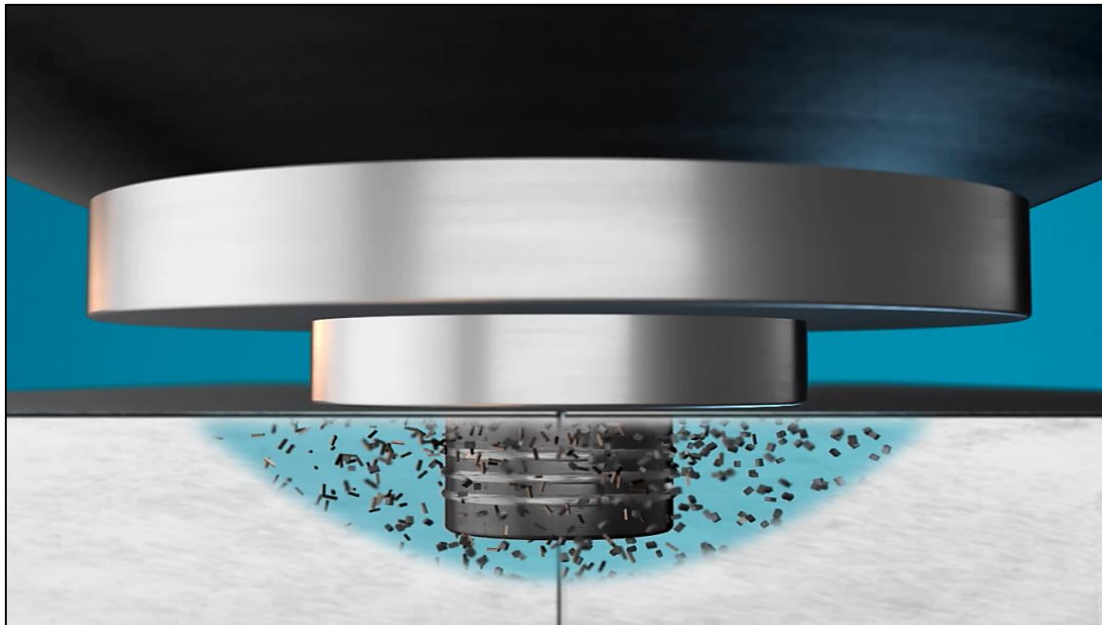




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ (ΜΕ Ή ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ) ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

*ΥΠΕΥΘΥΝΟΙ ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΜΑΝΑΡΑΚΗΣ , 44087
ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΤΣΟΥΛΟΣ , 43801*

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: Δρ. ΠΑΝΔΩΡΑ Π. ΨΥΛΛΑΚΗ
ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Γ. ΜΟΥΡΛΑΣ**

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά στη μελέτη και βελτιστοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής κραμάτων αλουμινίου (με ή χωρίς προθέρμανση). Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding-FSW) είναι μια τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, η οποία σημείωσε ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη από το 1991. Πλέον, έχει εξελιχθεί σε μια ιδιαιτέρως ελκυστική τεχνική για τη συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων και βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας.

Στην πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε θεωρητική μελέτη της τεχνικής αυτής για τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου. Αναλύσαμε και συγκρίναμε αποτελέσματα και συμπεράσματα σύγχρονων ερευνητών του κλάδου. Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να κατανοήσουμε τις βασικές θεμελιώδεις αρχές, τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη διαδικασία συγκόλλησης της μεθόδου, να αναγνωρίζουμε πιθανά ελαττώματα στην συγκόλληση ώστε να είμαστε σε θέση να προτείνουμε πιθανές λύσεις, που θα συνεισφέρουν στη βελτιστοποίησή της.

Λέξεις κλειδιά: συγκόλληση τριβής, κράματα αλουμινίου, θεωρητική μελέτη, παράμετροι που επηρεάζουν τη μέθοδό μας, εξέλιξη τεχνικής

Abstract

The diploma thesis presented here concerns a thorough literature research on the issue of Friction Stir Welding (FSW), with or without preheating. Friction stir welding (FSW) is a solid state technique developed recently, 1991, and has evolved into a particularly widespread process in many industry sectors, because of its inherent advantage for welding dissimilar materials.

In this thesis a theoretical study of the technique for a wide range of aluminum alloys was carried out. The results and the main conclusions of a number of recent published scientific articles have been analyzed and compared.

The aim of this work was to:

- Thoroughly understand the fundamentals of the technique.
- To correlate the processing parameters with the welding achieved and the quality of the latter.
- To evaluate possible suggestions that can contribute to the optimization of the processing technique.

Keywords: friction stir welding, aluminum alloys, theoretical study, parameters that affect the welding process, technique development

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μας εργασίας, θα θέλαμε να εκφράσουμε τις πιο θερμές ευχαριστίες μας, στην επιβλέπουσα, Δρ. Πανδώρα Π. Ψυλλάκη Αναπλ. καθηγήτρια, του τμήματος μηχανολογίας Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής και τον κύριο Αθανάσιο Γ. Μουρλά, εργαστηριακό συνεργάτη του τμήματος μηχανολογίας Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, για την συνεχή ενθάρρυνση, κατανόηση και υποστήριξη που μας έδειξαν αλλά και για την άρτια επιστημονική καθοδήγηση που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας, για την αμέριστη υποστήριξη και υπομονή που έδειξαν σε όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μας, που στάθηκαν διακριτικά στο πλευρό μας, σε κακές και καλές στιγμές. Εκφράζουμε τις θερμότερες ευχαριστίες μας τόσο για την ηθική τους συμπαράσταση, όσο και για την υλική τους υποστήριξη και τους αφιερώνουμε αυτή την πτυχιακή εργασία.

Περιεχόμενα

Περίληψη	ii
Abstract.....	iii
Ευχαριστίες	iv
Περιεχόμενα.....	v
Περιεχόμενα πινάκων.....	x
Εισαγωγή	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	12
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ	
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	18
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ.....	18
2.1 Βασικές θεμελιώδεις αρχές της τεχνικής.....	18
2.2 Τεχνικές συγκόλλησης δια τριβής.....	18
2.2.1 Συγκόλληση δια τριβής με περιστροφή (Rotary Friction Welding)	20
2.2.2 Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Stir Friction Welding)	21
2.2.3 Συγκόλληση δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (Linear Friction Welding)	
.....	22
2.2.4 Συγκόλληση δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή (Radial Friction Welding) ...	23
2.2.5 Συγκόλληση δια τριβής με κίνηση σε τροχιά (Orbital Friction Welding)	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	27
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	27
3.1 Εφαρμογές στη ναυπηγική.....	27
3.2 Εφαρμογές στην διαστημική τεχνολογία και στην αεροναυπηγική.....	28
3.3 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία	29
3.4 Εφαρμογές στην κατασκευή τρένων	30
3.5 Εφαρμογές στην κατασκευή ηλεκτρονικών υπολογιστών	30
3.6 Εφαρμογές στη ρομποτική.....	31
3.7 Εφαρμογές στην πυρηνική.....	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	33
ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	33
4.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση και πεδίο εφαρμογής	33
4.2 Βασική αρχή της μεθόδου	34
4.3 Τεχνολογικές εφαρμογές - εξοπλισμός	35
4.3.1 Μηχανή συγκόλλησης	36
4.3.2 Το σύστημα συγκράτησης	37
4.3.3 Το εργαλεία συγκόλλησης	38
4.4 Ροή υλικού ανά τύπο εργαλείου	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	40
ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ Η ΦΘΟΡΑ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	40
5.2 Σχεδιασμός εργαλείων συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση	40
5.2.1 Πυρίμαχα εργαλεία	42
5.2.2 Εργαλεία από υπερκράματα	42
5.2.3 Μορφολογία εργαλείου	43
5.3 Γεωμετρία εργαλείων	45
5.4 Φθορά του εργαλείου	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	49
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΖΩΝΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	49
6.1 Διακριτές ζώνες στην περιοχή των συγκολλήσεων	49
6.2.1 Ζώνη συγκόλλησης ανάδευσης	50
6.2.2 Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη	50
6.2.3 Θερμικά επηρεασμένη ζώνη	50
6.2.4 Ζώνη βασικού μετάλλου	50
6.3 Μέγεθος κόκκων	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	53
ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	53
7.1 Συγκολλήσεις χωρίς ελαττώματα	53
7.2 Ελαττώματα.....	54
7.2.1 Ατελής διείσδυση.....	54
7.2.2 Ατέλειες τύπου τούνελ.....	54
7.2.3 Εσωτερικοί πόροι.....	55
7.2.4 Ελαττώματα τύπου flash	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΝΟΨΗ ΠΡΟΣΦΑΤΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΝ	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	64
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	64
9.1 Συμπεράσματα.....	64
9.2 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67

Εικόνες

Εικόνα 1.1: (α) ο κολοσσός της Ρόδου και (β) το χαλύβδινο ξίφος.....	12
Εικόνα 1.2: Επενδεδυμένα ηλεκτρόδια.....	14
Εικόνα 1.3: Μέθοδος συγκόλλησης GTAW.....	14
Εικόνα 1.4: Μέθοδος ηλεκτροσυγκόλλησης (electroslag welding).....	15
Εικόνα 1.5: Συγκόλληση με χρήση laser.....	15
Εικόνα 1.6: Τυπική διάταξη της εκρηκτικής συγκόλλησης.....	16
Εικόνα 1.7: Μέθοδος συγκόλλησης laser-τόξου.....	17
Εικόνα 2.1: Τεχνικές συγκόλλησης	19
Εικόνα 2.2: Διαδικασία συγκόλλησης με περιστροφή.....	20
Εικόνα 2.3: Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση.....	21
Εικόνα 2.4: Συγκόλληση δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση.....	22
Εικόνα 2.5: Συγκόλληση δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή.....	24
Εικόνα 2.6: Σχηματική διαδικασία συγκόλλησης δια τριβής με κίνηση σε τροχιά.....	25
Εικόνα 3.1: Super Liner Ogasawara.....	27
Εικόνα 3.2: Orion – εφαρμογές μεθόδου από τη NASA.....	28
Εικόνα 3.3: Audi R8 – εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	29
Εικόνα 3.4: Εφαρμογές στην κατασκευή τρένων.....	30
Εικόνα 3.5: Εφαρμογές στην κατασκευή υπολογιστών.....	30
Εικόνα 3.6: Εφαρμογές στη ρομποτική.....	31
Εικόνα 3.7: Εφαρμογές στην πυρηνική.....	31
Εικόνα 4.1: Περιγραφή της μεθόδου.....	35
Εικόνα 4.2: Μηχανή συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση.....	36
Εικόνα 4.3: Σύστημα συγκράτησης των δύο δοκιμίων.....	37
Εικόνα 4.4: Περιγραφή εργαλείου.....	38
Εικόνα 4.5: Ροή υλικού.....	39

Εικόνα 5.1: Εξέλιξη σχεδιασμού εργαλείου PCBN	40
Εικόνα 5.2: Εργαλεία με επικάλυψη PCBN	43
Εικόνα 5.3: Διάφοροι τύποι γεωμετρικών εργαλείων	44
Εικόνα 5.4: Διάφοροι τύποι εργαλείων	44
Εικόνα 5.5: Τυπική γεωμετρία εργαλείου.....	45
Εικόνα 5.6: Μορφολογία πείρων.....	46
Εικόνα 5.7: Μορφολογία περιαιχενίου.....	46
Εικόνα 5.8: Εργαλείο συγκόλλησης με σπειροειδή μορφή στο πείρο και στο περαιαιχένιο.....	46
Εικόνα 5.9: Φθορά πείρου εργαλείου WC-Co	48
Εικόνα 6.1: Θερμικά επηρεασμένες ζώνες κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση.....	49
Εικόνα 6.2: Ταξινόμηση ζωνών κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση.....	50
Εικόνα 6.3: Onion rings.....	51
Εικόνα 6.4: Μικροδομή συγκόλλησης κατά την διαδικασία συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση.....	52
Εικόνα 7.1: Συγκόλληση χωρίς ελαττώματα	53
Εικόνα 7.2: Συγκόλληση χωρίς ασυνέχειες ή ατέλειες	53
Εικόνα 7.3: Ατελής διείδυση.....	54
Εικόνα 7.4: Ελαττώματα τύπου τούνελ.....	55
Εικόνα 7.5: Συγκόλληση με πόρους.....	55
Εικόνα 7.6: Ελαττώματα τύπου flash.....	56
Εικόνα 8.1: Σπείρωμα στον πείρο και στο άκρο του	89
Εικόνα 8.2: Επίδραση των περιαιχενίων στη σκληρότητα.....	59
Εικόνα 8.3: Επίδραση της απόληξης των πείρων στη σκληρότητα	59
Εικόνα 8.4: Γεωμετρία εργαλείου	61
Εικόνα 8.5: Απόληξη ακίδων	61
Εικόνα 9.1: Απόληξη τριών ακίδων.....	71

Περιεχόμενα πινάκων

1: Πρόσφατα διεθνή επιστημονικά αποτελέσματα για κράμα AA6061, ανά ερευνητή.....	58
2: Πρόσφατα διεθνή επιστημονικά αποτελέσματα για κράμα AA5083, ανά ερευνητή.....	60
3: Πρόσφατα διεθνή επιστημονικά αποτελέσματα για κράμα AA2219, ανά ερευνητή	62
4: Πρόσφατα διεθνή επιστημονικά αποτελέσματα για κράμα AA1050, ανά ερευνητή	62
5: Πρόσφατα διεθνή επιστημονικά αποτελέσματα για κράμα AA2014, ανά ερευνητή	63

Εισαγωγή

Η ποικιλομορφία και η επιθυμία για ένα καλύτερο πρότυπο ζωής έχουν ως αποτέλεσμα τη συνεχή ανάπτυξη των τεχνολογιών παραγωγής. Σύμφωνα με αυτές τις εξελίξεις, στις υφιστάμενες τεχνολογίες παραγωγής, η ζήτηση για πιο περίπλοκα προϊόντα αυξάνεται. Έτσι, οδηγηθήκαμε με το πέρασμα του χρόνου στην ανακάλυψη νέων μεθόδων συγκόλλησης και στην εξέλιξη αυτών.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, διαπραγματεύεται τη βελτιστοποίηση της συγκόλλησης διατριβής κραμάτων αλουμινίου (με ή χωρίς προθέρμανση). Πρόκειται, για μια τεχνική συγκόλλησης, η οποία αναπτύχθηκε το 1991 στο Ινστιτούτο συγκολλήσεων (TWI) από τον Wayne Thomas και χαίρει μεγάλης ανάπτυξης σε πολλούς βιομηχανικούς κλάδους. Ουσιαστικά, είναι μια τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, η οποία προσφέρει το πλεονέκτημα να συγκολληθούν υλικά μεγάλης ποικιλομορφίας, τα οποία δεν συγκολλούνται με τις συνηθισμένες μεθόδους συγκόλλησης. Αυτή η μεγάλη χρησιμότητά της, είναι που την έχει καταστήσει κυρίαρχη τα τελευταία χρόνια στον τομέα της και αυτό φαίνεται από τις εφαρμογές που έχει σε μεγάλες βιομηχανίες, στους τομείς παραγωγής και έρευνας. Μερικά ενδεικτικά παραδείγματα είναι η NASA, η Volvo και η Apple.

Η παρούσα μελέτη, εστιάζει στις μελέτες των ερευνητών, στην ιστορική αναδρομή της τεχνικής, στον τρόπο λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου, στα κατάλληλα εργαλεία (tools), στις παραλλαγές της, στις εφαρμογές που βρίσκει στη βιομηχανία και στην εφαρμογή της σε κράματα αλουμινίου. Καταλήγοντας, η μελέτη μας είναι βασισμένη στην έρευνα μιας μεγάλης μερίδας επιστημόνων του κλάδου και στα αποτελέσματα των ερευνών τους.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Για να κατανοήσουμε την εξέλιξη και την ανάπτυξη των συγκολλήσεων, είναι απαραίτητο να κάνουμε μια ιστορική ανασκόπηση. Η έννοια της σύνδεσης των μετάλλων είναι άρρητα συνδεδεμένη με την έννοια της κατασκευής υπό οποιαδήποτε μορφή. Ο όρος "συγκόλληση", δηλαδή η ένωση υλικών, κάνει την εμφάνισή του για πρώτη φορά στην Παλαιά διαθήκη. Πριν από 4000 χρόνια οι Αιγύπτιοι είχαν αναπτύξει την τέχνη της συγκόλλησης, δηλαδή την ένωση δύο ή περισσότερων μερών με θερμότητα ή πίεση ή και τα δύο. Ενδεικτικά, το κεφάλι του βασιλέα Τουταγχαμών (1361-1352 π.Χ.), το οποίο φορούσε μια μάσκα από χρυσό η οποία ήταν αποτέλεσμα συγκόλλησης, ανακαλύφθηκε το 1922 στην Κοιλάδα των Βασιλέων (Valley of the Kings). Επίσης, αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι ο περίφημος Κολοσσός της Ρόδου (292-280 π.Χ.) ο οποίος ανήκει στα επτά θαύματα του κόσμου. Πρόκειται για ένα άγαλμα ύψους 35 μέτρων του οποίου ο σκελετός αποτελείται από συγκολλημένο σίδηρο. Ακόμα, στην Ουκρανία πριν από περίπου 1200 χρόνια, μεταλλουργοί συγκόλλησαν ένα χαλύβδινο ξίφος, το οποίο έχει διασωθεί μέχρι σήμερα.



Εικόνα 1.1: (α) ο κολοσσός της Ρόδου και (β) συγκολλημένο χαλύβδινο ξίφος

Οι πρώτες κοινωνίες που φαίνεται από την ιστορία να εξασκούν συστηματικά τη συγκόλληση, ήξεραν πως να επεξεργαστούν με το μέταλλο, όμως είχαν μόνο στη διάθεσή τους τις στοιχειώδεις μεθόδους συγκόλλησης όπως αυτή της σφυρηλασίας. Οι διαδικασίες αυτές παρέμειναν αμετάβλητες έως τα μέσα περίπου του 19ου αιώνα. Από την περίοδο αυτή κι έπειτα οι μέθοδοι διαμόρφωσης τελειοποιήθηκαν προοδευτικά. Αναπτύχθηκαν μηχανικά οι μέθοδοι συναρμολόγησης και σταδιακά αντικαταστάθηκαν πρωτόγονες και συχνά μέτριες μέθοδοι συγκόλλησης. Εν συνεχεία, κατά το δεύτερο μισό του 10ου αιώνα, η διαδικασία της συγκόλλησης με τη χρήση σφυρηλάτησης τελειοποιήθηκε και για εξειδικευμένες εφαρμογές αποδείχθηκε εξαιρετικά παραγωγική. Την ίδια περίοδο εφευρέθηκαν και οι διεργασίες της συγκόλλησης τόξου και της συγκόλλησης αντίστασης. Τα παραπάνω αποτέλεσαν το πρώτο βήμα της μετάβασης προς τις σύγχρονες διαδικασίες, που αφορούν υψηλές ενεργειακές πυκνότητες. Παρόλα αυτά, δεν χρησιμοποιήθηκαν σε σημαντικό βαθμό λόγω της αργής ανάπτυξης της ηλεκτρικής ενέργειας εκείνη την εποχή.

Αργότερα, οι χημικές διεργασίες ήταν οι πρώτες που ήρθαν για να αλλάξουν την τέχνη της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε η πρώτη θερμοσυγκόλληση ροής κατά την οποία το τηγμένο μέταλλο χύνεται στην περιοχή της άρθρωσης προκειμένου να λιώσει τις πλευρές των αρμών και την περιοχή του υλικού πληρώσεως. Μάλιστα, τότε εμφανίστηκε το οξυακετυλένιο. Αντικαταστάθηκε σταδιακά τα επόμενα χρόνια, από τη μέθοδο συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου και τη συγκόλληση με αντίσταση, οι οποίες επανεμφανίσθηκαν από το 1925 και μετά. Βασικό τους πλεονέκτημα έναντι της συγκόλλησης με οξυακετυλένιο είναι, ότι ήταν ιδανικές για μαζική παραγωγή αλλά και για την παραγωγή μεγάλων αντικειμένων.

Η συγκόλληση με ηλεκτρικό τόξο δεν μπόρεσε να αναπτυχθεί έως ότου υπάρξει κάποια μέθοδος προστασίας του τόξου και της λιωμένης λίμνης συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα. Η πρώτη λύση φαίνεται να εμφανίζεται στις αρχές του 20ου αιώνα. Ήταν το επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο. Στη συγκεκριμένη μέθοδο ένα ηλεκτρόδιο μετάλλου, επενδύεται με μία επικάλυψη (πάστα), της οποίας ο βασικός ρόλος είναι να παράγει μέσω της θερμότητας του τόξου, αέρια που θα προστατεύουν το τηγμένο μέταλλο από την ατμόσφαιρα. Η προσθήκη άλλων ουσιών στην επένδυση επηρεάζει τη χημική σύνθεση και τη μεταλλουργική δομή του μετάλλου και συνεπώς τις μηχανικές του ιδιότητες.



