

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕ ΘΕΜΑ

«ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΧΥΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ
ΑΠΟ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟ ΚΑΙ ΠΥΡΙΜΑΧΟ ΧΑΛΥΒΑ»

Του Φοιτητή Χαράλαμπου Θ. Νομίδη

Επιβλέπων Καθηγητής Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος

Βόλος, Σεπτέμβριος 1999



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

Αριθ. Εισ.: 795/1
Ημερ. Εισ.:
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
1999
NOM

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕ ΘΕΜΑ

«ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΧΥΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ
ΑΠΟ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟ ΚΑΙ ΠΥΡΙΜΑΧΟ ΧΑΛΥΒΑ»

Του Φοιτητή Χαράλαμπου Θ. Νομίδα

Επιβλέπων Καθηγητής Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος

Βόλος, Σεπτέμβριος 1999

αρ. εγρ 155 / Π.Α



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

004000046476

Αφιερώνεται στους φίλους μου και στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα απ'όλους τον καθηγητή μου κ. Γρ. Ν. Χαϊδεμενόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, τους υποψήφιους διδάκτορες Αντώνη Κατσαμά και Αποστόλη Βασιλάκο, χωρίς την συμβολή των οποίων δεν θα είχε ολοκληρωθεί η εργασία αυτή. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον υπεύθυνο του Εργαστηρίου Υλικών Χασιώτη Νίκο και τον συμφοιτητή μου Μικρόνη Κωνσταντίνο για το ενδιαφέρον τους σε όλη την προσπάθεια ολοκλήρωσής της.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του επιχειρησιακού προγράμματος έρευνας και τεχνολογίας ΠΑΒΕ σε συνεργασία με την εταιρεία GMC ABEE με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας των χυτών αντικειμένων από ανοξείδωτο και πυρίμαχο χάλυβα.

Μελετήθηκαν τρία είδη ανοξείδωτου χάλυβα και ενός πυρίμαχου σε ένα ευρύ φάσμα συστάσεων ο καθένας. Έγινε προσπάθεια για την ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων φάσεων με σκοπό την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού χυτού.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα υπολογιστικής θερμοδυναμικής ThermoCalc με την βοήθεια του οποίου εξετάστηκε καταρχήν η πορεία της στερεοποίησης και η επίδραση των κραματικών στοιχείων στην εξέλιξή της. Στη συνέχεια εξετάστηκαν τα διαγράμματα της κατανομής των φάσεων από την υγρή κατάσταση μέχρι την θερμοκρασία δωματίου.

Η τελική επιλογή της σύστασης για τον κάθε χάλυβα έγινε με βάση τους παρακάτω παράγοντες :

- ελαχιστοποίηση της σ-φάσης.
- ελαχιστοποίηση του φερρίτη (BCC)
- ελαχιστοποίηση του καρβιδίου $M_{23}C_6$
- μεγιστοποίηση του ωστενίτη

Έγινε τελικά βελτιστοποίηση των χαλύβων, επιλέγοντας τις συστάσεις από τον κάθε χάλυβα οι οποίες ικανοποιούσαν όσο το δυνατόν πιο πιστά τους παραπάνω περιορισμούς.

Προτείνεται τέλος η χύτευση των χαλύβων με βάση τις προτεινόμενες συστάσεις.

Πίνακας περιεχομένων

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.1 Γενικά	1
1.2 Διάγραμμα <i>Schaeffer</i>	1
1.3 Κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων	2
1.3.1 Φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες	2
1.3.2 Ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες	3
1.3.3 Μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες	4
1.3.4 Ανοξειδωτοι χάλυβες διπλής φάσης	5
1.3.5 Ανοξειδωτοι χάλυβες που υπόκεινται σε σκλήρυνση με καθίζηση	5
1.4 Σχηματισμός σ-φάσης ,καρβιδίων $M_{23}C_6$, M_7C_3	5
1.4.1 Η σ-φάση	5
1.4.2 Καρβίδιο $M_{23}C_6$	6
1.4.3 Καρβίδιο M_7C_3	7
1.5 Επίδραση των κραμματικών στοιχείων στις ιδιότητες του χάλυβα	7

2. Υπολογιστική θερμοδυναμική και το πρόγραμμα ThermoCalc

2.1 Υπολογιστική θερμοδυναμική κραμάτων	8
2.2 Σκοπός του <i>ThermoCalc</i>	9
2.3 Περιγραφή του <i>ThermoCalc</i>	10
2.4 Διαγράμματα και γραφικά	11
2.5 Βάσεις δεδομένων	11
2.5.1 Βάση δεδομένων SGTE Solution	12
2.5.2 Βάση δεδομένων SGTE substance	12
2.6 Προσομοίωση στερεοποίησης	13

3. Συλλογή δεδομένων

3.1 Κατηγορίες χαλύβων - συστάσεις	14
3.1.1 Χάλυβας 1	14
3.1.2 Χάλυβας 2	15
3.1.3 Χάλυβας 3	16

3.1.4 Χάλυβας 4	17
3.2 Μεθοδολογία αξιολόγησης των χαλύβων	18
4. Αποτελέσματα	
4.1 Χάλυβας 1	19
4.1.1 Προσομοίωση Scheil	19
4.1.2 Ποσοστά των φάσεων κατά την στερεοποίηση	20
4.1.2.1 Φερρίτης (BCC)	20
4.1.2.2 Ωστενίτης (FCC)	21
4.1.2.3 Καρβίδιο M_7C_3	22
4.1.2.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$	22
4.1.2.5 Ποσοστά του χρωμίου και νικελίου στην υγρή φάση	23
4.1.3 Περιγραφή των φάσεων στην ισορροπία	24
4.1.3.1 Φερρίτης (BCC)	24
4.1.3.2 σ-φάση	25
4.1.3.3 Ωστενίτης (FCC)	27
4.1.3.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$	28
4.1.4 Προσέγγιση του ποσοστού των φάσεων μέσω της κινούσας δύναμης	29
4.2 Χάλυβας 2	29
4.2.1 Προσομοίωση Scheil	29
4.2.2 Ποσοστά των φάσεων κατά την στερεοποίηση	30
4.2.2.1 Φερρίτης (BCC)	30
4.2.2.2 Ωστενίτης (FCC)	31
4.2.2.3 Καρβίδιο M_7C_3	32
4.2.2.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$	32
4.2.2.5 Ποσοστά του χρωμίου και νικελίου στην υγρή φάση	32
4.2.3 Περιγραφή των φάσεων στην ισορροπία	34
4.2.3.1 Φερρίτης (BCC)	34
4.2.3.2 Ωστενίτης (FCC)	35
4.2.3.3 σ-φάση	36
4.2.3.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$	37
4.2.4 Προσέγγιση του ποσοστού των φάσεων μέσω της κινούσας δύναμης	38
4.3 Χάλυβας 3	39

4.3.1 Προσομοίωση Scheil	39
4.3.2 Ποσοστά των φάσεων κατά την στερεοποίηση	39
4.3.2.1 Φερρίτης (BCC)	39
4.3.2.2 Ωστενίτης (FCC)	40
4.3.2.3 Καρβίδιο M_7C_3	41
4.3.2.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$	42
4.3.2.5 Ποσοστά του χρωμίου και νικελίου στην υγρή φάση	42
4.3.3 Περιγραφή των φάσεων στην ισορροπία	43
4.3.3.1 Φερρίτης (BCC)	44
4.3.3.2 σ-φάση	44
4.3.3.3 Ωστενίτης (FCC)	45
4.3.3.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$	46
4.3.4 Προσέγγιση του ποσοστού των φάσεων μέσω της κινούσας δύναμης	47
4.4 <i>Χάλυβας 4</i>	48
4.4.1 Προσομοίωση Scheil	48
4.4.2 Ποσοστά φάσεων κατά την στερεοποίηση	48
4.4.2.1 Φερρίτης(BCC)	48
4.4.2.2 Ωστενίτης(FCC)	49
4.4.2.3 Καρβίδιο M_7C_3	50
4.4.2.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$	51
4.4.2.5 Ποσοστά του χρωμίου και νικελίου στην υγρή φάση	51
4.4.3 Περιγραφή των φάσεων σε ισορροπία	53
4.4.3.1 Φερρίτης (BCC)	53
4.4.3.2 σ-φάση	54
4.4.3.3 Καρβίδιο $M_{23}C_6$	55
4.4.4 Προσέγγιση του ποσοστού των φάσεων μέσω της κινούσας δύναμης	55
5. Συμπεράσματα	
5.1 <i>Συμπεράσματα</i>	57
5.2 <i>Επιλογή τελικών συστάσεων</i>	58
5.3 <i>Προτάσεις</i>	58
6. Βιβλιογραφικές αναφορές	59
7. Παραρτήματα	60

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.1 Γενικά

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες είναι μια σημαντική κατηγορία των κραμάτων σιδήρου (βιομηχανικών κραμάτων) που χρησιμοποιούνται για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και σε πολλά περιβάλλοντα. Χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στις χημικές βιομηχανίες, βιομηχανίες χαρτιού, καυσίμων και βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας αλλά βρίσκουν χρήση σε πολλά καθημερινά οικιακά και εμπορικά προϊόντα. Κατά βάση, οι ανοξείδωτοι χάλυβες βασίζονται στα συστήματα Fe - Cr, Fe - Cr - C και Fe - Cr - Ni αλλά μπορούν να περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία που μεταβάλλουν την δομή τους. Η ανοξείδωτη φύση αυτών των χάλυβων προκύπτει από την προσθήκη του χρωμίου σε ποσότητες μεγαλύτερη από 11%. Αυτό το επίπεδο του χρωμίου εγγυάται ένα συνεχές προστατευτικό στρώμα οξειδίου του χρωμίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια. Συνήθως περιέχονται και μικρά ποσοστά ακαθαρσιών όπως 0.03 % S και 0.04 % P.

Ιστορικά οι ανοξείδωτοι χάλυβες έχουν καταταχθεί με βάση την δομή τους και περιγράφονται σαν μαρτενσιτικοί, φερριτικοί, ωστενιτικοί και διπλής φάσης (ωστενιτικοί - φερριτικοί). Επί πρόσθετα ένας αριθμός μαρτενσιτικών ημιωστενιτικών και ωστενιτικών χάλυβων που υπόκεινται σε σκλήρυνση με καθίζηση υπάρχουν και κατατάσσονται ξεχωριστά.

1.2 Διάγραμμα Schaeffer

Για να είμαστε σε θέση να ελέγξουμε την μικροδομή και τις ιδιότητες τους ένας αριθμός κραματικών στοιχείων προστίθενται στα βασικά συστήματα Fe - Cr, Fe - Cr - C και Fe - Cr - Ni όπως τιτάνιο, νιόβιο, μαγνήσιο, πυρίτιο και άζωτο. Για να μπορούμε να περιγράψουμε την επίδραση της σύστασης στην μικροδομή σε ένα ευρύ πλάτος των ανοξείδωτων χάλυβων η έννοια του ισοδύναμου χρωμίου και νικελίου αναπτύχθηκε για να ομαλοποιήσει

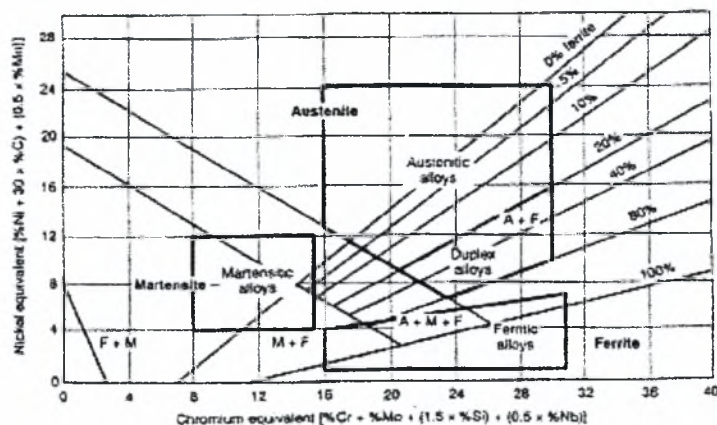
(κανονικοποιήσει) την επίδραση των κραματικών στοιχείων στην εξέλιξη της μικροδομής, σχετικά με τις επιδράσεις του χρωμίου και του νικελίου. Παριστάνοντας το ισοδύναμο χρώμιο και νικέλιο σε κάθετους άξονες παίρνουμε μια γραφική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ σύστασης και μικροδομής για τους ανοξειδωτους χάλυβες. Το διάγραμμα αυτό είναι γνωστό σαν διάγραμμα **Schaeffer** και αποτελεί τον χάρτη για τους ανοξειδωτους χάλυβες.

Υπολογίζοντας το ισοδύναμο Cr και Ni από τους τύπους

$$E_{Cr} = [\%Cr + \%Mo + (1.5\%Si) + (0.5\%Nb)]$$

$$E_{Ni} = [\%Ni + 3\%C + (0.5\%Mn)]$$

μπορούμε να βρούμε σε ποια κατηγορία χάλυβα από αυτούς που αναφέρθηκαν παραπάνω ανήκει το κράμα που μελετούμε.



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα Schaeffer

1.3 Κατηγορίες ανοξειδωτων χάλυβων

1.3.1 Φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες

Οι φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες είναι τόσο γνωστοί εξαιτίας της κρυσταλλικής δομής τους (bcc) η οποία είναι ίδια με αυτή του σιδήρου στην θερμοκρασία δωματίου.

Κατά την θέρμανση των ανοξειδωτων φερριτικών χάλυβων, επειδή οι χάλυβες αυτοί δεν υφίστανται αλλοτροπικό μετασχηματισμό, ευνοείται η αύξηση του μεγέθους των κόκκων, γεγονός που επιφέρει μείωση της μηχανικής τους αντοχής. Για παράδειγμα, η παρατεταμένη θέρμανση στους 475 °C, ενός ανοξειδωτου χάλυβα με ποσοστό χρωμίου 15 - 20 %, οδηγεί σε μείωση της δυσθραυστότητας λόγω του σχηματισμού της α' φάσης ενώ η παρατεταμένη

θέρμανση στους 550 - 800 °C ενός ανοξειδωτού χάλυβα με ποσοστό χρωμίου μεγαλύτερο από 20% κ.β οδηγεί σε παρόμοια αποτελέσματα λόγω του σχηματισμού της σ-φάσης.

Αυτά τα κράματα είναι μαγνητικά και δεν μπορούν να σκληρύνουν με θερμικές κατεργασίες. Γενικά οι χάλυβες αυτοί δεν έχουν ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή και η χαμηλή σκληρότητα και ευαισθησία τους περιορίζει την ευρεία χρήση και κατασκευή τους στην βιομηχανία. Τα κύρια πλεονεκτήματα τους είναι η αντοχή-αντίσταση σε όξινα περιβάλλοντα, ατμοσφαιρική διάβρωση και οξείδωση σε σχετικά χαμηλό κόστος. Οι φερριτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες περιέχουν 11-30% χρώμιο με μικρά μόνο ποσοστά στοιχείων που ευνοούν το σχηματισμό ωστενίτη όπως άνθρακας, άζωτο και νικέλιο. Η γενική χρήση τους εξαρτάται από το ποσοστό του χρωμίου.

α. Οι χαμηλά κραματωμένοι με χρώμιο χάλυβες (11%) έχουν μέτρια αντίσταση στην διάβρωση και οξείδωση αλλά καλή κατασκευαστικότητα σε σχετικά χαμηλό κόστος. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα εξάτμισης αυτοκινήτων.

β. Οι μεσαία κραματωμένοι με χρώμιο χάλυβες (16-18%) χρησιμοποιούνται για μαγειρικά σκεύη και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Αυτά τα κράματα δεν είναι και τόσο εύκολα στην κατεργασία τους όσο τα προηγούμενα εξαιτίας της χαμηλής σκληρότητας τους και δυσκολίας στην συγκόλληση.

γ. Οι υψηλά κραματωμένοι με χρώμιο χάλυβες (αναφέρονται σαν υπερφερριτικοί) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντίσταση στην διάβρωση και οξείδωση. Αυτά τα κράματα συχνά περιέχουν είτε αλουμίνιο είτε μολυβδένιο και πολύ μικρό ποσοστό άνθρακα. Διάφορα κραματικά στοιχεία όπως νιόβιο και τιτάνιο χρησιμοποιούνται ως σταθεροποιητές και βελτιώνουν τις ιδιότητες των συγκολλήσεων.

1.3.2 Ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες

Οι χάλυβες αυτοί αποτελούν την μεγαλύτερη αλυσίδα ανοξειδωτών κραμάτων με μεγάλο πλάτος χρήσεων και εφαρμογών. Όπως και οι φερριτικοί δεν μπορούν να σκληρύνουν με θερμικές κατεργασίες. Ωστόσο η ομοιότητα τους σταματά εκεί πέρα. Τα ωστενιτικά κράματα είναι μη μαγνητικά και η δομή τους είναι κυβική εδροκεντρωμένη (fcc) όπως αυτή του σιδήρου σε υψηλές θερμοκρασίες (900-1400). Κατέχουν εξαιρετική σκληρότητα (αντοχή), ευπλαστικότητα και ολκιμότητα ακόμα και σε συνθήκες πολύ χαμηλών θερμοκρασιών. Αν και το νικέλιο είναι το πρωταρχικό στοιχείο που χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση του ωστενίτη, άνθρακας και άζωτο χρησιμοποιούνται επίσης γιατί διαλύονται εύκολα στην fcc δομή. Εξισορροπώντας τα στοιχεία σχηματισμού φερριτη με αυτά του

ωστενίτη μπορούμε να πετύχουμε ένα ευρύ φάσμα αντοχής σε διάβρωση των κραμάτων αυτών.

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τα κράματα Cr - Ni και Cr - Mg - Ni.

Η δεύτερη κατηγορία γενικά περιέχει λιγότερο νικέλιο και διατηρεί την ωστενιτική δομή με υψηλά ποσοστά αζώτου. Το μαγγάνιο είναι απαραίτητο σε αυτά τα χαμηλά κραματωμένα με νικέλιο χάλυβες για να αυξήσει την διαλυτότητα του αζώτου στον ωστενίτη και να εμποδίσει τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Η προσθήκη αζώτου επίσης αυξάνει την αντοχή των ωστενιτικών κραμάτων. Άλλη μια ιδιότητα που εξαρτάται από την περιεκτικότητα του κράματος είναι η αντοχή στην διάβρωση. Υψηλά ποσοστά χρωμίου χρησιμοποιούνται σε οξειδωτικά περιβάλλοντα ενώ υψηλά ποσοστά νικελίου χρησιμοποιούνται σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα οξέων.

1.3.3 Μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες

Πρόκειται για χάλυβες με περιεκτικότητα σε χρώμιο μικρότερη του 17% και σε άνθρακα ως 0.5% κ.β. Είναι όμοιοι με τα κράματα Fe-C που ωστενιτοποιούνται ,σκληραίνουν με βαφή και έπειτα θερμαίνονται για να αυξήσουν την ολκιμότητα και δυσθραυστότητα τους. Τα κράματα αυτά είναι μαγνητικά και η δομή τους μετά την θερμική κατεργασία είναι τετραγωνική χωροκεντρωμένη. Η τελική αντοχή τους μετά την θερμική κατεργασία εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα του κράματος. Αυξάνοντας την περιεκτικότητα του άνθρακα αυξάνεται η αντοχή αλλά μειώνεται η δυσθραυστότητα και η ολκιμότητα. Η αντοχή σε φθορά των κραμάτων αυτών εξαρτάται πάρα πολύ από την περιεκτικότητα σε άνθρακα. Μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε άνθρακα ~ 1.1% ,οδηγούν στον σχηματισμό καρβιδίων, τα οποία δεσμεύουν χρώμιο, μειώνοντας την αντοχή του χάλυβα σε διάβρωση. Το νικέλιο μπορεί να προστεθεί στους χάλυβες αυτούς για να βελτιώσει τις ιδιότητες που σχετίζονται με την διάβρωση και την δυσθραυστότητα. Επίσης χρησιμοποιείται για να διατηρήσει την επιθυμητή μικροδομή αποτρέποντας υπερβολικά ποσά φερρίτη, ενώ υψηλά ποσοστά χρωμίου χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την αντοχή σε διάβρωση. Ωστόσο η προσθήκη αυτών των στοιχείων περιορίζεται πολλές φορές επειδή υψηλά ποσοστά έχουν σαν αποτέλεσμα δομή που δεν είναι πλήρως μαρτενσιτικοί.

1.3.4 Ανοξειδωτοι χάλυβες διπλής φάσης

Οι χάλυβες αυτοί είναι κράματα Cr - Ni - Mo και είναι ένα ισορροπημένο μίγμα ωστενίτη και φερρίτη μαζί. Η διπλή δομή τους έχει σαν αποτέλεσμα βελτιωμένη αντίσταση στην καταστροφή από εργοδιάβρωση ,συγκρινόμενη με τους ωστενιτικούς, και βελτιωμένη δυσθραυστότητα ,συγκρινόμενη με τους φερριτικούς. Η προσθήκη του αζώτου στους χάλυβες αυτούς μπορεί να αυξήσει το ποσό του ωστενίτη μέχρι και 50% σε ορισμένα κράματα. Η βελτίωση στην δυσθραυστότητα πιθανώς να σχετίζεται με το υψηλό ποσό του ωστενίτη που βρίσκουμε, που το κάνει δυνατόν να παράγει βαριά προϊόντα όπως μπάρες και ελάσματα.

1.3.5 Ανοξειδωτοι χάλυβες που υπόκεινται σε σκλήρυνση με καθίζηση

Πρόκειται για χάλυβες μικρού ποσοστού σε άνθρακα (1%) με 17% Cr, 8% Ni και 1% Al.

Είναι κράματα Cr - Ni που μπορούν να σκληρύνουν με διαδικασία τεχνητής γήρανσης. Κατατάσσονται σαν ωστενιτικοί, ημιωστενιτικοί και μαρτενσιτικοί. Η ταξινόμησή τους προσδιορίζεται από την πλήρως ανοπτημένη δομή τους. Ψυχρή κατεργασία μερικές φορές χρησιμοποιείται για να διευκολύνει την διαδικασία γήρανσης. Οι χάλυβες αυτοί έχουν γενικά καλή ολκιμότητα και δυσθραυστότητα. Ένας καλύτερος συνδυασμός αντοχής και αντίστασης στην διάβρωση επιτυγχάνεται σε σχέση με τους μαρτενσιτικούς. Αυτές οι βελτιωμένες ιδιότητες σχετίζονται με το υψηλό ποσοστό του άνθρακα, νικελίου και μολυβδενίου καθώς και με το χαμηλό ποσοστό του άνθρακα. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα ευθύνεται κυρίως για την καλή δυσθραυστότητα και ολκιμότητα. Ωστόσο η περιεκτικότητα αυτή μειώνει την αντοχή σε φθορά.

1.4 Σχηματισμός σ-φάσης , καρβιδίων $M_{23}C_6$, M_7C_3

1.4.1 σ - φάση (SIGMA PHASE)

Η ύπαρξη της σ - φάσης ανιχνεύθηκε για πρώτη φορά το 1907 με την παρατήρηση των θερμικών κύκλων (arrests) των καμπυλών ψύξης. Υποστηρίχθηκε ότι η θερμική υστέρηση οφειλόταν στον σχηματισμό της διαμεταλλικής ένωσης FeCr. Η πρώτη ανίχνευση της σ-φάσης με περίθλαση ακτίνων -X πραγματοποιήθηκε το 1927.

Η διαρκής μελέτη είχε ως αποτέλεσμα συνεχείς βελτιώσεις στο διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου - χρωμίου. Επίσης διαπιστώθηκε ότι η σ - φάση σχηματίστηκε σε θερμοκρασία 480 °C και σε κράμα με λιγότερο από 12% Cr.

Γενικά πάντως ο σχηματισμός της ευνοείται με παρατεταμένη θέρμανση σε θερμοκρασίες 565 - 980 °C, πρώτα αναπτυσσόμενη στα όρια των κόκκων, αν και το φάσμα της ποικίλει ανάλογα με την σύσταση και τη κατεργασία.

Η σ -φάση έχει τετραγωνική κρυσταλλική δομή με περίπου 30 άτομα / κυψελίδα και λόγο $c/a = 0.52$. Η σκληρότητά της υπολογίστηκε σε 68 HRC (980 HV). Εξαιτίας της ψαθυρής συμπεριφοράς της, η σ -φάσης θραύεται στις οδοντώσεις με τα αποτελέσματα να είναι ιδιαίτερα έντονα σε θερμοκρασία δωματίου.

1.4.2 Καρβίδιο $M_{23}C_7$

Το πιο συχνά παρατηρούμενο καρβίδιο στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες είναι το $M_{23}C_7$ που συχνά αναφέρεται και ως $Cr_{23}C_7$ αλλά πιο σωστά ως $(Fe,Cr)_{23}C_7$, $(Fe,Cr,Mo)_{23}C_7$. Ο σχηματισμός του στα όρια των κόκκων κατά την συγκόλληση έχει ως αποτέλεσμα την περικρυσταλλική διάβρωση.

Το θερμοκρασιακό πεδίο όπου πραγματοποιείται ο σχηματισμός του είναι 500 - 950 °C, με υψηλότερο ρυθμό στους 650 - 750 °C. Αρχικά σχηματίζεται στο σύνορο ωστενίτη - δ φερρίτη, μετέπειτα στα όρια των κόκκων και διδυμιών και τελικά στα όρια των διδυμιών.

