



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη συμπεριφοράς σε κόπωση συγκολλήσεων επικάλυψης,
κράματος AI 2024-T3, με τη μέθοδο συγκόλλησης διά τριβής και
ανάδευσης (FSW)**

Γιαλίδης Δημήτριος

Επιβλέπουσα: Δρ. Ζερβάκη Άννα
Τμήμα Μηχανολόγων μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Νοέμβριος 2013



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 12107/1
Ημερ. Εισ.: 28-11-2013
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ –ΜΜ
2013
ΓΙΑ

© 2013 Γιαλίδης Δημήτριος

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 αρ. 202 παρ. 2).

Πρώτος εξεταστής
(επιβλέπουσα)

Δρ. Ζερβάκη Άννα
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος εξεταστής

Δρ. Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόρης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος εξεταστής

Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος
Καθηγητής, τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας οφείλω, αρχικά, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας, Δρ. κ. Άννα Ζερβάκη , για την ανεκτίμητη βοήθεια και τις πολύτιμες γνώσεις που μου πρόσφερε, καθώς επίσης και για την εμπιστοσύνη που έδειξε τόσο κατά την ανάθεση της εργασίας όσο και στη διάρκεια εκπόνησής της. Θερμά ευχαριστήρια οφείλω, επίσης, στον Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο και στα μέλη του Εργαστηρίου Υλικών, Έλενα Καμούτση, Παναγιώτα Σαράφογλου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν και την ασφαλή καθοδήγησή τους στη διεξαγωγή των απαιτούμενων πειραμάτων. Επίσης, ευχαριστώ τον Καθ. κ. Νικόλαο Ανδρίτσο για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή εξέτασης, καθώς και τους Καθ. κ. Σ.Παντελάκη και Δρ. κ. Μ.Παπαδόπουλο, του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Παν. Πατρών, για την παραχώρηση των δοκιμίων κόπωσης.

Ευχαριστώ για την υποστήριξή τους, τους φίλους/ες Γεωργία, Βασίλη, Γιάννη, Ηλία, Τάσο, Michael, Κωνσταντίνα. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, που αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της πορείας μου μέχρι τώρα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης του προγράμματος σπουδών κι απόκτησης του τίτλου διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Αντικείμενό της, η κατανόηση της συμπεριφοράς σε κόπωση, συγκολλήσεων επικάλυψης (lap joints), κράματος αλουμινίου Al 2024-T3, που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο δια τριβής κι ανάδευσης (FSW). Τα δοκίμια ταξινομήθηκαν βάσει της επιφανειακής κατεργασίας που είχαν υποστεί (TSA, primer, adhesive) και του τύπου συγκόλλησης (μονού, διπλού και τριπλού περάσματος), με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την επίδραση των παραμέτρων αυτών στην ποιότητα της συγκόλλησης. Πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφικός έλεγχος των δοκιμίων, μακροσκοπικά και μικροσκοπικά, κι έγιναν μετρήσεις μικροσκληρομέτρησης επιλεκτικά, σε δοκίμια κάθε κατηγορίας. Τα αποτελέσματα, συσχετισμένα με τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης από το Εργαστήριο Τεχνολογίας κι Αντοχής των Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών, οδήγησαν στα εξής κύρια συμπεράσματα:

- χαμηλή απόδοση σε δοκιμές κόπωσης των δοκιμίων που είχαν υποστεί επιφανειακή κατεργασία TSA , διπλού περάσματος συγκόλλησης, συγκρινόμενα με δοκίμια ίδιου τύπου συγκόλλησης, διαφορετικής επιφανειακής κατεργασίας
- καταλυτική δράση του clad layer στην έναρξη και διάδοση των ρωγμών κόπωσης
- δημιουργία σφάλματος-εγκοπής στην άκρη της επικάλυψης, στα δοκίμια τριπλού περάσματος συγκόλλησης
- επιβεβαίωση προβλημάτων, γνωστών από αναφορές στη βιβλιογραφία, όπως, ελαττώματα τύπου hook και περιοχές αυξημένης συγκέντρωσης τάσεων, κυρίως στην πλευρά εξόδου του εργαλείου συγκόλλησης

πίνακας περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΣΚΟΠΟΣ.....	8
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	10
2.1 Συγκόλληση δια Τριβής και Ανάδευσης (F.S.W)	10
2.1.1 Αρχή της μεθόδου	10
2.1.2 Παράμετροι της συγκόλλησης	12
2.1.3 Μικροδομή και ζώνες της συγκόλλησης.....	13
2.1.4 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα της μεθόδου FSW.....	14
2.1.5 Συγκολλήσεις επικάλυψης (lap joints) με τη μέθοδο FSW	16
2.2 Κράματα αλουμινίου και αεροπορικές εφαρμογές.....	20
2.2.1 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2xxx (Al-Cu).....	20
2.2.1.1 Το κράμα Al 2024-T3	21
2.3 Επιφανειακές κατεργασίες.....	22
2.3.1 TSA (Tartaric Sulfuric Acid Anodising)	24
2.3.2 Primer (επίστρωση ασταριού)	25
2.3.3 Adhesive (συγκόλληση με κόλλα)	25
2.3.4 Aluminum cladding (επίστρωση αλουμινίου).....	25
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	27
3.1 Μεταλλογραφία των δοκιμών κόπωσης.....	31
3.1.1 Κοπή και προετοιμασία των δοκιμών.....	31
3.1.2 Μακροσκοπικός και μικροσκοπικός έλεγχος.....	32
3.1.3 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)	33
3.2 Μικροσκληρομέτρηση	34
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	35
4.1 Δοκίμια χωρίς επιφανειακή κατεργασία, με μονό πέρασμα συγκόλλησης.....	35
4.2 Δοκίμια χωρίς επιφανειακή κατεργασία, με διπλό πέρασμα συγκόλλησης.....	40
4.3 Δοκίμια με επιφανειακή κατεργασία TSA.....	48

4.4 Δοκίμια με επιφανειακή κατεργασία ανοδίωσης (TSA) κι επίστρωσης ασταριού (primer)	53
4.5 Δοκίμια με επιφανειακή κατεργασία TSA + primer + adhesive.....	58
4.6 Δοκίμια χωρίς επιφανειακή κατεργασία με συγκόλληση τύπου E.....	62
ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	70
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	74
Βιβλιογραφία	75

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΣΚΟΠΟΣ

Η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής και ανάδευσης (Friction Stir Welding, FSW) είναι μια νέα, «στερεής κατάστασης», μέθοδος συγκόλλησης, καθώς δεν υπάρχει τήξη των προς συγκόλληση τεμαχίων. Το γεγονός αυτό την καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλή στις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου, δίδοντας τη δυνατότητα αξιόπιστης παραγωγής συγκολλητών κατασκευών υψηλής ποιότητας στην αεροπορική βιομηχανία, σε κράματα που θεωρούνταν μη συγκολλήσιμα με τις παραδοσιακές μεθόδους συγκόλλησης με τήξη. Η FSW πλεονεκτεί έναντι των κλασικών συγκολλήσεων με τήξη και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους συγκολλήσεων, όπως συγκολλήσεις συμβολής, συγκολλήσεις επικάλυψης, γωνιακές συγκολλήσεις κ.λπ.

Οι συγκολλήσεις επικάλυψης (lap joints) χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική προς αντικατάσταση των ηλώσεων στο σκελετό των αεροσκαφών, σε συνδυασμό των συγκολλήσεων συμβολής και αυχενικών συγκολλήσεων. Η κατάργηση των ηλώσεων οδηγεί σε σημαντική μείωση του βάρους και του κόστους των κατασκευών καθώς και στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους και αντοχής τους σε διάβρωση. Οι οπές των ηλώσεων αποτελούν, συχνά, πιθανές θέσεις έναρξης ρωγμών και προβλημάτων διάβρωσης. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει σημαντική ερευνητική δραστηριότητα που αφορά στο πεδίο των εφαρμογών FSW σε αεροναυπηγικά κράματα Αλουμινίου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην κατανόηση της συμπεριφοράς σε κόπωση, συγκολλήσεων επικάλυψης (lap joints) του αεροναυπηγικού κράματος Al 2024-T3, με τη μέθοδο FSW. Στην εργασία μελετήθηκε η επίδραση επιφανειακών κατεργασιών (TSA, primer, adhesive), στις ιδιότητες κόπωσης της συγκόλλησης. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν στην EADS-IW, και οι δοκιμές κόπωσης στο Εργαστήριο Τεχνολογίας & Αντοχής των Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Τα

συγκολλημένα ελάσματα είχαν υποστεί διαφορετικές επιφανειακές κατεργασίες ή συνδυασμό αυτών.

Στα πλαίσια αυτά μελετήθηκαν 3 διαφορετικές επιφανειακές κατεργασίες σε μονού, διπλού και τριπλού περάσματος συγκολλήσεων επικάλυψης.

Η μελέτη περιελάμβανε:

- Αξιολόγηση της επιφάνειας αστοχίας των δοκιμίων κόπωσης σε στερεοσκόπιο και Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)
- Μεταλλογραφική εξέταση των δοκιμίων στην περιοχή θραύσης των συγκολλήσεων
- Προσδιορίστηκαν τα σημεία έναρξης κόπωσης, τα σφάλματα συγκόλλησης, το είδος θραύσης των δοκιμίων, βάσει της μορφολογίας των επιφανειών θραύσης και των επιμέρους περιοχών τους.
- Επίσης, έγιναν μετρήσεις μικροσκληρότητας επιλεκτικά σε ορισμένα δοκίμια με αποτύπωση του προφίλ μικροσκληρότητας της ζώνης ανάδευσης, των θερμομηχανικά και θερμικά επηρεασμένων ζωνών συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου.

Τα αποτελέσματα των ελέγχων ταξινομήθηκαν ανά κατηγορία δοκιμίων. Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων συσχετίστηκαν με τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης (μέση τάση-αριθμός κύκλων αστοχίας, καμπύλες S-N). Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση των συγκολλήσεων επικάλυψης με FSW .

2

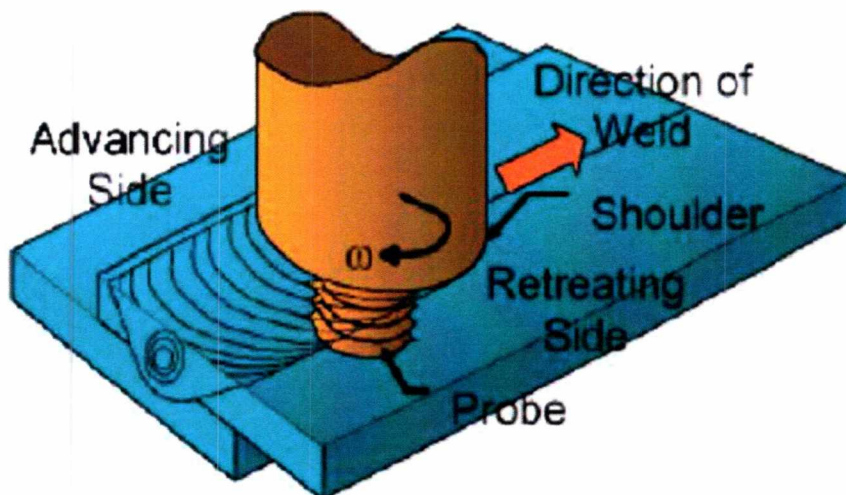
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Συγκόλληση δια Τριβής και Ανάδευσης (F.S.W)

2.1.1 Αρχή της μεθόδου

Η μέθοδος συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση (Friction Stir Welding, F.S.W), ανακαλύφθηκε στο Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute, TWI) το 1991, ως μια καινούρια «στερεάς κατάστασης» μέθοδος συγκόλλησης. Αρχικά εφαρμόστηκε κυρίως σε κράματα αλουμινίου.

Η βασική αρχή της μεθόδου είναι σχετικά απλή. Ένα μη-αναλώσιμο περιστρεφόμενο εργαλείο συγκόλλησης, με μια ειδικά σχεδιασμένη κεφαλή-προέκταση ενός περιαιχενίου, εισέρχεται στην επαφή των ακμών των δύο πλακών που πρόκειται να συγκολληθούν και διέρχεται κατά μήκος αυτών (σχ. 2.1).



Σχ. 2.1: Μακροσκοπική απεικόνιση συγκόλλησης με τη μέθοδο FSW [1]

Λόγω των πολλαπλών γεωμετρικών σχημάτων που μπορεί να έχει η κεφαλή, η κίνηση του υλικού είναι αρκετά σύνθετη. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με τη

μέθοδο FSW το υλικό υποβάλλεται σε έντονη πλαστική παραμόρφωση, σε υψηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα, τη δημιουργία λεπτόκοκκης δομής και ισοαξονικών κόκκων. Η λεπτόκοκκη αυτή μικροδομή της FSW προσδίδει στο μέταλλο αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες. Η μέθοδος FSW συγκαταλέγεται στις πιο εξελιγμένες μεθόδους συγκόλλησης της τελευταίας δεκαετίας. Καλείται και «πράσινη» μέθοδος, λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς δεν απαιτείται τήξη, σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους συγκολλήσεων. Η FSW μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους συγκολλήσεων όπως, συγκολλήσεις συμβολής, συγκολλήσεις επικάλυψης, γωνιακές συγκολλήσεις κ.λπ..

Το μηχανικό μέρος της FSW αποτελείται από ένα κυλινδρικό περιαυχένιο, η προέκταση του οποίου είναι μια κεφαλή, σχεδιασμένη έτσι ώστε περιστρεφόμενη να διεισδύει και ταυτόχρονα να προωθείται με ταχύτητα ανάμεσα στα προς συγκόλληση υλικά τα οποία εφάπτονται. Τα προς συγκόλληση τεμάχια συγκρατούνται σφιχτά πάνω στην τράπεζα εργασίας, προκειμένου να παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η περιστρεφόμενη κεφαλή, περνά κατά μήκος των ακμών των τεμαχίων που πρόκειται να συγκολληθούν. Λόγω τριβής αναπτύσσεται θερμότητα μεταξύ της κεφαλής και των προς συγκόλληση τεμαχίων. Η θερμότητα «μαλακώνει» το υλικό των ακμών του κάθε τεμαχίου το οποίο παρασύρεται από την περιστρεφόμενη κεφαλή, στροβιλίζεται, αναμιγνύεται και τελικά δημιουργεί τη ραφή μεταξύ των υλικών. Η κινητική ενέργεια της περιστρεφόμενης κεφαλής, μετατρέπεται σε θερμική ισχύ που απαιτείται για τη συγκόλληση των δύο πλακών.

Η FSW αξιοποιώντας την θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω τριβής σε συνδυασμό με την πίεση που ασκείται από την κεφαλή στις ακμές των τεμαχίων, οδηγεί σε συγκόλληση των υλικών, χωρίς αυτά να φτάνουν το σημείο τήξης, χαρακτηριστικό της μεθόδου που την καθιστά καλύτερη σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους συγκόλλησης.

2.1.2 Παράμετροι της συγκόλλησης

i. Γεωμετρία εργαλείου

Η γεωμετρία του εργαλείου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας προκειμένου να επιτευχθεί τόσο η καλή ποιότητα της συγκόλλησης όσο και η μέγιστη δυνατή ταχύτητα που αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί. Το εργαλείο της FSW αποτελείται από το περιουχένιο (φλάντζα) και την κεφαλή όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 2.2.



Σχ. 2.2: Τυπικό εργαλείο της FSW

ii. Γεωμετρία συγκόλλησης

Η FSW μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος συγκολλήσεων, συμπεριλαμβανομένης και της μετωπικής συγκόλλησης, μεταξύ ανόμοιων παχών των πλακών, συγκόλληση με επικάλυψη κ.α. Ωστόσο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα σε συγκολλήσεις τύπου “T”, σε βιομηχανική κλίμακα, καθώς η τεχνική βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο.

iii. Κίνηση του εργαλείου

Από τις πιο βασικές παραμέτρους της FSW είναι (α) η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου (περιουχένιο – κεφαλή) δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα (ω , rpm) και η ταχύτητα πρόωσης (v , mm/min) του περιουχένιου κατά μήκος της ραφής της συγκόλλησης. Η περιστροφή του εργαλείου προκαλεί την ανάδευση και ανάμιξη των δύο προς συγκόλληση υλικών γύρω από την κεφαλή και τελικά, η μετακίνηση αυτού από το μπροστινό στο πίσω μέρος της κεφαλής επιφέρει τελικά τη συγκόλλησή τους. Μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής συνεπάγεται μεγαλύτερη τριβή, αύξηση της θερμοκρασίας κι επομένως καλύτερη ανάδευση των υλικών.

2.1.3 Μικροδομή και ζώνες της συγκόλλησης

Η τυπική μικροδομή συγκολλήσεων FSW (Σχ. 2.3), αποτελείται από :

- τη ζώνη ανάδευσης (nugget zone),
- τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (Thermomechanically Affected Zone, TMAZ) και
- τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone, HAZ).

- Ζώνη ανάδευσης

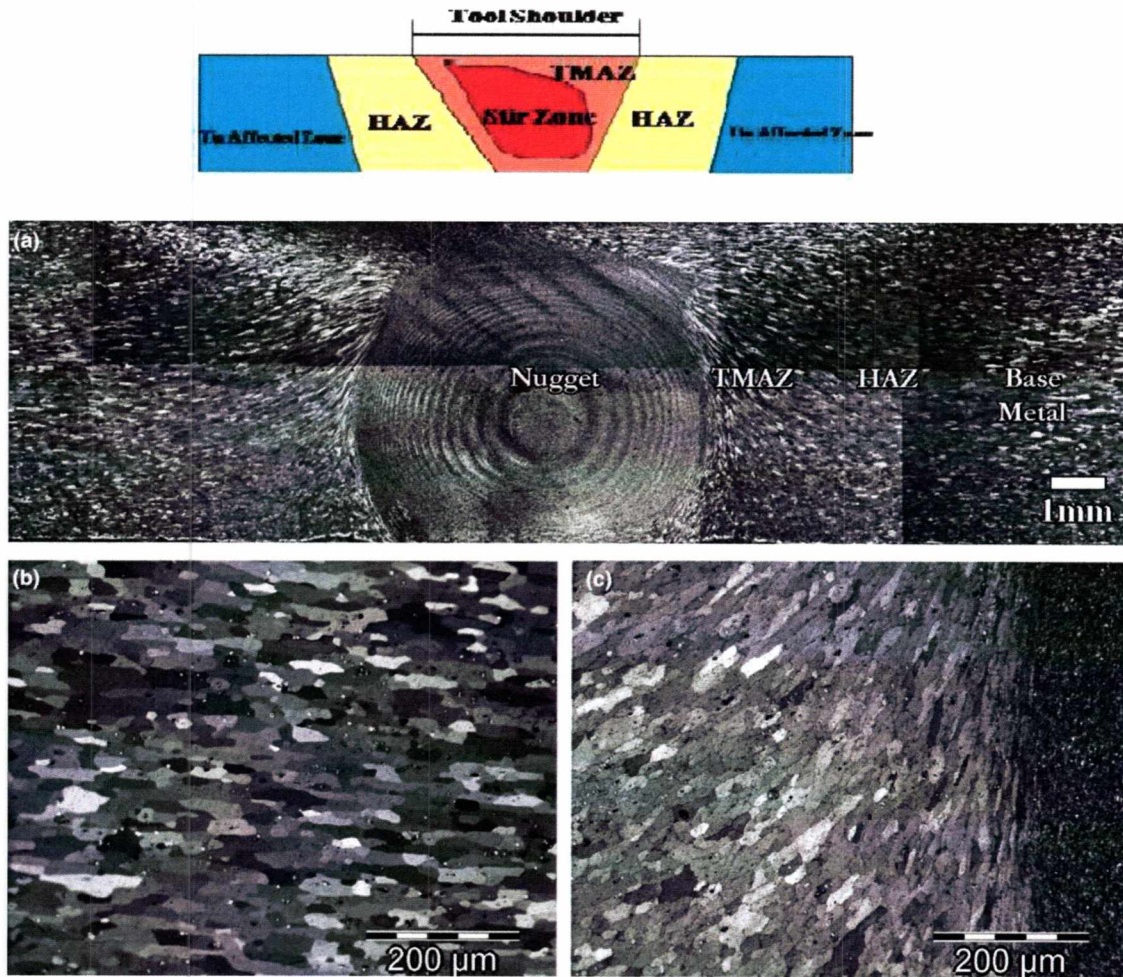
Η πλαστική παραμόρφωση και η θερμότητα λόγω τριβής που αναπτύσσεται, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ανακρυστάλλωσης των κόκκων στην περιοχή της ανάδευσης. Η ζώνη αυτή ονομάζεται ζώνη ανάδευσης (nugget zone - weld nugget). Η ανακρυστάλλωση στη ζώνη ανάδευσης δημιουργεί λεπτόκοκκη μικροδομή. Παράμετροι όπως η γεωμετρία του εργαλείου, η σύσταση του υλικού, η θερμοκρασία του, η πίεση που ασκεί το εργαλείο κατά τη διείδυση, το πόσο γρήγορα το δοκίμιο θα ψυχθεί, επηρεάζουν άμεσα τη μικροδομή που θα έχει το υλικό μετά τη συγκόλληση.

- Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη

Ανάμεσα στο βασικό μέταλλο και τη ζώνη ανάδευσης αναπτύσσεται η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ). Είναι απόρροια τόσο της θερμότητας που αναπτύσσεται όσο και της παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό. Παρατηρείται έντονη παραμόρφωση κι επιμήκυνση των κόκκων του βασικού μετάλλου. Παρότι η TMAZ υπόκειται σε πλαστική παραμόρφωση, η μικροδομή της δεν υφίσταται ανακρυστάλλωση.

- Θερμικά επηρεασμένη ζώνη

Μεταξύ βασικού μετάλλου και TMAZ υπάρχει η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ). Το υλικό επηρεάζεται από τη θερμοκρασία η οποία είναι 250°C – 350 °C. Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι η διαλυτοποίηση ή και η διεύρυνση των φάσεων ισχυροποίησης και κατά συνέπεια η σκληρότητα μειώνεται σε σχέση με τη σκληρότητα του βασικού μετάλλου.



Σχ. 2.3: Μικροδομή συγκολλήσεων FSW (a)Χαρακτηριστικές ζώνες συγκόλλησης FSW στο κράμα Al 2024 (b) Βασικό μέταλλο, (c) TMAZ [2]

2.1.4 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα της μεθόδου FSW

Η τεχνική συγκόλλησης δια τριβής και ανάδευσης έχει συγκεκριμένα και αναμφισβήτητα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις γνωστές συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης [3]. Συγκεκριμένα:

- Η FSW καθιστά δυνατή τη συγκόλληση όλων των κραμάτων αλουμινίου αυτογενώς, καθώς και τη συγκόλληση πολλών ανόμοιων κραμάτων μεταξύ τους.
- Πρόκειται για διαδικασία στερεάς κατάστασης με αποτέλεσμα την απουσία τήξης υλικού κατά την πραγματοποίησή της. Ως επακόλουθο της μη τήξης υλικού κατά

τη συγκόλληση είναι η απουσία ατελειών όπως το πορώδες, η ατελής τήξη, η θερμή ρωγμάτωση κ.α.

- Παράγει συγκολλήσεις με άριστες μηχανικές ιδιότητες και με πολύ χαμηλότερες στρεβλώσεις από ότι στις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης
- Τα συγκολλημένα τεμάχια παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.
- Οι φυσικές ιδιότητες των συγκολλημένων τεμαχίων είναι περίπου ίδιες με αυτές του αρχικού υλικού.
- Διαθέτει το μεγαλύτερο εύρος πάχους συγκολλούμενων τεμαχίων (περίπου από 0,5 mm έως 75mm για κράματα αλουμινίου σειράς 6XXX) με εξαίρεση τη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων.
- Δεν απαιτείται η χρήση προστατευτικών αερίων ή μετάλλου προσθήκης με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν προβλήματα σχετιζόμενα με τη σύσταση μετάλλου προσθήκης, αφού πρόκειται για μία αυτογενή διαδικασία.
- Για την πραγματοποίησή της δεν χρειάζεται ειδική μηχανουργική κατεργασία προετοιμασίας των προς συγκόλληση τεμαχίων (όπως π.χ. δημιουργία λοξοτομής).
- Είναι πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδος.
- Καταναλώνει χαμηλότερη ενέργεια σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.
- Μπορεί να αυτοματοποιηθεί εύκολα σε απλές φρέζες με χαμηλό κόστος εγκατάστασης και μικρή απαίτηση εκπαίδευσης προσωπικού
- Το κόστος αναλωσίμων είναι χαμηλό αφού με το ίδιο εργαλείο μπορούν να συγκολληθούν 1000m αλουμινίου πριν χρειαστεί αλλαγή το εργαλείο συγκόλλησης.
- Είναι μέθοδος φιλική προς το περιβάλλον, αφού δεν παράγονται ρυπογόνα αέρια και δεν εκπέμπεται υπέρυθρη και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Πρόκειται για μία από τις πιο ευέλικτες διαδικασίες συγκόλλησης, αφού μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε θέση (1-D, 2-D ή 3-D).

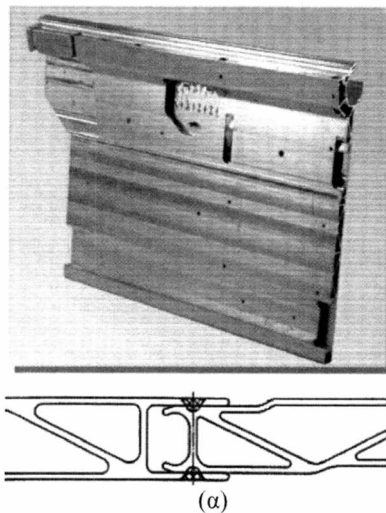
Ωστόσο υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα που αξίζει να σημειωθούν:

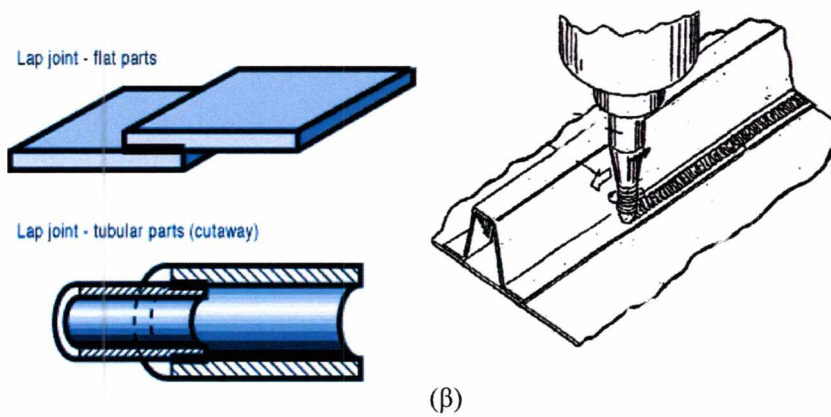
- Ανεπαρκείς θερμοκρασίες συγκόλλησης, λόγω των χαμηλών στροφών ή υψηλές ταχύτητες πρόωσης του εργαλείου που μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα ασυνέχειας στα προς συγκόλληση τεμάχια, δυσκολία στην ανάμειξη κτλ.

