



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ –  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΤΣΟΤΡΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**Επιβλέπων Καθηγητής:**

**Δρ. Δραγατογιάννης Δημήτριος**

**ΑΘΗΝΑ 2022**





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

Συγκόλληση δια τριβή με ανάδευση. Εφαρμογή σε συγκολλήσεις πολυμερικών υλικών.

**Συγγραφέας**

Τσότρας Δημήτριος (Α.Μ. : 51116104)

**Επιβλέπων**

Δραγατογιάννης Δημήτριος

**Ημερομηνία Εξέτασης**

23/2/2023

**Εξεταστική Επιτροπή**

Δραγατογιάννης Δημήτριος  
Διδάκτωρ Καθηγητής

Θεοδουλίδης Αλέξανδρος  
Επίκουρος Καθηγητής

Χιονόπουλος Σταύρος  
Επίκουρος Καθηγητής

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Τσότρας Δημήτριος του Διονυσίου, με αριθμό μητρώου 51116104, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών 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. Επιπλέον, 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 εμένα 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





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	13
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	14
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	15
ABSTRACT .....	16
1. ΠΟΛΥΜΕΡΗ .....	17
1.1 Γενικά .....	17
1.2 Μόρια πολυμερών – Πολυμερισμός/Συμπολυμερισμός .....	17
1.3 Ταξινόμηση πολυμερών .....	17
1.4 Πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding – FSW) .....	26
1.5 Άλλες τεχνικές σύνδεσης πολυμερών .....	27
1.6 Εφαρμογές πολυμερών στα πλοία .....	28
2. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (Friction Stir Welding – FSW) – ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ .....	30
2.1. Συγκολλήσεις δια τριβής .....	30
2.2. FSW – Γενικά .....	33
2.3. Μηχανές FSW .....	35
2.4. Παράμετροι συγκόλλησης FSW .....	37
2.4.1 Επίδραση ταχύτητας περιστροφής εργαλείου ( $\omega$ ) και ταχύτητας συγκόλλησης ( $v$ ) .....	38
2.4.2 Επίδραση της κλίσης ( $\alpha$ ) του εργαλείου συγκόλλησης .....	38
2.5. Ζώνες Συγκόλλησης .....	39
2.6. Πιθανά Ελαττώματα στις συγκολλήσεις FSW .....	40
2.7. Πλεονεκτήματα .....	45
2.8. Μειονεκτήματα .....	48
2.9. Εφαρμογή FSW στη Ναυπηγική Βιομηχανία .....	49
3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΟΔΟΣ ΣΤΗΝ FSW ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	52
3.1 Γενικά – Αρχή της FSW Πολυμερών .....	52
3.2 Polymer Matrix Composites – PMC .....	56
3.3 Η τεχνική FSSpW .....	58
3.4 Ερευνητικές μελέτες – Βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης για την FSW πολυμερών .....	60

3.5	Ο ρόλος του σχεδιασμού των εργαλείων σε συγκολλήσεις FSW πολυμερών .....	64
3.6	Επίδραση της εξωτερικής επαγωγής θερμότητας .....	66
3.7	Βυθισμένη FSW πολυμερών .....	67
3.8	Εξέλιξη της μικροδομής .....	69
3.9	Εξάλειψη Ατελειών Ρίζας σε FSW πολυμερών .....	70
3.10	Επίδραση της κρυστάλλωσης στις Ιδιότητες του Πολυμερούς .....	72
3.11	Ροή υλικού κατά τη διαδικασία της FSW .....	73
4	ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΟΜΟΙΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	74
4.1	Περίπτωση FSW φύλλων HDPE – Mishra et al. ....	74
4.1.1	Υλικά, Μέθοδοι, Παράμετροι και Μηχανήματα .....	74
4.1.2	Αποτελέσματα – Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις .....	78
4.2	Περίπτωση φύλλων Nylon-6 – Sahu et al. ....	87
4.2.1	Πειραματική διαδικασία .....	87
4.2.2	Αποτελέσματα – Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις .....	89
4.3	Περίπτωση φύλλων Nylon-6 – Zafar et al. ....	94
4.3.1	Υλικά και Μέθοδοι .....	94
4.3.2	Αποτελέσματα και Συζήτηση .....	95
5	ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	100
5.1	Περίπτωση FSW συγκόλλησης PE-HMW με PP – Eslami et al. ....	100
5.2	Περίπτωση FSW συγκόλλησης ABS με PP .....	107
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑ .....	117
	Βιβλιογραφία .....	118





## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Αρχή λειτουργίας της συγκόλλησης δια τριβής

Εικόνα 2.2: Αρχή λειτουργίας συγκόλλησης δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση

Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης δια τριβής σε τροχιά

Εικόνα 2.4: (α) Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας συγκόλλησης δια τριβής με τοξοειδή συμπεριφορά, (β) Σχηματική αναπαράσταση του σημείου επαφής του δακτυλίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων πριν την έναρξη της συγκόλλησης

Εικόνα 2.5: Αρχή της μεθόδου FSW

Εικόνα 2.6: Η προσαρμοσμένη μηχανή I-STIR της MTS (MTS I-STIR 5 axes process development system)

Εικόνα 2.7: Αριστερά: Ρομπότ σε αρθρωτό βραχίονα. Δεξιά: Ρομπότ με βραχίονα παράλληλης κινηματικής

Εικόνα 2.8: Προσαρμοσμένη εργαλειομηχανή FSW εγκατεστημένη στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Εικόνα 2.9: Ζώνες συγκόλλησης

Εικόνα 2.10: Ζώνες συγκόλλησης με εστίαση στο flow arm

Εικόνα 2.11: Ελάττωμα τύπου Τούνελ σε συγκολλημένο κράμα αλουμινίου-πυριτίου

Εικόνα 2.12: Ελάττωμα “kissing bond”

Εικόνα 2.13: Ελάττωμα “groove” και οπής πείρου σε συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αλουμινίων

Εικόνα 2.14: Σχηματισμός κενού κατά τη διάρκεια συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

Εικόνα 2.15: Μικρογραφική εικόνα όπου διαφαίνεται το ελάττωμα «flash» σε συγκόλληση πλακών από κράμα χύτευσης αλουμινίου ADC12

Εικόνα 2.16: Εικόνα κάτοψης συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση με ελαττώματα «flash» και «groove» στην επιφάνεια

Εικόνα 2.17: Ελάττωμα μη κανονικής ανάδευσης υλικού. Η εικόνα λήφθηκε στο κάτω μέρος της συγκόλλησης, κάτω από τη ζώνη ανάδευσης

Εικόνα 2.18: (a) Συγκόλληση συμβολής κατά μέτωπο (square butt joint), (b) Συγκόλληση συμβολής προς άκρες (edge butt joint), (c) Συγκόλληση ‘T’ συμβολής (T butt joint), (d) Συγκόλληση επικάλυψης (lap joint), (e) Πολλαπλή συγκόλληση επικάλυψης (multiple lap joint), (f) Συγκόλληση ‘T’ επικάλυψης (T lap joint), (g) Συγκόλληση φιλέτου (fillet joint)

Εικόνα 2.19: Στα δεξιά της εικόνας παρατηρείται η οπή που δημιουργείται λόγω του πείρου στο τέλος της συγκόλλησης

Εικόνα 2.20: Φωτογραφία του κρουαζιεροπλοίου “Super Liner Ogasawara”

Εικόνα 2.21: Φωτογραφία του κρουαζιεροπλοίου “Seven Seas Navigator”

Εικόνα 2.22: Φωτογραφία του πολεμικού πλοίου “Sea Fighter”

Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας FSW

Εικόνα 3.2: Στάδια της διαδικασίας της FSW

Εικόνα 3.3: Παραγωγή PMC

Εικόνα 3.4: Τα στάδια της διαδικασίας FSSpW

Εικόνα 3.5: Σχηματική απεικόνιση των διαδικασιών (a) FSW, (b) FSSpW

Εικόνα 3.6: Παράμετροι συγκόλλησης

Εικόνα 3.7: Τιμές περιστροφικής ταχύτητας και ταχύτητας συγκόλλησης συναρτήσει του είδους του πολυμερούς

Εικόνα 3.8: Η επιρροή του βάθους βύθισης στην αντοχή συγκόλλησης

Εικόνα 3.9: Τύποι πείρων

Εικόνα 3.10: (a) Σχηματική απεικόνιση του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε στη FSSpW των Oliveira et al. (b) Σύγκριση διατμητικής αντοχής στη FSSpW με άλλες τεχνικές συγκόλλησης

Εικόνα 3.11: Εγκατάσταση και διαδικασία της βυθισμένης FSW

Εικόνα 3.12: Σκληρότητα των συγκολλημένων δοκιμίων PC με βυθισμένη FSW

Εικόνα 3.13: (a) Σφαιρική δομή στη ραφή και στο υλικό βάσης, (b) Υπερμοριακή δομή στη συνοριακή περιοχή

Εικόνα 3.14: Παραδείγματα ελαττωμάτων ρίζας

Εικόνα 3.15: Σχηματική απεικόνιση του νεοσχεδιασμένου εργαλείου με δύο περιανχένια της μελέτης των Pirizadeh et al.

Εικόνα 3.16: Οι σχηματισθείσες περιοχές κατά τη FSW

Εικόνα 3.17: Εικόνες οπισθίου φωτισμού των συγκολλημένων φύλλων PMMA με συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση της μελέτης των Simoes et al. (a) Εργαλείο 1 (b) Εργαλείο 2

Εικόνα 4.1: Οι διαστάσεις του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία

Εικόνα 4.2: Η εγκατάσταση της μηχανής FSW που χρησιμοποιήθηκε στο ερευνητικό πείραμα

Εικόνα 4.3: Διαστάσεις δείγματος δοκιμής εφελκυσμού

Εικόνα 4.4: Material peeling (ξεφλούδισμα) (a) 500 rpm, (b) 900 rpm

Εικόνα 4.5: Επίδραση περιανυχενίου διαμέτρου 24 mm

Εικόνα 4.6: Συγκολλημένο δείγμα. (a) Πρόοψη, (b) Οπίσθια όψη, (c) Διευρυμένη άποψη της ζώνης συγκόλλησης

Εικόνα 4.7: Μεταβολή της αξονικής δύναμης με το χρόνο

Εικόνα 4.8: Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στην αντοχή σε εφελκυσμό

Εικόνα 4.9: Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην αντοχή σε εφελκυσμό

Εικόνα 4.10: Θραυσμένα από εφελκυσμό δείγματα. (a)  $\omega = 800$  rpm  $v = 10$  mm/min, (b)  $\omega = 500$  rpm,  $v = 30$  mm/min

Εικόνα 4.11: (a) Παγωμένο δείγμα συγκολλημένων θερμοπλαστικών ( $\omega = 800$  rpm,  $v = 10$  mm/min), (b) μακρο-εικόνα, (c) μικρο-εικόνα

Εικόνα 4.12: Πειραματική διάταξη μηχανής και εγκατάσταση σύσφιξης

Εικόνα 4.13: Το εργαλείο FSW που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία

Εικόνα 4.14: Συγκολλημένο δείγμα Nylon-6

Εικόνα 4.15: Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στην αντοχή σε εφελκυσμό

Εικόνα 4.16: Διάγραμμα Τάσης-Επιμήκυνσης

Εικόνα 4.17: Σκληρότητα Shore-D συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο συγκόλλησης για κάθε περίπτωση πειραματικής δοκιμής

Εικόνα 4.18: Φωτογραφία και σχηματικό γράφημα απεικόνισης του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα

Εικόνα 4.19: Σχηματική απεικόνιση της θέσης του θερμοστοιχείου τύπου-K

Εικόνα 4.20: Διάγραμμα Θερμοκρασίας - Ταχύτητας

Εικόνα 4.21: Διατομές συγκολλημένων δοκιμίων για (a) 300 rpm, (b) 400 rpm, (c) 500 rpm, (d) 1000 rpm

Εικόνα 4.22: Μικροδομή Ζώνης Ανάδευσης στις (a) 300 rpm, (b) 400 rpm, (c) 500 rpm, (d) 1000 rpm

Εικόνα 5.1: Συγκόλληση επικάλυψης ανομοίων πολυμερών. (a) CAD μοντέλο της συγκόλλησης επικάλυψης με σταθερό εργαλείο FSW, (b) Συγκολλημένο δείγμα, (c) Διαστάσεις των ελεγμένων συγκολλημένων δοκιμίων

Εικόνα 5.2: (a) Πρόοψη, (b) Όψη διατομής, (c) Κάτοψη, (d) Όψη της γεωμετρίας του επιπέδου πείρου, (e) Όψη της γεωμετρίας του τριγωνικού πείρου

Εικόνα 5.3: (a) Σχηματική απεικόνιση κάτοψης της θέσης και του προσανατολισμού των καμερών DIC, (b) Ρύθμιση της DIC εγκατάστασης κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής

Εικόνα 5.4: (a) Μοτίβο βαθμονόμησης, (b) Βαμμένο με ψεκασμό δείγμα για DIC μέτρηση

Εικόνα 5.5: (a) Συγκολλημένα δοκίμια PE-PP, (b) Απομακρυσμένη τάση συναρτήσεως της παραμόρφωσης

Εικόνα 5.6: Σχηματική απεικόνιση του εργαλείου με τις διαστάσεις του

Εικόνα 5.7: Εικόνα των δοκιμών που συγκολλήθηκαν στη μελέτη

Εικόνα 5.8: Απεικόνιση του ελαττώματος «τούνελ» το οποίο εμφανίστηκε στην πέμπτη πειραματική δοκιμή

Εικόνα 5.9: Απεικόνιση του αποτελέσματος της ενάτης πειραματικής δοκιμής συγκόλλησης

Εικόνα 5.10: Τα συγκολλημένα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού. Το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί στο ABS και το άσπρο στο PP.

Εικόνα 5.11: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

Εικόνα 5.12: Θραύση των συγκολλημένων ανομοίων πολυμερών ABS-PP, υπό δοκιμής εφελκυσμού

Εικόνα 5.13: Δοκιμές εφελκυσμού στα ανόμοια πολυμερικά υλικά PP και ABS

Εικόνα 5.14: Μετρήσεις σκληρότητας κατά μήκος και πλάτος των δοκιμών ABS-PP: (a) Δοκίμιο 13 και (b) Δοκίμιο 14

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Τα κυριότερα θερμοπλαστικά και οι χρήσεις τους

Πίνακας 3.1: Οι πιο σημαντικές μελέτες FSW πολυμερών

Πίνακας 3.2: Υλικά κατασκευής εργαλείων FSW

Πίνακας 4.1: Φυσικές ιδιότητες του HDPE

Πίνακας 4.2: Παράμετροι συγκόλλησης πειράματος

Πίνακας 4.3: Αντοχή σε εφελκυσμό ανά πειραματική δοκιμή

Πίνακας 4.4: Φυσικές ιδιότητες του Nylon-6

Πίνακας 4.5: Παράμετροι των πειραματικών δοκιμών συγκόλλησης

Πίνακας 5.1: Πίνακας Taguchi με τους συνδυασμούς παραμέτρων για την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών FSW

Πίνακας 5.2: Παράμετροι πειραματικών δοκιμών συγκολλήσεων FSW

Πίνακας 5.3: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ABS και PP γενικά

Πίνακας 5.4: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των συγκεκριμένων δοκιμών ABS και PP που επιλέχθηκαν σε αυτή τη μελέτη

Πίνακας 5.5: Παράμετροι πειραματικών δοκιμών συγκόλλησης FSW

Πίνακας 5.6: Παράμετροι δοκιμών εφελκυσμού

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται την εφαρμογή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση σε πολυμερικά υλικά. Περιγράφονται οι τρόποι σύνδεσης-συγκόλλησης των πολυμερών και σημαντικών εφαρμογών τους στις ναυπηγικές και τις θαλάσσιες κατασκευές. Παρουσιάζεται η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση και οι βασικές παράμετροι της διεργασίας, καθώς και χαρακτηριστικές της εφαρμογές στη ναυπηγική βιομηχανία.

Η σχετική ελληνική βιβλιογραφία τόσο στο σκέλος των διπλωματικών όσο και στο σκέλος των άρθρων είναι περιορισμένη και η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι η πρώτη που πραγματοποιείται τις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση σε πολυμερικά υλικά. Στόχος στη συγκεκριμένη εργασία ήταν η μελέτη των πιο σημαντικών σχετικών ερευνητικών εργασιών που υπάρχουν στην ελεύθερη αγγλόγλωσση ερευνητική βιβλιογραφία για την ανάδειξη ενός καινοτόμου θέματος που αφορά την εφαρμογή της μεθόδου σε πολυμερικά υλικά. Έμφαση δόθηκε σε περιπτώσεις συγκόλλησης όμοιων και ανόμοιων πολυμερικών υλικών που έχουν εφαρμογή στη ναυπηγική βιομηχανία. Η χρήση πολυμερών στα πλοία και στην ναυτιλία αυξάνεται συνεχώς, καθιστώντας τη μελέτη των συγκολλήσεων και εν γένει των μεθόδων συγκόλλησης, ιδιαίτερα σημαντικές για τους νέους Ναυπηγούς Μηχανικούς

Θα ήθελα, τέλος, να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Καθηγητή κύριο Δρ. Δημήτριο Δραγατογιάννη τόσο για την ηθική υποστήριξη όσο και για την έμπρακτη βοήθειά του στη σύνταξη αυτής της εργασίας με τις χρήσιμες συμβουλές του, τις βιβλιογραφικές προτάσεις, την εποπτεία και την καθοδήγηση του για τη δομή και την απαραίτητη έρευνα της εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η χημεία, οι εφαρμογές και οι τρόποι σύνδεσης των πολυμερών. Δίδονται βασικές πληροφορίες για τα πολυμερή, οι συγκολλήσεις των οποίων με τη μέθοδο της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζεται η αρχή της μεθόδου συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση και αναφέρονται οι βασικοί παράμετροί της εργασίας. Η επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης, όπως της ταχύτητας και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του εργαλείου είναι καθοριστικής σημασίας για την αποδοτική επιτυχία και την αντοχή της συγκόλλησης. Επίσης, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, τα τεμάχια που συγκολλούνται και συγκεκριμένα η περιοχή συγκόλλησής τους, διακρίνονται σε ζώνες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και διαφορετικές ιδιότητες που αφορούν κυρίως τη φύση του υλικού και την μικροδομή του. Ακόμη, παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου, τα ελαττώματα που εμφανίζονται κατά την εξέλιξη της διαδικασίας, καθώς και η εφαρμογή της στη ναυπηγική βιομηχανία. Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται οι βασικές αρχές συγκόλλησης πολυμερικών υλικών με τη μέθοδο δια τριβής με ανάδευση και γίνεται ανασκόπηση σχετικών βιβλιογραφικών ερευνών. Πιο εξεζητημένα αναλύονται διαφορετικοί μηχανισμοί. Εξετάζεται αναλυτικότερα η επιρροή των παραμέτρων, των εργαλείων, τα ελαττώματα και η αντιμετώπισή τους, η ροή του της θερμότητας.

Το τέταρτο και το πέμπτο κεφάλαιο αφορούν εφαρμογές της μεθόδου ομοίων και ανομοίων πολυμερικών υλικών, αντίστοιχα, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί από ερευνητικές ομάδες του εξωτερικού, με στόχο την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Μέσω των πρακτικών εφαρμογών και των παραδειγμάτων γίνεται κατανοητή η συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων διεργασίας και των μηχανισμών συγκόλλησης με την ποιότητα και την αντοχή της συγκόλλησης.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνονται μελλοντικές προτάσεις έρευνας στον τομέα σχετικά με τις συγκολλήσεις FSW πολυμερών, καθώς και την ανάπτυξη της εφαρμογής στη ναυπηγική βιομηχανία.

## **ABSTRACT**

The first chapter presents the chemistry, applications and ways of connecting polymers. Basic information is given on the polymers, the welding of which by the friction stir welding method is examined in this paper.

In the second chapter, the principle of the friction stir welding method is examined and the main parameters of the work are mentioned. The effect of welding parameters such as speed and tool geometry are critical to the efficient success and strength of the weld. Also, during welding, the pieces to be welded, and specifically their welding area, are distinguished in zones with specific characteristics and different properties that mainly concern the nature of material and its microstructure., Furthermore, the advantages and disadvantages of the method, the defects the appear during the evolution of the process, as well as its application in the shipbuilding industry are listed.

In the third chapter, the basic principles of welding polymeric materials using the friction stir welding method are described and relevant literature research is reviewed. Different mechanisms are analyzed in more detail. The influence of parameters, tools, defects and their treatment, the flow of heat are analyzed in more detail.

The fourth and fifth chapters concern applications of the method of similar and dissimilar polymeric materials, respectively, which have been carried out by research groups abroad, with the aim of analyzing the experimental results and drawing conclusions. Through practical applications and examples the correlation between process parameters and welding mechanisms with weld quality and strength is understood.

Finally, the sixth chapter includes future research proposals in the field of polymer FSW welding, as well as the development of the application in the shipbuilding industry.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΠΟΛΥΜΕΡΗ

## 1.1 Γενικά

Τα πολυμερή είναι υλικά τα οποία αποτελούν, από χημικής άποψης, ενώσεις υψηλού μοριακού βάρους. Κυρίως στην ομάδα αυτή ανήκουν συνθετικές ρητίνες, πλαστικά, ελαστικά, υφάνσιμες ίνες, κ.ά., με ευρύτατες εφαρμογές σε όλους τους κλάδους της βιομηχανίας. [1]

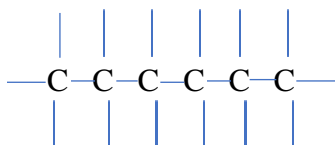
Τα πολυμερή που απαντώνται στη φύση περιλαμβάνουν το ξύλο, το καουτσούκ, το βαμβάκι, το μαλλί, το δέρμα και το μετάξι. Ιδιαίτερα μετά τη λήξη του Β' ΠΠ έχουν εισέλθει δυναμικά τα συνθετικά πολυμερή, τα οποία μπορούν να παραχθούν φθηνά, και οι ιδιότητές τους μπορούν να ελεγχθούν σε τεράστιο βαθμό. [2]

Τα πολυμερή ως υλικά αποτελούνται από μόρια μεγάλων διαστάσεων (μακρομόρια). Δομικοί λίθοι των μακρομορίων είναι χημικές ενώσεις-μονάδες, μικρού μοριακού βάρους, τα λεγόμενα μονομερή και ο αριθμός τους ποικίλει από 100 έως 100.000 ανά αλυσίδα. Στα **πλεονεκτήματα των πολυμερών έναντι των μεταλλικών υλικών** συμπεριλαμβάνονται η δυνατότητα τους να μορφοποιούνται εύκολα και να παρασκευάζονται σύμφωνα με τους σχεδιασμούς μας, η χαμηλή πυκνότητα, οι καλές μηχανικές ιδιότητες, δυνατότητα διαφάνειας και συνήθως αρκετά χαμηλό κόστος. Τα **μειονεκτήματά** τους σε σχέση με τα μεταλλικά υλικά είναι ότι συνήθως έχουν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες, δεν είναι δυνατή η χρήση τους σε υψηλές θερμοκρασίες και η χρήση τους επιφυλάσσει μεγάλους κινδύνους ρύπανσης του περιβάλλοντος (πρόβλημα ανακύκλωσης). [3]

## 1.2 Μόρια πολυμερών – Πολυμερισμός/Συμπολυμερισμός

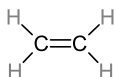
Στα πολυμερή τα μόρια αποτελούνται από μεγάλο αριθμό ατόμων ενωμένων μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς (μακρομόρια). Κάθε μόριο δημιουργείται από την επανάληψη μιας μικρής μοριακής μονάδας. Η μονάδα αυτή επανάληψης είναι ίδια ή παραπλήσια με την απλή χημική ένωση, το μονομερές, από το οποίο προκύπτει το πολυμερές. [3]

Τα άτομα μέσα σε κάθε μόριο συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς. Για παράδειγμα, στις ανθρακικές αλυσίδες τα άτομα άνθρακα συνδέονται ως εξής:

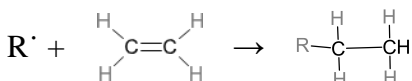


Καθένα από τα δύο ηλεκτρόνια σθένους που απομένουν για κάθε άτομο άνθρακα, μπορεί να υπεισέρχεται σε πλευρικούς δεσμούς με άτομα ή ρίζες που τοποθετούνται γειτονικά με την αλυσίδα ή ακόμα και να πραγματοποιηθούν διπλοί δεσμοί.

π.χ. Το αιθυλένιο  $C_2H_4$  (αέριο σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος)



Εάν στο αέριο αιθυλένιο εφαρμοστούν οι κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης θα μετατραπεί σε πολυαιθυλένιο (PE), το οποίο είναι ένα στερεό πολυμερές υλικό. Η διαδικασία αυτή αρχίζει όταν σχηματίζεται ένα ενεργό μονομερές από την αντίδραση μεταξύ ενός καταλύτη  $R^{\cdot}$  και του αιθυλενικού μονομερούς ως εξής:



Τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός πολυμερούς εξαρτώνται κυρίως από το μοριακό τους βάρος, το σχήμα και τη δομή των μοριακών αλυσίδων.

Στα πολυμερή με πολύ μεγάλες αλυσίδες διαπιστώνονται εξαιρετικά μεγάλα μοριακά βάρη.

Οι απλοί δεσμοί είναι ικανοί να περιστρέφονται και να κάμπτονται στις τρεις διαστάσεις, ενώ οι μοριακές αλυσίδες του πολυμερούς μπορούν να κάμπτονται, να περιελίσσονται και να διπλώνονται. Έτσι, υπάρχει αλληλο-διείσδυση και εμπλοκή μεταξύ γειτονικών μοριακών αλυσίδων. Οι τυχαίες αυτές μπερδεμένες δομές είναι υπεύθυνες για σημαντικά χαρακτηριστικά των πολυμερών, όπως των μεγάλων ελαστικών επιμηκύνσεων υλικών από καουτσούκ. [2]

Μέσω χημικών διαμοριακών αντιδράσεων μεταξύ των μορίων των μονομερών λαμβάνονται τα πολυμερή. **Ανάλογα με το είδος των αντιδρώντων μονομερών, το παραγόμενο μπορεί να είναι ομοιοπολυμερές ή συμπολυμερές και η χημική αντίδραση καλείται πολυμερισμός ή συμπολυμερισμός αντίστοιχα.**

Κατά τον πολυμερισμό συμβαίνουν είτε αντιδράσεις συμπτύκνωσης είτε αντιδράσεις προσθήκης. [3]

**Στον πολυμερισμό προσθήκης** τα μονομερή έχουν διπλούς (ή γενικά πολλαπλούς) δεσμούς. Κατά την αντίδραση έχουμε διάνοιξη του διπλού δεσμού, οπότε τα μονομερή αντιδρούν μεταξύ τους και οδηγούν σε μακριά αλυσίδα, χωρίς να ελευθερώνονται ενώσεις μικρού μοριακού βάρους. Τυπικό παράδειγμα πολυμερισμού προσθήκης είναι αυτό των παραγώγων αιθυλενίου

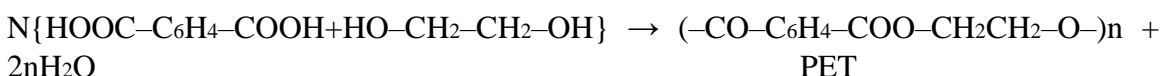
$$n \text{ H}_2\text{C}=\underset{\text{R}}{\text{CH}} \rightarrow \left( -\text{CH}_2-\underset{\text{R}}{\text{CH}_2}- \right)_n$$

Όπου n ο βαθμός πολυμερισμού.

Ιδιαίτερη περίπτωση πολυμερισμού προσθήκης είναι ο συμπολυμερισμός κατά τον οποίο δύο ή περισσότερα διαφορετικού είδους μονομερή ενώνονται και οδηγούν σε συμπολυμερές. Τα σημαντικότερα πολυμερή προσθήκης είναι το πολυαιθυλένιο, πολυστυρένιο, πολυμερή και συμπολυμερή του βινυλοχλωριδίου, πολυακρυλικά, πολυπροπυλένιο, πολυϊσοβουτυλένιο, φθοριοπλαστικά, κ.ά.

**Στον πολυμερισμό συμπτύκνωσης** λαμβάνει χώρα σειρά διαδοχικών αντιδράσεων συμπτύκνωσης ανάμεσα σε δύο διαφορετικά μονομερή όπου καθένα διαθέτει δύο δραστικές ομάδες. Ταυτόχρονα από κάθε αντίδραση συμπτύκνωσης αποβάλλεται ένα μικρό μόριο (συνήθως H<sub>2</sub>O, HCL).

Τυπική αντίδραση πολυσυμπτύκνωσης είναι ανάμεσα στην αιθυλενογλυκόλη και το τereφθαλικό οξύ.



Το πολυμερές που προκύπτει ανήκει στους πολυεστέρες, βρίσκει πλήθος εφαρμογών και χρησιμοποιείται μεταξύ άλλων και για παραγωγή υφάνσιμων ινών. [1]

**Ο πολυμερισμός με βάση την κινητική των αντιδράσεων αυτών διακρίνεται σε:**

**α) Σταδιακό**, όταν όλες οι αντιδράσεις οδεύουν κατά βαθμίδες (είδος αντιδράσεων συμπτύκνωσης).

**β) Αλυσιδωτό**, όταν οι αντιδράσεις οδεύουν με διαδοχικές προσθήκες ενός μονομερούς κάθε φορά που πρόκειται για ταχύτατες αντιδράσεις προσθήκης. Στην περίπτωση που εξετάσαμε του πολυαιθυλενίου ο πολυμερισμός είναι αλυσιδωτός.

**Κατά τον συμπολυμερισμό, τα μονομερή πολυμερίζονται ταυτόχρονα και σχηματίζουν συμπολυμερή, των οποίων η μοριακή αλυσίδα αποτελείται από όλα τα χρησιμοποιηθέντα είδη μονομερών.** Συμπολυμερή λαμβάνονται τόσο με αντιδράσεις συμπολυμερισμού, όσο και με χημικές αντιδράσεις μεταξύ ομοιοπολυμερών. Οι συνηθέστερες αντιδράσεις συμπολυμερισμού είναι αλυσιδωτές. [3]

### 1.3 Ταξινόμηση πολυμερών

[3]

**A) Ως προς την αρχιτεκτονική της πολυμερικής αλυσίδας, τα πολυμερή διακρίνονται σε:**

- **Γραμμικά πολυμερή:** Οι επαναλαμβανόμενες μονάδες συνδέονται μεταξύ τους από άκρο σε άκρο σε απλές αλυσίδες. Στα γραμμικά πολυμερή ασκούνται σε μεγάλο βαθμό δυνάμεις Van der Waals μεταξύ των αλυσίδων.  
π.χ. πολυαιθυλένιο, πολυστυρένιο, πολυαμίδιο, πολυμεθακρυλικός μεθυλεστέρας, νάιλον, φθοράνθρακες.
- **Διακλαδισμένα πολυμερή:** Οι κύριες αλυσίδες συνδέονται με πλευρικές (κλάδοι). Οι πλευρικές που θεωρούνται μέρος του κυρίως σκελετού του μορίου προέρχονται από παράπλευρες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την αντίδραση του πολυμερούς. Τα πολυμερή αυτά έχουν διδιάστατη δομή.  
π.χ. συμπολυμερές αιθυλενίου-εξενίου.
- **Διασταυρωμένα πολυμερή:** Γειτονικές πλευρικές αλυσίδες ενώνονται μεταξύ τους σε διάφορες θέσεις με ομοιοπολικούς δεσμούς. Πολλά από τα ελαστικά είναι διασταυρωμένα.
- **Δικτυωμένα πολυμερή:** Τρισδιάστατα δίκτυα που σχηματίζονται από πολυδραστικά μονομερή που διαθέτουν τρεις ή περισσότερους ενεργούς ομοιοπολικούς δεσμούς.

π.χ. φορμοφαινόλη, πολυεστέρες, πολυεποξειδικές ενώσεις, πολυουρεθάνες, κ.τ.λ.  
Ένα πολυμερές που είναι σε μεγάλο βαθμό διασταυρωμένο μπορεί να ταξινομηθεί ως ένα δικτυωμένο. Τα πολυμερή συνήθως δεν έχουν ένα μόνο διακριτό είδος

δομής. Επίσης, γραμμικά πολυμερή μπορούν με γεφύρωση να αποκτήσουν δικτυωτή δομή που τις περισσότερες φορές εκτείνεται σε τρεις διαστάσεις.

### **B) Ως προς τα επίπεδα οργάνωσης:**

- **Ομοιοπολυμερή:** Αποτελούνται από ένα μόνο είδος μονομερούς, π.χ. PE, και είναι τύπου:

-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-

- **Συμπολυμερή:** Αποτελούνται συνήθως από δύο είδη μονομερών A και B και ανάλογα με τη διαδοχή τους διακρίνονται σε:

- **Τυχαία ή στατιστικά συμπολυμερή,** διότι η κατανομή των A και B στην πολυμερική αλυσίδα είναι τυχαία (π.χ. συνθετικό καουτσούκ):

-A-B-A-A-B-B-A-A-A-B-A-

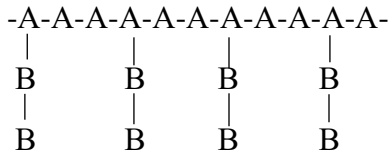
- **Εναλλασσόμενα συμπολυμερή.** Έχουμε εναλλασσόμενη παρουσία των δύο τύπων μονομερών στην πολυμερική αλυσίδα (π.χ. Nylon 6.6)

-A-B-A-B-A-B-A-B-A-A-B-A-

- **Τμηματικά συμπολυμερή.** Τα μονομερή A και B μετέχουν στην αλυσίδα του πολυμερούς κατά τμήματα, σε τυχαία ή περιοδική διαδοχή:

-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-

- **Ενοφθαλμισμένα συμπολυμερή.** Το ένα μονομερές αποτελεί πλευρική διακλάδωση στην πολυμερική αλυσίδα, την οποία συνθέτει μόνο το άλλο μονομερές:



Γ) Ως προς την προέλευσή τους τα πολυμερή διακρίνονται σε:

- **Φυσικά πολυμερή**

π.χ. μαλλί, μετάξι

- **Ημισυνθετικά πολυμερή**

Προκύπτουν από χημικό μετασχηματισμό φυσικών πρώτων υλών. π.χ. νιτροκυτταρίνη, εβονίτης, rayon, cellofan, κ.λ.π.

- **Συνθετικά πολυμερή**

Τα μόρια των μονομερών τα οποία συνθέτουν δεν υπάρχουν στη φύση. π.χ. χλωριούχο πολυβινύλιο, πολυτετραφθοροαιθυλένιο, Nylon 6, Nylon 6.6, κ.λ.π.

Δ) Ως προς τη χρήση τους, διακρίνονται σε πολυμερή ευρείας χρήσης, σε τεχνικά και προηγμένα πολυμερή.

Ε) Ως προς τις ιδιότητές τους, τα πολυμερή διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες τεράστιας σημασίας για την κατασκευαστική βιομηχανία:

- **Θερμοπλαστικά**

Αποτελούνται κυρίως από γραμμικά μόρια, που με τη θέρμανση μαλακώνουν και ρέουν, λόγω των χαλαρών μοριακών δεσμών, και αφού μορφοποιηθούν, αποψύχονται και στερεοποιούνται. Η διεργασία αυτή είναι αντιστρεπτή. Τα θερμοπλαστικά είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες. Στα θερμοπλαστικά ευρείας και βιομηχανικής χρήσης

περιλαμβάνονται: το πολυαιθυλένιο (PE), το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS), το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), το πολυαμίδιο (Nylon) καθώς και η οικογένεια των φθοροπολυμερών. [3]

- **Θερμοσκληρυνόμενα**

Πρόκειται για δισδιάστατα ή τρισδιάστατα δίκτυα, αποτελούμενα από μικρά, σχετικά, μακρομόρια που προέρχονται από την επανάληψη του μονομερούς μερικές εκατοντάδες φορές. Κατά την ανάμειξη των συστατικών του πολυμερούς (ρητίνη με το αντίστοιχο σκληρυντικό), με ή χωρίς θέρμανση, το πολυμερές σκληραίνει και μορφοποιείται κατά αναντίστροφο τρόπο. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία, διότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας διασπώνται οι δευτερεύοντες δεσμοί, αν και το πολυμερές δεν τήκεται λόγω της ιδιαίτερης δικτυωτής κατανομής των μακρομορίων του. Συνήθως είναι άμορφα. Τα κυριότερα θερμοσκληρυνόμενα είναι: τα φαινολικά πολυμερή (φαινοπλάστες ή βακελίτες, οι εποξειδικές ητίνες, οι αμινοπλάστες (ρητίνες ουρίας ή μελαμίνης με φορμαλδεΐδη), οι πολυεστέρες, κ.λ.π. [3]

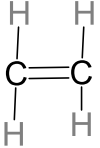
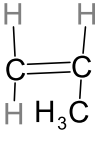
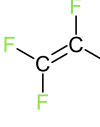
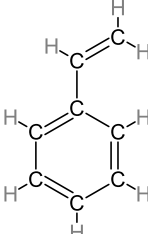
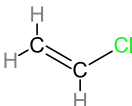
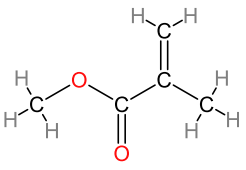
- **Ελαστομερή**

Είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες. Κατά τη φόρτισή τους μπορούν να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις και να επανέλθουν στο αρχικό τους σχήμα με την άρση του φορτίου (ιδιότητα υπερελαστικότητας). Οι χαρακτηριστικότεροι αντιπρόσωποι των ελαστομερών είναι: το ελαστικό κόμμι, το συνθετικό και φυσικό καουτσούκ, το συνθετικό πολυϊσοπρένιο, το ελαστικό στυρένιο-βουταδιένιο, το πολυχλωροπρένιο και οι σιλικόνες. Όταν το καουτσούκ θερμανθεί με θείο, υφίσταται βουλκανισμό. Δημιουργούνται, δηλαδή, διασταυρώσεις μεταξύ των μορίων, οι οποίες ενισχύουν πολύ τη δομή του ελαστικού. Με τον τρόπο αυτό, το ελαστομερές γίνεται σκληρότερο, ανθεκτικότερο και λιγότερο ευαίσθητο σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Η σχέση αναλογίας μεταξύ της περιεκτικότητας σε θείο του καουτσούκ και της βελτίωσης των μηχανικών του ιδιοτήτων, επιτρέπει την παραγωγή καουτσούκ με μεγάλο εύρος ιδιοτήτων. [3]

**Από τα τρία είδη τα μόνα που είναι συγκολλησιμα είναι τα θερμοπλαστικά.**

## Τα κυριότερα θερμοπλαστικά και οι χρήσεις τους:

Πίνακας 1.1: Τα κυριότερα θερμοπλαστικά και οι χρήσεις τους [3]

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΜΟΝΟΜΕΡΕΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ-ΧΡΗΣΕΙΣ
Πολυαιθυλένιο, PE		Σωλήνες, films, φιάλες. Κύπελλα, ηλεκτρικές μονώσεις, συσκευασία
Πολυπροπυλένιο, PP		Έχει τις ίδιες ιδιότητες με το PE, αλλά είναι ελαφρύτερο, στιβαρότερο και ανθεκτικότερο στην ηλιακή ακτινοβολία.
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο, PTFE		Έχει καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλό συντελεστή τριβής.
Πολυστυρένιο, PS		Φθηνά προϊόντα χύτευσης. Μορφοποιείται και σε αφρώδες πολυμερές για υλικά συσκευασίας.
Χλωριούχο πολυβινίλιο, PVC		Πλαίσια παραθύρων, δίσκοι γραμμοφώνων, απομιμήσεις δέρματος για ενδύματα, κ.τ.λ.
Πολυμεθυλομεθυλακρυλικό, PMMA		Διαφανή φύλλα και άλλα προϊόντα. Παράθυρα αεροσκαφών, οικιών, κ.τ.λ.
Nylon 6.6	$C_{12}H_{22}O_2N_2$	Έχουν άριστη εγχυτότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες, διαστασιακή σταθερότητα, χαμηλή διαπερατότητα από αέρια και ατμούς, αργή καύση και αυτόσβεση. Χρησιμοποιούνται για κατασκευή αντικειμένων ηλεκτρολογικής χρήσης (διακόπτες, μπρίζες, κτλ),



		ταπήτων, δικτυωτών ελαστικών, μελανοταινιών, χειρουργικών νημάτων, συνθετικών, υφάνσιμων ινών με απεριόριστες εφαρμογές στην υφαντουργία.
Nylon 6	$C_6H_{11}NO$	
Nylon 610	$C_{16}H_{30}N_2O_2$	
Nylon 11	$C_{11}H_{21}NO$	

**Παρατήρηση:** Στον παραπάνω πίνακα στη στήλη των μονομερών καταγράφονται οι χημικές ενώσεις των μονομερών μεμονωμένες μαζί με τους τους διπλούς δεσμούς (όπου υπάρχουν). Όταν πραγματοποιείται ο πολυμερισμός «σπάνε» οι διπλοί (ή γενικά πολλαπλοί) δεσμοί για να συνενωθούν τα μονομερή μεταξύ τους.