Η μορφολογία του $M_{23}C_7$ μεταβάλλεται σύμφωνα με την θερμοκρασία και το χρόνο. Αρχικά, στις χαμηλότερες θερμοκρασίες, έχει μια λεπτή, συνεχή και σε σχήμα φύλλων μορφολογία. Στους 600 - 700 °C σχηματίζονται δενδρίτες. Σε ακόμη υψηλότερες θερμοκρασίες αναπτύσσεται στα σύνορα των κόκκων ως ξεχωριστά σφαιρικά σωματίδια που το σχήμα τους εξαρτάται από τον προσανατολισμό των κόκκων, τον βαθμό συνοχής τους και την θερμοκρασία.

Όταν αναπτύσσεται στα σύνορα διδυμιών έχει την μορφή πλακιδίων (plates) ή λωρίδων (lamellae).

Με μικρά ποσοστά τιτανίου και νιοβίου σχηματίζονται καρβίδια διαφορετικά από το $M_{23}C_7$. Προκειμένου να επωφεληθούμε των προσμίξεων αυτών, πραγματοποιείται θερμική κατεργασία σταθεροποίησης ώστε ο άνθρακας να σχηματίσει τα καρβίδια αυτά. Η κατεργασία αυτή αναφέρεται και ως τύπος -321- και διατηρεί τα δοκίμια σε θερμοκρασία 845 - 900 °C για αρκετές ώρες.

Εκτός από τα καρβίδια, σχηματίζονται επίσης και νιτρίδια, οπότε οι προσμίξεις τιτανίου και νιοβίου πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά. Τα νιτρίδια του τιτανίου και νιοβίου εμφανίζονται ως διακριτά, κίτρινου χρώματος, κυβικά σωματίδια, ενώ τα καρβίδια με γκρι χρώμα και κάπως ακανόνιστο σχήμα.

1.4.3 Καρβίδιο M_7C_3

Όπως και με το καρβίδιο $M_{23}C_7$, έτσι και το M_7C_3 είναι σωματίδιο δεύτερης φάσης με εξαγωνική δομή και διαστάσεις κυψελίδας ($a = 1.398 \text{ nm}$, $c = 0.4523 \text{ nm}$). Η ένωση που αναφέρεται πιο συχνά είναι η Cr_7C_3 και παρατηρείται κυρίως σε μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

1.5 Επίδραση των κραμματικών στοιχείων στις ιδιότητες του χάλυβα

Η επίδραση των κραμματικών στοιχείων συγκεντρώνεται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 1.2 Επίδραση των κραμματικών στοιχείων στις ιδιότητες του χάλυβα

στοιχείο	ιδιότητα	διαλυτότητα	επίδραση
C			
Ni	γ - φερρογόνο (ευνοεί την σταθεροποίηση του ωστενίτη)	10% στον α -Fe απεριόριστη στον γ -Fe	αύξηση εμβαιπτότητας, αντοχής σε διάβρωση, σε επαναφορά
Cr	α - φερρογόνο (ευνοεί την σταθεροποίηση του φερρίτη) σχηματίζει καρβίδια	απεριόριστη στον α -Fe 12.8% στον γ -Fe	μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας, της αντοχής και της δυσθραυστότητας και αντίστασης στην διάβρωση
Mn	γ - φερρογόνο (ευνοεί την σταθεροποίηση του ωστενίτη) σχηματίζει καρβίδια	3.8% στον α -Fe απεριόριστη στον γ -Fe	μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας και μείωση των M_s , M_f
Si	α - φερρογόνο (ευνοεί την σταθεροποίηση του φερρίτη) σχηματίζει γραφίτη	18.5% στον α -Fe 6% στον γ -Fe	μικρή αύξηση εμβαιπτότητας, αύξηση της σκληρότητας

Υπολογιστική θερμοδυναμική και το πρόγραμμα Thermo-Calc

2.1 Υπολογιστική θερμοδυναμική κραμάτων

Τα διαγράμματα ισορροπίας των φάσεων είναι ένα από τα πιο σημαντικά κεφάλαια της επιστήμης των υλικών. Τα διαγράμματα φάσεων αποτελούν γραφικές αναπαραστάσεις της θερμοδυναμικής ισορροπίας. Για το λόγο αυτό η μαθηματική επεξεργασία αρχίζει απαραίτητα από την συνθήκη θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Η συνθήκη θερμοδυναμικής ισορροπίας είναι η ελαχιστοποίηση της ελεύθερης ενέργειας Gibbs. Επειδή στην φυσική μεταλλουργία ασχολούμαστε με συστήματα όπου η πίεση διατηρείται σταθερή γι'αυτόν τον λόγο το Thermo-Calc χρησιμοποιεί το κριτήριο της ελεύθερης ενέργειας Gibbs. Η συνθήκη όμως της θερμοδυναμικής ισορροπίας για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί σ' ένα πρόγραμμα όπως το Thermo-Calc πρέπει να περιγραφεί από ένα μαθηματικό μοντέλο. Τα μαθηματικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για να περιγράψουν την ελεύθερη ενέργεια Gibbs είναι πάρα πολλά και καθένα από αυτά δίνει έμφαση σε διαφορετικές παραμέτρους συνεισφοράς στην ενέργεια Gibbs.

Το μοντέλο που χρησιμοποιεί το Thermo-Calc είναι αυτό των Redlich-Kister-Muggianu. Στο μοντέλο αυτό η αναπαράσταση της συνάρτησης της ελεύθερης ενέργειας Gibbs για ένα διμερές σύστημα αποτελείται από τρία μέρη. Το πρώτο μέρος αντιστοιχεί σ' ένα μηχανικό μίγμα των δύο καθαρών στοιχείων. Το δεύτερο μέρος είναι η συνεισφορά του ιδανικού μίγματος και το τρίτο μέρος είναι αυτό που ονομάζουμε ως επιπλέον ενέργεια (excess energy). Το τρίτο μέρος περιέχει όλες τις συνεισφορές που βασίζονται στις αλληλεπιδράσεις των δύο διαφορετικών στοιχείων και είναι χαρακτηριστικό για την περιγραφή διμερών συστημάτων.

Το μοντέλο των Redlich-Kister-Muggianu περιέχει επιπλέον την συνεισφορά λόγω μαγνητικής ή ατομικής διάταξης των στοιχείων που συμμετέχουν στο σύστημα.

Άλλα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs είναι τα ακόλουθα :

- το μοντέλο αερίου ισορροπίας H-O
- το μοντέλο Wagner-Schottky
- το γενικό μοντέλο υποπλέγματος
- το μοντέλο στερεού διαλύματος παρεμβολής

Καθένα από τα παραπάνω μοντέλα δίνει έμφαση σε διαφορετικές παραμέτρους συνεισφοράς στην ενέργεια Gibbs και επομένως δεν μπορεί να είναι σαφής η περιγραφή όλων των φάσεων από ένα μοντέλο.

2.2 Σκοπός του *Thermo-Calc*

Το *Thermo-Calc* είναι μια τράπεζα δεδομένων για την ανόργανη χημεία και φυσική μεταλλουργία κατασκευασμένο στο τμήμα της επιστήμης των υλικών και μηχανικής στο βασιλικό ινστιτούτο τεχνολογίας της Στοκχόλμης. Ο πιο σημαντικός σκοπός του *Thermo-Calc* είναι να το κάνει διαθέσιμο για εφαρμογές στην επιστήμη και την βιομηχανία. Με το *Thermo-Calc* ο χρήστης μπορεί είτε απλά να ταξινομήσει τα θερμοδυναμικά δεδομένα για αντιδράσεις ή υλικά είτε να υπολογίσει πολύπλοκες ισορροπίες για χημικά και μεταλλουργικά συστήματα. Χρησιμοποιώντας το *Thermo-Calc* είναι επίσης δυνατόν να υπολογίσουμε πολυσύνθετα διαγράμματα φάσεων με μια αυτόματη διαδικασία mapping (map είναι η απαραίτητη εντολή για την δημιουργία διαγράμματος φάσεων).

Η SGTE βάση δεδομένων είναι μια γενική θερμοδυναμική βάση που περιγράφει τις θερμοχημικές ιδιότητες των ουσιών και φάσεων με ποικίλες συστάσεις για θερμοκρασίες από 298.15 °K μέχρι εκεί όπου μόνο η αέρια φάση είναι σταθερή.

Οι πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση ισορροπίας του συστήματος που μπορούν να ληφθούν από το *Thermo-Calc* είναι αναγκαίες για την λύση πολλών προβλημάτων που συναντώνται σε χημικές και μεταλλουργικές βιομηχανίες. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της θερμοδυναμικής βάσης δεδομένων είναι επίσης ότι παρέχει έναν εύκολο τρόπο να δούμε πως η ισορροπία μπορεί να επηρεαστεί από ποικίλους εξωτερικούς παράγοντες.

Ένας από τους κύριους σκοπούς του Thermo-Calc βρίσκεται στην χρήση του για τον σχεδιασμό και την μείωση της ανάγκης για νέα δαπανηρά πειράματα. Με υπολογισμούς είναι δυνατόν να προβλέψουμε τα αποτελέσματα του πειράματος και αυτό μπορεί να περιορίσει σημαντικά τον αριθμό των πειραμάτων που τελικά έπρεπε να είχαν γίνει. Μπορεί ακόμα να βρεθεί ότι οι υπολογισμοί από μόνοι τους δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα ώστε να χρησιμοποιηθούν απευθείας.

2.3 Περιγραφή του Thermo-Calc

Το Thermo-Calc είναι ένα πανίσχυρο πρόγραμμα για υπολογισμούς ισορροπίας και διαγραμμάτων φάσεων. Η βάση δεδομένων του Thermo-Calc αποτελείται από στρατηγικά και εύχρηστα θερμοδυναμικά προγράμματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με διάφορες βάσεις δεδομένων. Το πρόγραμμα μπορεί εύκολα να χειριστεί απλές ισορροπίες διαγράμματα ιδιοτήτων η διαγράμματα φάσεων με περισσότερα από 20 στοιχεία. Υπάρχουν δύο βασικές απαιτήσεις σε ένα τέτοιου είδους προγράμματα. Το πρώτο είναι ότι θα πρέπει να είναι ικανό να χειρίζεται μια ποικιλία μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των διαφόρων ισορροπιών και το δεύτερο ότι θα παρέχει μια εύχρηστη πρόσβαση για τον χρήστη να υπολογίσει και να λάβει διαγράμματα διαφόρων τύπων.

Το Thermo-Calc αποτελείται από τμήματα (modules) για τις διάφορες εργασίες που ενδιαφέρεται να κάνει ο χρήστης. Υπάρχει ένα τμήμα για την επιλογή της τράπεζας δεδομένων και πληροφοριών. Ένα άλλο τμήμα χρησιμοποιείται για δημιουργία πίνακα θερμοδυναμικών δεδομένων ή για την αλληλεπίδραση (interfacing) και την καταχώρηση θερμοδυναμικών δεδομένων. Επίσης ένα άλλο τμήμα χρησιμοποιείται για υπολογισμούς ισορροπίας.

Τέλος υπάρχει ένα τμήμα για την πινακοποίηση δεδομένων για ουσίες ή χημικές αντιδράσεις.

Όλα τα τμήματα επιτρέπουν την συνεχή ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών.

Το τμήμα για τους υπολογισμούς ισορροπίας έχει μια πολύ δυνατή και γενική ομάδα εντολών, ώστε να μπορεί να μπορεί να ορίσει κάθε είδους υπολογισμούς ισορροπίας και διαγραμμάτων φάσεων. Κάθε συνθήκη απαραίτητη για τον υπολογισμό ορίζεται ξεχωριστά και το είδος των συνθηκών είναι :

- τιμή της θερμοκρασίας, της ενθαλπίας ή της εντροπίας
- τιμή της πίεσης ή του όγκου
- ενεργότητες ή χημικό δυναμικό συστατικών

- ολική σύσταση σε συνολικό αριθμό μορίων ή μάζας ή σε κλάσματα μορίων ή μάζας
- ορίζοντας μερικές από τις σταθερές φάσεις , π.χ η μετασταθής ευτηκτική θερμοκρασία σε διμερές σύστημα σιδήρου - άνθρακα μπορεί να υπολογιστεί ορίζοντας ότι οι φάσεις FCC , BCC και σεμεντίτης πρέπει να είναι σταθερές.
- γενικές συναρτήσεις των διατυπωμένων μεταβλητών, π.χ το σημείο τήξης του Pyrrhotite στο διμερές σύστημα Fe - S μπορεί να υπολογιστεί κατευθείαν δίνοντας $X(\text{liquid},s) - X(\text{Pyrrhotite},s) = 0$ ως μια από τις συνθήκες.

Συνδυάζοντας τους διάφορους τύπους συνθηκών ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει κατευθείαν πολλούς τύπους ισορροπίας. Οι διατυπωμένες μεταβλητές μπορούν επίσης να οριστούν και να χρησιμοποιηθούν σαν συνθήκες ή για να γίνουν διάγραμμα τα τελικά αποτελέσματα.

2.4 Διαγράμματα και γραφικά

Ένας σημαντικός τύπος διαγραμμάτων που μπορεί να δημιουργηθεί από τα θερμοδυναμικά δεδομένα λαμβάνεται όταν μεταβάλλεται μόνο μια ανεξάρτητη μεταβλητή. Κάθε συνθήκη στο τμήμα για υπολογισμούς ισορροπίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μεταβλητή ενός άξονα και μπορεί κάποιος να συμβαδίσει σε έναν άξονα και να υπολογίσει πως όποια άλλη ποσότητα εξαρτάται από τις μεταβλητές του άξονα. Τέτοια διαγράμματα έχουν διαφορετικά ονόματα εξαρτημένα από τον τύπο της ιδιότητας που εξετάζεται αλλά ως γενική ονομασία είναι διαγράμματα ιδιοτήτων.

2.5 Βάσεις Δεδομένων

Μια θερμοδυναμική βάση δεδομένων είναι ένας μοναδικός τύπος βάσης δεδομένων με την έννοια ότι μπορεί κάποιος να έχει μερικά αξιολογημένα συστήματα μέσα σε αυτή αλλά μπορεί να χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη ιδιοτήτων σε πολυσύνθετα συστήματα όπου δεν υπάρχει διαθέσιμη πειραματική πληροφόρηση.

Αρχικά οι χρήστες των θερμοδυναμικών προγραμμάτων μπορούν να προσθέσουν τις δικές τους βάσεις δεδομένων που παρέχονται από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τα δεδομένα τα οποία εφαρμόζονται στα προγράμματα. Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις ο χρήστης περιορίζεται σε αυτές τις βάσεις δεδομένων που παρέχονται μαζί με τα

προγράμματα. Οι διαθέσιμες βάσεις δεδομένων σήμερα αναπτύχθηκαν κυρίως για ειδικές εφαρμογές χαλύβων, ελαφρών κραμάτων, διαλύματα νερού και μεταλλουργικά η γεωλογικά συστήματα. Ένας σοβαρός περιορισμός αυτών των εξειδικευμένων βάσεων δεδομένων είναι ότι μπορεί να είναι δύσκολο η αδύνατον να συνδυάσεις τα δεδομένα από διαφορετικές βάσεις δεδομένων επειδή μπορεί να χρησιμοποιούν διαφορετικά μοντέλα για την ίδια φάση, διαφορετικές περιγραφές των στοιχείων η ενώσεων η πιο κοινά διαφορετικές περιγραφές των μετασταθών φάσεων που χρειάζονται για την λύση του προβλήματος. Στην Ευρώπη μια συλλογική προσπάθεια για την καθιέρωση μιας γενικής βάσης δεδομένων με τα ίδια μοντέλα και στοιχεία οργανώνεται από την SGTE(Scientific Group Thermodata Europe).

Το πρόγραμμα Thermo-Calc έχει πρόσβαση στις ακόλουθες βάσεις δεδομένων

- 1)SGTE SOLUTION DATABASE
- 2)SGTE SUBSTANCE DATABASE
- 3)IRON SLAG DATABASE
- 4)FE-BASE DATABASE
- 5)KAUFMAN BINARY DATABASE
- 6)IONIC DATABASE
- 7)SAXENA GEOCHEMICAL DATABASE

Στην παρούσα εργασία μόνον οι δύο πρώτες βάσεις χρησιμοποιήθηκαν οι οποίες και περιγράφονται παρακάτω.

2.5.1 Βάση δεδομένων SGTE Solution

Το SGTE είναι μια κοινοπραξία επτά ερευνητικών ινστιτούτων και πανεπιστημίων στην Αγγλία, στην Γαλλία, στην Γερμανία και στη Σουηδία η οποία ασχολείται με την ανάπτυξη θερμοχημικών βάσεων δεδομένων για την ανόργανη χημεία και την φυσική μεταλλουργία και οι εφαρμογές αυτών σε προβλήματα που συναντώνται στην πράξη. Το σημαντικό χαρακτηριστικό μιας θερμοχημικής βάσης δεδομένων είναι ότι μπορεί κάποιος να συνδυάσει διάφορα αξιόλογα συστήματα και να υπολογίσει με παρεμβολή σε υψηλότερης τάξης συστήματα.

2.5.2 Βάση δεδομένων SGTE substance

Η βάση δεδομένων Substance περιέχει αξιολογημένα θερμοδυναμικά δεδομένα για περίπου 2000 συμπυκνωμένα συστατικά, 1000 αέρια στοιχεία και 500 υδατικά ιόντα και στοιχεία. Τα δεδομένα για κάθε συστατικό ή στοιχείο αποτελούνται από:

- την ενθαλπία σχηματισμού στους 298.15 °K (σε σχέση με το καθαρό στοιχείο)
- την εντροπία στους 298.15 °K (από ολοκλήρωση του τρίτου νόμου της θερμοδυναμικής ή από εκτιμήσεις)
- την εξάρτηση της θερμοχωρητικότητας από την θερμοκρασία σε σταθερή πίεση από τους 298.15 °K μέχρι την αέρια κατάσταση

Όλα τα δεδομένα που περιέχονται στις βάσεις δεδομένων είναι για πίεση 1 bar. Αυτή η βάση δεδομένων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη:

- πινακοποίηση των θερμοχημικών δεδομένων
- υπολογισμούς και πινακοποιήσεις των αντιδράσεων και των σταθερών ισορροπίας
- υπολογισμούς των σύνθετων αέριων ισορροπιών για πολυσύνθετα συστήματα χωρίς στερεά διαλύματα. Την αέρια φάση και την υγρή φάση τις μεταχειριζόμαστε σαν ιδανικές.

2.6 Προσομοίωση στερεοποίησης

Αν και το Thermo-Calc χρησιμοποιείται κυρίως για υπολογισμούς ισορροπίας, εντούτοις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση μετασχηματισμών όπου μόνο τοπική ισορροπία πρέπει να θεωρηθεί. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η στερεοποίηση σύμφωνα με το μοντέλο Scheil - Gulliver. Σε αυτή την περίπτωση υποθέτουμε ότι η υγρή φάση είναι πάντα ομογενής ενώ η στερεά φάση θα διατηρήσει την σύσταση που είχε όταν σχηματίστηκε.

Αυτό είναι ισοδύναμο με την υπόθεση ότι οι συντελεστές διάχυσης είναι άπειροι στην υγρή φάση και ίσοι με μηδέν στην στερεή. Στη διεπιφάνεια μεταξύ υγρού - στερεού θεωρείται ότι οι συνθήκες μπορούν να περιγραφούν από την θερμοδυναμική ισορροπία.

Συλλογή δεδομένων

3.1 Κατηγορίες χαλύβων - συστάσεις

3.1.1 Χάλυβας - 1

Πρόκειται για τον GX25CrNiSi25-20 (14848) κατά DIN πυρίμαχο χάλυβα του οποίου η σύσταση είναι η εξής (% κ. β) :

κραμματικά στοιχεία	C	Si	Mn	Cr	Ni
ποσοστό	0,3 - 0,5	1,0-2,5	1,5	24-26	19-21

Πίνακας 3.1 *Εύρος συστάσεων του GX25CrNiSi25-20 (14848)*

Από το διάγραμμα Schaeffer υπολογίζοντας τα ισοδύναμα του Cr [ϵ_{Cr}] και του Ni [ϵ_{Ni}] παρατηρούμε ότι είναι χάλυβας διπλής φάσης (dual phase steel).

Μεταβάλλοντας τις συστάσεις των κραμματικών στοιχείων μεταξύ άνω και κάτω ορίου, προκύπτουν 16 ενδεικτικές συστάσεις οι οποίες παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 3.2 Αναλυτικές συστάσεις του GX25CrNiSi25-20 (14848)

A/A	C	Si	Mn	Cr	Ni
1	0.3	1	1.5	24	19
2	0.5	1	1.5	24	19
3	0.3	2.5	1.5	24	19
4	0.5	2.5	1.5	24	19
5	0.3	1	1.5	26	19
6	0.5	1	1.5	26	19
7	0.3	2.5	1.5	26	19
8	0.5	2.5	1.5	26	19
9	0.3	1	1.5	24	21
10	0.5	1	1.5	24	21
11	0.3	2.5	1.5	24	21
12	0.5	2.5	1.5	24	21
13	0.3	1	1.5	26	21
14	0.5	1	1.5	26	21
15	0.3	2.5	1.5	26	21
16	0.5	2.5	1.5	26	21

3.1.2 Χάλυβας - 2

Πρόκειται για τον GX40CrNiSi27-4 (14823) κατά DIN ανοξείδωτο χάλυβα του οποίου η σύσταση είναι η εξής (% κ. β) :

κραμματικά στοιχεία	C	Si	Mn	Cr	Ni
ποσοστό	0,3 - 0,5	1,0-2,5	1,5	25-28	3.5-5.5

Πίνακας 3.3 Εύρος συστάσεων του GX40CrNiSi27-4 (14823)

Από το διάγραμμα Schaeffer υπολογίζοντας τα ισοδύναμα του Cr [ϵ_{Cr}] και του Ni [ϵ_{Ni}] παρατηρούμε ότι είναι φερριτικός χάλυβας.

Μεταβάλλοντας τις συστάσεις των κραμματικών στοιχείων μεταξύ άνω και κάτω ορίου, προκύπτουν 16 ενδεικτικές συστάσεις οι οποίες παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 3.4 Αναλυτικές συστάσεις του GX40CrNiSi27-4 (14823)

A/A	C	Si	Mn	Cr	Ni
1	0.3	1	1.5	25	3.5
2	0.5	1	1.5	25	3.5
3	0.3	2.5	1.5	25	3.5
4	0.5	2.5	1.5	25	3.5
5	0.3	1	1.5	28	3.5
6	0.5	1	1.5	28	3.5
7	0.3	2.5	1.5	28	3.5
8	0.5	2.5	1.5	28	3.5
9	0.3	1	1.5	25	5.5
10	0.5	1	1.5	25	5.5
11	0.3	2.5	1.5	25	5.5
12	0.5	2.5	1.5	25	5.5
13	0.3	1	1.5	28	5.5
14	0.5	1	1.5	28	5.5
15	0.3	2.5	1.5	28	5.5
16	0.5	2.5	1.5	28	5.5

3.1.3 Χάλυβας - 3

Πρόκειται για τον X20CrNi17-2 (14057) κατά DIN ανοξείδωτο χάλυβα του οποίου η σύσταση είναι η εξής (% κ. β) :

κραμματικά στοιχεία	C	Si	Mn	Cr	Ni
ποσοστό	0.14 - 0.23	1.0	1.0	15.5-17.5	1.5-2.5

Πίνακας 3.5 Εύρος συστάσεων του X20CrNi17-2 (14057)

Από το διάγραμμα Schaeffer υπολογίζοντας τα ισοδύναμα του Cr [ϵ_{Cr}] και του Ni [ϵ_{Ni}] παρατηρούμε ότι είναι φερριτικός χάλυβας.

Μεταβάλλοντας τις συστάσεις των κραμματικών στοιχείων μεταξύ άνω και κάτω ορίου, προκύπτουν 12 ενδεικτικές συστάσεις οι οποίες παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 3.6 Αναλυτικές συστάσεις του X20CrNi17-2 (14057)

A/A	C	Si	Mn	Cr	Ni
1	0.14	1.0	1.0	15.5	1.5
2	0.23	1.0	1.0	15.5	1.5
3	0.14	1.0	1.0	16.5	1.5
4	0.23	1.0	1.0	16.5	1.5
5	0.14	1.0	1.0	17.5	1.5
6	0.23	1.0	1.0	17.5	1.5
7	0.14	1.0	1.0	15.5	2.5
8	0.23	1.0	1.0	15.5	2.5
9	0.14	1.0	1.0	16.5	2.5
10	0.23	1.0	1.0	16.5	2.5
11	0.14	1.0	1.0	17.5	2.5
12	0.23	1.0	1.0	17.5	2.5

3.1.4 Χάλυβας - 4

Πρόκειται για τον X12Cr13 (14006) κατά DIN ανοξείδωτο χάλυβα του οποίου η σύσταση είναι η εξής (% κ. β) :

κραμματικά στοιχεία	C	Si	Mn	Cr
ποσοστό	0.08 - 0.12	1.0	1.0	12-14

Πίνακας 3.7 Εύρος συστάσεων του X12Cr13 (14006)

Από το διάγραμμα Schaeffer υπολογίζοντας τα ισοδύναμα του Cr [ϵ_{Cr}] και του Ni [ϵ_{Ni}] παρατηρούμε ότι είναι φερριτικός χάλυβας.