- Κατά την έξοδο του εργαλείου μένει οπή στο υλικό
- Απαιτούνται μεγάλες δυνάμεις για να συγκρατήσουν τις πλάκες κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης
- Όχι τόσο ευέλικτη μέθοδος για μικρά πάχη υλικού .

2.1.5 Συγκολλήσεις επικάλυψης (lap joints) με τη μέθοδο FSW

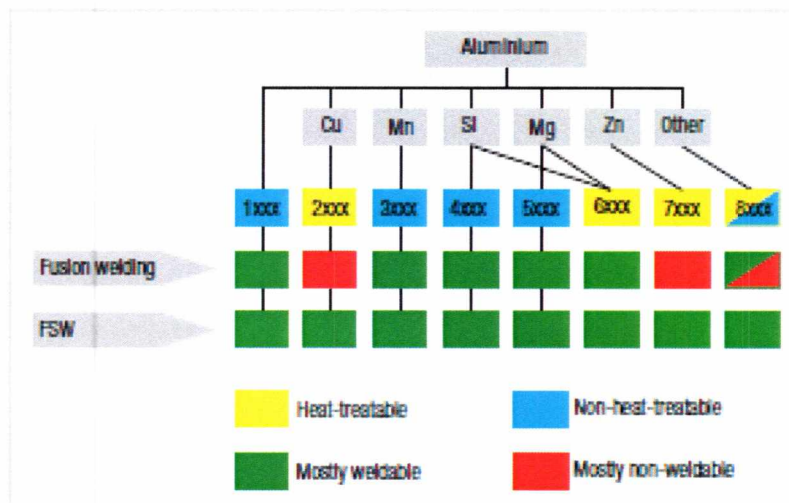
Οι συγκολλήσεις επικάλυψης έχουν ευρεία χρήση στη βιομηχανία αυτοκίνησης κι αεροσκαφών, βρίσκοντας εφαρμογή σε μηχανές, ζάντες τροχών, υποστηρίξεις πλαισίων αμαξωμάτων (Σχ. 2.4.α), ενώ στην αεροναυπηγική χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση των ηλώσεων στο σκελετό των αεροσκαφών σε συνδυασμό με τις συγκολλήσεις συμβολής και αυχενικές συγκολλήσεις. Οι οπές των ηλώσεων αποτελούν, συχνά, πιθανές θέσεις έναρξης ρωγμών και προβλημάτων διάβρωσης. Επιπλέον, η κατάργησή τους οδηγεί σε σημαντική μείωση του βάρους και του κόστους των κατασκευών [4]. Επίσης, εφαρμογή βρίσκουν στην κατασκευή ερμητικά κλειστών δοχείων, όπως ψυκτικά στοιχεία και εναλλάκτες θερμότητας [5]





Σχ. 2.4: (α) υποστήριξη πίσω καθίσματος αυτοκινήτου[5] (β) τυπικές εφαρμογές των συγκολλήσεων επικάλυψης[6]

Τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος FSW παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στις συγκολλήσεις επικάλυψης κραμάτων αλουμινίου. Να σημειωθεί ότι με τη μέθοδο αυτή μπορούν να συγκολληθούν όλες οι σειρές κραμάτων αλουμινίου (2xxx-7xxx), τα οποία δε θεωρούνται συγκολλησίμα για τις κλασικές μεθόδους συγκόλλησης εξαιτίας της σημαντικής μείωσης της μηχανικής αντοχής της ραφής σχετικά με το βασικό μέταλλο (σχ. 2.5).



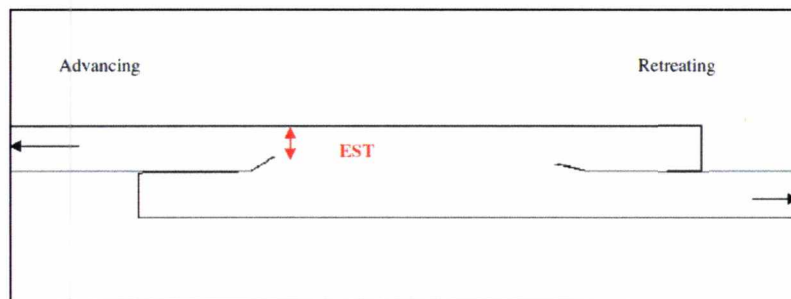
Σχ. 2.5: Συγκολλησιμότητα κραμάτων Αλουμινίου [7]

Από τις διαθέσιμες στην ανοιχτή βιβλιογραφία αναφορές, προκύπτει ότι οι συγκολλήσεις επικάλυψης με FSW έχουν πολύ χαμηλή αντοχή σε κόπωση, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε αεροναυπηγικές κατασκευές. Αυτό οφείλεται σε πρόβλημα μειωμένης διατομής στη διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων, καθώς και στην αυξημένη συγκέντρωση τάσεων στην ίδια περιοχή. Στην πλευρά

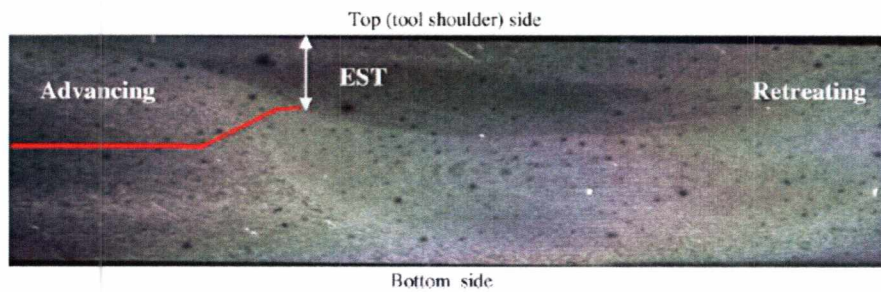
εισόδου του εργαλείου (Advancing Side, AS) δημιουργούνται γεωμετρικά ελαττώματα τύπου hook (σχ. 2.6, 2.7) καθώς και περιοχές συγκέντρωσης τάσεων τόσο στην πλευρά εισόδου του εργαλείου (AS) όσο και στην πλευρά εξόδου (RS) [1]

Οι ασυνέχειες αυτές έχουν επιπτώσεις στην αντοχή σε εφελκυσμό και κόπωση. Τα δημοσιευμένα αποτελέσματα μέχρι τώρα δείχνουν ότι η στατική αντοχή και η αντοχή σε κόπωση των συγκολλήσεων επικάλυψης με πλήρη μεταφορά φορτίου είναι πολύ χαμηλή, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή της σε πρωτεύουσες κατασκευές.

Ένα άλλο μειονέκτημα των συγκολλήσεων επικάλυψης με FSW είναι το γεγονός ότι κατά την αξονική φόρτιση δημιουργείται ένας συνδυασμός διατμητικών δυνάμεων και ροπών κάμψεως. Αυτό οφείλεται στα έκκεντρα φορτία που ασκούνται στην περιοχή συγκόλλησης των ελασμάτων και μπορεί να οδηγήσει σε κοινή περιστροφή τους. Προκειμένου να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό, τα ελάσματα πρέπει να είναι επαρκώς συγκρατημένα. Αν δεν υπάρχει εξωτερική συγκράτηση, δύο ή περισσότερες γραμμές συγκόλλησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή σε κάμψη [8]. Για τις συγκολλήσεις επικάλυψης, το πλάτος της συγκόλλησης στη διεπιφάνεια των ελασμάτων είναι σημαντικό. Μία μεγαλύτερη ζώνη ανάδευσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αντοχής σε κόπωση [5].

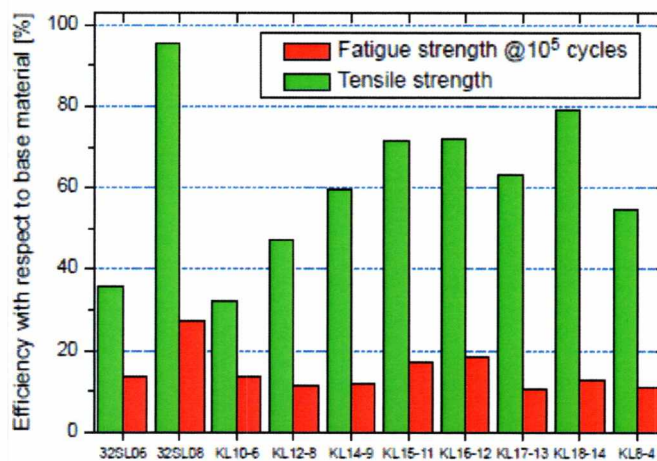


Σχ. 2.6: Σχηματική αναπαράσταση της περιοχής συγκόλλησης σε lap joints. Φαίνονται οι περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στη διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων (Effective sheet thickness, EST) [1]



Σχ. 2.7: Μικροδομή της περιοχής συγκόλλησης σε lap joint. Φαίνονται οι περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στη διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων, και σημειώνεται το πάχος της συγκόλλησης τοπικά (Effective sheet thickness, EST) [1]

Από διαθέσιμα στην ανοικτή βιβλιογραφία στοιχεία προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού συγκολλήσεων επικάλυψης, είναι συγκρίσιμα με αυτά του βασικού υλικού, ενώ η αντοχή σε κόπωση είναι πολύ χαμηλότερη (Σχ. 2.8).



Σχ. 2.8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού/ κόπωσης [9].

Τη βέλτιστη απόδοση παρουσιάζουν τα δοκίμια με τη μεγαλύτερη απόσταση μετάβασης του εργαλείου από το ένα πέρασμα στο άλλο. Επομένως, με κατάλληλη επιλογή της παραμέτρου αυτής μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση στις στατικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Ωστόσο, μεγάλη βελτίωση στην αντοχή κόπωσης δεν αναμένεται.[9]

2.2 Κράματα αλουμινίου και αεροπορικές εφαρμογές

Τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρέως σε μηχανολογικές εφαρμογές και ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές, ειδικές αντοχές, δηλαδή οι μηχανικές ιδιότητες ανοιγμένες ως προς την πυκνότητα του υλικού. Πλεονεκτήματα των κραμάτων αλουμινίου είναι το χαμηλό βάρος σε σχέση με το χάλυβα, η καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, η καλή αντοχή στη διάβρωση, η υψηλή κατεργασιμότητα και θεωρούνται μη τοξικά και μαγνητικά υλικά. Παράγονται από την προσθήκη διαφόρων κραματικών στοιχείων, όπως Cu, Li, Mg, Zn στο αλουμίνιο. Τα παραπάνω κραματικά στοιχεία προσδίδουν διαφορετικές ιδιότητες στο υπό ανάπτυξη υλικό.

Στις αεροπορικές εφαρμογές, ο λόγος αντοχής-βάρους των υλικών που χρησιμοποιούνται είναι ένας από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες στην επιλογή υλικού. Αυτός είναι και ο λόγος που στα σύγχρονα αεροσκάφη χρησιμοποιούνται κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό τα κράματα αλουμινίου. Ενδεικτικό στοιχείο για την ανάδειξη της σημασίας της χρήσης τους στα αεροσκάφη, αποτελεί το γεγονός ότι συναντώνται σε τμήματα της πρωτεύουσας δομής όπως το κέλυφος και τα πτερύγια.

2.2.1 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2xxx (Al-Cu)

Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6 – 6,3% και το Mg κυμαίνεται μεταξύ 0,5 – 1,5%. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με καθίζηση της ενδομεταλλικής ένωσης CuAl_2 (φάση θ), που προσδίδει στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8%, ευνοεί τον σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας.

Η παρουσία Fe συχνά αποδεικνύεται βλαβερή, εξαιτίας του σχηματισμού της ένωσης Cu_2FeAl_7 , η οποία στερεί από το στερεό διάλυμα μέρος του χαλκού, ελαττώνοντας τη δυνατότητα σκλήρυνσης της δομής. Ωστόσο, αν προστεθεί συγχρόνως και Ni, σχηματίζεται η ένωση Al_9FeNi , που προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή, μέχρι τους 230 °C.

Τα κράματα της σειράς 2xxx, μετά από βαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και συγκολλούνται δύσκολα διότι, οι γειτονικές προς την περιοχή της συγκόλλησης ζώνες, υπόκεινται φαινόμενα διαλυτοποίησης και διεύρυνσης των φάσεων ισχυροποίησης εξαιτίας του επιβαλλόμενου από τη συγκόλληση θερμικού κύκλου, με αποτέλεσμα, οι μηχανικές τους ιδιότητες να εξασθενούν σημαντικά.

Η ανάπτυξη των κραμάτων αυτών ως αρχικό στόχο είχε τη μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των δομικών στοιχείων των διαστημοπλοίων, λόγω της μικρής τους πυκνότητας, της υψηλής μηχανικής τους αντοχής και του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας. Σήμερα πλέον, βρίσκουν και άλλες εφαρμογές λόγω της πολύ καλής αντοχής τους σε κόπωση και της υψηλής μηχανικής αντοχής τους σε χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. δεξαμενές υγρού υδρογόνου).

2.2.1.1 Το κράμα Al 2024-T3

Πίνακας 2.1: Χημική σύσταση του κράματος Al 2024 (%κ.β.)

Cu	Cr max	Fe max	Mg	Mn	Si max	Ti max	Zn max	Other	Total other	Al
3.8-4.9	0.1	0.5	1.2-1.8	0.3-0.9	0.5	0.15	0.25	0.5	0.15	Rem

Πίνακας 2.2: Μηχανικές ιδιότητες του κράματος Al 2024-T3* για πάχος ελάσματος 1,6mm

Όριο αντοχής (MPa)	Όριο διαρροής (Mpa)	Επιμήκυνση %	Σκληρότητα HV	Όριο αντοχής σε κόπωση (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)
485	345	18	126	140	73

*T3: θερμική κατεργασία φυσικής γήρανσης (ομογενοποίηση, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση)

Γενικά, το κράμα 2024 είναι υλικό υψηλής αντοχής, επιδέχεται καλή μηχανική επεξεργασία και επιφανειακές κατεργασίες.

Συναντάται σε εξαρτήματα αεροσκαφών, γρανάζια, άξονες, βίδες, περικόχλια, εξαρτήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών, υδραυλικές βαλβίδες, εξαρτήματα πυραύλων, πυρομαχικά, έμβολα, ορθοπεδικούς εξοπλισμούς, κατασκευές, κ.α.

Σε θερμική κατεργασία T3 είναι ευρέως διαδεδομένο σε αεροπορικές εφαρμογές, λόγω των αυξημένων μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζει.

2.3 Επιφανειακές κατεργασίες

Ο όρος Επιφανειακή Κατεργασία (Surface Engineering) χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα ευρύ φάσμα διεργασιών τροποποίησης των εξωτερικών στρωμάτων ενός υλικού που στόχο έχει είτε την μικροδομική και μηχανική του ενίσχυση, ή την μεταβολή της μικρογεωμετρίας του. Οποιοδήποτε από τους δύο στόχους κι αν καλείται να ικανοποιήσει μια επιφανειακή κατεργασία, αυτή αποτελεί το τελευταίο στάδιο κατεργασίας ενός αντικειμένου πριν αυτό τεθεί σε λειτουργία. Περαιτέρω κατεργασία ενός αντικειμένου μετά την επιφανειακή του κατεργασία είναι επιτρεπτή μόνο για λόγους διόρθωσης ή συντήρησής του.

Σε αντίθεση με τις θερμικές κατεργασίες που επηρεάζουν το συνολικό όγκο του υλικού, οι επιφανειακές περιορίζονται σε μια εξωτερική στοιβάδα του, πάχους μερικών μμ έως μερικών δεκάτων του χιλιοστού. Οποιαδήποτε κι αν είναι η τελική χρήση ενός επιφανειακά κατεργασμένου προϊόντος, δε θα πρέπει να αγνοείται ο ρόλος του βασικού μετάλλου, το οποίο αποτελεί τον κύριο «φορέα» των καταπονήσεων που υφίσταται η κατασκευή.

Η σημασία τους για την καλή απόκριση του μεταλλικού αντικειμένου σε συνθήκες λειτουργίας είναι τεράστια, αφού το μεγαλύτερο μέρος των αστοχιών που καταγράφονται καθημερινά έχουν ως σημεία έναρξης επιφανειακές περιοχές του υλικού.

Ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν, οι επιφανειακές κατεργασίες διακρίνονται σε

- Κατεργασίες επιφανειακής ενίσχυσης του υλικού έναντι μηχανικών φορτίσεων ή/και δράσεων χημικών παραγόντων.

- Κατεργασίες εξομάλυνσης του ανάγλυφου ή χάραξης με επέμβαση στη μικρογεωμετρία της επιφάνειας και ταυτόχρονη αφαίρεση υλικού.

Σε βιομηχανικές εφαρμογές, οι επιφανειακές κατεργασίες των υλικών ως κύριο σκοπό έχουν την προστασία της συνολικής κατασκευής έναντι:

- Φθοράς, που προκαλείται από την επαφή συνεργαζόμενων επιφανειών
- Διάβρωσης, όταν η επιφάνεια φέρεται σε υγρό ή αέριο περιβάλλον που δρα δυσμενώς επ' αυτής.
- Οξειδωσης, όταν η επιφάνεια υπόκειται σε ξηρό περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες που ενεργοποιεί τη χημική δράση των οξειδωτικών αερίων.
- Κόπωσης, η οποία εκδηλώνεται ως αστοχία του υλικού λόγω εναλλασσόμενης μηχανικής ή θερμικής φόρτισης.

Στην περίπτωση προστατευτικών επιστρωμάτων, ένα υλικό προστίθεται ή εναποτίθεται στην επιφάνεια ενός άλλου ή του ίδιου υλικού. Επιστρώματα χρησιμοποιούνται συχνά για πληθώρα εφαρμογών, όπως την προστασία της επιφάνειας από το περιβάλλον το οποίο μπορεί να προκαλέσει αντιδράσεις διάβρωσης και εκφυλισμού ή την βελτίωση της επιφανειακής εμφάνισης ή αντοχής. Υπάρχουν πολλές τεχνικές σχηματισμού επιστρωμάτων και η επιλογή της καταλληλότερης εξαρτάται από λειτουργικές απαιτήσεις (το μέγεθος, το σχήμα και το είδος) του υποστρώματος, την προσαρμοστικότητα του υλικού επίστρωσης στην τεχνική που θα επιλεγεί, την απαιτούμενη συνάφεια υποστρώματος-επιστρώματος, τη διαθεσιμότητα και το κόστος του εξοπλισμού.

Μία άλλη κατηγορία επικαλύψεων είναι αυτή των επικαλύψεων μετατροπής, όπου επιφανειακό στρώμα του μετάλλου βάσης μετατρέπεται σε συμπαγές στρώμα οξειδίου, πάνω στο οποίο οικοδομείται η κυρίως επικάλυψη. Σημαντικότερη τεχνική αυτής της κατηγορίας είναι η κατεργασία της ανοδίωσης (anodising), η οποία εφαρμόζεται σε όλα τα κράματα αλουμινίου, από αυτά απλών δομικών χρήσεων έως τμήματα αεροναυπηγικών κατασκευών, προσφέροντάς τους χημική αδράνεια σε ατμοσφαιρικές συνθήκες και υψηλή σκληρότητα επιφάνειας. Ως επιφανειακή κατεργασία του αλουμινίου, η ανοδίωση εφαρμόζεται περισσότερο από 50 χρόνια.

Με την ανοδίωση, μετασχηματίζεται η επιφάνεια του αλουμινίου και δημιουργείται, τεχνητά, ένα στρώμα οξειδίου. Επειδή η διαδικασία γίνεται σε απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες, το στρώμα οξειδίου είναι πάρα πολύ συνεκτικό και σκληρό. Το στρώμα αυτό, επειδή είναι ήδη οξείδιο, όταν εκτίθεται στην ατμόσφαιρα δε διαβρώνεται και

έτσι προστατεύει το μέταλλο. Το ανοδικό επίστρωμα που το πάχος του κυμαίνεται από 10-25 μm , είναι διαφανές, η δομή του φέρει πόρους και επιτρέπει την ενσωμάτωση χρωστικών υλών για την ηλεκτροστατική βαφή του που ακολουθεί.[10]

Μερικά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ανοδίωσης είναι:

- Το στρώμα ανοδίωσης δημιουργείται από το ίδιο το μέταλλο, είναι πλήρως ενσωματωμένο σ' αυτό και έτσι δεν υπάρχουν προβλήματα πρόσφυσης.
- Η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά της ανοδίωσης είναι πάρα πολύ καλή, εφόσον τηρηθούν όλοι οι κανόνες παραγωγικής διαδικασίας, εφαρμογής και χρήσης.
- Τα ανοδιωμένα προϊόντα αλουμινίου έχουν μεταλλική εμφάνιση.

Ανάλογα με την τελική εφαρμογή του τελικού αντικειμένου, η χημική σύσταση των λουτρών ανοδίωσης και η θερμοκρασία τους μεταβάλλονται, ώστε το ανοδικό στρώμα να έχει το πάχος και τις ιδιότητες που απαιτούνται. Ενδεικτικά:

- Η κοινή θειική ανοδίωση χρησιμοποιείται για διαφανή ανοδικά στρώματα με πάχος 5-30 μm που βρίσκουν εφαρμογές στη διακόσμηση και την αρχιτεκτονική.
- Η χρωμική ανοδίωση χρησιμοποιείται για φαιά ανοδικά στρώματα με πάχος 3-7 μm που βρίσκουν εφαρμογές στη ναυπηγική και την αεροναυπηγική.
- Η σκληρή ανοδίωση χρησιμοποιείται για ανοδικά στρώματα υψηλής σκληρότητας με πάχος 30-80 μm που βρίσκουν μηχανολογικές εφαρμογές.

2.3.1 TSA (Tartaric Sulfuric Acid Anodising)

Η TSA είναι μία μορφή ανοδίωσης, στην οποία προστίθεται ταρταρικό οξύ κατά τη διαδικασία της ανοδίωσης προκειμένου να βελτιωθεί η αντοχή στη διάβρωση. Χρησιμοποιείται από την αεροπορική βιομηχανία σε συγκεκριμένες κατηγορίες κραμάτων για αντικατάσταση της παραδοσιακής χρωμικής ανοδίωσης και είναι μέθοδος φιλικότερη στο περιβάλλον.

2.3.2 Primer (επίστρωση ασταριού)

Επιστρώσεις και αστάρια χρωμιούχων αλάτων χρησιμοποιούνται για την προστασία των αεροσκαφών από τη διάβρωση. Αυτές οι επιστρώσεις προστατεύουν ενεργά το υπόστρωμα επιβραδύνοντας την κινητική των αναγωγικών αντιδράσεων του οξυγόνου με τις τοπικές καθόδους (διμεταλλικές ενώσεις) και τις ανοδικές αντιδράσεις σε ολόκληρη τη μήτρα του κράματος [11].

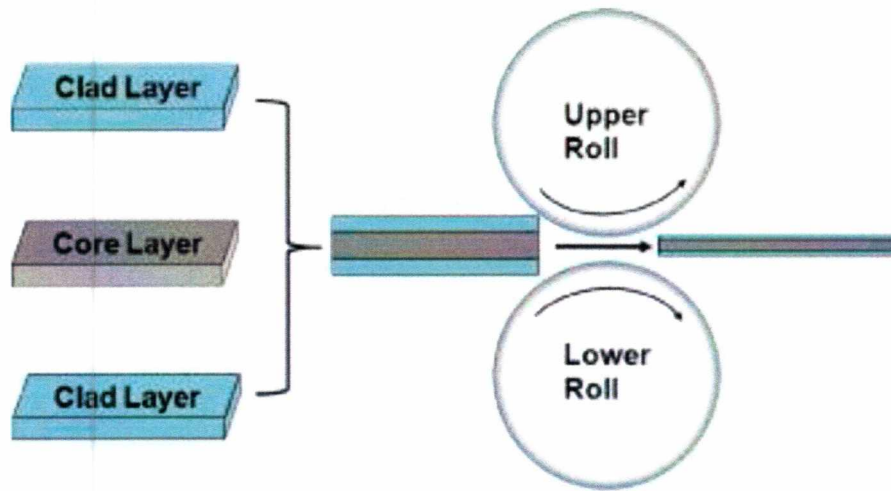
2.3.3 Adhesive (συγκόλληση με κόλλα)

Η δημιουργία της επίστρωσης αυτής, πάχους 0,1mm, όπως και στην περίπτωση της επίστρωσης ασταριού (primer) που αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3.2, επιτυγχάνεται με εφαρμογή του θερμοπλαστικού υλικού PA11, μέσω θερμικής διεργασίας ψεκασμού οξυγονικών αερίων υψηλής ταχύτητας (HVOF).

2.3.4 Aluminum cladding (επίστρωση αλουμινίου)

Επίστρωση αλουμινίου είναι η επένδυση που δημιουργείται χρησιμοποιώντας ένα λεπτό στρώμα αλουμινίου στην εξωτερική πλευρά του προϊόντος. Για παράδειγμα, με επικάλυψη καθαρού αλουμινίου προστατεύονται τα κράματα Al-Cu, με αποτέλεσμα να γίνονται πολύ ανθεκτικά στην ατμοσφαιρική διάβρωση ακόμη και σε παραθαλάσσιες περιοχές [12].

