

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝΤΑ ΩΣΤΕΝΙΤΗ  
ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ TRIP»**

υπό

**ΣΠΥΡΙΔΩΝΑ ΤΖΑΜΤΖΗ**



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας  
Βόλος, 2005



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

Αριθ. Εισ.: 3508/1  
Ημερ. Εισ.: 17-07-2006  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ  
2005  
ΤΖΑ

© 2005 Σπυρίδων Τζαμτζής

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. Νικόλαος Χασιώτης  
Διδάσκων Π.Δ. 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Γρηγόρη Ν. Χαϊδεμενόπουλο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να γίνω μέλος του Εργαστηρίου των Υλικών και να πραγματοποιήσω αυτή την εργασία. Η προσωπικότητά του και οι διαλέξεις του προσέλκυσαν το ενδιαφέρον μου στο πεδίο των Υλικών. Τον ευχαριστώ επίσης για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε στην προσπάθειά μου να συνεχίσω τις σπουδές μου σε μεταπτυχιακό επίπεδο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνη Κατσαμά για την άμεση συνεργασία, τις υποδείξεις και διορθώσεις του κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας. Η βοήθεια του υπήρξε καταλυτική για την άρτια ολοκλήρωση της.

Οφείλω επίσης ευχαριστίες στον κ. Νικόλαο Χασιώτη, τον άνθρωπο που βρισκόταν καθημερινά στο Εργαστήριο και προσέφερε την βοήθεια του ανά πάσα στιγμή. Είναι ο άνθρωπος από τον οποίο έμαθα να χρησιμοποιώ τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τους συναδέλφους και φίλους(ες) μου Άρη, Βασίλη, Γιώργο Μ., Γιώργο Μπ., Δημήτρη Σ., Δημήτρη Λ., Ευγενία, Κώστα, Νεφέλη, Πέτρο, Χάρη για την ηθική υποστήριξή τους. Βρισκόντουσαν συνέχεια στο πλευρό μου - στα εύκολα και στα δύσκολα - και θα έχουν πάντα μια θέση στη καρδιά μου. Επίσης, ευχαριστώ την Ιουλία, η οποία αν και μπήκε τελευταία στη ζωή μου, μου προσέφερε πολλές χαρούμενες στιγμές και αποτέλεσε στήριγμα κατά τη διάρκεια της ολοκλήρωσης αυτής της εργασίας.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Αργύρη και Γεωργία Τζαμτζή, καθώς και τον αδερφό μου Αντρέα, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Ως ελάχιστο δείγμα της ευγνωμοσύνης μου, αφιερώνω αυτή την εργασία στον πατέρα μου και στην μητέρα μου.

Σπύρος Τζαμτζής

## **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝΤΑ ΩΣΤΕΝΙΤΗ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ TRIP**

**ΤΖΑΜΤΖΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2005

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής Φυσικής  
Μεταλλουργίας

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η βιομηχανία αυτοκινήτου είναι υποχρεωμένη να τηρεί μια σειρά περιορισμών, όπως χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση, χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων και ανάπτυξη ελαφρύτερων οχημάτων. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη χαλύβων με εξαιρετικό συνδυασμό υψηλής αντοχής και διαμορφωσιμότητας, αρκετά ελκυστική για εφαρμογές ψυχρής διαμόρφωσης που απαιτεί η αυτοκινητοβιομηχανία. Μια κατηγορία που πληροί αυτές τις προϋποθέσεις είναι οι χάλυβες TRIP.

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια διερεύνησης του παραμένοντα ωστενίτη στους χάλυβες TRIP, καθώς αυτός είναι που τους προσδίδει τις επιθυμητές ιδιότητες. Έγινε μια σειρά πειραμάτων θερμικών κατεργασιών και στη συνέχεια μεταλλογραφία των δοκιμίων ώστε να αποκαλυφθεί η μικροδομή τους. Ακολούθησε ψηφιακή ανάλυση εικόνας, η οποία οδήγησε σε ποσοτικά αποτελέσματα σχετικά με το παραμένοντα ωστενίτη.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δείχνουν αυτό που περιμέναμε θεωρητικά. Αύξηση της θερμοκρασίας και του χρόνου θερμικής κατεργασίας οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη. Υπάρχουν βέβαια αποκλίσεις από την τιμή η οποία έχει υπολογιστεί θεωρητικά. Ο κυριότερος παράγοντας που οδηγεί στην απόκλιση αυτή είναι το γεγονός ότι στους φούρνους στους οποίους έγιναν οι θερμικές κατεργασίες δεν μπορούμε να είμαστε απόλυτα βέβαιοι ότι επιτυγχάνεται η ακριβής θερμοκρασία, καθώς και ότι αυτή διατηρείται σε όλο το χρόνο της κατεργασίας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και στόχοι.....	1
---------------------------------	---

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή.....	2
2.2 Μαρτενσιτικός Μετασχηματισμός.....	2
2.2.1 Εισαγωγή.....	2
2.2.2 Χαρακτηριστικά του Μαρτενσιτικού Μετασχηματισμού.....	3
2.3 Μπαινιτικός Μετασχηματισμός.....	4
2.4 Πλαστικότητα Μετασχηματισμού (Transformation Induced Plasticity, TRIP).....	5
2.5 Μετασχηματισμός Υποβοηθούμενος από την Τάση (Stress-Assisted Transformation).....	6
2.6 Μετασχηματισμός Προκαλούμενος από την Πλαστική Παραμόρφωση (Strain-Induced Plasticity) .....	7
2.7 Χάλυβες TRIP.....	8
2.8 Χάλυβες Διπλής Φάσης (Dual Phase).....	8
2.9 Σταθερότητα Ωστενιτικής Διασποράς.....	9
2.10 Θερμικές Κατεργασίες Πολυφασικών Χαλύβων TRIP.....	9

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Εισαγωγή.....	11
3.2 Περιγραφή Υλικών.....	11
3.3 Θερμικές Κατεργασίες.....	11
3.3.1 Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση .....	11
3.3.2 Μπαινιτικός Μετασχηματισμός.....	14
3.4 Προετοιμασία Δοκιμίων.....	16
3.5 Χημική Προσβολή.....	16
3.5.1 Nital.....	16
3.5.2 LePera.....	16
3.6 Οπτική Μικροσκοπία.....	17

3.7 Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας (Image Analysis).....	17
---	----

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

4.1 Μεταλλογραφία Χαλύβων.....	18
4.1.1. As Received.....	18
4.1.2 Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση.....	19
4.1.2.1 Χάλυβας TRIP 700 CR-FH.....	19
4.1.2.2 Χάλυβας TRIP 800 HR-FH.....	23
4.1.3 Μπαινιτικός Μετασχηματισμός.....	25
4.2 Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας των Δοκιμίων που Υποβλήθηκαν σε Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση.....	27
4.2.1 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα.....	36
4.3 Παραμένων Ωστενίτης σε Δοκίμια που Υποβλήθηκαν σε Μπαινιτικό Μετασχηματισμό.....	44

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΝΟΨΗ**

5.1 Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση.....	47
5.1.1 Χάλυβας TRIP 700 CR-FH.....	47
5.1.2 Χάλυβας TRIP 800 HR-FH.....	49
5.2 Μπαινιτικός Μετασχηματισμός.....	50
5.3 Σύνοψη.....	53

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>55</b>
-------------------------------------	-----------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>56</b>
-----------------------	-----------



**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ****ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

- Σχήμα 2.1** Καμπύλες ελεύθερης ενέργειας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τη μητρική και μαρτενσιτική φάση. /1/.....3
- Σχήμα 2.2** Χαρακτηριστική καμπύλη της εξέλιξης του μαινιτικού μετασχηματισμού με το χρόνο /4/ .....5
- Σχήμα 2.3** Σχηματική απεικόνιση του μαρτενσιτικού μηχανισμού, υπό την επιβολή εξωτερικής τάσης σ. /5/.....6
- Σχήμα 2.4** Σχηματική απεικόνιση της ανακατανομής της εργοσκήρυνσης. /1/...7

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

- Σχήμα 3.1** Σχηματική απεικόνιση της θερμικής κατεργασίας που πραγματοποιήθηκε.....14

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

- Σχήμα 4.1** Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 744°C.....37
- Σχήμα 4.2** Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 843°C.....38
- Σχήμα 4.3** Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 957°C.....39
- Σχήμα 4.4** Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 720°C.....41
- Σχήμα 4.5** Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 762°C.....42
- Σχήμα 4.6** Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 805°C.....43
- Σχήμα 4.7** Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH για διάφορους χρόνους και θερμοκρασίες ενδοκρίσιμης ανόπτησης και μαινιτικού μετασχηματισμού.....45

<b>Σχήμα 4.8</b>	Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH για διάφορους χρόνους και θερμοκρασίες ενδοκρίσιμης απόπτωσης και μπεινιτικού μετασχηματισμού.....	46
------------------	--	----

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 3.1	Χημική σύσταση χάλυβα TRIP 700 CR-FH.....	11
Πίνακας 3.2	Χημική σύσταση χάλυβα TRIP 800 HR-FH.....	11
Πίνακας 3.3	Ποσοστό ωστενίτη που αναμένεται θεωρητικά να παραχθεί σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.....	12
Πίνακας 3.4	Συνθήκες πειραμάτων ενδοκρίσιμης ανόπτησης.....	13
Πίνακας 3.5	Στοιχεία θερμικών κατεργασιών μπαινιτικού μετασχηματισμού.....	15

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πίνακας 4.1	Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C.....	36
Πίνακας 4.2	Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 843°C.....	36
Πίνακας 4.3	Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 957°C.....	36
Πίνακας 4.4	Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 720°C.....	40
Πίνακας 4.5	Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 762°C.....	40
Πίνακας 4.6	Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C.....	40
Πίνακας 4.7	Αποτελέσματα μετρήσεων παραμένοντα ωστενίτη με τη μαγνητική μέθοδο, για τους χάλυβες TRIP 700 CR-FH και TRIP 800 HR-FH, μετά από μπαινιτικό μετασχηματισμό.....	44

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ****ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

<b>Εικόνα 2.1</b>	Μαρτενσιτική δομή σε χάλυβα 4% Ni και 0.4% C. /2/.....	4
-------------------	--	---

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

<b>Εικόνα 4.1</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH as received.....	18
<b>Εικόνα 4.2</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH as received.....	19
<b>Εικόνα 4.3</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C για 180 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X. ....	20
<b>Εικόνα 4.4</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C για 600 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.....	20
<b>Εικόνα 4.5</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 957°C για 60 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.....	21
<b>Εικόνα 4.6</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 957°C για 240 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.....	22
<b>Εικόνα 4.7</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ανόπτηση στους 1050°C για 30 min και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.....	22
<b>Εικόνα 4.8</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C για 120 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.....	23
<b>Εικόνα 4.9</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C για 600 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.....	24
<b>Εικόνα 4.10</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH μετά από ανόπτηση στους 1050°C για 30 min και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.....	24

<b>Εικόνα 4.11</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 HR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 844°C για 600 sec, μπαινιτικό μετασχηματισμό στους 450°C για 600 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X. ....	25
<b>Εικόνα 4.12</b>	Λεπτομέρεια εικόνας 4.11, όπου διακρίνονται και οι τρεις φάσεις που υπάρχουν στο δοκίμιο.....	26
<b>Εικόνα 4.13</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C για 600 sec, μπαινιτικό μετασχηματισμό στους 350°C για 300 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.....	26
<b>Εικόνα 4.14</b>	Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5. ....	27
<b>Εικόνα 4.15</b>	Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5. ....	28
<b>Εικόνα 4.16</b>	Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5. ....	28
<b>Εικόνα 4.17</b>	Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5. ....	29
<b>Εικόνα 4.18</b>	Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5. ....	29
<b>Εικόνα 4.19</b>	Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5.....	30

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

<b>Εικόνα 5.1</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 1050°C για 30 min και χημική προσβολή με LePera για 15 sec σε μεγέθυνση 1000X.....	48
<b>Εικόνα 5.2</b>	Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 1050°C για 30 min και χημική προσβολή με LePera για 15 sec σε μεγέθυνση 1000X.....	50

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 Αντικείμενο και Στόχοι.

Η οικονομία καυσίμων, η μείωση των ρύπων και συνεπώς η μείωση του βάρους των οχημάτων ενδιαφέρουν έντονα την αυτοκινητοβιομηχανία τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Κύρια αιτία είναι ότι ο σκελετός του αυτοκινήτου αποτελεί το 25-30% του συνολικού του βάρους. Για να μειωθεί όμως το βάρος απαιτείται μείωση του πάχους της λαμαρίνας και συνεπώς αύξηση της αντοχής της, σε συνδυασμό με επιπλέον απαιτήσεις για ανάπτυξη χαλύβων χαμηλού κόστους παραγωγής και κατεργασίας, υψηλής διαμορφωσιμότητας και υψηλής συγκολλησιμότητας.

Μια κατηγορία χαλύβων που πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις είναι οι πολυφασικοί χάλυβες TRIP. Το ακρωνύμιο TRIP προέρχεται από την έκφραση Transformation Induced Plasticity, δηλαδή «πλαστικότητα εκ μετασχηματισμού» και συνδέεται με το μηχανικά προκαλούμενο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό του παραμένοντα ωστενίτη.

Η μικροδομή των χαλύβων TRIP αποτελείται κυρίως από φερρίτη, μπαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη. Η επιρροή του παραμένοντα ωστενίτη είναι αυτή που αυξάνει την ομοιόμορφη παραμόρφωση αυτών των χαλύβων και οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της διαμορφωσιμότητας τους. Για το λόγο αυτό οι χάλυβες TRIP είναι μια κατηγορία χαλύβων με εξαιρετικό συνδυασμό υψηλής αντοχής και διαμορφωσιμότητας, αρκετά ελκυστική για εφαρμογές ψυχρής διαμόρφωσης που απαιτεί η αυτοκινητοβιομηχανία.

Το βασικό αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας και του χρόνου θερμικής κατεργασίας στη μικροδομή των χαλύβων TRIP και ειδικότερα το ποσοστό του παραμένοντος ωστενίτη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

#### 2.1 Εισαγωγή.

Η βιομηχανία αυτοκινήτου είναι υποχρεωμένη να τηρεί μια σειρά περιορισμών όπως χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση σε ρύπους, χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων και ανάπτυξη ελαφρύτερων οχημάτων. Αυτό οδήγησε τη χαλυβουργική βιομηχανία στη ανάπτυξη νέων κατηγοριών χαλύβων, ώστε να ανταπεξέλθει στον ανταγωνισμό που δημιουργήθηκε από την εισαγωγή του αλουμινίου στην κατασκευή του πλαισίου του αυτοκινήτου. Μία από τις κατηγορίες αυτές είναι οι χάλυβες διπλής φάσης (dual phase), η μικροδομή των οποίων αποτελείται κατά 70 – 90 % από φερρίτη και 10 – 30 % μαρτενσίτη και η οποία παράγεται με ενδοκρίσιμη ανόπτηση και βαφή. Μία άλλη κατηγορία χαλύβων, η οποία είναι και αυτή που θα εξετάσουμε, είναι και οι πολυφασικοί χάλυβες TRIP.

Οι χάλυβες αυτοί προσφέρουν έναν πολύ καλό συνδυασμό ολκιμότητας και αντοχής εφελκυσμού που οφείλεται στην πλαστικότητα μετασχηματισμού του παραμένοντα ωστενίτη σε μαρτενσίτη, καθιστώντας τους πολύ ελκυστικούς σε εφαρμογές ψυχρής διαμόρφωσης όπως π.χ. η βαθεία κοίλανση.

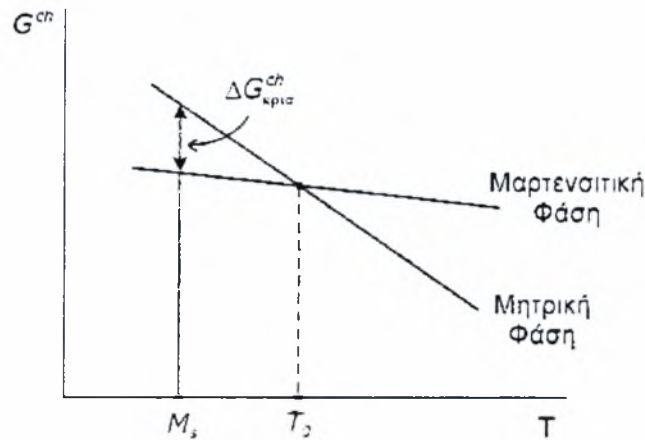
Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά στις βασικές αρχές και τα χαρακτηριστικά του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, του μπαινιτικού μετασχηματισμού καθώς και στην επιρροή του φαινομένου TRIP.

#### 2.2 Μαρτενσιτικός Μετασχηματισμός.

##### 2.2.1 Εισαγωγή.

Η σκλήρυνση του χάλυβα με τη βαφή είναι μια πολύ σημαντική τεχνολογικά διεργασία. Η απότομη ψύξη του ωστενίτη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μαρτενσίτη, μιας πολύ σκληρής φάσης η οποία περιέχει εγκλωβισμένο σε στερεό διάλυμα τον άνθρακα που προϋπήρχε σε στερεό διάλυμα στον ωστενίτη. Σε αντίθεση με άλλους μετασχηματισμούς, ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι ένας μη διαχυτικός διατμητικός μετασχηματισμός, που οδηγεί σε μια χαρακτηριστική πλακοειδή μικροδομή. Έτσι η νέα φάση που δημιουργείται κληρονομεί και τη χημική σύσταση της μητρικής ωστενιτικής φάσης.

### 2.2.2 Χαρακτηριστικά του Μαρτενσιτικού Μετασχηματισμού.



**Σχήμα 2.1** Καμπύλες ελεύθερης ενέργειας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τη μητρική και μαρτενσιτική φάση. /1/

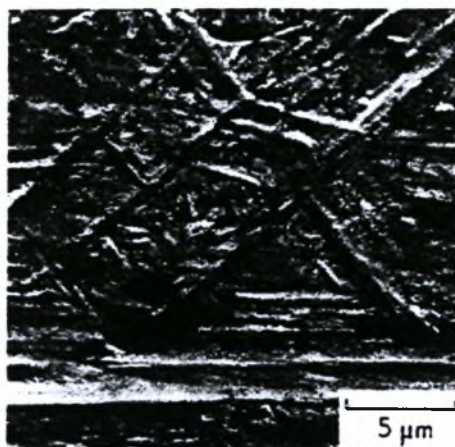
Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός πραγματοποιείται με την ψύξη σε ένα θερμοκρασιακό εύρος που μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια για συγκεκριμένο χάλυβα. Ξεκινάει στη θερμοκρασία  $M_s$  – θερμοκρασία έναρξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού – η οποία μεταβάλλεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών από  $500^\circ\text{C}$  έως και κάτω από τη θερμοκρασία δωματίου. Η μεγάλη αυτή διαφορά οφείλεται στα κραματικά στοιχεία που σταθεροποιούν ή όχι τον ωστενίτη. Η θερμοκρασία  $M_s$  μπορεί να οριστεί από το σχήμα 2.1 /1/.

Στο σχήμα φαίνεται η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας του ωστενίτη και του μαρτενσίτη σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Στη θερμοκρασία  $T_0$  οι δύο φάσεις έχουν την ίδια ελεύθερη ενέργεια, αλλά καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, η διαφορά της ελεύθερης ενέργειας των δύο φάσεων αυξάνεται. Η διαφορά αυτή είναι η χημική κινούσα δύναμη  $\Delta G^{\text{ch}}$ . Στη θερμοκρασία  $T_0$ ,  $\Delta G^{\text{ch}} = 0$ , ενώ για  $T < T_0$  η  $\Delta G^{\text{ch}} < 0$ . Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η θερμοκρασία, η  $\Delta G^{\text{ch}}$  αυξάνεται (γίνεται πιο αρνητική). Η θερμοκρασία  $M_s$  ορίζεται ως η θερμοκρασία στην οποία η χημική κινούσα δύναμη παίρνει την κρίσιμη τιμή  $\Delta G^{\text{ch}}_{\text{κρυσ}}$ , με την οποία ξεκινά η πυρήνωση του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.

Όταν η θερμοκρασία  $M_s$  επιτευχθεί, ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός συνεχίζεται με την ψύξη έως ότου φτάσουμε στη θερμοκρασία  $M_f$ . Τότε όλος ο ωστενίτης θα έπρεπε να είχε μετατραπεί σε μαρτενσίτη. Στην πράξη ένα μικρό ποσοστό δεν μετασχηματίζεται. Αυτό ονομάζεται παραμένων ωστενίτης και



εξαρτάται από τα κραματικά στοιχεία του χάλυβα, που μεταβάλλουν και τη θερμοκρασία  $M_f$ .



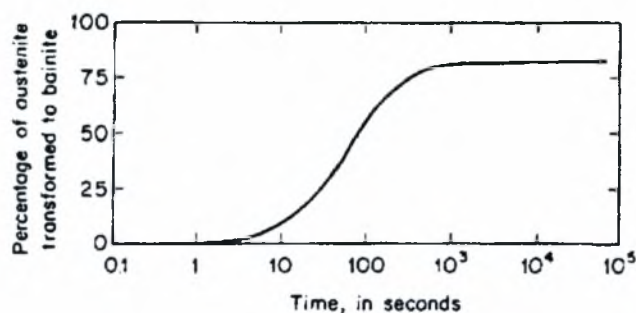
Εικόνα 2.1 Μαρτενσιτική δομή σε χάλυβα 4% Ni και 0.4% C. /2/

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός μπορεί εύκολα να αναγνωριστεί με οπτική μικροσκοπία. Κάθε κόκκος ωστενίτη μετασχηματίζεται με τον ταχύ σχηματισμό λεπτών πλακιδίων (plates) ή λωρίδων (laths) μαρτενσίτη. Χαρακτηριστική είναι η Εικόνα 2.1.

### 2.3 Μπαινιτικός Μετασχηματισμός.

Η διαφορά του μπαινιτικού μετασχηματισμού από τους άλλους μετασχηματισμούς του ωστενίτη έγκειται στο ότι πραγματοποιείται κάτω από συνθήκες συνεχούς ψύξης ή ισόθερμου μετασχηματισμού σε ένα θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ του περλιτικού και του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Ως εκ τούτου, ο μπαινίτης παρουσιάζει ομοιότητες και διαφορές τόσο με τον περλίτη όσο και με τον μαρτενσίτη. Ο μπαινίτης είναι μίγμα φάσεων φερρίτη και σεμεντίτη, όπως και ο περλίτης, για αυτό και ο μετασχηματισμός εξαρτάται από τη διάχυση του άνθρακα. Αποτελείται όμως από πλακίδια φερρίτη με σωματίδια σεμεντίτη σε αντίθεση με τη λαμελλοειδή μορφή του περλίτη.

Υπάρχουν δύο βασικές μορφολογίες μπαινίτη. Ο άνω μπαινίτης (upper bainite) που σχηματίζεται σε θερμοκρασίες 400-550°C και ο κάτω μπαινίτης (lower bainite) που σχηματίζεται σε θερμοκρασίες 250-400°C. Σε ότι αφορά στον άνω μπαινίτη, τα σχηματιζόμενα καρβίδια βρίσκονται ανάμεσα στις λωρίδες του φερρίτη. Σε χάλυβες με ποσοστό πυριτίου (Si) ή/και αλουμινίου (Al) > 1% καθυστερεί η καθίζηση καρβιδίων στο μπαινίτη. Έτσι ο άνθρακας (C) διατηρείται σε στερεό διάλυμα στον



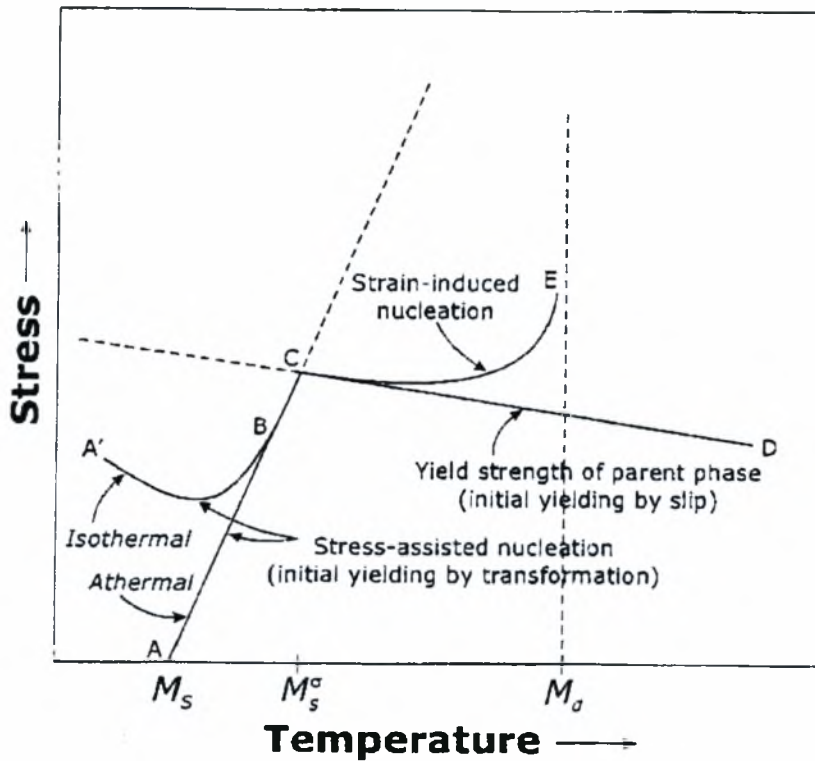
**Σχήμα 2.2** Χαρακτηριστική καμπύλη της εξέλιξης του μπαινιτικού μετασχηματισμού με το χρόνο /4/

ωστενίτη και για αυτό σταθεροποιείται. Ο εμπλουτισμός του ωστενίτη, που βρίσκεται ανάμεσα σε λωρίδες φερρίτη, σε άνθρακα καθιστά τον ωστενίτη αυτό πολύ σταθερό με αποτέλεσμα να διατηρείται στη θερμοκρασία δωματίου ως παραμένον ωστενίτης /3/. Η μορφολογία του κάτω μπαινίτη διαφέρει. Τα καρβίδια που σχηματίζονται βρίσκονται τοποθετημένα μέσα στα πλακίδια φερρίτη με αποτέλεσμα να έχουν πιο λεπτή διασπορά από τα καρβίδια του άνω μπαινίτη.

Η καθίζηση των καρβιδίων είναι και η πιο σημαντική διαφορά του μπαινιτικού από τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, καθώς ενεργοποιείται η διάχυση άνθρακα για τη δημιουργία καρβιδίων. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εξάρτηση της πορείας του μετασχηματισμού από το χρόνο. Ο μπαινιτικός μετασχηματισμός έχει μια χαρακτηριστική σιγμοειδή μορφή όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2 /4/.

#### **2.4 Πλαστικότητα Μετασχηματισμού (Transformation Induced Plasticity, TRIP).**

Η λειτουργία του φαινομένου TRIP στηρίζεται στο μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη με την επίδραση εξωτερικής μηχανικής τάσης. Στο σχήμα 2.3 /5/, στο οποίο η ευθεία CD παριστάνει την τάση διαρροής του ωστενίτη σε συνάρτηση με η θερμοκρασία, με ψύξη στη θερμοκρασία  $M_s$  έχουμε αυθόρμητο μετασχηματισμό σε μαρτενσίτη (χωρίς την επιβολή εξωτερικής τάσης). Καθώς η εξωτερική τάση  $\sigma$  αυξάνει, η θερμοκρασία στην οποία ξεκινά ο μετασχηματισμός σε μαρτενσίτη αυξάνεται και ακολουθεί την ευθεία AC, μέχρι τη θερμοκρασία  $M_s^\sigma$  και το σημείο C, όπου η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση ισούται με το όριο διαρροής της μητρικής φάσης (ωστενίτης). Δηλαδή, ο μετασχηματισμός υποβοηθείται από την εξωτερική τάση  $\sigma$  (stress-assisted) και η μηχανική κινούσα δύναμη  $\Delta G^\sigma$  προστίθεται



Σχήμα 2.3 Σχηματική απεικόνιση του μαρτενσιτικού μηχανισμού, υπό την επιβολή εξωτερικής τάσης  $\sigma$ . /5/

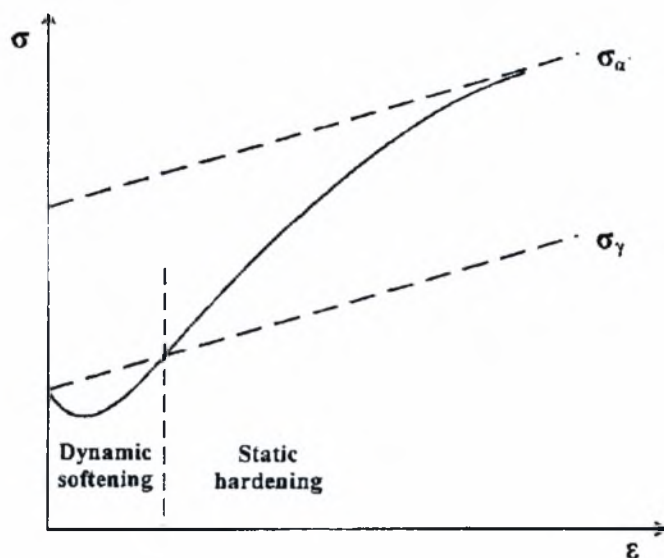
στη χημική κινούσα δύναμη  $\Delta G^{\text{ch}}$ , συνεισφέροντας στην κρίσιμη κινούσα δύναμη που οδηγεί στην πυρήνωση του μετασχηματισμού.

Μέχρι αυτό το σημείο, ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη γίνεται σε προϋπάρχουσες θέσεις πυρήνωσης. Αν η τάση  $\sigma$  συνεχίσει να αυξάνεται, τότε θα έχουμε πλαστική παραμόρφωση του ωστενίτη και δημιουργία νέων θέσεων πυρήνωσης (strain-induced). Στην περίπτωση αυτή η θερμοκρασία έναρξης του μετασχηματισμού ακολουθεί την καμπύλη CE.

## 2.5 Μετασχηματισμός Υποβοηθούμενος από την Τάση (Stress-Assisted Transformation).

Η πλαστικότητα μετασχηματισμού προσφέρει αύξηση και ανακατανομή της εργοσκλήρυνσης κατά μήκος της καμπύλης  $\sigma$ - $\epsilon$ , που είναι αποτέλεσμα τόσο της «δυναμικής» εξασθένησης (“dynamic” softening), όσο και της «στατικής» σκλήρυνσης (“static” hardening). Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.4 /1/.

Η «δυναμική» εξασθένηση εμφανίζεται ως μείωση του ορίου ροής με την παραμόρφωση και οφείλεται στο γεγονός ότι ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός



**Σχήμα 2.4** Σχηματική απεικόνιση της ανακατανομής της εργοσκλήρυνσης. /1/

λειτουργεί ως μηχανισμός παραμόρφωσης. Η «στατική» σκλήρυνση εμφανίζεται αντίθετα ως αύξηση του ορίου ροής με την παραμόρφωση (εργοσκλήρυνση) και οφείλεται στην σκλήρυνση που προσδίδει ο σχηματιζόμενος μαρτενσίτης.

Οι Olson και Cohen /6/ σε εργασία τους σε ομογενή ωστενιτικό χάλυβα Fe-Ni-Mn παρατήρησαν ότι ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός υπό την επιβολή εξωτερικής τάσης συνοδεύεται από παραμόρφωση, την οποία έχουμε ήδη ονομάσει πλαστικότητα μετασχηματισμού. Το μεγαλύτερο μέρος της πλαστικότητας μετασχηματισμού αποδίδεται στην πλαστική ροή που συμβαίνει γύρω από τα πλακίδια μαρτενσίτη που σχηματίζονται, λόγω αύξησης του όγκου και της προσωμογής τους στη μήτρα. Όταν πραγματοποιείται αυτή η παραμόρφωση σε τάσεις χαμηλότερες από το όριο διαρροής του υλικού, η μεταβολή της παραμόρφωσης καθοδηγείται από την κινητική του μετασχηματισμού που προκαλεί την παραμόρφωση.

## 2.6 Μετασχηματισμός Προκαλούμενος από την Πλαστική Παραμόρφωση (Strain-Induced Plasticity).

Κατά τον μετασχηματισμό που προκαλείται από παραμόρφωση, δημιουργούνται νέες θέσεις πυρήνωσης λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης. Όπως προέκυψε από διάφορες εργασίες /7,8,9/, οι τομές των ζωνών διάτμησης (shear bands) είναι τα κύρια σημεία τα οποία δημιουργούνται οι θέσεις πυρήνωσης. Οι ζώνες διάτμησης ωστόσο δεν είναι τυχαία κατανεμημένες. Αρχικά είναι παράλληλες

μεταξύ τους, έως ότου αρχίσουν να λειτουργούν δευτερεύοντα συστήματα ολίσθησης κατά την παραμόρφωση. Έτσι, ο αριθμός των ζωνών διάτμησης είναι αρχικά μικρός και αρχίζει να αυξάνεται πολύ γρήγορα. Ο ρυθμός αύξησης των μαρτενιτικών εμβρύων που παράγονται σχετίζεται με την αύξηση των τομών των ζωνών διάτμησης.

## 2.7 Χάλυβες TRIP.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες χάλυβων TRIP. Η μία αποτελείται από τους ομογενείς ωστενιτικούς χάλυβες, ενώ η δεύτερη από πολυφασικούς χάλυβες που έχουν διεσπαρμένο παραμένοντα ωστενίτη, ή ωστενίτη που σχηματίζεται από καθίζηση, σε μήτρα φερρίτη και μπαινίτη/μαρτενσίτη. Στους ωστενιτικούς χάλυβες TRIP, για να προσδοθεί επιπλέον ομοιόμορφη παραμόρφωση κατά τη διαμόρφωση, πρέπει αυτή να πραγματοποιηθεί σε μια περιοχή θερμοκρασιών μεταξύ της  $M_s$  και της  $M_d$ . Σε αυτή την περιοχή, ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, είτε υποβοηθείται από την τάση όταν είμαστε κοντά στην  $M_s$ , είτε προκαλείται από την παραμόρφωση όταν είμαστε κοντά στην  $M_d$ . Όταν η παραμόρφωση πραγματοποιηθεί μεταξύ των δύο θερμοκρασιών, τότε έχουμε τη μέγιστη επιμήκυνση, σε συνδυασμό με υψηλές τιμές αντοχής σε εφελκυσμό.

## 2.8 Χάλυβες Διπλής Φάσης (Dual Phase).

Σε ότι έχει να κάνει με το ρόλο του παραμένοντα ωστενίτη στην ολκιμότητα των χάλυβων χαμηλής κραμάτωσης, υπάρχουν στη βιβλιογραφία αντιφατικές ιδέες. Ορισμένοι, όπως οι Furukawa /10/, Marder /11/, Rigsbee και Vander Arend /12/, Rashid και Rao /13/, θεωρούν ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της ολκιμότητας των χάλυβων διπλής φάσης και του ποσού του παραμένοντα ωστενίτη. Αποδίδουν την αύξηση της ολκιμότητας στην αυξημένη ποσότητα παραμένοντα ωστενίτη. Αντίθετα, ο Eldis /14/ δεν βρήκε σύνδεση μεταξύ του παραμένοντα ωστενίτη και της ολκιμότητας. Υποστηρίζει ότι, λόγω του ότι ο παραμένων ωστενίτης μετασχηματίζεται στα πρώτα στάδια της πλαστικής παραμόρφωσης, δεν είναι δυνατόν να επηρεάζει την έναρξη του λαιμού στη δοκιμή εφελκυσμού, που σχηματίζεται αργότερα κατά τη διαδικασία πλαστικής παραμόρφωσης. Ομοίως, οι Speich και Miller /15/ αγνόησαν την επίδραση του παραμένοντα ωστενίτη στην ολκιμότητα, λόγω του μικρού ποσού που παρατηρήθηκε στα δοκίμια τους.

## 2.9 Σταθερότητα Ωστενιτικής Διασποράς.

Σύμφωνα με πρόσφατη εργασία των Haidemenopoulos et al. /16/, οι μηχανισμοί που προσδίδουν σταθερότητα στον παραμένοντα ωστενίτη εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες:

1. Από τη χημική σύσταση των σωματιδίων του ωστενίτη.