#### **1.4 Πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding-FSW)**

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζει στη συγκόλληση πολυμερικών υλικών με τη μέθοδο FSW. Από τα τρία είδη πολυμερών μόνο τα θερμοπλαστικά είναι τα συγκολλησίμα πολυμερή. Παραδείγματα πολυσκληρωμένων πολυμερών υλικών, όπως είδαμε, είναι το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), το πολυστυρένιο (PS), το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS), ο μεθακρυλικός πολυμεθυλεστέρας (PMMA), το πολυαιθυλένιο χαμηλής και υψηλής πυκνότητας (PE), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE), το νάιλον-6 (PA) και το πολυανθρακικό (PC).

Τα ακόλουθα πολυμερή έχουν συνδεθεί επιτυχώς μέσω FSW με ικανοποιητικά ποσοστά επιτυχίας που κυμαίνονται μεταξύ 50 και 98% :

- HDPE (High-density polyethylene)
- Nylon 6
- Ξύλο/πλαστικό
- PP/PC
- PP/PE
- PP
- PETG (Polyethylene terephthalate glycol)
- ABS

## 1.5 Άλλες τεχνικές σύνδεσης πολυμερών

Πέρα από τη μέθοδο FSW, σε γενικές γραμμές η σύνδεση των πολυμερών πραγματοποιείται με τις ακόλουθες τεχνικές [3]:

- **Μηχανική σύνδεση (mechanical fastening)**

Πραγματοποιείται κυρίως με τη χρήση κοχλιών.

- **Θερμική σύνδεση (thermal bonding)**

Αναφέρεται στη σύνδεση θερμοπλαστικών πολυμερών με θέρμανση και εφαρμογή πίεσης. Προκειμένου να προκύψει υγιής σύνδεση, απαιτείται σχολαστική και καλή καθαριότητα των επιφανειών συγκόλλησης. Διακρίνεται σε διάφορες παραλλαγές:

1. **Συγκόλληση με θερμαινόμενα εργαλεία ή ράουλα (heated tooling ή rollers).** Είναι κατάλληλη για συγκολλήσεις λεπτών πλαστικών φύλλων, π.χ. PE/PTFE
2. **Σύνδεση με τριβή (friction joining).** Τα προς συγκόλληση τεμάχια έρχονται σε επαφή και μετά από περιστροφή ή δόνηση (τουλάχιστον του ενός τεμαχίου), εκλύεται θερμότητα στην διεπιφάνεια, με αποτέλεσμα την τήξη και συγκόλληση.
3. **Συγκόλληση θερμού σύρματος (hot wire welding).** Μεταλλικό σύρμα ενσωματώνεται στην επιφάνεια επαφής των δύο πλαστικών τεμαχίων. Κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του σύρματος, απελευθερώνεται θερμότητα, μέσω του φαινομένου Joule, και αφού τηκούν τοπικά τα πολυμερή, εφαρμόζεται πίεση, η οποία οδηγεί στη συγκόλληση των τεμαχίων.
4. **Σύνδεση με διηλεκτρική θέρμανση (dielectric heating).** Λαμβάνει χώρα όταν τα προς σύνδεση τεμάχια πολυμερών εισέλθουν σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Η συχνότητα του πεδίου κυμαίνεται από 1 έως 200 MHz. Η τεχνική αυτή προτείνεται για συνδέσεις πολυμερών πολωμένων μακρομορίων, π.χ. το PVC.
5. **Ηλεκτρομαγνητική ή μαγνητική σύνδεση (electromagnetic bonding ή magnetic heat sealing).** Λεπτά μαγνητικά σωματίδια, με διάμετρο περίπου 1μm, εγκιβωτίζονται στη μάζα του πολυμερούς και τα προς σύνδεση τεμάχια εισάγονται σε μαγνητικό πεδίο υψηλής συχνότητας. Η θέρμανση των μαγνητικών σωματιδίων έχει ως αποτέλεσμα την τήξη και τη σύνδεση των πλαστικών.
6. **Συγκόλληση θερμού αερίου (hot-gas welding).** Πηγή θερμότητας είναι είτε θερμός αέρας είτε θερμό αδρανές αέριο. Είναι απαραίτητη η χρήση κυλίνδρου πληρωτικού υλικού, από το ίδιο θερμοπλαστικό, προκειμένου να αναπληρωθεί το υλικό στη ραφή.

- **Συνένωση με χρήση συνδετικού υλικού (adhesive bonding)**

Αποτελεί την ευκολότερη και πιο διαδεδομένη απ' όλες τις τεχνικές σύνδεσης πολυμερών, πολυμερών/μετάλλων και πολλών ακόμη άλλων συνδυασμών υλικών. Το συνδετικό υλικό μπορεί να είναι είτε μονομερές, π.χ. όπως στη σύνδεση PMMA, είτε ελαστομερές, είτε ένα θερμοσκληρυνόμενο υλικό, π.χ. εποξειδική ρητίνη, ευρισκόμενο μέσα σε κατάλληλο οργανικό πτητικό διαλύτη. Η χρήση του διαλύτη αυτού οδηγεί σε χαλάρωση των δεσμών συνάφειας στις προς σύνδεση επιφάνειες, των οποίων τα μόρια δύναται να ενωθούν μεταξύ τους. Η συνένωση των δύο επιφανειών επιτυγχάνεται με την εξάτμιση του διαλύτη. [3]

## 1.6 Εφαρμογές πολυμερών στα πλοία

Η χρήση πολυμερών-πλαστικών υλικών στα πλοία, πλέον είναι πολύ συχνή, πολυδιάστατη και αφορά πολλές πτυχές της κατασκευής και του εξοπλισμού του πλοίου.

**Οι κυριότερες εφαρμογές πολυμερών σε πλοία είναι σε:**

- κομμάτια της γάστρας, κατασκευή δομικών στοιχείων (π.χ. καταστρώματα, φρακτές),
- καλύμματα καταπακτών,
- κατασκευή σωληνών,
- κατασκευή ηλεκτρολογικών αντικειμένων, όπως μπρίζες, διακόπτες, μονώσεις καλωδίων, διάφορα προσωπικά αντικείμενα εντός του πλοίου, σκέπαστρα, βαφές, πλαστικοί τροχοί, σχοινιά, αντιδιαβρωτικές επικαλύψεις, κόλλες, πάνελ, έλικες, έπιπλα, ρουλεμάν,
- τοιχώματα,
- επενδύσεις και επιστρώσεις (κυρίως καταστρώματος, πατωμάτων και τοιχωμάτων), χρησιμοποιούνται κυρίως λόγω της αντιδιαβρωτικής τους προστασίας,
- οροφές,
- μόνωση, σε τμήματα της γάστρας, με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση της απώλειας θερμότητας,
- σκοινιά, κορδόνια,
- κατασκευή παραθύρων,
- φουσκωτές σωσίβιες σχεδίες, σωσίβια, λέμβοι διάσωσης.

Οι πλαστικοί σωλήνες είναι πολύ λιγότερο διαβρωτικοί και έχουν λιγότερες και μικρότερες διαρροές από τους μεταλλικούς. Απαγορεύεται η χρήση τους για πυρόσβεση. Ο πλαστικός σωλήνας μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για κρύο ή ζεστό νερό, γλυκό ή αλμυρό, σε πλήθος εφαρμογών, όπως σωλήνες στις δεξαμενές έρματος, απορριμάτων, στις δεξαμενές πετρελαίου, εξαγωγής αποβλήτων από τις τουαλέτες, λάστιχα πλύσης

καταστρώματος, κ.ά. Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται, κυρίως, για την κατασκευή των πλαστικών σωληνών πλοίων, είναι: το πολυαιθυλένιο, υψηλής ή χαμηλής πυκνότητας, το ABS, το PVC, το πολυπροπυλένιο, το CAB και το PTFE.

Η αισθητική, η υγιεινή και η διάρκεια του πλαστικού είναι στοιχεία που δεν αμφισβητούνται.

Το βασικό μειονέκτημα της χρήσης πολυμερών στο πλοίο είναι η τάση τους να παραμορφώνονται και να μειώνεται η αντοχή τους με το πέρασ του χρόνου όταν τους ασκηθεί κάποιο φορτίο ή όταν αυξάνεται πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο η θερμοκρασία, οδηγώντας κάποιες φορές και στην καύση τους.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (Friction Stir Welding – FSW) – ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ**

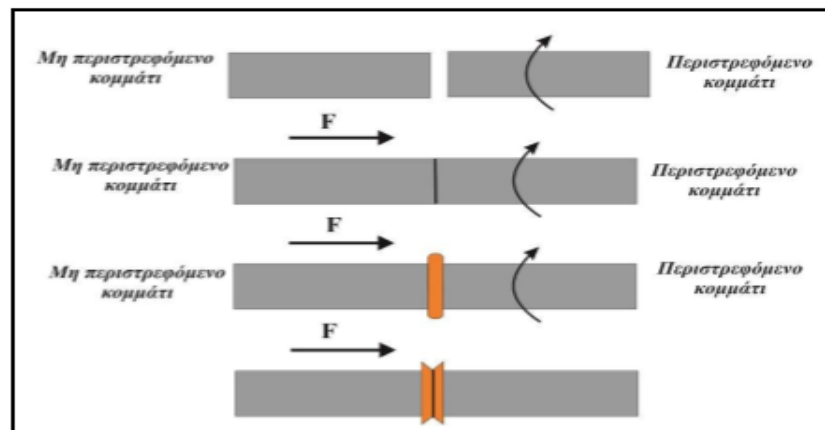
### **2.1 Συγκολλήσεις δια τριβής**

Οι συγκολλήσεις δια τριβής αποτελούν μεθόδους συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, δηλαδή η μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία κατά τη διάρκειά τους είναι μικρότερη από το σημείο τήξης των προς συγκόλληση κραμάτων. Κατά την πραγματοποίησή τους το ένα προς συγκόλληση κομμάτι περιστρέφεται ή βρίσκεται σε σχετική κίνηση ως προς το άλλο και υπό την άσκηση πίεσης, τα προς συγκόλληση κομμάτια έρχονται σε επαφή, αναπτύσσεται θερμότητα λόγω τριβής και εξώθηση υλικού από τις άκρες των επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Όταν επιτευχθεί η παραγωγή της μέγιστης επιθυμητής θερμοκρασίας η μεταξύ τους κίνηση σταματά και με την εφαρμογή επιπροσθέτης δύναμης πραγματοποιείται η συγκόλλησή τους. [11]

Οι συγκολλήσεις αυτές παρουσιάζουν μια εξαιρετικά βελτιωμένη μικροδομή συγκριτικά με τις συμβατικές συγκολλήσεις τήξης. Η απουσία τήξης έχει ως αποτέλεσμα την απουσία πόρων, εγκλεισμάτων, θερμών ρηγματώσεων και άλλων ατελειών που σχετίζονται με την τήξη, στην παραγωγή των συγκολλήσεων. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα συγκόλληση ετεροειδών (ανομοίων) κραμάτων (dissimilar welding), η οποία καθίσταται αδύνατη με τη χρήση συμβατικών μεθόδων. Επίσης, με τη μέθοδο αυτή δύναται να πραγματοποιηθούν οι συγκολλήσεις των περισσότερων σημαντικών μετάλλων ευρείας χρήσης. Ακόμη, όλες οι συγκολλήσεις δια τριβής είναι φιλικές προς το περιβάλλον, μιας και κατά την πραγματοποίησή τους δεν εκπέμπεται κανένα είδος επικίνδυνων ακτινοβολιών, δεν παράγονται ρυπογόνα αέρια και οι απαιτήσεις ενέργειας είναι μικρότερες σε σχέση με τις περισσότερες συγκολλήσεις τήξης. [11]

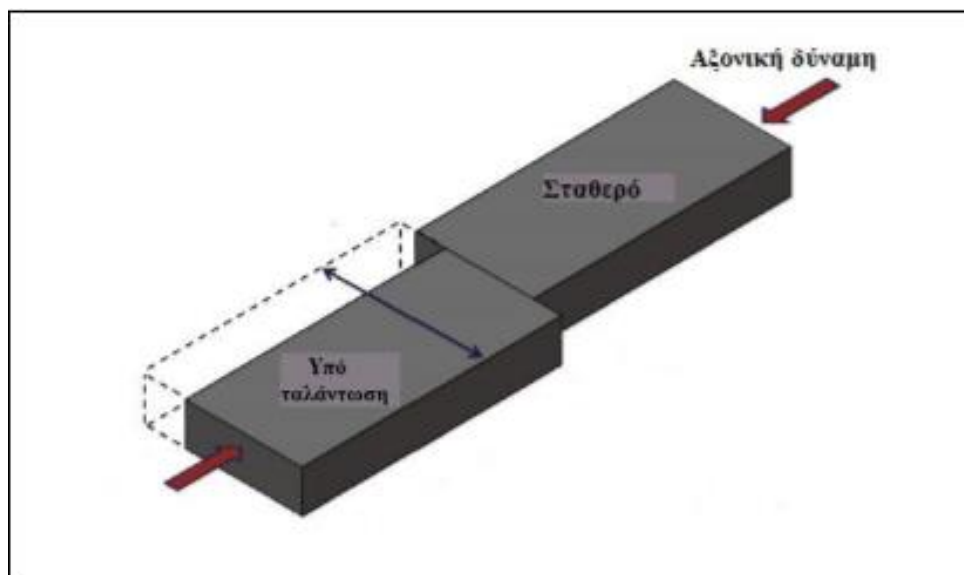
Οι συγκολλήσεις δια τριβής διακρίνονται στα εξής είδη [11]:

- Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (friction stir welding)
- Συγκόλληση δια τριβής με περιστροφή. Η μέθοδος αυτή χωρίζεται σε: μέθοδος συνεχούς οδήγησης (direct drive friction welding) και τη μέθοδο μέσω αδρανείας ή συσσωρευμένης ενέργειας (inertia friction welding).



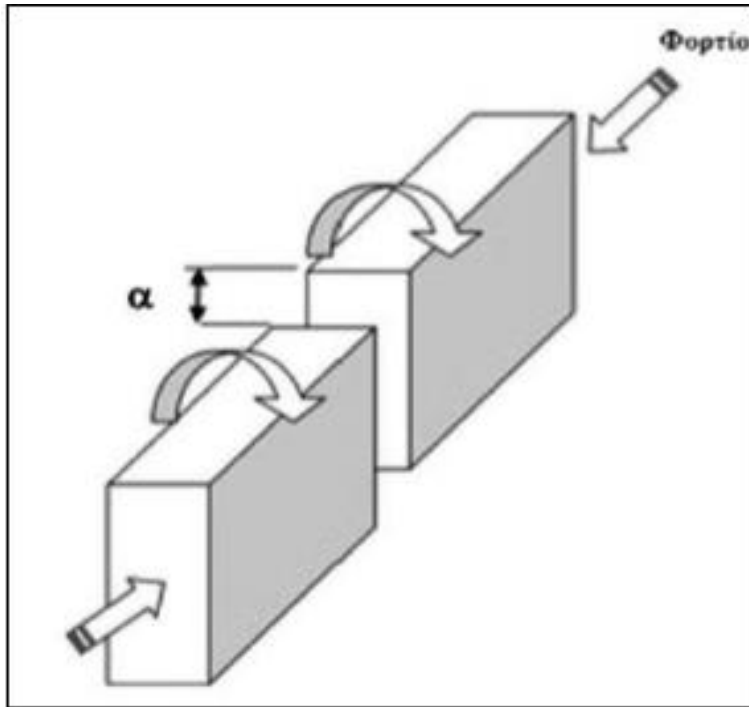
Εικόνα 2.1: Αρχή λειτουργίας της συγκόλλησης δια τριβής [11]

- Συγκόλληση δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (linear friction welding)



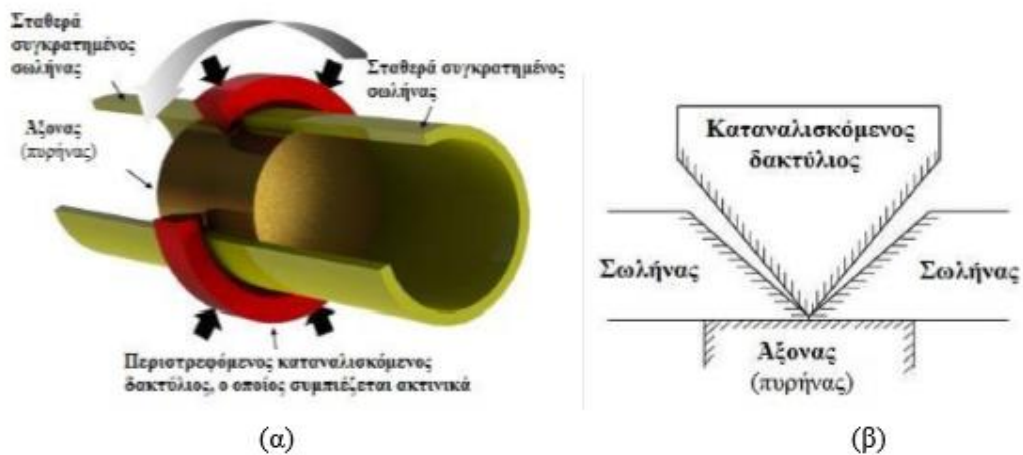
Εικόνα 2.2: Αρχή λειτουργίας συγκόλλησης δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση [Rotundo et al, 2010]

- Συγκόλληση δια τριβής με κίνηση σε τροχιά (orbital friction welding)



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης δια τριβής σε τροχιά [Maalekian et al, 2008]

- Συγκόλληση δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή (radical friction welding)



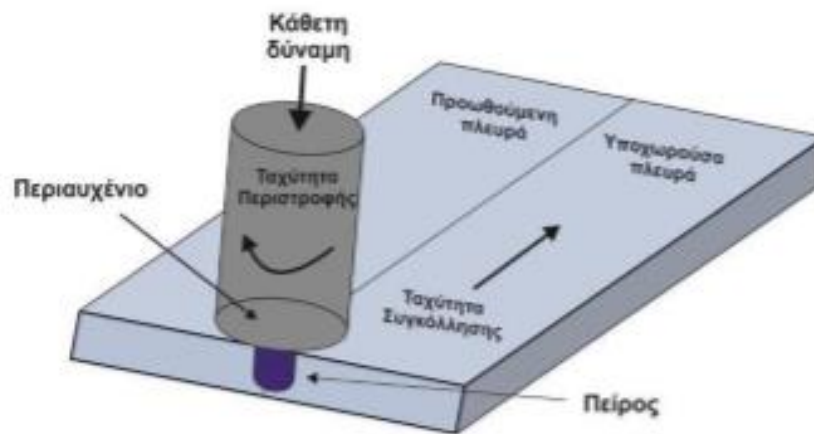
Εικόνα 2.4: (α) Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας της συγκόλλησης δια τριβής με τοξοειδή συμπεριφορά, (β) Σχηματική αναπαράσταση του σημείου επαφής του δακτυλίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων πριν την έναρξη της συγκόλλησης. [Della Rovere et al, 2013]



## 2.2 FSW – Γενικά

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αποτελεί μια καινοτόμα μέθοδο συγκόλλησης, στερεάς κατάστασης, η οποία επινοήθηκε και κατοχυρώθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute, TWI) το 1991. Είναι μια μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση όμοιων και ανόμοιων μετάλλων, όπως επίσης και όμοιων/ανόμοιων πολυμερών. [4]

Κατά τη συγκόλληση αυτή χρησιμοποιείται ένα μη καταναλισκόμενο εργαλείο συγκόλλησης, το οποίο αποτελείται από το περιουχένιο ή τον ώμο (shoulder) και καταλήγει σε έναν κατάλληλα σχεδιασμένο πείρο (pin). Το εργαλείο αυτό περιστρέφεται και βυθίζεται στις επαπτόμενες άκρες των προς συγκόλληση τεμαχίων έπειτα από την άσκηση κάθετης αξονικής δύναμης.



Εικόνα 2.5: Αρχή της μεθόδου FSW [11]

Το περιουχένιο ή ένα μέρος του (εξαρτάται από το αν το εργαλείο είναι υπό κλίση) έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια των προς συγκόλληση τεμαχίων, με αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας λόγω της μεταξύ τους τριβής. Στη θερμότητα αυτή προστίθεται η θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής και πλαστικής παραμόρφωσης που δημιουργεί ο πείρος, κατά την περιστροφή στο εσωτερικό των προς συγκόλληση υλικών. Η συνολική παραγόμενη θερμότητα πλαστικοποιεί τα προς συγκόλληση υλικά και στη συνέχεια το περιστρεφόμενο εργαλείο έχοντας την κατάλληλη ταχύτητα πρόωσης αναδύει τα πλαστικοποιημένα πλέον υλικά και πραγματοποιείται η συγκόλληση. [5]

**Οι συγκολλήσεις FSW χαρακτηρίζονται από δύο πλευρές: την προωθούμενη (advancing side), κατά την οποία η ταχύτητα περιστροφής έχει ίδια κατεύθυνση με την ταχύτητα συγκόλλησης, και την υποχωρούσα (retreating side), κατά την οποία η ταχύτητα περιστροφής έχει αντίθετη κατεύθυνση με την ταχύτητα συγκόλλησης. Οι δύο αυτές πλευρές έχουν σημαντική επίδραση κυρίως στις συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων.**

Για την πραγματοποίηση συγκολλήσεων FSW απαιτούνται στιβαρά μέσα συγκράτησης των πλακών, λόγω των μεγάλων δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την πραγματοποίησή τους. Επίσης, υπάρχει περιορισμός στο ύψος του πείρου (συνήθως 0.2 mm μικρότερο από το ύψος των προς συγκόλληση πλακών).

[4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]

### 2.3 Μηχανές FSW

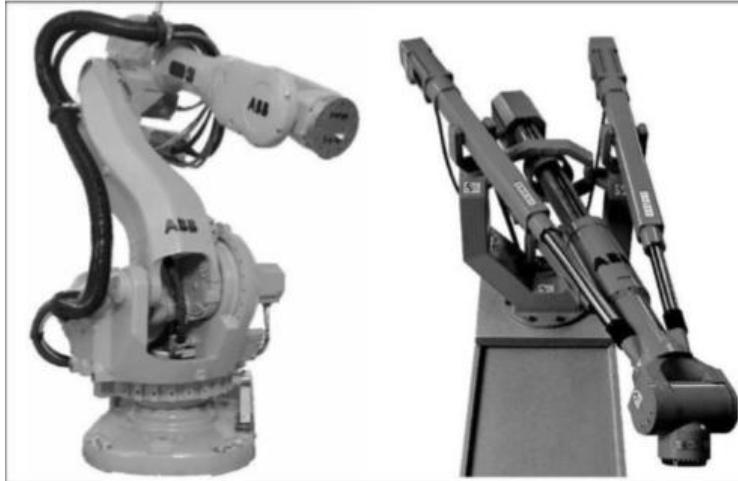
Η μηχανή συγκόλλησης αποτελεί έναν από τους σπουδαιότερους παράγοντες που επιδρούν στην ποιότητα της διαδικασίας. Η επιλογή και ο σχεδιασμός της εκάστοτε μηχανής συγκόλλησης εξαρτάται από τις οικονομικές παραμέτρους, οι οποίες είναι το κόστος και η παραγωγική απόδοση, από τις τεχνικές απαιτήσεις σε δύναμη, στιβαρότητα, ευελιξία και από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε εφαρμογής που είναι η γεωμετρία της κατασκευής, ο τύπος συγκόλλησης, ο σχεδιασμός του εργαλείου, οι παράμετροι συγκόλλησης και τα προς συγκόλληση υλικά.

**Οι μηχανές FSW χωρίζονται σε τρία ήδη: τις προσαρμοσμένες μηχανές (custom-built machines), τις ρομποτικές και τα τροποποιημένα κέντρα κατεργασίας (modified machining centers). [11]**

**Παραδείγματα μηχανών FSW:**



*Εικόνα 2.6: Η προσαρμοσμένη μηχανή I-STIR της MTS (MTS I-STIR 5 axes process development system) [11]*



*Εικόνα 2.7: Αριστερά: Ρομπότ με αρθρωτό βραχίονα. Δεξιά: Ρομπότ με βραχίονα παράλληλης κινηματικής [11]*



*Εικόνα 2.8: Προσαρμοσμένη εργαλειομηχανή FSW εγκατεστημένη στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ [14]*

## 2.4 Παράμετροι συγκόλλησης FSW

**Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση εξαρτάται από τρεις κατηγορίες παραμέτρων:**

- παράμετροι ( $\alpha$ ) συγκόλλησης,
- ( $\beta$ ) υλικού και
- ( $\gamma$ ) σχεδίασης.

**Οι κύριοι παράμετροι συγκόλλησης είναι:**

- η ταχύτητα περιστροφής εργαλείου ( $\omega$ ),
- η εγκάρσια ταχύτητα ή ταχύτητα συγκόλλησης ( $v$ ),
- η γωνία κλίσης ( $\alpha$ ) και
- το βάθος βύθισης ( $d$ ).

**Οι παράμετροι του υλικού περιλαμβάνουν:**

- το εργαλείο,
- τα τεμάχια εργασίας και
- τα υλικά του συστήματος στήριξης που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση.

**Οι παράμετροι σχεδίασης περιλαμβάνουν:**

- τη σχεδίαση και τη γεωμετρία του πείρου και του περιαυχενίου μαζί με
- τον σχηματισμό του αποτελέσματος της συγκόλλησης.

Η συνέργεια αυτών των παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα το πλαστικοποιημένο υλικό να ακολουθεί μια συγκεκριμένη πορεία ροής και έτσι να δημιουργούνται διάφορες ζώνες μετά το πέρας της απόψυξης.

Στη FSW η μεταφορά της θερμότητας λαμβάνει χώρα στη διεπαφή εργαλείου-τεμαχίου εργασίας και στη διεπαφή πλάκας υποστήριξης-τεμαχίου εργασίας.

Το υλικό του περιαυχενίου και του εργαλείου έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα έτσι ώστε να μειώνεται η απώλεια θερμότητας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

#### **2.4.1 Επίδραση ταχύτητας περιστροφής εργαλείου ( $\omega$ ) και ταχύτητας συγκόλλησης ( $v$ )**

Ο συνδυασμός των  $\omega$  και  $v$  έχει πρωταρχική σημασία στη διαδικασία της συγκόλλησης. Υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής  $\omega$  και χαμηλότερη εγκάρσια ταχύτητα  $v$  θα οδηγούσαν σε θερμότερες συγκολλήσεις με αποτέλεσμα τη δημιουργία ελαττωμάτων. Ομοίως, με χαμηλότερη  $\omega$  και υψηλότερη  $v$  δεν θα παραγόταν η απαιτούμενη θερμότητα και έτσι θα υπήρχε πάλι δημιουργία ελαττωμάτων. Επίσης, μια μεγαλύτερη γωνία κλίσης  $\alpha$  θα έκανε το εργαλείο να βυθιστεί περισσότερο και ως εκ τούτου θα οδηγούμασταν σε ελαττωματικές συγκολλήσεις. Σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής έχουμε μικρότερο πλαστικοποιημένο υλικό και λιγότερη αλληλεπίδραση της συγκόλλησης με το περιουχένιο, οπότε δεν δημιουργείται εύκολα η περιοχή της πλήρους αναμίξεως με αποτέλεσμα την εμφάνιση ελαττωμάτων, ανομοιογένειας και υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων στη ζώνη συγκόλλησης. Επίσης, με αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου έχουμε και μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση.

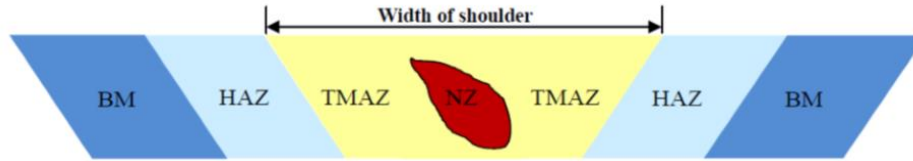
Όσον αφορά την ταχύτητα συγκόλλησης, έχει παρατηρηθεί ότι σε χαμηλότερες τιμές της υπάρχει μεγαλύτερη ομοιογένεια στον πυρήνα της συγκόλλησης, διότι τότε η παραγωγή θερμότητας ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης είναι μεγαλύτερη και επομένως προκαλείται καλύτερη κατανομή της θερμότητας και αποτελεσματικότερη ανακρυστάλλωση. [11]

#### **2.4.2 Επίδραση της κλίσης ( $\alpha$ ) του εργαλείου συγκόλλησης**

Σε διεθνές επίπεδο δεν έχει μελετηθεί επαρκώς η σημαντική παράμετρος της γωνίας κλίσεως του εργαλείου. Παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη ροή του υλικού κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Με την κατάλληλη γωνία κλίσης το περιουχένιο συγκρατεί το πλαστικοποιημένο υλικό που αναδύεται κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης και το μεταφέρει αποτελεσματικά και ομαλά προς το πίσω μέρος του πείρου, ώστε να υπάρχει καλύτερη κατανομή και ανάμειξη του υλικού ανάδευσης. Με την αύξηση της κλίσης μειώνεται το μέγεθος και ο αριθμός των ατελειών και έτσι έχουμε καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης και αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό. Βέβαια, πρέπει να επισημανθεί ότι η επίδραση της κλίσης εξαρτάται και από το υλικό συγκόλλησης.

Περισσότερες πληροφορίες για τις παραμέτρους συγκόλλησης FSW πολυμερών, παρατίθενται στο κεφάλαιο 3. [11]

## 2.5 Ζώνες Συγκόλλησης

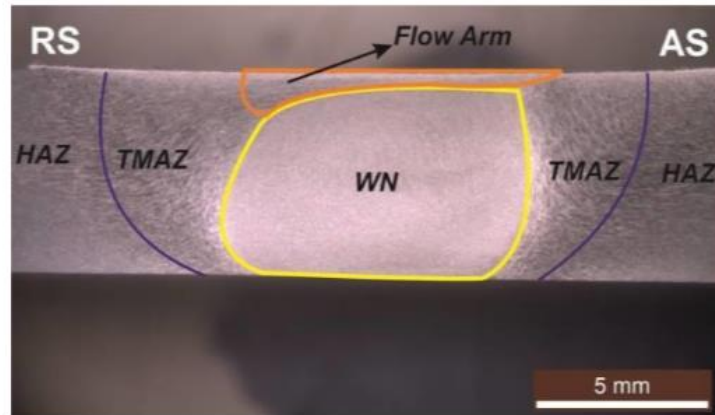


Εικόνα 2.9: Ζώνες συγκόλλησης [10]

Η μικροδομή της ζώνης συγκόλλησης διακρίνεται σε 5 βασικές χαρακτηριστικές ζώνες:

- **Το υλικό βάσης (Base Material – BM):** Αποτελεί την περιοχή η οποία είναι σχετικά απομακρυσμένη από τη γραμμή συγκόλλησης και έχει μείνει εντελώς ανεπηρέαστη η κρυσταλλική του δομή και οι μηχανικές του ιδιότητες μετά το πέρας της διαδικασίας. Γι' αυτό και ονομάζεται «υλικό βάσης», μιας και οι ιδιότητες του παραμένουν ίδιες με αυτές του αρχικού δοκιμίου πριν συγκολληθεί.
- **Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (Heat Affected Zone – HAZ):** Στην περιοχή αυτή το υλικό έχει υποστεί τέτοια θερμική κατεργασία ώστε να υπάρχουν αλλαγές στη μικροδομή του ή/και στις μηχανικές του ιδιότητες. Όμως, το υλικό δεν έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση στη συγκεκριμένη ζώνη. Δημιουργείται σε όλες τις συγκολλήσεις και στη FSW έχει καλύτερες ιδιότητες λόγω των χαμηλών αναπτυσσομένων θερμοκρασιών. Συνήθως, οι κόκκοι είναι μεγαλύτεροι από το υλικό βάσης.
- **Θερμομηχανικά Επηρεασμένης Ζώνης (Part of Thermomechanically Affected Zone – TMAZ):** Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται επιφέρουν αλλαγές στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Στη ζώνη αυτή υπάρχει πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Βρίσκεται εκατέρωθεν του πυρήνα συγκόλλησης και οι παραμορφωμένοι κόκκοι της είναι μικρού σχετικά μεγέθους.
- **Πυρήνας συγκόλλησης ή ζώνη ανάδευσης (Weld Nugget - WN or Stir Zone):** Αποτελεί την περιοχή η οποία βρίσκεται στη θέση όπου εφαρμόζεται και δρα ο πείρος του εργαλείου. Το μέγεθος και το σχήμα του WN εξαρτάται σημαντικά από την παραγόμενη θερμότητα και από το σχήμα του εργαλείου, μιας και το μέγιστο πλάτος του πυρήνα συγκόλλησης δεν μπορεί να ξεπερνά τη διάμετρο του περιουχενίου. Αποτελεί μια θερμομηχανικά επηρεασμένη και δυναμικά ανακρυσταλλωμένη περιοχή, με ισοαξονικούς κόκκους πολύ μικρού μεγέθους. [10]

- **Περιοχή ροής βραχίονα ή ροής εργαλείου (Flow arm):** Αποτελεί μια περιοχή άνωθεν του πυρήνα συγκόλλησης. Είναι θερμομηχανικά επηρεασμένη περιοχή με αρκετά παραμορφωμένους κόκκους. Είναι αποτέλεσμα της μεταφερομένης ροής του υλικού από την υποχωρούσα προς την προωθούμενη πλευρά. Δεν δημιουργείται πάντα ή σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι παρατηρήσιμη. [11]



Εικόνα 2.10: Ζώνες συγκόλλησης με εστίαση στη flow arm [11]

## 2.6 Πιθανά Ελαττώματα στις συγκολλήσεις FSW

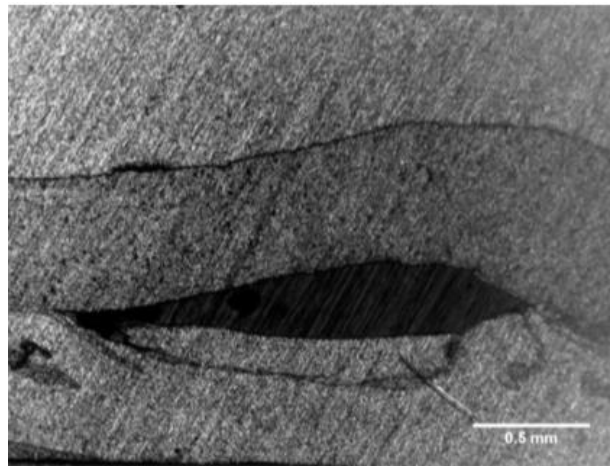
Τα διάφορα ελαττώματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων FSW είναι:

- 1) Ελλιπής θερμότητα
  - a) Ελάττωμα τύπου «Σιριγγίου» (tunnel)
  - b) Ελάττωμα τύπου «kissing bond»
  - c) Έλλειψη πλήρωσης (lack of fill)
  - d) Ελαττώματα σε σχήμα αυλακώσεων/ραβδώσεων (Groove/Channel like defect)
- 2) Υπερβολική θέρμανση
  - a) Ελάττωμα τύπου «flash» ή γρέζι
  - b) Κατάρρευση πυρήνα συγκόλλησης (nugget collapse)
  - c) Ελάττωμα τύπου «surface galling»
  - d) Ρηγματώσεις (Cracks)
  - e) Σχηματισμός διακενώσεων (Voids)



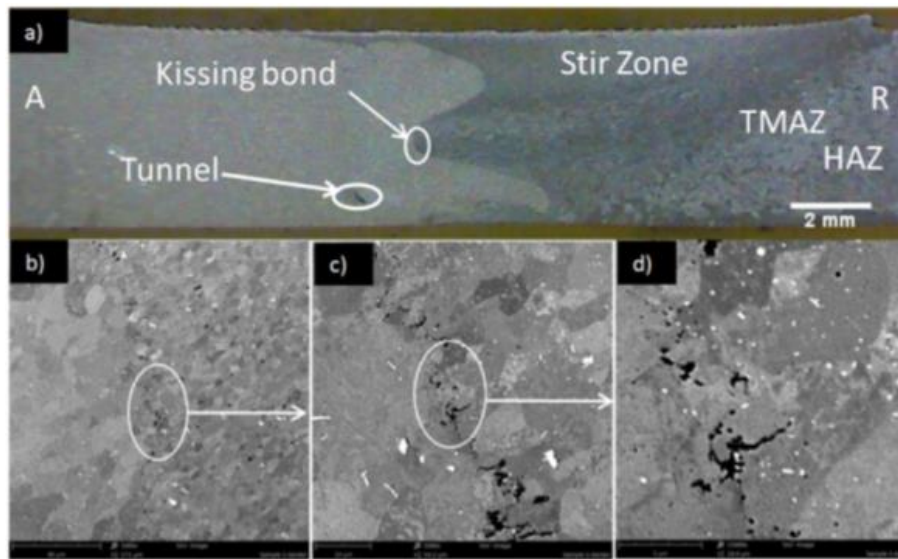
- 3) Σχεδιαστικά σφάλματα
- a) Ελαττώματα λόγω ελλιπούς διείσδυσης (lack of penetration)
  - b) Παγίδευση οξειδίου (oxide entrapment)
  - c) Υπερβολική εσοχή (excessive indentation)
  - d) Ελάττωμα «κλειδαρότρυπας» (keyhole/exit hole defect)
  - e) Ελάττωμα Ρίζας (root defect)

1) **a)** Οι ατέλειες τύπου «**συριγγίου**» (tunnel) αποτελούν ένα πολύ συνηθισμένο φαινόμενο στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση και μπορούν να απομειώσουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων δοκιμίων. Πρόκειται για σχηματισμούς που θυμίζουν «τούνελ» και περιέχουν στο εσωτερικό τους αέρα. Εμφανίζονται αποκλειστικά στην προωθούμενη πλευρά και κοντά στο κάτω μέρος της ραφής της συγκόλλησης. Δημιουργούνται συνήθως λόγω λανθασμένων επιλογών παραμέτρων συγκόλλησης με αποτέλεσμα την κακή ροή του υλικού. Οι ατέλειες τύπου τούνελ είναι συνεχείς σε όλο το μήκος της συγκόλλησης και φτάνουν κάποιες φορές μέχρι και την επιφάνεια της. Επίσης, εντοπίζονται συνήθως στις συγκολλήσεις με υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης, διότι τότε έχουμε και χαμηλότερη παραγόμενη θερμότητα.



