

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ δ-ΦΕΡΡΙΤΗ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ

ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ



υπό

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΣΠΥΡΙΔΟΠΟΥΛΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του

διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος 2010



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 8966/1
Ημερ. Εισ.: 21-10-2010
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2010
ΣΠΥ

!! Έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της
Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των
απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Αράβας
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Άννα Ζερβάκη, διδάσκ. ΠΔ 407/80
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Γρηγόρη Ν. Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Νικόλαο Αράβα και Δρ κ. Άννα Ζερβάκη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον φίλο μου Απόστολο Τοβλέτογλου για τις πολύτιμες υποδείξεις του όσον αφορά τα ψηφιακά προγράμματα επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τους γονείς μου Βασίλη Σπυριδόπουλο και Ιωάννα Γκέτσιου για την αγάπη και την ψυχολογική υποστήριξή τους και τον αδερφό μου Αλέξανδρο Σπυριδόπουλο για την ηθική υποστήριξή του.

Σπυριδόπουλος Κωνσταντίνος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τον μεταλλογραφικό προσδιορισμό δ-φερρίτη στο μέταλλο συγκόλλησης των ανοξειδωτων ωστενιτικών χαλύβων και στη συνέχεια τη σύγκρισή του αποτελέσματος με το διάγραμμα Schaeffler και τα αποτελέσματα προγραμμάτων υπολογιστικής θερμοδυναμικής. Σκοπός τη εργασίας είναι η μέτρηση του ποσοστού του φερρίτη στη συγκόλληση, με σκοπό την αποφυγή του φαινομένου της θερμής ρηγμάτωσης. Διαπιστώθηκε ότι το διάγραμμα Schaeffler προβλέπει ικανοποιητικά το ποσοστό του φερρίτη. Οι προσομοιώσεις υπολογιστικής θερμοδυναμικής και κινητικής προβλέπουν την παρουσία δ-φερρίτη στα τελευταία στάδια της στερεοποίησης, προϋπόθεση ικανή για την αποφυγή της θερμής ρηγμάτωσης. Δεν προβλέπουν όμως παρουσία δ-φερρίτη στο μέταλλο συγκόλλησης μετά το πέρας της συγκόλλησης. Επομένως φαίνεται η αδυναμία των προγραμμάτων αυτών να προσομοιώσουν πραγματικές καταστάσεις στο μέταλλο συγκόλλησης, λόγω του ότι λειτουργούν κάτω από συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας, ενώ στις συγκολλήσεις υπάρχουν αποκλίσεις από την θερμοδυναμική ισορροπία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

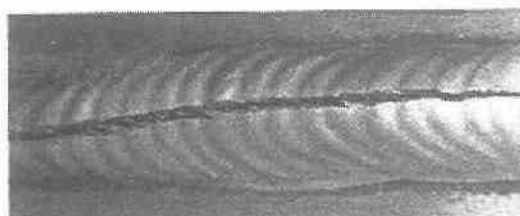
<u>1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	σελίδα 1
<u>2.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</u>	σελίδα 4
2.1 Ανοξείδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες	σελίδα 4
2.2 Συγκολλήσεις ανοξείδωτων ωστενιτικών χάλυβων	σελίδα 5
2.3 Θερμή ρηγμάτωση	σελίδα 7
2.4 Μετασχηματισμοί στο μέταλλο συγκόλλησης ανοξείδωτων ωστενιτικών χάλυβων	σελίδα 8
2.5 Αραίωση	σελίδα 10
2.6 Διάγραμμα Schaeffler	σελίδα 10
2.7 Στερεοποίηση με απουσία διάχυσης στο στερεό	σελίδα 12
<u>3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</u>	σελίδα 13
3.1 Πειραματική διαδικασία	σελίδα 13
3.2 Στάδια πειραματικής διαδικασίας	σελίδα 14
3.2.1 Συγκόλληση	σελίδα 14
3.2.2 Κοπή	σελίδα 16
3.2.3 Εγκιβωτισμός	σελίδα 16
3.2.4 Λείανση-Στυλβωση	σελίδα 16
3.2.5 Χημική προσβολή	σελίδα 17
3.2.6 Οπτική μικροσκοπία	σελίδα 17
3.3 Μελέτη με ψηφιακό πρόγραμμα επεξεργασίας	σελίδα 18
3.3.1 Υπολογισμός αραίωσης	σελίδα 18
3.3.2 Προσδιορισμός ποσοστού φερρίτη	σελίδα 20
3.3.3 Διερεύνηση δ-φερρίτη	σελίδα 24
3.4 Προγράμματα ThermoCalc και Dictra	σελίδα 25

<u>4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ</u>	σελίδα 27
4.1 Μεταλλογραφικός προσδιορισμός δ-φερρίτη	σελίδα 27
4.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας	σελίδα 27
4.1.2 Αποτελέσματα υπολογισμού αραίωσης στην περιοχή της συγκόλλησης	σελίδα 32
4.1.3 Υπολογισμός ποσοστού φερρίτη στην περιοχή της Συγκόλλησης	σελίδα 33
4.1.4 Διερεύνηση δ-φερρίτη	σελίδα 41
4.2 Εκτίμηση δ-φερρίτη από διάγραμμα Schaeffler	σελίδα 43
4.2.1 Αραίωση 5%	σελίδα 46
4.2.2 Διασπορά αποτελεσμάτων συναρτήσει των τιμών αραίωσης	σελίδα 47
4.3 Διαγράμματα με Thermocalc και Dictra	σελίδα 53
4.3.1 Διάγραμμα φάσης κράματος στην περιοχή της συγκόλλησης	σελίδα 53
4.3.2 Διάγραμμα υπολογισμού φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης	σελίδα 54
4.3.3 Διάγραμμα Thermocalc με Scheil module	σελίδα 57
4.4.4 Διαγράμματα Dictra	σελίδα 58
<u>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	σελίδα 62
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΩΝ</u>	

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και ο προσδιορισμός της μικροδομής της περιοχής της συγκόλλησης, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η ύπαρξη και το ποσοστό δ-φερρίτη σε μία κατηγορία ανοξειδωτων χαλύβων, οι οποίοι ονομάζονται ανοξειδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες. Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες είναι η σημαντικότερη κατηγορία ανοξειδωτων χαλύβων με πάρα πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Οι συγκολλήσεις των χαλύβων αυτών είναι επιρρεπείς στο φαινόμενο της θερμής ρηγμάτωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα1.

Για την αποφυγή του φαινομένου της θερμής ρηγμάτωσης στις συγκολλήσεις των ανοξειδωτων ωστενιτικών χαλύβων, αυτές πραγματοποιούνται με ηλεκτρόδιο πιο πλούσιο σε μέταλλο χρώμιο (Cr) σε σχέση με το βασικό μέταλλο. Αυτό συμβαίνει με σκοπό το μέταλλο συγκόλλησης, μετά την ψύξη του να περιέχει στη μικροδομή του φερρίτη. Το ικανοποιητικό ποσοστό φερρίτη που θα πρέπει να περιέχει έτσι ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της θερμής ρηγμάτωσης, είναι μεταξύ 5% και 10% της συνολικής μικροδομής. Μικρότερο ποσοστό, δεν προσφέρει ικανοποιητική προστασία από το φαινόμενο αυτό, ενώ μεγαλύτερο ποσοστό οδηγεί σε μείωση της ολκιμότητας και της αντοχής σε διάβρωση.

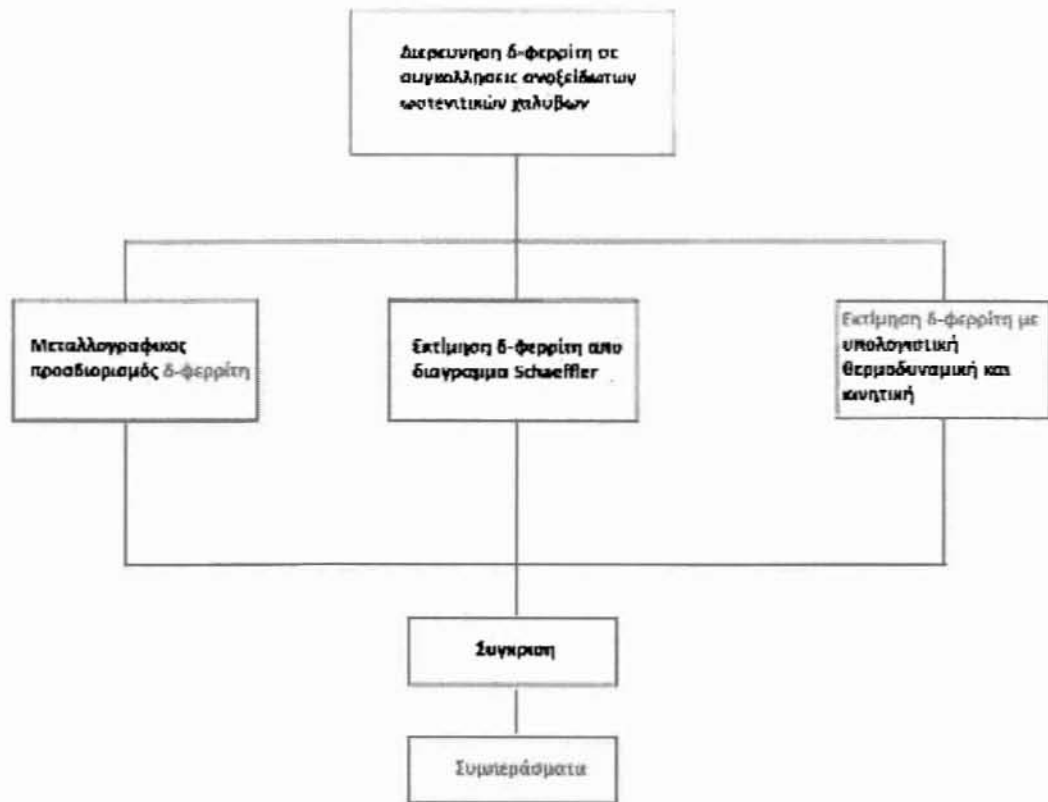


Σχήμα 1 (Θερμορωγμή στο μέταλλο συγκόλλησης σε κράμα αλουμινίου)

Κατά την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τρεις βασικές μεθοδολογίες προσδιορισμού του ποσοστού του δ-φερρίτη, οι οποίες περιγράφονται παρουσιάζονται στο Σχήμα2. Αρχικά πραγματοποιήθηκε πείραμα στο εργαστήριο υλικών του πανεπιστημίου. Κατά την πειραματική διαδικασία έγινε συγκόλληση πλακιδίων ανοξειδωτου ωστενιτικού χάλυβα (St 304), με διαφορετικό ηλεκτρόδιο πιο πλούσιο σε χρώμιο (St 308). Για μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερη εξαγωγή αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε ένα εύρος τιμών της έντασης του ρεύματος. Έπειτα τα δοκίμια επεξεργάστηκαν στο εργαστήριο και φωτογραφήθηκαν σε μικροσκόπιο. Οι εικόνες αυτές επεξεργάστηκαν με ένα ψηφιακό πρόγραμμα σχεδιασμού και μορφοποίησης εικόνας, με σκοπό να διαπιστωθεί, εάν το ποσοστό του δ-φερρίτη προσεγγίζει το 5-10% του συνολικού ποσοστού του μετάλλου. Στη

συνέχεια, έγινε εκτίμηση του ποσοστού του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης με τη χρήση διαγραμμάτων Schaeffler. Τα διαγράμματα Schaeffler είναι πειραματικά και έχουν προκύψει από τις καταγραφές των αποτελεσμάτων μηχανικών συγκολλήσεων. Μπορούν να προβλέψουν με σχετική ακρίβεια το ποσοστό του φερρίτη στη περιοχή της συγκόλλησης. Με κατάλληλους υπολογισμούς και με τη χρησιμοποίηση των συστάσεων του βασικού μετάλλου και του μετάλλου συγκόλλησης, καθώς επίσης και της αραίωσης του βασικού μετάλλου, μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα σχετικά με το αν έχουν επιλεγεί τα κατάλληλα υλικά και η κατάλληλη μέθοδος, έτσι ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της θερμής ρηγμάτωσης. Η τελευταία μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, αφορά τη χρήση προγραμμάτων υπολογιστικής θερμοδυναμικής και κινητικής (Thermocalc και Dictra) για τον προσδιορισμό του ποσοστού φερρίτη. Με τη βοήθεια του Thermocalc υπολογίστηκαν αποτελέσματα, σύμφωνα με τα οποία όμως η αντίδραση η οποία μελετήθηκε, βρισκόταν σε κάθε χρονική στιγμή σε θερμοδυναμική ισορροπία. Όμως στην πραγματικότητα σε μία συγκόλληση, ο ρυθμός ψύξης είναι πολύ μεγάλος και η περιοχή αυτή δεν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία στο θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο σχηματίζεται θερμή ρηγμάτωση. Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή ακόμα μία παραμέτρου στον κώδικα του προγράμματος, αυτή της στερεοποίησης με απουσία διάχυσης στο στερεό, η οποία περιγράφεται με την εξίσωση του Scheil. Με τον τρόπο αυτό, το πρόγραμμα προσέγγισε καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες και τα αποτελέσματα είναι πιο ρεαλιστικά. Με τη χρήση του προγράμματος Dictra, μελετήθηκε και η κινητική της αντίδρασης σε ένα χαρακτηριστικό θερμοκρασιακό εύρος ψύξης της συγκόλλησης, για να διαπιστωθεί εάν ο σχηματιζόμενος φερρίτης, ο οποίος υπάρχει στη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης και σχηματίζεται κατά την ψύξη του μετασχηματίζεται σε ωστενίτη.

Με την ολοκλήρωση των υπολογισμών των ποσοστών φερρίτη με τις τρεις διαδικασίες, ακολούθησε σύγκριση αποτελεσμάτων που έχει σαν στόχο να δείξει αρχικά πόσο κοντά πλησιάζουν τα αποτελέσματα του πειράματος με το διάγραμμα Schaeffler και στη συνέχεια, εάν τα υπολογιστικά πακέτα μπορούν να δώσουν αποτελέσματα που προσεγγίζουν την πραγματικότητα. Εάν δηλαδή η χρήση κατάλληλων προγραμμάτων μπορεί να αντικαταστήσει τις πειραματικές διαδικασίες.



Σχήμα 2 (Διάγραμμα ροής της διπλωματικής εργασίας)

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει η παρουσίαση και η ανάλυση χρήσιμων όρων και εννοιών τις οποίες συναντάμε σε επόμενα κεφάλαια.

2.1 ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι κράματα με βάση τον σίδηρο, τα οποία περιέχουν τουλάχιστον 10.5% χρώμιο. Ελάχιστοι ανοξειδωτοι χάλυβες περιέχουν χρώμιο σε ποσοστό άνω του 30%, και σίδηρο σε ποσοστό κάτω του 50%. Το κύριο χαρακτηριστικό τους, δηλαδή την ικανότητά τους να μην οξειδώνονται την οφείλουν σε ένα επιφανειακό στρώμα οξειδίου πλούσιο σε χρώμιο στην επιφάνειά τους. Βασικά στοιχεία του κράματος αποτελούν επίσης το νικέλιο (Ni), το πυρίτιο (Si), το τιτάνιο (Ti) ο χαλκός (Cu), το μαγγάνιο (Mn) και το θείο (S). Το ποσοστό του άνθρακα στο κράμα συνήθως δεν ξεπερνά το 1%. [1]

Οι ανοξειδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες έχουν κυβική εδροκεντρομένη δομή (FCC- Face center-cubic) η οποία επιτυγχάνεται λόγω της εκτενούς χρήσης μετάλλων όπως το μαγγάνιο και το νικέλιο που ευνοούν την παρουσία ωστενίτη στη μικροδομή. Η κατηγορία αυτή των χαλύβων δεν έχει μαγνητικές ιδιότητες, μπορούν να επεξεργαστούν μόνο με ψυχρές διαδικασίες (σφυρηλάτηση, διέλαση, κ.ά.), ενώ παρουσιάζουν και πολύ καλά συμπεριφορά όταν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες. Το ποσοστό του χρωμίου στα κράματα αυτά κυμαίνεται μεταξύ 16% και 26%, ενώ το νικέλιο δεν ξεπερνά το 35%. Μέταλλα όπως το σελήνιο και το θείο, πολλές φορές προσθέτονται κατά την παρασκευή των χαλύβων αυτών, διότι δίνουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. [2]

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες αυτής της κατηγορίας των χαλύβων, παρατηρείται πως δίνουν καλύτερα αποτελέσματα σε κατηγορίες όπως η σκληρότητα και η ολκιμότητα, συγκρινόμενοι με απλούς ανθρακοχάλυβες. Με τη χρήση επεξεργασιών όπως η σφυρηλάτηση, μπορεί να επιτευχθεί η αναβάθμιση κάποιων από αυτών των ιδιοτήτων. [3]

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας χάλυβα, είναι η αντίσταση στην οξείδωση, η οποία οφείλεται σε ένα οξείδιο πλούσιο σε χρώμιο στην επιφάνεια του κράματος. Έχει παρατηρηθεί πως απαιτείται ποσοστό χρωμίου άνω του 10.5% για τη δημιουργία του στρώματος αυτού. Όσο αυξάνει το ποσοστό, τόσο περισσότερο αυξάνεται η προστασία από την οξείδωση. Βέβαια, υψηλές συγκεντρώσεις της τάξεως του 26% με 29% μπορεί να προστατεύουν ικανοποιητικά, αλλά ταυτόχρονα επηρεάζουν και αρνητικά της μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα όπως η συγκολλησιμότητα, γι αυτό και προτιμώνται συνήθως ωστενιτικοί χάλυβες με σύσταση χρωμίου 17% με 20%. Ένα δεύτερο πολύ σημαντικό συστατικό είναι το νικέλιο, το οποίο βοηθάει στη διατήρηση της ωστενιτικής μικροδομής όταν η σύσταση του χάλυβα έχει πάνω από ένα συγκεκριμένο ποσοστό νικελίου. [4]

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά στη βιομηχανία και τις κατασκευές με κάποια παραδείγματα να παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με απλούς ανθρακοχάλυβες. Όμως ένα χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας των χαλύβων είναι οι υψηλοί θερμικοί συντελεστές διαστολής και οι χαμηλοί συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τους απλούς ανθρακοχάλυβες. Οι διαφορές αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τους μηχανικούς για να μην παρουσιαστούν τυχόν προβλήματα. [5]



Σχήμα 3 (Ακατέργαστος ανοξείδωτος χάλυβας ως πρώτη ύλη και η 192 μέτρων αψίδα στο St. Louis των Η.Π.Α κατασκευασμένη εξ' ολοκλήρου από ανοξείδωτο χάλυβα)

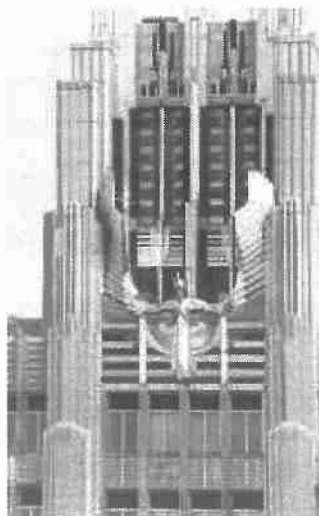
2.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Οι ανοξείδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες, παρουσιάζουν κυβική εδροκεντρομένη μορφή, όπως έχει προαναφερθεί, για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και θεωρούνται μία από τις πιο φιλικές προς συγκόλληση κατηγορία ανοξείδωτων χαλύβων με εφαρμογές στις κατασκευές, όπως το άγαλμα του Σχήματος 4. Λόγω των φυσικών τους ιδιοτήτων όμως, η συμπεριφορά τους κατά της διάρκεια της συγκόλλησης και κατά τη χρήση της περιοχής της συγκόλλησης, διαφέρει σε σχέση με τους φερριτικούς και μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες. Για παράδειγμα, η θερμική αγωγιμότητα των ωστενιτικών χαλύβων κυμαίνεται περίπου στο μισό σε σχέση με την αντίστοιχη στους φερριτικούς χάλυβες. Επομένως η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για να επιτευχθεί η ίδια διείδυση σε πανομοιότυπες συγκολλήσεις, είναι σχεδόν το μισό στους ωστενιτικούς χάλυβες. Αντιθέτως, ο

Θερμικός συντελεστής διαστολής του ωστενίτη είναι περίπου 30% με 40% υψηλότερος σε σχέση με αυτόν του φερρίτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την εμφάνιση τάσεων και παραμορφώσεων στις περιοχές της συγκόλλησης. Ένα πολύ σημαντικό θέμα που απασχολεί τους μηχανικούς συγκολλήσεων, είναι το ενδεχόμενο εμφάνισης ρωγμών στην περιοχή της συγκόλλησης, δηλαδή το φαινόμενο της θερμής ρηγμάτωσης. [6]

Κατά τη συγκόλληση ανοξείδωτων ωστενιτικών χαλύβων, η κύρια δομή που εμφανίζεται είναι η ωστενιτική. Βέβαια τις περισσότερες φορές παρατηρείται ένα μικρό ποσοστό κυβικής χωροκεντρομένης δομής (BCC- body centered cubic), δηλαδή φερρίτη κυρίως στην περιοχή της συγκόλλησης. Η ονομασία αυτού του φερρίτη είναι δ-φερρίτης. Σχηματίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες και ξεχωρίζει από την μικροδομή του α-φερρίτη, ο οποίος είναι η μορφή του φερρίτη σε χαμηλές θερμοκρασίες στα κράματα με βάση τον σίδηρο.