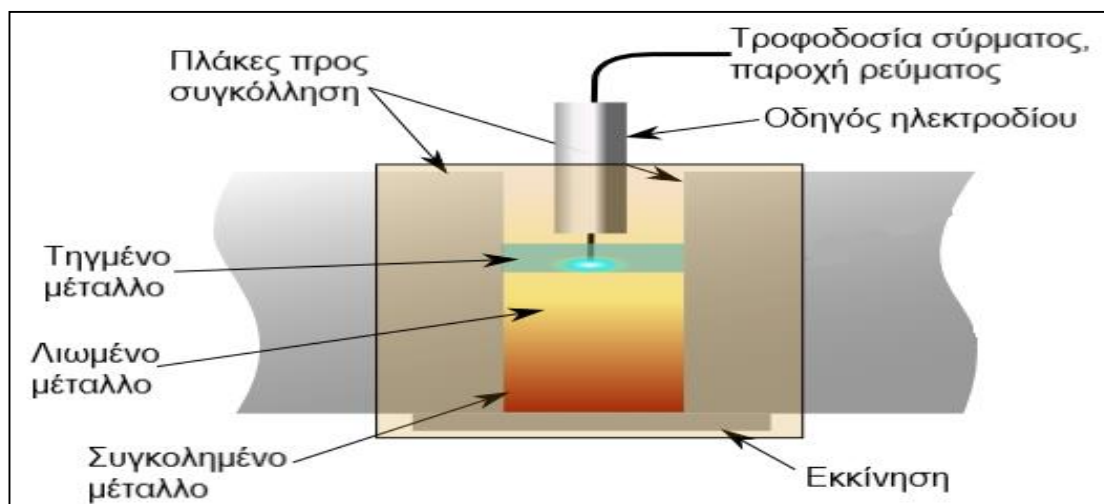
Εικόνα 1.2: Επενδεδυμένα ηλεκτρόδια [38]

Επιπλέον, κάποια από τα συστατικά της επένδυσης, σχηματίζουν ένα λεπτό στρώμα οξειδίων τα οποία κατά την ψύξη καλύπτουν το εναποτιθέμενο μέταλλο, βελτιώνοντας την εμφάνιση και την προστασία του από την ταχεία ψύξη, άρα κατά συνέπεια από πιθανή ευθραυστότητα της συγκόλλησης. Στη διαδικασία ηλεκτρικού τόξου, το ρεύμα συγκόλλησης ρέει κατά μήκος ολόκληρου του ηλεκτροδίου, του οποίου το μήκος περιορίζεται λόγω θερμικής αντίστασης. Η συγκεκριμένη συσσώρευση θερμότητας υπάρχει και πιθανότητα να οδηγήσει σε αλλοίωση της επίστρωσης. Κύρια ανάπτυξη της παραπάνω τεχνικής φαίνεται, να συνέβη τη δεκαετία του 1950. Λόγω της λειτουργικότητάς της για την εποχή, γρήγορα εξελίχθηκε σε μια δημοφιλή συγκόλληση με τόξο. Κατά την ίδια περίοδο, εισήχθησαν στην αγορά οι μηχανές AC-DC οι οποίες είχαν ενσωματωμένη συχνότητα για συγκόλληση με προστατευτικό αέριο και ηλεκτρόδιο βολφραμίου (GTAW).



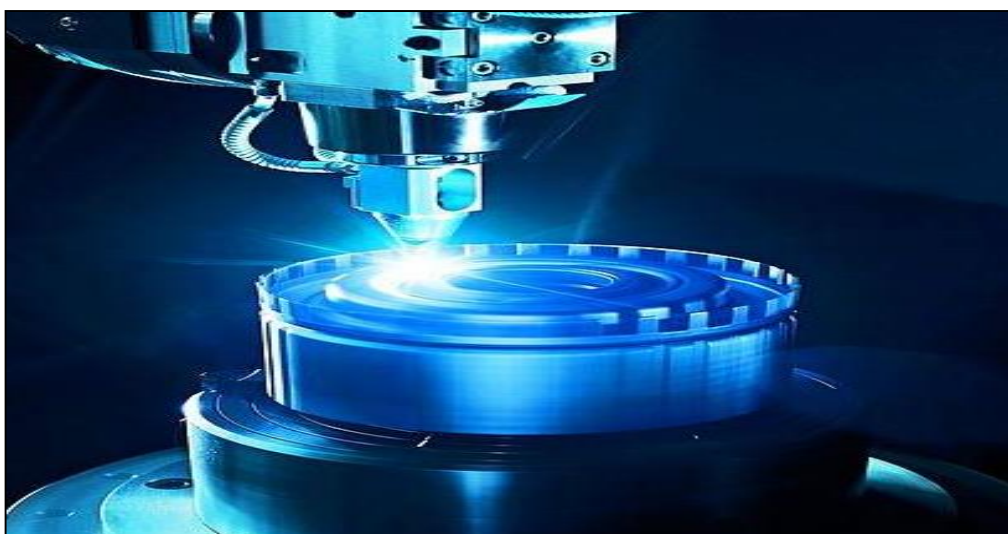
Εικόνα 1.3: Μέθοδος συγκόλλησης GTAW [38]

Παράλληλα η Miller Electric ανέπτυξε το ελεγχόμενο κύμα Millera που χρησιμοποιήθηκε για κρίσιμες συγκολλήσεις σε βλήματα και αεροσκάφη. Τη δεκαετία του 1950 ξεκινά η διαδικασία συγκόλλησης με ηλεκτρική δέσμη από τον A.J. Stohr. Εν συνεχεία, το 1958 το ινστιτούτο συγκόλλησης Paton αναπτύσσει τη μέθοδο της ηλεκτροσυγκόλλησης (Electroslag Welding) η οποία τελειοποιείται έως το 1961.



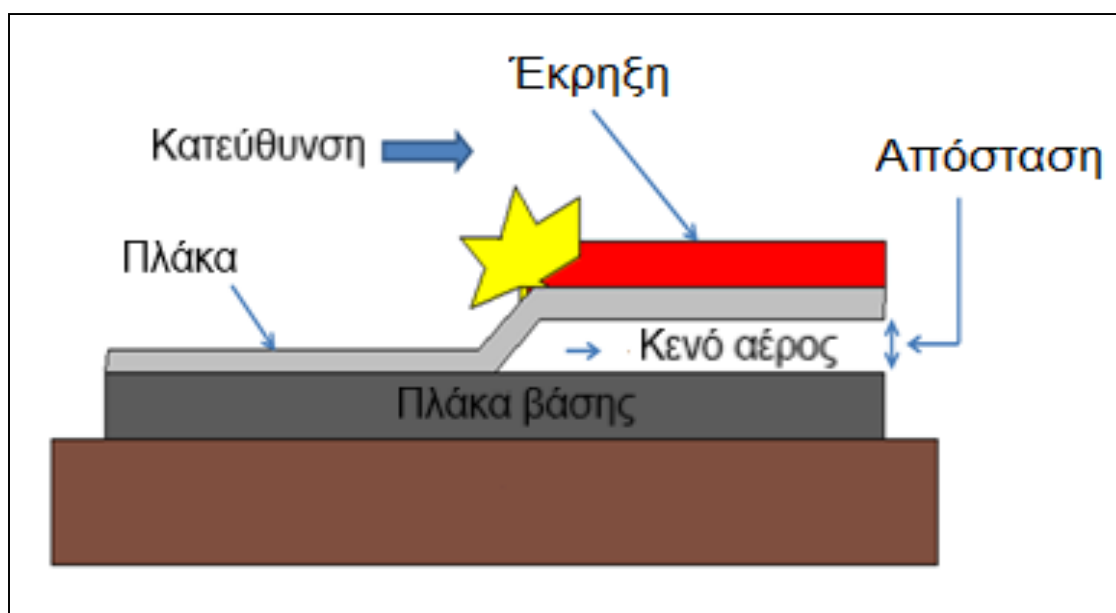
Εικόνα 1.4: Μέθοδος ηλεκτροσυγκόλλησης (ESW) [37]

Η συγκόλληση με τη χρήση laser (Laser Beam Welding) κάνει την εμφάνισή της στον τομέα των συγκολλήσεων το 1960 για να έρθει αρκετές δεκαετίες αργότερα και να αποκτήσει καθοριστικό ρόλο στον συγκεκριμένο τομέα. Αποδείχθηκε μάλιστα, ιδιαίτερα χρήσιμη στην αυτοματοποιημένη συγκόλληση υψηλής ταχύτητας.



Εικόνα 1.5: Συγκόλληση με χρήση laser (LBW)

Κατά το 1960 επίσης, ανακαλύπτεται και η μέθοδος της εκρηκτικής συγκόλλησης.



Εικόνα 1.6: Τυπική διάταξη της εκρηκτικής συγκόλλησης [36]

Το 1965-1967 ανακαλύπτεται η συγκόλληση και η κοπή με laser διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), ενώ ξεκινάει να αναπτύσσεται στο Ηνωμένο Βασίλειο και η μέθοδος συγκόλλησης με βαρύτητα. Το 1969 οι Ρώσοι επιτυγχάνουν συγκόλληση στο διάστημα στο SOYUZ-6.

Στη συνέχεια, έχουμε τη μετάβαση στις σύγχρονες τεχνικές συγκολλήσεων. Στις μέρες μας, υπάρχουν ποικίλες διαδικασίες συγκόλλησης, κάθε μία εκ' των οποίων ενδείκνυται για συγκεκριμένες διεργασίες, ενώ γίνεται συνεχής έρευνα για νέα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στις πυρηνικές, διαστημικές και ναυπηγικές βιομηχανίες. Η μεταβατική περίοδος στην εξέλιξη των συγκολλήσεων ήταν οι δεκαετίες του 1980 και 1990 όπου η συγκολλήσεις εξελίχθηκαν από τέχνη σε επιστήμη. Το 1991 ανακαλύπτεται η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, ενώ το 1999 το Ινστιτούτο Edison αναπτύσσει μια μέθοδο που οδηγεί σε 300% αύξηση της διείσδυσης ροής σε μια συγκόλληση.

Μπαίνοντας στον 21^ο αιώνα και πιο συγκεκριμένα, το 2000 αναπτύσσονται οι τεχνικές της παλμικής συγκόλλησης, της συγκόλλησης με τη χρήση ακτινών X καθώς και η συγκόλληση με laser επεκτείνεται και σε μέταλλα όπως φύλλα τιτανίου και σε ανοξείδωτους χάλυβες. Το 2008 αναπτύσσεται μια υβριδική μέθοδος συγκόλλησης laser-τόξου.



Εικόνα 1.7: Μέθοδος συγκόλλησης laser-τόξου [38]

Το 2013 η συγκόλληση αερίου χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση χάλυβα, που τοποθετείται σε αυτοκίνητα. Η συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιεί ένα μέταλλο πλήρωσης, αποτελούμενο από πυρίτιο με κράμα χαλκού. Επίσης, την ίδια χρονολογία επιτυγχάνεται η συγκόλληση χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και αλουμίνιο με τεχνολογία laser. Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεραίνουμε, ότι οι συγκολλήσεις εξελίχθηκαν με το πέρασμα των αιώνων σε τεχνικές απαραίτητες, για την εξέλιξη τεχνικών που έχουν βοηθήσει το ανθρώπινο είδος σε ποικίλους τομείς της ζωής του. Αυτός είναι και ο λόγος που μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα, ότι στο μέλλον θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται και να βελτιστοποιούνται από εμάς.

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ

2.1 Βασικές θεμελιώδεις αρχές της τεχνικής

Η συγκόλληση δια τριβής είναι μια κατεργασία κατά την οποία η θερμότητα που απαιτείται για την ένωση δύο τεμαχίων, παρέχεται στο σύστημα από την απ' ευθείας μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε θερμική, επί των προς συγκόλληση επιφανειών. Η μετατροπή αυτή λαμβάνει χώρα κατά τη συνεχή κίνηση, περιστροφική ή παλινδρομική, του ενός εκ των δύο τεμαχίων, ενώ έρχεται σταδιακά σε επαφή με το ακίνητο στέλεχος του δεύτερου τεμαχίου είτε υπό σταθερή είτε υπό αυξανόμενη πίεση. Οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται επί των δύο επιφανειών αυξάνουν σημαντικά τη θερμοκρασία των δύο τεμαχίων στην περιοχή της κατεργασίας. Η συγκόλληση επιτυγχάνεται λόγω της εφαρμογής της πίεσης επί των τεμαχίων, όταν η παραπάνω θερμικά επηρεασμένη ζώνη βρίσκεται στην πλαστική περιοχή. Η θερμοκρασία κατά την οποία επιτυγχάνεται η συγκόλληση είναι χαμηλότερη του σημείου τήξης του υλικού του εκάστοτε τεμαχίου. Τα χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

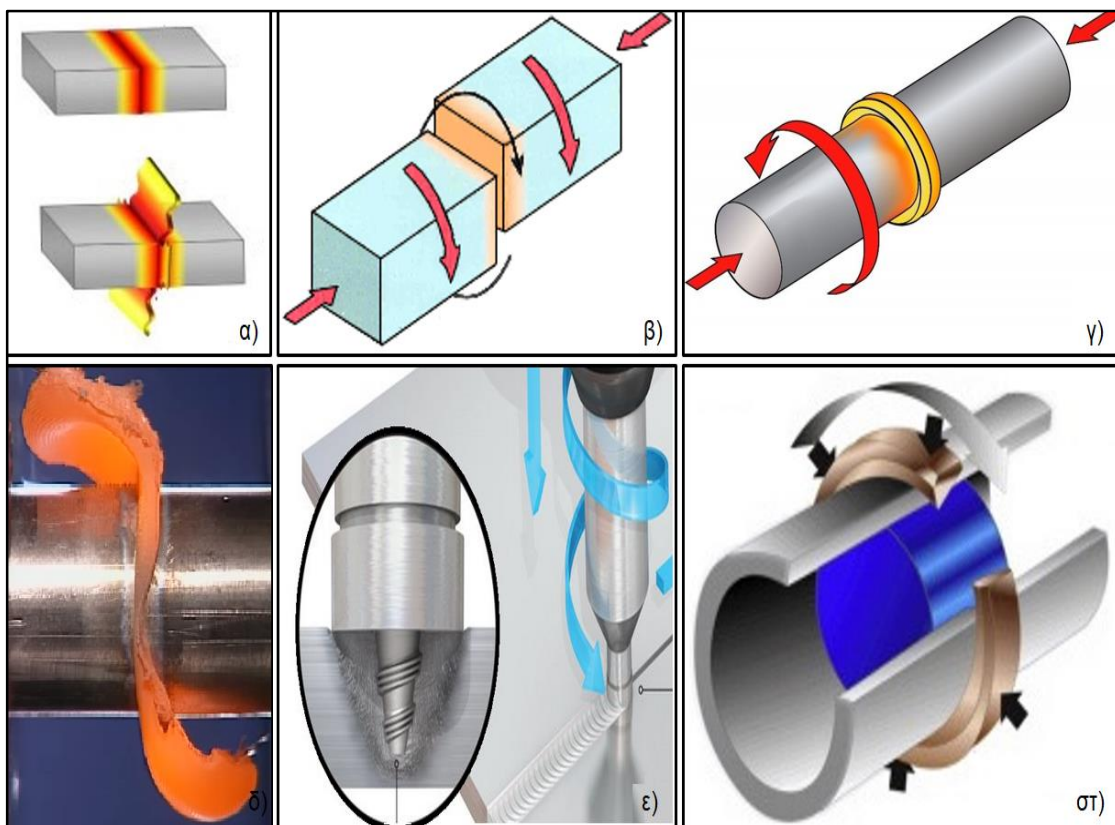
- i. Να συγκολληθούν πληθώρα σιδηρούχων και μη κραμάτων, όπως επίσης μέταλλα με πολύ διαφορετικές θερμικές και μηχανικές ιδιότητες.
- ii. Ότι παρουσιάζεται χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος, σε σχέση με τις άλλες συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης (π.χ. ηλεκτρικού τόξου).
- iii. Ότι δεν υπάρχουν απόβλητα και καπνοί που εμφανίζονται σε αντίστοιχες συμβατικές κατεργασίες.

2.2 Τεχνικές συγκόλλησης δια τριβής

Η κατάταξη των διαφόρων τεχνικών συγκόλλησης δια τριβής γίνεται ανάλογα με τη σχετική κίνηση των τεμαχίων που τίθενται για συγκόλληση και με βάση την παροχή της ισχύος στο σύστημα, εκτός από την περίπτωση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση όπου τα τεμάχια είναι σταθερά. Η σχετική κίνηση των δύο τεμαχίων μπορεί να γίνεται ως εξής:

- i. Συγκόλληση με περιστροφή (Rotary Friction Welding-RFW). Ένα εκ των δύο τεμαχίων καθώς περιστρέφεται έρχεται σε επαφή με το δεύτερο ακίνητο σώμα.

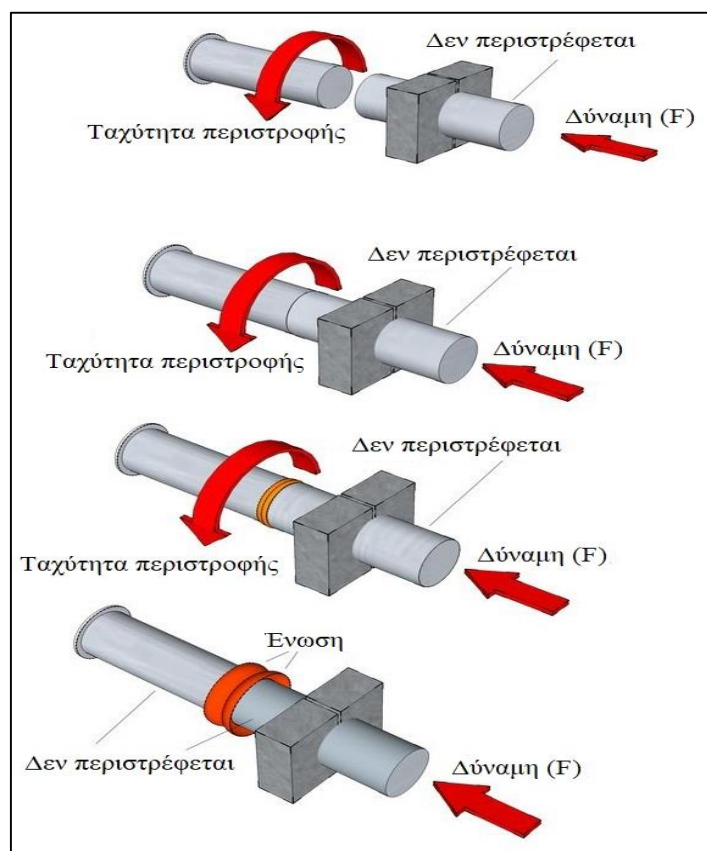
- ii. Συγκόλληση με γραμμική παλινδρομηση (Linear Friction Welding-LFW). Ένα εκ των δύο τεμαχίων παλινδρομεί γραμμικά, ενώ βρίσκεται σε επαφή με το προς συγκόλληση σώμα.
- iii. Συγκόλληση με τοξοειδή περιστροφή (Radial Friction Welding-RFW). Ένα εκ των δύο σωμάτων περιστρέφεται κατά μήκος του τόξου και σε κοινό άξονα με το δεύτερο τεμάχιο που εφάπτεται σε αυτό.
- iv. Συγκόλληση με κίνηση σε τροχιά (Orbital Friction Welding-OFW). Τα δύο τεμάχια περιστρέφονται ομόρροπα και υπό επαφή, σε άξονες που είναι παράλληλοι αλλά έχουν μετατοπιστεί κατά μία μικρή απόσταση μεταξύ τους. Υπάρχουν και περιπτώσεις που μόνο το ένα τεμάχιο κινείται κατά μήκος ενός κύκλου και σε επαφή με το δεύτερο σώμα.
- v. Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Stir Friction Welding-SFW). Ειδικό εργαλείο συγκόλλησης, περιστρέφεται, βυθίζεται και στη συνέχεια κινείται κατά μήκος της ένωσης των προς συγκόλληση τεμαχίων.



Εικόνα 2.1: Τεχνικές συγκόλλησης α) και δ) Linear Friction Welding, β) Orbital Friction Welding, γ) Rotary Friction Welding, ε) Stir Friction Welding, στ) Radial Friction Welding

2.2.1 Συγκόλληση δια τριβής με περιστροφή (Rotary Friction Welding)

Η περιστροφική συγκόλληση δια τριβής είναι μια διαδικασία σύνδεσης στερεάς κατάστασης, η οποία λειτουργεί με περιστροφή ενός τεμαχίου περί του άξονα του, σε σχέση με ένα άλλο που κρατείται σταθερά. Το περιστρεφόμενο κομμάτι έρχεται σε επαφή με το σταθερό κομμάτι και είτε υπό σταθερή είτε υπό αυξανόμενη πίεση. Η τριβή μεταξύ των επιφανειών παράγει θερμότητα, προκαλώντας πλαστικοποίηση του υλικού. Τέλος, ασκείται σταδιακά αυξανόμενη αξονική πίεση μεταξύ αυτών και συντελείται έτσι η συγκόλληση δια τριβής.



