτητα απόψυξης καθορίζει, με βάση το διάγραμμα CCT, τους διάφορους μετασχηματισμούς του ωστενίτη σε σταθερά και ασταθή, μαλακά ή σκληρά, εύθραυστα ή δύσθραυστα προϊόντα.

Οι θερμικοί κύκλοι εξαρτώνται από τι εξής, κυρίως, μεταβλητές:

- Από τη μέθοδο, τη διαδικασία συγκόλλησης και τις παραμέτρους της.
- Από τη θέση και απόσταση του σημείου από τον άξονα της συγκόλλησης.
- Από το πάχος και την έκταση των τεμαχίων προς συγκόλληση.
- Από την αρχική θερμοκρασία των τεμαχίων.
- Από το είδος του μετάλλου.

Από τις παραπάνω παραμέτρους ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση από τη φύση του προς συγκόλληση μετάλλου, το οποίο υπεισέρχεται στο θερμικό κύκλο με τη θερμική αγωγιμότητα λ, την ειδική θερμότητα c και την πυκνότητα ρ. Οι τρεις αυτές φυσικές ιδιότητες διαμορφώνουν το συντελεστή θερμικής διάχυσης (ή διαχυσιμότητας) D:

$$D = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

Για τους χάλυβες η θερμική διαχυσιμότητα, στο θερμοκρασιακό διάστημα από 900°C έως 400°C που ενδιαφέρει ιδιαίτερα, είναι κατά μέσο όρο 0,054 cm⁴/s και δε μεταβάλλεται για τους κοινούς και τους ελαφρά κραματωμένους χάλυβες. Μεταβάλλεται, όμως, ουσιαστικά στους ανοξείδωτους ωστενιτικούς χάλυβες, όπου η αγωγιμότητα είναι τέσσερις φορές μικρότερη απ' αυτή των κοινών συγκολλήσιμων χαλύβων.

7.2 <u>ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΟΥ Κ</u>

Τα θερμοστοιχεία μετρούν τη θερμοκρασία, εκμεταλλευόμενα το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο όταν δύο διαφορετικά μέταλλα βρίσκονται σε επαφή, τότε στο σημείο επαφής παράγεται μικρή τάση, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την κοινή θερμοκρασία των θερμοστοιχείων στο σημείο αυτό. Η θερμοηλεκτρική τάση συναρτήσει της θερμοκρασίας δίδεται από τη σχέση:

$$E(S) = S(T) \cdot T$$

όπου:

Ε: η θερμοηλεκτρική τάση,

Τ: η θερμοκρασία,

S: ο συντελεστής Seebeck (εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το ζεύγος των μεταλλικών αγωγών).



Σχήμα 7.1: Αρχή λειτουργίας θερμοστοιχείου.

Υπάρχουν αρκετοί τύποι θερμοστοιχείων, ανάλογα με τα υλικά του ζεύγους των αγωγών. Το θερμοστοιχείο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι *τύπου Κ*: το υλικό του θετικού πόλου είναι 90% Νi- 10% Cr, ενώ το υλικό του αρνητικού πόλου είναι 100% Νi. Τα θερμοστοιχεία τύπου Κ προτιμώνται αφού, εκτός των άλλων, η συμπεριφορά τους προσεγγίζει τη γραμμική περισσότερο από κάθε άλλου τύπου θερμοστοιχείο. Το εύρος λειτουργίας των συγκεκριμένων θερμοστοιχείων είναι από -200 έως 1050 ⁰C και έχουν αγοραστεί από την εταιρία «UTECO».

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας αρκεί να μετρήσουμε την τάση στους ακροδέκτες του θερμοστοιχείου. Είναι λοιπόν απαραίτητη η σύνδεση του θερμοστοιχείου με κάποιο μετρητικό σύστημα. Οι τιμές που προκύπτουν από τις μετρήσεις με το θερμοστοιχείο, μεταφέρονται σε φορητό Η/Υ μέσω της συσκευής που περιέχει τις μονάδες προσαρμογής σήματος, αποθηκεύονται σε αρχεία δεδομένων μέσω του προγράμματος Darviewer και είναι διαθέσιμα για περαιτέρω επεξεργασία.