Κατά τη στερεοποίηση οι δύο κύριες μορφές μικροδομής που εμφανίζονται είναι η ωστενιτική και η φερριτική. Πρέπει να αναφερθεί πως η διαδικασία στερεοποίησης της λίμνης συγκόλλησης σε αυτούς τους χάλυβες είναι περίπλοκη και δεν είχε μελετηθεί διεξοδικά παλαιότερα. Ο λόγος είναι πως η απόδοση μίας τέτοιας συγκόλλησης εξαρτάται άμεσα από την μικροδομή της περιοχής της συγκόλλησης. Είναι φυσικό λοιπόν να γίνει μία προσπάθεια πρόβλεψης της μικροδομής αυτής με τη χρήση εμπειρικών διαγραμμάτων, τύπων και πειραματικών ενδείξεων. Τέτοιες μέθοδοι είναι τα διαγράμματα Schaeffler και WRC. Το διάγραμμα Schaeffler θα χρησιμοποιηθεί στις πειραματικές διαδικασίες στην εργασία αυτή και μελετάται αναλυτικότερα παρακάτω. Βέβαια οι μέθοδοι αυτοί λόγω του ότι βασίζονται σε εμπειρικά δεδομένα δεν μπορούν να προσδιορίσουν με μεγάλη ακρίβεια το ποσοστό μίας μικροδομής, όπως του δ-φερρίτη. [7]

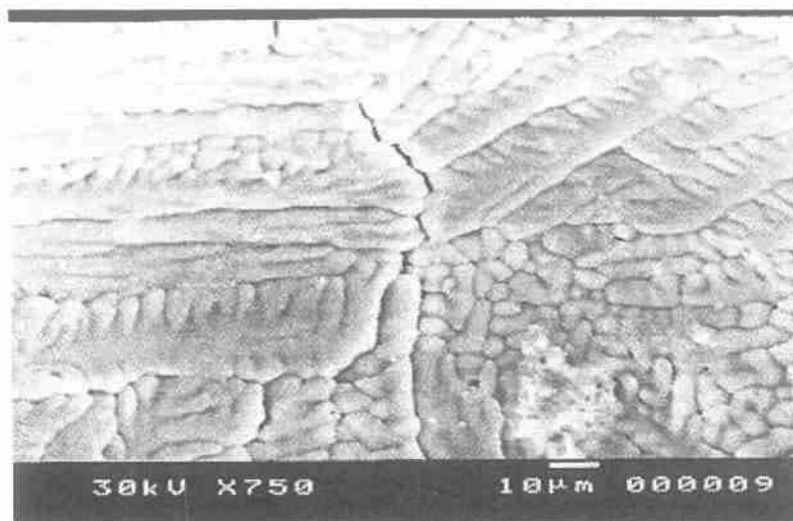


Σχήμα 4 (Άγαλμα ύψους 14 μέτρων στην πόλη Syracuse των Η.Π.Α κατασκευασμένο από συγκολλητά τμήματα ανοξείδωτου χάλυβα)

2.3 Θερμή ρηγμάτωση (Hot Cracking)

Η θερμή ρηγμάτωση (Hot Cracking) πήρε την ονομασία της από το γεγονός ότι πραγματοποιείται στα τελευταία στάδια της στερεοποίησης της λίμνης συγκόλλησης, όταν δηλαδή το μέταλλο είναι ακόμα θερμό. Δηλαδή στην τελική φάση της στερεοποίησης λίμνης συγκόλλησης οι δενδρίτες που έχουν σχηματιστεί περιβάλλονται από ένα λεπτό φιλμ υγρού που απομένει να στερεοποιηθεί. Παράλληλα στην συγκόλληση αναπτύσσονται υψηλές εφελκυστικές τάσεις από την αντίσταση που προβάλλει το βασικό μέταλλο στη εγκάρσια συστολή του μετάλλου συγκόλλησης. Το υγρό φιλμ δεν μπορεί να προβάλλει αντίσταση στις τάσεις αυτές και έτσι το υλικό διαχωρίζεται στα όρια των δενδριτών (Σχήμα 5). Οι παράγοντες που ευνοούν τη θερμή ρηγμάτωση είναι:

- Το εύρος στερεοποίησης
- Ανεπιθύμητα στοιχεία (Ακαθαρσίες)
- Η μορφολογία των κόκκων στο μέταλλο συγκόλλησης
- Οι εφελκυστικές τάσεις
- Ο μηχανικός περιορισμός της συγκόλλησης [8]



Σχήμα 5 (Θερμορωγμές που σχηματίζονται στα όρια των δενδριτών)

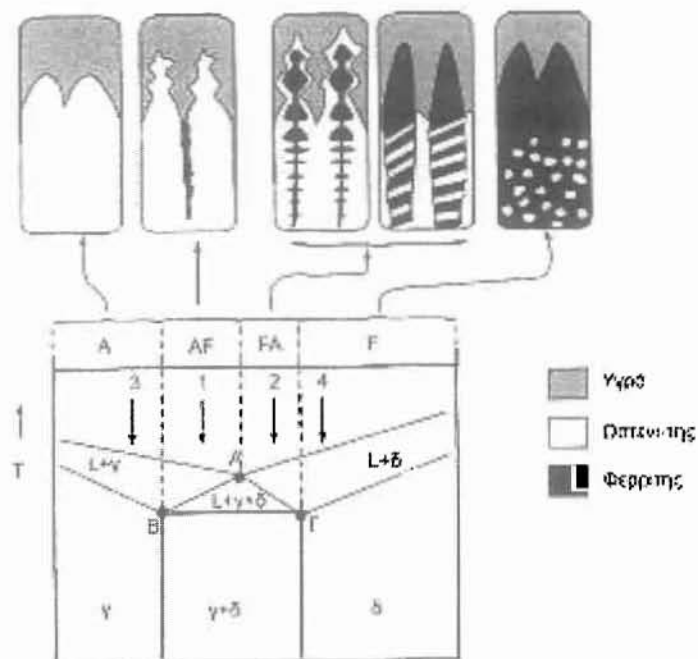
2.4 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΩΝ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΩΝ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες (304, 308, 316, 321) είναι η σημαντικότερη κατηγορία ανοξειδωτων χαλύβων καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως σε χημικές, πετροχημικές βιομηχανίες και διυλιστήρια, καθώς και σε βιομηχανίες τροφίμων ενώ έχουν πολλές ακόμα βιομηχανικές εφαρμογές. Οι συγκολλήσεις των χαλύβων αυτών είναι επιρρεπείς σε θερμή ρηγμάτωση, η οποία οφείλεται στον διαφορισμό ανεπιθύμητων στοιχείων (P και S) στα σύνορα των κόκκων όπου σχηματίζουν ευτηκτικές ενώσεις. Για την αποφυγή της θερμής ρηγμάτωσης οι συγκολλήσεις πραγματοποιούνται με ηλεκτρόδιο πιο πλούσιο σε χρώμιο απ' ότι το βασικό μέταλλο, ώστε το μέταλλο συγκόλλησης να περιέχει ένα ποσοστό φερρίτη που κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10%. Ο φερρίτης αυτός σχηματίζεται κατά τη στερεοποίηση ή αμέσως μετά από αυτήν και είναι δ-φερρίτης. Περισσότερος φερρίτης (άνω του 10%) οδηγεί σε μείωση της ολκιμότητας και της αντοχής σε διάβρωση, ενώ λιγότερος φερρίτης (κάτω του 5%) δεν επαρκεί για ικανοποιητική αντίσταση στη θερμή ρηγμάτωση. Είναι επομένως σημαντικό να μελετηθεί η διαμόρφωση της μικροδομής στο μέταλλο συγκόλλησης των ανοξειδωτων χαλύβων.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 6) απεικονίζεται το ψευδοδιμερές διάγραμμα φάσεων στο σύστημα Fe-Cr-Ni για σταθερή σύσταση σιδήρου, πχ 60% Fe. Στην ουσία το διάγραμμα του σχήματος είναι η κάθετη τομή στο τριμερές διάγραμμα φάσεων Fe-Cr-Ni στη σύσταση 60% Fe. Το τρίγωνο ABΓ είναι το τριφασικό ευτηκτικό τρίγωνο L+δ+γ. Κράματα με σύσταση αριστερά της κορυφής A του τριγώνου (κράμα 1) στερεοποιούνται σχηματίζοντας πρωτογενή ωστενίτη (ο όρος πρωτογενής αναφέρεται στην πρώτη στερεή φάση που σχηματίζεται από το υγρό). Με την πρόοδο της στερεοποίησης αναπτύσσονται ωστενιτικοί δενδρίτες ενώ ο δ-φερρίτης σχηματίζεται στα τελευταία στάδια της στερεοποίησης όταν η ψύξη εισέλθει στο ευτηκτικό τρίγωνο ABΓ. Η στερεοποίηση αναφέρεται ως τύπου AF (Austenitic-Ferritic). Ο δ-φερρίτης σχηματίζεται ανάμεσα στους πρωτογενείς και δευτερογενείς δενδριτικούς κλάδους και ονομάζεται ενδοδενδριτικός φερρίτης (interdendritic ferrite).

Κράματα με σύσταση αριστερά της κορυφής B του τριγώνου ABΓ του σχήματος 6 (όπως το κράμα 3) δεν υφίστανται την ευτηκτική αντίδραση και στερεοποιούνται με σχηματισμό μόνο ωστενίτη. Η στερεοποίηση εδώ είναι τύπου A (Austenitic). Αντίθετα τα κράματα με σύσταση δεξιά από την κορυφή A (το κράμα 2) στερεοποιείται σχηματίζοντας πρωτογενή φερρίτη. Οι κεντρικές περιοχές των φερριτικών δενδριτικών κλάδων, που σχηματίζονται στην αρχή της στερεοποίησης είναι πλουσιότερες σε χρώμιο (Cr) απ' ότι τα άκρα των δενδριτών που σχηματίζονται στο προς το τέλος της στερεοποίησης. Μετά το τέλος της στερεοποίησης η ψύξη στη διφασική περιοχή δ+γ μετασχηματίζει τα άκρα των δενδριτών σε ωστενίτη αφήνοντας τον φερρίτη μόνο στις κεντρικές περιοχές,

δηλαδή στον σκελετό των κλάδων. Ο φερρίτης αυτός ονομάζεται σκελετοειδής φερρίτης (skeletal ferrite). Η μορφολογία του φερρίτη που θα σχηματιστεί εξαρτάται από τη σύσταση και τις συνθήκες συγκόλλησης (ρυθμός ψύξης). Η στερεοποίηση του κράματος 2 είναι τύπου FA (Ferritic-Austenitic). Τέλος τα κράματα με σύσταση δεξιά από την κορυφή Γ του τριγώνου του Σχήματος 6 (όπως το κράμα 4) παρουσιάζουν στερεοποίηση τύπου F (Ferritic), δεν υφίστανται την ευτηκτική αντίδραση και σχηματίζουν μόνο πρωτογενή φερρίτη, ο οποίος μετασχηματίζεται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες σε ωστενίτη. [9]



Σχήμα 6 (Μορφολογίες φερρίτη και τύποι στερεοποίησης στο μέταλλο συγκόλλησης)

2.5 Αραίωση:

Οι περισσότερες συγκολλήσεις δεν είναι αυτογενείς αλλά πραγματοποιούνται με την προσθήκη συμπληρωματικού μετάλλου (filler metal). Όταν το πρόσθετο μέταλλο έχει την ίδια σύσταση με το βασικό μέταλλο, τότε η συγκόλληση είναι ομογενής. Στην αντίθετη περίπτωση η συγκόλληση είναι ετερογενής. Η χημική σύσταση του μετάλλου συγκόλλησης εξαρτάται από τη σύσταση του ηλεκτροδίου, το υλικού του οποίου αναμειγνύεται κατά την τήξη με αυτό του βασικού μετάλλου. Το γεγονός αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στις συγκολλήσεις, στις οποίες επιλέγεται ηλεκτρόδιο διαφορετικής σύστασης από αυτή του βασικού μετάλλου. Στην περίπτωση αυτή προκαλείται το φαινόμενο της αραίωσης (dilution) του υλικού του ηλεκτροδίου από το βασικό μέταλλο. Για τον υπολογισμό της αραίωσης σε μία συγκόλληση χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$D = \frac{W_{\text{BMT}}}{W_{\text{MΣ}}} \times 100$$

Η αραίωση (D) είναι ο λόγος του βάρους του βασικού μετάλλου που τήκεται και συμμετέχει στο μέταλλο συγκόλλησης (W_{BMT}) προς το βάρος του μετάλλου συγκόλλησης ($W_{\text{MΣ}}$).

Η αραίωση εξαρτάται και από την προετοιμασία των ακμών των προς συγκόλληση επιφανειών. Οι συγκολλήσεις με ακμές V ή X με πολλαπλά πάσα παρουσιάζουν μικρότερη αραίωση σε σχέση με συγκολλήσεις χωρίς προετοιμασία ακμών και ενός πάσου. [10]

2.6 Διάγραμμα Schaeffler:

Η ύπαρξη του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης είναι πολύ σημαντική για την αποφυγή της θερμής ρηγματώσης. Τα διαγράμματα Schaeffler (Σχήμα 7) έχουν προκύψει από την καταγραφή πειραματικών διαδικασιών και βιομηχανικών εφαρμογών, με σκοπό τον υπολογισμό του ποσοστού του φερρίτη στη συγκόλληση, συναρτήσει των συστάσεων του βασικού μετάλλου και του ηλεκτροδίου.

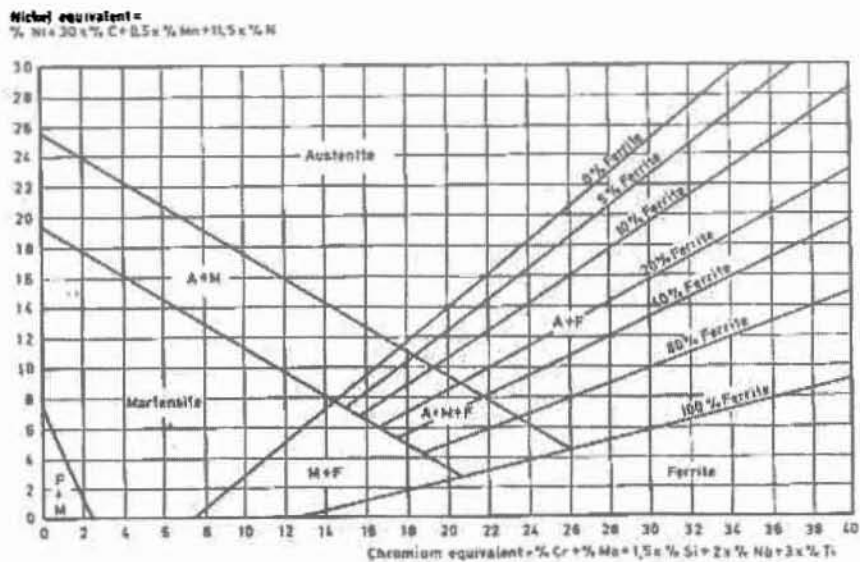
Οι άξονες του διαγράμματος, αντιστοιχούν με το ισοδύναμο του χρωμίου (Chromium equivalent) στον άξονα x και με το ισοδύναμο του νικελίου (nickel equivalent) στον άξονα y. Έχοντας το ποσοστά του επιμέρους στοιχείων στην περιοχή της συγκόλλησης, χρησιμοποιούμε τις παρακάτω σχέσεις για το υπολογισμό των *δύο* ισοδυνάμων.

$$\text{Ni (eq)} = \text{Ni} + (30 \times \text{C}) + (0.5 \times \text{Mn})$$

$$\text{Cr (eq)} = \text{Cr} + \text{Mo} + (1.5 \times \text{Si}) + (0.5 \times \text{Nb})$$

Για τον υπολογισμό του ισοδυναμού του νικελίου, χρησιμοποιούνται στοιχεία που σταθεροποιούν την ύπαρξη ωστενίτη, ενώ αντίστοιχα για τον υπολογισμό του ισοδυναμού χρωμίου τα στοιχεία που προκαλούν τη σταθεροποίηση του φερρίτη στη συγκόλληση. [11]

Με τον τρόπο αυτό το από το διάγραμμα Schaeffler υπολογίζεται η παρουσία ή μη ωστενίτη, φερρίτη, μπαινίτη και μαρτενσίτη. Με τον υπολογισμό της ποσοτήτων των διαφόρων μικροδομών είναι δυνατή η ταυτοποίηση της συγκόλλησης με διεθνείς κανόνες ποιότητας και σε περιπτώσεις χύτευσης η διόρθωση του μείγματος, όσο αυτό βρίσκεται ακόμα στον φούρνο. Πρέπει να αναφερθεί πως ο ρυθμός ψύξης της συγκόλλησης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο αποτέλεσμα. Έχει υπολογιστεί πως τα αποτελέσματα της διαδικασίας σε ανοξειδωτους ωστενιτικούς χάλυβες είναι λίγο διαφορετικά σε σχέση με την πραγματικότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή ο ρυθμός ψύξης είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες. [12]



Σχήμα 7 (Διάγραμμα Schaeffler)

2.7 Στερεοποίηση με απουσία διάχυσης στο στερεό

Κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου συγκόλλησης, ο ρυθμός ψύξης είναι πολύ μεγάλος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η σύσταση του μετάλλου να είναι διαφορετική σε σχέση με τη σύσταση που θα είχε εάν η στερεοποίηση είχε πραγματοποιηθεί υπό συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας. Ο μεγάλος ρυθμός ψύξης κατά τη στερεοποίηση σημαίνει και απουσία διάχυσης και συνεπώς στους κόκκους του στερεού στην περιοχή της συγκόλλησης να υπάρχει διαφορά της σύστασης. Το φαινόμενο της απουσίας διάχυσης κατά τη στερεοποίηση, περιγράφεται από την εξίσωση του Scheil:

$$C_s = C_0 K (1 - f_s)^{K-1}$$

C_0 : ονομαστική σύσταση του κράματος

K : Συντελεστής κατανομής

C_s : Η σύσταση κραματικού στοιχείου του συγκεκριμένου στερεού κράματος που στερεοποιήθηκε τελευταίο με κατά βάρος κλάσμα ίσο με f_s . [13],[14]

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σε αυτό το σκέλος της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε πείραμα στο εργαστήριο, κατά το οποίο πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις σε πλακίδια ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα (St 304) με τη χρήση ηλεκτροδίου χάλυβα (St 308). Στη συνέχεια η περιοχή της συγκόλλησης υποβλήθηκε σε κατεργασίες στο εργαστήριο και η μικροδομή της (Σχήμα 8) φωτογραφήθηκε και μελετήθηκε στο μικροσκόπιο. Στη συνέχεια, οι φωτογραφίες που απεικονίζουν την περιοχή της συγκόλλησης επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια προγράμματος ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.

Η διαδικασία αυτή χωρίζεται σε δύο στάδια. Πρώτον έγινε ψηφιακή μελέτη με σκοπό τον υπολογισμό του ποσοστού της αραίωσης στη συγκόλληση, δεδομένου του γεγονότος πως χρησιμοποιήθηκαν μέταλλο βάσης και ηλεκτρόδιο διαφορετικών συστάσεων. Ο υπολογισμός της αραίωσης γίνεται έτσι ώστε το πείραμα να πλησιάσει όσο το δυνατόν περισσότερο σε ακρίβεια τα αποτελέσματα του διαγράμματος Schaeffler για να μπορεί να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Δεύτερον, πάλι με τη χρήση του προγράμματος επεξεργασίας έγινε η απομόνωση περιοχών του μετάλλου, στην περιοχή της συγκόλλησης. Οι περιοχές αυτές αποτελούνται από φερρίτη και ωστενίτη. Έγινε προσπάθεια να προσδιοριστούν τα ποσοστά των δύο φάσεων για να διαπιστωθεί εάν το ποσοστό του φερρίτη κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10% του συνολικού ποσοστού, γεγονός που προλαμβάνει τη δημιουργία θερμής ρηγμάτωσης. Επίσης ακολούθησε ταυτοποίηση του είδους του φερρίτη.

Αξίζει να σημειωθεί πως κατά την περάτωση των συγκολλήσεων έγινε μεταβολή των συνθηκών, μέσω της αυξομείωσης της έντασης του ρεύματος. Χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικές τιμές για να μελετηθεί κατά πόσο η ένταση του ρεύματος σε μία συγκόλληση μπορεί να επηρεάσει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ωστόσο η ταχύτητα της συγκόλλησης για όλα τα δοκίμια παρέμεινε σταθερή.



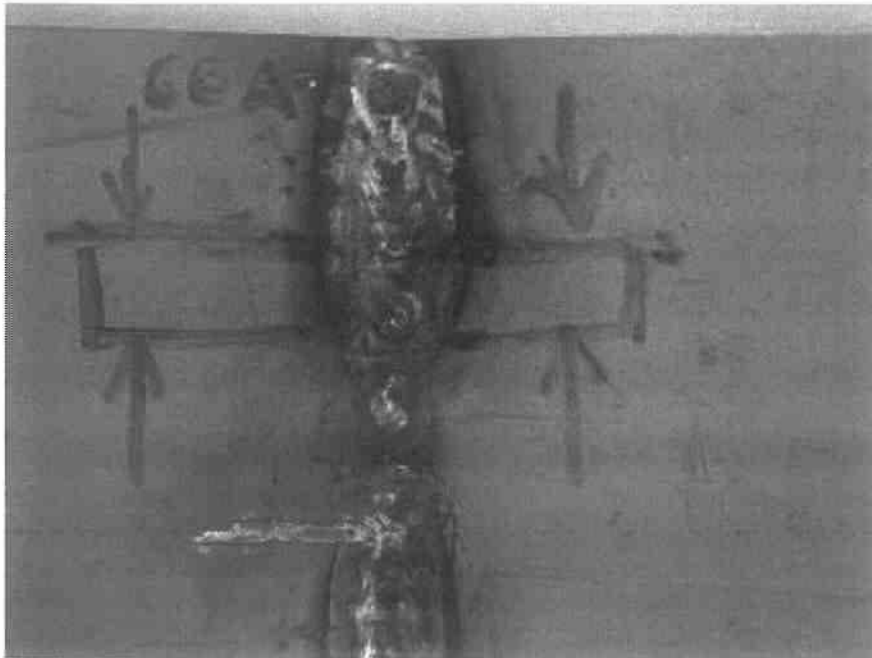
Σχήμα 8 (Φωτογραφία που παρουσιάζει τη μικροδομή στην περιοχή της συγκόλλησης)

3.2 Στάδια πειραματικής διαδικασίας:

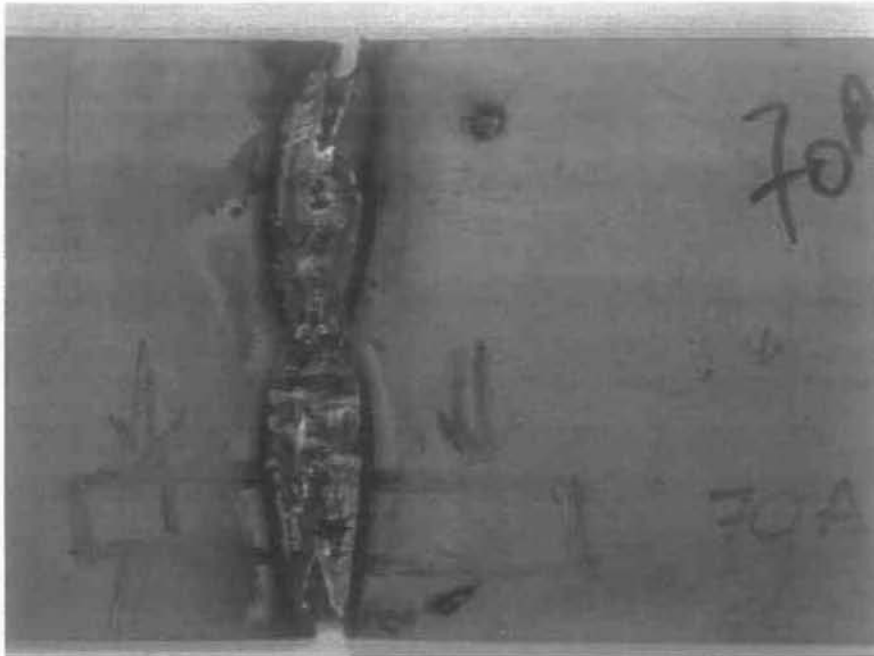
3.2.1 Συνκόλληση:

Επιλέχθηκαν πλακίδια ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα (St 304) πάχους 3 χιλιοστών (mm). Η μέθοδος συγκόλλησης που επιλέχθηκε είναι η συγκόλληση με επενδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW- Shielded metal/Arc welding). Η μέθοδος αυτή είναι χειροκίνητη και στην οποία η απαιτούμενη θερμότητα για τη τήξη παράγεται από ένα ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση μετάλλου. Το ηλεκτρόδιο είναι αναλίσκόμενο και καλύπτεται από επένδυση η οποία αποσυντίθεται παράγοντας αέρια απαραίτητα για την προστασία της λίμνης συγκόλλησης. Το πρόσθετο μέταλλο προέρχεται από τον εσωτερικό μεταλλικό πυρήνα του ηλεκτροδίου. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο ανοξείδωτου χάλυβα τύπου St 308.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επιλέχθηκαν τρεις τιμές για την ένταση του ρεύματος, μία παράμετρο η τιμή της οποίας ρυθμίζεται από τη συσκευή της συγκόλλησης και το εύρος της εξαρτάται από το ηλεκτρόδιο και τις συνθήκες κόλλησης. Σε αυτό το πείραμα η συσκευή συγκόλλησης ρυθμίστηκε διαδοχικά στα 60A, 70A και 80A με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στο Σχήμα 9, το Σχήμα 10 και το Σχήμα 11 αντίστοιχα. Το διαθέσιμο εύρος για το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο είναι μεταξύ 55A και 85A.



