

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΡΓΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ
ΣΕ ΦΙΑΛΕΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6061**

ΜΠΛΕΤΣΑ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:
ΚΑΜΟΥΤΣΗ ΕΛΕΝΗ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2021

© 2021 Χριστίνα Μπλέτσα

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα. (Ν. 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Πρώτος Εξεταστής :
(Επιβλέπουσα)

Δρ. Καμούτση Ελένη
Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής :

Δρ. Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόρης
Καθηγητής Φυσικής Μεταλλουργίας - Ανάπτυξης Κραμάτων &
Σύγχρονων Κατεργασιών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής :

Δρ. Παντελής Δημήτριος
Καθηγητής Στοχαστικών Προτύπων Επιχειρησιακής Έρευνας
στη Βιομηχανική Διοίκηση
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή ολοκληρώθηκε στο πλαίσιο της μερικής εκπλήρωσης των απαιτήσεων για το βαθμό του Διπλώματος Μηχανολόγων Μηχανικών στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Δρ. Ελένη Καμούτση, της οποίας η τεχνογνωσία ήταν απαραίτητη για να διαμορφωθεί το θέμα έρευνας και συγκεκριμένα η μεθοδολογία για την διεκπεραίωσή του. Όποτε ήθελα να επικοινωνήσω μαζί της ήταν εκεί για να μου δίνει πολύτιμες συμβουλές τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό κομμάτι που οδήγησαν στην ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές Χαϊδεμενόπουλο Γρηγόρη και Παντελή Δημήτριο που δέχτηκαν να είναι στην επιτροπή εξέτασης της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Τέλος, Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τους γονείς μου, οι οποίοι υπήρξαν στήριγμα για μένα και στους οποίους οφείλω όλη τη διαδρομή των σπουδών μου, μέχρι σήμερα.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	14
2.1 Κράματα Αλουμινίου	15
2.1.1 Μη θερμικώς κατεργαζόμενα κράματα.....	15
2.1.2 Θερμικώς κατεργαζόμενα κράματα.....	16
2.1.3 Ο ρόλος των κραματικών στοιχείων	16
2.2 Κατεργασίες κραμάτων Αλουμινίου	18
2.2.1 Καταστάσεις θερμικής κατεργασίας κραμάτων Al (tempers)	18
2.2.2 Κατεργασίες κραμάτων Αλουμινίου	18
2.3 Θερμική Κατεργασία Ισχυροποίησης.....	19
2.3.1 Τεχνητή Γήρανση για τα κράματα Al6061	20
2.3 Διάβρωση Κραμάτων της σειράς 6xxx	20
2.3.1. Μηχανισμός της ρήγματωσης λόγω εργοδιαβρωσης (SCC)	21
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	26
3.1 Υλικό προς μελέτη.....	26
3.2 Δοκιμές για την εκτίμηση της ευαισθησίας στη περικρυσταλλική διάβρωση.....	26
3.2.1 Γενική Αρχή	26
3.2.2 Λήψη δοκιμών.....	27
3.2.3 Προετοιμασία της επιφάνειας των δοκιμών	28
3.2.4 Προετοιμασία του διαβρωτικού διαλύματος.....	28
3.2.5 Προετοιμασία δοκιμών για εξέταση.....	29
3.3 Δοκιμή για την εκτίμηση της ευαισθησίας στην εργοδιάβρωση	30
3.3.1 Γενική αρχή.....	30
3.3.2 Λήψη δοκιμών.....	30
3.3.3 Μεθοδολογία της δοκιμής.....	31
3.3.3.1 Προετοιμασία του διαβρωτικού διαλύματος.....	31
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	34
4.1 Αποτελέσματα δοκιμής περικρυσταλλικής διάβρωσης	34
4.2 Αποτελέσματα δοκιμής εργοδιάβρωσης.....	97
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	106
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Σχηματικά διαγράμματα που απεικονίζουν τις πιο συνηθισμένες τοποθεσίες έναρξη ρωγμών σε SCC.....	23
Εικόνα 2: Επιφάνεια θραύσης SEM που δείχνει εκκίνηση ρωγμών από τρήμα διάβρωσης σε (α) εξαρτήματα αεροσκαφών μαρτενσιτικού-χάλυβα υψηλής αντοχής [2], και (β) μεταλλογραφία που δείχνει έναρξη ρωγμών από μια φάση πλούσια σε Mn πλούσιο σε κράμα Mn-Cu (Sonoston) που χρησιμοποιείται για υποβρύχιες προπέλες [2].	23
Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει ορισμένα χαρακτηριστικά του cleavage SCC. Οι κύριες όψεις είναι συχνά παράλληλες με {100} ή {110} επίπεδα μέσα υλικά fcc. (Dickson et al. [29]).	24
Εικόνα 4: Τοποθεσία λήψης δοκιμών για το πείραμα της περικρυσταλλικής διάβρωσης.....	27
Εικόνα 5: Διαστάσεις και σχήμα δοκιμών	27
Εικόνα 6: Λήψη δοκιμών	31
Εικόνα 7: Δοκίμια υπό τάση.....	31
Εικόνα 8: Συντελεστής διόρθωσης z.....	33
Εικόνα 9: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 1 ^ο δοκίμιο (AB1), α, β, γ και δ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 1 ^ο δοκίμιο (AB1), ε και ζ.....	37
Εικόνα 10: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 1 ^ο δοκίμιο (AB1), α έως και ζ.....	38
Εικόνα 11: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 2 ^ο δοκίμιο (AB2), α. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 2 ^ο δοκίμιο (AB2), β έως και ζ.	39
Εικόνα 12: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 2 ^ο δοκίμιο (AB2), α έως και δ.	40
Εικόνα 13: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 3 ^ο δοκίμιο (AB3), α, β και γ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 3 ^ο δοκίμιο (AB3), δ, ε και ζ.....	41
Εικόνα 14: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 3 ^ο δοκίμιο (AB3), α έως και ζ.....	42
Εικόνα 15: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 4 ^ο δοκίμιο (AB4), α έως και ζ.....	43
Εικόνα 16: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 4 ^ο δοκίμιο (AB4), α. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 4 ^ο δοκίμιο (AB4), β έως και ζ.	44
Εικόνα 17: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 4 ^ο δοκίμιο (AB4), α, β και γ.	45
Εικόνα 18: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 1 ^ο δοκίμιο (AC1), α και β. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 1 ^ο δοκίμιο (AC1), γ έως και ζ.....	47
Εικόνα 19: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 1 ^ο δοκίμιο (AC1), α έως και γ.....	48

Εικόνα 58: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 3 ^ο δοκίμιο (BT3), α έως και γ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 3 ^ο δοκίμιο (BT3), δ έως και ζ.	91
Εικόνα 59: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 3 ^ο δοκίμιο (BT3), α, β και γ.	92
Εικόνα 60: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 4 ^ο δοκίμιο (BT4), α έως και ζ.	93
Εικόνα 61: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 4 ^ο δοκίμιο (BT4), α και β. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 4 ^ο δοκίμιο (BT4), γ έως και ζ.	94
Εικόνα 62: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 4 ^ο δοκίμιο (BT4), α έως και γ.	95
Εικόνα 63: Δοκίμιο A1 Εσωτερική επιφάνεια.....	97
Εικόνα 64: Δοκίμιο A1 Εξωτερική επιφάνεια	97
Εικόνα 65: Δοκίμιο A1 Πάνω επιφάνεια.....	97
Εικόνα 66: Δοκίμιο A1 Κάτω επιφάνεια	97
Εικόνα 67: Δοκίμιο A2 Εσωτερική επιφάνεια.....	98
Εικόνα 68: Δοκίμιο A2 Εξωτερική επιφάνεια	98
Εικόνα 69: Δοκίμιο A2 Πάνω επιφάνεια.....	98
Εικόνα 70: Δοκίμιο A2 Κάτω επιφάνεια	98
Εικόνα 71: Δοκίμιο A3 Εσωτερική επιφάνεια.....	98
Εικόνα 72: Δοκίμιο A3 Εξωτερική επιφάνεια	98
Εικόνα 73: Δοκίμιο A3 Πάνω επιφάνεια.....	99
Εικόνα 74: Δοκίμιο A3 Κάτω επιφάνεια	99
Εικόνα 75: Δοκίμιο A4 Εσωτερική επιφάνεια.....	99
Εικόνα 76: Δοκίμιο A4 Εξωτερική επιφάνεια	99
Εικόνα 77: Δοκίμιο A4 Πάνω επιφάνεια.....	99
Εικόνα 78: Δοκίμιο A4 Κάτω επιφάνεια	99
Εικόνα 79: Δοκίμιο A5 Εσωτερική επιφάνεια.....	100
Εικόνα 80: Δοκίμιο A5 Εξωτερική επιφάνεια	100
Εικόνα 81: Δοκίμιο A5 Πάνω επιφάνεια.....	100
Εικόνα 82: Δοκίμιο A5 Κάτω επιφάνεια	100
Εικόνα 83: Δοκίμιο A6 Εσωτερική επιφάνεια.....	100
Εικόνα 84: Δοκίμιο A6 Εξωτερική επιφάνεια	100
Εικόνα 85: Δοκίμιο A6 Πάνω επιφάνεια.....	101
Εικόνα 86: Δοκίμιο A6 Κάτω επιφάνεια	101
Εικόνα 87: Δοκίμιο B1 Εσωτερική επιφάνεια.....	101
Εικόνα 88: Δοκίμιο B1 Εξωτερική επιφάνεια.....	101
Εικόνα 89: Δοκίμιο B1 Πάνω επιφάνεια.....	101
Εικόνα 90: Δοκίμιο B1 Κάτω επιφάνεια.....	101
Εικόνα 91: Δοκίμιο B2 Εσωτερική επιφάνεια.....	102
Εικόνα 92: Δοκίμιο B2 Εξωτερική επιφάνεια.....	102
Εικόνα 93: Δοκίμιο B2 Πάνω επιφάνεια.....	102
Εικόνα 94: Δοκίμιο B2 Κάτω επιφάνεια.....	102
Εικόνα 95: Δοκίμιο B3 Εσωτερική επιφάνεια.....	102

Εικόνα 96: Δοκίμιο B3 Εξωτερική επιφάνεια.....	102
Εικόνα 97: Δοκίμιο B3 Πάνω επιφάνεια.....	103
Εικόνα 98: Δοκίμιο B3 Κάτω επιφάνεια.....	103
Εικόνα 99: Δοκίμιο B4 Εσωτερική επιφάνεια.....	103
Εικόνα 100: Δοκίμιο B4 Εξωτερική επιφάνεια.....	103
Εικόνα 101: Δοκίμιο B4 Πάνω επιφάνεια.....	103
Εικόνα 102: Δοκίμιο B4 Κάτω επιφάνεια.....	103
Εικόνα 103: Δοκίμιο B5 Εσωτερική επιφάνεια.....	104
Εικόνα 104: Δοκίμιο B5 Εξωτερική επιφάνεια.....	104
Εικόνα 105: Δοκίμιο B5 Πάνω επιφάνεια.....	104
Εικόνα 106: Δοκίμιο B5 Κάτω επιφάνεια.....	104
Εικόνα 107: Δοκίμιο B6 Εσωτερική επιφάνεια.....	104
Εικόνα 108: Δοκίμιο B6 Εξωτερική επιφάνεια.....	104
Εικόνα 109: Δοκίμιο B6 Πάνω επιφάνεια.....	105
Εικόνα 110: Δοκίμιο B6 Κάτω επιφάνεια.....	105

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Χημική σύσταση (% κ.β.) του κράματος αλουμινίου 6061	26
Πίνακας 2: Θερμική κατεργασία.....	26
Πίνακας 3: Ονόματα δοκιμίων.....	35
Πίνακας 4: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμίων της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm.	36
Πίνακας 5: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμίων του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm.	46
Πίνακας 6: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμίων του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm.	54
Πίνακας 7: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμίων της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm.	64
Πίνακας 8: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμίων του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm.	74
Πίνακας 9: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμίων του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm.	84

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο υλικών στα πλαίσια ανάθεσης έργου από εταιρία κατασκευής φιαλών αλουμινίου. Στόχος της διπλωματικής αυτής ήταν ο έλεγχος αντοχής φιαλών αλουμινίου της σειράς 6061 σε διάβρωση σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 7866:2012; Annex A.

Κατά την διάρκεια της διπλωματικής έγινε διεξαγωγή πειραμάτων περικρυσταλλικής διάβρωσης (Intercrystalline Corrosion) και εργοδιάβρωσης (Stress Corrosion) σε φιάλες αλουμινίου σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 7866:2012; Annex A [1]. Μελετήθηκαν φιάλες δύο διαφορετικών διαμέτρων, 111mm και 140mm. Για την περίπτωση της περικρυσταλλικής διάβρωσης (Intercrystalline Corrosion) μελετήθηκαν 12 δοκίμια για κάθε διάμετρο φιάλης (2 Διάμετροι 111mm & 140mm) και για την περίπτωση της εργοδιάβρωσης (Stress Corrosion) 6 δοκίμια/δακτύλιοι για κάθε διάμετρο φιάλης (2 Διάμετροι 111mm & 140mm).

Για την περίπτωση της εργοδιάβρωσης κατασκευάστηκε στο εργαστήριο υλικών ιδιοσκευή για την εμφάνιση των δοκιμίων σε αλατόνερο, σύμφωνα με τις οδηγίες της προδιαγραφής. Έτσι εξετάστηκαν συνολικά 12 δοκίμια που παρέμεναν 10 λεπτά εμφατισμένα μέσα στο διάλυμα και ακολούθησαν 50 λεπτά έξω από το διάλυμα. Από τα 12 δοκίμια τα 6 δοκίμια εκτέθηκαν σε θλίψη και τα 6 σε εφελκυσμό. Το πείραμα διάρκεσε συνολικά ένα μήνα.

Για την περίπτωση της περικρυσταλλικής διάβρωσης κατασκευάστηκε στο εργαστήριο υλικών ιδιοσκευή για την εμφάνιση των δοκιμίων σε αλατόνερο με προσθήκη H_2O_2 . Η έκθεση των δοκιμίων στο διαβρωτικό περιβάλλον είχαν διάρκεια 6 ώρες σε θερμοκρασία $30^{\circ}C$

Η μελέτη ολοκληρώθηκε με την περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο υλικών στα πλαίσια ανάθεσης έργου από εταιρία κατασκευής φιαλών αλουμινίου. Στόχος της διπλωματικής αυτής ήταν ο έλεγχος αντοχής φιαλών αλουμινίου της σειράς 6061 σε διάβρωση σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 7866:2012; Annex A [1].

Έγινε διεξαγωγή πειραμάτων περικρυσταλλικής διάβρωσης (Intercrystalline Corrosion) και εργοδιάβρωσης (Stress Corrosion) σε φιάλες αλουμινίου σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 7866:2012; Annex A [1]. Μελετήθηκαν φιάλες δύο διαφορετικών διαμέτρων, 111mm και 140mm. Για την περίπτωση της περικρυσταλλικής διάβρωσης (Intercrystalline Corrosion) 12 δοκίμια για κάθε διάμετρο φιάλης (2 Διάμετροι 111mm & 140mm). Για την περίπτωση της εργοδιάβρωσης (Stress Corrosion) 6 δοκίμια/δακτύλιοι για κάθε διάμετρο φιάλης (2 Διάμετροι 111mm & 140mm).

Η μελέτη ολοκληρώθηκε με την περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα.

Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

Στο 1° κεφάλαιο παρουσιάζεται μια εισαγωγή που αναφέρεται στις σειρές κραμάτων αλουμινίου, στην επίδραση των κραματικών στοιχείων στο κράμα 6061 και στις κατεργασίες κραμάτων αλουμινίου.

Στο 2° κεφάλαιο γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από τα θέματα που ασχολείται αυτή η διπλωματική εργασία.

Στο 3° κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Στο 4° κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα πειράματα που έγιναν.

Τέλος, στο 5° κεφάλαιο δίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές όπως στην αεροναυπηγική, την αυτοκινητοβιομηχανία, την βιομηχανία τροφίμων ως υλικά συσκευασίας και αλλού. Και αυτό γιατί καταφέρνουν να συνδυάζουν μηχανική αντοχή, αντοχή σε οξείδωση/διάβρωση και χαμηλή πυκνότητα. Διακρίνονται ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί σε χυτά και ελατά, σε αυτά που επιδέχονται ή όχι θερμική κατεργασία και ανάλογα με το κραματικό σύστημα στο οποίο βασίζεται η σύστασή τους. Τα κράματα αλουμινίου έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορες εφαρμογές αποθήκευσης αερίων υψηλής πίεσης από τις αρχές του περασμένου αιώνα. Η παραγωγή μεγάλης κλίμακας φιαλών αερίου υψηλής πίεσης από κράμα αλουμινίου ξεκίνησε γύρω στο 1960, με την έλευση της τεχνολογίας της κρουστική διέλασης [2].

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της κατασκευής του προϊόντος πρέπει να εφαρμόζεται εξαιρετική προσοχή και ισχυρές αρχές διαχείρισης της ποιότητας και πρέπει να συνεχίζονται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της φιάλης. Η επιλογή κράματος έχει μεγάλη σημασία καθώς τα κατάλληλα υλικά πρέπει να παρουσιάζουν μια ιδιαίτερα απαιτητική ισορροπία μηχανικής αντοχής, σκληρότητας και αντίστασης στους μηχανισμούς υποβάθμισης που προκαλούνται από το περιβάλλον. Ορισμένες εφαρμογές, όπως η ειδική αποθήκευση αερίου, μπορεί επίσης να απαιτούν ορισμένα χαρακτηριστικά της επιφάνειας [2].

Οι φιάλες υψηλής πίεσης τυπικά κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας κάποια μορφή τεχνολογίας κρουστικής διέλασης, και στη συνέχεια ακολουθεί μια θερμή διαδικασία σχηματισμού για να εξασφαλίσει το κλείσιμο του λαιμού. Έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες για την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση των σταδίων της θερμομηχανικής διαδικασίας τόσο για την αποδοτικότητα της κατασκευής όσο και για τον έλεγχο της μικροδομής [2].

Τα κράματα από τα οποία κατασκευάζονται οι φιάλες υψηλής πίεσης είναι προϊόν μεγάλων προγραμμάτων έρευνας και ανάπτυξης, που πραγματοποιήθηκαν με την υποστήριξη μεγάλων παγκόσμιων προμηθευτών αλουμινίου. Πρώτον, η ικανότητα κατασκευής προϊόντων που χρησιμοποιούν υπάρχοντα εξοπλισμό και διαδικασίες ήταν μια σημαντική εξέταση. Αυτό επιτεύχθηκε με ολοκληρωμένες θεμελιώδεις μελέτες των θερμομηχανικών διεργασιών που εμπλέκονται στην κατασκευή των φιαλών. Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν για να προσομοιώσουν τις διάφορες διαδικασίες μεταλλουργίας που εμπλέκονται και τελικά να προβλέψουν τα χαρακτηριστικά της μικροδομής μέσω της θερμικής επεξεργασίας των συστατικών. Μόλις αποδείχθηκε η ικανότητα κατασκευής, αλλά πριν από τη διάθεση του προϊόντος στην αγορά, απαιτήθηκε εκτεταμένη ανάλυση και χαρακτηρισμός βάσει απόδοσης για να αποδειχθεί ότι τα νέα κράματα είχαν τουλάχιστον ισοδύναμη ασφάλεια με τα πιο συμβατικά υλικά φιαλών. Η δοκιμή περιελάμβανε ποσοτική ανοχή στη ζημιά και αξιολόγηση αντοχής κατάγματος για τον προσδιορισμό της έκρηξης (υπερπίεσης), του κύκλου ζωής, της αντοχής στη περικρυσταλλική διάβρωση, στις ρωγμές διάβρωσης λόγω τάσης και στους μηχανισμούς ρωγμών με σταθερό φορτίο. Τέτοιες δοκιμές έχουν πλέον ενσωματωθεί σε πολλά εθνικά και διεθνή πρότυπα για το σχεδιασμό και την πιστοποίηση νέων φιαλών αερίου υψηλής πίεσης [2].

2.1 Κράματα Αλουμινίου

Για την εύκολη αναγνώριση των διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου από χώρα σε χώρα χρησιμοποιείται το σύστημα IADS (International Alloy Designation System). Σύμφωνα με αυτό, τα διαφορετικά κράματα αναγνωρίζονται από έναν τετραψήφιο, του οποίου το πρώτο ψηφίο καθορίζει τα βασικά συστατικά του κράματος. Έτσι υπάρχουν οι σειρές:

- 1xxx, με 99% καθαρό Αλουμίνιο
- 2xxx, με βασικά στοιχεία τον Χαλκό (αλλά και το Μαγνήσιο)
- 3xxx, με βασικά στοιχεία το Μαγγάνιο (αλλά και το Μαγνήσιο)
- 4xxx, με βασικά στοιχείο το Πυρίτιο
- 5xxx, με βασικό στοιχείο το Μαγνήσιο
- 6xxx, με βασικά στοιχεία το Μαγνήσιο και το Πυρίτιο
- 7xxx, με βασικά στοιχεία τον Ψευδάργυρο (αλλά και το Μαγνήσιο)

2.1.1 Μη θερμικώς κατεργαζόμενα κράματα

Στη σειρά 1xxx ανήκουν τα κράματα αλουμινίου τα οποία έχουν περιεκτικότητα σε Αλουμίνιο 99,99 % και αυτά τα οποία έχουν περιεκτικότητα σε κάποια κραματικά στοιχεία το πολύ 1%. Τα κράματα αυτά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή κατεργασιμότητα, αλλά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Αυτή η σειρά αλουμινίου χρησιμοποιείται κυρίως σε ηλεκτρονικά και σε χημικά πεδία.

Στη σειρά 3xxx ανήκουν τα κράματα τα οποία έχουν ως βασικό στοιχείο το Μαγγάνιο. Τα κράματα αυτά συνδυάζουν μια μέτρια σκληρότητα, με υψηλή ευπλαστότητα και αντοχή στην διάβρωση. Επιπλέον, με την προσθήκη Μαγνησίου στο κράμα η σκληρότητα του στερεού διαλύματος αυξάνεται. Τα κράματα αυτά έχουν διαφορετικές ιδιότητες και εφαρμογές ανάλογα με το ποσοστό Μαγνησίου και του Μαγγανίου που περιέχουν. Τέλος, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δοχείων για πόσιμα υγρά, την κατασκευή οικιακών εργαλείων κ.α.

Στη σειρά 4xxx ανήκουν τα κράματα αλουμινίου που έχουν ως βασικό στοιχείο το Πυρίτιο με συγκέντρωση έως και 12%. Αυτά τα κράματα χαρακτηρίζονται από χαμηλό σημείο τήξης χωρίς να δημιουργείται ευθραυστότητα. Επομένως, η κύρια χρήση τους είναι σαν συγκολλητικό υλικό που θα κάνει την ένωση, αλλά και σαν υλικό συγκόλλησης ανάμεσα σε κράματα αλουμινίου τα οποία έχουν υψηλότερο σημείο τήξης. Τα κράματα αυτά είναι μη-θερμικώς κατεργάσιμα, αλλά όταν χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση θερμικώς κατεργάσιμων κραμάτων τότε θα πάρουν κάποιες ιδιότητες από τα κράματα αυτά και θα αντιδράσουν θετικά στις θερμικές κατεργασίες αλλά σε μικρό βαθμό.

Στη σειρά 5xxx ανήκουν τα κράματα τα οποία έχουν ως βασικό στοιχείο το Μαγνήσιο με συστάσεις να κυμαίνονται από 0.8% έως 5%. Οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων αυτών παίρνουν τιμές από 40MPa έως 310MPa, με την επιμήκυνση να έχει υψηλές τιμές και να ξεπερνά και το 25%. Χαρακτηριστικό τους είναι η καλή συγκολλησιμότητα αλλά και η αντοχή στη διάβρωση ακόμη και σε περιβάλλον όπως το θαλασσινό νερό.

2.1.2 Θερμικώς κατεργαζόμενα κράματα

Στη σειρά 2xxx ανήκουν τα κράματα τα οποία έχουν ως βασικό στοιχείο τον Χαλκό. Τα κράματα αυτά έχουν εξεταστεί πολύ περισσότερο από τα άλλα κράματα. Για να αποκτήσουν τις καλύτερες τους ιδιότητες απαιτούν θερμική κατεργασία. Επομένως, οι υψηλές μηχανικές τους ιδιότητες οφείλονται στη γήρανση, δηλαδή στη θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με καθίζηση. Ένα μειονέκτημα των κραμάτων αυτών είναι ότι δεν έχουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, όπως παρατηρείται σε άλλα κράματα αλουμινίου. Γι' αυτό στα κράματα αυτά όταν δίνεται η μορφή ελασμάτων συνήθως είναι καλυμμένα από καθαρό αλουμίνιο ή από αλουμίνιο της σειράς 6xxx τα οποία μπορούν να γαλβανιστούν ώστε να αντέχουν την διάβρωση. Επιπλέον χαρακτηριστικά είναι η χαμηλή συγκολλησιμότητα, αλλά και η καλή επεξεργασιμότητα. Τα κράματα της σειράς αυτής είναι κατάλληλα για κατασκευαστικά στοιχεία, όπως ρόδες από φορτηγά και αεροπλάνα, αναρτήσεις φορτηγών, για τα οποία είναι απαραίτητο να έχουν υψηλή αντοχή συνδυασμένη με μικρό βάρος, αλλά και ο σκελετός και τα μέρη των πτερυγίων του αεροσκάφους τα οποία έχουν αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες.

Στη σειρά 6xxx ανήκουν τα κράματα αλουμινίου που έχουν ως βασικά στοιχεία το Μαγνήσιο και το Πυρίτιο. Χαρακτηρίζονται από μέτρια αντοχή, αλλά έχουν ως πλεονέκτημα την καλή συγκολλησιμότητα, την αντοχή τους στην διάβρωση, και την εργοδιάβρωση. Το Μαγνήσιο και το Πυρίτιο σε ισορροπημένες ποσότητες ώστε να έχουμε σχηματισμό του ημιδιαδικού κράματος $Al-Mg_2Si$ ($Mg:Si$ 1.73:1) με λίγο μεγαλύτερη ποσότητα Si ώστε να σχηματιστεί Mg_2Si . Τα κράματα της σειράς αυτής δεν είναι τόσο ισχυρά όσο αυτά της σειράς 2xxx και 7xxx, αλλά μπορούν να επεξεργαστούν με θερμική κατεργασία και μετά την μορφοποίησή τους να ισχυροποιηθούν με την κατεργασία της γήρανσης λόγω καθίζησης της φάσης Mg_2Si . Συγκεκριμένα το κράμα 6061 -που είναι και αυτό που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα- είναι αυτό που έχει και μεγάλη ποσότητα Mg_2Si στη θερμοκρασία γήρανσης. Αυτά τα κράματα εκτός από κάποιες εφαρμογές στην αρχιτεκτονική μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή σκελετού του ποδηλάτου, ή άλλων μεταφορικών μέσων και τέλος σε κάποια μέρη γεφυρών και μέρη που συγκολλούνται. Στα κράματα αυτά αν δεν έχουμε αρκετό Μαγνήσιο και Χρώμιο τότε δημιουργούνται ενώσεις πλούσιες σε Σίδηρο όπως Fe_3SiAl_2 και $Fe_2Si_2Al_9$ ή μίγμα των δύο ενώσεων ανάλογα με τα ποσοστά στο κράμα των Μαγνησίου, Σιδήρου και Πυριτίου. Οι δευτερεύουσες διαμεταλλικές φάσεις που δημιουργούνται κατά την στερεοποίηση της σειράς 6xxx και οι οποίες φαίνονται κάτω από προϋποθέσεις και με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου είναι η β-φάση Mg_2Si καθώς και φάσεις του Σιδήρου όπως οι Al_3Fe_4 και $AlFeSi$.

1.2.3 Ο ρόλος των κραματικών στοιχείων

Επίδραση Si:

- Βελτιώνει τα χαρακτηριστικά χύτευσης.
- Βελτιώνει τη ρευστότητα.
- Βοηθά στην αντίσταση στο φαινόμενο "hot tear".

Επίδραση Mg:

- Αυξάνει τη σκληρότητα μετά την θερμική κατεργασία και την βαφή.

- Αυξάνει την αντοχή στα κατεργασμένα κράματα καθώς και την ελαστικότητα όταν έχουμε φυσική γήρανση.

Η αντοχή στην διάβρωση εξαρτάται από την ποσότητα Μαγνησίου αλλά και από την θερμική κατεργασία.

Επίδραση Fe:

- Ο Σίδηρος έχει μεγάλη διαλυτότητα στο Αλουμίνιο σε όλα τα χυτά στάδια της κατεργασίας. Η διαλυτότητα αυτή όμως είναι μικρή στη στερεή κατάσταση.
- Αυξάνει την αντοχή ενάντια στο "hot tear".
- Μειώνει την ελαστικότητα.
- Δημιουργεί πάρα πολλές αδιάλυτες φάσεις, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την αντοχή των κραμάτων ιδιαίτερα στις υψηλές θερμοκρασίες.

Επίδραση Cr:

- Εμποδίζει την ανακρυστάλλωση σε μηχανικές κατεργασίες διαμόρφωσης και κατά την θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης.
- Αυξάνει την αντοχή σε διάβρωση.
- Αυξάνει την σκληρότητα.

Το Χρώμιο είναι σύνηθες κραματικό στοιχείο στα κράματα της σειράς 2xxx αλλά και της 6xxx και γενικά δεν ξεπερνά ποσότητα του 0.35% του κράματος.

Επίδραση Mn:

Ο συνδυασμός Μαγνησίου-Μαγγανίου:

- Ισχυροποιεί τα κράματα αλουμινίου κάτω από συνθήκες εργοσκληρυνσης.
- Δίνει αντοχή στην διάβρωση.
- Δίνει καλή συγκολλησιμότητα.

Επίδραση Cu:

- Αυξάνει την αντοχή και τη σκληρότητα.
- Μειώνει την αντοχή της επιμήκυνσης.

Η αντοχή γίνεται μέγιστη όταν το κράμα περιέχει 4-6% Χαλκό και ανάλογα βέβαια και με τα άλλα κραματικά στοιχεία.

Επίδραση Zn:

Όταν συνδυάζεται η παρουσία του Ψευδάργυρου με την παρουσία Χαλκού ή / και Μαγνησίου έχουμε καλά αποτελέσματα στην θερμική κατεργασία ή στη φυσική γήρανση με ορισμένους συνδυασμούς.

2.2 Κατεργασίες κραμάτων Αλουμινίου

2.2.1 Καταστάσεις θερμικής κατεργασίας κραμάτων AI (tempers)

Η θερμική κατεργασία είναι η διαδικασία με την οποία τα κράματα αποκτούν την μέγιστη αντοχή τους. Η διαδικασία της τεχνητής γήρανσης χαρακτηρίζεται από το σύμβολο T6 (temper). Άλλα συνηθισμένα tempers για το κράμα 6061 είναι τα: T3, T4 και T8.

T3: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, Ψυχρή κατεργασία και Φυσική Γήρανση.

Η ψυχρή κατεργασία μετά τη θερμική κατεργασία της διαλυτοποίησης δίδει σκληρότητα στο κράμα και η φυσική γήρανση σταθεροποιεί τις μηχανικές ιδιότητές του.

T4: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και Φυσική Γήρανση.

Τα κράματα αυτά δεν χρειάζονται Ψυχρή κατεργασία για να επιτευχθούν οι βέλτιστες Μηχανικές τους Ιδιότητες.

T6: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και Τεχνητή Γήρανση.

Μετά την διαλυτοποίηση από τη θερμική κατεργασία δεν χρησιμοποιούμε την Ψυχρή Κατεργασία για να έχουμε τις Μηχανικές ιδιότητες που θέλουμε αλλά την καθίζηση φάσεων ισχυροποίησης.

T8: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, Ψυχρή κατεργασία και Τεχνητή Γήρανση.

Αυτή η κατεργασία συνηθίζεται όταν ένα κράμα έχει υποστεί ψυχρή κατεργασία για να βελτιώσει την σκληρότητα μετά την θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης - μέσω της γήρανσης - και να διατηρήσει τις Μηχανικές ιδιότητες που έχει μετά την καθίζηση από την θερμική κατεργασία.

2.2.2 Κατεργασίες κραμάτων Αλουμινίου

Αρχικά το καθαρό Αλουμίνιο τοποθετείται και όλα τα κραματικά στοιχεία σε αντίστοιχα ποσοστά σε σχέση με το αλουμίνιο ώστε το αποτέλεσμα να μας δίνει το κράμα αλουμινίου που θέλουμε - και αν υπάρχει σκραπ από το ίδιο κράμα. Όλα αυτά μέσα στον επαγωγικό φούρνο, ο οποίος λιώνει όλα τα μέταλλα ώστε να έχουμε ένα ομοιογενές αποτέλεσμα. Μετά χύνεται το λιωμένο μέταλλο στα καλούπια για να στερεοποιηθεί. Ακολούθως το στερεοποιημένο πια μέταλλο σε μορφή μπιγιέτας πρέπει να περάσει στην φάση της ομογενοποίησης γι'αυτό μπαίνει μέσα σε βιομηχανικούς φούρνους για μερικές ώρες. Πριν από την διέλαση οι μπιγιέτες πρέπει να θερμανθούν για να διατηρηθεί το όριο διαρροής χαμηλό. Ακολουθεί η διέλαση που δίνει το σχήμα που θέλουμε στο κράμα. Μετά την διέλαση αφήνουμε το προφίλ να ψυχθεί και μετά πέρνα στην φάση της διαλυτοποίησης για να εξαληφθούν οι ατέλειες που δημιουργήθηκαν στην επιφάνειά του, από τη διέλαση, αφού καθώς εξέρχεται από την μήτρα αναπτύχθηκαν στα εξωτερικά του μέρη υψηλότερες θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία της διαλυτοποίησης μπορεί να φτάσει και τους 480° C. Μετά έχουμε ταχεία ψύξη για το προφίλ το οποίο έχει πάρει πλέον το τελικό του σχήμα. Από εκεί μετά πρέπει να περάσει από θερμική κατεργασία τεχνητής γήρανσης, για να αποκτήσει την τελική του σκληρότητα. Εδώ οι τιμές της θερμοκρασίας κυμαίνονται γύρω στους 160° C. Τελικό στάδιο της γραμμής παραγωγής είναι η βαφή του κράματος σε διάφορα χρώματα.

Στα κράματα αλουμινίου δημιουργούνται κάποιες φάσεις ανάλογα με την σειρά στην οποία ανήκει το κράμα αυτό. Για την σειρά 6xxx αυτές οι φάσεις είναι:

α -Al(Mn,Fe)Si
 β -AlFeSi
 π -AlMgFeSi (λιγότερο)
Mg₂Si
Si

Τα πρώτα τρία ανήκουν στην κατηγορία των Mn, Fe σωματιδίων τα οποία δεν διαλυτοποιούνται τελείως στα βιομηχανικά κράματα και τα δύο τελευταία στην κατηγορία των Mg, Si σωματιδίων. Παρακάτω βλέπουμε τα κύρια στάδια της πυρήνωσης, ανάπτυξης και διαλυτοποίησης κατά την διάρκεια της ομογενοποίησης. Διάφορες ασταθείς φάσεις πυρηνώνονται κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης της θέρμανσης οι οποίες, όμως, δύσκολα διακρίνονται. Στους 400°C περίπου είναι ορατές δευτερεύουσες φάσεις Μαγνησίου και Πιριτίου. Ενώ μετά διακρίνονται και οι φάσεις Μαγγανίου και Σιδήρου στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Πυρήνωση είναι η διαδικασία κατά την οποία έχουμε καθίζηση μιας φάσης (π.χ α -φάσης) μέσα σε ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα άλλης φάσης ή του κράματος. Αρχικά έχουμε διάχυση της φάσης- α μέσα στο διάλυμα και άρα συνεπάγεται την δημιουργία νέας επιφάνειας, αυτής μεταξύ του α και του διαλύματος. Ανάπτυξη είναι μια διεργασία, η οποία ακολουθεί την πυρήνωση της νέας φάσης, έως ότου η νέα φάση αποκτήσει το ποσοστό ισορροπίας, όπως αυτό ορίζεται από από το διάγραμμα φάσεων.

Στα τρία στάδια της ομογενοποίησης τα φαινόμενα τα οποία συμβαίνουν είναι τα παρακάτω:

Κατά την Θέρμανση: Πυρήνωση, ανάπτυξη και μερική επανδιαλυτοποίηση των φάσεων Mn και Fe. Πυρήνωση, ανάπτυξη και διαλυτοποίηση των φάσεων Mg και Si. Όταν έγουμε σταθερή θερμοκρασία: Διάχυση των στοιχείων Fe, Si, Mn, Mg. Μεγαλώνουν, στρογγυλεύουν και μετατρέπονται σε φάσεις Fe και Mn. Διαλυτοποιούνται οι φάσεις Mg και Si.

Κατά την Ψύξη: Πυρήνωση των φάσεων Fe και Mn. Πυρήνωση και ανάπτυξη των φάσεων Mg και Si. Γενικά οι φάσεις που δημιουργούνται αρχικά είναι σχεδόν ασταθής και όσο η θερμοκρασία αυξάνεται αυτές είτε διαλύονται είτε μετασχηματίζονται.

2.3 Θερμική Κατεργασία Ισχυροποίησης

Η θερμική κατεργασία που χρειάζεται να περάσουν τα κράματα για να αποκτήσουν την κατάσταση T6 είναι αρχικά μια θερμική κατεργασία και μετά τεχνητή γήρανση με τη χρήση της θερμής καθίζησης. Με την κατεργασία αυτή πραγματοποιείται καθίζηση των φάσεων β (Mg₂Si). Έτσι ακολουθούνται τρία βήματα:

- α) Διαλυτοποίηση με θέρμανση πάνω από την καμπύλη solvus (580°C).
- β) Πτώση στη θερμοκρασία δωματίου χωρίς ψυχρή κατεργασία,
- γ) Τεχνητή γήρανση με θέρμανση σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες (100-200°C) ώστε να ενεργοποιηθεί η διάχυση και σε συνδυασμό με την μεγάλη κινούσα δύναμη να έχουμε καθίζηση (της β φάσης).

Η τεχνητή γήρανση είναι το τελευταίο στάδιο της θερμικής κατεργασίας για την δημιουργία των ιδιοτήτων των θερμικώς κατεργαζόμενων κραμάτων αλουμινίου. Ορισμένα κράματα αλουμινίου υποβάλλονται σε γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου (φυσική γήρανση) αλλά είναι απαραίτητο και για ένα χρονικό διάστημα να θερμαίνεται το κράμα σε θερμοκρασία μεγαλύτερη, που συνήθως κυμαίνεται γύρω στους 100-200°C. Το χρονικό διάστημα αυτό είναι συγκεκριμένο γιατί από ένα σημείο και μετά το κράμα θα υποστεί υπεργήρανση. Αύξηση της σκληρότητας πραγματοποιείται όσο το πλήθος και το μέγεθος των σωματιδίων αυξάνεται ενώ μετά η σκληρότητα

μειώνεται λόγω μείωσης του πλήθους των σωματιδίων εξαιτίας της διεύρυνσης. Η θερμική κατεργασία της τεχνητής γήρανσης βασίζεται στην καθίζηση μιας δεύτερης φάσης ισχυροποίησης από ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα. Στα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο η θερμική κατεργασία πραγματοποιήθηκε στους 580°C όπου και έμεινε το κράμα για 8 ώρες και μετά βαφή. Το επόμενο στάδιο της τεχνητής γήρανσης έγινε με θέρμανση στους 240, 200 και 160°C.

2.3.1 Τεχνητή Γήρανση για τα κράματα Al6061

Η σειρά καθίζησης των κραμάτων Al-Mg-Si είναι η παρακάτω:

GP (σφαίρες) → β'' (βελόνες) → β' (ράβδοι) → β (Mg₂Si) (πλακίδια) Αυτά τα κράματα ισχυροποιούνται ακόμη και όταν βρίσκονται για παρατεταμένη περίοδο σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η σκληρότητα συνεπάγεται την ανάπτυξη των ζωνών, ακόμη και αν δεν έχουν σίγουρα εντοπιστεί στο στάδιο της φυσικής γήρανσης. Μικροί χρόνοι γήρανσης στους 200°C δημιουργεί πολύ λεπτές ζώνες με την μορφή βελονών (β'') με διάμετρο 6 nm και με μήκος 20-100nm που διακρίνονται με ηλεκτρονική ανάλυση. Άλλες έρευνες έχουν δείξει ότι αρχικά έχουν σφαιρικό σχήμα οι ζώνες και μετά μετατρέπονται σε βελονοειδή μορφή όπου βρίσκονται και στην υψηλότερη τιμή από την καμπύλη της σκληρότητας. Μεγαλύτεροι χρόνοι γήρανσης προκαλούν μεγάλωμα των βελονών και προς τις τρεις διαστάσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία των ζωνών σε σχήμα ράβδου με δομή που αντιστοιχεί σε πλήρη εναρμόνιση με το Mg₂Si. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η αλλαγή φάσης (που χαρακτηρίζεται ως β') περνά μετά από μερική διαλυτοποίηση σε μετατροπή σε σταθερό Mg₂Si (β φάση).