7.3 ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για τη μέτρηση των θερμικών κύκλων, χρησιμοποιήθηκαν 5 θερμοστοιχεία τύπου Κ για κάθε συγκόλληση. Τα θερμοστοιχεία, όπως αναφέρεται και στο έκτο κεφάλαιο, τοποθετούνται στην επιφάνεια (4 mm μέσα) του προς μέτρηση ελάσματος σε αποστάσεις 15, 25, 35, 55 και 75 mm από τον άξονα της συγκόλλησης.

Κατά τη συγκόλληση πραγματοποιήθηκα τρία περάσματα (πάσα) που αντιστοιχούν και στις τρεις κορυφές, τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν στον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα 316L και τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 7.2. Από τη μελέτη του διαγράμματος, υπολογίζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες στα σημεία των μετρήσεων, καθώς και ο ρυθμός απόψυξης.



Σχήμα 7.2: Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης χάλυβα 316L.

Μετρήσεις των θερμικών κύκλων για τον 316L ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα της συγκόλλησης (Σχήμα 7.2.), έδειξαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία σε απόσταση 15 mm από τον άξονα συγκόλλησης και σε βάθος 4 mm είναι **319°C**, χαμηλότερη δηλαδή από την κρίσιμη θερμοκρασία σχηματισμού καρβιδίων του χρωμίου (400-450 °C). Η μέγιστη θερμοκρασία επιτεύχθηκαι κατά τη δεύτερη στρώση συγκόλλησης. Επίσης, είναι φανερό πως ο ρυθμός απόψυξης είναι αρκετά υψηλός.



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8⁰

«ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ - ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ»

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΣ ΤΟΞΟΥ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

<u>8.1</u> ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεταλλογραφία είναι ο τομέας της φυσικής μεταλλουργίας που ασχολείται με τη δομή των μετάλλων και των κραμάτων τους. Αρχικά γίνεται η αποκάλυψη της δομής του μετάλλου και στην συνέχεια η μελέτη της με την βοήθεια διαφόρων οργάνων και τεχνικών. Τα όργανα και οι τεχνικές που συνηθίζεται να χρησιμοποιούμε κατά τη μεταλλογραφία είναι στερεοσκόπια, οπτικά και ηλεκτρονικά μικροσκόπια.

Για να φτάσουμε, όμως στο στάδιο της παρατήρησης στο μικροσκόπιο, πρώτα οι συγκολλημένες πλάκες κόπηκαν, με τη βοήθεια παλινδρομικού πριονιού και δισκοτόμου σε δοκίμια μικρότερων διαστάσεων. Αυτό έγινε ώστε αυτά τα δοκίμια να είναι εύχρηστα και να είναι δυνατή η εύκολη τοποθέτησή τους στο μικροσκόπιο και στη συσκευή μικροσκληρομετρήσεων. Μετά ακολουθεί ο εγκιβωτισμός, η λείανση, η στίλβωση, και στη συνεχεία η χημική προσβολή του δοκιμίου για να φανερωθεί η δομή του προς εξέταση μετάλλου. Στη συνέχεια περιγράφεται πιο αναλυτικά πως έγινε η προετοιμασία των δοκιμίων.

8.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

8.2.1 Εγκιβωτισμός



Μετά την κοπή ακολουθεί ο εγκιβωτισμός. Συνήθως тα δοκίμια εγκιβωτίζονται όταν είναι πολύ μικρά ή έχουν έντονα ανομοιόμορφο σχήμα ώστε να είναι πιο εύκολη η συγκράτηση τους στα επόμενα στάδια της λείανσης και της στίλβωσης. 0 εγκιβωτισμός γίνεται με τη χρήση ρητίνης η οποία στερεοποιείται γύρω από το δείγμα, αφήνοντας ακάλυπτη την προς εξέταση επιφάνεια. Οι ρητίνες χωρίζονται ύομα3θ σε και ψυχρού

εγκιβωτισμού ανάλογα με το αν απαιτούν ή όχι θέρμανση για να χυτευθούν. Πριν τον εγκιβωτισμό σε ρητίνη πρέπει η επιφάνεια του δοκιμίου να καθαρίζεται από ακαθαρσίες και λιπαρές ουσίες, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη πρόσφυση μεταξύ του μεταλλικού δοκιμίου και της ρητίνης. Οι ρητίνες που χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκίμια μας ήταν ψυχρού τύπου και ανήκουν στην κατηγορία των πολυεστερικών ρητινών. Τέλος, για τη σκλήρυνση των ρητινών χρησιμοποιήθηκε και καταλύτης σκλήρυνσης.

