

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: "ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΗΣΕΩΝ ΑΥΛΩΝ  
ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΥ ΑΤΜΟΥ"**

**ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: ΓΙΑΝΝΑΚΟΥ ΜΑΡΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΡ. Ν. ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής**

**ΒΟΛΟΣ 5 – 6 – 2004**



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

Αριθ. Εισ.: 3947/1  
Ημερ. Εισ.: 01-10-2004  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ  
2004  
ΓΙΑ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής είναι η συγκόλληση αυλών υπέρθερμου ατμού με τη μέθοδο GTAW. Συγκεκριμένα, οι αυλοί είναι επιβελτιωμένοι χάλυβες με μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Οι αυλοί χρησιμοποιούνται στους θερμικούς σταθμούς της ΔΕΗ για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκόλληση και η συναρμολόγηση των αυλών πραγματοποιούνται στην εταιρία ΣΤΑΛΚΟ Α.Β.Ε, η οποία εδρεύει στην Α΄ Βιομηχανική Ζώνη του Βόλου.

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής είναι η ακόλουθη. Αρχικά έγινε η παραλαβή των αυλών (13CrMo44, 15Mo3, 10CrMo9.10) με συγκόλληση από την εταιρία ΣΤΑΛΚΟ Α.Β.Ε. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν δοκίμια εφελκυσμού, κάμψεως, μικροδομής και σκληρότητας για κάθε αυλό σε μηχανουργείο της περιοχής. Στην EBETAM πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές εφελκυσμού και κάμψεως. Στη συνέχεια μελετήθηκε η μακροδομή και η μικροδομή του μετάλλου βάσης, της θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και η λίμνη συγκόλλησης και έγινε σκληρομέτρηση των δοκιμίων με τη μέθοδο Vickers στο Εργαστήριο Υλικών στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Λόγω της χρήσης των συγκεκριμένων αυλών είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται υψηλές τεχνικές απαιτήσεις στη διαδικασία της παραγωγής και τους κανονισμούς ελέγχου, ώστε να διασφαλιστεί η διάρκεια και η αξιοπιστία τους στο πέρασμα του χρόνου. Για να ελεγχθεί επομένως η ποιότητα της συγκόλλησης και η αξιοπιστία των αυλών είναι απαραίτητο να διενεργηθούν οι παραπάνω δοκιμές, οι οποίες βασίζονται σε Ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα. Μετά το πέρα των δοκιμών προέκυψε τα εξής συμπεράσματα. Κατά τη δοκιμή εφελκυσμού η θραύση προήλθε στο μέταλλο βάσης και η τάση θραύση και η τάση διαρροής κυμαίνονται στα επιτρεπόμενα όρια και στη δοκιμή κάμψης δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές. Κατά τη μελέτη της μακροδομής δεν παρουσιάστηκαν πόροι ή εγκλείσματα (εκτός από το δοκίμιο 13CrMo44). Κατά χαρτογράφηση της μικροδομής ήταν δυνατό να γίνει και ο χαρακτηρισμός της. Τέλος με τη μικροσκληρομέτρηση είναι δυνατό να προσδιορισθεί ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας κατά τη συγκόλληση.

Ως συμπέρασμα όλων αυτών προκύπτει ότι στη περίπτωση και των τριών τύπων χαλύβων, οι συγκολλήσεις των αυλών πληρούν τις προϋποθέσεις των προτύπων.

*- ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ -*

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Γ. Χαϊδεμενόπουλο για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Σημαντική ήταν επίσης η συμβολή της κ. Ζερβάκη, η οποία βοήθησε αρκετά στην ολοκλήρωση των δοκιμών, που συμπεριλαμβάνονται στην διπλωματική μου εργασία.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον διευθυντή της ΣΤΑΛΚΟ Α.Β.Ε. κ. Κοντοκόστα, που με προμήθευσε με τους χάλυβες τους οποίους μελέτησα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μηχανικό κ. Χαρίση, ο οποίος πραγματοποίησε τις συγκολλήσεις των αυλών.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω το εργατικό δυναμικό της ΕΒΕΤΑΜ, όπου έγιναν οι δοκιμές εφελκυσμού και κάμψης.

Τέλος, χρωστάω πολλά ευχαριστώ στην οικογένειά μου που με στηρίζει ηθικά και οικονομικά όλα αυτά τα χρόνια.

*Μαρία Γιαννακού*

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

□ ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
-----------------	---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ GTAW ΚΑΙ ΤΩΝ ΧΑΜΗΛΑ ΚΡΑΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

1.1 Χημική σύσταση, Μηχανικές Ιδιότητες και Εφαρμογές των Επιβελτιωμένων Χαλύβων .....	11
1.2 Μέθοδος Συγκόλλησης με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου και Προστασία Αερίου (GTAW ή TIG).....	15
1.2.1 Η μέθοδος.....	16
1.2.2 Πολικότητα.....	17
1.2.3 Ηλεκτρόδια.....	19
1.2.4 Προστατευτικά αέρια.....	19
1.2.5 Ενεργή σκόνη.....	19
1.2.6 Πυκνότητα Ισχύος της Πηγής Θερμότητας .....	20
1.2.7 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου GTAW .....	21
1.3 Μετάδοση Θερμότητας στη Συγκόλληση .....	22
1.3.1 Πηγή Θερμότητας .....	22
1.3.2 Ικανότητα Τήξης .....	24
1.3.3 Κατανομή της Ισχύος της Πυκνότητας της Πηγής Θερμότητας .....	25
1.4 Ανάλυση της Ροής Θερμότητας στη Συγκόλληση .....	26
1.4.1 Εξισώσεις Rosenthals .....	27
1.4.2 Εξισώσεις Adam's.....	29

1.5 Επίδραση των Παραμέτρων Συγκόλλησης .....	30
1.5.1 Το σχήμα της λίμνης συγκόλλησης .....	30
1.5.2 Ρυθμός ψύξης και θερμοκρασιακή κλίμακα .....	30
1.5.3 Κατανομή της ισχύος πυκνότητας .....	31
1.5.4 Η επίδραση της απορρόφησης θερμότητας από το κατεργαζόμενο κομμάτι .....	31
1.6 Ανθρακούχοι Χάλυβες και Κράματα Χαλύβων .....	32
1.6.1 Ανθρακούχοι Χάλυβες και Κράματα Χαλύβων.....	32
1.6.2 Χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα.....	35
1.6.3 Χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες που έχουν υποστεί βαφή και ανόπτηση.....	38
1.6.4 Εμφάνιση ρωγμής εξαιτίας της επαναφοράς χαμηλά κραματωμένων χαλύβων.....	39
1.7 Μεταλλογνωσία της συγκόλλησης .....	40
1.7.1 Επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης στη δομή των κόκκων. ....	40
1.7.2 Μηχανισμοί πυρηνώσεως του μετάλλου συγκόλλησης. ....	42
1.7.3 Κινητήριες δυνάμεις στη ροή του ρευστού στη λίμνη συγκόλλησης. ....	43
1.7.4 Ανάπτυξη μικροδομής. ....	45
1.7.4.1 Ανάπτυξη μικροδομής. ....	46
1.7.4.2 Σκληρότητα των μετάλλων συγκόλλησης .....	49

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Πειραματικές Διαδικασίες

2.1 Δοκιμή Εφελκυσμού .....	50
2.1.1 Θεωρητική βάση της δοκιμής εφελκυσμού .....	50
2.1.2 Διάγραμμα πραγματικών τάσεων – παραμορφώσεων .....	53
2.2 Δοκιμή Κάμψεως .....	56

2.2.1 Μηχανές κάμψης .....	57
2.2.2 Προετοιμασία δοκιμίων .....	58
2.2.3 Διαδικασία δοκιμής κάμψης .....	59
2.3 Μεταλλογραφία .....	60
2.3.1 Εκτέλεση μεταλλογραφιών .....	60
2.3.2 Ταξινόμηση μικροδομής και ορολογία .....	62
2.3.2.1 Μηχανισμός μετατοπιστικού μετασχηματισμού .....	66
2.4 Δοκιμή Μικροσκληρομέτρησης .....	77
2.4.1 Αρχές μικροσκληρομέτρησης .....	77
2.4.2 Θεωρητική βάση σκληρομέτρησης .....	77
2.4.3 Μέθοδος Vickers .....	77
2.4.4 Εκτέλεση μικροσκληρομετρήσεων .....	78

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Αποτελέσματα Δοκιμών

3.1 Δειγματοληψία .....	80
3.2 Κατασκευή Δοκιμίων .....	83
3.3 Δοκιμή Εφέλκυσμού .....	86
3.3.1 Αποτελέσματα εφέλκυσμού του χάλυβα 13CrMo44.....	86
3.3.2 Αποτελέσματα εφέλκυσμού του χάλυβα 15Mo3.....	88
3.3.3 Αποτελέσματα εφέλκυσμού του χάλυβα 10CrMo9.10.....	90
3.4 Δοκιμή Κάμψεως .....	91
3.4.1 Κάμψη του χάλυβα 13CrMo44.....	92
3.4.2 Κάμψη του χάλυβα 10CrMo9.10.....	96
3.5 Μακροδομή .....	97

3.5.1	Μακροδομή του χάλυβα 13CrMo44.....	97
3.5.2	Μακροδομή του χάλυβα 15Mo3.....	99
3.5.3	Μακροδομή του χάλυβα 10CrMo9.10.....	101
3.6	Μικροδομή .....	103
3.6.1	Μικροδομή του χάλυβα 13CrMo44.....	103
3.6.2	Μικροδομή του χάλυβα 15Mo3.....	117
3.6.3	Μικροδομή του χάλυβα 10CrMo9.10.....	131
3.7	Αποτελέσματα Μικροσκληρομέτρησης .....	146
3.7.1	Μικροσκληρομέτρησης σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1043 – 1.....	146
3.7.2	Προφίλ μικροσκληρότητας του 13CrMo44.....	148
3.7.3	Προφίλ μικροσκληρότητας του 15Mo3.....	150
3.7.4	Προφίλ μικροσκληρότητας του 10CrMo9.10.....	152

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4*

---

### ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5*

---

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη συγκολλήσεων αυλών υπέρθερμου ατμού. Οι αυλοί υπέρθερμου ατμού κατασκευάζονται από υλικά, τα οποία έχουν την ιδιότητα να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες (όπως στους 650° C για μεγάλες χρονικές περιόδους) και υψηλές πιέσεις. Για αυτούς τους λόγους θα πρέπει να ικανοποιούν υψηλές τεχνικές απαιτήσεις στη διαδικασία παραγωγής και τους κανονισμούς ελέγχου, ώστε να διασφαλιστεί η διάρκεια και η αξιοπιστία τους στο πέρασμα του χρόνου.

Οι αυλοί αυτοί στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται από τη ΔΕΗ στις διάφορες εγκαταστάσεις της για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Η συγκόλληση και η συναρμολόγησή τους πραγματοποιήθηκε στη STALCO.



Η εταιρία STALCO A.B.E. ιδρύθηκε το 1973 ως Εταιρία Ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και ειδικότερα σε προϊόντα μέσης και χαμηλής τάσης στο τομέα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της Δ.Ε.Η.. Διευρύνοντας τη γκάμα των προϊόντων της, επεκτάθηκε και στη παραγωγή εξοπλισμού παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και σύνθετων ειδικών μεταλλικών κατασκευών υψηλών απαιτήσεων. Το εργοστάσιό της βρίσκεται στην Α' Βιομηχανική Ζώνη του Βόλου, σε οικόπεδο 55000m<sup>2</sup> με στεγασμένη επιφάνεια 15000 m<sup>2</sup>, με άμεση οδική, σιδηροδρομική και θαλάσσια εξυπηρέτηση. Η ΣΤΑΛΚΟ, ελέγχει τα προϊόντα της σε ιδιόκτητα εργαστήρια δοκιμών σύμφωνα με Ευρωπαϊκούς και διεθνείς κανονισμούς και είναι πιστοποιημένη με το σύστημα διασφάλισης ποιότητας ISO 9001:2000.

Οι αυλοί είναι κατασκευασμένοι από επιβελτιωμένους χάλυβες, που είναι χαμηλά κραματωμένοι και η συγκόλλησή τους έγινε με τη μέθοδο GTAW (ή TIG). Τα υλικά τα οποία μελετήθηκαν στην διπλωματική μου είναι οι χάλυβες 13CrMo44 (1.7335), 15Mo3 (1.5415) και 10CrMo9.10 (1.7380) (Σχ.1). Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν είναι του τύπου BÖHLER. Στον αυλό 1.7335 χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο DCMS – IG, στον αυλό 1.5415 χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο DMO – IG και στον αυλό 1.7335 χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο c.



Σχ. 1 Αυλοί υπέρθερμου ατμού: 15Mo3( χρώμα πράσινο-κόκκινο), 13CrMo44(χρώμα κίτρινο-ασημί)

Για την μελέτη των υλικών αυτών, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές εφελκυσμού και κάμψεως στην EBETAM και στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος πραγματοποιήθηκε η μικροσκληρομέτρηση, η μακροσκοπία και η μελέτη της μικροδομής. Ξεκινώντας από τη δοκιμή εφελκυσμού, η θέση θραύσης στα δοκίμια εντοπίστηκε στο βασικό μέταλλο. Κατά τη δοκιμή κάμψης τα δοκίμια δεν υπέστησαν θραύση. Από τη μελέτη της μακροδομής, προέκυψε ότι το μέγεθος της ΘΕΖ (Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη ή HAZ) καθώς και της λίμνης συγκόλλησης είναι ευδιάκριτο και μετρήσιμο. Από τις μακροφωτογραφίες μπορεί να διαπιστώθει αν υπάρχουν πόροι ή εγκλείσματα σε τυχαία διατομή της συγκόλλησης. Μόνο στο δοκίμιο 13CrMo44

εντοπίστηκαν εγκλείσματα που ίσως επηρεάζουν την αντοχή της συγκόλλησης. Επίσης πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση και ο χαρακτηρισμός της μικροδομής των χαλύβων. Από την μέτρηση της μικροσκληρότητας είναι δυνατό να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της ΘΕΖ και της λίμνης συγκόλλησης και ανάλογα με τις τιμές της μικροσκληρότητας μπορεί να διαπιστωθεί πόσο υψηλός ήταν ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας κατά τη συγκόλληση.

Με τη δοκιμή της μικροσκληρομέτρησης ολοκληρώνονται οι δοκιμές που είναι αναγκαίες για τον έλεγχο της αντοχής της συγκόλλησης. Στη περίπτωση και των τριών τύπων χάλυβα, οι δοκιμές απέδειξαν ότι οι συγκολλήσεις των αυλών πληρούν τις προϋποθέσεις των ελέγχων των Ευρωπαϊκών και διεθνών προτύπων.

Για πιο λεπτομερή μελέτη των συγκολλήσεων, θα μπορούσε να εφαρμοστεί κάποιο μαθηματικό μοντέλο, με το οποίο θα μπορούσε να υπάρξει μια πιο σαφή εικόνα για τους θερμικούς κύκλους, τη μετάδοση θερμότητας και το ρυθμό ψύξης.

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## **Βιβλιογραφική Ανασκόπηση της Μεθόδου GTAW και των Χαμηλά Κραματωμένων Χαλύβων**

### **1.1 Χημική σύσταση, Μηχανικές Ιδιότητες και Εφαρμογές των Επιβελτιωμένων Χαλύβων**

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, τα υλικά τα οποία μελετήθηκαν στη διπλωματική μου είναι 13CrMo44, 15Mo3 και 10CrMo9.10. Επίσης τα ηλεκτρόδια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την συγκόλληση των αυλών είναι DCMS-IG (BÖHLER), DMO-IG (BÖHLER) και CM2-IG (BÖHLER) αντίστοιχα.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην εφαρμογή (Πιν.1.4), την χημική σύσταση (Πιν.1.1 και Πιν.1.2) και τις μηχανικές ιδιότητες (Πιν.1.3) αυτών των επιβελτιωμένων χαλύβων.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 Τύποι και Χημική Ανάλυση των 13CrMo44, 15Mo3,  
10CrMo9.10**

		ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΛΙΚΩΝ					
		15Mo3		13CrMo44		10CrMo9.10	
WNr		1.5415		1.7335		1.7380	
Ομάδα μετάλλου		Υψηλής ποιότητας χάλυβας με Κραματικά στοιχεία					
Ι Σ Ο Δ Υ Ν Α Μ Ι Α	USA (UNS)	K 11820 K 12020 K 12320		K 11562 K 11757 K 11789 K 12062			
	UK	16Mo3 243B		13CrMo4-5 620 620-440 620-470 620-540 621		10CrMo9-10 622 622-490 622/515 622/690 B 3	
	Euro	15Mo3		13CrMo4-5		10CrMo9-10	
Χ Η Μ Ι Κ Η  Α Ν Α Λ Υ Σ Η	%	min	max	min	max	min	max
	C CAST	0,12	0,2	0,08	0,18	0,08 0,08	0,14 0,15
	Cr CAST	0	0,3	0,70	1,15	2,00 2,00	2,50 2,50
	Cu	0	0,3	0	0,30	0	0,30
	Mn CAST	0,40	0,9	0,40	1,00	0,40 0,40	0,80 0,70
	Mo CAST	0,25	0,35	0,40	0,60	0,90 0,90	1,10 1,10
	Ni	0	0,30	-	-	-	-
	P CAST	0	0,030	0	0,030	0 0	0,03 0,04
	S CAST	0	0,025	0	0,025	0 0	0,025 0,04
	Si CAST	0	0,35	0	0,35	0 0,03	0,50 0,50
	V	-	-	-	-	-	-
	Al CAST	0	0,050			- 0	- 0,07

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2 Ηλεκτρόδια: Χημική Ανάλυση και εφαρμογές**

		DMO-IG		CM2-IG		DCMS-IG	
W <sub>Nr</sub>		1.5424		1.7384		1.7339	
Σύμβολο		10MnMo4-5		7CrMo11-10		SG CrMo 1	
Ομάδα μετάλλου		Υψηλής ποιότητας χάλυβας με Κραματικά στοιχεία					
ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	%	min	max	min	max	min	max
	C	0,08	0,12	0,04	0,09	0,11	
	Cr	0	0,12	2,60	2,90	1,2	
	Cu	0	0,17	-	-	-	
	Mn	0,95	1,25	0,85	1,15	1,0	
	Mo	0,48	0,62	0,95	1,10	0,5	
	Ni	0	0,12	-	-	0	
	P	0	0,020	0	0,015	0	
	S	0	0,020	0	0,015	0	
	Si	0,55	0,75	0,55	0,75	0,6	
	V	-	-				
AL	0	0,030	0	0,030			
ΧΡΗΣΗ		17145: Στρογγυλεμένο Ηλεκτρόδιο για welding filler metals		17145: Στρογγυλεμένο Ηλεκτρόδιο για welding filler metals		17145: Στρογγυλεμένο Ηλεκτρόδιο για welding filler metals	

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3 13CrMo44, 15Mo3, 10CrMo9.10: Μηχανικές Ιδιότητες**

		ΤΙΜΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ					
		15Mo3		13CrMo44		10CrMo9.10	
		ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ (°C)					
		min	max	min	max	min	max
Hot working		1100	850	1100	850	1100	850
Σταδιακή Ανόπτηση	Normalizing	890	950				
	Ανακούφιση τάσεων	530	620	600	700	650	750
Σκλήρυνση		910	940	890	950	920	980
		Λάδι		Ωστενιτοποίηση Λάδι & αέρας		Ωστενιτοποίηση Αέρας	
Επαναφορά		660	710	630	730	680	760
		<b>Μηχανικές Ιδιότητες στη θερμοκρασία περιβάλλοντος όταν έχει υποστεί βαφή (MPa)</b>					
Τάση διαρροής		≥ 260		≥ 295		≥ 290	
Τάση θραύσης		440	590	450	660	480	630
Επιμήκυνση		≥ 24		≥ 20		≥ 18	
Δύναμη Κρούσης (J)		≥ 48		≥ 48		≥ 55	
Σκληρότητα κατά Brinell (HB 30)		130	170	130	175	130	175

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.4 13CrMo44, 15Mo3, 10CrMo9.10: Εφαρμογές**

ΥΛΙΚΟ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	ΠΡΟΤΥΠΑ	
<b>15Mo3</b>	Χάλυβας κατασκευών για υψηλές θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 530 °C. Prewelded φλάντζες	17155	Χάλυβας κατασκευών για υψηλές θερμοκρασίες. Έλασμα & λωρίδα ( <i>stip</i> )
		17175	Σωλήνες χωρίς ραφή από χάλυβα υψηλής αντοχής.
		17177	Συγκολλημένοι αυλοί ηλεκτρικής πίεσης για υψηλές θερμοκρασίες. ( <i>Electric pressure-welded steel tubes for elevated temperatures</i> )
		17243	Forgings & hot rolled or forged bars από συγκολλησίμους χάλυβες για υψηλές θερμοκρασίες
		EN 10028 Teil2	Χαλύβδινα επίπεδα υλικά με αντοχή στη πίεση. Μη κραματωμένοι χάλυβες με υψηλές θερμικές ιδιότητες.
<b>13CrMo44</b>	Χάλυβας κατασκευών για υψηλές θερμοκρασίες μικρότερες από 530°C. Συλλέκτες. Λέβητας νερού. Σωλήνες υπερθέρμανσης.	17155	Χάλυβας κατασκευών για υψηλές θερμοκρασίες. Έλασμα & λωρίδα
		17175	Σωλήνες χωρίς ραφή από χάλυβα υψηλής αντοχής.
		17176	Αυλοί χωρίς ραφή για hydrogen service σε υψηλές θερμοκρασίες & πιέσεις.
		17243	Forgings & hot rolled or forged bars από συγκολλησίμους χάλυβες για υψηλές θερμοκρασίες
		EN 10028 Teil2	Χαλύβδινα επίπεδα υλικά με αντοχή στη πίεση. Μη κραματωμένοι χάλυβες με υψηλές θερμικές ιδιότητες.
		17175	Σωλήνες χωρίς ραφή από χάλυβα υψηλής αντοχής.
		17176	Αυλοί χωρίς ραφή για hydrogen service σε υψηλές θερμοκρασίες & πιέσεις.
		17243	Forgings & hot rolled or forged bars από συγκολλησίμους χάλυβες για υψηλές θερμοκρασίες
		EN 10028 Teil2	Χαλύβδινα επίπεδα υλικά με αντοχή στη πίεση. Μη κραματωμένοι χάλυβες με συγκεκριμένες υψηλές θερμικές ιδιότητες.
		SEW 595	Χυτός χάλυβας για εγκαταστάσεις για κατεργασία λαδιού & φυσικό αέριο
<b>10CrMo9.10</b>	Χάλυβας κατασκευών για υψηλές θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 530 °C. Συλλέκτες. Λέβητας νερού. Σωλήνες υπερθέρμανσης.	17155	Χάλυβας κατασκευών για υψηλές θερμοκρασίες. Έλασμα & λωρίδα
		17175	Σωλήνες χωρίς ραφή από χάλυβα υψηλής αντοχής.
		17176	Αυλοί χωρίς ραφή για hydrogen service σε υψηλές θερμοκρασίες & πιέσεις.
		17243	Forgings & hot rolled or forged bars από συγκολλησίμους χάλυβες για υψηλές θερμοκρασίες
		EN 10028 Teil2	Χαλύβδινα επίπεδα υλικά με αντοχή στη πίεση. Μη κραματωμένοι χάλυβες με υψηλές θερμικές ιδιότητες.
		SEW 595	Χυτός χάλυβας για εγκαταστάσεις για κατεργασία λαδιού & φυσικό αέριο

## 1.2 Μέθοδος Συγκόλλησης με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου και Προστασία Αερίου (GTAW ή TIG)

Η συγκόλληση των αυλών πραγματοποιήθηκε στη STALCO με τη μέθοδο GTAW. Στη συνέχεια απεικονίζονται μηχανές συγκόλλησης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν από την εταιρία STALCO και επίσης γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης.



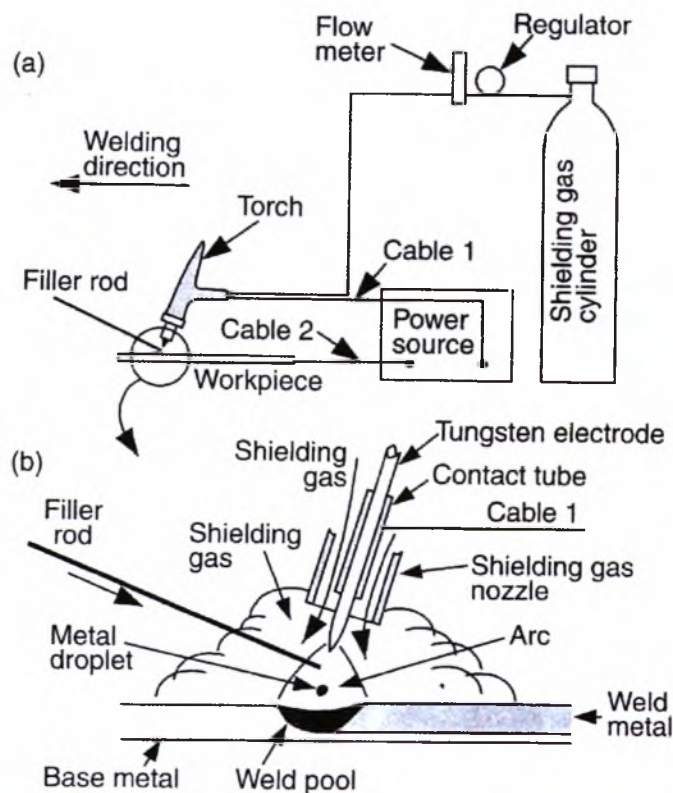
*Σχ.1.1 Μηχανές συγκόλλησης GTAW*



### 1.2.1 Η Μέθοδος

Η GTAW είναι μια μέθοδος συγκόλλησης που χρησιμοποιεί αδρανές αέριο για την προστασία της συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα. Το χρησιμοποιούμενο ηλεκτρόδιο είναι από μη τηκόμενο βολφράμιο. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και προστιθέμενο μέταλλο. Με τη μέθοδο αυτή δημιουργείται ένα τόξο μεταξύ του ηλεκτροδίου από βολφραμίο και του βασικού μετάλλου (Σχ. 1.2).

Ο φανός που συγκρατεί το ηλεκτρόδιο βολφραμίου συνδέεται με έναν κύλινδρο αερίου προστατευτικών καλυμμάτων καθώς επίσης και με ένα τερματικό της πηγής ενέργειας (Σχ. 1.2α). Το ηλεκτρόδιο βολφραμίου συνήθως συνδέεται με ένα υδρόψυκτο σωλήνα, που ονομάζεται σωλήνας επαφών (Σχ. 1.2b) και ο οποίος συνδέεται με το καλώδιο συγκόλλησης (*cable 1*) από το τερματικό. Αυτό επιτρέπει τόσο στο ρεύμα συγκόλλησης από την πηγή ενέργειας στην οποία τοποθετείται το ηλεκτρόδιο όσο και στο ηλεκτρόδιο να είναι ψυχρά για να αποτραπεί η υπερθέρμανση. Το κομμάτι προς κατεργασία συνδέεται με το άλλο τερματικό της πηγής ενέργειας μέσω ενός διαφορετικού καλωδίου (*cable 2*). Το αέριο προστατευτικών καλυμμάτων περνά από το σώμα του φανού και κατευθύνεται από το ακροφύσιο προς τη λίμνη συγκόλλησης για να τη προστατεύσει από τον αέρα. Η προστασία από τον αέρα είναι πολύ καλύτερη στη μέθοδο GTAW σε σχέση με τη μέθοδο SMAW, επειδή ένα αδρανές αέριο όπως το αργό ή το ήλιο χρησιμοποιείται συνήθως ως προστατευτικό αέριο που κατευθύνεται προς τη λίμνη συγκόλλησης. Για αυτόν τον λόγο, η GTAW καλείται επίσης TIG (*tungsten –inert gas welding*). Εντούτοις, σε ειδικές περιπτώσεις ένα εξωτερικό αέριο μπορεί να προστεθεί σε μικρή ποσότητα στο προστατευμένο αέριο. Επομένως, GTAW μοιάζει να είναι το κατάλληλο όνομα για αυτήν την διαδικασία συγκόλλησης.



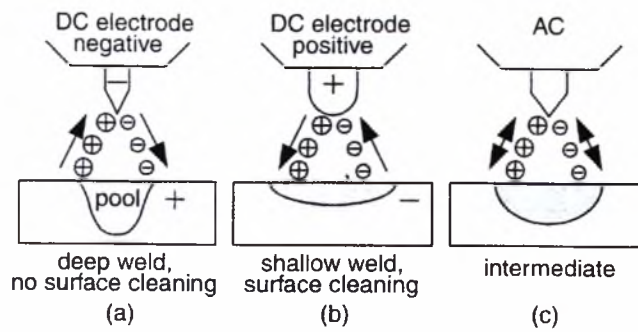
Σχ.1.2 GTAW: (α) διαδικασία (β) μεγέθυνση της περιοχής όπου γίνεται συγκόλληση

### 1.2.2 Πολικότητα

Το Σχ.1.3 παρουσιάζει τριών ειδών πολικότητες στη μέθοδο GTAW και περιγράφονται στη συνέχεια:

#### A. Αρνητικό ηλεκτρόδιο συνεχούς ρεύματος (*Direct-Current Electrode Negative (DCEN)*)

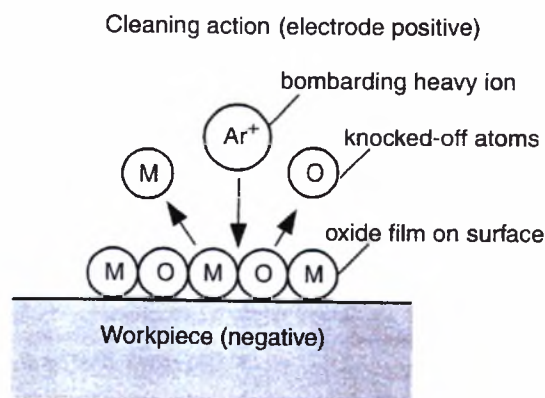
Επίσης ονομάζεται *straight polarity* και είναι η πιο συνηθισμένη πολικότητα στη μέθοδο GTAW. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με το αρνητικό τερματικό της παροχής του ηλεκτρικού ρεύματος. Όπως φαίνεται στο Σχ.1.3α, ηλεκτρόνια εκπέμπονται από το ηλεκτρόδιο βολφραμίου και επιταχύνονται καθώς κινούνται μέσα στο τόξο. Σημαντική ποσότητα ενέργεια, η οποία καλείται «λειτουργία εργασίας» (*work function*), απαιτείται για να εκπέμψει το ηλεκτρόδιο ένα ηλεκτρόνιο. Όταν το ηλεκτρόνιο εισέλθει στο τεμάχιο τότε ποσότητα ενέργειας ίση με τη «λειτουργία εργασίας» απελευθερώνεται. Για αυτό το λόγο στη μέθοδο GTAW με DCEN περισσότερη ενέργεια (περίπου τα 2/3) εντοπίζεται στο άκρο του τόξου και λιγότερο (περίπου το 1/3) εντοπίζεται στο άκρο του ηλεκτροδίου. Συνεπώς, παράγεται μια σχετικά στενή και μεγάλης διείσδυσης συγκόλληση.



Σχ. 1.3 Τριών ειδών πολικότητας στη μέθοδο GTAW

### B.Θετικό ηλεκτρόδιο συνεχούς ρεύματος Direct – Current Electrode Positive (DCEP)

Επίσης ονομάζεται αντίστροφη πολικότητα (*reverse polarity*). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με το θετικό τερματικό της παροχής του ηλεκτρικού ρεύματος. Όπως φαίνεται στο Σχ.1.3b, η επίδραση θέρμανσης των ηλεκτρονίων παρουσιάζεται στο ηλεκτρόδιο βολφραμίου παρά στο προς κατεργασία τεμάχιο. Κατά συνέπεια παράγεται μια συγκόλληση μικρής διεύθυνσης. Επιπλέον, είναι ανάγκη να χρησιμοποιηθούν υδρόψυκτα ηλεκτρόδια μεγάλης διαμέτρου, ώστε να αποτραπεί το λιώσιμο της άκρης των ηλεκτροδίων. Τα θετικά ιόντα του προστατευτικού αερίου βομβαρδίζουν το τεμάχιο (Σχ.1.4), “χτυπώντας” τα φιλμ των οξειδίων και δημιουργώντας μια καθαρή επιφάνεια συγκόλλησης. Για αυτό το λόγο η DCEP μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην συγκόλληση λεπτών φύλλων από υλικά τα οποία σχηματίζουν ισχυρά οξείδια, όπως το αλουμίνιο και το μαγνήσιο, όπου δεν απαιτείται βαθιά διεύθυνση.



Σχ. 1.4 Καθαρισμός της επιφάνειας στη μέθοδο GTAW με DC θετικό ηλεκτρόδιο

### C.Ασυνεχές ρεύμα (Alternating Current (AC))

Με την AC μπορεί επίσης να επιτευχθεί καλή διεύθυνση και καθαρισμός των οξειδίων από την επιφάνεια του τεμαχίου (Σχ.1.3c). Η πολικότητα αυτή συνήθως χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου.

### 1.2.3 Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια βολφραμίου με περιεκτικότητα 2% σε κέριο (*cerium*) ή θόριο (*thorium*), εμφανίζουν μεγαλύτερη ικανότητα ακτινοβολίας, ικανότητα μεταφοράς ρεύματος και αντίσταση στη μόλυνση σε σύγκριση με ηλεκτρόδια 100% βολφραμίου. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ευκολότερο άναμμα του τόξου, το οποίο είναι και πιο σταθερό. Η μεγαλύτερη ακτινοβολία σε ηλεκτρόνια, αναφέρεται στην ικανότητα της άκρης του ηλεκτροδίου να εκπέμπει ηλεκτρόνια. Μια χαμηλότερη ακτινοβολία σε ηλεκτρόνια υπονοεί ότι χρειάζεται υψηλότερη θερμοκρασία στην άκρη του ηλεκτροδίου για να παράγει ηλεκτρόνια και ενέχει μεγάλο κίνδυνο να λιώσει η άκρη.

### 1.2.4 Προστατευτικά Αέρια

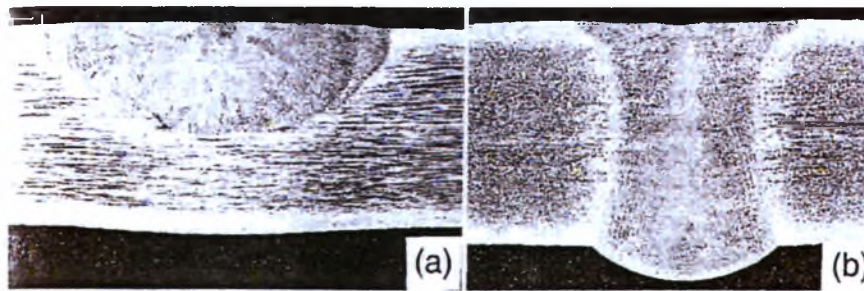
Το ήλιο και το αργό είναι τα πιο συνήθη αέρια τα οποία χρησιμοποιούνται στη μέθοδο GTAW. Η ικανότητα ιονισμού για το αργό και το ήλιο, είναι 15.5 και 24.5eV αντίστοιχα. Αφού είναι ευκολότερο να ιονίσεις το αργό από το ήλιο, το άναμμα του τόξου είναι ευκολότερο και η πτώση της τάσης κατά μήκος του τόξου είναι χαμηλότερη με το αργό. Επιπρόσθετα, επειδή το αργό είναι βαρύτερο από το ήλιο, προσφέρει αποτελεσματικότερη προστασία και μεγαλύτερη αντίσταση για να διασχίσει το *draft* σε σχέση με το ήλιο. Με τη πολικότητα DCEP ή AC, το αργό προσφέρει αποτελεσματικότερο καθαρισμό οξειδίων σε σύγκριση με το ήλιο. Τα προαναφερόμενα πλεονεκτήματα συν το χαμηλό κόστος του αερίου αργό, το καθιστά ελκυστικότερο για τη χρήση του στη μέθοδο GTAW από ότι το ήλιο.

Εξαιτίας της μεγάλης πτώσης της τάσης στο τόξο με προστατευτικό αέριο το ήλιο, μπορούν να εμφανιστούν υψηλές τιμές εισόδου ενέργειας και μεγάλη ευαισθησία σε παραλλαγές του μήκους τόξου. Το πρώτο επιτρέπει τη συγκόλληση των παχύτερων τμημάτων και τη χρήση των υψηλότερων ταχυτήτων συγκόλλησης. Το δεύτερο, από την άλλη, επιτρέπει καλύτερο έλεγχο του μήκους των τόξων κατά τη διάρκεια της αυτοματοποιημένης μηχανής GTAW.

### 1.2.5 Ενεργή σκόνη

Η χρήση της σκόνης (*flux*) στη GTAW, έχει βρεθεί ότι αυξάνει εντυπωσιακά τη διείσδυση της συγκόλλησης στους χάλυβες και τους ανοξείδωτους χάλυβες. Η σκόνη αποτελείται συνήθως από οξείδια και αλογονίδια και αναμιγνύεται με την ακετόνη ή προτιμάται να σχηματιστεί μια κόλλα που διαγράφεται ως λεπτό επίστρωμα στη περιοχή που πρόκειται να συγκολληθεί. Στο Σχ.1.5 απεικονίζονται

συγκολλήσεις με τη μέθοδο GTAW με τη χρήση ή χωρίς της σκόνης, σε ανοξείδωτο χάλυβα 316L πάχους 6mm με χαμηλή περιεκτικότητα σε S (0.005 κ.β.%).



Σχ. 1.5 Συγκολλήσεις με τη μέθοδο GTAW στον ανοξείδωτο χάλυβα 316L πάχους 6mm: (α) χωρίς σκόνη (β) με σκόνη

Ο Howse και Lucus παρατήρησαν ότι το τόξο γίνεται πιο συμπιεσμένο όταν χρησιμοποιείται σκόνη. Συνεπώς, συμπέραναν ότι η βαθύτερη διείσδυση προκαλείται από τη συστολή των τόξων και η ατμοποιημένη σκόνη εμποδίζει το τόξο με τη σύλληψη των ηλεκτρονίων στην ψυχρότερη εξωτερική περιοχή του τόξου. Για το ίδιο ρεύμα συγκόλλησης, όσο περισσότερο το τόξο είναι περιορισμένο, τόσο μικρότερη είναι η περιοχή στην επιφάνεια της λίμνης στην οποία το ηλεκτρικό πεδίο συγκλίνει προς το κομμάτι προς κατεργασία (μέσω της λίμνης συγκόλλησης) και ως εκ τούτου τόσο μεγαλύτερη η δύναμη Lorentz ( $F$ , Σχ.1.28c) και τόσο πιο βαθιά είναι η διείσδυση.

Ο Tanaka και οι συνεργάτες του, πρότειναν ότι η εσωτερική ροή της επιφανείας με τη παρουσία του οξυγόνου από τη σκόνη που περιέχει οξείδιο προκαλεί πιο βαθιά διείσδυση. Παρατήρησαν επίσης και μια εσωτερική επιφανειακή ροή και μια σημαντική μείωση στην επιφανειακή τάση όταν χρησιμοποιείται η σκόνη. Η φασματοσκοπική ανάλυση του τόξου έδειξε ότι το μπλε φωτεινό πλάσμα εμφανίζεται να αποτελείται κυρίως από ατμό μετάλλων (χρώμιο, Fe κ.α.) από τη λίμνη συγκόλλησης. Η πιο απότομη κλίση της θερμοκρασίας κατά μήκος της μικρότερης επιφάνεια της λίμνης, προτείνει μια τοπική εξάτμιση των μεταλλικών στοιχείων και ως εκ τούτου ένα πιο συμπυκνωμένο τόξο, το οποίο βοηθά επίσης στη καλύτερη διείσδυση.

### 1.2.6 Πυκνότητα Ισχύος της Πηγής Θερμότητας

Με τη μέθοδο GTAW με ισχύ 1.5 kW το τόξο συγκεντρώνεται σε μια μικρή περιοχή διαμέτρου 6mm και μπορεί πολύ εύκολα να δημιουργήσει μια λίμνη συγκόλλησης (*weld pool*). Αυτό το παράδειγμα καταδεικνύει τη σπουδαιότητα της πυκνότητας της ισχύος της θερμικής πηγής στη συγκόλληση.

Οι πηγές θερμότητας για τις μεθόδους συγκόλλησης αερίου, τόξου και δέσμη υψηλής ενέργειας είναι αντίστοιχα η φλόγα αερίου, το ηλεκτρικό τόξο και ακτίνα μεγάλης ενέργειας. Όσο αυξάνεται η ισχύς της πυκνότητας της πηγής θερμότητας, τόσο μειώνεται η εισαγωγή θερμότητας που απαιτείται για τη συγκόλληση. Το τμήμα του κομματιού προς κατεργασία που εκτίθεται στην φλόγα του αερίου, θερμαίνεται τόσο αργά, που πριν να λιώσει, μεγάλη ποσότητα θερμότητας έχει ήδη μεταφερθεί στον όγκο του κομματιού. Περαιτέρω θέρμανση μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο κατεργαζόμενο κομμάτι, περιλαμβανομένου τη μείωση της αντοχής και τη στρέβλωση του. Αντίθετα αν το ίδιο υλικό εκτεθεί σε δέσμη ηλεκτρονίων ή λέιζερ, μπορεί να λιώσει ή και να εξατμιστεί για να σχηματίσει στιγμιαία μια βαθιά τρύπα σε σχήμα κλειδαριάς και πριν η πολύ θερμότητα έχει ήδη μεταφερθεί σε όλο τον όγκο του κομματιού, η συγκόλληση έχει ολοκληρωθεί.

Επομένως, τα πλεονεκτήματα την πυκνότητα ισχύος της πηγής θερμότητας είναι η βαθύτερη διείσδυση συγκόλλησης, οι υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης και η καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης με τη λιγότερη ζημιά στο κομμάτι προς κατεργασία.

Η μέθοδος GTAW μπορεί να εφαρμοστεί στα ακόλουθα υλικά:

1. Σε ανθρακούχους χάλυβες
2. Σε χαμηλά κραματωμένους χάλυβες
3. Σε ανοξείδωτους χάλυβες
4. Στο νικέλιο τα κράματά του
5. Στο αλουμίνιο και τα κράματά του

### 1.2.7 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου GTAW

Η μέθοδος GTAW είναι κατάλληλη για τη συγκόλληση λεπτών τεμαχίων εξαιτίας των περιορισμένων θερμικών εισόδων. Το ποσοστό τροφοδοσίας του μετάλλου πλήρωσεως (*filler metal*) είναι ανεξάρτητο από το ρεύμα συγκόλλησης, συνεπώς επιτρέπει διακύμανση στο σχετικό ποσό της τήξης του μετάλλου πλήρωσεως. Επομένως, ο έλεγχος της διάλυσης και της ενεργειακής εισαγωγής στη συγκόλληση μπορεί να επιτευχθεί χωρίς αλλαγή του μεγέθους της. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε συγκόλληση butt joints λεπτών ελασμάτων μόνο με τήξη, δηλαδή χωρίς τη προσθήκη του μετάλλου πλήρωσεως ή με αυτογενής συγκόλληση. Επειδή η μέθοδος GTAW είναι πολύ «καθαρή» μέθοδος συγκόλλησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μέταλλα όπως το τιτάνιο, το ζirkόνιο, το αλουμίνιο και το μαγνήσιο.

Ωστόσο, το ποσοστό απόθεσης στη GTAW είναι μικρό. Τα υπερβολικά ρεύματα συγκόλλησης είναι δυνατό να προκαλέσουν την τήξη του ηλεκτροδίου βολφραμίου με αποτέλεσμα το σχηματισμό εύθραυστων εγκλεισμάτων βολφραμίου στο μέταλλο συγκόλλησης. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας προθερμασμένα μέταλλα πλήρωσης, το ποσοστό απόθεσης βελτιώνεται. Στη μέθοδο GTAW, το καλώδιο “τρέφεται” και σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης έτσι ώστε η αντίσταση στη θέρμανση μπορεί να αποκτηθεί με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του καλωδίου.

### 1.3 Μετάδοση Θερμότητας στη Συγκόλληση

#### 1.3.1 Πηγή Θερμότητας

##### A. Απόδοση της πηγής θερμότητας

Η απόδοση της πηγής θερμότητας  $\eta$  ορίζεται ως ακολούθως:

$$\eta = \frac{Q \cdot t_{weld}}{Q_{nominal} \cdot t_{weld}} = \frac{Q}{Q_{nominal}} \quad (1.1)$$

όπου

$Q$ : ο ρυθμός της μετάδοσης θερμότητας από το κατεργαζόμενο κομμάτι

$Q_{nominal}$ : η ονομαστική δύναμη της πηγής θερμότητας

$t_{weld}$ : ο χρόνος συγκόλλησης

Μέρος της θερμότητας η οποία παρέχεται από την πηγή θερμότητας μεταφέρεται στο κομμάτι προς κατεργασία και το μέρος που υπολείπεται απορροφάται από το περιβάλλον, επομένως  $\eta < 1$ . Αν είναι γνωστή η απόδοση  $\eta$ , τότε από τη σχέση (1.1) υπολογίζεται ο ρυθμός της μετάδοσης θερμότητας  $Q$  στο κομμάτι.

Στη συγκόλληση με τόξο, η οποία πραγματοποιείται με συνεχή τάση  $E$  και συνεχές ρεύμα  $I$ , τότε η απόδοση του τόξου εκφράζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{Q \cdot t_{weld}}{E \cdot I \cdot t_{weld}} = \frac{Q}{E \cdot I} \quad (1.2)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος εισαγωγή θερμότητας (*heat input*) αναφέρεται στον όρο  $Q_{nominal}$ , ή ο όρος  $E \cdot I$  στην συγκόλληση τόξου και ο όρος *heat input per unit length of weld* αναφέρεται στην αναλογία  $\frac{Q_{nominal}}{V}$  ή  $\frac{E \cdot I}{V}$ , όπου  $V$  είναι η ταχύτητα συγκόλλησης.

## B. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Η απόδοση της πηγής θερμότητας μετριέται με θερμιδομετρητή. Η θερμότητα η οποία μεταφέρεται από την πηγή στο τεμάχιο μεταφέρεται στη συνέχεια από το κομμάτι στο θερμιδομετρητή.

Η μεταφορά θερμότητας από το κομμάτι προς το θερμιδομετρητή είναι η ακόλουθη:

$$Q \cdot t_{\text{weld}} = \int_0^{\infty} W \cdot C \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \cdot dt \approx W \cdot C \cdot \int_0^{\infty} (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \cdot dt \quad (1.3)$$

όπου

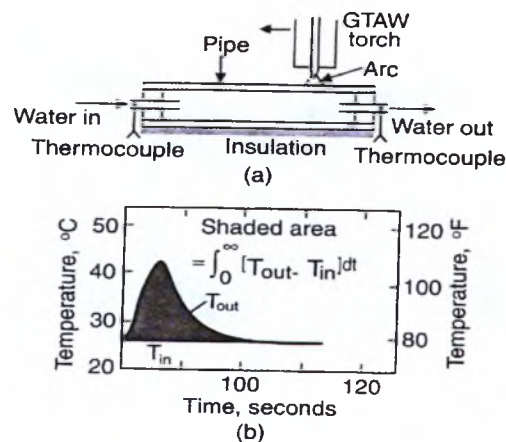
$W$ : το ποσοστό μαζικής ροής του νερού

$C$ : η συγκεκριμένη θερμότητα του νερού

$T_{\text{out}}$ : η θερμοκρασία εξόδου του νερού

$T_{\text{in}}$ : η θερμοκρασία εισόδου του νερού

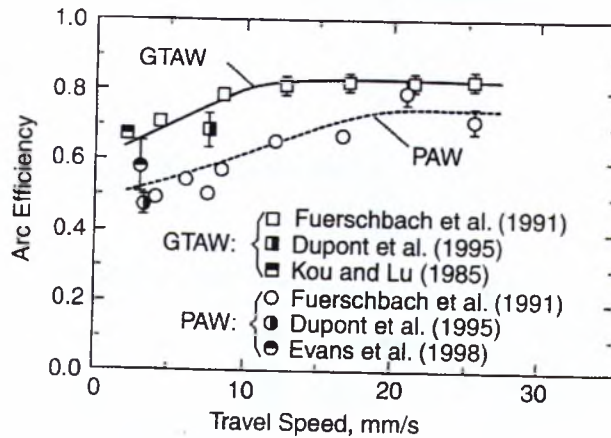
$t$ : ο χρόνος



Σχ. 1.6 Μετρήσεις της απόδοσης του τόξου στη GTAW: (α) θερμιδομετρητής, (β) άνοδος στη θερμοκρασία ψυκτικού νερού συναρτήσει του χρόνου. Τροποποιημένο από τον Κου.

Το ολοκλήρωμα αντιστοιχεί στη σκιασμένη περιοχή του Σχ. 1.4b. Η απόδοση των τόξων μπορεί να καθοριστεί από τις εξισώσεις (1.2) και (1.3).





Σχ.1.7 Απόδοση τόξου στη GTAW και PAW

### Γ. Η ισχύς της πηγής θερμότητας στη μέθοδο GTAW

Αντίθετα με τη μέθοδο PAW, δεν παρουσιάζονται απώλειες θερμότητας από το πλάσμα του τόξου στο υδρόψυκτο ακροφύσιο καυστήρα. Με τη βοήθεια του DCEN, τα ηλεκτρόνια μετάδοσης είναι μια σημαντική πηγή μεταφοράς θερμότητας στο κομμάτι προς κατεργασία. Απελευθερώνουν τη ισχύ τους ως θερμότητα και η κινητική ενέργειά τους μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Στη μέθοδο AC GTAW, εντούτοις, τα ηλεκτρόνια βομβαρδίζουν το κομμάτι προς κατεργασία μόνο κατά τη διάρκεια του μισού κύκλου του ηλεκτροδίου αρνητικής πολικότητας και η απόδοση των τόξων είναι έτσι χαμηλότερη. Στη μέθοδο GTAW με DCEP, η απόδοση τόξων είναι ακόμα χαμηλότερη επειδή τα ηλεκτρόνια βομβαρδίζουν το ηλεκτρόδιο παρά το κομμάτι προς κατεργασία.

#### 1.3.2 Ικανότητα Τήξης

Η ικανότητα της πηγής θερμότητας να τήκει το μέταλλο βάσης – όπως και το υλικό συγκόλλησης – αποτελεί σημαντικό κομμάτι του πρακτικού ενδιαφέροντος του συγκολλητή.

Η ικανότητα τήξης του τόξου συγκόλλησης,  $\eta_m$ , ορίζεται ως ακολούθως:

$$\eta_m = \frac{(A_{base} \cdot V \cdot t_{weld}) \cdot H_{base} + (A_{filler} \cdot V \cdot t_{weld}) \cdot H_{filler}}{\eta \cdot E \cdot I \cdot t_{weld}} \quad (1.4)$$

όπου

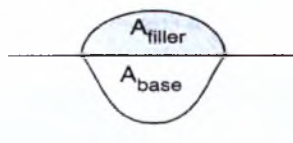
$V$ : ταχύτητα συγκόλλησης

$H_{base}$ : η ενέργεια που απαιτείται για να αυξήσει μια μονάδα όγκου του μετάλλου βάσης στο σημείο τήξης και να το λειώσει

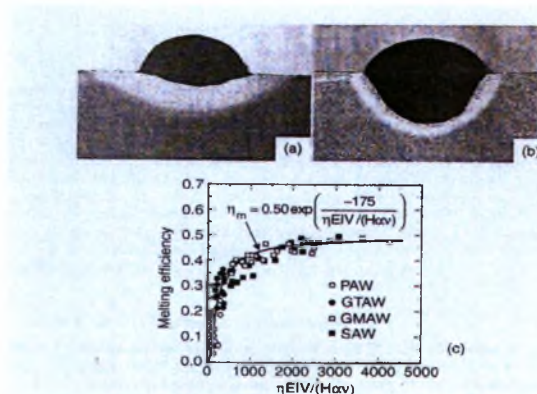
$H_{filler}$ : η ενέργεια που απαιτείται για να αυξήσει μια μονάδα όγκου του υλικού

συγκόλλησης στο σημείο τήξης και να το λειώσει

Η ποσότητα μέσα στις παρενθέσεις αντιπροσωπεύει τον όγκο του υλικού που τήκεται ενώ ο παρονομαστής απεικονίζει τη μεταφορά θερμότητας από την πηγή θερμότητας στο κομμάτι προς κατεργασία.



Σχ. 1.8 Εγκάρσιο διαγώνιο τμήμα της συγκόλλησης δείχνει περιοχές που αντιπροσωπεύουν τις συνεισφορές του μετάλλου βάσης και του υλικού συγκόλλησης

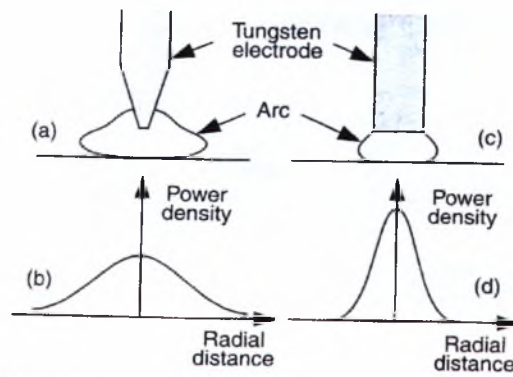


Σχ. 1.9 Ικανότητα τήξης: (α) χαμηλή είσοδος θερμότητας και ταχύτητα συγκόλλησης, (β) υψηλή είσοδος θερμότητας και ταχύτητα συγκόλλησης, (γ) παραλλαγή με τους αδιάστατους παραμέτρους  $\eta EIV / (H a_s)$

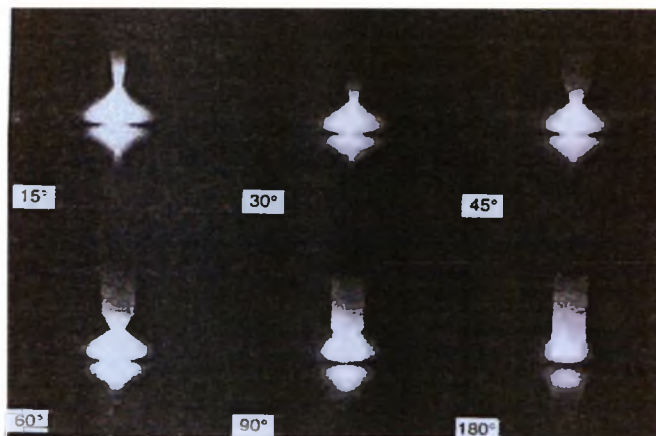
### 1.3.3 Κατανομή της Ισχύς της Πυκνότητας της Πηγής Θερμότητας

#### A. Επίδραση της Γωνίας της Άκρης των Ηλεκτροδίων

Στη μέθοδο GTAW με DCEN, το σχήμα της άκρης του ηλεκτροδίου επηρεάζει τόσο το σχήμα όσο και τη κατανομή της πυκνότητας της ισχύος του τόξου. Όσο η άκρη του ηλεκτροδίου αμβλύνεται, τόσο η διάμετρος του τόξου μειώνεται και ανοίγει η κατανομή της πυκνότητας της ισχύος (Σχ. 1.10). Ο Glickstein απέδειξε ότι το τόξο συγκεντρώνεται πιο πολύ καθώς αυξάνεται η κωνική γωνία της άκρης του ηλεκτροδίου βολφραμίου (Σχ. 1.11).



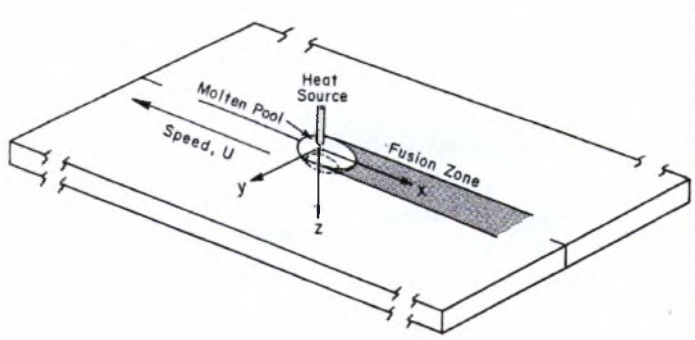
Σχ. 1.10 Επίδραση της γωνίας της άκρης του ηλεκτροδίου στο σχήμα και στη κατανομή της ισχύος της πυκνότητας του τόξου βολφραμίου



Σχ. 1.11 Επίδραση της γωνίας της άκρης του ηλεκτροδίου στο σχήμα του τόξου βολφραμίου

#### 1.4 Ανάλυση της Ροής Θερμότητας στη Συγκόλληση

Στο Σχ.1.12 απεικονίζεται η συγκόλληση ενός στατικού κομματιού προς επεξεργασία. Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων κινείται μαζί με τη πηγή θερμότητας με σταθερή ταχύτητα  $V$  πάνω στον αρνητικό άξονα  $x$ . Εκτός από το αρχικές και τελικές μεταβάσεις στη συγκόλληση, η ροή θερμότητας στο επεξεργαζόμενο κομμάτι, με ικανοποιητικό μήκος, είναι σταθερή ή ημι-σταθερή, ανάλογα με τη κίνηση της πηγής θερμότητας. Με άλλα λόγια, για ένα παρατηρητή που κινείται μαζί με τη πηγή, η θερμοκρασιακή κατανομή και η γεωμετρία της λίμνης συγκόλλησης δεν μεταβάλλεται με το χρόνο. Αρχικά η υπόθεση της σταθερότητας χρησιμοποιήθηκε από το Rosenthal για να απλοποιηθεί μαθηματικά η επεξεργασία της ροής θερμότητας κατά τη συγκόλληση.



Σχ. 1.12 Σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) που κινείται με τη πηγή θερμότητας.

### 1.4.1 Εξισώσεις Rosenthals

Ο Rosenthal's χρησιμοποίησε τις ακόλουθες απλοποιημένες υποθέσεις για να παράγει αναλυτικές εξισώσεις για τη μετάδοση θερμότητας κατά τη συγκόλληση:

1. σταθερή μετάδοση θερμότητας
2. σημειακή πηγή θερμότητας
3. αμελητέα έκλυση θερμότητας κατά τη τήξη
4. σταθερές θερμικές ιδιότητες
5. δεν υπάρχουν απώλειες θερμότητας από την επιφάνεια του επεξεργαζόμενου κομματιού
6. δεν λαμβάνει χώρα μεταφορά θερμότητας μέσα στη λίμνη συγκόλλησης

#### A. Δισδιάστατη εξίσωση Rosenthal's

Το Σχ.1.13 απεικονίζει τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων. Εξαιτίας του μικρού πάχους του κομματιού προς κατεργασία, οι μεταβολές της θερμοκρασίας πάνω στη κατεύθυνση πάχους θεωρείται αμελητέα και η ροή θερμότητας θεωρείται ότι είναι δισδιάστατη. Ο Rosenthal διατύπωσε την ακόλουθη εξίσωση για τη δισδιάστατη ροή θερμότητας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης των λεπτών φύλλων άπειρου πλάτους:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot (T - T_0) \cdot k \cdot g}{Q} = \exp\left(\frac{V \cdot x}{2a}\right) \cdot K_0 \cdot \left(\frac{V \cdot r}{2a}\right) \quad (1.5)$$

όπου

$T$ : θερμοκρασία

$T_0$ : η θερμοκρασία του κομματιού προς επεξεργασία πριν τη συγκόλληση

$k$ : θερμική αγωγιμότητα του κομματιού προς επεξεργασία

$g$ : πάχος του κομματιού προς επεξεργασία

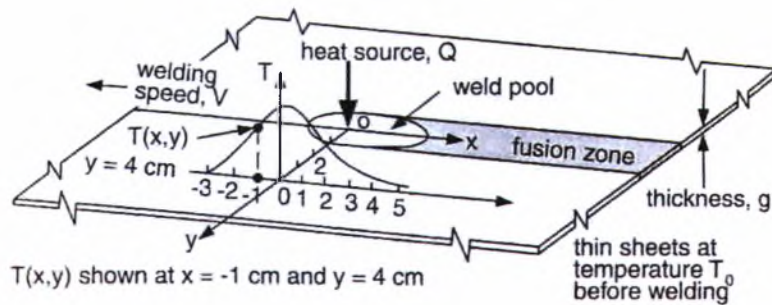
$Q$ : μετάδοση θερμότητας από την πηγή μετάδοσης προς το κομμάτι

$V$ : ταχύτητα κίνησης

$a$ : συντελεστής θερμικής διάχυσης,  $k/\rho \cdot C$

$K_0$ : τροποποιημένη εξίσωση Bessel δευτέρου είδους και μηδενικής τάξης (Σχ.2.16)<sup>26</sup>

$r$ : η ακτίνα από τη πηγή,  $(x^2 + y^2)^{1/2}$



Σχ. 1.13 Δισδιάστατη μετάδοση θερμότητας κατά τη συγκόλληση λεπτού ελάσματος

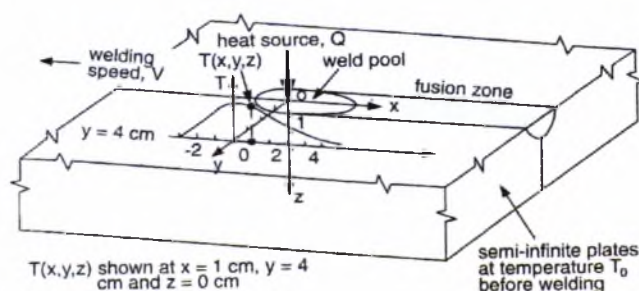
### B. Τρισδιάστατη εξίσωση Rosenthal's

Η αναλυτική επίλυση της εξίσωσης του Rosenthal για τη τρισδιάστατη μετάδοση θερμότητας σε ένα ημι-άπειρο κομμάτι προς επεξεργασία κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης (Σχ.1.14), είναι η ακόλουθη:

$$\frac{2\pi \cdot (T - T_0) \cdot k \cdot R}{Q} = \exp \left[ -\frac{V \cdot (R - x)}{2a} \right] \quad (1.6)$$

όπου  $R$  είναι η ακτίνα από την πηγή,  $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ .

Δηλαδή η σχέση (1.6) συνεπάγεται ότι στο εγκάρσιο διαγώνιο τμήμα της συγκόλλησης όλες οι ισόθερμες, συμπεριλαμβανομένου του ορίου τήξης και του εξωτερικού ορίου της ΘΕΖ, έχει μορφή ημικυκλική.



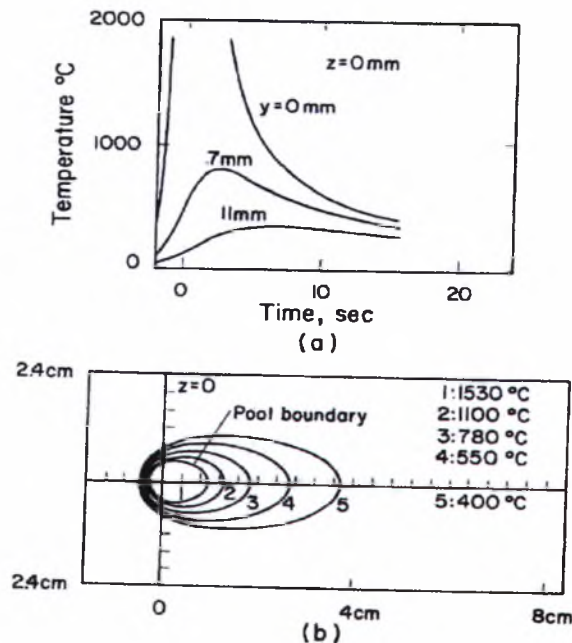
Σχ. 1.14 Τρισδιάστατη μετάδοση θερμότητας κατά τη συγκόλληση ημι-άπειρου κομματιού

### Γ. Θερμικοί Κύκλοι και Θερμοκρασιακές Κατανομές

Οι εξισώσεις (1.5) και (1.6) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογίσουν την κατανομή θερμοκρασίας στο κομμάτι προς κατεργασία κατά τη διάρκεια της

συγκόλλησης. Η κατανομή θερμοκρασίας στην κατεύθυνση της συγκόλλησης, για παράδειγμα, οι καμπύλες  $T - x$  στα σχήματα 1.13 και 1.14, εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Μπορούν να μετατραπούν εύκολα σε διαγράμματα θερμοκρασίας - χρόνου, δηλαδή σε *θερμικούς κύκλους*, μετατρέποντας την απόσταση  $x$  στο χρόνο  $t$ ,

$$\text{με τη βοήθεια της σχέσης } t = \frac{(x-0)}{V}.$$



Σχ. 1.15 Υπολογισμένα αποτελέσματα από τη τρισδιάστατη εξίσωση μετάδοσης θερμότητας του Rosenthal: (α) θερμικοί κύκλοι (β) ισόθερμες. Ταχύτητα συγκόλλησης: 2.4 mm/s, εισαγωγή θερμότητα: 3200W, υλικό: 1018 χάλυβας

### 1.4.2 Εξισώσεις Adam's

Οι παρακάτω εξισώσεις Adam's χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας κορυφής  $T_p$  στην επιφάνεια του κατεργαζομένου κομματιού ( $z = 0$ ) σε απόσταση  $Y$  από το σημείο τήξης:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot V \cdot Y \cdot g \cdot \rho \cdot C}{Q} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (1.7)$$

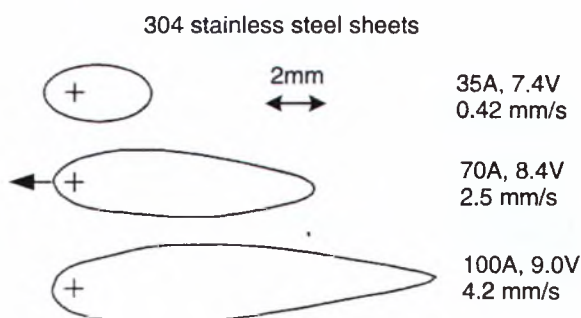
για δισδιάστατη μεταφορά θερμότητας και για τρισδιάστατη μεταφορά θερμότητας.

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{5.44 \cdot \pi \cdot k \cdot a}{Q \cdot V} \cdot \left[ 2 + \left( \frac{V \cdot Y}{2a} \right)^2 \right] + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (1.8)$$

## 1.5 Επίδραση των Παραμέτρων Συγκόλλησης

### 1.5.1 Το σχήμα της λίμνης συγκόλλησης

Δεδομένου ότι η εισαγωγή θερμότητας  $Q$  και η ταχύτητα συγκόλλησης  $V$  αυξάνονται, η λίμνη συγκόλλησης επιμηκύνεται και μεταβαίνει από ελλειπτικό σχήμα σε σταγονοειδές. Το Σχ.1.16 παρουσιάζει λίμνες συγκόλλησης που επισημαίνονται από τις φωτογραφίες που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια αυτογενούς συγκόλλησης GTAW σε ανοξείδωτα φύλλα χάλυβα 304, πάχους 1.6mm. Δεδομένου ότι οι λίμνες φωτογραφήθηκαν υπό μια κεκλιμένη γωνία (παρά κάθετα), η μονάδα κλίμακα ισχύει μόνο για τα μήκη στην κατεύθυνση συγκόλλησης. Σε κάθε λίμνη ο σταυρός δείχνει τη θέση της άκρης των ηλεκτροδίων σε σχέση με τη λίμνη. Όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα συγκόλλησης, τόσο μεγαλύτερη γίνεται η αναλογία μήκους-πλάτους και τόσο μεγαλύτερο το γεωμετρικό κέντρο της υστέρησης των λιμνών πίσω από την άκρη ηλεκτροδίων

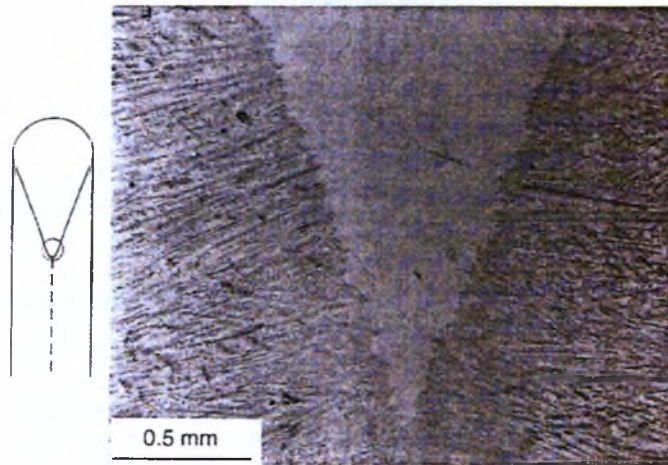


Σχ.1.16 Σχήματα από λίμνες συγκόλλησης με τη μέθοδο GTAW σε ανοξείδωτο χάλυβα 304.

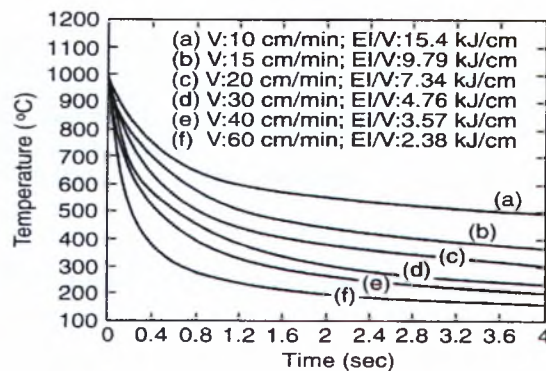
Η επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης στο σχήμα της λίμνης συγκόλλησης είναι σημαντικότερη στα φύλλα ανοξείδωτου χάλυβα απ' ό,τι στα φύλλα αλουμίνιας. Η πολύ μικρότερη θερμική αγωγιμότητα των ανοξείδωτων χαλύβων, καθιστά δυσκολότερο για τη λίμνη συγκόλλησης να αποβάλλει τη θερμότητα και να στερεοποιηθεί.

### 1.5.2 Ρυθμός ψύξης και θερμοκρασιακή κλίμακα

Ο λόγος  $E \cdot I / V$  αντιπροσωπεύει τη ποσότητα της εισαγόμενης θερμότητας ανά μονάδα μήκους της συγκόλλησης. Στο Σχ.1.18 δείχνει ότι με την αύξηση του  $E \cdot I / V$ , μειώνεται ο ρυθμός ψύξης. Ο Kihara απέδειξε ότι ο ρυθμός ψύξης μειώνεται με την αύξηση του  $E \cdot I / V$  και την προθέρμανση.



Σχ. 1.17 Αιχμηρή ακμής λίμνης συγκόλλησης του ανοξείδωτου χάλυβα 309 που έχει υποστεί βαφή με πάγο μετά τη συγκόλληση. Από τον Kou και Lee.



Σχ. 1.18 Διάφοροι ρυθμοί ψύξης με την εισαγόμενη θερμότητα ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης. Από τον Lee.

### 1.5.3 Κατανομή της ισχύος πυκνότητας

Προσεγγιστικά η κατανομή της ισχύος της πυκνότητας στην επιφάνεια του κομματιού προς επεξεργασία, συχνά θεωρείται Γκαουσιανή και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q = \frac{3Q}{\pi \cdot a^2} \exp \left[ \frac{r^2}{-a^2/3} \right] \quad (1.9)$$

όπου  $q$  η ισχύς της πυκνότητας,  $Q$  ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας από τη πηγή θερμότητας στο κομμάτι προς επεξεργασία και  $a$  η αποτελεσματική ακτίνα από τη πηγή θερμότητας.

### 1.5.4 Η επίδραση της απορρόφησης θερμότητας από το κατεργαζόμενο κομμάτι

Ο Kihara απέδειξε ότι ο ρυθμός ψύξης αυξάνει με το πάχος του κομματιού προς επεξεργασία. Αυτό συμβαίνει διότι ένα πιο παχύ κομμάτι απορροφά πιο πολύ τη



θερμότητα ώστε να μειώσει τη θερμοκρασία της συγκόλλησης. Ο Inagaki και ο Sekiguchi απέδειξαν ότι κάτω από τις ίδιες συνθήκες εισαγωγής θερμότητας και το πάχος της πλάκας, ο χρόνος ψύξης είναι μικρότερος για fillet συγκόλληση από ότι σε συγκόλληση bead-on-plate λόγω της μεγάλης απορρόφηση θερμότητας.

## 1.6 Ανθρακούχοι Χάλυβες και Κράματα Χαλύβων

Οι ανθρακούχοι και κραματικοί χάλυβες χρησιμοποιούνται ως υλικά συγκόλλησης πιο συχνά από οποιαδήποτε άλλο υλικό λόγω των διαδεδομένων εφαρμογών τους και επειδή είναι εύκολο να συγκολληθούν. Γενικά, οι ανθρακούχοι και κραματικοί χάλυβες μεγάλης αντοχής είναι πιο δύσκολο να συγκολληθούν λόγω του κινδύνου διάσπασης του υδρογόνου. Ο Πίνακας 1.5 συνοψίζει μερικά χαρακτηριστικά προβλήματα συγκόλλησης στους χάλυβες αυτού του τύπου και μερικές λύσεις αυτών.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.5** Τυπικά προβλήματα συγκόλλησης και Πρακτικές λύσεις για τους ανθρακούχους και κραματικούς χάλυβες

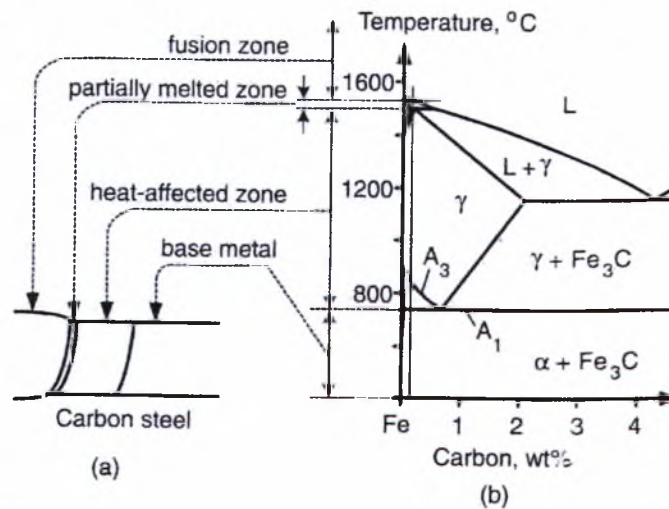
Τυπικά Προβλήματα	Τύποι Κραμάτων	Αντιμετώπιση του Προβλήματος
Παρουσία πόρων	Ανθρακούχοι και χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες	Προσθήκη αντι-οξειδωτικών (Al, Ti, Mn) στο υλικό συγκόλλησης
Διάσπαση υδρογόνου	Χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα	Χρήση ηλεκτροδίων που περιέχουν μικρό ποσοστό σε υδρογόνο ή αποτελούνται από ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα Προθέρμανση και postheat
Λαμελοειδής διάτμηση	Ανθρακούχοι και χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες	Χρήση ενώσεων που ελαχιστοποιούν την εγκάρσια διάτμηση Επικάλυψη με πιο μαλακό στρώμα
Εμφάνιση ρωγμών λόγω επαναφοράς	Χάλυβες που αντέχουν στη διάβρωση και την θέρμανση	Χαμηλή εισαγωγή θερμότητας για να αποφευχθεί η ανάπτυξη των κόκκων Ελαχιστοποίηση των περιορισμών και της συγκέντρωσης τάσεων Γρήγορη θέρμανση στο επίπεδο της κρίσιμης θερμοκρασίας, αν είναι δυνατόν
Εμφάνιση ρωγμών λόγω στερεοποίησης	Ανθρακούχοι και χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες	Διατήρηση της κατάλληλης αναλογίας Mn/S
Μικρή τιμή σκληρότητας στην HAZ εξαιτίας της ανάπτυξης των κόκκων	Ανθρακούχοι και χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες	Χρήση νιτριδίων και καρβιδίων ώστε να εμποδιστεί η ανάπτυξη των κόκκων Χαμηλή εισαγωγή θερμότητας
Μικρή τιμή σκληρότητας στην ζώνη τήξης εξαιτίας ανάπτυξης κιονοειδών κόκκων	Ανθρακούχοι και χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες	Εκλέπτυνση κόκκων Χρήση συγκόλλησης πολλών πάσων για εκλέπτυνση κόκκων

<sup>a</sup> Διαδικασίες με χαμηλή τιμή εισαγωγής θερμότητας (GMAW and SMAW vs. SAW and ESW) ή συγκόλληση πολλών πάσων με μικρή εισαγωγή θερμότητας σε κάθε πάσο.

### 1.6.1 Ανθρακούχοι Χάλυβες και Κράματα Χαλύβων

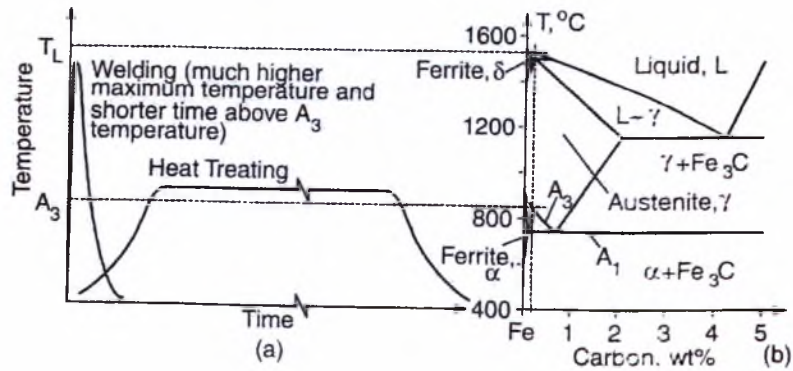
Η HAZ σε έναν ανθρακούχο χάλυβα μπορεί να συνδέεται με το διάγραμμα φάσεων Fe-C (Σχ.1.19), εάν αμελείται η κινητικότητα της γρήγορης θέρμανσης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης στους μετασχηματισμούς φάσης. Η HAZ μπορεί να

θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στην περιοχή στο κομμάτι προς κατεργασία, του οποίου η θερμοκρασία θέρμανσης κυμαίνεται μεταξύ της χαμηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας  $A_1$  (ευτηκτική θερμοκρασία) και της περιτεκτική θερμοκρασία. Ομοίως, η PMZ μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στις περιοχές μεταξύ της περιτεκτικής θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας liquidus, και τη ζώνη τήξης στις περιοχές επάνω από τη θερμοκρασία liquidus.



Σχ. 1.19 Συγκόλληση ανθρακούχου χάλυβα: (a) HAZ, (b) διάγραμμα φάσεων.

Το διάγραμμα φάσεων Fe-C και τα διαγράμματα CCT (*continuous-cooling transformation*) για την θερμική επεξεργασία των ανθρακούχων χαλύβων μπορούν να φανούν χρήσιμα, αλλά πρέπει να σημειωθούν μερικές θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ της συγκόλλησης και της θερμικής επεξεργασίας. Οι θερμικές αλλαγές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και της θερμικής κατεργασίας ενός ανθρακούχου χάλυβα διαφέρουν σημαντικά (Σχ.1.20). Καταρχήν, στη συγκόλληση η μέγιστη θερμοκρασία στη HAZ μπορεί να πλησιάσει τους 1500°C. Στην θερμική επεξεργασία, εντούτοις, η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 900°C, η οποία δεν απέχει πολύ πάνω από την ανώτερη κρίσιμη θερμοκρασία  $A_3$ , που απαιτείται για τον σχηματισμό του ωστενίτη ( $\gamma$ ). Επιπλέον, ο ρυθμός θέρμανσης είναι υψηλός και ο χρόνος διατήρησης πάνω από την  $A_3$  είναι μικρός κατά τη διάρκεια των περισσότερων διαδικασιών συγκόλλησης. Από την άλλη, στη θερμική κατεργασία ο ρυθμός θέρμανσης είναι πολύ πιο αργός και ο χρόνος διατήρησης πάνω από την  $A_3$  είναι μεγαλύτερος. Οι θερμοκρασίες  $A_1$  και  $A_3$  κατά τη διάρκεια της θέρμανσης (*chauffage*) συχνά αναφέρονται ως θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ .



Σχ. 1.20 Σύγκριση ανάμεσα στη συγκόλληση και την θερμική κατεργασία του χάλυβα: (a) θερμικές κατεργασίες, (b) Διάγραμμα φάσεων Fe – C.

Εξαιτίας της κινητικότητας, οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$  τείνουν να είναι υψηλότερες από τις θερμοκρασίες ισορροπίας  $A_1$  και  $A_3$ , αντίστοιχα και τείνουν να αυξηθούν με το αυξανόμενο ρυθμό θέρμανσης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Κινητικά, οι μετασχηματισμοί φάσης απαιτούν διάχυση (ο μετασχηματισμός σε μαρτενσίτη αποτελεί εξαίρεση) και η διάχυση παίρνει χρόνο. Συνεπώς, στη ταχεία θέρμανση κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, οι μετασχηματισμοί φάσης μπορούν να μην συμβούν στις θερμοκρασίες ισορροπίας  $A_1$  και  $A_3$  αλλά στις υψηλότερες θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ . Για τους χάλυβες που περιέχουν τα μεγαλύτερα ποσά στοιχείων που σχηματίζουν καρβίδια (όπως V, W, Cr, Ti και Mo), η επίδραση του ρυθμού θέρμανσης γίνεται εντονότερη. Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός διάχυσης τέτοιων στοιχείων είναι τάξης μεγέθη μικρότερα από εκείνα του άνθρακα και επίσης επειδή εμποδίζουν τη διάχυση του άνθρακα. Κατά συνέπεια, καθυστερούν τους μετασχηματισμούς φάσεως σε μεγάλη έκταση.

Ο συνδυασμός υψηλών ρυθμών θέρμανσης και μικρού χρόνου διατήρησης πάνω από την  $A_{c3}$  στη συγκόλληση, μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό του ανομοιογενούς ωστενίτη κατά τη διάρκεια της θέρμανσης. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για τα άτομα του άνθρακα στον ωστενίτη να διαχυθούν από τις προγενέστερες αποικίες περλίτη με υψηλό ποσοστό σε άνθρακα στις προγενέστερες αποικίες φερρίτη με χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα. Κατά τη γρήγορη ψύξη, τα πρώτα μπορούν να μετασχηματιστούν σε αποικίες μαρτενσίτη με υψηλό ποσοστό σε άνθρακα, ενώ τα τελευταία σε αποικίες φερρίτη με χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα. Συνεπώς, η μικροσκληρότητα στη HAZ μπορεί να αποκτήσει τιμές πάνω από ένα ευρύ φάσμα στις συγκολλήσεις που γίνονται με μεγάλους ρυθμούς θέρμανσης.

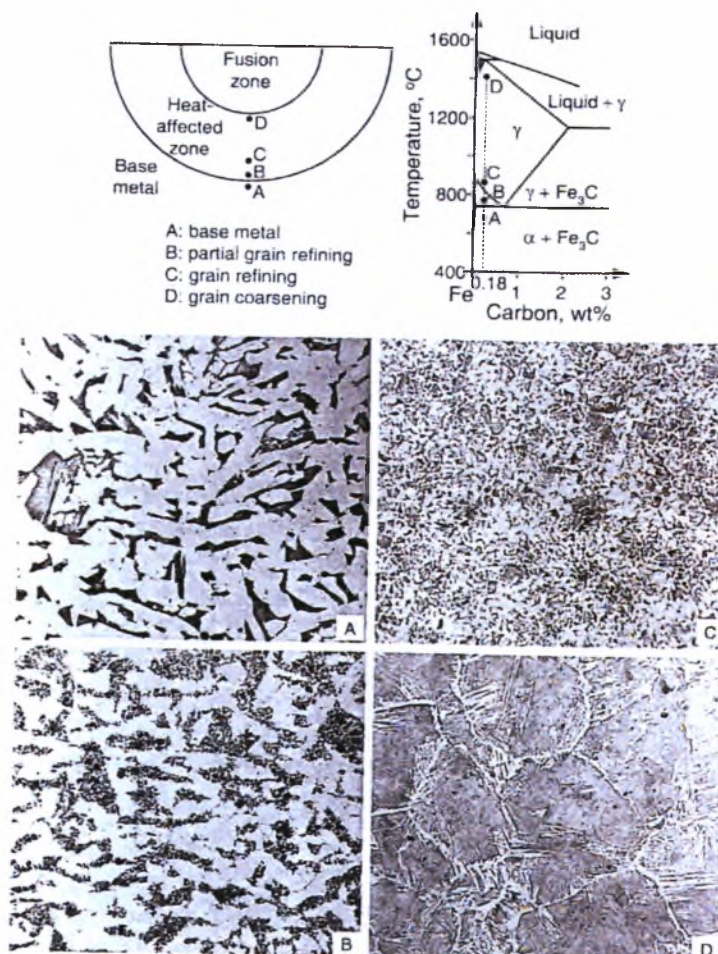
Ως αποτέλεσμα των υψηλών μέγιστων θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, η ανάπτυξη των κόκκων μπορεί να πραγματοποιηθεί κοντά στο όριο τήξης. Όσο πιο αργός είναι ο ρυθμός θέρμανσης, τόσο πιο μεγάλος είναι ο χρόνος διατήρησης πάνω από την  $A_{c_1}$  και ως εκ τούτου τόσο δριμύτερη είναι η διεύρυνση των κόκκων. Στην επεξεργασία με θερμότητα, εντούτοις, η μέγιστη θερμοκρασία που υιοθετείται κυμαίνεται γύρω στους 900°C προκειμένου να αποφευχθεί η ανάπτυξη των κόκκων.

Τα διαγράμματα CCT για τη συγκόλληση μπορούν να ληφθούν με τη χρησιμοποίηση ενός θερμικού προσομοιωτή συγκόλλησης και ενός μεγάλου διαστολομέτρου που ανιχνεύει τις αλλαγές του όγκου που προκαλούνται από τους μετασχηματισμούς φάσης. Εντούτοις, δεδομένου ότι τα διαγράμματα CCT για τη συγκόλληση είναι συχνά μη διαθέσιμα, εκείνα για τη θερμική κατεργασία έχουν χρησιμοποιηθεί. Αυτοί οι δύο τύποι διαγραμμάτων CCT μπορούν να διαφέρουν ο μεταξύ τους λόγω της κινητικής. Παραδείγματος χάριν, η ανάπτυξη των κόκκων στη συγκόλληση μπορεί να μετατοπίσει το διάγραμμα CCT σε μεγαλύτερους χρόνους που ευνοούν το μετασχηματισμό σε μαρτενσίτη. Η αιτία αυτού του γεγονότος είναι ότι η ανάπτυξη κόκκων μειώνει την περιοχή των διαφασικών συνόρων των κόκκων που είναι διαθέσιμη για να δημιουργηθεί πυρήνας φερρίτη και περλίτη κατά τη διάρκεια της ψύξης. Εντούτοις, η γρήγορη θέρμανση στη συγκόλληση μπορεί να μετατοπίσει το διάγραμμα CCT σε πιο σύντομους χρόνους, που αποθαρρύνουν το μετασχηματισμό σε μαρτενσίτη. Στοιχεία που σχηματίζουν καρβίδια (όπως Cr, Mo, Ti, V και Nb), όταν διαλύονται στον ωστενίτη, τείνουν να αυξήσουν την σκληρότητα του χάλυβα. Λόγω του ικανοποιητικά διαθέσιμου χρόνου στην θερμική κατεργασία, τέτοια καρβίδια διαλύονται τελείως και ενισχύουν έτσι την σκληρότητα του χάλυβα. Αυτό δεν είναι συνήθως δυνατό στη συγκόλληση λόγω του υψηλού ρυθμού θέρμανσης και του μικρού χρόνου διατήρησης σε υψηλή θερμοκρασίας που εντοπίζονται στη HAZ.

### 1.6.2 Χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα

Αυτοί οι χάλυβες, στην πραγματικότητα, περιλαμβάνουν και τους δύο ανθρακούχες χάλυβες με ποσοστό άνθρακα μέχρι 0.15%, γνωστοί ως χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες και με ποσοστό C 0.15-0.30%, γνωστοί ως ήπιοι (*mild*) χάλυβες. Στο Σχ.1.21 παρουσιάζει τα μικρογραφήματα μιας συγκόλλησης GTAW του χάλυβα 1018. Το μέταλλο βάσεων αποτελείται από φερρίτη (ανοιχτόχρωμα) και περλίτη (σκουρόχρωμα) (θέση Α). Η μικροδομή της HAZ μπορεί να διαιρεθεί σε

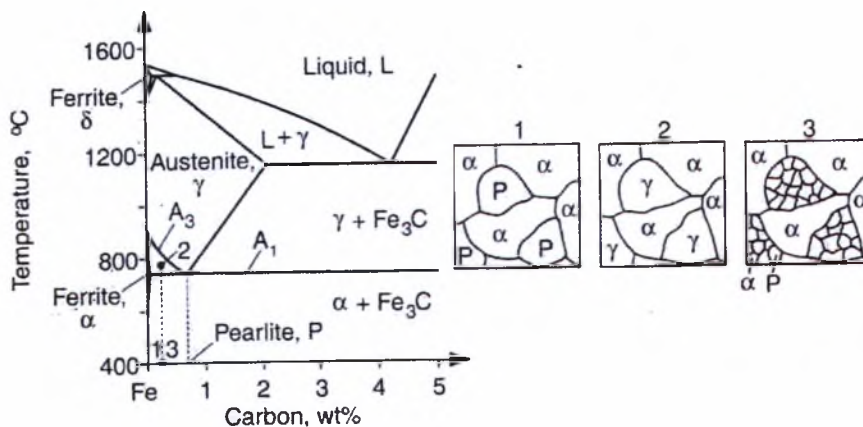
ουσιαστικά τρεις περιοχές: μερική εκλέπτυνση κόκκων, εκλέπτυνση κόκκων και περιοχές ανάπτυξης κόκκων (θέσεις BD).



Σχ. 1.21 Μικροδομή της HAZ της GTAW του χάλυβα 1018 (200x)

Η περιοχή μερικής εκλέπτυνση κόκκων (θέση B) υποβάλλεται σε μια μέγιστη θερμοκρασία ακριβώς πάνω από την χαμηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία  $A_{c1}$ . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.22, ο προϋπάρχων περλίτης (P) μετασχηματίζεται σε ωστενίτη ( $\gamma$ ) και επεκτείνεται ελαφρώς στις προϋπάρχουσες περιοχές του φερρίτη (F) κατά τη θέρμανση πάνω από την  $A_{c1}$  και στη συνέχεια αποσυντίθεται σε εξαιρετικά λεπτόκοκκο περλίτη και φερρίτη κατά τη διάρκεια της ψύξης. Οι προϋπάρχουσες αποικίες φερρίτη είναι ουσιαστικά απρόσβλητες. Η περιοχή εκλέπτυνση κόκκων (η θέση C) υποβάλλεται σε μια μέγιστη θερμοκρασία ακριβώς πάνω από την μέγιστη κρίσιμη θερμοκρασία  $A_{c3}$ , επιτρέποντας κατά συνέπεια την πυρήνωση των κόκκων ωστενίτη. Τέτοιοι κόκκοι ωστενίτη διασπώνται σε μικρούς περλιτικούς και φερριτικούς κόκκους κατά τη διάρκεια της επόμενης ψύξης. Η κατανομή περλίτη και φερρίτη δεν είναι ακριβώς ομοιόμορφη επειδή ο χρόνος διάχυσης για τον άνθρακα είναι περιορισμένος κατά τον υψηλό ρυθμό θέρμανσης στη διάρκεια της

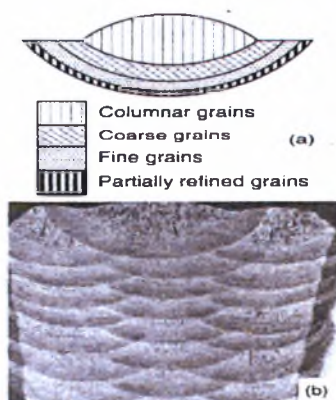
συγκόλλησης και ο σχηματιζόμενος ωστενίτης δεν είναι ομοιογενής. Η περιοχή ανάπτυξης κόκκων (θέση D) υποβάλλεται σε μια μέγιστη θερμοκρασία μεγαλύτερη της  $A_{c3}$ , επιτρέποντας στους κόκκους ωστενίτη να αναπτυχθούν. Ο υψηλός ρυθμός ψύξης και το μεγάλο μέγεθος κόκκου ευνοούν τον φερρίτη να σχηματίσει πλάγιες λαμέλλες από τα όρια των κόκκων, που είναι γνωστές ως φερρίτης Widmanstätten.



Σχ. 1.22 Μηχανισμός της μερικής εκλέπτυνσης κόκκων σε ανθρακούχο χάλυβα

Η ανάπτυξη των κόκκων κοντά στο όριο τήξης σχηματίζει κιονοειδή χονδρόκοκκους στη ζώνη τήξης που είναι σημαντικά μεγαλύτεροι από τους κόκκους στη HAZ, κατά μέσο όρο.

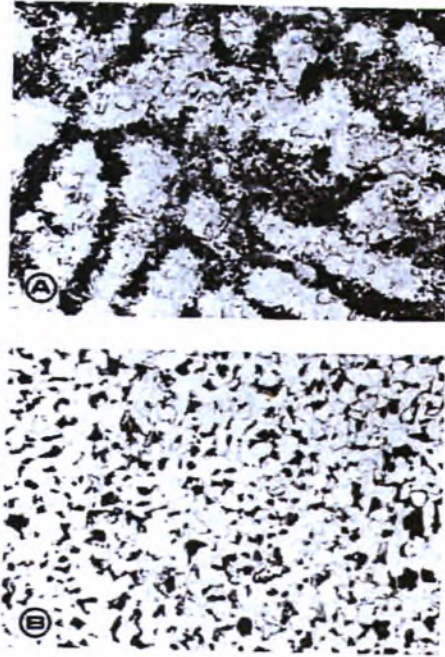
Αν και ο μαρτενσίτης συνήθως δεν εντοπίζεται στη HAZ ενός χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, μπορεί να σχηματιστεί μαρτενσίτης υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα όταν και η θέρμανση και ο ρυθμός ψύξης είναι πολύ υψηλός.



Σχ. 1.23 Εκλέπτυνση κόκκων σε συγκόλληση πολλαπλών πάσων: (α) συγκόλληση ενός πάσων (b) μικροδομή συγκόλλησης πολλαπλών πάσων. (AWS)

Ο μαρτενσίτης με υψηλό ποσοστό σε άνθρακα μπορεί να σχηματίσει στη HAZ ένα χυτό χάλυβα μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα, όπου ο μικροδιαχωρισμός κατά τη διάρκεια της χύτευσης αυξάνει τη περιεκτικότητα σε

άνθρακα στις ενδοδενδριτικές περιοχές. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης των χυτών υλικών, τα συνεχόμενα δίκτυα των κονδύλων περλίτη, διαμόρφωσαν τα συνεχή δίκτυα του ωστενίτη υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα κατά τη θέρμανση, η οποία μετασχημάτισε στη συνέχεια τα συνεχή δίκτυα του μαρτενσίτη υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα κατά τη ψύξη. Τα «νησιά» που διασκορπίζονται στα δίκτυα είναι φερρίτης. Αυτά τα δίκτυα των ενδοδενδριτικών εξογκωμάτων περλίτη μπορούν να αποβληθούν με την ομογενοποίηση στους 954°C για 2h (Σχ.1.24b).



Σχ. 1.24 Μικροδομή ανθρακούχου χάλυβα: (α) κατάσταση χυτού (β) μετά την ομογενοποίηση

### 1.6.3 Χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες που έχουν υποστεί βαφή και ανόπτηση

Οι χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης που έχουν υποστεί βαφή και ανόπτηση (QTLA), συνήθως περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό λιγότερο από 0.25% και το συνολικό ποσοστό των κραματικών στοιχείων δεν υπερβαίνει το 5%, αρχικά αυξάνουν την σκληρότητα τους με τη βαφή και την ανόπτηση ώστε να παραχθούν μικροδομές που περιέχουν μαρτενσίτη και μπαινίτη. Η τάση διαρροής κυμαίνεται από περίπου από 345 ως 895MPa, ανάλογα με τη σύνθεση και τη θερμική κατεργασία.

Η χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι επιθυμητή σε τέτοια κράματα για τους εξής λόγους: (i) για να ελαχιστοποιηθεί η σκληρότητα του μαρτενσίτη και (ii) για να αυξηθεί η θερμοκρασία  $M_s$  (έναρξη σχηματισμού μαρτενσίτη) έτσι ώστε οποιοσδήποτε μαρτενσίτη που σχηματίζεται μπορεί να μετριαστεί αυτόματα κατά τη διάρκεια της ψύξης. Εξαιτίας του σχηματισμού του *auto-tempered* μαρτενσίτη χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, τόσο η υψηλή αντοχή όσο και η σκληρότητας

μπορούν να επιτευχθούν. Η προσθήκη Mn, Cr, Ni, και Mo εξασφαλίζουν την σκληρότητα τέτοιων κραμάτων. Η χρήση Ni επίσης αυξάνει σημαντικά την αντοχή και μειώνει τη θερμοκρασία μετάβασης από όλκιμη σε ψαθυρή κατάσταση, σε αυτά τα κράματα.

Οποιαδήποτε συμβατική μέθοδος συγκόλλησης μπορεί να εφαρμοστεί στους χάλυβες QTLA, αλλά το υδρογόνο των μετάλλων συγκόλλησης πρέπει να διατηρηθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Συχνά απαιτείται προθέρμανση, προκειμένου να αποτραπεί η διάσπαση υδρογόνου. Οι θερμοκρασίες προθέρμανσης και μεταξύ των πάσων (*interpass*) που απαιτούνται είναι υψηλότερες από εκείνες που εφαρμόζονται στους χάλυβες HSLA, ωστόσο δεν θεωρούνται υψηλές. Παρόλα αυτά, πάρα πολύ υψηλή θερμοκρασία προθέρμανσης ή μεταξύ των πάσων είναι ανεπιθύμητη. Μπορεί να μειώσει το ρυθμό ψύξης του μετάλλου συγκόλλησης και της HAZ και να αναγκάσει τον ωστενίτη να μετασχηματιστεί είτε σε φερρίτη είτε σε χονδρόκοκκο μπαινίτη, και τα δύο από τα οποία στερούνται υψηλής αντοχής και την ικανοποιητική σκληρότητα. Η θερμική επεξεργασία πριν τη συγκόλληση συνήθως δεν απαιτείται.

Η υπερβολική εισαγωγή θερμότητας μπορεί επίσης να μειώσει το ποσοστό ψύξης και να παράγει μη επιθυμητές μικροδομές και μηχανικές ιδιότητες. Αντίθετα, εάν ο ρυθμός ψύξης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είναι ιδιαίτερα υψηλός, στην δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για αυτοεπαναφορά του μαρτενσίτη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στη διάσπαση του υδρογόνου εφόσον υπάρχει. Για αυτό συνίσταται η χρήση ηλεκτροδίων με χαμηλό ποσοστό υδρογόνου και μικρό χρόνο προθέρμανσης.

Για να καλυφθούν οι απαιτήσεις τόσο της περιορισμένης εισαγωγής θερμότητας και της κατάλληλης προθέρμανσης, η συγκόλληση πολλών πάσων χρησιμοποιείται συχνά σε συγκόλληση τμημάτων μεγάλου πάχους των χαλύβων QTLA. Επομένως, η θερμοκρασία ανάμεσα στα πάσα διατηρείται στο ίδιο επίπεδο με τη θερμοκρασία προθέρμανσης. Η συγκόλληση πολλών πάσων με πολλές μικρές *stringer beads* αυξάνει την σκληρότητα της συγκόλλησης ως αποτέλεσμα την εκλέπτυνση των κόκκων και την επίδραση της επαναφοράς των διαδοχικών περασμάτων συγκόλλησης.

#### 1.6.4 Εμφάνιση ρωγμής εξαιτίας της επαναφοράς χαμηλά κραματωμένων χαλύβων

Η εμφάνιση ρωγμής εξαιτίας της επαναφοράς αποτελεί ένα γνωστό πρόβλημα για τους χαμηλά κραματωμένους φερριτικούς χάλυβες που περιέχουν χρώμιο, μολυβδαίνιο και μερικές φορές βανάδιο και βολφράμιο για να ενισχύσουν την



αντίσταση τους σε διάβρωση και την αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτοί οι κραματικοί χάλυβες, γνωστοί ως φερριτικοί χάλυβες ανθεκτικοί στον ερπυσμό, χρησιμοποιούνται συχνά σε λειτουργίες αύξησης της θερμοκρασίας στις πυρηνικές και στις φυσικές ενεργειακές εφαρμογές.

Οι χάλυβες αυτοί θερμαίνονται εκ νέου, συνήθως σε περίπου 550-650°C, μετά από τη συγκόλληση για να ανακουφιστούν οι τάσεις και κατ' επέκταση να μειωθεί η τάση για ράγισμα. Εντούτοις, το ρήγμα μπορεί να εμφανιστεί κατά την επαναφοράς στην HAZ. Ο Nakamura<sup>(35)</sup> έχει προτείνει τον ακόλουθο τύπο για την επίδραση των κραματικών στοιχείων στην πιθανότητα δημιουργία ρωγμών:

$$CS = \%Cr + 3.3 \times (\%Mo) + 8.1 \times (\%V) - 2 \quad (1.10)$$

Όταν η τιμή του CS είναι ίση ή μεγαλύτερη του μηδενός, ο χάλυβας δύναται να είναι επιρρεπής στη δημιουργία ρωγμής λόγω επαναφοράς.

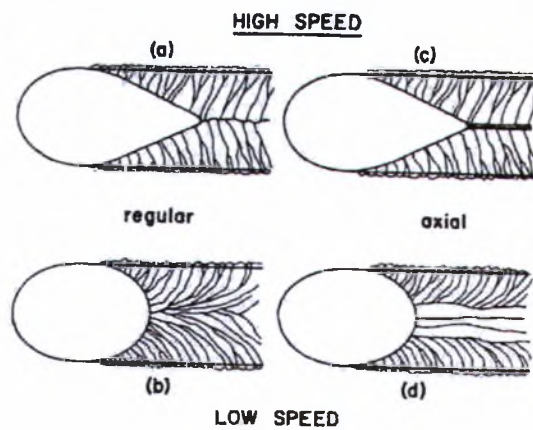
Ο μηχανισμός της δημιουργίας ρωγμής λόγω επαναφοράς εξηγείται ως εξής. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης η ΘΕΖ κοντά στη γραμμή τήξης, θερμαίνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες στο πεδίο της ωστενιτικής φάσης, όπου τα προϋπάρχοντα καρβίδια του Cr, Mo και B διαλύονται και οι κόκκοι ωστενίτη αναπτύσσονται. Επομένως η γρήγορη ψύξη δεν παρέχει στα καρβίδια αρκετό χρόνο για να καθιζήσουν, με αποτέλεσμα τον υπερκορεσμό αυτών των κραματικών στοιχείων καθώς ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη (εάν η σκληρότητα είναι ικανοποιητική). Όταν η χονδρόκοκκη ΘΕΖ αναθερμαίνεται σε ανυψωμένη θερμοκρασία για να ανακουφιστούν οι τάσεις, τα λεπτόκοκκα καρβίδια καθιζάνουν στις μετατοπίσεις στο εσωτερικό των κόκκων ωστενίτη και τους ενισχύει προτού να ανακουφιστούν οι παραμένουσες τάσεις. Δεδομένου ότι οι εσωτερικοί κόκκοι ενισχύονται περισσότερο από τα όρια των κόκκων και δεδομένου ότι αυτό συμβαίνει προτού να ανακουφιστούν οι τάσεις, το ράγισμα μπορεί να εμφανιστεί κατά μήκος των συνόρων των κόκκων.

## 1.7 Μεταλλογνωσία της συγκόλλησης

### 1.7.1 Επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης στη δομή των κόκκων

Η λίμνη συγκόλλησης έχει μορφή σταγόνας σε υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης και ελλειπτικό σε χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης. Δεδομένου ότι τα *trailing* σύνορα της λίμνης συγκόλλησης, με σταγονοειδής μορφή, είναι αρκετά ευθυγραμμισμένα, οι κιονοειδή κόκκοι είναι επίσης ευθείες προκειμένου να

αναπτυχθούν κάθετα στο όριο των λιμών (Σχ.1.25a). Ωστόσο, δεδομένου ότι το *trailing* όριο σε μια ελλειπτικής μορφής λίμνη συγκόλλησης είναι κυρτό, οι κιονοειδή κόκκοι είναι επίσης κυρτοί προκειμένου να αναπτυχθούν κάθετα στο σύνορο της λίμνης (Σχ.1.25b).



Σχ.1.25 Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης σε κιονοειδή δομή σε μέταλλο συγκόλλησης:

(a,b)συμμετρική δομή, (c,d) με αξονικούς κόκκους

### ΠΙΝΑΚΑΣ 1.5 Κατευθύνσεις εύκολης ανάπτυξης

Κρυσταλλική δομή	Κατεύθυνση εύκολης ανάπτυξης	Παραδείγματα
FCC	$\langle 100 \rangle$	Κράματα αλουμινίου, ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες
BCC	$\langle 100 \rangle$	Ανθρακούχοι χάλυβες, φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες
HCP	$\langle 10\bar{1}0 \rangle$	Τιτάνιο, μαγνήσιο
BCT	$\langle 110 \rangle$	Κασσίτερος

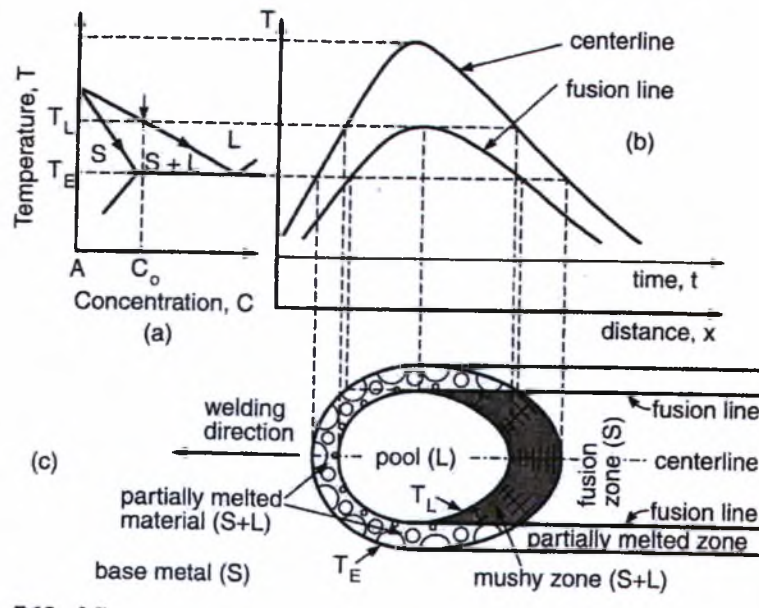
Πηγή: Chalmers

Οι αξονικοί (*axial*) κόκκοι μπορεί επίσης να εμφανίζονται στη ζώνη τήξης. Οι κόκκοι αυτοί, μπορούν να έχουν σημείο εκκίνησης το όριο τήξης στην αρχή της συγκόλλησης και να συνεχίσουν κατά μήκος της, εμποδίζοντας τους κιονοειδή κόκκους να αναπτυχθούν στο εσωτερικό των γραμμών τήξεως. Όπως άλλοι κιονοειδή κόκκοι, αυτοί οι αξονικοί κόκκοι τείνουν επίσης να αναπτυχθούν κάθετα στο όριο της λίμνης συγκόλλησης. Σε μια λίμνη με μορφή σταγόνας, μόνο μια μικρή περιοχή του *trailing* συνόρου της λίμνης, μπορεί να είναι κάθετη στην αξονική κατεύθυνση, και η περιοχή των αξονικών κόκκων είναι μάλλον στενή (Σχ.1.25c). Σε μια ελλειπτική λίμνη συγκόλλησης, εντούτοις, ένα σημαντικά μεγαλύτερο τμήμα του *trailing* συνόρου της λίμνης μπορεί να είναι κάθετο στην αξονική κατεύθυνση και η περιοχή των αξονικών κόκκων μπορεί έτσι να είναι σημαντικά ευρύτερη (Σχ.1.25d). Οι αξονικοί κόκκοι έχουν εντοπιστεί σε κράματα αργιλίου, σε ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες και σε κράματα ιριδίου.

## 1.7.2 Μηχανισμοί πυρήνωσης του μετάλλου συγκόλλησης

Για να γίνουν κατανοητοί οι μηχανισμοί πυρήνωσης, είναι ανάγκη πρώτα να γίνει αναφορά στη μικροδομή του υλικού γύρω από τη λίμνη συγκόλλησης.

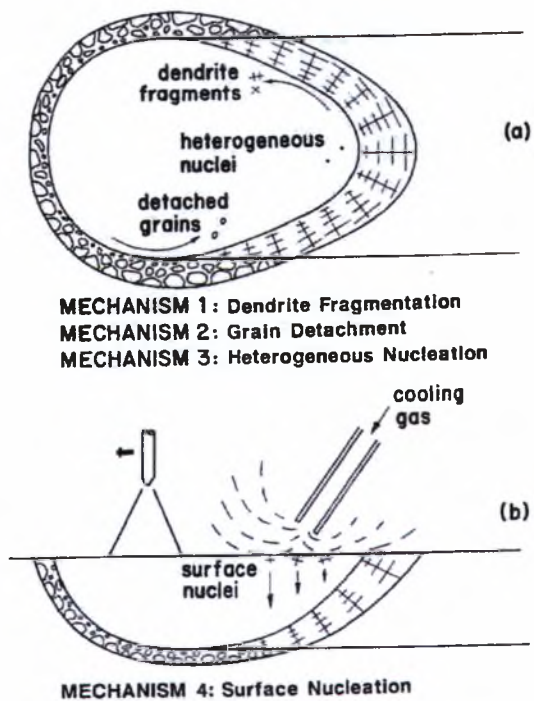
Στο Σχ.1.26 φαίνεται η μικροδομή του υλικού γύρω από τη λίμνη συγκόλλησης σε κράμα μετάλλου, οι θερμοί κύκλοι στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης καθώς και η γραμμή τήξης στο διάγραμμα φάσεων. Το ευθηκτοειδές διάγραμμα φάσεων είναι κοινό σε όλα τα κράματα αλουμινίου. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η γκριζα ζώνη πίσω από το απόστατο τμήμα των ορίων της λίμνης, περιλαμβάνει δενδρίτες (S) και μεσοδενδριτικό υγρό (L). Το μερικώς τηγμένο υλικό γύρω από το κύριο τμήμα των συνόρων της λίμνης, περιέχει στερεά σωματίδια (S) που είναι μερικώς τηγμένα και το υγρό στο εσωτερικό των κόκκων.



Σχ.1.26 Η μικροδομή γύρω από τα όρια της λίμνης συγκόλλησης: (a)διάγραμμα φάσεων,

(b) θερμοί κύκλοι, (c) μικροδομή του στερεού και του υγρού τμήματος γύρω από τη λίμνη συγκόλλησης

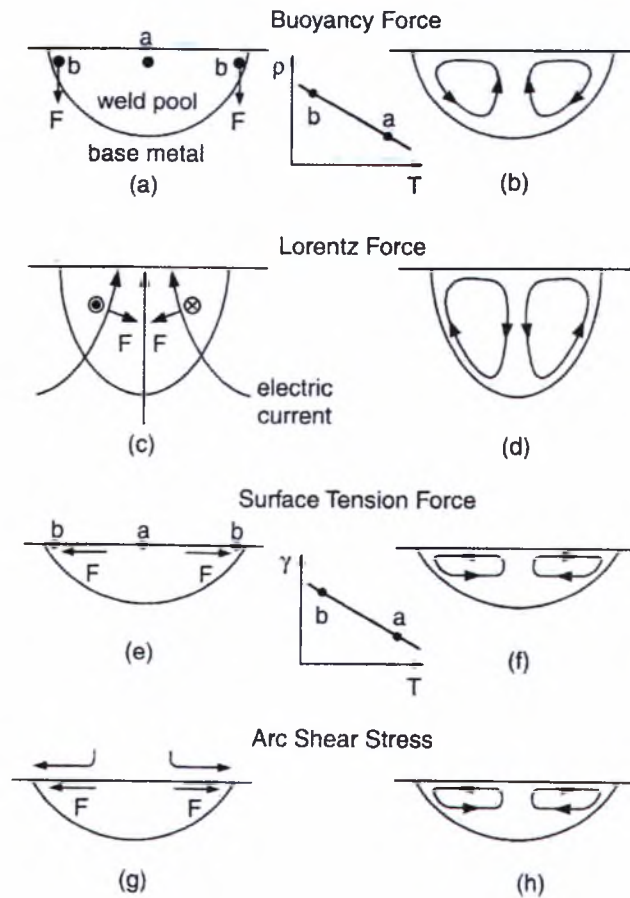
Το Σχ.1.26α παρουσιάζει τρεις πιθανούς μηχανισμούς για πυρήνωση νέων κόκκων κατά τη συγκόλληση: θρυμματισμός δενδριτών, αποκόλληση κόκκων και ετερογενής πυρήνωση. Στο Σχ.1.26b φαίνεται ο τέταρτος μηχανισμός πυρήνωσης, την επιφανειακή πυρήνωση.



Σχ. 1.27 Μηχανισμοί πυρηνώσεως γύρω κατά τη συγκόλληση: (a) κάτωψη (b) πλάγια όψη

### 1.7.3 Κινητήριες δυνάμεις στη ροή του ρευστού στη λίμνη συγκόλλησης

Οι κινητήριες δυνάμεις στη ροή του ρευστού στη λίμνη συγκόλλησης περιλαμβάνουν την άνοση, τη δύναμη Lorentz, τη διατμητική τάση που παράγονται από την κλίση επιφανειακής τάσης στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης καθώς και τη διατμητική τάση που ενεργεί στην επιφάνεια της λίμνης από το πλάσμα του τόξου. Η πίεση που προκαλούν τα τόξα, είναι μια άλλη δύναμη που ενεργεί στην επιφάνεια της λίμνης αλλά η επίδρασή της στη ροή είναι μικρή, ειδικά κάτω από 200A, που συμβαίνει συνήθως στη μέθοδο GTAW. Οι κινητήριες δυνάμεις για τη ροή του ρευστού στη λίμνη συγκόλλησης (Σχ. 1.28) εξηγούνται παρακάτω.



Σχ. 1.28 Κινητήριες δυνάμεις στη μετάδοση θερμότητας μέσα στη λίμνη συγκόλλησης: (α, β) άνωση, (c, d) δύναμη Lorentz, (e, f) διατμητική τάση που προκαλείται τη κλίση της επιφανειακής τάσης, (g, h) διατμητική τάση που προκαλείται από το πλάσμα του τόξου

### A. Άνωση

Η πυκνότητα του υγρού μετάλλου ( $\rho$ ) μειώνεται καθώς η θερμοκρασία ( $T$ ) αυξάνεται. Επειδή η πηγή θερμότητας εντοπίζεται πάνω από το κέντρο της επιφάνειας της λίμνης συγκόλλησης, το υγρό μέταλλο είναι θερμότερο στο σημείο  $\alpha$  και ψυχρότερο στο σημείο  $\beta$ . Το σημείο  $\beta$  είναι κοντά στο όριο της λίμνης, όπου η θερμοκρασία είναι η χαμηλότερη στο σημείο τήξης. Όπως φαίνεται στο Σχ. 1.28α, η βαρύτητα αναγκάζει το βαρύτερο υγρό μέταλλο στο σημείο  $\beta$  να βυθιστεί. Συνεπώς, το υγρό μέταλλο πέφτει κατά μήκος του ορίου της λίμνης και αυξάνεται κατά μήκος του άξονα της (Σχ. 1.28β).

### B. Δύναμη Lorentz

Η συγκόλληση με τη μέθοδο GTAW με αρνητικό ηλεκτρόδιο συνεχούς ρεύματος (DC), αναφέρεται ως παράδειγμα. Το ηλεκτρικό ρεύμα στο κομμάτι προς κατεργασία συγκλίνει προς το ηλεκτρόδιο βολφραμίου (που δεν είναι ορατό) και ως εκ τούτου κοντά στο κέντρο της επιφάνειας της λίμνης. Αυτό το συγκλίνων ηλεκτρικό πεδίο, μαζί με το μαγνητικό πεδίο που προκαλεί, είναι η αιτία για την εμφάνιση της δύναμης Lorentz που έχει κατεύθυνση είτε προς τα κάτω είτε είναι

εσωτερική, (Σχ.1.28c). Υπό αυτήν τη μορφή, το υγρό μέταλλο ωθείται προς τα κάτω κατά μήκος του άξονα της λίμνης και αυξάνεται κατά μήκος του ορίου της (Σχ.1.28d). Η περιοχή στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης, όπου διαπερνά το ηλεκτρικό ρεύμα, καλείται άνοδος ( $pb^2$ , όπου το  $b$  είναι η αποτελεσματική ακτίνα της διανομής της πυκνότητας του ρεύματος). Όσο μικρότερη η άνοδος, τόσο περισσότερο το ηλεκτρικό πεδίο συγκλίνει προς το κομμάτι προς κατεργασία (μέσω της λίμνης συγκόλλησης) στην άνοδο, και ως εκ τούτου τόσο αυξάνεται η δύναμη Lorentz για να ωθήσει το υγρό μέταλλο προς τα κάτω.

#### *Γ. Η κλίση της επιφανειακής τάσης προκαλεί διατμητική τάση*

Με την απουσία του παράγοντα ενός ενεργού παράγοντα επιφανείας, η διατμητική τάση ( $\gamma$ ) του υγρού μετάλλου μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία ( $T$ ), δηλαδή  $\partial\gamma/\partial T < 0$ . Όπως φαίνεται στο Σχ.1.28e, το θερμότερο υγρό μέταλλο με μικρή επιφανειακή τάση στο σημείο  $\alpha$  απορροφάται εξωτερικά από το ψυχρότερο υγρό μέταλλο με μεγαλύτερη επιφανειακή τάση στο σημείο  $\beta$ . Με άλλα λόγια μια εξωτερική διατμητική τάση προκαλείται στην επιφάνεια της λίμνης από την κλίση της επιφανειακής τάσης κατά μήκος της λίμνης συγκόλλησης. Αυτό αναγκάζει το υγρό μέταλλο για να ρεύσει από το κέντρο της επιφάνειας της λίμνης στην άκρη και να επιστρέψει κάτω από την επιφάνεια της λίμνης (Σχ.1.28f). Η μετάδοση θερμότητας που προκαλείται από την διατμητική τάση, καλείται επίσης την thermocapillary μετάδοση ή μετάδοση Marangoni.

#### *Δ. Διατμητική τάση που προκαλείται από το ρεύμα του ιονισμένου πλάσματος*

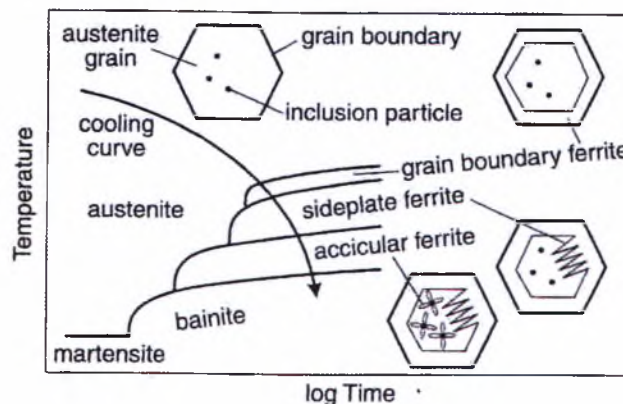
Το πλάσμα που κινείται εξωτερικά σε υψηλές ταχύτητες κατά μήκος της επιφάνειας της λίμνης μπορεί να ασκήσει μια εξωτερική διατμητική τάση στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης (Σχ.1.28g). Αυτή η διατμητική τάση αναγκάζει το υγρό μέταλλο να ρέει από το κέντρο της επιφάνειας της λίμνης στην άκρη της και να επιστρέψει κάτω από την επιφάνεια της (Σχ.1.28h).

### 1.7.4 Ανάπτυξη μικροδομής

Οι δενδρίτες ή οι κυψέλες στο μέταλλο συγκόλλησης δεν πάντα ευδιάκριτοι. Καταρχήν, σημαντικός διαχωρισμός του διαλύματος δεν πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης εάν η αναλογία διαχωρισμού  $k$  είναι κοντά στο 1. Ο μικροδιαχωρισμός (*microsegregation*), ιδιαίτερα ο διαχωρισμός του διαλύματος σε μεσοδενδριτικές (*interdendritic*) ή σε μεσοκυψελοειδή (*intercellular*) περιοχές, στο τελικό μέταλλο συγκόλλησης, μπορεί να είναι μην αρκεί για να φανερωθεί η δενδριτική ή κυψελοειδή (*cellular*) δομή στο εσωτερικό του κόκκου ακόμα κι αν η

δομή του κόκκου μπορεί να είναι αρκετά ευδιάκριτη. Έπειτα, εάν διάχυση στη στερεά κατάσταση, πραγματοποιείται γρήγορα, ο μικροδιαχωρισμός είτε είναι ασήμαντος είτε ομογενοποιείται γρήγορα, και οι δενδρίτες ή οι κυψέλες στο τελικό μέταλλο συγκόλλησης δεν είναι ευδιάκριτα. Τέλος, οι μετασχηματισμοί φάσεων μετά τη στερεοποίηση, εάν συμβούν, μπορούν να παράγουν νέες μικροδομές στο εσωτερικό των κόκκων ή/και κατά μήκος των συνόρων των κόκκων και η δομή στο εσωτερικό των κόκκων (*subgrain*) στο μέταλλο συγκόλλησης να είναι σκοτεινή.