Μεταβάλλοντας τις συστάσεις των κραμματικών στοιχείων μεταξύ άνω και κάτω ορίου, προκύπτουν 9 ενδεικτικές συστάσεις οι οποίες παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 3.8 Αναλυτικές συστάσεις του X12Cr13 (14006)

A/A	C	Cr	Si	Mn
1	0.08	12	1.0	1.0
2	0.08	13	1.0	1.0
3	0.08	14	1.0	1.0

4	0.1	12	1.0	1.0
5	0.1	13	1.0	1.0
6	0.1	14	1.0	1.0
7	0.12	12	1.0	1.0
8	0.12	13	1.0	1.0
9	0.12	14	1.0	1.0

3.2 Μεθοδολογία αξιολόγησης των χαλύβων

Για τους παραπάνω τέσσερις χάλυβες μελετήθηκε με την χρήση του προγράμματος ThermoCalc η πορεία της στερεοποίησης και πως μεταβάλλονται τα ποσοστά των φάσεων με την αλλαγή της σύστασης και την επίδραση των κραμματικών στοιχείων. Στη συνέχεια μελετήθηκε πως τα ποσοστά του χρωμίου και νικελίου μεταβάλλονται στην υγρή φάση και συναρτήσει της θερμοκρασίας. Με αυτόν τον τρόπο ανιχνεύσαμε τις τάσεις σχηματισμού των φάσεων σε υψηλές θερμοκρασίες (σημείο τήξης - ολοκλήρωσης της στερεοποίησης).

Ακόλουθα μελετήθηκε η εξάρτηση του ποσοστού των φάσεων συναρτήσει της θερμοκρασίας και της % κ.β σύστασης από την υγρή φάση ως την θερμοκρασία δωματίου σε κατάσταση ισορροπίας.

Για κάθε χάλυβα ακολουθήθηκε η παρακάτω σειρά :

1. Προσομοίωση Scheil (ποσοστά φάσεων, ποσοστά χρωμίου - νικελίου στην υγρή φάση)
2. Κατάσταση ισορροπίας (ποσοστά φάσεων συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού)
3. Κινούσα δύναμη

Οι τιμές που επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται στα διαγράμματα των αποτελεσμάτων του κεφ.4 είναι οι μέγιστες τόσο κατά την διάρκεια της στερεοποίησης όσο και στην κατάσταση ισορροπίας. Ο λόγος που έγινε αυτό έχει να κάνει με την τελική επιλογή της σύστασης που βασίζεται στα οριακά ποσοστά (μέγιστο, ελάχιστο) ορισμένων φάσεων.

Στο παράρτημα (κεφ.6) παρουσιάζονται ορισμένα ενδεικτικά διαγράμματα που λήφθηκαν από το ThermoCalc, στα οποία παριστάνονται αναλυτικά οι μεταβολές των φάσεων ,κ.ά για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών (συνολική καμπύλη) και όχι μόνο οι ακραίες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο κεφ.4.

Αποτελέσματα

4.1 Χάλυβας I

4.1.1 Προσομοίωση Scheil

Μελετήθηκε η πορεία της στερεοποίησης με την προσομοίωση Scheil από την υγρή φάση έως ότου επέλθει πλήρης στερεοποίηση για κάθε μια από τις 16 συστάσεις με σκοπό να δούμε πως η μεταβολή των κραματικών στοιχείων καθώς και οι μεταβολές των φάσεων επηρεάζουν την πορεία της στερεοποίησης.

Παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις τόσο στην θερμοκρασία έναρξης της liquidus όσο και στην τελική θερμοκρασία ολοκλήρωσης της στερεοποίησης. Η υψηλότερη θερμοκρασία έναρξης της liquidus παρατηρήθηκε στην πρώτη σύσταση ($1369\text{ }^{\circ}\text{C}$) και η χαμηλότερη στην 16^η σύσταση ($1307\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Στις ίδιες συστάσεις παρατηρήθηκαν αντίστοιχα η υψηλότερη και η χαμηλότερη θερμοκρασία λήξης της στερεοποίησης. Μελετώντας την στερεοποίηση είδαμε επίσης ότι αυτή ολοκληρώνεται μέσα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος $200 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Η πρώτη στερεά φάση που σχηματίζεται είναι ο ωστενίτης, κατόπιν ακολουθεί ο φερρίτης (BCC) και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα ο σχηματισμός των καρβιδίων M_7C_3 , M_{23}C_6 (αυτό συμβαίνει σε όλες τις συστάσεις). Από την μελέτη των θερμοκρασιών liquidus είδαμε ότι επηρεάζονται περισσότερο από τις αλλαγές στην σύσταση του άνθρακα και πυριτίου και λιγότερο από τις αλλαγές στα άλλα κραματικά στοιχεία.

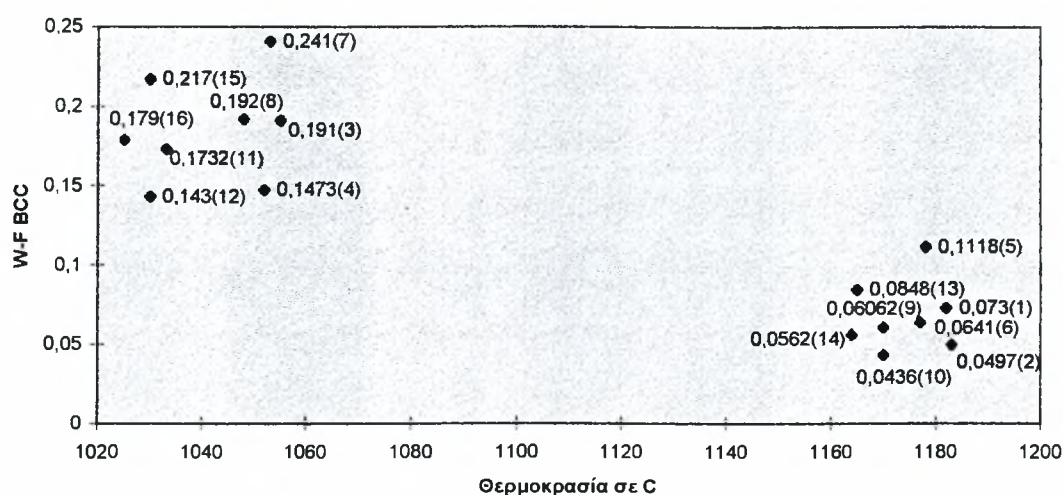
Πιο συγκεκριμένα παρατηρήσαμε ότι με αύξηση του άνθρακα και πυριτίου μειώνεται η θερμοκρασία έναρξης της liquidus και η μείωση αυτή είναι ακόμη μεγαλύτερη με ταυτόχρονη αύξηση και στα δυο στοιχεία. Με αύξηση των ποσοστών του χρωμίου και νικελίου, η liquidus επηρεάζεται κατά τον ίδιο τρόπο αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό.

4.1.2 Ποσοστά Φάσεων κατά την στερεοποίηση

Εξετάστηκαν στη συνέχεια τα ποσοστά των φάσεων κατά την διάρκεια της στερεοποίησης και για τις 16 συστάσεις συναρτήσει της θερμοκρασίας και η μεταβολή τους με αλλαγή της σύστασης.

4.1.2.1 Φερρίτης (BCC)

Τα μέγιστα ποσοστά του φερρίτη που παρατηρήθηκαν για καθεμιά από τις δεκαέξι συστάσεις, κατά την διάρκεια της στερεοποίησης, συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε για τον φερρίτη ενώ ο αριθμός στην παρένθεση αντιστοιχεί στον αριθμό της σύστασης.

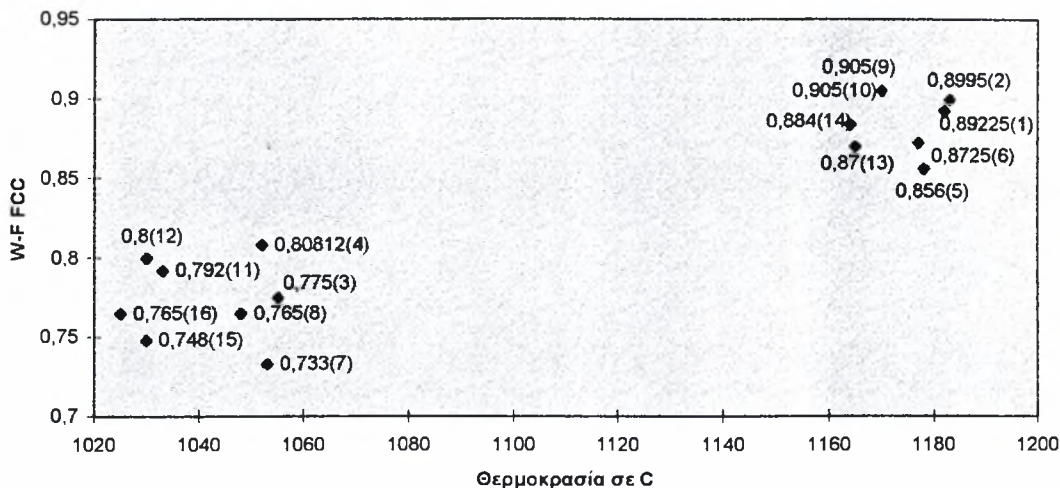


Σχήμα 4.1 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού φερρίτη κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του φερρίτη κατά την διάρκεια της στερεοποίησης παρατηρήθηκε στην δέκατη σύσταση (0.0436) ενώ η μέγιστη στη έβδομη (0.241). Τα ποσά αυτά είναι απολύτως φυσιολογικά ως προς το μέγεθος της τιμής τους και αυτό είναι απολύτως ξεκάθαρο κοιτώντας τις συστάσεις και λαμβάνοντας υπόψιν πως τα κραματικά στοιχεία επηρεάζουν την δομή. Πρέπει επίσης να σημειώσουμε πως τα υψηλά ποσά του φερρίτη παρατηρούνται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες έναρξης της liquidus, γεγονός που σημαίνει ότι όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία λήξης της στερεοποίησης τόσο περισσότερο ευνοείται ο σχηματισμός φερρίτη.

4.1.2.2 Ωστενίτης

Τα μέγιστα ποσοστά του ωστενίτη που παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια της στερεοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας, και για τις 16 συστάσεις, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε για τον ωστενίτη ενώ ο αριθμός στη παρένθεση αντιστοιχεί στον αριθμό της σύστασης.

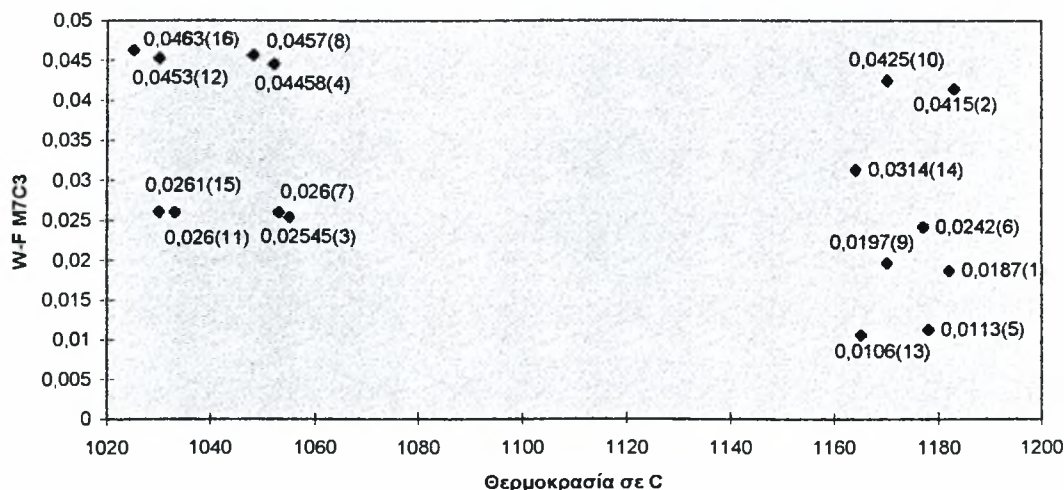


Σχήμα 4.2 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού ωστενίτη κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του ωστενίτη παρατηρήθηκε στην 7^η σύσταση (0.733) ενώ η μέγιστη τιμή στην 10^η (0.905). Τα ποσά αυτά είναι απολύτως φυσιολογικά ως προς την τιμή τους και είναι ξεκάθαρο κοιτώντας τις συστάσεις και λαμβάνοντας υπόψιν το πως τα κραματικά στοιχεία επηρεάζουν την δομή. (Ήταν άλλωστε αναμενόμενο μιας και προηγουμένως γνωρίζαμε τα ποσοστά του φερρίτη). Παρατηρείται επίσης ότι τα χαμηλά ποσοστά του ωστενίτη εμφανίζονται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες έναρξης της liquidus - αναμενόμενο μιας και τα μέγιστα ποσοστά του φερρίτη εμφανίζονται στις ίδιες θερμοκρασίες - γεγονός που σημαίνει ότι όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία λήξης στερεοποίησης τόσο περισσότερο μειώνεται ο σχηματισμός ωστενίτη(πράγμα το οποίο έρχεται σε συμφωνία με αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω για τον φερρίτη δεδομένου ότι δεν μπορεί ταυτόχρονα να ευνοείται ο σχηματισμός του φερρίτη και ωστενίτη).

4.1.2.3 Καρβίδιο M_7C_3

Τα μέγιστα ποσοστά του καρβιδίου που παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια της στερεοποίησης, και για τις 16 συστάσεις, συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου η ονοματολογία των μεγεθών είναι παρόμοια όπως παραπάνω.



Σχήμα 4.3 διάγραμμα θερμοκρασίας - κλάσμα μάζας καρβιδίου M_7C_3 κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του καρβιδίου M_7C_3 κατά την διάρκεια της στερεοποίησης αντιστοιχεί στην 13^η σύσταση (0.0106) και η μέγιστη στην 16^η σύσταση (0.0463). Παρατηρείται ότι τα ποσοστά είναι πολύ μικρά σε σχέση με αυτά του ωστενίτη και του φερρίτη. Παρατηρούνται δύο περιοχές θερμοκρασιών που σχετίζονται με τα ποσά του καρβιδίου. Συνδέοντας το αυτό με τις συστάσεις βλέπουμε ότι η αύξηση του πυριτίου μειώνει την θερμοκρασία σχηματισμού του καρβιδίου.

4.1.2.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$

Σε 4 μόνο συστάσεις παρατηρήθηκε η εμφάνιση του καρβιδίου κατά την στερεοποίηση, το οποίο σημαίνει ότι αυτό αρχίζει να εμφανίζεται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες και απ' αυτές της λήξης στερεοποίησης.

4.1.2.5 Ποσοστά του Cr και Ni στην υγρή φάση

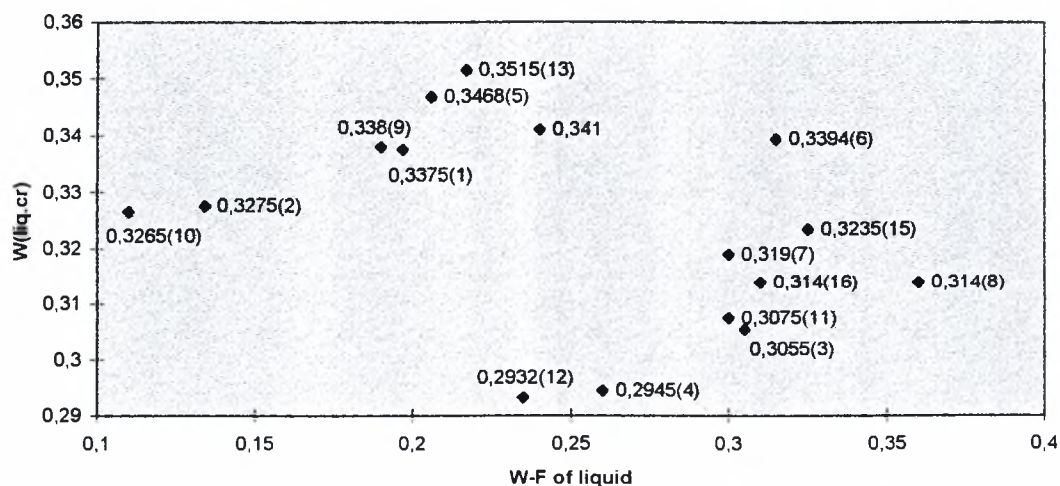
Εξετάστηκε στην συνέχεια πως μεταβάλλονται τα ποσοστά του χρωμίου και νικελίου στην υγρή φάση συναρτήσει του κλάσματος μάζας του υγρού και της θερμοκρασίας.

Κατά την διάρκεια της στερεοποίησης παρατηρήσαμε ότι το ποσοστό του χρωμίου αυξάνεται μέχρι μιας μέγιστης τιμής και στην συνέχεια ελαττώνεται λίγο. Η ίδια συμπεριφορά υπήρχε και για τις 16 συστάσεις με μόνη διαφορά ότι μετατοπίζονταν το μέγιστο ποσοστό και η αντίστοιχη θερμοκρασία.

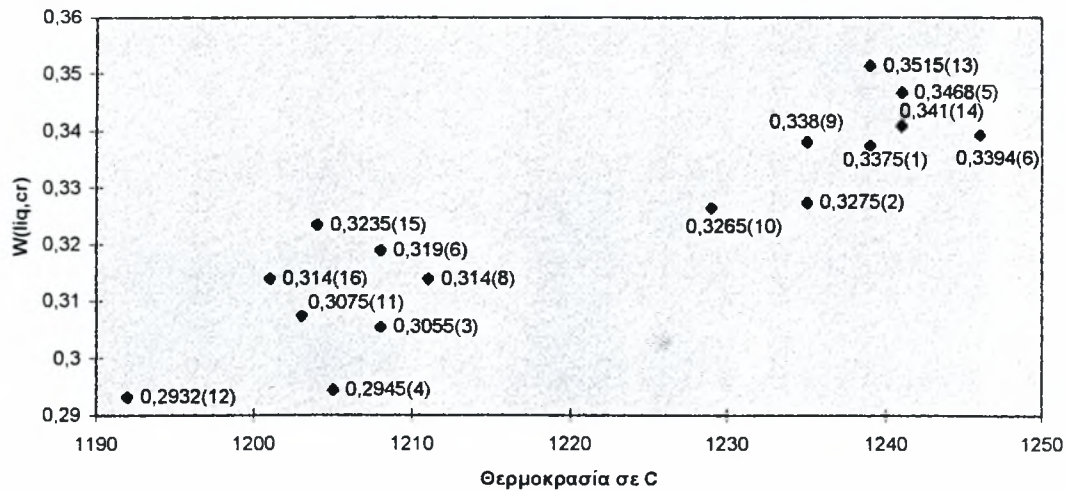
Η επίδραση του νικελίου ήταν εντελώς διαφορετική. Στην αρχή της στερεοποίησης μειωνόταν συνεχώς. Έπειτα σταθεροποιούνταν σε ένα μικρό θερμοκρασιακό εύρος και στη συνέχεια μειωνόταν με μικρότερο ρυθμό απ' ότι αρχικά.

Η επίδραση του νικελίου και χρωμίου συνδέεται άμεσα με τα ποσοστά των φάσεων του ωστενίτη και φερρίτη. Η γενική τάση κατά την διάρκεια της στερεοποίησης είναι μια μείωση του Ni στην υγρή φάση - ουσιαστικά μείωση του ωστενίτη - και αύξηση του Cr - ουσιαστικά αύξηση του φερρίτη.

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα των μέγιστων τιμών του χρωμίου στην υγρή φάση συναρτήσει του κλάσματος μάζας του υγρού και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.4 διάγραμμα κλάσμα μάζας υγρού - ποσοστού χρωμίου στην υγρή κατά την στερεοποίηση



Σχήμα 4.5 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού χρωμίου στην υγρή φάση κατά την στερεοποίηση

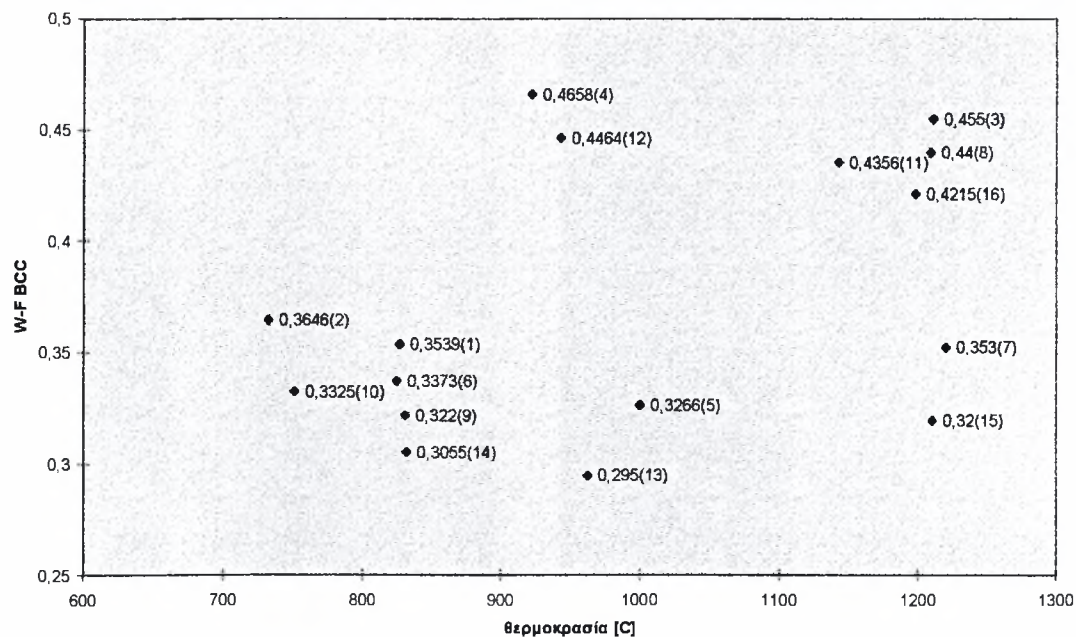
4.1.3 Περιγραφή των φάσεων σε ισορροπία

Μετά την μελέτη της στερεοποίησης με την προσομοίωση Scheil, εξετάσαμε τα ποσοστά των φάσεων, από το πέρας της στερεοποίησης μέχρι την θερμοκρασία δωματίου, συναρτήσει της θερμοκρασίας και της μεταβολής της σύστασης.

Ο στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων φάσεων (σ - φάση, φερρίτης, καρβίδιο $M_{23}C_6$) προσπαθώντας να κρατηθεί ο ωστενίτης σε ικανοποιητικό ποσοστό.

4.1.3.1 Φερρίτης (BCC)

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του φερρίτη στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού του και οι αλλαγές του με τις μεταβολές της σύστασης για κάθε μια από τις 16 συστάσεις ενώ οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις συστάσεις.

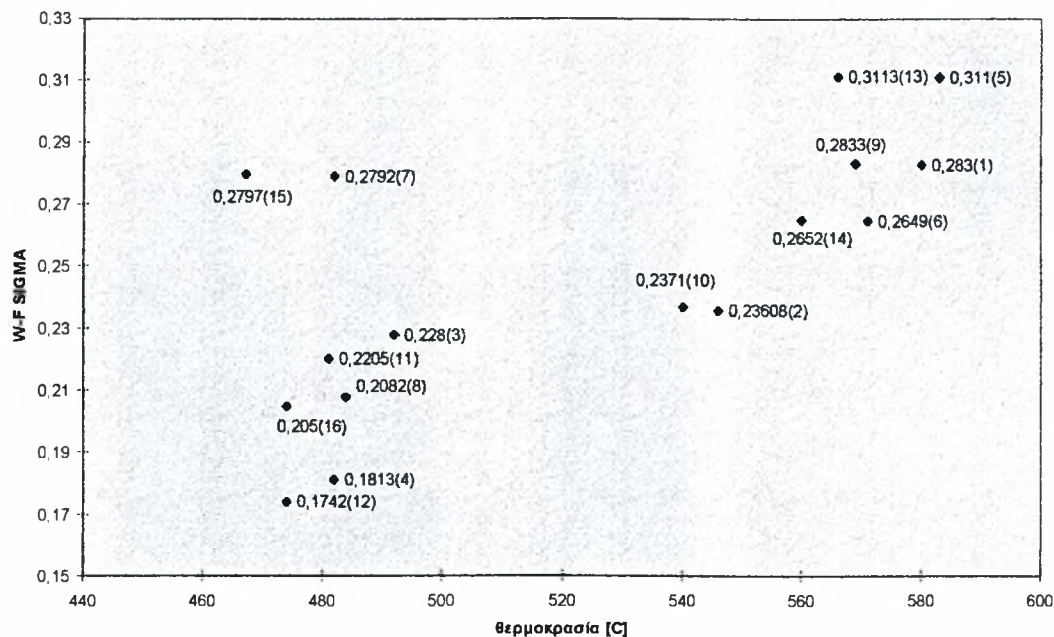


Σχήμα 4.6 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού φερρίτη στην ισορροπία

Η ελάχιστη τιμή του φερρίτη παρατηρείται στην 13^η σύσταση (0.295) και η μέγιστη στην 4^η (0.4658). Σημειώνεται μια απόκλιση από τις τιμές που περιμέναμε όσο αφορά το τελικό ποσό του φερρίτη. Πιο συγκεκριμένα πιστεύαμε ότι η μέγιστη τιμή του φερρίτη θα παρουσιαζόταν στην 5^η σύσταση με δεδομένη την επίδραση των κραματικών στοιχείων και πως αυτά επηρεάζουν τον σχηματισμό των φάσεων. Αυτό όπως θα εξηγηθεί παρακάτω (όταν θα αναφερθούμε στην σ-φάση) οφείλεται στην επίδραση του χρωμίου και πως αυτό επηρεάζει τον σχηματισμό των φάσεων.

