

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ
ΤΟΥ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝΤΑ ΩΣΤΕΝΙΤΗ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ TRIP**

υπό

ΦΕΝΤΕΡΙΚΟ ΧΟΥΛΙΑΡΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2006



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 4952/1
Ημερ. Εισ.: 15-11-2006
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2006
ΧΟΥ

© 2006 Φεντερίκο Χουλιάρας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας 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 Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Αντώνης Κατσαμάς
Διδάσκων Π.Δ 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νίκος Χασιώτης
Διδάσκων Π.Δ 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Με το πέρας της διπλωματικής μου, νιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω ιδιαίτερος κάποιους ανθρώπους. Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Γ. Χαϊδεμενόπουλο, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, που με εμπιστεύτηκε και που μου ανέθεσε την διπλωματική, για την πολύτιμη βοήθεια στην διάρκεια της εργασίας μου αλλά και για την συνεχή στήριξη του κατά την διάρκεια που ήμουν φοιτητής του τμήματος των Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας ως ακαδημαϊκός μου σύμβουλος. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον κ. Α. Κατσαμά για την συνεχή καθοδήγηση στην εργασία μου και για τις γνώσεις του, που μου τις πρόσφερε με μεγάλη χαρά οποιαδήποτε στιγμή τις χρειάστηκα, καθώς για την προθυμία του να με βοηθήσει ανά πάσα στιγμή. Οφείλω να ευχαριστήσω πάλι τους προαναφερθέντες και τον κ. Ν. Χασιώτη, για την τιμή που μου έκαναν να είναι τα τρία μέλη της εξεταστικής επιτροπής και για την ανάγνωση της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης μέσα από αυτήν την διπλωματική εργασία θέλω να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές που με δίδαξαν την τελευταία πενταετία για τις γνώσεις που αποκόμισα από αυτούς και που θα υπάρξουν θεμέλιος λίθος για την μετέπειτα πορεία μου. Ευχαριστίες θέλω να δώσω στους γονείς μου, Χρήστο και Τζιακομίνα για την αγάπη που μου δίνουν, που με στήριξαν με κάθε δυνατό τρόπο από την πρώτη στιγμή της προσπάθειάς μου και που πίστεψαν σε μένα και τις δυνατότητές μου αλλά και για την οικονομική συνεισφορά τους αυτήν την πενταετία ιδιαίτερα. Τέλος ένα θερμό ευχαριστώ στους συμφοιτητές μου Δημήτρη Σκαράκη και Κωνσταντίνο Παγώνη που στάθηκαν δίπλα μου κάθε στιγμή στο πανεπιστήμιο, αλλά και στην ζωή μου στον Βόλο την πενταετία αυτήν, ως πραγματικοί φίλοι. Αυτήν την εργασία θέλω να την αφιερώσω στον αδελφό μου Νικόλα για την αδελφική και ηθική του υποστήριξη.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝΤΑ ΩΣΤΕΝΙΤΗ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ TRIP

ΦΕΝΤΕΡΙΚΟ ΧΟΥΛΙΑΡΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2006

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής Φυσικής
Μεταλλουργίας, Διευθυντής Εργαστηρίου Υλικών

Περίληψη

Το ποσοστό και η σταθερότητα του παραμένουνα ωστενίτη επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες και γενικότερα την συμπεριφορά των χαλύβων TRIP. Σε αυτήν την διπλωματική παρουσιάζονται μαθηματικά μοντέλα που υπολογίζουν το ποσοστό του παραμένουνα ωστενίτη στην τελική δομή των χαλύβων TRIP ως συνάρτηση των συνθηκών του κρίσιμου σταδίου ανόπτησης και του ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού καθώς και των αρχικών ποσοστών των κραματικών συστατικών. Αρχικά στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για τους χάλυβες TRIP, τις μεθόδους θερμικής κατεργασίας αυτών και τα μαθηματικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν σε αυτούς, με την μορφή βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Στην συνέχεια παρουσιάζονται λεπτομερέστερα τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση των χαλύβων οι οποίοι μελετήθηκαν, παρουσιάζονται η διαδικασία και οι υπολογισμοί που γίνονται στηριζόμενοι σε αυτά τα μαθηματικά μοντέλα και, τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων και γίνεται σύντομος σχολιασμός αυτών.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Αντικείμενο και Στόχοι Διπλωματικής.....	1
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	4
2.1 Χάλυβες TRIP	4
2.1.1 Γενικά Χαρακτηριστικά.....	4
2.1.2 Χημική Σύσταση.....	6
2.1.3 Μηχανικές Ιδιότητες	9
2.2 Θερμική Κατεργασία.....	9
2.2.1 Αρχική Μικροδομή.....	11
2.2.2 Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση.....	11
2.2.3 Ισόθερμος Μπαινιτικός Μετασχηματισμός.....	12
2.3 Μαθηματικά Μοντέλα για Χάλυβες TRIP	14
2.3.1 Μοντέλο Υπολογισμού « f - ε»	15
2.3.2 Μοντέλο Ενδοκρίσιμης Ανόπτησης.....	17
2.3.3 Μοντέλο «Ms»	20
Κεφάλαιο 3 Υπολογισμός Κρίσιμων Θερμοκρασιών T_0 σε Χάλυβες TRIP	27
3.1 Εισαγωγή	27
3.2 Υπολογισμοί και Διαδικασία.....	29
3.3 Αποτελέσματα Υπολογισμών	44
Κεφάλαιο 4 Μοντέλο Υπολογισμού του Κλάσματος Όγκου Παραμένοντα Ωστενίτη κατά τον Ισόθερμο Μπαινιτικό Μετασχηματισμό.....	49
4.1 Εισαγωγή	49
4.2 Περιγραφή Μοντέλου Υπολογισμού Κλάσματος Όγκου Παραμένοντα Ωστενίτη κατά τον Ισόθερμο Μπαινιτικό Μετασχηματισμό.....	50

4.2.1	Η Ανάπτυξη του Μπαινιτικού Φερρίτη.....	50
4.2.2	Συνεισφορά μιας Μεμονωμένης Υπομονάδας στην Σταθεροποίηση του Ωστενίτη	53
4.2.3	Η Εξέλιξη του Παραμένοντα Ωστενίτη κατά τον Μπαινιτικό Μετασχηματισμό.....	57
4.2.4	Τελική Διατύπωση του Μοντέλου.....	63
4.3	Εφαρμογή και Αποτελέσματα του Μοντέλου.....	64
4.4	Διαδικασία Υπολογισμού και Αποτελέσματα Αυτής.....	65
4.5	Ανάλυση Ευαισθησίας Μοντέλου.....	91
Κεφάλαιο 5 Μοντέλο Σταθερότητας Παραμένοντα Ωστενίτη «M_s»		98
5.1	Εισαγωγή	98
5.2	Αρχικά Δεδομένα Μοντέλου	99
5.3	Υπολογισμοί Θερμοκρασιών M _s	112
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Ενασχόληση.....		118
6.1	Συμπεράσματα Διπλωματικής.....	118
6.2	Προτάσεις για Μελλοντική Ενασχόληση.....	120
Βιβλιογραφία		122

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Τυπικές συστάσεις των κραματικών στοιχείων σε έναν πολυφασικό χάλυβα TRIP	7
Πίνακας 2.2: Τα ποσοστά της κάθε φάσης στην τελική δομή ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP	14
Πίνακας 3.1: Οι ονομαστικές συστάσεις για τους τρεις χάλυβες που μελετούνται σε αυτό το κεφάλαιο	28
Πίνακας 3.2: Τα κλάσματα όγκου των φάσεων φερρίτη και ωστενίτη σε θερμοκρασία ανόπτησης 750 °C	29
Πίνακας 3.3: Οι χημικές συστάσεις σε κλάσμα μάζας της ωστενιτικής φάσης όπως προκύπτουν μετά το τέλος της ενδοκρίσιμης ανόπτησης για το καθένα από τους τρεις χάλυβες	30
Πίνακας 3.4: Οι θερμοκρασίες στις οποίες γίνεται ο μαινιτικός μετασχηματισμός	31
Πίνακας 3.5: Τα σημεία τομής της καμπύλης του ωστενίτη με την καμπύλη του φερρίτη όπως προέκυψαν από τις εικόνες 3.2 – 3.7 για κάθε μια από τις έξι θερμοκρασίες μαινιτικού μετασχηματισμού για τον χάλυβα A11	44
Πίνακας 3.6: Τα σημεία τομής της καμπύλης του ωστενίτη με την καμπύλη του φερρίτη όπως προέκυψαν από τις εικόνες 3.8 – 3.13 για κάθε μία από τις έξι θερμοκρασίες μαινιτικού μετασχηματισμού για τον χάλυβα Si1	45
Πίνακας 3.7: Τα σημεία τομής της καμπύλης του ωστενίτη με την καμπύλη του φερρίτη όπως προέκυψαν από τις εικόνες 3.14 – 3.19 για κάθε μια από τις έξι θερμοκρασίες μαινιτικού μετασχηματισμού για τον χάλυβα Si2	45
Πίνακας 4.1: Οι χημικές συστάσεις των χαλύβων lab1 και lab2	65
Πίνακας 4.2: Η χημική σύσταση κατά βάρος και το κλάσμα όγκου του ωστενίτη στο χάλυβα lab1	66

Πίνακας 4.3: Η χημική σύσταση κατά βάρος και το κλάσμα όγκου του ωστενίτη στο χάλυβα lab2.....	66
Πίνακας 4.4: Οι θερμοκρασίες μπεινιτικού μετασχηματισμού που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς.....	67
Πίνακας 4.5: Το πλάτος και το μήκος της υπομονάδας για τις τρεις θερμοκρασίες μπεινιτικού μετασχηματισμού.....	68
Πίνακας 4.6: Οι περιεκτικότητες του ωστενίτη σε μαγγάνιο και σε πυρίτιο των χαλύβων	69
Πίνακας 4.7: Οι ελάχιστες συγκεντρώσεις άνθρακα αναγκαίες για την διατήρηση του ωστενίτη.....	69
Πίνακας 4.8: Οι κρίσιμες τιμές πάχους της υπομονάδας σε κάθε θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού.....	70
Πίνακας 4.9: Οι χρόνοι τ_f που μένει ενεργή μια υπομονάδα	71
Πίνακας 4.10: Οι χρόνοι που επιλέχθηκαν για να σχεδιαστεί η καμπύλη $s_{\gamma_R}(\tau)-\tau_f$	75
Πίνακας 4.11: Οι τιμές του ολοκληρώματος $\int_0^{\infty} S_{\gamma_R}(\tau) d\tau$ που περικλείεται από τις καμπύλες των εικόνων 4.9 έως 4.14	78
Πίνακας 4.12: Οι πειραματικές τιμές για το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στον χάλυβα lab1 σε τρεις θερμοκρασίες μπεινιτικού μετασχηματισμού	79
Πίνακας 4.13: Οι πειραματικές τιμές για το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στον χάλυβα lab2 σε τρεις θερμοκρασίες μπεινιτικού μετασχηματισμού	79
Πίνακας 4.14: Οι τελικές τιμές των σταθερών που προέκυψαν από την προσαρμογή της σχέσης στα πειραματικά δεδομένα για το χάλυβα lab1	83
Πίνακας 4.15: Οι τελικές τιμές των σταθερών που προέκυψαν από την προσαρμογή	

της σχέσης στα πειραματικά δεδομένα για το χάλυβα lab2	84
Πίνακας 4.16: Οι πειραματικές και οι υπολογιστικές τιμές που προέκυψαν για το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στο χάλυβα lab1	89
Πίνακας 4.17: Οι πειραματικές και οι υπολογιστικές τιμές που προέκυψαν για το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στο χάλυβα lab2	90
Πίνακας 4.18: Οι τιμές του αρχικού κλάσματος όγκου για τον οποίο κάνουμε ανάλυση ευαισθησίας για τον κάθε χάλυβα	92
Πίνακας 5.1: Οι θερμοκρασίες ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού	99
Πίνακας 5.2: Τα αρχικά δεδομένα που έχουν υπολογιστεί στο τέταρτο κεφάλαιο και γίνεται χρήση τους σε αυτό το κεφάλαιο.....	100
Πίνακας 5.3: Οι τιμές για τον μέσο όγκο που προκύπτουν από εφαρμογή της σχέσης (5.1).....	101
Πίνακας 5.4: Οι τιμές του μέσου πάχους που προέκυψαν από εφαρμογή της σχέσης (5.3) για τα δεδομένα του πίνακα (5.2).....	102
Πίνακας 5.5: Οι τιμές των χρονικών στιγμών t_1 και t_2	103
Πίνακας 5.6: Οι τιμές του ολοκληρώματος $\int_0^{\dot{L}_{\gamma_R}} dt$	111
Πίνακας 5.7: Οι τιμές για την μέση περιεκτικότητα άνθρακα του ωστενίτη σε mol.....	111
Πίνακας 5.8: Οι τιμές για την μέση περιεκτικότητα μαγγανίου του ωστενίτη σε mol.....	112
Πίνακας 5.9: Οι τιμές του ορίου διαρροής για τους δύο χάλυβες ανάλογα με την περίπτωση που μελετάται	113
Πίνακας 5.10: Οι τιμές της παραμέτρου A που υπολογίστηκαν με βάση την σχέση (5.4).....	114
Πίνακας 5.11: Οι τιμές των θερμοκρασιών $M_s^{\sigma} (^{\circ}C)$ που υπολογίστηκαν με βάση την σχέση (5.4).....	114

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Σχέση ολικής επιμήκυνσης – ορίου διαρροής διαφόρων κραμάτων.....	5
Εικόνα 2.2: Τυπική μικροδομή ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP	6
Εικόνα 2.3: Θερμική κατεργασία ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP.....	10
Εικόνα 2.4: Αρχική μικροδομή ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP.....	11
Εικόνα 2.5: Μικροδομή του χάλυβα στο τέλος της ενδοκρίσιμης ανόπτησης.....	12
Εικόνα 2.6: Η καμπύλη της εξάρτησης του μπαινιτικού μετασχηματισμού από το χρόνο	13
Εικόνα 3.1: Η γραμμή T_0 που προέκυψε από κάποια προηγούμενη υπολογιστική διαδικασία	27
Εικόνα 3.2: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 523 \text{ }^\circ\text{C}$	32
Εικόνα 3.3: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (μπλε γραμμή) και του φερρίτη (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 573 \text{ }^\circ\text{C}$	33
Εικόνα 3.4: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (μπλε γραμμή) και του φερρίτη (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 623 \text{ }^\circ\text{C}$	33
Εικόνα 3.5: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (μπλε γραμμή) και του φερρίτη (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα	

για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 673 \text{ }^{\circ}\text{C}$	34
Εικόνα 3.6: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 723 \text{ }^{\circ}\text{C}$	35
Εικόνα 3.7: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 773 \text{ }^{\circ}\text{C}$	35
Εικόνα 3.8: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 523 \text{ }^{\circ}\text{C}$	36
Εικόνα 3.9: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 573 \text{ }^{\circ}\text{C}$	37
Εικόνα 3.10: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (μπλε γραμμή) και του φερρίτη (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 623 \text{ }^{\circ}\text{C}$	37
Εικόνα 3.11: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (μπλε γραμμή) και του φερρίτη (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 673 \text{ }^{\circ}\text{C}$	38
Εικόνα 3.12: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 723 \text{ }^{\circ}\text{C}$	39
Εικόνα 3.13: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη	

γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 773 \text{ }^{\circ}\text{C}$	39
Εικόνα 3.14: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του οστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 523 \text{ }^{\circ}\text{C}$	40
Εικόνα 3.15: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του οστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 573 \text{ }^{\circ}\text{C}$	41
Εικόνα 3.16: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του οστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 623 \text{ }^{\circ}\text{C}$	41
Εικόνα 3.17: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του οστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 673 \text{ }^{\circ}\text{C}$	42
Εικόνα 3.18: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του οστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 723 \text{ }^{\circ}\text{C}$	43
Εικόνα 3.19: Οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του οστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 773 \text{ }^{\circ}\text{C}$	43
Εικόνα 3.20: Η γραμμή T_0 για το χάλυβα A11	46
Εικόνα 3.21: Η γραμμή για το χάλυβα Si1	46
Εικόνα 3.22: Η γραμμή για το χάλυβα Si2	47

Εικόνα 4.1: Η σταδιακή ανάπτυξη μιας υπομονάδας πλακιδίων κατά την διάρκεια του μαινιτικού μετασχηματισμού.....	50
Εικόνα 4.2: Μια υπομονάδα που έχει αναπτυχθεί σε έναν όγκο $V_{SU} = (L_{SU})^2 S_{SU}$	51
Εικόνα 4.3: Ο τρόπος με τον οποίο απορρίπτει την περίσσεια άνθρακα η υπομονάδα.....	54
Εικόνα 4.4: Η μεταβολή των προφίλ συγκέντρωσης άνθρακα μέσα στα παρακείμενα ωστενιτικά στρώματα.....	55
Εικόνα 4.5: Το ομογενοποιημένο περιεχόμενο άνθρακα που θα απομείνει στο ωστενιτικό στρώμα όταν $S_{\gamma} \langle S_{\gamma}^* \rangle$	59
Εικόνα 4.6: Ο χρόνος που μένει ενεργή μια υπομονάδα	61
Εικόνα 4.7: Η καμπύλη $S_{\gamma_R} - \tau$ για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος $\int_0 S_{\gamma_R}(\tau) d\tau$	62
Εικόνα 4.8: Η γραφική παράσταση κρίσιμης τιμής πάχους S_{γ}^* (κάθετος άξονας) και της θερμοκρασίας του μαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} (οριζόντιος άξονας)	70
Εικόνα 4.9: Η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία μαινιτικού μετασχηματισμού 623K	72
Εικόνα 4.10: Η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία μαινιτικού μετασχηματισμού 673K	73
Εικόνα 4.11: Η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία μαινιτικού μετασχηματισμού 723K	73
Εικόνα 4.12: Η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία	

μπαινιτικού μετασχηματισμού 623K	74
Εικόνα 4.13: Η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού 673K	74
Εικόνα 4.14: Η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού 723K	75
Εικόνα 4.15: Η γραφική παράσταση του χρόνου που μένει ενεργή μια υπομονάδα σε σχέση με την θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού.....	77
Εικόνα 4.16: Η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.12) για τον χάλυβα lab1 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} (^{\circ}C) = 350$	80
Εικόνα 4.17: Η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.12) για τον χάλυβα lab1 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} (^{\circ}C) = 400$	81
Εικόνα 4.18: Η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.12) για τον χάλυβα lab1 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} (^{\circ}C) = 450$	81
Εικόνα 4.19: Η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.13) για τον χάλυβα lab2 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} (^{\circ}C) = 350$	82
Εικόνα 4.20: Η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.13) για τον χάλυβα lab2 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} (^{\circ}C) = 400$	82

Εικόνα 4.21: Η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.13) για τον χάλυβα lab2 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} (^{\circ}C) = 450$	83
Εικόνα 4.22: Η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T=623K$ για τον χάλυβα lab1.....	86
Εικόνα 4.23: Η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T=673K$ για τον χάλυβα lab1.....	86
Εικόνα 4.24: Η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T=723K$ για τον χάλυβα lab1.....	87
Εικόνα 4.25: Η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T=623K$ για τον χάλυβα lab2.....	87
Εικόνα 4.26: Η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T=673K$ για τον χάλυβα lab2.....	88
Εικόνα 4.27: Η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T=723K$ για τον χάλυβα lab2.....	88
Εικόνα 4.28: Οι καμπύλες του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab1 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος	

όγκου παραμένοντα και για μπαινιτική θερμοκρασία $T=623K$	94
Εικόνα 4.29: Οι καμπύλες του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab1 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπαινιτική θερμοκρασία $T=673K$	94
Εικόνα 4.30: Οι καμπύλες του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab1 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπαινιτική θερμοκρασία $T=723K$	95
Εικόνα 4.31: Οι καμπύλες του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab2 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπαινιτική θερμοκρασία $T=623K$	95
Εικόνα 4.32: Οι καμπύλες του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab2 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπαινιτική θερμοκρασία $T=673K$	96
Εικόνα 4.33: Οι καμπύλες του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab2 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπαινιτική θερμοκρασία $T=723K$	96
Εικόνα 5.1: Ένα σωματίδιο παραμένοντα ωστενίτη.....	101
Εικόνα 5.2: Η καμπύλη του πάχους του σωματιδίου ωστενίτη σε συνάρτηση του χρόνου και φαίνεται ότι η τιμή του μέσου πάχους λαμβάνεται σε δυο διαφορετικές χρονικές στιγμές.....	103
Εικόνα 5.3: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=623K$, τη χρονική στιγμή t_1	104
Εικόνα 5.4: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε	

συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=623K$, τη χρονική στιγμή t_2	105
Εικόνα 5.5: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=673K$, τη χρονική στιγμή t_1	105
Εικόνα 5.6: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=673K$, τη χρονική στιγμή t_2	106
Εικόνα 5.7: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=723K$, τη χρονική στιγμή t_1	106
Εικόνα 5.8: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=723K$, τη χρονική στιγμή t_2	107
Εικόνα 5.9: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=623K$, τη χρονική στιγμή t_1	107
Εικόνα 5.10: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=623K$, τη χρονική στιγμή t_2	108
Εικόνα 5.11: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=673K$, τη χρονική στιγμή t_1	108
Εικόνα 5.12: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=673K$, τη χρονική στιγμή t_2	109
Εικόνα 5.13: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=723K$, τη χρονική στιγμή t_1	109

- Εικόνα 5.14: Η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για το χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=723K$, τη χρονική στιγμή t_2 **110**
- Εικόνα 5.15: Η μεταβολή της θερμοκρασίας M_s^σ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} για τη χρονική στιγμή t_1 στον lab1..... **115**
- Εικόνα 5.16: Η μεταβολή της θερμοκρασίας M_s^σ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} για τη χρονική στιγμή t_2 στον lab1..... **116**
- Εικόνα 5.17: Η μεταβολή της θερμοκρασίας M_s^σ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} για τη χρονική στιγμή t_1 στον lab2..... **116**
- Εικόνα 5.18: Η μεταβολή της θερμοκρασίας M_s^σ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} για τη χρονική στιγμή t_2 στον lab2..... **117**

Κεφάλαιο 1^ο

Αντικείμενο και στόχοι της εργασίας

Σήμερα στη βιομηχανία χρησιμοποιείται κατά κόρον ο χάλυβας ως υλικό. Μπορεί να λεχθεί μάλιστα ότι η σημερινή βιομηχανία έχει στηριχθεί σε αυτό το υλικό το οποίο είναι ένα κράμα με βασικό στοιχείο το σίδηρο (Fe) και κύριο στοιχείο κραμάτωσης τον άνθρακα (C). Οι λόγοι στους οποίους οφείλεται αυτό το φαινόμενο, δηλαδή η αναπτυγμένη χρήση του χάλυβα ως υλικό στη βιομηχανία, είναι η αφθονία του σιδήρου, το χαμηλό κόστος παραγωγής του χάλυβα, αλλά κυρίως η ποικιλομορφία των μηχανικών ιδιοτήτων, και επομένως και του φάσματος χρήσης του, ανάλογα με τις συνθήκες παρασκευής του και επιπλέον η ευκολία να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες κατά την παραγωγή, επομένως να επιτευχθούν με σχετική ευκολία οι επιθυμητές τιμές με μεγάλη ακρίβεια για τις μηχανικές ιδιότητες. Σε αυτήν την εργασία θα ασχοληθούμε με μία συγκεκριμένη ομάδα χαλύβων, με βασικό τους χαρακτηριστικό τον συνδυασμό υψηλής αντοχής και ολκιμότητας, τους χάλυβες TRIP (Transformation Induced Plasticity), οι οποίοι αναπτύσσονται ραγδαία τα τελευταία χρόνια και η απαίτηση μελέτης τους, καθώς επίσης και ανάπτυξης αυτών κρίνεται αναγκαία. Οι χάλυβες TRIP έχουν μικροδομή αποτελούμενη από τρεις διαφορετικές φάσεις, τον φερρίτη, τον μπαινίτη και τον παραμένοντα ωστενίτη, το ποσοστό του οποίου (ωστενίτη) στην τελική μικροδομή έπειτα από τη θερμική κατεργασία είναι αυτό που αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών του. Στο δεύτερο κεφάλαιο της συγκεκριμένης εργασίας γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση στους χάλυβες TRIP, περιγράφεται ποια είναι τα στάδια παραγωγής τους, και τέλος ποια είναι τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες τους.

Απαίτηση της σύγχρονης βιομηχανίας, αλλά και απαίτηση της επιστημονικής κοινότητας για την λεπτομερή μελέτη των χαλύβων TRIP, είναι η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων και στη συνέχεια η προσομοίωση η οποία βασίζεται κυρίως σε αυτά και στους αλγόριθμους βέβαια. Μέσα από την ανάγκη παρατήρησης και κατανόησης της συμπεριφοράς των χαλύβων TRIP με ποικιλία συστάσεων σε προηγμένες και όχι μόνο τεχνολογικές εφαρμογές, καθώς και από την ανάγκη κατανόησης των μηχανισμών και αποτελεσμάτων των πειραμάτων, αναπτύχθηκαν διάφορα μαθηματικά μοντέλα τα οποία περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια τα διάφορα

στάδια της διεργασίας παραγωγής για τους χάλυβες TRIP. Τέτοιου είδους μαθηματικά μοντέλα είναι το μοντέλο υπολογισμού « f-ε », δηλαδή της μεταβολής του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη που μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη (f) σαν συνάρτηση του ποσοστού πλαστικής παραμόρφωσης (ε), το μοντέλο « $M_s^σ$ », δηλαδή το μοντέλο σταθερότητας του παραμένοντα ωστενίτη και τέλος το μοντέλο ενδοκρίσιμης ανόπτησης, που θα παρουσιαστούν αναλυτικά με τη μορφή βιβλιογραφικής ανασκόπησης στο τέλος του δεύτερου κεφαλαίου αυτής της εργασίας. Τα μαθηματικά μοντέλα σε συνδυασμό με την προσομοίωση, που μπορεί να γίνει σήμερα με την υπάρχουσα πλέον απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ, συντέλεσε ώστε να μειωθεί ο αριθμός των πειραμάτων και ειδικότερα η χρήση τους όπου δεν είναι αναγκαία αυτή. Τα πειράματα παραμένουν βεβαίως αναγκαία για την ανάπτυξη των χάλυβων, αλλά με τη μείωση τους στο ελάχιστο δυνατόν έχουν μειωθεί ταυτόχρονα και τα αρνητικά επακόλουθα αυτών, δηλαδή το αυξημένο στο πλείστον των περιπτώσεων οικονομικό κόστος, καθώς και η χρονοβόρα διαδικασία εφαρμογής αυτών. Τέλος, μέσα από την προσομοίωση είναι δυνατόν να επαναληφθεί η ίδια διαδικασία με τις ίδιες συνθήκες περισσότερες από μια φορά, κάτι πολύ δύσκολο στο πείραμα όπου δεν μπορούν να ελεγχθούν πλήρως οι συνθήκες. Επιπλέον κατέστη δυνατός ο σχεδιασμός υλικών, καθώς πλέον επιλέγονται οι επιθυμητές ιδιότητες που θέλουμε να έχει το υλικό, στην συγκεκριμένη περίπτωση ο χάλυβας, και με βάση αυτές, και γνωρίζοντας το μαθηματικό μοντέλο στο οποίο βασίζονται οι διεργασίες που συμβαίνουν στη μικροδομή του χάλυβα σε κάθε στάδιο παραγωγής του, καταλήγουμε στη σύσταση του και στις απαιτούμενες συνθήκες που πρέπει να επικρατούν στο κάθε στάδιο. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα να βελτιωθούν οι ιδιότητες των ήδη υπάρχοντων χάλυβων TRIP ή να δημιουργηθούν νέοι με τις απαιτούμενες ιδιότητες, σε σχετικά μικρούς χρόνους σε σχέση με την παραγωγή τους μέσω των πειραμάτων σε ένα εργαστήριο όπως προαναφέρθηκε.

Στόχος αυτής της εργασίας είναι να γίνει εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων, καθώς και να γίνει επαλήθευση των αποτελεσμάτων τους, που προέκυψαν για συγκεκριμένους χάλυβες των οποίων οι συστάσεις θα αναφερθούν στα επόμενα κεφάλαια, με άμεση σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα που προέκυψαν μέσω πειραματικής διαδικασίας για τους ίδιους πάντα χάλυβες. Στο τρίτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας με χρήση του υπολογιστικού πακέτου Thermo-Calc γίνεται υπολογισμός της γραφικής παράστασης και της συνάρτησης των κρίσιμων

θερμοκρασιών Το για τρεις χάλυβες TRIP με διαφορετικές χημικές συστάσεις. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του παραμένουτα ωστενίτη κατά τον ισόθερμο μαινιτικό μετασχηματισμό και με την χρήση του υπολογιστικού πακέτου Thermo-Calc και Dictra γίνεται η διαδικασία ανάλυσης για δυο διαφορετικών συστάσεων χάλυβες TRIP, αναλύονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών και μελετάται η ευαισθησία του συγκεκριμένου μοντέλου. Στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας εφαρμόζεται το μοντέλο σταθερότητας παραμένουτα ωστενίτη για τους δύο χάλυβες που χρησιμοποιούνται στο προηγούμενο κεφάλαιο (τέταρτο κεφάλαιο).

Κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι πρώτον να αναδειχθεί η σημαντικότητα των μαθηματικών μοντέλων κατά το σχεδιασμό και παραγωγή των χαλύβων TRIP και η αναγκαιότητα εμβάθυνσης και μελέτης αυτών των μοντέλων, η ανάπτυξη μέσω μαθηματικών μοντέλων και με τη χρήση υπολογιστικών εργαλείων των χαλύβων TRIP, δεύτερον η κατανόηση των αρχών που διέπουν τις διεργασίες παραγωγής και περιγραφή αυτών μέσω μαθηματικών μοντέλων και τρίτον να παρουσιασθούν κάποια ήδη γνωστά μαθηματικά μοντέλα και να αναδειχθεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων των ήδη υπαρχόντων αυτών μοντέλων για συγκεκριμένους χάλυβες. Τέλος, στόχος είναι επίσης να μελετηθεί πως επηρεάζεται το ποσοστό του παραμένουτα ωστενίτη στην τελική σύσταση του χάλυβα ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν κατά την θερμική κατεργασία αυτού.

Κεφάλαιο 2^ο

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

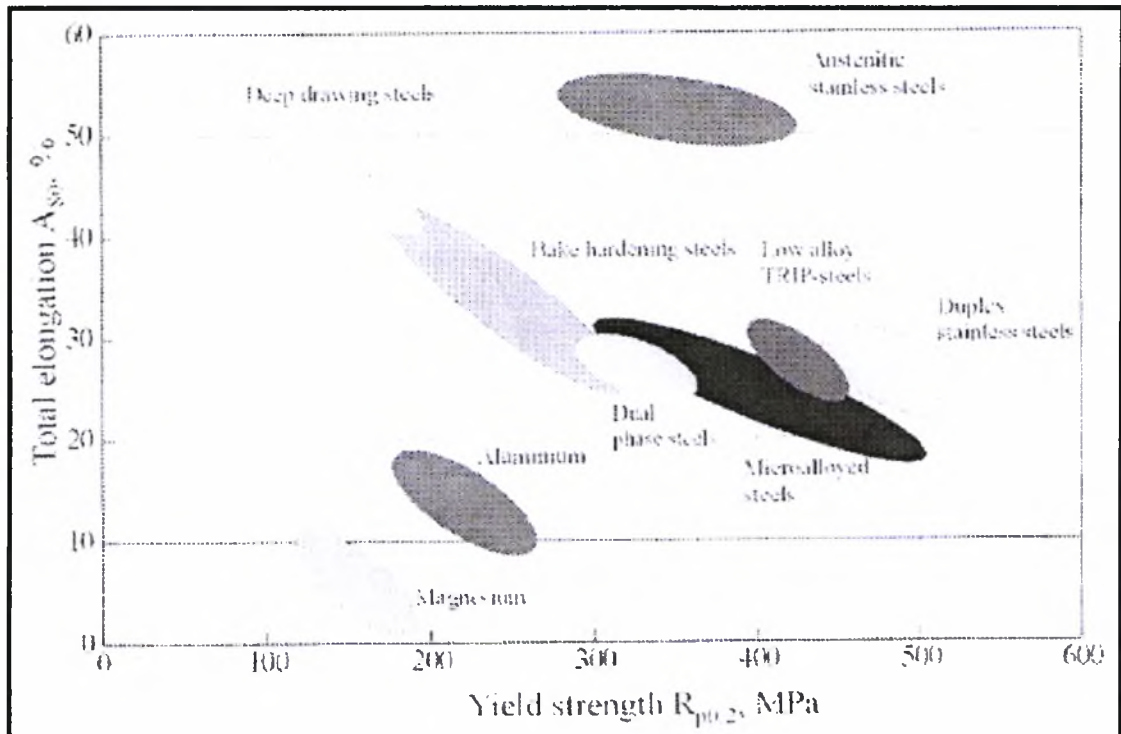
2.1 Χάλυβες TRIP

2.1.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Σε αυτό το κεφάλαιο και ειδικότερα στο πρώτο μισό θα γίνει αναφορά στους χάλυβες TRIP και συγκεκριμένα στους πολυφασικούς χάλυβες TRIP. Θα περιγραφεί η δομή τους, τα χαρακτηριστικά τους και οι ιδιότητες που τους κάνουν τόσο ελκυστικούς ειδικά στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Ο κλάδος ο οποίος συντελεί περισσότερο στην ήδη ραγδαία ανάπτυξη και χρήση χαλύβων TRIP είναι η αυτοκινητοβιομηχανία. Η τελευταία αναπτύσσει καινούρια είδη χαλύβων TRIP, μεταβάλλοντας κυρίως την ποσότητα των διάφορων κραματικών στοιχείων που εμπεριέχονται σε αυτούς με απώτερο στόχο την ελάττωση του αναγκαίου πάχους και βάρους διαφόρων μερών ή εξαρτημάτων του σκελετού του αυτοκινήτου ή και την αύξηση της απορρόφησης της ενέργειας από σύγκρουση με στόχο την αύξηση της ασφάλειας αυτού. Επιπλέον η ανάγκη για χάλυβες με μεγάλη διαμορφωσιμότητα έκανε αναγκαία την περαιτέρω μελέτη και έρευνα των ήδη υπαρχόντων για βελτιστοποίηση τους.

Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 2.1) φαίνεται ο συνδυασμός ιδιοτήτων που επιτυγχάνεται με την χρήση χαλύβων TRIP έναντι των άλλων στην αυτοκινητοβιομηχανία. Σε αυτήν φαίνεται ότι οι χάλυβες TRIP εμφανίζουν καλύτερο συνδυασμό αντοχής και διαμορφωσιμότητας σε σχέση με τα άλλα κράματα του διαγράμματος.

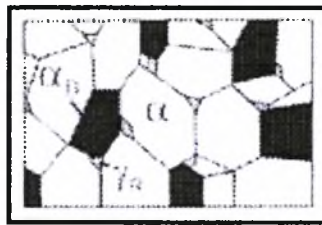


Εικόνα 2.1 : Απεικονίζεται η σχέση ολικής επιμήκυνσης –όριο διαρροής διαφόρων κραμάτων /1/

Οι χάλυβες TRIP ονομάστηκαν έτσι από το φαινόμενο της πλαστικότητας εκ μετασχηματισμού, ή αλλιώς φαινόμενο TRIP. Η πλαστικότητα εκ μετασχηματισμού όπως αλλιώς λέγεται το φαινόμενο TRIP (TRansformation Induced Plasticity) στηρίζεται στον με μηχανικό τρόπο προκαλούμενο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό του ωστενίτη, ένα φαινόμενο το οποίο συμβαίνει τόσο στους χαμηλά κραματωμένους πολυφασικούς χάλυβες, αλλά και στους ομογενείς ανοξειδωτους ωστενιτικούς χάλυβες. Ακριβώς σε αυτό το φαινόμενο βασίζεται η μεγάλη ολκιμότητα που διακρίνει τους χάλυβες TRIP. Κατά το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό από παραμόρφωση λόγω εξωτερικής τάσης ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη. Κατά την παραμόρφωση όμως και αφού ξεπεραστεί το όριο διαρροής έχουμε τον μετασχηματισμό που προαναφέραμε, από ωστενίτη σε μαρτενσίτη, ο οποίος προσδίδει στο υλικό μια νέα παραμόρφωση λόγω αλλαγής φάσης, από τον ωστενίτη στον πιο σκληρό μαρτενσίτη. Ακόμη ο μαρτενσίτης

προσδίδει στο υλικό αυξημένη τιμή εργοσκήρυσης σε σχέση με την αρχική τιμή. Οπότε η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης (σ - ϵ) του υλικού μεταβάλλεται και μάλιστα με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει καθυστέρηση στον σχηματισμό λαιμού σε σχέση με την παραμόρφωση, δηλαδή να έχουμε την πλαστικότητα εκ μετασχηματισμού ή το φαινόμενο TRIP. Χάρη στο φαινόμενο TRIP οι πολυφασικοί χάλυβες έχουν την ιδιότητα να έχουν αύξηση της διαμορφωσιμότητας τους σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή, κάτι επιθυμητό στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Στους πολυφασικούς χάλυβες TRIP, όπως προκύπτει από την ονομασία τους, έχουμε συνύπαρξη διάφορων φάσεων στην μικροδομή τους, για την ακρίβεια τριών, την φερριτική (α), την μπαινιτική (α_B) και την ωστενιτική ή του παραμένοντα ωστενίτη (γ) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.2



Εικόνα 2.2 : Απεικονίζεται η τυπική μικροδομή ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP

/1/

Στην μικροδομή το ποσοστό του παραμένοντα ωστενίτη είναι μικρό συγκρινόμενο με αυτά των άλλων δύο φάσεων, του φερρίτη και του μπαινίτη. Συνήθως το ποσοστό του παραμένοντα ωστενίτη είναι της τάξης του 5-15%, του μπαινίτη της τάξης του 30-45% και του φερρίτη της τάξης του 50%. Οι ιδιότητες που κάνουν εντούτοις τους πολυφασικούς χάλυβες TRIP τόσο ελκυστικούς εξαρτώνται κυρίως από το ποσοστό του παραμένοντα ωστενίτη στην τελική δομή και αυτός είναι και ο λόγος που έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά μοντέλα που να υπολογίζουν αυτό το ποσοστό, αλλά και να μελετάμε πως επηρεάζεται με βάσεις ορισμένες παραμέτρους.

2.1.2 Χημική Σύσταση

Στους πολυφασικούς χάλυβες TRIP η συνήθης χημική σύσταση τους είναι Fe, 0.15-0.20C, 1.5Si ή Al, 1.5Mn (κατά βάρος %) και μπορεί να περιέχονται και κάποια άλλα κραματικά στοιχεία με μικρότερες συγκεντρώσεις όπως P, Nb, Cr, Mo, V. Επίσης ένα άλλο κραματικό στοιχείο που παρουσιάζεται είναι το αλουμίνιο για το

οποίο ελέγχεται κατά πόσο μπορεί να αντικαταστήσει το πυρίτιο σε έναν χάλυβα. Στο Πίνακα 2.1 φαίνονται οι τυπικές περιεκτικότητες με τις οποίες εμφανίζονται τα κραματικά στοιχεία σε έναν πολυφασικό χάλυβα TRIP. Καθένα από τα κραματικά στοιχεία, και ανάλογα με την συγκέντρωση με την οποία βρίσκονται στον πολυφασικό χάλυβα καθορίζουν ή προσδίδουν κάποιες ιδιότητες ή κάποια χαρακτηριστικά στην μικροδομή του.

Πίνακας 2.1 : Απεικονίζονται οι τυπικές συστάσεις των κραματικών στοιχείων σε έναν πολυφασικό χάλυβα TRIP

Κραματικό Στοιχείο	C	Si	Mn	Al	P	Nb	Cr	Mo	V
Τυπική σύσταση	0.15 – 0.3	0.10 – 1.5	1.5 – 2.0	0.05 – 1.8	0.01 – 0.3	0.04	0.4	0.4	0.06

Σκοπός των κραματικών στοιχείων είναι να συνεισφέρουν ώστε να βελτιστοποιηθούν οι ιδιότητες των χαλύβων και εν τέλει τα χαρακτηριστικά της μικροδομής του μέσω της μεταβολής της θερμοδυναμικής ισορροπίας των φάσεων του και της κινηματικής του μετασχηματισμού του. Τελικά με την προσθήκη αυτών των κραματικών στοιχείων επιτυγχάνεται η αλλαγή της διανομής των φάσεων αλλά και του ποσοστού της καθεμίας στο κράμα. Ο άνθρακας είναι το πιο σημαντικό στοιχείο στους χάλυβες TRIP, αφού ακριβώς στην επίδρασή του στη δομή βασίζονται οι τελευταίοι. Είναι υπεύθυνος για την σταθεροποίηση του ωστενίτη, για την σταθερότητα και την παραμονή ποσοστού ωστενίτη έπειτα από την θερμική κατεργασία του χάλυβα με τη μορφή παραμένοντα ωστενίτη. Το μικρό ποσοστό με το οποίο βρίσκεται στην χημική σύσταση των πολυφασικών χαλύβων TRIP, παρόλο την σπουδαιότητα του, οφείλεται στην αρνητική του επίδραση στην συγκολλησιμότητα και στην αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Το μαγγάνιο είναι επίσης υπεύθυνο για την σταθερότητα της φάσης του ωστενίτη και διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στον έλεγχο του μετασχηματισμού φάσης. Συγκεκριμένα, το μαγγάνιο χρησιμοποιείται για την μείωση της θερμοκρασίας μετασχηματισμού και έχει θετική επίδραση στον εμπλουτισμό με άνθρακα του ωστενίτη, αυξάνοντας την ικανότητα απορρόφησης του τελευταίου. Το αρνητικό αποτέλεσμα της εμφάνισης του

μαγγάνιου στην χημική σύσταση του χάλυβα βρίσκεται στο ότι το μαγγάνιο μειώνει ενεργητικότητα του άνθρακα στον ωστενίτη με αποτέλεσμα την δημιουργία καρβιδίων. Το τρίτο από τα κύρια κραματικά στοιχεία των χαλύβων TRIP, το πυρίτιο, εξασφαλίζει ότι ο σεμεντίτης δεν θα εμφανιστεί κατά τον μπεινιτικό μετασχηματισμό. Το πυρίτιο όπως και το μαγγάνιο επηρεάζει και ελέγχει το μετασχηματισμό και ευθύνεται για την σταθερότητα του παραμένοντα ωστενίτη. Επιπλέον, προωθεί την δημιουργία προευκτηκτοειδούς φερρίτη κατά την ψύξη που ακολουθεί την ενδοκρίσιμη απόπτωση. Επίσης καθυστερεί την καθίζηση των καρβιδίων κατά τον μπεινιτικό μετασχηματισμό επιτρέποντας τον άνθρακα να διαχυθεί στον παραμένοντα ωστενίτη. Η μεγάλη προσθήκη πυριτίου στο κράμα έχει όμως ως αποτέλεσμα την μείωση της ποιότητας της επιφανείας του. Το αλουμίνιο είναι ένα άλλο κραματικό στοιχείο των χαλύβων TRIP, το οποίο ευνοεί την δημιουργία φερρίτη. Αρνητικό στοιχείο του αλουμινίου είναι ότι είναι μαλακό υλικό και ότι έχει χαμηλό δυναμικό σκλήρυνσης στερεάς διαλυτότητας (solid solution hardening potential). Ο φώσφορος χρησιμοποιείται όταν πρέπει να μειωθεί η προσθήκη αλουμινίου και πυριτίου. Με πολύ μικρή συγκέντρωση είναι ικανό να καθυστερήσει την καθίζηση καρβιδίων σιδήρου και ταυτόχρονα να αυξήσει την αντοχή του χάλυβα. Επιπλέον συμβάλει θετικά για την διατήρηση και σταθερότητα του ωστενίτη. Όμως η αύξηση του ποσοστού φωσφόρου πάνω από κάποια επιτρεπτά όρια οδηγεί στον διαχωρισμό στα όρια των κόκκων και στην επιδείνωση της ολκιμότητας (ductility). Το νιόβιο, άλλο ένα κραματικό στοιχείο που χρησιμοποιείται, πιο σπάνια από τα προηγούμενα όμως, επιδρά θετικά στην κινητικότητα στα όρια των κόκκων, στην ανάπτυξη του μεγέθους των κόκκων, αυξάνει την δυνατότητα εμπλουτισμού άνθρακα του ωστενίτη και καθυστερεί τον μπεινιτικό μετασχηματισμό. Το βανάδιο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του μπεινιτικού μετασχηματισμού. Τέλος το μολυβδαίνιο καθυστερεί το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε φερρίτη και σε περλίτη, μειώνει την ενεργητικότητα του άνθρακα στον ωστενίτη και παρακινεί την δημιουργία καρβιδίων από θερμοδυναμική σκοπιά, όμως στην πράξη η καθίζηση καρβιδίων καθυστερείται.

Τα παραπάνω στοιχεία παρατηρείται ότι επιδρούν το καθένα με τον τρόπο του και σε ορισμένες περιπτώσεις οι δράσεις τους είναι αντικρουόμενες. Οπότε για να καταλήξει στο επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή ο χάλυβας TRIP που θα δημιουργηθεί να έχει ορισμένες ιδιότητες, πρέπει οι συγκεντρώσεις όλων των παραπάνω στοιχείων να παίρνουν συγκεκριμένες τιμές.

2.1.3 Μηχανικές Ιδιότητες

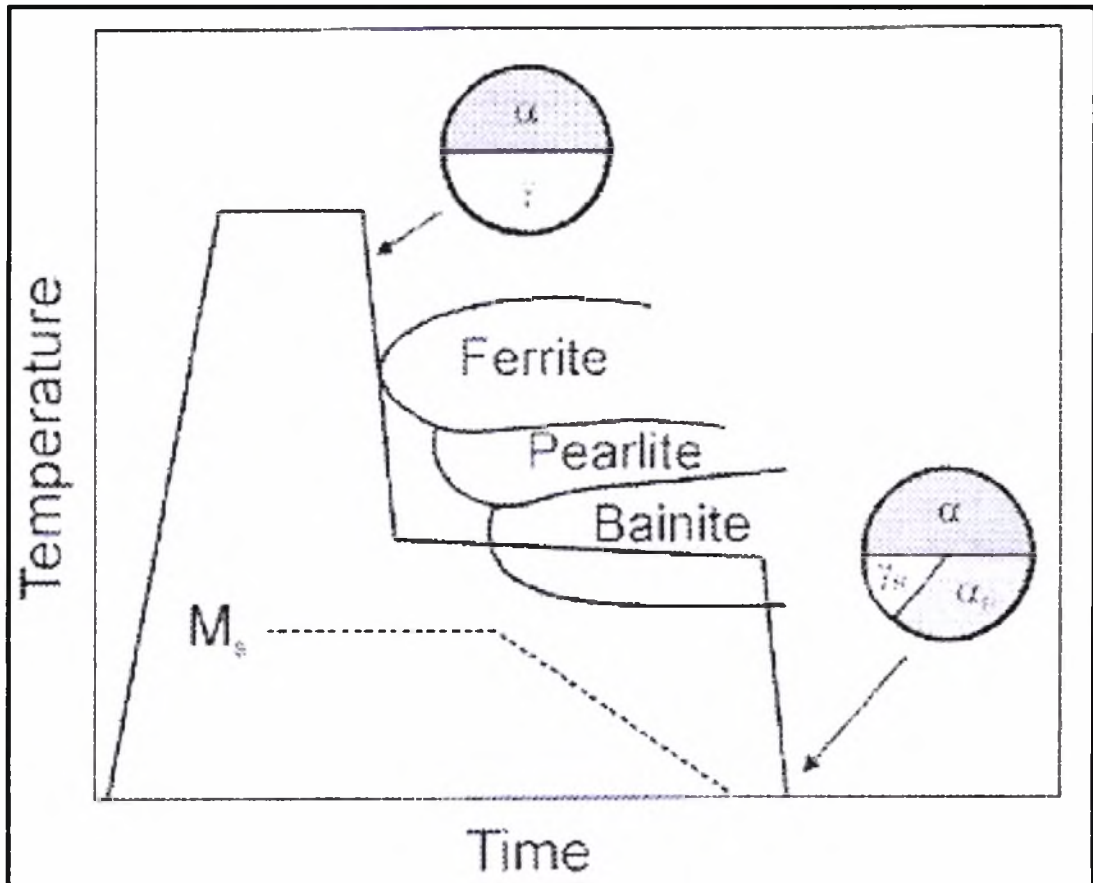
Οι πολυφασικοί χάλυβες TRIP παρουσιάζουν μηχανικές ιδιότητες οι οποίες υπερτερούν συγκρινόμενες με άλλους χάλυβες και αυτό οφείλεται κυρίως στον παραμένοντα ωστενίτη. Επομένως, για να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες, πρέπει να βρεθούν οι κατάλληλοι μηχανισμοί μέσω των οποίων θα καθίσταται δυνατόν να ελέγχουμε τον μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Καταρχήν οι χάλυβες TRIP παρουσιάζουν έναν πολύ καλό συνδυασμό ορίου διαρροής σε σχέση με την επιμήκυνση, όπως φαίνεται άλλωστε ήδη από την Εικόνα 2.1. Επιπλέον παρουσιάζουν αυξημένο όριο αντοχής σε θραύση, ενώ ταυτόχρονα δεν μειώνεται η ελατότητα τους. Συγκρινόμενοι πάντα με άλλους χάλυβες έχουν αυξημένη διαμορφωσιμότητα, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό στην κατασκευή αυτοκινήτων. Ένα ακόμη θετικό στοιχείο των χάλυβων αυτής της κατηγορίας είναι η πολύ καλή απόδοση σε κόπωση που παρουσιάζουν. Επίσης έχουν άριστη αντίδραση σε θερμική σκλήρυνση, σε σκλήρυνση μέσω σφυρηλάτησης σε όλο το πεδίο πλαστικότητας τους. Τέλος με τους χάλυβες TRIP πετυχαίνεται μείωση της μάζας του προϊόντος αλλά και του βάρους του χωρίς να αποκλίνει από τα όρια που τίθενται κατά την κατασκευή του για ορισμένες τιμές.