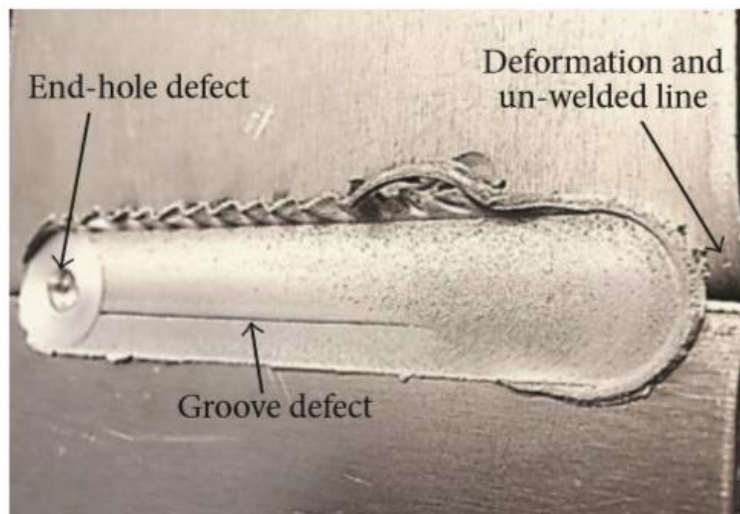
*Εικόνα 2.11: Ελάττωμα τύπου Τούνελ σε συγκολλημένο κράμα αλουμινίου - πυριτίου [12]*

**b)** Η ατέλεια τύπου «**kissing bond**» αποτελεί ένα ελάττωμα στερεής κατάστασης, το οποίο δημιουργείται λόγω ανεπαρκούς πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού λόγω της περιορισμένης ανάδευσής του. Η έλλειψη πλαστικής παραμόρφωσης οφείλεται κυρίως στη λανθασμένη επιλογή ταχύτητας συγκόλλησης και άρα ελλιπούς παραγόμενης θερμότητας. Το ελάττωμα αυτό εμφανίζεται στον πυρήνα της συγκόλλησης όπου τα υλικά βρίσκονται σε στενή επαφή αλλά δεν συνδέονται μηχανικά.



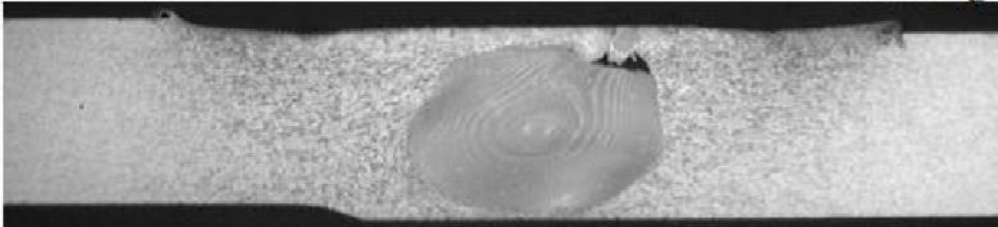
Εικόνα 2.12: Ελάττωμα “kissing bond” [12]

- c) Η **έλλειψη πλήρωσης (lack of fill)** αποτελεί ένα επιφανειακό ελάττωμα, το οποίο προκύπτει λόγω ανεπαρκούς δύναμης βύθισης.
- d) Γενικά, οι **ραβδώσεις (groove)** είναι μακριές και οριζόντιες αυλακώσεις που δημιουργούνται στην προωθούμενη πλευρά. Προκαλούνται από ανεπαρκή ποσά παραγωγής θερμότητας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, γεγονός που οφείλεται σε λανθασμένη επιλογή παραμέτρων συγκόλλησης με τον μεγαλύτερο ρόλο να τον έχει η γεωμετρία του εργαλείου.



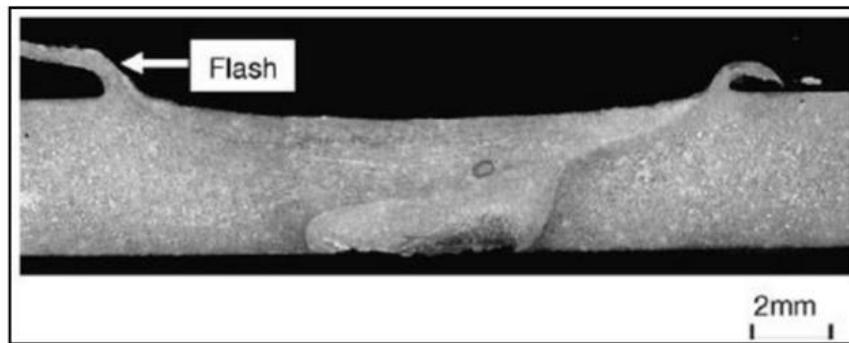
Εικόνα 2.13: Ελάττωμα “groove” και οπής πείρου σε συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αλουμινίων [13]

- e) Οι υπερβολικά υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης οδηγούν στο σχηματισμό **κενών (voids)** κάτω από την επιφάνεια συγκόλλησης ή στο άκρο της προωθούμενης πλευράς AS.

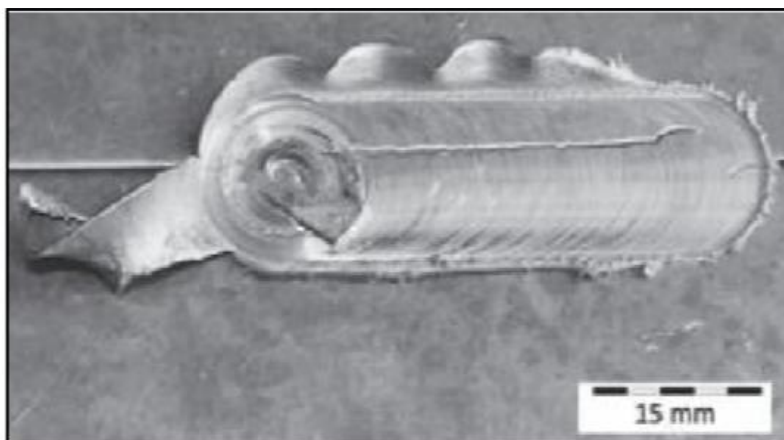


Εικόνα 2.14: Σχηματισμός κενού κατά τη διάρκεια συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση [14]

- 2) a) Ως αποτέλεσμα της υπερβολικά υψηλής παραγόμενης θερμότητας το πλαστικοποιημένο υλικό μερικές φορές ρέει έξω από τη ζώνη επίστρωσης του περιαιχενίου και ως εκ τούτου μέρος του υλικού δεν εισέρχεται στη ζώνη συγκόλλησης αλλά συσσωρεύεται στην υποχωρούσα πλευρά RS. Αυτή η συσσώρευση υλικού ονομάζεται **“flash”**.

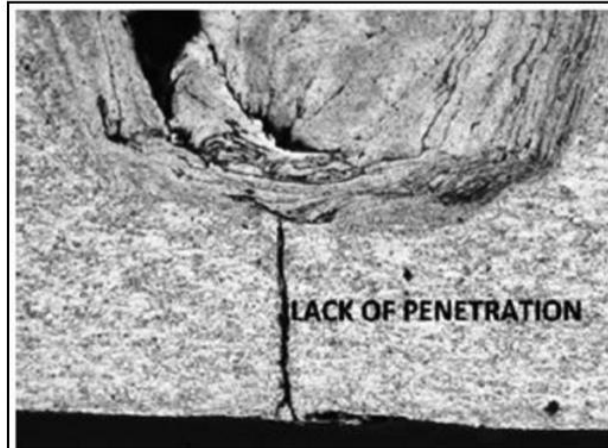


Εικόνα 2.15: Μικρογραφική εικόνα όπου διαφαίνεται το ελάττωμα «flash» σε συγκόλληση πλακών από κράμα χύτευσης αλουμινίου ADC12 [15]



**Εικόνα 2.16:** Εικόνα κάτοψης συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση με ελαττώματα «flash» και «groove» στην επιφάνεια [15]

- b) Η κατάρρευση του πυρήνα συγκόλλησης (nugget collapse)** συμβαίνει διότι σε συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται με υψηλές ταχύτητες περιστροφής και χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης η παραγωγή θερμότητας λαμβάνει χώρα στην άνω πλευρά των δοκιμίων, με αποτέλεσμα την υπερβολική μαλάκυνση των υλικών στη βάση των δοκιμίων.
  - c) Το «surface galling»** αναφέρεται στα κενά που εμφανίζονται στην προωθούμενη πλευρά AS λόγω υπερβολικής θερμότητας.
  - d) Ρηγματώσεις (cracks)** εμφανίζονται συνήθως στις συγκολλήσεις FSW ανομοίων υλικών λόγω διαφορετικών σημείων τήξης.
  - e) Το ελάττωμα ρίζας (root defect)** προκύπτει λόγω προβληματικής διείσδυσης του εργαλείου. Περισσότερες πληροφορίες δίδονται στο κεφάλαιο 4.6) σχετικά με την προσπάθειας εξάλειψης ελαττωμάτων ρίζας σε συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση πολυμερών.
- 3) a)** Όταν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης η διεπιφάνεια των δοκιμίων δεν είναι πλήρως συγκολλημένη μέχρι και τον πυρήνα, τότε **παρατηρείται το φαινόμενο της ανεπαρκούς διείσδυσης του υλικού (lack of penetration)** που κατ' επέκταση οδηγεί σε μη κανονική ανάδευση του υλικού. Αυτό οφείλεται στην επιλογή μικροτέρου από το απαιτούμενο μήκος πείρου, το οποίο έχει ως συνέπεια τη μη επιτυχημένη ομογενοποίηση.



*Εικόνα 2.17: Ελάττωμα μη κανονικής ανάδευσης υλικού. Η εικόνα λήφθηκε στο κάτω μέρος της συγκόλλησης, κάτω από τη ζώνη ανάδευσης [15]*

**b) Η παγίδευση οξειδίου (oxide entrapment)** είναι ένα πρόβλημα που εμφανίζεται σε μέταλλα που έχουν μεγάλη συγγένεια με το οξυγόνο, όπως είναι το αλουμίνιο.

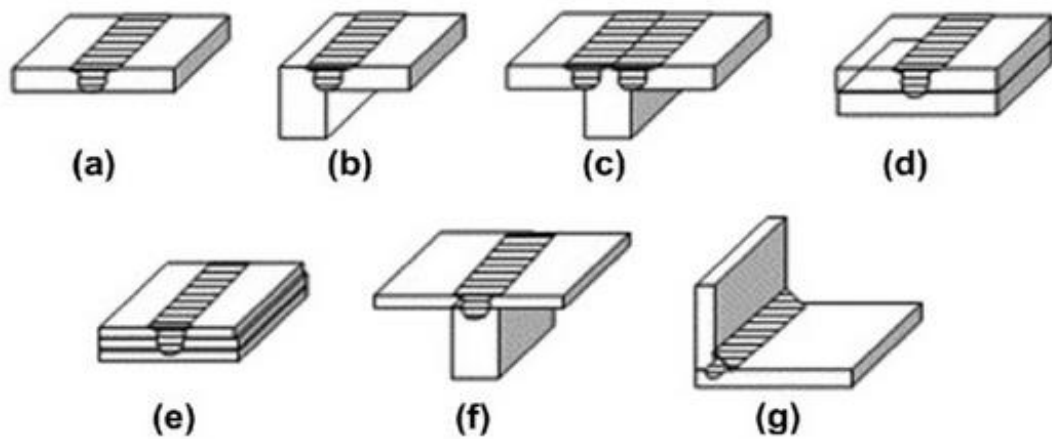
**c) Το ελάττωμα της υπερβολικής εσοχής (excessive indentation)** δημιουργείται λόγω του μεγαλύτερου βάθους βύθισης, ώστε έτσι να υπάρχει περαιτέρω απώλεια υλικού από τη ζώνη συγκόλλησης.

**d) Το ελάττωμα «keyhole» («κλειδαρότρυπας»)** εμφανίζεται με την απόσυρση του εργαλείου μετά την ολοκλήρωση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Αναφορά γίνεται και στο κεφάλαιο 2.8) στα μειονεκτήματα των συγκολλήσεων FSW.

## 2.7 Πλεονεκτήματα

- Δυνατότητα εφαρμογής σε όλους τους τρόπους τοποθέτησης των προς συγκόλληση δοκιμίων

Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα των FSW συγκολλήσεων είναι ικανότητα για εφαρμογή προς σε διαφορετικούς τρόπους συναρμογής συγκολλήσεων. Οι πιο συχνοί τρόποι συναρμογής συγκολλήσεων είναι: η συγκόλληση επικάλυψης (lap joint), η συγκόλληση συμβολής (butt joint) και η συγκόλληση 'T'.



**Εικόνα 2.18:** (a) Συγκόλληση συμβολής κατά μέτωπο (square butt joint), (b) Συγκόλληση συμβολής προς άκρες (edge butt joint), (c) Συγκόλληση 'Τ' συμβολής (T butt joint), (d) Συγκόλληση επικάλυψης (lap joint), (e) Πολλαπλή συγκόλληση επικάλυψης (multiple lap joint), (f) Συγκόλληση 'Τ' επικάλυψης (T lap joint), (g) Συγκόλληση φιλέτου (fillet joint) [14]

- Ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων δοκιμίων

Οι συγκολλήσεις FSW παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες στα συγκολλημένα δοκίμια από τις συμβατικές μεθόδους. Σύμφωνα με πολλές ερευνητικές μελέτες εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι συγκολλήσεις FSW μεγαλύτερη σκληρότητα, μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε κόπωση συγκριτικά με τις συγκολλήσεις MIG και TIG.

- Υψηλή αντοχή σε διάβρωση

Οι συγκολλήσεις FSW παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση (ειδικότερα στη διάβρωση βελονισμών) σε σχέση με τις μεθόδους MIG και GTAW, ενώ διαφέρει συνήθως ελάχιστα μόνο με την αντοχή του του μετάλλου βάσης.

- Μικρές παραμορφώσεις

Ένας λόγος που χρησιμοποιείται η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι ότι προκαλούνται μικρές παραμένουσες τάσεις και μικρές παραμορφώσεις μετά το πέρας της συγκόλλησης.

- Δυνατότητα συγκόλλησης ανομοίων κραμάτων

Η FSW μας δίνει τη δυνατότητα να συγκολληθούν και όμοια και ανόμοια κράματα, τα οποία δεν μπορούν να συγκολληθούν εύκολα με τις συμβατικές μεθόδους, όπως αλουμίνια 2XXX και 7XXX, αλουμινίου και χάλυβα, κράματος αλουμινίου και κράματος τιτανίου.

- Αυτοματοποιημένη μέθοδος

Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται μερικώς ή πλήρως αυτοματοποιημένα και ρομποτικά, συχνά σε μηχανές CFD.

- Μη καταναλισκόμενα εργαλεία

Το εργαλείο συγκόλλησης είναι μη καταναλισκόμενο και φθείρεται με πολύ αργό ρυθμό. Έτσι δεν απαιτούνται και αναλώσιμα υλικά.

- Πράσινη κατεργασία

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον λόγω της απουσίας τοξικών αερίων και ακτινοβολιών.

- Χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και εκπαίδευσης προσωπικού σε σχέση με άλλες μεθόδους. Εύκολη στην κατανόηση και την εκπαίδευση λειτουργίας της.

- Ενεργειακά αποδοτική
- Απλή στην εφαρμογή της
- Δεν είναι απαραίτητη η μηχανουργική κατεργασία των προς συγκόλληση τεμαχίων
- Δεν υπάρχει πρόσθετο βάρος στη διαδικασία συγκόλλησης

## 2.8 Μειονεκτήματα

- Δημιουργία της οπής πείρου



*Εικόνα 2.19: Στα δεξιά της εικόνας παρατηρείται η οπή που δημιουργείται λόγω του πείρου στο τέλος της συγκόλλησης [16]*

Ένα βασικό μειονέκτημα της μεθόδου συγκολλήσεως FSW είναι η δημιουργία μιας οπής στο τέλος της συγκόλλησης μετά το πέρας της διαδικασίας, καθώς απομακρύνεται το εργαλείο.

- Απαιτούνται υψηλές δυνάμεις αντίδρασης, ώστε να παραμείνει το εργαλείο στη γραμμή συγκόλλησης
- Απαιτείται ισχυρό και άκαμπτο σύστημα συσφίξεως
- Είναι αναγκαία η πλάκα σύσφιξης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης
- Το αρχικό κόστος επένδυσης είναι πολύ ακριβό (μηχανή συγκόλλησης, εργαλείο, μηχανολογικός εξοπλισμός, σύστημα σύσφιξης, κτλ). Ο βιομηχανικός εξοπλισμός ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης. Σε γενικές γραμμές το αρχικό κόστος επένδυσης ξεκινάει από τα 100.000\$ και συνήθως κυμαίνεται σε κάποια εκατομμύρια.
- Φθορά του εργαλείου σε κράματα υψηλής αντοχής



## 2.9 Εφαρμογή FSW στη Ναυπηγική Βιομηχανία

Η πρώτη εφαρμογή FSW υλοποιήθηκε για συγκόλληση αλουμινίου σειρά 6XXX σε καταψύκτες αλιευτικών σκαφών. Γενικά, σήμερα η κύρια χρήση της FSW στη ναυπηγική βιομηχανία είναι για συγκολλήσεις ελασμάτων αλουμινίου 5xxx και 6xxx, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή πλοίων.

Εφαρμόζεται στην κατασκευή ταχυπλόων σκαφών, σε εξέδρες άντλησης πετρελαίου, σε hovercraft και κρουαζιερόπλοια, κυρίως στη συγκόλληση ελασμάτων αλουμινίου. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ταχύπλοα σκάφη για την ενσωμάτωση χωρισμάτων πλοίου και καταστρωμάτων και σε πολλά κρουαζιερόπλοια τα οποία έχουν υπερκατασκευές αλουμινίου. Επίσης, η FSW έχει εφαρμογές και στην κατασκευή πολεμικών σκαφών, όπου τα ελάσματα έχουν συγκολληθεί με τη μέθοδο αυτή.

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση έχει ως συνέπεια το χαμηλό ποσοστό παραμενουσών τάσεων στα συγκολλημένα ελάσματα, καθώς και μικρές παραμορφώσεις. Επομένως, κατασκευάζονται μέρη του πλοίου με βελτιωμένη γεωμετρική ακρίβεια που οδηγεί σε βελτιωμένο σχήμα της τελικής κατασκευής. Έτσι, ναυπηγεία σε διάφορες περιοχές, όπως Dalian, Shanghai, Wuhan, Guangxi, Guangzhou, χρησιμοποιούν προκατασκευασμένα ελάσματα με χρήση FSW σε συγκεκριμένα τμήματα των πλοίων. [11]

**Συνοπτικά, όσον αφορά τη ναυπηγική, η FSW μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση των παρακάτω κατασκευαστικών στοιχείων:**

- Καταστρώματα, οροφές, φρακτές, δάπεδα, πάνελς, ελάσματα, δοκοί, ενισχυτικά, υπερκατασκευές, άλλα τμήματα της γάστρας του πλοίου
- Πλατφόρμες προσγείωσης ελικοπτέρων
- Πλατφόρμες γεώτρησης και άντλησης πετρελαίου
- Συστήματα ψύξης

**Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής της FSW σε πλοία είναι:**

- Η κατασκευή της υπερκατασκευής του μεγαλύτερου πλοίου αλουμινίου, του ιαπωνικού κρουαζιεροπλοίου «Super Liner Ogasawara».



Εικόνα 2.20: Φωτογραφία του κρουαζιεροπλοίου "Super Liner Ogasawara" [17]

- Η κατασκευή της υπερκατασκευής του κρουαζιεροπλοίου «Seven Seas Navigator»



Εικόνα 2.21: Φωτογραφία του κρουαζιεροπλοίου "Seven Seas Navigator" [18]

- Συγκολλημένα ελάσματα με FSW για το πολεμικό σκάφος «Sea Fighter»



*Εικόνα 2.22: Φωτογραφία του πολεμικού πλοίου “Sea Fighter” [19]*

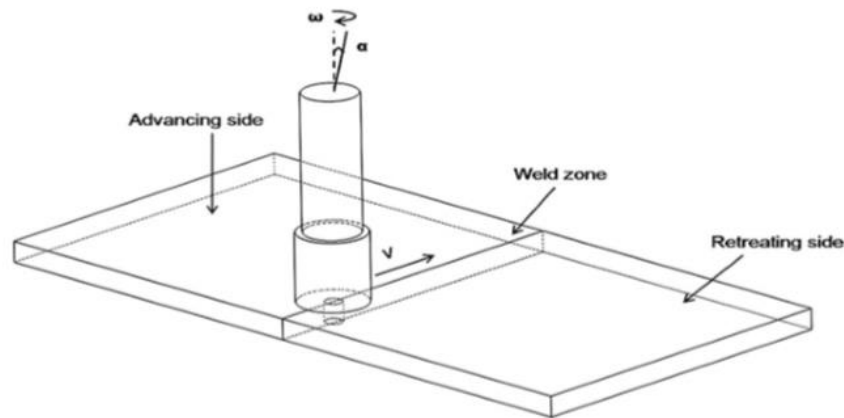
[11]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΟΔΟΣ ΣΤΗΝ FSW ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

### 3.1 Γενικά – Αρχή της FSW Πολυμερών

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση χρησιμοποιείται, ευρέως και για συγκολλήσεις πολυμερικών υλικών. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα θετικά και αποτελεσματικά, με λίγα ελαττώματα και μικρές παραμορφώσεις, ενώ υπάρχει και ερευνητική προσπάθεια βελτιστοποίησης των παραμέτρων της FSW πολυμερών.

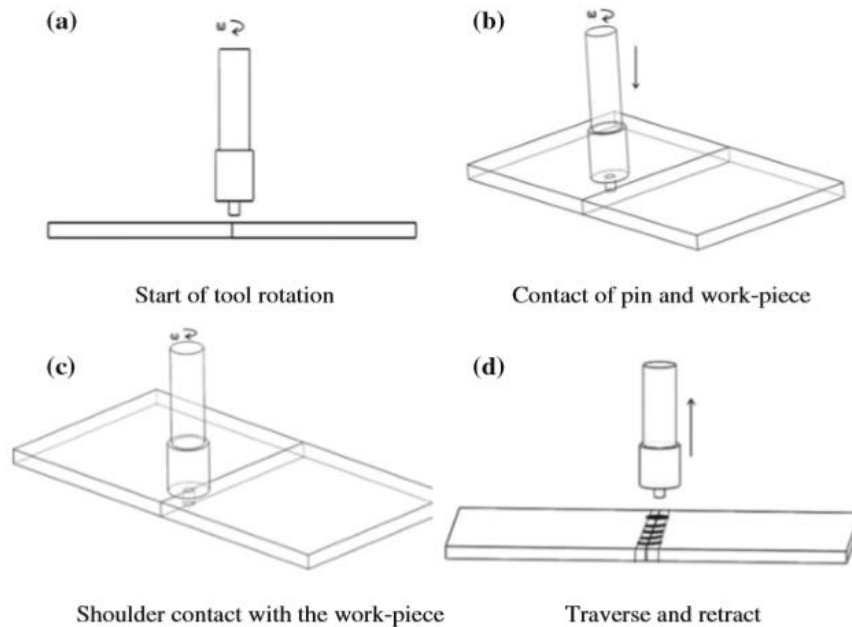
Το εργαλείο που χρησιμοποιείται στη διαδικασία δεν καταναλίσκεται και όπως και στις συγκολλήσεις των μετάλλων καθοριστικής σημασίας είναι η γεωμετρία του περιαιχηνίου και του πείρου.



Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας FSW [28]

Η συγκεκριμένη τεχνική συγκόλλησης περιλαμβάνει τρία διαδοχικά στάδια: τη βύθιση, τη διέλευση και την απόσυρση. Το εργαλείο είναι στερεωμένο στον άξονα του μηχανήματος. Τα προς συγκόλληση δοκίμια στερεώνονται ακλόνητα στην κλίνη της μηχανής, έτσι ώστε να μην καταστρέφονται οι άκρες τους κατά τη διάρκεια της εργασίας. Το εργαλείο περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα που ονομάζεται ταχύτητα περιστροφής. Η ταχύτητα με την οποία το εργαλείο προωθείται πάνω από τα τεμάχια, ονομάζεται ταχύτητα διέλευσης ή ταχύτητα συγκόλλησης.

Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην FSW είναι: η μεταφορική δύναμη στην διεύθυνση X, η εγκάρσια δύναμη στη διεύθυνση Y και η αξονική δύναμη στη διεύθυνση Z. Επίσης, καταγράφεται και η ροπή γύρω από τον άξονα περιστροφής. Το εργαλείο μπορεί, επίσης, να έχει μια κλίση για καλύτερη βύθιση και ανάμιξη του πλαστικοποιημένου υλικού και ονομάζεται γωνία κλίσης. Το περιστρεφόμενο εργαλείο βυθίζεται αργά στα δοκίμια καθώς ο πείρος έρχεται σε επαφή με αυτά. Η επαφή τεμαχίων και πείρου έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας τριβής. Μετά τον πείρο έρχεται σε επαφή και το περιουχένιο με τα τεμάχια και δημιουργείται επιπλέον θερμότητα. Οι συγκεκριμένες ενέργειες αποτελούν μέρη του σταδίου της βυθίσεως και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (a-c):



Εικόνα 3.2: Στάδια της διαδικασίας της FSW [28]

Η παραγόμενη θερμότητα τριβής παραμορφώνει και μαλακώνει το υλικό. Έτσι, το εργαλείο φέρνει το υλικό σε ένα σημείο που να μπορεί να ρέει. Μόλις το εργαλείο βυθιστεί επιτυχώς αρχίζει να διασχίζει τη γραμμή συγκόλλησης σέρνοντας το μαλακό υλικό από την AS πλευρά στην RS και έπειτα πάλι πίσω στην AS.

Η συνολική θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μπορεί να υπολογισθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$Q = \frac{2}{3} \pi \omega t (R^2 + 3r^2 h)$$

όπου, Q: η συνολική θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια της συγκολλήσεως σε (J)

$\omega$ : η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου σε (rpm)

t: η διατημητική τάση σε (MPa)

r: η ακτίνα του περιανυχνίου σε (mm)

h: το ύψος του πείρου σε (mm)

Η ροή του υλικού λαμβάνει χώρα από την AS μέσω της RS και εξαρτάται από τον όγκο σάρωσης (όγκος ανάδευσης):

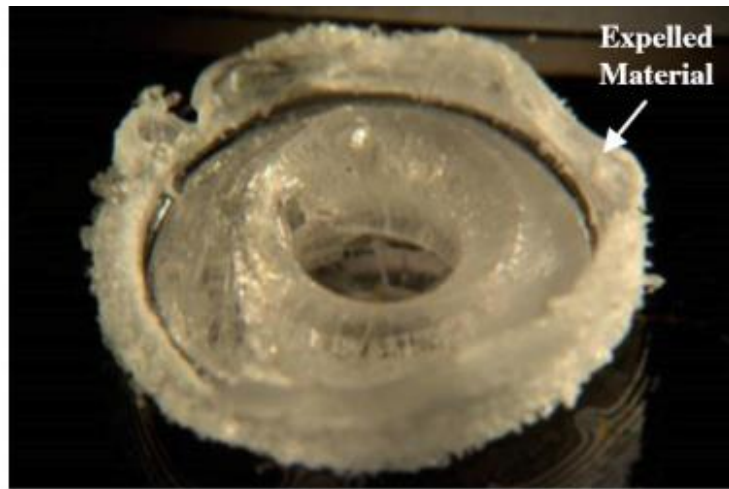
$$\text{Όγκος Σάρωσης} = \frac{\text{Δυναμικός Όγκος}}{\text{Στατικός Όγκος}}$$

όπου, δυναμικός όγκος είναι ο όγκος όταν το εργαλείο βρίσκεται σε κίνηση, ενώ στατικός όγκος όταν το εργαλείο βρίσκεται σε ηρεμία. [28]

**Η παραγωγή θερμότητας εξαρτάται σημαντικά από τη γεωμετρία του εργαλείου.** Η υψηλότερη θερμότητα θα είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια έλξης μεταξύ τεμαχίου εργασίας και εργαλείου, ενώ με ανεπαρκή θερμότητα το υλικό δεν θα μπορούσε να παραμορφωθεί και έτσι οδηγούμαστε σε ελαττωματικές συγκολλήσεις. Το περιανυχνίο εμποδίζει το υλικό να διαφύγει από τη γραμμή συγκόλλησης. Ένα πολύ μικρό ύψος πείρου θα είχε ως αποτέλεσμα την έλλειψη διείδυσης και έτσι η πλευρά της βάσης δεν θα μπορούσε να συγκολληθεί, ενώ ένα πολύ μεγαλύτερο θα έκανε το υλικό να κολλήσει στην αιχμή του πείρου.

Λόγω των διαφορετικών ρεολογικών ιδιοτήτων των πολυμερών, κυρίως του ιξώδους, η συμπεριφορά της ροής κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων διαφέρει. Επομένως, λόγω των διαφορών στη ροή υπάρχει ποικιλομορφία στους παράγοντες της διαδικασίας καθώς και στον πείρο. Ο μηχανισμός της FSW πολυμερών βασίζεται στη μοριακή διάχυση και στην αλλαγή της μοριακής αλυσίδας η οποία συμβαίνει στο στάδιο πλαστικοποίησης του πολυμερούς. Μετά την ψύξη και τη στερεοποίηση της συγκόλλησης θα παραμείνουν παραμένουσες τάσεις λόγω της συμπιεσμένης ροής, μοριακά ευθυγραμμισμένης σε συγκεκριμένη κατεύθυνση. Οι παραμένουσες τάσεις τελικά μπορούν να οδηγήσουν σε μια αδύναμη συγκόλληση.

Επιπλέον, ο βαθμός της ποιότητας της συγκόλλησης εξαρτάται από το είδος του πολυμερούς που χρησιμοποιείται στη συγκόλληση, τις ιδιότητές του και τους παράγοντες της διαδικασίας FSW. Η επίτευξη των βέλτιστων παραμέτρων διεργασίας γίνεται πιο δύσκολη όταν πρόκειται για πολυμερή τα οποία έχουν χαμηλό ιξώδες τήγματος, όπως το nylon-6. Η ταχύτητα περιστροφής είναι η κύρια παράμετρος στις συγκολλήσεις FSW και ποικίλλει για κάθε είδος υλικού ανάλογα με τις ιδιότητές του. Μια υψηλή ταχύτητα περιστροφής προκαλεί αποδόμηση του πολυμερικού υλικού, ενώ μια χαμηλή ταχύτητα περιστροφής επιφέρει κακή ανάμειξη και έτσι δημιουργούνται κενά στη ζώνη ανάδευσης. Επίσης, η συμπίεση του πλαστικοποιημένου υλικού είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη της μεγίστης αντοχής συγκόλλησης, διότι μπορεί να οδηγήσει σε αδύναμη και προβληματική τελική επιφάνεια. Παράδειγμα υπερσυμπίεσης πλαστικοποιημένου υλικού PC (πολυανθρακικό) δίνεται στην εικόνα 3.3.



*Εικόνα 3.3: Παράδειγμα υπερσυμπίεσης πλαστικοποιημένου υλικού πολυανθρακικού (PC) [21]*

Επιπλέον, μια ανομοιόμορφη ανάμειξη του υλικού κατά τη διαδικασία ανάδευσης μπορεί να οδηγήσει σε κακής ποιότητας συγκόλληση. Η ομοιομορφία στη ροή ή την ανάμειξη του υλικού εξαρτάται από τη γεωμετρία του προφίλ του πείρου. Οι εφαρμογές FSW σε συγκολλήσεις πολυμερών αναπτύσσονται και εξελίσσονται συνεχώς τα τελευταία χρόνια με τις προόδους που έγιναν στον σχεδιασμό εργαλείων, την εισαγωγή εξωτερικής θερμότητας και τις διαφορετικές συνθήκες βύθισης του εργαλείου. [21]

### 3.2 Polymer Matrix Composites – PMC (Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας – ΣΥΠΜ)

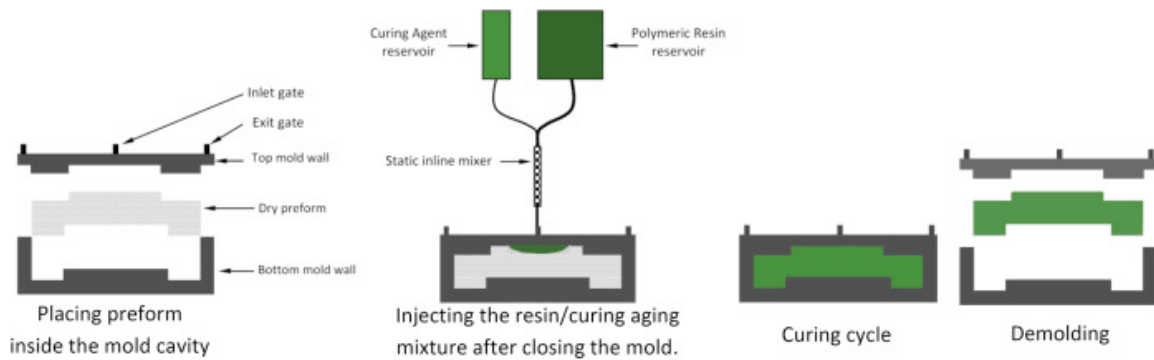
Σύνθετο υλικό ονομάζεται ένα πολυφασικό υλικό, το οποίο συγκεράζει ένα μεγάλο ποσοστό των ιδιοτήτων των δύο ή περισσότερων επιμέρους φάσεων που το αποτελούν, ώστε να επιτυγχάνεται ο καλύτερος δυνατός συνδυασμός των ιδιοτήτων τους. Ένα σύνθετο υλικό παρασκευάζεται τεχνητά και οι συνιστώσες φάσεις πρέπει να είναι χημικά ανόμοιες και να διαχωρίζονται με μια διακριτή επιφάνεια. Συνήθως η μία φάση αποτελεί τη φάση ενίσχυσης και είναι εκείνη που δύναται να φέρει τα εξασκούμενα φορτία, ενώ η μήτρα είναι η φάση που έχει τον ρόλο του μέσου μεταφοράς. Τα περισσότερα σύνθετα υλικά έχουν δημιουργηθεί για την βελτίωση των συνδυασμών των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, όπως η δυσκαμψία, η δυσθραυστότητα και η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Ανάλογα με τη φύση του μητρικού υλικού τα σύνθετα διαχωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: α) Μεταλλικής μήτρας, β) Πολυμερικής μήτρας, γ) Κεραμικής μήτρας.

**Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (ΣΥΠΜ) αποτελούνται από ένα πολυμερές ως μήτρα και ίνες ή σωματίδια ως το μέσον ενίσχυσης.** Τα πιο συνήθη υλικά ενίσχυσης με τη μορφή ινών είναι το οξείδιο του αλουμινίου, το αραμιδίδο, ο άνθρακας, το γυαλί και το καρβίδιο του πυριτίου. Οι βασικοί τύποι πολυμερών που χρησιμοποιούνται ως μήτρες είναι: τα εποξειδικά, τα φαινολικά, οι πολυεστέρες, οι σιλικόνες, τα πολυϊμίδια και τα θερμοπλαστικά. [23]

Κατά τη διάρκεια συμβατικών FSW πολυμερών και Συνθέτων Υλικών Πολυμερικής Μήτρας (Polymer Matrix Composites – PMC) όταν οι παράμετροι ή τα εργαλεία της συγκόλλησης δεν είναι τα κατάλληλα, τότε δημιουργούνται κακοί σχηματισμοί επιφάνειας, έλλειψη διείσδυσης της ρίζας και χαμηλή κρυσταλλότητα με αποτέλεσμα τον κακό σχηματισμό και την κακή ποιότητα συγκόλλησης. Ως εκ τούτου, προκειμένου να βελτιωθεί η ανάμειξη του υλικού, η θερμική αγωγιμότητα (ή ο ρυθμός ψύξης κατά τη συγκόλληση FSW) και στη συνέχεια και ο σχηματισμός της συγκόλλησης, οι ερευνητές έχουν δοκιμάσει μεθόδους FSW, όπως «σταθερή», «ημιβυθιζόμενη» και «προσθήκης τρίτου υλικού».

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, τα PMC, τα οποία παρουσιάζουν τις γενικές ιδιότητες και των πληρωτικών και των πολυμερών, έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας.





Εικόνα 3.3: Παραγωγή PMC [20]

Τα υλικά ενίσχυσης όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) και σωματίδια χαλκού (Cu) ενσωματώνονται εύκολα σε πολυμερές, τα οποία είναι δύσκολα να διαχωριστούν στη συνέχεια λόγω των δυνάμεων Van der Waals. Επομένως, η διασπορά των πληρωτικών στο πολυμερές είναι το βασικό ζήτημα για την ενίσχυση των ιδιοτήτων των PMC. Οι κύριες τεχνικές παρασκευής PMC είναι ο τοπικός πολυμερισμός, η ανάμειξη διαλύματος και η ανάμειξη τήγματος.

Επίσης, δίνεται τελευταία μεγάλη προσοχή σε μια νέα τεχνική παρασκευής συνθετικών υλικών η οποία ονομάζεται **διεργασία τριβής με ανάδευση (Friction Stir Processing-FSP)**. Η FSP προέρχεται από την FSW και είναι διαδικασία στερεάς κατάστασης για μικροδομικές τροποποιήσεις, κατασκευή επιφανειακού στρώματος και συνθέτων υλικών. Έχει τη δυνατότητα ανάμειξης και σύνδεσης μορίων πολυμερούς και υλικού ενίσχυσης, καθώς λαμβάνει χώρα σε χαμηλή θερμοκρασία επεξεργασίας και σε υψηλές τάσεις. Η FSP χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας. Σήμερα η FSP προτείνεται και για την κατασκευή πολυλειτουργικών PMC με σκοπό να βελτιωθούν οι μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες των πολυμερών.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συγκόλλησης PMC με FSW, είναι η ερευνητική μελέτη του Sudhir Kumar [22], όπου συγκολλήθηκαν επιτυχώς δοκίμια συνθέτων Nylon-6 με ίνες γυαλιού. Το βέλτιστο αποτέλεσμα συγκόλλησης, επιτεύχθηκε με ταχύτητα πρόωσης 0.2 mm/s, ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 600 rpm και γωνία κλίσης εργαλείου 2°. Η αντοχή σε εφελκυσμό και η ποσοστιαία επιμήκυνση των δοκιμίων αυξάνονται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και της κλίσης του εργαλείου, ενώ μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας πρόωσης.

### 3.3 Η τεχνική FSSpW

Το 2001 εμφανίστηκε μια παράγωγη υποκατηγορία της FSW, η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση σε σημείο (Friction Stir Spot Welding – FSSpW). Η τεχνική FSSpW είναι μια παραλλαγή της FSW και περιλαμβάνει τη βύθιση και εστίαση σε ένα μόνο σημείο. Δίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε αυτό το κεφάλαιο, διότι με την τεχνική αυτή συγκολλούνται πλήθος ομοίων και ανομοίων πολυμερών, με πολύ καλύτερες και ποιοτικότερες συγκολλήσεις σε σχέση με τις συμβατικές διαδικασίες, ενώ υπάρχουν και αρκετές μελέτες στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, με χαρακτηριστική τη μελέτη του Benyaru [24] για τη συγκόλληση HDPE με FSSpW. Στη μελέτη αυτή τα κύρια συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι: α) ότι μπορούμε να επιτύχουμε συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας με τις κατάλληλες παραμέτρους (ταχύτητα περιστροφής εργαλείου και χρόνος ανάδευσης και παραμονής έπειτα στο σημείο), β) ο χρόνος παραμονής αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό και γ) η ταχύτητα περιστροφής καθορίζει κυρίως το φαινόμενο αστοχίας της συγκόλλησης σε φορτίσεις.

#### Οι διαφορές της FSSpW με την FSW είναι:

- Στην FSSpW τα προς συγκόλληση δοκίμια τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και όχι πλάγια όπως στην FSW.
- Στην FSSpW η κατεργασία του εργαλείου πραγματοποιείται σε ένα συγκεκριμένο σημείο μόνο και όχι σε όλο το μήκος όπου εφάπτονται τα δοκίμια όπως συμβαίνει στην FSW.

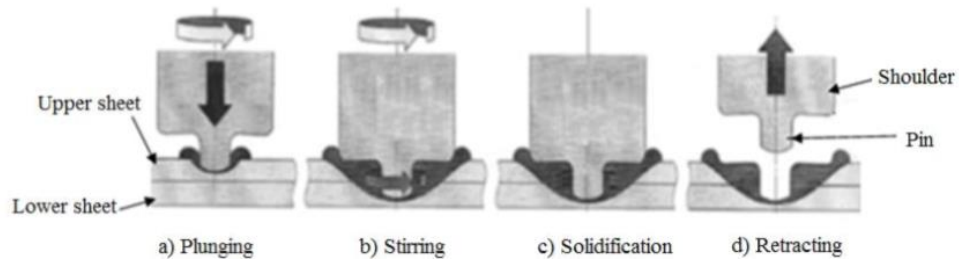
#### Η FSSpW διακρίνεται σε τέσσερα βασικά στάδια:

**A) Τη βύθιση:** Το εργαλείο περιστρέφεται και βυθίζεται σε ένα ορισμένο σημείο και βάθος.

**B) Την ανάδευση:** Το εργαλείο σταματά τη βύθιση και συνεχίζει μόνο την περιστροφή στο σημείο, αναδεύοντας τα δύο πολυμερικά υλικά. Στη διαδικασία αυτή παράγεται θερμότητα τριβής.

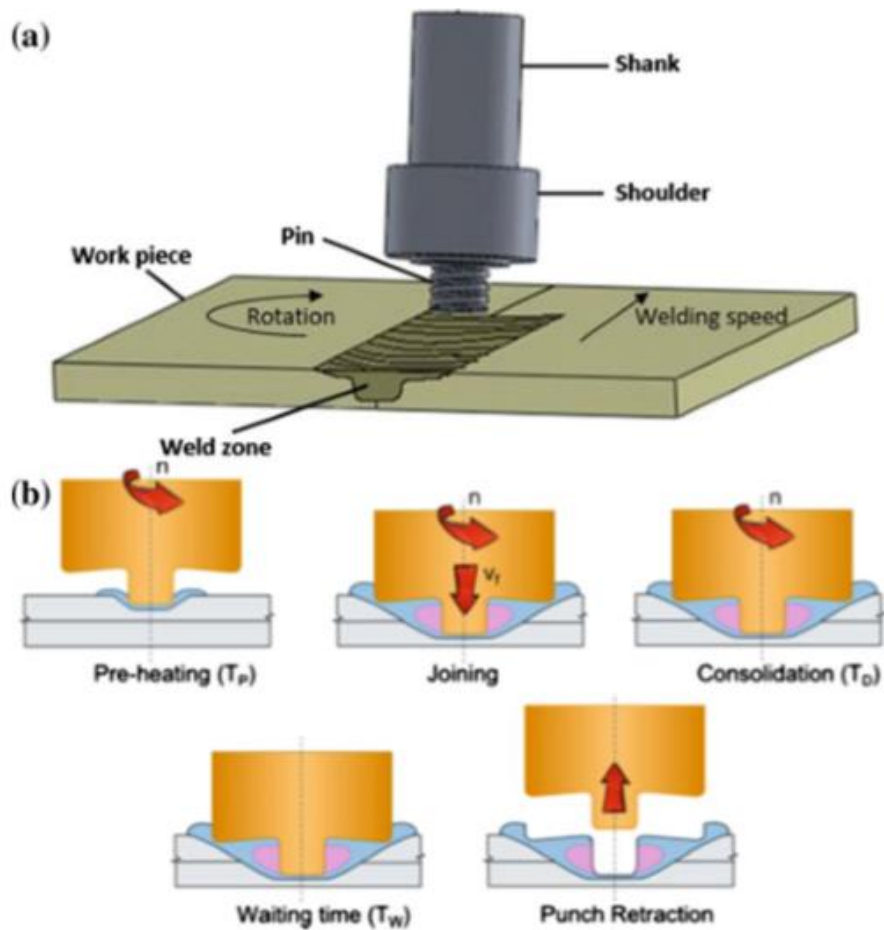
**Γ) Τη στερεοποίηση:** το εργαλείο σταματά τη λειτουργία του για ένα χρονικό διάστημα παραμένοντας βυθισμένο και επομένως σταματάει η παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής και με την ψύξη του αναδευμένου υλικού αρχίζει η στερεοποίησή του. Έτσι, μέσω του ομογενοποιημένου και πλαστικοποιημένου υλικού δημιουργείται ένας δεσμός στερεάς κατάστασης μεταξύ του άνω και του κάτω δοκιμίου.

**Δ) Απόσυρση:** Το εργαλείο αποσύρεται από τη συγκόλληση.



Εικόνα 3.4: Τα στάδια της διαδικασίας FSSpW [24]

Η διαφοροποίηση μεταξύ των διαδικασιών συγκόλλησης FSW και FSSpW είναι εμφανής και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.5: Σχηματική απεικόνιση των διαδικασιών (a) FSW , (b)FSSpW [21]

[21], [22], [23], [24]

### 3.4 Ερευνητικές μελέτες - Βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης για την FSW πολυμερών

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει τα πιο σημαντικά επιστημονικά ευρήματα μελετών για συγκολλήσεις FSW διαφόρων πολυμερών:

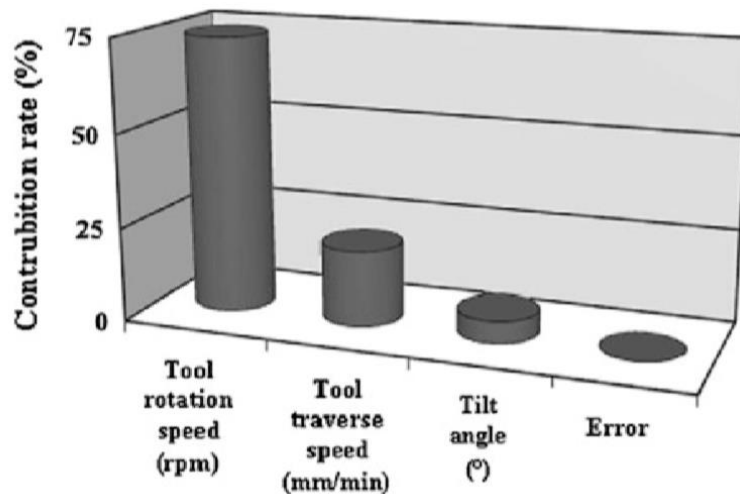
Πίνακας 3.1: Οι πιο σημαντικές μελέτες FSW πολυμερών [21]

Author(s)	Base material	Plate thickness (mm)	Tool/pin profile	UTS (MPa)	Joint efficiency (%)
Inaniwa et al [64]	Nylon-6	5	Threaded	67.1	35
	High-density polyethylene (HDPE)	5	Threaded	31.9	70
	Polyvinyl Chloride (PVC)	5	Threaded	66.5	45
Panneerselvam et al [65]	Nylon-6	10	Threaded	34.8	40
Zafar et al [30]	Nylon-6	16	Threaded	27.22	32
Sadeghian et al	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	8	Cylindrical	41.42	99.1
			Conical	39.30	94
Bagheri et al [66]	ABS	5	Threaded	32.62	88.76
Pirizadegh et al [67]	ABS	5	Double shoulder tool with convex pin	20.7	60.6
			Double shoulder tool with simple pin	15.58	45.6
Mendes et al [68]	ABS	6	Stationary shoulder with conical threaded pin	29.48	67

Oliveira et al [69]	Polymethyl methacrylate (PMMA)	3	Refill friction stir spot welding tool	9.5	11.87
Ahmadi et al [70]	PP	4	Simple cylindrical conical	5.7	-
			Threaded conical	3.84	-
Kiss et al [71]	PP	15	Traditional milling tool	11.50	50
Bozkurt [57]	HDPE	4	-	19.4	86.3
Gao et al [72]	HDPE	4	Threaded cylindrical	12.3	-
Azarsa et al [73]	HDPE	10	Threaded	33.76	95.69
Arici et al [74]	Medium-density polyethylene (MDPE)	5	Cylindrical	20	100
Aydin [75]	Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMW-PE)	4	Threaded	28.5	89

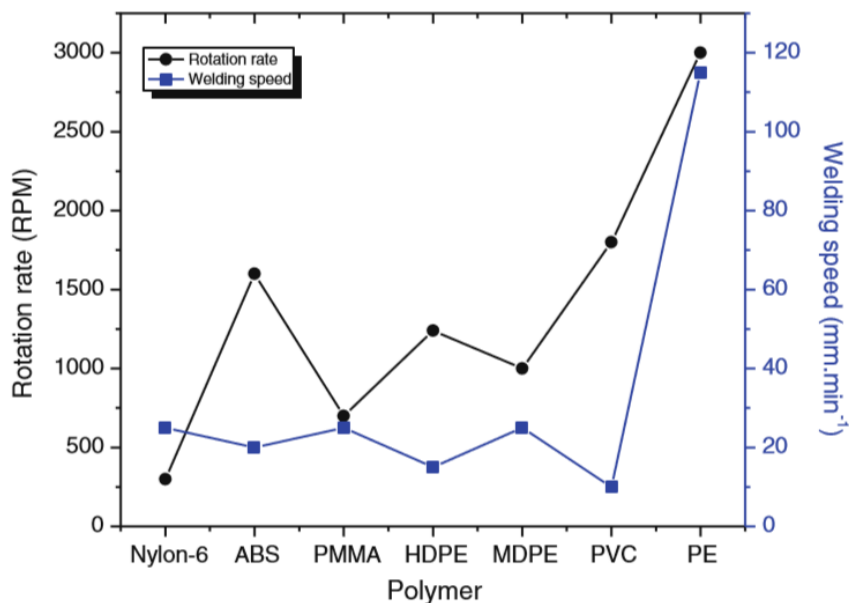
Για παράδειγμα, οι Azarsa et al. [73] συγκόλλησαν τεμάχια πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) πάχους 10 mm σε ταχύτητα περιστροφής 1400 RPM και ταχύτητα συγκόλλησης 25 mm / min με αντοχή συγκόλλησης σχεδόν όσο η αντοχή του υλικού βάσης.

Οι Dashatan et al. [76] στην εργασία τους παρουσίασαν τη δυνατότητα σύνδεσης των ανομοίων πολυμερών ABS και PMMA. Στη μελέτη τους διαπιστώθηκε ότι οι παράμετροι συγκόλλησης, ιδιαίτερα η ταχύτητα περιστροφής και ο ρυθμός βύθισης επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή συγκόλλησης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής είναι στις 800 RPM, διότι κάτω και άνω από αυτήν την τιμή παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής. Η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής προκάλεσε έλλειψη παραγωγής θερμότητας, ενώ η υψηλή οδήγησε σε επιπλέον θερμότητα, η οποία συμπίεσε υπερβολικά το πλαστικοποιημένο υλικό. Σύμφωνα με τον Bozkurt, η ταχύτητα περιστροφής συμβάλλει κατά 73.85% στο σύνολο των παραμέτρων συγκόλλησης, όσον αφορά την αντοχή των συγκολλημένων δοκιμίων. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα την μικρότερη επιρροή την έχει η γωνία κλίσης.



Εικόνα 4.1: Παράμετροι συγκόλλησης [21]

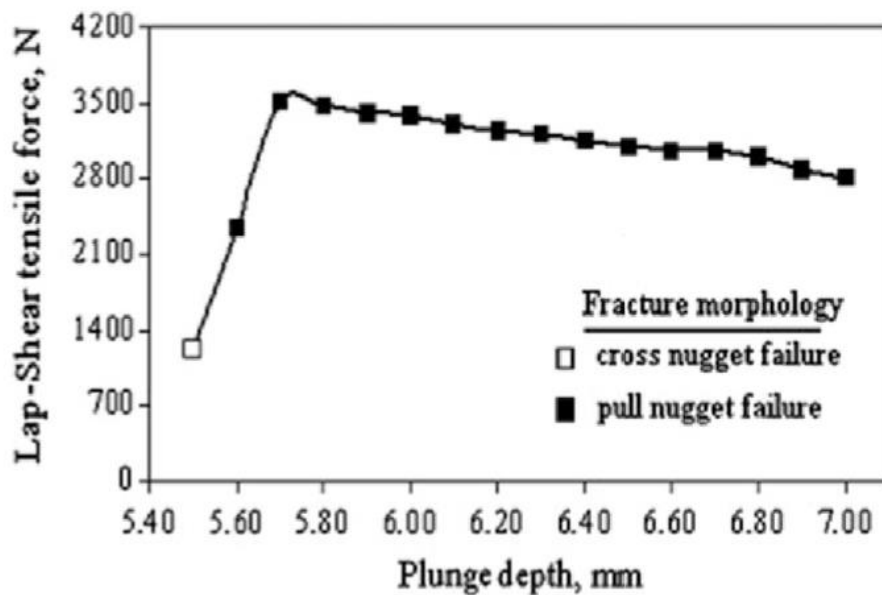
Καμία γενική τάση δεν μπορεί να εκφράσει τη σχέση μεταξύ συγκόλλησης και ταχύτητας περιστροφής. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τη βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής σε σχέση με την ταχύτητα συγκόλλησης για διάφορα πολυμερή.



Εικόνα 4.2: Τιμές περιστροφικής ταχύτητας και ταχύτητας συγκόλλησης συναρτήσει του είδους του πολυμερούς [21]

Γενικά, είναι σαφές ότι το πολυαιθυλένιο συγκολλάται με την υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης και ταχύτητα περιστροφής από τα υπόλοιπα πολυμερή. Ενώ το Nylon-6, λόγω του χαμηλού ιξώδους του, απαιτεί χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής και συγκόλλησης.

Το βάθος βύθισης είναι ζωτικής σημασίας, διότι ένα υψηλότερο βάθος μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη θερμότητα στην επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας λόγω της θερμομονωτικής φύσης του πολυμερούς. Οι Bilici και Yukler [77] αναφέρθηκαν στη μελέτη τους για τη συγκόλληση HDPE με FSSpW στην παράμετρο του βάθους βύθισης. Όπως διακρίνεται στο παρακάτω σχήμα, η αντοχή της συγκόλλησης αυξάνεται σε ένα ορισμένο επίπεδο βάθους βύθισης.



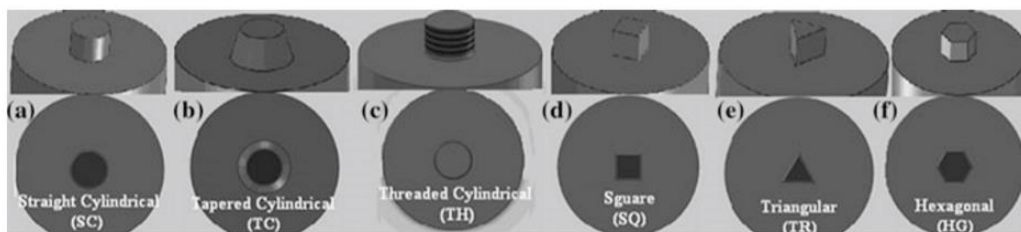
Εικόνα 4.3: Η επιρροή του βάθους βύθισης στην αντοχή συγκόλλησης [21]

Η περαιτέρω αύξηση του βάθους βύθισης είχε ως αποτέλεσμα τη συμπίεση του πολυμερούς που τελικά μείωσε την αντοχή του.

### 3.5 Ο ρόλος του σχεδιασμού των εργαλείων σε συγκολλήσεις FSW πολυμερών

Όπως είδαμε προηγουμένως, ο σχεδιασμός του εργαλείου αποτελεί βασική και σημαντική παράμετρος της διαδικασίας FSW.

Η γεωμετρία του εργαλείου και του πείρου επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της συγκόλλησης. Οι Bilici et al. [78] μελέτησαν στην έρευνα τους 6 διαφορετικές γεωμετρίες πείρων σε συγκόλληση FSSpW. **Οι τύποι των πείρων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ήταν ευθείς κυλινδρικοί, κωνικοί κυλινδρικοί, σπειροειδείς κυλινδρικοί, τετράγωνοι, τριγωνικοί και εξαγωνικοί.**



Εικόνα 4.4: Τύποι πείρων [21]

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκολλήσεις με τον σπειροειδή πείρο με μήκος βήματος 0.8 mm είχαν την υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι το μήκος του βήματος του πείρου έχει μεγάλη επιρροή στην αντοχή της συγκόλλησης, η οποία μειώνεται με τη μείωση του βήματος.

Επίσης, οι Ahmadi et al. [70] μελέτησαν την επίδραση του πείρου σε συγκόλληση περιτύλιξης συνθετικού προπυλενίου ενισχυμένο με ίνες άνθρακα. Χρησιμοποίησαν τέσσερα διαφορετικά προφίλ πείρων, σπειροειδή κυλινδρικό, σπειροειδή κωνικό, ευθύ κυλινδρικό και ευθύ κωνικό. Καλύτερα αποτελέσματα στην αντοχή εφελκυσμού έδειξε ο σπειροειδής κωνικός πείρος. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής που είχε ο πείρος αυτός με το δοκίμιο με αποτέλεσμα την υψηλότερη τριβή. Ακόμη, τα σπειρώματα προκάλεσαν υψηλό στροβιλισμό στη ραφή της συγκόλλησης, με συνέπεια την καλύτερη ανάμειξη του λιωμένου υλικού και την καλύτερη ποιότητα της συγκόλλησης. [21]

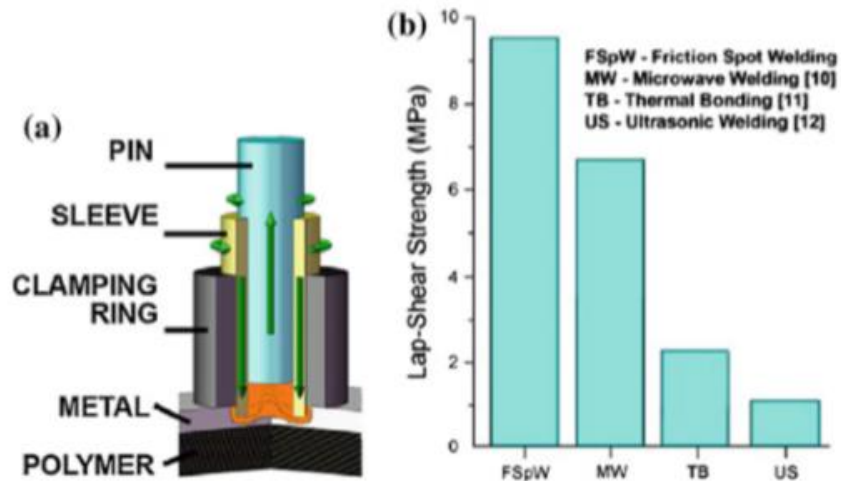
**Η επίδραση του ώμου (shoulder) του εργαλείου, έχει διερευνηθεί για συγκολλήσεις ABS από τους Sadeghian et al. [53] Χρησιμοποίησαν έναν ειδικά σχεδιασμένο κοίλο ώμο με ευθύ και κυλινδρικό πείρο. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός ώμου έγινε για να περιορισθεί η παραγόμενη θερμότητα τριβής εντός της περιοχής συγκόλλησης.**

Μια λεπίδα από ανοξείδωτο χάλυβα τοποθετήθηκε στην επάνω επιφάνεια των φύλλων του ABS για να αποτρέψει την αποκοπή της κορυφής της συγκόλλησης, δημιουργώντας έτσι



ένα καλό φινίρισμα επιφάνειας. Η αντοχή εφελκυσμού των δειγμάτων έδειξε εξαιρετικά αποτελέσματα καθώς οι υψηλότερες αντοχές συγκόλλησης ήταν στο 101% και 99% στους κωνικούς και κυλινδρικούς πείρους, αντίστοιχα, σε σχέση με το υλικό βάσης.

Στη μελέτη τους, οι Oliveira et al. [69] συγκόλλησαν φύλλα Πολυμεθυλομεθυλακρυλικού (PMMA) με FSSpW. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε τη δομή του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη μέθοδο.



Εικόνα 4.5: (α) Σχηματική απεικόνιση του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε στη FSSpW των Oliveira et al. (β) Σύγκριση διατμητικής αντοχής στην FSSpW με άλλες τεχνικές συγκόλλησης [21]

Στη γραφική αναπαράσταση 4.5-b παρουσιάζεται η σύγκριση της διατμητικής αντοχής της συγκόλλησης FSSpW, όπου σύμφωνα με αυτή τη μελέτη ισούται με περίπου 9.5 MPa, υψηλότερα σε σχέση με άλλες μεθόδους όπως η συγκόλληση με μικροκύματα, η θερμική συγκόλληση και η συγκόλληση με υπερήχους. Η προφανής διαπίστωση της συγκρίσεως αυτής είναι η πολύ μεγαλύτερη αντοχή της συγκόλλησης δια τριβής σε σημείο (FSSpW) σε σύντομο χρονικό διάστημα σύνδεσης σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους.

Επίσης, σε μια άλλη μελέτη, των Mendes et al. [83], αναπτύχθηκε μια νέα ρομποτική πλατφόρμα με σκοπό την μεγαλύτερη ευελιξία της διαδικασίας. Η πλατφόρμα αποτελούταν από έναν ρομποτικό χειριστή, ένα εργαλείο FSW και τεχνολογική υποστήριξη του εργαλείου.

Γενικά, το συμπέρασμα από τις μελέτες είναι ότι ο πείρος παίζει καθοριστικό ρόλο στην αντοχή της συγκόλλησης. Ο σπειροειδής πείρος, λόγω της ικανότητάς του να αναμιγνύει το πλαστικοποιημένο υλικό έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκόλλησης, ενώ σε περίπτωση που έχει και μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας παράγει υψηλότερη θερμότητα τριβής που είναι απαραίτητη για την εκτέλεση της συγκόλλησης. [21]

Η διάμετρος του περιαιχηνίου προς τη διάμετρο του πείρου κυμαίνεται σε αναλογία 3:1 ή 4:1. Το μήκος του πείρου πρέπει να είναι 0.3-0.4 mm μικρότερο από το πάχος του δοκιμίου εργασίας. Επίσης, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατασκευάστηκαν από διάφορα υλικά τα οποία καταγράφονται στον Πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.2:** Υλικά κατασκευής εργαλείων FSW [28]

S. No.	Tool material
1.	H13
2.	Tungsten carbide
3.	PCBN
4.	SAE 1050 steel
5.	Stellite 6B
6.	MP-159
7.	Ferro-Tic-HT-6A
8.	Mo-TZM
9.	Rhenium
10.	Ferro-TiC Sk

*H13* chromium-molybdenum steel, *PCBN* poly-cubic boron nitride, *Stellite 6B* cobalt based alloy, *MP-159* nickel cobalt based alloy, *Ferro-Tic-HT-6A* steel alloy bonded titanium carbide; non-magnetic and wear resistance, *Mo-TZM* titanium zirconium molybdenum, *Ferro-TiC* steel alloy bonded titanium carbide

### 3.6 Επίδραση της εξωτερικής επαγωγής θερμότητας

Λόγω της θερμομονωτικής φύσης των πολυμερών είναι γενικά δύσκολο να μεταφερθεί η παραγόμενη θερμότητα από τον ώμο στη βάση του τεμαχίου εργασίας. Μπορεί να προκληθεί ετερογενής ανάμειξη κοντά στη βάση, ειδικά σε χοντρά φύλλα. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την υιοθέτηση διαφορετικών προσεγγίσεων.

Για παράδειγμα, ο Aydın [75] προθέρμανε φύλλα πολυαιθυλενίου εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους (UHMW-PE) πριν την FSW. Η προθέρμανση πραγματοποιήθηκε σε κλίβανο στους 50 και 80 °C. Συγκρίνοντας τις τιμές αντοχής εφελκυσμού των προθερμασμένων και των μη θερμαινόμενων δοκίμια διαπιστώθηκε ότι τα δείγματα που

προθερμάνθηκαν στους 50°C είχαν 17% υψηλότερη αντοχή. Η αντοχή του μη προθερμασμένου δείγματος είχε το 72% της αντοχής του μητρικού υλικού. Αν και η προθέρμανση έδειξε καλά αποτελέσματα συγκόλλησης, κάνει πιο σύνθετη τη διαδικασία και αυξάνει επίσης το χρόνο πραγματοποίησής της. Γι' αυτό μια καλύτερη μέθοδος, για τη διατήρηση του συντόμου χρονικού διαστήματος της διαδικασίας, είναι η επί τόπου θέρμανση κατά τη διάρκεια της FSW.

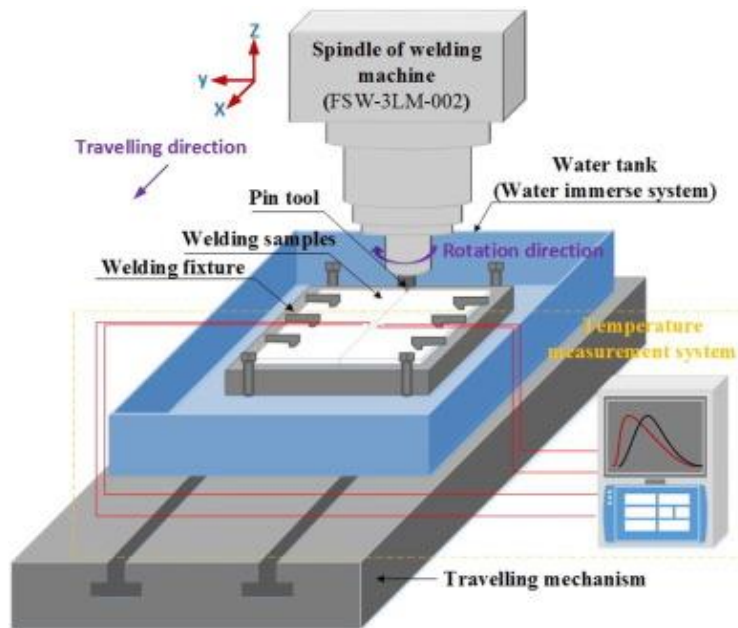
Οι Bagheri et. Al [66] χρησιμοποίησαν ένα «θερμαινόμενο παπούτσι» (hot shoe), το οποίο είναι ένα εξωτερικά θερμαινόμενο χαλύβδινο περιαιχέριο που κινείται γραμμικά κατά μήκος του εργαλείου, με σκοπό τη βελτίωση της αντοχής της συγκόλλησης και την εξάλειψη των ελαττωμάτων στις συγκολλήσεις ABS. Τα καλύτερα αποτελέσματα ελήφθησαν σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής, υψηλή θερμοκρασία παπουτσιού και χαμηλή ταχύτητα συγκόλλησης. Οι χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης έδωσαν επαρκή χρόνο για ανάμειξη και ως εκ τούτου επιτεύχθηκε καλύτερη αντοχή συγκόλλησης. Η υψηλότερη αντοχή εφέλκυσμού ήταν σχεδόν στο 89% της αντοχής του υλικού βάσης.

Σε μια άλλη μελέτη, οι Mostafarour και Asad [79] χρησιμοποίησαν τη μέθοδο «hot shoe» για συγκόλληση Nylon-6. Τα αποτελέσματα της συγκόλλησης ήταν καλά, διότι η αντοχή ήταν ίση σχεδόν με αυτήν του υλικού βάσης.

Οι Vijendra και Sharma [80] χρησιμοποίησαν μια διαφορετική τεχνική. Το εργαλείο θερμαίνεται μέσω επαγωγικής θέρμανσης και διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Χρησιμοποιήθηκε επαγωγικό πηνίο που περιβάλλει το εργαλείο και τροφοδοτήθηκε με εναλλασσόμενο ρεύμα. Αυτή η έρευνα έδειξε αξιοσημείωτα αποτελέσματα, στα οποία η αντοχή της συγκόλλησης ήταν σχεδόν ίση με την αντοχή του υλικού βάσης για θερμοκρασία εργαλείου-πείρου στους 45°C και ταχύτητα περιστροφής 2000 RPM. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους. Για παράδειγμα, οι τεχνικές με «hot shoe» δεν χρησιμοποιούνται γενικά σε καμπυλόγραμμες συγκολλήσεις λόγω του ότι η προθέρμανση του εργαλείου οδηγεί σε διαρροή της θερμότητας στο περιβάλλον με το πέρας του χρόνου, με συνέπεια σε μεγάλες συγκολλήσεις υπάρχει ακανόνιστη θέρμανση του υλικού βάσης. [21]

### **3.7 Βυθισμένη FSW πολυμερών**

Έχουν διεξαχθεί έρευνες για FSW μετάλλων σε κατάσταση βύθισης σε νερό (Submerged or Underwater Friction Stir Welding – UFSW) και τα αποτελέσματα ήταν πολύ υποσχόμενα. Ανάλογη έρευνα χρειάζεται και για τα πολυμερή, εφόσον στη βιβλιογραφία υπάρχει πολύ μικρός όγκος πληροφοριών, ενώ πολλά πολυμερή δεν έχουν συγκολληθεί ποτέ με βυθισμένη FSW σε νερό.

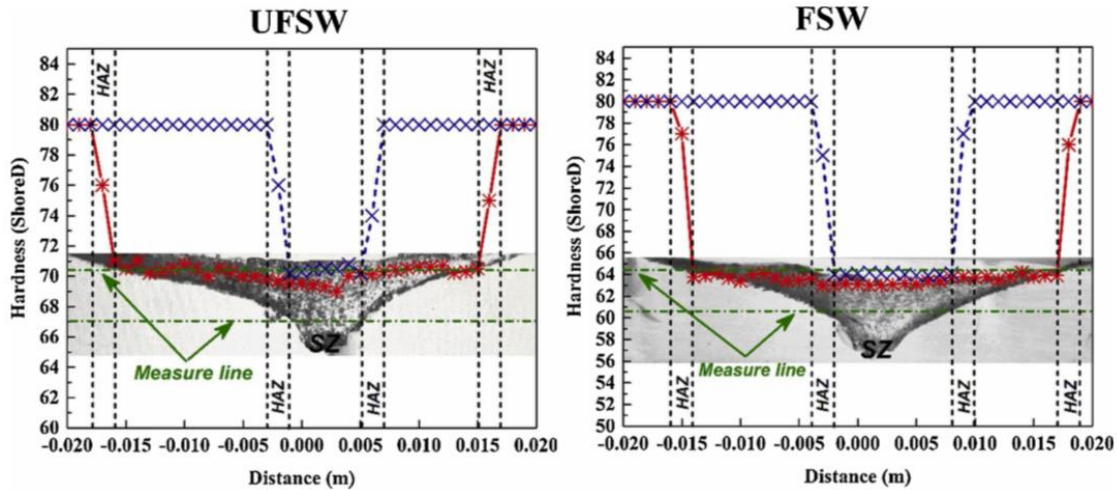


Εικόνα 4.6: Εγκατάσταση και διαδικασία της βυθισμένης FSW [25]

Οι Gao et al. [72] πραγματοποίησαν συγκολλήσεις φύλλων HDPE βυθισμένα κάτω από το νερό και στον αέρα και συνέκριναν τις αντοχές τους σε εφελκυσμό. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τις βέλτιστες παραμέτρους συγκόλλησης, χρησιμοποιώντας κυλινδρικό σπειροειδή πείρο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκόλληση που εκτελέστηκε κάτω από το νερό είχε υψηλότερη αντοχή από αυτή που πραγματοποιήθηκε στον αέρα. Η μέγιστη αντοχή κάτω από το νερό ήταν 12.3 MPa, ενώ στον αέρα ήταν 9.6 MPa. Απ' ότι φάνηκε, το νερό ελέγχει τη μέγιστη θερμοκρασία και επηρεάζει τον θερμικό κύκλο στο αδύναμο μέρος, με αποτέλεσμα την καλύτερη συγκόλληση.

Επίσης, οι Derazkola et al. [26] προχώρησαν σε μια πειραματική μελέτη συγκόλλησης FSW βυθισμένου πολυανθρακικού πολυμερούς (PC). Αποδείχθηκε στη μελέτη αυτή ότι:

- Η θερμότητα που παράχθηκε στην UFSW ήταν σχεδόν 6% χαμηλότερη από την περίπτωση της συμβατικής FSW.
- Η ικανότητα ροής του πλαστικοποιημένου υλικού ήταν χαμηλότερη στην UFSW από την απλή FSW. Ωστόσο, οι χημικές ιδιότητες του υλικού στη ζώνη ανάδευσης είναι πιο σταθερές στην UFSW.
- Η αντοχή σε εφελκυσμό στα συγκολλημένα δοκίμια της UFSW ήταν περίπου 8% υψηλότερη από την FSW. Επίσης, η σκληρότητα είχε μεγαλύτερες τιμές στην UFSW.



