

Συγκολλήσεις ανάδευσης με τριβή μεταλλικών ελασμάτων

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας: Κατασκευών

Επιβλέπων Καθηγητής : Βαΐρης Αχιλλέας

**Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας**  
**Συγκολλήσεις ανάδευσης με τριβή μεταλλικών ελασμάτων**  
**Friction stir welding of sheets**

Στοιχεία Φοιτητή

Όνομα: Φεργάδης Παναγιώτης

Αριθμός Μητρώου :18392053



ΑΙΓΑΛΕΩ 09 ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2023

**Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας**  
**Συγκολλήσεις ανάδευσης με τριβή μεταλλικών ελασμάτων**  
**Friction stir welding of sheets**

Διπλωματική Εργασία

του

Φεργάδη Παναγιώτη

Επιβλέπων: Αχιλλέας Βαΐρης

Καθηγητής Πα.Δ.Α.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή εξέτασης την 12η Οκτωβρίου 2023

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Αχιλλέας Βαΐρης

Καθηγητής Πα.Δ.Α.

.....

Κωνσταντίνος Στεργίου

Καθηγητής Πα.Δ.Α.

.....

Αντώνιος Τσολάκης

Αναπληρωτής Καθηγητής

Πα.Δ.Α.

Αιγάλεω, Οκτώβριος 2023

### ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παναγιώτης Φεργάδης του Ιωάννη , με αριθμό μητρώου 18392053 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».



Ο Δηλών

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	6
Περίληψη .....	7
Abstract.....	8
Αντικείμενο, σκοπός και στόχοι εργασίας.....	9
Δομή.....	9
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	10
1.1. Εισαγωγή στην συγκόλληση ανάδευσης με τριβή .....	10
1.1.1. Ιστορική Αναδρομή.....	10
1.1.2. Ανάγκες που οδήγησαν στην εύρεση νέας τεχνολογίας συγκόλλησης .....	10
1.1.3. Βασικοί όροι για την κατανόηση της διαδικασίας .....	11
1.2. Διαδικασία συγκόλλησης ανάδευση με τριβή .....	12
1.2.1. Ανάλυση διαδικασίας συγκόλλησης.....	12
1.2.2. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Συγκόλλησης Ανάδευσης με Τριβή .....	13
1.3. Παράμετροι συγκόλλησης .....	14
1.3.1. Ταχύτητα Περιστροφής και Ταχύτητα Πρόωσης.....	14
1.3.2. Υλικό εργαλείου συγκόλλησης .....	15
1.3.3. Γεωμετρία εργαλείου συγκόλλησης.....	15
1.3.3.1. Γεωμετρία περιαιχενίου και Χαρακτηριστικά του .....	16
1.3.3.2. Γεωμετρία πείρου και Χαρακτηριστικά του .....	17
1.3.4. Γωνία κλίσης εργαλείου.....	18
1.3.5. Βάθος βύθισης.....	18
1.3.6. Προθέρμανση .....	19
1.4. Χρήση φρέζας για συγκόλληση ανάδευσης με τριβή .....	19
1.5. Μικροδομή.....	20
1.5.1. Ζώνη Ψήγματος .....	20
1.5.2. Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη .....	21
1.5.3. Θερμικά επηρεασμένη ζώνη .....	21
1.6. Εισαγωγή στην δυναμική ανακρυστάλλωση.....	22
1.6.1. Ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση.....	22
1.6.2. Συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση .....	23
1.6.3 Γεωμετρικά Δυναμική ανακρυστάλλωση .....	24

1.7. Προβλήματα και δυσκολίες κατά την συγκόλληση ανάδευσης με τριβή .....	25
1.8. Ατέλειες Συγκόλλησης Κραμάτων Αλουμινίου .....	26
1.9. Τρόποι βελτίωσης της αντοχής της συγκόλλησης .....	27
1.9.1. Σημείο χαμηλότερης αντοχής της συγκόλλησης .....	27
1.9.2. Θερμικές κατεργασίες .....	28
1.9.3. Βελτίωση αντοχής της συγκόλλησης συνολικά .....	28
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	29
2.1. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	29
2.1.1. Υλικό βάσης και εξοπλισμός εργαστηρίου .....	29
2.1.2. Συγκράτηση Ελασμάτων .....	30
2.1.3. Παράμετροι συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία .....	30
2.1.4. Προετοιμασία δοκιμών προς την δοκιμή εφελκυσμού .....	33
2.1.4.1. Κοπή δοκιμών .....	33
2.1.4.2. Μακροσκοπική Απεικόνιση .....	34
2.1.4.3. Ορισμός καταπονούμενου μήκους.....	34
2.1.5. Δοκιμή Εφελκυσμού .....	35
2.1.6. Δοκίμια Μετά τη δοκιμή εφελκυσμού .....	36
2.2. Αποτελέσματα μετρήσεων .....	37
2.2.1. Συγκόλληση A (1500 rpm).....	37
2.2.1.1. Δοκίμιο A1.....	37
2.2.1.2. Δοκίμιο A2.....	38
2.2.1.3. Δοκίμιο A3.....	40
2.2.1.4. Σύνολο Δοκιμών Συγκόλλησης A' .....	41
2.2.2. Συγκόλληση B(750 rpm).....	44
2.2.2.1. Δοκίμιο B1.....	44
2.2.2.2. Δοκίμιο B2.....	45
2.2.2.3 Δοκίμιο B3.....	47
2.2.2.4. Δοκίμιο B4.....	49
2.2.2.5. Δοκίμιο B5.....	51
2.2.2.6. Σύνολο Διαγραμμάτων Δοκιμών B' .....	53
2.3. Συζήτηση .....	56
2.4. Συμπεράσματα-Προτάσεις .....	58
Παράρτημα .....	60
Bibliography .....	62

## Ευχαριστίες

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω των επιβλέποντα Καθηγητή μου Αχιλλέα Βαΐρη που μου ανέθεσε την διπλωματική εργασία αλλά και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Επιπλέον τον ευχαριστώ για την συνεχή καθοδήγηση και συμπαράσταση όπως και για τις επιστημονικές υποδείξεις του, οι οποίες με βοήθησαν να ολοκληρώσω την διπλωματική εργασία.

Το πειραματικό σκέλος της εργασίας, και συγκεκριμένα αυτό της συγκόλλησης, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο CNC του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΠΑΔΑ υπό την επίβλεψη του Ακαδημαϊκού Ανδρέα Τσαΐνη, τον οποίο ευχαριστώ για την συνεργασία του κατά την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας.

Το σκέλος των μετρήσεων των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Τεχνολογίας Υλικών του ΠΑΔΑ με την καθοδήγηση του Ακαδημαϊκού Δημήτριου Παπαγεωργίου, τον οποίο ευχαριστώ για την καθοριστική βοήθεια και καθοδήγηση του σε αυτό το μέρος της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ των Καθηγητή και Πρόεδρο του Τμήματος των Μηχανολόγων Μηχανικών του ΠΑΔΑ, για την παραχώρηση του εξοπλισμού των εργαστηρίων ώστε να είναι δυνατή η πραγματοποίηση της διπλωματικής έρευνας.

## Περίληψη

Η συγκόλληση ανάδευσης με τριβή είναι μια μέθοδος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης που αναπτύχθηκε και βρίσκεται εκτεταμένη εφαρμογή στην αεροναυπηγική βιομηχανία για την συγκόλληση ελασμάτων αλουμινίου σειρών, οι οποίες είναι δύσκολο να συγκολληθούν με συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης. Συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι μικρότερες περιορίζοντας τις αστοχίες που εμφανίζονταν κατά την στερεοποίηση. Η συγκόλληση πραγματοποιείται μέσω ενός περιστρεφόμενου εργαλείου, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με το υλικό βάσης παράγει ένα ποσό θερμότητας τριβής. Την ίδια στιγμή ασκώντας πίεση ενώ περιστρέφεται μεταξύ των επιφανειών προς συγκόλληση σχηματίζει την γραμμή συγκόλλησης ανακατεύοντας το υλικό βάσης.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει σκοπό να πραγματοποιηθούν συγκολλήσεις μεταξύ ελασμάτων αλουμινίου κράματος 2024, με διαφορετικές παραμέτρους και να σχολιαστεί ο συνδυασμός των παραμέτρων που θα ορίζονται. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ταχύτητες περιστροφής 750 rpm και 1500 rpm σε συνδυασμό με μια σταθερή ταχύτητα πρόωσης 50mm/min. Όλη η διαδικασία της συγκόλλησης πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο CNC κατεργασιών του ΠΑΔΑ. Κριτήριο για την ποιότητα της συγκόλλησης σε αυτή την εργασία θα αποτελέσει η εφελκυστική αντοχή της σε σχέση με αυτή του μετάλλου βάσης, αλλά και η εικόνα που θα παρουσιάζει σε μακροσκοπικό επίπεδο. Η αντοχή δοκιμάστηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Υλικών της σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής όπου έγινε και η μακροσκοπική απεικόνιση. Τα αποτελέσματα σχολιάστηκαν όπως και οι δυσκολίες στην διαδικασία που ακολουθήθηκε, προτείνοντας τρόπους ώστε να βελτιωθούν οι συνθήκες συγκόλλησης.

Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε ότι οι συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν είχαν κάποιες αποδεκτές τιμές αντοχής και παραμορφώσεως, ωστόσο το βέλτιστο θα ήταν να αναλυθούν και μικροσκοπικά για να υπάρχει μια εμπειριστατωμένη εικόνα των αποτελεσμάτων. Έτσι θα είναι εφικτό να γίνει βελτιστοποίηση των παραμέτρων.

## Abstract

Friction Stir Welding is a solid state joining technique developed and widely used for aircraft manufacturing to join aluminium alloys, classified as non-weldable or difficult to weld with conventional joining techniques. Compared to conventional technique, there is less generated heat minimizing the formation of defects during solidification. The joining is accomplished by a rotating tool, which generates frictional heat when it touches the base material. Simultaneously, it applies pressure between the joining surfaces while rotating resulting in the joint line by mixing the base material.

The purpose of the dissertation is to complete friction stir welding of aluminium alloy 2024 sheets, with different parameters and discuss the combination of the determined parameters. The parameters used are, rotational speed of 750 rpm and 1500 rpm combined with a constant value of welding speed of 50mm/min. The whole process was completed at the CNC machining Laboratory of University of West Attica. The criterion for judging the joint quality in the dissertation, is the tensile strength of the weld compared to the strength of the base metal and the visual result of the joint on a macroscopic level. The tensile strength was tested at the Materials Technology Laboratory of the University of West Attica, where the macroscopical analysis was also conducted. The results were discussed, as were the difficulties of the followed process, suggesting ways to improve the welding conditions.

Concluding, it was as detected that the joints had some accepted tensile strength and elongation values, however it would be optimum to conduct a microscopical analysis to have a comprehensive display of the results. In this way it would be feasible to accomplish an optimization of welding parameters.



## **Αντικείμενο, σκοπός και στόχοι εργασίας**

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της συγκόλλησης ανάδευσης με τριβή λεπτών ελασμάτων αλουμινίου κράματος 2024 σε μετωπική σύνδεση, με διαφορετικές παραμέτρους, με σκοπό τον σχολιασμό τους με βάση την εφελκυστική αντοχή. Οι στόχοι που θα βοηθήσουν να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα είναι το πείραμα να εκτελείται κατά τον ίδιο τρόπο κάθε φορά, να υπάρχει επαναληψιμότητα στις συγκολλήσεις ώστε να είμαι ικανός να εξάγω βασικά συμπεράσματα για την διαδικασία της συγκόλλησης και τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού που θα πραγματοποιηθούν.

## **Δομή**

### ***Θεωρητικό μέρος***

Αρχικά, στο πρώτο τμήμα της εργασίας γίνεται μια εισαγωγή στην συγκόλληση ανάδευσης με τριβή. Αναλύεται η διαδικασία της, οι παράμετροι συγκόλλησης και το αντίκτυπο που έχουν σε επίπεδα μικροδομής και μηχανικών ιδιοτήτων στην συγκόλληση. Γίνεται ανάλυση των ζωνών της συγκόλλησης σε επίπεδο μικροδομής και τέλος γίνεται αναφορά στα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στις συγκολλήσεις και τρόπους να περιοριστούν ανάλογα με τα κριτήρια που έχει ο συγκολλητής.

### ***Πειραματικό μέρος***

Το δεύτερο τμήμα της εργασίας είναι το πειραματικό κομμάτι στο οποίο καταγράφεται η πειραματική διαδικασία που εκτελέστηκε από τα ελάσματα αλουμινίου μέχρι την συγκόλλησή τους και τις κατεργασίες ή προετοιμασίες που πραγματοποιήθηκαν στα συγκολλημένα ελάσματα για να μπορέσει να γίνει δοκιμή εφελκυσμού των συγκολλήσεων αυτών. Κλείνοντας καταγράφονται τα συμπεράσματα για τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων και για την μικροδομή τους.

## 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 1.1. Εισαγωγή στην συγκόλληση ανάδευσης με τριβή

#### 1.1.1. Ιστορική Αναδρομή

Η συγκόλληση ανάδευσης με τριβή ή αλλιώς Friction Stir Welding είναι μια νέα μέθοδος συγκόλλησης, στερεάς μορφής. Η συγκόλληση ανάδευσης με τριβή επινοήθηκε στο The Welding Institute (TWI) του Ηνωμένου Βασιλείου το 1991 ως τεχνική ένωσης στερεάς κατάστασης και αρχικά εφαρμόστηκε σε κράματα αλουμινίου για την παραγωγή της συγκόλλησης. Έκτοτε υπάρχει ακόμα περισσότερη ανάπτυξη στον τομέα της συγκόλλησης με τριβή, έχοντας βρει εφαρμογή σε αρκετούς τομείς της αεροναυπηγικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας καλύπτοντας τις αδυναμίες των συμβατικών μεθόδων. Εκτός από κάθετες συγκολλήσεις, ακόμα πιο πρόσφατα το 2001, ο Ding πατένταρε το οριζόντιο σύστημα συγκόλλησης με τριβή, ενώ το 2016, ο Peterson ανέπτυξε το οριζόντιο σύστημα σε σωλήνες μικρής διαμέτρου (1).

#### 1.1.2. Ανάγκες που οδήγησαν στην εύρεση νέας τεχνολογίας συγκόλλησης

Ένας βασικός στόχος στον τομέα της αεροναυπηγικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας είναι η παραγωγή συγκολλήσεων υψηλής αντοχής χρησιμοποιώντας κράματα αλουμινίου, όπως οι σειρές υψηλής κραμάτωσης 2XXX και 7XXX. Αυτό το κριτήριο όμως έχει εμποδίσει για μεγάλο διάστημα την ευρεία χρήση της συγκόλλησης στον τομέα τέτοιου είδους κατασκευών. Αυτά τα κράματα αλουμινίου ταξινομούνται γενικά ως μη συγκολλησιμα λόγω κακής στερεοποίησης μικροδομής και του πορώδους στη ζώνη τήξης (2). Τα κράματα αλουμινίου-χαλκού (σειρά 2000) είναι τα κύρια κράματα που χρησιμοποιούνται σε δομικές εφαρμογές σκελετού αεροσκαφών με βάση το παραπάνω κριτήριο. Συγκεκριμένα τα κράματα της σειράς αυτής τα οποία περιέχουν μαγνήσιο, λόγω της καθίζησης των φάσεων  $Al_2Cu$  και  $Al_2CuMg$  έχουν υψηλότερη αντοχή και ανοχή σε φθορά όπως και καλή αντοχή στην ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης συγκριτικά με άλλες σειρές κραμάτων αλουμινίου (3). Το 2024 είναι ένα παράδειγμα τέτοιου κράματος ( $Al-Cu-Mg$ ). Άλλες τεχνικές σύνδεσης όπως παλαιότερα με ηλώσεις είτε ακόμα και με συμβατικές μεθόδους συγκολλήσεων, μειονεκτούν είτε ως προς τις μηχανικές ιδιότητες που απαιτεί η κάθε κατασκευή είτε, για το παράδειγμα των συγκολλήσεων, στο κατά πόσο το κράμα το οποίο μας παρέχει τις ιδιότητες που απαιτούνται είναι συγκολλησιμο.

### 1.1.3. Βασικοί όροι για την κατανόηση της διαδικασίας

Παρακάτω παρατίθενται και εξηγούνται οι τεχνικοί όροι, οι οποίοι είναι βασικοί για την κατανόηση της διαδικασίας της συγκόλλησης ανάδευσης με τριβή.

Αρχικά, η ημιπλάκα όπου η φορά περιστροφής είναι ίδια με αυτή της συγκόλλησης ονομάζεται προωθούμενη πλευρά, με την άλλη πλευρά να ορίζεται ως η υποχωρούσα πλευρά.

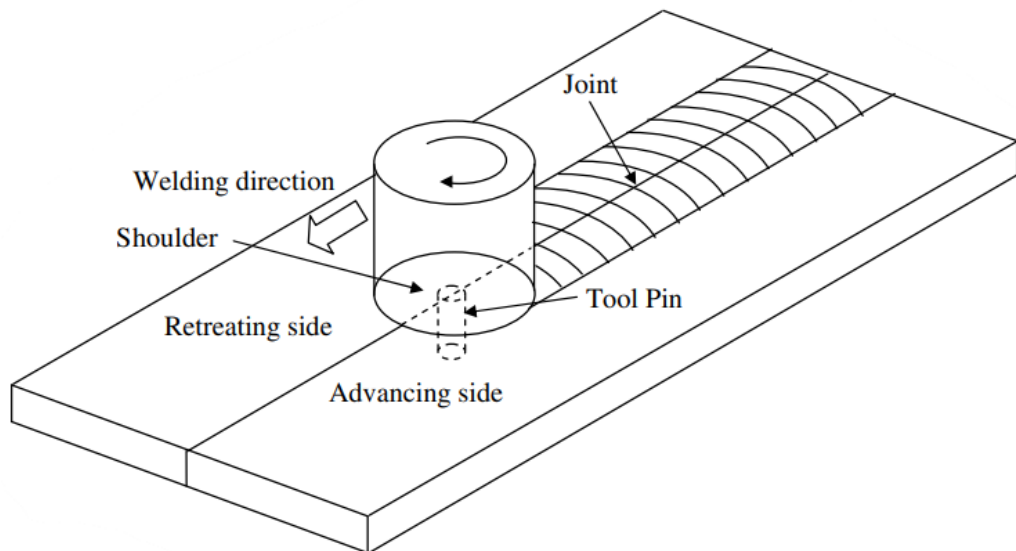
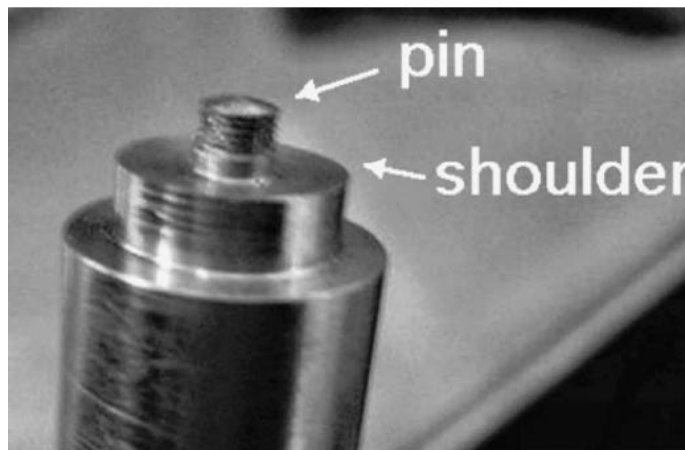


Figure 1:Υποχωρούσα και προωθούμενη πλευρά στην πορεία μιας συγκόλλησης ανάδευσης με τριβή (4)

Στη διαδικασία της συγκόλλησης επίσης θα αναφερθούν αρκετές φορές οι όροι περιαιχένιο του εργαλείου συγκόλλησης (shoulder) και πείρος (pin) όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω. (5)



Εικόνα 1:Τυπικό εργαλείο συγκόλλησης (4)

## 1.2. Διαδικασία συγκόλλησης ανάδευση με τριβή

### 1.2.1. Ανάλυση διαδικασίας συγκόλλησης

Ξεκινώντας , ένα εργαλείο του FSW όπως αναφέρθηκε αποτελείται από το περιαιχένιο και τον πείρο.

Το περιαιχένιο είναι υπεύθυνο για το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμότητας τριβής, καθιστώντας τη σφυρηλάτηση υποχρεωτική για τη σταθεροποίηση συγκόλλησης την ώρα που ο πείρος πραγματοποιεί την «ανάδευση», δηλαδή την πλαστική παραμόρφωση και ροή του υλικού.

Η διαδικασία χωρίζεται σε τέσσερις συνεχόμενες φάσεις :

- Φάση 1η (Βύθιση): Αρχικά το εργαλείο ξεκινάει να περιστρέφεται και βυθίζεται μέσα στις δύο πλάκες προς συγκόλληση. Η φάση αυτή τελειώνει όταν το περιαιχένιο έρχεται σε επαφή με τις πλάκες.
- Φάση 2η (Σταθεροποίηση): Αφού το εργαλείο έρθει σε επαφή με τις πλάκες, αυτό παραμένει στη θέση του περιστρεφόμενο , παράγοντας ενέργεια μέσω της τριβής για ορισμένο χρονικό διάστημα.
- Φάση 3η (Συγκόλληση): Αφού το διάστημα αυτό ολοκληρωθεί το εργαλείο κινείται κατά την γραμμή συγκόλλησης ενώ ταυτόχρονα περιστρέφεται. Η μέγιστη πίεση επαφής μεταξύ αυτού και του υλικού προς συγκόλληση , εφαρμόζεται στο μπροστινό τμήμα του πείρου και στην πίσω επιφάνεια του περιαιχενίου αναπτύσσοντας την απαιτούμενη τριβή και θερμότητα. Το υλικό σε επαφή με το μπροστά τμήμα του πείρου θερμαίνεται και η τάση κατά την ροή μειώνεται. Κατά την συνεχόμενη μετατόπιση του εργαλείου ,θερμό υλικό πιέζεται μεταξύ του μπροστινού τμήματος του πείρου και του ψυχρού υλικού(υψηλής τάσης ροή) στην μπροστινή περιοχή του θερμού υλικού. Το θερμό υλικό εξωθείται γύρω από τις δύο πλευρές του πείρου μέσα στην κοιλότητα που εκκενώνεται από αυτό καθώς αυτό μετακινείται .Το πίσω τμήμα του περιαιχενίου περνάει πάνω από αυτό το εξωθημένο υλικό και το σφυρηλατεί σταθεροποιώντας. Μάλιστα στην περίπτωση λεπτών ελασμάτων αυτή η κοιλότητα γεμίζεται εξ ολοκλήρου λόγω της ανάδευσης που προκαλεί το περιαιχένιο. (6)
- Φάση 4η (Υποχώρηση): Τέλος, όταν ολοκληρωθεί η συγκόλληση το εργαλείο ανασύρεται ,έξω από την συγκόλληση , καθώς περιστρέφεται.