2.3 Διάβρωση Κραμάτων της σειράς 6xxx

Η εργοδιάβρωση είναι ένα είδος διάβρωσης που υφίστανται πολλά υλικά κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος και φόρτισης και προκαλεί ρήγματα στο υλικό. Η προϋπόθεση για να συμβεί είναι να υφίσταται το υλικό εφελκυστικές τάσεις και να βρίσκεται σε διαβρωτικό περιβάλλον. Για κάθε κράμα αντιστοιχεί κάποιο συγκεκριμένο περιβάλλον που θα αρχίσει η ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης [3].

Ο συνολικός χρόνος έως την αστοχία ενός δείγματος εξαιτίας της εργοδιάβρωσης αποτελείται από δύο περιόδους, δηλαδή την περίοδο (crack nucleation or induction) πυρηνοποίησης ή επαγωγής ρωγμών και αυτή της διάδοσης ρωγμών [4].

Γενικά για το SCC παρατηρούνται τα εξής χαρακτηριστικά:

[1] Το (SCC), μακροσκοπικά προκαλεί ψαθυρή θραύση ακόμα και όταν εμφανίζεται σε όλκιμα μέταλλα.

[2] Το (SCC) προκαλεί τοπική πλαστική ροή.

[3] Μπορεί να εμφανιστεί σε φορτίσεις που είναι πολύ μικρότερες από αυτές που αντέχει η κατασκευή.

[4] Μόνο εφελκυστική τάση θα προκαλέσει αυτό το είδος ρήγματος.

[5] Η θραύση συμβαίνει σε ένα επίπεδο ονομαστικό κάθετο στον άξονα εφελκυσμού, δηλαδή είναι μια θραύση της μορφής ανοίγματος (σαν να ανοίγεις ένα βιβλίο).

[6] Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα ευαισθησίας ανάμεσα στους διάφορους συνδυασμούς κραμάτων και περιβάλλοντος, με άλλα λόγια, στο (SCC) μόνο μερικά χημικά είδη προκαλούν σοβαρά προβλήματα με τα ρήγματα, όταν έχουμε κάποιο δεδομένο κράμα, που σημαίνει για κάθε κράμα αντιστοιχεί κάποιο συγκεκριμένο περιβάλλον πού θα αρχίσει το (SCC), στον πίνακα 1.1 φαίνονται τα πιο γνωστά συστήματα εργοδιάβρωσης.

[7] Τα χημικά είδη πού πρέπει να βρίσκονται στο περιβάλλον ώστε να προχωρήσει η διαδικασία πρόθεσης του ρήγματος δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις ή σε μεγάλες ποσότητες.

[8] Τα ρήγματα μπορεί είτε να είναι απλά ή να έχουν διακλαδώσεις.

[9] Εάν και τα ρήγματα είναι μακροσκοπικά ψαθυρά, σε μικροσκοπικό επίπεδο το (SCC) περιλαμβάνει τοπική πλαστικότητα και 6 ακολουθεί δρόμους διαφορετικούς απ'αυτούς της καθαρά μηχανικής ψαθυρής θραύσης, το ρήγμα μπορεί να επιλέξει να προωθείται είτε από τα σύνορα των κόκκων, είτε μέσα από τους κόκκους, κάτι πού εξαρτάται από μικρομεταβολές στο περιβάλλον, στην σύνθεση του κράματος, στο μέγεθος της φόρτισης, ή στις μεταβολές της διεργασίας.

[10] Τέλος, το (SCC) φαίνεται να συμβεί μόνο όταν συγκεκριμένες ηλεκτροχημικές συνθήκες ικανοποιούνται.

Μία άλλη παρατήρηση είναι ότι και τα καθαρά μέταλλα μπορούν να υφίστανται εργοδιάβρωση όπως έδειξαν μερικές εργαστηριακές παρατηρήσεις σε χαλκό εξαιρετικά υψηλής καθαρότητας, όπου εμφανίστηκαν σημάδια SCC.

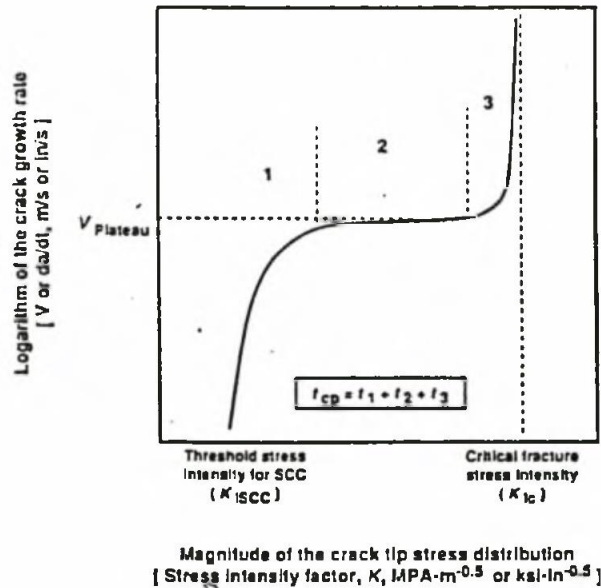
Υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ πολλών από τους τρόπους αστοχίας κάποιου υλικού, ιδιαίτερα μεταξύ αυτών πού συμπεριλαμβάνουν θραύση του υλικού. Είναι συνηθισμένο φαινόμενο η ρηγματώση λόγω εργοδιάβρωσης (SCC) να ξεκινάει από την τρηματική διάβρωση (Pitting corrosion). Είναι επίσης συνηθισμένο το SCC να προκαλεί την έναρξη ρηγμάτων κόπωσης, αυτό βέβαια σε αεροπορικά εξαρτήματα είναι ένας σημαντικός λόγος ανησυχίας σχετικά με το SCC στην αεροναυπηγική τεχνολογία, ψαθυρή θραύση μπορεί να ξεκινήσει από ρήγματα κόπωσης, ρήγματα εργοδιάβρωσης, ρήγματα υδρογόνου, και στους ψαθυρούς χάλυβες ακόμα από λάκκους που δημιουργήθηκαν λόγω διάβρωσης (corrosion pits)**.

2.3.1. Μηχανισμός της ρηγματώσης λόγω εργοδιάβρωσης (SCC)

Η ρηγματώση λόγω εργοδιάβρωσης είναι μια διεργασία καθυστερημένης βλάβης, το ρήγμα ξεκινάει και διαδίδεται με αργούς ρυθμούς (π.χ. 10^9 έως 10^6 m/s) μέχρι να υποστεί το υλικό θραύση.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η ακολουθία των γεγονότων της διεργασίας του SCC και είναι οι εξής:

- 1) Ξεκίνημα του ρήγματος και το πρώτο στάδιο της διάδοσης.
- 2) Το δεύτερο στάδιο ή η μόνιμη κατάσταση διάδοσης του ρήγματος.
- 3) Το τρίτο στάδιο διάδοσης του ρήγματος ή η τελική θραύση.



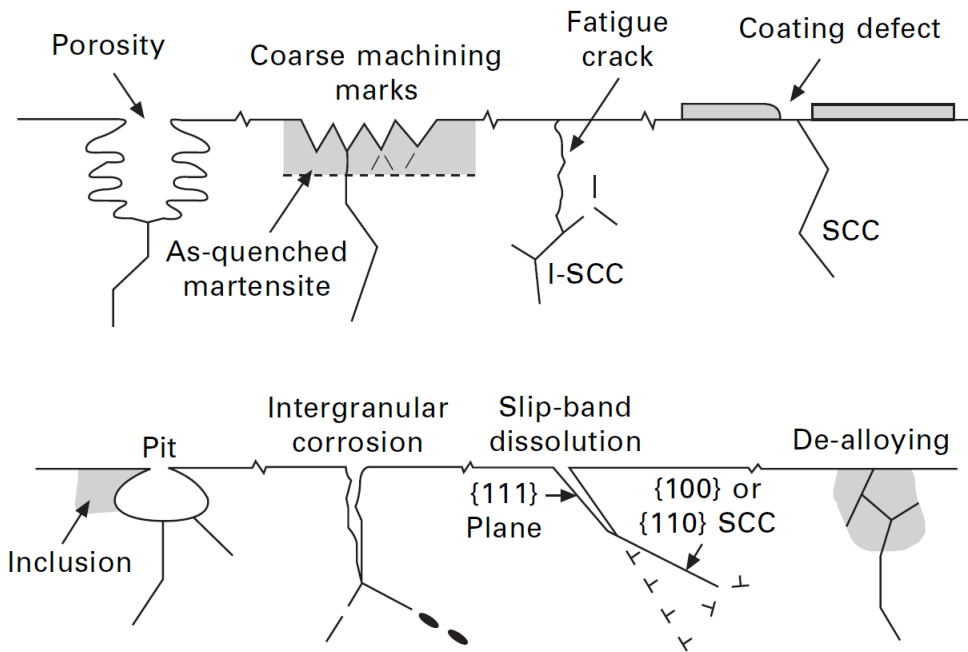
Σχήμα 1.1: Διάγραμμα του ρυθμού διάσωσης του ρήγματος σαν συνάρτηση με το παράγοντα έντασης τάσης στην κορυφή του ρήγματος δείχνοντας τις περιοχές των σταδίων 1, 2, και 3 της διάδοσης του ρήγματος.

Πολλοί διαφορετικοί μηχανισμοί έχουν προταθεί για να εξηγήσουν τις αντιδράσεις της εργοδιάβρωσης που συμβαίνουν στην κορυφή του ρήγματος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι μέχρι τώρα το φαινόμενο δεν έχει γίνει ακόμα πλήρως κατανοητό από την διεθνή επιστημονική κοινότητα.

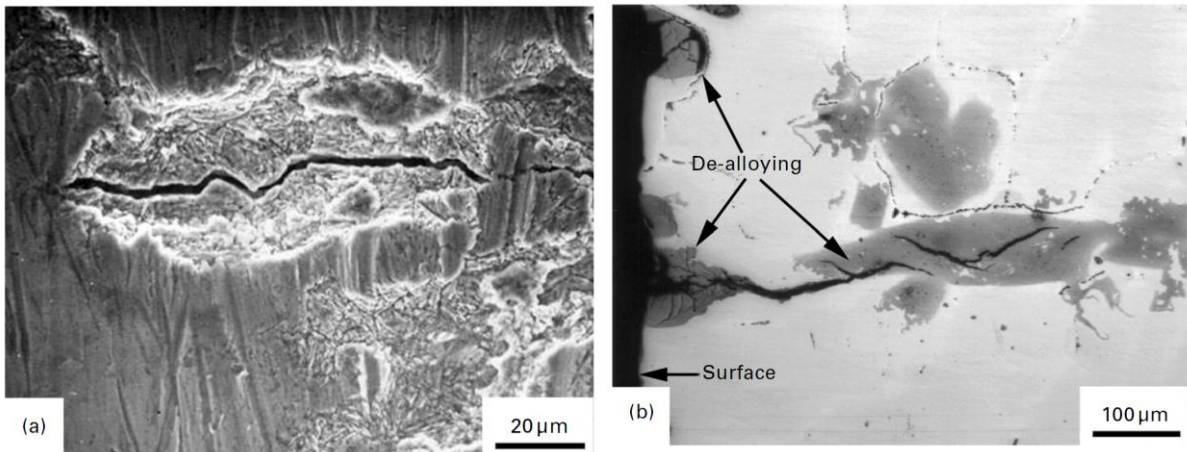
Ένας προτεινόμενος μηχανισμός μπορεί να διαιρεθεί σε δύο βασικές κατηγορίες : Ανοδικός μηχανισμός και καθοδικός μηχανισμός. Όπως είναι γνωστό στην διάβρωση η ανοδική αντίδραση και η καθοδική αντίδραση πρέπει να λάβουν χώρα την ίδια χρονική στιγμή και στην ίδια επιφάνεια όπου στην άνοδο γίνεται η διάλυση του μετάλλου και η κάθοδος προστατεύεται δηλαδή συμβαίνουν κάποιες χημικές αντιδράσεις στην κορυφή του ρήγματος.

Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η κορυφή του ρήγματος όπου η διάδοση του ρήγματος φαίνεται να είναι αποτέλεσμα κάποιων αντιδράσεων στο μέταλλο, όπου η θραύση των ατομικών δεσμών που συμβαίνει στην κορυφή του ρήγματος λαμβάνει χώρα ή από χημική διάλυση ή από μηχανική θραύση (όλκιμη ή ψαθυρή). Μηχανική θραύση η οποία υποβοηθείται ή επάγεται από μια ή παραπάνω από τις παρακάτω αντιδράσεις μεταξύ του υλικού και του περιβάλλοντος :

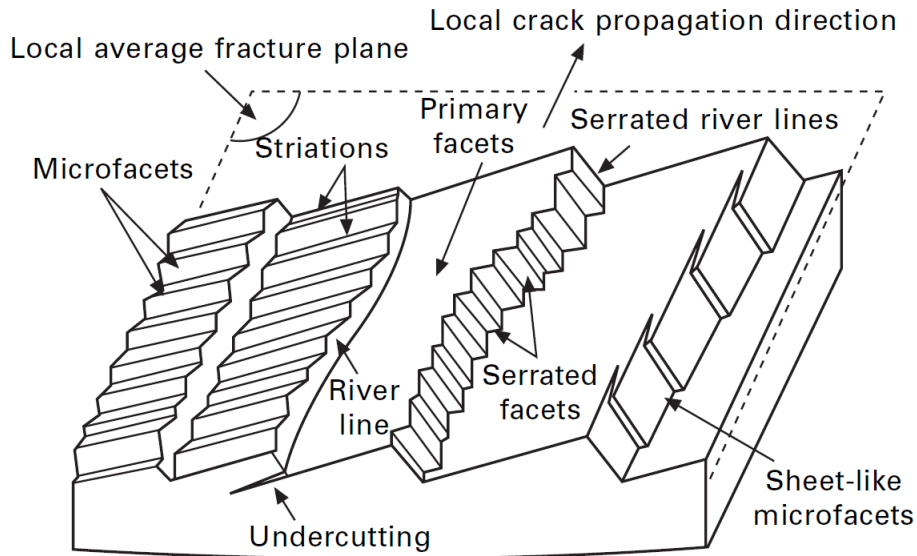
- I. Απορρόφηση χημικών ειδών που βρίσκονται στο περιβάλλον.
- II. Επιφανειακή διάχυση.
- III. Αντιδράσεις στο μέταλλο μπροστά από την κορυφή του ρήγματος.
- IV. Επιφανειακά φιλμ.



Εικόνα 1: Σχηματικά διαγράμματα που απεικονίζουν τις πιο συνηθισμένες τοποθεσίες έναρξη ρωγμών σε SCC.



Εικόνα 2: Επιφάνεια θραύσης SEM που δείχνει εκκίνηση ρωγμών από τρήμα διάβρωσης σε (α) εξαρτήματα αεροσκαφών μαρτενιτικού-χάλυβα υψηλής αντοχής [5], και (β) μεταλλογραφία που δείχνει έναρξη ρωγμών από μια φάση πλούσια σε Mn πλούσιο σε κράμα Mn-Cu (Sonoston) που χρησιμοποιείται για υποβρύχιες προπέλες [5].



Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει ορισμένα χαρακτηριστικά του cleavage SCC. Οι κύριες όψεις είναι συχνά παράλληλες με $\{100\}$ ή $\{110\}$ επίπεδα μέσα υλικά fcc. (Dickson et al. [29]).

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 6000 (AlMgSi), που περιέχουν μικρές ποσότητες Cu (<1% κ.β.), είναι γνωστό ότι είναι ανθεκτικά στην περικρυσταλλική διάβρωση (ICC), ειδικά σε συνθήκες μέγιστης αντοχής. Ωστόσο, την τελευταία δεκαετία έχει αποδειχθεί η αντίσταση στην περικρυσταλλική διάβρωση δεν υπάρχει σε underaged condition και μπορεί να εμφανιστεί σημαντική περικρυσταλλική διάβρωση σε κράματα που περιέχουν λιγότερο από 0,1% κ.β. Cu. Η ευαισθησία στην περικρυσταλλική διάβρωση αποδόθηκε στον διαχωρισμό μιας σχεδόν συνεχούς μεμβράνης πλούσιας σε Cu πάχους μερικών νανομέτρων κατά μήκος των ορίων των κόκκων

Η εργοδιάβρωση είναι αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης μεταλλουργικών, μηχανικών και περιβαλλοντικών παραγόντων. Ο πρώτος παράγοντας είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές αλλαγές τόσο στη σύνθεση όσο και στη θερμική επεξεργασία. Προσθέτοντας δευτερεύοντα συστατικά στο καθαρό σύστημα AlZnMg και εφαρμόζοντας μια κατάλληλη θερμική επεξεργασία, μπορούν να παραχθούν υλικά που είναι σχεδόν απρόσβλητος στην εργοδιάβρωση υπό συνθήκες περιβαλλοντικές και μηχανικές συνθήκες. Επομένως, από πρακτική άποψη, ο τρόπος με τον οποίο η μικροδομή επηρεάζει την ευαισθησία της εργοδιάβρωσης αυτού του τύπου κραμάτων έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον [6], [7].

Κράματα Al-Mg, κράματα Al-Mg-Si με Mg_2Si ως ενδοκοκκικό ίζημα και άλλα κράματα αλουμινίου στα οποία δεν παρατηρούνται διαφορές ή υπάρχουν μικρές πιθανές διαφορές μεταξύ των ιζημάτων μήτρας και των ενδοκοκκικών ιζημάτων, γενικά δεν είναι ευαίσθητα σε σοβαρή ενδοκοκκική διάβρωση [8].

Από την άλλη πλευρά, τα κράματα αλουμινίου στα οποία τα ενδοκοκκικά ιζήματα είναι πιο ευγενή από τη μήτρα (το $CuAl_2$ καθιζάνει από κράματα Al-Cu) ή λιγότερο ευγενές από τη μήτρα (το ίζημα Mg_2Al_3 καθιζάνει στα κράματα Al-Mg και το ίζημα $MgZn_2$ σε σύστημα κράματος Al-Zn-Mg) μπορεί να είναι ευαίσθητο στη διάβρωση μεταξύ των κόκκων. Ο βαθμός ευαισθησίας σε ενδοκοκκική προσβολή εξαρτάται από τη φύση, το μέγεθος, την ποσότητα, την κατανομή των ενδοκοκκικών ιζημάτων και επομένως της θερμικής επεξεργασίας που εφαρμόζεται σε αυτά τα κράματα [8].

Δυστυχώς, οι προσθήκες Zn και Mg μειώνουν την αντίσταση στη διάβρωση. Επίσης, η ευαισθησία του κράματος Al-Zn-Mg-(Cu) στη διάβρωση μεταξύ των κόκκων αυξάνεται όταν το κράμα εκτίθεται σε διαλύματα που περιέχουν ιόντα χλωρίου [8].

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Υλικό προς μελέτη

Στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο φιάλες αερίου, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από κράμα αλουμινίου 6061, σε δύο διαφορετικές διαστάσεις, με διάμετρο 111mm και 140mm. Η χημική σύσταση του υλικού φαίνεται παρακάτω στον Πίνακα 1:

Πίνακας 1: Χημική σύσταση (% κ.β.) του κράματος αλουμινίου 6061

Type of alloy	Chemical composition (% by mass)										Others		Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb	Each	Total		
6061A	min.	0,40	-	0,15	-	0,8	0,04	-	-	-	-	-	Remainder
	max.	0,8	0,7	0,40	0,15	1,2	0,35	0,25	0,15	0,003	0,05	0,15	

Η μέθοδος με την οποία κατασκευάστηκαν οι φιάλες είναι κρουστική διέλαση, ενώ ο λαϊμός των φιαλών σχηματίστηκε με θερμή σφυρηλάτηση. Επιπλέον, οι φιάλες υπέστησαν θερμική κατεργασία: τεχνητή γήρανση (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Θερμική κατεργασία

Θερμική κατεργασία	Ηλεκτρικός φούρνος	Θερμοκρασίες (°C)	Χρόνος (h)
Διαλυτοποίηση	Big oven	520±10	1.25x(1±30%)
	Small oven	540±10	1.25x(1±30%)
Τεχνητή γήρανση	/	180±5	9x(1±20%)

Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού σε θερμοκρασία δωματίου είναι οι εξής:

Αντοχή εφελκυσμού: ≥ 325 MPa

Yield strength: ≥ 280 MPa

Επιμήκυνση: $\geq 12\%$

Σκληρότητα: ≥ 90 HB ή ≥ 45 HRB

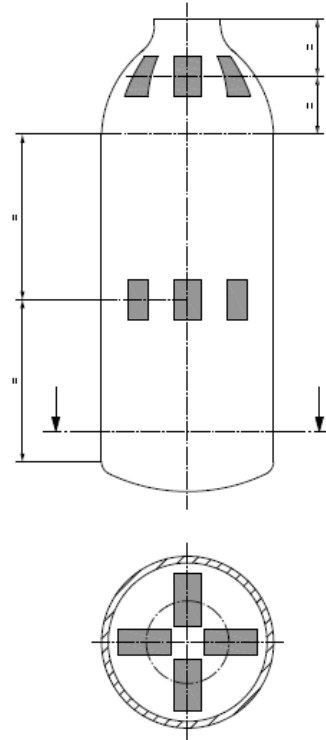
3.2 Δοκιμές για την εκτίμηση της ευαισθησίας στη περικρυσταλλική διάβρωση

3.2.1 Γενική Αρχή

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή αυτή είναι η ταυτόχρονη εμβάπτιση δοκιμίων, που λαμβάνονται από τις δύο φιάλες, σε διαβρωτικό διάλυμα και η εξέτασή τους μετά από συγκεκριμένο χρόνο χημικής προσβολής, προκειμένου να ανιχνευθούν τυχόν σημάδια περικρυσταλλικής διάβρωσης και να προσδιοριστεί η φύση και ο βαθμός της διάβρωσης. Η διάδοση της διάβρωσης προσδιορίζεται μεταλλογραφικά.

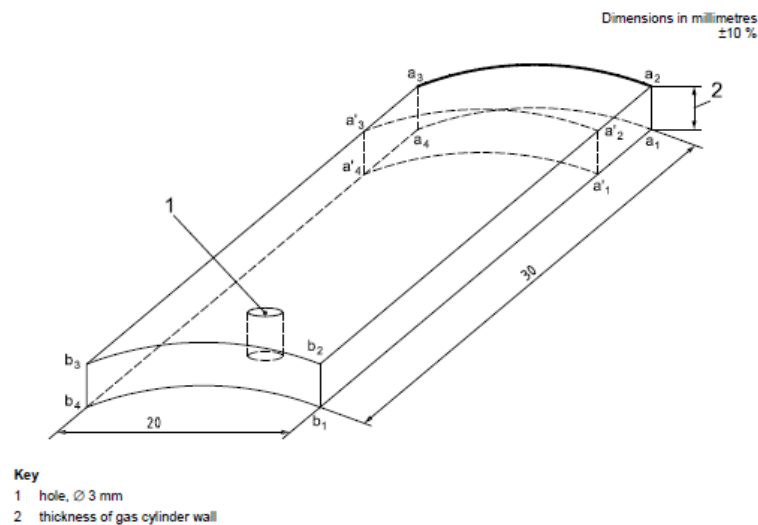
3.2.2 Λήψη δοκιμίων

Λαμβάνονται δοκίμια από το λαιμό, το σώμα και τη βάση της φιάλης αερίου (Εικόνα 4), έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν οι δοκιμές και στα τρία μέρη της φιάλης.



Εικόνα 4: Τοποθεσία λήψης δοκιμίων για το πείραμα της περικρυσταλλικής διάβρωσης.

Κάθε δοκίμιο έχει τις διαστάσεις και το γενικό σχήμα που φαίνεται στην Εικόνα 4. Οι επιφάνειες $a_1a_2a_3a_4$, $b_1b_2b_3b_4$, $a_1a_2b_2b_1$ και $a_4a_3b_3b_4$ κόπηκαν με πριονοκορδέλα. Οι επιφάνειες $a_1a_4b_4b_1$ και $a_2a_3b_3b_2$, που αντιστοιχούν στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια της φιάλης αερίου, παρέμειναν σε ακατέργαστη κατάσταση.



Εικόνα 5: Διαστάσεις και σχήμα δοκιμίων

3.2.3 Προετοιμασία της επιφάνειας των δοκιμών

Αντιδραστήρια:

- Νιτρικό οξύ (HNO₃), αναλυτικός βαθμός, πυκνότητα 1,33 g/cm³.
- Υδροφθορικό οξύ, αναλυτικός βαθμός, πυκνότητα 1,14 g / cm³ (40%).
- Απιονισμένο ή αποσταγμένο νερό.

Προετοιμάστηκε το ακόλουθο διάλυμα σε ένα δοχείο ζέσεως:

HNO₃: 63 cm³

HF: 6 cm³

H₂O: 931cm³

Το διάλυμα θερμάνθηκε στους 95°C. Κάθε δοκίμιο βυθίστηκε στο διάλυμα για ένα λεπτό. Στη συνέχεια, τα δοκίμια ξεπλύθηκαν με τρεχούμενο νερό και μετά με απιονισμένο ή αποσταγμένο νερό. Έπειτα, κάθε δοκίμιο βυθίστηκε σε νιτρικό οξύ για ένα λεπτό για να αφαιρεθεί τυχόν εναπόθεση χαλκού που μπορεί να έχει σχηματιστεί και ξεπλύθηκε με απιονισμένο ή αποσταγμένο νερό. Για να αποφευχθεί η οξείδωση των δοκιμών, βυθίστηκαν αμέσως μετά την προετοιμασία τους στο διαβρωτικό διάλυμα που περιγράφεται παρακάτω.

3.2.4 Προετοιμασία του διαβρωτικού διαλύματος

Το διαβρωτικό διάλυμα πρέπει να περιέχει 57 g/l χλωριούχου νατρίου και 3 g/l υπεροξειδίου του υδρογόνου.

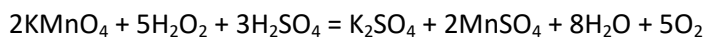
Αντιδραστήρια:

- Χλωριούχο νάτριο (NaCl).
- Υπεροξείδιο του υδρογόνου (H₂O₂).
- Υπερμαγγανικό κάλιο (KMnO₄).
- Θειικό οξύ (H₂SO₄).
- Απιονισμένο ή αποσταγμένο νερό.

3.2.4.1.1 Ογκομετρική ανάλυση υπεροξειδίου του υδρογόνου

Δεδομένου ότι το υπεροξείδιο του υδρογόνου είναι πολύ ασταθές, είναι σημαντικό να ελεγχθεί η συγκέντρωσή του πριν τη χρήση. Για να γίνει αυτό, παίρνουμε με μία πιπέτα 10 cm³ υπεροξειδίου του υδρογόνου και τα αραιώνουμε σε απιονισμένο ή αποσταγμένο νερό στα 1000 cm³, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα διάλυμα υπεροξειδίου του υδρογόνου (Solution C). Με τη χρήση πιπέτας τοποθετούνται 10 cm³ διαλύματος υπεροξειδίου του υδρογόνου και περίπου 2 cm³ θειικού οξέως σε ένα κωνικό δοχείο. Επίσης, για την ογκομετρική ανάλυση χρησιμοποιούνται 1,859 g/l διαλύματος υπερμαγγανικού καλίου. Το υπερμαγγανικό κάλιο λειτουργεί ως δείκτης.

Η αντίδραση του υπερμαγγανικού καλίου με υπεροξείδιο του υδρογόνου σε θειικό οξύ περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:



η οποία δίνει την εξής ισοδυναμία: $316\text{g KMnO}_4 = 170\text{g H}_2\text{O}_2$.

Επομένως, 1g καθαρού υπεροξειδίου του υδρογόνου αντιδρά με 1.859g υπερμαγγανικού καλίου, γι' αυτό χρησιμοποιείται διάλυμα υπερμαγγανικού καλίου 1,859 g/l, το οποίο εξουδετερώνει, όγκο κατ' όγκο, 1 g/l διαλύματος υπεροξειδίου του υδρογόνου. Δεδομένου ότι το υπεροξείδιο του υδρογόνου αραιώθηκε, αρχικά, x100, τα 10 cm³ του Solution C που λαμβάνονται, αντιπροσωπεύουν 0,1 cm³ του αρχικού υπεροξειδίου του υδρογόνου.

Πολλαπλασιάζοντας επί 10 τον αριθμό των κυβικών εκατοστών του διαλύματος υπερμαγγανικού καλίου που χρησιμοποιήθηκε για την ογκομετρική ανάλυση προκύπτει η titre T του αρχικού υπεροξειδίου του υδρογόνου, σε γραμμάρια ανά λίτρο.

Μετά από πολλές επαναλήψεις της παραπάνω διαδικασίας, ο αριθμός των κυβικών εκατοστών του διαλύματος υπερμαγγανικού καλίου που χρησιμοποιήθηκε για την ογκομετρική ανάλυση είναι 34 cm³ και πολλαπλασιάζοντας επί 10 προέκυψε T=340 g/l.

3.2.4.1.2 Προετοιμασία του διαλύματος

Μέθοδος για 10 λίτρα:

Διαλύονται 570 g χλωριούχου νατρίου σε απιονισμένο ή αποσταγμένο νερό, έτσι ώστε να ληφθεί συνολικός όγκος περίπου 9 λίτρων. Προστίθεται η ποσότητα του υπεροξειδίου του υδρογόνου που υπολογίζεται παρακάτω. Ανακατεύονται και στη συνέχεια συμπληρώνεται ποσότητα απιονισμένου ή αποσταγμένου νερού μέχρι να συμπληρωθούν 10 λίτρα.

Για τον υπολογισμό του όγκου του υπεροξειδίου του υδρογόνου που πρέπει να τοποθετηθεί στο διάλυμα λαμβάνεται υπόψη ότι απαιτείται ποσότητα καθαρού υπεροξειδίου του υδρογόνου 30g. Εφόσον το υπεροξείδιο του υδρογόνου περιέχει T=340 γραμμάρια H₂O₂ ανά λίτρο, ο απαιτούμενος όγκος, εκφρασμένος σε κυβικά εκατοστά, είναι:

$$\frac{1000 \times 30}{T} = 88,2 \text{ cm}^3$$

3.2.4.2 Διαδικασία χημικής προσβολής

Το διαβρωτικό διάλυμα τοποθετείται σε ένα μεγάλο δοχείο ζέσεως, το οποίο τοποθετείται σε μπάνιο νερού. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετούνται στο δοχείο ζέσεως με το διάλυμα έτσι ώστε να στηρίζονται μόνο στις γωνίες τους. Τα δοκίμια παραμένουν στο διαβρωτικό διάλυμα για 6 ώρες και σε θερμοκρασία σταθερή στους (30±1)°C. Επιπλέον, είναι σημαντικό ότι ο όγκος του διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε είναι τουλάχιστον 10cm³ ανά τετραγωνικό εκατοστό της επιφάνειας του δοκιμίου. Μετά τη χημική προσβολή τα δοκίμια πλένονται με νερό, βυθίζονται για περίπου 30sec σε 50% αραιωμένο νιτρικό οξύ, πλένονται ξανά με νερό και στεγνώνονται καλά με πεπιεσμένο αέρα.

3.2.5 Προετοιμασία δοκιμών για εξέταση

3.2.5.1 Κοπή

Το πρώτο στάδιο της προετοιμασίας των δοκιμών αποτελείται από την κοπή. Όσον αφορά τα δοκίμια έγιναν τομές εγκάρσια στην εσωτερική και στην εξωτερική επιφάνεια της φιάλης, έτσι ώστε να μην φαίνεται η διαβρωμένη επιφάνεια a1a2a3a4. Το πάχος που αφαιρείται με την κοπή είναι τουλάχιστον 2mm.

3.2.5.2 Εγκιβωτισμός

Μετά την κοπή των δοκιμών ακολουθεί ο εγκιβωτισμός τους. Για τον εγκιβωτισμό του δοκιμίου επιλέγουμε ένα υλικό που μπορεί να χυτευθεί, έτσι ώστε να μην επηρεασθεί η επιφάνεια του δοκιμίου από θερμότητα ή πίεση. Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε η ρητίνη Technovit 4071. Για την παρασκευή της αναμειγνύονται 2 μέρη σκόνης με 1 μέρος υγρού. Τοποθετούμε το κάθε δοκίμιο μέσα σε ένα ειδικό κυλινδρικό καλούπι, προσθέτουμε το μίγμα που ετοιμάσαμε και περιμένουμε μερικά λεπτά, έως ότου στερεοποιηθεί η ρητίνη. Αφαιρούμε το καλούπι και το δοκίμιο είναι πλέον έτοιμο για τις περαιτέρω διεργασίες.

3.2.5.3 Λείανση-Στίλβωση

Στη συνέχεια, ακολουθεί η λείανση των δοκιμών προκειμένου η επιφάνεια τους να γίνει λεία και να αφαιρεθούν τα κατεστραμμένα στρώματα. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν σταδιακά λειαντικοί τροχοί με λεπτότερους λειαντικούς κόκκους. Αρχικά, τα δοκίμια λειαινούνται με χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου (SiC), χρησιμοποιώντας το λειαντικό μηχάνημα του εργαστηρίου των υλικών, αυξάνοντας σταδιακά τα grit του κάθε χαρτιού. Συγκεκριμένα η σειρά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 500, 800, 1000 και 2000 grit. Τέλος, τα δοκίμια καθαρίστηκαν με νερό και αιθανόλη και τα στεγνώσαμε σε ρεύμα θερμού αέρα, ώστε να αποφευχθεί η οξείδωση τους στο μέλλον. Επόμενο στάδιο είναι η στίλβωση. Η στίλβωση γίνεται με AP-D Powder με μέγεθος κόκκων 0.3 μm. Σκοπός είναι η επιφάνεια των δοκιμών να γίνει λεία σαν καθρέφτης.

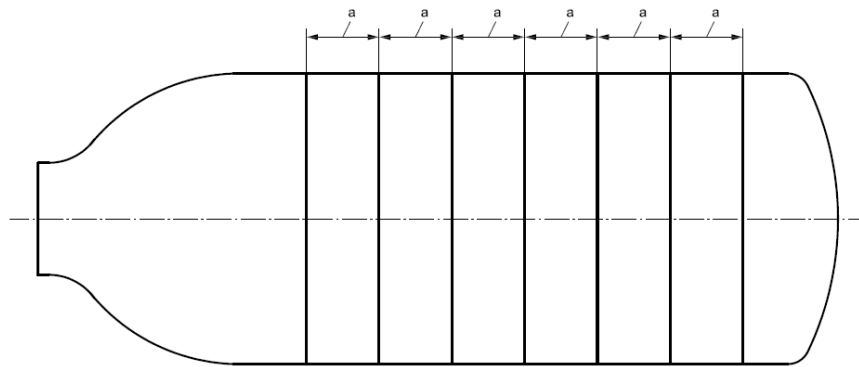
3.3 Δοκιμή για την εκτίμηση της ευαισθησίας στην εργοδιάβρωση

3.3.1 Γενική αρχή

Η μέθοδος που πραγματοποιήθηκε περιλαμβάνει δακτυλίους, οι οποίοι κόβονται από το κυλινδρικό τμήμα των φιαλών, υποβάλλονται σε τάση και βυθίζονται σε διάλυμα νερού και χλωριούχου νατρίου (αλατόνερο) για μια καθορισμένη περίοδο, ακολουθούμενη από την αφαίρεσή τους από το διάλυμα και την έκθεσή τους στον αέρα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, με αυτόν τον κύκλο να επαναλαμβάνεται για 30 μέρες. Εάν μετά την περίοδο των 30 ημερών δεν υπάρχουν ρωγμές, το κράμα θεωρείται κατάλληλο για την κατασκευή των φιαλών αερίου.

3.3.2 Λήψη δοκιμών

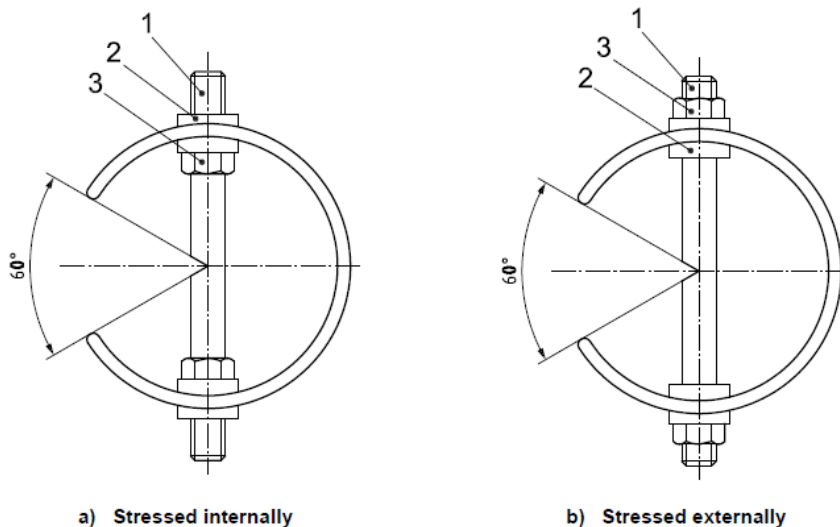
Για την λήψη των δοκιμών, κόβονται 6 δακτύλιοι από το κυλινδρικό τμήμα των φιαλών αερίου με πλάτος 4x το πραγματικό πάχος τοιχώματος ή 25mm, επιλέγουμε το μεγαλύτερο. Το πραγματικό πάχος τοιχώματος της μεγάλης φιάλης είναι 10mm και της μικρής είναι 8mm, επομένως το πλάτος των δακτυλίων είναι 40mm και 32mm αντίστοιχα (Εικόνα 3).



^a 4 × the actual wall thickness, in millimetres, or 25 mm, whichever is the greater.

Εικόνα 6: Λήψη δοκιμών

Στη συνέχεια, γίνεται ένα κόψιμο 60° σε κάθε δοκίμιο και υποβάλλεται σε τάση μέσω ενός σπειροειδούς μπουλονιού και δύο παξιμαδιών (Εικόνα 4). Η εσωτερική και η εξωτερική επιφάνεια των δοκιμών δεν υποβάλλονται σε κάποια κατεργασία.



Key
 1 threaded bar
 2 insulating bush
 3 nut

Εικόνα 7: Δοκίμια υπό τάση

3.3.3 Μεθοδολογία της δοκιμής

3.3.3.1 Προετοιμασία του διαβρωτικού διαλύματος

Το διαβρωτικό διάλυμα προετοιμάζεται αναμειγνύοντας (3,5 ± 0,1) % της μάζας του συνολικού διαλύματος χλωριούχο νάτριο σε 96,5 % της μάζας του συνολικού διαλύματος νερό. Το pH του διαλύματος πρέπει να κυμαίνεται από 6,4 έως 7,2. Το pH μπορεί να διορθωθεί μόνο με χρήση αραιού υδροχλωρικού οξέος ή αραιού υδροξειδίου του νατρίου. Το διάλυμα μπορεί να

συμπληρώνεται μόνο με προσθήκη αποσταγμένου νερού μέχρι την αρχική στάθμη στο δοχείο. Επίσης, το διάλυμα αντικαθίσταται πλήρως κάθε εβδομάδα.

3.3.3.2 Εφαρμογή της τάσης στα δοκίμια

Οι τρεις δακτύλιοι από κάθε φιάλη συμπιέζονται, έτσι ώστε η εξωτερική επιφάνεια να είναι υπό τάση. Οι άλλοι τρεις δακτύλιοι εκτείνονται, έτσι ώστε η εσωτερική επιφάνεια να είναι υπό τάση.

Οι δακτύλιοι πρέπει να υποβάλλονται έως μία μέγιστη τάση, οι οποία είναι:

$$\text{Μέγιστη τάση} = R_{eg} \times F$$

όπου,

R_{eg} είναι η εγγυημένη ελάχιστη τιμή 0,2% του ορίου διαρροής σε MPa,

F είναι ο συντελεστής ασφαλείας σχεδιασμού (μεταβλητός).

Η πραγματική τάση μπορεί να μετρηθεί με ηλεκτρικούς μετρητές τάσης.

Η διάμετρος του δακτυλίου που αντιστοιχεί στην απαιτούμενη μέγιστη τάση υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$D' = D \pm \frac{\pi R (D - t)^2}{4 E t z}$$

όπου,

D' είναι η εξωτερική διάμετρος του δακτυλίου όταν συμπιέζεται (ή εκτείνεται) σε χιλιοστά,

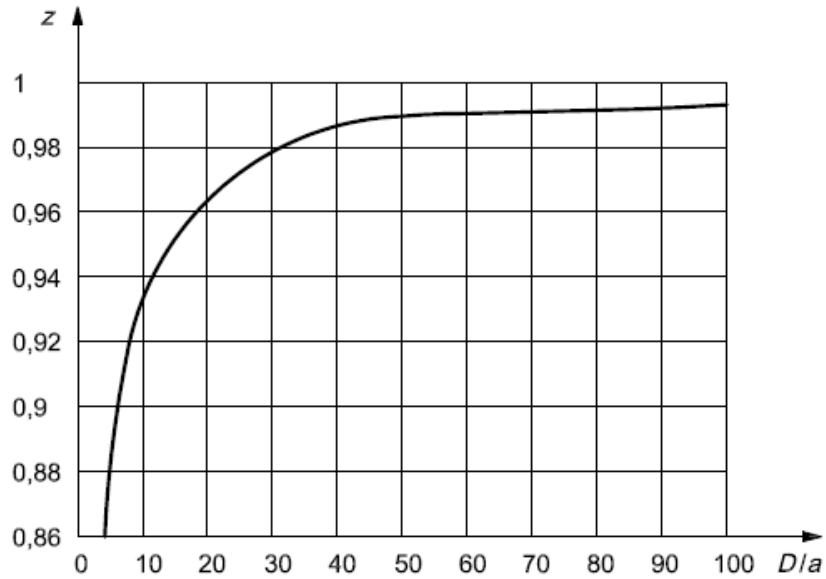
D είναι η εξωτερική διάμετρος της φιάλης αερίου σε χιλιοστά,

t είναι το πάχος του τοιχώματος της φιάλης αερίου σε χιλιοστά,

R είναι η μέγιστη τιμή της τάσης, $R_{eg} \times F$, σε MPa,

E είναι το μέτρο ελαστικότητας σε MPa (= 70MPa περίπου),

z είναι ένας συντελεστής διόρθωσης (Εικόνα 5).