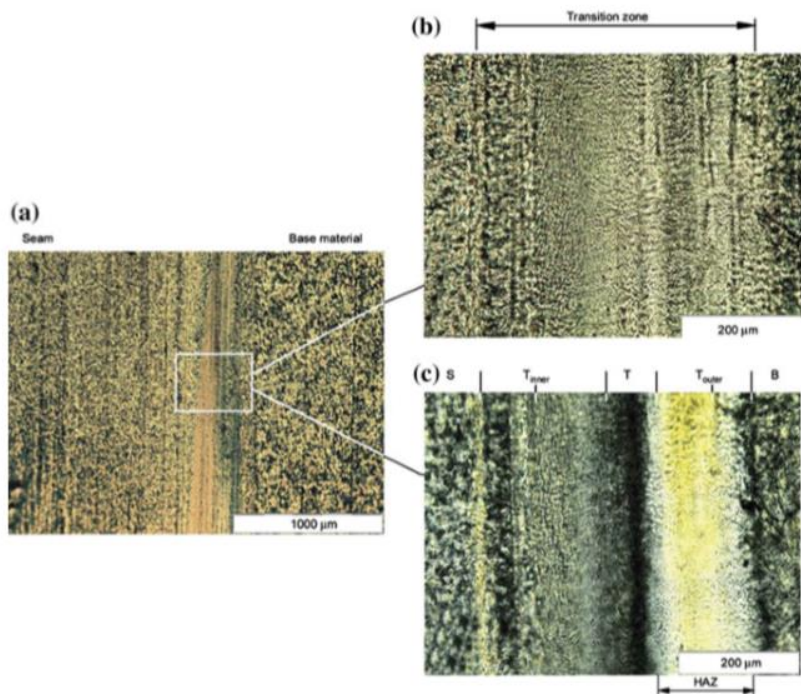
Εικόνα 4.7: Σκληρότητα των συγκολλημένων δοκιμών PC με βυθισμένη FSW [26]

[26]

### 3.8 Εξέλιξη της Μικροδομής

Οι παράμετροι συγκόλλησης έχουν άμεση σχέση με τη μικροδομή των υλικών και ως εκ τούτου την ποιότητα της συγκόλλησης. Κατά τη διάρκεια της FSW, το προς κατεργασία τεμάχιο υφίσταται έντονη θέρμανση που οδηγεί σε μικροδομικές αλλαγές και σχηματισμό διαφορετικών ζωνών. Στις FSW μετάλλων παρατηρούνται τέσσερις διαφορετικές ζώνες: τον πυρήνα συγκόλλησης (weld nugget-WN), τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (thermo-mechanically affected zone – TMAZ), τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat-affected zone-HAZ) και το υλικό βάσης (base material-BM). Ωστόσο, στην περίπτωση των πολυμερών δεν υπάρχει πάντα η HAZ. Επίσης, η μικροδομή που παρατηρείται στη ζώνη συγκόλλησης είναι διαφορετική από αυτή των μετάλλων.

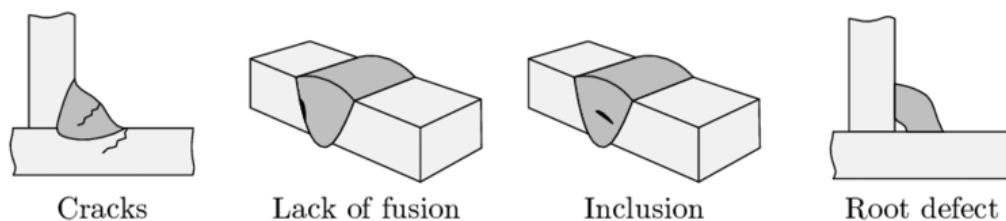
Οι Kiss et al. [81] μελέτησαν τη μορφολογία των ραφών συγκόλλησης FSW φύλλων PP. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, το οπτικό μικροσκόπιο έδειξε σφαιρική δομή στο κέντρο και στο υλικό βάσης. Διαπίστωσαν ότι για να επιτευχθεί καλής ποιότητας συγκόλληση θα πρέπει να μην υπάρχει μεγάλη πολυπλοκότητα στη μορφολογία και το πλάτος της ραφής να είναι μικρό. [21]



Εικόνα 4.8: (a) Σφαιρική δομή στη ραφή και στο υλικό βάσης, (b) Υπερμοριακή δομή στη συνοριακή περιοχή [21]

### 3.9 Εξάλειψη Ατελειών Ρίζας σε FSW πολυμερών

Μετά την επιτυχή εφαρμογή FSW σε πολυμερή, έχουν γίνει προσπάθειες για την εξάλειψη σχετικών ελαττωμάτων με σκοπό τη βελτίωση της αντοχής συγκόλλησης. Το ελάττωμα ρίζας προκύπτει λόγω ατελούς διείδυσης του εργαλείου και έχει άμεση επίδραση στην αντοχή της συγκόλλησης. Στις περισσότερες αστοχίες εφελκυσμού έχει αποδειχθεί ότι οι ρωγμές εκκινούν από «ρίζες». [21]

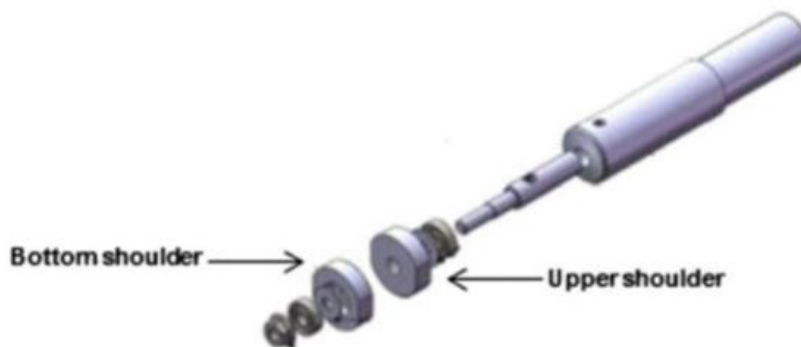


Εικόνα 4.9: Παραδείγματα ελαττωμάτων ρίζας [27]

Για την εξάλειψη αυτού του ελαττώματος έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι, όπως ο σχεδιασμός διπλού περιανυχενίου και οι διπλές διελεύσεις του εργαλείου.

Οι Arici et al. [74] εργάστηκαν με διπλά περάσματα του εργαλείου σε φύλλα MDPE (Medium Density Polyethelene). Η συγκόλληση έγινε σε δύο βήματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπήρχαν ελαττώματα ρίζας και η αντοχή ήταν υψηλότερη.

Σε μια άλλη μελέτη, οι Pirizadeh et al. [67] χρησιμοποίησαν ένα νεοσχεδιασμένο εργαλείο που αποτελούταν από δύο περιανυχένια και ήταν ικανό να έρχεται σε επαφή με την άνω και την κάτω επιφάνεια του τεμαχίου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.



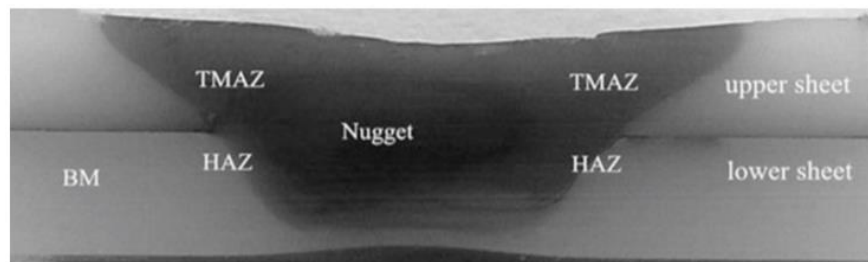
*Εικόνα 4.10: Σχηματική απεικόνιση του νεοσχεδιασμένου εργαλείου με δύο περιανυχένια της μελέτης των Pirizadeh et al. [21]*

Τα περιανυχένια διατηρήθηκαν ακίνητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, δηλαδή υπήρχε μόνο περιστροφή του πείρου. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε φύλλα ABS πάχους 5 mm. Μετά τη συγκόλληση δεν παρατηρήθηκαν ελαττώματα ρίζας ή οπίσθιες σχισμές. Η υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού ήταν στο 60% της αντοχής του υλικού βάσης. [21]

### 3.10 Επίδραση της Κρυστάλλωσης στις Ιδιότητες του Πολυμερούς

Ένα πλήρως κρυσταλλικό υλικό έχει άτομα ή μόρια με ταξινομημένο και περιοδικό τρόπο. Ο βαθμός κρυστάλλωσης έχει σημαντικές επιδράσεις στις ιδιότητες των πολυμερών, όπως την αντοχή σε εφελκυσμό, την ακαμψία, το όριο διαρροής, τη σκληρότητα και την αντοχή σε κρούση. Η αύξηση της κρυστάλλωσης προκαλεί αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό και της σκληρότητας, ενώ οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε κρούση. Ο βαθμός κρυστάλλωσης συνήθως μετράται σχετικά με το ποσοστό κρυστάλλωσης με τη Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (differential scanning calorimetry – DSC). Το ποσοστό κρυστάλλωσης είναι το συνολικό κρυσταλλικό περιεχόμενο ως προς το άμορφο υλικό. Η μέθοδος DSC μετράει την εξώθερμη ή ενδόθερμη θερμότητα ενός υλικού σε συνάρτηση με το χρόνο ή τη θερμοκρασία. Η κρυστάλλωση του πολυμερούς μπορεί να βρεθεί με την DSC μετρώντας τη θερμότητα τήξης του πολυμερούς. Αυτή η θερμότητα δίνει το ποσοστό % κρυστάλλωσης σε κατανομή σε σχέση με τη θερμότητα τήξης για ένα 100% ή πλήρως κρυσταλλωμένο δείγμα του ίδιου υλικού.

Οι Gao et al. [72] μέτρησαν το ποσοστό κρυστάλλωσης συγκολλημένων δοκιμίων HDPE με FSW σε διαφορετικές περιοχές, όπως: BM, HAZ, TMAZ και ψήγμα συγκόλλησης (WN), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.11.[21]



Εικόνα 4.11: Οι σχηματισθείσες περιοχές κατά τη FSW [21]

**Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση της κρυστάλλωσης από το BM στο WN.** Η FSW είναι μια γρήγορη διαδικασία συγκόλλησης που είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της κρυστάλλωσης λόγω της ταχείας ψύξης της ζώνης συγκόλλησης.

Η μελέτη των Kiss et al. [71] πραγματοποιήθηκε σε συγκολλημένα δοκίμια PP με FSW, χρησιμοποιώντας ένα θερμιδόμετρο Perkin-Elmer με ρυθμό θέρμανσης 10 K/min. Τα αποτελέσματα έδειξαν σχεδόν την ίδια τάση με αυτή των Gao et al. Το WN βρέθηκε να έχει τη χαμηλότερη κρυστάλλωση συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιοχές. Οι Kiss et al. θεώρησαν ότι αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο μέγεθος εργαλείου σε σχέση με το WN με αποτέλεσμα να απορροφάται γρηγορότερα η θερμότητα. Δηλαδή, η γρήγορη ψύξη

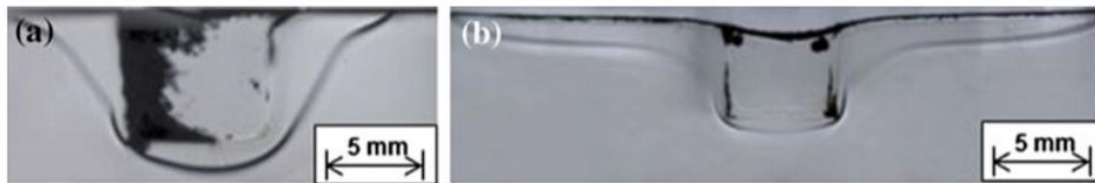


προκάλεσε τη χαμηλότερη κρυστάλλωση στο WN. Η περιοχή σε απόσταση από το εργαλείο είχε περισσότερο χρόνο να ψυχθεί, οπότε και είχε υψηλότερη κρυστάλλωση. [21]

### 3.11 Ροή υλικού κατά τη διαδικασία της FSW

Η κατανόηση της ροής του υλικού είναι σημαντική για την πρόληψη οπών και άλλων ελαττωμάτων που μπορεί να δημιουργηθούν κατά τη διαδικασία της ανάδευσης. Η μελέτη της ροής γίνεται και στις δύο πλευρές: προωθούμενη πλευρά (advancing side-AS) και υποχωρούσα πλευρά (retreating side-RS). [21]

Οι Simoes et al. [82] μελέτησαν τη ροή του υλικού σε φύλλα PMMA χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά εργαλεία. Το πρώτο είχε μικρή διάμετρο περιαιχηνίου με κωνικό πείρο και το δεύτερο είχε περιαιχηνίο με μεγάλη διάμετρο και κωνικό πείρο κοντά στο κέντρο. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους με τη μελέτη μοντέλου ροής Arbegast σε μέταλλο, υποστήριξαν ότι η ροή υλικού στα πολυμερή είναι διαφορετική από αυτή των μετάλλων. Επίσης, ανέφεραν ότι η διεπαφή της ζώνης του βυθισμένου πείρου και του υλικού βάσης παρέμενε ευθεία, γεγονός που δεν έδειξε ροή υλικού από τη ζώνη ανάδευσης στο υλικό βάσης. Οι εικόνες και των δύο δοκιμίων φαίνονται στην Εικόνα 4.12.



*Εικόνα 4.12:* Εικόνες οπισθίου φωτισμού των συγκολλημένων φύλλων PMMA με συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση της μελέτης των Simoes et al. (a) Εργαλείο 1 (b) Εργαλείο 2 [21]

**Γενικά, η ροή υλικού στα πολυμερή είναι ομοιόμορφη και διαφέρει από αυτή των μετάλλων σε μεγάλο βαθμό.**

Μια παρόμοια παρατήρηση της ροής του υλικού σημειώθηκε κατά τη διάρκεια της FSW του Nylon-6 από τους Zafar et al.

[21]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΟΜΟΙΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Εφόσον είδαμε σε γενικές γραμμές τις βασικές πληροφορίες όσον αφορά τις συγκολλήσεις FSW πολυμερών, τις παραμέτρους και την ερευνητική πρόοδο που έχει γίνει με βάση συγκεκριμένες μελέτες πάνω στο θέμα, σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται αναλυτικότερα η διαδικασία της FSW πολυμερών.

### 4.1 Περίπτωση FSW φύλλων HDPE – Mishra et al.

Για να εντρυφήσουμε περαιτέρω στις συγκολλήσεις ομοίων πολυμερικών υλικών με συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση παρουσιάζουμε τη μελέτη συγκόλλησης φύλλων HDPE (υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου) των D.Mishra et al. [28] Το πολυμερές HDPE είναι ένα θερμοπλαστικό με μεγάλο εύρος εφαρμογών και έχει καλή αντοχή στην κρούση. Είναι το πιο διαδεδομένο θερμοπλαστικό στις έρευνες των FSW πολυμερών.

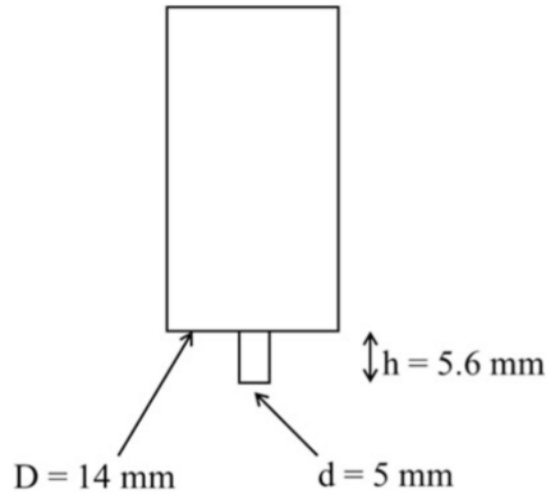
#### 4.1.1 Υλικά, Μέθοδοι, Παράμετροι και Μηχανήματα

Τα δοκίμια HDPE με διαστάσεις 100mm × 100mm × 6 mm προετοιμάστηκαν για τον σκοπό της συγκόλλησης. Οι φυσικές ιδιότητες του υλικού βάσης καταγράφηκαν στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.1: Φυσικές ιδιότητες του HDPE

Θερμική αγωγιμότητα ( W/m °C )	0.46
Σημείο τήξης ( °C )	126
Πυκνότητα ( kg / m <sup>3</sup> )	950
Συντελεστής θερμικής διαστολής × 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	100 - 200
Απόλυτη αντοχή σε εφελκυσμό ( MPa )	33

Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στη συγκόλληση κατασκευάστηκε από χάλυβα H13 και οι διαστάσεις του φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



*Εικόνα 4.1: Οι διαστάσεις του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία*

Το εργαλείο είχε διάμετρο περιουχενίου  $D=14\text{mm}$ , διάμετρο πείρου  $d=5\text{mm}$  και ύψος πείρου  $h=5.6 \text{ mm}$ .

Για τη συγκόλληση FSW χρησιμοποιήθηκε μια 2 τόνων CNC (ελεγχόμενη από υπολογιστή) μηχανή FSW που κατασκευάστηκε από την ETA Technology, Bangalore.



*Εικόνα 4.2: Η εγκατάσταση της μηχανής FSW που χρησιμοποιήθηκε στο ερευνητικό πείραμα*

Είναι μια μηχανή FSW γραμμικής συγκόλλησης με μέγιστη περιστροφική ταχύτητα 3000 rpm, μέγιστη ταχύτητα συγκόλλησης 1000 mm/min και γωνία κλίσης  $\pm 10^\circ$ . Οι παράμετροι συγκόλλησης που επιλέχθηκαν στο πείραμα φαίνονται στον Πίνακα 4.2, παρακάτω.

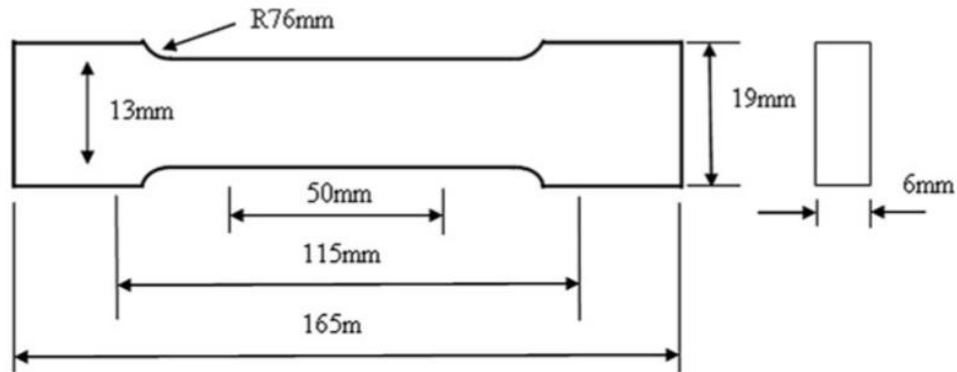
*Πίνακας 4.2: Παράμετροι συγκόλλησης πειράματος*

Εκτέλεση πειράματος	Ταχύτητα περιστροφής εργαλείου ( $\omega$ , rpm)	Ταχύτητα συγκόλλησης ( $v$ , mm/min)	Γωνία κλίσης ( $\alpha$ , $^\circ$ )
1	500	10	1
2	600	20	1
3	800	30	1

Η ταχύτητα περιστροφής και συγκόλλησης μεταβλήθηκαν, ενώ η γωνία κλίσης και το βάθος βύθισης έμειναν σταθερά  $1^\circ$  και 0.1 mm, αντίστοιχα, σε όλες τις πειραματικές δοκιμές. Τα προς συγκόλληση δοκίμια πακτώθηκαν ακλόνητα στην κλίνη με τη βοήθεια εξαρτήματος και διατηρήθηκε έτσι μηδενικό διάκενο. Στη συνέχεια το εργαλείο που ήταν στερεωμένο στον άξονα πέρασε πάνω από τη γραμμή συγκόλλησης, ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν υπήρχε αναντιστοιχία μεταξύ της γραμμής συγκόλλησης και της επιφάνειας του πείρου. Εφόσον εφαρμόστηκε κλίση  $1^\circ$ , η τιμή του βάθους βύθισης του εργαλείου καταγράφηκε με την επαφή μεταξύ του οπισθίου άκρου του εργαλείου και της επιφάνειας του τεμαχίου εργασίας. Έτσι, εξασφαλιζόταν η καλύτερη ανάμειξη του

πλαστικοποιημένου υλικού και ελαχιστοποιήθηκε ο σχηματισμός ελαττωμάτων. Εάν η βύθιση είχε μετρηθεί με το μπροστινό άκρο του εργαλείου, τότε το οπίσθιο άκρο θα είχε βυθιστεί περισσότερο με αποτέλεσμα την υπερβολική απώλεια υλικού από τη ζώνη συγκόλλησης.

Τα συγκολλημένα δοκίμια αφαιρέθηκαν μετά από 2 λεπτά από την κλίνη της μηχανής για να αποφευχθεί η παραμόρφωση του τεμαχίου από τα άκρα. Τα δείγματα εφελκυσμού, έπειτα, κόπηκαν από τα συγκολλημένα δοκίμια σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D638. Ένα τυπικό δείγμα δοκιμής εφελκυσμού σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο φαίνεται στην Εικόνα 5.3.

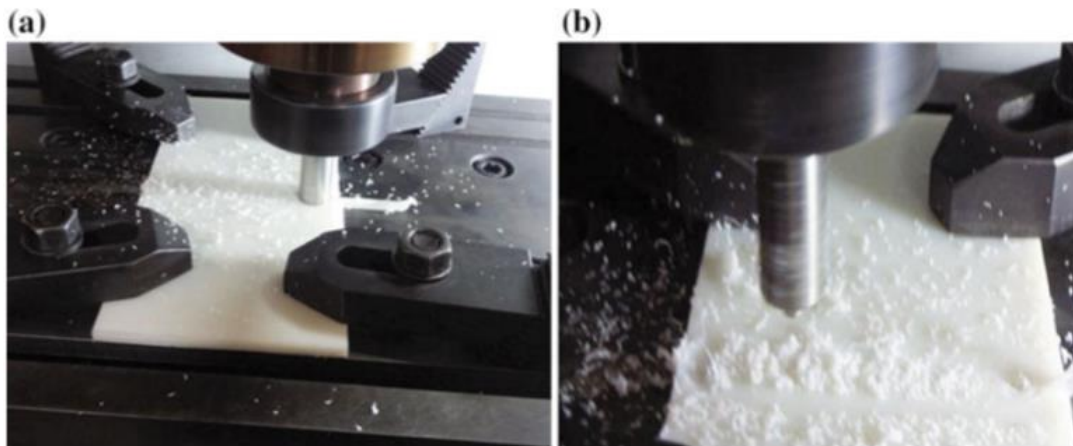


Εικόνα 4.3: Διαστάσεις δείγματος δοκιμής εφελκυσμού

Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε σε μια γενική μηχανή δοκιμής εφελκυσμού (Instron, 1344).

#### 4.1.2 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, παρατηρήθηκε ότι με  $\omega$  μικρότερη από 500 rpm η θερμότητα που παραγόταν ήταν ανεπαρκής για να παραμορφώσει πλαστικά το υλικό και ως εκ τούτου η αντοχή της συγκόλλησης ήταν μικρή. Όταν η  $\omega$  διατηρήθηκε άνω των 900 rpm, η θερμότητα που αναπτύχθηκε ήταν υπερβολικά υψηλή. Ομοίως, όταν η ταχύτητα συγκόλλησης διατηρήθηκε κάτω των 10 mm/min, η παραγόμενη θερμότητα σχεδόν έλιωνε το υλικό κάτω από την επιφάνεια του περιανυχενίου. Επίσης, η χαμηλή ταχύτητα συγκόλλησης θα μείωνε την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας μιας και θα χρειαζόταν και περισσότερος χρόνος ολοκλήρωσής της. Με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου αυξήθηκε και ο ρυθμός αποφλοίωσης του υλικού. Αυτό οφειλόταν στον υψηλότερο ρυθμό τριβής που διέσπασε τη θερμοπλαστική επιφάνεια και ξεκίνησε τη θραύση της ίνας. Η αποφλοίωση της επιφάνειας των προς συγκόλληση δοκιμίων σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής φαίνεται στην Εικόνα 5.4.

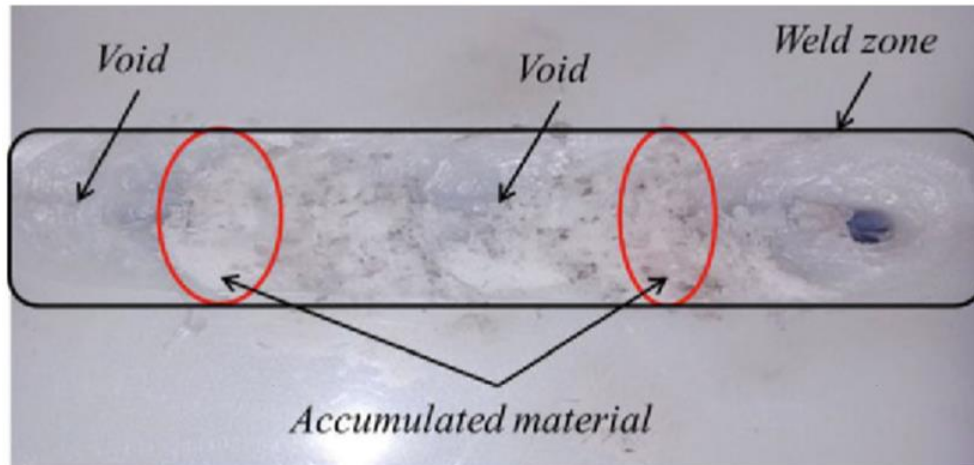


Εικόνα 4.4: Material peeling (ξεφλούδισμα) (a) 500 rpm , (b) 900 rpm

Το ξεφλούδισμα είναι προφανώς μεγαλύτερο στις 900 rpm. Οι διαστάσεις του εργαλείου και οι άλλες παράμετροι ήταν ίδιες και στις δύο περιπτώσεις.

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά εργαλεία με διάμετρο περιανυχενίου 24 και 18 mm. Η διάμετρος του πείρου ήταν 6 mm. Παρατηρήθηκε οπτικά ότι ο αναδεδόμενος όγκος του πλαστικοποιημένου υλικού αυξήθηκε με την αύξηση της διαμέτρου του περιανυχενίου. Με διάμετρο 24 mm, ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας ήταν επίσης μεγαλύτερος.

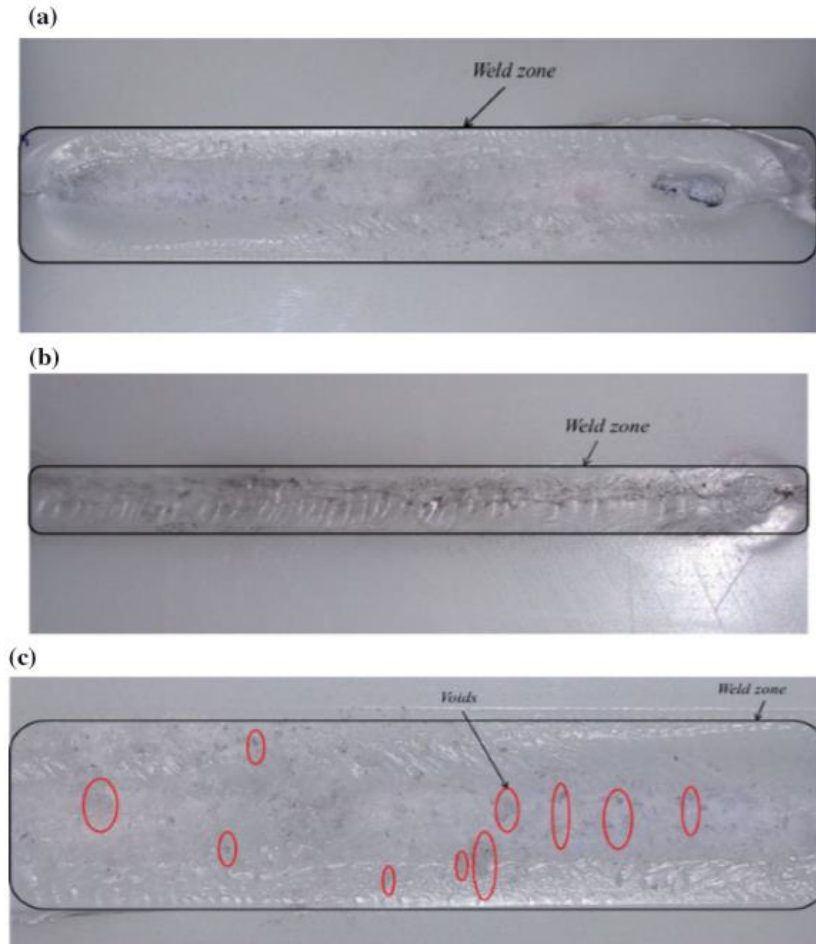
Όμως, παρατηρήθηκε και απώλεια υλικού από τη ζώνη συγκόλλησης λόγω του υψηλού όγκου παραμορφωμένου υλικού και τριβής. Το συγκολλημένο δείγμα με διάμετρο περιαιχενίου 24 mm φαίνεται στην Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5: Επίδραση περιαιχενίου διαμέτρου 24 mm

Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και με τη διάμετρο 18 mm. Ακόμη, παρατηρήθηκε ότι η περιστροφή του περιαιχενίου είναι καταστροφική για τα θερμοπλαστικά καθώς έχει ως αποτέλεσμα τη θραύση της άνω ίνας στην επιφάνεια του υλικού. Έτσι, για να αποφευχθεί η απώλεια υλικού από τη ζώνη συγκόλλησης έπρεπε να μειωθούν οι διαστάσεις του εργαλείου. Επομένως, η διάμετρος του περιαιχενίου ορίστηκε στα 14 mm και η διάμετρος του πείρου στα 5 mm.

Το δείγμα που συγκολλήθηκε με  $\omega = 600$  rpm και  $v = 10$  mm/min φαίνεται στην Εικόνα 5.6.



Εικόνα 4.6: Συγκολλημένο δείγμα. (α) Πρόοψη, (β) Οπίσθια όψη, (γ) Διευρυμένη άποψη της ζώνης συγκόλλησης

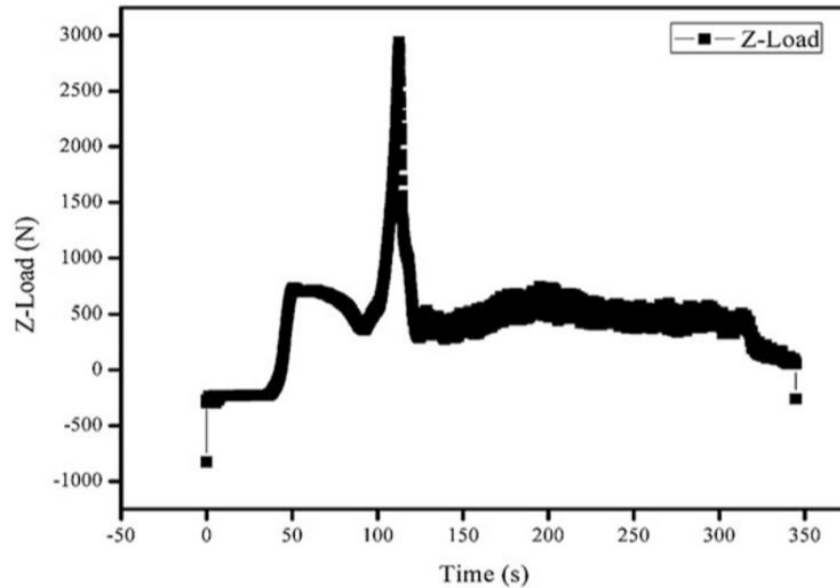
Η πρώτη εικόνα είναι η μπροστινή όψη του συγκολλημένου δείγματος. Η ζώνη της συγκόλλησης δεν παρουσιάζει ατέλειες και το φινίρισμα της επιφάνειας καλό. Παρατηρήθηκε, επίσης, αποφλοίωση των υλικών κατά το πείραμα με αυτές τις παραμέτρους, αλλά ο όγκος αφαίρεσης υλικού ήταν χαμηλός.

Η δεύτερη εικόνα είναι η οπίσθια πλευρά του τεμαχίου όπου η ροή του υλικού μπορεί να φανεί με τη μορφή ομόκεντρων δακτυλίων. Ακόμη, το πλάτος της ζώνης συγκόλλησης είναι μεγαλύτερο στην μπροστινή πλευρά σε σύγκριση με την οπίσθια, γεγονός που δείχνει ότι η επάνω επιφάνεια επηρεάζεται περισσότερο από το περιουχένιο ενώ η κάτω επιφάνεια από τον πείρο.

Η τρίτη εικόνα είναι μια μεγενθυμένη όψη της πρόοψης. Αν και η επιφάνεια φαινόταν λεία, υπήρχαν διάφορα μικροσκοπικά κενά. Αυτά τα κενά δημιουργήθηκαν ως αποτέλεσμα του ελαττώματος της αποφλοίωσης. **Επομένως, για τα θερμοπλαστικά υλικά, είναι προτιμότερο να αποφεύγεται η περιστροφή του περιουχενίου.**



Δεδομένου ότι τα θερμοπλαστικά έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες από αυτές των μετάλλων, ήταν αναγκαίο να μελετηθεί η μεταβολή της αξονικής δύναμης συγκόλλησης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Η μεταβολή της δύναμης για συγκολλημένο δείγμα με  $\omega = 800 \text{ rpm}$ ,  $v = 20 \text{ mm/min}$  φαίνεται στην Εικόνα 5.7.



Εικόνα 4.7: Μεταβολή της αξονικής δύναμης με το χρόνο

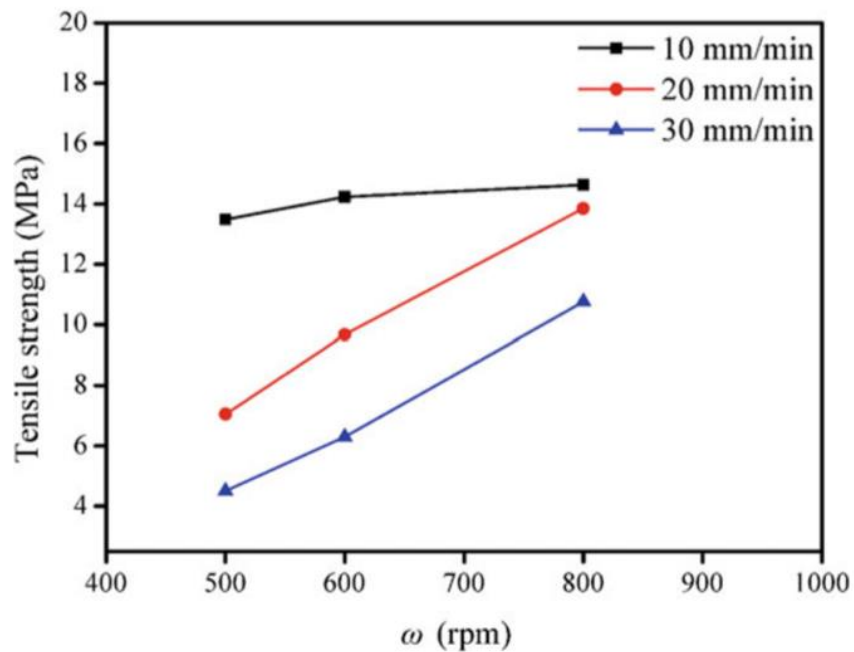
Η πρώτη κορυφή που παρατηρείται στο σχήμα δείχνει την επαφή του πείρου με τα υλικά βάσης. Η δύναμη άρχισε να αυξάνεται καθώς το υλικό βρισκόταν σε κατάσταση θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Με περαιτέρω βύθιση του πείρου το υλικό παραμορφώθηκε πλαστικά και έτσι στη συνέχεια παρατηρείται πτώση της δύναμης. Η δεύτερη κορυφή (2.8 kN) είναι αποτέλεσμα της αρχικής επαφής του περιανυχνίου με το τεμάχιο. Το μέγιστο αξονικό φορτίο στην περίπτωση FSW Αλουμινίου είναι περίπου 8.9 kN. Επομένως αυτό δείχνει ότι η δύναμη που απαιτείται στα θερμοπλαστικά είναι αρκετά χαμηλότερη. Σε αυτό το χρονικό σημείο υπάρχει μια ξαφνική πτώση του σήματος δύναμης και ονομάζεται στάδιο παραμονής, με διάρκεια περίπου 5 s, διότι ο χρόνος παραμονής των 5 s είναι ένα από τα χαρακτηριστικά της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα. Έπειτα, το εργαλείο ξεκίνησε τη διέλευση πάνω στη γραμμή συγκόλλησης και έτσι το σήμα της δύναμης έγινε σχεδόν σταθερό. Στο τέλος, καθώς το εργαλείο αποσύρθηκε από τη συγκόλληση, η τιμή της δύναμης πλησίαζε στο μηδέν.

Η αντοχή σε εφελκυσμό των συγκολλημένων δοκιμίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Αντοχή σε εφελκυσμό ανά πειραματική δοκιμή

No specimen's	$\omega$ (rpm)	$v$ (mm/min)	UTS – Ultimate Tensile Strength (MPa)
1	500	10	13.48
2	500	20	7.02
3	500	30	4.5
4	600	10	14.23
5	600	20	9.67
6	600	30	6.3
7	800	10	14.63
8	800	20	13.85
9	800	30	10.7

Η αντοχή του υλικού βάσης είναι 33 MPa. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό που επιτυγχάνεται με τις επιλεγμένες παραμέτρους είναι 14.63 MPa που ισούται με το 44.34% της αντοχής του υλικού βάσης. Η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου στην αντοχή εφελκυσμού φαίνεται στην Εικόνα 5.8.

