



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
– ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ**

Διπλωματική Εργασία

ΚΡΑΝΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής:
Δρ. Δραγατογιάννης Δημήτριος

ΑΘΗΝΑ 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση ανόμοιων υλικών. Ενίσχυση με κεραμικά νανοσωματίδια.

Συγγραφέας

ΚΡΑΝΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ (Α.Μ. : 18393110)

Επιβλέπων

Δραγατογιάννης Δημήτριος

Ημερομηνία Εξέτασης

Εξεταστική Επιτροπή

Δραγατογιάννης Δημήτριος

Χιονόπουλος Σταύρος

Ιακωβίδης Ισίδωρος

Εντενταλμένος Διδάσκων

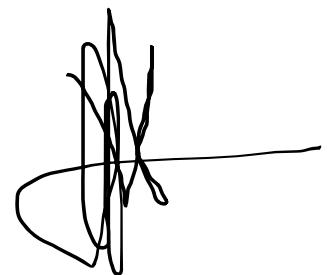
Επίκουρος Καθηγητής

Λέκτορας

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κρασιάς Βασίλειος του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 18393110, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επιπλέον, έχω αναφέρει πλήρως όλες τις πηγές από τις οποίες άντλησα δεδομένα, με πλήρεις αναφορές στους συγγραφείς, συμπεριλαμβανομένων τυχόν διαδικτυακών πηγών που χρησιμοποιήθηκαν. Βεβαιώνω επίσης ότι η παρούσα εργασία είναι αποκλειστικά δικιά μου. Οποιαδήποτε παραβίαση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	12
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	13
ABSTRACT	14
1. ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	15
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	15
1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΝΑΝΟΪΛΙΚΩΝ	15
1.3 ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ (NPs)	16
1.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	17
1.5 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ NPs	19
1.5.1 Μηχανικές ιδιότητες	19
1.5.2 Θερμικές ιδιότητες	19
1.5.3 Μαγνητικές ιδιότητες	20
1.6 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ	21
1.6.1 Ηλεκτρόδια συγκόλλησης χαμηλής θερμοκρασίας	21
1.6.2 Καύσιμα	21
1.6.3 Χρώματα και Ναυτιλία	22
1.6.4 Απορροφητές Ενέργειας Θαλάσσιων Κυμάτων Και Ηλιακού Φωτός	23
2. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FRICTION STIR WELDING – FSW).....	24
2.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ – ΓΕΝΙΚΑ	24
2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ FSW	25
2.3 ΠΙΘΑΝΑ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ FSW	26
2.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ	28
2.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ FSW	28
2.6 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ FSW	29
2.7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ FSW ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	29
3. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΜΕ ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	32
3.1. ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	32
3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	32
3.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΟΜΟΓΕΝΟΥΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΑ5083-Η111 ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ SiC	34
3.3.1 Μελέτη στο οπτικό στερεοσκόπιο	35
3.3.2 Οπτική μικροσκοπία	37
3.3.3 Μικροσκληρομετρήσεις.....	38
3.3.4 Δοκιμές εφελκυσμού	39
3.3.5 Συμπεράσματα.....	40
3.4 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΑ5083-Η111 ΚΑΙ ΑΑ6082-Τ6 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ TiC	41
3.4.1 Πειραματική Διαδικασία	41
3.4.2 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις.....	42
4. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ – ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΒΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	45

4.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΑΑ5083-H321 ΚΑΙ ΤΟΥ ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ DH36	45
4.1.1 Πειραματική Διαδικασία	45
4.1.2 Αποτελέσματα και Συζητήσεις.....	48
4.1.3 Συμπέρασμα.....	51
4.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ FSW ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ DH36 ΚΑΙ ΤΟΥ S690QL ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	52
4.2.1 Πειραματική Διαδικασία	52
4.2.2 Αποτελέσματα - Δοκιμές κόπωσης.....	54
4.2.3 Συμπέρασμα.....	56
5. ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ FSW	57
5.1 FSW ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ	57
5.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ABS ΠΟΥ ΠΑΡΗΧΘΗ ΜΕΣΩ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	58
5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ	60
5.4 ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	61
5.5 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ HFSW ΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ AL6061-T6 ΜΕ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟ ΧΑΛΥΒΑ STS304.....	61
5.5.1 Πειραματική διαδικασία.....	61
5.5.2 Χαρακτηριστικά επιφάνειας και διατομής στις συγκολλήσεις FSW και HFSW ..	63
5.5.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά στις συγκολλήσεις FSW και HFSW	64
5.5.4 Συμπεράσματα.....	68
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	69
7. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Ταξινόμηση νανοϋλικών με βάση τις διαστάσεις τους

Εικόνα 1.2: Τύποι οργανικών NPs. Α Δενδριμερή, Β λιποσώματα, Γ μικκύλια και Δ φερριτίνη

Εικόνα 1.3: Διαφορετικοί τύποι NPs με βάση τον άνθρακα. Α φουλερένιο C60 - Β NPs από αιθάλη - και Γ κβαντικές τελείες άνθρακα

Εικόνα 1.4: Ανάπτυξη ειδικής επίστρωσης με νανοτεχνολογία που εμποδίζει την ανάπτυξη θαλάσσιων οργανισμών, όπως τα βρύα, στο εξωτερικό στρώμα του κύτους των πλοίων από μια ιρανική εταιρεία που βασίζεται στην τεχνολογία

Εικόνα 1.5: Διάβρωση σώματος πλοίου

Εικόνα 2.1: Προσαρμοσμένη εργαλειομηχανή FSW εγκατεστημένη στο University of Stuttgart

Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση ενός δοκιμίου συγκόλλησης που παράγεται με τη διαδικασία FSW και οι θέσεις των κοινών ελαττωμάτων του υποδεικνύονται με αριθμούς όπως ακολουθούν: (1) Πόροι, κενά και σήραγγα. (2) Έλλειψη διείσδυσης (3) Kissing bond. (4) Hooking. (5) Flash. (6) Επιφανειακά ελαττώματα, όπως αυλακώσεις και ρωγμές

Εικόνα 2.4: Συγκολλημένα με τριβή πάνελ αλουμινίου στο X-Craft στο Nicols Bros. Boat Builders στο Freeland της Ουάσιγκτον

Εικόνα 2.5: FSW κατάστρωμα του 'USS Freedom'

Εικόνα 2.6: Δύναμη Άμυνας της Νέας Ζηλανδίας

Εικόνα 3.1: Διάγραμμα μικροσκληρότητας συγκολλήσεων με διαφορετικά νανοσωματίδια ενίσχυσης και μέταλλο βάσης

Εικόνα 3.2: Διάγραμμα της αντοχής σε εφελκυσμό συγκολλήσεων με διαφορετικά νανοσωματίδια ενίσχυσης και μέταλλο βάσης

Εικόνα 3.3: Εικόνες οπτικού στερεοσκοπίου των πειραμάτων FSW του AA5083-H111 με ενίσχυση SiC

Εικόνα 3.4: Συγκριτικό διάγραμμα των οριζοντίων κατανομών μικροσκληρότητας των πειραμάτων No 3 και No 4.

Εικόνα 3.5: Οπτικές μικρογραφίες της FSW του AA5083-H111 με ενίσχυση SiC, α) το flow arm, μεγέθυνση x100, γ) ο πυρήνας συγκόλλησης, δ) το κέντρο του πυρήνα συγκόλλησης, μεγέθυνση x100, ε) λεπτομέρεια κοντά στην επιφάνεια περιαιχενίου, μεγέθυνση x200.

Εικόνα 3.6: Η κατανομή της μικροσκληρότητας α) οριζοντίως, β) καθέτως.

Εικόνα 3.7: Τα τρία δοκίμια εφελκυσμού της FSW του AA5083 με ενίσχυση SiC μετά τη θραύση τους

Εικόνα 3.8: Οι καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων (σ - ϵ) και για τα τρία δοκίμια της FSW του AA5083 με ενίσχυση SiC.

Εικόνα 3.9: Οπτική μικροσκοπία των δειγμάτων (α) 1, (β) 2, (γ) 3, (δ) 4, (ε) 5 και (στ) 6

Εικόνα 3.10: Δοκίμια εφελκυσμού με θραύση (α) μη ενισχυμένα και (β) ενισχυμένα με TiC

Εικόνα 3.11: Προφίλ σκληρότητας των συγκολλήσεων ενισχυμένων με TiC (2 mm από την επιφάνεια)

Εικόνα 4.1: (α) Μηχανή ESAB Legio, (β) σχήμα εργαλείου Pin, (γ, δ) όψεις του εξαρτήματος σύσφιξης και (ε) γεωμετρικές παράμετροι του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε

Εικόνα 4.2: (α) Διαμόρφωση LAP, (β) δείγματα που κόπηκαν για την ανάλυση

Εικόνα 4.3: Δοκίμια που προέκυψαν για διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης: (α) 350 στροφές ανά λεπτό - 25 mm/min, (β) 500 στροφές ανά λεπτό - 25 mm/min, (γ) 900 στροφές ανά λεπτό - 100 mm/min, (δ) 1300 στροφές ανά λεπτό - 100 mm/min

Εικόνα 4.4: Φορτίο αστοχίας κατά τις δοκιμές διάτμησης των συγκολλήσεων συναρτήσει του λόγου περιστροφής/ταχύτητας τροφοδοσίας

Εικόνα 4.5: Εξέλιξη των παραμορφώσεων και του λόγου φορτίου/μήκους της άρθρωσης

Εικόνα 4.6: Εξέλιξη της σκληρότητας για τις περιπτώσεις μελέτης με σταθερή πρόωση, ίση με (α) 25 mm/min και (β) 50 mm/min μεταβάλλοντας τις ταχύτητες περιστροφής

Εικόνα 4.7: Σύγκριση των αποτελεσμάτων εφελκυστικής κόπωσης για διαφορετικές τεχνικές σύνδεσης (BM είναι το υλικό βάσης)

Εικόνα 4.8: Παράδειγμα κατεργασίας για το DH 36

Εικόνα 4.9: Μικροδομή του DH36 (α) και του S690 (β) στο μέσο του πάχους

Εικόνα 4.10: Φωτογραφίες του δείγματος κόπωσης

Εικόνα 4.11: Αποτελέσματα κόπωσης για τους χάλυβες DH36 και S690QL

Εικόνα 4.12: Παρατήρηση της επιφάνειας θραύσης για κάθε χάλυβα

Εικόνα 5.1: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας FS3DP (α) και διαστάσεις του εργαλείου (β)

Εικόνα 5.2: Σχηματική απεικόνιση του εργαλείου τριβής που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση

Εικόνα 5.3: Εικονογραφική απεικόνιση των δοκιμών εφελκυσμού των δοκιμίων

Εικόνα 5.4: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας HFSW

Εικόνα 5.5: Η επιφάνεια και η διατομή των συγκολλήσεων FSW και HFSW με τις ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου

Εικόνα 5.6: Σύγκριση των αντοχών στον εφελκυσμό των συγκολλήσεων FSW και HFSW με τις ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου

Εικόνα 5.7: Δοκίμιο θραύσης μετά από δοκιμή εφελκυσμού για συγκολλήσεις HFSW

Εικόνα 5.8: Προφίλ σκληρότητας της διατομής των συγκολλήσεων FSW και HFSW

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Εμφάνιση των επιδράσεων της ποσότητας της διαδικασίας παραμέτρων στο σχηματισμό ελαττωμάτων FSW

Πίνακας 2.2: Παρουσίαση ορισμένων συμβατικών μεθόδων NDE και της ικανότητάς τους να ανιχνεύουν ελαττώματα FSW

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες κεραμικών σωματιδίων

Πίνακας 3.2: Οι παράμετροι της FSW του AA5083-H111 με ενίσχυση SiC.

Πίνακας 3.3: Οι τιμές της μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, του ορίου διαρροής, της επιμήκυνσης καθώς και του μέτρου ελαστικότητας για την FSW του AA5083 με ενίσχυση SiC.

Πίνακας 3.4: Πειραματικοί παράμετροι FSW

Πίνακας 3.5: Μηχανικές ιδιότητες (μέσες τιμές) των συγκολλήσεων, με και χωρίς την προσθήκη νανοσωματιδίων TiC

Πίνακας 4.1: Χημικές συνθέσεις του εξεταζόμενου χάλυβα DC και του κράματος AA6016

Πίνακας 4.2: Κύριες μηχανικές ιδιότητες του εξεταζόμενου χάλυβα DC και του κράματος AA6016

Πίνακας 4.3: Χρησιμοποιούμενοι τεχνολογικοί παράμετροι

Πίνακας 4.4: Χρησιμοποιούμενοι τεχνολογικοί παράμετροι

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα δοκιμής διάτμησης

Πίνακας 4.6: Χημική σύνθεση των δύο μελετηθέντων χαλύβων

Πίνακας 4.7: Μηχανικές απαιτήσεις για δοκιμή εφελκυσμού

Πίνακας 5.1: Ημερολόγιο ελέγχου του πειράματος

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα της ANOVA για τον λόγο S/N για την αντοχή σε εφελκυσμό

Πίνακας 5.4: Χημικές συνθέσεις και μηχανικές ιδιότητες για ανόμοια υλικά.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW) και συγκεκριμένα την ενίσχυση της συγκόλλησης με κεραμικά νανοσωματίδια. Η τεχνική αυτή έχει αποδειχθεί εξαιρετικά σημαντική στους τομείς της ναυπηγικής και των θαλάσσιων κατασκευών. Η εργασία παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της μεθόδου της FSW, περιγράφοντας λεπτομερώς τις θεμελιώδεις παραμέτρους που αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας. Διερευνά επίσης τις κύριες εφαρμογές της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση στη ναυπηγική βιομηχανία, αναδεικνύοντας τη σημασία και τον αντίκτυπό της στον συγκεκριμένο τομέα. Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη μελέτη των πιο σχετικών ερευνητικών εργασιών που υπάρχουν στην ελεύθερη αγγλική ερευνητική βιβλιογραφία, για την ανάδειξη ενός καινοτόμου θέματος που αφορά την ενίσχυση της συγκόλλησης με κεραμικά νανοσωματίδια.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή Δρ. Δημήτριο Δραγατογιάννη για την αμέριστη υποστήριξη και για την έμπρακτη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της σύνταξης αυτής της εργασίας. Οι γνώσεις του, η ηθική ενθάρρυνση, οι πολύτιμες συμβουλές και οι υποδείξεις του ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στη σημασία της ναυοτεχνολογίας, εξετάζοντας τον χειρισμό της ύλης στη ναυοκλίμακα. Δίνονται βασικές πληροφορίες για τους διάφορους τύπους και τις ταξινομήσεις των ναυοσωματιδίων (NPs). Επίσης, γίνεται αναφορά στις μοναδικές φυσικοχημικές ιδιότητες των ναυοσωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών, θερμικών και μαγνητικών χαρακτηριστικών τους. Ακόμη, γίνεται αναφορά στην αναγκαιότητα της ναυοτεχνολογίας, ιδιαίτερα στον τομέα της ναυτιλίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιγράφει τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW), μια τεχνική με προοπτικές περαιτέρω εφαρμογής στη ναυπηγική βιομηχανία, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της ιστορικής της εξέλιξης, των βασικών αρχών, της διαδικασίας και του εξοπλισμού της. Το κεφάλαιο αυτό εξετάζει επίσης τα ελαττώματα που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της FSW και τις μεθόδους ανίχνευσής τους. Κλείνοντας, γίνεται παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της FSW, καθώς πιθανές εφαρμογές της στη ναυπηγική βιομηχανία.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται οι βασικές αρχές της ενίσχυσης της συγκόλλησης με κεραμικά ναυοσωματίδια με τη μέθοδο της FSW. Περιγράφοντας λεπτομερώς τη διαδικασία, αναλύονται οι μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων που προκύπτουν και παρουσιάζονται μελέτες περιπτώσεων συγκόλλησης FSW μεταξύ συγκεκριμένων ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου ενισχυμένων με ναυοσωματίδια TiC και SiC. Στην ενότητα αυτή παρέχεται μια ολοκληρωμένη περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, των αποτελεσμάτων, των συμπερασμάτων και των παρατηρήσεων που προέκυψαν από τη μελέτη.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στις εφαρμογές, στη ναυπηγική βιομηχανία, της συγκόλλησης FSW ανόμοιων υλικών. Επιπλέον, εξετάζεται η συμπεριφορά κόπωσης των συγκολλήσεων FSW για χάλυβα υψηλής αντοχής μέσω δοκιμών κόπωσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο διερευνώνται οι πρόσφατες εξελίξεις στην FSW, σε σχέση με την τρισδιάστατη εκτύπωση και την υβριδική συγκόλληση FSW (HFSW). Μελέτες περιπτώσεων, όπως η εφαρμογή της HFSW σε κράματα αλουμινίου και χάλυβα, αναλύονται ως προς τα επιφανειακά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

Τέλος, το έκτο κεφάλαιο παρουσιάζει τις προκλήσεις και τις μελλοντικές προοπτικές στην ναυτιλία, περιγράφοντας την τρέχουσα κατάσταση και των πιθανών εξελίξεων στις συγκολλήσεις FSW για τη ναυπηγική βιομηχανία.

ABSTRACT

The significance of nanotechnology and its application to the manipulation of matter at the nanoscale are covered in the first chapter. Additionally, it provides an overview of the several kinds and categories of nanoparticles (NPs) as well as their distinct physicochemical qualities, such as their mechanical, thermal, and magnetic traits. In summary, nanotechnology is essential, especially for the maritime industry.

The second chapter describes friction stir welding (FSW), a technique with potential for further application in the shipbuilding industry. It provides a comprehensive overview of its historical development, basic principles, process and equipment. The faults that might arise during FSW and how to find them are also covered in this chapter. A review of FSW's benefits and drawbacks, as well as its use in the shipbuilding sector, is included in the conclusion.

The fundamentals of ceramic nanoparticle weld strengthening by FSW are explained in chapter three. In-depth process descriptions are followed by analyses of the mechanical characteristics of the final welds and case studies of FSW welding between certain shipbuilding aluminum alloys enhanced with TiC and SiC nanoparticles. This section includes a thorough explanation of the experimental setup, findings, conclusions, and study-derived observations.

The applications of FSW welding of dissimilar materials in the shipbuilding sector are covered in the fourth chapter. Furthermore, fatigue experiments are used to investigate the fatigue behavior of FSW welds for high strength steel.

The fifth chapter examines current advancements in FSW with respect to hybrid HFSW welding and 3D printing. Case studies are examined in terms of their surface and mechanical properties, such as the application of HFSW to alloys made of steel and aluminum.

Finally, chapter six presents the challenges and future perspectives in the marine industry, providing reports of the current state and possible developments in FSW welding for the shipbuilding industry.

1. NANOTEΧΝΟΛΟΓΙΑ

1.1 Γενικά

Η νανοτεχνολογία είναι ένας διεπιστημονικός κλάδος της επιστήμης, της μηχανικής και της τεχνολογίας που περιλαμβάνει τον έλεγχο της ύλης στη νανοκλίμακα, συνήθως στην περιοχή από 1 έως 100 νανόμετρα. Σε αυτό το επίπεδο, οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά από εκείνες της μακροκλίμακας, δημιουργώντας μοναδικές και συχνά ανώτερες λειτουργικότητες. Τα επιτεύγματα της νανοτεχνολογίας βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως η ναυτιλία, η φυσική, η χημεία, η βιολογία, η επιστήμη των υλικών και η μηχανική.

1.2 Ταξινόμηση των νανοϋλικών

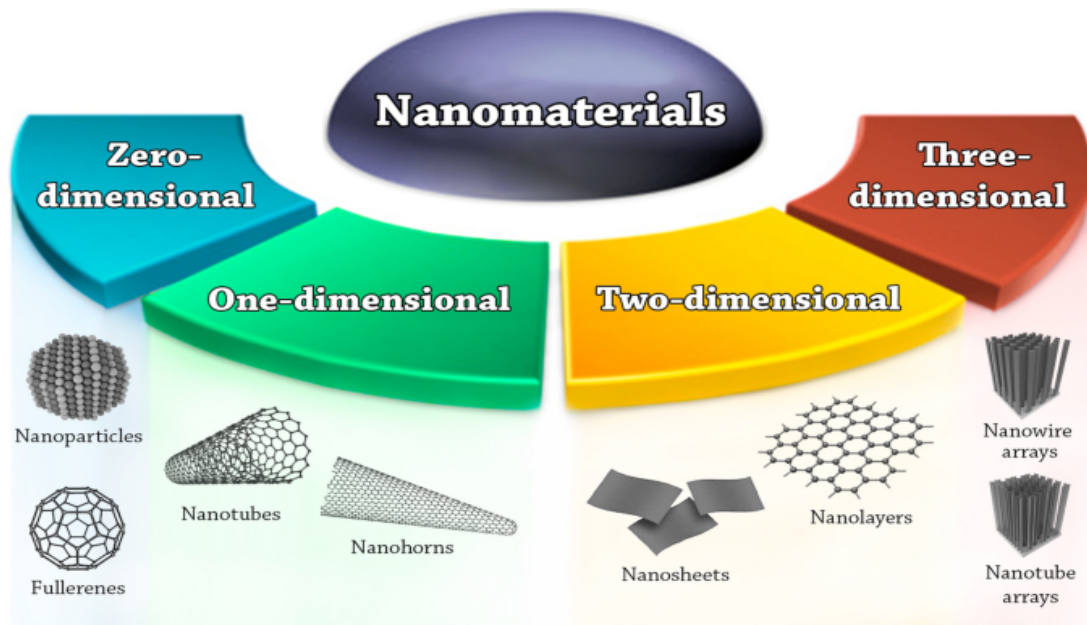
Ως νανοϋλικά ορίζονται τα υλικά με τουλάχιστον μία διάσταση μικρότερη από 100 νανόμετρα. (nm) [1]. Η Εικόνα 1.1 απεικονίζει τις τέσσερις κύριες κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα νανοϋλικά με βάση τις διαστάσεις τους.

Νανοϋλικά μηδενικών διαστάσεων (0-D): Και τις τρεις διαστάσεις τις συναντάμε σε υλικά όπως τα φουλερένια, οι κβαντικές τελείες και οι ατομικές συστάδες που βρίσκονται στη νανοκλίμακα (έως 50 nm).

Μονοδιάστατα νανοϋλικά (1-D): Τέτοια είναι οι νανοσωλήνες, οι νανοϊνες και οι νανοράβδοι. Όλα τα παραπάνω έχουν δύο διαστάσεις.

Νανοϋλικά δύο διαστάσεων (2-D): Μεταξύ αυτών είναι υπερπλέγματα που τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο, καθώς και νανοδίσκοι και νανοφύλλα.

Τρισδιάστατα νανοϋλικά (3-D) ή νανοϋλικά όγκου: Υλικά με κόκκους στη νανοκλίμακα. Στην περίπτωση αυτή, βασικά παραδείγματα αποτελούν τα κολλοειδή και οι λεπτές μεμβράνες με πορώδες ατομικής κλίμακας[2].



Εικόνα 1.1: Ταξινόμηση νανοϋλικών με βάση τις διαστάσεις τους [3]

1.3 Νανοσωματίδια (NPs)

Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) ορίζει τα νανοσωματίδια ως νανοαντικείμενα με όλες τις εξωτερικές διαστάσεις στη νανοκλίμακα, όπου τα μήκη του μεγαλύτερου και του μικρότερου άξονα του νανοαντικειμένου δεν διαφέρουν σημαντικά. Όταν οι διαστάσεις διαφέρουν σημαντικά, συνήθως περισσότερο από τρεις φορές, προτιμώνται συχνά όροι όπως νανοϊνες ή νανοπλάκες αντί για νανοσωματίδια. Τα νανοσωματίδια μπορούν να παρουσιάσουν ένα ευρύ φάσμα σχημάτων, μεγεθών και δομών, συμπεριλαμβανομένων σφαιρικών, κυλινδρικών, κωνικών, σωληνοειδών, κοίλου πυρήνα, σπειροειδών ή ακανόνιστων μορφών. Τα μεγέθη τους κυμαίνονται γενικά από 1 έως 100 nm, και όταν το μέγεθος πέφτει κάτω από 1 nm, συνήθως αναφέρονται ως συστάδες ατόμων. Τα NPs μπορεί να είναι κρυσταλλικά, είτε μονοκρυσταλλικά είτε πολυκρυσταλλικά, άμορφα ή συσσωματωμένα [3].

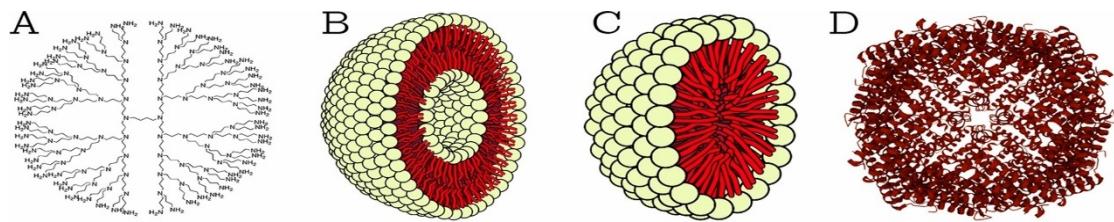
Τα νανοσωματίδια μπορεί να αποτελούνται από διάφορα στρώματα ή να είναι ομοιογενή. Στα πολυεπίπεδα νανοσωματίδια, τα στρώματα αυτά περιλαμβάνουν συνήθως: (α) το επιφανειακό στρώμα, το οποίο συχνά αποτελείται από πολυμερή, ιόντα μετάλλων, δραστικά συστατικά και άλλα μικροσκοπικά μόρια, (β) το στρώμα κελύφους, το οποίο αποτελείται από μια ουσία που διαφέρει χημικά από τον πυρήνα, και (γ) το στρώμα του πυρήνα, το οποίο αποτελεί το κεντρικό τμήμα του νανοσωματιδίου [4].

1.4 Ταξινόμηση νανοσωματιδίων

Τα νανοσωματίδια μπορούν ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες με βάση τη σύνθεσή τους: οργανικά, με βάση τον άνθρακα και ανόργανα [2].

- Οργανικά Νανοσωματίδια

Πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λιπίδια, πολυμερή και άλλες οργανικές ουσίες μπορούν να βρεθούν σε οργανικά νανοσωματίδια (NPs) [5]. Τέτοια νανοσωματίδια αποτελούν τα μικκύλια, λιποσώματα, δενδριμερή και πρωτεϊνικά σύμπλοκα όπως η φερριτίνη (που παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.2). Αυτά τα νανοσωματίδια είναι συνήθως βιοδιασπώμενα, μη τοξικά και σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως τα λιποσώματα μπορεί να έχουν κοίλο πυρήνα. Η θερμότητα και το φως, καθώς και άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μπορούν να επηρεάσουν τα οργανικά νανοσωματίδια [2]. Επιπλέον, συχνά δημιουργούνται μέσω μη ομοιοπολικών μοριακών αλληλεπιδράσεων, γεγονός που αυξάνει την ευαισθησία τους και προσφέρει στον οργανισμό έναν τρόπο για την εξάλειψή τους [6]. Η πιθανή εφαρμογή των οργανικών νανοσωματιδίων καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η σύνθεση, η σταθερότητα, το σχήμα της επιφάνειας, η ικανότητα μεταφοράς κ.λπ.