Ανάλογα με τα κραματικά στοιχεία και την ποσότητα που περιέχονται στον ωστενίτη, έχουμε μεταβολή στη χημική κινούσα δύναμη για μαρτενσιτικό μετασχηματισμό.

2. Από το μέγεθος των σωματιδίων του ωστενίτη.

Το μέγεθος του σωματιδίου του ωστενίτη επηρεάζει την πιθανότητα να βρεθεί μια θέση πυρήνωσης, από όπου θα ξεκινήσει ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός

3. Από την τριαξονικότητα των τάσεων (stress triaxility).

Επειδή ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός συνοδεύεται από διόγκωση του πλέγματος, μπορεί ανάλογα με την εντατική κατάσταση στη οποία βρίσκεται το υλικό (εφελκυσμός, θλίψη, κλπ) να ευνοείται ή να εμποδίζεται από τις μηχανικές τάσεις

4. Από το όριο διαρροής του διεσπαρμένου ωστενίτη (θεωρούμε το όριο διαρροής του χάλυβα ταυτόσημο με αυτό του ωστενίτη).

Η αντοχή του υλικού επηρεάζει την μηχανική κινούσα δύναμη για το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό.

## 2.10 Θερμικές Κατεργασίες Πολυφασικών Χαλύβων TRIP.

Δύο είναι οι προσεγγίσεις / μέθοδοι που οδηγούν σε χάλυβες TRIP. Η μια είναι ο ισόθερμος μαινιτικός μετασχηματισμό (Bainite Isothermal Transformation, BIT) και η άλλη είναι η απευθείας μετατροπή καρβιδίων σε ωστενίτη (Direct Carbide Conversion, DCC). Η πρώτη αφορά στη σταθεροποίηση του ωστενίτη, που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης απόπτησης, μέσω του μετασχηματισμού σε μαινίτη. Η δεύτερη στοχεύει στην καθίζηση του ωστενίτη και τη σταθεροποίηση του κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης απόπτησης. Στην πράξη, βιομηχανικά χρησιμοποιείται η πρώτη μέθοδος (BIT), καθώς η δεύτερη (DCC) απαιτεί πολύ μεγάλη ακρίβεια τόσο κατά τη θέρμανση στην ενδοκρίσιμη περιοχή, όσο και κατά την άμεση ψύξη (βαφή), ώστε τοπικά τα καρβίδια να μετατραπούν σε ωστενίτη. Έχει βρεθεί (Takechi et al. /17/) ότι η σταθερότητα του ωστενίτη είναι ευαίσθητη στο χρόνο ισόθερμου μετασχηματισμού (isothermal transformation time). Η περιεκτικότητα σε άνθρακα του ωστενίτη αρχικά αυξάνεται, λόγω απόρριψης

άνθρακα από τον μπαινίτη, αλλά στο τέλος ελαττώνεται λόγω της καθίζησης καρβιδίων.

Εκτός από τον εμπλουτισμό σε άνθρακα, η μείωση του μεγέθους του ωστενίτη αποτελεί σημαντική συνεισφορά στη σταθερότητά του. Ως μέτρο της σταθερότητας της ωστενιτικής διασποράς έχει υιοθετηθεί η θερμοκρασία  $M^s$ , και μάλιστα μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη αύξηση της ολκιμότητας αν η  $M^s$  μειωθεί κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### 3.1 Εισαγωγή.

Από τον τίτλο της παρούσας εργασίας καταλαβαίνει αμέσως κανείς ότι έπρεπε να γίνει μια σειρά πειραμάτων θερμικών κατεργασιών σε χάλυβες TRIP, ώστε να διερευνηθεί το ποσοστό του παραμένοντα ωστενίτη, και πως αυτό επηρεάζεται από τις συνθήκες της θερμικής κατεργασίας (θερμοκρασία και χρόνος). Αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν δύο πολυφασικοί χάλυβες TRIP, οι TRIP 700 CR-FH και TRIP 800 HR-FH. Έγιναν δύο ομάδες πειραμάτων θερμικών κατεργασιών. Η πρώτη περιελάμβανε ενδοκρίσιμη ανόπτηση και στη συνέχεια βαφή, ενώ η δεύτερη ενδοκρίσιμη ανόπτηση, μπαινιτικό μετασχηματισμός και τέλος βαφή.

#### 3.2 Περιγραφή Υλικών.

Στα πλαίσια της εργασίας εξετάστηκαν δύο πολυφασικοί χάλυβες TRIP:

1. Χάλυβας TRIP 700 CR-FH (Cold Rolled – Full Hard)
2. Χάλυβας TRIP 800 HR-FH (Hot Rolled – Full Hard)

Η χημική σύσταση των δύο χάλυβων παρατίθεται στους πίνακες που ακολουθούν:

TRIP 700	C	Si	Mn	Al	Cr	Nb
	0,220%	0,090%	1,680%	1,490%	0,020%	0,002%

Πίνακας 3.1 Χημική σύσταση χάλυβα TRIP 700 CR-FH

TRIP 800	C	Mn	P	Si	S	N	Al	Cr	Mo
	0,1950%	1,6400%	0,0110%	1,5820%	0,0025%	0,0040%	0,0320%	0,0190%	0,0090%

Πίνακας 3.2 Χημική σύσταση χάλυβα TRIP 800 HR-FH

#### 3.3 Θερμικές Κατεργασίες.

##### 3.3.1 Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση.

Δόθηκαν τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες ανόπτησης για κάθε χάλυβα, όπως αυτές προέκυψαν από το υπολογιστικό πακέτο ThermoCalc, που θεωρητικά δίνουν ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη 25%, 50% και 75% σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Τα στοιχεία αυτά είναι συγκεντρωμένα στον ακόλουθο πίνακα



Είδος Χάλυβα	Θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης T (°C)	Ποσοστό ωστενίτη γ
TRIP 700 CR-FH	744	25%
	843	50%
	957	75%
TRIP 800 HR-FH	720	25%
	762	50%
	805	75%

**Πίνακας 3.3** Ποσοστό ωστενίτη που αναμένεται θεωρητικά να παραχθεί σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης

Από τα δύο μεγάλα τεμάχια που διαθέταμε – ένα για κάθε χάλυβα – κόπηκαν δεκαεννέα (19) μικρότερα για το καθένα, για λόγους ευκολίας στη χρήση. Είχαμε έτσι συνολικά τριάντα οκτώ (38) δείγματα τα οποία και υποβάλλαμε σε θερμική κατεργασία. Επιλέξαμε να πραγματοποιηθούν οι θερμικές κατεργασίες σε χρόνο 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300 και 600 sec διαδοχικά, ώστε να συγκριθεί το ποσοστό του ωστενίτη που παράγεται πειραματικά με αυτό που αναμένεται θεωρητικά.

Ο ακόλουθος συγκεντρωτικός πίνακας περιέχει συνοπτικά όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τις θερμικές κατεργασίες που έγιναν.

Είδος Χάλυβα	Θερμοκρασία Ενδοκρίσιμης Ανόπτησης T (°C)	Χρόνος Παραμονής t (sec)	Αύξων Αριθμός Δοκιμίου
TRIP 700 CR-FH	744	10	7.1
		30	7.2
		60	7.3
		90	7.4
		120	7.5
		180	7.6
		240	7.7
		300	7.8
		600	7.9
TRIP 700 CR-FH	957	10	7.10
		30	7.11
		60	7.12
		90	7.13
		120	7.14
		180	7.15
		240	7.16
		300	7.17
		600	7.18
TRIP 800 HR-FH	720	10	8.1
		30	8.2
		60	8.3
		90	8.4
		120	8.5
		180	8.6
		240	8.7
		300	8.8
		600	8.9
TRIP 800 HR-FH	815	10	8.10
		30	8.11
		60	8.12
		90	8.13
		120	8.14
		180	8.15
		240	8.16
		300	8.17
		600	8.18

Πίνακας 3.4 Συνθήκες πειραμάτων ενδοκρίσιμης ανόπτησης.

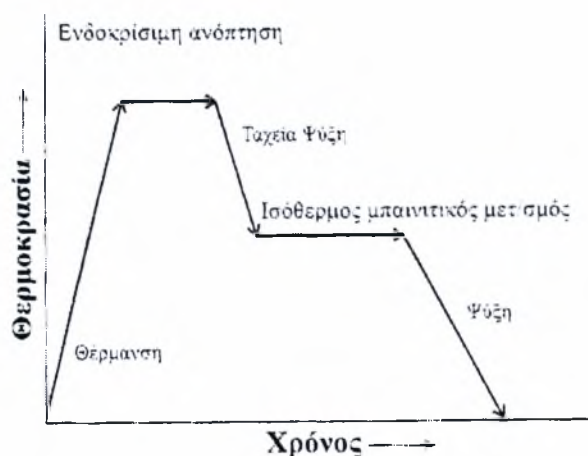
Το ένα μέρος των θερμικών κατεργασιών έγινε στους φούρνους υγρών αλάτων του Εργαστηρίου Υλικών του τμήματος και περιελάμβανε την ενδοκρίσιμη ανόπτηση των δοκιμίων 7.1 έως 7.9 και 8.1 έως 8.9 στους 744°C και 720°C αντίστοιχα.

Το δεύτερο μέρος των θερμικών κατεργασιών έγινε στους ατμοσφαιρικούς φούρνους του Εργαστηρίου Υλικών. Περιελάμβανε την ενδοκρίσιμη ανόπτηση των δοκιμίων 7.10 έως 7.18 και 8.10 έως 8.18 στους 957°C και 815°C αντίστοιχα. Ο λόγος που δεν έγινε και αυτή η σειρά των θερμικών κατεργασιών στους φούρνους υγρών αλάτων, παρ' ότι υπάρχει το πρόβλημα της οξειδωσης στους ατμοσφαιρικούς φούρνους, είναι ότι αντιμετωπίστηκαν δυσκολίες τόσο στην επίτευξη, όσο και στη διατήρηση των ζητούμενων θερμοκρασιών για όλα τα απαιτούμενα χρονικά διαστήματα. Για όλα τα δοκίμια, αμέσως μετά την ενδοκρίσιμη ανόπτηση ακολούθησε βαφή σε νερό.

Τέλος, έγινε ανόπτηση δύο δοκιμίων, των δοκιμίων 7.19 και 8.19, στους ατμοσφαιρικούς φούρνους, στους 1050° C για 30 min, με σκοπό την πλήρη ωστενιτοποίησή τους.

### 3.3.2 Μπαινιτικός Μετασχηματισμός.

Η θερμική κατεργασία που πραγματοποιήθηκε στην περίπτωση αυτή περιελάμβανε ενδοκρίσιμη ανόπτηση, ακολουθούμενη από μπαινιτικό μετασχηματισμό και στο τέλος βαφή. Στη συνέχεια παρατίθεται το Σχήμα 3.1, όπου απεικονίζεται σχηματικά η θερμική κατεργασία αυτή. Επίσης, ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας, με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μπαινιτικό μετασχηματισμό.



Σχήμα 3.1 Σχηματική απεικόνιση της θερμικής κατεργασίας που πραγματοποιήθηκε.

Είδος Χάλυβα	Θερμοκρασία Ενδοκρίσιμης Ανόπτησης T (°C)	Χρόνος Παραμονής t (sec)	Θερμοκρασία Μπαινιτικού Μετασχηματισμού T (°C)	Χρόνος Παραμονής t (sec)	Αύξων Αριθμός Δοκιμίου
TRIP 700 CR-FH	744	600	350	300	01
TRIP 700 CR-FH	744	600	450	300	02
TRIP 700 CR-FH	843	600	450	300	07
TRIP 700 CR-FH	843	600	450	600	08
TRIP 700 CR-FH	744	600	350	600	09
TRIP 800 HR-FH	720	600	350	300	11
TRIP 800 HR-FH	762	600	250	300	13
TRIP 800 HR-FH	762	600	350	300	15
TRIP 800 HR-FH	762	600	350	600	16
TRIP 800 HR-FH	762	600	450	300	17
TRIP 800 HR-FH	762	600	450	600	18
TRIP 800 HR-FH	805	600	450	300	20
TRIP 800 HR-FH	805	600	350	300	M1
TRIP 800 HR-FH	805	600	350	600	M2
TRIP 700 CR-FH	843	600	350	300	M3
TRIP 700 CR-FH	843	600	350	600	M4
TRIP 700 CR-FH	744	600	400	300	M5
TRIP 700 CR-FH	843	600	400	300	M6
TRIP 800 HR-FH	805	600	400	300	M7

Πίνακας 3.5 Στοιχεία θερμικών κατεργασιών μπαινιτικού μετασχηματισμού.

### 3.4 Προετοιμασία Δοκιμίων.

Από τα δοκίμια τα οποία επεξεργαστήκαμε θερμικά κόπηκαν μεταλλογραφικά δοκίμια, τα οποία και εγκιβωτίστηκαν σε ακρυλική ρητίνη AcryFix. Εν συνεχεία έγινε λείανση των δοκιμίων με λειαντικό χαρτί καρβιδίου του πυριτίου διαμέτρου κόκκου 80, 120, 220, 320, 500, 800 και 1000 gritt στη σειρά. Ακολούθησε στύλβωση των δοκιμίων.

### 3.5 Χημική Προσβολή.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη αντιδραστηρίων για την χημική προσβολή των δοκιμίων. Το ένα ήταν Nital 5% και το άλλο LePera. Το μεν Nital προκαλεί - σε συνδυασμό με χρήση σκίασης στο μικροσκόπιο - την εμφάνιση διαφορετικών επιπέδων για διαχωρισμό των φάσεων της μικροδομής. Το LePera από την άλλη επιφέρει καλύτερο χρωματισμό των διαφόρων φάσεων και διευκολύνει έτσι το διαχωρισμό τους. Πιο αναλυτικά:

#### 3.5.1 Nital.

Το Nital 5% είναι διάλυμα 5% νιτρικού οξέος ( $\text{HNO}_3$ ) σε αιθυλική αλκοόλη ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{OH}$ ). Χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά με το LePera για να επιβεβαιωθούν ορισμένες εκτιμήσεις σχετικά με τις διάφορες φάσεις της μικροδομής στα υπό μελέτη δοκίμια. Ο χρόνος χημικής προσβολής ήταν περίπου 10 sec.

#### 3.5.2 LePera.

Το συγκεκριμένο χημικό αντιδραστήριο φέρει το όνομα του Dr Frank LePera και αποτελείται από ένα μείγμα δύο διαλυμάτων. Το ένα διάλυμα είναι 1% μεταδιθειώδες νάτριο ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) σε απεσταγμένο νερό, ενώ το άλλο είναι 4% πικρικό οξύ [ $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO})_3\text{OH}$ ] σε αιθυλική αλκοόλη. Η αναλογία ανάμιξης είναι 1:1.

Ο χρόνος χημικής προσβολής κυμαινόταν από 10 έως 15 sec. Το αποτέλεσμα αυτής είναι ο χρωματισμός των διαφόρων φάσεων ως εξής:

- Για τον χάλυβα TRIP 800 ο φερρίτης εμφανίζεται καφέ και ο μαρτενσίτης λευκός.
- Για τον χάλυβα TRIP 700 ο φερρίτης εμφανίζεται μπεζ ή καφέ και ο μαρτενσίτης μπλε ή γκρι.

### **3.6 Οπτική Μικροσκοπία.**

Τα δοκίμια αφού προσεβλήθησαν χημικά μελετήθηκαν στα οπτικά μικροσκόπια του εργαστηρίου. Με χρήση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής Leica πάρθηκαν φωτογραφίες για να γίνει ψηφιακή ανάλυση εικόνας.

### **3.7 Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας (Image Analysis).**

Η ψηφιακή ανάλυση εικόνας έγινε για να υπολογιστεί το ποσοστό του παραμένουτος ωστενίτη υπό τη μορφή μαρτενσίτη. Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το Image-Pro Plus 4.5. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατίθενται αναλυτικά στη συνέχεια της εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 4.1 Μεταλλογραφία Χαλύβων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες που τραβήχτηκαν, με σκοπό να παρουσιαστεί η μικροδομή που προκύπτει μετά την πειραματική διαδικασία και πριν την ψηφιακή ανάλυση εικόνας.

##### 4.1.1. As Received

Αρχικά παρατίθενται δύο φωτογραφίες, μια για κάθε χάλυβα, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές της δομής που είχαν τα υλικά μας όταν παρελήφθησαν, προτού υποβληθούν στις θερμικές κατεργασίες. Η δομή τους είναι φερριτο-περλιτική και η κατευθυντικότητα των κόκκων οφείλεται στην έλαση στην οποία έχουν υποβληθεί τα υλικά μας.



**Εικόνα 4.1** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH as received.



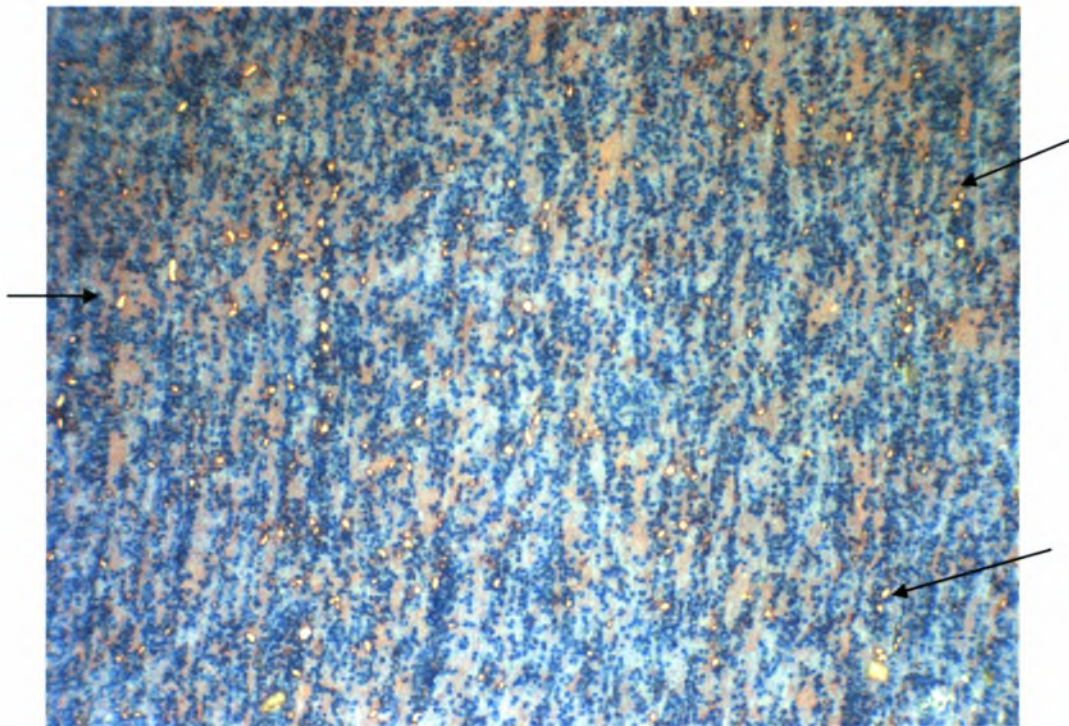
**Εικόνα 4.2** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH as received.

#### **4.1.2 Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση**

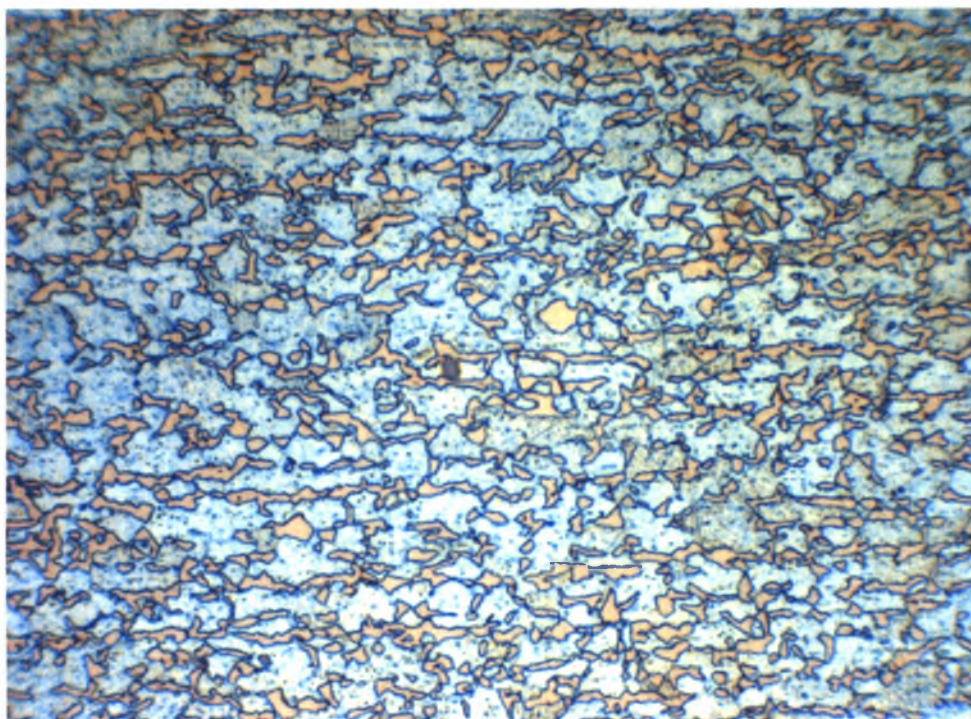
##### **4.1.2.1 Χάλυβας TRIP 700 CR-FH**

Η μικροδομή των δοκιμίων μετά την ενδοκρίσιμη ανόπτηση είναι δομή φερρίτη – ωστενίτη. Μετά την βαφή που ακολουθεί την ενδοκρίσιμη ανόπτηση, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3, για το χάλυβα TRIP 700 CR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C για 180 sec, η ποσότητα ωστενίτη που σχηματίστηκε ήταν πολύ μικρή. Στην εικόνα, ο ωστενίτης, με τη μορφή μαρτενσίτη, είναι οι μικροί λευκοί κόκκοι, ορισμένους από τους οποίους δείχνουν τα βέλη.





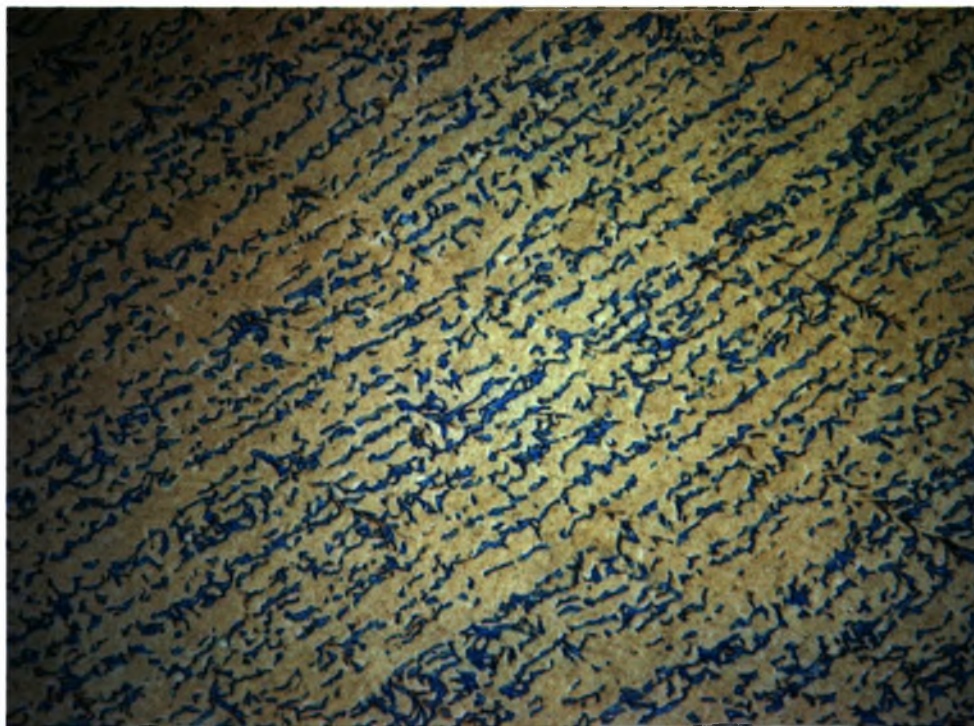
**Εικόνα 4.3** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C για 180 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.



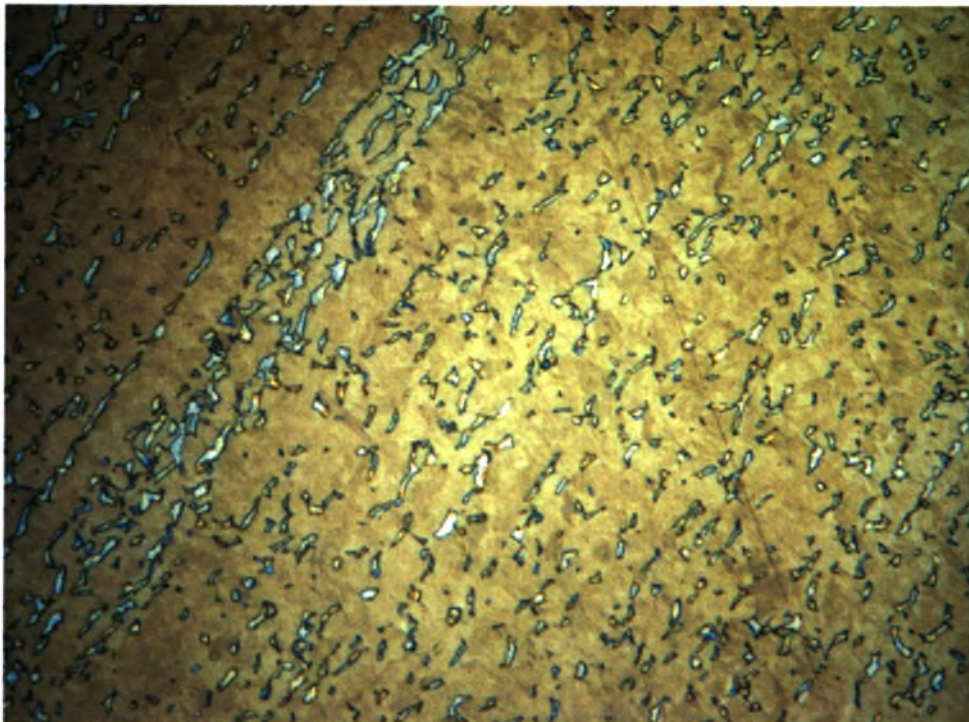
**Εικόνα 4.4** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C για 600 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.

Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται ξεκάθαρα, ότι για ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C για 600 sec, το ποσοστό ωστενίτη στον χάλυβα TRIP 700 CR-FH είναι σαφώς μεγαλύτερο από ότι για 180 sec.

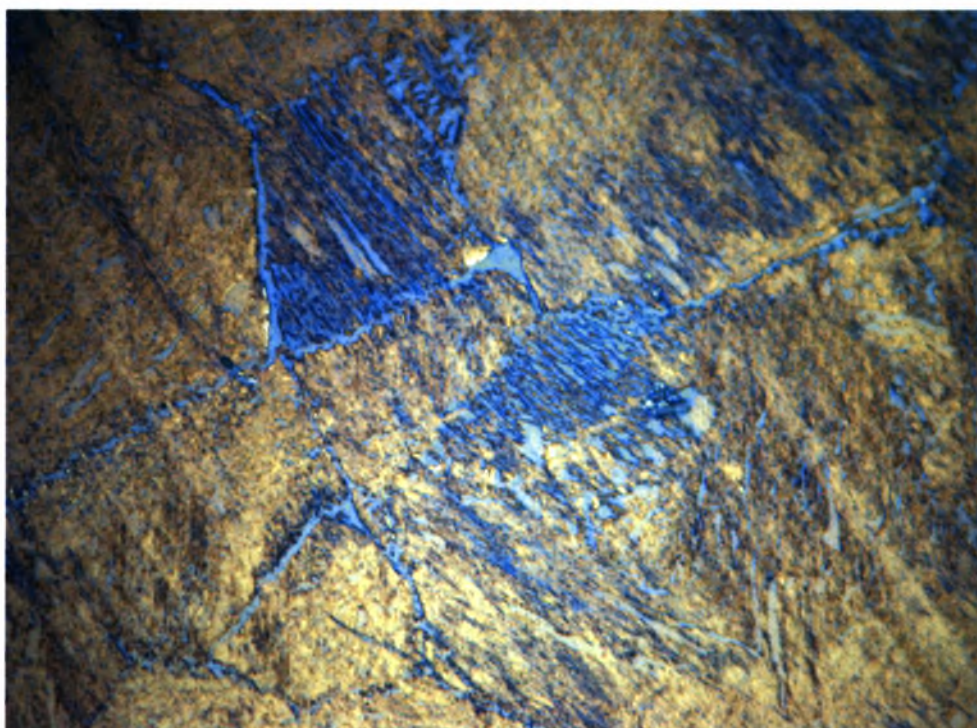
Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που παρατηρείται στις δύο αυτές μεταλλογραφίες, αλλά και σε όλες τις υπόλοιπες για το χάλυβα TRIP 700 CR-FH και για ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C, είναι ότι ενώ ο γενικός κανόνας θέλει το μαρτενσίτη να χρωματίζεται με μπλε ή γκρι χρώμα και το φερρίτη μεζ ή καφέ, στην πράξη φαίνεται να ισχύει το αντίθετο. Μόλις όμως περάσουμε σε υψηλότερες θερμοκρασίες ενδοκρίσιμης ανόπτησης, και πιο συγκεκριμένα στους 957°C, ο γενικός κανόνας φαίνεται να ισχύει. Αυτό φαίνεται και από τις επόμενες δύο φωτογραφίες, στις Εικόνες 4.5 και 4.4. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει ο χρόνος παραμονής στη θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης, τόσο αυξάνεται και το ποσοστό του ωστενίτη που μετασχηματίζεται.



**Εικόνα 4.5** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 957°C για 60 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.



**Εικόνα 4.6** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ενδοκρυστιμη ανόπτηση στους 957°C για 240 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.

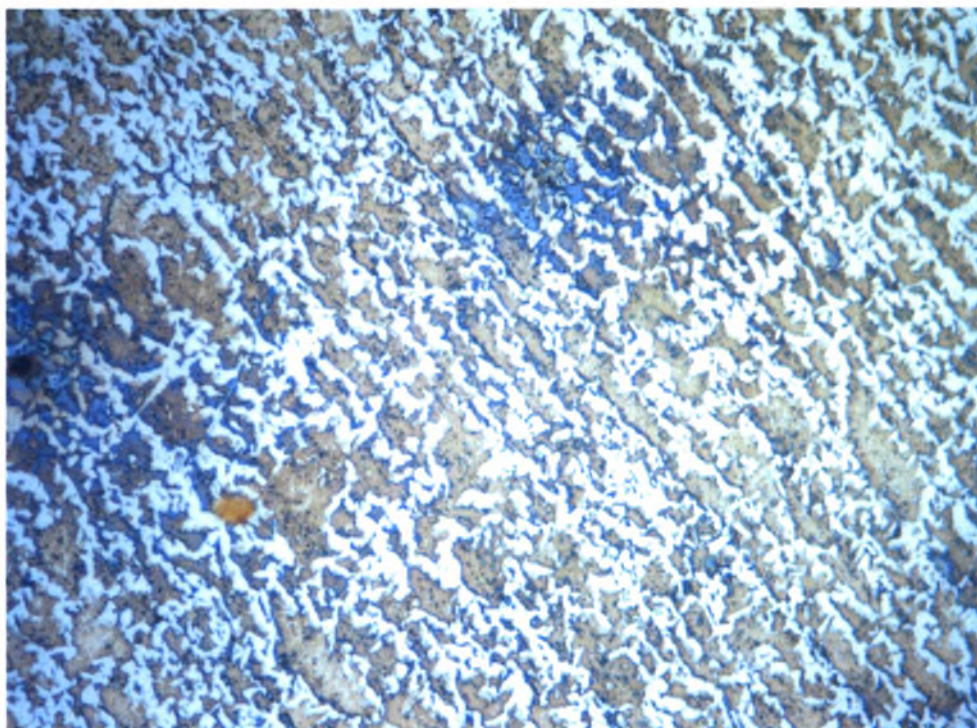


**Εικόνα 4.7** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ανόπτηση στους 1050°C για 30 min και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.

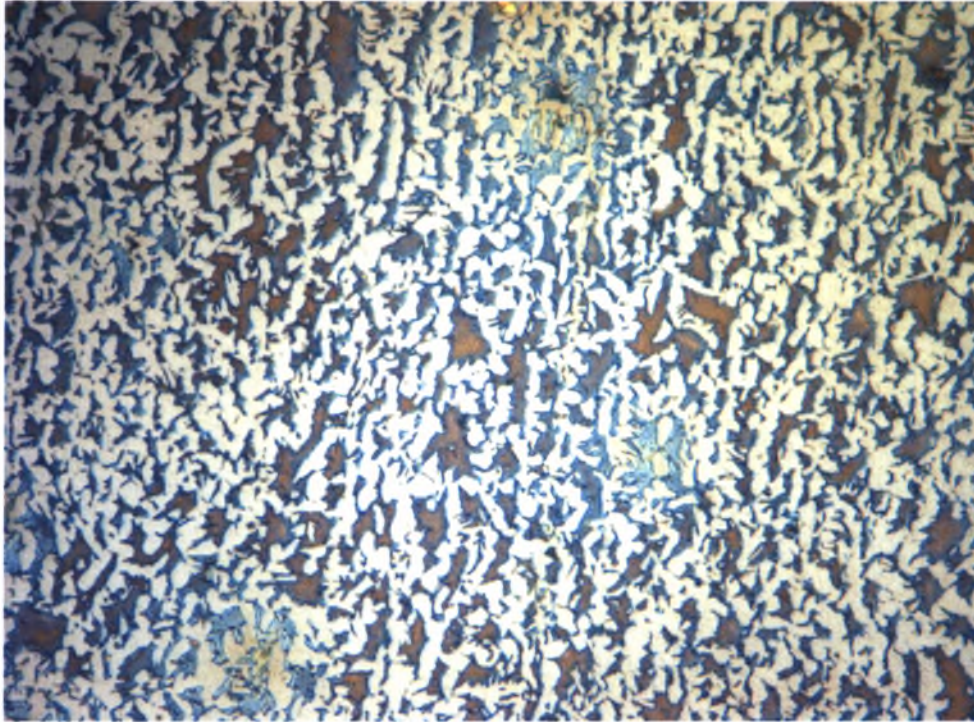
Τέλος παρατίθεται μια φωτογραφία του ίδιου χάλυβα μετά από ανόπτηση στους 1050°C για 30 min. Παρατηρούμε ότι η δομή του είναι καθαρά μαρτενσιτική, ενώ διαγράφονται ορισμένοι από τους κόκκους. Συμπεραίνουμε επομένως ότι έχει γίνει πλήρης ωστενιτοποίηση, όπως αναμενόταν.