Αρνητικό στοιχείο των χάλυβων TRIP είναι η συγκολλησιμότητα, της οποίας η τιμή μειώνεται, λόγω της παρουσίας άνθρακα, και με φυσικό επακόλουθο να δυσχαιρένεται η συγκόλληση και να παρουσιάζεται μείωση της ποιότητας αυτής. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί διατηρώντας το ποσοστό του άνθρακα στο χάλυβα κάτω από το 20% κατά βάρος. Επιπλέον ένα δεύτερο αρνητικό στοιχείο που παρουσιάζεται στους πολυφασικούς χάλυβες TRIP είναι το φαινόμενο της ισχυρής εξάρτησης τους από την θερμοκρασία αλλά και από τις συνθήκες (θερμοκρασία και χρονική διάρκεια κάθε σταδίου) που επικρατούν κατά την θερμική επεξεργασία τους.

2.2 Θερμική Κατεργασία

Η θερμική κατεργασία στους πολυφασικούς χάλυβες TRIP παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για μελέτη καθώς απ' αυτήν, δηλαδή από την χρονική της διάρκεια και από τις συνθήκες που επικρατούν στα στάδια της, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η τελική σύσταση και δομή στους χάλυβες και επομένως και οι ιδιότητες τους.

Η θερμική κατεργασία που ακολουθείται σε έναν χάλυβα TRIP φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.3), όπου το πρώτο στάδιο είναι αυτό της ενδοκρίσιμης ανόπτησης και το δεύτερο αυτό του ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού.

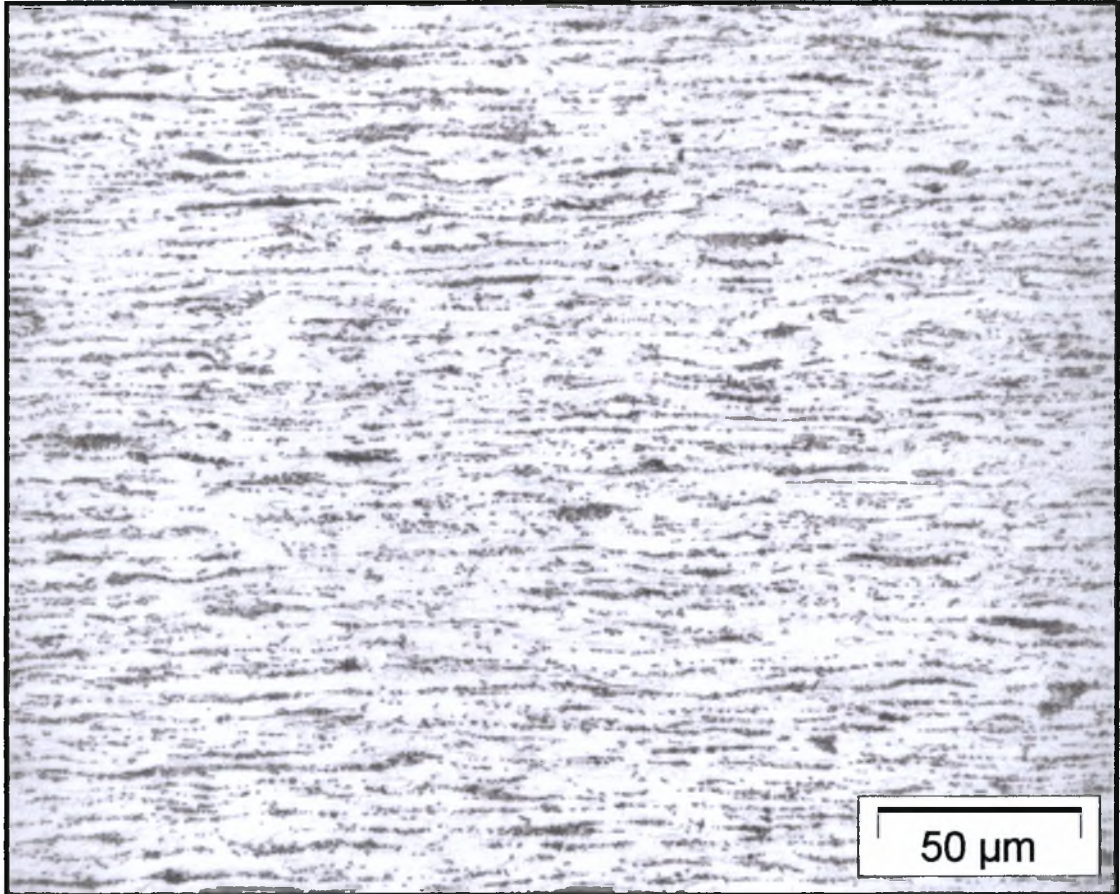


Εικόνα 2.3 : Απεικονίζεται η θερμική κατεργασία ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP /1/

Τα δύο αυτά στάδια είναι κρίσιμα, καθώς σε αυτά υπάρχει αλλαγή φάσεων στην μικροδομή του χάλυβα. Οπότε στον χάλυβα εμφανίζονται τρεις διαφορετικές μικροδομές, η αρχική μικροδομή πριν αρχίσει η θερμική κατεργασία, η μικροδομή στο τέλος της ενδοκρίσιμης ανόπτησης και η μικροδομή στο τέλος του ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού, που είναι και η τελική του μικροδομή. Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η αρχική μικροδομή και περιγράφονται αναλυτικά τα δύο στάδια της θερμικής κατεργασίας του χάλυβα.

2.2.1 Αρχική Μικροδομή

Η αρχική μικροδομή ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP πριν την θερμική κατεργασία απεικονίζεται στην Εικόνα 2.4.

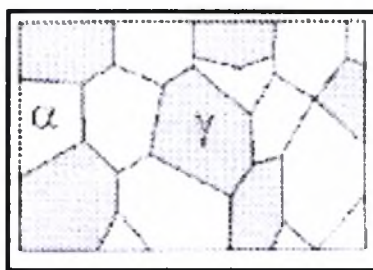


Εικόνα 2.4 : Απεικονίζεται η αρχική μικροδομή ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP /2/

Στην εικόνα 2.4 μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μικροδομή αποτελείται από φερρίτη που είναι η λευκή μήτρα και περλίτη που είναι οι μαύροι κόκκοι, οι οποίοι είναι επιμηκυμένοι λόγω της ψυχρής έλασης που έχει υποστεί ο χάλυβας προηγουμένως .

2.2.2 Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση

Το στάδιο της ενδοκρίσιμης ανόπτησης είναι το πρώτο κατά σειρά της θερμικής κατεργασίας ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP όπως έχει ήδη αναφερθεί. Κατά την ενδοκρίσιμη ανόπτηση σχηματίζεται μια διφασική δομή στον χάλυβα, καταλήγοντας στο τέλος της να υπάρχει προσεγγιστικά σε αναλογία 50% - 50% ωστενίτης (γ) και φερρίτης (α) όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5 : Απεικονίζεται η μικροδομή του χάλυβα στο τέλος της ενδοκρίσιμης ανόπτησης /1/

Η θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης, που συμβολίζεται T_{IA} , παίρνει τιμές μεταξύ $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $880\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ακολουθεί πάντα απότομη ψύξη μέχρι την θερμοκρασία του μπαινιτικού μετασχηματισμού. Η σημαντικότητα της ενδοκρίσιμης ανόπτησης έγκειται στο γεγονός ότι η μικροδομή στην οποία θα καταλήξει ο χάλυβας στο τέλος της, δηλαδή το κλάσμα όγκου του ωστενίτη και οι χημικές συστάσεις των κραματικών στοιχείων σε αυτήν την φάση θα αποτελέσουν την αρχική μικροδομή του ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού που ακολουθεί και επομένως θα τον επηρεάσουν.

2.2.3 Ισόθερμος Μπαινιτικός Μετασχηματισμός

Ο ισόθερμος μπαινιτικός μετασχηματισμός είναι το πιο κρίσιμο στάδιο της θερμικής κατεργασίας ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP, καθώς από τις συνθήκες υπό τις οποίες λαμβάνει χώρα εξαρτάται, κυρίως, το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη στην τελική δομή του χάλυβα του είδους που αναφέραμε. Πριν περιγραφεί ο ισόθερμος μπαινιτικός μετασχηματισμός θα παρουσιαστεί γενικά ο μπαινιτικός μετασχηματισμός.

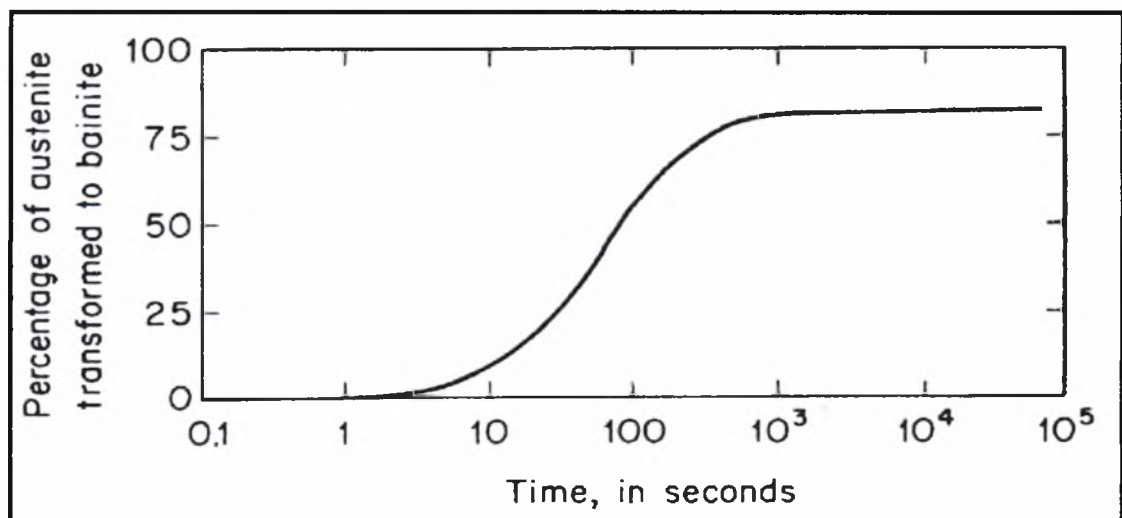
Γενικά ο μπαινιτικός μετασχηματισμός συμβαίνει μεταξύ των θερμοκρασιών $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ με σχηματισμό κάτω μπαινίτη και μεταξύ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ με σχηματισμό άνω μπαινίτη. Ο μπαινιτικός μετασχηματισμός δηλαδή γίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού και του περλιτικού μετασχηματισμού. Κατά τον μπαινιτικό μετασχηματισμό σχηματίζονται λεπτά πλακίδια ή λωρίδες φερρίτη και σωματίδια σεμεντίτη, μια δομή που ονομάζεται μπαινίτης.

Στον μπαινιτικό μετασχηματισμό με τελική δομή άνω μπαινίτη παρατηρούνται λεπτά πλακίδια φερρίτη και ανάμεσα καρβίδια. Τα πλακίδια φερρίτη

απορρίπτουν τον άνθρακα κατά την ανάπτυξη τους στο ωστενιτικό στρώμα που βρίσκεται ανάμεσα, οδηγώντας τελικά στην καθίζηση σεμεντίτη. Η μορφή του σεμεντίτη που δημιουργείται εξαρτάται από το ποσό άνθρακα που περιέχεται στον χάλυβα και μπορεί να είναι είτε με μορφή λωρίδων είτε με μορφή μικρών σωματιδίων. Αν ο χάλυβας περιέχει υψηλό ποσοστό πυριτίου ή αλουμινίου τότε αυτό δρα ανασταλτικά στην καθίζηση σεμεντίτη, με επακόλουθο να διατηρηθεί ο ωστενίτης στην τελική δομή (παραμένοντας ωστενίτης).

Στον μπαινιτικό μετασχηματισμό με σχηματισμό κάτω μπαινίτη παρατηρείται σε γενικές γραμμές παρόμοια μορφολογία με την δομή του άνω μπαινίτη. Όμως, σε αντιδιαστολή με τον άνω μπαινίτη, σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι υπάρχει καθίζηση σεμεντίτη και στο εσωτερικό των φερριτικών πλακιδίων. Οπότε ο σεμεντίτης σε αυτήν την περίπτωση είναι διασπαρμένος σε όλη την δομή, είτε ανάμεσα στα πλακίδια είτε στο εσωτερικό τους, με την διαφορά τώρα ότι η διάχυση άνθρακα στο εσωτερικό του ωστενίτη γίνεται με μικρότερο ρυθμό λόγω της μικρότερης διαχυτότητας στον φερρίτη. Αν ο χάλυβας έχει υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο ή σε αλουμίνιο, και στον κάτω μπαινίτη όπως και στον άνω μπαινίτη, καθυστερείται η καθίζηση σεμεντίτη. Στον κάτω μπαινίτη όμως υπάρχει σχηματισμός μεταβατικού ϵ - καρβιδίων στον μπαινιτικό φερρίτη αντί για σεμεντίτη.

Χαρακτηριστικό του μπαινιτικού σχηματισμού είναι η εξάρτηση του από τον χρόνο λόγω της διάχυσης άνθρακα και της καθίζησης καρβιδίων ή σεμεντίτη, όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6 : Απεικονίζεται η καμπύλη της εξάρτησης του μπαινιτικού μετασχηματισμού από τον χρόνο /3/

Κύριος στόχος του ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού στους πολυφασικούς χάλυβες TRIP είναι ο καθορισμός της περιεκτικότητας του χάλυβα σε ωστενίτη, του λεγόμενου παραμένοντα ωστενίτη, και της σταθεροποίησης του κατά τη φάση μετασχηματισμού του σε μπεινίτη. Χαρακτηριστικό στον ισόθερμο μπεινιτικό μετασχηματισμό είναι η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα, η οποία στην αρχή αυξάνεται λόγω της διάχυσης του άνθρακα από τον φερρίτη στον ωστενίτη και στην συνέχεια μειώνεται σταδιακά λόγω της καθίζησης των καρβιδίων. Η σταθεροποίηση του ωστενίτη σε αυτήν την φάση της θερμικής κατεργασίας μπορεί να επιτευχθεί με εμπλουτισμό σε άνθρακα και με μείωση του μεγέθους των κόκκων των σωματιδίων. Τέλος να σημειωθεί ότι τον ισόθερμο μπεινιτικό μετασχηματισμό, που γίνεται στην θερμοκρασία T_{BIT} , ακολουθεί βαφή του χάλυβα ως την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η τελική δομή θα αποτελείται τότε στους πολυφασικούς χάλυβες TRIP από φερρίτη, μπεινίτη και παραμένοντα ωστενίτη με περιεκτικότητες όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακα 2.2)

Πίνακας 2.2 : Απεικονίζονται τα ποσοστά της κάθε φάσης στην τελική δομή ενός πολυφασικού χάλυβα TRIP

<i>Φάση</i>	<i>Ποσοστό (%)</i>
<i>Μπεινίτης</i>	<i>30 – 45</i>
<i>Φερρίτης</i>	<i>50</i>
<i>Ωστενίτης</i>	<i>5 – 15</i>

2.3 Μαθηματικά Μοντέλα για Χάλυβες TRIP

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή, σε μια προσπάθεια να περιγραφούν οι διεργασίες και οι μετασχηματισμοί φάσεων που συμβαίνουν στη δομή των πολυφασικών χάλυβων TRIP αλλά και να καθοριστούν οι διάφορες παράμετροι και κατά πόσο συμβάλλουν η καθεμία στην τελική μικροδομή, επακολούθως και στις ιδιότητες και στα χαρακτηριστικά που θα προσδώσουν στον χάλυβα, έχουν αναπτυχθεί κάποια μαθηματικά μοντέλα. Μέσω αυτών καθίσταται δυνατόν πλέον να επιλέγονται οι επιθυμητές ιδιότητες που θέλουμε να προσδοθούν στον χάλυβα και

στην συνέχεια να καταλήξουμε στις κατάλληλες συνθήκες θερμικής κατεργασίας και αρχικών συστάσεων των απαιτούμενων κραματικών στοιχείων. Επιπλέον μέσω αυτών, των μαθηματικών μοντέλων, γίνεται να εισαχθεί η έννοια του σχεδιασμού νέων υλικών, δηλαδή να μην καταφεύγουμε στη μέθοδο του πειράματος και μέσω της επανάληψης του να επιτύχουμε ένα χάλυβα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, αλλά αυτό να γίνεται μέσω του σχεδιασμού του και της προσομοίωσης, δηλαδή της εφαρμογής των μαθηματικών μοντέλων με χρήση υπολογιστή.

Με βασικό σκοπό αυτά που έχουν αναφερθεί παραπάνω, σε αυτό το κομμάτι της εργασίας θα παρουσιασθούν τρία μαθηματικά μοντέλα για τους χάλυβες TRIP, το μοντέλο υπολογισμού « $f - \epsilon$ », το μοντέλο « M_s^o » και τέλος το μοντέλο της ενδοκρίσιμης ανόπτησης.

2.3.1 Μοντέλο Υπολογισμού « $f - \epsilon$ »

Το μοντέλο υπολογισμού « $f - \epsilon$ » είναι ένα μοντέλο μέσω του οποίου υπολογίζεται η μεταβολή του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη που μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη (f) σαν συνάρτηση του ποσοστού πλαστικής παραμόρφωσης (ϵ). Σε αυτό το μοντέλο λαμβάνονται υπόψη, εκτός από τις θέσεις πυρήνωσης λόγω της τάσης και οι θέσεις πυρήνωσης που εμφανίζονται εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης του παραμένοντα ωστενίτη. Οπότε ο μετασχηματισμός με βάση τη θεωρία αποτελείται από δυο επιμέρους μετασχηματισμούς, τον υποβοηθούμενο από την τάση και τον υποβοηθούμενο από την πλαστική παραμόρφωση με τις αντίστοιχες θέσεις πυρήνωσης N_v^{oo} , N_v^o .

Οι θέσεις πυρήνωσης που οφείλονται στη τάση (N_v^{oo}) είναι σταθερές ενώ οι θέσεις πυρήνωσης που οφείλονται στην πλαστική παραμόρφωση (N_v^o) λόγω της δυνατότητας αύξησης της παραμόρφωσης θα εξαρτώνται από αυτήν, δηλαδή θα υπάρχει μια σχέση της μορφής $N_v^o = N_v^o(\epsilon)$ και για την ακρίβεια, με βάση τη μελέτη που έχει γίνει από τον Kuroda /4/ ισχύει η σχέση :

$$N_v^o = N [1 - \exp(-k\epsilon^n)] \quad (2.1)$$

όπου

$N = 4.79 \times 10^{20}$, ο συνολικός αριθμός των θέσεων πυρήνωσης οφειλόμενες σε παραμόρφωση

$k = 46$, μια σταθερά

$n = 3.45$, μια σταθερά

Όμως η πιθανότητα να υπάρξει θέση πυρήνωσης σε ένα σωματίδιο ωστενίτη δίνεται από τη σχέση /3/:

$$f = 1 - \exp(-N_v V_p) \quad (2.2)$$

όπου

f : η πιθανότητα ένα σωματίδιο παραμένοντα ωστενίτη να περιέχει τουλάχιστον μια θέση πυρήνωσης

N_v : ο αριθμός των θέσεων πυρήνωσης ανά μονάδα όγκου

V_p : ο όγκος ενός σωματιδίου

Αν θεωρήσουμε ένα μεγάλο αριθμό σωματιδίων ωστενίτη τότε το κλάσμα αυτών που θα μετασχηματιστούν σε μαρτενσίτη δίνεται από τη σχέση /3/ :

$$f = 1 - \exp\left\{-V_p \left[N_v^{oo} \exp(-a_o n_o) + N_v^o \exp(-a_1 n_1) \right]\right\} \quad (2.3)$$

όπου

a_o, a_1 : σταθερές

N_v^{oo} : θέσεις πυρήνωσης λόγω τάσης

N_v^o : θέσεις πυρήνωσης λόγω παραμόρφωσης

και

$$n_o = -\frac{2\gamma_s / d}{\Delta G^{ch} + \Delta G_{\max}^{\sigma} / 3 + E^{str} + W_f} \quad (2.4)$$

$$n_1 = -\frac{2\gamma_s / d}{\Delta G^{ch} + \Delta G_{\max}^{\sigma} + E^{str} + W_f} \quad (2.5)$$

με

d : η απόσταση μεταξύ δύο επιπέδων σφάλματος

ΔG^{ch} : η χημική κινούσα δύναμη

E^{str} : η ενέργεια παραμόρφωσης

ΔG_{max}^{σ} : η μηχανική κινούσα δύναμη για βέλτιστο προσανατολισμό των θέσεων πυρήνωσης

γ_s : η διεπιφανειακή ενέργεια μεταξύ μαρτενσίτη και ωστενίτη

W_f : το έργο εσωτερικής τριβής

Οπότε με βάση τις σχέσεις (2.1), (2.4) και (2.5) το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη που μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη όπως δίνεται από τη σχέση (2.3) μπορεί να μετασχηματιστεί και να πάρει την εξής μορφή που αποτελεί και την αναλυτική σχέση του μοντέλου « f – ε » /3/:

$$f = 1 - \exp \left\{ -V_p \left[N_v^{oo} \exp \left(\frac{2a_o \gamma_s / d}{\Delta G^{ch} + \Delta G_{max}^{\sigma} / 3 + E^{str} + W_f} \right) + N \left[1 - \exp(-k\varepsilon^n) \right] \exp \left(\frac{2a_i \gamma_s / d}{\Delta G^{ch} + \Delta G_{max}^{\sigma} + E^{str} + W_f} \right) \right] \right\} \quad (2.6)$$

όπου όλα τα μεγέθη είναι γνωστά.

2.3.2 Μοντέλο Ενδοκρίσιμης Ανόπτωσης

Το δεύτερο μοντέλο που θα παρουσιαστεί σε αυτήν την εργασία είναι το μοντέλο της ενδοκρίσιμης ανόπτωσης. Με αυτό το μοντέλο γίνεται μια προσπάθεια να προβλεφθεί το ποσό του ωστενίτη σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ανόπτωσης και βασίζεται στις εξισώσεις διάχυσης σε ένα ζεύγος διάχυσης ωστενίτη – φερρίτη. Κατά το στάδιο της ενδοκρίσιμης ανόπτωσης αρχικά γίνεται ο μετασχηματισμός του περλίτη σε ωστενίτη ο οποίος όμως συμβαίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό και στην συνέχεια ο ωστενίτης αναπτύσσεται σε βάρος του φερρίτη, το οποίο αυτό δεύτερο στάδιο συμβαίνει με πολύ πιο αργό ρυθμό και είναι αυτό που μελετάται στην ουσία. Με βάση το μοντέλο γίνεται η θεώρηση ότι μελετάται ένα μονοδιάστατο πρόβλημα, δηλαδή ότι υπάρχει διάχυση μόνο σε μια κατεύθυνση και ότι η αρχική μικροδομή αποτελείται από ωστενίτη και φερρίτη, με πλάτη περιοχών L_{γ} και L_{α} αντίστοιχα και θερμοκρασία τέτοια ώστε να μην εμφανίζεται πια περλίτης στο σύστημα. Επιπλέον θεωρείται ότι η θερμοκρασία αυξάνει με γραμμικό τρόπο από αυτήν την θερμοκρασία στην θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτωσης όπου και σταθεροποιείται μέχρι το τέλος

της χρονικής διάρκειας της ενδοκρίσιμης ανόπτησης. Στην αρχή αν θεωρηθούν τα κλάσματα όγκου των δύο φάσεων f_γ για τον ωστενίτη και f_α για τον φερρίτη, τα οποία και μπορούν να υπολογιστούν από το λογισμικό Thermo-calc, τότε ισχύει η σχέση /3/:

$$\frac{f_\gamma}{f_\alpha} = \frac{L_\gamma}{L_\alpha} \quad (2.7)$$

Επιπλέον, η αρχική σύσταση του ωστενίτη και του φερρίτη μπορεί να υπολογισθεί για κάθε στοιχείο (κ) από την παρακάτω σχέση /3/:

$$L_\alpha c_\kappa^\alpha + L_\gamma c_\kappa^\gamma = (L_\alpha + L_\gamma) c_\kappa^o \quad (2.8)$$

όπου :

c_κ^o : η ονομαστική συγκέντρωση του στοιχείου κ στο σύστημα

c_κ^γ : η συγκέντρωση του στοιχείου κ στον ωστενίτη

c_κ^α : η συγκέντρωση του στοιχείου κ στο φερρίτη

Στην συνέχεια, αν θεωρηθεί ότι υπάρχει διάχυση, τότε η εξέλιξη του προφίλ συγκέντρωσης του στοιχείου κ (c_κ) σαν συνάρτηση του χρόνου στον ωστενίτη και στον φερρίτη θα δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις /3/ :

$$\frac{\partial c_\kappa^\alpha}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\kappa^\alpha \frac{\partial c_\kappa^\alpha}{\partial x} \right) \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial c_\kappa^\gamma}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\kappa^\gamma \frac{\partial c_\kappa^\gamma}{\partial x} \right) \quad (2.10)$$

όπου :

c_κ^γ : η συγκέντρωση του στοιχείου κ στον ωστενίτη

c_κ^α : η συγκέντρωση του στοιχείου κ στο φερρίτη

D_κ^α : ο συντελεστής διάχυσης του στοιχείου κ στο φερρίτη

D_κ^γ : ο συντελεστής διάχυσης του στοιχείου κ στον ωστενίτη

Επιπλέον, η ροή των ατόμων στον ωστενίτη και στον φερρίτη δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις, που αναπτυχθεί από τον Onsager κάνοντας χρήση του νόμου του Fick /3/,/5/ :

$$J_{\kappa}^{\alpha} = -\sum_{j=1}^n D_{j\kappa}^{\alpha} \frac{\partial c_j^{\alpha}}{\partial x} \quad (2.11)$$

$$J_{\kappa}^{\gamma} = -\sum_{j=1}^n D_{j\kappa}^{\gamma} \frac{\partial c_j^{\gamma}}{\partial x} \quad (2.12)$$

όπου:

n : ο συνολικός αριθμός των συστατικών κ

J_{κ}^{α} : η ροή των ατόμων του συστατικού κ στο φερρίτη

J_{κ}^{α} : η ροή των ατόμων του συστατικού κ στον ωστενίτη

Τέλος, μπορεί να υπολογισθεί η ταχύτητα (v) της διεπιφάνειας ωστενίτη – φερρίτη κάνοντας εφαρμογή ενός ισοζυγίου μάζας και προκύπτει η παρακάτω σχέση /3/ :

$$v(\gamma c_{\kappa}^{\gamma/\alpha} - \alpha c_{\kappa}^{\gamma/\alpha}) = D_{\kappa}^{\alpha} \left(\frac{\partial c_{\kappa}^{\alpha}}{\partial x} \right)_{\gamma/\alpha} - D_{\kappa}^{\gamma} \left(\frac{\partial c_{\kappa}^{\gamma}}{\partial x} \right)_{\gamma/\alpha} \quad (2.13)$$

όπου :

v : η ταχύτητα της διεπιφάνειας φερρίτη/ωστενίτη

$\gamma c_{\kappa}^{\gamma/\alpha}$: η συγκέντρωση του στοιχείου κ στην διεπιφάνεια από την πλευρά του ωστενίτη

$\alpha c_{\kappa}^{\gamma/\alpha}$: η συγκέντρωση του στοιχείου κ στην διεπιφάνεια από την πλευρά του φερρίτη

D_{κ}^{α} : ο συντελεστής διάχυσης του στοιχείου κ στον φερρίτη

D_{κ}^{γ} : ο συντελεστής διάχυσης του στοιχείου κ στον ωστενίτη

Για να γίνει επίλυση των παραπάνω εξισώσεων που προέκυψαν με βάση το μοντέλο της ενδοκρίσιμης ανόπτησης γίνεται χρήση κάποιων αρχικών συνθηκών και κάποιων συνοριακών. Στις συνοριακές που παρουσιάζονται παρακάτω έχει γίνει η παραδοχή ότι το σύστημα είναι πεπερασμένο και στις αρχικές συνθήκες θεωρείται ότι

οι αρχικές συστάσεις των στοιχείων είναι αυτές που προκύπτουν από το πρώτο στάδιο της ενδοκρίσιμης ανόπτησης που διαρκεί ελάχιστα. Οι συνοριακές συνθήκες δίνονται από τις σχέσεις /3/ :

$$\left. \frac{\partial c_{\kappa}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.14)$$

$$\left. \frac{\partial c_{\kappa}}{\partial x} \right|_{x=L_{\gamma}+L_{\alpha}} = 0 \quad (2.15)$$

Ενώ οι αρχικές συνθήκες δίνονται από τις σχέσεις /3/:

$$c_{\kappa}^{\gamma}(x,0) = c_{\kappa}^{\gamma}(T_s), 0 \leq x \leq L_{\gamma}$$

$$c_{\kappa}^{\alpha}(x,0) = c_{\kappa}^{\alpha}(T_s), 0 \leq x \leq L_{\gamma} + L_{\alpha}$$

2.3.3 Μοντέλο « M_s^{σ} »

Το τρίτο και τελευταίο μοντέλο που αναπτύσσεται σε αυτήν την εργασία είναι το μοντέλο « M_s^{σ} », στο οποίο υπολογίζεται η θερμοκρασία M_s^{σ} , δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση ισούται με το όριο διαρροής της ωστενιτικής φάσης. Η σημαντικότητα αυτής της θερμοκρασίας έγκειται στο γεγονός ότι αποτελεί ένα κριτήριο για τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, για θερμοκρασίες μικρότερες από αυτήν ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός υποβοηθάται από τάση ενώ για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτήν ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός υποβοηθάται από την πλαστική παραμόρφωση. Σ' αυτό το μοντέλο σκοπός είναι ο υπολογισμός της θερμοκρασίας M_s^{σ} σαν συνάρτηση των συστάσεων του άνθρακα και του μαγγανίου του ωστενίτη, του μέσου όγκου των σωματιδίων ωστενίτη, του ορίου διαρροής του ωστενίτη και τέλος, του λόγου της υδροστατικής τάσης προς την ισοδύναμη τάση, δηλαδή μιας σχέσης της μορφής :

$$M_s^{\sigma} = M_s^{\sigma} (X_c, X_{Mn}, \bar{V}_p, \sigma_y, \frac{\sigma_h}{\sigma})$$

όπου

X_c : η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα

X_{Mn} : η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε μαγγάνιο

\bar{V}_p : η τιμή του μέσου όγκου των σωματιδίων ωστενίτη

σ_y : το όριο διαρροής του ωστενίτη

$\frac{\bar{\sigma}_h}{\sigma}$: ο λόγος της υδροστατικής προς την ισοδύναμη τάση

Με αυτόν τον υπολογισμό γίνεται προσπάθεια να ελεγχθεί η σταθερότητα της ωστενιτικής διασποράς που είναι εξίσου σημαντική με το ποσοστό του παραμένοντα ωστενίτη για την μετέπειτα συμπεριφορά του υλικού. Λαμβάνοντας υπόψη την θεωρία που έχουν αναπτύξει οι Olson και Cohen /6/ είναι γνωστό ότι μια ατέλεια στη δομή μπορεί να διασπαστεί στην κατάλληλη θερμοκρασία M_s και να δημιουργήσει ένα σφάλμα, το οποίο είναι το πρώτο μαρτενσιτικό σωματίδιο. Σε αυτήν την περίπτωση το σφάλμα αυτό στην δομή έχει ενέργεια /3/:

$$\gamma = np(\Delta G^{ch} + E^{str}) + 2\gamma_s \quad (2.16)$$

όπου

n : ο αριθμός των επιπέδων που απαρτίζουν το σφάλμα

ρ : η πυκνότητα των ατόμων στο επίπεδο του σφάλματος (mol/m^2)

ΔG^{ch} : η χημική κινούσα δύναμη (J/mol)

E^{str} : η ενέργεια παραμόρφωσης (J/mol)

γ_s : η διεπιφανειακή ενέργεια μεταξύ μαρτενσιτικής και μητρικής φάσης (J/m^2)

Η κρίσιμη τιμή της ενέργειας είναι όταν $\gamma=0$ που συμβαίνει στη θερμοκρασία M_s . Το κρίσιμο πάχος n για το οποίο υπάρχει η θερμοκρασία M_s με δεδομένη χημική κινούσα δύναμη δίνεται από τη σχέση /3/:

$$n = -\frac{2\gamma_s / \rho}{\Delta G^{ch} + E^{str} + W_f} \quad (2.17)$$

όπου

W_f : το έργο της τριβής για την κίνηση της διεπιφάνειας (J/mol)

Ο αριθμός πυκνότητας των θέσεων πυρήνωσης σαν συνάρτηση του κρίσιμου πάχους n /7/, αν ψυχθεί απότομα ο χάλυβας σε δεδομένη θερμοκρασία αυτήν της συγκεκριμένης στιγμής, δίνεται από τη σχέση /3/ :

$$N_v = N_v^o \exp(-an) \quad (2.18)$$

όπου

N_v : ο αριθμός πυκνότητας των θέσεων πυρήνωσης

N_v^o : ο συνολικός αριθμός των θέσεων πυρήνωσης

a : μια σταθερά που εξαρτάται από το σχήμα των σωματιδίων

Ο αριθμός πυκνότητας των θέσεων πυρήνωσης όμως, εξαρτάται από την χημική κινούσα δύναμη η οποία δίνεται από τη σχέση /3/:

$$\Delta G = \Delta G^{ch} + \Delta G^\sigma \quad (2.19)$$

όπου

ΔG^{ch} : η χημική κινούσα δύναμη

ΔG^σ : η μηχανική κινούσα δύναμη

με :

$$\Delta G^\sigma = \frac{\sigma}{2} \{ \gamma_o \sin(2\theta) \cos \beta + \varepsilon_o (1 + \cos(2\theta)) \} \quad (2.20)$$

όπου

γ_o : η διατμητική παραμόρφωση του μετασχηματισμού

ε_o : η ορθή παραμόρφωση του μετασχηματισμού

θ : η γωνία μεταξύ εφαρμοζόμενης τάσης και τυπικού επιπέδου

β : η γωνία μεταξύ διεύθυνσης διάτμησης μετασχηματισμού και μέγιστης διεύθυνσης διάτμησης της εφαρμοζόμενης τάσης στο τυπικό επίπεδο

Αν ληφθεί υπόψη η θεωρία του Patel και Cohen /8/ ότι οι θέσεις πυρήνωσης έχουν βέλτιστο προσανατολισμό όταν ισχύει $\Delta G^\sigma = \Delta G_{\max}^\sigma$ τότε θα ισχύει η σχέση /3/:

$$N_v(\sigma) = N_v^o \exp \frac{2\alpha\gamma_s / d}{\Delta G^{ch} + \Delta G_{\max}^\sigma + W_f + E^{str}} \quad (2.21)$$

Στο μοντέλο γίνεται η θεώρηση ότι ο μέσος όγκος των σωματιδίων ωστενίτη είναι V_p . Το κλάσμα όγκου τότε των σωματιδίων που θα μετασχηματιστούν δίνεται από τη σχέση /3/ :

$$f = 1 - \exp(-N_v V_p) \quad (2.22)$$

Επιπλέον η μηχανική κινούσα δύναμη μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση /3/:

$$\Delta G^\sigma = \sigma \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial \sigma} \right) \quad (2.23)$$

Οπότε συνδυάζοντας τις τρεις παραπάνω σχέσεις η τάση μετασχηματισμού σ_t θα δίνεται από τη σχέση /3/ :

$$\sigma_t = \frac{1}{\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial \sigma} \right)} \left\{ \frac{2\alpha\gamma_s / \rho}{\ln \left[\frac{\ln(1-f)}{N_v V_p} \right]} - \Delta G^{ch} - E^{str} - W_f \right\} \quad (2.24)$$

Όμως ισχύει ότι $\Delta G^{ch} = \Delta G^{ch}(M_s)$ για τιμή της τάσης μετασχηματισμού (σ_t) ίση με το όριο διαρροής του ωστενίτη (σ_y), οπότε μπορεί να υπολογιστεί η επιθυμητή θερμοκρασία από την παραπάνω σχέση. Πλέον άγνωστες παράμετροι παραμένουν η χημική κινούσα δύναμη, η μηχανική κινούσα δύναμη και το έργο

τριβής για την κίνηση της διεπιφάνειας και αρκεί να υπολογιστούν αυτές οι τρεις για να εξαχθεί μια σχέση με μόνη άγνωστη τιμή την θερμοκρασία M_s^σ , που είναι και απώτερος σκοπός του μοντέλου.

Όπως προκύπτει από βιβλιογραφική μελέτη (/3/, /9/, /10/, /11/, /12/, /13/) καταλήγουμε στις τρεις παρακάτω σχέσεις που καθορίζουν τις άγνωστες τιμές :

$$\Delta G^{ch} = G(BCC) - G(FCC) = -7381.6 + 69447X_C + 19296X_{Mn} - 38776X_C X_{Mn} + 6.7821T - 33.45X_C T$$

(2.25)

όπου :

ΔG^{ch} : η χημική κινούσα δύναμη

$G(BCC)$: η ελεύθερη ενέργεια Gibbs της φάσης του φερρίτη

$G(FCC)$: η ελεύθερη ενέργεια Gibbs της φάσης του ωστενίτη

X_C : η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα

X_{Mn} : η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε μαγγάνιο

T : η θερμοκρασία

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial \sigma} \right) = -0.715 - 0.3206 \left(\frac{\sigma_h}{\sigma} \right) \quad (2.26)$$

όπου :

$\left(\frac{\sigma_h}{\sigma} \right)$: ο λόγος υδροστατικής τάσης προς ισοδύναμης που ισούται με -1/3 για μονοαξονική θλίψη, 0 για καθαρή διάτμηση και 1/3 για μονοαξονικό εφελκυσμό

$$W_f = 1169 + 8777X_C + 2246X_{Mn} + 19900X_C X_{Mn} \quad (2.27)$$

όπου :

W_f : το έργο της τριβής για την κίνηση της διεπιφάνειας

X_C : η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα

X_{Mn} : η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε μαγγάνιο

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την σύσταση του άνθρακα και του μαγγανίου μόνο από τα κραματικά στοιχεία, εφόσον αυτά τα δυο θεωρούνται τα κύρια στοιχεία σταθεροποίησης του ωστενίτη και για το έργο της τριβής για την κίνηση της διεπιφανείας θεωρήθηκε ότι έχει γραμμική συμπεριφορά

Οπότε τελικά το μοντέλο καταλήγει για την θερμοκρασία M_s^σ στην παρακάτω σχέση που αποτελεί και την τελική έκφραση του μοντέλου /3/:

$$M_s^\sigma = (6.7891 - 33.45X_C)^{-1} (A + 5712.6 - 78224X_C - 21542X_{Mn} + 18876X_C X_{Mn}) + \sigma_y \left(0.715 + 0.3206 \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \right)$$

(2.28)

και

$$A = \frac{2\alpha\gamma_s / \rho}{\ln\{-[\ln(1-f)] / N_v^\circ V_p\}} \quad (2.29)$$

όπου :

α : μια σταθερά εξαρτώμενη από το σχήμα των σωματιδίων

ρ : η πυκνότητα των ατόμων στο επίπεδο σφάλματος

γ_s : η διεπιφανειακή ενέργεια μεταξύ μαρτενσιτικής και μητρικής φάσης

X_C : η χημική περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα

X_{Mn} : η χημική περιεκτικότητα του ωστενίτη σε μαγγάνιο

$\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}}$: ο λόγος της υδροστατικής προς την ισοδύναμη τάση

σ_y : το όριο διαρροής του ωστενίτη

V_p : ο μέσος όγκος των σωματιδίων ωστενίτη

N_v° : ο συνολικός αριθμός των θέσεων πυρήνωσης για όλα τα δυναμικά

f : μια σταθερά που αντιπροσωπεύει το 1% του μετασχηματισμού

και οι τυπικές τιμές αυτών των παραμέτρων είναι :

$$\alpha = 0.8666 / 12/$$

$$N_v^\circ = 2E+17 \text{ m}^{-3}$$

$$\gamma_s = 0.15 \text{ j/m}^2$$

$$\rho = 3\text{E-}5 \text{ mol/m}^2$$

$$f = 0.01$$

$$\frac{\sigma_h}{\sigma} = 1/3 \text{ θεωρώντας μονοαξονικό εφελκυσμό.}$$

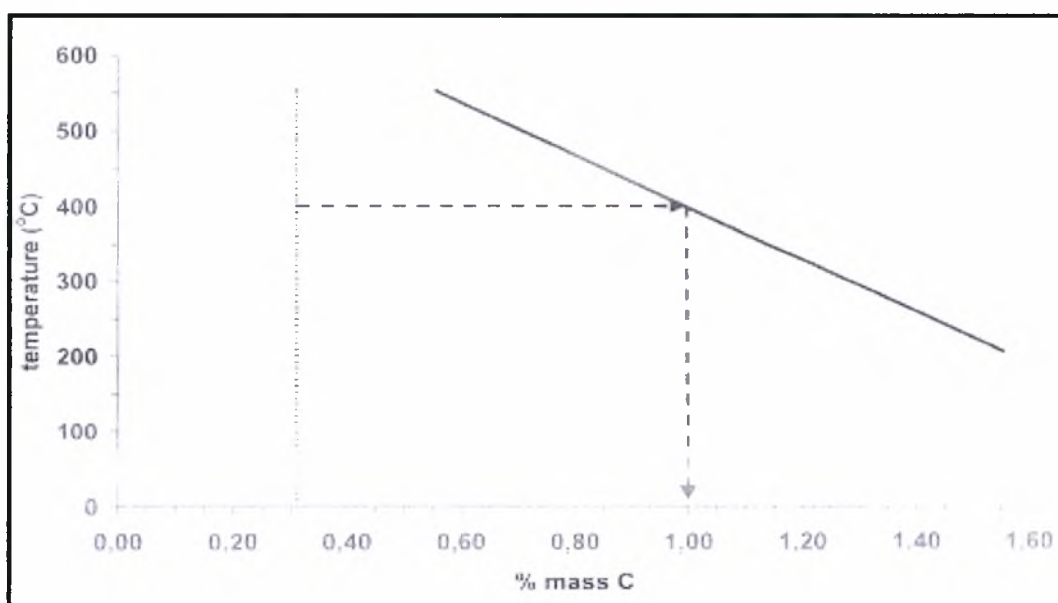
Κεφάλαιο 3^ο

Υπολογισμός Κρίσιμων Θερμοκρασιών T_0 σε Χάλυβες TRIP

3.1 Εισαγωγή

Σ' αυτό το κεφάλαιο της εργασίας θα αναπτυχθεί η μεθοδολογία και η διαδικασία για τρεις χάλυβες TRIP του υπολογισμού της καμπύλης των κρίσιμων θερμοκρασιών T_0 . Στόχος αυτής της μελέτης είναι ο υπολογισμός της γραμμής T_0 , δηλαδή της θερμοκρασίας στην οποία οι δομές fcc (ωστενίτης) και bcc (φερρίτης ή μαρτενσίτης) έχουν την ίδια τιμή ελεύθερης ενέργειας Gibbs σε σχέση με την περιεκτικότητα του άνθρακα, στην οποία θα καταλήξει με την χρήση του κατάλληλου υπολογιστικού προγράμματος.

Η γραμμή T_0 είναι μια καμπύλη με μορφή όπως αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Για την κατασκευή της απαιτείται να υπολογιστούν τα σημεία στα οποία η ελεύθερη ενέργεια Gibbs της ωστενιτικής φάσης ισούται με αυτήν την φερριτικής φάσης, για διάφορες τιμές θερμοκρασίας, και στην συνέχεια με ένωση του συνόλου αυτών των ζευγών τιμών, ελεύθερης ενέργειας Gibbs – θερμοκρασίας προκύπτει η γραμμή T_0 όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.1 : Απεικονίζεται η γραμμή T_0 που προέκυψε από κάποια προηγούμενη υπολογιστική διαδικασία /2/

Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί είναι κοινή για τα τρία διαφορετικά κράματα τα οποία θα μελετηθούν. Η σημαντικότητα της γραμμής T_0 κατά τη μελέτη ενός χάλυβα TRIP έγκειται στο ότι αυτή περιέχει πληροφορίες αναγκαίες, καθώς αυτή καθορίζει για συγκεκριμένη θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού ποια θα είναι η μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα άνθρακα (C) της φάσης γ (ωστενιτική φάση) και επιπλέον σε περίπτωση που η αρχική συγκέντρωση της αντιδρούσας φάσης που έχει υπολογιστεί κατά το ενδοκρίσιμο στάδιο ανόπτησης θα βρίσκεται στην αριστερή πλευρά της γραμμής T_0 τότε σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνει χώρα ο μετασχηματισμός $\gamma \rightarrow \alpha_B$ (ωστενίτη σε μπεινιτικό φερρίτη) χωρίς να συμβαίνει διάχυση.

Για τον υπολογισμό της γραμμής T_0 είναι αναγκαία μια σειρά από υπολογισμούς που είναι κοινή για τους τρεις χάλυβες και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού. Τέλος στον παρακάτω πίνακα (Πίνακα 3.1) δίνονται οι αρχικές συγκεντρώσεις κατά βάρος των τριών χάλυβων με τους οποίους θα γίνει ενασχόληση σε αυτό το κεφάλαιο και θα υπολογισθεί τελικά η καμπύλη T_0 που αντιστοιχεί στον καθένα.

Πίνακα 3.1 : Απεικονίζονται οι ονομαστικές συστάσεις για τους τρεις χάλυβες που μελετούνται σε αυτό το κεφάλαιο

Περιεκτικότητα(% κ.β.) / Χάλυβας	Fe	C	Mn	Al/Si
Χάλυβας 1 (Al1)	96.84	0.11	1.55	1.50/ -
Χάλυβας 2 (Si1)	96.86	0.11	1.53	-/1.50
Χάλυβας 3 (Si2)	96.88	0.29	1.42	-/1.41

Από εδώ και πέρα θα γίνεται αναφορά στους χάλυβες με τις παραπάνω συστάσεις με τα ονόματα Al1, Si1, Si2 ανάλογα με την σύσταση, όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα (Πίνακα 3.1). Επιπλέον να τονισθεί, όπως φαίνεται άλλωστε και από τον πίνακα συστάσεων τους, ότι ο χάλυβας Al1 περιέχει αλουμίνιο ενώ οι χάλυβες Si1 και Si2 αντιθέτως περιέχουν πυρίτιο.