<u>8.2.2</u> <u>Λείανση</u>

Μετά τον εγκιβωτισμό ακολουθεί η λείανση. Κατά τη λείανση χρησιμοποιούμε λειαντικά χαρτιά, τα οποία τοποθετούνται σε ένα περιστρεφόμενο δίσκο και η λείανση των δοκιμίων γίνεται με το χέρι η μηχανικά. Πάνω στο χαρτί ρέει νερό, το οποίο βοηθάει στην απομάκρυνση των κομματιών του μετάλλου, της ρητίνης ή του λειαντικού χαρτιού από την επιφάνια επαφής.

Τα χαρτιά λείανσης τοποθετούνται διαδοχικά από το πιο χονδρόκοκκο στο πιο λεπτόκοκκο χαρτί. Σκοπός μας είναι κάθε φορά να εξαλείφονται οι ανωμαλίες της επιφάνειας ή οι γραμμές από το προηγούμενο χαρτί, δημιουργώντας μία ομοιόμορφη επιφάνεια με κάθε φορά όλο και πιο λεπτές γραμμές. Μετά το τελευταίο χαρτί, το δοκίμιο είναι έτοιμο να στιλβωθεί. Η λείανση των δοκιμίων μας έγινε διαδοχικά με τα εξής χαρτιά: 220, 320, 500, 800,1200, 2400 grit.

<u>8.2.3</u> Στίλβωση



Η στίλβωση ακολουθεί τη λείανση και σκοπός της είναι να εξαλείψει τις γραμμές λείανσης από τα δοκίμια. Η στίλβωση γίνεται πάνω σε κατάλληλα υφάσματα στα οποία απλώνεται διαμαντόπαστα ή πάστα οξειδίων (π.χ. αλούμινας). Τα υφάσματα τοποθετούνται σε περιστρεφόμενο τροχό και η διαδικασία απαιτεί και ύανυ λιπαντικό μέσο ανάλογα ЗЦ τηv χρησιμοποιούμενη πάστα. Ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται και το στάδιο στίλβωσης, γίνεται και η ανάλογη χρήση υφάσματος.

Τέλος, κάθε στάδιο χρησιμοποιεί, όπως και στη λείανση μικρότερο μέγεθος λειαντικών σωματιδίων από το προηγούμενο. Το τελικό αποτέλεσμα θα είναι μία επιφάνεια μετάλλου τόσο λεία που θα καθρεφτίζει, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται και στην παραπάνω φωτογραφία.

<mark>8.2.4</mark> Χημική προσβολή

Το στάδιο της χημικής προσβολής είναι απαραίτητο για να αποκαλυφθεί η δομή του εξεταζόμενου υλικού με μικροσκοπικές μεθόδους, μιας και η απρόσβλητη επιφάνεια μπορεί να δώσει λίγες σχετικά πληροφορίες.

Η χημική προσβολή είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνική αποκάλυψης των χαρακτηριστικών της δομής μεταλλικών δοκιμίων. Γνωρίζοντας ποιες φάσεις προσβάλλει το αντιδραστήριο που έχουμε επιλέξει και ποιες όχι, αντιλαμβανόμαστε τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της δομής. Για την προσβολή των μετάλλων και των κραμάτων έχουν αναπτυχθεί πολλά αντιδραστήρια. Οι πληροφορίες που χρειάζεται κανείς για να χρησιμοποιήσει ένα αντιδραστήριο είναι η σύσταση του, ο τρόπος χρησιμοποίησης του και τι προφυλάξεις πρέπει να λαμβάνονται κατά τη χρήση του. Για να μπορέσει να κατανοήσει κάποιος την δομή που παρατηρεί θα πρέπει να ξέρει ποίες φάσεις προσβάλλονται ή χρωματίζονται από το αντιδραστήριο και το χρώμα που λαμβάνουν. Μετά από την προσβολή η επιφάνεια εκπλένεται με νερό για να απομακρυνθεί το αντιδραστήριο και να σταματήσει η προσβολή, καθαρίζεται με οινόπνευμα και στεγνώνεται.