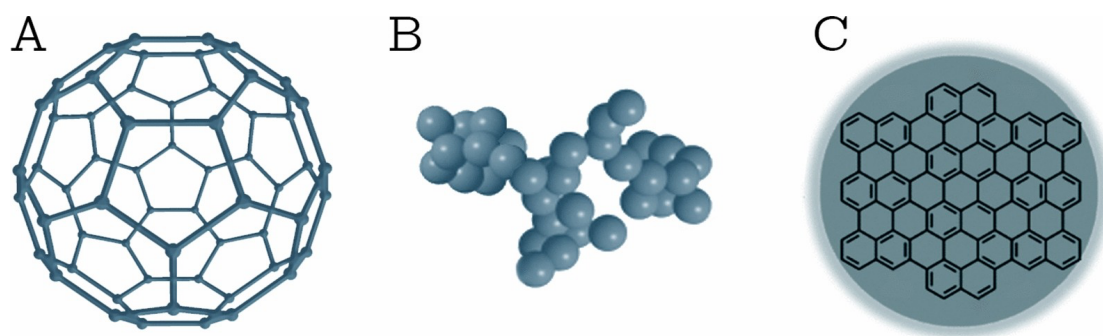


Εικόνα 1.2: Τύποι οργανικών NPs. Α Δενδριμερή, Β λιποσώματα, Γ μικκύλια και Δ φερριτίνη [3]

- Νανοσωματίδια με βάση τον άνθρακα

Αυτή η ομάδα περιλαμβάνει φουλερένια, NPs από αιθάλη και κβαντικές τελείες άνθρακα (που παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.3), καθώς και νανοσωματίδια που αποτελούνται εξ ολοκλήρου από άτομα άνθρακα [2]. Οι ενώσεις άνθρακα που είναι γνωστές ως φουλερένια έχουν συμμετρική δομή κλειστού κλωβού. Τα φουλερένια C_{60} , αποτελούνται από 60 άτομα άνθρακα [8], ενώ έχουν επίσης αναφερθεί πρόσθετες ποικιλίες φουλερενίων, όπως τα φουλερένια C_{70} και C_{540} [9]. Τα σφαιρικά σωματίδια που μοιάζουν με σταφύλι και συσσωρεύονται σε συσσωματώματα υψηλής τάξης ονομάζονται νανοσωματίδια αιθάλης [10]. Τα NP άνθρακα που είναι διακριτά, σφαιρικά και μικρότερα από 10 nm αποτελούν τις κβαντικές τελείες άνθρακα [11]. Στη νανοκλίμακα, τα NPs με βάση τον άνθρακα συνδυάζουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των sp^2 υβριδισμένων δεσμών άνθρακα με ιδιόμορφα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά.

Τα νανοσωματίδια με βάση τον άνθρακα χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, όπως η χορήγηση φαρμάκων [13], η αποθήκευση ενέργειας [14], η βιοαπεικόνιση [15], οι φωτοβολταϊκές συσκευές και οι εφαρμογές περιβαλλοντικής ανίχνευσης για την παρακολούθηση της μικροβιακής οικολογίας ή την ανίχνευση μικροβιακών παθογόνων [12]. Πιο περίπλοκα NPs με βάση τον άνθρακα είναι τα νανοδιαμάντια άνθρακα και οι νανοκρύσταλλοι άνθρακα. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μηχανικής ιστών και χορήγησης φαρμάκων λόγω της ιδιαίτερα χαμηλής τοξικότητας και της βιοσυμβατότητάς τους [16, 17].



Εικόνα 1.3: Διαφορετικοί τύποι NPs με βάση τον άνθρακα. Α φουλερένιο C60 - Β NPs από αιθάλη - και Γ κβαντικές τελείες άνθρακα [3]

- **Ανόργανα Νανοσωματίδια**

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τα νανοσωματίδια που δεν αποτελούνται από άνθρακα ή οργανικά υλικά, όπως τα νανοσωματίδια μετάλλων, τα κεραμικά νανοσωματίδια και τα νανοσωματίδια ημιαγωγών. Οι πρόδρομες ενώσεις μετάλλων συνθέτουν τα μεταλλικά νανοσωματίδια, τα οποία μπορεί να είναι μονομεταλλικά, διμεταλλικά ή πολυμεταλλικά [18-19]. Τα διμεταλλικά NPs μπορούν να δημιουργηθούν σε ξεχωριστά στρώματα (πυρήνας-κελύφος) ή από κράματα [18]. Αυτά τα NPs έχουν διακριτές οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες λόγω των χαρακτηριστικών επιφανειακού συντονισμού πλάσματος [4]. Ορισμένα μεταλλικά νανοσωματίδια έχουν επίσης ειδικά βιολογικά, μαγνητικά και θερμικά χαρακτηριστικά [2]. Εξαιτίας αυτού, γίνονται όλο και πιο κρίσιμα δομικά στοιχεία για τη δημιουργία νανοσυσκευών με ευρύ φάσμα φυσικών, χημικών, βιολογικών, φαρμακολογικών και φαρμακευτικών χρήσεων [20, 21]. Σήμερα, το μέγεθος, το σχήμα και η ελεγχόμενη εμφάνιση της σύνθεσης των μεταλλικών νανοσωματιδίων καθορίζουν τον τρόπο παραγωγής νέων υλικών [22].

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή νανοσωματιδίων ημιαγωγών είναι ημιαγωγοί, οι οποίοι έχουν χαρακτηριστικά μεταξύ εκείνων των μετάλλων και των αμέταλλων [23]. Αυτά τα NPs αποτελούν πολύτιμα υλικά στην ηλεκτρονική και την οπτική [23, 24]. Τα κεραμικά νανοσωματίδια αποτελούνται από ανόργανα στερεά, όπως οξειδία ασβεστίου και τιτανίου, καθώς και ανθρακικά άλατα, καρβίδια και φωσφορικά άλατα [25]. Η μεγάλη τους σταθερότητα και η υψηλή μεταφορική τους ικανότητα είναι οι βασικοί λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται σε βιολογικές εφαρμογές [26,27].

1.5 Φυσικοχημικές ιδιότητες των NPs

Όπως έχει ήδη διαπιστωθεί, τα ιδιαίτερα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των νανοσωματιδίων που τα διαφοροποιούν από τα μεγαλύτερα σε διαστάσεις αντίστοιχα σωματίδια, τα καθιστούν χρήσιμα για διάφορους σκοπούς. Τα σημαντικότερα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους περιγράφονται στις επόμενες ενότητες.

1.5.1 Μηχανικές ιδιότητες

Όπως και για τα συμβατικά υλικά, οι μηχανικές ιδιότητες των νανοϋλικών αφορούν την αντοχή, την ευθραυστότητα, τη σκληρότητα, την ανθεκτικότητα, την αντοχή σε κόπωση, την πλαστικότητα, την ελαστικότητα, την ολκιμότητα και την τάση διαρροής [28]. Τα περισσότερα μη μεταλλικά, ανόργανα υλικά είναι εύθραυστα και στερούνται θεμελιωδών ιδιοτήτων όπως η ολκιμότητα, η ανθεκτικότητα, η ελαστικότητα ή η πλαστικότητα. Αντίθετα, τα οργανικά υλικά είναι εύκαμπτα.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των νανοσωματιδίων διαφέρουν από εκείνα των μεγαλύτερων διαστάσεων λόγω επιφανειακών και κβαντικών επιδράσεων [28]. Για παράδειγμα, τα κράματα σιδήρου-αλουμινίου (FeAl) με κόκκους μεγέθους άνω των 4 μm είναι εύθραυστα, ενώ για κάτω των 4 μm παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή, ολκιμότητα και αυξημένη πλαστικότητα [29]. Οι ηλεκτροστατικές, οι πλευρικές τριχοειδείς και οι δομικές δυνάμεις είναι πρόσθετες σχετικές δυνάμεις αλληλεπίδρασης [30-33].

1.5.2 Θερμικές ιδιότητες

Η μεταφορά θερμότητας των νανοσωματιδίων εξαρτάται κυρίως από τη μεταφορά ενέργειας ηλεκτρονίων και φωτονίων (δονήσεις πλέγματος) [38]. Η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοηλεκτρική ισχύς, η θερμοχωρητικότητα και η θερμική σταθερότητα είναι οι κύριες παράμετροι των θερμικών χαρακτηριστικών ενός υλικού [38, 39].

Το μέγεθος έχει άμεσο αντίκτυπο στην ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα ενός νανοσωματιδίου. [39]. Ο λόγος της επιφάνειας των σωματιδίων προς τον όγκο των NPs αυξάνεται δραματικά καθώς μειώνεται το μέγεθός τους [39]. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος επιφάνειας προς όγκου των NPs σε σχέση με τα υλικά όγκου, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των ηλεκτρονίων που είναι διαθέσιμα για τη μετάδοση θερμότητας, δεδομένου ότι μία από τις δύο κύριες μεθόδους μετάδοσης θερμότητας είναι η αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων. Επιπλέον, η θερμική αγωγιμότητα των NPs διευκολύνεται επίσης από τη μικρή συγκέντρωση λόγω της κίνησης Brown των NPs [41]. Αλλά αυτό το φαινόμενο συμβαίνει μόνο όταν η υγρή φάση αναμιγνύεται με στερεά νανοσωματίδια για να δημιουργηθεί ένα νανορευστό [42]. Για παράδειγμα, η προσθήκη νανοσωματιδίων χαλκού σε αιθυλενογλυκόλη (C₂H₆O₂) αυξάνει τη θερμική αγωγιμότητα του υγρού έως και 40% [43].

Η παρουσία των NPs αυξάνει τον λόγο θερμοηλεκτρικής ισχύος [44]. Αυτό μπορεί να συμβεί με την ενίσχυση του συντελεστή Seebeck ή με την ενίσχυση της αγωγιμότητας.

Επιπλέον, μια ελεγχόμενη προσθήκη NPs σε θερμοηλεκτρικά υλικά μπορεί να συμβάλει στη μείωση της θερμικής αγωγιμότητας και στην αύξηση του συντελεστή Seebeck [45, 46]. Γενικά, ο συντελεστής Seebeck μειώνεται καθώς αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα και αντίστροφα [44]. Σε σύγκριση με δείγματα με τον ίδιο όγκο, τα δείγματα που περιέχουν NPs μπορούν να ενισχύσουν, αλλά και να μειώσουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα, με βάση το μέγεθος, το κλάσμα όγκου των NPs.

Πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι η θερμοχωρητικότητα των νανοσωματιδίων μπορεί να ξεπεράσει αυτή των συγκρίσιμων υλικών όγκου κατά 10% [47]. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές για τα NPs του οξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3) και του διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) [48,49]. Τα νανοσωματίδια παρουσιάζουν συνήθως σημαντικά μειωμένη θερμοκρασία τήξης [50]. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η μέση ενέργεια στην επιφάνεια στερεού/ατμού είναι συχνά υψηλότερη από εκείνη της επιφάνειας υγρού/ατμού [51]. Καθώς το μέγεθος των σωματιδίων μειώνεται, η ελεύθερη ενέργεια στην επιφάνεια των σωματιδίων βελτιώνεται, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του λόγου επιφάνειας προς όγκο και μείωση της θερμοκρασίας τήξης [52-55].

1.5.3 Μαγνητικές ιδιότητες

Τα «μαγνητικά στοιχεία» σε όλες τις μαγνητικές ενώσεις είναι ο σίδηρος (Fe), το κοβάλτιο (Co) ή το νικέλιο (Ni) στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Στα μαγνητικά στοιχεία περιλαμβάνονται ο άργυρος (Ag), ο χρυσός (Au) και το παλλάδιο (Pd). Όλα αυτά αλλάζουν στη νανοκλίμακα. Ορισμένα υλικά παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες ως NPs λόγω της ανομοιομορφής κατανομής των ηλεκτρονίων σε αυτά, όπως για παράδειγμα, το FeAl [60]. Η σύνθεση και η κρυσταλλική δομή των υλικών όγκου είναι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν τα μαγνητικά χαρακτηριστικά τους [61, 62]. Ωστόσο, στη νανοκλίμακα, οι δύο βασικοί παράμετροι, το μέγεθος και το σχήμα, εμπλέκονται έντονα [63].

Ένα από τα βασικά φαινόμενα των NPs είναι ο υπερμαγνητισμός [63]. Η ενέργεια μαγνητικής ανισοτροπίας μειώνεται καθώς μειώνεται το μέγεθος των NPs. Η ενέργεια που διατηρεί τη μαγνητική ροπή σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση είναι γνωστή ως ενέργεια μαγνητικής ανισοτροπίας. Στο μέγεθος των ιδιοτήτων κάθε τύπου NPs, η ενέργεια ανισοτροπίας και η θερμική ενέργεια είναι ισοδύναμες, ενώ οι μαγνητικές ροπές μπορεί να αντιστραφούν τυχαία [64], οπότε τα NPs ορίζονται ως υπερμαγνητικά [65]. Τα υπερμαγνητικά NPs παρουσιάζουν υψηλό μαγνητισμό μόνο σε μαγνητικό πεδίο και δεν διατηρούν τον μαγνητισμό όταν απομακρύνονται [66,67].

1.6 Δυνατότητες Εφαρμογής της Νανοτεχνολογίας στη Ναυτιλία

Η ναυτιλία περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, όπως τη κατασκευή και τη λειτουργία πλοίων και υποβρυχίων, τις υπεράκτιες πλατφόρμες και όλες τις βιομηχανίες που σχετίζονται με τη θάλασσα. Ορισμένες από τις εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στη ναυτιλία είναι τα ηλεκτρόδια συγκόλλησης χαμηλής θερμοκρασίας, τα προηγμένα καύσιμα, οι νανοσύνθετες επικαλύψεις, οι νανοϊνες, οι απορροφητές κραδασμών, οι απορροφητές ακουστικής ενέργειας, τα χρώματα, οι απορροφητές ενέργειας από τη θάλασσα και το ηλιακό φως, τα νανοσωματίδια λίπανσης και η μείωση τριβών.

1.6.1 Ηλεκτρόδια συγκόλλησης χαμηλής θερμοκρασίας

Τα ενισχυμένα με νανοσωματίδια ηλεκτρόδια έχουν πολύ χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας σε σύγκριση με τα υπάρχοντα ηλεκτρόδια συγκόλλησης. Τα ηλεκτρόδια αυτά, τα οποία προκαλούν ελάχιστη παραμόρφωση, επηρεάζουν σημαντικά την τεχνολογία συγκόλλησης, ιδίως τη συγκόλληση αλουμινίου. Οι Sokoluk κ.ά. [70] έδειξαν ότι το κράμα αλουμινίου AA7075-T6 μπορεί να συγκολληθεί με ασφάλεια με τόσο χωρίς θερμές ρωγμές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με τη βοήθεια νανοσωματιδίων [70]. Οι ενώσεις που συγκολλήθηκαν με μέταλλο βάσης το AA7075-T6 και νανοσωματίδια TiC ενίσχυσης παρουσιάζουν εξευγενισμένους σφαιρικούς κόκκους και τροποποιημένες δευτερογενείς φάσεις, εξαλείφοντας την ευαισθησία των υλικών σε θερμές ρωγμές και παρουσιάζοντας εξαιρετική αντοχή σε εφελκυσμό τόσο υπό συνθήκες θερμικής κατεργασίας όσο και μετά τη συγκόλληση.

1.6.2 Καύσιμα

Τα πλοία και τα σκάφη μεταφέρουν συχνά αρκετούς τόνους καυσίμων στη θάλασσα και τα υπερωκεάνια αναγκάζονται μερικές φορές να ανεφοδιάζονται κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους. Η νανοτεχνολογία παρέχει καύσιμα υψηλής ενέργειας, όπως το υδρογόνο. Εκτός από τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, τα πρόσθετα νανοκαύσιμα μειώνουν επίσης τη ρύπανση. Αυτά τα καύσιμα απελευθερώνουν πολλή ενέργεια, οπότε ένα λίτρο αυτού του καυσίμου ισοδυναμεί με δέκα κυβικά μέτρα συγκρίσιμων τυποποιημένων καυσίμων. Δεδομένου ότι τα νανοσωματίδια αυξάνουν τον ρυθμό καύσης και την ομοιομορφία της, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε νέα καύσιμα για να αυξήσουν την απελευθέρωση ενέργειας του καυσίμου. Η νανοτεχνολογία είναι κατάλληλη για την παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων υδρογόνου χωρίς την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα ή τις απαιτήσεις αποθήκευσης υδρογόνου. Τα πρόσθετα καυσίμου προστίθενται στο καύσιμο για να μειώσουν τις εκπομπές σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (PM) και να μεταβάλουν την παραγωγή οξειδίου του αζώτου (NOx), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και υδρογονάνθρακων (HC). Η χρήση ορισμένων από αυτά τα πρόσθετα έχει μειώσει την ποσότητα των σωματιδιακών ρύπων κατά 15 έως 20%. Έρευνες έχουν δείξει ότι όταν το καύσιμο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με καταλύτη DPF (φίλτρο σωματιδίων πετρελαίου), οι εκπομπές μπορούν να μειωθούν σχεδόν κατά 99%. Ορισμένα πρόσθετα μειώνουν τους πυρηνικούς υδρογονάνθρακες έως και 80%. Τα πρόσθετα νανοκαύσιμα μπορούν να κυμαίνονται από 10 ppm (δέκα σωματίδια ανά εκατομμύριο) έως 100 ppm στο καύσιμο. Επιπλέον, προκαλούν σημαντική μείωση της

θερμοκρασίας καύσης του καπνού. Ακόμη, πρόσθετα νανοκαύσιμα προστίθενται στο καύσιμο ντίζελ για τη μείωση της θερμοκρασίας ανάφλεξης της εξόδου της αιθάλης ονομάζονται καταλύτες FDC (Καταλύτες Ferroelectric DeNOx). Τα πρόσθετα αυτά χρησιμοποιούνται με ενεργούς και ανενεργούς καταλύτες. Ένα από τα πρόσθετα καυσίμου είναι τα νανοσωματίδια με βάση την πλατίνα που χρησιμοποιούνται πάντα με ένα άλλο μέταλλο. Αυτό το πρόσθετο παράγεται επίσης σε νανοκλίμακα. Αυτά τα νανοσωματίδια έχουν μειώσει τους ρύπους κατά 25%, τους υδρογονάνθρακες κατά 35% και το μονοξείδιο του άνθρακα κατά 25%. Αυτά τα πρόσθετα νανοκαύσιμα έχουν επίσης μειώσει την κατανάλωση καυσίμου κατά περίπου 5 έως 7%.

1.6.3 Χρώματα και Ναυτιλία

Επειδή τα πλοία ταξιδεύουν στη θάλασσα, τα φύκια και τα αιωρούμενα σωματίδια προσκολλώνται πάνω τους, κάνοντάς τα να κινούνται πιο αργά. Η ακραία διάβρωση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, ιδίως στις υφάλμυρες θάλασσες, και η προσκόλληση βρύων και φυκιών στα κύπη αποτελούν σημαντικά προβλήματα στη συντήρηση των υπεράκτιων πλατφορμών και των πλοίων. Οι ειδικές συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος απαιτούν, κατά μέσο όρο, το βάψιμο των σκαφών και των πλοίων να πραγματοποιείται μία φορά κάθε τρία χρόνια. Μία από τις συνήθεις μεθόδους καθαρισμού του κύτους είναι η μεταφορά του πλοίου σε δεξαμενή ξηρής λείανσης, η οποία έχει υψηλό κόστος, παρατεταμένο χρόνο διακοπής λειτουργίας και άλλα πρόσθετα έξοδα. Η επίλυση αυτού του ζητήματος οδηγεί σε αύξηση της μεταφορικής ικανότητας και της διάρκειας ζωής της κατασκευής. Η συντήρηση θα βελτιωθεί επίσης. Η νανοτεχνολογία επιτρέπει νέα χρώματα που είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στη διάβρωση και σε άλλες επιβλαβείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιπλέον, η χρήση της νανοτεχνολογίας στη βιομηχανία χρωμάτων αποτρέπει την προσκόλληση των φυκιών στο κύτος και παρατείνει τη διάρκεια ζωής των πλοίων (Εικόνα 1.4). Ένα αντιρρυπαντικό υλικό που εφευρέθηκε από μια ιρανική εταιρεία [71] αποτρέπει την ανεπιθύμητη συσσώρευση βρύων στην υγρή επιφάνεια του κύτους των πλοίων. Η επίστρωση είναι επίσης φιλική προς το περιβάλλον, δεν απελευθερώνει χημικές ουσίες στη θάλασσα και μειώνει τη χρήση βιοκτόνων. Εκτός από τα κύπη των πλοίων, η νανοεπίστρωση θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε παράκτιες κατασκευές και προβλήτες, καθώς και σε στρατιωτικά υποβρύχια.



Εικόνα 1.4: Ανάπτυξη ειδικής επίστρωσης με νανοτεχνολογία που εμποδίζει την ανάπτυξη θαλάσσιων οργανισμών, όπως τα βρύα, στο εξωτερικό στρώμα του κύτους των πλοίων από μια ιρανική εταιρεία που βασίζεται στην τεχνογνωσία [71].

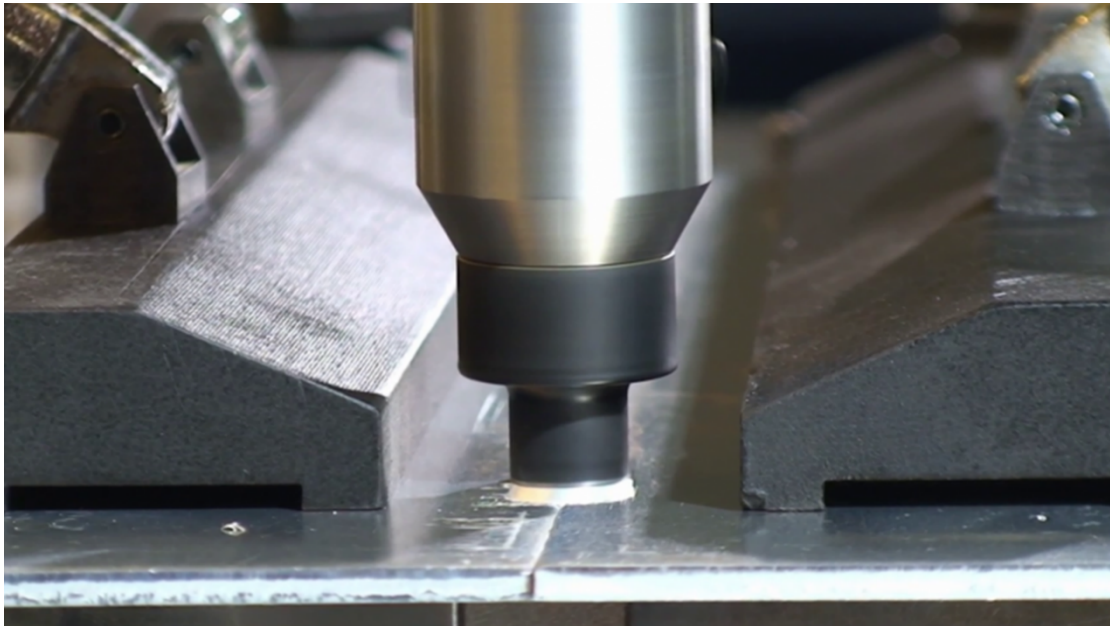
1.6.4 Απορροφητές Ενέργειας Θαλάσσιων Κυμάτων Και Ηλιακού Φωτός

Η νανοτεχνολογία εισάγει μια νέα γενιά υλικών, τα οποία απορροφούν τα θαλάσσια κύματα και το ηλιακό φως και λειτουργούν ως πηγή ενέργειας. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των υλικών είναι ότι μπορούν να προσαρτηθούν σε ένα σώμα και να αποτρέψουν το κύτος του πλοίου από τις δυσμενείς επιπτώσεις της παρατεταμένης παραμονής του στο θαλασσινό νερό. Υπάρχουν επίσης περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση αυτών των πηγών ενέργειας. (Εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Διάβρωση σώματος πλοίου [72]

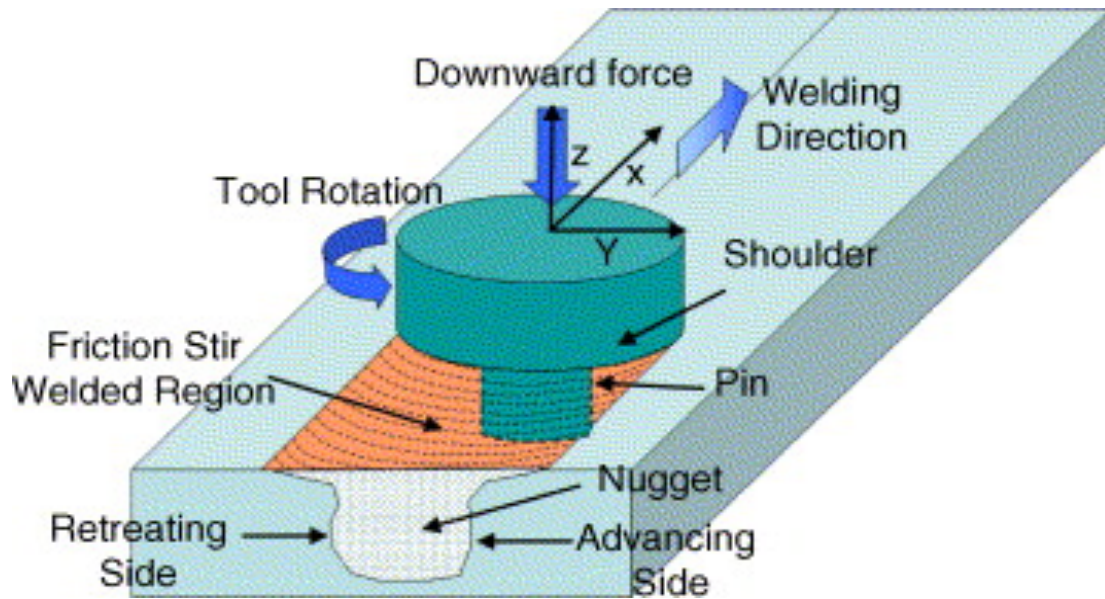
2. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (Friction Stir Welding – FSW)



Εικόνα 2.1: Προσαρμοσμένη εργαλειομηχανή FSW εγκατεστημένη στο University of Stuttgart [73]

2.1 Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση – Γενικά

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction stir welding - FSW) εφευρέθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο, στο Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute TWI) το 1991. Έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, η ναυτιλία, οι σιδηροδρομικές και οι αεροδιαστημικές βιομηχανίες. Στη τεχνική της FSW συναντάμε πλήθος πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές συγκόλλησης. Οι συγκολλήσεις με FSW διαθέτουν αρκετά υψηλή αντοχή, περίπου ίση με την αντοχή του αρχικού υλικού. Με την εφαρμογή αυτής της τεχνικής είναι δυνατή η σημαντική μείωση του βάρους. Η FSW πραγματοποιείται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από το σημείο τήξης του βασικού μετάλλου. Έτσι, μπορούν να αποφευχθούν όλες οι ανωμαλίες που σχετίζονται με την επαναστερεοποίηση του συγκολλημένου υλικού, όπως το πορώδες, η ευθραυστότητα και η δημιουργία ρωγμών. Καθώς η διαδικασία FSW πραγματοποιείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, δεν υφίσταται μεγάλη παραμόρφωση και παραμένουσες τάσεις. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή παρέχει εξαιρετική σταθερότητα διαστάσεων. Το υλικό πλήρωσης και το προστατευτικό αέριο δεν απαιτούνται για την FSW, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνικές συγκόλλησης τήξης. Πρόκειται για μια ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, λόγω αυτών των ιδιοτήτων καθώς και των πλεονεκτημάτων της έναντι των παραδοσιακών τεχνικών συγκόλλησης τήξης [75].



Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση [74]

2.2 Βασικές αρχές της FSW

Κατά τη FSW, χρησιμοποιείται ένα μη καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο συγκόλλησης, το οποίο φέρει έναν πείρο συγκεκριμένης γεωμετρίας και ένα φαρδύτερο κυλινδρικό περιαιχένιο, το οποίο αφήνεται να περιστραφεί με ορισμένη ταχύτητα. Το εργαλείο βυθίζεται μεταξύ δύο υλικών τεμαχίου (σε μορφή φύλλου ή πλάκας) και λόγω της θερμότητας τριβής εμφανίζεται «τοπική πλαστική παραμόρφωση» στο τμήμα της συγκόλλησης. Ως αποτέλεσμα, το εργαλείο αναδύει την περιοχή μεταξύ των προς συγκόλληση υλικών προς την κατεύθυνση της συγκόλλησης. Η χρονική περίοδος για την οποία το εργαλείο περιστρέφεται σε ένα μόνο σημείο κατά τη διαδικασία βύθισης του εργαλείου, μέχρι να εμφανιστεί η επαφή μεταξύ του ώμου και της επιφάνειας εργασίας, αναφέρεται ως «περίοδος παραμονής». Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, υφίστανται πλευρικές δυνάμεις οι οποίες υπάρχουν κάθετα προς τη διεύθυνση συγκόλλησης.

Κατά τη διάρκεια της ανάδευσης, ο ώμος ανυψώνει το υλικό στην άνω επιφάνεια της συγκόλλησης από την «πλευρά προώθησης» στην «πλευρά υποχώρησης». Κατά την παράλληλη κατεύθυνση, ασκούνται δυνάμεις γνωστές ως «εγκάρσιες δυνάμεις» πλευρικά κατά μήκος της διεύθυνσης της συγκόλλησης κατά τη διάρκεια της εγκάρσιας κίνησης. Το εργαλείο εξάγεται από το υλικό μόλις ολοκληρωθεί η εγκάρσια κίνησή του και φτάσει στο τελικό του σημείο. Για να αποφευχθεί ο διαχωρισμός των παρακείμενων συνδεδεμένων επιφανειών των τεμαχίων καθ' όλη τη διάρκεια της πορείας της FSW, τα τεμάχια πρέπει να είναι σταθερά στερεωμένα.[76].

2.3 Πιθανά Ελαττώματα στις συγκολλήσεις FSW

Τα ακόλουθα προβλήματα μπορεί να προκύψουν κατά τις συγκολλήσεις FSW:

1) Ελλιπής θερμότητα

- **Ελάττωμα τύπου «Συριγγίου» (tunnel):**
Δημιουργείται σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής και υψηλούς ρυθμούς συγκόλλησης και προκαλείται από την ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας σε όλο το πάχος. Πρέπει να ελέγχεται με ακτίνες X ή με καταστροφικές δοκιμές, επειδή είναι αόρατη με γυμνό μάτι.
- **Ελάττωμα τύπου «kissing bond» :**
Πρόκειται για ένα ελάττωμα στερεάς κατάστασης που προκαλείται από την ανεπαρκή ανάδευση του υλικού, η οποία οδηγεί σε ανεπαρκή πλαστική παραμόρφωση.
- **Έλλειψη πλήρωσης (lack of fill):**
Είναι μια επιφανειακή ατέλεια που προκαλείται από ανεπαρκή δύναμη βύθισης.
- **Ελαττώματα σε σχήμα αυλακώσεων/ραβδώσεων (Groove/Channel like defect):**
Προκαλούνται από ανεπαρκή παραγωγή θερμότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης, η οποία είναι αποτέλεσμα λανθασμένης επιλογής παραμέτρων, με τη γεωμετρία του εργαλείου να έχει τη μεγαλύτερη επιρροή.

2) Υπερβολική θέρμανση

- **Ελάττωμα τύπου «flash» ή γρέζι:**
Αυτό οφείλεται στην τεράστια παροχή θερμότητας και την εξαιρετικά βαθιά διείσδυση.
- **Κατάρρευση πυρήνα συγκόλλησης (nugget collapse):**
Κάτω από το όριο του εργαλείου, το πάχος της συγκόλλησης μειώνεται αισθητά.
- **Ρηγματώσεις (Cracks):**
Η συνήθης εμφάνισή τους είναι σε συγκολλήσεις FSW διαφόρων υλικών λόγω των διαφορετικών θερμοκρασιών τήξης τους.

3) Σχεδιαστικά σφάλματα

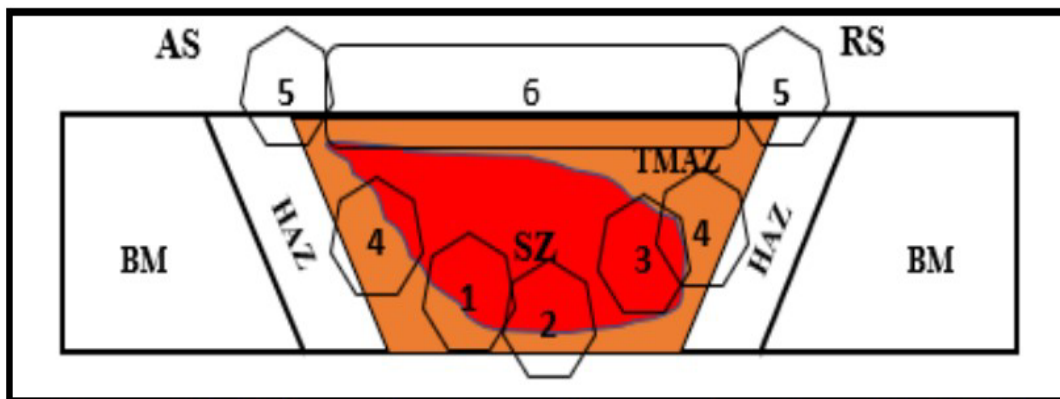
- **Ελαττώματα λόγω ελλιπούς διείσδυσης (lack of penetration):**
Το φαινόμενο της έλλειψης διείσδυσης του υλικού παρατηρείται κατά τη συγκόλληση όταν η επιφάνεια των δοκιμίων δεν συγκολλάται πλήρως μέχρι τον πυρήνα. Αυτό, με τη σειρά του, προκαλεί ανώμαλη ανάδευση του υλικού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκε λανθασμένο μήκος πείρου, με αποτέλεσμα να μην είναι αποτελεσματική η διαδικασία ομογενοποίησης.
- **Παγίδευση οξειδίου (oxide entrapment):**

Αυτό είναι ένα πρόβλημα που το συναντάμε σε μέταλλα όπως το αλουμίνιο που έχουν ισχυρή έλξη για το οξυγόνο.

- **Υπερβολική διείσδυση (excessive indentation):**

Δημιουργείται ως αποτέλεσμα της βαθύτερης βύθισης, η οποία προκαλεί περαιτέρω απώλεια υλικού από τη ζώνη συγκόλλησης. [77]

Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζονται οι θέσεις των περισσότερων κοινών ελαττωμάτων της FSW.



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση ενός δοκιμίου συγκόλλησης που παράγεται με τη διαδικασία FSW και οι θέσεις των κοινών ελαττωμάτων του υποδεικνύονται με αριθμούς όπως ακολουθούν: (1) Πόροι, κενά και σήραγγα. (2) Έλλειψη διείσδυσης (3) Kissing bond. (4) Hooking. (5) Flash. (6) Επιφανειακά ελαττώματα, όπως αυλακώσεις, και ρωγμές [78].

2.4 Μέθοδοι Ανίχνευσης Ελαττωμάτων

Η συγκόλληση FSW είναι μια διαδικασία που είναι απαραίτητη για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ιδιότητες αντοχής και διασφάλισης της ποιότητας της διαδικασίας. Όπως έχουν επισημάνει πολυάριθμες προηγούμενες έρευνες, διάφοροι τύποι ελαττωμάτων μπορούν να εμφανιστούν μετά τη διαδικασία FSW. Ως εκ τούτου, η επιθεώρηση των συγκολλήσεων είναι ζωτικής σημασίας για την εγγύηση και τη διαχείριση της ποιότητας της παραγόμενης συγκόλλησης. Αυτό μας οδηγεί σε δύο τύπους μεθόδων αξιολόγησης ή ανίχνευσης που μπορούν να εφαρμοστούν για τον έλεγχο της παραγόμενης συγκόλλησης, την καταστροφική αξιολόγηση (DE) και τη μη καταστροφική αξιολόγηση (NDE). Ενώ η DE, που περιλαμβάνει εφελκυσμό, διάτμηση, μικροδομή και αντοχή στη κάμψη, συχνά δεν είναι προτιμητέα για τον έλεγχο της ποιότητας λόγω του κόστους της σε όρους απώλειας υλικού και σπατάλης χρόνου και προσπάθειας, οι μέθοδοι NDE, όπως η οπτική, τα μαγνητικά σωματίδια, οι υπέρηχοι και οι ακτίνες Χ κυριαρχούν στις βιομηχανικές εφαρμογές [79, 80]. Ορισμένα ελαττώματα είναι περίπλοκο να εντοπιστούν με τις συμβατικές μεθόδους NDE λόγω του μεγέθους, της θέσης και του προσανατολισμού του ελαττώματος [81,82,83]. Μικρά ελαττώματα όπως η συγκόλληση, οι μικρορωγμές, η hooking και η έλλειψη διείδυσης είναι περίπλοκο να ανιχνευθούν με οποιαδήποτε μέθοδο NDE [82,84]. Στον Πίνακα 2.2, συγκεντρώνονται οι συμβατικές μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου και η ικανότητά τους να ανιχνεύουν τα ελαττώματα όπου οι μικρορωγμές, η έλλειψη διείδυσης, η kissing bond και η αγκίστρωση (hooking).

Πίνακας 2.2: Παρουσίαση ορισμένων συμβατικών μεθόδων NDE και της ικανότητάς τους να ανιχνεύουν ελαττώματα FSW [78]

	Τύποι ελαττωμάτων	Οπτική	Διειδυτικό χρωστικής	Μαγνητικά σωματίδια	Υπέρηχοι	Ανοξειδωτο	Ακτίνες Χ
1	Μικρορωγμές	0	0	1	1	1	1
2	Πόροι	0	0	1	2	1	2
3	Κενά & Σήραγγα	0	0	1	2	1	2
4	Θραύσματα	0	0	0	2	1	2
5	έλλειψη διείδυσης	1	1	1	1	1	1
6	Kissing bond	0	0	0	1	1	1
7	Hooking	0	0	0	1	1	1
8	Επιφανειακά ελαττώματα	2	2	2	2	2	1
9	Flash	2	2	2	1	2	2

(0) Δεν ισχύει (1) Κακή & εξαρτάται από την τοποθεσία και το μέγεθος (2) αποτελεσματική

2.5 Πλεονεκτήματα της FSW

1. Η FSW εξαλείφει τα σφάλματα στερεοποίησης, καθώς η τεχνική δεν απαιτεί τήξη και εκ νέου στερεοποίηση.
2. Η φθορά του εργαλείου είναι σχεδόν αμελητέα για υλικά χαμηλής πυκνότητας, με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος εργαλείων.

3. Περίπου το 2,5 τοις εκατό της ενέργειας που χρησιμοποιείται στη συγκόλληση με λέιζερ/ηλεκτρονική δέσμη χρησιμοποιείται στην ενεργειακά αποδοτική διαδικασία FSW.

4. Η δυναμική ανακρυστάλλωση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία λεπτών (ριζωμένων) κόκκων, που οδηγούν σε υψηλότερες μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες στη συγκόλληση. Με την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων της διεργασίας εισόδου, η FSW μπορεί να οδηγήσει σε απόδοση συγκόλλησης 70-90%.

5. Δεν απαιτούνται προστατευτικά αέρια.

6. Ανόμοια μέταλλα μπορούν να συγκολληθούν με επιτυχία, όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο και το μαγνήσιο.

2.6 Μειονεκτήματα της FSW

1. Στο τέλος της διεργασίας συγκόλλησης δημιουργείται μια οπή.

2. Το εργαλείο FSW εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες και ακραίες καταπονήσεις. Όταν πρόκειται για υλικά με υψηλή αντοχή, όπως ο χάλυβας και τα κράματα τιτανίου, αυτό προκαλεί φθορά του εργαλείου και απώλεια αντοχής, γεγονός που μειώνει την απόδοση του εργαλείου.

3. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βύθισης δημιουργείται πολύ μεγάλη δύναμη αντίδρασης και ως εκ τούτου απαιτείται υψηλή ακαμψία [76].

2.7 Εφαρμογή FSW στη Ναυπηγική Βιομηχανία

Η FSW χρησιμοποιείται σε πολλούς σύγχρονους βιομηχανικούς τομείς λόγω των αξιοσημείωτων πλεονεκτημάτων της. Στις βιομηχανίες αυτές περιλαμβάνονται η ναυπηγική, η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, οι σιδηροδρομικές και χερσαίες μεταφορές και ο στρατιωτικός τομέας. Η κύρια χρήση αυτής της τεχνικής είναι η συγκόλληση ανόμοιων υλικών.

Στη ναυπηγική βιομηχανία η συγκόλληση FSW χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τη συγκόλληση αλουμινίου της σειράς 6XXX στους καταψύκτες των αλιευτικών σκαφών, στη συνέχεια η FSW βρίσκει εφαρμογή στην κατασκευή ταχύπλων σκαφών, δεξαμενόπλοιων πετρελαίου, χόβερκραφτ και κρουαζιερόπλοιων, κυρίως για τη συγκόλληση πλακών αλουμινίου. Επιπλέον, η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στην κατασκευή ταχύπλων σκαφών για την ενσωμάτωση τμημάτων κύτους και καταστρώματος, καθώς και σε πολυάριθμα κρουαζιερόπλοια με υπερκατασκευές από αλουμίνιο. Ακόμη, η FSW χρησιμοποιείται στην κατασκευή πολεμικών πλοίων, όπου οι πλάκες συγκολλούνται με αυτή τη μέθοδο. Ακολουθούν βασικές περιπτώσεις χρήσης της FSW σε πλοία:

- ΗΠΑ: FSF-1

Η ναυπηγική βιομηχανία χρησιμοποιεί τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση για την παραγωγή πάνελ αλουμινίου. Οι πλάκες αντιστέκονται στη διάβρωση και είναι ελαφριές. Λόγω των ενισχύσεων που υπάρχουν ήδη, έχουν εξαιρετική αναλογία βάρους/αντοχής. Οι τελικές μονάδες που κατασκευάζονται σε ένα ναυπηγείο μπορούν να ανυψωθούν με γερανό στο πλοίο [84,85,86].



Εικόνα 2.4: Συγκολλημένα με τριβή πάνελ αλουμινίου στο X-Craft στο Nicols Bros. Boat Builders στο Freeland της Ουάσινγκτον. [84]

- ΗΠΑ: LCS-1

Η συγκόλληση δια τριβής χρησιμοποιήθηκε για την ένωση του καταστρώματος και της υπερκατασκευής αλουμινίου του «USS Freedom (LCS-1)». Λόγω του γωνιώδους σχήματος, τα συστήματα ραντάρ δυσκολεύονται να την εντοπίσουν [105]. Το πλοίο διαθέτει χαλύβδινο κύτος με ενιαίο κύλινδρο. Κατασκευάστηκε στο Marinette του Ουισκόνσιν από την εταιρεία Lockheed Martin LCS (Lockheed Martin, Gibbs & Cox, Marinette Marine, Bollinger Shipyards) [87].



Εικόνα 2.5: FSW κατάστρωμα του 'USS Freedom' [84]

- Νέα Ζηλανδία

Τέσσερα πολεμικά σκάφη που χρησιμοποιούνται για παράκτιες πολεμικές επιχειρήσεις του Βασιλικού Ναυτικού της Νέας Ζηλανδίας (RNZN) κατασκευάστηκαν στο Whangarei από την BAE Systems Australia (πρώην Tenix Shipbuilding). Ο σχεδιασμός τους βασίζεται σε ένα τροποποιημένο σκάφος έρευνας και διάσωσης για την Ακτοφυλακή των Φιλιππίνων, με διαφορετικό σχεδιασμό υπερκατασκευής από FSW πάνελ αλουμινίου, τα οποία κατασκευάστηκαν από την Donovan Group ως την πρώτη εταιρεία με έδρα τη Νέα Ζηλανδία που χρησιμοποίησε την τεχνική αυτή, γεγονός που της εξασφάλισε τη σύμβαση για το συγκεκριμένο τμήμα της κατασκευής του σκάφους. Και τα τέσσερα πλοία πήραν τα ονόματά τους από τις λίμνες της Νέας Ζηλανδίας, γι' αυτό και είναι γνωστά ως Lake-class, Rotoiti-class ή Protector-class [88,89,90].



Εικόνα 2.6: Δύναμη Άμυνας της Νέας Ζηλανδίας [84]

3. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΜΕ ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

3.1. Κεραμικά Νανοσωματίδια

Λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων της σε απλές δομές, η νανοκεραμική ενίσχυση χρησιμοποιείται ευρέως στις διάφορες διαδικασίες για την κατασκευή σύνθετων υλικών. Ορισμένα πλεονεκτήματα αυτών των νανοενισχυμένων σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε κόπωση, σκληρότητα), υψηλή θερμική σταθερότητα και βελτιωμένες χημικές ιδιότητες [91]. Ο ρόλος των κεραμικών νανοσωματιδίων στην FSW είναι η ενίσχυση των ιδιοτήτων της συγκόλλησης. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο κεραμικό νανοσωματίδιο είναι το καρβίδιο του πυριτίου (SiC). Η αντοχή στην οξείδωση, η υψηλή σκληρότητα, το υψηλό σημείο τήξης και η εξαιρετική αντοχή στη φθορά, είναι τα βασικότερα χαρακτηριστικά του καρβιδίου του πυριτίου. Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει στην θερμική σταθερότητα που διαθέτει το SiC λόγω της μικρής διαστολής σε θερμική ενέργεια. Για το λόγο αυτό, ένα υλικό ενισχυμένο με SiC έχει μικρότερες πιθανότητες να παρουσιάσει ρηγμάτωση [92,94].

Στο πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των κεραμικών σωματιδίων.

Κεραμικά Νανοσωματίδια	Σημείο Τήξης	Πυκνότητα	Μέτρο ελαστικότητας	Συντελεστής θερμικής διαστολής
TiB	2200	4,50	425-480	8,60
TiC	3160	4,99	440	6,52-7,15
TiN	3290	3,97	420	8,30
SiC	2697	3,19	430	4,63
TiB_2	2980	4,52	500	4,60-8,10
B_4C	2447	2,51	445	4,78

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες κεραμικών σωματιδίων [93]

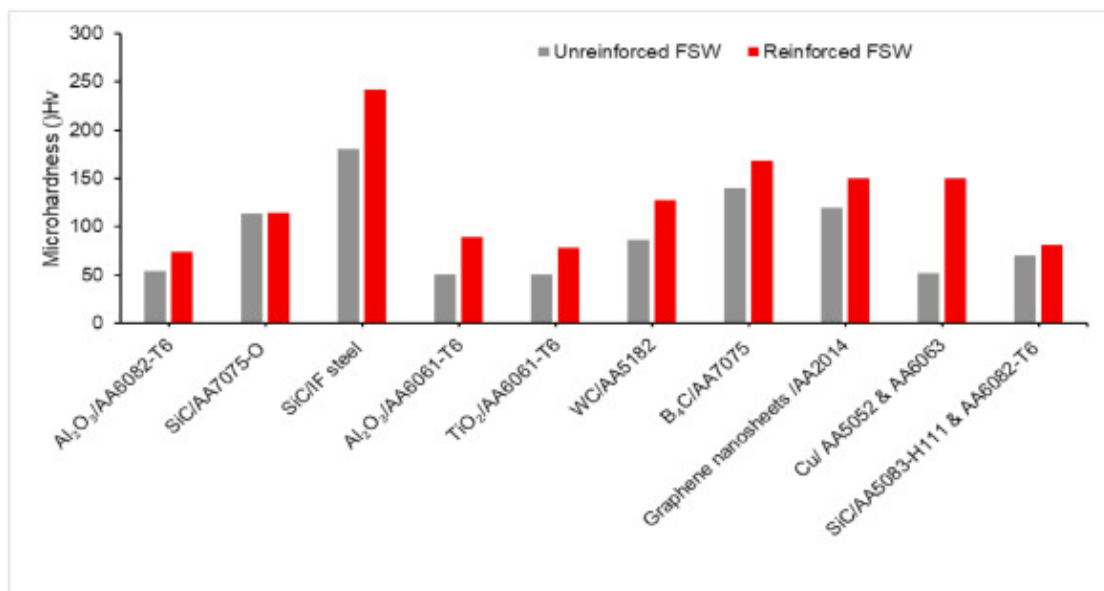
3.2 Μηχανικές ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες των ενισχυμένων, με κεραμικά νάνοσωματίδια, δοκιμίων FSW καθορίζονται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της αλληλεπίδρασης των μετάλλων βάσης και των νανοσωματιδίων μεταξύ τους υπό διάφορες παραμέτρους διεργασίας και το μέγεθος των κόκκων. Σύμφωνα με το νόμο Hall-Petch, η μείωση του μεγέθους των κόκκων οδηγεί στην ενίσχυση της αντοχής σε εφελκυσμό σ_y , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση [96].

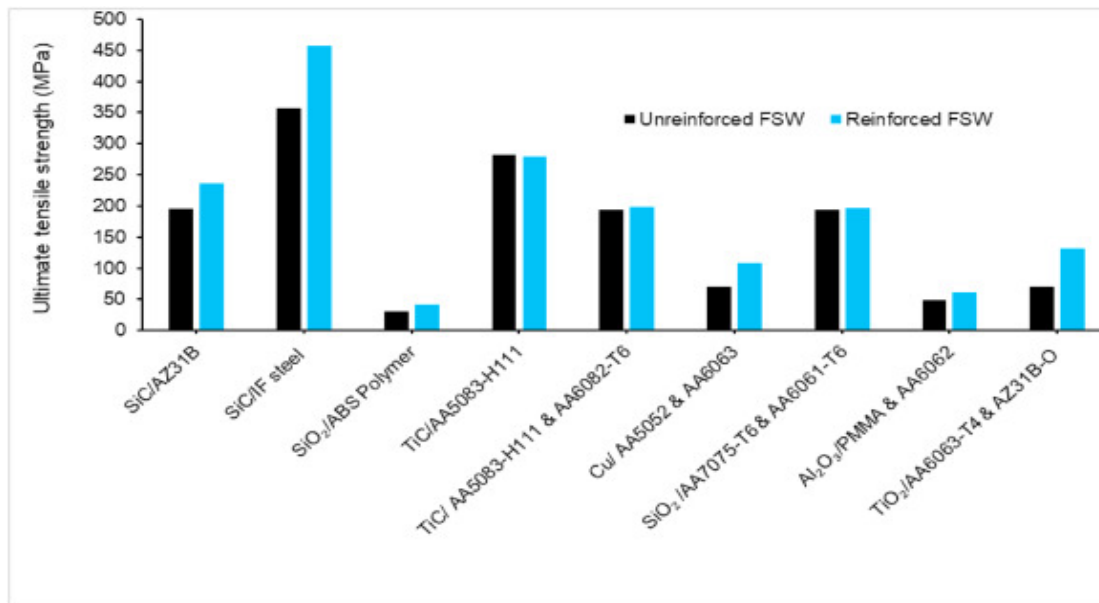
$$\sigma_y = \sigma_0 + Kyd^{-1/2}$$

όπου (σ_0) είναι η αρχική αντοχή του υλικού, (Ky) είναι η σταθερά του υλικού και (d) είναι το μέγεθος των κόκκων του υλικού. Στην χωρίς νανοσωματίδια ενίσχυσης συγκόλληση FSW, η βελτίωση της μικροδομής λόγω δυναμικής ανακρυστάλλωσης είναι υπεύθυνη για τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων. Ωστόσο, στην

περίπτωση ενίσχυσης με νανοσωματίδια, λαμβάνονται επίσης υπόψη πρόσθετοι παράμετροι όπως, η διασπορά των σωματιδίων λόγω αναντιστοιχίας του συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ των σωματιδίων ενίσχυσης και της μήτρας (ενίσχυση Orowan) [97,98]. Η ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η αντοχή σε εφελκυσμό, η σκληρότητα, η ανθεκτικότητα και η αντοχή σε κόπωση, είναι ένας από τους στόχους της εισαγωγής νανοσωματιδίων κατά τη διάρκεια της FSW. Έχει αποδειχθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται ως ενίσχυση κατά τη συγκόλληση, τα νανοσωματίδια μπορούν να ικανοποιήσουν αυτές τις ανάγκες. Η Εικόνα 3.1 παρουσιάζει την αύξηση της μικροσκληρότητας της ενισχυμένης, με νανοσωματίδια, ζώνης πυρήνα (nugget) που συγκολλήθηκε με FSW. Η ενίσχυση της μικροδομής και η προσθήκη των ενισχυτικών σωματιδίων ευθύνονται για αυτή την αύξηση της μικροσκληρότητας. Η Εικόνα 3.2 δείχνει την αύξηση της αντοχής της συγκόλλησης ενισχυμένης με νανοσωματίδια σε σχέση με την χωρίς νανοσωματίδια συγκόλληση.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα μικροσκληρότητας συγκολλήσεων με διαφορετικά νανοσωματίδια ενίσχυσης και μέταλλο βάσης [102]



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα της αντοχής σε εφελκυσμό συγκολλήσεων με διαφορετικά νανοσωματίδια ενίσχυσης και μέταλλο βάσης [100,102,103]

3.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΟΜΟΓΕΝΟΥΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΟΥ AA5083-H111 ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ SiC

Οι Karakizis et al. [95] μελέτησαν την επίδραση της ενίσχυσης με νανοσωματίδια SiC συγκόλλησης FSW του μετάλλου βάσης AA5083-H111. Με βάση προηγούμενες μελέτες και τη βιβλιογραφία [99], οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι απαιτούνται περισσότερα τους ενός περάσματα (πάσα) συγκόλλησης, για να επιτευχθεί ομοιογενής διασπορά των σωματιδίων καρβιδίου του πυριτίου στον πυρήνα της συγκόλλησης. Επιλέχθηκαν νέες παράμετροι με περισσότερα «πάσα» συγκόλλησης, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Για να μειωθεί ο αριθμός πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι, καθορισμένες με τη μέθοδο Taguchi. Οι όροι «βέλτιστη συγκόλληση» και «βέλτιστες συνθήκες» αφορούν τις δυνατότητες της υπάρχουσας μηχανής συγκόλλησης, δηλαδή της τροποποιημένης κάθετης φρεζομηχανής FU-32 (Universal Milling Machine ,UMC CUGIR) του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πείραμα	Ταχύτητα περιστροφής - ω (RPM)	Ταχύτητα πρόωσης - ν (mm/min)	Κλίση εργαλείου (ο)	Λόγος ταχυτήτων συγκόλλησης (ν/ω) (mm/min*RPM)	Αριθμός πάσων *
N_0 1	750	85	3	0,113	2 (+-)
N_0 2	1180	85	3	0,072	3 (+++)
N_0 3	1500	85	3	0,056	3 (+-)
N_0 4	1500	19	3	0,013	3 (+-)

Πίνακας 3.2: Οι παράμετροι της FSW του AA5083-H111 με ενίσχυση SiC.

* Το σύμβολο (+) σημαίνει ότι κατά το πάσο τα διανύσματα των ταχυτήτων περιστροφής και πρόωσης ήταν ομόρροπα ενώ το σύμβολο (-) σημαίνει ότι τα εν λόγω διανύσματα ήταν αντίρροπα.