#### 4.1.2.2 Χάλυβας TRIP 800 HR-FH

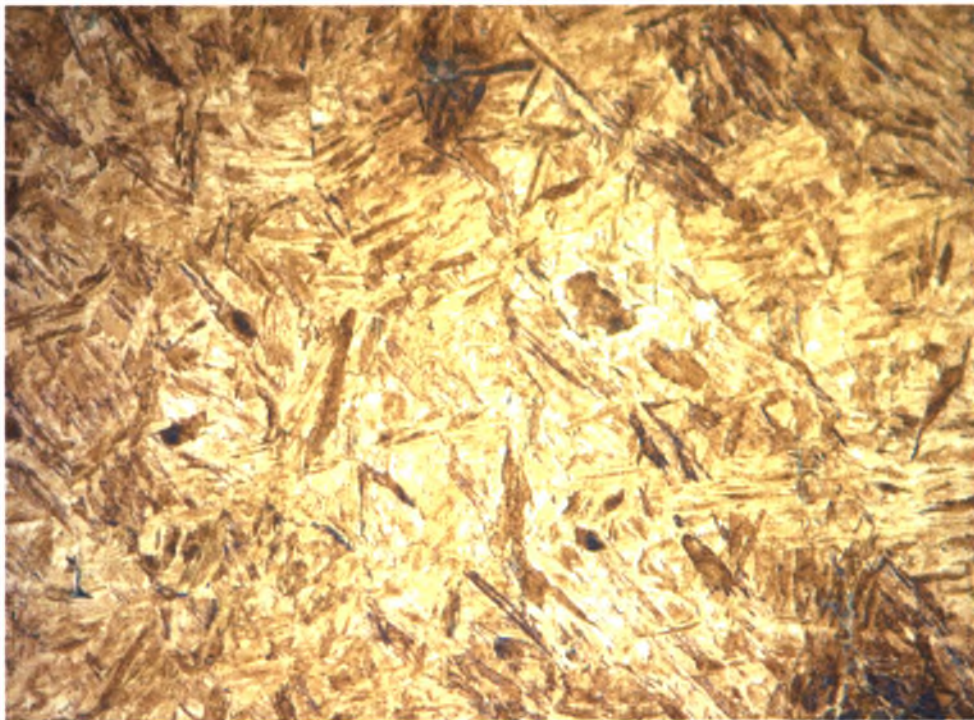
Σε αντίθεση με τις μεταλλογραφίες του χάλυβα TRIP 700 CR-FH, στο χάλυβα TRIP 800 HR-FH δεν παρατηρήθηκε απόκλιση από το γενικό κανόνα που θέλει μετά τη χημική προσβολή με LePera ο μαρτενσίτης να χρωματίζεται λευκός και ο φερρίτης καφέ. Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένες μεταλλογραφίες χαρακτηριστικές για το χάλυβα TRIP 800 HR-FH.



**Εικόνα 4.8** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C για 120 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.



**Εικόνα 4.9** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C για 600 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.



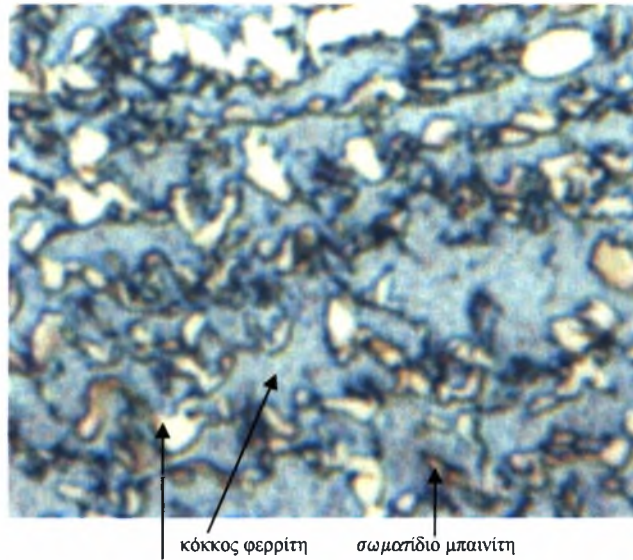
**Εικόνα 4.10** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH μετά από ανόπτηση στους 1050°C για 30 min και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.

### 4.1.3 Μπαινιτικός Μετασχηματισμός

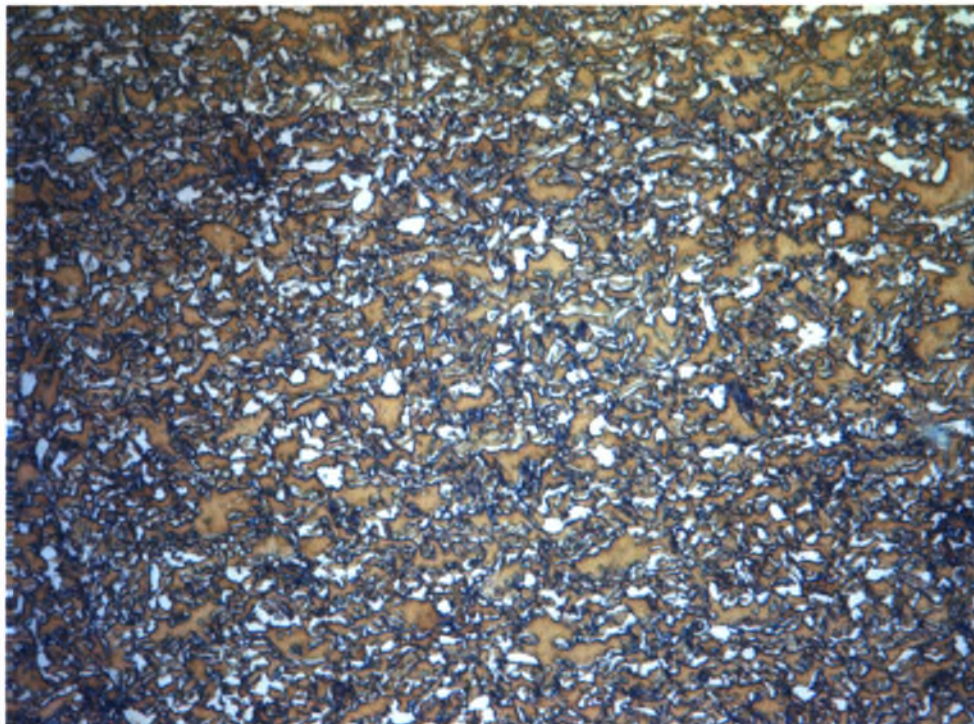
Οι εικόνες που παρατίθενται στη συνέχεια είναι χαρακτηριστικές μεταλλογραφίες δοκιμίων τόσο του χάλυβα TRIP 700 CR-FH όσο και του TRIP 800 HR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση και μπαινιτικό μετασχηματισμό. Η μικροδομή των δοκιμίων είναι δομή φερρίτη – ωστενίτη – μπαινίτη. Μετά την βαφή, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη. Ο φερρίτης είναι η μπεζ/καφέ φάση, ο παραμένων ωστενίτης ή ο μαρτενσίτης είναι η λευκή φάση, ενώ ο μπαινιτης είναι τα σκούρα καφέ/μαύρα σωματίδια.



**Εικόνα 4.11** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 HR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 844°C για 600 sec, μπαινιτικό μετασχηματισμό στους 450°C για 600 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.

**Εικόνα 4.12**

σωματίδιο μαρτενσίτη ή παραμένοντα ωστενίτη  
Λεπτομέρεια εικόνας 4.11, όπου διακρίνονται και οι τρεις φάσεις που υπάρχουν στο δοκίμιο.

**Εικόνα 4.13**

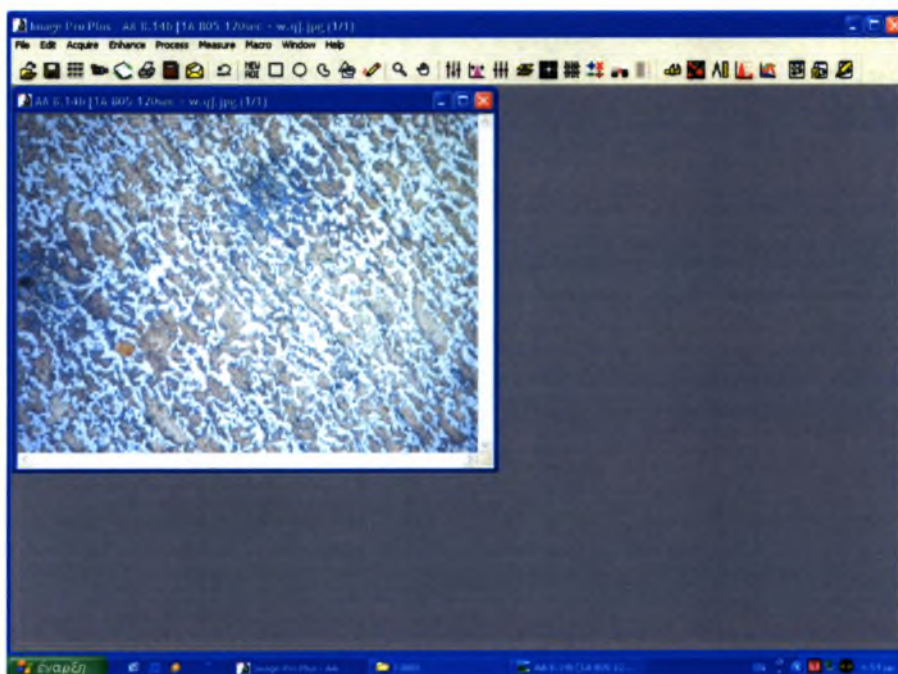
Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C για 600 sec, μπαϊνιτικό μετασχηματισμό στους 350°C για 300 sec και χημική προσβολή με LePera για 15 sec, σε μεγέθυνση 1000X.

## 4.2 Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας των Δοκιμίων που Υποβλήθηκαν σε Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή αποτελεσμάτων μέσω της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας με το λογισμικό Image-Pro Plus 4.5 είναι η εξής:

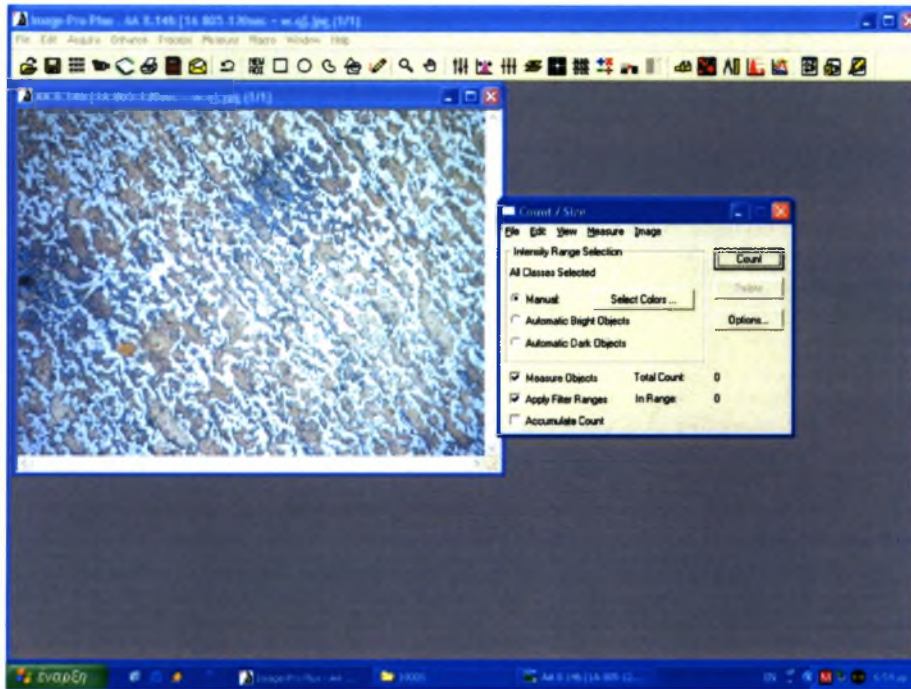
Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα επιλογής χρωμάτων σε μια εικόνα είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα (φωτεινά ή σκούρα χρώματα), με το κάθε χρώμα να αντιστοιχεί σε διαφορετικό στοιχείο της μικροδομής, με την αντιστοιχία που έχουμε ήδη αναφέρει στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια υπολογίζει την επιφάνεια που καταλαμβάνουν τα στοιχεία που έχουμε επιλέξει ως προς τη συνολική επιφάνεια της εικόνας. Το αποτέλεσμα που προκύπτει μας δίνει και το ποσοστό της φάσης που μας ενδιαφέρει.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται το περιβάλλον εργασίας του προγράμματος Image-Pro Plus 4.5.

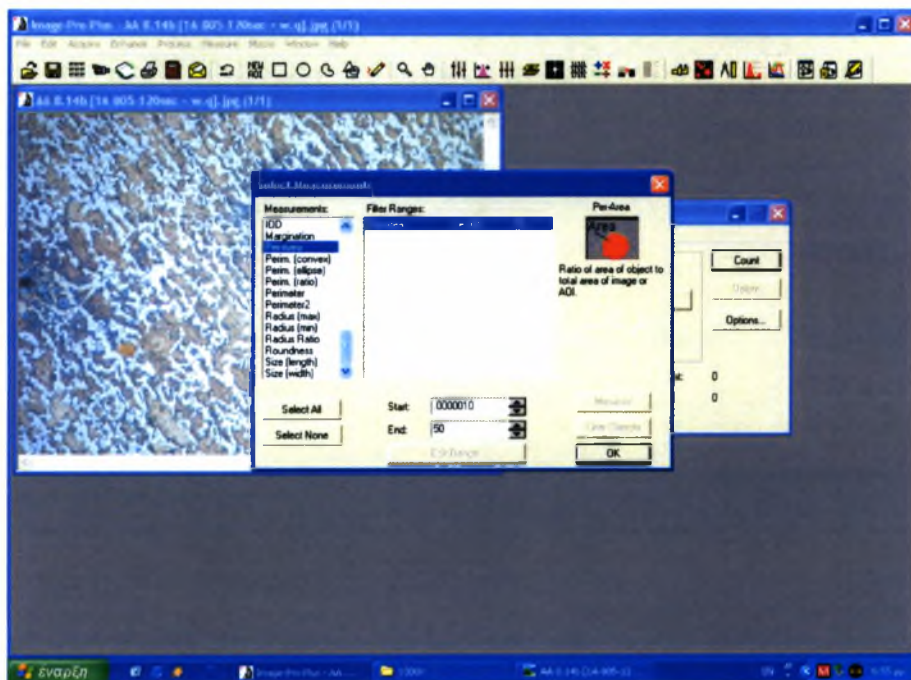


Εικόνα 4.14 Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5.

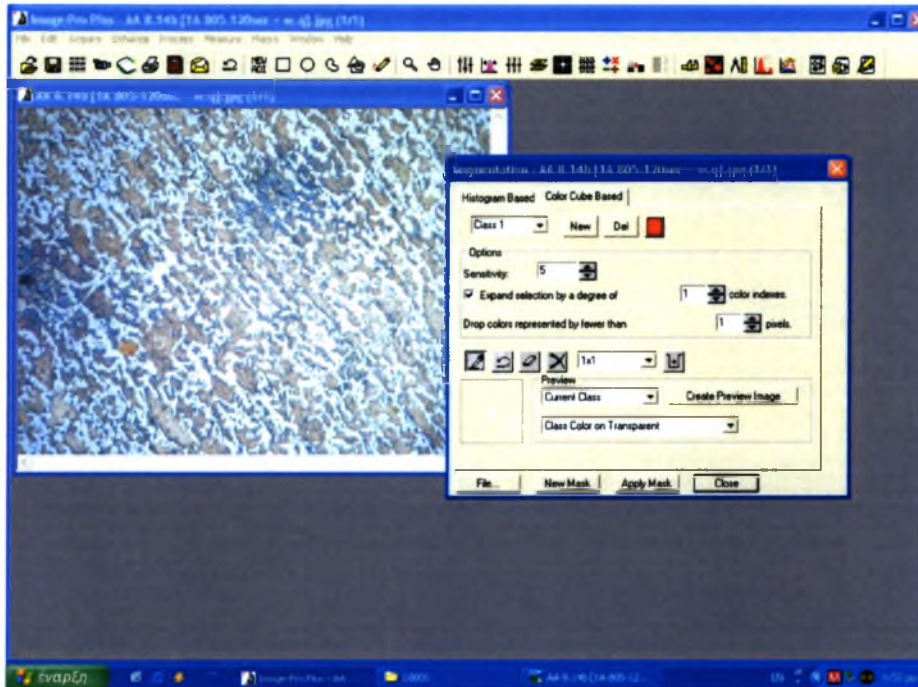




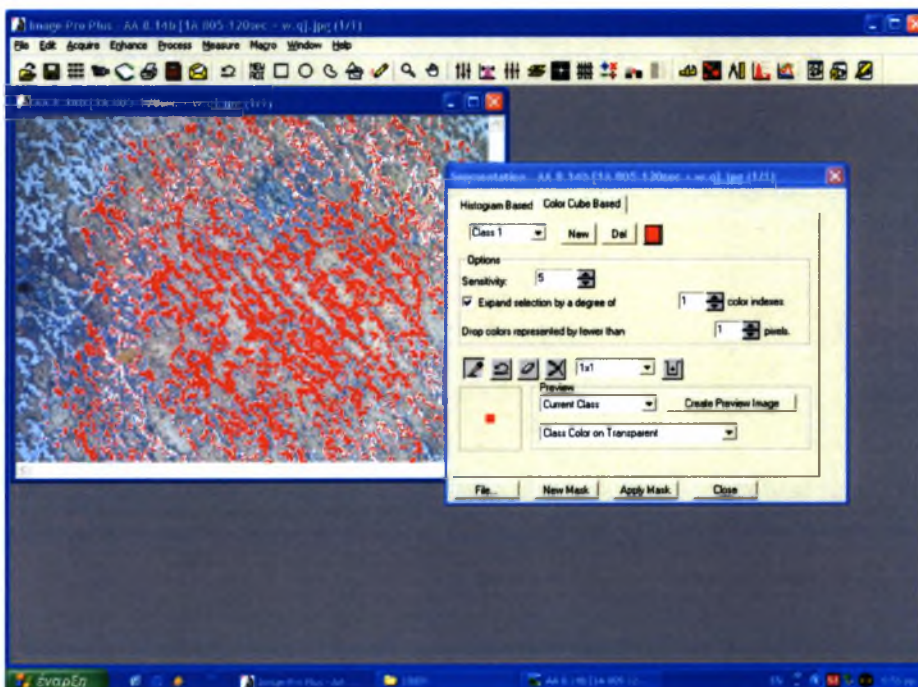
Εικόνα 4.15 Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5.



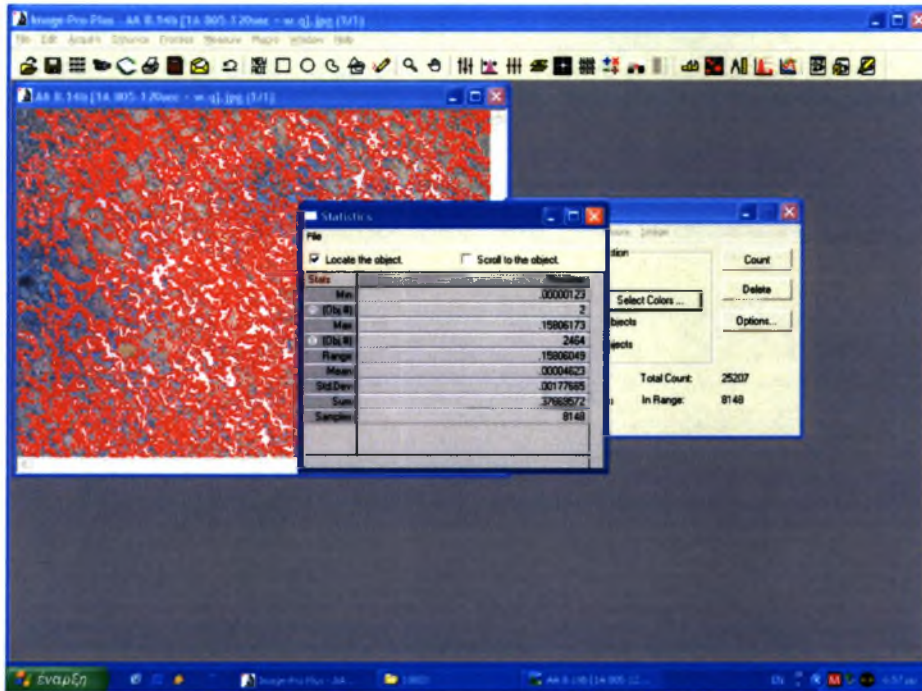
Εικόνα 4.16 Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5.



Εικόνα 4.17 Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5.



Εικόνα 4.18 Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5.



Εικόνα 4.19 Χαρακτηριστική εικόνα του περιβάλλοντος εργασίας του Image-Pro Plus 4.5.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για καθένα από τους δύο χάλυβες, σε όλες τις θερμοκρασίες και για όλους τους χρόνους. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα αυτά αναπαρίστανται γραφικά σε διαγράμματα

TRIP 700 CR-FH / T = 744°C			
A/A 7.1 (744°C - 10SEC + W.Q.)		A/A 7.2 (744°C - 30SEC + W.Q.)	
<b>Stats</b>	<b>Per-Area</b>	<b>Stats</b>	<b>Per-Area</b>
Min	0	Min	0
(Obj,#)	0	(Obj,#)	0
Max	0	Max	0
(Obj,#)	0	(Obj,#)	0
Range	0	Range	0
Mean	0	Mean	0
Std,Dev	0	Std,Dev	0
<b>Sum</b>	<b>0</b>	<b>Sum</b>	<b>0</b>
Samples	0	Samples	0

A/A 7.3 (744°C - 60SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0
(Obj,#)	0
Max	0
(Obj,#)	0
Range	0
Mean	0
Std,Dev	0
<b>Sum</b>	<b>0</b>
Samples	0

A/A 7.4 (744°C - 90SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0
(Obj,#)	0
Max	0
(Obj,#)	0
Range	0
Mean	0
Std,Dev	0
<b>Sum</b>	<b>0</b>
Samples	0

A/A 7.5 (744°C - 120SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0
(Obj,#)	0
Max	0
(Obj,#)	0
Range	0
Mean	0
Std,Dev	0
<b>Sum</b>	<b>0</b>
Samples	0

A/A 7.6 (744°C - 180SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000109
(Obj,#)	10
Max	0,00018346
(Obj,#)	518
Range	0,00018236
Mean	0,00001547
Std,Dev	0,00002212
<b>Sum</b>	<b>0,00439541</b>
Samples	284

A/A 7.7 (744°C - 240SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000109
(Obj,#)	43
Max	0,00015517
(Obj,#)	213
Range	0,00015408
Mean	0,0000037
Std,Dev	0,00000849
<b>Sum</b>	<b>0,00362185</b>
Samples	977

A/A 7.8 (744°C - 300SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000109
(Obj,#)	55
Max	0,0024164
(Obj,#)	13836
Range	0,0024153
Mean	0,00004013
Std,Dev	0,00009656
<b>Sum</b>	<b>0,09279171</b>
Samples	2312

A/A 7.9 (744°C - 600SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000117
(Obj,#)	5
Max	0,00207185
(Obj,#)	14534
Range	0,00207067
Mean	0,00003919
Std,Dev	0,00012818
<b>Sum</b>	<b>0,13953717</b>
Samples	3560

TRIP 700 CR-FH / T = 957°C			
A/A 7.10 (957°C - 10SEC + W.Q.)		A/A 7.11 (957°C - 30SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area	Stats	Per-Area
Min	0	Min	0
(Obj,#)	0	(Obj,#)	0
Max	0	Max	0
(Obj,#)	0	(Obj,#)	0
Range	0	Range	0
Mean	0	Mean	0
Std,Dev	0	Std,Dev	0
<b>Sum</b>	<b>0</b>	<b>Sum</b>	<b>0</b>
Samples	0	Samples	0

A/A 7.12 (957°C - 60SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	29
Max	0,72369051
(Obj,#)	10
Range	0,72368926
Mean	0,00028246
Std,Dev	0,0141573
<b>Sum</b>	<b>0,7378031</b>
Samples	2612

A/A 7.13 (957°C - 90SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	40
Max	0,83903813
(Obj,#)	15
Range	0,83903688
Mean	0,00073771
Std,Dev	0,02475244
<b>Sum</b>	<b>0,84689593</b>
Samples	1148

A/A 7.14 (957°C - 120SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	50
Max	0,80096436
(Obj,#)	5
Range	0,8009631
Mean	0,00037569
Std,Dev	0,01722595
<b>Sum</b>	<b>0,81186658</b>
Samples	2161

A/A 7.15 (957°C - 180SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	2
Max	0,79286337
(Obj,#)	1
Range	0,79286212
Mean	0,00027347
Std,Dev	0,01462253
<b>Sum</b>	<b>0,80374801</b>
Samples	2939

A/A 7.16 (957°C - 240SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	53
Max	0,7926057
(Obj,#)	4
Range	0,79260445
Mean	0,00034494
Std,Dev	0,01640604
<b>Sum</b>	<b>0,80474818</b>
Samples	2333

A/A 7.17 (957°C - 300SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	9
Max	0,89338648
(Obj,#)	1
Range	0,89338523
Mean	0,00127801
Std,Dev	0,03371853
<b>Sum</b>	<b>0,89589018</b>
Samples	701

<b>A/A 7.18 (957°C - 600SEC + W.Q.)</b>	
<b>Stats</b>	<b>Per-Area</b>
Min	0,00000123
(Obj,#)	227
Max	0,90573788
(Obj,#)	1
Range	0,90573663
Mean	0,00217934
Std,Dev	0,0443006
<b>Sum</b>	<b>0,90878505</b>
Samples	417

<b>TRIP 800 CR-FH / T = 720°C</b>			
<b>A/A 8.1 (720°C - 10SEC + W.Q.)</b>		<b>A/A 8.2 (720°C - 30SEC + W.Q.)</b>	
<b>Stats</b>	<b>Per-Area</b>	<b>Stats</b>	<b>Per-Area</b>
Min	0,00000123	Min	0,00000123
(Obj,#)	17	(Obj,#)	22
Max	0,00022895	Max	0,00043288
(Obj,#)	1442	(Obj,#)	6969
Range	0,00022772	Range	0,00043165
Mean	0,00000783	Mean	0,00000406
Std,Dev	0,00002015	Std,Dev	0,0000132
<b>Sum</b>	<b>0,00378321</b>	<b>Sum</b>	<b>0,00597701</b>
Samples	483	Samples	1471

<b>A/A 8.3 (720°C - 60SEC + W.Q.)</b>		<b>A/A 8.4 (720°C - 90SEC + W.Q.)</b>	
<b>Stats</b>	<b>Per-Area</b>	<b>Stats</b>	<b>Per-Area</b>
Min	0,00000123	Min	0,00000123
(Obj,#)	8	(Obj,#)	13
Max	0,00013564	Max	0,00138209
(Obj,#)	2622	(Obj,#)	14391
Range	0,0001344	Range	0,00138085
Mean	0,00000668	Mean	0,00002023
Std,Dev	0,00001184	Std,Dev	0,00006166
<b>Sum</b>	<b>0,00736497</b>	<b>Sum</b>	<b>0,06820665</b>
Samples	1101	Samples	3370

<b>A/A 8.5 (720°C - 120SEC + W.Q.)</b>		<b>A/A 8.6 (720°C - 180SEC + W.Q.)</b>	
<b>Stats</b>	<b>Per-Area</b>	<b>Stats</b>	<b>Per-Area</b>
Min	0,00000123	Min	0,00000123
(Obj,#)	54	(Obj,#)	23
Max	0,03167377	Max	0,0029919
(Obj,#)	6669	(Obj,#)	3719
Range	0,03167253	Range	0,00299066
Mean	0,00002912	Mean	0,00002898
Std,Dev	0,00069224	Std,Dev	0,0001307
<b>Sum</b>	<b>0,06127889</b>	<b>Sum</b>	<b>0,05162588</b>
Samples	2104	Samples	1781

A/A 8.7 (720°C - 240SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	14
Max	0,01937121
(Obj,#)	151
Range	0,01936997
Mean	0,00003015
Std,Dev	0,00053143
<b>Sum</b>	<b>0,07497435</b>
Samples	2486

A/A 8.9 (720°C - 600SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	1
Max	0,01879186
(Obj,#)	6959
Range	0,01879063
Mean	0,00001636
Std,Dev	0,00025528
<b>Sum</b>	<b>0,11651897</b>
Samples	7122

A/A 8.8 (720°C - 300SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	12
Max	0,01505314
(Obj,#)	12019
Range	0,01505191
Mean	0,00001353
Std,Dev	0,00026769
<b>Sum</b>	<b>0,13313991</b>
Samples	9834

TRIP 800 CR-FH / T = 805°C			
A/A 8.10 (805°C - 10SEC + W.Q.)		A/A 8.11 (805°C - 30SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area	Stats	Per-Area
Min	0	Min	0
(Obj,#)	0	(Obj,#)	0
Max	0	Max	0
(Obj,#)	0	(Obj,#)	0
Range	0	Range	0
Mean	0	Mean	0
Std,Dev	0	Std,Dev	0
<b>Sum</b>	<b>0</b>	<b>Sum</b>	<b>0</b>
Samples	0	Samples	0

A/A 8.12 (805°C - 60SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0
(Obj,#)	0
Max	0
(Obj,#)	0
Range	0
Mean	0
Std,Dev	0
<b>Sum</b>	<b>0</b>
Samples	0

A/A 8.13 (805°C - 90SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0
(Obj,#)	0
Max	0
(Obj,#)	0
Range	0
Mean	0
Std,Dev	0
<b>Sum</b>	<b>0</b>
Samples	0

A/A 8.14 (805°C - 120SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	2
Max	0,15806173
(Obj,#)	2464
Range	0,15806049
Mean	0,00004623
Std,Dev	0,00177665
<b>Sum</b>	<b>0,37669572</b>
Samples	8148

A/A 8.15 (805°C - 180SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	1
Max	0,57482266
(Obj,#)	6
Range	0,57482141
Mean	0,00013311
Std,Dev	0,00845716
<b>Sum</b>	<b>0,6148631</b>
Samples	4619

A/A 8.16 (805°C - 240SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	13
Max	0,59457082
(Obj,#)	4
Range	0,59456956
Mean	0,00026179
Std,Dev	0,01219258
<b>Sum</b>	<b>0,62228854</b>
Samples	2377

A/A 8.17 (805°C - 300SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	101
Max	0,66196018
(Obj,#)	12
Range	0,66195893
Mean	0,00041216
Std,Dev	0,01606475
<b>Sum</b>	<b>0,6994469</b>
Samples	1697

A/A 8.18 (805°C - 600SEC + W.Q.)	
Stats	Per-Area
Min	0,00000123
(Obj,#)	23
Max	0,63335097
(Obj,#)	3
Range	0,63334972
Mean	0,00026428
Std,Dev	0,01263918
<b>Sum</b>	<b>0,66335744</b>
Samples	2510



## 4.2.1 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα.

TRIP 700 CR-FH (T = 744°C)	
t (sec)	Sum vol $\gamma$ (%)
10	0
30	0
60	0
90	0
120	0
180	0,439541
240	0,362185
300	9,279171
600	13,953717

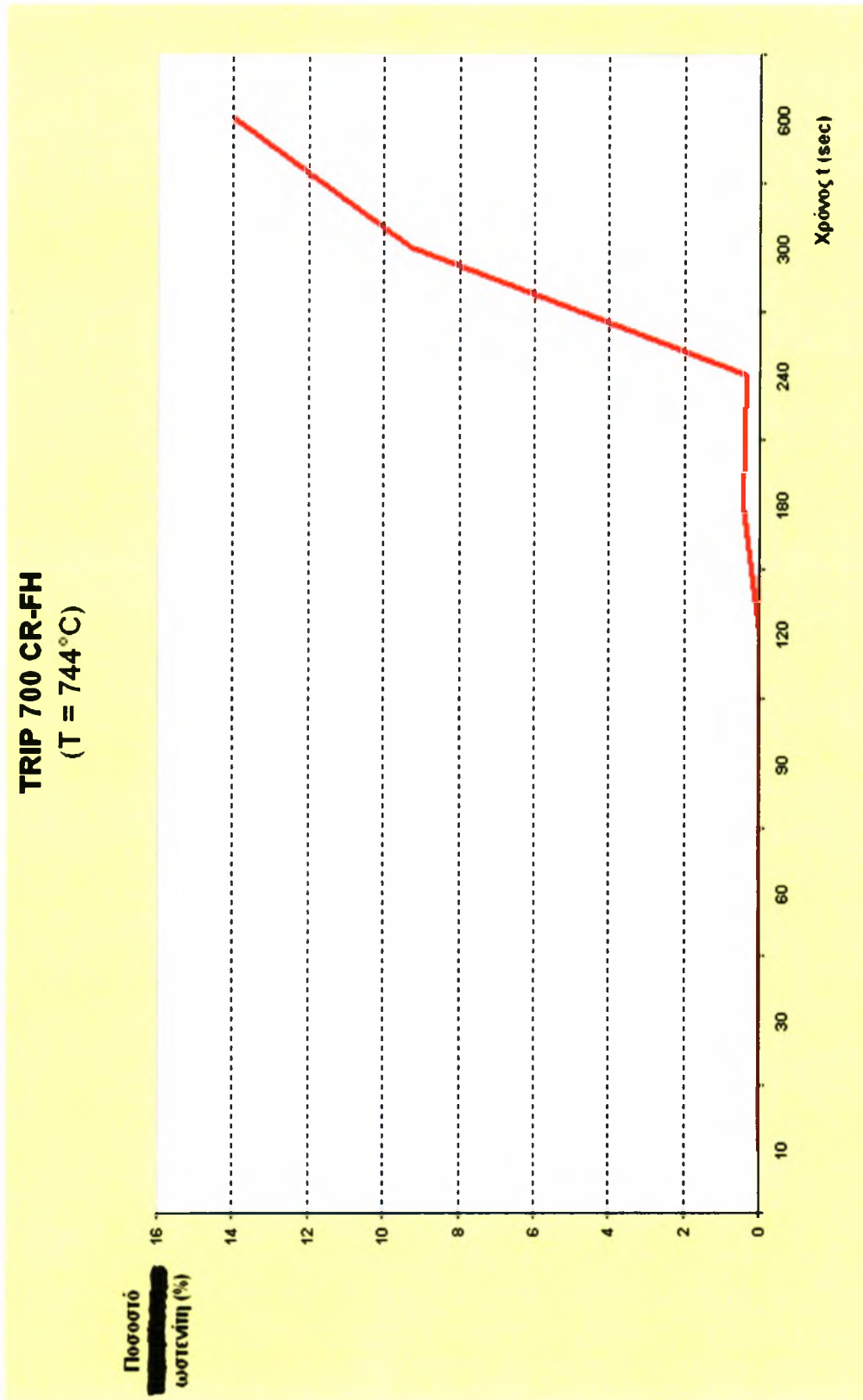
**Πίνακας 4.1** Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C.

TRIP 700 CR-FH (T = 843°C)	
t (sec)	Sum vol $\gamma$ (%)
0	0
10	35,3191667
30	46,9833333
60	49,1442857
180	51,4693333
600	47,452

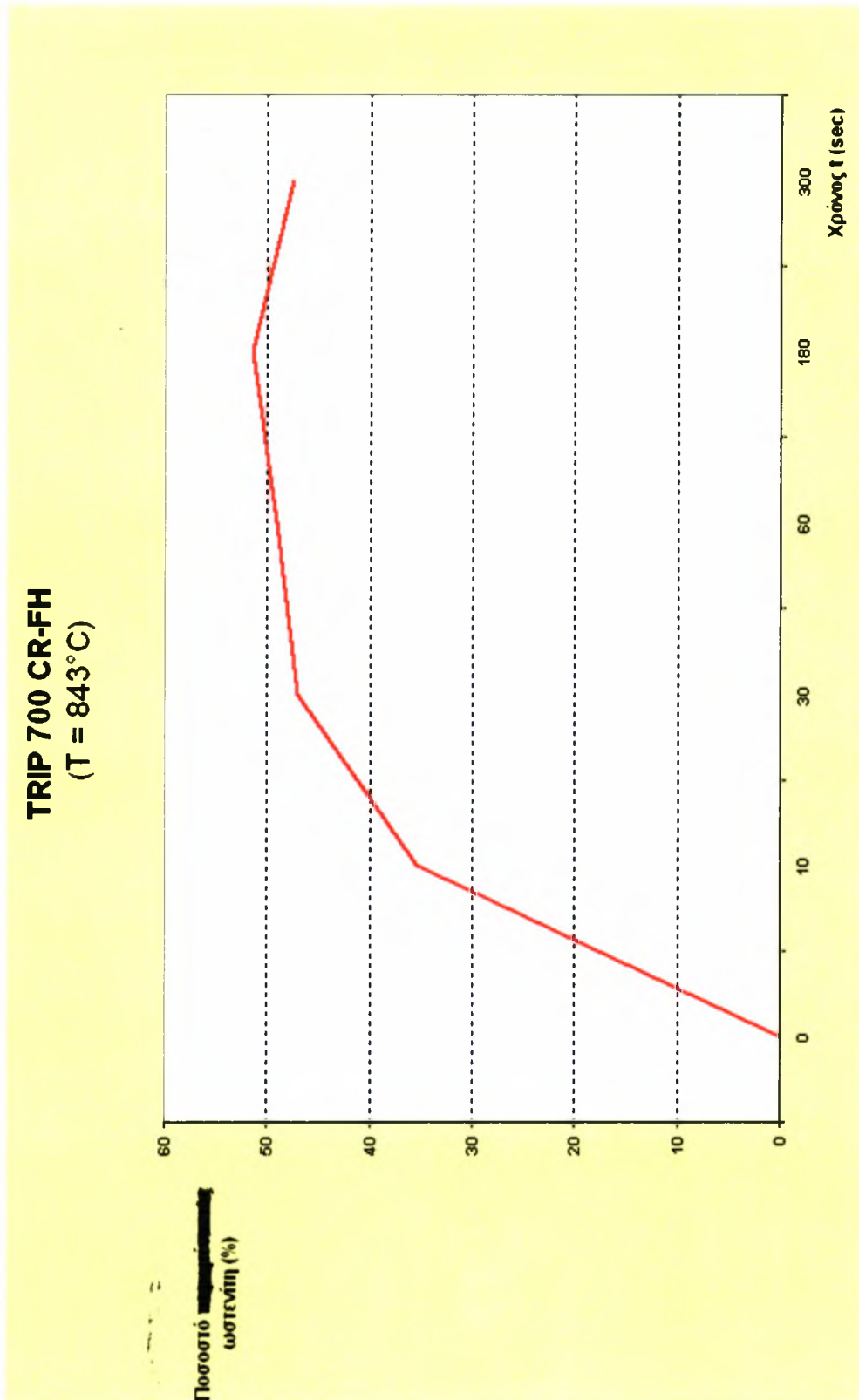
**Πίνακας 4.2** Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 843°C.