## 1.2.2. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Συγκόλλησης Ανάδευσης με Τριβή

### *Πλεονεκτήματα*

- Το πρώτο και βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα συγκόλλησης μη συγκολλησίμων ή δύσκολων στο να συγκολληθούν, μέχρι πρότινος, κραμάτων, λόγω χαρακτηριστικών της μικροδομής τους. Η λύση βρέθηκε με την συγκόλληση ανάδευσης με τριβή αφού είναι μια στερεή μέθοδος συγκόλλησης και βασίζεται στην πλαστικοποίηση και ταυτόχρονα την ανάδευση του υλικού χωρίς να προκύπτει απαραίτητα χημικός δεσμός.
- Χαμηλότερες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες και παραμένουσες τάσεις σε σχέση με συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης, οδηγούν σε ελαχιστοποίηση διαμηκών και εγκάρσιων παραμορφώσεων ενώ ταυτόχρονα υψηλές μηχανικές ιδιότητες.
- Στην συγκόλληση ανάδευσης δεν υπάρχει καταναλισκόμενο υλικό κατά την συγκόλληση αφού το υλικό βάσης συγκολλείται μέσω της ανάδευσης που προκαλείται από το μη καταναλισκόμενο εργαλείο. Έτσι αντιμετωπίζεται ο περιορισμός που υπήρχε όσον αφορά την ανάγκη εύρεσης συμβατού υλικού πλήρωσης.
- Παρουσιάζει ομοιόμορφη κοκκομετρία, χωρίς πορώδες ή ακαθαρσίες που έχουν τα καταναλισκόμενα υλικά αντίστοιχων μεθόδων.
- Μεγάλη αντοχή σε διάβρωση.
- Είναι ενεργειακά αποδοτική και αρκετά ασφαλής λόγω της απουσίας αερίων που συναντάμε στο μεγαλύτερο ποσοστό των υπόλοιπων μεθόδων.
- Τέλος οι παράμετροι συγκόλλησης, είναι ιδιαίτερα εύκολο να ελεγχθούν και να τροποποιηθούν πριν την συγκόλληση γεγονός που καθιστά την μέθοδο διαχειρίσιμη και της προσφέρει επαναληψιμότητα.

### *Μειονεκτήματα*

- Παρά το γεγονός ότι το υλικό δεν περνάει την θερμοκρασία τήξης του, συμβαίνουν αρκετές σύνθετες θερμομηχανικές αντιδράσεις κατά την συγκόλληση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα δημιουργία ατελειών στην συγκόλληση μας.
- Το γεγονός ότι συνήθως ο συγκολλητής έχει πρόσβαση μόνο σε μια επιφάνεια της συγκόλλησης αφού συγκρατήσει το υλικό, καθιστά δύσκολη την πραγματοποίηση πιο περίπλοκων συναρμογών. Επίσης είναι σημαντικό να συγκρατηθεί σταθερά το υλικό προς συγκόλληση.
- Σε συγκολλήσεις κραμάτων υψηλής αντοχής ο ρυθμός που φθείρεται το εργαλείο είναι υψηλός.
- Συχνά, συνολικά ο χρόνος ολοκλήρωσης της συγκόλλησης σε σχέση με συμβατικές μεθόδους είναι περισσότερος.

### 1.3. Παράμετροι συγκόλλησης

Η ποιότητα της συγκόλλησης ανάδευσης με τριβή ελέγχεται από τις παραμέτρους συγκόλλησης αλλά και την γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης. Το πόσο επηρεάζουν οι παράμετροι τις συγκολλήσεις ερευνάται και για την πληθώρα των κραμάτων αλουμινίου (7) (8), (9), (10), όπως και για συγκολλήσεις μεταξύ διαφορετικών μετάλλων και κραμάτων, (11) (12).

#### 1.3.1. Ταχύτητα Περιστροφής και Ταχύτητα Πρόωσης

Αναλυτικά, αναφέρομαι στις παραμέτρους :ταχύτητα πρόωσης ,με την οποία κινείται το εργαλείο συγκόλλησης ή η τράπεζα της εργαλειομηχανής στην παρούσα διπλωματική εργασία , και ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου. Και οι δύο είναι καθοριστικές καθώς η περιστροφή του εργαλείου έχει ως αποτέλεσμα την ανάδευση και ανάμειξη του υλικού περιμετρικά του πείρου που περιστρέφεται και η μετατόπιση του εργαλείου(ή της τράπεζας στην περίπτωση της φρέζας) μεταφέρει το υλικό που αναδύεται από το μπροστινό προς το πίσω τμήμα του πείρου και ολοκληρώνει τη διαδικασία συγκόλλησης (2).

Έχοντας ένα εργαλείο συγκόλλησης σκοπός είναι να πραγματοποιηθούν συγκολλήσεις ανάδευσης με τριβή με διαφορετικές παραμέτρους και να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Αυτές οι παράμετροι είναι που επηρεάζουν πιο ριζικά το θερμικό κύκλο της συγκόλλησης. Μάλιστα μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι ο συνδυασμός παραμέτρων και ροής υλικού επηρεάζει έντονα την εικόνα της συγκόλλησης (13) , (14).

Πιο συγκεκριμένα, οι σχηματισμοί ατελειών και ασυνεχειών ελέγχονται και περιορίζονται από τις παραπάνω παραμέτρους. Αυτές οι αστοχίες κατά συνέπεια μειώνουν την εφελκυστική αντοχή των συγκολλήσεων . Δηλαδή θα καθορίσουν το κατά πόσο ποιοτικό είναι το αποτέλεσμα που θα έχουμε. Από τη μια όσον αφορά την ταχύτητα πρόωσης ,για υψηλότερες τιμές της , έχουμε χαμηλότερη εισροή θερμότητας ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης . Το γεγονός αυτό προκαλεί έλλειψη ανάδευσης στην περιοχή αυτή άρα χαμηλές τιμές εφελκυστικής αντοχής. Μειώνοντας αντίθετα την ταχύτητα πρόωσης , αυξάνεται η παραγόμενη θερμότητα ενώ ο ρυθμός ψύξης μειώνεται και προκαλείται αύξηση μεγέθους κόκκων (15), (7). Αντίστοιχα αυξάνοντας την περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου αυξάνει την εισροή θερμότητας ,αλλά μειώνεται η ροπή κατά την συγκόλληση (13).

### 1.3.2. Υλικό εργαλείου συγκόλλησης

Το υλικό του εργαλείου είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία καθώς μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της συγκόλλησης λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων της, την ροή θερμότητας, την απόδοση και φθορά του εργαλείου.

Συγκεκριμένα τα υλικά αυτά μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τα υλικά προς συγκόλληση: μαλακά κράματα, όπως αλουμίνιο και μαγνήσιο, και υψηλής αντοχής κράματα, όπως ο χάλυβας και το τιτάνιο. Η φθορά των εργαλείων είναι μια σημαντική ανησυχία για τη διαδικασία συγκόλλησης ανάδευσης με τριβή, ιδιαίτερα για κράματα υψηλής αντοχής.

### 1.3.3. Γεωμετρία εργαλείου συγκόλλησης

Το βασικό κριτήριο για την επιτυχία μιας διαδικασίας είναι η ικανότητα παραγωγής αρκετής θερμότητας ώστε να επιτραπεί η ροή του πλαστικοποιημένου υλικού και στην συνέχεια να επιτευχθεί συγκόλληση.

Ο σχεδιασμός του εργαλείου επηρεάζει την παραγωγή θερμότητας, την πλαστική ροή υλικού, την απαιτούμενη ισχύ και την ομοιομορφία των συγκολλημένων επιφανειών.

Αναφερόμενοι στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου εννοούμε διαστάσεις, το μήκος του πείρου, τη διάμετρο του πείρου και τη διάμετρο του περιαιχενίου.

Αυτές οι διαστάσεις είναι βασικές καθώς το μήκος του πείρου για μια δεδομένη συγκόλληση θα πρέπει να αντιστοιχεί στο πάχος του υλικού προς συγκόλληση αλλά και η κλίση του εργαλείου (εάν υπάρχει) ή το επιθυμητό διάκενο μεταξύ των άκρων του πείρου και του πίσω τμήματος.

Όσον αφορά τη διάμετρό του πείρου, θα πρέπει να υπολογισθεί με αντιστάθμιση καθώς μεγαλύτερη διάμετρος αντιστέκεται στα εγκάρσια φορτία κατά τη διάρκεια της διαδικασίας άρα αποφεύγεται πιο εύκολα η θραύση του. Από την άλλη, μια μικρότερη διάμετρος βελτιώνει την στερεοποίηση του υλικού βάσης πίσω από το εργαλείο πριν την ψύξη. Η επιλογή γεωμετρίας του περιαιχενίου από την άλλη έχει ζωτική αξία για το θερμικό πεδίο και την ροή υλικού γύρω από το εργαλείο κατά την συγκόλληση, συμβάλλοντας έτσι στην εικόνα της συγκόλλησης σε επίπεδο μικροδομής και στα χαρακτηριστικά αυτής.

### 1.3.3.1. Γεωμετρία περιαιχηνίου και Χαρακτηριστικά του

Νέα χαρακτηριστικά και γεωμετρίες περιαιχηνίου αναπτύσσονται με στόχο την ενίσχυση της ροής του υλικού και τον περιορισμό του.

Η εξωτερική επιφάνεια του συνήθως είναι είτε κυλινδρική είτε κωνική. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη εξωτερική επιφάνεια είναι κυλινδρική λόγω του συνήθως μικρού βάθους βύθισης .

Η επίπεδη επιφάνεια του περιαιχηνίου ήταν η πρώτη και απλούστερη γεωμετρία που σχεδιάστηκε. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι αυτός ο σχεδιασμός είχε κάποιες αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα των συγκολλήσεων, λόγω της ανικανότητάς του να περικλείει και να συγκρατεί το υλικό που ρέει κάτω από το περιαιχένιο. Στην συνέχεια εξελίσσοντας την γεωμετρία, σχεδιάστηκε η κοίλη επιφάνεια βελτιώνοντας ακριβώς το μειονέκτημα που είχε η επίπεδη.

Σκοπός του σχεδιασμού αυτού ήταν να λειτουργεί ως "δεξαμενή" για το εκτοπισμένο υλικό από τον πείρο και καθώς το εργαλείο προχωρά, νέο υλικό αντικαθιστά το ήδη υπάρχον ωθώντας το πίσω από τον πείρο. Αντίστοιχα υπάρχει και ο κυρτός σχεδιασμός περιαιχηνίου.

Εκτός από την τροποποίηση ολόκληρου του σχεδιασμού του μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιφανειακά χαρακτηριστικά του που έχουν αντίκτυπο στο υλικό βάσης. Τα πιο διαδεδομένα περιλαμβάνουν κυλίνδρους, αιχμές, αυλακώσεις, μεταξύ άλλων, όπως φαίνεται και παρακάτω .

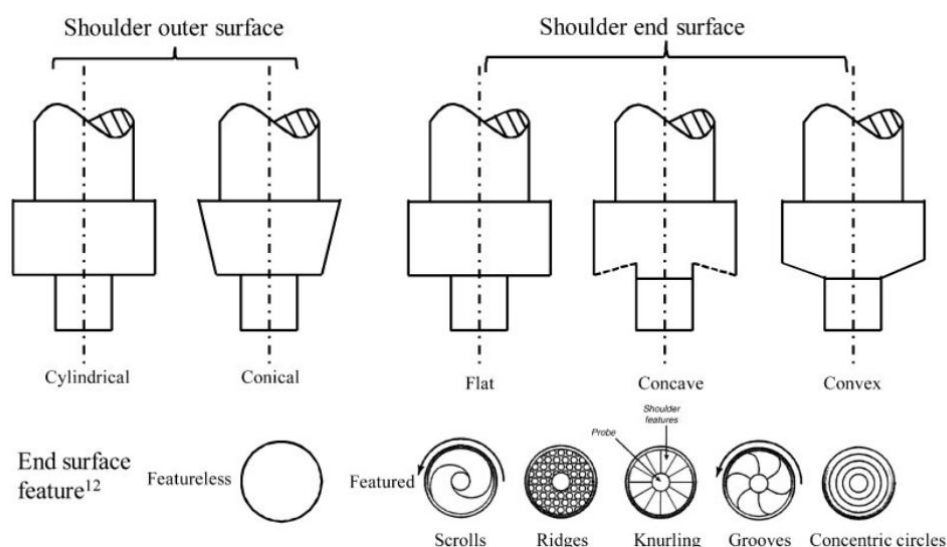


Figure 2:Συνηθισμένα σχήματα και προφίλ περιαιχηνίου



Πιο ευρέως χρησιμοποιημένοι οι κυλίομενου προφίλ. Σκοπός του είναι να μεγιστοποιήσει τον περιορισμό υλικού γύρω από την άκρη του περιαιχενίου κατά την περιστροφή του εργαλείου, επωφελούμενο από την εξάλειψη της χρήσης εργαλείου με κλίση. Τα υπόλοιπα προφίλ σχεδιάστηκαν ανάλογα με τη ροή απαιτείται στο υλικό κατά την συγκόλληση και τα κράματα προς συγκόλληση.

### 1.3.3.2. Γεωμετρία πείρου και Χαρακτηριστικά του

Όπως προαναφέρθηκε ο πείρος αποτελεί ένα από τα δύο βασικά χαρακτηριστικά του εργαλείου. Ρόλος του είναι η διάτμηση το υλικού βάσης μπροστά από το εργαλείο και η μετακίνηση του πίσω από το εργαλείο, παράγοντας ταυτόχρονα παραμορφωτική και θέρμανση τριβής στις προς συγκόλληση επιφάνειες.

Ο ορισμός της ταχύτητας πρόωσης, η έκταση της παραμόρφωσης και η μικροδομή των συγκολλήσεων που θα προκύψει εξαρτώνται από τον σχεδιασμό του πείρου (1), (2) Παρακάτω φαίνονται μερικοί από τις πιο συνηθισμένους σχεδιασμούς πείρων.

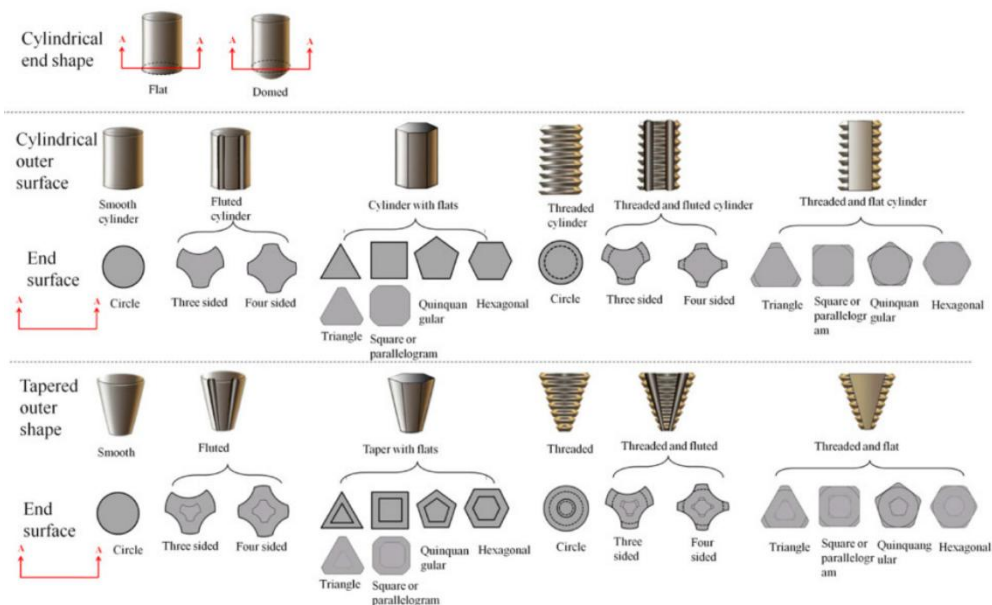


Figure 3: Συνηθισμένα σχήματα και προφίλ πείρου (16)

Οι πείροι σε σχήμα επίπεδου άκρου χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο λόγω της εύκολης κατεργασίας τους. Ωστόσο όπως καταλήγει και η έρευνα (17) ο κυλινδρικός αυτός σχεδιασμός ωθούσε ακόμα περισσότερο υλικό πάνω, προς την περιφέρεια του περιαιχενίου και εξωτερικά αυτού, ένα πρόβλημα που έχει ήδη προαναφερθεί ως

αποτέλεσμα της χρήσης κυλινδρικού περιαιχενίου. Και οι δύο ενέργειες συντελούν στην δημιουργία ατελειών εντός της συγκόλλησης, αποτέλεσμα που μπορεί να αποφευχθεί με την χρήση τριγωνικού πείρου. Από την άλλη πλευρά οι πείροι σε σχήμα θόλου είναι ικανοί να μειώσουν δραστικά τη φθορά του εργαλείου κατά τη βύθιση μειώνοντας την τοπικά συγκεντρωμένη καταπόνηση, αλλά και να βελτιώσουν τη συγκόλληση ως την βάση της (1). Ακόμα, ο τριγωνικός πείρος έχει τις μικρότερες τιμές θερμικής ροής εργαλείου άρα διευκολύνει την υψηλή μεταφορά θερμότητας στο υλικό βάσης και περιορίζει τις ατέλειες (17), (18).

Εξωτερικά η επιφάνεια του μπορεί να είναι είτε κυλινδρική είτε κωνική με διάφορα ξεχωριστά χαρακτηριστικά, που αναπτύχθηκαν λόγω της ανάγκης μείωσης εγκάρσιων φορτίων. Αυτή η διαφοροποίηση αποτέλεσε πρωτοποριακό τρόπο πρόληψης θραύσης του εργαλείου κατά τη συγκόλληση με υλικό βάσης από κράμα υψηλότερης αντοχής.

Τα σπειρώματα ως χαρακτηριστικό του πείρου είναι το πιο διαδεδομένο στις μέρες μας. Αναλύοντας χρησιμοποιούνται σπειρώματα με αντίθετη φορά από αυτή που περιστρέφεται το εργαλείο για να επιτρέψει στο υλικό να μεταφερθεί μέσω του σπειρώματος από το περιαιχένιο προς τα κάτω στο άκρο του πείρου. Αντί να εναποθέτει απλά το υλικό κατευθείαν το μετακινεί γύρω από το εργαλείο, ενισχύοντας την ανάδευση του υλικού, διευκολύνοντας το κλείσιμο των κενών και εντείνοντας την διάσπαση του οξειδίου. Στην θέση του σπειρώματος, οι κωνικοί πείροι μπορούν να φέρουν ένα βαθμιδωτό σπειροειδές προφίλ, ανεπτυγμένο για κράματα υψηλής αντοχής καλύπτοντας το μειονέκτημα των χωρίς σπείρωμα πείρων που δεν μπορούσαν να εγγυηθούν αρκετή ροή υλικού.

#### **1.3.4. Γωνία κλίσης εργαλείου**

Σημαντική παράμετρος είναι και η γωνία κλίσης του εργαλείου ή του άξονα ως προς την επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας. Κατάλληλη κλίση της ατράκτου προς την κατεύθυνση προς την αρχή της συγκόλλησης εξασφαλίζει ότι το περιαιχένιο του εργαλείου συγκρατεί το αναδυόμενο υλικό και το μετακινεί από το μπροστινό προς το πίσω μέρος του πείρου.

#### **1.3.5. Βάθος βύθισης**

Το βάθος στο οποίο εισέρχεται ο πείρος στο μέταλλο βάσης είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για την παραγωγή συγκολλήσεων με εργαλείο που διαθέτει ίσιο περιαιχένιο. Όπως γίνεται κατανοητό σχετίζεται άμεσα με το ύψος του πείρου. Όταν το βάθος αυτό είναι μικρό, το περιαιχένιο του εργαλείου δεν έρχεται σε επαφή με την αρχική επιφάνεια του μετάλλου βάσης. Κατά αυτό τον τρόπο, ακυρώνεται ο σημαντικός ρόλος του περιαιχενίου διότι δεν μπορεί να μετακινήσει αποτελεσματικά το αναδυόμενο υλικό από το μπροστινό προς το πίσω μέρος του πείρου, δημιουργώντας έτσι αστοχίες στην

συγκόλληση και συγκεκριμένα εσωτερικά κανάλια στην συγκόλληση. Αυξάνοντας , αντίθετα, το βάθος το περιουχένιο βυθίζεται υπερβολικά οδηγώντας σε μια σημαντικά κοίλη συγκόλληση και τοπική εκλέπτυνση των συγκολλημένων πλακών λόγω της αυξημένης πίεσης που ασκείται.

### 1.3.6. Προθέρμανση

Η προθέρμανση ή η ψύξη μπορεί επίσης να είναι σημαντικές για συγκεκριμένες συγκολλήσεις. Για υλικά με υψηλό σημείο τήξης όπως χάλυβας και τιτάνιο ή υψηλής αγωγιμότητας όπως ο χαλκός, η θερμότητα που παράγεται από την τριβή και την ανάδευση μπορεί να μην επαρκούν για να μαλακώσουν και να επιφέρουν στο υλικό πλαστική παραμόρφωση γύρω από το περιστρεφόμενο εργαλείο. Αυτό θα προκαλούσε προβλήματα και ατέλειες στις συγκολλήσεις τέτοιων μετάλλων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, προθέρμανση ή επιπλέον εξωτερική πηγή θέρμανσης βοηθά τη ροή του υλικού .

Αντίθετα σε υλικά με χαμηλότερο σημείο τήξης όπως αλουμίνιο και μαγνήσιο, η ψύξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λύση για μείωση εκτεταμένης ανάπτυξης ανακρυσταλλωμένων κόκκων και διάλυση ιζημάτων μέσα και γύρω από την αναδύομενη ζώνη (2). Δύο παράμετροι λοιπόν που μπορεί να μην είναι όσο δραστικοί όσο οι ταχύτητες πρόωσης και περιστροφής αλλά παραμένουν να είναι αποτρεπτικές και χρήσιμες στην αποφυγή ή έστω περιορισμό χαρακτηριστικών στις συγκολλήσεις μας.

### 1.4. Χρήση φρέζας για συγκόλληση ανάδευσης με τριβή

Η παραπάνω διαδικασία έχει εφαρμοστεί εναλλακτικά και με τη χρήση συμβατικών ή και CNC φρεζών με έρευνες να γίνονται και σε αυτές τις περιπτώσεις για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας μέσω επιλογής παραμέτρων (19), (10). Ακόμα σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι έχουν γίνει προσπάθειες να σχεδιαστούν διατάξεις και τρόποι συγκράτησης που να εφαρμόζονται εξ ολοκλήρου από κάθετες συμβατικές και CNC φρέζες όπως αυτή της έρευνας (20).

Το εργαλείο κινείται στον άξονα z της φρέζας. Η συγκεκριμένη κίνηση μετατρέπεται στην απαιτούμενη κάθετη δύναμη πάνω στο υλικό βάσης . Η εγκάρσια πρόωση δίδεται στην τράπεζα της φρέζας, στους άξονες x και y. Αρχικά το εργαλείο συγκόλλησης τοποθετείται πάνω στην σύνδεση των δύο πλακών του υλικού βάσης. Το εργαλείο στην συνέχεια κατεβαίνει σε συγκεκριμένο βάθος , που έχει ορισθεί . Έχει δοθεί συγκεκριμένος χρόνος για την παραγωγή θερμότητας πριν προχωρήσει η διαδικασία στην κίνηση της τράπεζας . Αφού περάσουν τα δευτερόλεπτα αυτά δίνεται μέσω του άξονα y κίνηση στην τράπεζα με ταχύτητα την ταχύτητα πρόωσης που έχει ορισθεί ως παράμετρος. Αφού ολοκληρωθεί η συγκόλληση στο απαιτούμενο μήκος , το εργαλείο αποσύρεται από τις συγκολλημένες πλάκες.

Όλες οι παράμετροι συγκόλλησης στην περίπτωση της CNC φρέζας ορίζονται με την μορφή κώδικα στο πρόγραμμα που εκτελείται για να πραγματοποιηθεί η κατεργασία.

## 1.5. Μικροδομή

Κατά την διάρκεια που εκτελείται μια συγκόλληση ανάδευσης με τριβή, στην αναδύομενη ζώνη των πλακών, αναπτύσσονται έντονες πλαστικές παραμορφώσεις και υψηλές θερμοκρασίες. Οι αλλαγές και η ποικιλομορφία στην δομή της συγκόλλησης σε σχέση με το μέταλλο βάσης έχουν σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες μετά τη συγκόλληση. Ενδιαφέρον λοιπόν αποτελεί το πως επηρεάζεται η μικροδομή του μετάλλου βάσης και πως διαμορφώνεται μετά την συγκόλληση. Είτε ως αποτέλεσμα του συνδυασμού των παραμέτρων συγκόλλησης σε συνδέσεις όμοιων μετάλλων βάσης (21), είτε σε συγκολλήσεις ανόμοιων μετάλλων (11) συνεχίζει να είναι βασικό κριτήριο για την ποιότητα μιας συγκόλλησης.