3.3.1 Μελέτη στο οπτικό στερεοσκόπιο

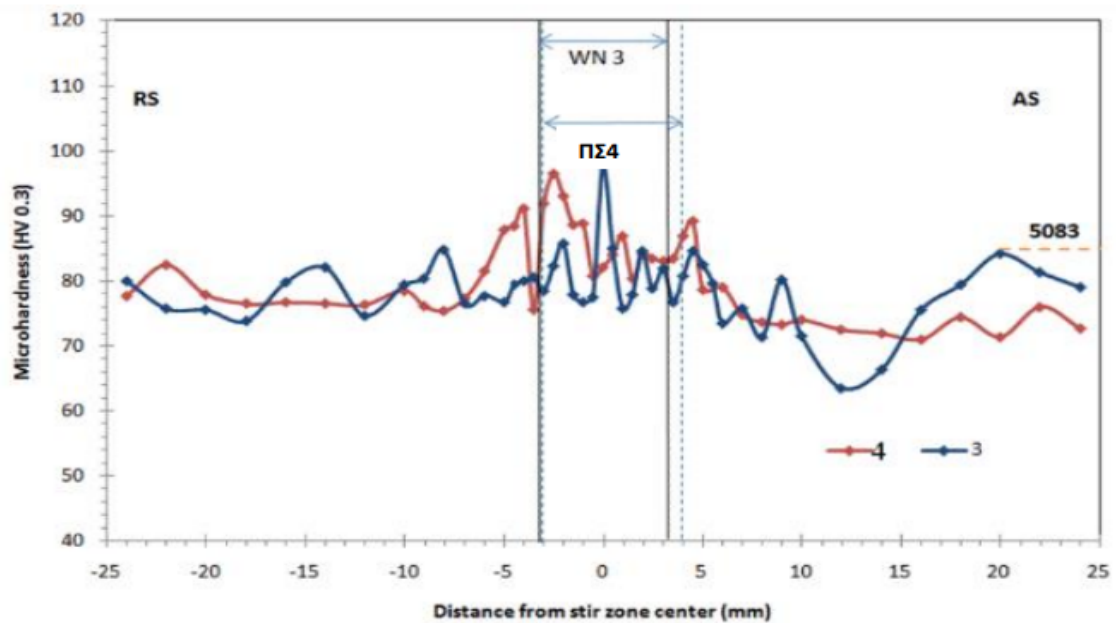
Για τη μελέτη στο οπτικό στερεοσκόπιο πραγματοποιήθηκε πλήθος εγκάρσιων τομών σε κάθε συγκόλληση. Επιπλέον, με βάση την Εικόνα 3.3, στην οποία παρουσιάζονται οι πιο χαρακτηριστικές μακρογραφίες κάθε περίπτωσης, παρατηρούνται τα ακόλουθα:

1. Υπάρχει μεγάλη συσσωμάτωση κοντά στην άκρη του πυρήνα συγκόλλησης, όσον αφορά τη συγκόλληση $N_0 1$.
2. Λόγω του μικρότερου λόγου ταχυτήτων συγκόλλησης, οι συγκολλήσεις $N_0 2$ και $N_0 3$ παρουσιάζουν καλύτερη διασπορά των σωματιδίων, ενώ εξακολουθεί να υπάρχει κάποια συσσωμάτωση.
3. Ο συγκόλληση $N_0 4$ παρουσιάζει ομοιόμορφη διασπορά νανοσωματιδίων και ομοιογενή πυρήνα.



Εικόνα 3.3: Εικόνες οπτικού στερεοσκοπίου των πειραμάτων FSW του AA5083-H111 με ενίσχυση SiC [95]

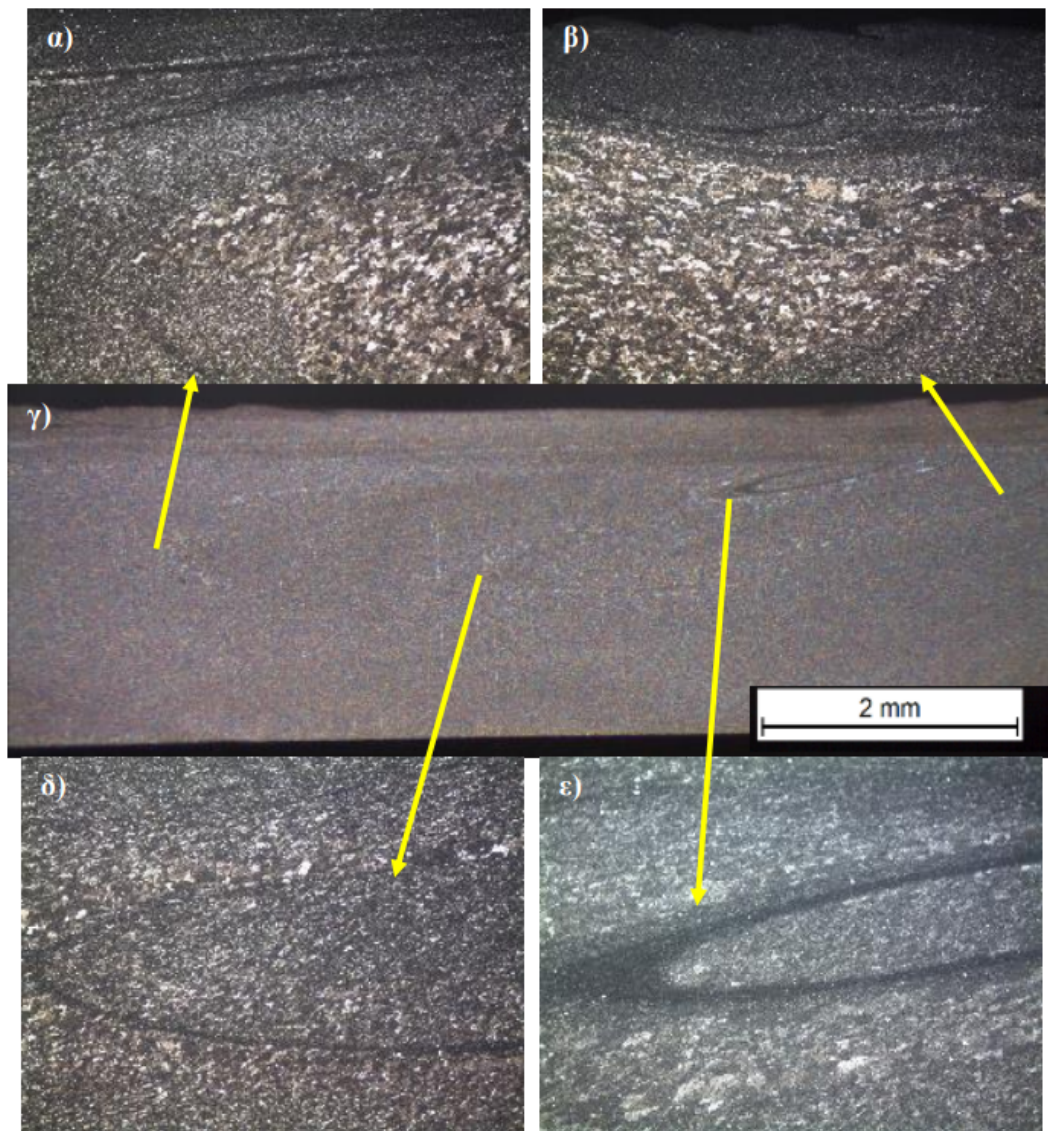
Αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν πρόσθετες μετρήσεις της διαμήκου μικροσκληρότητας των συγκολλήσεων $N_0 3$ και $N_0 4$, σε απόσταση 1 mm κάτω από την επιφάνεια του περιαιχενίου του εργαλείου, προκειμένου να προσδιοριστεί το βέλτιστο δείγμα, καθώς δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστεί με βεβαιότητα μόνο από τις εικόνες του οπτικού στερεοσκοπίου. Οι μετρήσεις απεικονίζονται στην Εικόνα 3.4, όπου η συγκόλληση $N_0 4$ απεικονίζεται με την κόκκινη γραμμή και η συγκόλληση $N_0 3$ με την μπλε γραμμή. Είναι σαφές και με βάση τα ευρήματα του στερεοσκοπίου ότι η συγκόλληση $N_0 4$ έχει γενικά μεγαλύτερη και πιο ομοιόμορφη κατανομή μικροσκληρότητας.



Εικόνα 3.4: Συγκριτικό διάγραμμα των οριζοντίων κατανομών μικροσκληρότητας των πειραμάτων No 3 και No 4 [95]

3.3.2 Οπτική μικροσκοπία

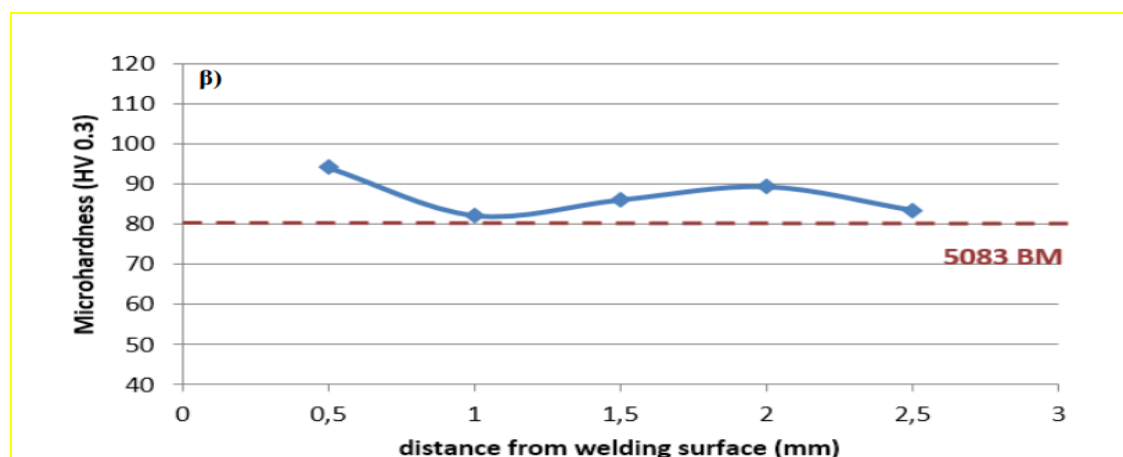
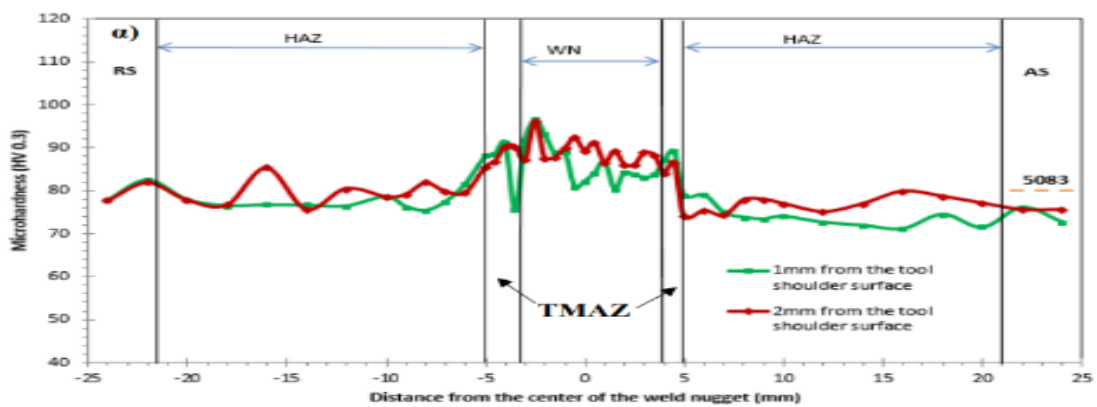
Μετά τον προσδιορισμό της βέλτιστης συγκόλλησης ενισχυμένης με SiC, η συγκόλληση εξετάστηκε με οπτικό μικροσκόπιο. Επαληθεύτηκε ότι δεν υπήρχαν συσσωματώματα και ότι τα σωματίδια SiC ήταν καλά αναμεμειγμένα. Ειδικότερα, παρατηρήθηκαν πιο σκουρόχρωμες περιοχές, πιθανώς πλούσιες σε νανοσωματίδια SiC. Οι κόκκοι στον πυρήνα της συγκόλλησης ήταν μικροί και ομοαξονικοί, ενώ, στην θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη (TMAZ), ήταν επιμήκεις και είχαν αποκτήσει συγκεκριμένο προσανατολισμό. Σε αυτό το σημείο έγιναν επίσης μετρήσεις του μεγέθους των ανακρυσταλλωμένων κόκκων εντός αυτού του πυρήνα. (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Οπτικές μικρογραφίες της FSW του AA5083-H111 με ενίσχυση SiC, α, β) το flow arm, μεγέθυνση x100, γ) ο πυρήνας συγκόλλησης, δ) το κέντρο του πυρήνα συγκόλλησης, μεγέθυνση x100, ε) λεπτομέρεια κοντά στην επιφάνεια περιαιχενίου, μεγέθυνση x200 [95].

3.3.3 Μικροσκληρομετρήσεις

Η Εικόνα 3.6α απεικονίζει τη διαμήκη κατανομή της μικροσκληρότητας για συγκόλληση ενισχυμένη με SiC σε δύο αποστάσεις (1 και 2 mm) από την επιφάνεια του περιαιχενίου του εργαλείου. Στη ΘΕΖ, η κατανομή της μικροσκληρότητας αντικατοπτρίζει εκείνη της συγκόλλησης χωρίς νανοσωματίδια, ένα επιθυμητό αποτέλεσμα δεδομένης της απουσίας νανοσωματιδίων στη ΘΕΖ. Ωστόσο, στη συγκόλληση του πυρήνα, παρατηρούμε μια αύξηση της μικροσκληρότητας κατά 10% (~88 HV_{0,3}). Αυτή η αύξηση δεν είναι αυθαίρετη, αλλά αποτελεί άμεση συνέπεια της σχέσης Hall-Petch. Το μικρότερο μέγεθος κόκκων (5,3 μm) στην συγκόλληση πυρήνα, σε σύγκριση με τη μη ενισχυμένη συγκόλληση (6,6 μm), είναι ο βασικός παράγοντας που οδηγεί σε αυτή την αύξηση. Η Εικόνα 3.6β παρέχει περαιτέρω αποδείξεις, δείχνοντας την κατακόρυφη κατανομή της μικροσκληρότητας στο μέσο της περιοχής της συγκόλλησης, με την υψηλότερη τιμή κοντά στην επιφάνεια του περιαιχενίου, στην περιοχή δηλαδή του flow arm, όπου υπάρχει η υψηλότερη συγκέντρωση νανοσωματιδίων (βλ. Εικόνα 3.6α και β).

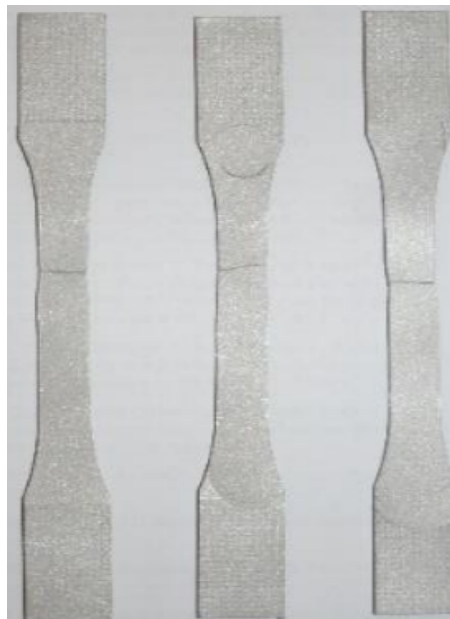


Εικόνα 3.6: Η κατανομή της μικροσκληρότητας α) οριζοντίως, β) καθέτως [95]

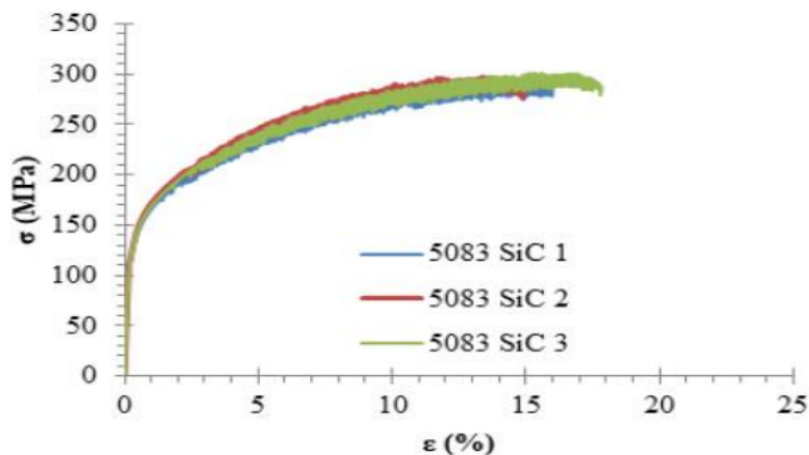
3.3.4 Δοκιμές εφελκυσμού

Κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, κάθε δοκίμιο έσπασε στη ζώνη ΘΕΖ (βλ. Εικόνα 3.7). Η θραύση των ενισχυμένων με SiC δοκιμίων σε περιοχή εκτός του πυρήνα της συγκόλλησης είναι ένδειξη τόσο της άριστης σύνδεσης των σωματιδίων με το υλικό της μήτρας όσο και της ομοιόμορφης κατανομής τους εντός της μεταλλικής μήτρας. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας, Τάσης Διαρροής, Αντοχής σε Εφελκυσμό και Ολκιμότητας.

Με εξαίρεση το όριο διαρροής, όλες οι τιμές είναι αρκετά κοντά σε εκείνες του βασικού μετάλλου. Αυτό δείχνει ότι η προσθήκη των νανοσωματιδίων ενίσχυσε τη συγκόλληση, αντισταθμίζοντας τη μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών λόγω ανόπτησης.



Εικόνα 3.7: Τα τρία δοκίμια εφελκυσμού της FSW του AA5083 με ενίσχυση SiC μετά τη θραύση τους [95]



Εικόνα 3.8: Οι καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων (σ - ϵ) και για τα τρία δοκίμια της FSW του AA5083 με ενίσχυση SiC [95].

Πίνακας 3.3: Οι τιμές της μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, του ορίου διαρροής, της επιμήκυνσης καθώς και του μέτρου ελαστικότητας για την FSW του AA5083 με ενίσχυση SiC [95].

Δοκίμιο	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Τάση Διαρροής (MPa)	Απόλυτη Αντοχή σε Εφελκυσμό (MPa)	Επιμήκυνση (%)
No1	73,42	127	297,46	17,23
No2	75,07	134,6	298,95	15,12
No3	74,35	128,4	307,46	18,61
No4	74,28 ± 0,83	130 ± 4,04	301,29 ± 5,40	17,63 ± 1,76

3.3.5 Συμπεράσματα

Η ομοιόμορφη διασπορά των νανοσωματιδίων στον πυρήνα ευνοείται από έναν χαμηλό λόγο ταχυτήτων συγκόλλησης, ο οποίος είναι συνέπεια του συνδυασμού υψηλής ταχύτητας περιστροφής και χαμηλής ταχύτητας πρόωσης, σύμφωνα με τα πρώτα συμπεράσματα που εξάγονται από την οπτική στερεοσκοπική έρευνα. Επιπλέον, το οπτικό μικροσκόπιο αποκάλυψε ότι το μειωμένο μέγεθος κόκκων του πυρήνα συγκόλλησης περιέχεται εντός των ορίων του σφάλματος μέτρησης. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η περιοχή του flow arm, η οποία ήταν η περιοχή με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση νανοσωματιδίων, βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του περιαιχενίου και έχει τον υψηλότερο βαθμό μικροσκληρότητας. Συμπερασματικά, όσον αφορά τη δοκιμή εφελκυσμού, κάθε δείγμα έσπασε στη ΘΕΖ, η οποία είναι η ζώνη με τη χαμηλότερη σκληρότητα [95].

3.4 Μελέτη συγκόλλησης μεταξύ των AA5083-H111 και AA6082-T6 ενισχυμένων με νανοσωματίδια TiC

Σκοπός της εργασίας των Dragatogiannis et al. [105] είναι η αξιολόγηση της μικροδομής και της μηχανικής συμπεριφοράς ανόμοιων συγκολλήσεων FSW μεταξύ των AA5083-H111 και AA6082-T6 ενισχυμένων με καρβίδιο του τιτανίου (TiC). Το TiC χρησιμοποιήθηκε λόγω των εξαιρετικών μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του, καθώς και της χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, υψηλής χημικής σταθερότητας, της εύκολης κατασκευής και του σχετικά φθηνού κόστους.

3.4.1 Πειραματική Διαδικασία

Για τη διεργασία της συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε μια προσαρμοσμένη κάθετη μηχανή φρεζαρίσματος από τη Σχολή Ναυπηγών Μηχανικών, του Εργαστηρίου Ναυτικής Τεχνολογίας, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ο θερμικά επεξεργασμένος χάλυβας «SVERKER 21» που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του εργαλείου FSW παρουσιάζει σκληρότητα 61 HRC. Το εργαλείο έχει διάμετρο 23 mm, διάμετρο πείρου 6 mm και μήκος πείρου 2,8 mm.

Σε όλα τα πειράματα η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε παράλληλα με τη διεύθυνση κατά μήκος επαφής των πλακών. Το αυλάκι είχε διαστάσεις, μήκους 180 mm, πάχους 1 mm και βάθους 2,5 mm που δημιουργήθηκε όταν οι πλάκες τοποθετήθηκαν στερεά στη διάταξη σύσφιξης [106]. Τα νανοσωματίδια TiC, αφού αναμίχθηκαν με αιθανόλη για να γίνουν πιο εύχρηστα, συμπίεστηκαν μέσα στο αυλάκι. Το αυλάκι και η κεντρική γραμμή του πείρου περιστροφής ευθυγραμμίζονται. Το θεωρητικό κλάσμα όγκου (V_f) των νανοσωματιδίων στη ζώνη ανάδευσης, το οποίο υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [107] ήταν 13,8% σε κάθε πείραμα:

$$V_f = \frac{\text{Περιοχή αυλακώσεων (Area of groove)}}{\text{Προβλεπόμενη επιφάνεια (Projected area)}} \times 100$$

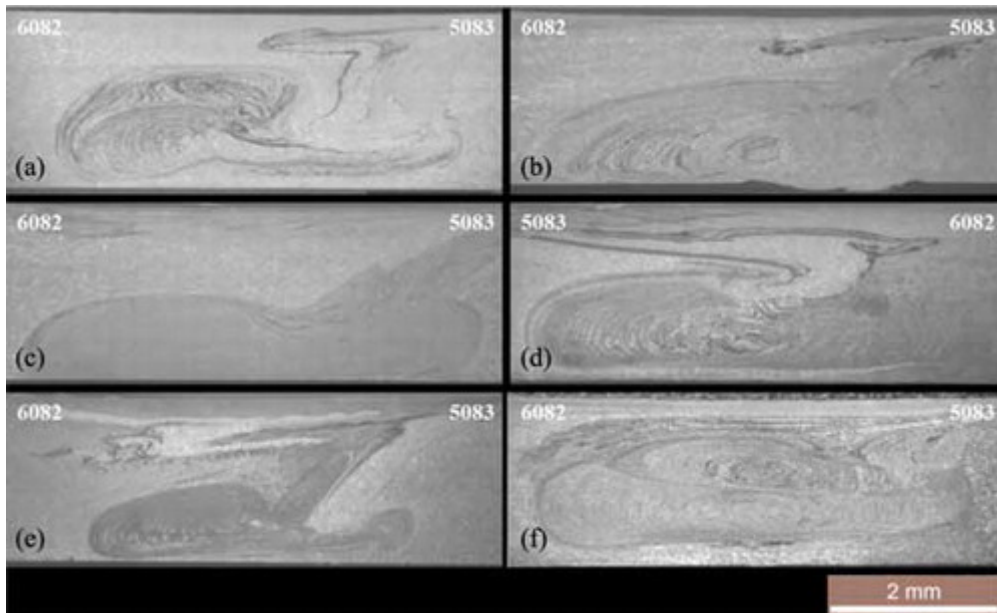
Οι συγγραφείς διεξήγαγαν μια αρχική μελέτη χωρίς την προσθήκη TiC για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων συγκόλλησης μεταξύ βασικών μετάλλων. Οι βέλτιστες παράμετροι καθορίστηκαν μεταβάλλοντας την ταχύτητα διέλευσης (60-85 mm/min), την ταχύτητα περιστροφής (600-1180 RPM), τη γωνία κλίσης του εργαλείου (0-4°) και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4 (δοκίμιο 9: χωρίς TiC). Το δοκίμιο αυτό χρησιμοποιήθηκε επίσης για λόγους σύγκρισης, ώστε να παρατηρηθεί η επίδραση της κατανομής των νανοσωματιδίων στη μηχανική συμπεριφορά.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4: Πειραματικοί παράμετροι FSW [105]

Αριθμός δείγματος	Αριθμός περασμάτων (mm)	Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	Κατεύθυνση των περασμάτων
1	3	750	+++
2	2	1180	++
3	3	1180	+++
4	2	750	+ -
5	3	750	+ - +
6	3	1500	+ - +
7	3	1180	+ - +
8	3	1500	+ -
9 (χωρίς TiC)	1	750	+

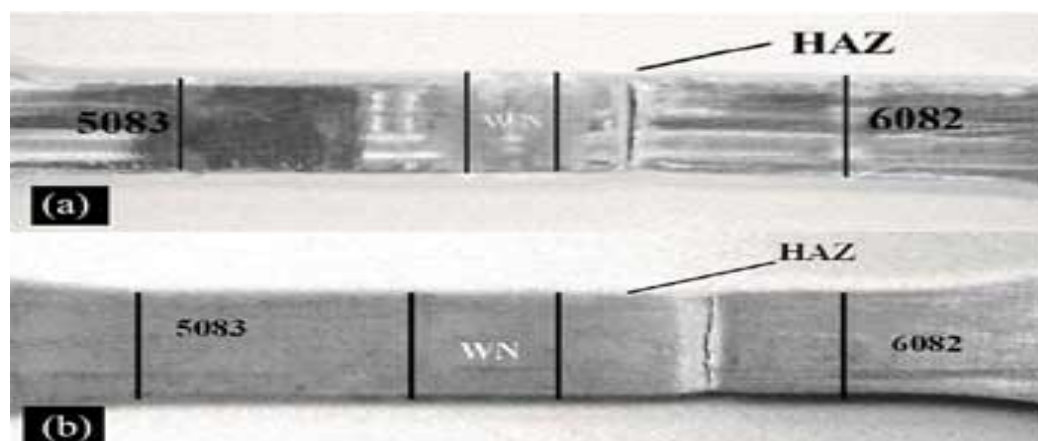
3.4.2 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα- Παρατηρήσεις

Στην Εικόνα 3.9(a), (d) και (e), παρατηρήθηκε έντονη συσσωμάτωση και ανεπαρκής ανάμιξη του υλικού, κυρίως στην περιοχή του flow arm, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ταχύτητα περιστροφής 750 στροφών ανά λεπτό του εργαλείου δεν απέδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια του εργαλείου συγκόλλησης μεταφέρει υλικό.



Εικόνα 3.9: Οπτική μικροσκοπία των δειγμάτων (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5 και (f) 6 [105]

Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζονται τα δοκίμια θραύσης ενισχυμένα με TiC, αλλά και χωρίς ενίσχυση. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν στο σημείο όπου η σκληρότητα παρουσιάζει ελάχιστη τιμή, δηλαδή στη ΘΕΖ του AA6082. Η θραύση των δειγμάτων εκτός της ζώνης ανάδευσης υποδηλώνει ότι τα νανοσωματίδια είναι διασκορπισμένα εντός της ζώνης και ότι τα σωματίδια TiC έχουν ισχυρό δεσμό με τη μεταλλική μήτρα.

