



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Συγκολλήσεις τόξου προσθετικής τεχνολογίας

Δ Ι Π Λ Ω Μ Α Τ Ι Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α

του

Νικολόπουλου Παναγιώτη

Επιβλέπων:

Δρ. Αχιλλέας Βαΐρης

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Wire Arc Additive Manufacturing

DIPLOMA THESIS
of
Nikolopoulos Panagiotis

Supervisor:
Dr. Achilleas Vairis

Athens, October 2023

Η Διπλωματική εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Βαΐρης Αχιλλέας Καθηγητής	Προεστάκης Εμμανουήλ Λέκτορας Εφαρμογών	Στεργίου Κωνσταντίνος Καθηγητής, Πρόεδρος Τμήματος

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Παναγιώτης Νικολόπουλος, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή αυτής για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Νικολόπουλος Παναγιώτης** του Φωτίου με αριθμό μητρώου 272017072 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών



Περίληψη

Η συγκόλληση τόξου προσθετικής τεχνολογίας χρησιμοποιεί συμβατικές τεχνολογίες συγκόλλησης (TIG, MIG, PAW) ως προσθετική τεχνολογία για την κατασκευή μεγάλων αντικειμένων από διάφορα μέταλλα (π.χ. κράματα αλουμινίου ή νικελίου). Αυτή η κατασκευαστική μέθοδος έχει βρει εφαρμογή στην αεροναυπηγική βιομηχανία για την οικονομική και γρήγορη κατασκευή μεγάλων εξαρτημάτων(π.χ. μηχανισμός προσγείωσης).Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η Βιβλιογραφική έρευνα των τεχνολογιών με την συγκόλληση τόξου προσθετικής τεχνολογίας για τα κράματα αλουμινίου, τιτανίου και νικελίου.

Λέξεις κλειδιά:

Συγκολλήσεις τόξου προσθετικής τεχνολογίας, Προσθετικές τεχνολογίες κατασκευών, Συγκολλήσεις τόξου, Συγκολλήσεις τήξεως

Abstract

Arc welding additive technology uses conventional welding technologies (TIG, MIG, plasma) as additive technology for the construction of large objects from various metals (e.g., aluminum or nickel alloys). This construction method has found application in the aerospace industry for the economical and rapid construction of large components (e.g., landing gear). The purpose of this work is the literature research of technologies with arc welding additive technology for aluminum, titanium, and nickel alloys.

Keywords:

WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing, AM, Additive Manufacturing, Welding, Arc Welding

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Όρων	10
Κατάλογος Εικόνων	12
Κατάλογος Διαγραμμάτων	13
Κατάλογος Πινάκων	13
1. Εισαγωγή	14
1.1. Τεχνολογίες Συγκολλήσεων	14
1.1.1. Συγκολλήσεις τόξου (Arc Welding)	14
1.1.1.1. Συγκόλληση τόξου με χρήση ηλεκτροδίου Βολφραμίου και προστατευτικό αέριο(GTAW/TIG).....	14
1.1.1.2. Συγκόλληση τόξου με χρήση πλάσματος(PAW)	15
1.1.1.3. Συγκόλληση τόξου με χρήση επενδυμένου ηλεκτροδίου(SMAW/MMAW)	16
1.1.1.4. Συγκόλληση τόξου με χρήση τηκόμενου ηλεκτροδίου και προστατευτικό αέριο(GMAW-MIG/MAG).....	18
1.1.1.5. Συγκόλληση βυθισμένου τόξου	19
1.1.2. Άλλα είδη Συγκολλήσεων.....	20
1.2. Τεχνολογίες Προσθετικών Κατασκευών	21
1.2.1. Φωτοπολυμερισμός (VPP)	22
1.2.2. Εξώθηση υλικού (MEX).....	23
1.2.3. Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (BJT) - Εναπόθεση υλικού (MJT).....	24
1.2.4. Διεργασίες επάλληλων φύλλων (SHL).....	25
1.2.5. Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (PBF)	26
1.2.6. Διεργασίες εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (DED)	27
2. Συγκολλήσεις τόξου Προσθετικής Τεχνολογίας – Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)	29
2.1. Ανάλυση.....	29
2.2. Ιστορική Αναδρομή.....	33
3. Υλικά WAAM	36
3.1. Κράματα Αλουμινίου	36
3.2. Κράματα Τιτανίου.....	40
3.3. Κράματα Νικελίου	46
4. Τομείς Εφαρμογής – Παραδείγματα	51