### 1.5.1. Ζώνη Ψήγματος

Η έντονη πλαστική παραμόρφωση και η θέρμανση με τριβή κατά την διαδικασία συντελεί στην ανακρυσταλλωμένη λεπτόκοκκη μικροδομή εντός της ζώνης ανάδευσης. Αυτή η περιοχή ονομάζεται ζώνη ψήγματος ή ψήγμα. Χαρακτηρίζεται από ανακρυσταλλωμένους κόκκους τις περισσότερες φορές. Ωστόσο οι λεπτοί ανακρυσταλλωμένοι κόκκοι της ζώνης ψήγματος περιέχουν υψηλή πυκνότητα υποσυνόρων, υποκόκκων και εξαρθρώσεων. Η διεπαφή μεταξύ της ανακρυσταλλωμένης ζώνης ψήγματος και του μετάλλου βάσης είναι σχετικά διάχυτη στην υποχωρούσα πλευρά, ενώ αρκετά αιχμηρά στην προωθούμενη πλευρά του εργαλείου. Το σχήμα της ζώνης ψήγματος μεταβάλλεται ανάλογα με τις παραμέτρους επεξεργασίας, τη γεωμετρία του εργαλείου, τη θερμοκρασία του τεμαχίου εργασίας και τη θερμική χωρίζοντας το σε δύο βασικές κατηγορίες. Τις ζώνες με σχήμα λεκάνης και εκείνες με ελλειπτικό σχήμα.

Η διαφοροποίηση αυτή όπως και η άμεση εξάρτηση του σχήματος της ζώνης από τις παραμέτρους ταχύτητας πρόωσης και ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου αποτελεί σκοπό πολλών ερευνών (14), (15).

Σε επίπεδο μικροδομής, είναι γνωστό ότι η δυναμική ανακρυστάλλωση κατά την συγκόλληση ανάδευσης δημιουργεί λεπτούς και ισοαξονικούς κόκκους στη ζώνη ψήγματος (11), (22), (23), ενώ παράμετροι και συνθήκες πραγματοποίησης της συγκόλλησης ασκούν σημαντική επίδραση στο μέγεθος των ανακρυσταλλωμένων κόκκων. Όσον αφορά το μέγεθος κόκκου εντός της ζώνης συγκόλλησης, αυτό τείνει να αυξάνεται

κοντά στην κορυφή της ζώνης συγκόλλησης και να μειώνεται γύρω από την κεντρική γραμμή της ζώνης συγκόλλησης.

Το μέσο μέγεθος κόκκου κυμαίνεται από 3.2 mm στο κάτω μέρος έως 5.3 mm στο επάνω μέρος. Αντίστοιχα 3.5 mm από την υποχωρούσα πλευρά έως 5.1 mm από την προωθούμενη. Ως γνωστόν το κάτω μέρος του μετάλλου βάσης έρχεται σε επαφή με την πλάκα στήριξης, επομένως η μέγιστη θερμοκρασία είναι χαμηλότερη και ο θερμικός κύκλος είναι μικρότερος σε σύγκριση με το άνω τμήμα του ψήγματος (2). Έτσι επιβραδύνεται η ανάπτυξη των κόκκων και οδηγούμαστε σε μικρότερους ανακρυσταλλωμένους κόκκους σε εκείνο το τμήμα .

Συμπερασματικά αυξάνοντας το πάχος της πλάκας συγκράτησης , η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του κάτω και του πάνω μέρους του τεμαχίου συγκόλλησης αυξάνεται, αυξάνοντας και τη διαφορά μεταξύ του μεγέθους κόκκων στις δύο περιοχές.

### **1.5.2. Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη**

Η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη εμφανίζεται μεταξύ του υλικού βάσης και της ζώνης ψήγματος. Η ζώνη αυτή επηρεάζεται τόσο θερμοκρασία όσο και σε επίπεδο παραμόρφωσης κατά την συγκόλληση, συνεπώς χαρακτηρίζεται από μια εξαιρετικά παραμορφωμένη δομή. Οι επιμήκεις κόκκοι του μετάλλου βάσης παραμορφώνονται με ανοδική ροή γύρω από τη ζώνη ψήγματος. Λόγω ανεπαρκούς παραμόρφωσης ,αν και η ζώνη υπέστη πλαστική παραμόρφωση, η ανακρυστάλλωση δεν συμβαίνει σε αυτή τη ζώνη.

Τα επίπεδα σκληρότητας θα είναι τα χαμηλότερα εσωτερικά της περιοχής καθώς δεν υπάρχει ακόμη σκλήρυνση, και το μέγεθος των κόκκων είναι χονδροειδές (23). Τέλος οι κόκκοι στην περιοχή αυτή περιέχουν συνήθως υψηλή πυκνότητα υποορίων (2).

### **1.5.3. Θερμικά επηρεασμένη ζώνη**

Η ζώνη αυτή ενώ επηρεάζεται προφανώς θερμικά άρα πραγματοποιεί έναν θερμικό κύκλο, δεν υφίσταται καμία πλαστική παραμόρφωση . Ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι ότι η περιοχή διατηρεί την ίδια δομή κόκκων με το υλικό βάσης . Λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας των κραμάτων αλουμινίου η ζώνη αυτή είναι πιο πλατειά από εκείνες συγκολλήσεων άλλων μετάλλων. Όπως και στην έρευνα (21), έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει ελάχιστη διάλυση των ιζημάτων στην περιοχή κατά τη συγκόλληση ενώ η μορφή των ιζημάτων είναι χονδροειδής όπως στο μέταλλο βάσης. Η θερμοκρασία επεξεργασίας της ζώνης εκτιμάται στην περιοχή του 543–663 K, που είναι κοντά στη θερμοκρασία διάλυσης ή τράχυνσης των ιζημάτων.

Τέλος προσελκύει μεγάλο ενδιαφέρον η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη λόγω μεγάλων διακυμάνσεων σε παραμένουσες τάσεις, σκληρότητα και μικροδομή. Όπως

συγκεκριμένα αναφέρεται σε αντίστοιχη έρευνα για την εξέλιξη ρωγμών στις συγκολλήσεις ανάδευσης (23), στην ζώνη αυτή μπορεί οι παραμένουσες τάσεις να είναι χαμηλές, αλλά θα είναι συμπιεστικές για να εξισορροπούν τις εφελκυστικές τάσεις κοντά στη συγκόλληση ενώ η δευτερεύουσα σκλήρυνση θα προκαλέσει τοπικά μέγιστα στη σκληρότητα.

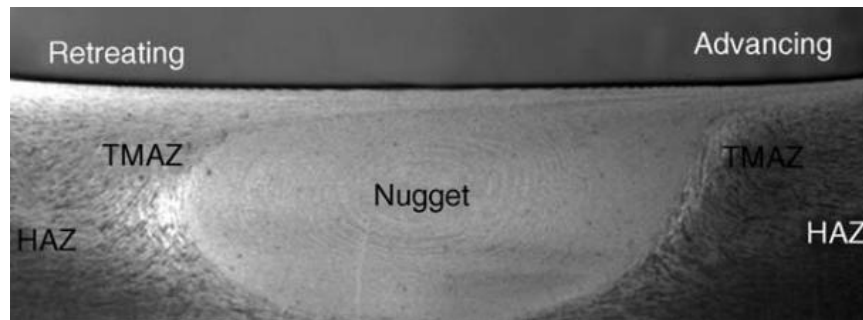


Figure 4:Τυπική μακρογραφία που απεικονίζει διάφορες μικροδομικές ζώνες (Nugget:ψήγμα, TMAZ :θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, HAZ:θερμικά επηρεασμένη ζώνη, Retreating :υποχωρούσα πλευρά, Advancing :προωθούμενη πλευρά) (1)

## 1.6. Εισαγωγή στην δυναμική ανακρυστάλλωση

Κατά τη διάρκεια διαφορετικών θερμομηχανικών επεξεργασιών μεταλλικών υλικών λαμβάνουν χώρα φαινόμενα δυναμικής ανακρυστάλλωσης .

Η ανακρυστάλλωση και σχετικά φαινόμενα ανόπτησης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την τελική μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων .

Η έρευνα (24) έχει μελετήσει και αναλύσει τους διαφορετικούς τύπους δυναμικής ανακρυστάλλωσης που παρατηρούνται για ένα πλήθος κραμάτων. Αναφέρει ότι αστοχίες όπως εξαρθρώσεις και διεπιφάνειες αυξάνονται κατά την παραμόρφωση που καθιστά το υλικό θερμοδυναμικά ασταθές, επομένως παραμορφώνοντας μέταλλο σε υψηλές θερμοκρασίες, οι θερμικά ενεργοποιημένες διεργασίες τείνουν να προσπαθήσουν να αποτρέψουν αυτές τις αστοχίες προκειμένου να μειωθεί συνολικά η ελεύθερη ενέργεια του συστήματος . Η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες τείνουν να επανέλθουν μερικώς στις αρχικές τους τιμές πριν η παραμόρφωσης λόγω επαναφοράς μέσω εξαΰλωσης και αναδιάταξης των εξαρθρώσεων.

### 1.6.1. Ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση

Συνήθως παρατηρείται κατά τη διάρκεια θερμής παραμόρφωσης σε κράματα χαμηλής έως μέσης συσσωρευμένης ελαττωματικής ενέργειας. Τα κράματα που παρουσιάζουν αυτή την ανακρυστάλλωση έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Γίνεται επίτευξη μιας κρίσιμης τάσης μικρότερη της μέγιστης πριν εμφανιστεί η ασυνεχής ανακρυστάλλωση.

Στο διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης ενδεχομένως να εμφανιστούν ένα ή περισσότερα τοπικά μέγιστα ανάλογα με την θερμοκρασία παραμόρφωσης και το αρχικό μέγεθος κόκκου.

Αρχικά οι πυρήνες αυτής της ανακρυστάλωσης σχηματίζονται σε ήδη προϋπάρχοντα όρια κόκκων ενώ όταν έχει ήδη οδηγήσει σε αναδόμηση των αρχικών κόκκων σχηματίζεται μια ιδιαίτερη δομή από ισοαξονικούς κόκκους μια κατάσταση η οποία έχει αναλυθεί στην έρευνα (25). Μειώνοντας το μέγεθος των αρχικών κόκκων ή του ρυθμού παραμόρφωσης, ή αντίθετα αυξάνοντας την θερμοκρασία παραμόρφωσης αυξάνεται η κινηματική της ανακρυστάλλωσης. Τέλος κατά την ασυνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση, το μέγεθος των κόκκων εξελίσσεται προς μια συγκεκριμένη τιμή κορεσμού και δεν αλλάζει στην εξέλιξη της ανακρυστάλλωσης.

### **1.6.2. Συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση**

Όταν η μικροδομή εξελίσσεται με σχετικά ομοιογενή τρόπο σε όλο το υλικό, χωρίς αναγνωρίσιμο πυρήνα και ανάπτυξη των ανακρυσταλλωμένων κόκκων έχουμε συνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση. Τα κοινά χαρακτηριστικά των κραμάτων που παρουσιάζουν αυτού του είδους ανακρυστάλλωση αναφέρονται παρακάτω.

Αρχικά σε αντίθεση με την ασυνεχή, σε αυτή την περίπτωση στο διάγραμμα εφελκυσμού σε κράματα αλουμινίου και μαγνησίου παρουσιάζεται ένα μέγιστο ενώ σε κράματα χάλυβα και χαλκού δεν παρατηρείται ξεκάθαρα μέγιστη τιμή. Επίσης σε μεγάλες τιμές παραμόρφωσης επιτυγχάνεται μια σταθερή τιμή τάσης η οποία αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας παραμόρφωσης. Μέσες τιμές παραμόρφωσης προκαλούν αποπροσανατολισμό των ορίων των κόκκων.

Επιπλέον στα αρχικά στάδια της παραμόρφωσης, η υποδιαίρεση των κόκκων κατά τη διάρκεια της θερμής παραμόρφωσης επηρεάζεται ιδιαίτερα από τον προσανατολισμό των κόκκων. Το μέσο μέγεθος του κρυσταλλίτη μειώνεται με την παραμόρφωση και φτάνει σε «σταθερή τιμή» σε μεγάλες παραμορφώσεις ενώ ορισμένοι αρχικοί κόκκοι παραμένουν στο ίδιο μέγεθος ακόμη και σε μεγάλες παραμορφώσεις. Τέλος σχηματίζεται μια ισχυρή κρυσταλλογραφικά υφή για μεγάλες τιμές παραμόρφωσης.

### 1.6.3 Γεωμετρικά Δυναμική ανακρυστάλλωση

Η ιδέα ξεκίνησε τη δεκαετία του 1980 από τον McQueen και τους συνεργάτες του στην οποία σχηματίζεται μια νέα δομή κόκκων ως αποτέλεσμα της αλλαγής γεωμετρίας των κόκκων κατά την παραμόρφωση. Συνεπώς η παραγωγή υλικών με λεπτούς κόκκους μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνικές όπως η έλαση μέσω γεωμετρικά δυναμικής ανακρυστάλλωσης.

Αυτή η μορφή παρατηρείται κυρίως σε υλικά με υψηλά ποσοστά συσσωρευμένης ελαττωματικής ενέργειας παραμορφωμένα σε υψηλές θερμοκρασίες με χαμηλά ποσοστά παραμόρφωσης .

Όσον αφορά την καμπύλη εφελκυσμού, η τάση αρχικά αυξάνεται έως ένα σχετικά ευρύ μέγιστο, στη συνέχεια μειώνεται αργά, πιθανώς λόγω της μείωσης της σκληρότητας της υφής οδηγώντας τελικά σε μια σταθερή κατάσταση στις μεγάλες παραμορφώσεις.

Οι υπόκοκκοι που σχηματίζονται μετά από μια κρίσιμη παραμόρφωση παραμένουν περίπου ισοαξονικοί και σταθερό σε μέγεθος. Ο εσφαλμένος προσανατολισμός των υποκόκκων και συγκεκριμένα η γωνία των ορίων σχηματίζεται από την αντίδραση εξάρθρωσης. Παρατηρείται επίσης θραύση των ορίων κόκκων υψηλών γωνιών.

Σε επίπεδα κρυσταλλογραφικής υφής, η υφή ανακρυστάλλωσης παραμένει σε μεγάλο βαθμό αμετάβλητη. Για παράδειγμα διατηρεί ισχυρή υφή έλασης κατά τη διάρκεια της θερμής έλασης. Η μείωση σκληρότητας της υφής ωστόσο θεωρείται υπεύθυνη για τη μείωση της τάσης μετά το πρώτο μέγιστο στην καμπύλη του εφελκυσμού.

Τέλος για την επίδραση διαλυμένων και λεπτών σωματιδίων, όταν διαλυμένα σωματίδια εμπλέκονται, η κρίσιμη παραμόρφωση για τον σχηματισμό υποκόκκων αυξάνεται αλλά το μέγεθος υποκόκκου σταθερής κατάστασης μειώνεται που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι απαιτείται μεγάλη παραμόρφωση για να επιτευχθεί μια πλήρης γεωμετρικά δυναμική ανακρυστάλλωση.



### 1.7. Προβλήματα και δυσκολίες κατά την συγκόλληση ανάδευσης με τριβή

Τα συχνότερα μα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζονται σε μια συγκόλληση ανάδευσης με τριβή μπορεί να φαντάζουν απλά αλλά παραμένουν σύνθετα αν εξετάσουμε τον τρόπο που πρέπει να μελετηθούν ώστε να αποφευχθούν και στο μεγάλο ποσοστό που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της συγκόλλησης.

Η ανάγκη για εξασφάλιση άκαμπτης στήριξης των πλακών και γενικά για στερέωση σε όλες τις κατευθύνσεις όσων τεμαχίων χρησιμοποιούνται στην πειραματική διάταξη περιορίζουν τις επιλογές του πειραματιστή. Για να είναι κανείς σε θέση να εξετάζει την ποιότητα της συγκόλλησης , δηλαδή τις μηχανικές της ιδιότητες, την εικόνα της, την μικροδομή της αλλά κυρίως την επαναληψιμότητά της θα πρέπει να έχει εξασφαλισθεί ότι οι συνθήκες συγκράτησης είναι ίδιες.

Η αραίωση της συγκόλλησης που προκαλείται από το βάθος βύθισης του περιαιχενίου είναι καθοριστική για την συγκόλληση καθώς προκαλεί συχνά παραμένουσες τάσεις .

Λανθασμένες επιλογές γεωμετρίας εργαλείου ή παραμέτρων προκαλούν αστοχίες στις συγκολλήσεις και μείωση στις μηχανικές τους ιδιότητες (26). Όλα έχουν προαναφερθεί είτε απλά ως τμήμα της διαδικασίας είτε ως παράμετροι συγκόλλησης παρόλα αυτά όπως φαίνεται και από τα παραπάνω δεν πρέπει να αντιμετωπιστούν επιπόλαια καθώς είναι ιδιαίτερα κρίσιμα.

## 1.8. Ατέλειες Συγκόλλησης Κραμάτων Αλουμινίου

Στην συγκόλληση ανάδευσης με τριβή, πολλές θερμοδυναμικές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις λαμβάνουν χώρα στιγμιαία. Διαφορετικοί ρυθμοί θέρμανσης, ψύξης, πλαστικές παραμορφώσεις και φυσική ροή του υλικού βάσεις είναι κάποια από τα βασικά φαινόμενα που παρατηρούνται.

Παρόλο που το υλικό βάσης δεν περνάει την θερμοκρασία τήξης και αναφερόμαστε σε στερεά μορφή συγκόλλησης, η θερμότητα που παράγεται δημιουργεί συνθήκες που προκαλούν αλλαγές στην μικροδομή του υλικού, όπως ανακρυστάλλωση, διαμόρφωση των κόκκων, κατακρήμνιση και διάλυση ιζήματος. Αυτοί οι παράγοντες είναι κάποιοι από τις αιτίες που ανάλογα και με τις συνθήκες οδηγούν σε ατέλειες των συγκολλήσεων όπως αναφέρονται στην συνέχεια.

- Σχηματισμός μικροδομής δακτυλίου (onion ring):

Παρατηρούνται σε μορφή στρωμάτων στην ζώνη ψήγματος. Διαθέτουν έντονα σκοτεινά και φωτεινά στρώματα ενώ η απόσταση μεταξύ των στρωμάτων είναι ίση με την πρόωση του εργαλείου σε μια περιστροφή.

- Σχηματισμός ατέλειας τούνελ (tunnel defect):

Παρατηρείται όταν οι παράμετροι συγκόλλησης (περιστροφική ταχύτητα, πρόωση) αποτυγχάνουν να παράξουν την απαιτούμενη θερμότητα για την συγκόλληση. Έτσι ανεπαρκής ποσότητα υλικού αναμιγνύεται και αναδεύεται με αποτέλεσμα να σχηματίζει αυτές τις ατέλειες.

- Σχηματισμός ατέλειας εκτοπισμένου υλικού-γρεζιού (flash defect):

Καθώς το υλικό συγκολλείται, λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας κατά την περιστροφική κίνηση του εργαλείου, αυτό μαλακώνει περιμετρικά του περιαιχηνίου του εργαλείου. Έτσι απομακρύνει μεγάλη ποσότητα υλικού στη μορφή γρεζιού. Κυρίως εξαρτάται από την επιλογή γεωμετρίας εργαλείου και την άσκηση πίεσης του περιαιχηνίου στο υλικό βάσης.

- Ατέλεια τύπου "φιλιού" (kissing bond defect):

Σε μεγάλες ταχύτητες πρόωσης ή μικρές ταχύτητες περιστροφής, παρατηρούμε ανεπαρκή ανάδευση και κατά συνέπεια, μερικής θραύση του φυσικού  $Al_2O_3$  και χαμηλή εισροή θερμότητας. Έτσι, αυτά τα σωματίδια μετά την θραύση έχουν την μορφή σκοτεινής κυματιστής γραμμής.

- Σχηματισμός ρωγμών στην βάση της συγκόλλησης (crack-like root defect):

Όταν το βάθος βύθισης είναι ανεπαρκές μπορεί να σχηματιστεί μια αυλάκωση στην προωθούμενη πλευρά. Όταν ο πείρος είναι μικρότερο μήκος από όσο θα έπρεπε για το αντίστοιχο πάχος υλικού βάσης, μεγάλες αυλακώσεις στην βάση παρατηρούνται στην προωθούμενη πλευρά. Επίσης ακραία μεγάλες και μικρές γωνίες εργαλείου συμβάλουν στον σχηματισμό ατελειών βάσης.

- Σχηματισμός κενών (voids):

Συχνό φαινόμενο, επηρεάζεται έντονα μέσω της ρευστοδυναμικής που σχετίζεται με την πλαστική παραμόρφωση στη ζώνη ψήγματος. Πολύ υψηλές ταχύτητες πρόωσης οδηγούν στον σχηματισμό κενών κάτω από την επιφάνεια της συγκόλλησης ή στην προωθούμενη πλευρά εφαπτομενικά στην ζώνη ψήγματος.

## **1.9. Τρόποι βελτίωσης της αντοχής της συγκόλλησης**

### **1.9.1. Σημείο χαμηλότερης αντοχής της συγκόλλησης**

Πρακτικά, από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που μπορούμε να βελτιώσουμε είναι να μεγιστοποιήσουμε την εφελκυστική αντοχή του σημείου της συγκόλλησης με την χαμηλότερη αντοχή. Στην ζώνη ψήγματος που δέχεται και την μεγαλύτερη παραμόρφωση, υπάρχει σημαντική ανάκτηση αντοχής λόγω της επανακατακρύμνησης των φάσεων χαμηλής θερμοκρασίας (27).

Το σημείο που αναφέρθηκε νωρίτερα είναι σχεδόν πάντα εφαπτόμενο της ζώνης ψήγματος εκεί όπου οι κατακρημνίσεις έχουν σταθεροποιηθεί και χονδροποιηθεί επομένως συμβάλλουν ελάχιστα στην αντοχή και ταυτόχρονα εμποδίζουν λόγω του όγκου τους την ανάκτηση αντοχής από επανακατακρύμνηση.

Ένας τρόπος λοιπόν να επιτευχθεί η ενίσχυση της αντοχής είναι μέσω του ορισμού βέλτιστων παραμέτρων συγκόλλησης που έχουν αναφερθεί.

Βελτιστοποίηση ταχύτητας πρόωσης, περιστροφής, γεωμετρία εργαλείου και συνδυασμός τους με σκοπό να περιορίσουν τις ατέλειες έχουν απασχολήσει πολλούς ερευνητές λόγω της πολυπλοκότητας του συνδυασμού τους (11) (28) (29).

### 1.9.2. Θερμικές κατεργασίες

Ωστόσο εκτός από αυτές τις παραμέτρους που ουσιαστικά προλαμβάνουν ατέλειες και καθορίζουν την μικροδομή της συγκόλλησης πριν αυτή ολοκληρωθεί, υπάρχει δυνατότητα να βελτιώσουμε την αντοχή της αδύναμης ζώνης μέσω θερμικών κατεργασιών με παρακάτω τρόπους:

- Η φυσική ωρίμανση με το πλεονέκτημα ότι δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του μετάλλου βάσης, αλλά δεν μειώνει δραστικά τις εσωτερικές τάσεις άρα δεν βελτιώνει σημαντικά την αντοχή της ζώνης,
- Η τεχνητή ωρίμανση έχει καθοριστικά αποτελέσματα μέσω κάποιων κατεργασιών χαμηλής θερμοκρασίας,
- Η πλήρης θερμική κατεργασία που συμπεριλαμβάνει εμβάπτιση σε διαλύματα και ωρίμανση που ενδέχεται να είναι πιθανό σε μικρού μεγέθους δοκίμια. Έχοντας βέβαια αρκετά προβλήματα όσον αφορά την επαναφορά, όπως οι κατακρημνίσεις που συμβαίνουν τότε και πρέπει να εξισορροπούνται με τις εσωτερικές τάσεις .