Σχήμα 9 (Συγκόλληση πλακιδίων με ένταση ρεύματος 60A)



Σχήμα 10 (Συγκόλληση πλακιδίων με ένταση ρεύματος 70A)



Σχήμα 11 (Συγκόλληση πλακιδίων με ένταση ρεύματος 80A)

3.2.2 Κοπή:

Για να μελετηθεί η μικροδομή του δοκιμίου πρέπει πρώτα να επεξεργαστεί. Το πρώτο στάδιο αφορά τη διαδικασία της κοπής. Όλα τα δοκίμια κόπηκαν σε μικρότερα μεγέθη με τη χρήση αποξεστικού τροχού (Σχήμα 12). Κατά τη διάρκεια της κοπής και με σκοπό την αποφυγή ατελειών και παραμορφώσεων, υπήρξε συνεχής ψύξη των δοκιμίων με συνεχή παροχή διαλύματος λαδιού και νερού.



Σχήμα 12 (Αποξεστικός τροχός με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η κοπή των δοκιμίων)

3.2.3 Εγκιβωτισμός:

Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ορθογώνια καλούπια και εγκιβωτίστηκαν με τη χρήση της ρητίνης Versocit. Η ρητίνη αποτελείται από δύο τμήματα, σκόνη και υγρό. Η αναλογία μεταξύ των δύο είναι περίπου μία δόση υγρού για κάθε μιάμιση δόση σκόνης. Μετά από εξώθερμη αντίδραση η ρητίνη στερεοποιείται και τα δοκίμια αφαιρούνται από τα καλούπια.

3.2.4 Λείανση-Στίλβωση

Για τη λείανση και τη στίλβωση των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκαν λειαντικοί τροχοί, όπως αυτοί του Σχήματος 13, με χαρτιά που είναι επενδεδυμένα με καρβίδια του πυριτίου. Σε κάθε στάδιο της λείανσης, αλλάζει το μέγεθος του

κόκκου, παίρνοντας τιμές 120grit, 240grit, 320grit, 800grit, 1200grit. Για τη ψύξη των δοκιμίων και τον καθαρισμό τους, οι δίσκοι τροφοδοτούνται με νερό. Στη συνέχεια ακολουθεί η στίλβωση με τη χρήση διαμαντόπαστας διαμέτρου 3 και 1μm.



Σχήμα 13 (Λειαντικοί τροχοί για τη λείανση και τη στίλβωση των δοκιμίων)

3.2.5 Χημική Προσβολή:

Για να αποκαλυφθεί η μικροδομή των δοκιμίων πρέπει να υποβληθούν σε χημική προσβολή. Στη συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε διάλυμα marbles (4g CuSO₄, 20ml HCl, 20ml H₂O) για πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

3.2.6 Οπτική μικροσκοπία:

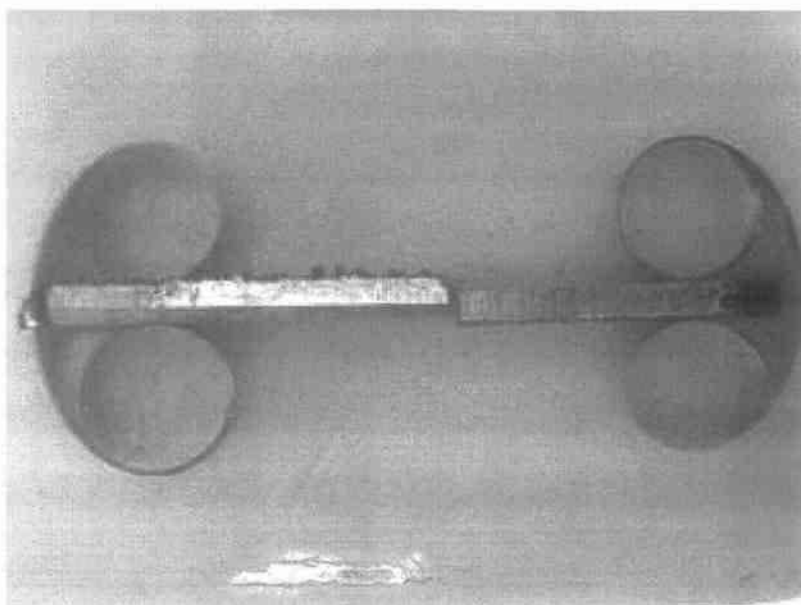
Στο τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας χρησιμοποιείται οπτικό μικροσκόπιο Leica συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στο μικροσκόπιο τα δοκίμια φωτογραφίζονται και μελετώνται ως προς τη δομή τους. Κατά τη διαδικασία αυτή, διαφορετικοί φακοί έδωσαν ευρείες ή πιο εστιασμένες φωτογραφίες.

3.3 Μελέτη με ψηφιακό πρόγραμμα επεξεργασίας:

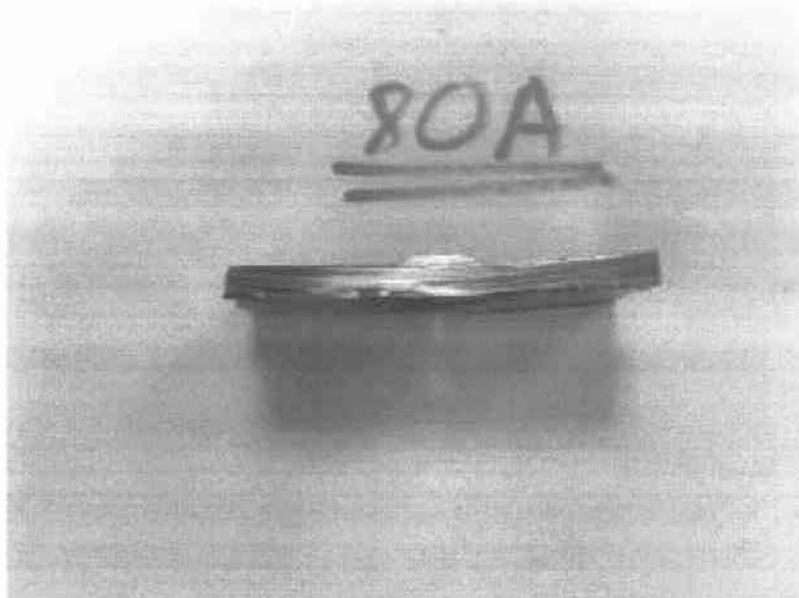
Σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας, έγινε ο υπολογισμός του ποσοστού του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης, μελετώντας τα δοκίμια του πειράματος με τη βοήθεια του προγράμματος επεξεργασίας εικόνας Adobe Photoshop CS5. Σκοπός είναι να προσδιοριστούν τα ποσοστά φερρίτη και ωστενίτη στις περιοχές αυτές. Στη συνέχεια, τα δοκίμια μελετήθηκαν σε υψηλές μεγεθύνσεις και έγινε αναγνώριση του είδους του δ-φερρίτη που προέκυψε από τη συγκόλληση.

3.3.1 Υπολογισμός αραίωσης:

Όπως έχει ειπωθεί, οι συνθήκες του πειράματος θα πρέπει να προσεγγίζουν αυτές που θα μελετηθούν αργότερα στο διάγραμμα Schaeffler. Για τον λόγο αυτό, πρέπει να υπολογιστεί η αραίωση της συγκόλλησης και να γίνει η σύγκρισή της με το ποσοστό 60% που θα χρησιμοποιείται τόσο στο Schaeffler diagram, όσο και στα προγράμματα υπολογιστικής θερμοδυναμικής. Ο υπολογισμός αυτός έγινε με τη χρήση των φωτογραφιών δύο δοκιμίων. Η μία φωτογραφία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 14 απεικονίζει τις άκρες των πλακιδίων προτού αυτά συγκολληθούν και το δεύτερο τα ίδια πλακίδια αμέσως μετά τη συγκόλληση (Σχήμα 15).

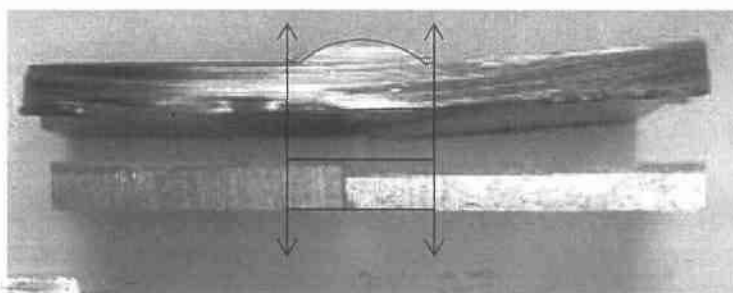


Σχήμα 14 (Δοκίμιο πλακιδίων πριν από τη συγκόλληση)



Σχήμα 15 (Δοκίμιο με την περιοχή της συγκόλλησης σε τομή)

Στη συνέχεια και με τη χρήση του προγράμματος Photoshop, οι δύο εικόνες τοποθετήθηκαν στο ίδιο κάδρο έτσι ώστε οι άκρες των πλακιδίων να βρίσκονται μέσα στην περιοχή της συγκόλλησης του δεύτερου πλακιδίου. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να υπολογιστεί το εμβαδό του μετάλλου το οποίο συμμετείχε στην συγκόλληση, επομένως και το ποσοστό του βασικού μετάλλου που συμμετείχε στη συγκόλληση, μετρημένο σε μονάδες επιφάνειας. Το Σχήμα 16 που ακολουθεί δείχνει τα δύο δοκίμια τοποθετημένα και έτοιμα για επεξεργασία.



Σχήμα 16 (Τομή των δύο δοκιμίων με τονισμένες τις επιφάνειες συγκόλλησης και βασικού μετάλλου)

Με τη χρήση της φωτογραφίας αυτής έγινε ο υπολογισμός της αραίωσης. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 16, τα δύο σχεδιασμένα βέλη δείχνουν την περιοχή της συγκόλλησης (κόκκινο πλαίσιο) και το βασικό μέταλλο (μαύρο πλαίσιο). Το εμβαδό της κλειστής από τα βέλη περιοχής του πρώτου πλακιδίου, είναι μεγαλύτερο από το εμβαδό της κλειστής περιοχής του δεύτερου πλακιδίου. Υπολογίζοντας τα δύο εμβαδά και χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$\text{Αραίωση} = \frac{\text{Εμβαδό βασικού μετάλλου που συμμετέχει στη συγκόλληση}}{\text{εμβαδό περιοχής συγκόλλησης}} \times 100$$

υπολογίζουμε το ποσοστό της αραίωσης. Το Photoshop μπορεί να προσδιορίσει την επιφάνεια μίας επιλεγμένης περιοχής. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως το πρόγραμμα υπολογίζει το εμβαδό μίας περιοχής σε ρixel και όχι σε μονάδες SI. Ακολουθεί πίνακας με τις υπολογισμένες επιφάνειες των δύο δοκιμίων:

3.3.2 Προσδιορισμός ποσοστού φερρίτη:

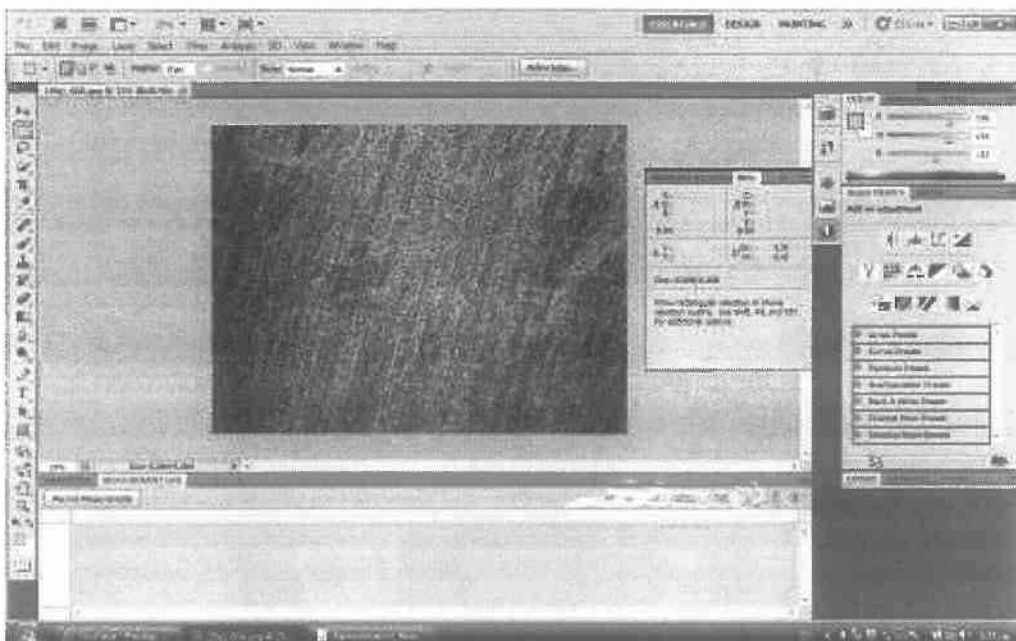
Για τον προσδιορισμό του ποσοστού του φερρίτη, χρησιμοποιήθηκαν οι φωτογραφίες των δοκιμίων από το μικροσκόπιο του εργαστηρίου. Χρησιμοποιήθηκε η μεγέθυνση 200x έτσι ώστε να απεικονίζεται μεγάλη επιφάνεια της περιοχής της συγκόλλησης, με σκοπό τον μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων και τη μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Επιλέχθηκαν περιοχές από όλη την επιφάνεια του δοκιμίου όπως παρουσιάζονται και στο Σχήμα 17 που ακολουθεί.



Σχήμα 17 (Τμήματα της περιοχής συγκόλλησης που επιλέγονται ως δείγματα)

Η αναλυτική διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί είναι η εξής:

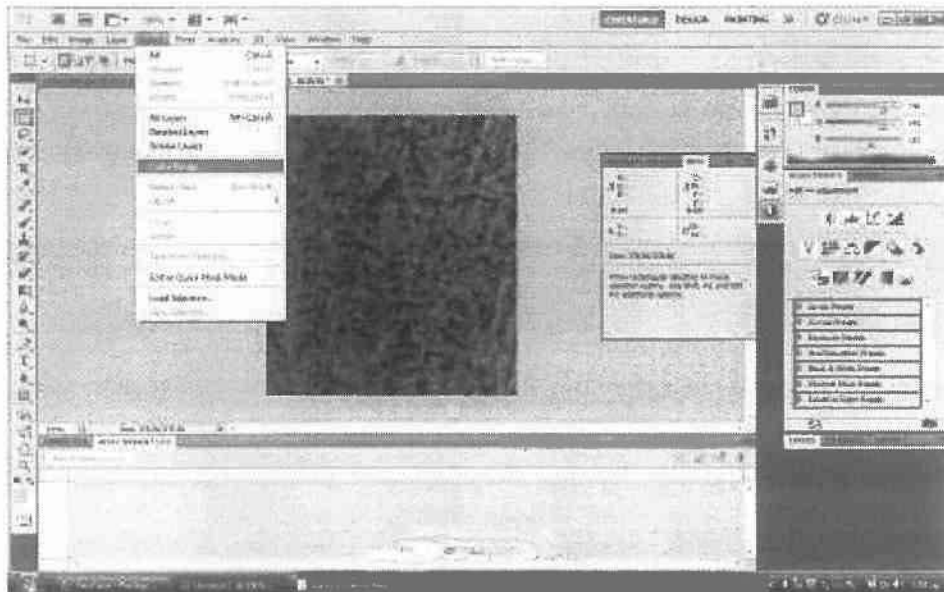
1. Γίνεται η φόρτωση της εικόνας στο Photoshop και επιλέγεται η περιοχή που θα μετρηθεί (Σχήμα 18):



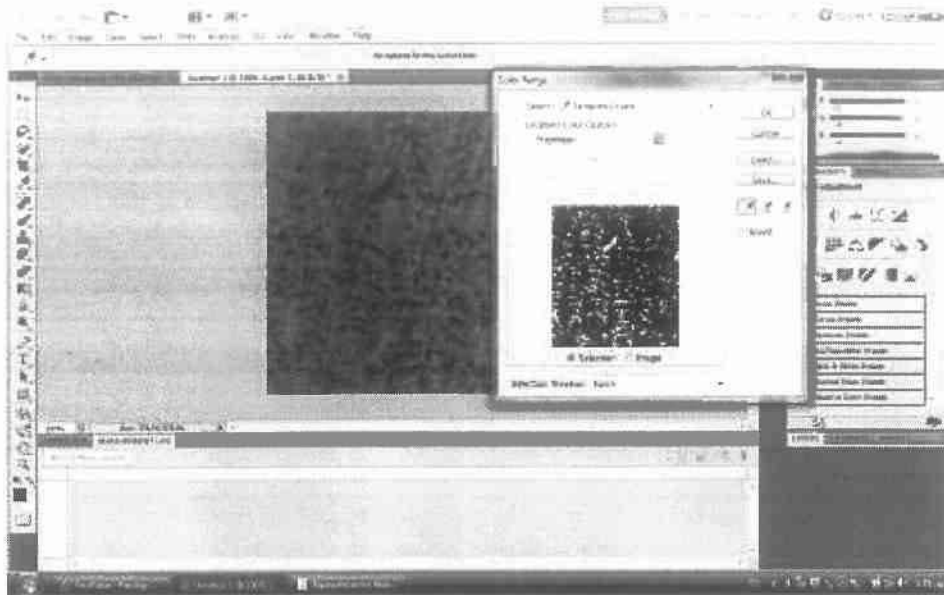
Σχήμα 18 (Interface του προγράμματος Photoshop με επιλεγμένη περιοχή για επεξεργασία)

Όπως φαίνεται στη κάτω αριστερή γωνία του δοκιμίου στο Σχήμα 18 γίνεται επιλογή μίας περιοχής. Στον πίνακα info εμφανίζονται το μήκος και το ύψος του δοκιμίου και με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστεί το εμβαδό της επιλεγμένης περιοχής.

2. Ακολουθούν οι εντολές: **Ctrl+c**, **Ctrl+n** και **Ctrl+v**. Με τον τρόπο αυτό απομονώνεται η επιλεγμένη περιοχή και είναι έτοιμη προς περαιτέρω επεξεργασία.
3. Η σειρά των εντολών που ακολουθούνται είναι: **Select** και έπειτα **Color range** και επιλογή χρώματος στο δοκίμιο (Σχήμα 19). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 20, στο δοκίμιο ο φερρίτης που απεικονίζεται με μαύρο ξεχωρίζει σε σχέση με τον ωστενίτη που στις φωτογραφίες έχει πράσινο χρώμα.
4. Χρησιμοποιώντας το φίλτρο χρώματος και την επιλογή **Fuziness** διαχωρίζουμε σε αρνητικά χρώματα ακόμα περισσότερο τον φερρίτη από τον ωστενίτη (Σχήμα 20). Πατώντας **OK** εμφανίζεται το δοκίμιο, έχοντας επιλεγμένες όλες τις περιοχές του φερρίτη.