Key

- D outside diameter of gas cylinder
- t actual wall thickness of gas cylinder
- z correction factor

Εικόνα 8: Συντελεστής διόρθωσης z

Είναι σημαντικό τα μπουλόνια και τα παξιμάδια να μονώνονται ηλεκτρικά από τους δακτυλίους και να προστατεύονται από τη διάβρωση που προκαλείται από το διάλυμα αλατιού. Επομένως, επιλέχθηκαν ανοξείδωτα.

Οι δακτύλιοι βυθίζονται στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου για 10 min. Στη συνέχεια, αφαιρούνται από το διάλυμα και παραμένουν στον αέρα για 50 min. Αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται για 30 μέρες ή μέχρι να σπάσουν οι δακτύλιοι, ότι συμβεί πρώτο. Τέλος, τα δοκίμια ελέγχονται οπτικά για τυχόν ρωγμές.

Καθημερινά, κατά τη διάρκεια του πειράματος, πραγματοποιούνται μετρήσεις στη θερμοκρασία, το pH και τη στάθμη του διαβρωτικού διαλύματος.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Αποτελέσματα δοκιμής περικρυσταλλικής διάβρωσης

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών από τις δύο φιάλες, μετά την δοκιμή της περικρυσταλλικής διάβρωσης. Τα δοκίμια προέρχονται από το λαιμό, το κέντρο και τη βάση των φιαλών. Αναλυτικά παρουσιάζονται αποτελέσματα από τέσσερα δοκίμια από την κάθε περιοχή της κάθε φιάλης, δηλαδή συνολικά 24 δοκίμια.

Στον Πίνακα 3 αναφέρονται τα ονόματα των δοκιμών, τα οποία δόθηκαν σύμφωνα με το μέγεθος της φιάλης και την περιοχή από την οποία προέρχονται.

Στους Πίνακες 4-9 είναι συγκεντρωμένες όλες οι τιμές του βάθους διείσδυσης της διάβρωσης για κάθε περιοχή της εσωτερικής και της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμών. Για παράδειγμα, στον Πίνακα 4 για την εσωτερική επιφάνεια του δοκιμίου AB1 βρέθηκαν 4 περιοχές με περικρυσταλλική διάβρωση. Αναφέρονται οι τιμές του βάθους διείσδυσης της διάβρωσης σε αυτές τις 4 περιοχές, καθώς και η μέση και μέγιστη τιμή τους. Επιπλέον στο τέλος του πίνακα αναφέρονται η συνολική μέση και μέγιστη τιμή του βάθους διείσδυσης από όλα τα δοκίμια της βάσης της φιάλης.

Πίνακας 3: Ονόματα δοκιμών

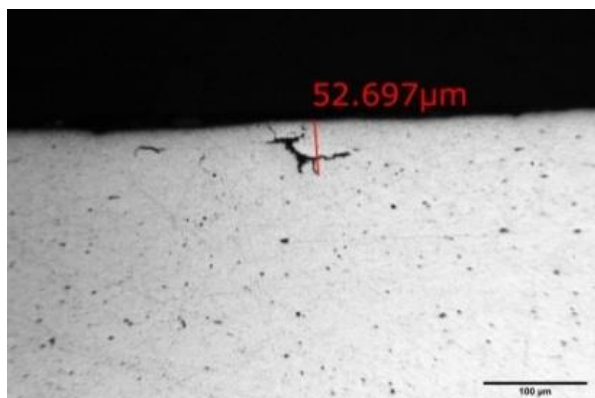
ΟΝΟΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	AB1	1 ^ο δοκίμιο από τη βάση φιάλης διαμέτρου 140mm
	AB2	2 ^ο δοκίμιο από τη βάση φιάλης διαμέτρου 140mm
	AB3	3 ^ο δοκίμιο από τη βάση φιάλης διαμέτρου 140mm
	AB4	4 ^ο δοκίμιο από τη βάση φιάλης διαμέτρου 140mm
	AC1	1 ^ο δοκίμιο από το κέντρο φιάλης διαμέτρου 140mm
	AC2	2 ^ο δοκίμιο από το κέντρο φιάλης διαμέτρου 140mm
	AC3	3 ^ο δοκίμιο από το κέντρο φιάλης διαμέτρου 140mm
	AC4	4 ^ο δοκίμιο από το κέντρο φιάλης διαμέτρου 140mm
	AT1	1 ^ο δοκίμιο από το λαιμό φιάλης διαμέτρου 140mm
	AT2	2 ^ο δοκίμιο από το λαιμό φιάλης διαμέτρου 140mm
	AT3	3 ^ο δοκίμιο από το λαιμό φιάλης διαμέτρου 140mm
	AT4	4 ^ο δοκίμιο από το λαιμό φιάλης διαμέτρου 140mm
	BB1	1 ^ο δοκίμιο από τη βάση φιάλης διαμέτρου 111mm
	BB2	2 ^ο δοκίμιο από τη βάση φιάλης διαμέτρου 111mm
	BB3	3 ^ο δοκίμιο από τη βάση φιάλης διαμέτρου 111mm
	BB4	4 ^ο δοκίμιο από τη βάση φιάλης διαμέτρου 111mm
	BC1	1 ^ο δοκίμιο από το κέντρο φιάλης διαμέτρου 111mm
	BC2	2 ^ο δοκίμιο από το κέντρο φιάλης διαμέτρου 111mm
	BC3	3 ^ο δοκίμιο από το κέντρο φιάλης διαμέτρου 111mm
	BC4	4 ^ο δοκίμιο από το κέντρο φιάλης διαμέτρου 111mm
BT1	1 ^ο δοκίμιο από το λαιμό φιάλης διαμέτρου 111mm	
BT2	2 ^ο δοκίμιο από το λαιμό φιάλης διαμέτρου 111mm	
BT3	3 ^ο δοκίμιο από το λαιμό φιάλης διαμέτρου 111mm	
BT4	4 ^ο δοκίμιο από το λαιμό φιάλης διαμέτρου 111mm	

Πίνακας 4: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμών της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm.

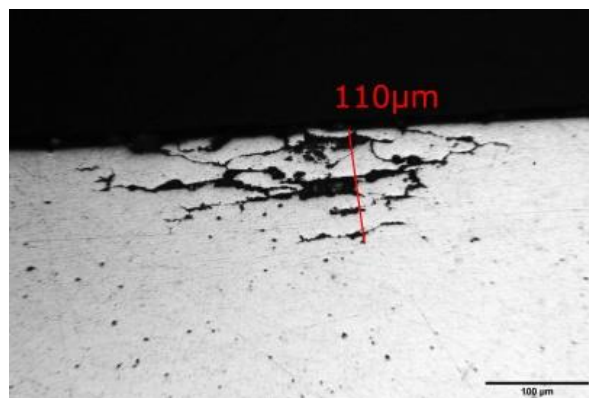
	A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)
AB1 IN	1	52.697	AB2 IN	1	71.177	AB3 IN	1	26.316	AB4 IN	1	115.881
	2	110		2	76.497		2	88.826			
	3	97.867		3	82.174		3	50.004			
	4	100.873		4			4	69.129			
				5			5	56.583			
										6	82.366
										7	96.981
	MEAN	90.359		MEAN	71.177		MEAN	61.6623		MEAN	79.9671
	MAX	110		MAX	71.177		MAX	82.174		MAX	115.881
AB1 OUT	1	62.625	AB2 OUT	1	127.016	AB3 OUT	1	136.286	AB4 OUT	1	69.192
	2	48.067		2	53.947		2	128.332		2	67.843
	3	92.143		3	87.522		3	125.028		3	50.662
	4	81.749		4	94.136		4	53.983		4	97.424
	5	81.844		5	126.4		5	92.772		5	135.528
	6	61.311		6	124.386		6	65.135		6	67.134
	7	181.609		7	46.053		7	106.587		7	123.033
	8	68.623		8	82.897					8	70.407
				9	92.705						
		MEAN		84.7463			MEAN	92.7846			MEAN
	MAX	181.609		MAX	127.016		MAX	136.286		MAX	135.528

Total MEAN 83.3761

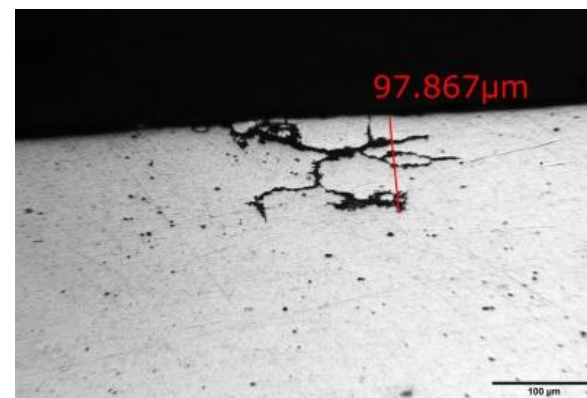
Total MAX 181.609



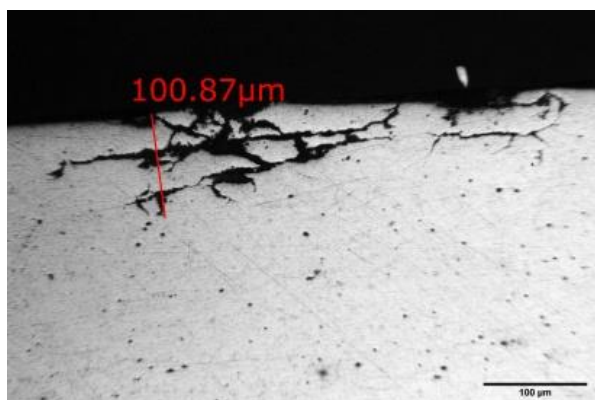
(α)



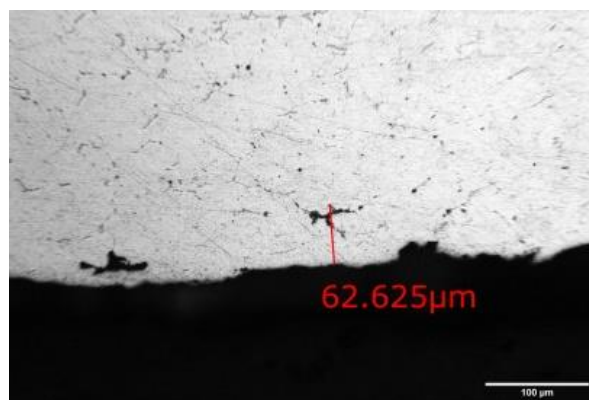
(β)



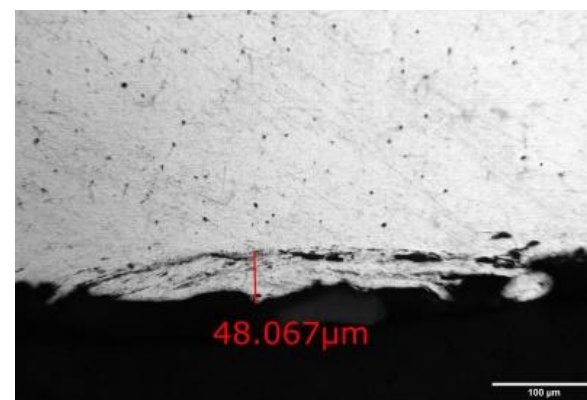
(γ)



(δ)

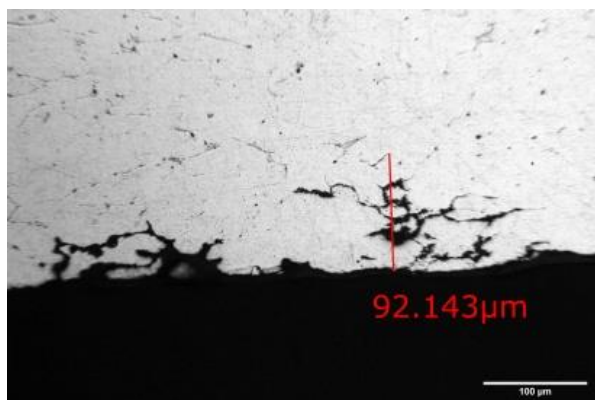


(ε)

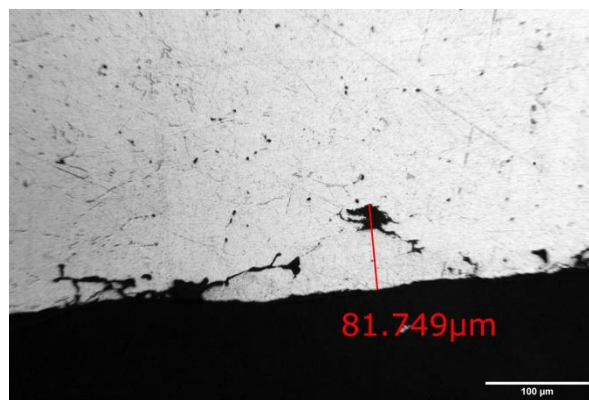


(ζ)

Εικόνα 9: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 1^ο δοκίμιο (AB1), α, β, γ και δ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 1^ο δοκίμιο (AB1), ε και ζ.



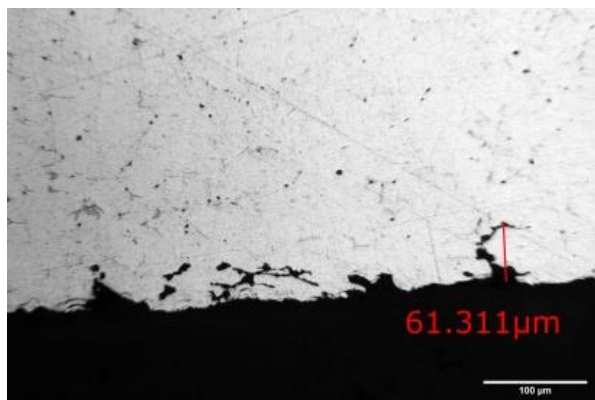
(α)



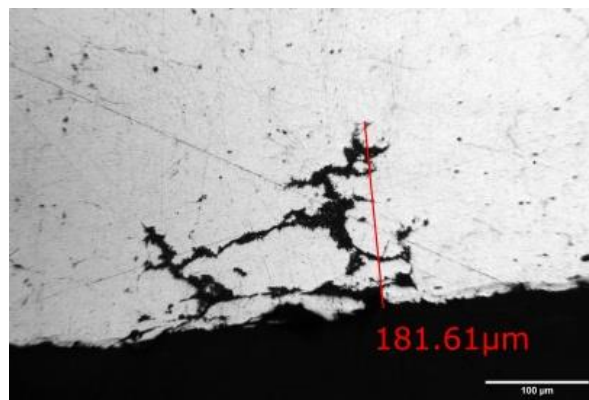
(β)



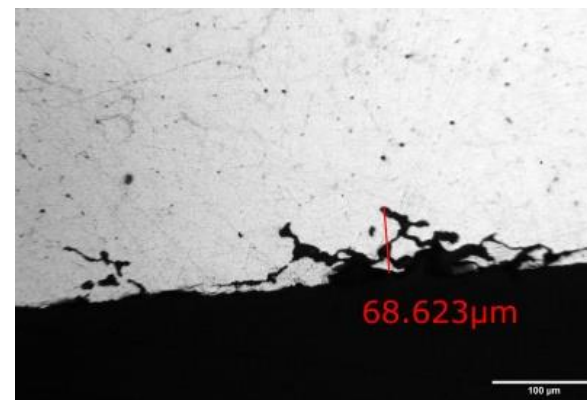
(γ)



(δ)

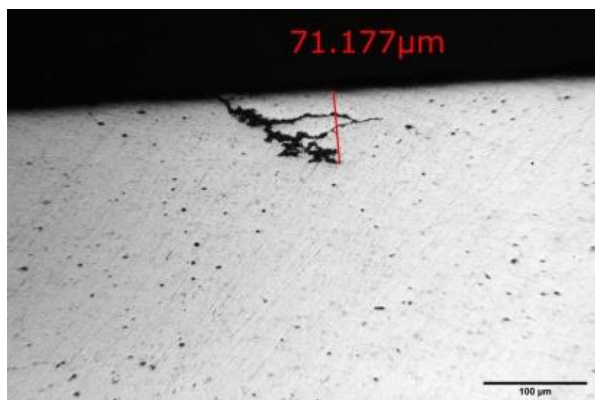


(ε)

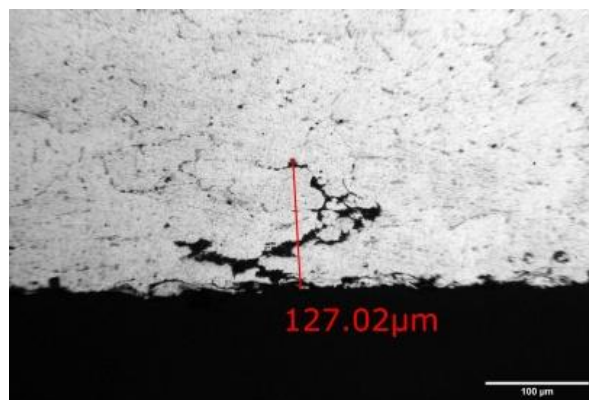


(ζ)

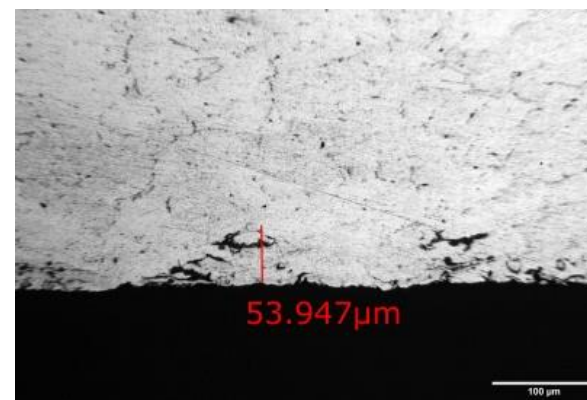
Εικόνα 10: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 1^ο δοκίμιο (AB1), α έως και ζ.



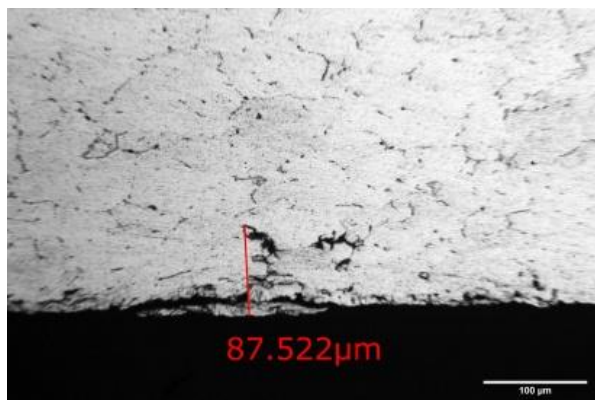
(α)



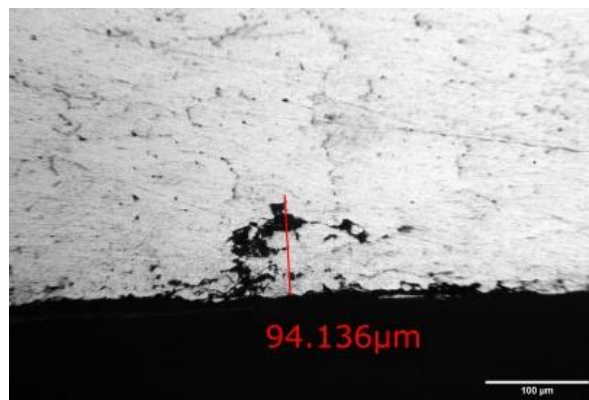
(β)



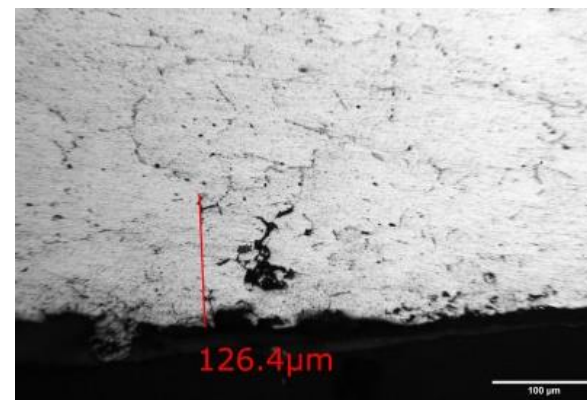
(γ)



(δ)

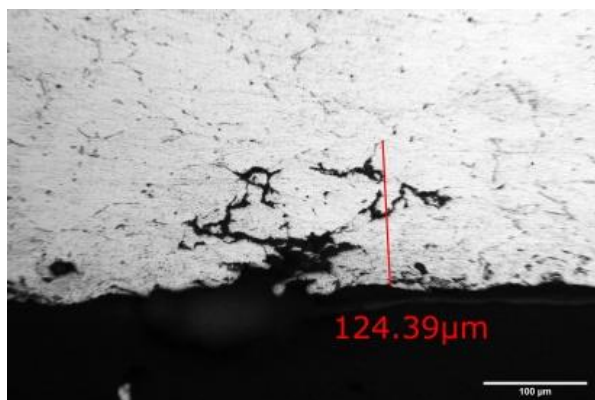


(ε)

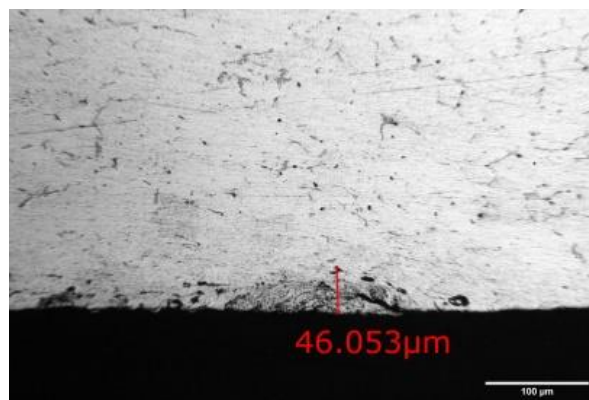


(ζ)

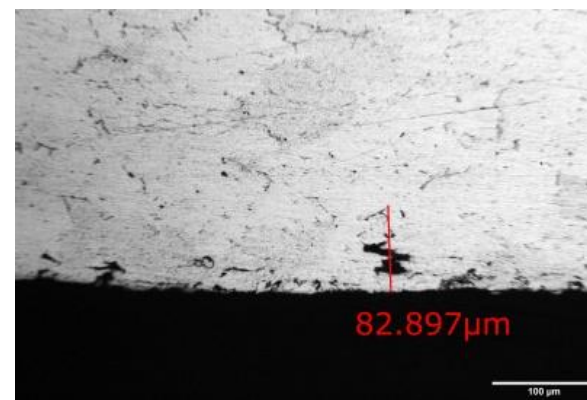
Εικόνα 11: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 2° δοκίμιο (AB2), α. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 2° δοκίμιο (AB2), β έως και ζ.



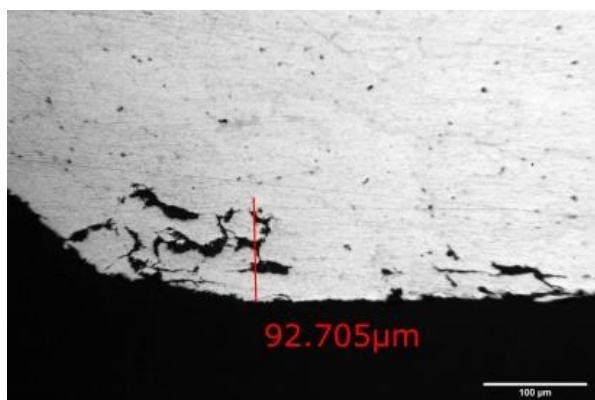
(α)



(β)

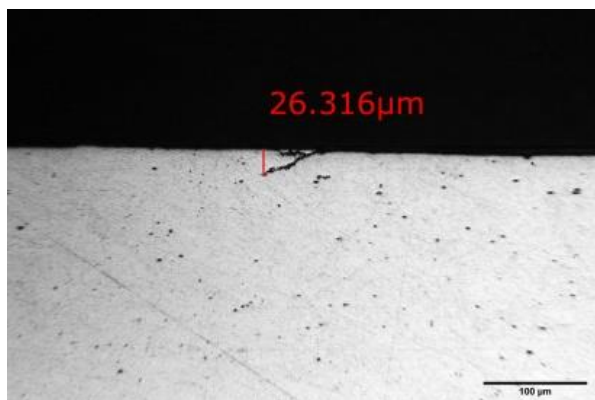


(γ)

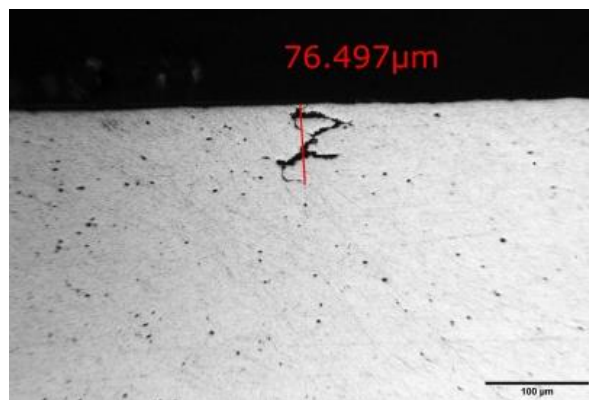


(δ)

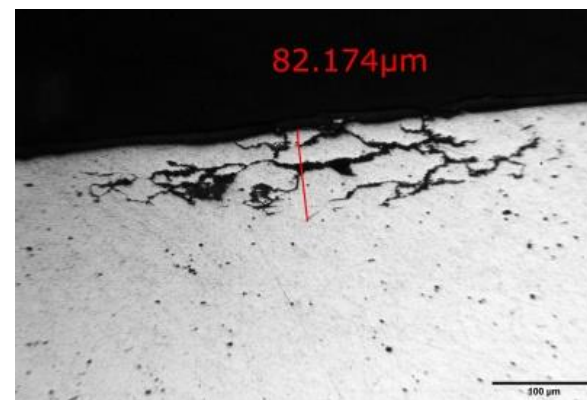
Εικόνα 12: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 2^ο δοκίμιο (AB2), α έως και δ.



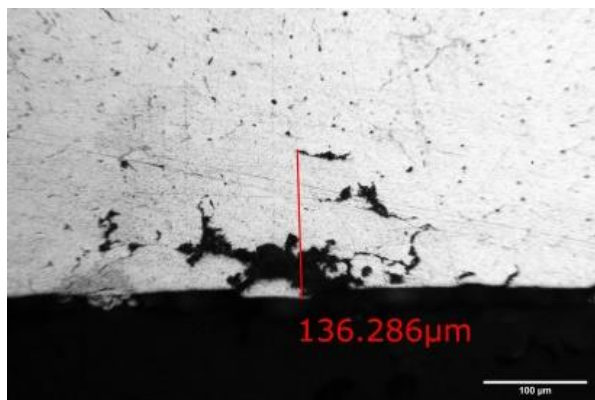
(α)



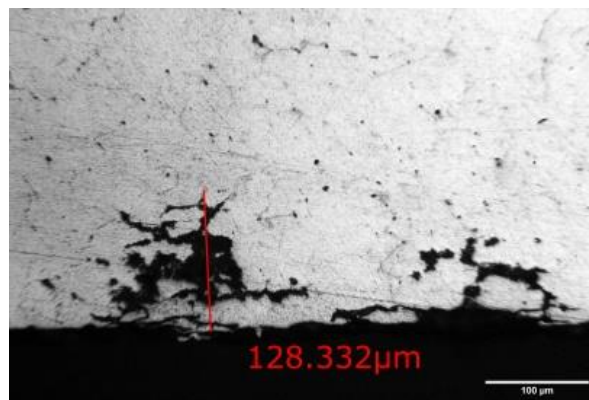
(β)



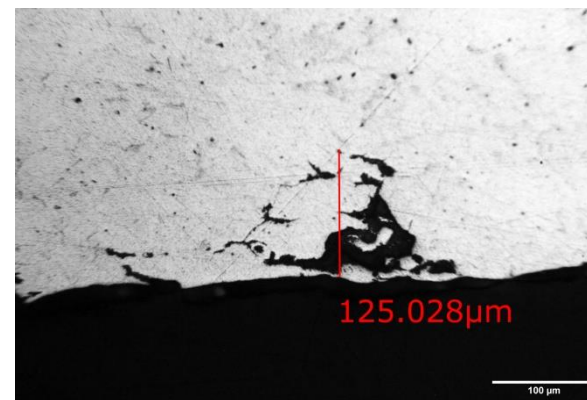
(γ)



(δ)

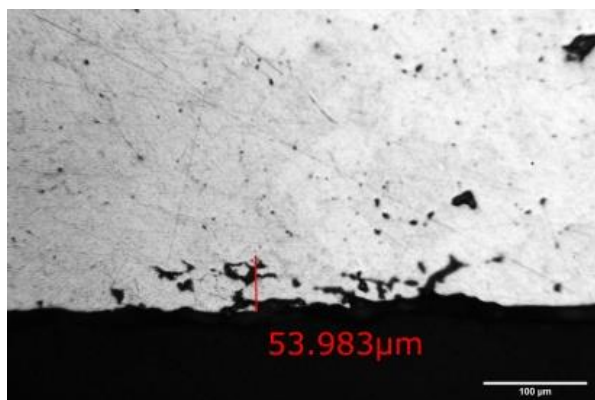


(ε)

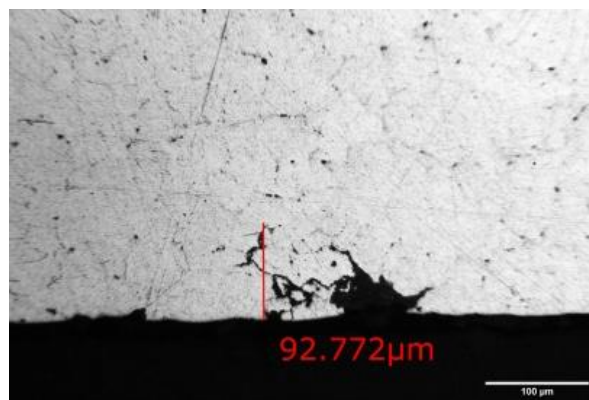


(ζ)

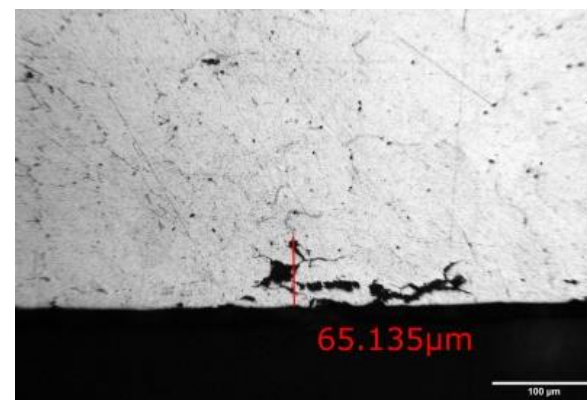
Εικόνα 13: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 3^ο δοκίμιο (AB3), α, β και γ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 3^ο δοκίμιο (AB3), δ, ε και ζ.



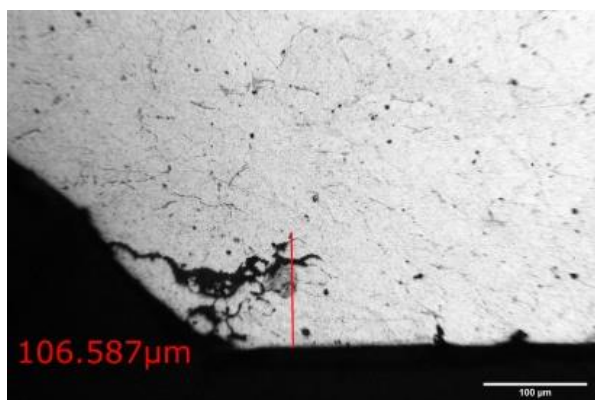
(α)



(β)

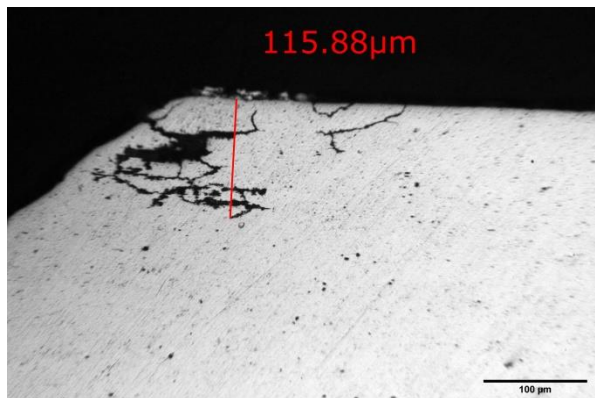


(γ)

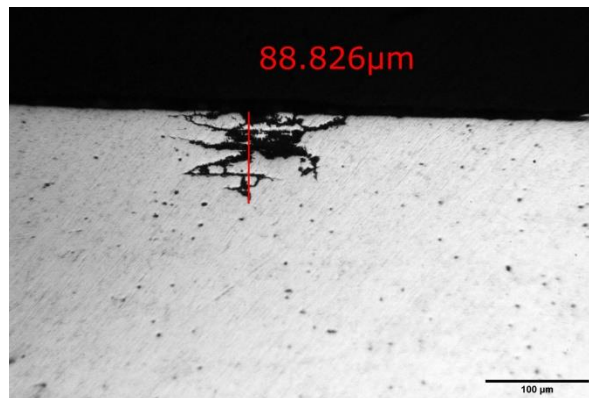


(δ)

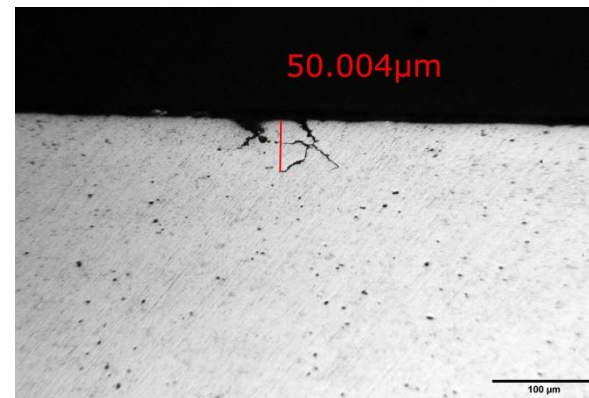
Εικόνα 14: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 3^ο δοκίμιο (AB3), α έως και ζ.



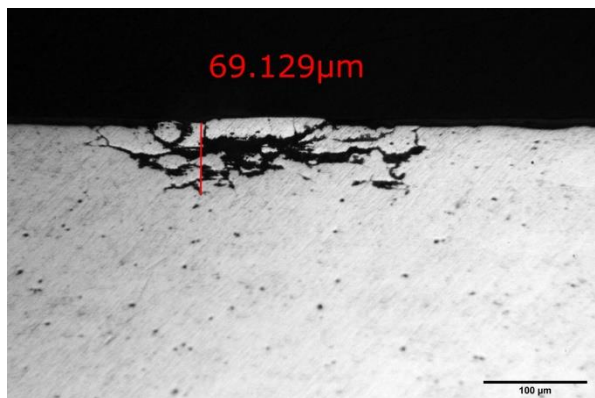
(α)



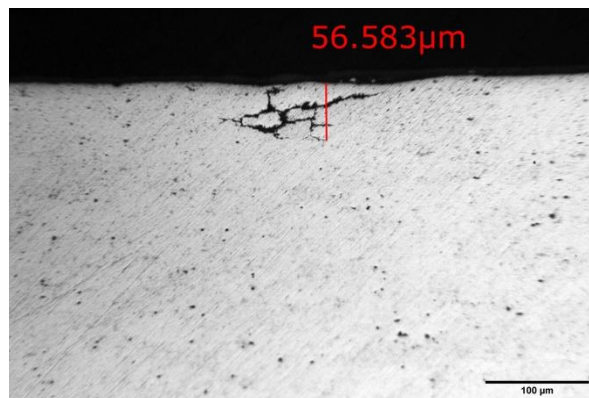
(β)



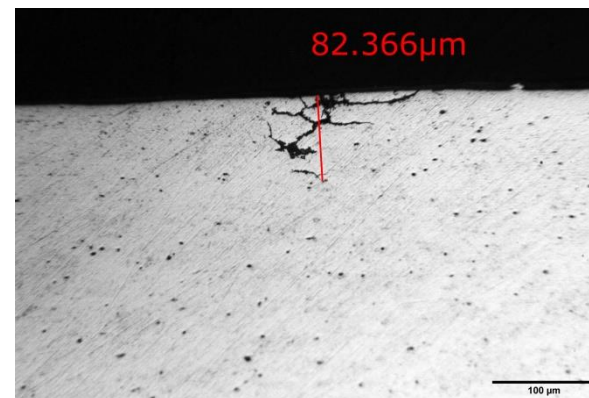
(γ)



(δ)

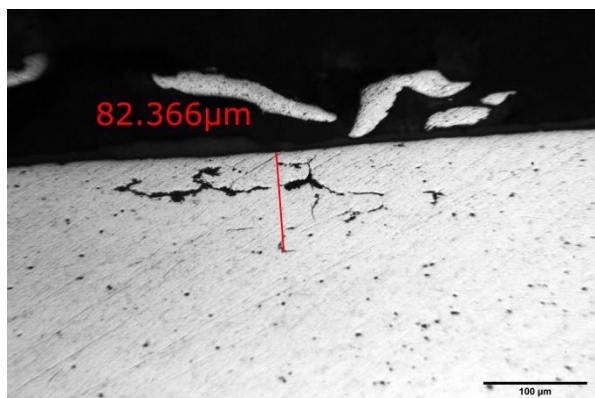


(ε)

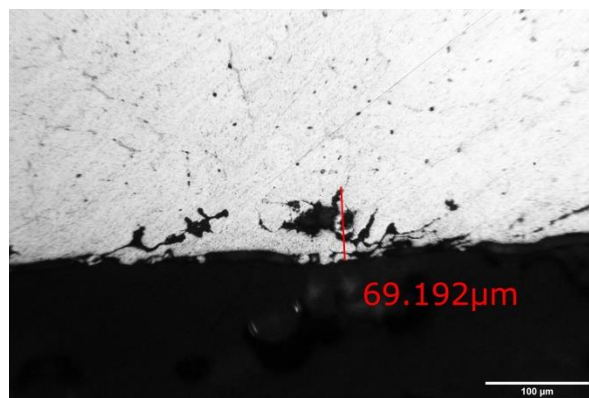


(ζ)

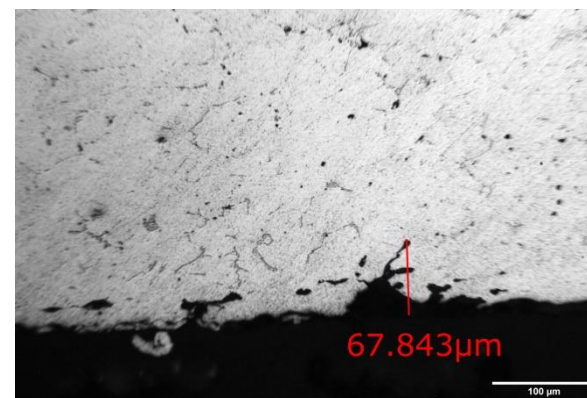
Εικόνα 15: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 4^ο δοκίμιο (AB4), α έως και ζ.