Εικόνα 2.2: Διαδικασία συγκόλλησης με περιστροφή

Η περιστροφική συγκόλληση δια τριβής έχει χρησιμοποιηθεί για πολλές εφαρμογές, όπως:

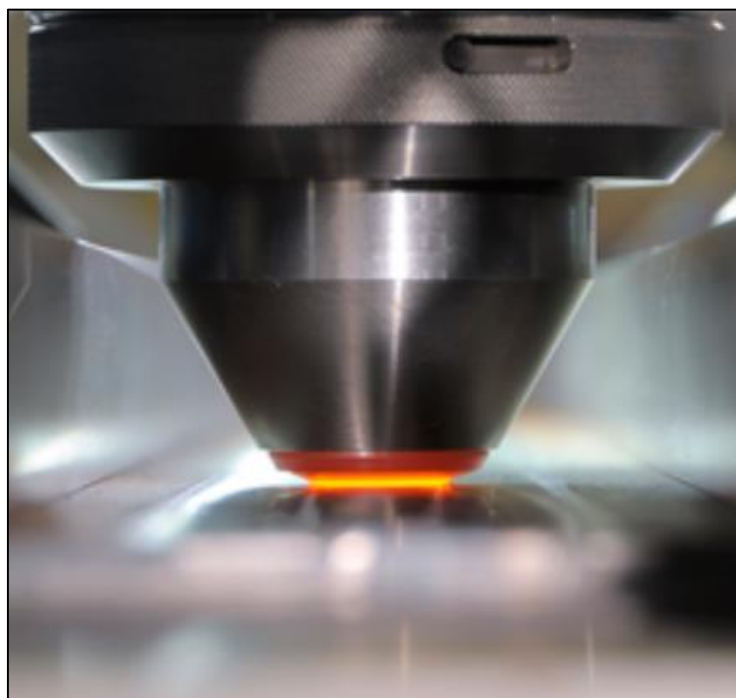
- i. Άξονες τουρμπίνας
- ii. Ναυτικά εξαρτήματα
- iii. Εξαρτήματα αυτοκινήτου
- iv. Σωληνοειδείς μεταβατικές αρθρώσεις που συνδυάζουν ανόμοια μέταλλα (αλουμίνιο-τιτάνιο και αλουμίνιο-ανοξείδωτο χάλυβα)

Η περιστροφική συγκόλληση δια τριβής έχει πλεονεκτήματα όπως:

- i. Χαμηλά ποσοστά ατελειών
- ii. Δεν χρειάζονται αναλώσιμα υλικά
- iii. Ένωση διάφορων ανόμοιων υλικών
- iv. Η διαδικασία δεν απαιτεί μέταλλο πλήρωσης
- v. Η διαδικασία είναι εύκολα αυτοματοποιημένη
- vi. Η συγκόλληση παραμένει στην στερεή κατάσταση
- vii. Δεν υπάρχει παραμόρφωση του στοιχείου (ομοιόμορφη εισαγωγή θερμότητας)

2.2.2 Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Stir Friction Welding)

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση πρόκειται για μια καινοτόμα τεχνική συγκόλλησης, κατά την οποία ένα εργαλείο, με ειδικά διαμορφωμένο πείρο και ένα κατάλληλο περιαιχένιο, βυθίζεται στις επαπτόμενες ακμές, καλά συγκρατημένων υπό συγκόλληση τεμαχίων και κινείται κατά μήκος της επιθυμητής ακμής ανάδευσης. Τα προς συγκόλληση σώματα πακτώνονται σε σταθερή θέση, με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η αμοιβαία απόθησή τους. Ο πείρος πρέπει να έχει μήκος λίγο μικρότερο από το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων και το περιαιχένιο πρέπει να έρχεται σε πλήρη επαφή με την επιφάνειά τους.



Εικόνα 2.3: Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση [44]

2.2.3 Συγκόλληση δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (Linear Friction Welding)

Στη μέθοδο συγκόλλησης δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση τα δύο τεμάχια προς συγκόλληση κινούνται γραμμικά το ένα ως προς το άλλο. Μέσω της τριβής που δημιουργείται μεταξύ τους, παράγεται θερμότητα χάρη στην οποία τήκεται η επιφάνεια, που αυτά έρχονται σε επαφή. Στο ένα τεμάχιο ασκείται στατικό φορτίο, άρα και στο τηγμένο μέταλλο και έτσι δημιουργείται ροή στο ρευστό υλικό και τελικά επιτυγχάνεται η συγκόλληση. Πρόκειται, για μια πολύ γρήγορη διαδικασία, η οποία παίρνει λίγα δευτερόλεπτα, για να δημιουργηθεί μια συγκόλληση. Απαιτείται πολύ μικρή προετοιμασία των επιφανειών που πρόκειται να συνδεθούν.

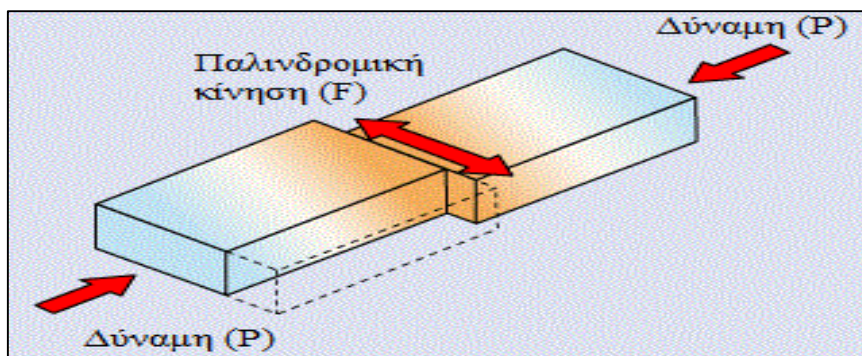
Γίνεται χρήση της τεχνικής για μια μεγάλη ποικιλία υλικών, όπως ο χάλυβας, ο χαλκός, το αλουμίνιο, καθώς επίσης και αρκετών κραμάτων μετάλλου όπως αυτά, από τιτάνιο που γίνεται χρήση τους στην αεροναυπηγική.

Παράμετροι της μεθόδου είναι:

- i. Η συχνότητα (frequency, f) της παλινδρομικής κίνησης
- ii. Το πλάτος (amplitude, a) της παλινδρομικής κίνησης
- iii. Η αξονική δύναμη τριβής (P)
- iv. Η μείωση μήκους (axial shortening)

Οι φάσεις της συγκεκριμένης μεθόδου είναι τέσσερις και είναι η εξής:

- i. Η αρχική φάση
- ii. Η φάση μετάβασης
- iii. Η φάση εξισορρόπησης
- iv. Η φάση επιβράδυνσης



Εικόνα 2.4: Συγκόλληση δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση [40]

Η συγκόλληση δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση έχει χρησιμοποιηθεί για πολλές εφαρμογές, όπως:

- i. Εφαρμογές αεροδιαστημικής
- ii. Στην αυτοκινητοβιομηχανία
- iii. Στη ναυπηγική

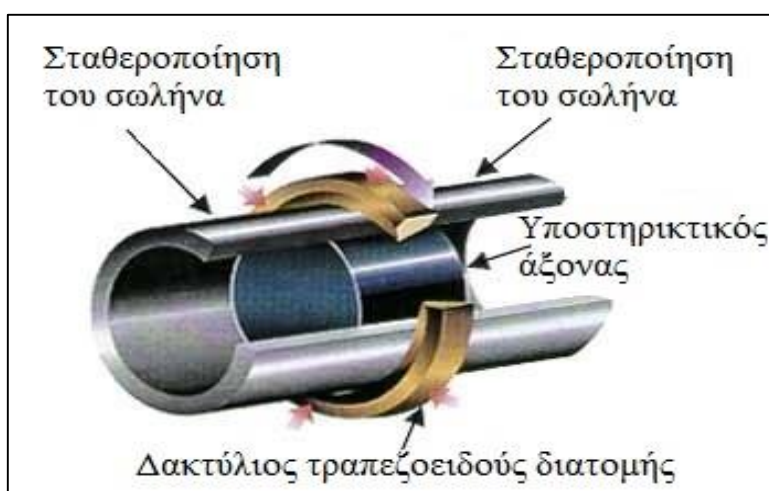
Η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση είναι μια καθιερωμένη τεχνολογία, για τις κατασκευές κραμάτων τιτανίου. Λόγω των πολλών ωφελειών της διαδικασίας, το βιομηχανικό ενδιαφέρον είναι μεγάλο. Προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των ανταγωνιστικών διαδικασιών κατασκευής, για παράδειγμα:

- i. Η μέθοδος δεν απαιτεί αναλώσιμα
- ii. Δεν παράγει επιβλαβείς αναθυμιάσεις
- iii. Η διαδικασία δεν απαιτεί μέταλλο πλήρωσης, ροή και αέριο θωράκισης.
- iv. Η διαδικασία είναι εύκολα αυτοματοποιημένη, καθιστώντας τη διαδικασία επαναλαμβανόμενη και όχι εξαρτώμενη από την ανθρώπινη επιρροή, με αποτέλεσμα πολύ χαμηλά ποσοστά ατελειών.
- v. Η συγκόλληση παραμένει στην στερεή κατάσταση, αποφεύγοντας πολλά από τα ελαττώματα που σχετίζονται με την τήξη και την στερεοποίηση κατά τη συγκόλληση με συγκόλληση, όπως οι πόροι και οι ρωγμές στερεοποίησης. Επίσης μειώνεται η παραμόρφωση του συγκολλημένου εξαρτήματος.

2.2.4 Συγκόλληση δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή (Radial Friction Welding)

Αρχικά, η λειτουργία της συγκεκριμένης τεχνικής, είναι, τα άκρα των σωλήνων που πρόκειται να συγκολληθούν, πρώτα υπόκεινται σε κατεργασία ούτως ώστε όταν έρθουν σε επαφή να σχηματίσουν διατομή τύπου "V". Αποτελείται από μια επιφάνεια κάθετη στην ακτίνα των δύο κυκλικών σωλήνων και από μια δεύτερη επιφάνεια που σχηματίζει αμβλεία γωνία σε σχέση με την ακτινική διεύθυνση των σωλήνων. Έτσι, όταν τα άκρα αυτών έρθουν σε επαφή, δημιουργείται μια εσοχή αποτελούμενη από τρεις πλευρές. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε ευρέως για τη συγκόλληση εξαρτημάτων κυλινδρικής μορφής, αφού προσφέρει υψηλή ποιότητα και είναι εύκολα αυτοματοποιήσιμη.

Στη συνέχεια, ένας δακτύλιος τραπεζοειδούς διατομής περιστρέφεται γύρω από τα άκρα των δύο σωλήνων που βρίσκονται σε ακινησία εντός της διατομής που έχει σχηματιστεί, ενώ ταυτόχρονα επιβάλλεται σε αυτόν περιφερειακής πίεσης με αποτέλεσμα η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των επιφανειών του δακτυλίου και των τμημάτων του σωλήνα να συντελέσει στη δημιουργία των απαραίτητων θερμομηχανικών προϋποθέσεων που απαιτούνται για να επιτευχθεί η συγκόλληση. Μετά από συγκεκριμένο χρόνο η περιστροφή του δακτυλίου σταματά, ενώ η επιβολή του περιφερειακού φορτίου είτε διακόπτεται είτε εξακολουθεί να εφαρμόζεται για να ισχυροποιηθεί ο δεσμός που δημιουργήθηκε.



Εικόνα 2.5: Συγκόλληση δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή [42]

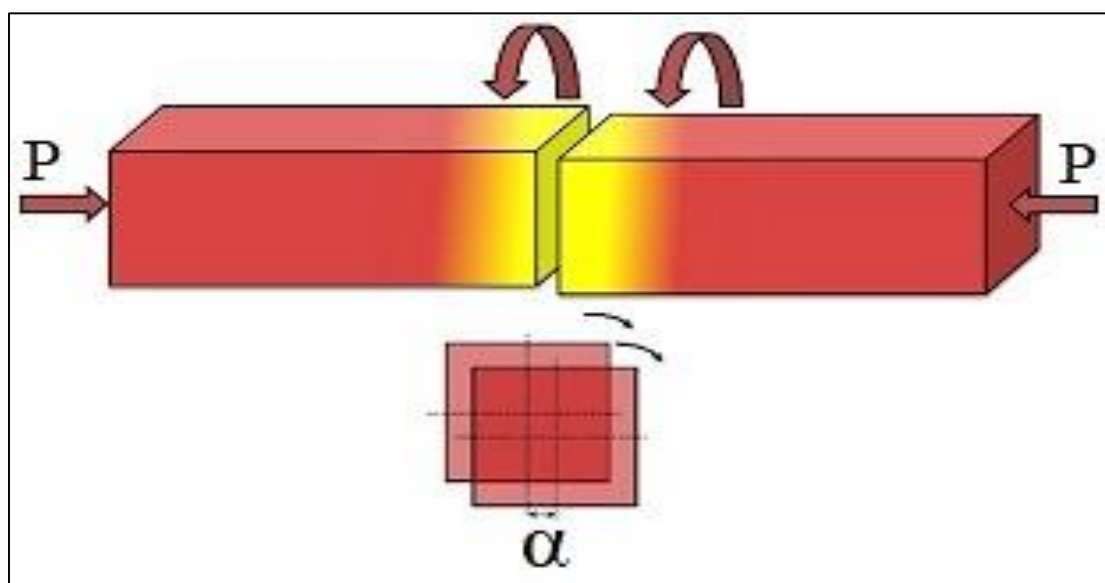
Στο εσωτερικό των δύο σωλήνων, στην περιοχή της ένωσης των δύο άκρων τους, τοποθετείται μια μεταλλική υποστηρικτική μπάρα. Η μπάρα αυτή εξυπηρετεί δύο σκοπούς, που είναι οι εξής:

- i. Ο πρώτος, είναι η στήριξη των άκρων των σωλήνων, ώστε να αποφευχθεί πιθανή κατάρρευσή τους υπό το βάρος της περιφερειακής πίεσης.
- ii. Ο δεύτερος, είναι η διασφάλιση της ροής του υλικού που πλαστικοποιείται προς την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων, ώστε να αποφευχθεί πιθανή είσοδος του υλικού προς την εσωτερική επιφάνειά τους.

Επίσης, είναι απαραίτητη η πάκτωση των προς συγκόλληση σωλήνων, ώστε να καταστεί ανέφικτη οποιαδήποτε κίνηση, είτε κατά την αξονική, είτε κατά την ακτινική διεύθυνση. Έχει διαπιστωθεί ότι κράματα νικελίου αποτελούν ιδανική επιλογή για τις υποστηρικτικές μπάρες, αφού παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά απέναντι στα αξονικά φορτία και τις υψηλές θερμοκρασίες που σημειώνονται κατά την συγκόλληση.

2.2.5 Συγκόλληση δια τριβής με κίνηση σε τροχιά (Orbital Friction Welding)

Η συγκόλληση δια τριβής με κίνηση των συγκολλούμενων τεμαχίων σε τροχιά αποτελεί μια επιμέρους παραλλαγή των τεχνικών συγκόλλησης με τη χρήση τριβής. Περιλαμβάνει μετωπική συγκόλληση κυρίως σε μη κυκλικά και ουσιαστικά αποτελεί ένα συνδυασμό των προηγούμενων δύο τεχνικών. Χρήση αυτής γίνεται κυρίως για επισκευαστικούς ή και κατασκευαστικούς σκοπούς. Κατά τη διαδικασία αυτή, το κέντρο του κάθε τεμαχίου, κατά την κίνησή του σε σχέση με το έτερο του καταγράφει μια κυκλική τροχιά -εξ' ου και το όνομά της- ούτως ώστε να δημιουργηθεί η απαραίτητη κίνηση άρα και τριβή μεταξύ αυτών. Τα προς συγκόλληση τεμάχια κινούνται περί των αξόνων τους κατά την ίδια φορά και ταχύτητα περιστροφής. Οι άξονες βρίσκονται παράλληλα τοποθετημένοι μεταξύ τους, όμως υπάρχει μια μικρή μετατόπιση του ενός ως προς τον άλλο κατά μια συγκεκριμένη απόσταση. Καθ' όλο το χρόνο περιστροφής εφαρμόζεται και στα δύο σώματα αξονική δύναμη P κάθετη στην επιφάνεια τριβής. Μετά το πέρας της κίνησης και αφού τα δύο τεμάχια ευθυγραμμιστούν, εφαρμόζεται ισχυρή αξονική δύναμη προκειμένου να ισχυροποιηθεί και να εδραιωθεί η ένωση αυτών. Είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να δίνει μεγαλύτερο βαθμό ομοιομορφίας της παραγόμενης θερμότητας σε σχέση με τις μεθόδους της γραμμικής παλινδρόμησης και της τοξοειδούς περιστροφής. Αυτό είναι εφικτό διότι το μέτρο και η διεύθυνση της ταχύτητας της σχετικής κίνησης των δοκιμίων παραμένουν αμετάβλητες.



Εικόνα 2.6: Σχηματική διαδικασία συγκόλληση δια τριβής με κίνηση σε τροχιά [43]

Να σημειωθεί, ότι η συγκόλληση δια τριβής με κίνηση σε τροχιά είναι παρόμοια με την συγκόλληση δια τριβής με περιστροφή, αλλά και τα δύο συγκολλημένα μέρη περιστρέφονται κατά την ίδια κατεύθυνση και με την ίδια ταχύτητα, αλλά με τους άξονές τους μετατοπισμένους έως και 3mm. Στο τέλος μιας συγκόλλησης, η σχετική κίνηση τελειώνει με την επιστροφή και των δύο μερών στον κοινό άξονα της μηχανής και η δύναμη συγκόλλησης διατηρείται ή αυξάνεται. Για συνεχή συγκόλληση περιστροφικής τριβής με κίνηση, η επιφανειακή ταχύτητα αυξάνεται από το κέντρο της περιοχής επαφής στην εξωτερική της ακμή, ωστόσο, η συγκόλληση με τροχιακή τριβή έχει το πλεονέκτημα μιας ομοιόμορφης επιφανειακής ταχύτητας σε όλη την επιφάνεια επαφής. Είναι δυνατή η σύνδεση μη στρογγυλών εξαρτημάτων και ενός αριθμού ξεχωριστών τμημάτων σε μία ακολουθία συγκόλλησης τριβής. Αν και έχει αποδειχθεί για πολλά υλικά και κοινές διαμορφώσεις, υπάρχουν λίγοι βιομηχανικοί χρήστες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^[45]

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, είναι μια μέθοδος που βρίσκει ποικίλες εφαρμογές στους βασικούς κλάδους της βιομηχανίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται χρήση της τεχνικής στην ναυπηγική, στην αεροναυπηγική, στη αυτοκινητοβιομηχανία καθώς και στην κατασκευή τρένων και ηλεκτρονικών συσκευών.

3.1 Εφαρμογές στη ναυπηγική

Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή θαλάσσιων σκαφών. Η συγκεκριμένη τεχνική, αρχικά, χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία πάνελ καταλυκτών ψαριών και επίσης για να κατασκευαστούν πλατφόρμες προσγείωσης ελικοπτέρων. Επίσης, η ναυπηγική βιομηχανία της Ιαπωνίας σε συνεργασία με την εταιρεία Mitsui Engineering κατασκεύασαν το Super Liner Ogasawara το οποίο φημολογείται, πως είναι το μεγαλύτερο του είδους του και κατασκευάστηκε με την τεχνική συγκόλλησης τριβής με ανάδευση. Τέλος, πολλές είναι οι ναυτιλιακές εταιρίες που χρησιμοποιούν τη μέθοδο με σκοπό τη θωράκιση των πλοίων τους.



Εικόνα 3.1: Super Liner Ogasawara [45]

3.2 Εφαρμογές στην διαστημική τεχνολογία και στην αεροναυπηγική

Στη διαστημική τεχνολογία και στη αεροναυπηγική υπάρχει έξαρση της χρήσης της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση τα τελευταία έτη. Μέσω αυτής κατασκευάζονται πόρτες, άτρακτοι, φτερά και πατώματα. Επίσης, μειώνεται το βάρος των ηλώσεων. Τα πάνελ της πόρτας του Boeing 747 υπήρξαν τα πρώτα τμήματα στην αεροναυπηγική που συγκολλήθηκαν με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Στη διαστημική τεχνολογία έχουμε για πρώτη φορά εφαρμογή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση στους πυραύλους Delta II, Delta IV και στο Atlas V μόλις το 1999. Στη συνέχεια, η μέθοδος εφαρμόστηκε για το Orion (διαστημικό σκάφος) της NASA. Η συγκεκριμένη τεχνική δίνει ακαμψία με αποτέλεσμα οι συγκολλήσεις που γίνονται μέσω αυτής να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις που υπάρχουν σε μια διαστημική πτήση.



Εικόνα 3.2: Orion – εφαρμογές μεθόδου από τη NASA [45]

3.3 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία

Στην αυτοκινητοβιομηχανία η αμερικάνικη εταιρία Ford έφερε την καινοτομία της μεθόδου στον κλάδο εφαρμόζοντας τη μέθοδο στο μοντέλο τους Ford GT 2005. Έπειτα, οι μεγαλύτερες εταιρίες του κλάδου ξεκίνησαν να αναπτύσσουν και να χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη τεχνική. Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση εξυπηρετεί τις ανάγκες του κατασκευαστή αφού παρέχει χώρο για τη δεξαμενή καυσίμων στο κεντρικό κόμβο του αυτοκινήτου προστατεύοντας την, έτσι από τυχόν συγκρούσεις και βλάβες ενώ ταυτόχρονα προσφέρει ακαμψία. Η Mazda έχει κάνει χρήση της τεχνικής σε διάσημα μοντέλα της όπως το MX-5 και το RX-8. Επίσης, η Audi για το μοντέλο της R8 χρησιμοποιεί την μέθοδο αυτή σε κάποια τμήματα του αυτοκινήτου.