Για την χημική προσβολή των δοκιμίων χρησιμοποιήσαμε τα αντιδραστήρια *Glyceregia*. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν στο αντιδραστήριο για περίπου 3 λεπτά. Η σύσταση του αντιδραστηρίου έχει ως εξής:

• <u>Glyceregia</u>: 15ml HCl, 10ml Glycerin, 5ml HNO₃

8.2.5 Οπτικό μικροσκόπιο

Η οπτική μικροσκοπία είναι σήμερα η πιο σημαντική μέθοδος μελέτης της μικροδομής μετάλλων και κραμάτων. Τα δοκίμια αφού στιλβωθούν και γίνει η χημική προσβολή, είναι έτοιμα για το οπτικό μικροσκόπιο. Το κύριο εργαλείο της οπτικής μικροσκοπίας είναι το μικροσκόπιο ανακαλούμενου φωτός. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μικροσκοπίων, που ανάλογα με τον προσανατολισμό του δοκιμίου κατά την παρατήρηση του χωρίζονται σε ορθής παρατήρησης και αντεστραμμένης. Το μικροσκόπιο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, που χρησιμοποιήθηκε και για την φωτογράφηση των δοκιμίων, είναι ανεστραμμένης παρατήρησης.

8.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ WRC-1992 & SCHAEFFLER

Όπως έχει αναφερθεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 2 (παράγραφος 2.2), με την χρήση διαγραμμάτων ισοδύναμου Cr_{eq}- Ni_{eq}, όπως αυτό του WRC-1992 και του Schaeffler, μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό φερρίτη που θα έχουμε στη συγκόλλησή μας. Η πρόβλεψη της δομής είναι πολύ σημαντική και χρησιμοποιείται κατά κόρων σήμερα για τη σωστή επιλογή του μετάλλου προσθήκης (filler metal).

Σε αυτή την παράγραφο θα προσδιορίσουμε τη μικροδομή της συγκόλλησης με δύο διαφορετικά διαγράμματα, (α) WRC-1992 και (β) Schaeffler και θα δούμε αν συμπίπτει με αυτή που προκύπτει από τη μελέτη μέσω οπτικού μικροσκοπίου που αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο (8.4).

WRC-1992:

Ο υπολογισμός των ισοδύναμων Ni_{eq} – Cr_{eq} γίνεται με βάση τους παρακάτω τύπους:





Σχήμα 8.1: Διάγραμμα WRC-1992 [43].

Υπολογίσαμε τα σημεία (Ni_{eq} , Cr_{eq}) για το μέταλλο βάσης και για το μέταλλο προσθήκης, που είναι τα εξής:

Με βάση το διάγραμμα (Σχήμα 8.1) φαίνεται ο υπολογισμός του **FN=10**, που βρίσκεται στα 2/3 της ευθείας που ενώνει το μέταλλο βάσης (Μ.Β.) με το μέταλλο προσθήκης (Μ.Π.).

Schaeffler:

Ο υπολογισμός των ισοδύναμων Ni_{eq} – Cr_{eq} γίνεται με βάση τους παρακάτω τύπους:





Σχήμα 8.2: Διάγραμμα Schaeffler [34].

Υπολογίσαμε τα σημεία (Ni_{eq} , Cr_{eq}) για το μέταλλο βάσης και για το μέταλλο προσθήκης, που είναι τα εξής:

<u>M.B:</u> $(Ni_{eq}, Cr_{eq}) = (11.50, 19.56)$ <u>M.II:</u> $(Ni_{eq}, Cr_{eq}) = (13.50, 22.84)$

Με βάση το διάγραμμα (Σχήμα 8.2) φαίνεται ο υπολογισμός της προκύπτουσας μικροδομής **A+F (10%Fe)**, που βρίσκεται στα 2/3 της ευθείας που ενώνει το μέταλλο βάσης (Μ.Β.) με το μέταλλο προσθήκης (Μ.Π.).