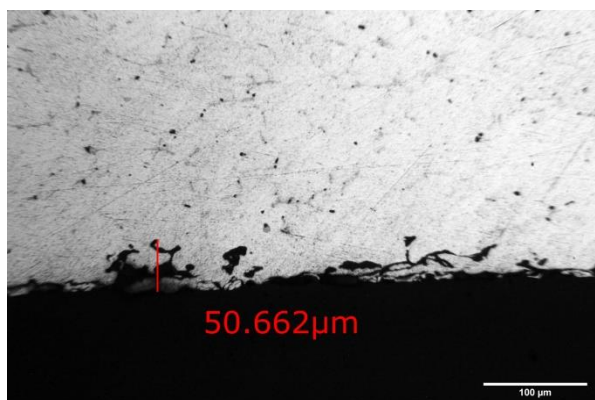
(α)



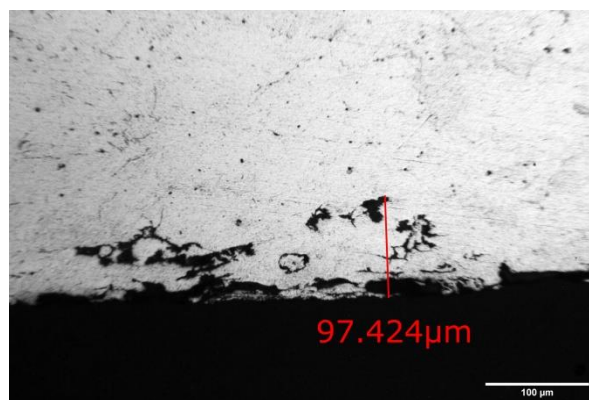
(β)



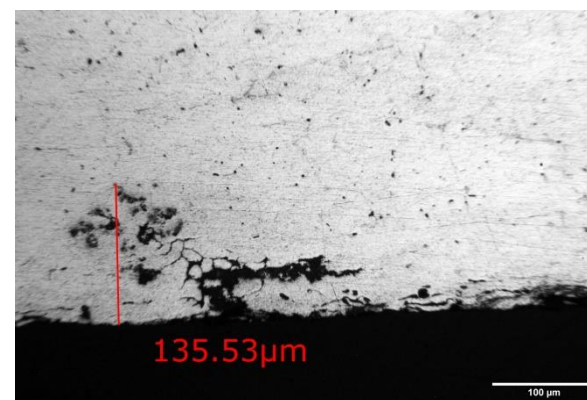
(γ)



(δ)

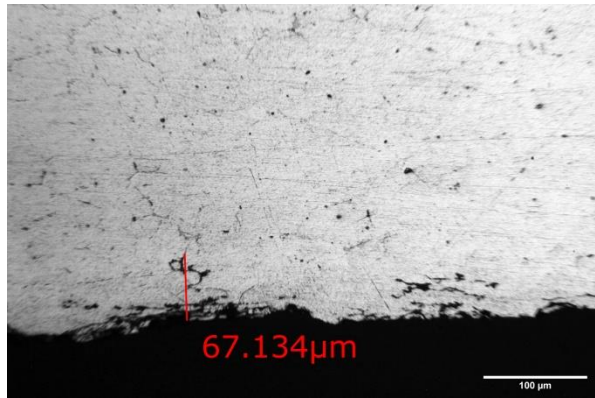


(ε)

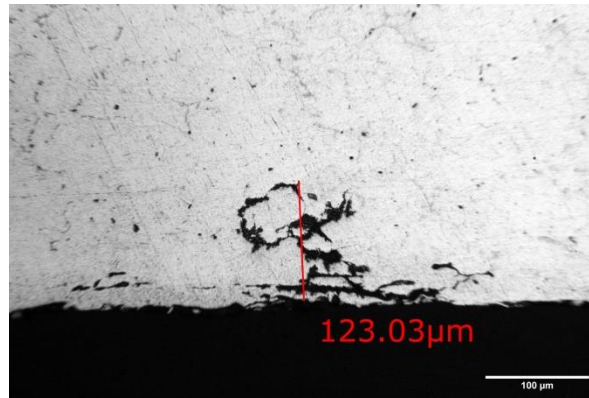


(ζ)

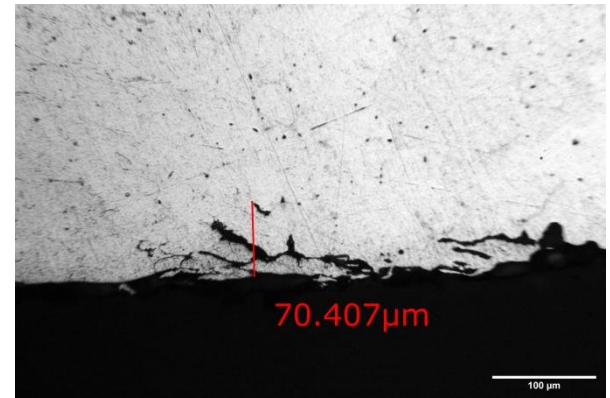
Εικόνα 16: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 4° δοκίμιο (AB4), α. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 4° δοκίμιο (AB4), β έως και ζ.



(α)



(β)



(γ)

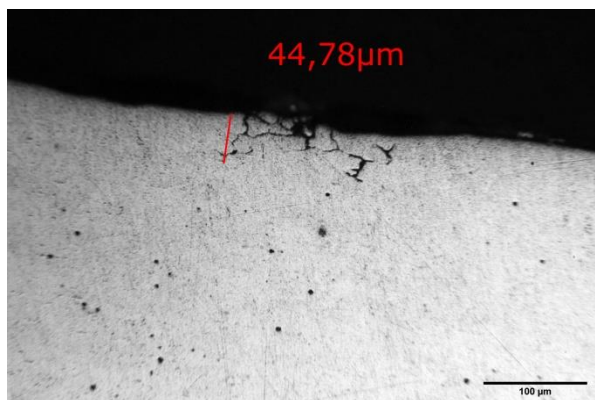
Εικόνα 17: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 140mm, 4^ο δοκίμιο (AB4), α, β και γ.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμών του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm.

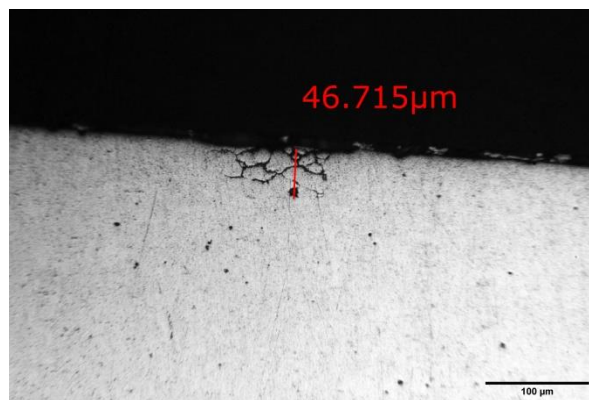
	A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)
AC1 IN	1	44.78	AC2 IN	1	110.833	AC3 IN	1	23.721	AC4 IN	1	92.763
	2	46.715		2	23.83		2	39.496			
	MEAN	45.7475		MEAN	110.833		MEAN	30.7963		MEAN	66.1295
	MAX	46.715		MAX	110.833		MAX	44.838		MAX	92.763
AC1 OUT	1	68.082	AC2 OUT	1	32.954	AC3 OUT	1	48.671	AC4 OUT	1	80.036
	2	69.988		2	96.713		2	79.562		2	33.784
	3	41.578		3	55.956		3	85.89		3	69.192
	4	42.844		4	53.354		4	52.31		4	43.441
	5	66.711		5	88.315		5	57.331		5	67.792
	6	96.558		6	55.921		6	55.921		6	93.458
	7	105.201								7	48.031
										8	52.669
										9	57.373
										10	127.715
	MEAN	70.1374		MEAN	65.4584		MEAN	63.2808		MEAN	67.3491
	MAX	105.201		MAX	96.713		MAX	85.89		MAX	127.715

Total MEAN 64.9665

Total MAX 127.715



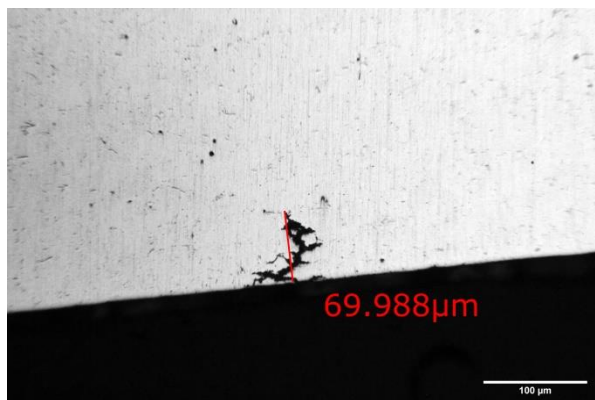
(α)



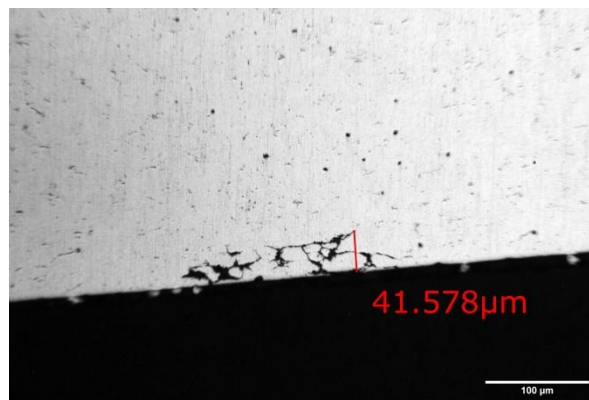
(β)



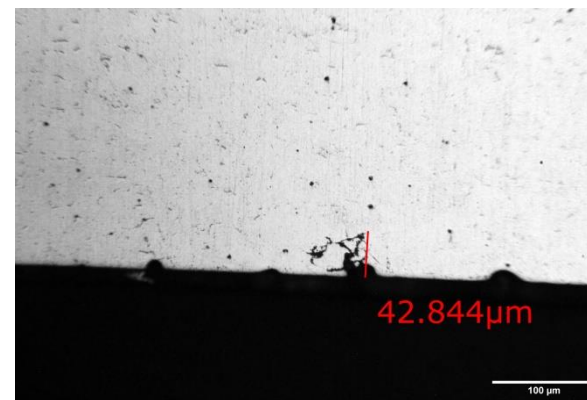
(γ)



(δ)

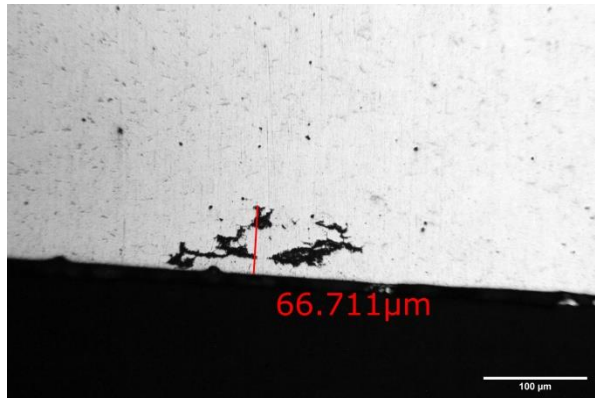


(ε)

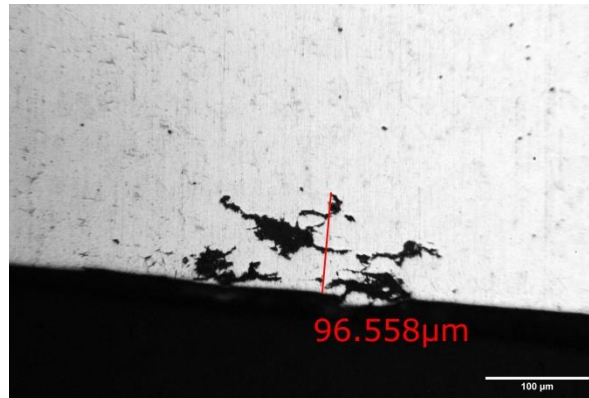


(ζ)

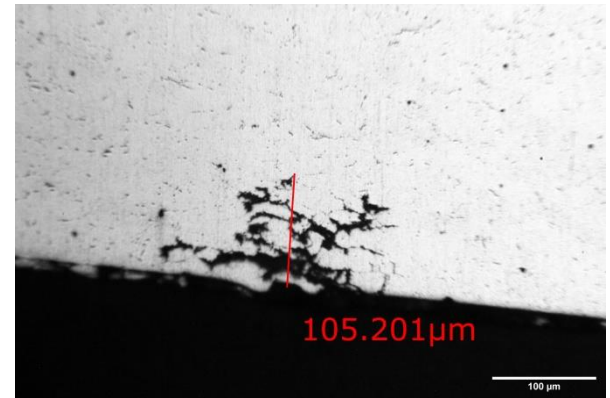
Εικόνα 18: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 1^ο δοκίμιο (AC1), α και β. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 1^ο δοκίμιο (AC1), γ έως και ζ.



(α)

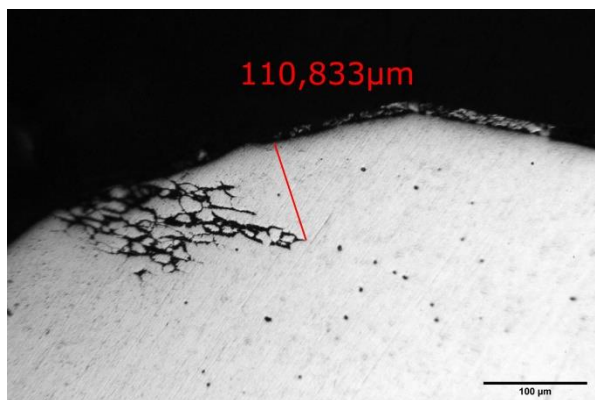


(β)

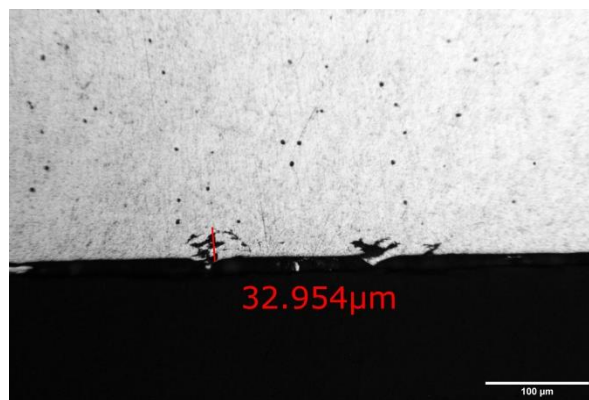


(γ)

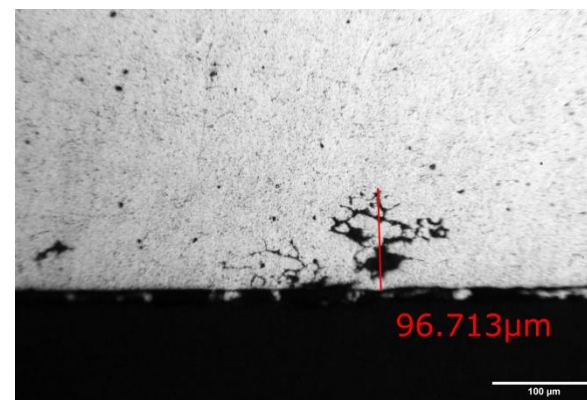
Εικόνα 19: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 1^ο δοκίμιο (AC1), α έως και γ.



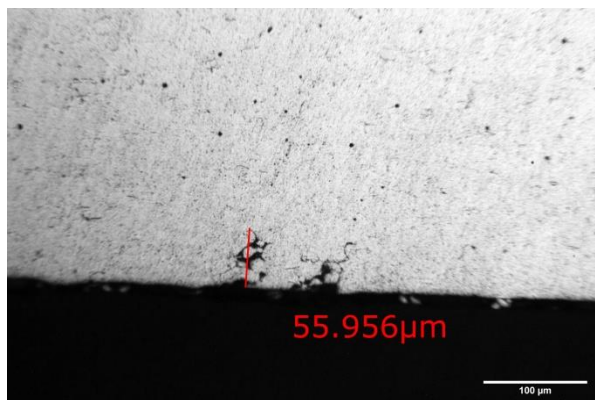
(α)



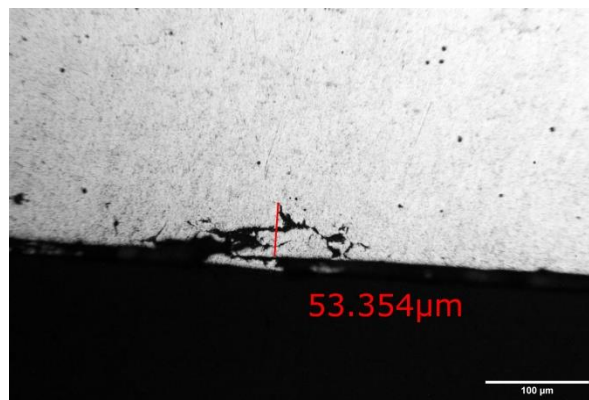
(β)



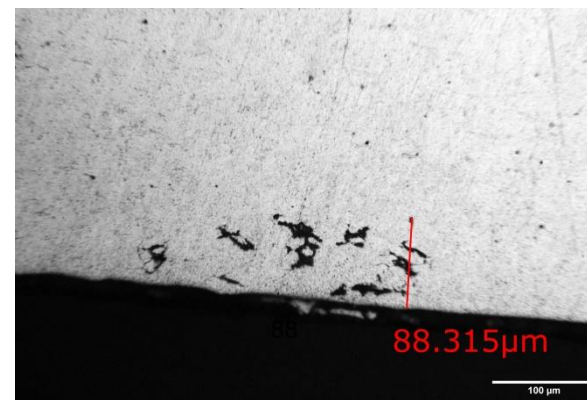
(γ)



(δ)

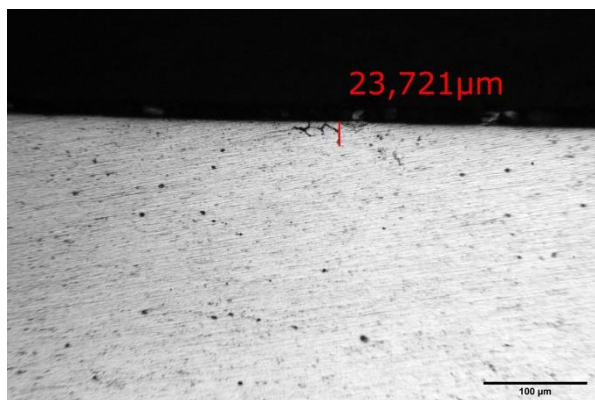


(ε)

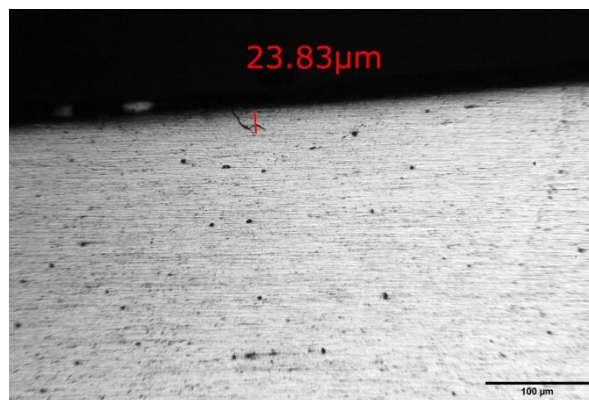


(ζ)

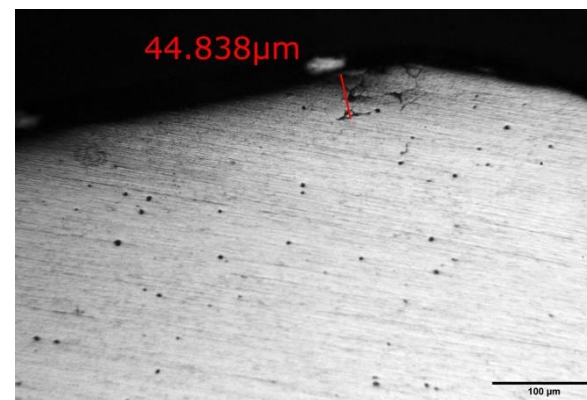
Εικόνα 20: Μεταλλογραφία της εσωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 2^ο δοκίμιο (AC2), α. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 2^ο δοκίμιο (AC2), β έως και ζ.



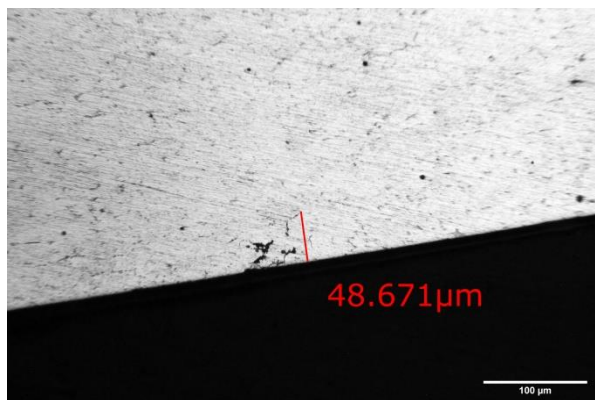
(α)



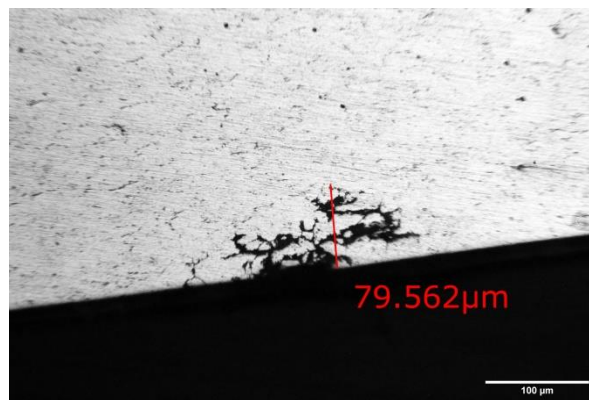
(β)



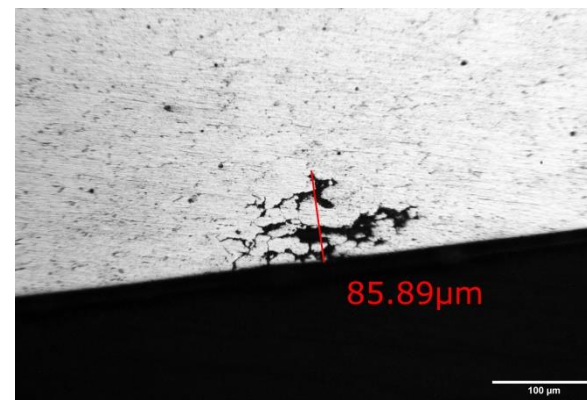
(γ)



(δ)

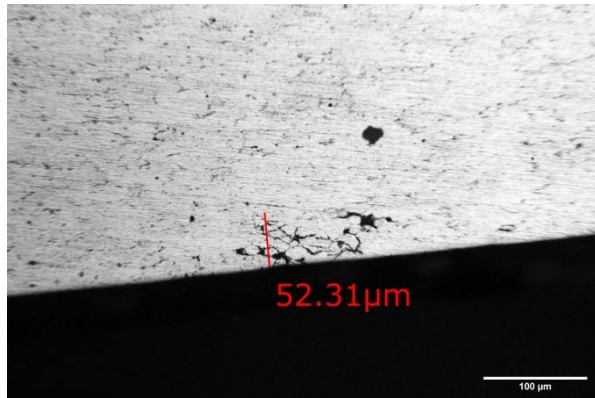


(ε)

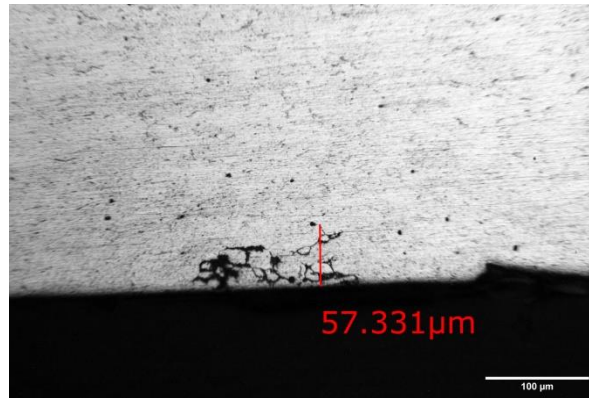


(ζ)

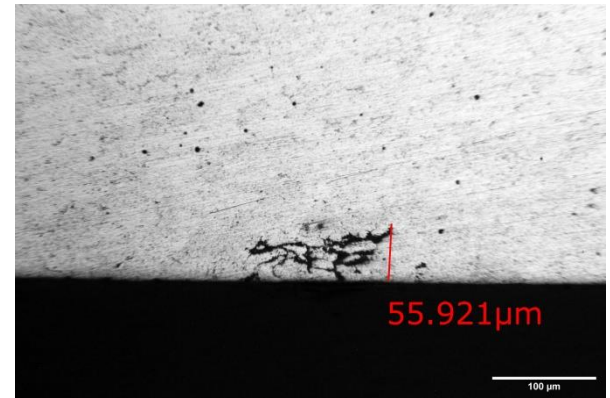
Εικόνα 21: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 3^ο δοκίμιο (AC3), α, β και γ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 3^ο δοκίμιο (AC3), δ, ε και ζ.



(α)

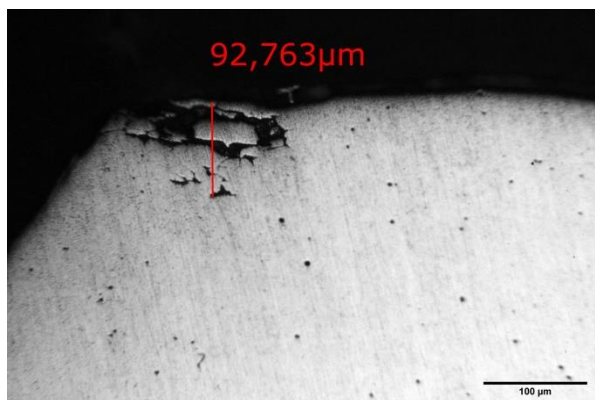


(β)

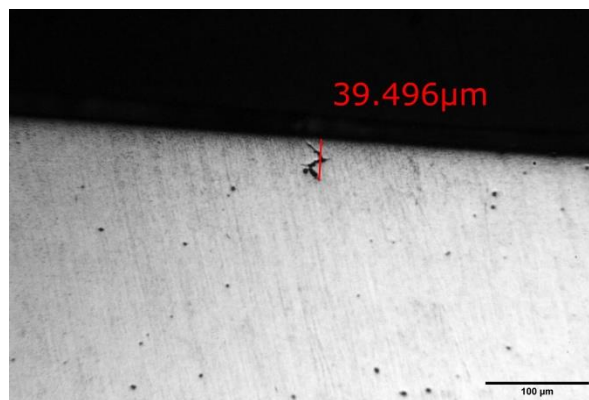


(γ)

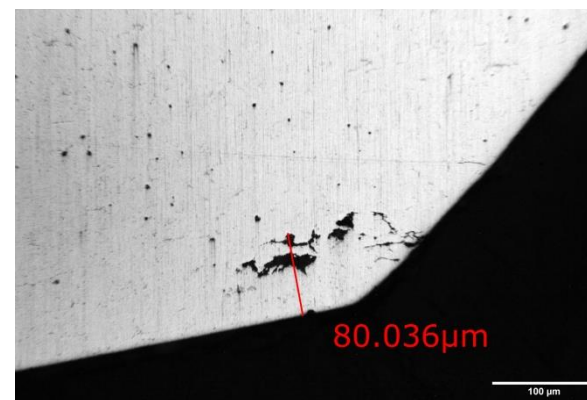
Εικόνα 22: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 3^ο δοκίμιο (AC3), α, β και γ.



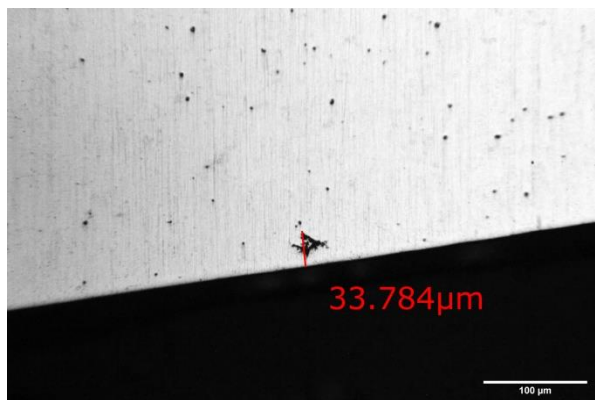
(α)



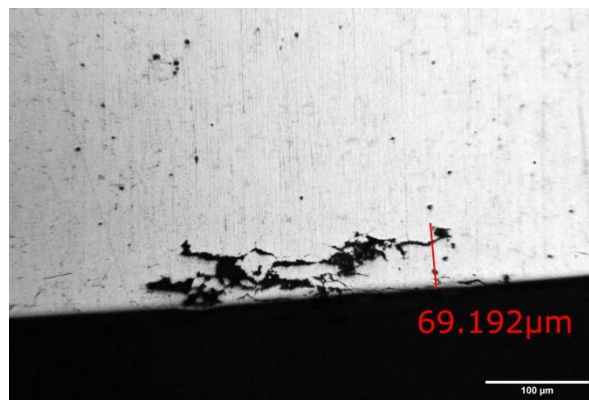
(β)



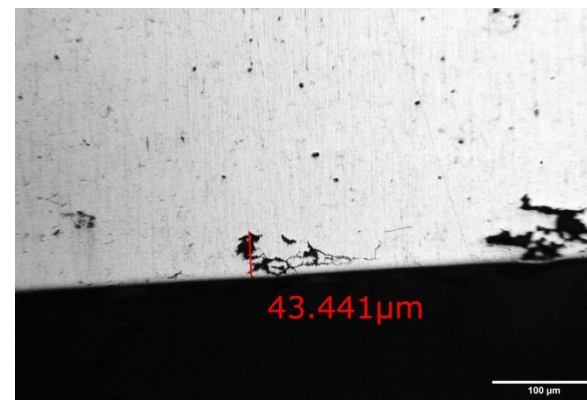
(γ)



(δ)

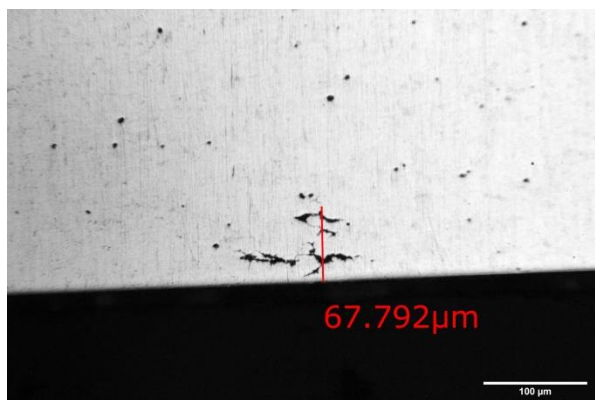


(ε)

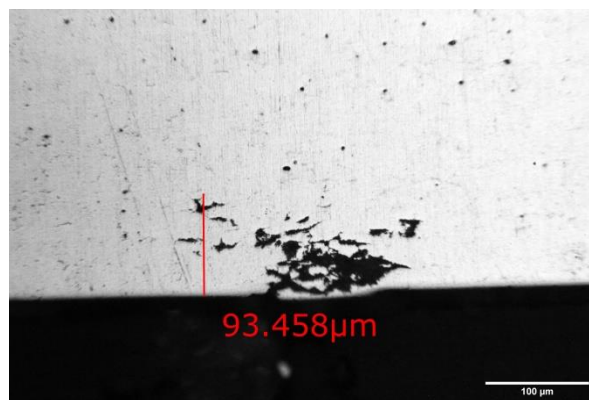


(ζ)

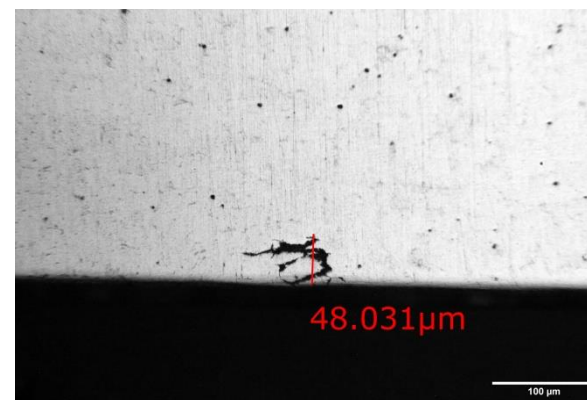
Εικόνα 23: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 4^ο δοκίμιο (AC4), α και β. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 4^ο δοκίμιο (AC4), γ έως και ζ.



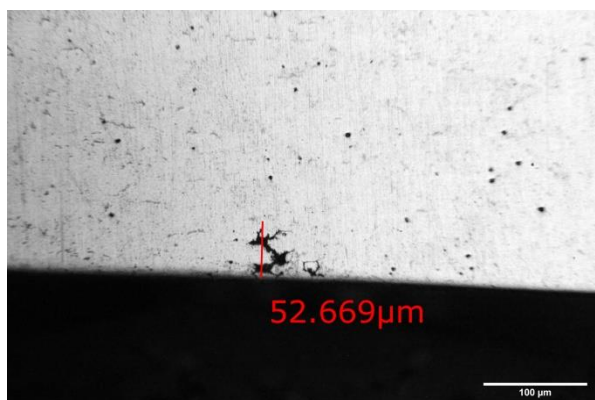
(α)



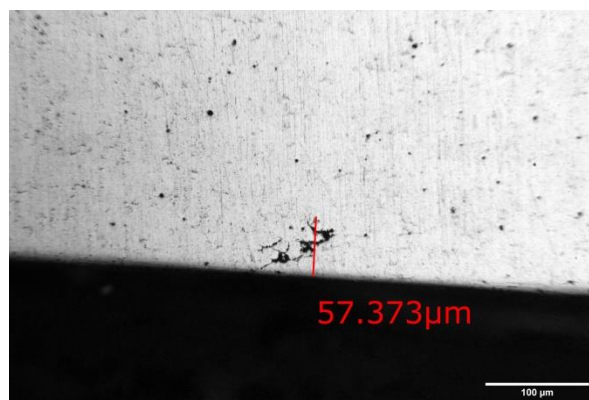
(β)



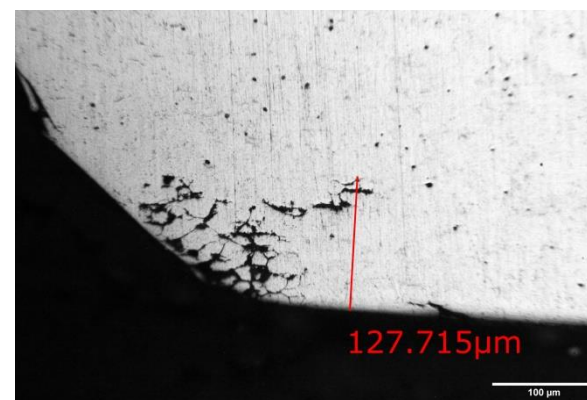
(γ)



(δ)



(ε)



(ζ)

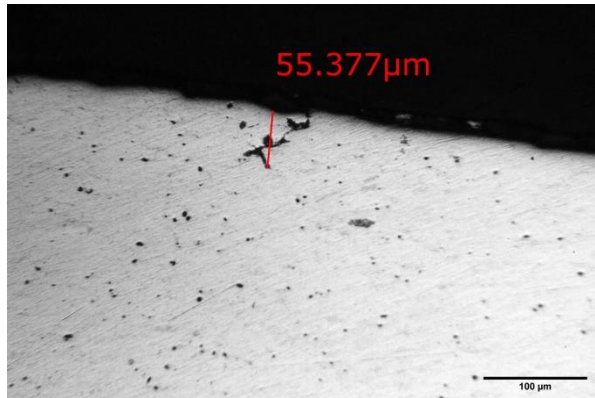
Εικόνα 24: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 140mm, 4^ο δοκίμιο (AC4), α έως και ζ.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμών του λαμού φιάλης διαμέτρου 140mm.

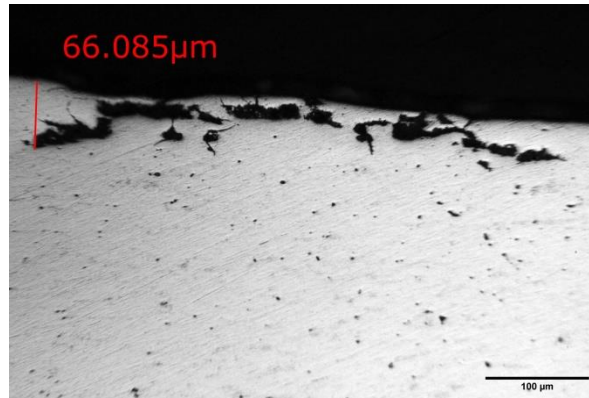
	A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)				
AT1 IN	1	55.377	AT2 IN	1	103.09	AT3 IN	1	136.643	AT4 IN	1	103.398				
	2	66.085		2	69.029		2	112.951		2	132.211				
	3	64.955		3	76.87		3	126.489		3	115.019				
	4	99.831		4	63.158		4	80.331		4	116.105				
	5	135.584		5	103.323		5	117.765		5	101.393				
	6	60.541		6	105.273		6	73.026		6	129.055				
	7	42.839								7	140.943				
										8	137.766				
										9	143.716				
		MEAN		75.0302			MEAN	86.7905			MEAN	107.8675		MEAN	124.4006
	MAX	135.584		MAX	105.273		MAX	136.643		MAX	143.716				
AT1 OUT	1	71.129	AT2 OUT	1	69.814	AT3 OUT	1	77.201	AT4 OUT	1	81.621				
	2	69.876		2	32.564		2	112.825		2	96.746				
	3	121.931		3	136.641		3	104.707		3	88.818				
	4	92.586		4			4	123.518		4	74.447				
				5			5	35.824		5	121.042				
				6						6	86.635				
				7						7	127.103				
				8						8	131.816				
		MEAN		88.8805			MEAN	79.673			MEAN	90.815		MEAN	101.0285
		MAX		121.931			MAX	136.641			MAX	123.518		MAX	131.816

Total MEAN 94.3107

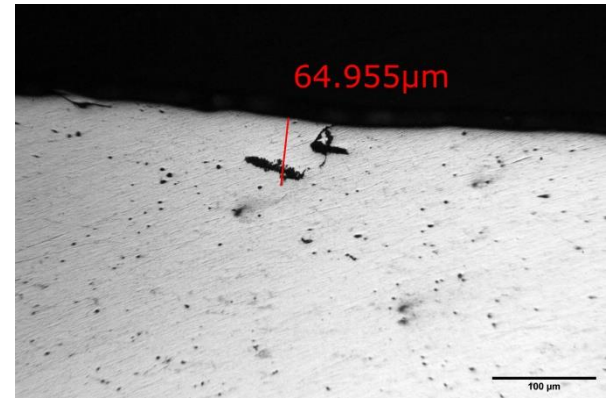
Total MAX 143.716



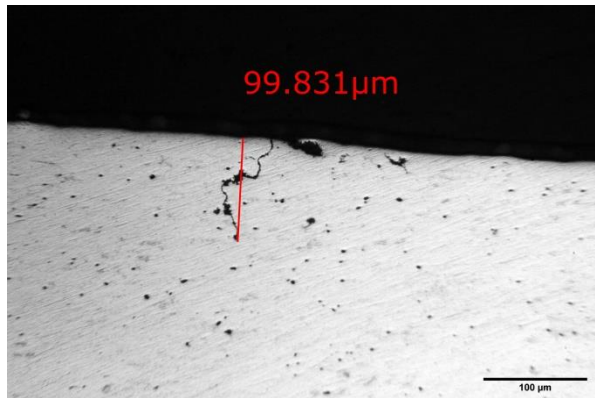
(α)



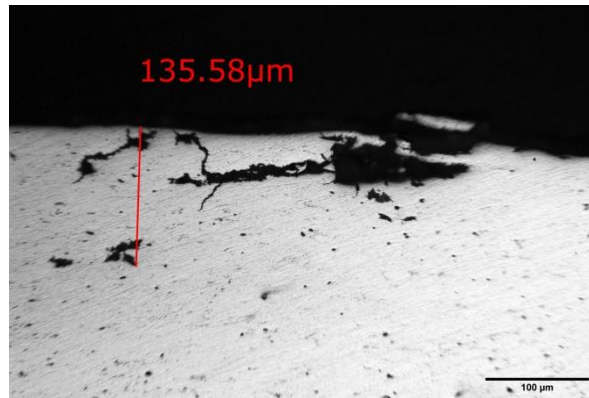
(β)



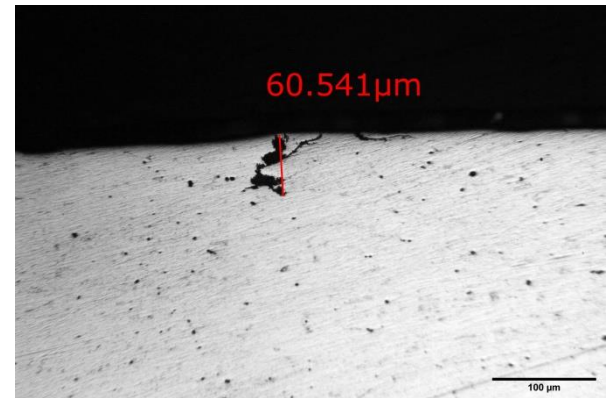
(γ)



(δ)

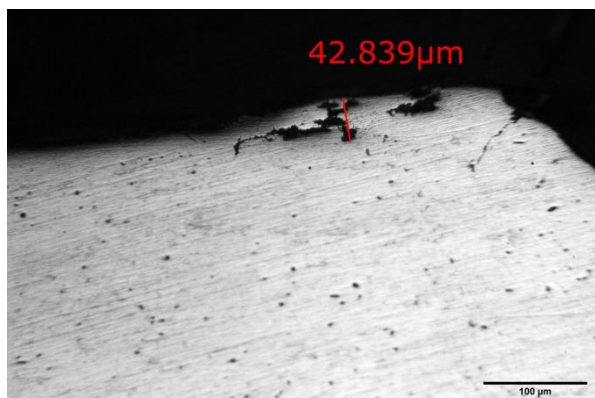


(ε)

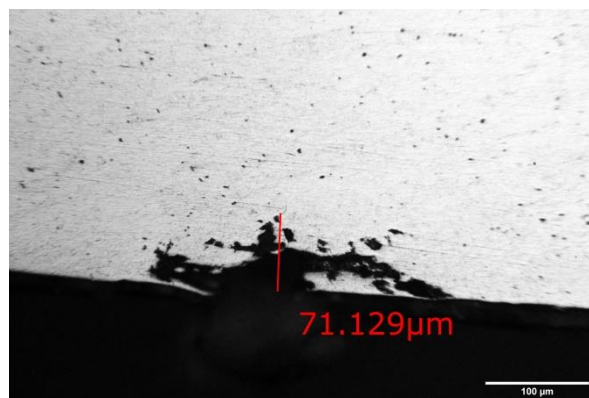


(ζ)

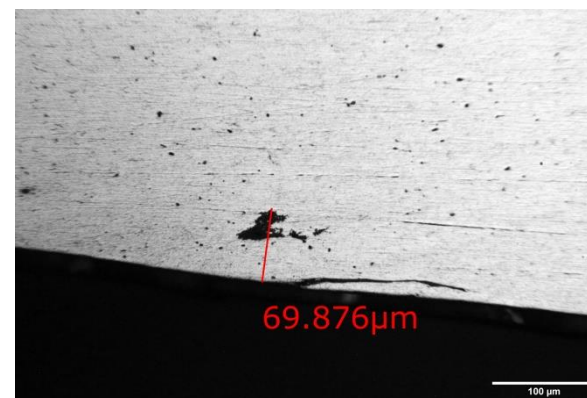
Εικόνα 25: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 1^ο δοκίμιο (AT1), α έως και ζ.