3.2 Υπολογισμοί και Διαδικασία

Στην πρώτη φάση της διαδικασίας υπολογισμού της γραμμής T_0 υπολογίζονται με την χρήση του προγράμματος Thermo-Calc για δεδομένη θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης T_{IA} , δηλαδή της θερμοκρασίας του πρώτου σταδίου της θερμικής επεξεργασίας του χάλυβα TRIP, τα κλάσματα όγκου των φάσεων φερρίτη και ωστενίτη και η χημική σύσταση της ωστενιτικής φάσης για το καθένα από τα τρία κράματα ξεχωριστά. Επιλέγεται για την μελέτη τους θερμοκρασία $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, δηλαδή $T_{IA} = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ή 1023 K . Σε αυτό το στάδιο επιπλέον επιλέγονται σαν μεταβλητές εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα ατμοσφαιρική πίεση ($P = 1\text{ atm}$) και ποσότητα του κάθε κράματος ίση με 1 mol ($N = 1\text{ mol}$). Στον υπολογισμό αυτό επίσης γίνεται μία πολύ βασική παραδοχή, ότι ο χρόνος του σταδίου είναι αρκετός, ώστε να υπάρξει μετάβαση σε συνθήκες ισορροπίας. Τα ζητούμενο αυτού του σταδίου υπολογισμών είναι να υπολογισθούν τα κλάσματα όγκου και οι χημικές συστάσεις των κραμάτων στο τέλος του ενδοκρίσιμου σταδίου ανόπτησης και επομένως οι αρχικές τιμές του σταδίου του ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού που ακολουθεί.

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακες 3.2 και 3.3) δίνονται τα κλάσματα όγκου των φάσεων φερρίτη και ωστενίτη και οι χημικές συστάσεις αντίστοιχα που προκύπτουν για τους τρεις χάλυβες σε θερμοκρασία ανόπτησης ίση με $750\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Πίνακας 3.2 : Απεικονίζονται τα κλάσματα όγκου των φάσεων φερρίτη και ωστενίτη σε θερμοκρασία ανόπτησης $750\text{ }^{\circ}\text{C}$

Χάλυβας	f_{γ}°	f_{α}°
A11	0.1545796	0.8454204
Si1	0.237116994	0.762883005
Si2	0.531965739	0.46803426

Πίνακας 3.3 : Απεικονίζονται οι χημικές συστάσεις σε κλάσμα μάζας της ωστενιτικής φάσης όπως προκύπτουν μετά το τέλος της ενδοκρίσιμης ανόπτησης για τον καθένα από τους τρεις χάλυβες

Χάλυβας	Al/Si	C	Fe	Mn
Al1	$7.57614336 * 10^{-3}/-$	$5.97406297 * 10^{-3}$	0.955527955	$3.0921838 * 10^{-2}$
Si1	$-/1.28054259 * 10^{-2}$	$4.25842351 * 10^{-3}$	0.954462739	$2.8473411 * 10^{-2}$
Si2	$-/1.24620021 * 10^{-2}$	$5.30698961 * 10^{-3}$	0.962192761	$2.0038247 * 10^{-2}$

Επομένως, όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, μέσω της προσομοίωσης του ενδοκρίσιμου σταδίου ανόπτησης προέκυψαν οι αρχικές χημικές συστάσεις και τα αρχικά κλάσματα όγκου για το στάδιο του ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού. Στη συνέχεια κατά τον τελευταίο ο ωστενίτης θα μετασχηματιστεί εν μέρει σε μπαινιτικό φερρίτη ενώ ο άλλος θα παραμείνει όπως έχει και θα ονομάζεται παραμένοντας ωστενίτης. Με χρήση του υπολογιστικού πακέτου Thermo-calc στην συνέχεια θα υπολογισθεί η γραμμή T_0 . Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι μόνο η σύσταση του άνθρακα αλλάζει σε κάθε φάση, ενώ οι συστάσεις ή οι ποσότητες κάθε άλλου στοιχείου, στην προκειμένη περίπτωση των Al, Mn για τον χάλυβα Al1 και των Mn, Si για τους χάλυβες Si1, Si2, παραμένουν σταθερές σε κάθε φάση, καθώς δεν υπάρχει μετακίνηση από τον ωστενίτη προς τον φερρίτη ή το αντίστροφο κατά τον μπαινιτικό μετασχηματισμό.

Στη συνέχεια θα μελετηθούν σε ένα φάσμα μπαινιτικής θερμοκρασίας T_{BIT} μεταξύ 250 °C και 500 °C, με ελάχιστη την πρώτη, μέγιστη την δεύτερη και με βήμα 50 °C κάθε φορά όπως φαίνεται και στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.4)

Πίνακας 3.4 : Απεικονίζονται οι θερμοκρασίες στις οποίες γίνεται ο μπαινιτικός μετασχηματισμός

Μπαινιτική θερμοκρασία T_{BIT}	
Σε βαθμούς κελσίου ($^{\circ}C$)	Σε βαθμούς κέλβιν (K)
250	523
300	573
350	623
400	673
450	723
500	773

Στόχος είναι μέσω της χρήσης του υπολογιστικού πακέτου να υπολογισθεί για κάθε θερμοκρασία από τις παραπάνω η καμπύλη ελεύθερης ενέργειας Gibbs σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για την κάθε φάση ξεχωριστά (φερρίτη και ωστενίτη), στην συνέχεια να τεθούν στο ίδιο γράφημα και να υπολογισθεί το σημείο τομής των καμπύλων των δύο φάσεων για κάθε θερμοκρασία . Κάνοντας αυτήν την διαδικασία προκύπτουν τα διαγράμματα που έχουν αναφερθεί για κάθε θερμοκρασία και κάθε χάλυβα ξεχωριστά. Τα διαγράμματα αυτά, τα ζεύγη τιμών που επιλέχθηκαν για να σχεδιαστούν οι καμπύλες καθώς επίσης και οι υπολογισμοί για την εύρεση του σημείου τομής παρατίθενται αμέσως παρακάτω (Εικόνες 3.2-3.19).

- Για τον χάλυβα A11

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.2 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3469.6x - 18199 = 1486.1x - 15383$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.3 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

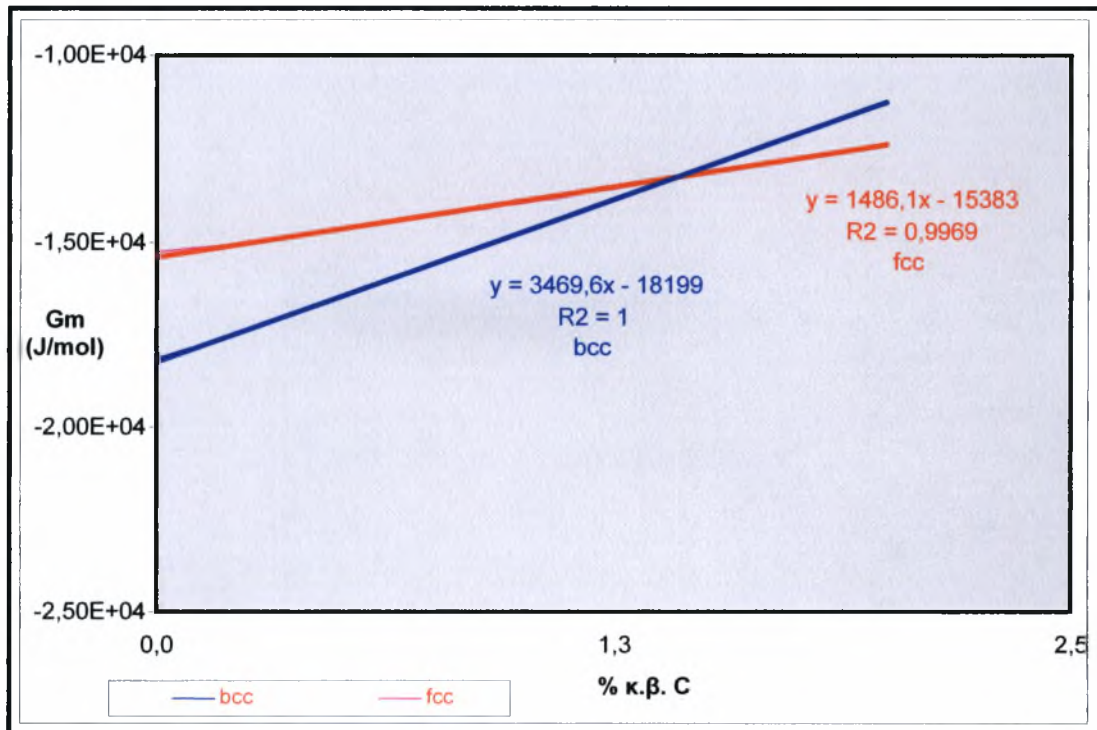
$$3390.2x - 20498 = 1485.3x - 18074$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

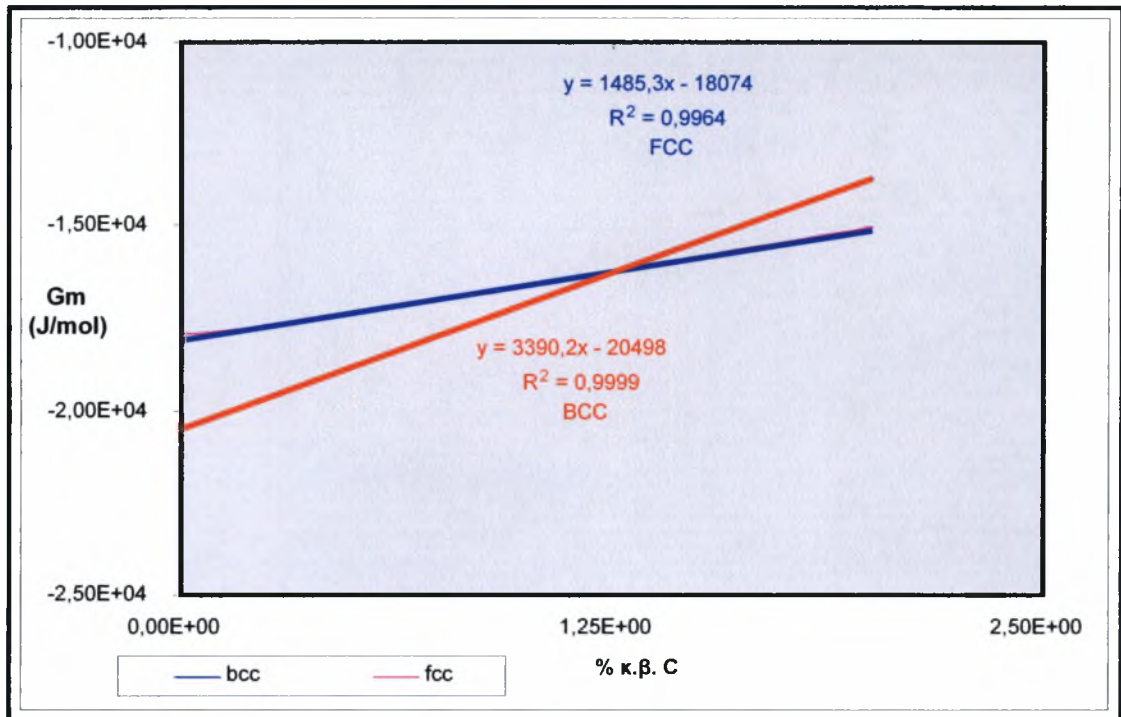
Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.4 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3313.7x - 22935 = 1488.2x - 20893$$

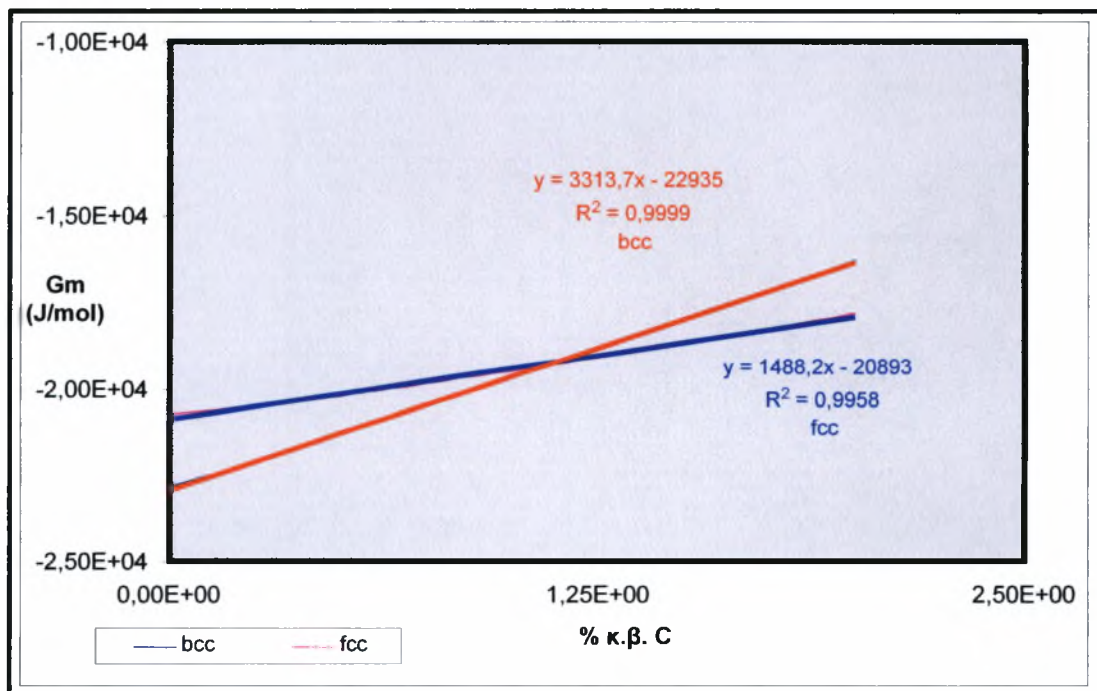
και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.



Εικόνα 3.2 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 523 \text{ } ^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.3 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (μπλε γραμμή) και του φερρίτη (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}=573\text{ }^{\circ}\text{K}$



Εικόνα 3.4 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (μπλε γραμμή) και του φερρίτη (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}=623\text{ }^{\circ}\text{K}$

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.5 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3240.2x - 25507 = 1490.8x - 23823$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.6 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

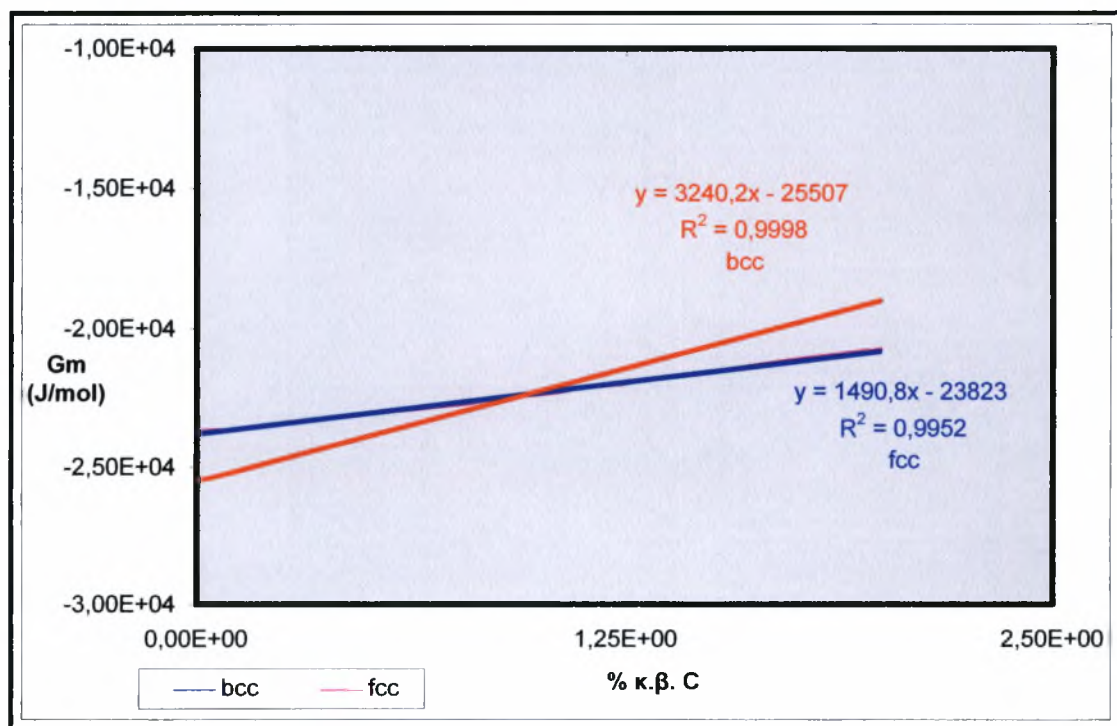
$$3169.4x - 28210 = 1496.6x - 26867$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

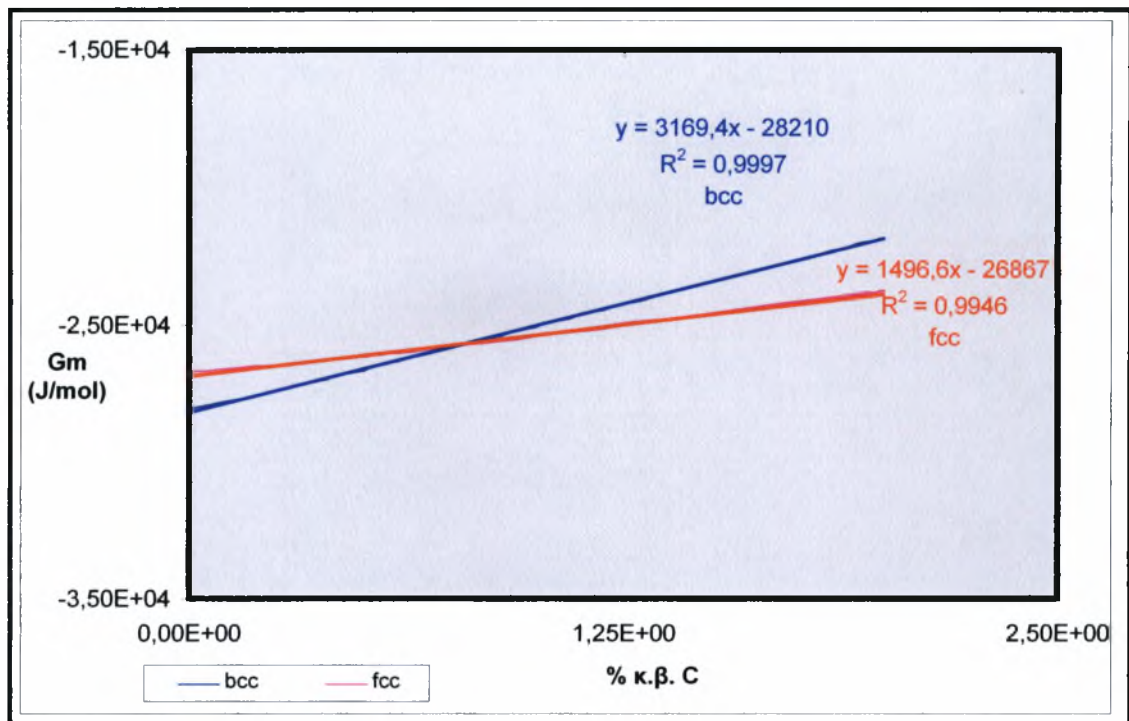
Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.7 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3101.4x - 31043 = 1504.1x - 30014$$

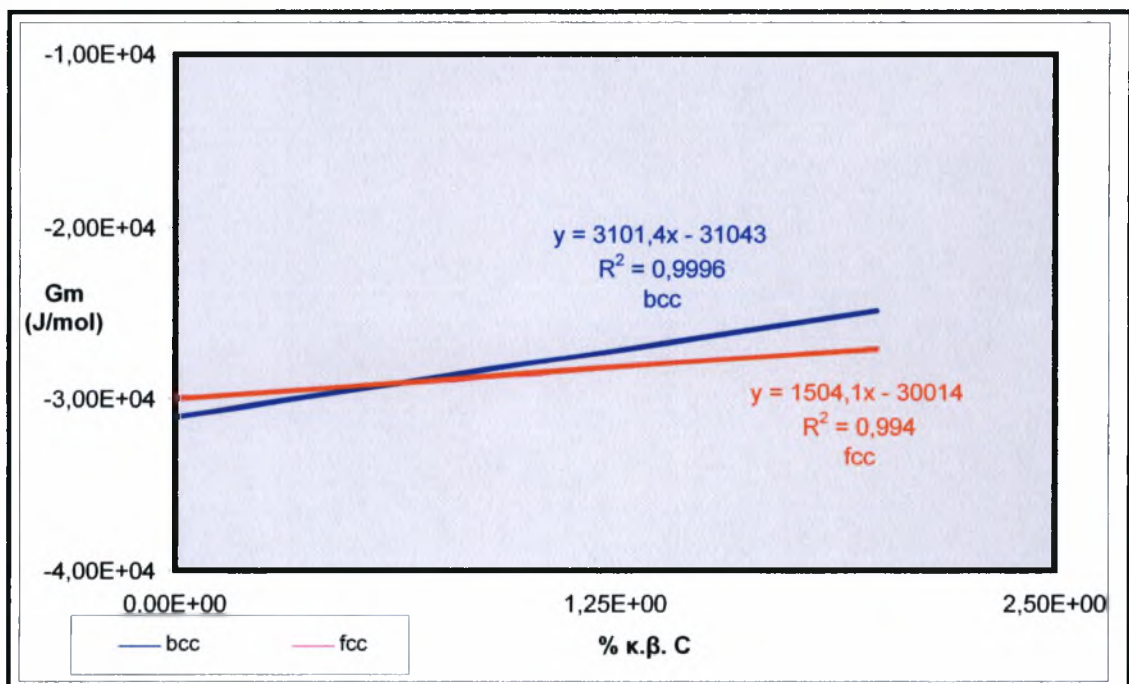
και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.



Εικόνα 3.5 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (μπλε γραμμή) και του φερρίτη (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 673 \text{ } ^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.6 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 723 \text{ }^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.7 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 773 \text{ }^\circ\text{K}$

- Για τον χάλυβα Si1

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.8 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$1534.5x - 16969 = 2780.8x - 20103$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.9 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

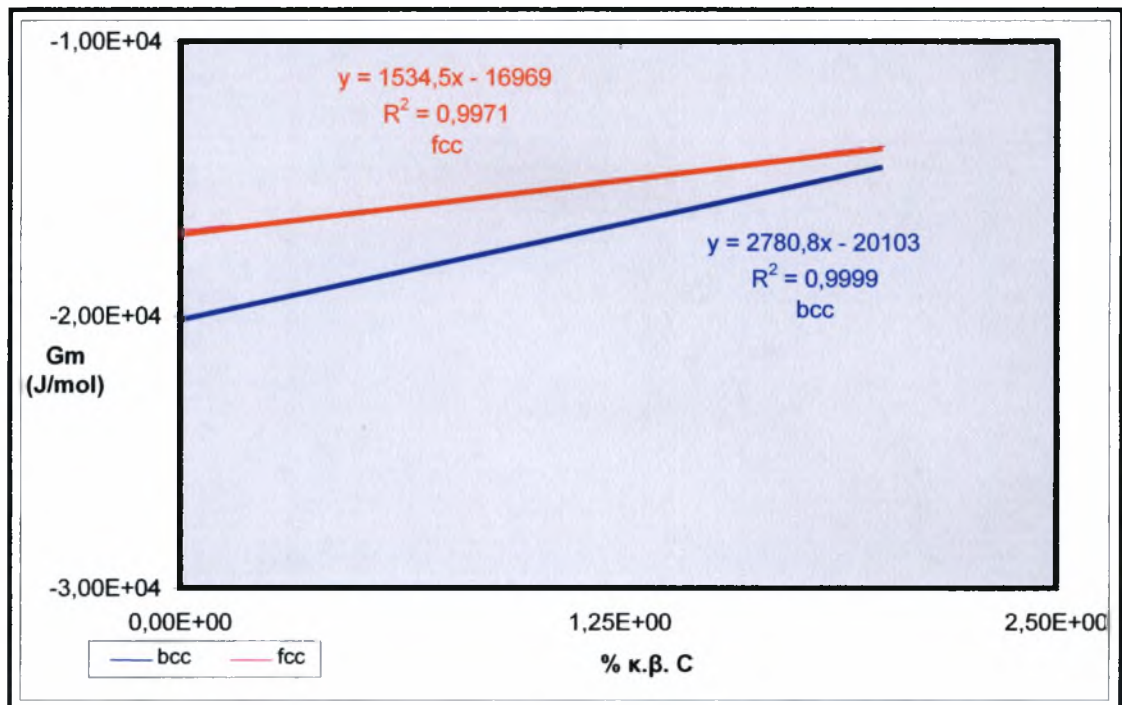
$$3358.5x - 22112 = 1534.9x - 19646$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

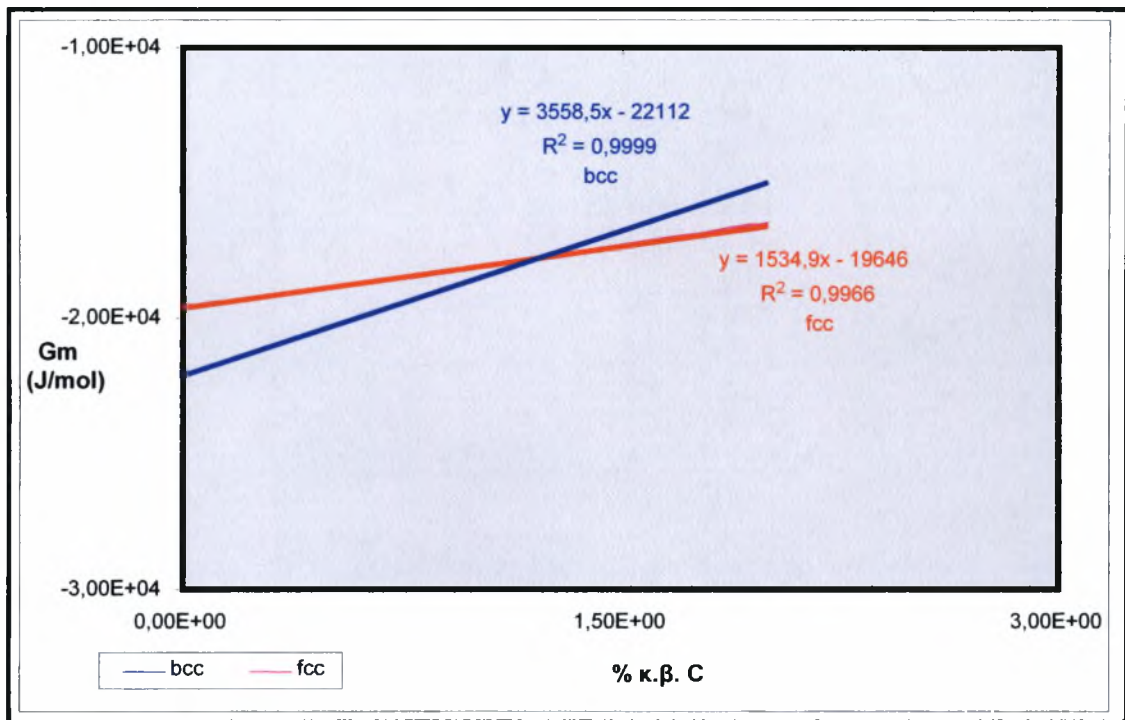
Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.10 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3478.8x - 24535 = 1537.6x - 22449$$

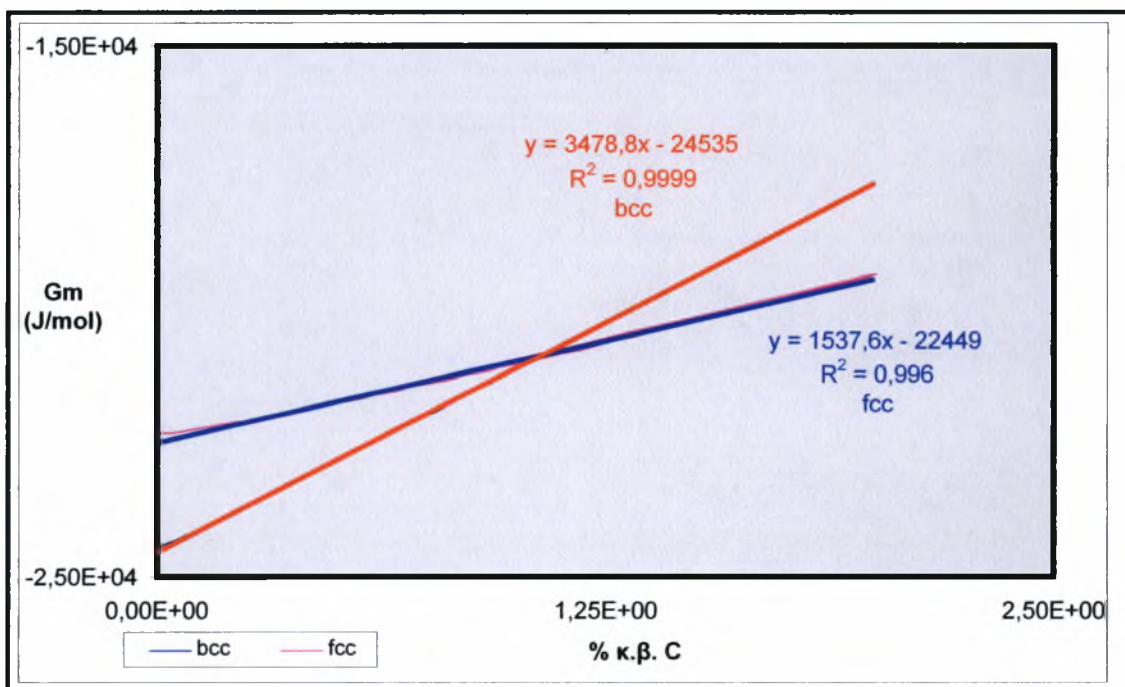
και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.



Εικόνα 3.8 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μαινωτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 523 \text{ }^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.9 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}=573 \text{ }^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.10 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (μπλε γραμμή) και του φερρίτη (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}=623 \text{ }^\circ\text{K}$

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.11 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3401.7x - 27090 = 1542.4x - 25368$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.12 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

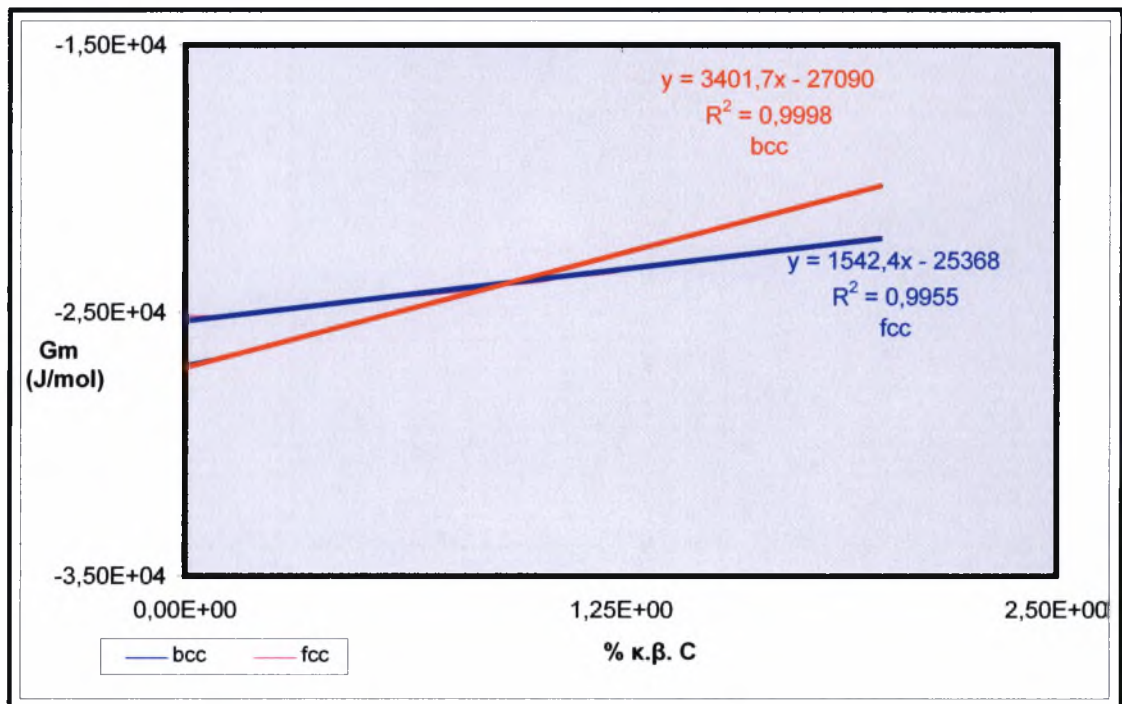
$$3327.3x - 29776 = 1549x - 28396$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

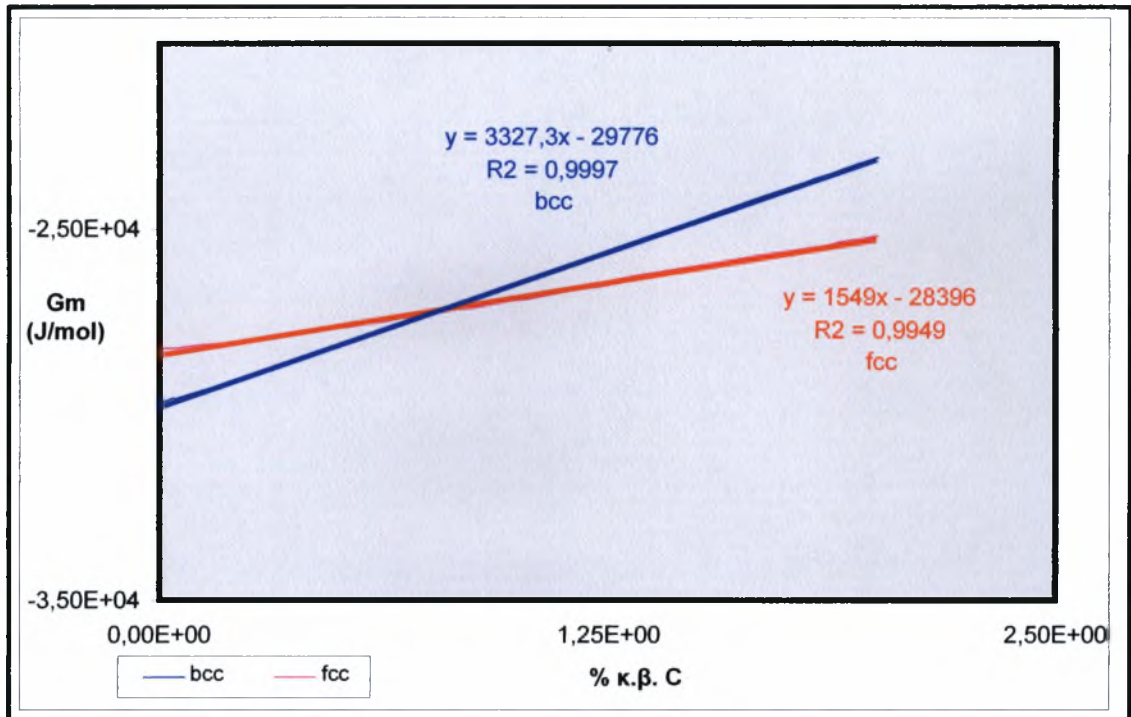
Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.13 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3255.6x - 32589 = 1557.2x - 31529$$

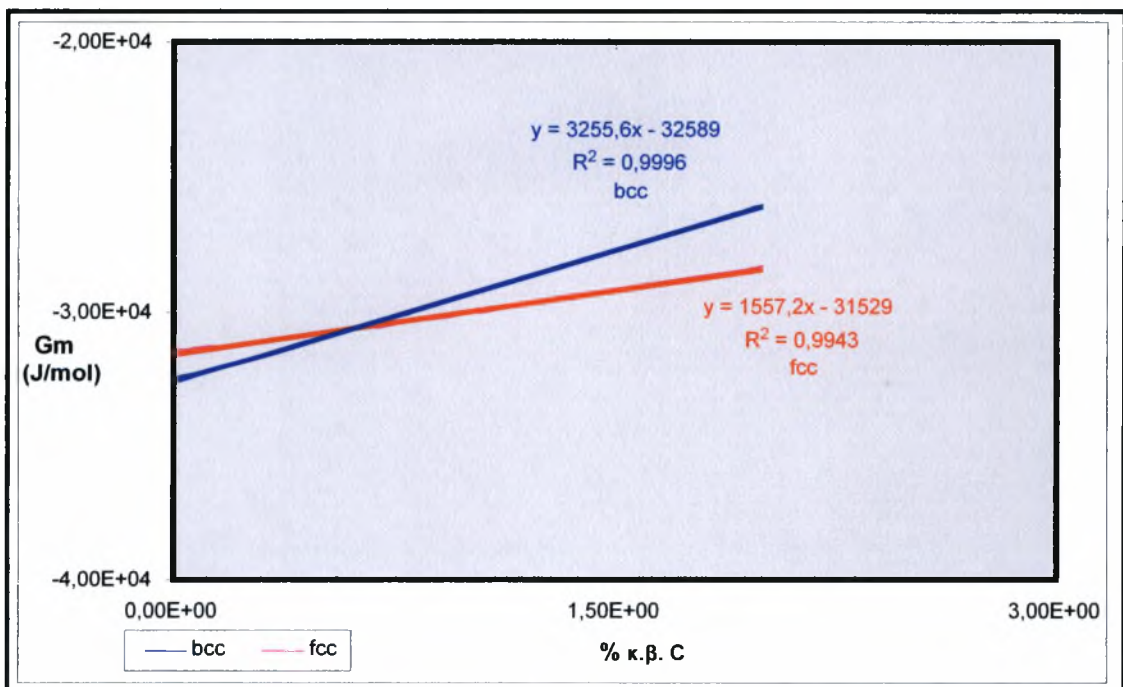
και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.



Εικόνα 3.11 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (μπλε γραμμή) και του φερρίτη (κόκκινη γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BT}=673 \text{ }^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.12 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 723 \text{ }^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.13 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 773 \text{ }^\circ\text{K}$

- Για τον χάλυβα Si2

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.14 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3663.2x - 19679 = 1538.6x - 16666$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.15 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

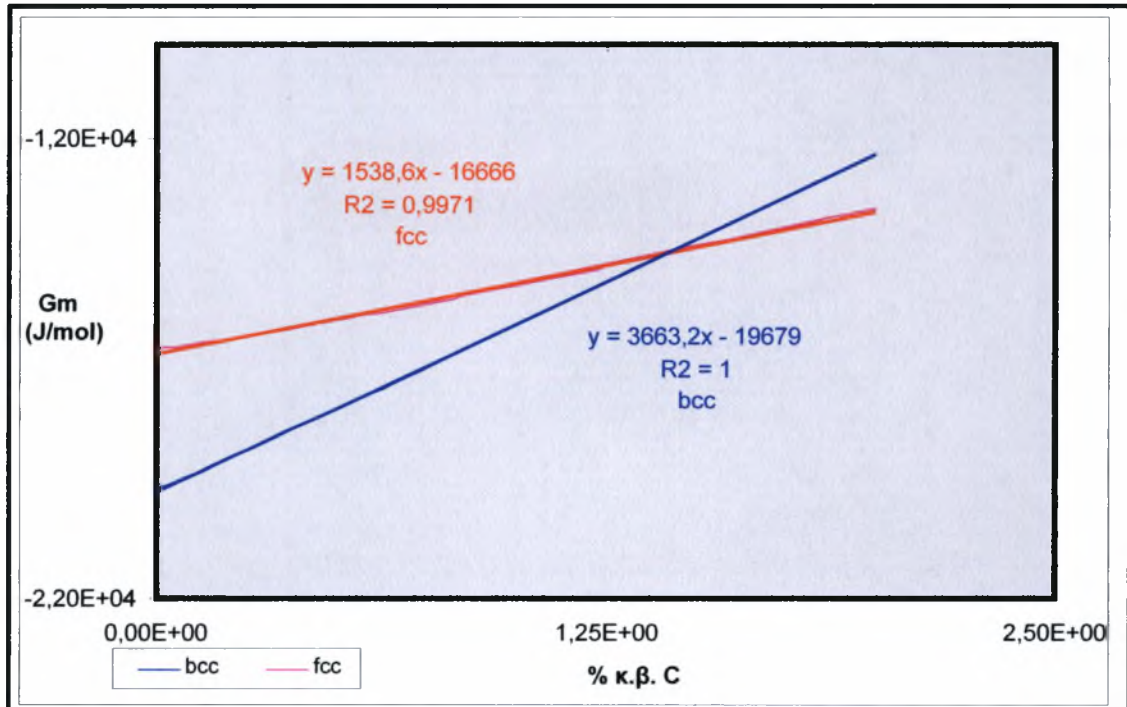
$$3579.3x - 21946 = 1538.4x - 19331$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

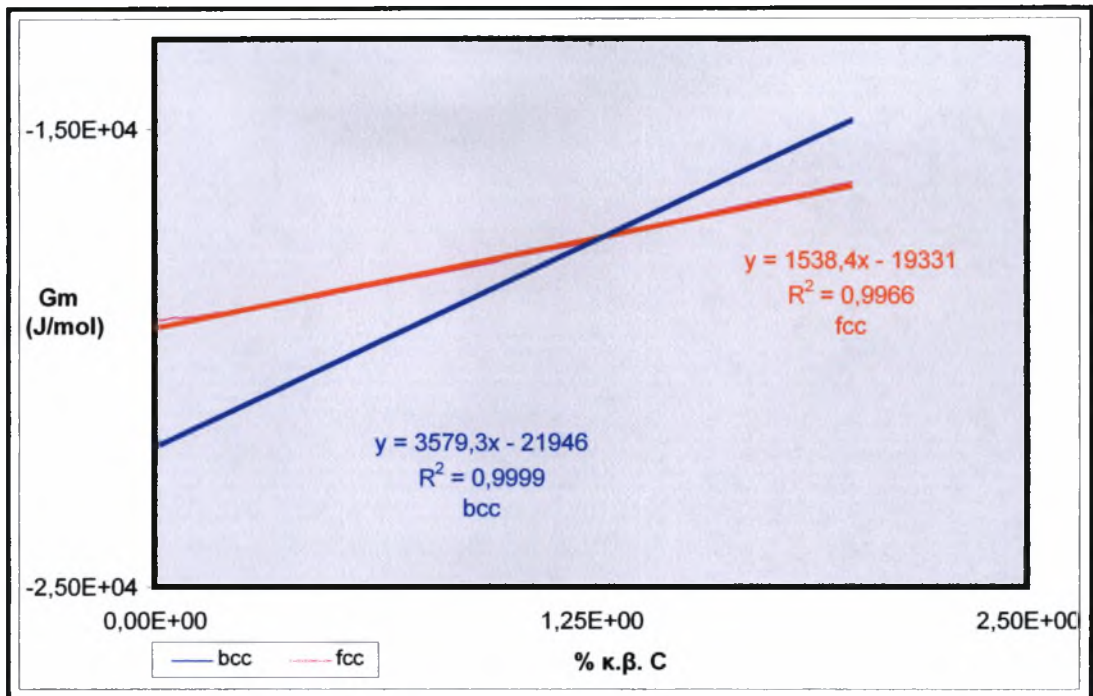
Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.16 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3498.3x - 24350 = 1540.4x - 22120$$

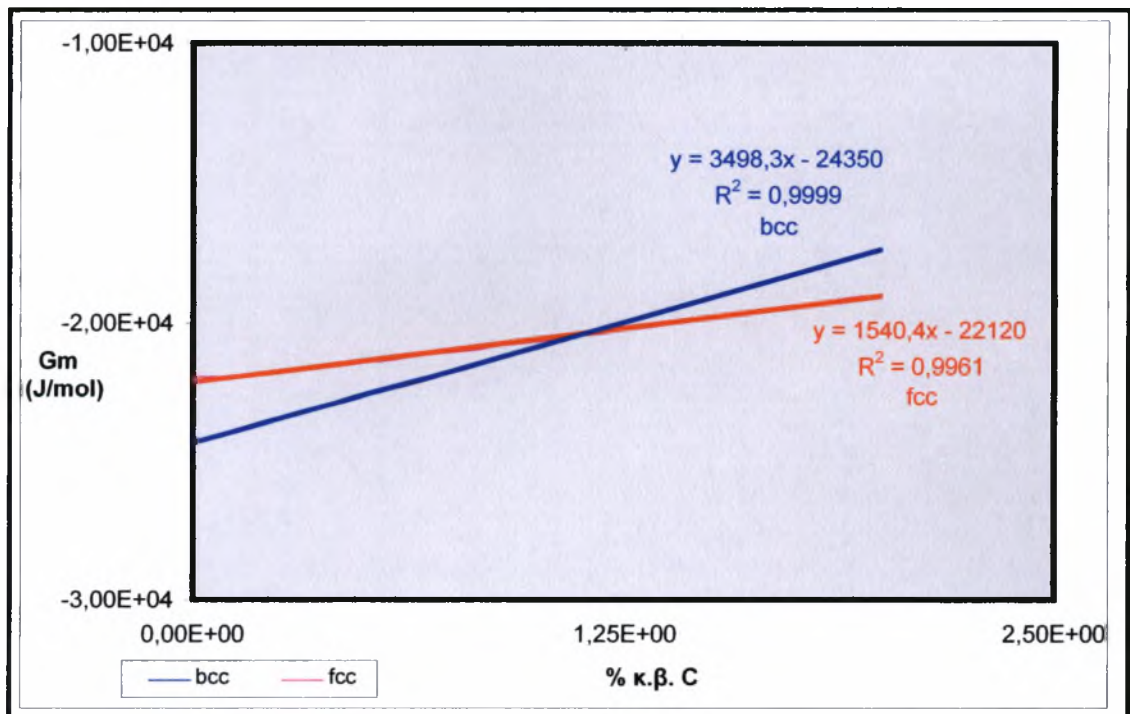
και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.



Εικόνα 3.14 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 523 \text{ } ^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.15 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}=573 \text{ }^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.16 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}=623 \text{ }^\circ\text{K}$

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.17 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3420x - 26887 = 1544.5x - 25026$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.18 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

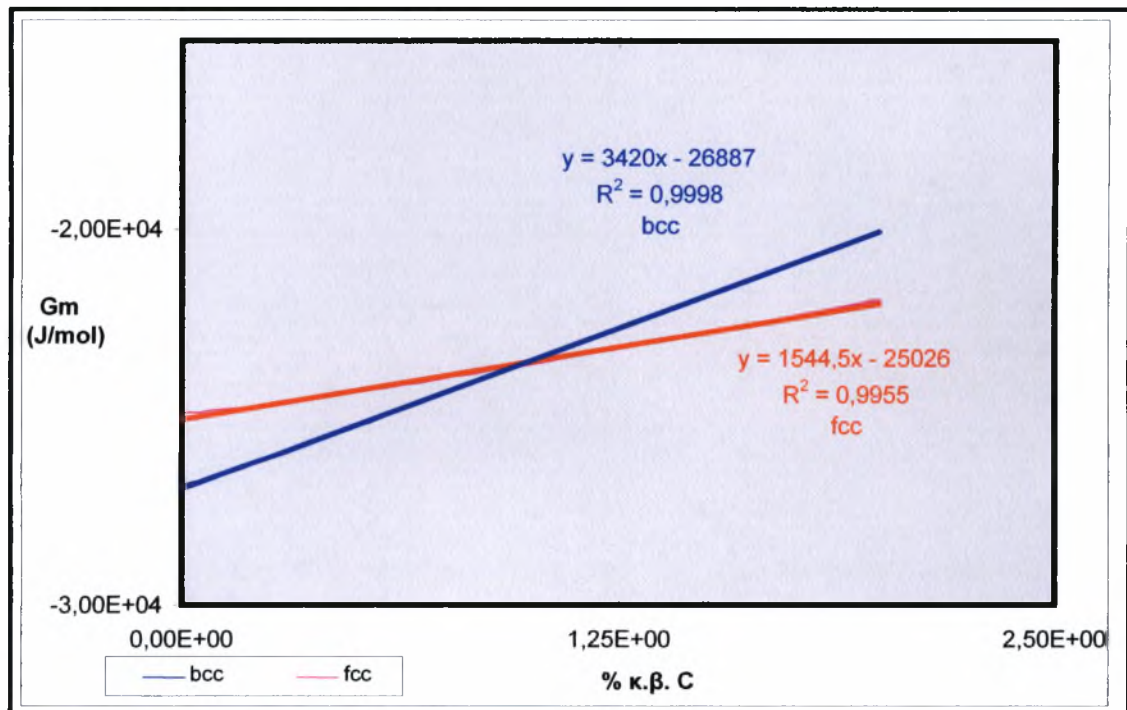
$$3344.2x - 29553 = 1550.4x - 28042$$

και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.