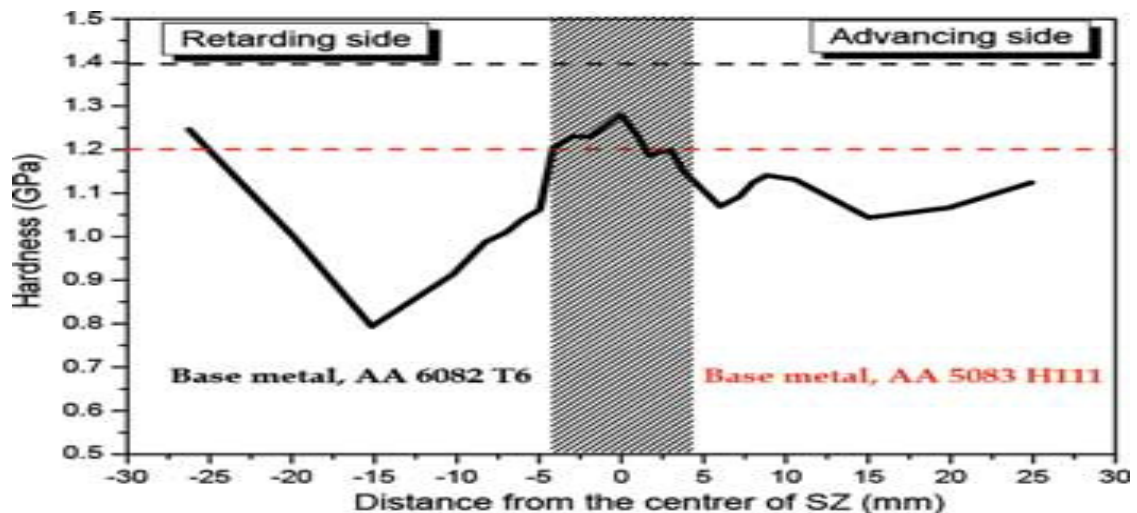


Εικόνα 3.10: Δοκίμια εφελκυσμού με θραύση (α) μη ενισχυμένα και (β) ενισχυμένα με TiC. [105]

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5: Μηχανικές ιδιότητες (μέσες τιμές) των συγκολλήσεων, με και χωρίς την προσθήκη νανοσωματιδίων TiC [105]

ΔΕΙΓΜΑΤΑ	Μέτρο ελαστικότητας του Young (GPa)	Τάση διαρροής (MPa)	UTS (MPa)	Επιμήκυνση (%)
ΔΕΙΓΜΑ 3	76,8	145 ± 2	199 ± 3	3,7 ± 0,3
ΔΕΙΓΜΑ 6	75,4	140 ± 3	179 ± 4	1,3 ± 0,2
ΔΕΙΓΜΑ (χωρίς TiC)	66,2	140 ± 3	193 ± 5	3 ± 0,4

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11, οι μέσες τιμές της νανοσκληρότητας είναι χαμηλότερες από εκείνες των βασικών μετάλλων. Επίσης, προσδιορίστηκαν μειωμένες τιμές νανοσκληρότητας στη ΘΕΖ, στην πλευρά του AA6082-T6, λόγω διάσπασης των κατακρημνισμάτων ενίσχυσης του μετάλλου. Από την άλλη πλευρά, η νανοσκληρότητα βρέθηκε να αυξάνεται στη περιοχή της συγκόλλησης λόγω της προσθήκης νανοσωματιδίων TiC.



Εικόνα 3.11: Προφίλ σκληρότητας των συγκολλήσεων ενισχυμένων με TiC (2 mm από την επιφάνεια) [105]

Μετά την εκτέλεση τριών περασμάτων FSP (Friction Stir Processing) με ταχύτητα περιστροφής 1500 RPM και εγκάρσια ταχύτητα 85 mm/min, επιτεύχθηκε η βέλτιστη διασπορά νανοσωματιδίων. Η ανάλυση EDS (φασματοσκοπία ενεργειακής διασποράς), οι οπτικές μικρογραφίες, οι μικρογραφίες ηλεκτρονικής σάρωσης και οι μετρήσεις της επιφάνειας του flow arm έδειξαν ότι η κατανομή των νανοσωματιδίων TiC στη ζώνη ανάδευσης ήταν αρκετά ομοιόμορφη, με εξαίρεση μια μικροσκοπική συσσώρευση. Σε σύγκριση με τη σκληρότητα της ζώνης ανάδευσης του μη ενισχυμένου δοκιμίου, η μικροσκληρότητα της ζώνης ανάδευσης αυξήθηκε κατά περίπου 18% ως αποτέλεσμα της ενίσχυσης με νανοσωματίδια TiC. Όσον αφορά τις άλλες ζώνες συγκόλλησης, η κατανομή της μικροσκληρότητας ήταν σύμφωνη με την αναμενόμενη για τα δοκίμια FSP, παρουσιάζοντας ένα ελάχιστο στη ΘΕΖ του υλικού AA6082-T6. Όσον αφορά τις δοκιμές εφελκυσμού, τα δοκίμια αστόχησαν στη θέση ελάχιστης σκληρότητας, δηλαδή στη ΘΕΖ του AA6082. Αυτό αποδεικνύει την επιτυχή συγκόλληση, με ομοιόμορφη ανάμιξη των υλικών και διασπορά των σωματιδίων TiC στη μεταλλική μήτρα. Επιπλέον, η προσθήκη νανοσωματιδίων προκάλεσε μια μικρή αύξηση του ποσοστού επιμήκυνσης, του ορίου διαρροής, της αντοχής σε εφελκυσμό και του μέτρου ελαστικότητας. [105].

4. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ – ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΒΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

4.1 Περίπτωση συγκόλλησης μεταξύ του κράματος αλουμινίου AA5083-H321 και του ναυπηγικού χάλυβα DH36

Στην εργασία των Davide Campanella et al.[108], η FSW εφαρμόστηκε για συγκολλήσεις, δύο ανόμοιων υλικών, αλλά ευρέως χρησιμοποιούμενων στο ναυπηγικό τομέα. Στόχος της εργασίας είναι η συγκόλληση πλακών μεταξύ του κράματος αλουμινίου AA5083-H321 και του ναυπηγικού χάλυβα DH36 με πάχος 6 mm.

4.1.1 Πειραματική Διαδικασία

Οι πειραματικές δοκιμές FSW πραγματοποιήθηκαν σε πλάκες από ναυπηγικό χάλυβα DH36 και κράμα αλουμινίου AA5083-H321, και οι δύο με πάχος 6 mm. Οι βασικές μηχανικές και χημικές ιδιότητες των παραπάνω μετάλλων αναφέρονται στον Πίνακα 4.1 και στον Πίνακα 4.2.

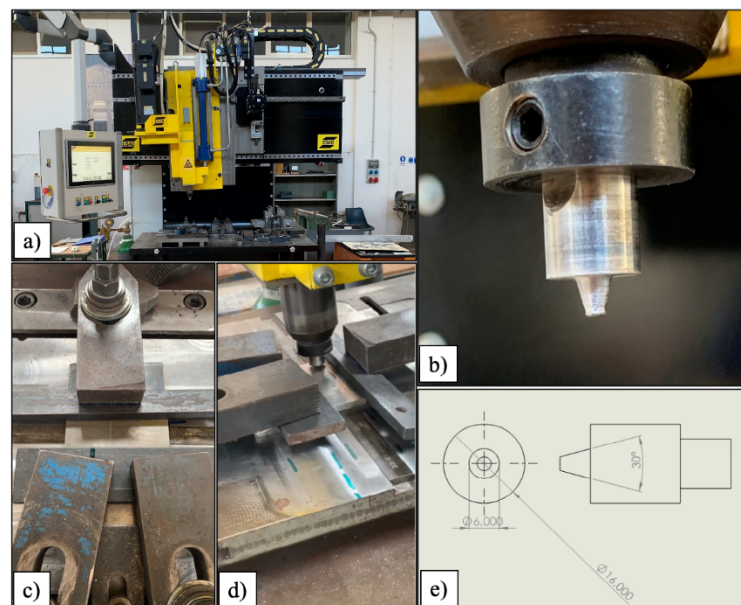
Χ.ΣΤΟΙΧΕΙΑ		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ΑΛΛΑ
AA5083	Min	-	-	-	0,4	4	0,1	-	-	
	Max	0,4	0,4	0,1	1	4,9	0,3	0,3	0,2	0,1
Χ.ΣΤΟΙΧΕΙΑ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V
DH36	<0,18	0,1-0,5	0,9-1,6	<0,035	,0,035	0,05-0,1	0,02-0,05	<0,015	<0,02	<0,35

Πίνακας 4.1: Χημικές συστάσεις του εξεταζόμενου χάλυβα DC και του κράματος AA6016 [108]

Υλικά	Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Όριο διαρροής 0,2 % (MPa)	Επιμήκυνση κατά τη θραύση (%)	Σκληρότητα Vickers (HV)
AA5083	350	220	17	93
DH36	490-620	355	21	150

Πίνακας 4.2: Βασικές μηχανικές ιδιότητες του εξεταζόμενου χάλυβα DC και του κράματος AA6016 [108]

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με μηχανή ESAB LEGIO (Εικόνα 4.1α) με ύψος εργαλείου 6 mm και γωνία κλίσης (θ) $2,5^\circ$. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι μια μηχανή τριών αξόνων ελεγχόμενης δύναμης ειδικά για τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, με μέγιστη ταχύτητα περιστροφής 2500 rpm και ταχύτητα πρόωσης 2000 mm/min. Η δύναμη της κεφαλής ανάδευσης ρυθμίστηκε κατάλληλα, ώστε η βύθιση κατά μήκος της συγκόλλησης να είναι σταθερή. Το άνω και το κάτω φύλλο διαμορφώθηκαν σε ορθογώνια τμήματα μήκους και πλάτους 100 x 100 mm αντίστοιχα. Το χρησιμοποιούμενο εξάρτημα σύσφιξης παρουσιάζεται στις Εικόνες 4.1γ και 4.1δ. Για τις δοκιμές, χρησιμοποιήθηκαν συγκολλήσεις με αστάλι ως κάτω φύλλο και αλουμίνιο ως άνω φύλλο. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε από κράμα W25Re (tungsten 75 %wt., rhenium 25 %wt.), είχε διάμετρο περιαιχενίου 16 mm και κωνικό πείρο με ύψος 6 mm, 6 mm κύρια διάμετρο και 30° γωνία. Οι Εικόνες 4.1β και 4.1ε δείχνουν τα σχήματα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές.



Εικόνα 4.1: (α) Μηχανή ESAB Legio, (β) σχήμα εργαλείου Pin, (γ, δ) όψεις του εξαρτήματος σύσφιξης και (ε) γεωμετρικές παράμετροι του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε.[108]

Η περιστροφή του εργαλείου και η ταχύτητα πρόωσης ρυθμίστηκαν εντός των παραμέτρων της διεργασίας, που κυμαίνονταν από 350 έως 1300 στροφές ανά λεπτό και 25 έως 100 mm/min, αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο εξετάστηκαν δώδεκα διαφορετικές συνθήκες διεργασίας. Οι συνδυασμοί ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

Ταχύτητα περιστροφής [rpm]	Ταχύτητες Πρόωσης [mm/min]
350	25,50,100
500	25,50,100
900	25,50,100
1300	25,50,100

Πίνακας 4.3: Χρησιμοποιούμενοι τεχνολογικοί παράμετροι [108]

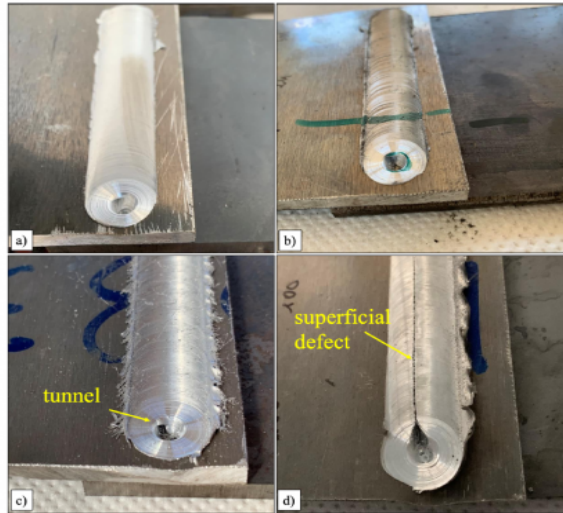
Από κάθε δοκιμή προέκυψαν τρία διαφορετικά δοκίμια (Εικόνα 4.2) προκειμένου να διερευνηθεί η ποιότητα της συγκόλλησης. Για τον μηχανικό χαρακτηρισμό των συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διάτμησης (με τη χρήση του Galdabini Quasar 600) και μετρήσεις μικροσκληρότητας (με τη χρήση του Remet HBV30A). Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκαν με βάρος 500gr για 30s κατά μήκος του πάχους της συγκόλλησης, με απόσταση 0,5mm μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων. Η κάθε δοκιμή έγινε από τρεις φορές, χωρίς να παρατηρηθεί σημαντική διαφορά στα αποτελέσματα.



Εικόνα 4.2: (α) Διαμόρφωση LAP, (β) δείγματα που κόπηκαν για την ανάλυση[108]

4.1.2 Αποτελέσματα και Συζητήσεις

Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζονται οι συγκολλήσεις που δεν εμφάνισαν κάποιο ελάττωμα, αλλά και εκείνες που παρουσίασαν κάποια ατέλεια (π.χ. ελάττωμα «σύρραγας» στο εσωτερικό του πυρήνα συγκόλλησης ή επιφανειακό ελάττωμα ροής υλικού στο άνω φύλλο).



Εικόνα 4.3: Δοκίμια που προέκυψαν για διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης: (a) 350 στροφές ανά λεπτό - 25 mm/min, (b) 500 στροφές ανά λεπτό - 25 mm/min, (c) 900 στροφές ανά λεπτό - 100 mm/min, (d) 1300 στροφές ανά λεπτό - 100 mm/min [108]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3a και 4.3b, αναφορικά με τις συγκολλήσεις που προέκυψαν δεν παρατηρήθηκε κανένα ελάττωμα. Ωστόσο, υπήρχαν αξιοσημείωτες ατέλειες στη συγκόλληση που παρήχθη όταν περιστράφηκε στις 1300 στροφές ανά λεπτό και προωθήθηκε με ταχύτητα 100 mm/min (Εικόνα 4.3d). Για αυτή τη συγκόλληση δεν πραγματοποιήθηκε δοκιμή σκληρότητας (HV). Ανάλογες εκτιμήσεις ισχύουν για τη συγκόλληση που παρουσίασε ατέλεια τύπου «σήραγγας» και ορίστηκε με ταχύτητα περιστροφής 900 στροφές ανά λεπτό και ρυθμό πρόωσης 100 mm/min (Σχήμα 4.3γ). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα προβλήματα ροής που αναφέρθηκαν προηγουμένως ήταν εμφανή και στις τρεις επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν για κάθε κατάσταση συγκόλλησης.

Ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει τις παραμέτρους της διαδικασίας. Το σύμβολο «Ο» χρησιμοποιήθηκε για να επισημανθούν τα σύνολα παραμέτρων που οδήγησαν, από οπτικό έλεγχο, σε υγιή συγκόλληση, ενώ οι συνθήκες διεργασίας για τις οποίες δεν επιτεύχθηκε σωστή στερεή συγκόλληση υποδείχθηκαν με το σύμβολο «Χ». Φαίνεται ότι μόνο λίγες συνθήκες διεργασίας οδήγησαν σε ελαττώματα.

Ταχύτητα Πρόωσης [mm/min]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ		ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ [rpm]	
	350	500	900	1300
25	O	O	O	O
50	O	O	O	X
100	O	O	X	X

Πίνακας 4.4: Χρησιμοποιούμενοι τεχνολογικοί παράμετροι [108]

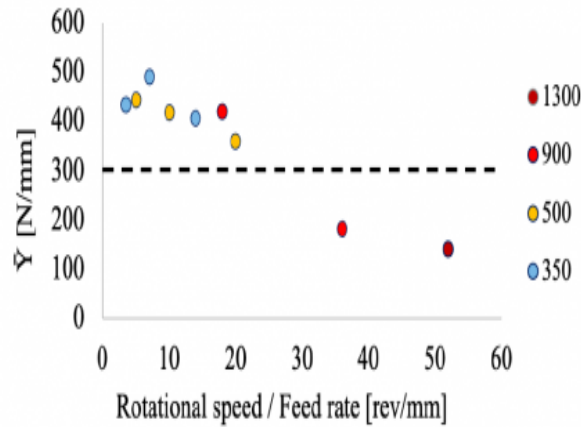
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές διάτμησης, όσον αφορά το φορτίο αστοχίας ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης, αναφέρονται στον ακόλουθο πίνακα 4.5. Με τον όρο αστοχία κοπής (CF), υποδηλώνεται ένα δοκίμιο που έσπασε κατά τη διάρκεια της σύσφιξης για κοπή.

Ταχύτητα περιστροφής [rpm]	Ταχύτητα Πρόωσης [mm/min]	\bar{Y} [N/mm]
350	25	407
	50	492
	100	433
500	25	359
	50	418
	100	444
900	25	182
	50	420
	100	CF
1300	25	139
	50	CF
	100	CF

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα δοκιμής διάτμησης [108]

Το μέγιστο του φορτίου αστοχίας (\bar{Y}) (492 N/mm) ελήφθη για τη συγκόλληση που χαρακτηρίστηκε από ταχύτητα περιστροφής 350 rpm και ταχύτητα πρόωσης 50 mm/min, που αντιστοιχεί στη δεύτερη χαμηλότερη εισροή θερμότητας μεταξύ των συνθηκών συγκόλλησης που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη. Η συγκόλληση με τη μεγαλύτερη εισροή θερμότητας, η οποία είναι επίσης εκείνη με ταχύτητα περιστροφής 1300 στροφές ανά λεπτό και ταχύτητα πρόωσης 25 mm/min, έδωσε το χαμηλότερο \bar{Y} (139 N/mm). Μικρότερη αντοχή ανιχνεύεται στις ταχύτητες 900 και 1300 στροφών ανά λεπτό. Η συγκόλληση παρατηρήθηκε να επιτυγχάνει υψηλή τιμή \bar{Y} , ή 420 N/mm, σε ταχύτητα περιστροφής 900 rpm και ταχύτητα πρόωσης 50 mm/min. Η γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της δοκιμής διάτμησης ως συνάρτηση του λόγου περιστροφής του εργαλείου προς την ταχύτητα πρόωσης δίνει χρήσιμες πληροφορίες (βλ. Εικόνα 4.4). Αξίζει να σημειωθεί ότι η τελευταία παράμετρος, χρησιμοποιήθηκε ως ανάλογη της εισροής θερμότητας στη συγκόλληση.

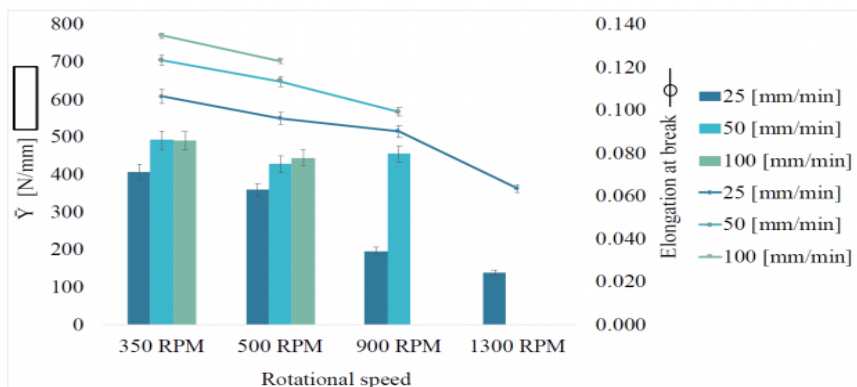
Ορίστηκε επίσης ένα κατώτατο όριο για την αντίσταση της ένωσης (διακεκομμένη γραμμή, στην τιμή 300 [N/mm]) με βάση τις τυπικές βιομηχανικές απαιτήσεις.



Εικόνα 4.4: Φορτία αστοχίας κατά τις δοκιμές διάτμησης των συγκολλήσεων συναρτήσει του λόγου περιστροφής/ταχύτητας τροφοδοσίας [108]

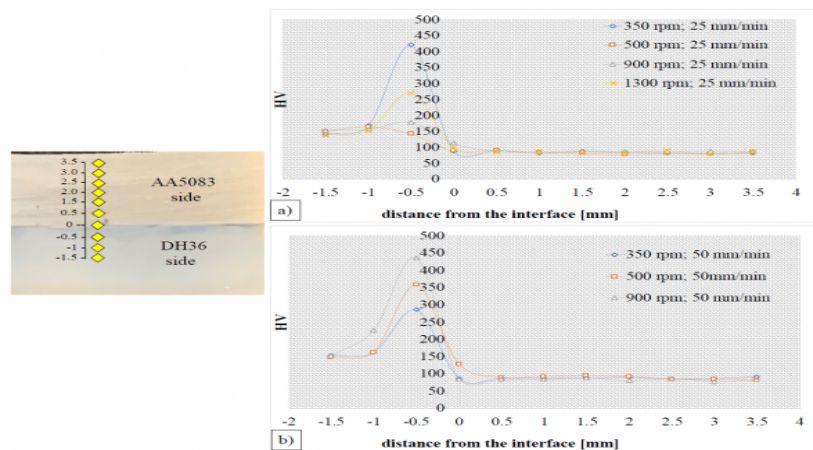
Ακόμη, μπορούν να επιτευχθούν καλές μηχανικές ιδιότητες σε συνθήκες «ψυχρής» συγκόλλησης, δηλαδή χαμηλές τιμές του λόγου μεταξύ της περιστροφής του εργαλείου και της ταχύτητας πρόωσης. Αντίθετα, λόγω των διαφορών στις φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών, η υψηλή θερμική εισροή δεν οδηγεί σε κατάλληλες συνθήκες συγκόλλησης μεταξύ των φύλλων. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες ευνοούν την ανάπτυξη μεταλλικών ενώσεων, γεγονός που μειώνει την ολκιμότητα των συγκολλήσεων και τα φορτία αστοχίας, όπως παρατήρησαν οι Jacome et al. [109].

Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ της επιμήκυνσης κατά τη θραύση, των παραμέτρων της διεργασίας και του φορτίου αστοχίας της συγκόλλησης. Φαίνεται ότι οι «θερμότερες» συγκολλήσεις (που προκύπτουν από μεγάλη τιμή του λόγου μεταξύ περιστροφής του εργαλείου και ταχύτητα πρόωσης), εκτός από μικρότερα φορτία αστοχίας, χαρακτηρίζονται επίσης από χαμηλότερη ολκιμότητα.



Εικόνα 4.5: Εξέλιξη των παραμορφώσεων και του λόγου φορτίου/μήκος της συγκόλλησης [109]

Επιπλέον, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε και μελέτη της μικροσκληρότητας. Σε συμφωνία με την έρευνα των Wan και Huang [110], οι κορυφές της σκληρότητας βρίσκονται στην επιφάνεια όπου συναντώνται τα δύο υλικά. Οι κορυφές αυτές έχουν τιμές που συνάδουν και πάλι με τη δημιουργία μεταλλικών ενώσεων. Για τον χάλυβα DH36 και το κράμα αλουμινίου AA5083, τα επίπεδα σκληρότητας των βασικών υλικών είναι 150 HV και 93 HV αντίστοιχα. Διαπιστώθηκε ότι, ακόμη και κοντά στην επιφάνεια του χάλυβα, η σκληρότητα της πλάκας αλουμινίου δεν μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος του πάχους της και κατά μήκος της γραμμής μέτρησης που διέρχεται από το κέντρο της συγκόλλησης. Υπήρξε επίσης αξιοσημείωτη αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα κοντά στην επιφάνεια. Σε απόσταση περίπου 0,5 mm από την επιφάνεια, οι τιμές HV κορυφώνονται και σε απόσταση περίπου 1 mm πέφτουν στα επίπεδα του βασικού υλικού.



Εικόνα 4.6: Εξέλιξη της σκληρότητας για τις περιπτώσεις μελέτης με σταθερή πρόωση, ίση με (α) 25 mm/min και (β) 50 mm/min μεταβάλλοντας τις ταχύτητες περιστροφής [108]

4.1.3 Συμπέρασμα

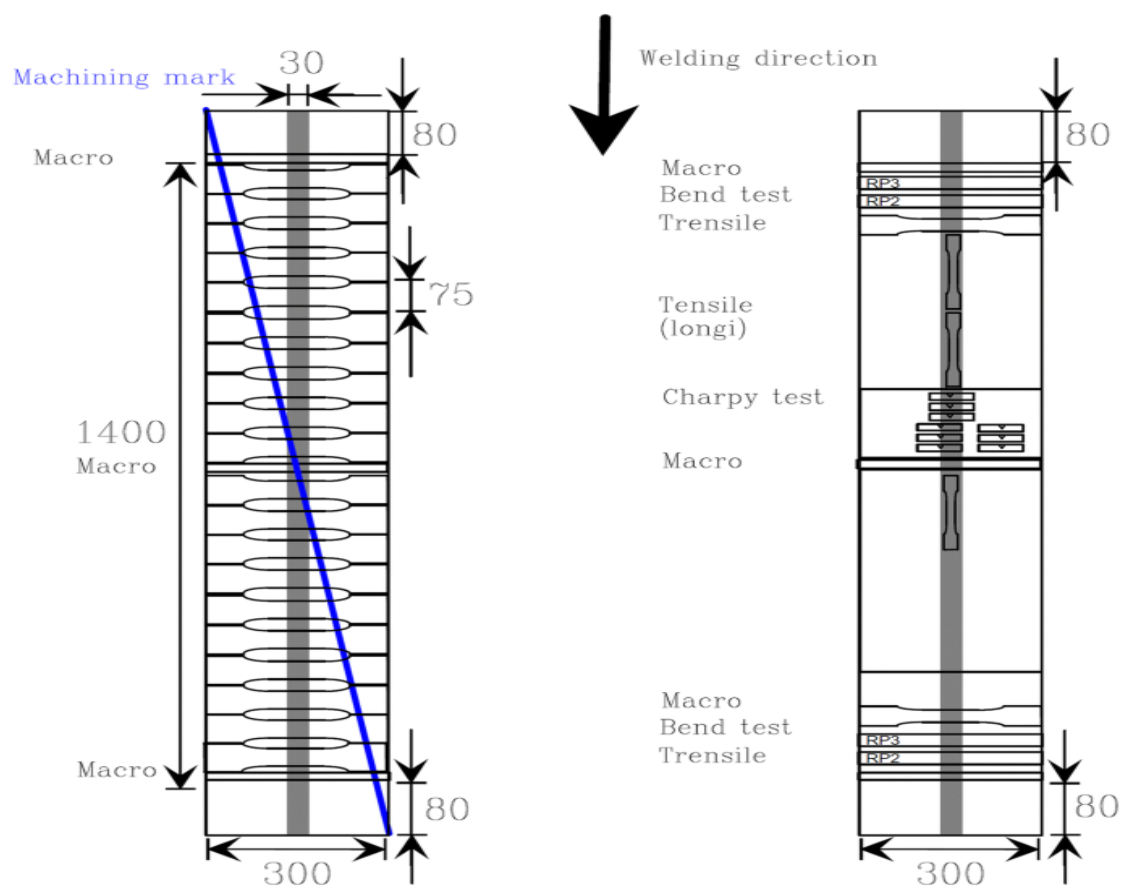
Κατά τη διάρκεια των δοκιμών για τη μέτρηση της αντοχής στη διάτμηση, μπορούν να επιτευχθούν καλές μηχανικές ιδιότητες αν ληφθούν υπόψη οι συνθήκες που επικρατούν κατά τη «ψυχρή» συγκόλληση. Αυτό συμβαίνει επειδή το διάστημα μεταξύ των επαναλαμβανόμενων κινήσεων είναι μικρότερο. Αντίθετα, η υψηλή θερμική εισροή δεν οδήγησε σε κατάλληλες συνθήκες συγκόλλησης μεταξύ των φύλλων λόγω των διαφορετικών χημικών και φυσικών χαρακτηριστικών των υλικών. Στις δοκιμές μικροσκληρότητας, οι τιμές των βασικών υλικών αντιστοιχούν σε 150 HV για τον χάλυβα DH36 και 75 HV για το κράμα αλουμινίου AA5083. Μεταξύ των δύο υλικών, υπάρχουν κορυφές κοντά στην επιφάνεια με τιμές σύμφωνες με το σχηματισμό των μεταλλικών ενώσεων.