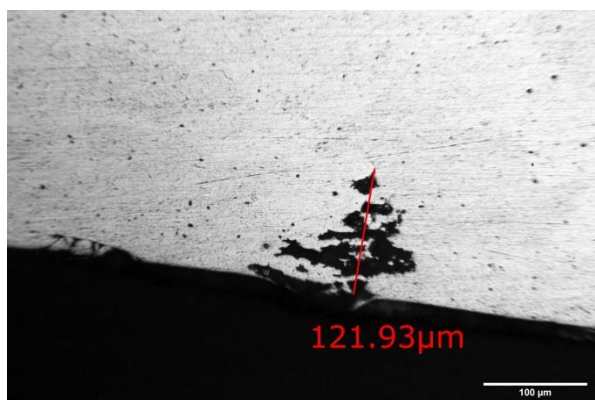
(α)



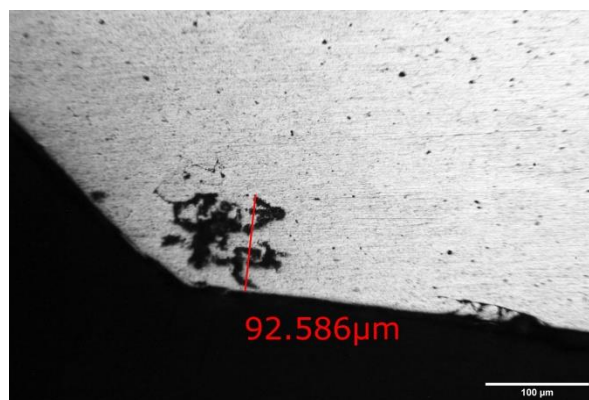
(β)



(γ)

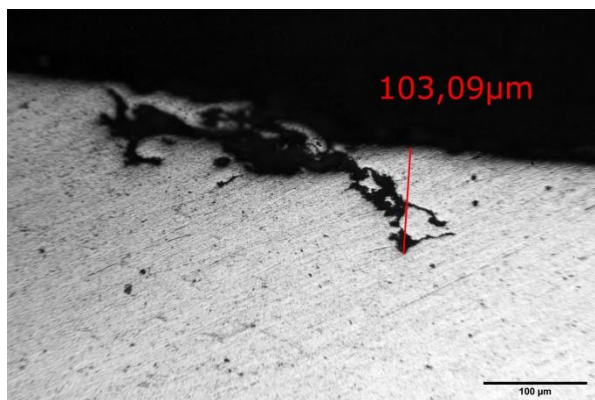


(δ)

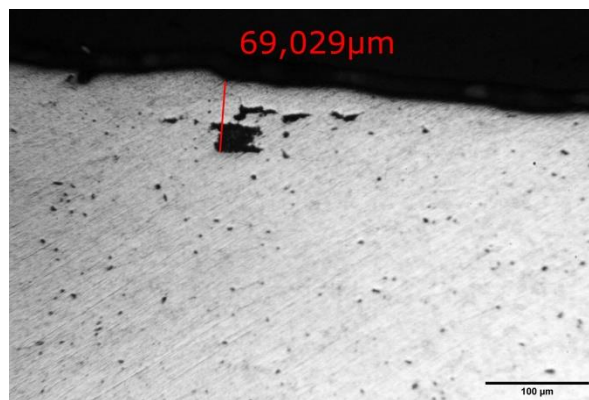


(ε)

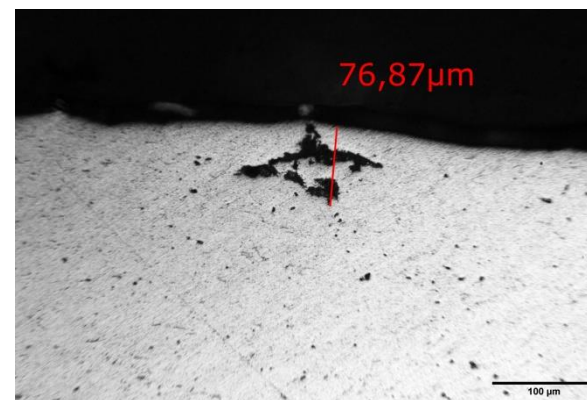
Εικόνα 26: Μεταλλογραφία της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 1^ο δοκίμιο (AT1), α. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 1^ο δοκίμιο (AT1), β έως και ζ.



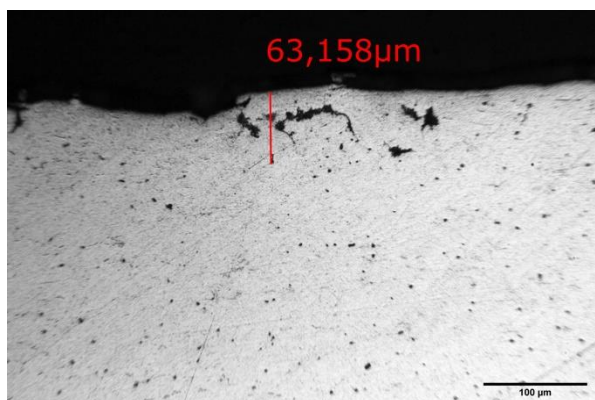
(α)



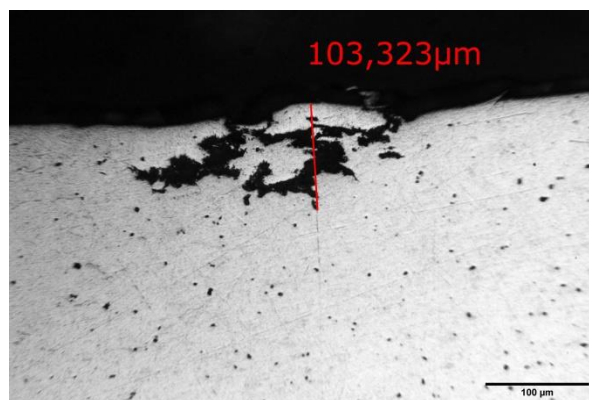
(β)



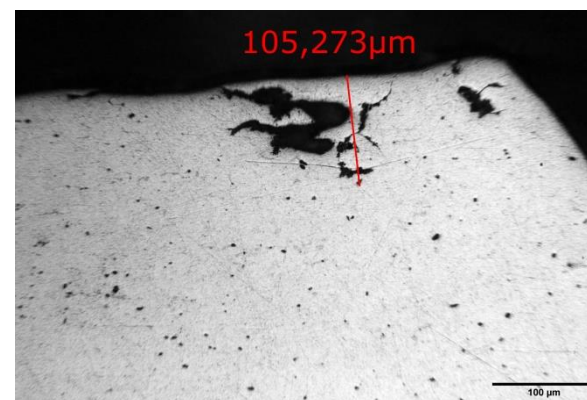
(γ)



(δ)

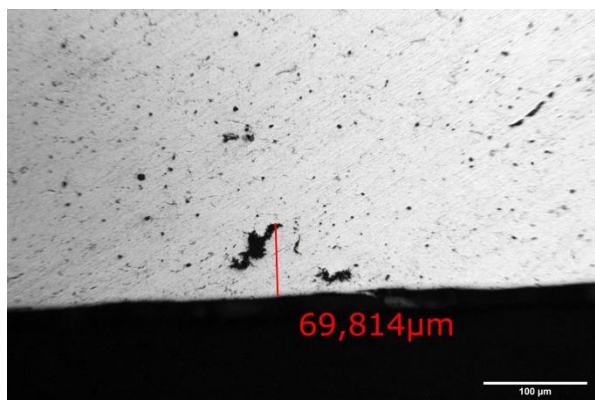


(ε)

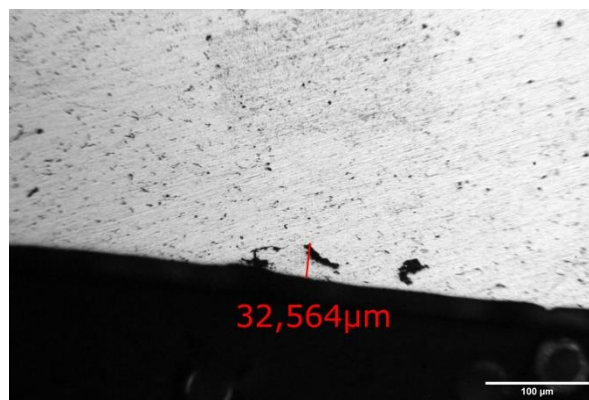


(ζ)

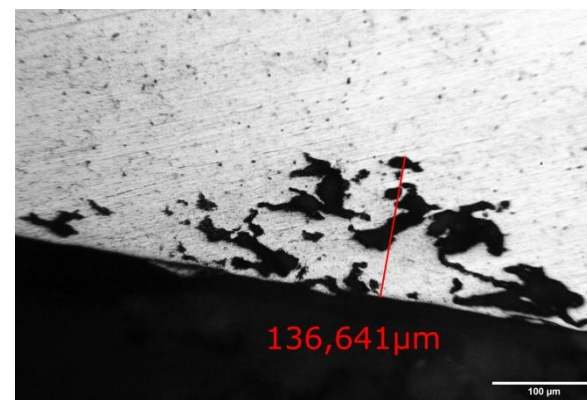
Εικόνα 27: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 2^ο δοκίμιο (AT2), α έως και ζ.



(α)

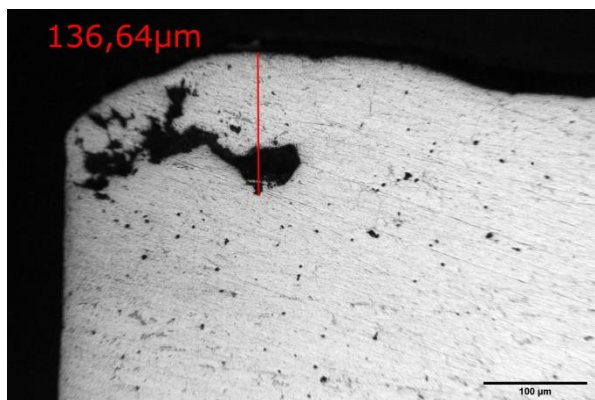


(β)

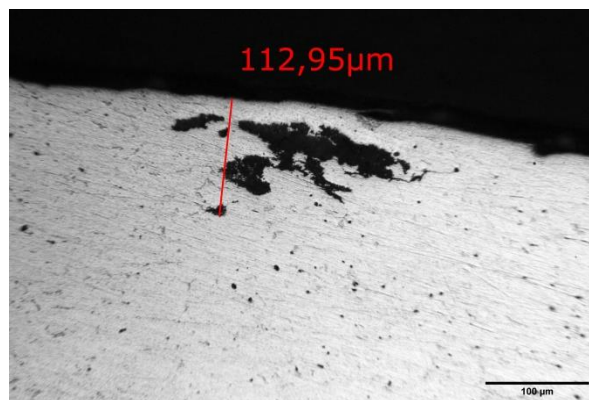


(γ)

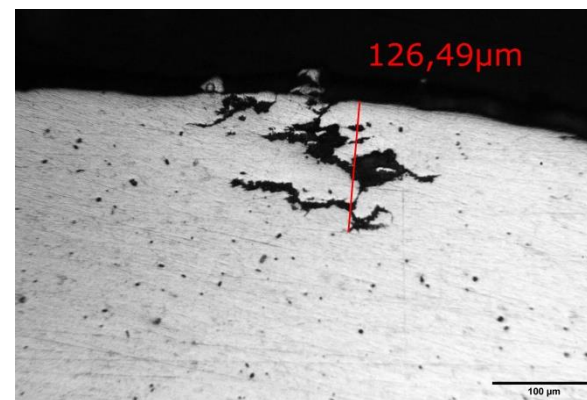
Εικόνα 28: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 2^ο δοκίμιο (AT2), α έως και γ.



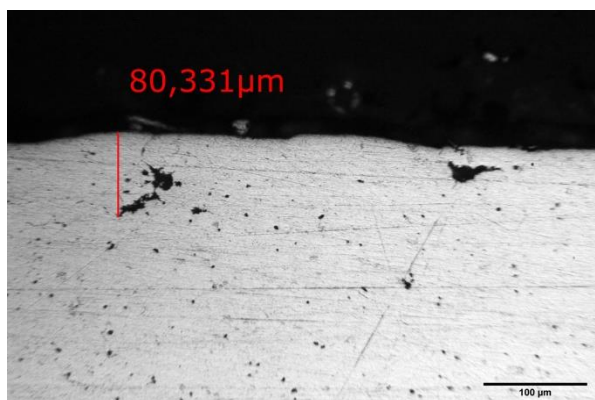
(α)



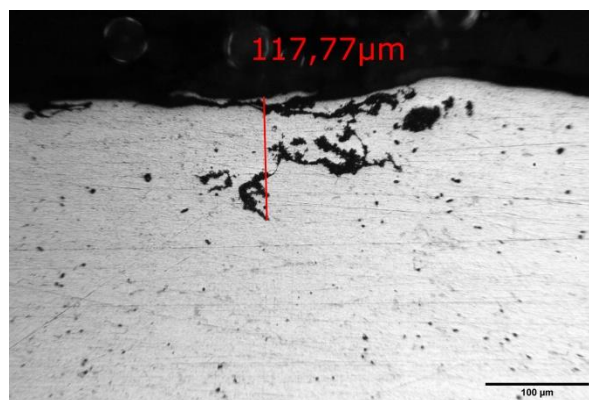
(β)



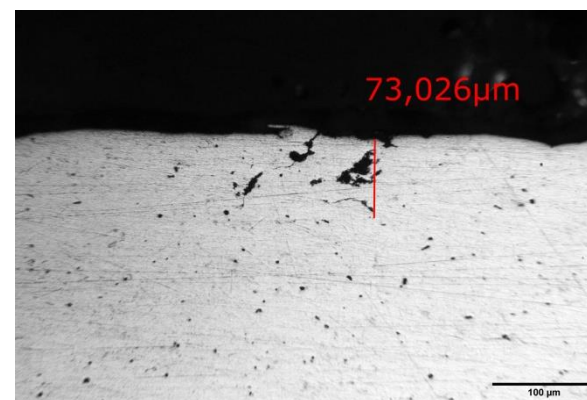
(γ)



(δ)

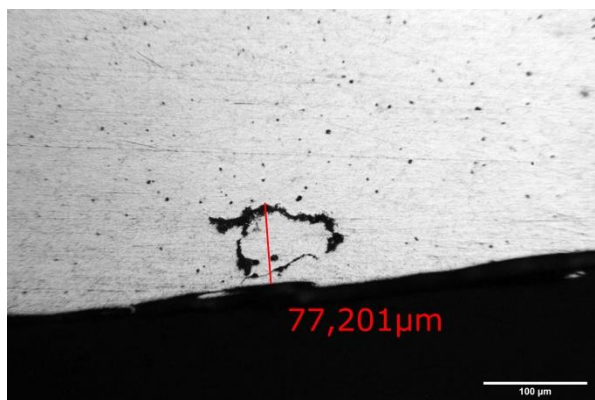


(ε)

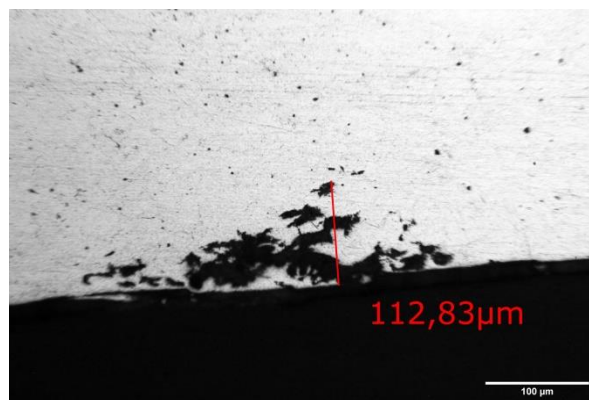


(ζ)

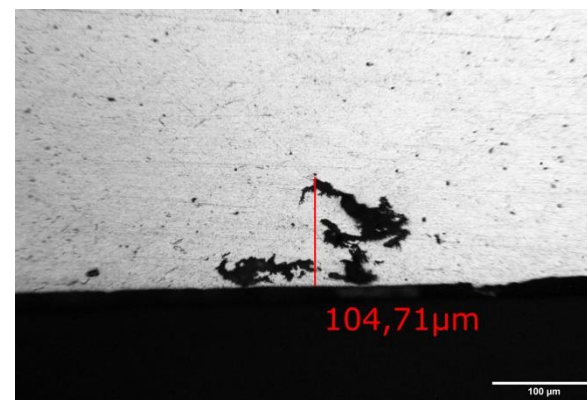
Εικόνα 29: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 3^ο δοκίμιο (AT3), α έως και ζ.



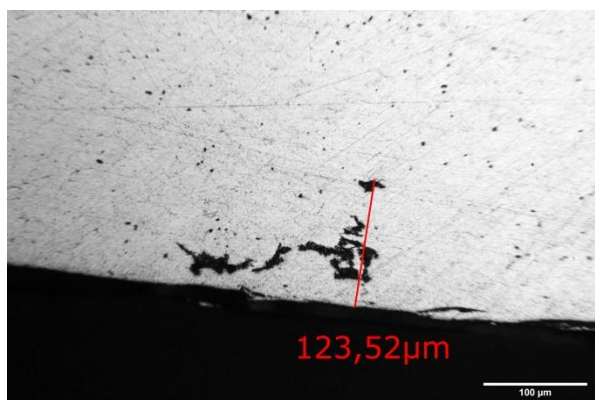
(α)



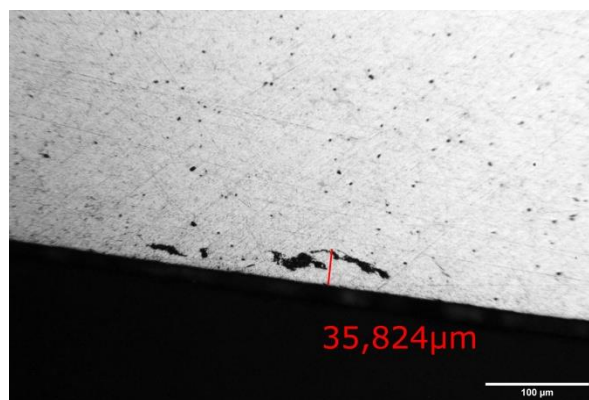
(β)



(γ)

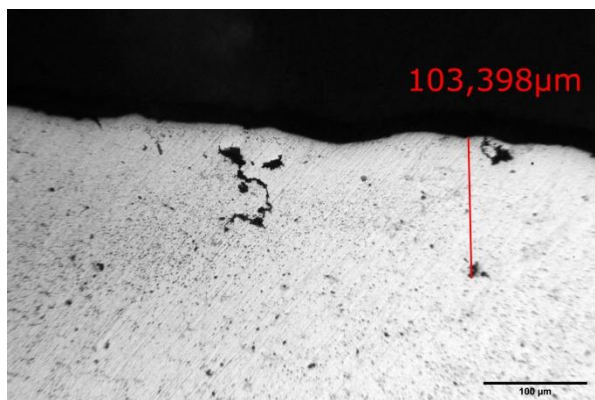


(δ)

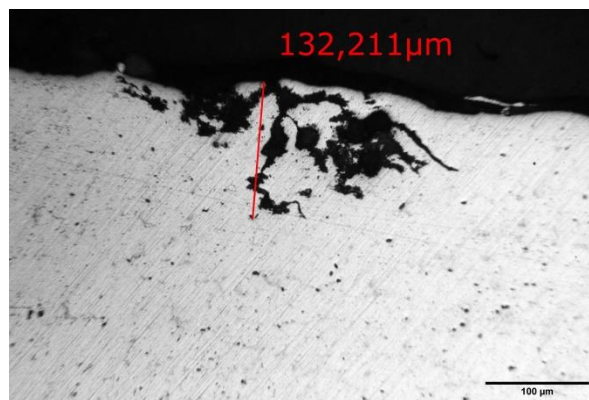


(ε)

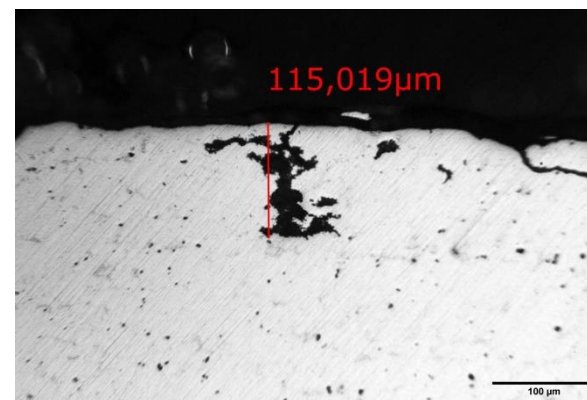
Εικόνα 30: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 3^ο δοκίμιο (AT3), α έως και ε.



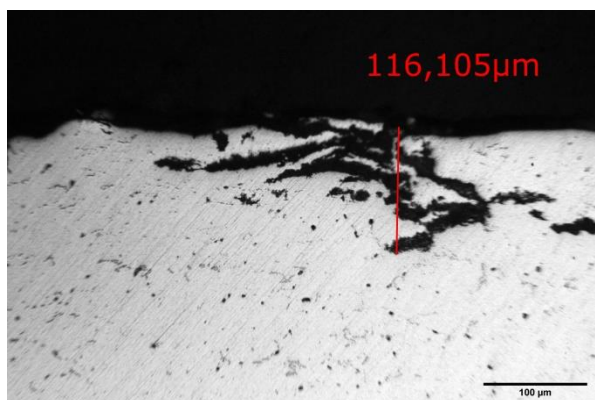
(α)



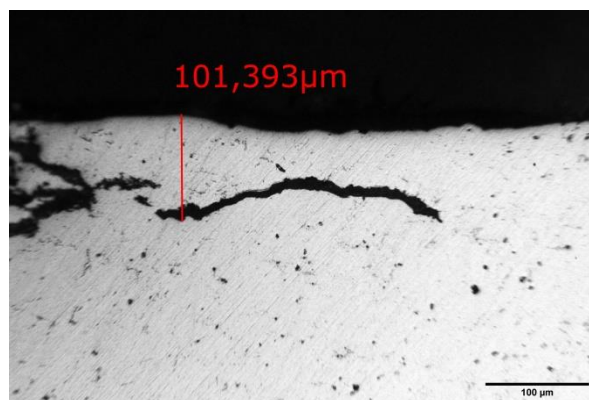
(β)



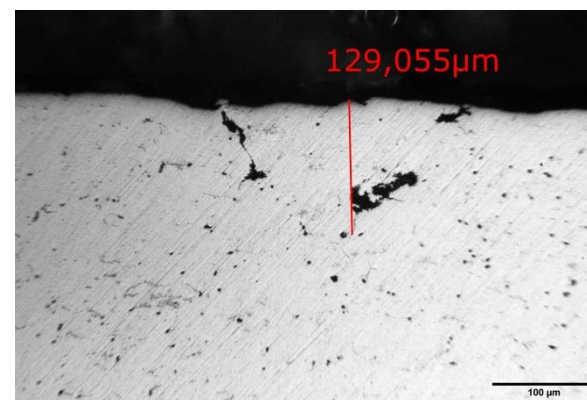
(γ)



(δ)

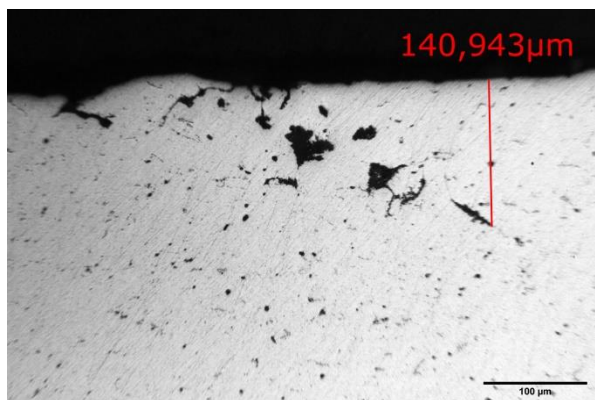


(ε)

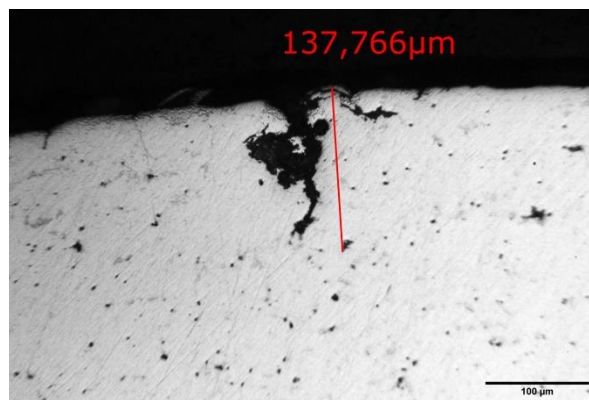


(ζ)

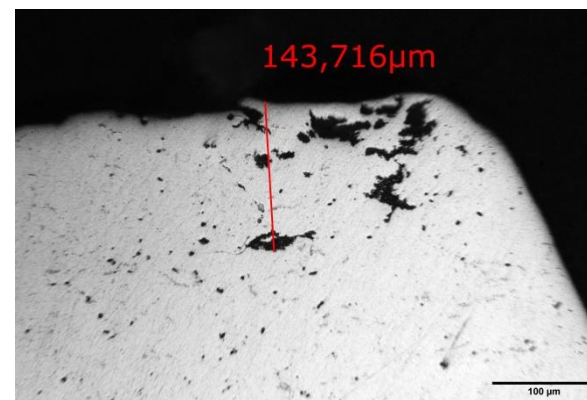
Εικόνα 31: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 4^ο δοκίμιο (AT4), α έως και ζ.



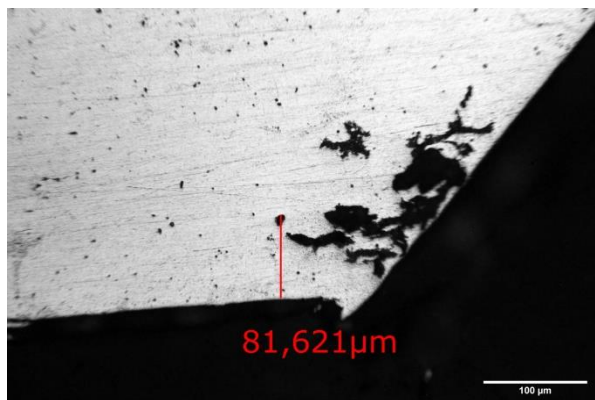
(α)



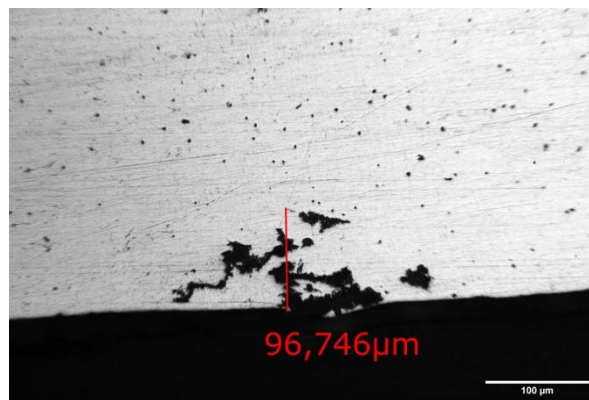
(β)



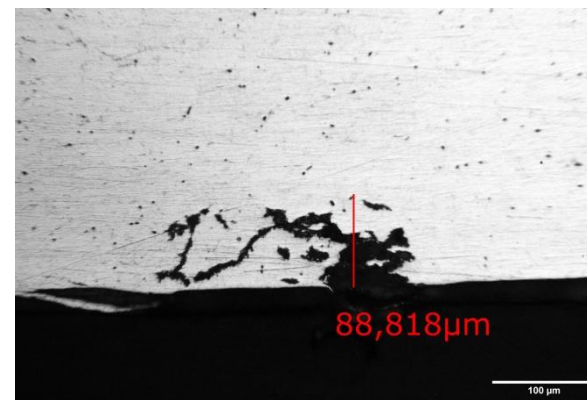
(γ)



(δ)

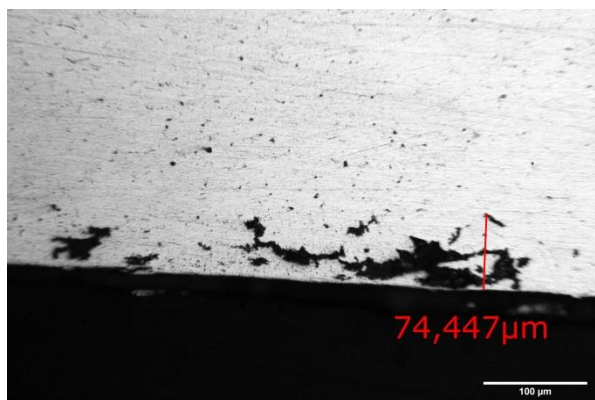


(ε)

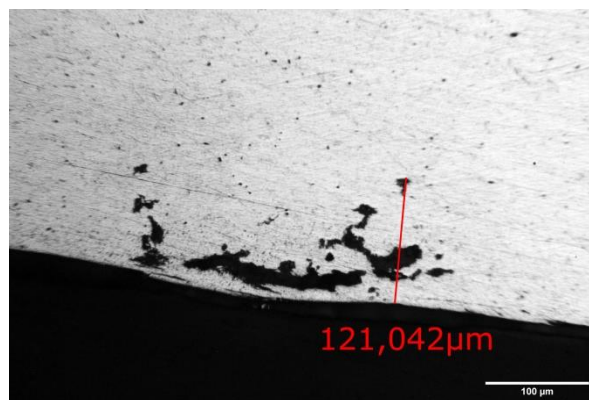


(ζ)

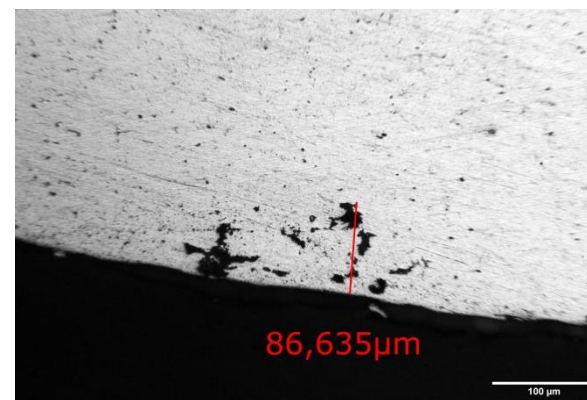
Εικόνα 32: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 4° δοκίμιο (AT4), α, β και γ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 4° δοκίμιο (AT4), δ, ε και ζ.



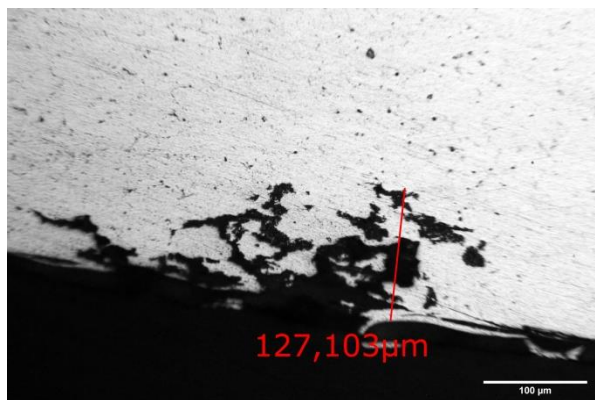
(α)



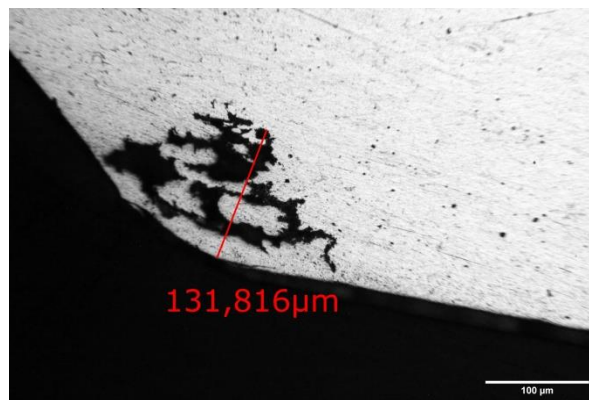
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

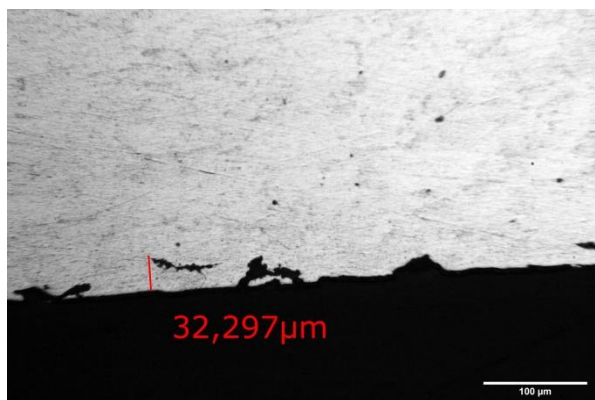
Εικόνα 33: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 140mm, 4^ο δοκίμιο (AT4), α έως και ε.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμών της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm.

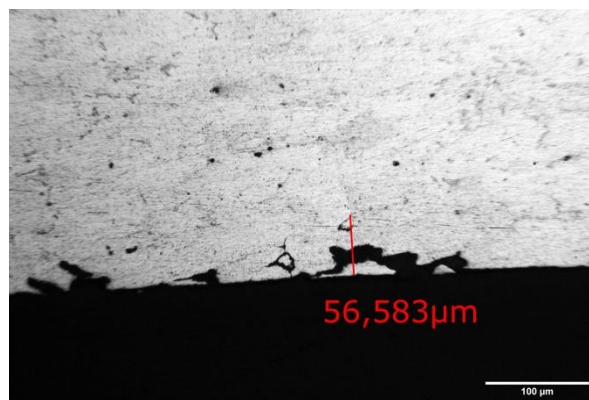
A/A		Μήκος (μm)	A/A		Μήκος (μm)	A/A		Μήκος (μm)	A/A		Μήκος (μm)
BB1 IN			1	45.318		1	102.651		1	138.664	
			2	69.69		2	44.123		2	127.112	
			3	40.325		3	80.932		3	104.607	
			4	50.069		4	82.918		4	46.826	
						5	142.765		5		
						6	163.799		6		
					7	168.093		7			
					8	125.107					
					9	113.696					
	MEAN	-	MEAN	51.3505	MEAN	113.7871	MEAN	104.3022			
	MAX	-	MAX	69.69	MAX	168.093	MAX	138.664			
BB1 OUT	1	32.297	1	131.605	1	106.215	1	159.473			
	2	56.583	2	67.108	2	100.216	2	102.802			
			3	75.669	3	87.658	3	154.454			
			4	61.856	4	96.163	4	97.477			
			5	85.529	5	114.046	5	77.81			
			6	79.082	6	67.363	6	78.292			
			7	66.431			7	116.464			
							8	149.517			
							9	92.126			
							10	86.307			
							11	151.432			
	MEAN	44.44	MEAN	81.04	MEAN	95.2768	MEAN	115.1049			
	MAX	56.583	MAX	131.605	MAX	114.046	MAX	159.473			

Total MEAN 86.4716

Total MAX 168.093

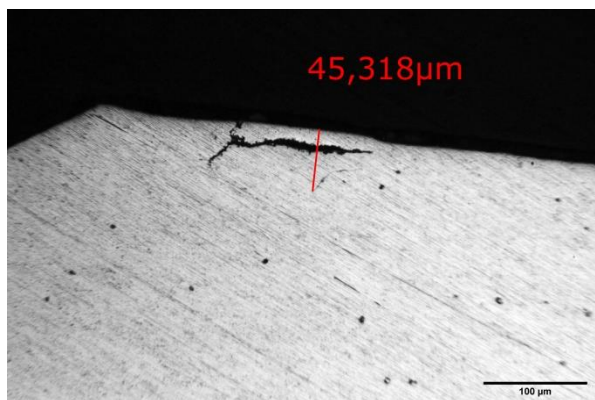


(α)

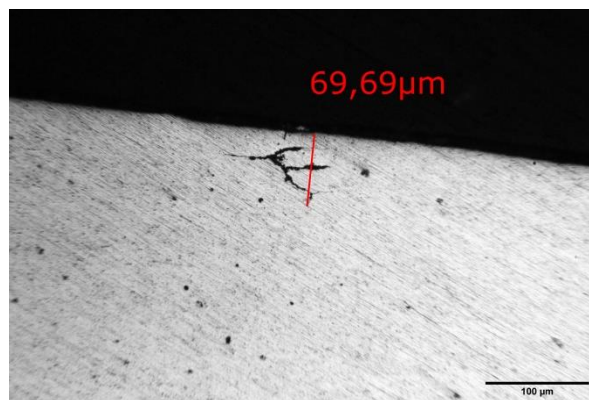


(β)

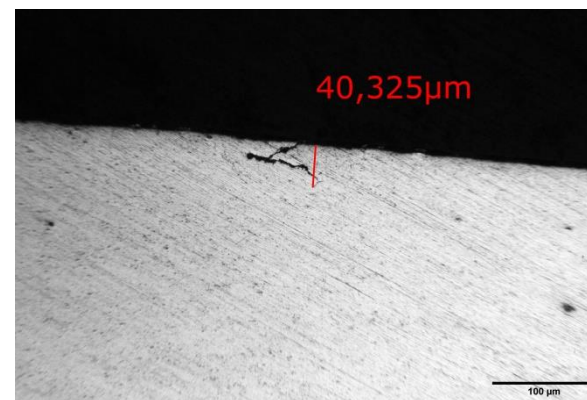
Εικόνα 34: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 1^ο δοκίμιο (BB1), α και β.