### 1.9.3. Βελτίωση αντοχής της συγκόλλησης συνολικά

Βέβαια ο σκοπός να βελτιστοποιήσουμε μια συγκόλληση ανάδευσης με τριβή ξεπερνάει το να βελτιώσουμε την αντοχή της.

Αν ωστόσο έχουμε σαν κριτήριο μόνο την αντοχή θα πρέπει να εξεταστούν τα παρακάτω :

- Μεγιστοποίηση του σημείου χαμηλότερης τοπικής αντοχής σε όποιο σημείο της συγκόλλησης,
- Ελαχιστοποίηση της διαφοράς αντοχής μεταξύ μετάλλου βάσης και συγκόλλησης,
- Μεγιστοποίηση της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής της συγκόλλησης.

Συμπεραίνοντας, παρά την κρισιμότητα του σημείου χαμηλότερης αντοχής, η συγκόλληση πρέπει να αντιμετωπιστεί ως ένα σύνολο από τις ζώνες που την αποτελούν και έχουν διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

#### 2.1.1. Υλικό βάσης και εξοπλισμός εργαστηρίου

Το υλικό βάσης που χρησιμοποιήθηκε είναι κράμα αλουμινίου 2024 του οποίου οι χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες αναλύονται στον πίνακα.

Table 1: Χημική Σύσταση Al 2024 (30)

Στοιχείο	Περιεκτικότητα%	Στοιχείο	Περιεκτικότητα
Al	90.7-94.7	Cr	Μέγιστη 0.1
Cu	3.8-4.9	Fe	Μέγιστη 0.5
Mg	1.2-1.8	Mn	0.3-0.9
Si	Μέγιστη 0.5	Ti	Μέγιστη 0.15
Zn	Μέγιστη 0.25	Άλλα, σύνολο	Μέγιστη 0.15

Table 2: Μηχανικές Ιδιότητες Al 2024 (30)

Περιγραφή	Σύμβολο	Τιμή
Όριο διαρροής(MPa)	σ <sub>y</sub>	345
Μέγιστη εφελκυστική αντοχή, UTS(MPa)	σ <sub>u</sub>	483
Μέτρο ελαστικότητας(GPa)	E	71.75
Επιμήκυνση κατά την θραύση(%)	ε	18

Τα ελάσματα αλουμινίου πάχους 1.5 mm κόπηκαν σε διαστάσεις 145mm x 75mm σύμφωνα με τις διαστάσεις της τράπεζας της φρέζας έτσι ώστε να με διευκολύνει στην τοποθέτηση και συγκράτηση τους. Οι πλάκες κατεργάστηκαν στις δύο διαστάσεις τους (μήκος ,πλάτος).



Figure 5: CNC φρέζα HAAS Minimill

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η CNC φρέζα του Εργαστηρίου CNC Κατεργασιών του ΠΑΔΑ . Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η εργαλειομηχανή HAAS Minimill-EDU που φαίνεται στο Figure 5.

### 2.1.2. Συγκράτηση Ελασμάτων

Τα ελάσματα συγκρατήθηκαν στην τράπεζα έτσι ώστε να συγκολληθούν κατά μέτωπο (butt joint). Στις κατά μέτωπο συγκολλήσεις δύο πλάκες ή φύλλα με το ίδιο πάχος τοποθετούνται σε μια πλάκα στήριξης και στηρίζονται σταθερά. Απαραίτητο είναι να διασφαλιστεί ότι στις πλάκες στο μήκος που εφάπτονται δεν υπάρχει κενό σε κανένα σημείο και δεν ξεχωρίζουν. Έτσι το περιστρεφόμενο εργαλείο βυθίζεται στη γραμμή συγκόλλησης και διανύει την ορισμένη απόσταση κατά μήκος αυτή της γραμμής όταν το περιουχένιο του εργαλείου βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια των πλακών.

Στην διάταξη για το πείραμα χρησιμοποίησα 4 χαλύβδινους σφιγκτήρες και 2 διαμήκεις ράβδους για την στήριξη των ελασμάτων όπως φαίνεται παρακάτω.

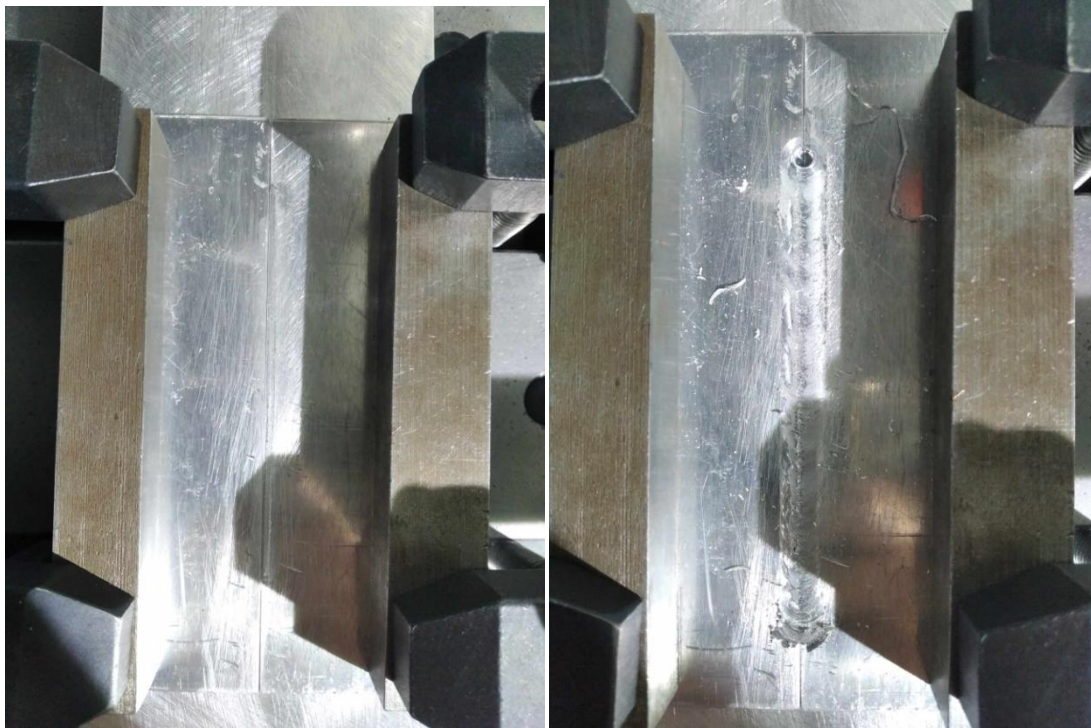


Figure 6: Διάταξη Συγκράτησης των προς Συγκόλληση Φύλλων :Α) Πριν την συγκόλληση και Β) Μετά την συγκόλληση

### 2.1.3. Παράμετροι συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία

Στο πείραμά μου ξεκίνησα τις συγκολλήσεις με σταθερή ταχύτητα πρόωσης αλλάζοντας κάθε φορά μόνο την ταχύτητα περιστροφής και πραγματοποίησα δύο επιτυχημένες συγκολλήσεις.

### Συγκόλληση Α΄

Η πρώτη συγκόλληση ονομάστηκε συγκόλληση Α΄. Ο συνδυασμός παραμέτρων ήταν: Ταχύτητα περιστροφής 1500rpm και ταχύτητα πρόωσης 50mm/min .

### Συγκόλληση Β΄

Η δεύτερη συγκόλληση ονομάστηκε συγκόλληση Β΄ με παραμέτρους :Ταχύτητα περιστροφής 750rpm και ταχύτητα πρόωσης 50mm/min .

Το εργαλείο κατεβαίνει σε συγκεκριμένο βάθος 0.3 mm πάνω από την επιφάνεια της πλάκας χάλυβα στην οποία συγκρατείται το υλικό βάσης.

Έχει δοθεί συγκεκριμένος χρόνος σταθεροποίησης 8 sec για την παραγωγή θερμότητας πριν προχωρήσει η διαδικασία στην κίνηση της τράπεζας. Παρακάτω φαίνονται πως έχουν ονομαστεί τα δοκίμια και οι συνθήκες στις οποίες συγκολλήθηκαν.

Table 3:Παράμετροι Συγκόλλησης

Όνομα Δοκιμίου	Ταχύτητα Πρόωσης(mm/min)	Ταχύτητα Περιστροφής(rpm)
A1	50	1500
A2	50	1500
A3	50	1500
B1	50	750
B2	50	750
B3	50	750
B4	50	750
B5	50	750

Για την συγκόλληση χρησιμοποιήθηκε εργαλείο από ταχυχάλυβα, με κυλινδρικό περιαυχένιο και μη-κοχλιωτό κυλινδρικό πείρο. Οι διαστάσεις του αναγράφονται στον πίνακα Table 4:Διαστάσεις εργαλείου συγκόλλησης.

Table 4:Διαστάσεις εργαλείου συγκόλλησης

Στοιχείο	Διάσταση(mm)
Διάμετρος περιαυχενίου	10
Διάμετρος πείρου	4
ύψος πείρου	1.2

## Συγκολλήσεις ανάδευσης με τριβή μεταλλικών ελασμάτων



Figure 7:Εργαλείο Συγκόλλησης διπλωματικής εργασίας

Στις εικόνες που ακολουθούν τονίζεται η θέση του κάθε δοκιμίου στην γραμμή της συγκόλλησης.

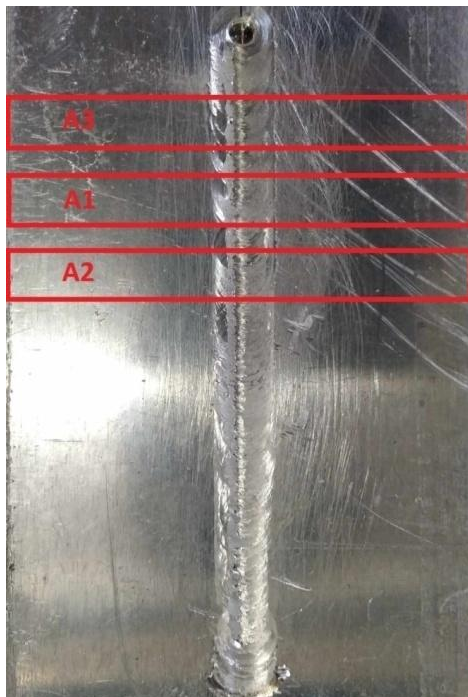


Figure 8:Δοκίμια Συγκόλλησης A

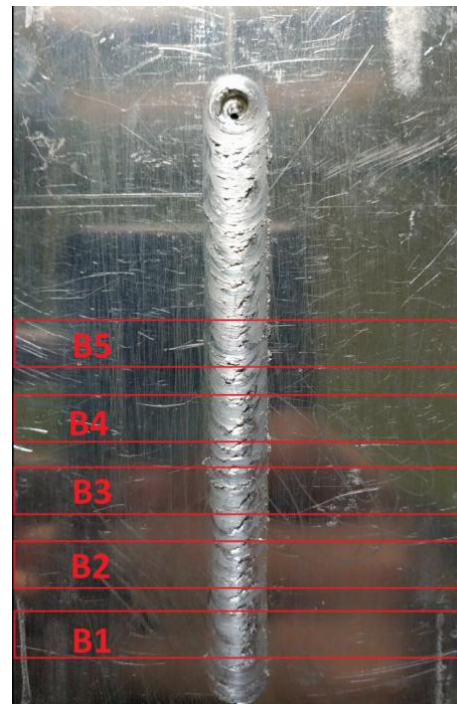


Figure 9:Δοκίμια Συγκόλλησης B



## 2.1.4. Προετοιμασία δοκιμίων προς την δοκιμή εφελκυσμού

### 2.1.4.1. Κοπή δοκιμίων

Το προϊόν συγκόλλησης στην συνέχεια κατεργάστηκε για να λάβω τα δοκίμια που θα χρησιμοποιούσα για την δοκιμή εφελκυσμού. Συγκεκριμένα κόπηκαν με την εργαλειομηχανή Raycus RFL C500, με την χρήση ίνας laser .

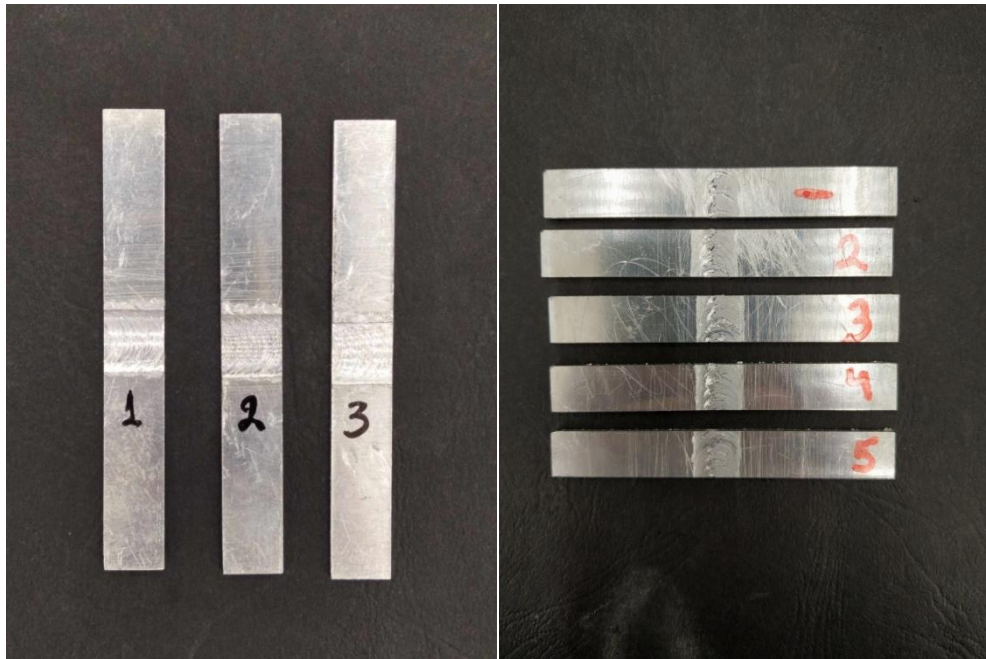


Figure 10:Δοκίμια Συγκόλλησης Α'

Figure 11:Δοκίμια Συγκόλλησης Β'



Figure 12:Raycus RFL C500

Τα εγκάρσια δοκίμια προέκυψαν από την κοπή των συγκολλημένων φύλλων κάθετα στην συγκόλληση και σε διαστάσεις 73mm x 10mm .

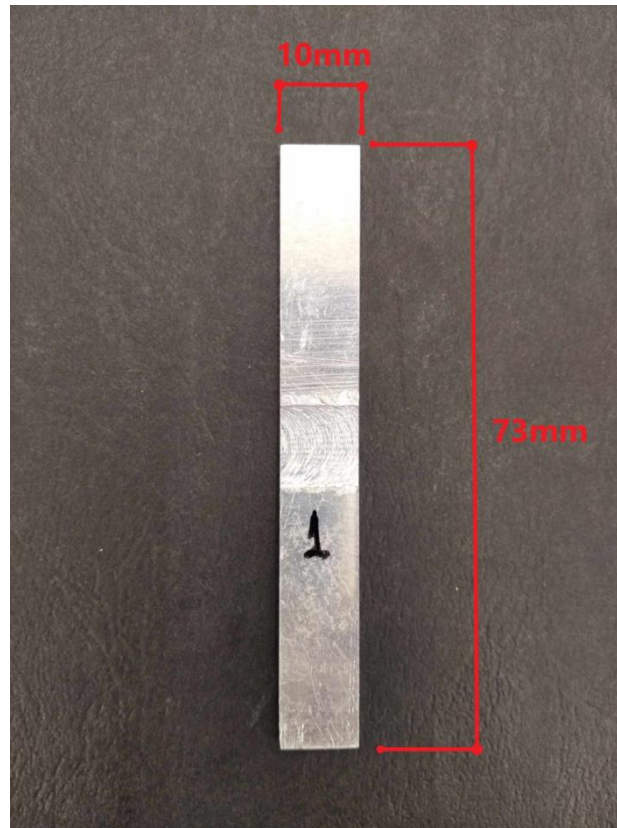


Figure 13: Διάσταση δοκιμίων προς εφελκυσμό

#### 2.1.4.2. Μακροσκοπική Απεικόνιση

Προτού γίνει η δοκιμή του εφελκυσμού, από το κάθε δοκίμιο αποτυπώθηκαν εικόνες με τη χρήση του στερεοσκοπίου του εργαστηρίου Dino-Lite Pro /Pro2 AM4000/AD4000series 1.3 megapixel, οι οποίες και παρουσιάζονται στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Για την συγκόλληση Β', επειδή η επιφάνεια της συγκόλλησης ήταν ιδιαίτερα περίπλοκη, τα δοκίμια έχουν απεικονιστεί σε τρεις διαφορετικούς φωτισμούς :α), β), γ) όπως παρουσιάζονται στα αποτελέσματα.

#### 2.1.4.3. Ορισμός καταπονούμενου μήκους

Για να μπορέσουν να συγκρατηθούν στην μηχανή του εφελκυσμού, στα δοκίμια δημιουργήθηκαν ρικνώσεις διπλής γράμμωσης. Στην συνέχεια καταγράφηκε στο κάθε δοκίμιο το ίδιο καταπονούμενο μήκος (gauge length) των 25 mm. Ένα παράδειγμα των δοκιμίων πριν την δοκιμή για την Συγκόλληση Β' φαίνεται στο Figure 14 παρακάτω:

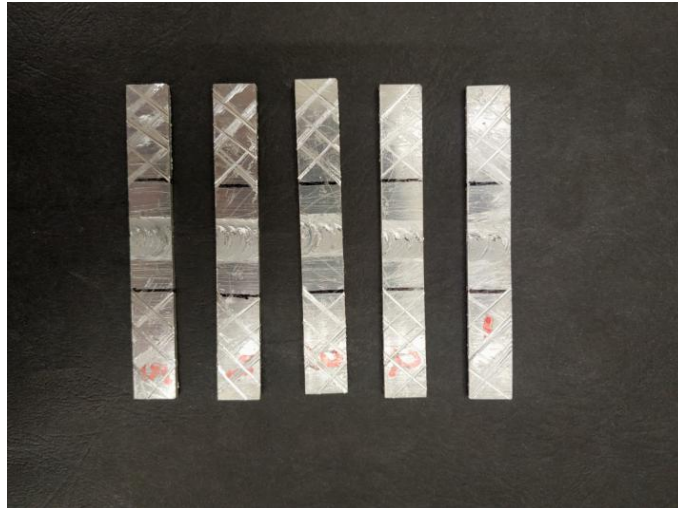


Figure 14: Δοκίμια Συγκόλλησης Β' πριν τον εφέλκυσμό.

### 2.1.5. Δοκιμή Εφέλκυσμού

Για την δοκιμή εφέλκυσμού, χρησιμοποιήθηκε η μηχανή εφέλκυσμού Instron 4411 h1897 του εργαστηρίου Τεχνολογίας Υλικών όπως φαίνεται παρακάτω. Επιπλέον ορίστηκε η ταχύτητα του Crosshead speed στα 6mm /min. Αυτό προέκυψε ορίζοντας ταχύτητα 0,24 mm/min για τα 25 mm gauge length που είχαμε ορίσει ήδη.