5. Σχόλια-Συμπεράσματα.....	57
6. Βιβλιογραφία	58

Ευρετήριο Όρων

BJT	Binder Jetting
CET	Collumnar to Equiaxed Transition
CLAD	Laser Cladding Process
CMT	Cold Metal Transfer
DED	Direct Energy Deposition
DLP	Digital Light Processing
EBM	Electron Beam Melting
EBSD	Electron BackScatter Diffraction
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HAGB	High Angle Grain Boundaries
HAZ	Heat Affected Zones
LAGB	Low Angle Grain Boundary
LED	Light Emitting Diode
LENS	Laser Engineered Net Shape
LOM	Laminated object manufacturing
LSP	Laser Shock Peening
MAG	Metal Active Gas welding
MC	Metal Carbide
MEX	Material Extrusion
MIG	Metal Inert Gas welding
MJT	Material Jetting
MMAW	Manual Metal Arc Welding
PAW	Plasma Arc Welding
PBF	Powder Bed Fusion
PSC	Plasma Spray Coated
RRI	Range Resolved Interferometry
SHL	Sheel Lamination
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas Welding
TS	Travel Speed
TZM	Titanium Zirconium Molybdenum
UTS	Ultimate Tensile Strength

UV	Ultra Violet
VPP	Vat Photo Polymerization
WFS	Wire Feed Speed
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1. Σχηματική επεξήγηση συγκόλλησης GTAW/TIG.....	15
Εικόνα 1-2. Λειτουργίες συγκόλλησης τόξου πλάσματος. α) λειτουργία μη μεταφερόμενου τόξου και β) λειτουργία μεταφερόμενου τόξου.(ΜΗΠΙΑΚΗΣ, 2010).....	16
Εικόνα 1-3. Σχηματική επεξήγηση συγκόλλησης SMAW/MMA.(Lebar et al., 2012).....	17
Εικόνα 1-4. Σύγκριση λειτουργιών συγκόλλησης PAW.(Barhorst & Cary, 1985).....	18
Εικόνα 1-5. Σχηματική επεξήγηση συγκόλλησης GMAW.(J.M. Antonini, 2014)	19
Εικόνα 1-6. Σχηματική επεξήγηση συγκόλλησης SAW.(ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ)	20
Εικόνα 1-7.Σχηματική επεξήγηση τεχνολογίας VPP.(Chaudhary et al., 2023)	23
Εικόνα 1-8. Σχηματική απεικόνιση της MEX τεχνολογίας.(Jin et al., 2015)	24
Εικόνα 1-9. Σχηματική απεικόνιση MTJ.(Gülcan et al., 2021).....	25
Εικόνα 1-10.Σχηματική επεξήγηση SHL.(Jose et al., n.d.).....	26
Εικόνα 1-11. Σχηματική απεικόνιση SLS όπου: α) θέρμανση, β) παραγωγή με 1)στρώση πούδρας, 2) εισαγωγή ενέργειας (μέσω laser), 3) σύντηξη πούδρας και c) αποθέρμανση.(Chatham et al., 2019)	27
Εικόνα 1-12. Σχηματική απεικόνιση LENS.(Drezet et al., 2004).....	28
Εικόνα 2-1. Προϊόν WAAM όπου απαιτείται επιφανειακή κατεργασία.(ZELINSKI, 2022)	29
Εικόνα 2-2. Θερμικές απώλειες στη WAAM.(Kühne et al., 2019)	30
Εικόνα 2-3. Παράδειγμα παραμόρφωσης και παραμένουσας τάσης σε προϊόν WAAM.(Cunningham et al., 2018).....	31
Εικόνα 2-4. Πορώδες σε κατασκευή από WAAM.(Horgar et al., 2018)	31
Εικόνα 2-5. Ρωγμές(αριστερά) και αποκόλληση(δεξιά) σε τεμάχιο κατασκευασμένο με WAAM.(Mu et al., 2022).....	32
Εικόνα 3-1. α) Διάταξη) β) Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας κατασκευής c) Εξήγηση μετάλλων εναπόθεσης d) Τομή τεμαχίου και ανάλυση μεταλλικών περιοχών.(Paul et al., 2022).....	38
Εικόνα 3-2. Διαδικασία παραγωγής WAAM με εφαρμογή φορτίου με ράουλο.(Donoghue et al., 2016)	41
Εικόνα 3-3. Διαφορετική γεωμετρία ράουλο όπου α) με εσωτερική αύλακα και β) με εξωτερική καμπυλότητα.(McAndrew et al., 2018)	44
Εικόνα 3-4. Κατασκευή με δύο καλώδια παροχής υλικού, όπου α) σχηματική απεικόνιση εξοπλισμού, β) σχηματική απεικόνιση κατασκευής και c) θεωρητική τομή του τεμαχίου.(B. Wu et al., 2020).....	47
Εικόνα 3-5. Σχηματική απεικόνιση από τη λήψη δειγμάτων από δοκίμιο κατασκευασμένο με WAAM. Παρατηρείται και παραμόρφωση βάσης λόγω των παραμένουσων τάσεων.(Hassel & Carstensen, n.d.)	50
Εικόνα 4-1. Διάταξη WAAM με ρομποτικό βραχίονα και βάση πολλών αξόνων από τη YASKAWA.(YASKAWA, n.d.).....	52
Εικόνα 4-2. Διάταξη WAAM με βάση χωρίς κίνηση και δυνατότητα εφαρμογής πίεσης μέσω ράουλου.(Z. Wang & Zhang, 2021)	53
Εικόνα 4-3. Επεξήγηση διάταξης WAAM με ρομποτικό βραχίονα και πολυ-αξονική βάση(Ren et al., 2020).....	53