8.4 ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ

Ύστερα από τη χημική προσβολή των δοκιμίων μας, έγινε χρήση του οπτικού μικροσκοπίου και του SEM του εργαστηρίου όπου και πήραμε φωτογραφίες από το μέταλλο βάσης (Μ.Β.), την θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) και την ζώνη τήξης-μέταλλο συγκόλλησης (Μ.Σ.).

8.4.1 <u>Μέταλλο βάσης (Μ.Β.)</u>

Στα Σχήματα 8.3 και 8.4 φαίνεται η τυπική δομή του μέταλλου βάσης (Μ.Β.) σε δύο μεγενθύσεις.



Σχήμα 8.3: Μέταλλο βάσης ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 316L.



Σχήμα 8.4: Μέταλλο βάσης ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 316L.

Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε στο μέταλλο βάσης πλήρως ωστενιτική δομή με ευδιάκριτους κόκκους και διδυμίες. Εμφανείς είναι επίσης οι γραμμές δ-φερρίτη οι οποίες προκύπτουν από τον τοπικό διαφορισμό των α-φερογόνων στοιχείων (που προωθούν την φάση του φερρίτη) που δημιουργούνται κατά την κατεργασία της θερμής έλασης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα των γραμμών του δ-φερρίτη λόγω του τοπικού διαφορισμού είναι το Σχήμα 8.5, που με τη χημική ανάλυση του EDS σε συγκεκριμένο σημείο παρατηρούμε πολύ αυξημένες τιμές Cr και Mo.





10μm Electron Image 1 **Σχήμα 8.5:** Μέταλλο βάσης ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 316L (SEM).

8.4.2 Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (Θ.Ε.Ζ.)

Στο Σχήμα 8.6, διακρίνεται μία πολύ στενή ζώνη σύνδεσης μεταξύ του μετάλλου βάσης και του μετάλλου συγκόλλησης. Δεν παρατηρείται μεταβολή ούτε στο μέγεθος των κόκκων αλλά ούτε και ως προς την μορφολογία της μικροδομής, όπου παραμένει ίδια μέχρι το μέταλλο συγκόλλησης (Μ.Σ.). Το γεγονός αυτό εμποδίζει τον οπτικό χαρακτηρισμό της ΘΕΖ ή την χαρακτηρίζει ως πάρα πολύ μικρή.

Στο Σχήμα 8.7, είναι ευδιάκριτες οι στρώσεις των περασμάτων στο μέταλλο συγκόλλησης (Μ.Σ.), καθώς και ο διαχωρισμός από το μέταλλο βάσης.



Σχήμα 8.6: Σύνδεση του μετάλλου συγκόλλησης (ΜΣ) με την ΘΕΖ στον 316L.



Σχήμα 8.7: ΘΕΖ ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 316L.

8.4.3 Μέταλλο συγκόλλησης (Μ.Σ.)

Στο Σχήμα 8.8 (α) φαίνεται η τυπική δομή του μέταλλου συγκόλλησης (Μ.Σ.).



Σχήμα 8.8: Μέταλλο συγκόλλησης ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 316L.

Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω σχήματα εμφανίζονται κόκκοι ωστενίτη δενδριτικής μορφής, οι οποίοι ακολουθούν τη διεύθυνση στερεοποίησης. Οι δενδρίτες αυτοί είναι αποτέλεσμα γρήγορης απόψυξης. Στα όρια των δενδριτικών κόκκων, σε όλη την έκταση του μετάλλου συγκόλλησης (Μ.Σ.), είναι εμφανής η ύπαρξη δ-φερρίτη (Σχήμα 8.8-β).

Οι παραπάνω παρατηρήσεις επαληθεύτηκαν μετά από επισταμένη παρατήρηση στο SEM και τη χημική σημειακή ανάλυση στο EDS. Έγιναν δύο χημικές αναλύσεις στη ζώνη τήξης.

Η πρώτη αφορά την παρουσία δ-φερρίτη και αποδεικνύει την ύπαρξη του.
Παρατηρούμε πολύ αυξημένα επίπεδα Cr–Mo και σημαντική ελάττωση του Ni.