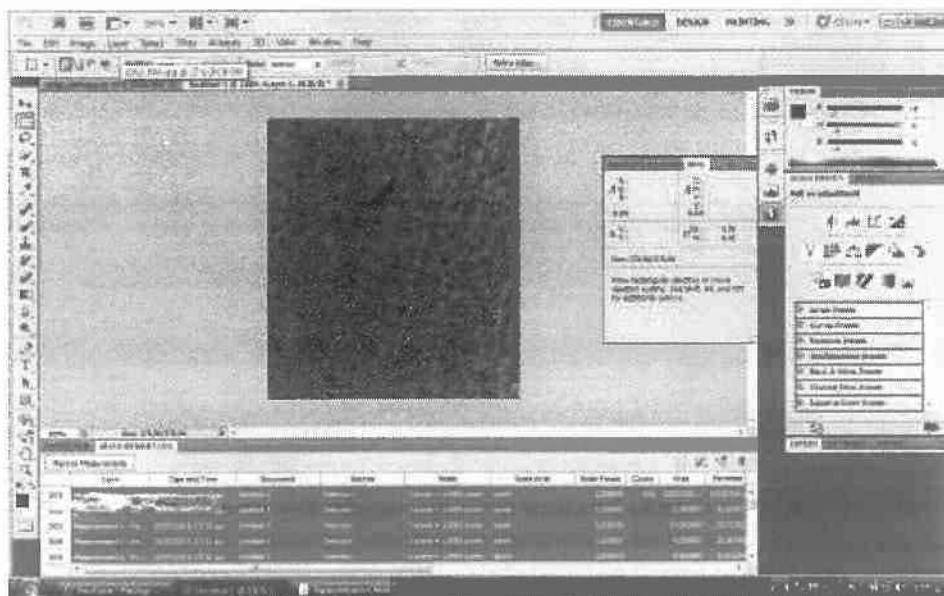


Σχήμα 19 (Επιλογή της εντολής color range με την οποία διαχωρίζονται τα στρώματα του φερρίτη και του ωστενίτη)



Σχήμα 20 (Η αναγωγή του δείγματος σε αρνητικά χρώματα διαχωρίζει τον φερρίτη από τον ωστενίτη)

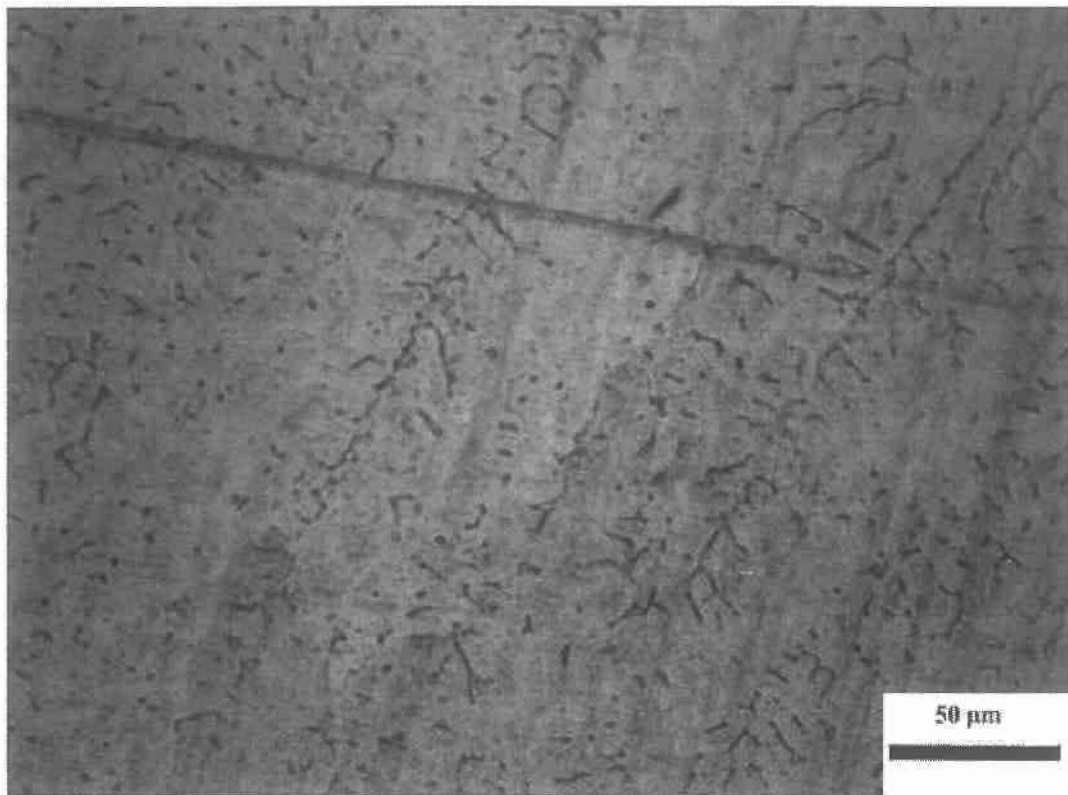
5. Οι επόμενες εντολές που πρέπει να οριστούν είναι **Analysis** και μετά **Record measurements**. Στο κάτω μέρος της οθόνης εμφανίζονται μετρήσεις σχετικά με την επιλεγμένη περιοχή, δηλαδή τον φερρίτη. Η πρώτη επιλογή δίνει τη συνολική επιφάνεια των περιοχών. Επομένως διαιρώνοντας την επιφάνεια του φερρίτη με τη συνολική επιφάνεια, μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης.



Σχήμα 21 (Interface του προγράμματος Photoshop με τη συνολική επιφάνεια του φερρίτη επιλεγμένη και υπολογισμένη σε pixel)

3.3.3 Διερεύνηση δ-φεροίτη:

Στο τελικό στάδιο της πειραματικής διαδικασίας, επιλέγονται περιοχές της περιοχής της συγκόλλησης οι οποίες έχουν φωτογραφηθεί με μεγάλη μεγέθυνση, όπως αυτή του Σχήματος 22. Με τον τρόπο αυτό, θα επιτευχθεί η αναγνώριση της μορφής του φερρίτη.



Σχήμα 22 (Τμήμα της περιοχής συγκόλλησης σε μεγέθυνση το οποίο μελετάται για τον προσδιορισμό της μικροδομής)

3.4 Προγράμματα Thermocalc και Dictra

Το πρόγραμμα Thermocalc είναι ένα υπολογιστικό πακέτο δεδομένων το οποίο χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό θερμοδυναμικών διαγραμμάτων και διαγραμμάτων φάσης, καθώς επίσης και για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων διαφόρων κραμάτων. Οι υπολογισμοί αυτοί έχουν ιδιαίτερη σημασία και χρησιμότητα στη βιομηχανία. Βοηθούν στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων που προκύπτουν σε θέματα που έχουν να κάνουν με σχεδιασμό κραμάτων, υπολογισμό ιδιοτήτων και τις συμπεριφοράς αυτών κατά την αλλαγή διαφόρων συνθηκών όπως η θερμοκρασία και η πίεση. Οι υπολογισμοί του προγράμματος Thermocalc γίνονται με τη βοήθεια βάσεων δεδομένων οι οποίες περιλαμβάνουν πληροφορίες για τους χάλυβες, μέταλλα όπως αλουμίνιο, τιτάνιο μαγνήσιο, χρώμιο, νικέλιο και άλλα μέταλλα, όπως επίσης και για υλικά με πολλά συστατικά. Οι βάσεις δεδομένων χρησιμοποιούν την μέθοδο CALPHAD για την επίλυση των προβλημάτων αυτών. [16]

Η μέθοδος CALPHAD είναι η μέθοδος σχεδιασμού διαγραμμάτων φάσης. Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν για τους μηχανικούς και τους επιστήμονες μία δύσβατη περιοχή, κυρίως λόγω της δυσκολίας που υπάρχει στα συστήματα τρίτης ή και μεγαλύτερης τάξης. Η μέθοδος CALPHAD άλλαξε δραστικά αυτές τις ιδέες, καθώς είναι τώρα δυνατόν να προβλέψουμε τη θερμοδυναμική ισορροπία σε πολυσυστατικά κράματα εφαρμόζοντας μία προέκταση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων από τα διμερή και τριμερή συστήματα. Επιπρόσθετα είναι δυνατόν να γίνει σύζευξη της μεθόδου με κινητικά μοντέλα σε μία προσπάθεια κατανοήσεως και προβλέψεως της συμπεριφοράς των υλικών σε συνθήκες, που απέχουν από τη θερμοδυναμική ισορροπία, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο αυτή πολύ χρήσιμη.

Το κεντρικό σημείο της μεθόδου είναι η ανάπτυξη μοντέλων για τη περιγραφή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs τόσο των καθαρών μετάλλων, όσο και των φάσεων (στερεών διαλυμάτων) και των διαμεταλλικών ενώσεων. Η μαθηματική περιγραφή της ελεύθερης ενέργειας των φάσεων αποθηκεύεται σε ηλεκτρονική μορφή σε θερμοχημικές βάσεις δεδομένων για περαιτέρω χρήση από λογισμικά υπολογισμού θερμοδυναμικής ισορροπίας. [17]

Στη θερμοδυναμική, ο όρος ελεύθερη ενέργεια Gibbs είναι ένα θερμοδυναμικό μηχανικό που μετρά το χρήσιμο έργο που μπορεί να αποκτηθεί από ένα ισόθερμο, ισοβαρές θερμοδυναμικό σύστημα. Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs, είναι η μέγιστη ποσότητα έργου που μπορεί να εξαχθεί από ένα κλειστό σύστημα. Το ανώτατο αυτό όριο μπορεί να επιτευχθεί μόνο σε μία εντελώς αντιστρέψιμη διαδικασία. [18]

Το Dictra είναι ένα λογισμικό πακέτο δεδομένων το οποίο μπορεί να πραγματοποιήσει προσομοιώσεις διάχυσης σε πολυσύνθετα κραματικά στοιχεία. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό ομογενοποίησης κραμάτων, για υπολογισμούς

στη διαδικασία ενανθράκωσης χαλύβων και για άλλες εφαρμογές.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του προγράμματος DICTRA είναι πως για να λειτουργήσει, χρησιμοποιεί και τις βάσεις δεδομένων του προγράμματος ThermoCalc. Λειτουργούν δηλαδή συμπληρωματικά, διότι στη μελέτη της κατασκευής κραμάτων, η πρόβλεψη της χρονικής εξέλιξης των μετασχηματισμών είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ουσιαστικά, το Dictra χρησιμοποιεί τα θερμοδυναμικά πακέτα του ThermoCalc για τον υπολογισμό της θερμοδυναμικής ισορροπίας, και τις δικές του βάσεις δεδομένων με σκοπό τη μελέτη της αντίδρασης με γνώμονα την εξέλιξη της αντίδρασης στο πεδίο του χρόνου. Η μέθοδοι υπολογισμού βασίζονται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων διαχύσεως με πολλά συστατικά θεωρώντας ότι στα διεφασικά σύνορα επικρατεί τοπική θερμοδυναμική ισορροπία. Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται με μεθόδους πεπερασμένων διαφορών και ακολουθεί τέσσερα κύρια βήματα προκειμένου να δώσει τη λύση στο δοθέν πρόβλημα. Αρχικά επιλύονται οι εξισώσεις διάχυσης, ενώ στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός της τοπικής θερμοδυναμικής ισορροπίας με τη χρήση των βάσεων δεδομένων του προγράμματος ThermoCalc. Έπειτα ακολουθεί η επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το ισοζύγιο ροής μάζας και τέλος πραγματοποιείται η μετατόπιση των διεφασικών συνόρων. [19], [20]

Με τη χρήση των δύο προγραμμάτων υπολογίστηκε αρχικά το διάγραμμα φάσεων του ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα με σύσταση η οποία προέκυψε με την ενσωμάτωση του φαινομένου της αραίωσης στο μέταλλο συγκόλλησης με τιμή της τάξεως του 60%. Στη συνέχεια και με τη χρησιμοποίηση του module Scheil, έγινε προσπάθεια να εξαχθούν αποτελέσματα τα οποία πλησιάζουν περισσότερο την πραγματικότητα, λαμβάνοντας υπ' όψιν πως μία συγκόλληση έχει πολύ μεγάλο ρυθμό ψύξης και πως η περιοχή που μελετάται δεν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία κατά τη διάρκεια της ψύξης αυτής. Σε αυτό το σκέλος η εφαρμογή αυτή βασίστηκε στο φαινόμενο της στερεοποίησης με απουσία διάχυσης στο στερεό. Στο τέλος με τη χρήση του προγράμματος Dictra προσομοιώθηκε η διάχυση ωστενίτη σε μία φερριτική περιοχή, έτσι ώστε να μελετηθεί εάν μετά το πέρας συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, συνεχίζει να υφίσταται η μικροδομή του φερρίτη ή θα αντικατασταθεί από ωστενίτη.

Για την περάτωση όλων των παραπάνω αναπτύχθηκαν διαφορετικοί κώδικες που είχαν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία διαγραμμάτων, η μελέτη των οποίων μπορεί να δώσει απάντηση για το αν μπορεί η χρήση κώδικα πλέον να παρουσιάσει παραπλήσια αποτελέσματα με τις πειραματικές διαδικασίες. Όλοι οι κώδικες βρίσκονται στο παράρτημα της εργασίας, ενώ τα διαγράμματα σχολιάζονται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.

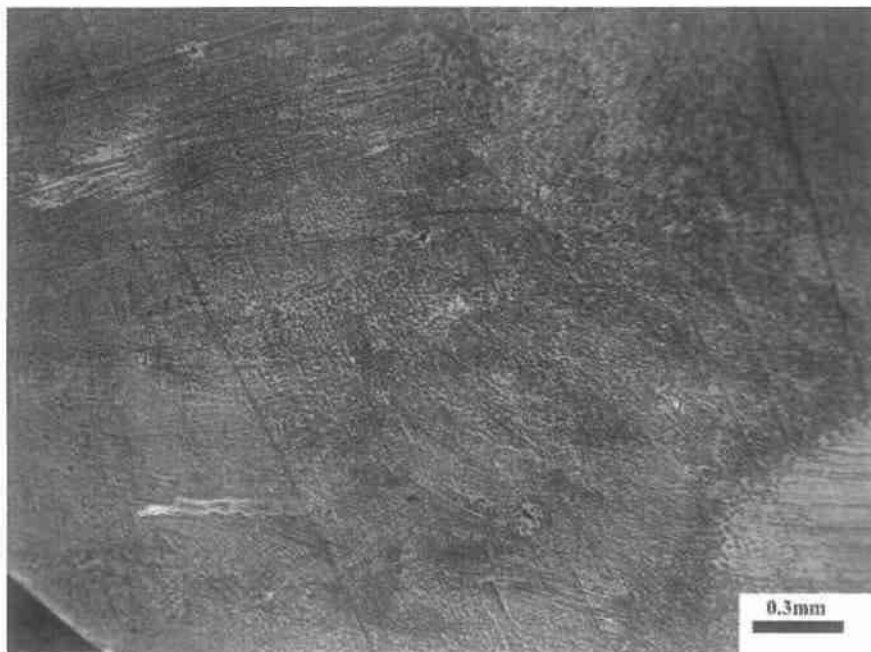
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, γίνεται η παρουσίαση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων που υπολογίστηκαν στην πειραματική διαδικασία και στο διάγραμμα Schaeffler. Επίσης παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα διαγράμματα που έδωσαν ως αποτελέσματα τα προγράμματα ThermoCalc και Dictra.

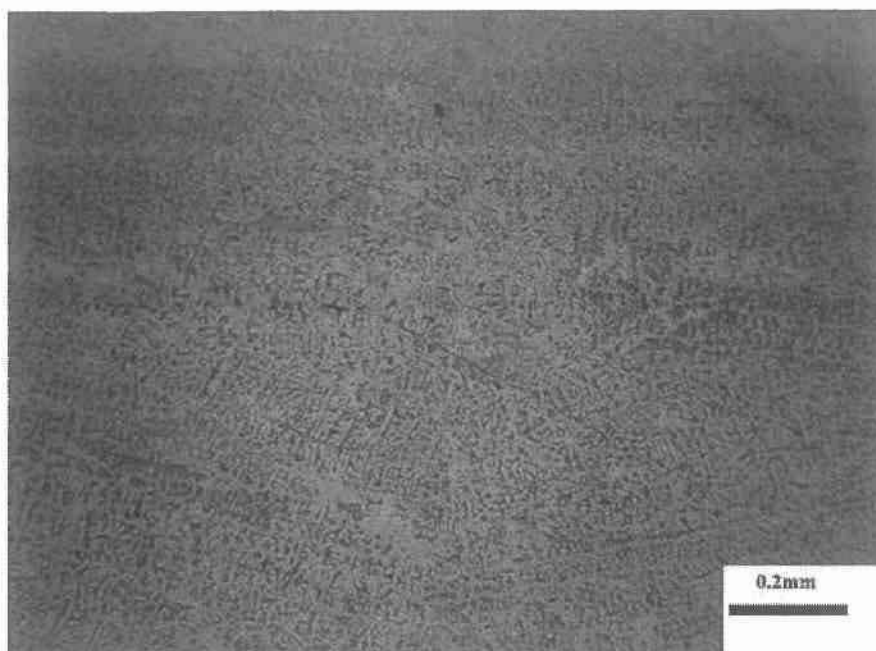
4.1 Μεταλλογραφικός προσδιορισμός δ-φερρίτη:

4.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας:

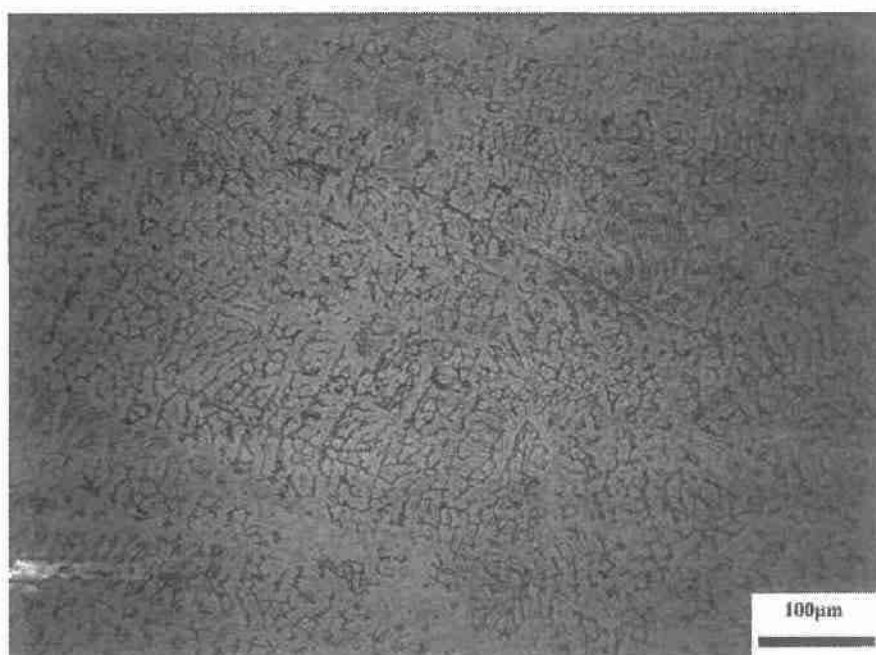
Στο Κεφάλαιο 3 της εργασίας έγινε αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του ποσοστού του δ-φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης, καθώς επίσης και για τη μορφή που έχει στα δοκίμια που συγκολλήθηκαν. Στα Σχήματα 23-32 που ακολουθούν παρουσιάζονται δοκίμια από την περιοχή της συγκόλλησης, τη θερμοεπηρεασμένη ζώνη και το βασικό μέταλλο, τα οποία έχουν συγκολληθεί με διαφορετικές εντάσεις ρεύματος και φωτογραφηθεί σε διάφορες μεγεθύνσεις στο μικροσκόπιο.



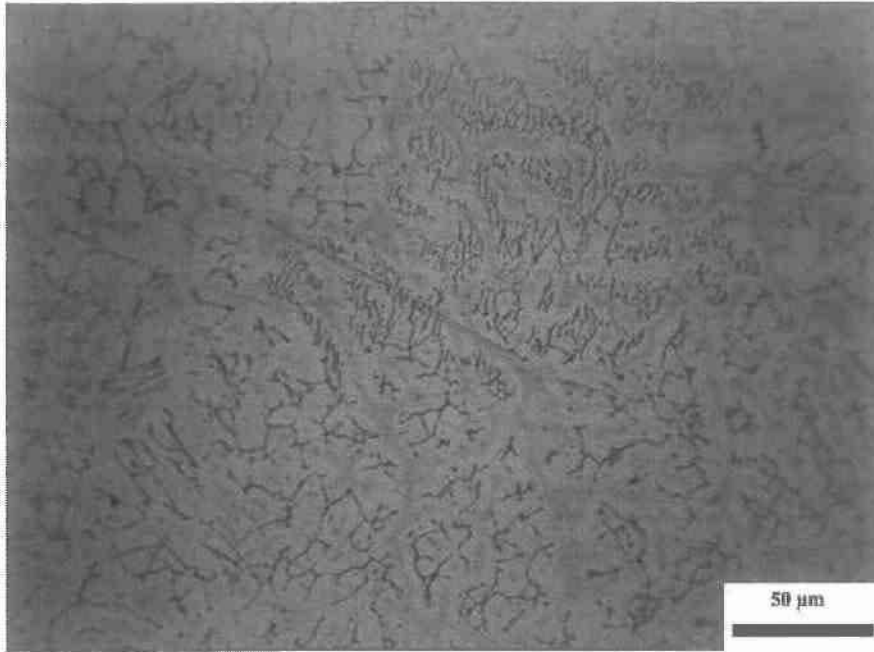
Σχήμα 23 (Περιοχή συγκόλλησης δοκμίου στα 80Α)



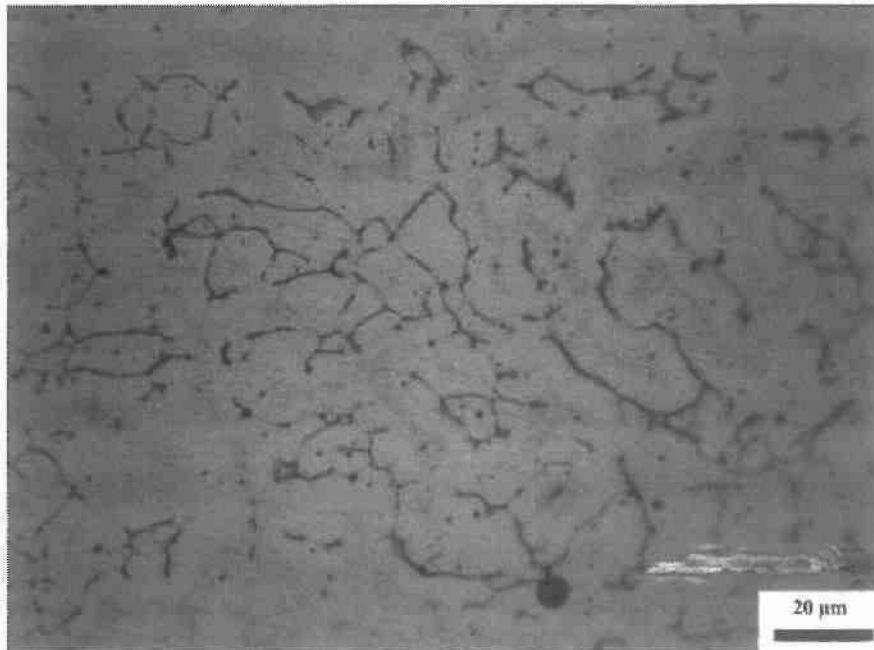
Σχήμα 24 (Περιοχή συγκόλλησης δοκιμίου στα 70A)