Εικόνα 4-4. Προπέλα κατά τη κατασκευή της με WAAM.(GEFERTEC, n.d.)	54
Εικόνα 4-5. Προπέλα κατασκευασμένη με WAAM, κατά την τελική επιφανειακή επεξεργασία.(Huntingdon Fusion, n.d.).....	54
Εικόνα 4-6. Πτερωτή κατασκευασμένη με WAAM κατά την τελική επιφανειακή επεξεργασία.(LASER WELDING SOLUTIONS, n.d.)	55
Εικόνα 4-7. Πτερωτή υδροστρόβιλου Pelton κατά την κατασκευή της με WAAM.(Posch et al., 2014)	55
Εικόνα 4-8. Κομμάτι πλαισίου αεροναυπηγικής από την ΤΚΝΙΚΑ, πριν και μετά την τελική επιφανειακή επεξεργασία.(ΤΚΝΙΚΑ, n.d.)	56
Εικόνα 4-9. Γέφυρα κατασκευασμένη με WAAM στην Ολλανδία.....	56

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Σύνολο δημοσιευμένων άρθρων ανά έτος με λέξεις κλειδιά την ορολογία WAAM-Wire Arc Additive Manufacturing.	34
Διάγραμμα 2. Δημοσιευμένα Άρθρα ανά έτος με λέξη κλειδί WAAM-Wire Arc Additive Manufacturing με βάση τις κύριες χώρες του τομέα.....	34

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Παράμετροι WAAM.....	32
Πίνακας 2. Εφαρμογές υλικών στον τομέα της αεροδιαστημικής.....	52
Πίνακας 3. Υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στη WAAM ανά κλάδο/χρήση.....	52

1. Εισαγωγή

1.1. Τεχνολογίες Συγκολλήσεων

1.1.1. Συγκολλήσεις τόξου (Arc Welding)