Figure 15: Instron 4411 h1897

### 2.1.6. Δοκίμια Μετά τη δοκιμή εφελκυσμού



Figure 16: Δοκίμια συγκόλλησης Α μετά τον εφελκυσμό

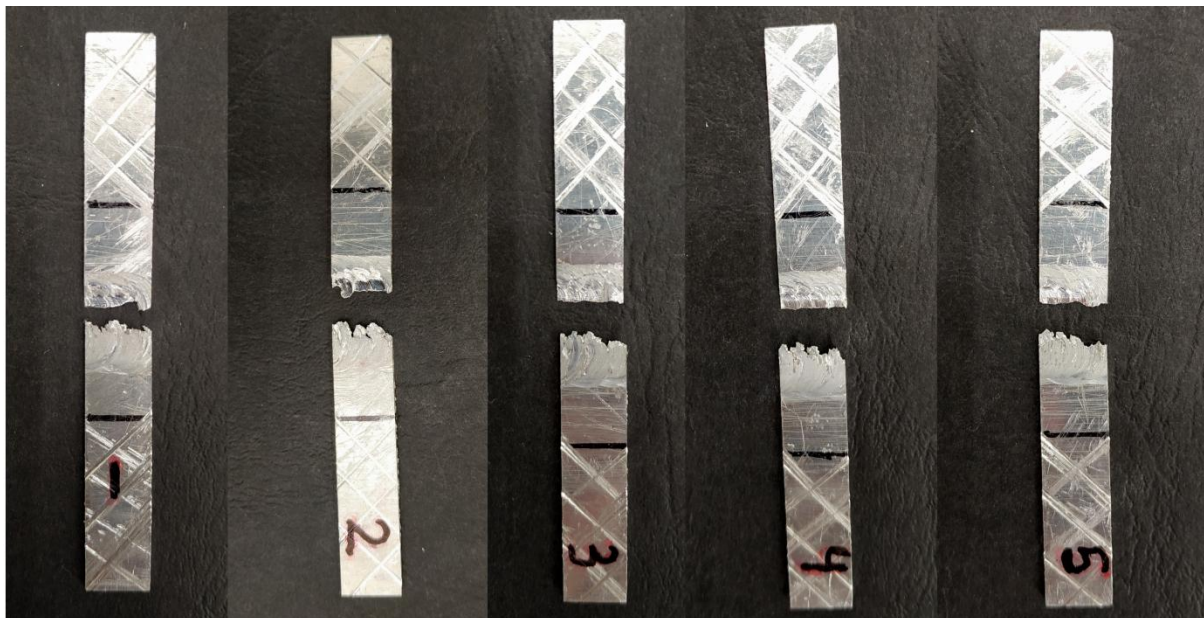


Figure 17: Δοκίμια συγκόλλησης Β μετά τον εφελκυσμό

## 2.2. Αποτελέσματα μετρήσεων

### 2.2.1. Συγκόλληση A (1500 rpm)

#### 2.2.1.1. Δοκίμιο A1

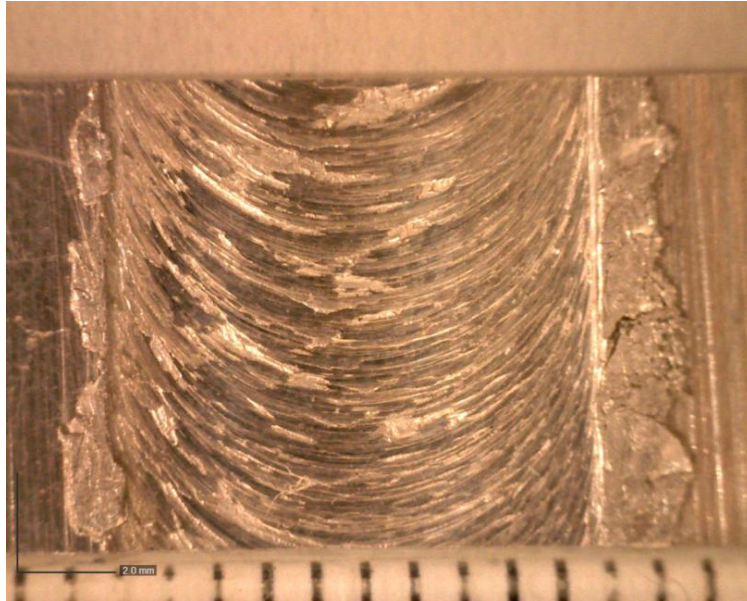


Figure 18:Μακροσκοπική Αποτύπωση κάτοψης δοκιμίου A1

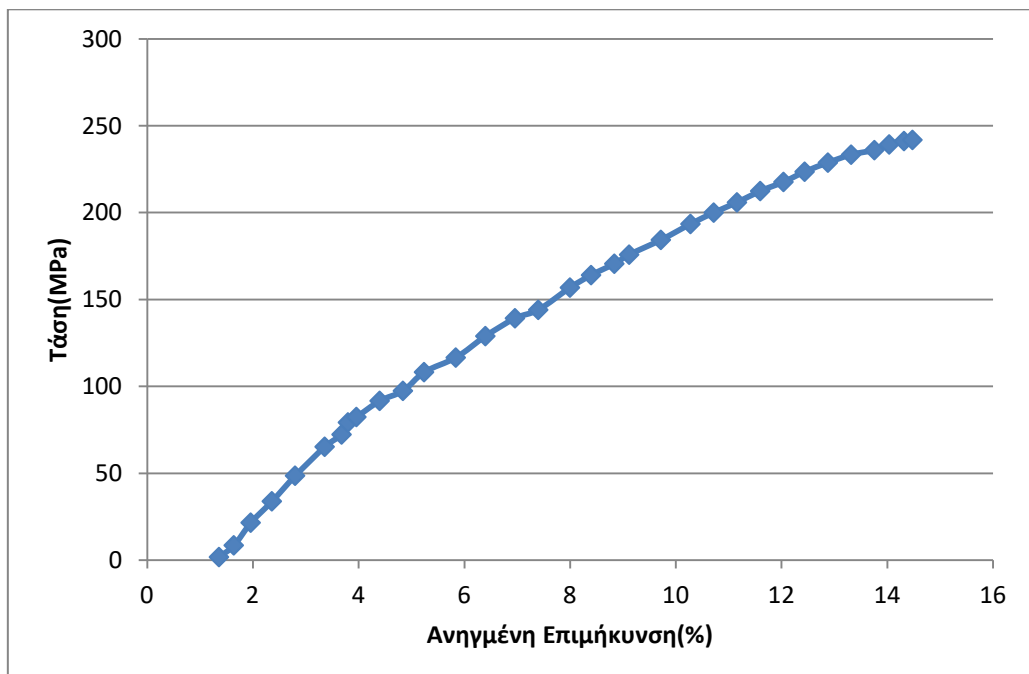


Figure 19:Διάγραμμα Τάσης -Ανηγμένης Επιμήκυνσης A1

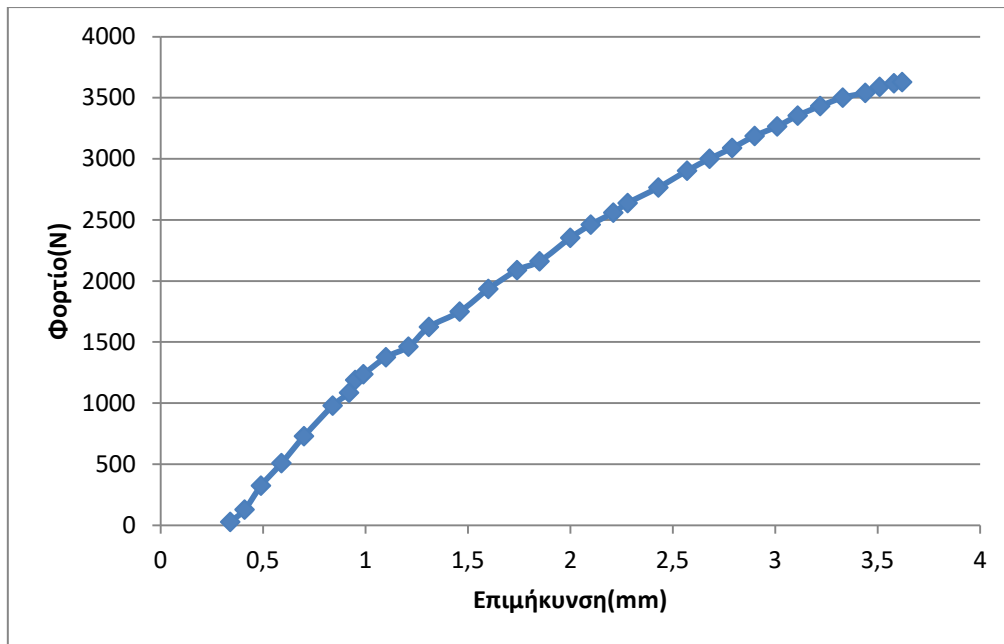


Figure 20: Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης A1

#### Σχολιασμός δοκιμίου A1

Αρχικά η εικόνα της συγκόλλησης όπως φαίνεται στο Figure 18 συμβαδίζει με τα χαρακτηριστικά μιας συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων όσον αφορά την σχετικά ομαλή επιφάνεια και ακόμα περισσότερο με την μικρή απόσταση μεταξύ των στρωμάτων του υλικού ανά περιστροφή. Η σύγκριση μεταξύ συγκολλήσεων διαφορετικών παχών των ελασμάτων έχει εξεταστεί στην έρευνα (31).

Το A1 παρουσίασε την υψηλότερη μέγιστη τιμή εφελκυστικής αντοχής από τα δοκίμια της συγκόλλησης A' με 241.9 MPa (παρουσιάστηκε στο φορτίο 370 kg) και την δεύτερη μεγαλύτερη παραμόρφωση 14.48% (επιμήκυνση 3.62 mm ).

#### 2.2.1.2. Δοκίμιο A2

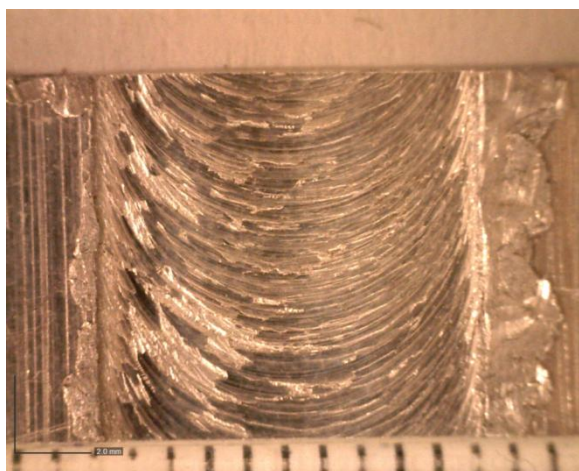


Figure 21: Μακροσκοπική Αποτύπωση κάτοψης δοκιμίου A2

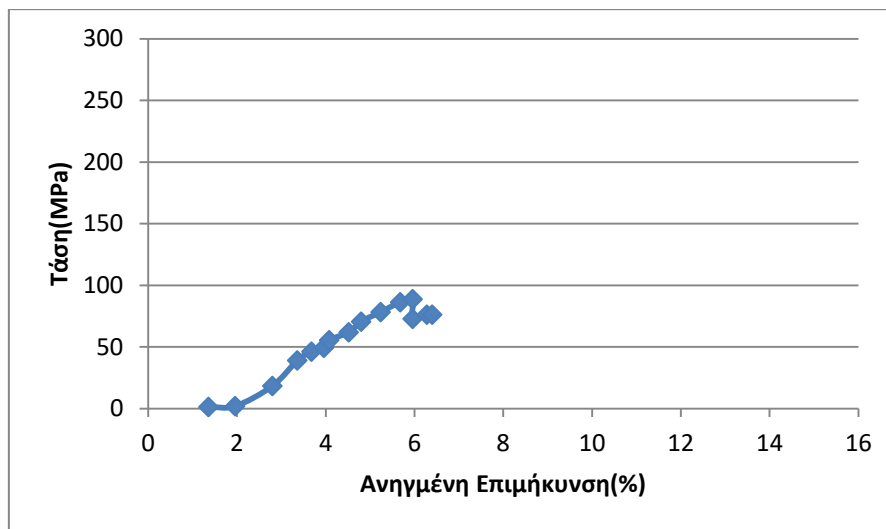


Figure 22: Διάγραμμα Τάσης -Ανηγμένης Επιμήκυνσης A2

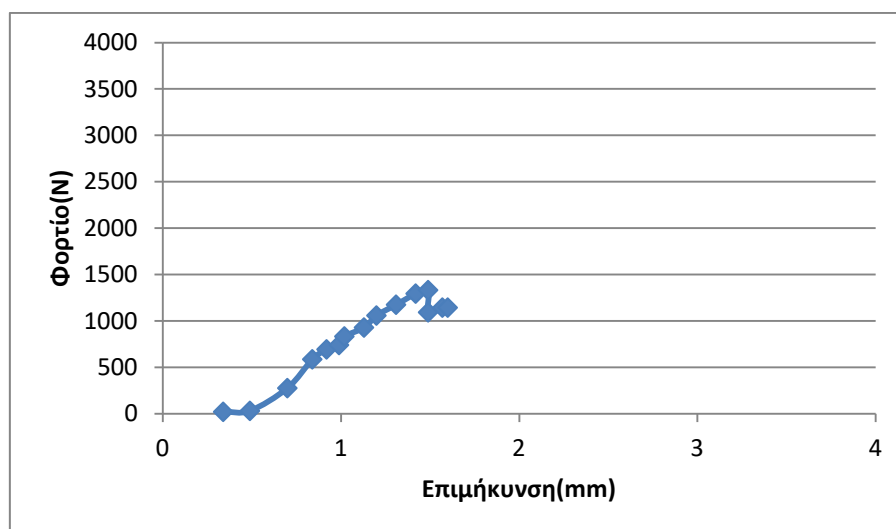


Figure 23: Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης A2

#### Σχολιασμός δοκιμίου A2

Η εικόνα της συγκόλλησης σε αυτήν την περίπτωση είναι πιο τραχεία ωστόσο κατά τα άλλα συμβαδίζει με την μορφή του δοκιμίου A1.

Παρουσίασε την χαμηλότερη μέγιστη τιμή εφελκυστικής αντοχής από τα δοκίμια της συγκόλλησης A' με μόλις 88.8 MPa (παρουσιάστηκε στο φορτίο 135.8 kg) καθώς και την χαμηλότερη παραμόρφωση 6.4% (επιμήκυνση με 1.6 mm). Ωστόσο ήταν το μόνο δοκίμιο από όλα το οποίο παρουσίασε πιο έντονα μια μέγιστη τιμή αντοχής και μετά μια μείωση έως την αποκόλληση.

### 2.2.1.3. Δοκίμιο A3

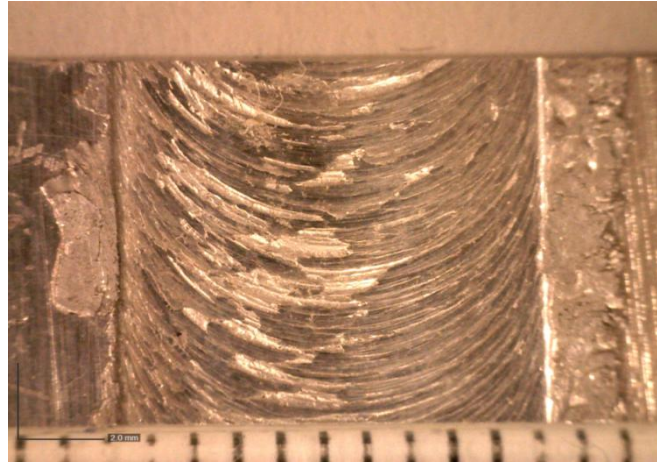


Figure 24:Μακροσκοπική Αποτύπωση κάτοψης δοκμίου A3

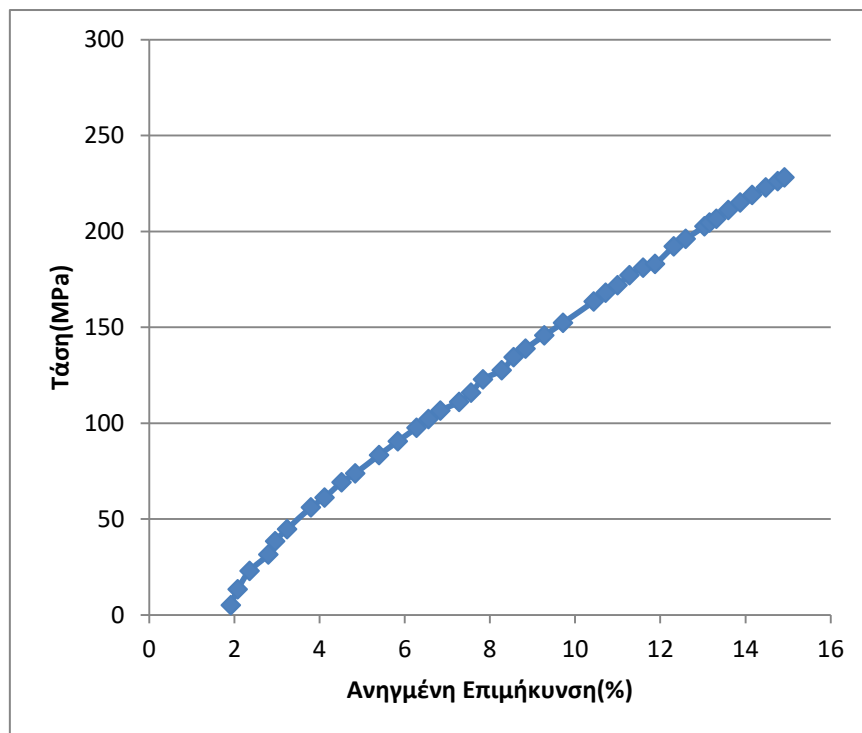


Figure 25:Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Επιμήκυνσης A3



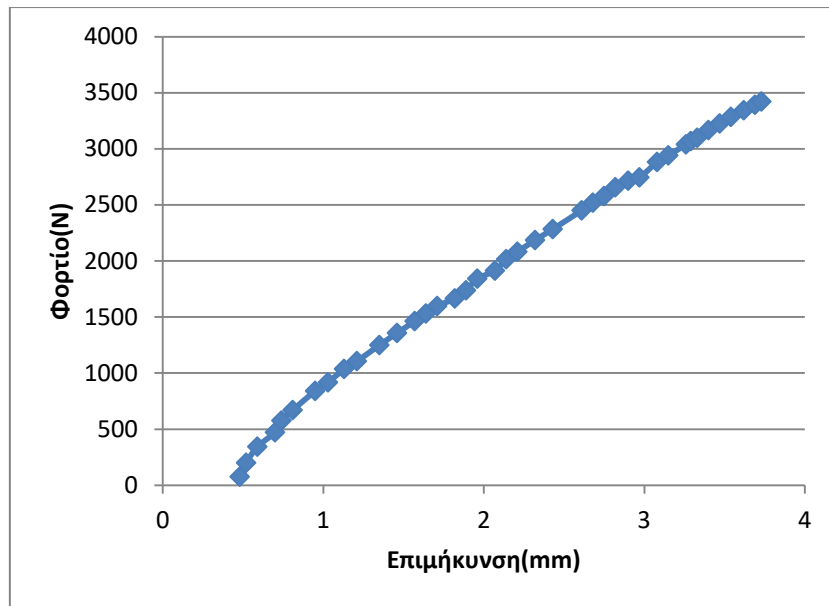


Figure 26: Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης A3

Σχολιασμός δοκιμίου A3

Παρόμοια εικόνα και σε αυτό το δοκίμιο με το δοκίμιο A2 με τραχεία επιφάνεια . Με μέγιστη τιμή εφελκυστικής αντοχής 228.2 MPa (παρουσιάστηκε στο φορτίο 349kg) καθώς και την υψηλότερη παραμόρφωση από τα δοκίμια της συγκόλλησης A με 14.92 % (επιμήκυνση 3.73 mm ), αλλά σε γενικές γραμμές , τιμές αρκετά κοντά στο δοκίμιο A1.

2.2.1.4. Σύνολο Δοκιμών Συγκόλλησης A'

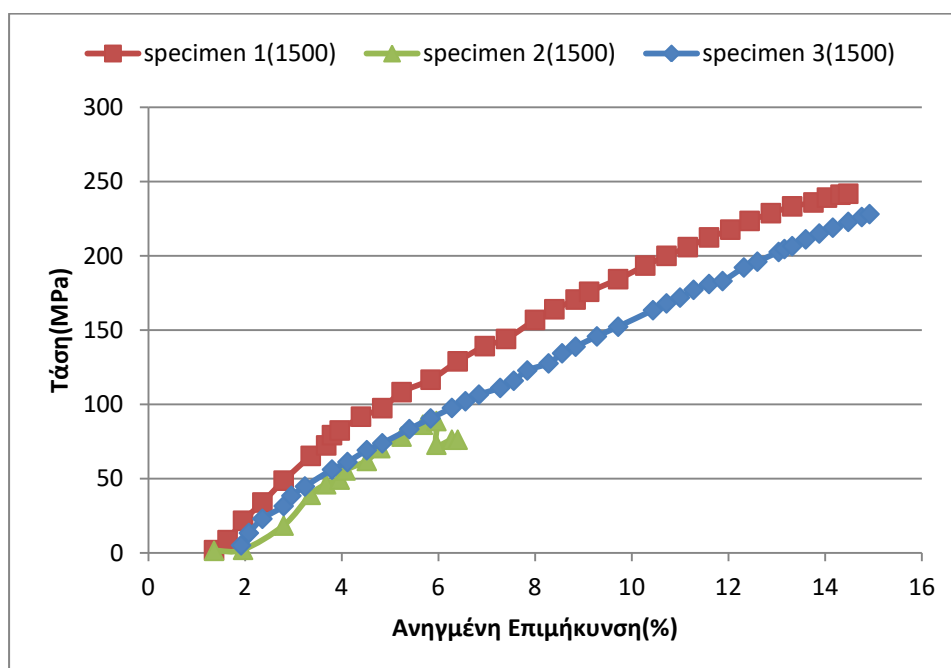


Figure 27: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Επιμήκυνσης Δοκιμών A'

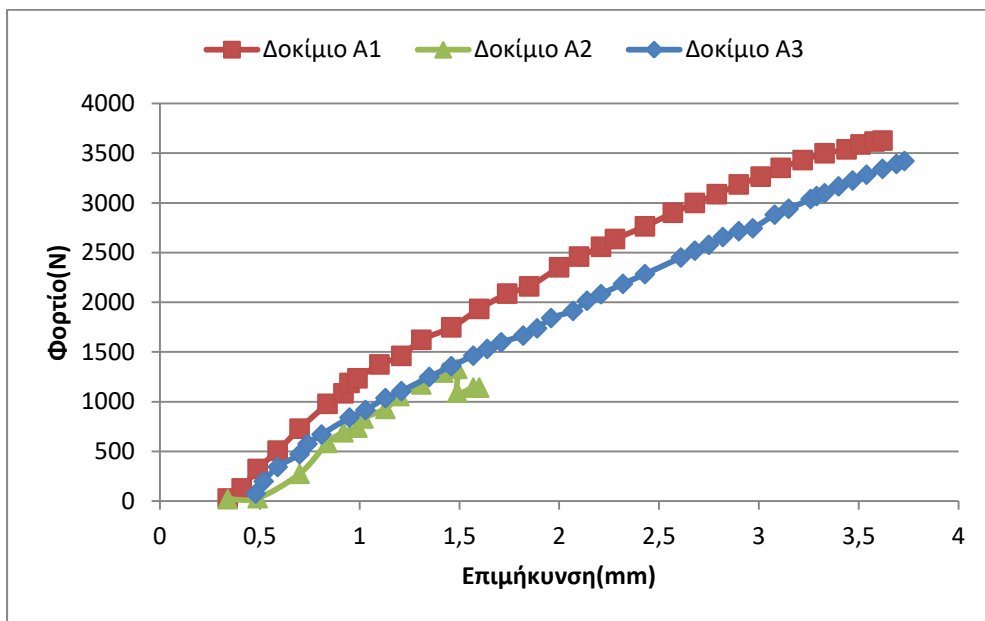


Figure 28:Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης Δοκιμών Α'

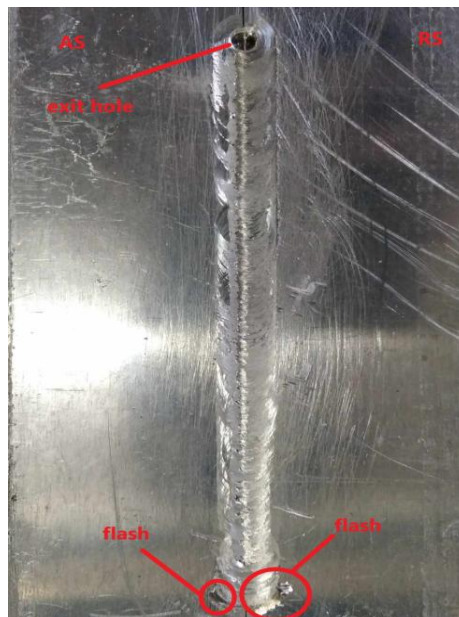


Figure 29:Συνολική εικόνα ατελειών συγκόλλησης Α'

### Σχολιασμός συγκόλλησης Α'

Συνολικά βλέποντας τη συγκόλληση σε όλο της το μήκος όπως φαίνεται στο Figure 29, παρατηρούνται οι εξής επιφανειακές ατέλειες. Σε όλο της το μήκος η συγκόλληση παρουσιάζει την ατέλεια τούνελ στην προωθούμενη πλευρά . Στο τέλος της συγκόλλησης φαίνεται η οπή εξόδου (exit hole) του εργαλείου που προκαλείται από την απομάκρυνση

του εργαλείου όταν ολοκληρωθεί η συγκόλληση. Στην αρχή της συγκόλλησης, χαμηλά στην εικόνα, είναι ευδιάκριτες και οι περιοχές με ατέλεια γρεζιού (flash).

Από το Figure 16, φαίνεται ότι σε όλα τα δοκίμια της συγκόλλησης A η αποκόλληση έχει γίνει στην προωθούμενη πλευρά.

Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της συγκόλλησης A' φαίνεται η μεγάλη διαφορά στις τιμές αντοχής και επιμήκυνσης του δοκιμίου A2 το οποίο ήταν και το δοκίμιο πιο κοντά στο κέντρο της γραμμής συγκόλλησης και όχι όσο κοντά στην έξοδο ήταν τα άλλα δύο.

Τα (2/3) των δοκιμίων φτάνουν σε αντοχές και επιμηκύνσεις στις οποίες έχουν καταλήξει και άλλες δημοσιευμένες εργασίες για συγκόλληση ελασμάτων αλουμινίου 2024, (14) (32) (33). Επίσης από τα διαγράμματα εξάγονται τα συμπεράσματα:

- Δεν υπάρχει ορατό όριο διαρροής,
- Δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση κατά την δυναμική φόρτιση του δοκιμίου, δηλαδή από την μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό έως την αποκόλληση.

Η εικόνα αυτή αντιστοιχεί σε ένα ψαθυρό υλικό και όχι σε ένα έλασμα κράματος 2024 ακόμα και μετά την συγκόλληση.

Το γεγονός ότι το 1/3 των δοκιμίων παρουσιάζει διάγραμμα με μορφή πιο κοντά στην προβλεπόμενη αλλά όχι τις ανάλογες αντοχές, δείχνει την έντονη ποικιλομορφία κατά μήκος της συγκόλλησης.

- Η εφελκυστική απόδοση (μέγιστη εφελκυστική αντοχή συγκόλλησης /μέγιστη εφελκυστική αντοχή υλικού βάσης) των δοκιμίων A1,A2,A3 είναι αντίστοιχα 50%,18%,47% της αντοχής του μετάλλου βάσης,
- Η απόδοση της παραμόρφωσης (παραμόρφωση συγκόλλησης/παραμόρφωση υλικού βάσης) για τα A1,A2,A3 είναι αντίστοιχα 80%,36%,83% της παραμόρφωσης που παρουσιάζει το μέταλλο βάσης.