4.1.3.2 σ - φάση

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό της σ-φάσης στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού της και οι αλλαγές της με τις μεταβολές της σύστασης για κάθε μια από τις δεκαέξι συστάσεις ενώ οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις συστάσεις.



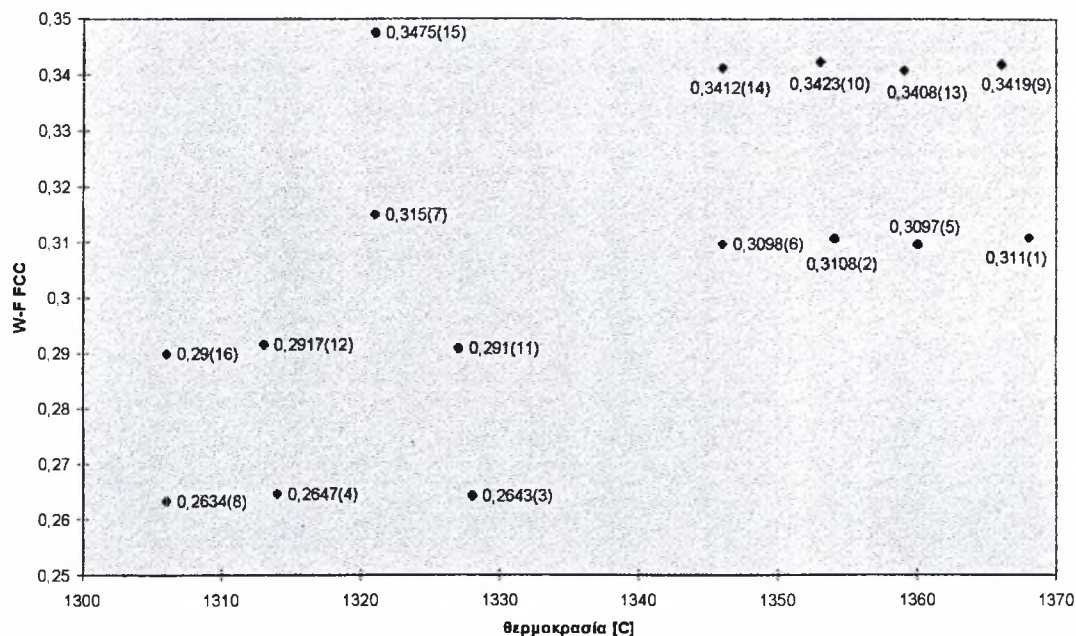
Σχήμα 4.7 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού σ - φάσης στην ισορροπία

Παρατηρείται ότι υπάρχουν δυο περιοχές όσον αφορά την θερμοκρασία σχηματισμού της σ -φάσης. Η πρώτη κυμαίνεται μεταξύ των 470 - 500 °C και η δεύτερη μεταξύ των 540 - 590 °C. Με βάση τις συστάσεις, φαίνεται ότι αυτό έχει σχέση με το χαμηλό ποσοστό του πυριτίου, δηλαδή χαμηλό ποσοστό πυριτίου οδηγεί σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες σχηματισμού και αυξημένα ποσοστά της σ -φάσης και αντίστροφα.

Οι μέγιστες τιμές της σ - φάσης παρουσιάζονται στην 13^η και 5^η σύσταση, όπου υπάρχουν επίσης υψηλά ποσοστά χρωμίου και χαμηλά νικελίου και με δεδομένη βέβαια την επίδραση και των άλλων κραμματικών στοιχείων. Παρατηρείται ότι η αύξηση του χρωμίου ευνοεί ιδιαίτερα τον σχηματισμό της σ -φάσης και λιγότερο τον σχηματισμό του φερρίτη και του καρβιδίου, δηλαδή για το μέγιστο ποσοστό της σ -φάσης παρατηρούνται τα χαμηλότερα ποσοστά του φερρίτη και του καρβιδίου. Αντίθετα οι ελάχιστες τιμές της σ -φάσης εμφανίζονται στην 12^η και 4^η σύσταση όπου παρουσιάζεται χαμηλό ποσοστό χρωμίου και υψηλό νικελίου.

4.1.3.3 Ωστενίτης

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του ωστενίτη στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού του και οι αλλαγές του με τις μεταβολές της σύστασης για κάθε μια από τις 16 συστάσεις ενώ οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις συστάσεις.



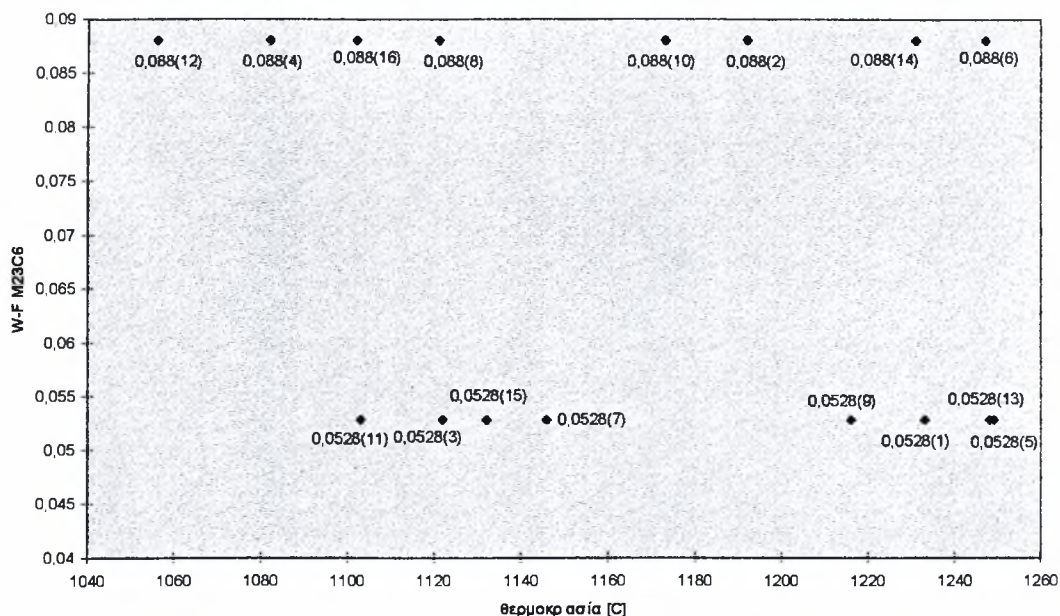
Σχήμα 4.8 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού ωστενίτη στην ισορροπία

Παρατηρείται ότι υπάρχουν δυο περιοχές όσον αφορά την θερμοκρασία σχηματισμού του ωστενίτη. Η πρώτη κυμαίνεται μεταξύ των 1300 - 1330 °C και η δεύτερη μεταξύ των 1345 - 1370 °C. Με βάση τις συστάσεις, φαίνεται ότι το πυρίτιο έχει την ίδια επίδραση στον ωστενίτη όπως και στην σ-φάση δηλαδή χαμηλό ποσοστό πυριτίου οδηγεί σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες σχηματισμού του ωστενίτη και αντίστροφα.

Το υψηλότερο ποσοστό του ωστενίτη παρατηρήθηκε στην 15^η σύσταση και το χαμηλότερο στην 8^η σύσταση. Κοιτώντας την επίδραση των κραμματικών στοιχείων υπάρχει συμφωνία όσον αφορά την χαμηλή σύσταση όχι όμως και την υψηλή. Αυτό οφείλεται στα κραμματικά στοιχεία και πως αυτά επηρεάζουν τα ποσοστά των φάσεων καθώς και στην αλληλεπίδραση των φάσεων μεταξύ τους.

4.1.3.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του καρβιδίου $M_{23}C_6$ στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού του και οι αλλαγές του με τις μεταβολές της σύστασης για κάθε μια από τις 16 συστάσεις ενώ οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις συστάσεις.



Σχήμα 4.9 διάγραμμα θερμοκρασίας - κλάσματος μάζας του καρβιδίου $M_{23}C_6$ στην ισορροπία

Παρατηρείται ότι υπάρχουν δυο περιοχές σύστασης, οι οποίες επηρεάζονται από το ποσοστό του άνθρακα. Για χαμηλό ποσοστό άνθρακα έχουμε χαμηλό ποσό του καρβιδίου και αντίστροφα. Ο άνθρακας είναι το μοναδικό στοιχείο που επηρεάζει το ποσό του καρβιδίου ενώ τα υπόλοιπα έχουν αμελητέα επίδραση.

Όσον αφορά την θερμοκρασία σχηματισμού, έχουμε τέσσερις διακριτές ζώνες, δυο σε κάθε περιοχή σύστασης. Οι χαμηλές θερμοκρασίες σχηματισμού του καρβιδίου οφείλονται στο υψηλό ποσοστό του πυριτίου. Τα υπόλοιπα στοιχεία έχουν αμελητέα επίδραση στην θερμοκρασία σχηματισμού.

Με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορούμε να πούμε ότι ο άνθρακας επηρεάζει μόνο την σύσταση και το πυρίτιο μόνο την θερμοκρασία σχηματισμού.

4.1.4 Προσέγγιση του ποσοστού των φάσεων μέσω της κινούσας δύναμης

Εξετάστηκε στη συνέχεια η κινούσα δύναμη των φάσεων που παρατηρήθηκαν στην θερμοκρασία δωματίου για κάθε μια από τις δεκάεξι συστάσεις του χάλυβα. Βρέθηκε η κατανομή της για τις φάσεις του φερρίτη, του ωστενίτη, της σ-φάσης και του καρβιδίου $M_{23}C_6$ από την θερμοκρασία σχηματισμού τους μέχρι την θερμοκρασία δωματίου. Η κινούσα δύναμη για κάθε μια από τις παραπάνω φάσεις δεν μας έδωσε το επιθυμητό αποτέλεσμα ώστε να καθιστά εύκολη την επιλογή της σύστασης για το ελάχιστο ποσό της σ-φάσης, του φερρίτη, του ωστενίτη και του καρβιδίου (με δεδομένο το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι η κινούσα δύναμη τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση για σχηματισμό των παραπάνω φάσεων).

Παρατηρήσαμε δηλαδή ότι σε μεγαλύτερες τιμές της κινούσας δύναμης δεν εμφανίζονταν απαραίτητα και μεγαλύτερο ποσοστό της συγκεκριμένης φάσης.

Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην διαφορετική θερμοκρασία σχηματισμού των φάσεων.

4.2 Χάλυβας 2

4.2.1 Προσομοίωση Scheil

Αρχικά μελετήθηκε η πορεία της στερεοποίησης με την προσομοίωση Scheil από την υγρή φάση έως ότου επέλθει πλήρης στερεοποίηση για κάθε μια από τις 16 συστάσεις με σκοπό να δούμε πως επηρεάζει η μεταβολή των κραματικών στοιχείων καθώς και οι μεταβολές των φάσεων την πορεία της στερεοποίησης.

Παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις τόσο στην θερμοκρασία έναρξης της liquidus όσο και στην τελική θερμοκρασία ολοκλήρωσης της στερεοποίησης. Η υψηλότερη θερμοκρασία έναρξης της liquidus παρατηρήθηκε στην πρώτη και στην πέμπτη σύσταση ($1447\text{ }^{\circ}\text{C}$) και η χαμηλότερη στην δωδέκατη σύσταση ($1359\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Στις ίδιες συστάσεις παρατηρήθηκαν αντίστοιχα η υψηλότερη και η χαμηλότερη θερμοκρασία λήξης της στερεοποίησης. Μελετώντας την στερεοποίηση είδαμε επίσης ότι αυτή ολοκληρώνεται μέσα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος $150 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Η πρώτη στερεά φάση που σχηματίζεται είναι ο φερρίτης (BCC), κατόπιν ακολουθεί ο ωστενίτης (FCC) και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα ο σχηματισμός του καρβιδίου M_7C_3 (και αυτό συμβαίνει σε όλες τις συστάσεις). Από την μελέτη των θερμοκρασιών liquidus είδαμε ότι επηρεάζονται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση των κραματικών στοιχείων και ιδιαίτερα με την αύξηση του άνθρακα και του πυριτίου. Η αύξηση αυτή είναι ακόμα

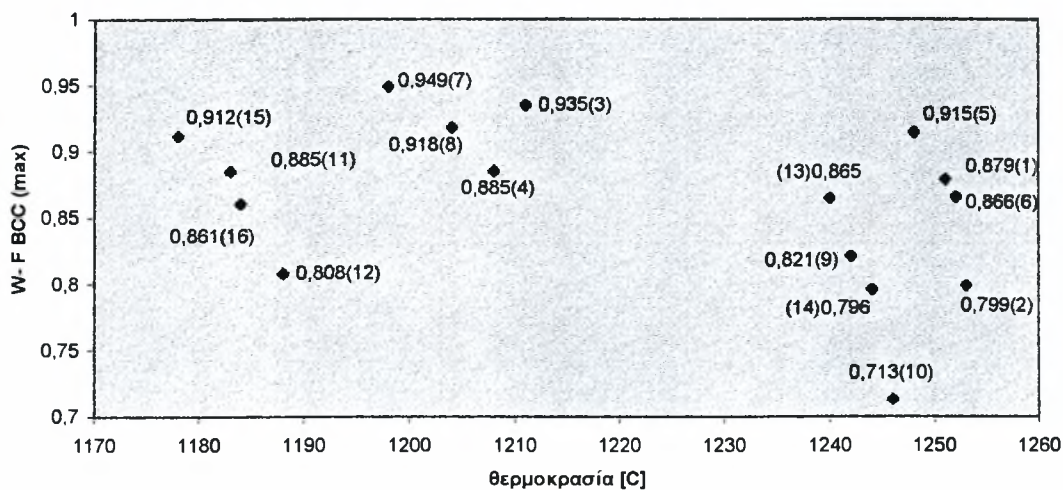
μεγαλύτερη όταν έχουμε ταυτόχρονη αύξηση του άνθρακα και του πυριτίου. Με αύξηση του χρωμίου και του νικελίου η liquidus επηρεάζεται κατά τον ίδιο τρόπο αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό.

4.2.2 Ποσοστά Φάσεων κατά την στερεοποίηση

Εξετάστηκαν στη συνέχεια τα ποσοστά των φάσεων κατά την διάρκεια της στερεοποίησης και για τις 16 συστάσεις συναρτήσει της θερμοκρασίας και η μεταβολή τους με την αλλαγή της σύστασης.

4.2.2.1 Φερρίτης (BCC)

Τα μέγιστα ποσοστά του φερρίτη που παρατηρήθηκαν για κάθε μια από τις 16 συστάσεις κατά την διάρκεια της στερεοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε για τον φερρίτη ενώ ο αριθμός στην παρένθεση αντιστοιχεί στον αριθμό της σύστασης.



Σχήμα 4.10 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού φερρίτη κατά την στερεοποίηση

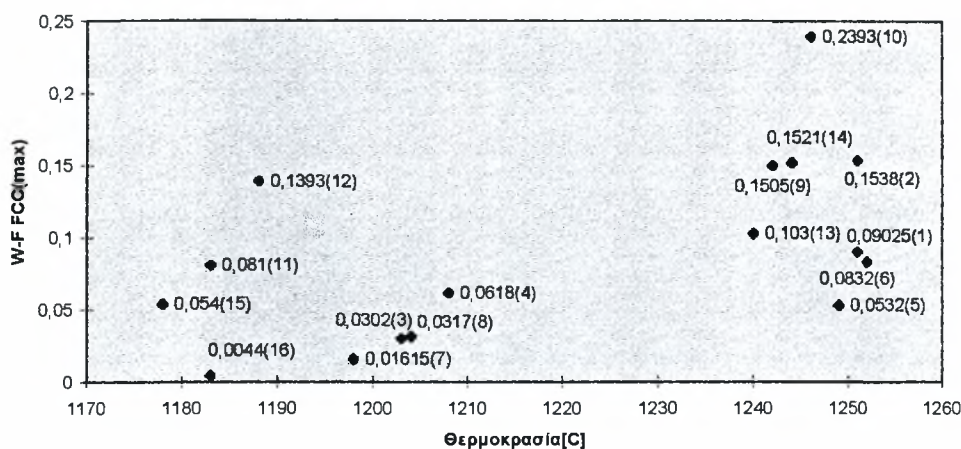
Η ελάχιστη τιμή του φερρίτη κατά την διάρκεια της στερεοποίησης παρατηρήθηκε στην 10η σύσταση (0.713) ενώ η μέγιστη στη 7^η (0.949). Τα ποσά αυτά είναι απολύτως φυσιολογικά ως προς το μέγεθος της τιμής τους και αυτό είναι εύκολο να το αντιληφθούμε κοιτώντας τις συστάσεις και λαμβάνοντας υπόψιν πως τα κραματικά στοιχεία επηρεάζουν την δομή.

Παρατηρείται επίσης από το διάγραμμα πως υπάρχουν δυο περιοχές όσον αφορά την θερμοκρασία που παρατηρείται το μέγιστο ποσό του φερρίτη και αυτό έχει να κάνει με το

ποσοστό του πυριτίου, δηλαδή χαμηλά ποσοστά πυριτίου οδηγούν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες εμφάνισης του μέγιστου ποσοστού και προφανώς και της θερμοκρασίας σχηματισμού.

4.2.2.2 Ωστενίτης (FCC)

Τα μέγιστα ποσοστά του ωστενίτη που παρατηρήθηκαν για κάθε μια από τις 16 συστάσεις κατά την διάρκεια της στερεοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε για τον ωστενίτη ενώ ο αριθμός στη παρένθεση αντιστοιχεί στον αριθμό της σύστασης.

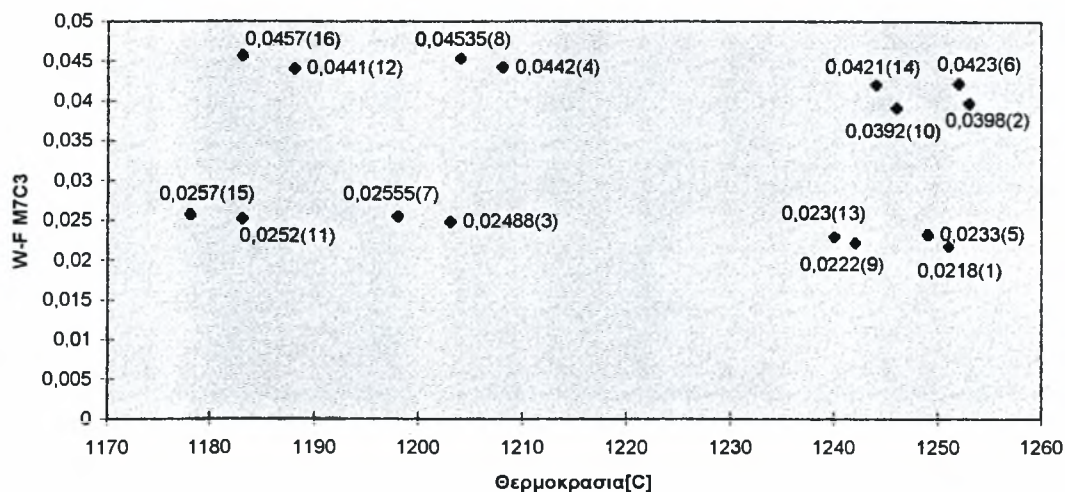


Σχήμα 4.11 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού ωστενίτη κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του ωστενίτη παρατηρήθηκε στην 16^η σύσταση (0.0044) και στην έβδομη (0.01615) ενώ η μέγιστη τιμή στην 10η (0.2393). Αξίζει να σημειώσουμε ότι σε αυτές τις τιμές παρατηρήθηκαν αντίστοιχα η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του φερρίτη. Τα ποσά αυτά είναι απολύτως φυσιολογικά ως προς το μέγεθος της τιμής τους και αυτό είναι ξεκάθαρο κοιτώντας τις συστάσεις και λαμβάνοντας υπόψιν το πως τα κραματικά στοιχεία επηρεάζουν την δομή. Παρατηρείται επίσης πως υπάρχουν δυο περιοχές θερμοκρασιών και αυτό έχει να κάνει με το ποσοστό του πυριτίου, δηλαδή χαμηλά ποσοστά πυριτίου οδηγούν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες εμφάνισης του μέγιστου ποσοστού και προφανώς και της θερμοκρασίας σχηματισμού.

4.2.2.3 Καρβίδιο M_7C_3

Τα μέγιστα ποσοστά του καρβιδίου που παρατηρήθηκαν κατά την στερεοποίηση, και για τις 16 συστάσεις, συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή για το καρβίδιο ενώ ο αριθμός στην παρένθεση αντιστοιχεί στην σύσταση.



Σχήμα 4.12 διάγραμμα θερμοκρασίας - κλάσματος μάζας του καρβιδίου M_7C_3 κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του καρβιδίου M_7C_3 κατά την διάρκεια της στερεοποίησης αντιστοιχεί στην 13^η σύσταση (0.0106) και η μέγιστη στην 16^η σύσταση (0.0463). Παρατηρείται ότι είναι τα ποσοστά είναι πολύ μικρά σε σχέση με αυτά του ωστενίτη και του φερρίτη.

4.2.2.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$

Σε ελάχιστες από τις 16 συστάσεις παρατηρήθηκε σχηματισμός του καρβιδίου κατά την στερεοποίηση πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο σχηματισμός του λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες απ' αυτές της λήξης στερεοποίησης.

4.2.2.5 Ποσοστά του Cr και Ni στην υγρή φάση

Εξετάστηκε στην συνέχεια πως μεταβάλλονται τα ποσοστά του χρωμίου και νικελίου στην υγρή φάση συναρτήσει του κλάσματος μάζας του υγρού και της θερμοκρασίας.

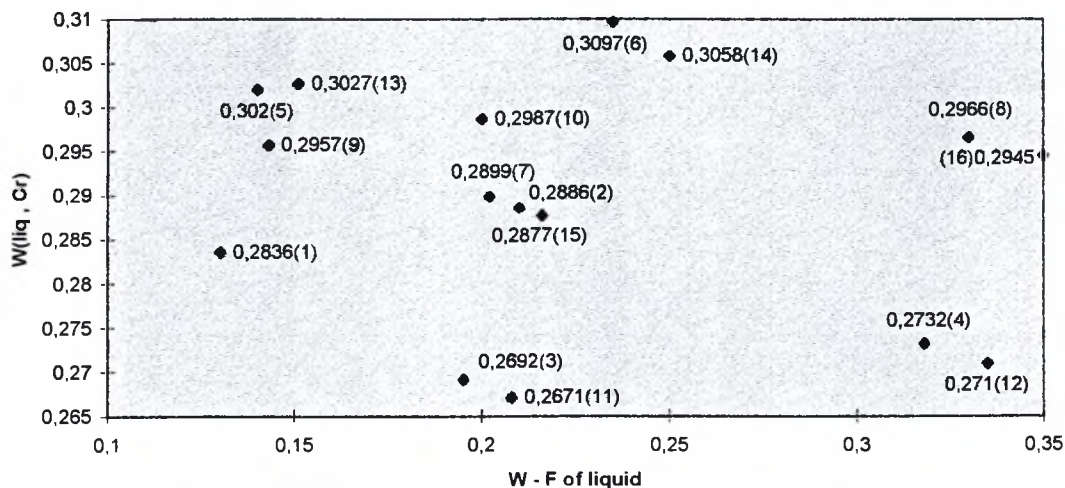
Κατά την διάρκεια της στερεοποίησης παρατηρήσαμε ότι το ποσοστό του χρωμίου αυξάνεται μέχρι μιας μέγιστης τιμής και στην συνέχεια ελαττώνεται λίγο. Η ίδια συμπεριφορά υπήρχε

και για τις 16 συστάσεις με μόνη διαφορά ότι μετατοπίζονταν το μέγιστο ποσοστό του ενώ η μεταβολή στην θερμοκρασία δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλη.