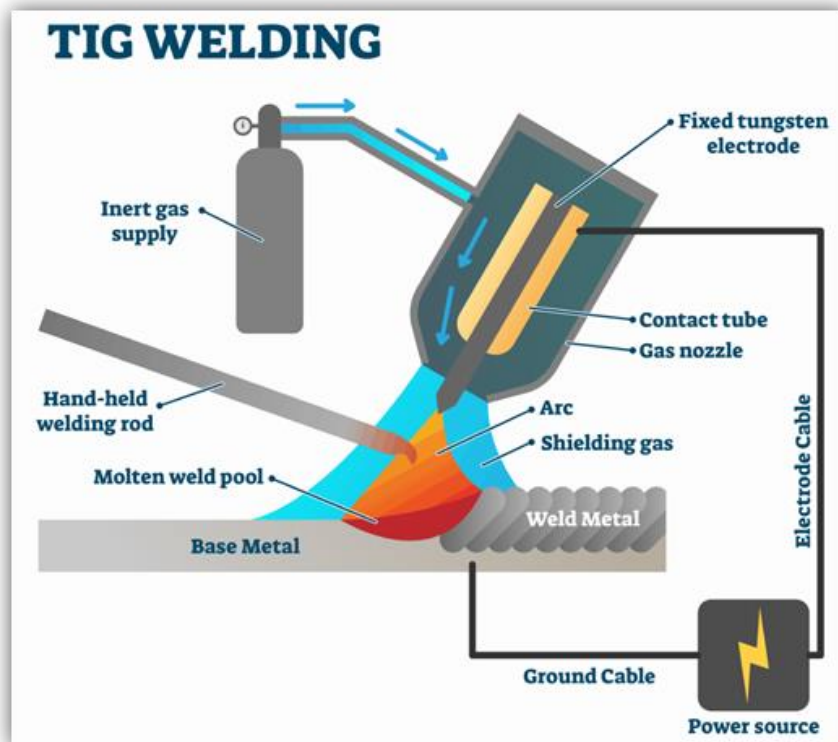
Οι συγκολλήσεις τόξου είναι μια κατηγορία συγκολλήσεων που λειτουργεί θερμαίνοντας δύο υλικά στα σημεία τήξης τους μέσω ενός βολταϊκού τόξου. Το βολταϊκό ή ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται μεταξύ του κενού των δύο υλικών όταν στο ένα υλικό συνδεθεί η άνοδος και στο άλλο η κάθοδος μιας ηλεκτρικής πηγής, (ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ & ΔΙΑΚΟΥΜΑΚΟΣ, 2011). Η διαδικασία δημιουργεί έναν ισχυρό δεσμό μεταξύ των δύο υλικών που μπορεί να είναι όσο ισχυρός ή και ισχυρότερος από τα αρχικά υλικά. Η συγκόλληση τόξου χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευών, αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημική και ναυπηγική. Για τη συγκόλληση απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός όπως μάσκα συγκόλλησης, γάντια συγκόλλησης και άλλο προστατευτικό εξοπλισμό όταν πραγματοποιείται από άνθρωπο(πχ. Σιδηρουργείο) ή ειδικά σχεδιασμένα ρομποτικά συστήματα όταν πραγματοποιείται από αυτοματοποιημένα συστήματα(πχ αυτοκινητοβιομηχανίες), (ΕΜΠΟΡΙΚΟ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ, 2007). Οι συγκολλητές πρέπει επίσης να έχουν πλήρη κατανόηση των διαδικασιών ασφάλειας συγκόλλησης για να προστατευθούν από εγκαύματα, ηλεκτροπληξία και άλλους κινδύνους καθώς πρόκειται για μια πολύ επικίνδυνη διαδικασία. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τεχνικών συγκόλλησης τόξου, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. Κάθε μέθοδος έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, και η επιλογή της τεχνικής εξαρτάται από τα προς συγκόλληση υλικά, το πάχος αυτών και την εφαρμογή του τελικού προϊόντος, (ΑΛΕΞΙΟΥ Γ. ΚΑΡΜΙΡΗ, 1997).

Κάποιες από τις πιο διαδεδομένες στη βιομηχανία τεχνικές συγκολλήσεων τόξου είναι οι ακόλουθες.

1.1.1.1. Συγκόλληση τόξου με χρήση ηλεκτρόδιου Βολφραμίου και προστατευτικό αέριο(GTAW/TIG)

Σε αυτό το τύπο συγκόλλησης τόξου, το ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται μέσω ενός ηλεκτρόδιου βολφραμίου το οποίο δεν αναλώνεται. Αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί τη χρήση υλικού πλήρωσης. Όταν αυτό υπάρχει, παρέχεται στο σημείο τήξης ξεχωριστά είτε σε μορφή ράβδου χειροκίνητα είτε σε μορφή καλωδίου μέσω αυτοματοποιημένου συστήματος. Η συγκόλληση προστατεύεται από την ατμοσφαιρική μόλυνση από ένα προστατευτικό αέριο, συνήθως αργό ή ένα μείγμα αργού και ηλίου, το οποίο παρέχεται από το άκρο του ηλεκτροδίου βολφραμίου,(ΨΥΛΛΑΚΗ, 2022a). Η διαδικασία χρησιμοποιείται συχνά για τη συγκόλληση λεπτών τμημάτων ανοξείδωτου χάλυβα, αλουμινίου και άλλων μη σιδηρούχων μετάλλων, καθώς και για ακριβείς εφαρμογές

συγκόλλησης όπου απαιτούνται συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της συγκόλλησης GTAW είναι ότι παράγει υψηλής ποιότητας, ακριβής συγκόλληση με ελάχιστο πρισίλισμα-παραμόρφωση και χαμηλό πορώδες, (ΚΥΡΓΙΑΖΟΓΛΟΥ). Η διαδικασία επιτρέπει επίσης μεγαλύτερο έλεγχο της εισόδου θερμότητας, με αποτέλεσμα στενή ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα και μειωμένο κίνδυνο παραμόρφωσης ή παραμόρφωσης. Ωστόσο, η συγκόλληση GTAW απαιτεί υψηλότερο επίπεδο δεξιοτήτων και εμπειρίας σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες συγκόλλησης και είναι γενικά πιο αργή ως προς το ρυθμό εναπόθεσης υλικού και τη ταχύτητα συγκόλλησης. Επιπλέον μπορεί να μην παράγει αναθυμιάσεις αλλά παράγει πιο έντονες ακτίνες UV συγκριτικά με άλλες μεθόδους, (ΕΜΠΟΡΙΚΟ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ, 2007).