Συνήθως, η επικάλυψη επιτυγχάνεται με την εξώθηση των δύο μετάλλων μέσω μιας μήτρας, ειδικά στις περιπτώσεις που το αλουμίνιο χρησιμοποιείται ως προστατευτικός μανδύας κάποιου άλλου μετάλλου. Ένας άλλος τρόπος είναι η συμπίεση ή έλαση των ελασμάτων υπό υψηλή πίεση ώστε να επιτευχθεί καλή πρόσφυση μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9. Και στις δύο διαδικασίες, η υψηλή και σταθερή θερμοκρασία κρίνεται απαραίτητη για την επίτευξη του δεσμού μεταξύ των μετάλλων. Άλλοι τρόποι είναι η επικάλυψη με χρήση laser ή εκρηκτικής διαμόρφωσης.



Σχ. 2.9: Διαδικασία παραγωγής ελασμάτων Al με clad layer κατά τη διαδικασία έλασης [13]

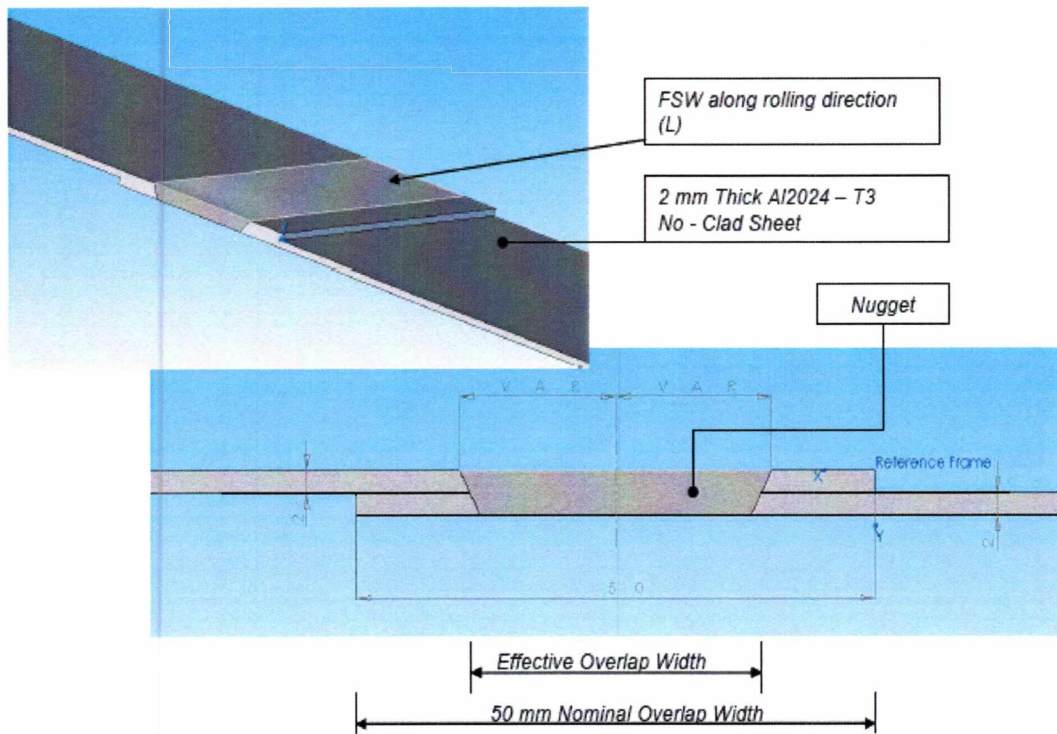
3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Οι πειραματικές διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς σε κόπωση παρουσιάζονται σε αυτό το Κεφάλαιο. Μελετήθηκαν συγκολλήσεις επικάλυψης με μονή, διπλή και τριπλή ραφή συγκόλλησης και επιφανειακές κατεργασίες, TSA, primer και adhesive προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις τους στη συμπεριφορά σε κόπωση των δοκιμίων. Στην περίπτωση των δοκιμίων που έχουν υποστεί επιφανειακή κατεργασία επίστρωσης primer ή adhesive, η επίστρωση στη ραφή συγκόλλησης (πλάτους 10mm) έχει απομακρυνθεί μηχανικά για την αποφυγή επίδρασης της στην ποιότητα των συγκολλήσεων.

Συνολικά εξετάστηκαν 20 δοκίμια, υλικού Al2024-T3, πάχους 2mm τα οποία έχουν συγκολληθεί με τη μέθοδο FSW σε γεωμετρία επικάλυψης 50mm (Σχ. 3.1), σε μονό, διπλό και τριπλό πέρασμα συγκόλλησης (Σχ. 3.2). Οι συγκολλήσεις, πραγματοποιήθηκαν στην EADS-IW, έγιναν με χρήση του τυπικού εργαλείου της μεθόδου FSW και τις παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Επιφανειακή κατεργασία ή συνδυασμό κατεργασιών είχαν υποστεί μερικά από τα δοκίμια, όπως φαίνεται κι αναλυτικότερα, μαζί με τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης, στον πίνακα 3.2.

Οι μηχανικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, σε σερβοϋδραυλική μηχανή MTS γενικών δοκιμών και μέγιστης δυναμικότητας 100kN



Σχ. 3.1: Γεωμετρία συγκολλήσεων

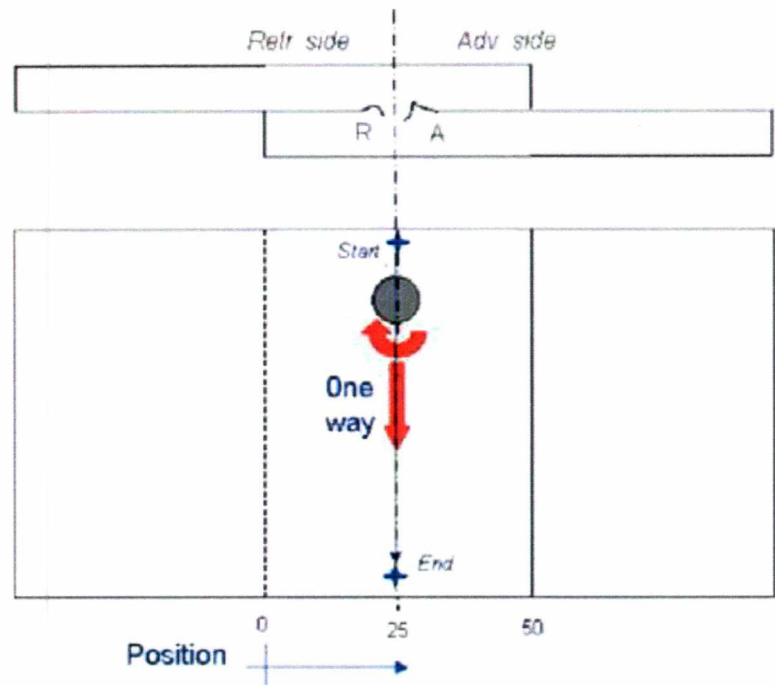
Πίνακας 3.1: Πειραματικές συνθήκες συγκόλλησης FSW

Ταχύτητα πρόωσης	140mm/min
Ταχύτητα περιστροφής	500rpm
Διάμετρος περιανχενίου	13mm
Διάμετρος κεφαλής	4mm

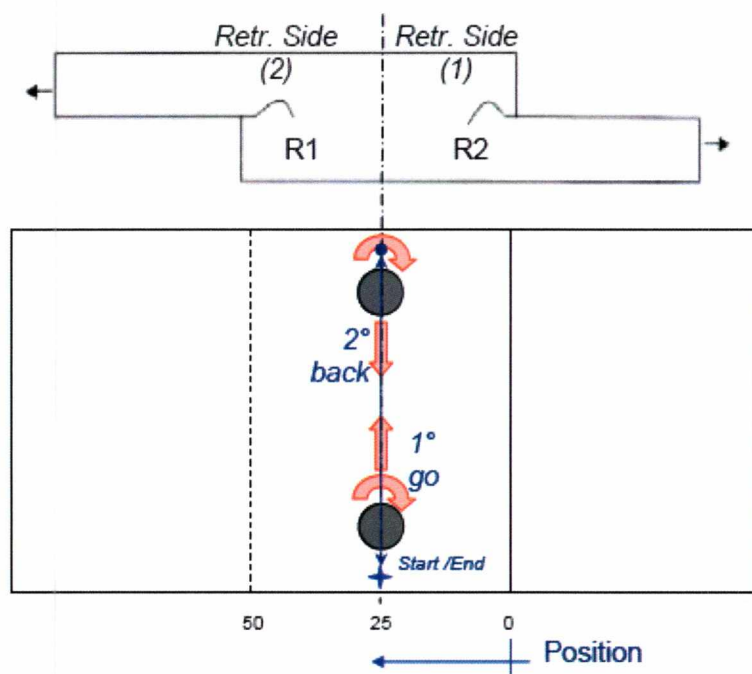
Επιφανειακή κατεργασία ή συνδυασμό κατεργασιών είχαν υποστεί μερικά από τα δοκίμια, όπως φαίνεται κι αναλυτικότερα, μαζί με τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης, στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Δοκίμια που μελετήθηκαν

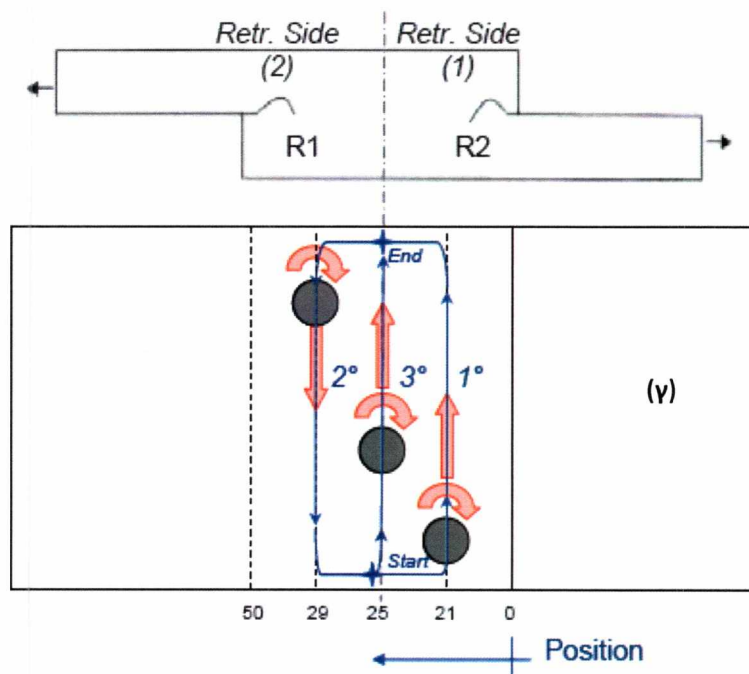
Τύπος συγκόλλησης	Αρ. δοκιμίου	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	N_f κύκλοι αστοχίας	Επιφανειακή κατεργασία
A	KL 6-2-02	40	4	102.400	NONE
	KL 6-2-03	40	4	82.500	
	KL 6-2-04	40	4	100.200	
	KL 6-2-06	30	3	2.000.000	
	KL 7-3-02 (με cladding)	40	4	59.100	
	KL 7-3-03 (με cladding)	30	3	224.000	
B	KL 10-6-01	80	8	1100	NONE
	KL 10-6-03	40	4	218600	
	KL 10-6-07	40	4	161200	
	KL 10-6-04	40	4	81200	
B	KL 11-7-01	40	4	1812	TSA
	KL 11-7-06	20	2	2000000	
	KL 11-7-02	20	2	206094	
B	KL 24-7-01	40	4	24902	TSA + primer
	KL 24-7-05	30	3	112242	
B	KL 22-15-02	40	4	1921172	TSA + primer + adhesive
	KL 22-15-03	50	5	575237	
E	KL 18-14-01	40	4	84900	NONE
	KL 18-14-05	25	2.5	886500	
	KL 18-14-02	40	4	110.000	



(a)



(b)



Σχ. 3.2: Σχηματική απεικόνιση των συγκολλήσεων τύπου A, B και E.

3.1 Μεταλλογραφία των δοκιμών κόπωσης

3.1.1 Κοπή και προετοιμασία των δοκιμών

Για την κοπή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δύο κοπτικά εργαλεία, το πρώτο μηχανικό (Struers-Unitom 2 Spindle speed:2775rpm) και το δεύτερο ψηφιακό (Stuers-Accutom 5). Το ψηφιακό χρησιμοποιήθηκε, διότι ορισμένα κομμάτια από το δείγμα είχαν μικρές διαστάσεις. Στο πρώτο κοπτικό εργαλείο χρησιμοποιήθηκε δίσκος κοπής 83 EXO, ενώ στο δεύτερο δίσκος 356 CA και ταχύτητα κοπής 14mm/sec.



Σχ. 3.3: Κοπτικό εργαλείο:Struers-Unitom 2 Accutom 5



Σχ. 3.4: Κοπτικό εργαλείο:Struers-

Ο εγκιβωτισμός των δοκιμίων έγινε με ρητίνη Acryfix, ενώ η λείανση έγινε στο μοντέλο Struers-Knuth-Rotor-3. Τα δοκίμια λειάνθηκαν διαδοχικά στους δίσκους των 120, 300, 500, 800 και 1000 Grid και στη συνέχεια στίλβώθηκαν στο μηχάνημα Struers DAP-V με διαμαντόπαστα 3 μm και 1 μm . Τέλος υπεβλήθησαν σε χημική προσβολή με αντιδραστήριο Keller's [2 mL HF (48%), 3 mL HCL (conc), 5 mL HNO₃ (conc), 190 mL H₂O] για περίπου 25 δευτερόλεπτα.



Σχ. 3.5: Δίσκοι λείανσης και στίλβωσης

3.1.2 Μακροσκοπικός και μικροσκοπικός έλεγχος

Στο πλαίσιο της μεταλλογραφικής μελέτης, έγινε παρατήρηση και φωτογράφιση όλων των δοκιμίων στη ρίζα της συγκόλλησης, στην επιφάνεια θραύσης και περιμετρικά του δοκιμίου με τη χρήση στερεοσκοπίου. Επίσης, μελετήθηκαν περιοχές βλάβης και σημεία έναρξης κόπωσης. Ο μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος έγινε με το οπτικό μικροσκόπιο Leitz Wild GMBH με τη χρήση πολωμένου φωτός. Έγινε παρατήρηση και φωτογράφιση της μικροδομής, της επιφάνειας θραύσης καθώς και καταγραφή του μεγέθους των οπών λόγω της διάβρωσης των δοκιμίων.



Σχ. 3.6: Οπτικό μικροσκόπιο Aristomet Leitz



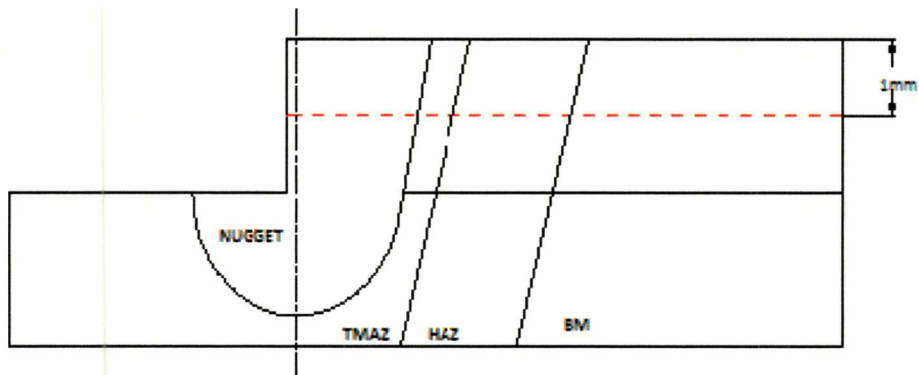
Σχ. 3.7: Στερεοσκόπιο

3.1.3 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

Πραγματοποιήθηκε στις επιφάνειες θραύσης επιλεγμένων δοκιμίων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) JEOL JSM 5310 σε μεγεθύνσεις έως 5000X.

3.2 Μικροσκληρομέτρηση

Η μικροσκληρομέτρηση των δοκιμίων έγινε με σκοπό τον έλεγχο της μεταβολής της σκληρότητάς τους στην οριζόντια κατεύθυνση από το κέντρο της συγκόλλησης έως το μέταλλο βάσης, 1mm κάτω από την επιφάνεια του εργαλείου, όπως φαίνεται στο σκαρίφημα του σχήματος 3.8. Η μικροσκληρομέτρηση έγινε με τη μέθοδο της κλίμακας Vickers, με φορτίο 300gr (HV0.3) και χρόνο μέτρησης 15 δευτερόλεπτα, στο μικροσκληρόμετρο WOLLPERT 402MVD.



Σχ. 3.8: Θέση profil μικροσκληρομέτρησης.

4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

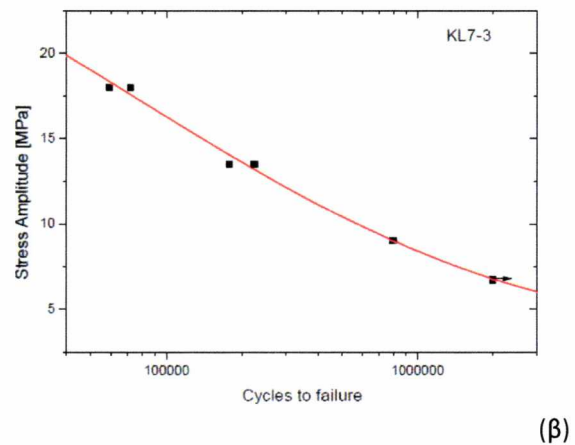
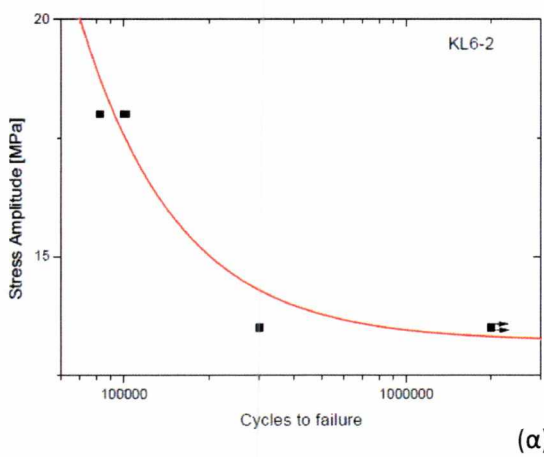
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά κατηγορία δοκιμίων. Τα δοκίμια έχουν κατηγοριοποιηθεί βάσει της επιφανειακής κατεργασίας που έχουν υποστεί, καθώς και του τύπου συγκόλλησης.

4.1 Δοκίμια χωρίς επιφανειακή κατεργασία, με μονό πέρασμα συγκόλλησης

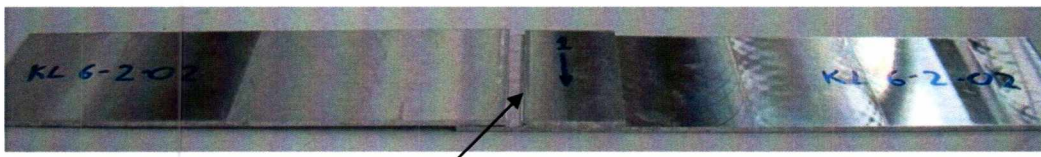
Τα δοκίμια που μελετήθηκαν από τις συγκολλήσεις με μονό πέρασμα του εργαλείου φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Από αυτά, τα δοκίμια με κωδικό 6-2 δεν είχαν υποστεί καμία επιφανειακή κατεργασία, ενώ τα δοκίμια με κωδικό 7-3 είχαν στην ενδιάμεση επιφάνεια clad layer. Οι καμπύλες S-N δίδονται στο Σχ. 4.1 απ' όπου και φαίνεται ότι η παρουσία του clad layer έχει ως άμεση επίπτωση τη μείωση του χρόνου ζωής σε κόπωση. Χαρακτηριστικό δοκίμιο κόπωσης φαίνεται στο Σχ. 4.2 για την πρώτη ομάδα των δοκιμίων, και φαίνεται ότι η περιοχή της θραύσης ευρίσκεται στα όρια της ζώνης τριβής του περιαιχενίου του εργαλείου της FSW. Από τη μελέτη της μακροδομής σε εγκάρσια τομή στην επιφάνεια αστοχίας των δοκιμίων κόπωσης (Σχ. 4.4), φαίνεται καθαρά ότι τα δοκίμια έχουν αστοχήσει από την πλευρά εξόδου του εργαλείου (RS). Όσον αφορά την περίπτωση των δοκιμίων με clad layer χαρακτηριστική μακροδομή παρουσιάζεται στο Σχ. 4.5. Το Al-clad έχει εγκλωβιστεί τόσο στην περιοχή του nugget όσο και στην περιοχή της TMAZ (Σχ. 4.6). Αντιπροσωπευτική μακροφωτογραφία σε εγκάρσια τομή στην επιφάνεια αστοχίας (Σχ. 4.8.), δείχνει ότι η θραύση του δοκιμίου έγινε στο όριο nugget/TMAZ από την πλευρά εξόδου του εργαλείου (RS). Οι εγκλωβισμένες περιοχές του cladding λειτούργησαν ως σημεία έναρξης της ρωγμής κόπωσης (Σχ. 4.9) μειώνοντας το χρόνο αντοχής σε κόπωση σε σχέση με την προηγούμενη κατηγορία δειγμάτων.

Πίνακας 4.1: Δοκίμα συγκολλήσεων επικάλυψης με μονό πέρασμα

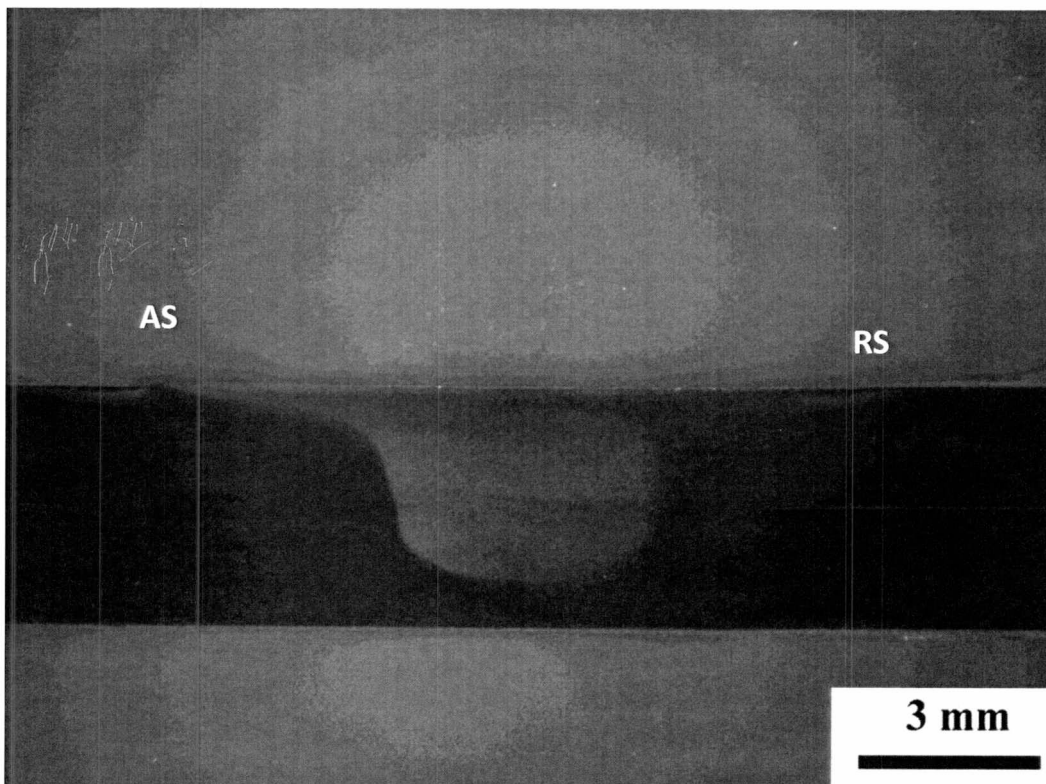
Αρ. δοκιμίου	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	N_f κύκλοι αστοχίας	τύπος συγκόλλησης
KL 6-2-02	40	4	102.400	A
KL 6-2-03	40	4	82.500	
KL 6-2-04	40	4	100.200	
KL 6-2-06	30	3	2.000.000	
KL 7-3-02 (με cladding)	40	4	59.100	
KL 7-3-03 (με cladding)	30	3	224.000	



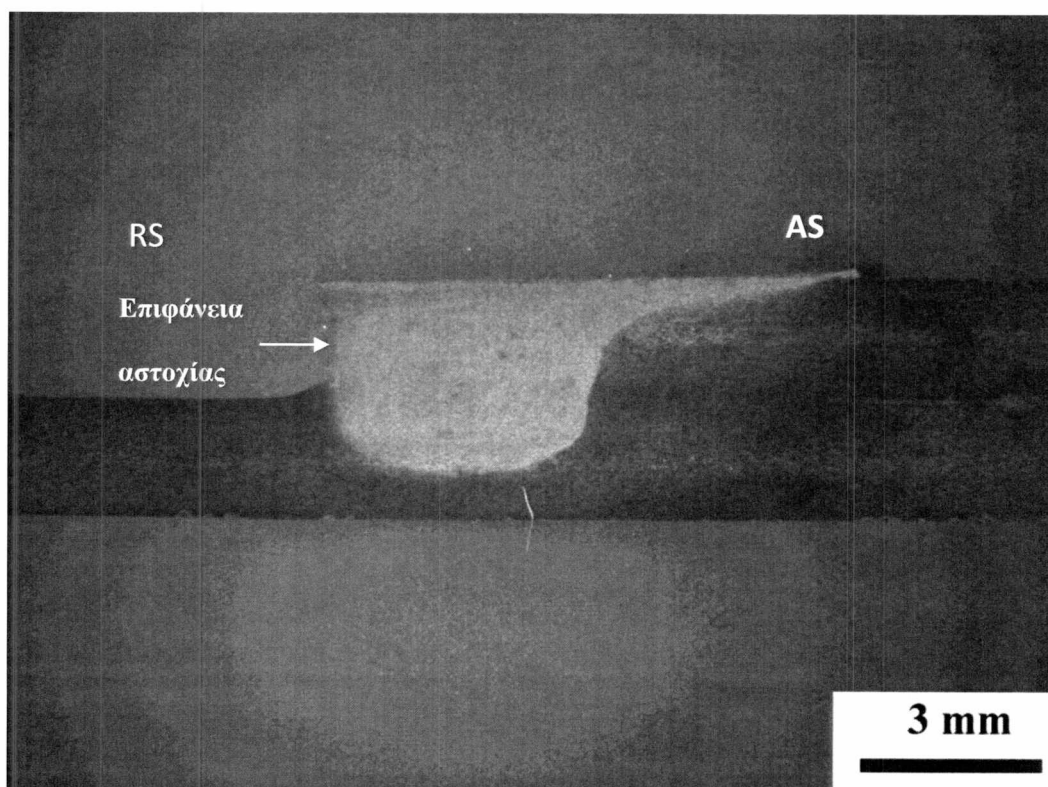
Σχ. 4.1: Καμπύλες S-N δοκιμίων με συγκόλληση τύπου A. (α) χωρίς επιφανειακή κατεργασία (β) με clad-layer



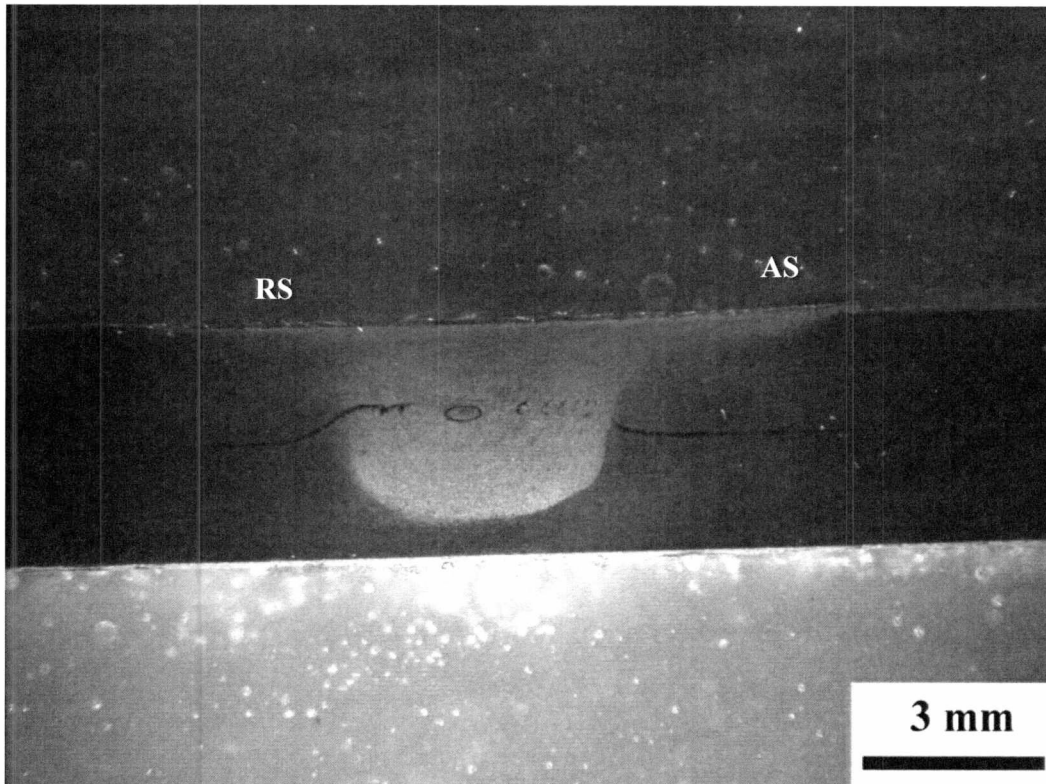
Σχ. 4.2: Δοκίμιο κόπωσης (KL 6-2-02), σημειώνεται η περιοχή θραύσης.