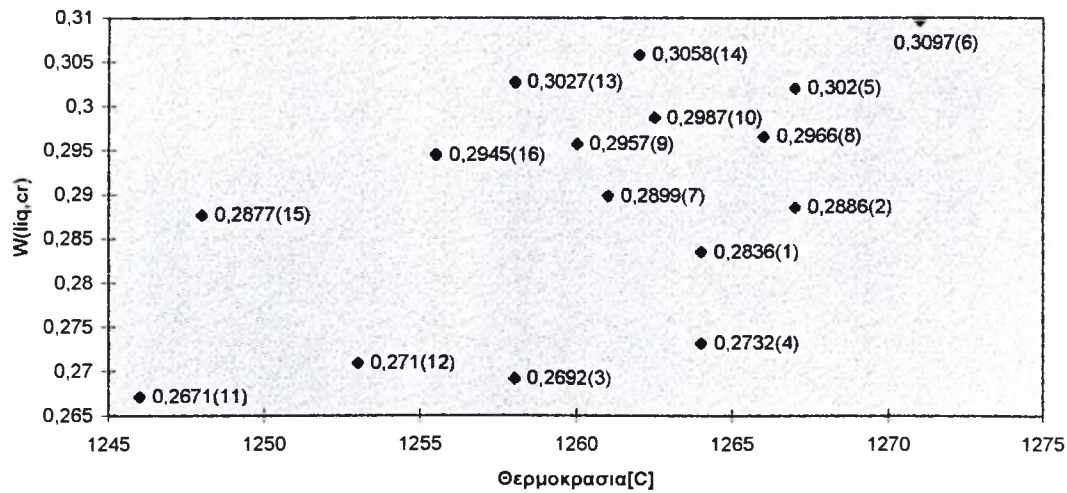
Η επίδραση του νικελίου ήταν εντελώς διαφορετική και για τις 16 συστάσεις όπου το ποσοστό του στην υγρή φάση αυξάνονταν συνεχώς και έπαιρνε την μέγιστη τιμή του σχεδόν με το πέρας της στερεοποίησης (πρέπει να σημειώσουμε όμως ότι η αρχική με την τελική τιμή του δεν παρουσίαζαν μεγάλη διαφορά).

Η επίδραση του νικελίου και χρωμίου συνδέεται άμεσα με τα ποσοστά των φάσεων του ωστενίτη και φερρίτη. Η γενική τάση κατά την διάρκεια της στερεοποίησης είναι μια αύξηση του Ni στην υγρή φάση - ουσιαστικά αύξηση του ωστενίτη, όχι όμως σημαντική - και μείωση του Cr - ουσιαστικά μείωση του φερρίτη.

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα των μέγιστων τιμών του χρωμίου στην υγρή φάση συναρτήσει του κλάσματος μάζας του υγρού και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.13 διάγραμμα κλάσμα μάζας υγρού - ποσοστού χρωμίου στην υγρή κατά την στερεοποίηση



Σχήμα 4.14 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού χρωμίου στην υγρή κατά την στερεοποίηση

4.2.3 Περιγραφή των φάσεων σε ισορροπία

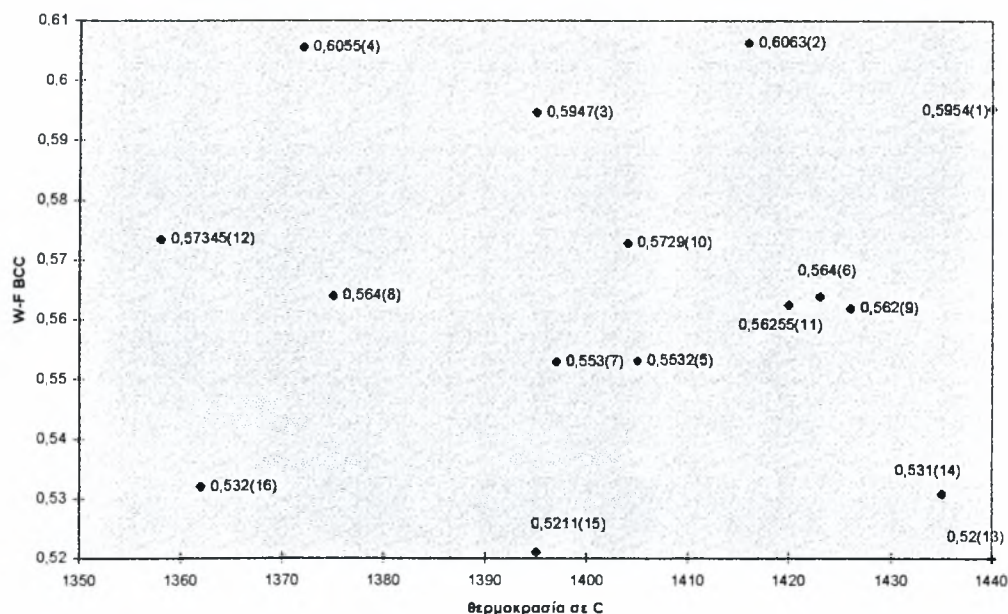
Μετά την μελέτη της στερεοποίησης με την προσομοίωση Scheil, εξετάσαμε τα ποσοστά των φάσεων, από το πέρας της στερεοποίησης μέχρι την θερμοκρασία δωματίου, συναρτήσει της θερμοκρασίας και της μεταβολής της σύστασης.

Ο στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων φάσεων (σ - φάση, φερρίτης, καρβίδιο $M_{23}C_6$).

4.2.3.1 Φερρίτης (BCC)

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του φερρίτη στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού του και οι αλλαγές του με τις

μεταβολές της σύστασης ενώ οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις συστάσεις .

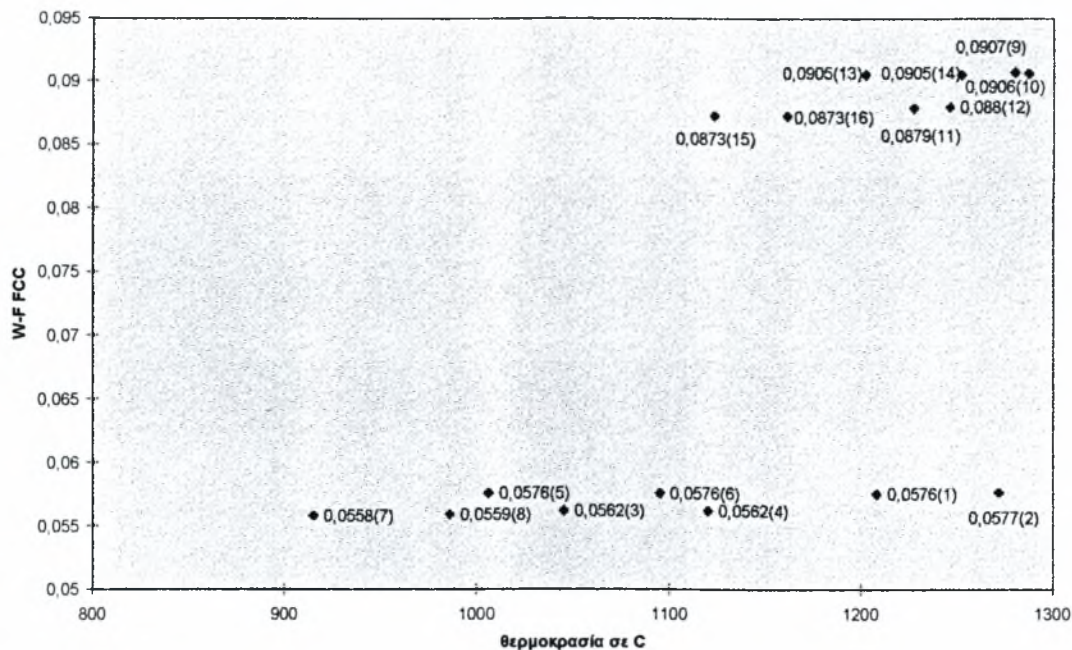


Σχήμα 4.15 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού φερρίτη στην ισορροπία

Η ελάχιστη τιμή του φερρίτη παρατηρείται στην 13^η σύσταση (0.52) και η μέγιστη στην 2^η (0.6063). Σημειώνεται μια απόκλιση από τις τιμές που περιμέναμε όσο αφορά το τελικό ποσό του φερρίτη και αυτό σχετίζεται με την επίδραση του χρωμίου στον σχηματισμό της σ-φάσης δηλαδή τα υψηλά ποσοστά του βοηθούν τελικά ιδιαίτερα τον σχηματισμό της σ-φάσης μειώνοντας το ποσό του φερρίτη.

4.2.3.2 Ωστενίτης

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του ωστενίτη στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού του και οι αλλαγές του με τις μεταβολές της σύστασης για κάθε μια από τις 16 συστάσεις ενώ οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις συστάσεις.



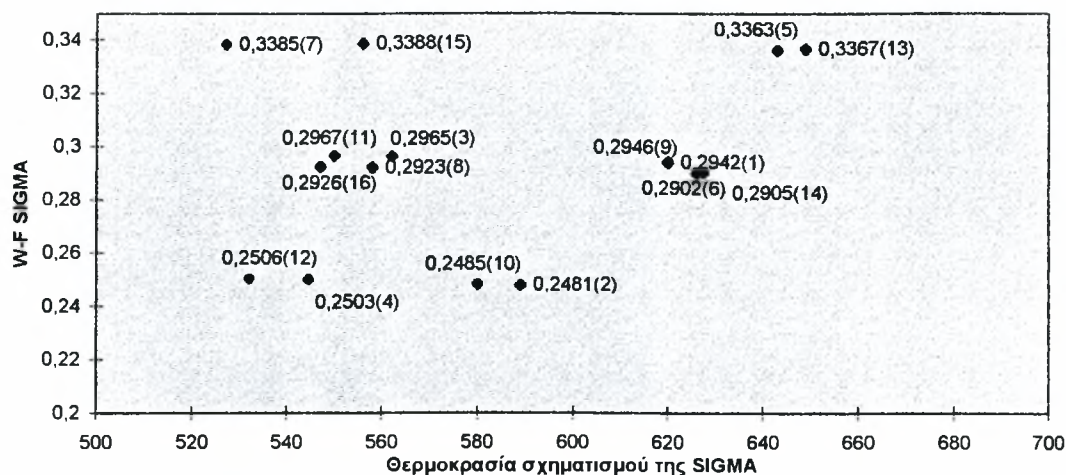
Σχήμα 4.16 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού ωστενίτη στην ισορροπία

Παρατηρείται ότι υπάρχουν δυο περιοχές όσον αφορά το τελικό ποσοστό του ωστενίτη στην θερμοκρασία δωματίου, που σχετίζονται με την σύσταση του νικελίου. Η πρώτη είναι(χαμηλή) είναι για ποσοστό νικελίου 3.5% κ.β και η δεύτερη (υψηλή) για ποσοστό νικελίου 5.5 % κ.β.

Το υψηλότερο ποσοστό του ωστενίτη παρατηρήθηκε στην 9^η (0.0907)σύσταση και το χαμηλότερο στην 7^η (0.0558).

4.2.3.3 SIGMA φάση

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό της σ-φάσης για κάθε μια από τις 16 συστάσεις στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού της και για τις εννιά συστάσεις και οι αλλαγές της με τις μεταβολές της σύστασης ενώ οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις συστάσεις.

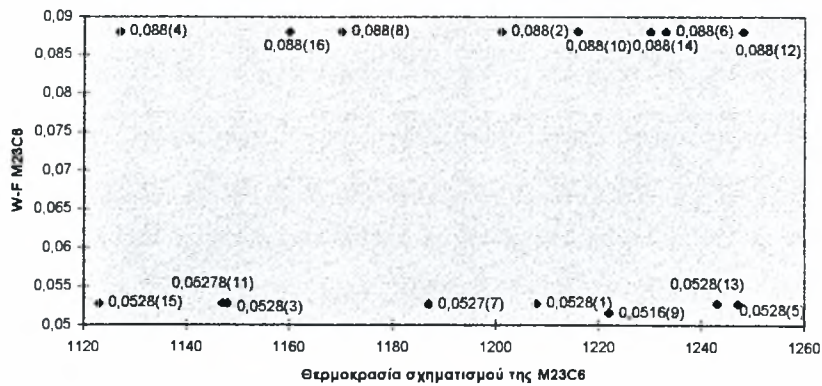


Σχήμα 4.17 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού σ - φάσης στην ισορροπία

Παρατηρείται ότι η ελάχιστη τιμή της σ -φάσης εμφανίζεται στην δεύτερη σύσταση (0.2481) και η μέγιστη στην πέμπτη (0.3363). Το μέγιστο ποσοστό της σ -φάσης το περιμέναμε στην 5^η και 7^η σύσταση. Παρατηρώντας όμως τα ποσά των συστάσεων αυτών βλέπουμε ότι δεν διαφέρουν και πολύ από το ποσό της 15^{ης} σύστασης. Αξιοσημείωτο είναι πως το ίδιο συμβαίνει και για τα χαμηλά ποσά της σ -φάσης, δηλαδή ενώ την χαμηλή σ -φάση την περιμέναμε στην 10^η και 12^η σύσταση αυτή παρουσιάστηκε στην 2^η με πολύ μικρή όμως διαφορά στο τελικό ποσοστό. Κοιτώντας όμως και τα αντίστοιχα ποσά του φερρίτη για τον χάλυβα παρατηρούμε ότι έχουν βάση δεδομένου ότι εκεί που έχουμε χαμηλή σ -φάση έχουμε υψηλό φερρίτη και αντίστροφα.

4.2.3.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του καρβιδίου $M_{23}C_6$ στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού του και για τις 16 συστάσεις και οι αλλαγές του με τις μεταβολές της σύστασης ενώ οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις συστάσεις.



Σχήμα 4.18 διάγραμμα θερμοκρασίας - κλάσματος μάζας του $M_{23}C_6$ στην ισορροπία

Παρατηρείται ότι υπάρχουν δυο περιοχές σύστασης, οι οποίες επηρεάζονται από το ποσοστό του άνθρακα. Για χαμηλό ποσοστό άνθρακα έχουμε χαμηλό ποσό του καρβιδίου και αντίστροφα. Ο άνθρακας είναι το μοναδικό στοιχείο που επηρεάζει το ποσό του καρβιδίου ενώ τα υπόλοιπα έχουν αμελητέα επίδραση πάνω του. Μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε κοιτώντας τις θερμοκρασίες σχηματισμού ότι η αύξηση του ποσοστού του πυριτίου οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας σχηματισμού του.

4.2.4 Προσέγγιση του ποσοστού των φάσεων μέσω της κινούσας δύναμης

Εξετάστηκε στη συνέχεια η κινούσα δύναμη των φάσεων που παρατηρήθηκαν στην θερμοκρασία δωματίου για κάθε μια από τις δεκάεξι συστάσεις του χάλυβα. Βρέθηκε η κατανομή της για τις φάσεις του φερρίτη, του ωστενίτη, της σ-φάσης και του καρβιδίου $M_{23}C_6$ από την θερμοκρασία σχηματισμού τους μέχρι την θερμοκρασία δωματίου. Η κινούσα δύναμη για κάθε μια από τις παραπάνω φάσεις δεν μας έδωσε το επιθυμητό αποτέλεσμα ώστε να καθιστά εύκολη την επιλογή της σύστασης για το ελάχιστο ποσό της σ-φάσης, του φερρίτη, του ωστενίτη και του καρβιδίου (με δεδομένο το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι η κινούσα δύναμη τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση για σχηματισμό των παραπάνω φάσεων).

Παρατηρήσαμε δηλαδή ότι σε μεγαλύτερες τιμές της κινούσας δύναμης δεν εμφανίζονταν απαραίτητα και μεγαλύτερο ποσοστό της συγκεκριμένης φάσης.

Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην διαφορετική θερμοκρασία σχηματισμού των φάσεων. Αποτελέσματα από την κινούσα δύναμη θα μπορούσαμε να παίρναμε όταν οι θερμοκρασίες σχηματισμού των φάσεων δεν είχαν μεγάλη διαφορά, τότε πιστεύουμε πως θα μπορούσαμε να δούμε πραγματικά την τάση για σχηματισμό των φάσεων.

4.3 Χάλυβας 3

4.3.1 Προσομοίωση Scheil

Μελετήθηκε η πορεία της στερεοποίησης με την προσομοίωση Scheil από την υγρή φάση έως ότου επέλθει πλήρης στερεοποίηση για κάθε μια από τις 12 συστάσεις με σκοπό να δούμε πως η μεταβολή των κραματικών στοιχείων καθώς και οι μεταβολές των φάσεων επηρεάζουν την πορεία της στερεοποίησης.

Παρατηρήθηκαν πολύ μικρές διακυμάνσεις τόσο στην θερμοκρασία έναρξης της liquidus όσο και στην τελική θερμοκρασία της στερεοποίησης. Η υψηλότερη θερμοκρασία έναρξης της liquidus παρατηρήθηκε στην πρώτη σύσταση ($1468\text{ }^{\circ}\text{C}$) και η χαμηλότερη στην 12^η σύσταση ($1453\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Μελετώντας την στερεοποίηση είδαμε επίσης ότι αυτή ολοκληρώνεται μέσα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος $190 - 210\text{ }^{\circ}\text{C}$.

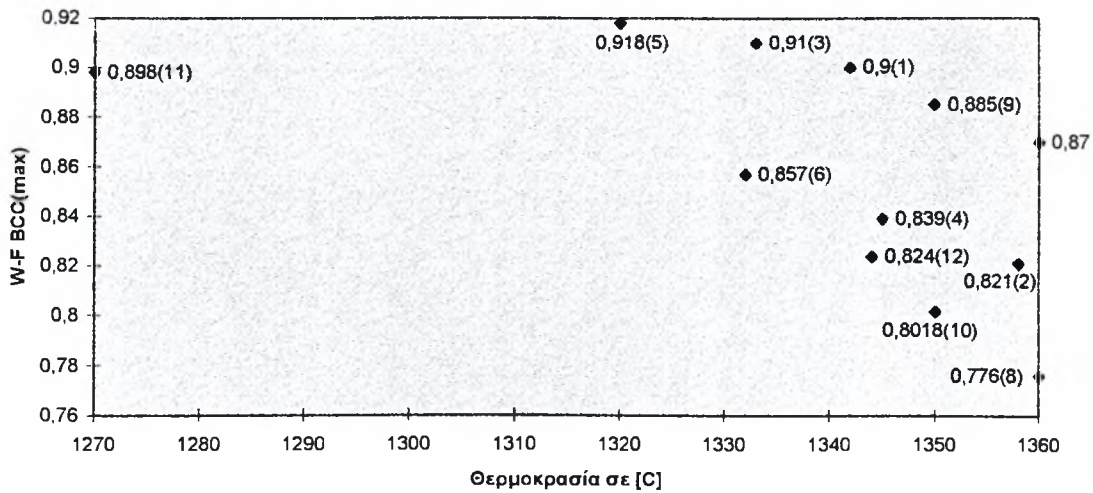
Η πρώτη στερεά φάση που σχηματίζεται είναι ο φερρίτης (BCC), κατόπιν ακολουθεί ο ωστενίτης (FCC) και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα ο σχηματισμός των καρβιδίων M_7C_3 , M_{23}C_6 (αυτό συμβαίνει σε όλες τις συστάσεις).

4.3.2 Ποσοστά Φάσεων κατά την στερεοποίηση

Εξετάστηκαν στη συνέχεια τα ποσοστά των φάσεων κατά την διάρκεια της στερεοποίησης και για τις δώδεκα συστάσεις, συναρτήσει της θερμοκρασίας και η μεταβολή τους με αλλαγή της σύστασης.

4.3.2.1 Φερρίτης (BCC)

Τα μέγιστα ποσοστά του φερρίτη που παρατηρήθηκαν για κάθε μια από τις δώδεκα συστάσεις, κατά την διάρκεια της στερεοποίησης, συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε για τον φερρίτη ενώ ο αριθμός στην παρένθεση αντιστοιχεί στον αριθμό της σύστασης.

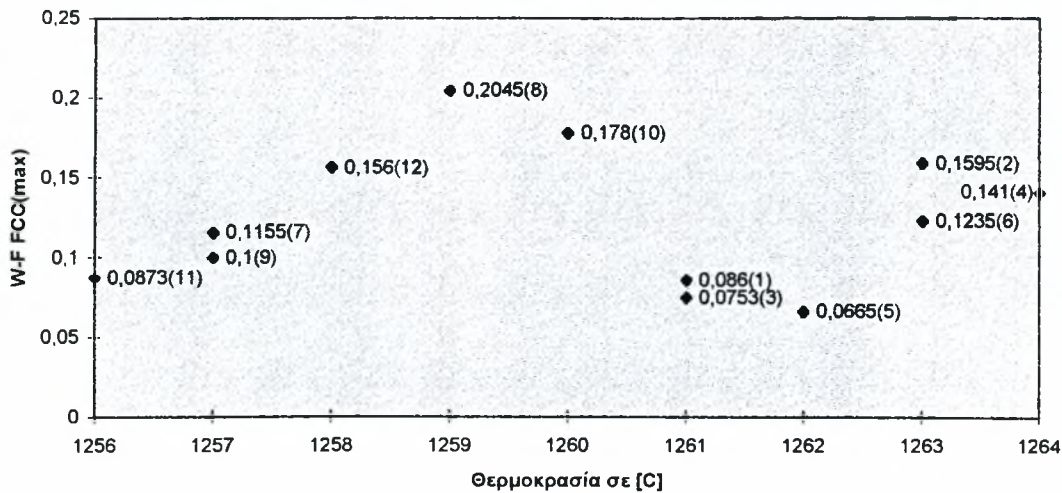


Σχήμα 4.19 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού φερρίτη κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του φερρίτη κατά την διάρκεια της στερεοποίησης παρατηρήθηκε στην 8^η σύσταση (0.776) ενώ η μέγιστη στη 5^η (0.918). Τα ποσά αυτά είναι απολύτως φυσιολογικά ως προς το μέγεθος της τιμής τους και αυτό είναι απολύτως ξεκάθαρο κοιτώντας τις συστάσεις και λαμβάνοντας υπόψιν πως τα κραματικά στοιχεία επηρεάζουν την δομή.

4.3.2.2 Ωστενίτης

Τα μέγιστα ποσοστά του ωστενίτη κατά την διάρκεια της στερεοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας, για κάθε μια από τις 12 συστάσεις, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε για τον ωστενίτη ενώ ο αριθμός στη παρένθεση αντιστοιχεί στον αριθμό της σύστασης.

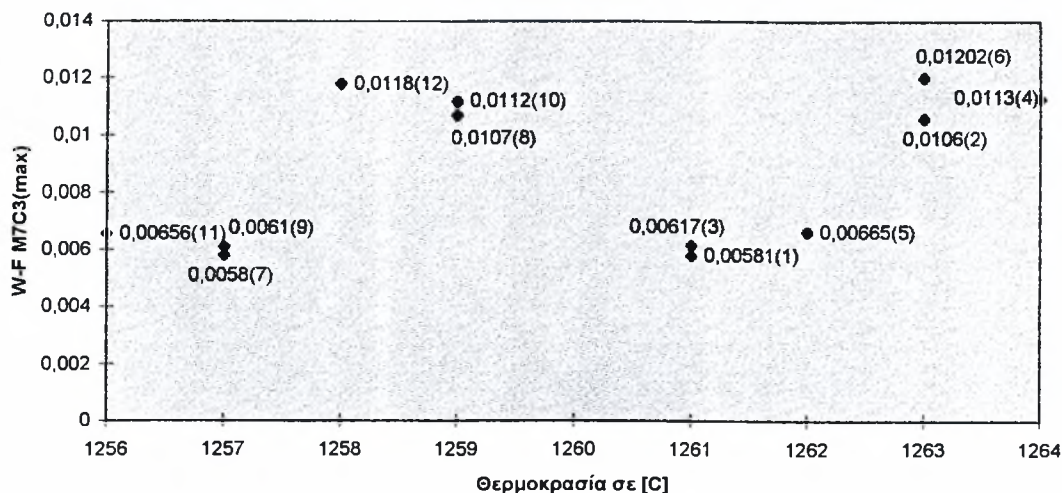


Σχήμα 4.20 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού ωστενίτη κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του ωστενίτη παρατηρήθηκε στην 5^η σύσταση (0.0665) ενώ η μέγιστη τιμή στην 8^η (0.2045). Τα ποσά αυτά είναι απολύτως φυσιολογικά ως προς την τιμή τους και αυτό είναι ξεκάθαρο κοιτώντας τις συστάσεις και λαμβάνοντας υπόψιν το πως τα κραματικά στοιχεία επηρεάζουν την δομή. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα αντίστοιχα ποσά έρχονται σε συμφωνία με τα ποσά που προηγουμένως βρήκαμε από τον φερρίτη(δηλαδή στην σύσταση για την οποία παρατηρείται το μέγιστο ποσό του ωστενίτη παρατηρείται και το ελάχιστο ποσό του φερρίτη και αντίστροφα).

4.3.2.3 Καρβίδιο M_7C_3

Τα μέγιστα ποσοστά του καρβιδίου κατά την στερεοποίηση για κάθε μια από τις 12 συστάσεις, συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου η ονοματολογία των μεγεθών είναι παρόμοια όπως παραπάνω.



Σχήμα 4.21 διάγραμμα θερμοκρασίας - κλάσματος μάζας καρβιδίου M_7C_3 κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του καρβιδίου M_7C_3 κατά την διάρκεια της στερεοποίησης αντιστοιχεί στην 7^η σύσταση (0.0058) και η μέγιστη στην 6^η (0.01202). Παρατηρούμε ότι τα ποσοστά είναι πολύ μικρά σε σχέση με αυτά του ωστενίτη και του φερρίτη.