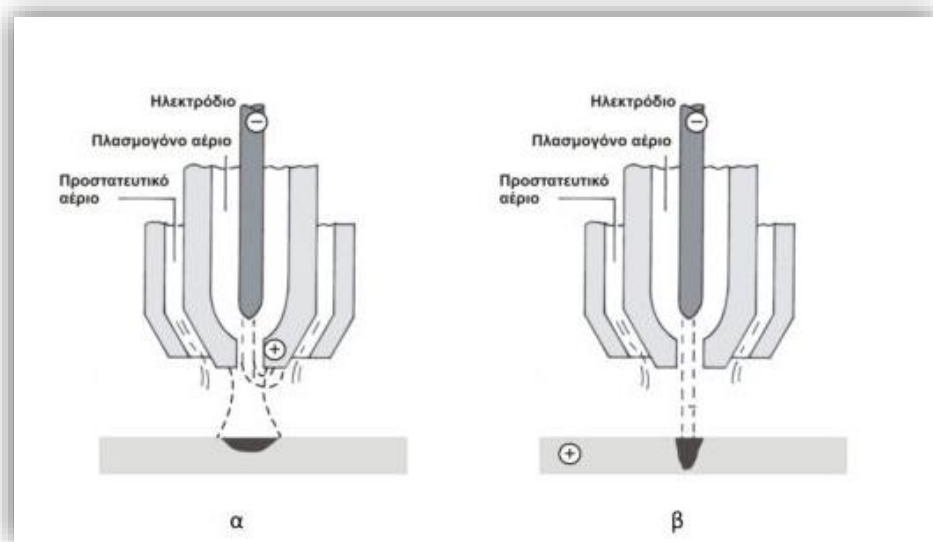


Εικόνα 1-1. Σχηματική επεξήγηση συγκόλλησης GTAW/TIG.

1.1.1.2. Συγκόλληση τόξου με χρήση πλάσματος(PAW)

Η συγκόλληση με τόξο πλάσματος είναι μια διαδικασία συγκόλλησης που χρησιμοποιεί ένα τόξο πλάσματος υψηλής ταχύτητας, υψηλής θερμοκρασίας για την τήξη του υλικού βάσης και του μετάλλου πλήρωσης (εάν απαιτείται) για τη δημιουργία μιας συγκόλλησης. Το πλάσμα δημιουργείται περνώντας ένα αέριο, συνήθως αργό ή ένα μείγμα αργού και υδρογόνου, μέσα από ένα μικρό στόμιο όπου βρίσκεται ένα ηλεκτρόδιο, συνήθως από βολφράμιο(Μαρόπουλος). Υπάρχουν δύο είδη λειτουργίας της PAW, η λειτουργία μη μεταφερόμενου τόξου (melt-in) στην οποία το τόξο δημιουργείται μεταξύ του ακροφυσίου και του ηλεκτροδίου και ο ρυθμός εναπόθεσης θερμικής ενέργειας είναι υψηλότερος από το ρυθμό που αυτή χάνεται, οπότε λαμβάνει χώρα η σύντηξη των δύο μετάλλων, (C. S.

Wu et al., 2014). Η λειτουργία μεταφερόμενου τόξου (keyhole) στην οποία το τόξο δημιουργείται μεταξύ του μετάλλου βάσης και του ηλεκτροδίου και ο ρυθμός είναι τόσο υψηλότερος από το ρυθμό της χαμένης ενέργειας που το τόξο πλάσματος διατρύπαι τη τηγμένη περιοχή (melt pool), με αποτέλεσμα βαθύτερη ζώνη τήξης. Το τόξο πλάσματος δημιουργεί θερμοκρασίες έως και 30.000°C , που είναι υψηλότερες από τις θερμοκρασίες που παράγονται από τις περισσότερες άλλες διαδικασίες συγκόλλησης, (C. S. Wu et al., 2014). Αυτή η υψηλή εισροή θερμότητας επιτρέπει στη συγκόλληση με τόξο πλάσματος να συγκολλά υλικά πάχους, συνήθως έως 20 mm , και να δημιουργεί μια βαθιά και στενή ποίνα συγκόλλησης, με αποτέλεσμα μια συγκόλληση υψηλής ποιότητας, ακριβείας. Η συγκόλληση με τόξο πλάσματος χρησιμοποιείται συχνά για τη συγκόλληση ανοξειδωτου χάλυβα, αλουμινίου και άλλων μη σιδηρούχων μετάλλων. Χρησιμοποιείται σε τομείς όπως στην αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία, όπου απαιτείται συγκόλληση υψηλής ποιότητας και ακριβείας. Ωστόσο, η συγκόλληση με τόξο πλάσματος απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και υψηλό επίπεδο δεξιοτήτων και εμπειρίας. Το κόστος της είναι σαφώς υψηλότερο από άλλες διαδικασίες συγκόλλησης,(ΚΥΡΓΙΑΖΟΓΛΟΥ).