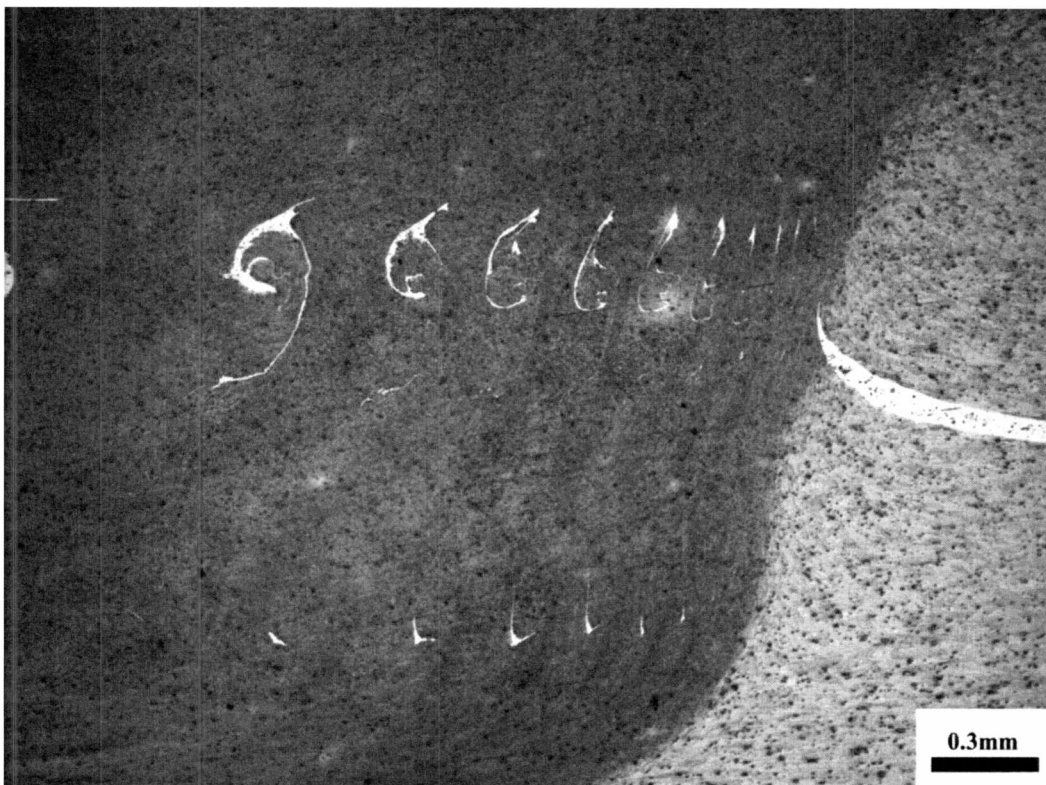
Σχ. 4.3: (KL 6-2) Μακροδομή συγκόλλησης.



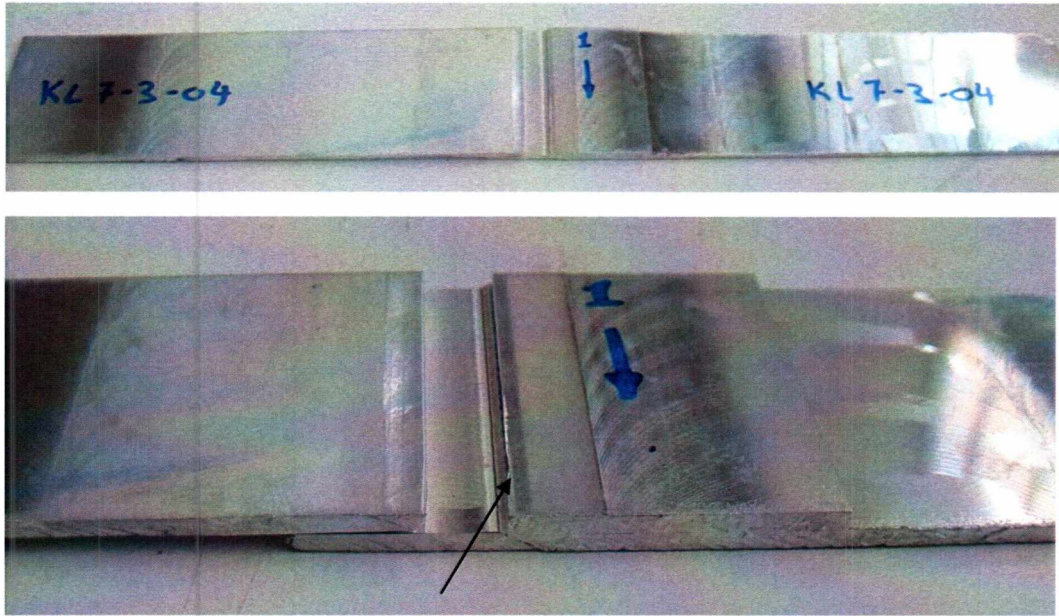
Σχ. 4.4: (KL 6-2-04) Μακροδομή δοκιμίου κόπωσης μετά τη θραύση. Σημειώνεται η επιφάνεια αστοχίας



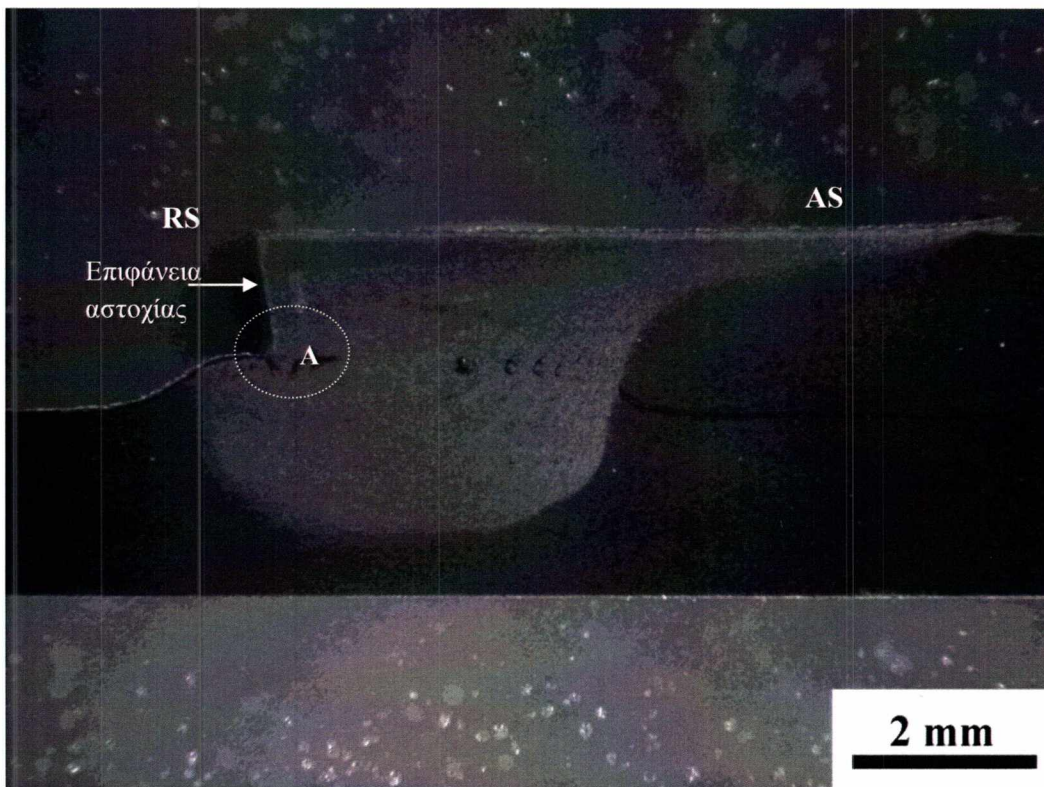
Σχ. 4.5: (KL 7-3) Μακροδομή συγκόλλησης.



Σχ. 4.6: (KL 7-3) Διεπιφάνεια nugget/TMAZ. Οι λευκές περιοχές που διακρίνονται είναι τμήματα του clad-layer που εγκλωβίστηκε μέσα στη nugget και στην TMAZ.



Σχ. 4.7: Δοκίμιο κόπωσης (KL 7-3-04), σημειώνεται η περιοχή θραύσης.



Σχ. 4.8: (KL 7-3-02) Μακροδομή δοκιμίου κόπωσης μετὰ τη θραύση. Σημειώνεται η επιφάνεια αστοχίας



Σχ. 4.9: (KL 7-3-02) Περιοχή Α, Σχήματος 4.8, περιοχή έναρξης ρωγμής κόπωσης μέσα στο clad layer.

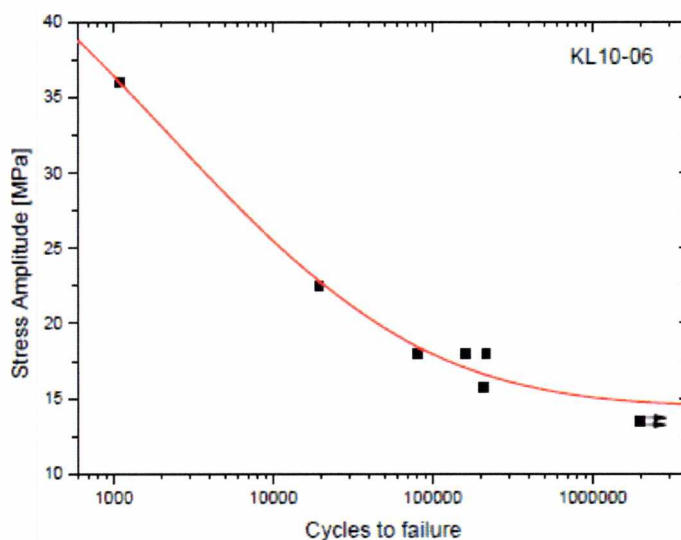
4.2 Δοκίμια χωρίς επιφανειακή κατεργασία, με διπλό πέρασμα συγκόλλησης

Τα δοκίμια που μελετήθηκαν από τις συγκολλήσεις με διπλό πέρασμα του εργαλείου φαίνονται στον Πίνακα 4.2, η καμπύλη S-N δίδεται στο Σχ. 4.10, ενώ αντιπροσωπευτική μακροφωτογραφία δοκιμίου παρουσιάζεται στο Σχ. 4.11. Η περιοχή της αστοχίας φαίνεται ότι ευρίσκεται εντός της περιοχής τριβής του περιαιχηνίου. Η μακροδομή της συγκόλλησης φαίνεται στο Σχ. 4.12, ενώ στα Σχ. 4.13-4.15 δίδονται χαρακτηριστικές λεπτομέρειες των περιοχών της συγκόλλησης. Το profil μικροσκληρότητας αντιπροσωπευτικού δοκιμίου δίδεται στο σχ. 4.16, απ' όπου φαίνεται ότι υπάρχει μία διαφορά ~ 30 HV, μεταξύ των ζωνών της συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου. Οι μικροσκληρομετρήσεις έδειξαν μικρές διαφορές μέσα στη περιοχή συγκόλλησης (nugget+TMAZ) και τη HAZ. Η πλευρά στην οποία έγινε η θραύση των δοκιμίων κόπωσης σημειώνεται στο Σχ. 4.17 (εγκάρσια τομή στην

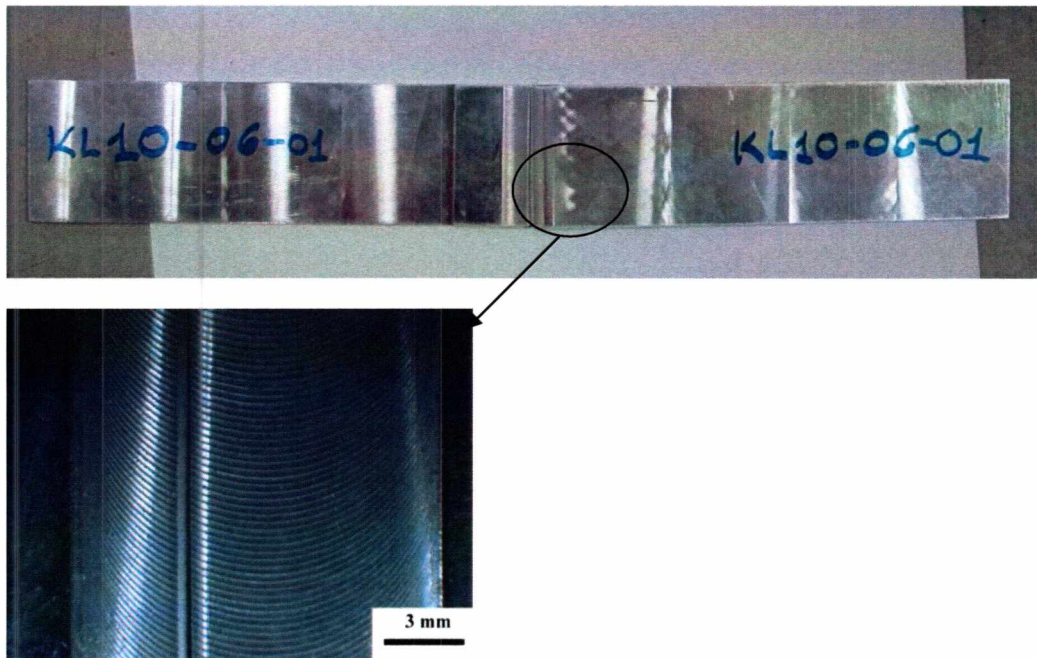
επιφάνεια αστοχίας) και φαίνεται ότι είναι η πλευρά εξόδου του εργαλείου στο πρώτο πέρασμα (RS1≡AS2). Το δοκίμιο που αστόχησε στους λιγότερους κύκλους φαίνεται ότι είχε πιθανό ελάττωμα στη ζώνη ανάδευσης (Σχ. 4.18). Χαρακτηριστικά των επιφανειών αστοχίας παρουσιάζονται στα Σχ. 4.19-4.21 από τη μελέτη τους στο Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η περιοχή της κόπωσης έχει τις χαρακτηριστικές αυλακώσεις (striations) και ακολουθείται περιοχή με χαρακτηριστικά όγκιμης θραύσης (dimples) στο κέντρο του δοκιμίου. Στο άλλο άκρο η θραύση έχει τις χαρακτηριστικές πτυχώσεις (ridges) κόπωσης.

Πίνακας 4.2: Δοκίμια συγκολλήσεων επικάλυψης με διπλό πέρασμα, χωρίς επιφανειακή κατεργασία

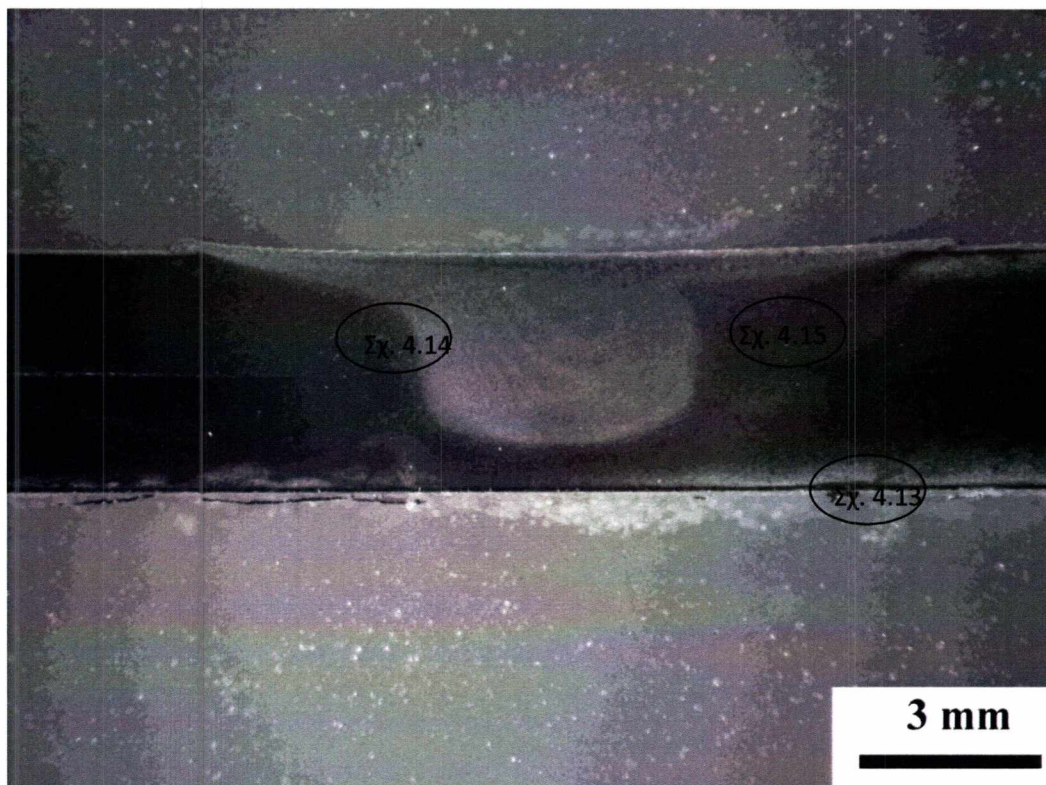
Αρ. δοκιμίου	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	Ν κύκλοι αστοχίας	τύπος συγκόλλησης
KL 10-6-01	80	8	1100	B
KL 10-6-03	40	4	218600	
KL 10-6-04	40	4	81200	
KL 10-6-07	40	4	161200	



Σχ. 4.10: Καμπύλη S-N δοκιμών με συγκόλληση τύπου B, χωρίς επιφανειακή κατεργασία



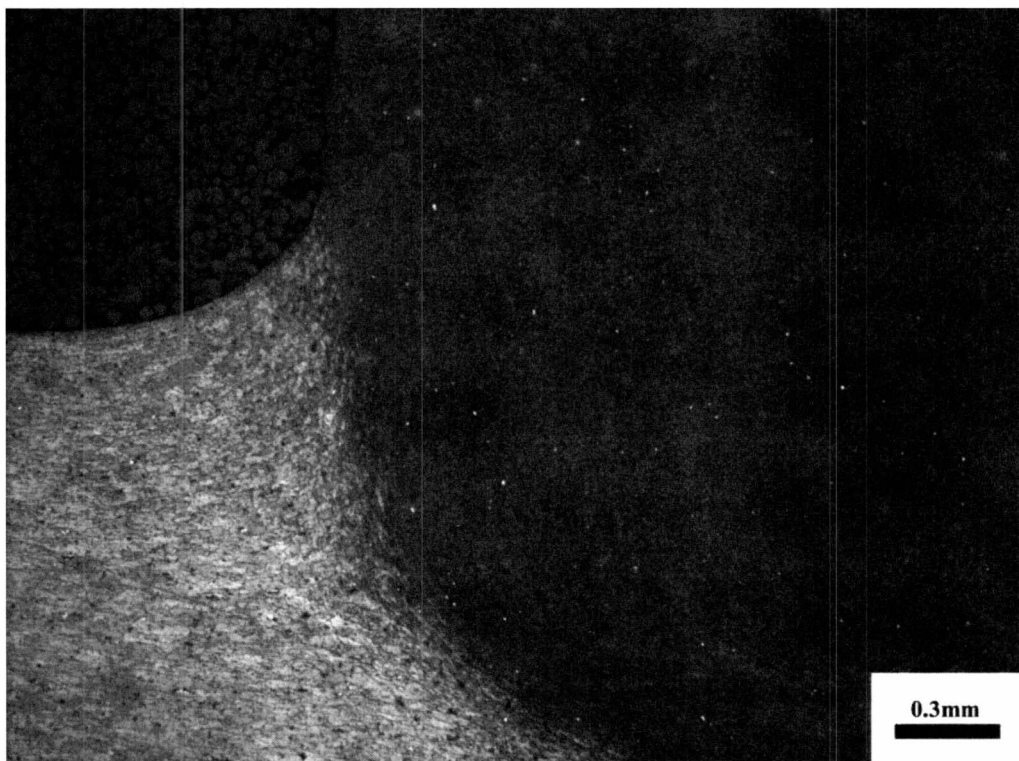
Σχ. 4.11: Δοκίμιο KL 10-6-01. Σημειώνεται η περιοχή θραύσης.



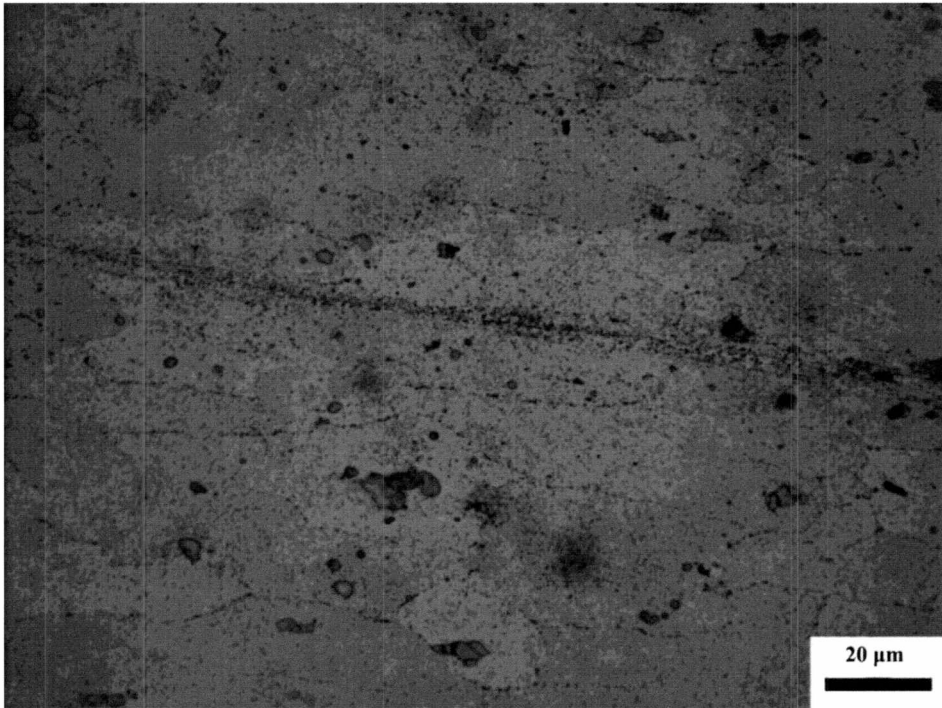
Σχ. 4.12: Μακροδομή συγκόλλησης τύπου Β, χωρίς επιφανειακή κατεργασία.