4.3.2.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$

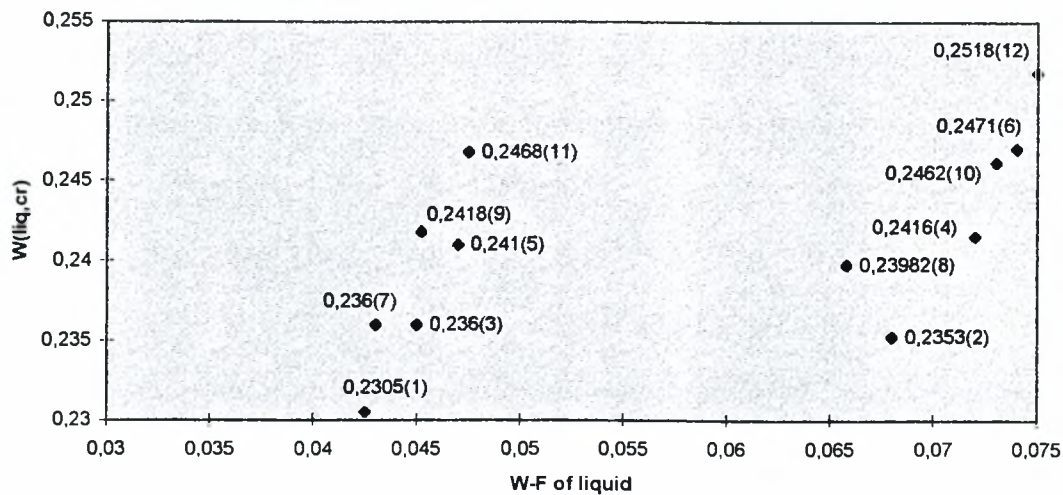
Σε καμιά από τις 12 συστάσεις δεν παρατηρήθηκε η εμφάνιση του καρβιδίου $M_{23}C_6$ κατά την στερεοποίηση, το οποίο σημαίνει ότι αυτό αρχίζει να εμφανίζεται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες και απ' αυτές της λήξης στερεοποίησης.

4.3.2.5 Ποσοστά του Cr και Ni στην υγρή φάση

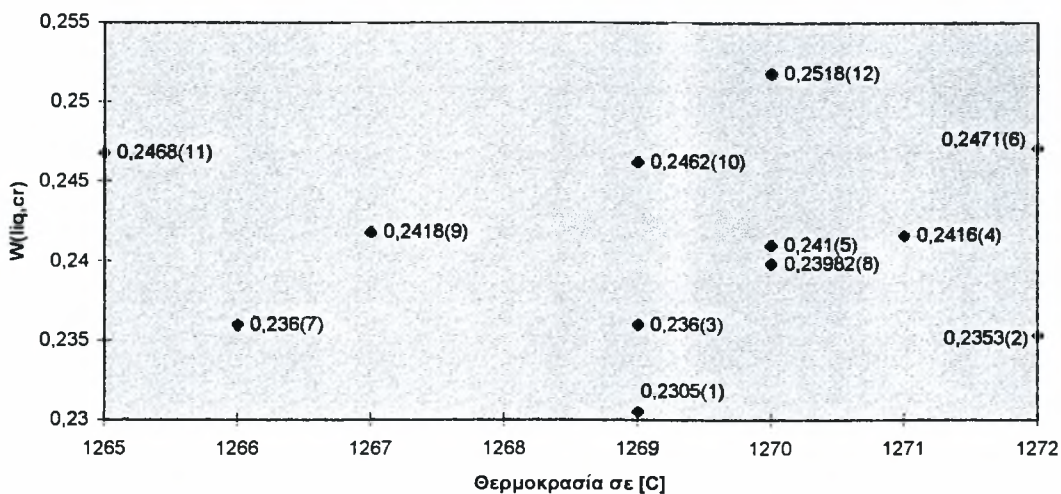
Εξετάστηκε στην συνέχεια πως μεταβάλλονται τα ποσοστά του χρωμίου και νικελίου στην υγρή φάση συναρτήσει του κλάσματος μάζας του υγρού και της θερμοκρασίας.

Κατά την διάρκεια της στερεοποίησης παρατηρήσαμε ότι το ποσοστό του χρωμίου αυξάνεται μέχρι μιας μέγιστης τιμής και στην συνέχεια ελαττώνεται λίγο. Η ίδια συμπεριφορά υπήρχε και για τις 12 συστάσεις με μόνη διαφορά ότι μετατοπίζονταν το μέγιστο ποσοστό και η αντίστοιχη θερμοκρασία.

Η επίδραση του νικελίου ήταν εντελώς διαφορετική. Παρατηρήσαμε δηλαδή ότι το ποσοστό του αυξάνονταν συνεχώς και έπαιρνε την μέγιστη τιμή του μετά το τέλος της στερεοποίησης. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα των μέγιστων τιμών του χρωμίου στην υγρή φάση συναρτήσει του κλάσματος μάζας του υγρού και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.22 διάγραμμα κλάσμα μάζας υγρού - ποσοστού χρωμίου στην υγρή κατά την στερεοποίηση



Σχήμα 4.23 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού χρωμίου στην υγρή κατά την στερεοποίηση

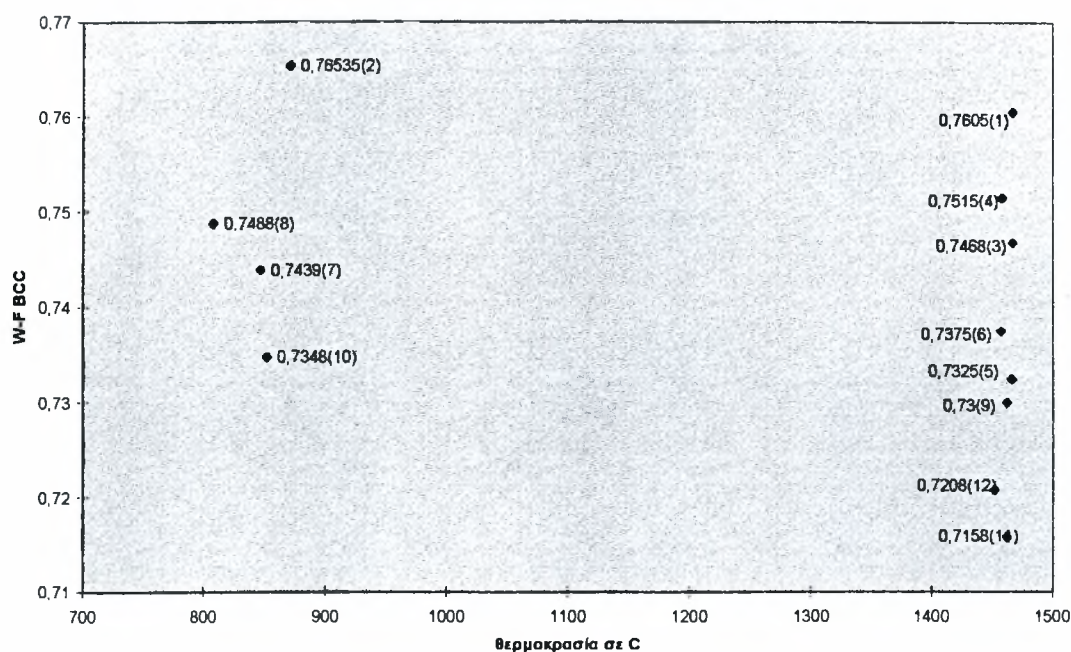
4.3.3 Περιγραφή των φάσεων σε ισορροπία

Μετά την μελέτη της στερεοποίησης με την προσομοίωση Scheil, εξετάσαμε τα ποσοστά των φάσεων, από το πέρας της στερεοποίησης μέχρι την θερμοκρασία δωματίου, συναρτήσει της θερμοκρασίας και της μεταβολής της σύστασης.

Ο στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων φάσεων (σ - φάση, φερρίτης, καρβίδιο $M_{23}C_6$) προσπαθώντας να κρατηθεί ο ωστενίτης σε ικανοποιητικό ποσοστό.

4.3.3.1 Φερρίτης (BCC)

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του φερρίτη στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού του και οι αλλαγές του με τις μεταβολές της σύστασης για κάθε μια από τις 12 συστάσεις.

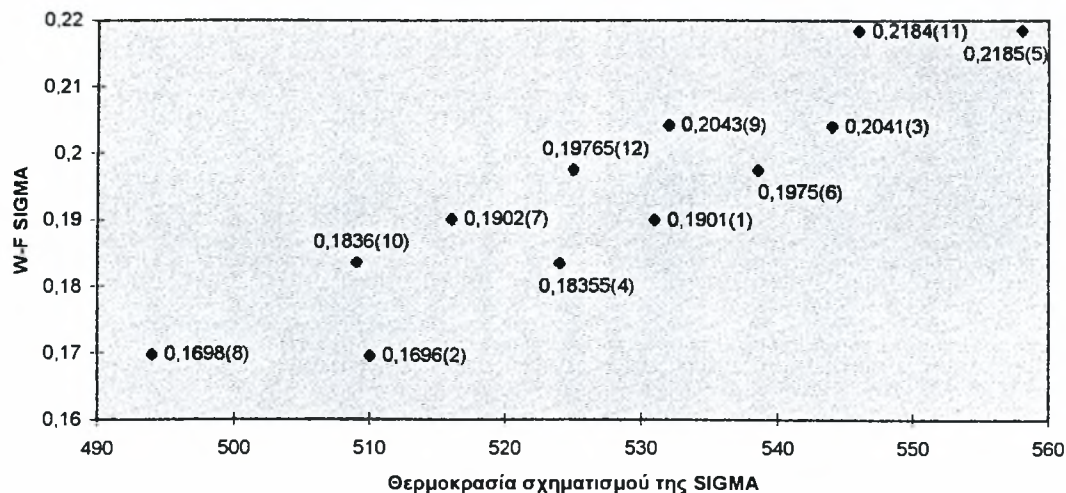


Σχήμα 4.24 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού φερρίτη στην ισορροπία

Η ελάχιστη τιμή του φερρίτη παρατηρείται στην 11^η σύσταση (0.7158) και η μέγιστη στην 2^η (0.76535). Σημειώνεται μια απόκλιση από τις τιμές που περιμέναμε όσο αφορά το τελικό ποσό του φερρίτη. Αυτό έχει να κάνει με την επίδραση των κραματικών στοιχείων στον σχηματισμό των φάσεων και με την αλληλεπίδραση των φάσεων μεταξύ τους.

4.3.3.2 σ - φάση

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό της σ -φάσης στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού της και οι αλλαγές της με τις μεταβολές της σύστασης για κάθε μια από τις 12 συστάσεις.



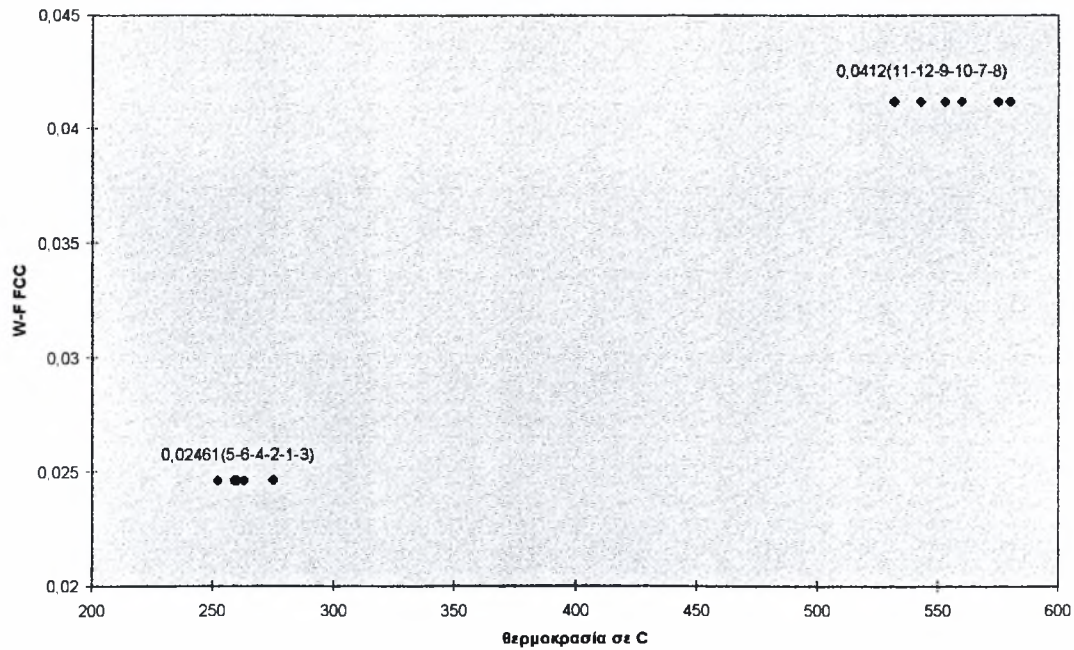
Σχήμα 4.25 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού σ-φάσης στην ισορροπία

Από το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση του άνθρακα οδηγεί σε μείωση του ποσού της σ-φάσης και της θερμοκρασίας σχηματισμού της. Επίσης φαίνεται η θετική επίδραση του χρωμίου και η αρνητική του νικελίου στον σχηματισμό της σ-φάσης.

Οι μέγιστες τιμές της σ-φάσης παρουσιάζονται στην 11^η και 5^η σύσταση, όπου τα ποσοστά του χρωμίου είναι αυξημένα. Αντίθετα οι ελάχιστες τιμές της σ-φάσης εμφανίζονται στην 2^η και 8^η σύσταση όπου το ποσοστό του χρωμίου είναι χαμηλό.

4.3.3.3 Ωστενίτης

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του ωστενίτη στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού του και οι αλλαγές του με τις μεταβολές της σύστασης για κάθε μια από τις 12 συστάσεις. Πρέπει να αναφέρουμε ότι οι θερμοκρασίες που φαίνονται στο διάγραμμα δεν είναι οι αρχικές θερμοκρασίες σχηματισμού του ωστενίτη αλλά οι θερμοκρασίες κάτω από τις οποίες δεν εξαφανίζεται καθόλου (σχηματίζεται δηλαδή σε υψηλές θερμοκρασίες, μηδενίζεται στην συνέχεια και ξανασχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες).

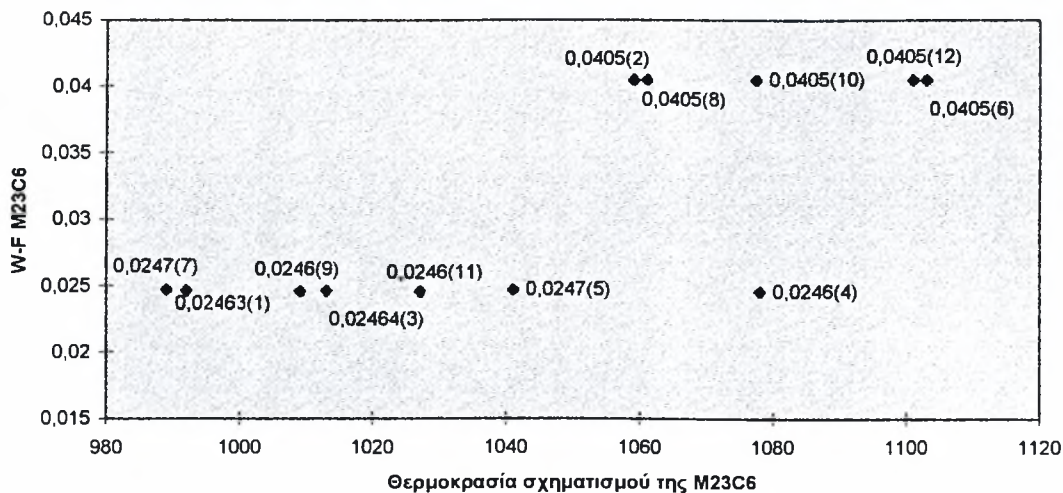


Σχήμα 4.26 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού ωστενίτη στην ισορροπία

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν δυο περιοχές όσον αφορά το τελικό ποσό και την θερμοκρασία σχηματισμού του ωστενίτη. Η πρώτη κυμαίνεται μεταξύ των 250 - 270 °C και η δεύτερη μεταξύ των 530 - 580 °C. Με βάση τις συστάσεις, φαίνεται ότι το νικέλιο ευθύνεται για την κατανομή αυτή όπου οι υψηλές θερμοκρασίες παρατηρούνται για ψηλά ποσοστά νικελίου και αντίστροφα.

4.3.3.4 Καρβίδιο $M_{23}C_6$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του καρβιδίου $M_{23}C_6$ στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού του και οι αλλαγές του με τις μεταβολές της σύστασης.



Σχήμα 4.27 διάγραμμα θερμοκρασίας - κλάσματος μάζας $M_{23}C_6$ στην ισορροπία

Παρατηρείται ότι υπάρχουν δυο περιοχές σύστασης, οι οποίες επηρεάζονται από το ποσοστό του άνθρακα. Για χαμηλό ποσοστό άνθρακα έχουμε χαμηλό ποσό του καρβιδίου και αντίστροφα. Ο άνθρακας είναι το μοναδικό στοιχείο που επηρεάζει το ποσό του καρβιδίου ενώ τα υπόλοιπα έχουν αμελητέα επίδραση.

Όσον αφορά την θερμοκρασία σχηματισμού, έχουμε δύο διακριτές ζώνες. Οι χαμηλές θερμοκρασίες σχηματισμού του καρβιδίου οφείλονται στο υψηλό ποσοστό του άνθρακα και αντίστροφα. Τα υπόλοιπα στοιχεία έχουν αμελητέα επίδραση στην θερμοκρασία σχηματισμού.

4.3.4 Προσέγγιση του ποσοστού των φάσεων μέσω της κινούσας δύναμης

Εξετάστηκε στη συνέχεια η κινούσα δύναμη των φάσεων που παρατηρήθηκαν στην θερμοκρασία δωματίου για κάθε μια από τις 12 συστάσεις του χάλυβα. Βρέθηκε η κατανομή της για τις φάσεις του φερρίτη, του ωστενίτη, της σ-φάσης και του καρβιδίου $M_{23}C_6$ από την θερμοκρασία σχηματισμού τους μέχρι την θερμοκρασία δωματίου. Η κινούσα δύναμη για κάθε μια από τις παραπάνω φάσεις συγκλίνει στο ίδιο ποσό ώστε να καθιστά δύσκολη την επιλογή της σύστασης για το ελάχιστο ποσό της σ-φάσης, του φερρίτη, του ωστενίτη και του καρβιδίου (με δεδομένο το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι η κινούσα δύναμη τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση για σχηματισμό των παραπάνω φάσεων). Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην διαφορετική θερμοκρασία σχηματισμού των φάσεων.

4.4 Χάλυβας 4

4.4.1 Προσομοίωση Scheil

Αρχικά μελετήθηκε η πορεία της στερεοποίησης με την προσομοίωση Scheil από την υγρή φάση έως ότου επέλθει πλήρης στερεοποίηση για κάθε μια από τις 9 συστάσεις με σκοπό να δούμε πως επηρεάζει η μεταβολή των κραματικών στοιχείων καθώς και οι μεταβολές των φάσεων την πορεία της στερεοποίησης.

Παρατηρήθηκαν πολύ μικρές διακυμάνσεις τόσο στην θερμοκρασία έναρξης της liquidus όσο και στην τελική θερμοκρασία ολοκλήρωσης της στερεοποίησης. Η υψηλότερη θερμοκρασία έναρξης της liquidus παρατηρήθηκε στην πρώτη σύσταση ($1485\text{ }^{\circ}\text{C}$) και η χαμηλότερη στην 9^η σύσταση ($1479\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Στις ίδιες συστάσεις παρατηρήθηκαν αντίστοιχα η υψηλότερη και η χαμηλότερη θερμοκρασία λήξης της στερεοποίησης. Δηλαδή και για τις παραπάνω 9 συστάσεις οι θερμοκρασίες έναρξης της liquidus και ολοκλήρωσης της στερεοποίησης σχεδόν συνέπιπταν με διαφορές της τάξης των $2 - 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αυτό οφείλεται στην πολύ μικρή μεταβολή της σύστασης των κραματικών στοιχείων που είχε αμελητέα τελικά επίδραση στον καθορισμό των θερμοκρασιών. Μελετώντας την στερεοποίηση είδαμε επίσης ότι αυτή ολοκληρώνεται μέσα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος $220 - 225\text{ }^{\circ}\text{C}$.

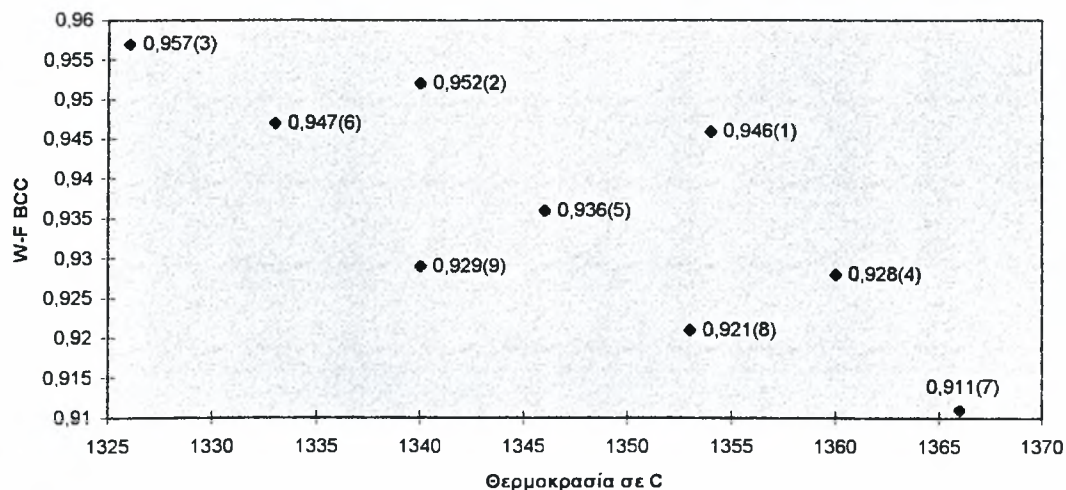
Η πρώτη στερεά φάση που σχηματίζεται είναι ο φερρίτης (BCC), και αυτό συμβαίνει σε όλες τις συστάσεις, κατόπιν ακολουθεί ο ωστενίτης (FCC) και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα ο σχηματισμός του καρβιδίου M_7C_3 . Από την μελέτη των θερμοκρασιών liquidus είδαμε ότι επηρεάζονται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση των κραματικών στοιχείων

4.4.2 Ποσοστά Φάσεων κατά την στερεοποίηση

Εξετάστηκαν στη συνέχεια τα ποσοστά των φάσεων συναρτήσει της θερμοκρασίας και η μεταβολή τους με αλλαγή της σύστασης.

4.4.2.1 Φερρίτης (BCC)

Τα μέγιστα ποσοστά του φερρίτη που παρατηρήθηκαν για τις 9 συστάσεις κατά την διάρκεια της στερεοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε για τον φερρίτη ενώ ο αριθμός στην παρένθεση αντιστοιχεί στον αριθμό της σύστασης.



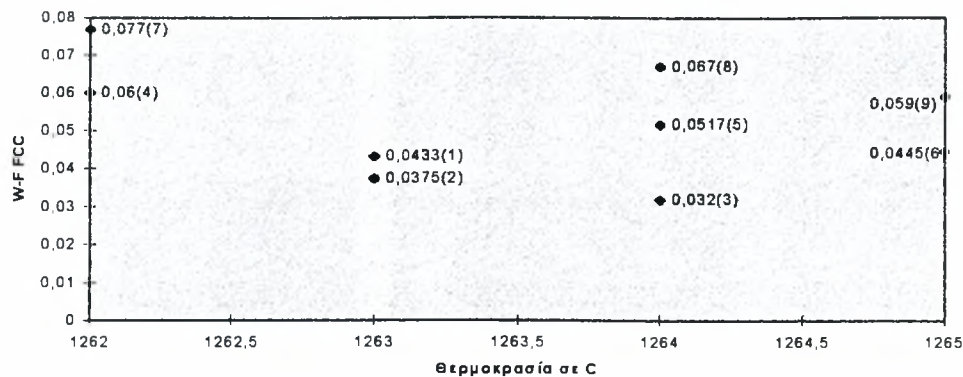
Σχήμα 4.28 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού φερρίτη κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του φερρίτη κατά την διάρκεια της στερεοποίησης παρατηρήθηκε στην έβδομη σύσταση (0.911) ενώ η μέγιστη στη τρίτη (0.957). Τα ποσά αυτά είναι απολύτως φυσιολογικά ως προς το μέγεθος της τιμής τους και αυτό είναι εύκολο να το αντιληφθούμε κοιτώντας τις συστάσεις και λαμβάνοντας υπόψιν πως τα κραματικά στοιχεία επηρεάζουν την δομή.

Παρατηρείται επίσης από το διάγραμμα πως υπάρχουν τρεις περιοχές του φερρίτη οι οποίες μπορούν με ικανοποιητική προσέγγιση να θεωρηθούν ότι μεταβάλλονται γραμμικά τόσο ως προς την θερμοκρασία όσο και ως προς το ποσοστό του. Δηλαδή με την αλλαγή της σύστασης οι μεταβολές που συμβαίνουν στο ποσό του φερρίτη και στην θερμοκρασία είναι περίπου οι ίδιες.

4.4.2.2 Ωστενίτης (FCC)

Τα μέγιστα ποσοστά του ωστενίτη που παρατηρήθηκαν για τις εννέα συστάσεις κατά την διάρκεια της στερεοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε για τον ωστενίτη ενώ ο αριθμός στη παρένθεση αντιστοιχεί στον αριθμό της σύστασης.