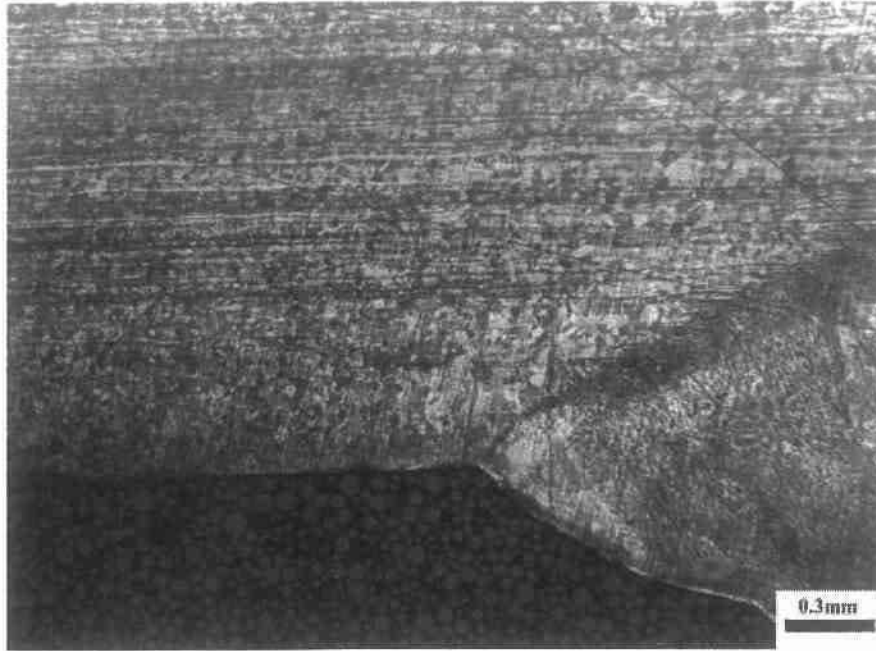
Σχήμα 25 (Περιοχή συγκόλλησης δοκιμίου στα 70A)



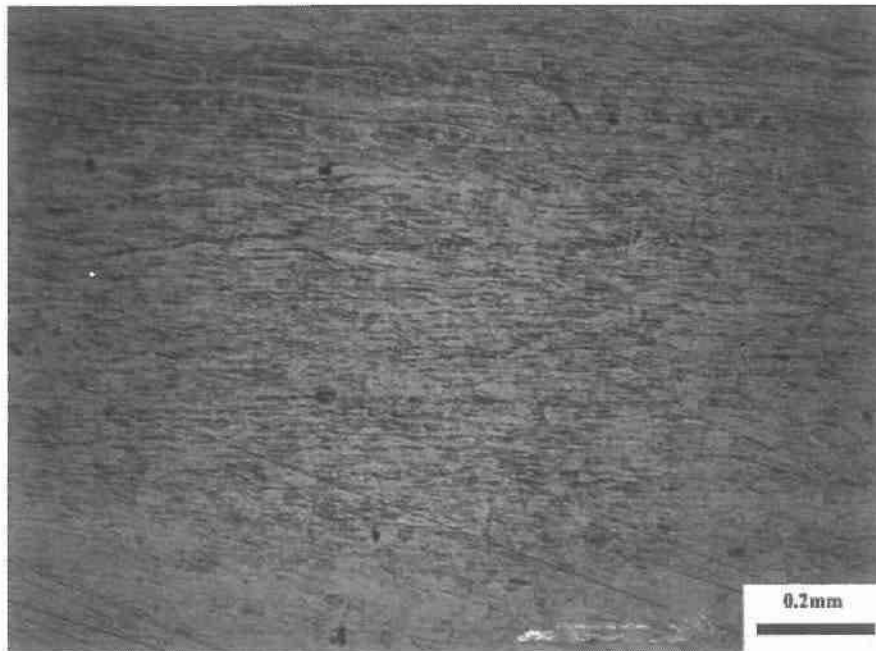
Σχήμα 26 (Περιοχή συγκόλλησης δοκιμίου στα 70Α)



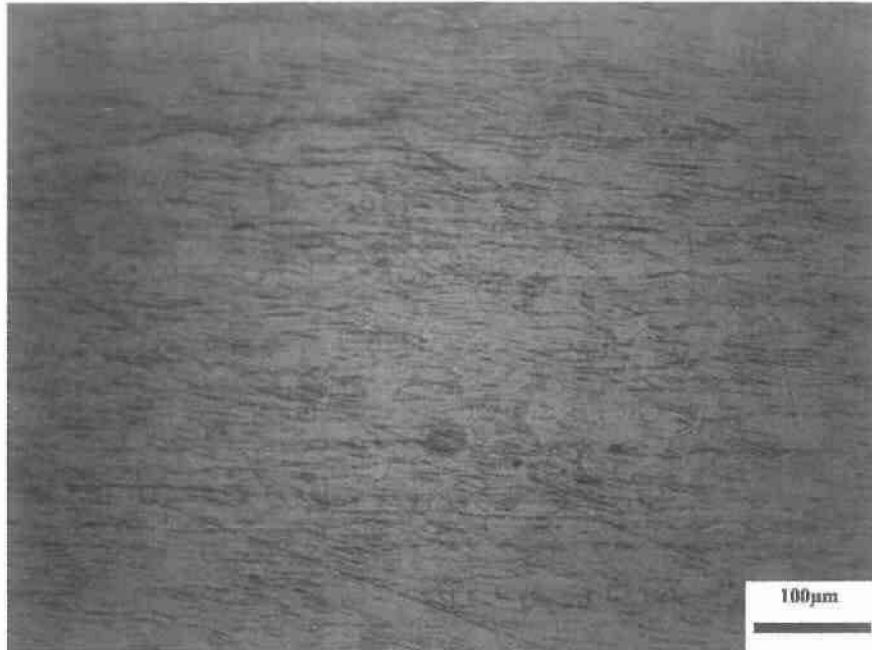
Σχήμα 27 (Περιοχή συγκόλλησης δοκιμίου στα 70Α)



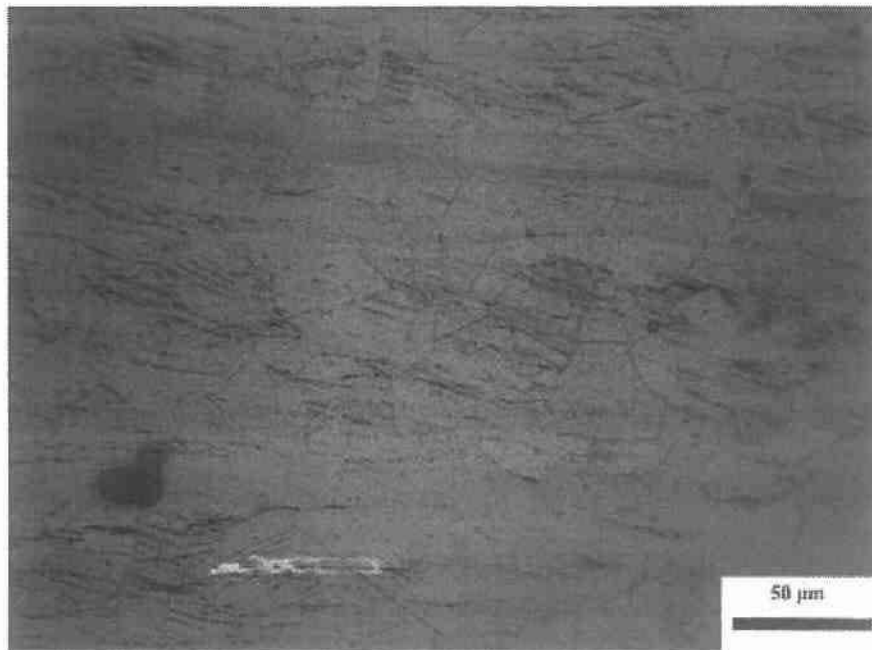
Σχήμα 28 (Θερμοεπεξεργασμένη ζώνη δοκιμίου στα 60A)



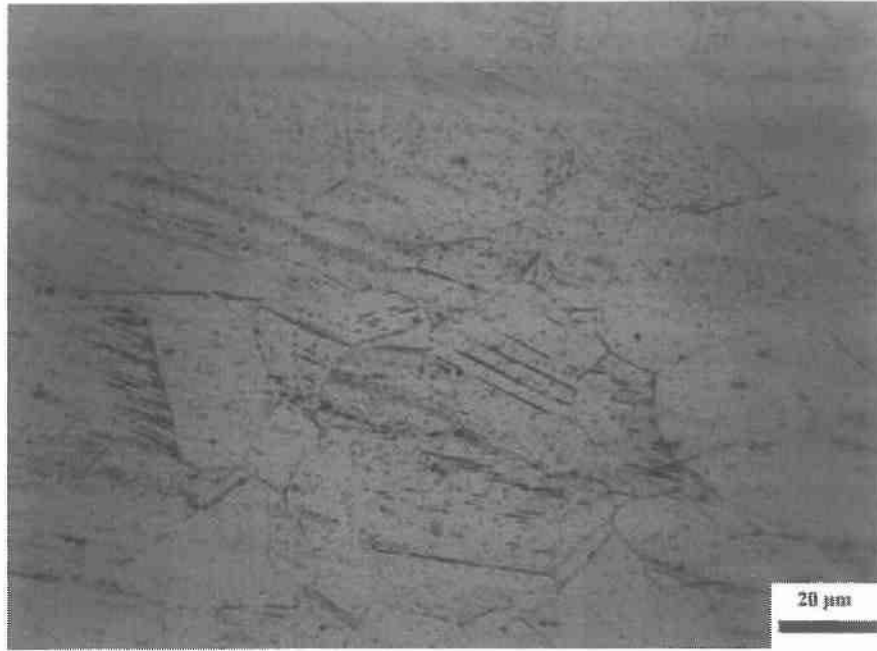
Σχήμα 29 (Θερμοεπεξεργασμένη ζώνη δοκιμίου στα 70A)



Σχήμα 30 (Θερμοεπηρεασμένη ζώνη δοκιμίου στα 70Α)



Σχήμα 31 (Θερμοεπηρεασμένη ζώνη δοκιμίου στα 70Α)



Σχήμα 32 (Θερμοεπηρεασμένη ζώνη δοκιμίου στα 70Α)

4.1.2 Αποτελέσματα υπολογισμού αραίωσης στην περιοχή της συγκόλλησης:

Ο υπολογισμός της αραίωσης στην περιοχή της συγκόλλησης έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος επεξεργασίας εικόνας Photoshop CS5. Υπολογίστηκαν οι επιφάνειες του βασικού μετάλλου που συμμετείχε στη συγκόλληση και της επιφάνειας της περιοχής της συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα υπολογισμένα σε pixels παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 (Επιφάνειες βασικού μετάλλου και περιοχής συγκόλλησης υπολογισμένες σε pixels)

ΕΜΒΑΔΟ ΒΑΣΙΚΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟΥ	ΕΜΒΑΔΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ
14490	22513

Στη συνέχεια και με τη βοήθεια του τύπου:

$$\text{Αραίωση} = \frac{\text{Εμβαδό βασικού μετάλλου που συμμετέχει στη συγκόλληση}}{\text{εμβαδό περιοχής συγκόλλησης}} \times 100$$

υπολογίστηκε το ποσοστό της αραίωσης στην περιοχή της συγκόλλησης. Το αποτέλεσμα της αραίωσης υπολογισμένο σε ποσοστό επί της εκατό είναι:



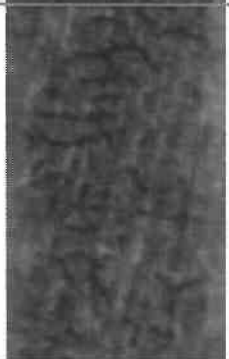

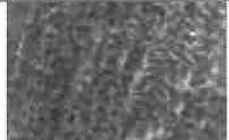
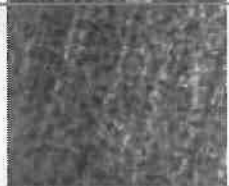
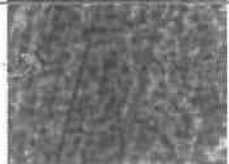
$$\text{Αραίωση δοκιμίου} = \frac{14490}{22513} \times 100 = 64.36\%$$


Ένας μέσος όρος αραίωσης στις συγκολλήσεις των ανοξειδωτων ωστενιτικών χαλύβων είναι της τάξεως του 60%. Το ποσοστό που υπολογίστηκε στα δοκίμια της πειραματικής διαδικασίας προσεγγίζει το νούμερο αυτό.

4.1.3 Υπολογισμός ποσοστού φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης:

Για τον προσδιορισμό του ποσοστού του φερρίτη, χρησιμοποιήθηκαν οι φωτογραφίες των δοκιμών από το μικροσκόπιο του εργαστηρίου με μεγέθυνση 20x. Εξετάστηκαν τρία δοκίμια, στα οποία πραγματοποιήθηκε συγκόλληση με εντάσεις ρεύματος 60A, 70A και 80A αντίστοιχα. Από το κάθε δοκίμιο επιλέχθηκε ένας αριθμός δειγμάτων, τα οποία επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Adobe Photoshop CS5. Καταγράφηκαν όλα τα ποσοστά φερρίτη και στο τέλος υπολογίστηκε ο μέσος όρος του ποσοστού φερρίτη για κάθε δοκίμιο. Στον Πίνακα 2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα δείγματα της περιοχής της συγκόλλησης για ένταση ρεύματος 60A και στο Σχήμα 33 η διασπορά του ποσοστού του φερρίτη στο δοκίμιο.

Πίνακας 2 (Ποσοστά φερρίτη σε δείγματα δοκιμίου που συγκολλήθηκε με ένταση ρεύματος 60Α)

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 60 ^Α ΜΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ 20x					
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΕΜΒΑΔΟ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΦΕΡΡΙΤΗ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΦΕΡΡΙΤΗ (%)	ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ
1 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	508 x 364	184912	15544	8.4	
2 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	576 x 542	312192	29326	9.39	
3 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	312 x 508	158496	12717	8.02	
4 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	508 x 549	278892	10319	3.7	
5 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	657 x 420	275940	23934	8.67	
6 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	583 x 483	281589	19346	6.87	
7 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	569 x 427	242963	9360	3.83	

8ο ΔΕΙΓΜΑ	603 x 557	335871	22129	6.59	
9ο ΔΕΙΓΜΑ	576 x 537	309312	14661	4.74	
10ο ΔΕΙΓΜΑ	732 x 530	387960	31350	8.08	

Διευκρινήσεις:

- Οι στήλες εμβαδό, διαστάσεις και συνολική επιφάνεια, εκφράζουν επιφάνεια, η οποία όμως είναι υπολογισμένη με μονάδα μέτρησης το 1 pixel.
- Οι τιμές στη στήλη διαστάσεις, εκφράζουν τη συνολική επιφάνεια του δείγματος (πλάτος x ύψος). Η συνολική επιφάνεια αναγράφεται στη στήλη εμβαδό.
- Ο όρος συνολική επιφάνεια εκφράζει τη συνολική επιφάνεια του φερρίτη στο δείγμα. Ο τρόπος υπολογισμού της επιφάνειας αυτής έχει περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.



Σχήμα 33 (Διασπορά ποσοστού φερρίτη σε δοκίμιο που συγκολλήθηκε με ένταση ρεύματος 60Α)


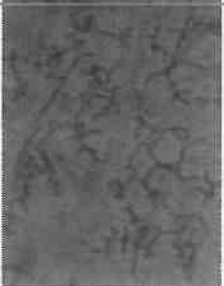
Με σκοπό να διαπιστωθεί εάν το ποσοστό του φερρίτη βρίσκεται ανάμεσα στα επιθυμητά όρια έτσι ώστε να μην εμφανιστεί θερμή ρηγμάτωση, υπολογίζεται η μέση τιμή του ποσοστού του φερρίτη των δειγμάτων.



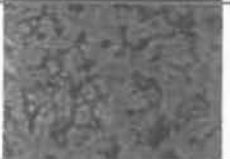
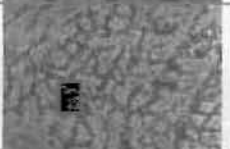
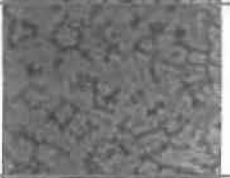


$$\text{Μέση τιμή φερρίτη} = \frac{8.4 + 9.39 + 8.02 + 3.7 + 8.67 + 6.87 + 3.83 + 6.59 + 4.74 + 8.08}{10} = 6.289\%$$


Επομένως το ποσοστό του φερρίτη για ένταση ρεύματος 60Α όπως προέκυψε από τις μετρήσεις του δοκιμίου είναι 6.289%.

Στον Πίνακα 3, καταγράφονται και παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα δείγματα της περιοχής της συγκόλλησης με ένταση ρεύματος 70Α, ενώ στο Σχήμα 34 η διασπορά του ποσοστού του φερρίτη στο δοκίμιο.

Πίνακας 3 (Ποσοστά φερρίτη σε δείγματα δοκιμίου που συγκολλήθηκε με ένταση ρεύματος 70Α)

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 70Α ΜΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ 20x					
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΕΜΒΑΔΟ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΦΕΡΡΙΤΗ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΦΕΡΡΙΤΗ (%)	ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ
1 ₀ ΔΕΙΓΜΑ	567 x 637	361179	38304	10.6	
2 ₀ ΔΕΙΓΜΑ	427 x 555	236985	9912	4.18	

3₀ ΔΕΙΓΜΑ	501 x 718	359718	22271	6.19	
4₀ ΔΕΙΓΜΑ	404 x 650	262600	20043	7.6	
5₀ ΔΕΙΓΜΑ	603 x 433	261099	19988	7.65	
6₀ ΔΕΙΓΜΑ	704 x 469	330176	12070	3.63	
7₀ ΔΕΙΓΜΑ	549 x 428	234972	11147	4.74	
8₀ ΔΕΙΓΜΑ	488 x 598	291824	11383	3.9	
9₀ ΔΕΙΓΜΑ	603 x 483	291249	17524	6.0	

10 _ο ΔΕΙΓΜΑ	522 x 537	280314	12178	4.34	
---------------------------	-----------	--------	-------	------	---



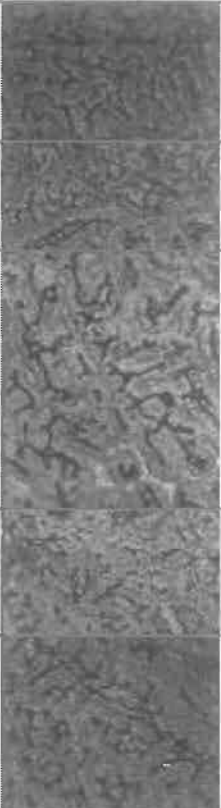
Σχήμα34 (Διασπορά ποσοστού φερρίτη σε δοκίμιο που συγκολλήθηκε με ένταση ρεύματος 70A)

$$\text{Μέση τιμή φερρίτη} = \frac{10.6 + 4.18 + 6.19 + 7.6 + 7.65 + 3.63 + 4.74 + 3.9 + 6 + 4.34}{10} = 5.88\%$$

Επομένως το ποσοστό του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης για ένταση ρεύματος 790A υπολογίστηκε στο 5.88%.

Στον Πίνακα 4, καταγράφονται και παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα δείγματα της περιοχής της συγκόλλησης με ένταση ρεύματος 780A, ενώ στο Σχήμα 35 η διασπορά του ποσοστού του φερρίτη στο δοκίμιο αυτό.

Πίνακας 4 (Ποσοστά φερρίτη σε δείγματα δοκιμίου που συγκολλήθηκε με ένταση ρεύματος 80Α)

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 80Α ΜΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ 20x					
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΕΜΒΑΔΟ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΦΕΡΡΙΤΗ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΦΕΡΡΙΤΗ (%)	ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ
1 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	542 x 340	184280	15182	8.2	
2 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	623 x 300	186900	11404	6.1	
3 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	440 x 515	226600	13022	5.7	
4 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	583 x 605	352715	32347	9.17	
5 ^ο ΔΕΙΓΜΑ	562 x 467	262454	12184	4.64	



Σχήμα 35 (Διασπορά ποσοστού φερρίτη σε δοκίμιο που συγκολλήθηκε με ένταση ρεύματος 80Α)

$$\text{Μέση τιμή φερριτή} = \frac{8.2+6.1+5.7+9.17+4.64}{5} = 6.7\%$$

Επομένως το ποσοστό του φερριτή στην περιοχή της συγκόλλησης για ένταση ρεύματος είναι 6.7%.

Με τον υπολογισμό των μέσων τιμών των ποσοστών, μπορεί να γίνει κατανοητό πως και οι τρεις εντάσεις ρεύματος είναι ικανές να δώσουν φερριτή σε τέτοια ποσότητα ώστε να μην παρουσιαστεί θερμή ρηγμάτωση. Βέβαια μία προσεκτικότερη ανάλυση φανερώνει ότι στα 60A έχουμε ποσοστό περίπου 6.3%, αλλά με αρκετές αυξομειώσεις στα ποσοστά του φερριτή (Σχήμα 33). Ορισμένες τιμές είναι αρκετά υψηλές, δηλαδή κοντά στο 8%, αλλά υπάρχουν και δείγματα που έδωσαν πολύ χαμηλά ποσοστά φερριτή.