Εικόνα 3.3: Audi R8 – εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία [45]

3.4 Εφαρμογές στην κατασκευή τρένων

Στην κατασκευή τρένων γίνεται χρήση της τεχνικής, για την κατασκευή βαγονιών σε όλη την υφήλιο. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η τεχνική από το σιδηροδρομικό δίκτυο της Κίνας έως το μετρό του Λονδίνου, όπου εκεί παρατηρείται χρήση της μεθόδου από το 1997. Τέλος, γίνεται χρήση της για την ψύξη των ηλεκτρονικών, μεγάλης ισχύος που υπάρχουν στους αγωγούς θερμότητας.



Εικόνα 3.4: Εφαρμογές στην κατασκευή τρένων [45]

3.5 Εφαρμογές στην κατασκευή ηλεκτρονικών υπολογιστών

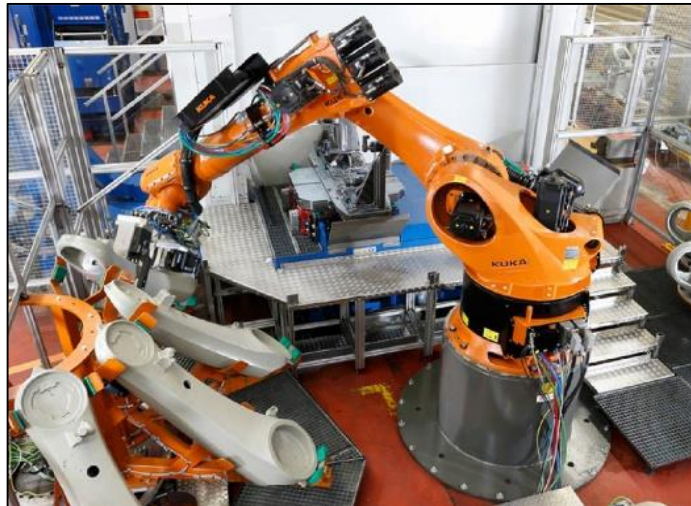
Η Apple καινοτόμησε στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών χρησιμοποιώντας την τεχνική προκειμένου να πλαισιώσει τις επιφάνειες του αλουμινίου των iMac. Η συγκεκριμένη μέθοδος επέτρεψε στους μηχανικούς της, να κατασκευάσουν ένα προϊόν που εκτός από λειτουργικό παρέχει και καλαισθησία στον καταναλωτή, αφού δεν έχει ατέλειες, ούτε φαίνονται σημάδια συγκόλλησης στην περίμετρο της οθόνης.



Εικόνα 3.5: Εφαρμογές στην κατασκευή υπολογιστών [45]

3.6 Εφαρμογές στη ρομποτική

Στη ρομποτική, η ομάδα ρομπότ της KUKA έχει προσαρμόσει το ρομπότ KR500-3MT βαρέως τύπου για συγκόλληση τριβής μέσω του εργαλείου Delta N FS. Το σύστημα έκανε την πρώτη του δημόσια εμφάνιση στην εκπομπή Euro BLECH τον Νοέμβριο του 2012.



Εικόνα 3.6: Εφαρμογές στη ρομποτική [45]

3.7 Εφαρμογές στην πυρηνική

Στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, τα καπάκια των δοχείων χαλκού πάχους 50 mm για πυρηνικά απόβλητα συνδέονται στον κύλινδρο με συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση στη SKB.



Εικόνα 3.7: Εφαρμογές στην πυρηνική [45]

Συμπεραίνουμε ότι η ευρεία εφαρμογή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση στο βιομηχανικό τομέα, μας δείχνει την ευελιξία της συγκεκριμένης τεχνικής συγκόλλησης. Μάλιστα τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας σύμφωνα με το Ινστιτούτο συγκολλήσεων (TWI) αναφέρεται ότι ξεπερνούν τα 3000 σε παγκόσμιο επίπεδο όσον αφορά τη διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση.

ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

4.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση και πεδίο εφαρμογής

Γενικά, η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση πρόκειται, για μια μέθοδο η οποία αναπτύχθηκε σχετικά πρόσφατα από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute, Δεκέμβριος 1991). Είναι τεχνική συγκόλλησης στερεής κατάστασης κατά την οποία συμβαίνει πλαστική παραμόρφωση και συγκόλληση των υλικών, αλλά σε θερμοκρασίες κάτω από το σημείο τήξης τους. Η τεχνική της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, θεωρείται ως μια σημαντική εξέλιξη στον τομέα των συγκολλήσεων. Το 1991 οι πρώτες έρευνες επικεντρώθηκαν σε βασικούς τομείς τόσο για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της μεθόδου, όσο και για τη δημιουργία των εξαρτημάτων, που απαρτίζουν μια μηχανή συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Μέχρι το 1995, οι επιστήμονες είχαν μεταβεί πια, από το θεωρητικό επίπεδο σε εφαρμογές στην αεροναυπηγική, στη ναυπηγική βιομηχανία και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η έρευνα και η ανάπτυξη, της τελευταίας δεκαετίας πάνω στη μέθοδο αυτή, οδήγησαν σε περαιτέρω εξέλιξη προϊόντων και άλλων παρόμοιων τεχνολογιών, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα των προϊόντων και μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος τους. Να σημειωθεί, ότι η μέθοδος εφαρμόστηκε κυρίως σε κράματα αλουμινίου, γρήγορα όμως βρήκε εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος υλικών.

Η συγκόλληση με τριβή, χρησιμοποιείται στην παραγωγή σειράς κατασκευαστικών εξαρτημάτων φορτηγών και επιβατικών αυτοκινήτων, μοτοσικλετών, γεωργικών μηχανημάτων κ.α. Η μέθοδος αυτή, προσφέρεται ιδιαίτερα, για την σύνδεση υλικών με πάρα πολλές διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, όπως το αλουμίνιο με ανθρακούχο χάλυβα, τιτανίου, νιοβίου, νικελίου, μαγνησίου, χαλκού κ.ά. Η συγκόλληση με τριβή χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία, χαρακτηρισμένη ως κατάλληλη μέθοδο για την σύνδεση μετάλλων και κραμάτων για αρκετά παραγόμενα προϊόντα.

4.2 Βασική αρχή της μεθόδου

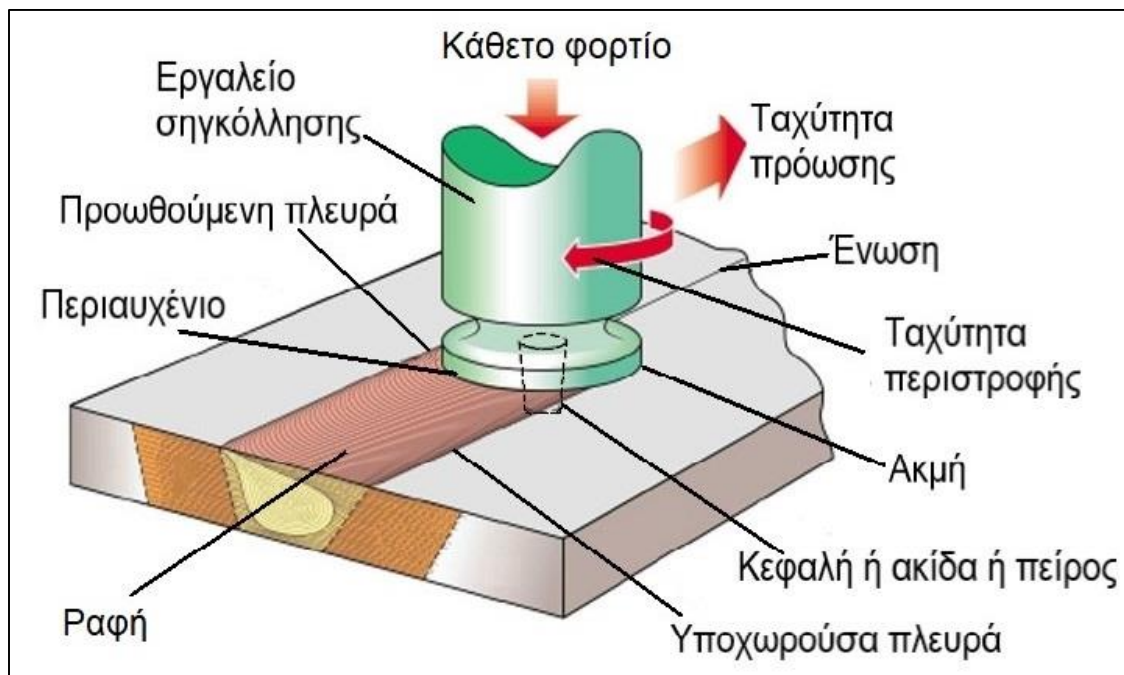
Οι βασικότερες αρχές που διέπουν την μέθοδο συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση, είναι η τριβή και η ανάδευση, όπου σε συνδυασμό με την παραγόμενη θερμότητα δημιουργούν, τις προϋποθέσεις εκείνες που οδηγούν, σε πλαστική παραμόρφωση και σε συγκόλληση των υλικών. Είναι μία μέθοδος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, όπου μέσω της τριβής, στα προς συγκόλληση υλικά, παρέχεται επαρκής ποσότητα θερμότητας, ώστε να χάσουν τοπικά, ποσοστό της σκληρότητάς τους και κατά συνέπεια, να παραμορφωθούν πλαστικά, χωρίς να φτάσουν το σημείο τήξης τους. Τα τεμάχια πακτώνονται σε σταθερή θέση και ένα ειδικά σχεδιασμένο, περιστρεφόμενο εργαλείο προωθείται, κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης (εικόνα 4.1). Ένα περιστρεφόμενο εργαλείο συγκόλλησης, με μία ειδικά σχεδιασμένη κεφαλή, ως προέκταση ενός περιαιχένιου, εισέρχεται στην επαφή των ακμών των δύο πλακών, που πρόκειται να συγκολληθούν και διέρχεται κατά μήκος αυτών. Καθώς το εργαλείο συγκόλλησης κινείται προς την κατεύθυνση της συγκόλλησης, επιβάλλει στο πλαστικοποιημένο υλικό να κινηθεί από το μπροστά προς το πίσω μέρος του πείρου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται δυο διαφορετικές πλευρές στο συγκολλημένο υλικό:

- i. Η προωθούμενη πλευρά (advancing side).
- ii. Η υποχωρούσα πλευρά (retreating side).

Η προωθούμενη πλευρά είναι εκείνη στην οποία, η φορά της ταχύτητας συγκόλλησης ή πρόωσης (traverse speed) είναι ομόρροπη με τη φορά της ταχύτητας περιστροφής (rotational speed), ενώ η υποχωρούσα πλευρά είναι εκείνη στην οποία η φορά της ταχύτητας πρόωσης, είναι αντίρροπη της ταχύτητας περιστροφής. Άρα, ο πείρος ή κεφαλή καθώς περιστρέφεται διεισδύει στα δυο τεμάχια και μεταφέρει υλικό από την προωθούμενη πλευρά (advancing side) στην υποχωρούσα πλευρά (retreating side), ενώ κινείται κατά μήκος του κέντρου συγκόλλησης.

Το περιστρεφόμενο εργαλείο (tool) της μηχανής, έχει τρεις βασικές λειτουργίες που είναι:

- i. Η τοπική θέρμανση του δοκιμίου, (δύο πλακών)
- ii. Η ανάδευση του υλικού των δύο πλακών που οδηγεί στη συγκόλληση τους
- iii. Η συγκράτηση του υλικού στην περιοχή της συγκόλλησης, κάτω ακριβώς από το περιαιχένιο



Εικόνα 4.1: Περιγραφή της μεθόδου

Η θερμότητα που αναπτύσσεται, λόγω τριβής ανάμεσα στην κεφαλή συγκόλλησης και του δοκιμίου, οδηγεί στην πλαστική παραμόρφωση αυτού. Η τοπική θερμότητα, μαλακώνει το υλικό γύρω από την κεφαλή. Ο συνδυασμός της περιστροφικής και της εμπρόσθιας κίνησης του εργαλείου, προκαλεί την κίνηση του υλικού από το μπροστινό μέρος της κεφαλής, στο πίσω μέρος αυτής. Στη συνέχεια, το περιστρεφόμενο εργαλείο κινείται κατά μήκος των πλακών που μεταφέρουν το υλικό γύρω από το ίδιο, αναδεύοντας τις πλάκες μαζί. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται για την συγκόλληση είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής.

4.3 Τεχνολογικές εφαρμογές - εξοπλισμός

Ο βασικός εξοπλισμός για της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- i. Την μηχανή συγκόλλησης
- ii. Το σύστημα συγκράτησης
- iii. Τα εργαλεία συγκόλλησης

Οι συνθήκες συγκόλλησης είναι αυτές που επιφέρουν την τελική αντοχή, καθώς και τις ιδιότητες στο συγκολλημένο υλικό. Οι συνθήκες της συγκόλλησης είναι οι εξής:

- i. Ταχύτητα περιστροφής
- ii. Ταχύτητα πρόωσης
- iii. Κάθετο φορτίο

4.3.1 Μηχανή συγκόλλησης

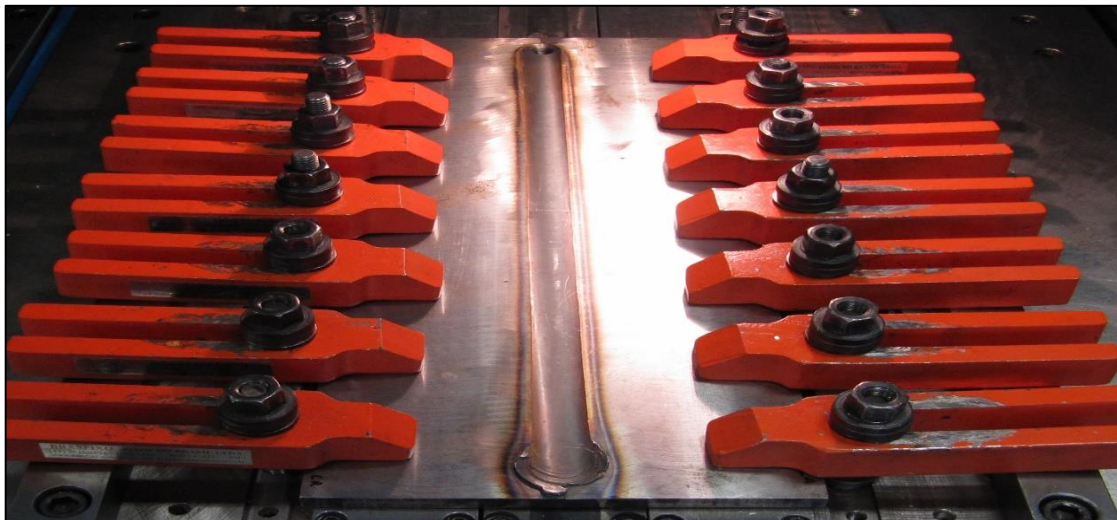
Οι μηχανές συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση έχουν γνωρίσει μεγάλη ζήτηση λόγω της λειτουργικότητάς τους, αναπόφευκτα λοιπόν το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό. Από την άλλη πλευρά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τροποποιημένες φρεζομηχανές, στις οποίες αντικαθίσταται το κλασικό κοπτικό εργαλείο, με το ειδικά διαμορφωμένο εργαλείο συγκόλλησης. Παράλληλα, εγκαθίσταται σύστημα συγκράτησης των ελασμάτων που πρόκειται να συγκολληθούν.



Εικόνα 4.2: Μηχανή συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

4.3.2 Το σύστημα συγκράτησης

Το σύστημα συγκράτησης είναι ένα ουσιαστικό κομμάτι της μεθόδου, καθώς χρειάζεται πολύ καλή συγκράτηση των μετάλλων προς συγκόλληση, ώστε να αποτραπεί η μετακίνηση των τεμαχίων προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Ουσιαστικά τα δύο τεμάχια προς συγκόλληση πακτώνονται. Η οποιαδήποτε μετακίνηση των κομματιών θα αλλοιώσει το αποτελέσματα στην τελική συγκόλληση. Έτσι λοιπόν, το σύστημα συγκράτησης τροποποιείται, ανάλογα με τις διαστάσεις των δοκιμίων, το σχήμα τους, καθώς και τον τύπο συγκόλλησης.



Εικόνα 4.3: Σύστημα συγκράτησης των δύο δοκιμίων

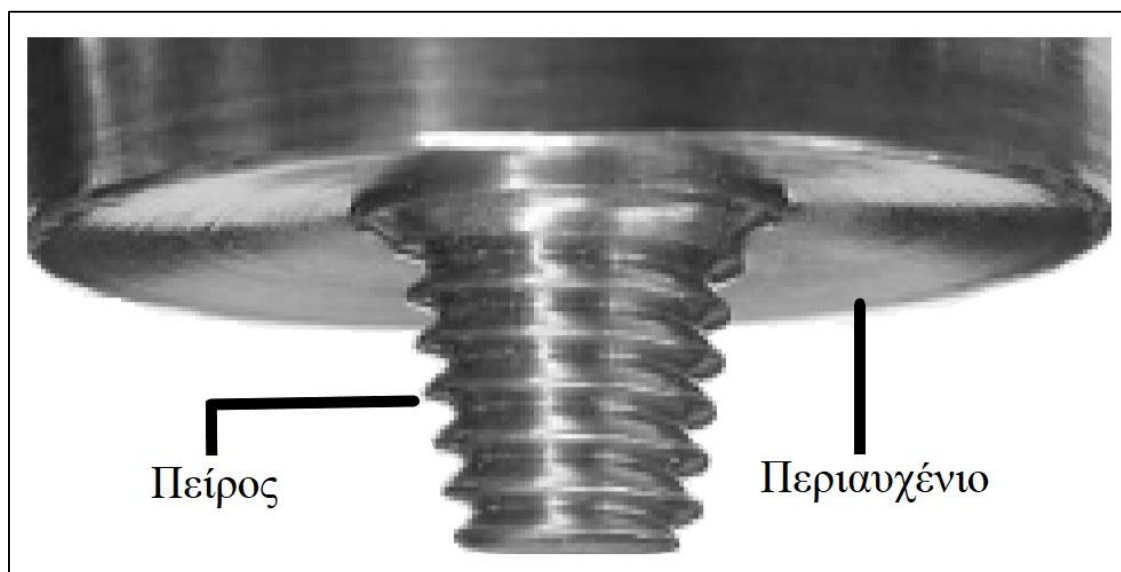
4.3.3 Το εργαλείο συγκόλλησης

Το εργαλείο φέρει δύο βασικά μέρη, το περιουχένιο (shoulder) και την κεφαλή ή πείρο (pin). Ο πείρος εισέρχεται στο κέντρο των προς συγκόλληση τεμαχίων, που είναι πακτωμένα και κινείται κατά μήκος την επιθυμητής ραφής συγκόλλησης.

Το περιουχένιο αυξάνει την θερμότητα της επιφάνειας, λόγω της τριβής με τα τεμάχια, που πρόκειται να συγκολληθούν, έτσι τα κράματα μαλακώνουν και διευκολύνεται η ανάδευση τους. Το υλικό πιέζεται προς τα κάτω από το περιουχένιο του εργαλείου, εμποδίζοντας το υλικό να ρέει έξω από την επιφάνεια. Δυο είναι οι σημαντικές παράμετροι της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση:

- i. Ο ρυθμός περιστροφής του εργαλείου
- ii. Η ταχύτητα μετακίνησης του εργαλείου κατά μήκος της ραφής συγκόλλησης

Έτσι, τα τεμάχια αναμειγνύονται μηχανικά υπό συνθήκες παραμόρφωσης, κατά τη διάρκεια αυτής της τεχνικής σύνδεσης, στερεάς κατάστασης.



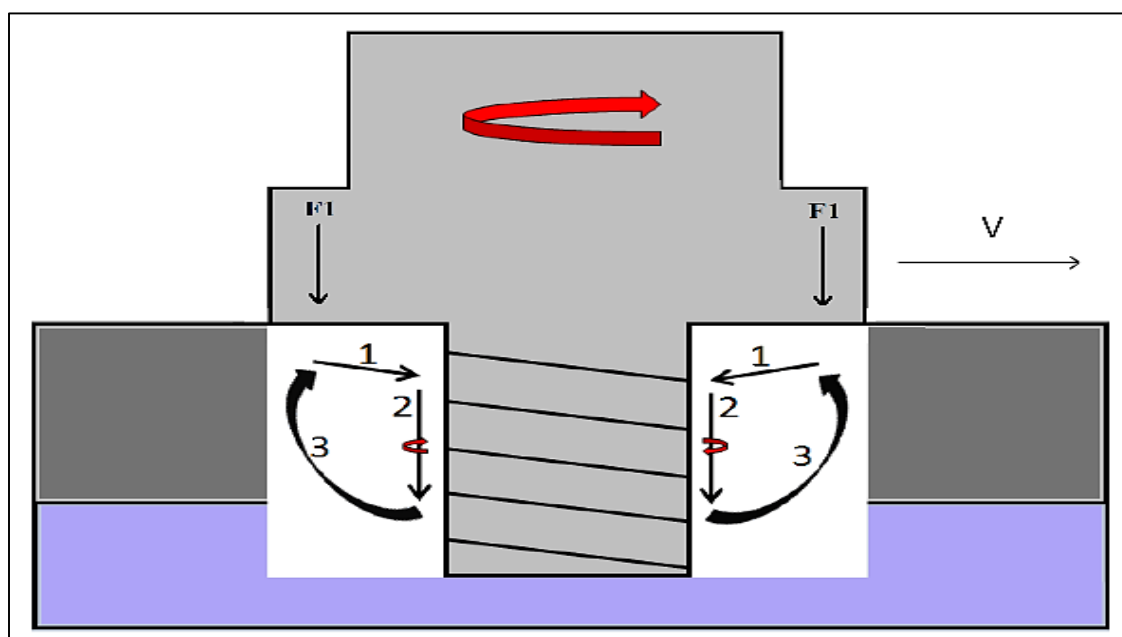
Εικόνα 4.4: Περιγραφή εργαλείου

4.4 Ροή υλικού ανά τύπο εργαλείου

Η ροή του υλικού κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, είναι μια αρκετά σύνθετη διαδικασία, που εξαρτάται από τη γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης, από τις λειτουργικές παραμέτρους και από το προς συγκόλληση υλικό. Κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευσης έχουμε δύο διαφορετικά είδη ροής υλικού, τα οποία διακρίνονται σε:

- i. Ροή η οποία υποκινείται από τον πείρο ή κεφαλή (pin)
- ii. Ροή η οποία υποκινείται από το περιανχένιο (shoulder)

Η μεταφορά του υλικού στην περίπτωση της ροής, η οποία υποκινείται από τον πείρο ή κεφαλή γίνεται κατά στρώματα, ενώ η περίπτωση της ροής η οποία υποκινείται από το περιανχένιο γίνεται στην επιφάνεια των δύο τεμαχίων. Καθώς το εργαλείο κινείται, το υλικό από το μπροστινό άκρο γεμίζει το κενό το οποίο δημιουργείται, εξαιτίας της κίνησης του εργαλείου και σχηματίζει μια σειρά στρωμάτων στην κατεύθυνση της συγκόλλησης.