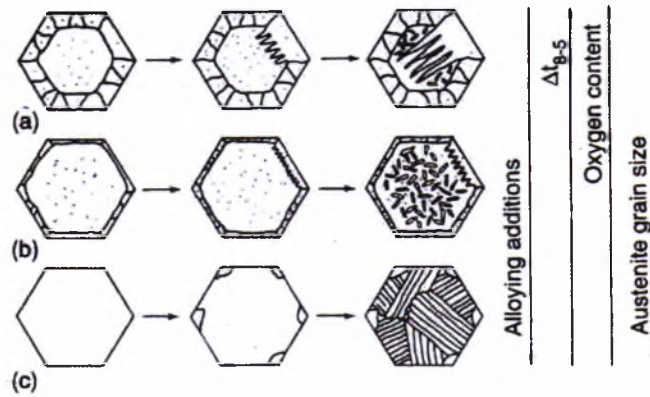
Διάφορα διαγράμματα CCT, σκιαγραφούνται σχηματικά για να εξηγήσουν την ανάπτυξη της μικροδομής των μετάλλων συγκόλλησης με χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα, χαμηλά κραματωμένους χάλυβες. Τα εξάγωνα αντιπροσωπεύουν τα εγκάρσια διαγώνια τμήματα των κιονοειδών κόκκων ωστενίτη στο μέταλλο συγκόλλησης. Δεδομένου ότι ο ωστενίτης ( $\gamma$ ) ψύχεται κάτω από υψηλή θερμοκρασία, ο φερρίτης ( $\alpha$ ) πυρηνώνεται στα σύνορα των κόκκων και αναπτύσσεται στο εσωτερικό (Σχ.1.29). Ο φερρίτης στα σύνορα των κόκκων καλείται επίσης "περικρυσταλλικός", δηλαδή είναι φερρίτης χωρίς τη συνηθισμένη εδροτομημένη μορφή που απεικονίζει την εσωτερική κρυσταλλική δομή του.



Σχ.1.29 Διάγραμμα CCT για το μέταλλο συγκόλλησης του χαμηλά κραματωμένου χάλυβα

#### 1.7.4.1 Ανάπτυξη μικροδομής

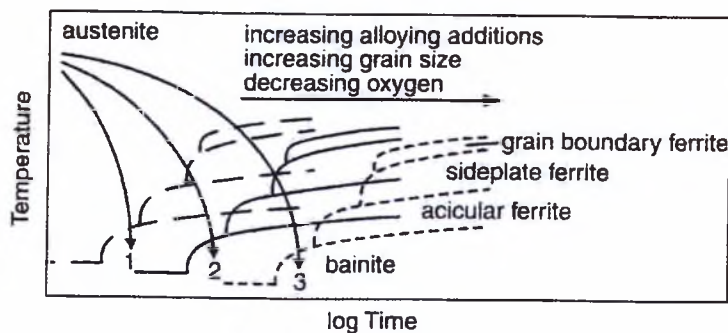
Ο Bhadeshia και Suensson παρουσίασαν στο Σχ.1.30 την επίδραση διάφορων παραγόντων στην ανάπτυξη της μικροδομής του μετάλλου συγκόλλησης, δηλαδή η σύνθεση των μετάλλων συγκόλλησης, ο χρόνος ψύξης από 800 στους 500°C ( $\Delta t_{8-5}$ ), η περιεκτικότητα σε οξυγόνο των μετάλλων συγκόλλησης, και το μέγεθος των κόκκων ωστενίτη. Τα κάθετα βέλη δείχνουν τις κατευθύνσεις στις οποίες οι παράγοντες αυτοί αυξάνουν την αντοχή. Αυτό θα εξηγηθεί με τη βοήθεια των καμπυλών CCT.



Σχ. 1.30 Το σκίτσο δείχνει τα κραματικά στοιχεία, με χρόνο ψύξης από 800 στους 500 °C, περιεκτικότητα σε οξυγόνο και μέγεθος κόκκου ωστενίτη.

### A. Χρόνος ψύξης

Σύμφωνα με τις αριστερές καμπύλες στο διάγραμμα CCT (Σχ.1.31) και δεδομένου ότι ο ρυθμός ψύξης μειώνεται (αύξηση  $\Delta t_{8-5}$ ) από την καμπύλη 1 στην καμπύλη 2 και την καμπύλη 3, και η δομή του προϊόντος μετασχηματισμού μπορεί να αλλάξει από μπαινιτική (Σχ.1.30c) κυρίως σε βελονοειδές φερρίτη (Σχ.1.30b) στα διαφασικά του όρια με τον φερρίτη Widmanstatten (Σχ.1.30a).



Σχ.1.31 Επίδραση των κραματικών στοιχείων, του μεγέθους των κόκκων, και παρουσία οξυγόνου στα διαγράμματα CCT για τα μέταλλα συγκόλλησης σε χαμηλά κραματομένους χάλυβες

### B. Κραματικά στοιχεία

Μια αύξηση στη προσθήκη κραματικών στοιχείων (αύξηση της σκληρότητας), θα προκαλέσει μετατόπιση στις καμπύλες CCT προς μεγαλύτερους χρόνους και μικρότερες θερμοκρασίες. Σύμφωνα με την καμπύλη 3 (Σχ.1.31), το προϊόν μετασχηματισμού μπορεί να μεταβληθεί από τα διαφασικά όρια και το φερρίτη Widmanstatten (αριστερές καμπύλες CCT) σε κυρίως βελονοειδές φερρίτη (μέσες καμπύλες CCT) και μπαινίτη (δεξιές καμπύλες CCT) (Σχ.1.30).



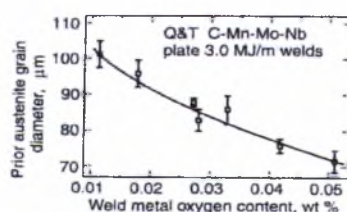
### Γ. Μέγεθος κόκκων

Παρόμοια την επίδραση των κραματικών στοιχείων, μια αύξηση στο μέγεθος κόκκων του ωστενίτη (μικρότερη περιοχή συνόρων των κόκκων για τη πυρήνωση του φερρίτη) θα μετατοπίσει επίσης τις καμπύλες CCT προς μεγαλύτερους χρόνους και χαμηλότερες θερμοκρασίες.

### Δ. Περιεκτικότητα σε οξυγόνο του μετάλλου συγκόλλησης

Η επίδραση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο των μετάλλων συγκόλλησης στη μικροδομή τους εξηγείται ως ακολούθως. Κατ' αρχάς (Σχ.1.32), ο Fleck και οι συνεργάτες του παρατήρησαν ότι στις συγκολλήσεις βυθιζόμενων βολταϊκών τόξων το μέγεθος των κόκκων ωστενίτη πριν από το μετασχηματισμό μειώνεται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε οξυγόνο στα μέταλλα συγκόλλησης. Οι Liu και Olson παρατήρησαν ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο των μετάλλων συγκόλλησης αύξησε το κλάσμα του όγκου των οπών και μείωσε το μέσο μέγεθος των οπών. Στη πραγματικότητα εντοπίστηκε ένας μεγάλος αριθμός οπών μικρότερου μεγέθους, με διάμετρο λιγότερο από 0.1μm. Δεδομένου ότι τα λεπτόκοκκα δευτερογενή σωματίδια αποτελούν εμπόδια στην αύξηση των κόκκων, η αύξηση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο επιβάλλεται να μειώσει το προϋπάρχον μέγεθος του κόκκου ωστενίτη.

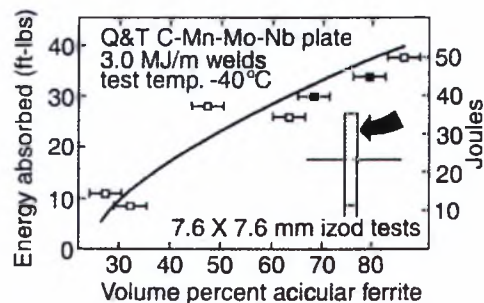
Δεύτερον, μεγαλύτερα εγκλείσματα, που ευνοούνται από τη χαμηλή σε περιεκτικότητα οξυγόνου στα μέταλλα συγκόλλησης, μπορούν να ενεργήσουν όπως οι περιοχές που ευνοούν την πυρήνωση του βελονοειδή φερρίτη. Τα καταλληλότερα εγκλείσματα εμφανίζονται να είναι μεγέθους 0.2-2.0μm και με βέλτιστο μέσο μέγεθος περίπου 0.4μm. Αφ' ετέρου, πολλά μικρά οξείδια (0.2μm) μπορεί να παραχθούν εάν η περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι πάρα πολύ υψηλή (> 300ppm). Αυτά τα εγκλείσματα, ωστόσο είναι πολύ μικρά για αποτελέσουν αποτελεσματικούς πυρήνες για βελονοειδή φερρίτη, μειώνουν το μέγεθος του κόκκου και εξασφαλίζουν έτσι μεγάλη περιοχή διαφασικών ορίων για πυρήνωση των ορίων κόκκων του φερρίτη.



Σχ.1.32 Επίδραση της διαμέτρου του κόκκου ως μηχανισμός της περιεκτικότητας οξυγόνου στο μέταλλο συγκόλλησης στις συγκολλήσεις βυθιζόμενου τόξου.

### 1.7.4.2 Σκληρότητα των μετάλλων συγκόλλησης

Ο βελονοειδής φερρίτης είναι επιθυμητός, επειδή βελτιώνει την σκληρότητα του μετάλλου συγκόλλησης. Ο Dallam και οι συνεργάτες του (Σχ. 1.33), παρατήρησαν ότι η σκληρότητα στα μέταλλα συγκόλλησης με εγκοπή μορφής V στις συγκολλήσεις βυθιζόμενων βολταϊκών τόξων, αυξάνεται με την ανάπτυξη του όγκου του βελονοειδή φερρίτη στο μέταλλο συγκόλλησης. Η δομή στο εσωτερικό των κόκκων του βελονοειδή φερρίτη, σε συνδυασμό με το λεπτό μέγεθος του κόκκου, παρέχει τη μέγιστη αντίσταση στη διάδοση ρωγμών λόγω οπών. Ο σχηματισμός των συνόρων κόκκων φερρίτη, των πλευρικών πλακιδίων φερρίτη ή του άνω μαινίτη είναι καταστρεπτικός για την σκληρότητα των μετάλλων συγκόλλησης, δεδομένου ότι αυτές οι μικροδομές διευκολύνουν τη διάδοση ρωγμών.



Σχ. 1.33 Υπομέγεθος Charpy V-notch τιμών σκληρότητας ως μηχανισμός του όγκου του βελονοειδή φερρίτη στις συγκολλήσεις βυθιζόμενου τόξου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Πειραματικές Διαδικασίες

### 2.1 Δοκιμή Εφελκυσμού

#### 2.1.1 Θεωρητική βάση της δοκιμής εφελκυσμού

Η μονοαξονική δοκιμή εφελκυσμού είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μηχανικές δοκιμές. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της δίνει στοιχεία για την ελαστική και την πλαστική παραμόρφωση όπως είναι το μέτρο του Young, ο λόγος Poisson, η αντοχή σε εφελκυσμό, το όριο διαρροής, η επιμήκυνση και η ολκιμότητα. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ποιότητας στην παραγωγή, για κατάταξη της απόδοσης των δομικών υλικών, για εκτίμηση των νέων κραμάτων σε σχέση με τις στατικές απαιτήσεις του σχεδιασμού.

Συχνά πιστοποιήσεις ή αναφορές δίνουν τις τιμές των ιδιοτήτων του εφελκυσμού των υλικών χωρίς λεπτομερείς πληροφορίες. Αυτές οι πληροφορίες για τον εφελκυσμό γίνονται αποδεκτές ως ακριβείς & αξιόπιστες. Ωστόσο, έμπειροι τεχνολόγοι γνωρίζουν ότι μια λεπτομερή περιγραφή της δοκιμής εφελκυσμού, της προετοιμασίας του δοκιμίου, του στησίματος της δοκιμής και όλης της διαδικασίας, είναι απαραίτητες για να εκτιμηθεί η αξιοπιστία και η χρησιμότητα αυτών των πληροφοριών.

Οι πιστοποιημένες δοκιμές εφελκυσμού έχουν διαμορφωθεί σύμφωνα με τις οδηγίες του ASTM. Οι τυποποιημένες μέθοδοι του ASTM καθορίζουν σημαντικές λεπτομέρειες σχετικά με την επιλογή του δοκιμίου, το μέγεθος, το σχήμα, την προετοιμασία και την διαδικασία της δοκιμής και την ανάλυση των πληροφοριών.

Γενικά κατά την διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού, το δοκίμιο υφίσταται συνεχόμενο και αυξανόμενο μονοαξονικό φορτίο και συγχρόνως γίνονται παρατηρήσεις σχετικά με την επιμήκυνση του δοκιμίου. Καταγράφονται οι διαστάσεις του δοκιμίου πριν και μετά τη δοκιμή. Αυτές οι πληροφορίες αναλύονται για να υπολογιστούν η τάση διαρροής, η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού, η επιμήκυνση & η μείωση της διατομής.

Η τελική επιμήκυνση  $\epsilon_f$  και η μείωση της διατομής στη θραύση  $q$ , εκφράζονται ως ποσοστά. Και οι δυο ιδιότητες παίρνουν τιμές μετά την θραύση, συναρμολογώντας το δοκίμιο & παίρνοντας μετρήσεις από το τελικό μήκος  $L_f$  & την τελική διατομή  $A_f$ . Οι τιμές τους δίνονται από τους εξής σχέσεις:

$$\varepsilon_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.1)$$

$$q = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (2.2)$$

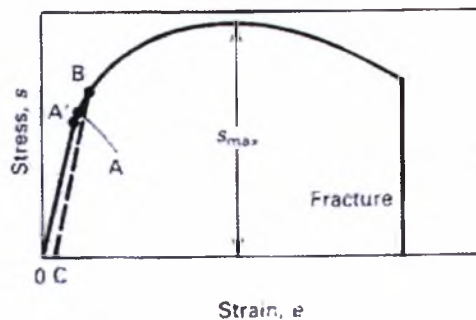
Επειδή εκτιμάται ότι η θραύση, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης, θα εντοπίζεται στη περιοχή του λαιμού, του δοκιμίου εφελκυσμού, η τιμή της  $\varepsilon_f$  θα εξαρτάται από το αρχικό μήκος  $L_0$ , πάνω από το οποίο πάρθηκε η μέτρηση. Για αυτό το λόγο το αρχικό μήκος καθορίζεται από τις προδιαγραφές. Εάν η θραύση εντοπιστεί εκτός της περιοχής αυτής, τότε η δοκιμή απορρίπτεται. Στη γενική περίπτωση ισχύει ότι όσο μικρότερο είναι το αρχικό μήκος τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συνεισφορά του λαιμού στην ολική επιμήκυνση μέχρι την μέγιστη τιμή της  $\varepsilon_f$ .

Η μείωση στη διατομή αποτελεί μέτρο της παραμόρφωσης που απαιτείται για να προκληθεί θραύση και η κύρια προσφορά του πηγάζει από την διεργασία του λαιμού. Εξαιτίας της πολύπλοκης κατάστασης τάσεων που επικρατεί στο λαιμό, οι τιμές από την μείωση στη διατομή εξαρτώνται από την γεωμετρία του δοκιμίου, και από την συμπεριφορά του κατά την παραμόρφωση και δε θα πρέπει να θεωρούνται ως πραγματικές μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο η μείωση στη διατομή αποτελεί τον πιο ευαίσθητο δομικό παράγοντα ολκιμότητας και για αυτό είναι χρήσιμο να εντοπίζονται ποιοτικές αλλαγές στο υλικό.



Πρέπει να σημειωθεί ότι στη δοκιμή εφελκυσμού υπάρχουν τρία κριτήρια για την έναρξη της διαρροής :

1. Το ονομαστικό όριο ελαστικότητας
2. Το πραγματικό όριο διαρροής
3. Η τάση διαρροής



Σχ. 2.1 Τοπική καμπύλη εφελκυσμού τάσης – παραμόρφωσης για ελατό μέταλλο

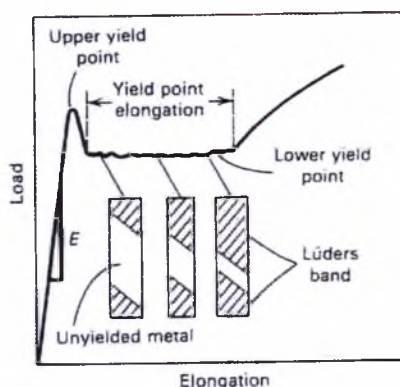
Το ονομαστικό όριο διαρροής, σημείο A (Σχ.2.1), αντικατοπτρίζει την μέγιστη τάση που το υλικό είναι ικανό να αντέξει χωρίς μετρήσιμες μόνιμες παραμένουσες τάσεις, οι οποίες θα είχαν απομείνει μετά την αφαίρεση του φορτίου. Αυξάνοντας την ευαισθησία της μέτρησης της έντασης, η τιμή του ονομαστικού ορίου διαρροής μειώνεται μέχρι να εξισωθεί με το πραγματικό όριο διαρροής. Το ονομαστικό όριο διαρροής είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό όριο διαρροής με ευαισθησία  $10^{-4}$ . Ο προσδιορισμός του ονομαστικού ορίου διαρροής απαιτεί μια επίπονη διαδικασία φόρτισης – αποφόρτισης. Για αυτό το λόγο αντικαθιστούμε το ονομαστικό όριο διαρροής με το πραγματικό όριο διαρροής.

Το πραγματικό όριο διαρροής, σημείο A', είναι η υψηλότερη τιμή της τάσης στην οποία η τάση είναι ανάλογη της έντασης. Καθορίζεται από την κλίση της καμπύλης  $\sigma - \epsilon$ .

Το όριο ροής, σημείο B (Σχ.2.1), είναι η τάση που απαιτείται για να προκαλέσει μικρή πλαστική παραμόρφωση. Ο προσδιορισμός αυτής της τιμής γίνεται ως εξής: the offset yield strength καθορίζεται από την αντίστοιχη τάση στη διατομή της καμπύλης  $\sigma - \epsilon$  και μια γραμμή παράλληλη στο ελαστικό μέρος της μετατοπισμένης καμπύλης από καθορισμένη ένταση.

Είναι ανάγκη να σημειωθεί ότι η αντοχή σε εφελκυσμό είναι το κύριο ζητούμενο από τη δοκιμή εφελκυσμού. Όμως η τιμή του δεν είναι ιδιαίτερης σημασίας σε σχέση με την αντοχή του μετάλλου. Για όλκιμα μέταλλα, η αντοχή σε εφελκυσμό θεωρείται ως μέτρο του μέγιστου φορτίου που το δοκίμιο είναι ικανό να αντέξει όταν υποβάλλεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

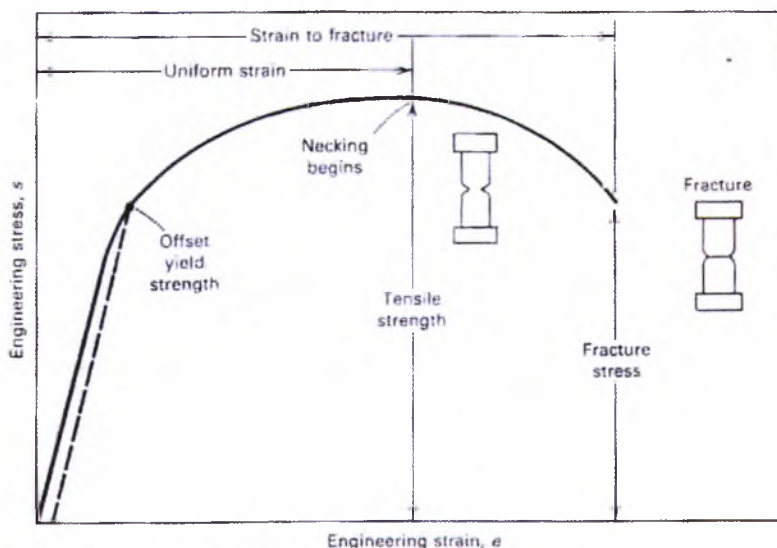
Σήμερα θεωρείται πιο λογικό να βασίζουμε το σχεδιασμό των όλκιμων υλικών στο όριο διαρροής, όμως λόγω της μακρόχρονης χρήσης της αντοχής σε εφελκυσμό και επειδή είναι πιο εύκολο να την προσδιοριστεί συνεχίζουμε να χρησιμοποιούμε την τιμή της για πιστοποίηση και για έλεγχο ποιότητας. Για ψαθυρά υλικά το όριο διαρροής αποτελεί βασικό κριτήριο για το σχεδιασμό.



Σχ.2.2 Τυπικό όριο διαρροής στη συμπεριφορά χαμηλά κραματωμένου ανθρακούχο χάλυβα

## 2.1.2 Διάγραμμα πραγματικών τάσεων – παραμορφώσεων

Για να υπολογίσουμε την αντοχή σε θραύση του υλικού είναι ανάγκη να σχεδιαστούν τα διαγράμματα ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης:



Σχ.2.3 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης

Το Σχ.2.3 υποδεικνύει ότι στην ελαστική περιοχή η τάση είναι γραμμικά συμμετρική με την παραμόρφωση. Όταν η τάση υπερβεί τη τιμή που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής, τότε το δοκίμιο αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Εάν το φορτίο στη συνέχεια μηδενιστεί, τότε το δοκίμιο θα παραμείνει μόνιμα παραμορφωμένο. Η τάση που απαιτείται για να παραχθεί συνεχή πλαστική παραμόρφωση, αυξάνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης. Ο όγκος του δοκιμίου (περιοχή×μήκος) παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης,  $A \cdot L = A_0 \cdot L_0$ , ενώ όσο επιμηκύνεται το δοκίμιο, η διατομή μειώνεται ομοιόμορφα στο αρχικό μήκος.

Τελικά, φτάνουμε σε ένα σημείο όπου η μείωση της διατομής είναι μεγαλύτερη από την αύξηση του φορτίου παραμόρφωσης, ανερχόμενο λόγω εργοσκληρυνσης. Αυτή η κατάσταση θα εμφανιστεί αρχικά σε σημείο του δοκιμίου, το οποίο είναι πιο αδύνατο από τα υπόλοιπα. Η υπόλοιπη πλαστική παραμόρφωση συγκεντρώνεται σε αυτή την περιοχή και το δοκίμιο εμφανίζει λαιμό ή λεπταίνει τοπικά. Επειδή η διατομή τώρα μειώνεται με ταχύτερο ρυθμό από ότι το φορτίο αυξάνεται από τη σκλήρυνση, τότε το πραγματικό φορτίο που απαιτείται για την παραμόρφωση του δοκιμίου, η τάση (Σχ.2.3) συνεχίζει να μειώνεται μέχρι να προκληθεί θραύση.

Γενικά το σχήμα και το μέγεθος της καμπύλης  $\sigma - \varepsilon$  ενός μετάλλου, εξαρτάται από την χημική σύνθεση, την θερμική κατεργασία, την ιστορία της πλαστικής παραμόρφωσης, τον ρυθμό της έντασης, τη θερμοκρασία και το είδος της τάσης που επιβάλλεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Οι παράμετροι οι οποίοι περιγράφουν την καμπύλη  $\sigma - \varepsilon$  ενός μετάλλου είναι η αντοχή σε εφελκυσμό, το όριο διαρροής, η επί της εκατό επιμήκυνση και η μείωση στην διατομή. Οι πρώτοι δυο είναι παράγοντες αντοχής και οι άλλοι δυο υποδεικνύουν την ολκιμότητα.

Η ονομαστική καμπύλη  $\sigma - \varepsilon$  δεν δίνει τα πραγματικά αποτελέσματα της παραμόρφωσης του υλικού, διότι βασίζεται αποκλειστικά στις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου, ενώ αυτές μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Για να οδηγηθούμε στην πραγματική τιμή της θραύσης χρειάζεται να σχεδιασθούν τα διαγράμματα πραγματικής τάσης – παραμόρφωσης. Η πραγματική τάση είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική διότι λαμβάνοντας υπόψη την αρχική και όχι την τελική διατομή, η οποία είναι μικρότερη, υποεκτιμούμε την τάση θραύσης.

Οι τύποι των ονομαστικών και πραγματικών τάσεων και παραμόρφωσης είναι διαφορετικοί και είναι οι ακόλουθοι:

**Ονομαστική Τάση:**  $\sigma_n = \frac{F}{A_0}$  (2.3)

**Ονομαστική Παραμόρφωση:**  $\varepsilon_n = \frac{L - L_0}{L_0}$  (2.4)

**Πραγματική Τάση:**  $\sigma = \frac{F}{A}$  (2.5)

**Πραγματική Παραμόρφωση:**  $\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$  (2.6)

Όπου:

A: τελική διατομή του δοκιμίου

A<sub>0</sub>: αρχική διατομή του δοκιμίου

L: τελικό μήκος του δοκιμίου

L<sub>0</sub>: αρχικό μήκος του δοκιμίου

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ισχύουν οι σχέσεις:

$$\varepsilon = \ln(\varepsilon_n + 1) \quad (2.7) \quad \text{και} \quad \sigma = \sigma_n \cdot (\varepsilon_n + 1) \quad (2.8)$$

Από τις σχέσεις (2.7) και (2.8) προκύπτει το πραγματικό διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$ . Η τελική διατομή προκύπτει μετρώντας τη μικρότερη διατομή ή τις μικρότερες πλευρές –ανάλογα με το σχήμα– μετά τη δοκιμή εφελκυσμού. Οι τύποι που καταλήξαμε ισχύουν μόνο μέχρι την αντοχή εφελκυσμού  $\sigma_{UTS}$ .

Με τη χρήση της μεθόδου Mc Gregor, κατά τη διάρκεια του πειράματος, μετρώνται το μέγιστο φορτίο θραύσης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι το φορτίο το οποίο εφαρμόζεται μετά τη δημιουργία του λαιμού, παραμένει σταθερό και ίσο με το φορτίο θραύσης. Έτσι ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$\sigma_{\pi i} = \frac{P_M}{A_0} \quad (2.9) \quad \text{και} \quad \epsilon = l n \frac{A_0}{A} \quad (2.10)$$

Όπου  $P_M$  : μέγιστο φορτίο και  $P_E$  : φορτίο θραύσης

Το μέγιστο φορτίο είναι εκείνο όπου δημιουργείται ο λαιμός:

$$P_M = \sigma_{UTS} \cdot A_0 \quad (2.11)$$

Επομένως η τάση θραύσης δίνεται ως εξής:

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_M}{A} \quad (2.12)$$

Η μέθοδος αυτή έχει ένα βασικό μειονέκτημα. Η εφαπτομένη της καμπύλης στο σημείο σχηματισμού του λαιμού δεν ικανοποιεί τη συνθήκη  $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \tan \alpha \neq \sigma$ .

Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε άλλη μέθοδο. Από το ονομαστικό διάγραμμα μετράμε τη τάση θραύσης, το οποίο είναι το τελευταίο σημείο του διαγράμματος, από όπου υπολογίζουμε το φορτίο θραύσης.

## 2.2 Δοκιμή Κάμψεως

Οι δοκιμές κάμψεως διενεργούνται για να καθορίσουν την ολκιμότητα ή την αντοχή ενός υλικού. Επίσης διαφέρουν πλήρως από άλλες μηχανικές δοκιμές δεδομένου ότι οι περισσότερες μηχανικές δοκιμές έχουν ως σκοπό να δώσουν σε ένα ποσοτικό αποτέλεσμα και έχουν ένα αντικειμενικό σημείο τερματισμού. Αντίθετα, οι



δοκιμές κάμψεως δίνουν ένα επιτυχόν ή όχι αποτέλεσμα με ένα υποκειμενικό σημείο τερματισμού όπου οι χειριστές αποφασίζουν σε μια επιφάνεια έχει δημιουργηθεί ράγισμα.

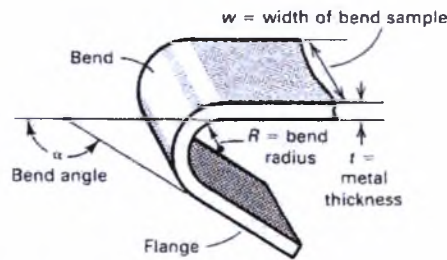
Η δοκιμή κάμψης δεδομένου αναπτύχθηκε ως μια επιθεώρηση του υλικού λόγω της ποιότητας της επιτυχής ή όχι δοκιμής καθώς για την απλότητα της μεθόδου και το χαμηλό κόστος της απαραίτητης κατεργασίας. Κατά συνέπεια η ανάπτυξη των μεθόδων κάμψης και των καμπτικών συσκευών πραγματοποιείται από τους χρήστες παρά από τους κατασκευαστές του εξοπλισμού.

Η διαδικασία της δοκιμής και η προετοιμασία των δοκιμίων εξελίχθηκαν χωρίς να δοθεί μεγάλη προσοχή στη λεπτομέρεια. Επομένως, παρά την αξία της δοκιμής και της μακροχρόνιας χρήσης του, υπάρχει ελάχιστη τυποποίηση.

Δοκιμές που καθορίζουν της καμπτική δύναμη των μετάλλων δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, αν και οι πληροφορίες από τέτοιες δοκιμές είναι σαφώς χρήσιμες. Λόγω της πολυπλοκότητας των σχέσεων τάσης-παραμόρφωσης στην κάμψη, η αντοχή κάμψης συνήθως δεν ποσοτικοποιείται πέρα από αυτήν που παρέχεται από την υπόθεση της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς

Στις μετωπικές συγκολλήσεις η δοκιμή πραγματοποιείται για να καθοριστεί η ολκιμότητα των ενώσεων που σχηματίζονται στη συγκόλληση τήξης. Η ολκιμότητα χαρακτηρίζεται από τη γωνία και την επιμήκυνση κάμψης. Με το δοκίμιο είναι δυνατό να καθοριστεί η συμπεριφορά της συγκόλλησης, η επιφάνεια τήξης, η ΘΕΖ και το βασικό μέταλλο σε διαφορετικές κατευθύνσεις της επιμήκυνσης.

Επίσης οι δοκιμές κάμψεως καθορίζουν τη μικρότερη ακτίνα στην οποία ένα δείγμα μπορεί να καμφθεί χωρίς ρωγμές που παρατηρούνται στην επιφάνεια (τάση). Αυτό το όριο διαμόρφωσης συνήθως καλείται ελάχιστη ακτίνα κάμψεως και εκφράζεται με πολλαπλάσιο του πάχους των δοκιμίων,  $t$ . Με μια ελάχιστη ακτίνα κάμψεων  $3t$  μπορεί να καμφθεί χωρίς ράγισμα μέσω μιας ακτίνας ίσης με τρεις φορές το πάχος των δειγμάτων. Συνεπάγεται ότι ένα υλικό με ελάχιστη ακτίνα κάμψεων  $1t$  έχει τη μεγαλύτερη ολκιμότητα από ένα υλικό με ελάχιστη ακτίνα κάμψεων  $5t$ . Εναλλακτικά, μπορεί να καθοριστεί η ακτίνα κάμψεως και η γωνία της κάμψης στην οποία δημιουργείται το ράγισμα. Στο Σχ.2.4 εικονίζονται η ακτίνα κάμψης, τη γωνία κάμψης και άλλες έννοιες που συνδέονται με τη δοκιμή κάμψης.

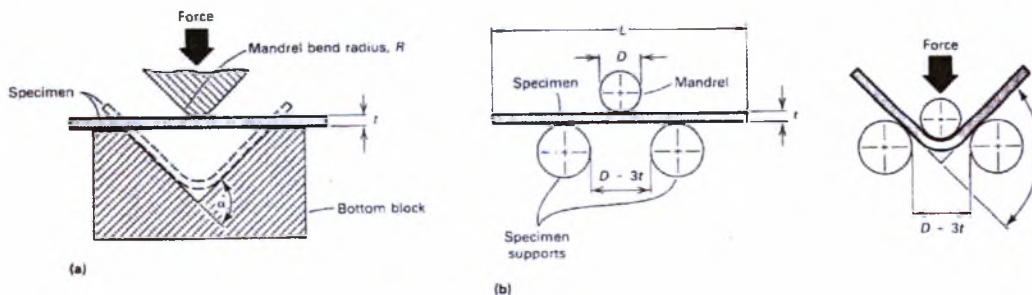


Σχ.2.4 Όροι που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή κάμψης

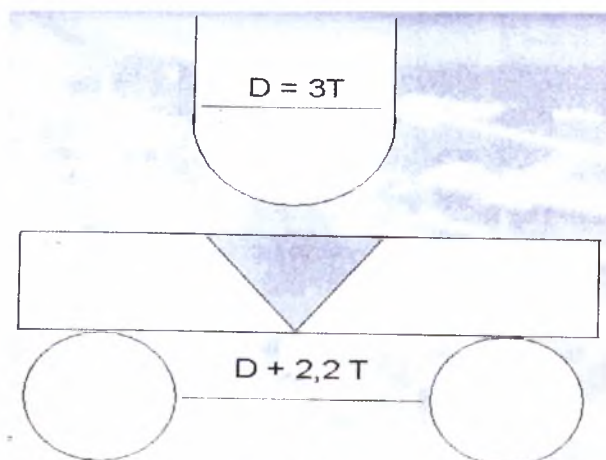
### 2.2.1 Μηχανές κάμψης

Οι συσκευές κάμψεως περιλαμβάνουν τύλιγμα (*wrap*), χτύπημα (*wipe*), εγκοπή V και συσκευές “ελαφριάς” κατεργασίας όπου αλλάζουν οι ακτίνες κάμψεως και μπορούν να κάμψουν τα δοκίμια σε διάφορες γωνίες. Οι καρφίτσες, τα ρουλεμάν, οι κύλινδροι, τα ακτινικά επίπεδα και οι μεγκένες πρέπει να έχουν μεγαλύτερο μήκος από το πλάτος των δειγμάτων και πρέπει αντέχουν και να μην κάμπτονται ώστε να μην παραμορφώνονται και να μην φθείρονται.

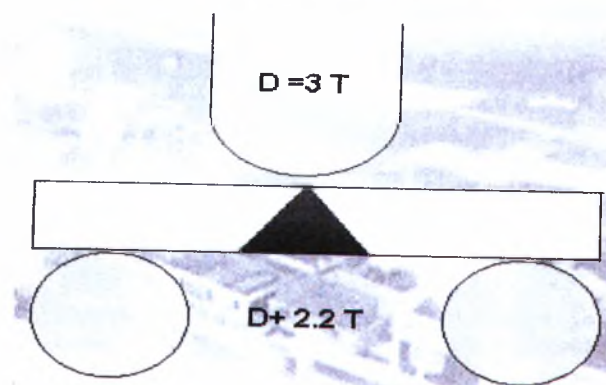
Οι μηχανές κάμψης V, αποτελούνται από ρουλεμάν και έναν κατώτατο επίπεδο (Σχ.4a) ή στηρίγματα των δοκιμίων (Σχ.4b). Τα δοκίμια στα στηρίγματα ή στο κατώτατο επίπεδο δεν συγκρατούνται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων επιλέγεται για να αναγκάσει το δείγμα να προσαρμοστεί στην ακτίνα του ρουλεμάν χωρίς ιδιαίτερη παρέμβαση. Η απόσταση αυτή καθορίζεται συνήθως από τη διάμετρο των ρουλεμάν,  $D$ , συν τρεις φορές το πάχος των δοκιμίων,  $t$ . Η δύναμη κάμψης εφαρμόζεται στο κέντρο του δείγματος. Το κατώτατο επίπεδο είναι συνήθως σε μορφή V ή U.



Σχ.2.5 Μηχανές κάμψης V



Σχ.2.6 Κάμψης ρίζας



Σχ.2.7 Κάμψη προσώπου

## 2.2.2 Προετοιμασία δοκιμίων

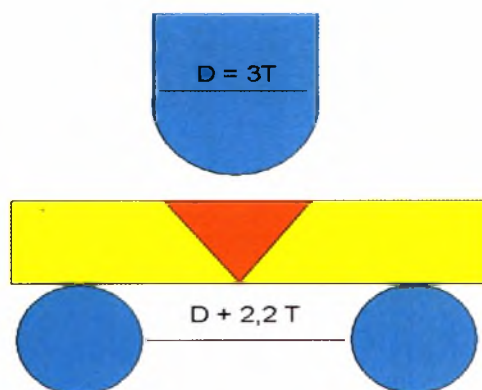
Τα δοκίμια ελασμάτων είναι συνήθως πλήρους πάχους και προετοιμάζονται με διάτμηση, κατεργασία, θερμική κοπή ή με κοπή με πλάσμα. Λεπτές λωρίδες και σωλήνες μπορούν να εξεταστούν με δοκίμια που κόβονται κατά μήκος. Για τις πολυγωνικές μορφές, είναι μερικές φορές απαραίτητο να γίνεται κατεργασία ή να γίνεται λείανση του επιπέδου και η ακατέργαστη επιφάνεια να τοποθετείται από την πλευρά της κάμψης που θα εφαρμοστεί η τάση. Οι τραχιές άκρες των κομμένων δειγμάτων μπορούν να αφαιρεθούν με αμμοβολή, με γέμισμα κ.λ.π. Οι άκρες των ορθογώνιων δοκιμίων μπορούν να στρογγυλευτούν σε μια ακτίνα μέχρι ένα δέκατο του πάχους των δειγμάτων. Η προετοιμασία των ακρών δεν απαιτείται για δείγματα με αναλογίες πλάτος-πάχους μεγαλύτερες από 8 ως 1, εκτός αν το ράγισμα ξεκινά από την άκρη κατά τη διάρκεια της κάμψης. Δεν πρέπει να παρουσιάζονται καθόλου εγκοπές εγκάρσια στην επιμήκη κατεύθυνση του δοκιμίου ως αποτέλεσμα της κατεργασίας.

Το δοκίμιο μπορεί να κατεργαστεί για να χωρέσει, εάν έχει μεγάλο πάχος για την μηχανή κάμψης ή εάν οι δυνάμεις κάμψης υπερβαίνουν την ικανότητα της

μηχανής. Η επιφάνεια τοποθετείται από την πλευρά της κάμψης που θα εφαρμοστεί η τάση. Εάν χρησιμοποιούνται δοκίμια με μειωμένο πάχος, οι διαστάσεις των δοκιμίων πρέπει να είναι σταθερές κατά τη διάρκεια της δοκιμής και να σημειωθούν στην αναφορά.

Τα δοκίμια με εγκοπή V μπορούν να έχουν οποιοδήποτε μήκος, αρκεί να είναι μεγαλύτερο από την απόσταση μεταξύ των ρουλεμάν (Σχ.2.8).

Οποιοσδήποτε προσανατολισμός στο επίπεδο του πλάτους και του μήκους των δοκιμίων μπορεί να δοκιμαστεί. Οι διαστάσεις των δοκιμίων πρέπει να είναι οι ίδιες για οποιοδήποτε προσανατολισμό της δοκιμής.



Σχ.2.8 Κάμψη.

### 2.2.3 Διαδικασία δοκιμής κάμψης

Τα δοκίμια και οι μηχανές πρέπει να επιθεωρηθούν προσεκτικά. Τα δείγματα με τα σημάδια, γρατσουνιές, υπερβολική κυρτότητα ή άλλες ατέλειες επιφάνειας πρέπει να απορριφθούν. Οι ακτίνες κάμψης, τα ρουλεμάν και οι στηρίξεις πρέπει να μην αφήνουν σημάδια ή άλλη ορατή ζημιά.

Στις δοκιμές κάμψεως, τα δοκίμια κάμπτονται σταδιακά σε μικρότερες ακτίνες ή σε μεγάλες γωνίες κάμψεως, έως ότου εμφανιστεί αστοχία ή ρωγμή στην κυρτή επιφάνεια. Οποιαδήποτε μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναγκάσει το δοκίμιο να αποκτήσει την επιθυμητή ακτίνα ή τη γωνία. Ωστόσο, πρέπει να κάμπτεται με αργούς ρυθμούς και σταθερά χωρίς σημαντική κίνηση πλευρικά. Κατά τη διάρκεια της κάμψης, το δείγμα μπορεί να αφαιρεθεί για να επιθεωρηθεί η κυρτή επιφάνεια για τις ρωγμές. Η γωνία κάμψης  $\alpha$  κυμαίνεται κοντά στις  $2^\circ$  όταν το δοκίμιο είναι αφόρτιστο. Αν η απαιτούμενη γωνία κάμψης είναι  $180^\circ$ , αυτό θα κριθεί αν θα φτάσει μέχρι εκεί κάτω από τις συνθήκες δοκιμής σύμφωνα με το Πρότυπο. Η δοκιμή είναι πλήρης όταν ικανοποιηθούν οι προδιαγραφές των υλικών.



Σχ.2.9 Γωνία κάμψης

## 2.3 Μεταλλογραφία

Κατά τη μελέτη κάθε συγκόλλησης μακροσκοπικά και μικροσκοπικά είναι απαραίτητη ώστε να χαρακτηριστεί η μορφή της συγκόλλησης, το σχήμα της, το μέγεθος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, το βάθος διείσδυσης και τα τυχόν σφάλματα έχουν δημιουργηθούν στις συγκολλήσεις. Η μεταλλογραφία, είναι μια επιθεώρηση που φανερώνει συγκεκριμένες φάσεις της ποιότητας και της δομής του χάλυβα. Για να συμβεί αυτό, τα δοκίμια υποβάλλονται σε διαβρωτική δράση η οποία δημιουργεί εγχάραξη και εξετάζοντάς την οπτικά ή μεγεθύνοντάς την.

### 2.3.1 Εκτέλεση μεταλλογραφιών

Η διαδικασία που ακολουθείται για την εκτέλεση των μεταλλογραφιών, περιγράφεται συνοπτικά στα ακόλουθα βήματα.

#### **ΒΗΜΑ 1:**

Η εξαγωγή και η κοπή των δοκιμίων από τους αγωγούς, τους οποίους μας παρέιχε η STALCO, πραγματοποιήθηκε στο μηχανουργείο.

#### **ΒΗΜΑ 2:**

Εγκιβωτίζουμε το δοκίμιο σε ρητίνη ώστε να στη συνέχεια να λειανθεί και να στίλβωθεί.

#### **ΒΗΜΑ 3:**

Πραγματοποιείται η λείανση του δοκιμίου ξεκινώντας από τον δίσκο των 80Grid και διαδοχικά πηγαίνουμε στα 120Grid , 320Grid, 500Grid, 800Grid και τελικά στα 1000Grid.

#### **ΒΗΜΑ 4:**

Αφού στεγνώσουμε το δοκίμιο ακολουθούμε την διαδικασία στίλβωσης κατά την οποία επιτυγχάνουμε το λεγόμενο 'καθρέπτισμα' της επιφάνειας, χωρίς την δημιουργία χαρακιών.

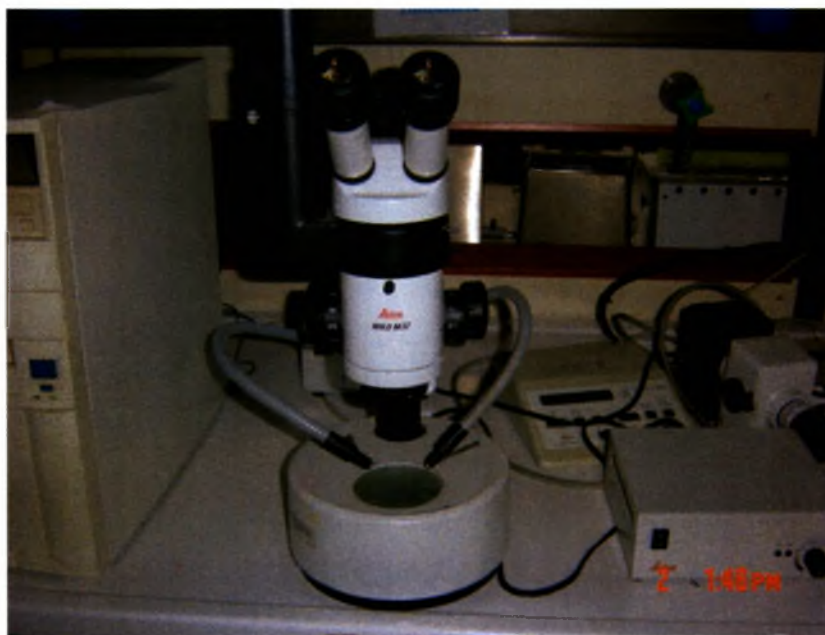
#### **ΒΗΜΑ 5:**

Είναι το τελευταίο βήμα πριν την εμφάνιση φωτογραφιών. Το δοκίμιο προσβάλλεται με χημικό αντιδραστήριο ώστε να εμφανιστεί η δομή. Ανάλογα με τον

χρόνο προσβολής η εμφάνιση της δομής θα είναι πιο έντονη ή λιγότερο έντονη.

Μόλις ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία προχωρούμε στην μελέτη της μικροδομής στο μικροσκόπιο του Εργαστηρίου Υλικών, τύπου Leitz Aristomet, ώστε να εντοπιστεί το μέταλλο βάσης, η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και η λίμνη συγκόλλησης ώστε φωτογραφηθούν οι περιοχές που επιλέγουμε.

Η εκτέλεση της μακροσκοπίας έγινε στο στερεοσκόπιο του Εργαστηρίου των Υλικών, τύπου WILD MPS46/52. Τόσο στο στερεοσκόπιο όσο και στο μικροσκόπιο υπάρχει η δυνατότητα προσάρτησης ψηφιακής μηχανής για την λήψη φωτογραφιών.



Σχ.2.10 Στερεοσκόπιο τύπου WILD MPS46/52



Σχ.2.11 Μικροσκόπιο τύπου Leitz Aristomet

### 2.3.2 Ταξινόμηση μικροδομής και ορολογία

Οι κύριες δομές σε υψηλή θερμοκρασία, στη περιοχή μετασχηματισμού αναδόμησης είναι φερρίτης και περλίτης. Οι αντιδράσεις σε αυτό το σύστημα τείνουν να είναι η διάχυση που ελέγχεται με τα αργούς ρυθμούς αντίδρασης.

#### A. Φερρίτης

Στα υλικά με χαμηλή τιμή στη σκληρότητα, η πρώτη φάση συνήθως σχηματίζεται στα προϋπάρχοντα σύνορα των κόκκων ωστενίτη του υποευτηκτοειδή χάλυβα (*prior*) κατά τη διάρκεια της ψύξης κάτω από τη θερμοκρασία είναι  $Ae_3$ , η οποία αναφέρεται ως ετερομορφικός (*allotriomorphic*) φερρίτης (Σχήμα1). Η πυρήνωση των ετερομορφών του φερρίτη υπακούει στη σχέση προσανατολισμού μεταξύ μητρικής και θυγατρικής φάσεως που ονομάζεται Kurdjimon-Sachs. Τα διαφασικά όρια φερρίτη/ωστενίτη είναι μη συνοχής και με μεγάλη κινητικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες μετασχηματισμού.

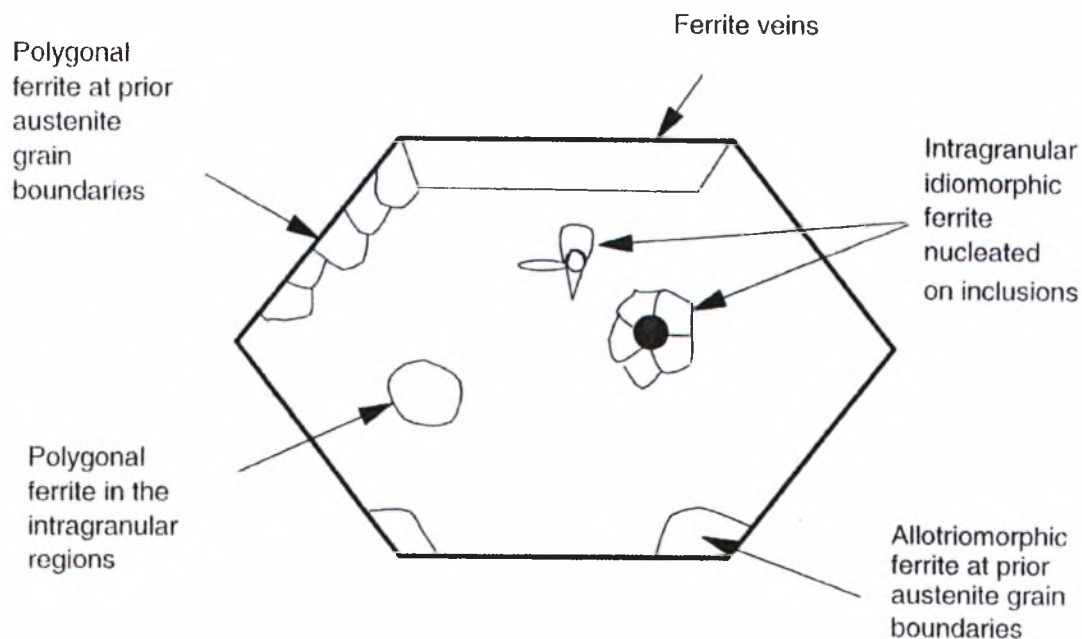
Σε χαμηλότερη θερμοκρασία, μπορεί να αρχίσει η πυρήνωση του φερρίτη σε εγκλείσματα μέσα στους κόκκους ωστενίτη – δηλαδή στο εσωτερικό των ωστενιτικών κόκκων – και ονομάζονται διακρυσταλλικές ιδιομορφές φερρίτη (*idiomorphic ferrite*) (Σχ.1). Η ανάπτυξη στις θερμοκρασίες μετασχηματισμού, εξαρτάται από το ποσοστό του άνθρακα και την διάχυση των στοιχείων αντικατάστασεως. Οι διάφοροι τρόποι ανάπτυξης χωρίζονται ως ακολούθως:

- i. Τοπική ισορροπία (*Local equilibrium*) με το διαχωρισμό (*bulk partition*) των κραματικών στοιχείων PLE.
- ii. Τοπική ισορροπία χωρίς διαχωρισμό των κραματικών στοιχείων NPLE.
- iii. Ανισοτροπία (*Paraequilibrium*) όπου διαχέονται μόνο τα ενδιάμεσα (*interstitial*) άτομα άνθρακα.

Μεταξύ της ανισοτροπίας και των μετασχηματισμών που είναι καθαρά μετατοπιστικοί (*displacive*), μπορούν να υπάρξουν διάφοροι τρόποι ανάπτυξης όπου ο διαχωρισμός του άνθρακα μπορεί να διαφέρει σε κάθε ισορροπία. Ο Dube αναφέρεται στα διαφασικά όρια φερρίτη/ωστενίτη ως **GBF** (*grain boundary ferrite*), δηλαδή περικρυσταλλικός φερρίτης. Το κείμενο αναφέρεται σε όλες τις μορφές του φερρίτη που σχηματίζονται στις θερμοκρασίες μετασχηματισμού τον προευτηκτοειδή φερρίτη **PF** (*primary ferrite*).

Τα περικρυσταλλικά όρια ωστενίτη/προευτηκτοειδή φερρίτη αναφέρονται στα κείμενα ως **PF(G)** (*primary ferrite grains*) και εμφανίζεται συνήθως με διακρυσταλλική ιδιομορφή (*polygonal*) ή ως διακρυσταλλικά πλακίδια (*veins*) (Σχ.1).

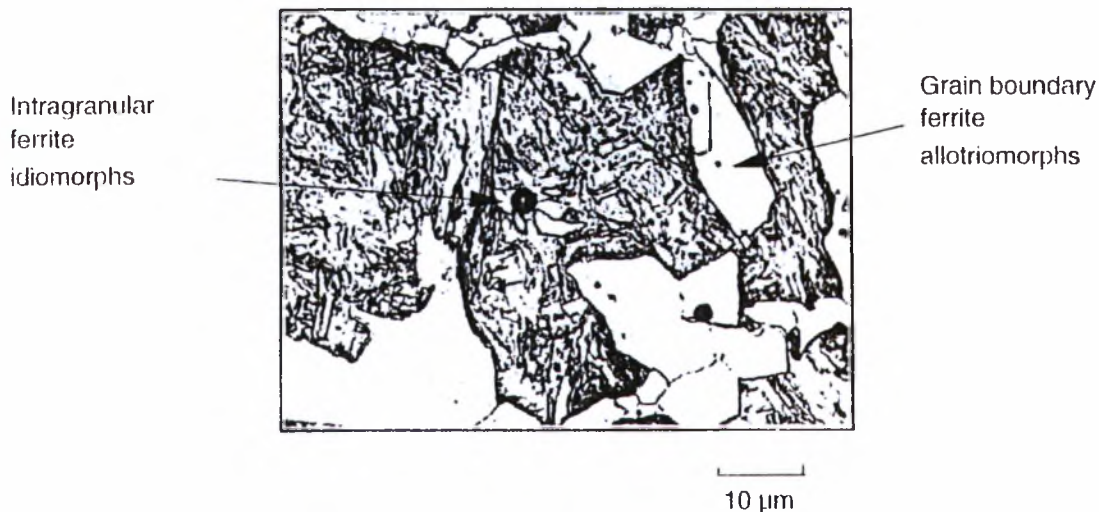
Αναφορά γίνεται στους κόκκους φερρίτη με διακρυσταλλική ιδιομορφή, οι οποίοι φαινομενικά (seemingly) εντοπίζονται σε περιοχές στο εσωτερικό των κόκκων (*intragranular*) και χαρακτηρίζονται από τάξη μεγέθους περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από εκείνο της περιβάλλουσας μήτρας (*surrounding matrix*) (Σχ.2.12). Αυτοί οι κόκκοι φερρίτη μπορεί να είναι διατομές (*cross-sections*) ετερομορφικού φερρίτη που αναπτύσσεται στα προϋπάρχοντα ωστενιτικά σύνορα κόκκων στο επίπεδο στο οποίο γίνεται η παρατήρηση. Ορίζονται ως PF(I). Ο συντάκτης αναφέρεται στις διαφορετικές μορφές στα περικρυσταλλικά όρια ωστενίτη/προευτηκτοειδή φερρίτη ως **GB(PF)**, έτσι ώστε να γίνει διάκριση με τις ιδιομορφές του προευτηκτοειδή φερρίτη όπως περιγράφεται στη συνέχεια.



Σχ.2.12 Ετερομορφικός και ιδιομορφές του προευτηκτοειδή φερρίτη

Στα μέταλλα συγκόλλησης, τα καρβίδια που διασκορπίζονται στους χάλυβες και σε μερικούς από τους χαμηλά κραματωμένους χάλυβες, η πυρήνωση του φερρίτη μπορεί να γίνει όχι μόνο στα σύνορα κόκκων του ωστενίτη αλλά ακόμα και στα σωματίδια μέσα στους κόκκους ωστενίτη (Σχ.2.13). Οι συντάκτες ονομάζουν αυτές τις ιδιομορφές στο εσωτερικό των κόκκων του φερρίτη ως **I(PF)** (*intragranular primary ferrite*). Ανάλογα με τη θερμοκρασία μετασχηματισμού, η μορφολογία του **I(PF)** μπορεί να είναι εμπόδια (*blocks*), βρόχοι (*loops*), ελλείψεις (*ellipses*), rose petals ή σφήνες (*wedges*). Στο κείμενο δεν περιέχεται ορολογία για αυτές τις ιδιομορφές του προευτηκτοειδή φερρίτη.





C-Mn Weld Metal, Continuously Cooled, Iced Brine Quenched from 670°C<sup>60</sup>

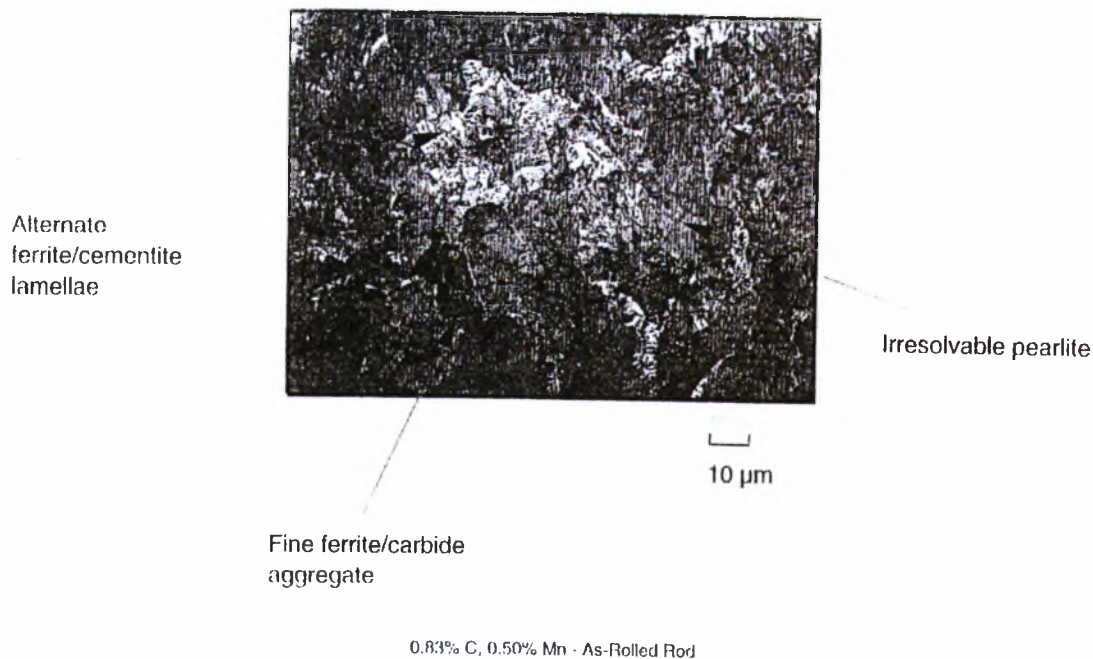
Σχ.2.13 Μορφολογίες του φερρίτη στον *prior* σύνορα ωστενιτικών κόκκων και *intragranular sites*

### B. Περλίτης

Κλασικά, ο περλιτικός μετασχηματισμός μπορεί να γίνει στα σύνορα κόκκων του ωστενίτη ή σε μια ανομοιογένεια (*inhomogeneity*) όπως το έγκλεισμα (*inclusion*). Η πυρήνωση του φερρίτη ή του σεμεντίτη μπορεί να προκαλέσει την έναρξη του περλιτικού μετασχηματισμού, ανάλογα αν ο χάλυβας είναι υποευτηκτοειδής (*hypoeutectoid*) ή υπereυτηκτοειδής (*hyper-eutectoid*). Η ανάπτυξη ενός περλιτικού κόκκου (*nodule*) μέσα σε ωστενιτικό κόκκο ευνοείται από την εναλλαγή (*alternate*) λωρίδων ή λαμελών (*lamellae*) φερρίτη και σεμεντίτη. Τόσο ο σεμεντίτης όσο και ο φερρίτης εντοπίζονται σε ιδιαίτερους κρυσταλλογραφικούς προσανατολισμούς μέσα στο περλιτικό κόκκο (*nodule*). Μπορεί να παρουσιαστεί η πλευρική πυρήνωση νέων λαμελών ή διακλάδωση (*branching*) των ήδη υπάρχοντων λαμελών σεμεντίτη. Η διαδικασία που ελέγχει τον ρυθμό ανάπτυξης του περλίτη είναι η διάχυση του άνθρακα στον ωστενίτη. Καθώς η θερμοκρασία μετασχηματισμού μειώνεται, η κινητήρια δύναμη για την αντίδραση αυξάνεται αλλά η ικανότητα διάχυσης (*diffusivity*) του άνθρακα μειώνεται με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η ανάπτυξη του περλίτη (*perlite interlamellar*).

Ο περλίτης παρατηρείται γενικά στις υψηλές θερμοκρασίες μετασχηματισμού με λαμελοειδή μορφή (*nodule*) εναλλασσόμενου φερρίτη με λαμέλλες σεμεντίτη, οι οποίες μπορεί να είναι αρκετά χονδρόκοκκες (*coarse*) και ετερογενείς (*degenerate*). Καθώς η θερμοκρασία μετασχηματισμού μειώνεται, οι λαμέλλες γίνονται όλο και

πιο λεπτές (*fine*) έως ότου η δομή του δε διαπερνάται (*irresolvable*) στο φως του μικροσκοπίου (Σχ.2.14). Τότε ο περλίτης μπορεί να έχει μια ελαφριά εγχάραξη. Εναλλακτικά, οι λαμέλλες μπορεί να υποστούν στρέβλωση (*distortion*) και κάμψη (*bending*) και να διακρίνονται ως σκοτεινή εγχάραξη (*etching*), ο φερρίτης με τα καρβίδια αναμειγνύονται (*aggregate*) ή μόλις είναι διαπερατά (*resolvable*), σε μεγάλο βαθμό ο μη λαμελοειδής περλίτης, συχνά περιγράφεται σε παλαιότερη ορολογία ως αρχικός troostite.