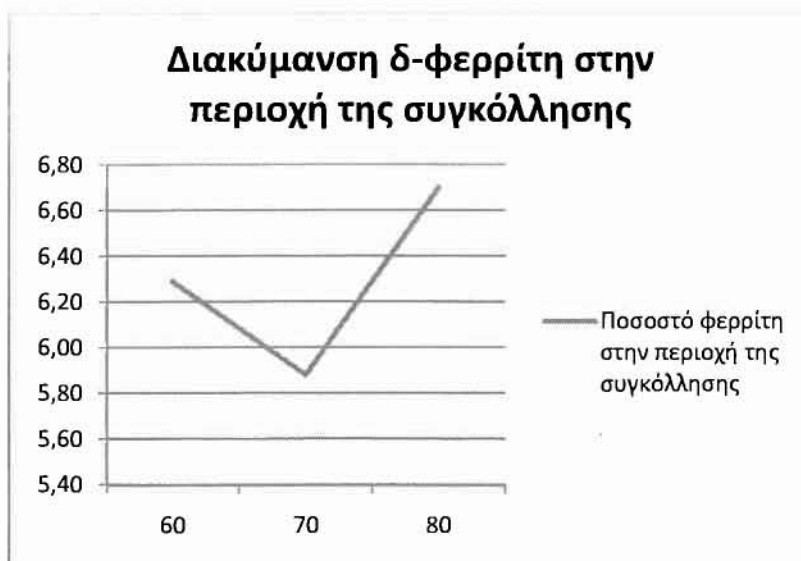
Στη συγκόλληση με ένταση ρεύματος 70A αυτό που παρατηρείται είναι πως αν εξαιρέσουμε μία πολύ μεγάλη τιμή στο πρώτο δείγμα, το ποσοστό του φερριτή κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα το δοκίμιο να δώσει μέση τιμή 5.88% (Σχήμα 34). Το ποσοστό αυτό, μπορεί να είναι μέσα στα επιθυμητά όρια, αλλά βρίσκεται πολύ κοντά στο κατώτατο όριο του ποσοστού φερριτή που προστατεύει από θερμή ρηγμάτωση.

Σε αντίθεση με την ένταση των 70A, η συγκόλληση που πραγματοποιήθηκε με ένταση ρεύματος 80A παρουσιάζει σχεδόν σε όλα τα δείγματα ποσοστά φερριτή άνω του 5%, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μία μέση τιμή ποσοστού φερριτή ίση με 6.7% (Σχήμα 35).

Επομένως, για το ίδιο ποσοστό αραίωσης και την ίδια ταχύτητα συγκόλλησης, ένταση ρεύματος ίση με 80A θα δώσει το καλύτερο αποτέλεσμα, ενώ ένταση 70A χαμηλό ποσοστό φερριτή και ενδεχομένως να μην προστατεύσει την συγκόλληση από τη θερμή ρηγμάτωση, όπως ακριβώς παρουσιάζεται και στο Σχήμα 36. Σε αυτό το σχήμα φαίνεται πως η τιμή του ποσοστού του φερριτή μειώνεται όσο αυξάνει η ένταση του ρεύματος από τα 60A στα 70A. Από την τιμή αυτή και μετά, το ποσοστό αυξάνει και παίρνει τη μέγιστη τιμή του για ένταση ρεύματος ίση με 80A (Πίνακας 5). Δηλαδή για καλύτερη προστασία από το φαινόμενο της θερμής ρηγμάτωσης, είναι προτιμότερη η επιλογή εντάσεων ρεύματος κοντά στα όρια της έντασης του ηλεκτροδίου, σε σχέση με τιμές έντασης που προσεγγίζουν μία μέση τιμή.

Πίνακας 5 (Ποσοστά φερριτή στην περιοχή της συγκόλλησης δοκιμών συναρτήσει της έντασης του ρεύματος)

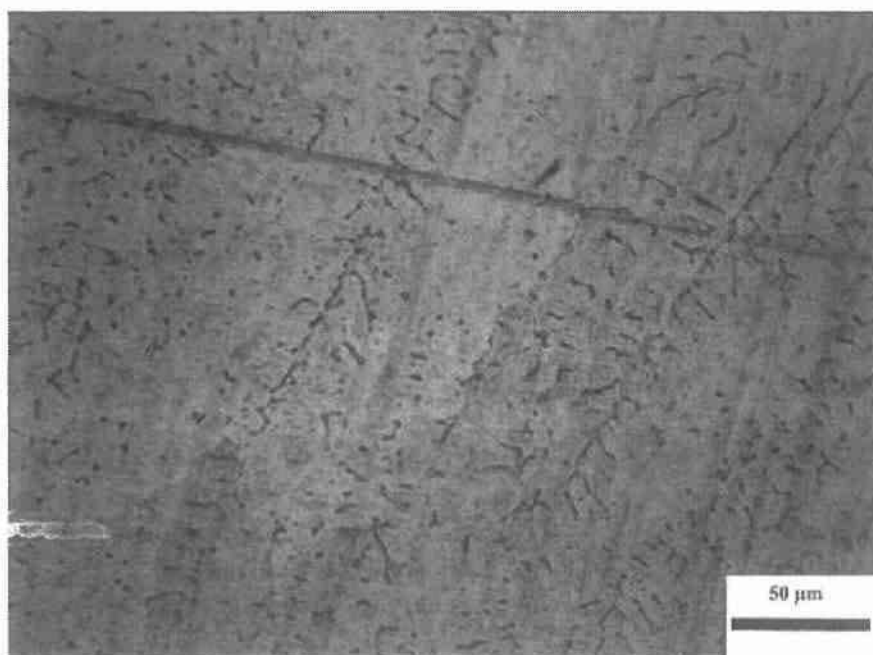
ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΦΕΡΡΙΤΗ (%)
60	6.289
70	5.88
80	6.7



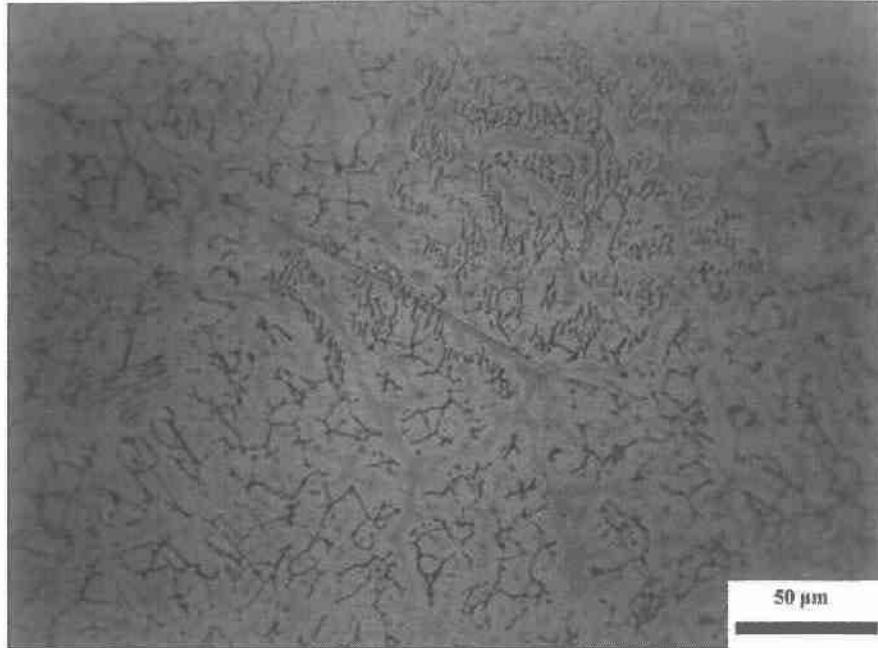
Σχήμα 36 (Διακύμανση ποσοστού δ-φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης συναρτήσει του ρεύματος)

4.1.4 Διερεύνηση δ-φερρίτη:

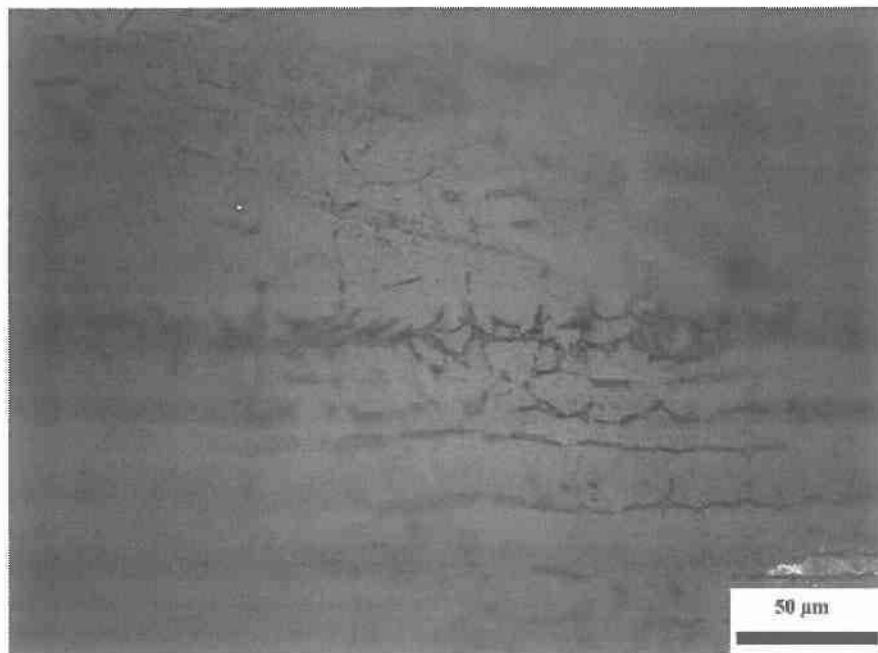
Για τη διερεύνηση του είδους του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης, θα χρησιμοποιηθούν οι φωτογραφίες των δοκιμίων, αλλά με μεγάλες μεγεθύνσεις στο μικροσκόπιο. Στις επόμενες σελίδες (Σχήματα 37-39) παρουσιάζονται οι φωτογραφίες τις μικροδομής για διαφορετικές εντάσεις ρεύματος.



Σχήμα 37 (Φωτογραφία δοκιμίου συγκολλημένου στα 60Α)



Σχήμα 38 (Φωτογραφία δοκιμίου συγκολλημένου στα 70Α)



Σχήμα 39 (Φωτογραφία δοκιμίου συγκολλημένου στα 80Α)

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από την παρατήρηση των τριών φωτογραφιών και σε σύγκριση με τη φωτογραφία που λειτουργεί ως πρότυπο και βρίσκεται στο κεφάλαιο των πειραματικών διαδικασιών (Σχήμα 22), η μορφολογία του δ-φερρίτη και στις τρεις συγκολλήσεις, είναι ενδοδενδριτικός φερρίτης (interdendritic ferrite). Οι συγκολλήσεις δηλαδή ανοξειδωτων ωστενιτικών χαλύβων που πραγματοποιούνται με ηλεκτρόδιο ωστενιτικού χάλυβα πλουσιότερου σε χρώμιο, δίνουν μορφολογία ενδοδενδριτικού φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης. Επίσης όπως φαίνεται και από τα τρία Σχήματα (37-39) υπάρχει δ-φερρίτης στην περιοχή αυτή στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

4.2 Εκτίμηση δ-φερρίτη από διάγραμμα Schaeffler:

Σε αυτό το σκέλος της εργασίας έγινε χρήση του διαγράμματος Schaeffler και ο υπολογισμός του ποσοστού του δ-φερρίτη με τη βοήθεια αυτού. Ως βασικό μέταλλο χρησιμοποιήθηκε ανοξειδωτος ωστενιτικός χάλυβας κατηγορίας 304, ενώ ως σύσταση για το ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε η σύσταση ανοξειδωτου χάλυβα κατηγορίας 308.

Αναλυτικότερα στον Πίνακα 6 ακολουθούν οι γενικές συστάσεις των δύο προαναφερθέντων χαλύβων: [15]

Πίνακας 6 (Συστάσεις ανοξειδωτων χαλύβων St304 και St308)

ΣΤΟΙΧΕΙΑ	ΧΑΛΥΒΑΣ 304	ΧΑΛΥΒΑΣ 308
Fe		67.9%
C	<0.08%	0.043%
Cr	17.5-20%	20%
Ni	8-11%	10%
Mn	<2%	1.96%
Si	<1%	0.062%
P	<0.045%	0.011%
S	<0.03%	0.015%

Παρατηρήσεις:

- Το ποσοστό του σιδήρου στον χάλυβα 304 θα υπολογιστεί, αφού πρώτα προσδιοριστούν τα ποσοστά όλων των υπολοίπων μετάλλων.
- Για τον υπολογισμό του φερρίτη θα πρέπει να δοθούν συγκεκριμένες τιμές όσον αφορά τον χάλυβα 304. Για τον λόγο αυτό στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται τα ποσοστά των μετάλλων που συμμετέχουν στο κράμα και οι συστάσεις τους.

Πίνακας 7 (Σύσταση ανοξείδωτου χάλυβα St304 με τις επιλεγμένες τιμές των κραματικών στοιχείων)

C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
0.08%	18%	8%	1.7%	0.07%	0.04%	0.02%

Στη συνέχεια, θα χρειαστεί για τη σωστή προσομοίωση να εισαχθεί και το φαινόμενο της αραίωσης. Έχει παρατηρηθεί πως της περισσότερες συγκολλήσεις το ποσοστό της αραίωσης προσεγγίζει ένα μία τιμή της τάξεως 60%. Επομένως και στην περίπτωση η οποία μελετάται θα χρησιμοποιηθεί το ποσοστό αυτό.

Στο Κεφάλαιο 2 (Παράγραφος 2.5) , η αραίωση εκφράστηκε ως ο λόγος του βασικού μετάλλου που τήκεται και συμμετέχει στο μέταλλο συγκόλλησης της το βάρος του μετάλλου συγκόλλησης. Επομένως χρησιμοποιείται η σχέση:

$$D = \frac{a}{(a+b)} \times 100 \Leftrightarrow 60 = \frac{a}{(a+b)} \times 100 \Leftrightarrow \frac{a}{b} = 1.5$$

Στην παραπάνω σχέση, ως a ορίζεται το βασικό μέταλλο (ανοξείδωτος χάλυβας 304) στη συγκόλληση και ως b το μέταλλο από το ηλεκτρόδιο της συγκόλλησης (ανοξείδωτος χάλυβας 308).

Στη συνέχεια και με σκοπό την εύρεση της περιεκτικότητας του μετάλλου συγκόλλησης για τα στοιχεία των Πινάκων 6 και 7 τα οποία της ενδιαφέρουν για τον υπολογισμό των ισοδυνάμων χρωμίου και νικελίου θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος:

$$X_{MS} = \frac{aX_a + bX_b}{a+b}$$

Στον παραπάνω τύπο τα στοιχεία X_{MS} , X_a και X_b εκφράζουν την περιεκτικότητα (%κ.β.) του στοιχείου στην περιοχή της συγκόλλησης, στον χάλυβα 304 και στον χάλυβα 308 αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται είναι:

$$X_{Cr} = \frac{18a + 20b}{a+b} = \frac{27b + 20b}{2.5b} = 18.8\% \text{ Cr}$$

$$X_{Ni} = \frac{8a + 10b}{a + b} = \frac{12b + 10b}{2.5b} = 8.8\% \text{ Ni}$$

$$X_C = \frac{0.08a + 0.043b}{a + b} = \frac{0.12b + 0.043b}{2.5b} = 0.0652\% \text{ C}$$

Άρα

$$X_{Fe} = 100\% - 18.8\% \text{ Cr} - 8.8\% \text{ Ni} - 0.0652\% \text{ C} = 72.33\% \text{ Fe.}$$

Πίνακας 8 (Σύσταση μετάλλου συγκόλλησης μετά την εισαγωγή της αραίωσης)

ΣΥΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ			
Cr	Ni	C	Fe
18.8%	8.8%	0.0652%	72.33%

Οι τιμές του Πίνακα 8 αντιστοιχούν στα ποσοστά των χρωμίου, νικελίου, άνθρακα και σιδήρου, τα οποία έχει το μέταλλο στην περιοχή της συγκόλλησης, μετά τη συμμετοχή του βασικού μετάλλου και του ηλεκτροδίου και την ύπαρξη του φαινομένου της αραίωσης. Παρατηρείται πως τις υπολογισμούς χρησιμοποιούνται μόνο τα παραπάνω στοιχεία και όχι όλα τα υπόλοιπα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ιδιότητες οι οποίες εξετάζονται εξαρτώνται στον μεγαλύτερο βαθμό από τα στοιχεία αυτά. Τα υπόλοιπα μέταλλα δεν θα επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια για τη χρήση του διαγράμματος Schaeffler θα χρειαστεί ο υπολογισμός του ισοδυναμίου του χρωμίου και του ισοδυναμίου του νικελίου. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν δύο σχέσεις οι οποίες συσχετίζουν τις συστάσεις των διαφόρων στοιχείων του χάλυβα. Συγκεκριμένα:

$$\text{Nickel Equivalent} = \%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \%Mn$$

$$\text{Chromium Equivalent} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb$$

Συνεπώς:

$$(Cr)_{eq} = \%Cr = 18.8$$

$$(Ni)_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C = 8.8 + 30 \times 0.0652 = 10.756$$

Στο επόμενο βήμα, τα ισοδύναμα χρωμίου και νικελίου θα τοποθετηθούν στο διάγραμμα Schaeffler τις άξονες x και γ αντίστοιχα. Από τις δύο άξονες σχεδιάζονται κάθετες σε τις ευθείες και βρίσκεται το σημείο τομής των δύο αυτών

ευθειών. Τέλος και σύμφωνα με τη διαγράμμιση και την αρίθμηση του διαγράμματος υπολογίζεται με σχετική ακρίβεια το ποσοστό φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η συχνότερη τιμή της αραίωσης για μία συγκόλληση κυμαίνεται στο 60% περίπου. Στη συνέχεια τις θα δόθηκαν για υπολογισμό διάφορες τιμές αραίωσης, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και τον προσδιορισμό των αποκλίσεων που μπορεί να προκύψουν εάν μεταβληθεί η γεωμετρία της συγκόλλησης ή η σύσταση του ηλεκτροδίου έτσι ώστε να αλλάξει η αραίωση.

4.2.1 Αραίωση 5%

Στην περιγραφή του προβλήματος αναφέρθηκε πως χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο διαφορετικής σύστασης σε σχέση με το βασικό μέταλλο. Στην περίπτωση τις την οποία δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ βασικού μετάλλου και ηλεκτροδίου συγκόλλησης, τότε η συγκόλληση είναι ομογενής και παρουσιάζεται το φαινόμενο της αραίωσης σε πολύ μικρό βαθμό. Με τα δεδομένα αυτά και με τη βοήθεια του διαγράμματος Schaeffler θα προσδιοριστεί η ύπαρξη φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης και το ποσοστό αυτού. Η χρήση τις τόσο μικρού ποσοστού γίνεται για να έχουμε αποτελέσματα που να πλησιάζουν όσο το δυνατόν περισσότερο το μηδενικό ποσοστό αραίωσης.

Χρησιμοποιώντας τις δοθέντες τύπους έχουμε:

$$D = \frac{a}{a+b} \times 100 \Leftrightarrow 5 = \frac{a}{a+b} \times 100 \Leftrightarrow \frac{a}{b} = 0.0527$$

και

$$X_{Cr} = \frac{18a + 20b}{a+b} = \frac{0.9486b + 20b}{1.0527b} = 19.89\%Cr$$

$$X_{Ni} = \frac{8a + 10b}{a+b} = \frac{0.4216b + 10b}{1.0527b} = 9.89\%Ni$$

$$X_C = \frac{0.08a + 0.043b}{a+b} = \frac{4.216 \times 10^{-3}b + 0.043b}{1.0527b} = 0.0449\%C$$

άρα

$$X_{Fe} = 100\% - 19.89\% Cr - 9.89\% Ni - 0.0449\% C = 70.17\% Fe.$$

Τα δύο ισοδύναμα υπολογίζονται:

$$(Cr)_{eq} = \%Cr = 19.89$$

$$(Ni)_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C = 9.89 + 30 \times 0.0449 = 11.237$$

4.2.2 Διασπορά αποτελεσμάτων συναρτήσεως των τιμών αραίωσης

Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση σχετικά με τις μεταβάλλεται το ποσοστό του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης συναρτήσεως τις αραίωσης υπολογίζουμε τα ισοδύναμα και τη θέση τις στο διάγραμμα και για τις τιμές.

Αραίωση 20%

$$D = \frac{a}{a+b} \times 100 \Leftrightarrow 20 = \frac{a}{a+b} \times 100 \Leftrightarrow \frac{a}{b} = 0.25$$

και

$$X_{Cr} = \frac{18a + 20b}{a+b} = \frac{4.5b + 20b}{1.25b} = 19.6 \%Cr$$

$$X_{Ni} = \frac{8a + 10b}{a+b} = \frac{2b + 10b}{1.25b} = 9.6 \%Ni$$

$$X_c = \frac{0.08a + 0.043b}{a+b} = \frac{0.02b + 0.043b}{1.25b} = 0.05 \%C$$

$$X_{Fe} = 100\% - 19.6\% Cr - 9.6\% Ni - 0.05\% C = 70,75\% Fe.$$

Ισοδύναμα χρωμίου και νικελίου:

$$(Cr)_{eq} = \%Cr = 19.6$$

$$(Ni)_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C = 9.6 + 30 \times 0.05 = 11.1$$

Αραιώση 40%

$$D = \frac{a}{a+b} \times 100 \Leftrightarrow 40 = \frac{a}{a+b} \times 100 \Leftrightarrow \frac{a}{b} = 0.6$$

και

$$X_{Cr} = \frac{18a + 20b}{a+b} = \frac{10.8b + 20b}{1.6b} = 19.25\%Cr$$

$$X_{Ni} = \frac{8a + 10b}{a+b} = \frac{4.8b + 10b}{1.6b} = 9.25\%Ni$$

$$X_c = \frac{0.08a + 0.043b}{a+b} = \frac{0.048b + 0.043b}{1.6b} = 0.056\%C$$

$$X_{Fe} = 100\% - 19.25\% Cr - 9.25\% Ni - 0.056\% C = 71.44\% Fe.$$

Ισοδύναμα χρωμίου και νικελίου:

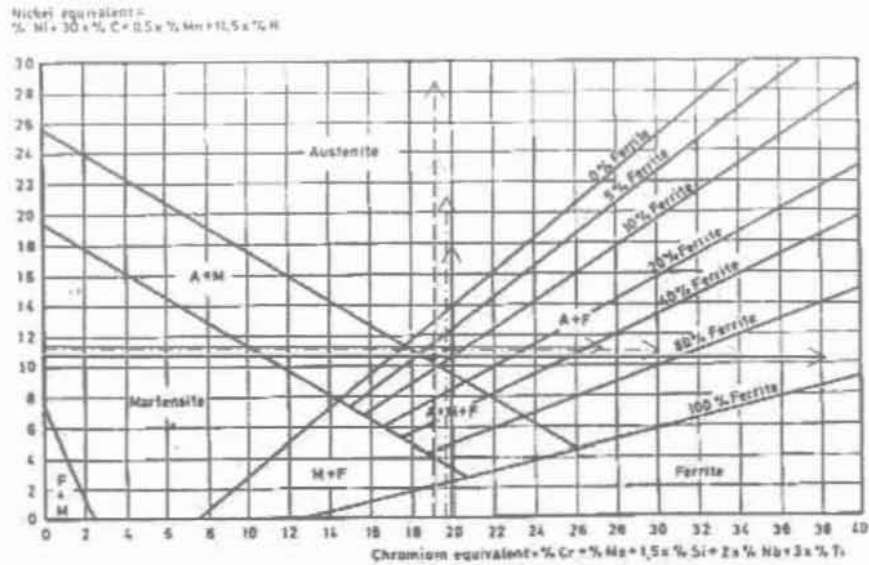
$$(Cr)_{eq} = \%Cr = 19.25$$

$$(Ni)_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C = 9.25 + 30 \times 0.056 = 10.93$$

Στον Πίνακα 9 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών και το διάγραμμα Schaeffler με τα ποσοστά του φερρίτη που προέκυψαν από τις διάφορες τιμές των αραιώσεων, ενώ στο Σχήμα 40 οι τομές των ευθειών των ισοδυνάμων για τις υπολογισμένες τιμές.