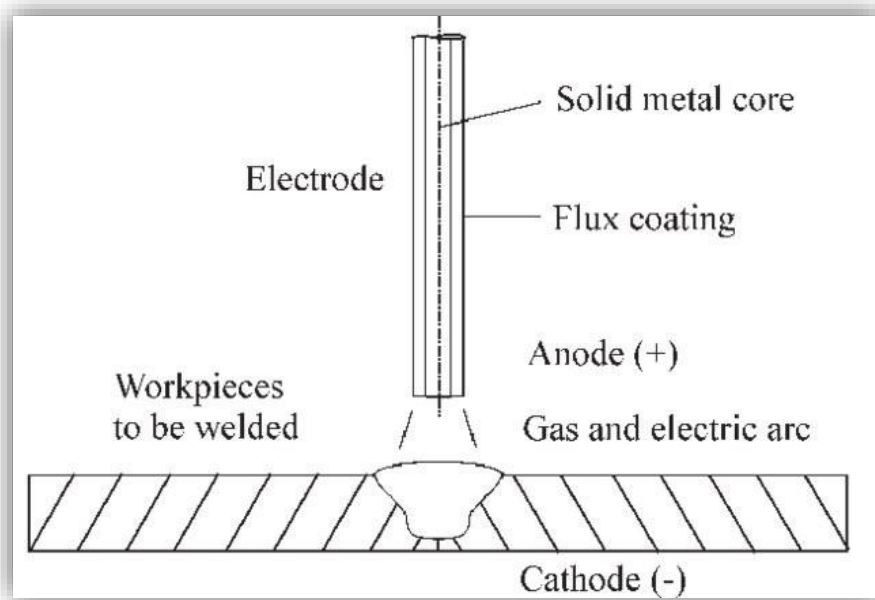


Εικόνα 1-2. Λειτουργίες συγκόλλησης τόξου πλάσματος. α) λειτουργία μη μεταφερόμενου τόξου και β) λειτουργία μεταφερόμενου τόξου.(ΜΗΓΙΑΚΗΣ, 2010)

1.1.1.3. Συγκόλληση τόξου με χρήση επενδυμένου ηλεκτροδίου(SMAW/MMAW)

Κατά τη SMAW ένα αναλώσιμο επικαλυμμένο ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο και δημιουργείται το ηλεκτρικό τόξο. Η παραγόμενη θερμότητα τήκει το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το μεταλλικό πυρήνα του ηλεκτροδίου ώστε να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση. Η επικάλυψη, που αποτελείται από συμπιεσμένο συλλίπασμα, στο ηλεκτρόδιο λιώνει και σχηματίζει ένα προστατευτικό αέριο που προστατεύει τη συγκόλληση από την ατμοσφαιρική μόλυνση και στη συνέχεια δημιουργία μια στρώση αφαιρούμενης σκουριάς που προστατεύει τη συγκολλημένη περιοχή από τη οξείδωση,(ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ & ΔΙΑΚΟΥΜΑΚΟΣ, 2011).