Σχ.2.14 Διαλυμένος και αδιάλυτος περλίτη

Η ορολογία **FC(P)**, χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον λαμελλοειδή περλίτη, ετερογενή ή χονδρόκοκκο περλίτη και την λεπτότητα στη περιοχή του αδιαπέραστου (*fine colony of irresolvable*) περλίτη. Ο όρος **FC** χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μίγμα φερρίτη-καρβιδίων σεμεντίτη (*ferrite carbide aggregate*). Στις θερμοκρασίες μετασχηματισμού, μεγάλες νησίδες (*large islands*) περλίτη ή μίγμα φερρίτη-καρβιδίων, μπορεί να σχετίζονται με το διακρυσταλλικό (*polygonal*) προευτηκτοειδή φερρίτη **PF(G)** στα προϋπάρχοντα σύνορα κόκκων του ωστενίτη. Παρόμοια κατάσταση, μπορεί να παρουσιαστεί στις ιδιομορφές του προευτηκτοειδή φερρίτη **I(PF)** (Σχ.2.15). Σε μερικές περιπτώσεις ο περλίτης μπορεί να είναι παρόν ως μικροφάση (*microphase*).



As-Cast, Cerium Sulphide, Particle Dispersed Steel<sup>(11)</sup>

Σχ.2.15 Intragranular πρεντηκτοειδής φερρίτης και περλίτης

### 2.3.2.1 Μηχανισμός μετατοπιστικού μετασχηματισμού

#### (Displacive Transformation Regime)

Οι βασικές δομές στη χαμηλή θερμοκρασία κατά τον μετατοπιστικό μετασχηματισμό, είναι ο φερρίτης Widmanstätten, ο μπαινίτης και ο μαρτενσίτης. Οι αντιδράσεις σε αυτό το μηχανισμό τείνουν να προκαλούν διάτμηση (*shear*) που εξαρτάται τη ταχύτητα του ρυθμούς αντίδρασης.

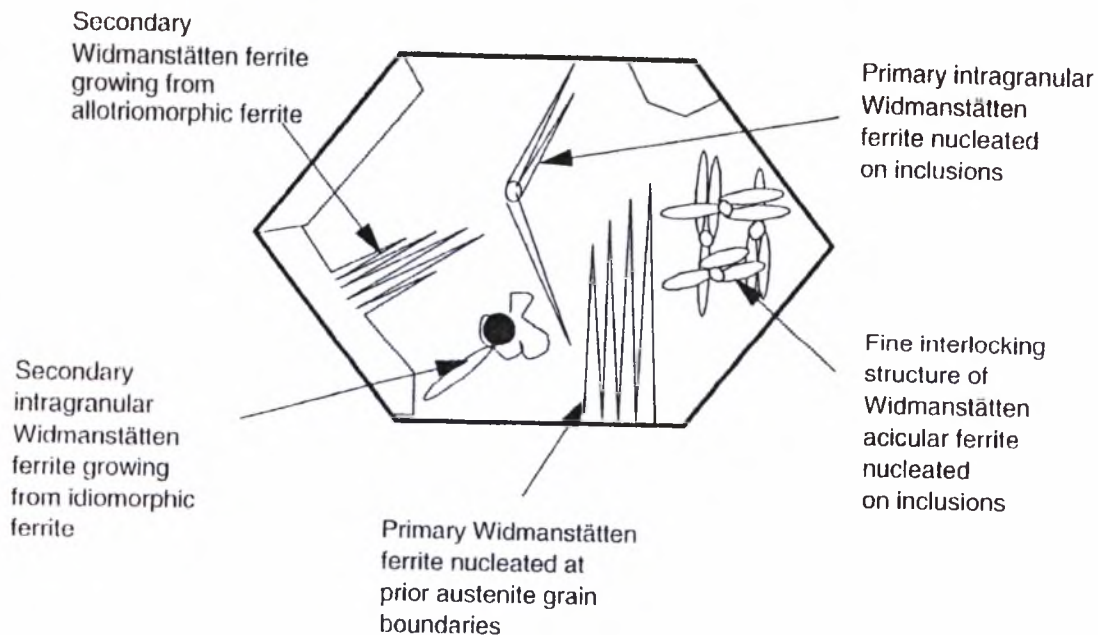
#### A. Φερρίτης Widmanstätten

Κλασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του σχηματισμού του φερρίτη Widmanstätten, είναι ότι μπορεί να σχηματιστεί σε σχετικά χαμηλή υπόψυξη (*undercooling*). Ο μηχανισμός ανάπτυξης πλακιδίων θεωρείται ότι περιλαμβάνει τη πυρήνωση στα ωστενιτικά σύνορα κόκκων ή στις προϋπάρχουσες φερριτικές ετερομορφές και αναπτύσσονται κατά μήκος συγκεκριμένων επιπέδων της μητρικής φάσης, έτσι ώστε να απαιτείται η μικρότερη κινητήρια δύναμη για το μετασχηματισμό αυτό σε σχέση με τη κινητήρια δύναμη που απαιτείται στο σχηματισμό του μπαινίτη ή του μαρτενσίτη. Τα πλακίδια του φερρίτη αναπτύσσονται γρήγορα με ρυθμό (*aspect ratio*) (~10:1), με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σε παράλληλες σειρές που χωρίζονται από σύνορα μικρής γωνίας. Ο φερρίτης Widmanstätten δεν είναι ένας καθαρά μετατοπιστικός μετασχηματισμός αλλά σχηματίζεται από μηχανισμό ανισοτροπίας, ο οποίος περιλαμβάνει τη ταχεία διάχυση των μικρών και ενδιάμεσων ατόμων άνθρακα κατά μήκος της διεπιφάνειας συνοχής

στον παραμένοντα ωστενίτη κατά τη διάρκεια του διατμητικού μετασχηματισμού. Σε σχετικά χαμηλό ρυθμό ψύξης (*undercooling*), που απαιτείται για τον σχηματισμό του φερρίτη Widmanstätten, οι μικροφάσεις (*microphases*) του παραμένοντα ωστενίτη, μαρτενσίτη ή περλίτη μπορούν να σχηματιστούν μεταξύ των αναπτυσσόμενων πλακιδίων φερρίτη.

Ο φερρίτης Widmanstätten μπορεί εύκολα να θεωρηθεί ότι είναι μπαινίτης. Ο Dube περιγράφει τόσο τα προϋπάρχοντα διαφασικά σύνορα ωστενίτη/φερρίτη Widmanstätten και μπαινίτη ως πλευρικές λωρίδες φερρίτη **FS** (*ferrite sideplate*) αλλά αναφορά γίνεται επίσης στο πλακίδιο στο εσωτερικό των κόκκων **IP** (*intragranular plate*). Το κείμενο αναφέρεται σε όλες τις μορφές του φερρίτη Widmanstätten και του μπαινίτη ως φερρίτη στη δευτερογενής φάση **FS**.

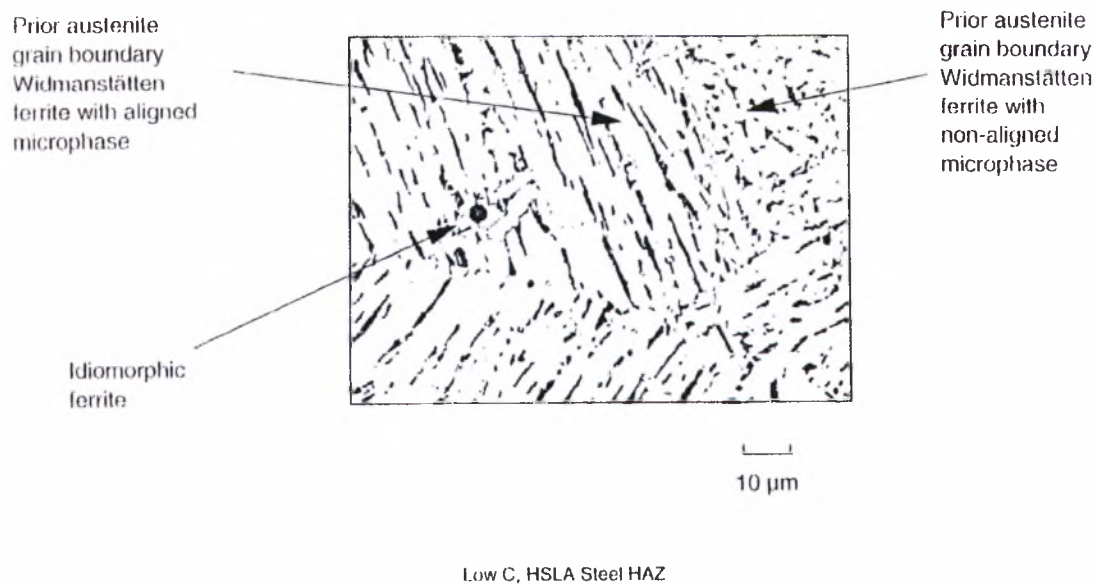
Χαρακτηριστικά, τα πλακίδια του προευτηκτοειδή φερρίτη Widmanstätten αναπτύσσονται κατευθείαν από ένα προϋπάρχοντα σύνορο κόκκων ωστενίτη, ενώ τα δευτερογενή (*secondary*) πλακίδια φερρίτη Widmanstätten αναπτύσσονται από ετερομορφικό φερρίτη στα σύνορα των κόκκων (Σχ.2.16). Τα πλακίδια του προευτηκτοειδή φερρίτη Widmanstätten μπορεί επίσης να αναπτυχθούν από τα εγκλείσματα, ενώ τα δευτερογενή πλακίδια φερρίτη Widmanstätten δημιουργούνται από τις εσωτερικές (*intragranular*) ιδιομορφές φερρίτη.



Σχ.2.16 Προευτηκτοειδής και δευτερογενής φερρίτης Widmanstätten

Οι διαφορετικοί τύποι των προϋπάρχοντων διεπιφανειών ωστενίτη/φερρίτη Widmanstätten συνήθως εμφανίζονται ως χονδρόκοκκα πλευρικά πλακίδια με ευθυγραμμισμένη μικροφάση (*microphase*) (Σχ.2.17) και ορίζονται ως **FS(A)**.

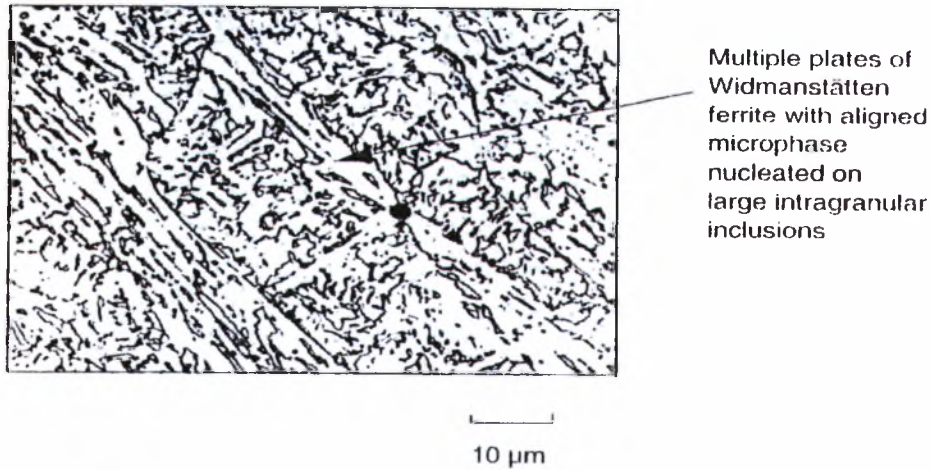
Ανάλογα με το επίπεδο της παρατήρησης η μικροφάση μπορεί να εμφανιστεί μη ευθυγραμμισμένη. Κατά την εξέταση μιας διατομής (*cross-section*) λωρίδων (*lath*) φερρίτη που διευρύνονται από τα σύνορα των ωστενιτικών κόκκων, κάτω από το επίπεδο που εξετάζεται, μπορεί να εμφανίζονται ως νησίδες (*islands*) ή μικροφάσεις ή πυρήνας (*matrix*) φερρίτη, προφανώς μέσα στους προϋπάρχοντες ωστενιτικούς κόκκους (Σχ.2.17). Ο φερρίτη Widmanstätten ορίζεται ως **FS(NA)**. Οι συντάκτες αναφέρονται στις διάφορες μορφές ή στα διαφασικά όρια ωστενίτη/φερρίτη Widmanstätten ως **MB(WF)** έτσι ώστε να υπάρχει διαφοροποίηση με τον εσωτερικό (*intragranular*) φερρίτη Widmanstätten.



Σχ.2.17 Προϋπάρχοντα διαφασικά όρια ωστενιτικών κόκκων με τον φερρίτη Widmanstätten

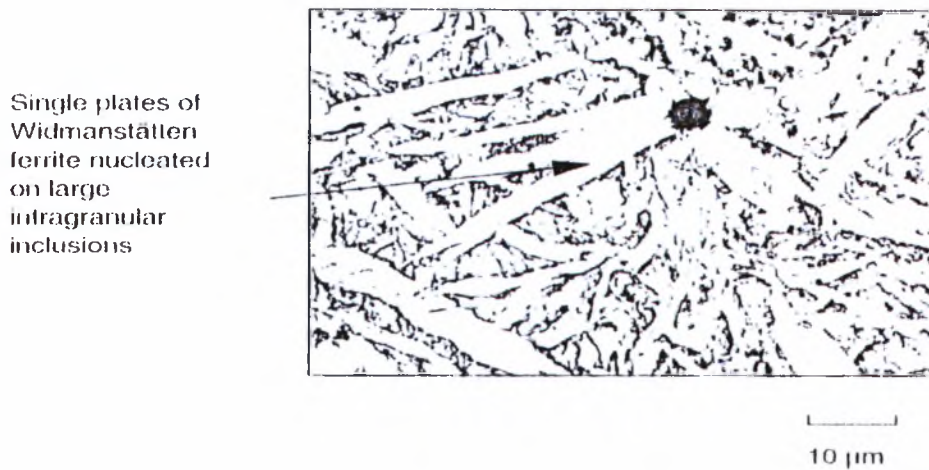
Στο εσωτερικό των κόκκων (*intragranular*) στις συγκολλήσεων και σε μερικούς χάλυβες, τα μεγάλα πλακίδια (*aspect ratio* μεγαλύτερος από 4:1) του φερρίτη Widmanstätten με την ευθυγραμμισμένη φάση της μικροδομής, είναι πιθανό να παρατηρηθεί άμεση και ανεμπόδιστη ανάπτυξη των εγκλείσματα (αρχικά) ή των ιδιομορφών του φερρίτη (δευτερογενής) (Σχ.2.18). Δεν υπάρχει ορολογία για αυτά τα πλακίδια. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι πιθανό να παρατηρηθούν ενιαία μεγάλα πλακίδια χωρίς ευθυγραμμισμένη *microphase* (Σχ.2.19). Οι πυρηνώσεις των εγκλεισμάτων δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτές δεδομένου ότι μπορεί να είναι κάτω από το επίπεδο της παρατήρησης. Αυτά τα πλακίδια έχουν οριστεί ως **IFP** από τον συντάκτη, ο οποίος άθροισε το **FS(I)** και το **IFP** για να δώσει μια συνολική ποσότητα του *intragranular* φερρίτη Widmanstätten, στην οποία αναφέρεται ως **I(WF)**. Η πολλαπλάσια περίοδος επίδρασης (*hard impingement*) των πλακιδίων φερρίτη

Widmanstätten, που αναπτύσσονται από τα εγκλείσματα μπορεί να παράγει μια λεπτή αλληλοσύνδετη (*interlocking*) δομή (Σχ.2.16). Το κείμενο αναφέρεται γενικά σε αυτού του τύπου τη δομή ως βελονοειδές φερρίτης **AF** (*acicular ferrite*).



As-Deposited, Low C, HSLA Weld Metal<sup>(14)</sup>

Σχ.2.18 Intragranular φερρίτης Widmanstätten



Ti-Mo-B Alloyed Weld Metal, Continuously Cooled, Iced Brine Quenched from 630°C<sup>(14)</sup>

Σχ.2.19 Intragranular φερρίτης Widmanstätten

## B. Μπαινίτης

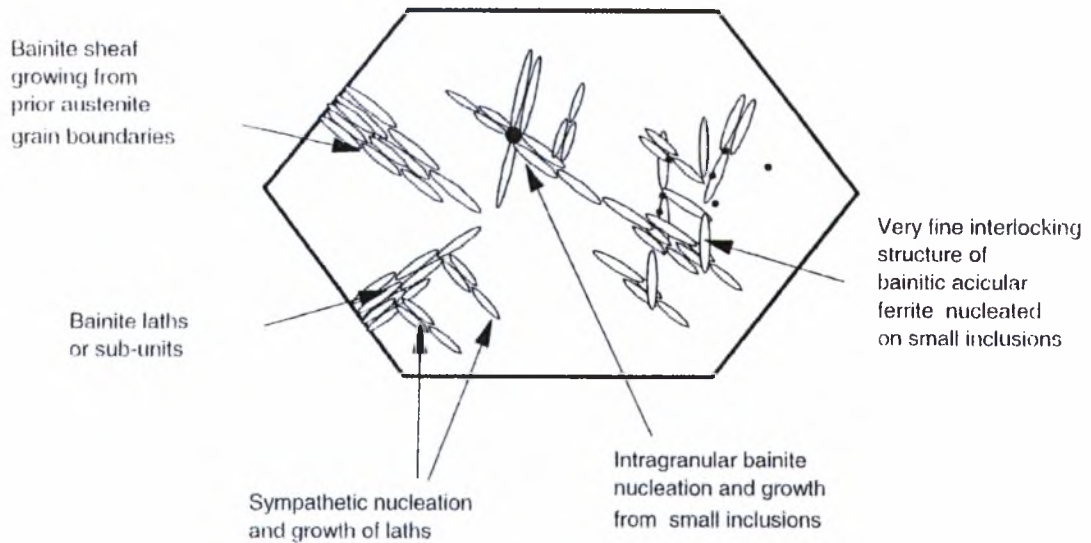
Ο μπαινίτης αναγνωρίζεται γενικά καθώς σχηματίζεται σε θερμοκρασίες όπου οι ελεγχόμενοι μετασχηματισμοί της διάχυσης γίνονται με αργούς ρυθμούς και έχουν κοινά χαρακτηριστικά γνωρίσματα με τους μαρτενσιτικούς μετασχηματισμούς σε χαμηλή θερμοκρασία. Κλασικά, ο μπαινίτης διακρίνεται σε δύο σύνθετες (*component*) ενώσεις, ειδικότερα στον άνω και κάτω μπαινίτη (*upper and lower*

*bainite*), ανάλογα με τη θερμοκρασία μετασχηματισμού. Αναπτύσσεται υπό μορφή ομάδων παράλληλων πλακιδίων (*clusters of plates*) ή δεσμίδες (*sheaves*). Τα μεμονωμένα πλακίδια μέσα στη δέσμη (*sheaf*) είναι γνωστά ως υπομονάδες (*sub-units*). Η διεύρυνση κάθε υπομονάδας συνοδεύεται από μια παραμόρφωση μορφής μεγάλης διατμητικής συνιστώσας (*shear component*) με χαρακτηριστικά παραμορφώσεως αμετάβλητου επιπέδου (*invariant plane strain shape change*). Δεν υπάρχει καμία ανακατανομή του σιδήρου ή των στοιχείων αντικαταστάσεως (*substitutional*) στη διεπιφάνεια του μετασχηματισμού. Ο διαχωρισμός του άνθρακα στον παραμένοντα ωστενίτη στο άνω μπαινίτη, καθιζάνει ως υπέρκορος σεμεντίτης μεταξύ των πλακιδίων μπαινίτη φερρίτη. Στο κάτω μπαινίτη, ο μπαινιτικός φερρίτης γίνεται υπέρκορος (*supersaturated*) με τον άνθρακα και με μερική καθίζηση καρβιδίων που πραγματοποιείται μέσα στις υπομονάδες του φερρίτη καθώς επίσης και μεταξύ τους.

Ο ακριβής μηχανισμός ανάπτυξης του μπαινίτη αποτελεί ακόμα το αντικείμενο μεγάλης συζήτησης. Ο μηχανισμός ανισοτροπίας στον άνω μπαινίτη, που περιλαμβάνει μετασχηματισμό διάτμησης που συνοδεύεται με ταχεία διάχυση των ενδιάμεσων (*interstitial*) ατόμων άνθρακα εγκάρσια στη διεπιφάνεια  $\gamma \rightarrow \alpha$ , θα σήμαινε ότι η μπαινιτική ανάπτυξη είναι εν μέρει παρόμοια με εκείνη του φερρίτη Widmanstätten. Ωστόσο, ένας καθαρά μετατοπιστικός μετασχηματισμός δεν θα απαιτούσε καμία ανακατανομή των ατόμων κατά μήκος της διεπιφάνεια από  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Κατά συνέπεια ο μπαινίτης θα σχηματιστεί από το μετασχηματισμό κατά τη διάχυση σε θερμοκρασίες κάτω από την οποίες ο ωστενίτης και ο φερρίτης της ίδιας σύνθεσης έχουν την ίδια ελεύθερη ενέργεια. Μια γρήγορη ανακατανομή των ατόμων άνθρακα θα απαιτείται μετά την μείωση της διάχυσης (*diffusionless*) κατά την ανάπτυξη του μπαινιτικού φερρίτη.

Είναι εύκολο να υπάρξει σύγχυση μεταξύ του μπαινίτη και του φερρίτη Widmanstätten. Και οι δύο δομές αναφέρονται ως φερρίτης στη δευτερογενής φάση, **FS**, αν και μια διάκριση μπορεί να γίνει στην ορολογία όπου τα πλευρικά πλακίδια ή ο μπαινίτης μπορούν να αναγνωριστούν π.χ. η διάκριση **FS(SP)** ή **FS(B)**. Μια περαιτέρω διάκριση μπορεί να γίνει εκεί όπου ο άνω και κάτω μπαινίτης αναγνωρίζεται π.χ. **FS(UB)**, **FS(LB)**.

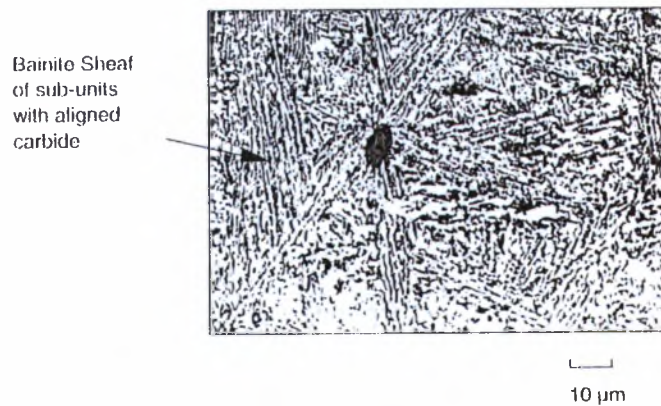
Χαρακτηριστικά, ο μπαινίτης μπορεί να αναπτυχθεί απευθείας από τα σύνορα κόκκων του ωστενίτη ή από ένα έγκλεισμα στο εσωτερικό των κόκκων (*intragranular*) (Σχ.2.20). Κοινό χαρακτηριστικό γνώρισμα αποτελεί η *Sympathetic* πυρήνωση των πλακιδίων μπαινίτη από τις υπάρχοντες δεσμίδες.



Σχ.2.20 Μπαινιτικές δεσμίδες και υπομονάδες

Στα διαφασικά όρια ωστενίτη/μπαινίτη συνήθως παρατηρείται στη μορφή των interlocking δεσμίδων πολύ λεπτόκοκκων πλάγιων πλακιδίων (*very fine sideplates*) ευθυγραμμισμένα με το καρβίδιο (*aligned carbide*) (Σχ.2.21), τα οποία ορίζονται ως **FS(A)** or **FS(UB)**. Είναι συχνά δύσκολο να διακρίνεις τα προϋπάρχοντα σύνορα των ωστενιτικών κόκκων. Οι δεσμίδες εμφανίζονται στη διαδικασία της ανάπτυξης (Σχ.2.12). Η εκτενής sympathetic πυρήνωση είναι εμφανής. Ανάλογα με το επίπεδο της παρατήρησης ο σεμεντίτης μπορεί να εμφανιστεί μη ευθυγραμμισμένος. Κατά εξέταση μιας διατομής (cross-section) λωρίδων του φερρίτη που αναπτύσσονται από τα σύνορα των ωστενιτικών κόκκων κάτω από το επίπεδο της παρατήρησης, αυτά που διακρίνονται είναι σωματίδια σεμεντίτη στο πυρήνα (*matrix*) του φερρίτη, φαινομενικά μέσα στα σύνορα των ωστενιτικών κόκκων. Ο μπαινίτης τότε ορίζεται ως **FS(NA)**. Οι συντάκτες έχει αναφερθεί σε διαφορετικές μορφές διαφασικών ορίων ωστενίτη/μπαινιτικού φερρίτη ως **GB(B)** έτσι ώστε να γίνει διαχωρισμός με το εσωτερικό (*intragranular*) μπαινίτη.

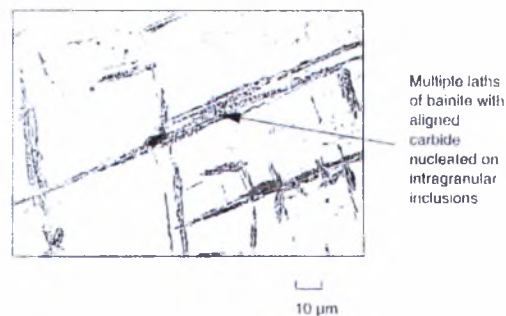




Medium C-Mn, Resulphurised Steel, Isothermally Transformed, 30 min at 450°C<sup>198</sup>

### Σχ.2.21 Interlocking των μαινιτικών δεσμίδων

Στο εσωτερικό των κόκκων στις συγκολλήσεις και σε μερικούς χάλυβες, δεσμίδες μαινίτη μπορούν να αναπτυχθούν ανεμπόδιστα από τα εγκλείσματα (πόρους, inclusions) (Σχ.2.22). Ο συντάκτης και οι συνάδελφοι του τις έχουν ορίσει ως μαινιτικές δεσμίδες (*intragranular bainite*) **I(B)**. Σε πολλές περιπτώσεις, τα ενιαία λεπτόκοκκα πλακίδια (single fine plates) μαινιτικού φερρίτη χωρίς aligned καρβίδια μπορεί να παρατηρηθούν. Μπορεί να είναι δύσκολο να διακριθούν από τα πλακίδια του φερρίτη Widmanstätten, **IFP**. Η πυρήνωση των εγκλεισμάτων δεν μπορούν να παρατηρηθούν δεδομένου ότι είναι κάτω από το επίπεδο της παρατήρησης. Όπου υπάρχει υψηλή πυκνότητα των εγκλεισμάτων, πολλαπλάσια περίοδος αλληλεπίδρασης (*multiple hard impingement*) των πλακιδίων μαινίτη που αναπτύσσεται από τα εγκλείσματα μπορεί να οδηγήσει σε μια πολύ λεπτόκοκκη αλληλένδετη (*interlocking*) δομή (Σχ.2.19). Το κείμενο αναφέρεται γενικά σε αυτό τον τύπο δομής ως βελονοειδές φερρίτης **AF**.



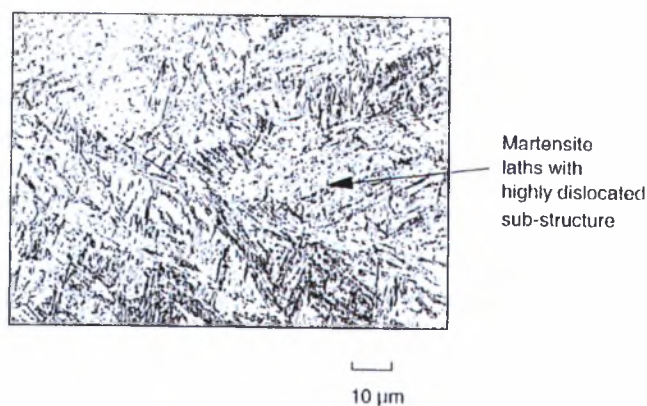
Medium C-Mn, Resulphurised Steel, Isothermally Transformed, 30 s at 450°C<sup>198</sup>

### Σχ.2.22 Ανάπτυξη των μαινιτικών δεσμίδων από τα εγκλείσματα

### Γ. Μαρτενσίτης

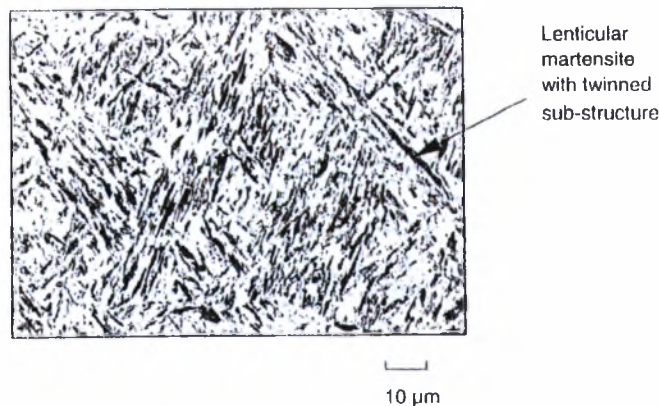
Ο μαρτενσίτης είναι κλασικά ένας εξαιρετικά γρήγορος, μη-διάχυτικός μετασχηματισμός όπου ο άνθρακας παραμένει στο διάλυμα (solution). Καθώς τα ωστενιτικά πλέγματα (*lattice*) αλλάζουν από FCC στον απαιτούμενο μαρτενσίτη BCC ή στο πλέγμα BCT, οι ενέργεια παραμορφώσεως που χαρακτηρίζεται από ισχυρή διατμητική τάση (*strain energy considerations*) επιδρούν και ο μαρτενσίτης αναγκάζεται να εμφανίζεται υπό μορφή λεπτών πλακιδίων.

Στους χάλυβες που περιέχουν χαμηλό ποσοστό άνθρακα (λιγότερο από 0.2%C) οι λωρίδες μαρτενσίτης με κρυσταλλική δομή bcc, είναι η μορφή που συνήθως εμφανίζεται ο μαρτενσίτης και υποδεικνύεται ως **M** ή **M(L)** στο κείμενο. Ο μονάδες του μαρτενσίτη σχηματίζονται σε μορφή λωρίδων, που ομαδοποιούνται σε μεγαλύτερες δεσμίδες ή packets (Σχ.2.23). Η υποδομή χαρακτηρίζεται από την υψηλή πυκνότητα των μετατοπίσεων (*dislocations*) που διευθετούνται μέσα στα κύτταρα, όπου η κάθε λωρίδα μαρτενσίτη αποτελείται από πολλά κύτταρα μετατόπισης. Όταν η περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα αυξάνεται σημαντικά πάνω από 0.2%C, τα πλακίδια μαρτενσίτη τείνουν να αποκτήσουν κρυσταλλική δομή BCT ή BCC. Οι μονάδες μαρτενσίτη σχηματίζονται ως μεμονωμένα lenticular πλακίδια (Σχ.2.24), με υποδομή που αποτελείται από τα πολύ λεπτές διδυμίες (*fine twins*). Αυτή η μορφή του μαρτενσίτη καλείται ως διδυμία μαρτενσίτη (*twinned martensite*) στο κείμενο και υποδεικνύεται ως **M** ή **M(T)**. Ο μαρτενσίτης, είτε είναι σε μορφή πλακιδίων είτε σε μορφή λωρίδων, είναι γενικά δύσκολα να διακριθεί (irresolvable) κάτω από το φως του μικροσκοπίου και τείνει να έχει μια αργή εγχάραξη.



0.13% C, Laser Weld Metal™

Σχ.2.23 Λωρίδες μαρτενσίτη



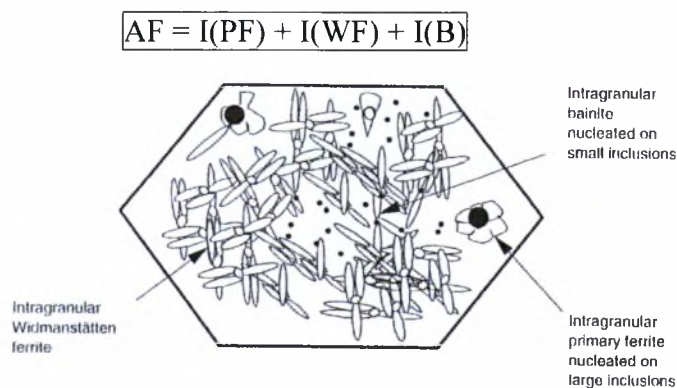
0.27% C, Laser Weld Metal<sup>TM</sup>

Σχ.2.24 Πλακίδια των διδυμιών μαρτενσίτη

#### Δ. Βελονοειδής φερρίτης

Συμβατικά ο βελονοειδής φερρίτης αναγνωρίζεται ως τη μορφολογία της πυρήνωσης του φερρίτη στο εσωτερικό των κόκκων (*intragranular*), στην οποία υπάρχει αλληλεπίδραση (*multiple impingement*) μεταξύ των κόκκων. Η πυρήνωση του βελονοειδή φερρίτη πραγματοποιείται στα εγκλείσματα μέσα στα προϋπάρχοντα σύνορα κόκκων του ωστενίτη κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Υπό τον όρο ότι υπάρχει υψηλή πυκνότητα των εγκλεισμάτων, μια λεπτή αλληλένδετη δομή (μικρότερη από 5 μm) μπορεί να παραχθεί.

Στο κείμενο ο βελονοειδής φερρίτης υποδεικνύεται ως **AF**. Για μεγάλο διάστημα ο βελονοειδής φερρίτης θεωρείτο ενιαίο (*single*) προϊόν μετασχηματισμού. Μελέτη που είχε γίνει στο παρελθόν πρότεινε ότι ήταν εσωτερικά πυρηνωμένος φερρίτης Widmanstätten. Πρόσφατη έρευνα παρείχε τις αποδείξεις για το *intragranularly* πυρηνωμένο μπαινίτη στο εσωτερικό των κόκκων. Ωστόσο, πρόσφατη έρευνα από το συντάκτη και τους συναδέλφους του έχει καταδείξει ότι προϊόντα διαφόρων αντιδράσεων είναι δυνατό να υποστούν πυρήνωση στους εγκλείσματα στο εσωτερικό των κόκκων (*intragranular*) σε διαφορετικές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της συνεχούς ψύξης ανάλογα με τη φύση, το μέγεθος και το ποσοστό των εγκλεισμάτων. Η φύση του βελονοειδή φερρίτη εμφανίζεται όπως παρουσιάζεται στο Σχ.2.25. Η ανάπτυξη του βελονοειδή φερρίτη φαίνεται για να περιλάβει διάφορα προϊόντα αντίδρασης τα οποία πυρηνώνονται και αναπτύσσονται από τα εγκλείσματα συνυπολογισμούς στις θερμοκρασίες μετασχηματισμού αναδόμησης (*reconstructive*) και αντικατάστασης, σύμφωνα με το θεωρητικό εμπόδιο ενεργοποίησης (*activation energy barrier*), στη πυρήνωση των εγκλεισμάτων. Κατά συνέπεια για το μετασχηματισμό υπό συνεχή ψύξη, ισχύει:



Σχ.2.25 Μορφολογία του βελονοειδή φερρίτη

Αυτό οδηγεί σε βελονοειδές φερρίτη που μπορεί να εμφανίζεται σε ποικίλες μορφές ανάλογα με τη σύνθεση του χάλυβα, το ρυθμό ψύξης και τα χαρακτηριστικά των εγκλεισμάτων. Ο βελονοειδές φερρίτης μπορεί να περιλαμβάνει μίγματα διαφορετικών προϊόντων μετασχηματισμού στο εσωτερικό των κόκκων (intragranular) (Σχ.2.26). Εναλλακτικά, ο βελονοειδής φερρίτης Widmanstätten ή ο μπαινιτικός βελονοειδής φερρίτης μπορεί να αυτοδιαμορφωθεί (may form per se). Εντούτοις, εάν οι αντιδράσεις ολοκληρώνονται σε θερμοκρασίες μετασχηματισμού αναδόμησης (reconstructive), μπορεί να προτιμηθεί η χρήση του όρου ιδιομορφές του προευτηκτοειδή φερρίτη αντί βελονοειδές φερρίτη, για να περιγράψει τη μικροδομή, δεδομένου ότι ο προευτηκτοειδής φερρίτης στο εσωτερικό των κόκκων (intragranular) είναι πιθανώς χονδρόκοκκος και μη-βελονοειδής στη μορφολογία (Σχ.2.15).

Ο βελονοειδές φερρίτης παρατηρείται συνήθως ως λεπτή στο εσωτερικό των κόκκων (interlocking) φερριτική δομή που διανθίζεται με μικροφάσεις (Σχ.2.26). Η μορφή των πλακιδίων φερρίτη μπορεί να μην μοιάζει με βελόνες όπως υποδηλώνει ο όρος "βελονοειδής". Αυτό συμβαίνει διότι οι διαφορετικές μορφολογίες του φερρίτη, δεν μπορούν να επεκταθούν πολύ, πριν από την αμοιβαία αλληλεπίδραση (mutual hard impingement). Είναι εμφανές στο Σχ.2.26 ότι το ποσοστό διαλυτότητας (refinement) του βελονοειδές φερρίτη εξαρτάται από τη φύση των προϊόντων μετασχηματισμού που είναι έμφυτη (inherent) στο σχηματισμό του.



10  $\mu\text{m}$

C-Mn Weld Metal<sup>61</sup>  
Acicular Ferrite - Primary Ferrite/Widmanstätten Ferrite



10  $\mu\text{m}$

Ti-Mo-B Alloyed Weld Metal<sup>62</sup>  
Acicular Ferrite - Widmanstätten Ferrite, Bainite

*Σχ. 2.26 Μορφές του βελονοειδή φερρίτη*

## 2.4 Δοκιμή Μικροσκληρομέτρησης

Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1043-1 καθορίζει τις δοκιμές σκληρότητας σε εγκάρσια τμήματα των συγκολλήσεων τόξου των μεταλλικών υλικών. Καλύπτει τη σκληρότητα κατά Vickers σύμφωνα με το ISO 6507-1, συνήθως με φορτία 49N ή 98 N (*HV 5* ή *HV 10*).

Η δοκιμή θα πρέπει να διενεργηθεί για να εξασφαλιστεί το μέγιστο και το ελάχιστο επίπεδο της σκληρότητας τόσο στο μέταλλο βάσης όσο και στη λίμνη συγκόλλησης.

### 2.4.1 Αρχές μικροσκληρομέτρησης

Η δοκιμή μικροσκληρότητας πραγματοποιείται βάση των προτύπων ISO 6507-1, ISO 6507-2 ή EN 10003-1. Θα πρέπει να εκτελεστεί σε σειρές σημείων ή σε μεμονωμένα σημεία. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου.

### 2.4.2 Θεωρητική βάση σκληρομέτρησης

Η σκληρότητα ενός υλικού εξαρτάται από την φύση του, την συνοχή του και τη μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος. Σκληρότητα είναι η αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό όταν μέσα σε αυτό διεισδύει ένα σκληρότερο υλικό (στη συγκεκριμένη δοκιμή είναι διαμάντι). Όλες οι μέθοδοι προσδιορισμού της σκληρότητας χρησιμοποιούν έναν κατάλληλο διεισδυτή από διαμάντι. Η δοκιμή της μικροσκληρομέτρησης έχει πολύ μεγάλη σημασία διότι εκτός από το μέτρο αντίστασης του υλικού στη τριβή, καταδεικνύει την κατεργαστικότητα του υλικού. Πολλές φορές χρησιμοποιείται η δοκιμή αυτή ως μέσο σύγκρισης ή ελέγχου μιας θερμικής κατεργασίας (συγκόλληση, επαναφορά, επιφανειακή σκλήρυνση, κ.τ.λ). Υπάρχουν πολλοί πίνακες οι οποίοι, εκτός από την μετατροπή, της σκληρότητας στις διάφορες κλίμακες, δίνουν και την αντοχή εφελκυσμού του υλικού, ανάλογα με την σκληρότητα. Επίσης δίνουν και την τάση θλίψης σε παραμόρφωση 10% (compression stress at 10% strain). Τέτοιοι πίνακες βρίσκονται στο παράρτημα Α. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήσαμε είναι μέθοδοι στατικής δοκιμής σκληρομέτρησης.

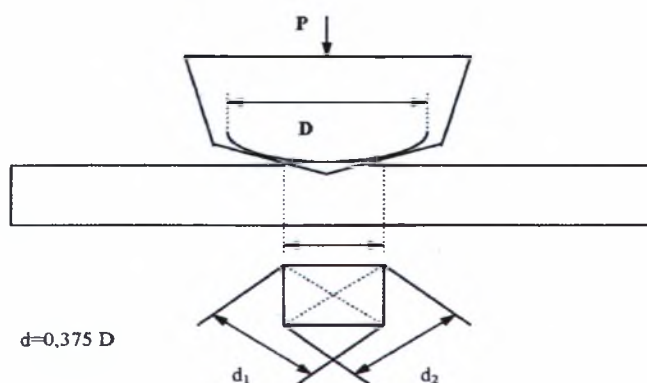
### 2.4.3 Μέθοδος Vickers

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται διεισδυτής από διαμάντι με σχήμα τετράπλευρης πυραμίδας και με γωνία κορυφής 136°. Η μέθοδος αυτή είναι η ακριβέστερη και χρησιμοποιείται για την μέτρηση κάθε είδους σκληρότητας, γι' αυτό και ονομάζεται μικροσκληρομέτρηση. Η μέθοδος VICKERS έχει μονάδες τάσης ( $\frac{kp}{mm^2}$ ). Ορίζεται από τον λόγο του φορτίου P προς το εμβαδόν της τύπωσης S.

$$VHN = \frac{S}{P} \text{ ή } VHN = 1.8544 \cdot \left( \frac{P}{d^2} \right)$$

Όπου  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$  (μέση τιμή των διαγωνίων)

Το φορτίο κυμαίνεται, ανάλογα με το είδος του μικροσκληρόμετρου, σε διάφορες τιμές. Ο χρόνος συμπίεσης του διεισδυτή εξαρτάται από το υλικό, πρέπει όμως να είναι αρκετός ώστε να ολοκληρωθεί η πλαστική παραμόρφωση. Η δοκιμή γίνεται συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου. Η ελεγχόμενη επιφάνεια πρέπει να είναι λεία και καθαρή και το φορτίο πρέπει να δρα κάθετα σε αυτή. Ο χρόνος συμπίεσης κυμαίνεται γύρω στα 15sec ενώ η ταχύτητα διείδυσης είναι κοντά στα 3m/sec. Εμείς αυτό που μετράμε στο μικροσκόπιο είναι οι διάμετροι  $d_1, d_2$  και το όργανο μας δίνει την σκληρότητα ανάλογα με την μεγέθυνση. Στο Σχ.2.27 φαίνεται παραστατικά η γεωμετρία της μεθόδου.



Σχ.2.27 Γεωμετρική Μορφή της μεθόδου Vickers

#### 2.4.4 Εκτέλεση μικροσκληρομετρήσεων

Για τη δημιουργία του προφίλ σκληρότητας χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί η ακριβέστερη μέθοδος μικροσκληρομέτρησης, που είναι η μέθοδος VICKERS. Οι μικροσκληρομετρήσεις κατά VICKERS πραγματοποιήθηκαν στο μικροσκληρόμετρο του εργαστηρίου υλικών. Πρόκειται για ένα μικροσκληρόμετρο τύπου HMV 2000 SMIMADJU. Στη μέθοδο VICKERS και στο συγκεκριμένο μικροσκληρόμετρο πρώτα επιλέγουμε το φορτίο, το οποίο είναι τυποποιημένο, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του μικροσκληρομέτρου. Κατόπιν επιλέγουμε τον χρόνο διείδυσης για την ολοκλήρωση της πλαστικής παραμόρφωσης. Αφού εστιάσουμε από τον κατάλληλο φακό μεγέθυνσης εκτελούμε το πείραμα. Πρέπει να είμαστε προσεκτικοί

κατά την μέτρηση των διαγωνίων διότι μία μικρή απόκλιση επιφέρει αλλοίωση των αποτελεσμάτων.

Αμέσως μετά φαίνεται ο τρόπος εξαγωγής των διάφορων αποτελεσμάτων από το συγκεκριμένο μικροσκληρόμετρο. Οι δυνατότητες του μικροσκληρομέτρου του εργαστηρίου των υλικών είναι πολλές και μία από αυτές είναι η εκτύπωση των αποτελεσμάτων χωρίς την δική μας παρέμβαση.



Σχ.2.28 Μικροσκληρόμετρο τύπου HMV- 2000 SMIMADJU.



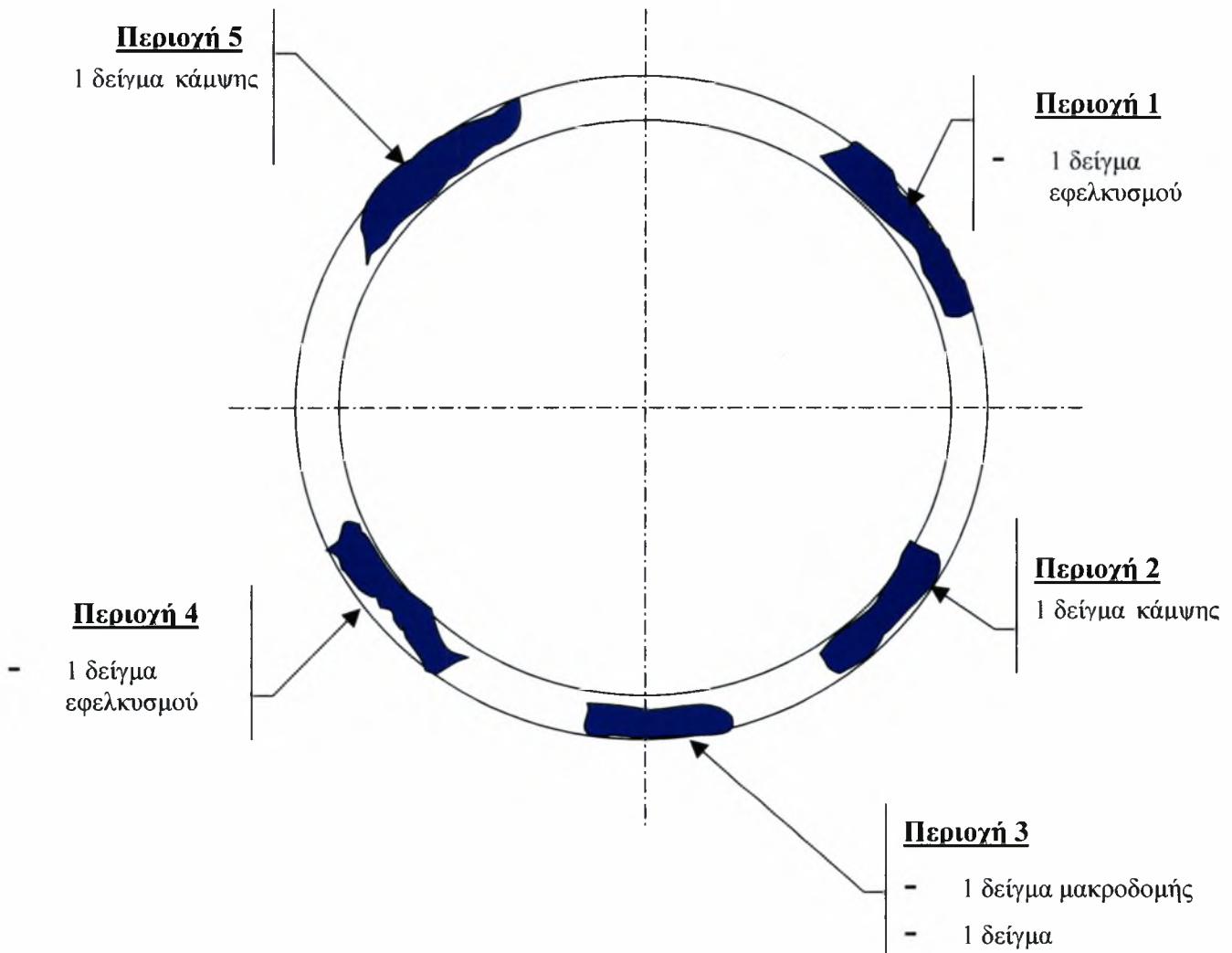
# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

## **Αποτελέσματα Δοκιμών**

### 3.1 Δειγματοληψία

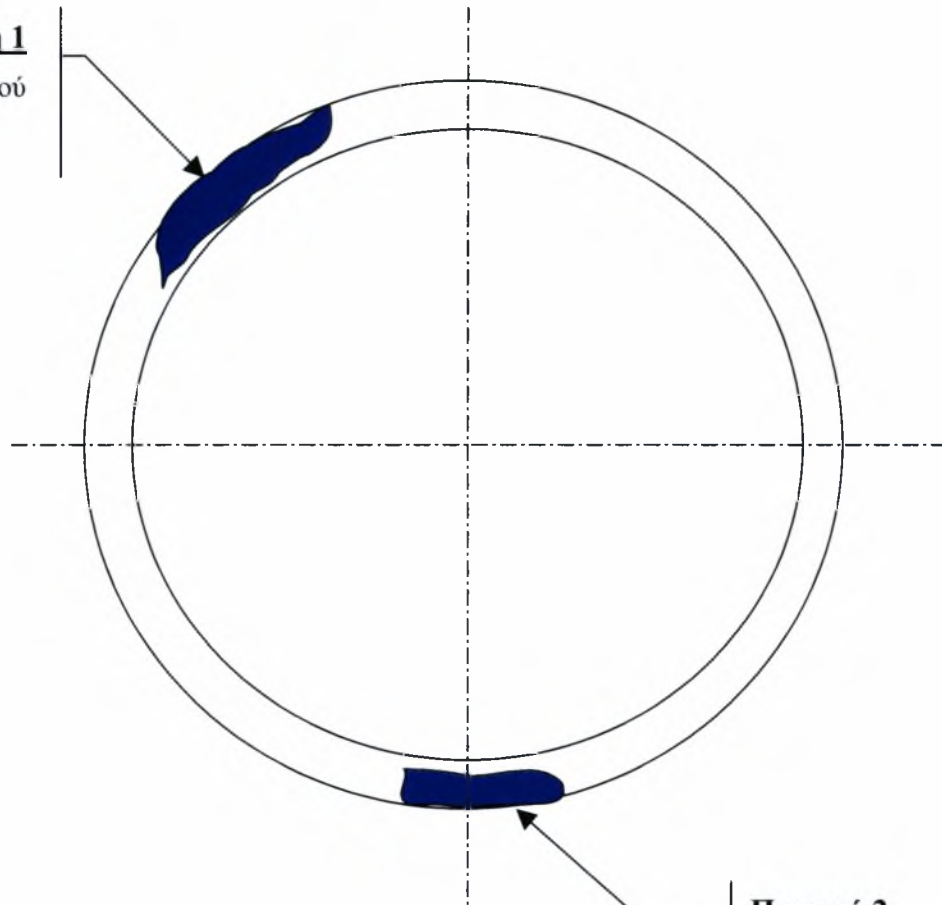
Η θέση εξαγωγής των δοκιμών των χαλύβων 13CrMo44, 15Mo3 και 10CrMo9.10, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 288.

#### **A. ΧΑΛΥΒΑΣ 13CrMo44**



*B. ΧΑΛΥΒΑΣ 15Mo3*

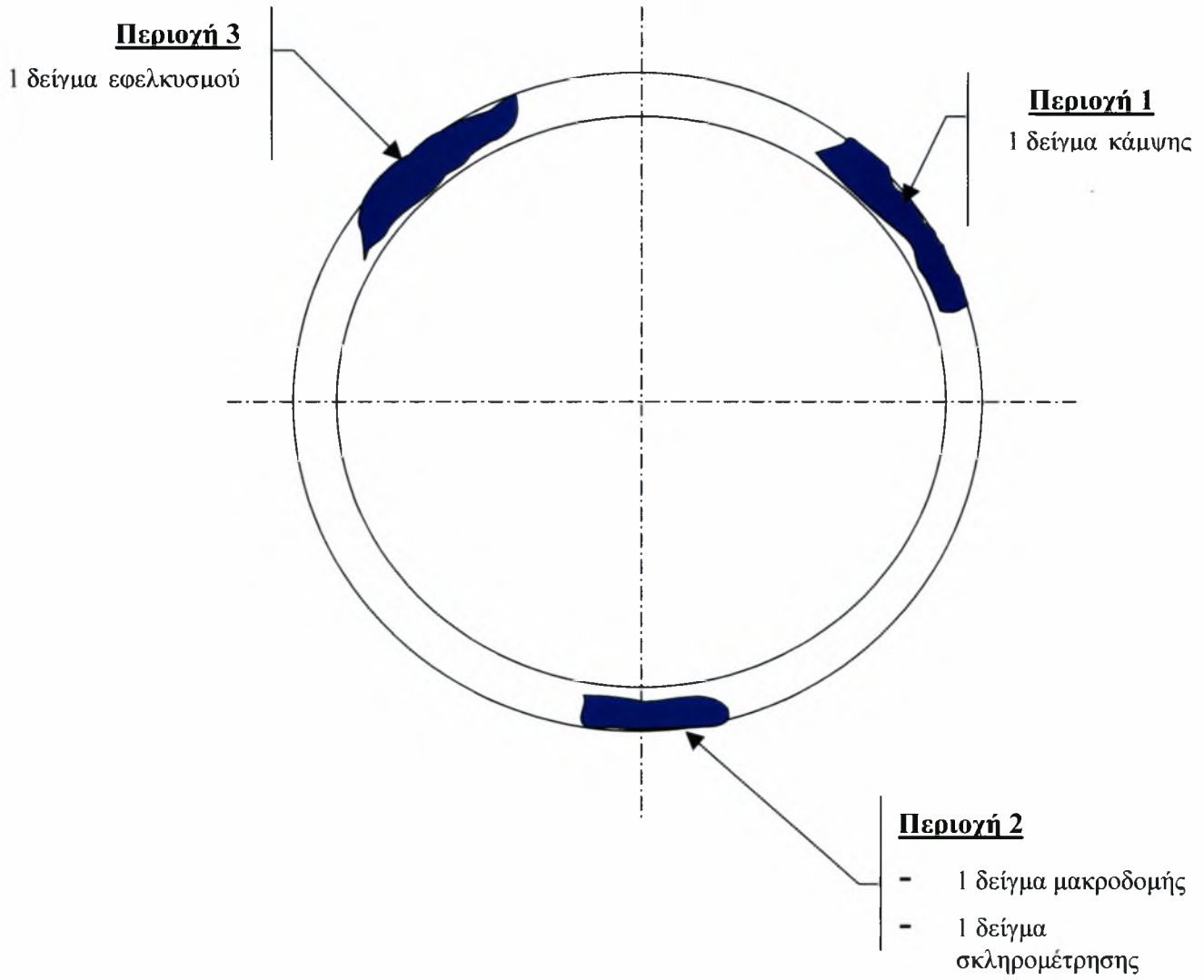
**Περιοχή 1**  
1 δείγμα εφελκυσμού



**Περιοχή 2**

- 1 δείγμα μακροδομής
- 1 δείγμα σκληρομέτρησης

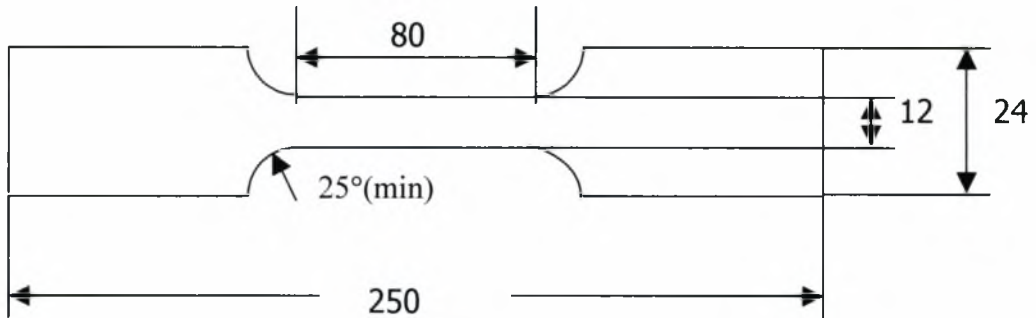
Γ. ΧΑΛΥΒΑΣ 10CrMo9.10



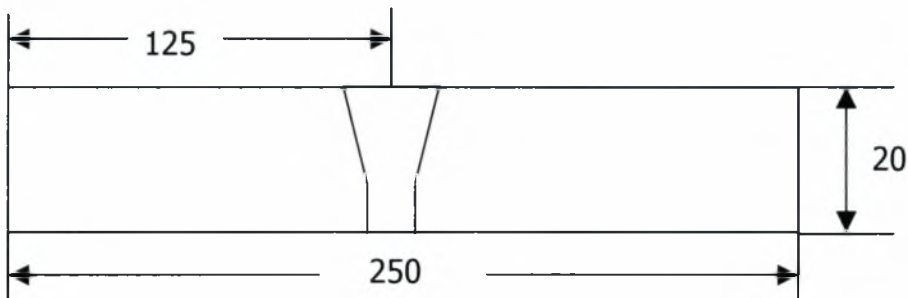
### 3.2 Κατασκευή Δοκιμίων

*ΧΑΛΥΒΑΣ 13CrMo44 (1.7335) [ $\varnothing$  51× 4]*

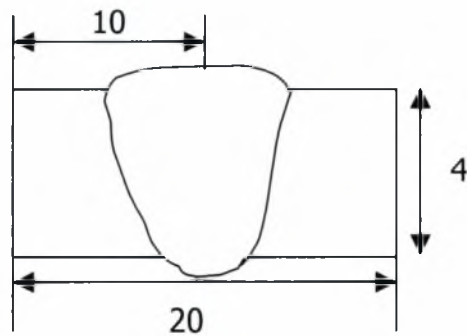
- Δοκιμή Εφελκυσμού (ΕΛΟΤ EN 895)



- Δοκιμή Κάμψης (DIN 50121)

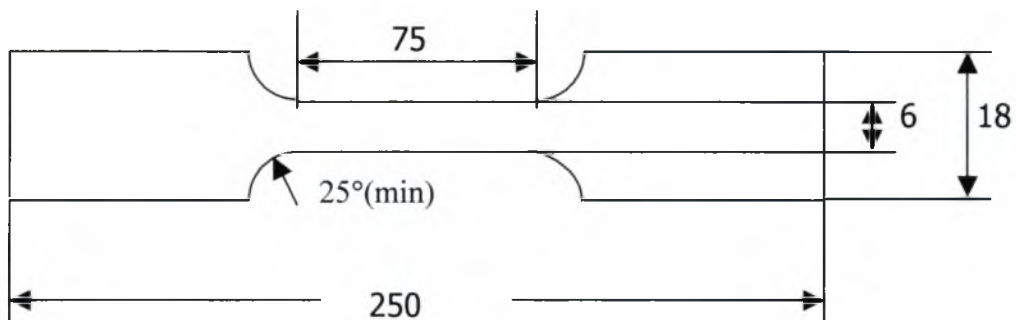


- Δοκιμή Σκληρότητας (EN 1043-1)

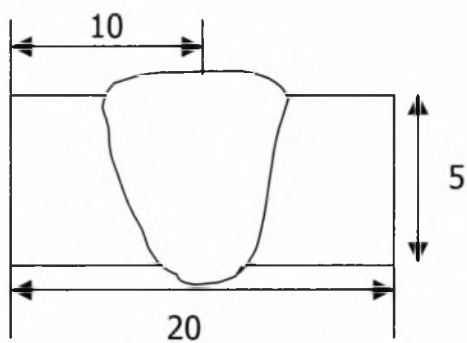


*ΧΑΛΥΒΑΣ 15Mo3 (1.5415) [Ø 30x5]*

- Δοκιμή Εφελκυσμού (ΕΛΟΤ EN 895)

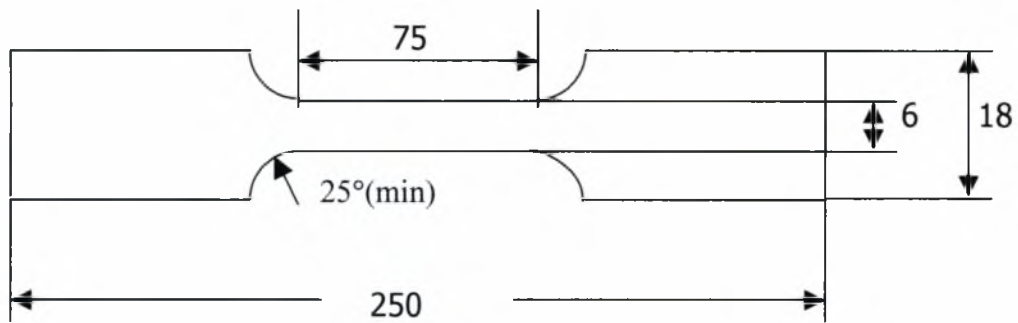


- Δοκιμή Σκληρότητας (EN 1043-1)

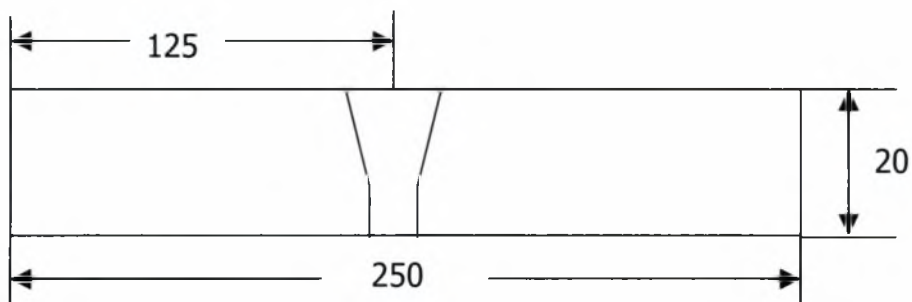


ΣΩΛΗΝΑΣ 10CrMo9.10 (1.7380) [Ø 44.5x5]

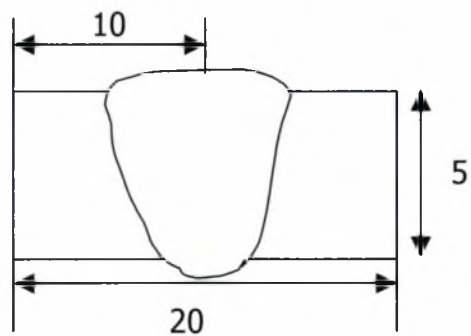
- Δοκιμή Εφελκυσμού (ΕΛΟΤ EN 895)



- Δοκιμή Κάμψης (DIN 50121)



- Δοκιμή Σκληρότητας (EN 1043-1)

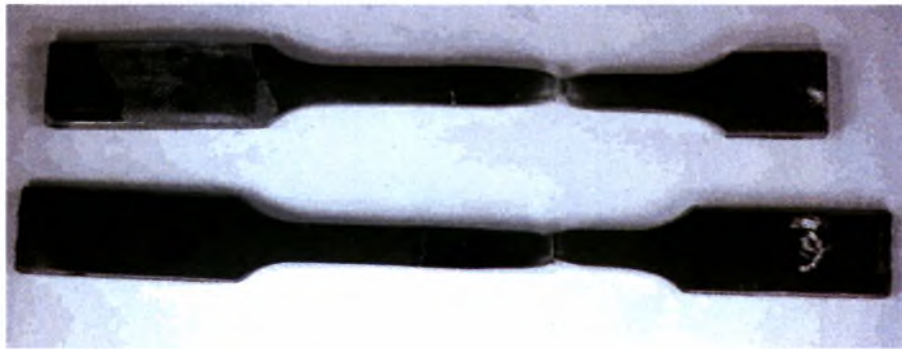


### 3.3 Δοκιμή Εφελκυσμού

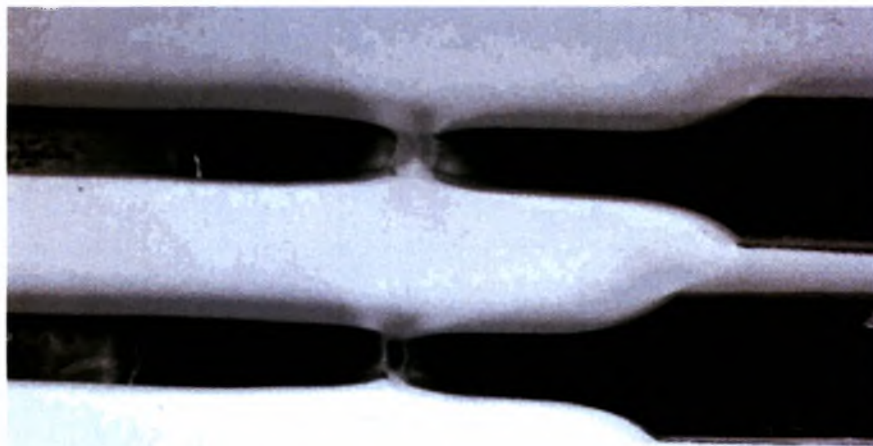
Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο *EN 10 002-1*. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για κάθε δοκίμιο.

Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε στην EBETAM. Το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων καθώς και οι τιμές που προκύπτουν από τη δοκιμή και για τα δύο δοκίμια εφελκυσμού φαίνονται στη συνέχεια.

#### 3.3.1 Αποτελέσματα εφελκυσμού του χάλυβα 13CrMo44

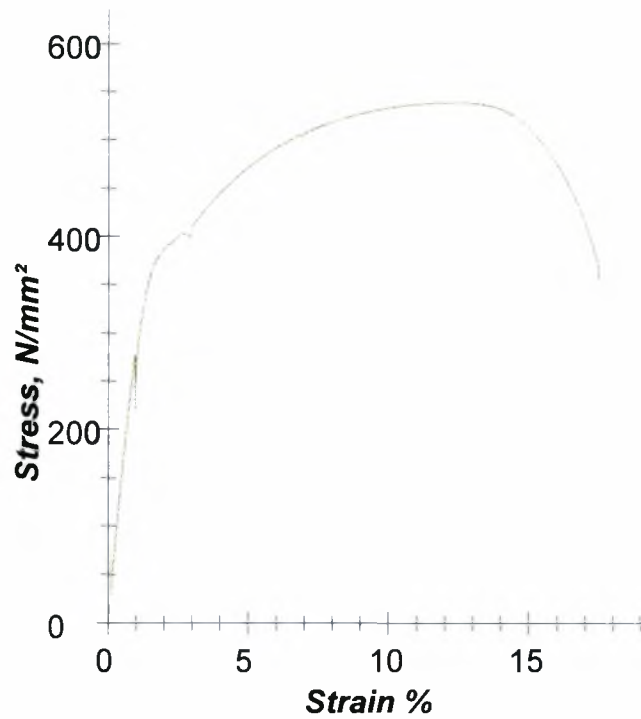


*TENSILE 13CrMo44*

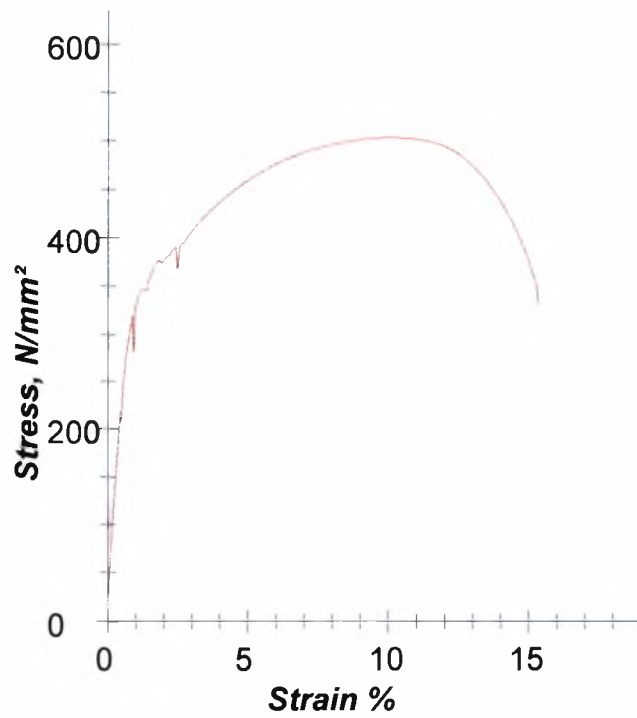


*TENSILE 13CrMo44*

Σχ. 3.1 Δοκίμια εφελκυσμού μετά το πέρας της δοκιμής



Σχ. 3.2 Διάγραμμα πραγματικής τάσης παραμόρφωσης του 13CrMo44 (No.1)



Σχ. 3.3 Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του 13CrMo44 (No.2)



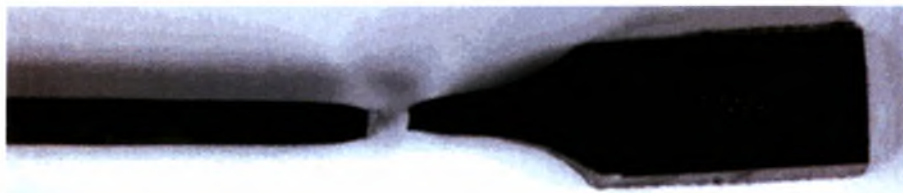
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1** Αποτελέσματα εφελκυσμού του δοκιμίου 13CrMo44

Α/Α	ΠΛΑΤΟΣ (mm)	ΠΑΧΟΣ (mm)	ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (mm <sup>-2</sup> )	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (N·mm <sup>-2</sup> )	ΘΕΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ
No.1	12.0	3.69	402	538	Βασικό Μέταλλο
No.2	12.2	3.76	345	503	Βασικό Μέταλλο

3.3.2 Αποτελέσματα εφελκυσμού του χάλυβα 15Mo3

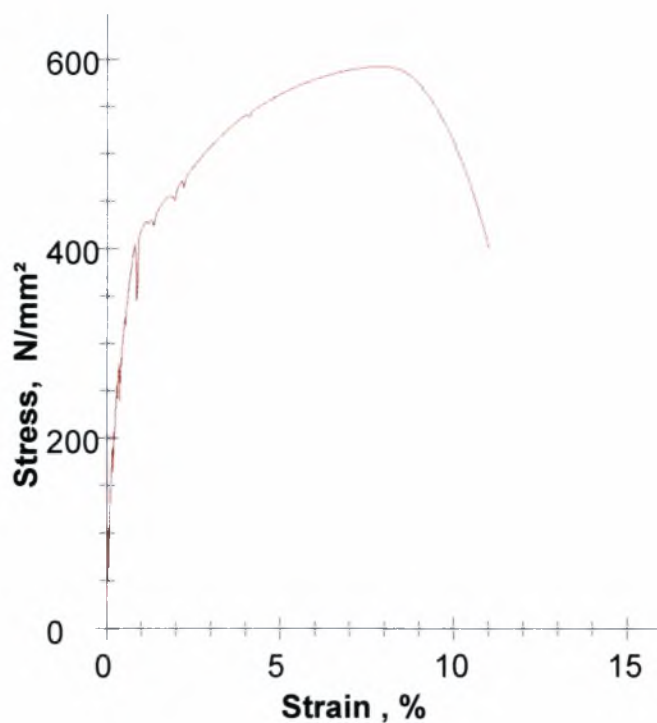


*TENSILE 15Mo3*



*TENSILE 15Mo3*

Σχ.3.4 Δοκίμια εφελκυσμού μετά το πέρας της δοκιμής

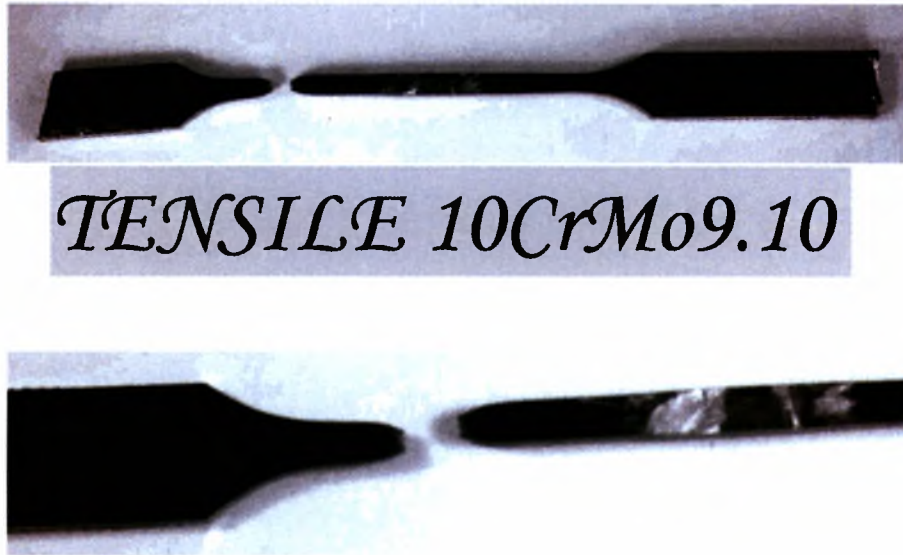


Σχ.3.5 Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του 15Mo3

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2** Αποτελέσματα εφελκυσμού του δοκιμίου 15Mo3

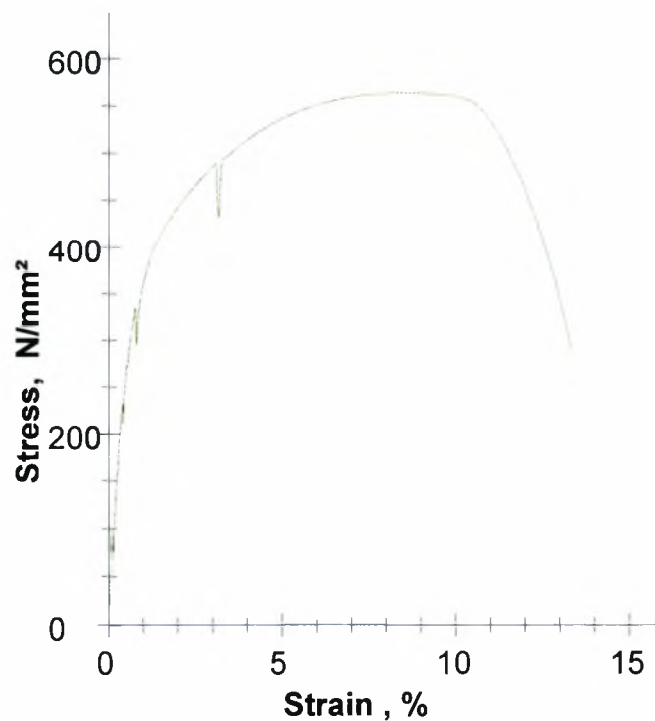
<b>ΠΛΑΤΟΣ (mm)</b>	<b>ΠΑΧΟΣ (mm)</b>	<b>ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (N·mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>ΘΕΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ</b>
6	4.80	428	592	Βασικό Μέταλλο

### 3.3.3 Αποτελέσματα εφελκυσμού του χάλυβα 10CrMo9.10



## *TENSILE 10CrMo9.10*

Σχ.3.6 Δοκίμια εφελκυσμού μετά το πέρας της δοκιμής



Σχ.3.7 Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του 10CrMo9.10

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3** Αποτελέσματα εφελκυσμού του δοκιμίου 10CrMo9.10

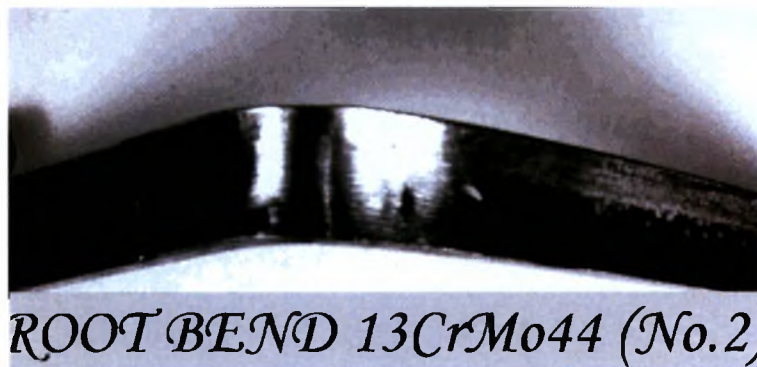
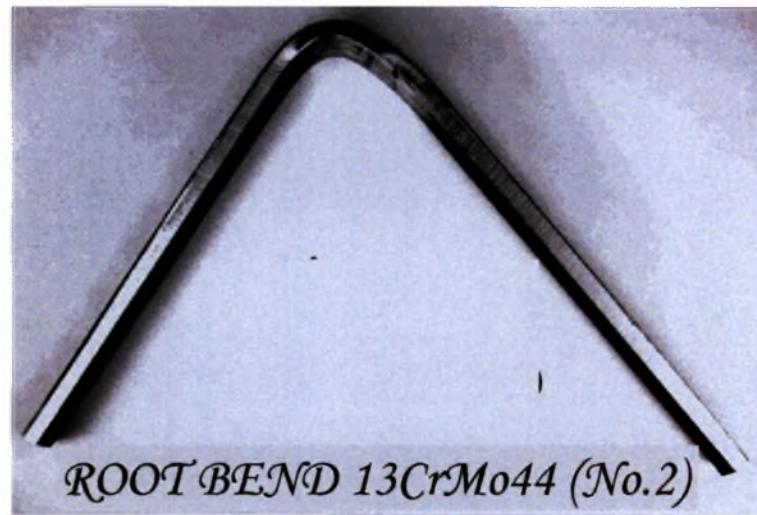
<b>ΠΛΑΤΟΣ (mm)</b>	<b>ΠΑΧΟΣ (mm)</b>	<b>ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (N·mm<sup>-2</sup>)</b>	<b>ΘΕΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ</b>
6	4.40	410	563	Βασικό Μέταλλο

### 3.4 Δοκιμή Κάμψεως

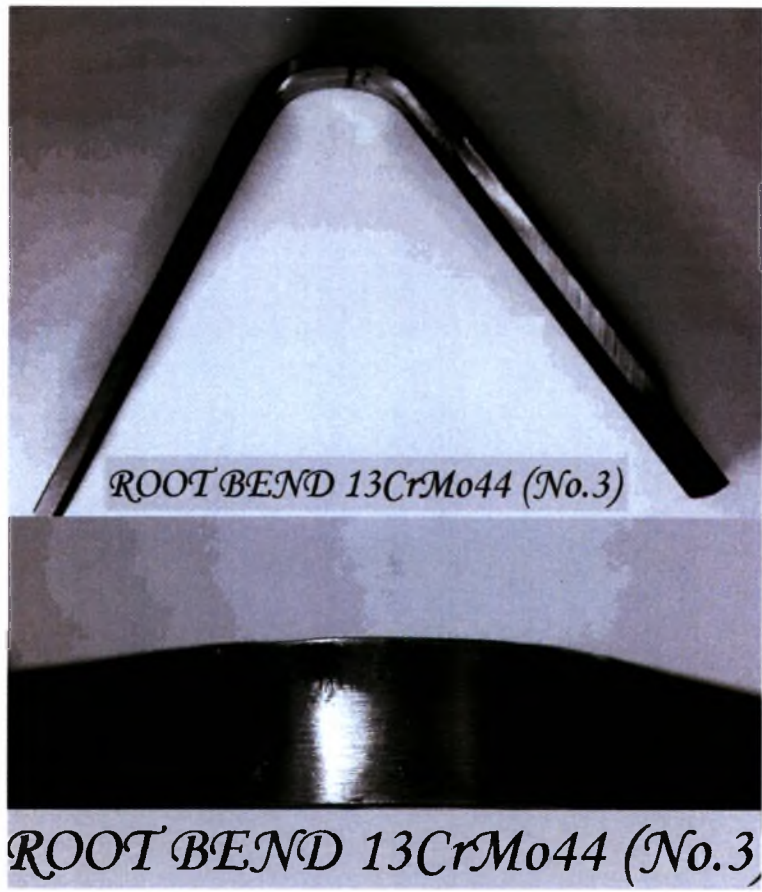
Οι δοκιμές κάμψης των μετάλλων δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, ωστόσο οι πληροφορίες που προκύπτουν από τις δοκιμές αυτές είναι σαφώς χρήσιμες. Λόγω της σχετικής πολυπλοκότητας των σχέσεων τάσης – παραμόρφωσης στη κάμψη, η αντοχή στη κάμψη δεν ποσοτικοποιείται πέρα από όσο επιτρέπει η υπόθεση ότι ισχύει η γραμμική ελαστική συμπεριφορά.

Οι δοκιμές κάμψης πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο *DIN 50 121*. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για κάθε δοκίμιο. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στην EBETAM.

### 3.4.1 Κάμψη του χάλυβα 13CrMo44



Σχ.3.8 Κάμψη 13CrMo44(No.2)



*Σχ.3.9 Κάμψη 13CrMo44(No.3)*



*FACE BEND 13CrMo44 (No.4)*

*Σχ.3.10 Κάμψη 13CrMo44(No.4)*



*FACE BEND 13CrMo44 (No.5)*

*Σχ.3.11 Κάμψη 13CrMo44(No.5)*



### 3.4.2 Κάμψη του χάλυβα 10CrMo9.10



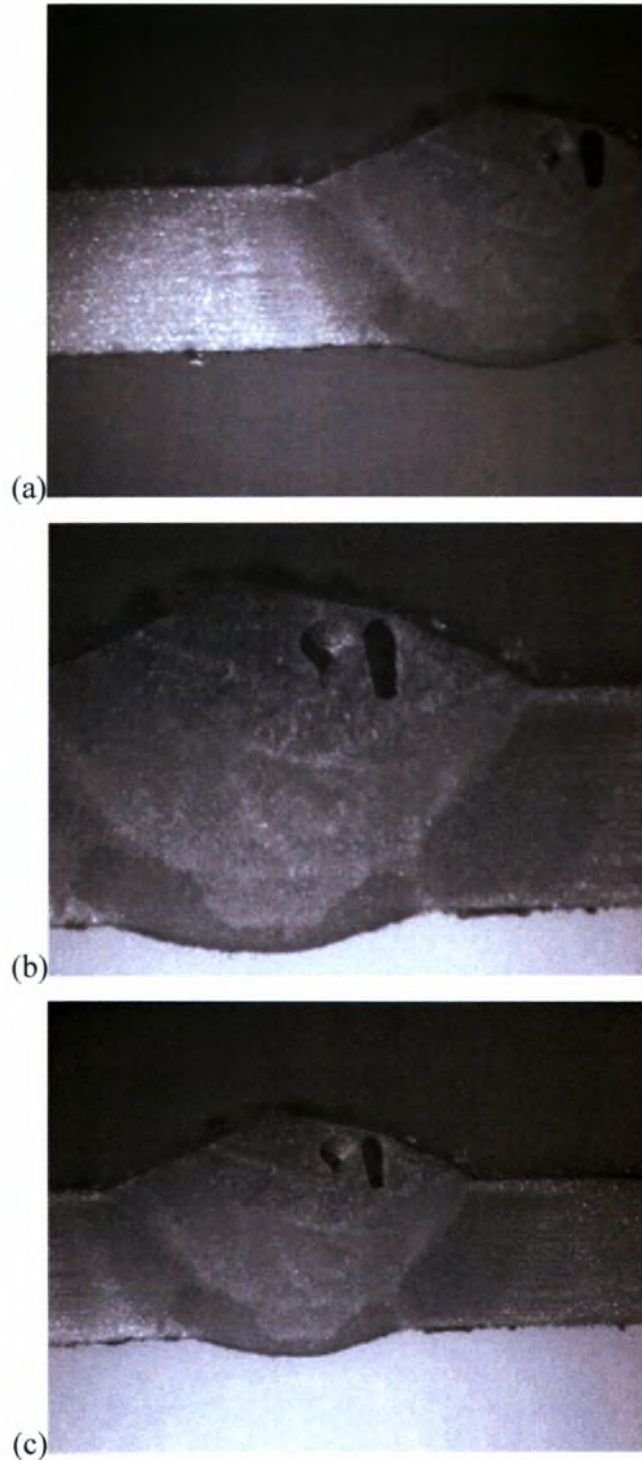
*Σχ.3.12* Δοκίμια κάμψης 10CrMo9.10 μετά το πέρας της δοκιμής

Από τις φωτογραφίες των δοκιμίων που υπέστησαν κάμψη, είναι φανερό ότι δεν δημιουργήθηκε ρωγμή σε κανένα από τους χάλυβες, επομένως τα δοκίμια πέρασαν το έλεγχο με επιτυχία.

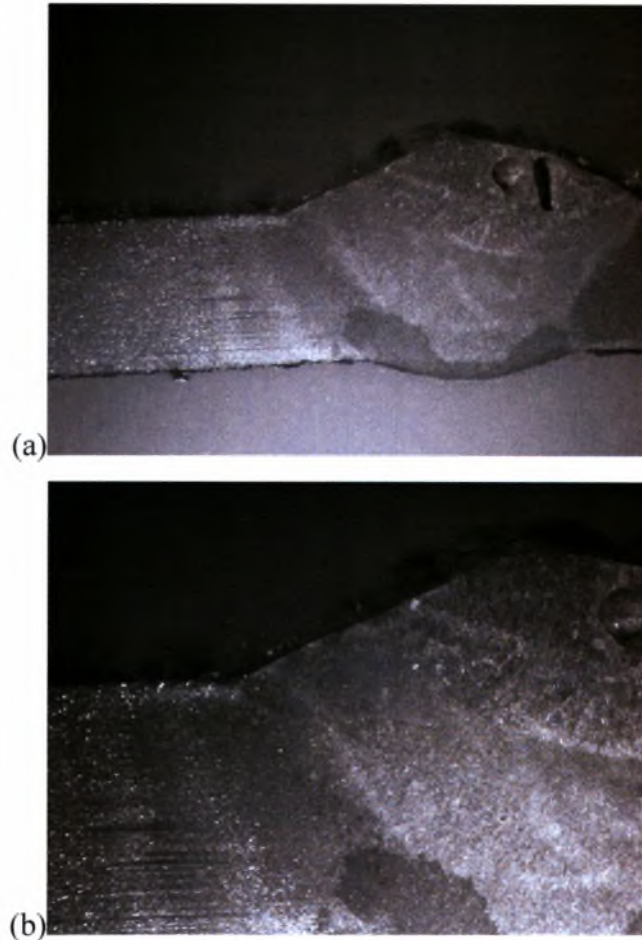
### 3.5 Μακροδομή

Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Nital 30%. Οι φωτογραφίες τραβήχτηκαν στο Εργαστήριο Υλικών. Στη συνέχεια υπάρχουν οι φωτογραφίες των δοκιμίων 13CrMo44, 15Mo3 και 10CrMo9.10 οι οποίες τραβήχτηκαν στο Εργαστήριο Υλικών με μεγέθυνση  $\times 8$ .

#### 3.5.1 Μακροδομή του 13CrMo44



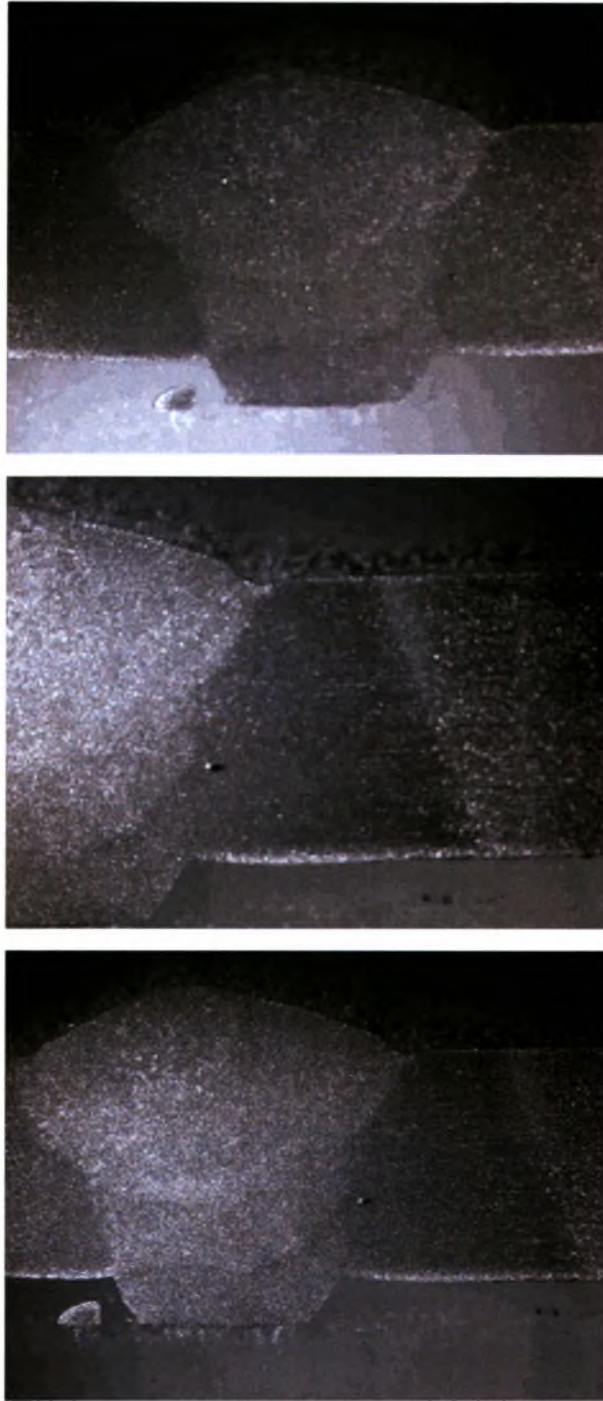
Σχ.3.13 Μακροδομή του 13CrMo44(8 $\times$ )



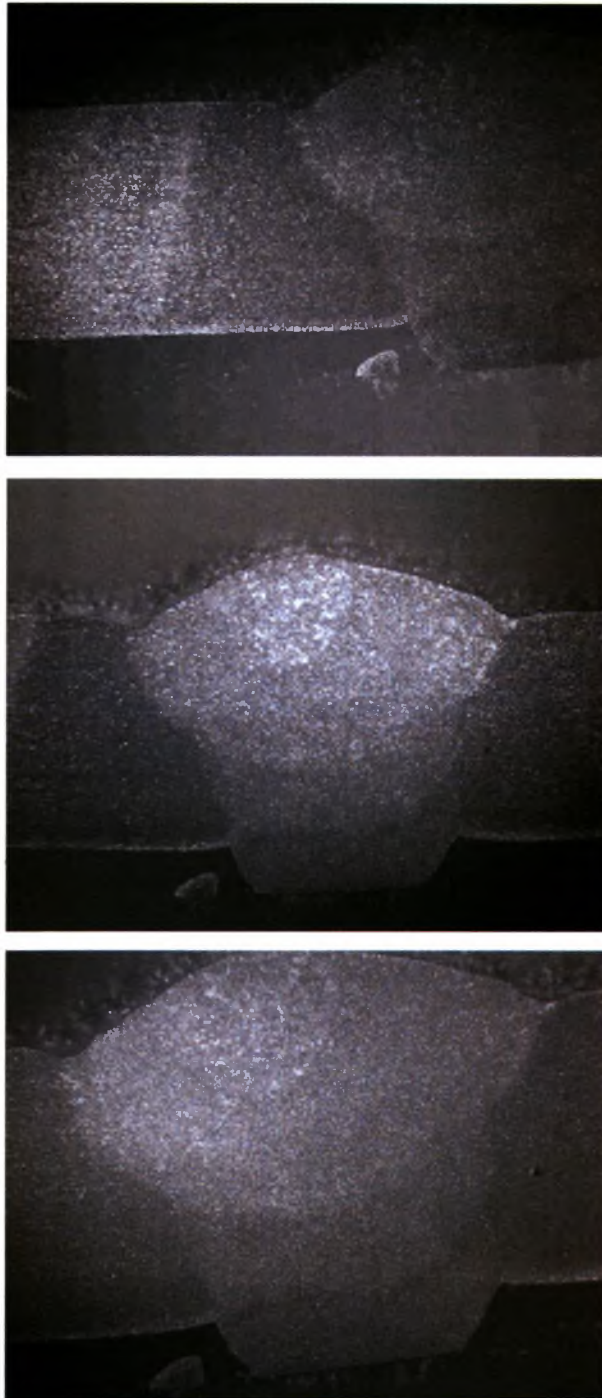
*Σχ. 3.14 Μακροδομή του 13CrMo44(a-8x,b-10x)*

Από τα Σχ.3.13 και 3.14 προκύπτει το συμπέρασμα ότι στο δοκίμιο καταρχήν ότι η ΘΕΖ και η λίμνη συγκόλλησης είναι μετρήσιμες. Επίσης έχουν δημιουργηθεί δυο ΘΕΖ, που συμβαίνει όταν η συγκόλληση πραγματοποιείται με 2 πάσα. Στην λίμνη συγκόλλησης διακρίνονται διαφορετικές ζώνες τήξεως. Τέλος διακρίνονται εγκλείσματα στο επάνω μέρος της συγκόλλησης στη λίμνη συγκόλλησης, τα οποία ίσως προκλήθηκαν από εγκλωβισμό αερίων από το περιβάλλον κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

### 3.5.2 Μακροδομή του 15Mo3



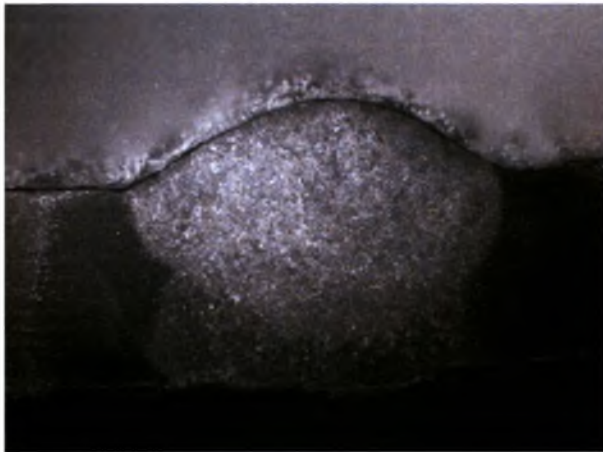
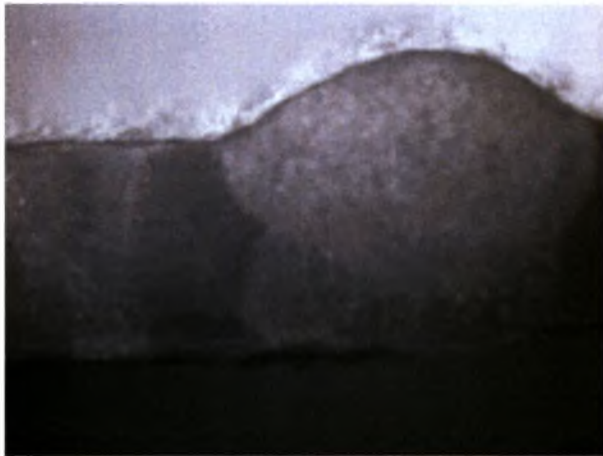
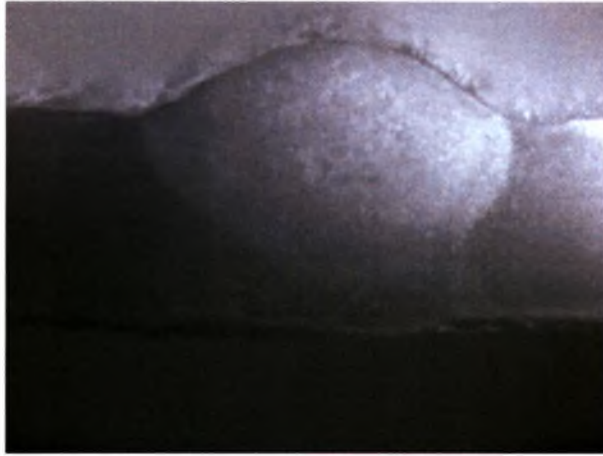
*Σχ.3.15 Μακροδομή του 15Mo3(8x)*



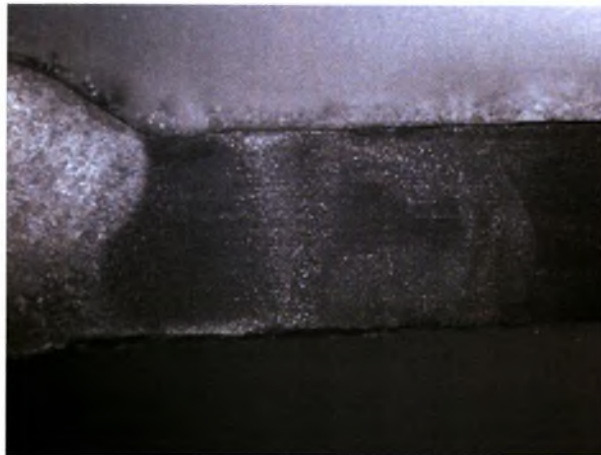
*Σχ.3.16 Μακροδομή του 15Mo3(8x)*

Από τα Σχ.3.15 και 3.16 προκύπτει το συμπέρασμα ότι στο δοκίμιο είναι ευδιάκριτες και μετρήσιμες οι περιοχές της ΘΕΖ και της λίμνη συγκόλλησης. Επίσης έχουν δημιουργηθεί δυο ΘΕΖ, που συμβαίνει όταν η συγκόλληση πραγματοποιείται με 2 πάσα. Στην λίμνη συγκόλλησης διακρίνονται διαφορετικές ζώνες τήξεως. Δεν διακρίνονται εγκλείσματα ή πόροι.

### 3.5.3 Μακροδομή του 10CrMo9.10



*Σχ. 3.17 Μακροδομή του 10CrMo9.10(8x)*



*Σχ.3.18 Μακροδομή του 10CrMo9.10 (8x)*

Από τα Σχ.3.17 και 3.18 προκύπτει το συμπέρασμα ότι στο δοκίμιο είναι ευδιάκριτες και μετρήσιμες οι περιοχές της ΘΕΖ και της λίμνη συγκόλλησης. Επίσης έχουν δημιουργηθεί δυο ΘΕΖ, που συμβαίνει όταν η συγκόλληση πραγματοποιείται με 2 πάσα. Στην λίμνη συγκόλλησης διακρίνονται διαφορετικές ζώνες τήξεως. Δεν διακρίνονται εγκλείσματα ή πόροι.

## 3.6 Μικροδομή

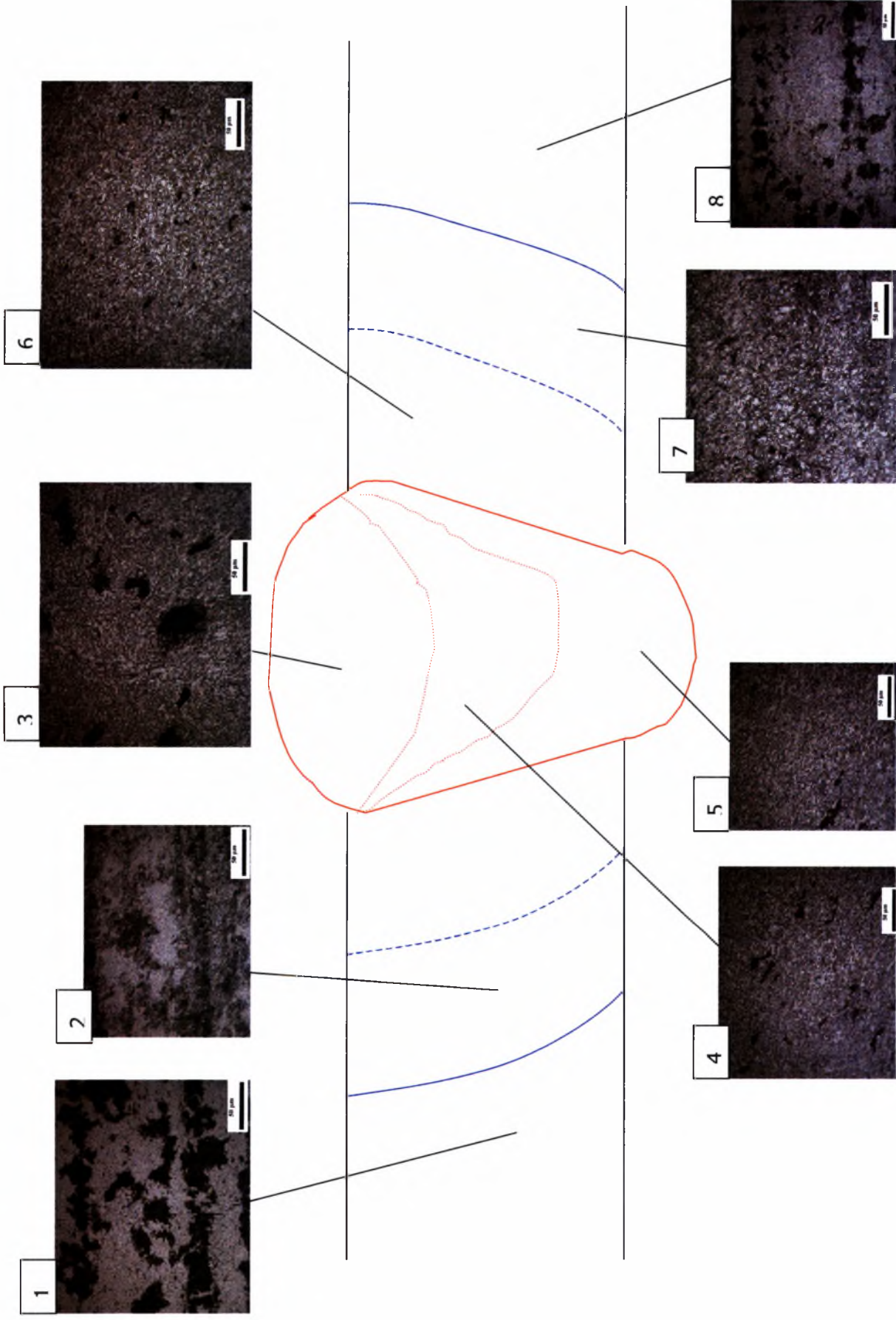
Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Nital 2% και ο χρόνος της χημικής προσβολής 10 sec. Οι φωτογραφίες τραβήχτηκαν στο Εργαστήριο Υλικών. Στη συνέχεια παρατίθεται η χαρτογράφηση των δοκιμίων 13CrMo44, 15Mo3 και 10CrMo9.10 και φωτογραφίες των δοκιμίων αυτών, από τη περιοχή του μετάλλου βάσης (*base metal*), της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (*HAZ*) και της λίμνης συγκόλλησης (*weld pool*).

### 3.6.1 Μικροδομή του 13CrMo44

Από το διάγραμμα φάσεων Fe-C, μπορούμε να καταλάβουμε ότι το μέταλλο βάσης αποτελείται από φερρίτη και περλίτη. Κατά συνέπεια, θεωρώντας τη μέση τιμή της περιεκτικότητάς του χάλυβα 13CrMo44, σε C (από τη χημική ανάλυση), δηλαδή 0.14%C, από το διάγραμμα φάσεων Fe-C και το κανόνα του μοχλού μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό σε φερρίτη και περλίτη του μετάλλου βάσης. Εφαρμόζοντας το κανόνα του μοχλού προκύπτει ότι το μέταλλο βάσης αποτελείται από 85.16% προευτηκτοειδή φερρίτη (γιατί προέρχεται από υποευτηκτοειδή χάλυβα) και 14.84% περλίτη. Η λίμνη συγκόλλησης όμως αποτελείται από διαφορετικό υλικό πλήρωσης, με περιεκτικότητα 0.11%C, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη για τη μικροδομή της λίμνης συγκόλλησης, που έχει διαφορετική σύσταση από το μέταλλο βάσης. Στις περιοχές της ΘΕΖ και της λίμνης συγκόλλησης λόγω της συγκόλλησης (πρόσδοση θερμότητας) και των γρήγορων ρυθμών ψύξης, ο φερρίτης και ο περλίτης μετασχηματίζονται. Επομένως στη ΘΕΖ θα αναμέναμε παραμένον ωστενίτη, προευτηκτοειδής φερρίτης,, περλίτη, μαρτενσίτη ή μπαινίτη ο οποίος δύσκολα αναγνωρίζεται (χρειάζεται ειδικό αντιδραστήριο). Αντίστοιχα στην λίμνη συγκόλλησης περιμένουμε να παρατηρήσουμε αντίστοιχες φάσεις αλλά να υπάρχει μεγαλύτερη ομοιογένεια σε σχέση με τη HAZ, δενδρίτες και ίσως και πιο λεπτόκοκκες φάσεις. Στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός για τις φάσεις της μικροδομής που αντιστοιχούν σε κάθε περιοχή.

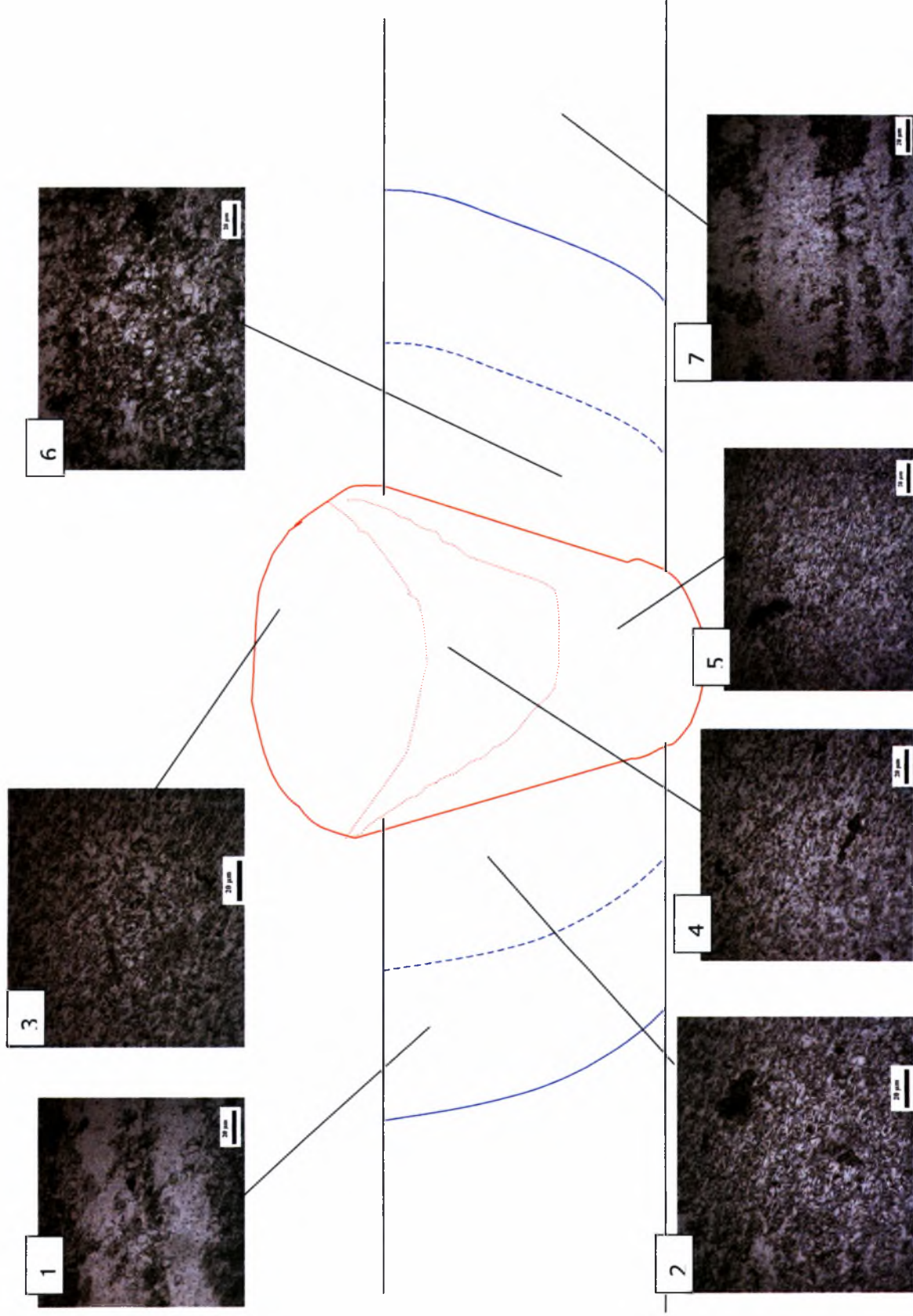


# ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΟΥ 13CrMo44

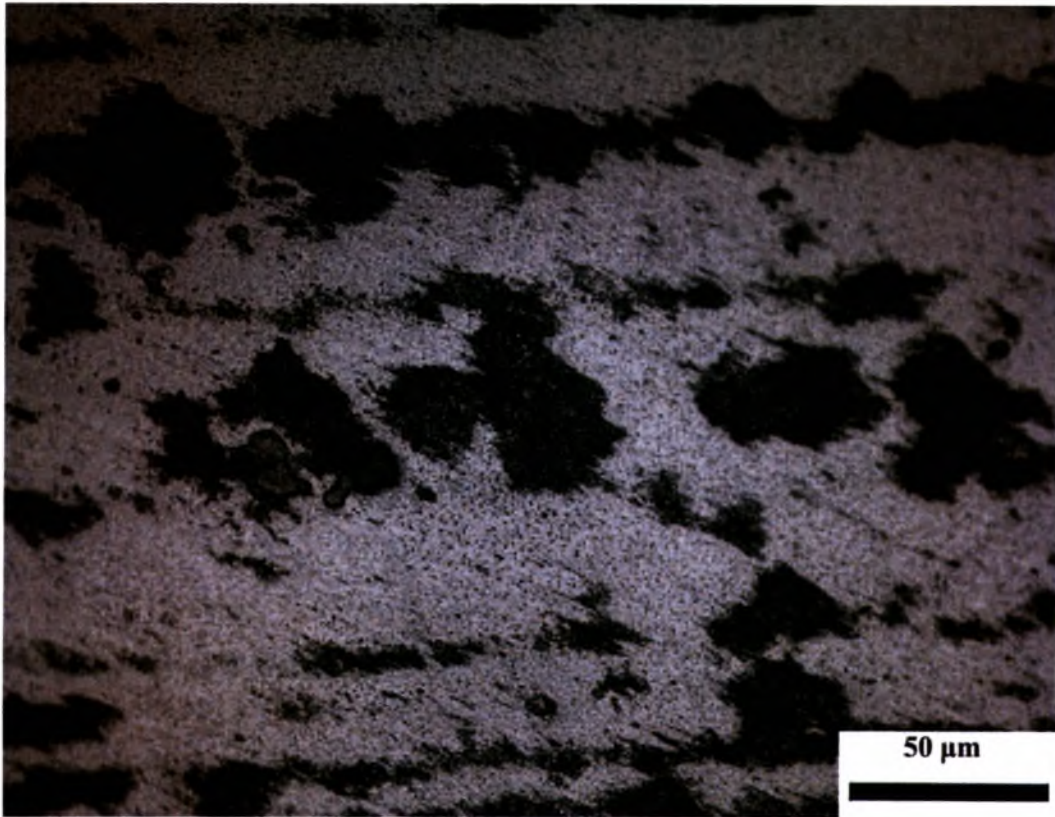


Σχ. 3.19 Χαρτογράφηση 13CrMo 44 – 500 φορές μεγέθυνση

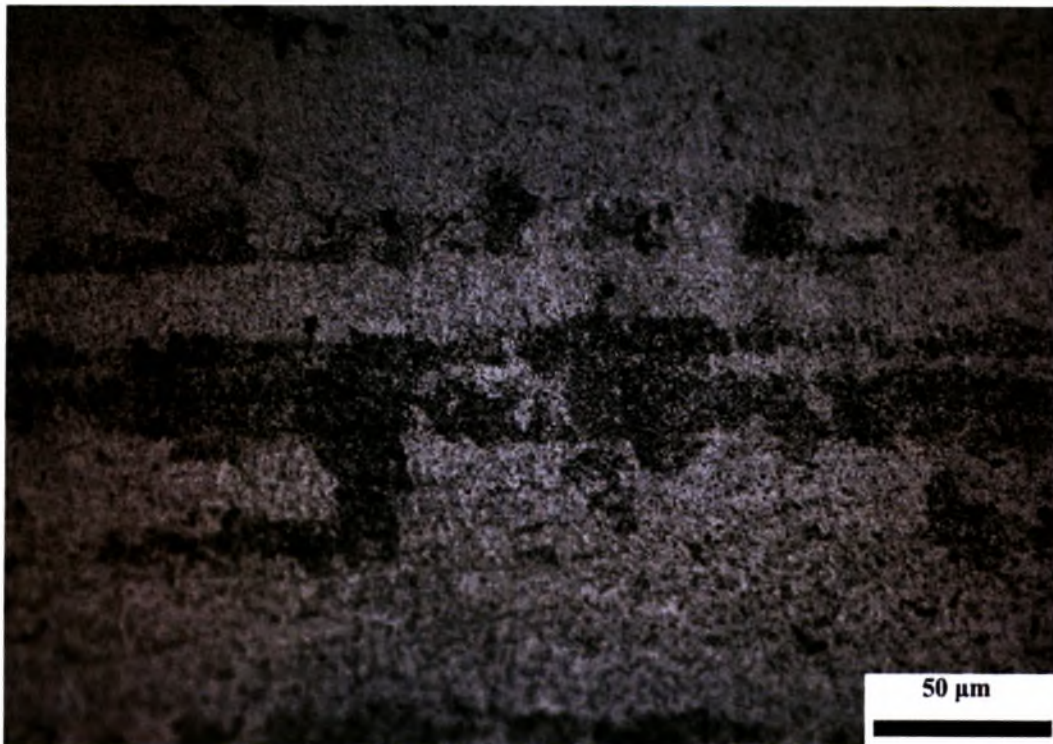
# ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ 13CrMo44



Σχ. 3.20 Χαρτογράφιση 13CrMo 44 – 1000 φορές μεγέθυνση

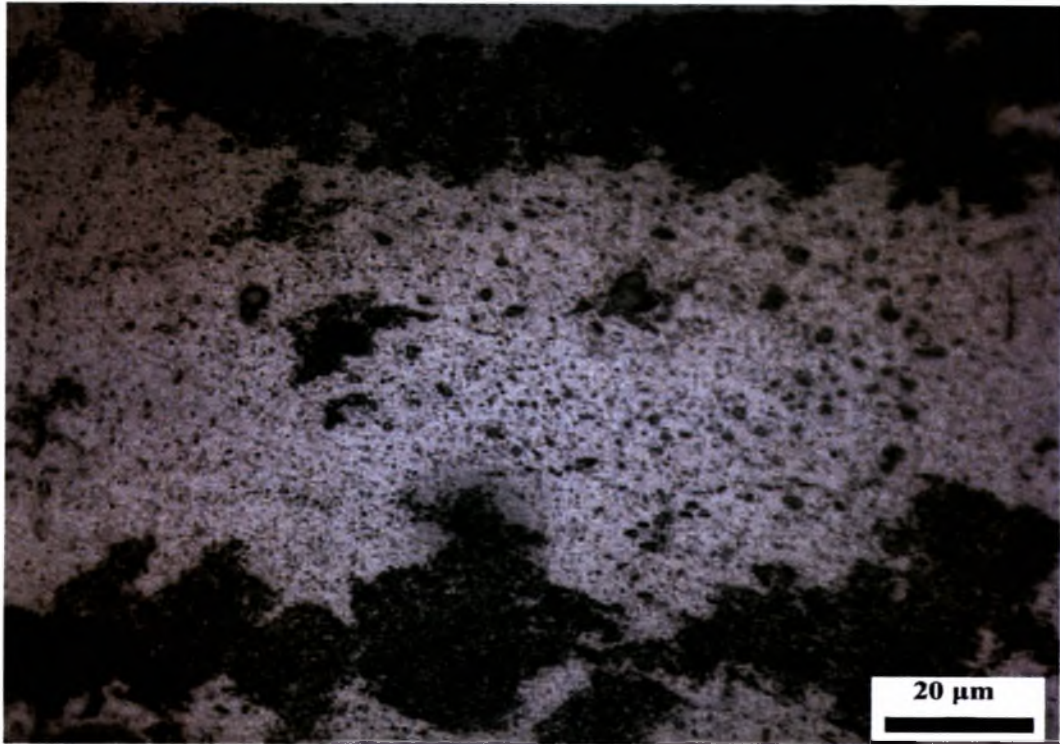


(a)

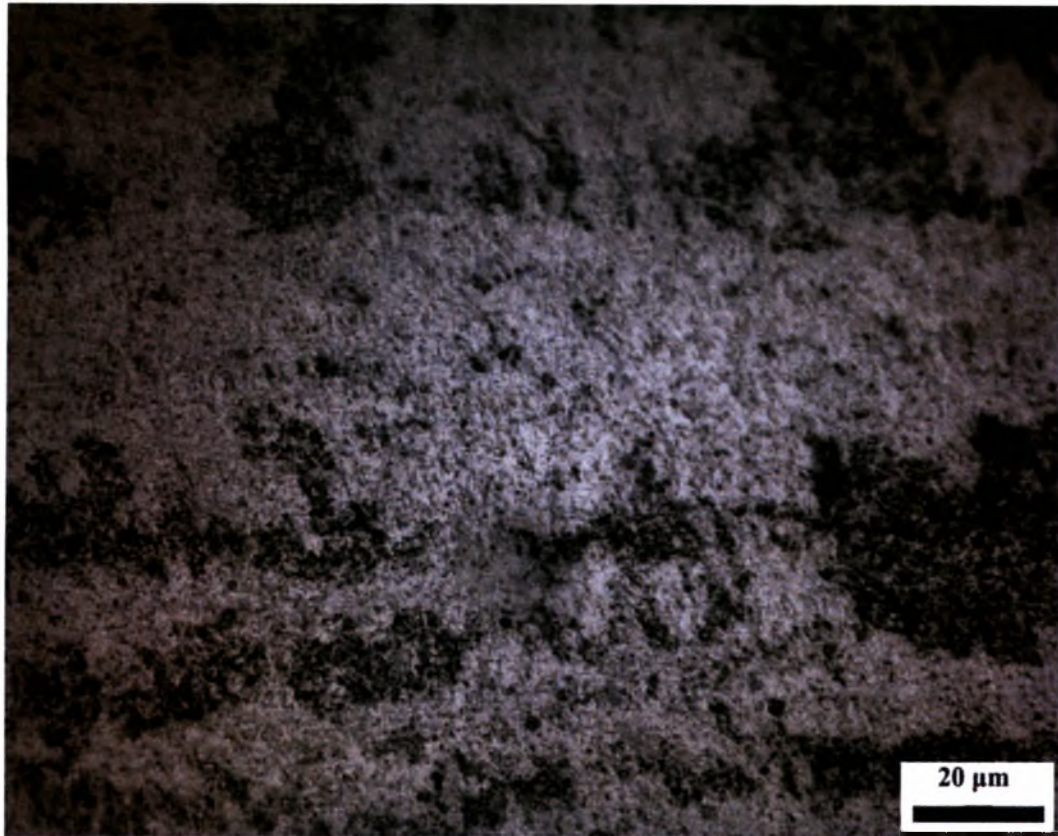


(β)

Σχ.3.21 Μέταλλο βάσης 13CrMo44, α και β (x500)



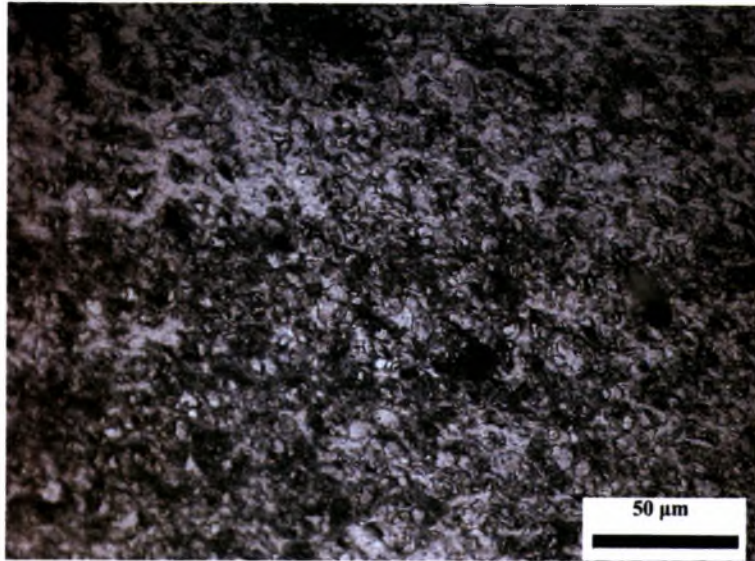
(γ)



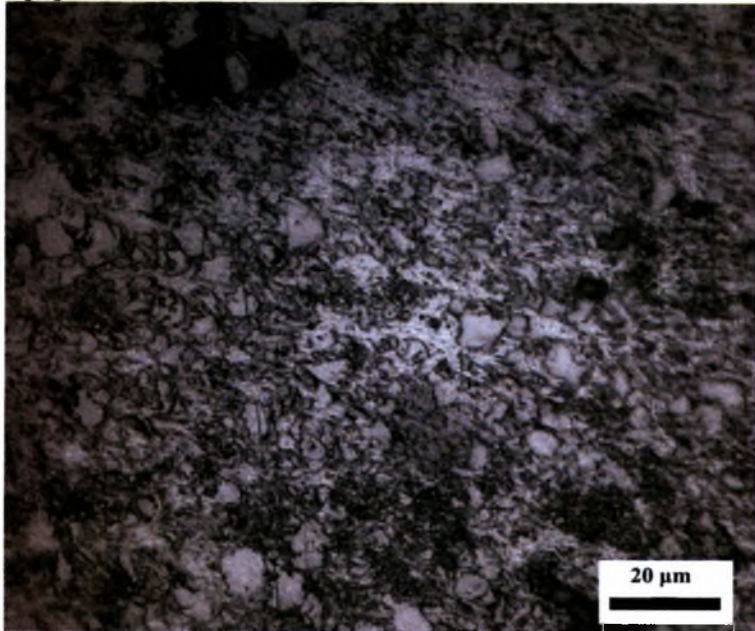
(δ)

Σχ. 3.22 Μέταλλο βάσης 13CrMo44, γ και δ (x1000)

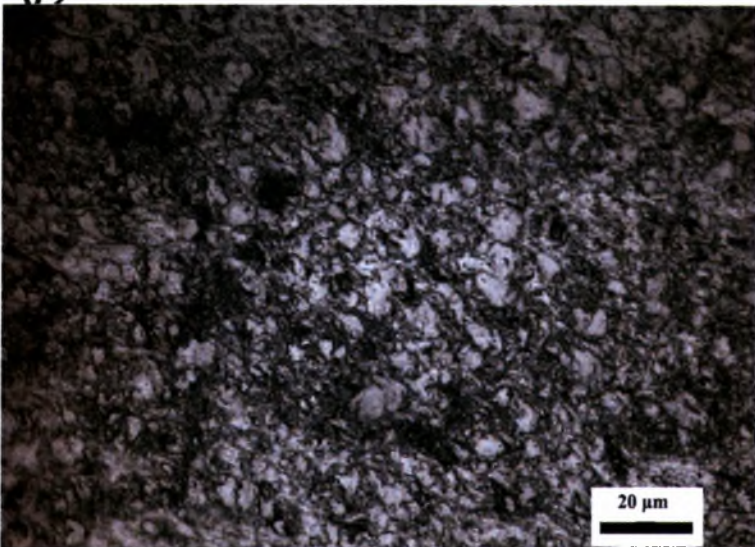
Το μέταλλο βάσης είναι κυρίως φερριτικό και έχει σε ένα ποσοστό περλίτη. Διακρίνουμε κυρίως πλακίδια φερρίτη καθώς και βελονοειδή φερρίτη (Σχ.3.22δ). Επίσης υπάρχουν καρβίδια τα οποία μπορεί να είναι άνθρακας που δεν πρόλαβε να διαλυθεί ή κάποιο άλλο κραμματικό στοιχείο.