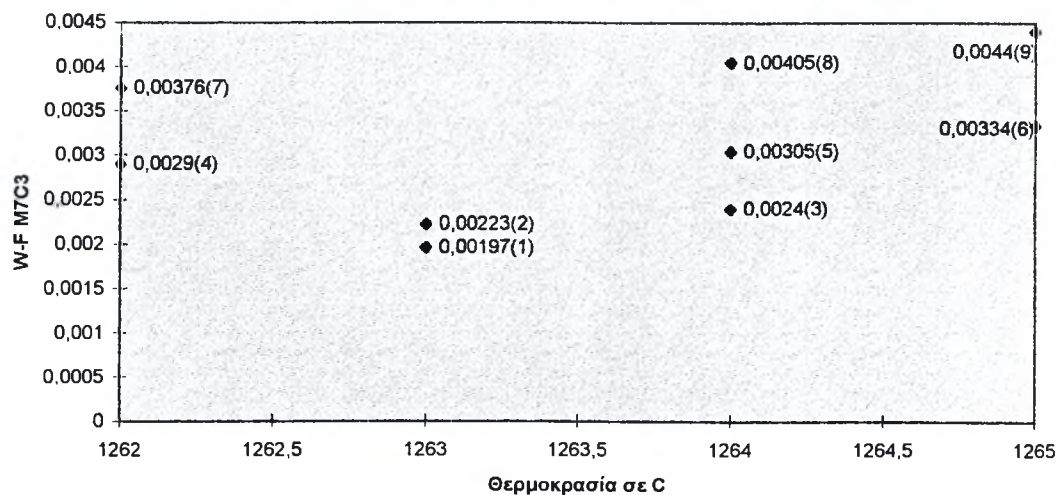


Σχήμα 4.29 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού ωστενίτη κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του ωστενίτη παρατηρήθηκε στην τρίτη σύσταση (0.032) ενώ η μέγιστη τιμή στην έβδομη (0.077). Αξίζει να σημειώσουμε ότι σε αυτές τις τιμές παρατηρήθηκαν αντίστοιχα η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του φερρίτη. Τα ποσά αυτά είναι απολύτως φυσιολογικά ως προς το μέγεθος της τιμής τους και αυτό είναι ξεκάθαρο κοιτώντας τις συστάσεις και λαμβάνοντας υπόψιν το πως τα κραματικά στοιχεία επηρεάζουν την δομή.

4.4.2.3 Καρβίδιο M_7C_3

Τα μέγιστα ποσοστά του καρβιδίου κατά την στερεοποίηση, και για τις 9 συστάσεις, συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή για το καρβίδιο ενώ ο αριθμός στην παρένθεση αντιστοιχεί στην σύσταση.



Σχήμα 4.30 διάγραμμα θερμοκρασίας - κλάσματος μάζας καρβιδίου M_7C_3 κατά την στερεοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του καρβιδίου M_7C_3 κατά την διάρκεια της στερεοποίησης αντιστοιχεί στην 1^η σύσταση (0.00197) και η μέγιστη στην 9^η (0.0044). Παρατηρούμε ότι τα ποσοστά είναι πολύ μικρά σε σχέση με αυτά του ωστενίτη και του φερρίτη.

4.4.2.4 Καρβίδιο $M_{73}C_6$

Σε καμιά από τις 9 συστάσεις δεν παρατηρήθηκε σχηματισμός του καρβιδίου κατά την στερεοποίηση πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο σχηματισμός του λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες απ' αυτές της λήξης στερεοποίησης (1262).

4.4.2.5 Ποσοστά του Cr και Ni στην υγρή φάση

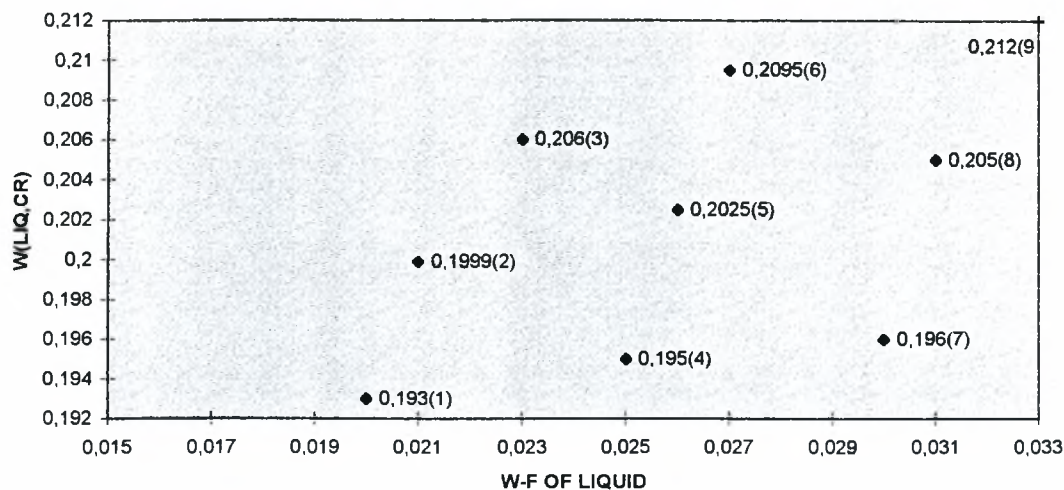
Εξετάστηκε στην συνέχεια πως μεταβάλλονται τα ποσοστά του χρωμίου και νικελίου στην υγρή φάση συναρτήσει του κλάσματος μάζας του υγρού και της θερμοκρασίας.

Κατά την διάρκεια της στερεοποίησης παρατηρήσαμε ότι το ποσοστό του χρωμίου αυξάνεται μέχρι μιας μέγιστης τιμής και στην συνέχεια ελαττώνεται λίγο. Η ίδια συμπεριφορά υπήρχε και για τις 9 συστάσεις με μόνη διαφορά ότι μετατοπιζόνταν το μέγιστο ποσοστό ενώ η μεταβολή στην θερμοκρασία ήταν αμελητέα.

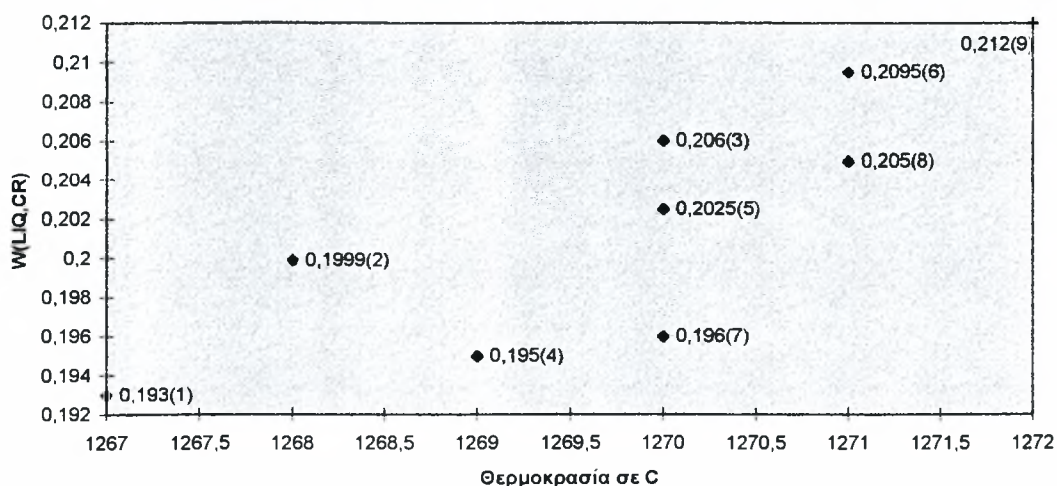
Η επίδραση του νικελίου ήταν εντελώς διαφορετική και για τις 9 συστάσεις όπου το ποσοστό του στην υγρή φάση μειωνόταν συνεχώς και έπαιρνε την ελάχιστη τιμή του σχεδόν με το πέρας της στερεοποίησης.

Η επίδραση του νικελίου και χρωμίου συνδέεται άμεσα με τα ποσοστά των φάσεων του ωστενίτη και φερρίτη. Η γενική τάση κατά την διάρκεια της στερεοποίησης είναι μια μείωση του Ni στην υγρή φάση - ουσιαστικά μείωση του ωστενίτη - και αύξηση του Cr - ουσιαστικά αύξηση του φερρίτη.

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα των μέγιστων τιμών του χρωμίου στην υγρή φάση συναρτήσει του κλάσματος μάζας του υγρού και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.31 διάγραμμα κλάσμα μάζας υγρού - ποσοστού χρωμίου στην υγρή φάση κατά την στερεοποίηση



Σχήμα 4.32 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού χρωμίου στην υγρή φάση κατά την στερεοποίηση

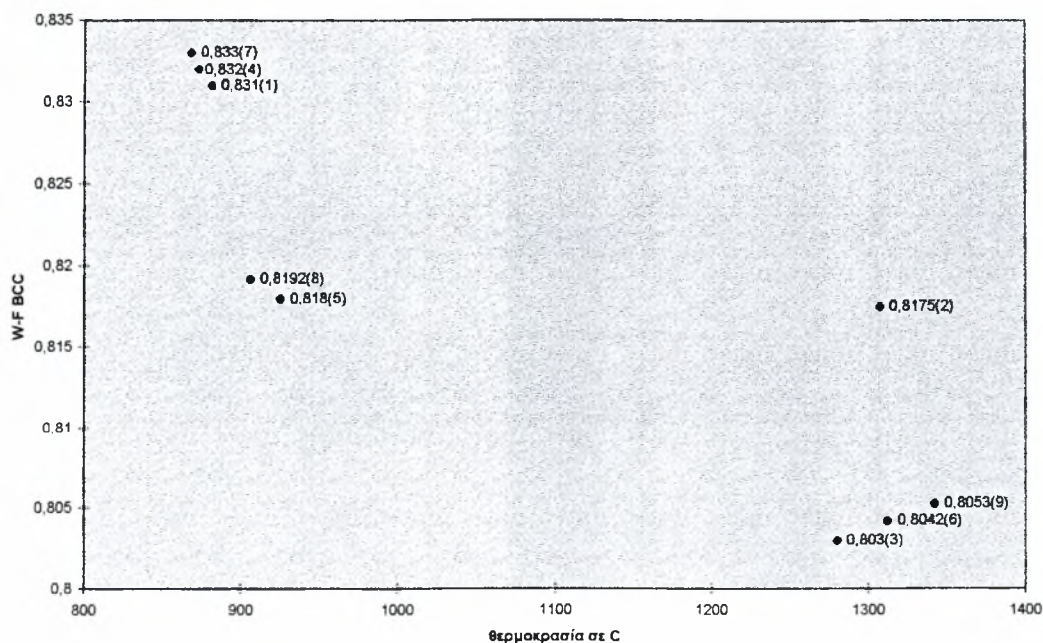
4.4.3 Περιγραφή των φάσεων σε ισορροπία

Μετά την μελέτη της στερεοποίησης με την προσομοίωση Scheil, εξετάσαμε τα ποσοστά των φάσεων, από το πέρας της στερεοποίησης μέχρι την θερμοκρασία δωματίου, συναρτήσει της θερμοκρασίας και της μεταβολής της σύστασης.

Ο στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων φάσεων (σ - φάση, φερρίτης, καρβίδιο $M_{23}C_6$).

4.4.3.1 Φερρίτης (BCC)

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του φερρίτη στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας και οι αλλαγές του με τις μεταβολές της σύστασης ενώ οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις συστάσεις . Πρέπει να πούμε ότι οι θερμοκρασίες που φαίνονται δεν είναι οι αρχικές θερμοκρασίες σχηματισμού του φερρίτη αλλά οι θερμοκρασίες κάτω από τις οποίες δεν εξαφανίζεται καθόλου (δηλαδή σχηματίζεται σε ψηλές θερμοκρασίες μηδενίζεται στην συνέχεια και ξανασχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες).



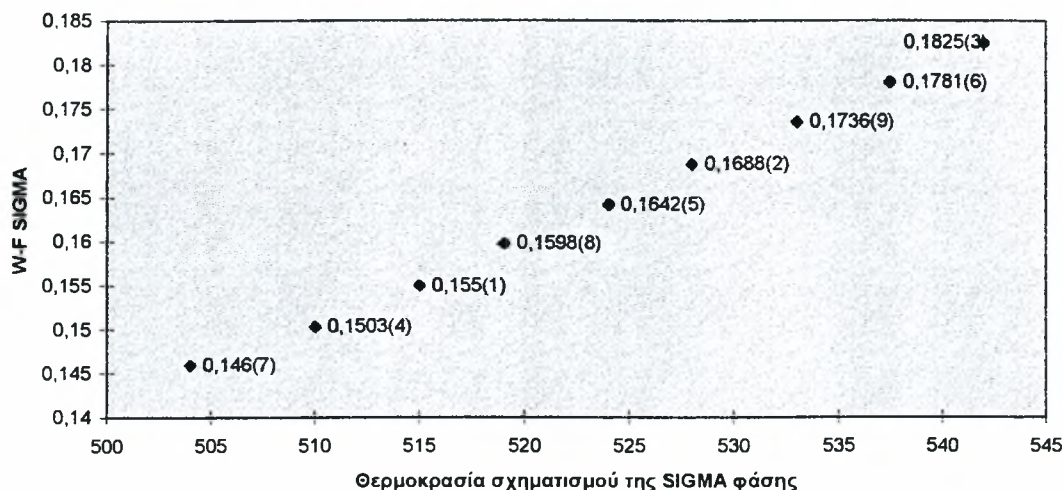
Σχήμα 4.33 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού φερρίτη στην ισορροπία

Η ελάχιστη τιμή του φερρίτη παρατηρείται στην τρίτη σύσταση (0.803) και η μέγιστη στην έβδομη (0.833). Σημειώνεται μια απόκλιση από τις τιμές που περιμέναμε όσο αφορά το

τελικό ποσό του φερρίτη. Πιο συγκεκριμένα πιστεύαμε ότι η μέγιστη τιμή του φερρίτη θα παρουσιαζόταν στην τρίτη σύσταση και η ελάχιστη στην έβδομη με δεδομένη την επίδραση των κραματικών στοιχείων. Αυτό οφείλεται στην επίδραση των κραματικών στοιχείων και πως αυτά επηρεάζουν την δομή καθώς και στην αλληλεπίδραση των φάσεων μεταξύ τους.

4.4.3.2 SIGMA φάση

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό της σ -φάσης στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού της και για τις εννιά συστάσεις και οι αλλαγές της με τις μεταβολές της σύστασης ενώ οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις συστάσεις.

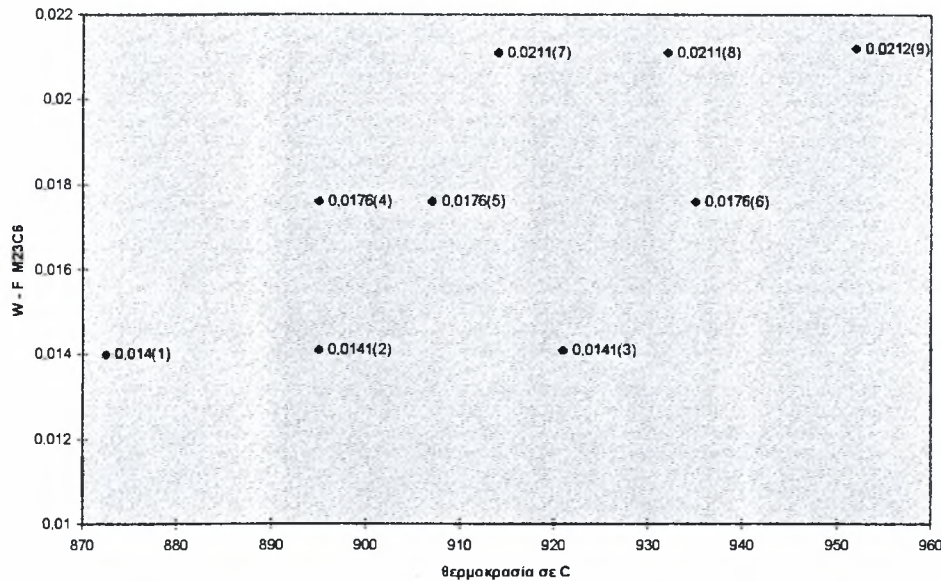


Σχήμα 4.34 διάγραμμα θερμοκρασίας - ποσοστού σ - φάσης στην ισορροπία

Παρατηρείται ότι η ελάχιστη τιμή της σ -φάσης εμφανίζεται στην έβδομη σύσταση (0.146) και η μέγιστη στην τρίτη (0.1825). Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα με δεδομένη την επίδραση των κραματικών στοιχείων στον σχηματισμό των φάσεων. Μπορούμε να παρατηρήσουμε επίσης πως στην αντίστοιχη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της σ -φάσης παρατηρήθηκε η ελάχιστη και μέγιστη τιμή του φερρίτη.

4.4.3.3 Καρβίδιο $M_{23}C_6$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μέγιστο ποσό του καρβιδίου $M_{23}C_6$ στην θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει της θερμοκρασίας σχηματισμού του και για τις εννιά συστάσεις και οι αλλαγές του με τις μεταβολές της σύστασης.



Σχήμα 4.35 διάγραμμα θερμοκρασίας - κλάσματος μάζας καρβιδίου $M_{23}C_6$ στην ισορροπία

Παρατηρείται ότι υπάρχουν τρεις περιοχές σύστασης, οι οποίες επηρεάζονται από το ποσοστό του άνθρακα. Για χαμηλό ποσοστό άνθρακα έχουμε χαμηλό ποσό του καρβιδίου και αντίστροφα. Ο άνθρακας είναι το μοναδικό στοιχείο που επηρεάζει το ποσό του καρβιδίου ενώ τα υπόλοιπα έχουν αμελητέα επίδραση πάνω του. Μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε κοιτώντας τις θερμοκρασίες σχηματισμού ότι η αύξηση του ποσοστού του χρωμίου οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας σχηματισμού του.

4.4.4 Προσέγγιση του ποσοστού των φάσεων μέσω της κινούσας δύναμης

Εξετάστηκε στη συνέχεια η κινούσα δύναμη των φάσεων που παρατηρήθηκαν στην θερμοκρασία δωματίου για κάθε μια από τις εννέα συστάσεις του χάλυβα. Βρέθηκε η κατανομή της για τις φάσεις του φερρίτη, της σ-φάσης και του καρβιδίου $M_{23}C_6$ από την θερμοκρασία σχηματισμού τους μέχρι την θερμοκρασία δωματίου. Η κινούσα δύναμη για κάθε μια από τις παραπάνω φάσεις συγκλίνει στο ίδιο ποσό ώστε να καθιστά δύσκολη την επιλογή της σύστασης για το ελάχιστο ποσό της σ-φάσης, του φερρίτη και του καρβιδίου (με

δεδομένο το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι η κινούσα δύναμη τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση για σχηματισμό των παραπάνω φάσεων). Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην διαφορετική θερμοκρασία σχηματισμού των φάσεων. Η προσέγγιση με την κινούσα δύναμη θα μπορούσε να μας δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν οι θερμοκρασίες σχηματισμού των φάσεων δεν είχαν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους.

Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα

1. Αύξηση του C και του Si μειώνουν την Liquidus και η μείωση είναι ακόμα μεγαλύτερη όταν έχουμε ταυτόχρονη αύξηση των δύο στοιχείων. Η επίδραση του Cr και του Ni έχουν αμελητέα επίδραση στον καθορισμό της liquidus.
2. Χαμηλές θερμοκρασίες liquidus ευνοούν τον σχηματισμό του φερρίτη και αποτρέπουν τον σχηματισμό του ωστενίτη.
3. Παρατηρούμε μια γενική τάση για αύξηση του χρωμίου και μείωση του νικελίου στην υγρή φάση η οποία έχει να κάνει με τα ποσοστά του φερρίτη και του ωστενίτη.
4. Το καρβίδιο $M_{23}C_6$ σχηματίζεται κατά κανόνα (εκτός από ελάχιστες περιπτώσεις) μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης και σε θερμοκρασίες αρκετά διαφορετικές από αυτές που η βιβλιογραφία ορίζει.
5. Το καρβίδιο M_7C_3 σχηματίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες και για ένα μικρό θερμοκρασιακό εύρος της τάξης των 200 - 300 °C. Παρατηρείται ότι ενώ εμφανίζεται στην προσομοίωση της στερεοποίησης, πολλές φορές δεν εμφανίζεται σε διαγράμματα ισορροπίας.
6. Η μείωση του πυριτίου οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας σχηματισμού της σ - φάσης του καρβιδίου και του ωστενίτη και αντίστροφα.
7. Ο άνθρακας είναι το μοναδικό στοιχείο που επηρεάζει το ποσό του καρβιδίου $M_{23}C_6$. Συγκεκριμένα αύξηση του άνθρακα οδηγεί σε αύξηση του ποσού του καρβιδίου $M_{23}C_6$.
8. Εκεί που παρατηρείται το μέγιστο ποσό της σ - φάσης παρατηρούνται τα χαμηλότερα ποσά του φερρίτη και του καρβιδίου και αντίστροφα .
9. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για την κινούσα δύναμη, δεν ήταν ιδιαίτερα διαφωτιστικά για την τελική επιλογή των συστάσεων, μιας και οι μεταβολές της δεν ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητες.

5.2 Επιλογή τελικών συστάσεων

Η τελική επιλογή των συστάσεων για τον κάθε χάλυβα θα γίνει με σκοπό την ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων φάσεων, δηλαδή του φερρίτη, της σ - φάσης και του καρβιδίου και την μεγιστοποίηση του ωστενίτη. Από τα αποτελέσματα όμως παρατηρούμε ότι δεν μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των παραπάνω φάσεων.

Παρατηρείται επίσης ότι η χαμηλή θερμοκρασία σχηματισμού της σ -φάσης οδηγεί σε χαμηλά ποσοστά της φάσης σε θερμοκρασία δωματίου.

Η τελική, λοιπόν, επιλογή της σύστασης θα εξαρτηθεί από τα παρακάτω :

1. Χαμηλό ποσοστό σ - φάσης
2. Χαμηλή θερμοκρασία σχηματισμού

Οι τελικές προτεινόμενες συστάσεις είναι οι παρακάτω :

1. Χάλυβας - 1
 - σύσταση 4 και 12
2. Χάλυβας - 2
 - σύσταση 12
3. Χάλυβας - 3
 - σύσταση 8
4. Χάλυβας - 4
 - σύσταση 7

5.3 Προτάσεις

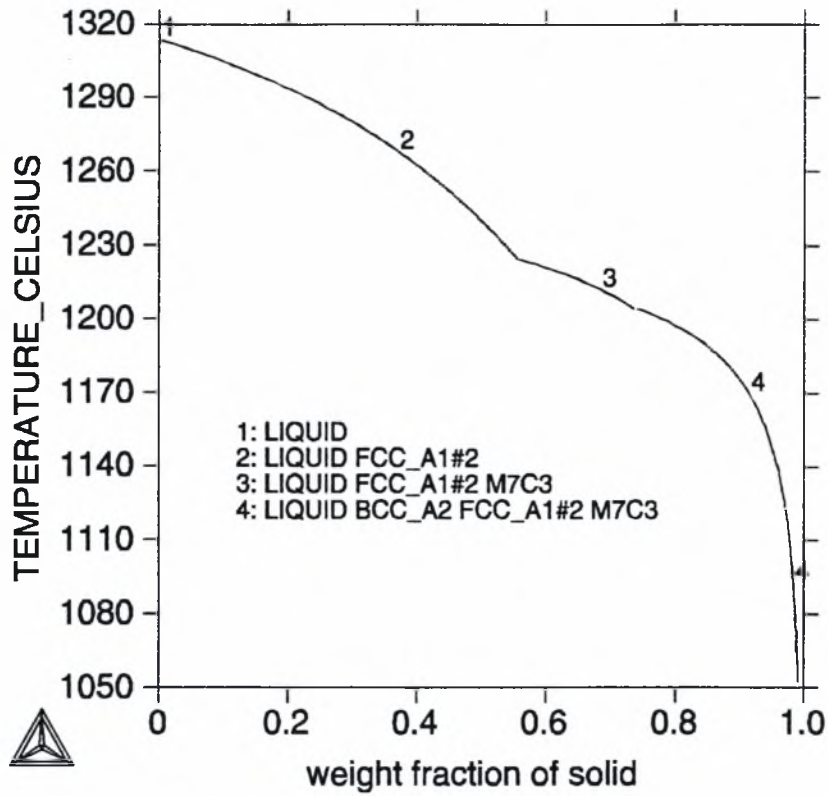
Προτείνεται η χύτευση των χάλυβων με βάση τις παραπάνω συστάσεις. Ακολούθως να γίνει πειραματική μελέτη των δοκιμών αυτών προκειμένου να εξετάσουμε κατά πόσο τα υπολογιστικά αποτελέσματα του ThermoCalc έρχονται σε συμφωνία με τα χυτευμένα δοκίμια.