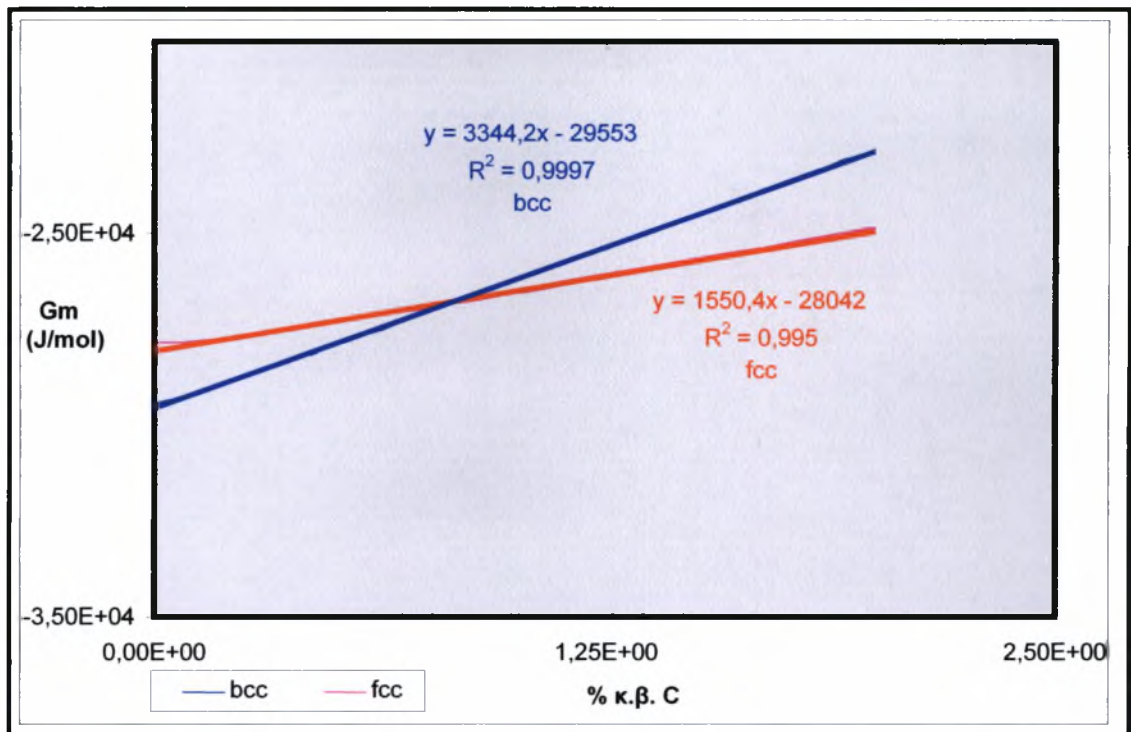
Το σημείο τομής των καμπύλων της Εικόνας 3.19 προκύπτει αν εξισωθούν οι δυο συναρτήσεις των καμπύλων που δίνονται, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$3271.1x - 32345 = 1558.2x - 31161$$

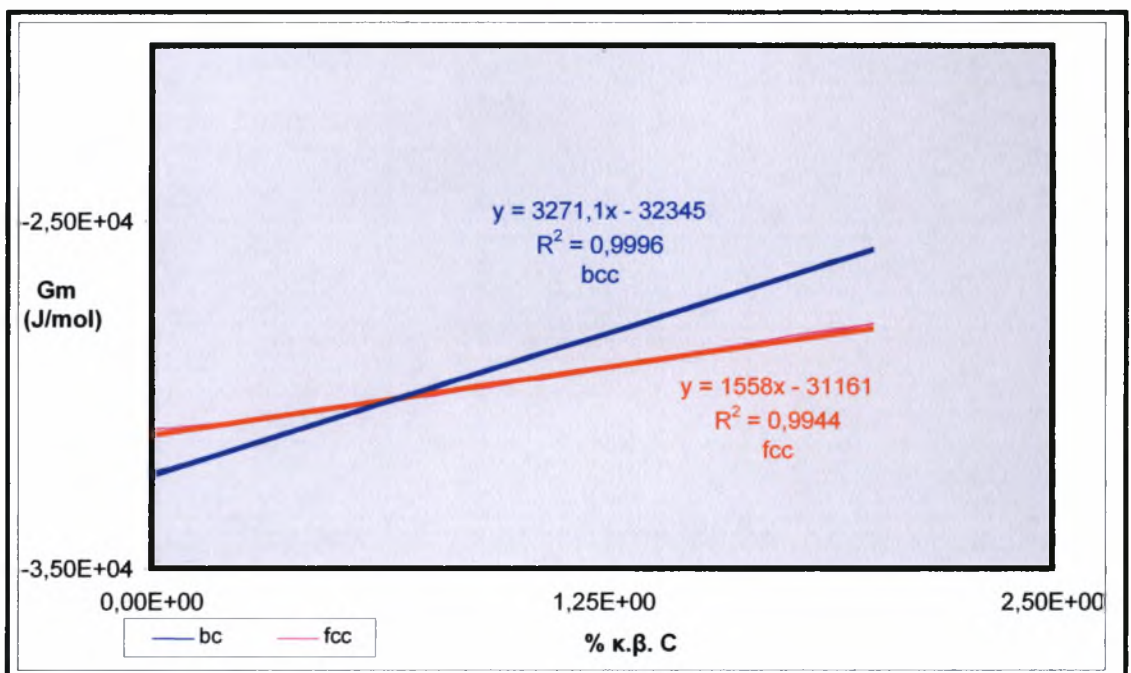
και στην συνέχεια αντικατασταθεί η συντεταγμένη x σε μια από τις δυο συναρτήσεις ώστε να υπολογισθεί και η συντεταγμένη y.



Εικόνα 3.17 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}=673 \text{ }^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.18: Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 723 \text{ }^\circ\text{K}$



Εικόνα 3.19 : Απεικονίζονται οι καμπύλες ελεύθερης ενέργειας Gibbs του ωστενίτη (κόκκινη γραμμή) και του φερρίτη (μπλε γραμμή) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του άνθρακα για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT} = 773 \text{ }^\circ\text{K}$

Από τα διαγράμματα αυτά (Εικόνες 3.2 – 3.19) προκύπτουν έξι σημεία με συντεταγμένες τις συντεταγμένες των σημείων τομής της μιας καμπύλης με την άλλη σε κάθε θερμοκρασία του Πίνακα (3.4) για τον καθένα από τους τρεις χάλυβες A11, Si1 και Si2.

3.3 Αποτελέσματα Υπολογισμών

Με βάση αυτά τα έξι σημεία τα οποία παρουσιάζονται στους παρακάτω τρεις Πίνακες (3.5, 3.6, 3.7) για τον κάθε χάλυβα αντίστοιχα είναι δυνατόν να σχεδιαστεί η γραμμή T_0 του κάθε χάλυβα, όπως προκύπτει στις Εικόνες 3.20 – 3.22 που ήταν ο απώτερος σκοπός της διαδικασίας που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό της εργασίας.

Πίνακας 3.5 : Παρουσιάζονται τα σημεία τομής της καμπύλης του ωστενίτη με την καμπύλη του φερρίτη όπως προέκυψαν από τις Εικόνες 3.2 – 3.7 για κάθε μια από τις έξι θερμοκρασίες μπαινιτικού μετασχηματισμού για τον χάλυβα A11

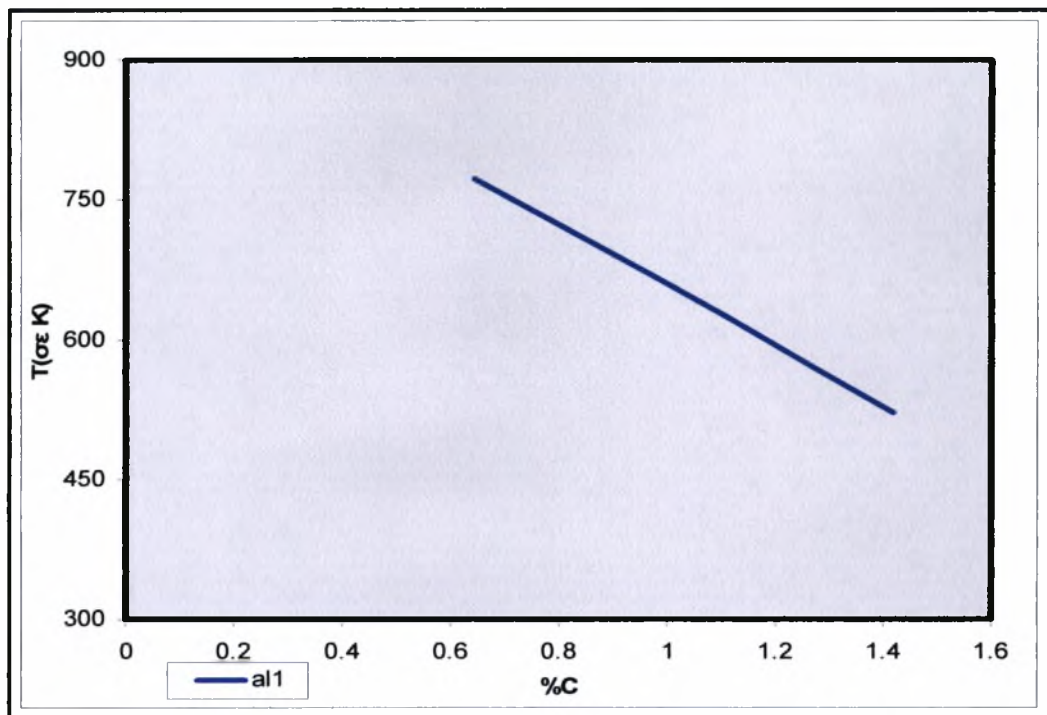
Θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin (T)	Περιεκτικότητα κ.β. σε άνθρακα (%C)	Ελεύθερη ενέργεια Gibbs (gm) σε J/mol
523	1,42	-13272
573	1,268	-16191
623	1,119	-19228
673	0,963	-22388
723	0,803	-25665
773	0,644	-29045

Πίνακας 3.6 : Παρουσιάζονται τα σημεία τομής της καμπύλης του ωστενίτη με την καμπύλη του φερρίτη όπως προέκυψαν από τις Εικόνες 3.8 – 3.13 για κάθε μια από τις έξι θερμοκρασίες μπεινιτικού μετασχηματισμού για τον χάλυβα Si1

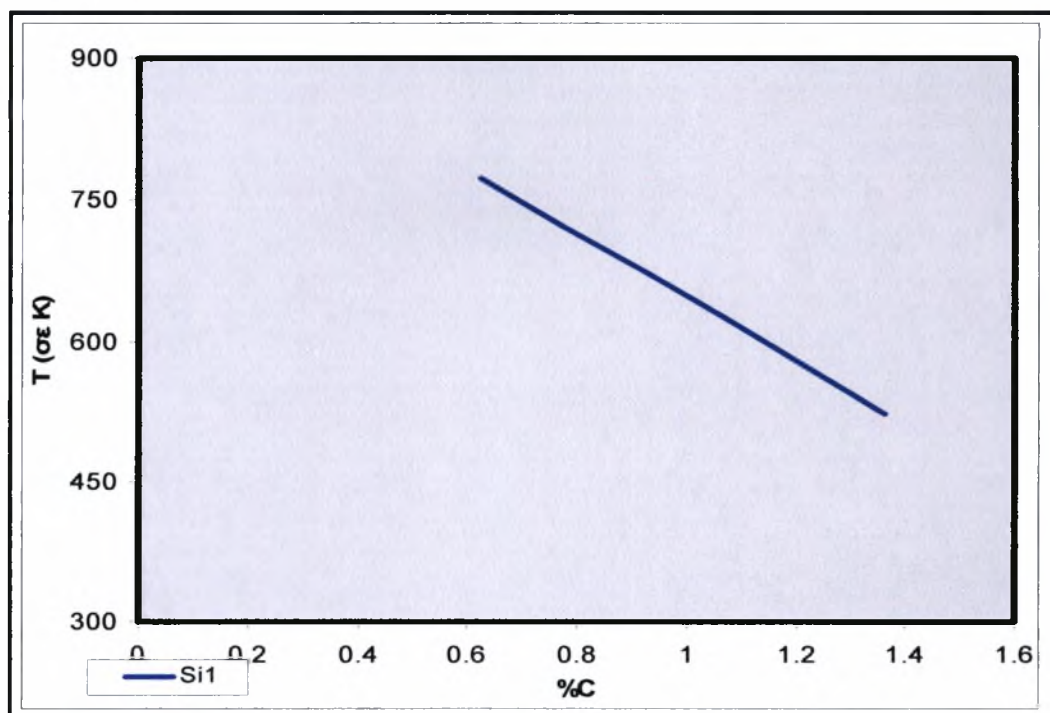
Θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin (T)	Περιεκτικότητα κ.β. σε άνθρακα (%C)	Ελεύθερη ενέργεια Gibbs (gm) σε J/mol
523	1,363	-13110
573	1,219	-17776
623	1,075	-20797
673	0,926	-23939
723	0,776	-27194
773	0,624	-30557

Πίνακας 3.7 : Παρουσιάζονται τα σημεία τομής της καμπύλης του ωστενίτη με την καμπύλη του φερρίτη όπως προέκυψαν από τις Εικόνες 3.14 – 3.19 για κάθε μια από τις έξι θερμοκρασίες μπεινιτικού μετασχηματισμού για τον χάλυβα Si2

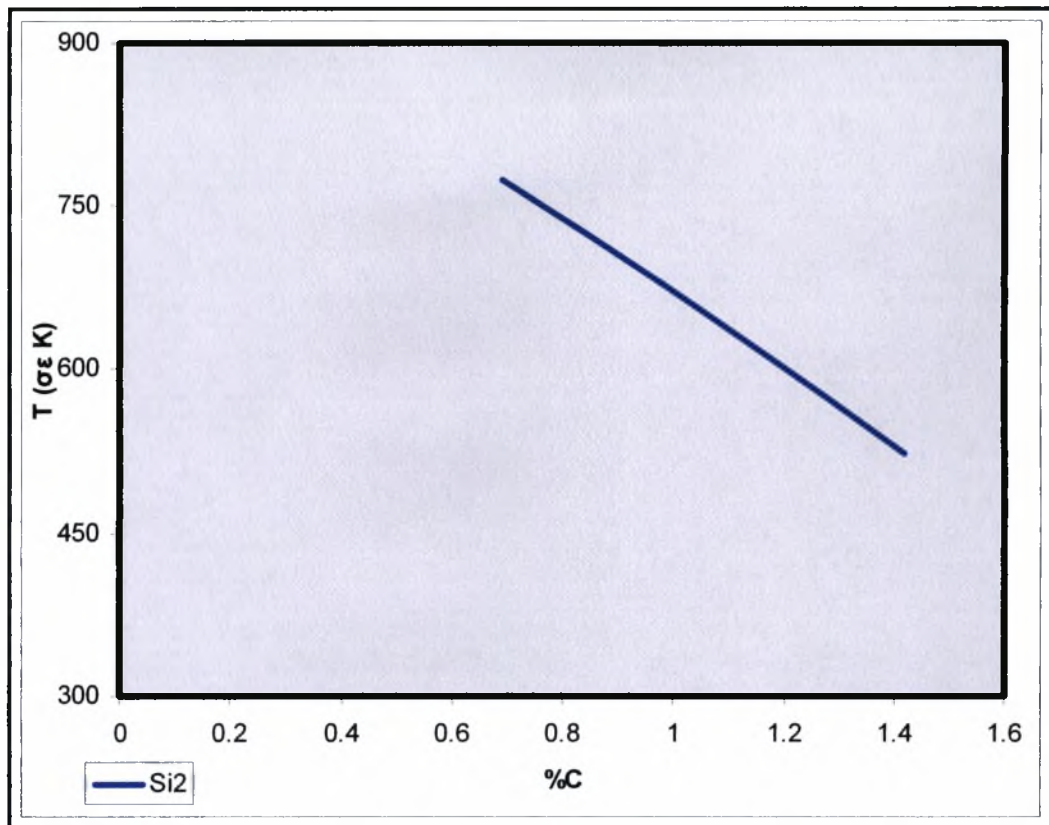
Θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin (T)	Περιεκτικότητα κ.β. σε άνθρακα (%C)	Ελεύθερη ενέργεια Gibbs (gm) σε J/mol
523	1,418	-14484
573	1,281	-17360
623	1,139	-20366
673	0,992	-23493
723	0,842	-26736
773	0,691	-30084



Εικόνα 3.20 : Απεικονίζεται η γραμμή T_o για τον χάλυβα Al1



Εικόνα 3.21 : Απεικονίζεται η γραμμή T_o για τον χάλυβα Si1



Εικόνα 3.22 : Απεικονίζεται η γραμμή T_0 για τον χάλυβα Si2

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση μεταξύ της μορφής της γραμμής T_0 που προέκυψε με την μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο κεφάλαιο με τη χρήση της προσομοίωσης μέσω του Thermo-calc με τη μορφή της γραμμής T_0 όπως προκύπτει από πειραματικά δεδομένα. Στόχος είναι η μορφή να είναι ταυτόσημη ή να τείνει μορφολογικά, δηλαδή από την μέθοδο αυτή να προκύπτουν ορθά αποτελέσματα και επομένως να μπορεί να αντικαταστήσει την πιο χρονοβόρα διαδικασία του πειράματος, αλλά και να γνωρίζεται εκ των προτέρων ανάλογα με το ποσοστό άνθρακα που επιθυμείται να έχει το τελικό προϊόν του χάλυβα σε τι θερμοκρασία πρέπει να γίνει η ενδοκρίσιμη ανόπτηση και σε ποια ο μπαινιτικός ισόθερμος μετασχηματισμός και ακόμη, τέλος, σε ποια στιγμή πρέπει να διακοπεί ο τελευταίος, δηλαδή πότε πρέπει να γίνει η βαφή του χάλυβα.

Παρατηρώντας την γραμμή T_0 (Εικόνα 3.1) που έχει παρθεί από την βιβλιογραφία κάποιου παλαιότερου παρόμοιου υπολογισμού και συγκρίνοντας την μορφή της με τις παραπάνω γραμμές στις οποίες έχει καταλήξει η μελέτη (εικόνες 3.20-3.21-3.22) προκύπτει αυτό που αναμένονταν, ότι η μορφή ταιριάζει με επακόλουθο όλα τα

θετικά στοιχεία που έχουν αναφερθεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου αλλά και παραπάνω για την ορθότητα των αποτελεσμάτων μιας τέτοιας μεθόδου έναντι στην μέθοδο του πειράματος.

Κεφάλαιο 4ο

Μοντέλο Υπολογισμού Κλάσματος Όγκου Παραμένοντα Ωστενίτη κατά τον Ισόθερμο Μπαινιτικό Μετασχηματισμό

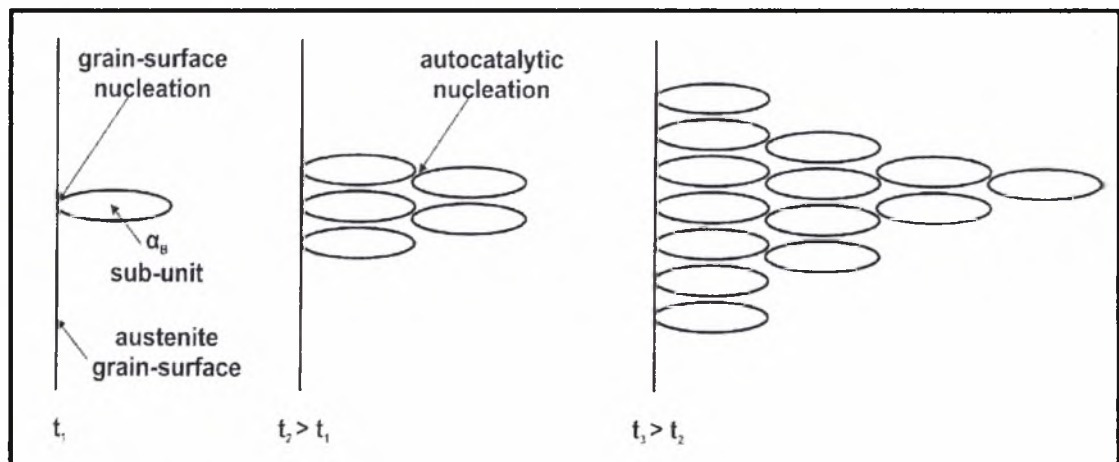
4.1 Εισαγωγή

Στο δεύτερο κεφάλαιο αυτής της εργασίας, στο οποίο έχει περιγραφεί η θερμική κατεργασία του χάλυβα, στην περιγραφή του ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού έχει τονιστεί η σημασία του παραμένοντα ωστενίτη στο τέλος του θερμικού κύκλου του χάλυβα, καθώς και με ποιο τρόπο καταλήγει το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη να έχει την συγκεκριμένη τιμή. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη μιας μεθόδου με την οποία μπορεί να υπολογιστεί το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη κατά τον ισόθερμο μπαινιτικό μετασχηματισμό, η οποία θα περιγραφεί στην αρχή του κεφαλαίου αυτού. Στη συνέχεια και αφού έχει ήδη παρουσιαστεί η θεωρία και η μεθοδολογία της μεθόδου θα εφαρμοσθεί αυτή για δυο διαφορετικών συστάσεων χάλυβες, των οποίων οι συστάσεις θα δοθούν παρακάτω. Με αυτόν τον τρόπο θα ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Αυτό μπορεί να γίνει καθώς υπάρχουν πειραματικά δεδομένα με τα οποία και θα γίνει άμεση σύγκριση. Επιπλέον, σε αυτό το κεφάλαιο θα ελεγχθεί η επιρροή της θερμοκρασίας του μπαινιτικού μετασχηματισμού, αλλά και της θερμοκρασίας της ενδοκρίσιμης ανόπτησης, του χρόνου ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού στο κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στους πολυφασικούς χάλυβες TRIP. Ο λόγος που θα γίνει αυτή η διαδικασία είναι η σημαντικότητα του ποσοστού παραμένοντα ωστενίτη, καθώς αυτός είναι υπεύθυνος για το συνδυασμό εξαιρετικής ολκιμότητας και δυσθραυστότητας που έχει παρατηρηθεί στους χάλυβες TRIP.

4.2 Περιγραφή του Μοντέλου Υπολογισμού Κλάσματος Παραμένοντα Ωστενίτη κατά τον Ισόθερμο Μπαινιτικό Μετασχηματισμό

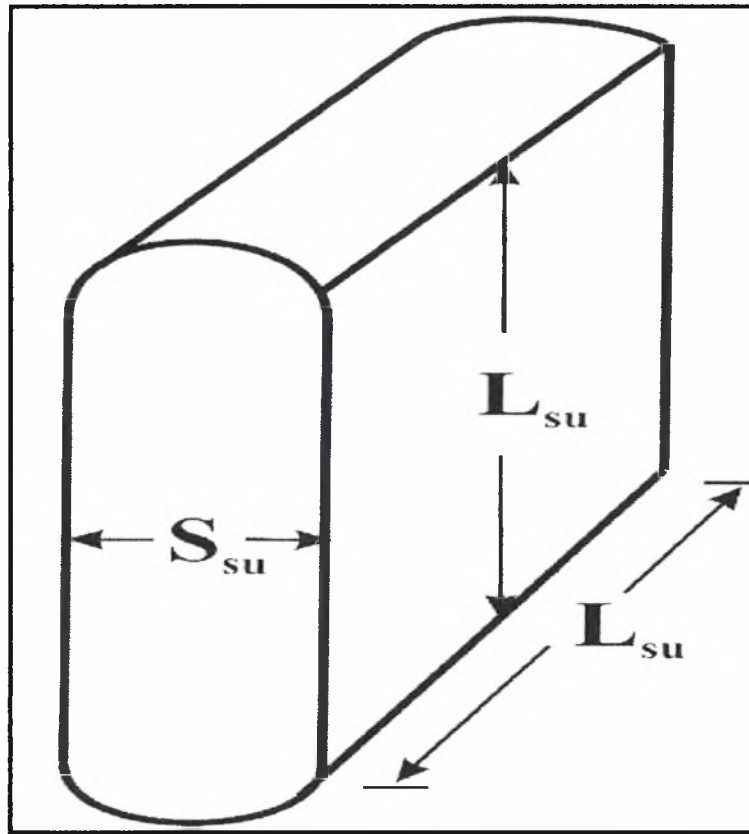
4.2.1 Η Ανάπτυξη του Μπαινιτικού Φερρίτη

Έχει καθοριστεί καλά ότι ο μπαινιτικός φερρίτης (α_B) αναπτύσσεται με τη μορφή ομάδων από μικρά πλακίδια, που πιο πρόσφατα ονομάστηκαν «υπομονάδες» (sub-units) /15/. Κάθε σύνολο ή δεμάτιο, του μπαινίτη, αναπτύσσεται με διαδοχικά γεγονότα πυρήνωσης και ανάπτυξης των μεμονωμένων υπομονάδων α_B , μια διαδικασία που πραγματοποιείται συνεχώς στη μικροδομή κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού, Εικόνα 4.1



Εικόνα 4.1: Απεικονίζεται η σταδιακή ανάπτυξη μιας ομάδας πλακιδίων κατά τη διάρκεια του μπαινιτικού μετασχηματισμού /2/

Σύμφωνα με τον Bhadeshia και άλλους /16/, κάθε υπομονάδα α_B πυρηνώνεται και μετά στιγμιαία αναπτύσσεται σε έναν πεπερασμένο όγκο, $V_{su} = (L_{su})^2 S_{su}$, όπου το L_{su} εκπροσωπεί το μήκος και το πλάτος του πλακιδίου, και το S_{su} το πάχος του, Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 : Απεικονίζεται μια υπομονάδα που έχει αναπτυχθεί σε έναν όγκο $V_{su}=(L_{su})^2S_{su}/2/$

Το πραγματικό μέγεθος των υπομονάδων καθορίζεται από την προσαρμογή της προκύπτουσας πλαστικής παραμόρφωσης στον περιβάλλοντα ωστενίτη /16/, και μερικοί εμπειρικοί συσχετισμοί μεταξύ του μεγέθους των υπομονάδων και της θερμοκρασίας μετασχηματισμού έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία /16/,/17/.

Υποθέτοντας έναν ρυθμό πυρήνωσης ανά μονάδα όγκου ωστενίτη, I_{su} , ο οποίος αντιπροσωπεύει τον αριθμό των υπομονάδων που σχηματίζονται ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα όγκου του μη μετασχηματισμένου ωστενίτη, η πυκνότητα του πληθυσμού των υπομονάδων στη μικροδομή, έπειτα από μια περίοδο διατήρησης (t) στη θερμοκρασία μετασχηματισμού, θα δίνεται από τη σχέση:

$$n(t)= I_{su}t \quad (4.1)$$

Ο συνολικός αριθμός των υπομονάδων που έχουν σχηματιστεί στη μικροδομή από την αρχή του μετασχηματισμού μέχρι το χρόνο t, n(t), θα δίνεται τότε από τη σχέση :

$$N(t) = \int_0^t n(t) V_\gamma(t) dt = I_{su} \int_0^t V_\gamma(t) dt \quad (4.2)$$

Στη σχέση (4.2), το $V_\gamma(t)$ δείχνει τον όγκο του μη μετασχηματισμένου οστενίτη στη μικροδομή σαν μια συνάρτηση του χρόνου μετασχηματισμού, όπως θα συζητηθεί περαιτέρω στη συνέχεια. Πριν από αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι στη σχέση (4.2) ο ρυθμός πυρήνωσης των υπομονάδων, I_{su} , θεωρείται χρονικά ανεξάρτητος και, επομένως, βγαίνει έξω από το ολοκλήρωμα. Ο σχηματισμός των υπομονάδων μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους [16]: από την πυρήνωση στην επιφάνεια των κόκκων οστενίτη και από την αυτοκαταλυτική πυρήνωση στις ήδη υπάρχουσες υπομονάδες. Κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού, γεγονότα πυρήνωσης στην επιφάνεια των κόκκων οστενίτη γίνονται όλο και πιο σπάνια, λόγω της βαθμιαίας κάλυψης αυτών των επιφανειών από τις υπομονάδες. Επομένως, ο ρυθμός των πυρήνώσεων στην επιφάνεια των κόκκων οστενίτη υπερτερεί στα αρχικά στάδια του μετασχηματισμού, αλλά ελαττώνεται με το χρόνο μετασχηματισμού. Σε αντίθεση, τα αυτοκαταλυτικά γεγονότα πυρήνωσης είναι λιγοστά στα αρχικά στάδια του μετασχηματισμού, λόγω του μικρού αριθμού των ήδη υπαρχόντων υπομονάδων. Εντούτοις, καθώς ο μπεινιτικός μετασχηματισμός εξελίσσεται, τα αυτοκαταλυτικά γεγονότα πυρήνωσης συμβάλλουν αυξητικά στο σχηματισμό νέων υπομονάδων, δηλαδή ο ρυθμός αυτοκαταλυτικής πυρήνωσης αυξάνει. Στη παρούσα προσέγγιση, το I_{su} , έχει θεωρηθεί για να ληφθεί υπόψη η συμβολή και των δύο τρόπων πυρήνωσης, και επομένως θεωρήθηκε σταθερό όσον αφορά το χρόνο μετασχηματισμού.

Όσον αφορά τον όγκο του μη μετασχηματισμένου οστενίτη στη μικροδομή, αυτός μειώνεται με το χρόνο μετασχηματισμού, καθώς ο οστενίτης μετασχηματίζεται βαθμιαία σε μπεινιτικό φερρίτη. Υποθέτοντας ότι ο μπεινιτικός φερρίτης αυξάνει σύμφωνα με τη κινητική Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK), μπορεί ναδειχθεί εύκολα ότι η μείωση του οστενίτη σε σχέση με το χρόνο μετασχηματισμού δίνεται από τη σχέση :

$$V_\gamma(t) = f_\gamma^0 V \exp(-kt^n) \quad (4.3)$$

Στη σχέση (4.3), το f_γ^0 αντιπροσωπεύει το κλάσμα όγκου του οστενίτη στην αρχή του μπεινιτικού μετασχηματισμού, το V τον συνολικό όγκο του δείγματος χάλυβα, ενώ τα k και n είναι οι γνωστές παράμετροι της εξίσωσης JMAK. Πρέπει να τονιστεί σε

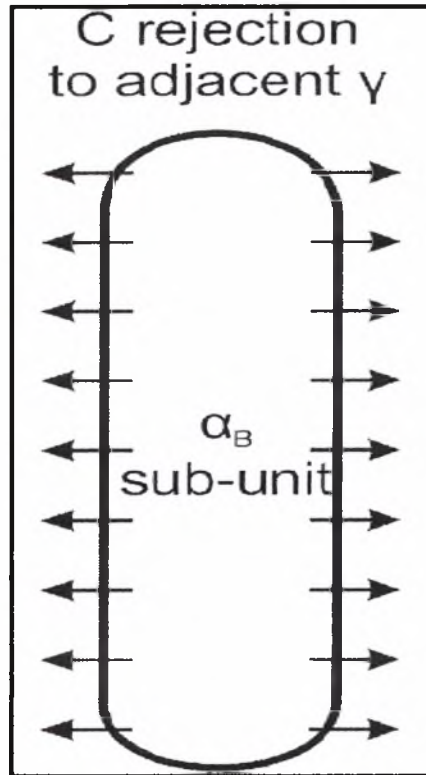
αυτό το σημείο ότι στην περίπτωση ενός πλήρως ωστενιτικού χάλυβα το $f_{\gamma}^0 = 1$, ενώ στη περίπτωση ενός χάλυβα που έχει υποστεί ενδοκρίσιμη ανόπτηση το f_{γ}^0 καθορίζεται από την θερμοκρασία κι από την χρονική διάρκεια της διαδικασίας ανόπτησης. Με την αντικατάσταση της σχέσης (4.3) στη σχέση (4.2), η τελευταία γίνεται:

$$N(t) = f_{\gamma}^0 V I_{su} \int_0^t \exp(-kt^n) dt \quad (4.4)$$

Κατά συνέπεια, η σχέση (4.4) υπολογίζει την εξέλιξη του πληθυσμού των υπομονάδων α_B στην μικροδομή σε σχέση με το χρόνο μετασχηματισμού, για μια δοθείσα θερμοκρασία μετασχηματισμού.

4.2.2 Συνεισφορά μιας Μεμονωμένης Υπομονάδας στην Σταθεροποίηση του Ωστενίτη.

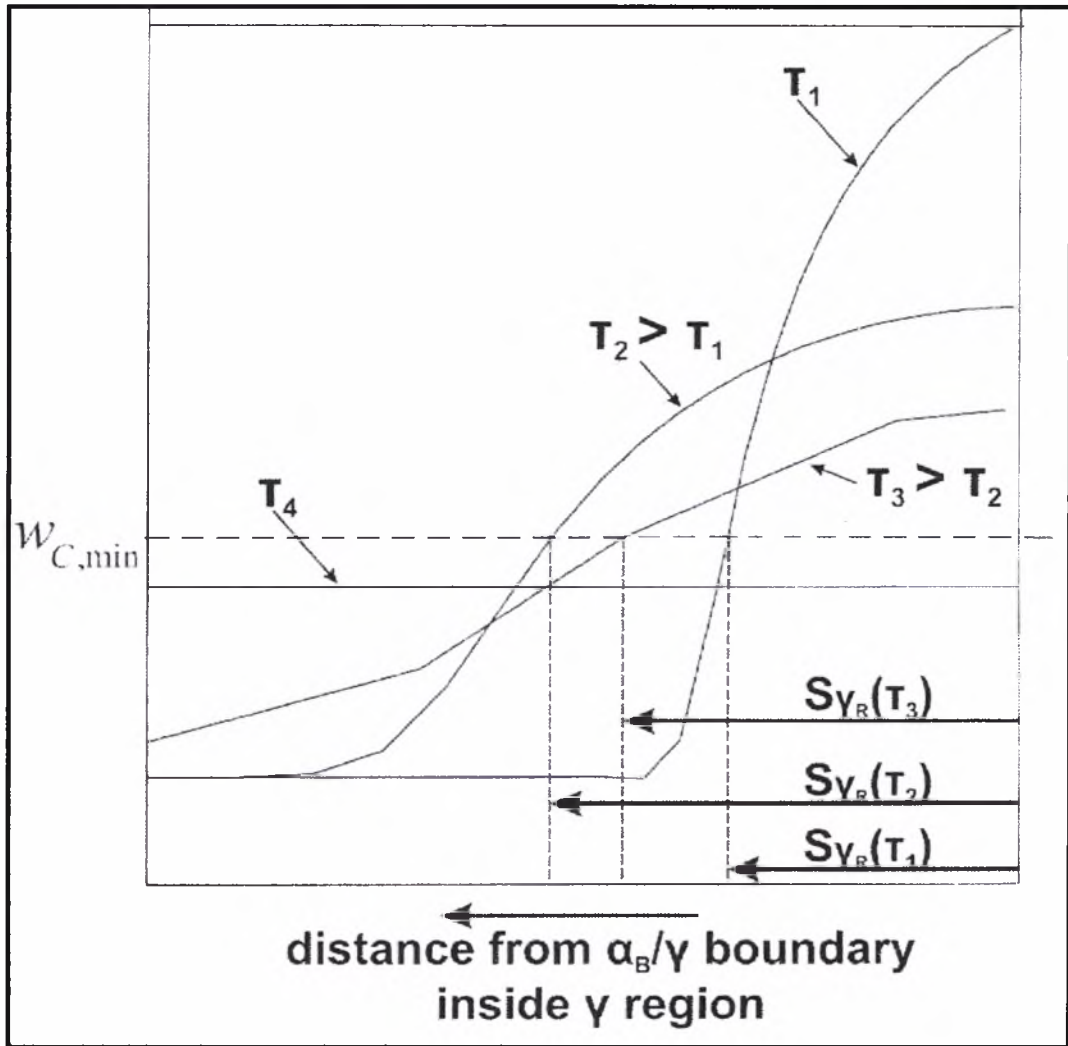
Υιοθετώντας τον προαναφερθέντα μηχανισμό για τον σχηματισμό των υπομονάδων α_B , δηλαδή πυρήνωση συνοδευμένη από στιγμιαία ανάπτυξη, συνεπάγεται ότι κάθε μεμονωμένη υπομονάδα κληρονομεί την χημική σύσταση του μητρικού ωστενίτη τη στιγμή που σχηματίζεται. Η σύσταση του μητρικού ωστενίτη είναι αυτή που λαμβάνεται στο τέλος της ενδοκρίσιμης ανόπτησης, και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη διάρκεια της ανόπτησης. Αυτό οδηγεί σε ένα αρχικό υπερκορεσμό της υπομονάδας σε άνθρακα (C). Επομένως, μόλις σχηματιστεί η υπομονάδα θα αρχίσει να απορρίπτει την περίσσεια C στα παρακείμενα στρώματα ωστενίτη κατά τη διεύθυνση του πάχους του πλακιδίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3 : Απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο απορρίπτει την περίσσεια άνθρακα η υπομονάδα /2/

Το πρόβλημα της απόρριψης C από αρχικά υπερκορεσμένα φερριτικά πλακίδια σε παρακείμενα οστενιτικά στρώματα έχει αντιμετωπιστεί από τους Mujahid και Bhadeshia /18/ και τον Hillert /19/, λύνοντας το πρόβλημα διάχυσης σε ζεύγος διάχυσης φερρίτη/οστενίτη.

Το πλεόνασμα C που απορρίπτεται από την υπομονάδα οδηγεί στην ανάπτυξη προσωρινών βαθμίδων συγκέντρωσης C στο εσωτερικό των παρακείμενων στρωμάτων οστενίτη. Σε ένα διάγραμμα «τοπικού» χρόνου αναφερόμενου στην υπομονάδα, έτσι ώστε το $\tau=0$ να αντιστοιχεί στην ακριβή στιγμή της δημιουργίας της υπομονάδας, τότε η μεταβολή των προφίλ συγκέντρωσης C μέσα στα παρακείμενα οστενιτικά στρώματα θα είναι όπως φαίνεται στη Εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4 : Απεικονίζεται η μεταβολή των προφίλ συγκέντρωσης άνθρακα μέσα στα παρακείμενα ωστενιτικά στρώματα /2/

Μόλις η υπομονάδα υπό μελέτη σχηματιστεί (δηλ. σε $t=0$), η συγκέντρωση C στο παρακείμενο ωστενιτικό στρώμα είναι μια οριζόντια γραμμή, όμοια με την περιεκτικότητα C του ωστενίτη που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης. Καθώς ο χρόνος περνάει, ο C που απορρίπτεται από την υπομονάδα διαχέεται μέσα στον ωστενίτη και η συγκέντρωση C κοντά στην ακίνητη διεπιφάνεια α_B/γ αυξάνει (δηλ. σε $t=t_1>0$). Μόλις ολόκληρη η περίσσεια C έχει απορριφθεί από την υπομονάδα, ο C αρχίζει να ομογενοποιείται στον ωστενίτη, απομακρυνόμενος από την διεπιφάνεια α_B/γ και μετακινούμενος προς το εσωτερικό του ωστενιτικού στρώματος (δηλ. σε $t=t_2>t_1$ και σε $t=t_3>t_2$). Αυτή η διαδικασία είναι η ίδια για κάθε μεμονωμένη υπομονάδα που σχηματίζεται στη μικροδομή σε οποιαδήποτε στιγμή κατά τον μπαινιτικό μετασχηματισμό.

Ο παρεχόμενος C από την υπομονάδα σταθεροποιεί προσωρινά ένα μέρος από το γειτονικό ωστενιτικό στρώμα έναντι σε ένα πιθανό γεγονός βαφής. Προκειμένου να καθοριστεί η έκταση αυτής της σταθεροποίησης, μπορεί να υποθεθεί ότι κάθε μέρος από το ωστενιτικό στρώμα το οποίο περιέχει ένα επαρκές ποσό από C, έτσι ώστε για αυτό το μέρος του στρώματος να είναι $M_s \leq T_Q$, όπου T_Q η θερμοκρασία του μέσου βαφής, τότε το στρώμα αυτό θα «επιβιώσει» από μια πιθανή βαφή και θα παραμείνει στην τελική μικροδομή. Έπειτα, θέτοντας για παράδειγμα $T_Q=25^\circ\text{C}$ και χρησιμοποιώντας τον τύπο του Andrews για την $M_s/20$, η ελάχιστη συγκέντρωση C που απαιτείται για την διατήρηση ωστενίτη μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$w_{C,\min}^{\gamma} = \frac{514 - 30.4w_{Mn}^{\gamma} - 11w_{Si}^{\gamma}}{423} \quad (4.5)$$

Στη σχέση (4.5), τα w_{Mn}^{γ} και w_{Si}^{γ} δείχνουν την περιεκτικότητα σε Mn και Si (σε % μάζα) του ωστενίτη, αντίστοιχα. Επειδή, όπως είναι γνωστό ότι κατά τον μαινιτικό μετασχηματισμό καμία ανακατανομή των κραματικών στοιχείων αντικατάστασης δεν λαμβάνει χώρα μεταξύ των παλιών και νέων φάσεων /15/, οι περιεκτικότητες Mn και Si του ωστενίτη στη σχέση (4.5) αντιστοιχούν σε αυτές που επιτυγχάνονται κατά το στάδιο της ενδοκρίσιμης ανόπτησης.

Έχοντας καθορίσει τη μεταβολή των προφίλ συγκέντρωσης C μέσα στα ωστενιτικά στρώματα που γειτονεύουν με μια υπομονάδα, καθώς επίσης και την ελάχιστη αναγκαία ποσότητα C για την διατήρηση ($w_{C,\min}^{\gamma}$), μπορεί έπειτα να καθοριστεί η μεταβολή του πιθανού όγκου του παραμένουσα ωστενίτη που έχει συνεισφερθεί από μια μεμονωμένη υπομονάδα κατά την βαφή. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 4.4, όπου η διακεκομμένη οριζόντια γραμμή απεικονίζει την $w_{C,\min}^{\gamma}$ και τοποθετείται επάνω στα προφίλ συγκέντρωσης C που αναπτύσσονται μέσα σε ένα ωστενιτικό στρώμα. Όπως φαίνεται, σε χρόνο τ_1 μετά τη δημιουργία της υπομονάδας η οριζόντια γραμμή $w_{C,\min}^{\gamma}$ τέμνει το αντίστοιχο προφίλ της συγκέντρωσης C στο σημείο $sg_R(\tau_1)$. Αν η βαφή συμβεί εκείνη τη στιγμή, τότε ένα στρώμα με πάχος $sg_R(\tau_1)$ θα σταθεροποιηθεί επαρκώς, επειδή η περιεκτικότητα C εντός αυτού του στρώματος υπερβαίνει το $w_{C,\min}^{\gamma}$. Αυτό το στρώμα, επομένως, θα έχει διατηρηθεί στη τελική μικροδομή, ενώ το υπόλοιπο ωστενιτικό στρώμα θα έχει μετασχηματιστεί σε

μαρτενσίτη. Αν η βαφή συμβεί σε μεταγενέστερο χρόνο, π.χ. σε τ_2 , τότε το $w_{C,\min}^{\gamma}$ θα έτεμνε το αντίστοιχο προφίλ συγκέντρωσης C στο σημείο $s_{\gamma R}(\tau_2)$, και έτσι το πάχος του ωστενιτικού στρώματος που θα διατηρούνταν θα ήταν ίσο με $s_{\gamma R}(\tau_2)$, Εικόνα 4.4. Συνεπώς, η συμβολή μιας μεμονωμένης υπομονάδας στον πιθανό όγκο του παραμένοντα ωστενίτη δίνεται γενικά από τη σχέση :

$$V_{\gamma R} = (L_{su})^2 s_{\gamma R}(\tau) \quad (4.6)$$

Έχοντας καθορίσει τη συνεισφορά μιας μεμονωμένης τυχαίας υπομονάδας στην πιθανή διατήρηση του ωστενίτη, καθώς επίσης και την εξέλιξη ολόκληρου του πληθυσμού των υπομονάδων στη μικροδομή κατά τη διάρκεια του μπαινιτικού μετασχηματισμού (ενότητα 4.2.1), μπορεί έπειτα να καθοριστεί η συνεισφορά όλων των υπομονάδων και επομένως, να καθοριστεί το συνολικό ποσό του παραμένοντα ωστενίτη στην τελική μικροδομή.

4.2.3 Η Εξέλιξη του Παραμένοντα Ωστενίτη κατά τον Μπαινιτικό Μετασχηματισμό

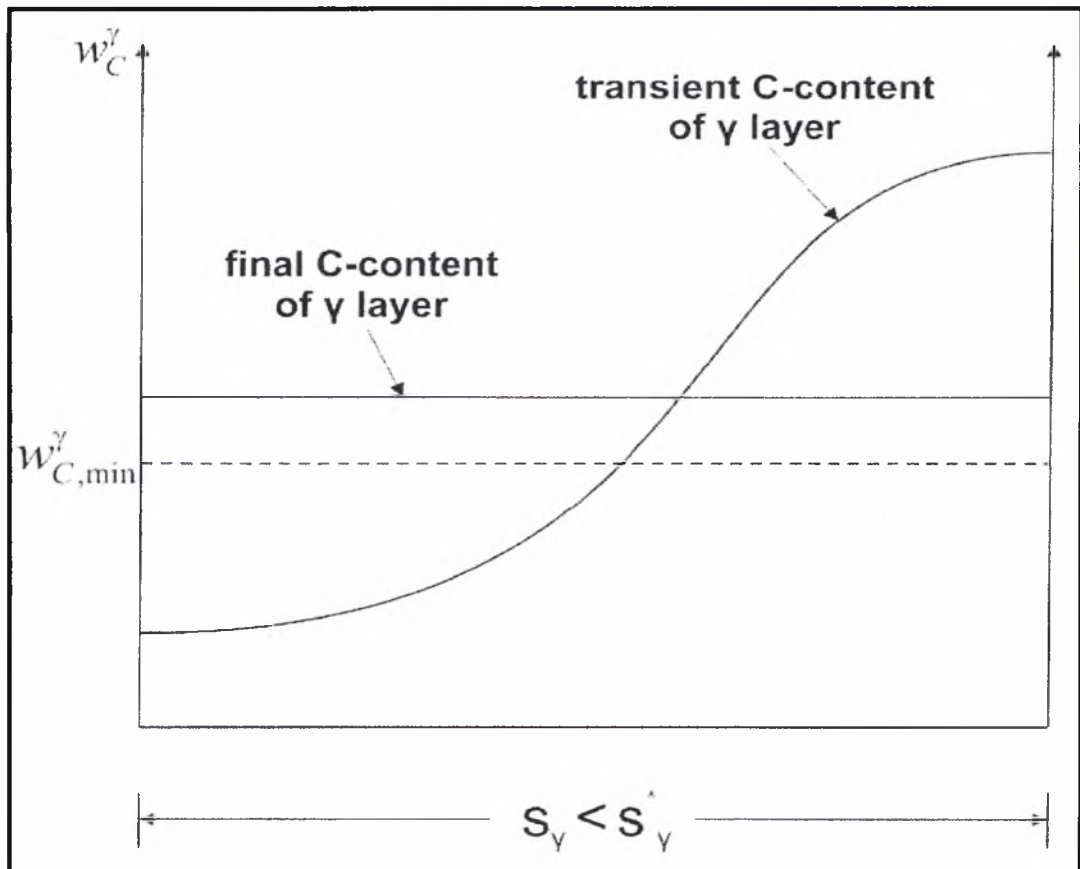
Είναι εμφανές από την προαναφερθείσα ανάλυση ότι η συμβολή μιας υπομονάδας στην διατήρηση του ωστενίτη είναι προσωρινή. Αυτό συμβαίνει επειδή, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα έπειτα από τον σχηματισμό μιας υπομονάδας, ολόκληρο το προφίλ συγκέντρωσης C στο γειτονικό ωστενιτικό στρώμα έχει μειωθεί κάτω από το επίπεδο $w_{C,\min}^{\gamma}$ λόγω της ομογενοποίησης (π.χ. το προφίλ για το χρόνο τ_4 στην Εικόνα 4.4). Εάν η βαφή δεν συμβεί μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα, η συμβολή από την συγκεκριμένη υπομονάδα στην διατήρηση του ωστενίτη θα εξαλειφθεί. Με άλλα λόγια, κάθε υπομονάδα παραμένει αποτελεσματική, όσον αφορά την διατήρηση του ωστενίτη, για μια περιορισμένη περίοδο χρόνου κατά τη διάρκεια του μπαινιτικού μετασχηματισμού. Επομένως, προκειμένου να καθοριστεί η μεταβολή του ποσού του παραμένοντα ωστενίτη σε ολόκληρη την μικροδομή σαν συνάρτηση του χρόνου μετασχηματισμού, είναι αναγκαίο να καθοριστεί η μεταβολή του πληθυσμού των «ενεργών» υπομονάδων, δηλαδή του πληθυσμού των υπομονάδων που συμβάλλουν στιγμιαία στην διατήρηση ωστενίτη, σε κάθε δεδομένη στιγμή κατά τον μετασχηματισμό.