TRIP 700 CR-FH (T = 957°C)	
t (sec)	Sum vol $\gamma$ (%)
10	0
30	0
60	73,78031
90	84,689593
120	81,186658
180	80,374801
240	80,474818
300	89,589018
600	90,878505

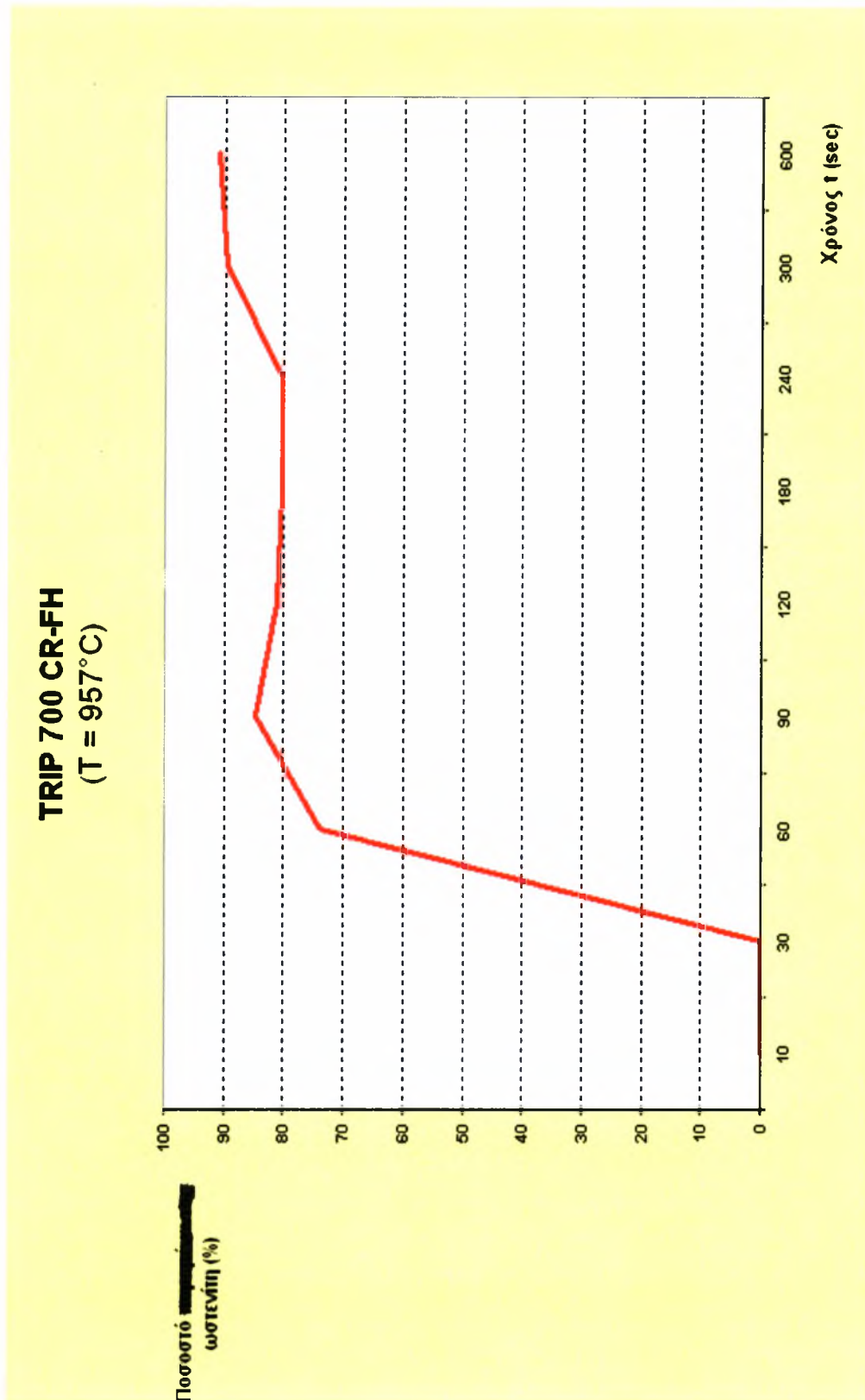
**Πίνακας 4.3** Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 957°C.



**Σχήμα 4.1** Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 744°C.



**Σχήμα 4.2** Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης απόπτησης στους 843°C.



Σχήμα 4.3

Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης απόπτησης στους 957°C.

<b>TRIP 800 HR-FH (T = 720°C)</b>	
<b>t (sec)</b>	<b>Sum vol <math>\gamma</math>(%)</b>
10	0,378321
30	0,597701
60	0,736497
90	6,820665
120	6,127889
180	5,162588
240	7,497435
300	13,313991
600	11,651897

**Πίνακας 4.4** Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 720°C.

<b>TRIP 800 HR-FH (T = 762°C)</b>	
<b>t (sec)</b>	<b>Sum vol <math>\gamma</math>(%)</b>
0	0
10	0
30	12,44
60	10,2175
180	28,6609091
300	27,2258333
600	33,119

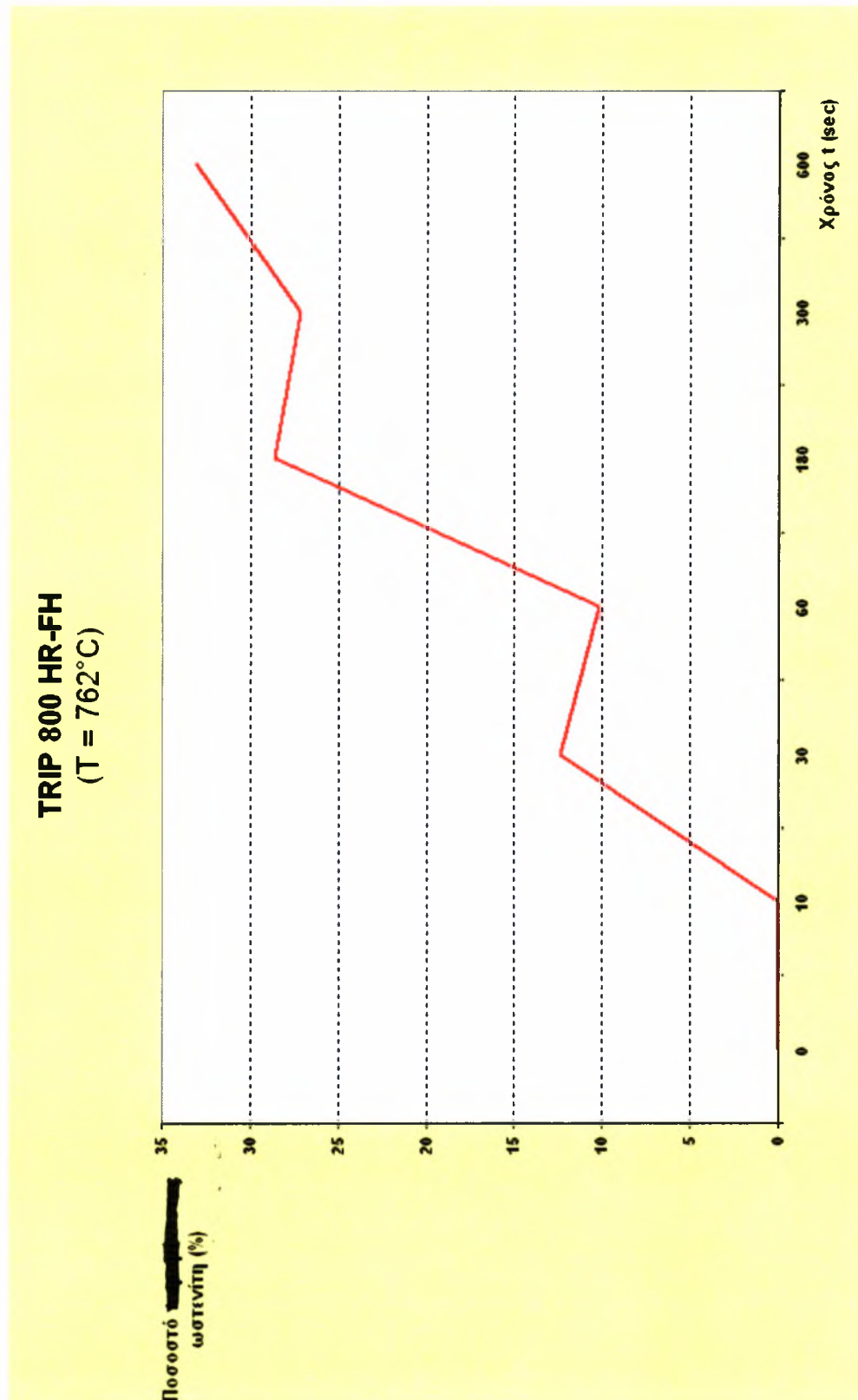
**Πίνακας 4.5** Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 762°C.

<b>TRIP 800 HR-FH (T = 805°C)</b>	
<b>t (sec)</b>	<b>Sum vol <math>\gamma</math>(%)</b>
10	0
30	0
60	0
90	0
120	37,669572
180	61,48631
240	62,228864
300	69,944692
600	66,335744

**Πίνακας 4.6** Αποτελέσματα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH, μετά από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C.

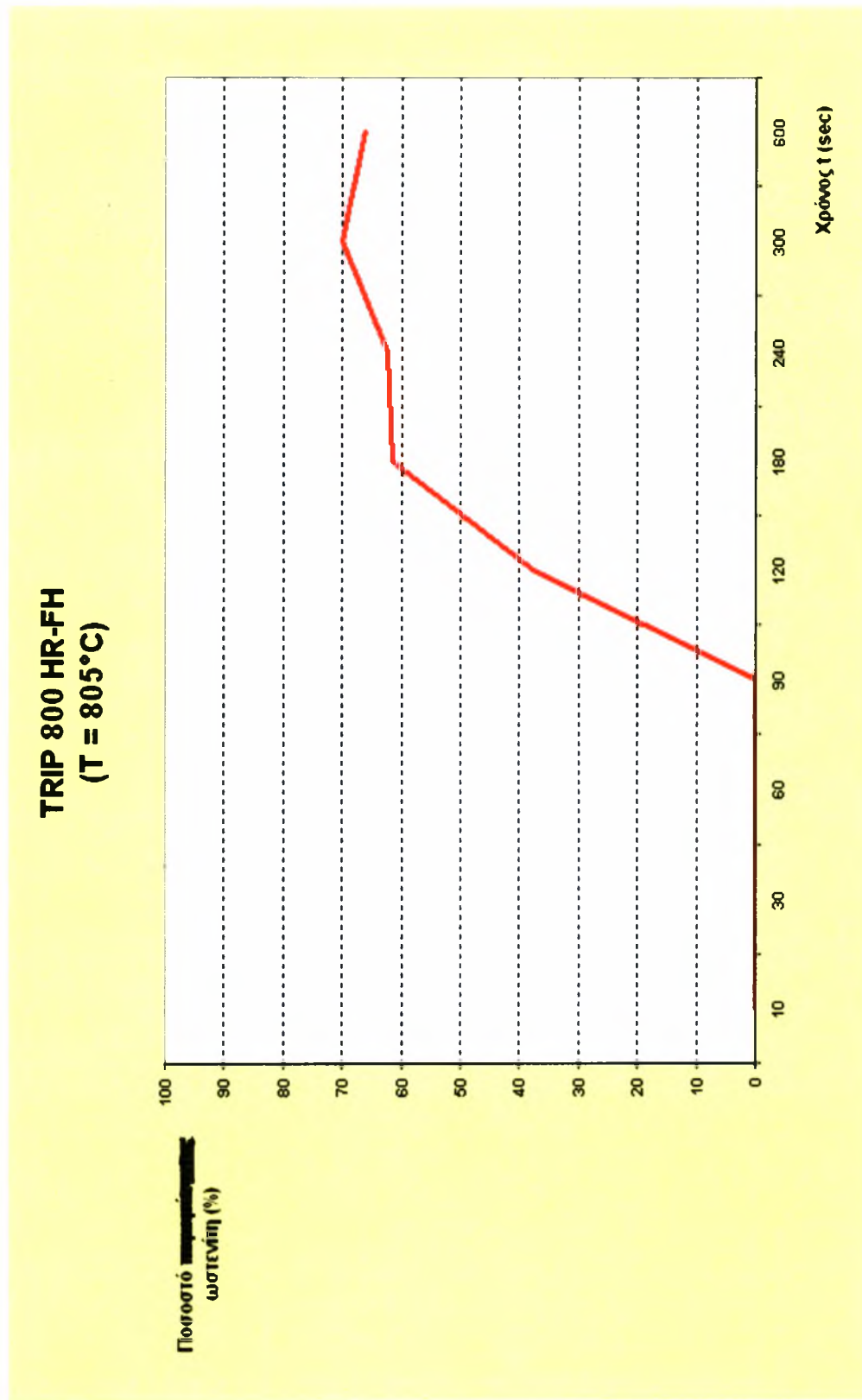


**Σχήμα 4.4** Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης απόπτησης στους 720°C.



Σχήμα 4.5

Ποσό ωστανίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης απόψησης στους 762°C.



Σχήμα 4.6

Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH για διάφορους χρόνους ενδοκρίσιμης απόπτησης στους 805°C.



### 4.3 Παραμένων Οστενίτης σε Δοκίμια που Υποβλήθηκαν σε Μπαινιτικό

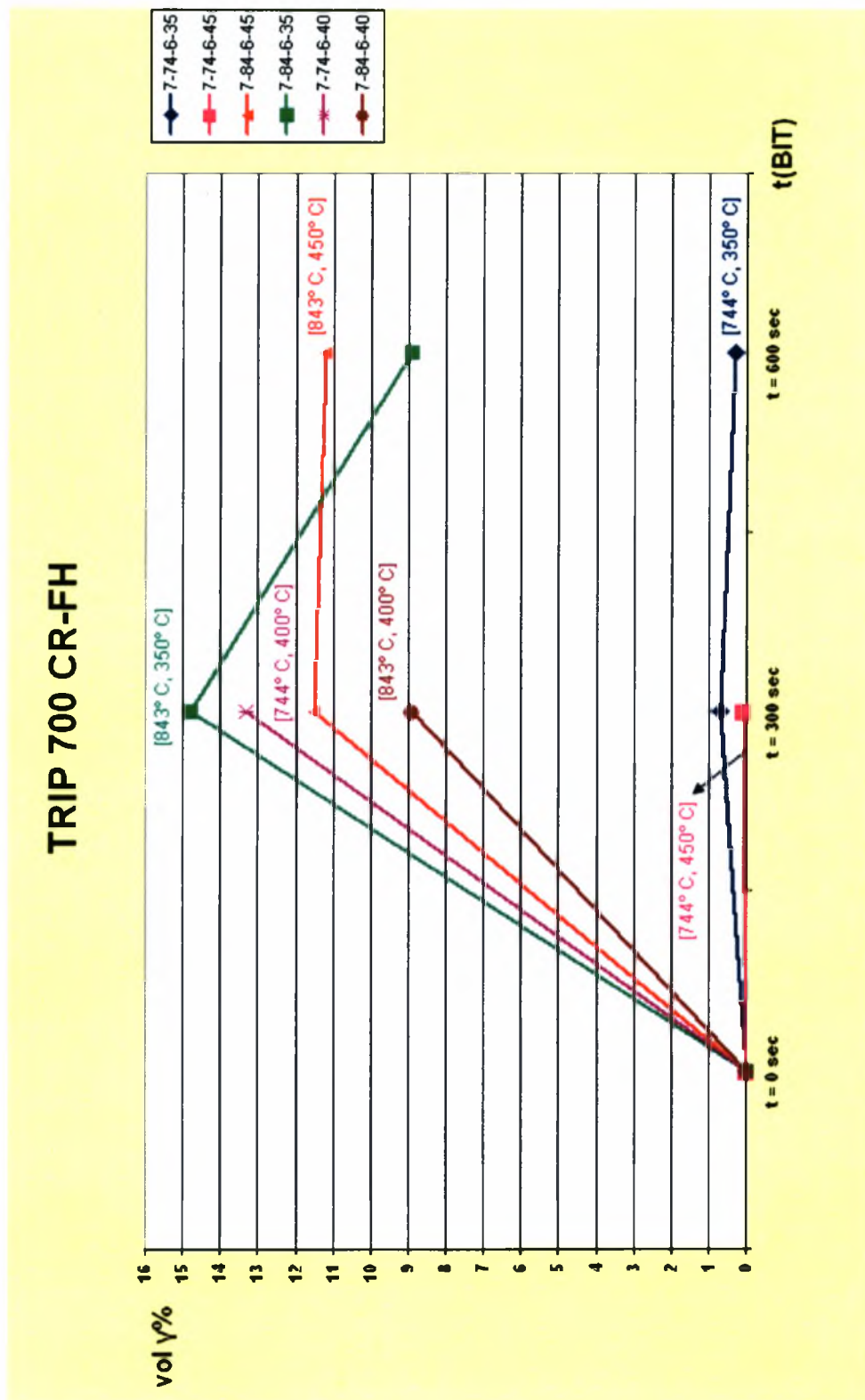
#### Μετασχηματισμό.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι μετρήσεις του ποσού παραμένοντα οστενίτη στα δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε μπαινιτικό μετασχηματισμό, έγιναν με μαγνητική μέθοδο στην εταιρεία VOEST-ALPINE στο Linz της Αυστρίας. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Αύξων Αριθμός Δοκιμίου	Ποσό παραμένοντα οστενίτη %
01 [7-74-6-35-3]	0,7
02 [7-74-6-45-3]	0,1
07 [7-84-6-45-3]	11,5
08 [7-84-6-45-6]	11,2
09 [7-74-6-35-6]	0,3
11 [8-72-6-35-3]	0,2
13 [8-76-6-25-3]	0,2
15 [8-76-6-35-3]	0,5
16 [8-76-6-35-6]	0,5
17 [8-76-6-45-3]	0,8
18 [8-76-6-45-6]	0,6
20 [8-80-6-45-3]	8,7
M1 [8-80-6-35-3]	13,1
M2 [8-80-6-35-6]	15,9
M3 [7-84-6-35-3]	14,8
M4 [7-84-6-35-6]	8,9
M5 [7-74-6-40-3]	13,3
M6 [7-84-6-40-3]	8,9
M7 [8-80-6-40-3]	14,9

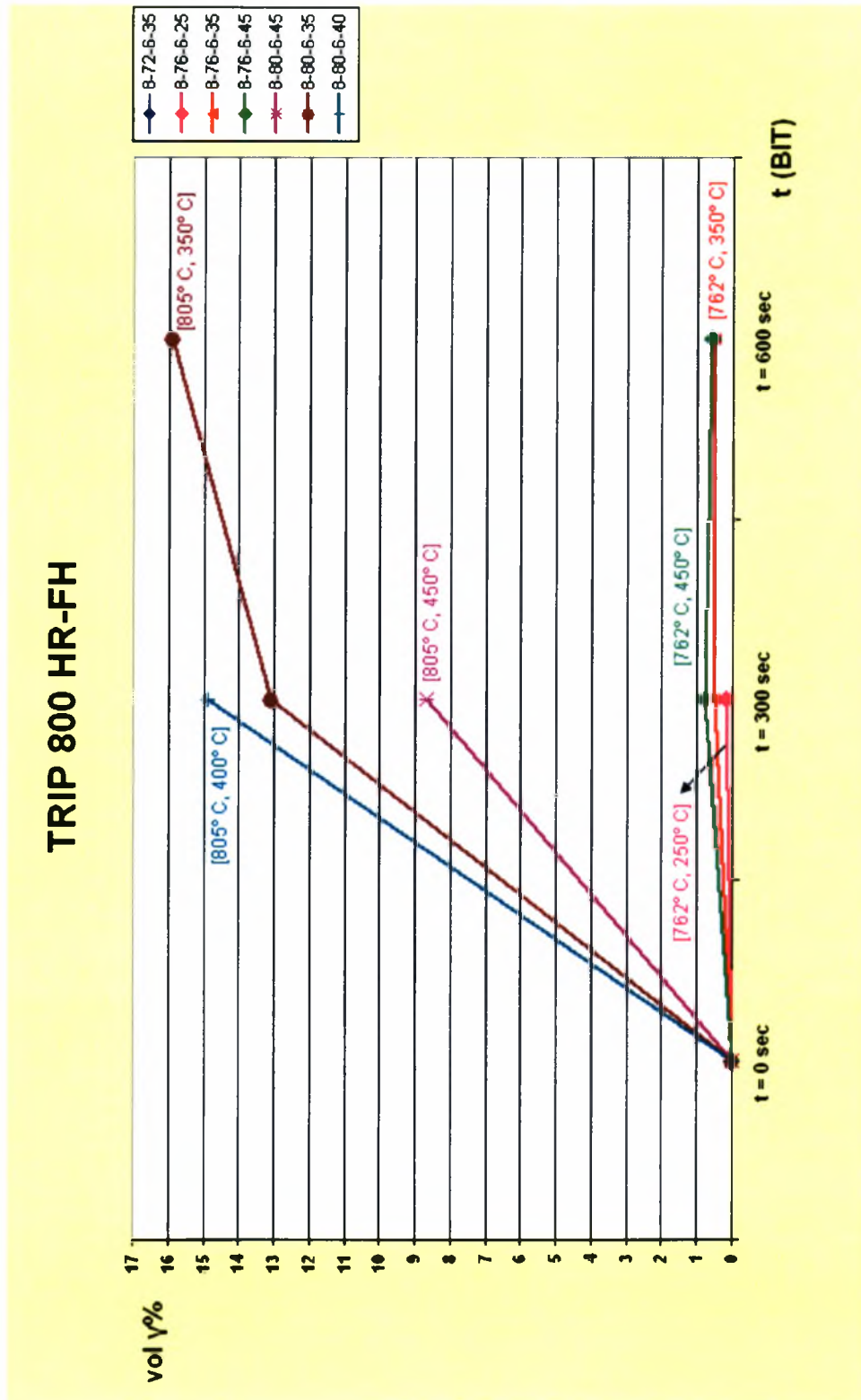
**Πίνακας 4.7** Αποτελέσματα μετρήσεων παραμένοντα οστενίτη με τη μαγνητική μέθοδο, για τους χάλυβες TRIP 700 CR-FH και TRIP 800 HR-FH, μετά από μπαινιτικό μετασχηματισμό.

Ακολουθούν δύο διαγράμματα, ένα για κάθε χάλυβα, τα οποία παριστούν γραφικά τα αποτελέσματα αυτά.



Σχήμα 4.7

Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 700 CR-FH για διάφορους χρόνους και θερμοκρασίες ενδοκρίσιμης ανόπτησης και μαινιτικού μετασχηματισμού.



Σχήμα 4.8

Ποσό ωστενίτη που μετρήθηκε για τον χάλυβα TRIP 800 HR-FH για διάφορους χρόνους και θερμοκρασίες ενδοκρίσιμης απόπτησης και μπαινιτικού μετασχηματισμού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΝΟΨΗ

#### 5.1 Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση

##### 5.1.1 Χάλυβας TRIP 700 CR-FH

Ένα γενικό συμπέρασμα που προέκυψε κατά τη διάρκεια της εργασίας για το χάλυβα αυτό είναι το γεγονός ότι υπάρχει μια αμφιβολία σχετικά με το γενικό κανόνα που θέλει κατά τη χημική προσβολή με το αντιδραστήριο LePera ο μαρτενσίτης να χρωματίζεται μπλε ή γκρι και ο φερρίτης μπλε ή καφέ. Και αυτό προκύπτει από τα αποτελέσματα σχετικά με το ποσοστό του ωστενίτη που σχηματίζεται κατά την εξέλιξη της θερμικής κατεργασίας.

Σε ότι αφορά στα ποσοτικά αποτελέσματα έχουμε:

- **T = 744°C**

Στη θερμοκρασία αυτή περιμένουμε, μετά από υπολογισμούς που προέκυψαν με το υπολογιστικό πακέτο ThermoCalc, ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη 25%. Στην πράξη παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία αυτή είναι αρκετά χαμηλή ώστε να μας δώσει τα επιθυμητά και αναμενόμενα αποτελέσματα στους επιλεγμένους χρόνους θερμικής κατεργασίας. Έτσι, μετά και τα πρώτα 120 sec δεν έχει σχηματιστεί καθόλου ωστενίτης στα δοκίμια μας. Τα πρώτα σωματίδια ωστενίτη που προκύπτουν από το μετασχηματισμό εμφανίζονται στα 180 sec, με το ποσοστό να είναι πολύ μικρό, της τάξης του 1%. Παρατηρείται μια απότομη αύξηση στα 300 sec όταν το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη στο χάλυβα γίνεται 9%, για να καταλήξουμε σε ποσοστό 14% στα 600 sec, πολύ κάτω από το αναμενόμενο 25%.

- **T = 843°C**

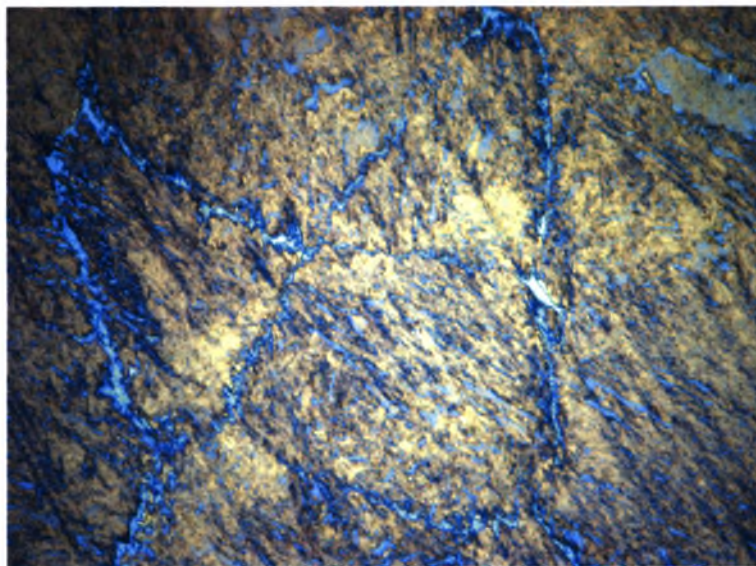
Οι μετρήσεις που έγιναν στα δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 843°C δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα. Θεωρητικά αναμένουμε ποσοστό ωστενίτη 50% στη μικροδομή. Στην πράξη, σχηματίζεται πολύ νωρίς, μόλις μετά από 10 sec μια αρκετά σημαντική ποσότητα ωστενίτη, της τάξης του 35%. Στα 30 sec η ποσότητα αυτή μετριέται στο 46%, ενώ στα 60 sec εμφανίζεται η αναμενόμενη τιμή, με τη μέτρηση να δείχνει 49,1%. Στα 180 sec παίρνουμε τιμή 51%, ενώ στην τελευταία μέτρηση, η τιμή του ωστενίτη πέφτει στο 47,5%. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε σφάλμα κατά τη μέτρηση είτε σε απόκλιση της θερμοκρασίας από τους 843°C κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας.

- **T = 957°C**

Οι υπολογισμοί με το ThermoCalc δίνουν σε κατάσταση ισορροπίας ποσοστό ~~ωστενίτη~~ ωστενίτη 75%. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν το ποσοστό αυτό να ξεπερνιέται κατά πολύ. Πιο συγκεκριμένα, στους αρχικούς χρόνους της θερμικής κατεργασίας, στα πρώτα 10 και 30 sec, δεν φαίνεται να σχηματίζεται ωστενίτης. Ο χρόνος αυτός των 30 sec είναι ένα κρίσιμο όριο ωστόσο, καθώς στην επόμενη μέτρηση, στα 60 sec, το ποσοστό ~~ωστενίτη~~ ωστενίτη εκτοξεύεται στο 74%. Στη συνέχεια και για τις επόμενες τέσσερις μετρήσεις, διαδοχικά στα 90, 120, 180 και 240 sec, το ποσοστό κυμαίνεται γύρω στο 80% για να καταλήξουμε σε ένα ποσοστό της τάξης του 90% στις τελευταίες δύο μετρήσεις, στα 300 και 600 sec. Δύο μπορεί να είναι οι πιθανές αιτίες της μεγάλης αυτής διαφοράς. Είτε πρόκειται περί σφάλματος κατά τη μέτρηση με τη μέθοδο ψηφιακής ανάλυσης που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί, είτε κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας, η θερμοκρασία ανέβηκε σε πολύ υψηλότερα επίπεδα. Δυστυχώς, στους φούρνους στους οποίους πραγματοποιήθηκαν οι θερμικές κατεργασίες δεν υπάρχει η δυνατότητα απόλυτου ελέγχου της θερμοκρασίας.

- **T = 1050°C**

Όπως ήταν αναμενόμενο εκ των προτέρων, στη θερμοκρασία αυτή και μετά από χρόνο 30 min έχει επέλθει πλήρης ωστενιτοποίηση. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από τη μεταλλογραφία που προκύπτει, στην οποία το δοκίμιο έχει αμιγώς μαρτενσιτική δομή.



**Εικόνα 5.1** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 700 CR-FH μετά από ~~ωστενιτοποίηση~~ ανόπτηση στους 1050°C για 30 min και χημική προσβολή με LePera για 15 sec σε μεγέθυνση 1000X.

### 5.1.2 Χάλυβας TRIP 800 HR-FH.

- **T = 720°C**

Στους 720°C το υπολογιστικό πακέτο ThermoCalc προβλέπει ποσοστό ωστενίτη 25%. Όπως παρατηρήθηκε και στο χάλυβα TRIP 700, για την αντίστοιχη θερμοκρασία των 744°C που προβλέπει θεωρητικά ποσοστό ωστενίτη 25%, τα πειραματικά αποτελέσματα απέχουν από τα αναμενόμενα. Κυμαίνονται ωστόσο σε λογικά πλαίσια, υπό την έννοια ότι το ποσό ωστενίτη αυξάνεται με το χρόνο ανόπτησης, φτάνοντας μέχρι και 13%. Συνεπώς, αναμένουμε σε χρόνους μεγαλύτερους των 600sec να έχει σχηματιστεί μεγαλύτερο ποσό ωστενίτη, το οποίο θα πλησιάζει το ποσοστό του 25%.

- **T = 762°C**

Το ποσοστό ωστενίτη που περιμέναμε να μετρηθεί στους 762°C είναι θεωρητικά 50%. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ωστόσο δεν συμφωνούν με αυτό. Στα πρώτα 10 sec της κατεργασίας δεν δείχνει να έχει σχηματιστεί κάποια ποσότητα ωστενίτη. Το πρώτο ποσοστό εμφανίζεται στα 30 sec και είναι 12%. Η επόμενη μέτρηση στα 60 sec εμφανίζει παρόμοια τιμή, με το ποσοστό ωστενίτη να είναι 10%. Στα 180 sec παρατηρούμε μια αύξηση στο ποσοστό ωστενίτη με την τιμή να είναι 28,7%, ενώ και στα 300 sec παίρνουμε τιμή στο 27,2%. Η τελική μέτρηση στα 600 sec δίνει ποσοστό ωστενίτη 33%, πολύ κάτω από το αναμενόμενο 50%. Με δεδομένο ότι καθώς ο χρόνος της θερμικής κατεργασίας αυξάνει, αυξάνεται και το ποσοστό του ωστενίτη που μετασχηματίζεται, περιμένουμε σε χρόνους μεγαλύτερους των 600 sec να μετρηθούν τιμές που θα πλησιάζουν το 50%. Αν κάτι τέτοιο δεν συμβεί, η απόκλιση της τιμή που υπολογίζουμε από την αναμενόμενη οφείλεται είτε σε σφάλμα κατά την μέτρηση, είτε στην αδυναμία που έχουμε να ελέγξουμε απόλυτα τη θερμοκρασία της θερμικής κατεργασίας στους φούρνους του Εργαστηρίου Υλικών, όπου και πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα (διατηρείται επιφύλαξη κατά πόσο αναπτύσσουμε την επιθυμητή θερμοκρασία και εάν αυτή διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας).

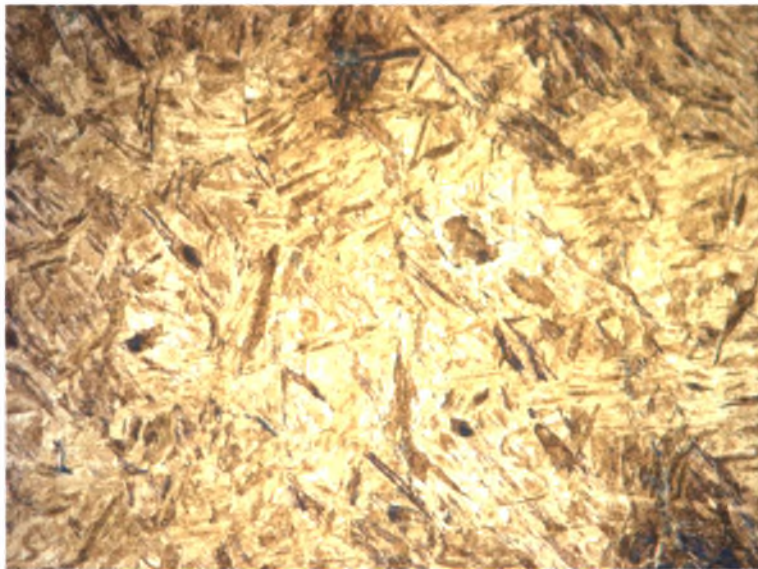
- **T = 805°C**

Η θερμοκρασία των 805°C είναι αυτή στην οποία, βάση των υπολογισμών με το ThermoCalc, περιμένουμε ποσοστό ωστενίτη 75%, σε κατάσταση ισορροπίας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την ψηφιακή ανάλυση εικόνας είναι κατά βάση

αναμενόμενα. Στους αρχικούς χρόνους των 10, 30, 60 και 90 sec, δεν παρατηρείται να έχει σχηματιστεί κάποια ποσότητα ωστενίτη. Ο χρόνος όμως των 90 sec είναι το όριο στο οποίο παρατηρείται σημαντική αύξηση του ποσού ωστενίτη που σχηματίζεται, καθώς στη αμέσως επόμενη μέτρηση στα 120 sec, παρατηρούμε ποσοστό ωστενίτη 37,67%. Η ποσότητα αυτή γίνεται περίπου 60% στις επόμενες δύο μετρήσεις, στα 180 και 240 sec. Η μέγιστη μέτρηση εμφανίζεται στα 300 sec και είναι σχεδόν 70%, ενώ και στην τελευταία μέτρηση στα 600 sec, το ποσό του ωστενίτη που μετρήθηκε είναι 66%. Φαίνεται ότι ο μετασχηματισμός πλησιάζει σε κατάσταση ισορροπίας, στην οποία και θεωρητικά θα έχουμε ποσοστό ωστενίτη 75%

- **T = 1050°C**

Η θερμοκρασία αυτή ανόπτησης είναι θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης. Οι μεταλλογραφική ανάλυση επιβεβαιώνει αυτό που περιμέναμε, δηλαδή ότι μετά από 30min παραμονής στους 1050°C, η δομή του χάλυβα είναι καθαρά ωστενιτική. Χαρακτηριστική είναι η Εικόνα 5.2.