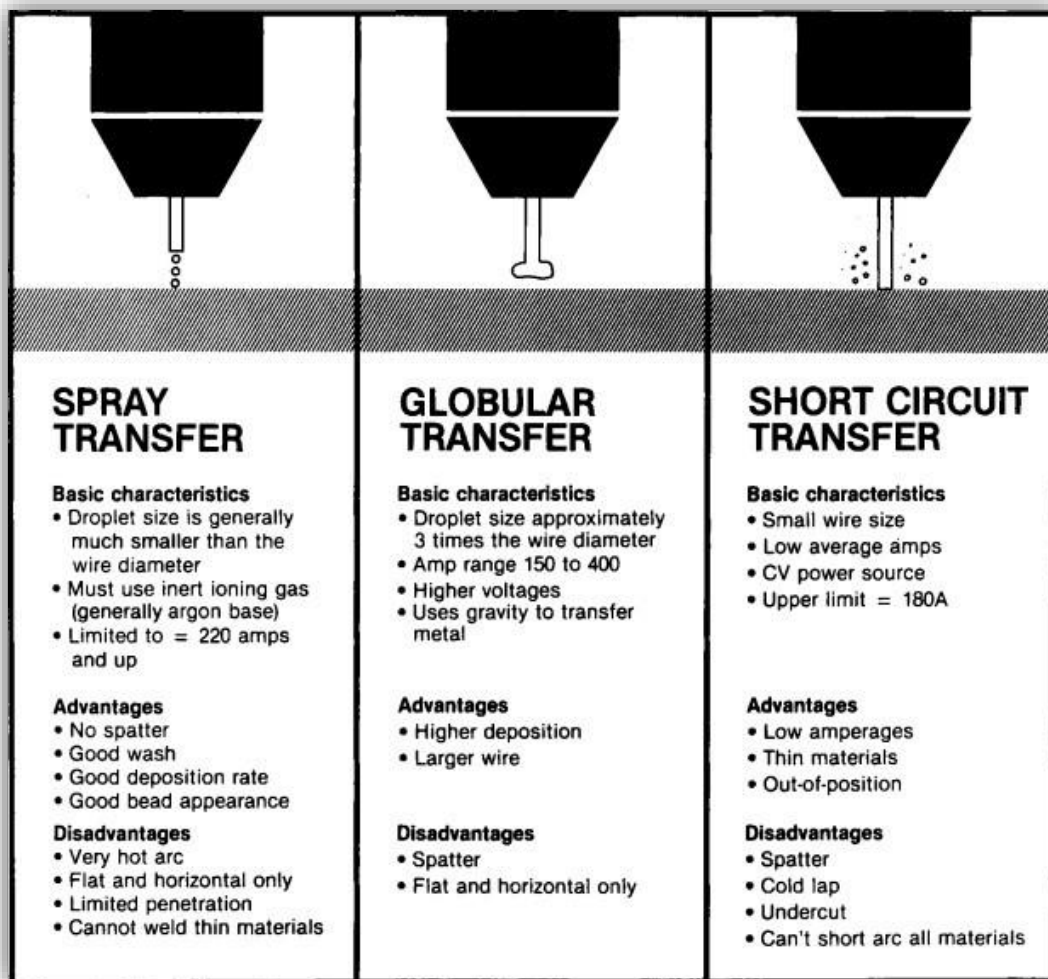
Χρησιμοποιείται συνήθως στον κατασκευαστικό κλάδο για τη συγκόλληση μεταλλικών κατασκευών και αγωγών, καθώς και για εργασίες επισκευής και συντήρησης. Ένα από τα πλεονεκτήματα του SMAW είναι η απλότητα και η φορητότητά του. Ο εξοπλισμός που απαιτείται για το SMAW είναι σχετικά απλός και μπορεί εύκολα να μεταφερθεί σε εργοτάξια. Η διαδικασία είναι επίσης ευέλικτη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγκόλληση σε διάφορες θέσεις και σε στενούς χώρους, (ΚΥΡΓΙΑΖΟΓΛΟΥ). Ωστόσο, το SMAW έχει ορισμένα μειονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της σχετικά χαμηλής ταχύτητας συγκόλλησης σε σύγκριση με άλλες διεργασίες και της ανάγκης διακοπής και αλλαγής ηλεκτροδίων περιοδικά. Η διαδικασία μπορεί επίσης να παράγει μεγάλη ποσότητα πιτσιλισματος και μπορεί να απαιτεί εκτεταμένο καθαρισμό μετά τη συγκόλληση,(ΕΜΠΟΡΙΚΟ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ, 2007).



Εικόνα 1-3. Σχηματική επεξήγηση συγκόλλησης SMAW/MMA.(Lebar et al., 2012)

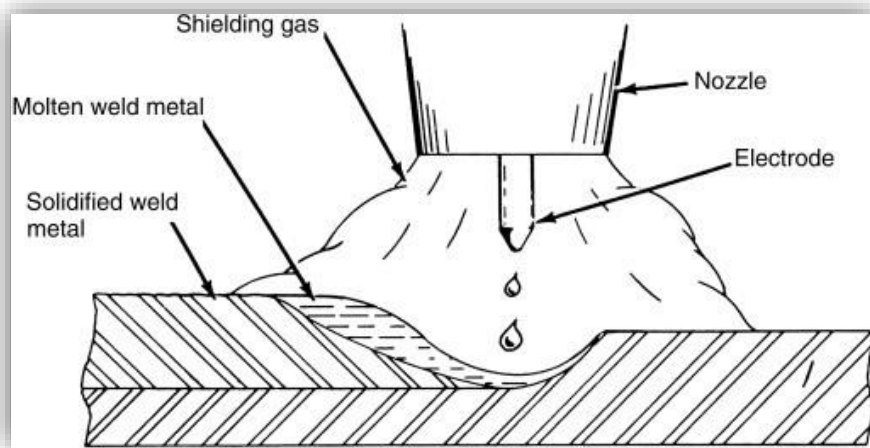
1.1.1.4. Συγκόλληση τόξου με χρήση τηκόμενου ηλεκτροδίου και προστατευτικό αέριο(GMAW-MIG/MAG)