Παρόλο που οι τιμές αντοχής είναι αρκετά χαμηλές, τα ποσοστά παραμόρφωσης είναι αρκετά υψηλότερα, συγκριτικά και με άλλες αντίστοιχες έρευνες για το κράμα 2024, (29) (34) (35) (14), που είχαν τιμές κοντά στο 40% της αρχικής παραμόρφωσης.

## 2.2.2. Συγκόλληση B(750 rpm)

### 2.2.2.1. Δοκίμιο B1

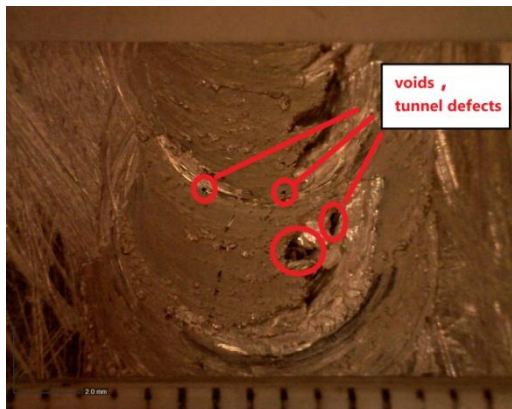


Figure 30:Μακροσκοπική αποτύπωση δοκίμιου B1(α)

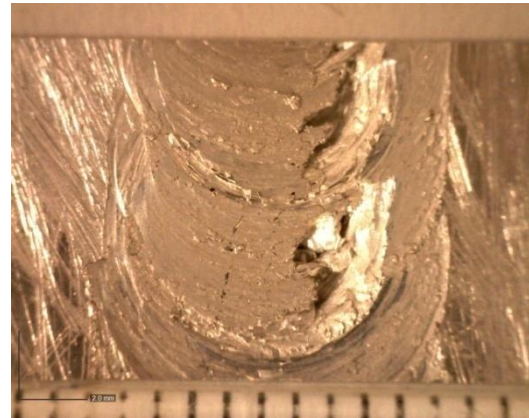


Figure 31:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκίμιου B1(β)

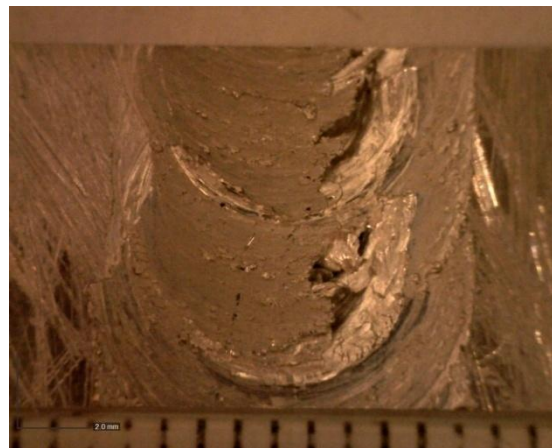


Figure 32:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκίμιου B1(γ)

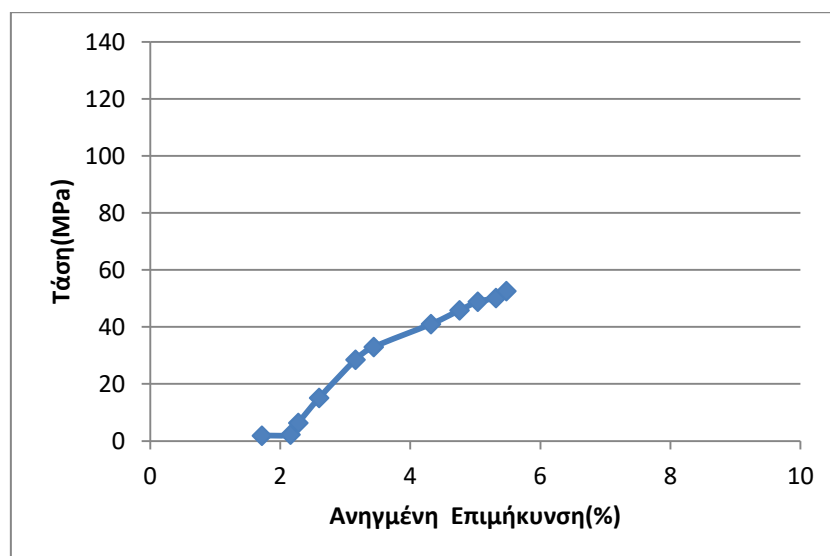


Figure 33:Διάγραμμα Τάσης -Ανηγμένης Επιμήκυνσης B1

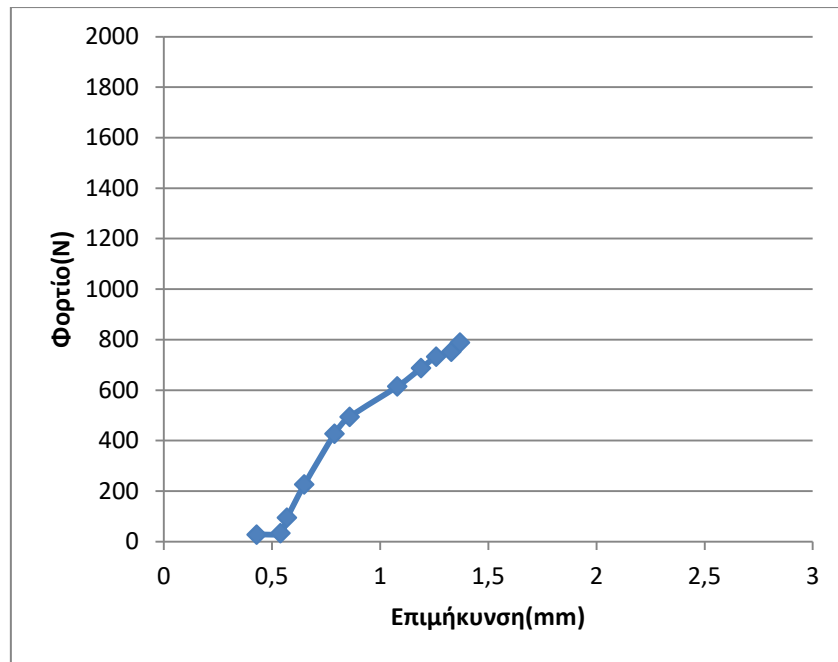


Figure 34: Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης B1

#### Σχολιασμός δοκιμίου B1

Αρχικά αναφορικά με την εικόνα της συγκόλλησης όπως φαίνεται στο Figure 30 ενώ στο κέντρο και στην προωθούμενη πλευρά η επιφάνεια είναι ιδιαίτερα ομαλή , στην υποχωρούσα πλευρά είναι έντονη η ατέλεια τούνελ. Όπως φαίνεται και στο Figure 30 η συγκόλληση σε αυτό το δοκίμιο παρουσιάζει και κάποια κενά όπως έχουν σημειωθεί .

Σε αυτή την συγκόλληση όπως θα φανεί και παρακάτω υπάρχει μεγάλο εύρος στις τιμές αντοχής .Στο B1 ξεκινάμε με μέγιστη εφελκυστική αντοχή 52.6 MPa (παρουσιάστηκε στο φορτίο 80.4kg) και παραμόρφωση 5.48% (επιμήκυνση 1.72 mm ).

#### 2.2.2.2. Δοκίμιο B2

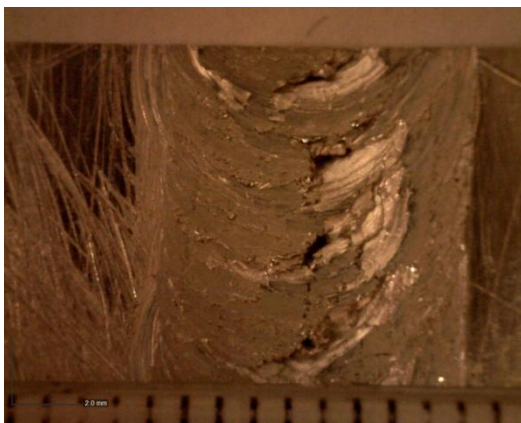


Figure 35: Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B2(α)

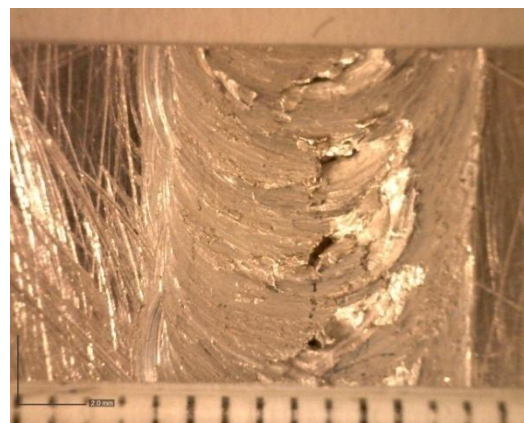


Figure 36: Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B2(β)

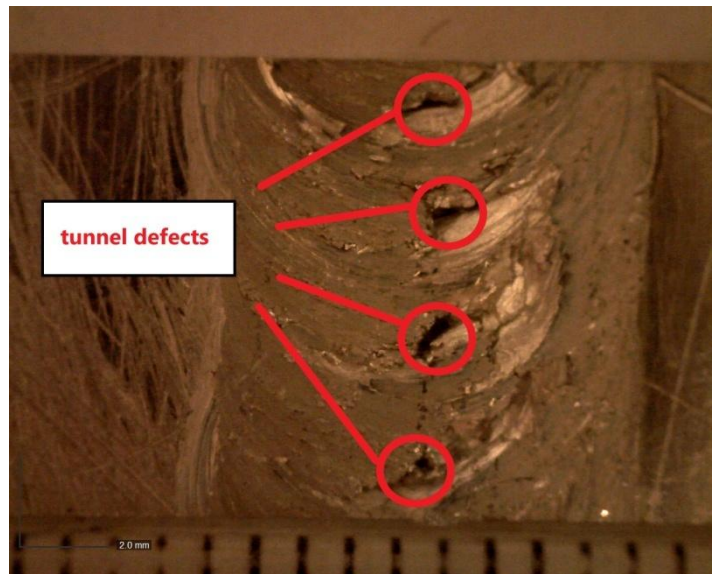


Figure 37:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B2(γ)

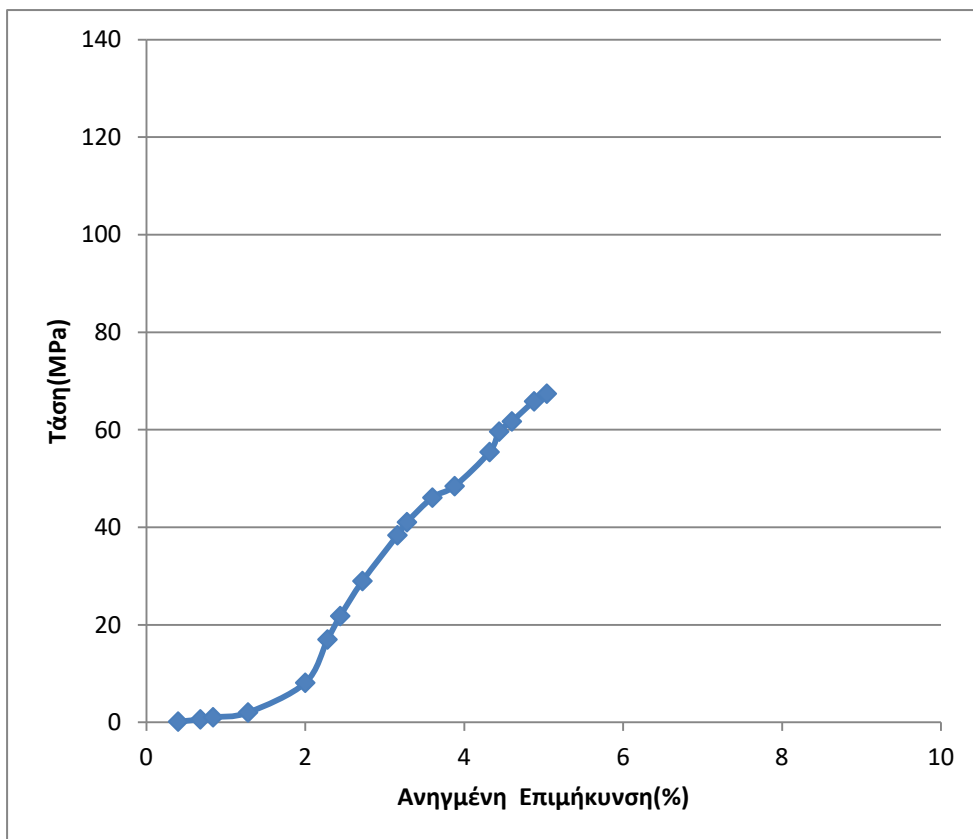


Figure 38:Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Επιμήκυνσης B2

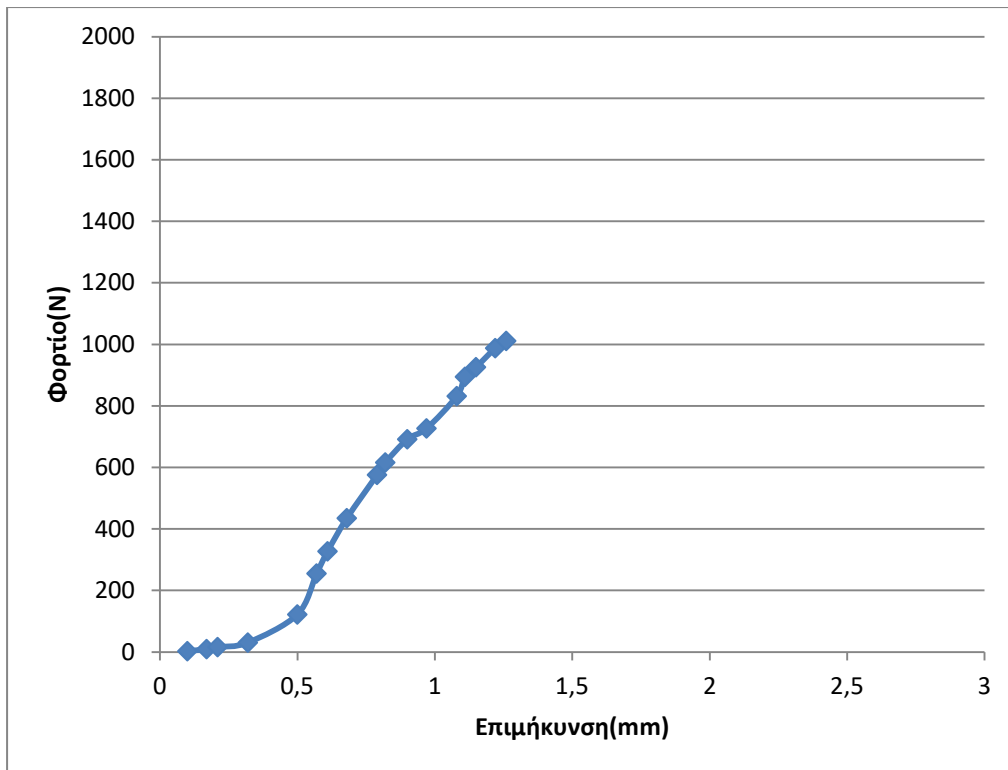


Figure 39: Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης B2

### Σχολιασμός δοκιμίου B2

Παρόμοια εικόνα και σε αυτό το δοκίμιο όσον αφορά τον σχηματισμό ατέλειας τούνελ. Επιπλέον και εδώ Figure 38 η συγκόλληση παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερη τραχύτητα στο πίσω μέρος της πορείας του εργαλείου .

Το B2 έχει μέγιστη εφελκυστική αντοχή 67.4 MPa (παρουσιάστηκε στο φορτίο 103.1kg) και παραμόρφωση 5.04% (επιμήκυνση 1.26 mm ).

### 2.2.2.3 Δοκίμιο B3



Figure 40: Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B3(β)

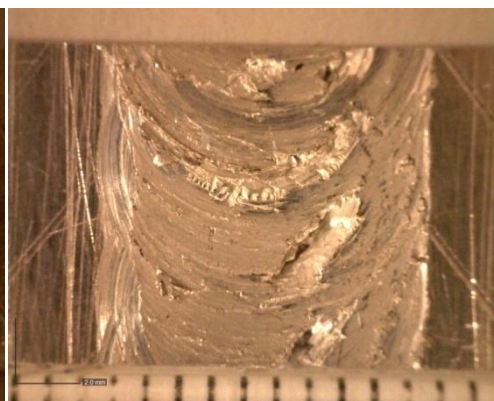


Figure 41: Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B3(α)

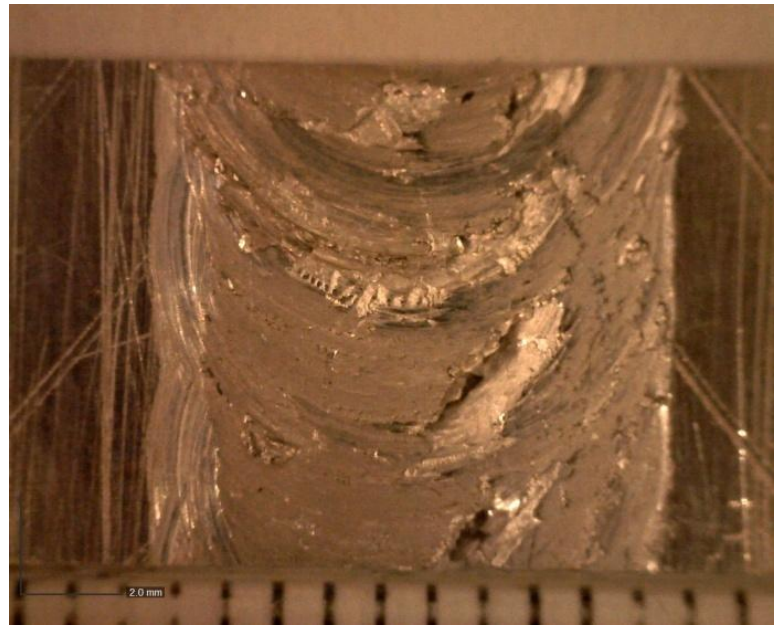


Figure 42:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκμίου Β3(γ)

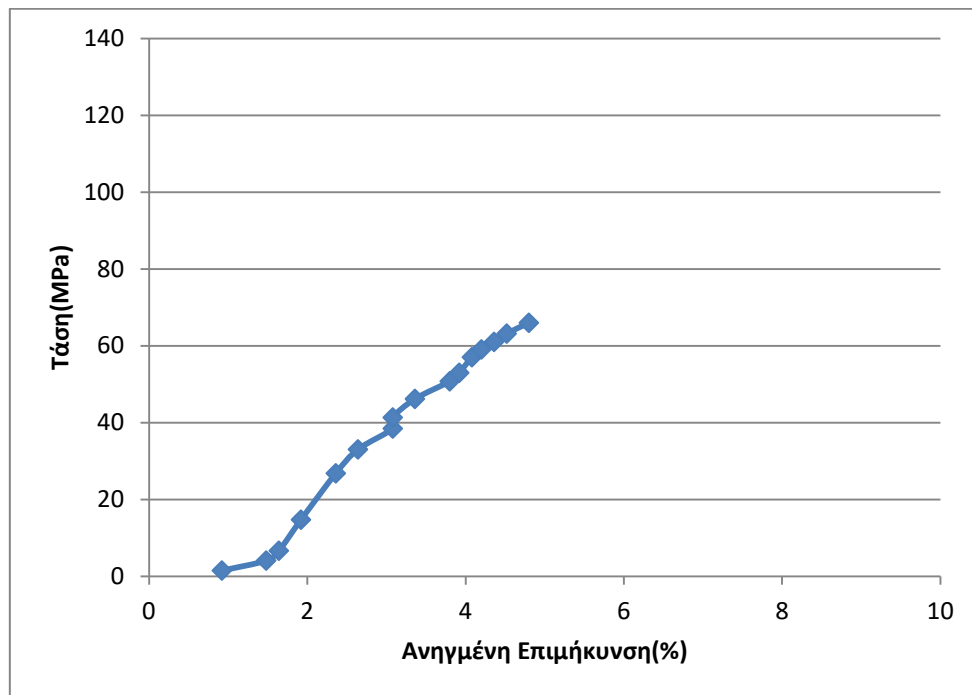


Figure 43:Διάγραμμα Τάσης -Ανηγμένης Επιμήκυνσης Β3



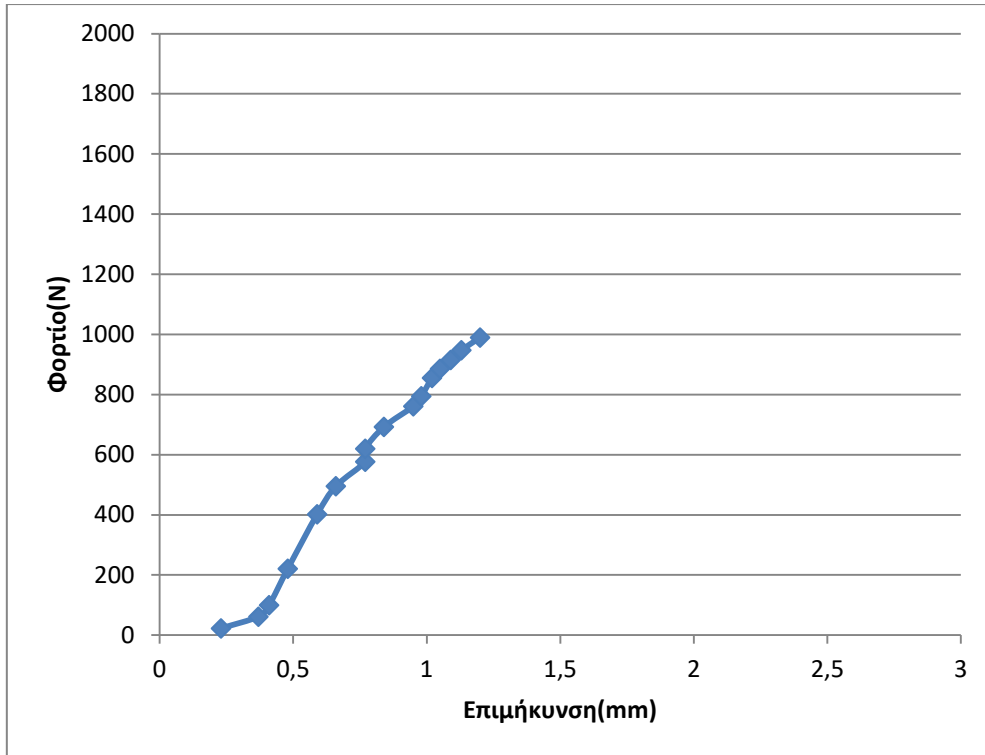


Figure 44: Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης B3

#### Σχολιασμός δοκιμίου B3

Η εικόνα της επιφάνειας της συγκόλλησης και σε αυτό το δοκίμιο εξακολουθεί να είναι ομαλή στην προωθούμενη πλευρά και αρκετά τραχεία στην υποχωρούσα και στο πίσω μέρος του εργαλείου. Και εδώ παρατηρείται ατέλεια τούνελ, ωστόσο όχι τόσο έντονα όσο στα B1 και B2.

Το B3 έχει μέγιστη εφελκυστική αντοχή 66 MPa (παρουσιάστηκε στο φορτίο 100.9kg) και παραμόρφωση 4.8% (επιμήκυνση 1.2 mm).