**Εικόνα 5.2** Μεταλλογραφία χάλυβα TRIP 800 HR-FH μετά από ~~1050°C~~ ανόπτηση στους 1050°C για 30 min και χημική προσβολή με LePera για 15 sec σε μεγέθυνση 1000X.

## 5.2 Μπαινιτικός Μετασχηματισμός.

Σε ότι έχει να κάνει με τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μπαινιτικό μετασχηματισμό, η μεταλλογραφική ανάλυση που έγινε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας απλά επιβεβαιώνει τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εταιρεία VOEST-ALPINE. Παρατηρώντας τις φωτογραφίες που τραβήχτηκαν για καθένα από τα δοκίμια, οι οποίες παρατίθενται όλες στο Παράρτημα που ακολουθεί,

φαίνεται ξεκάθαρα ότι το ποσό του παραμένοντα ωστενίτη είναι αυτό που προκύπτει από τις μετρήσεις με τη μαγνητική μέθοδο.

Σε ότι αφορά στα ποσοτικά αποτελέσματα, μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

- **Χάλυβας TRIP 700 CR-FH**

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο «κατηγορίες» δοκιμίων του Χάλυβα TRIP 700 CR-FH: **i)** Αυτά τα οποία υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C πριν το μπαινιτικό μετασχηματισμό και **ii)** αυτά που υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 843°C.

**i)** Η ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C αναμένεται να δώσει ποσοστό ωστενίτη 25%. Ο μπαινιτικός μετασχηματισμός που ακολούθησε έγινε σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες. Στους 350°C παρατηρούμε μετά από 300 sec ότι το ποσοστό ωστενίτη που μετρήθηκε είναι μόλις 0,7%, ενώ μετά από 600 sec είναι ακόμα μικρότερο, 0,3%. Στους 450°C, μετά από 300 sec το ποσοστό αυτό είναι 0,1%. Σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες θερμοκρασίες μπαινιτικού μετασχηματισμού, στους 400°C, μετά από 300 sec, το ποσοστό ωστενίτη που μετρήθηκε είναι 13,3%

**ii)** Τρεις διαφορετικές είναι και σε αυτή την περίπτωση οι θερμοκρασίες μπαινιτικού μετασχηματισμού. Στους 350°C, μετά από 300 sec το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη μετρήθηκε 14,8%, ενώ μετά από 600 sec 8,9%. Στους 400°C η μέτρηση στα 300 sec έδωσε 8,9% παραμένοντα ωστενίτη. Τέλος, σε θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού 450°C, μετά από 300 sec μετρήθηκε 11,5% παραμένων ωστενίτης και στα 600 sec 11,2%. Το γεγονός ότι ο παραμένων ωστενίτης σε αυτή την περίπτωση είναι περισσότερος σε σχέση με την πρώτη κατηγορία οφείλεται στο ότι τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 843°C, όπου και περιμένουμε ποσοστό ωστενίτη 50%.

- **Χάλυβας TRIP 800 HR-FH**

Και εδώ θα κάνουμε παρόμοιο διαχωρισμό των δοκιμίων σε τρεις ομάδες: **iii)** Ένα δοκίμιο το οποίο υποβλήθηκε σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 720°C πριν το μπαινιτικό μετασχηματισμό, **iv)** αυτά τα οποία υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 762°C πριν το μπαινιτικό μετασχηματισμό και **v)** αυτά που υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C.



- iii)** Στο δοκίμιο το οποίο υποβλήθηκε σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 720°C πριν το μπαινιτικό μετασχηματισμό θεωρητικά σχηματίστηκε ποσοστό ωστενίτη 25%. Εν συνεχεία υποβλήθηκε σε μπαινιτικό μετασχηματισμό στους 350°C για 300sec και μετρήθηκε ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη πολύ μικρό, μόλις 0,2%.
- iv)** Στα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη στους 762°C αναμένεται να σχηματιστεί 50% ωστενίτης. Στη συνέχεια ακολούθησε μπαινιτικός μετασχηματισμός σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, στους 250°C, στους 350°C και στους 450°C. Και στις τρεις θερμοκρασίες, μετά χρόνους 300 και 600 sec, το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη που μετρήθηκε είναι πού μικρό και κυμαίνεται από 0,2% (250°C, 300 sec) έως 0,8% (450°C, 300sec).
- v)** Τέλος, στην ομάδα αυτή των δοκιμίων, τα οποία υποβλήθηκαν πριν το μπαινιτικό μετασχηματισμό σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C, το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη που μετρήθηκε είναι σαφώς μεγαλύτερο από τις άλλες δυο ομάδες και κυμαίνεται μεταξύ 8,7% και 15,9%. Και αυτό γιατί στους 805°C αναμένεται να έχει σχηματιστεί 75% ωστενίτη. Ο μπαινιτικός μετασχηματισμός που ακολούθησε έγινε σε τρεις θερμοκρασίες. Στους 350°C, μετρήθηκε παραμένον ωστενίτης 13,1% μετά από 300 sec και 15,9% μετά από 600 sec. Στους 400°C η τιμή αυτή είναι 14,9% μετά από 300 sec, ενώ στους 450°C ο παραμένον ωστενίτης μετρήθηκε 8,7% μετά από 300 sec.

### 5.3 Σύνοψη.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή και τα οποία είδαμε αναλυτικά παραπάνω, μπορούν να παρουσιαστούν συνοπτικά ως εξής:

- **Ενδοκρίσιμη ανόπτηση.**

- **Χάλυβας TRIP 700 CR-FH.**

- **T = 744°C:** Στους αρχικούς χρόνους της κατεργασίας δείχνει να μην έχει σχηματιστεί ωστενίτης. Το ποσοστό ωστενίτη που μετρήθηκε φτάνει το 14%, πολύ κάτω από το αναμενόμενο 25%.
- **T = 843°C:** Τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι πολύ καλά, με το ποσοστό να φτάνει το 51%, όπως αναμενόταν.
- **T = 957°C:** Περιμέναμε ποσοστό ωστενίτη 75% και οι μετρήσεις μας έδειξαν μέχρι και 90%. Υπάρχει λογικά κάποιο σφάλμα είτε σχετικά με τη θερμοκρασία κατά τη θερμική κατεργασία είτε στις μετρήσεις με τη μέθοδο της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας.

- **Χάλυβας TRIP 800 HR-FH.**

- **T = 720°C:** Το ποσοστό ωστενίτη που μετασχηματίζεται αυξάνει με λογικούς ρυθμούς, φτάνοντας μέχρι 13%. Αναμένεται σε μεγαλύτερους χρόνους θερμικής κατεργασίας να φτάσουμε στο επιθυμητό ποσοστό του 25%.
- **T = 762°C:** Αναμέναμε ποσοστό ωστενίτη 50%. Οι μετρήσεις δείχνουν λογικά αποτελέσματα, με το ποσοστό να φτάνει στο 33%, ακολουθώντας ωστόσο αυξητική πορεία καθώς αυξάνει ο χρόνος θερμικής κατεργασίας.
- **T = 805°C:** Η θερμοκρασία αυτή θεωρητικά δίνει 75% ωστενίτη. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικές, με τις μετρήσεις να δίνουν ποσοστό έως 70%

- **Μπαινιτικός μετασχηματισμός.**

- **Χάλυβας TRIP 700 CR-FH:** Το ποσοστό ~~ωστενίτη~~<sup>παραμένοντα</sup> ωστενίτη μετά από μπαινιτικό μετασχηματισμό δείχνει να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία της ενδοκρίσιμης ανόπτησης που προηγήθηκε. Όταν αυτή είναι 744°C, το ποσοστό αυτό είναι πού μικρό, με εξαίρεση τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μπαινιτικό μετασχηματισμό στους 400°C.

Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης είναι 843°C, το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη κυμαίνεται από 8,9% έως 14,8%.

- **Χάλυβας TRIP 800 HR-FH:** Ομοίως με τον TRIP 700, όταν προηγηθεί ενδοκρίσιμη ανόπτηση στις θερμοκρασίες των 720°C και 762°C, το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη είναι πολύ μικρό, κάτω από 1%, ανεξαρτήτως θερμοκρασίας μπεινιτικού μετασχηματισμού. Αντίθετα, όταν προηγηθεί ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C, το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη είναι σημαντικά μεγαλύτερο και κυμαίνεται μεταξύ 8,7% και 15,9%, για διάφορους χρόνους και θερμοκρασίες μπεινιτικού μετασχηματισμού.

Κλείνοντας, κρίνεται σκόπιμο να γίνουν ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με το θέμα της εργασίας αυτής. Έτσι θα μπορούσε να γίνει:

- Εξέλιξη της πειραματικής διαδικασίας σε χρόνους θερμικής κατεργασίας μεγαλύτερους των 600 sec ώστε να διερευνηθεί η εξέλιξη του μετασχηματισμού.
- Μέτρηση του μεγέθους των κόκκων καθώς και μελέτη της επίδρασης της θερμικής κατεργασίας στη διασπορά των σωματιδίων.
- Συσχέτιση της χημικής σύστασης με το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

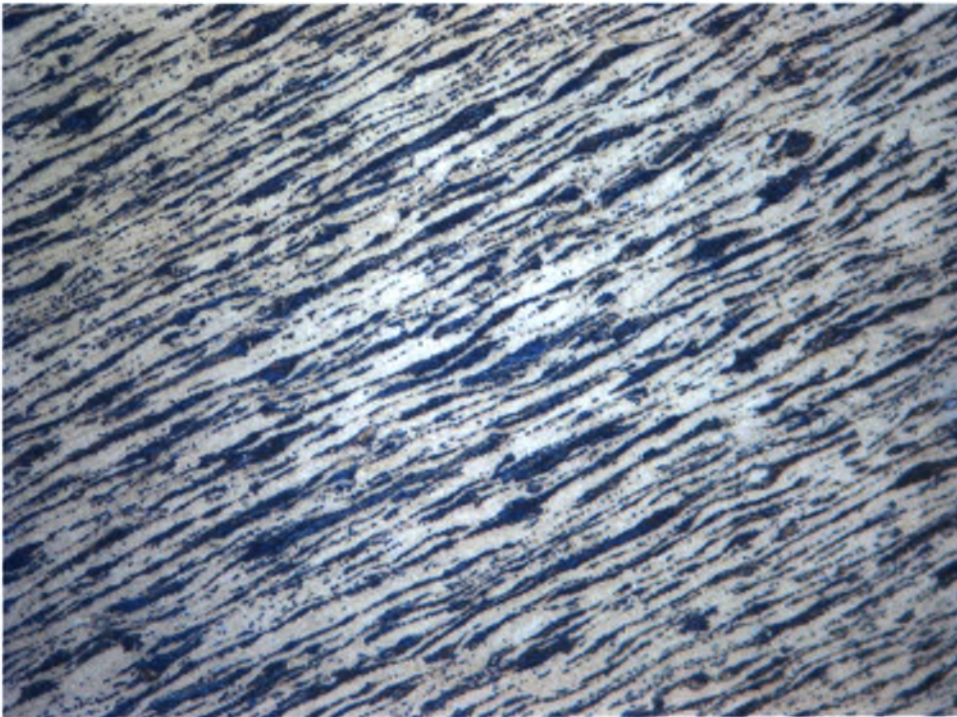
- /1/ *A.N. Βασιλάκος*, «Πλαστικότητα Μετασχηματισμού του Παραμένοντα Ωστενίτη σε Χάλυβες Χαμηλής Κραμάτωσης», Διδακτορική διατριβή (2000).
- /2/ *R.W.K honeycombe & H.K.D.H Bhadeshia*, *Steels, microstructure and properties*, Second Edition, (1995), Edward Arnold.
- /3/ *G. Krauss*, *Steels, Heat Treatment and Processing Principles*, ASM, (1989).
- /4/ *R.F. Hehemann and A.R. Troiano*, *Metal Progress*, No.2, 97 (1956).
- /5/ *G.B. Olson*, “Mechanically-Induced Phase Transformations in Alloys”, *Encyclopedia of Mat. Sci. And Eng.*, Ed. M.B. Bever, Pergamon Press, NY, (1986).
- /6/ *G.B. Olson and M.Cohen*, *Kinetics of Strain-Induced Martensitic Nucleation*, *Met. Trans.*, vol 6A, (1975).
- /7/ *F. Lecroisey and A.Pineau*, *Met. Trans.*, vol. 3, (1972).
- /8/ *J.A. Venables*, *Phil. Mag.*, vol 7, (1964).
- /9/ *P.L. Manganon and G. Thomas*, *Met. Trans.*, vol. 1, (1970).
- /10/ *T. Furukawa, H. Morikawa, H. Takechi and K. Koyama*, *Process Factors for Highly Ductile Dual-Phase Steel Sheet*, [In:] *Structure and Properties of Dual-Phase Steels*, New York 1979, [eds:] Knot, R.A. and Morris, J.M., AIME.
- /11/ *A.R. Marder*, *Factors Affecting the Ductility of Dual-Phase Alloy*, [In:] *Formable HSLA and Dual-Phase Steels*, New York 1979, [eds.] Knot, R.A. and Morris, J.M., AIME.
- /12/ *J.M. Rigsbee, P.J. Vander Arend*, *Laboratory Studies of Microstructures and Structure-Property Relationships in Dual-Phase Steels*, [In:] *Formable HSLA and Dual-Phase Steels*, New York 1979, [eds.] Knot, R.A. and Morris, J.M., AIME.
- /13/ *S.M.Rashid, B.N.V. Rao*, *Tempering Characteristics of a Vanadium-Containing Dual-Phase Steel*, [In:] *Formable HSLA and Dual-Phase Steels*, New York 1979, [eds.] Knot, R.A.; Bramfitt, B.L., AIME.
- /14/ *G.T. Eldis*, *The Influence of Microstructure and Testing Procedure on the Measured Mechanical Properties of Heat-Treated Dual-Phase Steels*, [In:] *Formable HSLA and Dual-Phase Steels*, New York 1979, [eds.] Knot, R.A. and Morris, J.M., AIME.
- /15/ *G.R. Speich, R.L. Miller*, *Mechanical Properties of Ferrite-Martensite*, [In:] *Formable HSLA and Dual-Phase Steels*, New York 1979, [eds.] Knot, R.A. and Morris, J.M., AIME.
- /16/ *G.N. Haidemenopoulos, M. Grujicic, G.B. Olson, M. Cohen*, *Journal of Alloys and Compounds* 220 (1995).
- /17/ *O. Matsumura, Y. Sakuma, K. Takechi*, *Trans. ISIJ* 27 (1987).

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

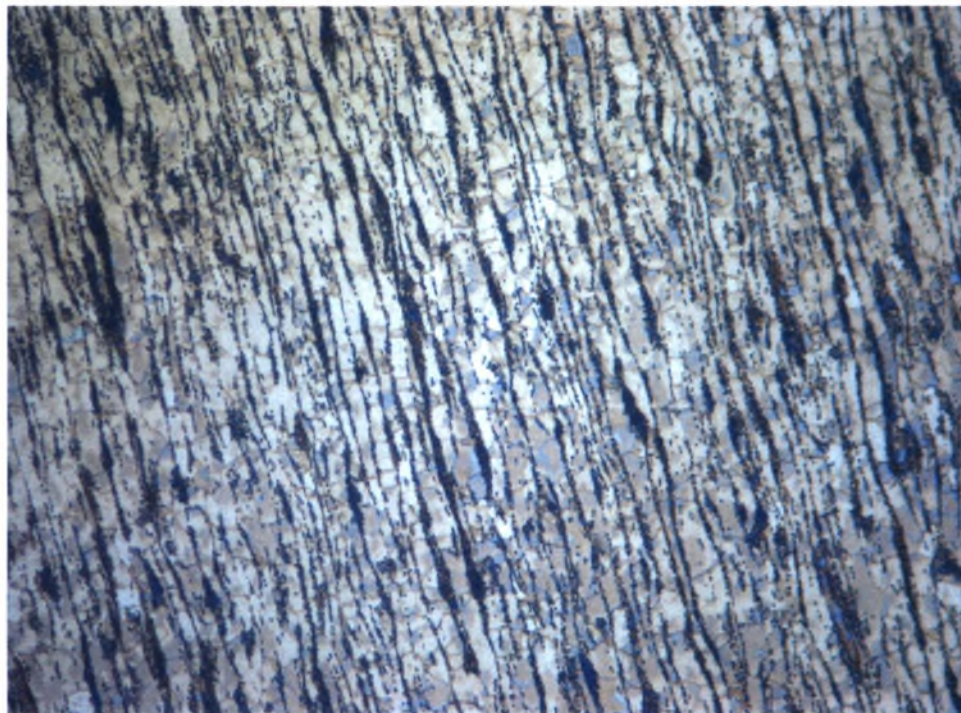
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται όλες οι φωτογραφίες που προέκυψαν από τις μεταλλογραφίες όλων των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

### 1. Χάλυβας TRIP 700 CR-FH

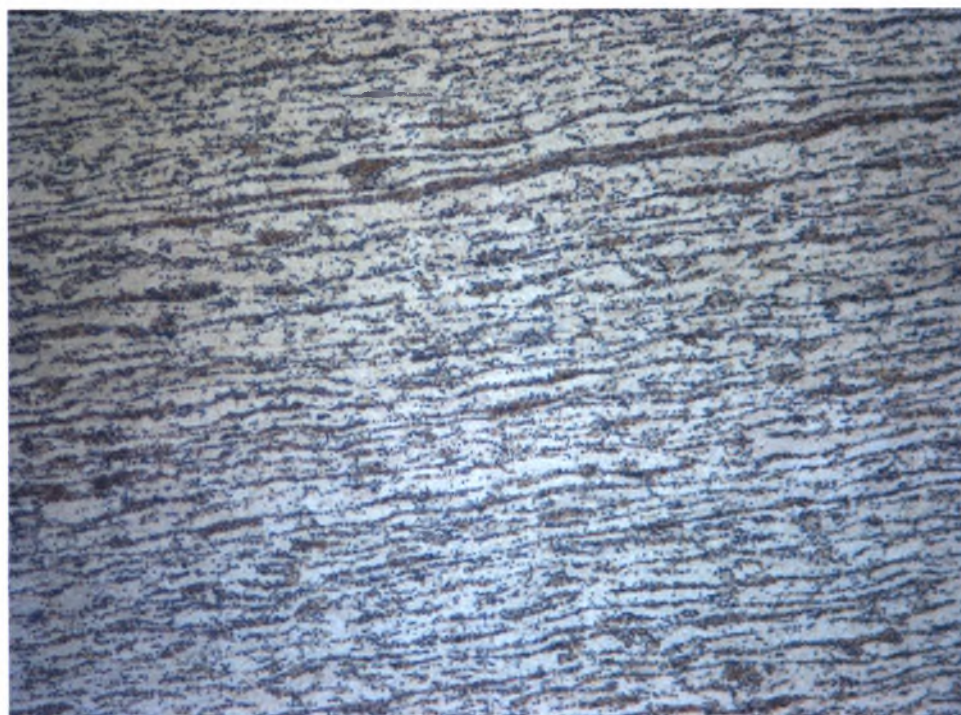
Οι πρώτες εννέα μεταλλογραφίες αντιστοιχούν στα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 744°C, όπου και αναμένουμε ποσοστό ωστενίτη 25%. Στις πρώτες φωτογραφίες, αυτές των δοκιμών με A/A 7.1 έως και 7.5, παρατηρούμε ότι δεν έχει σχηματιστεί καθόλου ωστενίτης. Η δομή είναι αμιγώς φερριτο-περλιτική.



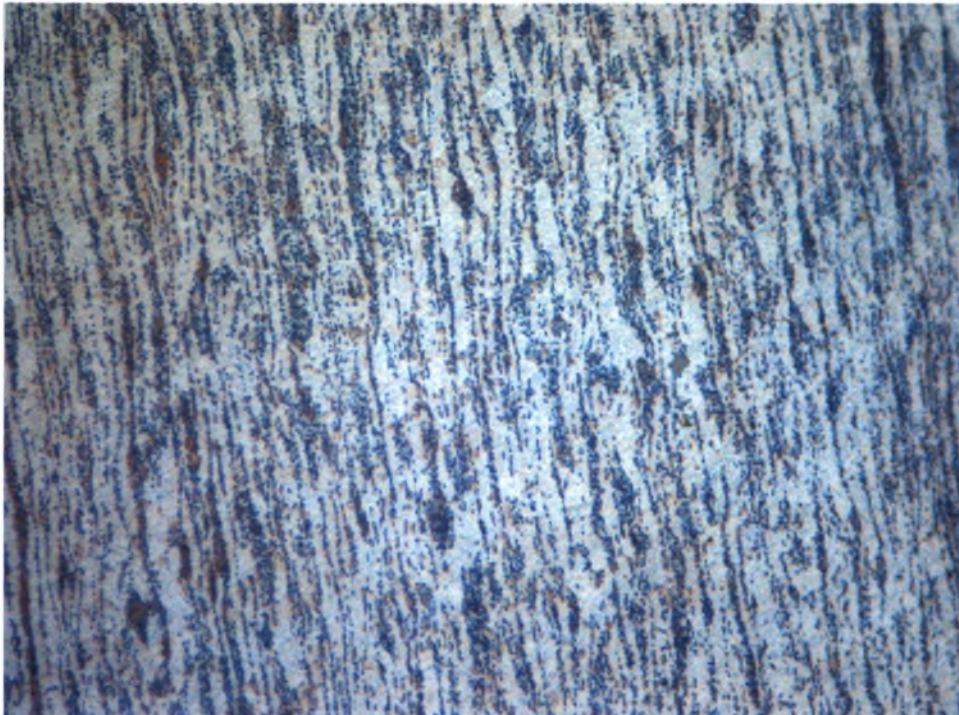
A/A 7.1, LePera (15 sec), 1000X



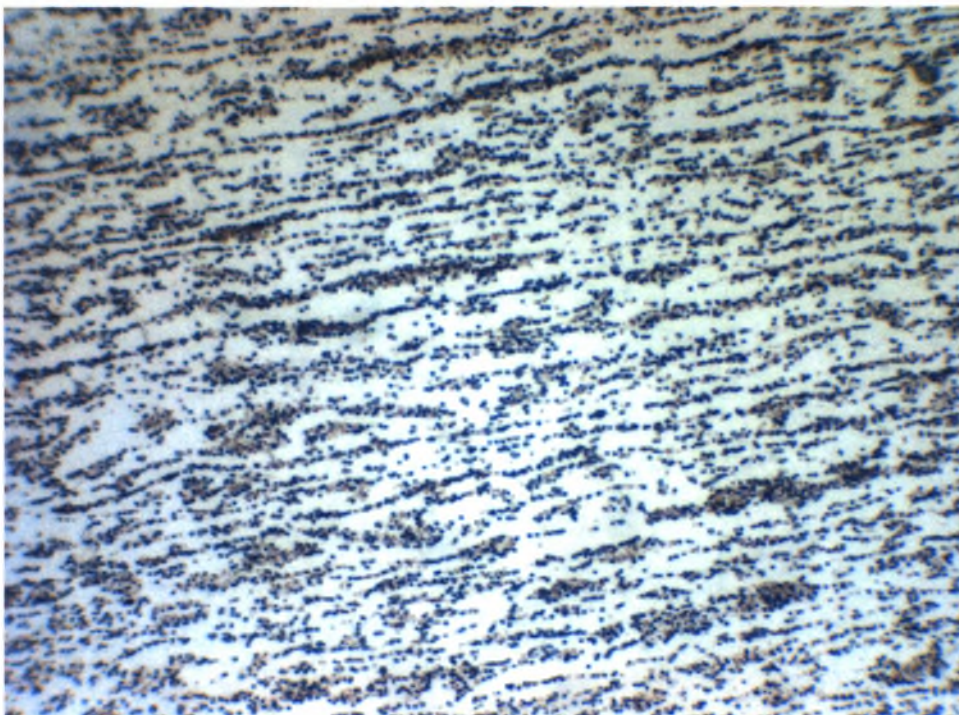
**A/A 7.2, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A 7.3, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A 7.4, LePera (15 sec), 1000X**



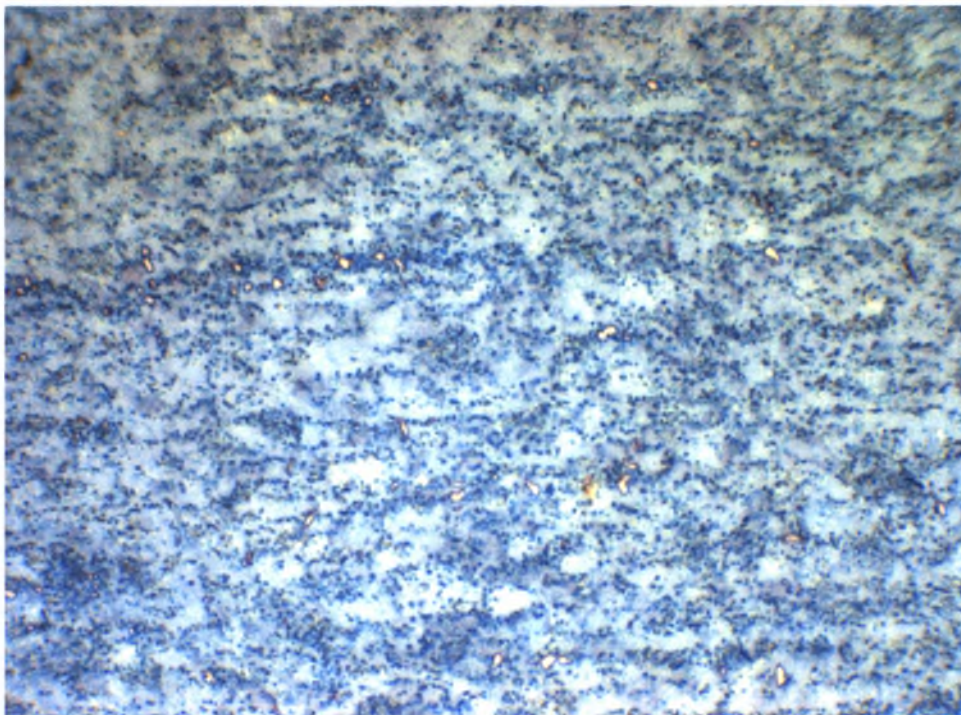
**A/A 7.5, LePera (15 sec), 1000X**

Στις επόμενες δύο φωτογραφίες (A/A 7.6 -7.7) εμφανίζονται τα πρώτα σωματίδια

ωστενίτη, ενώ στις άλλες δύο που ακολουθούν (A/A 7.8 – 7.9) το ποσοστό ωστενίτη είναι σαφώς μεγαλύτερο και φτάνει το 13%.

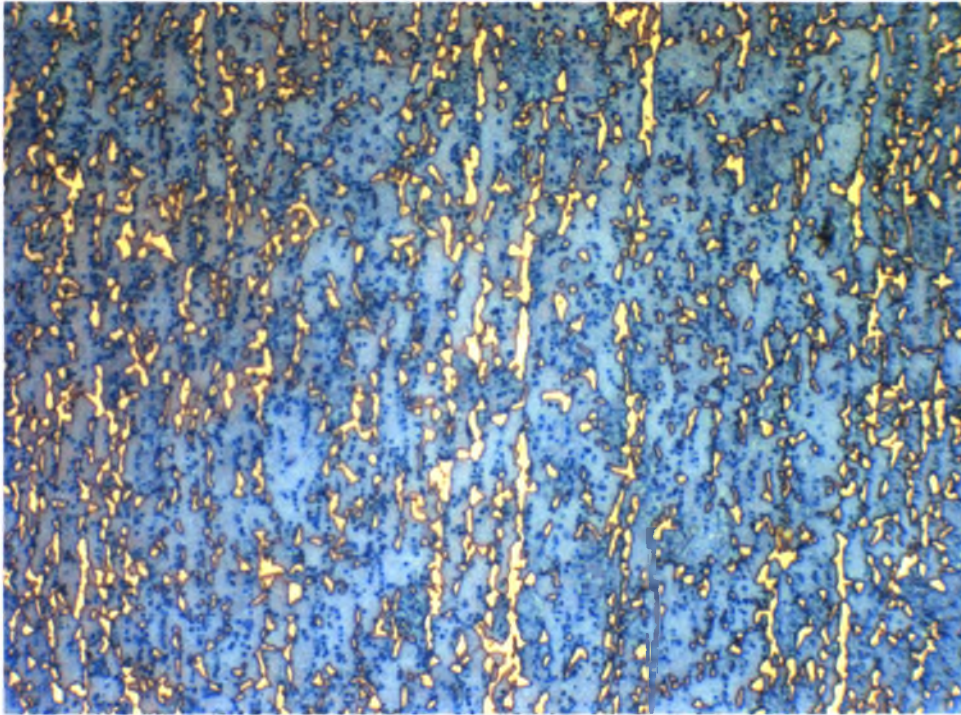


**A/A 7.6, LePera (15 sec), 1000X**

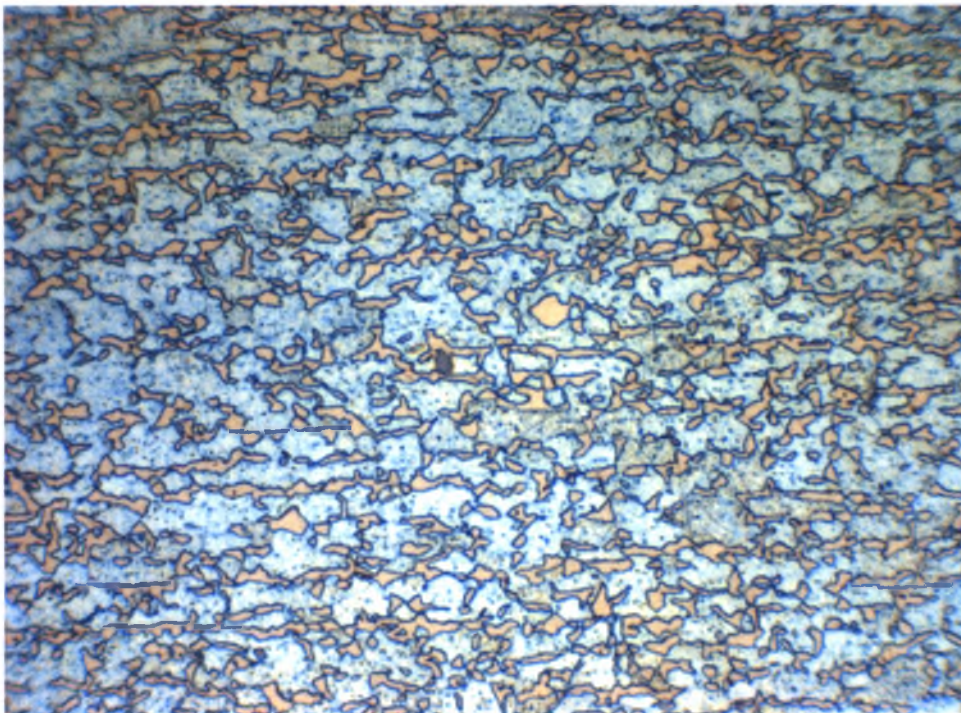


**A/A 7.7, LePera (15 sec), 1000X**



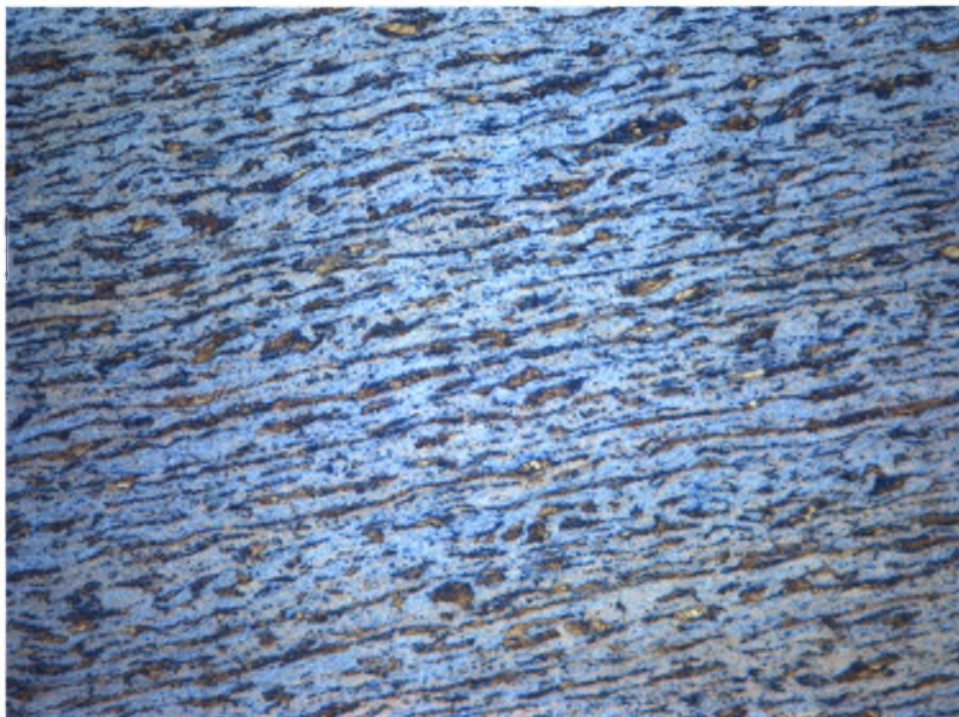


**A/A 7.8, LePera (15 sec), 1000X**

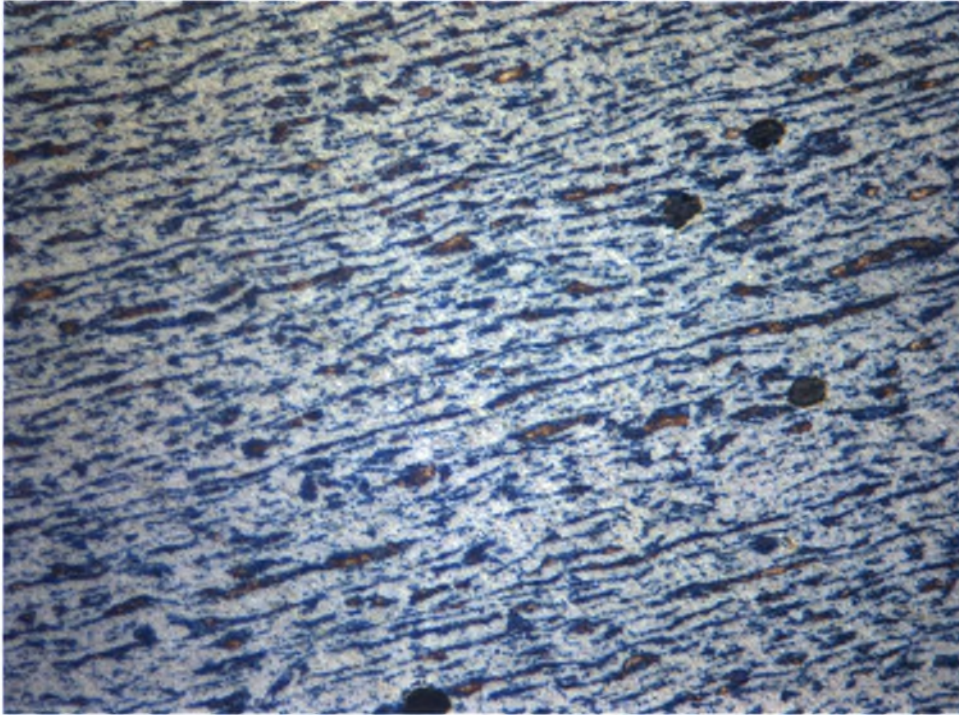


**A/A 7.9, LePera (15 sec), 1000X**

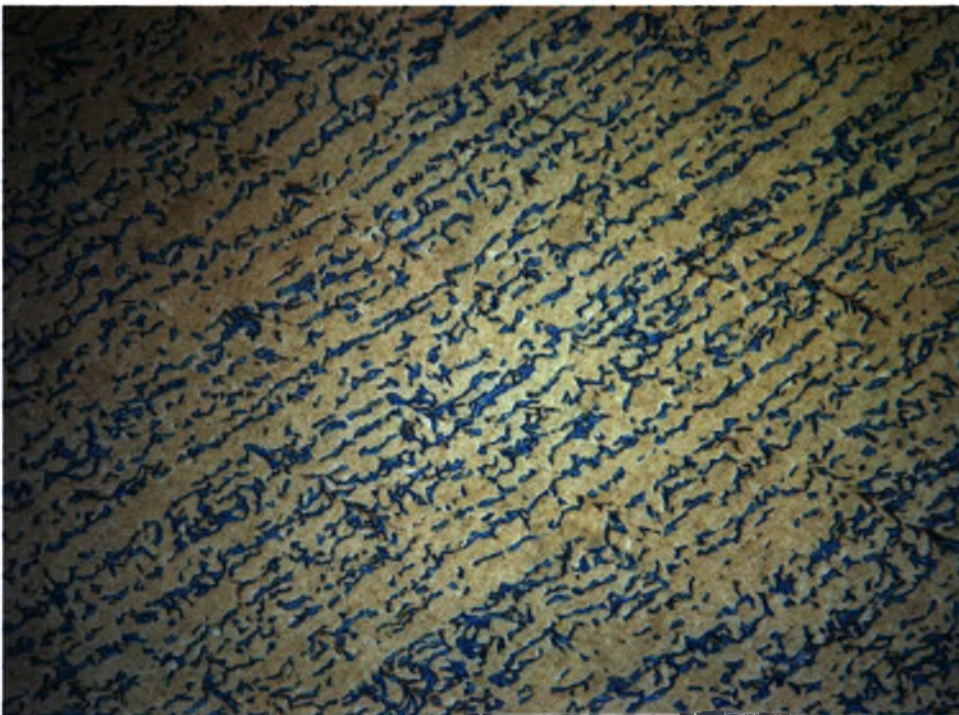
Οι επόμενες εννέα μεταλλογραφίες είναι των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη απόπτηση στους 957°C, όπου θεωρητικά θα έπρεπε να έχει σχηματιστεί 75% ωστενίτης. Στις δύο πρώτες φωτογραφίες (A/A 7.10 – 7,11), παρατηρούμε ότι δεν έχει εμφανιστεί καθόλου ωστενίτης. Αντίθετα, στις επόμενες επτά (A/A 7.12 – 7.18), το ποσοστό ωστενίτη είναι πολύ μεγάλο, φτάνοντας το 90%.