Όσον αφορά αυτό το θέμα, πρέπει να επισημανθεί ότι κάθε υπομονάδα μπορεί να υπάρξει σε δύο πιθανές μορφές:

α) Περιορισμένη μεταξύ δυο ήδη υπάρχουσών υπομονάδων, έτσι ώστε η περιοχή διάχυσης του C να περιορίζεται πλευρικά από τις γειτονικές υπομονάδες, με συνέπεια το πάχος των οστενιτικών στρωμάτων που μεσολαβούν να είναι μικρότερο από μια κρίσιμη τιμή πάχους. Αυτή η κρίσιμη τιμή πάχους, s_{γ}^* , μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας ένα ισοζύγιο μάζας C μεταξύ της υπομονάδας και του γειτονικού στρώματος οστενίτη, υποθέτοντας ότι η τελική περιεκτικότητα C της υπομονάδας (δηλαδή αφού έχει απορριφθεί ο C) είναι αμελητέα:

$$\frac{s_{SU}}{2} w_C^o = s_{\gamma}^* w_{C,\min}^{\gamma} - s_{\gamma}^* w_C^o \Rightarrow s_{\gamma}^* = \frac{s_{SU} w_C^o}{2(w_{C,\min}^{\gamma} - w_C^o)} \quad (4.7)$$

Στη σχέση (4.7), το w_C^o είναι η περιεκτικότητα C της υπομονάδας μόλις αυτή έχει σχηματιστεί, η οποία είναι στην πραγματικότητα η περιεκτικότητα C του αρχικού οστενίτη, με βάση το μηχανισμό ανάπτυξης που έχει υιοθετηθεί εδώ. Κάθε υπομονάδα που ανήκει σε αυτήν την κατηγορία θα δημιουργήσει έναν μόνιμο όγκο από σταθεροποιημένο οστενίτη, ο οποίος θα διατηρηθεί στη μικροδομή έπειτα από τη βαφή, επειδή το τελικό (δηλαδή το ομογενοποιημένο) περιεχόμενο C του γειτονικού οστενιτικού στρώματος θα είναι πιο υψηλό από $w_{C,\min}^{\gamma}$, Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5 : Απεικονίζεται το ομογενοποιημένο περιεχόμενο άνθρακα που θα απομείνει στο ωστενιτικό στρώμα, όταν $s_\gamma < s_\gamma^*$ /2/

Επομένως, η μέγιστη συνεισφορά μιας μεμονωμένης υπομονάδας αυτής της κατηγορίας στον όγκο του παραμένοντα ωστενίτη στην τελική μικροδομή θα είναι ίση με:

$$V_{\gamma R} = 2(L_{su})^2 s_\gamma^* \quad (4.8)$$

Η συνεισφορά όλων των υπομονάδων αυτής της κατηγορίας στον όγκο του παραμένοντα ωστενίτη στην τελική μικροδομή θα δίνεται, επομένως, από τον πολλαπλασιασμό της συνεισφοράς μιας υπομονάδας επί τον συνολικό πληθυσμό των υπομονάδων επί την πιθανότητα (p) μια υπομονάδα να ανήκει σε αυτήν την κατηγορία:

$$V_{\gamma R}(t) = p [2(L_{su})^2 s_\gamma^*] N(t) \quad (4.9)$$

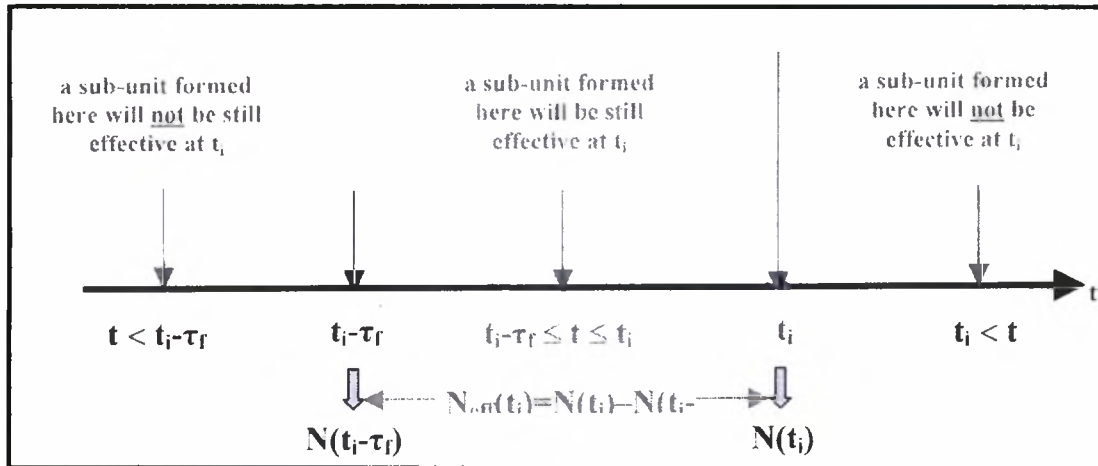
Αντικαθιστώντας το $N(t)$ από την σχέση (4.4) και διαιρώντας και τις δύο πλευρές της σχέσης (4.9) με τον όγκο του δείγματος (V), το κλάσμα όγκου του παραμένουσα ωστενίτη, που προκύπτει από τις υπομονάδες αυτής της κατηγορίας, λαμβάνεται από τη σχέση:

$$f_{\gamma_R}(t) = p [2(L_{SU})^2 s_{\gamma}^*] f_{\gamma}^0 I_{SU} \int_0^t \exp(-kt^n) dt \quad (4.10)$$

β) Η υπομονάδα δεν είναι περιορισμένη, δηλ. σχηματίζεται σε μια περιοχή που δεν περιορίζεται από προϋπάρχουσες γειτονικές υπομονάδες. Σε αυτήν την περίπτωση, ο C που απορρίπτεται από την υπομονάδα είναι ελεύθερος να διαχυθεί μακριά μέσα στα γειτονικά ωστενιτικά στρώματα. Η συμβολή μιας τέτοιας υπομονάδας στο πιθανό όγκο του παραμένουσα ωστενίτη στην τελική μικροδομή είναι ίση με :

$$V_{\gamma_R}(t) = 2(L_{SU})^2 s_{\gamma_R}(\tau) \quad (4.11)$$

Εντούτοις, τώρα το πάχος του πιθανού ωστενιτικού στρώματος, $s_{\gamma_R}(\tau)$, ποικίλλει με το χρόνο, Εικόνα 4.4, δηλαδή κάθε υπομονάδα αυτής της κατηγορίας συμβάλλει στη σταθεροποίηση του γειτονικού ωστενίτη, αλλά μόνο για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα. Κάθε υπομονάδα αυτής της κατηγορίας παραμένει «ενεργή» ακριβώς για μια χρονική περίοδο ίση με τ_f . Μετά, το επόμενο ζήτημα είναι να καθοριστεί ο πληθυσμός των ενεργών υπομονάδων που συνυπάρχουν σε κάθε δοθείσα στιγμή κατά το μετασχηματισμό. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί, συνειδητοποιώντας, ότι όλες οι υπομονάδες που είναι ενεργές σε μια τυχαία χρονική στιγμή t_i κατά το μετασχηματισμό πρέπει να σχηματίστηκαν κατά την περίοδο $t_i - \tau_f \leq t \leq t_i$ (Εικόνα 4.6), αλλιώς δεν θα ήταν πια ενεργές στον χρόνο t_i .



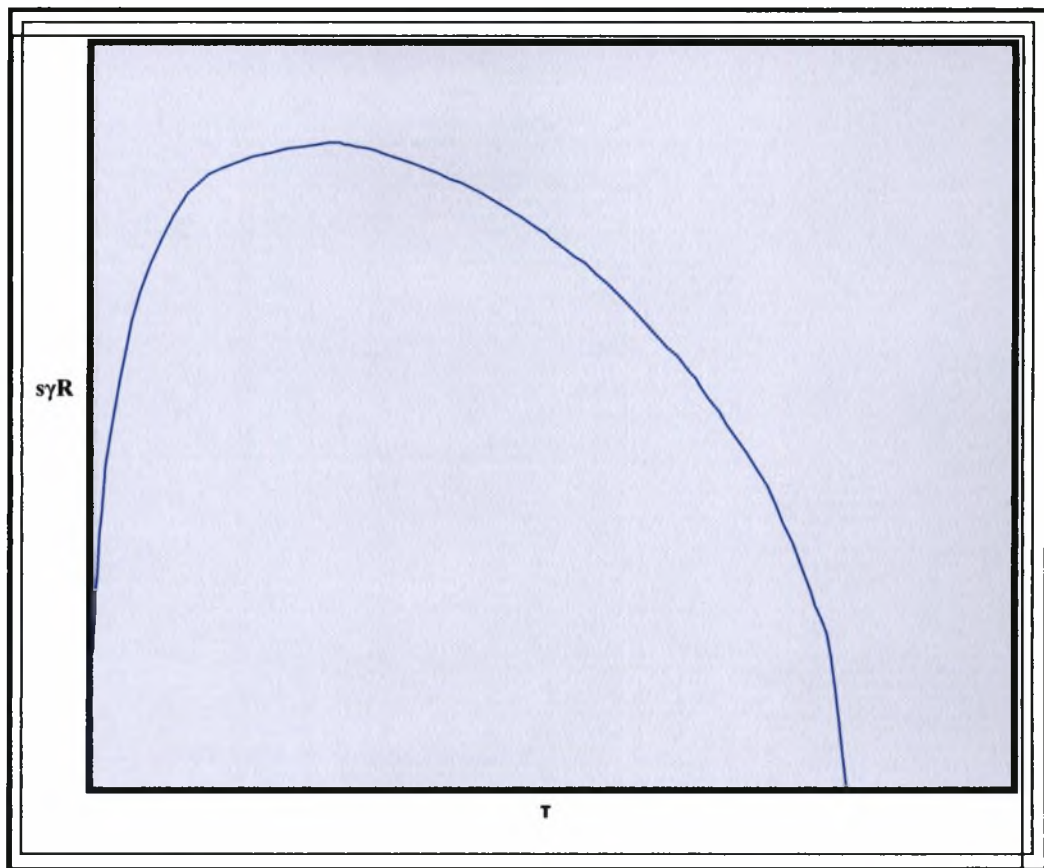
Εικόνα 4.6 : Απεικονίζεται ο χρόνος που μένει ενεργή μια υπομονάδα /2/

Ο αριθμός των υπομονάδων που σχηματίστηκαν εντός της περιόδου $t_i - \tau_f \leq t \leq t_i$ μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την σχέση (4.4) για το ακόλουθο ισοζύγιο:

$$N_{eff}^{(t_i)} = N(t_i) - N(t_i - \tau_f) = f_{\gamma}^o V I_{su} \left[\int_0^{t_i} t \exp(-kt^n) dt - \int_0^{t_i - \tau_f} t \exp(-kt^n) dt \right] \quad (4.12)$$

Είναι σημαντικό να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι όλες αυτές οι ενεργές υπομονάδες δεν είναι στην ίδια χρονική « φάση » τη στιγμή t_i , επειδή οι υπομονάδες που είναι συγχρόνως ενεργές την t_i μπορεί να έχουν σχηματιστεί σε διαφορετικές στιγμές εντός της περιόδου $t_i - \tau_f \leq t \leq t_i$. Για παράδειγμα, οι υπομονάδες που σχηματίστηκαν στην $t = t_i$ είναι φυσικά ενεργές τη στιγμή t_i (Εικόνα 4.6). Εντούτοις, το πάχος του σταθεροποιημένου ωστενιτικού στρώματος που συνεισφέρεται από αυτές τις συγκεκριμένες υπομονάδες είναι $s_{\gamma_R}(\tau=0)=0$, δηλαδή δεν έχει διαχυθεί ακόμη C από αυτές τις υπομονάδες στα γειτονικά τους ωστενιτικά στρώματα. Το ίδιο ισχύει για τις υπομονάδες που σχηματίστηκαν τη στιγμή $t = t_i - \tau_f$. Αυτές είναι ακόμη ενεργές όσον αφορά τη στιγμή t_i , εντούτοις η συνεισφορά τους στο παραμένοντα ωστενίτη είναι πάλι μηδενική επειδή $s_{\gamma_R}(\tau=\tau_f)=0$. Συνεπώς, οι υπομονάδες που δημιουργούνται εντός της περιόδου $t_i - \tau_f \leq t \leq t_i$ είναι ενεργές όσον αφορά τη στιγμή t_i , η συνεισφορά τους ωστόσο στον όγκο του παραμένοντα ωστενίτη εξαρτάται από τις αντίστοιχες τιμές τους s_{γ_R} , οι οποίες με την σειρά τους εξαρτώνται από τη σχετική χρονική

διαφορά ανάμεσα στην στιγμή δημιουργίας τους και την t_i . Μπορεί ναδειχθεί ότι, αν οι ενεργές υπομονάδες σχηματίζονται ομοιόμορφα όσον αφορά το χρόνο στο διάστημα $t_i - \tau_f \leq t \leq t_i$, ο ρυθμός σχηματισμού τους είναι ίσος με $N_{eff}^{(i)}/\tau_f$. Το συνολικό πάχος του σταθεροποιημένου ωστενιτικού υποστρώματος που συνορεύει με τις ενεργές υπομονάδες θα δίνεται από το ολοκλήρωμα $\int_0^{\tau_f} S_{\gamma_R}(\tau) d\tau$, το οποίο ισοδυναμεί με την περιοχή που περικλείεται από την καμπύλη της Εικόνας 4.7.



Εικόνα 4.7 : Απεικονίζεται η καμπύλη $sy_R - \tau$ για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος

$$\int_0^{\tau_f} S_{\gamma_R}(\tau) d\tau$$

Ο συνολικός όγκος του παραμένοντα ωστενίτη που συνεισφέρεται από όλες τις ενεργές υπομονάδες στην στιγμή t_i θα δίνεται επομένως από την σχέση:

$$V_{\gamma_R}(t_i) = \frac{N_{eff}^{(i)}}{\tau_f} 2(L_{SU})^2 \int_0^{\tau_f} s_{\gamma_R}(\tau) d\tau \quad (4.13)$$

Αντικαθιστώντας το $N_{eff}^{(i)}$ από την σχέση (4.12) και αφαιρώντας το δείκτη (i), δεδομένου ότι η ίδια ανάλυση ισχύει για κάθε στιγμή κατά τον μετασχηματισμό, διαιρώντας με τον όγκο του δείγματος (V) και πολλαπλασιάζοντας με την πιθανότητα (1-p) ότι μια υπομονάδα ανήκει στη δεύτερη κατηγορία, η σχέση (4.13) παρέχει το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη που ήταν συνεισφορά στη μικροδομή από αυτήν την κατηγορία υπομονάδων σαν συνάρτηση του χρόνου μετασχηματισμού:

$$f_{\gamma_R}(t) = (1-p) \frac{2(L_{SU})^2 f_{\gamma}^o I_{SU} \int_0^{\tau_f} s_{\gamma_R}(\tau) d\tau}{\tau_f} \left[\int_0^t t \exp(-kt^n) dt - \int_0^{t-\tau_f} t \exp(-kt^n) dt \right] \quad (4.14)$$

4.2.4 Τελική Διατύπωση του Μοντέλου

Κατά τη διάρκεια του μπεινιτικού μετασχηματισμού είναι πιθανό υπομονάδες και των δυο κατηγοριών που συζητήθηκαν προηγουμένως να σχηματιστούν στη μικροδομή. Το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στο χάλυβα θα αποτελείται από τις συνεισφορές όλων των υπομονάδων. Επομένως, η τελική σχέση του μοντέλου θα δίνεται με την πρόσθεση των σχέσεων (4.10) και (4.14). Μετά την πρόσθεση και την αλγεβρική επεξεργασία, η τελική σχέση του μοντέλου γίνεται:

$$f_{\gamma_R} = 2L_{SU}^2 f_{\gamma}^o I_{SU} \left[p s_{\gamma}^* \int_0^t t e^{-kt^n} + (1-p)(\tau_f)^{-1} \int_0^{\tau_f} s_{\gamma_R}(\tau) d\tau \left(\int_0^t t e^{-kt^n} dt - \int_0^{t-\tau_f} t e^{-kt^n} dt \right) \right] \quad (4.15)$$

Η σχέση (4.15) επιτρέπει τον υπολογισμό του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στη μικροδομή, σαν συνάρτηση της χρονικής διάρκειας στη θερμοκρασία του μπεινιτικού μετασχηματισμού.

4.3 Εφαρμογή και Αποτελέσματα του Μοντέλου.

Η σχέση (4.15) περιέχει αρκετές παραμέτρους και ποσότητες, μερικές από τις οποίες μπορούν να υπολογιστούν απ' ευθείας, ενώ άλλες πρέπει να καθοριστούν με προσαρμογή σε αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη σαν συνάρτηση του ισόθερμου χρόνου παραμονής στον μπαινιτικό μετασχηματισμό. Το μήκος και το πλάτος της υπομονάδας a_B (L_{su}) έχει συσχετιστεί εμπειρικά με τη θερμοκρασία μετασχηματισμού διαμέσου της σχέσης /16/:

$$L_{su} = \frac{10(T - 528)}{150} \quad (4.16)$$

Στη σχέση (4.16) το T εκπροσωπεί την απόλυτη θερμοκρασία μετασχηματισμού (σε βαθμούς Kelvin) ενώ το L_{su} υπολογίζεται σε μm . Το κλάσμα όγκου του ωστενίτη στην αρχή του μπαινιτικού μετασχηματισμού (f_γ°) μπορεί να καθοριστεί είτε από ποσοτική μεταλλογραφική ανάλυση δοκιμίων που έχουν υποβληθεί σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση και βαφή, ή υιοθετώντας θερμοδυναμική ισορροπία του χάλυβα στην ενδοκρίσιμη θερμοκρασία ανόπτησης. Το κρίσιμο πάχος του ωστενιτικού υποστρώματος (s_γ^*) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (4.7), η οποία με τη σειρά της χρειάζεται τιμές για τα το ελάχιστο περιεχόμενο C αναγκαίο για την ωστενιτική σταθεροποίηση ($w_{C,\min}^\gamma$), το πάχος (s_{su}) και το αρχικό περιεχόμενο σε C (w_C°) της υπομονάδας. Ο προσδιορισμός του $w_{C,\min}^\gamma$ γίνεται με τη σχέση (4.5). Το πάχος της υπομονάδας μπορεί να υπολογιστεί από μια εμπειρική συσχέτιση παρόμοια με τη σχέση (4.16) /17/:

$$s_{su} = \frac{0.2(T - 528)}{150} \quad (4.17)$$

Ακόμη μια φορά, η θερμοκρασία T αντιπροσωπεύει την απόλυτη θερμοκρασία μετασχηματισμού (σε βαθμούς Kelvin) και το s_{su} υπολογίζεται σε μm . Το αρχικό περιεχόμενο C της υπομονάδας (w_C°) θεωρείται ότι είναι ίδιο με το περιεχόμενο του

αρχικού ωστενίτη στην αρχή της ενδοκρίσιμης θερμοκρασίας ανόπτησης, δηλαδή υιοθετείται η θερμοδυναμική ισορροπία του ωστενίτη κατά την ενδοκρίσιμη ανόπτηση.

Προκειμένου να αποκομιστούν οι τιμές για τον ενεργό χρόνο των υπομονάδων (τ_f)

και για το ολοκλήρωμα $\int_0^{\tau_f} S_{\gamma_R}(\tau) d\tau$ είναι αναγκαίο να αποκομιστεί η καμπύλη της

Εικόνας 4.7. Αυτό μπορεί να γίνει με την επίλυση για το αντίστοιχο ζεύγος διάχυσης φερρίτη/ωστενίτη. Σε αυτήν την εργασία, ακολουθήθηκε η μέθοδος που προτάθηκε από τον Hillert et al. /19/, και το ζεύγος διάχυσης λύθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό DICTRA και τις βάσεις δεδομένων του /21/.

Οι υπόλοιπες παράμετροι της σχέσης (4.15), δηλαδή ο ρυθμός πυρήνωσης (I_{SU}), η πιθανότητα p και οι JMAK παράμετροι k και n , πρέπει να καθοριστούν με την προσαρμογή σε κατάλληλα πειραματικά δεδομένα.

4.4 Διαδικασία Υπολογισμού και Αποτελέσματα αυτής

Στη συνέχεια αφού έχει καθοριστεί η σειρά υπολογισμών της μεθόδου εξετάζεται για τους δυο πολυφασικούς χάλυβες TRIP που έχουν προαναφερθεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου, τους lab1 και lab2 με χημικές συστάσεις αυτές που δίνονται στο πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1 : Απεικονίζονται οι χημικές συστάσεις των χάλυβων lab1 και lab2

Χάλυβας	Σύσταση % κατά βάρος				
	C	Si	Mn	Al	P
Lab1	0.106	1.50	1.42	0.03	-
Lab2	0.180	0.02	1.40	1.58	0.04

Αρχικά υπολογίζονται οι αρχικές συστάσεις για τον ισόθερμο μπαινιτικό μετασχηματισμό. Αυτό γίνεται με τη χρήση του λογισμικού Thermo-calc, με το οποίο υπολογίζονται οι χημικές συστάσεις και τα κλάσματα όγκου του ωστενίτη και του φερρίτη στο τέλος της ενδοκρίσιμης ανόπτησης. Στην φάση αυτή της μελέτης

επιλέγεται θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης T_{IA} ίση με $827\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1100 K) και χρόνο ανόπτησης t_{IA} ίσο με 3 λεπτά (3 min). Η επιλογή αυτής της θερμοκρασίας και της χρονικής διάρκειας του σταδίου της ενδοκρίσιμης ανόπτησης έγινε γιατί είναι ίση με αυτή που χρησιμοποιήθηκε κατά την διαδικασία της αντίστοιχης πειραματικής διαδικασίας. Τα αποτελέσματα του κλάσματος όγκου του ωστενίτη και της χημικής του σύστασης για τους δυο χάλυβες lab1 και lab2 δίνονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακες 4.2-4.3)

Πίνακας 4.2 : Απεικονίζονται η χημική σύσταση κατά βάρος και το κλάσμα όγκου του ωστενίτη στο χάλυβα lab1

Χάλυβας lab1	
w(fcc,Al)	2.1144713×10^{-4}
w(fcc,C)	2.0840982×10^{-3}
w(fcc,Fe)	0.96498003
w(fcc,Mn)	1.905003×10^{-2}
w(fcc,Si)	1.3674392×10^{-2}
f_{γ}^o	0.48550757

Πίνακας 4.3 : Απεικονίζονται η χημική σύσταση κατά βάρος και το κλάσμα όγκου του ωστενίτη στο χάλυβα lab2

Χάλυβας lab2	
w(fcc,Al)	9.8415539×10^{-3}
w(fcc,C)	4.6706843×10^{-3}
w(fcc,Fe)	0.96466651
w(fcc,Mn)	2.0416117×10^{-2}
w(fcc,Si)	2.0342102×10^{-4}
w(fcc,P)	2.0170887×10^{-4}
f_{γ}^o	0.34768945

Στον παραπάνω υπολογισμό γίνεται, όπως αναφέρθηκε για την παρόμοια διαδικασία στο τρίτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας, η παραδοχή ότι ο χρόνος της ενδοκρίσιμης ανόπτησης είναι αρκετός, ώστε το σύστημα να μεταβεί σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας. Αν και αυτή η παραδοχή δεν ισχύει στην πραγματικότητα, εφόσον για να μεταβεί το σύστημα σε θερμοδυναμική ισορροπία θα απαιτούνταν θεωρητικά μεγάλος χρόνος, υιοθετείται εφόσον δεν επηρεάζει στην πράξη τα αποτελέσματα που λαμβάνονται κάνοντας χρήση αυτής.

Στην συνέχεια υπολογίζεται το μήκος και το πάχος της υπομονάδας a_B για τους χάλυβες lab1 και lab2 σε θερμοκρασίες μπαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} . Επιλέγεται να γίνουν οι υπολογισμοί για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες μπαινιτικού μετασχηματισμού (T_{BIT}), στις οποίες υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα, οι οποίες δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.4) και είναι ίδιες για τους χάλυβες lab1 και lab2.

Πίνακας 4.4 : Απεικονίζονται οι θερμοκρασίες μπαινιτικού μετασχηματισμού που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς

Θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} (σε °C)		
350	400	450

Για τον υπολογισμό του μήκους της υπομονάδας χρησιμοποιείται η σχέση (4.16) :

$$L_{su} = \frac{10(T - 528)}{150}$$

όπου

L_{su} : το μήκος της υπομονάδας a_B σε μικρόμετρα και

T : η θερμοκρασία T_{BIT} σε βαθμούς Kelvin

ενώ για τον υπολογισμό του πλάτους της υπομονάδας χρησιμοποιείται η σχέση (4.17):

$$s_{su} = \frac{0.2(T - 528)}{150}$$

όπου

s_{su} : το πλάτος της υπομονάδας a_B σε μικρόμετρα και

T : η θερμοκρασία T_{BIT} σε βαθμούς Kelvin

Τελικά καταλήγει στα αποτελέσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.5), που είναι κοινά για τους χάλυβες lab1 και lab2 εφόσον αυτά εξαρτώνται μόνο από την θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού η οποία σε κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις είναι κοινή για τους δύο χάλυβες

Πίνακας 4.5 : Απεικονίζονται το πλάτος και το μήκος της υπομονάδας για τις τρεις θερμοκρασίες μπεινιτικού μετασχηματισμού

T_{BIT} (K)	L_{su} (μm)	s_{su} (μm)
623	6.333	0.126
673	9.666	0.193
723	13.000	0.260

Επόμενο στάδιο είναι να υπολογισθεί με χρήση της σχέσης (4.5) η ελάχιστη συγκέντρωση άνθρακα αναγκαία για την διατήρηση του ωστενίτη. Οι συγκεντρώσεις μαγγανίου και πυριτίου στην σχέση αυτή είναι αυτές που υπολογίσθηκαν με την χρήση του λογισμικού Thermo-calc. Αυτό γίνεται εφόσον είναι δεδομένο ότι οι συστάσεις των στοιχείων αντικατάστασης δεν μεταβάλλονται στην κάθε φάση κατά το μετασχηματισμό φάσεων που συμβαίνει. Οπότε θα ληφθούν οι παρακάτω τιμές (Πίνακας 4.6) για τα δύο αυτά για τους χάλυβες lab1 και lab2, οι οποίες είναι οι ίδιες των Πινάκων 4.2 και 4.3 αντίστοιχα για τον καθένα.

Πίνακα 4.6 : Απεικονίζονται οι περιεκτικότητες του ωστενίτη σε μαγγάνιο και σε πυρίτιο των χαλύβων

Στοιχείο/χάλυβας	Lab1	Lab2
Mn	1.905003×10^{-2}	2.0416117×10^{-2}
Si	1.3674392×10^{-2}	2.0342102×10^{-4}

Οπότε η ελάχιστη συγκέντρωση $w_{C,\min}^{\gamma}$ στην οποία θα καταλήξει είναι αυτή που δίνεται στο Πίνακα 4.7 για τον κάθε χάλυβα και η οποία είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας μπεινιτικού μετασχηματισμού

Πίνακας 4.7 : Απεικονίζονται οι ελάχιστες συγκεντρώσεις άνθρακα αναγκαίες για την διατήρηση του ωστενίτη

	Lab1	Lab2
$w_{C,\min}^{\gamma}$ (%)	1.042662122	1.015505182

Πλέον γνωρίζοντας τις τιμές , για τον κάθε χάλυβα φυσικά, του περιεχομένου της υπομονάδας σε άνθρακα μόλις έχει διαμορφωθεί (w_C^o), της ελάχιστης συγκέντρωσης C αναγκαίας για την διατήρηση ωστενίτη ($w_{C,\min}^{\gamma}$) και τέλος του πάχους της υπομονάδας (s_{su}) γίνεται κάνοντας χρήση της σχέσης (4.7)

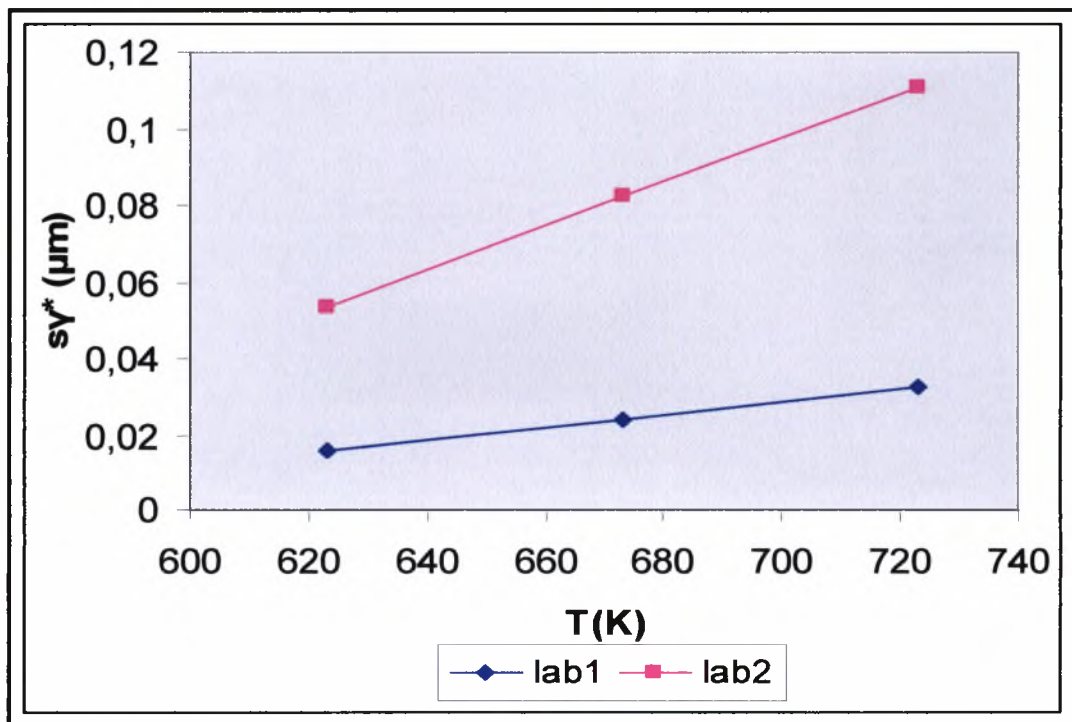
$$s_{\gamma}^* = \frac{s_{su} w_C^o}{2(w_{C,\min}^{\gamma} - w_C^o)} \quad (4.7)$$

να υπολογισθεί η κρίσιμη τιμή πάχους s_{γ}^* του ωστενιτικού στρώματος που μεσολαβεί μεταξύ των υπομονάδων. Επειδή το πλάτος της υπομονάδας εξαρτάται από την μπεινιτική θερμοκρασία T_{BIT} , θα καταλήξει σε μια κρίσιμη τιμή πάχους για κάθε διαφορετική θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού (Πίνακας 4.8)

Πίνακας 4.8 : Απεικονίζονται οι κρίσιμες τιμές πάχους της υπομονάδας σε κάθε θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού

T_{BIT} (K)	s_{γ}^* (μm)	
	Lab1	Lab2
623	0.015738426	0.053653062
673	0.024107272	0.082182864
723	0.032476118	0.110712667

Από το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 4.8) μπορεί να παρατηρηθεί ότι στους δυο χάλυβες, lab1 και lab2, υπάρχει μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ της κρίσιμης τιμής πάχους s_{γ}^* (κάθετος άξονας) και της θερμοκρασίας του μπαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} (οριζόντιος άξονας).



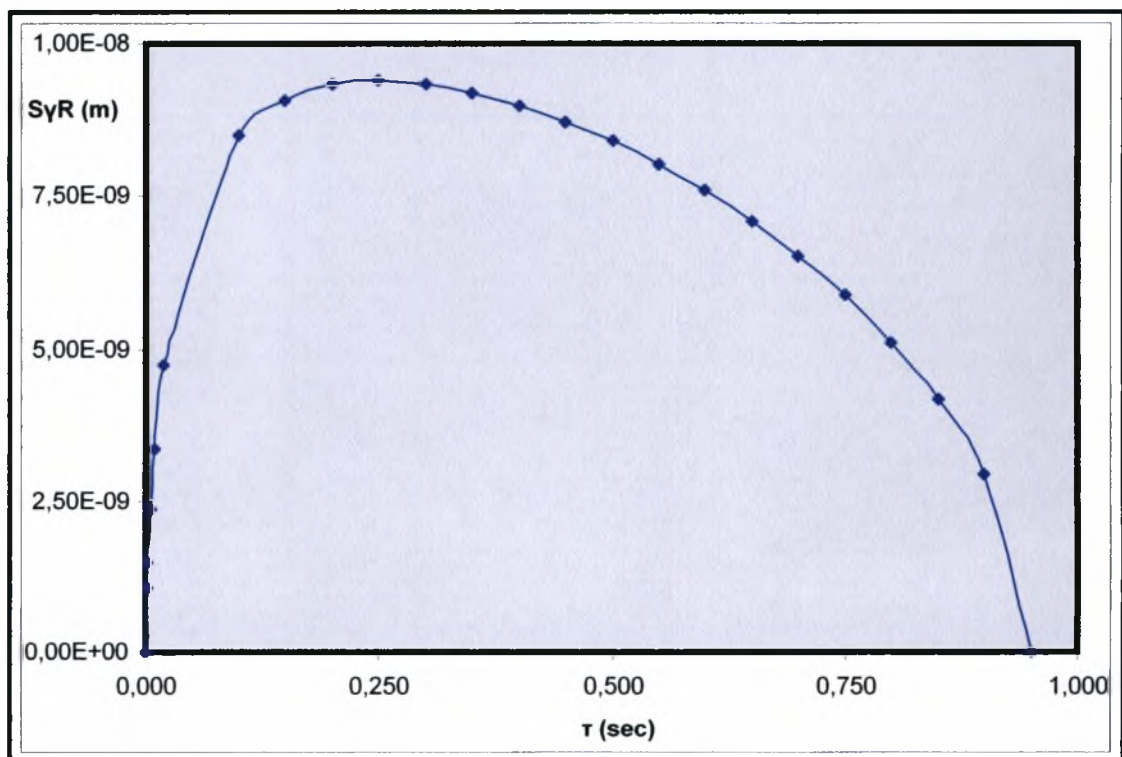
Εικόνα 4.8 : Απεικονίζεται η γραφική παράσταση κρίσιμης τιμής πάχους s_{γ}^* (κάθετος άξονας) και της θερμοκρασίας του μπαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} (οριζόντιος άξονας)

Στο αμέσως επόμενο στάδιο θέλουμε να υπολογισθεί το πάχος του παραμένοντος ωστενιτικού στρώματος, που συνορεύει με τις υπομονάδες a_B . Αυτό δίνεται από το ολοκλήρωμα $\int_0^{\tau_f} S_{\gamma_R}(\tau) d\tau$ το οποίο ισούται με το εμβαδό της περιοχής που περικλείεται από την καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$, όπου $S_{\gamma_R}(\tau)$ το πάχος σταθεροποιημένου ωστενιτικού στρώματος και τ_f ο χρόνος που παραμένει ενεργεί μια υπομονάδα. Επομένως, πρέπει να καθοριστούν οι παραπάνω καμπύλες, οι οποίες εξαρτώνται από την θερμοκρασία του μπαινιτικού μετασχηματισμού. Με τη χρήση του λογισμικού DICTRA θα υπολογισθούν αρχικά καμπύλες παρόμοιες με αυτήν του Εικόνας 4.4, προσομοιώνοντας το ζεύγος διάχυσης φερρίτη- ωστενίτη. Με αυτόν τον τρόπο στην συνέχεια θα μπορεί να καθορισθούν οι παραπάνω αναγκαίες καμπύλες για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος. Κατά την προσομοίωση με το λογισμικό DICTRA θεωρείται αρχικό πάχος ωστενίτη $S_{\gamma_R}(\tau)$ μεγαλύτερο από την τιμή του κρίσιμου πάχους s_{γ}^* , επειδή σε διαφορετική περίπτωση θα προκύπτει ότι όλη η περιοχή παρέμεινε σε ωστενιτική φάση. Οπότε υιοθετείται μια τυπική τιμή για αυτήν διαδικασία ίση με $S_{\gamma} = 1 \mu\text{m}$. Επιπλέον, κατά τον υπολογισμό τίθεται αρχικό πάχος φερριτικής περιοχής ίσο με το μισό από αυτό που έχει υπολογισθεί και δίνεται στον Πίνακα 4.5 λόγω συμμετρίας του προβλήματος. Εφόσον γίνει η προσομοίωση της διάχυσης, κατόπιν υπολογίζεται ο χρόνος τ_f , για τον οποίο η συγκέντρωση του άνθρακα θα προκύπτει ίση με την ελάχιστη για την διατήρηση ωστενίτη, δηλαδή την $w_{C,\text{min}}^{\gamma}$. Τελικά καταλήγει στους παρακάτω χρόνους (Πίνακας 4.9) για τους δυο χάλυβες ανάλογα με την θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού και στην Εικόνα 4.15 φαίνεται η καμπύλη του χρόνου σαν συνάρτηση της μπαινιτικής θερμοκρασίας

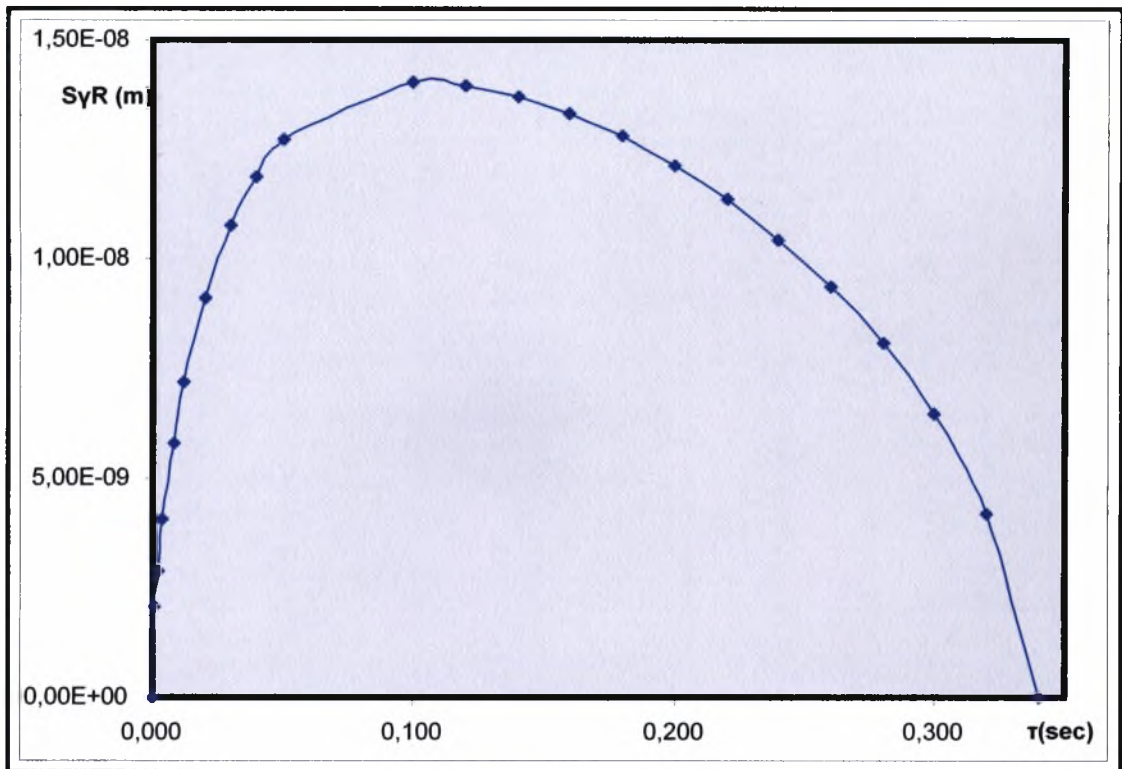
Πίνακας 4.9 : Απεικονίζονται οι χρόνοι τ_f που μένει ενεργή μια υπομονάδα

$T_{\text{BIT}} \text{ (K)}$	$\tau_f \text{ (sec)}$	
	Lab1	Lab2
623	0.95	3.48
673	0.34	1.117
723	0.122	0.409

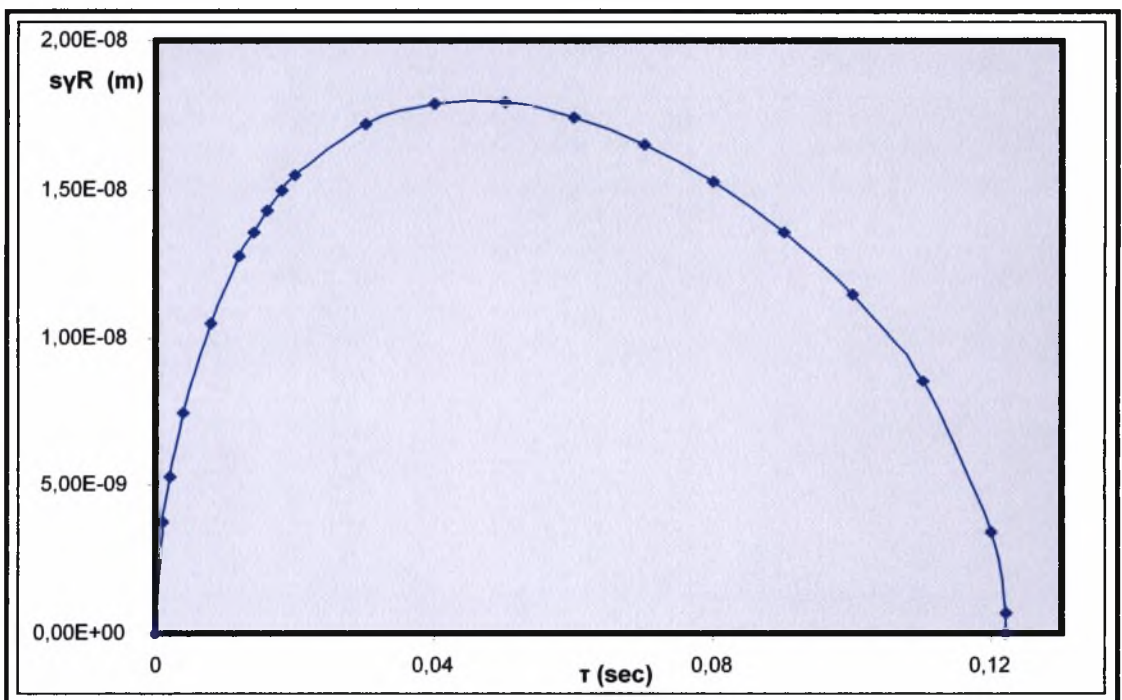
Εφόσον είναι γνωστός ο συνολικός ενεργός χρόνος κάθε υπομονάδας μπορεί να σχεδιασθεί η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για την κάθε περίπτωση και καταλήγει στις έξι παρακάτω καμπύλες $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ (Εικόνες 4.9 – 4.14) για τους δύο χάλυβες που μελετούνται σε αυτό το κεφάλαιο. Με την χρήση του Dictra υπολογίζεται, για τον καθένα από τους δύο χάλυβες σε μια διαφορετική μπεινιτική θερμοκρασία κάθε φορά από το Πίνακα 4.4, το πάχος $S_{\gamma_R}(\tau)$ σε συνάρτηση με τον χρόνο ανάμεσα στο χρονικό διάστημα $(0 - \tau_f)$. Για την κατασκευή της καμπύλης επιλέγονται τα χρονικά σημεία που φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 4.10) για κάθε ζεύγος θερμοκρασίας – χάλυβα και για τα οποία γίνεται η προσπάθεια να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στο παραπάνω χρονικό διάστημα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα που εισέρχεται κατά τον μετέπειτα υπολογισμό του ολοκληρώματος.