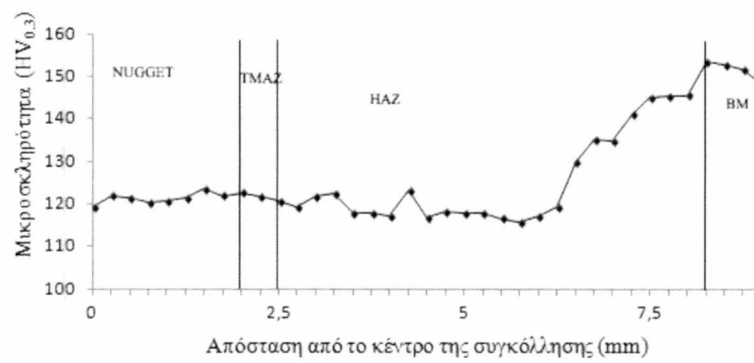
Σχ. 4.13: (KL10-6) Clad layer στο κάτω έλασμα



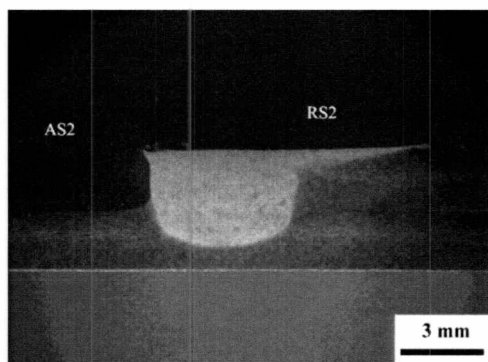
Σχ. 4.14: Διεπιφάνεια χωρίς υπολείμματα cladding



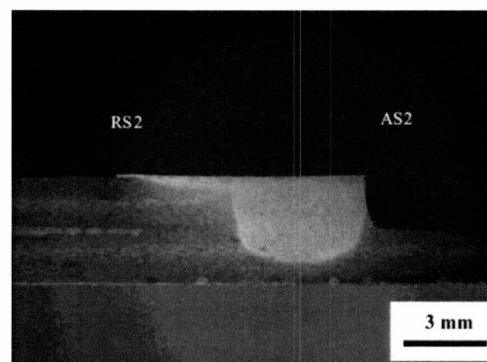
Σχ. 4.15: (KL10-6) Μικροδομή στη HAZ



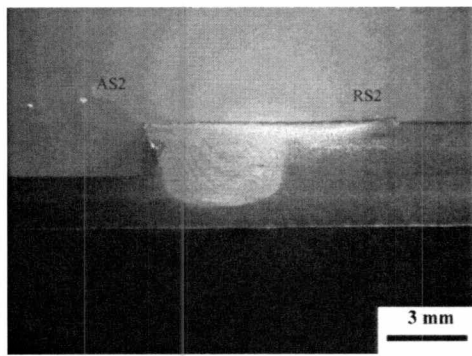
Σχ. 4.16: (KL 10-6-01) Προφίλ μικροσκληρότητας



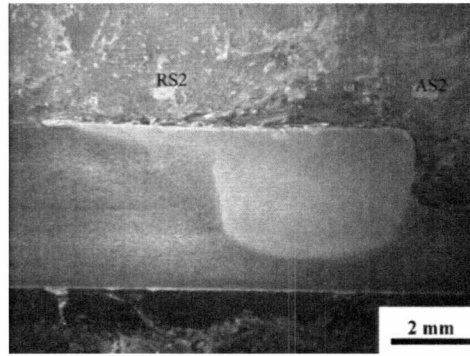
(α) Δοκ. KL 10-6-01 περιοχή θραύσης



(β) Δοκίμιο KL 10-6-03

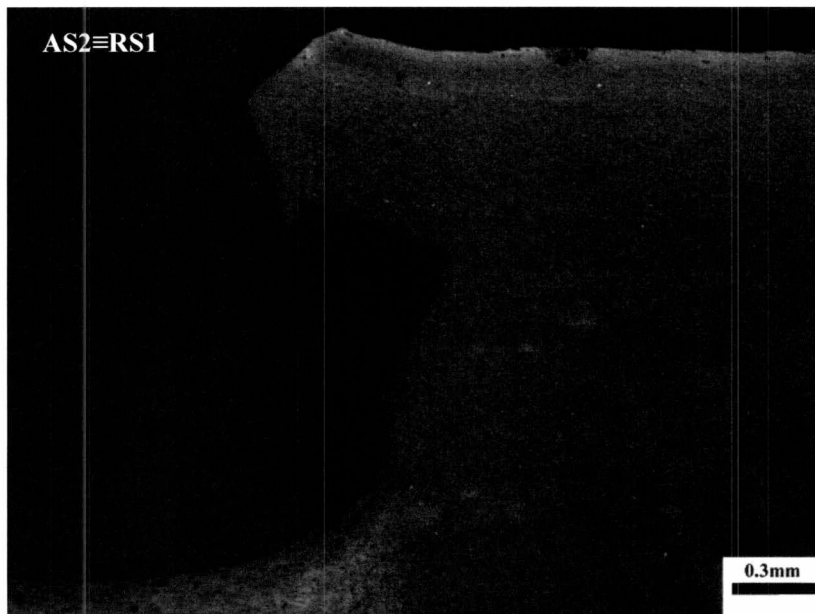


(γ) Δοκίμιο KL 10-6-04

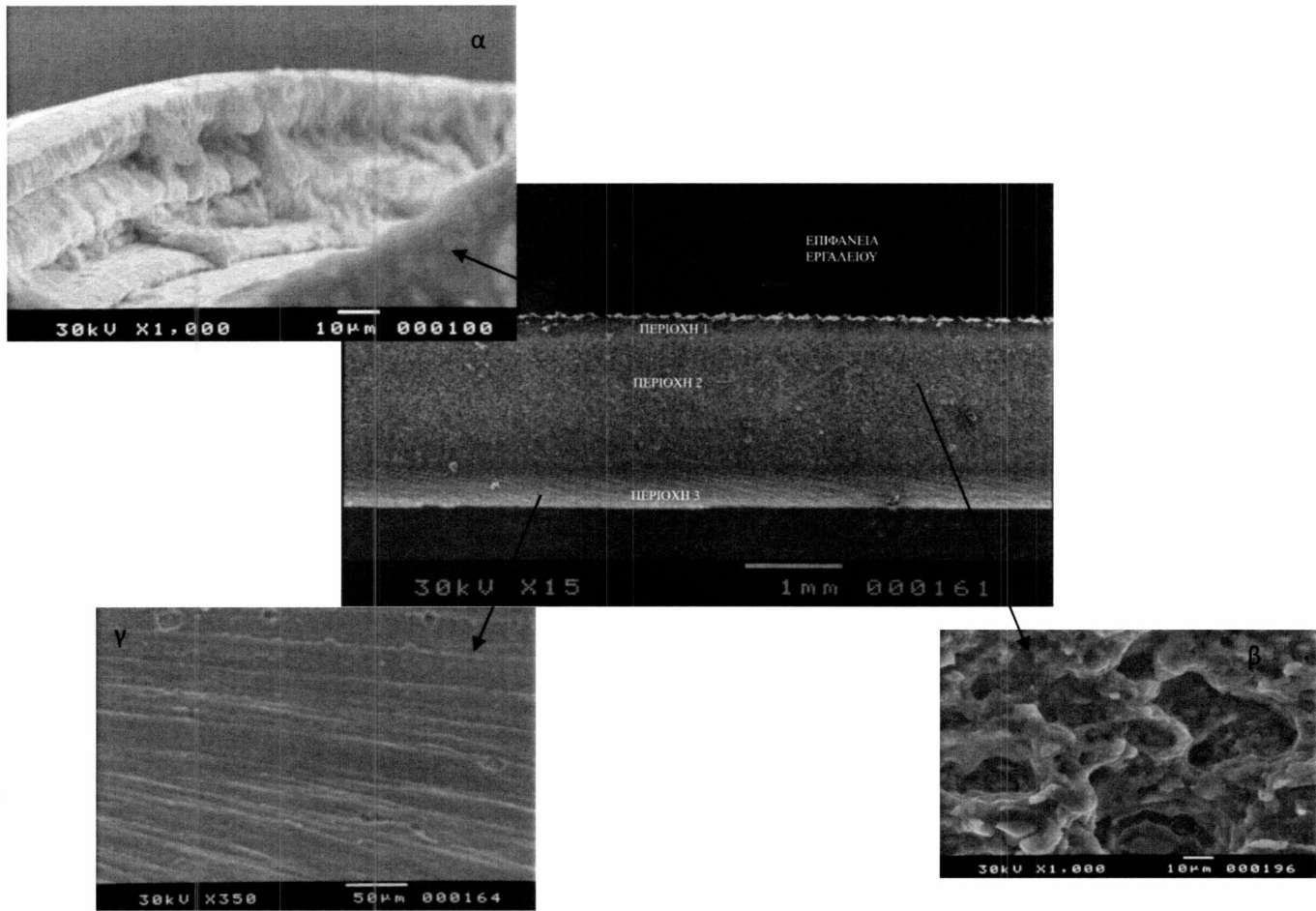


(δ) δοκίμιο KL-10-6-07

Σχ. 4.17: Μακροδομή δοκιμίων κόπωσης μετά τη θραύση. Σημειώνονται οι περιοχές εισόδου (AS) και εξόδου του εργαλείου (RS).

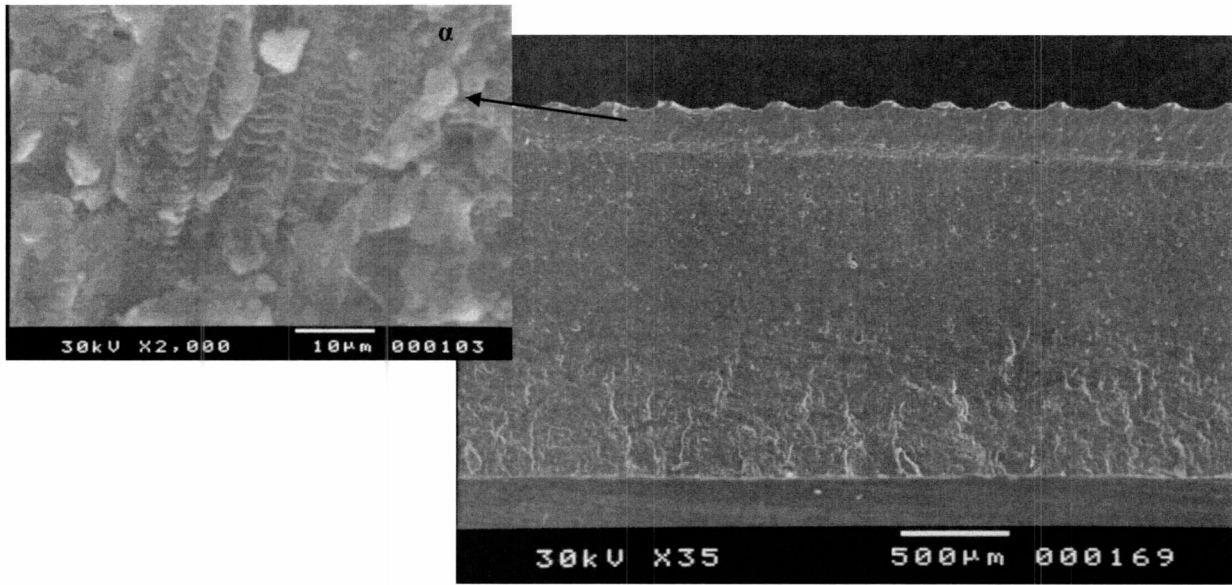


Σχ. 4.18: Μακροδομή δοκ. KL 10-6-04 μετά τη θραύση. Πιθανή περιοχή σφάλματος συγκόλλησης.

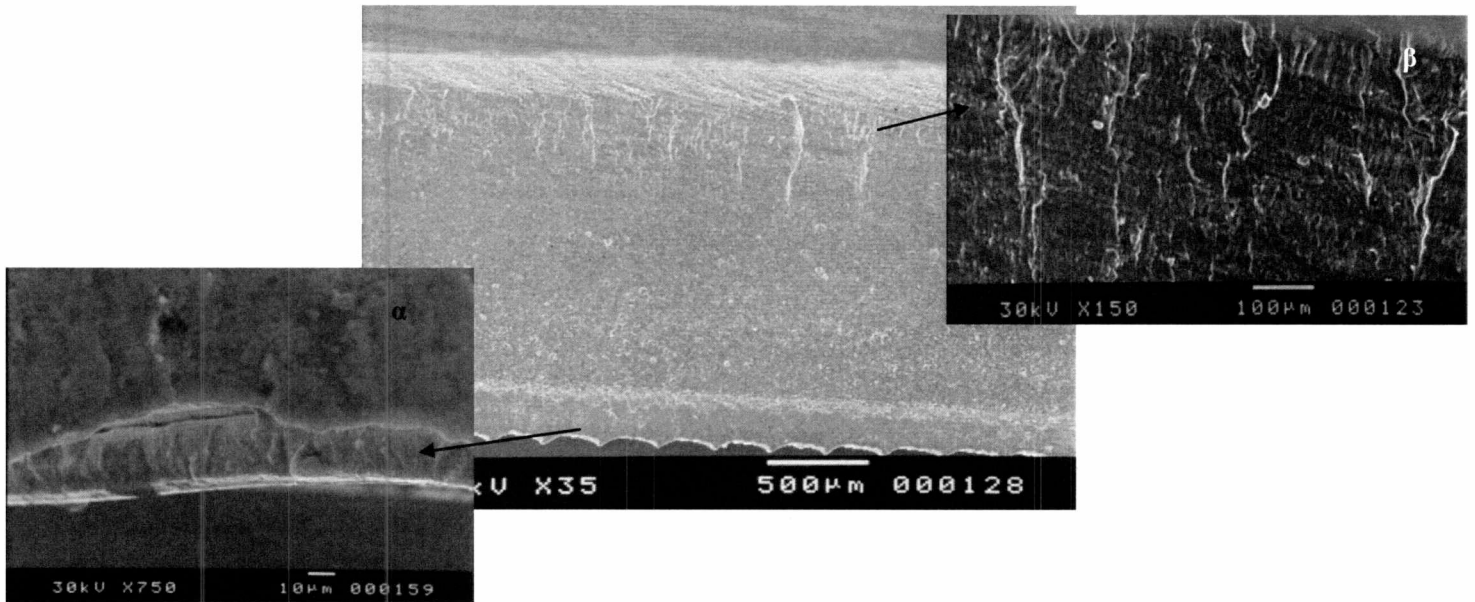


Σχ. 4.19: (KL 10-6-01) Επιφάνεια θραύσης

α) Αυλακώσεις κόπωσης κάτω από την επιφάνεια τριβής του εργαλείου (β) Dimples στην περιοχή 2, όλκιμη θραύση (γ) Μορφολογία περιοχής 3



Σχ. 4.20: (KL 10-6-03) Παρατηρούμε 4 διαφορετικές περιοχές στην επιφάνεια θραύσης, αρχίζοντας την αρίθμησή τους από την επιφάνεια του εργαλείου προς τη διεπιφάνεια των ελασμάτων, παρόμοια με το Σχ. 4.19. Αυλακώσεις κόπωσης κάτω από την επιφάνεια τριβής του εργαλείου.



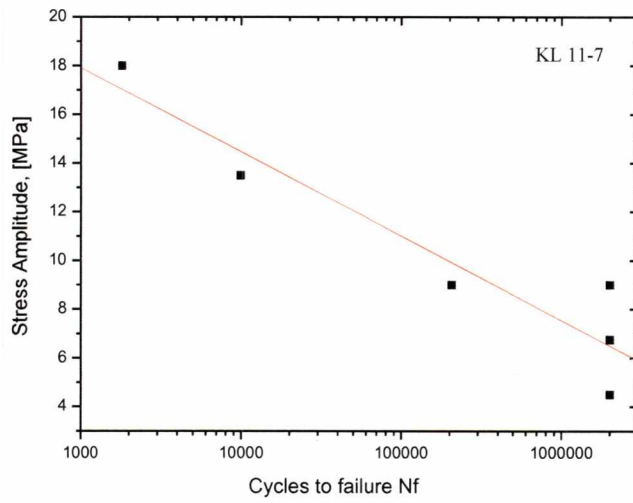
Σχ. 4.21: (KL 10-6-04) Παρατηρούμε 4 διαφορετικές περιοχές στην επιφάνεια θραύσης, αρχίζοντας την αρίθμησή τους από την επιφάνεια του εργαλείου προς τη διεπιφάνεια των ελασμάτων, παρόμοια με το Σχ. 4.19 . (α) Αυλακώσεις κόπωσης κάτω από την επιφάνεια τριβής του εργαλείου (β) Επιφάνεια περιοχής 3-πτυχώσεις (ridges)

4.3 Δοκίμια με επιφανειακή κατεργασία TSA

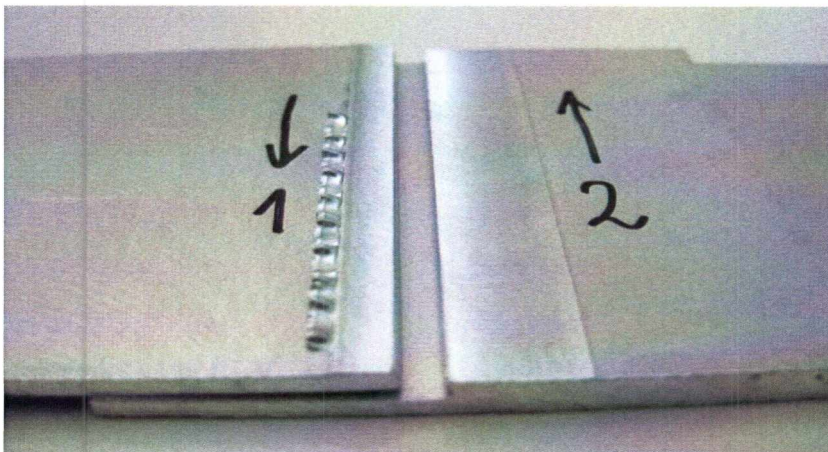
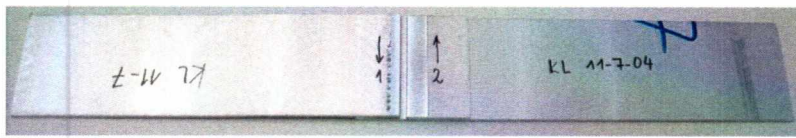
Τα δοκίμια που μελετήθηκαν από τις συγκολλήσεις με διπλό πέρασμα του εργαλείου και κατεργασία TSA φαίνονται στον Πίνακα 4.3, η καμπύλη S-N δίδεται στο Σχ. 4.22, ενώ αντιπροσωπευτική μακροφωτογραφία δοκιμίου παρουσιάζεται στο Σχ. 4.23. Η περιοχή της αστοχίας φαίνεται ότι ευρίσκεται εντός της περιοχής τριβής του περιανυχνίου. Η μακροδομή της συγκόλλησης φαίνεται στο Σχ. 4.24, και τα profil μικροσκληρότητας αντιπροσωπευτικών δοκιμίων δίδονται στο Σχ. 4.25, απ' όπου φαίνεται ότι υπάρχει μία διαφορά ~ 25 HV, μεταξύ των ζωνών της συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου. Οι μικροσκληρομετρήσεις έδειξαν μικρές διαφορές μέσα στην περιοχή συγκόλλησης (nugget+TMAZ) και τη HAZ. Η πλευρά στην οποία έγινε η θραύση των δοκιμίων κόπωσης σημειώνεται στο Σχ. 4.26 (εγκάρσια τομή στην επιφάνεια αστοχίας) και φαίνεται ότι είναι η πλευρά εξόδου του εργαλείου στο πρώτο πέρασμα (RS1≡AS2), για το πρώτο δοκίμιο που μελετήθηκε και η πλευρά εξόδου του εργαλείου στο δεύτερο πέρασμα (RS2≡AS1) για το άλλο. Τα δοκίμια φαίνεται ότι στην περιοχή της συγκόλλησης έχουν υπολείμματα Al, από το clad layer στη διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων (Σχ. 4.27, 4.28). Χαρακτηριστικά των επιφανειών αστοχίας παρουσιάζονται στα Σχ. 4.29, 4.30 από την παρατήρησή τους στο SEM. Φαίνεται να υπάρχει διαμήκης άνοιγμα κάτω από την επιφάνεια του εργαλείου, σε όλο το μήκος της επιφάνειας θραύσης καθώς και κενές κοιλότητες μέσα στη nugget, γεγονός που εξηγεί την μειωμένη αντοχή των δοκιμίων της κατηγορίας αυτής σε κόπωση.

Πίνακας 4.3: Δοκίμια συγκολλήσεων επικάλυψης με διπλό πέρασμα, με επιφανειακή κατεργασία TSA

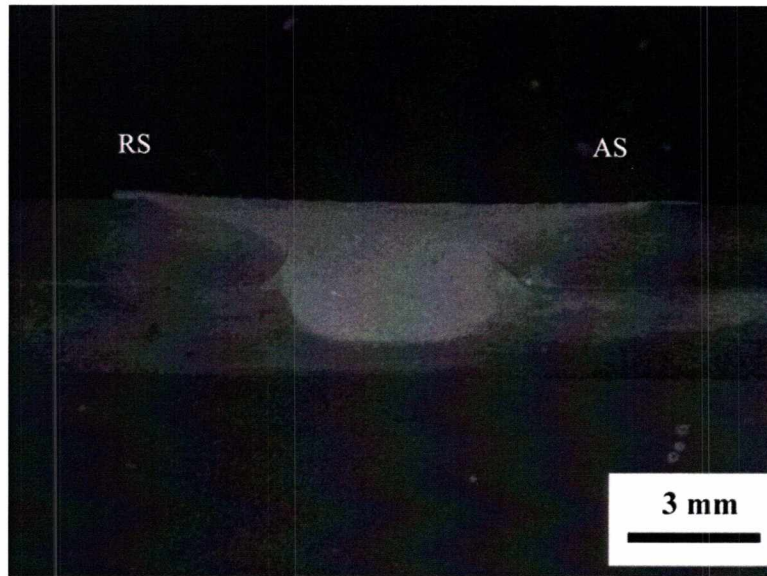
Αρ. δοκιμίου	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	N _{κύκλοι} αστοχίας	τύπος συγκόλλησης
KL 11-7-01	40	4	1812	B
KL 11-7-06	20	2	2000000 (run out)	
KL 11-7-02	20	2	206094	



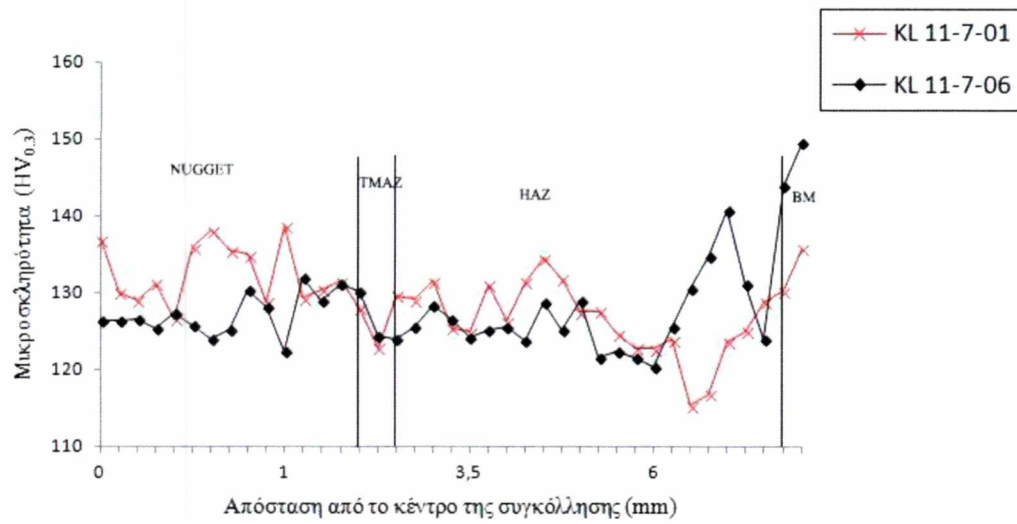
Σχ. 4.22: Καμπύλη S-N δοκιμών με συγκόλληση τύπου Β, με επιφανειακή κατεργασία TSA



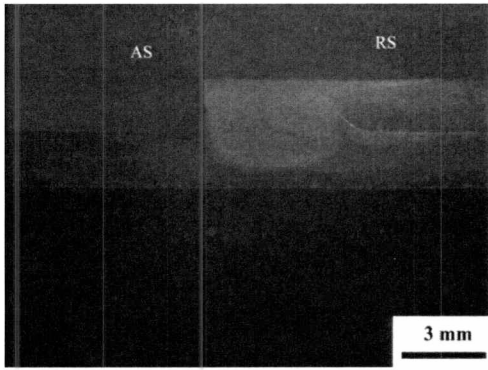
Σχ. 4.23: Δοκίμιο κόπωσης μετά τη θραύση



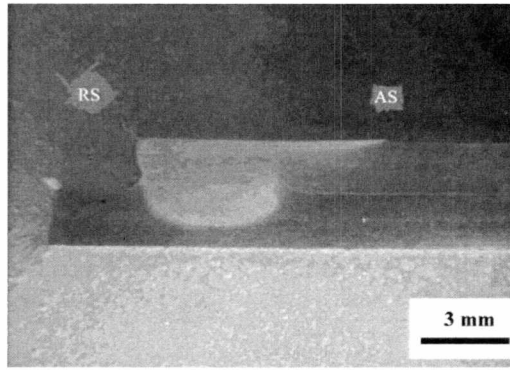
Σχ. 4.24: (KL 11-07) Μακροδομή συγκόλλησης.