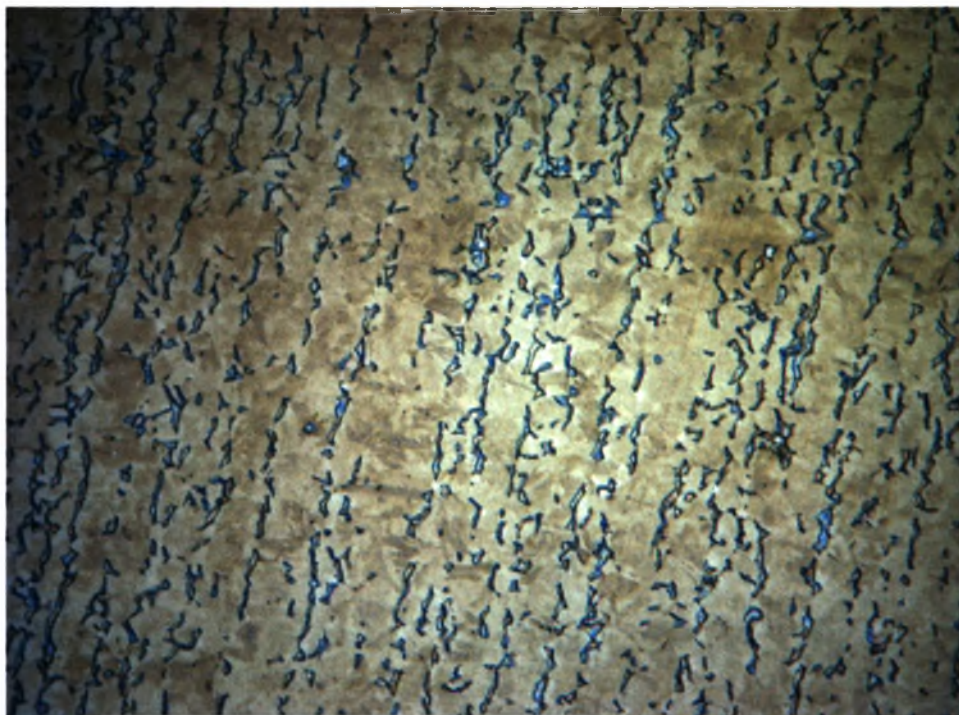
**A/A 7.10, LePera (15 sec), 1000X**



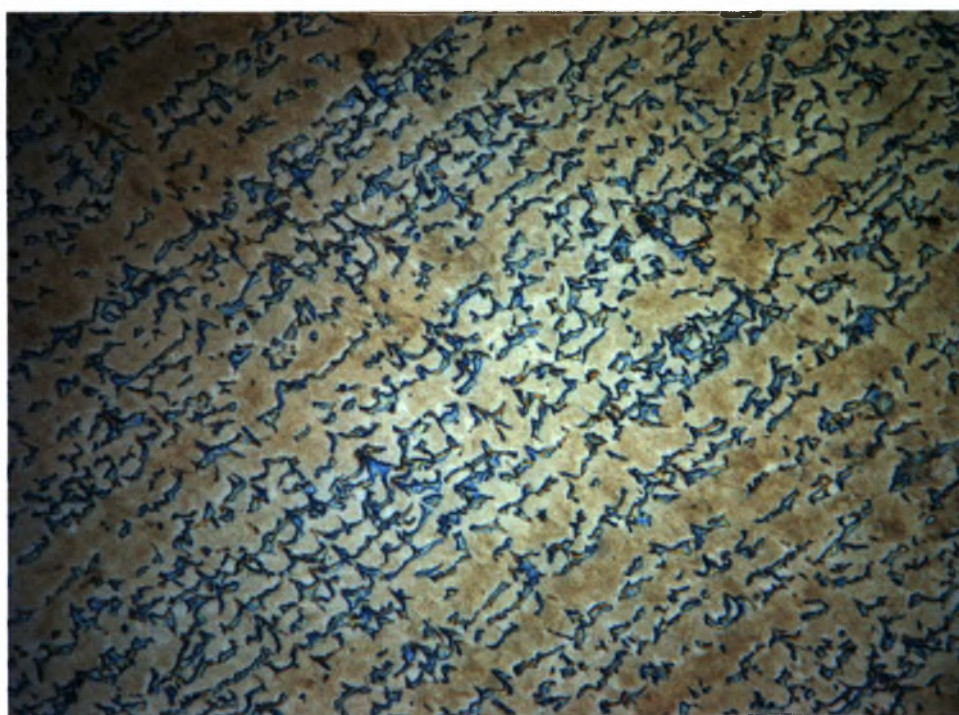
**A/A 7.11, LePera (15 sec), 1000X**



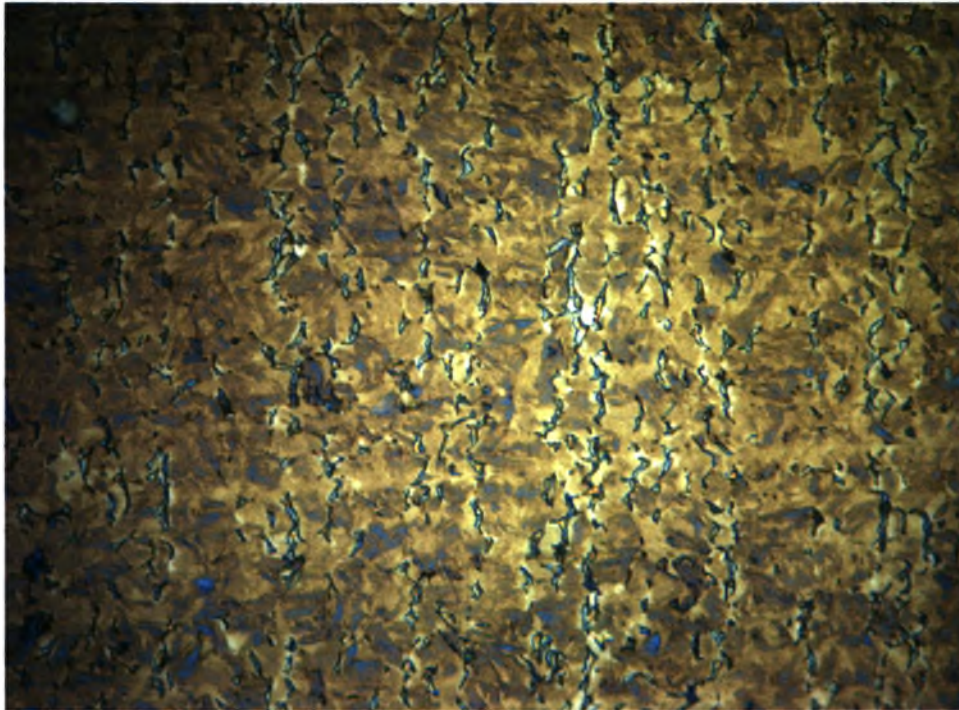
**A/A 7.12, LePera (15 sec), 1000X**



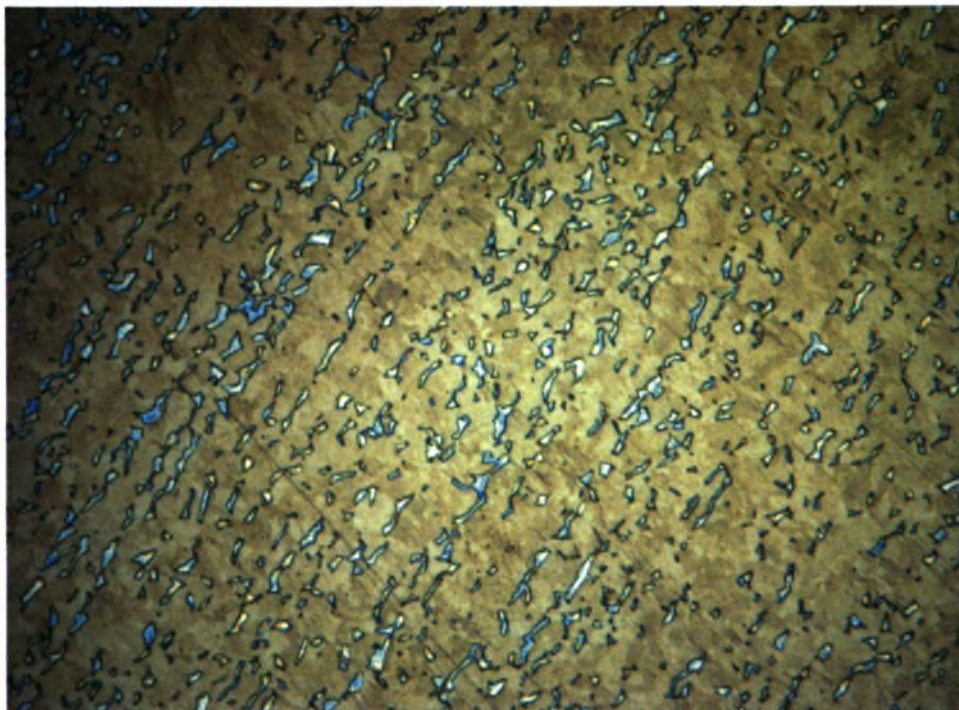
**A/A 7.13, LePera (15 sec), 1000X**



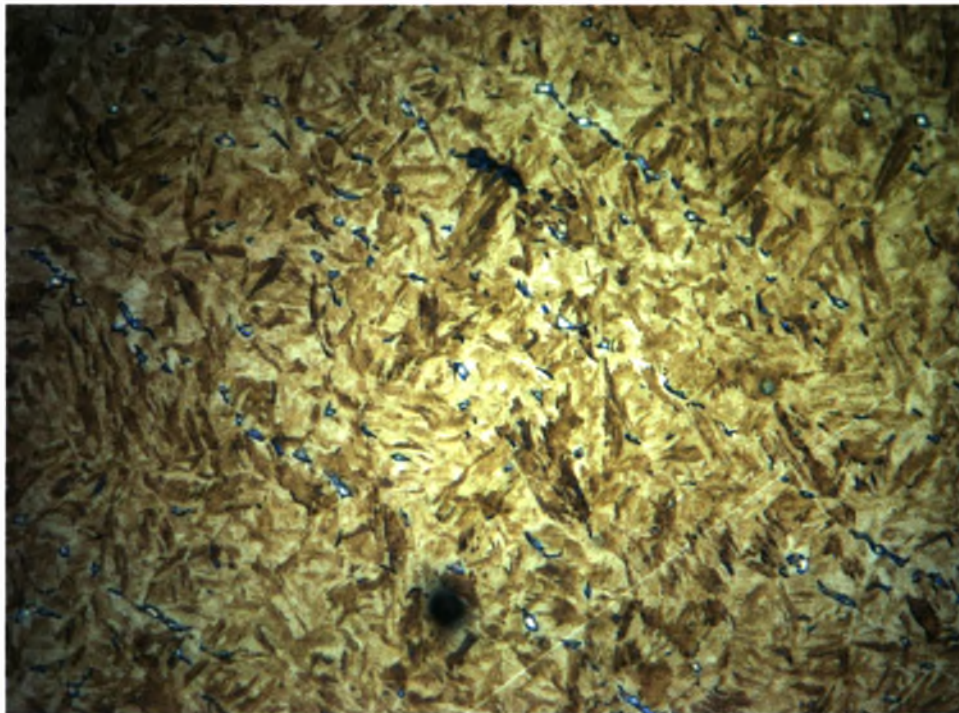
**A/A 7.14, LePera (15 sec), 1000X**



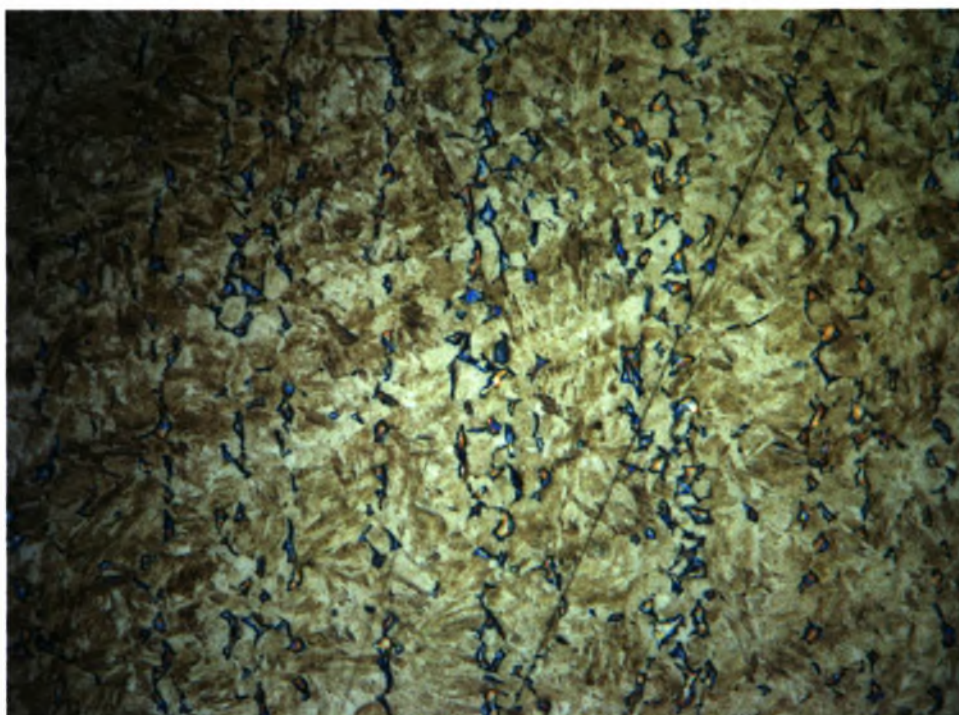
**A/A 7.15, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A 7.16, LePera (15 sec), 1000X**

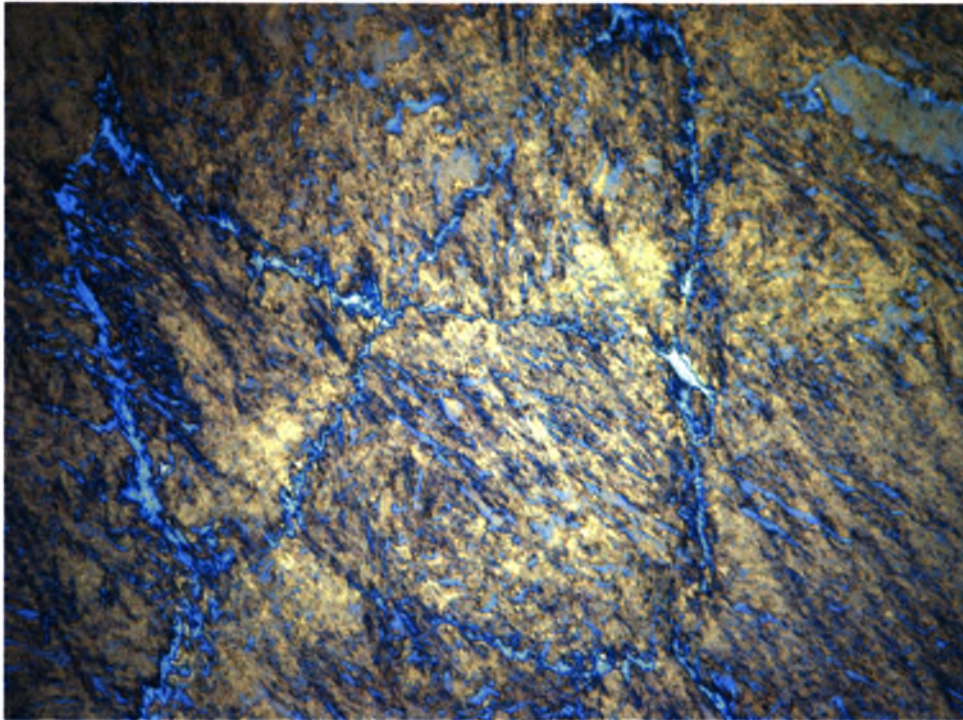


**A/A 7.17, LePera (15 sec), 1000X**



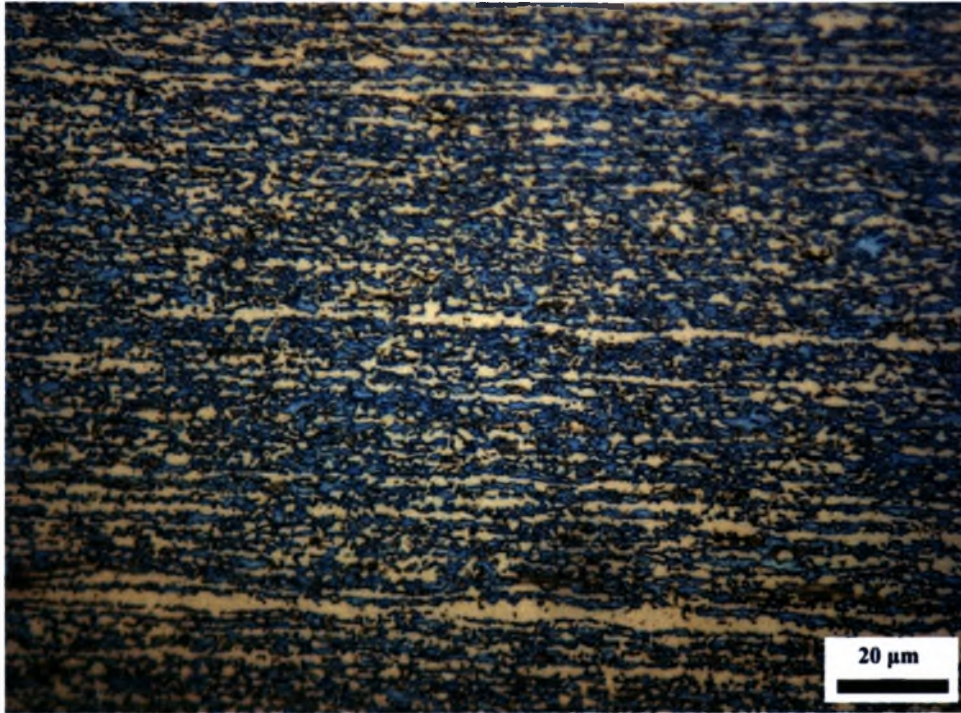
**A/A 7.18, LePera (15 sec), 1000X**

Τέλος, η φωτογραφία του δοκιμίου με A/A 7.19 είναι χαρακτηριστική της πλήρους ωστενιτοποίησης που έχει επέλθει μετά από ανόπτηση στους 1050°C για 30 min.



**A/A 7.19, LePera (15 sec), 1000X**

Οι επόμενες πέντε φωτογραφίες αντιστοιχούν στα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 843°C όπου και περιμένουμε ποσοστό ωστενίτη 50%. Διακρίνονται καθαρά και οι δύο οι φάσεις, τόσο ο ωστενίτης (μετασχηματισμένος σε μαρτενσίτη) όσο και ο φερρίτης.

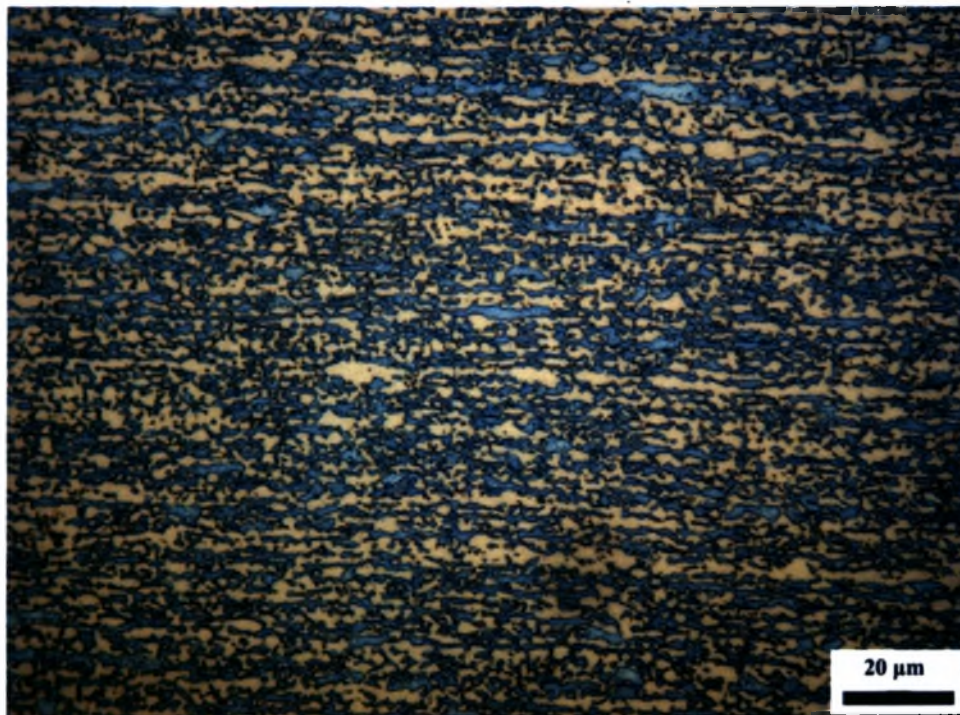


**TRIP 700, 843°C, 10 sec**

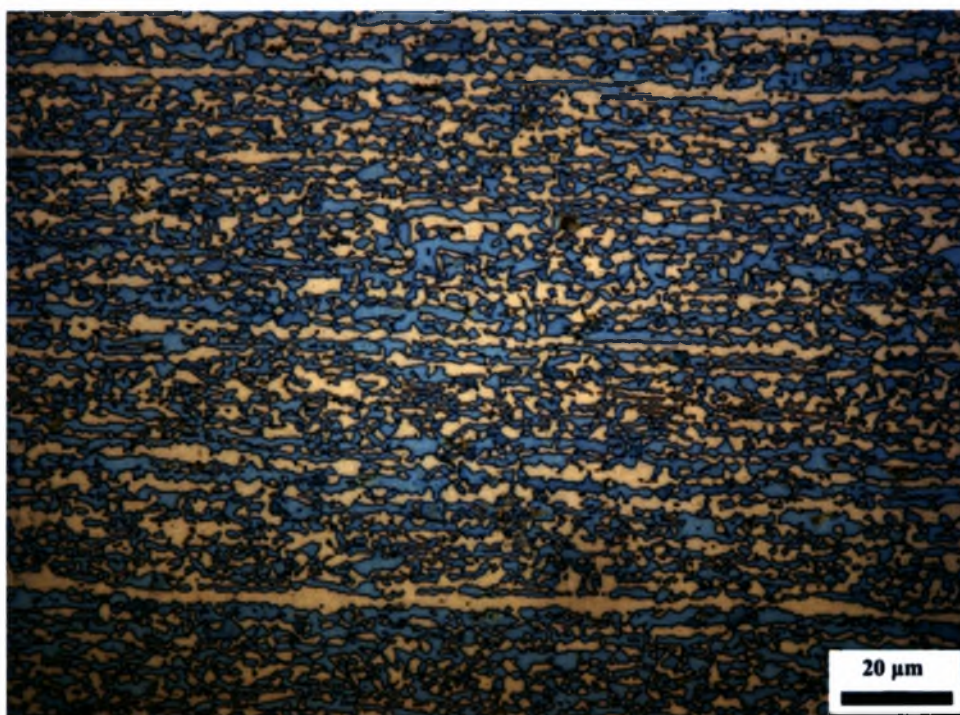


**TRIP 700, 843°C, 30 sec**





**TRIP 700, 843°C, 60 sec**



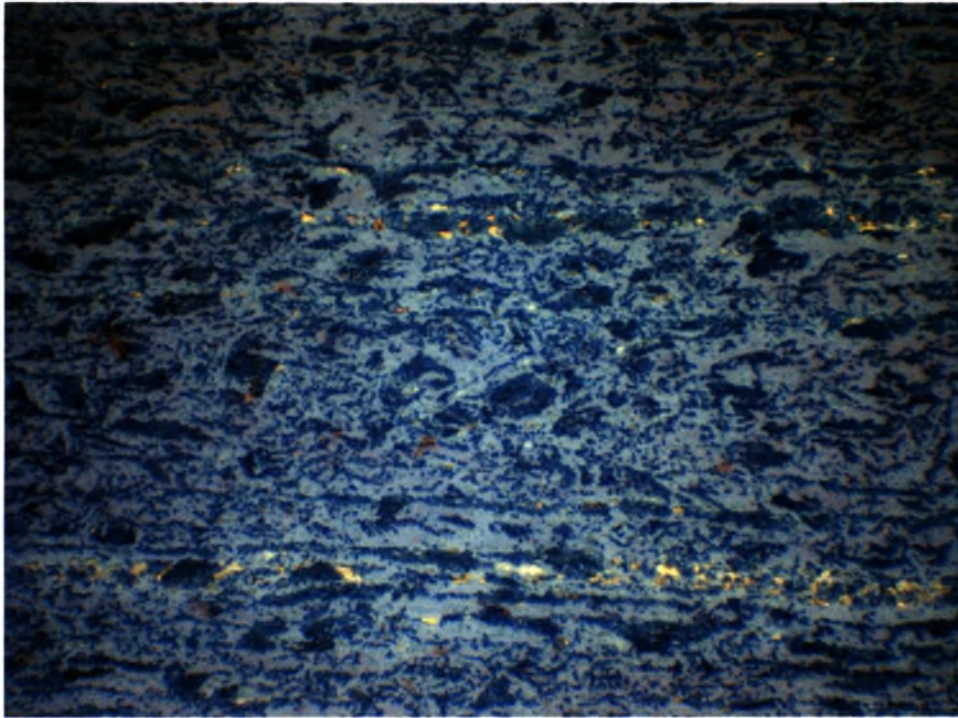
**TRIP 700, 843°C, 180 sec**



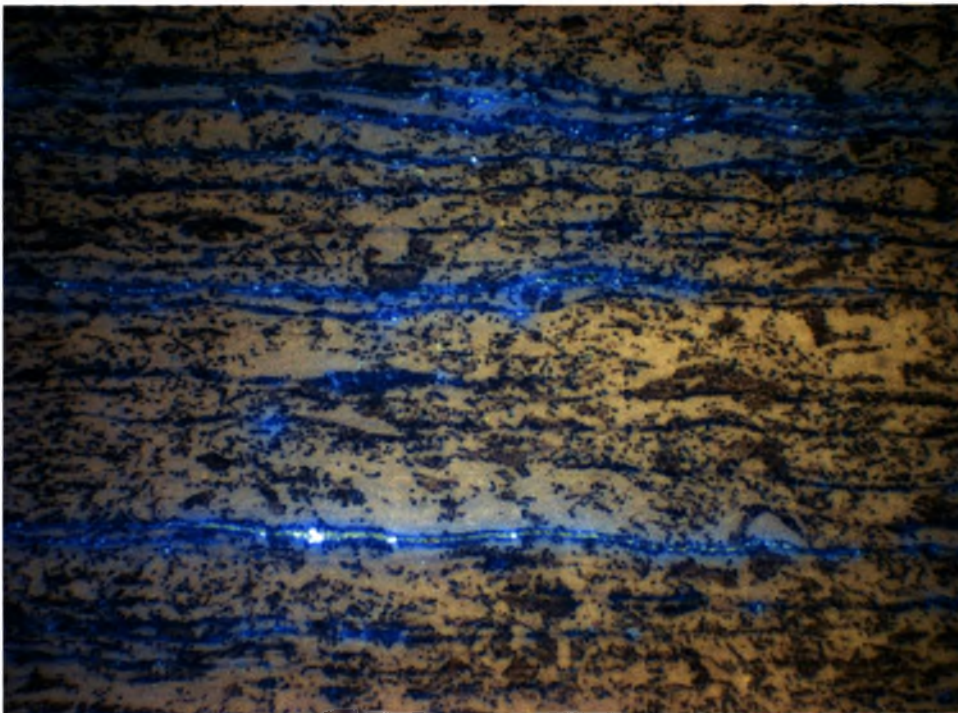
TRIP 700, 843°C, 6000 sec

## 2. Χάλυβας TRIP 800 HR-FH

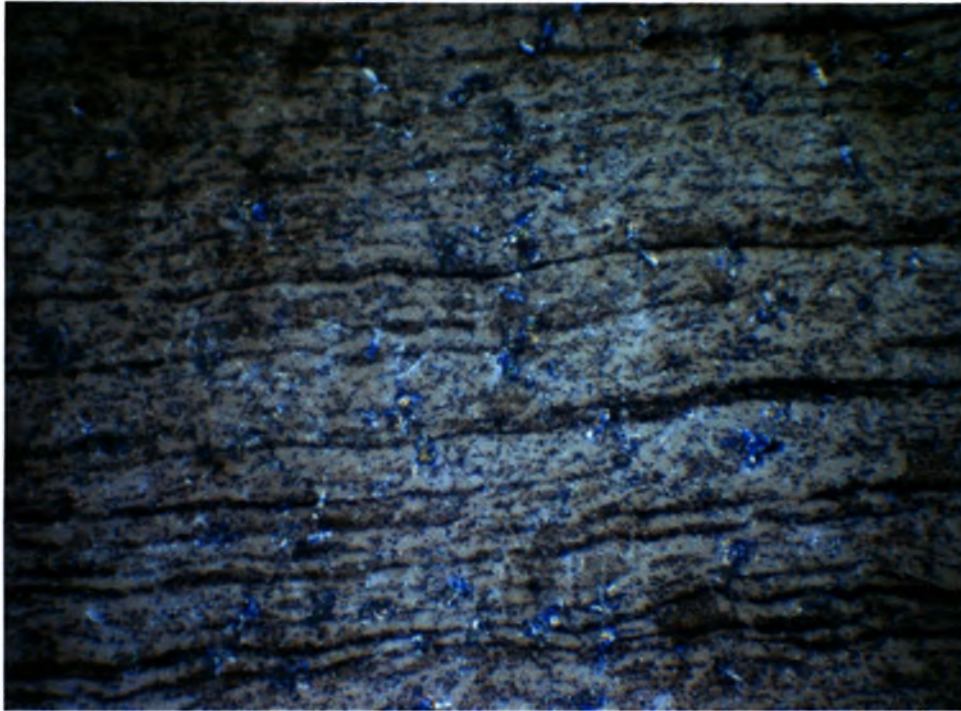
Οι πρώτες εννέα μεταλλογραφίες είναι των δοκιμίων με A/A 8.1 έως 8.9, τα οποία υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 720°C, όπου αναμένουμε ποσοστό ωστενίτη 25%. Στις τρεις πρώτες το ποσοστό που μετρήθηκε είναι πολύ μικρό (<1%), ενώ στις επόμενες έξι αυξάνεται σταδιακά και φτάνει μέχρι 13%.