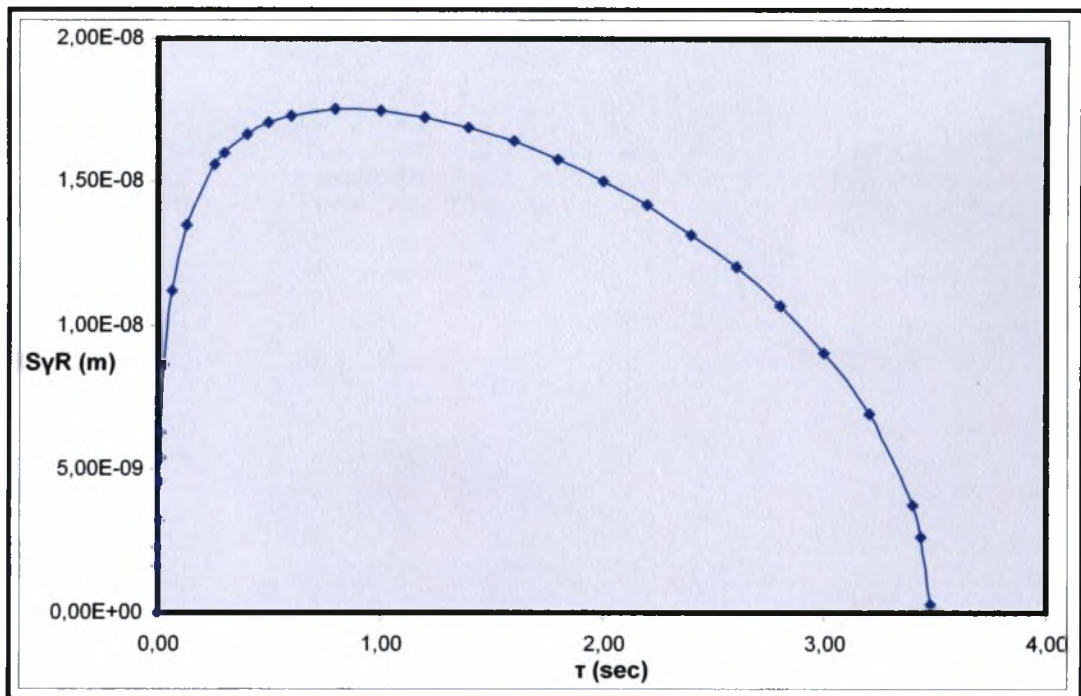
Εικόνα 4.9 : Απεικονίζεται η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού 623 K



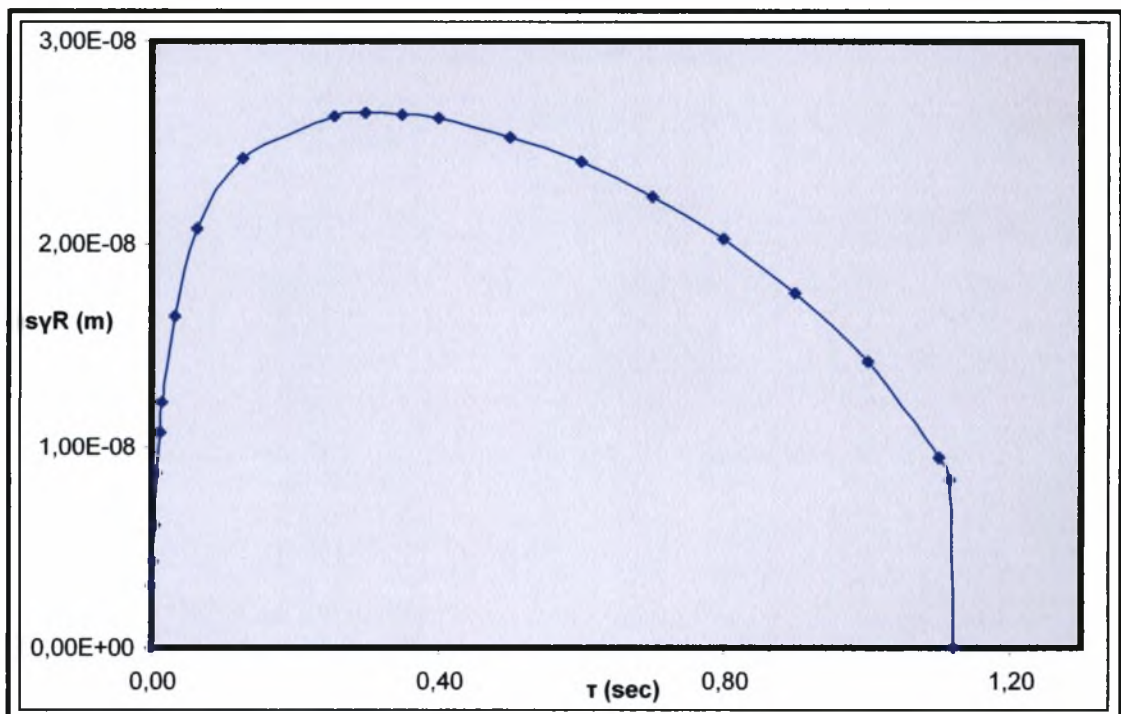
Εικόνα 4.10 : Απεικονίζεται η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού 673 K



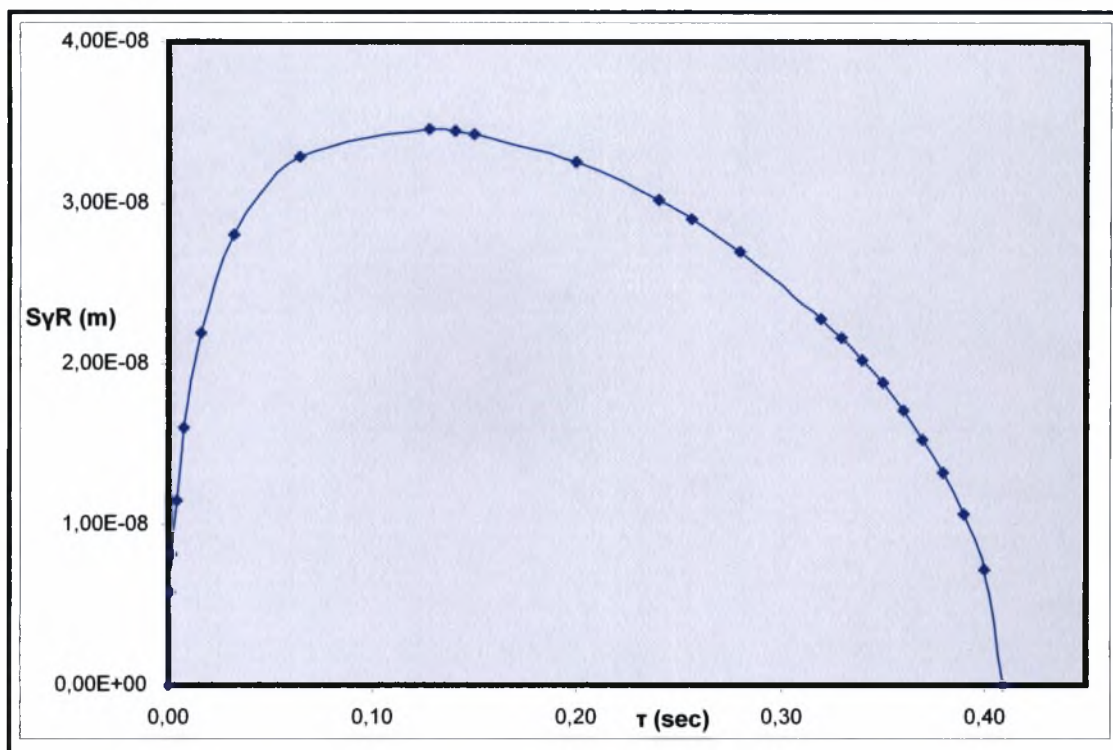
Εικόνα 4.11 : Απεικονίζεται η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού 723 K



Εικόνα 4.12 : Απεικονίζεται η καμπύλη $S_{yR}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού 623 K



Εικόνα 4.13 : Απεικονίζεται η καμπύλη $S_{yR}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού 673 K

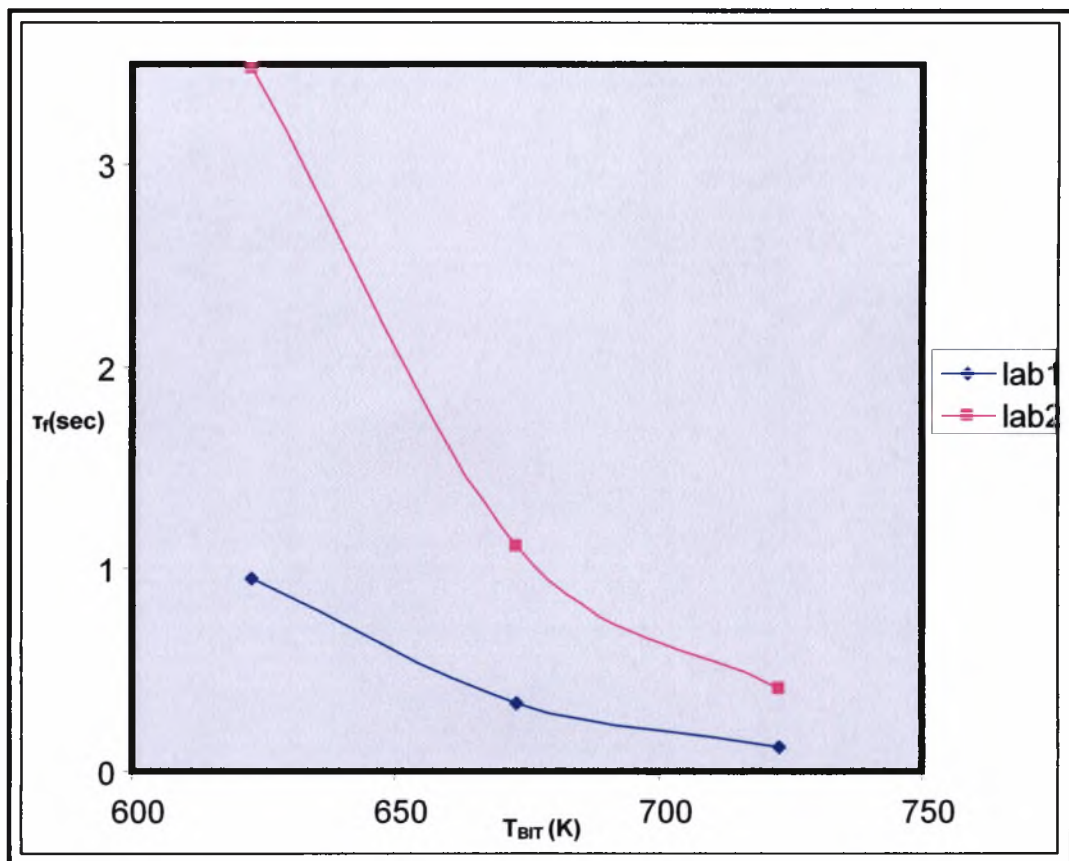


Εικόνα 4.14 : Απεικονίζεται η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού 723 K

Πίνακας 4.10 : Απεικονίζονται οι χρόνοι που επιλέχθηκαν για να σχεδιαστεί η καμπύλη $S_{\gamma_R}(\tau) - \tau_f$

	lab1			lab2		
	623	673	723	623	673	723
0.000	0.000	0.000	0.001	0	0,000	0
0.001	0.001	0.001	0.002	0,001	0,001	0,001
0.002	0.002	0.002	0.004	0,002	0,002	0,002
0.005	0.004	0.004	0.008	0,004	0,004	0,004
0.01	0.008	0.008	0.012	0,008	0,008	0,008
0.02	0.012	0.012	0.014	0,012	0,012	0,016
0.10	0.02	0.02	0.016	0,016	0,016	0,032

0.15	0.03	0.018	0,032	0,032	0,064
0.20	0.04	0.020	0,064	0,064	0,128
0.25	0.05	0.030	0,128	0,128	0,14
0.30	0.10	0.040	0,256	0,256	0,15
0.35	0.12	0.050	0,3	0,300	0,2
0.40	0.14	0.060	0,4	0,350	0,24
0.45	0.16	0.070	0,5	0,400	0,256
0.50	0.18	0.080	0,6	0,500	0,28
0.55	0.20	0.090	0,8	0,600	0,32
0.60	0.22	0.100	1	0,700	0,33
0.65	0.24	0.110	1,2	0,800	0,34
0.70	0.26	0.120	1,4	0,900	0,35
0.75	0.28	0.122	1,6	1,000	0,36
0.80	0.30		1,8	1,100	0,37
0.80	0.32		2	1,117	0,38
0.90	0.34		2,2		0,39
0.95			2,4		0,4
			2,6		0,409
			2,8		
			3		
			3,2		
			3,4		
			3,44		
			3,48		



Εικόνα 4.15 : Απεικονίζεται η γραφική παράσταση του χρόνου που μένει ενεργή μια υπομονάδα σε σχέση με την θερμοκρασία μπειντικού μετασχηματισμού

Πλέον, έχοντας τις παραπάνω καμπύλες (Εικόνες 4.9 – 4.14) μπορεί να υπολογισθεί το εμβαδό που περικλείεται, δηλαδή να υπολογισθεί το ολοκλήρωμα

$$\int_0^{\tau_f} S_{\gamma_R}(\tau) d\tau$$

και οι τιμές του δίνονται στο Πίνακα 4.11 για τα ολοκλήρωμα.

Πίνακας 4.11 : Απεικονίζονται οι τιμές του ολοκληρώματος $\int_0^{\tau_f} S_{\gamma_R}(\tau) d\tau$ που περικλείεται από τις καμπύλες των εικόνων 4.9 έως 4.14

$\int_0^{\tau_f} S_{\gamma_R}(\tau) d\tau \text{ (m} \times \text{s)}$		
$T_{BIT} \text{ (K)}$	Lab1	Lab2
623	6.79571×10^{-9}	4.76528×10^{-8}
673	3.57967×10^{-9}	2.37663×10^{-8}
723	1.67382×10^{-9}	1.09513×10^{-8}

Αφού έχουν υπολογισθεί οι τιμές και του ολοκληρώματος, έχουν υπολογισθεί όλες οι μεταβλητές που χρειάζονται για την επίλυση της σχέσης (4.15), με την οποία μπορεί να υπολογισθεί το κλάσμα του παραμένοντα ωστενίτη ως συνάρτηση του χρόνου παραμονής στην θερμοκρασία του μπαινιτικού μετασχηματισμού.

Παρατηρείται στην σχέση (4.15) ότι υπάρχουν τέσσερις σταθερές για τις οποίες δεν έχουν ακόμη υπολογιστεί οι τιμές τους ακόμη.

$$f_{\gamma_R} = 2L_{SU}^2 f_{\gamma}^o I_{SU} \left[p s_{\gamma}^* \int_0^t t e^{-kt^n} + (1-p)(\tau_f)^{-1} \int_0^{\tau_f} S_{\gamma_R}(\tau) d\tau \left(\int_0^t t e^{-kt^n} dt - \int_0^{t-\tau_f} t e^{-kt^n} dt \right) \right] \quad (4.15)$$

Τις τιμές για την πιθανότητα (p) η υπομονάδα να εμφανίζεται με την πρώτη μορφή από αυτές που αναφέρθηκαν στην παρουσίαση της μεθόδου, ο ρυθμός πυρήνωσης (I_{SU}) και οι παράμετροι k, n της JMAK υπολογίζονται με προσαρμογή σε πειραματικά δεδομένα. Για την τιμή της παραμέτρου έχει βρεθεί ότι για τιμή της ίση με ένα (n=1) έχουμε τα καλύτερα αποτελέσματα και στην εξίσωση (4.18) έχει ήδη αντικατασταθεί. Επιπλέον είναι γνωστό ότι η πιθανότητα p πρέπει να πάρει τιμές στο διάστημα 0-1 ως τέτοια. Η σχέση (4.15) μπορεί να μετασχηματιστεί στην παρακάτω απλούστερη μορφή για υπολογισμούς θέτοντας n=1 :

$$f_{\gamma_R}(t) = \frac{pf_{\gamma}^{\circ} I_{SU} (2L_{SU}^2 s_{\gamma}^*)}{k^2} [1 - (1+kt)e^{-kt}] + \frac{(1-p)f_{\gamma}^{\circ} I_{SU} \left(2L_{SU}^2 \int_0^{\tau_f} s_{\gamma_R}(\tau) d\tau \right)}{\tau_f k^2} \times [(1+kt - k\tau_f)e^{-k(t-\tau_f)} - (1+kt)e^{-kt}] \quad (4.18)$$

Από πειραματικές τιμές ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού για τους δυο χάλυβες οι οποίοι μελετούνται έχουν προκύψει οι τιμές για το κλάσμα όγκου παραμένοντα ωστενίτη για δεδομένη θερμοκρασία και χρονική διάρκεια μπαινιτικού μετασχηματισμού που δίνονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακες 4.12 - 4.13).

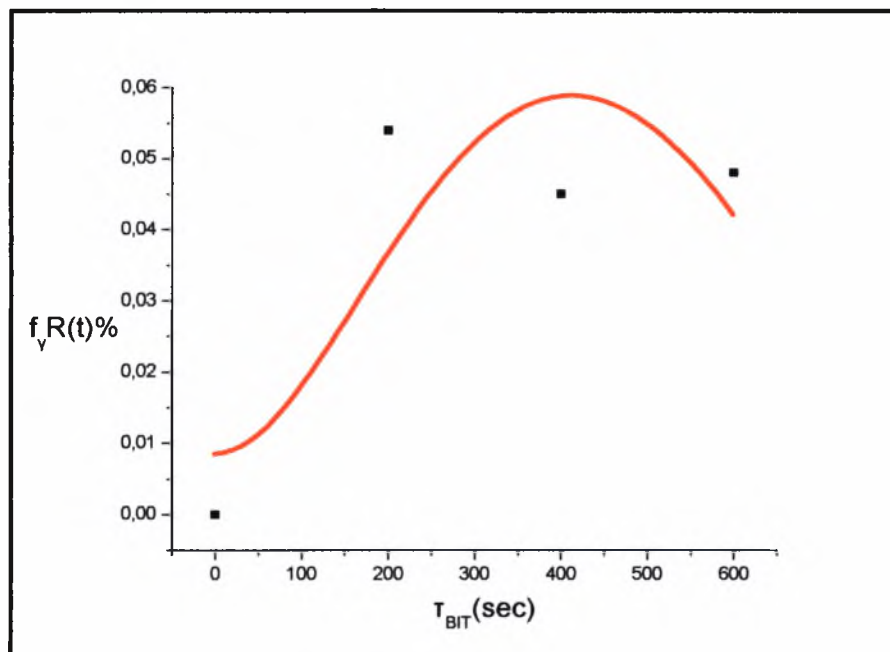
Πίνακας 4.12 : Απεικονίζονται οι πειραματικές τιμές για το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στον χάλυβα lab1 σε τρεις θερμοκρασίες μπαινιτικού μετασχηματισμού.

Lab1			
	$f_{\gamma_R}(t)$ (%)		
$T_{BIT}(^{\circ}C)/t_{BIT}(sec)$	200	400	600
350	5.4	4.5	4.8
400	4.1	3.8	3.7
450	4.1	1.4	1.1

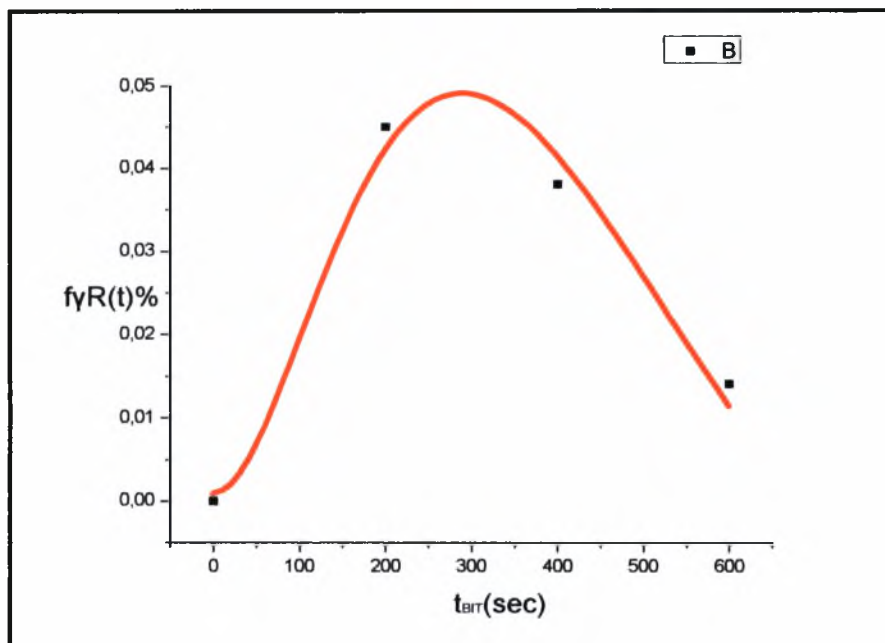
Πίνακας 4.13 : Απεικονίζονται οι πειραματικές τιμές για το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στον χάλυβα lab2 σε τρεις θερμοκρασίες μπαινιτικού μετασχηματισμού.

Lab2			
	$f_{\gamma_R}(t)$ (%)		
$T_{BIT}(^{\circ}C)/t_{BIT}(sec)$	200	400	600
350	13.3	9.5	7.4
400	9.1	7.4	6.8
450	8.9	3.2	1.1

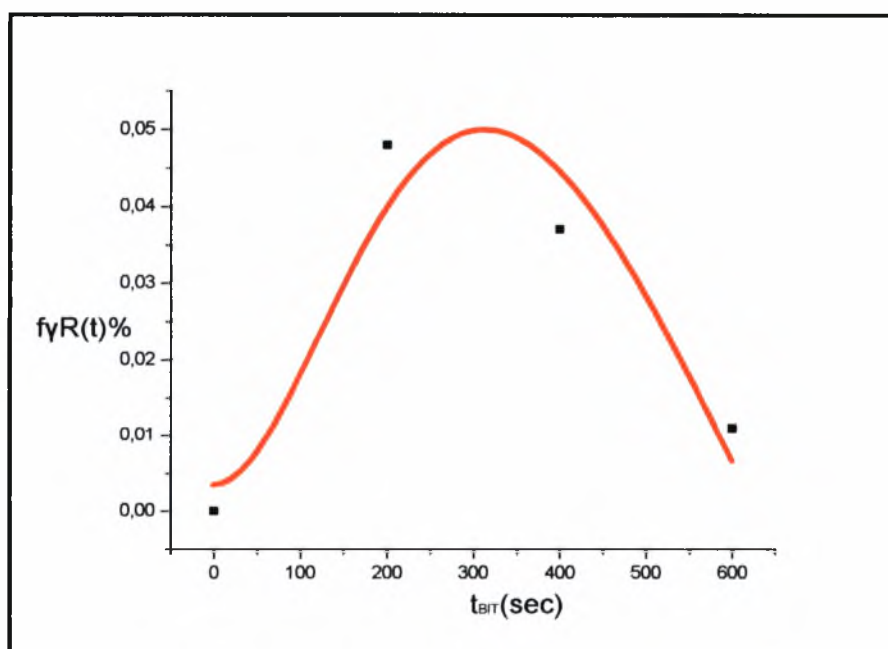
Σε αυτό το σημείο και με δεδομένες τις παραπάνω πειραματικές τιμές θα προσαρμοσθεί η καμπύλη της σχέσης (4.18) στα πειραματικά αποτελέσματα για το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στον χάλυβα, ώστε να προκύψουν οι τιμές για τις άγνωστες ακόμη σταθερές. Γι' αυτήν την διαδικασία γίνεται χρήση πάλι του λογισμικού Origin. Για τις μεταβλητές που παρουσιάζονται στο δεξί μέλος της σχέσης χρησιμοποιούνται οι τιμές που έχουν βρεθεί υπολογιστικά. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δειχθεί στην επιλογή των αρχικών τιμών των τριών αυτών άγνωστων σταθερών, ώστε τα αποτελέσματα για τις τελικές τιμές οι οποίες θα προκύψουν στο τέλος της προσαρμογής να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες για κάθε μια περίπτωση (Εικόνες 4.16 – 4.21)



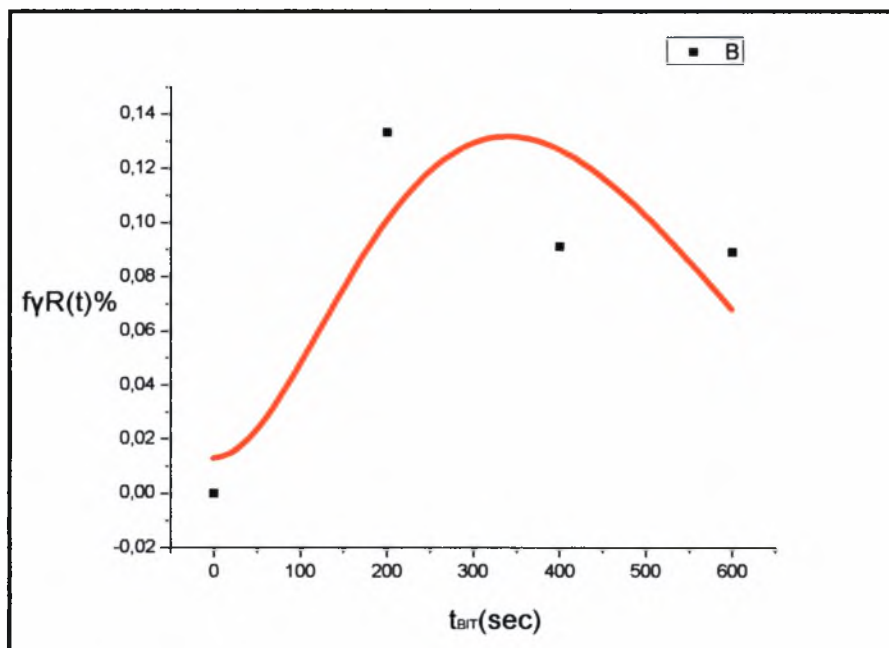
Εικόνα 4.16 : Απεικονίζεται η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.12) για τον χάλυβα lab1 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}(^{\circ}C) = 350$



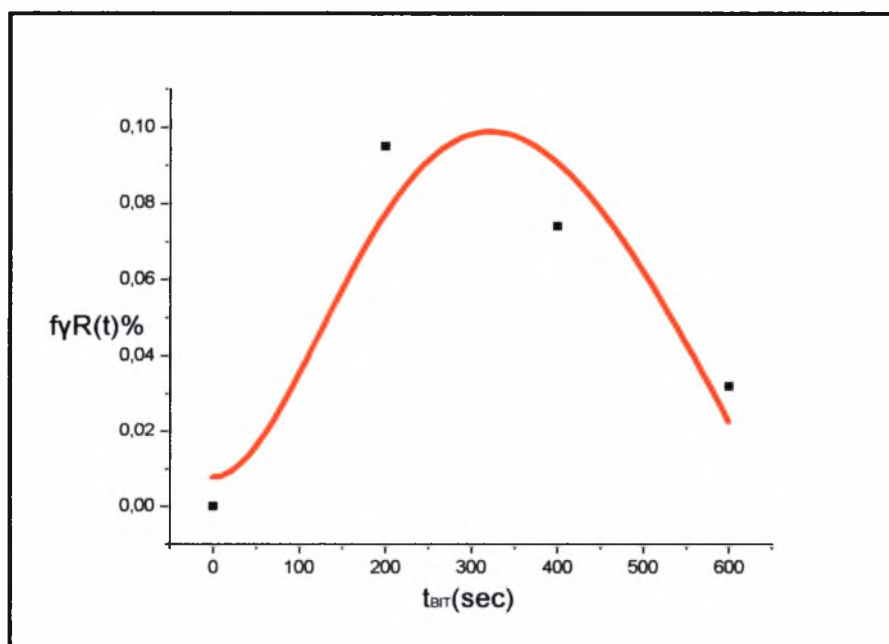
Εικόνα 4.17 : Απεικονίζεται η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.12) για τον χάλυβα lab1 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}(^{\circ}C) = 400$



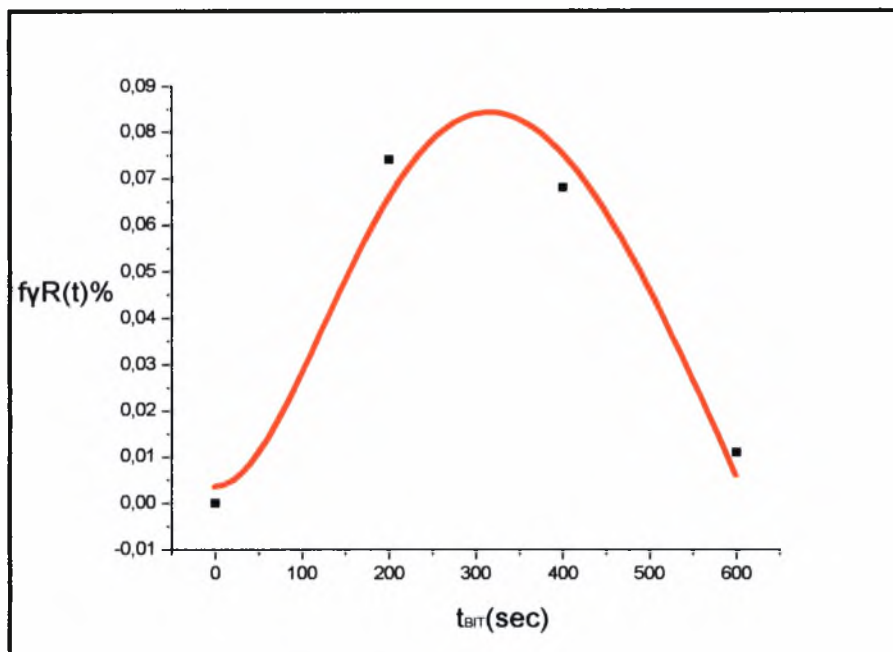
Εικόνα 4.18 : Απεικονίζεται η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.12) για τον χάλυβα lab1 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}(^{\circ}C) = 450$



Εικόνα 4.19 : Απεικονίζεται η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.13) για τον χάλυβα lab2 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}(^{\circ}\text{C}) = 350$



Εικόνα 4.20 : Απεικονίζεται η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.13) για τον χάλυβα lab2 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}(^{\circ}\text{C}) = 400$



Εικόνα 4.21 : Απεικονίζεται η προσαρμογή της σχέσης (4.18) στα πειραματικά δεδομένα του πίνακα (4.13) για τον χάλυβα lab2 και σε θερμοκρασία ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού $T_{BIT}(^{\circ}C) = 450$

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι τελικές τιμές που προέκυψαν έπειτα από την προσαρμογή για την κάθε μια από τις έξι περιπτώσεις που μελετούνται (Πίνακες 4.14 – 4.15).

Πίνακας 4.14 : Απεικονίζονται οι τελικές τιμές των σταθερών που προέκυψαν από την προσαρμογή της σχέσης στα πειραματικά δεδομένα για τον χάλυβα lab1

	Τελικές τιμές σταθερών για lab1		
Σταθερά/ $T_{BIT}(^{\circ}C)$	350	400	450
K	3.11×10^{-3}	3.04×10^{-3}	7.64×10^{-3}
p	0	0	0
I_{SU}	1.748×10^{15}	1.0957×10^{15}	3.3776×10^{15}

Πίνακας 4.15 : Απεικονίζονται οι τελικές τιμές των σταθερών που προέκυψαν από την προσαρμογή της σχέσης στα πειραματικά δεδομένα για τον χάλυβα lab2.

	Τελικές τιμές σταθερών για lab2		
Σταθερά/ $T_{\text{ΒΠ}}(^{\circ}\text{C})$	350	400	450
k	4.45×10^{-3}	3.61×10^{-3}	8.42×10^{-3}
p	0	0	0
I_{SU}	1.1788×10^{15}	5.7443×10^{14}	1.8561×10^{15}

Έχοντας υπολογίσει και τις τιμές των σταθερών όρων της σχέσης (4.18) πλέον μπορεί μέσω αυτής να υπολογισθεί το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη για καθορισμένη χρονική διάρκεια μαινετικού μετασχηματισμού και για δεδομένο κλάσμα όγκου ωστενίτη στον χάλυβα στην αρχή αυτού. Η σχέση (4.18), αν γίνει αντικατάσταση των παραπάνω σταθερών, μπορεί να πάρει τις εξής μορφές ανάλογα με την θερμοκρασία μαινετικού μετασχηματισμού και το αρχικό κλάσμα όγκου που προέκυψε στο τέλος της ενδοκρίσιμης ανόπτησης :

- Για lab1 (350 °C)

$$f_{\gamma_R}(t) = 50.31281477 \times \left[(0.99689 + 3.11 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.11 \times 10^{-3} \times (t - 0.95)) - (1 + 3.11 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.11 \times 10^{-3} t) \right]$$

- Για lab1 (400 °C)

$$f_{\gamma_R}(t) = 113.2473772 \times \left[(0.9989664 + 3.04 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.04 \times 10^{-3} \times (t - 0.34)) - (1 + 3.04 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.04 \times 10^{-3} t) \right]$$

- Για lab1 (450 °C)

$$f_{\gamma_R}(t) = 130.2816131 \times \left[(0.99906792 + 7.64 \times 10^{-3} t) \times \exp(-7.64 \times 10^{-3} \times (t - 0.122)) - (1 + 7.64 \times 10^{-3} t) \times \exp(-7.64 \times 10^{-3} t) \right]$$

- Για lab2 (350 °C)

$$f_{\gamma_R}(t) = 22.73368144 \times [(0.984514 + 4.45 \times 10^{-3} t) \times \exp(-4.45 \times 10^{-3} \times (t - 3.48)) - (1 + 4.45 \times 10^{-3} t) \times \exp(-4.45 \times 10^{-3} t)]$$

- Για lab2 (400 °C)

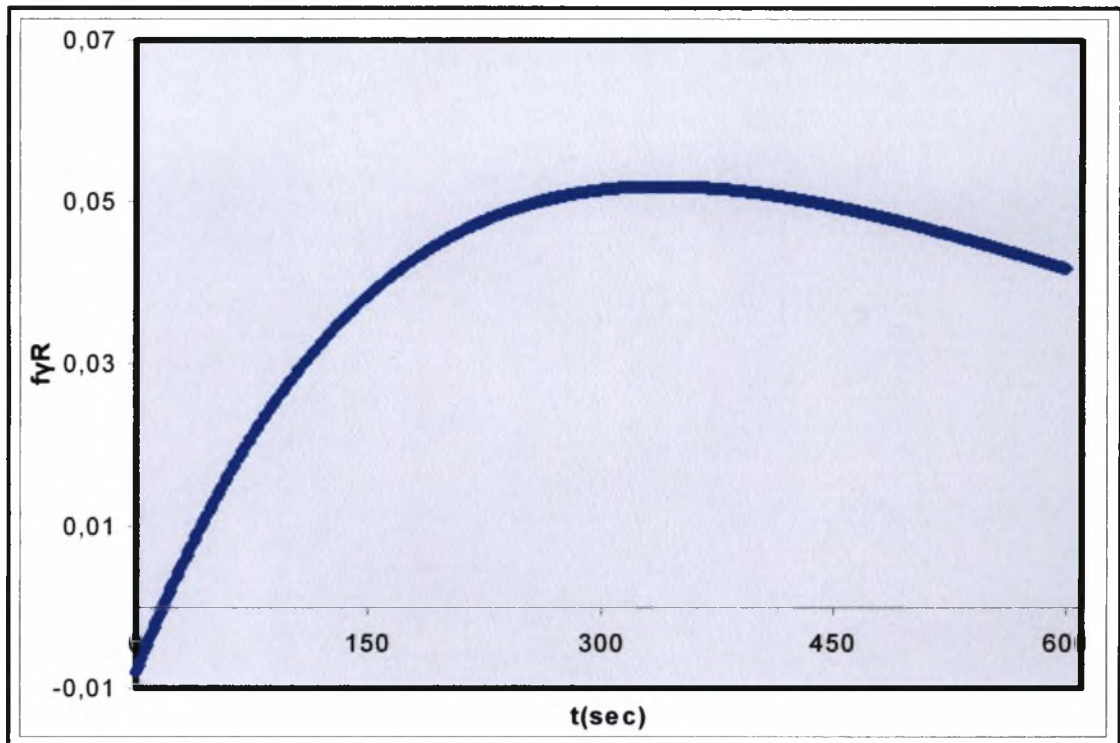
$$f_{\gamma_R}(t) = 60.93210774 \times [(0.99639 + 3.61 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.61 \times 10^{-3} \times (t - 1.117)) - (1 + 3.61 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.61 \times 10^{-3} t)]$$

- Για lab2 (450 °C)

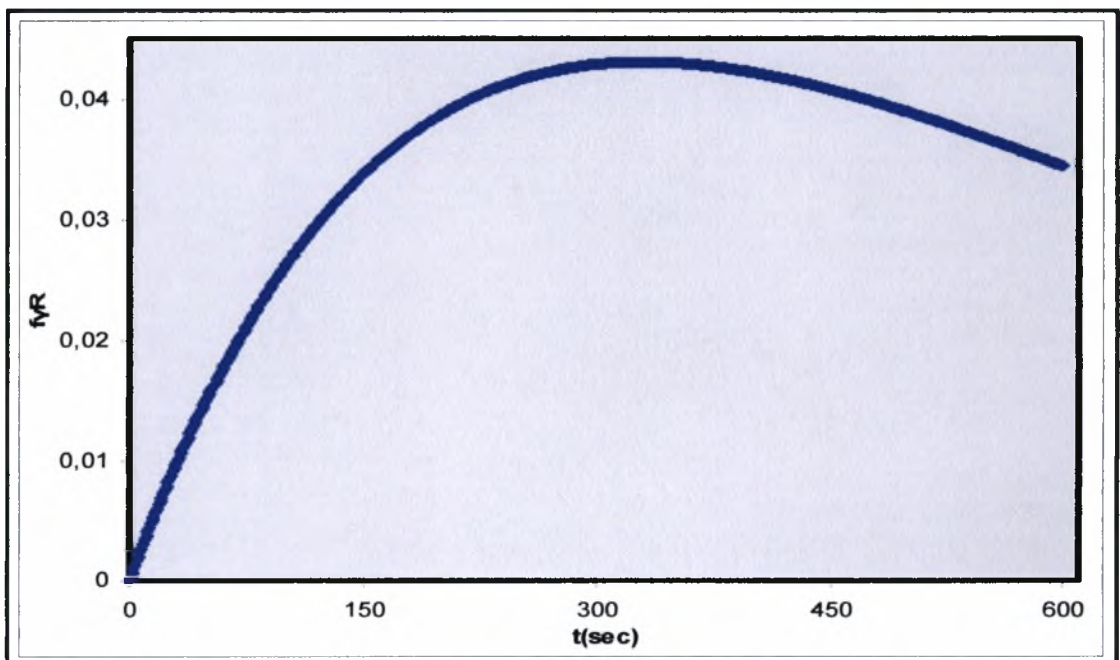
$$f_{\gamma_R}(t) = 82.38113465 \times [(0.99655622 + 8.42 \times 10^{-3} t) \times \exp(-8.42 \times 10^{-3} \times (t - 0.409)) - (1 + 8.42 \times 10^{-3} t) \times \exp(-8.42 \times 10^{-3} t)]$$

Στις παραπάνω σχέσεις που έχουν αντικατασταθεί τα δεδομένα προκύπτει η τιμή για το κλάσμα όγκου του ωστενίτη (f_{γ_R}) σε σχέση με το χρόνο, αφού στην αρχή του μπαινιτικού μετασχηματισμού η τιμή του κλάσματος όγκου που είχε υπολογισθεί για τον ωστενίτη (f_{γ}^o) είναι η μέγιστη δυνατή με βάση την θερμοκρασία ανόπτησης για την οποία υπολογίστηκε.

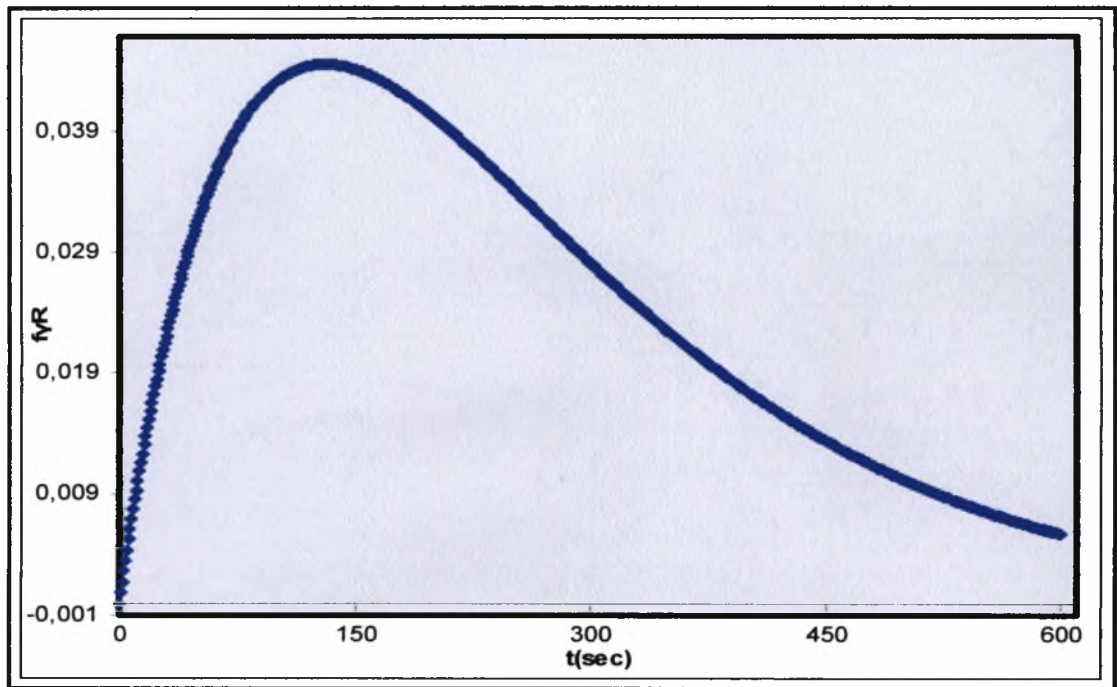
Οι γραφικές παραστάσεις των παραπάνω σχέσεων φαίνονται παρακάτω (Εικόνες 4.22 – 4.27)



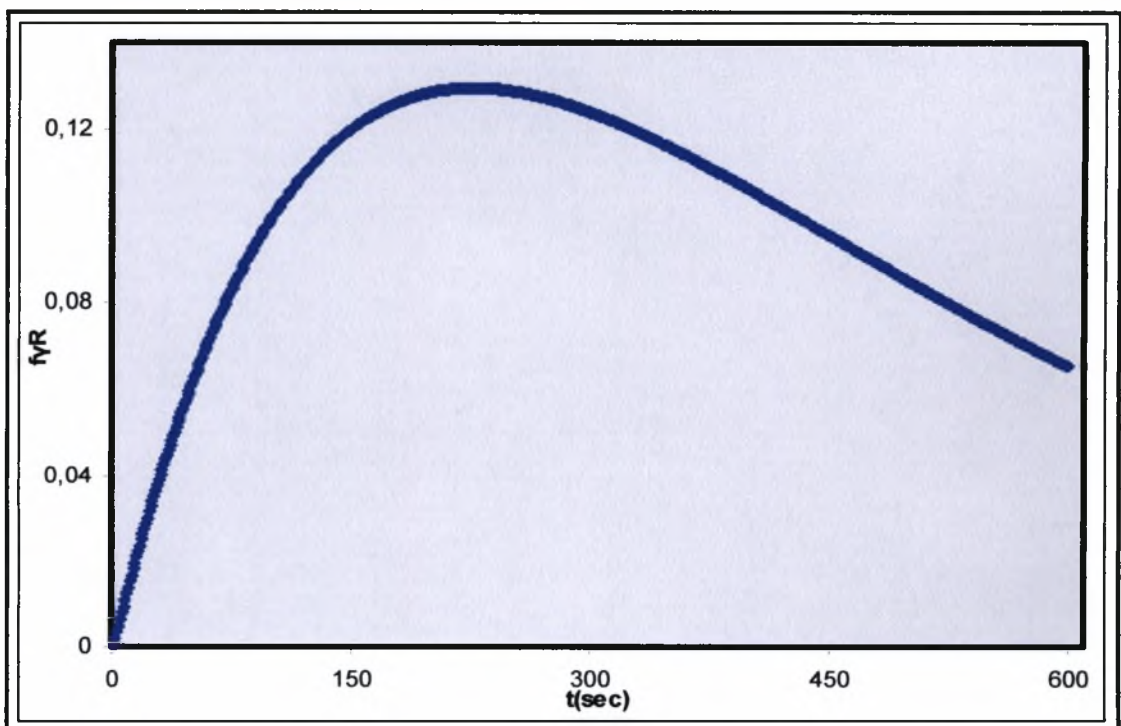
Εικόνα 4.22 : Απεικονίζεται η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένουνα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T= 623K$ για τον χάλυβα lab1



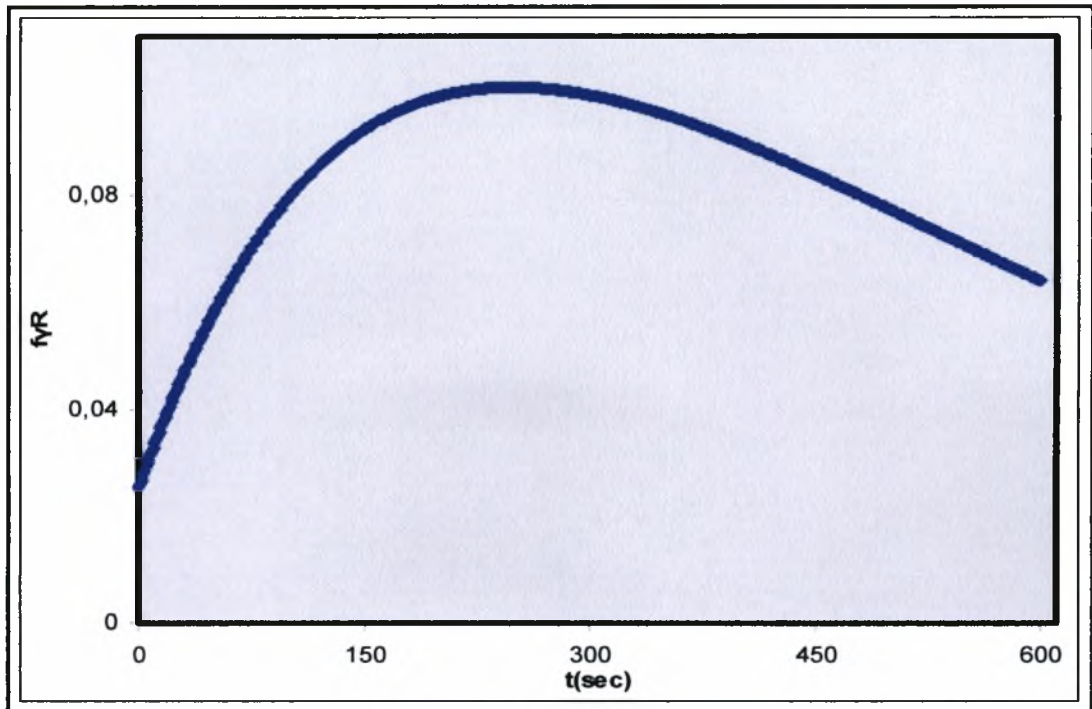
Εικόνα 4.23 : Απεικονίζεται η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένουνα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T= 673K$ για τον χάλυβα lab1



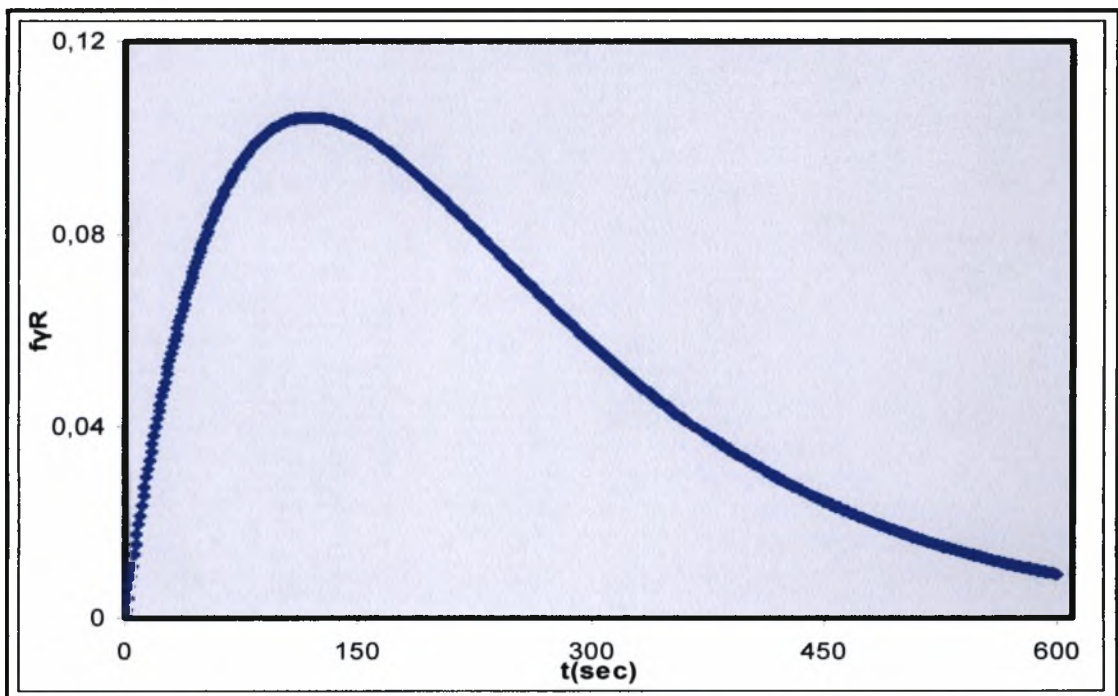
Εικόνα 4.24 : Απεικονίζεται η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένουνα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T= 723K$ για τον χάλυβα lab1



Εικόνα 4.25 : Απεικονίζεται η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένουνα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T= 623K$ για τον χάλυβα lab2



Εικόνα 4.26 : Απεικονίζεται η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένουνα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T= 673K$ για τον χάλυβα lab2



Εικόνα 4.27 : Απεικονίζεται η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένουνα ωστενίτη σαν συνάρτηση του χρόνου για θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού $T= 723K$ για τον χάλυβα lab2

Επομένως, πλέον μπορεί να βρεθεί με μαθηματικό τρόπο το ποσό του παραμένοντα ωστενίτη στην τελική δομή του χάλυβα αποφεύγοντας την διαδικασία του πειράματος.