Πίνακας 9 (Ισοδύναμα του χρωμίου και του νικελίου συναρτήσει του ποσοστού της αραιώσης)

Αραιώσεις	a/b	Cr _{eq}	Ni _{eq}
5%	0.0527	19.89	11.237
20%	0.25	19.6	11.1
40%	0.6	19.25	10.93
60%	1.5	18.8	10.756

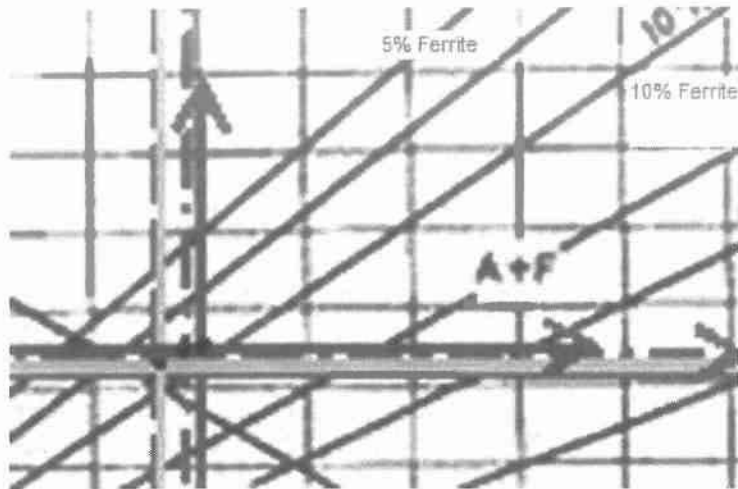


Σχήμα 40 (Διάγραμμα Schaeffler με σχεδιασμένες τις τομές των ευθειών των δύο ισοδυνάμων για διαφορετικές αραιώσεις)

Υπόμνημα 1 (Επεξήγηση του Σχήματος 40)

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ 40		
ΑΡΑΙΩΣΗ		ΧΡΩΜΑ ΒΕΛΟΥΣ
5%		→
20%		→
40%		→
60%		→

Όπως παρατηρείται, στο δεξί μέρος του Σχήματος 40 βρίσκονται άξονες οι οποίοι αναγράφουν το ποσοστό του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης. Για να μην εμφανιστεί το φαινόμενο της θερμής ρηγμάτωσης στην περιοχή της συγκόλλησης, θα πρέπει το ποσοστό του φερρίτη να κυμαίνεται μεταξύ 5% και 10%. Ουσιαστικά δηλαδή θα πρέπει οι τομές των ευθειών των δύο ισοδυνάμων (χρωμίου και νικελίου) να βρίσκονται μέσα στην περιοχή που ορίζουν ο άξονας (5% Ferrite) και ο άξονας (10% Ferrite). Για την καλύτερη κατανόηση του σχήματος, ακολουθεί μεγέθυνση της περιοχής μεταξύ των δύο αξόνων στο Σχήμα 41.



Σχήμα 41 (Μεγέθυνση της περιοχής του διαγράμματος Schaeffler ανάμεσα στα ποσοστά φερρίτη 5% και 10%)

Από το Σχήμα 41, διαπιστώνεται πως και για τις τέσσερις τιμές της αραίωσης, το σημείο τομής των ευθειών βρίσκεται ανάμεσα στα επιθυμητά όρια. Παρατηρείται όμως, πως όσο μειώνεται το ποσοστό της αραίωσης, τόσο το σημείο τομής των ευθειών των ισοδυνάμων μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Το γεγονός αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό εάν παρατηρήσουμε πως το κίτρινο βέλος που αντιπροσωπεύει αραίωση της τάξεως του 40%, είναι στα δεξιά του βέλους που αντιπροσωπεύει αραίωση της τάξεως 60%. Το ίδιο συμβαίνει και για τις υπόλοιπες τιμές, οι οποίες είναι όλες μικρότερες του 60%, κάτι που επαληθεύεται και αριθμητικά από τον Πίνακα 10 που μας δείχνει τα ισοδύναμα του χρωμίου και του νικελίου. Η μικρότερη αραίωση που έχει χρησιμοποιηθεί σε αυτούς τους υπολογισμούς είναι 5%. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει αραίωση, η τομή των δύο ευθειών βρίσκεται εκτός των συνόρων που ορίζουν οι προαναφερθέντες άξονες. Αυτό επαληθεύεται όχι μόνο γραφικά, αλλά και αριθμητικά (Πίνακας 10), όπου όσο μειώνεται η αραίωση, αυξάνει το Chromium equivalent του οποίου οι τιμές απεικονίζονται πάνω στον άξονα x του διαγράμματος Schaeffler.

Πίνακας 10 (Ισοδύναμα του χρωμίου και του νικελίου συναρτήσει του ποσοστού της αραίωσης)

Αραιώσεις	Cr_{eq}	Ni_{eq}
5%	19.89	11.237
20%	19.6	11.1
40%	19.25	10.93
60%	18.8	10.756

Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη του διαγράμματος είναι η ύπαρξη φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης. Της το ποσοστό του δ-φερρίτη στην περιοχή αυτή βρίσκεται ανάμεσα στα επιθυμητά όρια, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ενδεχόμενο σχηματισμού θερμής ρηγμάτωσης. Της το διάγραμμα Schaeffler δείχνει την ύπαρξη φερρίτη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύτηκε και στην πειραματική διαδικασία στην οποία ο μεταλλογραφικός προσδιορισμός της περιοχής της συγκόλλησης έδειξε την παρουσία ενδοδενδριτικού φερρίτη στην περιοχή αυτή.

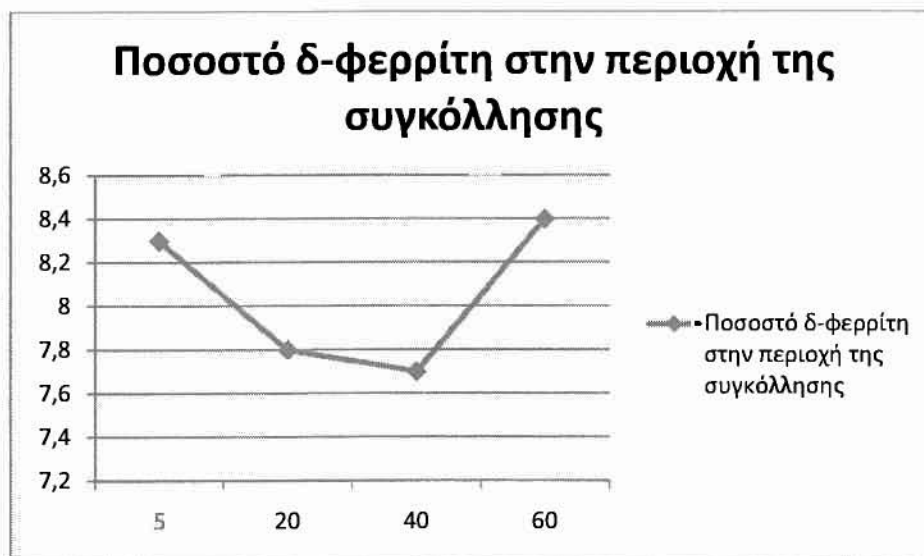
Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει είναι το πόσο σημαντικό ρόλο στη διαδικασία αυτή έχει το ηλεκτρόδιο από ανοξείδωτο χάλυβα 308. Είναι πιο πλούσιο σε χρώμιο και βοηθάει το μέταλλο στην περιοχή της συγκόλλησης να έχει τη μικροδομή αυτή. Όσο μειώνεται η αραίωση, δηλαδή η σύσταση του ηλεκτροδίου πλησιάζει τη σύσταση του μετάλλου βάσης, το ποσοστό του δ-φερρίτη αυξάνεται και πλησιάζει σε ποσοστό το 10%. Της έτσι μειώνεται η ολκιμότητα του κράματος, ενώ κινδυνεύει περισσότερο από το φαινόμενο της διάβρωσης. Ταυτόχρονα η τομή των ευθειών των δύο ισοδυνάμων μετατοπίζεται δεξιά στο διάγραμμα και κινδυνεύει να περάσει έξω από το σύνορο που ορίζει ο άξονας Ferrite10%. Επομένως είναι απαραίτητη η διαφορετική σύσταση μεταξύ ηλεκτροδίου και μετάλλου βάσης, ειδικά η περιοχή της συγκόλλησης μπορεί να εμφανίσει ρωγμές και της είναι το ποσοστό του φερρίτη μεγαλύτερο σε σχέση με τα ποσοστά που εμφανίζει ο δ-φερρίτης σε της τις περιπτώσεις που περιγράφονται πιο πριν.

Στη συνέχεια και με τη μελέτη του διαγράμματος Schaeffler παρουσιάζονται στον Πίνακα 11 τα εκτιμώμενα ποσοστά δ-φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης. Πρέπει βεβαίως πάλι να αναφερθεί πως η διαδικασία αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί τελείως ακριβής, λόγω της φύσης του διαγράμματος.

Πίνακας 11 (Εκτιμώμενο ποσοστό φερρίτη στο διάγραμμα Schaeffler συναρτήσει της αραίωσης)

ΑΡΑΙΩΣΗ	ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΟ ΠΟΣΟΣΤΟ δ-ΦΕΡΡΙΤΗ (%)
5%	8.2-8.4
20%	7.8-7.9
40%	7.7-8
60%	8.3-8.5

Τα στοιχεία του Πίνακα 11 παρουσιάζονται σχηματοποιημένα στο Σχήμα 42 που ακολουθεί.



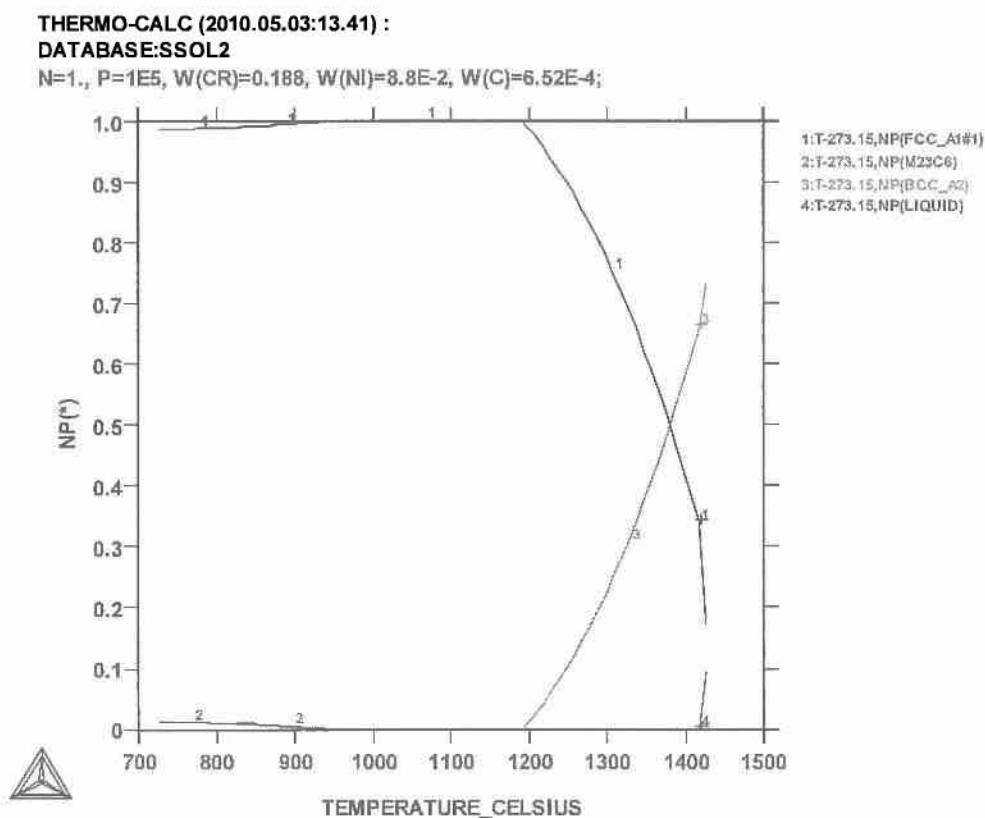
Σχήμα 42 (Εκτίμηση ποσοστού φερρίτη στο διάγραμμα Schaeffler συναρτήσει της αραίωσης)

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 42 οι τιμές του δ-φερρίτη ξεκινούν από ποσοστό κοντά στο 8.5%, ενώ πέφτουν περίπου 1%, όσο η αραίωση αυξάνεται μέχρι να πάρει τιμές κοντά στο 38-40%. Στη συνέχεια, το ποσοστό του δ-φερρίτη αυξάνει και παίρνει τιμές κοντά στο 8.5% για τιμή αραίωσης 60%. Ως μέση τιμή του ποσοστού δ-φερρίτη από το διάγραμμα υπολογίστηκε η τιμή 8.05%.

έχουν καθοριστεί, ενώ αυτό βέβαια συνεχίζει να ψύχεται μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

4.3.2 Διάγραμμα υπολογισμού φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης:

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 45), περιγράφεται η πορεία στερεοποίησης της λίμνης συγκόλλησης, η μικροδομή της περιοχής αυτής, καθώς επίσης και τα ποσοστά του φερρίτη, του ωστενίτη και της υγρής φάσης και οι μεταβολές αυτών συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 45 (Διάγραμμα υπολογισμού των ποσοστών των φάσεων συναρτήσει της θερμοκρασίας στην περιοχή της συγκόλλησης με το πρόγραμμα ThermoCalc)

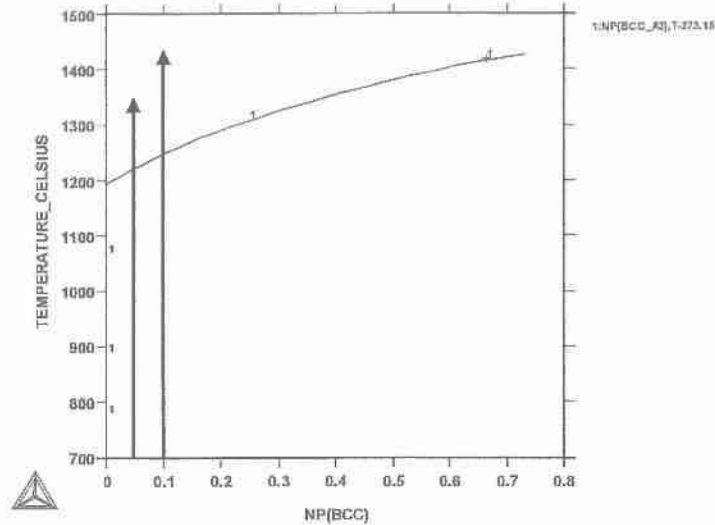
Ο άξονας x του διαγράμματος απεικονίζει τη θερμοκρασία μετρημένη σε βαθμούς κελσίου. Σε θερμοκρασία κοντά στους 1400 °C παρατηρείται πως η υγρή φάση (liquid-μπλε χρώμα) έχει πλέον ένα πολύ μικρό ποσοστό, περίπου 10%, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό, όπως φαίνεται με τιμή κοντά στο 75% είναι ο φερρίτης (BCC-πράσινο χρώμα). Το υπόλοιπο ποσοστό της μικροδομής έχει τη μορφή του ωστενίτη (FCC-μαύρο χρώμα). Βέβαια η υγρή φάση παύει να υπάρχει μετά από τους 1420 °C περίπου και πλέον έχουμε περάσει στη διφασική περιοχή του διαγράμματος φάσεων του κράματος αυτού.

Όσο η θερμοκρασία μειώνεται, τόσο περισσότερο ο ωστενίτης αυξάνει το ποσοστό του, εις βάρος του φερρίτη του οποίου το ποσοστό συνέχεια μειώνεται. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, σε θερμοκρασία κοντά στους 1350 °C οι ποσότητες αυτές εξισώνονται στο 50%. Αυτό σημαίνει πως στην περιοχή της συγκόλλησης υπάρχουν δύο φάσεις, ο ωστενίτης και ο δ-φερρίτης και είναι ισόποσες. Με την συνεχή πτώση της θερμοκρασίας, συνεχίζεται η μείωση του ποσοστού του φερρίτη, μέχρι και τον μηδενισμό του ποσοστού του λίγο πιο χαμηλά από τους 1200 °C. Από το σημείο αυτό και μέχρι περίπου τους 940 °C στην περιοχή της συγκόλλησης έχουμε 100% ποσοστό ωστενίτη. Στην προαναφερθείσα θερμοκρασία, κάνει την εμφάνιση του το καρβίδιο $M_{23}C_6$, που οφείλει την ύπαρξη του στα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία του χάλυβα. Το καρβίδιο αυξάνει ελάχιστα το ποσοστό του, παίρνοντας τελική τιμή περίπου 2%. Όλο το υπόλοιπο ποσοστό στην εξεταζόμενη περιοχή είναι ωστενίτης.

Το συμπέρασμα που εξάγεται με τη μελέτη του διαγράμματος, είναι πως υπάρχει η παρουσία φερρίτη στο διάγραμμα. Βέβαια όπως αναφέρθηκε το ποσοστό αυτό μηδενίζεται κάτω από μία θερμοκρασία. Αυτό που είναι πολύ σημαντικό όμως, είναι το να διαπιστωθεί πως στις κρίσιμες θερμοκρασίες, δηλαδή στα τελευταία στάδια της στερεοποίησης όπου και μπορεί να εμφανιστεί θερμή ρηγμάτωση, υπάρχει φερρίτης και μάλιστα σε ποσοστό ικανοποιητικό για να αποτρέψει το φαινόμενο αυτό. Για τον λόγο αυτό, στο Σχήμα 46 φαίνεται η πορεία του ποσοστού του φερρίτη απομονωμένη από όλες τις άλλες φάσεις.

Όπως διαπιστώνεται στο Σχήμα 46 από τα δύο παράλληλα βέλη που βρίσκονται κάθετα στον άξονα x του διαγράμματος, το ποσοστό του δ-φερρίτη, κυμαίνεται μεταξύ 5% και 10%, στο θερμοκρασιακό πεδίο 1220°C - 1250°C. Σε κρίσιμες δηλαδή θερμοκρασίες, επικίνδυνες για εμφάνιση θερμής ρηγμάτωσης, βλέπουμε πως υπάρχει δ-φερρίτης σε ικανό ποσοστό, έτσι ώστε η συγκόλληση να μην παρουσιάσει πρόβλημα.

THERMO-CALC (2010.05.06:14.30) :
DATABASE:SSOL2
N=1., P=1E6, W(CR)=0.188, W(NI)=8.8E-2, W(C)=6.62E-4;



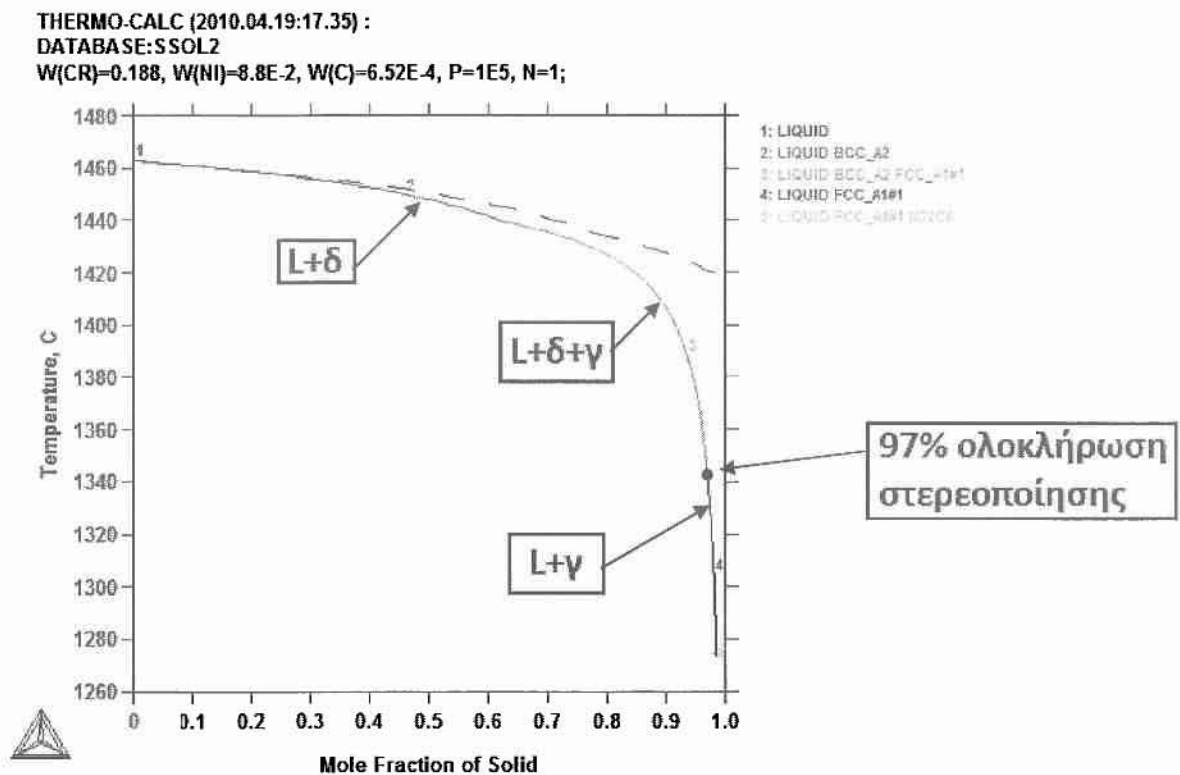
Σχήμα 46 (Διάγραμμα ποσοστού του δ-φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης συναρτήσει της θερμοκρασίας με το πρόγραμμα ThermoCalc)

Με τον υπολογισμό ισορροπίας, φαίνεται ότι υπάρχει ικανοποιητική ποσότητα φερρίτη κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, ώστε να αποφευχθεί η θερμή ρηγματώση. Όμως δεν προβλέπεται καθόλου φερρίτης στο μέταλλο συγκόλλησης, αφού έχει ολοκληρωθεί η συγκόλληση, σε αντίθεση με το διάγραμμα Schaeffler. Αυτό συμβαίνει διότι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με την υπόθεση της θερμοδυναμικής ισορροπίας, όπου η ψύξη είναι εξαιρετικά αργή.