4.2 Περίπτωση συγκόλλησης FSW του χάλυβα DH36 και του S690QL για εφαρμογή στη ναυπηγική βιομηχανία

4.2.1 Πειραματική Διαδικασία

Στη μελέτη των Julien Beaudet et al. [117] παρουσιάζεται η FSW μεταξύ διαφορετικών χαλυβών DH36 (συμβατικός χάλυβας για ναυπηγικές κατασκευές) και S690QL (χάλυβας υψηλής αντοχής). Οι πρωταρχικοί στόχοι αυτής της μελέτης είναι η επικύρωση της διαδικασίας καθώς και η εξέταση της δυνατότητας εφαρμογής των συγκολλημένων εξαρτημάτων. Επιπλέον, η εργασία αυτή συμβάλλει στην ερμηνεία περαιτέρω πειραματικών ευρημάτων σχετικά με την αντοχή σε κόπωση των κατασκευών FSW.

Στην Εικόνα 4.7 παρουσιάζεται, σχηματικά η διαδικασία κοπής δοκιμίων, για τον χάλυβα DH36.



Εικόνα 4.7: Παράδειγμα κατεργασίας για το DH 36 [117]

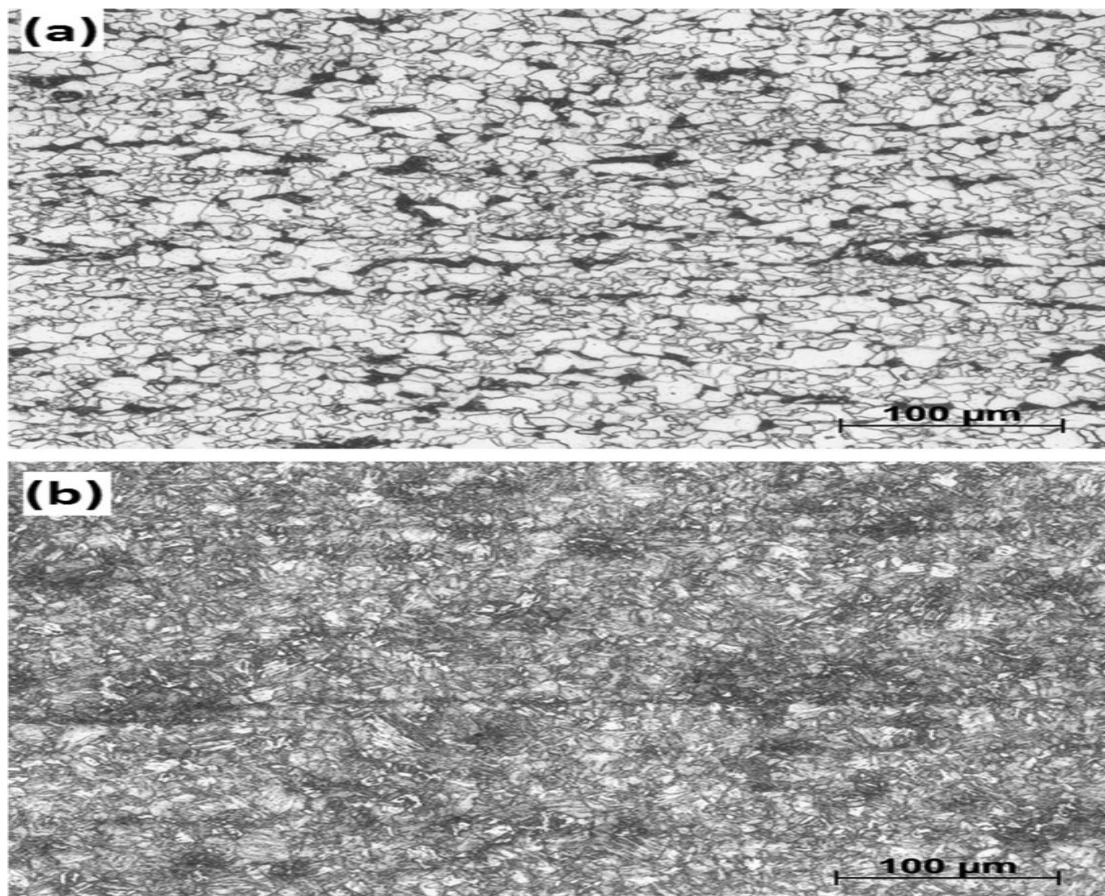
Πίνακας 4.6: Χημική σύσταση των δύο χαλύβων [117]

	C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ti	V	Ni	Zr
DH36	0,18	0,50	1,60	0,035	0,035	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S690QL	0.18	0.50	1.60	0.020	0.010	0.015	0.005	0.80	0.50	0.70	0.062	0.050	0.10	2.0	0.15

Πίνακας 4.7: Μηχανικές ιδιότητες από πείραμα εφελκυσμού [117]

Υλικό (τυποποιημένο)	Τάση διαρροής (MPa)	Μέγιστη τάση σε εφελκυσμό (MPa)	Επιμήκυνση (%)
DH36 (BV NR 216)	355	490–620	21
S690QL (EN 10025–6)	690	770–940	14

Ο S690QL είναι ένας χάλυβας υψηλής αντοχής για ελαφρές κατασκευές, ενώ ο DH36 είναι ένας παραδοσιακός χάλυβας για την κατασκευή σκαφών (παρόμοιος με τον χάλυβα S355). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, τα δείγματα αποκόπτονται από τις συνδεδεμένες πλάκες με βάση τον κανονισμό NF EN ISO 15614-1 [120], ο οποίος χρησιμοποιείται συχνά στη βιομηχανία για τον χαρακτηρισμό συγκολλήσεων.

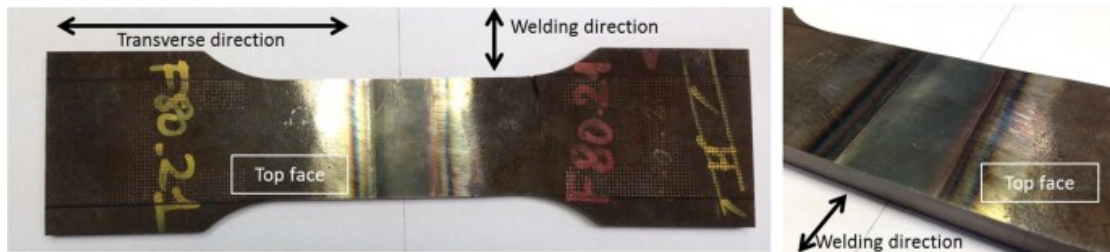


Εικόνα 4.8: Μικροδομή του DH36 (α) και του S690 (β) στο μέσο του πάχους [117].

4.2.2 Αποτελέσματα- Δοκιμές κόπωσης

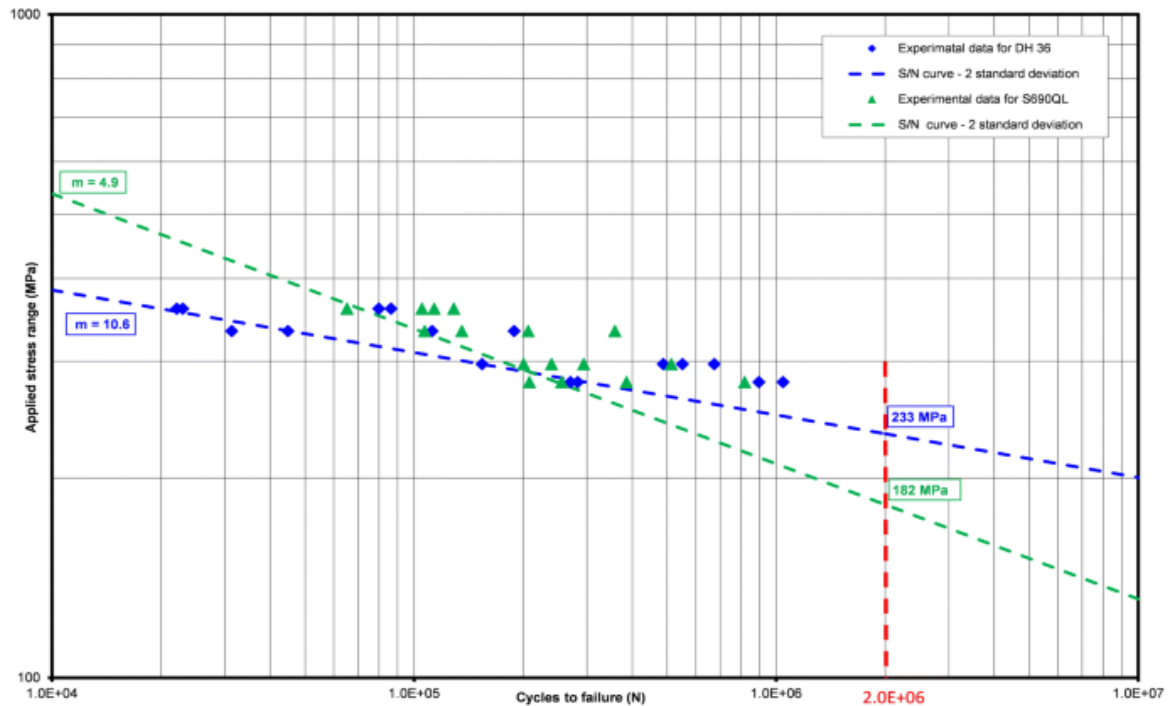
Στόχος είναι η υψηλή ποιότητα της συγκόλλησης, ως προς τη συγκέντρωση τάσεων αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται σύμφωνα με τον κανονισμό ISO/TR 14345 [121,122]. Καταγράφεται η καμπύλη S/N και προσδιορίζεται η αντοχή σε κόπωση σε $2,10^6$ κύκλους με λόγο τάσεων $R = 0,1$.

Τα δοκίμια κόπωσης (βλ. Εικόνα 4.9) ελέγχονται «όπως συγκολλήθηκαν», δεν γίνεται καμία επιφανειακή προετοιμασία, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά της παραγωγής. Οι δοκιμές κόπωσης είναι δοκιμές εφελκυσμού και ο λόγος τάσεων R είναι 0,1. Πριν από τη δοκιμή ορίζονται διαφορετικά επίπεδα φόρτισης για να καλυφθεί όλο το εύρος της διάρκειας ζωής λόγω αντοχής σε κόπωση. Αιχμηρές απολήξεις του κάθε δοκιμίου αφαιρούνται μέσω μιας προσεκτικής διαδικασίας λείανσης για την απομάκρυνση πλευρικών ρωγμών.



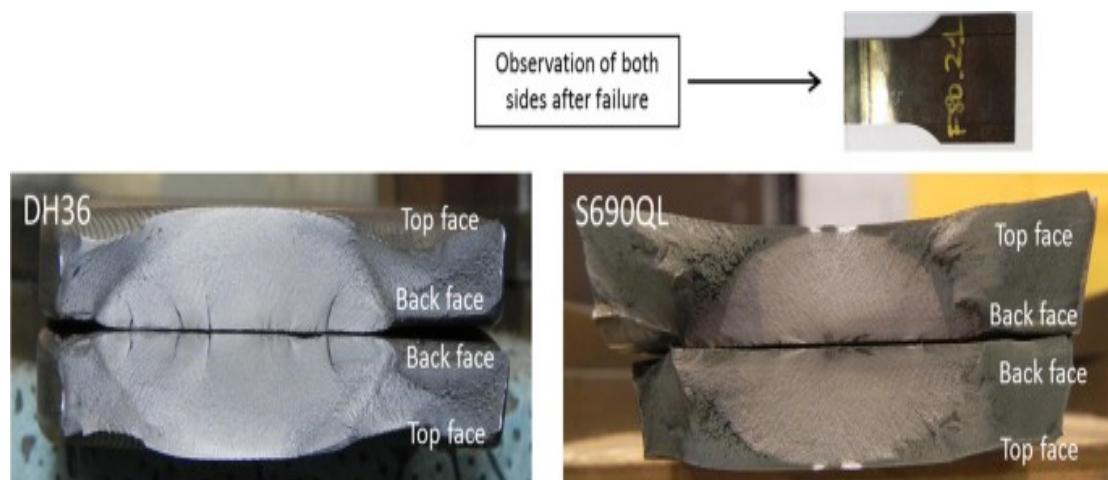
Εικόνα 4.9: Φωτογραφίες του δείγματος κόπωσης [117]

Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κόπωσης για τους χάλυβες DH36 και S690QL. Τα δεδομένα αξιολογούνται στατιστικά και οι κλίσεις προσδιορίζονται σύμφωνα με τον κανονισμό ISO 12107 [123]. Η κλίση είναι 10,6 και η αντοχή σε κόπωση στους 2.10^6 κύκλους με λόγο τάσεων $R = 0,1$ είναι 233 MPa. Η καμπύλη DH36 εμφανίζεται με μπλε χρώμα, ενώ η καμπύλη S690QL εμφανίζεται με πράσινο χρώμα. Η διασπορά είναι μεγαλύτερη και η διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης μικρότερη από την DH36, ωστόσο η κλίση είναι 4,9 και η αντοχή σε κόπωση είναι 182 MPa (ίδιες συνθήκες δοκιμής). Θα έπρεπε να έχουν επιτευχθεί αρκετές δοκιμές σε χαμηλό χρόνο ζωής κύκλου για να επικυρωθεί η ληφθείσα κλίση.



Εικόνα 4.10: Αποτελέσματα κόπωσης για τους χάλυβες DH36 και S690QL [117]

Η δοκιμή κόπωσης διακόπτεται μετά την αστοχία και προσδιορίζεται το σημείο που εμφανίζεται η ρωγμή για κάθε δοκίμιο. Για τα δοκίμια DH36 και S690QL, οι ρωγμές εμφανίζονται και εξαπλώνονται από τη βάση της συγκόλλησης. Η πίσω πλευρά επηρεάζεται από γεωμετρικές ιδιομορφίες. Για το DH36, η αστοχία μερικές φορές εμφανίζεται έξω από τη περιοχή της συγκόλλησης, στην ακτίνα του δοκιμίου. Αυτό αποδεικνύει την εξαιρετική συμπεριφορά της συγκόλλησης υπό κυκλική καταπόνηση. Οι παρατηρήσεις για τον χάλυβα S690QL και τον χάλυβα DH36 συνοψίζονται στην Εικόνα 4.11. Η επέκταση της θραύσης στην οπίσθια επιφάνεια φαίνεται σε αυτές τις δύο εικόνες.



Εικόνα 4.11: Παρατήρηση της επιφάνειας θραύσης για κάθε χάλυβα [117]

4.2.3 Συμπέρασμα

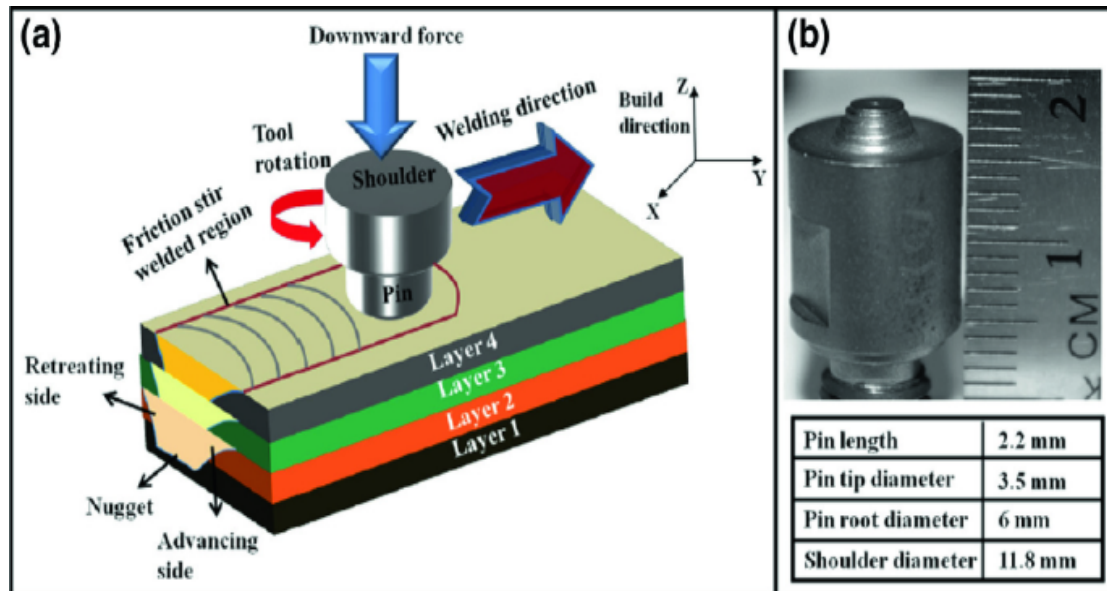
Οι παράμετροι της συγκόλλησης καθορίστηκαν και επαληθεύτηκαν για ένα συγκεκριμένο χαλύβδινο εργαλείο. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά για αξιοποίηση σε βιομηχανικές εφαρμογές σε ναυπηγείο καθώς συγκολλήθηκαν αρκετά μέτρα χωρίς σημαντική φθορά του εργαλείου. Η μελέτη ασχολείται κυρίως με την αξιολόγηση της διάρκειας ζωής λόγω κόπωσης και τη μηχανική συμπεριφορά της συγκόλλησης. Οι S690QL και DH36 παρουσιάζουν εξαιρετική απόδοση υπό κυκλική καταπόνηση. Σε αντίθεση με την καλή του συμπεριφορά σε στατικές δοκιμές, το S690QL παρουσιάζει χαμηλότερη διάρκεια ζωής και αντοχή σε κόπωση, λόγω ελαττωμάτων στη βάση της συγκόλλησης.

5. ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ FSW

5.1 FSW και Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Η συγκόλληση FSW για τη κατασκευή προϊόντων τρισδιάστατης εκτύπωσης εφαρμόστηκε το 2004 [124]. Η αρχική αναφορά το 2006 σχετικά με την FSW, ως μέθοδο συγκόλλησης, σε τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα οφείλεται στην Airbus 2006 [125]. Η Airbus και η Boeing τόνισαν ότι η καινοτομία είναι κατάλληλη για την αντιμετώπιση δύο εκ των προκαθορισμένων στόχων: (1) επίτευξη υψηλής απόδοσης και (2) λιγότερα απόβλητα υλικών [125, 126]. Οι Sharma et al. [127] ανέπτυξαν ένα υλικό βαθμωτής δομής μέσω διεργασίας Friction stir-3D printing (FS3DP).

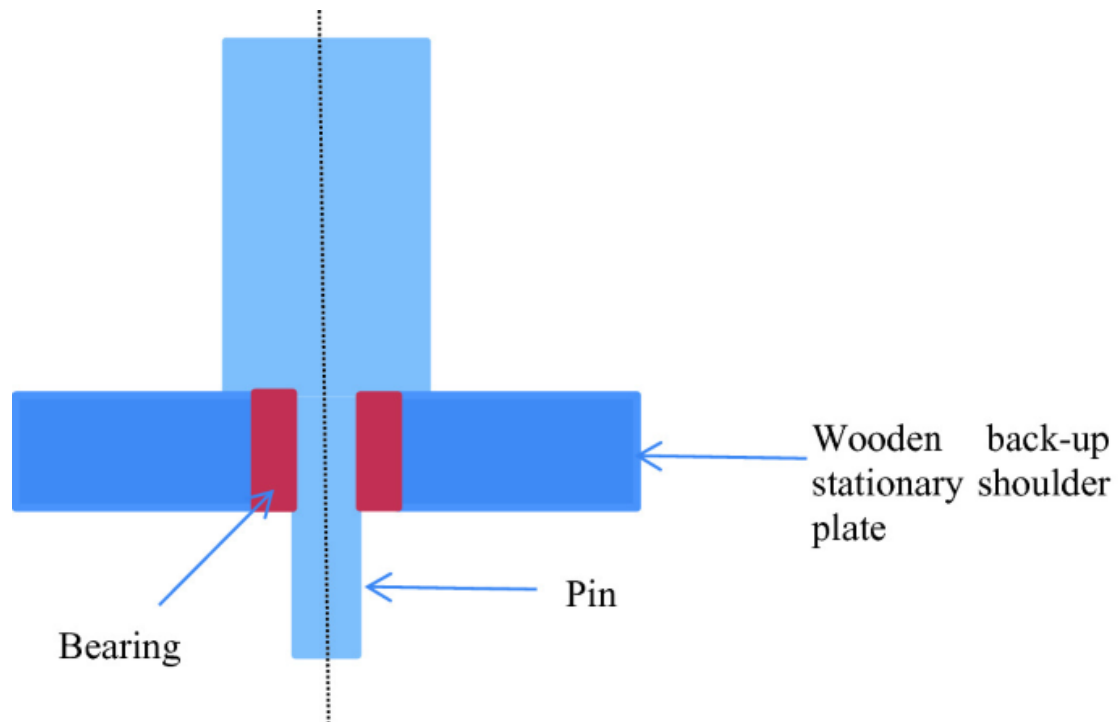
Οι Palanivel et al. [129] κατασκεύασαν μια πολυστρωματική δομή από τέσσερις στρώσεις, ύψους 5.6 mm, με διαδοχικό χτίσιμο και κατεργασία με CNC των συγκολλημένων στρώσεων (Εικόνα 5.1). Η μέθοδος Friction stir-3D printing (FS3DP) εφαρμόστηκε με ένα δεξιόστροφο εργαλείο κατασκευασμένο από χάλυβα.



Εικόνα 5.1: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας FS3DP (α) και διαστάσεις του εργαλείου (β) [129]

5.2 Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση ABS που παρήχθη μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης

Στη παρούσα μελέτη των Sunpreet Singh et al. [129], η συγκόλληση FSW των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δοκιμών από ακρυλονιτρίλιο-βουταδιένιο-στυρένιο πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μιας μηχανής CNC -Vertical Milling Machine. Ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής ανοικτού κώδικα χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση έτοιμων προς συγκόλληση δοκιμών. Το μισό μήκος των δοκιμών εφελκυσμού (που συνιστάται από την ASTM-638- τύπος IV) εκτυπώθηκε με έξυπνα επιλεγμένες παραμέτρους διαδικασίας (όπως: 100% πυκνότητα, πάχος στρώματος 0,254 και γωνία κατασκευής 0°). Η FSW πραγματοποιήθηκε στο μέσο της διαδρομής με ένα κυλινδρικό εργαλείο που αναπτύχθηκε εσωτερικά με μήκος 10 mm και διάμετρο 5 mm (βλ. Εικόνα 5.2). Η βοηθητική πλάκα βοήθησε να αποφευχθεί η διασπορά του θερμαινόμενου πολυμερούς από τη γραμμή συγκόλλησης. Η επιτυχής ολοκλήρωση των δοκιμών οδήγησε στην οριστικοποίηση του σχεδιασμού.

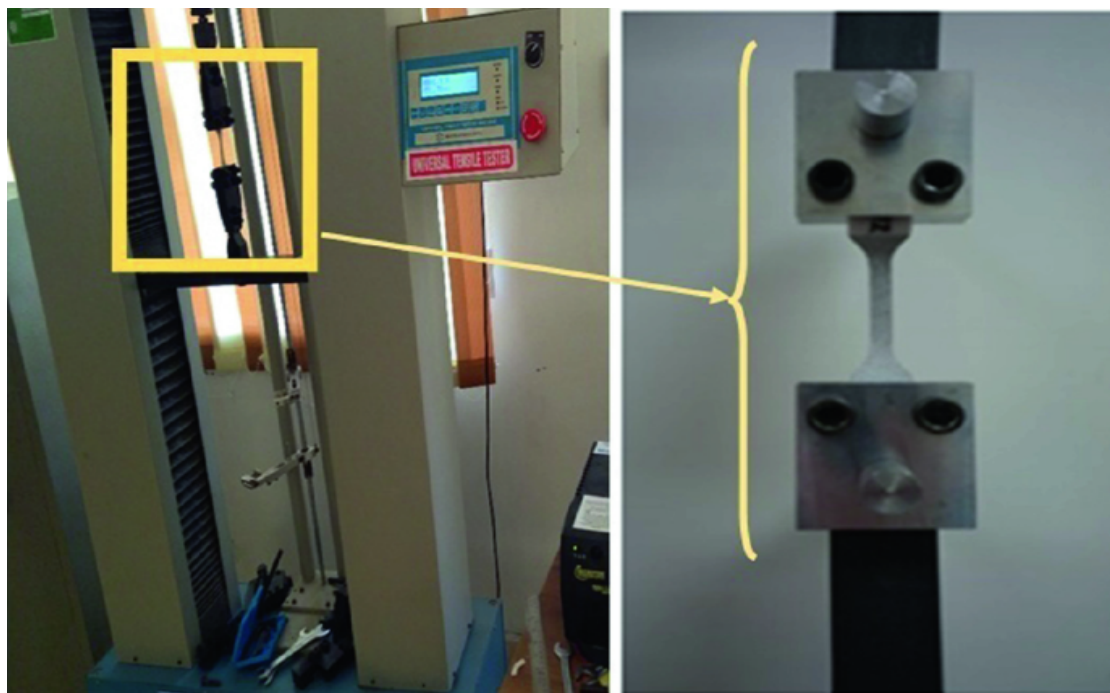


Εικόνα 5.2: Σχηματική απεικόνιση του εργαλείου τριβής που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση [129]

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τη βελτιστοποίηση της διεργασίας σύμφωνα με τη μέθοδο Taguchi με στόχο την ελαχιστοποίηση του σφάλματος και του εύρους των πειραμάτων.

	Ταχύτητα περιστροφής εργαλείου (rpm)	Ταχύτητα Πρόωσης (mm/min)	Βάθος διείδυσης (mm)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Λόγος S/N (dB)
1	900	5	1.5	34.77	30.8241
2	900	7	2	36.07	31.1429
3	900	9	2.5	39.22	31.8702
4	1000	5	2	39.99	32.0390
5	1000	7	2.5	41.60	32.3819
6	1000	9	1.5	40.25	32.0953
7	1100	5	2.5	42.32	32.5309
8	1100	7	1.5	42.38	32.5432
9	1100	9	2	44.67	33.0003

Πίνακας 5.1: Βελτιστοποίηση Taguchi [129]



Εικόνα 5.3: Δοκιμές εφελκυσμού [129]

Διαπιστώθηκε ότι η υπερβολική επεξεργασία είχε επίσης ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ινωδών δομών που επιδρά αρνητικά στη μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων των εξαρτημάτων. Τέλος, με την αύξηση του βάθους διείδυσης των πείρων αυξήθηκε και η αντοχή σε εφελκυσμό των εξαρτημάτων. Παρατηρήθηκε ότι οι βαθύτερες διεισδύσεις είχαν ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της συγκόλλησης μεταξύ των δύο τμημάτων κατά μήκος του βάθους της διεπιφάνειας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για τον λόγο S/N που αντιστοιχεί στα δεδομένα της αντοχής σε εφελκυσμό εμφανίζονται στον πίνακα 5.2. Τα αποτελέσματα της

ανάλυσης ANOVA επιβεβαίωσαν ότι, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, μόνο η «ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου» είχε στατιστικά σημαντική επίδραση στην αντοχή σε εφελκυσμό ($P < 0,05$).