Για να ελεγχθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο που αναλύεται σε αυτό το κεφάλαιο, όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή του, γίνεται άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτήν με τα πειραματικά αποτελέσματα που διατίθενται. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν με τους δυο διαφορετικούς τρόπους, πειραματικά και υπολογιστικά έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακες 4.16 – 4.17) δίνονται οι πειραματικές και οι υπολογιστικές τιμές για τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες μπεινιτικού μετασχηματισμού που μελετήσαμε σε τρεις διαφορετικές χρονικές διάρκειες αυτού.

Πίνακας 4.16 : Απεικονίζονται οι πειραματικές και οι υπολογιστικές τιμές που προέκυψαν για το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη στον χάλυβα lab1.

Lab1			
T _{BIT} =350 °C			
t _{BIT} (sec)	Πειραματική τιμή	Υπολογιστική τιμή	Απόκλιση (%)
200	0.054	0.045	16.66
400	0.045	0.051	-13.33
600	0.048	0.041	14.58
T _{BIT} =400 °C			
200	0.041	0.038	7.31
400	0.038	0.042	9.52
600	0.037	0.034	8.10
T _{BIT} =450 °C			
200	0.041	0.040	2.43
400	0.014	0.017	21.42
600	0.011	0.005	54.5

Πίνακας 4.17 : Απεικονίζονται οι πειραματικές και οι υπολογιστικές τιμές που προέκυψαν για το κλάσμα όγκου του παραμένουσα ωστενίτη στον χάλυβα lab2.

Lab2			
T _{BIT} =350 °C			
t _{BIT} (sec)	Πειραματική τιμή	Υπολογιστική τιμή	Απόκλιση (%)
200	0.133	0.128	3.75
400	0.095	0.106	-10.37
600	0.074	0.065	12.1
T _{BIT} =400 °C			
200	0.091	0.098	-7.6
400	0.074	0.089	-20.2
600	0.068	0.064	5.8
T _{BIT} =450 °C			
200	0.089	0.088	1.12
400	0.032	0.032	0
600	0.011	0.009	1.8

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τον lab2 παρατηρείται ότι η απόκλιση μεταξύ των τιμών κυμαίνεται από 0 έως 20.2 % ενώ για τον lab1 από 2.43 έως 54.5 αντίστοιχα. Οι αποκλίσεις, αν εξαιρεθούν κάποιες περιπτώσεις όπου η απόκλιση είναι μεγάλη, είναι φυσιολογικές εάν ληφθεί υπόψη ότι κατά την πειραματική διαδικασία υπάρχουν κάποια σφάλματα και ότι στην υπολογιστική μέθοδο έχουν γίνει κάποιες παραδοχές ενώ υπεισέρχεται και το σφάλμα των στρογγυλοποιήσεων κατά τους υπολογισμούς, το οποίο βέβαια έγινε προσπάθεια να μειωθεί στο μέγιστο δυνατό λαμβάνοντας υπόψη κατά τους υπολογισμούς όλα τα δεκαδικά ψηφία

Επομένως, τελικό συμπέρασμα είναι ότι η μέθοδος δίνει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ποσοστού παραμένουσα ωστενίτη στην τελική δομή του χάλυβα μετά την θερμική του επεξεργασία.

4.5 Ανάλυση Ευαισθησίας Μοντέλου.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της ευαισθησίας του μοντέλου έναντι του αρχικού κλάσματος όγκου της ωστενιτικής φάσης κατά τον μπεινιτικό μετασχηματισμό. Δηλαδή, γίνεται μελέτη κατά πόσο μεταβάλλεται το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη με μεταβολή της αρχικής του ποσότητας (f_{γ}^o) διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές. Για να γίνει αυτή η διαδικασία στην σχέση (4.18) αντικαθίστανται όλες τις μεταβλητές που έχουν υπολογισθεί εκτός της τιμής του αρχικού κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη (f_{γ}^o). Με βάση αυτά η αναφερθείσα σχέση θα γραφεί στην παρακάτω μορφή ανάλογα με την περίπτωση που επιλέγεται :

- Για lab1 (350)

$$f_{\gamma_R}(t) = 103.6293106 f_{\gamma}^o \times \left[(0.99689 + 3.11 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.11 \times 10^{-3} \times (t - 0.95)) - (1 + 3.11 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.11 \times 10^{-3} t) \right]$$

- Για lab1 (400)

$$f_{\gamma_R}(t) = 233.2556363 f_{\gamma}^o \times \left[(0.9989664 + 3.04 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.04 \times 10^{-3} \times (t - 0.34)) - (1 + 3.04 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.04 \times 10^{-3} t) \right]$$

- Για lab1 (450)

$$f_{\gamma_R}(t) = 268.341054 f_{\gamma}^o \times \left[(0.99906792 + 7.64 \times 10^{-3} t) \times \exp(-7.64 \times 10^{-3} \times (t - 0.122)) - (1 + 7.64 \times 10^{-3} t) \times \exp(-7.64 \times 10^{-3} t) \right]$$

- Για lab2 (350)

$$f_{\gamma_R}(t) = 65.38501943 \times f_{\gamma}^o \times \left[(0.984514 + 4.45 \times 10^{-3} t) \times \exp(-4.45 \times 10^{-3} \times (t - 3.48)) - (1 + 4.45 \times 10^{-3} t) \times \exp(-4.45 \times 10^{-3} t) \right]$$

- Για lab2 (400)

$$f_{\gamma_R}(t) = 175.2486529 \times f_{\gamma}^o \times \left[(0.99639 + 3.61 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.61 \times 10^{-3} \times (t - 1.117)) - (1 + 3.61 \times 10^{-3} t) \times \exp(-3.61 \times 10^{-3} t) \right]$$

- Για lab2 (450)

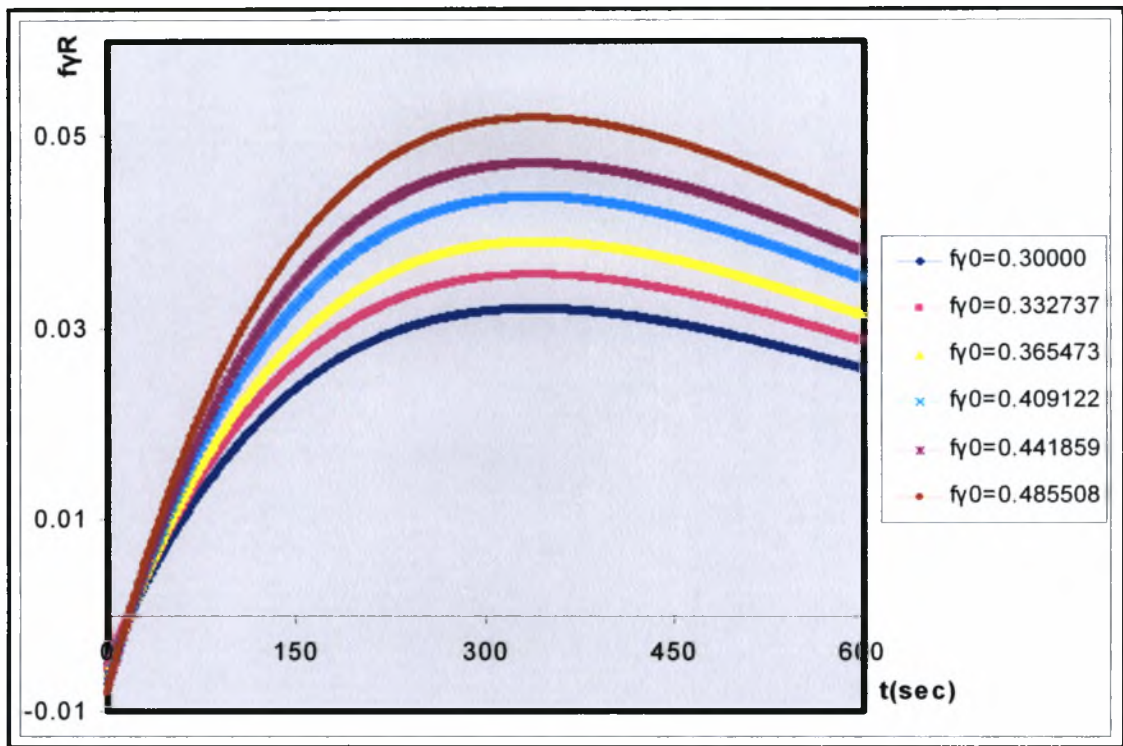
$$f_{\gamma R}(t) = 236.9388391 \times f_{\gamma}^o \times \left[(0.99655622 + 8.42 \times 10^{-3} t) \times \exp(-8.42 \times 10^{-3} \times (t - 0.409)) - (1 + 8.42 \times 10^{-3} t) \times \exp(-8.42 \times 10^{-3} t) \right]$$

Για να ελεγχθεί η ευαισθησία του μοντέλου στον αρχικό όγκο παραμένοντα ωστενίτη μεταβάλλεται αυτός στο διάστημα (0.3000 – 0.48550757) για τον χάλυβα lab1 και στο διάστημα (0.25000- 0.34768945) για τον χάλυβα lab2 και μελετείται η διακύμανση του κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη για το χρονικό διάστημα των πρώτων εξακοσίων δευτερολέπτων (t=600 sec). Για το κλάσμα όγκου του αρχικού όγκου ωστενίτη επιλέγονται οι τιμές που φαίνονται στο πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4.18) για τον κάθε χάλυβα.

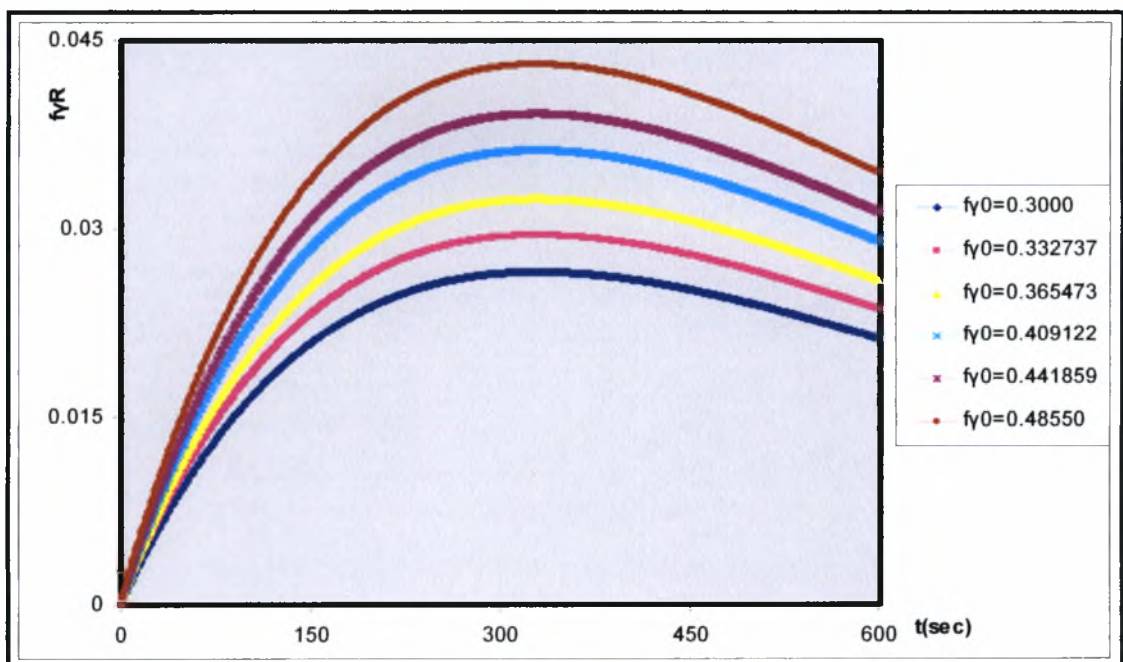
Πίνακας 4.18 : Απεικονίζονται οι τιμές του αρχικού κλάσματος όγκου για τον οποίο κάνουμε ανάλυση ευαισθησίας για τον κάθε χάλυβα.

f_{γ}^o	
Lab1	Lab2
0.30000	0.250000
0.31091221	0.255746438
0.32182442	0.261492876
0.33273663	0.267239314
0.34364884	0.272985752
0.35456105	0.27873219
0.36547326	0.284478628
0.37638547	0.290225065
0.38729768	0.295971504
0.39820989	0.301717942
0.4091221	0.30746438
0.42003431	0.313210818
0.43094652	0.318957256
0.44185873	0.324703694
0.45277094	0.330450132
0.46368315	0.33619657
0.48550757	0.34768945

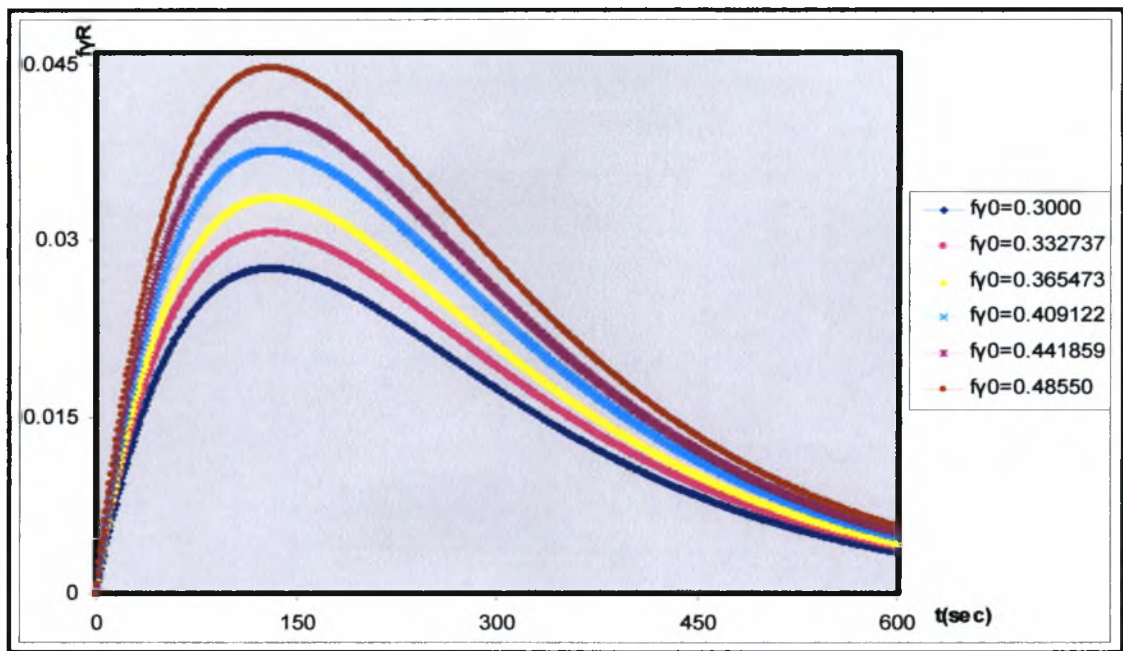
Με αντικατάσταση ορισμένων ενδεικτικών τιμών από τις παραπάνω στις τελευταίες σχέσεις και με την μεταβλητή του χρόνου (t) να λαμβάνει τιμές στο διάστημα ($0 - 600 \text{ sec}$) με βήμα ένα, προκύπτουν τα έξι διαγράμματα που ακολουθούν (Εικόνες 4.28 – 4.33) στα οποία δείχνεται η επίδραση του αρχικού κλάσματος όγκου ωστενίτη στην αρχή του μαινιτικού μετασχηματισμού στον τελικό κλάσμα όγκου παραμένοντα ωστενίτη. Για τις υπόλοιπες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη προκύπτουν ανάλογες καμπύλες.



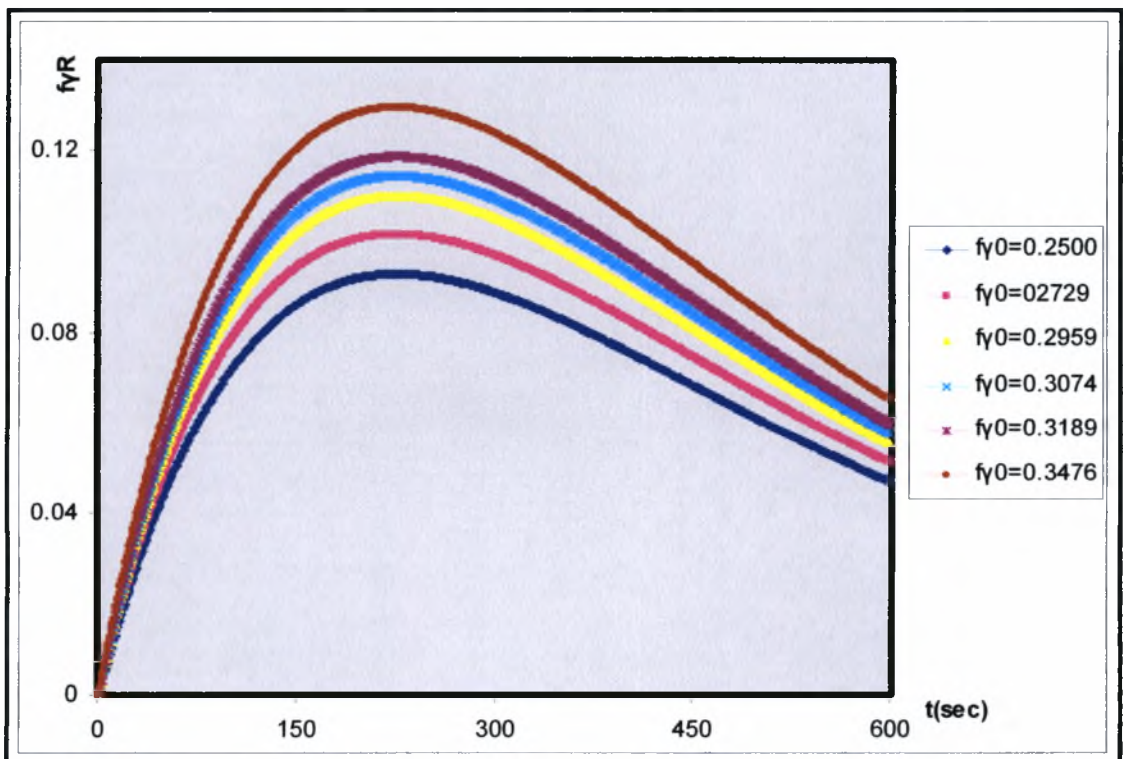
Εικόνα 4.28 : Απεικονίζεται οι καμπύλες του κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab1 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπεινιτική θερμοκρασία $T=623\text{ K}$



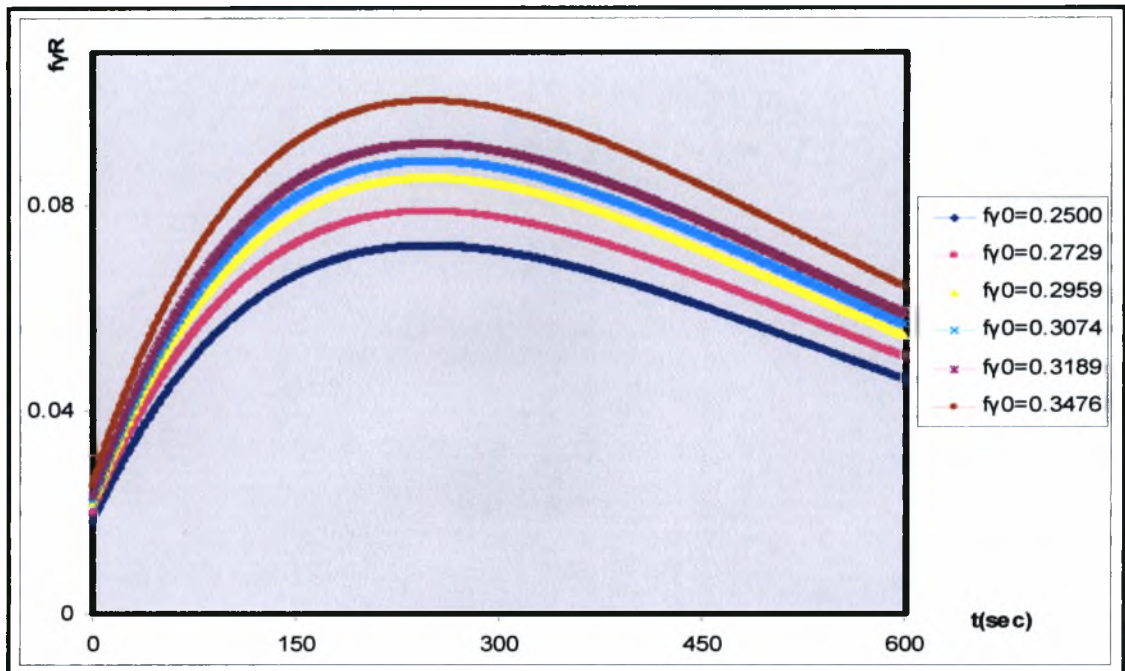
Εικόνα 4.29 : Απεικονίζεται οι καμπύλες του κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab1 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπεινιτική θερμοκρασία $T=673\text{ K}$



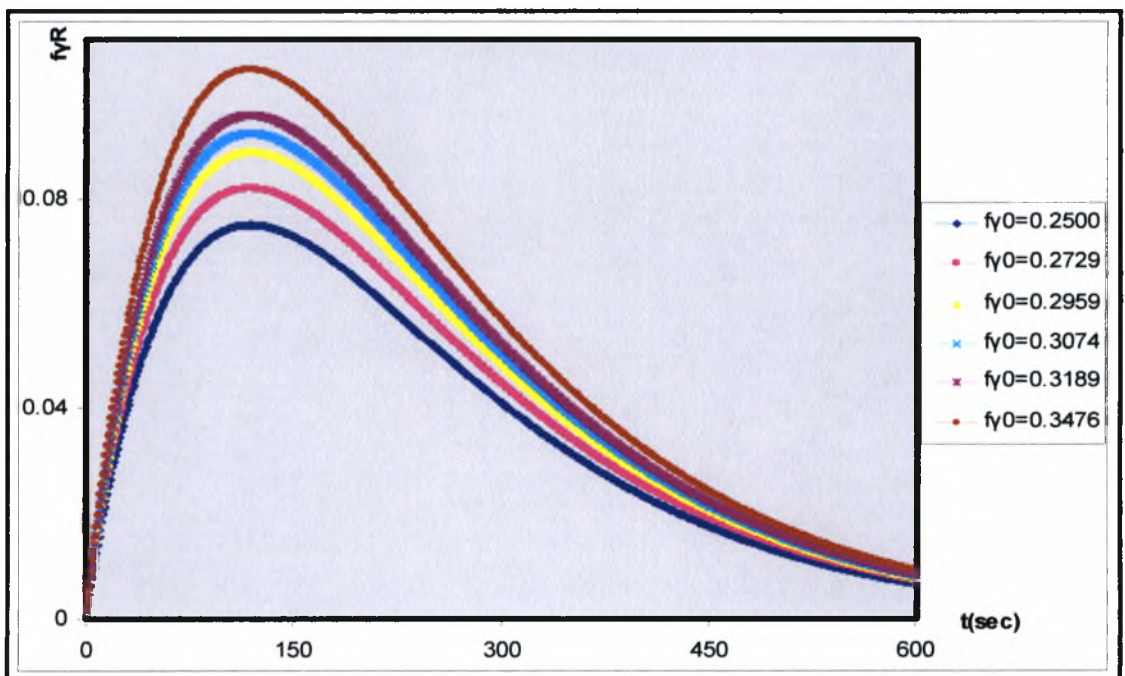
Εικόνα 4.30 : Απεικονίζεται οι καμπύλες του κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab1 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπεινιτική θερμοκρασία $T=723\text{ K}$



Εικόνα 4.31 : Απεικονίζεται οι καμπύλες του κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab2 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπεινιτική θερμοκρασία $T=623\text{ K}$



Εικόνα 4.32 : Απεικονίζεται οι καμπύλες του κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab2 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπεινιτική θερμοκρασία $T=673\text{ K}$



Εικόνα 4.33 : Απεικονίζεται οι καμπύλες του κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη του χάλυβα lab2 συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές αρχικού κλάσματος όγκου παραμένοντα και για μπεινιτική θερμοκρασία $T=723\text{ K}$

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι καμπύλες ανεξάρτητα από την τιμή που έχει το αρχικό κλάσμα όγκου έχουν παρόμοια μορφή. Παρατηρείται ότι μόνο η ποσότητα του παραμένουτος ωστενίτη μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή του f_p^o αλλά ακολουθεί ανάλογη μεταβολή σε σχέση με το χρόνο. Επίσης, αν συγκριθούν οι καμπύλες που προκύπτουν από τα τρία διαγράμματα, παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από την μπεινιτική θερμοκρασία μετασηματισμού για το lab2 το ποσό παραμένουτα ωστενίτη παρουσιάζει μέγιστο στην περιοχή των 250 δευτερολέπτων από την έναρξη για τις δυο πρώτες θερμοκρασίες ενώ για την τελευταία παρουσιάζει μέγιστο έπειτα από 150 δευτερόλεπτα, ενώ για το lab1 παρουσιάζει μέγιστο στην περιοχή των 300 δευτερολέπτων για τις δυο πρώτες θερμοκρασίες ενώ για την τελευταία παρουσιάζει μέγιστο στα 150 δευτερόλεπτα από την έναρξη, κάτι που αναμενόταν καθώς όσο αυξάνει η θερμοκρασία αυξάνει ταυτόχρονα και ο ρυθμός με τον οποίο διαχέεται ο άνθρακας στο εσωτερικό των ωστενιτικών στρωμάτων. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για μικρές μεταβολές του αρχικού κλάσματος όγκου παραμένουτα ωστενίτη δεν υπάρχουν μεγάλες μεταβολές στο τελικό κλάσμα όγκου παραμένουτα ωστενίτη σε συνάρτηση με το χρόνο.

Κεφάλαιο Πέμπτο

Μοντέλο Σταθερότητας Παραμένοντα Ωστενίτη (M_s^σ)

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό της εργασίας εφαρμόζεται για τους χάλυβες lab1 και lab2, με τους οποίους ασχοληθήκαμε στο τέταρτο κεφάλαιο, το μαθηματικό μοντέλο σταθερότητας παραμένοντα ωστενίτη (M_s^σ). Σκοπός είναι να παρατηρηθεί για τους χάλυβες που έχουν αναφερθεί η σταθερότητα της διασποράς που παρουσιάζει ο παραμένοντας ωστενίτης και που σε αυτό ακριβώς το φαινόμενο οφείλεται η αυξημένη αντοχή και ολκιμότητα των χαλύβων TRIP. Πριν παρουσιασθεί η διαδικασία η οποία θα ακολουθηθεί κατά τους υπολογισμούς του μοντέλου, θα περιγραφεί η θερμοκρασία M_s^σ , η οποία χρησιμοποιείται από το μοντέλο και εν ολίγοις μέσω αυτού υπολογίζεται. Η M_s^σ είναι η θερμοκρασία στην οποία η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση ισούται με το όριο διαρροής της ωστενιτικής φάσης. Η σημαντικότητα αυτής της θερμοκρασίας, της M_s^σ έγκειται στο γεγονός ότι αποτελεί ένα κριτήριο για τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός: για θερμοκρασίες μικρότερες από αυτήν ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός υποβοηθάται από τάση ενώ για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτήν ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός υποβοηθάται από την πλαστική παραμόρφωση.

Σ' αυτό το κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια να μελετηθεί για τους δυο χάλυβες με τους οποίους θα ασχοληθεί, και αν είναι δυνατόν να προκύψουν κάποια γενικά συμπεράσματα, πως μεταβάλλεται, εφόσον υπάρχει μεταβολή, η θερμοκρασία M_s σε σχέση με τις παραμέτρους όπως τις συστάσεις των κραματικών στοιχείων, την θερμοκρασία και διάρκεια μπεινιτικού μετασχηματισμού. Οπότε θα υπολογισθεί η θερμοκρασία M_s για καθέναν από τους δύο χάλυβες σε καθεμία περίπτωση από τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες ισόθερμου μπεινιτικού μετασχηματισμού που δίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1)

Πίνακας 5.1: Απεικονίζονται οι θερμοκρασίες ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού

Θερμοκρασία ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} (K)		
623	673	723

5.2 Αρχικά Δεδομένα Μοντέλου

Αυτό το μοντέλο βασίζεται στα αποτελέσματα και στα δεδομένα που έχουν προκύψει από το προηγούμενο κεφάλαιο. Για να υπολογισθεί η θερμοκρασία M_s^σ , που είναι μια συνάρτηση της μορφής :

$$M_s^\sigma = M_s^\sigma (X_c, X_{Mn}, \bar{V}_p, \sigma_y, \frac{\bar{\sigma}_h}{\sigma})$$

όπου:

X_c : είναι η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα

X_{Mn} : είναι η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε μαγγάνιο

\bar{V}_p : είναι η τιμή του μέσου όγκου των σωματιδίων ωστενίτη

σ_y : είναι το όριο διαρροής του ωστενίτη

$\frac{\bar{\sigma}_h}{\sigma}$: είναι ο λόγος της υδροστατικής προς την ισοδύναμη τάση

πρέπει αρχικά να υπολογισθεί μια μέση τιμή του πάχους των σωματιδίων ωστενίτη \bar{s}_{γ_R} , την τιμή του μέσου όγκου (\bar{V}_p) των σωματιδίων ωστενίτη και τις τιμές των συστάσεων σε άνθρακα και μαγγάνιο του ωστενίτη που αντιστοιχούν στην μέση τιμή του πάχους που θα υπολογισθεί.

Η τιμή του μέσου όγκου των σωματιδίων ωστενίτη μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση :

$$\bar{V}_p = \frac{L_{SU}^2 \int_0^{\tau_f} s_{\gamma_R}(\tau) d\tau}{\tau_f} \quad (5.1)$$

όπου

L_{SU} : το μήκος των σωματιδίων μαινιτικού φερρίτη, όπως υπολογίστηκε στο τέταρτο κεφάλαιο

s_{γ_R} : το πάχος των σωματιδίων παραμένοντα ωστενίτη, όπως υπολογίστηκε στο τέταρτο κεφάλαιο

τ_f : ο χρόνος που μένει «ενεργό» ένα σωματίδιο μαινιτικού φερρίτη

Οπότε κάνοντας χρήση των δεδομένων που έχουν υπολογισθεί στο τέταρτο κεφάλαιο για κάθε θερμοκρασία μαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} , όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2, καταλήγει στα αποτελέσματα που δίνονται στον Πίνακα 5.3

Πίνακας 5.2 : Απεικονίζονται τα αρχικά δεδομένα που έχουν υπολογιστεί στο τέταρτο κεφάλαιο και γίνεται χρήση τους σε αυτό το κεφάλαιο

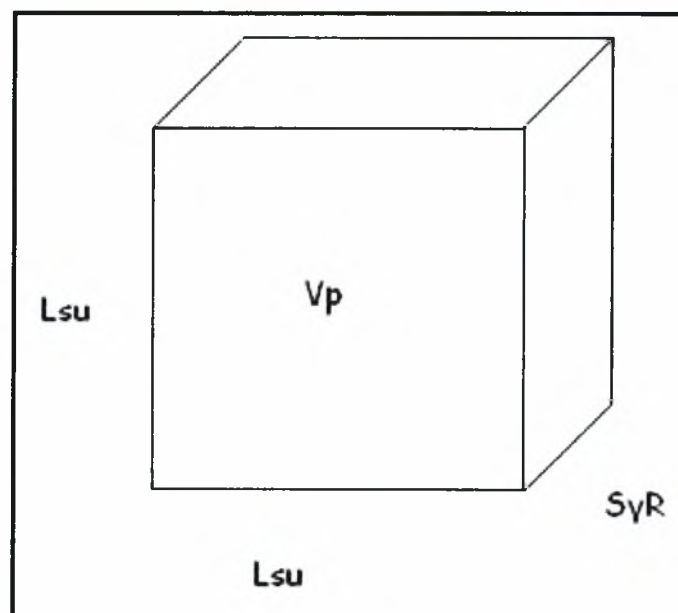
Lab1	L_{SU} (m)	$\int_0^{\tau_f} s_{\gamma_R}(\tau) d\tau$ (m s)	τ_f (s)
$T_{BIT} = 623$ (K)	6.333E-6	6.79571E-9	0.95
$T_{BIT} = 673$ (K)	9.666E-6	3.57967E-9	0.34
$T_{BIT} = 723$ (K)	13.00E-6	1.67382E-9	0.122
Lab2			
$T_{BIT} = 623$ (K)	6.333E-6	4.76528E-8	3.48
$T_{BIT} = 673$ (K)	9.666E-6	2.37663E-8	1.117
$T_{BIT} = 723$ (K)	13.00E-6	1.09513E-8	0.409

Πίνακας 5.3 : Απεικονίζονται οι τιμές για τον μέσο όγκο που προκύπτουν από εφαρμογή της σχέσης (5.1)

$T_{BIT} (K)$	623	673	723
	<i>Lab1</i>		
$\bar{V}_p (m^3)$	2.868997754E-19	9.836886414E-19	2.318652295E-18
	<i>Lab2</i>		
$\bar{V}_p (m^3)$	5.49197E-19	1.9879341E-18	4.525109291E-18

Στη συνέχεια θέλουμε να υπολογισθεί η περιεκτικότητα άνθρακα των σωματιδίων ωστενίτη. Όμως λόγω του ότι η περιεκτικότητα δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου υπολογίζεται μια μέση τιμή. Για να υπολογισθεί αυτή η μέση τιμή πρέπει πρώτα να καθορισθεί μια μέση τιμή του πάχους (\bar{s}_{γ_R}). Όμως είναι γνωστό ότι ο μέσος όγκος των σωματιδίων ωστενίτη όπως φαίνεται στη εικόνα 5.1 δίνεται εναλλακτικά από την σχέση :

$$\bar{V}_p = L_{SU} \bar{s}_{\gamma_R} \quad (5.2)$$



Εικόνα 5.1 : Απεικονίζεται ένα σωματίδιο παραμένοντα ωστενίτη

Μετασχηματίζοντας την σχέση (5.2) στην μορφή :

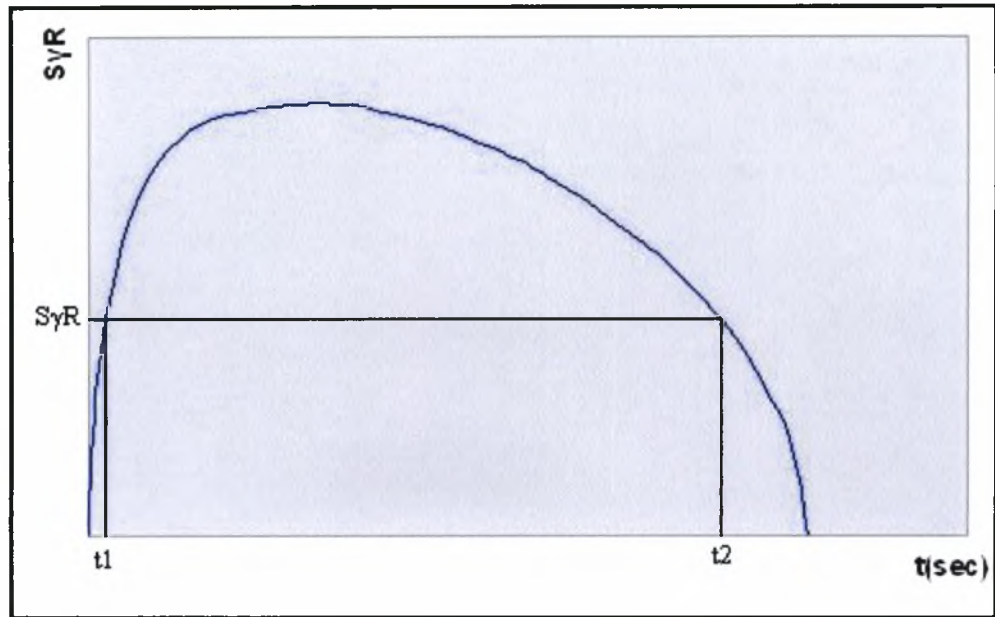
$$\bar{s}_{\gamma_R} = \frac{\bar{V}_p}{L_{SU}^2} \quad (5.3)$$

και χρησιμοποιώντας τις τιμές του Πίνακα (5.2) καταλήγει στις τιμές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακα 5.4) για το μέσο πάχος \bar{s}_{γ_R} .

Πίνακας 5.4 : Απεικονίζονται οι τιμές του μέσου πάχους που προέκυψαν από εφαρμογή της σχέσης (5.3) για τα δεδομένα του Πίνακα (5.2)

$T_{BIT} (K)$	623	673	723
	<i>Lab1</i>		
$\bar{s}_{\gamma_R} (m)$	7.15337706E-9	10.52844116E-9	13.71983607E-9
	<i>Lab2</i>		
$\bar{s}_{\gamma_R} (m)$	1.3693333E-8	2.127690242E-8	2.67579462E-8

Όμως για να υπολογισθούν οι περιεκτικότητες σε άνθρακα του ωστενίτη για τους δυο χάλυβες και για την κάθε θερμοκρασία μαινιτικού μετασχηματισμού πρέπει να υπολογισθεί καταρχήν ο χρόνος για τον οποίο το πάχος του σωματιδίου ισούται με το μέσο πάχος που έχει υπολογισθεί νωρίτερα από την αρχή του ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού. Για να υπολογισθεί ο χρόνος γίνεται χρήση των καμπύλων που είχαν προκύψει στο τέταρτο κεφάλαιο (Εικόνες 4.9 – 4.14) και περιγράφανε το πάχος του σωματιδίου σε συνάρτηση με το χρόνο, από τις οποίες παρατηρείται ότι αυτή η τιμή του μέσου πάχους αντιστοιχεί σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες, έστω t_1 και t_2 όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2 : Απεικονίζεται η καμπύλη του πάχους του σωματιδίου ωστενίτη σε συνάρτηση του χρόνου και φαίνεται ότι η τιμή του μέσου πάχους λαμβάνεται σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές.

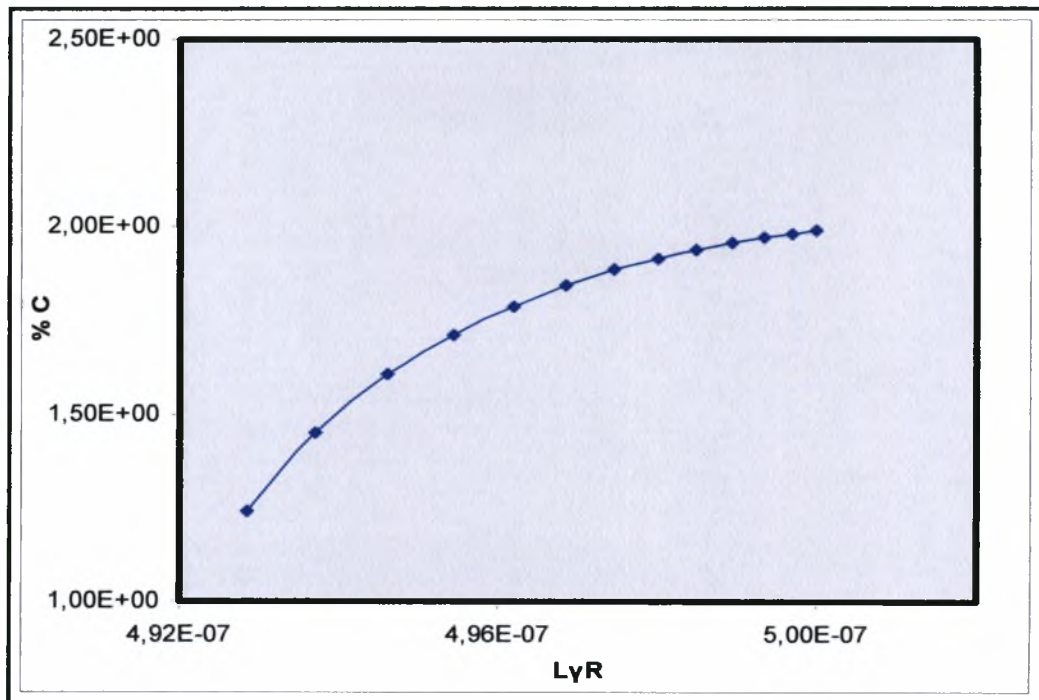
Οι τιμές αυτές για τις t_1 και t_2 απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.5) και προέκυψαν με βάση τις καμπύλες των Εικόνων (4.9) – (4.14).

Πίνακας 5.5 : Απεικονίζονται οι τιμές των χρονικών στιγμών t_1 και t_2

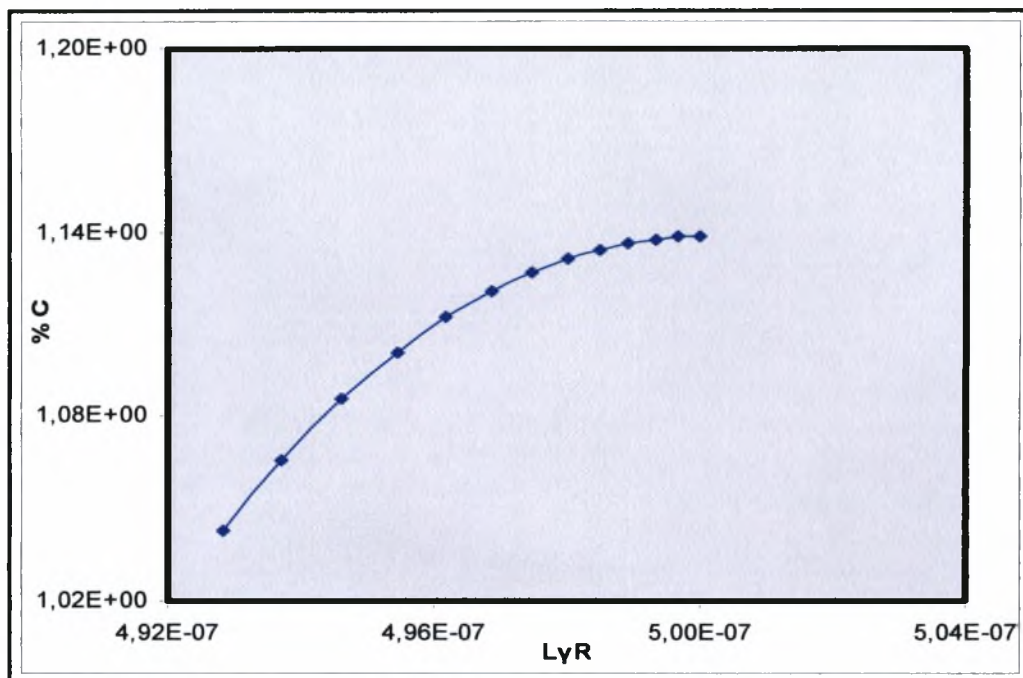
T_{BIT} (K)	623	673	723
	<i>Lab1</i>		
t_1 (s)	0.071234404	0.028569943	0.014354227
t_2 (s)	0.644228258	0.23794643	0.089298833
	<i>Lab2</i>		
t_1 (s)	0.138917014	0.072398776	0.028617752
t_2 (s)	2.294079321	0.752250014	0.282233412

Έχοντας υπολογίσει τους χρόνους στους οποίους επιτυγχάνεται πάχος ίσο με το μέσο πάχος του σωματιδίου που επιθυμείται, γίνεται πλέον να υπολογισθεί η μέση τιμή του ποσού άνθρακα που υπάρχει στο εσωτερικό του σωματιδίου, καθώς η περιεκτικότητα

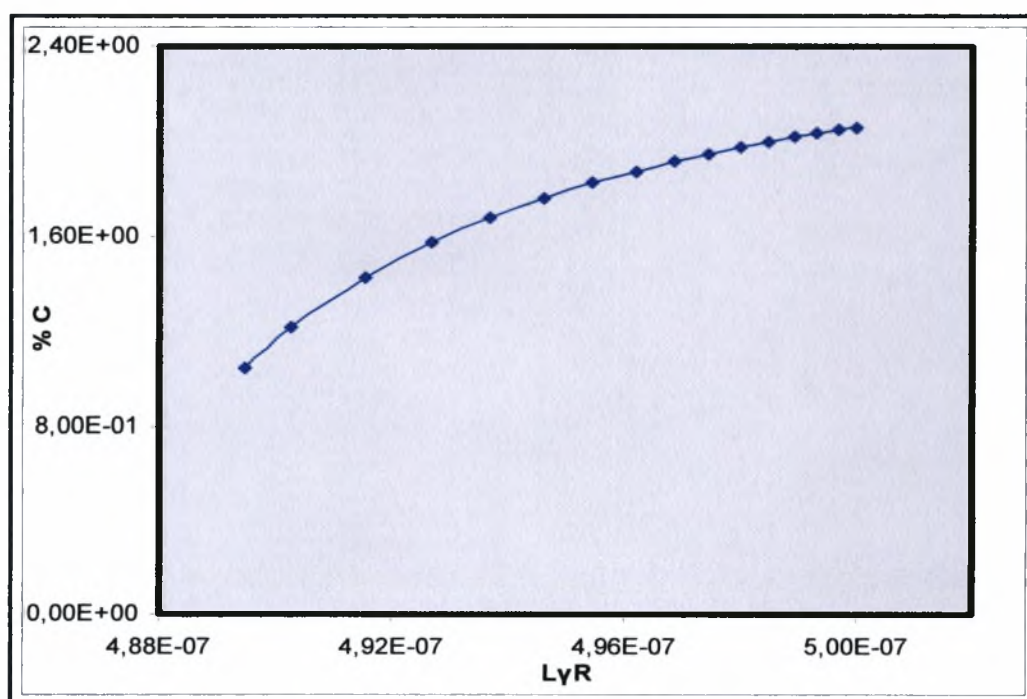
του άνθρακα μεταβάλλεται με την απόσταση του σωματιδίου από την διεπιφάνεια ωστενίτη – φερρίτη. Συνεπώς κάνοντας χρήση του λογισμικού Dictra, όπως και στο τέταρτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας καταλήγει στις παρακάτω καμπύλες (Εικόνες 5.3 – 5.14) περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με την απόσταση από την διεπιφάνεια, με μέγιστη απόσταση προς το εσωτερικό του ωστενίτη ίση με το μέσο πάχος που έχει υπολογισθεί πιο πάνω.