Όπως όμως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, ο ρυθμός ψύξης στην περιοχή της συγκόλλησης είναι πολύ μεγάλος. Επομένως για να μπορέσει να γίνει μία απευθείας σύγκριση μεταξύ του ThermoCalc και του Schaeffler diagram θα πρέπει ο κώδικας να προσομοιώσει τη γρήγορη ψύξη του μετάλλου συγκόλλησης. Η παράμετρος της γρήγορης ψύξης, μπορεί να εισαχθεί μέσα στον κώδικα του ThermoCalc με το Scheil module.

4.3.3 Διάγραμμα Thermocalc με Scheil module:

Με το Scheil module, πραγματοποιείται προσομοίωση της στερεοποίησης του μετάλλου συγκόλλησης, με την υπόθεση ότι δεν υπάρχει διάχυση στο στερεό. Έτσι επιτυγχάνεται μία σημαντική απόκλιση από τη θερμοδυναμική ισορροπία. Στο διάγραμμα του Σχήματος 47 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η στερεοποίηση του μετάλλου στην περιοχή της συγκόλλησης, που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση της εξίσωσης Scheil για τη διάχυση, μέσω του Scheil module.



Σχήμα 47 (Διάγραμμα στερεοποίησης της περιοχής της συγκόλλησης σχεδιασμένο με το module Scheil του Thermocalc)

Το διάγραμμα του Σχήματος 47, περιγράφει την πορεία στερεοποίησης στην περιοχή της συγκόλλησης. Ο άξονας γ περιγράφει τη θερμοκρασία, σε θερμοκρασιακό πεδίο από 1480 °C μέχρι 1260 °C. Στον άξονα x απεικονίζεται το γραμμομοριακό κλάσμα του στερεού.

Μέχρι τους 1460 °C, η μόνη φάση η οποία συναντάται στη περιοχή της συγκόλλησης, είναι η υγρή φάση (συνεχής μαύρη γραμμή). Στη συνέχεια και μέχρι περίπου τη θερμοκρασία των 1440 °C, συνυπάρχουν η υγρή φάση, καθώς επίσης και δ-φερρίτης που έχει σχηματιστεί (κόκκινη γραμμή). Με τη βοήθεια του άξονα x βγαίνει το συμπέρασμα πως το υγρό και ο φερρίτης συνυπάρχουν μέχρι να στερεοποιηθεί το 60% περίπου του υγρού. Καθώς μειώνεται η τιμή της θερμοκρασίας, παρατηρούμε πως αρχίζει να σχηματίζεται ωστενίτης. Επομένως οι τρεις φάσεις συνυπάρχουν μέχρι το γραμμομοριακό κλάσμα του στερεού να έχει τιμή 97% (πράσινη καμπύλη). Όσο αυξάνεται το ποσοστό στερεοποίησης, ο δ-φερρίτης δίνει τη θέση του στον ωστενίτη που συναντάται μαζί με την υγρή φάση για ποσοστό στερεοποίησης από 97% έως 99% περίπου (μπλε γραμμή). Τέλος και μέχρι το υλικό στην περιοχή συγκόλλησης να στερεοποιηθεί τελείως, μπορούμε να δούμε πως έχουν σχηματιστεί και καρβίδια, εκτός από ωστενίτη και υγρό (γαλάζια γραμμή).

Αναλύοντας το διάγραμμα το κύριο συμπέρασμα το οποίο εξάγεται είναι το ότι πως υπάρχει δ-φερρίτης στην περιοχή της συγκόλλησης, από τη στιγμή που αυτή αρχίζει να στερεοποιείται. Μελετώντας τη σύσταση από το κέντρο προς τα σύνορα ενός κόκκου, μπορούμε να αναλύσουμε τη συμπεριφορά και τη σύσταση της μικροδομής μίας μεγαλύτερης περιοχής. Δηλαδή γίνεται κατανοητό πως μέχρι την στερεοποίηση περίπου του 97% του στερεού, υπάρχει φερρίτης στη μικροδομή, εμποδίζοντας την εμφάνιση της θερμής ρηγματώσης. Πάλι όμως δεν προβλέπεται φερρίτης στο μέταλλο συγκόλλησης μετά το πέρας της στερεοποίησης.

4.4.4 Διαγράμματα Dictra:

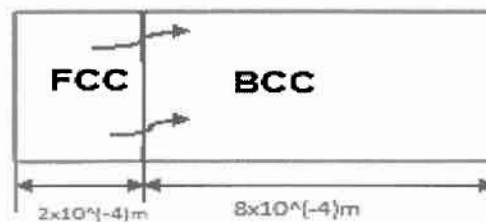
Αφού η περιοχή της συγκόλλησης μελετήθηκε με το πρόγραμμα Thermocalc και υπολογίστηκαν τα ποσοστά φερρίτη, καθώς επίσης και η συμπεριφορά της περιοχής αυτής κατά τη διάρκεια ενός γρήγορου ρυθμού ψύξης, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Dictra για τη μελέτη της κινητικής της αντίδρασης. Η κεντρική ιδέα πίσω από τη χρήση του προγράμματος αυτού, είναι να μελετηθεί, εάν είναι δυνατόν και πόσο χρόνο χρειάζεται η φερριτική μικροδομή να μετασχηματιστεί εξ'ολοκλήρου σε ωστενιτική δομή. Ουσιαστικά δηλαδή, το ζητούμενο του προβλήματος, είναι να διαπιστωθεί εάν αφήσουμε ωστενιτική δομή δίπλα σε φερριτική δομή για ένα χρονικό διάστημα, το ποσοστό του ωστενίτη που θα εισχωρήσει στην φερριτική περιοχή και το πόσο θα εισχωρήσει σε αυτήν.

Οι βασικές παράμετροι του προβλήματος και του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε είναι οι εξής:

- Θερμοκρασία
- Χρόνος
- Ρυθμός ψύξης
- Μέγεθος ωστενίτη
- Μέγεθος φερρίτη
- Γεωμετρία ωστενίτη
- Γεωμετρία φερρίτη

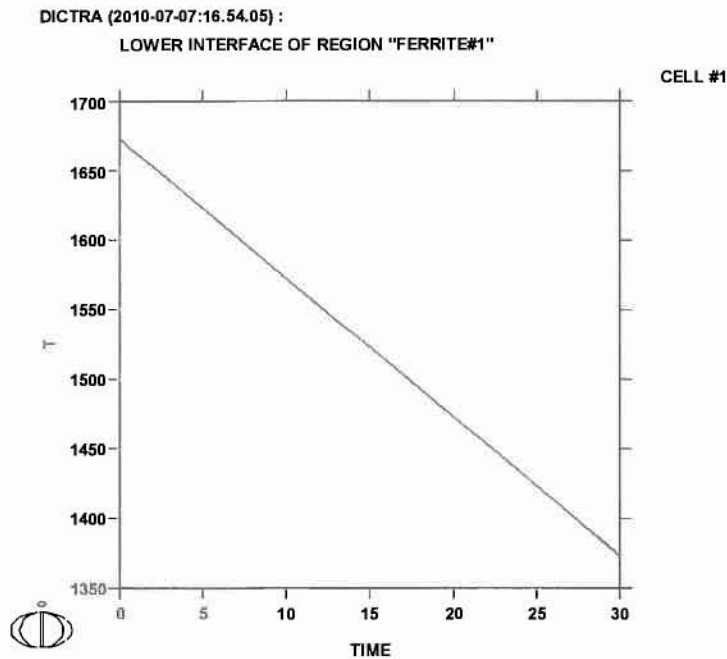
Για να μπορέσουν να προσομοιωθούν οι πραγματικές συνθήκες, όπως η περιοχή συγκόλλησης μεταξύ δύο ελασμάτων, θεωρήθηκε μία ορθογώνια πλάκα με πεπερασμένο μέγεθος, η οποία συμβολίζει τον φερρίτη. Στο αριστερό σύνορο της πλάκας θεωρήθηκε μία πολύ μικρότερη περιοχή με πεπερασμένο μέγεθος που συμβολίζει τον ωστενίτη. Και οι δύο περιοχές έχουν γεωμετρική δομή και οι φάσεις θεωρούνται ενεργές.

Πριν το πρόγραμμα Dictra ξεκινήσει να υπολογίζει την κινητική της αντίδρασης, θα πρέπει με τη χρήση βάσεων δεδομένων να μελετηθεί η θερμοδυναμική πλευρά του προβλήματος. Επομένως τα δύο προγράμματα συνεργάζονται, διότι το Dictra δεν μπορεί να υπολογίσει διαγράμματα και ποσοστά φάσεων. Στη συνέχεια δίνεται στο κώδικα ο ρυθμός και το βήμα της ψύξης, καθώς επίσης και ο επιθυμητός χρόνος που ζητείται η εξομοίωση από τον χρήστη. Η εξομοίωση αυτή πραγματοποιείται σε βάσεις δεδομένων του Dictra. Στο Σχήμα 48 επεξηγείται σχηματικά το πρόβλημα.



Σχήμα 48 (Γραφική αναπαράσταση του προβλήματος υπολογιστικής κινητικής με το πρόγραμμα Dictra)

Ως παράμετρος της θερμοκρασίας, θεωρήθηκε η περιοχή από 1673K έως 1373K, με ρυθμό ψύξης 10K/sec. Ο χρόνος προσομοίωσης ορίστηκε στα 30 sec και το διάγραμμα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 49.



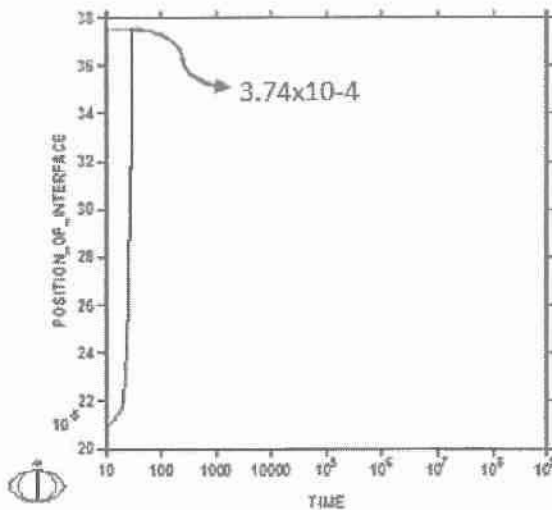
Σχήμα 49 (Μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου του προβλήματος υπολογιστικής κινητικής με το πρόγραμμα DICTRA)

Στη συνέχεια και με το πέρας της διαδικασίας της εξομοίωσης, το πρόγραμμα παράγαγε γράφημα (Σχήμα 50) το οποίο μας δείχνει πόσο έχει μετακινηθεί προς τα δεξιά το σύνορο μεταξύ ωστενίτη και φερρίτη συναρτήσει του χρόνου. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να βγει το συμπέρασμα του πόσο έχει εισχωρήσει ο ωστενίτης μέσα στην φερριτική περιοχή. Πρέπει να σημειωθεί πως ως αρχικές διαστάσεις για τις δύο περιοχές στα δεδομένα του κώδικα δόθηκαν οι $8 \times 10^{-4} \text{m}$ για τον φερρίτη και $2 \times 10^{-4} \text{m}$ για τον ωστενίτη.

DICTRA (2010-07-08:13:47 AG):

LOWER INTERFACE OF REGION "FERRITE#1"

CELL #1



Σχήμα 50 (Διάγραμμα που παρουσιάζει τη μετακίνηση του προφίλ του φερρίτη μετά το πέρας του χρόνου προσομοίωσης)

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα μετά το πέρας των 30 δευτερολέπτων που είχε οριστεί ως χρόνος ψύξης, το σύνορο του φερρίτη έχει μετατοπιστεί προς τα δεξιά. Η απόσταση προσδιορίζεται με αρκετή ακρίβεια στα $3.74 \times 10^{-4} \text{m}$. Ο χρόνος και ο ρυθμός ψύξης που επιλέχθηκαν, αντιστοιχούν στις πραγματικές τιμές που χρειάζεται η περιοχή μιας συγκόλλησης για να χαμηλώσει τη θερμοκρασία της από τους 1673K στους 1373K περίπου. Οι τιμές αυτές, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, είναι αυτές στις οποίες υπάρχει η μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανιστεί θερμή ρηγμάτωση. Με τους υπολογισμούς αυτούς φαίνεται ότι υπάρχει ποσοστό δ-φερρίτη αρκετό, έτσι ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός θερμής ρηγμάτωσης.

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον μεταλλογραφικό προσδιορισμό του δ-φερρίτη είναι αξιόπιστη.
- Ο ακριβής προσδιορισμός της αραίωσης είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό του ποσοστού του φερρίτη μέσω του διαγράμματος Schaeffler.
- Η ένταση του ρεύματος συγκόλλησης επηρεάζει το ποσοστό του δ-φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης.
- Το διάγραμμα Schaeffler μπορεί να εκτιμήσει με σχετική ακρίβεια το ποσοστό του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης.
- Τα προγράμματα υπολογιστικής θερμοδυναμικής και υπολογιστικής κινητικής μπορούν να προβλέψουν την παρουσία φερρίτη στα τελευταία στάδια της στερεοποίησης. Αδυνατούν όμως να προβλέψουν την παρουσία φερρίτη στο μέταλλο συγκόλλησης μετά το πέρας της συγκόλλησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]: ASM HANDBOOK VOLUME 1, PAGE 841 [WROUGHT STAINLESS STEELS (S.D WASKO AND G.AGGEN)]
- [2]: ASM HANDBOOK VOLUME 1, PAGE 842 [WROUGHT STAINLESS STEELS (S.D WASKO AND G.AGGEN)]
- [3]: ASM HANDBOOK VOLUME 1, PAGE 853 [WROUGHT STAINLESS STEELS, tensile properties (S.D WASKO AND G.AGGEN)]
- [4]: ASM HANDBOOK VOLUME 1, PAGE 871 [WROUGHT STAINLESS STEELS, effects of composition (S.D WASKO AND G.AGGEN)]
- [5]: ASM HANDBOOK VOLUME 1, PAGE 868 [WROUGHT STAINLESS STEELS, physical properties (S.D WASKO AND G.AGGEN)]
- [6]: ASM HANDBOOK VOLUME 6, PAGE 457 [SELECTION OF WROUGHT AUSTENITIC STAINLESS STEELS (JOHN A.BROOKS, JOHN C. LIPPOLD)]
- [7]: ASM HANDBOOK VOLUME 6, PAGE 457 [SELECTION OF WROUGHT AUSTENITIC STAINLESS STEELS (JOHN A.BROOKS, JOHN C. LIPPOLD)]
- [8]: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ, ΣΕΛΙΔΑ 106 [ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ, θερμή ρηγμάτωση (ΓΡΗΓΟΡΗΣ Ν. ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ)]
- [9]: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ, ΣΕΛΙΔΑ 113 [ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ, μετασχηματισμοί στο μέταλλο συγκόλλησης των ανοξείδωτων ωστενιτικών χαλύβων (ΓΡΗΓΟΡΗΣ Ν. ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ)]
- [10]: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ, ΣΕΛΙΔΑ 104 [ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ, αραιώση (ΓΡΗΓΟΡΗΣ Ν. ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ)]
- [11]: (www.bssa.org.uk/topics.php?article=121)
- [12]: (www.gietech.be/LinkClick.aspx?fileticket=HJmiFOYi0RA%3D&tabid=111&mid=539)
- [13]: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY 194(2007), PAGE 66 [MODELLING OF MICROSEGREGATION AND HOMOGENIZATION OF 6061 EXTRUABLE Al-ALLOY, results (S.N. SAMARAS, G.N. HAIDEMENOPOULOS)]
- [14]: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ, ΣΕΛΙΔΑ 104 [ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ, αραιώση (ΓΡΗΓΟΡΗΣ Ν. ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ)]

[15]: (www.kaker.com/std/ctt/html/2857.html)

[16]: (WWW.THERMOCALC.COM)

[17]: ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ/ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ, ΣΕΛΙΔΑ 406 [ΥΛΙΚΟ ΑΠΟ ΤΗ ΣΚΕΨΗ, υπολογιστική θερμοδυναμική των κραμάτων-Η μέθοδος CALPHAD (ΓΡΗΓΟΡΗΣ Ν. ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ)]

[18]: ([en.wikipedia.org/wiki/gibbs free energy](http://en.wikipedia.org/wiki/gibbs_free_energy))

[19]: (www.thermocalc.com/dictra)

[20]: ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ/ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ, ΣΕΛΙΔΑ 412 [ΥΛΙΚΟ ΑΠΟ ΤΗ ΣΚΕΨΗ, υπολογιστική θερμοδυναμική των κραμάτων-Η μέθοδος CALPHAD (ΓΡΗΓΟΡΗΣ Ν. ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ)]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΩΝ

ΚΩΔΙΚΑΣ Νο1

Διάγραμμα φάσεων

Ο κώδικας που ακολουθεί αφορά το πρόγραμμα Thermocalc και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του διαγράμματος φάσεων (Σχήμα 44).

LOGFILE GENERATED ON PC/WINDOWS NT DATE 2010- 3- 8

go data

def-sys

fe c cr ni

rej-ph /all

restore

phases

bcc fcc m7 m23

get-data

go poly

set-condition t=1100, n=1, p=1e5, w(fe)=72.33e-2, w(c)=0.0652e-2

l-c

set-condition w(cr)=18.8e-2

l-c

s-a-v

1

cr

s-a-v

1

w(cr)

0

1

.025

s-a-v

2

t

600

1600

25

c-e

l-e

SCREEN

VWCS

map

post

s-d-a

x

w-p cr

s-d-a

y

temperature-c

set-label

f

plot

SCREEN

```
set-interactive
```

```
exit
```

ΚΩΔΙΚΑΣ Νο2

Υπολογισμός ποσοστού φερρίτη

Ο κώδικας που ακολουθεί, αναφέρεται στο πρόγραμμα Thermostat και χρησιμοποιήθηκε για το διάγραμμα υπολογισμού του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης (Σχήμα 45).

```
LOGFILE GENERATED ON PC/WINDOWS NT DATE 2010- 2-24
```

```
go data
```

```
def-sys
```

```
fe c cr ni
```

```
rej-ph /all
```

```
restore
```

```
phases
```

```
bcc fcc m23 m7 liq
```

```
get-data
```

```
go poly
```

```
set-condition n=1, t=1100, p=1e5
```

```
l-c
```

```
set-condition w(cr)=18.8e-2, w(ni)=3.8e-2, w(c)=0.0652e-2
```

```
l-c
```

```
s-a-v
```

```
1
```

t

1000

1700

17.5

c-e

l-e

file

VWCS

step

NORMAL

post

s-d-a

x

np(*)

*

s-d-a

y

temperature-c

set-label

f

plot

SCREEN

s-s

x

N

700

```
1500
plot
SCREEN
set-interactive
exit
```

ΚΩΔΙΚΑΣ Νο3

Διάγραμμα (Scheil)

Ο κώδικας Νο3 χρησιμοποιήθηκε από το πρόγραμμα Thermocalc για τη δημιουργία του διαγράμματος που περιγράφει τη στερεοποίηση την περιοχή της συγκόλλησης με απουσία διάχυσης (Σχήμα 47).

```
LOGFILE GENERATED ON PC/WINDOWS NT  DATE 2010- 4-19
```

```
scheil
```

```
go scheil
```

```
1
```

```
SSOL2
```

```
fe
```

```
γ
```

```
cr
```

```
18.8
```

```
ni
```

```
8.8
```

```
c
```

```
0.0652
```


2000

*

liq bcc fcc m23 m7

NONE

Y

N

1

Y

NONE

N

N

Y

bs(fcc)

t

N

N

N

Y

bs(bcc)

t

N

N

N

Y

bs(m23)

```
t
N
N
N
Y
bs(m7)
bs(m7)

set-interactive

exit
```

ΚΩΔΙΚΑΣ Νο4

Κώδικας Dictra:

Με τη χρήση του κώδικα αυτού έγινε η μελέτη στο πρόγραμμα Dictra για τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της μετακίνησης των προφίλ του ωστενίτη και του φερρίτη στην περιοχή της συγκόλλησης (Σχήματα 49 και 50).

```
LOGFILE GENERATED ON PC/WINDOWS NT  DATE 2010- 7- 8
```

```
go da
def-sys fe c cr ni
rej-ph /all
res-ph fcc bcc
get
app
```

mob
def-sys fe c cr ni
rej-ph /all
res-ph fcc bcc
get
go d-m
set-cond
GLOBAL
t
0
1673-time*10;
30
y
1373;

N
enter-reg
ferrite
enter-reg
austenite
FERRITE
n
enter-grid
AUSTENITE
2e-4
geo

50

1.05

enter-grid

FERRITE

8e-4

geo

50

1.05

enter-ph

ACTIVE

AUSTENITE

MATRIX

fcc

1

enter-ph

ACTIVE

FERRITE

MATRIX

bcc

enter-comp

AUSTENITE

FCC_A1#1

fe

w-p

C

LINEAR

0.07

.07

CR

LINEAR

16

16

NI

LINEAR

11

11

enter-comp

FERRITE

BCC_A2

fe

w-p

C

LINEAR

0.0652

.0652

CR

LINEAR

19

19

NI

LINEAR

8.2

8.2

set-sim-time

30

YES

3

1E-07

1E-07

s-s-c

0

1

2

NO

ACTIVITIES

YES

YES

1

2

NO

YES

sim

YES

post

s-d-a

x

time

s-d-a

y
t
plot
s-p-c
interface
ferrite
LOWER
plot
SCREEN
set-axis-type x log
s-s-s x n 10 1e9
plot screen
s-d-a
y
position
ferrite
LOWER
plot screen
set-axis-type
x
LINEAR
plot
SCREEN
back
post
s-d-a y t

s-d-a x time

plot screen

s-p-c

INTERFACE

ferrite

s-p-c

INTERFACE

ferrite

plot

SCREEN

post

s-d-a y t

s-d-a x time

s-p-c

INTERFACE

ferrite

plot

plot

SCREEN

s-d-a

y

position

ferrite

plot screen

set-interactive

exit



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104082