#### 2.2.2.4. Δοκίμιο B4

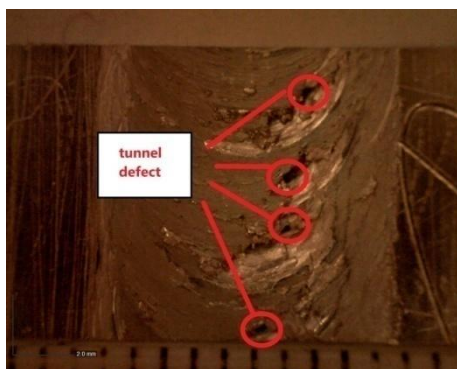


Figure 45: Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B4(α)

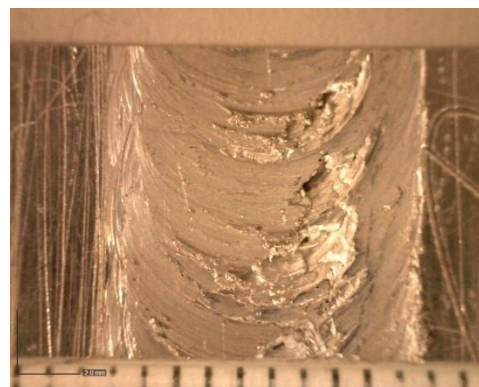


Figure 46: Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B4(β)

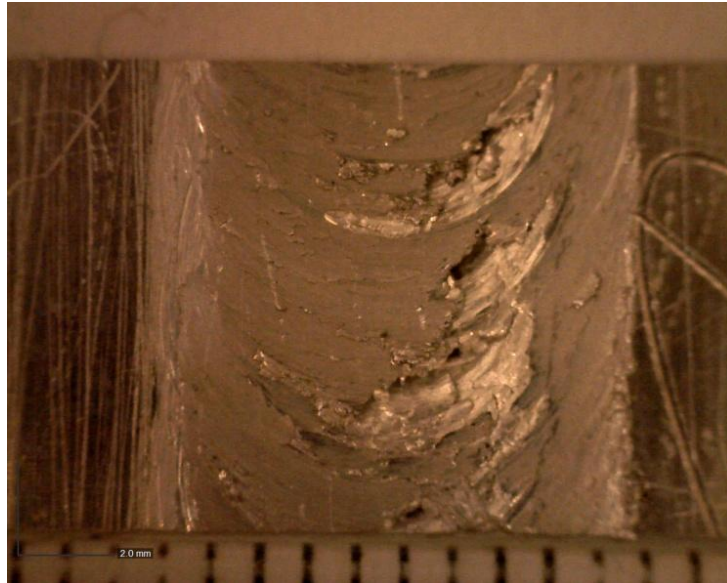


Figure 47:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B4(γ)

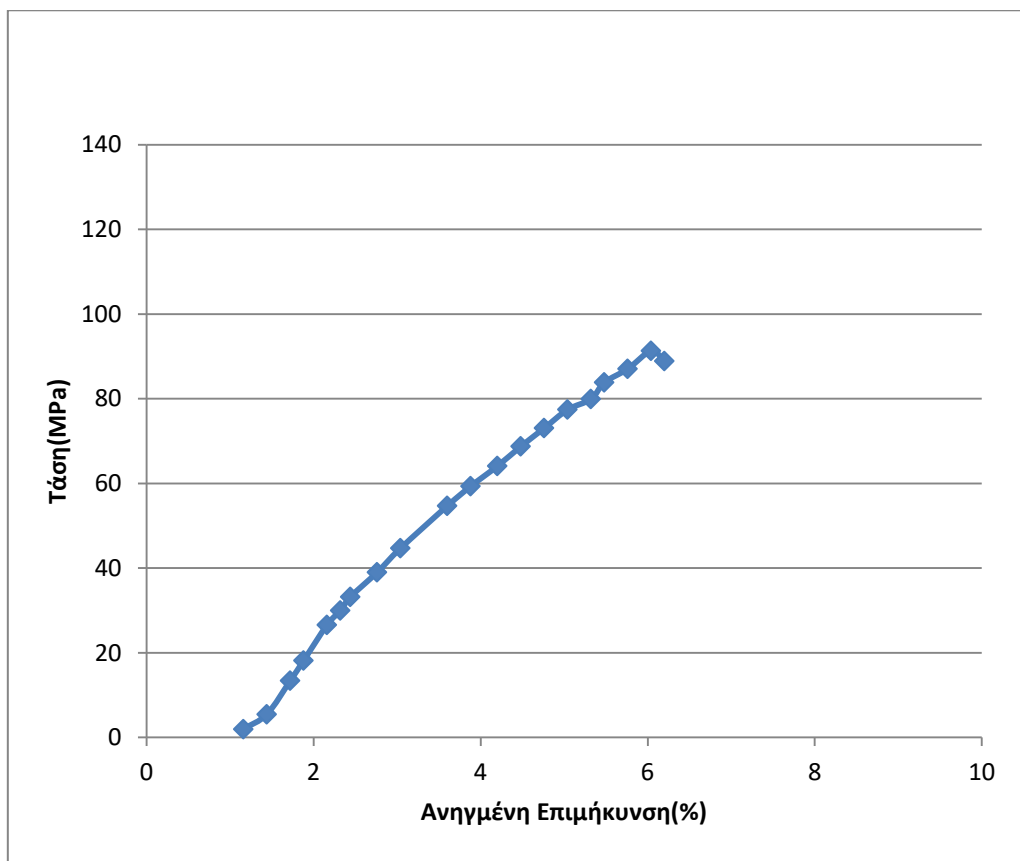


Figure 48:Διάγραμμα Τάσης -Ανηγμένης Επιμήκυνσης B4

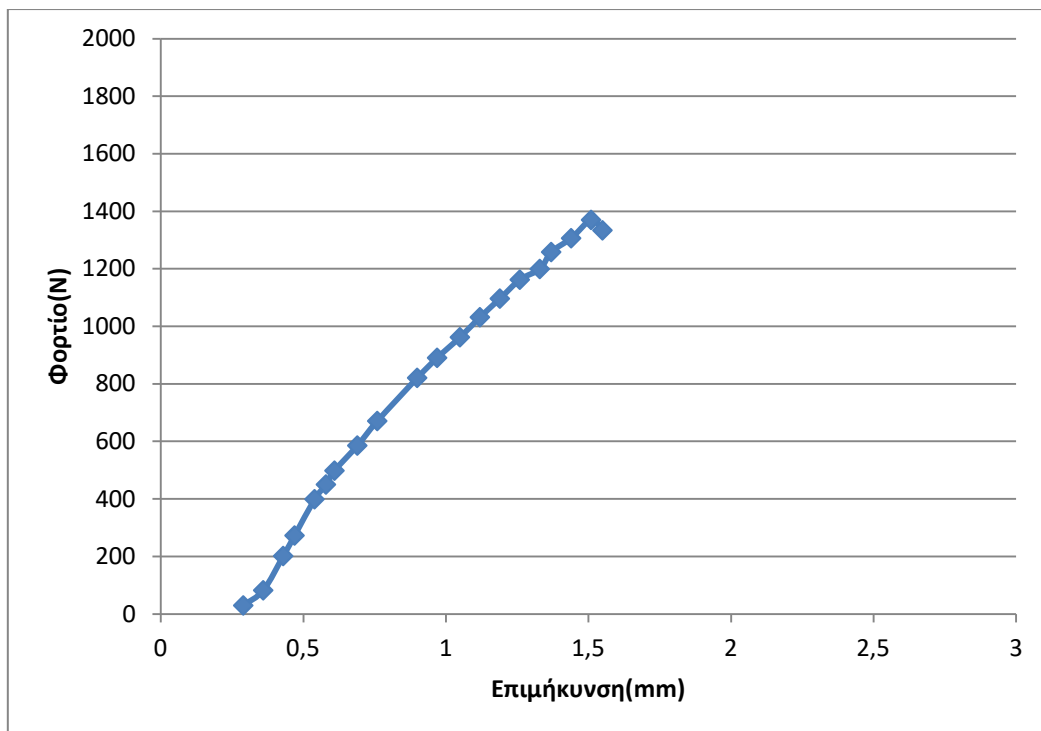


Figure 49: Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης B4

Σχολιασμός δοκιμίου B4

Αντίστοιχη εικόνα και σε αυτό το δοκίμιο με ατέλεια τούνελ στην υποχωρούσα πλευρά όπως φαίνεται και στο Figure 45. Ωστόσο εδώ αρχίζει και φαίνεται η διαφορά στην αντοχή. Το B4 έχει μέγιστη εφελκυστική αντοχή 91.33 MPa (παρουσιάστηκε στο φορτίο 139.7kg) και παραμόρφωση 6.04%(επιμήκυνση 1.51mm ).

2.2.2.5. Δοκίμιο B5

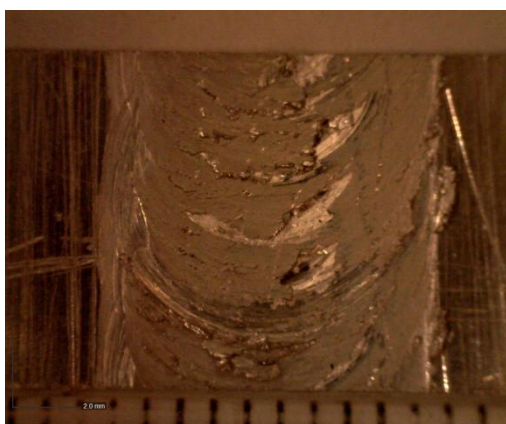


Figure 50: Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B5(α)

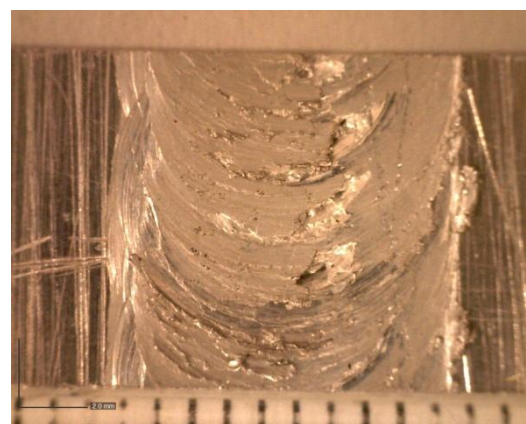


Figure 51: Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B5(β)

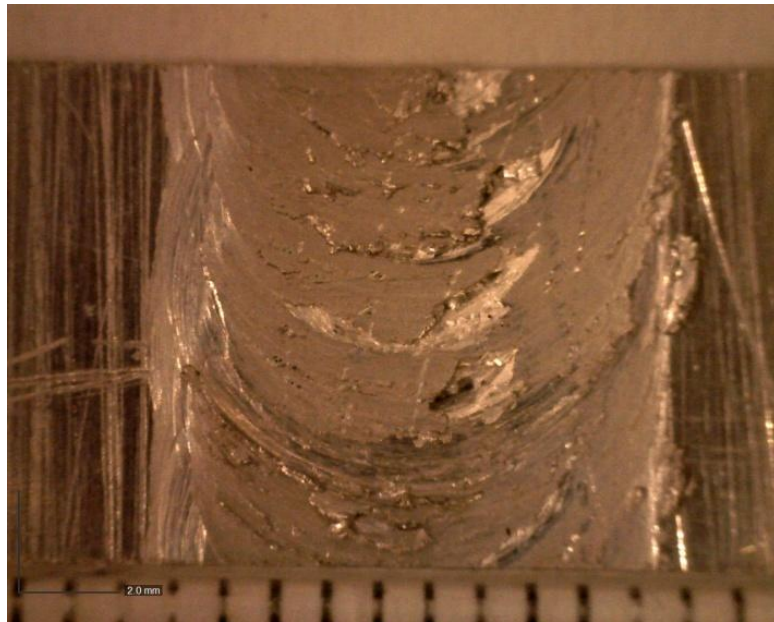


Figure 52:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B5(γ)

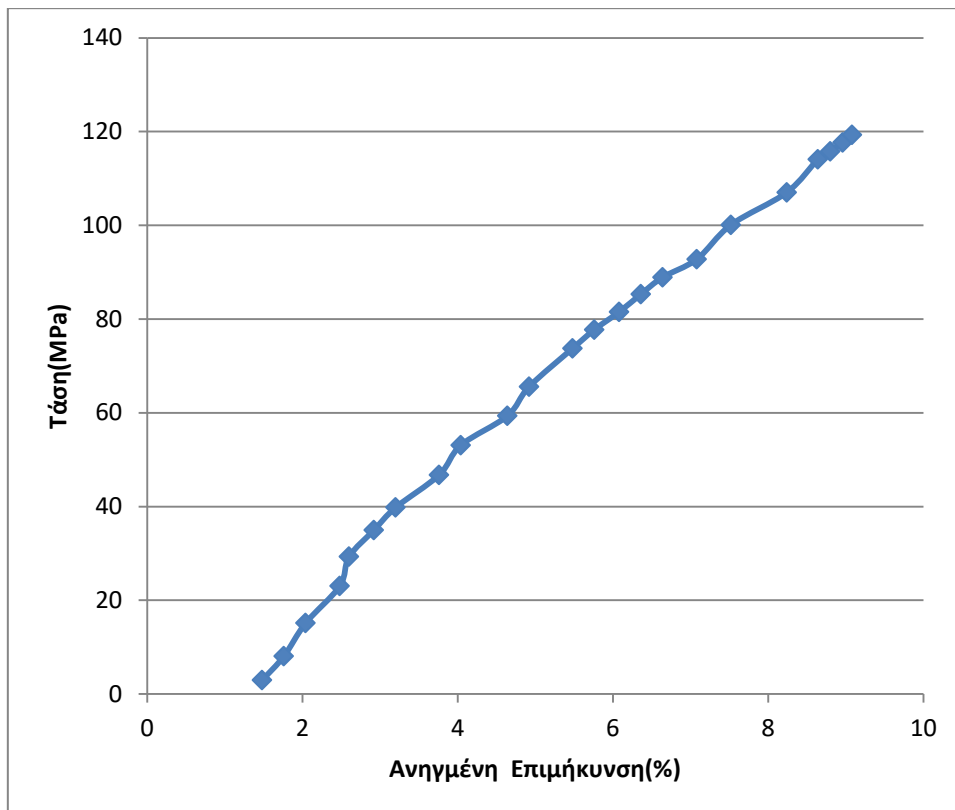


Figure 53:Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Επιμήκυνσης B5

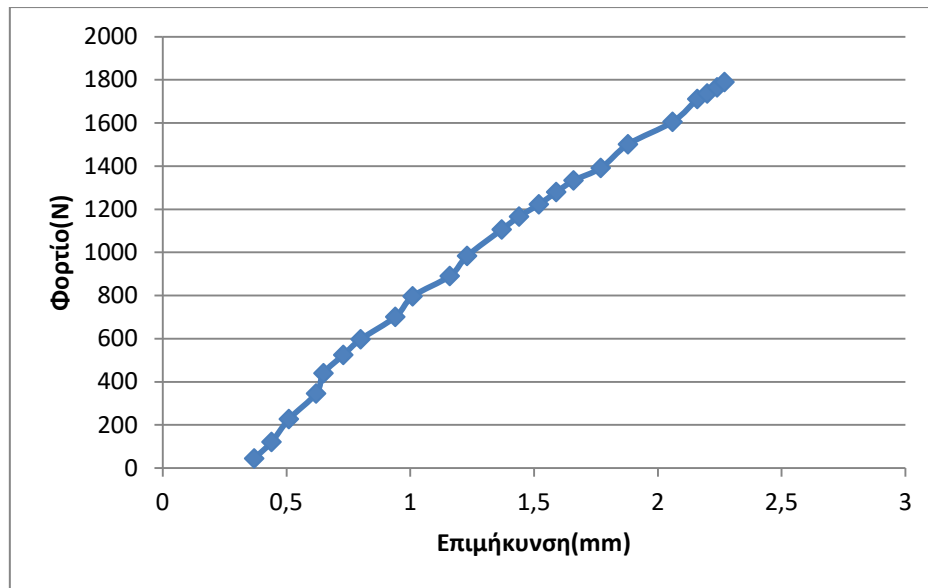


Figure 54: Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης B5

#### Σχολιασμός δοκιμίου B5

Τέλος, η συγκόλληση εδώ παρουσιάζει μια συνολικά πιο ομοιόμορφη εικόνα ωστόσο και εδώ είναι φανερή η ατέλεια τούνελ στην υποχωρούσα πλευρά Figure 52. Ακόμα μεγαλύτερη αντοχή για το B5 που έχει μέγιστη εφελκυστική αντοχή 119.3 MPa (παρουσιάστηκε στο φορτίο 182.5kg) και παραμόρφωση 9.08% (επιμήκυνση 2.27mm).

#### 2.2.2.6. Σύνολο Διαγραμμάτων Δοκιμών Β'

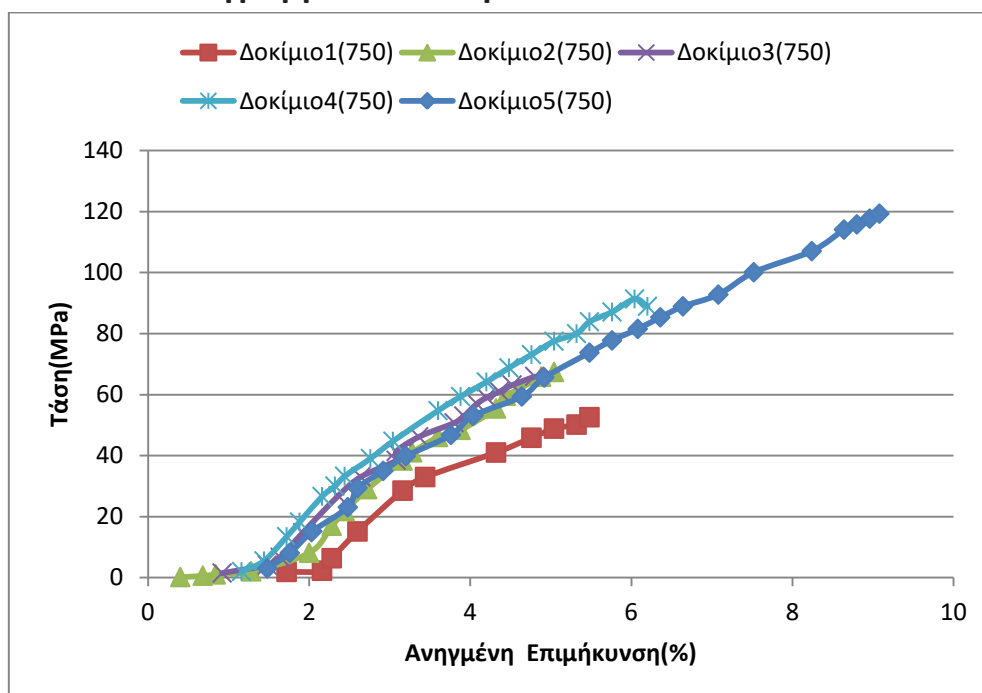


Figure 55: Συγκεντρικό Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Επιμήκυνσης δοκίμια Β

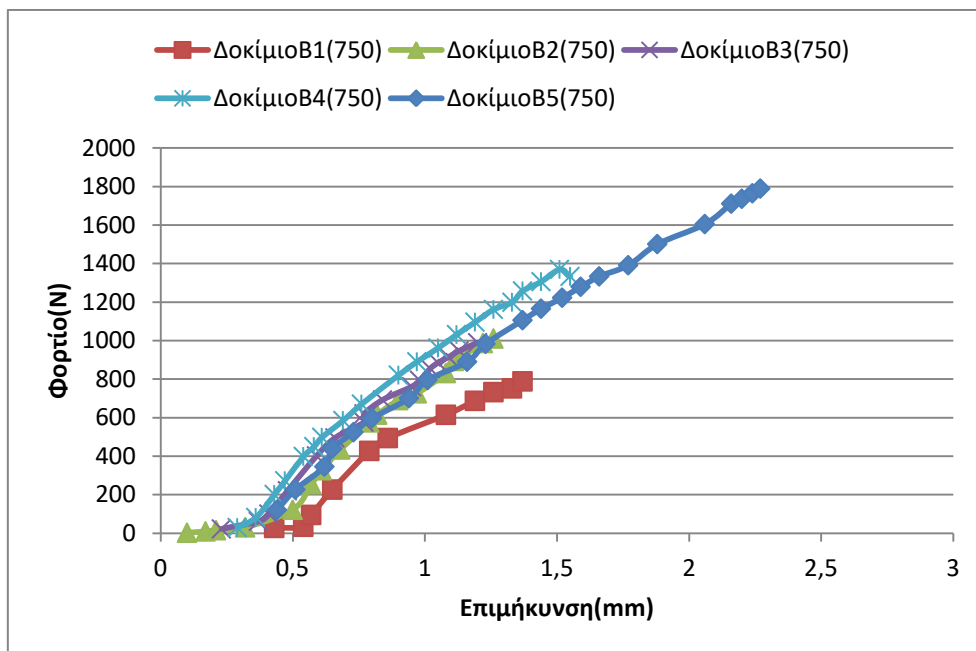


Figure 56: Συγκεντρωτικό διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης δοκίμια Β'



Figure 57: Συνολική εικόνα συγκόλλησης Β'

### Σχολιασμός συγκόλλησης Β'

Όσον αφορά την επιφάνεια της συγκόλλησης συνολικά και εδώ προφανώς υπάρχει σπή εξόδου του εργαλείου και οι ατέλειες που προαναφέρθηκαν ,δηλαδή ατέλεια τούνελ σε όλο το μήκος σχεδόν της συγκόλλησης Figure 57 .

Σε αυτή την συγκόλληση, σε αντίθεση με την συγκόλληση Α', τα δοκίμια που ήταν πιο κοντά στο μέσο της γραμμής συγκόλλησης είχαν υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό και μεγαλύτερη επιμήκυνση. Μάλιστα, η αντοχή αυξανόταν από την άκρη προς το μέσον σε κάθε δοκίμιο σε σχέση με το προηγούμενο, με την μέγιστη αντοχή να φτάνει τα 119.3 MPa στο δοκίμιο B5 και την παραμόρφωση 9.08%. Ωστόσο το εύρος των τιμών αντοχής και παραμορφώσεων είναι ιδιαίτερα μεγάλο κατά μήκος της συγκόλλησης. Ταυτόχρονα στα (3/5) των δοκιμίων ήταν και πολύ χαμηλότερες από αντίστοιχες μελέτες που προαναφέρθηκαν. Από 52.6 MPa και 5.48% παραμόρφωση το δοκίμιο B1, φτάνει τα 119.3MPa και 9.08 % παραμόρφωση στο δοκίμιο B5.

- Δεν υπάρχει ορατό όριο διαρροής σε κανένα δοκίμιο,
- Δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση κατά την δυναμική φόρτιση του δοκιμίου , δηλαδή από την μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό έως την αποκόλληση.
- Η εφελκυστική απόδοση των δοκιμίων B1,B2,B3,B4,B5 είναι αντίστοιχα 11%,14%,14%,19%,25% της αντοχής του μετάλλου βάσης.
- Η απόδοση της παραμόρφωσης για τα B1,B2,B3,B4,B5 είναι αντίστοιχα 30%,28%,27%,34%,50% της παραμόρφωσης που παρουσιάζει το μέταλλο βάσης.

Η εικόνα αυτή αντιστοιχεί σε ένα ψαθυρό υλικό και όχι σε ένα έλασμα κράματος 2024. Όπως στην συγκόλληση Α, έτσι και σε αυτή την περίπτωση οι τιμές αντοχής είναι αρκετά χαμηλές, ωστόσο και πάλι τα ποσοστά παραμόρφωσης είναι κοντά στα αποτελέσματα αντίστοιχων ερευνών ή ακόμα και υψηλότερα(B5).

### 2.3. Συζήτηση

Από τα παραπάνω σχόλια των συγκολλήσεων A και B και τα αντίστοιχα διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα και να οδηγήσουν σε προτάσεις.