Εικόνα 4.5: Ροή υλικού

ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ Η ΦΘΟΡΑ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Τα εργαλεία για την μέθοδο συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, πρέπει να παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες σε θερμοκρασίες άνω των 900 °C. Επίσης, θα πρέπει τα εργαλεία να έχουν αντοχή σε κόπωση, να είναι ανθεκτικά σε θραύση και σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι δύο κύριες κατηγορίες υλικών που κατέδειξαν την μεγαλύτερη επιτυχία, κατά την τελευταία δεκαετία είναι το πολυκρυσταλλικό νιτρίδιο του κυβικού βορίου (PCBN) και τα πυρίμαχα μέταλλα. Το πολυκρυσταλλικό κυβικό νιτρίδιο του βορίου σχηματίζεται σε πρέσα, σε μεγάλη πίεση και υψηλή θερμοκρασία, ενώ έρχεται δεύτερο στην σκληρότητα, σε σχέση με το βασικό διαμάντι. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή, σκληρότητα, υψηλής θερμοκρασίας και προσφέρει μεγαλύτερη θερμική και χημική σταθερότητα από το βασικό διαμάντι. Οι Sorensenetal και ο Raietal έχουν δώσει λεπτομερείς περιλήψεις των υλικών PCBN, επεξεργασία υλικών, χαρακτηριστικά και βασικά σχέδια εργαλείων.

5.2 Σχεδιασμός εργαλείων συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

Ο σχεδιασμός των εργαλείων, PCBN για τις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση έχει αλλάξει αρκετά την τελευταία δεκαετία. Τα πρώιμα εργαλεία [εικόνα 5.1 (α)] δεν είχαν χαρακτηριστικά, δηλαδή είχαν μόνο έναν ομαλό κώνο. Το 2003, προστέθηκε ένα σπειροειδές χαρακτηριστικό (σπείρωμα), [εικόνα 5.1 (β)], και το 2005, προστέθηκαν σπειροειδής κώνοι [εικόνα 5.1 (γ)].



Εικόνα 5.1: Εξέλιξη σχεδιασμού εργαλείου PCBN: (α) πρώιμος σχεδιασμός χωρίς χαρακτηριστικά, (β) σπειροειδής ανιχνευτής βημάτων, και (γ) σπειροειδής κώνος [5]

Αυτά είναι τα χαρακτηριστικά, που συνέβαλαν στη βελτίωση της παραγωγικότητας και της διαδικασίας, με αποτέλεσμα να εξαλείψουν τα ελαττώματα που χαρακτηρίζουν την παλαιότερη γενιά σχεδίων εργαλείων. Η οικογένεια PCBN των εργαλείων συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς, για την ένωση μερικών υλικών όπως οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες, οι διπλοί ανοξείδωτοι χάλυβες, χάλυβες εργαλείων και μια ποικιλία άλλων χαλύβων. Πιο πρόσφατα, αναπτύχθηκε μια νέα κατηγορία εργαλείων PCBN, που προσφέρει σημαντικά βελτιωμένη ανθεκτικότητα σε θραύση. Η απόδοση του εργαλείου χαρακτηρίζεται τόσο από τη φθορά του εργαλείου όσο και από τη θραύση του. Τόσο η φυσική, όσο και η χημική φθορά συμβάλλουν στην υποβάθμιση του εργαλείου. Η φυσική και χημική φθορά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το:

- i. Το συγκολλημένο υλικό βάσης
- ii. Τις παραμέτρους συγκόλλησης

Από αυτά τα υλικά που συγκολλούνται επιτυχώς, οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες, παράγουν τα υψηλότερα ποσοστά φθοράς του εργαλείου. Ωστόσο, οι παράμετροι συγκόλλησης έχουν σημαντικό ρόλο στο ρυθμό φθοράς του εργαλείου. Η αξιοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης, που μειώνουν τις θερμοκρασίες εργαλείων τείνουν να μειώνουν σημαντικά τη φθορά του εργαλείου. Κατά κανόνα, οι θερμοκρασίες εργαλείων, για εργαλεία με βάση το PCBN, δεν πρέπει να υπερβαίνουν τους 900 °C.

Πρωταρχικό μέλημα στα εργαλεία αποτελεί η φθορά του εργαλείου. Αν και δεν είναι πλήρως κατανοητό, οι υψηλές καταπονήσεις κατά τη διάρκεια της βύθισης του εργαλείου και η κόπωση κατά τη συγκόλληση είναι οι πρωταρχικοί παράγοντες που συμβάλλουν στη θραύση του. Για να μειωθεί η θραύση στα εργαλεία, θα πρέπει τα εργαλεία να έχουν κατάλληλο σχεδιασμό τόσο στη γεωμετρία του περιαιχηνίου όσο και στην γεωμετρία του πείρου.

5.2.1 Πυρίμαχα εργαλεία

Τα πυρίμαχα μέταλλα όπως το βολφράμιο και το μολυβδαίνιο χρησιμοποιήθηκαν σε πολλά πρώιμα εργαλεία για τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση των χαλύβων. Αν και αυτά τα υλικά αποδείχθηκαν επαρκή για τη συγκόλληση, υπέστησαν παραμόρφωση και θραύση κατά τη διάρκεια της βύθισης. Αυτό συνέβη, λόγω των υψηλών φορτίων που σχετίζονται με αυτό το στάδιο της διαδικασίας και των υψηλών θερμοκρασιών, από όλκιμο προς εύθραυστο υλικό εργαλείου, αντίστοιχα. Ο Wayne Thomas πρότεινε τη χρήση οπών και την προθέρμανση του χώρου βύθισης για να μειωθούν αυτές οι τάσεις. Επίσης, ο υψηλός βαθμός φθοράς αυτών των υλικών περιορίζει τη χρησιμότητά τους.

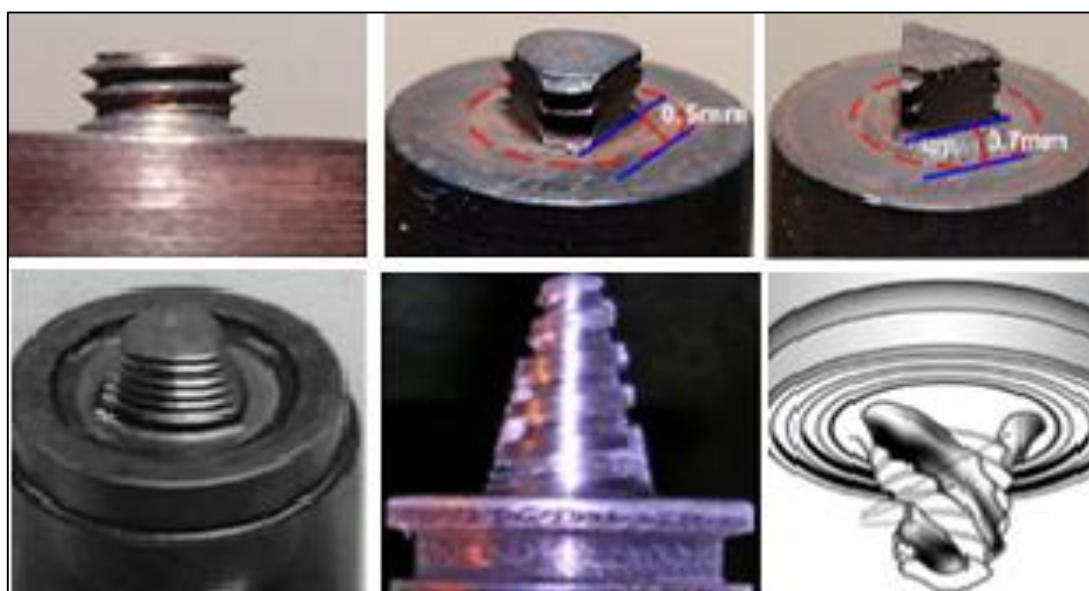
Το βολφράμιο του Rhenium (W-25% Re) έχει γίνει το υλικό πυρίμαχων εργαλείων επιλογής κατά την τελευταία δεκαετία. Αυτό το εργαλείο έχει πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία μετατόπισης από όλκιμο σε εύθραυστο (~ -50 °C), γεγονός που μείωσε την τάση για ράγισμα. Επιπρόσθετα, η προσθήκη του Rhenium βελτίωσε σημαντικά την αντοχή του υλικού σε θερμότητα, πράγμα που μείωσε την παραμόρφωση του πείρου ή κεφαλής, κατά τη διάρκεια της βύθισης και βελτίωσε την αντίσταση στη φθορά. Ωστόσο, ο ρυθμός φθοράς εξακολουθεί να είναι αρκετά υψηλός ώστε να υποβαθμίσει γρήγορα, οποιαδήποτε χαρακτηριστικά που εφαρμόζονται στο πείρο ή κεφαλή. Τα πυρίμαχα εργαλεία έχουν γνωρίσει την ίδια επιτυχία, με τα εργαλεία που βασίζονται σε PCBN.

5.2.2 Εργαλεία από υπερκράματα

Αρχικά, τα υπερκράματα παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή στην διάβρωση και στην οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Έχουν χαρακτηριστικές εφαρμογές στην αεροναυπηγική. Τα κράματα με βάση το Ni ή Co βασίστηκαν ως υλικά εργαλείων για τους χάλυβες συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Ένα εργαλείο συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, που κατασκευάστηκε για την συγκόλληση υπέρυθρων ανθρακούχων χαλύβων, που δείχνουν καλή αντοχή στη φθορά μετά από ένα μήκος συγκόλλησης 150 mm. Μετά από συγκόλληση μήκους 500 mm του ανοξειδώτου χάλυβα AISI304, δεν παρατηρήθηκε έντονη φθορά σε εργαλείο συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση κατασκευασμένο από κράμα Ni που περιέχει Ir. Δεν παρατηρήθηκε έντονη φθορά στο εργαλείο υπερκάλυψης βάσης Ni που περιέχει Ir μετά από 600 δοκιμές

συγκόλλησης σημείου ανάδευσης τριβής του χάλυβα DP590. Όλα αυτά τα εργαλεία αποτελούνται από μια απλή λυγισμένη κωνική κεφαλή.

Αναγνωρίζοντας, ότι κάθε ένα από αυτά τα υπερκράματα έχουν αναφερθεί για κάποια ικανή ποσότητα συγκόλλησης διάφορων χαλύβων, κάθε υλικό εργαλείων δεν έχει αποδειχθεί ακόμη εμπορικά βιώσιμο. Οι λόγοι για αυτό ποικίλλουν από την έλλειψη διαθεσιμότητας στην περίπτωση των υλικών που περιέχουν Ir (ιρίδιο) έως την αδυναμία παραγωγής εμπορικά βιώσιμων μηκών συγκόλλησης (εκατοντάδες μέτρα) χωρίς βλαπτική φθορά. Το χημικό στοιχείο ιρίδιο είναι μέταλλο με ατομικό αριθμό 77 και σχετική ατομική μάζα 192,217, επίσης έχει θερμοκρασία τήξης 2466 °C και θερμοκρασία βρασμού 4428 °C.

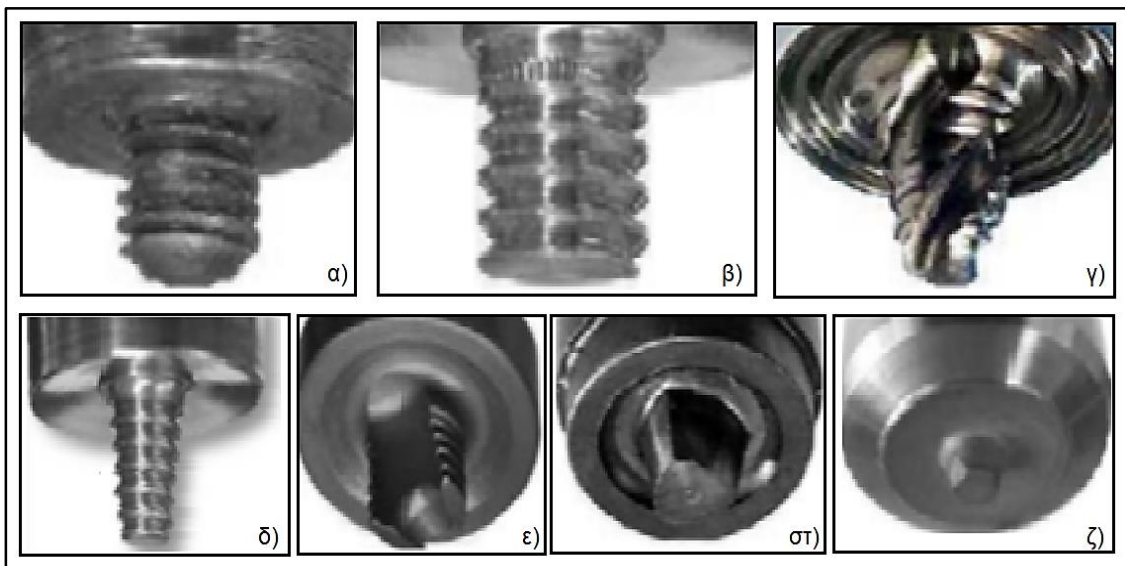


Εικόνα 5.2: Εργαλεία με επικάλυψη PCBN [48]

5.2.3 Μορφολογία εργαλείου

Το εργαλείο συγκόλλησης είναι ένα σημαντικό κομμάτι στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση. Αποτελείται από δυο βασικά τμήματα. Το περιαιχένιο (shoulder) και την κεφαλή ή πείρο (pin) όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Πρόκειται, για ένα εργαλείο το οποίο χρειάζεται να έχει ιδιότητες τέτοιες, ώστε να αντέχει μεγάλες δυνάμεις τριβής, θλιπτικά φορτία καθώς και την μεγάλη θερμότητα που αναπτύσσεται. Η συνεχής έκθεση του εργαλείου σε μεγάλες θερμοκρασίες είναι εύκολο να επιφέρει αλλαγές στην μικροδομή, οι οποίες θα συμβάλουν στην μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του.

Η μορφή του εργαλείου στο κομμάτι του πείρου είναι συνήθως περίπλοκη και ανάλογα το μέγεθος των κομματιών που θα συγκολληθούν, είναι συνήθως μικρή. Ο πείρος μπορεί να είναι είτε κωνικός είτε σφαιρικός ή και με σπείρωμα. Οπότε, η κατεργασιμότητα του υλικού έχει σημαντικό ρόλο στην κατασκευή του. Συνήθως, το εργαλείο για συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση είναι κατασκευασμένο από εργαλειοχάλυβα. Η ευκολία στην κατεργασία του, συμβάλει στην επιλογή ενός τέτοιου υλικού για την κατασκευή του εργαλείου.



Εικόνα 5.3: Διάφοροι τύποι γεωμετρικών εργαλείων, α. Round bottom, β. Flat bottom, γ. Truncated, δ. MX triflute, ε. A-skew, στ. Trivex, ζ. Thread less [7]



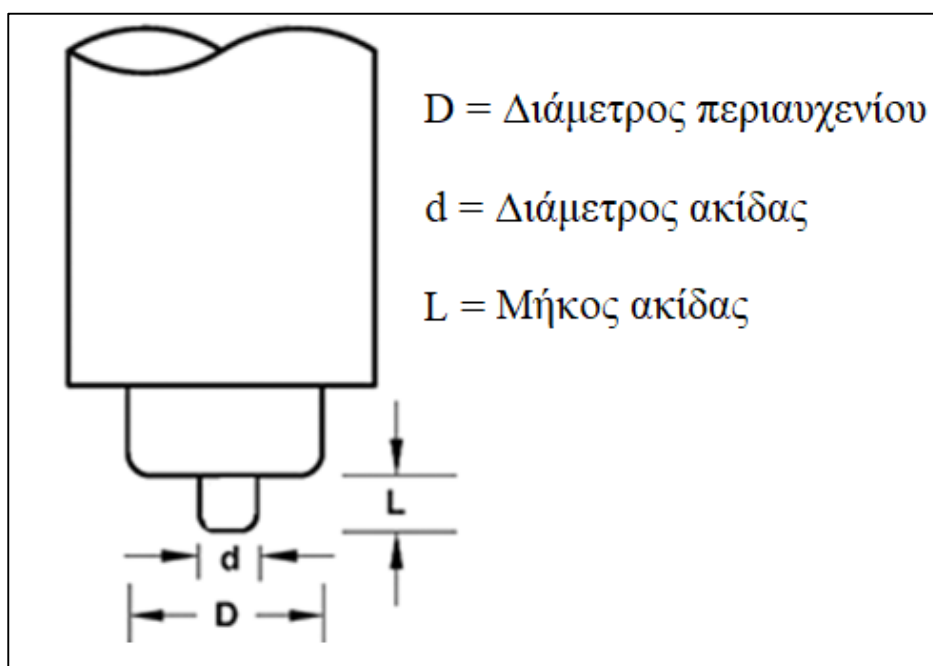
Εικόνα 5.4: Διάφοροι τύποι εργαλείων [48]

5.3 Γεωμετρία εργαλείων

Η γεωμετρία των εργαλείων και οι παράμετροι συγκόλλησης ασκούν σημαντική επίδραση στη μικροδομή του υλικού. Μάλιστα, η γεωμετρία του εργαλείου κατέχει σημαντικό ρόλο στη ροή υλικού και με τη σειρά του, στην ποιότητα της συγκόλλησης. Ένα εργαλείο συγκόλλησης δια τριβής με ανάδυσση έχει δύο βασικές λειτουργίες:

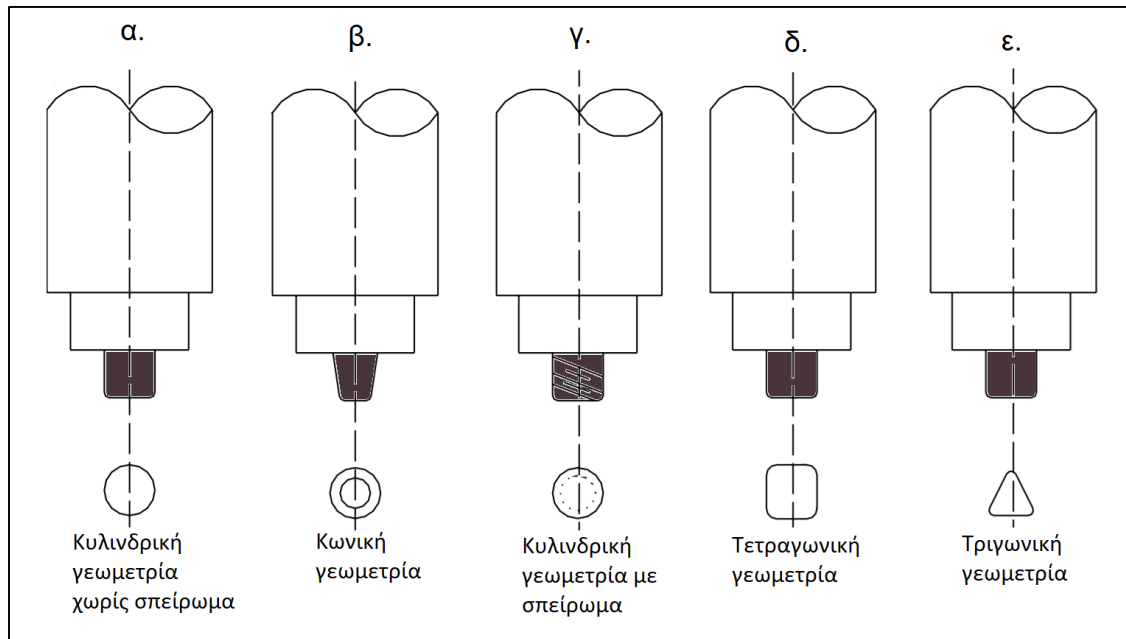
- i. Την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας
- ii. Την διευκόλυνση ροής πλαστικοποιημένου υλικού

Πιο συγκεκριμένα, το εργαλείο στην αρχική του φάση, βυθίζεται και αυξάνει την θέρμανση, που προκύπτει κυρίως από την τριβή μεταξύ της κεφαλής και του τεμαχίου εργασίας. Η βύθιση του εργαλείου πραγματοποιείται μέχρι το περιανχένιο που εφάπτεται στο τεμάχιο εργασίας. Η τριβή μεταξύ του περιανχένιου και του τεμαχίου εργασίας, έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της θέρμανσης και την σωστή μετακίνηση ροής του υλικού.