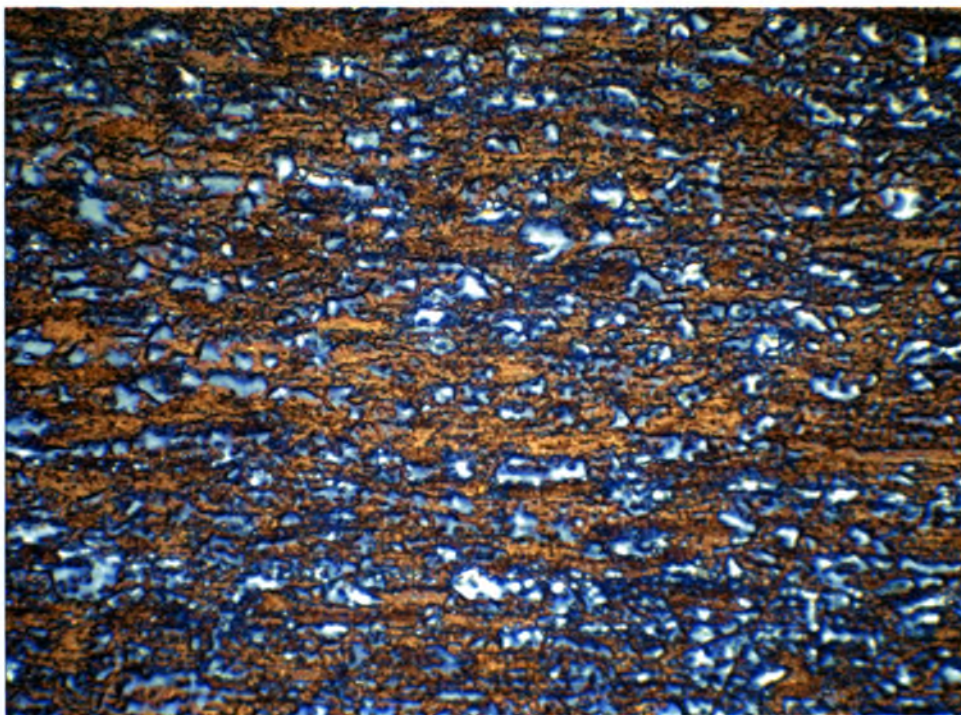
**A/A 8.1, LePera (15 sec), 1000X**



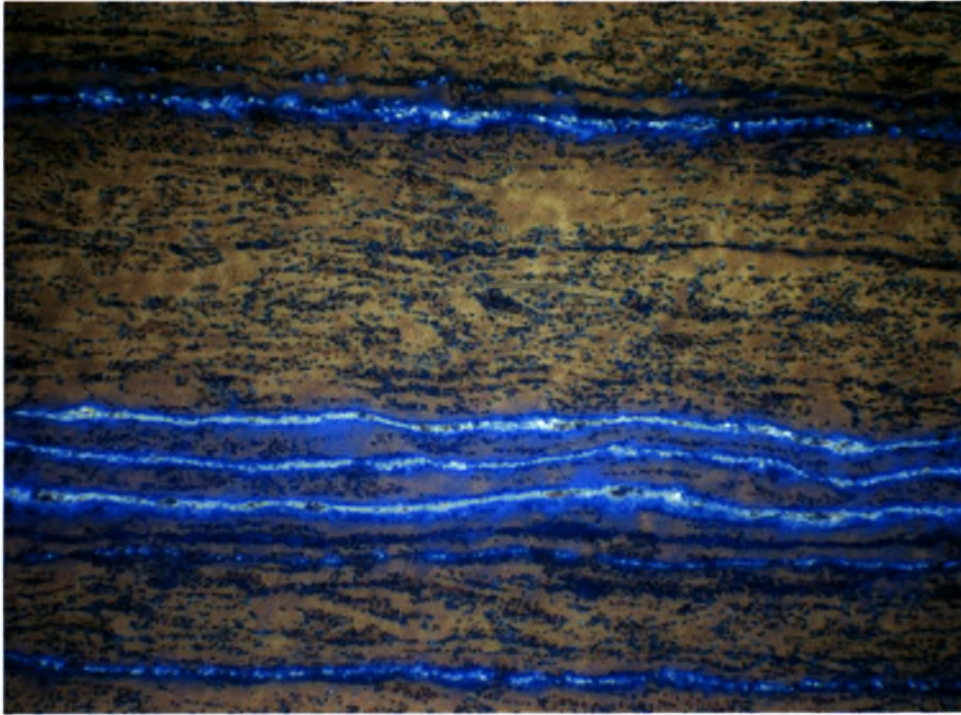
**A/A 8.2, LePera (15 sec), 1000X**



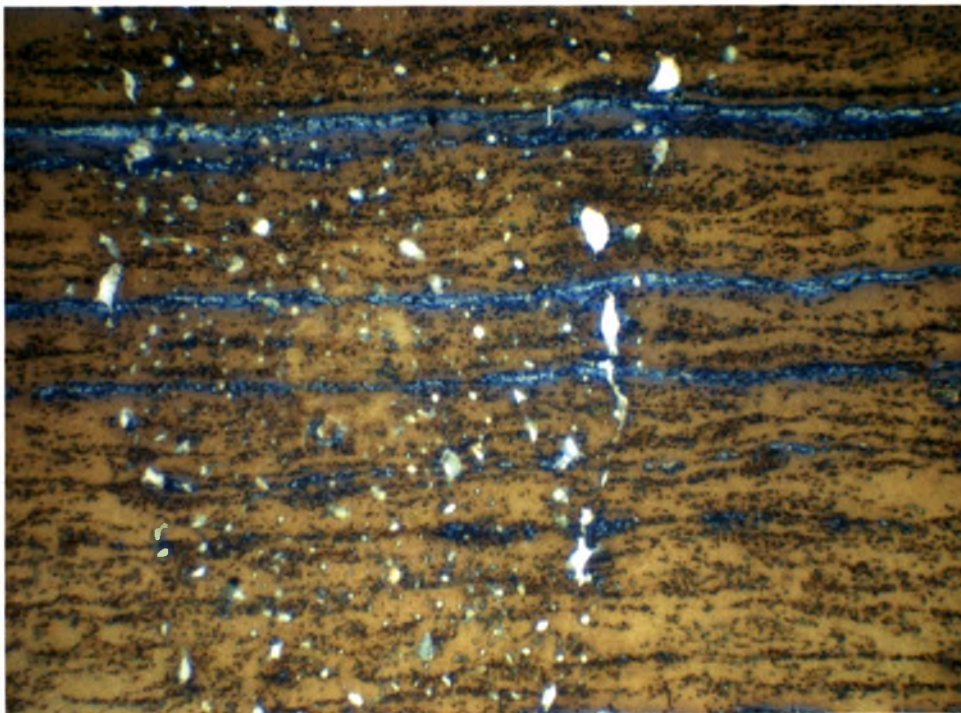
**A/A 8.3, LePera (15 sec), 1000X**



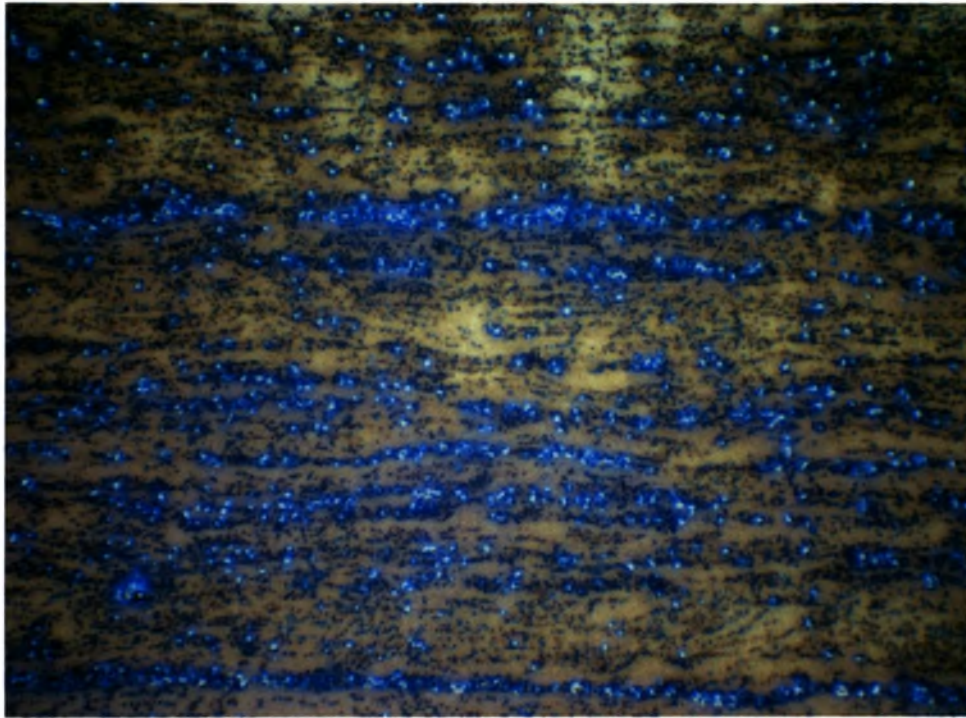
**A/A 8.4, LePera (15 sec), 1000X**



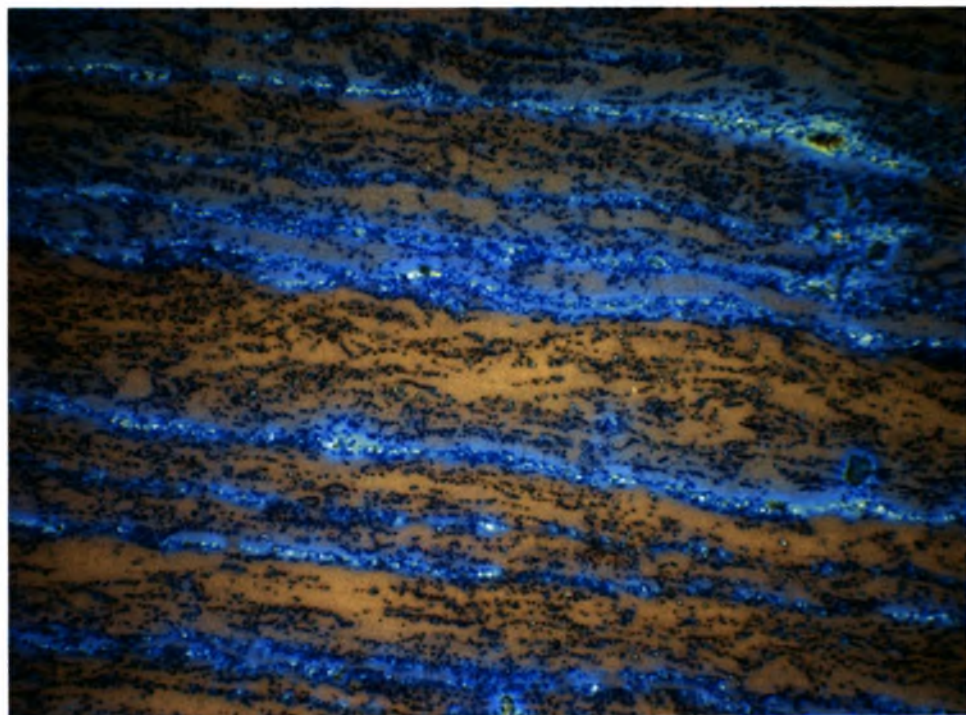
**A/A 8.5, LePera (15 sec), 1000X**



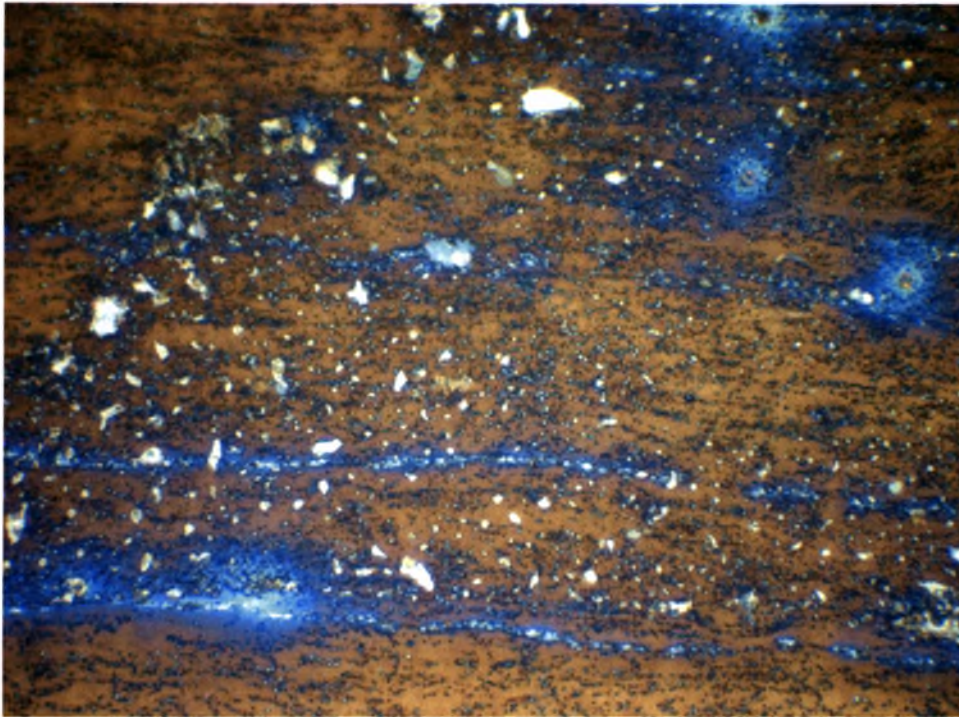
**A/A 8.6, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A 8.7, LePera (15 sec), 1000X**

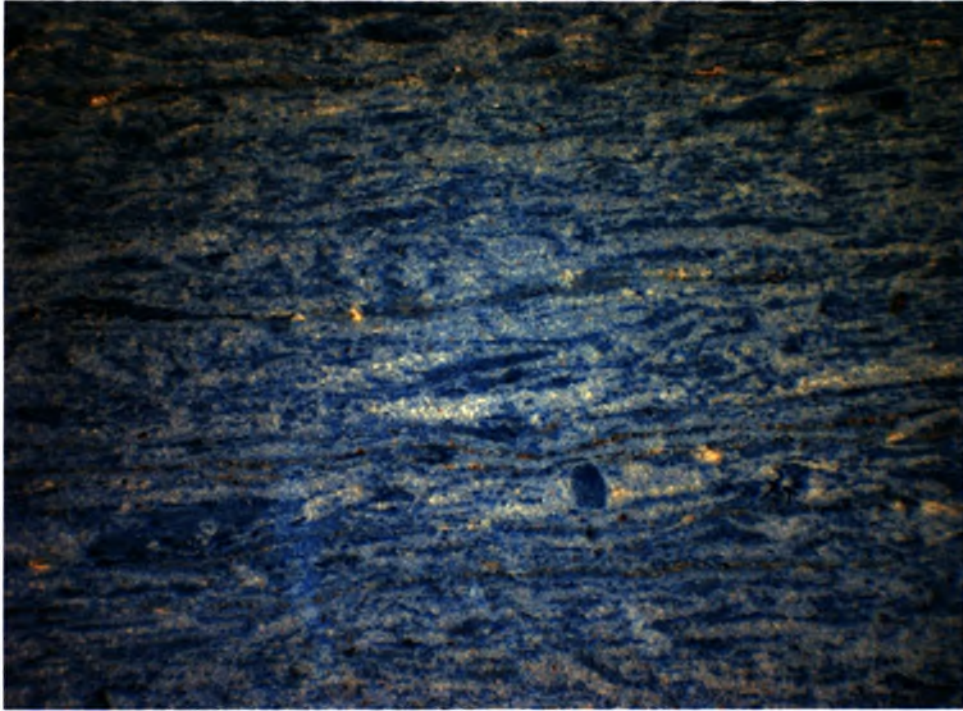


**A/A 8.8, LePera (15 sec), 1000X**

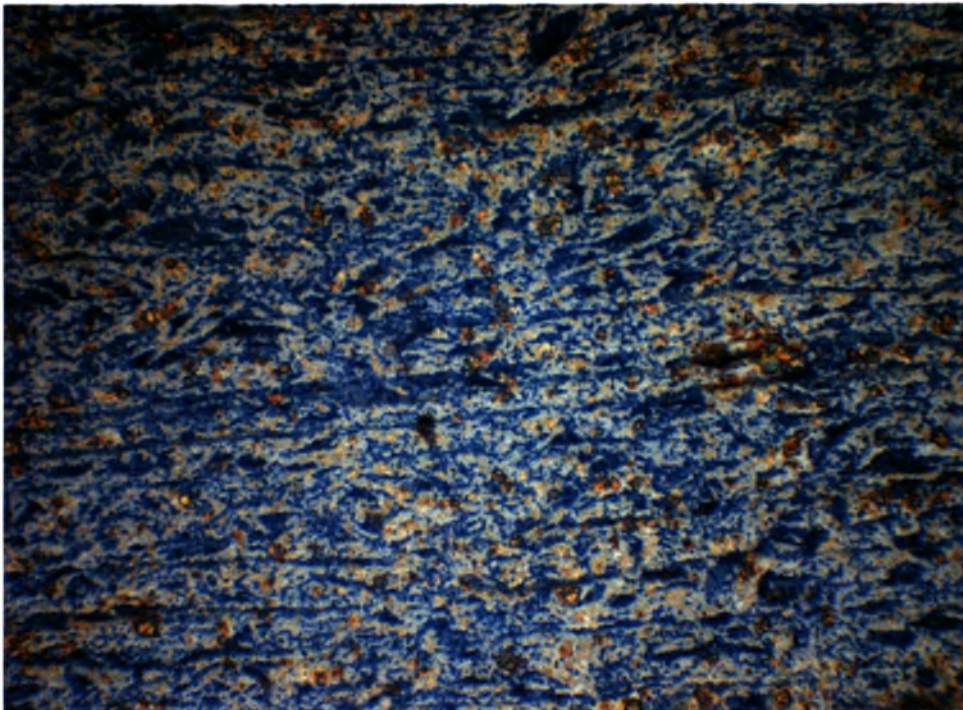


**A/A 8.9, LePera (15 sec), 1000X**

Οι επόμενες εννέα μεταλλογραφίες είναι των δοκιμίων με A/A 8.10 – 8.18 τα οποία υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 805°C, όπου αναμένουμε ποσοστό ωστενίτη 75%. Στις τέσσερις πρώτες φωτογραφίες (A/A 8.10 – 8.13) δεν φαίνεται να έχει σχηματιστεί κάποια ποσότητα ωστενίτη. Αντίθετα, στις επόμενες πέντε (A/A 8.14 – 8.18) το ποσοστό αυτό αυξάνει και φτάνει μέχρι 70%. Διακρίνονται καθαρά και οι δύο φάσεις (φερρίτης – ωστενίτης).

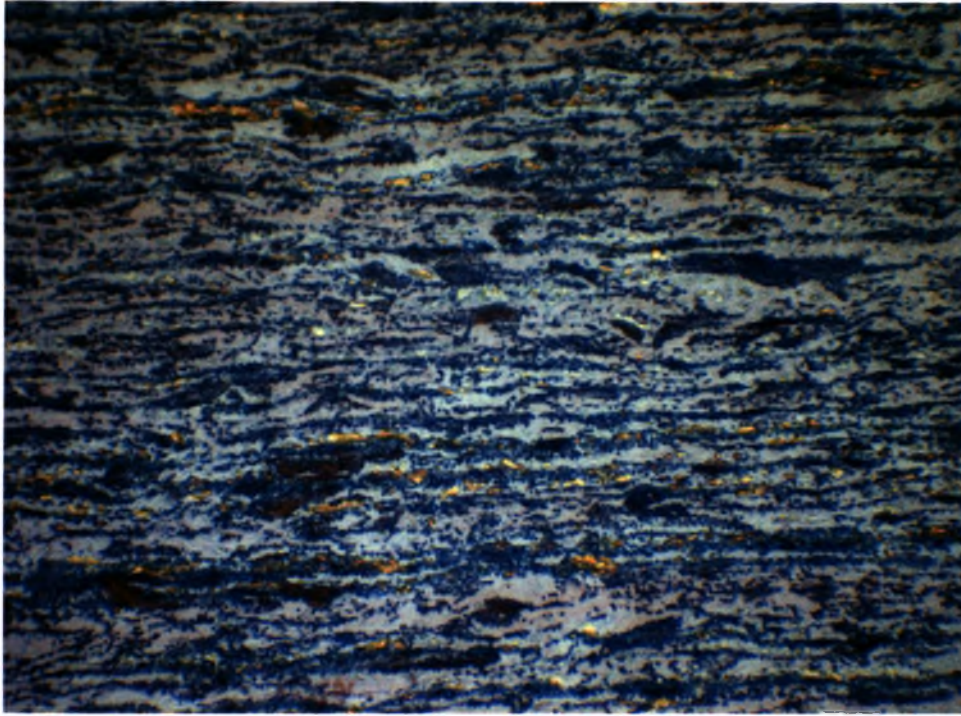


**A/A 8.10, LePera (15 sec), 1000X**

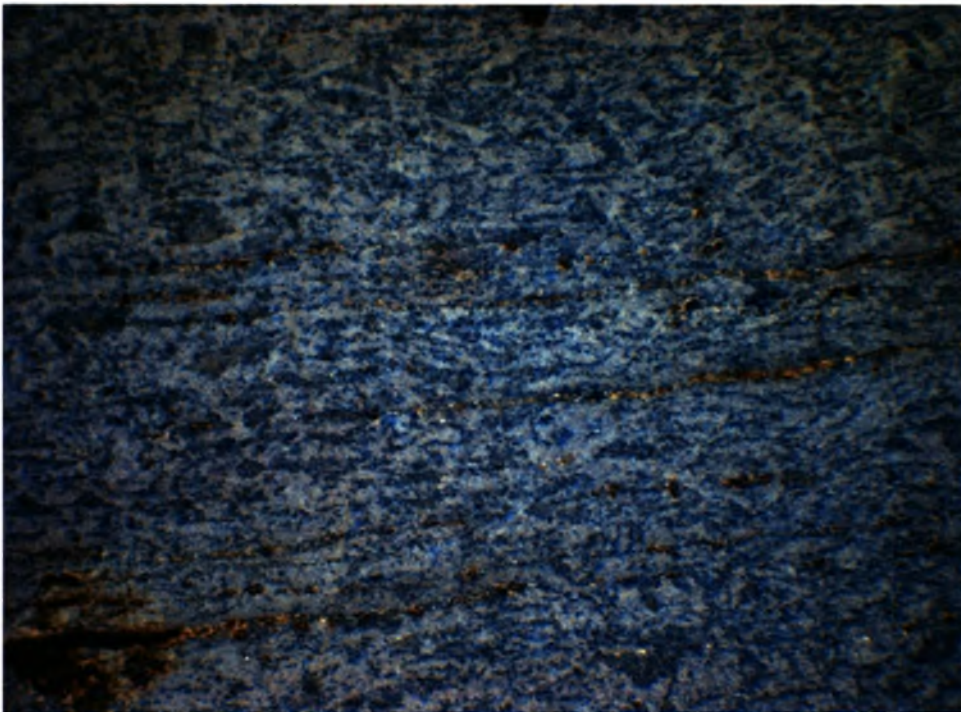


**A/A 8.11, LePera (15 sec), 1000X**

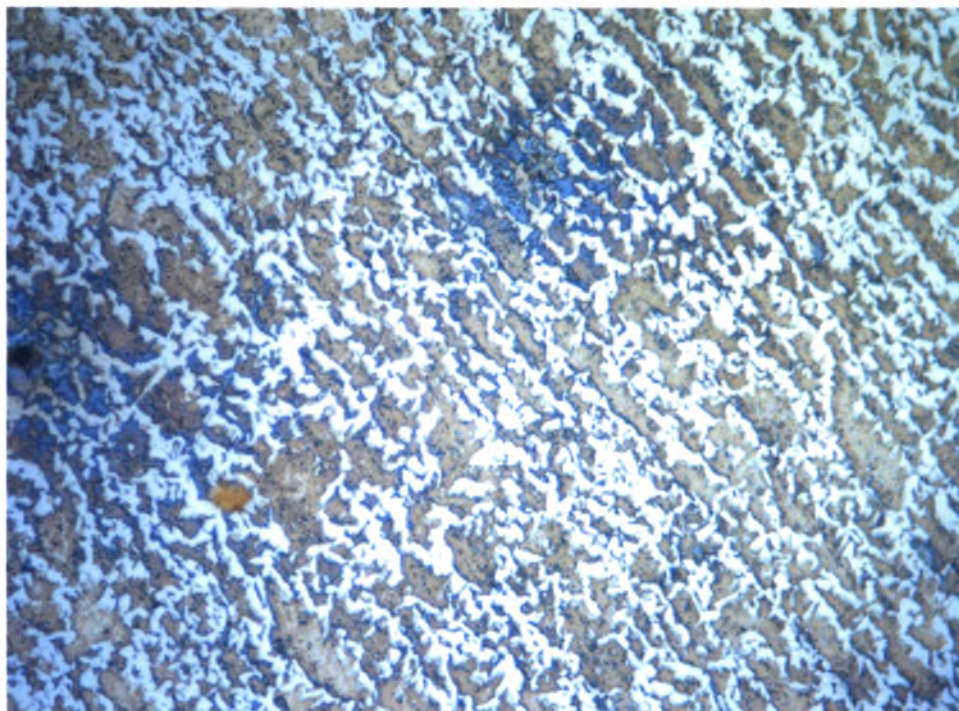




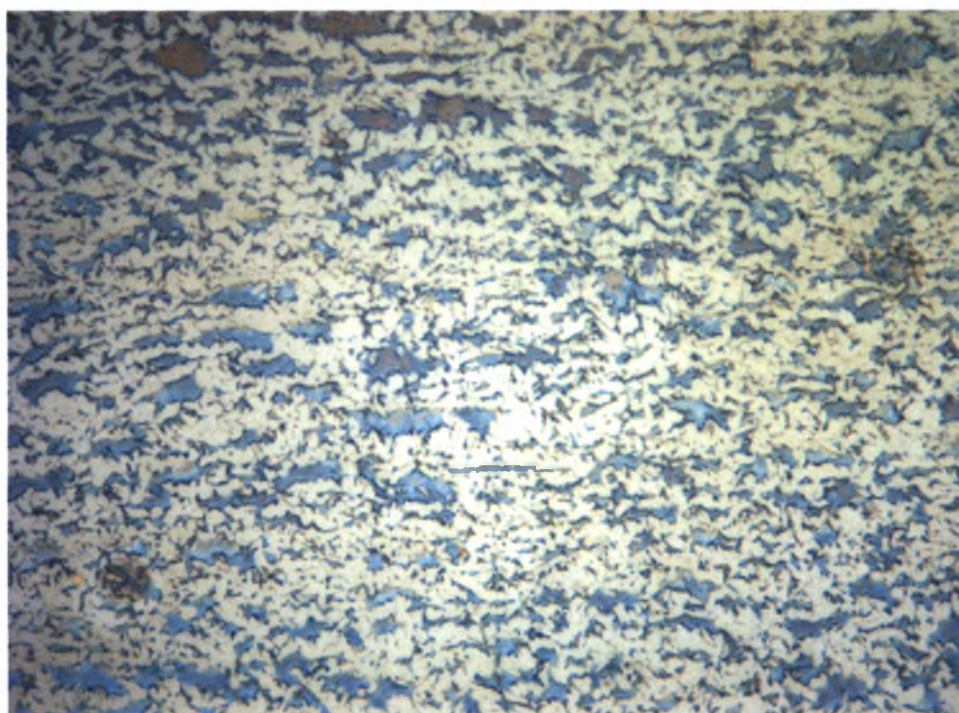
**A/A 8.12, LePera (15 sec), 1000X**



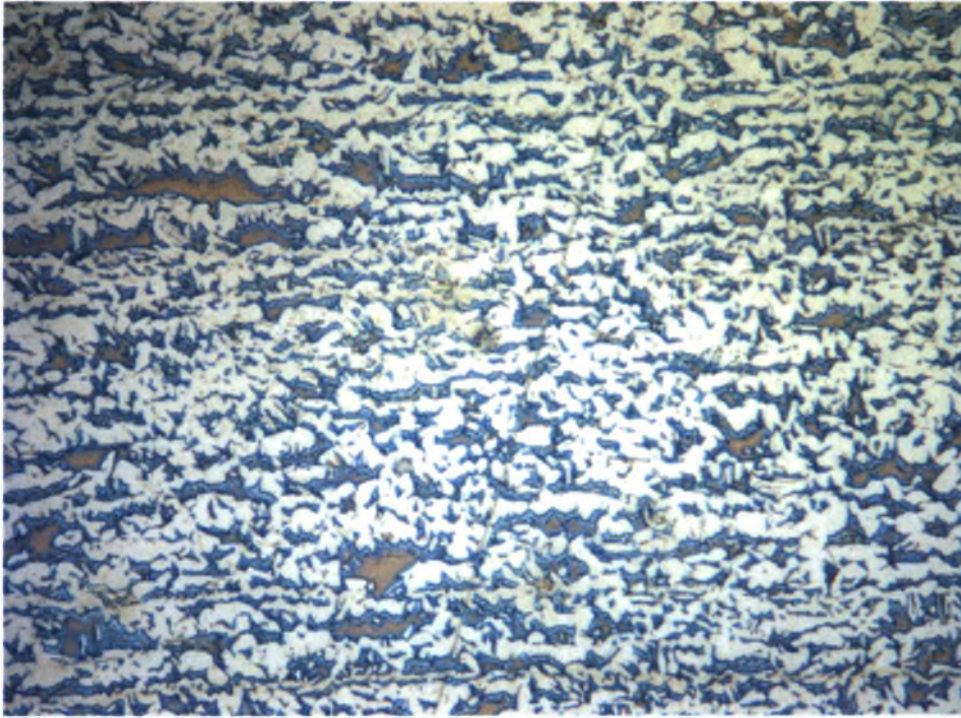
**A/A 8.13, LePera (15 sec), 1000X**



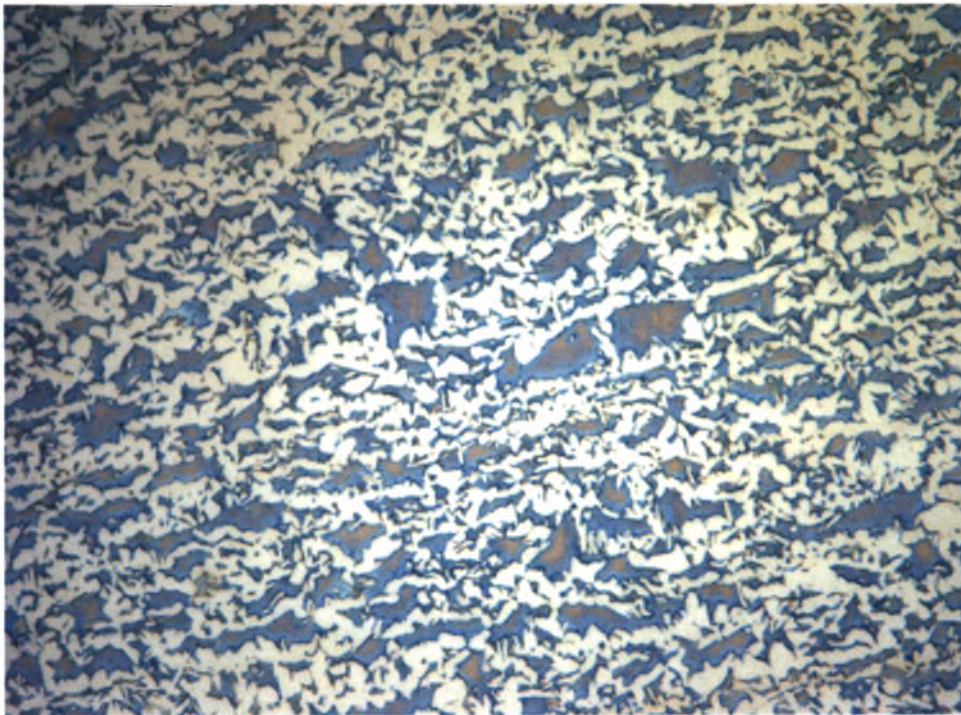
**A/A 8.14, LePera (15 sec), 1000X**



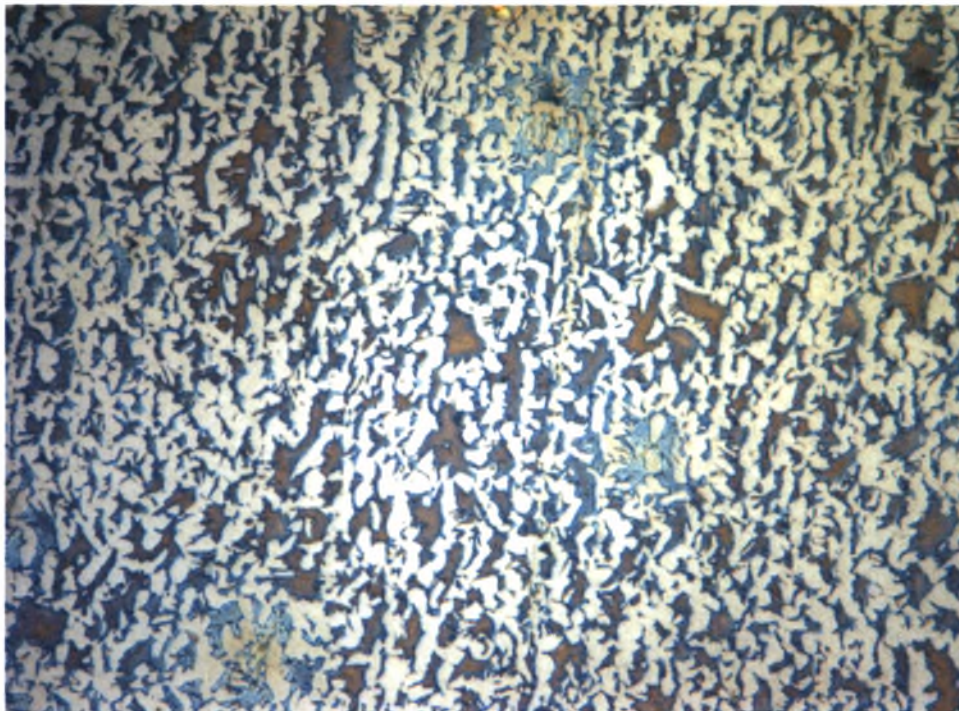
**A/A 8.15, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A 8.16, LePera (15 sec), 1000X**

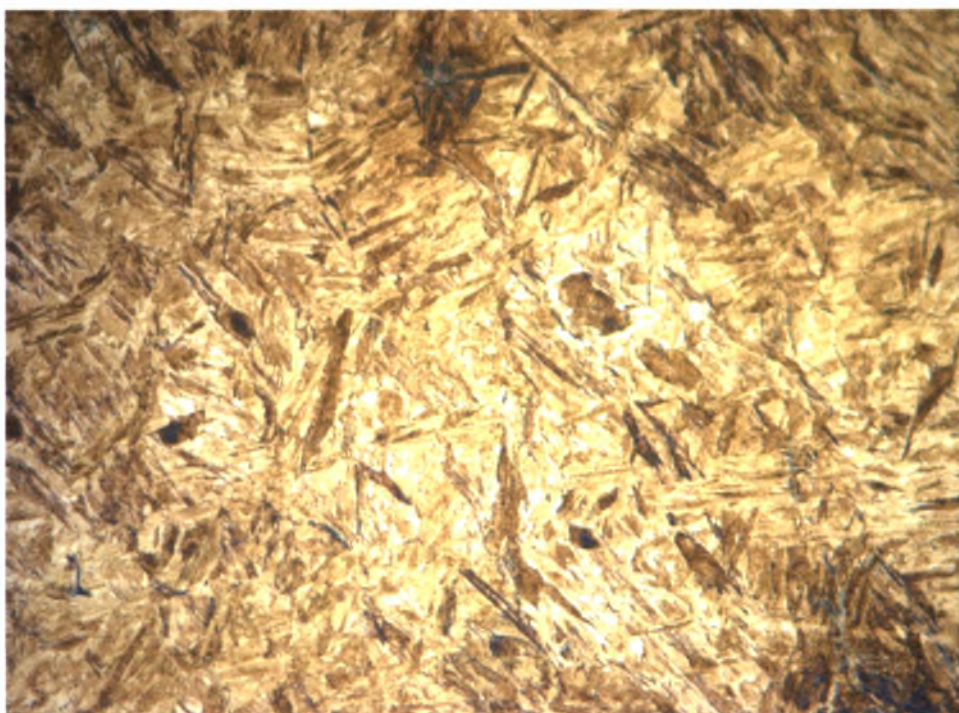


**A/A 8.17, LePera (15 sec), 1000X**



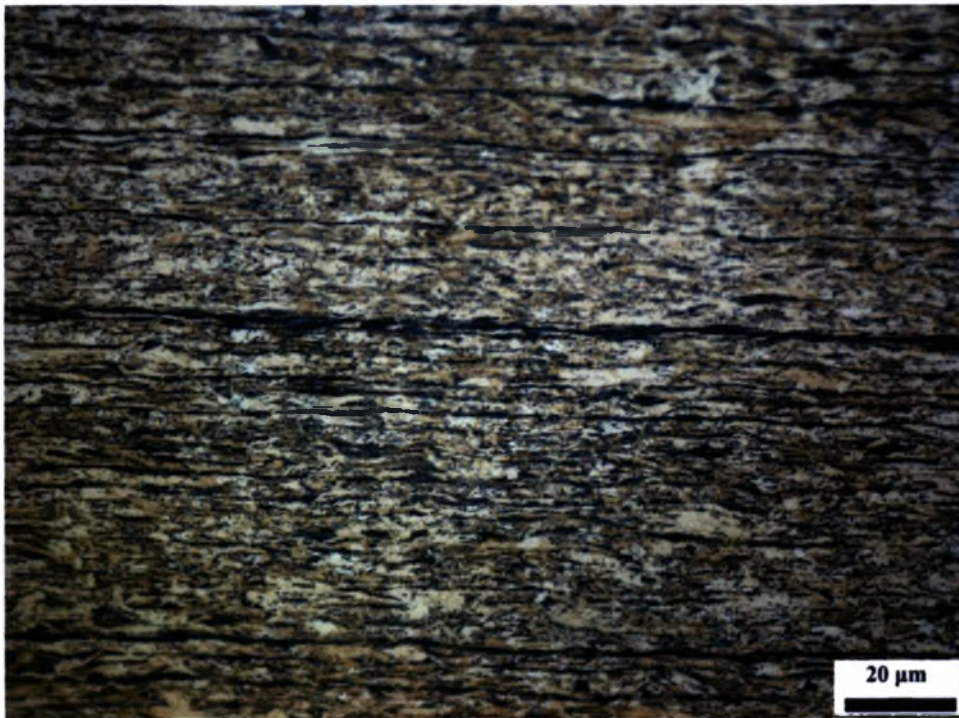
**A/A 8.18, LePera (15 sec), 1000X**

Η φωτογραφία του δοκιμίου A/A 8.19 είναι χαρακτηριστική της πλήρους ωστενιτοποίησης που έχει επέλθει μετά από ανόπτηση στους 1050°C για 30 min.