Βιβλιογραφικές αναφορές

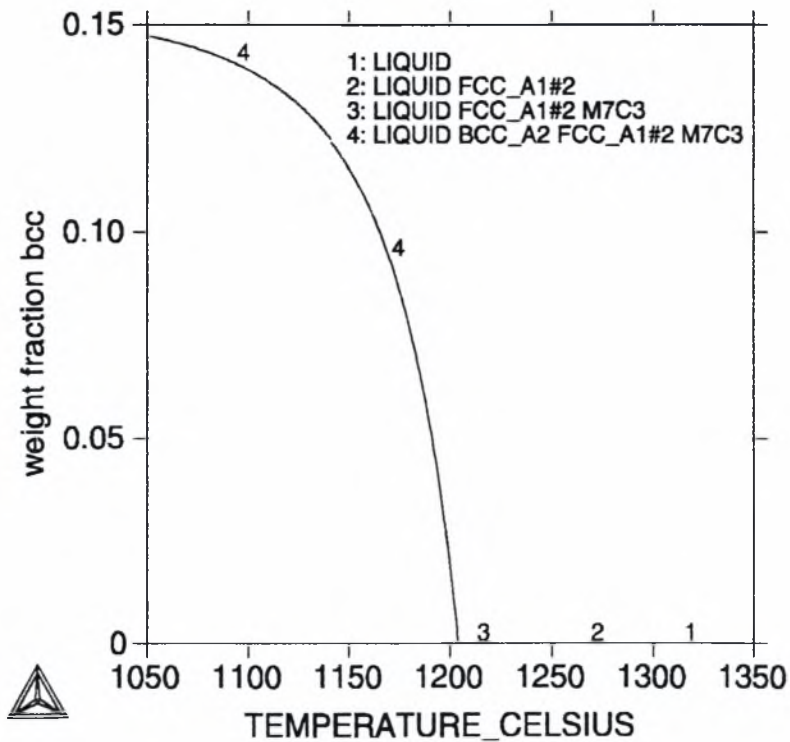
1. ASM Specialty Handbook / Stainless Steels / Ed. J. R. Davis / ASM International 1994
2. Stainless Steel / R. A. Lula / ASM International 1986
3. Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών / Γ. Δ. Χρυσουλάκης - Δ. Ι. Παντελής / Εκδόσεις Παπασωτηρίου 1996
4. Βελτιστοποίηση του κράματος αλουμινίου A357 / Α.Ν.Βασιλάκος / διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας 1996
5. ThermoCalc -Users' Guide / Royal Institute of Technology / Stockholm - Sweden 1993

Παραρτήματα

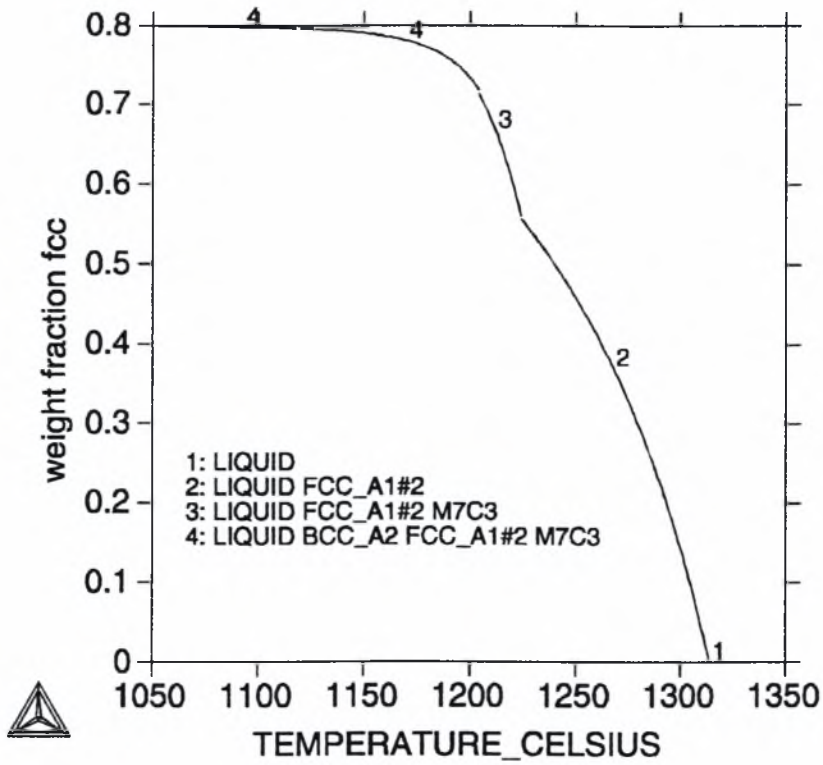
Ακολούθως παρατίθενται ορισμένα ενδεικτικά διαγράμματα που λήφθηκαν από το πρόγραμμα ThermoCalc.



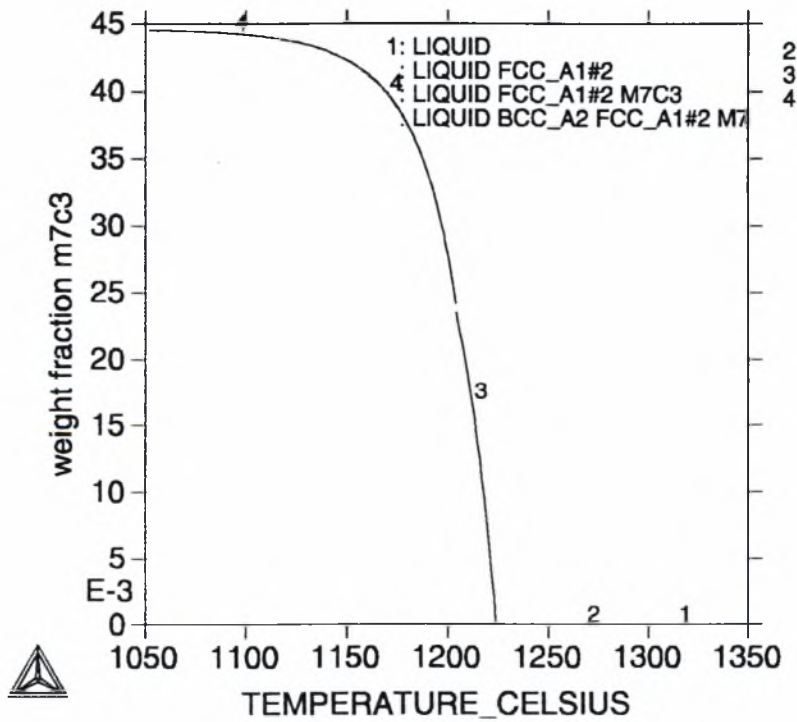
7.1 Τυπικό διάγραμμα στερεοποίησης



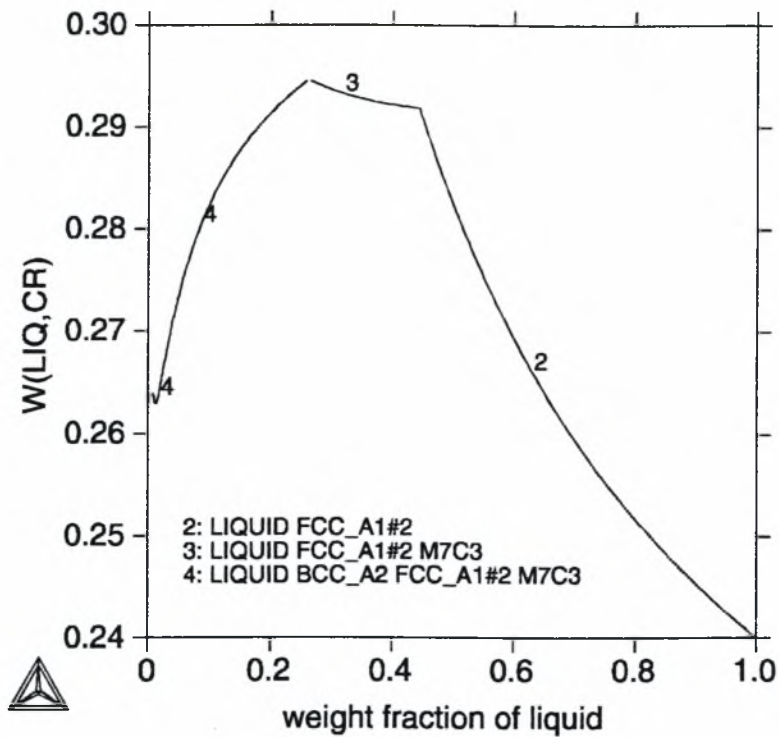
7.2 Διάγραμμα κλάσματος μάζας φερριτή - θερμοκρασίας



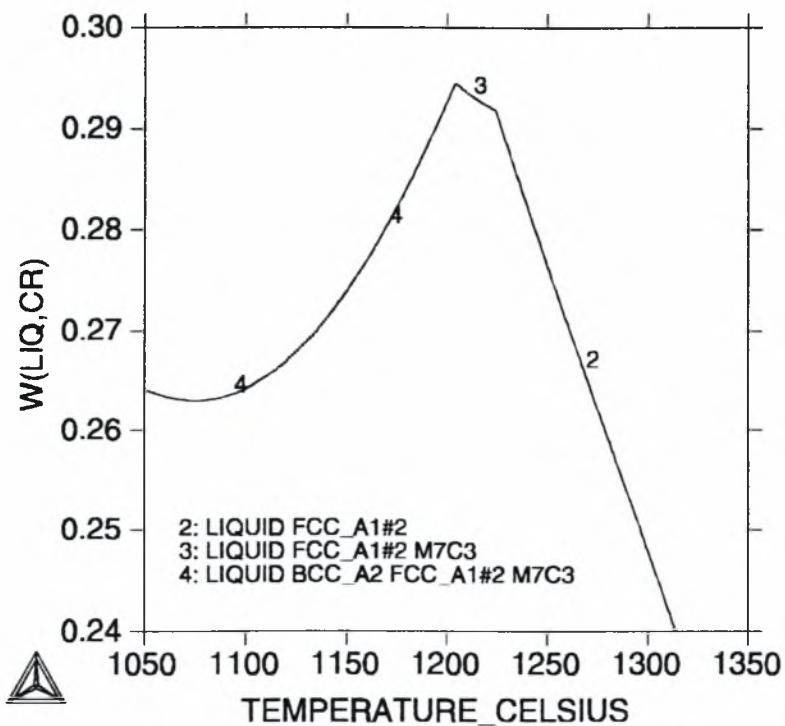
7.3 Διάγραμμα κλάσματος μάζας ωστενίτη - θερμοκρασίας



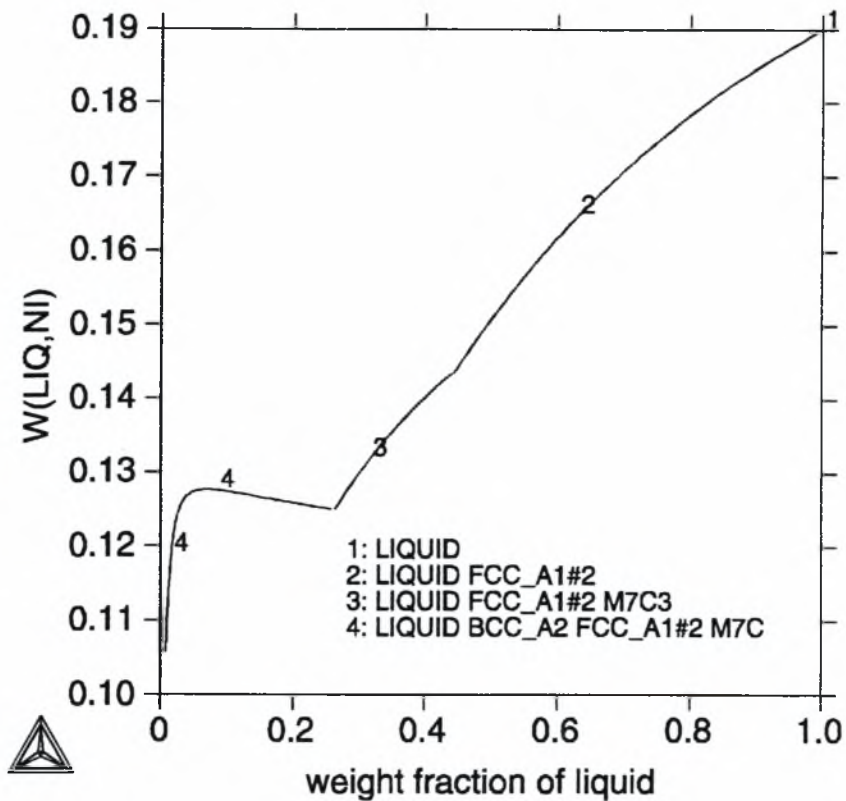
7.4 Διάγραμμα κλάσματος μάζας καρβιδίου M_7C_3 - θερμοκρασίας



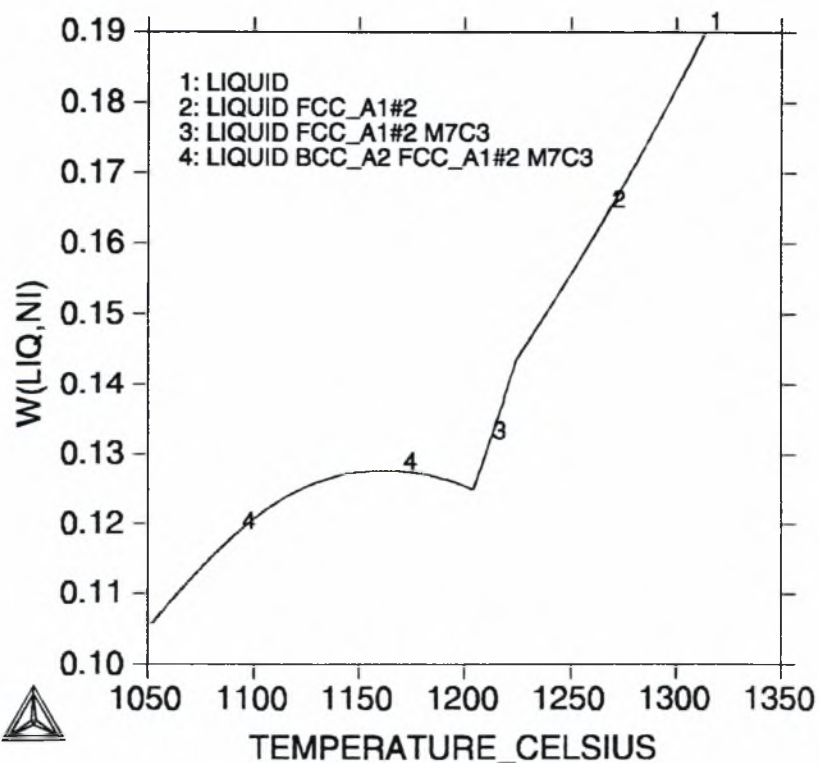
7.5 Διάγραμμα ποσοστού χρωμίου στην υγρή φάση - κλάσματος μάζας υγρού



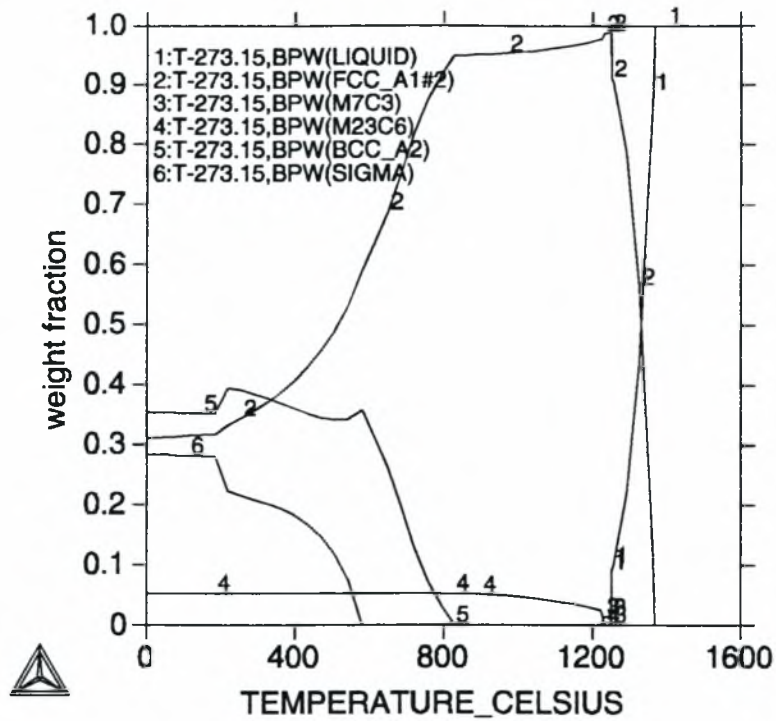
7.6 Διάγραμμα ποσοστού χρωμίου στην υγρή φάση - θερμοκρασίας



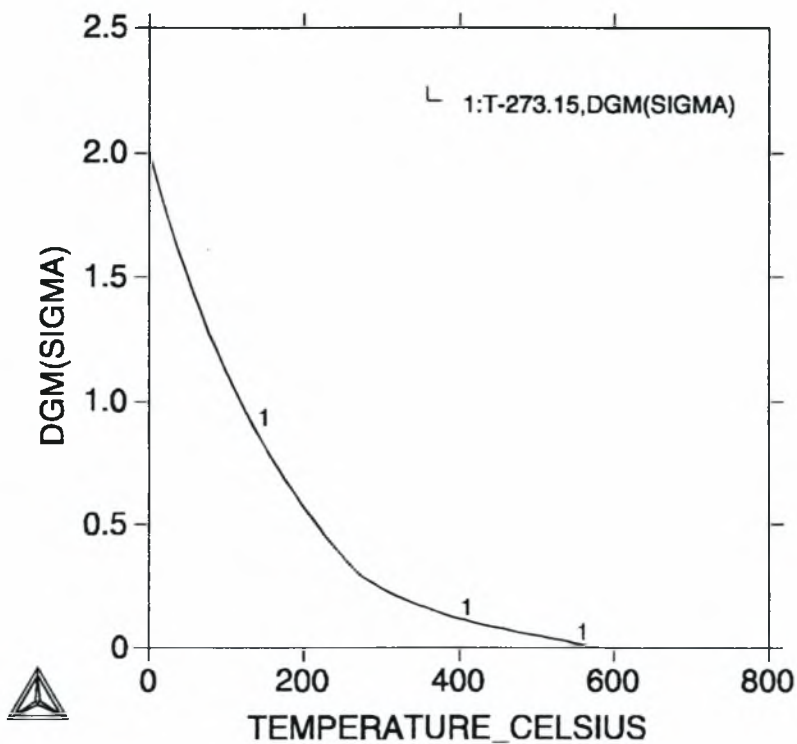
7.7 Διάγραμμα ποσοστού νικελίου στην υγρή φάση - κλάσματος μάζας υγρού



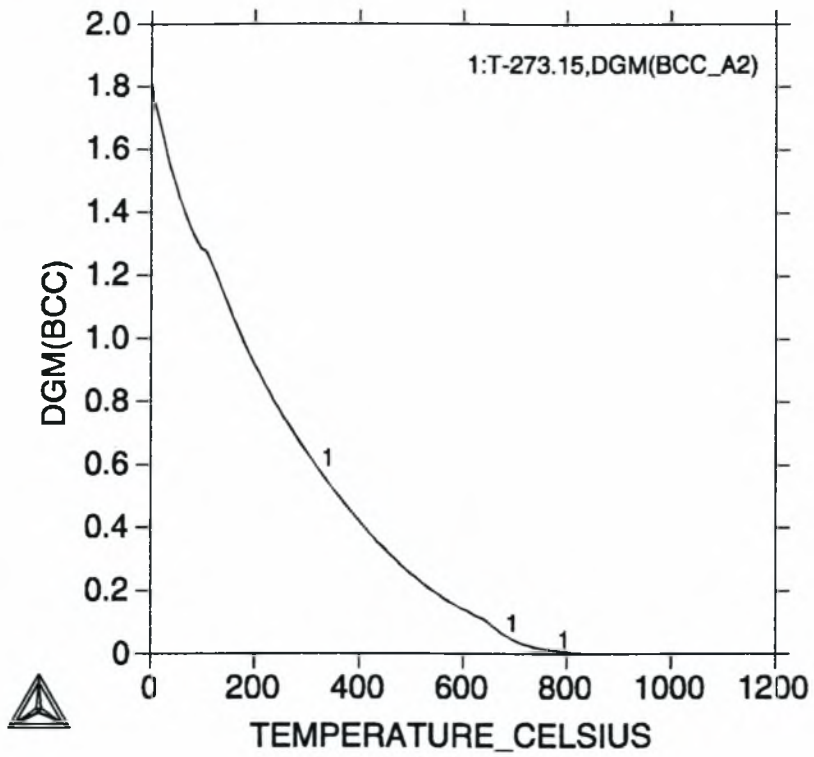
7.8 Διάγραμμα ποσοστού νικελίου στην υγρή φάση - θερμοκρασίας



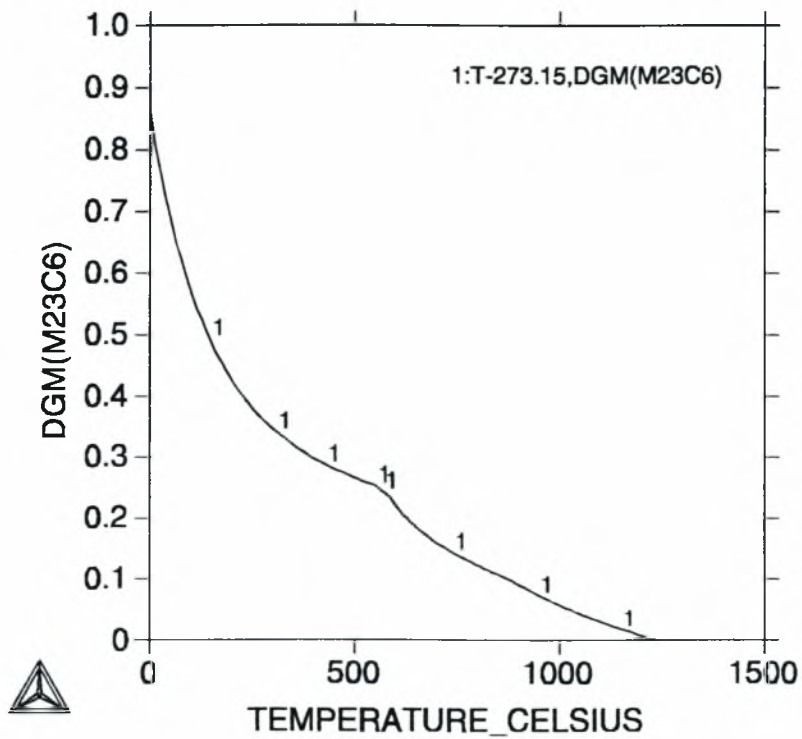
7.9 Διάγραμμα κατανομής των φάσεων - θερμοκρασίας



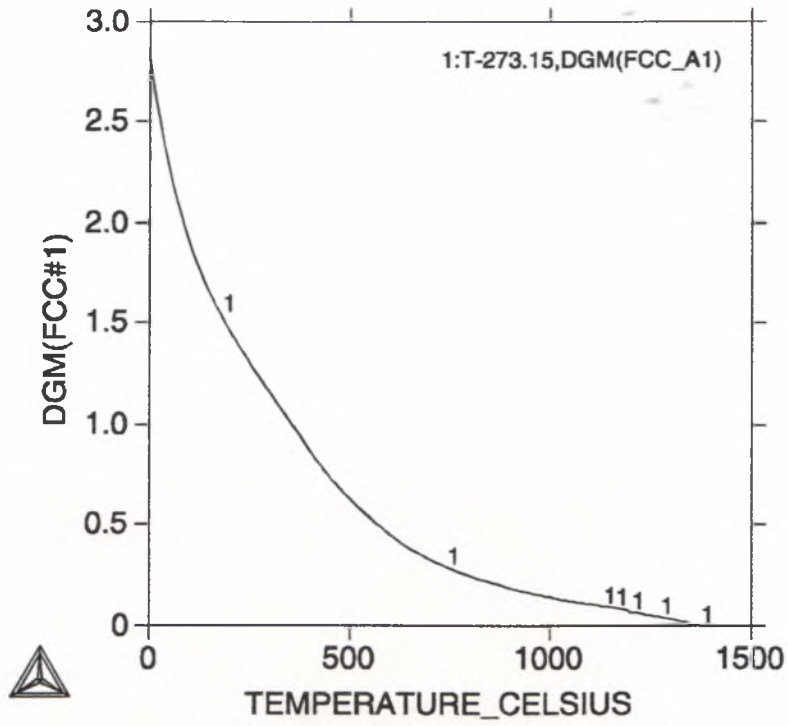
7.10 Διάγραμμα κινούσας δύναμης της σ-φάσης - θερμοκρασίας



7.11 Διάγραμμα κινούσας δύναμης φερρίτη - θερμοκρασίας



7.12 Διάγραμμα κινούσας δύναμης καρβιδίου $M_{23}C_6$ - θερμοκρασίας



7.13 Διάγραμμα κινούσας δύναμης ωστενίτη - θερμοκρασίας

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ

ΤΙΤΛΟΣ

ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
10.6.02	ΧΑΡΑΝΑΣ
2/10/02	400
23.10.02	400
17.12.03	ΧΑΡΙΩΤΗΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

Τηλ.: 74.760-61

74233-5