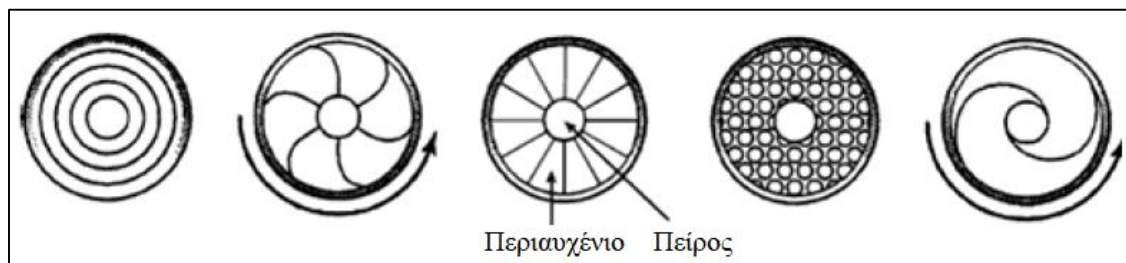
Εικόνα 5.5: Τυπική γεωμετρία εργαλείου [9]

Αναφορικά το σχήμα και η μορφολογία, που μπορεί να έχει η κεφαλή ή πείρος του εργαλείου ποικίλη.



Εικόνα 5.6: Μορφολογία πείρων [6]

Εκτός από την γεωμετρία και μορφολογία του πείρου, η μορφή και γεωμετρία του περιανθενίου κατέχουν σημαντικό ρόλο για την συγκόλληση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες μορφές περιανθενίου.



Εικόνα 5.7: Μορφολογία περιανθενίου [7]



Εικόνα 5.8: Εργαλείο συγκολλήσεις με σπειροειδή μορφή στο πείρο και στο περιανθένιο

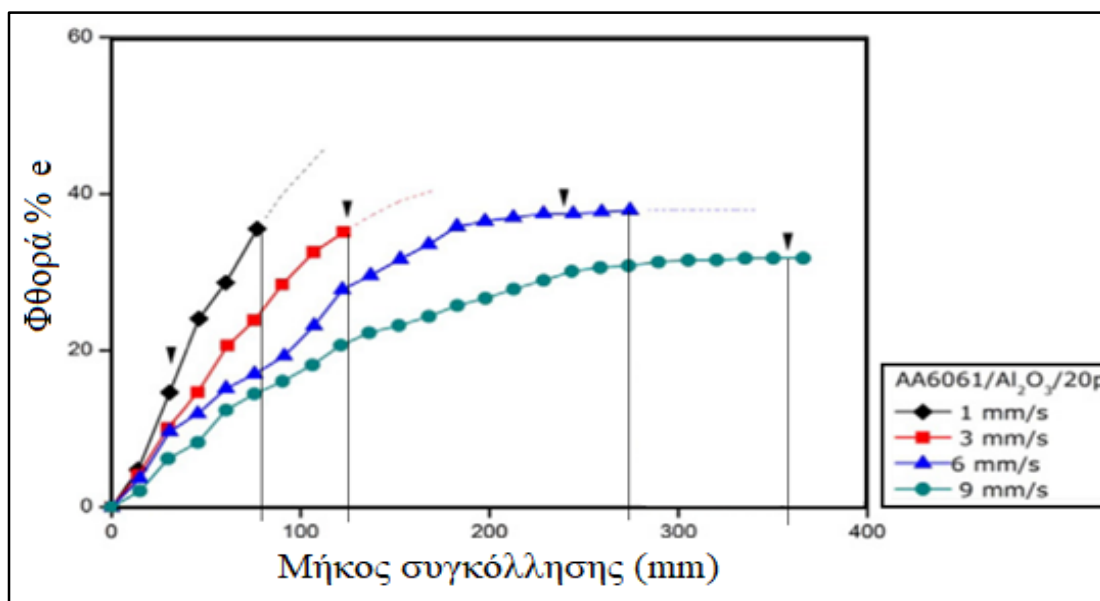
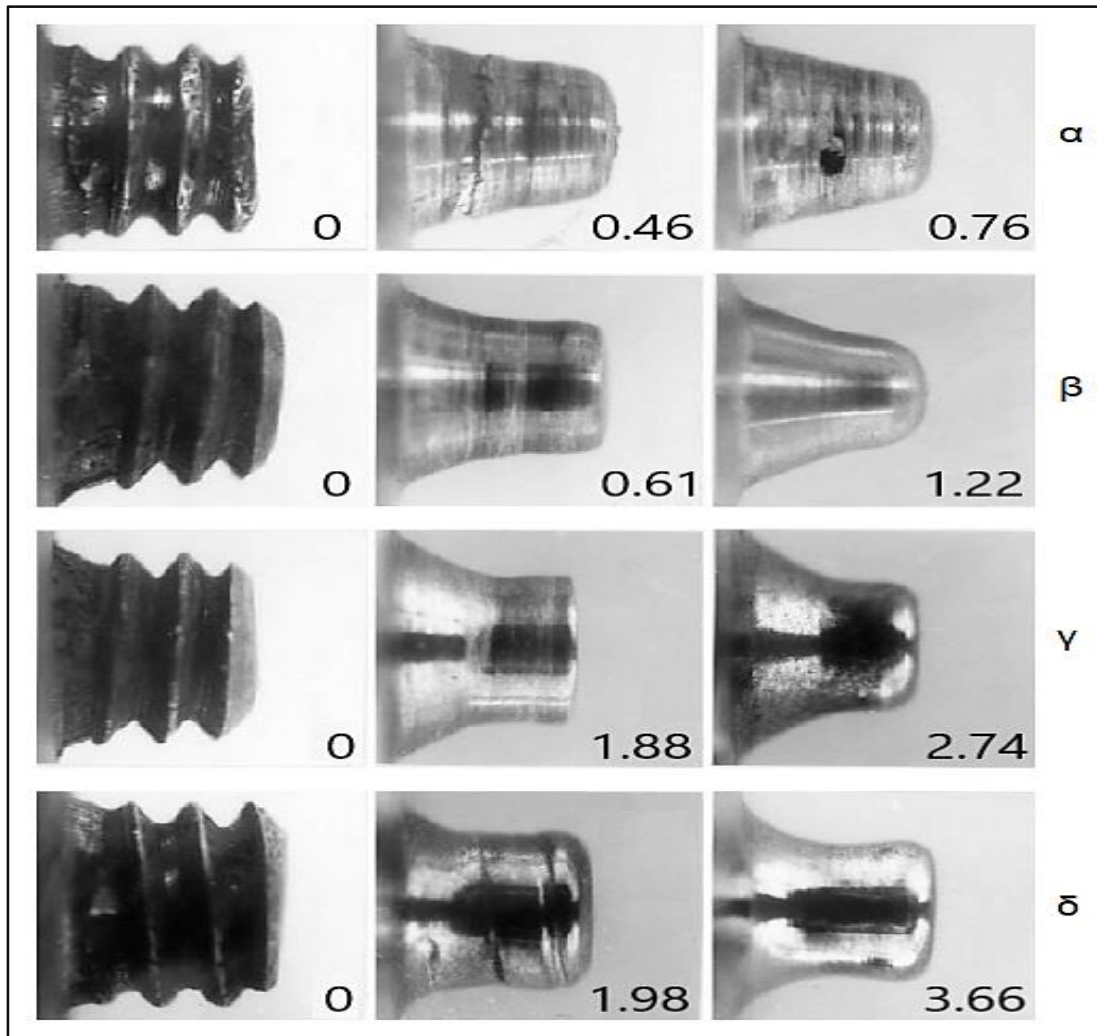
5.4 Φθορά του εργαλείου

Η φθορά στην οποία υπόκειται το εκάστοτε εργαλείο μεταβάλλει πλαστικά το σχήμα αυτού και κατά συνέπεια αυξάνει την πιθανότητα δημιουργίας ελαττωμάτων υποβαθμίζοντας έτσι, την ποιότητα της συγκόλλησης. Ο μηχανισμός φθοράς εξαρτάται από ποικίλες παραμέτρους. Οι βασικότερες απ' αυτές είναι:

- i. Η γεωμετρία του εργαλείου
- ii. Το υλικό του εργαλείου
- iii. Η αλληλεπίδραση του τεμαχίου εργασίας
- iv. Οι παράμετροι συγκόλλησης

Όσον αφορά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, σοβαρές φθορές εργαλείων παρατηρούνται μετά την παραγωγή πολλών συγκολλήσεων. Τα εργαλεία συγκόλλησης για ελαφρά μέταλλα, όπως για παράδειγμα τα κράματα αλουμινίου και μαγνησίου είναι συνήθως κατασκευασμένα από χάλυβα τα οποία έχουν μικρή φθορά. Έχει παρατηρηθεί μάλιστα, ότι ακόμα και από εκατοντάδες χιλιάδες τοπικές συγκολλήσεις για αλουμίνιο, δεν βρέθηκαν σημαντικές φθορές σε εργαλεία ατσαλιού. Ωστόσο, τα εργαλεία αυτά δεν ενδείκνυνται για υλικά με υψηλό σημείο τήξης όπως το τιτάνιο, το νικέλιο κ.α. Για τέτοιου είδους υλικά που έχουν υψηλή αντοχή τα εργαλεία συγκόλλησης κατασκευάζονται συνήθως από σκληρά μέταλλα, καρβίδια και υλικά μεταλλικής μήτρας με ανώτερη θερμική αντίσταση σε φθορά και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1000° C, όπως WC-Co, TiC και PCBN.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι οι ραγδαίες βελτιώσεις στην συγκόλληση τριβής με ανάδευση που έχουν πραγματοποιηθεί τις τελευταίες δεκαετίες έχουν οδηγήσει στο σχεδιασμό εξελιγμένων εργαλείων συγκόλλησης. Έτσι, το χαμηλό κόστος και η απαίτηση για μεγάλη διάρκεια ζωής των εργαλείων οδήγησαν στην ανάπτυξη ειδικών ακίδων για υλικά χαμηλής αντοχής όπως τα κράματα αλουμινίου και μαγνησίου.

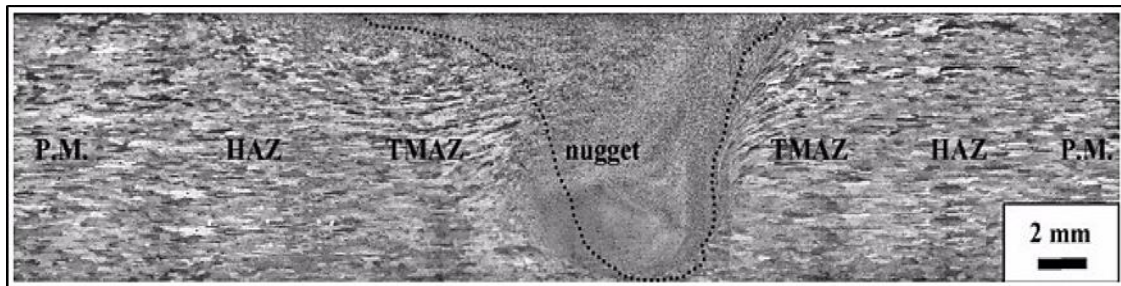


Εικόνα 5.9: Φθορά πείρου εργαλείου WC-Co (a) - (d) με σταθερή ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 rpm αλλά με διαφορετικές ταχύτητες μετακίνησης (α) 1 mm/s, (β) 3 mm/s, (γ) 6 mm/s, και (δ) 9 mm/s [8]

ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΖΩΝΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

6.1 Διακριτές ζώνες στην περιοχή των συγκολλήσεων

Οι συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον στην μικροδομή του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ο πείρος ή κεφαλή του εργαλείου συγκολλήσεις δημιουργεί την ζώνη ανάδευσης (WNZ). Αριστερά και δεξιά της ζώνης ανάδευσης ακολουθεί η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ) και έπειτα, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ), ενώ στο τέλος διακρίνουμε το βασικό μέταλλο (PM).



Εικόνα 6.1: Θερμικά επηρεασμένες ζώνες κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση [49]

Η μικροδομή μιας συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση εξαρτάται από τη θερμοκρασία και η θερμοκρασία εξαρτάται από:

- i. Την περιστροφική κίνηση του εργαλείου
- ii. Το σχεδιασμό του εργαλείου (γεωμετρία εργαλείου)
- iii. Την οριζόντια ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου
- iv. Την κάθετη πίεση από το περιαυχένιο
- v. Το υλικό κατεργασίας (δυο τεμάχια)

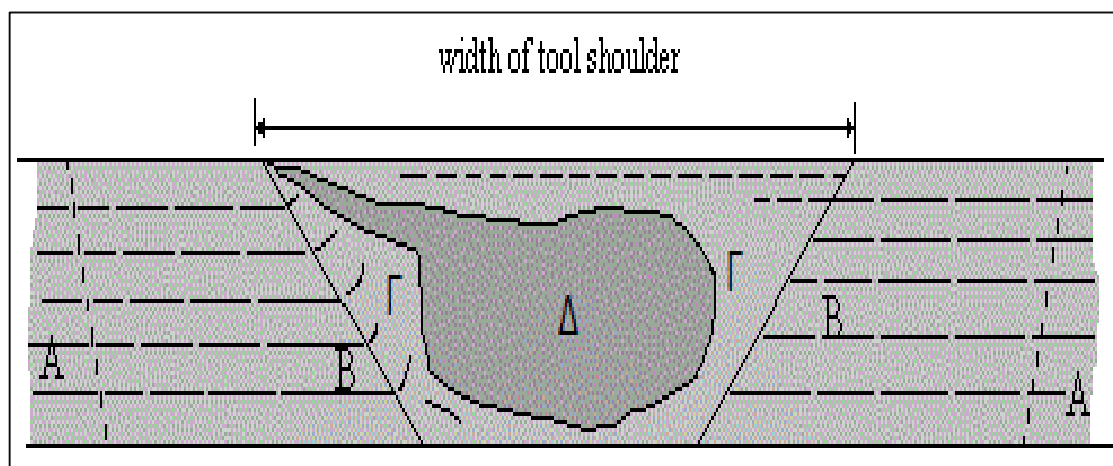
Τα παραπάνω καθιστούν δύσκολη την περιγραφή της μικροδομής του κατεργαζόμενου δοκιμίου. Λόγω των πολλαπλών γεωμετρικών σχημάτων που μπορεί να έχει η κεφαλή, η κίνηση του υλικού είναι αρκετά σύνθετη. Κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης με τη μέθοδο συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, το υλικό υποβάλλεται σε έντονη πλαστική παραμόρφωση σε υψηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα, τη δημιουργία λεπτόκοκκης δομής. Η λεπτόκοκκη αυτή μικροδομή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση προσδίδει στο μέταλλο αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες.

6.2.1 Ζώνη συγκόλλησης ανάδευσης [Weld nugget – WNZ (Δ): Πρόκειται για την περιοχή που αλλάζει πλήρως η δομή του υλικού, η οποία καλείται και ζώνη ανάδευσης και εξαρτάται πλήρως από την κεφαλή του περιαιχενίου. Ο όρος ζώνη ανάδευσης χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου έχουμε να κάνουμε με κατεργασίες τριβής με ανάδευσης και όχι στην περίπτωση των συγκολλήσεων και αυτό γιατί στην πρώτη περίπτωση έχουμε να κάνουμε κατά κύριο λόγο με τη μεταποίηση του υλικού.

6.2.2 Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη [Thermomechanically affected zone - TMAZ (Γ): Στην περιοχή αυτή το εργαλείο, θα επιδράσει πάνω στο υλικό, όπως επίσης και η θερμότητα που αναπτύσσεται. Στην περίπτωση του αλουμινίου, υφίσταται πλαστική παραμόρφωση με άμεση επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, χωρίς όμως πλήρη αλλαγή της δομής του. Κάτι που τη διακρίνει χαρακτηριστικά, σε σχέση με τη ζώνη συγκόλλησης, η οποία υφίσταται πλήρη αλλαγή της δομής του.

6.2.3 Θερμικά επηρεασμένη ζώνη [(Heat affected zone – HAZ (B**):** Η περιοχή αυτή βρίσκεται κοντά στη ζώνη συγκόλλησης. Ο θερμικός κύκλος θα διαμορφώσει ανάλογα τη μικροδομή ή ακόμα και τις μηχανικές ιδιότητες (σε μικρό βαθμό), του υλικού. Παρόλα αυτά, δεν παρατηρείται πλαστική παραμόρφωση.

6.2.4 Ζώνη βασικού μετάλλου [Unaffected material – P.M. (A**):** Η περιοχή αυτή, βρίσκεται μακριά από τη ζώνη συγκόλλησης, δεν έχει παραμορφωθεί και παρόλο που θα υποβληθεί στους θερμικούς κύκλους της συγκόλλησης, δεν έχουμε καμία μεταβολή στην δομή του μετάλλου, γιατί η θερμότητα που αναπτύσσεται είναι πολύ χαμηλή. Αυτό σημαίνει ότι η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες δεν αλλάζουν.



Εικόνα 6.2: Ταξινόμηση ζωνών κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση [10]

6.3 Μέγεθος κόκκων

Σύμφωνα με τους Murretal et al. το 1998 το μέγεθος κόκκου στην ζώνη ανάδευσης είναι 10 φορές μικρότερο από το αρχικό βασικό μέταλλο. Το σχήμα του εργαλείου συγκόλλησης μπορεί να ποικίλει ανάλογα το υλικό που πρέπει να συγκολληθεί. Σύμφωνα με τους Bradley et al. και James et al. η διάμετρος του εργαλείου συγκόλλησης (εικόνα 6.2) είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από τη πλάτος της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Επίσης, μερικές φορές υπάρχουν ομόκεντροι δακτύλιοι ορατοί όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 6.3: Onion rings [10]

Αυτοί οι δακτύλιοι, που ονομάζονται "onion rings", βρίσκονται στο κέντρο του συγκολλημένου κομματιού. Υπάρχουν μερικές θεωρίες σχετικά με αυτούς τους δακτύλιους:

- i. Μερικοί συγγραφείς συμμερίζονται την άποψη, ότι αυτοί οι δακτύλιοι είναι αποτέλεσμα του εργαλείου με σπείρωμα (εικόνα 5.6 γ), όπως αναφέρθηκε από τους Bradley et al. και James et al. Αυτοί οι δακτύλιοι θεωρούνται ως ένδειξη καλής ποιότητας της συγκόλλησης.
- ii. Σε αντίθεση με την τελευταία θεωρία, των Larsson et al. υποθέτουν, ότι οι δακτύλιοι δεν είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών μεγέθους κόκκων, αλλά μάλλον αποτέλεσμα μιας μεταβολής στον προσανατολισμό αυτών των κόκκων.

Ωστόσο, και οι δύο έρευνες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα, ότι οι δακτύλιοι δεν είναι ορατοί σε όλα τα κράματα.

Παρακάτω παρατηρούμε τον στροβιλισμό στην περιοχή της ανάδευσης που έχει δημιουργηθεί από το εργαλείο.



Εικόνα 6.4: Μικροδομή συγκόλλησης κατά την διαδικασία συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

Μελέτες που διεξήχθησαν για κράματα αλουμινίου έχουν επίσης αποκαλύψει, ότι το μέγεθος κόκκων ποικίλλει εντός της αναδευόμενης ζώνης, από την κορυφή προς τα κάτω, καθώς και από τη κεντρική γραμμή της συγκόλλησης στις πλευρές. Η διακύμανση του μεγέθους των κόκκων από την κεντρική γραμμή συγκόλλησης, έως την άκρη της ζώνης ανάδευσης είναι σύμφωνα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος της συγκόλλησης nugget, που είναι μέγιστη στην κεντρική γραμμή και μειώνεται ανάλογα με την απόσταση από κάθε πλευρά του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^[12]

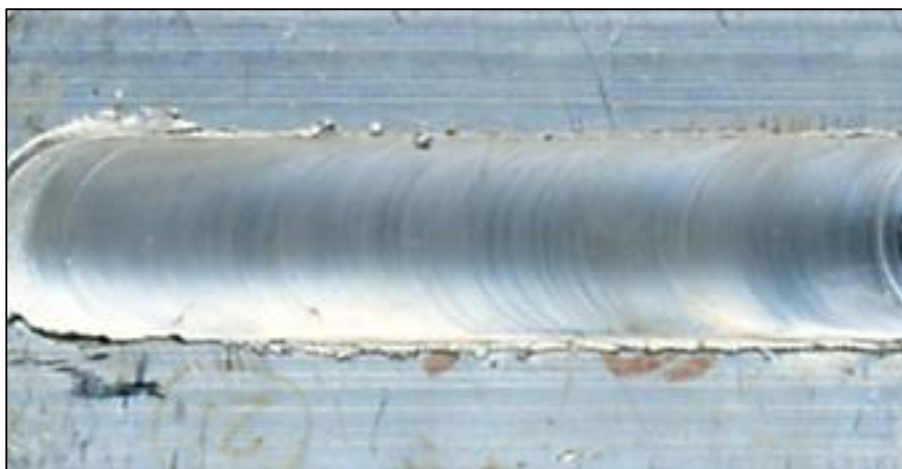
ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

7.1 Συγκολλήσεις χωρίς ελαττώματα

Για να επιτευχθεί μια συγκόλληση, η οποία δεν παρουσιάζει ελαττώματα κρίνεται σημαντική η χρήση ικανοποιητικών παραμέτρων, που είναι το κάθετο φορτίο, η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, η ταχύτητα πρόωσης κατά μήκος της συγκόλλησης και η κατάλληλη επιλογή της γεωμετρίας του εργαλείου. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται συγκολλήσεις χωρίς εκροή υλικού (flash), ατέλειες, και ασυνέχειες.