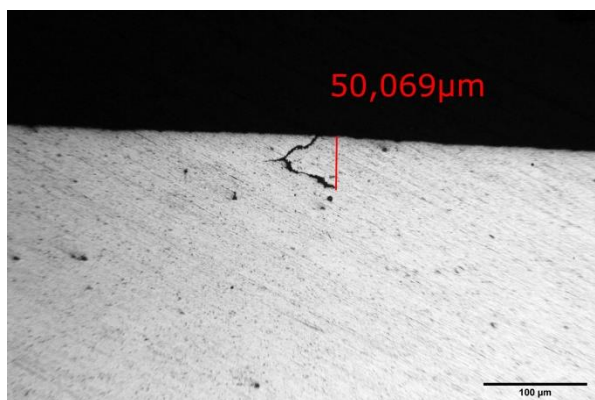
(α)



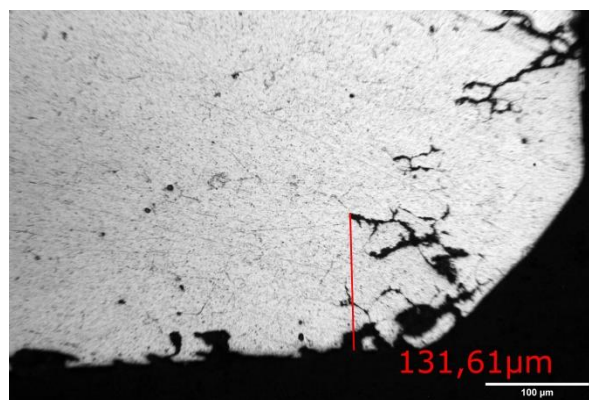
(β)



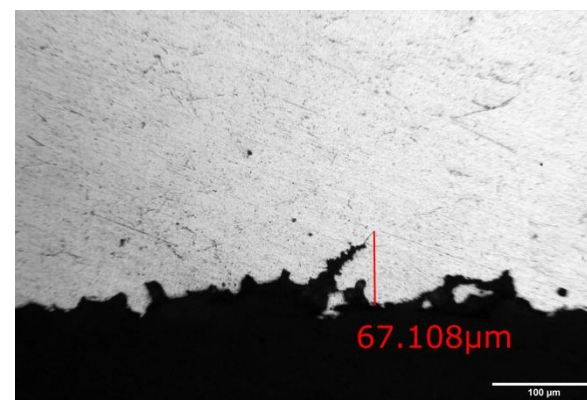
(γ)



(δ)

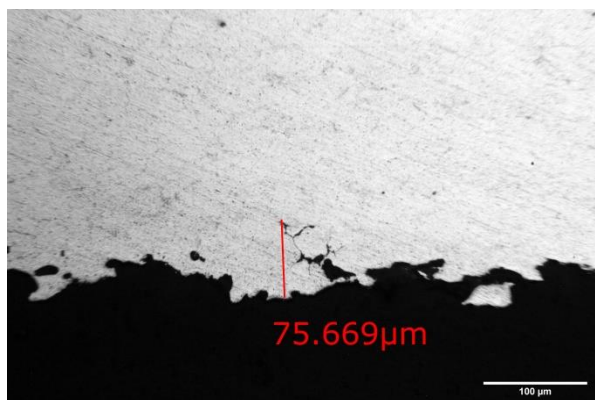


(ε)

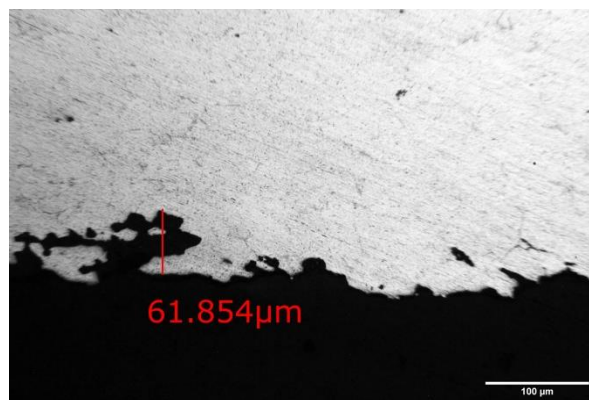


(ζ)

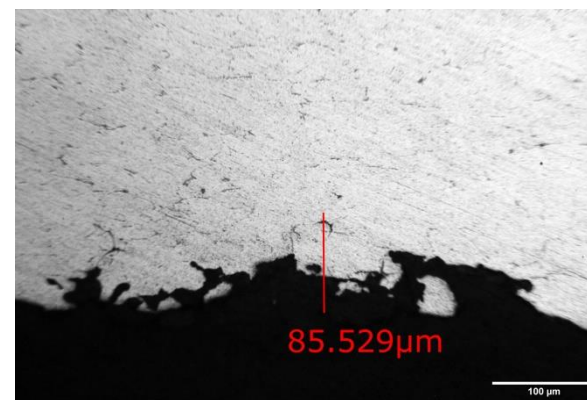
Εικόνα 35: : Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 2^ο δοκίμιο (BB2), α έως και δ. : Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 2^ο δοκίμιο (BB2), ε και ζ.



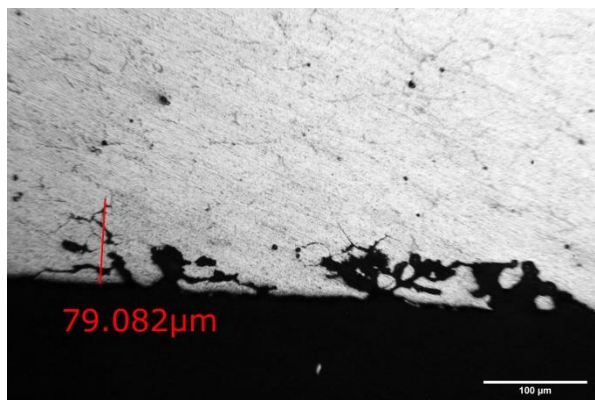
(α)



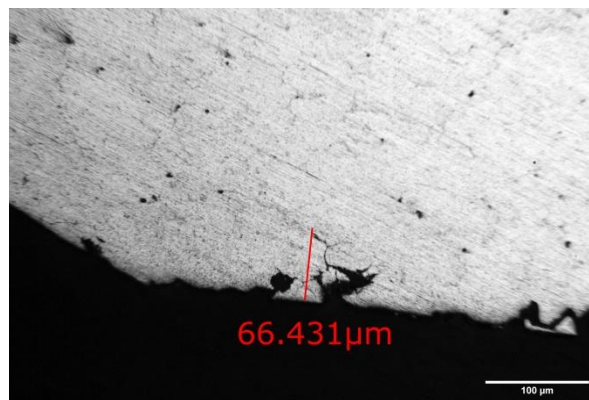
(β)



(γ)

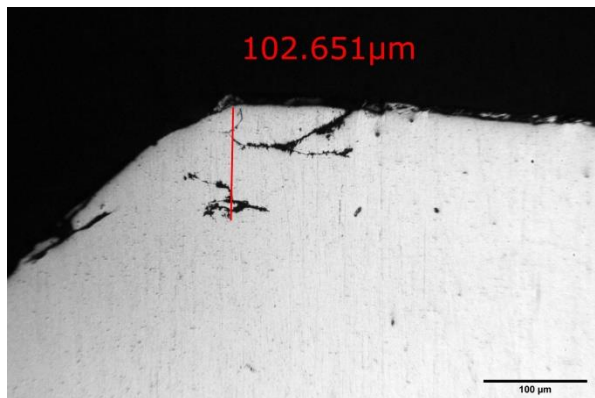


(δ)

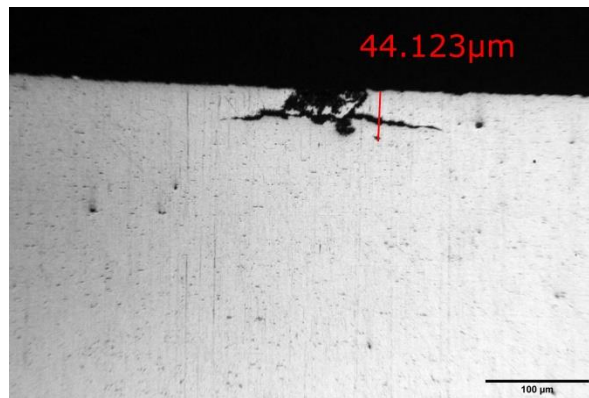


(ε)

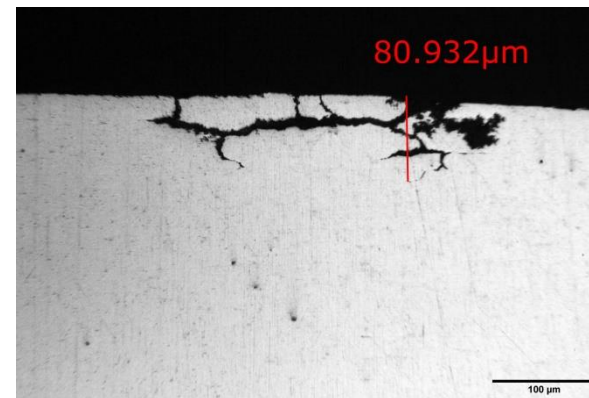
Εικόνα 36: : Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 2^ο δοκίμιο (BB2), α έως και ε.



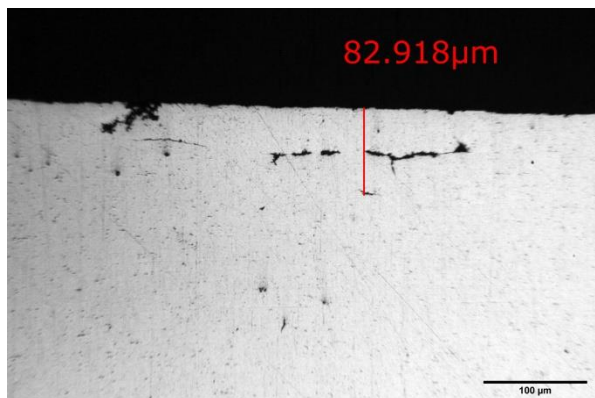
(α)



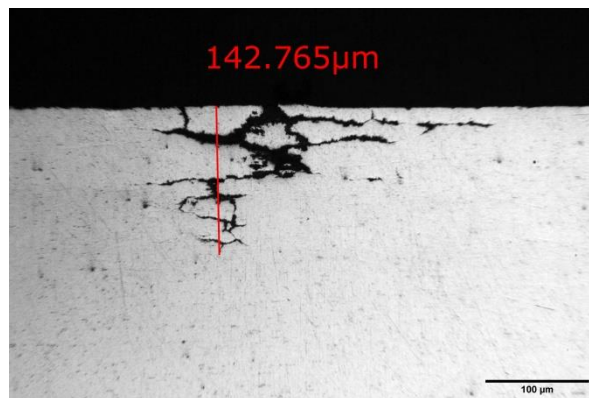
(β)



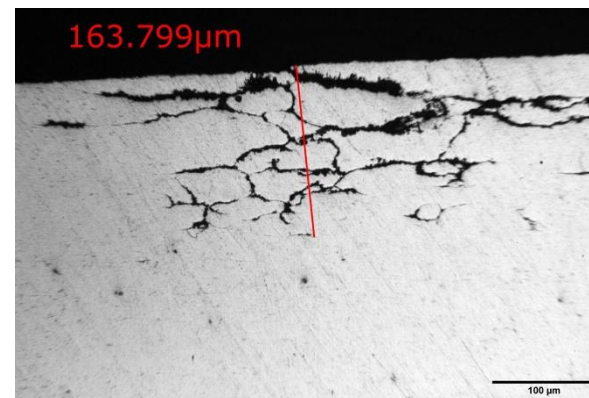
(γ)



(δ)

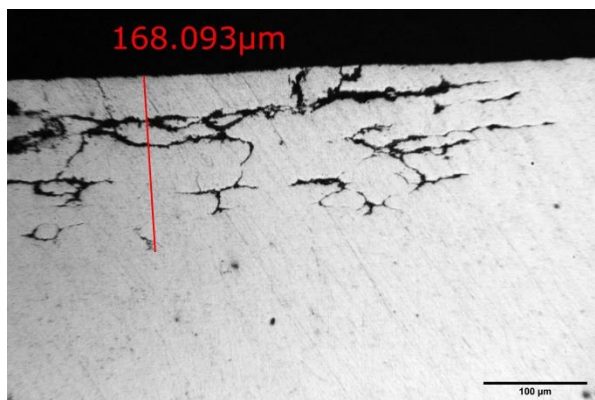


(ε)

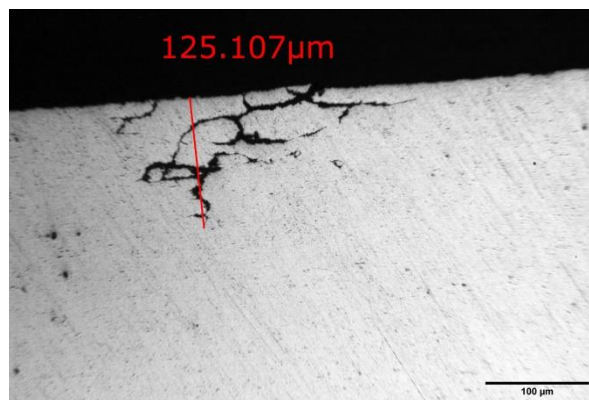


(ζ)

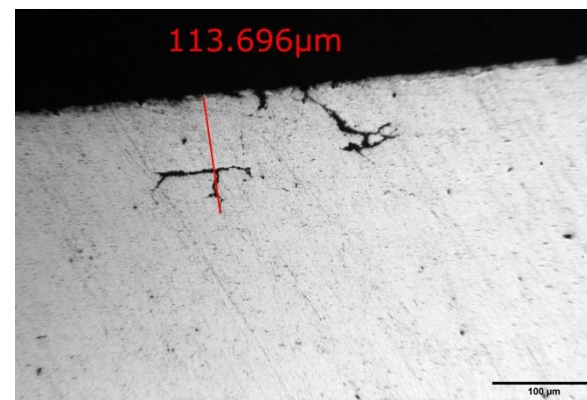
Εικόνα 37: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BB3), α έως και ζ.



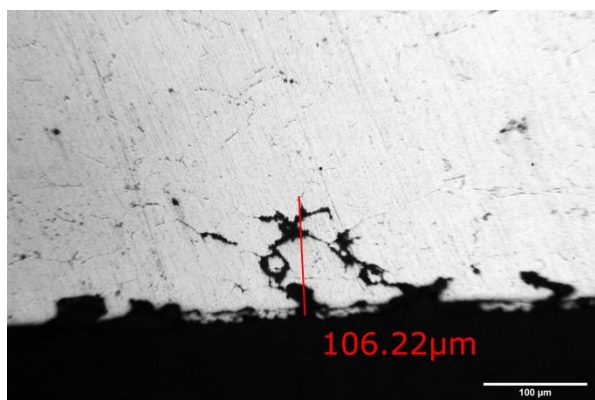
(α)



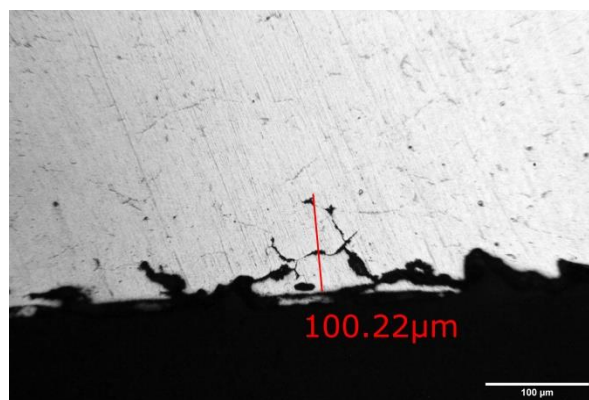
(β)



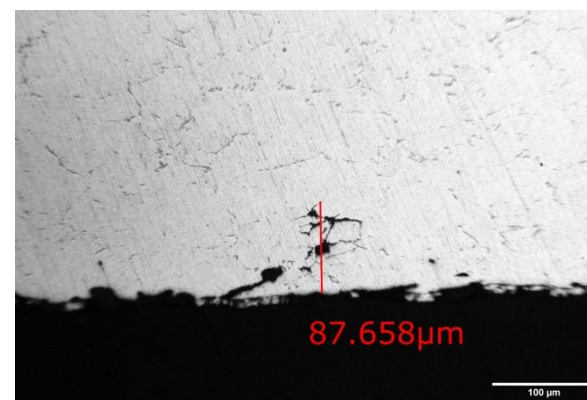
(γ)



(δ)

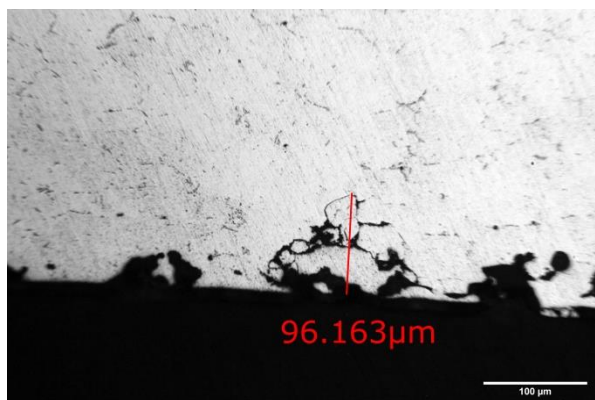


(ε)

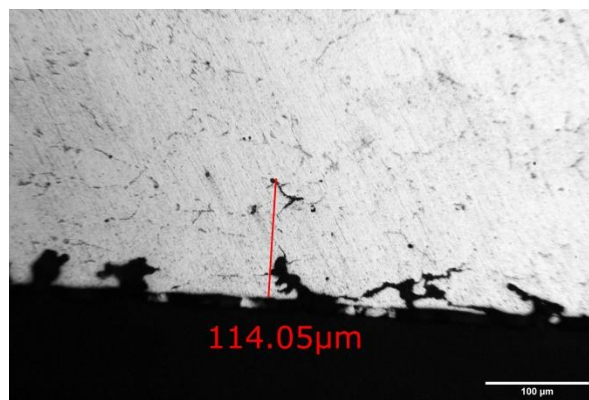


(ζ)

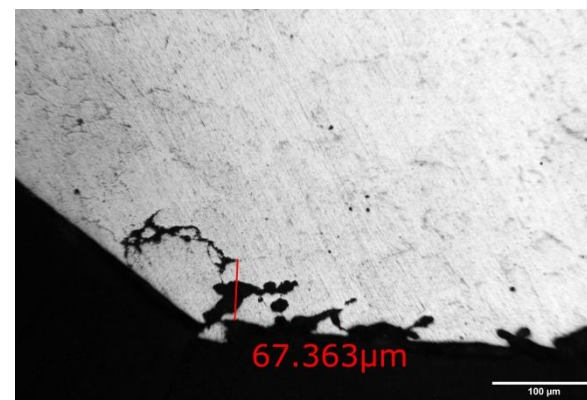
Εικόνα 38: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BB3), α, β και γ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BB3), δ, ε και ζ.



(α)

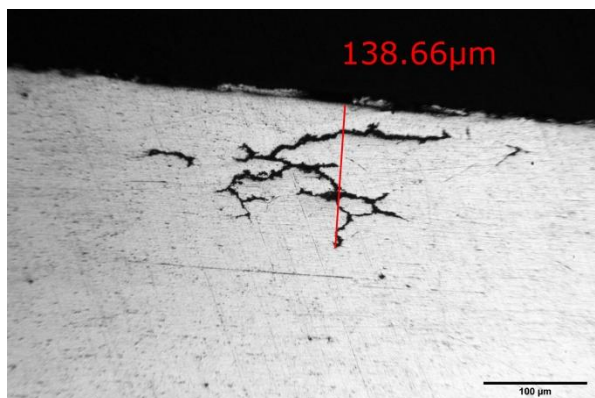


(β)

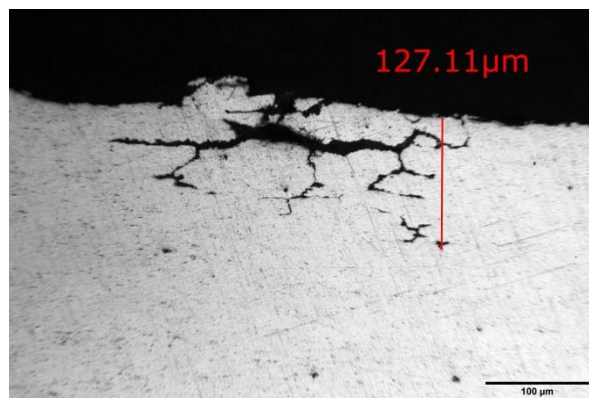


(γ)

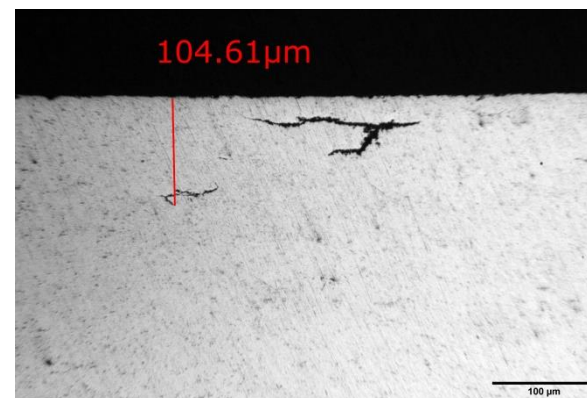
Εικόνα 39: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BB3), α, β και γ.



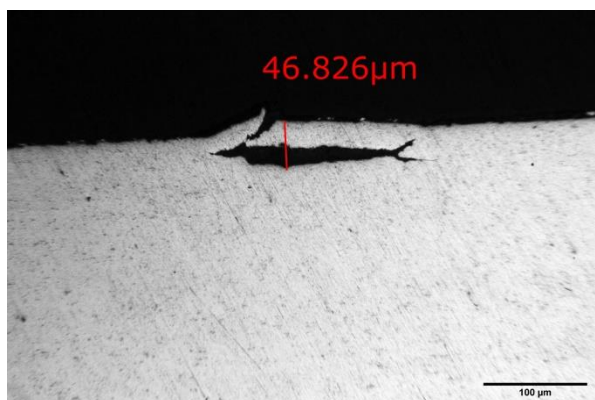
(α)



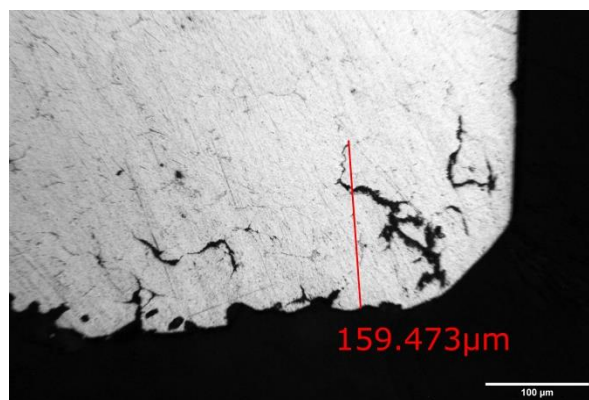
(β)



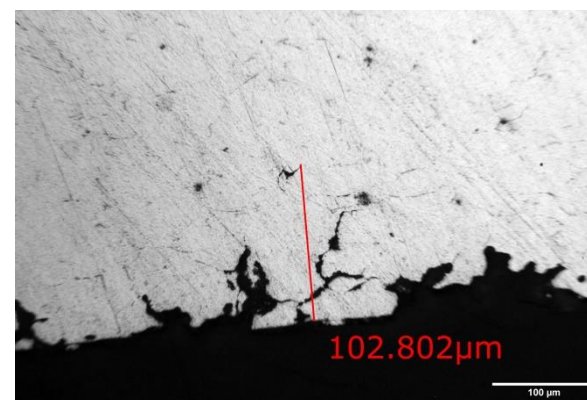
(γ)



(δ)

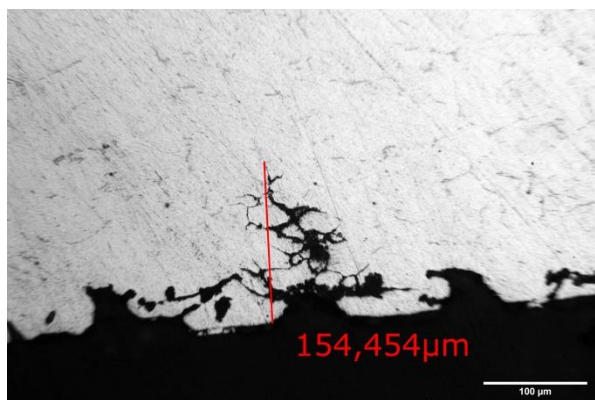


(ε)

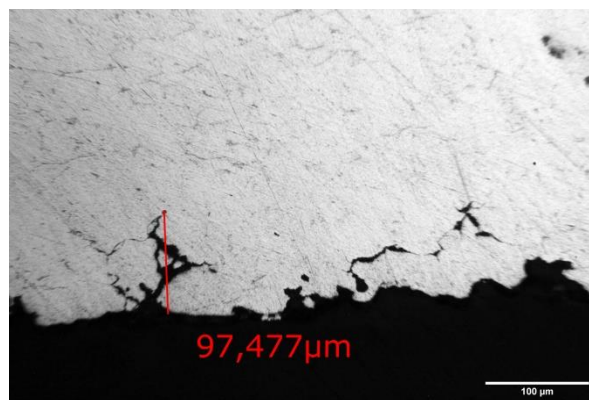


(ζ)

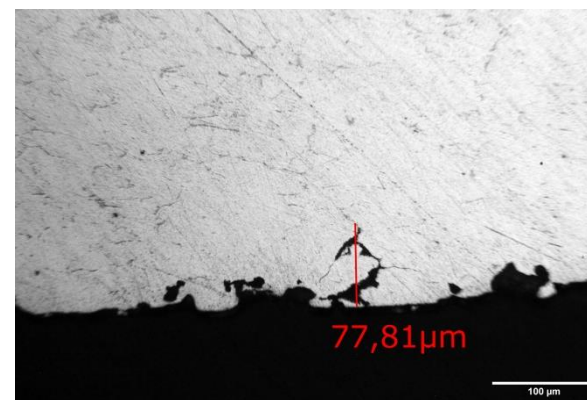
Εικόνα 40: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BB4), α έως και δ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BB4), ε και ζ.



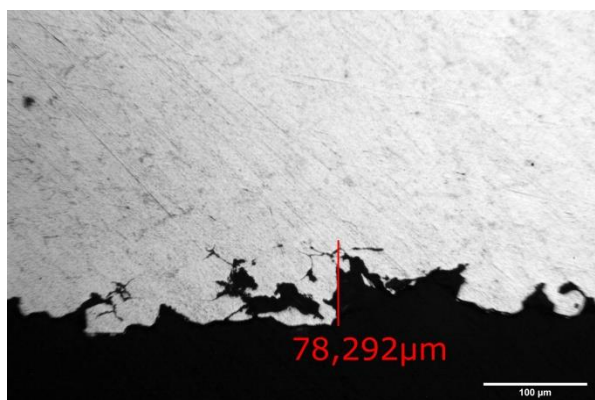
(α)



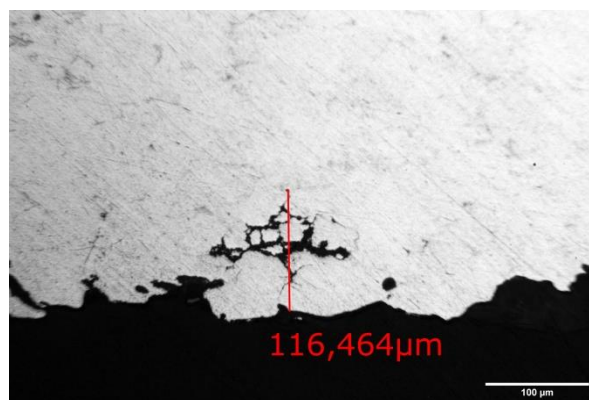
(β)



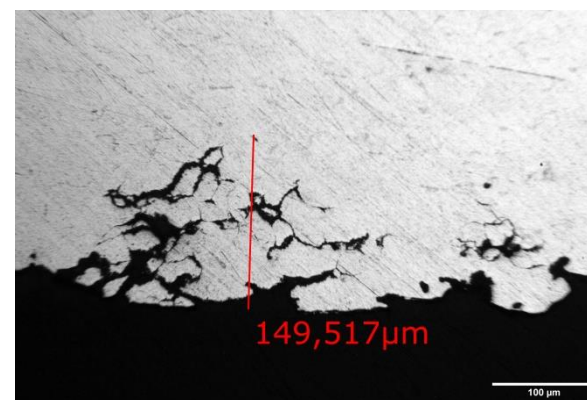
(γ)



(δ)

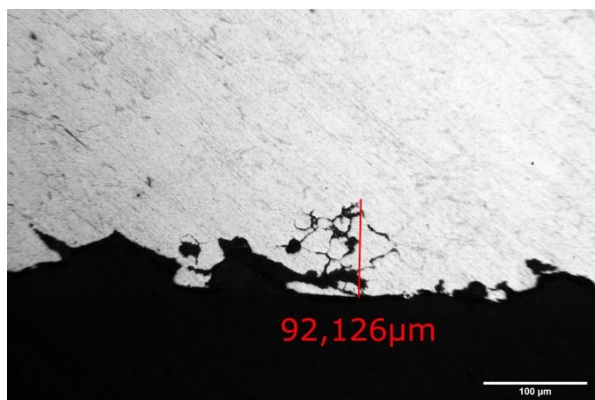


(ε)

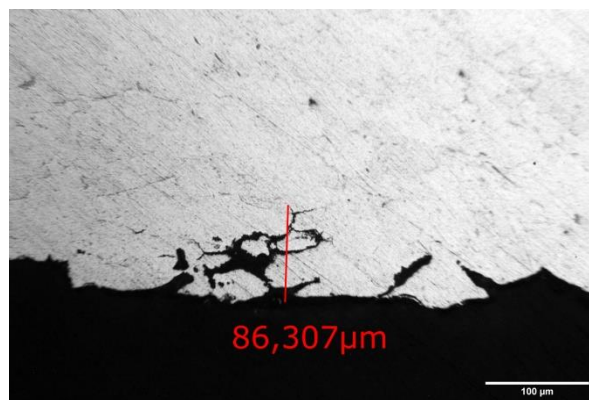


(ζ)

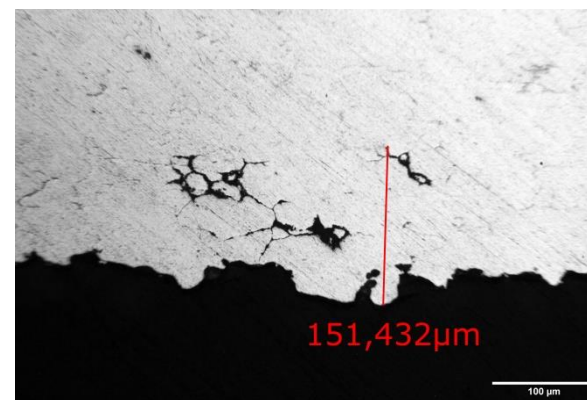
Εικόνα 41: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BB4), α έως και ζ.



(α)



(β)



(γ)

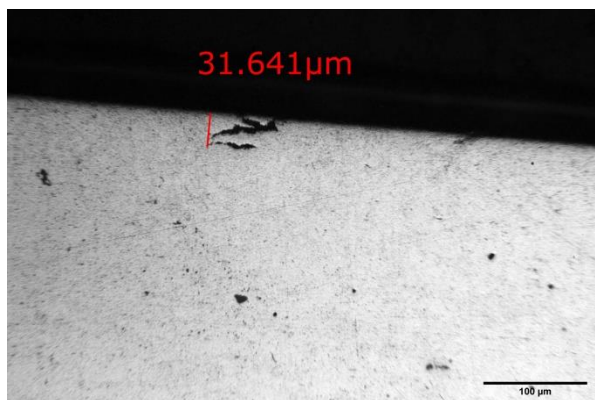
Εικόνα 42: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας της βάσης φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BB4), α, β και γ.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμών του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm.

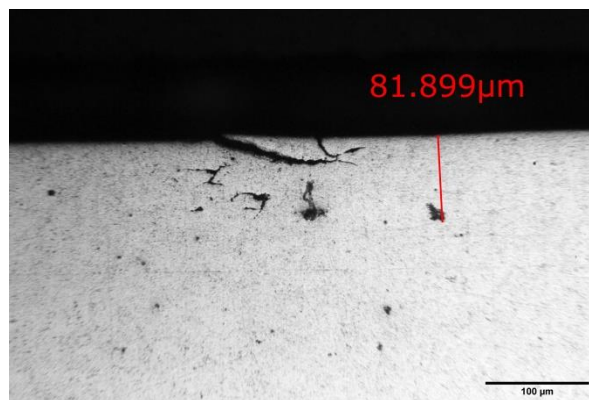
	A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)
BC1 IN	1	31.641	BC2 IN	1	21.216	BC3 IN	1	46.752	BC4 IN	1	67.926
	2	81.899		2	76.974		2	75.414		2	68.142
	3	147.857		3	101.676		3	51.083			
				4	126.077		4	51.61			
				5	43.086		5	83.093			
				6	51.539						
	MEAN	87.1323		MEAN	73.8058		MEAN	59.9151		MEAN	68.034
	MAX	147.857		MAX	126.077		MAX	83.093		MAX	68.142
BC1 OUT	1	55.051	BC2 OUT	1	79.736	BC3 OUT	1	96.269	BC4 OUT	1	56.96
	2	49.622		2	86.435		2	70.259		2	37.552
	3	107.164		3	131.055		3	96.493		3	51.421
	4	134.87		4	40.153		4	73.322		4	84.993
	5	81.794		5	71.056		5	87.747		5	67.766
	6	61.579		6	175.545		6	58.553		6	109.371
				7	79.18		7	106.871		7	132.431
							8	85.123			
							9	53.694			
	MEAN	81.68		MEAN	94.7371		MEAN	80.9256		MEAN	77.2134
	MAX	134.87		MAX	175.545		MAX	106.871		MAX	132.431

Total MEAN 77.9304

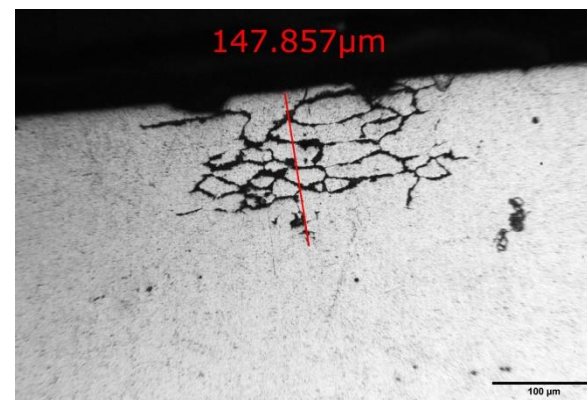
Total MAX 175.545



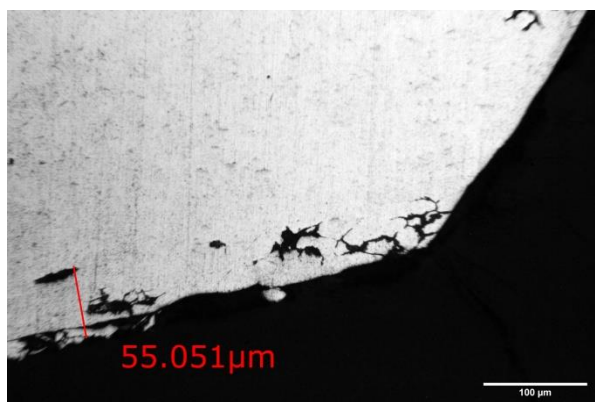
(α)



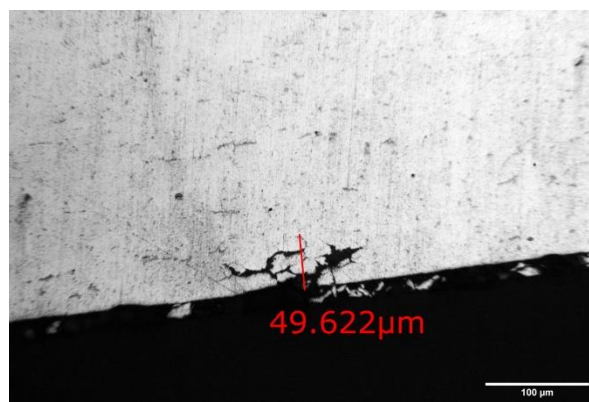
(β)



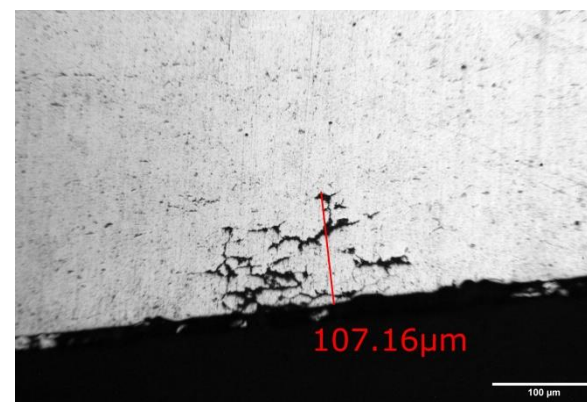
(γ)



(δ)

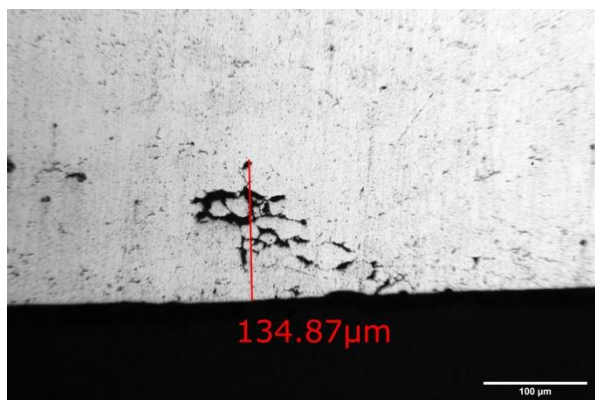


(ε)

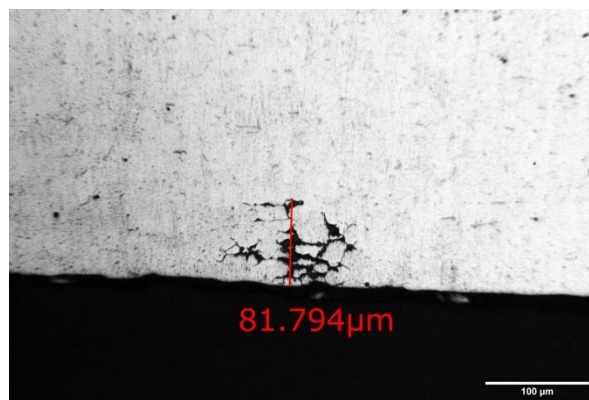


(ζ)

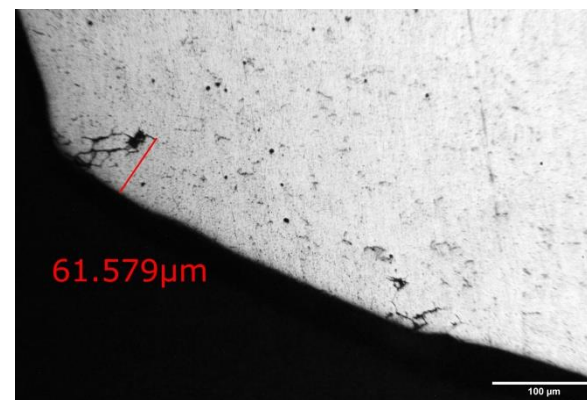
Εικόνα 43: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 1^ο δοκίμιο (BC1), α, β και γ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 1^ο δοκίμιο (BC1), δ, ε και ζ.



(α)

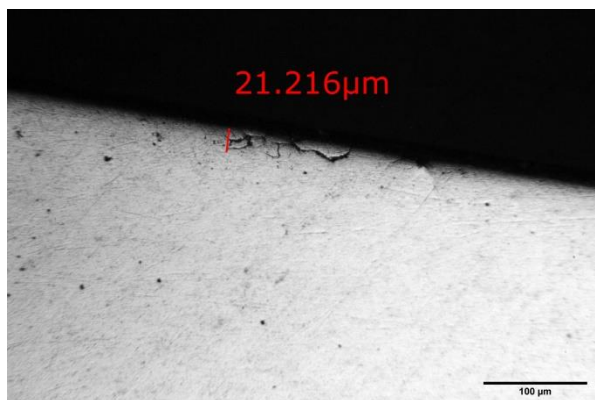


(β)

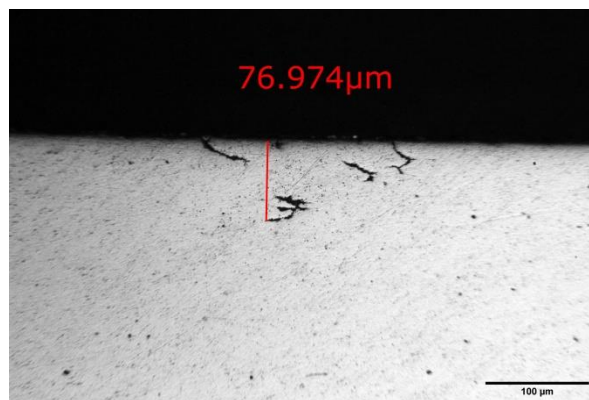


(γ)

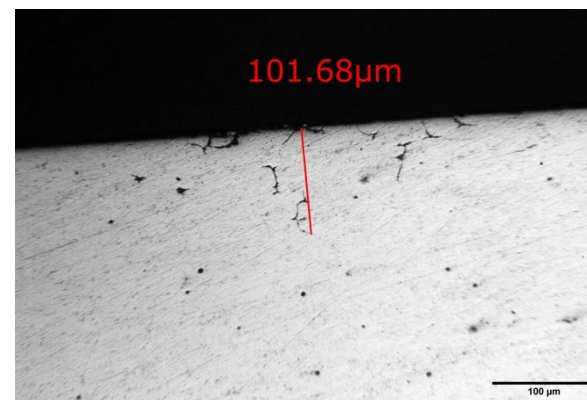
Εικόνα 44: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 1^ο δοκίμιο (BC1), α, β και γ.