(a)

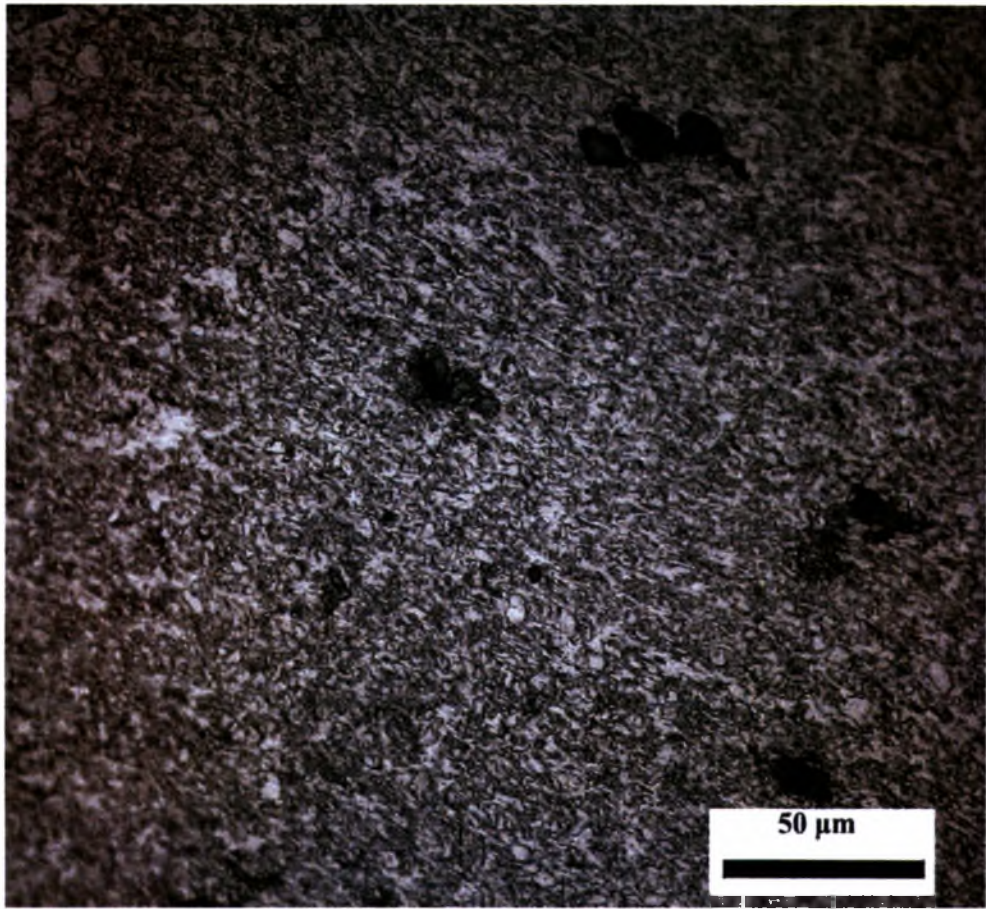


(β)

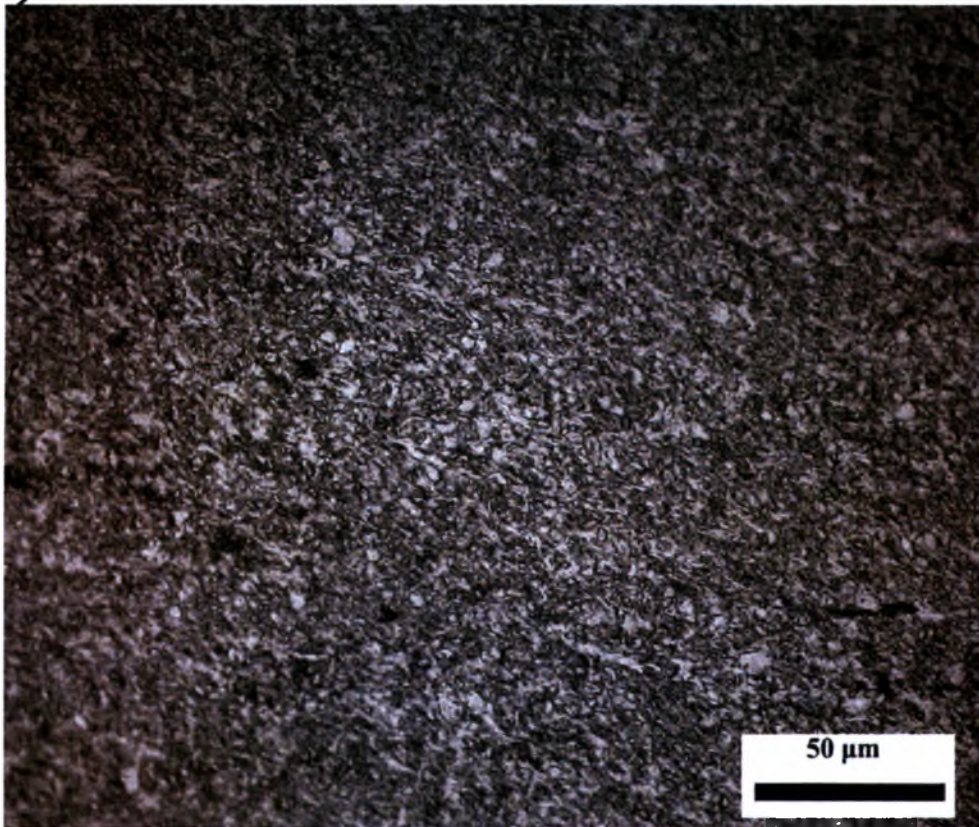


(γ)

Σχ. 3.23 HAZI Δοκιμίου 13CrMo44, α (x500), β και γ (x1000)

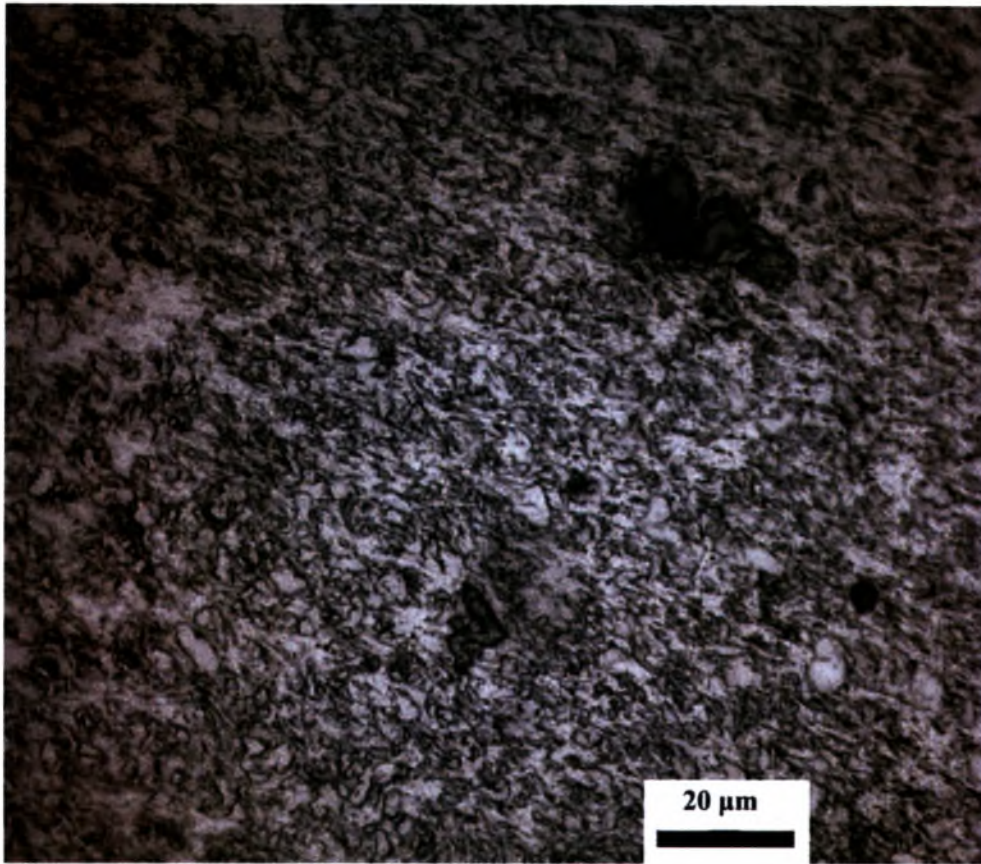


(a)

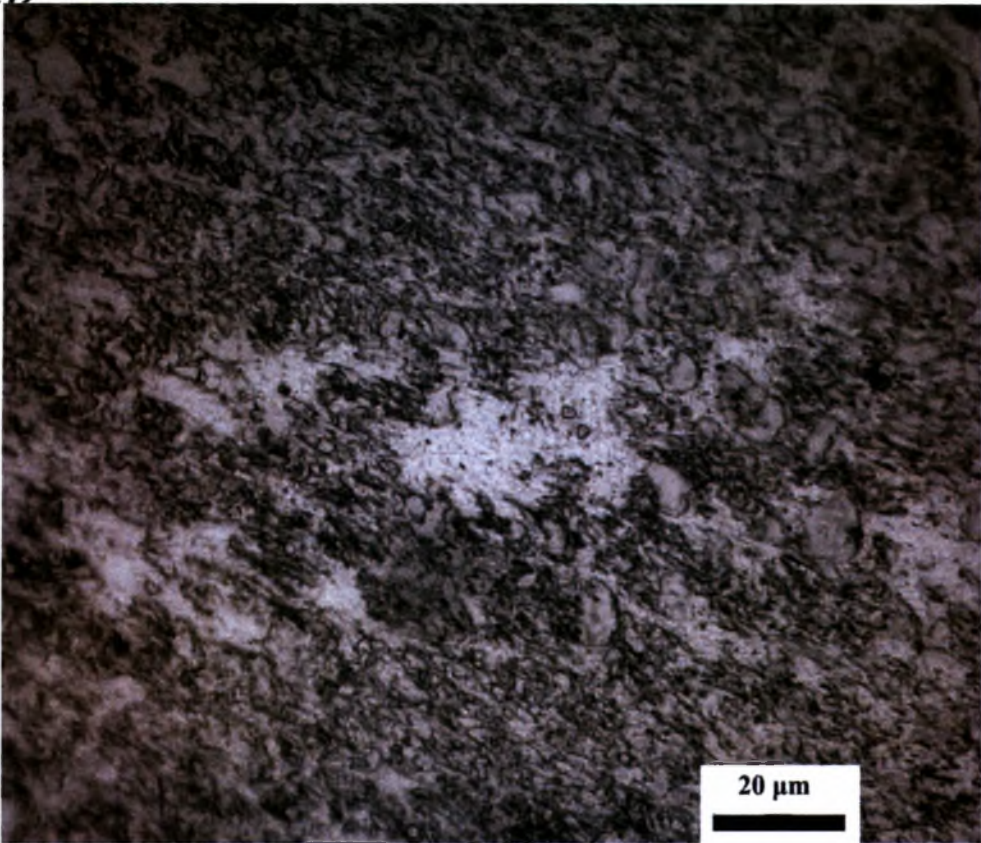


(β)

Σχ. 3.24 HAZ2 Δοκίμιου 13CrMo44 – α και β (x500)



( $\gamma$ )

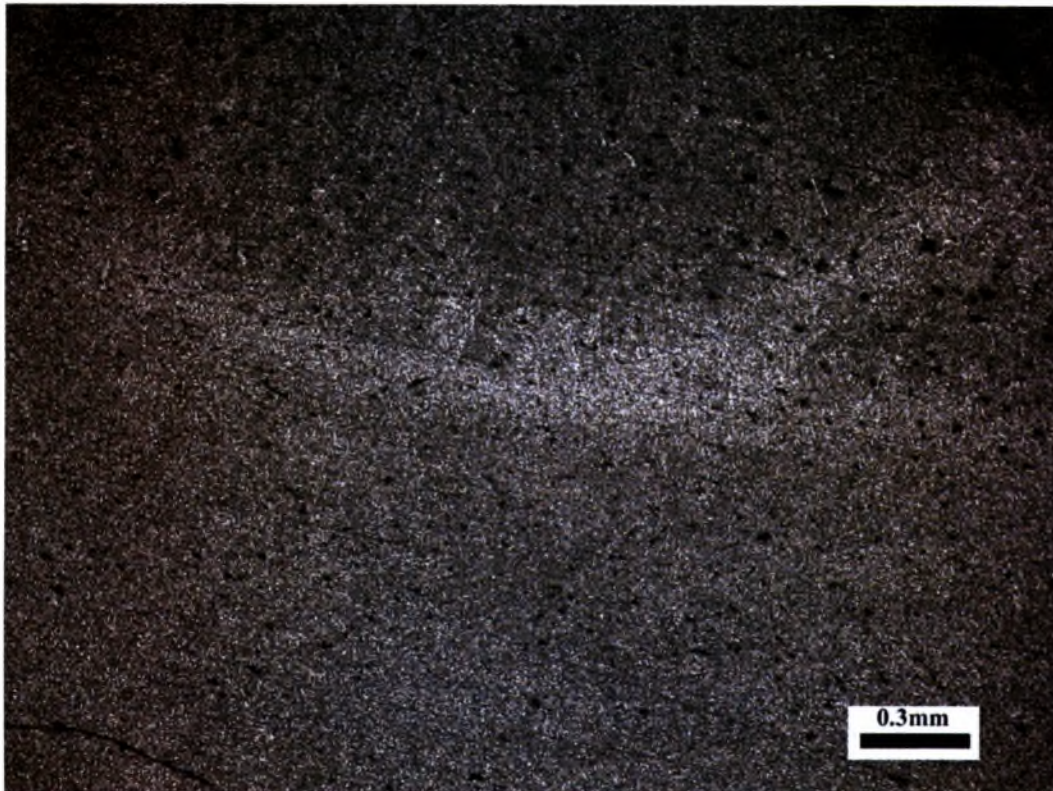


( $\delta$ )

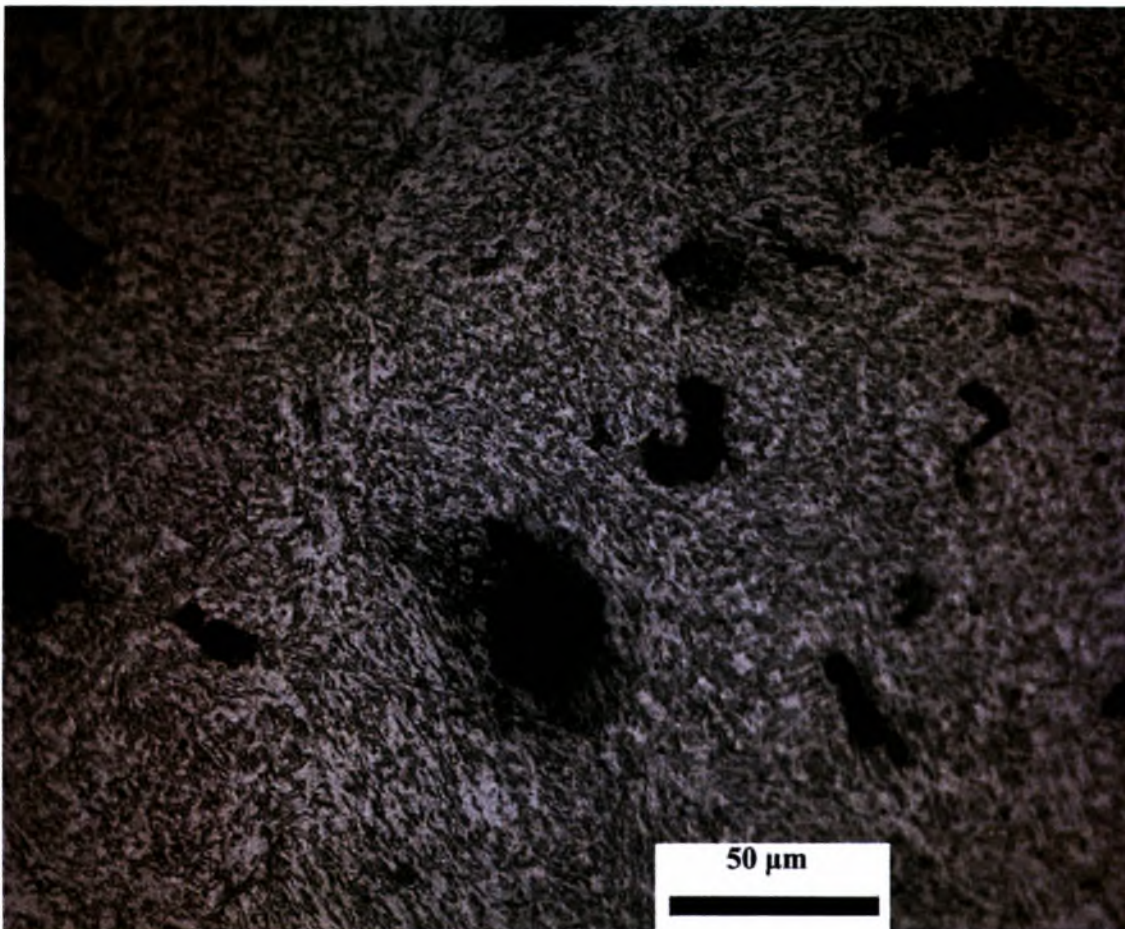
Σχ. 3.25 HAZ2 Δοκμίου 13CrMo44 –  $\gamma$  και  $\delta$  (x1000)



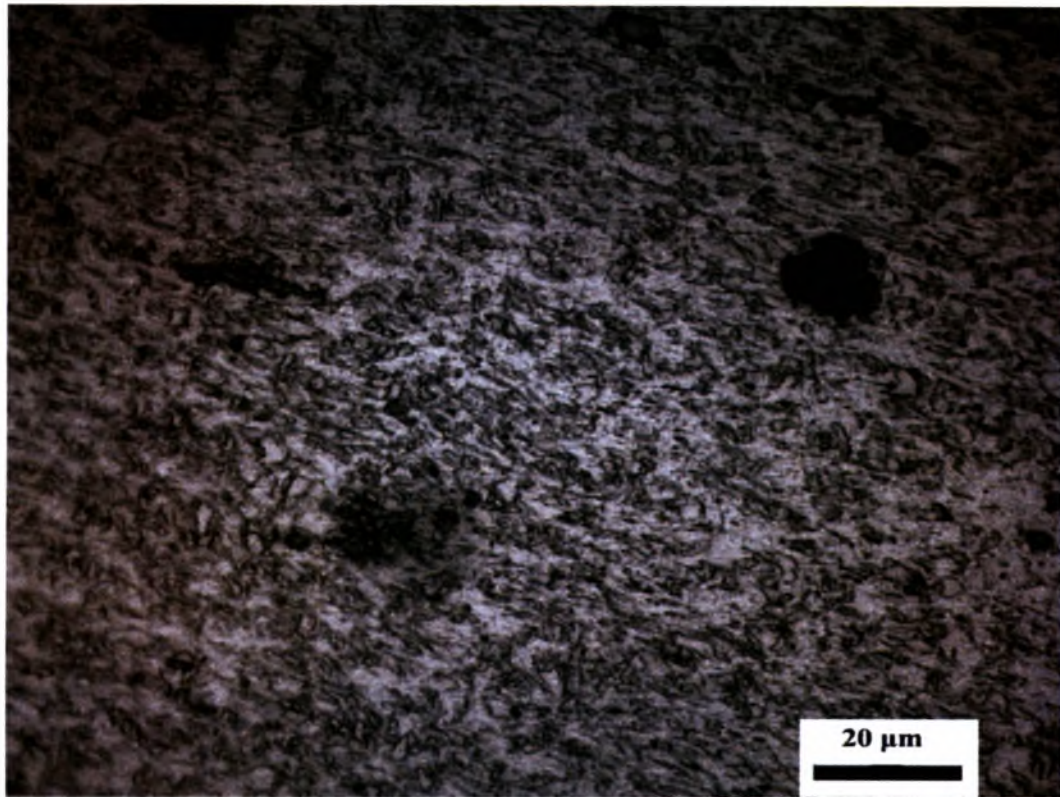
Στη ΘΕΖ διακρίνουμε μια δομή πιο λεπτόκοκκη από το μέταλλο βάσης όπου έχουμε δημιουργία μαρτενσίτη σε μικρό ποσοστό. Παράλληλα φαίνεται να υπάρχει παραμένων ωστενίτης και ίσως μπαινίτης. Επίσης διακρίνονται ιδιομορφές φερρίτη, φερρίτης Widmanstätten, φερρίτης που πυρηνώνεται στο εσωτερικό των κόκκων των καρβιδίων αλλά και προεπηκτοειδή φερρίτη. Επιπλέον υπάρχουν εγκλωβισμένα καρβίδια.



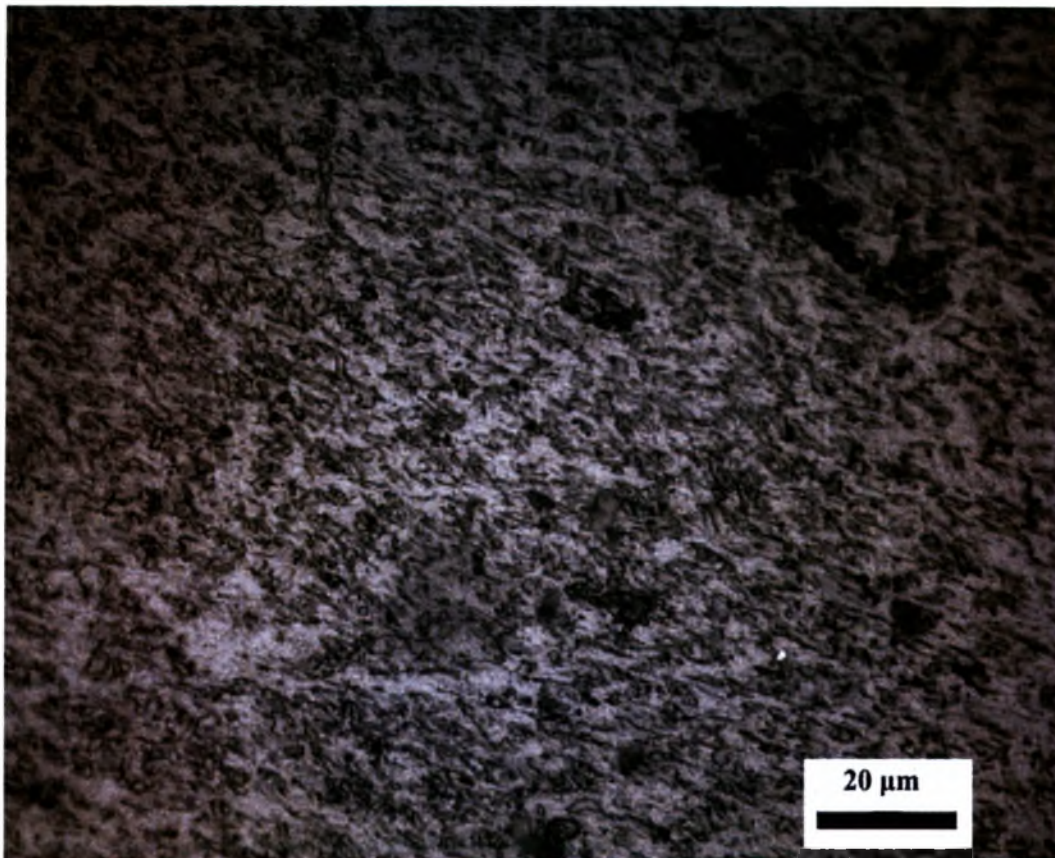
Σχ.3.26 Λίμνη συγκόλλησης Δοκιμίου 13CrMo44 – (x50)



Σχ.3.27 Λίμνη συγκόλλησης Δοκιμίου 13CrMo44 – (x500)



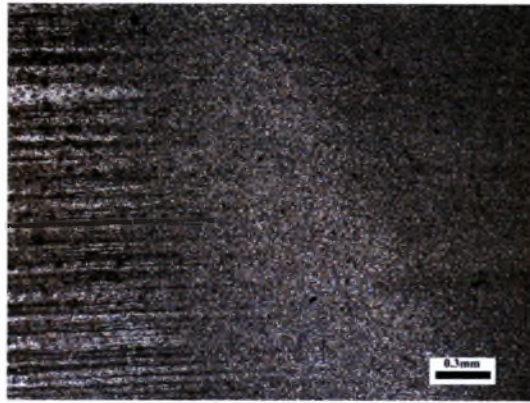
(a)



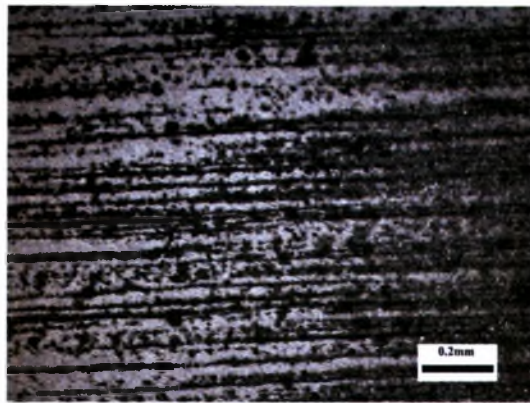
(b)

Σχ.3.28 Λίμνη συγκόλλησης Δοκιμίου 13CrMo44 – α και β (x1000)

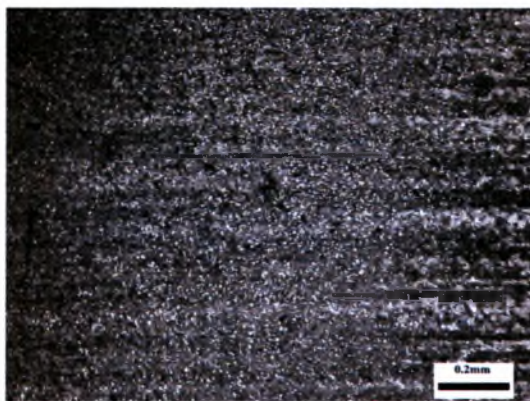
Στη λίμνη συγκόλλησης παρατηρούμε αρκετή ομοιογένεια, δενδρίτες και τον εγκλωβισμό πολλών καρβιδίων. Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση διαπιστώνουμε την ύπαρξη πολλαπλών πλακιδίων φερρίτη Widmanstätten, με λεπτόκοκκη δομή, που είναι ευθυγραμμισμένα και πυρηνώνεται εσωτερικά σε μεγάλα εγκλείσματα. Επίσης διακρίνουμε λωρίδες προφανώς μπαινίτη που ακολουθούν τη διεύθυνση της ροής και ένα μικρό ποσοστό μαρτενσίτη. Επίσης υπάρχει βελονοειδής φερρίτης και ένα ποσοστό προευτηκτοειδή φερρίτη.



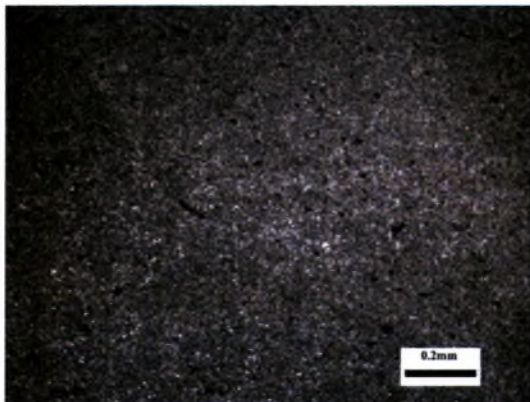
Σχ.3.29 Όρια b.m. – haz1 – haz2 (x50)



Σχ.3.30 Όρια b.m. – haz1 (x100)



Σχ.3.31 Όρια haz2 – haz1 – b.m. (x100)

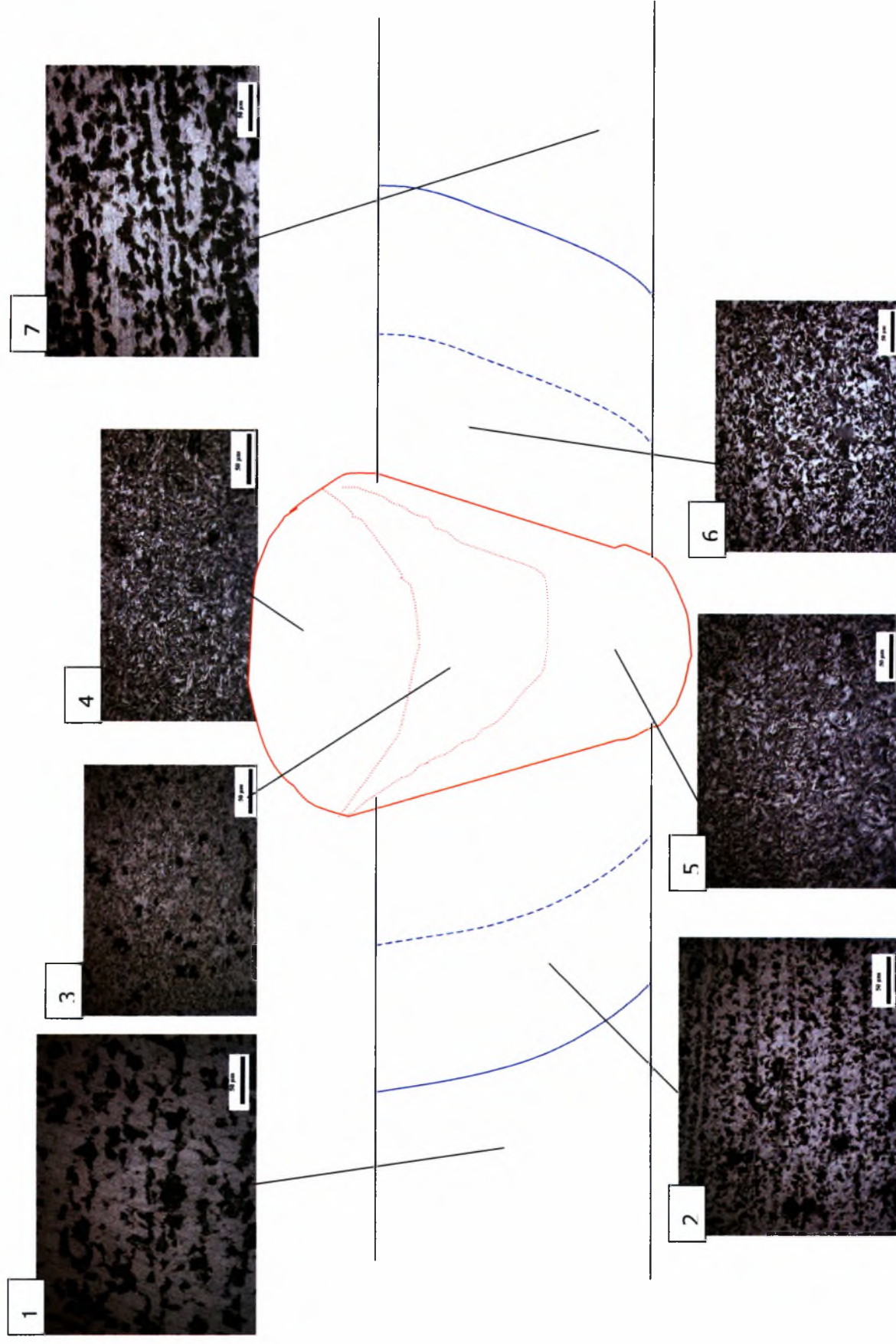


Σχ.3.32 Όρια haz2 – w.p. (x100)

### 3.6.2 Μικροδομή του 15Mo3

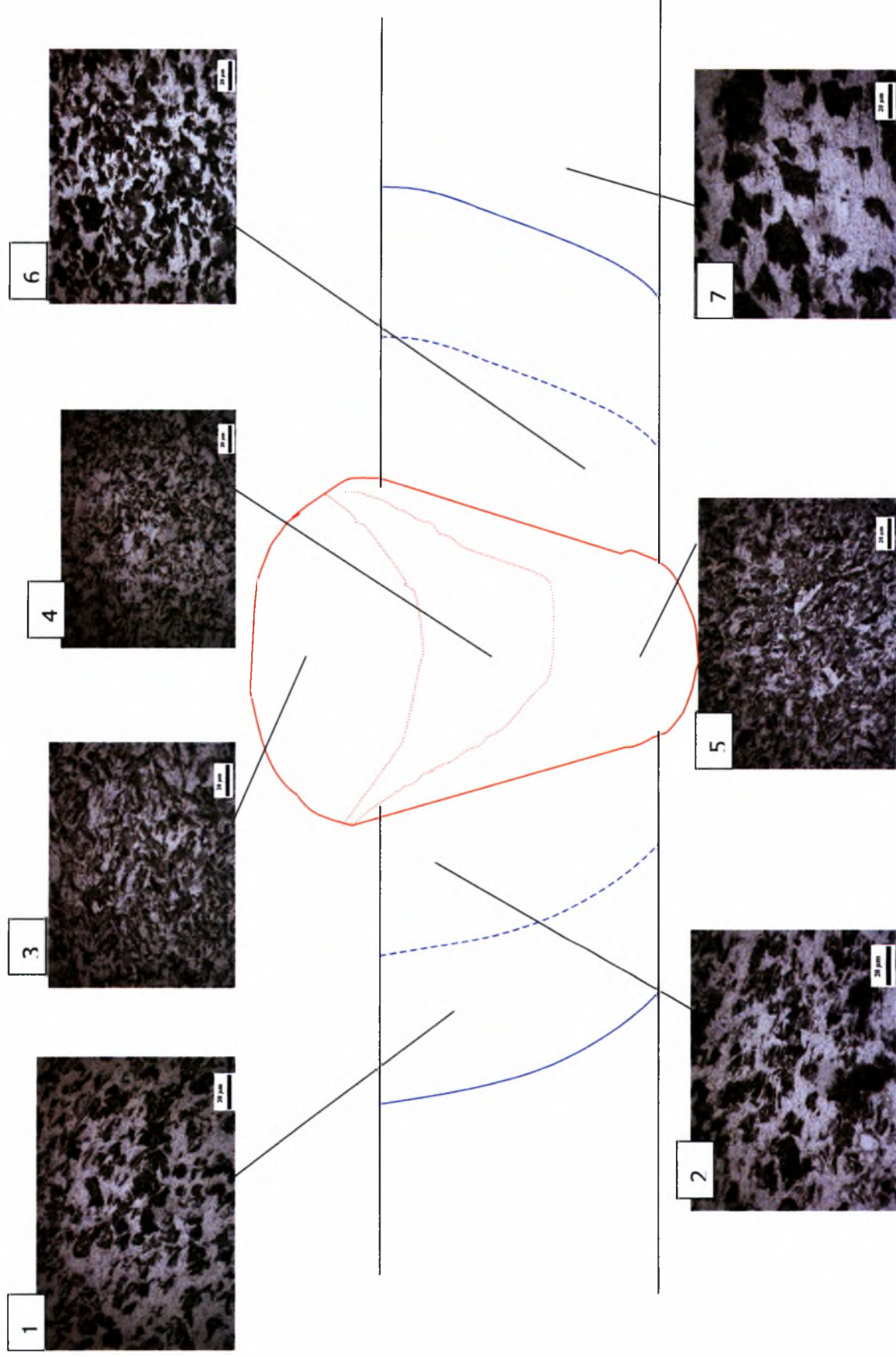
Από το διάγραμμα φάσεων Fe-C, μπορούμε να καταλάβουμε ότι το μέταλλο βάσης αποτελείται από φερρίτη και περλίτη. Κατά συνέπεια, θεωρώντας τη μέση τιμή της περιεκτικότητας του χάλυβα 15Mo3, σε C (από τη χημική ανάλυση), δηλαδή 0.16%C, από το διάγραμμα φάσεων Fe-C και εφαρμόζοντας το κανόνα του μοχλού προκύπτει ότι το μέταλλο βάσης αποτελείται από 82.58% προευτηκτοειδή φερρίτη (γιατί προέρχεται από υποευτηκτοειδή χάλυβα) και 17.42% περλίτη. Η λίμνη συγκόλλησης όμως αποτελείται από διαφορετικό υλικό πλήρωσης, με περιεκτικότητα 0.1%C, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη για τη μικροδομή της λίμνης συγκόλλησης, που έχει διαφορετική σύσταση από το μέταλλο βάσης. Στη ΘΕΖ, από το μετασχηματισμό του ωστενίτη, θα αναμέναμε παραμένων ωστενίτη, προευτηκτοειδής φερρίτης, περλίτη, μαρτενσίτη ή μπαινίτη ο οποίος δύσκολα αναγνωρίζεται (χρειάζεται ειδικό αντιδραστήριο). Αντίστοιχα στην λίμνη συγκόλλησης περιμένουμε να παρατηρήσουμε αντίστοιχες φάσεις αλλά να υπάρχει μεγαλύτερη ομοιογένεια σε σχέση με τη HAZ, δενδρίτες και ίσως και πιο λεπτόκοκκες φάσεις. Στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός για τις φάσεις της μικροδομής που αντιστοιχούν σε κάθε περιοχή.

# ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ 15Μο3



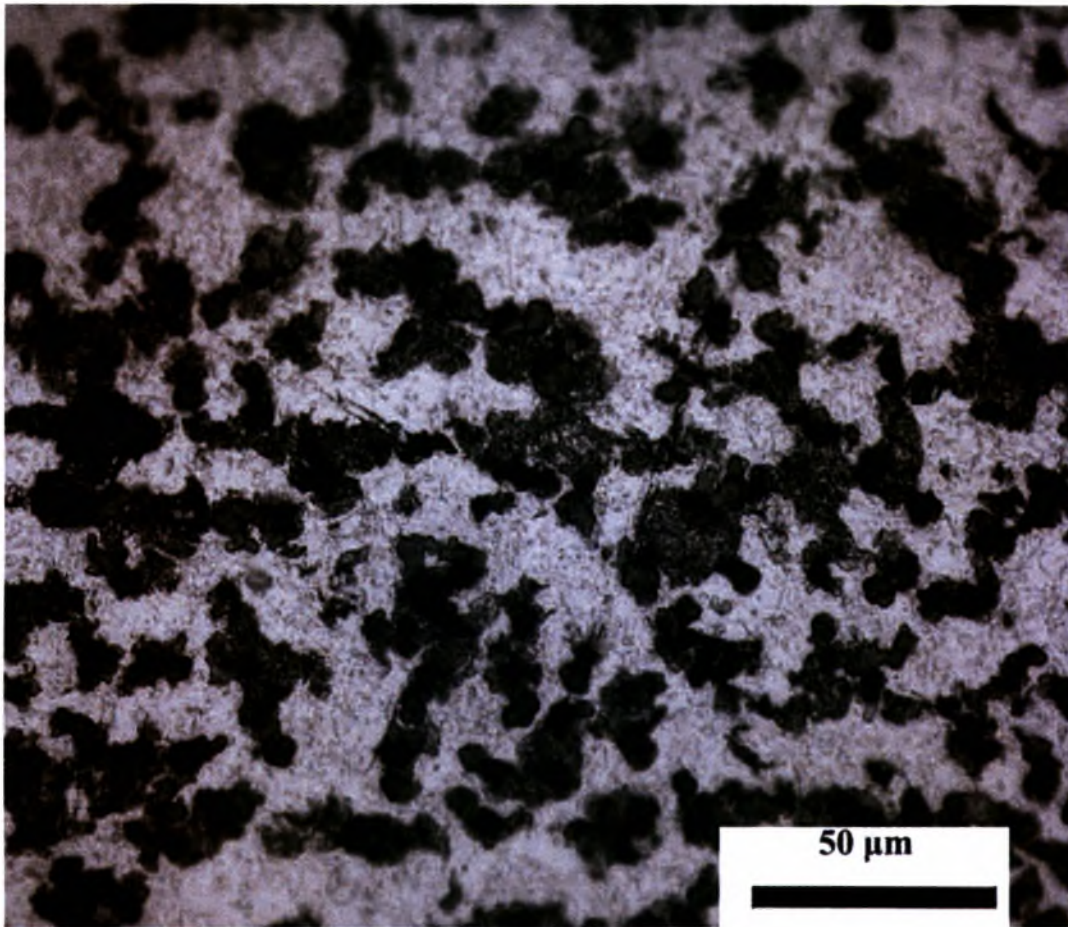
Σχ.3.33 Χαρτογράφηση 15Μο3 – 500 φορές μεγέθυνση

# ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ 15Μο3

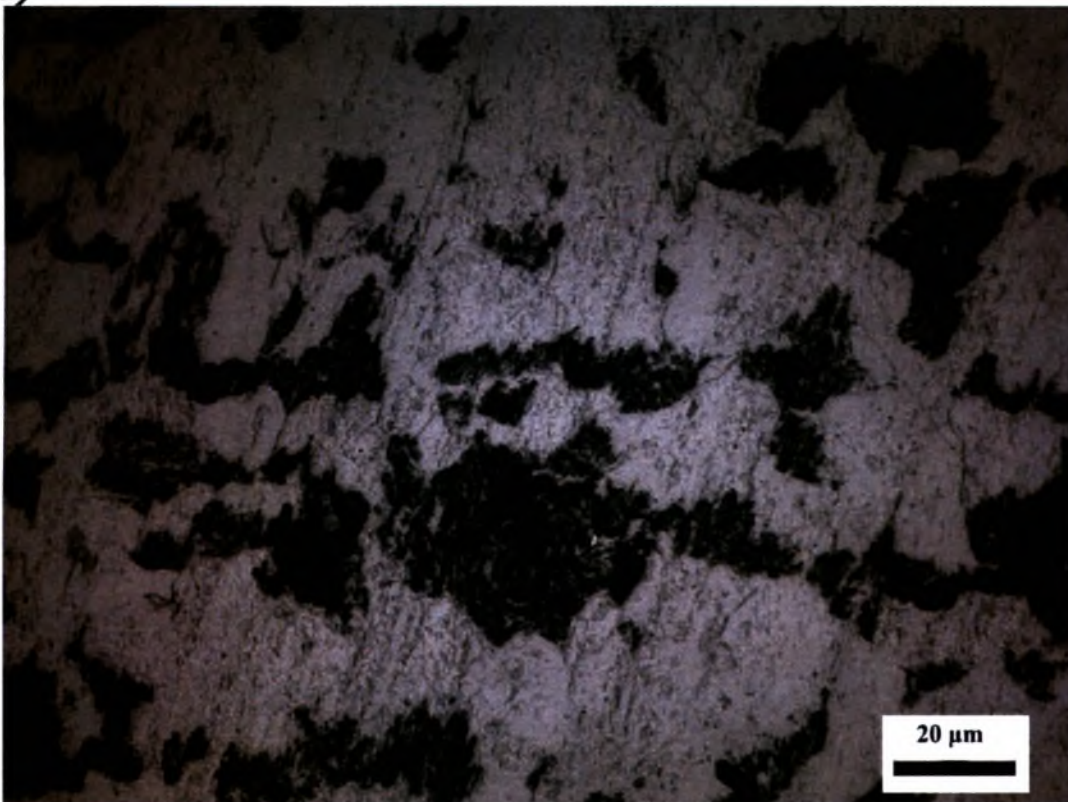


Σχ. 3.34 Χαρτογράφηση 15Μο3 – 1000 φορές μεγέθυνση





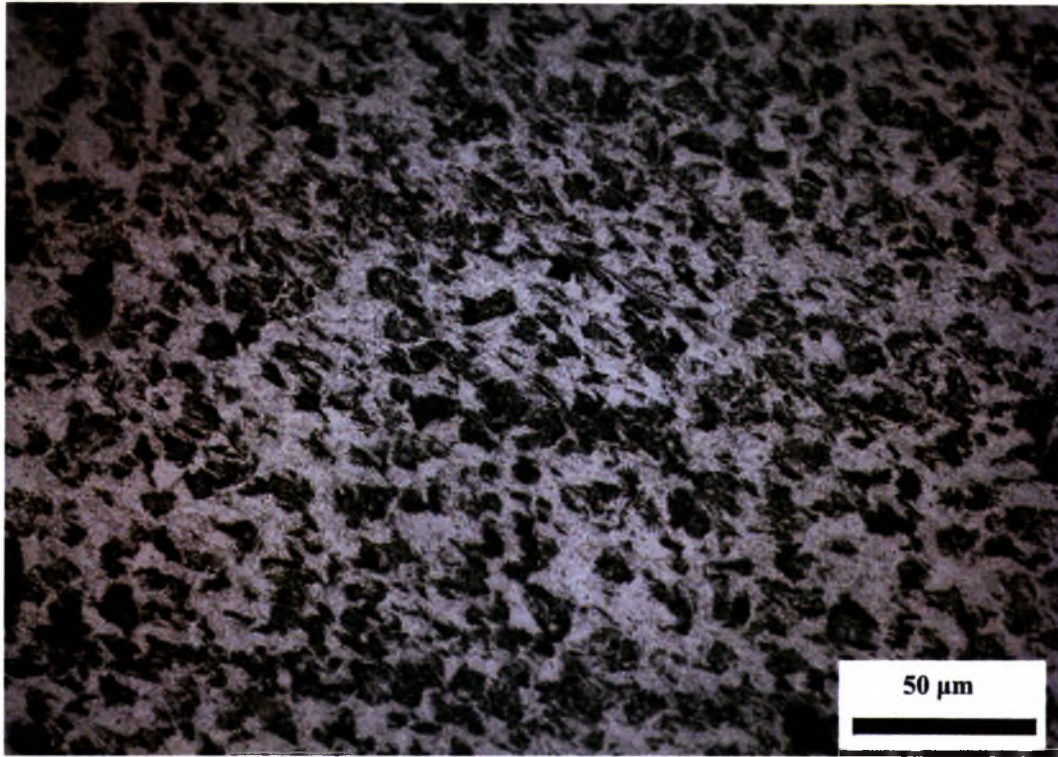
(a)



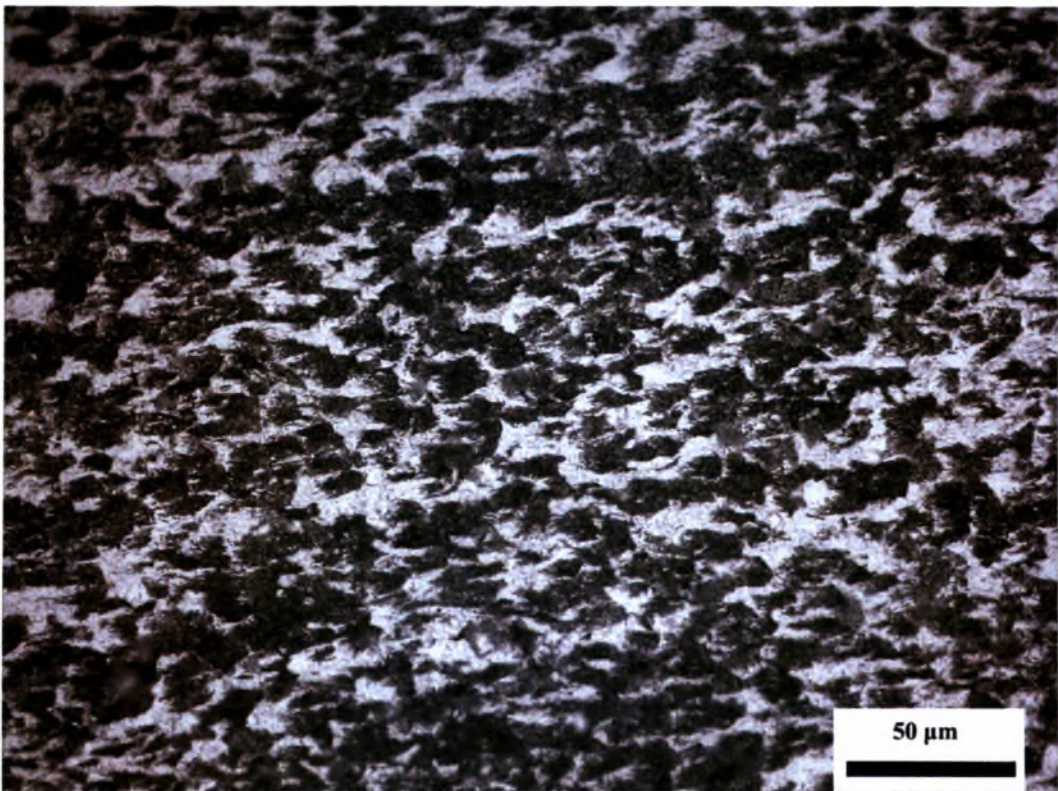
(b)

Σχ.3.35 Μέταλλο βάσης 15Mo3, α (x500), β (x1000)

Στο μέταλλο βάσης εντοπίζουμε φερρίτη κυρίως και σε μικρότερο ποσοστό περλίτη. Διακρίνουμε μεγάλα πολυγωνικά πλακίδια φερρίτη και παραμένων ωστενίτη σε μικρό ποσοστό. Πάντως η δομή ευνοεί την πυρήνωση του φερρίτη.

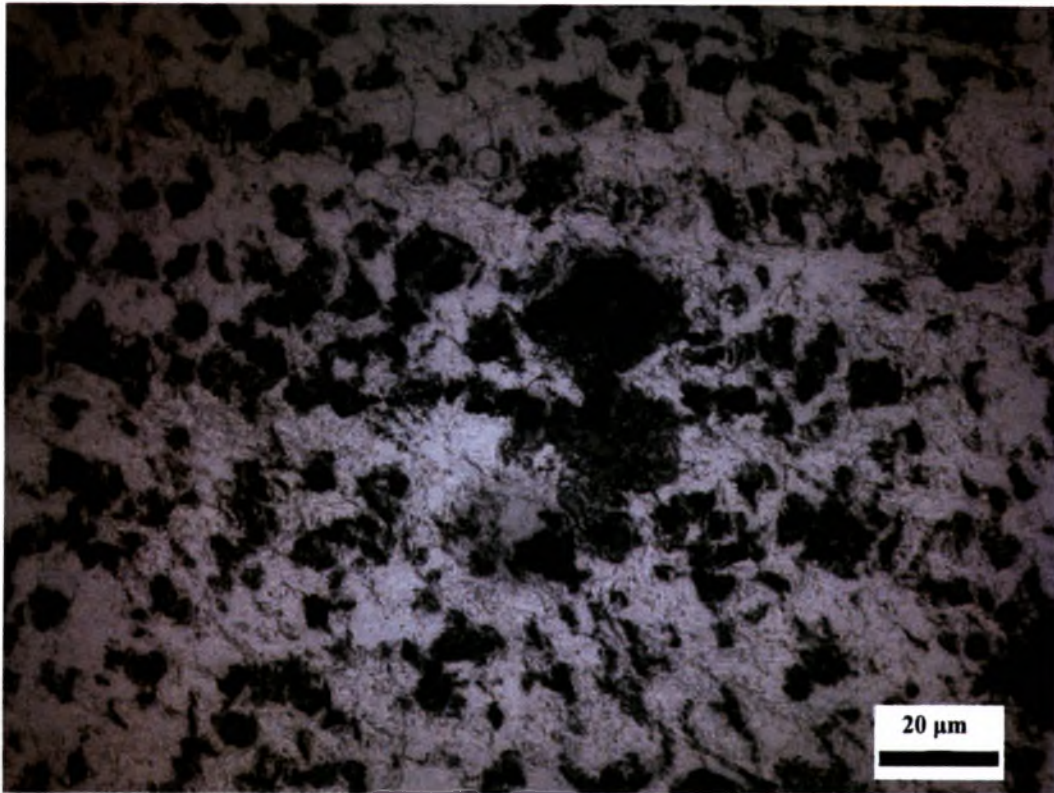


(a)

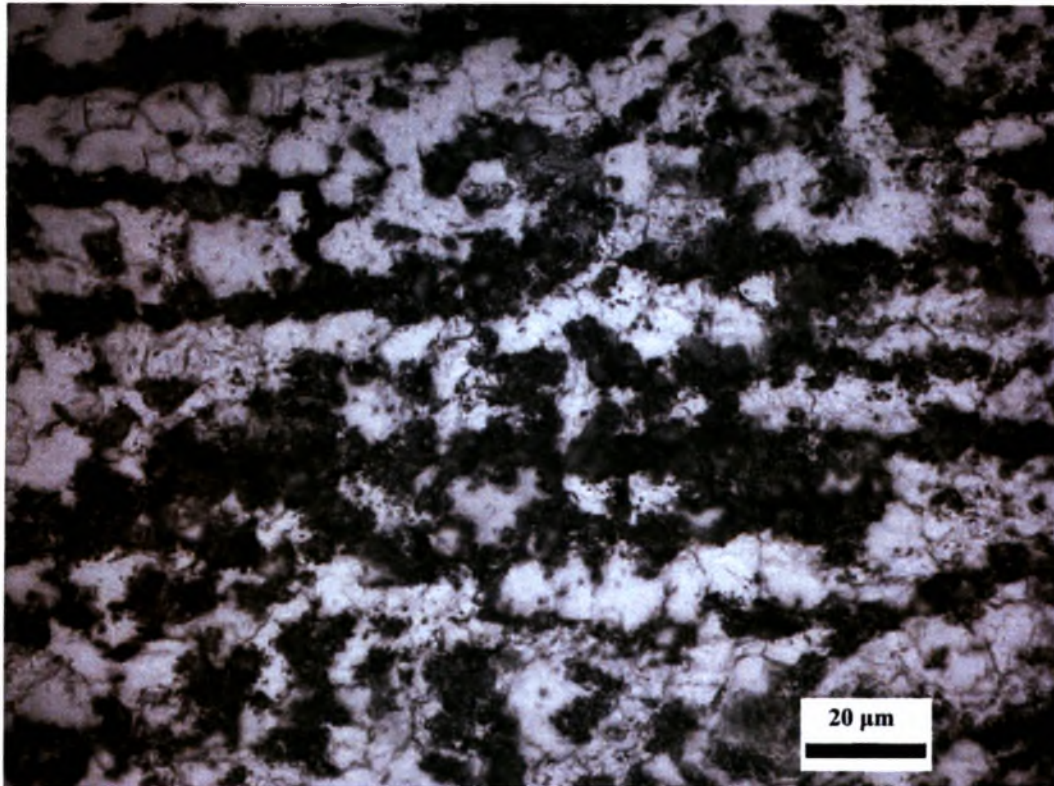


(b)

Σχ.3.36 HAZI Δοκιμίων 15Mo3, α, β (x500)

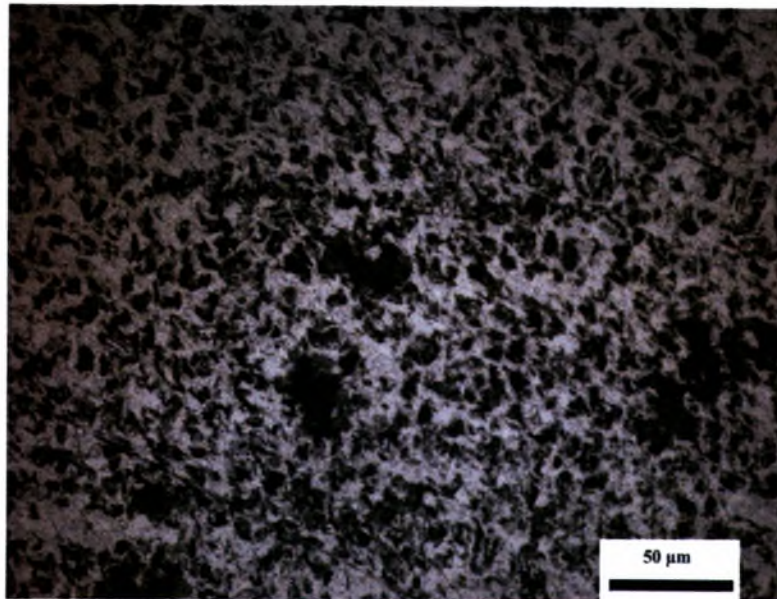


(a)

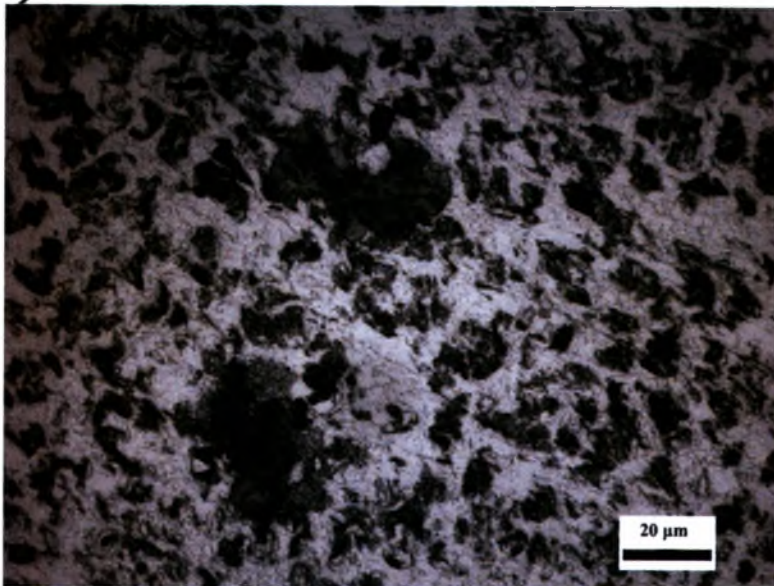


(b)

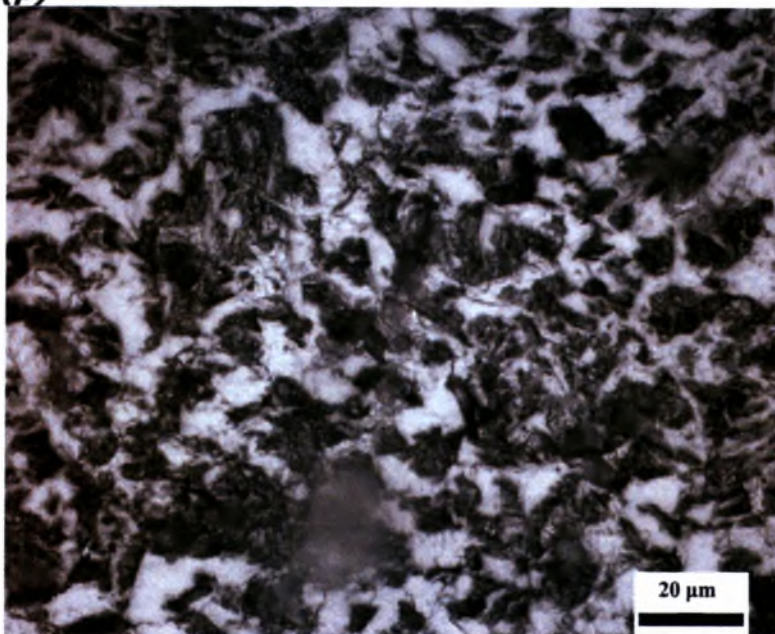
Σχ.3.37 HAZ1 Δοκμίου 15Mo3, α, β (x1000)



(a)



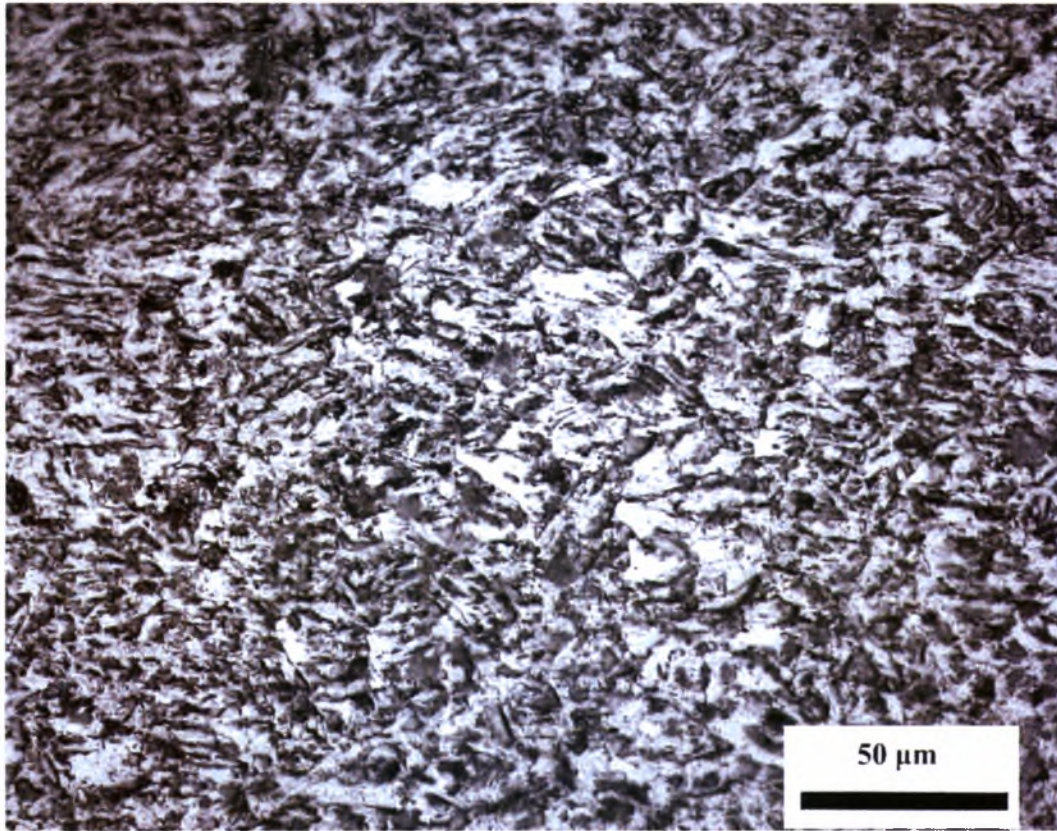
(β)



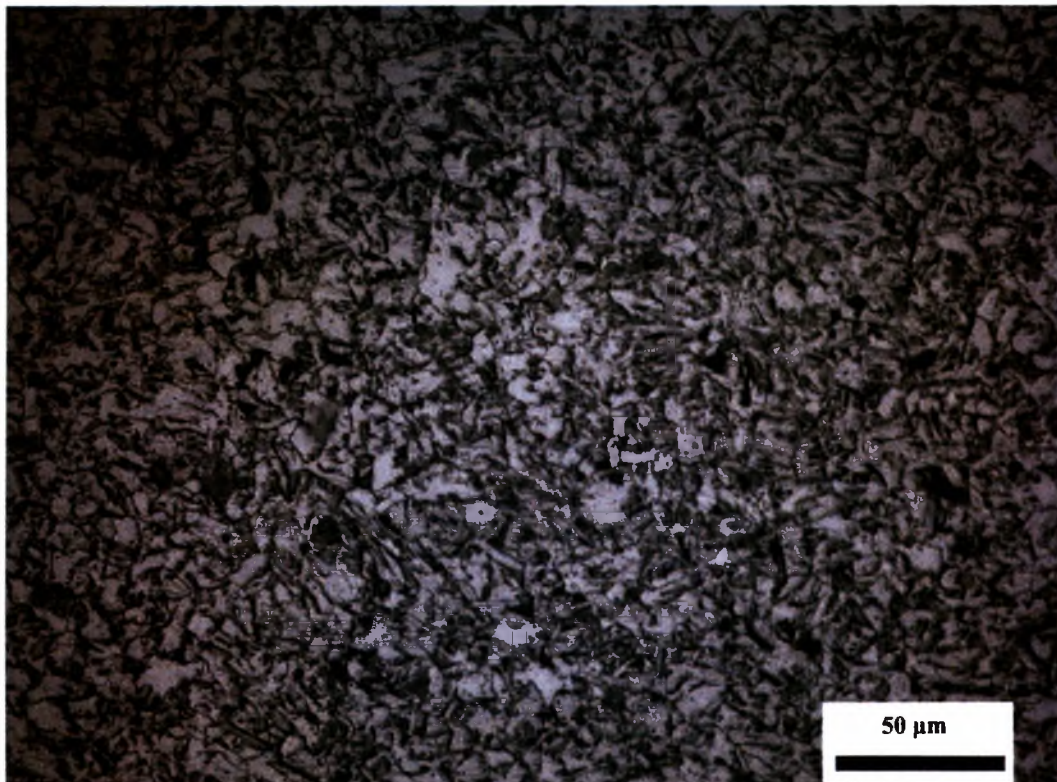
(γ)

Σχ. 3.38 HAZ2 Δοκιμίων 15Mo3, α (x500), β και γ (x1000)

Στη ΘΕΖ διακρίνουμε τη δημιουργία μαρτενσίτη σε μικρό ποσοστό. Επίσης διακρίνεται πολυγωνικός φερρίτης, προευτηκτοειδής φερρίτης και φερρίτης που πυρηνώνεται στο εσωτερικό των κόκκων των καρβιδίων. Επίσης υπάρχει περλίτης. Επιπλέον υπάρχουν εγκλωβισμένα καρβίδια και παραμένων οστενίτης ο οποίος λόγω του γρήγορου ρυθμού ψύξης δεν πρόλαβε να διαχυθεί. Επιπλέον περιέχεται και ένα ποσοστό μαρτενσίτη.