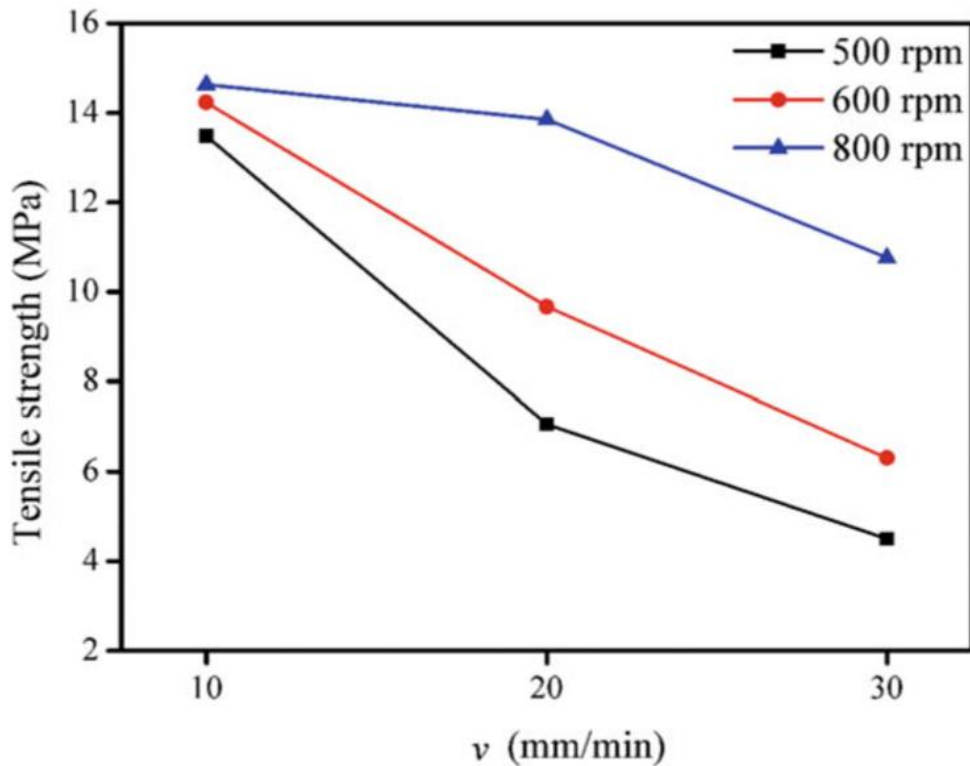


Εικόνα 4.8: Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στην αντοχή σε εφελκυσμό

Παρατηρείται ότι υπάρχει αύξηση της αντοχής όταν αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Η παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής αυξάνεται όσο αυξάνεται και η

ταχύτητα περιστροφής και επομένως αυξάνεται ο ρυθμός παραμόρφωσης του υλικού βάσης. Σε σταθερή ταχύτητα συγκόλλησης 10 mm/min, για  $\omega = 500$  rpm η αντοχή σε εφελκυσμό που επιτυγχάνεται είναι 13.48 MPa, ενώ αυξάνεται στα 14.23 MPa με την αύξηση της  $\omega$  στα 600 rpm. Με περαιτέρω αύξηση της  $\omega$  στα 800 rpm η αντοχή εφελκυσμού αυξάνεται στα 14.63 MPa. Εάν υπερβούμε τις 800 rpm πιθανότατα δεν θα υπάρξει άλλη αύξηση της αντοχής. Ο λόγος είναι ότι η φύση των θερμοπλαστικών είναι μαλακή και μια υπερβολικά υψηλή ταχύτητα περιστροφής του πείρου θα οδηγήσει σε απανθράκωση, καταστροφή του υλικού και άρα στη δημιουργία ατελειών.

Η επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην αντοχή σε εφελκυσμού φαίνεται στην Εικόνα 5.9

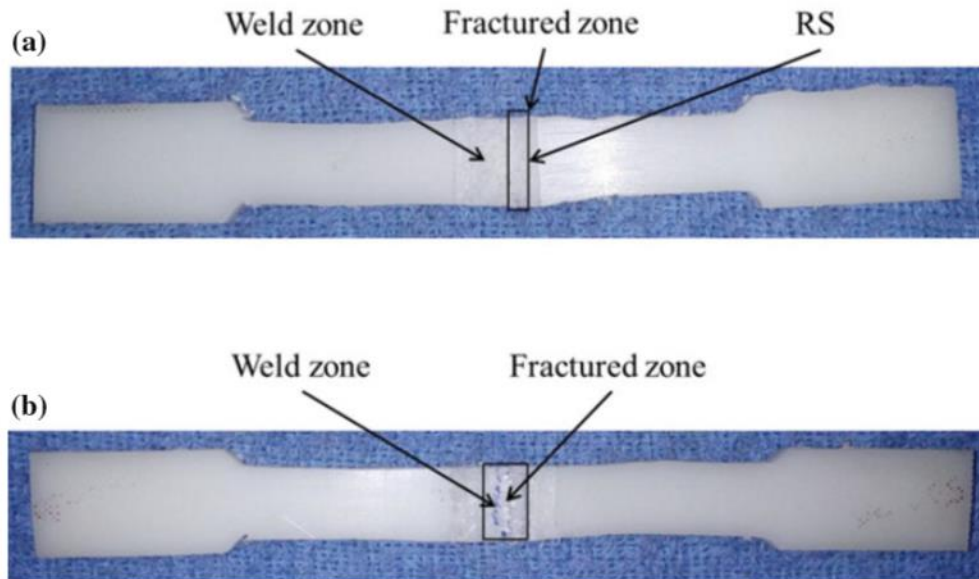


Εικόνα 4.9: Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην αντοχή σε εφελκυσμό

Είναι προφανές ότι η αντοχή σε εφελκυσμό μειώνεται ανάλογα με την αύξηση της ταχύτητας διέλευσης του εργαλείου. Με την υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης μειώνεται ο χρόνος της διαδικασίας και άρα η παραγωγή θερμότητας μειώνεται λόγω της μικρότερης τριβής που υπάρχει μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου. Άρα, η μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης και κατά συνέπεια η μείωση της παραγωγής θερμότητας επιφέρει και μείωση της αντοχής στη συγκόλληση. Η αντοχή σε εφελκυσμό που λαμβάνεται με  $\omega = 500$  rpm και  $v = 10$  mm/min, είναι 13.48 MPa, ενώ για  $\omega = 500$  rpm και  $v = 20$  mm/min, η αντοχή ισούται με 7.02 MP και για  $\omega = 500$  rpm και  $v = 30$  mm/min, η αντοχή ισούται με 4.5 MPa.

Η ποσοστιαία αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό από 500 σε 600 rpm είναι 40%, ενώ από 600 σε 800 rpm είναι 69.9%. Η χαμηλότερη τιμή αντοχής που επιτεύχθηκε στο πείραμα ήταν των 4.5 MPa με  $\omega = 500$  rpm και  $v = 30$  mm/min. Με αυτές τις παραμέτρους η θερμότητα που αναπτύχθηκε ήταν η ελάχιστη, αφού είχαμε τη χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής και την υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης. Άρα, δεν υπήρξε η απαιτούμενη παραμόρφωση του υλικού και έτσι το εργαλείο απέτυχε να ομογενοποιήσει το υλικό με αποτέλεσμα την χαμηλή αντοχή. Η υψηλότερη αντοχή που υπολογίστηκε στην παρούσα μελέτη απείχε κατά πολύ από την αντοχή του υλικού βάσης. [28]

Το υλικό βάσης είναι όλκιμο. Επίσης, όλα τα συγκολλημένα δοκίμια κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε εφελκυσμό εμφάνισαν σταθερή αστοχία (σταθερή θραύση). Το θραυσμένο δοκίμιο με την υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό ( $\omega = 800$  rpm,  $v = 10$  mm/min) και το θραυσμένο δοκίμιο με τη χαμηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό ( $\omega = 500$  rpm,  $v = 30$  mm/min) παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.10.

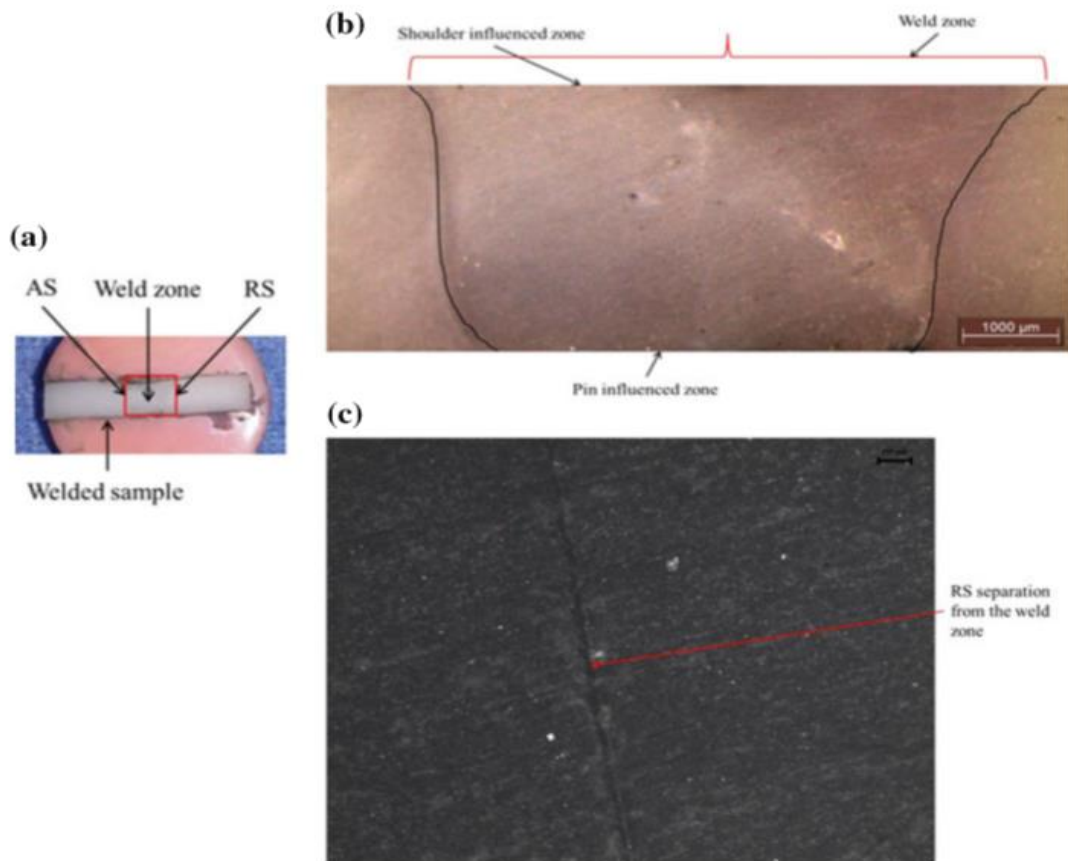


Εικόνα 4.10: Θραυσμένα από εφελκυσμό δείγματα. (a)  $\omega = 800$  rpm,  $v = 10$  mm/min b)  $\omega = 500$  rpm,  $v = 30$  mm/min

Το πρώτο δείγμα στις ταχύτητες  $\omega = 800$  rpm,  $v = 10$  mm/min, έσπασε λόγω εφελκυσμού από την RS της ζώνης συγκόλλησης. Οι κοιλότητες στο δείγμα ήταν πολύ λιγότερες σε σύγκριση με τα άλλα συγκολλημένα δείγματα, γεγονός που δείχνει ότι η θερμότητα που παράχθηκε ήταν ικανή να παραμορφώσει τα τεμάχια εργασίας στο απαιτούμενο επίπεδο. Η ζώνη συγκόλλησης παρέμεινε άθικτη. Το δείγμα με ταχύτητες  $\omega = 500$  rpm,  $v = 30$  mm/min έσπασε από τη ζώνη συγκόλλησης. Αυτό δείχνει την ελλειπούσα εισαγωγή

θερμότητας με τον επιλεγμένο συνδυασμό παραμέτρων με αποτέλεσμα η ποιότητα της συγκόλλησης να ήταν πολύ κακή. Επίσης, υπήρξαν πολλές οπές, ένδειξη απώλειας υλικού, λόγω ακατάλληλης ροής.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ένα μικρό δείγμα αποκόπηκε από ένα συγκολλημένο δοκίμιο και τοποθετήθηκε για να οπτικοποιηθεί η ζώνη συγκόλλησης.



Εικόνα 4.11: (a) Παγωμένο δείγμα συγκολλημένων θερμοπλαστικών ( $\omega = 800 \text{ rpm}$ ,  $v = 10 \text{ mm/min}$ ), (b) μακρο-εικόνα, (c) μικρο-εικόνα

Το τοποθετημένο δείγμα φαίνεται στην Εικόνα 5.11 - (a).

Στην Εικόνα 5.11 - (b) παρουσιάζεται η μακροσκοπική εικόνα του δείγματος. Η ζώνη ροής μοιάζει με σχήμα U, με τη ζώνη που επηρεάστηκε από το περιανχένιο να ευρίσκεται ψηλότερα από αυτήν του πείρου. Η επίδραση του περιανχενίου ήταν περιορισμένη στην

επιφάνεια του τεμαχίου, αφού μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ζώνη ροής μειώνεται από την κορυφή προς τα κάτω. Το κάτω μέρος του τεμαχίου επηρεάζεται από τον πείρο. Από την οπτικοποίηση διακρίνονται κενοί χώροι μέσα στη ζώνη συγκόλλησης, άρα υπάρχει ένδειξη ότι τα υλικά δεν αναμείχθηκαν καλά και ως εκ τούτου δεν επετεύχθη η ομογενοποίηση. Αυτό θα μπορούσε να είναι ένας πιθανός λόγος για τη χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό των συγκολλημένων δοκιμίων σε σχέση με αυτήν του υλικού βάσης.

Στη μικροσκοπικό επίπεδο, Εικόνα 5.11 - c, της ζώνης συγκόλλησης διακρίνεται μια γραμμή που λειτουργεί ως όριο μεταξύ δύο ζωνών, της αριστερής που είναι ζώνη συγκόλλησης και της δεξιάς που είναι η RS. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα παράδειγμα ότι το παραδοσιακό εργαλείο FSW δεν μπορεί να κάνει το υλικό να ρέει καλά μέσα στις άκρες.

Γενικά, συμπεραίνεται ότι στην παρούσα μελέτη τα φύλλα HDPE συγκολλήθηκαν επιτυχώς, με καλό φινίρισμα και ελάχιστα ελαττώματα κάτω από συγκεκριμένες παραμέτρους, αλλά η αντοχή της συγκόλλησης δεν ήταν αξιόλογη. Η αντοχή εφελκυσμού στη μελέτη βρέθηκε να αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής  $\omega$  και να μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης  $v$ . Η μέγιστη αντοχή που επιτεύχθηκε ήταν 14.63 MPa χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους συγκόλλησης  $\omega = 800$  rpm,  $v = 10$  mm/min και  $\alpha = 1^\circ$ .

[28]

## 4.2 Περίπτωση FSW φύλλων Nylon-6 – Sahu et al.

Η εργασία των Sahu et al. [29] παρουσιάζει τη συγκόλληση FSW φύλλων Nylon-6 και κυρίως τη μηχανική συμπεριφορά του αποτελέσματος. Η FSW πραγματοποιήθηκε με προφίλ πείρου κυλινδρικό. Η υψηλότερη αντοχή 41% πολυμερούς βάσης, επιτεύχθηκε σε ταχύτητα περιστροφής ίση με 1800 rpm και ταχύτητα συγκόλλησης 20 mm/min. Ο μέγιστος αριθμό αστοχιών παρατηρήθηκε στην προωθούμενη πλευρά της ζώνης συγκόλλησης.

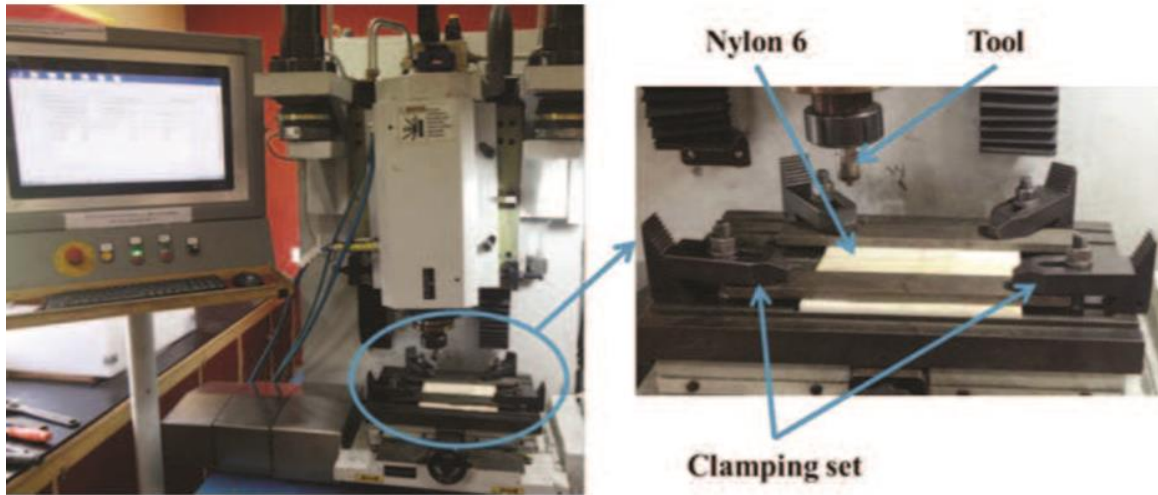
### 4.2.1 Πειραματική διαδικασία

Το υλικό βάσης που επιλέχθηκε για την πειραματική διαδικασία ήταν ένα φύλλο Nylon-6 διαστάσεων 100mm × 100mm × 6mm. Το Nylon-6 είναι ένα ελαφρύ θερμοπλαστικό, το οποίο έχει ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων και εφαρμογών. Σημαντικές του ιδιότητες είναι η υψηλή αντοχή, καλή επιμήκυνση, ακαμψία και άλλες οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Φυσικές ιδιότητες του Nylon-6

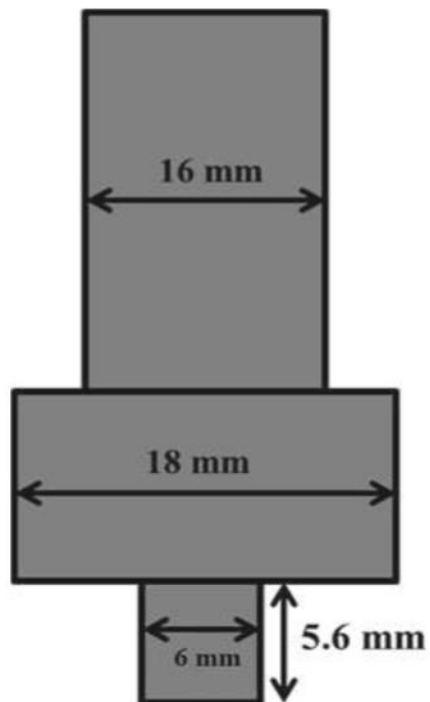
Πυκνότητα (g/cc)	Απόλυτη Αντοχή σε Εφελκυσμό (MPa)	Συντελεστής γραμμικής διαστολής (ανά °C) × 10 <sup>-6</sup>	Σημείο Τήξεως (°C)	Αγωγιμότητα (W/mk)
0.91	46.7	85	220	0.21

Χρησιμοποιώντας μια μηχανή συγκόλλησης ελεγχόμενη από υπολογιστή, FSW 2 τόνων και 3 αξόνων (Τεχνολογία ETA, PVT. LTD. , Bangalore) συγκολλήθηκαν τα φύλλα.



*Εικόνα 4.12: Πειραματική διάταξη μηχανής και εγκατάσταση σύσφιξης*

Το εργαλείο FSW που χρησιμοποιήθηκε είναι από χάλυβα H13 με διάμετρο περιανυχενίου 18mm, διάμετρο πείρου 6 mm και μήκος πείρου 5.6mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.13.



*Εικόνα 4.13: Το εργαλείο FSW που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία*

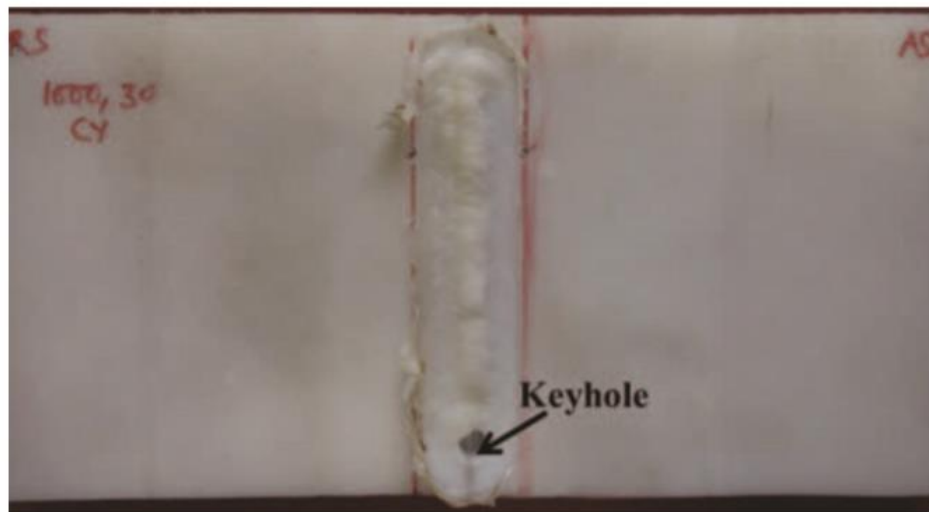


Υπήρξαν διάφορες πειραματικές δοκιμές με εύρος τιμών ταχυτήτων περιστροφής και συγκόλλησης. Το εργαλείο διέλευσε πάνω από τη γραμμή συγκόλλησης και την όψη του πείρου, με σταθερή γωνία κλίσης  $1^\circ$  και βάθος βύθισης 0.1 mm. Πραγματοποιήθηκαν 9 πειραματικές δοκιμές σε αυτή την ερευνητική εργασία. Μετά το πέρας της συγκόλλησης, δείγμα εξετάστηκε σε δοκιμή εφελκυσμού στην κάθετη διεύθυνση της συγκόλλησης με μηχανή Universal Testing Machine – Instron 1344, με ρυθμό παραμόρφωσης 0.1mm/min και σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D638. Όλα τα συγκολλημένα δοκίμια κόπηκαν σε μήκος 20 mm εγκάρσια της συγκόλλησης για έλεγχο σκληρότητας.

#### 4.2.2 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Τα φύλλα Nylon-6 συγκολλήθηκαν με επιτυχία. Αρκετά ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως η σκληρότητα ζώνης συγκόλλησης (Hw), η σκληρότητα της θερμικά επηρεασμένης ζώνης κατά μήκος της προωθούμενης πλευράς (Hhaz,AS) και της υποχωρούσας πλευράς (Hhaz, RS) των συγκολλημένων δοκιμίων και η τελική αντοχή σε εφελκυσμό (απόδοση συγκόλλησης), και οι παράμετροι των πειραματικών συγκολλήσεων αποτυπώνονται στον Πίνακα 4.5.

Στην Εικόνα 5.14 φαίνεται μια περίπτωση της συγκόλλησης με πολυμερές Nylon-6.



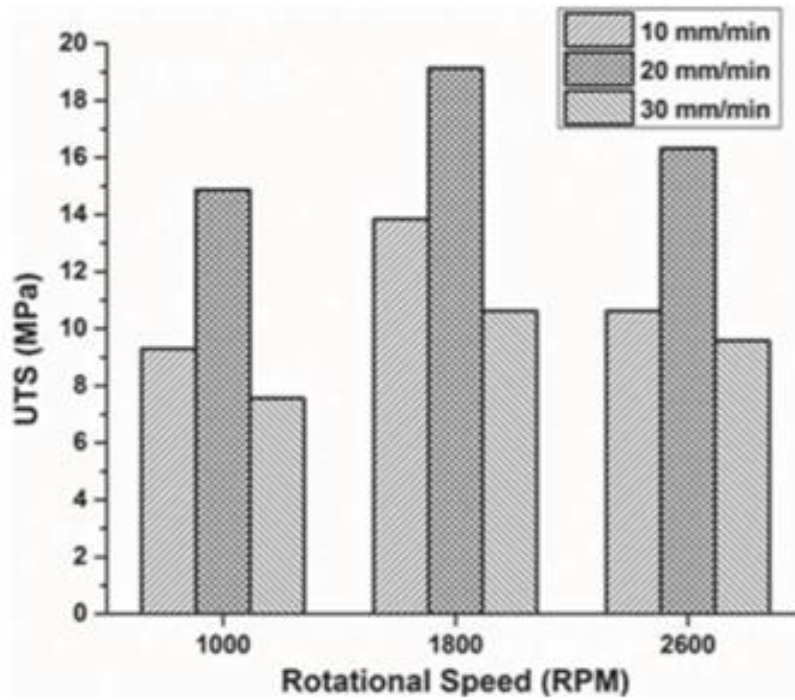
Εικόνα 4.14: Συγκολλημένο δείγμα Nylon-6

Υπάρχουν μικροί κυματισμοί σε σχήμα κυκλικού δακτυλίου, ενώ το ελάττωμα της οπής βρέθηκε στο τέλος κάθε γραμμής συγκόλλησης

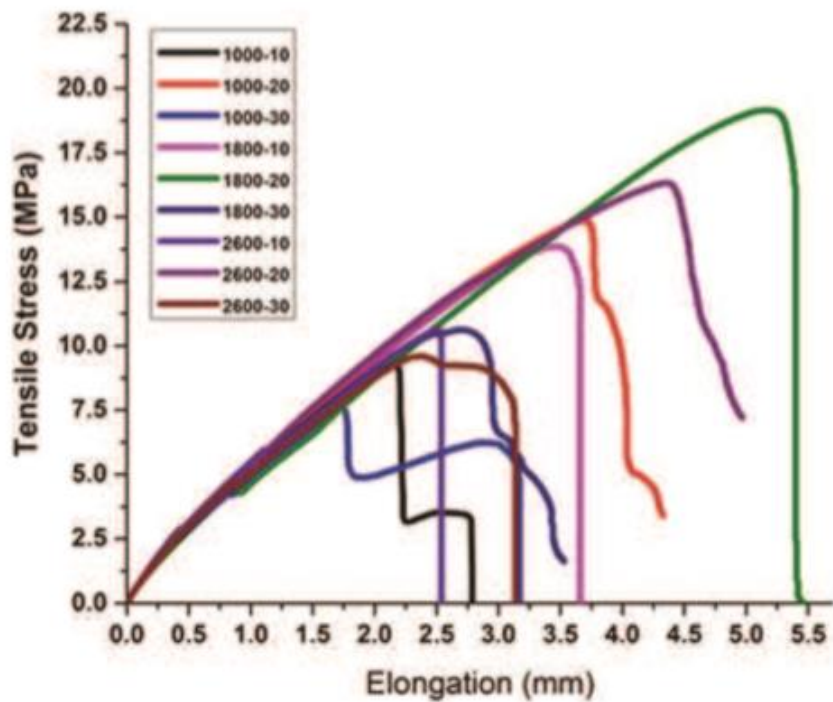
Πίνακας 4.5: Παράμετροι των πειραματικών δοκιμών συγκόλλησης

Πειραματικές δοκιμές	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα Συγκόλλησης (mm/min)	Shore D hardness					UTS (MPa)	Απόδοση (%)	Ζώνη αστοχίας
			Hw	H <sub>haz, AS</sub>	H <sub>haz, RS</sub>	H <sub>μhaz</sub>	ΔH			
1	1000	10	62	60	54	57	5	9.3	19.91	HAZ (RS)
2	1000	20	71	67	58	62.5	8.5	14.87	31.84	HAZ (AS)
3	1000	30	64	52	42	47	17	7.57	16.21	HAZ (AS)
4	1800	10	68	62	59	60.5	7.5	13.85	29.66	HAZ (AS)
5	1800	20	68	66	60	63	5	19.14	40.99	HAZ (AS)
6	1800	30	68	67	60	63.5	4.5	10.62	22.74	HAZ (AS)
7	2600	10	64	61	55	58	6	10.62	22.74	HAZ (AS)
8	2600	20	71	62	61	61.5	9.5	16.32	34.95	HAZ (AS)
9	2600	30	69	67	66	66.5	2.5	9.58	20.51	HAZ (AS)

Η τελική αντοχή της συγκόλλησης για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής και συγκόλλησης αποτυπώνονται στην Εικόνα 5.15.



Εικόνα 4.15: Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στην αντοχή σε εφελκυσμό



Εικόνα 4.16: Διάγραμμα Τάσης-Επιμήκυνσης

Η αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού βάσης του φύλλου Nylon-6 είναι 46.7 MPa. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό 19.14 MPa επιτυγχάνεται στην ενδιάμεση ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου 1800 rpm και ταχύτητα συγκόλλησης 20 mm/min.

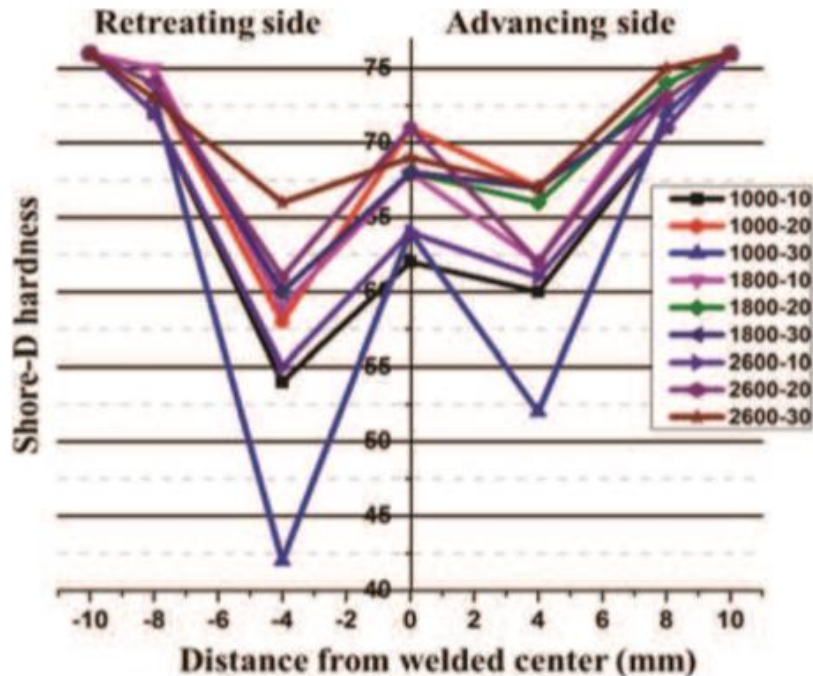
Επομένως, η υψηλότερη απόδοση της συγκόλλησης είναι 40.99% της αντοχής του υλικού βάσης.

Η ολκιμότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\%e = \frac{\text{Αρχικό μήκος τεμαχίου} + \text{επιμήκυνση}}{\text{Αρχικό μήκος τεμαχίου}} \times 100\%$$

Άρα, το ποσοστό επιμήκυνσης από το Nylon-6 βάσης ισούται με 49% (η επιμήκυνση ήταν 4.9 mm και το αρχικό μήκος τεμαχίου 100mm). Η τελική αντοχή συγκόλλησης, καθώς και η ποσοστιαία επιμήκυνση, βελτιώθηκαν με την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης, αλλά μειώθηκαν με περαιτέρω αύξηση λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής Μικρο-Σκληρότητας για όλες τις πειραματικές δοκιμές συγκόλλησης φαίνονται στην Εικόνα 5.17.



Εικόνα 4.17: Σκληρότητα Shore-D συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο συγκόλλησης για κάθε περίπτωση πειραματικής δοκιμής

Η σκληρότητα Shore-D του υλικού βάσης βρέθηκε να είναι 76. Παρατηρούμε ότι η σκληρότητα υποχωρεί περί τα 4 mm από το κέντρο συγκόλλησης και στην προωθούμενη και στην υποχωρούσα πλευρά και έπειτα αυξάνει εκ νέου απότομα όσο απομακρυνόμαστε. Η σκληρότητα μειώνεται λόγω του αργού ρυθμού ψύξης, εφόσον το υλικό έχει χαμηλή θερμοαγωγιμότητα. Έτσι, αποδεικνύεται ότι υπάρχει περισσότερη συσσώρευση υλικού περί του μέσου (4mm) και της προωθούμενης και της υποχωρούσας πλευράς. Επίσης, η σκληρότητα είναι μικρότερη κατά μήκος της υποχωρούσας πλευράς από της προωθούμενης. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι στις άκρες (10 mm) η προωθούμενη πλευρά εμφανίζεται ελαφρώς πιο αδύναμη. Επομένως, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το υλικό συγκεντρώνεται κυρίως από την προωθούμενη πλευρά προς την υποχωρούσα και έτσι υπήρξε ανεπαρκής ανάδευση του υλικού η οποία αυξάνει τη σκληρότητα στην προωθούμενη πλευρά αυτή αλλά μειώνει την απόδοση της συγκόλλησης. **Άρα, η πτώση της σκληρότητας ήταν αντιστρόφως ανάλογη με την αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης.** Δηλαδή, η μείωση στην αντοχή της συγκόλλησης οφείλεται κυρίως στη συγκέντρωση υλικού από την προωθούμενη προς την υποχωρούσα πλευρά.

[29]

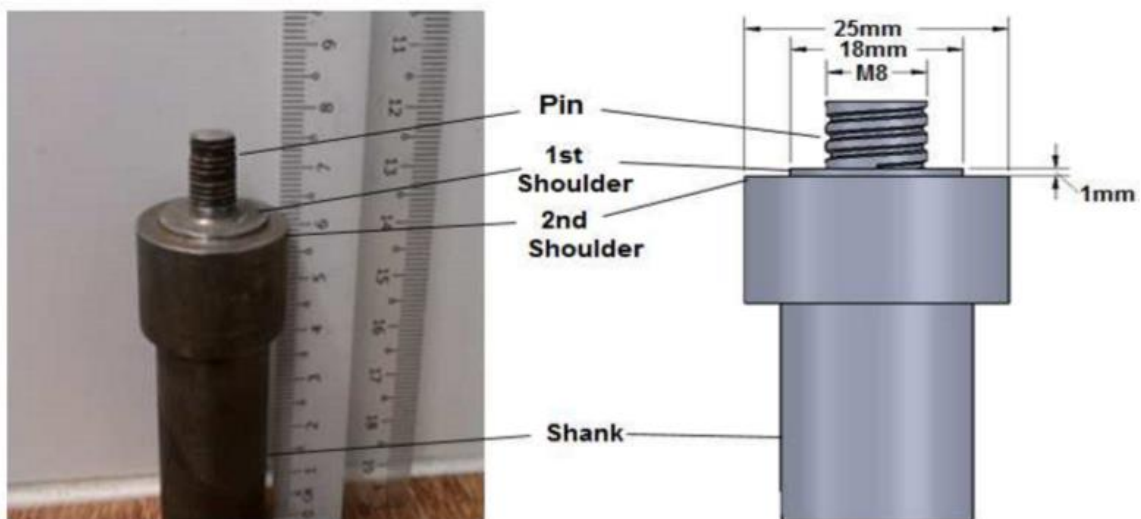
### 4.3 Περίπτωση FSW φύλλων Nylon-6 – Zafar et al.

Μια ακόμη σημαντική ερευνητική εργασία όσον αφορά τη συγκόλληση φύλλων Nylon-6 είναι των Zafar et al. [30] και η οποία εξετάζει κυρίως την επίδραση του διπλού περιαιχενίου στην ταχύτητα περιστροφής και στα θερμο-φυσικά χαρακτηριστικά της FSW.

Σε αυτή την μελέτη εφαρμόστηκε FSW σε φύλλα Nylon-6 πάχους 16 mm με ταχύτητα συγκόλλησης 25 mm/min και μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής μεταξύ 300 και 1000 rpm. Χρησιμοποιήθηκε ένα ειδικά σχεδιασμένο εργαλείο με διπλό περιαιχένιο και πείρος με δεξιόστροφο σπειροειδές προφίλ. Το εργαλείο αυτό έδειξε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες περιστροφής. Παρατηρήθηκε μια γραμμική σχέση μεταξύ θερμότητας και ταχύτητα περιστροφής.

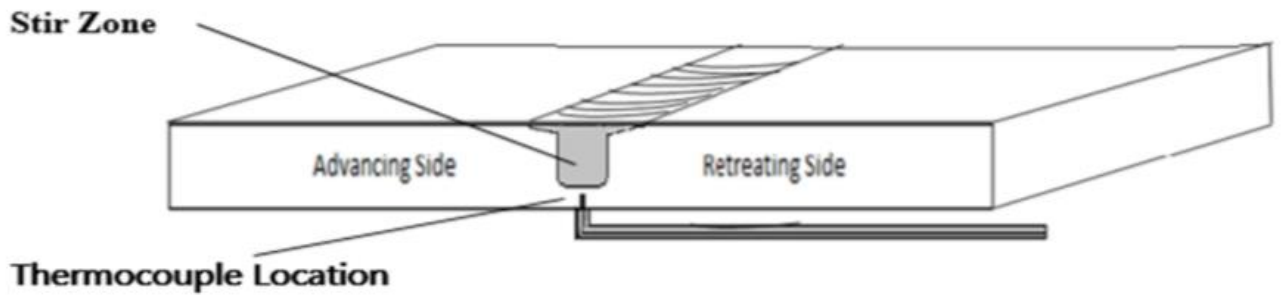
#### 4.3.1 Υλικά και Μέθοδος

Οι διαστάσεις των δύο προς συγκόλληση δοκιμίων ήταν 123mm × 205mm. Για την FSW χρησιμοποιήθηκε μηχανή CNC Bridgeport VMC 2216. Το εργαλείο ήταν κατασκευασμένο από χάλυβα H13.



Εικόνα 4.18: Φωτογραφία και σχηματικό γράφημα απεικόνισης του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα

Πριν από τη συγκόλληση πραγματοποιήθηκε θερμική επεξεργασία του εργαλείου, ώστε να αποφευχθεί σπάσιμο του πείρου κατά τη διαδικασία της συγκολλήσεως. Έτσι, η σκληρότητα του εργαλείου αυξήθηκε από 22 HRC σε 56 HRC. Το Nylon-6 έχει χαμηλό ιξώδες τήξης και έτσι χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο με διπλό περιανχένιο για τον έλεγχο τυγχούσης διαφυγής υλικού από το πρώτο περιανχένιο. Η διάμετρος του πρώτου περιανχενίου ήταν μικρή για να υπάρχει μικρότερη τριβή στην επιφάνεια των δοκιμίων. Η θερμοκρασία μετρήθηκε με θερμοστοιχείο τύπου-K, κάτω από τον πείρο στο κέντρο της διαδρομής της διαδρομής συγκόλλησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.19.