Σχ. 4.25: Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίων KL-11-7-06, KL 11-7-01

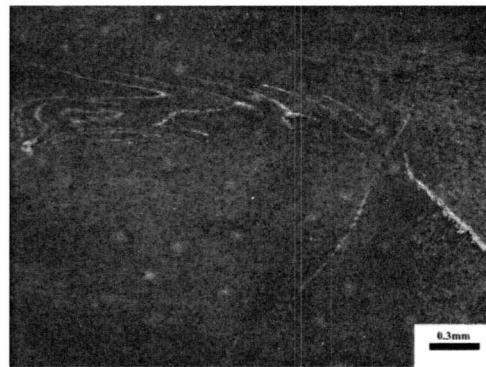
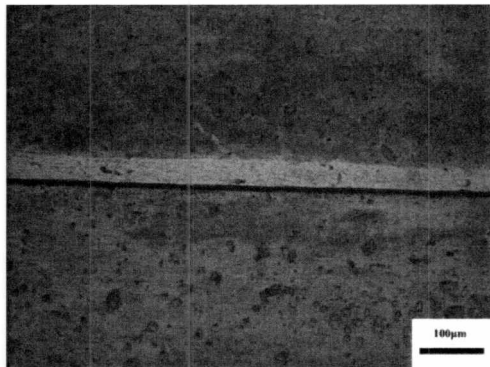


(α) Δοκίμιο KL 11-7-01



(β) Δοκίμιο KL 11-7-02

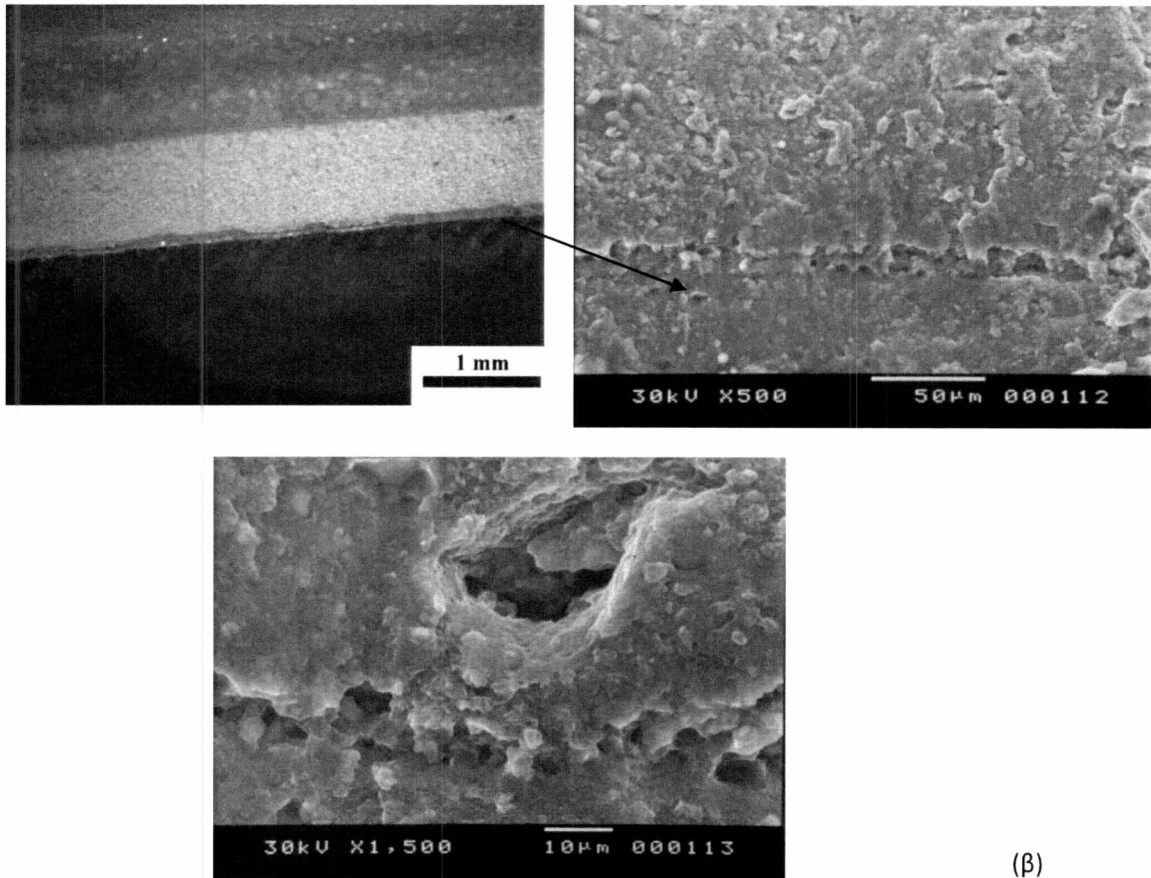
Σχ. 4.26: Μακροδομή δοκιμίων κόπωσης μετά τη θραύση. Σημειώνονται οι περιοχές εισόδου (AS) και εξόδου του εργαλείου (RS) ως προς το δεύτερο πέρασμα.



Σχ. 4.27: (KL 11-7-01) Clad στη διεπιφάνεια των ελασμάτων, διασπορά λόγω ανάδευσης της επίστρωσης clad στη nugget

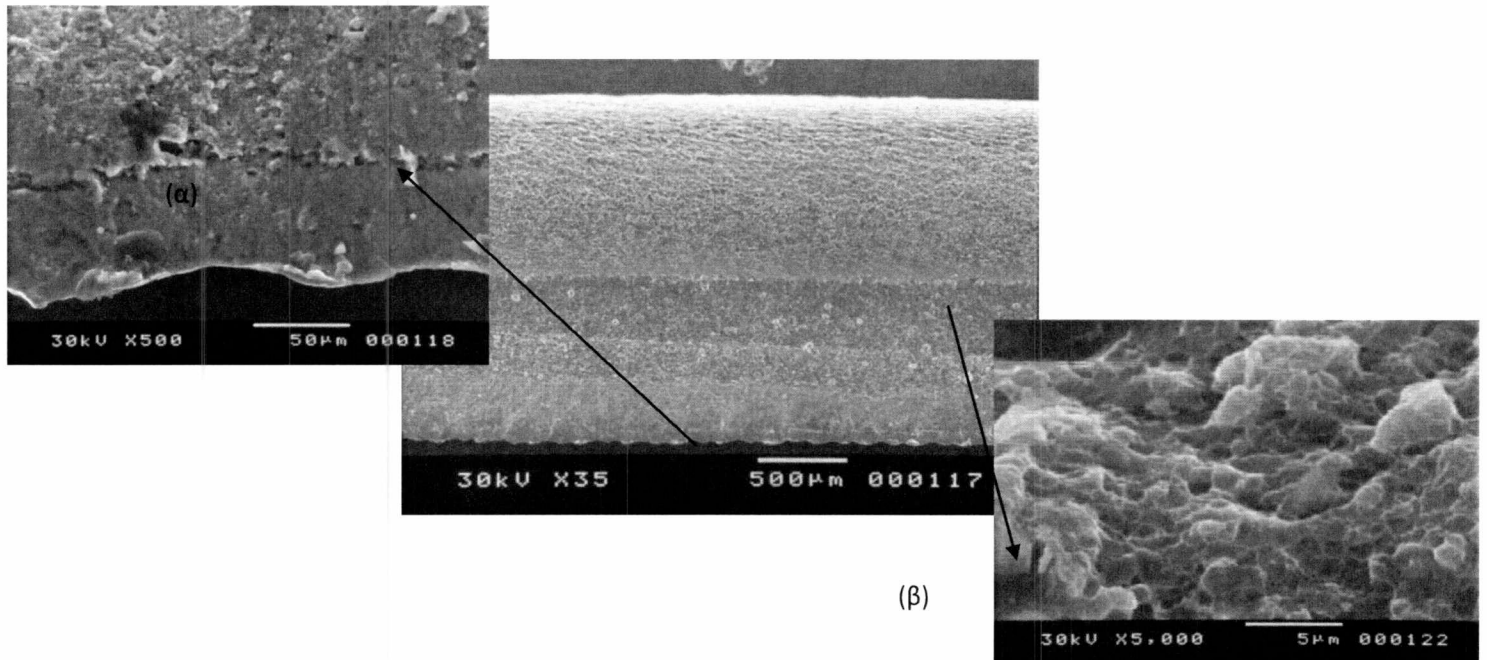


Σχ. 4.28: (KL 11-7-06) Επίστρωση clad στη διεπιφάνεια και διάσπαρτο υλικό από cladding στη ζώνη ανάδευσης



(β)

Σχ. 4.29: (KL 11-7-01) Επιφάνεια θραύσης-διαμήκης άνοιγμα κάτω από την επιφάνεια του εργαλείου, σε όλο το μήκος της επιφάνειας θραύσης. (β) Κοιλότητα-σφάλμα συγκόλλησης στη nugget



Σχ. 4.30: (KL 11-7-02) Επιφάνεια θραύσης (α) διαμήκης άνοιγμα κάτω από την επιφάνεια του εργαλείου, σε όλο το μήκος της επιφάνειας θραύσης. (β) Όγκιμη θραύση

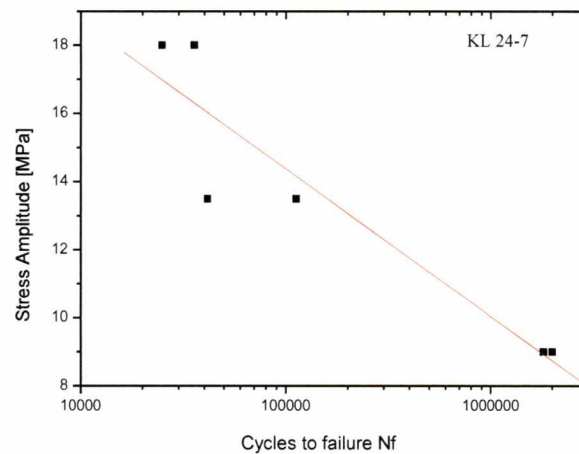
4.4 Δοκίμια με επιφανειακή κατεργασία ανοδίωσης (TSA) κι επίστρωσης ασταριού (primer)

Τα δοκίμια που μελετήθηκαν από τις συγκολλήσεις με διπλό πέρασμα του εργαλείου και κατεργασία TSA+primer φαίνονται στον Πίνακα 4.4, η καμπύλη S-N δίδεται στο Σχ. 4.31, ενώ αντιπροσωπευτική μακροφωτογραφία δοκιμίου μετά τη θραύση στη δοκιμή κόπωσης παρουσιάζεται στο Σχ. 4.32. Η περιοχή της αστοχίας φαίνεται ότι ευρίσκεται εντός της περιοχής τριβής του περιαυχενίου. Η μακροδομή της συγκόλλησης φαίνεται στα Σχ. 4.33, 4.34 για τα δύο δοκίμια που μελετήθηκαν και αντιπροσωπευτικό profil μικροσκληρότητας στο Σχ. 4.35, απ' όπου φαίνεται ότι υπάρχει πολύ μικρή διαφορά, μεταξύ των ζωνών της συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου. Η πλευρά στην οποία έγινε η θραύση των δοκιμίων κόπωσης σημειώνεται στα Σχ. 4.33, 4.34 (εγκάρσια τομή στην επιφάνεια αστοχίας) και φαίνεται ότι είναι η πλευρά εξόδου του εργαλείου στο πρώτο πέρασμα (RS1≡AS2, και για τα δύο

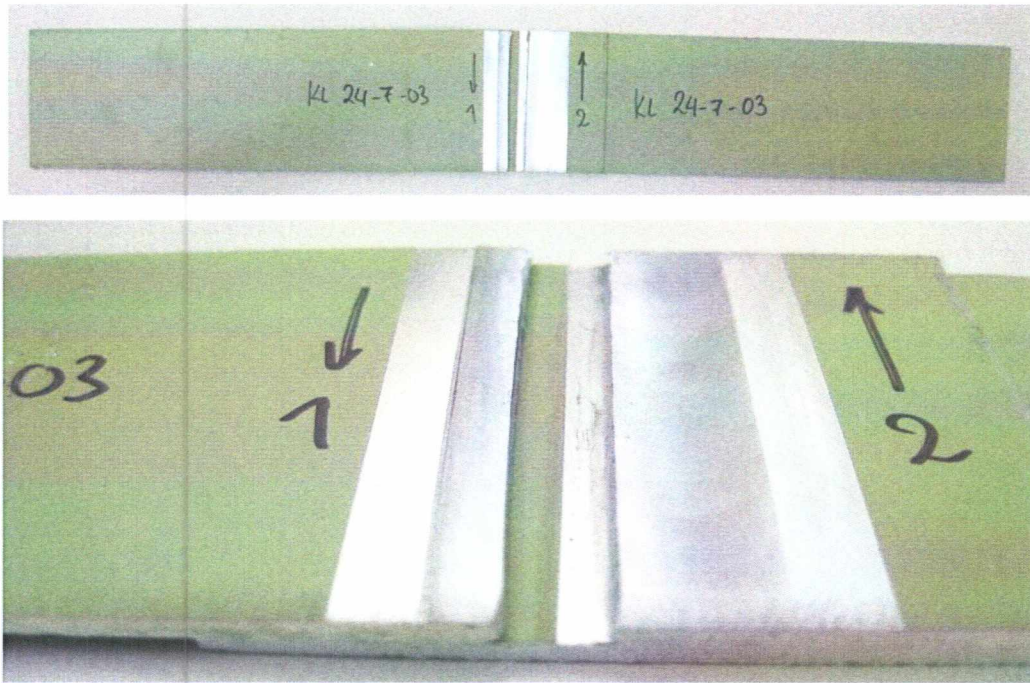
δοκίμια). Χαρακτηριστικά των επιφανειών αστοχίας παρουσιάζονται στο Σχ. 4.36 από την παρατήρησή τους στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Παρατηρούνται 3 διακριτές ζώνες, με τις χαρακτηριστικές αυλακώσεις κόπωσης να ευρίσκονται ακριβώς κάτω από την περιοχή τριβής του περιανυχνίου. Παρατηρείται και εδώ το κενό, που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, σε μικρότερη όμως έκταση.

Πίνακας 4.4: Δοκίμια συγκολλήσεων επικάλυψης με διπλό πέρασμα, με επιφανειακή κατεργασία TSA+Primer

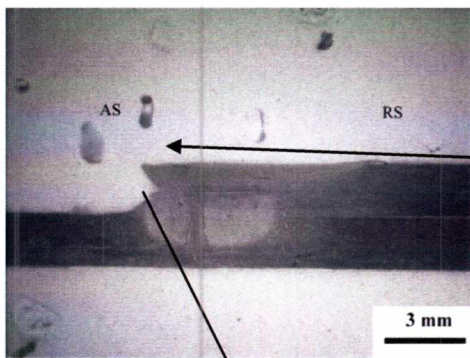
Αρ. δοκιμίου	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (Mpa)	N_f κύκλοι αστοχίας	τύπος συγκόλλησης
KL 24-7-01	40	4	24902	B
KL 24-7-05	30	3	112242	



Σχ. 4.31: Καμπύλη S-N δοκιμών με συγκόλληση τύπου B, με επιφανειακή κατεργασία TSA+Primer



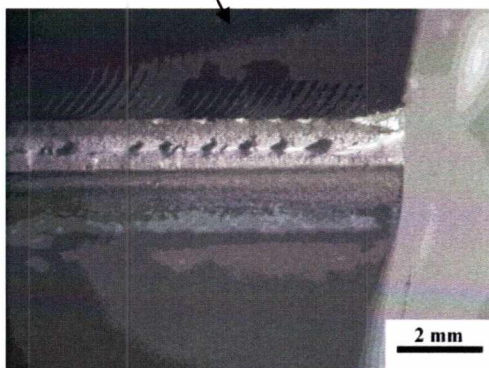
Σχ. 4.32: Δοκίμιο κόπωσης μετά τη θραύση.



(α) Δοκ. KL 24-7-01 περιοχή θραύσης

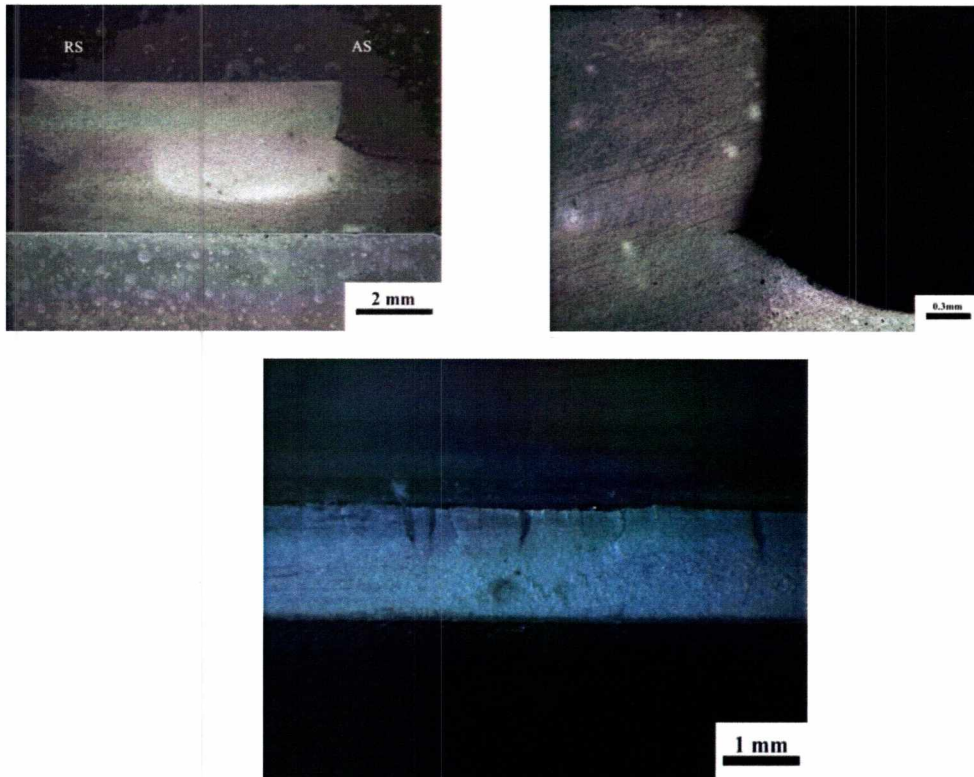


(β) Εγκάρσια τομή της επιφάνειας θραύσης

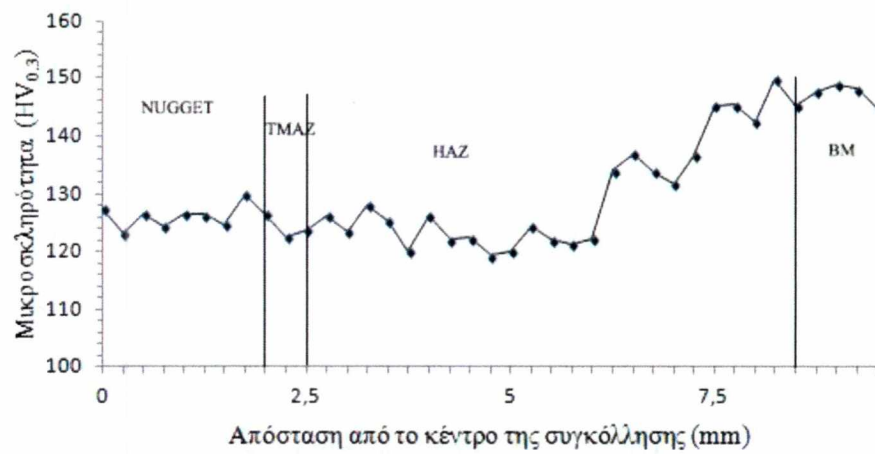


(δ) Επιφάνεια θραύσης

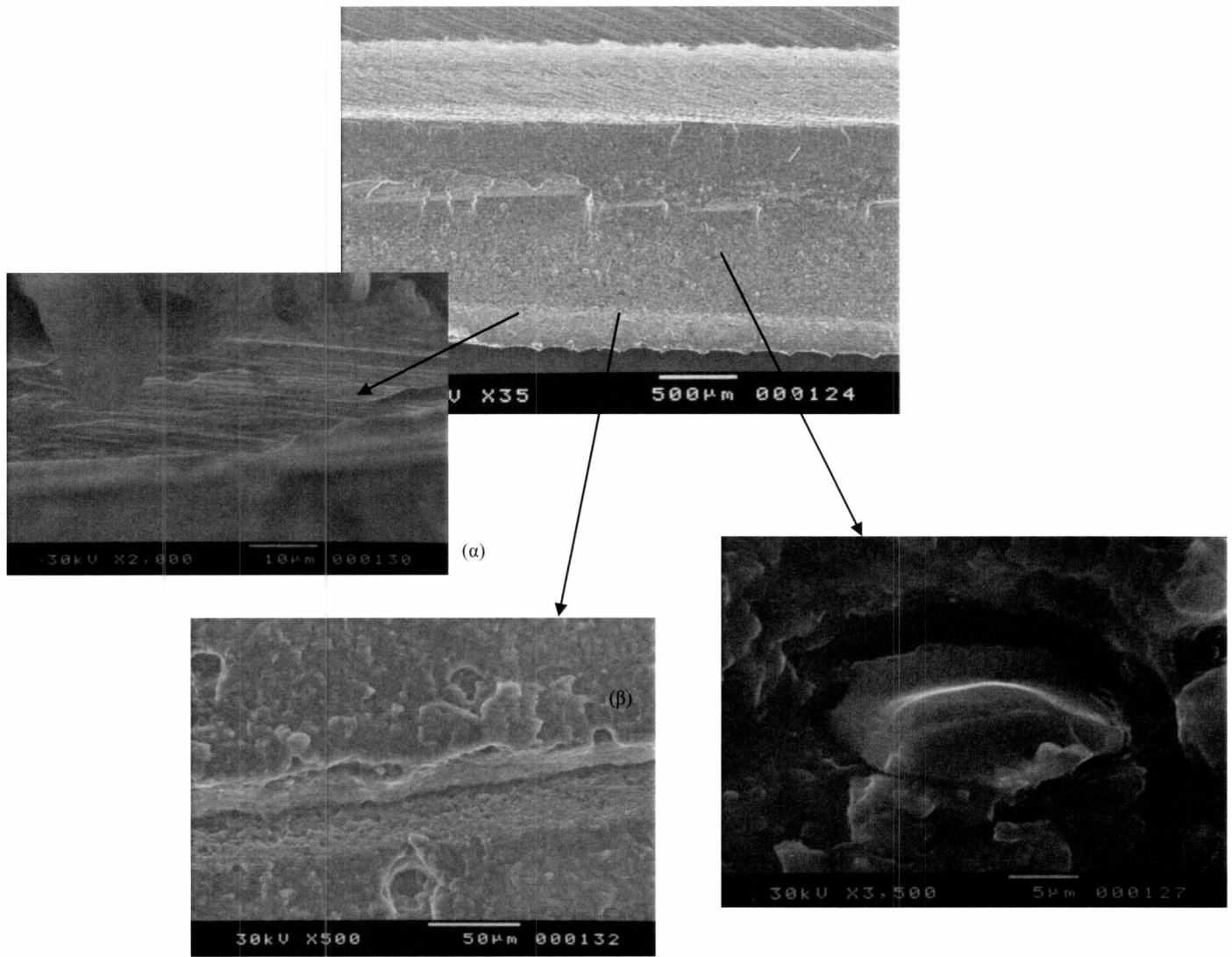
Σχ. 4.33: Μακροδομή και επιφάνεια θραύσης δοκίμιου KL 24-7-01



Σχ. 4.34: Μακροδομή δοκιμίου KL 24-7-05 και εγκάρσια τομή της επιφάνειας θραύσης



Σχ. 4.35: KL 24-7-01 , Προφίλ μικροσκληρότητας



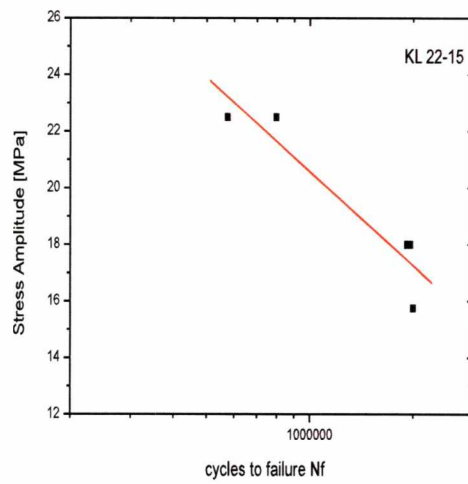
Σχ. 4.36: KL 24-7-01 Επιφάνεια αστοχίας-3 περιοχές διαφορετικής μορφολογίας. (α) Αυλακώσεις κόπωσης στην περιοχή 1, (β) Άνοιγμα από το εργαλείο (γ) κενό στη pugget

4.5 Δοκίμια με επιφανειακή κατεργασία TSA + primer + adhesive

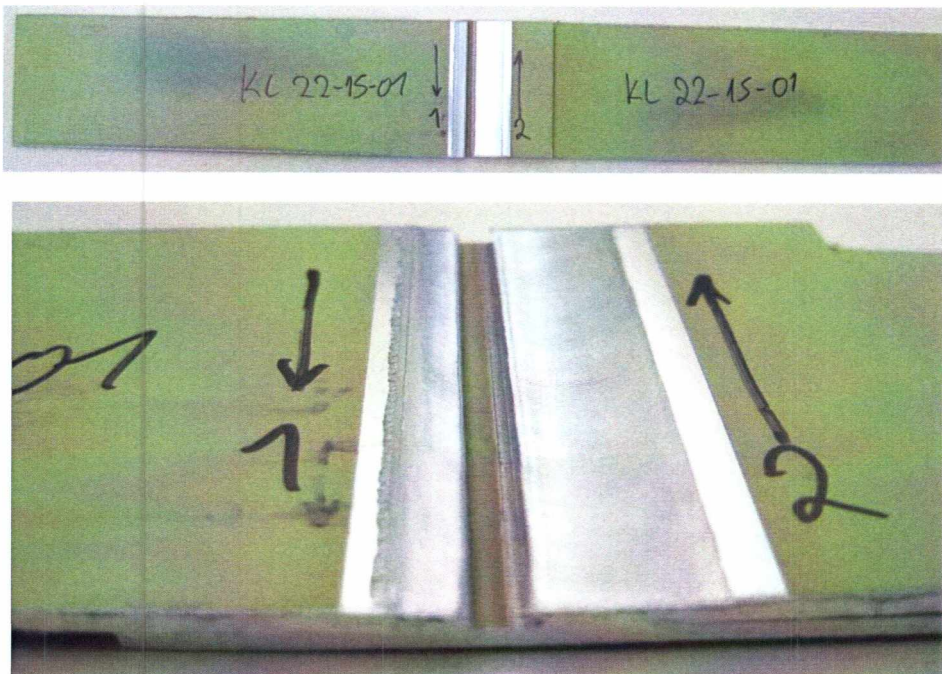
Τα δοκίμια που μελετήθηκαν από τις συγκολλήσεις με διπλό πέρασμα του εργαλείου και επιφανειακής κατεργασίας TSA + primer + adhesive φαίνονται στον Πίνακα 4.5, η καμπύλη S-N δίδεται στο Σχ. 4.37, ενώ αντιπροσωπευτική μακροφωτογραφία δοκιμίου μετά τη θραύση στη δοκιμή κόπωσης παρουσιάζεται στα Σχ. 4.38, 4.39. Η περιοχή της αστοχίας ευρίσκεται εντός της περιοχής τριβής του περιουχενίου (για το ένα δοκίμιο) ενώ για το άλλο μέσα στη HAZ. Η μακροδομή της συγκόλλησης φαίνεται στα Σχ. 4.40, για τα δύο δοκίμια που μελετήθηκαν, και αντιπροσωπευτικό profil μικροσκληρότητας στο Σχ. 4.41, απ' όπου φαίνεται ότι υπάρχει πολύ μικρή διαφορά, μεταξύ των ζωνών της συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου. Η πλευρά στην οποία έγινε η θραύση των δοκιμίων κόπωσης σημειώνεται στο Σχ. 4.40 (εγκάρσια τομή στην επιφάνεια αστοχίας) και φαίνεται ότι είναι η πλευρά εξόδου του εργαλείου στο πρώτο πέρασμα (RS1≡AS2) για το πρώτο δοκίμιο και η HAZ για το άλλο. Χαρακτηριστικά των επιφανειών αστοχίας παρουσιάζονται στο Σχ. 4.42 από την παρατήρησή τους στο SEM. Παρατηρούνται 2 διακριτές ζώνες, με τις χαρακτηριστικές αυλακώσεις κόπωσης να ευρίσκονται ακριβώς κάτω από την περιοχή τριβής του περιουχενίου.