Πηγή	Βαθμός ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Διακύμανση	Τιμή του Fisher	Πιθανότητα(P)	Συνεισφορά (%)
Ταχύτητα περιστροφής εργαλείου (rpm)	2	3.06222	1.53111	38.36	0.025	79.6
Ταχύτητα πρόωσης εργαλείου (mm/s)	2	0.41452	0.20726	5.19	0.161	10.77
Βάθος παροχών (mm)	2	0.29132	0.14566	3.65	0.215	7.57
Υπολειπόμενο σφάλμα	2	0.07983	0.03992			2.07
Σύνολο	8	3.84788				

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα της ANOVA για τον λόγο S/N για την αντοχή σε εφελκυσμό [129]

5.3 Συμπέρασμα

Η ταχύτητα περιστροφής αποδείχθηκε ότι έχει σημαντικό αντίκτυπο στην εφελκυστική αντοχή της συγκόλλησης. Ο τεμαχισμός και οι ινώδεις επιφάνειες ήταν δύο παράμετροι που επιδείνωσαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων [129].

5.4 Υβριδική συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση

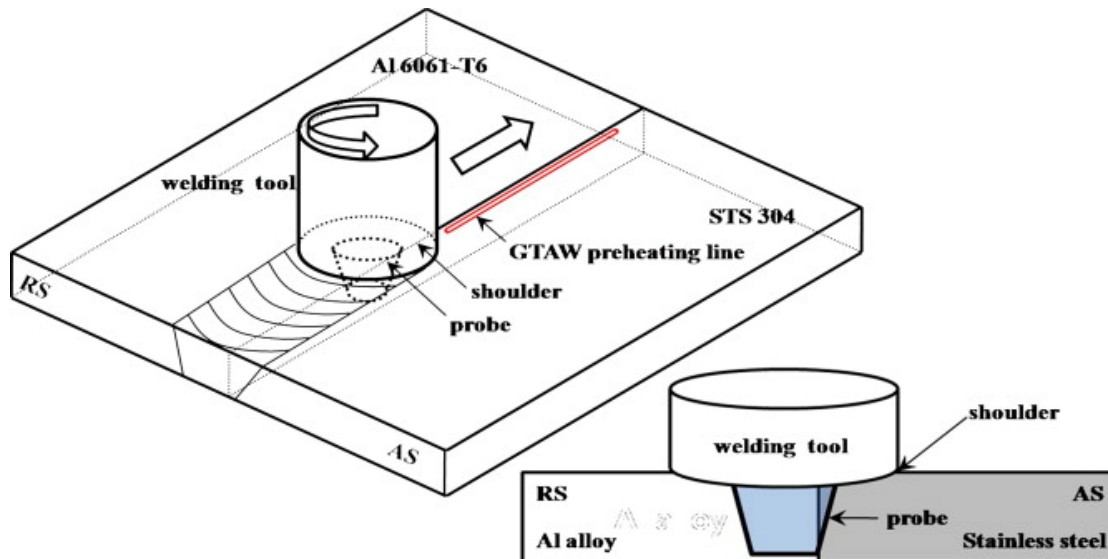
Η νέα τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, γνωστή ως υβριδική συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (HFSW), θέτει τα θεμέλια για την παραγωγή αποτελεσματικής συγκόλλησης τόσο για όμοια όσο και για ανόμοια υλικά, παρά τις διαφορές τους στα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά και την υψηλή χημική συγγένεια, όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο. Το τόξο πλάσματος προσφέρει έναν μοναδικό συνδυασμό φθηνού, από άποψη κόστους, εξοπλισμού, συγκεντρωμένης ενεργειακής πυκνότητας και μεγάλης σταθερότητας του τόξου. Επιπλέον, το τόξο πλάσματος χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με άλλες παραγωγικές διαδικασίες για την αύξηση της αποτελεσματικότητας των παραδοσιακών διαδικασιών συγκόλλησης και κατεργασίας. Ως εκ τούτου, διερευνάται η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση με πλάσμα (P-FSW), προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα και η αποδοτικότητα της συγκόλλησης. Η προθέρμανση με χρήση τόξου πλάσματος, κράματος αλουμινίου και άλλων κραμάτων υψηλής αντοχής βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Επιπλέον, η ενσωμάτωση του τόξου πλάσματος στο εργαλείο FSW μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης ελαττωμάτων στη συγκόλληση. [130,131,132].

5.5 Η περίπτωση της συγκόλλησης HFSW του κράματος αλουμινίου Al6061-T6 με ανοξείδωτο χάλυβα STS304

Η μελέτη των HanSur Bang et al. [133], αναφέρεται στην υβριδική συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (HFSW) με τη βοήθεια της συγκόλλησης με τόξο αερίου βολφραμίου (GTAW), για τη βελτίωση της αντοχής της ένωσης κράματος αλουμινίου (Al6061-T6) με ανοξείδωτο χάλυβα (STS304), με την ενίσχυση της ροής του υλικού, η οποία προκαλείται από την προθέρμανση της ανοξείδωτης επιφάνειας με τη χρήση GTAW.

5.5.1 Πειραματική διαδικασία

Χρησιμοποιήθηκε κράμα αλουμινίου πάχους τριών χιλιοστών (Al6061-T6) και ανοξείδωτος χάλυβας (STS304). Η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. Για τη διαδικασία συγκόλλησης εφαρμόστηκε GTAW με εργαλείο συγκόλλησης FSW (WC-12% CO), με διάμετρο περιαιχηνίου 18 mm, διάμετρο 6 mm και μήκος πείρου 2,7 mm. Το εργαλείο συγκόλλησης είχε κλίση 3° προς τα εμπρός και ήταν μετατοπισμένο προς το κράμα αλουμινίου με τον πείρο μετατοπισμένο περίπου 0,8 mm προς τον χάλυβα. Για να αποφευχθεί η επιφανειακή οξείδωση των συγκολλήσεων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, εφαρμόστηκαν 7 lt/min προστατευτικού αερίου.



Εικόνα 5.4: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας HFSW [133]

Πίνακας 5.4: Χημικές συστάσεις και μηχανικές ιδιότητες για ανόμοια υλικά. [133]

Υλικό	Χημική σύνθεση (wt.%)								
Al6061-T6	Al	Fe	Si	Cr	Mg	Ti	Cu	Mn	Zn
	98	0,7	0,4–0,8	0,04–0,35	0,1	0,03	0,15–0,4	0,15	0,25
Μηχανικές ιδιότητες									
Τάση διαρροής (MPa)	Επιμήκυνση (%)		Τάση εφελκυσμού (MPa)			Πυκνότητα (g/cc)		Σημείο τήξης	
276	12		310			2,7		650	
STS304	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr		
	0,08	1,00	2,00	0,040	0,030	8,0~10,50	18,0~20,0		
Μηχανικές ιδιότητες									
Τάση διαρροής (MPa)	Επιμήκυνση (%)		Τάση εφελκυσμού (MPa)			Πυκνότητα (g/cc)		Σημείο τήξης	
265	55		628			7,94		1450	

Προκειμένου να εξασφαλιστεί μικρότερη φθορά του εργαλείου και καλύτερη ροή του υλικού κατά τη συγκόλληση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4, η εφαρμογή της πηγής θερμότητας για την προθέρμανση της επιφάνειας της πλάκας από ανοξείδωτο χάλυβα έγινε σε ένα σημείο 2 mm από τον ανοξείδωτο χάλυβα μακριά από το κέντρο της συγκόλλησης υπό γωνία 60° δίπλα στη συγκόλληση. Στην «πλευρά προώθησης» βρισκόταν η πλάκα από ανοξείδωτο χάλυβα, ενώ στην «πλευρά υποχώρησης» βρισκόταν η πλάκα από κράμα αλουμινίου. Η HFSW εκτελέστηκε υπό τις ακόλουθες συνθήκες: ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου 300-600 rpm, αξονικό φορτίο 300 kgf και ταχύτητα κίνησης 48 mm/min και ρεύμα GTAW 80 A. Οι παράμετροι για το πείραμα αυτό επιλέχθηκαν από τις συνθήκες συγκόλλησης FSW χωρίς την πηγή θερμότητας προθέρμανσης GTAW της αρχικής μελέτης. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι ένα ρεύμα GTAW 80 A παρήγαγε τη μέγιστη μηχανική ιδιότητα στις συγκολλήσεις HFSW. Μέσω δοκιμών σκληρομέτρησης Vickers και αντοχής σε εφελκυσμό αξιολογήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων. Η σκληρότητα

Vickers προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας φορτίο 0,5 Kgf και διάρκεια παραμονής 10 s κατά μήκος της διατομής του συγκολλημένου δοκιμίου. Η δοκιμή εφελκυσμού των συγκολλημένων δοκιμίων διεξήχθη με βάση το πρότυπο ASTM E8M-04 [133]. Τα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά εξετάστηκαν με οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) με φασματοσκοπία ενεργειακής διασποράς ακτίνων X (EDS).

5.5.2 Χαρακτηριστικά επιφάνειας και διατομής στις συγκολλήσεις FSW και HFSW

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζονται η επιφάνεια και η διατομή των συγκολλήσεων FSW και HFSW, αντίστοιχα. Η μορφολογία των επιφανειακών ατελειών μελετήθηκε για τις συγκολλήσεις FSW και HFSW, σε ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου από 300 rpm έως 600 rpm. Ωστόσο, αρκετά κενά και ένας συνδυασμός χονδροειδών σωματιδίων ανοξειδωτού χάλυβα και κράματος αλουμινίου που διασκορπίστηκαν από την επιφάνεια του ανοξειδωτού χάλυβα από την ανάδευση του πείρου του εργαλείου αποκαλύφθηκαν στη ζώνη ανάδευσης που φαίνεται με το βέλος στη διατομή της συγκόλλησης FSW. Η αντοχή της συγκόλλησης επιδεινώνεται λόγω ορισμένων από τα μεγάλα διασκορπισμένα σωματίδια χάλυβα στην «πλευρά υποχώρησης». Η γραμμή της θραύσης εντοπίζεται στη διεπιφάνεια μεταξύ σωματιδίων αλουμινίου και χάλυβα στον πυρήνα της συγκόλλησης. Λόγω ανεπαρκούς ανάδευσης και παραγωγής θερμότητας, το δοκίμιο συγκολλήθηκε περίπου στα τρία τέταρτα της διαδρομής κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης [133].

Tool rotation speed (rpm)	Travel Speed (mm/min)	Surface	Cross section	
300	48			
400				
500				
600				

(a) FSW welds

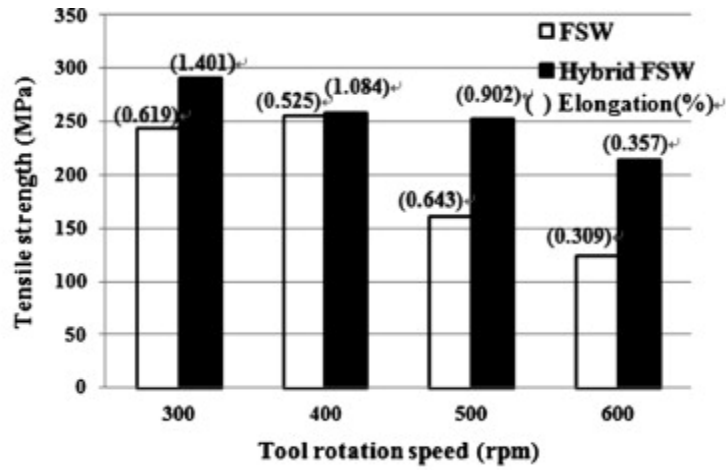
Tool rotation speed (rpm)	Travel Speed (mm/min)	Surface	Cross section	
300	48			
400				
500				
600				

(b) HFS welds

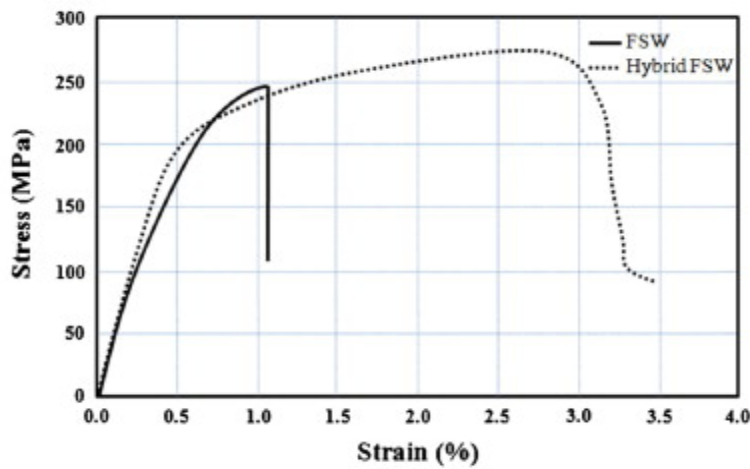
Εικόνα 5.5: Η επιφάνεια και η διατομή των συγκολλήσεων FSW και HFSW με τις ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου [133]

5.5.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά στις συγκολλήσεις FSW και HFSW


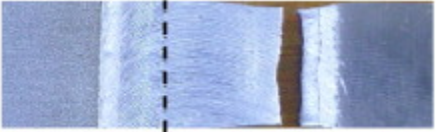
Στην Εικόνα 5.6 παρουσιάζεται η αντοχή σε εφελκυσμό των συγκολλήσεων FSW και HFSW που κατασκευάστηκαν με τις προαναφερθείσες παραμέτρους συγκόλλησης. Πρόκειται για α) την αντοχή των συγκολλήσεων σε εφελκυσμό και β) την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που προκύπτει από τη δοκιμή εφελκυσμού των συγκολλήσεων. Η αντοχή σε εφελκυσμό των συγκολλήσεων HFSW ήταν μεγαλύτερη από εκείνη των συγκολλήσεων FSW στις ίδιες ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου, όπως δείχνει η Εικόνα 5.6α. Η επιφάνεια μεταξύ STS304 και Al6061-T6 είναι το σημείο όπου συνέβη η θραύση στα δοκίμια εφελκυσμού των συγκολλήσεων FSW και HFSW. Σε ταχύτητα περιστροφής 300 rpm, η υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό των συγκολλήσεων HFSW ήταν 290 MPa, ή περίπου 93% της αντοχής σε εφελκυσμό του βασικού μετάλλου κράματος αλουμινίου. Αυτά τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού για τη συγκόλληση HFSW πληρούν τις ελάχιστες μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε εφελκυσμό 270 MPa) σύμφωνα με την εργασία των HanSur Bang et al. [133]. Ενώ η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό 244 MPa επιτεύχθηκε για τις συγκολλήσεις FSW με ταχύτητα περιστροφής 300 rpm, η οποία ήταν περίπου 78% της αντοχής σε εφελκυσμό του βασικού μετάλλου κράματος αλουμινίου. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό των συγκολλήσεων HFSW είναι 15% μεγαλύτερη από εκείνη των συγκολλήσεων FSW, σύμφωνα με τα αποτελέσματα.



(a) Tensile strength



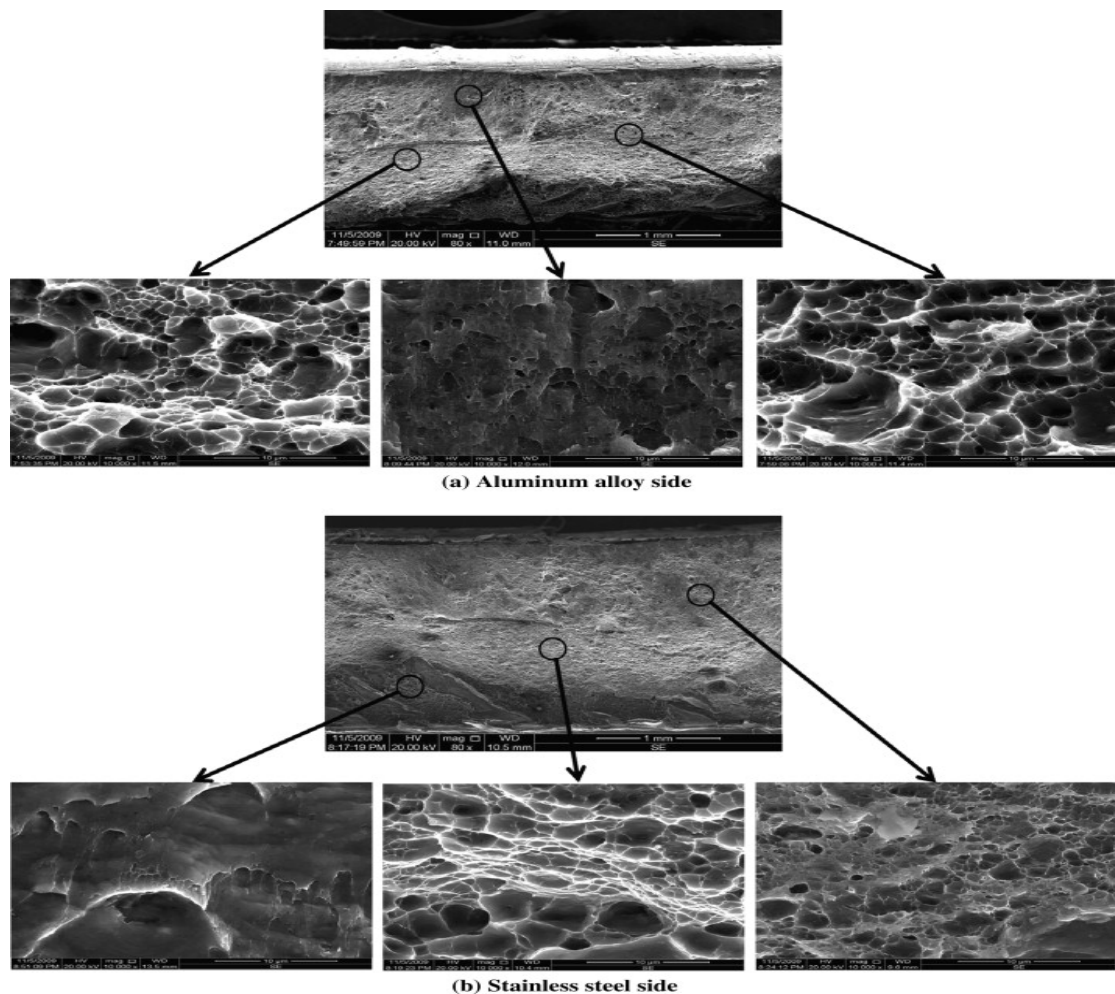
(b) Stress-strain curve

Welding process	Fractured specimens	Fracture mode
FSW	 Inter face	Brittle
HFSW	 Inter face HAZ	Dimple

(c) Fractured specimens

Εικόνα 5.6: Σύγκριση των εφελκυστικών αντοχών των συγκολλήσεων FSW και HFSW με τις ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου [133]

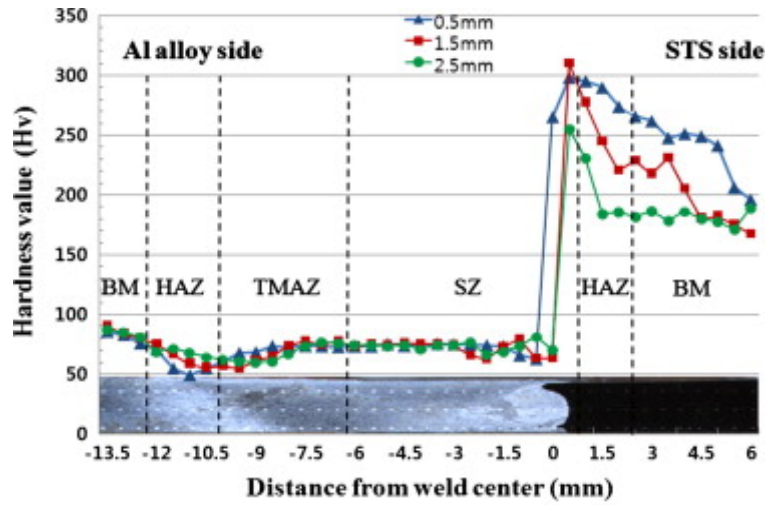
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6b, διαπιστώθηκε ότι οι συγκολλήσεις HFSW παρουσίασαν όλκιμη συμπεριφορά θραύσης. Αυτό το αποτέλεσμα έδειξε ότι η επαρκής πλαστική ροή του υλικού σε ανόμοια υλικά, με την προθέρμανση της πλευράς του ανοξείδωτου χάλυβα GTAW, αυξάνει σημαντικά την επιμήκυνση και βελτιώνει τη συγκόλληση μεταξύ του κράματος αλουμινίου και του ανοξείδωτου χάλυβα.



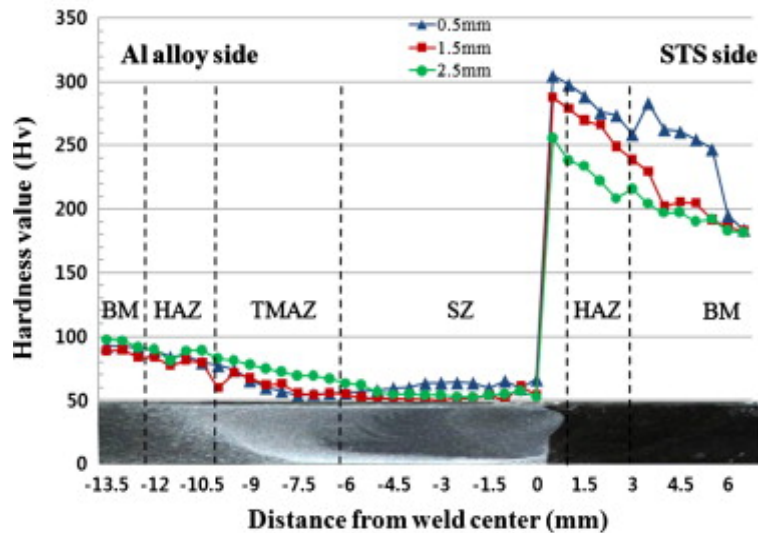
Εικόνα 5.7: Δοκίμιο θραύσης μετά από δοκιμή εφελκυσμού για συγκολλήσεις HFSW [133]

Τα προφίλ σκληρότητας στην κορυφή, στο κάτω μέρος και στο κέντρο της ζώνης συγκόλλησης εμφανίζονται στην Εικόνα 5.8 κατά μήκος της διατομής του συγκολλημένου δοκιμίου. Τα προφίλ σκληρότητας στη μέση, στο κάτω μέρος και στην κορυφή της ζώνης συγκόλλησης παρουσιάζουν παρόμοια ποιοτική τάση. Η σκληρότητα του κράματος αλουμινίου στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη ΘΜΕΠΖ στην «πλευρά υποχώρησης» μειώθηκε κάπως στις συγκολλήσεις FSW. Αυτό εξηγείται από το ενδεχόμενο η θερμομηχανική κρούση που προκλήθηκε από την ανακρουστάλλωση να προκάλεσε τη διάλυση των σωματιδίων της δεύτερης φάσης. Η περιοχή έξω από το κέντρο της συγκόλλησης, περίπου 9-11 mm, έχει τη χαμηλότερη

σκληρότητα. Η διάσπαση των κατακρημνισμάτων κατά τη συγκόλληση είναι η αιτία αυτής της μείωσης της σκληρότητας στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (HAZ) [133].



(a) FS welds



(b) HFS welds

Εικόνα 5.8: Προφίλ σκληρότητας της διατομής των συγκολλήσεων FSW και HFSW [133]

Στην περίπτωση της HFSW, η ελάχιστη τιμή της συγκόλλησης εντοπίζεται στη ζώνη ανάμιξης περίπου 0–6 mm από το κέντρο της συγκόλλησης. Η διάλυση ιζημάτων κατά τη συγκόλληση είναι ο λόγος για τη μειωμένη σκληρότητα της ζώνης ανάδευσης σε σύγκριση με το βασικό μέταλλο, κράμα αλουμινίου. Στα 50 HV κατά μέσο όρο, η τιμή σκληρότητας συγκόλλησης του πυρήνα συγκόλλησης είναι η μισή από την τιμή σκληρότητας του βασικού μετάλλου (100 HV). Αντίθετα, η σκλήρυνση του ανοξείδωτο χάλυβα είναι αυτή που προκαλεί την παρατηρούμενη αύξηση της σκληρότητας και της ΘΕΖ στον ανοξείδωτο χάλυβα.

5.5.4 Συμπεράσματα

Η υβριδική συγκόλληση FSW κράματος αλουμινίου με ανοξειδωτο χάλυβα ήταν βέλτιστη, χωρίς την παρουσία ατελειών στη συγκόλληση, με ταχύτητα περιστροφής 300 rpm χρησιμοποιώντας μια πηγή προθέρμανσης. Η μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό που επιτεύχθηκε στη συγκόλληση ήταν 93% αυτής του βασικού μετάλλου, κράματος αλουμινίου για την HFSW και 78% για την FSW, καταδεικνύοντας τις δυνατότητες αυτής της τεχνικής σε πρακτικές εφαρμογές. Η συμπεριφορά σε θραύση είναι κυρίως όλκιμη με χαρακτηριστικές «μικροοπές» και κατά τόπους ψαθυρή συμπεριφορά με χωρίς εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση. Αυτό το αποτέλεσμα έδειξε ότι η επαρκής ροή πλαστικού υλικού και η επίδραση της μερικής ανόπτησης σε ανόμοια υλικά λόγω της προθέρμανσης του ανοξειδωτου χάλυβα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά αυξημένη επιμήκυνση και να βελτιώσει την αντοχή της συγκόλλησης μεταξύ κράματος αλουμινίου και ανοξειδωτου χάλυβα. Στις συγκολλήσεις HFSW, ο κόκκος του κράματος αλουμινίου στην «πλευρά της υποχωρούσας ζώνης» ήταν λεπτότερος από αυτόν των συγκολλήσεων FSW στην ΘΕΖ και στην ΘΜΕΠΖ. Ο πυρήνας της συγκόλλησης έχει μια σύνθετη δομή με ελαφρώς λεπτότερους κόκκους αλουμινίου και σκεδασμένα σωματίδια χάλυβα [133].

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αρχικά, διαπιστώθηκε ότι η δυναμική ανακρυστάλλωση ενισχύει τη μικροδομή του πυρήνα των συγκολλήσεων ενισχυμένων με νανοσωματίδια SiC και TiC. Το φαινόμενο της πυρηνοποίησης στα όρια των κόκκων ήταν το σταθερό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας. Εκτός από τα μεγάλο μεγέθους νανοσωματίδια που έχουν σπάσει και κατακερματιστεί ως αποτέλεσμα της ανάδευσης, δεν ανιχνεύθηκε καμία χημική αντίδραση μεταξύ των νανοσωματιδίων και του μητρικού υλικού ή των ενδομεταλλικών ενώσεων.
- Για τη συγκόλληση FSW των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δοκιμίων από ακρυλονιτρίλιο-βουταδιένιο-στυρένιο διαπιστώθηκε ότι η αντοχή στον εφελκυσμό της συγκόλλησης επηρεάστηκε σημαντικά από την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου. Ο τεμαχισμός και οι ινώδεις επιφάνειες ήταν δύο σημαντικά ζητήματα που επιδείνωσαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων.
- Για τη συγκόλληση μεταξύ του κράματος αλουμινίου Al6061-T6 με ανοξείδωτο χάλυβα STS304 επιτεύχθηκαν καλές μηχανικές ιδιότητες. Αντίθετα, επειδή τα υλικά αυτά είχαν διαφορετικές χημικές και φυσικές ιδιότητες, η υψηλή εισροή θερμότητας δεν οδήγησε σε κατάλληλες συνθήκες συγκόλλησης μεταξύ των φύλλων.
- Χρησιμοποιώντας θερμαινόμενη πηγή θερμότητας GTAW, η συγκόλληση HFSW κράματος αλουμινίου με ανοξείδωτο χάλυβα ολοκληρώθηκε ικανοποιητικά και χωρίς ελαττώματα συγκόλλησης σε ταχύτητα περιστροφής 300 στροφών ανά λεπτό.
- Η μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό που επιτεύχθηκε στη συγκόλληση ήταν, 93% του βασικού μετάλλου κράματος αλουμινίου για την HFSW και 78% για την FSW, καταδεικνύοντας τις δυνατότητες αυτής της τεχνικής σε πρακτικές εφαρμογές.

7. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι η μια σχετικά νέα μέθοδος συγκόλλησης, που χρησιμοποιείται πλέον ευρέως στη βιομηχανία και με συνεχή έρευνα και ανάπτυξη. Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάστηκε η μέθοδος και οι συγκεκριμένες εφαρμογές της στην πράξη για συγκολλήσεις ενισχυμένες με κεραμικά νανοσωματίδια.

Προκλήσεις:

1. Διασπορά νανοσωματιδίων: Η διασπορά νανοσωματιδίων μπορεί να οδηγήσει σε διακυμάνσεις των μηχανικών ιδιοτήτων και να θέσει σε κίνδυνο την ακεραιότητα της συγκόλλησης.

2. Φθορά και συντήρηση των εργαλείων: Η παρουσία κεραμικών νανοσωματιδίων μπορεί να επιταχύνει τη φθορά του εργαλείου κατά τη διαδικασία FSW λόγω αυξημένης φθοράς που προκύπτει από τη τριβή. Αυτό απαιτεί συχνές επιθεωρήσεις και αντικαταστάσεις εργαλείων, αυξάνοντας το λειτουργικό κόστος.

3. Διασφάλιση ποιότητας: Είναι αδύνατο να υπερεκτιμηθεί η σημασία των εξελιγμένων μεθόδων επιθεώρησης για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ποιότητας των συγκολλήσεων FSW. Οι τεχνικές αυτές, ικανές να ανιχνεύουν ελαττώματα στη νανοκλίμακα, αποτελούν σημαντικό βήμα προόδου στον τομέα μας. Οι παραδοσιακές μη καταστροφικές μέθοδοι ενδέχεται να μην επαρκούν, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη νέων μεθόδων ανίχνευσης ελαττωμάτων.

4. Συμβατότητα υλικών: Ζητήματα συμβατότητας ενδέχεται να προκύψουν κατά την ενσωμάτωση κεραμικών νανοσωματιδίων σε ορισμένα κρίσιμα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στη ναυπηγική βιομηχανία, όπως κράμα αλουμινίου και χάλυβες. Τα ζητήματα συμβατότητας είναι απαραίτητα για την αποφυγή ανεπιθύμητων επιπτώσεων ή υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων.

Μελλοντικές προοπτικές:

1. Ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες: Η FSW προσφέρει τη δυνατότητα για συγκολλήσεις με ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης αντοχής σε κόπωση και αντοχής στη διάβρωση. Οι συνεχιζόμενες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης στοχεύουν στη μεγιστοποίηση αυτών των πλεονεκτημάτων, με αποτέλεσμα να προκύψουν νέες δυνατότητες για το σχεδιασμό και την κατασκευή πλοίων.

2. Ασφάλεια κατασκευών: Βελτιώνοντας τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων, η συγκόλληση FSW, με τη προσθήκη κεραμικών νανοσωματιδίων, επιτρέπει την κατασκευή ελαφρύτερων πλοίων χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια ή η

ανθεκτικότητα. Αυτό συμβάλλει στην αποδοτικότητα των καυσίμων και στην εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους.

3. Περιβαλλοντική βιωσιμότητα: Η ικανότητά της FSW να κατασκευάζει ελαφριά, ενεργειακά αποδοτικά πλοία, σε συνδυασμό με τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων, θέτει τα θεμέλια της υιοθέτησης αυτής της τεχνικής για ένα βιώσιμο μέλλον.

4. Εφαρμογή στη βιομηχανία: Δεν υπάρχουν πολλές χρήσεις για αυτή τη διαδικασία συγκόλλησης στους βιομηχανικούς, βιοτεχνικούς ή εκπαιδευτικούς τομείς της Ελλάδας. Η ανάπτυξη της μεθόδου σε παραγωγικούς τομείς (π.χ. ναυπηγεία) και η εκπαίδευση επαγγελματιών συγκολλητών στην Ελλάδα θα καταστεί δυνατή με την εισαγωγή της μεθόδου στα προγράμματα εκπαίδευσης συγκολλήσεων, την καθιέρωση σχετικών σεμιναρίων και την απαραίτητη υποδομή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kolahalam LA, Viswanath IVK, Diwakar BS, Govindh B, Reddy V, Murthy YLN. Review on nanomaterials: synthesis and applications. *Mater Today Proc.* 2019;18:2182–90.
- [2] ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΤΙΤΑΝΙΑ ΓΙΑ ΦΩΤΟΚΑΤΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Διπλωματική Εργασία Ράππος Στέφανος, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ
- [3] Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists, Nadeem Joudeh & Dirk Linke
- [4] Khan I, Saeed K, Khan I. Nanoparticles: properties, applications and toxicities. *Arab J Chem.* 2019;12(7):908–31.
- [5] Pan K, Zhong Q. Organic nanoparticles in foods: fabrication, characterization, and utilization. *Annu Rev Food Sci Technol.* 2016;7:245–66.
- [6] Ng KK, Zheng G. Molecular interactions in organic nanoparticles for phototheranostic applications. *Chem Rev.* 2015;115(19):11012–42.
- [7] Gujrati M, Malamas A, Shin T, Jin E, Sun Y, Lu Z-R. Multifunctional cationic lipid-based nanoparticles facilitate endosomal escape and reduction-triggered cytosolic siRNA release. *Mol Pharm.* 2014;11(8):2734–44.
- [8] Long CM, Nascarella MA, Valberg PA. Carbon black vs black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: physical and chemical distinctions. *Environ Pollut.* 2013;181:271–86.
- [9] Dresselhaus MS, Dresselhaus G, Eklund PC. Fullerenes. *J Mater Res.* 1993;8(8):2054–97.
- [10] Yuan X, Zhang X, Sun L, Wei Y, Wei X. Cellular toxicity and immunological effects of carbon-based nanomaterials. *Part Fibre Toxicol.* 2019;16(1):1–27.
- [11] Lu K-Q, Quan Q, Zhang N, Xu Y-J. Multifarious roles of carbon quantum dots in heterogeneous photocatalysis. *J Energy Chem.* 2016;25(6):927–35
- [12] Mauter MS, Elimelech M. Environmental applications of carbon-based nanomaterials. *Environ Sci Technol.* 2008;42(16):5843–59.
- [13] Oh W-K, Yoon H, Jang J. Size control of magnetic carbon nanoparticles for drug delivery. *Biomaterials.* 2010;31(6):1342–8.
- [14] Liu M, Zhao F, Zhu D, Duan H, Lv Y, Li L, et al. Ultramicroporous carbon nanoparticles derived from metal–organic framework nanoparticles for high-performance supercapacitors. *Mater Chem Phys.* 2018;211:234–41.

- [15] Chandra S, Das P, Bag S, Laha D, Pramanik P. Synthesis, functionalization and bioimaging applications of highly fluorescent carbon nanoparticles. *Nanoscale*. 2011;3(4):1533–40.
- [16] Mochalin VN, Shenderova O, Ho D, Gogotsi Y. The properties and applications of nanodiamonds. *Nat Nanotechnol*. 2012;7(1):11–23.
- [17] Ahlawat J, Asil SM, Barroso GG, Nurunnabi M, Narayan M. Application of carbon nano onions in the biomedical field: recent advances and challenges. *Biomater Sci*. 2021.
- [18] Toshima N, Yonezawa T. Bimetallic nanoparticles—novel materials for chemical and physical applications. *New J Chem*. 1998;22(11):1179–201.
- [19] Nascimento MA, Cruz JC, Rodrigues GD, de Oliveira AF, Lopes RP. Synthesis of polymetallic nanoparticles from spent lithium-ion batteries and application in the removal of reactive blue 4 dye. *J Clean Prod*. 2018;202:264–72.
- [20] Mody VV, Siwale R, Singh A, Mody HR. Introduction to metallic nanoparticles. *J Pharm Bioallied Sci*. 2010;2(4):282.
- [21] Fedlheim DL, Foss CA. *Metal nanoparticles: synthesis, characterization, and applications*. Boca Raton: CRC Press; 2001.
- [22] Dreaden EC, Alkilany AM, Huang X, Murphy CJ, El-Sayed MA. The golden age: gold nanoparticles for biomedicine. *Chem Soc Rev*. 2012;41(7):2740–79.
- [23] Gupta SM, Tripathi M. An overview of commonly used semiconductor nanoparticles in photocatalysis. *High Energy Chem*. 2012;46(1):1–9.
- [24] Sun S, Murray CB, Weller D, Folks L, Moser A. Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices. *Science (80-)*. 2000;287(5460):1989–92.
- [25] Thomas S, Kumar Mishra P, Talegaonkar S. Ceramic nanoparticles: fabrication methods and applications in drug delivery. *Curr Pharm Des*. 2015;21(42):6165–88.
- [26] Moreno-Vega A-I, Gomez-Quintero T, Nunez-Anita R-E, Acosta-Torres L-S, Castaño V. Polymeric and ceramic nanoparticles in biomedical applications. *J Nanotechnol*. 2012.
- [27] D'Amato R, Falconieri M, Gagliardi S, Popovici E, Serra E, Terranova G, et al. Synthesis of ceramic nanoparticles by laser pyrolysis: from research to applications. *J Anal Appl Pyrolysis*. 2013;104:461–9.
- [28] Wu Q, Miao W, Gao H, Hui D. Mechanical properties of nanomaterials: a review. *Nanotechnol Rev*. 2020;9(1):259–73.
- [29] Pithawalla YB, El-Shall MS, Deevi SC, Ström V, Rao KV. Synthesis of magnetic intermetallic FeAl nanoparticles from a non-magnetic bulk alloy. *J Phys Chem B*. 2001;105(11):2085–90.

- [30] Keesom WH. On the deduction of the equation of state from Boltzmann's entropy principle'. *KNAW Proc.* 1912;15:240–56.
- [31] Debye P. Molecular forces and their electrical interpretation. *Phys Zeitschrift.* 1921;22:302–8.
- [32] London F. The general theory of molecular forces. *Trans Faraday Soc.* 1937;33:8b–26.
- [33] Guo D, Xie G, Luo J. Mechanical properties of nanoparticles: basics and applications. *J Phys D Appl Phys.* 2013;47(1):13001.
- [34] Missana T, Adell A. On the applicability of DLVO theory to the prediction of clay colloids stability. *J Colloid Interface Sci.* 2000;230(1):150–6.
- [35] Brant J, Lecoanet H, Wiesner MR. Aggregation and deposition characteristics of fullerene nanoparticles in aqueous systems. *J Nanoparticle Res.* 2005;7(4):545–53.
- [36] Tan S, Sherman RL, Ford WT. Nanoscale compression of polymer microspheres by atomic force microscopy. *Langmuir.* 2004;20(17):7015–20.
- [37] Armini S, Vakarelski IU, Whelan CM, Maex K, Higashitani K. nanoscale indentation of polymer and composite polymer–silica core–shell submicrometer particles by atomic force microscopy. *Langmuir.* 2007;23(4):2007–14.
- [38] Savage T, Rao AM. Thermal properties of nanomaterials and nanocomposites. In: *Thermal conductivity.* Springer; 2004. p. 261–84.
- [39] Andrievski RA. Review of thermal stability of nanomaterials. *J Mater Sci.* 2014;49(4):1449–60.
- [40] Qiu L, Zhu N, Feng Y, Michaelides EE, Żyła G, Jing D, et al. A review of recent advances in thermophysical properties at the nanoscale: from solid state to colloids. *Phys Rep.* 2020;843:1–81.
- [41] Shima PD, Philip J, Raj B. Role of microconvection induced by Brownian motion of nanoparticles in the enhanced thermal conductivity of stable nanofluids. *Appl Phys Lett.* 2009;94(22): 223101.
- [42] Syam Sundar L, Sharma KV. Thermal conductivity enhancement of nanoparticles in distilled water. *Int J Nanoparticles.* 2008;1(1):66–77.
- [43] Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Appl Phys Lett.* 2001;78(6):718–20.
- [44] Zebarjadi M, Esfarjani K, Shakouri A, Bahk J-H, Bian Z, Zeng G, et al. Effect of nanoparticle scattering on thermoelectric power factor. *Appl Phys Lett.* 2009;94(20): 202105.

- [45] Zeng G, Zide JMO, Kim W, Bowers JE, Gossard AC, Bian Z, et al. Cross-plane Seebeck coefficient of Er As: In Ga As/In Ga Al As superlattices. *J Appl Phys*. 2007;101(3):34502.
- [46] Kim W, Singer SL, Majumdar A, Vashaee D, Bian Z, Shakouri A, et al. Cross-plane lattice and electronic thermal conductivities of Er As: In Ga As/ In Ga Al As superlattices. *Appl Phys Lett*. 2006;88(24):242107.
- [47] Likhachev VN, Vinogradov GA, Alymov MI. Anomalous heat capacity of nanoparticles. *Phys Lett A*. 2006;357(3):236–9.
- [48] Wang L, Tan Z, Meng S, Liang D, Li G. Enhancement of molar heat capacity of nanostructured Al₂O₃. *J Nanoparticle Res*. 2001;3(5):483–7.
- [49] Druzhinina A, Varushchenko RA, Li G. Heat capacity enhancement and thermodynamic properties of nanostructured amorphous SiO₂. *J Non Cryst Solids*. 2001;296(1–2):139–42.
- [50] Borel J-P. Thermodynamical size effect and the structure of metallic clusters. *Surf Sci*. 1981;106(1–3):1–9.
- [51] Gülseren O, Ercolessi F, Tosatti E. Premelting of thin wires. *Phys Rev B*. 1995;51(11):7377.
- [52] Shim J-H, Lee B-J, Cho YW. Thermal stability of unsupported gold nanoparticle: a molecular dynamics study. *Surf Sci*. 2002;512(3):262–8.
- [53] Naitabdi A, Ono LK, Behafarid F, Cuenya BR. Thermal stability and segregation processes in self-assembled size-selected Au x Fe_{1-x} nanoparticles deposited on TiO₂ (110): composition effects. *J Phys Chem C*. 2009;113(4):1433–46.
- [54] Mottet C, Rossi G, Baletto F, Ferrando R. Single impurity effect on the melting of nanoclusters. *Phys Rev Lett*. 2005;95(3):35501.
- [55] Cuenya BR. Synthesis and catalytic properties of metal nanoparticles: size, shape, support, composition, and oxidation state effects. *Thin Solid Films*. 2010;518(12):3127–50.
- [56] Nealon GL, Donnio B, Greget R, Kappler J-P, Terazzi E, Gallani J-L. Magnetism in gold nanoparticles. *Nanoscale*. 2012;4(17):5244–58.
- [57] Matthias BT, Clogston AM, Williams HJ, Corenzwit E, Sherwood RC. Ferromagnetism in solid solutions of Scandium and Indium. *Phys Rev Lett*. 1961;7(1):7.
- [58] Matthias BT, Bozorth RM. Ferromagnetism of a zirconium–zinc compound. *Phys Rev*. 1958;109(2):604.
- [59] Acker F, Fisk Z, Smith JL, Huang CY. Enhanced paramagnetism of TiBe₂ and ferromagnetic transitions in TiBe₂-xCu_x. *J Magn Magn Mater*. 1981;22(3):250–6.

- [60] Hori H, Teranishi T, Nakae Y, Seino Y, Miyake M, Yamada S. Anomalous magnetic polarization effect of Pd and Au nano-particles. *Phys Lett A*. 1999;263(4–6):406–10.
- [61] McCurrie RA. *Ferromagnetic materials: structure and properties*. Cambridge: Academic Press; 1994.
- [62] Edelstein AS, Cammaratra RC. *Nanomaterials: synthesis, properties and applications*. Boca Raton: CRC Press; 1998.
- [63] Jun Y, Seo J, Cheon J. Nanoscaling laws of magnetic nanoparticles and their applicabilities in biomedical sciences. *Acc Chem Res*. 2008;41(2):179–89.
- [64] Skumryev V, Stoyanov S, Zhang Y, Hadjipanayis G, Givord D, Nogués J. Beating the superparamagnetic limit with exchange bias. *Nature*. 2003;423(6942):850–3.
- [65] Kolhatkar AG, Jamison AC, Litvinov D, Willson RC, Lee TR. Tuning the magnetic properties of nanoparticles. *Int J Mol Sci*. 2013;14(8):15977–6009.
- [66] Hu M, Butt H-J, Landfester K, Bannwarth MB, Wooh S, Thérien-Aubin H. Shaping the assembly of superparamagnetic nanoparticles. *ACS Nano*. 2019;13(3):3015–22.
- [67] Marghussian V, Marghussian V. *Nano-glass ceramics*. Amsterdam: Elsevier; 2015.
- [68] Kalubowilage M, Janik K, Bossmann SH. Magnetic nanomaterials for magnetically-aided drug delivery and hyperthermia. *Appl Sci*. 2019;9(14):2927.
- [69] Podaru G, Chikan V. *Magnetism in nanomaterials: heat and force from colloidal magnetic particles*. 2017;
- [70] Sokoluk M, Cao C, Pan S, et al. Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075. *Nat Commun*. 2019;10:98
- [71] Available:<https://www.tasnimnews.com/en/news/2019/11/23/2144926/iran-makes-anti-mossnano-coating-for-watercraft>)
- [72] Available:<https://statnano.com/news/67320/Nanotechnology-Wave-Now-Hits-the-MarineSector-to-Tackle-Corrosion-and-Biofouling>
- [73] University of Stuttgart Develops New Friction Stir Welding Process for Joining Aluminum and Steel Plates
- [74] R.S. Mishraa and Z.Y. Ma, Z, “Friction stir welding and processing,” *Materials Science and Engineering R*, 50, 1–78, 2005.
- [75] Friction stir welding: Process, automation, and control, B.T. Gibson a, D.H. Lammlein b, T.J. Prater c, W.R. Longhurst d, C.D. Cox a, M.C. Ballun a, K.J. Dharmaraj a, G.E. Cook a, A.M. Strauss a

- [76] Fundamentals of Friction Stir Welding, Its Application, and Advancements Chapter First Online: 13 February 2021
- [77] ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ Διπλωματική Εργασία ΤΣΟΤΡΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
- [78] Review The Common Defects In Friction Stir Welding Abdulaziz I. Albannai
- [79] Rosado, L.S., et al., Advanced technique for nondestructive testing of friction stir welding of metals. Measurement, 2010. 43(8): p. 1021-1030.
- [80] Chowdhury, S., et al., Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch. Materials Science and Engineering: A, 2010. 527(21-22): p. 6064-6075.
- [81] Mandache, C., et al., Non-destructive detection of lack of penetration defects in friction stir welds. Science and Technology of Welding and Joining, 2012. 17(4): p. 295-303.
- [82] Dos Santos, T.G., P.M. Ramos, and P. dos Santos Vilaça. Non destructive testing of friction stir welding: Comparison of planar eddy current probes. in 16th IMEKO TC4 Symposium. 2008
- [83] Friction stir welding of aluminium ships 2007 International Forum on Welding Technologies in the Shipping Industry (IFWT) during the Beijing Essen Welding and Cutting Fair in Shanghai, 16–19 June 2007.
- [84] Application of innovative welding methods to prefabricate aluminium Panels. Speed at Sea, October 2004, S. 23.
- [85] Application of friction stir welding in the shipbuilding industry. Lightweight Construction – Latest Developments. The Royal Institution of Naval Architects, London, 24–25 February 2000.
- [86] Sandra Knisely: Friction stir welding fuses engineering research and Wisconsin industry. 11 May 2010.
- [87] Wikipedia article on USS Freedom (LCS-1).
- [88] Protector/Rotoiti class Inshore Patrol Vessel - IPV.
- [89] Wikipedia article on the Lake-class inshore patrol vessels.
- [90] Wikipedia article on Roy Geddes - Friction stir welding.
- [91] Thomas WM, Nicholas ED et al (1991) Friction welding, the welding institute TWI patent application no. 91259788, Cambridge
- [92] M.D. Hayat, H. Singh, Z. He, P. Cao Titanium metal matrix composites: an overview Compos Appl Sci Manuf, 121 (2019)

- [93] M. Bahrami, K. Dehghani, M.K. Besharati Givi A novel approach to develop aluminum matrix nano-composite employing friction stir welding technique Mater Des, 53 (2014)
- [94] M. Tabasi, M. Farahani, M.K.B. Givi, M. Farzami, A. Moharami Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles
- [95] Μελέτη δημιουργίας συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση κραμάτων αλουμινίου ενισχυμένων με κεραμικά νανοσωματίδια» ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ Καρακίζης Παναγιώτης του Νικολάου Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π
- [96] A. Sanaty-Zadeh Comparison between current models for the strength of particulate-reinforced metal matrix nanocomposites with emphasis on consideration of Hall-Petch effect Mater Sci Eng A, 531 (2012)
- [97] Y.S. Sato, M. Urata, H. Kokawa, K. Ikeda Hall-Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys Mater Sci Eng A, 354 (2003)
- [98] S. Iijima, T. Ichihashi Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter Nature, 363 (1993)
- [99] Avettand-Fènoël MN, Simar A, Shabadi R, Taillard R, de Meester B (2014) Characterization of Oxide Dispersion Strengthened Copper Based Materials Developed by Friction Stir Processing. Matls & Desg. 60, 343-57
- [100] Journal of Materials Research and Technology Volume 9, Issue 6, November–December 2020, Pages 16459-16487
- [101] Journal of Materials Processing Technology Volume 203, Issues 1–3, 18 July 2008, Pages 46-57
- [102] A review on nanomaterials reinforcement in friction stir welding, Sufian Raja a, Mohd Ridha Muhamad a b, Mohd Fadzil Jamaludin b, Farazila Yusof a b
- [103] M. Farahmand Nikoo, H. Azizi, N. Parvin, H. Yousefpour Naghibi The influence of heat treatment on microstructure and wear properties of friction stir welded AA6061-T6/Al₂O₃ nanocomposite joint at four different traveling speed J Manuf Process, 22 (2016)
- [104] University of Stuttgart Develops New Friction Stir Welding Process for Joining Aluminum and Steel Plates
- [105] 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

- [106] Pantelis, D.I.; Karakizis, P.N.; Daniolos, N.M.; Charitidis, C.A.; Koumoulos E.P.; Dragatogiannis D.A. Microstructural study and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6082-T6 reinforced with SiC nanoparticles. *Materials and Manufacturing Processes* 2015.
- [107] Sathiskumar, R.; Murugan, N.; Dinaharan, I.; Vijay, S.J. Characterization of boron carbide particulate reinforced in situ copper surface composites synthesized using friction stir processing. *Materials Characterization* 2013, 84, 16–27.
- [108] Friction Stir Welding of dissimilar aluminum-steel joints for the shipbuilding industry Davide Campanella, Gianluca Buffa and Livan Fratini
- [109] Jácome, L. A., Weber S., Leitner A., Arenholz E., Bruckner J., Hackl H. Influence of filler composition on the microstructure and mechanical properties of steelaluminum joints produced by metal arc joining, *Adv Eng Mater*, 2009, Vol. 11, pp. 350-8.
- [110] Wan, L., Huang, T., Microstructure and Mechanical Properties of Al/Steel Friction Stir Lap Weld, *Metals* 2017, Vol. 7, doi:10.3390/met7120542
- [111] Morel F. and Hénaff G. (2005), *Fatigue des structures*. Ellipses
- [112] The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process Mustafa Boz, Adem Kurt
- [113] Ericsson M, Sandström R (2003) Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. *Int J Fatigue* 25:1379–1387
- [114] Zhou CZ, Yang XQ, Luan GH (2006) Investigation of microstructures and fatigue properties of friction stir welded Al-Mg alloy. *Mater Chem Phys* 98:285–290
- [115] Hori H, Makita S, Hino H (1999) Friction stir welding of rolling stock for subway. *Proceedings of the first international FSW symposium*. Thousand Oaks, USA
- [116] Le Jolu T (2012) Etude de l'influence des défauts de soudage sur le comportement plastique et la durée de vie en fatigue de soudures par friction malaxage d'un alliage Al-Cu-Li. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France
- [117] Fatigue behavior of FSW high-yield strength steel welds for shipbuilding application Julien Beaudet, Guillaume Rückert & François Cortial
- [118] Konkol PJ, Mathers JA, Johnson R, Pickens JR (2003) Friction stir welding of HSLA-65 steel for shipbuilding. *J Ship Prod* 19:159–164
- [119] Sanderson SC (2012) The effect of friction stir welding process parameters on Charpy V-notch impact toughness in HSLA-65, all theses and dissertations, Brigham Young University, 3745

- [120] NF EN ISO 15614-1/A1 (2008) Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Épreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage - Partie 1 : soudage à l'arc et aux gaz des aciers et soudage à l'arc des nickels et alliages de nickel, AFNOR
- [121] ISO/TR 14345 Standard (2012) Fatigue — fatigue testing of welded components — guidance. BSI Standards Publication
- [122] Document IIW-1823-07 (2007) Recommendations for fatigue design of welded joints and components. International Institute of Welding
- [123] ISO 12107 (2012) Metallic materials -- fatigue testing -- statistical planning and analysis of data. ISO Standard
- [124] White D (2002) Object consolidation employing friction joining, US patent, Patent No.: US 6,457,629 B1
- [125] Lequeu PH, Muzzolini R, Ehrstrom JC, Bron F, Maziarz R (2006) Powerpoint presentation on: high performance friction stir welded structures using advanced alloys. In: Aeromat conference, Seattle, WA
- [126] Baumann JA (2012) Technical report on: production of energy efficient preform structures. The Boeing Company, Huntington Beach, CA
- [127] Sharma A, Bandari V, Ito K, Kohama K, Ramji M, BV HS (2017) A new process for design and manufacture of tailor-made functionally graded composites through friction stir additive manufacturing. J Manuf Process 26:122–130
- [128] Palanivel S, Nelaturu P, Glass B, Mishra RS (2015) Friction stir additive manufacturing for high structural performance through microstructural control in an Mg based WE43 alloy. Mater Des 65:934–952
- [129] Materials Forming, Machining and Post Processing Chapter On Friction-Stir Welding of 3D Printed Thermoplastics June 2019 pp 75–91, Sunpreet Singh, Chander Prakash & Munish K. Gupta
- [130] A new method of hybrid friction stir welding assisted by friction surfacing for joining dissimilar Ti/Al alloy Y Huang, Z Lv, L Wan, J Shen, JF dos Santos - Materials Letters, 2017
- [131] Hybrid friction stir welding of high-carbon steel DH Choi, CY Lee, BW Ahn
- [132] Hybrid approaches of assisted heating and cooling for friction stir welding of copper to aluminum joints KP Mehta, VJ Badheka - Journal of Materials Processing Technology, 2017
- [133] Gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials Al6061-T6 aluminum alloy and STS304 stainless steel HanSur Bang, HeeSeon Bang, GeunHong Jeon, IkHyun Oh, ChanSeung