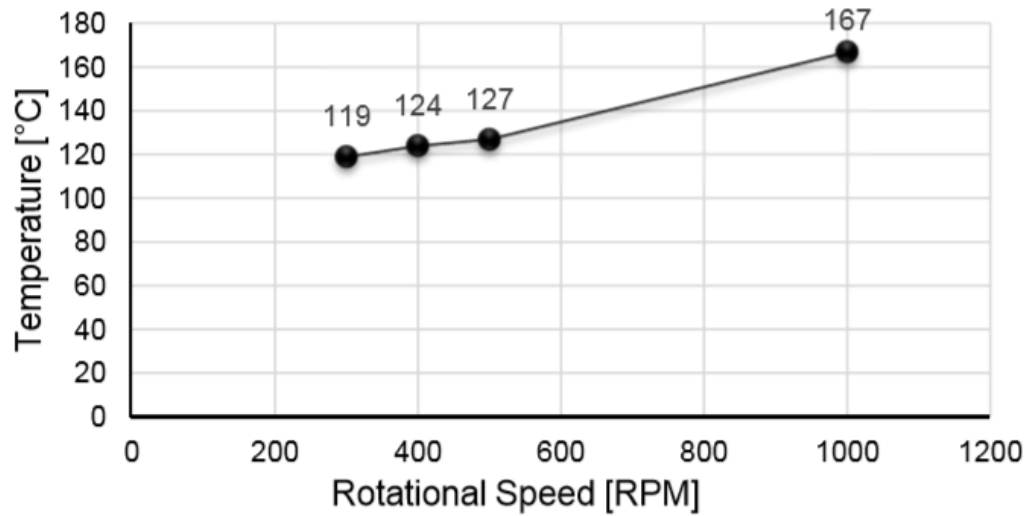


Εικόνα 4.19: Σχηματική απεικόνιση της θέσης του θερμοστοιχείου τύπου-K

Η ταχύτητα συγκόλλησης και ο χρόνος παραμονής διατηρήθηκαν σταθερά 25 mm/min και 15 s, αντίστοιχα, ενώ η ταχύτητα περιστροφής κυμαινόταν από 300 έως 1000 rpm. Η φορά περιστροφής του εργαλείου σε όλες τις πειραματικές δοκιμές ήταν δεξιόστροφη.

#### 4.3.2 Αποτελέσματα και Συζήτηση

Η θερμοκρασία μετρήθηκε 1 mm κάτω από τον πείρο στο δείγμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου, αυξάνεται και η θερμοκρασία.

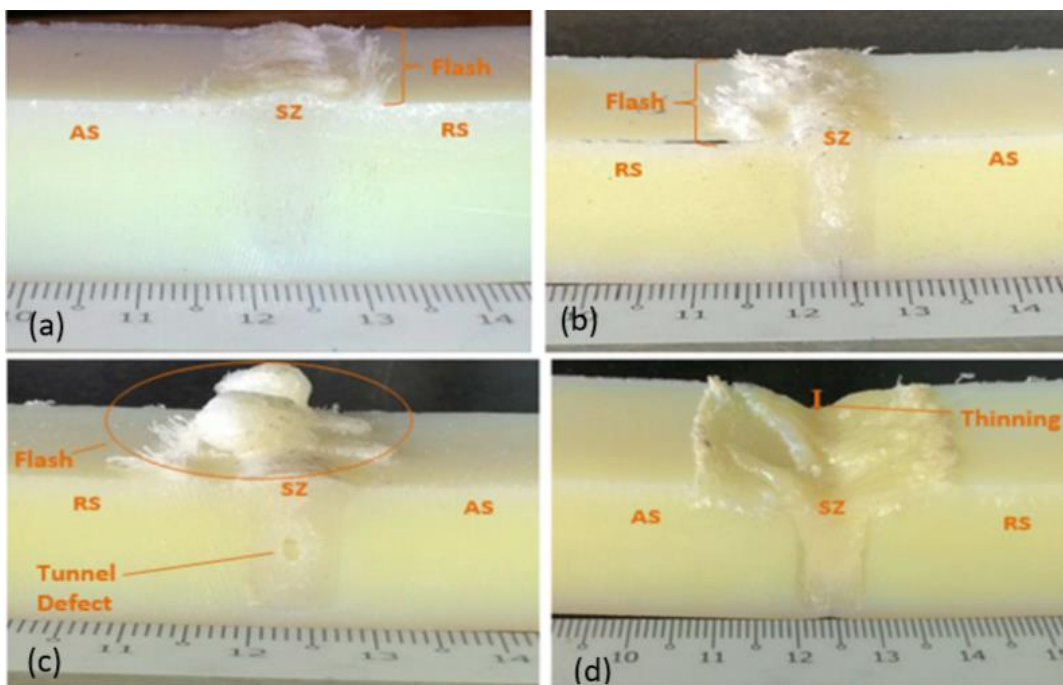


Εικόνα 4.20: Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Ταχύτητας περιστροφής

Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας δεν είναι σταθερή. Η καταλληλότερη θερμοκρασία που βρέθηκε σε αυτή τη μελέτη ήταν των 119 °C στις 300 rpm, με πολύ λιγότερα απαέρια. Αυτή η θερμοκρασία είναι πολύ μικρότερη από τη θερμοκρασία θερμικής αποδόμησης του Nylon-6 που είναι 350 °C. Επομένως, δεν υπάρχει πιθανότητα αποδόμησης του πολυμερούς με αυτές τις παραμέτρους κατά τη συγκόλληση.

Η Εικόνα 5.21 παρουσιάζει τις διατομές των συγκολλήσεων FSW που δημιουργούνται κάτω από διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.





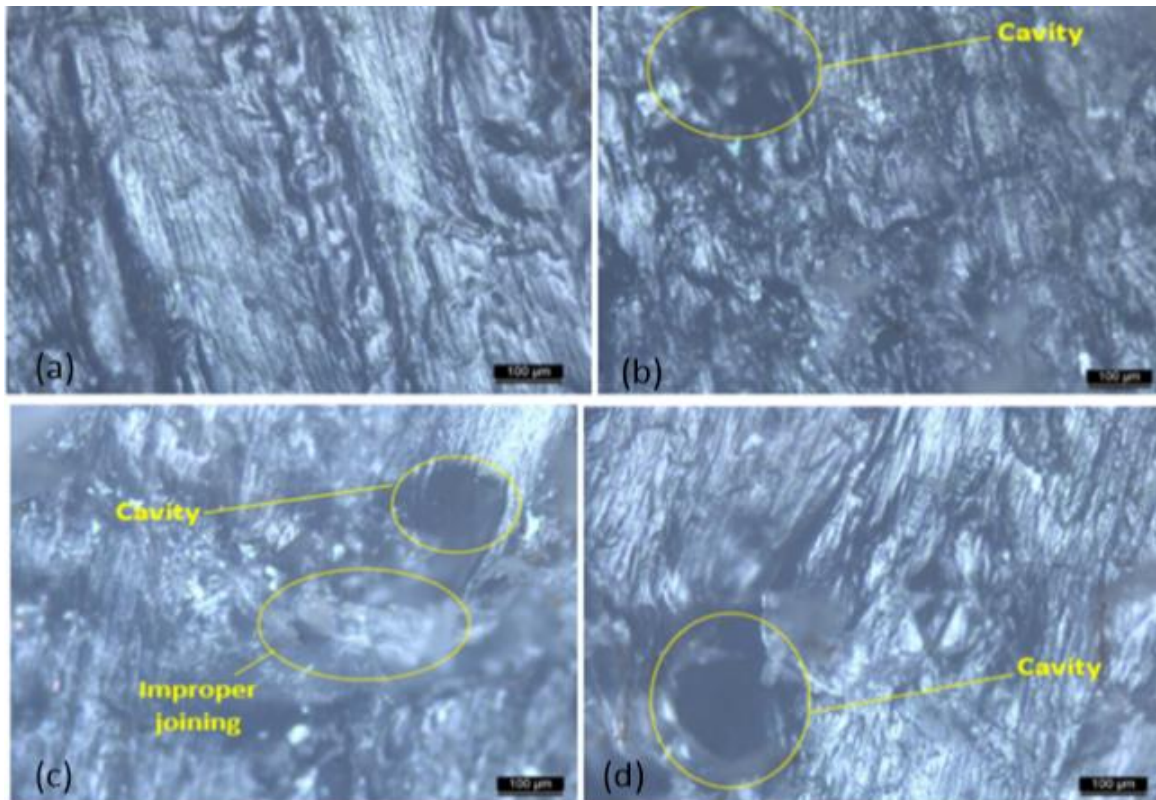
Εικόνα 4.21: Διατομές συγκολλημένων δοκιμίων για (a) 300 rpm, (b) 400 rpm, (c) 500 rpm, (d) 1000 rpm

Στις 300 rpm είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει κανένα ελάττωμα πλην μιας πολύ μικρής ποσότητας ελαττώματος τύπου «flash». Η ατέλεια τύπου «flash» είναι το γρέζι που δημιουργείται όταν το πλαστικοποιημένο υλικό τείνει να εξωθείται στην άνω επιφάνεια της συγκόλλησης. Περίπου ίση ποσότητα υπάρχει και στην περίπτωση των 400 rpm, όμως υπάρχουν και κάποια κενά στη γραμμική ραφής. Αυτά τα κενά παρατηρούνται σε όλη την περιοχή συγκόλλησης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη αντοχή συγκόλλησης. Μια πολύ μεγάλη ποσότητα «flash» είναι εμφανής στην περίπτωση των 500 rpm. Αυτό οφείλεται στον υψηλότερη εισροή θερμότητας σε αυτήν την ταχύτητα περιστροφής, η οποία προκάλεσε υπερβολική πλαστικοποίηση του υλικού και ως εκ τούτου τη ροή του πολυμερούς. Αυτό το είδος «flash» δεν υπήρχε σε ολόκληρο το μήκος της συγκόλλησης, αλλά εμφανίστηκε μετά από μερικά χιλιοστά συγκόλλησης. Ένα ακόμη ελάττωμα που παρατηρείται στη ζώνη ανάδευσης, στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι το ελάττωμα «τούνελ». Πρόκειται για σχηματισμούς που θυμίζουν τούνελ και έχουν στο εσωτερικό τους παγιδευμένο αέρα. Εμφανίζονται γενικά στην προωθούμενη πλευρά. Είναι συνήθως συνεχείς σε όλο το μήκος της συγκόλλησης και ενδέχεται να φτάσουν ως την επιφάνειά της. Εδώ εντοπίστηκε σε όλη τη διαδρομή συγκόλλησης. Στις 1000 rpm παρατηρούμε το ελάττωμα της αραίωσης. Υπερβολικά ημι-λιωμένο Nylon-6 στροβιλίστηκε γύρω από το περιαιχένιο και κόλλησε εκεί σε αντίθεση με τα συγκολλημένα δοκίμια των 300, 400 και 500 rpm. Έτσι, μεγάλη ποσότητα πολυμερούς έρεε έξω και προκάλεσε τη σμίκρυνση του τμήματος συγκόλλησης.

Σε σύγκριση με άλλα πολυμερή, όπως το πολυαιθυλένιο, το ABS και το PMMA, ότι το Nylon-6 σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής παράγει μεγαλύτερες ποσότητες «flash».

Αυτό συμβαίνει διότι το Nylon-6 έχει χαμηλότερο σημείο τήξεως από τα περισσότερα πολυμερή.

Εικόνες μικροδομών που ελήφθησαν από οπτικό μικροσκόπιο με μεγέθυνση  $\times 100$  παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.22.



Εικόνα 4.22: Μικροδομή Ζώνης Ανάδευσης στις (a) 300 rpm, (b) 400 rpm, (c) 500 rpm, (d) 1000 rpm

Αυτή η οπτική μικροδομική ανάλυση επαλήθευσε την απουσία ελαττωμάτων στη συγκόλληση των 300 rpm, καθώς δεν βρέθηκε κοιλότητα ή κάτι το ασυνήθιστο. Στη συγκόλληση των 400 rpm υπάρχει κοιλότητα, ενώ στις 500 rpm υπάρχει βαθιά κοιλότητα και ακατάλληλα συγκολλημένη περιοχή. Παρόμοια κοιλότητα αλλά μεγαλύτερου μεγέθους παρατηρείται στο συγκολλημένο δείγμα με τις 1000 rpm. Η αιτία σχηματισμού κοιλοτήτων στα συγκολλημένα με FSW πολυμερή είναι ακόμη υπό διερεύνηση, αλλά εκτιμάται ότι οφείλεται σε θερμική συστολή, εγκλωβισμένο αέρα ή κάποιες φυσικοχημικές δομικές αλλαγές.

**Τα πολυμερή έχουν χαμηλότερο σημείο τήξης και συγκολλούνται σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και συγκόλλησης σε σύγκριση με τα μέταλλα.** Η μελέτη αυτή δείχνει μια ευθέως αναλογική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ταχύτητας περιστροφής.

Επιπλέον, τα ελαττώματα εμφανίζονται δυναμικά στις συγκολλήσεις με υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής.

[30]

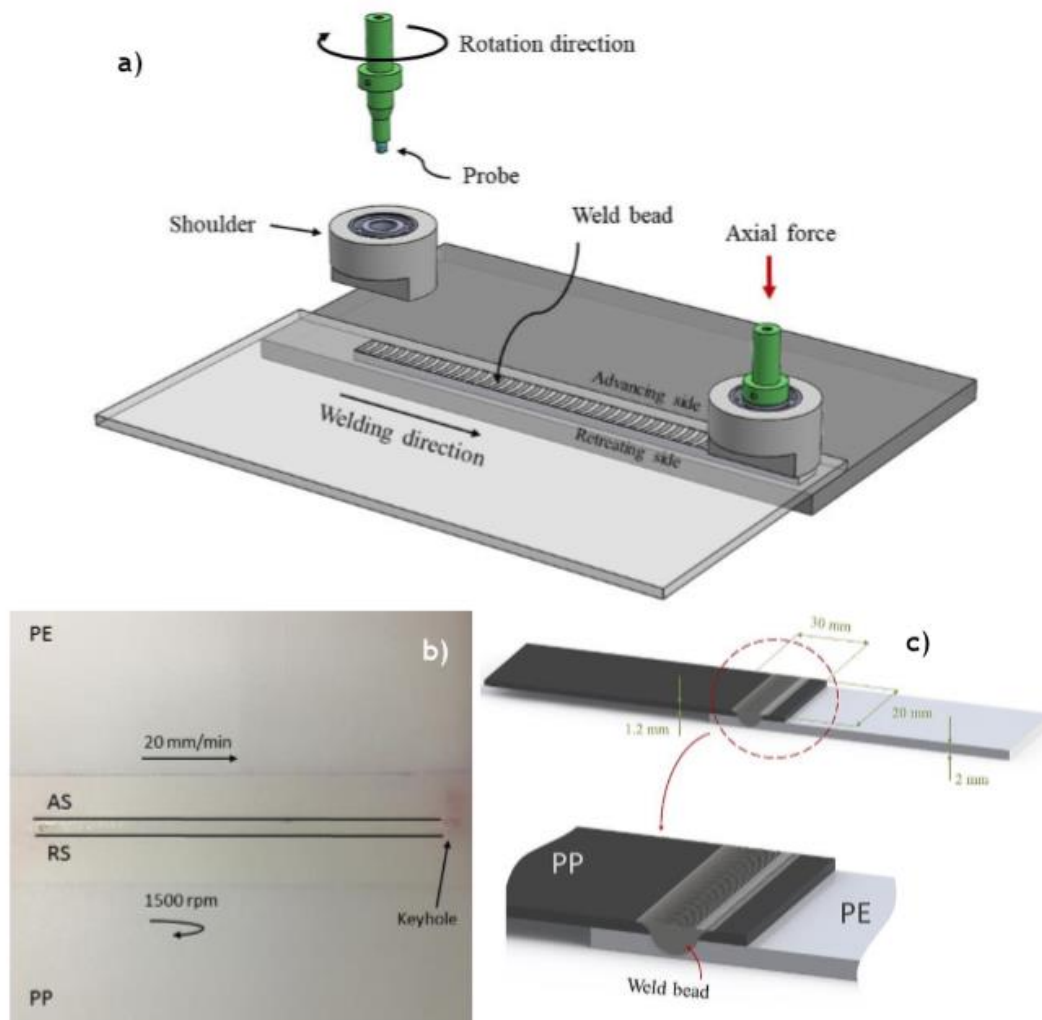
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζουμε και παραθέτουμε μελέτες, πειραματικές δοκιμές και αναλύσεις σχετικά με FSW και FSSpW συγκολλήσεις ανόμοιων πολυμερών.

### **5.1 Περίπτωση FSW συγκόλλησης PE-HMW με PP – Eslami et al.**

Εξετάζουμε τη μελέτη των Eslami et al. [16], όπου συγκολλήθηκαν δύο φύλλα διαστάσεων  $120 \times 120 \text{ mm}^2$  των ανόμοιων πολυμερών: πολυαιθυλένιο υψηλού μοριακού βάρους (PE-HMW) πάχους 2mm και πολυπροπυλένιο (PP) πάχους 1.2mm, με προσαρμογή επικάλυψης (lap joint). Τα δοκίμια (φύλλα πολυμερών) στερεώθηκαν στη μηχανή ακλόνητα. . Οι παράμετροι συγκόλλησης βελτιστοποιήθηκαν με τη μεθοδολογία με το σύστημα Taguchi - DOE (Design of Experiments) και μελετήθηκε η αντοχή της συγκόλλησης σε κόπωση.

Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διαδικασίας FSW για συγκόλληση επικάλυψης.



Εικόνα 5.1: Συγκόλληση επικάλυψης ανομοίων πολυμερών. (α) CAD μοντέλο της συγκόλλησης επικάλυψης με σταθερό εργαλείο FSW, (β) Συγκολλημένο δείγμα, (γ) Διαστάσεις των ελεγμένων συγκολλημένων δοκιμίων

Μετά τη διαδικασία συγκόλλησης, τα συγκολλημένα δοκίμια, προετοιμάστηκαν κατάλληλα ώστε να διεξαχθούν δοκιμές εφελκυσμού και κοπώσεως. Από κάθε πειραματική δοκιμή συγκόλλησης με επικαλυπτόμενη περιοχή  $600 \text{ mm}^2$ , προέκυψαν τρία δείγματα τα οποία υποβλήθηκαν σε μηχανικές δοκιμές. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται ο συνδυασμός των παραμέτρων για την εκτέλεση των συγκολλήσεων FSW και στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα 16 πειράματα συγκόλλησης κάθε ένα από τα οποία επαναλήφθηκε τρεις φορές καταλήγοντας σε 48 διαφορετικές συγκολλήσεις. Επιλέχθηκε ένας Πίνακας Taguchi για να ορίσει τους καλύτερους συνδυασμούς παραμέτρων για την εκτέλεση αυτών των πειραματικών δοκιμών FSW. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία συγκόλλησης, αντί του ελέγχου ολοκλήρου του εύρους των παραμέτρων συγκόλλησης, επιλέχθηκε και εφαρμόστηκε μια μέθοδος πειραματικού σχεδιασμού (DOE) για τη μείωση

των πειραματικών δοκιμών κατά τη διάρκεια της μελέτης. Η μέθοδος Taguchi είναι μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους ποιοτικού ελέγχου που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, ώστε να διατηρείται υπό έλεγχο ο αριθμός των πειραμάτων, μειώνοντας σημαντικά το πειραματικό έργο.

*Πίνακας 5.1: Πίνακας Taguchi με τους συνδυασμούς παραμέτρων για την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών FSW*

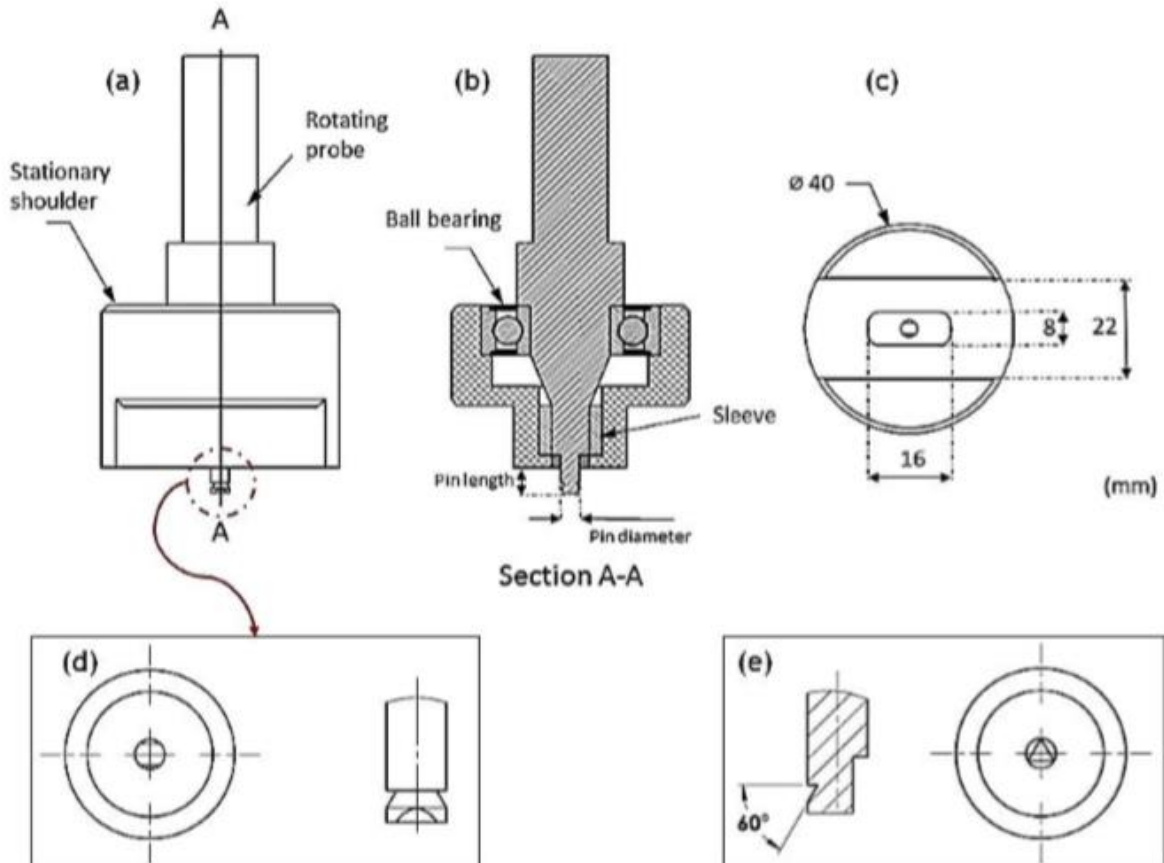
Σύμβολο	Παράμετρος Συγκόλλησης	Μονάδες Μέτρησης	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2
A	Σχήμα πείρου	-	Επίπεδο (Flat face – F)	Τριγωνικό (Triangular – T)
B	Ταχύτητα περιστροφής	rpm	1500	2500
C	Ταχύτητα συγκόλλησης	mm/min	20	100
D	Διάμετρος πείρου	mm	3	6
E	Μήκος πείρου	mm	2.4	2.8

*Πίνακας 5.2: Παράμετροι πειραματικών δοκιμών συγκολλήσεων FSW*

Specimen ID	FSW process parameters				
	A	B	C	D	E
	Probe shape	Rotational speed	Welding speed	Probe diameter	Probe length
	-	(rpm)	(mm/min)	(mm)	(mm)
S1	Flat face	1500	20	3	2.4
S2	Flat face	1500	20	6	2.8
S3	Flat face	1500	100	3	2.8
S4	Flat face	1500	100	6	2.4
S5	Flat face	2500	20	3	2.8
S6	Flat face	2500	20	6	2.4
S7	Flat face	2500	100	3	2.4
S8	Flat face	2500	100	6	2.8
S9	Triangular	1500	20	3	2.8
S10	Triangular	1500	20	6	2.4
S11	Triangular	1500	100	3	2.4
S12	Triangular	1500	100	6	2.8
S13	Triangular	2500	20	3	2.4
S14	Triangular	2500	20	6	2.8
S15	Triangular	2500	100	3	2.8

S16	Triangular	2500	100	6	2.4
-----	------------	------	-----	---	-----

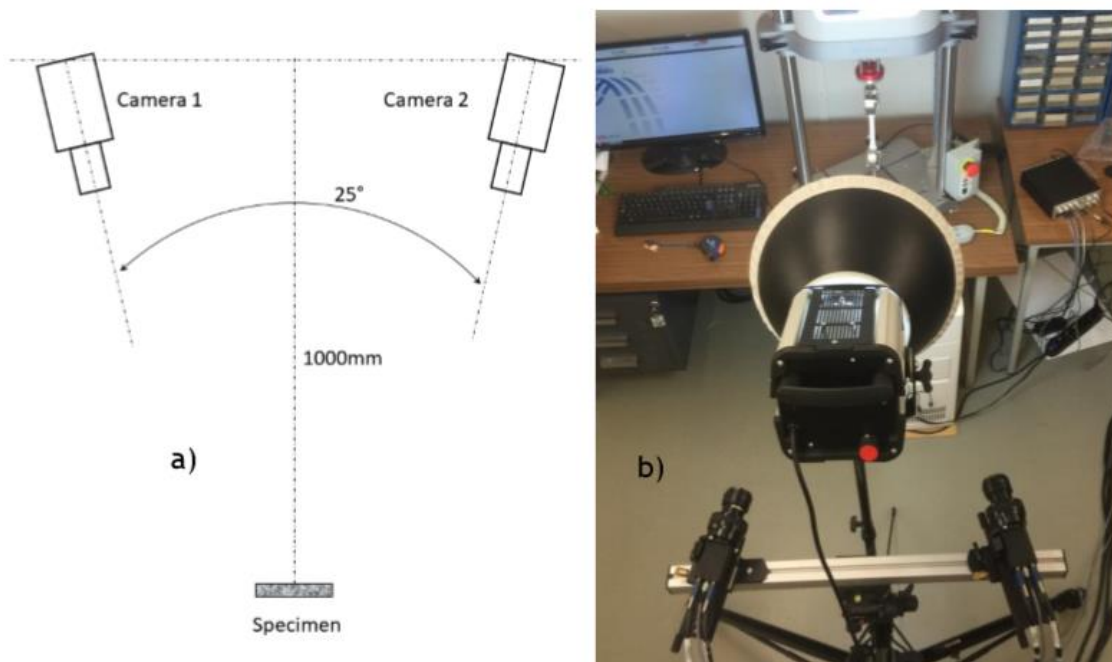
Στην Εικόνα 5.2 απεικονίζεται η σχηματική αναπαράσταση του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 5.2: (a) Πρόοψη, (b) Όψη διατομής, (c) Κάτοψη, (d) Όψη της γεωμετρίας του επιπέδου πείρου, (e) Όψη της γεωμετρίας του τριγωνικού πείρου

Χρησιμοποιήθηκαν δύο γεωμετρίες πείρων, οι οποίες αποτελούνται από αυλάκωση  $60^\circ$  και ύψους 1 mm: επίπεδος (c) και τριγωνικός πείρος (d).

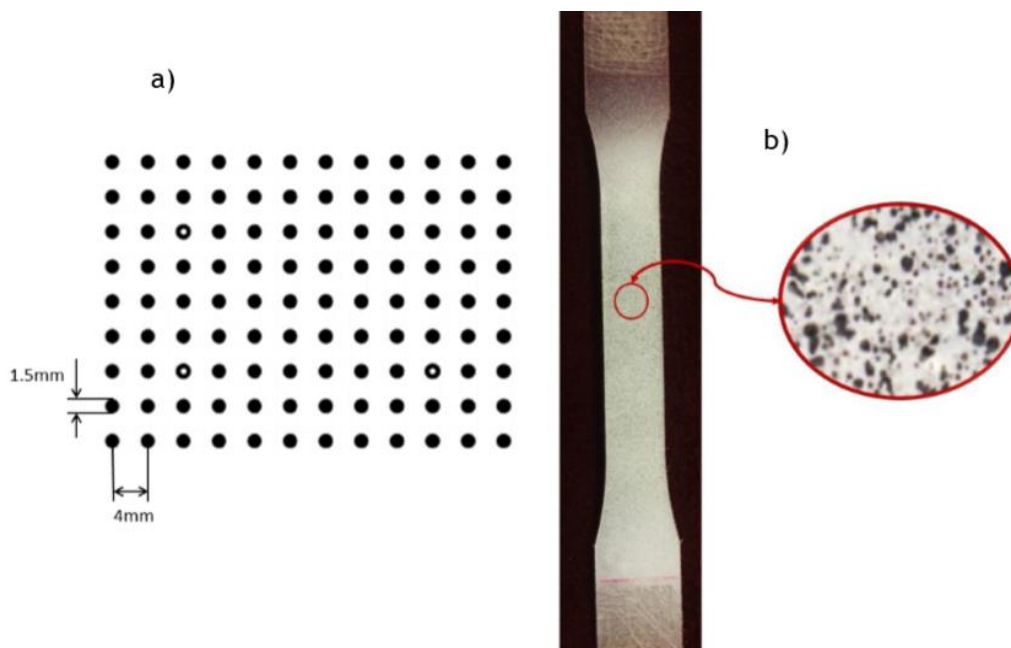
Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε η τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC (Digital Image Correlation) προκειμένου να αποτιμηθεί και αναλυθεί η πλήρης μετατόπιση και το πεδίο καταπονήσεων των μητρικών πολυμερικών υλικών και των συγκολλημένων δοκιμίων. Η DIC είναι μια οπτική μέθοδος, ολοκλήρου του πεδίου, ανέπαφη τεχνική για την μέτρηση των πεδίων μετατόπισης σε 2D και 3D εφαρμογές. Λειτουργεί με βάση την εγγραφή εικόνων σε διαφορετικά στάδια μιας πειραματικής δοκιμής, με παρακολούθηση των pixels και μετρώντας τη μετατόπιση της επιφάνειας όταν υποβάλλεται σε παραμόρφωση. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το σύστημα VIC-Gauge 3DTM από την Correlated Solutions με δύο κάμερες 4 MPixel για τις μετρήσεις του πεδίου καταπονήσεων στην περιοχή αστοχίας. Οι κάμερες ήταν εξοπλισμένες με φακούς Rodagon μήκους εστίασης 80 mm από την QiOptic και τοποθετήθηκαν περίπου 1000 mm από το δείγμα. Στην Εικόνα 5.3 φαίνονται σχηματικά η θέση και προσανατολισμός των καμερών DIC και η πραγματική απεικόνιση της εγκατάστασης.



Εικόνα 5.3: (α) Σχηματική απεικόνιση κάτοψης της θέσης και του προσανατολισμού των καμερών DIC, (β) Ρύθμιση της DIC εγκατάστασης κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής

Για τη δημιουργία κατάλληλης αντίθεσης που απαιτείται στις εφαρμογές των συγκεκριμένων μονόχρωμων καμερών, ψεκάζεται η επιφάνεια του δείγματος με μαύρο μελάνι πάνω από ένα λείο λευκό στρώμα πάνω από την επιφάνεια του δείγματος για τη δημιουργία ενός τυχαίου μοτίβου κηλίδων.





Εικόνα 5.4: (α) Μοτίβο βαθμονόμησης, (β) Βαμμένο με ψεκασμό δείγμα για DIC μέτρηση

Αυτό το τυχαίο μοτίβο αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.4-β. Το πεδίο μετατοπίσεων λόγω καταπόνησης υπολογίζεται από τη συσχέτιση κάθε νέας εικόνας με αυτήν της αναφοράς. Πριν από την απόκτηση των δεδομένων, το σύστημα βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας ένα μοτίβο βαθμονόμησης 12×9 κουκκίδων (Εικόνα 5.4-α). Η βαθμονόμηση εφαρμόστηκε ώστε να μετρηθούν οι εσωτερικές και οι εξωτερικές παράμετροι της κάμερας για να καταστεί δυνατή η αναδιάταξη του συστήματος DIC. Πριν από την εκτέλεση κάθε πειραματικής δοκιμής καταγράφηκε μια εικόνα αναφοράς. Στη συνέχεια, ασκήθηκε φόρτιση στο δείγμα με ρυθμό 2 mm/min και η καταπόνηση μετρήθηκε σε πραγματικό χρόνο με ένα εικονικό μηκυνσιόμετρο μήκους 50 mm μέχρι την αστοχία. Το φορτίο μετρήθηκε από τη μηχανή Instron E1000.

Έπειτα, μετά τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης και την ανάλυση της αντοχής συγκόλλησης για διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων, παρήχθησαν αρκετά δείγματα με τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους συγκόλλησης. Στη συνέχεια, τα παρασκευασμένα δείγματα, τα οποία ήταν συγκολλημένα με FSW, συγκρίθηκαν με άλλες εμπορικές μεθόδους συγκολλήσεως.

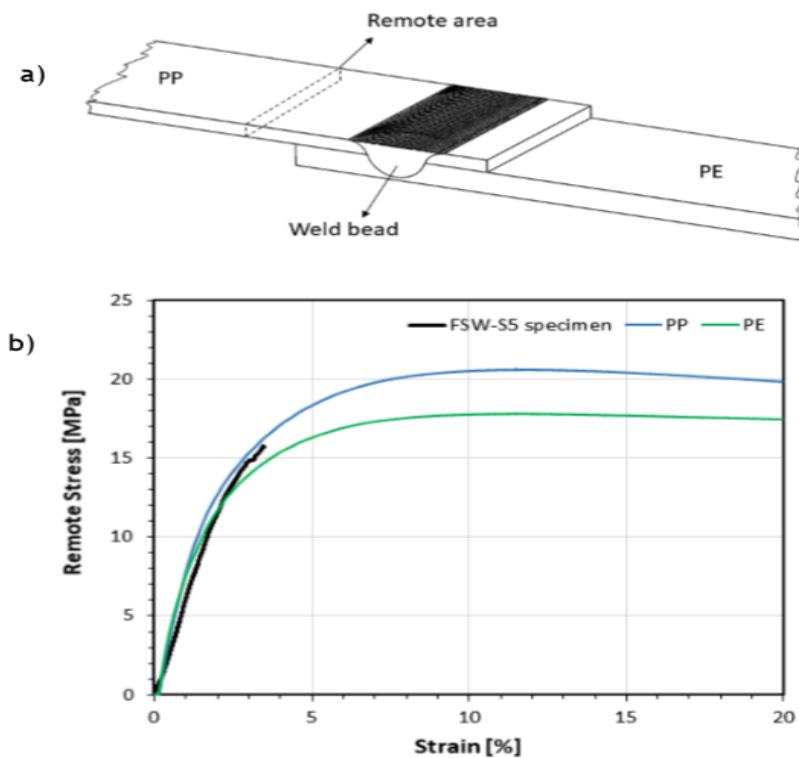
Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κόπωσης με ελεγχόμενο φορτίο υψηλής συχνότητας. Η διάρκεια της κόπωσης λήφθηκε για τρία διαφορετικά επίπεδα φόρτισης:

90%, 80% και 70% της τελικής αντοχής εφελκυσμού (UTS) υλικού βάσης με την υψηλότερη απόδοση, δηλαδή το πολυπροπυλένιο (PP). Ο λόγος τάσεων ισούταν με

$R = 0.1$  , η συχνότητα με 25 Hz, χρησιμοποιώντας τη ηλεκτρική μηχανή Instron ElectroPuls σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Για να συγκριθεί η αντοχή σε εφελκυσμό των συγκολλημένων δειγμάτων με αυτή των υλικών βάσης, υιοθετήθηκε η έννοια της «απομακρυσμένης τάσης». Η απομακρυσμένη τάση υπολογίστηκε στην απομακρυσμένη περιοχή από την επικαλυπτόμενη περιοχή του λεπτότερου μητρικού υλικού, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα – α).

Η αντοχή σε εφελκυσμό των υλικών βάσης μετρήθηκε με την τυπική μέθοδο δοκιμής ASTM D-638 με ρυθμό φόρτισης 2 mm/min. Κατά τη σύγκριση της απομακρυσμένης τάσης του δείγματος “S5” με αυτή του προπυλενίου, επιτεύχθηκε απόδοση 76% όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.5-b. Επίσης, παρατηρείται ότι μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας παρήχθησαν ισχυρές συγκολλήσεις, αλλά με αρκετά μικρότερη ολκιμότητα σε σχέση με τα μητρικά υλικά. Αυτό συμβαίνει, διότι, τα συγκολλημένα δείγματα αποτελούνται από δύο διαφορετικά είδη πολυμερικών υλικών με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, τα οποία αναδεύτηκαν και σφυρηλατήθηκαν μαζί υπό υψηλή θερμοκρασία και υψηλή αξονική δύναμη. [16]



Εικόνα 5.5: (α) Συγκολλημένα δοκίμια PE-PP, (β) Απομακρυσμένη τάση συναρτήσει της παραμόρφωσης

## 5.2 Περίπτωση FSW συγκόλλησης ABS με PP – Miranda et al.

Η μοναδική ερευνητική εργασία που έχει πραγματοποιηθεί πάνω στην FSW των ανόμοιων θερμοπλαστικών ABS-PP είναι των Sanchez Miranda et al. [32]

Στους Πίνακες 5.3 και 5.4 παρατίθενται, εν γένει οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των εμπορικών ABS-PP πολυμερών και ειδικά των συγκεκριμένων που επιλέχθηκαν για αυτή την μελέτη.

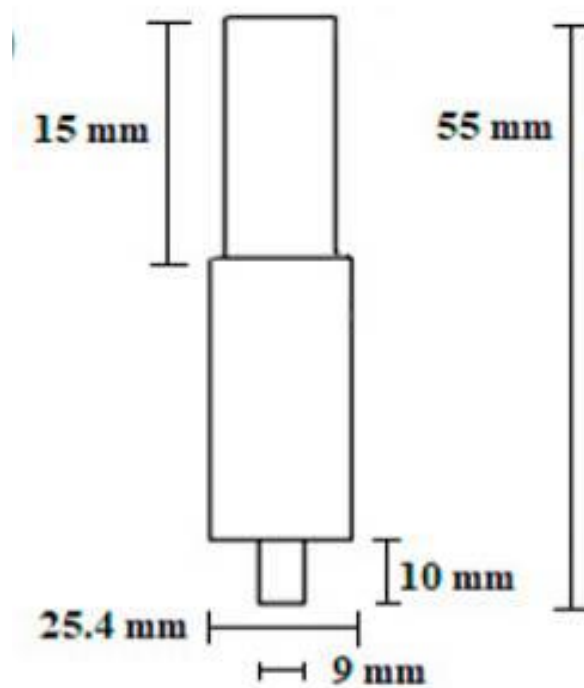
*Πίνακας 5.3: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ABS και PP γενικά*

Ιδιότητες	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Σκληρότητα Rockwell	Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (°C)	Μοριακό Βάρος (g/mol)
PP	900 - 2400	0.008 – 8.25	12 - 43	20 - 118	-20 - -17	250000
ABS	1000 - 1200	1.8 – 3.2	30 - 40	68 - 118	108 - 109	105250

*Πίνακας 5.4: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των συγκεκριμένων δοκιμών ABS και PP που επιλέχθηκαν σε αυτή τη μελέτη*

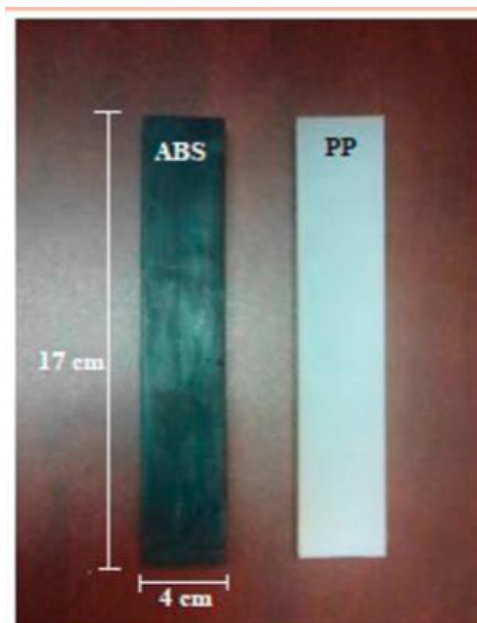
Ιδιότητες	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Σκληρότητα Rockwell	Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (°C)	Μοριακό Βάρος (g/mol)
PP	900	1.3	30	94	-18	250000
ABS	1050	2.3	40	100	108	105250

Χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικός πείρος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6.