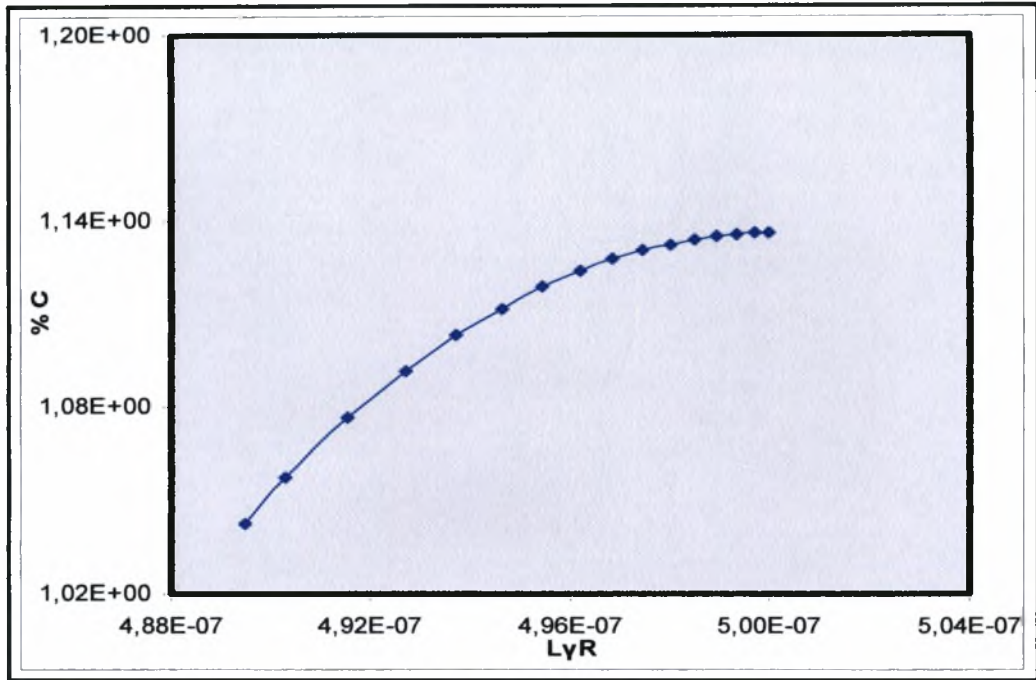
Εικόνα 5.3 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος $L_{\gamma R}$ για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=623K$, τη χρονική στιγμή t_i



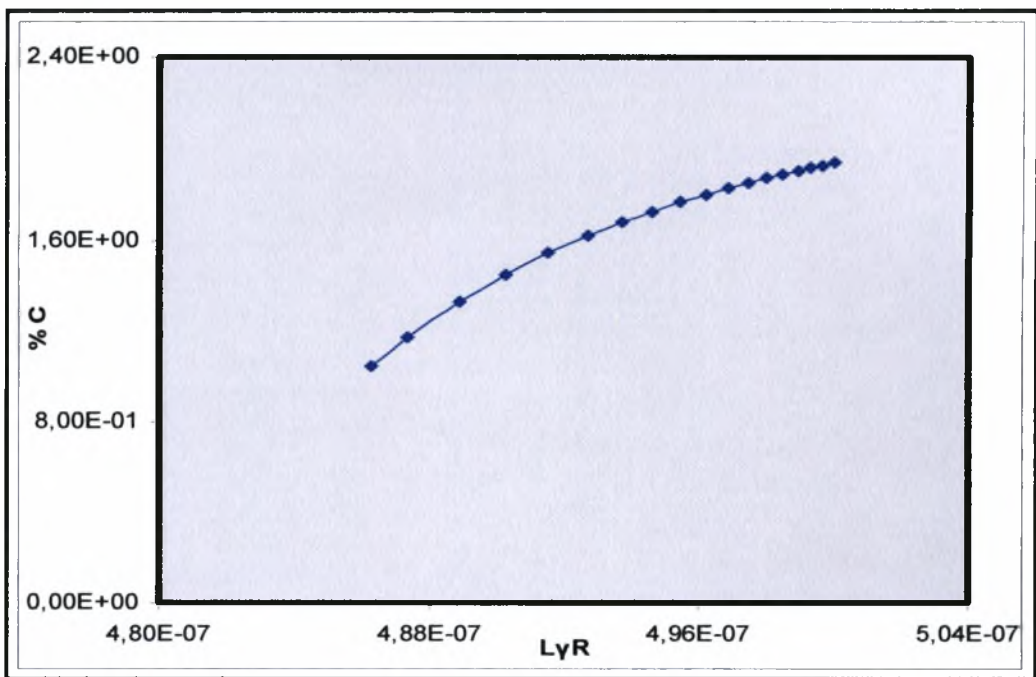
Εικόνα 5.4 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{yR} για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=623K$, τη χρονική στιγμή t_2



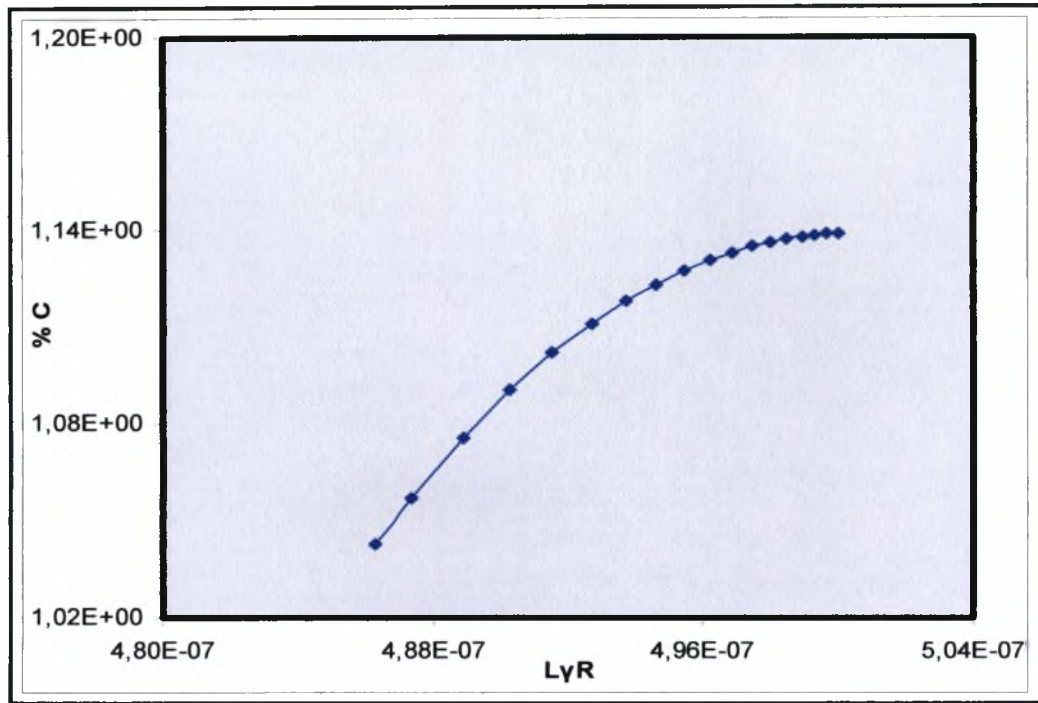
Εικόνα 5.5 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{yR} για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=673K$, τη χρονική στιγμή t_1



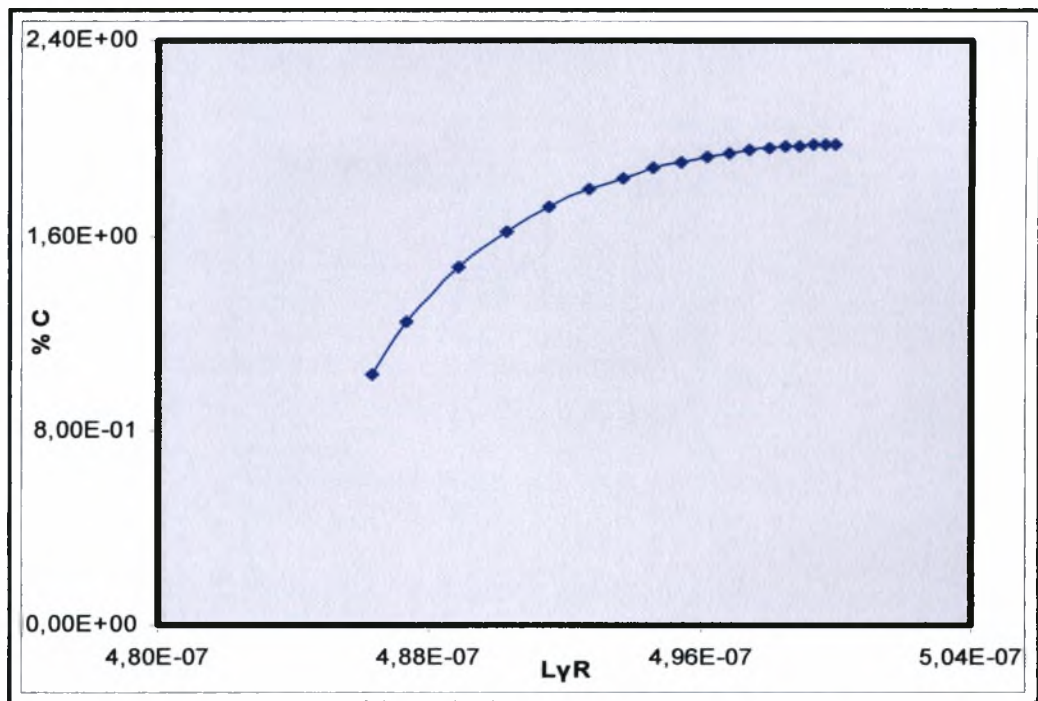
Εικόνα 5.6 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος $L_{\gamma R}$ για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=673K$, τη χρονική στιγμή t_2



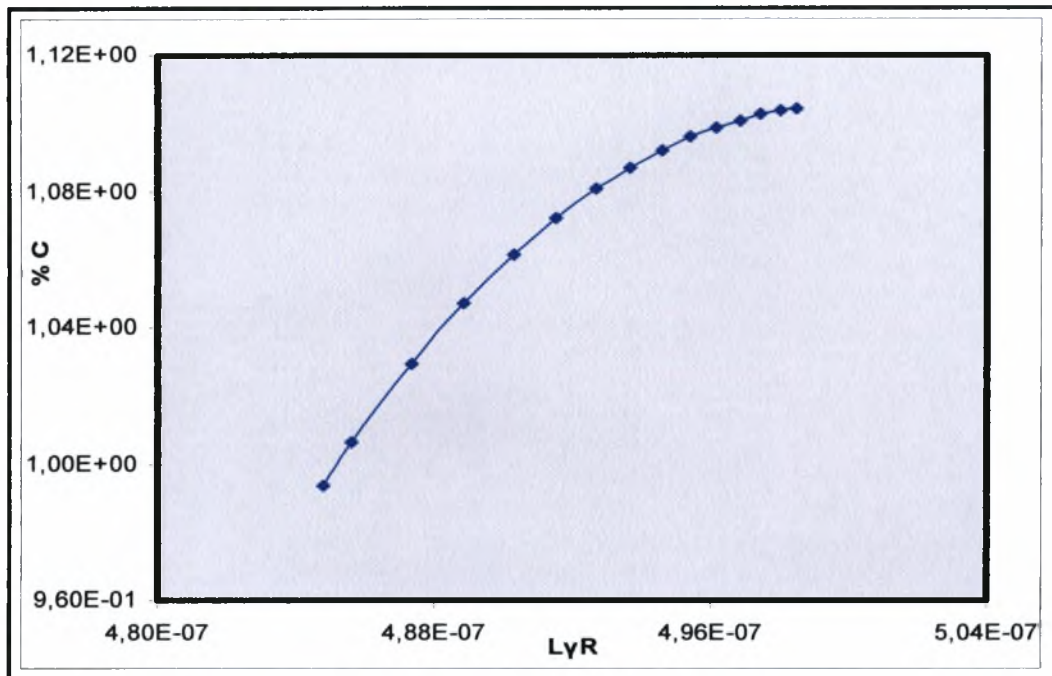
Εικόνα 5.7 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος $L_{\gamma R}$ για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=723K$, τη χρονική στιγμή t_1



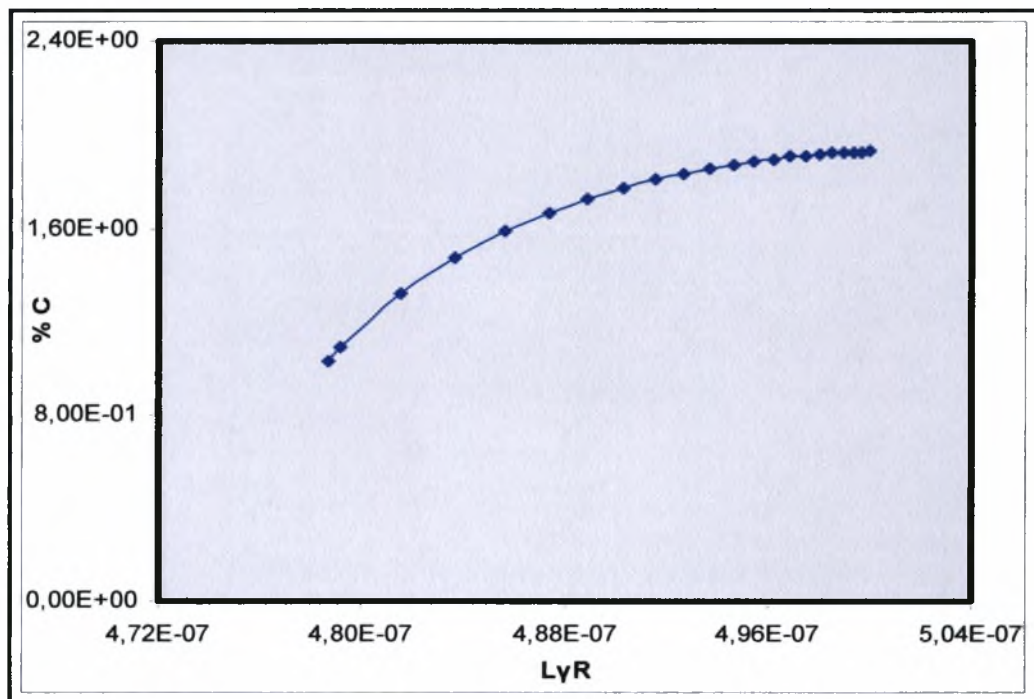
Εικόνα 5.8 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος $L_{\gamma R}$ για τον χάλυβα lab1 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=723K$, τη χρονική στιγμή t_2



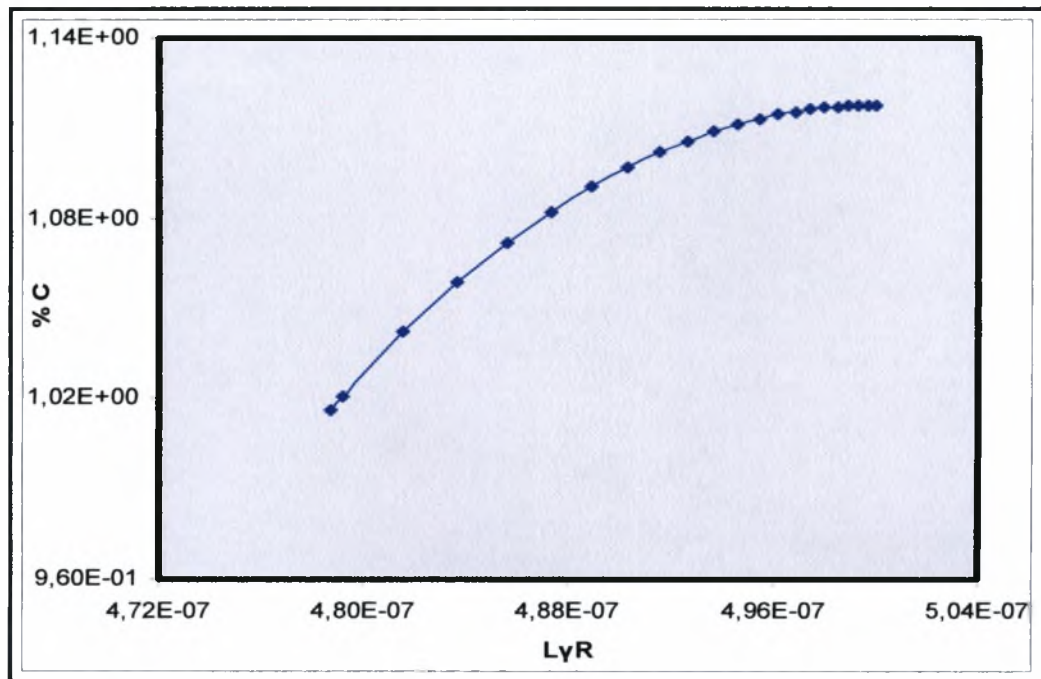
Εικόνα 5.9 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος $L_{\gamma R}$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=623K$, τη χρονική στιγμή t_1



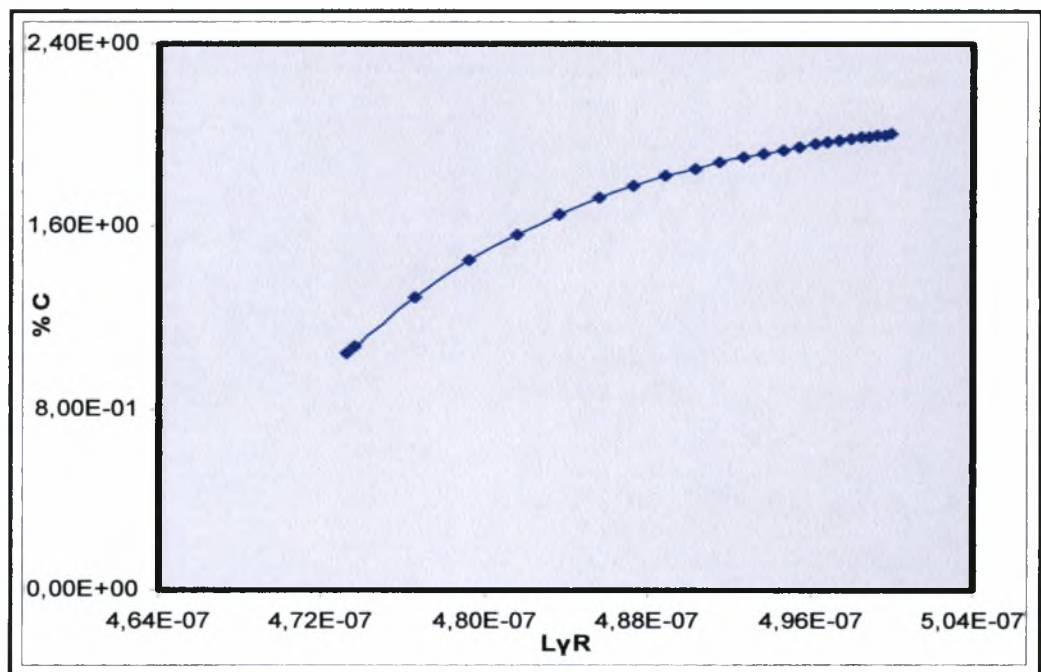
Εικόνα 5.10 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος $L_{\gamma R}$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=623K$, τη χρονική στιγμή t_2



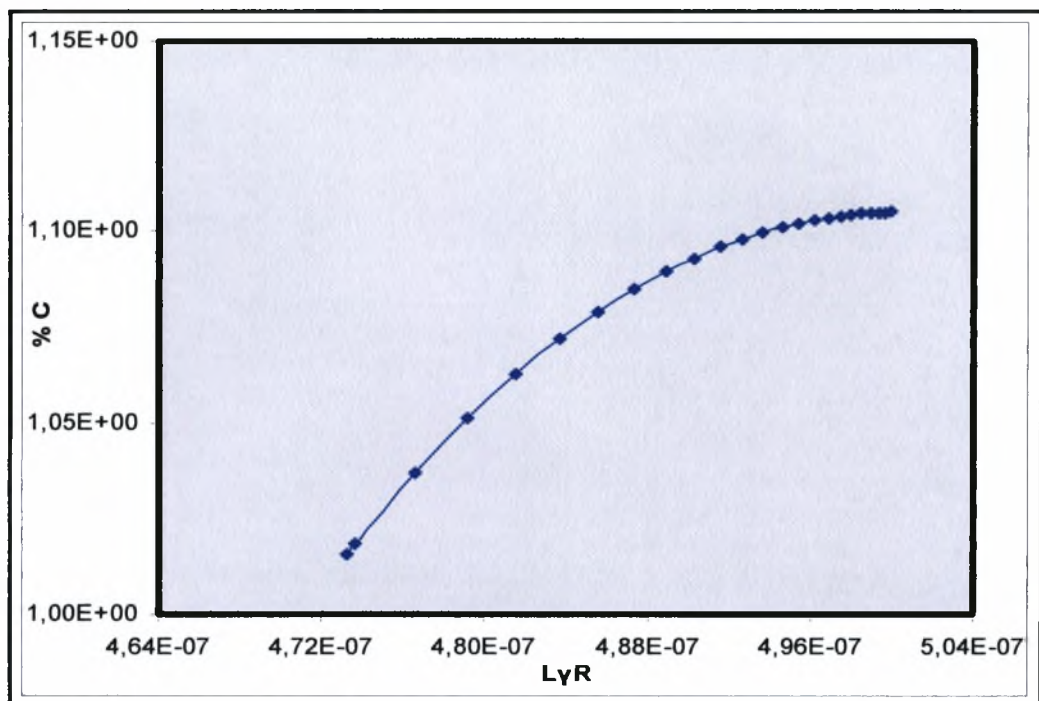
Εικόνα 5.11 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος $L_{\gamma R}$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=673K$, τη χρονική στιγμή t_1



Εικόνα 5.12 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος $L_{\gamma R}$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=673K$, τη χρονική στιγμή t_2



Εικόνα 5.13 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος $L_{\gamma R}$ για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=723K$, τη χρονική στιγμή t_1



Εικόνα 5.14 : Απεικονίζεται η καμπύλη της περιεκτικότητας άνθρακα σε συνάρτηση με το μήκος L_{γ_R} για τον χάλυβα lab2 σε θερμοκρασία $T_{BIT}=723K$, τη χρονική στιγμή t_2

Από τις παραπάνω καμπύλες μπορεί να υπολογισθεί πλέον η μέση τιμή για την περιεκτικότητα του άνθρακα σε κάθε περίπτωση, αρκεί να υπολογισθεί το εμβαδό που περικλείεται από την κάθε καμπύλη και τον οριζόντιο άξονα, καθώς η περιεκτικότητα του άνθρακα ισούται με το λόγο του ολοκληρώματος $\int_0^{l_i} L_{\gamma_R} dt$ όπου $i=1,2$ προς το μέσο πάχος s_{γ_R} . Όμως το ολοκλήρωμα αυτό ισούται με το εμβαδό της καμπύλης και το μέσο πάχος ισούται με το πλάτος της καμπύλης (στον οριζόντιο άξονα). Αν γίνουν οι παραπάνω υπολογισμοί για το ολοκλήρωμα καταλήγει στις τιμές που δίνονται στον πίνακα 5.6

Πίνακα 5.6 : Απεικονίζονται οι τιμές του ολοκληρώματος $\int_0^{t_i} L_{\gamma R} dt$

$T_{BIT} (K)$	623	673	723
	<i>Lab1</i>		
$t_1 (s)$	1.25094E-8	1.79236E-8	2.18908E-8
$t_2 (s)$	7.92003E-9	1.16343E-8	1.51774E-8
	<i>Lab2</i>		
$t_1 (s)$	2.35721E-8	3.53585E-8	4.50101E-8
$t_2 (s)$	1.45824E-8	2.30641E-8	2.87685E-8

Στην συνέχεια από την σχέση $\bar{X}_c = \frac{\int_0^{t_i} L_{\gamma R}}{S_{\gamma R}}$, $i=1,2$ και μετατρέποντας με το λογισμικό

Thermo-calc την περιεκτικότητα σε mol προκύπτουν οι παρακάτω τιμές (Πίνακας 5.7) για την μέση τιμή της περιεκτικότητας (\bar{X}_c) του άνθρακα στα σωματίδια ωστενίτη.

Πίνακας 5.7 : Απεικονίζονται οι τιμές για την μέση περιεκτικότητα άνθρακα του ωστενίτη σε mol

$T_{BIT} (K)$	623	673	723
	<i>Lab1</i>		
$t_1 (s)$	7.6409617E-2	7.452526E-2	7.0105542E-2
$t_2 (s)$	4.7956215E-2	4.9388491E-2	4.9440142E-2
	<i>Lab2</i>		
$t_1 (s)$	7.5285357E-2	7.2850687E-2	7.3688928E-2
$t_2 (s)$	4.766295E-2	4.8483988E-2	4.8102733E-2

Οι αντίστοιχες ποσότητες για τις μέσες τιμές του μαγγανίου, γνωρίζοντας ότι η περιεκτικότητα του μαγγανίου παραμένει σταθερή σε κάθε φάση κατά τον ισόθερμο μπαινιτικό μετασχηματισμό, είναι αυτές που προέκυψαν στο τέλος της ενδοκρίσιμης

ανόπτησης και δίνονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακα 5.8) έπειτα από την κατάλληλη μετατροπή με το λογισμικό Thermo-calc

Πίνακας 5.8 : Απεικονίζονται οι τιμές για την μέση περιεκτικότητα μαγγανίου του ωστενίτη σε mol

$T_{BIT} (K)$	623	673	723
	<i>Lab1</i>		
$t_1 (s)$	<i>1.8198025E-2</i>	<i>1.8198025E-2</i>	<i>1.8198025E-2</i>
$t_2 (s)$	<i>1.8198025E-2</i>	<i>1.8198025E-2</i>	<i>1.8198025E-2</i>
	<i>Lab2</i>		
$t_1 (s)$	<i>1.9520882E-2</i>	<i>1.9520882E-2</i>	<i>1.9520882E-2</i>
$t_2 (s)$	<i>1.9520882E-2</i>	<i>1.9520882E-2</i>	<i>1.9520882E-2</i>

5.3 Υπολογισμοί Θερμοκρασιών M_s^σ

Στο μοντέλο σταθερότητας παραμένοντα ωστενίτη, η σχέση με την οποία υπολογίζεται η θερμοκρασία (M_s^σ) είναι η παρακάτω /3/ :

$$M_s^\sigma = (6.7891 - 33.45X_C)^{-1} (A + 5712.6 - 78224X_C - 21542X_{Mn} + 18876X_C X_{Mn}) + \sigma_y \left(0.715 + 0.3206 \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \right)$$

και

$$A = \frac{2\alpha\gamma_s / \rho}{\ln\{-[\ln(1-f)]/N_v^\sigma V_p\}} \quad (5.4)$$

όπου :

α : μια σταθερά εξαρτώμενη από το σχήμα των σωματιδίων

ρ : η πυκνότητα των ατόμων στο επίπεδο σφάλματος

γ_s : η διεπιφανειακή ενέργεια μεταξύ μαρτενσιτικής και μητρικής φάσης

X_C : η χημική περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα

X_{Mn} : η χημική περιεκτικότητα του ωστενίτη σε μαγγάνιο

$\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}}$: ο λόγος της υδροστατικής προς την ισοδύναμη τάση

σ_y : το όριο διαρροής του ωστενίτη

V_p : ο μέσος όγκος των σωματιδίων ωστενίτη

N_v^o : ο συνολικός αριθμός των θέσεων πυρήνωσης για όλα τα δυναμικά

f : μια σταθερά που αντιπροσωπεύει το 1% του μετασχηματισμού

και οι τυπικές τιμές αυτών των παραμέτρων είναι /3/,/14/ :

$$\alpha = 0.8666$$

$$N_v^o = 2E+17 \text{ m}^{-3}$$

$$\gamma_s = 0.15 \text{ j/m}^2$$

$$\rho = 3E-5 \text{ mol/m}^2$$

$$f = 0.01$$

$\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} = 1/3$ θεωρώντας μονοαξονικό εφελκυσμό

X_C, X_{Mn} : οι τιμές που δίνονται στους Πίνακες (5.7) και (5.8)

Τέλος το όριο διαρροής του ωστενίτη ισούται με το όριο διαρροής του χάλυβα και επομένως επιλέγονται οι τιμές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.9)

Πίνακας 5.9 : Απεικονίζονται οι τιμές του ορίου διαρροής για τους δυο χάλυβες ανάλογα με την περίπτωση που μελετάται

σ_y (MPa)			
	Lab1		
T_{BIT} (°C)/ t_{BIT} (sec)	200	400	600
350	334	338	407
400	406	424	420
450	412	409	428
	Lab2		
T_{BIT} (°C)/ t_{BIT} (sec)	200	400	600
350	321	393	448
400	416	471	493
450	443	475	496

Οι τιμές της παραμέτρου A που υπολογίζονται από τη σχέση (5.4) δίνονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακα 5.10) για κάθε περίπτωση που μελετάται:

Πίνακας 5.10 : Απεικονίζονται οι τιμές της παραμέτρου A που υπολογίστηκαν με βάση την σχέση (5.4)

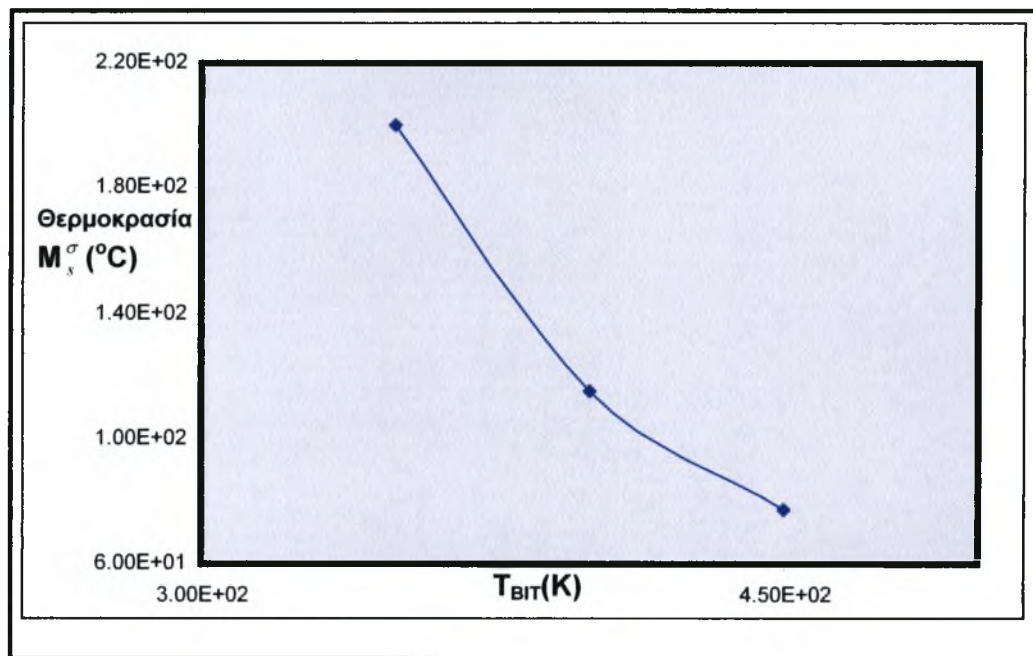
T_{BIT} (K)	623	673	723
	<i>Lab1</i>		
t_1 (s)	-4.97e+3	-2.91e+3	-2.26e+3
t_2 (s)	-4.97e+3	-2.91e+3	-2.26e+3
	<i>Lab2</i>		
t_1 (s)	-3.62e+3	-2.36e+3	-1.93e+3
t_2 (s)	-3.62e+3	-2.36e+3	-1.93e+3

Επομένως μπορεί να υπολογισθούν οι θερμοκρασίες M_s^σ για τις περιπτώσεις που μελετούνται κάνοντας χρήση των τιμών που υπολογίστηκαν παραπάνω. Πρέπει να αναφερθεί επιπλέον ότι έχει επιλεγεί σαν όριο διαρροής για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών M_s^σ το όριο διαρροής του χάλυβα για χρόνο ισόθερμου μαινετικού μετασχηματισμού t_{BIT} (sec)= 200. Τελικά καταλήγει στις τιμές που φαίνονται στον Πίνακα (5.11)

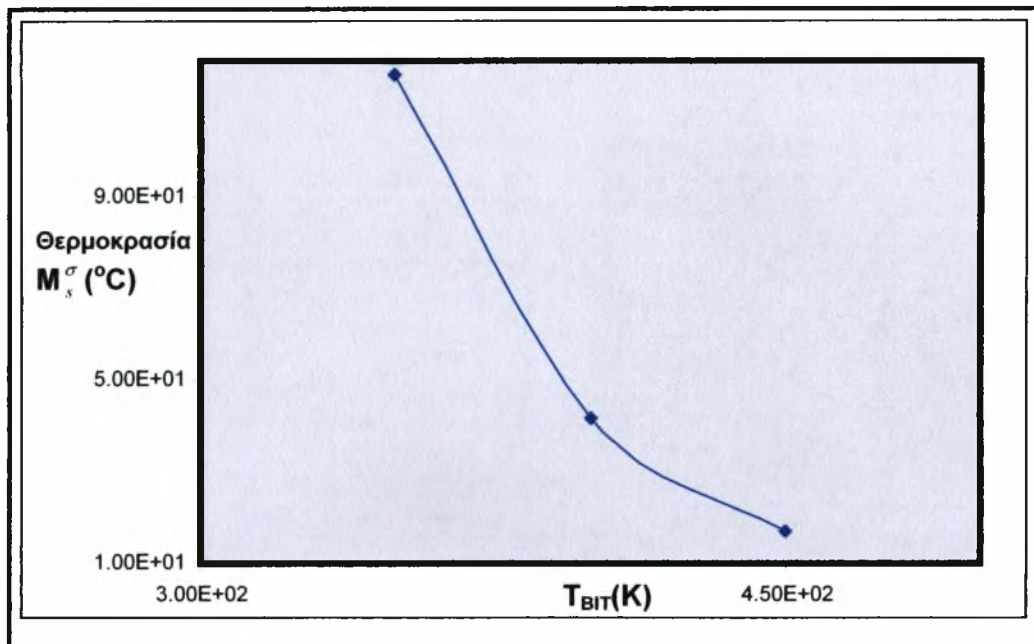
Πίνακας 5.11 : Απεικονίζονται οι τιμές των θερμοκρασιών M_s^σ (°C) που υπολογίστηκαν με βάση την σχέση (5.4)

T_{BIT} (K)	623	673	723
	<i>Lab1</i>		
t_1 (s)	200	115	77.4
t_2 (s)	117	41.5	17.0
	<i>Lab2</i>		
t_1 (s)	147	89.8	75.3
t_2 (s)	66.7	18.6	0.545

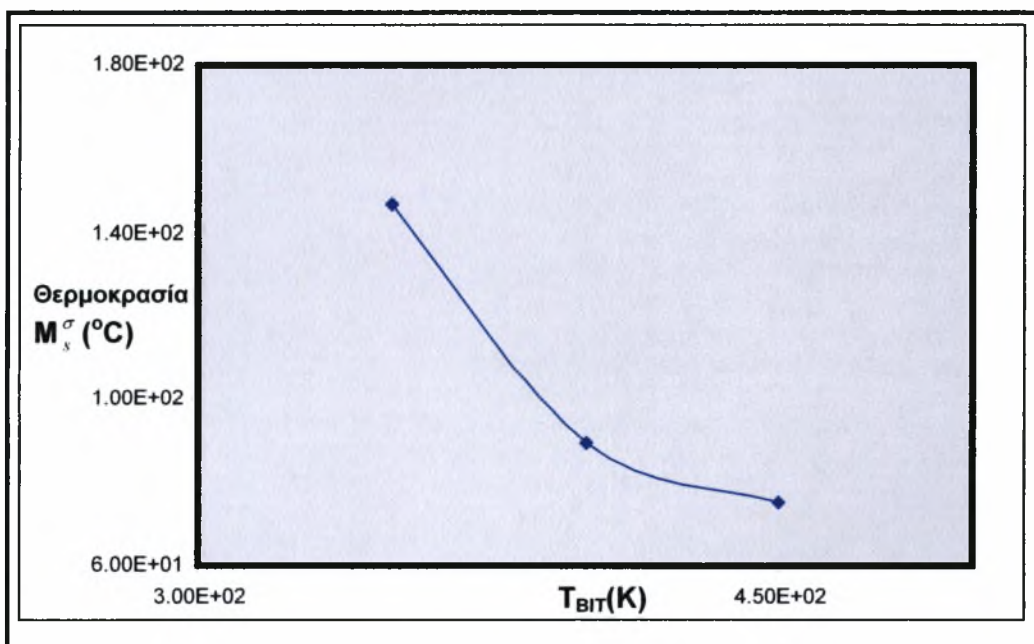
Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία M_s^σ μειώνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία του ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού. Επιπλέον για τον lab1 η θερμοκρασία M_s^σ είναι μεγαλύτερη σε κάθε περίπτωση από τις αντίστοιχες στον lab2. Τέλος στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας M_s^σ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} για τους χρόνους t_1 και t_2 .



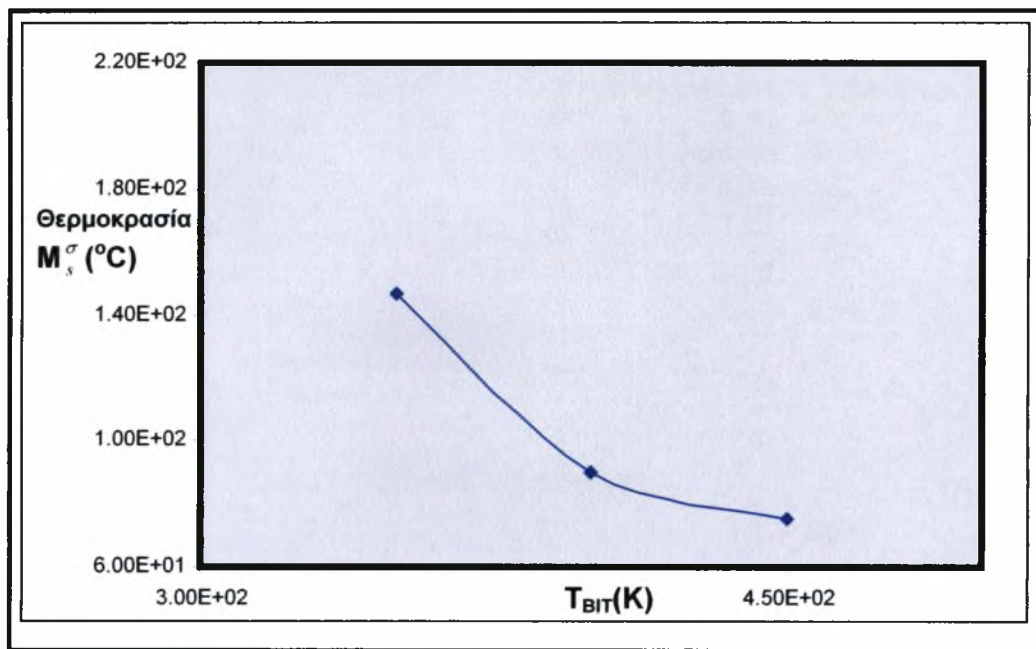
Εικόνα 5.15 : Απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας M_s^σ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} για την χρονική στιγμή t_1 στον lab1



Εικόνα 5.16 : Απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας M_s^σ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} για την χρονική στιγμή t_2 στον $lab1$



Εικόνα 5.17 : Απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας M_s^σ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} για την χρονική στιγμή t_1 στον $lab2$



Εικόνα 5.18 : Απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας M_s^σ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού T_{BIT} για την χρονική στιγμή t_2 στον lab2

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι η συμπεριφορά της καμπύλης είναι ίδια ανεξάρτητα από την θερμοκρασία του ισόθερμου μαινιτικού μετασχηματισμού και την χρονική στιγμή.

Κεφάλαιο 6^ο

Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

6.1 Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία αναπτύχθηκαν κάποια μαθηματικά μοντέλα και έγινε εφαρμογή τους σε συγκεκριμένους πολυφασικούς χάλυβες TRIP. Σκοπός ήταν να μελετηθεί κατά πόσο η εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων με την χρήση υπολογιστή μπορεί να προσομοιώσει την πειραματική διαδικασία και να προκύψουν ευσταθή αποτελέσματα.

Με γνώμονα τα παραπάνω που αναφέρθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας σχεδιάστηκε η γραμμή T_0 υπολογιστικά για τρεις πολυφασικούς χάλυβες διαφορετικών συστάσεων, στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού του κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη κατά τον ισόθερμο μπεινιτικό μετασχηματισμό, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο έγινε εφαρμογή του μοντέλου σταθερότητας παραμένοντα ωστενίτη « M_s^σ » πάντα υπολογιστικά. Για τον σχεδιασμό της γραμμής T_0 καθώς επίσης για την εφαρμογή του μοντέλου σταθερότητας παραμένοντα ωστενίτη « M_s^σ » μπορούν να αποκομισθούν κάποια γενικά συμπεράσματα αφού δεν υπάρχουν τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για άμεση σύγκριση. Αντίθετα στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υπολογιστική εφαρμογή του μοντέλου κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη κατά τον ισόθερμο μπεινιτικό μετασχηματισμό μπορούν να προκύψουν και συμπεράσματα από την αριθμητική σύγκριση μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών τιμών. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν τελικά είναι :

- Η μορφή της γραμμής T_0 είναι όμοια για τους τρεις, διαφορετικών συστάσεων, χάλυβες, ενώ οι τιμές T_0 σε κάθε περίπτωση διαφέρουν, δηλαδή εξαρτώνται από την θερμοκρασία ανόπτησης καθώς και από τα ποσοστά των κραματικών στοιχείων στον χάλυβα.
- Το συμπέρασμα που προκύπτει από το τέταρτο κεφάλαιο και την εφαρμογή του μοντέλου κλάσματος όγκου παραμένοντα ωστενίτη κατά τον ισόθερμο μπεινιτικό μετασχηματισμό είναι ότι το ποσό του παραμένοντα ωστενίτη

εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των κραματικών στοιχείων καθώς αυτό μεταβάλλεται από χάλυβα σε χάλυβα για όμοιες συνθήκες.

- Επιπλέον μελετώντας κάθε χάλυβα ξεχωριστά παρατηρείται ότι το ποσό του παραμένοντα ωστενίτη εξαρτάται επίσης από τις συνθήκες, δηλαδή το χρόνο και την θερμοκρασία, της ενδοκρίσιμης ανόπτησης και του ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού.
- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε σχέση με τα αντίστοιχα που πάρθηκαν πειραματικά προκύπτει ότι η υπολογιστική εφαρμογή του μοντέλου κλάσματος παραμένοντα ωστενίτη κατά τον ισόθερμο μπαινιτικό μετασχηματισμό κρίνεται επιτυχής καθώς το σφάλμα που προκύπτει σε κάθε περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες στους οποίους μπορεί να οφείλεται αυτή η διαφορά, δεν είναι σημαντικό.
- Παρατηρείται ότι το κλάσμα όγκου του παραμένοντα ωστενίτη έχει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή για την μικρότερη θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού και ότι ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο είναι μεγαλύτερος στην μέγιστη από τις τρεις τιμές που επιλέχθηκαν για μελέτη.
- Παρατηρείται ακόμη ότι όσο μεγαλύτερο είναι το αρχικό κλάσμα όγκου του ωστενίτη, πριν αρχίσει δηλαδή ο μπαινιτικός μετασχηματισμός, αντίστοιχα θα είναι μεγαλύτερο και στο τέλος του σταδίου.
- Παρατηρείται ότι η καμπύλη του κλάσματος όγκου του παραμένοντα ωστενίτη σε σχέση με τον χρόνο είναι παρόμοια σε δεδομένη θερμοκρασία ανεξάρτητα από την σύσταση του χάλυβα, η οποία βέβαια σε αυτούς που μελετήθηκαν δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές.
- Στο μοντέλο σταθερότητας παραμένοντα ωστενίτη όπως παρουσιάστηκε στο πέμπτο κεφάλαιο και ύστερα από την μελέτη της συμπεριφοράς των δεδομένων χαλύβων που μελετήθηκαν, συμπεραίνεται ότι εξαρτάται από τις συνθήκες του ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού καθώς επίσης από τις περιεκτικότητες των κραματικών στοιχείων σε κάθε χάλυβα.

6.2 Προτάσεις

Σε αυτήν την εργασία επιχειρήθηκε να μελετηθούν όσο το δυνατόν πιο αναλυτικά ορισμένα μαθηματικά μοντέλα και να προσομοιωθούν σε ορισμένους χάλυβες, τα οποία όπως φάνηκε δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επιπλέον έγινε προσπάθεια μέσα από μια βιβλιογραφική ανασκόπηση να αναπτυχθούν οι μαθηματικές και ενεργειακές βάσεις αυτών. Μέσα από αυτήν την εργασία προτείνονται αναφορικά οι παρακάτω προτάσεις, οι οποίες δείχνουν την κατεύθυνση που θα πρέπει να ακολουθηθεί με βάση την προσωπική άποψη, για περαιτέρω ενασχόληση με το συγκεκριμένο θέμα :

- Μια πιο αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία θα περιλαμβάνει όλα τα μαθηματικά μοντέλα για χάλυβες.
- Επίσης για να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα για την ευστάθεια και την ορθότητα αυτών, θα πρέπει να γίνει εφαρμογή τους σε επιπλέον χάλυβες με ένα μεγαλύτερο εύρος συστάσεων και συνθηκών.
- Προτείνεται η μελέτη παρόμοιων μαθηματικών μοντέλων με σκοπό την περαιτέρω ανάπτυξη της προσομοίωσης ως ένα εργαλείο έρευνας και μελέτης χαλύβων.
- Κρίνεται θετική η ενασχόληση με τον σχεδιασμό υλικών, δηλαδή την εκ των προτέρων γνώση των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών του υλικού και ανάλογα με αυτά να επιλέγονται κατάλληλα οι συνθήκες κατεργασίας λόγω όλων των λόγων που έχουν ήδη αναφερθεί μέσω αυτής της εργασίας και δείχνουν την σημαντικότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος.
- Προτείνεται η μελέτη μοντέλων σε χάλυβες για άλλου είδους εντατικών καταστάσεων και μηχανικών κατεργασιών ώστε να μελετηθεί κατά πόσο αυτά τα υπάρχοντα μοντέλα καλύπτουν αυτές τις συνθήκες και μπορούν να γενικευθούν.

Η προσομοίωση είναι ένα πολύτιμο εργαλείο πλέον στα χέρια των επιστημόνων, το οποίο σε συνάρτηση με τις θεωρητικές βάσεις οι οποίες είναι αυτές στις οποίες στηρίζονται τα μαθηματικά μοντέλα, μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη

νέων χαλύβων ή και νέων υλικών γενικά μέσα από τον κλάδο του σχεδιασμού υλικών με πολύ μικρότερο κόστος είτε σε άποψη χρόνου είτε σε άποψη οικονομικού κόστους απ' ότι με τις συμβατές πειραματικές διαδικασίες.

Βιβλιογραφία

- /1/ Using the TRIP effect- the dawn of a promising group of cold formable steels, Wolfgang Bleck
- /2/ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών –Εργαστήριο Υλικών
- /3/ Διδακτορική Διατριβή : Πλαστικότητα Μετασχηματισμού του Παραμένοντα Ωστενίτη σε Χάλυβες Χαμηλής Κραμάτωσης, Απόστολος Ν.Βασιλάκος, Βόλος Νοέμβρης 2000
- /4/ Y. Kuroda, “Kinetics of Deformation – Induced Transformation of Dispersed Austenite In Two Alloy Systems”, S.M. Thesis, MIT (1987).
- /5/ J. Agren, “A new numerical method to solve coupled diffusion equations”, internal report series D, No. 84, Institutionen for Metallografi, KTH, Stockholm, 1987.
- /6/ G.B. Olson and M. Cohen, A general mechanism of martensitic nucleation, Met Trans. A, vol 7A, (1976) pp.1897/1923
- /7/ M. Cohen and G.B. Olson, “Martensitic nucleation and the role of the nucleation defect”, in New Aspects of Martensitic Transformations, First JIM International Symposium (JIMIS - 1) Kobe, Japan. Suppl. Trans. JIM 17 (1976) p.93
- /8/ T.R. Patel and Morris Cohen, Acta Metall. 1 (1953) p.531
- /9/ B. Sundman, B. Jansson, J.O. Anderson, CALPHAD, 9 (1985) p.153
- /10/ M. Hillert, L-I. Staffanson, Acta Chem. Scand., 24 (1970) p.3618/26
- /11/ B. Sundman, J. Agren, J. Phys. Chem. Solids, M42 (1981) p.297/301
- /12/ G.B. Olson and M. Cohen, Met. Trans. A, 13A, (1982) pp.1907/14
- /13/ H. Chang, T.Y. Hsu, Acta Metall. 34 (1986) p.333/38
- /14/ M. Cohen and G.B. Olson, New Aspects of Martensitic Transformation, (1977), Japan Inst. Kobe Japan, pp.93/98
- /15/ Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in steels, second ed., IOM Communications Ltd., London, U.K., 2001
- /16/ Jacques P.J. Journ. Phys. IV 2003; 112:297
- /17/ Matsuda H., Badeshia H.K.D.H. Proc. r.soc. Lond. A 2004; 460:1707
- /18/ Parker S.V., Modelling of Phase Transformations in Hot – Rolled Steels, Ph.D. thesis, University of Cambridge, U.K., 1997
- /19/ Mujahid S.A., Bhadeshia H.K.D.H. Acta metal. mater. 1992; 40:389
- /20/ Hillert M., Hoglund L. Agren J. Acta metal. mater. 1993; 41:1951
- /21/ Andrews K.W. JISI 1965; 203:721
- /22/ Εισαγωγή στην Τεχνολογία Υλικών, Γρηγόρης Ν.Χαϊδεμενόπουλος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος Σεπτέμβριος 2000
- /23/ Φυσική Μεταλλουργία : Θεμελιώδεις Αρχές, Γ.Ν.Χαϊδεμενόπουλος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος 2000



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000089103