Εικόνα 7.1: Συγκόλληση χωρίς ελαττώματα



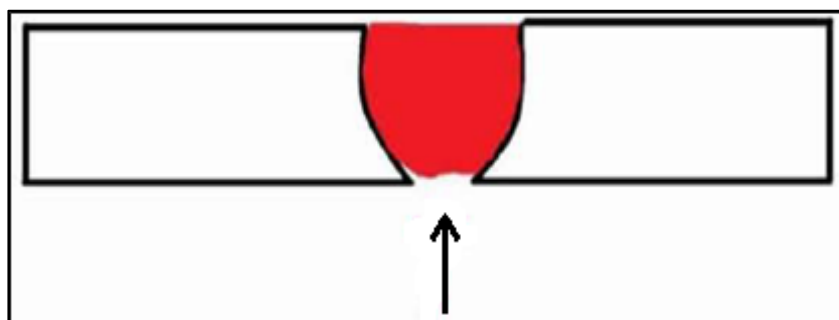
Εικόνα 7.2: Συγκόλληση χωρίς ασυνέχειες ή ατέλειες

7.2 Ελαττώματα

Στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση, όπως και σε κάθε μέθοδο συγκόλλησης υπάρχουν διάφορα ελαττώματα, τα οποία μπορεί να είναι εσωτερικά ή εξωτερικά και να επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα την αντοχή του μετάλλου. Επίσης, τα ελαττώματα στη μικροδομή επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Μάλιστα, τα ελαττώματα αυτά, κάποιες φορές μπορεί να είναι ορατά με γυμνό μάτι και κάποιες άλλες όχι. Πιο αναλυτικά, συχνά παρουσιάζονται τα παρακάτω ελαττώματα.

7.2.1 Ατελής διείσδυση

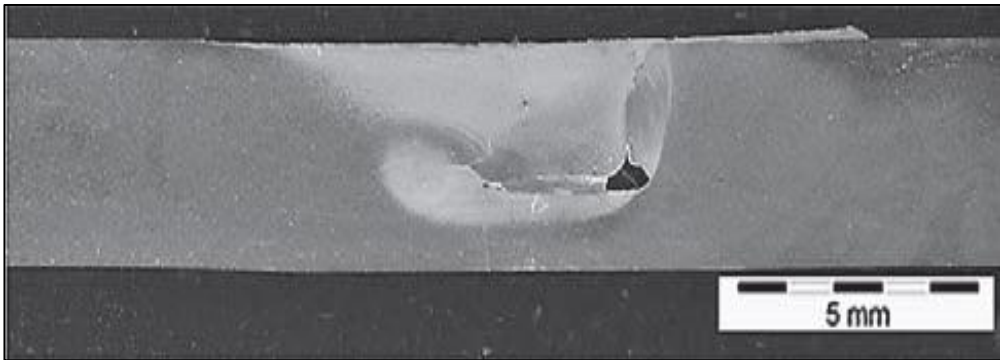
Ένα συχνό φαινόμενο είναι η ατελής διείσδυση και οφείλεται στο μικρό κάθετο φορτίο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα, ο πείρος ή κεφαλή να μην εισέρχεται σωστά στο επιθυμητό μήκος του τεμαχίου με αποτέλεσμα, να μην υπάρχει σωστή ένωση των δυο τεμαχίων. Συνεπώς, υπάρχουν κενά στην κάτω περιοχή της συγκόλλησης και η τελική αντοχή του υλικού μειώνεται σε μεγάλο βαθμό.



Εικόνα 7.3: Ατελής διείσδυση

7.2.2 Ατέλειες τύπου τούνελ

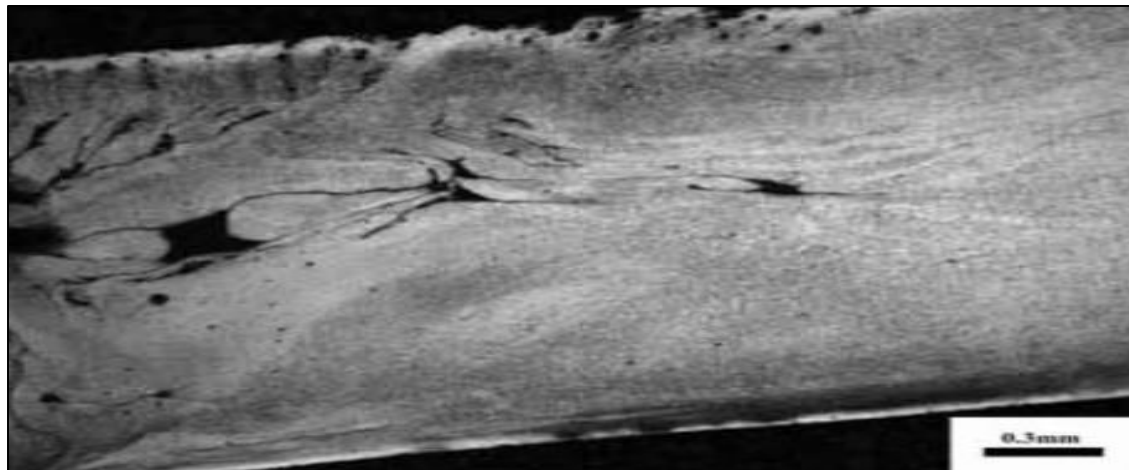
Ατέλειες τύπου τούνελ στις συγκολλήσεις οφείλονται στο μικρό κάθετο φορτίο, που ασκεί το περιανχένιο στα δυο προς συγκόλληση τεμάχια, με αποτέλεσμα να δημιουργείται τέτοιου είδους ατέλεια, η οποία εμφανίζεται στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Επίσης, οι ατέλειες τύπου τούνελ είναι συνεχείς σε όλο το μήκος της συγκόλλησης και ενδέχεται να φτάσουν μέχρι την επιφάνεια της.



Εικόνα 7.4: Ελαττώματα τύπου τούνελ [12]

7.2.3 Εσωτερικοί πόροι

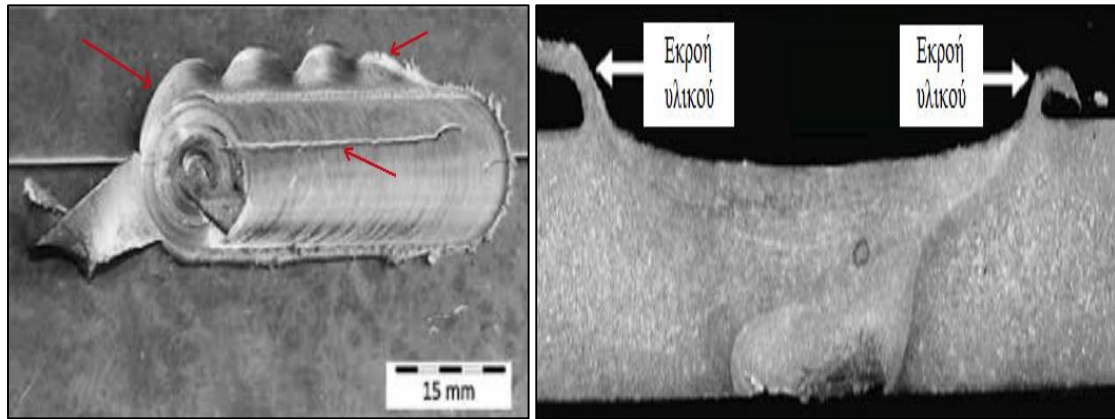
Η εμφάνιση εσωτερικών πόρων στην περιοχή της συγκόλλησης είναι συχνό ελάττωμα και οφείλεται στην ταχύτητα περιστροφής και στο κάθετο φορτίο του εργαλείου. Πιο αναλυτικά, όταν αυτοί οι δυο παράμετροι δεν έχουν την σωστή λειτουργία, τότε δεν αναπτύσσεται η απαραίτητη θερμοκρασία στον πείρο και το περιαιχενίου του εργαλείου, έτσι ώστε η ροή του υλικού να είναι η κατάλληλη. Στην περίπτωση αυτή είναι δύσκολο να κλείσει το κενό που δημιουργείται από την προωθούσα πλευρά (advancing side) με αποτέλεσμα να δημιουργούνται οι πόροι. Επιπρόσθετα, πολλές φορές οι πόροι οφείλονται στη μη σωστή επιλογή της γεωμετρίας του εργαλείου.



Εικόνα 7.5: Συγκόλληση με πόρους [12]

7.2.4 Ελαττώματα τύπου flash

Ελαττώματα τύπου flash (γρέζι) δημιουργούνται, στην περίπτωση που το κάθετο φορτίο είναι μεγαλύτερο από αυτό που χρειάζεται, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμότητας. Λόγω αυτού δημιουργείται κατά μήκος της συγκόλλησης αριστερά και δεξιά, εκροή του υλικού όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 7.6: Ελαττώματα τύπου flash [12]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^[4.6,17-32]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΝΟΨΗ ΠΡΟΣΦΑΤΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΝ

Η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι μια καινοτόμα τεχνική ανακαλυφθείσα πρόσφατα, που χαίρει μεγάλης ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια στο βιομηχανικό χώρο και έχει μελετηθεί εκτενώς από πολλούς ερευνητές του κλάδου. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος έχει εφαρμοστεί και μελετηθεί για πληθώρα υλικών λόγω της ιδιαίτερης εφαρμογής που βρίσκει στα κράματα αλουμινίου, μιας και είναι ιδανικά για τη μέθοδο. Από την εμφάνιση της συγκεκριμένης τεχνικής, οι πρώτες εφαρμογές της έγιναν σε κράματα αλουμινίου και γίνονται μέχρι και σήμερα, γιατί ενδείκνυται για τη συγκόλληση αλουμινίου. Σκοπός των ερευνητών είναι να μελετήσουν όλες τις παραμέτρους της τεχνικής, με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθεί μια συγκόλληση χωρίς ατέλειες. Οι παράμετροι που απαιτούνται για μια τέτοια συγκόλληση είναι:

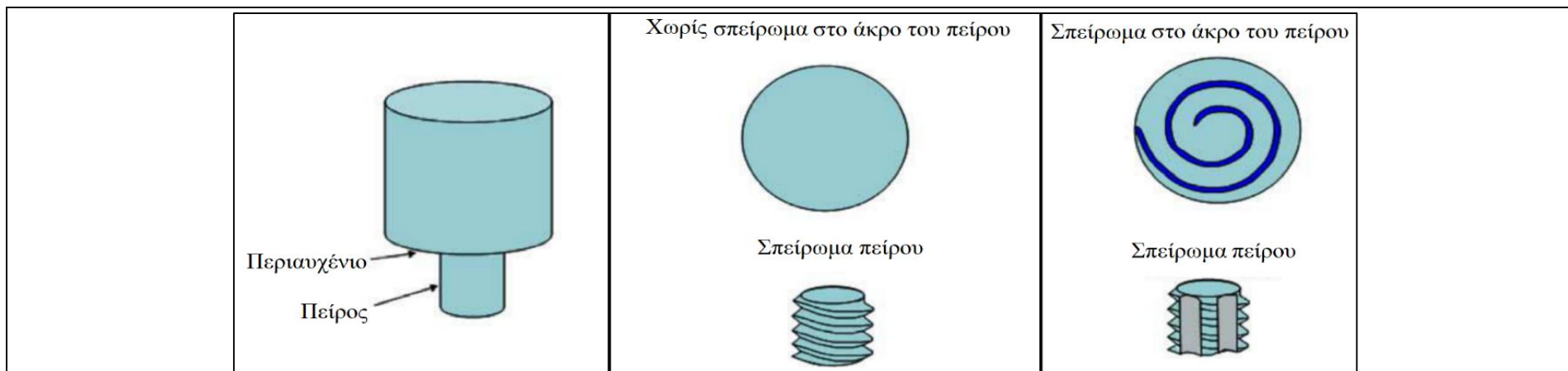
- i. Τα υλικά που πρόκειται να συγκολληθούν
- ii. Η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου
- iii. Η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου κατά μήκος της συγκόλλησης
- iv. Το κάθετο φορτίο που ασκεί το εργαλείο
- v. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου.

Όλοι οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν τη μικροδομή της συγκόλλησης, με αποτέλεσμα να προσδιορίζονται οι μηχανικές και χημικές ιδιότητες της συγκόλλησης.

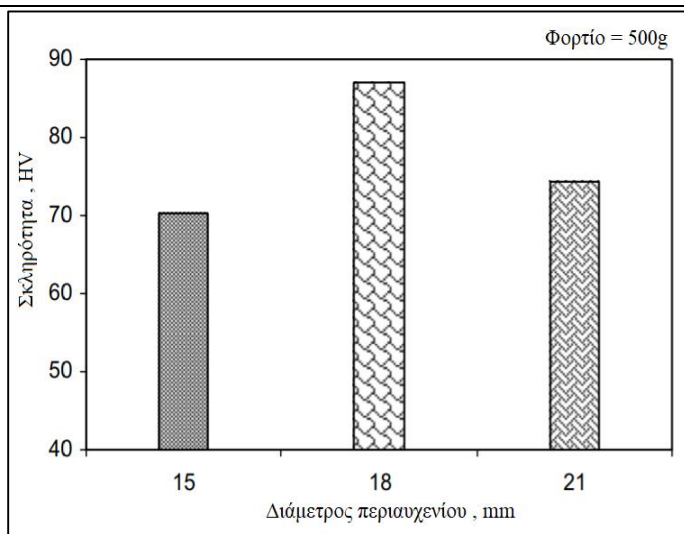
Η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές οι οποίοι έχουν δώσει ιδιαίτερη σημασία στις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου. Παρακάτω, παραθέτουμε 5 πίνακες, με τα αποτελέσματα των ερευνητών, που αφορούν τα ευρέως διαδεδομένα κράματα αλουμινίου AA6061, AA5083, AA2219, AA1050 και AA2014, που τους βοήθησαν να καταλήξουν σε διαπιστώσεις ιδιαίτερα χρήσιμες για την κατανόηση, βελτιστοποίηση και εξέλιξη της τεχνικής μας.

1. Πρόσφατα διεθνή επιστημονικά αποτελέσματα για κράμα AA6061, ανά ερευνητή

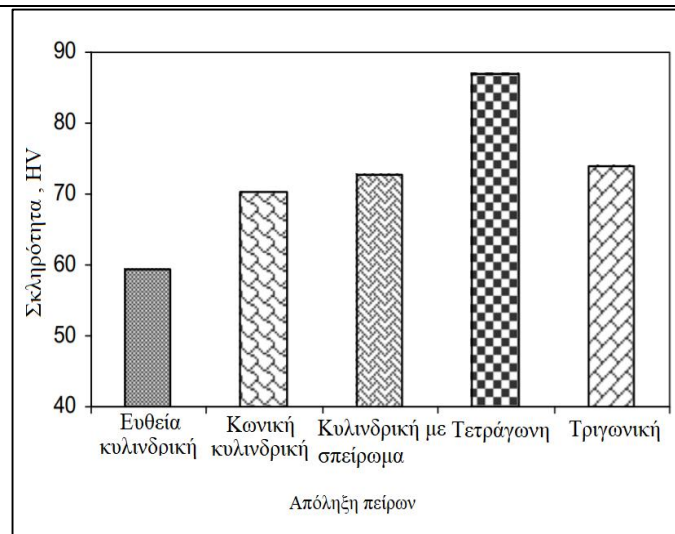
ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΤΗΣΗΣ	ΑΝΑΦΟΡΑ
Fuji	Οι Fuji et al. διεξάγοντας πειράματα σε κράμα αλουμινίου AA6061-T6, με εργαλεία συγκόλλησης συγκεκριμένης γεωμετρίας διαπίστωσαν, ότι για συγκεκριμένη θερμοκρασία μετάλλου και όταν το εργαλείο έχει σπείρωμα στο άκρο του πείρου, η αντίσταση είναι χαμηλή και αποτελεσματική, ενώ όταν το εργαλείο συγκόλλησης δεν έχει σπείρωμα, η αντίσταση είναι υψηλή, αρά η συγκόλληση δεν είναι αποτελεσματική (εικόνα 5.3, 5.6 γ, 8.1.).	[21]
Elangovan	Οι Elangovan et al. πραγματοποιώντας πειράματα για κράμα AA6061, με χαρακτηριστικά εργαλείων κυλινδρικά, κωνικά κυλινδρικά, κυλινδρικά με σπείρωμα, τριγωνικά και τετράγωνα παρατήρησαν, πως το εργαλείο με κατακόρυφη και τριγωνική κεφαλή έδειξε εξαιρετικές εφελκυστικές ιδιότητες, ενώ τα κυλινδρικά εργαλεία παρουσίασαν κατώτερες ιδιότητες εφελκυσμού (εικόνα 5.6 α, 8.5 α).	[6,22]
Elatharasan	Οι Elatharasan et al. διεξάγοντας πειράματα για κράμα AA6061-T6 παρατήρησαν, ότι με την αύξηση των στροφών (RPM) και της ταχύτητας πρόωσης της συγκόλλησης, το κράμα παρουσίασε αύξηση στην τελική αντοχή του σε εφελκυσμό, έως ένα σημείο και μετά από αυτό αρχίζει να μειώνεται.	[31]
Bulasubramanian	Οι Balasubramaniam et al. ερεύνησαν την επίδραση της απόληξης, του πείρου και της διαμέτρου του περιουχενίου στο σχηματισμό της ζώνης ανάδευσης σε AA6061 κράμα αλουμινίου. Πέντε διαφορετικές μορφές πείρων εργαλείων (ευθείες κυλινδρικές, κωνικές κυλινδρικές, κυλινδρικές με σπείρωμα, τριγωνικές και τετράγωνα) με τρεις διαφορετικές διαμέτρους 15mm, 18mm και 21mm περιουχενίου. Η έρευνα τους αποκάλυψε τις ακόλουθες δύο παρατηρήσεις. Πρώτον, από την ανάλυση της μικροδομής, το συμπέρασμα είναι, ότι ο σχηματισμός της τριβής χωρίς ελαττώματα στη ζώνη επεξεργασίας ανάδευσης εξαρτάται από το εργαλείο συγκόλλησης και την διάμετρο του περιουχενίου του εργαλείου. Δεύτερον, οι εγκάρσιες ιδιότητες εφελκυσμού εξαρτώνται από το πείρο και τη διάμετρο του περιουχενίου (εικόνα 5.6, 8.2, 8.3, 8.5).	[19,22]
Dhancholia	Οι Dhancholia et al. πραγματοποιώντας πειράματα σε διατάξεις κραμάτων AA6061 με τη χρήση εργαλείων κυλινδρικού τύπου, έφτασαν στο συμπέρασμα, ότι ο τύπος του εργαλείου, η ταχύτητα περιστροφής και η ταχύτητα πρόωσης συμβάλλουν κατά 40%, 21% και 35% αντίστοιχα στην ποιότητα της συγκόλλησης. Επίσης, η διαδικασία συγκόλλησης σε χαμηλές ταχύτητες έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από ό,τι υψηλότερες ταχύτητες. Οι μηχανικές ιδιότητες αυξάνονται με την ταχύτητα περιστροφής και με την ταχύτητα συγκόλλησης, ενώ σε κάποιο επίπεδο αρχίζουν να μειώνονται (εικόνα 5.6 α).	[30]



Εικόνα 8.1: Σπείρωμα στον πείρο και στο άκρο του [18]



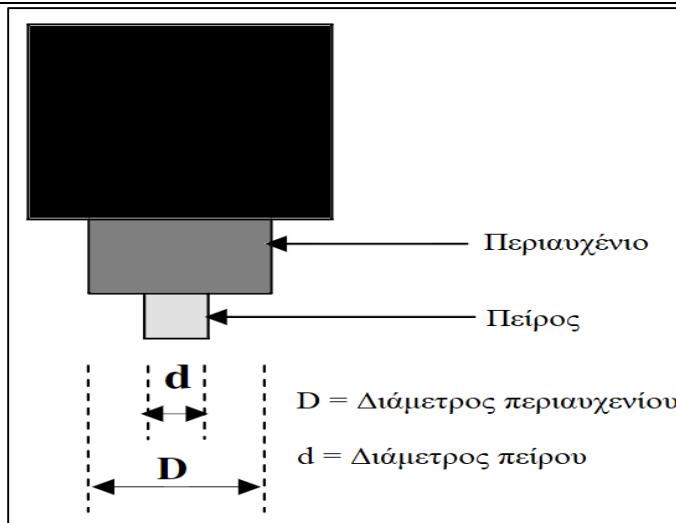
Εικόνα 8.2: Επίδραση των περιουχενίων στη σκληρότητα [6]