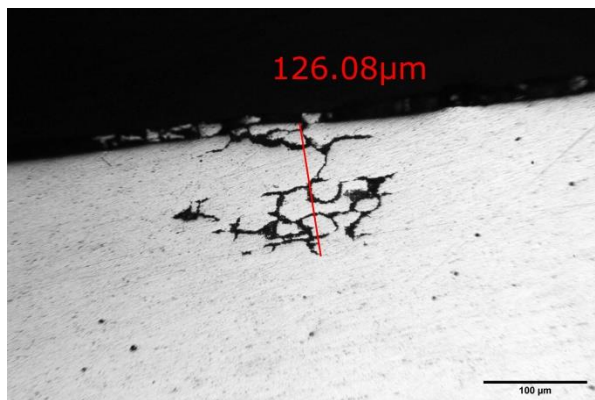
(α)



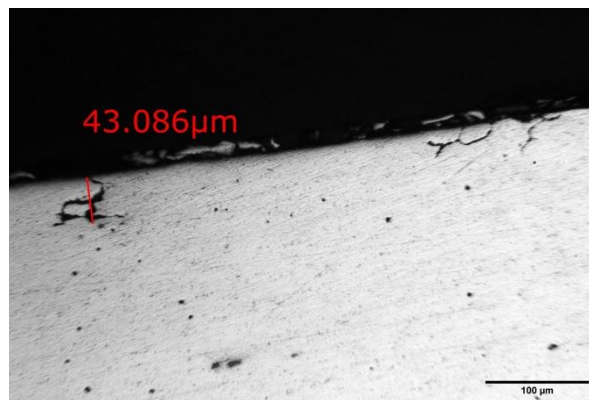
(β)



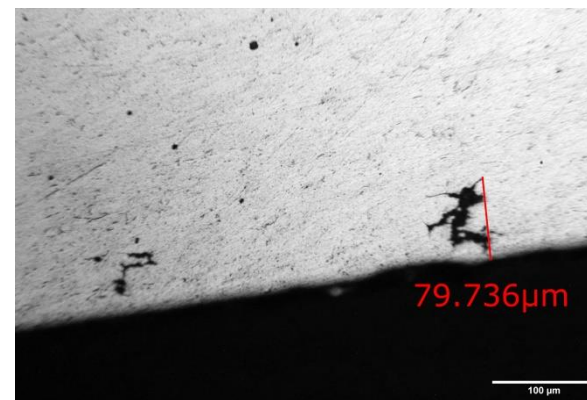
(γ)



(δ)

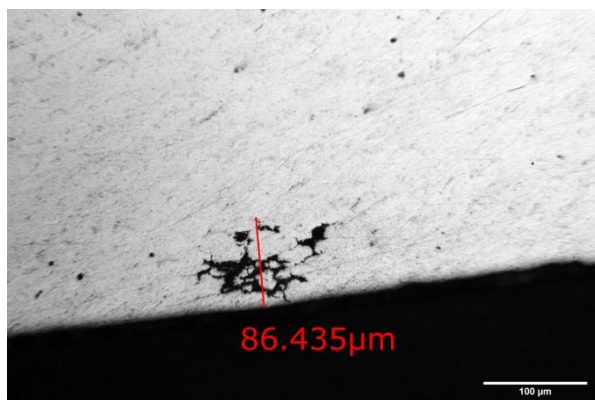


(ε)

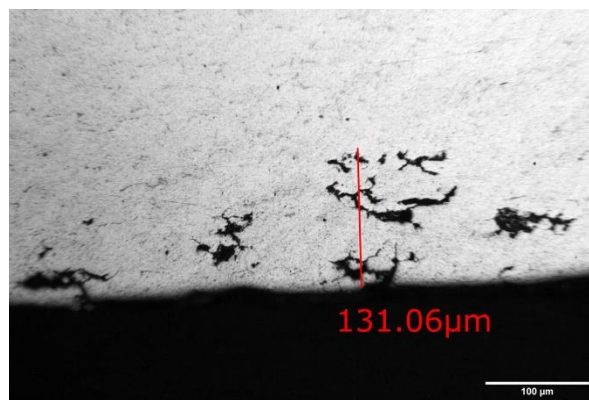


(ζ)

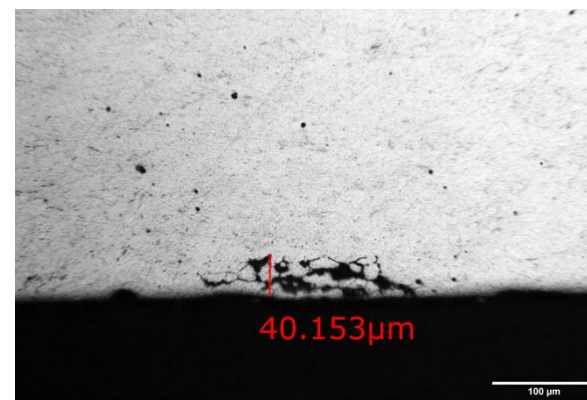
Εικόνα 45: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 2^ο δοκίμιο (BC2), α έως και ε. Μεταλλογραφία της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 2^ο δοκίμιο (BC2), ζ.



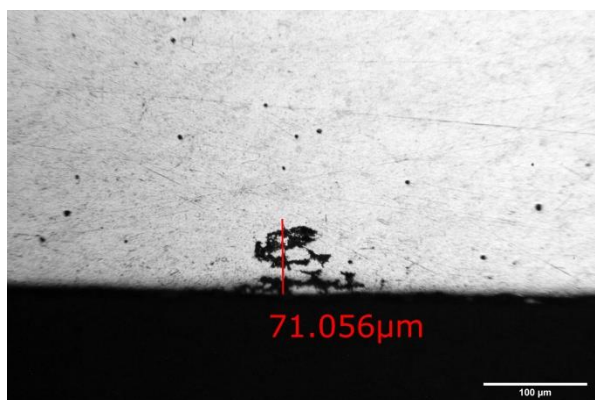
(α)



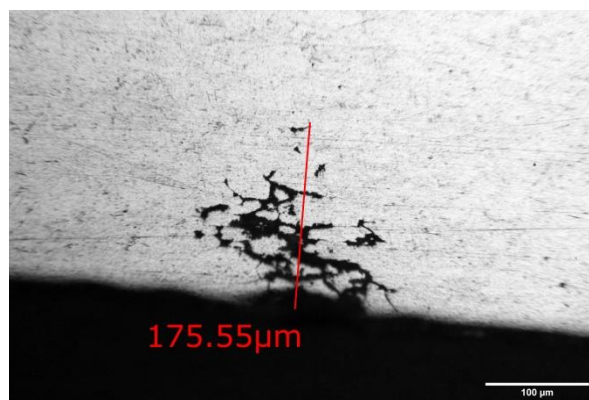
(β)



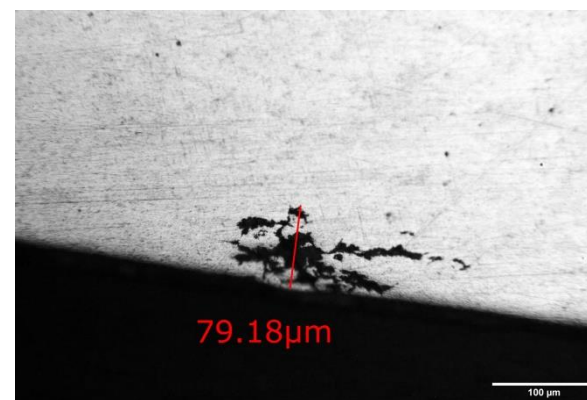
(γ)



(δ)

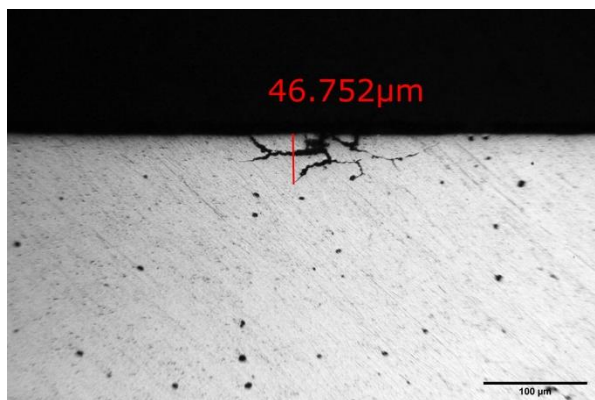


(ε)

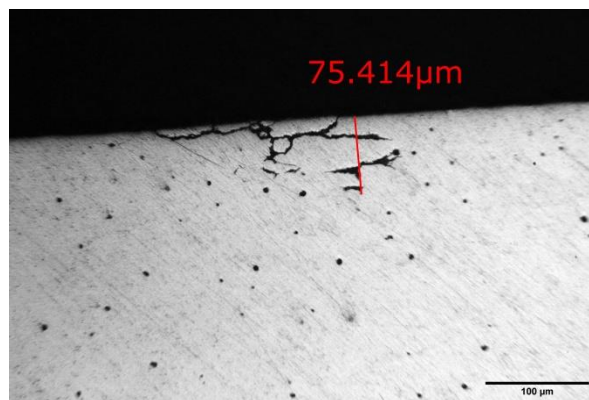


(ζ)

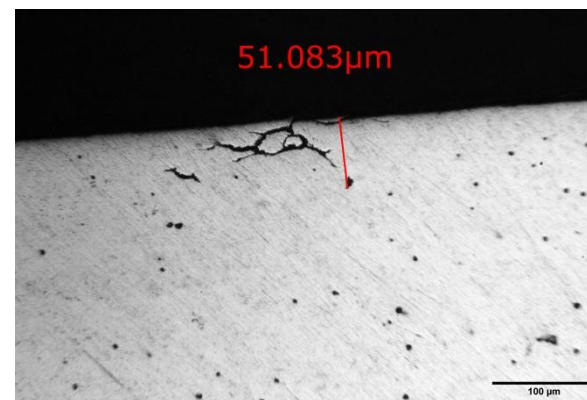
Εικόνα 46: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 2^ο δοκίμιο (BC2), α έως και ζ.



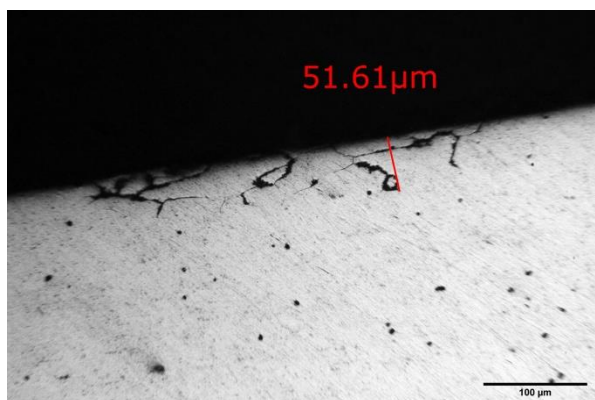
(α)



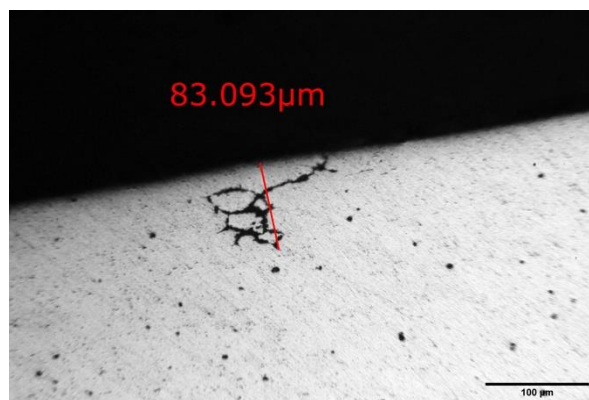
(β)



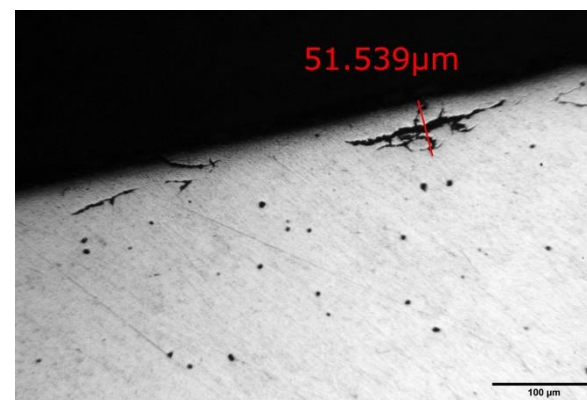
(γ)



(δ)

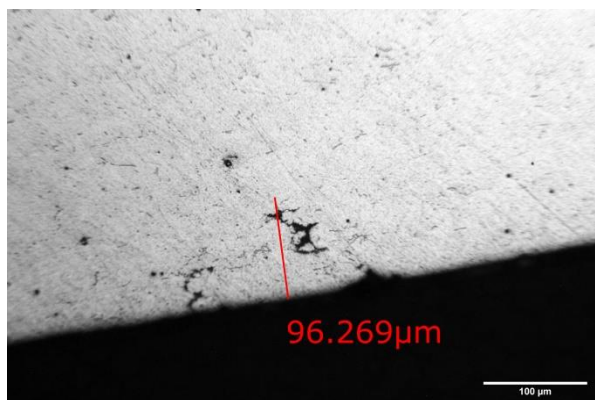


(ε)

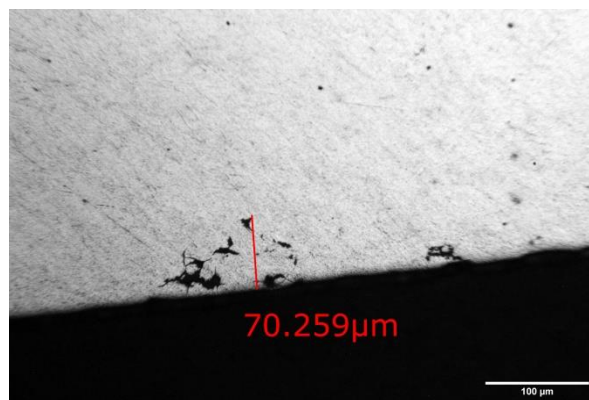


(ζ)

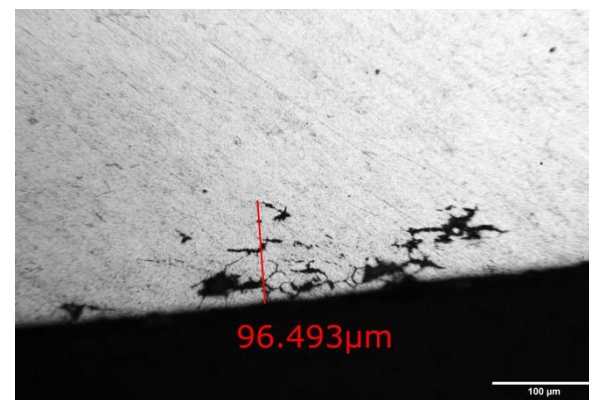
Εικόνα 47: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BC3), α έως και ζ.



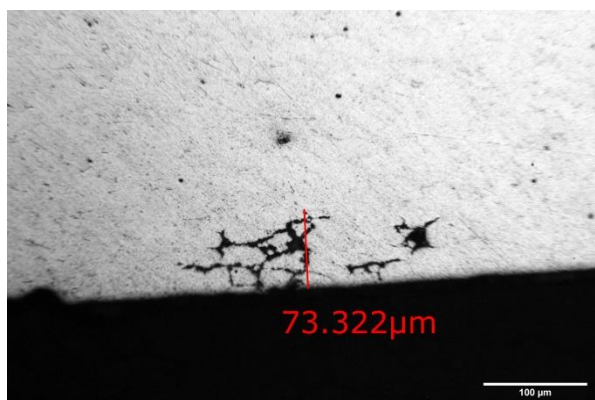
(α)



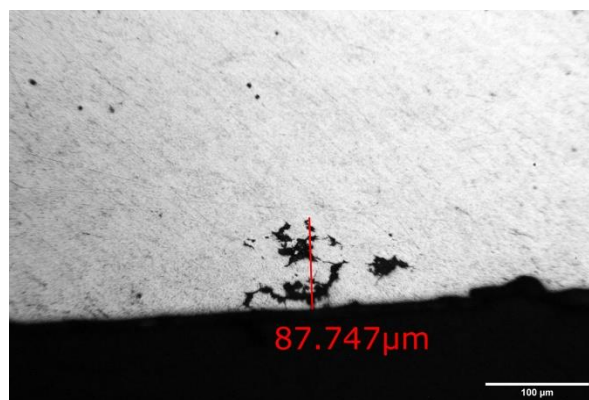
(β)



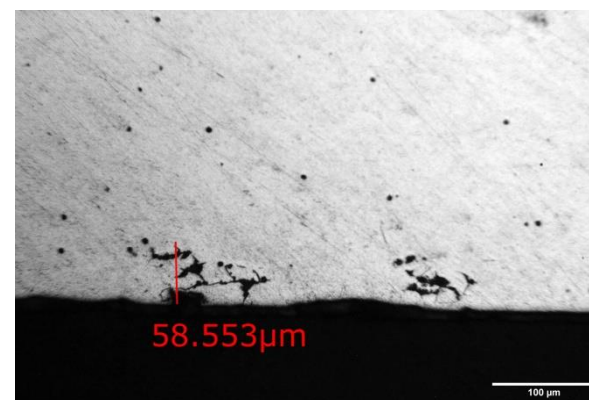
(γ)



(δ)

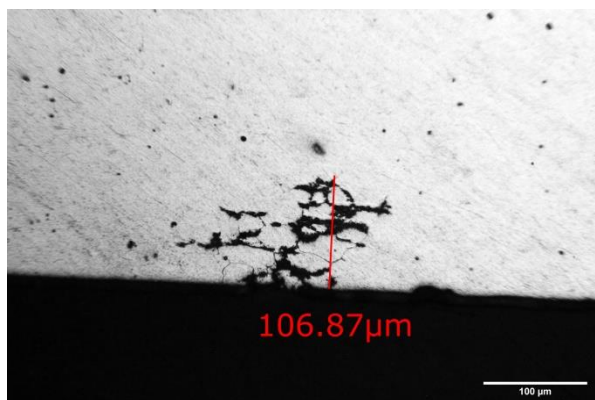


(ε)

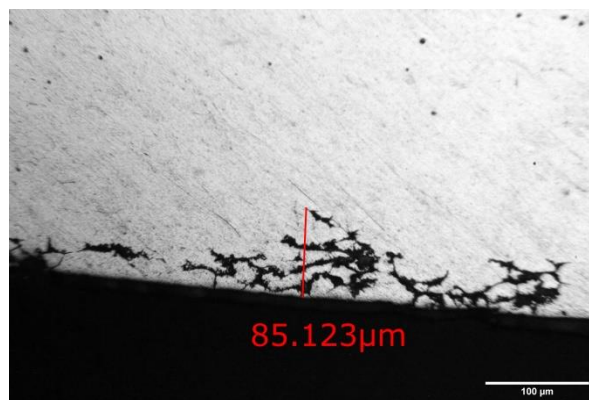


(ζ)

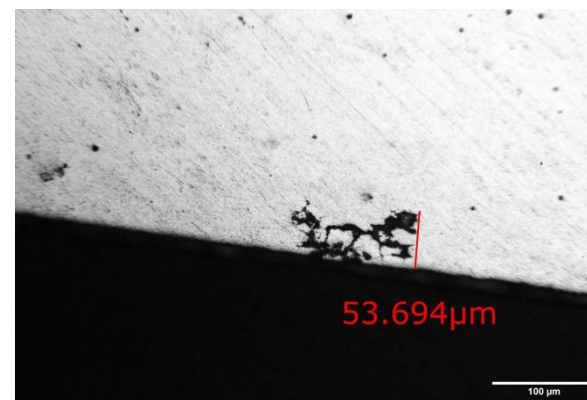
Εικόνα 48: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BC3), α έως και ζ.



(α)

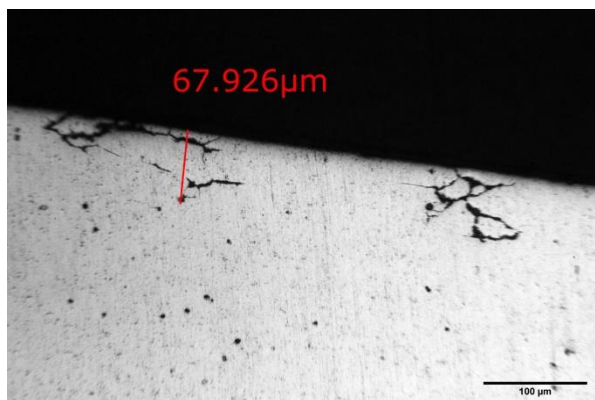


(β)

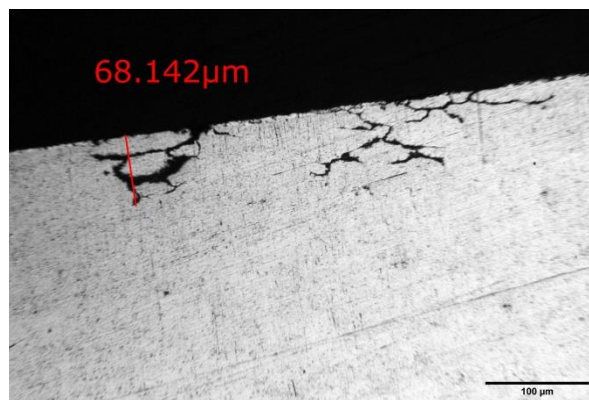


(γ)

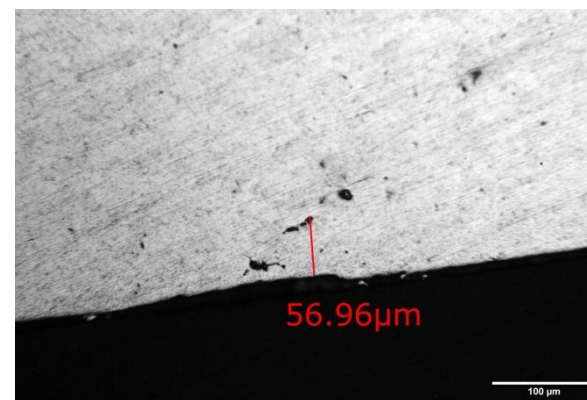
Εικόνα 49: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BC3), α, β και γ.



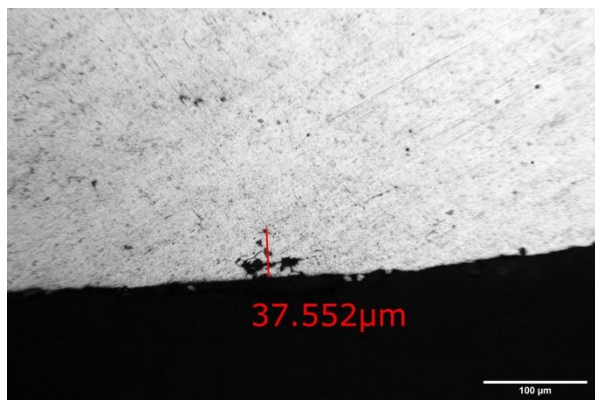
(α)



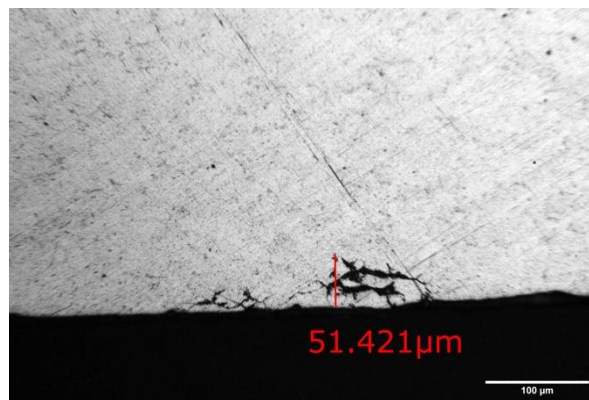
(β)



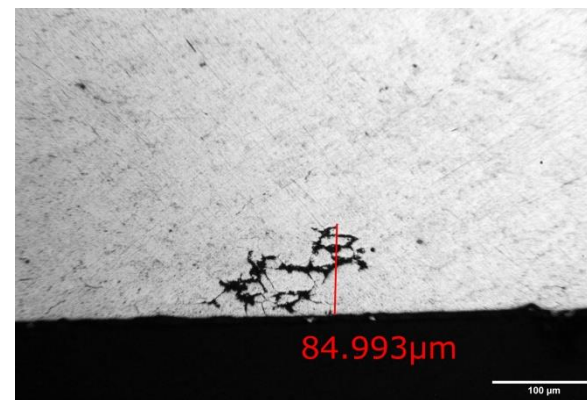
(γ)



(δ)

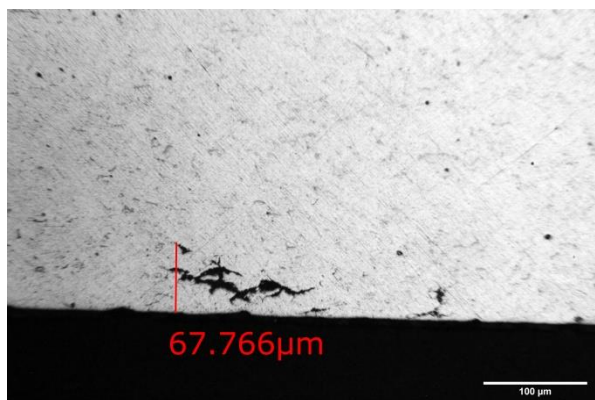


(ε)

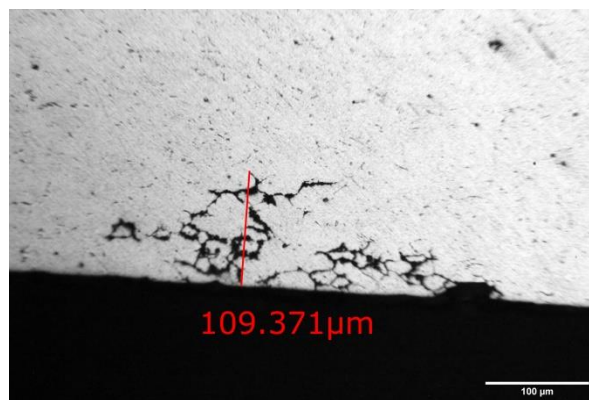


(ζ)

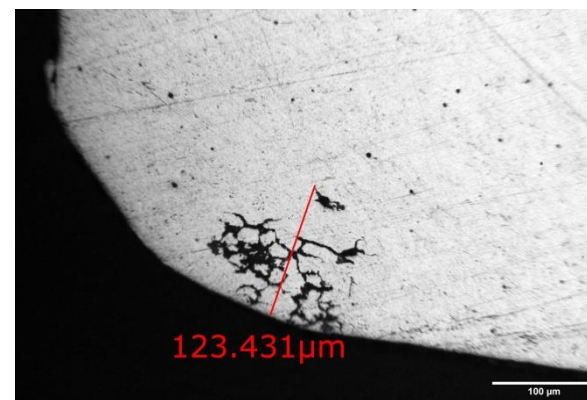
Εικόνα 50: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BC4), α και β. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BC4), γ έως και ζ.



(α)



(β)



(γ)

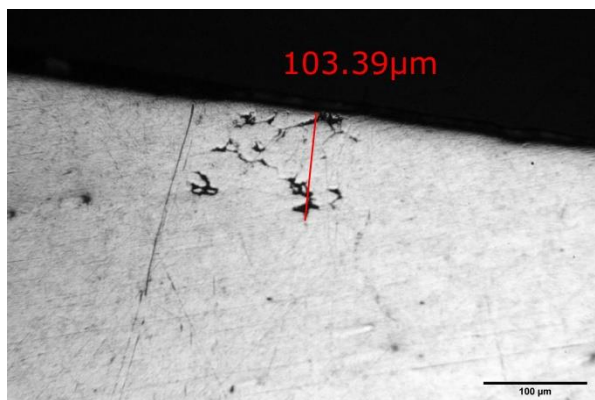
Εικόνα 51: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του κέντρου φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BC4), α, β και γ.

Πίνακας 9: Αποτελέσματα μετρήσεων του βάθους ρωγμής των δοκιμών του λαμού φιάλης διαμέτρου 111mm.

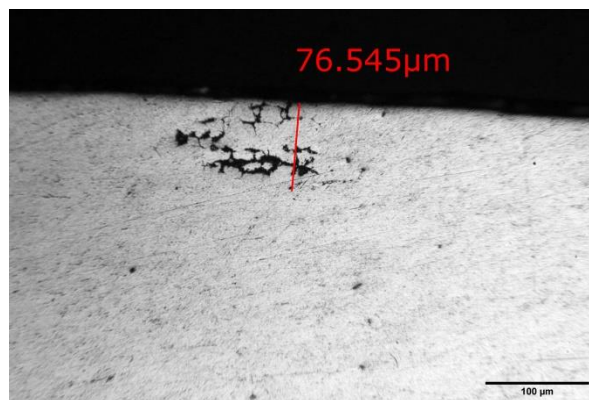
	A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)		A/A	Μήκος (μm)
BT1 IN	1	103.39	BT2 IN	1	32.895	BT3 IN	1	100.546	BT4 IN	1	137.876
	2	76.545		2	33.553		2	96.298		2	78.565
	3	75.003		3			3	32.264		3	122.82
	4	135.605		4			4	109.965		4	176.15
	5	71.08		5			5	88.818		5	189.321
	6	135.987		6			6	86.994		6	69.392
	7	94.088		7			7	100.918		7	137.766
	8	65.691		8			8	130.444		8	88.18
	9	83.739		9			9	47.882			
		MEAN		93.4586			MEAN	33.224			MEAN
	MAX	135.987		MAX	33.553		MAX	130.444		MAX	189.321
BT1 OUT	1	154.913	BT2 OUT	1	59.839	BT3 OUT	1	91.639	BT4 OUT	1	113.349
	2	67.427		2	67.843		2	85.549		2	119.63
	3	70.398		3	61.216		3	86.207		3	143.856
	4	115.402		4	80.945		4	140.503		4	96.055
	5	88.638		5	96.109		5	93.098		5	107.945
	6	66.431		6	113.513		6	88.033		6	88.818
	7	74.039		7	58.645		7			7	109.211
	8	115.348									
	9	129.164									
		MEAN		97.9733			MEAN	76.8728			MEAN
	MAX	154.913		MAX	113.513		MAX	140.503		MAX	143.856

Total MEAN 90.4431

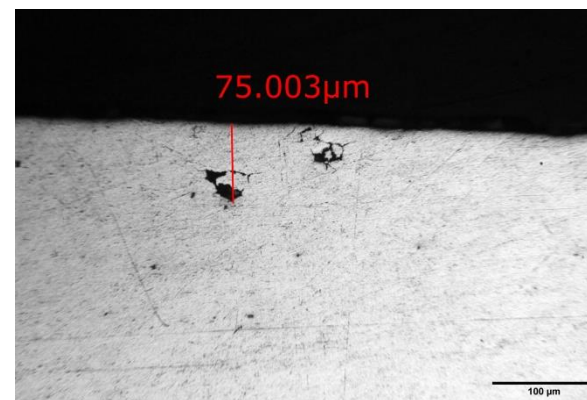
Total MAX 189.321



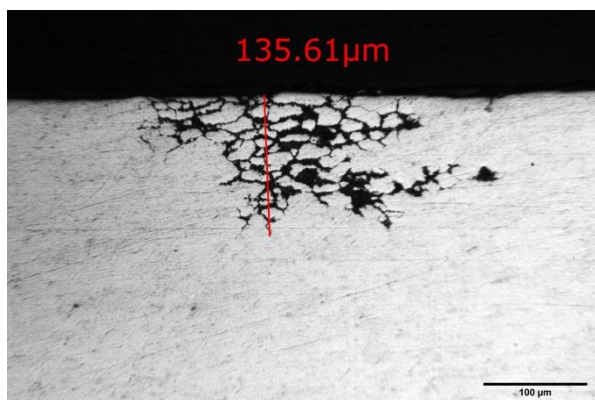
(α)



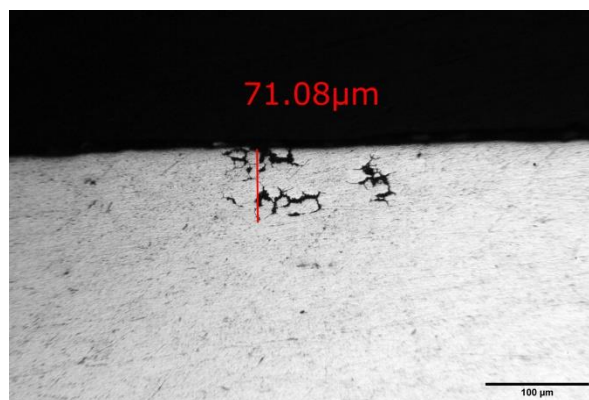
(β)



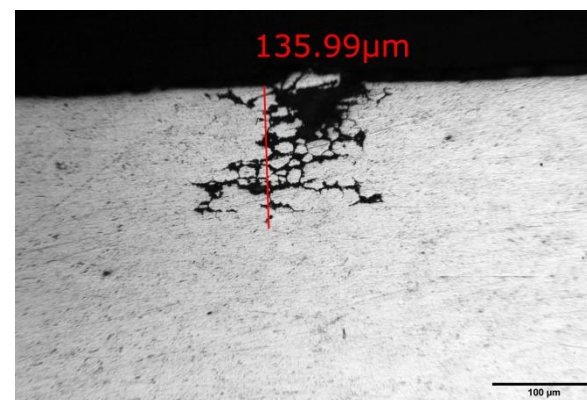
(γ)



(δ)

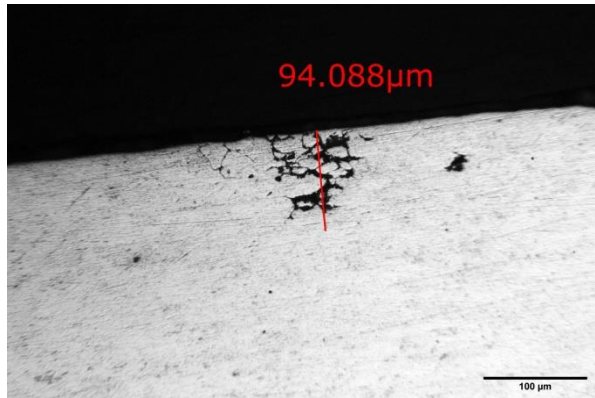


(ε)

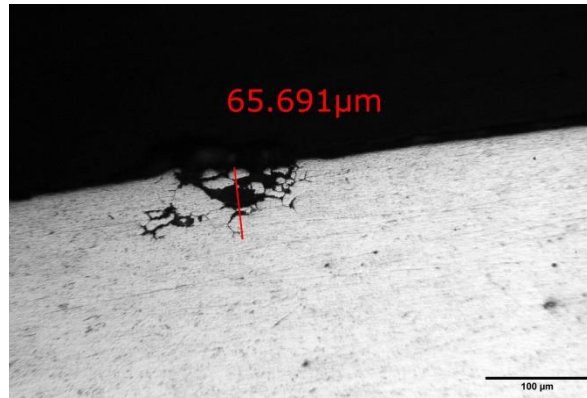


(ζ)

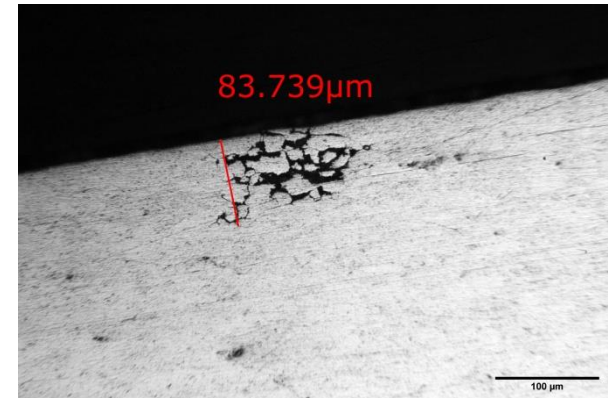
Εικόνα 52: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 1^ο δοκίμιο (BT1), α έως και ζ.



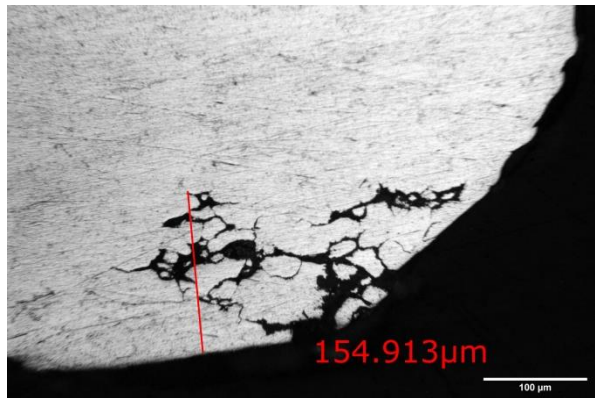
(α)



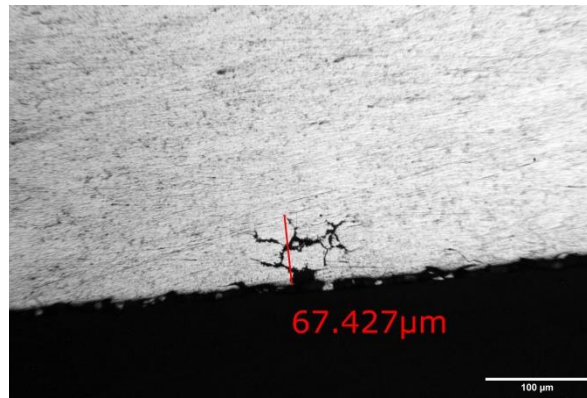
(β)



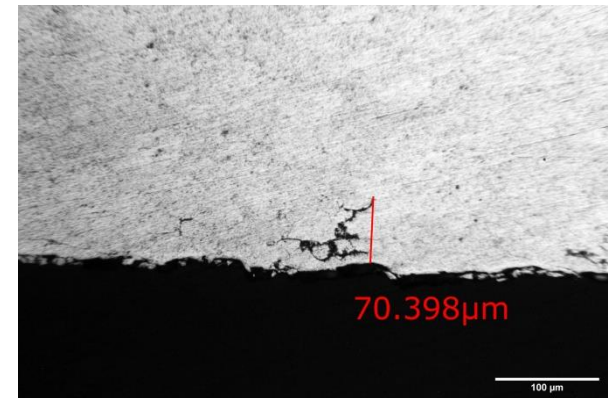
(γ)



(δ)

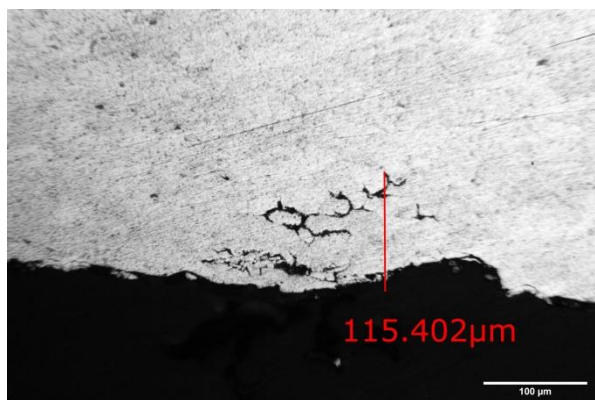


(ε)

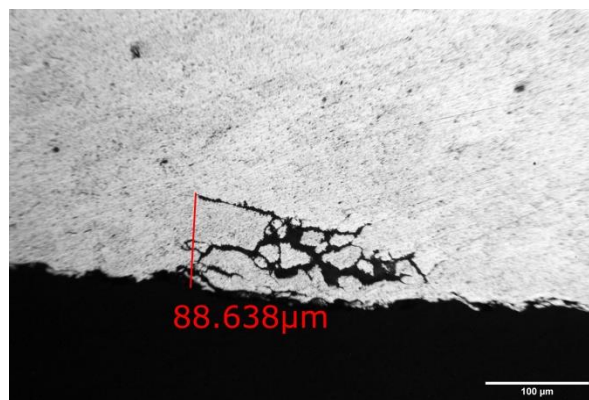


(ζ)

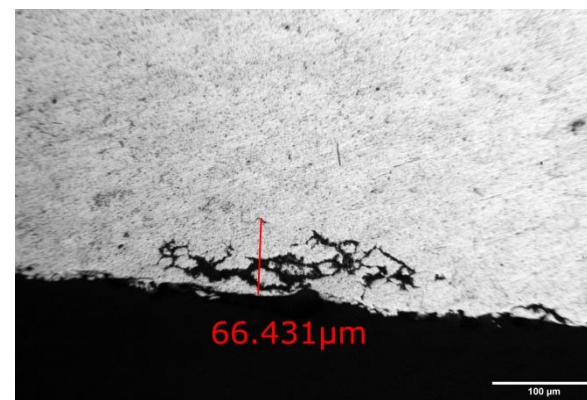
Εικόνα 53: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 1^ο δοκίμιο (BT1), α έως και γ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 1^ο δοκίμιο (BT1), δ έως και ζ.