Πίνακας 4.5: Δοκίμια συγκολλήσεων επικάλυψης με διπλό πέρασμα, με επιφανειακή κατεργασία TSA+Primer+adhesive

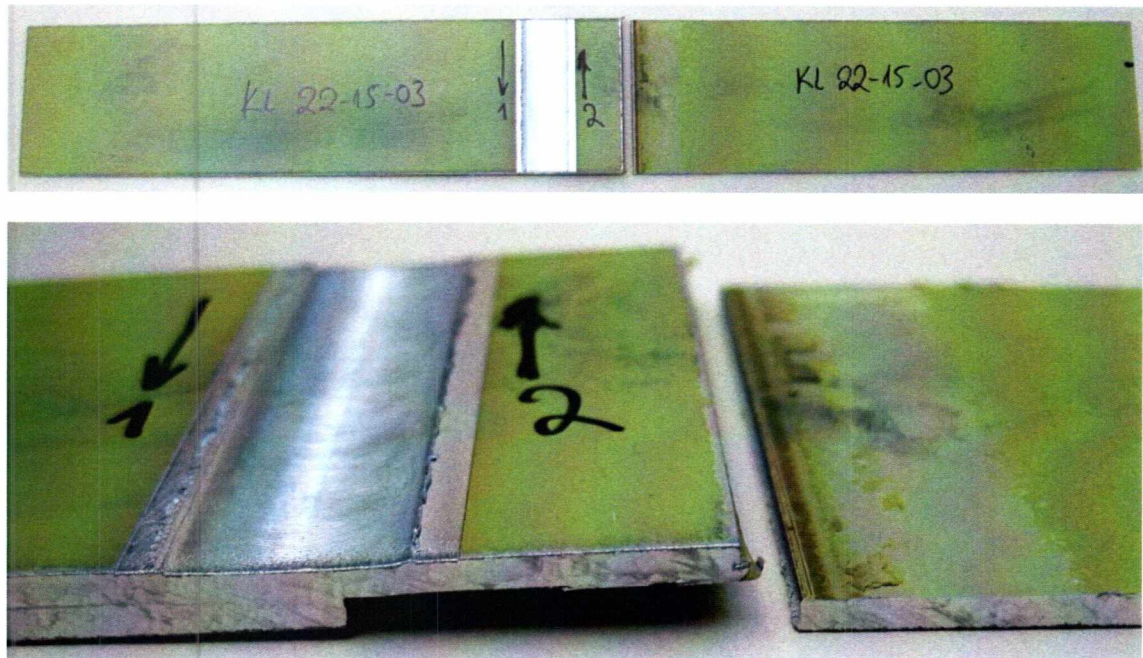
Αρ. δοκιμίου	σ_{\max} (Mpa)	σ_{\min} (Mpa)	N_f κύκλοι αστοχίας	τύπος συγκόλλησης
KL 22-15-02	40	4	1921172	B
KL 22-15-03	50	5	575237	



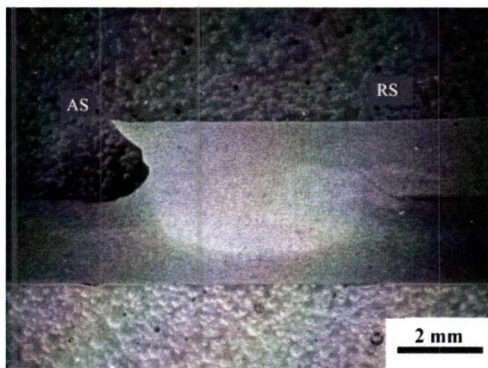
Σχ. 4.37: Καμπύλη S-N δοκιμών με συγκόλληση τύπου B, με επιφανειακή κατεργασία TSA+Primer+adhesive



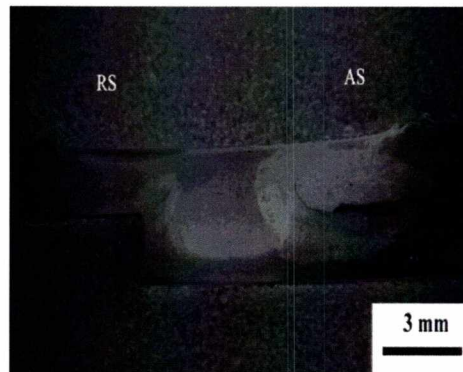
Σχ. 4.38: (KL 22-15-01) Δοκίμιο κόπωσης μετά τη θραύση.



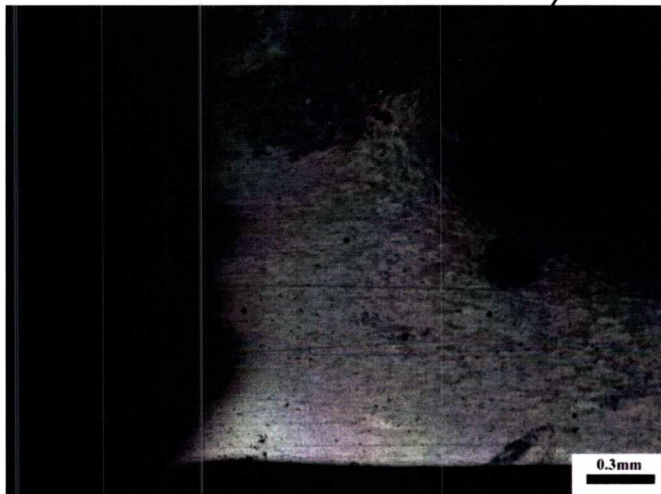
Σχ. 4.39: (KL 22-15-03) Δοκίμιο κόπωσης μετά τη θραύση.



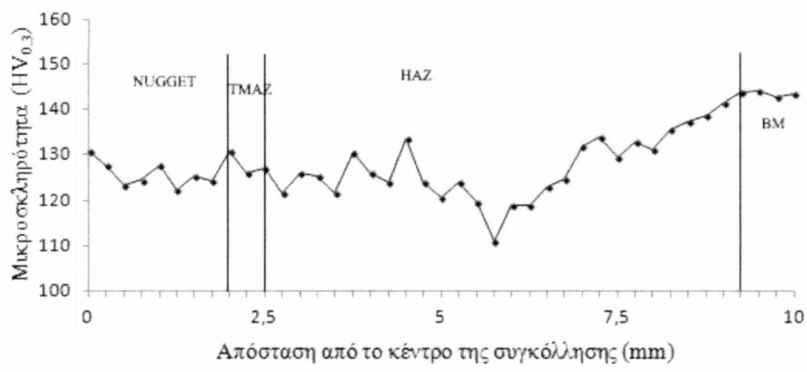
(α) Δοκ. 22-15-02



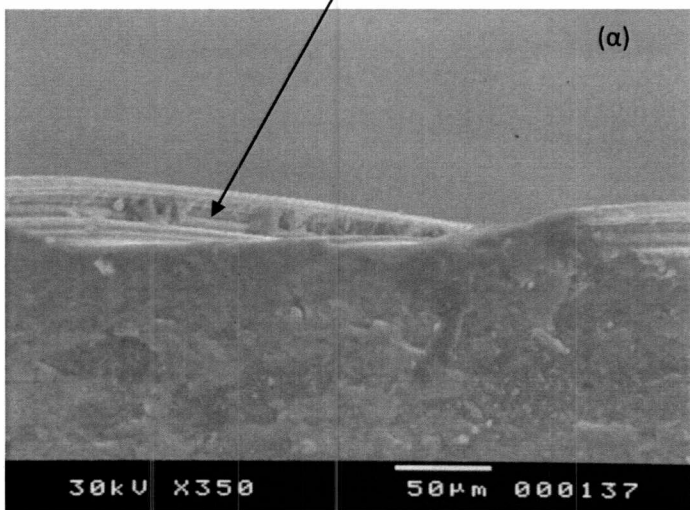
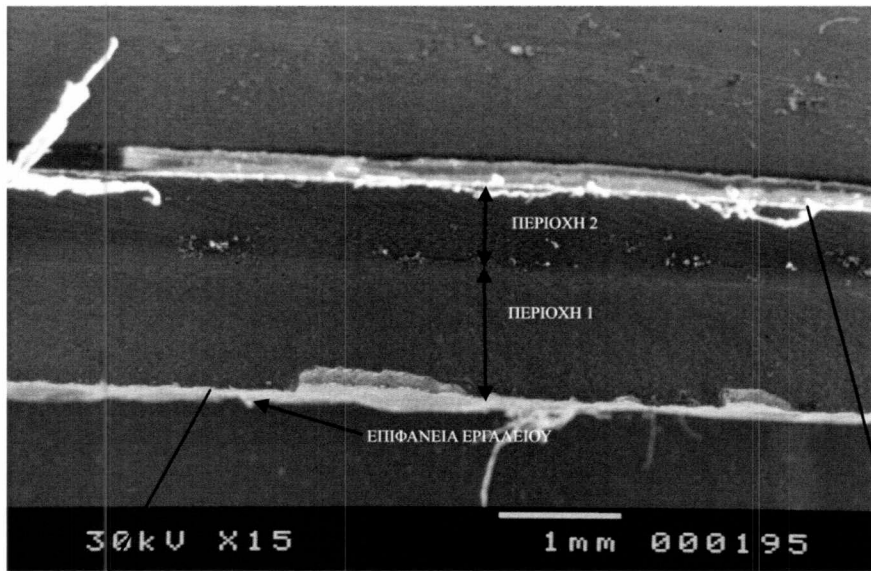
(β) Δοκ. 22-15-03 θραύση στη HAZ



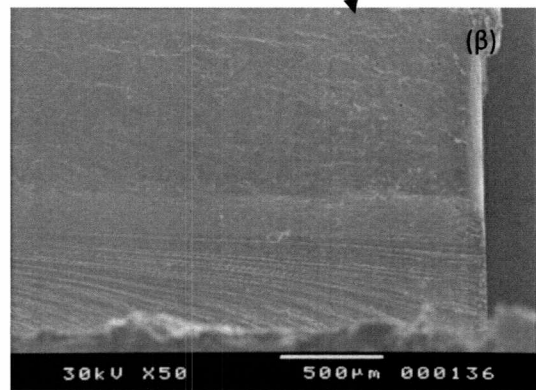
Σχ. 4.40: Μακροδομή περιοχής θραύσης



Σχ. 4.41: KL 22-15-02 Προφίλ μικροσκληρότητας



(α) Περιοχή 1- αυλακώσεις κόπωσης



(β) Περιοχή μη συγκολλημένη

Σχ.4.42: Επιφάνεια αστοχίας-διακρίνονται δύο περιοχές διαφορετικής μορφολογίας

4.6 Δοκίμια χωρίς επιφανειακή κατεργασία με συγκόλληση τύπου E

Τα δοκίμια που μελετήθηκαν από τις συγκολλήσεις με τριπλό πέρασμα του εργαλείου χωρίς επιφανειακή κατεργασία φαίνονται στον Πίνακα 4.6, η καμπύλη S-N δίδεται στο Σχ. 4.43, ενώ αντιπροσωπευτική μακροφωτογραφία δοκιμίου μετά τη θραύση στη δοκιμή κόπωσης παρουσιάζεται στα Σχ. 4.44. Η περιοχή της αστοχίας ευρίσκεται μέσα στη HAZ. Η μακροδομή της συγκόλλησης φαίνεται στα Σχ. 4.45-4.52, για τα τρία δοκίμια που μελετήθηκαν, και αντιπροσωπευτικό profil μικροσκληρότητας στο Σχ. 4.53. Από τη σύγκριση των προφίλ μικροσκληρότητας των ζωνών ανάδευσης και των τριών περασμάτων του δοκιμίου KL 18-14-01 φαίνεται ότι το εύρος τιμών και των τριών προφίλ είναι σταθερό (120-145HV). Εξάιρεση παρουσιάζει το προφίλ της συγκόλλησης του δεύτερου περάσματος (πλησιέστερη στην περιοχή θραύσης) με τις δύο πρώτες μετρήσεις να δίνουν τιμές αρκετά χαμηλότερες από τις υπόλοιπες (94HV και 109HV).

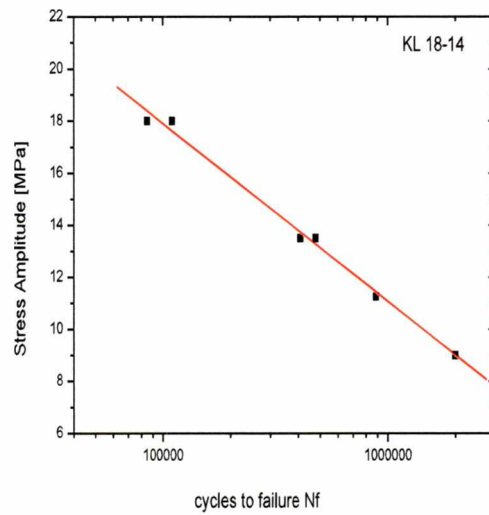
Η πλευρά στην οποία έγινε η θραύση των δοκιμίων κόπωσης σημειώνεται στο Σχ. 4.47 και 4.52 (εγκάρσια τομή στην επιφάνεια αστοχίας) και φαίνεται ότι είναι η HAZ και για τα τρία δοκίμια που μελετήθηκαν. Χαρακτηριστικά των επιφανειών αστοχίας παρουσιάζονται στα Σχ. 4.54, 4.55 από την παρατήρησή τους στο SEM. Η επιφάνεια του κάτω ελάσματος έχει χαρακτηριστικά ημι-ψαθυρής θραύσης (semi-cleavage), και παρατηρούνται διακρυσταλλικές ρωγμές μέσα σε αυτήν (Σχ. 4.56)

Οι συγκολλήσεις τριών περασμάτων (τύπου E) αστόχησαν στη HAZ κι όχι στην περιοχή της συγκόλλησης, σε αντίθεση με τα δοκίμια όλων των άλλων τύπων συγκόλλησης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι κατά την εκτέλεση της συγκόλλησης, στην άκρη της επικάλυψης, εξαιτίας της υψηλής κάθετης πίεσης που ασκείται από το εργαλείο, δημιουργείται μια εγκοπή στο κάτω έλασμα

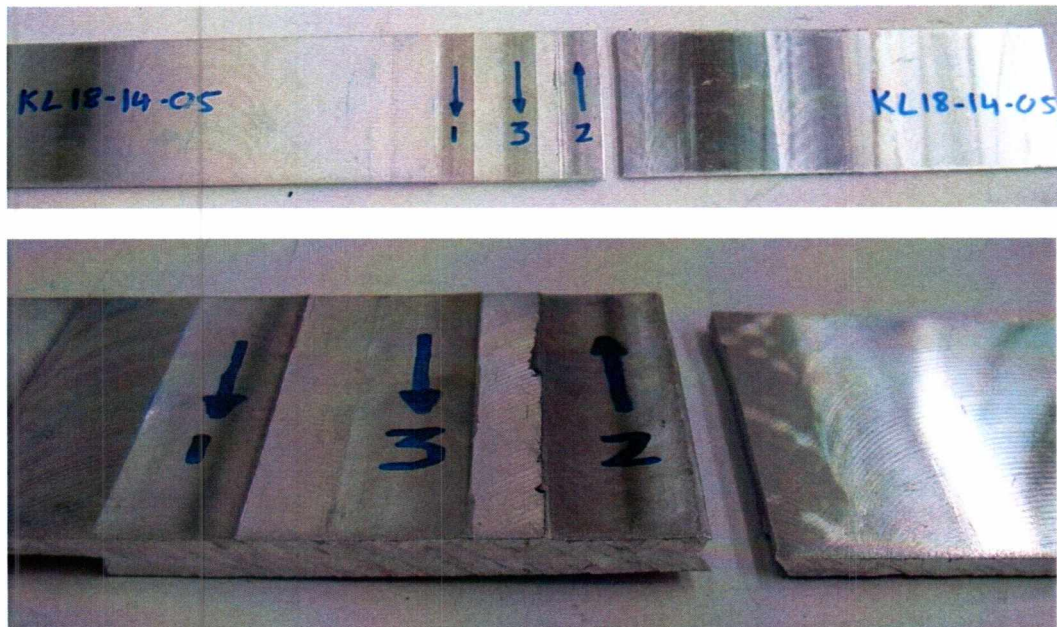
Πίνακας 4.6: Δοκίμια συγκολλήσεων επικάλυψης με τριπλό πέρασμα, χωρίς επιφανειακή κατεργασία

Αρ. δοκιμίου	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)	Νfκύκλοι αστοχίας	τύπος συγκόλληση S
KL 18-14-01	40	4	84900	E

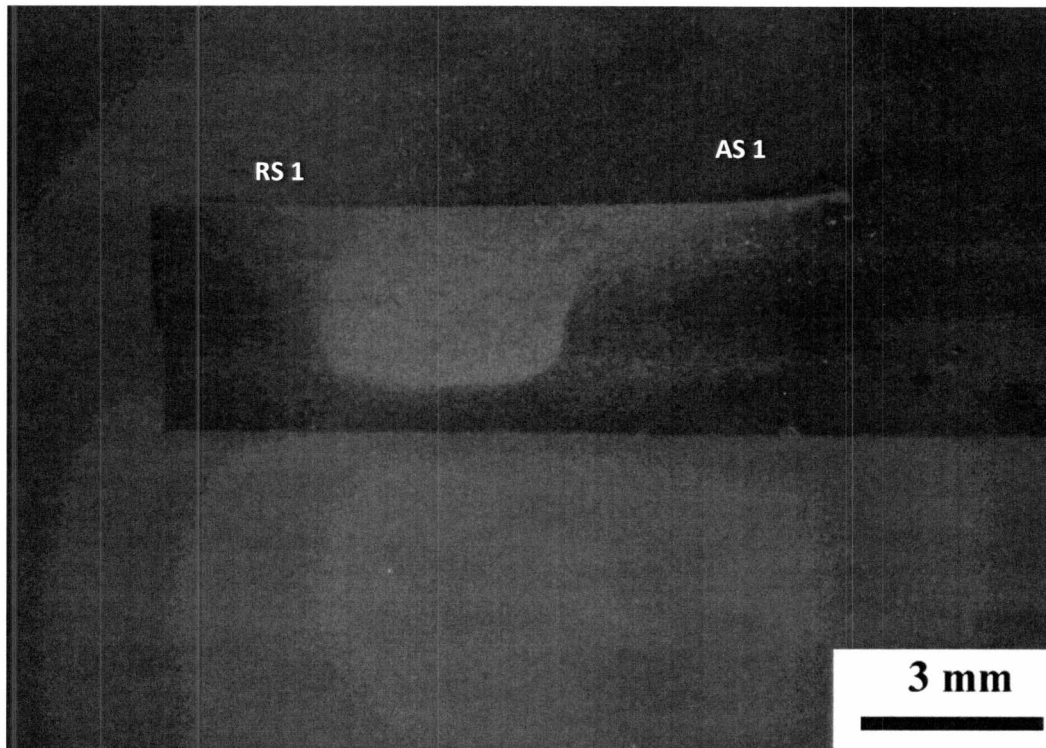
KL 18-14-02	40	4	110.000	
KL 18-14-05	25	2.5	886500	



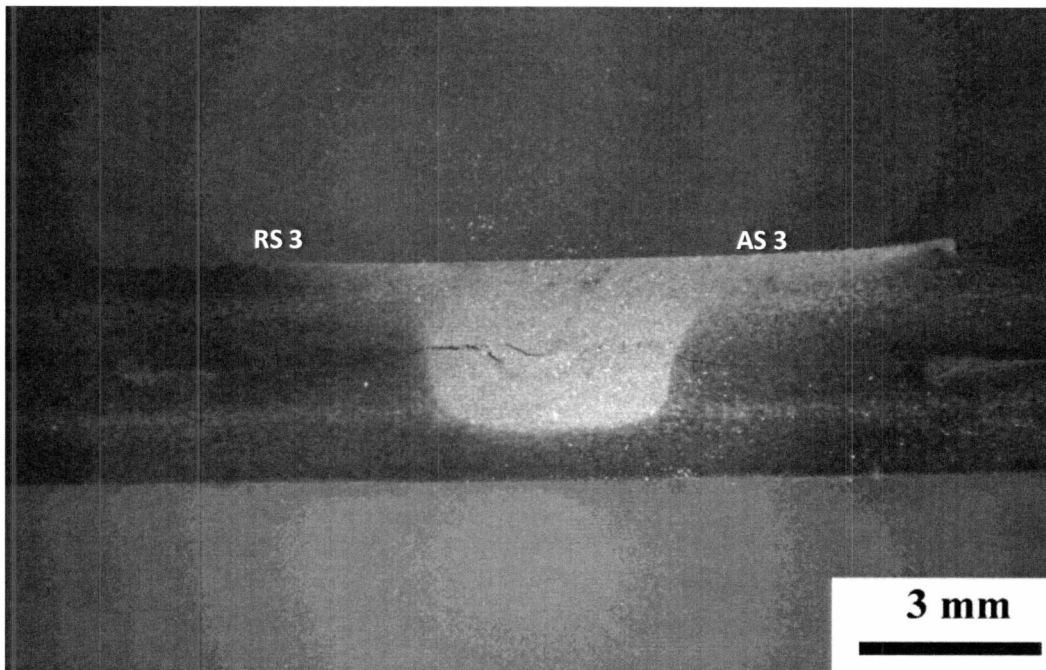
Σχ. 4.43: Καμπύλη S-N δοκιμών με συγκόλληση τύπου E, χωρίς επιφανειακή κατεργασία



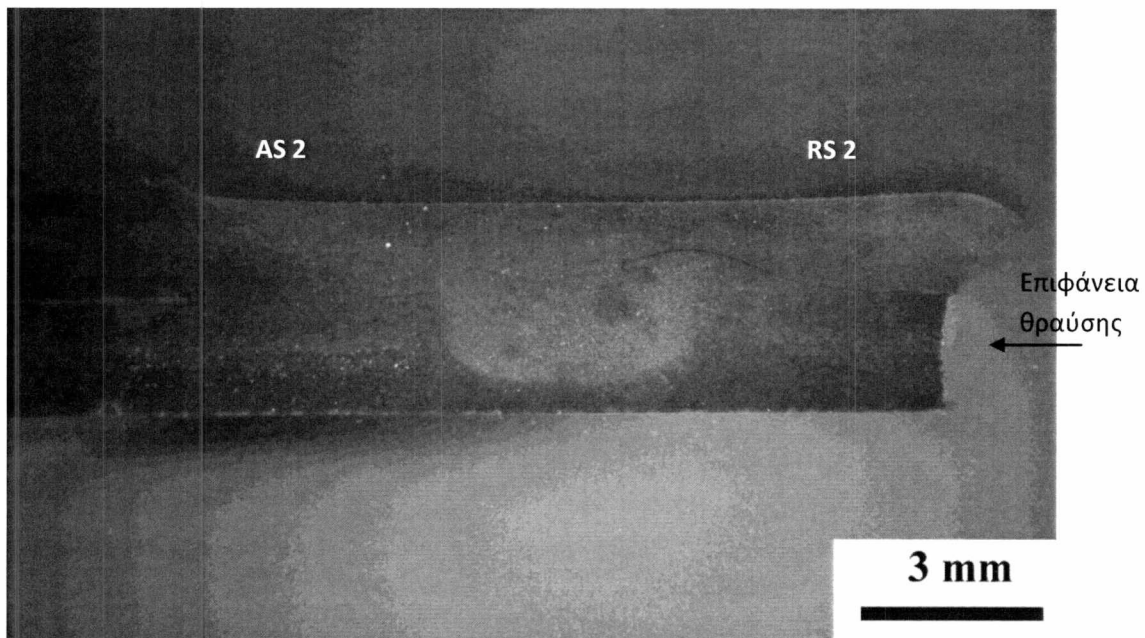
Σχ. 4.44: (KL 18-14-05) Δοκίμιο κόπωσης μετά τη θραύση



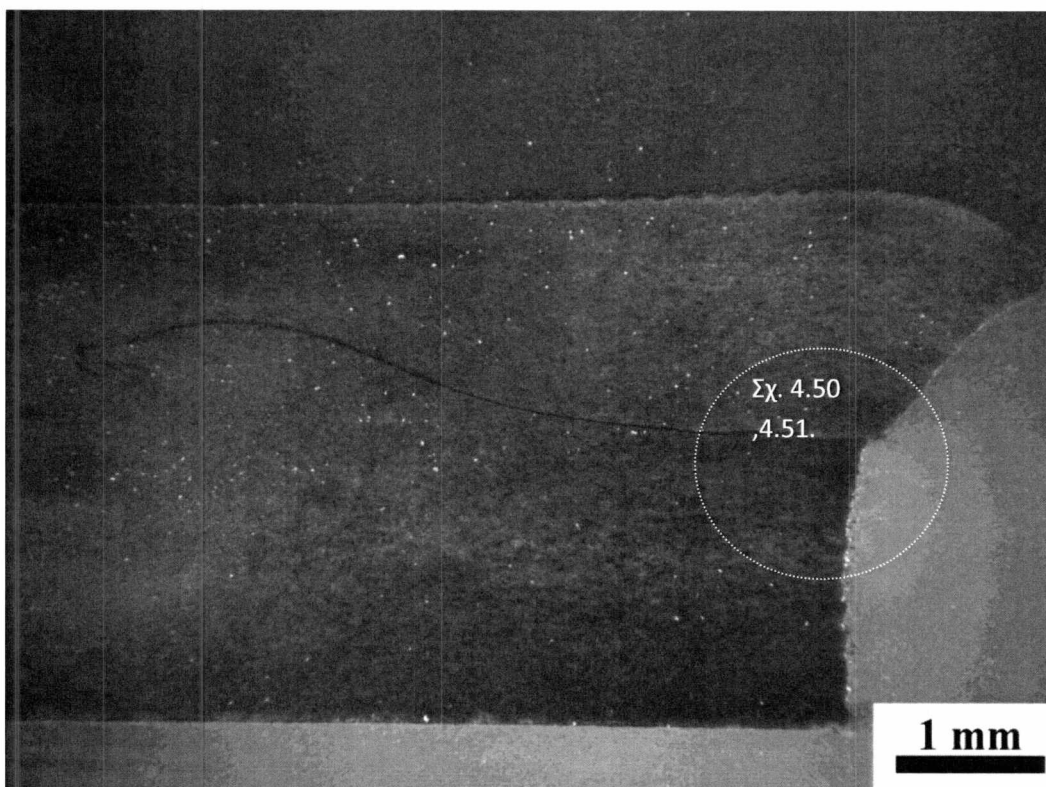
Σχ. 4.45: (KL18-14-02) Μακροδομή περιοχής θραύσης (Σ1).