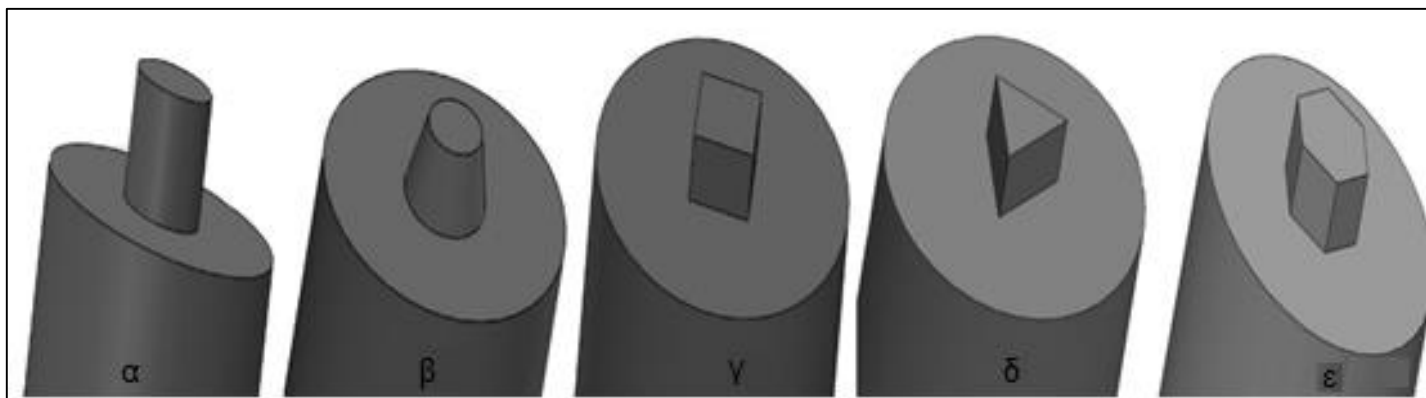
Εικόνα 8.3: Επίδραση της απόληξης των πείρων στη σκληρότητα [6]

2. Πρόσφατα διεθνή επιστημονικά αποτελέσματα για κράμα AA5083, ανά ερευνητή

ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΤΗΣΗΣ	ΑΝΑΦΟΡΑ
Fuji	Οι Fuji et al. διεξάγοντας πειράματα σε κράμα αλουμινίου AA5083O, με εργαλεία συγκόλλησης συγκεκριμένης γεωμετρίας, διαπίστωσαν, ότι για υψηλή θερμοκρασία τήξης μετάλλου και όταν το εργαλείο έχει σπείρωμα στο άκρο του πείρου, η αντίσταση είναι χαμηλή και αποτελεσματική, ενώ όταν το εργαλείο συγκόλλησης δεν έχει σπείρωμα, η αντίσταση είναι υψηλή, αρά η συγκόλληση δεν είναι αποτελεσματική (εικόνα 5.3, 5.6 γ, 8.1.).	[21]
Koilaraj	Οι Koilaraj et al. για AA5083-H321, κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι κυλινδρικά εργαλεία με σπείρωμα είναι ιδανικότερα για τη διαδικασία της συγκόλλησης. Ο λόγος D / d έχει σημαντικό ρόλο και συμβάλλει στο 60% της αντοχής της συγκόλλησης (εικόνα 8.4)	[32]
Kumar	Οι Kumar et al. για AA5083O, έφτασαν στο εξής συμπέρασμα. Η αύξηση των στροφών RPM, το αξονικό φορτίο και η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου, αυξάνουν την αντοχή της συγκόλλησης σε εφελκυσμό μέχρι ένα σημείο και μετά μειώνεται η αντοχή της. Η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου και η αξονική δύναμη είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση και την ποσοστιαία επιμήκυνσή του εργαλείου, ενώ η αύξηση της ταχύτητας πρόωσης οδήγησε σε μείωση του ποσοστού επιμήκυνσης του.	[4,26]
Palanivel	Οι Palanivel et al. για AA5083-H111, κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι οι χαμηλότερες ταχύτητες πρόωσης προκαλούν ακατάλληλη ενοποίηση υλικού. Αυτό οδηγεί σε μείωση του UTS λόγω ελαττώματος που δημιουργείται στην συγκόλληση. Η ανάδευση του υλικού είναι ανεπαρκής σε υψηλότερες ταχύτητα πρόωσης. Το υλικό που υπάρχει στην πλευρά προώθησης του εργαλείου δεν κινείται αρκετά στη πλευρά υποχώρησης, με συνέπεια να έχουμε ελαττώματα στην συγκόλληση.	[28]



Εικόνα 8.4: Γεωμετρία εργαλείου [6]



Εικόνα 8.5: Απόληξη ακίδων: α) κυλινδρική διατομή, β) κωνική διατομή, γ) τετράγωνη διατομή, δ) τριγωνική διατομή, ε) εξαγωνικής διατομή

3. Πρόσφατα διεθνή επιστημονικά αποτελέσματα για κράμα AA2219, ανά ερευνητή

ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΤΗΣΗΣ	ΑΝΑΦΟΡΑ
Zhang	Οι Zhang et al. πραγματοποίησαν πειράματα σε κράμα αλουμινίου AA2219-T6, και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι στο κάτω τμήμα της συγκόλλησης παρουσιάστηκε μικρή σκληρότητα στην ζώνη ανάδευσης και υψηλή στις θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη και θερμικά επηρεασμένη ζώνη.	[23,24]
Rambabu	Οι Rambabu et al. για κράμα AA2219-T87, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με εργαλεία συγκόλλησης εξαγωνικής μορφής, η συγκόλληση παρουσιάζει δομή λεπτού κόκκου (εικόνα 8.5 ε).	[25]
Chen	Οι Chen et al. μελέτησαν την επίδραση της γήρανσης της συγκόλλησης, μετά από θερμική επεξεργασία στις ιδιότητες εφελκυσμού για κράμα αλουμινίου AA2219-O. Το εύρημα τους υποδηλώνει, ότι οι θερμικά επεξεργασμένες ενώσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό.	[17,20]
Kovacevic	Οι Kovacevic et al. ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο μοντέλο που βασίζεται στη μέθοδο του πεπερασμένου στοιχείου για τη μελέτη της θερμικής επίδρασης και της εξέλιξης της καταπόνησης της συγκόλλησης, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του εργαλείου.	[20]

4. Πρόσφατα διεθνή επιστημονικά αποτελέσματα για κράμα AA1050, ανά ερευνητή

ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΤΗΣΗΣ	ΑΝΑΦΟΡΑ
Fuji	Οι Fuji et al. διεξάγοντας πειράματα σε κράμα αλουμινίου AA1050, με εργαλεία συγκεκριμένης γεωμετρίας, διαπίστωσαν, ότι για υψηλή θερμοκρασία μετάλλου και όταν το εργαλείο έχει σπείρωμα (εικόνα 5.6 γ) στην απόληψη του πείρου, η αντίσταση είναι χαμηλή και αποτελεσματική, ενώ όταν το εργαλείο δεν έχει σπείρωμα (εικόνα 5.6 α, β, δ, ε), η αντίσταση είναι υψηλή, αρά η συγκόλληση δεν είναι αποτελεσματική.	[21]
Barekatin	Οι Barekatin et al. για κράμα AA1050 και με εργαλείο συγκόλλησης, κυλινδρικής γεωμετρίας (χάλυβα H13) και με συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής (RPM) του εργαλείου έφτασαν στο συμπέρασμα ότι η είσοδος θερμότητας, στη συγκόλληση προκάλεσε ανάπτυξη στους κόκκους και μείωση της σκληρότητας, στην πλευρά της ζώνη ανάδευσης (εικόνα 8.5 α).	[29]

5. Πρόσφατα διεθνή επιστημονικά αποτελέσματα για κράμα AA2014, ανά ερευνητή

ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΤΗΣΗΣ	ΑΝΑΦΟΡΑ
Kadaganchi	Οι Kadaganchi et al. για AA2014-T6, διαπίστωσαν, ότι το εξάγωνο εργαλείο (εικόνα 8.5 ε) παράγει υψηλότερη παλμική επίδραση και ομαλή ροή υλικού, που οδήγησε σε βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, ενώ το κωνικό εργαλείο (εικόνα 5.3 δ, 8.5 β) παρήγαγε τις χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Τα ελαττώματα συγκόλλησης μπορούν να εξαλειφθούν αυξάνοντας τη γωνία κλίσης του εργαλείου.	[27]
Rajamanickam	Οι Rajamanickam et al. διερεύνησαν τη στατιστική σημασία των παραμέτρων της διαδικασίας συγκόλλησης, όπως η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου και η ταχύτητα πρόωσης της συγκόλλησης. Το συμπέρασμα είναι, ότι η ταχύτητα πρόωσης της συγκόλλησης ήταν η κύρια παράμετρος εισόδου, που είχε την υψηλότερη στατιστική επίδραση σχετικά με τις ιδιότητες εφελκυσμού.	[18]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

9.1 Συμπεράσματα

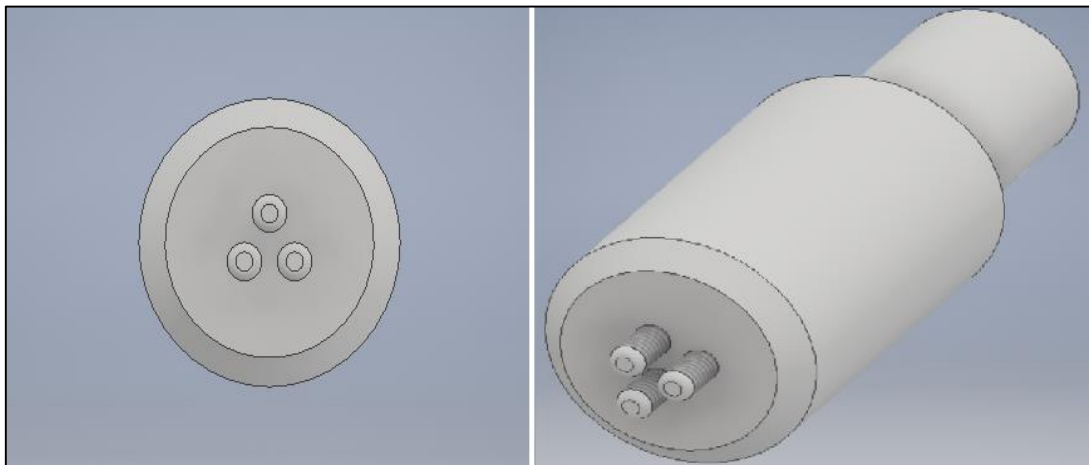
Στη παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη της διαδικασίας συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευσης. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συγκολληθούν υλικά μεγάλης ποικιλομορφίας τα οποία δεν μπορούν να συγκολληθούν με τις συνηθισμένες μεθόδους. Ωστόσο, μπορούν να συγκολληθούν μαλακά υλικά όπως αλουμίνιο, χαλκό, νικέλιο, κ.α. με επιτυχία. Η τεχνική επηρεάζεται σημαντικά, από διάφορες παραμέτρους συγκόλλησης, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η ταχύτητα συγκόλλησης, το αξονικό φορτίο και η γεωμετρία του εργαλείου. Επίσης, η μικροδομή των συγκολλήσεων είναι σημαντική για την ποιότητα της συγκόλλησης. Παρακάτω παρουσιάζουμε, τη σύνοψη της βιβλιογραφικής ανασκόπησης της διαδικασίας συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, που εφαρμόζεται στα μαλακά υλικά. Εύλογα λοιπόν, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Είναι μια καινοτόμα τεχνική συγκόλλησης ανακαλυφθείσα πρόσφατα. Επιτρέπει την ένωση επιμέρους τεμαχίων, ακόμη και ανόμοιων υλικών υπό την ταυτόχρονη επίδραση θερμοκρασίας και πίεσης.
- Η μέθοδος επιτρέπει τη σημαντική βελτίωση στην αντοχή, την ολκιμότητα και στη κόπωση των συγκολλούμενων υλικών σε σύγκριση με την παραδοσιακή συγκόλληση σύντηξης.
- Η γεωμετρία των εργαλείων έχει βαρύνουσα σημασία για την επιτυχία της συγκόλλησης, ωστόσο οι πληροφορίες που διατίθεται σχετικά είναι περιορισμένες, δεδομένης της βιομηχανικής σπουδαιότητας της τεχνικής. Ένας σημαντικός παράγοντας για την επιτυχία της συγκόλλησης είναι η μορφολογία της απόληξης των κοπτικών εργαλείων, καθώς επηρεάζει την μικροδομή της συγκόλλησης.
- Η ροή του υλικού στη ζώνη ανάδευσης (nugget zone) κατά την συγκόλληση με δια τριβής με ανάδευση, δεν έχει πλήρως διαλευκανθεί λόγω της πολυπλοκότητας του μηχανισμού.

- Η σκληρότητα στη ζώνη συγκόλλησης είναι υψηλότερη, της Θ.Ε.Ζ. λόγω της ανακρυστάλλωσης εκείνων των κόκκων σε αυτή την περιοχή.
- Η συγκόλληση με τοξοειδή περιστροφή χρησιμοποιεί, επιπλέον αναλώσιμο υλικό, τραπεζοειδούς διατομής τύπου V, ως συνδετικό μέσο των προς συγκόλληση τεμαχίων και αποτελεί την μόνη τεχνική που απαιτεί επιπλέον και προεργασία των τεμαχίων πριν τη συγκόλληση.

9.2 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

- Κατασκευή ή προμήθεια σχετικού εξοπλισμού και παρελκόμενων, που θα επιτρέψει την υλοποίηση σχετικών ερευνητικών εργασιών υπό ελεγχόμενες συνθήκες κατεργασίας.
- Μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας του κοπτικού άκρου, π.χ. απόληξη τριών ακίδων, στην πλαστική ροή των κατεργαζόμενων τεμαχίων.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη των θέσεων, όπου τοποθετείται το εργαλείο συγκόλλησης και η αξιολόγηση των επιδράσεων στην μικροδομή των κατασκευών.
- Ενδιαφέρον, θα είχε επίσης ο αριθμός, η γεωμετρία και η σχετική θέση των προς συγκόλληση μερών.



Εικόνα 9.1: Απόληξη τριών ακίδων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. L. Threadgill, A. J. Leonard, H. R. Shercliff and P. J. Withers. (2009). Friction stir welding of aluminium alloys, *International Materials Reviews*, vol.54, pp. 49-93.
- [2] U. Raab, S. Levin, L. Wagner, C. Heinze. (2015). Orbital friction welding as an alternative process for blisk manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 189-192.
- [3] G. K. Padhy, C. S. Wu, S. Gao, (2018). Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 34, pp. 1-38.
- [4] S. K. Tiwari, D. S. Kumar, R. Chandra. (2013). Friction Stir Welding of Aluminum Alloys: A Review, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering* Vol:7, pp. 12.
- [5] F. C. Liu, Y. Hovanski, M. P. Miles, C. D. Sorensen, T. W. Nelson. (2018). A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure, and properties, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 34, pp. 39-57.
- [6] K. Elangovan, and V. Balasubramaniam. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, *Materials and Design*, vol. 29, pp. 362-373.
- [7] Raju, Lakshman, Purushottam, Bharat, Bhargavi, Swetha et al. (2015). A Brief Review of Friction Stir Welding Tool, *Journal of Material Science and Mechanical Engineering* Vol. 2, pp.329-334.
- [8] O. S. Salih, H. Ou, W. Sun, D. G. McCartney. (2015). A review of friction stir welding of aluminium matrix composites, *Materials & Design*, Vol. 86, pp. 61-71.
- [9] Igor Z. Radisavljevic, Aleksandar B. Zivkovic, Vencislav K. Grabulov, Nenad A. Radovic (2015). Influence of pin geometry on mechanical and structural properties of butt friction stir welded 2024-T351 aluminum alloy, *Hem. Ind.* 69 (3), pp.323–330.
- [10] J. De Backer, B. Verheyden. (2009). *Robotic Friction Stir Welding For Automotive and Aviation Applications*, University West, Department of Technology, Mathematics and Computer Science, Trollhättan, SWEDEN, May.
- [11] O. S. Salih, H. Ou, W. Sun, D. G. McCartney. (2015). A review of friction stir welding of aluminium matrix composites, *Materials & Design*, Vol. 86, pp. 61-71.
- [12] P. Podrzaj, B. Jerman, D. Klobcar. (2015). Welding defects at friction stir welding, *UDC-UDK*, pp.387-389.
- [13] G. Shinde, S. Gajghate, Dr. P. S. Dabeer, Dr. C. Y. Seemikeri. (2016). Low Cost Friction Stir Welding: A Review, *Materials Today*, pp. 8901-8910.
- [14] Yajie Li, Fengming Qin, Cuirong Liu, Zhisheng Wu. (2017). A Review: Effect of Friction Stir Welding on Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloys

- [15] H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, and K. Nogi. (2003). Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 142, pp. 692-696.
- [16] D. Mohan. (2014). Friction Stir Welding Tools and Overview, *International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research (IJIEASR)*, Vol. 3.
- [17] Y. C. Chen, H. J. Liu, and J. C. Feng. (2005). Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2219-O friction stir welded joints, *Journal of Material Science*, vol. 40, pp. 4657-4659.
- [18] N. Rajamanickam, V. Balusamy, M. G. Reddy, and K. Natarajan. (2009). Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds, *Materials and Design*, vol. 30, pp. 2726-2731.
- [19] S. Malarvizhi, and V. Balasubramaniam. (2011). Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 21, pp. 962-973.
- [20] C. M. Chen, and R. Kovacevic. (2003). Finite element modeling of friction stir welding – thermal and thermomechanical analysis, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43, pp. 1319-1326.
- [21] H. Fuji, L.Cui, M.Maeda, K.Nogi. (2006). Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminium alloys, *Material Science and Engineering A*. pp. 419:25-31.
- [22] K. Elangovan, V. Balasubramanian, M. Valliappan. (2008). Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, *Int J AdvManufTechnol*, pp.38:285-295.
- [23] H.J. Zhang, H.J. Liu. (2009). Mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminium alloy, *Trans.non ferrous Met.Soc.China*, pp.20:1387-1391.
- [24] H.J. Zhang, H.J. Liu. (2010). Effect of Water Cooling on the Performances of Friction Stir Welding Heat-Affected Zone, *JMEPEG*, pp. 21:1182–1187.
- [25] G. Rambabu, D. BalajiNaik. (2015). Optimization of friction stir welding parameters for improved corrosion resistance of AA2219 aluminium alloy joints, *Defence Technology*, pp.11:330-337.
- [26] A.S. Kumar, R.M. Rengaraj. (2015). Optimization of process parameters of friction stir welding for dissimilar aluminium alloys AA5083-O and 6061-T6, *Int j for Res in tech Studies*, pp. 2:2348-1439.
- [27] R. Kadaganchi, M.R. Gankidi, H.Gokhale. (2015). Optimization of process parameters of aluminium alloy AA2014-T6 friction stir welds by response surface methodology, *Defence Technology*, pp. 11:209-219.
- [28] R. Palanivel, P. Koshy Mathews, I. Dinaharan. (2014). Mechanical and metallurgical properties of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminium alloys, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*24, pp. 58–65.

[29] H. Barekatin, M. Kazeminezhad A.H. Kokabi. (2013). Microstructure and Mechanical Properties in Dissimilar Butt Friction Stir Welding of Severely Plastic Deformed Aluminium AA 1050 and Commercially Pure Copper Sheets, J. Mater. Sci. Technol, pp. 1-9.

[30] Divya Deep Dhancholia, Anuj Sharma, Charit Vyas. (2014). Optimisation of Friction Stir Welding Parameters for AA 6061 and AA 7039 Aluminium Alloys by Response Surface Methodology (RSM), Volume 4, Number 5, pp. 565-571.

[31] G.Elatharasan, V.S.Senthil Kumar. (2012). Modelling and Optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminium alloys using RSM, Procedia Engineering, pp.3477-3481.

[32] M.Koilraj, V. Sundareswaran, S.Vijayan, S. R. Koteswara Rao. (2012). Friction stir welding of dissimilar aluminium alloys AA2219 to AA508- Optimization of process parameters using taguchi technique, Materials and Design, pp. 1-7.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

[33] https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-662-11049-2_1 (10-04-2018)

[34] <http://weldguru.com/welding-history> (10-04-2018)

[35] <http://www.netwelding.com/History%20of%20Welding.htm> (16-04-2018)

[36] <http://www.theweldingmaster.com/explosive-welding> (16-04-2018)

[37] <http://www.theweldingmaster.com/electroslag-welding> (16-04-2018)

[38] <http://www.theweldingmaster.com/types-welding-process> (16-04-2018)

[39] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/rotary-friction-welding-148/> (02-05-2018)

[40] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/linear-friction-welding-146> (02-05-2018)

[41] <https://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/friction-welding/rotary-friction-welding> (02-05-2018)

[42] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-radial-friction-welding> (02-05-2018)

[43] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-orbital-friction-welding> (02-05-2018)

[44] <https://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/friction-welding/friction-stir-welding/> (02-05-2018)

[45] <https://www.holroyd.com/blog/friction-stir-welding-applications/> (25-04-2018)

[46] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-friction-stir-welding/> (05-05-2018)

[47] <https://www.thefabricator.com/article/shopmanagement/an-introduction-to-friction-stir-welding> (04-05-2018)

[48] <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2011/tools.html> (10-05-2018)

[49] <http://www.cypriusweldinginstitute.org/en/07/11/2017-Friction-stir-welding/> (02-05-2018)