Στις δύο συγκολλήσεις παρατηρούνται αρκετές επιφανειακές ατέλειες. Αρχικά η τραχύτητα της επιφάνειας πίσω από το εργαλείο όπως φαίνεται στα δοκίμια της συγκόλλησης B, επηρεάζεται κυρίως από την ροή του υλικού. Συγκεκριμένα, η έρευνα (36) έχει καταλήξει ότι το υλικό στην υποχωρούσα πλευρά δεν περιστρέφεται μαζί με τον πείρο, ενώ το υλικό στην προωθούμενη πλευρά σχηματίζει μια ζώνη γύρω από τον πείρο. Μετά από αρκετές περιστροφές του εργαλείου το υλικό αρχίζει να υποχωρεί στο πίσω μέρος του πείρου. Συνεπώς το υλικό πίσω από τον πείρο είναι έντονα παραμορφωμένο ειδικά σε συγκεκριμένες γωνίες.

Η ατέλεια της οπής εξόδου ήταν χαρακτηριστικό και των δύο συγκολλήσεων όπως και όλων των συγκολλήσεων ανάδευσης με τριβή στις οποίες το εργαλείο στο τέλος απομακρύνεται κάθετα από την συγκόλληση ενώ περιστρέφεται. Είναι ωστόσο μια δυσμενής ατέλεια, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων και την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων της συγκόλλησης που επιφέρει .

Ακόμα μια κοινή ατέλεια και στις δύο συγκολλήσεις είναι οι ατέλειες τούνελ . Ενώ στην συγκόλληση A, παρατηρείται η ατέλεια σε όλο το μήκος της γραμμής συγκόλλησης σε σχετικά χαμηλό βαθμό, στην B σε κάποια δοκίμια είναι ιδιαίτερα έντονη Figure 37, Figure 32, Figure 47. Αυτή η διαφορά έχει παρατηρηθεί και από άλλες έρευνες (37). Η αύξηση εισροής θερμότητας βελτιώνει την ροή υλικού άρα και την ατέλεια αυτή. Αυτό δικαιολογεί και την πιο έντονη ατέλεια της συγκόλλησης B λόγω της χαμηλότερης εισροής θερμότητας (χαμηλότερη περιστροφική ταχύτητα από το A).

Η μεγαλύτερη εισροή θερμότητας ωστόσο που είχε η συγκόλληση A σε σχέση με την B δικαιολόγησε και την ατέλεια των γρεζιών στην αρχή της συγκόλλησης A. Εκτός από τις ταχύτητες που ορίστηκαν, αυτή την ατέλεια επηρεάζει και η γεωμετρία του πείρου αλλά και η διείσδυση του εργαλείου στα ελάσματα, η οποία ενδέχεται να μεταβάλλεται αν τα ελάσματα έχουν την παραμικρή παραμόρφωση πριν την συγκόλλησή τους (37).

Επίσης, η συγκόλληση A' όπου το A2 δοκίμιο παρουσίαζε μια πιο λογική εικόνα καμπύλης εφελκυσμού είχε πολύ χαμηλές τιμές αντοχής και παραμόρφωσης, δείγμα της ανομοιομορφίας των δοκιμίων ακόμα και στην ίδια συγκόλληση. Αντίστοιχα, στην



συγκόλληση Β παρατηρείται μεγάλο εύρος σε τιμές αντοχής και παραμόρφωσης μεταξύ των δοκιμών.

Όσον αφορά τη δοκιμή εφελκυσμού, σε άλλες έρευνες χρησιμοποιήθηκαν, μεγαλύτερες ταχύτητες κατά τη δοκιμή (38), συγκεκριμένα 10mm/min crosshead speed. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στην περιοχή της κράτυνσης να επέρχεται εργοσκήρυνση του υλικού. Το γεγονός ότι το δοκίμιο παραμορφώνεται πλαστικά, σημαίνει ότι ανεβάζοντας το ρυθμό τόσο αυξάνεται η εργοσκήρυνση του υλικού. Η εργοσκήρυνση έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση αντοχής σε εφελκυσμό όπως φαίνεται και στην αντίστοιχη έρευνα.

Η ταχύτητα πρόωσης που χρησιμοποιήθηκε και στις δύο συγκολλήσεις είναι χαμηλή. Όπως έχουν καταλήξει και άλλες δημοσιευμένες έρευνες (29), (39) οι μικρότερες ταχύτητες πρόωσης δίνουν το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της μεγάλης εισροής θερμότητας παράγεται περισσότερη ενέργεια για την ανάπτυξη των κόκκων. Σε δοκίμια, όπως αυτά της συγκεκριμένης εργασίας που έχουν κοπή εγκάρσια στην γραμμή της συγκόλλησης, περιέχονται όλες οι θερμικά επηρεασμένες ζώνες, οπότε οι διαφορές μεταξύ τους είναι ιδιαίτερα έντονες. Έτσι η ολκιμότητα των δοκιμών είναι ένας μέσος όρος των παραμορφώσεων κάθε ζώνης με προφανώς πολύ διαφορετική μικροδομή. Κατά την δοκιμή εφελκυσμού οι συγκεντρώσεις τάσης και παραμόρφωσης επικεντρώνονται στο σημείο χαμηλότερης αντοχής, όπου και στην συνέχεια πραγματοποιείται η αποκόλληση. Επομένως, η ποικιλομορφία της δομής και των χαρακτηριστικών κατά μήκος της ίδιας συγκόλλησης οδηγεί σε ανομοιογενή παραμόρφωση και είναι η αιτία μείωσης της μετρούμενης παραμόρφωσης της συγκόλλησης σε σχέση με το υλικό βάσης. Ωστόσο συγκριτικά με την παραμόρφωση, η εφελκυστική αντοχή δεν φαίνεται να επηρεάζεται τόσο από την αλλαγή στο μέγεθος των κόκκων.

## 2.4. Συμπεράσματα-Προτάσεις

Συμπερασματικά, παρατηρήθηκαν διάφορες ατέλειες στην επιφάνεια της συγκόλλησης. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε τραχύτητα επιφάνειας της συγκόλλησης στο σημείο που αντιστοιχεί το πίσω μέρος του εργαλείου, ατέλεια οπής εξόδου, ατέλεια τούνελ και ατέλεια γρεζιού.

- Μια πρόταση για να αντιμετωπιστεί η τραχύτητα στο σημείο που διέρχεται το πίσω μέρος του εργαλείου, θα ήταν να ρυθμιστούν καλύτερα οι παράμετροι συγκόλλησης, ή να αυξηθεί η διάμετρος του περιαυχενίου έτσι ώστε να αυξηθεί η εισροή θερμότητας και να ευνοηθεί η ροή υλικού.
- Σχετικά με την ατέλεια της οπής εξόδου, προτείνεται είτε η χρήση ενός μερικώς καταναλισκόμενου εργαλείου συγκόλλησης, είτε η συνέχεια της συγκόλλησης μέχρι το τέλος των ελασμάτων χωρίς να αλλάξει κατεύθυνση το εργαλείο συγκόλλησης για να απομακρυνθεί, όπως αναφέρει και η έρευνα (40) .
- Αναφορικά με την ατέλεια τούνελ, μια πρόταση είναι να τροποποιηθούν οι παράμετροι συγκόλλησης έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη εισροή θερμότητας.
- Τέλος για την ατέλεια γρεζιού είναι σημαντική η εξασφάλιση μιας σίγουρης και σταθερής διάταξης συγκράτησης εκτός των άλλων παραμέτρων.

Επίσης, τα δοκίμια της κάθε συγκόλλησης παρά την μικρή απόσταση του ενός από το άλλο, παρουσίαζαν μεγάλο εύρος στις τιμές αντοχής και παραμόρφωσης. Επομένως πρέπει οι παράμετροι συγκόλλησης να ελέγχονται καλύτερα κατά την διαδικασία και να είναι εξασφαλισμένο ότι ανά πάσα στιγμή οι τιμές που ορίστηκαν πριν την συγκόλληση διατηρούνται στα ίδια επίπεδα σε όλη τη διάρκειά της. Το ίδιο θα πρέπει να εξασφαλιστεί και η διάταξη συγκράτησης έτσι ώστε να γνωρίζει ο πειραματιστής ότι τα ελάσματα θα παραμένουν σταθερά στις ίδιες θέσης σε όλο το διάστημα. Έτσι θα εξασφαλιστεί καλύτερα η ποιότητα κατά μήκος όλης της συγκόλλησης και θα υπάρχει επαναληψιμότητα.

Σε μακροσκοπικό επίπεδο δεν είναι ευδιάκριτο το σημείο των ζωνών που πραγματοποιήθηκε η αποκόλληση. Ο ακριβής προσδιορισμός του σημείου αυτού είναι σημαντικός λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας της μικροδομής της συγκόλλησης. Επομένως δεν υπάρχει δυνατότητα να εξαχθούν συμπεράσματα από την μακροσκοπική ανάλυση και το κατά πόσο δικαιολογείται τέτοιου είδους συμπεριφορά του κράματος κατά τον εφελκυσμό.

Κρίνεται βασικό να γίνει μικροσκοπική ανάλυση της μικροδομής των συγκολλημένων δοκιμίων και μέτρηση εφελκυσμού δοκιμίων του υλικού βάσης διότι θα δικαιολογούσαν

σε μεγάλο βαθμό τις μετρήσεις της εργασίας και τις αποκλίσεις τους από τις τιμές του μετάλλου βάσης. Αυτό θα είχε επιτευχθεί έχοντας μια εικόνα των θερμικά επηρεασμένων ζωνών και των φαινομένων ανακρυστάλλωσης. Επίσης, ενδεχομένως θα είχαμε την δυνατότητα να αντιληφθούμε την αιτία που όλα τα διαγράμματα παρουσιάζουν εικόνα ψαθυρού υλικού παρόλο που τα αποτελέσματα της διπλωματικής σε αρκετά μέρη των μετρήσεων συμβαδίζουν με άλλες έρευνες όπως έχει προαναφερθεί.

Κατά αυτό τον τρόπο, ο πειραματιστής θα είναι σε θέση να αυξήσει το πλήθος των συγκολλήσεων άρα και των δοκιμών. Έτσι, θα υπάρχει δυνατότητα να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης.

## Παράρτημα

### Κατάλογος Πινάκων

Table 1:Χημική Σύσταση Al 2024 (30).....	29
Table 2:Μηχανικές Ιδιότητες Al 2024 (30).....	29
Table 3:Παράμετροι Συγκόλλησης .....	31
Table 4:Διαστάσεις εργαλείου συγκόλλησης .....	31

### Κατάλογος Εικόνων και Διαγραμμάτων

Figure 1:Υποχωρούσα και προωθούμενη πλευρά στην πορεία μιας συγκόλλησης ανάδευσης με τριβή (4) .....	11
Figure 2:Συνηθισμένα σχήματα και προφίλ περιαιχηνίου .....	16
Figure 3:Συνηθισμένα σχήματα και προφίλ πείρου (16) .....	17
Figure 4:Τυπική μακρογραφία που απεικονίζει διάφορες μικροδομικές ζώνες (Nugget:ψήγμα, TMAZ :θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, HAZ:θερμικά επηρεασμένη ζώνη, Retreating :υποχωρούσα πλευρά, Advancing :προωθούμενη πλευρά) (1) .....	22
Figure 5:CNC φρέζα HAAS Minimill.....	29
Figure 6:Διάταξη Συγκράτησης των προς Συγκόλληση Φύλλων :Α)Πριν την συγκόλληση και Β)Μετά την συγκόλληση .....	30
Figure 7:Εργαλείο Συγκόλλησης διπλωματικής εργασίας.....	32
Figure 9:Δοκίμια Συγκόλλησης Β .....	32
Figure 8:Δοκίμια Συγκόλλησης Α .....	32
Figure 10:Δοκίμια Συγκόλλησης Α' .....	33
Figure 11:Δοκίμια Συγκόλλησης Β' .....	33
Figure 12:Raycus RFL C500 .....	33
Figure 13:Διάσταση δοκιμίων προς εφελκυσμό .....	34
Figure 14:Δοκίμια Συγκόλλησης Β' πριν τον εφελκυσμό. ....	35
Figure 15:Instron 4411 h1897.....	35
Figure 16:Δοκίμια συγκόλλησης Α μετά τον εφελκυσμό .....	36
Figure 17:Δοκίμια συγκόλλησης Β μετά τον εφελκυσμό .....	36
Figure 18:Μακροσκοπική Αποτύπωση κάτοψης δοκιμίου Α1 .....	37
Figure 19:Διάγραμμα Τάσης -Ανηγμένης Επιμήκυνσης Α1.....	37
Figure 20:Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης Α1 .....	38
Figure 21:Μακροσκοπική Αποτύπωση κάτοψης δοκιμίου Α2.....	38
Figure 22:Διάγραμμα Τάσης -Ανηγμένης Επιμήκυνσης Α2 .....	39
Figure 23:Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης Α2 .....	39
Figure 24:Μακροσκοπική Αποτύπωση κάτοψης δοκιμίου Α3 .....	40
Figure 25:Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Επιμήκυνσης Α3.....	40
Figure 26:Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης Α3 .....	41
Figure 27:Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Επιμήκυνσης Δοκιμίων Α' .....	41
Figure 28:Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης Δοκιμίων Α'.....	42
Figure 29:Συνολική εικόνα ατελειών συγκόλλησης Α' .....	42
Figure 30:Μακροσκοπική αποτύπωση δοκιμίου Β1(α) .....	44
Figure 31:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου Β1(β) .....	44

Figure 32:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B1(γ) .....	44
Figure 33:Διάγραμμα Τάσης -Ανηγμένης Επιμήκυνσης B1 .....	44
Figure 34:Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης B1.....	45
Figure 35:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B2(α)      Figure 36:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B2(β) .....	45
Figure 37:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B2(γ) .....	46
Figure 38:Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Επιμήκυνσης B2 .....	46
Figure 39:Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης B2.....	47
Figure 40:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B3(β)      Figure 41:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B3(α) .....	47
Figure 42:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B3(γ) .....	48
Figure 43:Διάγραμμα Τάσης -Ανηγμένης Επιμήκυνσης B3 .....	48
Figure 44:Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης B3.....	49
Figure 45:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B4(α)      Figure 46:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B4(β) .....	49
Figure 47:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B4(γ) .....	50
Figure 48:Διάγραμμα Τάσης -Ανηγμένης Επιμήκυνσης B4 .....	50
Figure 49:Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης B4.....	51
Figure 50:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B5(α)      Figure 51:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B5(β) .....	51
Figure 52:Μακροσκοπική Αποτύπωση δοκιμίου B5(γ) .....	52
Figure 53:Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Επιμήκυνσης B5 .....	52
Figure 54:Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης B5.....	53
Figure 55:Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Επιμήκυνσης δοκίμια Β .....	53
Figure 56:Συγκεντρωτικό διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης δοκίμια Β' .....	54
Figure 57:Συνολική εικόνα συγκόλλησης Β' .....	54

## Bibliography

1. **Ferreira et. al., Fransisco.** A Review of Orbital Friction Stir Welding. *Elsevier*. [Online] 2023.  
[https://www.researchgate.net/publication/371189340\\_A\\_Review\\_of\\_Orbital\\_Friction\\_Stir\\_Welding](https://www.researchgate.net/publication/371189340_A_Review_of_Orbital_Friction_Stir_Welding)
2. **Mishra and Ma.** Friction stir welding and processing. *Elsevier*. [Online] 2005.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X05000768>.
3. **Soutis, Tolga Dursun Costas.** *elsevier*. [Online] 2014.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913011357>. 1.
4. **Nandan, DebRoy and Bhadeshia.** Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. *Elsevier*. [Online] 2008.  
<https://sciencedirect.com/science/article/pii/S007964250800039X>.
5. **Pantelis, Papazoglou και Chaidemenopoulos.** Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων. s.l. : Tziola, 2017.
6. **Ambrosio, et al.** Material flow in friction stir welding: A review. *Elsevier*. [Online] 2023.  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013623002613?fbclid=IwAR1uvN2k1zr-EDdcEEwH54NPDSKFRvddnPK\\_bF65ZswkOLCTUIS7Mky3C7E](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013623002613?fbclid=IwAR1uvN2k1zr-EDdcEEwH54NPDSKFRvddnPK_bF65ZswkOLCTUIS7Mky3C7E).
7. **Elangovan and Balasubramanian.** Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Elsevier*. [Online] 2008.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607008035>.
8. **Zhao, et al.** The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy. *Elsevier*. [Online]  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X05004416#:~:text=In%20this%20paper%202014%20Al,structure%20and%20the%20mechanical%20properties..>
9. **Vairis, et al.** The Effect of Tool Geometry on the Strength of FSW Aluminum Thin Sheets. *MDPI*. [Online] 2022. <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/22/8187>.
10. **Sefene, et al.** A multi-criterion optimization of mechanical properties and sustainability performance in friction stir welding of 6061-T6 AA. [Online] 2023.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492823015295>.
11. **Kumar, et al.** Effect of FSW process parameters on mechanical properties and microstructure of dissimilar welded joints of AA2024 and AA6082. *Elsevier*. [Online] 2022.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321058028>.
12. **Safari, et al.** The effect of FSW parameters on the macro/micro-galvanic corrosion of the dissimilar joint between AZ31 and AA5052. [Online] 2023.

13. **Zhang, Xiao and Ma.** A Transient Thermal Model for Friction Stir Weld. Part II: Effects of Weld Conditions. *ResearchGate*. [Online] 2011.  
[https://www.researchgate.net/publication/241556445\\_A\\_Transient\\_Thermal\\_Model\\_for\\_Friction\\_Stir\\_Weld\\_Part\\_II\\_Effects\\_of\\_Weld\\_Conditions](https://www.researchgate.net/publication/241556445_A_Transient_Thermal_Model_for_Friction_Stir_Weld_Part_II_Effects_of_Weld_Conditions).
14. **Radisavljevic, et al.** Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints. *Elsevier*. [Online] 2013.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632613628976>.
15. **Ma, et al.** Effect of Temperature and Material Flow Gradients on Mechanical Performances of Friction Stir Welded AA6082-T6 Joints. *MDPI*. [Online] 2022. <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/19/6579>.
16. **Zhang, et al.** Review of tools for friction stir welding and processing. *ResearchGate*. [Online] 2012.  
[https://www.researchgate.net/publication/265083765\\_Review\\_of\\_tools\\_for\\_friction\\_stir\\_welding\\_and\\_processing](https://www.researchgate.net/publication/265083765_Review_of_tools_for_friction_stir_welding_and_processing).
17. **Hirasawa, et al.** Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. *Elsevier*. [Online] 2010.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013610001135>.
18. **Sarma, Srikanth and Vanketeshwarlu.** Methodological approach for best tool geometry determination in friction stir welding process. *Elsevier*. [Online] 2021.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320378561#!>.
19. **Kumar, et al.** Influence of rotation speed, transverse speed, and pin length during underwater friction stir welding (UW-FSW) on aluminum AA6063: A novel criterion for parametric control. *Elsevier*. [Online] 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840422000105>.
20. **Ramnath, et al.** Design and Development of Milling Fixture for Friction Stir Welding. *Elsevier*. [Online] 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317325506>.
21. **Geng, et al.** Parametric optimization and microstructural characterization of friction welded aeronautic aluminum alloy 2024. *Elsevier*. [Online] 2019.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632619651563>.
22. **Mehdi and Mishra.** Effect of friction stir processing on mechanical properties and heat transfer of TIG welded joint of AA6061 and AA7075. *Elsevier*. [Online] 2021.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914720303305>.
23. **Bussu and Irving.** The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints. *Elsevier*. [Online] 2003.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112302000385>.
24. **Huang and Loge.** A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials. *Elsevier*. [Online] 2016. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516311753>.

25. **Ponge and Gottstein.** Necklace formation during dynamic recrystallization: mechanisms and impact on flow behavior. *Elsevier*. [Online] 1998.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645497002334>.
26. **Gibson, et al.** Friction stir welding: Process, automation, and control. *Elsevier*. [Online] 2014.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612513000601>.
27. **Starhin, Deschamps and Wang.** The strength of friction stir welded and friction stir processed aluminium alloys. [Online] 2008.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646207007117>.
28. **Sun, et al.** Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welded T2 copper. *Elsevier*. [Online] 2023.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492823010565>.
29. **Hu, Wang and Yuan.** Quantitative investigation of the tensile plastic deformation characteristic and microstructure for friction stir welded 2024 aluminum alloy. *Elsevier*. [Online] 2012.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580312002343>.
30. **Beden, et al.** Fatigue crack growth simulation of aluminium alloy under spectrum loadings. *elsevier*. [Online] 2010.  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306910000531?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=80ff73d95c5ceeb0](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306910000531?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=80ff73d95c5ceeb0).
31. **Edwards and Ramulu.** Investigation of microstructure, surface and subsurface characteristics in titanium alloy friction stir welds of varied thicknesses. *ResearchGate*. [Online] 2099.  
[https://www.researchgate.net/publication/228849680\\_Investigation\\_of\\_microstructure\\_surface\\_and\\_subsurface\\_characteristics\\_in\\_titanium\\_alloy\\_friction\\_stir\\_welds\\_of\\_varied\\_thicknesses#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/228849680_Investigation_of_microstructure_surface_and_subsurface_characteristics_in_titanium_alloy_friction_stir_welds_of_varied_thicknesses#fullTextFileContent).
32. **Ridha, Alkhazraji and Abdullah.** Investigation of Friction Stir Welding of AA2024-T4 Thin Sheets for Industrial Applications. *ResearchGate*. [Online] 2020.  
[https://www.researchgate.net/publication/343586337\\_Investigation\\_of\\_Friction\\_Stir\\_Welding\\_of\\_AA2024-T4\\_Thin\\_Sheets\\_for\\_Industrial\\_Applications#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/343586337_Investigation_of_Friction_Stir_Welding_of_AA2024-T4_Thin_Sheets_for_Industrial_Applications#fullTextFileContent).
33. **Karthikeyan, Thiagarajan and Mahadevan.** Study of Relation between Welding and Hardening Parameters of Friction Stir Welded Aluminium 2024 Alloy. *Elsevier*. [Online] 2014.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814033426>.
34. **Kumar, Ramana and Shanmuganathan.** Experimental Investigation of Mechanical Properties And Morphological Studies on Friction Stir Welded Aluminum 2024 Alloy. *Elsevier*. [Online] 2018.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317323829>.
35. **Milcic, et al.** Experimental investigation of fatigue properties of FSW in AA2024-T351. *Elsevier*. [Online] 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245232161830458X>.
36. **H.W.Zhang, Z.Zhang and Chen.** The finite element simulation of the friction stir welding process. *Elsevier*. [Online] 2005.



[https://www.researchgate.net/publication/353686379\\_The\\_finite\\_element\\_simulation\\_of\\_the\\_friction\\_stir\\_welding\\_process](https://www.researchgate.net/publication/353686379_The_finite_element_simulation_of_the_friction_stir_welding_process).

37. **Kah, et al.** <https://ijmme.springeropen.com/articles/10.1186/s40712-015-0053-8>. *SpringerOpen*. [Online] 2015. <https://ijmme.springeropen.com/articles/10.1186/s40712-015-0053-8>.

38. **Aydin, et al.** Tensile properties of friction stir welded joints of 2024 aluminum alloys in different heat-treated-state. *Elsevier*. [Online] 2009. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026130690800424X>.

39. **Vuherer, et al.** Fatigue and fracture behaviour of Friction Stir Welded AA-2024-T351 joints. *Elsevier*. [Online] 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016784422100135X>.

40. **Albannai.** Review The Common Defects In Friction Stir . *ResearchGate*. [Online] 2020. [https://www.researchgate.net/publication/346023570\\_Review\\_The\\_Common\\_Defects\\_In\\_Friction\\_Stir\\_Welding](https://www.researchgate.net/publication/346023570_Review_The_Common_Defects_In_Friction_Stir_Welding).

41. **Pantelis, Papazoglou and Chaidemenopoulos.** *Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων*. 2017.