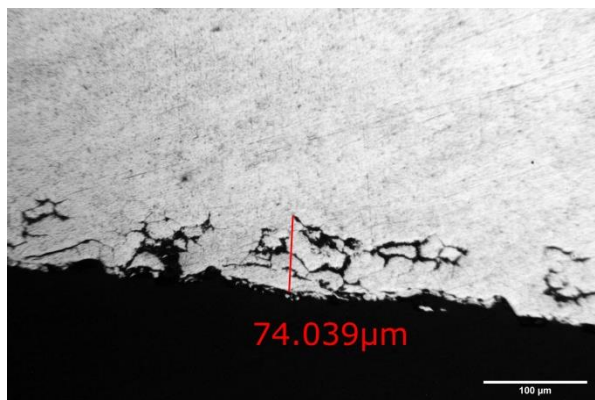
(α)



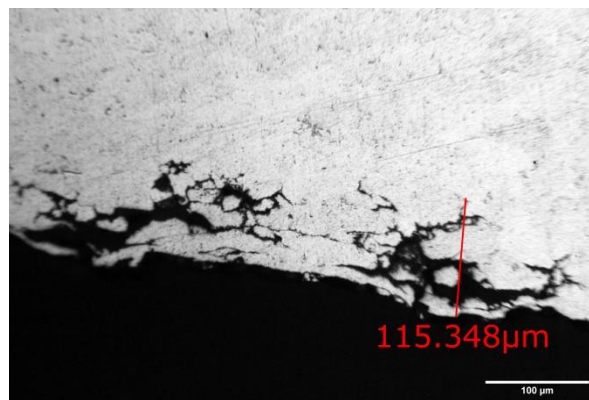
(β)



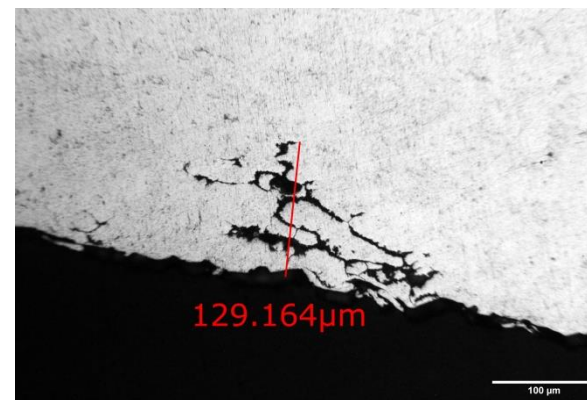
(γ)



(δ)

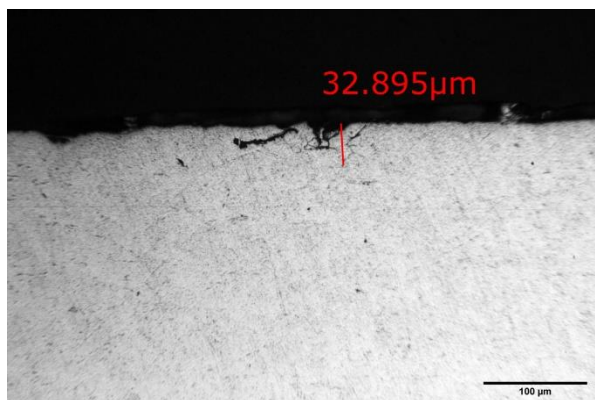


(ε)

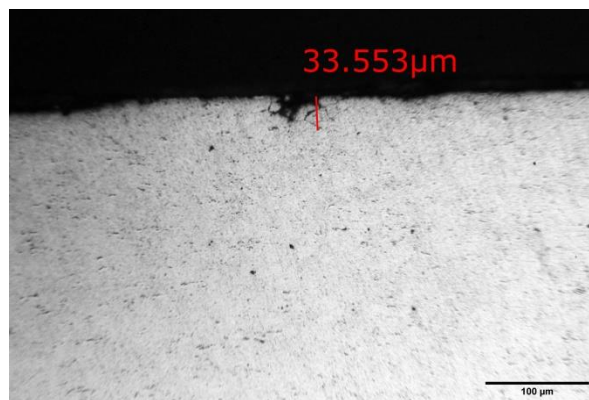


(ζ)

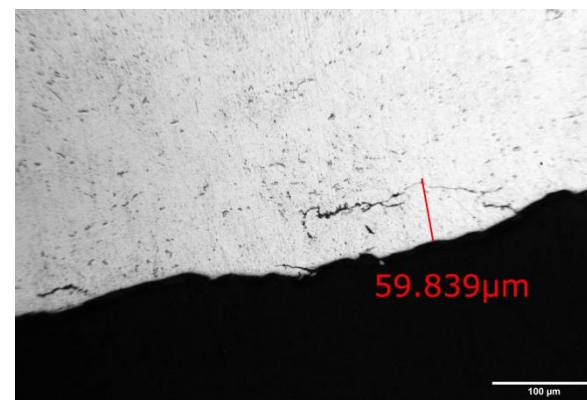
Εικόνα 54: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 1^ο δοκίμιο (BT1), α έως και ζ.



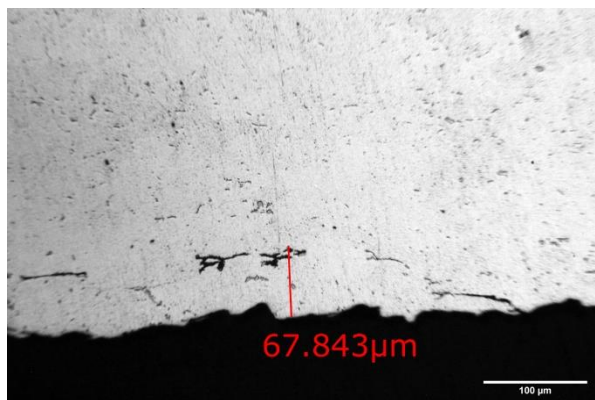
(α)



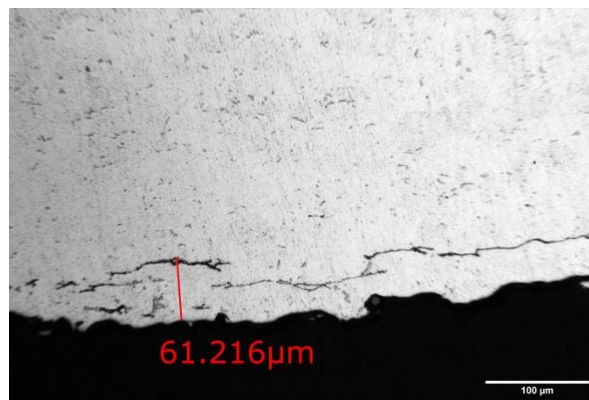
(β)



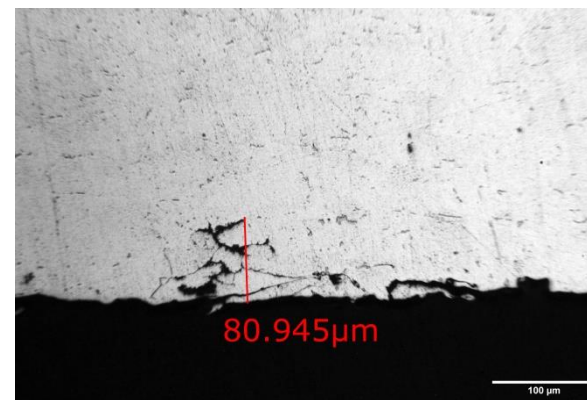
(γ)



(δ)

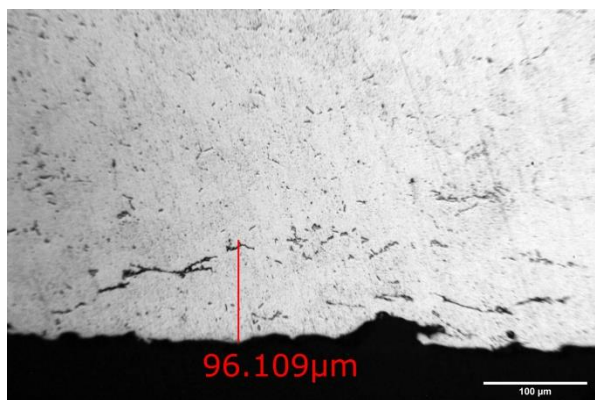


(ε)

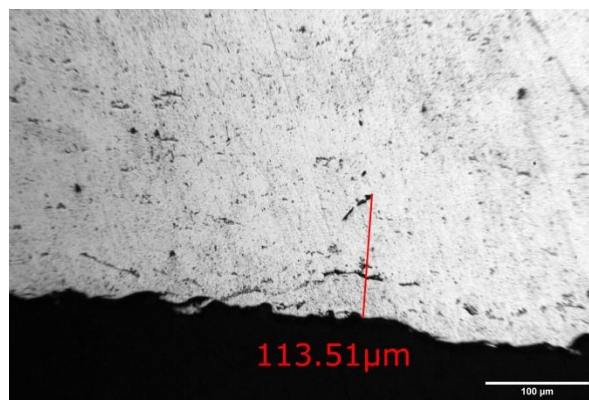


(ζ)

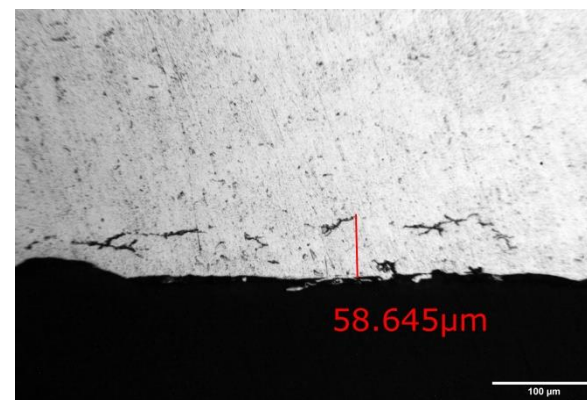
Εικόνα 55: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 2^ο δοκίμιο (BT2), α και β. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 2^ο δοκίμιο (BT2), γ έως και ζ.



(α)

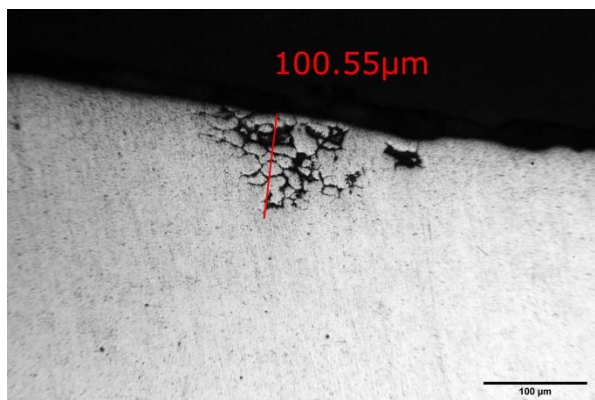


(β)

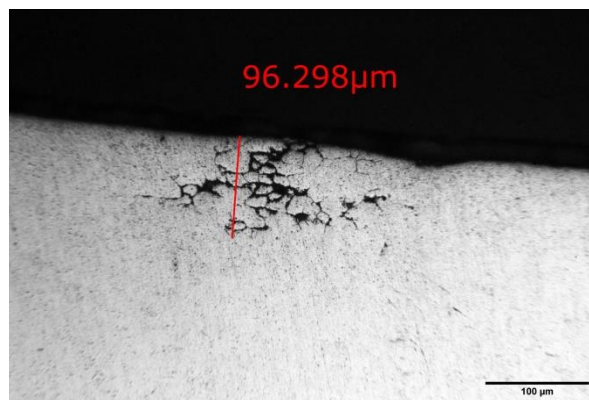


(γ)

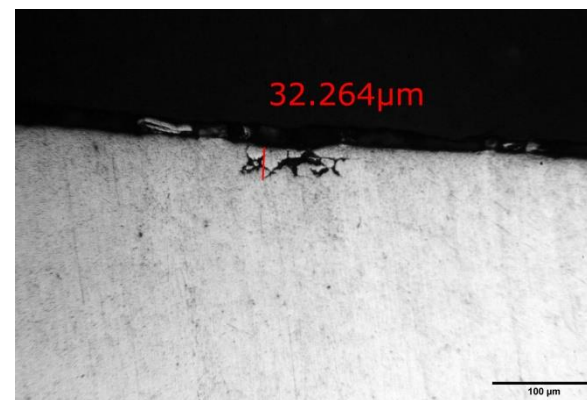
Εικόνα 56: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 2^ο δοκίμιο (BT2), α, β και γ.



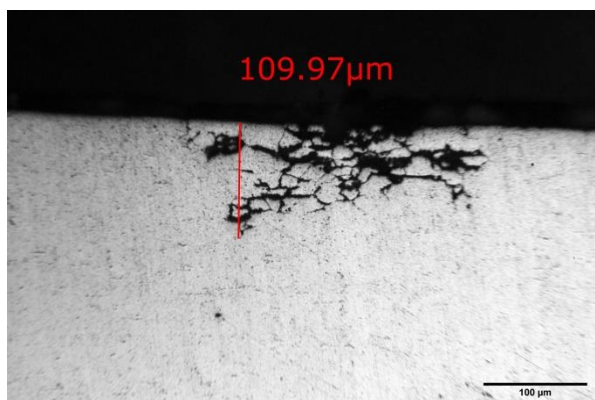
(α)



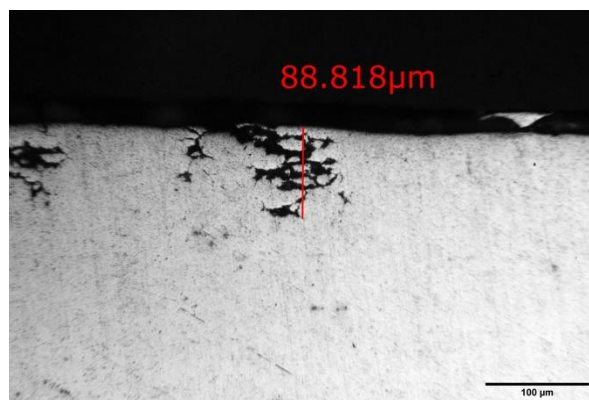
(β)



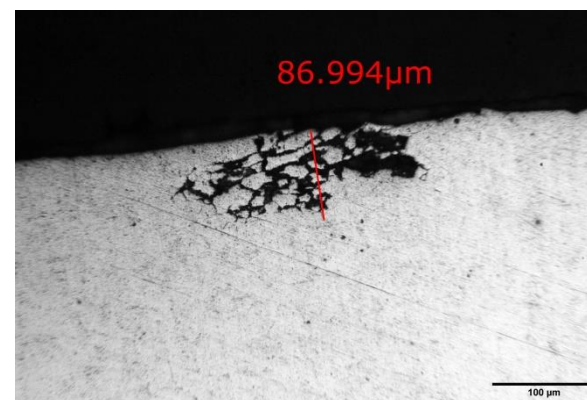
(γ)



(δ)

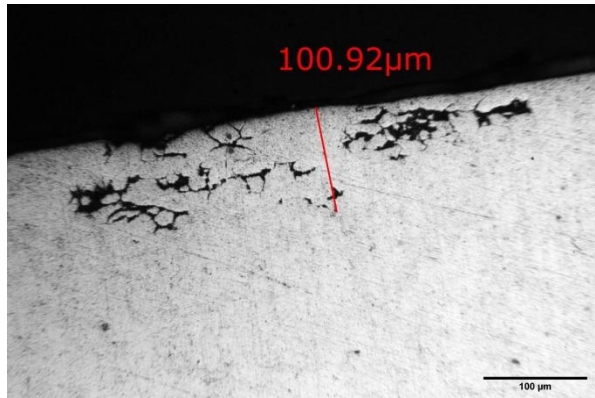


(ε)

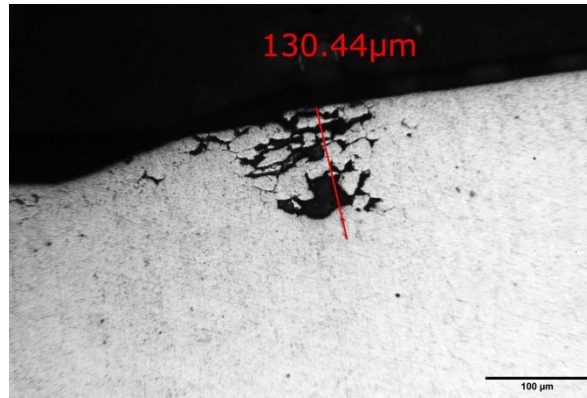


(ζ)

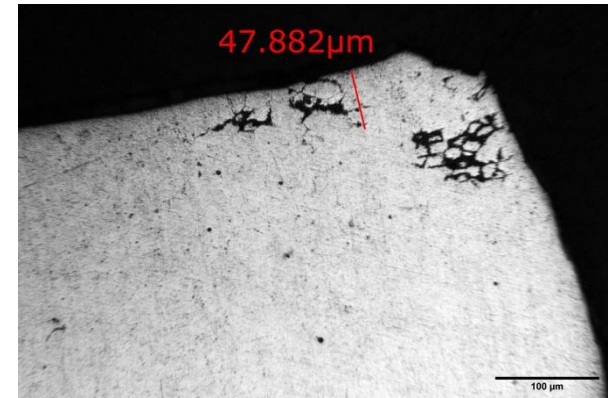
Εικόνα 57: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BT3), α έως και ζ.



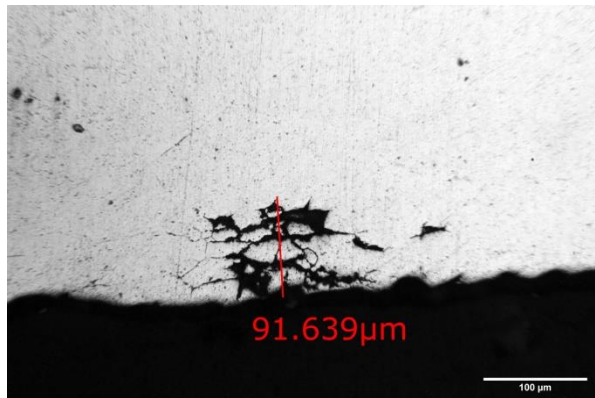
(α)



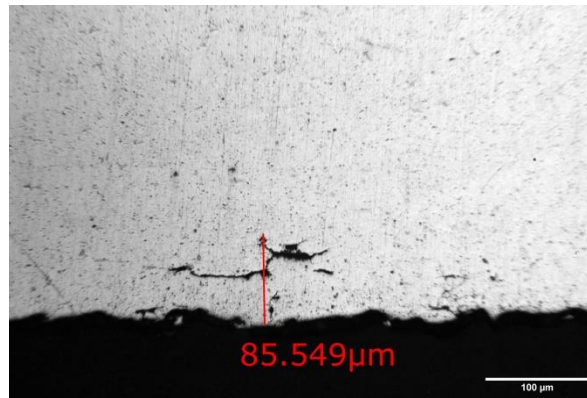
(β)



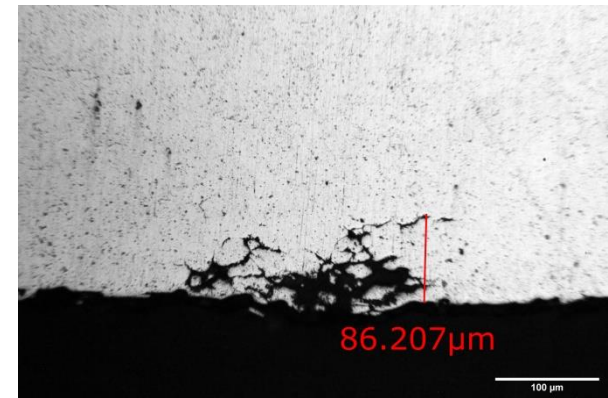
(γ)



(δ)

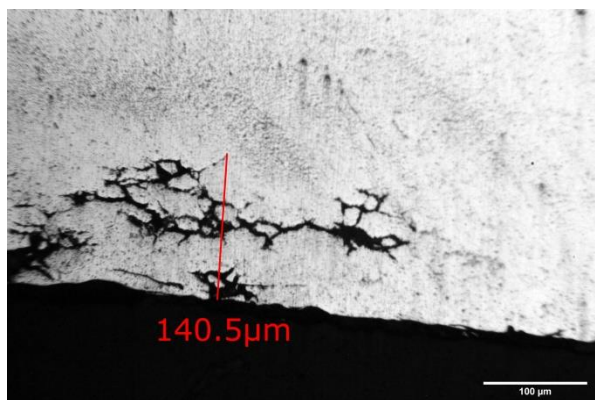


(ε)

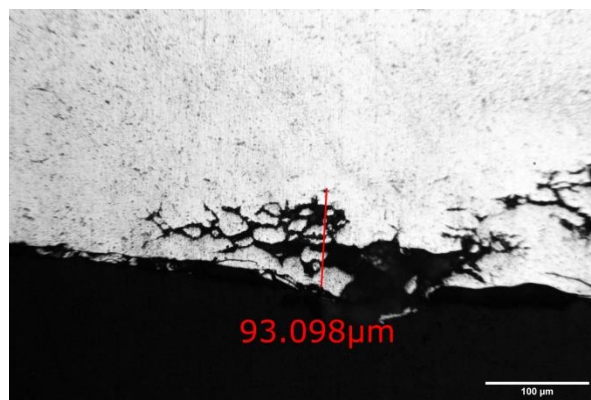


(ζ)

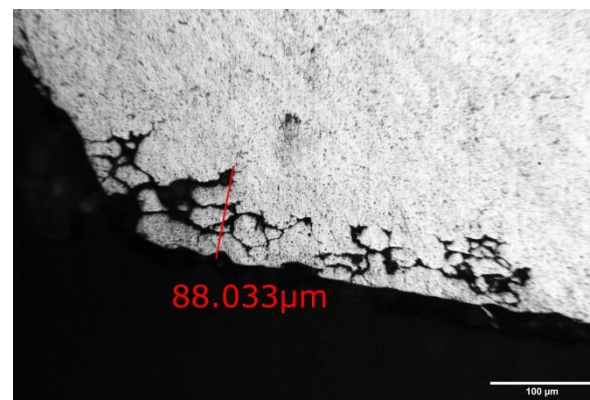
Εικόνα 58: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BT3), α έως και γ. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BT3), δ έως και ζ.



(α)

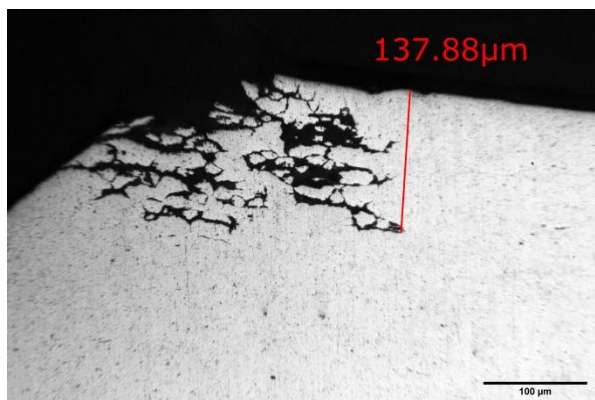


(β)

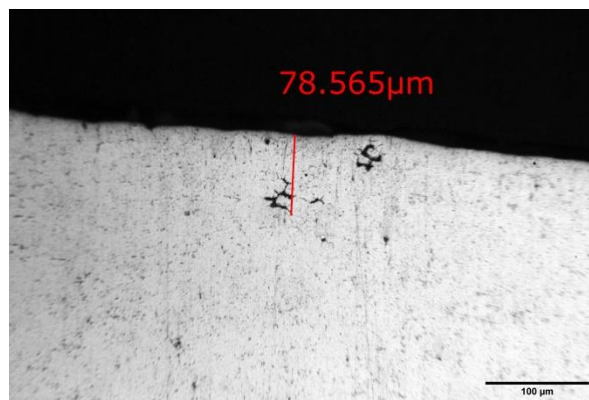


(γ)

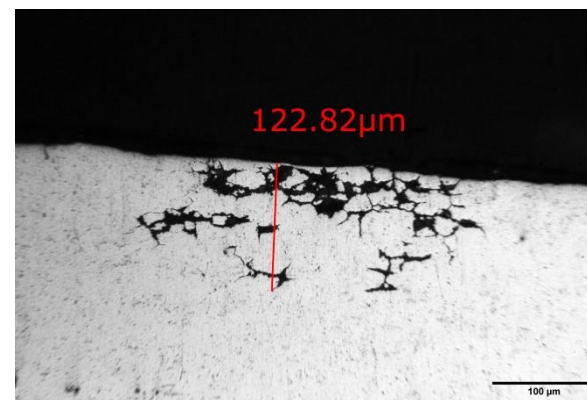
Εικόνα 59: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 3^ο δοκίμιο (BT3), α, β και γ.



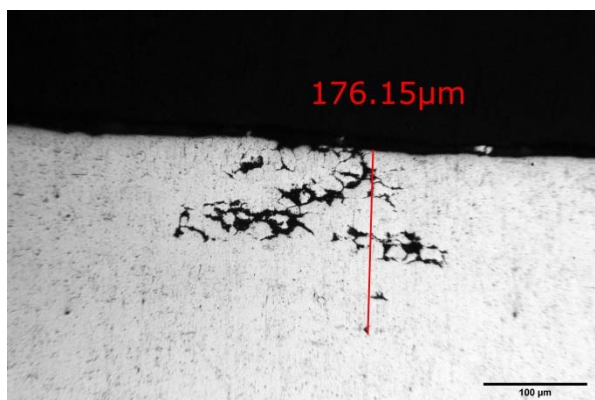
(α)



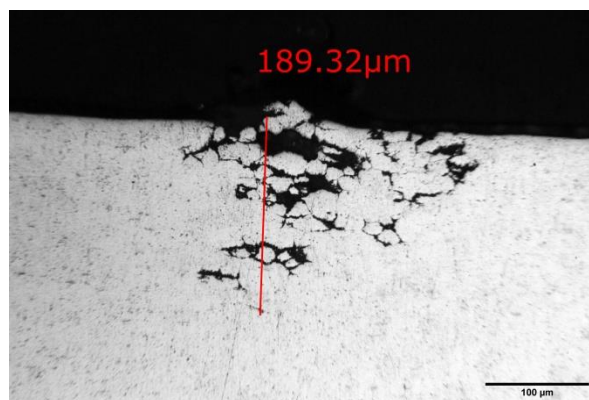
(β)



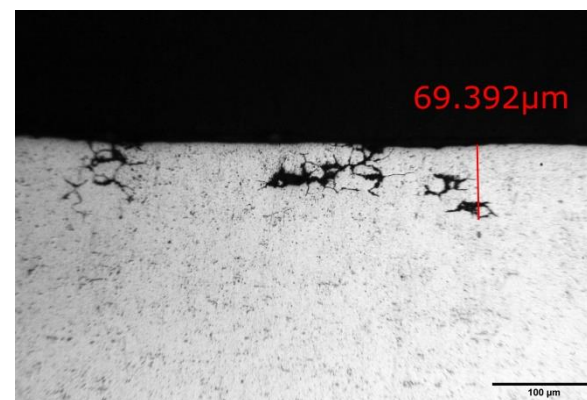
(γ)



(δ)

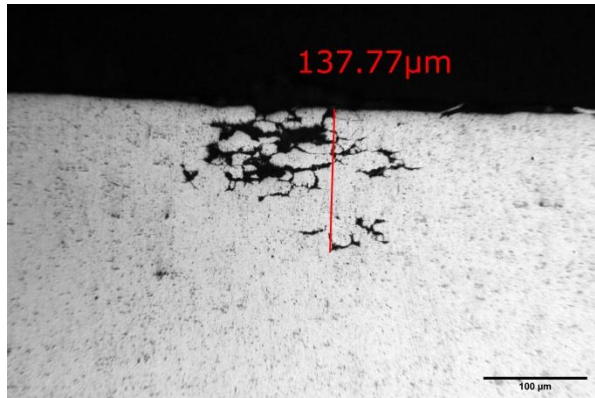


(ε)

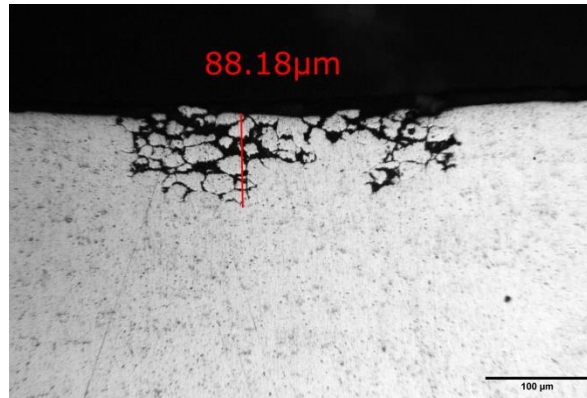


(ζ)

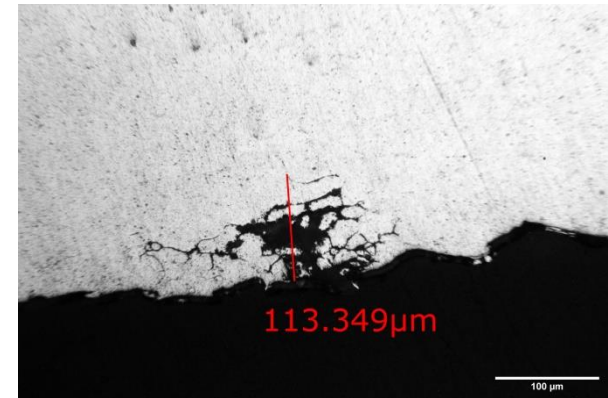
Εικόνα 60: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BT4), α έως και ζ.



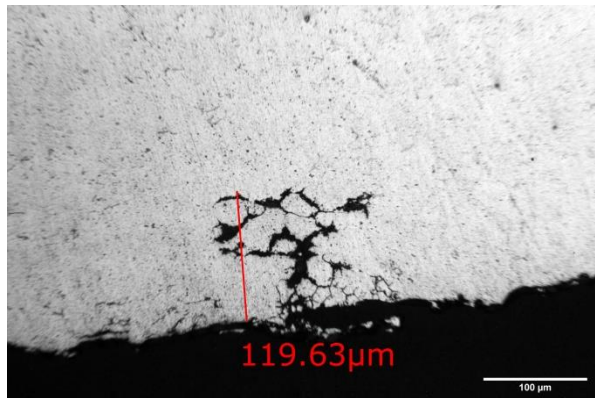
(α)



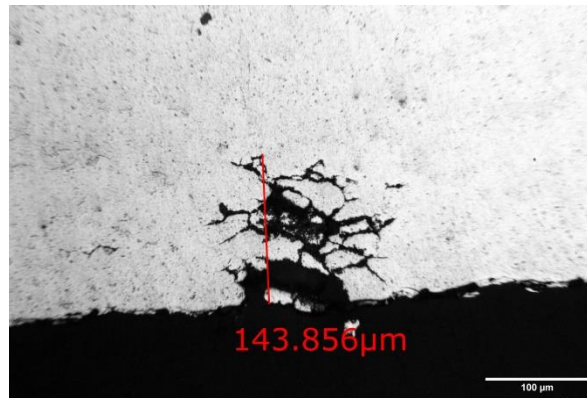
(β)



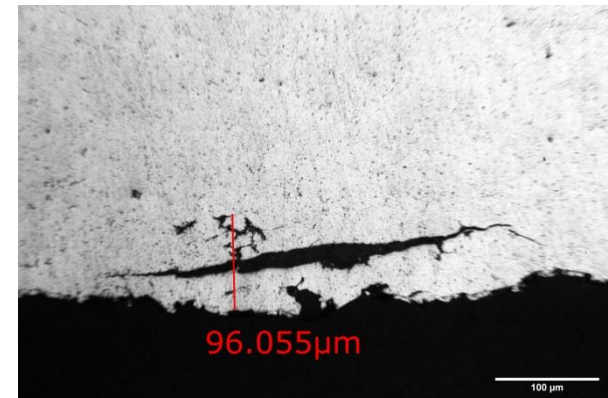
(γ)



(δ)

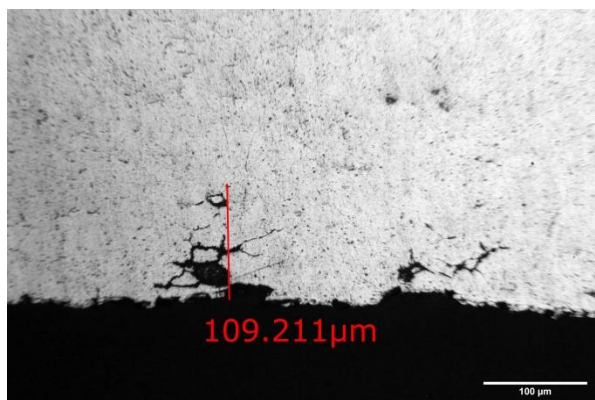


(ε)

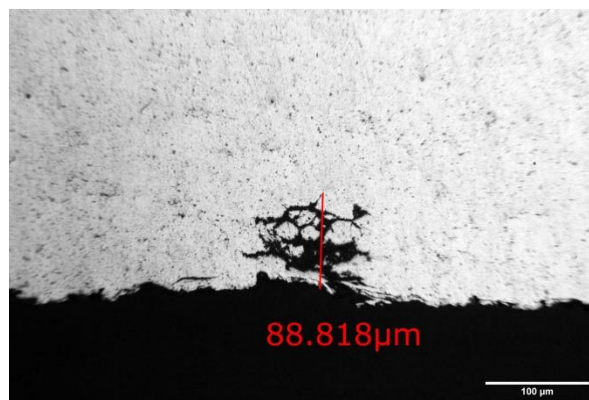


(ζ)

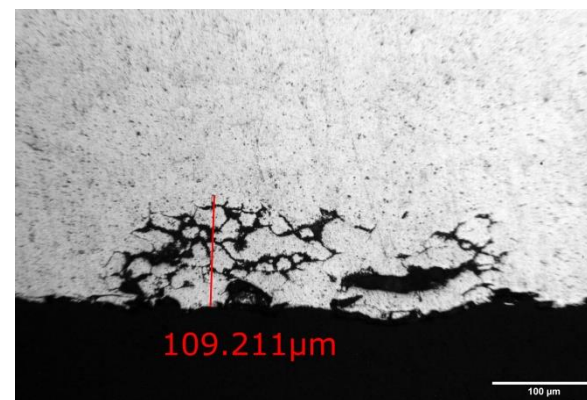
Εικόνα 61: Μεταλλογραφίες της εσωτερικής επιφάνειας του λαϊμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BT4), α και β. Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαϊμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BT4), γ έως και ζ.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 62: Μεταλλογραφίες της εξωτερικής επιφάνειας του λαιμού φιάλης διαμέτρου 111mm, 4^ο δοκίμιο (BT4), α έως και γ.

Η εξέταση στο μικροσκόπιο αποσκοπεί στην εκτίμηση του βαθμού διείσδυσης της περικρυσταλλικής διάβρωσης τόσο στην εσωτερική, όσο και στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων των φιαλών αερίου.

Το βάθος της διάβρωσης δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή των 0.2mm. Ωστόσο, επιτρέπεται η υπέρβαση της τιμής αυτής σε τοπικό επίπεδο, υπό την προϋπόθεση ότι δεν παρατηρείται σε περισσότερα από τέσσερα πεδία εξέτασης. Σε καμία περίπτωση όμως το βάθος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0,3 mm. Επομένως, το κράμα θεωρείται αποδεκτό για την κατασκευή των φιαλών.

4.2 Αποτελέσματα δοκιμής εργοδιάβρωσης

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά τη δοκιμή της εργοδιάβρωσης. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται αρχικά τα δοκίμια από τη φιάλη με το μεγαλύτερο μέγεθος $D=140\text{mm}$ (δοκίμια A1-A6, Εικόνες 63-86) και στη συνέχεια τα δοκίμια από τη φιάλη με το μικρότερο μέγεθος $D=111\text{mm}$ (δοκίμια B1-B6, Εικόνες 87-110). Τα δοκίμια A1, A2, A3, B1, B2, B3 είναι οι δακτύλιοι που η εξωτερική επιφάνεια τους ήταν υπό τάση και τα δοκίμια A4, A5, A6, B4, B5, B6 είναι οι δακτύλιοι που η εσωτερική επιφάνεια τους ήταν υπό τάση. Πιο αναλυτικά, παρακάτω παρουσιάζονται οι τέσσερις επιφάνειες (εσωτερική επιφάνεια, εξωτερική επιφάνεια, πάνω επιφάνεια, κάτω επιφάνεια) των δοκιμών μετά το τέλος των 30 ημερών που διήρκεσε η πειραματική διαδικασία.

Δακτύλιοι από την φιάλη με διάμετρο $D=140\text{mm}$:



Εικόνα 63: Δοκίμιο A1 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 64: Δοκίμιο A1 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 65: Δοκίμιο A1 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 66: Δοκίμιο A1 Κάτω επιφάνεια



Εικόνα 67: Δοκίμιο A2 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 68: Δοκίμιο A2 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 69: Δοκίμιο A2 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 70: Δοκίμιο A2 Κάτω επιφάνεια



Εικόνα 71: Δοκίμιο A3 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 72: Δοκίμιο A3 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 73: Δοκίμιο A3 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 74: Δοκίμιο A3 Κάτω επιφάνεια



Εικόνα 75: Δοκίμιο A4 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 76: Δοκίμιο A4 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 77: Δοκίμιο A4 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 78: Δοκίμιο A4 Κάτω επιφάνεια



Εικόνα 79: Δοκίμιο A5 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 80: Δοκίμιο A5 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 81: Δοκίμιο A5 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 82: Δοκίμιο A5 Κάτω επιφάνεια



Εικόνα 83: Δοκίμιο A6 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 84: Δοκίμιο A6 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 85: Δοκίμιο A6 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 86: Δοκίμιο A6 Κάτω επιφάνεια

Δακτύλιοι από την φιάλη με διάμετρο D=111mm:



Εικόνα 87: Δοκίμιο B1 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 88: Δοκίμιο B1 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 89: Δοκίμιο B1 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 90: Δοκίμιο B1 Κάτω επιφάνεια



Εικόνα 91: Δοκίμο Β2 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 92: Δοκίμο Β2 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 93: Δοκίμο Β2 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 94: Δοκίμο Β2 Κάτω επιφάνεια



Εικόνα 95: Δοκίμο Β3 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 96: Δοκίμο Β3 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 97: Δοκίμο Β3 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 98: Δοκίμο Β3 Κάτω επιφάνεια



Εικόνα 99: Δοκίμο Β4 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 100: Δοκίμο Β4 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 101: Δοκίμο Β4 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 102: Δοκίμο Β4 Κάτω επιφάνεια



Εικόνα 103: Δοκίμιο B5 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 104: Δοκίμιο B5 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 105: Δοκίμιο B5 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 106: Δοκίμιο B5 Κάτω επιφάνεια



Εικόνα 107: Δοκίμιο B6 Εσωτερική επιφάνεια



Εικόνα 108: Δοκίμιο B6 Εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 109: Δοκίμιο B6 Πάνω επιφάνεια



Εικόνα 110: Δοκίμιο B6 Κάτω επιφάνεια

Το κράμα θεωρείται αποδεκτό για την κατασκευή των φιαλών αερίου εάν κανένας από τους δακτυλίους δεν έχει δημιουργήσει ρωγμές ορατές με γυμνό μάτι ή ορατές σε χαμηλή μεγέθυνση ($\times 10$ έως $\times 30$), στο τέλος της περιόδου των 30 ημερών.

Μετά από λεπτομερή εξέταση των δοκιμών με οπτική παρατήρηση και παρατήρηση στο στερεοσκόπιο, σε κανέναν από τους δακτυλίους δεν παρατηρούνται ρωγμές. Το μόνο που παρατηρείται στην επιφάνειά τους είναι τρηματική διάβρωση, η οποία οφείλεται στην κακή ποιότητα της αρχικής επιφάνειας των φιαλών στις οποίες δεν είχε γίνει το τελικό φινίρισμα.

Παρόλα αυτά, εφόσον δεν παρατηρούνται ρωγμές στα δοκίμια το κράμα θεωρείται αποδεκτό για την κατασκευή των φιαλών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όσον αφορά τις δοκιμές της περικρυσταλλικής διάβρωσης: η εξέταση μεταλλογραφικών δοκιμών στο μικροσκόπιο και οι ακόλουθες μετρήσεις του βάθους προσβολής απέδειξαν ότι το βάθος της διείσδυσης δεν υπερβαίνει την τιμή των 0.2mm. τόσο στην εσωτερική, όσο και στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμών των φιαλών αερίου και σε καμία περίπτωση το βάθος δεν υπερβαίνει τα 0.3 mm.

Στην περίπτωση της δοκιμής για έλεγχο σε εργοδιάβρωση μετά από λεπτομερή εξέταση των δοκιμών, σε κανένα από αυτά δεν παρατηρούνται ρωγμές ορατές με γυμνό μάτι ή ορατές σε χαμηλή μεγέθυνση (x10 έως x30), στο τέλος της περιόδου των 30 ημερών. Το μόνο που παρατηρείται στην επιφάνειά τους είναι τρηματική διάβρωση, η οποία οφείλεται στην κακή ποιότητα της αρχικής επιφάνειας των φιαλών στις οποίες δεν είχε γίνει το τελικό φινίρισμα.

Επομένως, σύμφωνα με τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι και στις δύο περιπτώσεις το κράμα θεωρείται αποδεκτό για την κατασκευή των φιαλών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “ISO 7866:2012 Gas cylinders — Refillable seamless aluminium alloy gas cylinders — Design, construction and testing.”
- [2] M. R. Clinch *et al.*, “Aluminium Alloy and Technology Developments for Advanced Gas Containment Applications,” p. 8.
- [3] M. G. Fontana, *Corrosion engineering*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [4] R. H. Jones, Ed., “Evaluation of Stress-Corrosion Cracking,” in *Stress-Corrosion Cracking*, ASM International, 2017, pp. 367–417. doi: 10.31399/asm.tb.sccmpe2.t55090367.
- [5] W. Y. Zheng, “Stress corrosion cracking of oil and gas pipelines in near neutral pH environment: review of recent research,” *Energy Materials*, vol. 3, no. 4, pp. 220–226, Dec. 2008, doi: 10.1179/174892309X12555944292234.
- [6] M. Baumgartner and H. Kaesche, “Intercrystalline Corrosion and Stress Corrosion Cracking of AlZnMg Alloys,” vol. 44, no. 4, p. 9, 1988.
- [7] B. F. Brown, *Stress corrosion cracking control measures*. Washington: U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards : for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off., 1976. [Online]. Available: [//catalog.hathitrust.org/Record/000083227](http://catalog.hathitrust.org/Record/000083227)
- [8] M.-C. Enescu, I.-N. Popescu, R. Zamfir, A. Molagic, and V. Bratu, “Experimental researches on the corrosion behavior and microstructural aspects of heat treated Al-Zn-Mg-Cu alloys,” *INTERNATIONAL JOURNAL of ENERGY and ENVIRONMENT*, vol. 4, no. 4, p. 9, 2010.