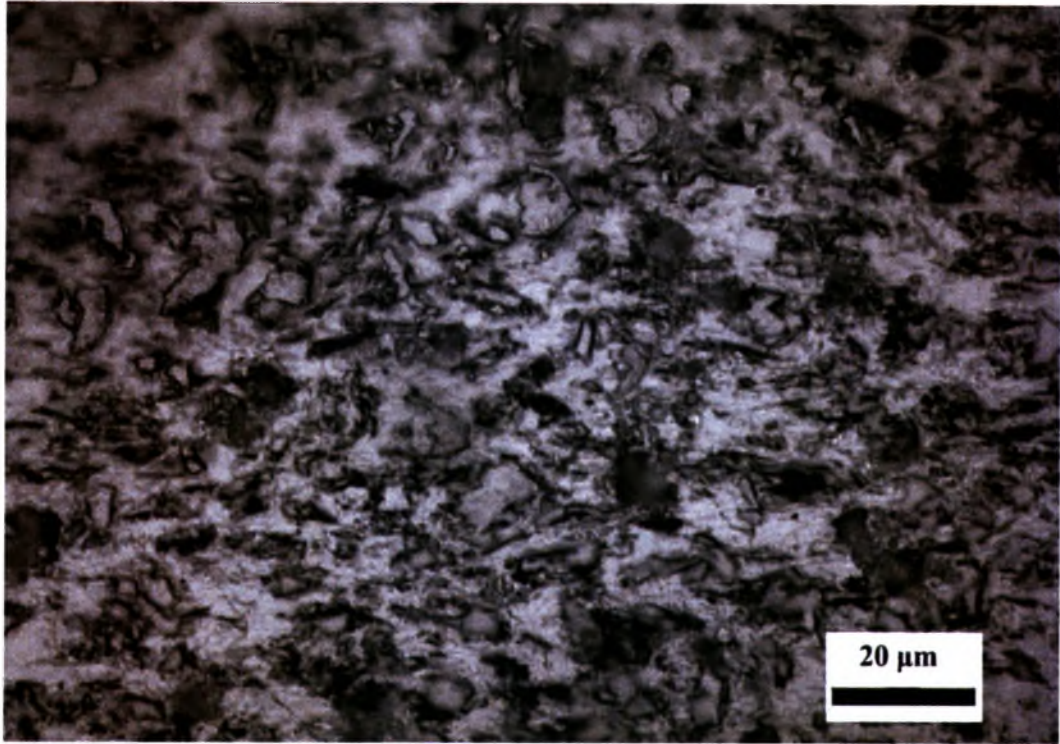


(a)

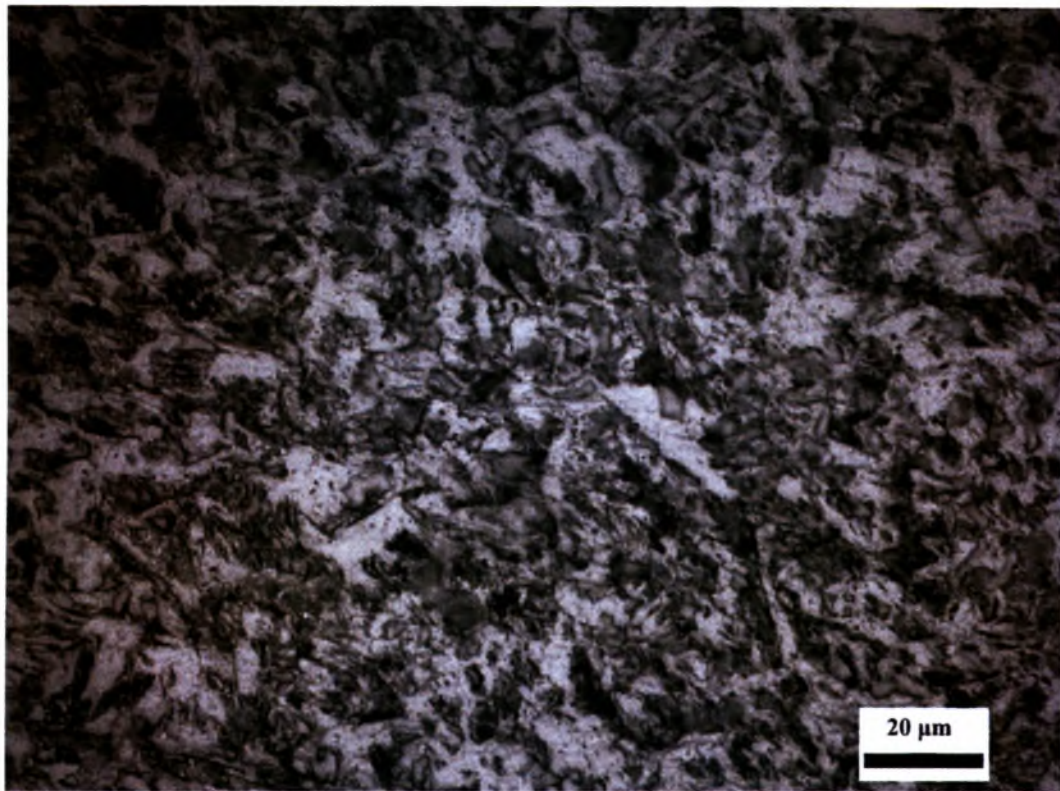


(β)

Σχ.3.39 Λίμνη Συγκόλλησης 15Mo3, α, β (x500)



(a)

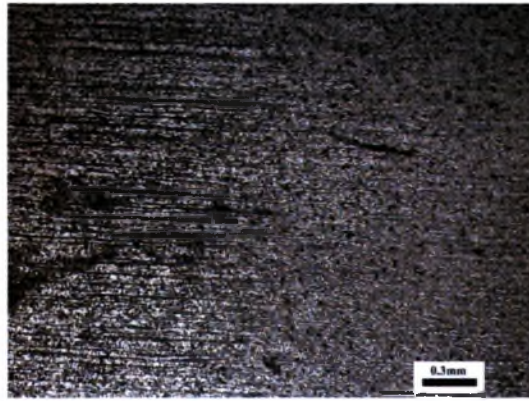


(β)

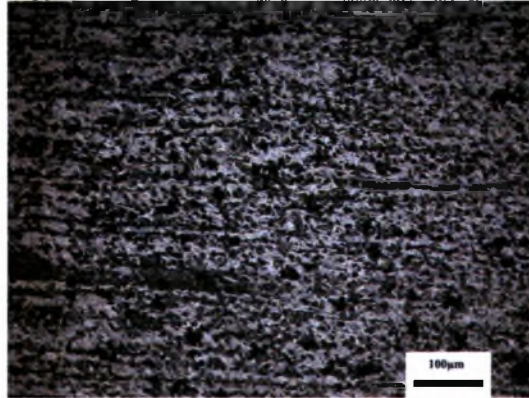
Σχ.3.40 Λίμνη Συγκόλλησης 15Mo3, α, β (x1000)



Η δομή της λίμνη συγκόλλησης παρατηρούμε είναι χονδρόκοκκη και αποτελείται από πλακίδια φερρίτη Widmanstätten, πολυγωνικό φερρίτη, παραμένων ωστενίτη, λωρίδες πιθανώς μπαινίτη. Επίσης υπάρχει βελονοειδής φερρίτης ο οποίος πυρηνώνεται και η παρουσία των καρβιδίων είναι αισθητή. Επίσης παρατηρούμε την ανάπτυξη δενδριτών μέσα στη περιοχή της λίμνης συγκόλλησης.



Σχ.3.41 b.m. – haz1 – haz2 του 15Mo3, (x50)



Σχ.3.42 b.m. – haz1 του 15Mo3, (x200)



Σχ.3.43 haz2 – w.p. του 15Mo3, (x100)



Σχ.3.44 w.p – haz2 του 15Mo3 (x50)

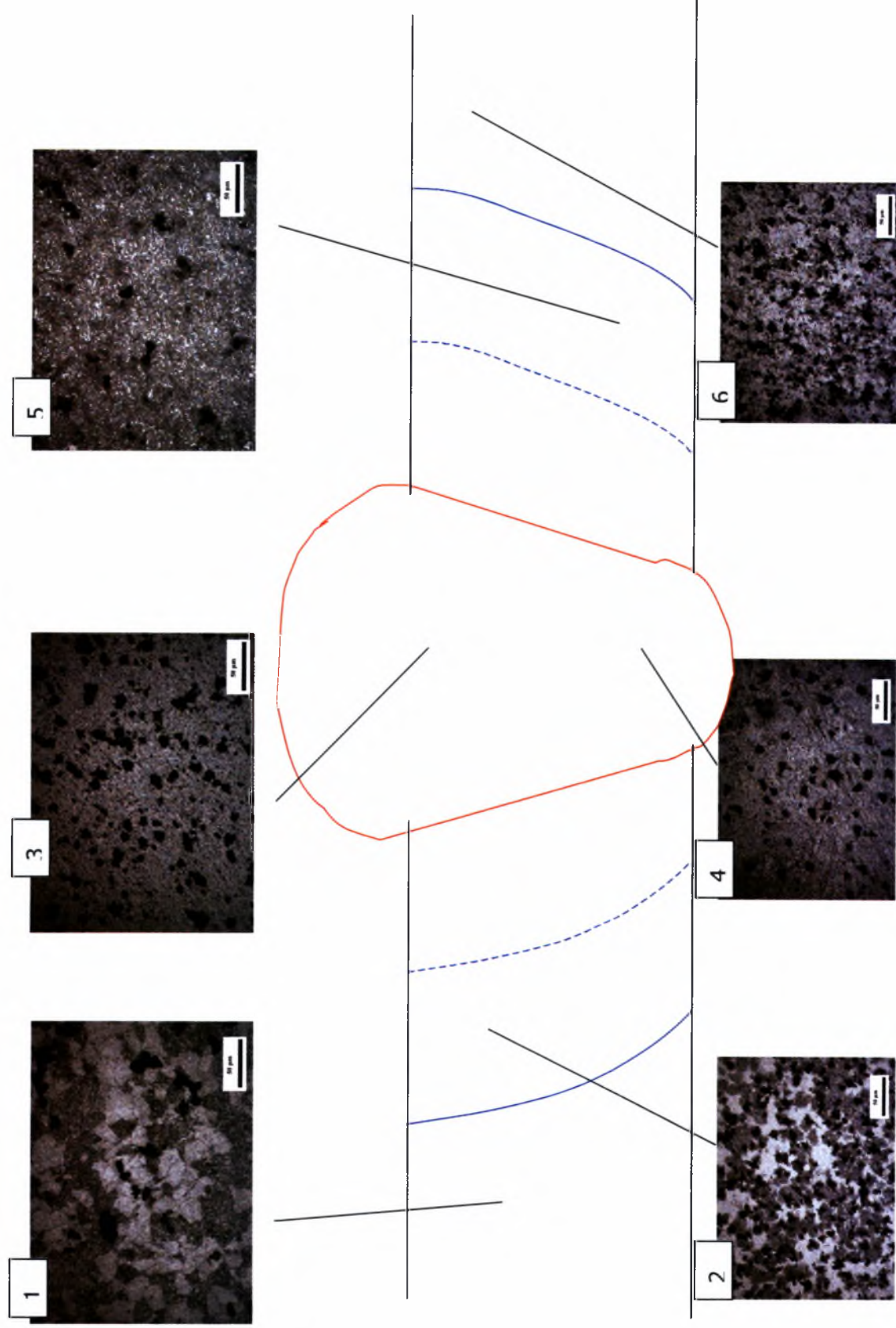
### 3.6.3 Μικροδομή του 10CrMo9.10

Από το διάγραμμα φάσεων Fe-C, μπορούμε να καταλάβουμε ότι το μέταλλο βάσης αποτελείται από φερρίτη και περλίτη. Κατά συνέπεια, θεωρώντας τη μέση τιμή της περιεκτικότητάς του χάλυβα 13CrMo44, σε C (από τη χημική ανάλυση), δηλαδή 0.11%C, από το διάγραμμα φάσεων Fe-C και το κανόνα του μοχλού, το μέταλλο βάσης αποτελείται από 89.03% προευτηκτοειδή φερρίτη (γιατί προέρχεται από υποευτηκτοειδή χάλυβα) και 10.97% περλίτη. Η λίμνη συγκόλλησης όμως αποτελείται από διαφορετικό υλικό πλήρωσης, με περιεκτικότητα 0.06%C, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη για τη μικροδομή της λίμνης συγκόλλησης, που έχει διαφορετική σύσταση από το μέταλλο βάσης. Στις περιοχές της ΘΕΖ και της λίμνης συγκόλλησης λόγω της συγκόλλησης (πρόσδοση θερμότητας) και των γρήγορων ρυθμών ψύξης αναμένουμε μετασχηματισμό φάσεων στη μικροδομή του χάλυβα. Επομένως στη ΘΕΖ θα αναμέναμε παραμένον ωστενίτη, προευτηκτοειδής φερρίτης,, περλίτη, μαρτενσίτη ή μπαινίτη ο οποίος δύσκολα αναγνωρίζεται (χρειάζεται ειδικό αντιδραστήριο). Αντίστοιχα στην λίμνη συγκόλλησης περιμένουμε να παρατηρήσουμε αντίστοιχες φάσεις αλλά να υπάρχει μεγαλύτερη ομοιογένεια σε σχέση με τη HAZ, δενδρίτες και ίσως και πιο λεπτόκοκκες φάσεις. Στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός για τις φάσεις της μικροδομής που αντιστοιχούν σε κάθε περιοχή.



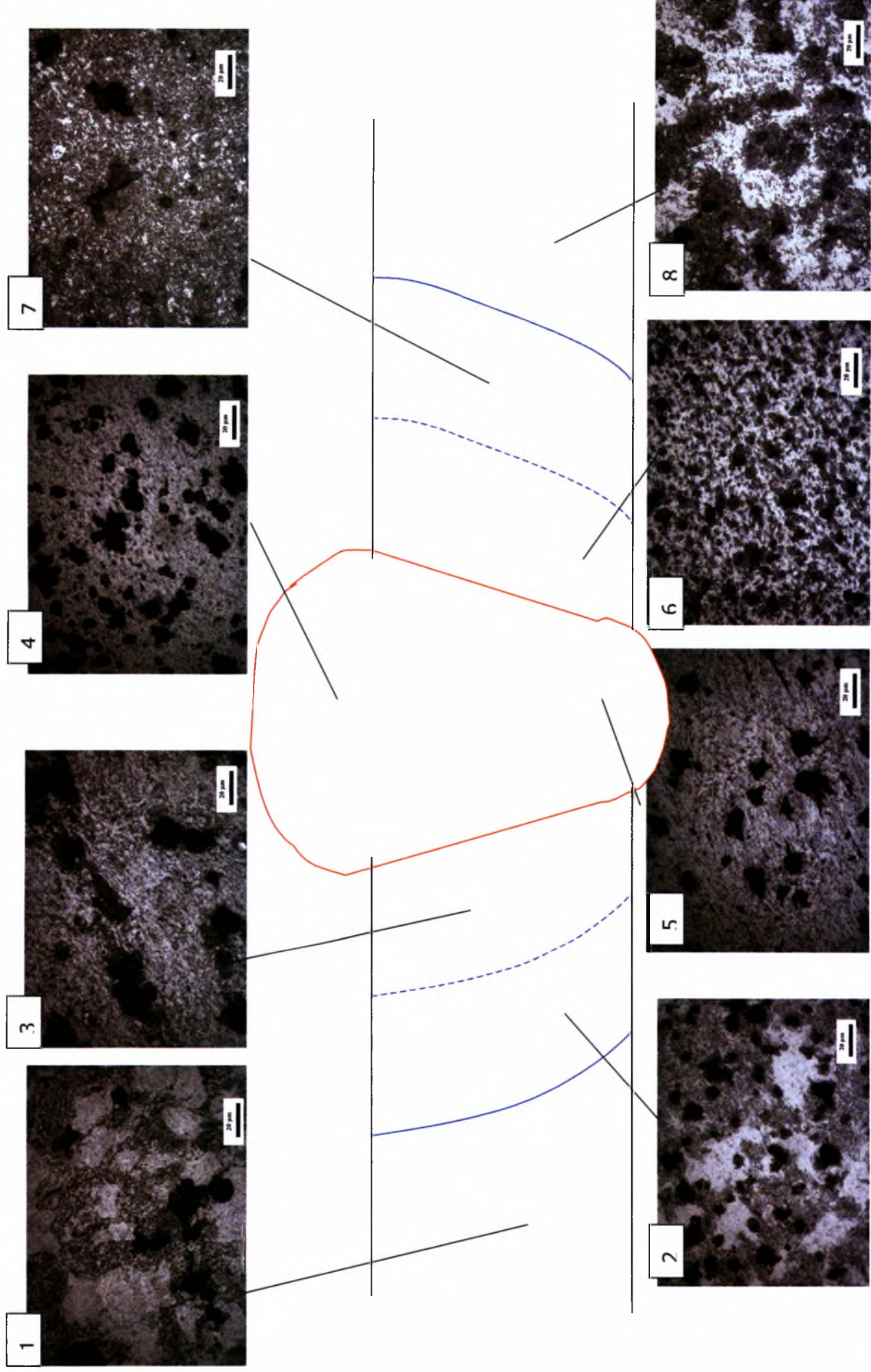


# ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ 10CrMo9.10

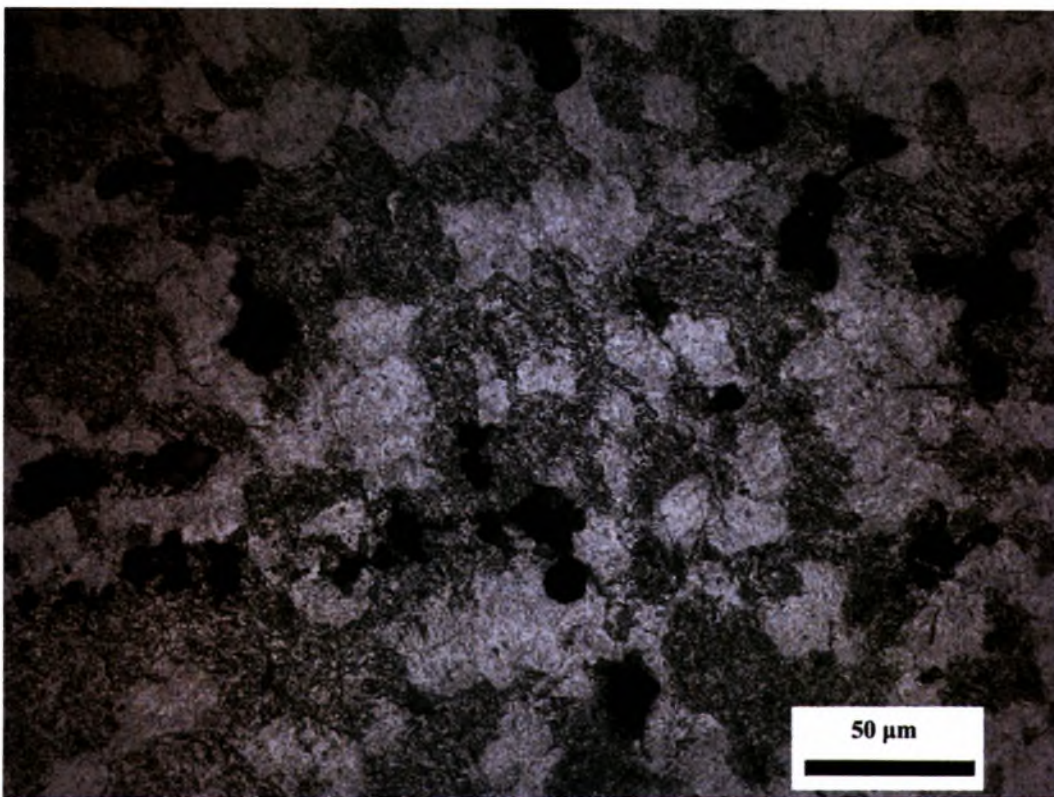


Σχ.3.45 Χαρτογράφηση 10CrMo9.10 – 500 φορές μεγέθυνση

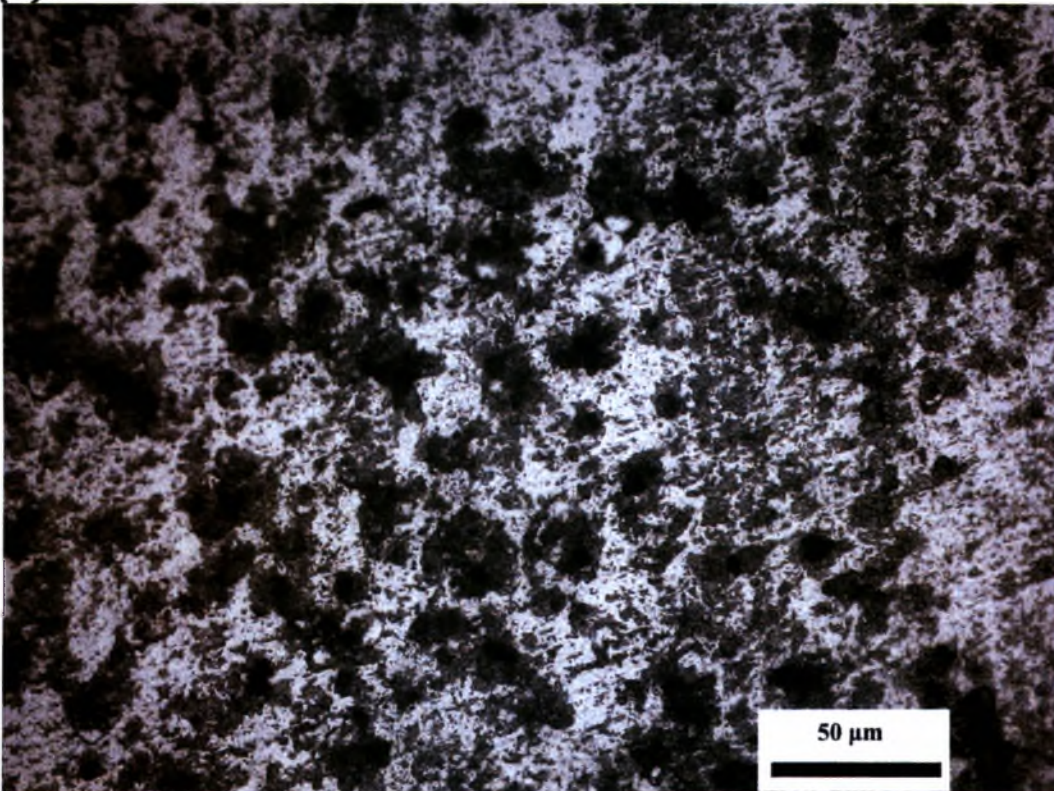
# ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ 10CrMo9.10



Σχ. 3.46 Χαρτογράφηση 10CrMo9.10 – 1000 φορές μεγέθυνση



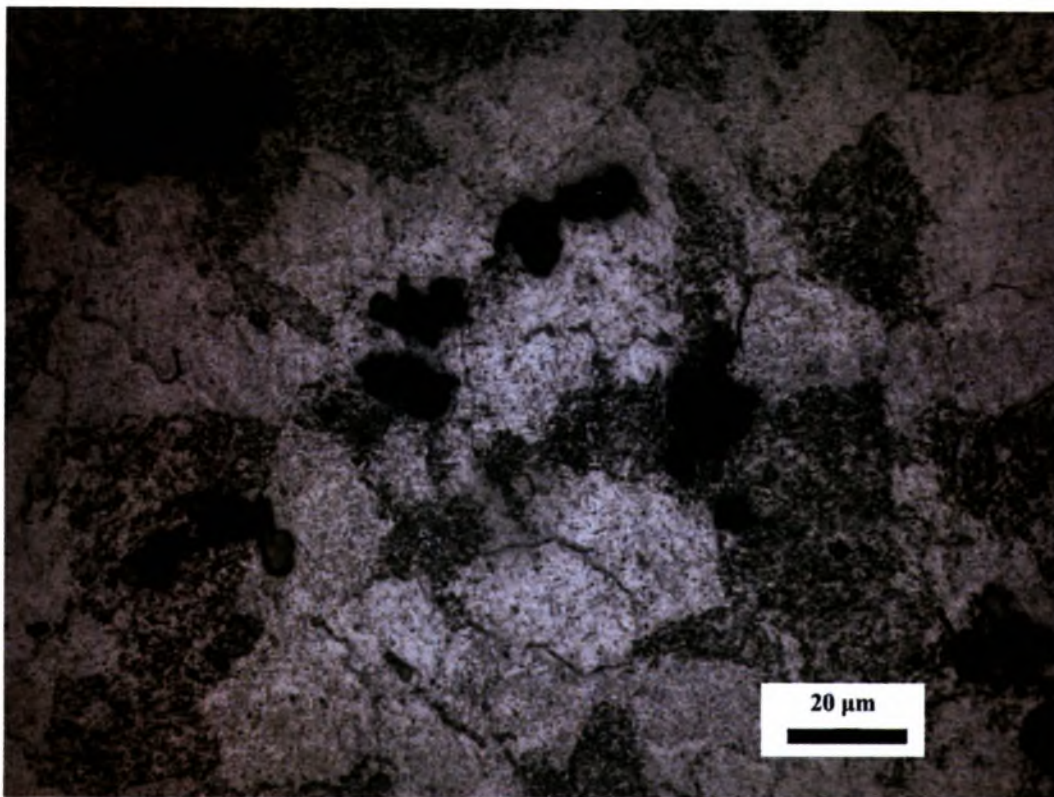
(a)



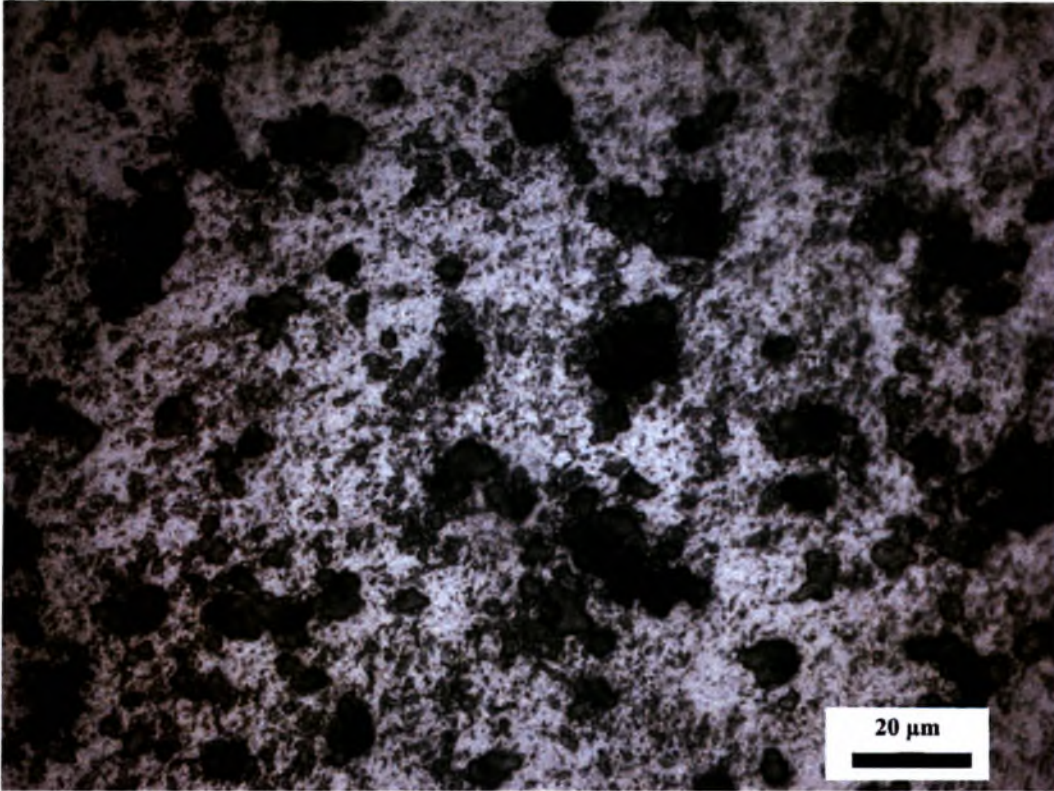
(b)

Σχ. 3.47 Βασικό μέταλλο 10CrMo9.10, α, β (x500)





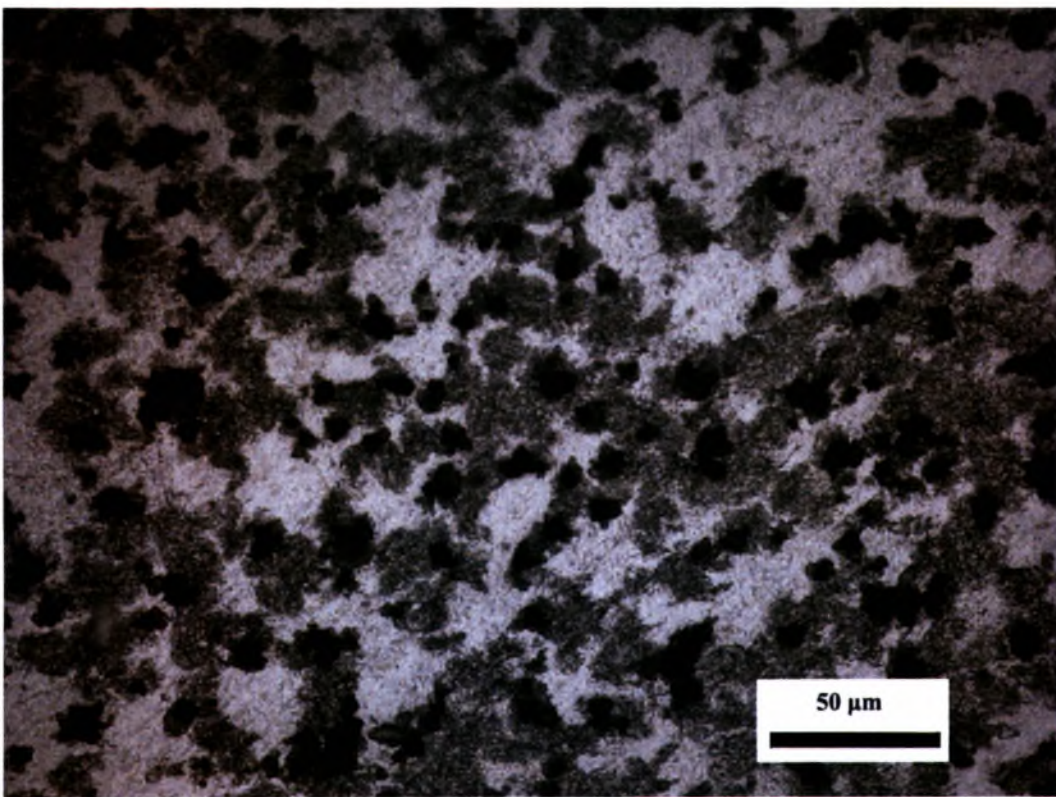
(α)



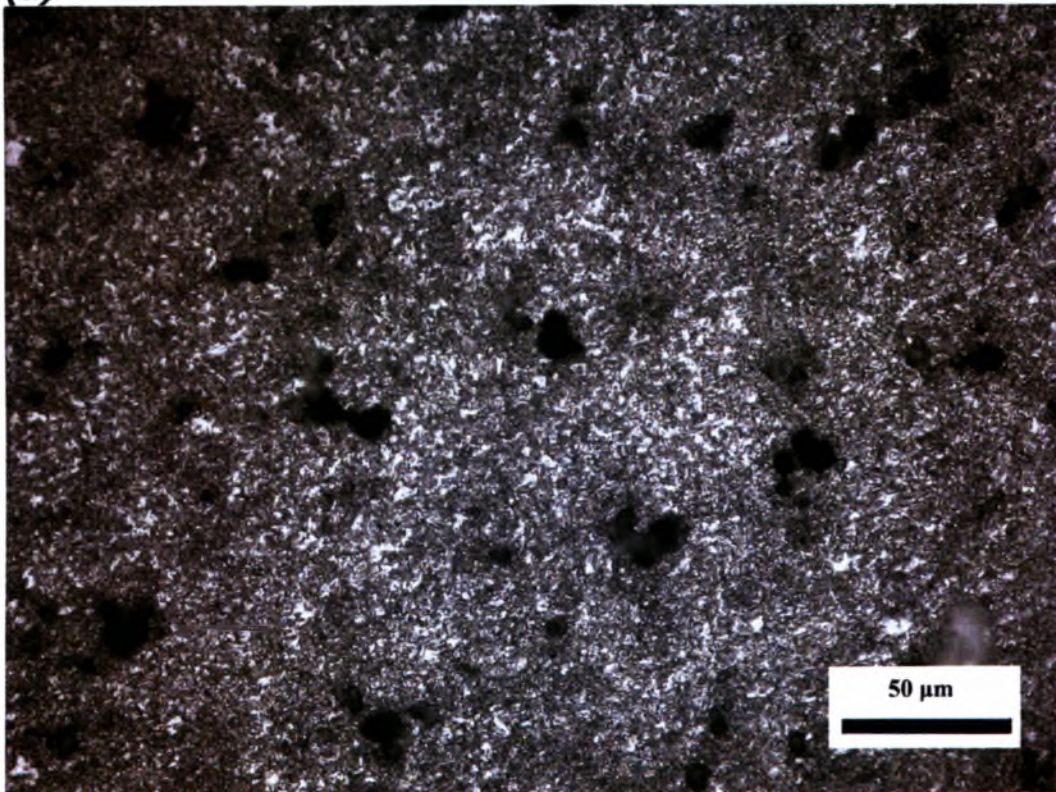
(β)

Σχ.3.48 Βασικό μέταλλο 10CrMo9.10, α, β (x1000)

Το μέταλλο βάσης είναι κυρίως φερριτικό και έχει σε ένα ποσοστό περλίτη. Διακρίνουμε κυρίως πολυγωνικό φερρίτη καθώς και εγκλείσματα. Επίσης υπάρχει παραμένων ωστενίτης σε μικρό ποσοστό. Τα καρβίδια τα οποία εντοπίζονται είναι πιθανό να είναι άνθρακας που δεν πρόλαβε να διαλυθεί ή κάποιο άλλο κραμματικό στοιχείο.

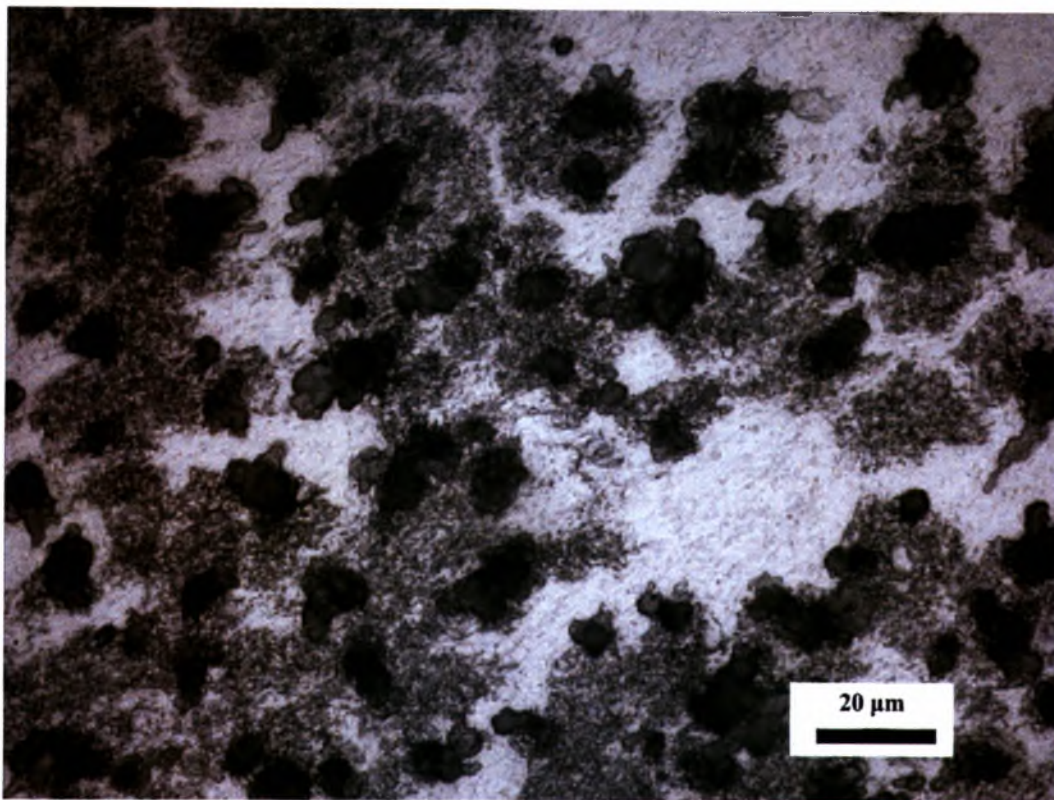


(a)

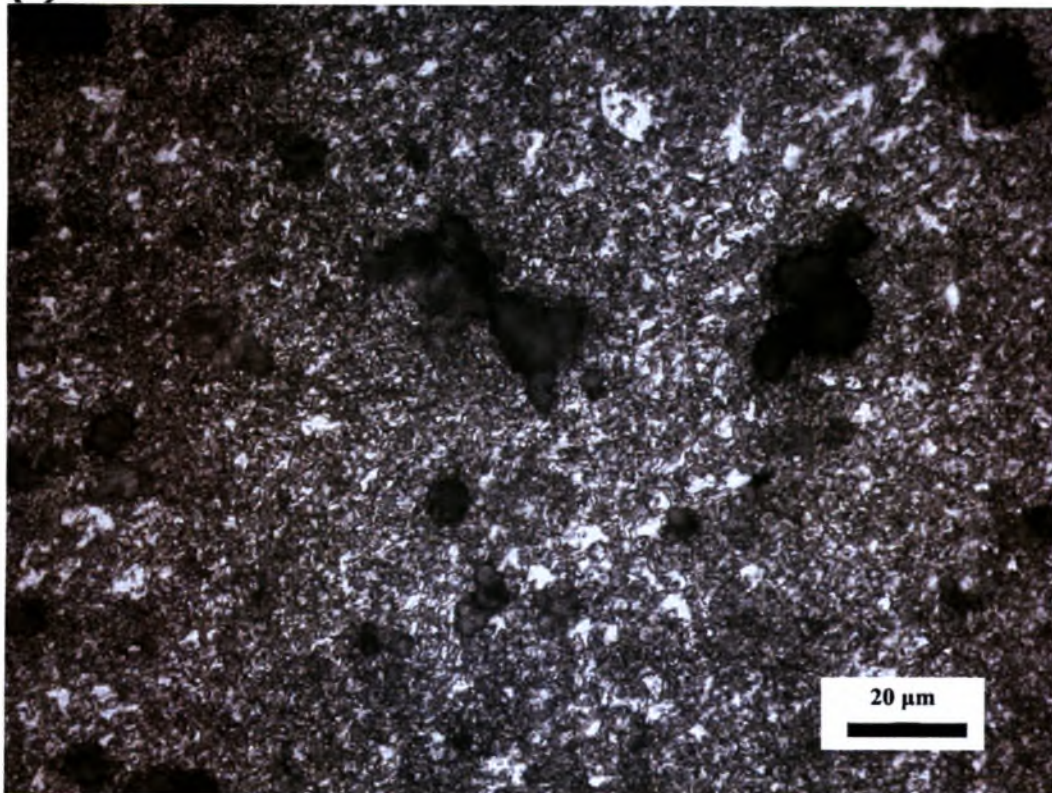


(b)

$\Sigma\chi.3.49$  Haz1 10CrMo9.10,  $\alpha$ ,  $\beta$  (x500)

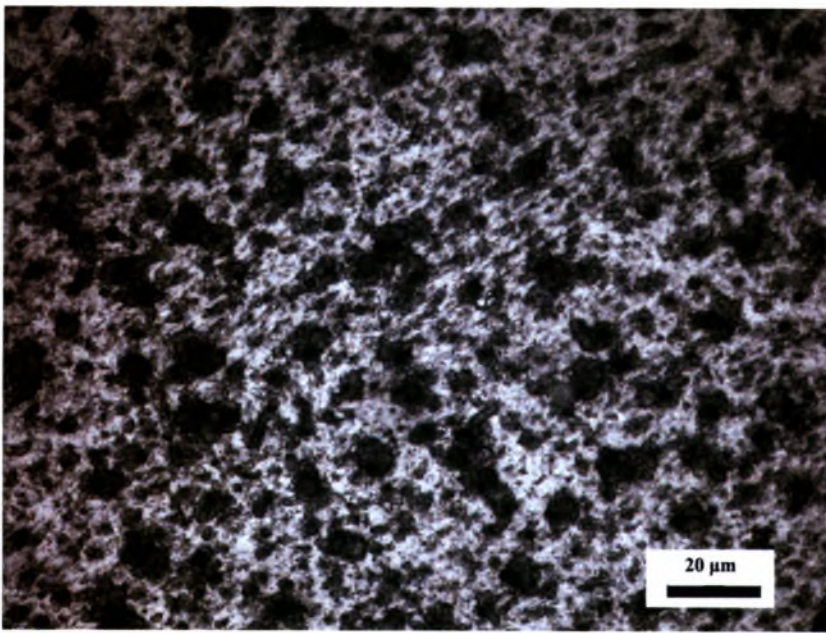


(a)

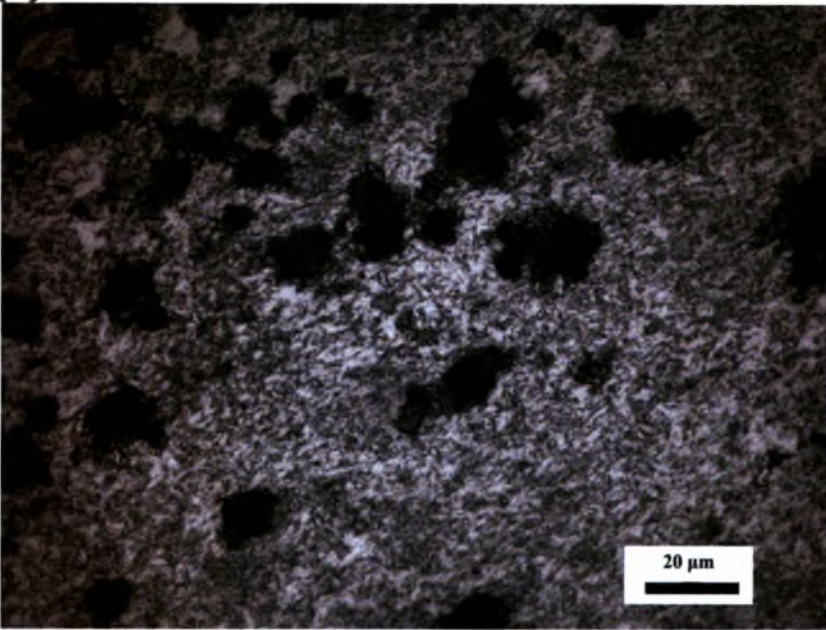


(b)

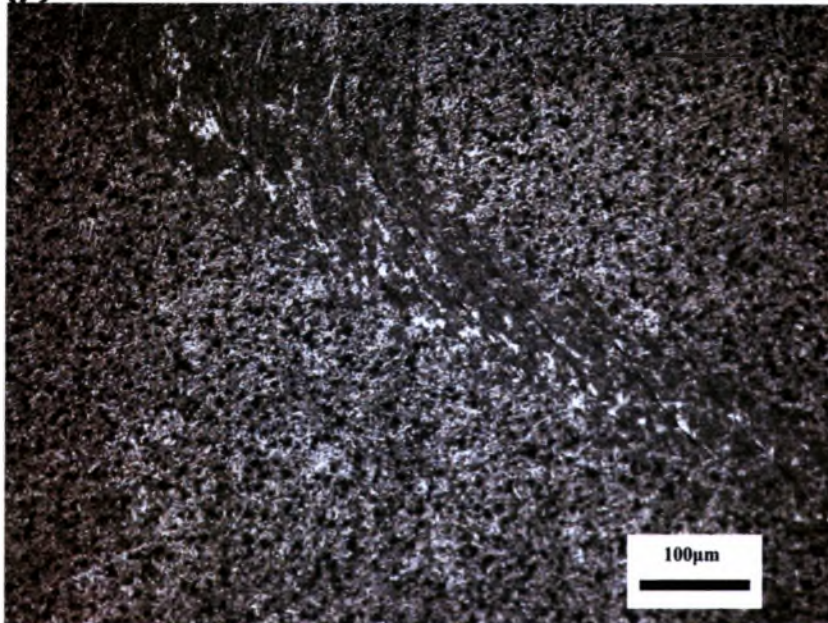
Σχ.3.50 Haz1 10CrMo9.10,  $\alpha$ ,  $\beta$  (x1000)



(a)



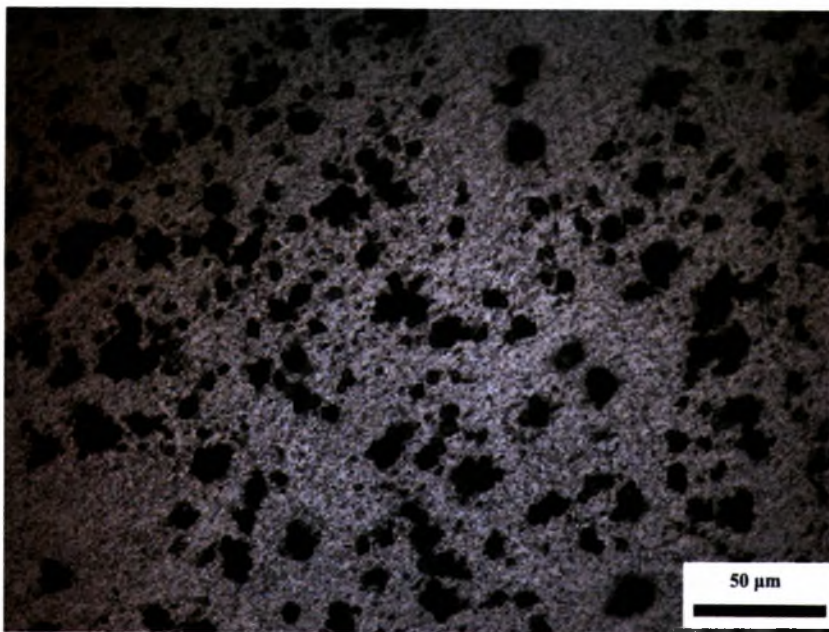
(β)



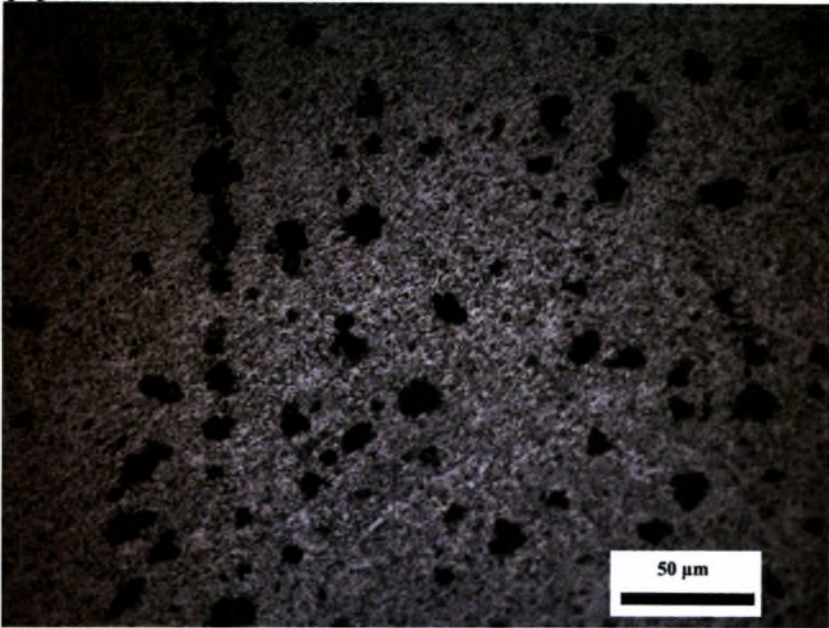
(γ)

$\Sigma\chi.3.51$  Haz2 10CrMo9.10,  $\alpha$ ,  $\beta$  (x1000),  $\gamma$  (x200)

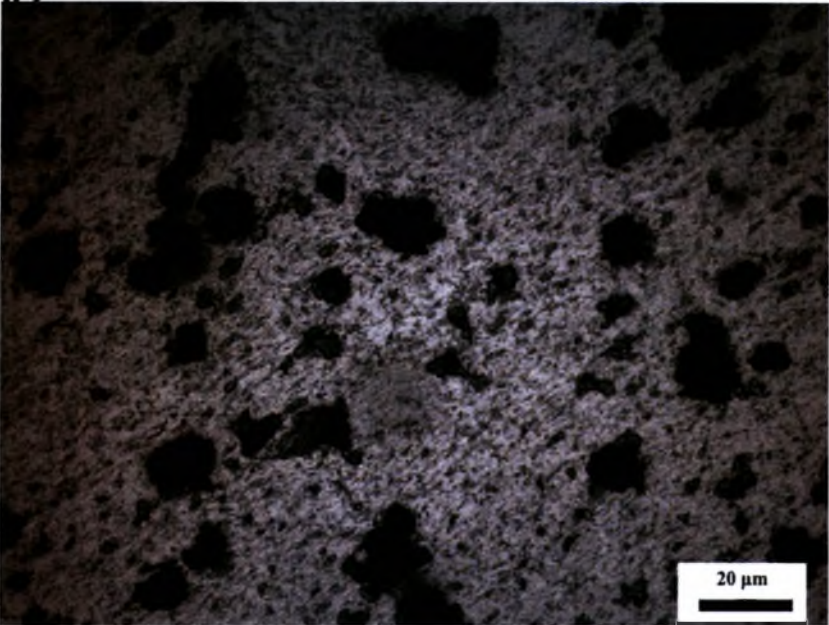
Στη ΘΕΖ διακρίνουμε μια δομή χονδρόκοκκη αλλά σε κάποιο σημεία υπάρχει εκλέπτυση των κόκκων. Επίσης διακρίνονται πλακίδια φερρίτη Widmanstätten που ακολουθούν τη ροή. Η παρουσία του παραμένων οστενίτη και των καρβιδίων είναι έντονη. Τέλος παρατηρούμε πλακίδια πολυγωνικού και προευτηκτοειδή φερρίτη καθώς και φερρίτη που πυρηνώνεται στο εσωτερικό των κόκκων του οστενίτη αλλά και των καρβιδίων, όπου το επιτρέπει το μέγεθός τους.



(α)



(β)

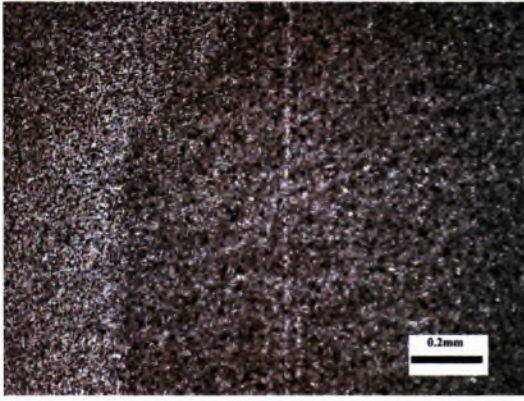


(γ)

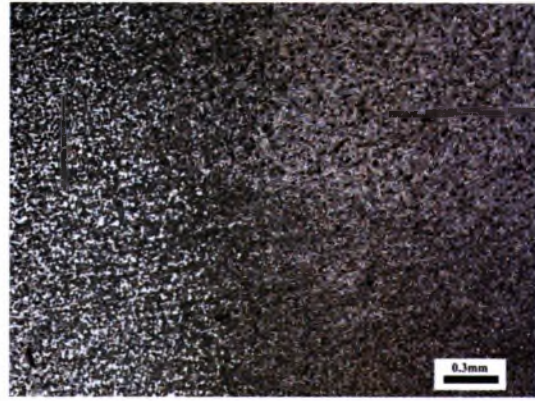
Σχ.3.52 Λίμνη συγκόλλησης 10CrMo9.10, α, β (x500), γ (x1000)

Στη λίμνη συγκόλλησης παρατηρούμε λεπτόκοκκη δομή, ομοιογένεια και ανάπτυξη δενδριτών. Οι φάσεις που διακρίνονται στην περιοχή της λίμνης είναι κυρίως καρβίδια, πολλαπλά πλακιδία φερρίτη Widmanstätten, με λεπτόκοκκη δομή, πιθανώς μπαινιτικές δεσμίδες και ένα ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη.

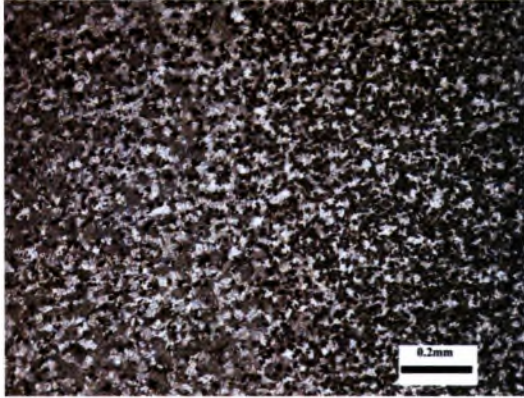




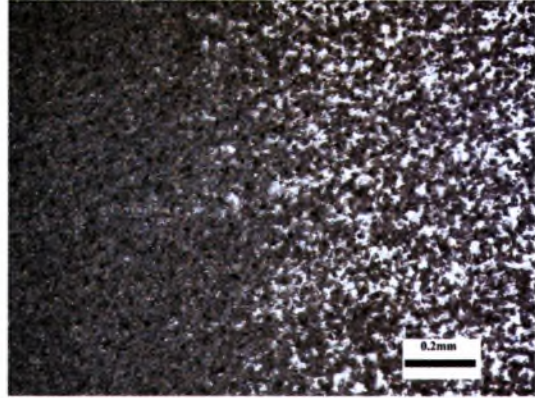
$\Sigma\chi.3.53$  haz2 - haz1 (x100)



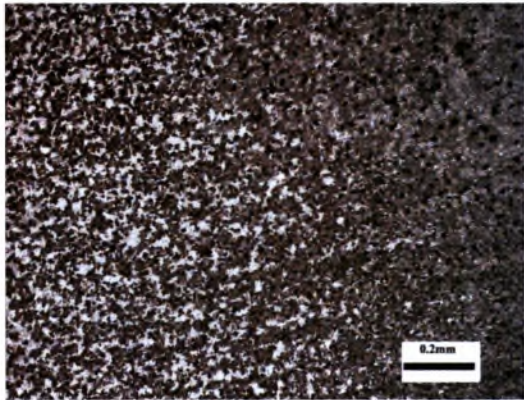
$\Sigma\chi.3.54$  b.m - haz1 - haz2 (x50)



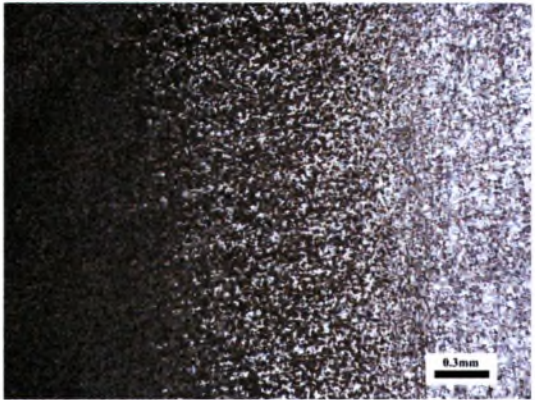
$\Sigma\chi.3.55$  b.m - haz1 (x100)



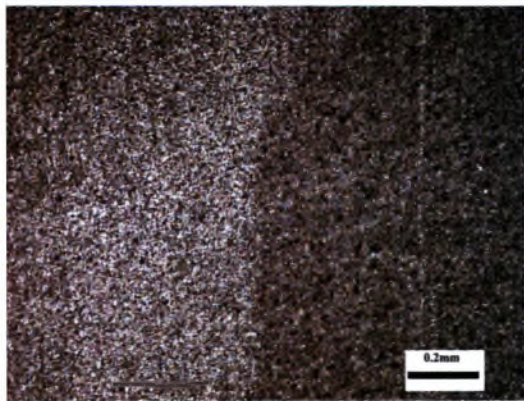
$\Sigma\chi.3.56$  haz1 - b.m (x100)



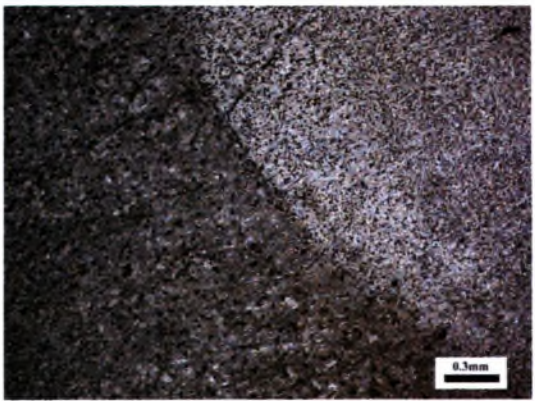
$\Sigma\chi.3.57$  haz1 - haz2 (x100)



$\Sigma\chi.3.58$  haz2 - haz1 - b.m. (x50)



$\Sigma\chi.3.59$  haz2 - haz1 (x100)



$\Sigma\chi.3.60$  haz2 - w.p. (x50)

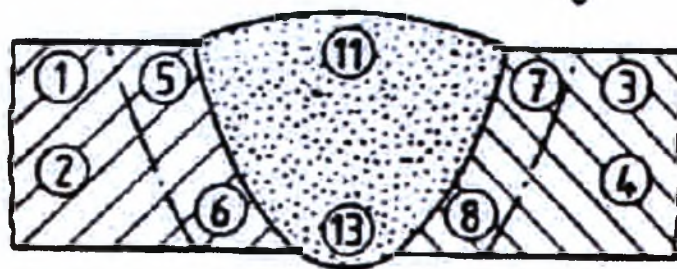
### 3.7 Αποτελέσματα Μικροσκληρομέτρησης

Για να πιστοποιηθούν οι συγκολλήσεις, είναι αναγκαίο να περάσουν τη δοκιμή σκληρομέτρησης, η οποία θα μας δώσει μια καλύτερη εικόνα για την σκληρότητα των χαλύβων.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα δοκίμια από τους σωλήνες 13CrMo44, 15Mo3 και 10CrMo9.10, αρχικά μικροσκληρομετρήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1043-1 και στη συνέχεια δημιουργήθηκε το προφίλ μικροσκληρότητας κάθε δοκιμίου, τοποθετώντας στο διάγραμμα το μέσο όρο από 3 τιμές σε κάθε σημείο – το μεσαίο σημείο απείχε από το αριστερό και το δεξιό σημείο 30mm. Οι μικροσκληρομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο Vickers, με φορτίο 200gr, στο Εργαστήριο Υλικών.

#### 3.7.1 Μικροσκληρομέτρηση σύμφωνα με το Πρότυπο

ΕΛΟΤ EN 1043 – 1



-1

Σχ.3.61 Μικροσκληρομετρήσεις κατά Vickers σύμφωνα με την προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 1043-1

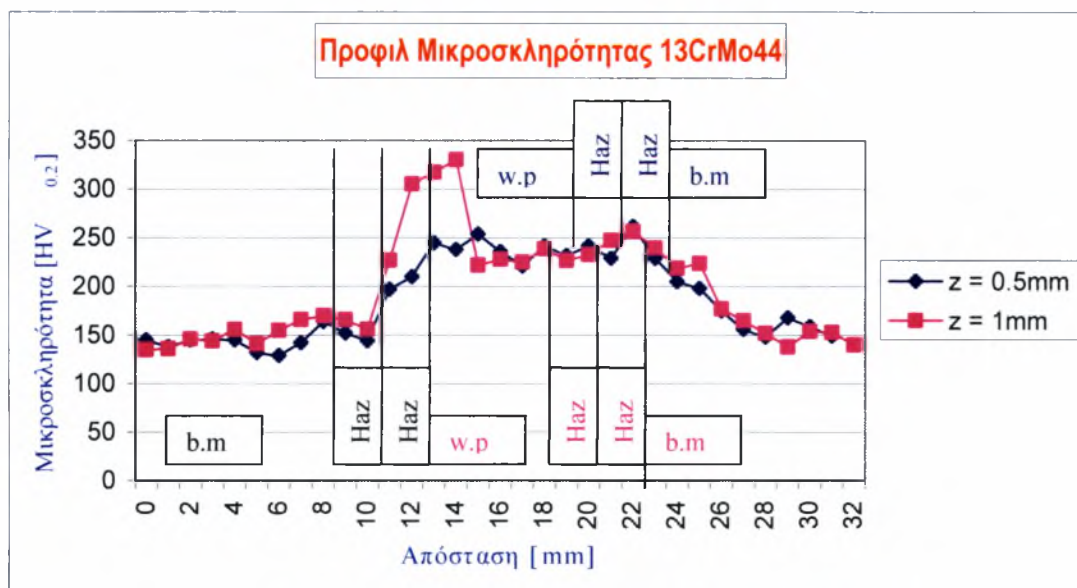
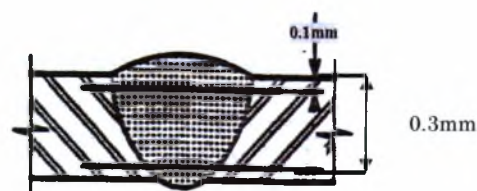
Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι τιμές της μικροσκληρότητας στα προδιαγραφόμενα σημεία και των τριών δοκιμίων.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4** Αποτελέσματα μετρήσεων σύμφωνα με την προδιαγραφή  
*ΕΛΟΤ EN 1043-1*

<b>ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ VICKERS</b>			
<b>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</b>	<b>ΔΟΚΙΜΙΟ 13CrMo44</b>	<b>ΔΟΚΙΜΙΟ 15Mo3</b>	<b>ΔΟΚΙΜΙΟ 10CrMo9.10</b>
1	144	139	158
2	157	144	164
3	163	157	169
4	160	168	174
5	197	214	285
6	252	209	249
7	213	192	269
8	231	184	317
11	229	225	301
13	231	235	268

Στα Σχ.3.62,3.63, 3.64 παρουσιάζονται τα προφίλ μικροσκληρότητας για το κάθε δοκίμιο.

### 3.7.2 Προφίλ μικροσκληρότητας του 13CrMo44



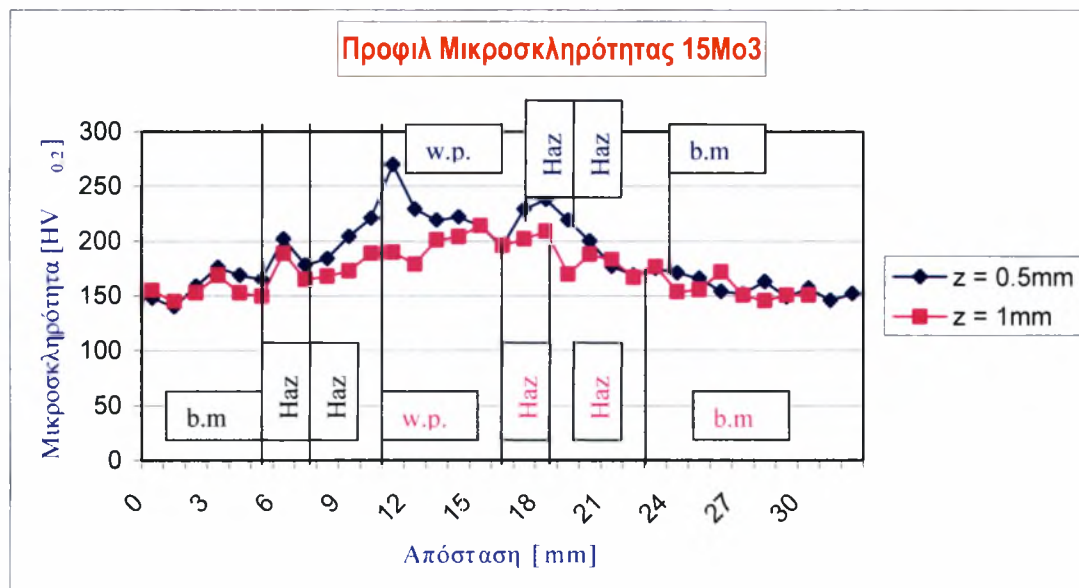
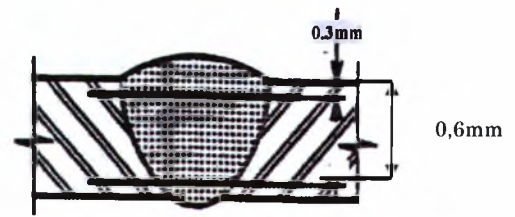
Σχ.3.62 Προφίλ μικροσκληρότητας του δοκιμίου 13CrMo44

Παρατηρούμε ότι η τιμή μικροσκληρότητας στο βασικό μέταλλο (b.m) κυμαίνεται σε 170HV κατά μέσο όρο. Στη περιοχή της HAZ κυμαίνεται από 200HV ως 250 HV και παρατηρούμε ότι στη περιοχή HAZ2 (αριστερά) η τιμή μικροσκληρότητας στο δεύτερο προφίλ είναι μεγαλύτερη από τη τιμή μικροσκληρότητας στο πρώτο προφίλ. Το γεγονός αυτό μάλλον θα οφείλεται ότι στη περιοχή με τη μεγαλύτερη μικροσκληρότητα εντοπίζεται μεγαλύτερο ποσοστό μαρτενσίτη. Στη λίμνη συγκόλλησης η τιμή είναι 225HV περίπου. Γενικά παρατηρούμε ότι υπάρχει απότομη αύξηση της σκληρότητας καθώς εισερχόμαστε στην λίμνη συγκόλλησης, καθώς και η δημιουργία αυτιών, δηλαδή απότομη αύξηση της σκληρότητας στη ζώνη τήξης και κατόπιν τη σταθεροποίησή της σε χαμηλότερη τιμή, στη λίμνη συγκόλλησης. Η δημιουργία αυτιών οφείλεται προφανώς στη δημιουργία μαρτενσίτη στη ζώνη τήξης. Επίσης η σκληρότητα του χάλυβα είναι αυξημένη στη HAZ και τη λίμνη λόγω ύπαρξης βελονοειδή φερρίτη ο οποίος βελτιώνει την σκληρότητα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5** Αποτελέσματα μετρήσεων με τιμές που προέρχονται από μέσους όρους και πραγματοποιούνται σε 2 σειρές.

<b>ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ VICKERS</b>				
<b>ΔΟΚΙΜΙΟ 13CrMo44 (μέσοι όροι)</b>				
<b>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</b>	<b>ΓΡΑΜΜΗ</b>	<b>ΠΕΡΙΟΧΗ</b>	<b>ΓΡΑΜΜΗ</b>	<b>ΠΕΡΙΟΧΗ</b>
	<b>A</b>		<b>B</b>	
0	145	Βασικό μέταλλο	144	Βασικό μέταλλο
1	138	Βασικό μέταλλο	136	Βασικό μέταλλο
2	145	Βασικό μέταλλο	146	Βασικό μέταλλο
3	146	Βασικό μέταλλο	144	Βασικό μέταλλο
4	145	Βασικό μέταλλο	156	Βασικό μέταλλο
5	132	Βασικό μέταλλο	141	Βασικό μέταλλο
6	129	Βασικό μέταλλο	155	Βασικό μέταλλο
7	142	Βασικό μέταλλο	166	Βασικό μέταλλο
8	164	Βασικό μέταλλο	170	Βασικό μέταλλο
9	152	Βασικό μέταλλο	166	Βασικό μέταλλο
10	167	Βασικό μέταλλο	156	Βασικό μέταλλο
11	197	HAZ1	227	HAZ1
12	210	HAZ1	306	HAZ1
13	245	HAZ2	318	HAZ2
14	238	HAZ2	331	HAZ2
15	254	Λίμνη συγκόλλησης	228	Λίμνη συγκόλλησης
16	236	Λίμνη συγκόλλησης	225	Λίμνη συγκόλλησης
17	221	Λίμνη συγκόλλησης	239	Λίμνη συγκόλλησης
18	242	Λίμνη συγκόλλησης	227	Λίμνη συγκόλλησης
19	232	Λίμνη συγκόλλησης	233	Λίμνη συγκόλλησης
20	242	Λίμνη συγκόλλησης	248	HAZ2
21	229	Λίμνη συγκόλλησης	257	HAZ2
22	262	HAZ2	240	HAZ2
23	229	HAZ2	219	HAZ1
24	205	HAZ1	224	HAZ1
25	198	HAZ1	177	Βασικό μέταλλο
26	175	Βασικό μέταλλο	165	Βασικό μέταλλο
27	156	Βασικό μέταλλο	152	Βασικό μέταλλο
28	148	Βασικό μέταλλο	138	Βασικό μέταλλο
29	168	Βασικό μέταλλο	154	Βασικό μέταλλο
30	159	Βασικό μέταλλο	153	Βασικό μέταλλο
31	149	Βασικό μέταλλο	140	Βασικό μέταλλο
32	137	Βασικό μέταλλο	152	Βασικό μέταλλο
33	146	Βασικό μέταλλο	147	Βασικό μέταλλο
34	145	Βασικό μέταλλο		

### 3.7.3 Προφίλ μικροσκληρότητας του 15Mo3



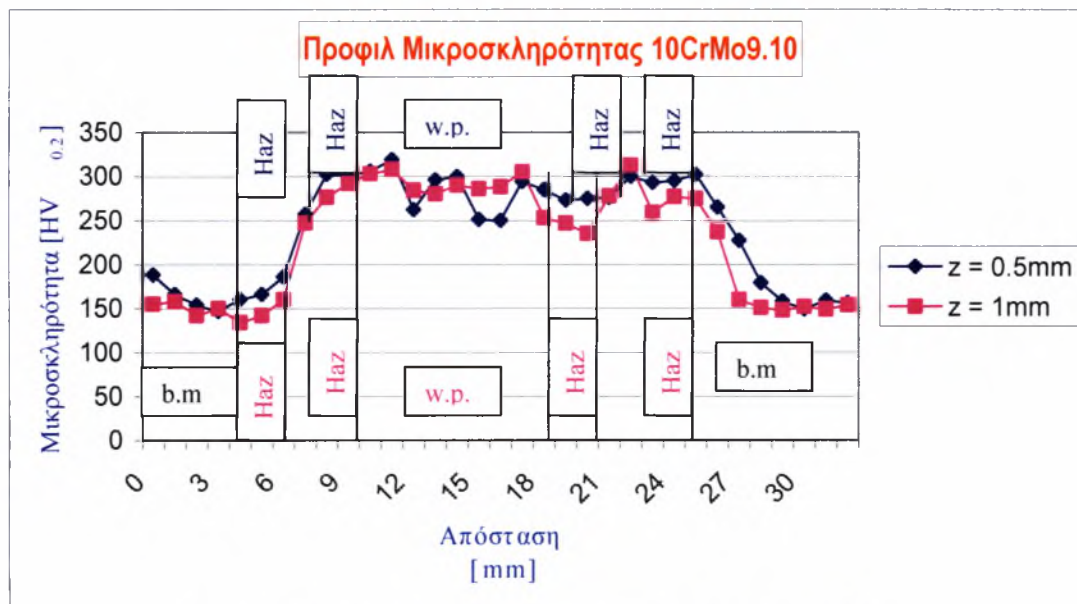
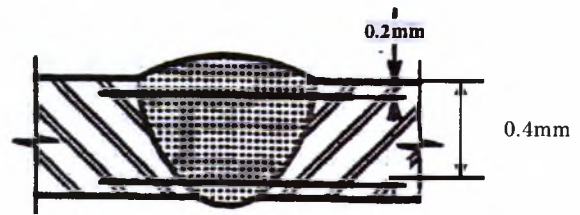
Σχ.3.63 Προφίλ μικροσκληρότητας του δοκιμίου 15Mo3

Η τιμή μικροσκληρότητας στο βασικό μέταλλο (b.m) κυμαίνεται σε 160HV κατά μέσο όρο. Στη περιοχή της HAZ κυμαίνεται από 180HV ως 230 HV και παρατηρούμε ότι στη περιοχή HAZ2 (αριστερά) υπάρχει μια μικρή απόκλιση στο δεύτερο προφίλ από το πρώτο προφίλ, προφανώς εντοπίζεται μεγαλύτερο ποσοστό μαρτενσίτη. Στη λίμνη συγκόλλησης η τιμή είναι 200HV ως 220HV περίπου. Τα αυτιά στο προφίλ καταδεικνύουν τη παρουσία μαρτενσίτη στη ζώνη τήξης. Επίσης η αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα σε σχέση με το βασικό μέταλλο οφείλεται στην ύπαρξη βελονοειδή φερρίτη ο οποίος βελτιώνει την σκληρότητα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6** Αποτελέσματα μετρήσεων με τιμές που προέρχονται από μέσους όρους και πραγματοποιούνται σε 2 σειρές.

<b>ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ VICKERS</b>				
<b>ΔΟΚΙΜΙΟ 15Mo3 (μέσοι όροι)</b>				
<b>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</b>	<b>ΓΡΑΜΜΗ</b>	<b>ΠΕΡΙΟΧΗ</b>	<b>ΓΡΑΜΜΗ</b>	<b>ΠΕΡΙΟΧΗ</b>
	<b>A</b>		<b>B</b>	
0	148	Βασικό μέταλλο	155	Βασικό μέταλλο
1	140	Βασικό μέταλλο	145	Βασικό μέταλλο
2	159	Βασικό μέταλλο	153	Βασικό μέταλλο
3	176	Βασικό μέταλλο	169	Βασικό μέταλλο
4	169	Βασικό μέταλλο	153	Βασικό μέταλλο
5	165	Βασικό μέταλλο	150	Βασικό μέταλλο
6	202	Βασικό μέταλλο	189	Βασικό μέταλλο
7	178	Βασικό μέταλλο	165	Βασικό μέταλλο
8	184	HAZ1	168	HAZ1
9	204	HAZ1	173	HAZ1
10	221	HAZ2	189	HAZ2
11	270	HAZ2	190	HAZ2
12	229	HAZ2	179	HAZ2
13	219	Λίμνη συγκόλλησης	201	Λίμνη συγκόλλησης
14	222	Λίμνη συγκόλλησης	204	Λίμνη συγκόλλησης
15	214	Λίμνη συγκόλλησης	214	Λίμνη συγκόλλησης
16	195	Λίμνη συγκόλλησης	196	Λίμνη συγκόλλησης
17	229	Λίμνη συγκόλλησης	202	Λίμνη συγκόλλησης
18	238	Λίμνη συγκόλλησης	209	HAZ2
19	219	Λίμνη συγκόλλησης	170	HAZ2
20	200	HAZ2	188	HAZ2
21	177	HAZ2	183	HAZ1
22	169	HAZ1	167	HAZ1
23	175	HAZ1	177	HAZ1
24	171	HAZ1	154	Βασικό μέταλλο
25	166	HAZ1	156	Βασικό μέταλλο
26	154	Βασικό μέταλλο	172	Βασικό μέταλλο
27	152	Βασικό μέταλλο	151	Βασικό μέταλλο
28	163	Βασικό μέταλλο	146	Βασικό μέταλλο
29	149	Βασικό μέταλλο	151	Βασικό μέταλλο
30	157	Βασικό μέταλλο	151	Βασικό μέταλλο
31	146	Βασικό μέταλλο		
32	152	Βασικό μέταλλο		

### 3.7.4 Προφίλ μικροσκληρότητας του 10CrMo9.10



Σχ.3.64 Προφίλ μικροσκληρότητας του δοκιμίου 10CrMo9.10

Η τιμή μικροσκληρότητας στο βασικό μέταλλο (b.m) κυμαίνεται σε 165HV κατά μέσο όρο. Στη περιοχή της HAZ κυμαίνεται από 200HV ως 280 HV. Στη λίκνη συγκόλλησης η τιμή είναι 250HV ως 300HV περίπου. Παρατηρούμε αύξηση της μικροσκληρότητας του χάλυβα καθώς κινούμαστε προς την HAZ και έχουμε μια σταθερότητα (ομοιογένεια μικροδομής) στην λίκνη συγκόλλησης και στη συνέχεια η τιμή της μικροσκληρότητας μειώνεται καθώς πλησιάζουμε το μέταλλο βάσης. Τα αυτιά στο προφίλ οφείλονται στη δημιουργία μαρτενσίτη στη ζώνη τήξης. Προφανώς στην λίκνη συγκόλλησης μειώνεται λίγο η παρουσία του μαρτενσίτη διότι έχουμε μια μικρή πτώση της τιμής.



**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7** Αποτελέσματα μετρήσεων με τιμές που προέρχονται από μέσους όρους και πραγματοποιούνται σε 2 σειρές.

<b>ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ VICKERS</b>				
<b>ΔΟΚΙΜΙΟ 10CrMo9.10 (μέσοι όροι)</b>				
<b>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</b>	<b>ΓΡΑΜΜΗ</b>	<b>ΠΕΡΙΟΧΗ</b>	<b>ΓΡΑΜΜΗ</b>	<b>ΠΕΡΙΟΧΗ</b>
	<b>A</b>		<b>B</b>	
0	188	Βασικό μέταλλο	155	Βασικό μέταλλο
1	166	Βασικό μέταλλο	158	Βασικό μέταλλο
2	154	Βασικό μέταλλο	142	Βασικό μέταλλο
3	147	Βασικό μέταλλο	150	Βασικό μέταλλο
4	160	Βασικό μέταλλο	134	Βασικό μέταλλο
5	166	Βασικό μέταλλο	142	Βασικό μέταλλο
6	186	Βασικό μέταλλο	160	Βασικό μέταλλο
7	257	HAZ1	247	HAZ1
8	302	HAZ1	276	HAZ1
9	301	HAZ1	292	HAZ2
10	306	HAZ2	303	HAZ2
11	319	HAZ2	308	HAZ2
12	262	Λίμνη συγκόλλησης	284	Λίμνη συγκόλλησης
13	296	Λίμνη συγκόλλησης	280	Λίμνη συγκόλλησης
14	300	Λίμνη συγκόλλησης	290	Λίμνη συγκόλλησης
15	251	Λίμνη συγκόλλησης	286	Λίμνη συγκόλλησης
16	250	Λίμνη συγκόλλησης	288	Λίμνη συγκόλλησης
17	294	Λίμνη συγκόλλησης	305	Λίμνη συγκόλλησης
18	285	Λίμνη συγκόλλησης	253	Λίμνη συγκόλλησης
19	273	Λίμνη συγκόλλησης	247	Λίμνη συγκόλλησης
20	275	Λίμνη συγκόλλησης	235	Λίμνη συγκόλλησης
21	276	Λίμνη συγκόλλησης	278	HAZ2
22	300	HAZ2	313	HAZ2
23	293	HAZ2	259	HAZ1
24	295	HAZ1	277	HAZ1
25	302	HAZ1	275	HAZ1
26	265	HAZ1	237	HAZ1
27	227	Βασικό μέταλλο	160	Βασικό μέταλλο
28	179	Βασικό μέταλλο	151	Βασικό μέταλλο
29	158	Βασικό μέταλλο	148	Βασικό μέταλλο
30	149	Βασικό μέταλλο	152	Βασικό μέταλλο
31	159	Βασικό μέταλλο	149	Βασικό μέταλλο
32	156	Βασικό μέταλλο	154	Βασικό μέταλλο

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Γενικά οι ανθρακούχοι και κραματικοί χάλυβες χρησιμοποιούνται ως υλικά συγκόλλησης πιο συχνά από οποιαδήποτε άλλο υλικό λόγω των διαδεδομένων εφαρμογών τους και επειδή είναι εύκολο να συγκολληθούν καθώς επίσης και αντιμετωπιστούν πιο εύκολα προβλήματα που πιθανώς να προκύψουν από τις συνθήκες συγκόλλησης.

Από την δοκιμή εφελκυσμού η οποία πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια προκύπτουν στοιχεία για την αντοχή σε εφελκυσμό, το όριο διαρροής, την επί της εκατό επιμήκυνση και την μείωση στην διατομή. Οι πρώτοι δυο είναι παράγοντες αντοχής και οι άλλοι δυο υποδεικνύουν την ολκιμότητα. Παρατηρούμε ότι στο χάλυβα 13CrMo44 η τάση διαρροής κυμαίνεται από 345 ως 402  $\text{mm}^{-2}$ , ενώ η τάση θραύσης κυμαίνεται από 503 ως 538  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ . Στο χάλυβα 15Mo3 η τάση διαρροής είναι 428  $\text{mm}^{-2}$ , ενώ η τάση θραύσης είναι 592  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$  και στον χάλυβα 10CrMo9.10 η τάση διαρροής είναι 410  $\text{mm}^{-2}$ , ενώ η τάση θραύσης είναι 563  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ . Επομένως από τους τρεις τύπους χαλύβων μεγαλύτερη τάση διαρροής και τάση θραύσης εμφανίζει ο 15Mo3. Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι στην ελαστική περιοχή η τάση είναι γραμμικά συμμετρική με την παραμόρφωση και η θραύση των δοκιμίων εφελκυσμού εντοπίστηκε στην περιοχή του λαιμού λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης, η οποία οφείλεται ως ένα βαθμό στη χρήση Ni που αυξάνει σημαντικά την αντοχή και μειώνει τη θερμοκρασία μετάβασης από όλκιμη σε ψαθυρή κατάσταση.

Από τις φωτογραφίες των δοκιμίων που υπέστησαν κάμψη, είναι φανερό ότι δεν δημιουργήθηκε ρωγμή σε κανένα από τους χάλυβες. Η μη εμφάνιση ρωγμών στην επιφάνεια των δοκιμίων κάμψης λόγω στερεοποίησης πιθανώς οφείλεται στη διατήρηση της καλής αναλογίας Mn/S στους χαμηλά κραματωμένους χάλυβες.

Η μελέτη της μακροδομής απέδειξε ότι η ΘΕΖ και η λίμνη συγκόλλησης είναι μετρήσιμες. Επίσης έχουν δημιουργηθεί δυο ΘΕΖ, που συμβαίνει όταν η συγκόλληση πραγματοποιείται με 2 πάσα. Στην λίμνη συγκόλλησης διακρίνονται διαφορετικές ζώνες τήξεως. Τέλος δεν διακρίνονται πόροι ή άλλες ατέλειες στα δοκίμια, εκτός από το χάλυβα 13CrMo44 όπου παρατηρούνται εγκλείσματα στο επάνω μέρος της λίμνη συγκόλλησης, που ίσως προκλήθηκαν από εγκλωβισμό οξυγόνου από το περιβάλλον κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Από τη μελέτη της μικροδομής προκύπτει ότι και οι τρεις τύποι χαλύβων είναι κυρίως φερριτικοί με ένα μικρό ποσοστό περλίτη. Επομένως αναμένουμε στη ΘΕΖ να υπάρχει παραμένων ωστενίτης, προευτηκτοειδής φερρίτης, περλίτης, μαρτενσίτης ή μπαινίτης. Επειδή η λίμνη συγκόλλησης αποτελείται από διαφορετικό ποσοστό άνθρακα (λόγω του ηλεκτροδίου πληρώσεως), το οποίο όμως δεν έχει μεγάλη διαφορά από το μέταλλο βάσης, περιμένουμε να δούμε αντίστοιχες φάσεις σε σχέση με τη ΘΕΖ αλλά να υπάρχει μεγαλύτερη ομοιογένεια, δενδρίτες και ίσως και πιο λεπτόκοκκες φάσεις.

Συγκεκριμένα ο χάλυβας 13CrMo44 στο βασικό μέταλλο περιέχει 85.16% προευτηκτοειδή φερρίτη (γιατί προέρχεται από υποευτηκτοειδή χάλυβα) και 14.84% περλίτη, ο χάλυβας 15Mo3 περιέχει 82.58% προευτηκτοειδή φερρίτη και 17.42% περλίτη, ενώ ο χάλυβας 10CrMo9.10 αποτελείται από 89.03% προευτηκτοειδή φερρίτη και 10.97% περλίτη. Δηλαδή στο μέταλλο βάσης διακρίνουμε στον 13CrMo44 πλακίδια φερρίτη καθώς και βελονοειδή φερρίτη, ενώ στους άλλους δύο χάλυβες ο φερρίτης έχει μορφή μεγάλων πολυγωνικών πλακιδίων και διακρίνεται ο παραμένων ωστενίτη σε μικρό ποσοστό. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δομές των χαλύβων ευνοούν την πυρήνωση του φερρίτη, αφού υπάρχουν καρβίδια τα οποία μπορεί να είναι άνθρακας που δεν πρόλαβαν να διαλυθούν ή κάποιο άλλο κραματικό στοιχείο.

Στη ΘΕΖ διακρίνουμε και στους τρεις χάλυβες τη δημιουργία μαρτενσίτη σε μικρό ποσοστό, παραμένων ωστενίτης ο οποίος λόγω του γρήγορου ρυθμού ψύξης δεν πρόλαβε να διαχυθεί, ιδιομορφές φερρίτη, φερρίτη Widmanstätten, φερρίτη που πυρηνώνεται στο εσωτερικό των κόκκων του ωστενίτη αλλά και των καρβιδίων όπου το επιτρέπει το μέγεθός τους και προευτηκτοειδή φερρίτη. Ειδικά στον χάλυβα 10CrMo9.10 τα πλακίδια φερρίτη Widmanstätten ακολουθούν τη ροή και η δομή του είναι πιο χονδρόκοκκη από τις ΘΕΖ των άλλων χαλύβων όπου σε κάποια σημεία υπάρχει εκλέπτυση των κόκκων. Επίσης στον 15Mo3 και 10CrMo9.10 είναι έντονη η παρουσία των πλακιδίων του πολυγωνικού φερρίτη, ενώ στον χάλυβα 13CrMo44 υπάρχει ποσοστό μαρτενσίτη και στον 15Mo3 πιθανώς να υπάρχει μπαινίτης. Τέλος υπάρχουν εγκλωβισμένα καρβίδια στη δομή όλων των χαλύβων, τα οποία διασκορπίζονται στους χάλυβες και σε μερικούς από τους χαμηλά κραματωμένους χάλυβες και επομένως ευνοούν την πυρήνωση του φερρίτη όχι μόνο στα σύνορα κόκκων του ωστενίτη αλλά ακόμα και στα σωματίδια μέσα στους κόκκους ωστενίτη.

Η δομή των χαλύβων στη λίμνη συγκόλλησης αποτελείται από πλακίδια φερρίτη Widmanstätten—που δεν είναι ένας καθαρά μετατοπιστικός μετασχηματισμός

αλλά σχηματίζεται από μηχανισμό ανισοτροπίας, ο οποίος περιλαμβάνει τη ταχεία διάχυση των μικρών και ενδιάμεσων ατόμων άνθρακα κατά μήκος της διεπιφάνειας συνοχής στον παραμένοντα ωστενίτη κατά τη διάρκεια του διατμητικού μετασχηματισμού—που είναι ευθυγραμμισμένα και πυρηνώνονται εσωτερικά σε μεγάλα εγκλείσματα, λωρίδες προφανώς μπαινίτη (μπορούν να αναπτυχθούν ανεμπόδιστα από τα εγκλείσματα) που ακολουθούν τη διεύθυνση της ροής και ένα ποσοστό παραμένοντος ωστενίτη και προευτηκτοειδή φερρίτη. Στον χάλυβα 13CrMo44 διακρίνουμε ένα μικρό ποσοστό μαρτενσίτη και βελονοειδή φερρίτη (που μπορεί να εμφανίζεται σε ποικίλες μορφές ανάλογα με τη σύνθεση του χάλυβα, το ρυθμό ψύξης και τα χαρακτηριστικά των εγκλεισμάτων), ενώ στο χάλυβα 15Mo3 διακρίνεται πολυγωνικός φερρίτη. Πρέπει να σημειωθεί ότι στη περιοχή των λιμνών συγκόλλησης παρατηρείται αρκετή ομοιογένεια, ανάπτυξη δενδριτών και εγκλωβισμένα καρβίδια.

Οι μετασχηματισμοί φάσης που παρατηρείται στους χάλυβες οφείλεται κινητικά κυρίως στη διάχυση η οποία απαιτεί χρόνο. Συνεπώς, στη ταχεία θέρμανση κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, οι μετασχηματισμοί φάσης μπορούν να μην συμβούν στις θερμοκρασίες ισορροπίας αλλά σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Για τους χάλυβες που περιέχουν τα μεγαλύτερα ποσά στοιχείων που σχηματίζουν καρβίδια (όπως Cr και Mo), η επίδραση του ρυθμού θέρμανσης γίνεται εντονότερη. Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός διάχυσης τέτοιων στοιχείων είναι τάξης μεγέθη μικρότερα από εκείνα του άνθρακα και επίσης επειδή εμποδίζουν τη διάχυση του άνθρακα. Κατά συνέπεια, καθυστερούν τους μετασχηματισμούς φάσεως σε μεγάλη έκταση. Ο συνδυασμός των υψηλών ρυθμών θέρμανσης και του μικρού χρόνου διατήρησης πάνω από την  $A_3$  στη συγκόλληση, μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό του ανομοιογενούς ωστενίτη κατά τη διάρκεια της θέρμανσης. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για τα άτομα του άνθρακα στον ωστενίτη να διαχυθούν από τις προγενέστερες αποικίες περλίτη με υψηλό ποσοστό σε άνθρακα στις προγενέστερες αποικίες φερρίτη με χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα. Κατά τη γρήγορη ψύξη, τα πρώτα μπορούν να μετασχηματιστούν σε αποικίες μαρτενσίτη με υψηλό ποσοστό σε άνθρακα, ενώ τα τελευταία σε αποικίες φερρίτη με χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα. Επίσης η κατανομή περλίτη και φερρίτη δεν είναι ακριβώς ομοιόμορφη επειδή ο χρόνος διάχυσης για τον άνθρακα είναι περιορισμένος κατά τον υψηλό ρυθμό θέρμανσης στη διάρκεια της συγκόλλησης και ο σχηματιζόμενος ωστενίτης δεν είναι ομοιογενής. Ο υψηλός ρυθμός ψύξης και το μεγάλο μέγεθος κόκκου

ευνοούν τον φερρίτη να σχηματίζει πλάγιες λαμέλες από τα όρια των κόκκων, που είναι γνωστές ως φερρίτης Widmanstätten. Αν και ο μαρτενσίτης συνήθως δεν εντοπίζεται στη HAZ ενός χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, μπορεί να σχηματιστεί μαρτενσίτης υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα όταν και η θέρμανση και ο ρυθμός ψύξης είναι πολύ υψηλός. Τέλος δεδομένου ότι ο ρυθμός ψύξης μειώνεται η δομή του προϊόντος μετασχηματισμού μπορεί να αλλάξει από μπαινιτική κυρίως σε βελονοειδές φερρίτη στα διαφασικά του όρια με τον φερρίτη Widmanstätten. Μεγαλύτερα εγκλείσματα, που ευνοούνται από τη χαμηλή σε περιεκτικότητα οξυγόνου στα μέταλλα συγκόλλησης, μπορούν να ενεργήσουν όπως οι περιοχές που ευνοούν την πυρήνωση του βελονοειδή φερρίτη.

Τέλος από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέτρηση της μικροσκληρότητας των δοκιμίων των χάλυβων οφείλονται στα εξής. Αρχικά η σκληρότητα ενός υλικού εξαρτάται από την φύση του, την συνοχή του και τη μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος. Λόγω του ικανοποιητικά διαθέσιμου χρόνου στην θερμική κατεργασία, τα καρβίδια διαλύονται τελείως και ενισχύουν έτσι την σκληρότητα του χάλυβα. Αυτό δεν είναι συνήθως δυνατό στη συγκόλληση λόγω του υψηλού ρυθμού θέρμανσης και του μικρού χρόνου διατήρησης σε υψηλή θερμοκρασία που εντοπίζονται στη HAZ. Συνεπώς, η μικροσκληρότητα στη HAZ μπορεί να αποκτήσει τιμές πάνω από ένα ευρύ φάσμα στις συγκολλήσεις που γίνονται με μεγάλους ρυθμούς θέρμανσης. Επιπλέον ο βελονοειδής φερρίτης είναι επιθυμητός, επειδή βελτιώνει την σκληρότητα του μετάλλου συγκόλλησης. Έχει παρατηρηθεί ότι η σκληρότητα στα μέταλλα συγκόλλησης με εγκοπή μορφής V στις συγκολλήσεις βυθιζόμενων βολταϊκών τόξων, αυξάνεται με την ανάπτυξη του όγκου του βελονοειδή φερρίτη στο μέταλλο συγκόλλησης. Η δομή στο εσωτερικό των κόκκων του βελονοειδή φερρίτη, σε συνδυασμό με το λεπτό μέγεθος του κόκκου, παρέχει τη μέγιστη αντίσταση στη διάδοση ρωγμών λόγω οπών. Ο σχηματισμός των συνόρων κόκκων φερρίτη, των πλευρικών πλακιδίων φερρίτη ή του άνω μπαινίτη είναι καταστρεπτικός για την σκληρότητα των μετάλλων συγκόλλησης, δεδομένου ότι αυτές οι μικροδομές διευκολύνουν τη διάδοση ρωγμών. Τέλος η χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της σκληρότητας του μαρτενσίτη και η αύξηση της θερμοκρασία έναρξης σχηματισμού μαρτενσίτη, έτσι ώστε οποιοσδήποτε μαρτενσίτη που σχηματίζεται μπορεί να μετριαστεί αυτόματα κατά τη διάρκεια της ψύξης. Εξαιτίας του σχηματισμού του *auto-tempered* μαρτενσίτη χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, τόσο η υψηλή αντοχή όσο και η σκληρότητας μπορούν να επιτευχθούν. Η προσθήκη Mn, Cr, Ni, και Mo

εξασφαλίζουν την σκληρότητα τέτοιων κραμάτων. Είναι ανάγκη να σημειωθεί ότι το προφίλ της μικροσκληρότητας παρουσιάζει σχεδόν την ίδια μορφή και στους τρεις χάλυβες. Απλά ο χάλυβας 10CrMo9.10 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σκληρότητα στην περιοχή της ΘΕΖ και της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τους άλλους χάλυβες, χωρίς όμως να έχει μεγάλη διαφορά.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### Συμπεράσματα

1. Ο χάλυβας 13CrMo44 η τάση διαρροής κυμαίνεται του από 345 ως 402  $\text{mm}^{-2}$ , ενώ η τάση θραύσης κυμαίνεται από 503 ως 538  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$  και η θραύση εντοπίστηκε στο μέταλλο βάσης.
2. Ο χάλυβας 15Mo3 η τάση διαρροής είναι 428  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , ενώ η τάση θραύσης είναι 592  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$  και η θραύση εντοπίστηκε στο μέταλλο βάσης.

3. Ο χάλυβα 10CrMo9.10 η τάση διαρροής είναι  $410 \text{ mm}^{-2}$ , ενώ η τάση θραύσης είναι  $563 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  και η θραύση εντοπίστηκε στο μέταλλο βάσης.
4. Κατά τη δοκιμή κάμψης οι χάλυβες δεν παρουσιάστηκαν ρωγμές.
5. Στο χάλυβα 13CrMo44 παρατηρήθηκε η παρουσία εγκλεισμάτων.
6. Στους χάλυβες 15Mo3 και 10CrMo9.10 δεν εμφανίστηκαν οπές ή άλλου είδους ατέλειες.
7. Και στους τρεις χάλυβες η ΘΕΖ και η λίμνη συγκόλλησης είναι μετρήσιμες. Έχουν δημιουργηθεί δυο ΘΕΖ και στην λίμνη συγκόλλησης διακρίνονται διαφορετικές ζώνες τήξεως.
8. Η δομή του χάλυβα 13CrMo44 είναι η εξής:
  - Μέταλλο βάσης: 85.16% προευτηκτοειδή φερρίτη, 14.84% περλίτης, πλακίδια και βελονοειδή φερρίτη, καρβίδια.
  - ΘΕΖ: Λεπτόκοκκη δομή, μικρό ποσοστό μαρτενσίτη, παραμένων ωστενίτης, πιθανώς μπαινίτης, ιδιομοφές φερρίτη, φερρίτης Widmastatten, προευτηκτοειδή φερρίτη, καρβίδια.
  - Λίμνη συγκόλλησης: Ομοιογένεια, δενδρίτες, φερρίτης Widmastatten, λωρίδες μπαινίτη, μικρό ποσοστό μαρτενσίτη, βελονοειδή φερρίτη, προευτηκτοειδή φερρίτη.
9. Η δομή του χάλυβα 15Mo3 είναι η εξής:
  - Μέταλλο βάσης: 82.58% προευτηκτοειδή φερρίτη, 17.42% περλίτης, πολυγωνικά πλακίδια φερρίτη, παραμένων ωστενίτης.
  - ΘΕΖ: Μικρό ποσοστό μαρτενσίτη, παραμένων ωστενίτης, περλίτης, πολυγωνικός φερρίτης, προευτηκτοειδή φερρίτη, καρβίδια.
  - Λίμνη συγκόλλησης: Ομοιογένεια, δενδρίτες, φερρίτης Widmastatten, λωρίδες μπαινίτη, παραμένων ωστενίτης, βελονοειδή φερρίτη, πολυγωνικά πλακίδια φερρίτη.
10. Η δομή του χάλυβα 10CrMo9.10 είναι η εξής:
  - Μέταλλο βάσης: 89.03% προευτηκτοειδή φερρίτη, 10.97% περλίτης, πολυγωνικός φερρίτης, παραμένων ωστενίτης, άνθρακας.
  - ΘΕΖ: Χονδρόκοκκη δομή με εκλέπτυνση κόκκων σε ορισμένα σημεία, παραμένων ωστενίτης, πολυγωνικός φερρίτης, προευτηκτοειδής φερρίτης, καρβίδια.
  - Λίμνη συγκόλλησης: Ομοιογένεια, λεπτόκοκκη δομή, δενδρίτες, φερρίτης Widmastatten, μπαινιτικές δεσμίδες, παραμένων ωστενίτης.
11. Για το χάλυβα 13CrMo44 οι τιμές μικροσκληρότητας είναι οι εξής:

➤ Μέταλλο βάσης: 170HV.

➤ ΘΕΖ:200 – 250 HV.

➤ Λίμνη συγκόλλησης: 225HV.

12. Για το χάλυβα 15Mo3 οι τιμές μικροσκληρότητας είναι οι εξής:

➤ Μέταλλο βάσης: 160HV.

➤ ΘΕΖ:180 – 230HV.

➤ Λίμνη συγκόλλησης: 200 – 220HV.

13. Για το χάλυβα 10CrMo9.10 οι τιμές μικροσκληρότητας είναι οι εξής:

➤ Μέταλλο βάσης: 165HV.

➤ ΘΕΖ:200 – 280HV.

➤ Λίμνη συγκόλλησης: 250HV.



# **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1*

---

1. Welding Handbook, Vol.3 7<sup>th</sup> ed., American Welding Society, Miami, FL,1980, pp. 170-238
2. Mendez, P.F. & Eagar, T.W., Advanced Materials & Processes, 159: 39, 2001
3. Welding Handbook, Vol.1, 7<sup>th</sup> ed., American Welding Society, Miami, FL,1976, pp. 2-32
4. Welding Handbook, Vol.2, 7<sup>th</sup> ed., American Welding Society, Miami, FL,1978, pp. 296-330
5. Welding Metallurgy, 2<sup>nd</sup> ed., Sindo Kou, pp.13 – 21
6. Schwartz, M.M., Metals Joining Manual, McGraw-Hill, New York, 1979
7. Eichhorn, F., Rimmel, J. & Wubbels
8. Welding Metallurgy, 2<sup>nd</sup> ed., Sindo Kou, Chapter 2
9. Kou & Le, Metal Trans. A
10. Lu & Kou, Weld J. 77: 76s, 1998
11. Tsai, N., Ph.D. Thesis, Department of Materials Science & Engineering, MIT, 1983
12. Grill, A., Metall. Trans., 1981
13. Welding Metallurgy, 2<sup>nd</sup> ed., Sindo Kou, pp.116-117
14. Tsai, M.C. & Kou, Int. J. Heat Mass Transfer, 33 : 2089, 1990
15. Welding Metallurgy, 2<sup>nd</sup> ed., Sindo Kou, pp.174-181
16. Welding Metallurgy, 2<sup>nd</sup> ed., Sindo Kou, pp.206
17. Welding Metallurgy, 2<sup>nd</sup> ed., Sindo Kou, pp.232-239
18. Welding Metallurgy, 2<sup>nd</sup> ed., Sindo Kou, Chapter 17
19. Metallurgy of welding, 5<sup>th</sup> ed., J. F. Lancaster, Chapter 8

1. Hellenic Standard ELOT EN 1043 – 1
2. Technological Bending Test on Welded Joints & Weld Platings, DIN 50121, part1
3. Hellenic Standard ELOT EN 895
4. Summary: Classification & Quantification of Microstructures in Steels, Corus UK Limited, Sweden Technology Centre, 22 February 2002
5. Metals Handbool, Vol. 8

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1*

---

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1** Τύποι και Χημική Ανάλυση των 13CrMo44, 15Mo3,  
10CrMo9.10

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2** Ηλεκτρόδια: Χημική Ανάλυση και εφαρμογές

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3** 13CrMo44, 15Mo3, 10CrMo9.10: Μηχανικές Ιδιότητες

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.4** 13CrMo44, 15Mo3, 10CrMo9.10: Εφαρμογές

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.5** Τυπικά προβλήματα συγκόλλησης και Πρακτικές  
λύσεις για τους ανθρακούχους και κραματικούς χάλυβες

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3*

---

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1** Αποτελέσματα εφελκυσμού του δοκιμίου 13CrMo44

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2** Αποτελέσματα εφελκυσμού του δοκιμίου 15Mo3

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3** Αποτελέσματα εφελκυσμού του δοκιμίου 10CrMo9.10

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4** Αποτελέσματα μετρήσεων σύμφωνα με την  
προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 1043–1

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5** Αποτελέσματα μετρήσεων με τιμές που προέρχονται  
από μέσους όρους και πραγματοποιούνται σε 2 σειρές.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6** Αποτελέσματα μετρήσεων με τιμές που προέρχονται  
από μέσους όρους και πραγματοποιούνται σε 2 σειρές.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7** Αποτελέσματα μετρήσεων με τιμές που προέρχονται  
από μέσους όρους και πραγματοποιούνται σε 2 σειρές.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ.1 Αυλοί υπέρθερμου ατμού: 15Mo3( χρώμα πράσινο-κόκκινο),13CrMo44(χρώμα κίτρινο-ασημί)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

---

Σχ.1.1 Μηχανές συγκόλλησης GTAW

Σχ.1.2 GTAW: (α) διαδικασία (β) μεγέθυνση της περιοχής όπου γίνεται συγκόλληση

Σχ.1.3 Τριών ειδών πολικότητας στη μέθοδο GTAW

Σχ.1.4 Καθαρισμός της επιφάνειας στη μέθοδο GTAW με DC θετικό ηλεκτρόδιο

Σχ.1.5 Συγκολλήσεις με τη μέθοδο GTAW στον ανοξειδωτο χάλυβα 316L πάχους 6mm:(α) χωρίς σκόνη (β) με σκόνη

Σχ.1.6 Μετρήσεις της απόδοσης του τόξου στη GTAW: (α) θερμοδομετρητής, (β) άνοδος στη θερμοκρασία ψυκτικού νερού συναρτήσει του χρόνου. Τροποποιημένο από τον Κου.

Σχ.1.7 Απόδοση τόξου στη GTAW και PAW

Σχ.1.8 Εγκάρσιο διαγώνιο τμήμα της συγκόλλησης δείχνει περιοχές που αντιπροσωπεύουν τις συνεισφορές του μετάλλου βάσης και του υλικού συγκόλλησης

Σχ.1.9 Ικανότητα τήξης: (α) χαμηλή είσοδος θερμότητας και ταχύτητα συγκόλλησης, (β) υψηλή είσοδος θερμότητας και ταχύτητα συγκόλλησης, (γ) παραλλαγή με τους αδιάστατους

Σχ.1.10 Επίδραση της γωνίας της άκρης του ηλεκτροδίου στο σχήμα και στη κατανομή της ισχύος της πυκνότητας του τόξου βολφραμίου

Σχ.1.11 Επίδραση της γωνίας της άκρης του ηλεκτροδίου στο σχήμα του τόξου βολφραμίου

Σχ.1.12 Σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) που κινείται με τη πηγή θερμότητας.

Σχ.1.13 Δισδιάστατη μετάδοση θερμότητας κατά τη συγκόλληση λεπτού ελάσματος

Σχ.1.14 Τρισδιάστατη μετάδοση θερμότητας κατά τη συγκόλληση ημι- άπειρου κομματιού

Σχ.1.15 Υπολογισμένα αποτελέσματα από τη τρισδιάστατη εξίσωση μετάδοσης θερμότητας του Rosenthal: (α) θερμικοί κύκλοι (β) ισόθερμες. Ταχύτητα συγκόλλησης: 2.4 mm/s, εισαγωγή θερμότητα: 3200W, υλικό: 1018 χάλυβας

**Σχ.1.16** Σχήματα από λίμνες συγκόλλησης με τη μέθοδο GTAW σε ανοξείδωτο χάλυβα 304.

**Σχ.1.17** Αιχμηρή ακμής λίμνης συγκόλλησης του ανοξείδωτου χάλυβα 309 που έχει υποστεί βαφή με πάγο μετά τη συγκόλληση. Από τον Κου και Lee.

**Σχ.1.18** Διάφοροι ρυθμοί ψύξης με την εισαγόμενη θερμότητα ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης. Από τον Lee.

**Σχ.1.19** Συγκόλληση ανθρακούχου χάλυβα: (a) HAZ, (b) διάγραμμα φάσεων.

**Σχ.1.20** Σύγκριση ανάμεσα στη συγκόλληση και την θερμική κατεργασία του χάλυβα: (a)θερμικές κατεργασίες, (b) Διάγραμμα φάσεων Fe – C.

**Σχ.1.21** Μικροδομή της HAZ της GTAW του χάλυβα 1018 (200x)

**Σχ.1.22** Μηχανισμός της μερικής εκλέπτυνσης κόκκων σε ανθρακούχο χάλυβα

**Σχ.1.23** Εκλέπτυνση κόκκων σε συγκόλληση πολλαπλών πάσων: (a) συγκόλληση ενός πάσου (b) μικροδομή συγκόλλησης πολλαπλών πάσων. (AWS)

**Σχ.1.24** Μικροδομή ανθρακούχου χάλυβα: (a) κατάσταση χυτού (b) μετά την ομογενοποίηση

**Σχ.1.25** Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης σε κοινοειδή δομή σε μέταλλο συγκόλλησης: (a,b)συμμετρική δομή, (c,d) με αξονικούς κόκκους

**Σχ.1.26** Η μικροδομή γύρω από τα όρια της λίμνης συγκόλλησης: (a)διάγραμμα φάσεων, (b) θερμικοί κύκλοι, (c) μικροδομή του στερεού και του υγρού τμήματος γύρω από τη λίμνη συγκόλλησης

**Σχ.1.27** Μηχανισμοί πυρηνώσεως γύρω κατά τη συγκόλληση: (a) κάτοψη (b)πλάγια όψη

**Σχ.1.28** Κινητήριες δυνάμεις στη μετάδοση θερμότητας μέσα στη λίμνη συγκόλλησης:(a,b)άνωση, (c,d) δύναμη Lorentz, (e,f)διατμητική τάση που προκαλείται τη κλίση της επιφανειακής τάσης, (g,h)διατμητική τάση που προκαλείται από το πλάσμα του τόξου

**Σχ.1.29** Διάγραμμα CCT για το μέταλλο συγκόλλησης του χαμηλά κραματωμένου χάλυβα

**Σχ.1.30** Το σκίτσο δείχνει τα κραματικά στοιχεία, με χρόνο ψύξης από 800 στους 500°C, περιεκτικότητα σε οξυγόνο και μέγεθος κόκκου ωστενίτη.

**Σχ.1.31** Επίδραση των κραματικών στοιχείων, του μεγέθους των κόκκων, και παρουσία οξυγόνου στα διαγράμματα CCT για τα μέταλλα συγκόλλησης σε χαμηλά κραματωμένους χάλυβες

**Σχ.1.32** Επίδραση της διαμέτρου του κόκκου ως μηχανισμός της περιεκτικότητας οξυγόνου στο μέταλλο συγκόλλησης στις συγκολλήσεις βυθιζόμενου τόξου.

*Σχ.1.33 Υπομέγεθος Charpy V-notch τιμών σκληρότητας ως μηχανισμός του όγκου του βελονοειδή φερριτή στις συγκολλήσεις βυθιζόμενου τόξου.*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

---

*Σχ.2.1 Τυπική καμπύλη εφελκυσμού τάσης – παραμόρφωσης για ελατό μέταλλο*

*Σχ.2.2 Τυπικό όριο διαρροής στη συμπεριφορά χαμηλά κραματωμένου ανθρακούχο χάλυβα*

*Σχ.2.3 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης*

*Σχ.2.4 Όροι που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή κάμψης*

*Σχ.2.5 Μηχανές κάμψης V*

*Σχ.2.6 Κάμψης ρίζας*

*Σχ.2.7 Κάμψη προσώπου*

*Σχ.2.8 Κάμψη*

*Σχ.2.9 Γωνία κάμψης*

*Σχ.2.10 Στερεοσκόπιο τύπου WILD MPS46/52*

*Σχ.2.11 Μικροσκόπιο τύπου Leitz Aristomet*

*Σχ.2.12 Ετερομορφικός και ιδιομορφές του πρευτηκτοειδή φερριτή*

*Σχ.2.13 Μορφολογίες του φερριτή στον prior σύνορα ωστενιτικών κόκκων και intragranular sites*

*Σχ.2.14 Διαλυμένος και αδιάλυτος περλίτη*

*Σχ.2.15 Intragranular πρευτηκτοειδής φερριτής και περλίτης*

*Σχ.2.16 Προευτηκτοειδής και δευτερογενής φερριτής Widmanstätten*

*Σχ.2.17 Προϋπάρχοντα διαφασικά όρια ωστενιτικών κόκκων με τον φερριτή Widmanstätten*

*Σχ.2.18 Intragranular φερριτής Widmanstätten*

*Σχ.2.19 Intragranular φερριτής Widmanstätten*

*Σχ.2.20 Μπαινιτικές δεσμίδες και υπομονάδες*

*Σχ.2.21 Interlocking των μπαινιτικών δεσμιδων*

*Σχ.2.22 Ανάπτυξη των μπαινιτικών δεσμιδων από τα εγκλείσματα*

*Σχ.2.23 Λωρίδες μαρτενσίτη*

- Σχ.2.24* Πλακίδια των διδυμίων μαρτενσίτη  
*Σχ.2.25* Μορφολογία του βελονοειδή φερρίτη  
*Σχ.2.26* Μορφές του βελονοειδή φερρίτη  
*Σχ.2.27* Γεωμετρική Μορφή της μεθόδου Vickers  
*Σχ.2.28* Μικροσκληρόμετρο τύπου HMV- 2000 SMIMADJU.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

---

- Σχ.3.1* Δοκίμια εφελκυσμού μετά το πέρας της δοκιμής  
*Σχ.3.2* Διάγραμμα πραγματικής τάσης παραμόρφωσης του 13CrMo44 (No.1)  
*Σχ.3.3* Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του 13CrMo44 (No.2)  
*Σχ.3.4* Δοκίμια εφελκυσμού μετά το πέρας της δοκιμής  
*Σχ.3.5* Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του 15Mo3  
*Σχ.3.6* Δοκίμια εφελκυσμού μετά το πέρας της δοκιμής  
*Σχ.3.7* Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του 10CrMo9.10  
*Σχ.3.8* Κάμψη 13CrMo44(No.2)  
*Σχ.3.9* Κάμψη 13CrMo44(No.3)  
*Σχ.3.10* Κάμψη 13CrMo44(No.4)  
*Σχ.3.11* Κάμψη 13CrMo44(No.5)  
*Σχ.3.12* Δοκίμια κάμψης 10CrMo9.10 μετά το πέρας της δοκιμής  
*Σχ.3.13* Μακροδομή του 13CrMo44(8x)  
*Σχ.3.14* Μακροδομή του 13CrMo44(a-8x,b-10x)  
*Σχ.3.15* Μακροδομή του 15Mo3(8x)  
*Σχ.3.16* Μακροδομή του 15Mo3(8x)  
*Σχ.3.17* Μακροδομή του 10CrMo9.10(8x)  
*Σχ.3.18* Μακροδομή του 10CrMo9.10 (8x)  
*Σχ.3.19* Χαρτογράφηση 13CrMo 44 – 500 φορές μεγέθυνση  
*Σχ.3.20* Χαρτογράφηση 13CrMo 44 – 1000 φορές μεγέθυνση  
*Σχ.3.21* Μέταλλο βάσης 13CrMo44, α και β (x500)

- Σχ.3.22 Μέταλλο βάσης 13CrMo44, γ και δ (x1000)
- Σχ.3.23 HAZ1 Δοκιμίου 13CrMo44, α (x500), β και γ (x1000)
- Σχ.3.24 HAZ2 Δοκιμίου 13CrMo44 – α και β (x500)
- Σχ.3.25 HAZ2 Δοκιμίου 13CrMo44 – γ και δ (x1000)
- Σχ.3.26 Λίμνη συγκόλλησης Δοκιμίου 13CrMo44 – (x50)
- Σχ.3.27 Λίμνη συγκόλλησης Δοκιμίου 13CrMo44 – (x500)
- Σχ.3.28 Λίμνη συγκόλλησης Δοκιμίου 13CrMo44 – α και β (x1000)
- Σχ.3.29 Όρια b.m. – haz1 – haz2 (x50)
- Σχ.3.30 Όρια b.m. – haz1 (x100)
- Σχ.3.31 Όρια haz2 – haz1 – b.m. (x100)
- Σχ.3.32 Όρια haz2 – w.p. (x100)
- Σχ.3.33 Χαρτογράφηση 15Mo3 – 500 φορές μεγέθυνση
- Σχ.3.34 Χαρτογράφηση 15Mo3 – 1000 φορές μεγέθυνση
- Σχ.3.35 Μέταλλο βάσης 15Mo3, α (x500), β (x1000)
- Σχ.3.36 HAZ1 Δοκιμίου 15Mo3, α, β (x500)
- Σχ.3.37 HAZ1 Δοκιμίου 15Mo3, α, β (x1000)
- Σχ.3.38 HAZ2 Δοκιμίου 15Mo3, α (x500), β και γ (x1000)
- Σχ.3.39 Λίμνη Συγκόλλησης 15Mo3, α, β (x500)
- Σχ.3.40 Λίμνη Συγκόλλησης 15Mo3, α, β (x1000)
- Σχ.3.41 b.m. – haz1 – haz2 του 15Mo3, (x50)
- Σχ.3.42 b.m. – haz1 του 15Mo3, (x200)
- Σχ.3.43 haz2 – w.p. του 15Mo3, (x100)
- Σχ.3.44 w.p – haz2 του 15Mo3 (x50)
- Σχ.3.45 Χαρτογράφηση 10CrMo9.10 – 500 φορές μεγέθυνση
- Σχ.3.46 Χαρτογράφηση 10CrMo9.10 – 1000 φορές μεγέθυνση
- Σχ.3.47 Βασικό μέταλλο 10CrMo9.10, α, β (x500)
- Σχ.3.48 Βασικό μέταλλο 10CrMo9.10, α, β (x1000)
- Σχ.3.49 Haz1 10CrMo9.10, α, β (x500)



*Σχ.3.50 Haz1 10CrMo9.10, α, β (x1000)*

*Σχ.3.51 Haz2 10CrMo9.10, α, β (x1000), γ (x200)*

*Σχ.3.52 Λίμνη συγκόλλησης 10CrMo9.10, α, β (x500), γ (x1000)*

*Σχ.3.53 haz2 – haz1 (x100)*

*Σχ.3.54 b.m – haz1 – haz2 (x50)*

*Σχ.3.55 b.m – haz1 (x100)*

*Σχ.3.56 haz1 – b.m (x100)*

*Σχ.3.57 haz1 – haz2 (x100)*

*Σχ.3.58 haz2 – haz1 – b.m. (x50)*

*Σχ.3.59 haz2 – haz1 (x100)*

*Σχ.3.60 haz2 – w.p. (x50)*

*Σχ.3.61 Μικροσκληρομετρήσεις κατά Vickers σύμφωνα με την προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 1043-1*

*Σχ.3.62 Προφίλ μικροσκληρότητας του δοκιμίου 13CrMo44*

*Σχ.3.63 Προφίλ μικροσκληρότητας του δοκιμίου 15Mo3*

*Σχ.3.64 Προφίλ μικροσκληρότητας του δοκιμίου 10CrMo9.10*



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074023