Σημειακή Χημική Ανάλυση – EDS				
	Cr	Ni	Мо	Si
EDS	24.24	7.16	4.26	0.63



Σχήμα 8.9: Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης τήξης σε παρουσία δ-φερρίτη

Η δεύτερη επιβεβεώνει τον ισχυρισμό της μήτρας ως ωστενιτική.
Παρατηρούμε φυσιολογικά επίπεδα Cr–Mo για ωστενίτη.

Σημειακή Χημική Ανάλυση – EDS					
	Cr	Ni	Мо	Si	
EDS	17.62	11.06	2.80	0.52	



Σχήμα 8.10: Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης τήξης σε ωστενιτική μήτρα.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι σε καμία περιοχή δεν εντοπίστηκαν μικρορωγματώσεις, πορώδες ή άλλες ασυνέχειες αλλά ούτε και καρβίδια.

8.4 ΣΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Ως Σκληρότητα ενός υλικού θα μπορούσαμε να ορίσουμε τη συνεκτικότητα που παρουσιάζει το ίδιο το υλικό, ή την αντίσταση που παρουσιάζει ένα υλικό στην διείσδυση του από ένα σκληρότερο υλικό. Η μέτρηση και ο υπολογισμός της σκληρότητας ενός υλικού γίνεται με τη διείσδυση ενός εκτυπωτικού εργαλείου από σκληρό υλικό (διαμάντι) σε ένα μαλακότερο.

Οι σκληρομετρήσεις είναι μία μη-καταστρεπτική μέθοδος, καθώς τα αποτυπώματα που δημιουργούνται είναι πολύ μικρά και μπορούν να εξαφανιστούν με μία απλή λείανση του δοκιμίου. Ανάλογα με το μέγεθος του αποτυπώματος μπορούμε να υπολογίσουμε την σκληρότητα σε μακροσκοπική ή μικροσκοπική κλίμακα.

Στα δοκίμια μας έγιναν μετρήσεις σκληρότητας σε μικροσκοπική κλίμακα, ώστε να βρεθεί η μεταβολή της σκληρότητας από τη ζώνη τήξης μέχρι το μέταλλο συγκόλλησης. Εξαιτίας του μεγέθους των δοκιμίων μας, οι σκληρομετρήσεις έγιναν με τη βοήθεια του μικροσκληρόμετρου του οίκου «SHIMANTZU» στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Οι μικροσκληρομετρήσεις έγιναν με την μέθοδο Vickers. Σκοπός της μικροσκληρομέτρησης είναι η παρατήρηση της μεταβολής της σκληρότητας, στους κόκκους του μετάλλου βάσης, της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης και της ζώνης τήξης.

Η μικροσκληρομέτρηση μπορεί να οριστεί ως η δοκιμή σκληρότητας που περιλαμβάνει την εισαγωγή ενός διαμαντιού, ειδικού σχήματος, στην επιφάνια του δοκιμίου. Η τιμή της σκληρότητας υπολογίζεται από την μέτρηση του μεγέθους του αποτυπώματος χρησιμοποιώντας ένα μικροσκόπιο. Δηλαδή όσο πιο μεγάλο είναι το αποτύπωμα, τόσο μαλακότερο είναι το υλικό Το διαμάντι είναι πολύ καλά στιλβωμένο και έχει σχήμα πυραμίδας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.11.



Σχήμα 8.11: Σκληρομέτρηση με χάραξη αποτυπώματος (πυραμίδας) από διαμάντι.

Ο αριθμός σκληρότητας κατά Vickers (HV) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$HV = 2P \cdot \sin(\theta/2) / D^2$		
Ρ= Εφαρμοζόμενο φορτίο σε kgf (1kgf = 9,81N) D= Μήκος της διαγωνίου σε mm		