Εικόνα 5.6: Σχηματική απεικόνιση του εργαλείου με τις διαστάσεις του

Οι πλάκες που συγκολλήθηκαν ήταν διαστάσεων  $17 \times 4 \times 1.27$  cm :



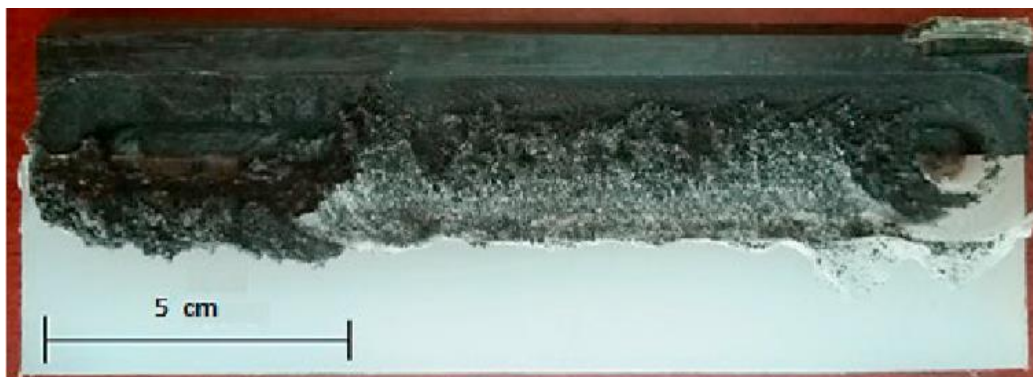
Εικόνα 5.7: Εικόνα των δοκιμών που συγκολλήθηκαν στη μελέτη

Στον Πίνακα 5.5 καταγράφονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων συγκόλλησης που εφαρμόστηκαν στις δοκιμές FSW.

*Πίνακας 5.5: Παράμετροι πειραματικών δοκιμών συγκόλλησης FSW*

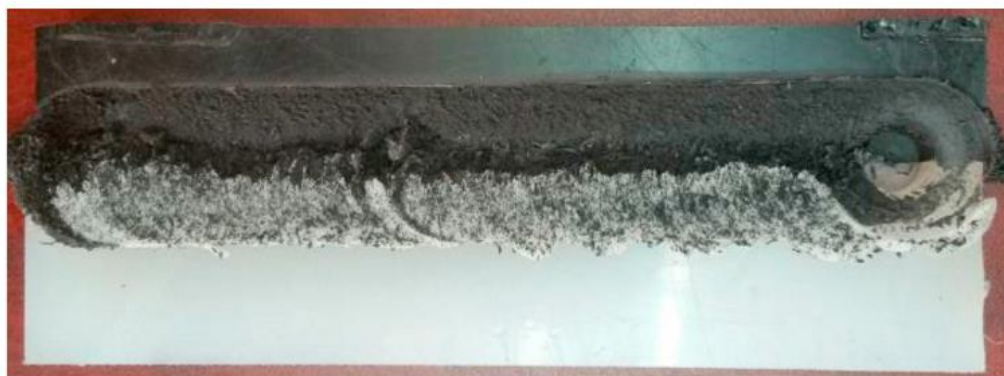
FSW Test	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα Συγκόλλησης (mm/min)	Ταχύτητα Διείσδυσης (mm/min)	Σχήμα Πείρου	Επαφή περιαιχενίου/υλικών συγκόλλησης
1	1060	30	20	Κύλινδρος	Όχι
2	1060	15	10	Κύλινδρος	Όχι
3	1060	15	10	Κύλινδρος	Ναι
4	1060	10	10	Κύλινδρος	Ναι
5	1060	5	5	Κύλινδρος	Ναι
6	1060	5	5	Κύλινδρος	Ναι
7	1060	3	5	Κύλινδρος	Ναι
8	2000	1.5	2.5	Κύλινδρος	Ναι
9	2000	3	5	Κύλινδρος	Ναι
10	2000	1.5	5	Κύλινδρος	Ναι
11	3000	3	2.5	Κύλινδρος	Ναι
12	2000	5	2.5	Κύλινδρος	Ναι
13	2000	3	2.5	Κύλινδρος	Ναι
14	2000	1.5	2.5	Κύλινδρος	Ναι

Οι δύο πρώτες δοκιμές δεν είχαν ως αποτέλεσμα την ένωση των δύο πολυμερικών υλικών. Η τρίτη και η τέταρτη δοκιμή προκάλεσαν ατελή σύνδεση. Στην πέμπτη δοκιμή φαίνεται να βελτιώνεται η ένωση των δύο ανόμοιων υλικών, ακόμη κι αν παρατηρείται το ελάττωμα του «τούνελ» στα πρώτα 5 cm από την έναρξη της διαδικασίας συγκόλλησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.8.



*Εικόνα 5.8: Απεικόνιση του ελαττώματος «τούνελ» το οποίο εμφανίστηκε στην πέμπτη πειραματική δοκιμή*

Στη δοκιμή 7 η ταχύτητα συγκόλλησης μειώνεται στα 3 mm/min, με το ελάττωμα τύπου τούνελ να εμφανίζεται 3 cm από την αρχή της συγκόλλησης. Στη δοκιμή 8 έχουμε αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και μείωση των ταχυτήτων συγκόλλησης και διείσδυσης και έτσι το ελάττωμα τύπου τούνελ εμφανίστηκε με μήκος 1 cm από την αρχή της συγκόλλησης. Στη δοκιμή 9 δεν υπήρξε καθόλου ο σχηματισμός του ελαττώματος τύπου τούνελ, όπως παρατηρείται στην Εικόνα 5.9.

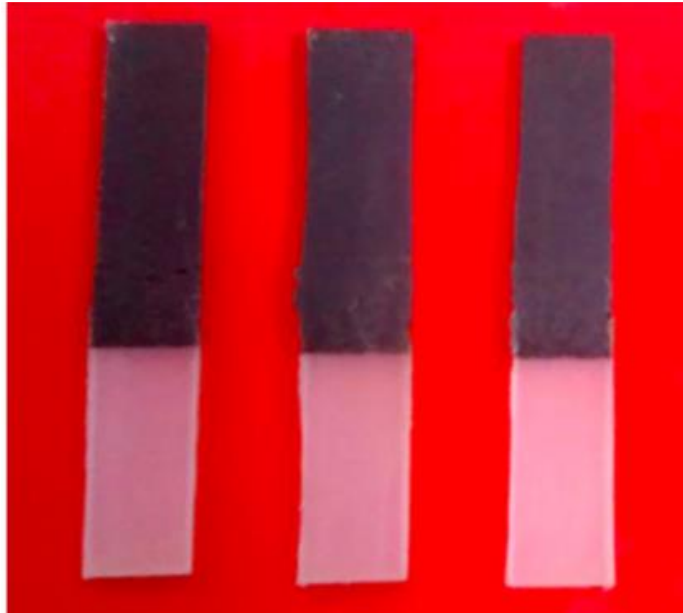


*Εικόνα 5.9: Απεικόνιση του αποτελέσματος της ενάτης πειραματικής δοκιμής συγκόλλησης*

Στη δοκιμή 10 η ταχύτητα συγκόλλησης μειώνεται κατά 50% σε σχέση με την προηγούμενη και το ελάττωμα τύπου τούνελ εμφανίζεται και πάλι με μήκος 1 cm. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής στις 3000 rpm (δοκιμή 11), προκαλεί βλάβη στη συγκόλληση, λόγω της υπερβολικής διάχυσης θερμότητας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ασυνεχειών στη ζώνη συγκόλλησης. Τέλος, στις δοκιμές 12,13 και 14 μειώνεται η ταχύτητα συγκολλησεως από 3 mm/min σε 1.5 mm/min προκειμένου να αξιολογηθεί η

αντοχή σε εφελκυσμό των συγκολλημένων δοκιμίων. Βέλτιστα αποτελέσματα ως προς τις μηχανικές ιδιότητες ελήφθησαν στις δοκιμές 13 και 14.

Οι διαστάσεις των συγκολλημένων πρισματικών δειγμάτων των δοκιμών 12,13,14, στις οποίες πραγματοποιήθηκε έλεγχος της αντοχής σε εφελκυσμό, ήταν: μήκος 65 mm, πλάτος 12 mm και πάχος 3 mm. Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν με σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης 1.5 mm/min.



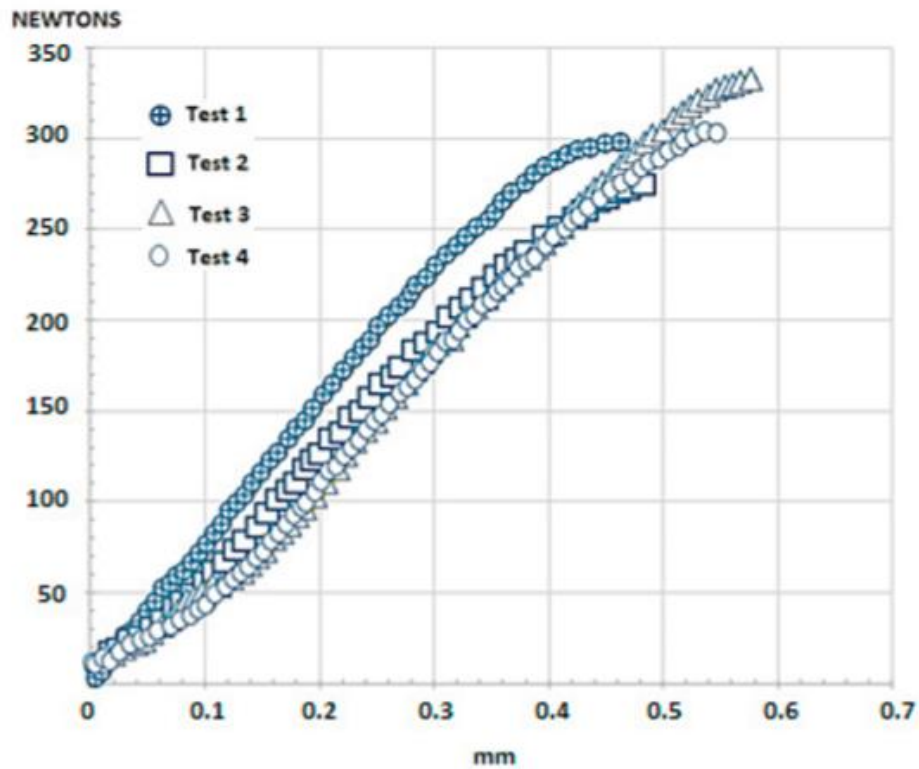
*Εικόνα 5.10: Τα συγκολλημένα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού. Το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί στο ABS και το άσπρο στο PP.*

Στον Πίνακα 5.6 παρατίθενται οι πειραματικές παράμετροι των δοκιμών εφελκυσμού.

*Πίνακας 5.6: Παράμετροι δοκιμών εφελκυσμού*

Αριθμός δοκιμής	Τελικό εφαρμοσμένο φορτίο (Newtons)	Συνολική μετατόπιση (mm)
1	291.96	0.4637
2	269.56	0.4857
3	326.50	0.5779
4	298.00	0.5494

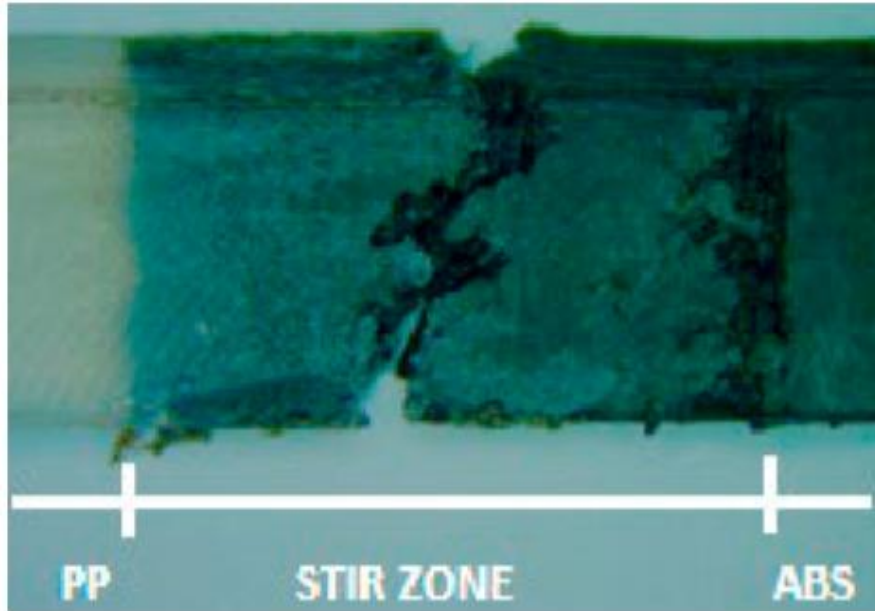
Στην Εικόνα 5.11 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού.



Εικόνα 5.11: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

Σε γενικό πλαίσιο, η θραύση στις δοκιμές εφελκυσμού λαμβάνει χώρα σε 5 ζώνες: α) έξω από τη ραφή συγκόλλησης, β) στη διεπιφάνεια υποχώρησης, γ) στην υποχωρούσα πλευρά της ραφής συγκόλλησης, δ) στο κέντρο της ραφής συγκόλλησης και ε) στην προωθούμενη πλευρά της ραφής συγκόλλησης.

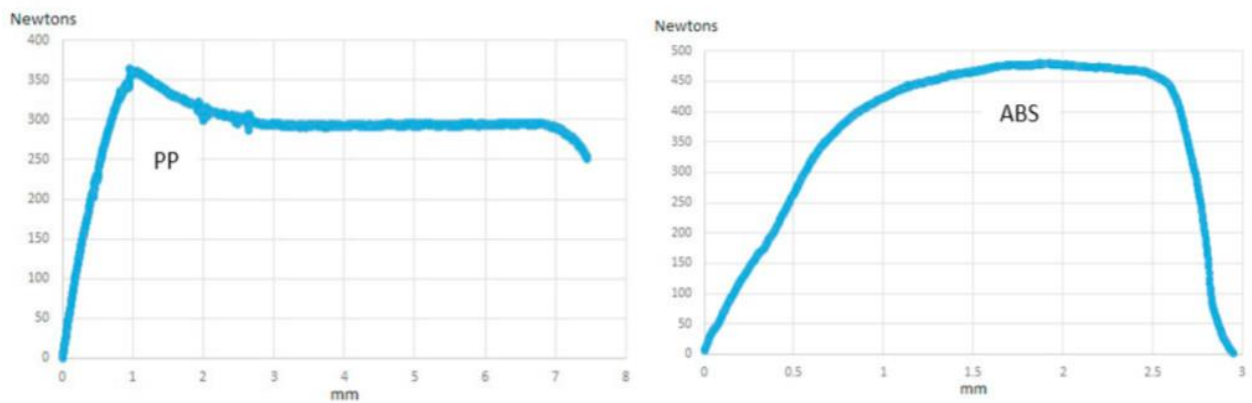




Εικόνα 5.12: Θραύση των συγκολλημένων ανομοίων πολυμερών ABS-PP, υπό δοκιμή εφελκυσμού

Στη συγκεκριμένη μελέτη, όπως διακρίνεται στην Εικόνα 5.12, όλες οι θραύσεις των δοκιμών εφελκυσμών συνέβησαν στη ζώνη ανάδευσης και στο κέντρο περίπου της συγκόλλησης.

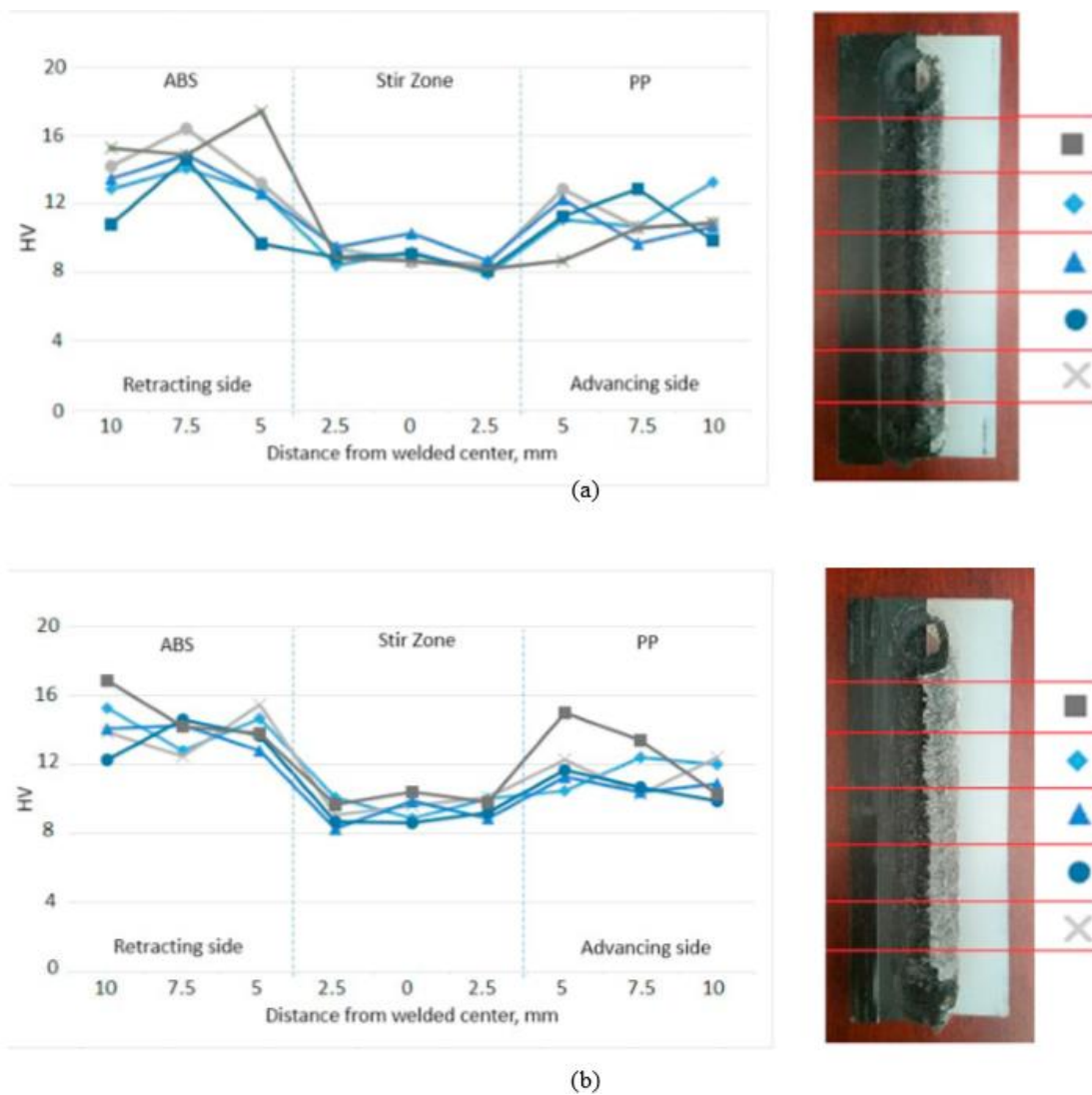
Στα γραφήματα της Εικόνας 5.13 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις τάσης-μετατόπισης, των πολυμερικών υλικών ABS και PP, που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού μηχανής μεγίστου φορτίου 400 kg και ταχύτητας εφελκυσμού 1.5 mm/min.



Εικόνα 5.13: Δοκιμές εφελκυσμού στα ανόμοια πολυμερικά υλικά PP και ABS

Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για να συγκριθούν με αυτά του εφελκυσμού της συγκόλλησης των ανόμοιων πολυμερών. Οι τιμές της Μεγίστης Αντοχής σε Εφελκυσμό (UTS) ήταν 360 N στο PP και 480 N στο ABS. Επομένως, η αντοχή της συγκόλλησης ως προς την μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό του PP ήταν 91% στη δοκιμή 3 και 83% στη δοκιμή 4.

Για την εκτίμηση της σκληρότητας, μετρήθηκε η σκληρότητα σε ζώνες κατά μήκος και πλάτος των συγκολλημένων δοκιμίων 13 και 14.



Εικόνα 5.14: Μετρήσεις σκληρότητας κατά μήκος και πλάτος των δοκιμίων ABS-PP: (α) Δοκίμιο 13 και (β) Δοκίμιο 14

Οι τιμές σκληρότητας των πέντε εγκαρσίων ζωνών μέτρησης σκληρότητας, απεικονίζονται η καθεμία με διαφορετικό σύμβολο. Η σκληρότητα παρουσιάζει τιμές 12-17 HV στην περιοχή του ABS και 10-13 HV στη ζώνη του PP. **Όπως παρατηρείται, η σκληρότητα μειώνεται αισθητά, έχοντας τις χαμηλότερες τιμές της, στη ζώνη ανάδευσης. Δηλαδή, στα σημεία που τα δύο πολυμερή είναι αναμιγμένα έχουμε μειωμένη σκληρότητα σε σχέση με τις περιοχές των καθαρά μητρικών υλικών.**

[32]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑ

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αποτελεί την πιο καινοτόμα νέα μέθοδο συγκόλλησης με ευρεία, πλέον, χρήση στη βιομηχανία και συνεχή ερευνητική πρόοδο και εξέλιξη. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία παρουσίασε τη μέθοδο και συγκεκριμένες εφαρμογές της επί του πρακτέου, όσον αφορά συγκολλήσεις πολυμερικών υλικών. Τα κύρια συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι ότι η FSW παράγει βέλτιστες συγκολλήσεις πολυμερών (κυρίως των HDPE, ABS, Nylon 6, PC, PP, PE, PP, PETG) με ιδιαίτερα υψηλές αντοχές, εφαρμόζοντας τις κατάλληλων συνθήκες (σχετικά υψηλές ταχύτητες περιστροφής και χαμηλές ταχύτητες πρόωσης).

Προτιμάται η χρήση σπειροειδούς πείρου για βέλτιστη ανάδευση των υλικών. Αποφεύγεται γενικά η περιστροφή του περιανυχνίου, η κρυστάλλωση μειώνεται στη ζώνη ανάδευσης και στα σημεία των συγκολλημένων δοκιμών που υπάρχει υψηλή σκληρότητα η ολκιμότητα είναι μειωμένη.

Είναι μια οικονομική και οικολογική μέθοδος με βασικό της προτέρημα έναντι των συγκολλήσεων με τόξο η συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων και υλικών. Σε επίπεδο Ναυπηγικής η FSW προσφέρει πολλές δυνατότητες ανάπτυξης των συγκολλήσεων τμημάτων της γάστρας. Όπως αναφέρθηκε, στη ναυπηγική βιομηχανία η FSW εφαρμόζεται κυρίως για συγκολλήσεις αλουμινίων των σειρών 5-xxx και 6-xxx. Η FSW πολυμερών θα μπορούσε να έχει σημαντικές εφαρμογές όσον αφορά συγκολλήσεις πλαστικών σωλήνων (PE, ABS, PVC, PP, CAB, PTFE) οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα πλοία, πλαστικών καθισμάτων, υπερκατασκευών και πάνελ.

Παρατηρήθηκε, ότι τα πολυμερή λόγω του χαμηλότερου σημείου τήξης συγκολλούνται σε πολύ μικρότερες ταχύτητες συγκόλλησης και περιστροφής εργαλείου από τα μέταλλα, ενώ υπάρχουν και τεράστιες διαφορές μεταξύ τους στη ροή του υλικού και την ανακρυστάλλωση κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η έρευνα, η μελέτη και οι σχετικές πειραματικές εφαρμογές της FSW στα μέταλλα είναι εκτεταμένη, εν αντιθέσει με την περίπτωση των πολυμερών. Τέλος στο σκέλος της μείωσης του κόστους θα πρέπει να υπάρχει εύκολη προσαρμογή των FSW εργαλείων σε διάφορα είδη εργαλειομηχανών και εισαγωγή σε μεγαλύτερο αυτοματοποιημένων/ ρομποτικών μηχανών FSW.

Στην Ελλάδα η συγκεκριμένη τεχνική συγκόλλησης έχει περιορισμένες εφαρμογές στους τομείς της εκπαίδευσης, της βιομηχανίας και της βιοτεχνίας. Η εισαγωγή της εκμάθησης της μεθόδου σε εκπαιδευτικά προγράμματα συγκολλητών και η δημιουργία αντίστοιχων σεμιναρίων μαζί με τις κατάλληλες υποδομές θα προσφέρει δυνατότητες εκπαίδευσης Ελλήνων επαγγελματιών συγκολλητών και ανάπτυξης της μεθόδου σε παραγωγικούς τομείς (π.χ. Ναυπηγεία).

## Βιβλιογραφία

- [1] Χρήστου Μ. Μηναδάκη, Βιβλίο: Χημική Τεχνολογία, ΙΩΝ – ΜΑΚΕΔΟΝΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ
- [2] WILLIAM D. CALLISTER, DAVID G. RETHWISCH, Βιβλίο: ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ
- [3] ΔΗΜΗΤΡΗΣ Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Βιβλίο: ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [4] C. A. Charitidis, D. A. Dragatogiannis, E. P. Koumoulos, and I. A. Kartsonakis, Residual stress and defomation mechanism of friction stir welded aluminum alloys by nanoindentation, 2012
- [5] Dragatogiannis, D. A., E. P. Koumoulos, I. A. Kartsonakis, D. I. Pantelis, P. N. Karakizis, and C. A. Charitidis, Dissimilar friction stir welding between 5083 and 6082 Al alloys reinforced with TiC nanoparticles, Materials and manufacturing Processes 31, no 16: 2101-2114, 2016
- [6] Chionopoulos, S. K., C. H. I. Sarafoglou, D. I. Pantelis, and V. J. Papazoglou, Effect of tool pin and welding parameters on friction stir welded (FSW) marine aluminum alloys, In Proceedings of the 3rd international conference on manufacturing engineering (ICMEN), pp. 1-3, 2008
- [7] Chionopoulos, S. K., D. I. Pantelis, V. J. Papazoglou, and N. Daniolos, Influence of process variables and tool's design on friction stir welding (FSW) of marine aluminum alloys, In 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. of Mediterranean IMAM, 2009
- [8] Karakizis, P. N., E. C. Nasioulas, S. Chionopoulos, and D. I. Pantelis, The effect of dry ice cooling on the microstructure of dissimilar friction stir welds between aluminum and magnesium, In 6th ICMEN International Conference, vol. 10, 2017
- [9] Karakizis, P.N., D. I. Pantelis, D. A. Dragatogiannis, V. D. Bougiouri, and C. A. Charitidis, Study of friction stir butt welding between thin plates of AA5754 and mild steel for automotive applications, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 102: 3065-3076, 2019
- [10] ΑΡΓΥΡΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ – ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗΣ ΣΕ ΜΟΝΑΔΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ FSW (ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ) ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΕΛΑΣΜΑΤΑ 5083-H111, 2016
- [11] ΝΙΚΟΛΑΟΣ Μ. ΔΑΝΙΟΛΟΣ, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ – ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΟΜΟΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ, 2017

- [12] Noor Zaman Khan, Arshad Noor Siddiquee, Zahid A. Khan, Suha K. Shihab, Investigations on tunneling and kissing bond defects in FSW joints for dissimilar aluminum alloys, 2015
- [13] Sadiq Aziz Hussein, S. Thiru , R. Izamshah, Abd Salam Md Tahir, Unstable Temperature Distribution in Friction Stir Welding, 2014
- [14] Παναγιώτης Ράπτης, Διπλωματική εργασία – Υπολογιστική μελέτη των ασκουμένων φορτίων κατά τη Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση κραμάτων αλουμινίου, 2021
- [15] Abdulaziz Albannai, Review The Common Defects In Friction Stir Welding, 2020
- [16] Shayan Eslami, Friction Stir Welding of Polymers: an innovative technological approach, 2019
- [17] <https://www.secretprojects.co.uk/threads/techno-superliner-japan-1989-2005.22696/>
- [18] <https://www.cruisemapper.com/ships/Seven-Seas-Navigator-633>
- [19] [https://en.wikipedia.org/wiki/Sea\\_Fighter\\_\(FSF-1\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sea_Fighter_(FSF-1))
- [20] Youssef K.Hamidi, Cengiz M.Altan, 2.5 Process-Induced Defects in Resin Transfer Molded Composites
- [21] Adeel Zafar, Mokhtar Awang, Sajjad Raza Khan, Friction Stir Welding of Polymers: An Overview, 2017
- [22] Sudhir Kumar, Tanmoy Medhi, Barnik Saha Roy, Friction Stir Welding of Thermoplastic Composites, 2019
- [23] ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ – Κατασκευή, Χαρακτηρισμός και Ιδιότητες Σύνθετων Δηλεκτρικών Υλικών Πολυμερικής Μήτρας, 2015
- [24] Djilali Benyerou, B. Ould Chikh, Habib Khellafi, H. M. Meddah, Parametric Study Of Friction Stir Spot Welding (FSSW) For Polymer Materials Case Of High Density Polyethelene Sheets Experimental And Numerical Study, 2021
- [25] Qingzhao Wang, Zhixia Zhao, Yong Zhao, Keng Yan, Hao Zhang, The adjustment strategy of welding parameters for spray formed 7055 aluminum alloy underwater friction stir welding joint, 2015
- [26] Hamed Aghajani Derazkola, Eduardo Garcia, Majid Elyasi, Underwater friction stir welding of PC: Experimental study and thermo-mechanical modelling, 2021
- [27] [https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-weld-defects-imperfections\\_fig40\\_329699083](https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-weld-defects-imperfections_fig40_329699083)
- [28] Debasish Mishra, Santosh Kumar Sahu, Raju prasad Mahto, Surjya K Pal, Friction Stir Welding for Joining of Polymers, 2019

- [29] Santosh K. Sahu, Kamal Pal, Susmita Das, Avisek Tripathy, Study on Mechanical Behavior of Friction Stir Welded Nylon-6, 2021
- [30] Adeel Zafar, Mokhart Awang, Sajjad Raza Khan, Sattar Emamian, Effect of Double Shoulder tool Rotational Speed on Thermo-Physical Characteristics of Friction Stir Welded 16mm thick Nylon6, 2015
- [31] Shayan Eslami, Paulo Tavares, Pedro M G P Moreira, Fatigue Life Assessment of Friction Stir Welded Dissimilar Polymers, 2017
- [32] M.A. Sanchez Miranda, G.M. Dominguez Almaraz, J.J. Villalon Lopez, J.A. Ruiz Vilchez, Dissimilar joining of ABS and PP using friction stir welding (FSW) and mechanical properties evaluation , 2021
- [33] ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΔΟΥΛΓΙΕΡΗΣ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ - Η χημεία των πολυμερών. Εφαρμογές και χρήσεις των πολυμερών στην καθημερινή ζωή, 2018
- [34] Xiacong He, Fengshou Gu, Andrew Ball, A review of numerical analysis of friction stir welding, 2013
- [35] Adeel Zafar, Mokhart Awang, Sajjad Raza Khan, Sattar Emamian, Invatigating Friction Stir Welding on Thick Nylon 6 Plates, 2016
- [36] Mojtaba Rezaee Hajideh, Mohammadreza Farahani, Seyed Amir Davoud Alavi, Navid Molla Ramezani, Investigation on the effects of tool geometry on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethelene and propylene sheets, 2016
- [37] Hossain Ahmed, Michael Van tooren, Ramy Harik, A.P. Reynolds, Investigation and development of friction stir welding process for unreinforced polyphenylene sulfide and reinforced polyethetherketone, 2018
- [38] Shantosh K. Sahu, Kamal Pal, Raju P.Mahto, Padmanav Dash, Monitoring of friction stir welding for dissimilar Al 6063 alloy to polypropylene using sensor signals, 2018
- [39] Mojtaba Rezaee Hajideh, Mohammadreza Farahani, Navid Molla Ramezani, Reinforced Dissimilar Friction Stir Weld of polypropylene to Acrylonitrile Butadiene Styrene with Copper Nanopowder, 2017
- [40] Harish Kumar, S.V. Satish, Studies Friction Stir Welding of Polymers – A Review, 2020
- [41] Emerald Backfiles, The many uses of PLASTIC ABOARD SHIP, 2007
- [42] Neetesh Soni, Chandrashekhara Sangam, Defects Formation during Friction Stir Welding: A Review, 2016
- [43] Shayan Eslami, Tiago Ramos, Paulo J. Tavares, P.M.G.P. Moreira, Effect of friction stir welding parameters with newly developed tool for lap joint of dissimilar polymers, 2015

- [44] Alfonso Paolletti, Francesco Lambiase, Antoniomaria Di Ilio, Analysis of forces and temperature in friction spot welding of thermoplastic polymers, 2015
- [45] William J. Arbegast, A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding, 2007
- [46] Paul Kah, Raimo Suoranta, Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminum alloys, 2015
- [47] Andro A.E. Sidhom, Soheir A.R. Naga, A.M. Kamal, Friction stir spot welding of similar and dissimilar high density polyethelene and propylene sheets, 2022
- [48] Plyush Jain, Jaimin Vaghela, Experimental Comparison between Friction Stir Welding and Underwater Friction Stir Welding on Al6061 Alloys, 2021
- [49] D.B. Naga Muruga, A review on Friction Stir Welding, 2019
- [50] Zoltan Kiss, Tibor Czigany, Applicability of friction stir welding in polymeric materials, 2007
- [51] Syed Haris Iftikhar, Jamal Sheikh-Ahmad, F. Almaskari, A Comprehensive Review on Optimal Welding Conditions for Friction Stir Welding of thermoplastic Polymers and Their Composites, 2021
- [52] Ankit Kumar Pandey, Kanhu Charan Nayak, S.S. Mahapatra, Characterization of friction stir spot welding between copper and poly-methyl-methacrylate (PMMA) sheet, 2019
- [53] Nasser Sadeghian, Mohammad Kazem Besharati Givi, Experimental optimization of the mechanical properties of friction stir welded Acrylonitrile Butadiene Styrene sheets, 2014
- [54] Yinfei Yan, Yifu Shen, Haobin Lei, Junyi Zhuang, Influence of welding parameters and tool geometry on the morphology and mechanical performance of ABS friction stir spot welds, 2018
- [55] Shayan Eslami, Tiago Ramos, Paulo J. Tavares, P.M.G.P Moreira, Shoulder design developments for FSW lap joints of dissimilar polymers, 2015
- [56] ChatGPT (<https://chat.openai.com/chat>)
- [57] Yahya Bozkurt, The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethelene sheets, 2012
- [58] Yongxian Huang, Xiangchen Meng, Yuming Xie, Long Wan, Zongliang Lv, Jian Cao, Jicai Feng, Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites, 2018
- [59] Shayan Eslami, M. A. V. de Figueiredo, Paulo J. Tavares, P. M. G. P. Moreira, Parameter optimization of friction stir welded dissimilar polymers joints, 2017



- [60] Mikkel Melters Pedersen, Introduction to Metal Fatigue – Concepts and Engineering Approaches, 2018
- [61] Neeru Bhardwaj, Ganesh Narayanan, Uday Dixit, M.s.J. Hashmi, Recent developments in friction stir welding and resulting industrial practice, 2019
- [62] Mustafa kemal Bilici, Ahmet Yukler, The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethelene sheets, 2011
- [63] VP Mahesh, Sooraj Patel, Anurag Gumaste, Amit Arora, Joining of polymer matrix Composites Through Friction Stir Processes, 2021
- [64] Inaniwa S et al., Application of friction stir welding for several plastic materials, In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> international joint symposium on joining and welding, Osaka, Japan, 2014
- [65] Paneerselvam K, Lenin K, Joining of Nylon 6plate by friction stir welding process using threaded tools, 2014
- [66] Bakheri A, Azdast T, Doniavi A, An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets, 2013
- [67] Pirizadeh M et al, Friction stir welding of thermoplastics using a newly designed tool, 2014
- [68] Mendes N. et al, Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds, 2014
- [69] Oliveira PHF. et al, Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA, 2010
- [70] Ahmdi H, Arab NBM, Ashenai Ghasemi F, Eslami Farsani R, Influence of pin profile on quality of friction stir lap welds in carbon fiber reinforced polypropylene composite, 2012
- [71] Kiss Z, Czigany T, Applicability of friction stir welding in polymeric materials, 2007
- [72] Gao J. et al, Submerged friction stir weld of polyethelene sheets, 2014
- [73] Azarsa E, Mostafapour A, Experimental investigation on flexuar behavior of friction stir welded high density polyethelene sheets, 2014
- [74] Arici E, Sinmazcelyk T, Effects of double passes of the tool on friction stir welding of polyethelene, 2005
- [75] Aydin M, Effects of welding parameters and pre-heating on the friction stir welding of UHMW-polyethelene, 2010
- [76] Dashatan SH. et al, Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets, 2013

- [77] Bilici MK, Yukler AI, Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethelene sheets, 2012
- [78] Bilici MK, Yukler AI, Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethelene sheets, 2012
- [79] Mostafapour A, Taghizad Asad F, Investigations on joining of nylon 6 plates via novel method of heat assisted friction stir welding to find the optimum process parameters, 2016
- [80] Vijendra B, Sharma A, Induction heated tool assisted friction-stir welding (i-FSW): a novel hybrid process for joining of thermoplastics, 2015
- [81] Kiss Z, Czigany T, Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropelene, 2012
- [82] Simoes F, Rodriguez DM, Material flow and thermos-mechanical conditions during friction stir welding of polymers: literature review, experimental results and empirical analysis, 2014
- [83] Mendes N. et al, A novel friction stir welding robotic platform: welding polymeric materials, 2014