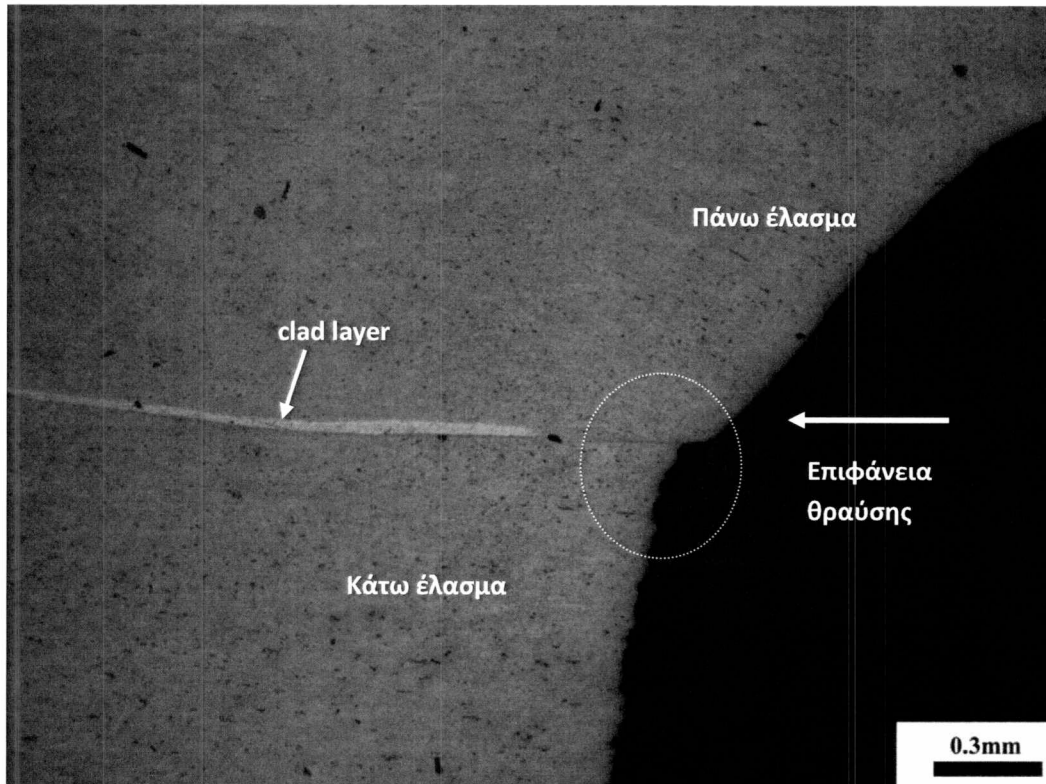
Σχ. 4.46: (KL18-14-02) Μακροδομή περιοχής θραύσης (Σ3).



Σχ. 4.47: (KL18-14-02) Μακροδομή περιοχής θραύσης (Σ2).



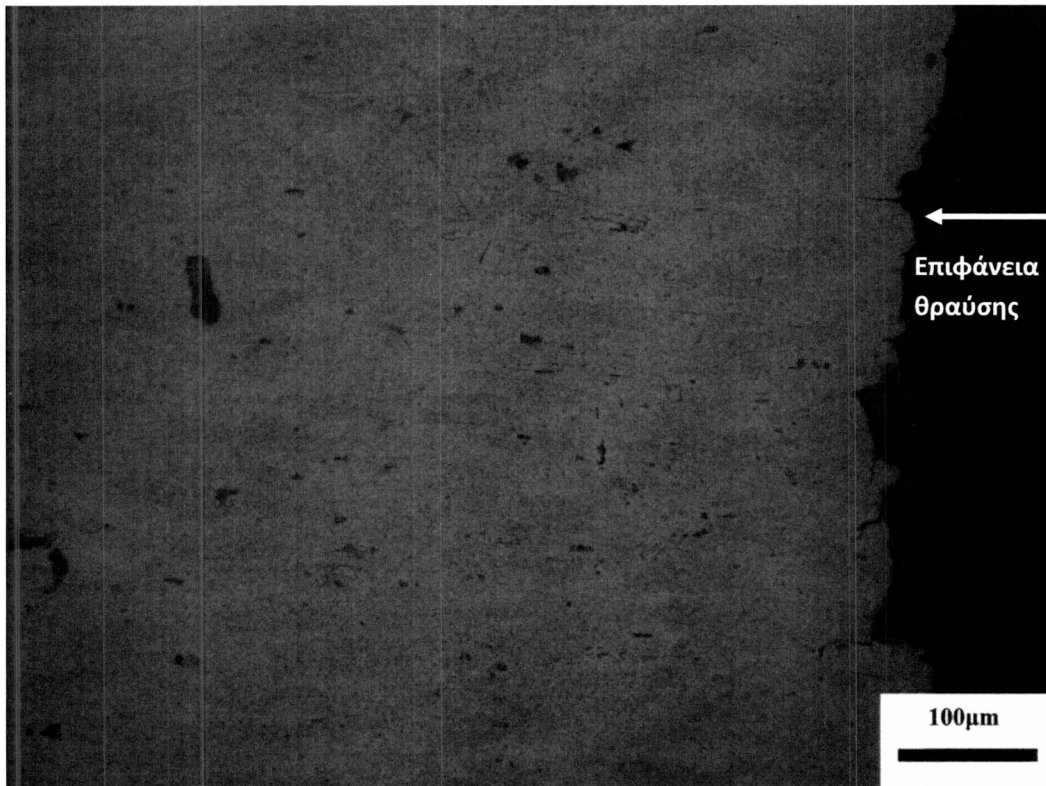
Σχ. 4.48: (KL18-14-02) Μακροδομή περιοχής θραύσης



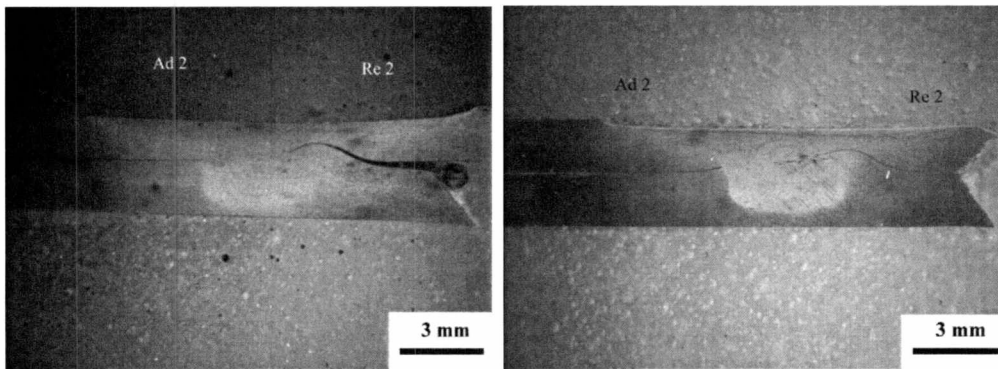
Σχ. 4.49: (KL18-14-02) Μικροδομή κοντά στην επιφάνεια θραύσης. Εγκλωβισμός στρώματος clad ~ 3mm από την επιφάνεια αστοχίας. .



Σχ. 4.50: (KL18-14-02) Λεπτομέρεια από Σχ. 4.49. Δεν παρατηρείται clad layer.



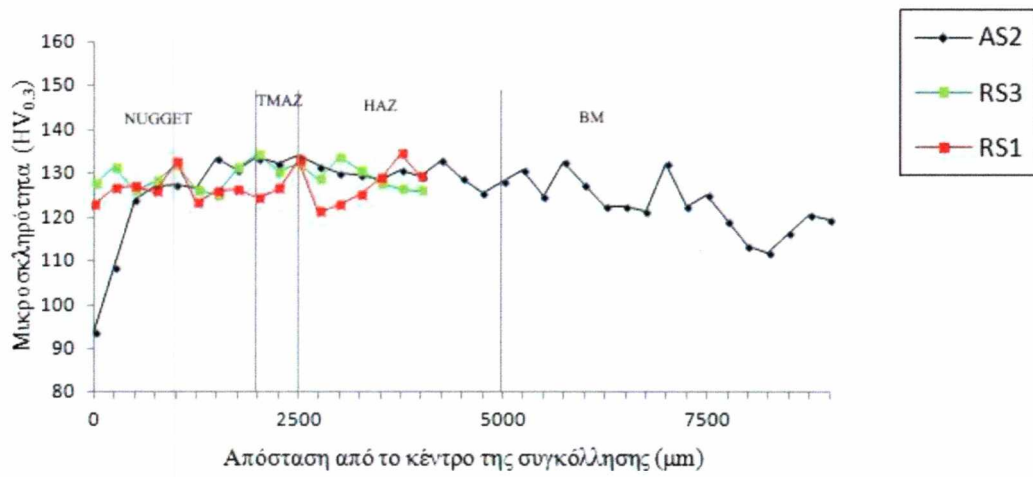
Σχ. 4.51: (KL18-14-02) Μικροδομή στην περιοχή του κάτω ελάσματος. Μικρορωγμές κάθετες στην επιφάνεια αστοχίας.



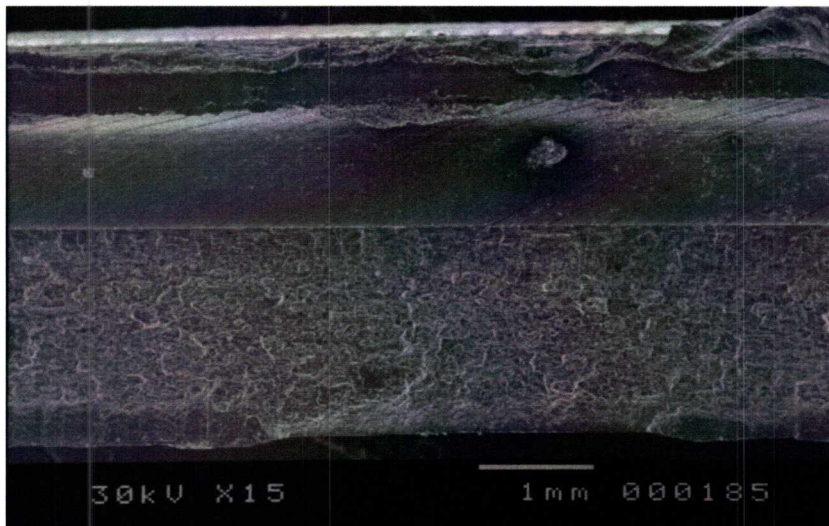
(α) Δοκ. 18-14-01 περιοχή θραύσης

(β) Δοκ. 18-14-05 περιοχή θραύσης

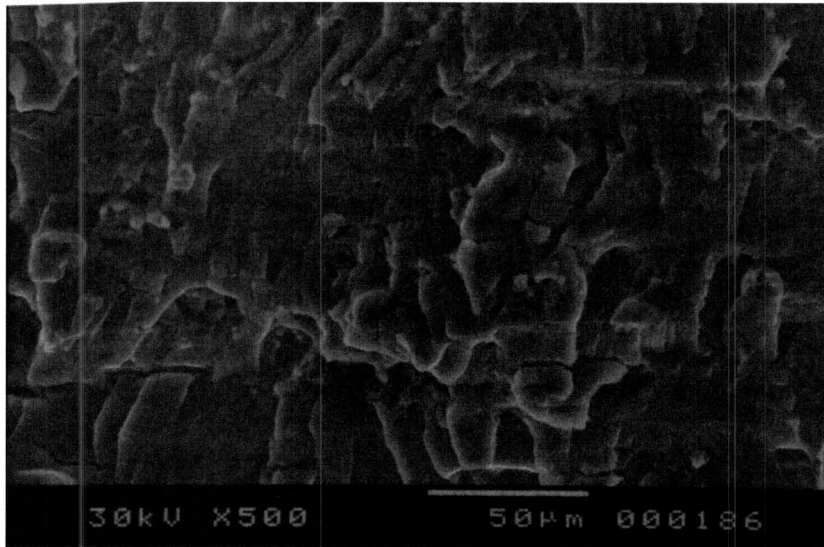
Σχ. 4.52: Μακροδομή στην περιοχή θραύσης.



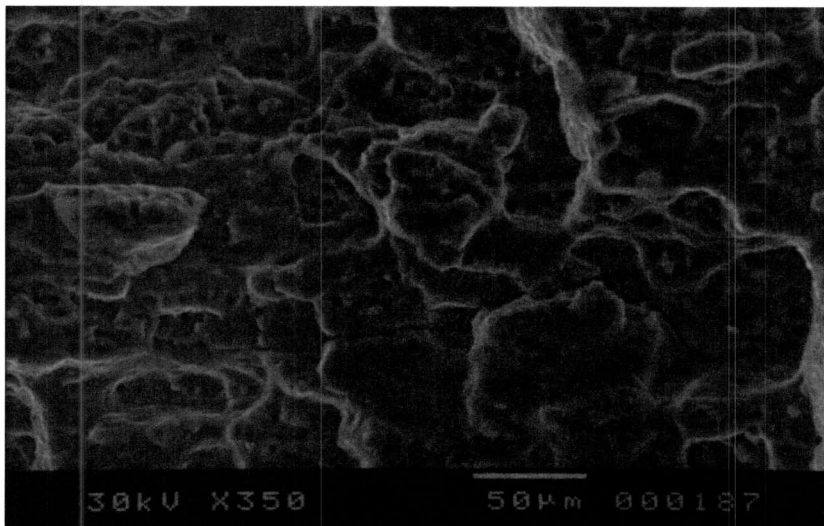
Σχ. 4.53: (KL 18-14-01) Προφίλ μικροσκληρότητας της ζώνης ανάδευσης και των τριών περασμάτων.



Σχ. 4.54: Επιφάνεια θραύσης – άνω και κάτω έλασμα



Σχ. 4.55: Επιφάνεια του κάτω ελάσματος με χαρακτηριστικά ψαθυρής θραύσης

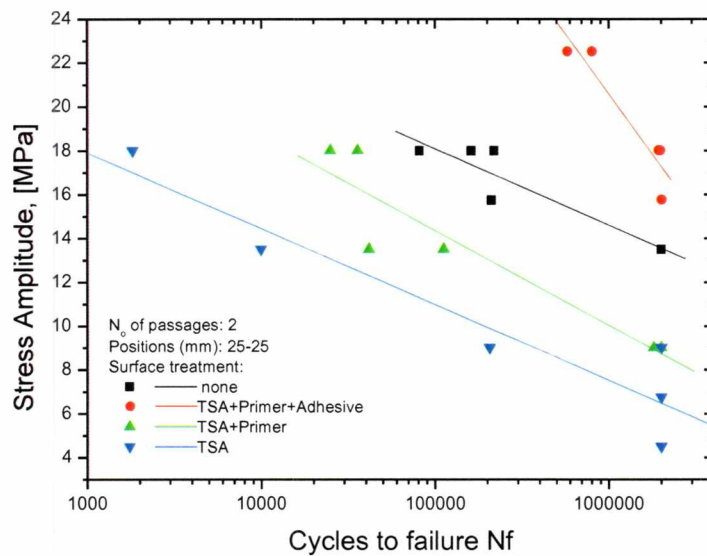


Σχ. 4.56: Διακρυσταλλική ρωγμή στο κάτω έλασμα

5

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 5.1 και στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης για τα δοκίμια που μελετήθηκαν με διπλή συγκόλληση και διαφορετικές επιφανειακές κατεργασίες. Όπως φαίνεται, τα δοκίμια που παρουσίασαν την καλύτερη συμπεριφορά σε κόπωση είναι αυτά που έχουν υποστεί συνδυασμό των τριών επιφανειακών κατεργασιών (TSA, primer, adhesive) σε αντίθεση με τα δοκίμια που έχουν υποστεί μόνο επιφανειακή κατεργασία της μεθόδου TSA. Κατά τη μελέτη των δοκιμίων αυτών (KL 11-7) παρατηρήθηκαν κενά κάτω από την επιφάνεια του περιουχενίου του εργαλείου και κενές κοιλότητες στη ζώνη ανάδευσης, σφάλματα που δεν εντοπίστηκαν σε δοκίμια άλλης κατηγορίας. Τα κενά αυτά οδηγούν σε περαιτέρω μείωση της διατομής στη διεπιφάνεια συγκόλλησης των δύο ελασμάτων, γνωστό πρόβλημα ως EST (Effective Sheet Thickness) στη βιβλιογραφία, με αποτέλεσμα την ταχύτερη διάδοση της ρωγμής κόπωσης.



Σχ. 5.1: Καμπύλες S-N των δοκιμών συγκόλλησης τύπου B με διαφορετικές επιφανειακές κατεργασίες.

Πίνακας 5.1: Συγκριτικά αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για συγκόλληση τύπου B και διαφορετικές επιφανειακές κατεργασίες.

Τύπος συγκόλλησης	Κωδικός συγκόλλησης	Επιφανειακή κατεργασία	Δσ [MPa]	
			1E+05 Cycles	1E+06 Cycles
B	KL 10-6	None	19.0	14.1
B	KL 22-15	TSA+Primer+Adhesive	31.5	20.5
B	KL 24-7	TSA+Primer	14.3	10.0
B	KL 11-7	TSA	11.0	7.5

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα δοκίμια που εξετάστηκαν συνολικά. Στη δεξιά στήλη αναγράφεται η πλευρά έναρξης της ρωγμής κόπωσης. Παρατηρείται ότι, στην πλειοψηφία των δοκιμών, η έναρξη της ρωγμής πραγματοποιήθηκε στην πλευρά εξόδου του εργαλείου. Ακόμη και στα δοκίμια διπλής συγκόλλησης, η ρωγμή ξεκίνησε στην πλευρά εξόδου του πρώτου περάσματος, εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις (KL 11-7-02, KL 22-15-03) όπου η θέση έναρξης της ρωγμής κόπωσης εντοπίζεται στην πλευρά εξόδου του δεύτερου περάσματος. Αυτό επιβεβαιώνει προβλήματα γνωστά από αναφορές στην ανοιχτή βιβλιογραφία και προηγούμενες

μελέτες, όπως γεωμετρικά ελαττώματα τύπου hook και περιοχές αυξημένης συγκέντρωσης τάσεων κυρίως στην πλευρά εξόδου του εργαλείου (RS).

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών

Τύπος συγκόλλησης	Αρ. δοκιμίου	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)	N_f κύκλοι αστοχίας	Επιφανειακή κατεργασία	Πλευρά αστοχίας	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
A	KL 6-2-02	40	4	102.400	NONE	RS	-
	KL 6-2-03	40	4	82.500		RS	
	KL 6-2-04	40	4	100.200		RS	
	KL 6-2-06	30	3	2.000.000		-	
	KL 7-3-02	40	4	59.100		RS	Clad layer στη διεπιφάνεια
	KL 7-3-03	30	3	224.000		RS	
B	KL 10-6-01	80	8	1100	NONE	AS2≡RS1	-
	KL 10-6-03	40	4	218600		AS2≡RS1	
	KL 10-6-07	40	4	161200		AS2≡RS1	
	KL 10-6-04	40	4	81200		AS2≡RS1	
B	KL 11-7-01	40	4	1812	TSA	AS2≡RS1	Clad layer στη διεπιφάνεια-Κενές κοιλότητες στη nugget
	KL 11-7-06	20	2	2000000		-	
	KL 11-7-02	20	2	206094		RS2≡AS1	
B	KL 24-7-01	40	4	24902	TSA + primer	AS2≡RS1	Κενές κοιλότητες στη nugget
	KL 24-7-05	30	3	112242		AS2≡RS1	
B	KL 22-15-02	40	4	1921172	TSA + primer + adhesive	AS2≡RS1	-
	KL 22-15-03	50	5	575237		RS2≡AS1	Θραύση στη HAZ
E	KL 18-14-01	40	4	84900	NONE	RS2	Clad layer στη διεπιφάνεια-Θραύση στη HAZ-Ψαθυρή θραύση
	KL 18-14-05	25	2.5	886500		RS2	
	KL 18-14-02	40	4	110.000		RS2	

Στην περίπτωση των συγκολλήσεων τριών περασμάτων (τύπου E), τα δοκίμια αστόχησαν στη HAZ, σε αντίθεση με τα περισσότερα δοκίμια των άλλων τύπων

συγκόλλησης που αστόχησαν είτε στη ζώνη ανάδευσης είτε στα σύνορα ζώνης ανάδευσης-TMAZ. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία εγχοπής στο κάτω έλασμα, στην άκρη της επικάλυψης, κατά την εκτέλεση της συγκόλλησης, εξαιτίας της υψηλής κάθετης πίεσης που ασκείται από το εργαλείο. Αποτέλεσμα, η δημιουργία μιας πιθανής θέσης έναρξης της ρωγμής κόπωσης. Στην κατηγορία των δοκιμίων συγκόλλησης τύπου A, μικρότερη αντοχή σε κόπωση παρουσιάζουν τα δοκίμια KL 7-3, στα οποία υπάρχει επίστρωση clad στη διεπιφάνεια των ελασμάτων που εγκλωβίζεται λόγω ανάδευσης, στη nugget και στην TMAZ. Στα παραπάνω δοκίμια, κατά το μεταλλογραφικό έλεγχο, εντοπίστηκε θέση έναρξης ρωγμής κόπωσης μέσα στην επίστρωση clad, σε περιοχή αυξημένης συγκέντρωσης τάσεων. Επομένως, η παρουσία του επιστρώματος clad στη διεπιφάνεια των προς συγκόλληση ελασμάτων, μπορεί να επιδράσει καταλυτικά στην έναρξη και διάδοση της ρωγμής κόπωσης.

6

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η μελλοντική έρευνα, θα μπορούσε να αφορά:

- Βελτίωση ιδιοτήτων συγκολλήσεων με χρήση πιθανόν άλλου τύπου εργαλείου συγκόλλησης
- Βελτιστοποίηση του τρόπου συγκράτησης των δοκιμίων για την αποφυγή δημιουργίας εγχοπών
- Αποφυγή της παρουσίας cladding στη διεπιφάνεια των ελασμάτων
- Επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης FSW στην ποιότητα της συγκόλλησης
- Σύγκριση συμπεριφοράς συγκόλλησης μεταξύ διαφόρων γεωμετριών συγκόλλησης

Βιβλιογραφία

- [1] D. Fersini, A. Pironi. Fatigue behavior of Al 2024-T3 friction stir welded lap joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 74 (2007), 468-480
- [2] C. Genevois, A. Deschamps , A. Denquin, B. Doisneau-cottignies, Quantitative investigation of precipitation and mechanical behaviour for AA2024 friction stir welds, *Acta Materialia*, 53 (2005) 2447–2458.
- [3] Rajiv S. Mishra, Center for Friction Stir Processing, University of Missouri-Rolla
Murray W. Mahoney, Rockwell Scientific Company
- [4] D. Fersini, A. Pironi. Analysis and modeling of fatigue failure of friction stir welded aluminum alloy single-lap joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (2008), 790-803
- [5] Mats Ericsson, Lai-Zhe Jin, Rolf Sandstrom (2008). Fatigue properties of friction stir overlaps welds. Department of materials Science and Engineering and Brinell Centre.
- [6] Ιστοσελίδα: www.lucasmilhaupt.com (knowledge base/ brazing fundamentals / joint design)
- [7] Ιστοσελίδα: www.twi.co.uk
- [8] Duanne K. Miller. Designing Welded Lap Joints. *Welding Innovation* Vol. XVIII, No.3, 2001
- [9] M. Papadopoulos, S. Tavares, M. Pacchione, S. Pantelakis. Mechanical behaviour of AA 2024 friction stir overlap welds. www.emeraldinsight.com/1757-9864.htm
- [10] Δρ Πανδώρα Ψυλλάκη. Επιφανειακές κατεργασίες υλικών για μηχανολογικές εφαρμογές. Τμήμα μηχανολογίας, ΣΤΕΦ-ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ, Μάρτιος 2013-10-26
- [11] Active Aluminum-Rich Primer for Corrosion Protection. Materials Engineering Division .Naval Air Warfare Center, Aircraft Division, U.S. Navy, January 8, 2013
- [12] Ιστοσελίδα: evants.nace.org

[13] Eun-Young Kim, JaeHyung Cho, Hyung-Wook Kim, Shi-Hoon Choi. Evolution of deformation texture in Al/Al-Mg/Al composite sheets during cold-roll cladding. *Materials Science and Engineering:A*, 530 (2011), 244-252



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000118298