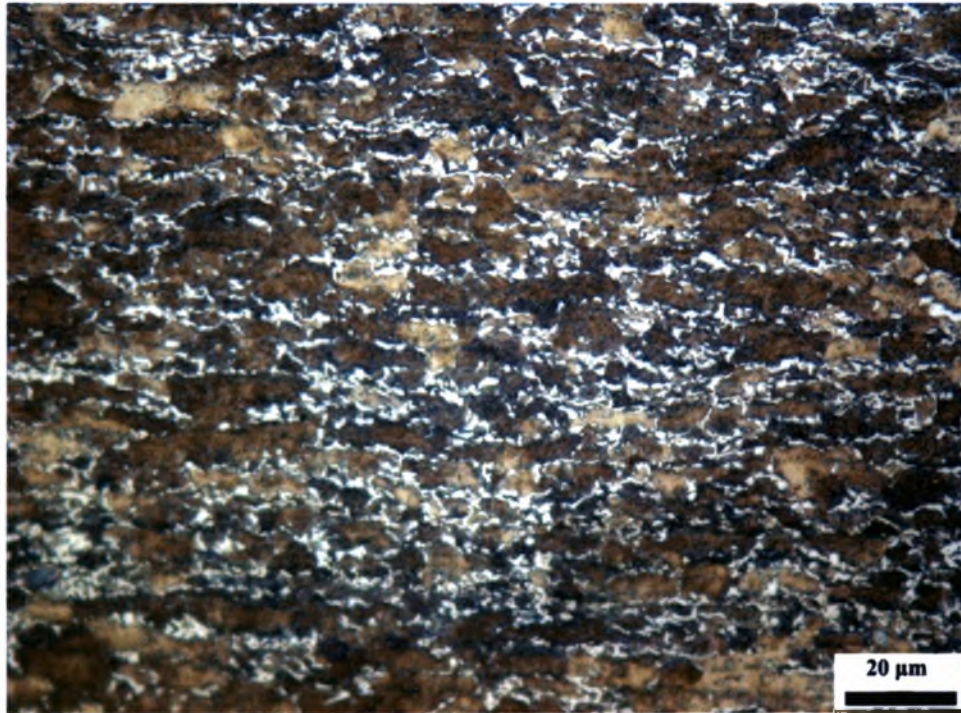


**A/A 8.19, LePera (15 sec), 1000X**

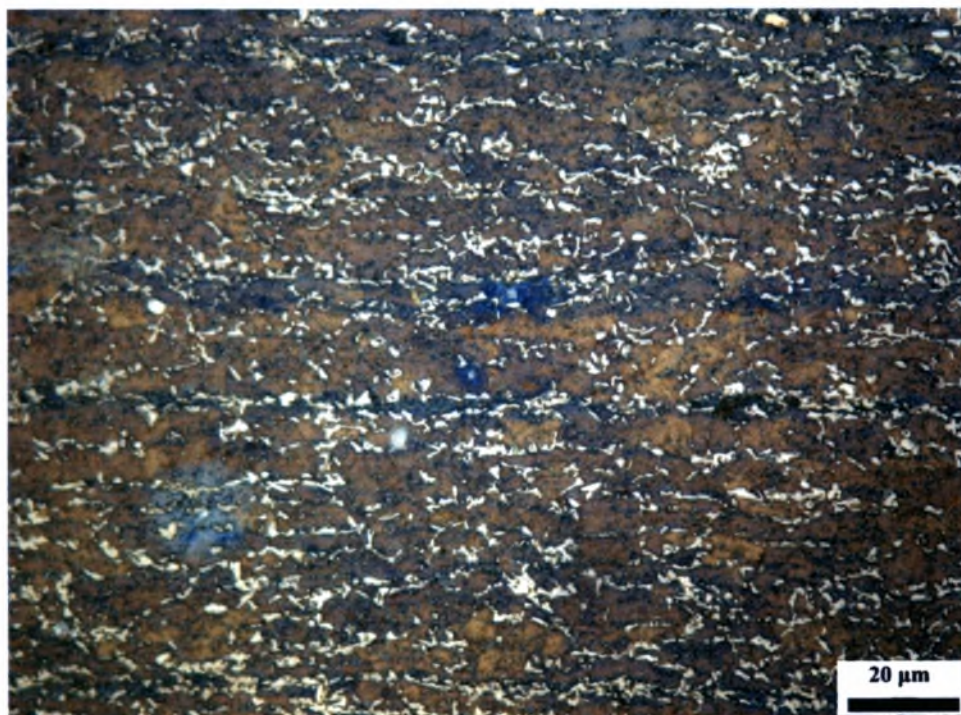
Οι επόμενες έξι φωτογραφίες αντιστοιχούν στα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 762°C, όπου και περιμένουμε ποσοστό ωστενίτη 50%. Στην πράξη το ποσοστό που μετρήθηκε φτάνει μέχρι το 33%. Με εξαίρεση την πρώτη φωτογραφία, στην οποία δεν φαίνεται να έχει σχηματιστεί κάποια ποσότητα ωστενίτη, στις υπόλοιπες πέντε διακρίνονται καθαρά και οι δύο οι φάσεις, τόσο ο ωστενίτης (μετασχηματισμένος σε μαρτενσίτη) όσο και ο φερρίτης.



**TRIP 800, 762°C, 10 sec**



**TRIP 800, 762°C, 30 sec**



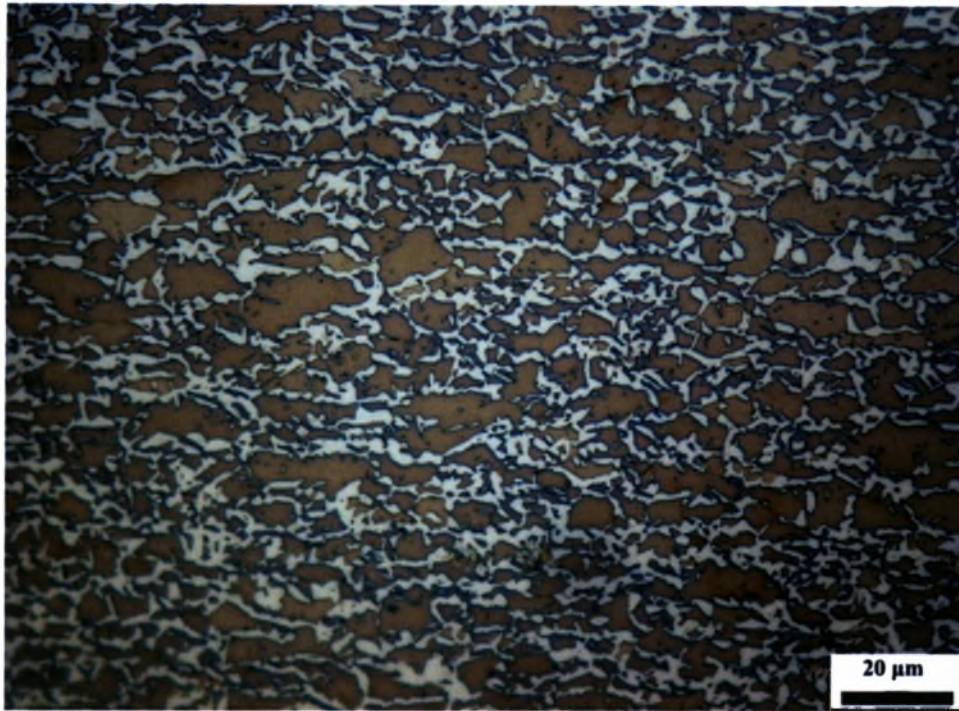
**TRIP 800, 762°C, 60 sec**



**TRIP 800, 762°C, 180 sec**



**TRIP 800, 762°C, 300 sec**



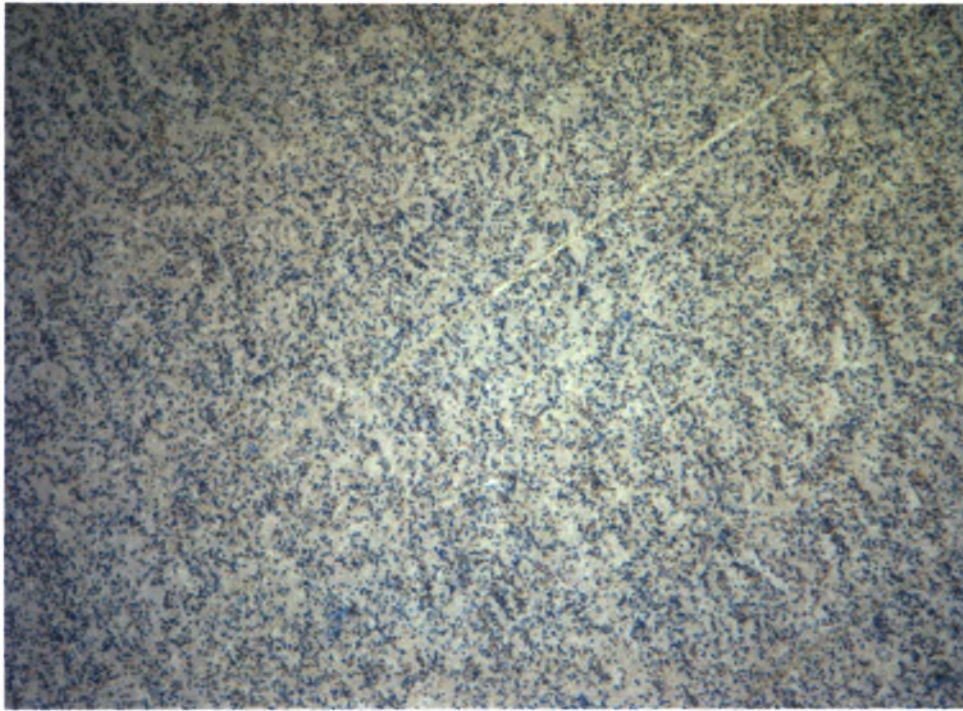
**TRIP 800, 762°C, 600 sec**

### **3. Μπαινιτικός Μετασχηματισμός (TRIP 700 CR-FH & TRIP 800 HR-FH)**

Οι μεταλλογραφίες που ακολουθούν αντιστοιχούν σε δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση και στη συνέχεια σε μπαινιτικό μετασχηματισμό, σε διάφορες θερμοκρασίες και διάφορους χρόνους.

Στις δύο πρώτες μεταλλογραφίες, αυτές των δοκιμίων με A/A 0.1 και 0.2, δεν διακρίνεται παραμένων ωστενίτης. Το ποσοστό που μετρήθηκε ήταν 0,7% και 0,1% αντίστοιχα.





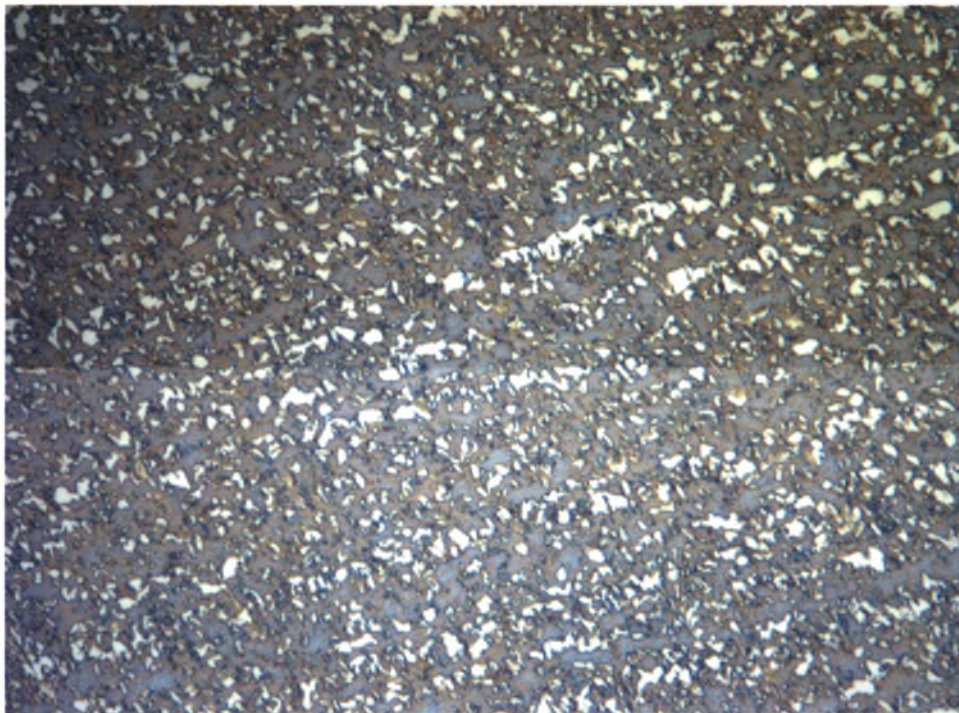
**A/A 01, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A 02, LePera (15 sec), 1000X**

Στις επόμενες δύο φωτογραφίες (A/A 0.7 – 0.8) διακρίνονται όλες οι φάσεις

(φερρίτης, μπαινίτης, μαρτενσίτης / παραμένων ωστενίτης). Το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη που μετρήθηκε ήταν περίπου 11%.



**A/A 07, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A 08, LePera (15 sec), 1000X**

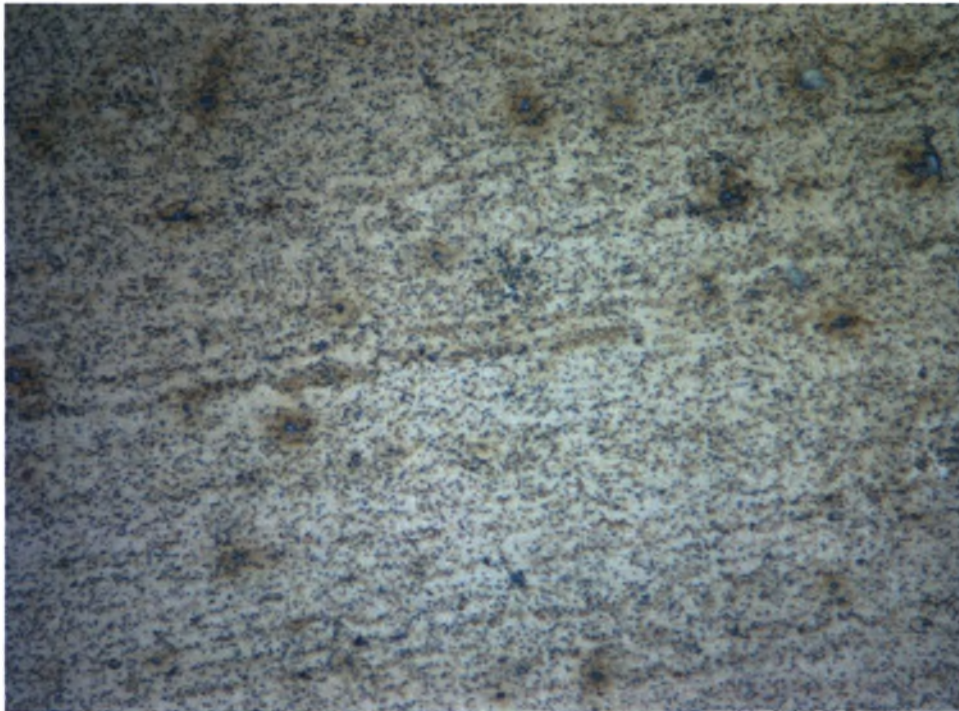
Στις επόμενες επτά μεταλλογραφίες που ακολουθούν δεν φαίνεται να υπάρχει παραμένον ωστενίτης. Το ποσοστό που μετρήθηκε για τα δοκίμια αυτά ήταν <1%.



**A/A 09, LePera (15 sec), 1000X**



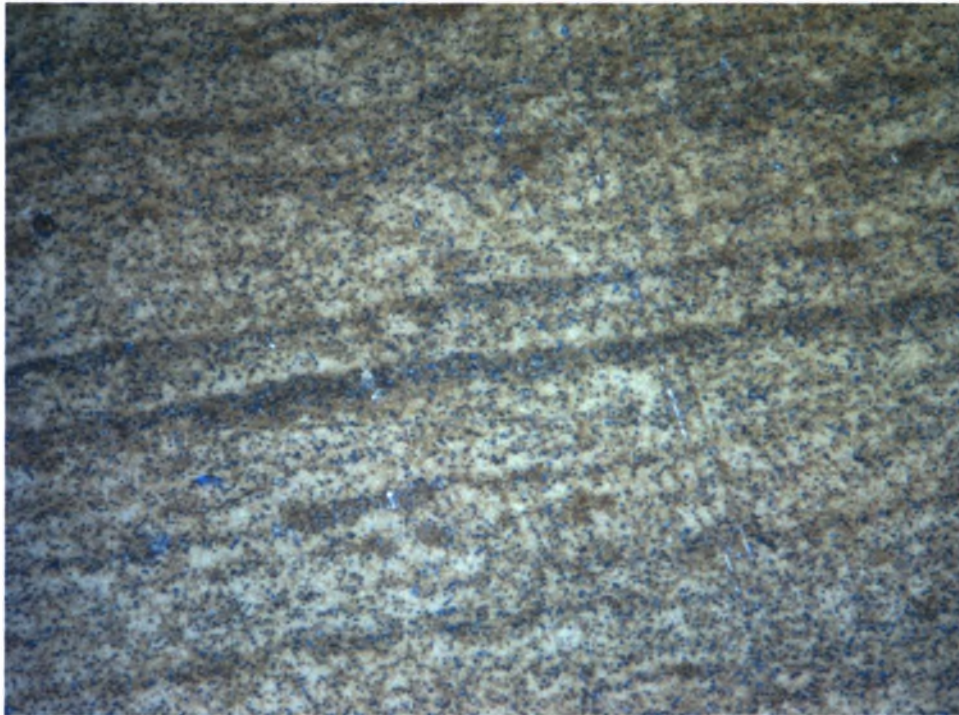
**A/A 11, LePera (15 sec), 1000X**



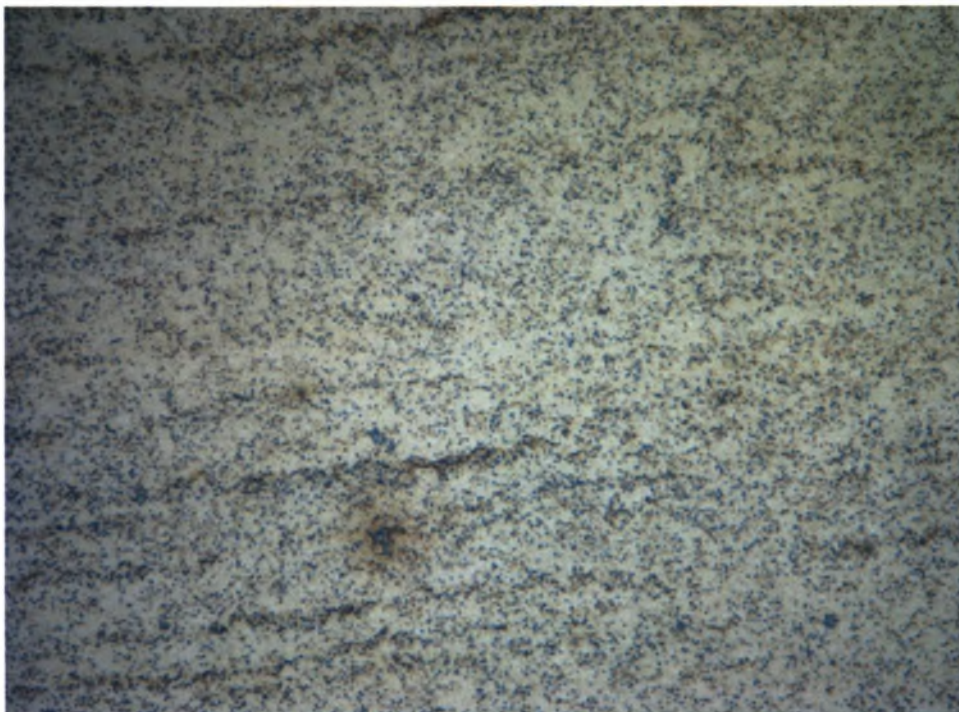
**A/A 13, LePera (15 sec), 1000X**



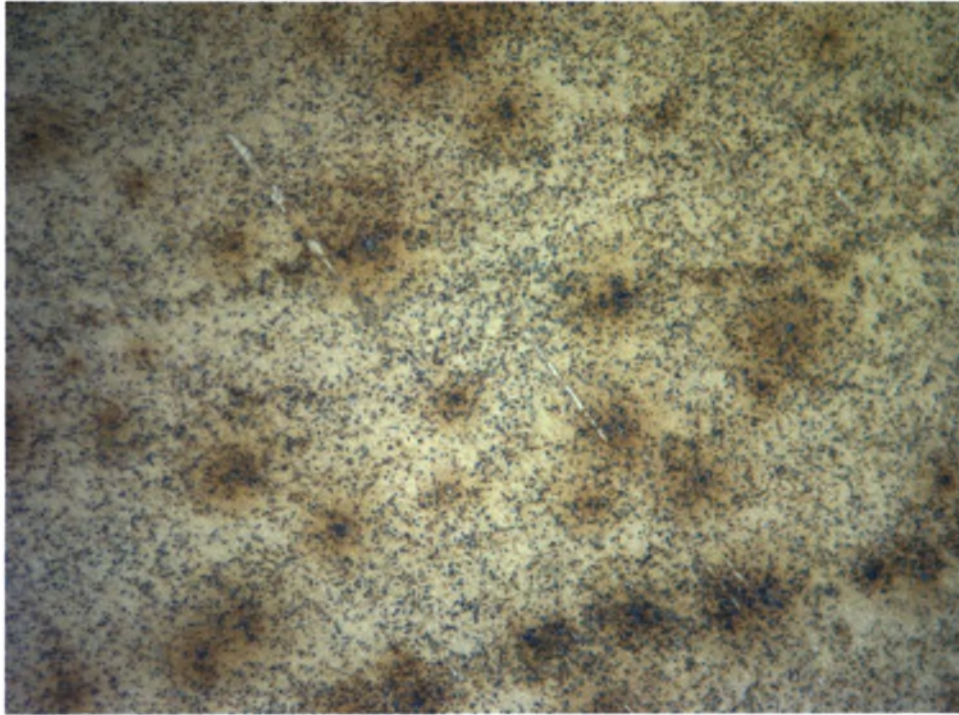
**A/A 15, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A 16, LePera (15 sec), 1000X**

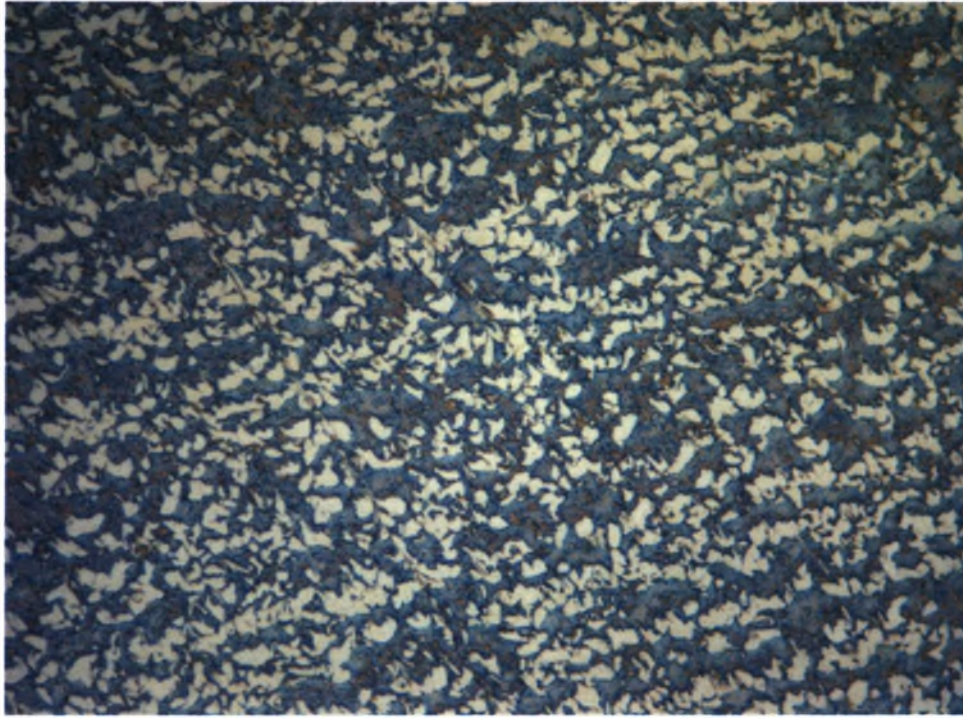


**A/A 17, LePera (15 sec), 1000X**

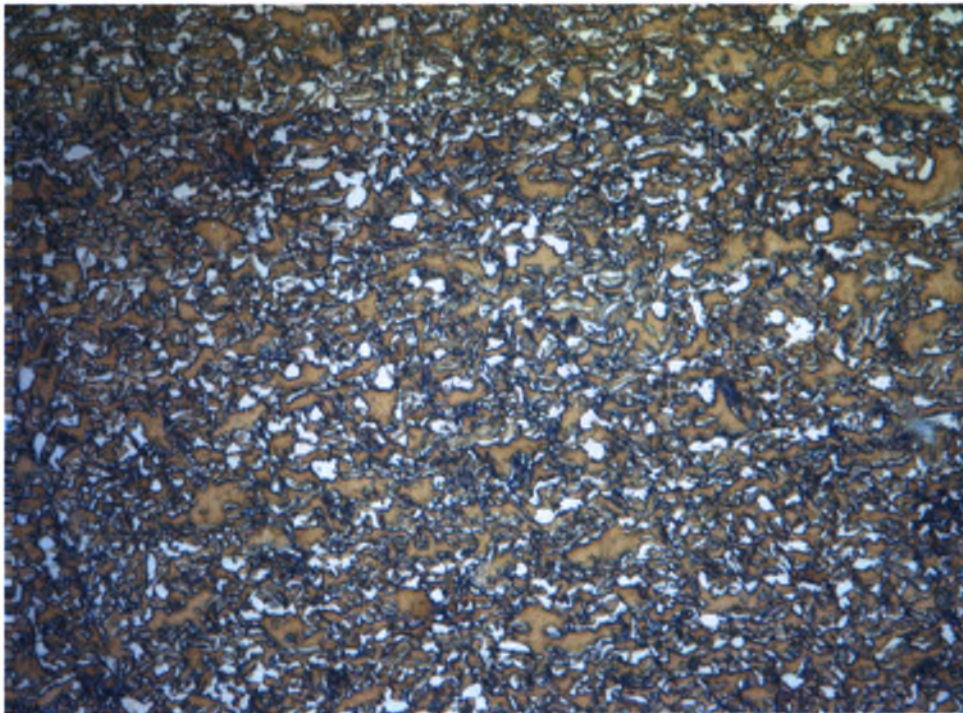


**A/A 18, LePera (15 sec), 1000X**

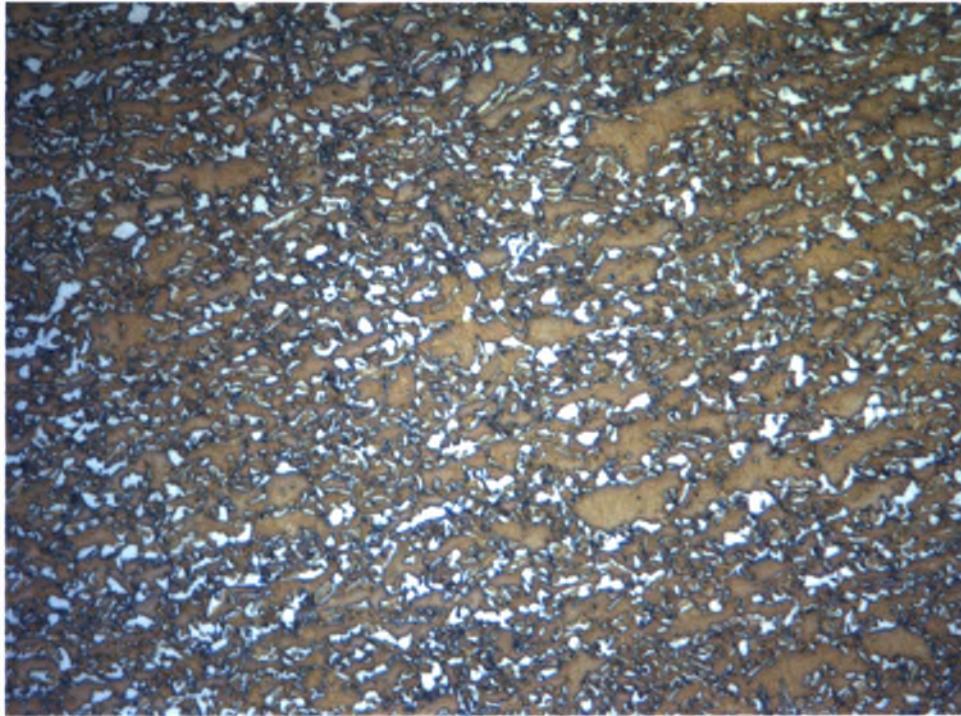
Στις τελευταίες οκτώ φωτογραφίες που παρατίθενται διακρίνονται όλες οι φάσεις της μικροδομής. Το ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη που μετρήθηκε για τα δοκίμια αυτά κυμαίνεται μεταξύ 8.7% και 15.9%.



**A/A 20, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A M1, LePera (15 sec), 1000X**

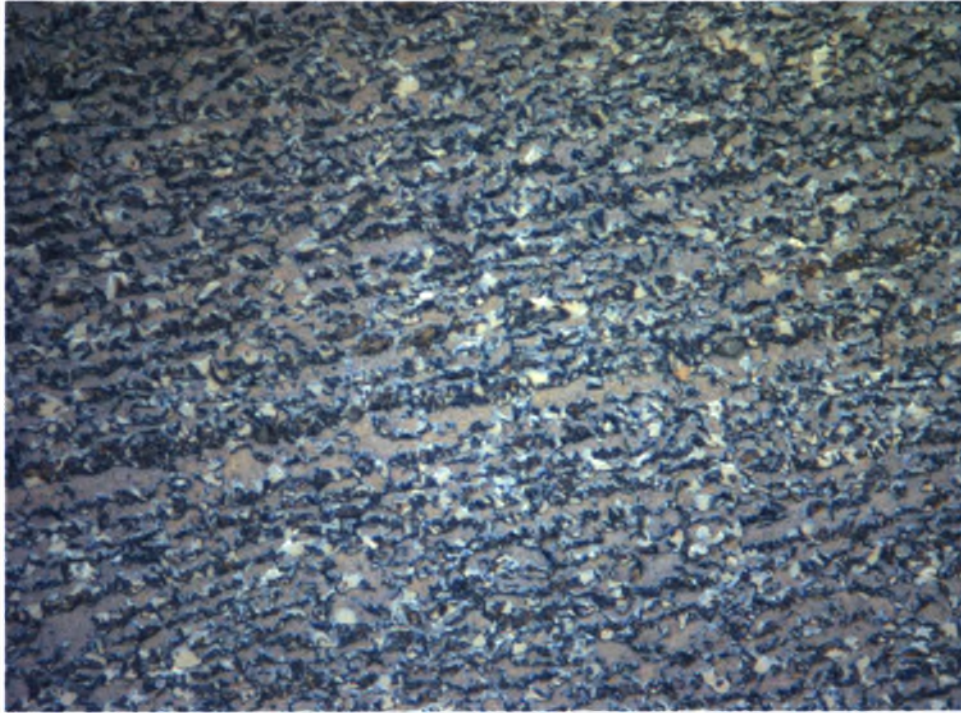


**A/A M2, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A M3, LePera (15 sec), 1000X**

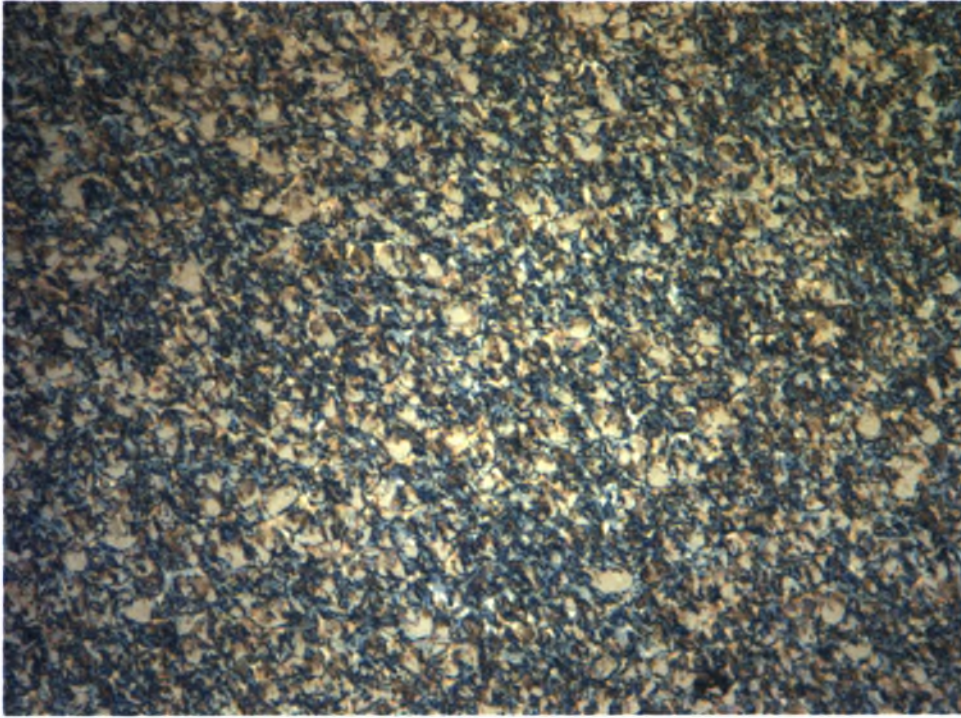




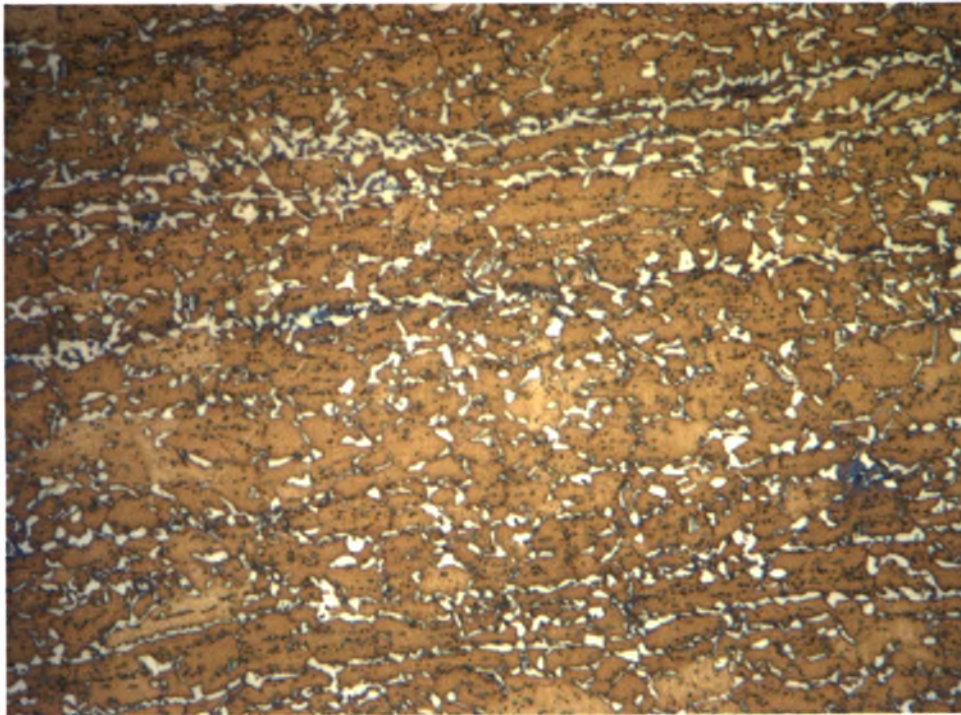
**A/A M4, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A M5, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A M6, LePera (15 sec), 1000X**



**A/A M7, LePera (15 sec), 1000X**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074895