Με το μικροσκόπιο μετράμε τις δύο διαγώνιους του αποτυπώματος και χρησιμοποιούμε τη μέση τιμή για τον υπολογισμό του αριθμού της σκληρότητας. Το μικροσκληρόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι προγραμματισμένο έτσι ώστε, όταν του δίνουμε τις τιμές των δύο διαγωνίων να υπολογίζει την τιμή της σκληρότητας. Σε όλες τις σκληρομετρήσεις το εφαρμοζόμενο φορτίο ήταν σταθερό στα **2,98 N** και ο χρόνος επιβολής του φορτίου **20 sec**. Αν και ο μέσος όρος τιμών μικροσκληρότητας είναι κοντά στην ονομαστική σκληρότητα του κράματος, η παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι έχουμε αύξηση της σκληρότητας από το Μ.Β. προς το Μ.Σ. Οι μέγιστες τιμές (κόκκινες) είναι 229 και 218 ΗV ενώ η ελάχιστη 168 ΗV. Αυτή η αύξηση των τιμών στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης φτάνει σχεδόν το 30% ως προς τη σκληρότητα των δύο βασικών μετάλλων.



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

εργασία πραγματοποιήθηκε Στην παρούσα η μελέτη μετωπικής συγκόλλησης με τη μέθοδο FCAW (Flux Cored Arc Welding) ελασμάτων διαστάσεων 350x150 mm² από ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα τύπου AISI 316L, πάχους 8 mm. Τα μέταλλα ετοιμάστηκαν και συγκολλήθηκαν στο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής των Ερναστήριο Ναυπηνών Ως Е.М.П. μέταλλο Μηχανολόγων Μηχανικών του εναπόθεσης χρησιμοποιήθηκε κράμα ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα παρόμοιας χημικής σύστασης με το βασικό μέταλλο σε μορφή σύρματος, διαμέτρου 1,2 mm, ενώ το αέριο προστασίας ήταν το 82% Ar - 18% CO2 (EN 439 - M21). Κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας της συγκόλλησης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των θερμικών κύκλων της με την χρήση θερμοστοιχείων τύποι Κ. Σε τομές συγκολλημένων δοκιμίων πραγματοποιήθηκε πλήρης μεταλλογραφική μελέτη και σληρομέτρηση.

Μετρήσεις των θερμικών κύκλων

Οι μετρήσεις των θερμικών κύκλων για τον 316L ωστενιτικό ανοξείδοτο χάλυβα της συγκόλλησης, έδειξαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία σε απόσταση 15 mm από τον άξονα συγκόλλησης και σε βάθος 4 mm είναι λίγο πάνω από 300⁰C, χαμηλότερη δηλαδή από την κρίσιμη θερμοκρασία σχηματισμού καρβιδίων του χρωμίου (400-450 ⁰C). Η μέγιστη θερμοκρασία επιτεύχθηκαι κατά τη δεύτερη στρώση συγκόλλησης. Επίσης, είναι φανερό πως ο ρυθμός απόψυξης είναι αρκετά υψηλός.

<u>Μεταλλογραφικά</u>

Το μέταλλο βάσης έχει πλήρη ωστενιτική μικροδομή με εμφανείς διδυμίες. Το μέγεθος των κόκκων και η μορφολογία τους παραμένει η ίδια μέχρι και το όριο διαχωρισμού της ΘΕΖ από το μέταλλο συγκόλλησης, γεγονός που υποδεικνύει ότι δεν υπήρξε αξιοσημείωτος θερμικός επηρεασμός λόγω της συγκόλλησης. Σε όλο το μέταλλο συγκόλλησης εμφανίζονται κόκκοι δενδριτικής μορφής, οι οποίοι ακολουθούν τις διευθύνσεις στερεοποίησης. Ανάμεσα στους δενδρίτες, είναι εμφανής η ύπαρξη δ-φερρίτη. Τέλος σημειώνεται ότι σε καμία περιοχή δεν εντοπίστηκαν μικρο-ρωγματώσεις, πορώδες ή άλλες ασυνέχειες, αλλά ούτε και καρβίδια.

Σκληρομέτρηση

Ο μέσος όρος τιμών μικροσκληρότητας HV_{0,3N} είναι κοντά στην ονομαστική σκληρότητα του κράματος και έχουμε αύξηση της σκληρότητας από το Μ.Β. προς το Μ.Σ. Η μέγιστη τιμή είναι 229 HV.

Τέλος, θα ήταν πολύ ενδιαφέρων να πραγματοποιηθούν περεταίρω μελέτες στον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα 316L, που θα συμπεριλαμβάνουν και μετρήσεις παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων.