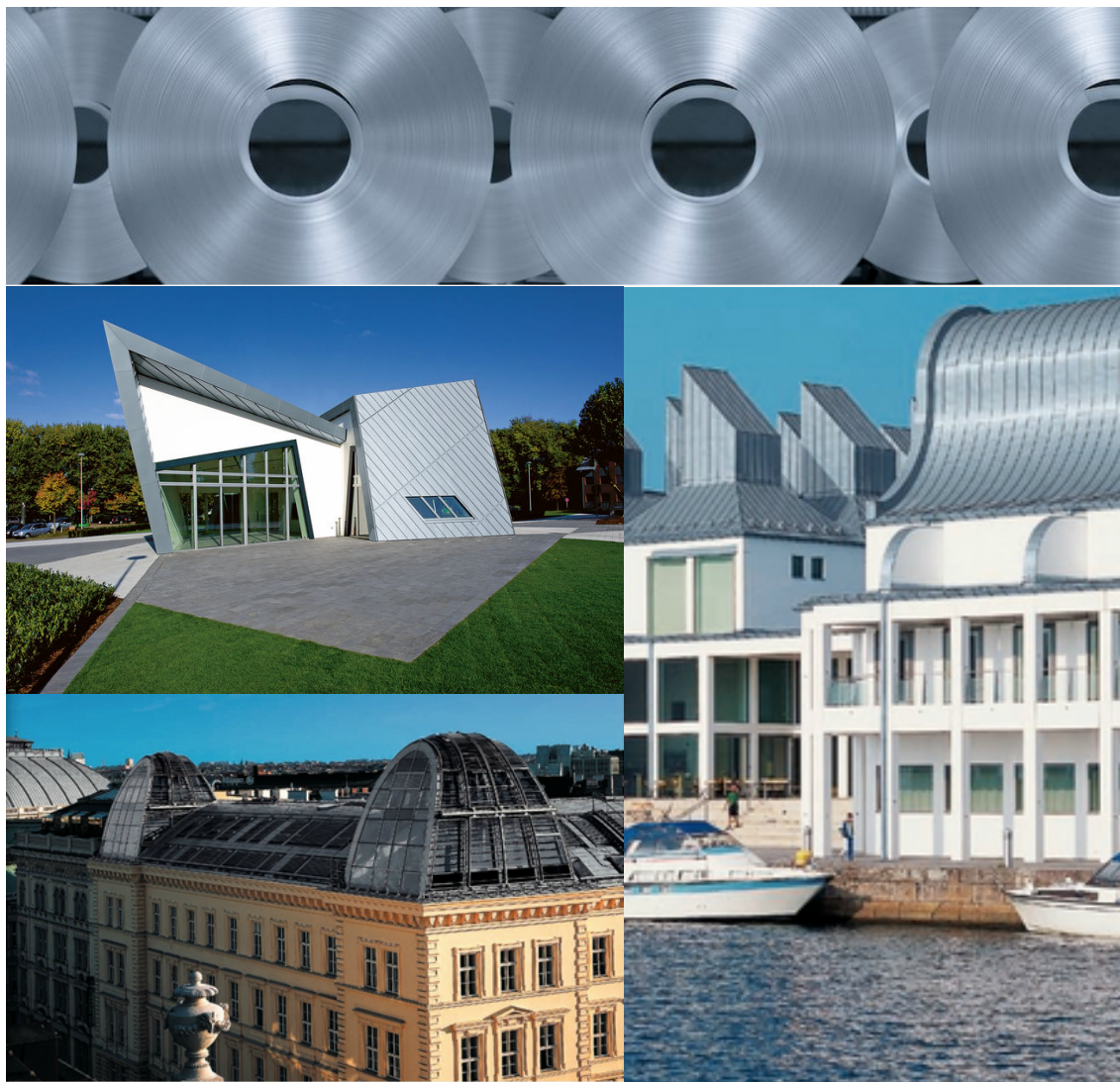


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΛΕΠΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥΧΟΥ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ



ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Α. ΓΟΥΛΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Χ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ: 07107038

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΛΕΠΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥΧΟΥ  
ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΓΟΥΛΑΣ

Επιβλέπων: Χ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ, καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 24/07/2012

Χ. Παναγόπουλος, καθηγητής, ..... (Υπογραφή)

Ε. Χριστοφόρου, καθηγητής, ..... (Υπογραφή)

Η. Χαλικιά, καθηγήτρια, ..... (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

Φωτογραφίες εξωφύλλου:

Πηγή: Rheinzink

Πάνω: coils ZnTiCu, [www.rheinzink.com](http://www.rheinzink.com)

Αριστερά μέση: Libeskind Villa, [www.rheinzink.com](http://www.rheinzink.com)

Αριστερά κάτω: silberfeil-architekten, Rogl Koblinger, Βιέννη, Αυστρία

Δεξιά κάτω: Kim Utzon, Κοπενγχάγη, Δανία

Copyright © Κ. Γούλας, Σ. Παπαευθυμίου, ΕΛΚΕΜΕ ΑΕ, 2012

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή μου κύριο Χρήστο Παναγόπουλο για την καθοδήγησή του και την υποστήριξη της εκπόνησης της Διπλωματικής μου εργασίας στην εταιρεία «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.».

Ευχαριστώ θερμά τη διοίκηση της εταιρείας «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.», συγκεκριμένα τους κ. Καθ. Δ. Κ. Παπαμαντέλλο, κ. S. Ping, κ. Αθ. Μηλιώκα, κ. Γ. Πανταζόπουλο και κ. Σπ. Παπαευθυμίου, που μου επέτρεψαν τη διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών στο πλαίσιο της εργασίας μου.

Ιδιαίτερα θέλω να σταθώ στην καθοριστική συμβολή του Δρ. Σπ. Παπαευθυμίου όχι μόνο στην εκπόνηση της πρακτικής μου άσκησης και της Διπλωματικής μου εργασίας αλλά και στην έναρξη της επαγγελματικής μου συνεργασίας με την «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.». Επιπλέον, τον ευχαριστώ για την πολύτιμη επιστημονική συνεργασία μας στο πλαίσιο διπλωματικής εργασίας, την οποία και επέβλεψε σε συνεργασία με τον καθηγητή μου κ. Χρ. Παναγόπουλο.

Ευχαριστώ επίσης τους κ.κ. Δρ. Γ. Πανταζόπουλο, Αθ. Βαζδερβανίδη και Ανδρ. Ρίκο για την επιστημονική συνεργασία, την τεχνική εκπαίδευση και τη βοήθεια αντίστοιχα. Ευχαριστώ τον κ. S. Ping, Team Leader της «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.», για την υποστήριξη της περαιτέρω διερεύνησης του επιστημονικού αντικειμένου.

Τέλος, ευχαριστώ την κα. Β. Παντελεάκου τον κ. Ε. Γαβαλά και τον κ. Μ. Μαρίου, με τους οποίους έχω την ευχαρίστηση να συνεργάζομαι καθημερινά.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	4
Σύνοψη.....	6
Abstract .....	7
<b>1. Θεωρητικό Μέρος .....</b>	<b>8</b>
1.1 Εξαγωνικό σύστημα υψηλής πυκνότητας.....	8
1.2 Διδυμιακή παραμόρφωση .....	9
1.3 Γενικά στοιχεία για τον Τιτανιούχο Ψευδάργυρο .....	10
1.4 Συνεχής χύτευση με τη μέθοδο Twin Roll Casting [24].....	14
1.5 Ημισυνεχής χύτευση (Ingot Metallurgy) .....	15
1.6 Μέθοδος συγκόλλησης με μη καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο και προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου (TIG) [4] .....	16
1.7 Δοκιμή εφελκυσμού.....	19
1.8 Μικροσκληρομέτρηση Vickers .....	21
1.9 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope) ..	22
<b>2. Πειραματικό Μέρος.....</b>	<b>24</b>
2.1 Δοκιμές συγκόλλησης.....	24
2.1.1 Χειροκίνητες δοκιμές συγκόλλησης με TIG .....	24
2.1.2 Βιομηχανικές Δοκιμές συγκόλλησης .....	26
2.2 Προετοιμασία δειγμάτων .....	29
2.2.1 Λείανση των δειγμάτων.....	30
2.2.2 Στίλβωση.....	31
2.3 Προετοιμασία δοκιμών μηχανικών ιδιοτήτων .....	31
2.2.3 Χημική Προσβολή .....	33
<b>3. Αποτελέσματα.....</b>	<b>35</b>
3.1 Αποτελέσματα μεταλλογραφικής εξέτασης .....	35
3.1.1 Μεταλλογραφική εξέταση με πολωμένο φως.....	35
3.1.2 Εξέταση μετά την χημική προσβολή .....	37
3.1.3 Μικροσκληρομέτρηση .....	38
3.2 Αποτελέσματα μηχανικών ιδιοτήτων .....	58
3.2.1 Δοκιμή εφελκυσμού.....	58
3.2.2 Απλή δοκιμή κάμψης .....	61
3.2.3 Δοκιμή κάμψης 3 σημείων .....	63
3.3 Εξέταση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.....	66
3.3.1 Εξέταση του του μετάλλου βάσης .....	66
3.3.2 Εξέταση της επιφάνειας θραύσης των δοκιμών εφελκυσμού.....	71
<b>4. Συζήτηση για τα αποτελέσματα .....</b>	<b>81</b>
<b>5. Συμπεράσματα.....</b>	<b>87</b>
<b>6. Βιβλιογραφία.....</b>	<b>89</b>

## Σύνοψη

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής μελετήθηκε η επίδραση της διακύμανσης κρίσιμων παραγωγικών παραμέτρων της συγκόλλησης στη δομική ακεραιότητα σωλήνων κατασκευαστικής χρήσης (υδρορροές) κράματος ZnTiCu. Πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητες και βιομηχανικές δοκιμές συγκόλλησης με τη μέθοδο TIG (Tungsten Iner Gas - Μέθοδος με μη καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο Βολφραμίου και προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου) με παραμέτρους την ένταση του ρεύματος, την παροχή αερίου, την πολικότητα και το είδος του ρεύματος (AC-DC). Στα δείγματα που παρήχθησαν από τις δοκιμές διεξήχθησαν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού και κάμψης 3 σημείων, μεταλλογραφική εξέταση των συγκολλήσεων με οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία και εξέταση της επιφάνειας θραύσης των δοκιμίων του εφελκυσμού τόσο του μετάλλου βάσης όσο και των συγκολλήσεων. Με αφετηρία τα αποτελέσματα των παραπάνω, έγινε προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων αναφορικά με την ποιότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών, των συνθηκών συγκόλλησης και όλων των παραμέτρων, που επηρεάζουν τη διεργασία. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η κατανομή της μεσομεταλλικής ένωσης  $TiZn_{15}$  (β-φάση) και το μέγεθος των κόκκων της βασαλτικής ζώνης επηρεάζουν την αντοχή της συγκόλλησης. Με την τήξη και επαναστερεοποίηση που προκαλείται κατά τη συγκόλληση, η β-φάση αναδιατάσσεται και προκαλεί ψαθυροποίηση. Δεν είναι δυνατή η επαναδιαλυτοποίησή της μέσω θερμικής κατεργασίας διότι διαλυτοποιείται 2 βαθμούς κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του κράματος. Επιπλέον, καθώς η β-φάση σκληραίνει το μέταλλο βάσης, επηρεάζει τη διαμορφωσιμότητά του και την ακρίβεια της συγκράτησής του κατά τη συγκόλληση προκαλώντας συγκολλήσεις με λέπτυνση στο κέντρο που αστοχούν ευκολα.

---

## Abstract

In the present diploma thesis the influence of the variation of vital welding process parameters on the structural integrity of ZnTiCu structural tubes used as gutters was examined. Manual and industrial TIG (Tungsten Inert Gas) welding trials were conducted with parameters current intensity, gas supply, polarity and the current's form (AC-DC). The specimens from the trials underwent mechanical properties determination through tensile and 3 point bending tests, metallographical examination by means of Light Optical Metallography and Scanning Electron Microscopy and tensile specimen fractography both for weld and base metal specimens.

By taking into account the results of the above, it was attempted to come to conclusions about the quality of the used materials, welding parameters and other parameters that affect the process. The analysis revealed that  $\beta$ -phase affects weld integrity. After melting and solidification, which occur during the welding process, intermetallic  $\text{TiZn}_{15}$  ( $\beta$ -phase) redistributes and causes embrittlement. Solution of  $\beta$ -phase through heat treatment is not possible, as it desolutes two degrees below the alloy's melting point. Additionally,  $\beta$ -phase hardens the base metal, affects its formability and the accuracy of clamping during the welding process, causing production of welds with central thinning, which fail easily.

## 1. Θεωρητικό Μέρος

### 1.1 Εξαγωνικό σύστημα υψηλής πυκνότητας

Στο Εξαγωνικό σύστημα υψηλής πυκνότητας (Hexagonal Close Packed - HCP) το στοιχειώδες κύτταρο είναι ένα ορθό πρίσμα, του οποίου η βάση είναι ένα κανονικό εξάγωνο. Τα άτομα τοποθετούνται στις κορυφές και στα κέντρα των εξαγωνικών βάσεων, καθώς και πάνω στο επίπεδο που τέμνει στη μέση το εξαγωνικό πρίσμα. Μερικά βασικά χαρακτηριστικά του εξαγωνικού μεγίστης πυκνότητας είναι τα εξής:

(1) Κάθε στοιχειώδης κυψελίδα περιέχει συνολικά 6 άτομα.

(2) Ο βαθμός ατομικής πλήρωσης του εξαγωνικού συστήματος μέγιστης πυκνότητας είναι ίσος με αυτό του εδροκεντρωμένου κυβικού συστήματος, δηλαδή 74%.

(3) Ο λόγος  $c/a$  (ύψος κυψελίδας/πλευρά εξαγωνικής βάσης) της ιδανικής κυψελίδας εξαγωνικού συστήματος υψηλής πυκνότητας είναι ίσος προς 1.633.

Γενικά, όλοι οι μονοκρύσταλλοι ολισθαίνουν κάτω από την ίδια κρίσιμη τιμή διατμητικής ή εφελκυστικής τάσης. Μικροσκοπικά εμφανίζονται δέσμες παράλληλων γραμμών, ο αριθμός των οποίων αυξάνεται με την πλαστική παραμόρφωση. Η διεύθυνση των επιπέδων ολίσθησης σε μέταλλο που έχει υποστεί παραμόρφωση γίνεται φανερή με την εμφάνιση, στην επιφάνεια του, ταινιών ολίσθησης. Σε πυκνά σε επίπεδα άτομα, διεύθυνση ολίσθησης είναι η κρυσταλλογραφική διεύθυνση της μεγαλύτερης δυνατής ατομικής πυκνότητας. Ο συνδυασμός ενός επιπέδου και μιας πυκνής σε άτομα διεύθυνσης ολίσθησης καθορίζει ένα πιθανό σύστημα ολίσθησης.



## 1.2 Διδυμιακή παραμόρφωση

Η διδυμιακή παραμόρφωση είναι ιδιαίτερα σημαντικός μηχανισμός για μέταλλα με χαμηλή συμμετρία της κρυσταλλικής δομής, όπως είναι τα μέταλλα του HCP συστήματος.

Δυο μέρη ενός κρυστάλλου βρίσκονται σε σχέση διδυμίας όταν μέρος ενός κρυστάλλου είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το υπόλοιπο κατά τρόπο ώστε το ένα να αποτελεί το είδωλο του άλλου ως προς ένα κρυσταλλικό επίπεδο που ονομάζεται επίπεδο διδυμίας. Το φαινόμενο της διδυμίας χαρακτηρίζεται από τρία μεγέθη:

- α) το επίπεδο της διδυμίας
- β) τη διεύθυνση και
- γ) το βαθμό της διδυμίας

Υπάρχει διαφορά ανάμεσα στο φαινόμενο της ολίσθησης και το φαινόμενο της διδυμίας. Κατά την ολίσθηση, αφενός μεν η πραγματοποιούμενη παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από μια πλεγματική απόσταση (που καθορίζεται από το διάνυσμα Burgers), δεδομένου ότι εξαρτάται από το πλήθος των διαταραχών που ολισθαίνουν, αφετέρου όλα τα άτομα του τμήματος που ολισθαίνει μετακινούνται κατά ίσες αποστάσεις, ενώ ο προσανατολισμός των ατόμων παραμένει ο ίδιος [20].

Αντίθετα κατά τη διδυμιακή παραμόρφωση μετακινούνται όλα τα άτομα που περικλείονται ανάμεσα στα επίπεδα της διδυμίας με διαφορετικό τρόπο το καθένα ανάλογα με την απόσταση τους από το επίπεδο της διδυμίας. Παρόλο που το φαινόμενο αυτό αφορά μικρό μόνο μέρος του συνολικού όγκου του κρυστάλλου του μετάλλου, ο ρόλος του είναι σημαντικός γιατί οι αλλαγές προσανατολισμού που προκαλούνται είναι δυνατόν να δημιουργήσουν νέα συστήματα ολίσθησης, όταν ο κρύσταλλος υποβληθεί σε υψηλές διατμητικές τάσεις ή σε μεγάλη ταχύτητα παραμόρφωσης [21].

Η ολίσθηση απαντάται πιο συχνά από τη διδυμιακή παραμόρφωση σε μέταλλα με συμμετρική κρυσταλλική δομή, όπως τα μέταλλα με κυβικό κρυσταλλικό πλέγμα, στα οποία είναι διαθέσιμα πολλά συστήματα ολίσθησης με χαμηλή ενέργεια ενεργοποίησης. Η εμφάνιση διδυμιακής παραμόρφωσης

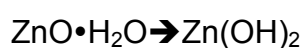
σε κυβικά χωροκεντρωμένα μέταλλα (body center cubic – bcc) ευνοείται στην περίπτωση αδυναμίας ενεργοποίησης της ολίσθησης κατά την παραμόρφωση σε χαμηλές θερμοκρασίες ή με υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης [22]. Στην περίπτωση των μετάλλων του εδροκεντρωμένου κυβικού συστήματος (face center cubic – fcc) η εμφάνιση διδυμιακής παραμόρφωσης υποβοηθάται από την χαμηλή ενέργεια επιστοίβασης (stacking fault energy) [23].

### 1.3 Γενικά στοιχεία για τον Τιτανιούχο Ψευδάργυρο

Τα ελατά κράματα του συστήματος Zn-Ti-Cu χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κτιρίων, και πιο συγκεκριμένα στην κατασκευή στεγών, προσόψεων και στην κατασκευή σωλήνων και υδρορροών. Το κράμα παράγεται από Ψευδάργυρο (Zn) καθαρότητας 99,995% (Ποιότητα Z1 κατά EN1179).

Ο ZnTiCu προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα που τον καθιστούν συμφέρουσα επιλογή ως δομικό υλικό. Είναι υλικό με υψηλή αντοχή, μεγάλη διάρκεια ζωής, χαμηλό κόστος, φιλικό προς το περιβάλλον και 100% ανακυκλώσιμο.

Η αυξημένη διάρκεια ζωής του οφείλεται στο προστατευτικό στρώμα (πατίνα) που δημιουργείται στην επιφάνεια του ελάσματος λόγω αντίδρασης με το νερό (H<sub>2</sub>O), το οξυγόνο (O<sub>2</sub>) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Το στρώμα αυτό είναι ιδιαίτερα σταθερό, συμπαγές και πρακτικά αδιάλυτο στο νερό και με αυτό τον τρόπο ελέγχει το ρυθμό διάβρωσης του ελάσματος εμποδίζοντας την επαφή του υποστρώματος του Zn με το O<sub>2</sub>. Η πατίνα δημιουργείται σε 2 στάδια, αρχικά ο Zn που βρίσκεται στην επιφάνεια του ελάσματος αντιδρά με το O<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας παρουσία νερού σχηματίζοντας υδροξείδιο του ψευδαργύρου σύμφωνα με την αντίδραση:



Στη συνέχεια, το Zn(OH)<sub>2</sub> αντιδρώντας με το CO<sub>2</sub> που επίσης βρίσκεται σε αφθονία στην ατμόσφαιρα σχηματίζει 2ZnCO<sub>3</sub>•3Zn(OH)<sub>2</sub>, που είναι το κύριο συστατικό της πατίνας.

Παρόλα αυτά, ορισμένοι ρύποι είναι δυνατόν να αυξήσουν το ρυθμό διάβρωσης του ψευδαργύρου. Τέτοιοι ρύποι είναι για παράδειγμα το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), το οποίο αντιδρά με την πατίνα, την διασπά και δημιουργεί  $\text{ZnSO}_3$  και  $\text{ZnSO}_4$ , τα οποία είναι διαλυτά στο νερό και απομακρύνονται από το έλασμα, αφήνοντας εκτεθειμένο το μεταλλικό ψευδάργυρο. Το  $\text{SO}_2$  παράγεται κατά κύριο λόγο από τις βιομηχανίες αλλά και από τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Είναι λοιπόν κατανοητό ότι η αντοχή του Zn σε διάβρωση διαφέρει σε από μια αστική ή βιομηχανική περιοχή σε μία αγροτική εξαιτίας του παράγοντα αυτού. Παρόλα αυτά, χάρη σε μία σειρά από μέτρα που λαμβάνονται τα τελευταία χρόνια με σκοπό τον περιορισμό των αερίων ρύπων για την προστασία του περιβάλλοντος, επωφελήθηκαν οι εγκαταστάσεις που κατασκευάστηκαν από ZnTiCu, καθώς περιορίστηκε ο ρυθμός διάβρωσής τους στο  $1\mu\text{m}/\text{ετος}$ , ο οποίος δίνει με τη σειρά του ένα προσδωκόμενο χρόνο ζωής για την κατασκευή 70-100 έτη, με δεδομένο ότι το έλασμα ZnTiCu που χρησιμοποιείται στις κατασκευές έχει συνηθως πάχος  $0.7\text{mm}$ . [2]

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του ψευδαργύρου είναι ότι κατά την παραγωγή του καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια, σε σύγκριση με το Χαλκό (Cu), το Αλουμίνιο (Al) ή το Χάλυβα, τα οποία είναι τα κύρια ανταγωνιστικά υλικά για τις ίδιες εφαρμογές. Για την παραγωγή  $1\text{Kg}$  Al απαιτούνται  $203\text{MJ}$ , ενώ για  $1\text{kg}$  Zn απαιτούνται  $50\text{MJ}$ . Αυτό συμβαίνει διότι ο Zn έχει χαμηλό σημείο τήξης οπότε απαιτείται λιγότερη ενέργεια για να τακεί σε σύγκριση με άλλα μέταλλα. Η χρήση ανακυκλωμένου Zn (από scrap) μειώνει περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας, η οποία φθάνει στα μόλις  $12\text{MJ}/\text{Kg}$  παραγόμενου Zn. Στην Ευρώπη σήμερα ανακυκλώνεται το 95% των παλαιών ελασμάτων Zn και αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι είναι εύκολο να συγκεντρωθούν τα ελάσματα κατά την αποσυναρμολόγηση μιας στέγης για παράδειγμα, αλλά και στο ότι υπάρχει εκτενές δίκτυο διακίνησης και προώθησης scrap στις βιομηχανίες. Η παραγωγή scrap στην Ευρώπη σήμερα κυμαίνεται στις  $100.000\text{T}/\text{έτος}$  και αναμένεται να διατηρηθεί τουλάχιστον στα σημερινά επίπεδα την προσεχή δεκαετία [17]. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η τιμή του scrap στο London Metal Exchange είναι κατά πολύ μικρότερη σε σύγκριση με

τον καθαρό Zn, κάτι που καθιστά την αγορά scrap για παραγωγή ελασμάτων Zn συμφέρουσα.

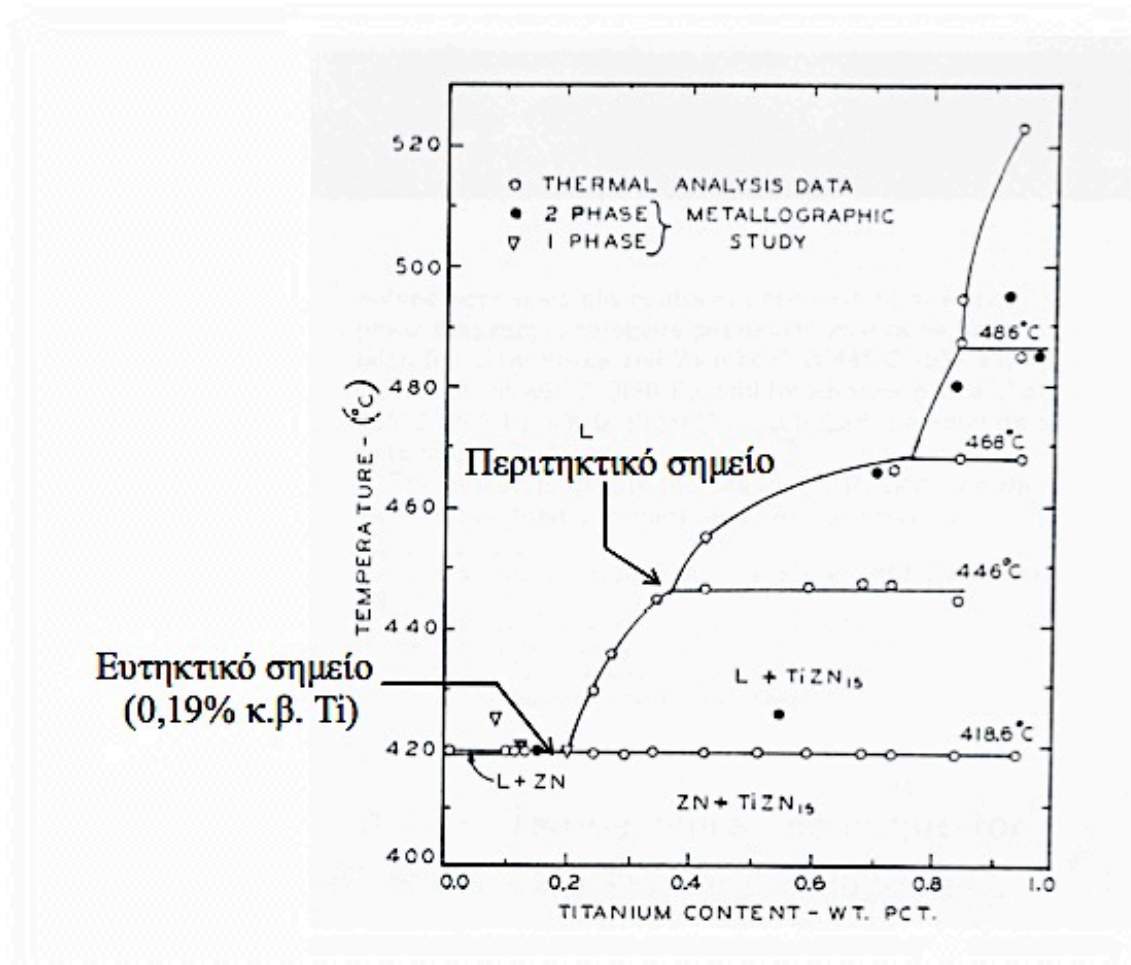
Για όλους τους παραπάνω λόγους τα ελάσματα ψευδαργύρου αποτελούν μια πρόταση με προοπτική για την οικοδομή, και η περαιτέρω διερεύνηση του υλικού, της διαδικασίας παραγωγής του και των κατεργασιών του μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλό όφελος.

Ο Χαλκός (Cu) και το Τιτάνιο (Ti) είναι τα κύρια κραματικά στοιχεία του κράματος ZnTiCu, η σύσταση του οποίου καθορίζεται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 988:1997, **Πίνακας 1**.

**Πίνακας 1: Χημική σύσταση του κράματος ZnTiCu (%w/w)  
κατά το πρότυπο EN 988:1997 [19]**

Cu	Ti	Al	Zn
0,080-1,000	0,060-0,200	0,0150	Remaining

Τα ελάσματα ψευδαργύρου, αποκτούν τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες με την προσθήκη Cu και Ti. Σύμφωνα με το διάγραμμα φάσης, Εικόνα 1, ο Cu έχει μεγαλύτερη διαλυτότητα στον Zn από το Ti, το οποίο είναι σχεδόν αδιάλυτο. Ο Cu δημιουργεί στερεό διάλυμα με τον Zn σε συγκέντρωση μέχρι 1% ενώ το Ti έχει πολύ μικρότερη διαλυτότητα στον Zn (0,02%) [3] με αποτέλεσμα να καταναλώνεται κυρίως για το σχηματισμό σκληρής μεσομεταλλικής ένωσης με σύσταση  $TiZn_{15}$ , ως προϊόν αντίδρασης με το Zn [15].



Εικόνα 1: Διάγραμμα φάσης Zn-Ti στην περιοχή κοντά στον καθαρό Zn [16]

Η παρουσία της ένωσης αυτής είναι πολύ σημαντική, διότι χρησιμεύει για εκλέπτυνση του κόκκου του χυτού Zn και για τον περιορισμό της μεγέθυνσης του κόκκου κατά τη θερμή έλαση. Η ένωση  $TiZn_{15}$  σχηματίζεται σχεδόν απευθείας μετά τη στερεοποίηση (στερεοποίηση  $420^{\circ}C$  – κατακρήμιση στους  $418^{\circ}C$ ) εμφανίζεται σε ινώδεις σχηματισμούς (stringers), οι οποίοι βρίσκονται στη μήτρα του Zn και ευθυγραμμίζονται κατά τη φορά της έλασης. Η  $TiZn_{15}$  έχει ορθορομβική κρυσταλλική δομή Το μέγεθος και η διασπορά της ένωσης αυτής οδηγεί στην αύξηση της αντοχής του κράματος σε ερπυσμό [13][14][29].

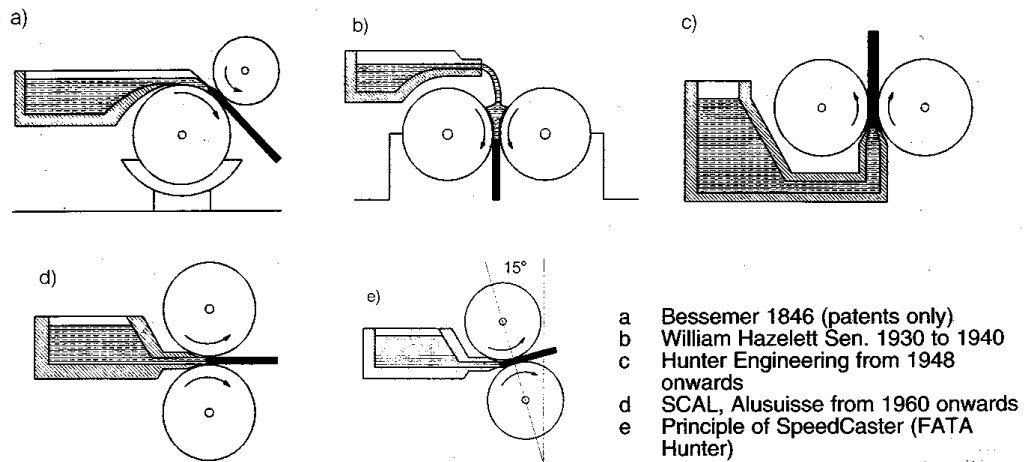
Ο Cu στο συγκεκριμένο κράμα βρίσκεται σε πλήρη διάλυση στην κρυσταλλική μήτρα του Zn, σχηματίζοντας στερεό διάλυμα που ονομάζεται  $\alpha$ -Zn. με την προσθήκη του στο κράμα σε περιεκτικότητα που να μην υπερβainei τη μέγιστη διαλυτότητα (δηλαδή 1%) αυξάνει το όριο διαρροής, την αντοχή σε ερπυσμό, τη σκληρότητα και τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης.

Εκτός όμως από την  $\text{TiZn}_{15}$  έχει διαπιστωθεί ότι κατά την αργή απόψυξη κραμάτων  $\text{ZnTiCu}$  είναι δυνατό να σχηματιστούν και άλλες ενώσεις, οι οποίες έχουν αυξημένη σκληρότητα και μειώνουν κατά πολύ την ολκιμότητα. Παρόλα αυτά, οι συνθήκες που επικρατούν κατά την παραγωγή ελασμάτων  $\text{ZnTiCu}$  είναι κατά πολύ διαφορετικές από αυτές που απαιτούνται για το σχηματισμό των ενώσεων αυτών, καθώς το κράμα χυτεύεται απευθείας σε έλασμα 5mm, το οποίο αποψύχεται γρήγορα.

#### **1.4 Συνεχής χύτευση με τη μέθοδο Twin Roll Casting [24]**

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις τεχνικές συνεχούς χύτευσης όσον αφορά τα μη σιδηρούχα κράματα καθώς παρουσιάζουν μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με τις ημισυνεχείς μεθόδους (Ingot metallurgy) σχετικά με το παραγόμενο προϊόν.

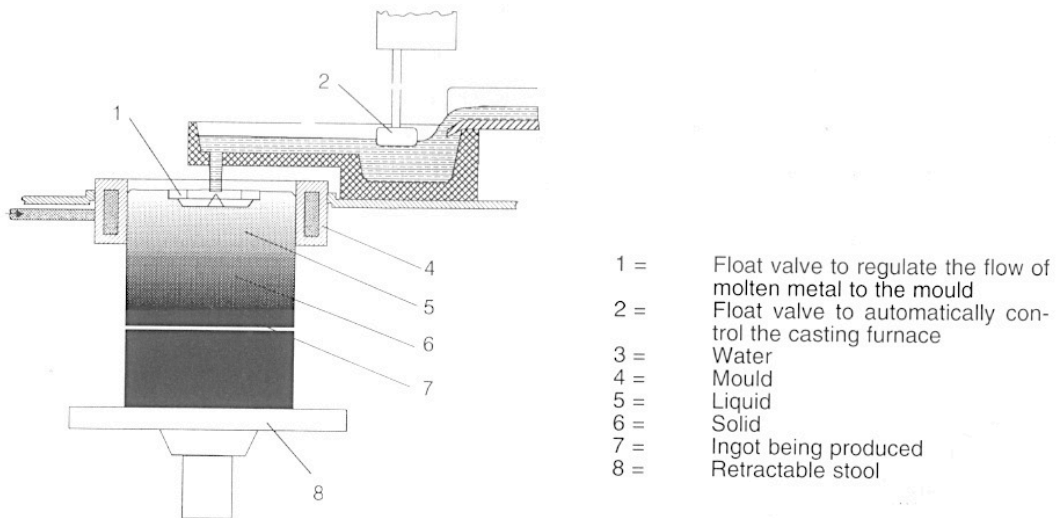
Η μέθοδος Twin Roll Casting ανήκει στις συνεχείς μεθόδους χύτευσης. Χρησιμοποιείται ήδη ευρέως στην παραγωγή ελασμάτων κραμάτων Al και Mg και πρόσφατα εφαρμόστηκε και στην παραγωγή ελασμάτων κραμάτων Zn. Η μέθοδος επιτυγχάνει απευθείας χύτευση σε λεπτό έλασμα (5mm), το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τον ταχύ ρυθμό στερεοποίησης. Λόγω αυτού μπορεί να ελεγχθεί καλύτερα η μικροδομή του παραγόμενου ελάσματος, δηλαδή παράγεται προϊόν με λεπτόκοκκη μικροδομή και περιορισμένο μακροδιαφορισμό, τα οποία οδηγούν σε έλασμα με καλές μηχανικές ιδιότητες. Ακόμα, είναι μέθοδος οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον καθώς καταναλώνει λιγότερη ενέργεια μέσω της παράλειψης ορισμένων σταδίων στην παραγωγική διαδικασία και τον περιορισμό των σταδίων της έλασης λόγω του μικρότερου υποβιβασμού που απαιτείται για να επιτευχθεί το τελικό πάχος του ελάσματος, Εικόνα 2.



**Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Twin Roll Casting και της εξέλιξής της από το 1846 [24]**

### 1.5 Ημισυνεχής χύτευση (Ingot Metallurgy)

Η Μέθοδος ημισυνεχούς χύτευσης αποτελούσε κοινή πρακτική στη χύτευση πολλών μετάλλων κατά το παρελθόν, αλλά τείνει να αντικατασταθεί στις περισσότερες περιπτώσεις από τη συνεχή χύτευση. Περιλαμβάνει τη χύτευση σε τύπους (καλούπια) του μετάλλου σε σχήμα χοντρής πλάκας, η οποία αφού στερεοποιηθεί, αναθερμαίνεται και υφίσταται θερμή έλαση αποτελούμενη από πολλά πάσα. Ακολουθεί ψυχρή έλαση, από την οποία προκύπτει προϊόν υπό μορφή ρόλλων (coils), ονομαστικού πάχους 0,6-0,7mm και υψηλής ποιότητας επιφάνειας (surface finish) Το αποτέλεσμα της διεργασίας αυτής είναι ένα υλικό με πολύ λεπτή μικροδομή. Στην περίπτωση του ZnTiCu επιτυγχάνεται και μερικός μηχανικός κατακερματισμός των φυλλιδίων της β-φάσης ( $TiZn_{15}$ ).



**Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου ημισυνεχούς χύτευσης [24]**

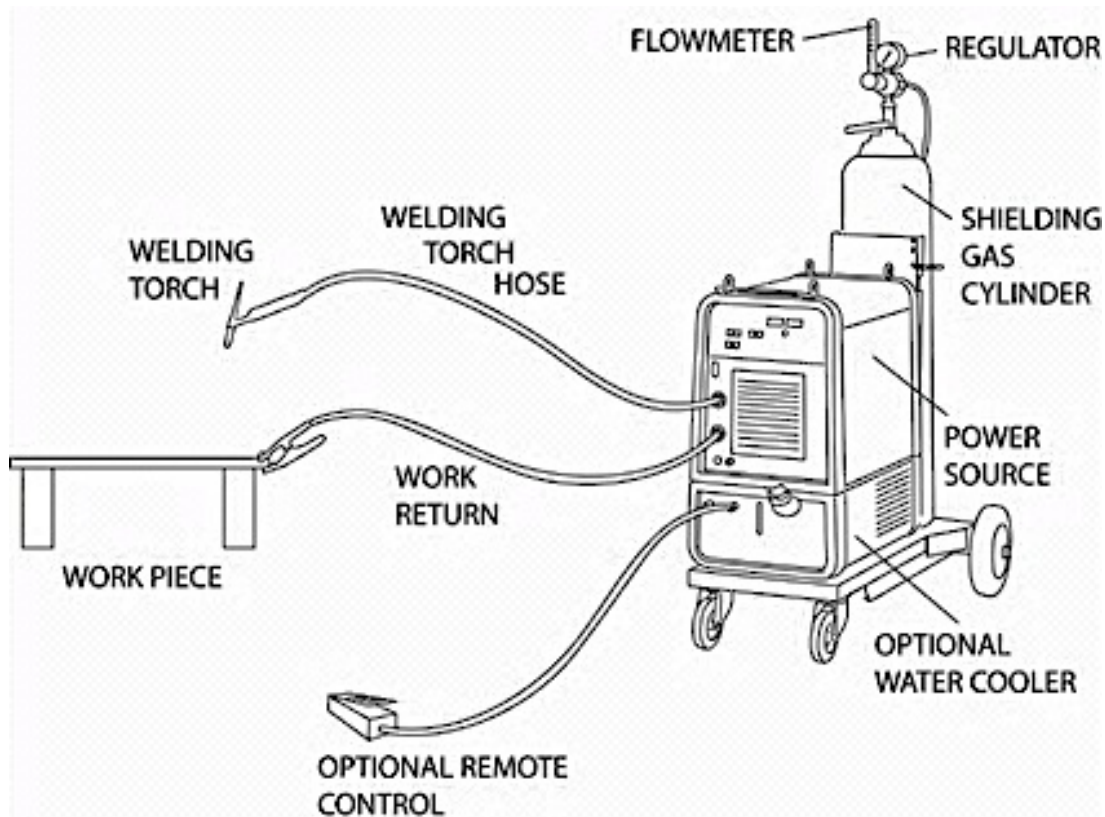
### **1.6 Μέθοδος συγκόλλησης με μη καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο και προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου (TIG) [4]**

Η τεχνική TIG χρησιμοποιεί ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται μεταξύ ενός ηλεκτροδίου, συνήθως από βολφράμιο, και του μετάλλου που πρόκειται να συγκολληθεί. Το ηλεκτρόδιο είναι μη καταναλισκόμενο και δεν τήκεται στην θερμοκρασία του τόξου. Το μέταλλο προσθήκης, εάν χρησιμοποιείται, είναι μία ράβδος που ο συγκολλητής τροφοδοτεί με το χέρι στην περιοχή του λουτρού, χωρίς να παίζει το ρόλο ηλεκτροδίου. Το ηλεκτρόδιο, το μέταλλο προσθήκης και το λουτρό προστατεύονται από αέριο, συνήθως αδρανές, και ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα και το προς συγκόλληση μέταλλο μπορεί να είναι τα εξής: Αργό (Ar), Ήλιο (He), Μείγμα Αργού υδρογόνου (92,5-95%Ar-7,5-5%H).

Κατά κύριο λόγο, ως προστατευτική ατμόσφαιρα στις συγκολλήσεις TIG χρησιμοποιείται το Ar, και στις ΗΠΑ είναι αρκετά συχνό το He, λόγω χαμηλού κόστους στην περιοχή αυτή.

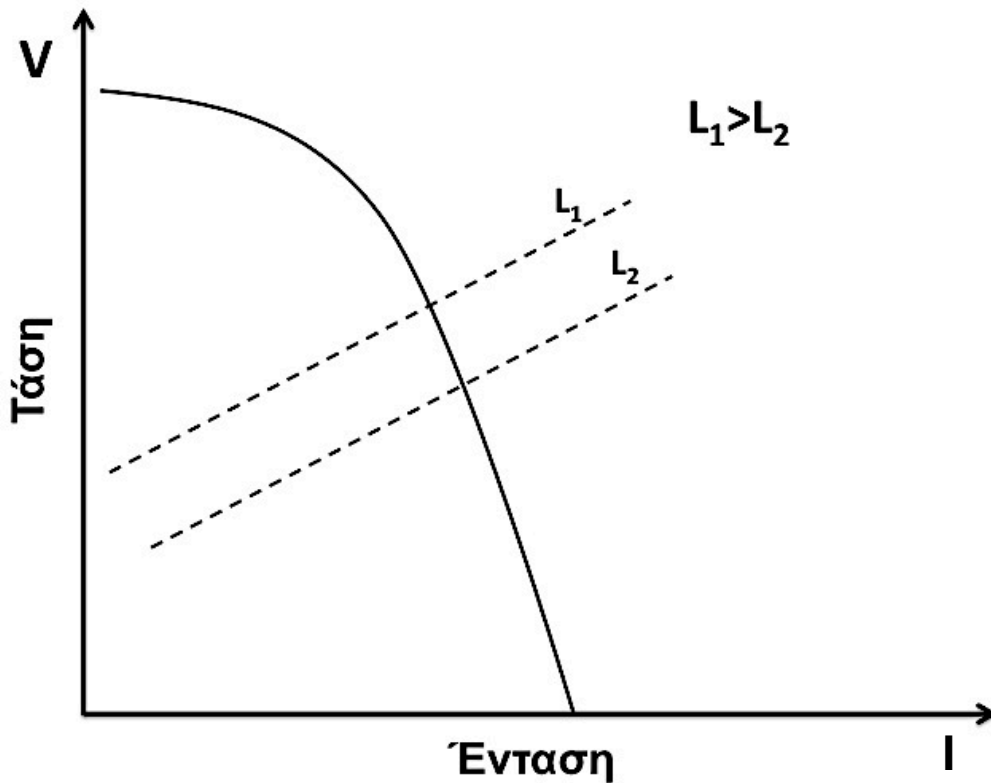
Η διάταξη αποτελείται από τη λαβίδα, στην οποία προσαρμόζεται το ηλεκτρόδιο και τροφοδοτείται το αέριο μέσω ειδικού ακροφυσίου, τη φιάλη του αερίου με ρυθμιστή παροχής και την πηγή του ρεύματος. Η διάταξη αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 4:





**Εικόνα 4: Τυπική διάταξη συγκόλλησης με τη μέθοδο TIG**

Στη μέθοδο TIG, δεδομένου ότι είναι χειρωνακτική κυρίως μέθοδος, χρησιμοποιούνται πηγές πτωτικής τάσης λόγω της ικανότητας που έχουν να σταθεροποιούν σχετικά την ένταση του ρεύματος παρόλες τις αυξομειώσεις του μήκους του τόξου λόγω πιθανής αδεξιότητας του χειριστή, επιτυγχάνοντας ομοιόμορφη συγκόλληση σε μεγάλα μήκη. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί μέσω του διαγράμματος τάσης-έντασης (V-I) της πηγής πτωτικής τάσης, Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Διάγραμμα τάσης-έντασης για πηγή πτωτικής τάσης. Για διαφορετικά μήκη τόξου  $L_1$ ,  $L_2$  η μεταβολή στην ένταση του ρεύματος είναι μικρή, προστατεύοντας από ασταθείς συνθήκες τη συγκόλληση. Η ιδιότητα αυτή των πηγών πτωτικής τάσης τις καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμες στις χειρωνακτικές μεθόδους συγκόλλησης.

Το Ar είναι αδρανές αέριο, προσφέρει μεγάλη σταθερότητα στο τόξο λόγω του χαμηλού δυναμικού ιονισμού και της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, χάρις στα οποία η θερμότητα δεν διαφεύγει από την περιοχή της συγκόλλησης προς το περιβάλλον [4]. Όσον αφορά τη διείσδυση, οι συγκολλήσεις με Ar χαρακτηρίζονται από μεγάλη διείσδυση στο κέντρο της περιοχής της συγκόλλησης και πολύ περιορισμένη στις άκρες. Αυτή η διαφορά υπάρχει διότι το τόξο έχει πολύ θερμό πυρήνα ο οποίος είναι εστιασμένος στο κέντρο της συγκόλλησης. Ο πυρήνας αυτός έχει περιορισμένη διάχυση στην περιφέρεια της συγκόλλησης λόγω του χαμηλού δυναμικού ιονισμού του Ar [5].

### 1.7 Δοκιμή εφελκυσμού

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μηχανική δοκιμή για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων. Κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, το δοκίμιο υποβάλλεται σε συνεχώς αυξανόμενο μονοαξονικό εφελκυστικό φορτίο με τη βοήθεια της μηχανής εφελκυσμού. Κατά τη διάρκεια της εφελκυστικής καταπόνησης του δοκιμίου καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση σε αυτό ( $\Delta l$ ).

Τα δοκίμια εφελκυσμού είναι συνήθως ράβδοι κυκλικής διατομής ή ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων. Η επιμήκυνση μετρείται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή, ανάμεσα σε δύο σημεία αναφοράς που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου. Τα άκρα του δοκιμίου τα οποία χρησιμοποιούνται για τη συγκράτησή του στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού έχουν μεγαλύτερη διατομή.

Έστω  $S_0$  η αρχική διατομή του δοκιμίου και  $l_0$  το αρχικό του μήκος. Εκφράζοντας την εφελκυστική δύναμη  $F$  που ασκείται στο δοκίμιο ανά μονάδα επιφανείας έχουμε:  $\sigma = F/S_0$ . Η παραπάνω σχέση εκφράζει τάση. Επίσης ανάγοντας την επιμήκυνση  $\Delta l$  στη μονάδα μήκους του δοκιμίου,  $e = \Delta l/l_0$ , δημιουργείται το μέγεθος που ονομάζεται ειδική επιμήκυνση ή αλλιώς παραμόρφωση.

Η καταγραφή της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης [ $\sigma = f(e)$ ] είναι χαρακτηριστική του μεταλλικού υλικού. Στο διάγραμμα διακρίνεται η ελαστική περιοχή και η πλαστική περιοχή. Η ελαστική περιοχή είναι γραμμική και σε αυτήν το υλικό εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά, επομένως η άρση της δύναμης επιτρέπει στο δοκίμιο να επανέλθει στο αρχικό του μήκος. Μετά από το αρχικό σύντομο στάδιο της ελαστικής παραμόρφωσης, το δοκίμιο παραμορφώνεται πλαστικά αυξάνοντας το μήκος του και μειώνοντας το πλάτος του. Μετά από ένα μέγιστο φορτίο το δοκίμιο εμφανίζει ελάττωση της διατομής τοπικά (φαινόμενο δημιουργίας λαιμού) και επέρχεται θραύση μέσα στην περιοχή του λαιμού.

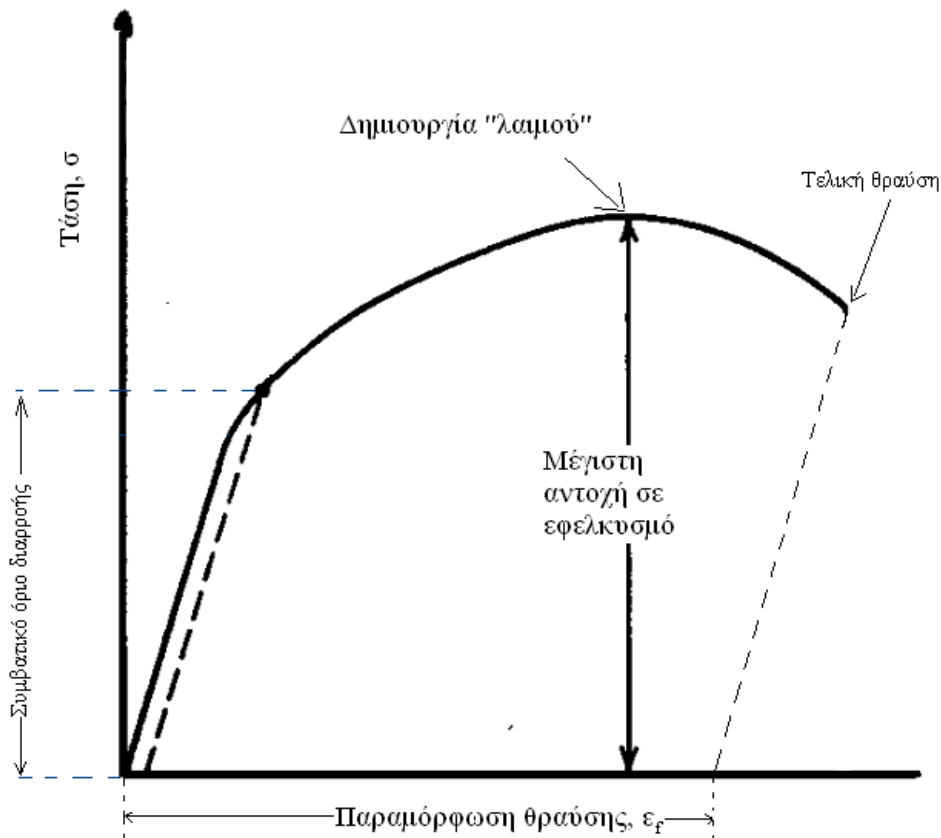
Από την καμπύλη τάσης παραμόρφωσης (Εικόνα 6) υπολογίζονται τα εξής μεγέθη:

- **Όριο αναλογίας:** Πρόκειται για την οριακή τάση πάνω από την οποία η τάση παύει να είναι ανάλογη με την αντίστοιχη παραμόρφωση. Στην περιοχή του ορίου αναλογίας ισχύει ο νόμος του Hooke:  
 $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , όπου το  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας και είναι χαρακτηριστική σταθερά του υλικού.

Το *μέτρο ελαστικότητας*  $E$  είναι ο λόγος τάσης προς την παραμόρφωση και αποδίδει την ευκολία (ή δυσκολία) με την οποία παραμορφώνεται ένα υλικό μέσα στην ελαστική περιοχή.

- **Όριο ελαστικότητας:** Το όριο ελαστικότητας είναι η μέγιστη τάση στην οποία μπορεί να υποβληθεί ένα υλικό χωρίς να παραμορφωθεί μόνιμα.
- **Όριο διαρροής  $Y_s$  ή  $R_p$ :** Είναι η τάση πάνω από την οποία εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση. Ορίζουμε συμβατικό όριο διαρροής την τάση για την οποία έχουμε παραμόρφωση 0,2%. Για τον υπολογισμό του  $\sigma_{0.2\%}$  φέρνουμε μια ευθεία παράλληλη προς την ευθεία της ελαστικής περιοχής για παραμόρφωση 0,2%, στο σημείο που τέμνει την καμπύλη εφελκυσμού φέρνουμε μια παράλληλη προς τον άξονα των παραμορφώσεων και βρίσκουμε την αντίστοιχη τάση.
- **Μεγιστη αντοχη στον εφελκυσμό ( $UTS$  ή  $R_m$ ):** είναι η μέγιστη τάση του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης

Για τιμές μικρότερες του ορίου διαρροής, οι παραμορφώσεις του δοκιμίου είναι ελαστικές. Για τιμές μεγαλύτερες του ορίου διαρροής, οι παραμορφώσεις του δοκιμίου είναι το άθροισμα των πλαστικών και των ελαστικών παραμορφώσεων. Πολλές φορές η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή δε γίνεται σε ένα σημείο (όριο διαρροής) αλλά σε μία περιοχή, η οποία οριοθετείται από το άνω και το κάτω όριο διαρροής, όπως συμβαίνει στους μαλακούς χάλυβες.



Εικόνα 6: παράδειγμα διαγράμματος εφέλκυσμού.

### 1.8 Μικροσκληρομέτρηση Vickers

Η μικροσκληρομέτρηση επιτρέπει τη μέτρηση της σκληρότητας σε περιοχές μεγέθους όσο ένας κόκκος. Η δοκιμή αυτή γίνεται είτε με τη μέθοδο Vickers είτε με τη μέθοδο Knoop. Η μεν μέθοδος Vickers χρησιμοποιεί μία αδαμαντοπυραμίδα, με γωνίες  $136^\circ$  η δε μέθοδος Knoop μια ρομβοεδρική αδαμαντοπυραμίδα με βάση ρόμβο με λόγο διαγωνίων 7:1 και γωνίες κορυφής  $172^\circ 30'$  και  $130^\circ$  αντίστοιχα. Η μέθοδος Knoop ενδείκνυται για μέτρηση σκληρότητας μακρόστενων κόκκων, καθώς επίσης και κεραμικών, διότι δεν επιτρέπει τη δημιουργία μικρορωγμών ή σπασίματος. Οι διαστάσεις του αποτυπώματος που δημιουργείται επειδή είναι πολύ μικρό μετρούνται με μικροσκόπιο. Η μικροσκληρομέτρηση χρησιμοποιείται όταν απαιτείται λεπτομερής δοκιμή σκληρότητας για τον προσδιορισμό της σκληρότητας επιμέρους μεταλλουργικών φάσεων σε ένα υλικό (π.χ. του σεμεντίτη στον περλίτη) ή όταν επιβάλλεται ο περιορισμός του επιβαλλόμενου φορτίου λόγω

της φύσης του εξεταζόμενου υλικού (π.χ. σε επιφανειακές επικαλύψεις, λεπτά υλικά, κεραμικά υλικά).

### **1.9 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope)**

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) χρησιμοποιείται για την παρατήρηση επιφανειών και σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα μικροανάλυσης για την στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Η λειτουργία του SEM στηρίζεται στην αλληλεπίδραση του προς εξέταση δείγματος και της προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων σε αυτό.

Το SEM αποτελείται κυρίως από το σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης, το θάλαμο που τοποθετείται το δείγμα, την αντλία κενού και το σύστημα ανιχνευτών και παρουσίασης.

Η δέσμη των ηλεκτρονίων η οποία παράγεται από νήμα βολφραμίου και επιταχύνεται από μια τάση της τάξης των 20KV, προσπίπτει στο δείγμα. Μετά την πρόσπτωση η ακτινοβολία ανακλάται, και το είδος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια του δείγματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων του υλικού, και μπορεί να είναι:

Δευτερογενή ηλεκτρόνια

Οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια

Ηλεκτρόνια Auger

Ακτίνες-X

Τα σήματα των δευτερογενών και των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, κυρίως, ενισχύονται και δημιουργούν ένα οπτικό σήμα. Έτσι είναι δυνατή η μεγεθυμένη απεικόνιση σε μια οθόνη, της επιφάνειας του δείγματος που σαρώνει η δέσμη των ηλεκτρονίων.

Τα *δευτερογενή ηλεκτρόνια* προκύπτουν από την ανελαστική σύγκρουση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα του δοκιμίου (συνκεκοιμένα σε βάθος 10nm). Έχουν ενέργεια 50eV

και δίνουν πληροφορίες κυρίως για την τοπογραφία της επιφάνειας του δοκιμίου. Η ένταση του σήματος εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και τις επιφανειακές ανωμαλίες του δείγματος.

Τα *οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια* έχουν ενέργεια από 5 έως 50KeV. Προκύπτουν από την ελαστική σύγκρουση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα των επιφανειακών στρωμάτων του δοκιμίου, που βρίσκονται σε βάθος 100nm. Η ένταση του παραγόμενου σήματος εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και από τον ατομικό αριθμό των στοιχείων. Δίνουν μια εικόνα κατανομής των στοιχείων (οι φωτεινές περιοχές αντιστοιχούν σε βαριά στοιχεία ενώ οι πιο σκουρόχρωμες σε ελαφριά).

Τα *ηλεκτρόνια Auger* προέρχονται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των υποστοιβάδων των επιφανειακών ατόμων (σε βάθος 1nm). Το φάσμα που προκύπτει είναι κατάλληλο για στοιχειακές χημικές αναλύσεις της επιφάνειας του υλικού.

Οι χαρακτηριστικές *ακτίνες X*, παράγονται από τις ανελαστικές συγκρούσεις των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του δείγματος. Όταν φεύγει ένα ηλεκτρόνιο από εσωτερική στοιβάδα, τότε ένα ηλεκτρόνιο από υψηλότερη ενεργειακή στοιβάδα καλύπτει το κενό πέφτοντας στην χαμηλότερη στοιβάδα και εκπέμποντας την διαφορά ενεργείας σαν ακτίνες X. Η ενέργεια αυτών των ακτίνων είναι χαρακτηριστική για το κάθε στοιχείο και με αυτό τον τρόπο μπορεί να ταυτοποιηθεί.

Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης υπάρχει και η δυνατότητα χημικής στοιχειακής ανάλυσης (EDS) [31]. Η ανάλυση EDS είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται για να προσδιοριστεί η χημική σύσταση μίας περιοχής του εξεταζόμενου δοκιμίου μέσω της ανάλυσης των ακτίνων X που παράγονται από το επιφανειακό στρώμα του μετά την πρόσκρουση της δέσμης ηλεκτρονίων. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι η στοιχειακή χημική ανάλυση της επιλεγμένης περιοχής της επιφάνειας.

## 2. Πειραματικό Μέρος

### 2.1 Δοκιμές συγκόλλησης

#### 2.1.1 Χειροκίνητες δοκιμές συγκόλλησης με TIG

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συγκόλλησης σε λεπτά ελάσματα ZnTiCu (0,7mm) με τη μέθοδο συγκόλλησης με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστατευτική ατμόσφαιρα (TIG) χωρίς μέταλλο προσθήκης στο εργαστήριο συγκολλήσεων της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του ΕΜΠ.

Οι δοκιμές έγιναν χειροκίνητα, με παραμέτρους το είδος (συνεχές-εναλλασσόμενο), την ένταση και την πολικότητα του ρεύματος, την παροχή προστατευτικού αερίου (Ar), τη γωνία της μύτης του ηλεκτροδίου και την ταχύτητα πρόωσης. Επιπλέον, δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις για τα προς συγκόλληση ελάσματα. Οι διατάξεις απεικονίζονται συνολικά στην Εικόνα 7:



Σύνδεση κατά μέτωπο (butt joint)



Επάλληλη σύνδεση (lap joint)

**Εικόνα 7: Διατάξεις συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις χειροκίνητες δοκιμές TIG**

Στην πρώτη διάταξη τα ελάσματα τοποθετούνται κατά μέτωπο (butt joint). Αυτή η διάταξη έχει μεγάλο ενδιαφέρον, διότι το συγκολλημένο τεμάχιο δεν διαφέρει σημαντικά σε πάχος από το αρχικό έλασμα αλλά και στην περίπτωση των σωλήνων, αποτελεί τη βιομηχανική πρακτική.



Στη δεύτερη διάταξη τα ελάσματα τοποθετούνται επάλληλα με αποτέλεσμα το πάχος του συγκολλημένου τεμαχίου να διπλασιάζεται στην περιοχή της συγκόλλησης. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι η θερμότητα μεταδίδεται με πιο αργό ρυθμό με αποτέλεσμα να καθυστερεί να τακεί το έλασμα, κάτι που στην περίπτωση των πολύ λεπτών ελασμάτων είναι υψηλής σημασίας.

Στις κατά μέτωπο συγκολλήσεις δεν επετεύχθη σύνδεση με κανένα συνδυασμό παραμέτρων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ελάσματα ήταν πολύ λεπτά και το κράμα έχει χαμηλό σημείο τήξης, επομένως ακόμα και με χαμηλές τιμές έντασης ρεύματος το έλασμα ετήκετο εκτενώς δημιουργώντας οπές.

Με ορθή πολικότητα το τόξο ήταν ασταθές στις χαμηλές εντάσεις ρεύματος (10-30A) και στις υψηλές εντάσεις το έλασμα καταστρεφόταν (31-60A). Δοκιμάστηκε επίσης η χρήση ανάστροφης πολικότητας με σκοπό τον περιορισμό της μετάδοσης θερμότητας στο έλασμα, αλλά και πάλι σύνδεση δεν επετεύχθη.

Σε επάλληλη τοποθέτηση ελασμάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με τις ίδιες παραμέτρους. Παρόλο το διπλό πάχος στην περιοχή της συγκόλλησης, η σύνδεση ήταν πολύ δύσκολη, ήταν επιτυχής μόνο με εναλλασσόμενο ρεύμα και ένταση 46A, παροχή αερίου 16l/min. Με τις ρυθμίσεις αυτές εξασφαλίστηκαν σταθερές συνθήκες συγκόλλησης για όλο το πάσο με αποτέλεσμα να παραχθούν δύο ικανοποιητικά δοκίμια. Παρατηρήθηκε όμως ότι με την αύξηση της ταχύτητας το αποτέλεσμα βελτιωνόταν, αλλά με χειροκίνητη συγκόλληση ήταν αδύνατο να διατηρηθεί σταθερό το τόξο σε μεγάλη ταχύτητα, λόγω της μικρής ακρίβειας που έχει το ανθρώπινο χέρι.

Συγκεντρωτικά παρουσιάζονται οι συνθήκες των δοκιμών χειροκίνητης συγκόλλησης TIG, Πίνακας 2.

**Πίνακας 2: Συγκεντρωτικός πίνακας συνθηκών χειροκίνητων δοκιμών TIG που διεξήχθησαν στο εργαστήριο συγκολλήσεων του ΕΜΠ**

Ρεύμα (A)	Πολικότητα (+,-)*	AC - DC	Παροχή Ar (l/min)	Ταχύτητα	Σύνδεση (Ναι/Όχι)
15	+	DC	5	Μέτρια	Όχι
25	+	DC	5	Μέτρια	Όχι
40	+	DC	10	Μέτρια	Όχι
30	+	DC	10	Μεγάλη	Όχι
30	-	DC	10	Μέτρια	Όχι
30	+	AC	15	Μέτρια	Όχι
30	+	AC	16	Μέτρια	Όχι
40	-	AC	16	Μεγάλη	Όχι
45	-	AC	16	Μεγάλη	Ναι
60	-	AC	25	Μεγάλη	Όχι

\*Στο εναλλασσόμενο ρεύμα δεν ορίζεται πολικότητα, η ρύθμιση στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα αναφέρεται στη δυνατότητα της πηγής να καθορίζει χρονικά το ποσοστό του χρόνου που παρέχει ρεύμα με ορθή ή ανάστροφη πολικότητα.

### 2.1.2 Βιομηχανικές Δοκιμές συγκόλλησης

Τα λεπτά ελάσματα ZnTiCu χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων και για την παραγωγή σωλήνων υδρορροών. Οι σωλήνες αυτοί έχουν ραφή και είναι είτε ευθύγραμμοι είτε σχηματίζουν γωνίες. Τα ελάσματα αφού διαμορφωθούν κατάλληλα, συγκολλώνται αυτοματοποιημένα με διάφορες μεθόδους. Αρχικά κοινή πρακτική ήταν η μέθοδος συγκόλλησης με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστατευτική ατμόσφαιρα (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW), αλλά λόγω του ότι παράγαγε συγκολλήσεις χαμηλής ολκιμότητας, τείνει να αντικατασταθεί από μεθόδους όπως η συγκόλληση με υπερήχους (Ultrasonic Welding).

Η μέθοδος συγκόλλησης με υπερήχους (Ultrasonic Welding – UW) είναι βιομηχανική, γρήγορη μέθοδος σύνδεσης μη σιδηρούχων, πλαστικών αλλά και σύνθετων υλικών. Η UW είναι οικονομικά συμφέρουσα διότι δεν χρησιμοποιεί καταναλισκόμενα μέρη αλλά και οικολογική, διότι δεν

---

χρησιμοποιεί προστατευτική ατμόσφαιρα και δεν παράγονται τοξικοί ατμοί, όπως συμβαίνει με άλλες πιο παραδοσιακές μεθόδους (π.χ. TIG-MIG).

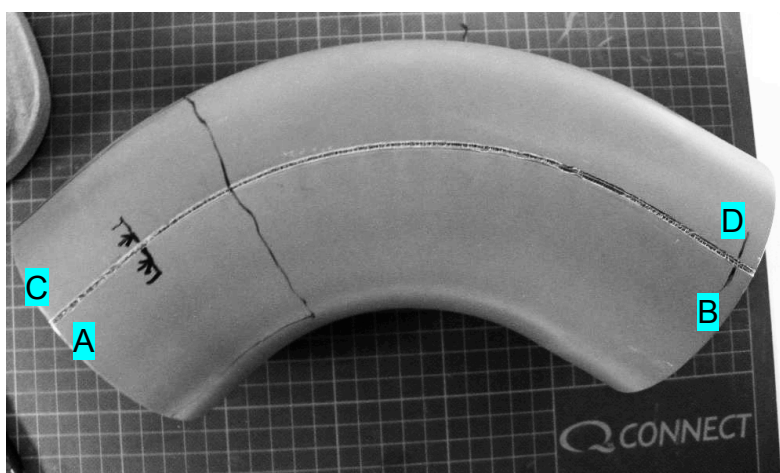
Η UW χρησιμοποιεί ένα εργαλείο το οποίο παράγει τοπικά υπερήχους. Οι υπερήχοι θερμαίνουν το προς συγκόλληση υλικό λόγω των ταλαντώσεων που προκαλούνται στα μόριά του, το τήκουν και επιτυγχάνεται σύνδεση. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και μία σχετικά περιορισμένη ζώνη τήξης.

Παρελήφθησαν 13 δείγματα σωλήνων κατασκευασμένων από ελάσματα Τιτανιούχου Ψευδαργύρου συγκολλημένων υπό διαφορετικές συνθήκες από βιομηχανική ρομποτική μηχανή, Εικόνα 8. Οι συνδέσεις των ελασμάτων ήταν κατά μέτωπο. Τα πρώτα έντεκα δείγματα αποτελούνται από το ίδιο κράμα, με συνθήκες συγκόλλησης διαφοροποιημένες ως προς το χρησιμοποιούμενο ρεύμα, το μέγεθος της ροής του προστατευτικού αερίου, αλλά και συνδυασμός των παραμέτρων αυτών. Το δωδέκατο δείγμα είναι κατασκευασμένο από έλασμα που παρήχθη από έλαση πλάκας και όχι από συνεχή χύτευση. Το δέκατο τρίτο δείγμα ήταν παλαιότερης κατασκευής, βαμμένο στο χρώμα της πατίνας που αποκτά ο Ψευδάργυρος με το πέρασμα του χρόνου.

Συνοπτικά τα δείγματα που παρελήφθησαν περιγράφονται παρακάτω, Πίνακας 3.

**Πίνακας 3: Συνοπτική κατάσταση των δειγμάτων που εξετάστηκαν**

Αριθμός δείγματος	Σχόλια
1	Αρχικό προϊόν 1 χρόνο πριν, κανονικές ρυθμίσεις συγκόλλησης
2	Αρχικό προϊόν, 6 μήνες πριν, κανονικές ρυθμίσεις συγκόλλησης
3	Συγχρονο αρχικό προϊόν, Κανονικές ρυθμίσεις συγκόλλησης
4	Συγχρονο αρχικό προϊόν, Κανονικές ρυθμίσεις συγκόλλησης
5	Συγχρονο αρχικό προϊόν, Κανονικές ρυθμίσεις συγκόλλησης
6	Τροποποιημένες ρυθμίσεις, ελαττωμένο ρεύμα (-15%)
7	Τροποποιημένες ρυθμίσεις, ελαττωμένο ρεύμα (-15%)
8	Τροποποιημένες ρυθμίσεις, μειωμένη παροχή προστατευτικού αερίου
9	Τροποποιημένες ρυθμίσεις, μειωμένη παροχή προστατευτικού αερίου
10	Μειωμένη παροχή αερίου και μειωμένο ρεύμα κατα 15%
11	Μειωμένη παροχή αερίου και μειωμένο ρεύμα κατα 15%
12	Δείγμα αναφοράς, προϊόν έλασης πλάκας (Ingot) με αυξημένο Ti
13	Χρωματισμένος σωλήνας με κανονικές ρυθμίσεις, αλλά ελαττωματική συγκόλληση



**Εικόνα 8:** Σωλήνας με δύο συγκολλήσεις (η μία είναι εμφανής στη φωτογραφία, η άλλη είναι συμμετρική στην άλλη πλευρά του σωλήνα). Οι θέσεις κοπής των δειγμάτων σημειώνονται στη φωτογραφία. Τα A και C υποδεικνύουν την αρχή ενώ τα B και D το πέρας της συγκόλλησης

## 2.2 Προετοιμασία δειγμάτων

Οι σωλήνες, που παρελήφθησαν, κατεγράφησαν και ταυτοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, έγινε ονομασία των συγκολλήσεων (A-D) και φωτογράφησή τους. Για να επιτευχθεί αυτό, προσδιορίστηκε η φορά της συγκόλλησης με βάση τη μορφολογία της, Εικόνα 8 και Εικόνα 11. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατόν να παραχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα. Ακολούθως, έγινε παρατήρηση στο στερεοσκόπιο Nikon SMZ 1500 των σωλήνων με σκοπό μια πρώτη σύγκριση των συγκολλήσεων ή τον εντοπισμό τυχόν μακροσκοπικών ελαττωμάτων. Έπειτα, έγιναν εγκάρσιες τομές στους σωλήνες σε ειδικό ψαλίδι κοπής ελασμάτων του εργαστηρίου. Τα δείγματα που κόπηκαν τοποθετήθηκαν ανα 5 (4 για τις συγκολλήσεις A-D και 1 για το μέταλλο βάσης) στην ειδική μήτρα ψυχρού εγκιβωτισμού μαζί με την αντίστοιχη ρητίνη και ακόλουθα στο μηχάνημα κενού προκειμένου να απομακρυνθούν όσες φυσαλλίδες εγκλωβίστηκαν κατά την έγχυση της ρητίνης. Αφού αφεθούν τα δείγματα για 24 ώρες να στερεοποιηθούν, ακολουθεί το στάδιο της λείανσης.

### 2.2.1 Λείανση των δειγμάτων

Η λείανση πραγματοποιείται με σκοπό την εξάλειψη των γεωμετρικών ανωμαλιών της επιφάνειας των δοκιμίων, καθώς επίσης και για την απομάκρυνση των επιφανειακών στρωμάτων, τα οποία είναι πιθανόν να έχουν παραμορφωθεί ή αλλοιωθεί κατά τη διαδικασία της κοπής. Μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μηχανικές είτε με ηλεκτροχημικές μεθόδους. Στη μηχανική λείανση, που πραγματοποιείται στο εργαστήριο χρησιμοποιούνται χαρτιά Smirindex με κόκκους καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Η αποξεστική δράση αυτών των κόκκων έχει ως αποτέλεσμα να εξαλείφονται οι ανωμαλίες με μέγεθος μεγαλύτερο από το μέσο μέγεθος των κόκκων.

Το εργαστήριο διαθέτει μηχάνημα ημιαυτόματης λείανσης, το οποίο αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο δίσκο στον οποίο τοποθετούνται διαδοχικά τα λειαντικά χαρτιά με ταυτόχρονη παροχή νερού και ένα περιστρεφόμενο βραχίονα συγκράτησης των δειγμάτων (Εικόνα 9). Τα προς λείανση δείγματα τοποθετούνται σε ένα δειγματοφορέα και ο δειγματοφορέας στον περιστρεφόμενο βραχίονα. Η λείανση διεξάγεται σε 5 στάδια, με τη χρήση των ακόλουθων χαρτιών: 80 mesh, 220 mesh, 500 mesh, 800 mesh, 1200 mesh. Μετά τα στάδια αυτά, ακολουθεί η στίλβωση.



α)



β)

Εικόνα 9: Συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προετοιμασία των μεταλλογραφικών δειγμάτων. α) Ημιαυτόματη συσκευή λείανσης - στίλβωσης Struers Rotorol-15, β) Συσκευή ψυχρού εγκιβωτισμού Struers Citovac

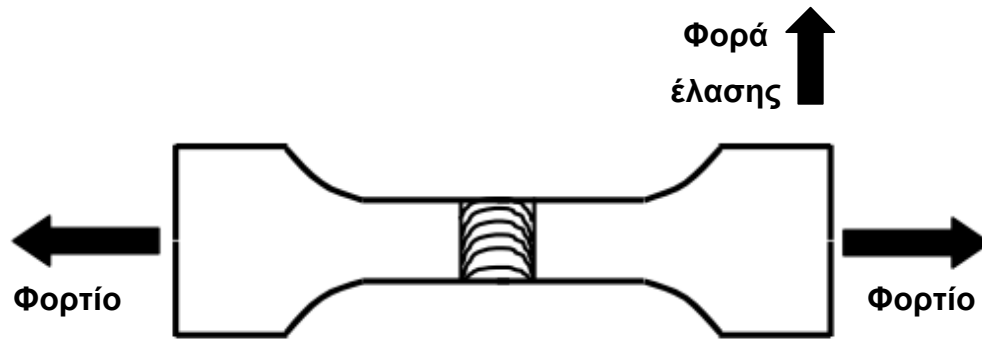
### 2.2.2 Στίλβωση

Η στίλβωση γίνεται σε 2 σταδια. Αρχικά το δείγμα στιλβώνεται με τη χρήση ειδικού βελούδινου υφάσματος πάνω στα οποία τοποθετείται αδαμαντόπαστα με διάμετρο κόκκων διαμαντιού 3μm. Στη συνέχεια, το δείγμα στιλβώνεται με πιο λεπτό ύφασμα στο οποίο προστίθεται διάλυμα OP-U (Colloidal silica suspension). Μετά από αυτό το στάδιο το δείγμα έχει αποκτήσει επιφάνεια τραχύτητας 1μm και είναι έτοιμο για παρατήρηση.

Ο Zn εξετάζεται στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο κάτω από πολωμένο φως, δηλαδή με τη χρήση πολωτή και αναλυτή (cross-polarised light), προκειμένου να γίνουν εμφανείς οι κόκκοι. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το ανάστροφο μικροσκόπιο Nikon Epihot 300. Για περαιτέρω ανάλυση και για εξέταση της διασποράς της ενδομεταλλικής ένωσης απαιτείται χημική προσβολή και ακολούθως μεταλλογραφική παρατήρηση με κανονικό φωτισμό (bright field illumination)

### 2.3 Προετοιμασία δοκιμών μηχανικών ιδιοτήτων

Τα δοκίμια μηχανικών ιδιοτήτων κατασκευάστηκαν από ελάσματα ZnTiCu στην αρχική κατάσταση πριν την τελική διαμόρφωση προϊόντος αλλά και από τελικά προϊόντα. Η πρώτη κατηγορία δοκιμών θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του μετάλλου βάσης και η δεύτερη για την αξιολόγηση των συγκολλήσεων. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν ώστε το φορτίο κατά τη δοκιμή να εφαρμοστεί κάθετα στη φορά της έλασης και στις δύο περιπτώσεις, Εικόνα 10. Τα δοκίμια εφελκυσμού κόπηκαν από ειδική πρέσσα σε σχήμα dogbone και σε διαστάσεις 155mm X 12,6mm ενώ τα δοκίμια της κάμψης κόπηκαν με ειδικό ψαλίδι κοπής ελασμάτων σε διαστάσεις 50mm X 25mm. Όσον αφορά τις συγκολλήσεις, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο να μην παραμορφωθούν κατά τη διάρκεια της κοπής, ώστε να μην εισαχθούν τάσεις που θα επηρέαζαν το αποτέλεσμα της δοκιμής.



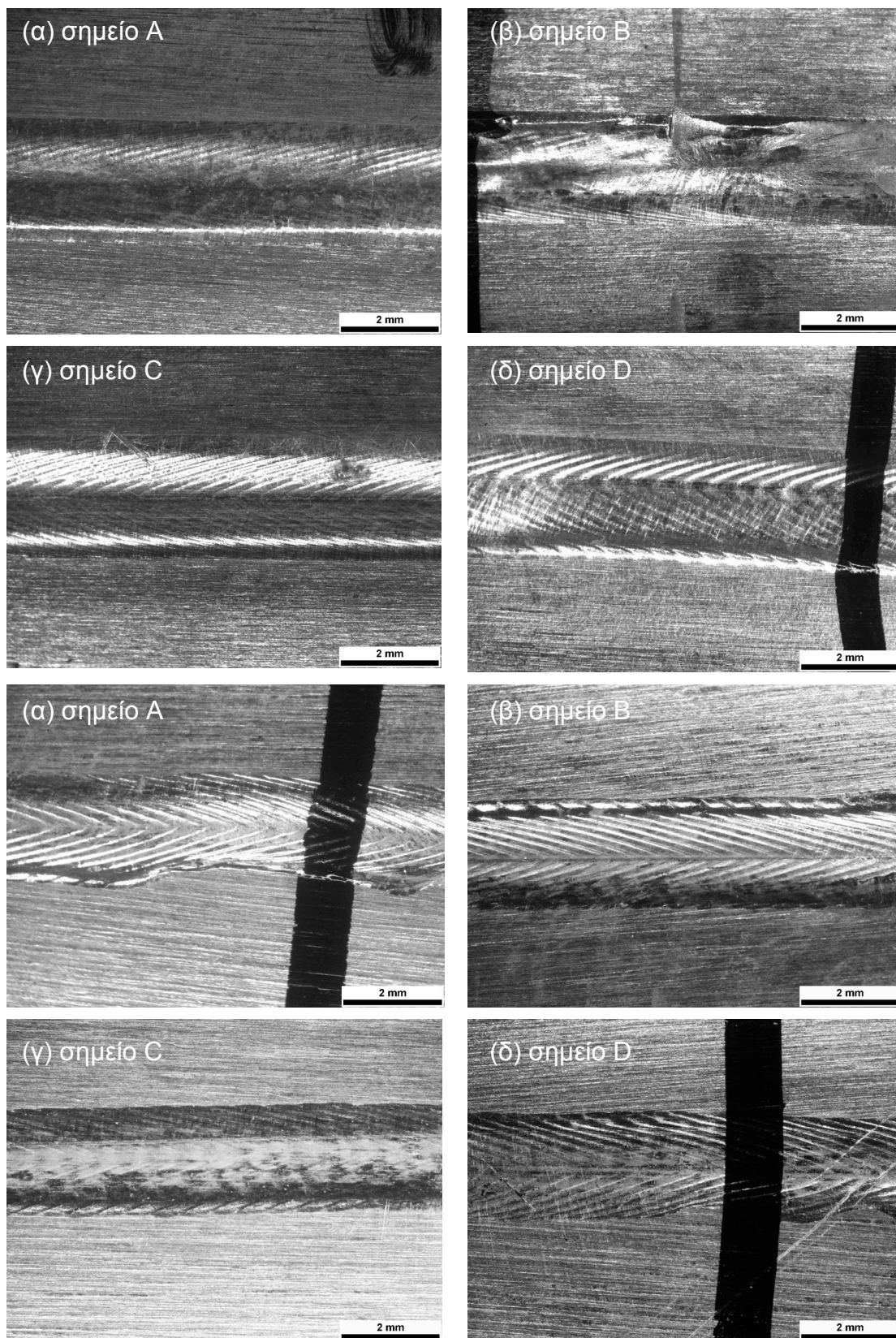
Εικόνα 10: Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίου εφελκυσμού από συγκολλημένο έλασμα. Η διεύθυνση της επιβολής του φορτίου κατά τη δοκιμή είναι κάθετη στη φορά της έλασης [30]



### 2.2.3 Χημική Προσβολή

Η προσβολή μπορεί να είναι χημική ή ηλεκτροχημική. Η χημική προσβολή γίνεται με εμβάπτιση της επιφάνειας του δοκιμίου σε κατάλληλο χημικό αντιδραστήριο για ορισμένο χρόνο, αναλόγως του είδους του υλικού βάσει συγκεκριμένου προτύπου της ASTM. Στην ηλεκτροχημική προσβολή το δοκίμιο βυθίζεται στο αντιδραστήριο και με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της επιβολής κατάλληλου δυναμικού πραγματοποιείται η προσβολή στον ανοδικό πόλο (δείγμα) του ηλεκτρολυτικού στοιχείου. Στην προκειμένη περίπτωση έγινε χημική προσβολή. Η χημική προσβολή βασίζεται στην επιλεκτική διαλυτοποίηση των ορίων των κόκκων, των φάσεων και των κατακρημνισμάτων που τυχόν υπάρχουν στο δείγμα. Στα όρια των κόκκων, η ενέργεια είναι αυξημένη με αποτέλεσμα να συμμετέχουν πολύ ευκολότερα σε αντιδράσεις. Με την προσβολή, τα όρια προσβάλλονται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με το εσωτερικό των κόκκων. Τα όρια διαλυτοποιούνται και ανακλούν το φως λιγότερο σε σχέση με τους κόκκους και κατά συνέπεια φαίνονται στο οπτικό μικροσκόπιο ως σκοτεινές γραμμές σε συνθήκες φωτεινού πεδίου.

Η εξέταση του Zn στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο αποκαλύπτει την παρουσία ενδομεταλλικών ενώσεων, εγκλεισμάτων και άλλων λεπτομερειών, όπως πόροι ή ρωγμές. Η χημική προσβολή αποκαλύπτει λεπτομερώς τα κατακρημνίσματα ή τα σωματίδια των δευτερογενών φάσεων που βρίσκονται σε διασπορά στη μεταλλική μήτρα. Χρησιμοποιήθηκε χημική προσβολή με Nitral 2% (2% πυκνό HNO<sub>3</sub>, 98% Αιθανόλη)



**Εικόνα 11: Ενδεικτικές φωτογραφίες στερεοσκοπίου από την εξέταση του δείγματος 1. Τα μαύρα σημάδια υποδεικνύουν το σημείο της τομής. Τα A και B υποδεικνύουν την αρχή ενώ τα C και D το πέρας της συγκόλλησης**

### 3. Αποτελέσματα

#### 3.1 Αποτελέσματα μεταλλογραφικής εξέτασης

##### 3.1.1 Μεταλλογραφική εξέταση με πολωμένο φως

Η μεταλλογραφική εξέταση των χειροκίνητων συγκολλήσεων έδειξε ότι η σύνδεση των ελασμάτων κατά παράθεση ήταν επιτυχής (Εικόνα 12, Εικόνα 13, Εικόνα 14). Το πλάτος της ζώνης τήξης ήταν αρκετά μεγάλο σε σχέση με τις βιομηχανικές συγκολλήσεις, παρόλα αυτά δεν παρουσίασαν κανένα ελάττωμα. Η ζώνη τήξης αποτελείται από μικρούς σχετικά ισοαξονικούς κόκκους και η βασαλτική ζώνη είναι περιορισμένη.

Όσον αφορά τις βιομηχανικές συγκολλήσεις, η μορφολογία της συγκόλλησης, καθώς και το πάχος και το πλάτος της ζώνης τήξης παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιομορφία, η οποία -εκτός του ίδιου περάσματος (“κορδονιού”)- παρατηρείται και μεταξύ των συγκολλήσεων. Η διακύμανση αυτή είναι εμφανής σε μεταλλογραφικές τομές που έγιναν σε σημεία 1cm από την άκρη του σωλήνα, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω (Εικόνα 15, Εικόνα 16, Εικόνα 17, **Εικόνα 18**, **Εικόνα 19**, **Εικόνα 20**, **Εικόνα 21**, **Εικόνα 22**, **Εικόνα 23**, Εικόνα 24, **Εικόνα 25**, Εικόνα 26). Η ανομοιομορφία των συγκολλήσεων υποδεικνύει αστάθεια των συνθηκών συγκόλλησης αλλά και πιθανή αστάθεια στις συνθήκες της συγκράτησης. Αυτό μπορεί να οφείλεται και σε διαφοροποίηση των ιδιοτήτων του μετάλλου βάσης.

Αναλυτικότερα, η μεταλλογραφική εξέταση αποκάλυψε συγκεκριμένα ελατώματα στις συγκολλήσεις, τα οποία οφείλονται κυρίως στις συνθήκες συγκόλλησης. Στην Εικόνα 15, στην Εικόνα 16 και στην Εικόνα 17 παρατηρείται λέπτυνση στη μέση του «κορδονιού» και σχετική αύξηση πάχους (swelling) στην περιοχή της βασαλτικής ζώνης. Το πλάτος της συγκόλλησης συνολικά αλλά και της βασαλτικής ζώνης μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ των διαφορετικών τομών του ίδιου δοκιμίου και κυρίως μεταξύ των C και D. Σε ορισμένες συγκολλήσεις παρατηρήθηκε μετατόπιση

του κέντρου του “κορδονιού”, κάτι που δείχνει ανομοιομορφία στο ρυθμό απόψυξης (Εικόνα 17, Εικόνα 24).

Επίσης, στο δείγμα 3 παρατηρήθηκε έντονη εμφάνιση διδυμιών, Εικόνα 17. Οι διδυμίες εμφανίζονται κυρίως στη μια πλευρά της συγκόλλησης, και αναπτύσσονται σε όλο το πάχος του ελάσματος.

Επιλέον, παρατηρήθηκαν πόροι, κυρίως στο δείγμα 12, οι οποίοι οφείλονται συνήθως σε εγκλείσματα αερίων (Εικόνα 26). Οι πόροι θεωρούνται σοβαρό ελάττωμα και υπονομεύουν την αξιοπιστία της συγκόλλησης.

Στο δείγμα 13 διαπιστώθηκε ατελής τήξη. Η ατελής τήξη έχει ως αποτέλεσμα την ανομοιογενή και ασθενή συγκόλληση, καθώς τα ελάσματα δεν συνδέονται ουσιαστικά, με ταυτόχρονη ανάμειξή τους (Εικόνα 27).

Στο δείγμα 4 και στο δείγμα 12 διαπιστώθηκε υποκοπή (undercut). Η υποκοπή δημιουργείται από την υπερβολική παροχή ρεύματος στη συγκόλληση με αποτέλεσμα να τήκεται το μέταλλο βάσης και να εισέρχεται στο λουτρό, κάτι που οδηγεί σε μειωμένο πλάτος στις άκρες της ζώνης τήξης (Εικόνα 26) και συνιστά σημαντικό ελάττωμα καθότι αποτελεί σημείο συγκέντρωσης τάσεων με αποτέλεσμα τη μείωση της αξιοπιστίας των συγκολλητών κατασκευών σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις.

Στα δείγματα με τροποποιημένες παραμέτρους, παρατηρήθηκε βελτίωση στη μορφολογία και στη δομή της συγκόλλησης. Το περίγραμμα της σύνδεσης έγινε πιο ομοιόμορφο, η ζώνη τήξης περιορίστηκε σε πλάτος και σχηματίστηκε στο κέντρο της μια λεπτόκοκκη ισοαξονική ζώνη, περιορίζοντας την έκταση της βασαλτικής (ζώνης), **Εικόνα 20**, **Εικόνα 21**, **Εικόνα 22**, **Εικόνα 23**, Εικόνα 24 **Εικόνα 25**. Η ισοαξονική ζώνη είναι πιο εκτεταμένη στο δείγμα 12 (Εικόνα 26), ενώ στα δείγματα 1-4 απουσιάζει πλήρως (Εικόνα 17). Η ύπαρξη ισοαξονικής ζώνης είναι θεμιτή, καθώς έχει ευνοϊκές επιπτώσεις στην αξιοπιστία της συγκολλητής κατασκευής.

### 3.1.2 Εξέταση μετά την χημική προσβολή

Στις χειροκίνητες συγκολλήσεις είναι εμφανής η αναδιάταξη της μεσομεταλλικής ένωσης μετά την τήξη και επαναστερεοποίηση που προκάλεσε η συγκόλληση. Η μετάβαση από το μέταλλο βάσης στη ζώνη τήξης είναι άμεση, δημιουργώντας μία ξεκάθαρη διεπιφάνεια, Εικόνα 14. Το παραπάνω δηλώνει απουσία θερμικά επηρεασμένης ζώνης, που οφείλεται στη ραγδαία απόψυξη που επιτυγχάνεται λόγω του μικρού πάχους του ελάσματος.

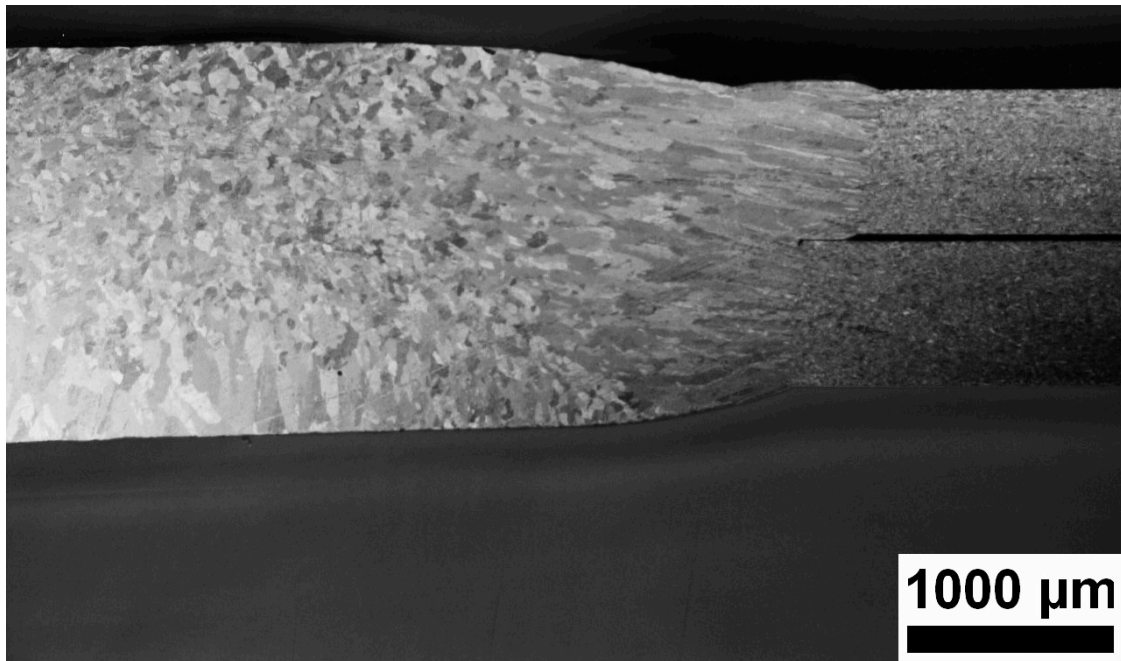
Η Εικόνα 28 δείχνει την κατανομή της ενδομεταλλικής φάσης  $TiZn_{15}$  στα δείγματα, στα οποία διαπιστώθηκε διαφορά στην περιεκτικότητα σε Ti. Στο δείγμα 12 η ένωση εμφανίζεται σε κυρίως σε ινώδη μορφή (stringers), ενώ στα υπόλοιπα δείγματα η κατανομή είναι πιο ομοιόμορφη, λεπτομερής και κυρίως σφαιροποιημένη. Η διαφορά στη μορφολογία της ένωσης οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το έλασμα του δείγματος 12 αποτελεί προϊόν ημισυνεχούς χύτευσης ακολουθούμενης από έλαση πλάκας (ingot metallurgy), ενώ τα υπόλοιπα δείγματα είναι προϊόντα συνεχούς χύτευσης-έλασης (twin roll casting).

Όσον αφορά στις περιοχές των συγκολλήσεων, με παρατήρηση υπό υψηλή μεγέθυνση διαπιστώθηκε ότι η κατανομή της  $TiZn_{15}$  ήταν ομοιόμορφη και δεν διαπιστώθηκε έντονος διαφορισμός, τόσο ώστε να προκληθεί ψαθυροποίηση. Πιο συγκεκριμένα, το έλασμα με 650 ppm Ti παρουσίασε ομοιόμορφη κατανομή διεσπαρμένων κατακρημνισμάτων στο εσωτερικό και τα όρια των κόκκων, και σε σύγκριση με τα ελάσματα των 745 ppm Ti και 805 ppm Ti δεν υπήρξε αξιοσημείωτη διαφορά (Εικόνα 28, Εικόνα 29).

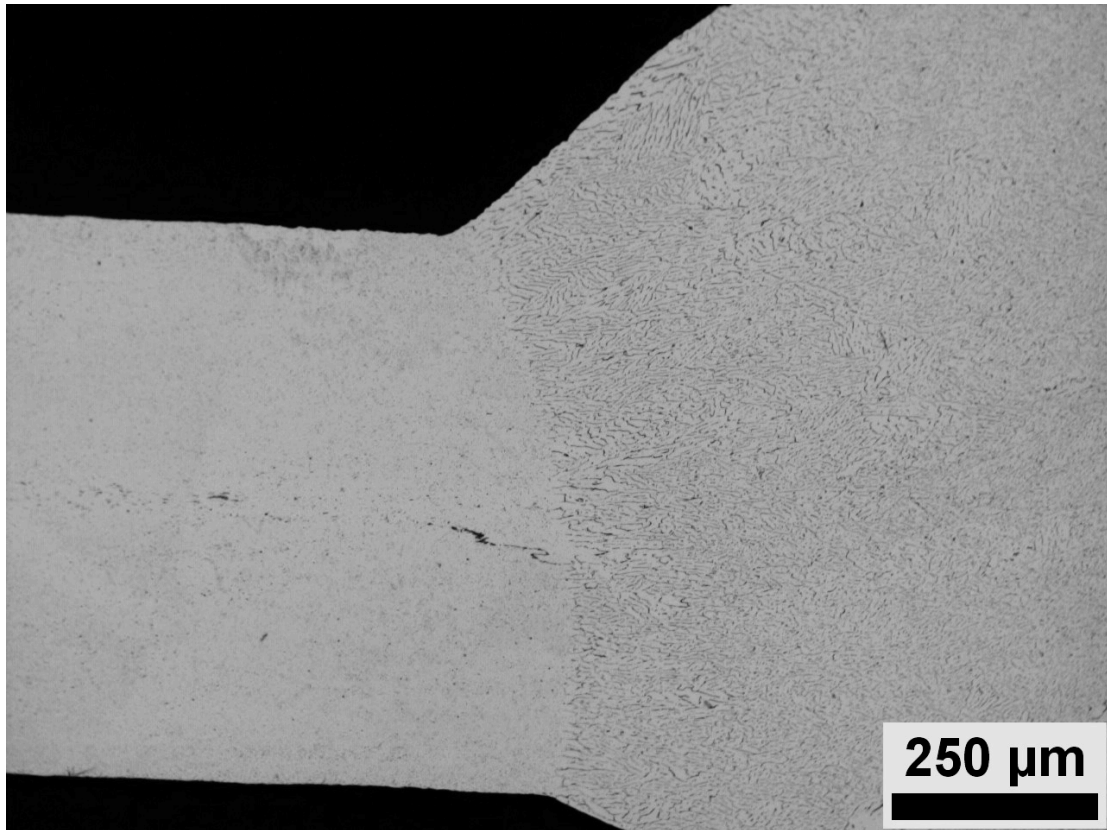
### 3.1.3 Μικροσκληρομέτρηση

Αρχικά γίνεται βαθμονόμηση του μικροσκληρόμετρου με μία δοκιμή σε ένα δείγμα ανοξειδωτου χάλυβα δεδομένης σκληρότητας. Στη συνέχεια, τοποθετείται το προς εξέταση δείγμα στο μικροσκόπιο και εντοπίζεται το σημείο από το οποίο πρέπει να μετρηθεί. Αφού επιλεγεί η μέθοδος, χρόνος επιβολής του φορτίου και το φορτίο ανάλογα με το μέγεθος σκληρότητας που αναμένουμε, παίρνουμε τη μέτρηση.

Ενδεικτικές μετρήσεις μικροσκληρομέτρησης Vickers διεξήχθησαν στα δείγματα στις θέσεις Α των συγκολλήσεων και στο αντίστοιχο μέταλλο βάσης (Εικόνα 17, Εικόνα 24, Εικόνα 26). Στο αρχικό δείγμα εμφανίστηκε μεγάλο εύρος τιμών μικρο-σκληρότητας, 39 - 56 HV<sub>0.2</sub>. Αντίθετα, τα δείγματα με τις τροποποιημένες ρυθμίσεις (λιγότερο ρεύμα, μικρότερη παροχή αερίου) έδειξαν πιο σταθερή συμπεριφορά με μια διακύμανση της σκληρότητας από 47 ως 52 HV<sub>0.2</sub>. Παρόμοια ήταν η συμπεριφορά και του δείγματος 12, για το οποίο οι τιμές σκληρότητας ήταν μεταξύ 46 και 55 HV<sub>0.2</sub>.

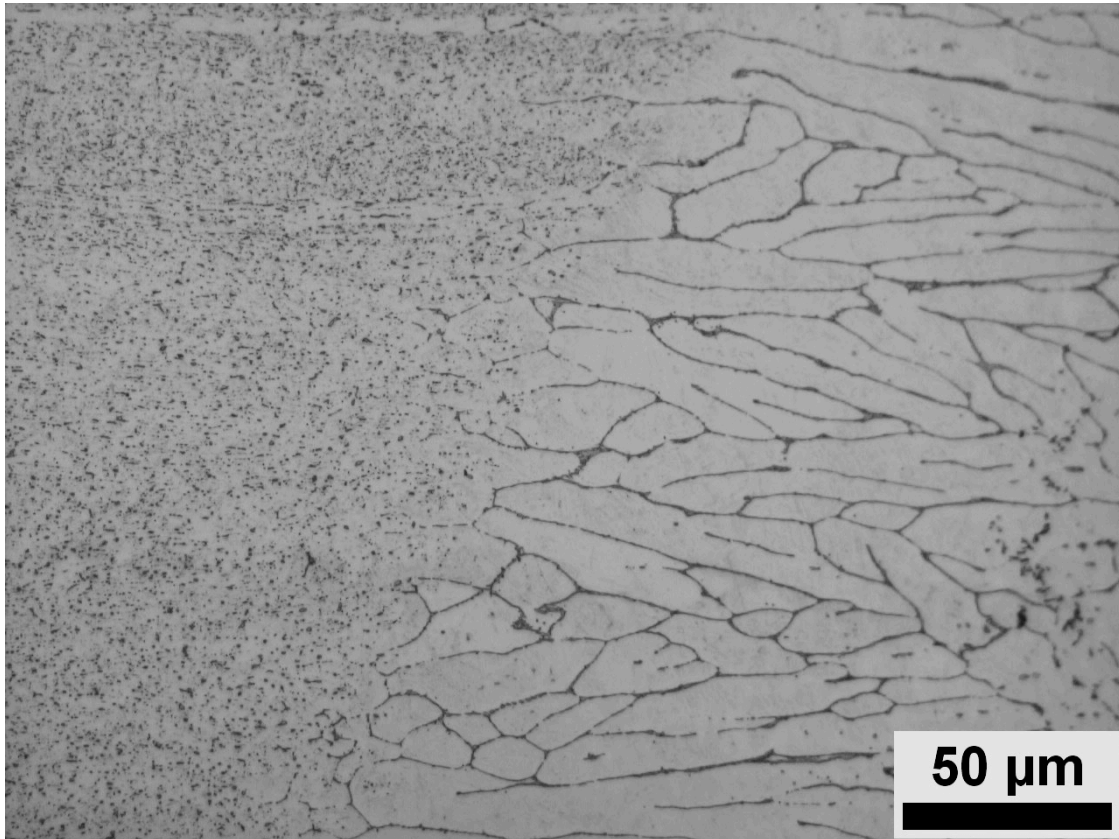


Εικόνα 12: Μικρογραφία συγκόλλησης TIG σε επάλληλα τοποθετημένα ελάσματα, που πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα (45A A/C ανάστροφη πολικότητα, 16l/min Ar, μεγάλη ταχύτητα). Η σύνδεση είναι επιτυχής. Το πλάτος της ζώνης τήξης είναι μεγάλο σε σύγκριση με τη βιομηχανική συγκόλληση, παρόλα αυτά παρατηρείται εκτενής και ομοιόμορφη ισοαξονική ζώνη. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως

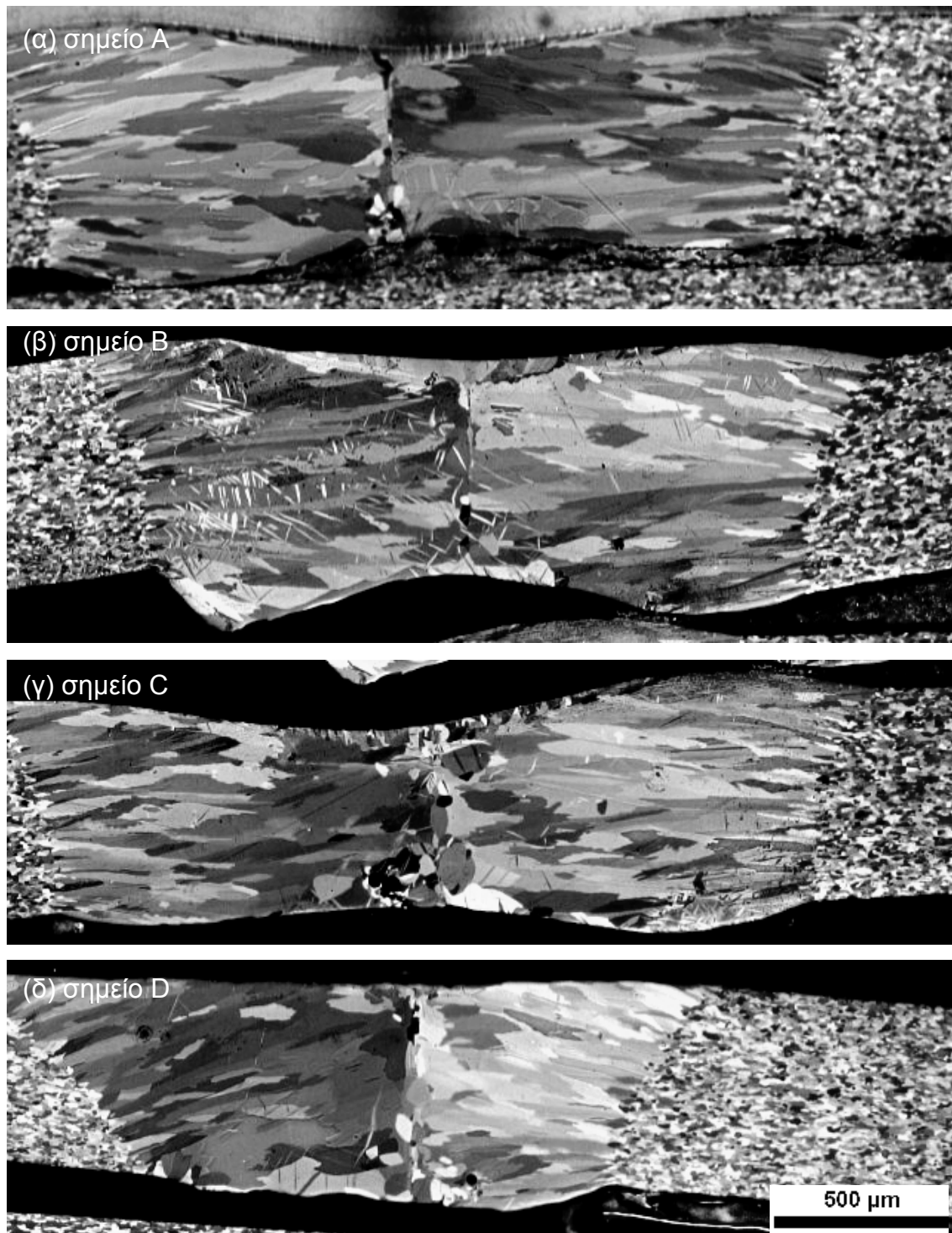


Εικόνα 13: Μικρογραφία συγκόλλησης TIG σε επάλληλα τοποθετημένα ελάσματα, που πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα (45A A/C ανάστροφη πολικότητα, 16l/min Ar, μεγάλη ταχύτητα). Η σύνδεση είναι επιτυχής. Είναι εμφανής η διασπορά της μεσομεταλλικής ένωσης  $TiZn_{15}$ . Παρατηρείται έντονη διαφορά μεταξύ του μετάλλου βάσης και της ζώνης τήξης, λόγω της αναδιάταξης της μεσομεταλλικής ένωσης, η οποία σχηματίζει χαρακτηριστικά φυλλίδια (stringers). Φωτογραφία υπό κανονικό φως, χημική προσβολή με Nital 2%

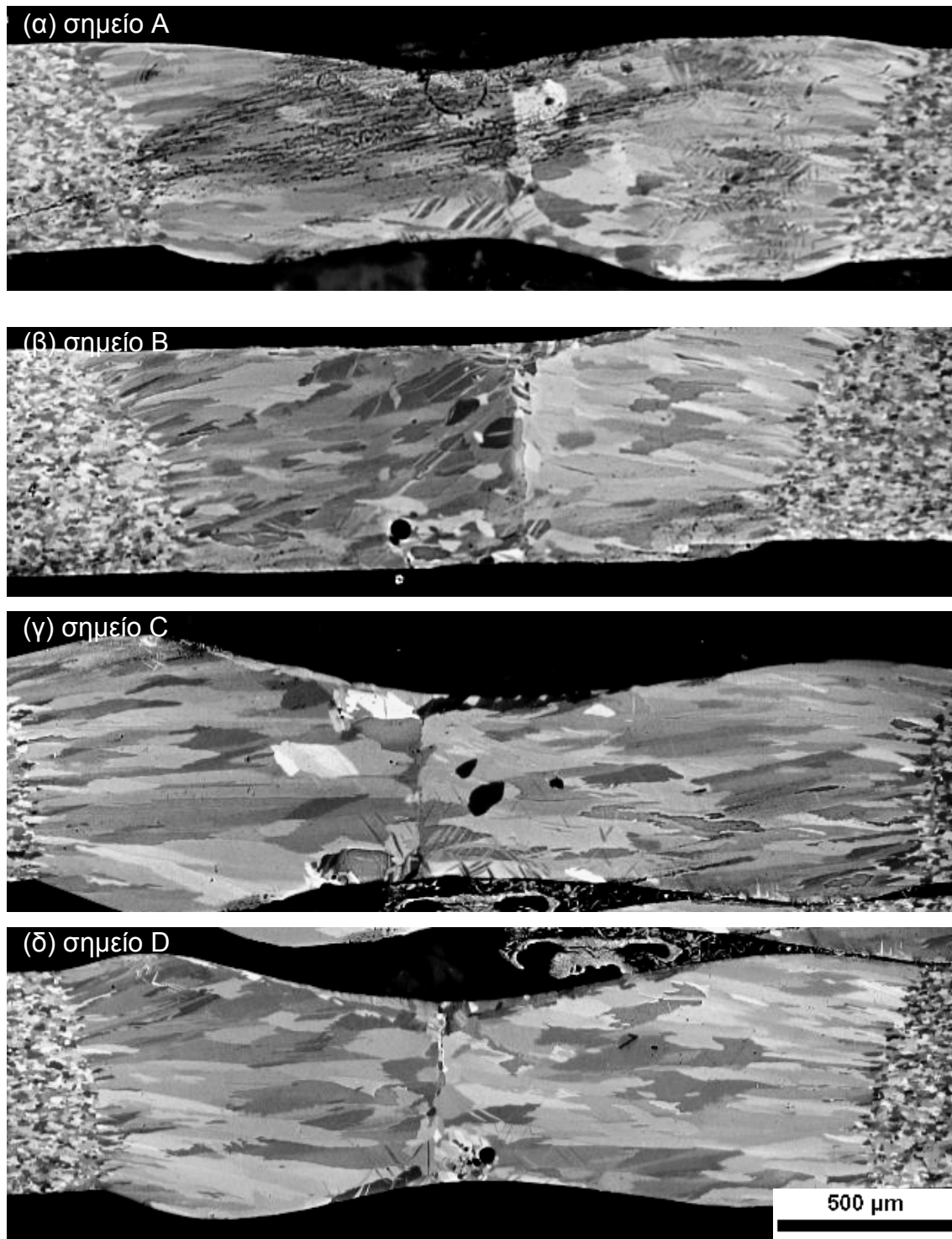




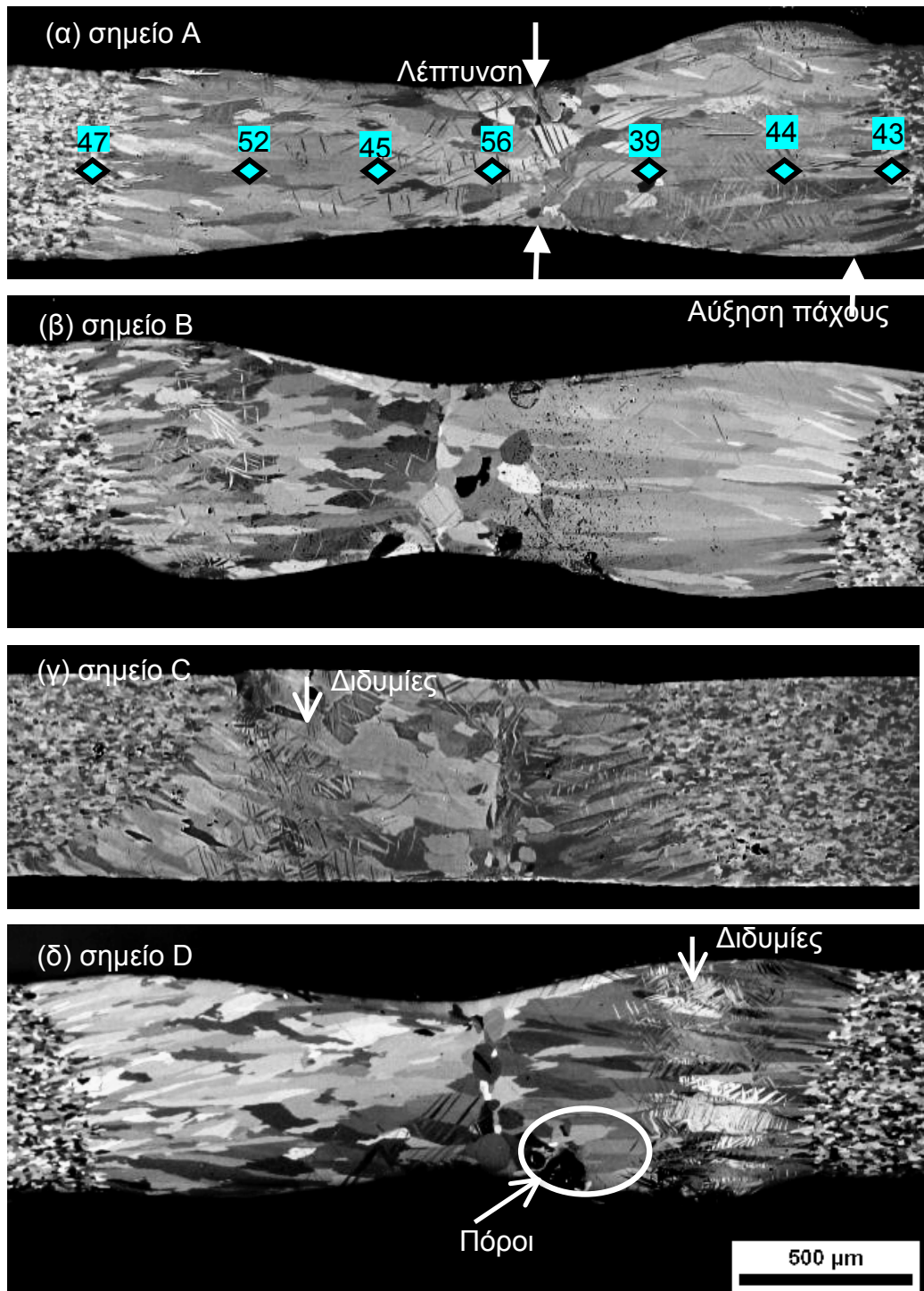
**Εικόνα 14:** Μεγέθυνση της περιοχής μετάβασης από τη ζώνη τήξης στο μέταλλο βάσης. Είναι εμφανής η ανομοιομορφία στη διασπορά της μεσομεταλλικής ένωσης  $TiZn_{15}$ . Φωτογραφία υπό κανονικό φως, χημική προσβολή με Nital 2%



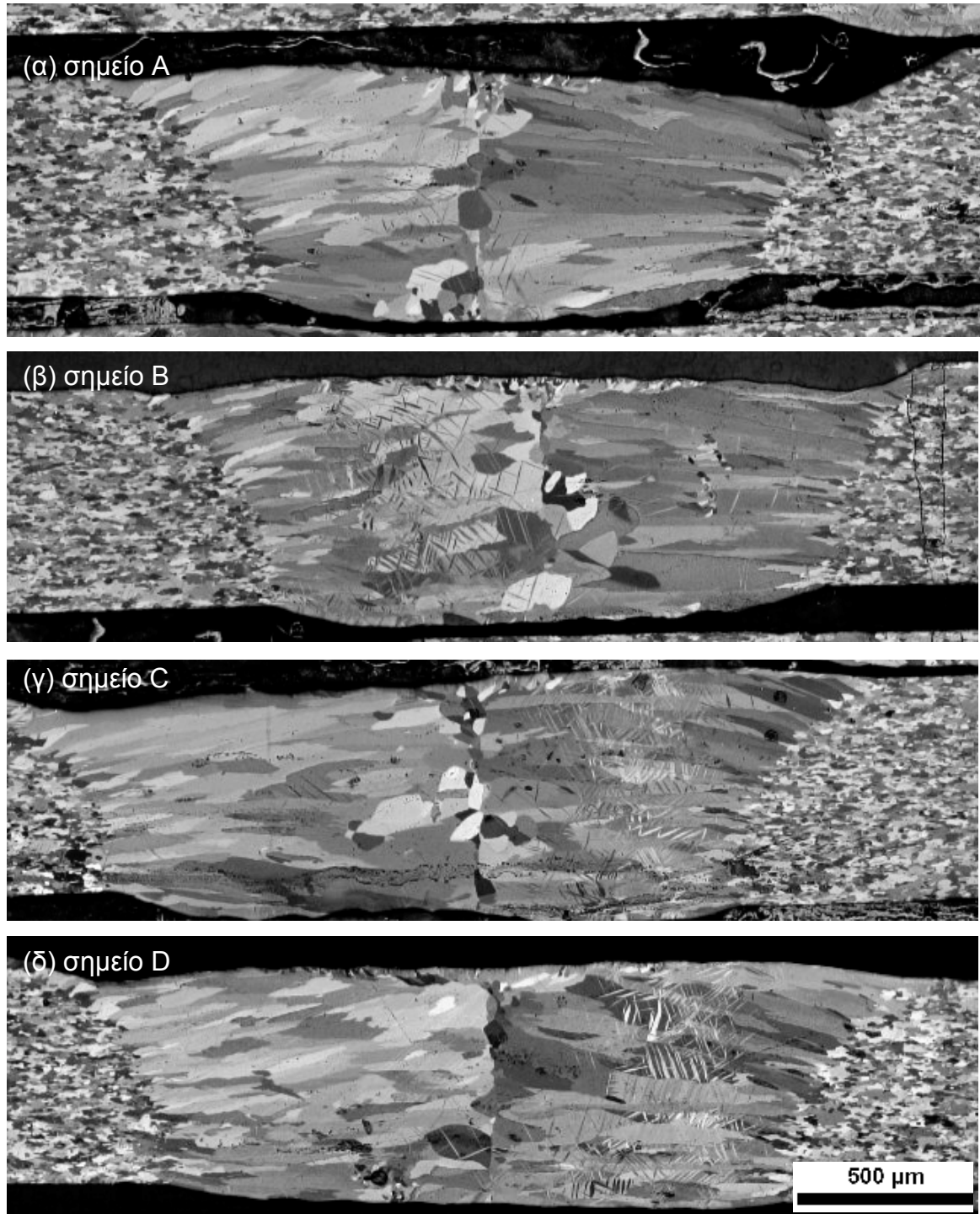
**Εικόνα 15: (α)-(δ) Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 1. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις από τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως**



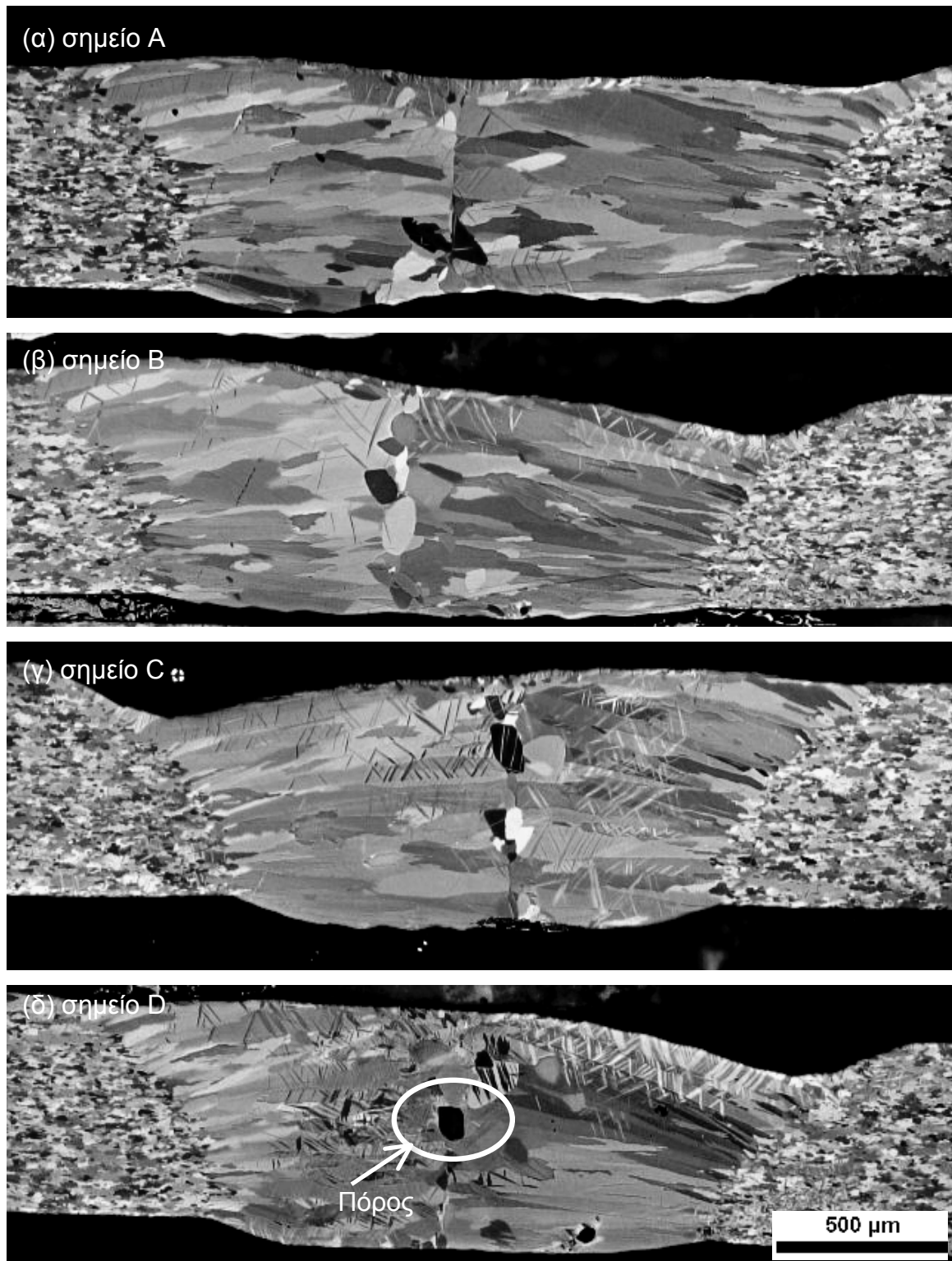
**Εικόνα 16: (α)-(δ) Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 2. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις απο τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως**



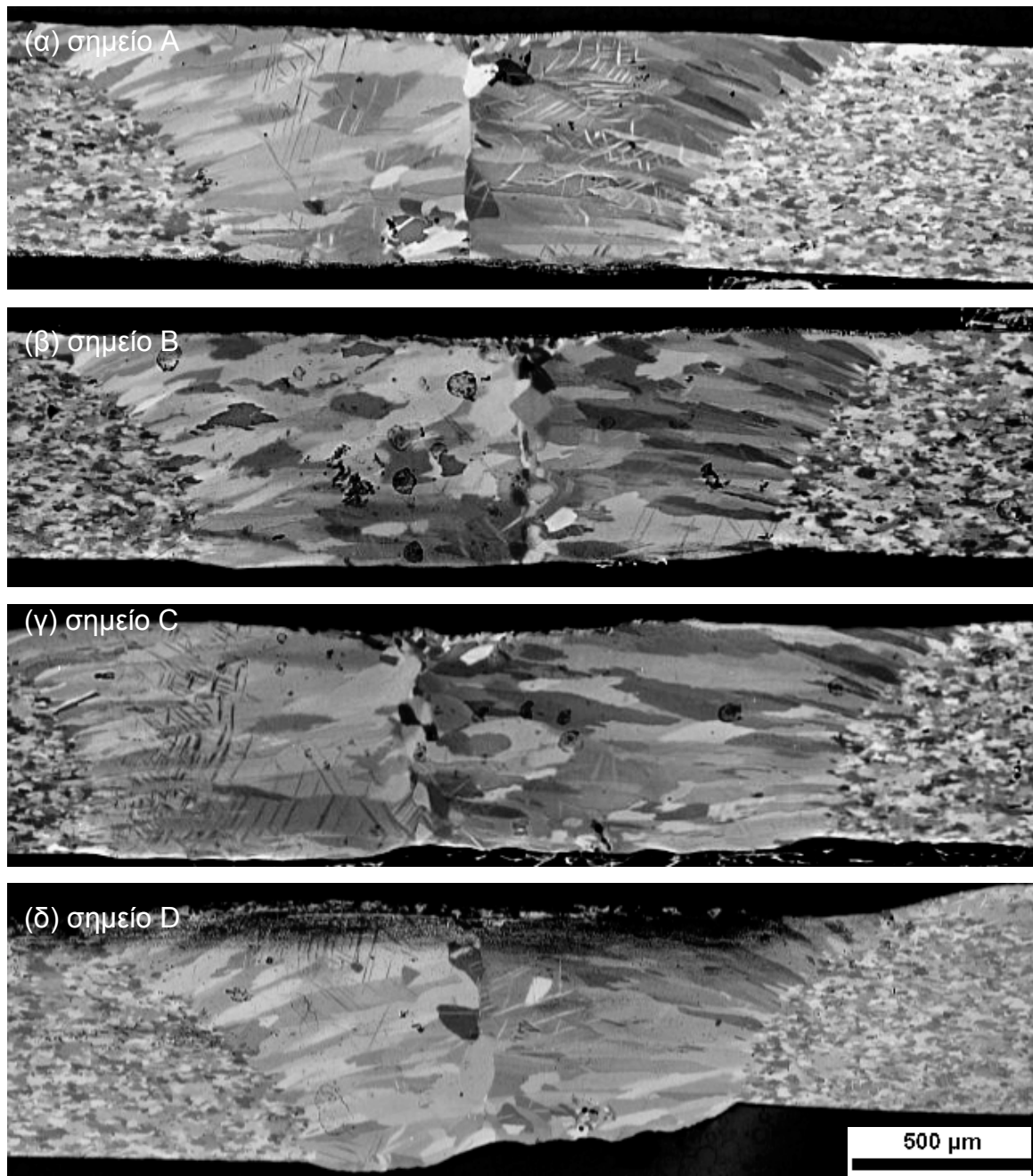
Εικόνα 17: (α)-(δ) Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 3. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις από τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. (α) Ενδεικτικές μικροσκληρομετρήσεις  $HV_{0.2}$ . Παρατήρηση υπό πολωμένο φως



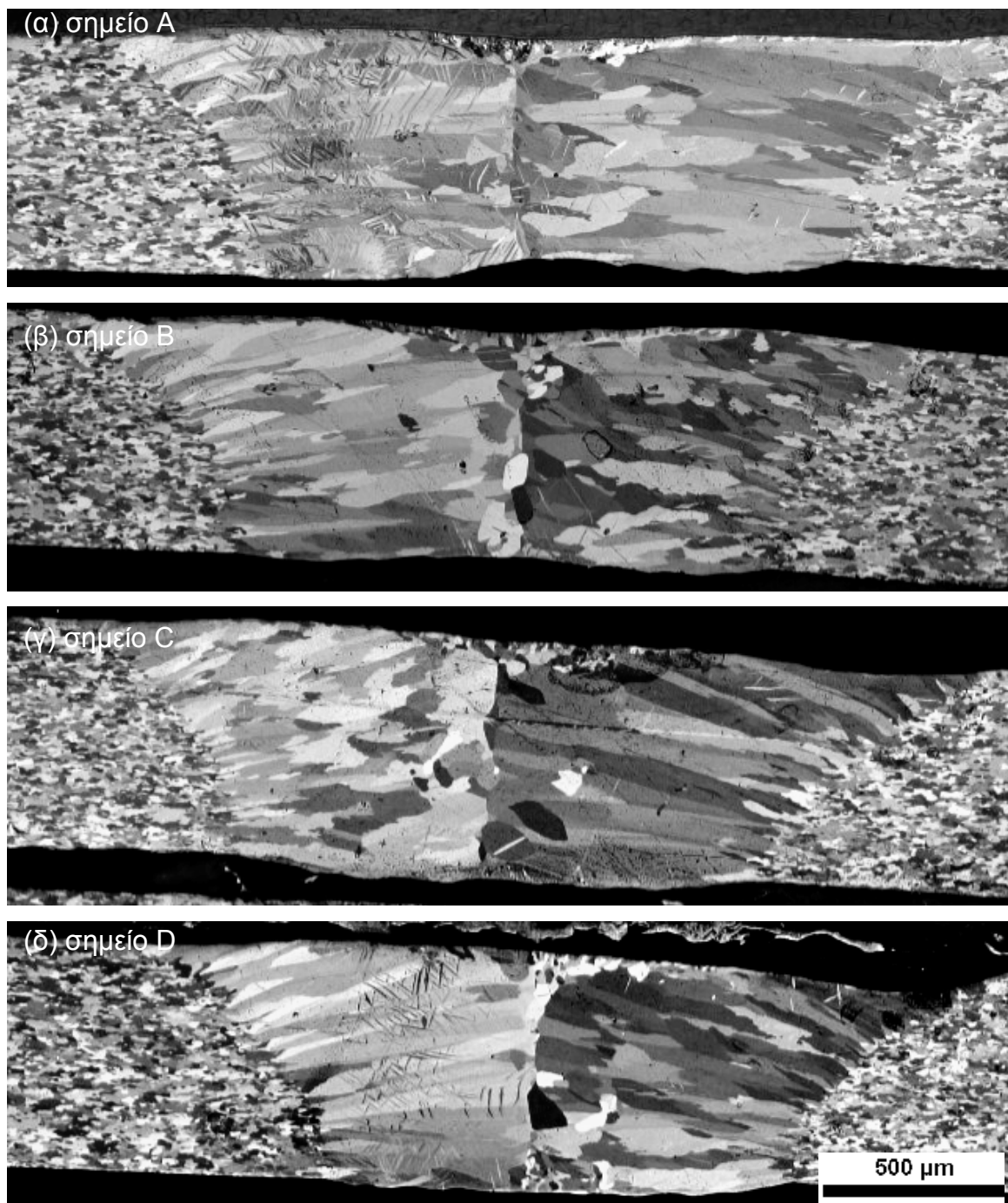
**Εικόνα 18: (α)-(δ) Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 4. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις από τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως**



**Εικόνα 19: (α)-(δ) Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 5. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις απο τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. Παρατηρούνται ευμεγέθεις πόροι. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως**

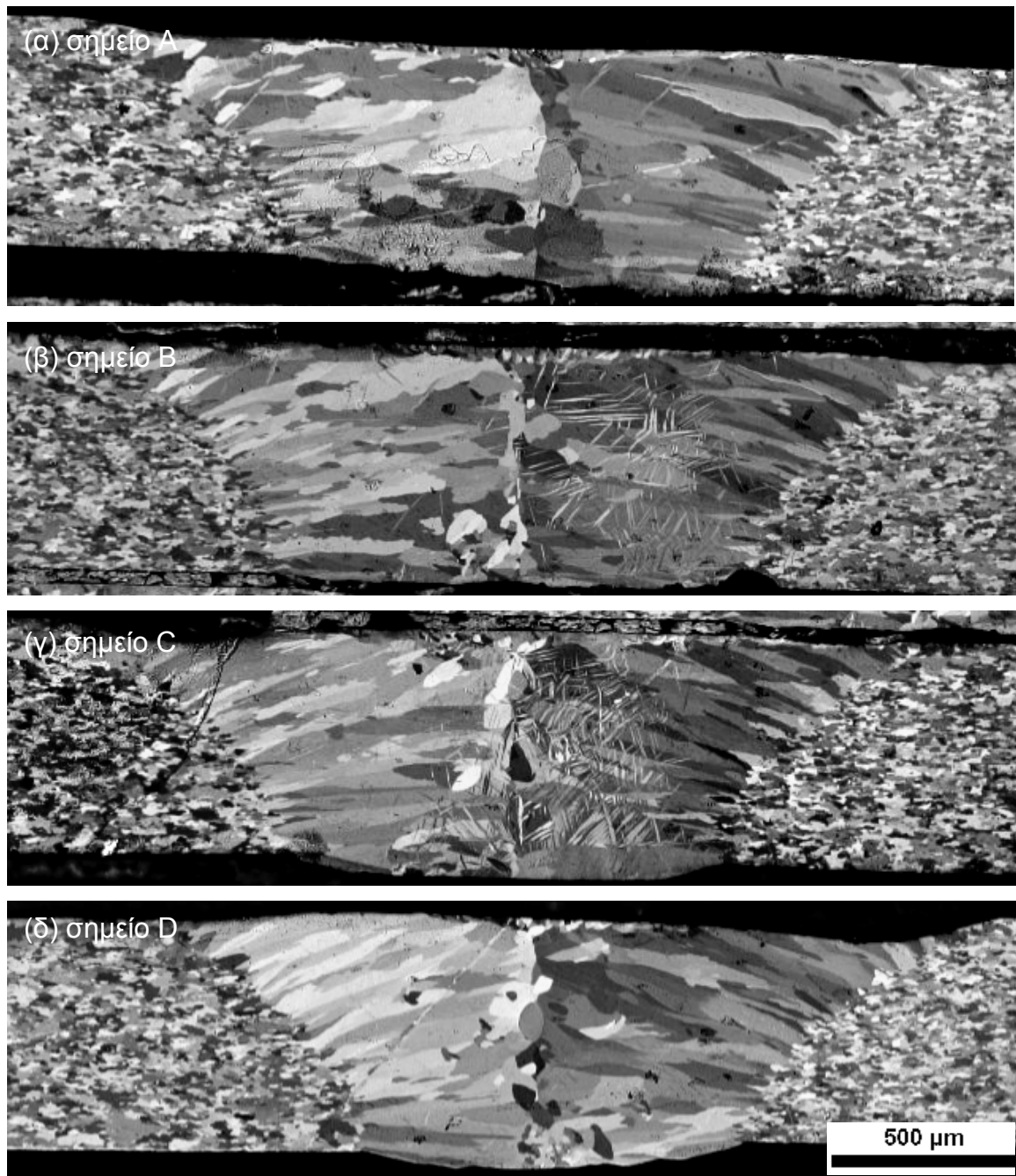


**Εικόνα 20: (α)-(δ) Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 6. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις από τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως**

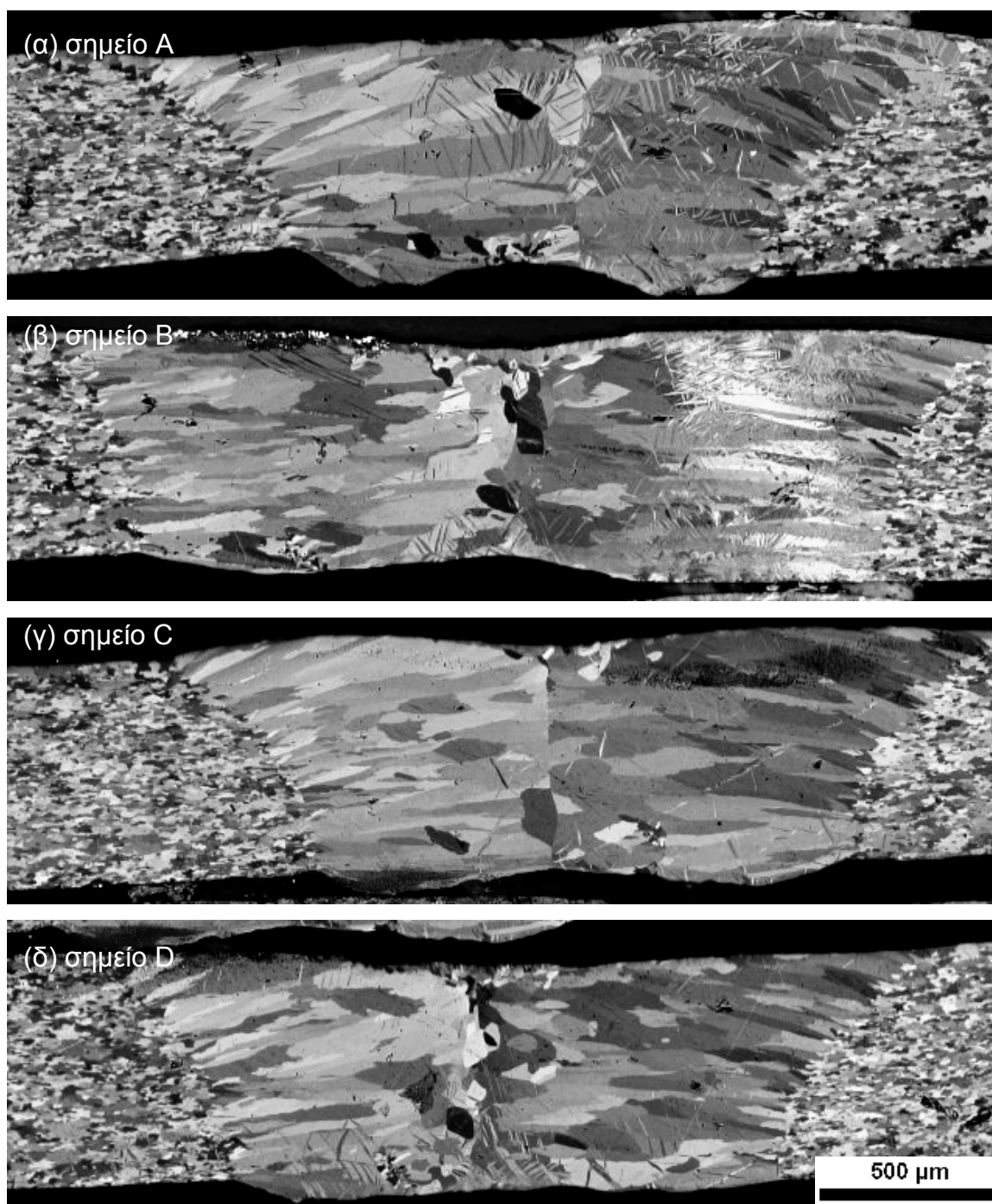


**Εικόνα 21: (α)-(δ) Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 7. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις από τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως**

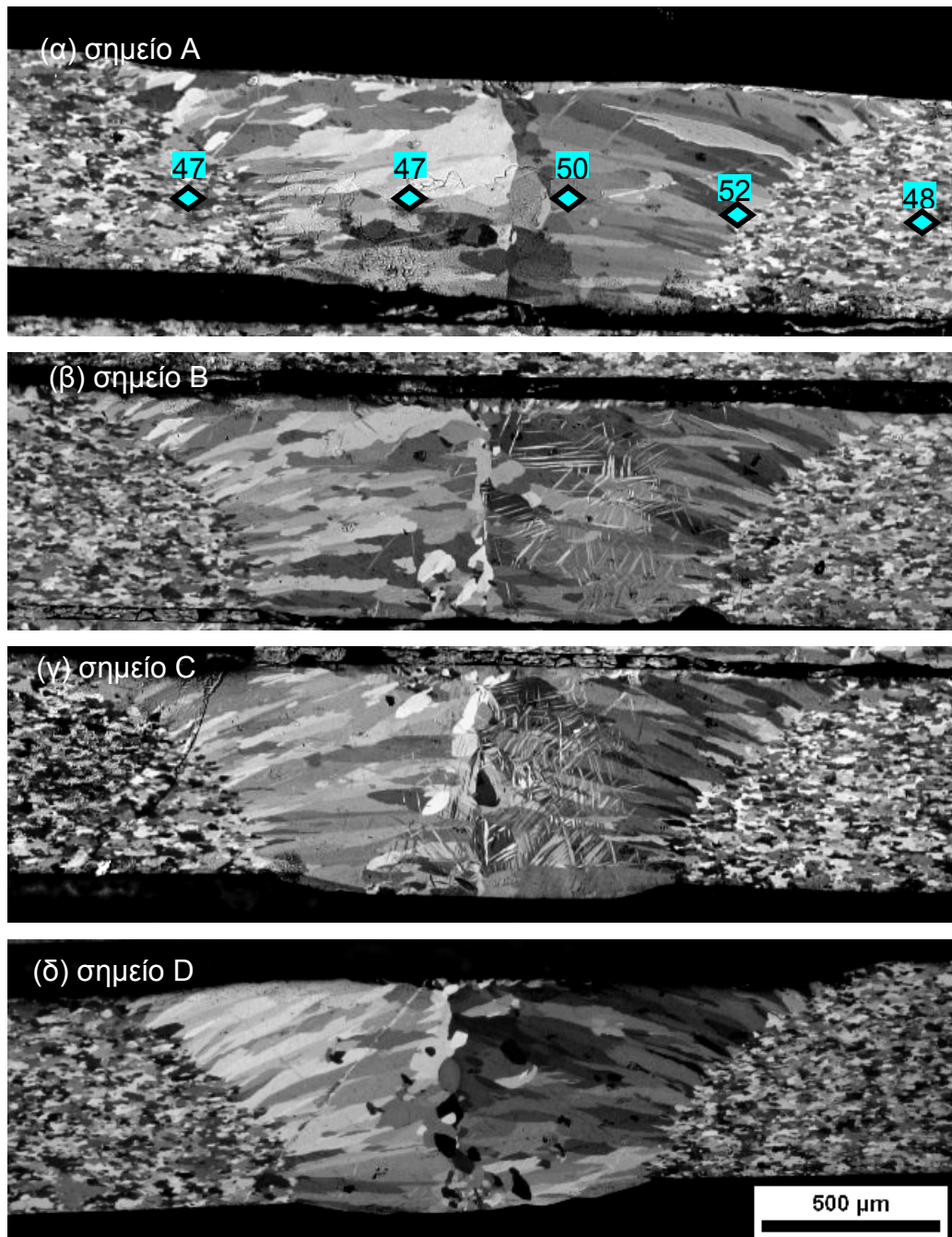




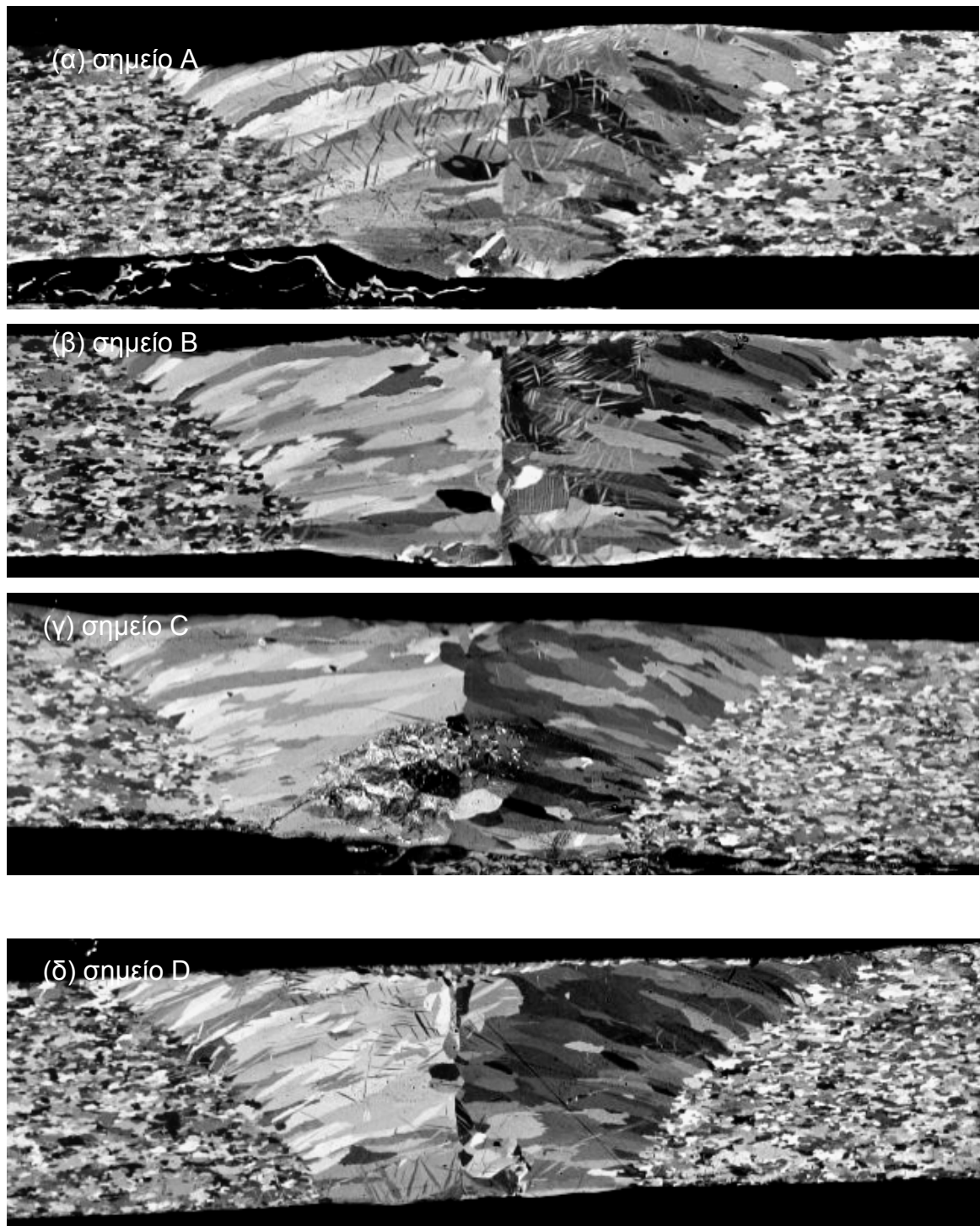
Εικόνα 22: (α)-(δ) Φωτογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 8. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις από τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. Παρατηρούνται πόροι και εκτεταμένες διδυμίες. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως



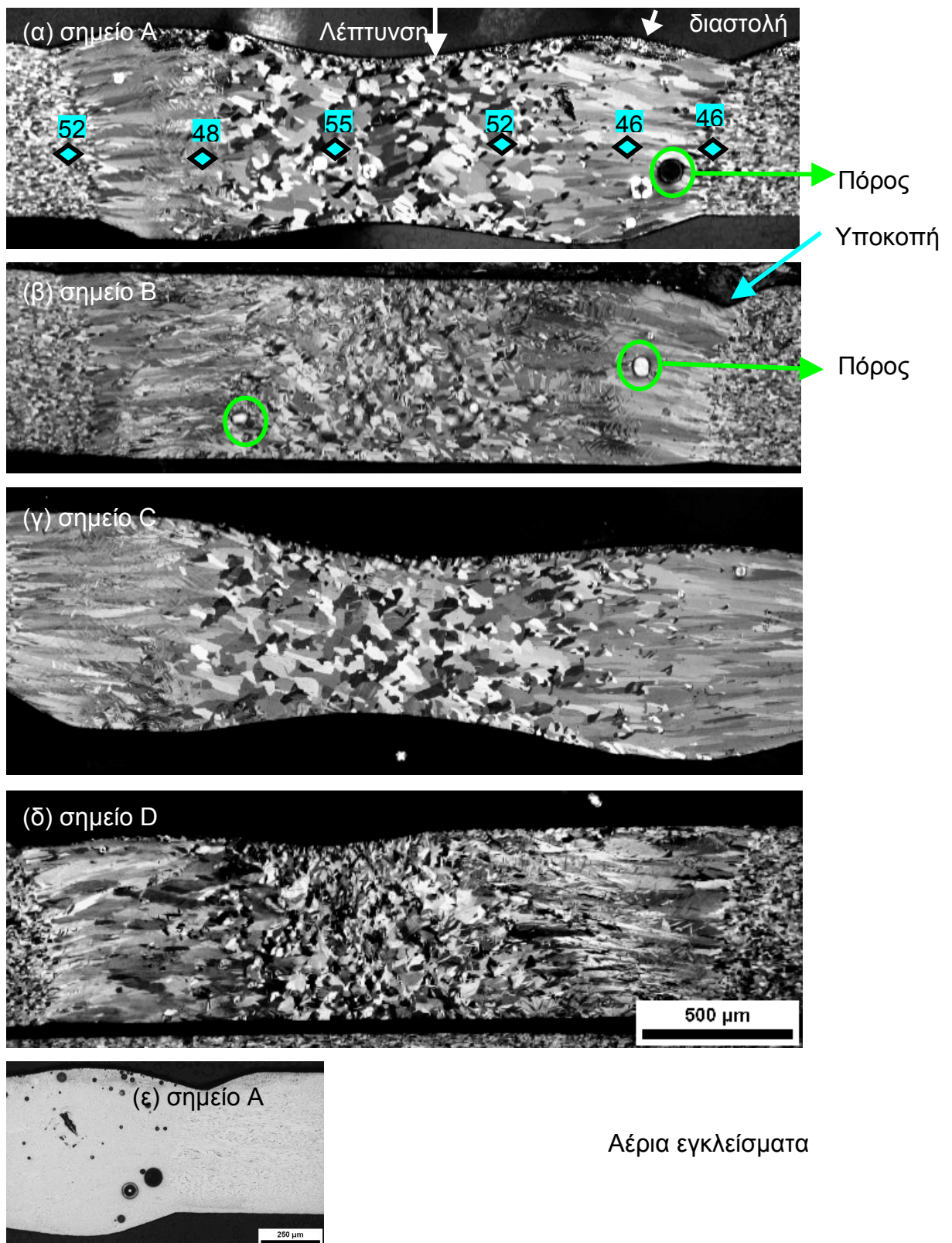
Εικόνα 23: (α)-(δ) Φωτογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 9. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις από τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως



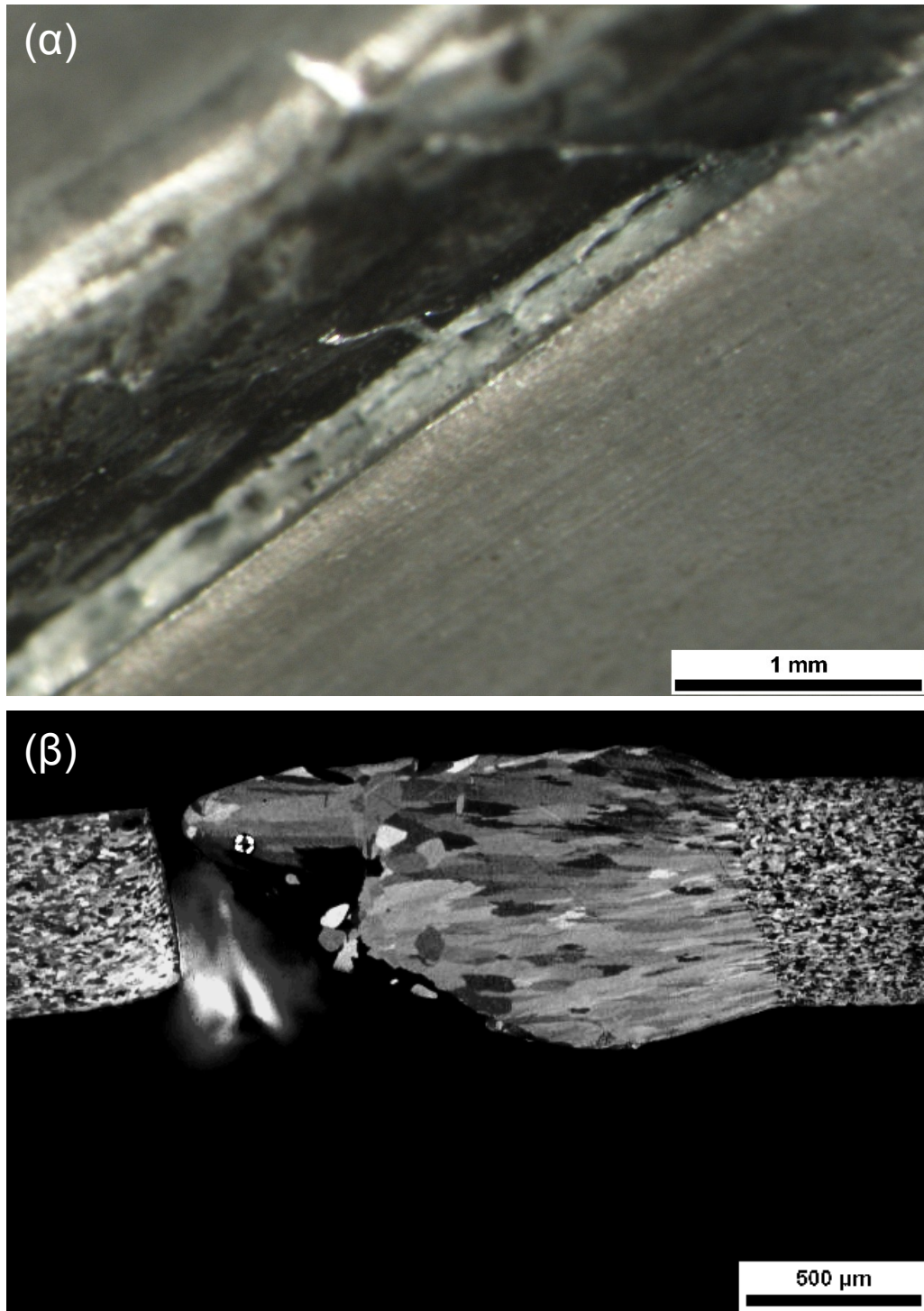
Εικόνα 24: (α)-(δ) Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 10. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις απο τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. (α) Ενδεικτικές μικροσκληρομετρήσεις HV<sub>0.2</sub>. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως



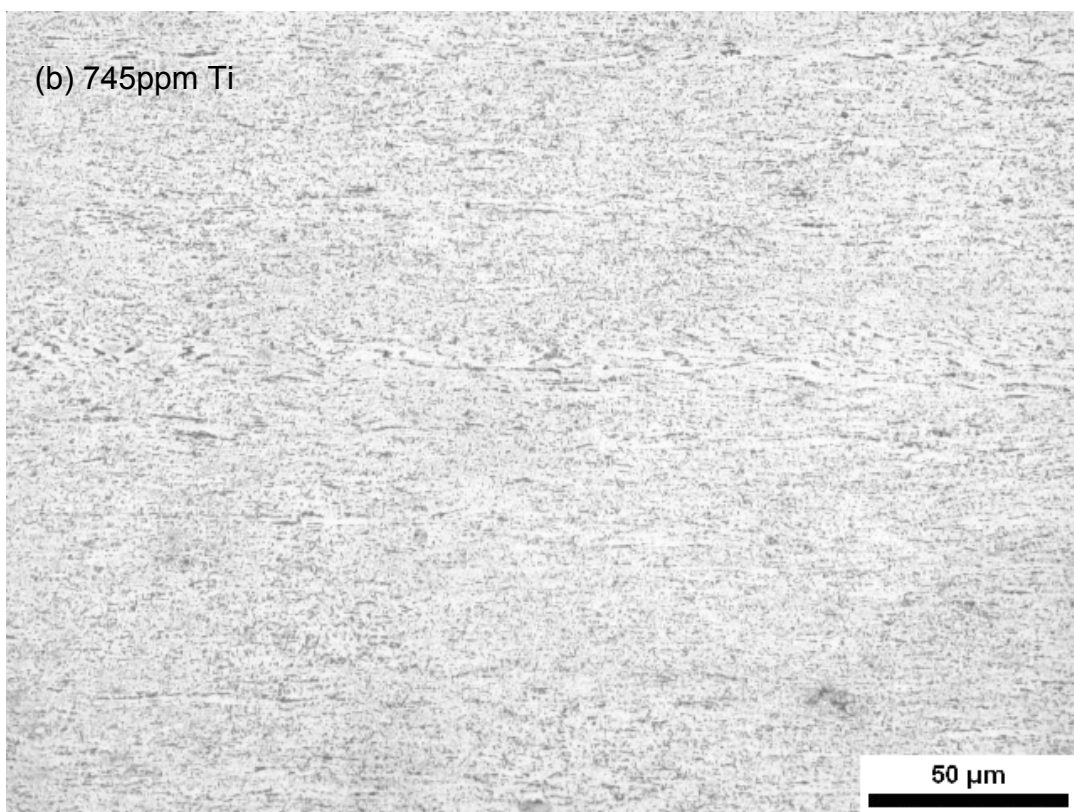
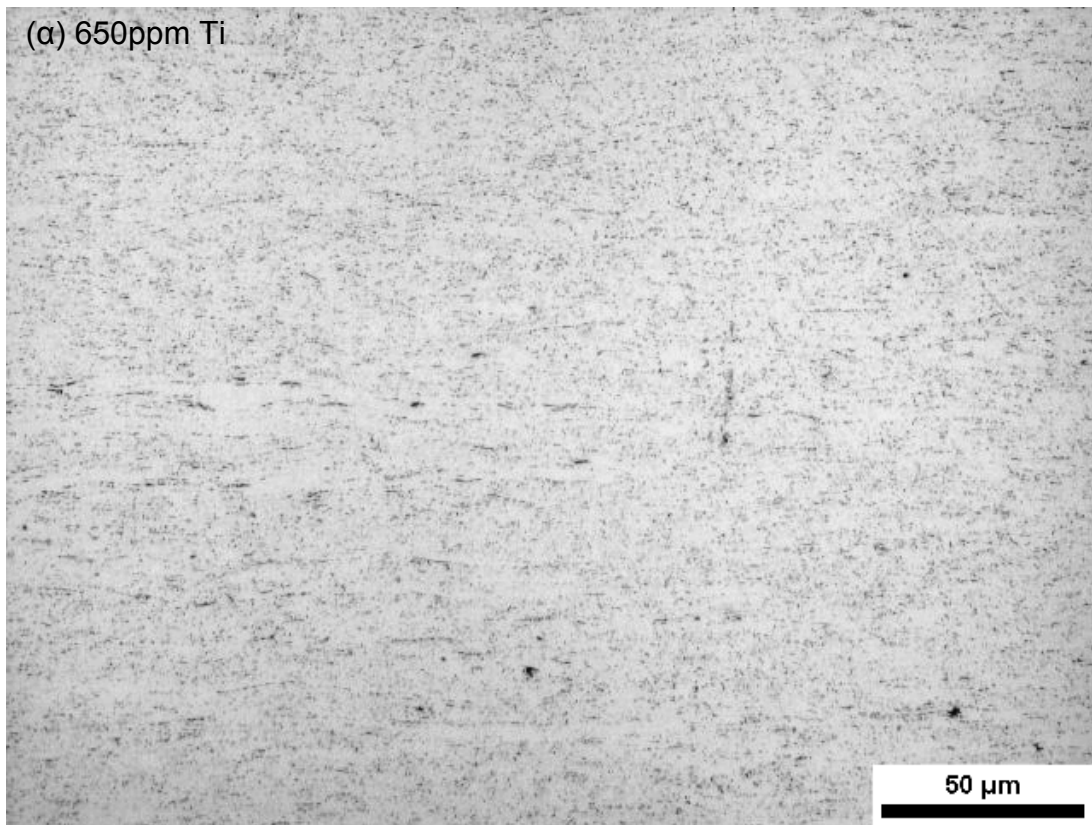
**Εικόνα 25: (α)-(δ) Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 11. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις από τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. Παρατηρείται περιορισμένη ζωνή τήξης, αποτέλεσμα της μειωμένης παροχής ρεύματος. Παρατήρηση υπό πολωμένο φως**

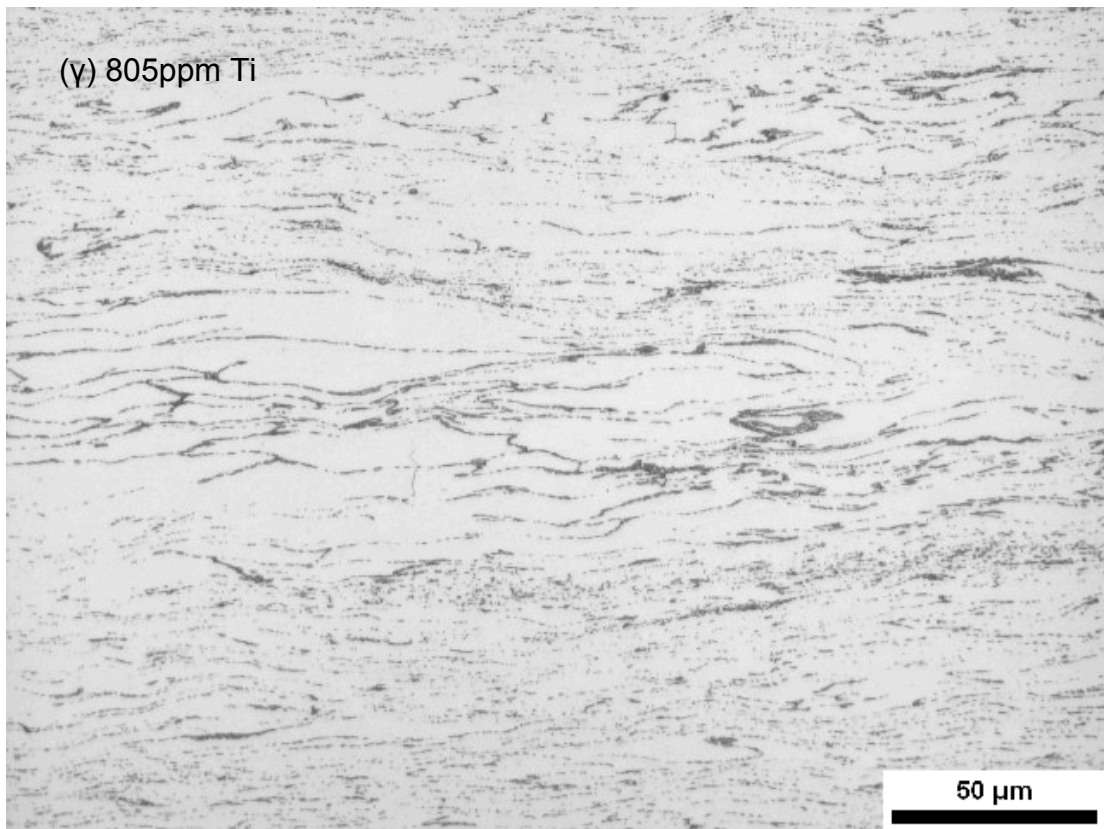


Εικόνα 26: (α)-(δ) Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου υπό πολωμένο φως των συγκολλήσεων του δείγματος 12. Η ονοματολογία A-D αντιστοιχεί στις θέσεις από τις οποίες κόπηκαν τα δείγματα. (α) Ενδεικτικές μικροσκληρομετρήσεις  $HV_{0.2}$ . (ε) φωτογραφία της A υπό κανονικό φως μετά από χημική προσβολή με 2% Nital. Διακρίνονται ευμεγέθεις πόροι.



**Εικόνα 27:** Μικρογραφίες του δείγματος 13 (α) από το στερεοσκόπιο (β) από το μικροσκόπιο. Είναι εμφανής η ατελής τήξη, η οποία οδήγησε σε ελαττωματική συγκόλληση και τελικά σε αστοχία στη δοκιμή κάμψης.

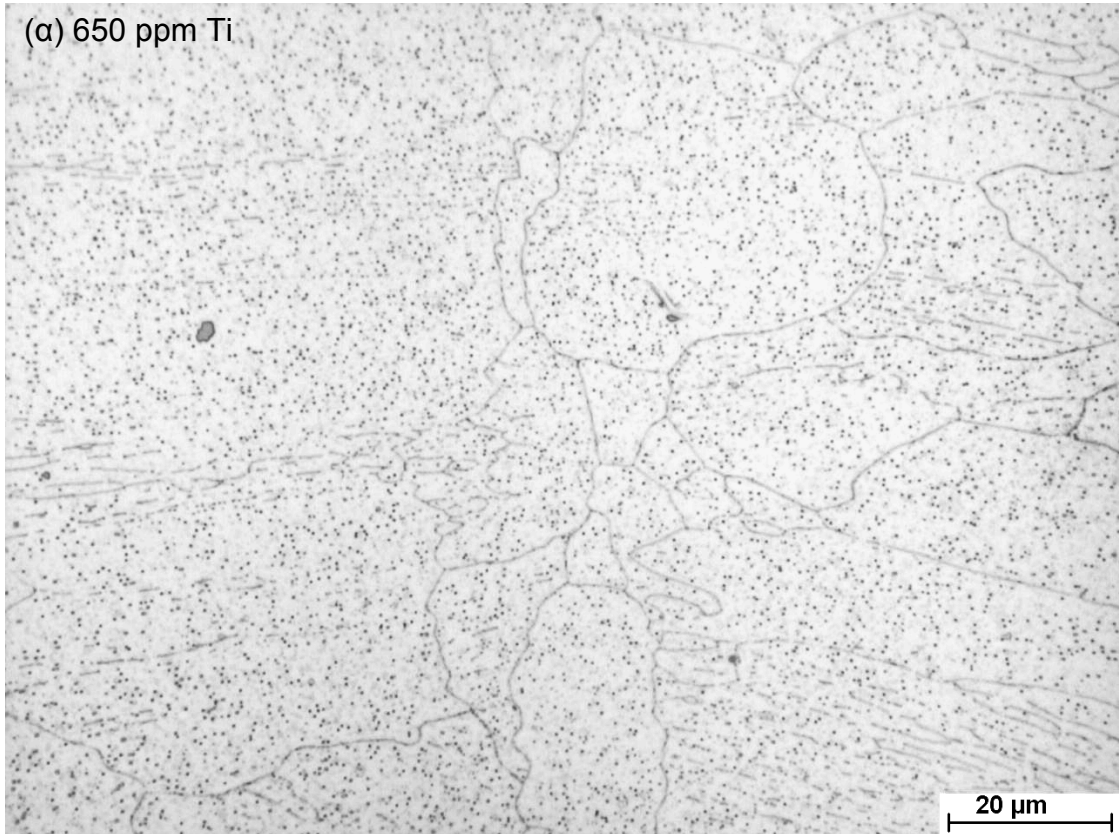




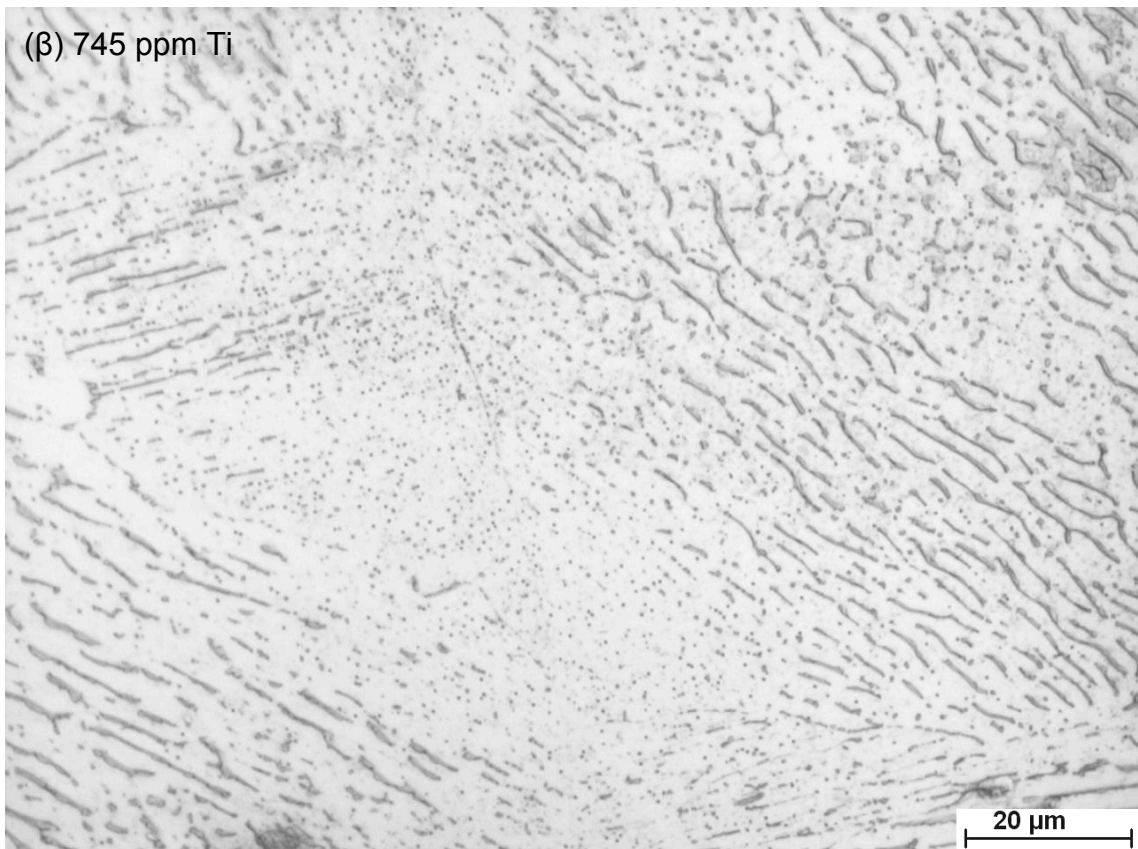
**Εικόνα 28:** Μικρογραφίες μικροσκοπίου δειγμάτων από το μέταλλο βάσης με διαφορετική περιεκτικότητα σε Ti. Τα δείγματα α) και β) είναι προϊόντα συνεχούς χύτευσης ενώ το γ) είναι προέρχεται από έλαση πλάκας (ingot). Φαίνεται η διαφορά στη διασπορά της ενδομεταλλικής ένωσης  $TiZn_{15}$ . Οι τομές είναι κάθετα στη φορά της έλασης και το δείγμα έχει υποστεί χημική προσβολή με Nital 2%.

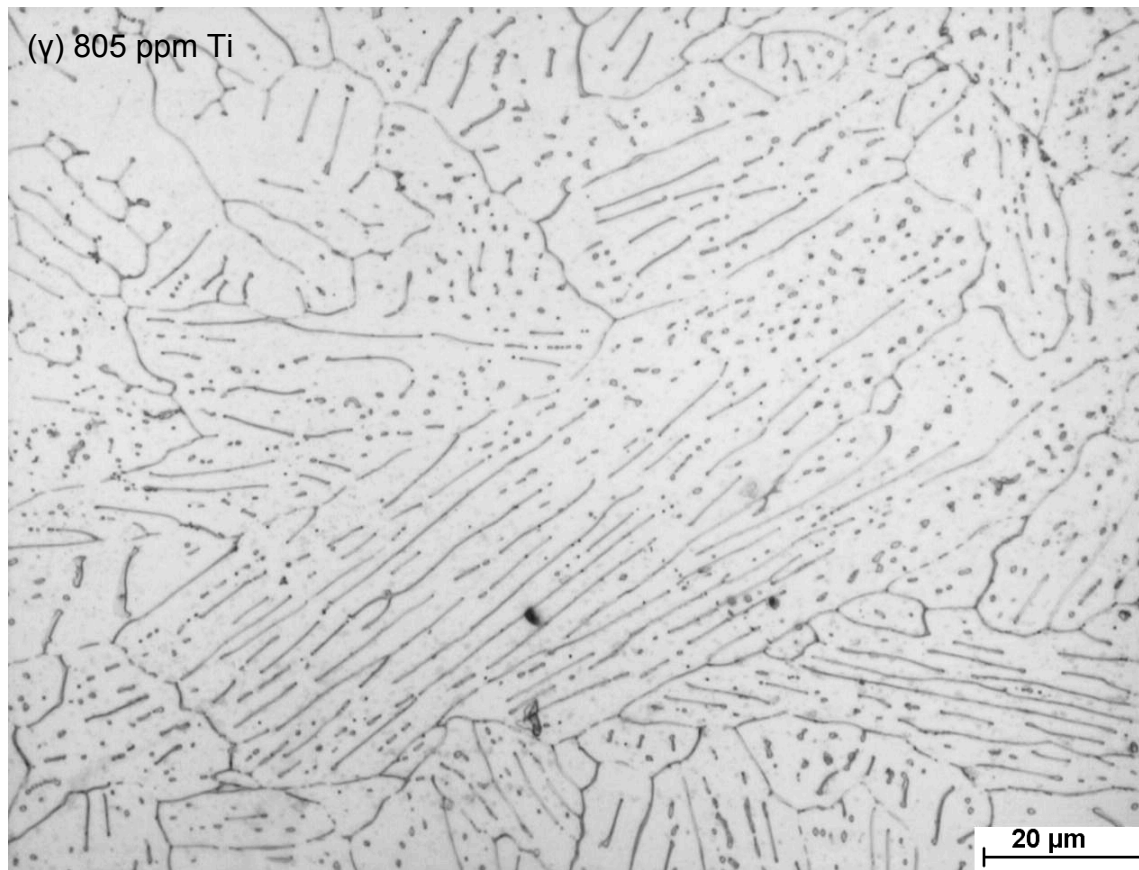


(α) 650 ppm Ti



(β) 745 ppm Ti





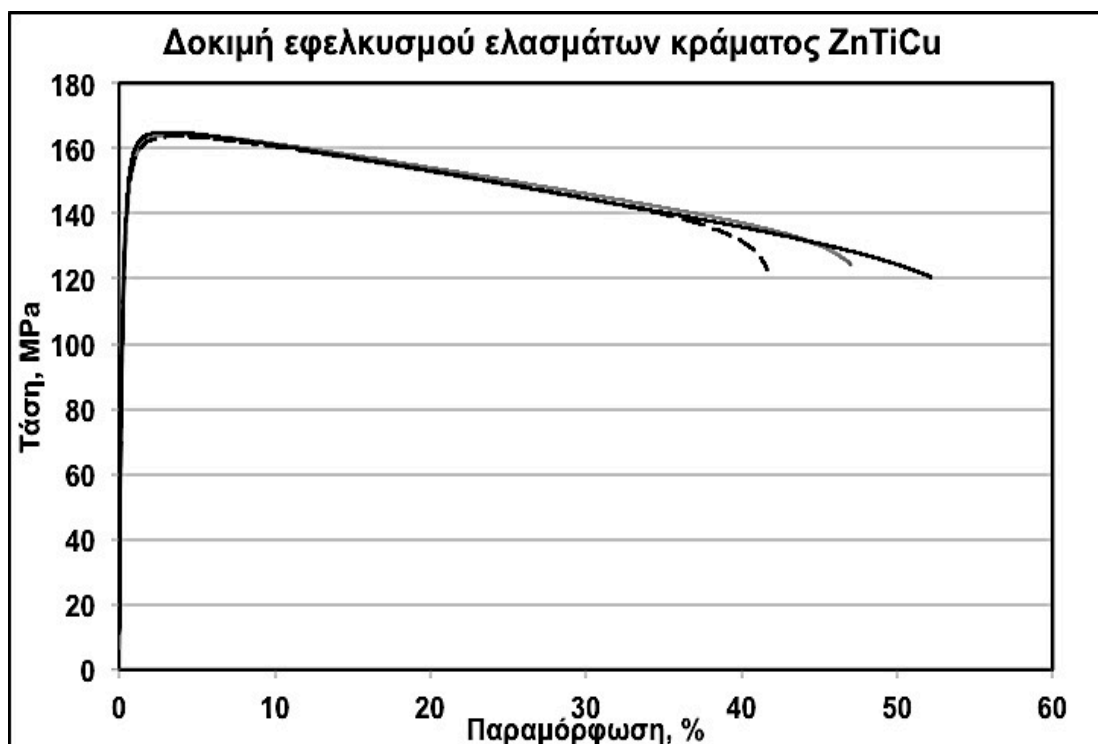
**Εικόνα 29:** Φωτογραφίες από την περιοχή της συγκόλλησης από δείγματα με διαφορετική περιεκτικότητα σε Ti. Τα δείγματα α) και β) είναι προϊόντα συνεχούς χύτευσης ενώ το γ) είναι προέρχεται από έλαση πλάκας (ingot). Φαίνεται η διασπορά της ενδομεταλλικής φάσης  $TiZn_{15}$ . Οι τομές είναι κάθετα στη φορά της έλασης και το δείγμα έχει υποστεί χημική προσβολή με Nital 2%.

## 3.2 Αποτελέσματα μηχανικών ιδιοτήτων

### 3.2.1 Δοκιμή εφελκυσμού

Ελάσματα του μετάλλου βάσης αλλά και συγκολλημένοι σωλήνες κόπηκαν σε κατάλληλες διαστάσεις προκειμένου να κατασκευαστούν τα δοκίμια του εφελκυσμού με χρήση ειδικής πρέσσας. Τα ελάσματα κόπηκαν με ειδικό ψαλίδι και οι σωλήνες με πριονοκορδέλα. Κατά τη διαδικασία της κοπής των σωλήνων δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο να μην εφαρμοστούν εξωτερικές τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης ώστε να μην επηρεαστεί το αποτέλεσμα της δοκιμής εφελκυσμού. Τα δοκίμια κόπηκαν παράλληλα στη φορά της έλασης.

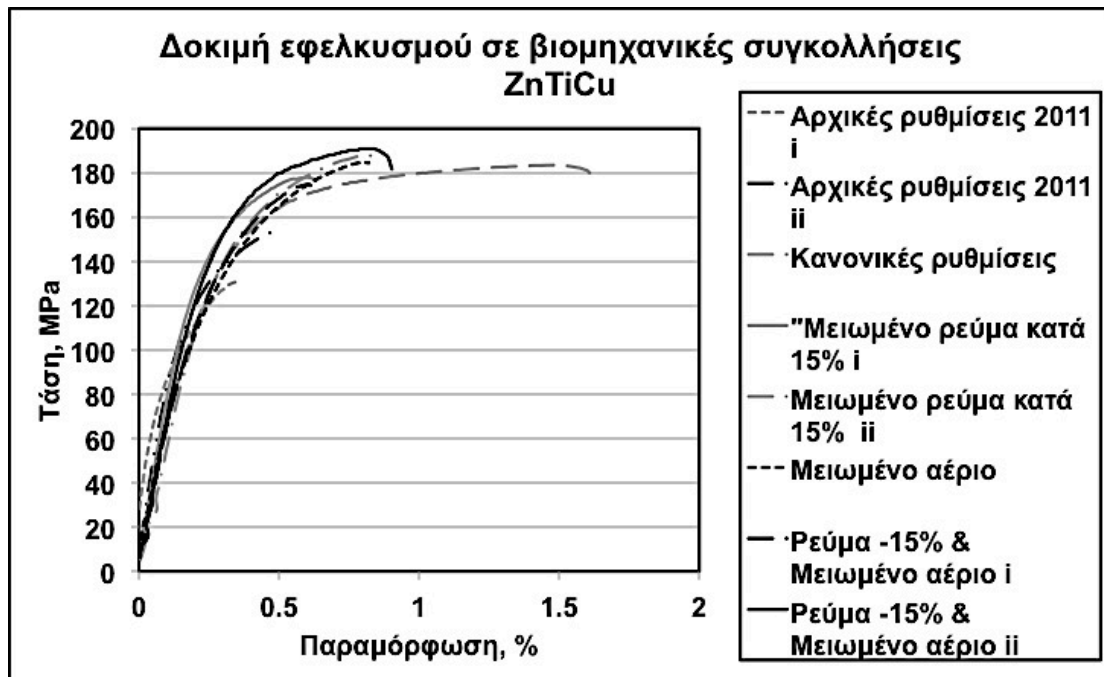
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η δοκιμή στη μηχανή INSTRON 5567. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις καμπύλες τάσης παραμόρφωσης που ακολουθούν, Εικόνα 30



Εικόνα 30: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης ελάσματος κράματος ZnTiCu, το οποίο αποτελεί και το μέταλλο βάσης των συγκολλήσεων.

Παρατηρείται ότι το μέταλλο βάσης παρουσιάζει μεγάλη ολκιμότητα της τάξεως του 40-50%, όριο διαρροής ( $R_p$ ) περίπου 130 MPa και μέγιστη αντοχή  $R_m$  165 MPa. Οι τιμές αυτές είναι εντός των ορίων που ορίζει το πρότυπο EN 988:1997. Τα δοκίμια πρίν τη θραύση δημιούργησαν έντονο λαιμό στην περιοχή συσσώρευσης τάσεων (localized necking), καθώς επίσης και εμφανείς ζώνες ολίσθησης (shear bands).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού των συγκολλήσεων, τόσο των χειροκίνητων TIG, όσο και των βιομηχανικών συγκολλήσεων Εικόνα 31, Πίνακας 4



**Εικόνα 31:** Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης συγκολλημένων ελασμάτων κράματος ZnTiCu

Με βάση τις παραπάνω καμπύλες, παρατηρείται μία κατακόρυφη πτώση της ολκιμότητας τόσο στις βιομηχανικές, όσο και στις χειροκίνητες συγκολλήσεις, από το 40-50% στο 1-2%. Η τάξη μεγέθους της συνολικής επιμήκυνσης επιμήκυνσης (<5%) δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων ή την ευθεία σύγκριση των συγκολλήσεων, καθώς για τη μελέτη φαινομένων και τόσο μικρών τιμών επιμήκυνσης απαιτούνται ειδικές μεθόδους που δεν είναι διαθέσιμες σε απλό εργαστήριο δοκιμών μηχανικών ιδιοτήτων.

Παρόλα αυτά, μπορεί να παρατηρηθεί μια αύξηση του  $R_m$  σε σχέση με το αρχικό υλικό. Τα δείγματα με τις ρυθμίσεις του 2011 έχουν όντως χαμηλές μηχανικές ιδιότητες, όπως αναμενόταν και από τη μεταλλογραφική εξέταση. Τόσο η αντοχή τους στον εφελκυσμό όσο και η συνολική επιμήκυνση που πέτυχαν είναι πολύ χαμηλές. Αντίθετα οι ρυθμίσεις της σύγχρονης παραγωγής δείχνουν λίγο αυξημένη επιμήκυνση, χωρίς όμως αυτό να αποτελεί επαναλήψιμο ή ασφαλές συμπέρασμα.

Όσον αφορά τα δείγματα της χειροκίνητης δοκιμής TIG, δεν είχε νόημα η κατασκευή καμπύλης για λόγους σύγκρισης, καθώς η σύνδεση ήταν

επάλληλη (lap joint) και επομένως η διατομή στο κέντρο του δοκιμίου (οπου βρίσκεται και η συγκόλληση) ήταν τουλάχιστον διπλάσια, επηρεάζοντας αντίστοιχα και τα αποτελέσματα της δοκιμής. Προκειμένου να είναι έγκυρα τα αποτελέσματα της δοκιμής, θα έπρεπε το δοκίμιο να προετοιμαστεί κατάλληλα με στόχο το δοκίμιο να έχει σε όλο του το μήκος το ίδιο πάχος. Αυτό δεν ήταν δυνατό διότι το έλασμα έχει πάχος 0,7 mm, που το καθιστά ακατάλληλο για τέτοιου είδους κατεργασία. Ενδεικτικά παρατίθενται τα αποτελέσματα των χειροκίνητων πειραμάτων με τη μέθοδο TIG, Πίνακας 4:

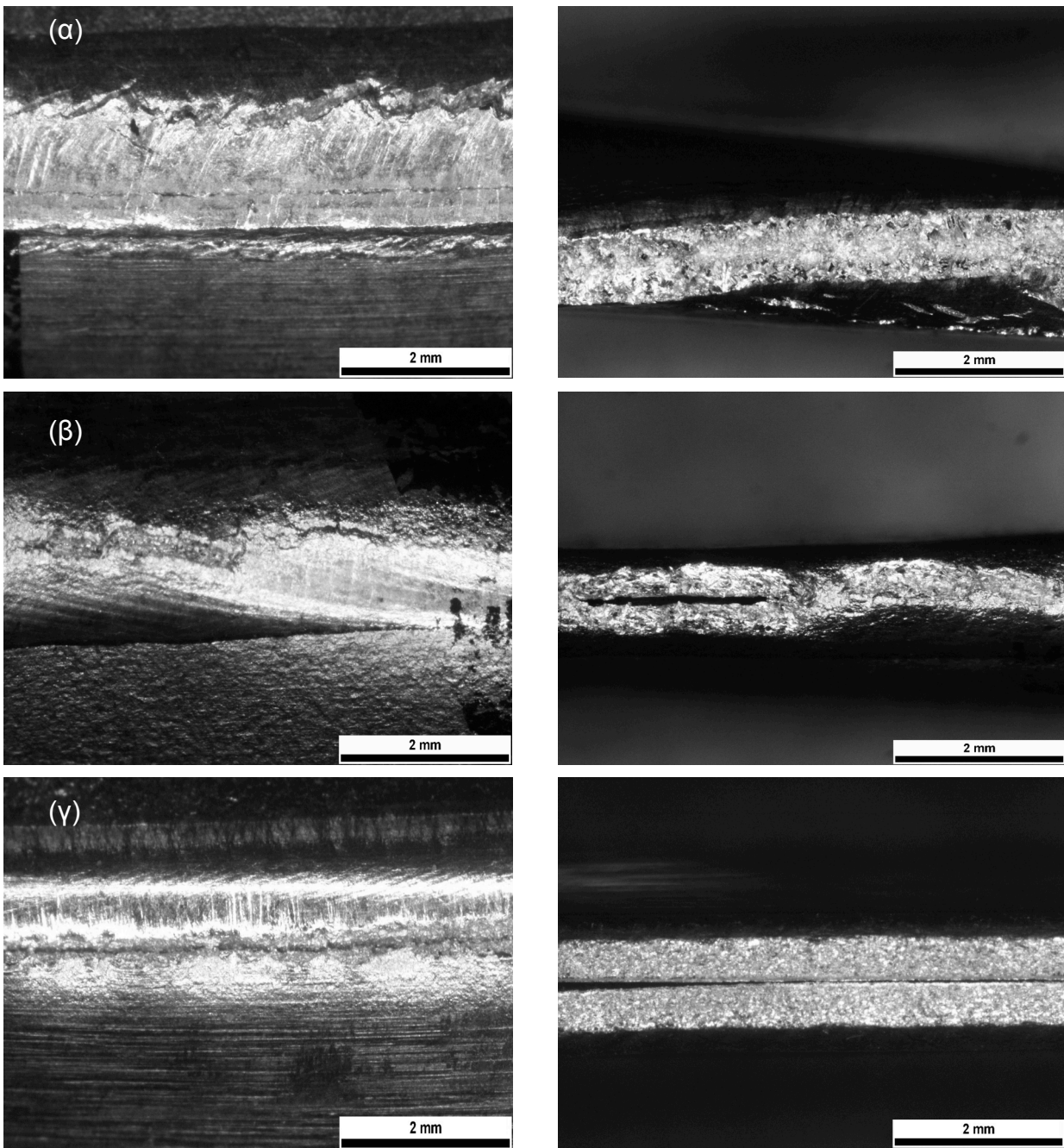
**Πίνακας 4: Αποτελέσματα Χειροκίνητων συγκολλήσεων ελασμάτων ZnTiCu με τη μέθοδο TIG**

Πάχος (mm)	Πλάτος (mm)	R <sub>p0.2%</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	Επιμήκυνση ε (%)
0,7	12,57	161,9	169,8	1,0
0,7	12,57	166,1	180,4	2,0

Τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων των χειροκίνητων συγκολλήσεων TIG είναι σε γενικές γραμμές αντίστοιχα με εκείνα των βιομηχανικών συγκολλήσεων. Η συνολική επιμήκυνση των δοκιμίων είναι ελάχιστη, παρόλο που η σύνδεση δεν παρουσίαζε κάποιο ελάττωμα.

### 3.2.2 Απλή δοκιμή κάμψης

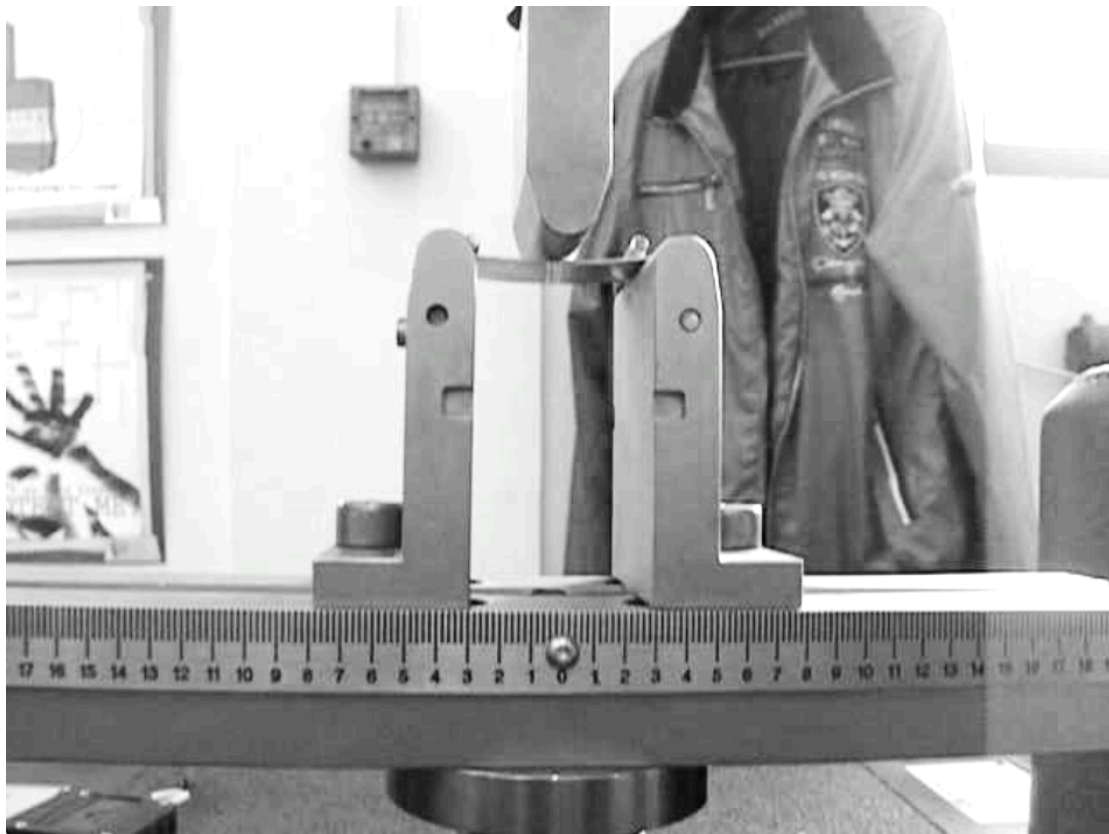
Προκειμένου να υπάρξει ολοκληρωμένη εικόνα για τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων, διεξήχθησαν δοκιμές κάμψης σε δοκίμια ίδιας κατασκευής με αυτά, που αναφέρονται παραπάνω, Πίνακας 3 (οι τομές έγιναν σε τυχαία σημεία των συγκολλήσεων και όχι στα A ως D). Οι γωνίες κάμψης ορίστηκαν στις 90 και 180 μοίρες αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής έδειξαν ότι όλα τα δοκίμια διερράγησαν σε γωνία μικρότερη των 90 μοιρών και έσπασαν εντελώς στις 180 μοίρες, Εικόνα 32



Εικόνα 32: Μικρογραφίες στερεοσκοπίου που απεικονίζουν τη ρηγμάτωση των δοκιμίων μετά απο κάμψη 90 μοιρών (αριστερά) και τη θραύση τους μετά από κάμψη 180 μοιρών (δεξιά). Τα δοκίμια κόπηκαν από τυχαία σημεία της συγκόλλησης των σωλήνων. (α) Δείγμα με αρχικές ρυθμίσεις συγκόλλησης (β) δείγμα με χαμηλό ρεύμα και ελαττωμένη παροχή αερίου, (γ) δείγμα με υψηλότερο Ti, προϊόν έλασης πλάκας (Ingot)

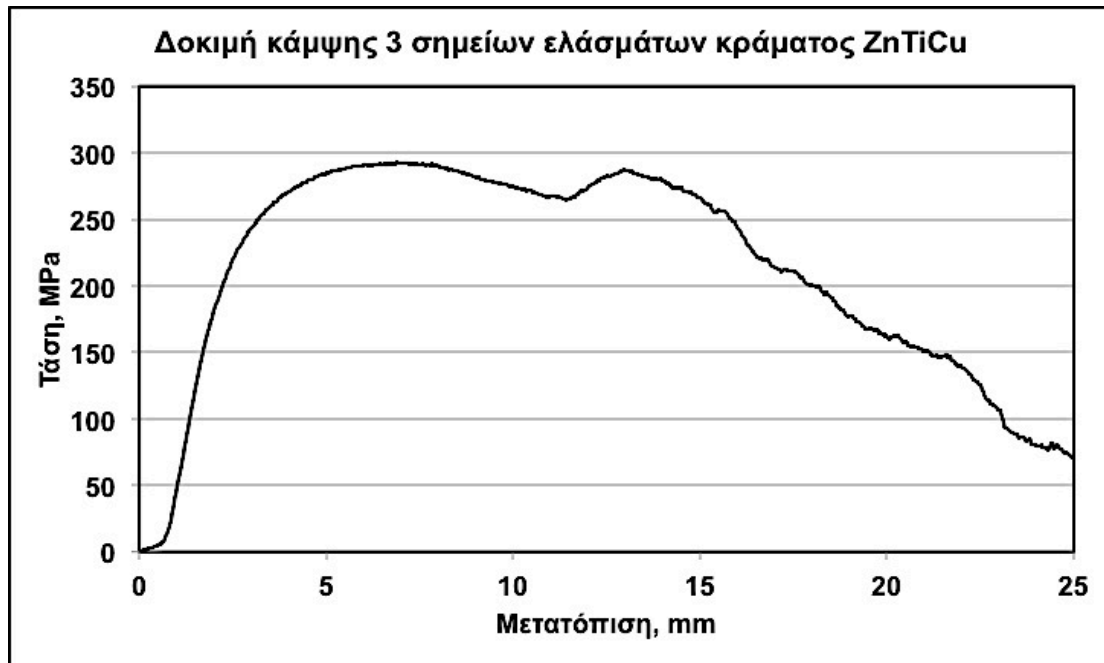
### 3.2.3 Δοκιμή κάμψης 3 σημείων

Εφόσον το σύνολο των δοκιμών διερράγη σε γωνία μικρότερη των 90 μοιρών, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει δοκιμή με δυνατότητα προσδιορισμού της γωνίας έναρξης της ρηγματώσης. Μια πιο εμπειριστατωμένη εικόνα για την αντοχή των συγκολλήσεων σε κάμψη είναι δυνατή μέσω της δοκιμής κάμψης 3 σημείων. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε ορθογώνια δοκίμια διαστάσεων 20mm x 50mm στη μηχανή INSTRON 5567 και σύμφωνα με το πρότυπο BS EN ISO 7438. Η ταχύτητα της δοκιμής ορίστηκε στα 30mm/min, Εικόνα 33

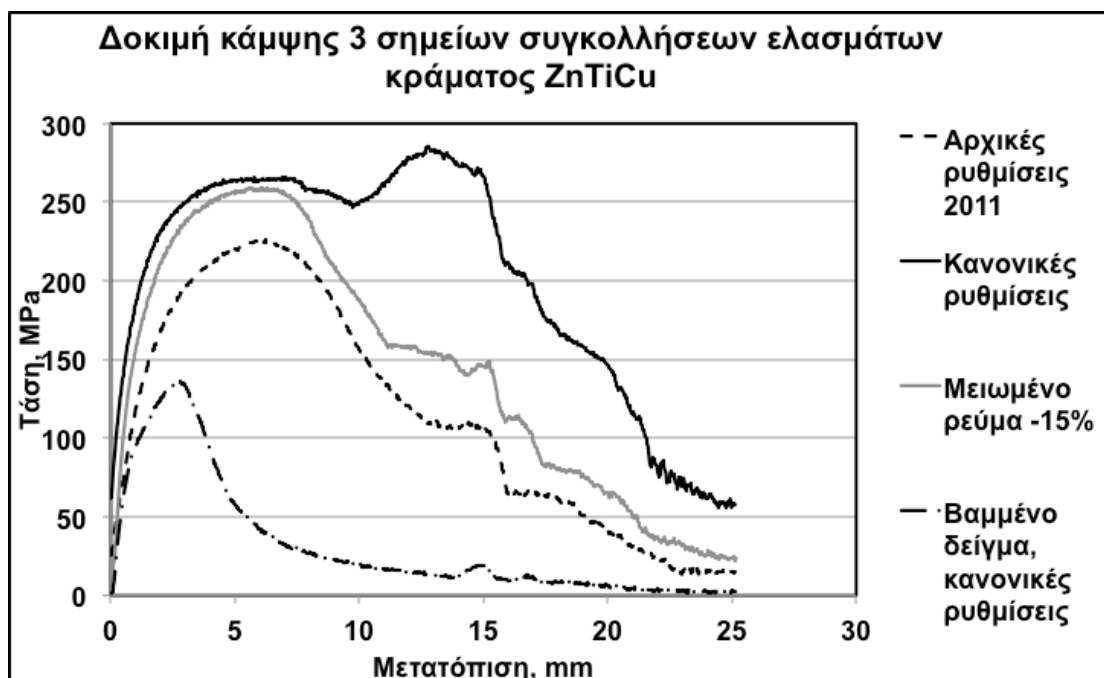


Εικόνα 33: Μηχανή κάμψης 3 σημείων INSTRON 5567 στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές

Τα αποτελέσματα των δοκιμών κάμψης 3 σημείων παρατίθενται παρακάτω, Εικόνα 34, Εικόνα 35:



Εικόνα 34: Καμπύλη τάσης - μετατόπισης από τη δοκιμή κάμψης 3 σημείων ελασματος ZnTiCu



Εικόνα 35: Καμπύλες τάσης – μετατόπισης συγκολλημένων ελασμάτων κράματος ZnTiCu



---

Γίνεται αντιληπτό ότι το μέταλλο βάσης δεν διαρρηγνύεται κατά τη δοκιμή, ακόμα και μετά την υπέρβαση της μέγιστης αντοχής του σε κάμψη (περίπου 290 MPa), συνεχίζει να ανθίσταται. Αντίθετα, οι συγκολλήσεις μετά τη μέγιστη αντοχή τους, διαρρηγνύονται και καταρρέουν πλήρως. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι συγκολλήσεις με τις βελτιωμένες συνθήκες σημείωσαν καλύτερες επιδόσεις στη δοκιμή σε σχέση με τις αρχικές του 2011.

Το βαμμένο δείγμα (δειγμα 13) είχε τη χειρότερη επίδοση στη δοκιμή κάμψης. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο από τη μεταλλογραφική εξέταση, αφού είχε διαπιστωθεί ότι η σύνδεση ήταν ανεπαρκής, Εικόνα 27.

Η αξιολόγηση των συγκολλήσεων ολοκληρώνεται με την παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope, SEM) των θραυσμένων δοκιμίων εφελκυσμού, προκειμένου να αναλυθεί η επιφάνεια θραύσης και να προσδιοριστεί το είδος της.

### 3.3 Εξέταση στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης

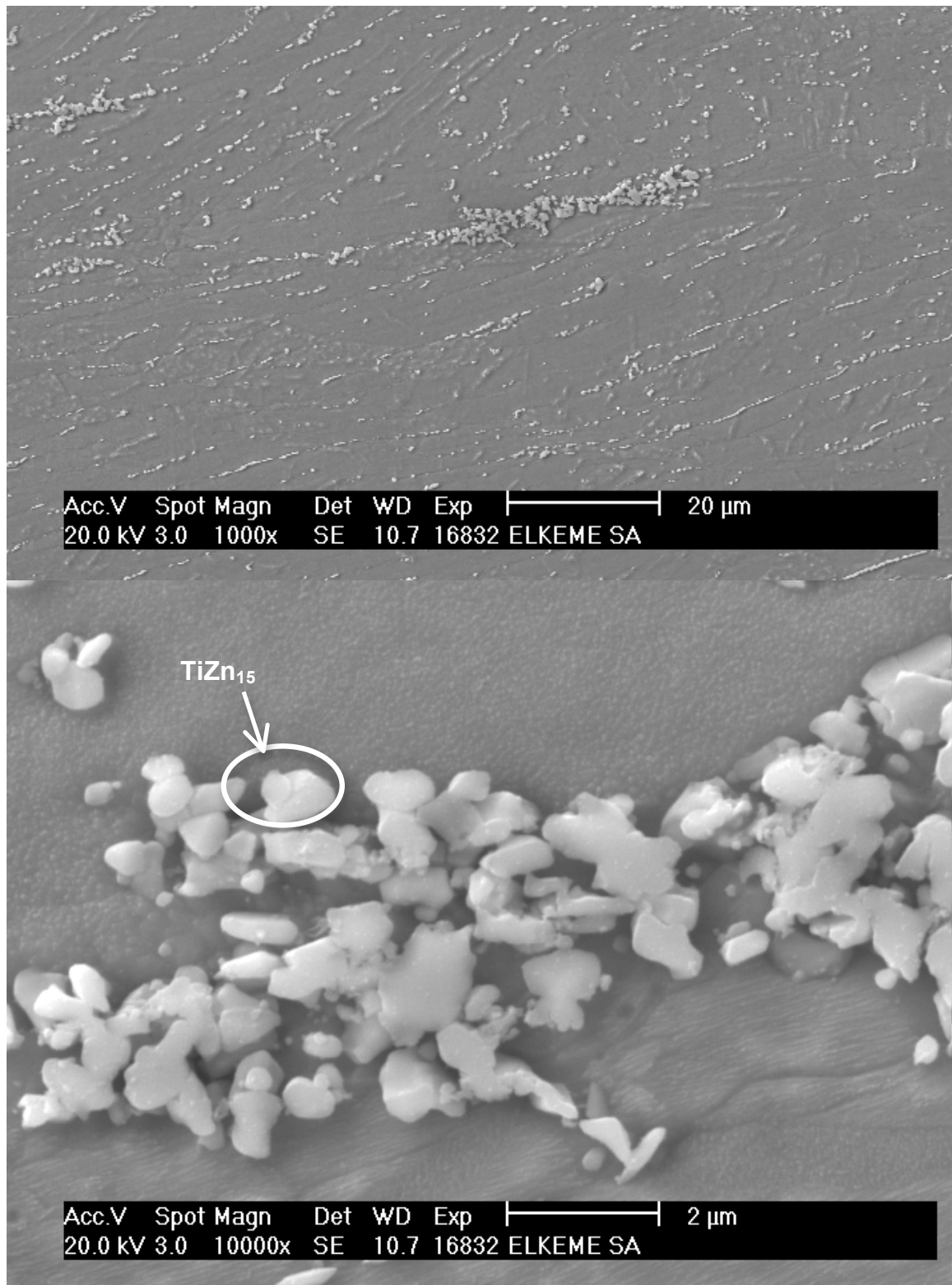
#### 3.3.1 Εξέταση του του μετάλλου βάσης

Κατά την εξέταση του μετάλλου βάσης προσδιορίστηκε το μέγεθος και η μορφολογία των κατακρημνισμάτων της μεσομεταλλικής ένωσης, και ταυτοποιήθηκε η χημική της σύσταση μέσω ανάλυσης EDS.

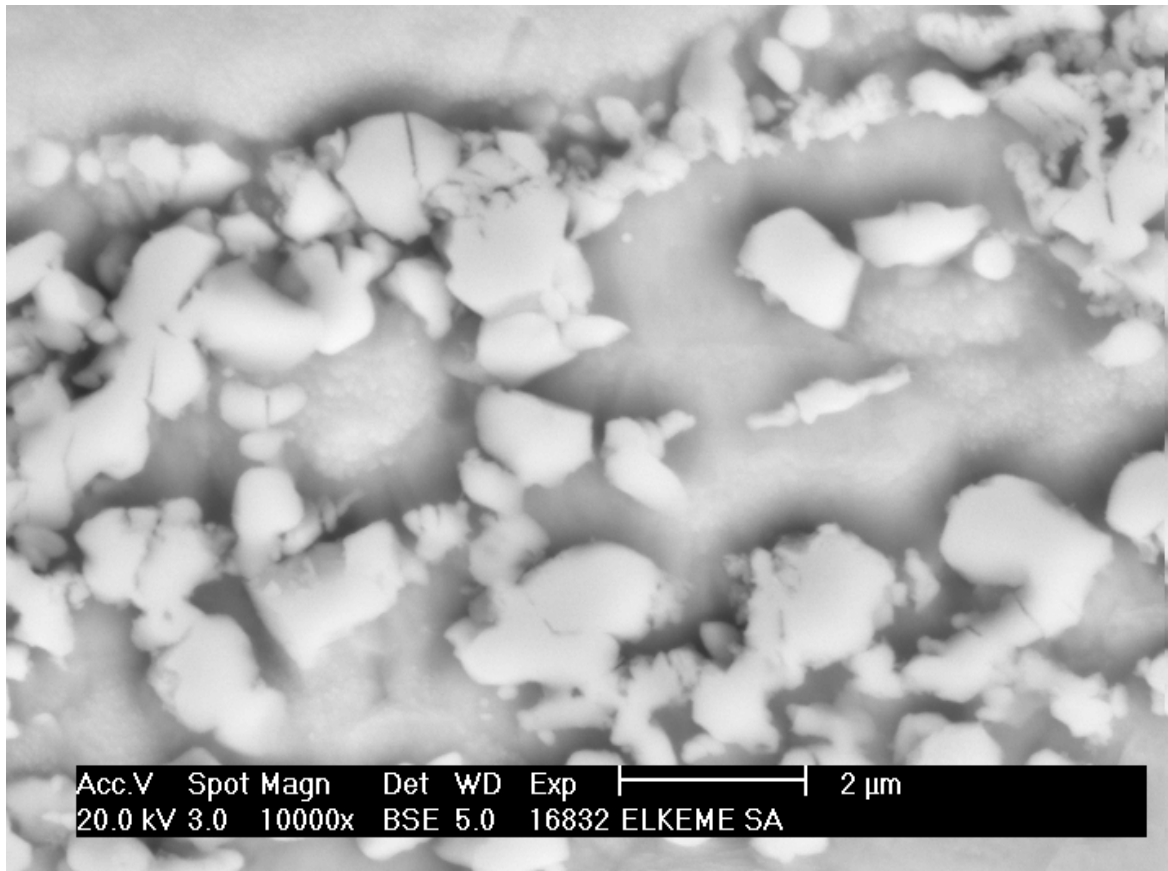
Η μεσομεταλλική ένωση παρατηρήθηκε να διατάσσεται σε φυλλίδια αλλά και σε σφαιρικά σωματίδια. Τα φυλλίδια ήταν υπαρκτά και στα δύο είδη ελασμάτων, αλλά ήταν εντονότερα στα ελάσματα που παρήχθησαν από έλαση πλάκας. Στα ελάσματα της συνεχούς χύτευσης παρατηρήθηκε μία ζώνη πολύ λεπτομερών σφαιρικών σωματιδίων κοντά στην επιφάνεια (0,5-1μm), αλλά πιά βαθειά τα σφαιρικά σωματίδια δίνουν τη θέση τους στα φυλλίδια.

Τα φυλλίδια ήταν πιά έντονα στην κεντρική περιοχή του ελάσματος, όπου παρατηρείται μακροδιαφορισμός, τόσο στα ελάσματα από έλαση πλάκας όσο και σε εκείνα από συνεχή χύτευση. Το φαινόμενο εμφανίζεται σε εντονότερο βαθμό στα ελάσματα από έλαση πλάκας. Τα σωματίδια της ένωσης  $TiZn_{15}$  στα φυλλίδια έχουν μέσο μέγεθος  $\sim 1\mu m$ .

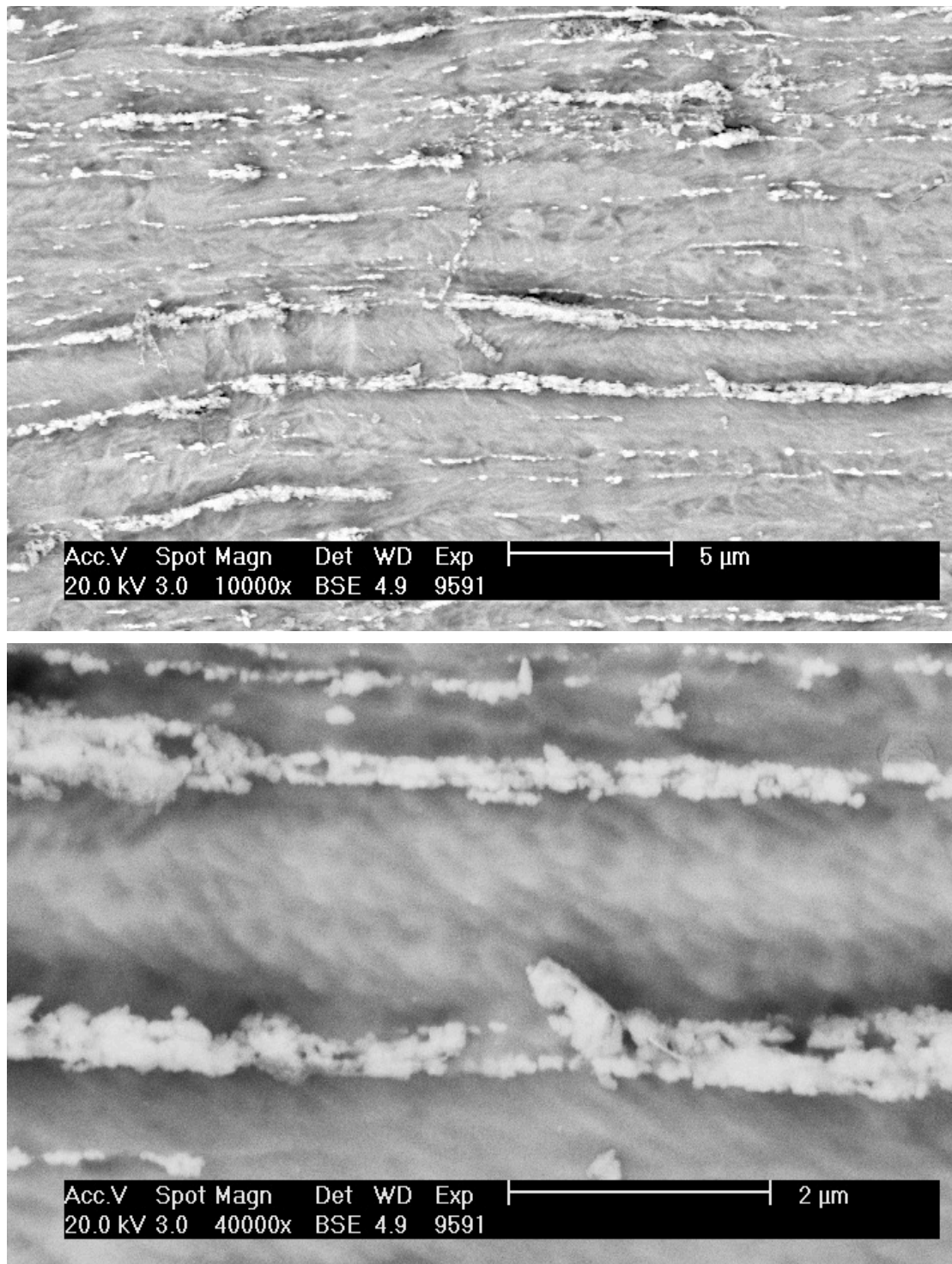
Τα φυλλίδια της ένωσης ακολουθούν τη φορά της έλασης, και διατάσσονται στη μήτρα του Zn ανεξάρτητα από τα όρια των κόκκων.



**Εικόνα 36:** Κατακρημνίσματα της μεσομεταλλικής ένωσης  $TiZn_{15}$  στην κέντρο του ελάσματος, όπου παρατηρείται μακροδιαφορισμός (centerline segregation). Εικόνες από τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Detector)



**Εικόνα 37: Κατακρημνίσματα της μεσομεταλλικής ένωσης  $TiZn_{15}$  στην κέντρο του ελάσματος, όπου παρατηρείται μακροδιαφορισμός (centerline segregation). Εικόνα από τον ανιχνευτή οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (Back-Scattered Electron Detector)**



**Εικόνα 38:** Κατακρημνίσματα της μεσομεταλλικής ένωσης TiZn<sub>15</sub> στο μέταλλο βάσης. Παρατηρείται η διάταξη της ένωσης σε φυλλίδια (stringers). Επίσης παρατηρούνται ζώνες ολίσθησης στο εσωτερικό των κόκκων του Zn, αποτέλεσμα της ψυχρής έλασης. Εικόνα από τον ανιχνευτή οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BSE Detector)



**Εικόνα 39:** Κατακρημνίσματα της μεσομεταλλικής ένωσης TiZn<sub>15</sub> σε μεγάλη μεγέθυνση. Τα σωματίδια είναι διεσπαρμένα, κατά τη διεύθυνση της έλασης, χωρίς να είναι συσσωματωμένα. Είναι ορατά τα όρια των κόκκων. Εικόνα από τον ανιχνευτή οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BSE Detector)

### 3.3.2 Εξέταση της επιφάνειας θραύσης των δοκιμών εφελκυσμού

Τα μέταλλα αστοχούν με διαφορετικούς τρόπους και για διαφορετικούς λόγους. Το να καθοριστεί η αιτία της αστοχίας είναι σημαντικό για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ενός υλικού. Τις περισσότερες πληροφορίες για την αιτία της θραύσης προσφέρει η ίδια η επιφάνεια θραύσης. Εκεί αποτυπώνονται όλα τα φαινόμενα που έλαβαν χώρα κατά την αστοχία του υλικού, αλλά και πριν από αυτή. Περιέχονται πληροφορίες για την ποιότητα κατασκευής του υλικού (πιθανά εγκλείσματα, ποιότητα μηχανουργικής κατεργασίας), για το ιστορικό φορτίσεων του πριν από την τελική φόρτιση που οδήγησε στην αστοχία καθώς επίσης και για περιβαλλοντικούς παράγοντες που μπορεί να έπαιξαν κάποιο ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα (π.χ. διάβρωση). Τα θραυσμένα δοκίμια εφελκυσμού εξετάστηκαν στη συνέχεια στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για να εξεταστεί η μορφολογία της επιφάνειας θραύσης και να διερευνηθούν οι μηχανισμοί της θραύσης (fracture modes).

Στο μέταλλο βάσης παρατηρήθηκε χαρακτηριστική μορφολογία όλκιμης θραύσης (Dimple rupture fracture mode). Ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί μέσω της συνένωσης μικροοπών (microvoid coalescence). Οι οπές πυρηνώνονται σε σημεία τοπικής ασυνέχειας της παραμόρφωσης (localised strain discontinuity), όπως σωματίδια άλλων φάσεων, εγκλείσματα, όρια κόκκων και σημεία συσσώρευσης διαταραχών. Οι οπές καθώς η παραμόρφωση του υλικού αυξάνεται, μεγαλώνουν, συνενώνονται και σχηματίζουν μία ενιαία επιφάνεια θραύσης. Χαρακτηριστικό της εμφάνισης της επιφάνειας αυτής είναι οι κοιλότητες (cup-like depressions), οι οποίες ονομάζονται dimples.

Όσον αφορά το μέγεθος των dimples, από την εξέταση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο προκύπτει ότι είναι ευμεγέθη, κάτι που σημαίνει ότι τα σημεία πυρήνωσής τους ήταν λίγα, επομένως δεν υπήρχαν στο υλικό πολλές περιοχές στις οποίες να υπάρχει η δυνατότητα πυρήνωσης μικροοπών, και αυτές που υπήρχαν ήταν αραιές, δίνοντας τους τη δυνατότητα να αναπτυχθούν και να συνενωθούν, όπως προβλέπεται από το μηχανισμό της όλκιμης θραύσης.

Όσον αφορά το σχήμα των dimples, παρατηρήθηκαν τόσο ισοαξονικά όσο και επιμηκυμένα. Τα επιμηκυμένα dimples είναι ένδειξη ύπαρξης διατμητικών τάσεων. Εκ πρώτης όψεως μπορεί κανείς να σκεφτεί ότι λόγω της φύσης της δοκιμής από την οποία προέκυψαν τα δοκίμια (καθαρός μονοαξονικός εφελκυσμός), είναι αδύνατη η εφαρμογή διατμητικών τάσεων. Παρόλα αυτά, κατά την πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου και τη δημιουργία λαιμού, παρατηρείται λέπτυνση στο πλάτος και στο πάχος του ελάσματος, η οποία δημιουργεί τις προϋποθέσεις για διατμητικές τάσεις (Triaxial stress state-shear fracture).

Εκτός από τα dimples, στην επιφάνεια θραύσης είναι εμφανή και τα επίπεδα ολίσθησης, απόδειξη της μεγάλης πλαστικής παραμόρφωσης που είχε το δείγμα του μετάλλου βάσης πριν τη θραύση.

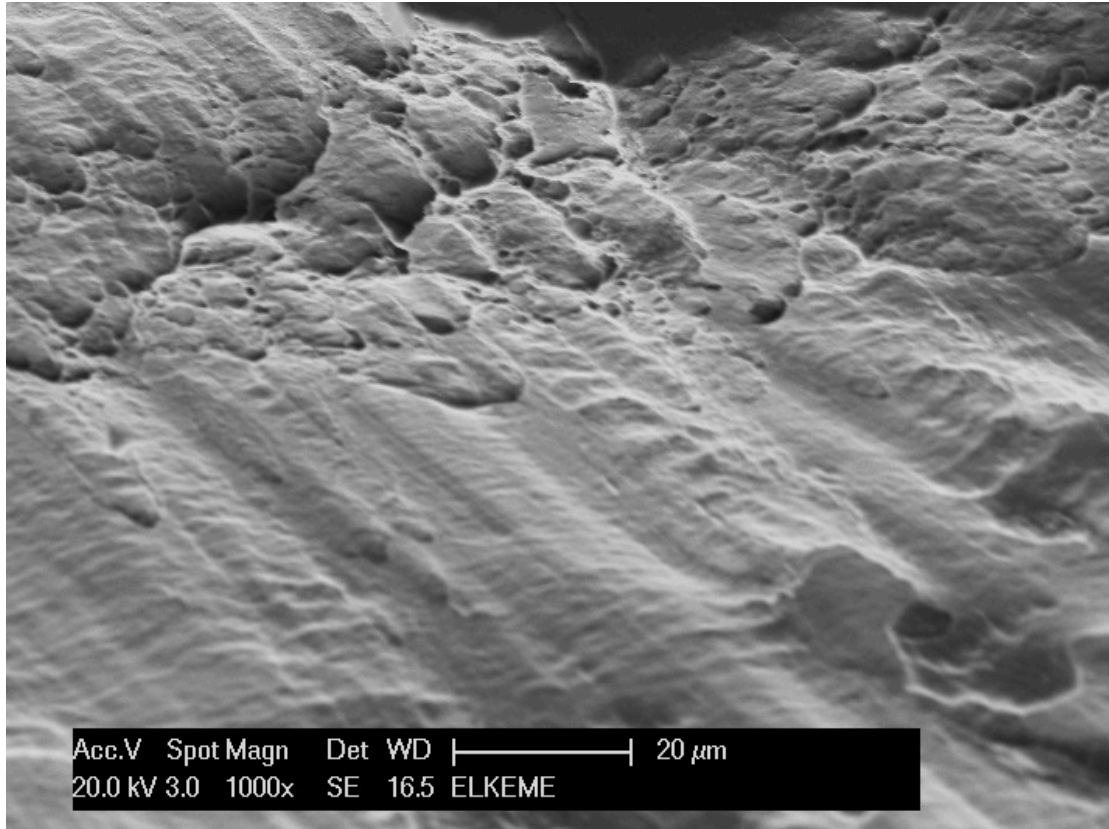
Σε αντίθεση με το μέταλλο βάσης, τα δείγματα των συγκολλήσεων παρουσίασαν μια εντελώς διαφορετική επιφάνεια θραύσης. Κοινό χαρακτηριστικό ήταν οι έντονοι σχισμοί (cleavages), χαρακτηριστικοί της ψαθυρής θραύσης.

Ο μηχανισμός της θραύσης με σχισμό είναι χαμηλής ενέργειας και προχωρά κατά μήκος καθορισμένων κρυσταλλικών επιπέδων, γνωστών ως επίπεδα σχισμού (cleavage planes). Θεωρητικά η επιφάνεια θραύσης με σχισμό είναι επίπεδη (featureless), αλλά στην πραγματικότητα τα βιομηχανικά κράματα είναι πολυκρυσταλλικά και περιέχουν ατέλειες όπως εγκλείσματα, όρια κόκκων, διαταραχές και αλλαγές κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού, τα οποία παρεμποδίζουν τοπικά την εξέλιξη της ρωγμής. Το αποτέλεσμα είναι μια επιφάνεια θραύσης με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως τα river patterns, feather markings, chevron patterns και tongues [10].

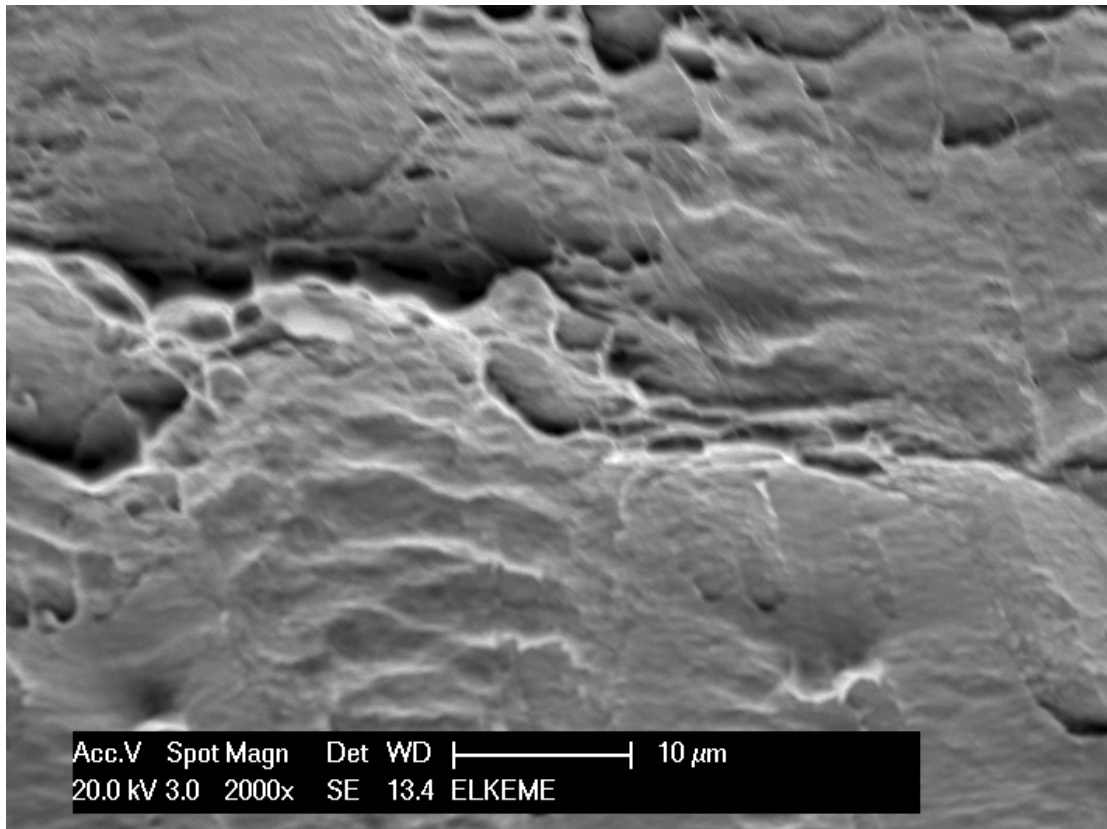
Στα δείγματα που εξετάστηκαν, κοινό χαρακτηριστικό ήταν ότι η ρωγμή εξελίχθηκε σε βαθμίδες, ακολουθώντας τα όρια των κόκκων και σε ορισμένες περιπτώσεις σχίζοντας τους κόκκους (περικρυσταλλική – διακρυσταλλική θραύση, intergranular – transgranular fracture). Διακρίνονται και



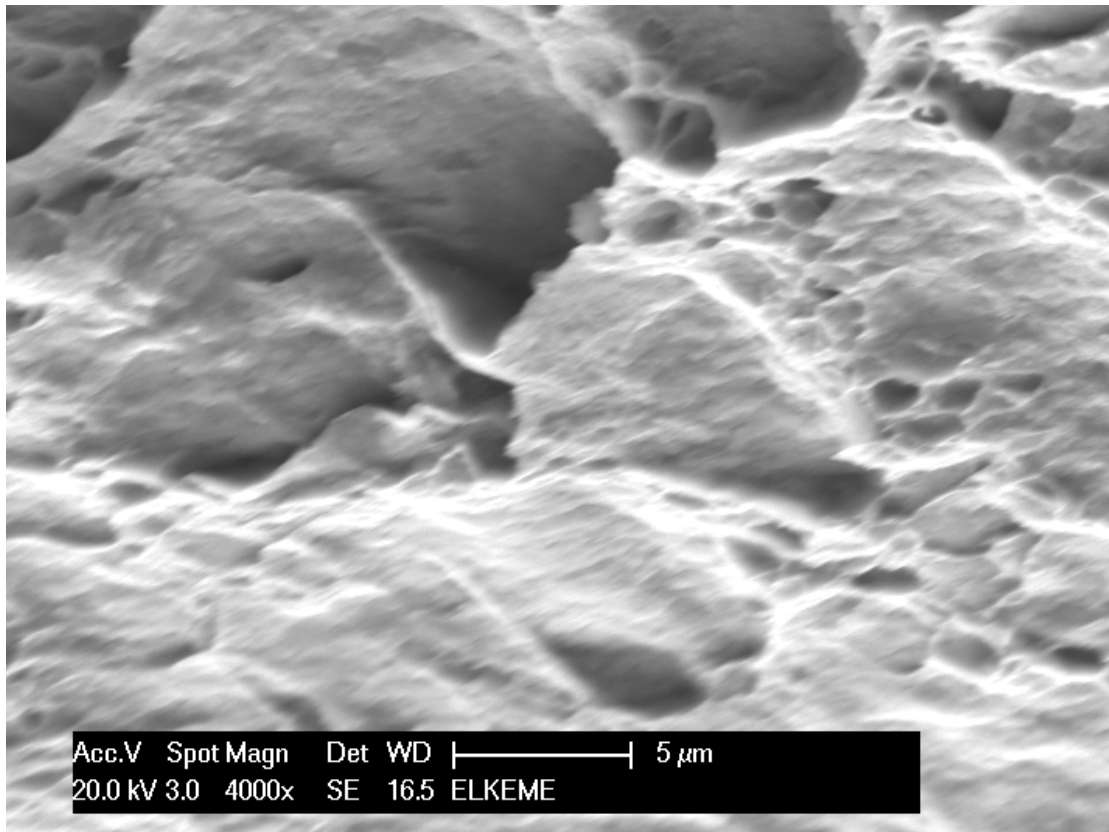
χαρακτηριστικές μορφολογίες της φαθυρής θραύσης, όπως είναι τα river marks, από τα οποία διαπιστώνεται η κατεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής, Εικόνα 47.



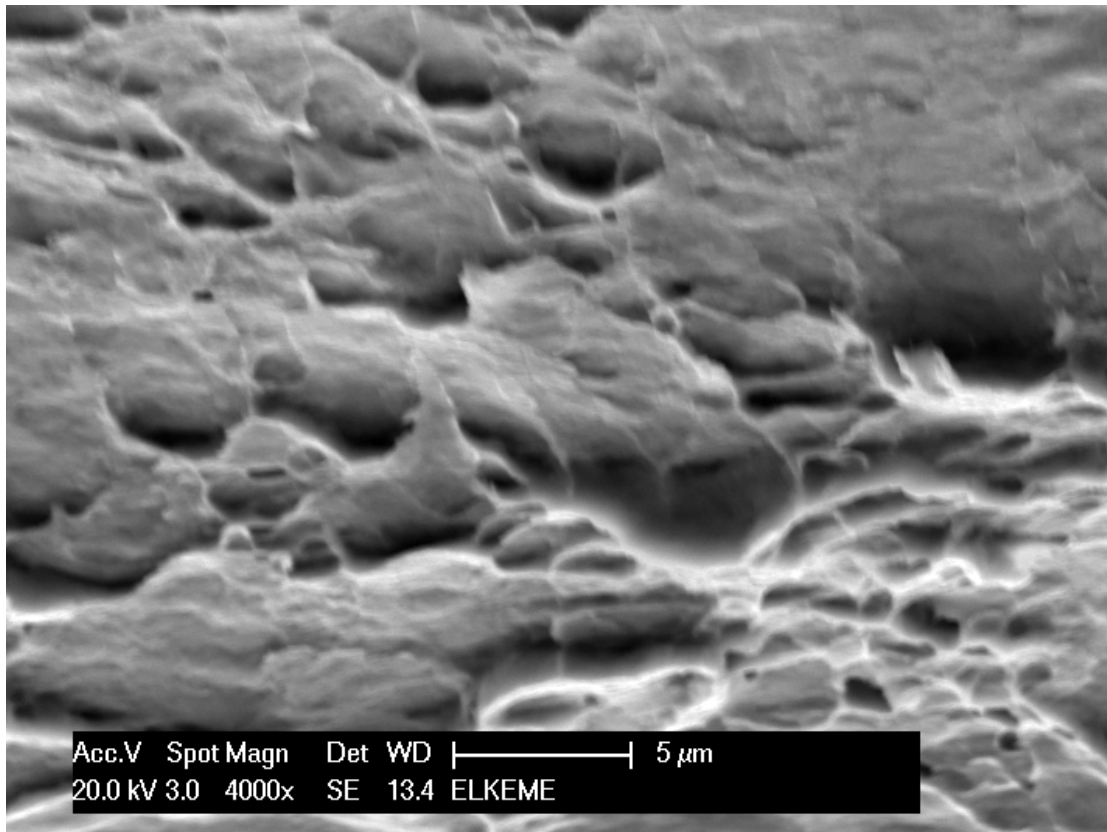
**Εικόνα 40:** Μικρογραφία της επιφάνειας θραύσης δείγματος εφελκυσμού του μετάλλου βάσης από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Είναι εμφανή ισοαξονικά και επιμήκη dimples καθώς και ένα επίπεδο ολίσθησης, χαρακτηριστικά της όλκιμης θραύσης. Φωτογραφία από τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Detector)



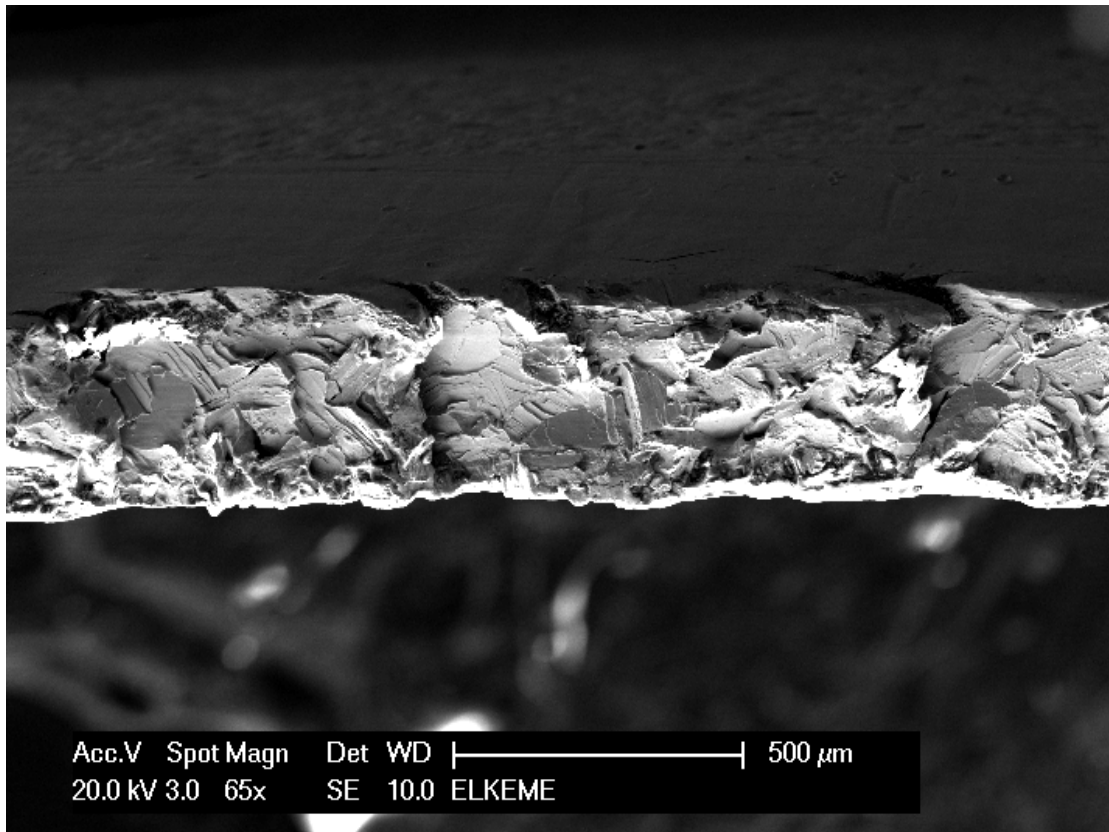
**Εικόνα 41:** Μικρογραφία της επιφάνειας θραύσης δείγματος εφελκυσμού του μετάλλου βάσης από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Είναι εμφανή μεγαλύτερα και μικρότερα dimples πυρηνωμένα κατά κύριο λόγο στα όρια των κόκκων, τα οποία έχουν συνενωθεί και έχουν δημιουργήσει ρωγμή. Φωτογραφία από τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Detector)



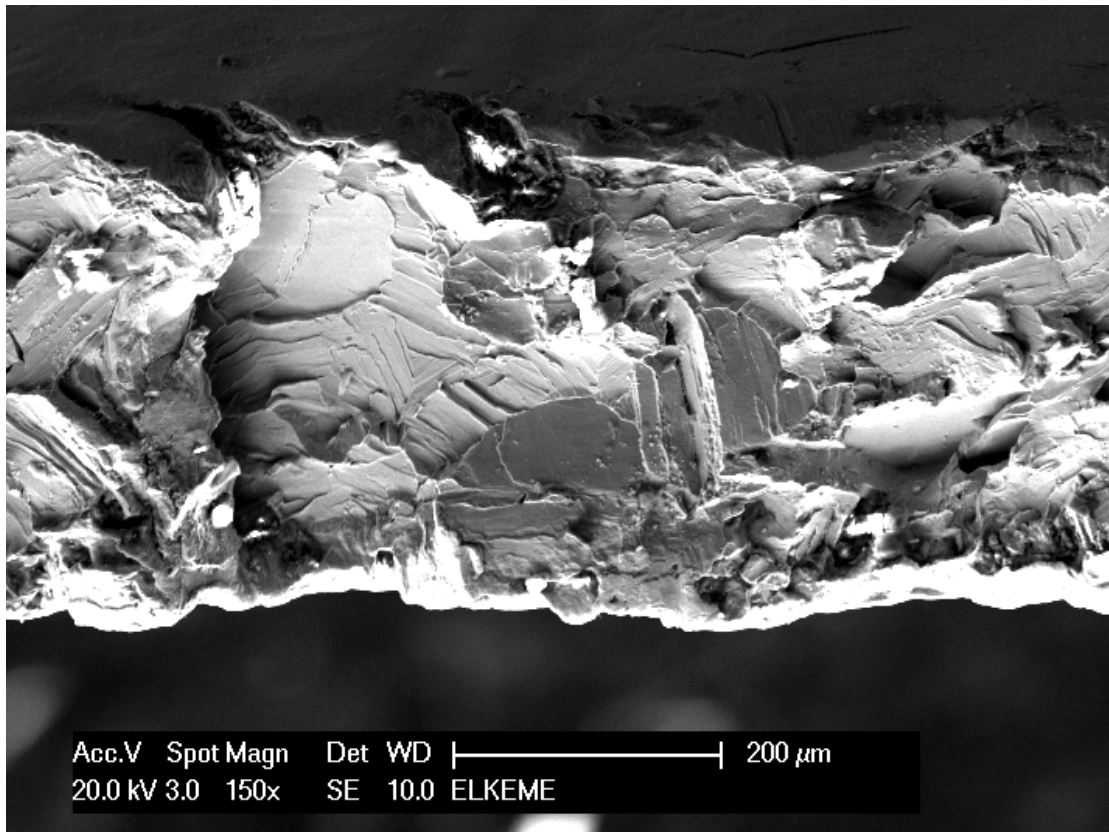
**Εικόνα 42:** Μικρογραφία της επιφάνειας θραύσης δείγματος εφελκυσμού του μετάλλου βάσης από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, σε ακόμα μεγαλύτερη μεγέθυνση. Είναι εμφανή μεγαλύτερα και μικρότερα dimples. Φωτογραφία από τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Detector)



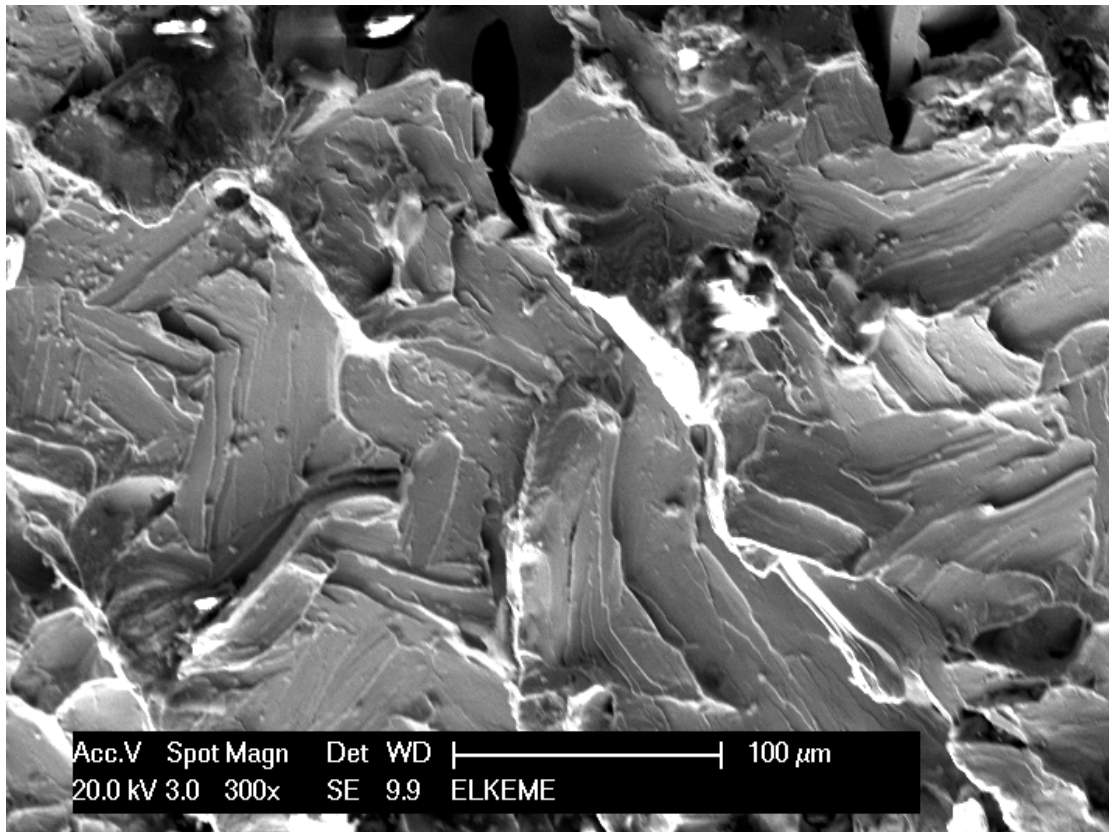
**Εικόνα 43:** Μικρογραφία της επιφάνειας θραύσης δείγματος εφελκυσμού του μετάλλου βάσης από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Είναι εμφανή επιμήκη dimples, ενδεικτικά της ύπαρξης διατμητικών τάσεων. Φωτογραφία από τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Detector)



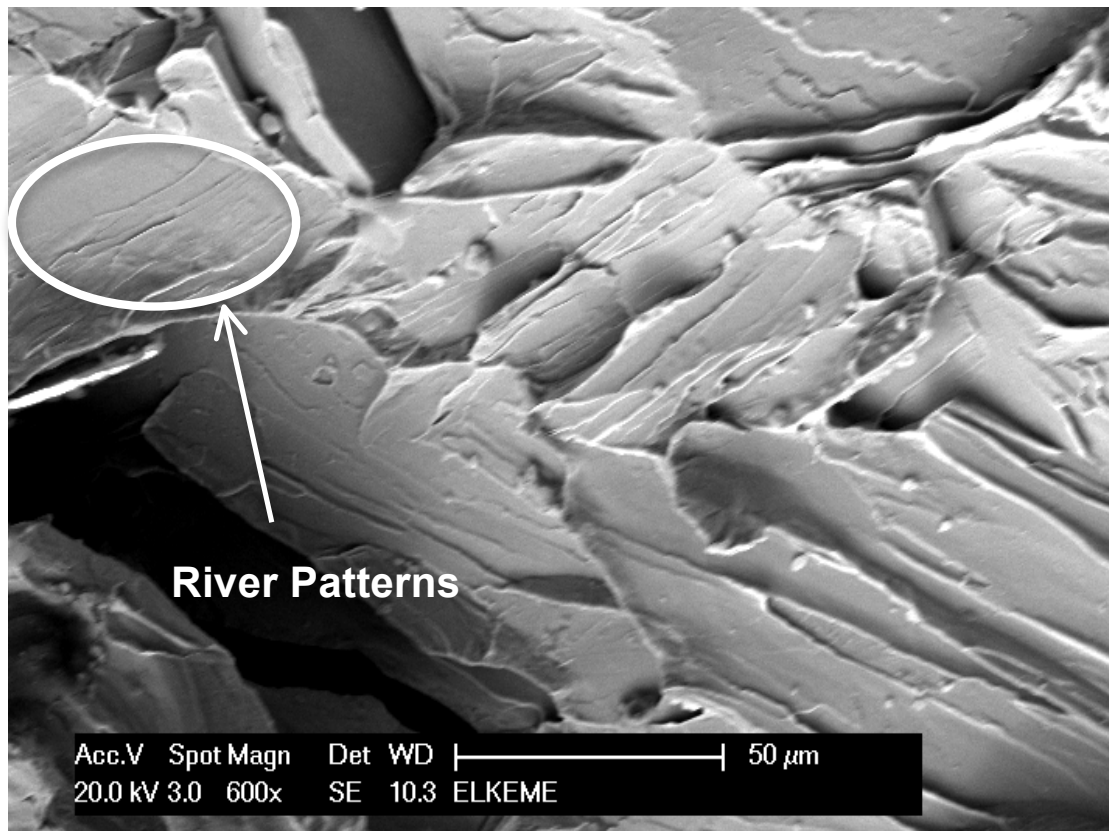
**Εικόνα 44:** Γενική άποψη της επιφάνειας θραύσης δείγματος εφελκυσμού συγκόλλησης από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η επιφάνεια θραύσης έχει μορφολογία μορισσανίδας ξύλου (ply-wood fracture). Φωτογραφία από τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Detector)



**Εικόνα 45:** Φωτογραφία της επιφάνειας θραύσης δείγματος εφελκυσμού συγκόλλησης από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Είναι εμφανή χαρακτηριστικά της θραύσης με σχισμό, όπως τα διαφορετικά επίπεδα προσανατολισμού και θραύσης. Φωτογραφία από τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Detector)



**Εικόνα 46:** Μικρογραφία της επιφάνειας θραύσης δείγματος εφελκυσμού συγκόλλησης από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Είναι εμφανή χαρακτηριστικά της θραύσης με σχισμό όπως τα river patterns. Φαίνονται επίσης αναλυτικά τα επίπεδα της θραύσης. Φωτογραφία από τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Detector)



Εικόνα 47: Μικρογραφία της επιφάνειας θραύσης δείγματος εφελκυσμού συγκόλλησης από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Είναι εμφανή χαρακτηριστικά της θραύσης με σχισμό όπως τα river patterns που καταδεικνύουν τη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής. Φαίνονται επίσης αναλυτικά τα επίπεδα της θραύσης. Φωτογραφία από τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Detector)



## 4. Συζήτηση για τα αποτελέσματα

Η τελική χρήση των προϊόντων καθορίζει τις απαιτήσεις ως προς τις μηχανικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών. Οι συνθήκες μορφοποίησης και συγκόλλησης επηρεάζουν τη δομική ακεραιότητα των τελικών προϊόντων.

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής μελετήθηκε η επίδραση της διακύμανσης κρίσιμων παραγωγικών παραμέτρων της συγκόλλησης στη δομική ακεραιότητα του τελικού προϊόντος, συγκεκριμένα σωλήνων κατασκευαστικής χρήσης (υδρορροές).

Παρά το γεγονός ότι στο παρελθόν μοναδικό κριτήριο της ποιότητας των συγκεκριμένων προϊόντων ήταν η στεγανότητα της συγκόλλησης, ο διεθνής ανταγωνισμός και οι απαιτήσεις κατά την εγκατάσταση έθεσαν υψηλότερα τον πήχη των μηχανικών αντοχών. Παρατηρήθηκε ότι κατά την εγκατάσταση υδρορροών οι σωλήνες έπρεπε να έχουν τη δυνατότητα να παραμορφώνονται προκειμένου να συνδέονται επιτυχώς και να ακολουθούν το σχήμα του κτηρίου. Για να γίνει κάτι τέτοιο εφικτό έπρεπε, όσον αφορά στους σωλήνες, να αυξηθεί η αντοχή του υλικού και η ολκιμότητα των συγκολλήσεων, καθώς κατά την εγκατάσταση συχνά αστοχούσαν. Όμως, ένα υψηλότερης αντοχής υλικό ήταν σκληρότερο και έφερε στο προσκήνιο νέους περιορισμούς, όπως για παράδειγμα τα προβλήματα ελαστικής επαναφοράς (springback) κατά τη διαμόρφωση.

Προκειμένου να σχεδιαστεί ένα υλικό από το οποίο να παράγεται ένα άριστο τελικό προϊόν θα πρέπει να συνεκτιμηθούν όλες οι παράμετροι που οδηγούν σε καλή διαμορφωσιμότητα και καλή συγκολλησιμότητα, αλλά και να βελτιστοποιηθούν οι αντίστοιχες διαδικασίες. Για το λόγο αυτό έγινε ανάλυση του υλικού και των συγκολλήσεων μέσω μεταλλογραφίας και μηχανικών ιδιοτήτων. Παράλληλα μέσω εργαστηριακών πειραμάτων και θεωρητικής προσέγγισης έγινε προσπάθεια κατανόησης των βιομηχανικών διαδικασιών

και του τρόπου με τον οποίο αυτές επιδρούν στη μικροδομή και στην αντοχή του τελικού προϊόντος.

Με αφετηρία τις παρατηρήσεις σε οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και τα αποτελέσματα του ελέγχου μηχανικών ιδιοτήτων, έγινε προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων αναφορικά με την ποιότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών, των συνθηκών συγκόλλησης και όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διεργασία.

Η μεταλλογραφική εξέταση αποκάλυψε στοιχεία στις μικροδομές, που υποδεικνύουν την πιθανότητα ύπαρξης ασταθών συνθηκών συγκόλλησης. Αυτό βασίζεται αρχικά στο γεγονός ότι συγκολλήσεις που προέκυψαν από την ίδια μηχανή με θεωρητικά τις ίδιες ρυθμίσεις είχαν διαφορετικό πλάτος και μικροδομή. Παρόλα αυτά εξήχθησαν συγκεκριμένα γενικά συμπεράσματα ως προς την κατεύθυνση που έπρεπε να ακολουθήσουν οι δοκιμές. Για παράδειγμα στην Εικόνα 15, την Εικόνα 16 και Εικόνα 17 υπάρχουν ενδείξεις για υπερβολική παροχή ρεύματος, γι' αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με λιγότερο ρεύμα (-15%) που οδήγησαν στο σαφώς βελτιωμένο αποτέλεσμα που αποτυπώνεται στην **Εικόνα 25**.

Κατά τη μεταλλογραφική εξέταση διαπιστώθηκε επίσης η ύπαρξη πολυάριθμων και συχνά ευμεγέθων πόρων, Εικόνα 17, **Εικόνα 19**, **Εικόνα 20**, Εικόνα 26. Οι πόροι περιέχουν αέρια τα οποία βρίσκονταν σε διάλυση στο λουτρό της συγκόλλησης και απελευθερώθηκαν κατά τη στερεοποίηση. Οι πόροι οφείλονται σε ακαθαρσίες στο μέταλλο βάσης, σε αντιδράσεις μεταξύ των συστατικών του ή σε ουσίες που βρίσκονται στην επιφάνειά του όπως λάδια, γράσσα, η κεριά. Αυτές οι ουσίες προστίθενται πολλές φορές σκόπιμα στην επιφάνεια του μετάλλου μετά το τέλος της έλασης προκειμένου να την προστατεύσουν από οξειδωση. Παρόλα αυτά συχνά έχουν την ιδιότητα να συγκρατούν υγρασία, η οποία διασπάται κατά τη συγκόλληση σε  $H_2$  και  $O_2$  λόγω του τόξου και μολύνει το λουτρό με  $H_2$ , το οποίο δημιουργεί πόρους και προκαλεί ψαθυροποίηση [4]. Λαμβάνοντας υπόψη το παραπάνω, κατά τις χειροκίνητες δοκιμές έγινε ιδιαίτερη προετοιμασία των επιφανειών με τη χρήση ακετόνης προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι ουσίες που μπορεί να

υπήρχαν στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα να μην παρατηρηθούν πόροι στις δοκιμές αυτές, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 12.

Εκτός από τις συνθήκες συγκόλλησης, οι ιδιότητες του μετάλλου βάσης επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα και μάλιστα σε διαφορετικά στάδια της παραγωγής του προϊόντος. Τέτοιες ιδιότητες είναι η διασπορά της β-φάσης ( $TiZn_{15}$ ), το μέγεθος του κόκκου, η σκληρότητα και η ανισοτροπία. Οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται από τη χημεία του κράματος (κυρίως από το ποσοστό του Ti) αλλά και από τη διαδικασία παραγωγής του (Continuous Casting, Ingot Metallurgy).

Η παραγωγή των σωλήνων περιλαμβάνει το στάδιο της μορφοποίησης του αρχικού ελάσματος στο επιθυμητό σχήμα και την συγκράτηση των προς σύνδεση τεμαχίων από ειδικό εργαλείο πριν τη συγκόλλησή τους. Τα ελάσματα σε όλες τις διαδικασίες μορφοποίησης μετά το τέλος της επιβολής φορτίου παρουσιάζουν επαναφορά (springback), τείνοντας να επανέλθουν στο αρχικό τους σχήμα. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι τυχόν εμφάνιση εκτεταμένης ελαστικής επαναφοράς οδηγεί σε προβλήματα στη συγκράτηση και κατ'επέκταση στη συγκόλληση, καθώς τα τεμάχια δεν εφάπτονται πλήρως και η συγκόλλησή τους δυσχεραίνει. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο διότι η συγκόλληση είναι αυτογενής. Η πιθανή χρήση μετάλλου προσθήκης μπορούσε ενδεχομένως να διορθώσει τέτοια ελαττώματα, αλλά θα είχε αρνητική επίδραση στην εμφάνιση του προϊόντος, η οποία λόγω της χρήσης του κρίνεται υψηλής σημασίας.

Η έκταση της ελαστικής επαναφοράς και η τελική απόκλιση του ελάσματος από την αρχική θέση συγκράτησης εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του ελάσματος. Κατά το σχεδιασμό της διαδικασίας μορφοποίησης των ελασμάτων πριν τη συγκόλληση λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένο επίπεδο μηχανικές ιδιότητες με στόχο να γίνει μια εκτίμηση της ελαστικής επαναφοράς του ελάσματος (springback) μετά την αφαίρεσή του από το καλούπι. Το τελευταίο οδηγεί σε αστάθεια του τόξου, διαφοροποίηση της πρόσδοσης θερμότητας, και, κυρίως, μεγαλώνει το πλάτος της ζώνης συγκολλησης προκαλώντας ταυτόχρονα λέπτυνση στο κέντρο της. Αυτή η λέπτυνση είναι

ένας από τους σημαντικότερους περιοριστικούς παράγοντες ως προς τις μηχανικές ιδιότητες και τη δομική ακεραιότητα του σωλήνα.

Εάν οι μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου βάσης δεν είναι σταθερές με το χρόνο, τότε η πρόβλεψη αυτή αποτυγχάνει και το παραγόμενο τεμάχιο δεν έχει το επιθυμητό σχήμα.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μηχανή συγκόλλησης τροφοδοτείται με ελάσματα από continuous casting αλλά και από ingot metallurgy, τα οποία έχουν διαφορετικές ιδιότητες, είναι πιθανό να χρειάζεται επανασχεδιασμός της μορφοποίησης και της συγκράτησης κατά τη συγκόλληση ή εξειδίκευση των παραμέτρων τους για κάθε μέταλλο βάσης ξεχωριστά.

Τα παραπάνω ενισχύει και η παρατήρηση διδυμιών στην μία πλευρά της βασαλτικής ζώνης των συγκολλήσεων. Η εμφάνιση διδυμιών στη μία πλευρά κυρίως της συγκόλλησης αποτελεί πιθανώς ένδειξη άνισης εφαρμογής δύναμης κατά τη συγκράτηση και ανομοιόμορφης ψύξης.

Οι διδυμίες προκύπτουν ως αποτέλεσμα εφαρμογής τάσεων, που επιφέρει παραμόρφωση του κρυστάλλου με μετατόπιση κρυσταλλογραφικών επιπέδων παράλληλα προς το επίπεδο διδυμίας με αποτέλεσμα τη συμμετρική απεικόνιση των ατόμων ως προς αυτό το επίπεδο. Η διδυμιακή παραμόρφωση δεν αποτελεί κύριο μηχανισμό παραμόρφωσης σε μέταλλα με πολλά συστήματα ολίσθησης, αλλά είναι πολύ σημαντικός μηχανισμός για μέταλλα του εξαγωνικού συστήματος μέγιστης πυκνότητας (HCP). Ο Zn είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα μετάλλου του HCP συστήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι διδυμίες είναι αποτέλεσμα έντονων τάσεων, οι οποίες εισήχθησαν στο υλικό κατά τη στερεοποίηση στην περιοχή της συγκόλλησης.

Συγκρίνοντας τη μεσομεταλλική ένωση  $TiZn_{15}$  σε ελάσματα συνεχούς χύτευσης και αυτών, που προέκυψαν από ingot, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μορφολογία και η κατανομή της είναι διαφοροποιημένη, Εικόνα 28. Τα προϊόντα της συνεχούς χύτευσης έχουν λεπτομερή και ομοιόμορφη κατανομή

σφαιρικών σωματιδίων της μεσομεταλλικής ένωσης, κάτι που επιτυγχάνεται μέσω της ραγδαίας απόψυξης που προσφέρει η μέθοδος. Δίχως τον απαραίτητο χρόνο, δεν προλαβαίνουν να συσσωματωθούν, καθώς η συσσωμάτωση είναι διαχυτικός μηχανισμός.

Τα ελάσματα που παρήχθησαν από έλαση πλάκας παρουσιάζουν έντονα ζωνώδη μορφή με την  $TiZn_{15}$  να διατάσσεται σε φυλλίδια κατά τη φορά της έλασης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε έντονος μακροδιαφορισμός της  $TiZn_{15}$  στο κέντρο του ελάσματος (centerline segregation), αποτέλεσμα του μηχανισμού της στερεοποίησης της πλάκας. Τα παραπάνω οδηγούν σίγουρα σε αύξηση της σκληρότητας του ελάσματος και σε πτώση της ολκιμότητας.

Παρόλα αυτά, συγκρίνοντας τις παραγόμενες από τα δύο ελάσματα συγκολλήσεις, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι οι συγκολλήσεις στο έλασμα από ingot metallurgy είχαν πιο λεπτομερή μικροδομή και ελαφρά αυξημένη αντοχή, παρόλο που το μέταλλο βάσης είναι χαμηλότερης ποιότητας συνολικά σε σχέση με εκείνο της συνεχούς χύτευσης. Μία πιθανή εξήγηση μπορεί να είναι η εξής:

Η συγκόλληση αποτελεί διαδικασία τήξης και επαναστερεοποίησης, η οποία επιφέρει παράλληλα και πλήρη διάλυση και επανακατακρήμνιση της μεσομεταλλικής ένωσης, η οποία αποκτά μορφολογία χονδρομερών φυλλιδίων. Το γεγονός αυτό αναιρεί πλήρως την επίδραση οποιωνδήποτε διεργασιών προηγούνται της συγκόλλησης στη ζώνη τήξης και μειώνει την αντοχή των συγκολλήσεων.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο σημείο της μετάβασης από το μέταλλο βάσης στη ζώνη τήξης, στο οποίο παρατηρείται η αλλαγή της μορφολογίας της  $TiZn_{15}$ . Το σημείο αυτό έχει μεγάλη πιθανότητα να παρουσιάσει ψαθυρότητα και η θραύση της συγκόλλησης να επέλθει εκεί. Στην Εικόνα 14 φαίνεται η διεπιφάνεια μεταξύ ζώνης τήξης και μετάλλου βάσης από χειροκίνητη συγκόλληση TIG, στην οποία είναι έκδηλο το φαινόμενο της αλλαγής της μορφολογίας της  $TiZn_{15}$ .

Παρόλα αυτά, οι συγκολλήσεις που δοκιμάστηκαν έσπασαν ακριβώς στη μέση και όχι στην περιοχή που περιγράφηκε παραπάνω. Αυτό αποδίδεται στους εξής παράγοντες: αρχικά οι συγκολλήσεις εμφάνισαν μια συνολική λέπτυνση στο κέντρο τους (όπως αναφέρθηκε παραπάνω) και ταυτόχρονα χονδρόκοκη μικροδομή (απουσία ισοαξονικής ζώνης). Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι το φορτίο που επιβάλλεται κατά τη δοκιμή να επιμερίζεται σε ελάχιστους κόκκους. Στους κόκκους αυτούς, λόγω του υπερβολικού φορτίου που επιβάλλεται ανα κόκκο, δεν προλαβαίνουν να ενεργοποιηθούν οι μηχανισμοί ολίσθησης και οι διδυμίες και έτσι το υλικό αστοχεί χωρίς καμία πλαστικότητα.

Η δυνατότητα παραμόρφωσης περιορίζεται επιπλέον από τη μεσομεταλλική ένωση, η οποία βρίσκεται στην επίμαχη περιοχή σε χονδρομερή φυλλίδια. Τα φυλλίδια της ένωσης είναι σκληρά και εμποδίζουν την απορρόφηση ενέργειας. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων αλλά και από την εξέταση των επιφανειών θραύσης των δοκιμίων του εφελκυσμού.

Το γεγονός ότι οι συγκολλήσεις στο έλασμα από Ingot Metallurgy είχαν λεπτότερη μικροδομή από τις αντίστοιχες στα ελάσματα από Continuous Casting μπορεί να αποδοθεί στην ιδιότητα της β-φασής να προκαλεί εκλέπτυνση κόκκου μέσω της παρεμπόδισης μετακίνησης των ορίων των κόκκων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το έλασμα από Ingot metallurgy είχε αυξημένο ποσοστό σε Τι σε σχέση με τα άλλα ελάσματα, είναι ακόλουθο να παράγει συγκολλήσεις με λεπτότερη μικροδομή και αυξημένη ισοαξονική ζωνη υπό τις ίδιες συνθήκες τα οποία να οδηγούν και σε μεγαλύτερη αντοχή του προϊόντος συνολικά.

## 5. Συμπεράσματα

Προκειμένου να σχεδιαστεί ένα υλικό από το οποίο να παράγεται ένα άριστο τελικό προϊόν θα πρέπει να συνεκτιμηθούν όλες οι παράμετροι που οδηγούν σε καλή διαμορφωσιμότητα και καλή συγκολλησιμότητα, αλλά και να βελτιστοποιηθούν οι αντίστοιχες διαδικασίες.

- Οι συγκολλήσεις που εξετάστηκαν επέδειξαν χαμηλή ολκιμότητα, αποτέλεσμα των παραμέτρων της συγκόλλησης και της ψαθυροποίησης που προκάλεσε η κατανομή της β-φάσης.
- Οι συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν με λιγότερο ρεύμα είχαν καλύτερη συμπεριφορά.
- Το δείγμα με αυξημένο Ti εμφάνισε λεπτομερή μικροδομή με εκτεταμένη ισοαξονική ζώνη. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι το Ti μπορεί να προκαλεί εκλέπτυνση κόκκου μέσω παρεμπόδισης μετακίνησης των ορίων των κόκκων.
- Από τις χειροκίνητες δοκιμές προέκυψε ότι μια πιθανή εφαρμογή της μεθόδου TIG κατά την εγκατάσταση δεν είναι δόκιμη, διότι οι ταχύτητες που απαιτούνται για επιτυχή σύνδεση είναι πολύ μεγάλες. Διακύμανση της ταχύτητας της χειροκίνητης συγκόλλησης και του μήκους του τόξου, οδηγεί σε σημαντικές αλλαγές στη μικροδομή, άρα και στο τελικό αποτέλεσμα της σύνδεσης του προϊόντος.
- Το μέταλλο βάσης της συνεχούς χύτευσης είναι από πλευράς μικροδομής ανώτερο από εκείνο της ημισυνεχούς, αλλά στην περίπτωση της βιομηχανικής συγκόλλησης είναι πιο αποτελεσματικό αυτό της ημισυνεχούς. Αυτό οφείλεται πιθανόν στο σχεδιασμό και την παραμετροποίηση της βιομηχανικής μηχανής συγκόλλησης.
- Η ποσότητα, η διασπορά και η κατανομή της β-φάσης επηρεάζει τη σκληρότητα και κατ' επέκταση τη διαμορφωσιμότητα των ελασμάτων, τυχόν διακύμανση σε κάτι από τα παραπάνω επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα των παραγόμενων τεμαχίων.
- Η αποτελεσματικότητα της συγκράτησης των τεμαχίων κατά τη συγκόλληση επηρεάζεται από τη σκληρότητα του ελάσματος.

- Τυχόν λάδια ή κεριά που προστίθενται μετά την έλαση στην επιφάνεια των ελασμάτων για προστασία από τη διάβρωση είναι πιθανό να προκαλούν πόρους στη συγκόλληση, διότι συγκεντρώνουν υγρασία.

Συνολικά, λαμβανοντας υπόψη και τα παραπάνω, η β-φάση είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την αντοχή και την ακεραιότητα της συγκόλλησης. Με την τήξη και επαναστερεοποίηση που προκαλείται κατά τη συγκόλληση, η β-φάση αναδιατάσσεται και προκαλεί ψαθυροποίηση. Δεν είναι δυνατή η επαναδιαλυτοποίησή της μέσω θερμικής κατεργασίας διότι διαλυτοποιείται 2 βαθμούς κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του κράματος. Επιπλέον, καθώς η β-φάση σκληραίνει το μέταλλο βάσης, επηρεάζει τη διαμορφωσιμότητά του και την ακρίβεια της συγκράτησής του κατά τη συγκόλληση. Η κακή συγκράτηση προκαλεί συγκολλήσεις με λέπτυνση στο κέντρο που αστοχούν ευκολα. Τέλος, προτείνεται η δοκιμή μεθόδων συγκόλλησης που συνδέουν με τη μικρότερη δυνατή πρόσδοση θερμότητας, με στόχο την παραγωγή λεπτόκοκκων συγκολλήσεων με λεπτομερή κατανομή της β-φάσης.



## 6. Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Ν. Χαιδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία, εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2007
- [2] “Environmental effects of zinc run off from roofing materials of different ages as a result of atmospheric corrosion” I. Odnevall Wallinder, P. Verbiest, C.R. Jansen, C Leygraf – 14th International Corrosion Congress 1999, South Africa
- [3] E. Gebhardt; Zink Metallkunde; Vol. 33, p 355 Germany 1941
- [4] Γ. Παπαδημητρίου, Εισαγωγή στην τεχνολογία και τον έλεγχο των συγκολλήσεων; Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1990
- [5] Γ. Δ. Παπαδημητρίου, Γενική Μεταλλογνωσία Ι και ΙΙ; Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1993
- [6] Γ. Αντωνόπουλος, Μέταλλα και Άλλα Υλικά; University Studio Press, Θεσσαλονίκη 1991
- [7] G. Pantazopoulos, A. Sampani; Analysis of a weld failure of a rolled Zn-alloy strip – A case study, Engineering Failure Analysis, Volume 14, 2007
- [8] ASM Metals Handbook, Welding and Joining
- [9] ASM Metals Handbook, Metallography and Microstructures
- [10] ASM Metals handbook Fracture analysis
- [11] ASM Metals handbook, Mechanical testing
- [12] ASM Metals Handbook, Non Ferrous Alloys
- [13] J.A.Spittle, Metallography Vol. 5, Cardiff 1972
- [14] E.H.Renhack; Redetermined zinc rich portion of the Zn-Ti system; Trans. Metallurgical Society; AIME Vol. 236, p 1441, ΗΠΑ 1966
- [15] J. Lecompte-Beckers, G. Walmag; Microstructural study of high strength rolled Zn-Cu-Ti alloys; Micron and Microscopica Acta; Vol.18, No. 3 pp 241-242, Great Britain 1987
- [16] D. Soares, C Vilarinho, F. Castro; Contribution to the Knowledge of the Cu-Zn-Ti system for compositions close to Brass alloys, Scandinavian Journal of Metallurgy 2001, Vol. 30 pp 254-257, Denmark 2001
- [17] London Metal Exchange, <http://www.lme.com/zinc> επίσκεψη στις 10.05.12
- [18] G. Pantazopoulos, A. Vazdirvanidis; Analysis of Bending Failure of Zn alloy sheet, πρακτικά 3ου συνεδρίου μεταλλικών υλικών σ.567-572, 12.2007
- [19] BS EN 988:1997; “Zinc and Zinc Alloys – Specification for rolled flat products for building” CEN; Brussels, Belgium 1996
- [20] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής; Επιστήμη και Τεχνολογία των μεταλλικών υλικών; Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996
- [21] D.F.Bahr, D.E. Kramer, W.W. Gerberich; Non linear Deformation mechanisms during nanoindentation; Acta materialia 1998; 46:3605-17
- [22] S.H. Lim, J.Washburn, Z.L.Weber; Transmission Electron Microscopy of

---

Threading dislocations in ZnO films grown in sapphire, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol.19 p2601-2605, 2001

- [23] A. Berghezan, A. Fourdeux, S. Amelinckx; Transmission Electron Microscopy studies of dislocations and stacking faults in a Hexagonal metal: Zinc, *Acta Metallurgica*, Vol 9, 1961
- [24] K. Kammer; *Aluminium Handbook*, Vol 1, Fundamentals and materials; Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, Düsseldorf 1999
- [25] <http://www.struers.com> επίσκεψη ιστοτόπου στις 04.07.2012
- [26] J. Hinojosa-Torres, S. M. Durán-Guerrero, J. M. Aceves-Hernández, Víctor M. Castaño-Meneses; Crystalline phases and granular structure of TIG - welded Zn–22Al–2Cu alloy plates, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 198, p162–167, 2008
- [27] T.Kumar, V. Balasubramanian, M.Y. Sanavullah; Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy, *Materials & Design*, Vol 28, Issue 7, p 2080-2092, 2007
- [28] J.J.Funderberger, M.J.Philippe, F.Wagner, C.Esling; Modelling and prediction of mechanical properties for materials with hexagonal symmetry; *Acta Materialia* Vol.45 p4041-4055, 1997
- [29] J.Spittle; Lammellar and rod morphologies in the TiZn<sub>15</sub> eutectic, *Metallography*; p115-121, 1973
- [30] T. Khaled; *An Outsider look at Friction Stir Welding*; California 2005
- [31] Χ.Παναγόπουλος; *Τεχνολογία επιφανειών*; Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ;
- [32] Ι. Μουλακάκη, Μελέτη της επίδρασης των θερμικών κατεργασιών στη μηχανική συμπεριφορά και τη μικροδομή φύλλων κράματος ZnTiCu, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2007