Η συγκόλληση GMAW είναι μια τεχνική συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου που χρησιμοποιεί ένα αναλώσιμο ηλεκτρόδιο σύρματος, ένα προστατευτικό αέριο και ένα πιστόλι συγκόλλησης για να λιώσει και να ενώσει μεταλλικά κομμάτια μεταξύ τους. Το ηλεκτρόδιο του σύρματος τροφοδοτείται συνεχώς μέσω του πιστολιού συγκόλλησης και λιώνει καθώς τροφοδοτείται στη δεξαμενή συγκόλλησης, δημιουργώντας μια συνεχή συγκόλληση. Το προστατευτικό αέριο, συνήθως αργό, ήλιο, διοξείδιο του άνθρακα ή ένα μείγμα αυτών, χρησιμοποιείται για την προστασία της περιοχής συγκόλλησης από την ατμοσφαιρική μόλυνση και για τη σταθεροποίηση του τόξου, (Miller Electric Mfg. Co., 2013). Υπάρχουν τρεις λειτουργίες όσο αφορά τη συγκόλληση αυτού του είδους. Η πρώτη είναι μεταφορά λιωμένου μετάλλου με τη μορφή σταγόνων(globular transfer), η δεύτερη με τη μορφή ψεκασμού(spray transfer) και η τρίτη με βραχυκύκλωση τόξου(short circuit transfer). Οι διαφορές των ειδών αυτών φαίνονται στην εικόνα παρακάτω, (Barhorst & Cary, 1985).



Εικόνα 1-4. Σύγκριση λειτουργιών συγκόλλησης PAW.(Barhorst & Cary, 1985)

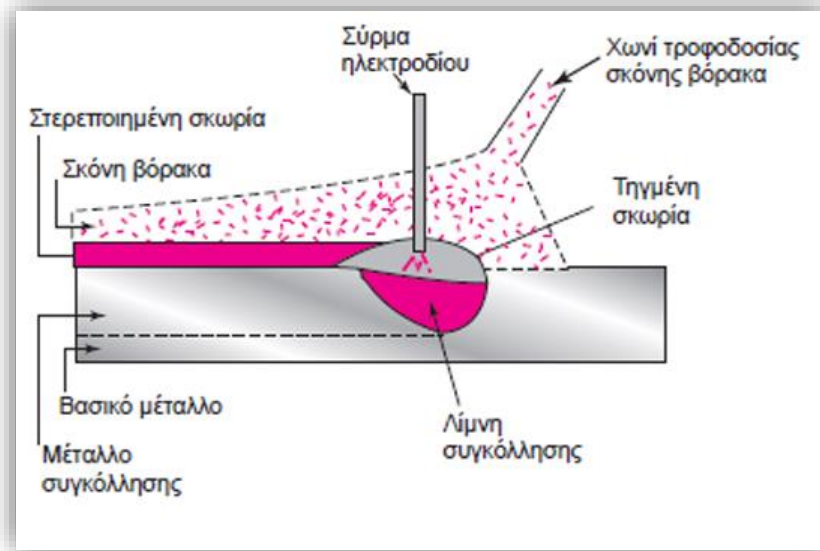
Χρησιμοποιείται συνήθως για τη συγκόλληση υλικών όπως ο μαλακός χάλυβας, ο ανοξείδωτος χάλυβας και το αλουμίνιο και πάχους έως 6 mm λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Συναντάται επίσης ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία και στη μεταποιητική βιομηχανία, όπου απαιτείται ακριβής και υψηλής ποιότητας συγκόλληση. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της συγκόλλησης GMAW είναι η υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης και η αποτελεσματικότητά της. Η συνεχής τροφοδοσία του ηλεκτροδίου σύρματος επιτρέπει μια γρήγορη και συνεπή διαδικασία συγκόλλησης, (ΨΥΛΛΑΚΗ, 2022b). Η συγκόλληση MAG/MIG παράγει επίσης σχετικά χαμηλή ποσότητα πιτσιλίσματος και απαιτεί ελάχιστο καθαρισμό μετά τη συγκόλληση. Ωστόσο, έχει ορισμένους περιορισμούς, όπως την ανικανότητά της να συγκολλήσει αποτελεσματικά παχιά υλικά και την ευαισθησία της στον άνεμο και τα ρεύματα, που μπορεί να επηρεάσουν το προστατευτικό αέριο και την ποιότητα της συγκόλλησης, (ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ & ΔΙΑΚΟΥΜΑΚΟΣ, 2011). Επιπλέον απαιτείται επίσης σημαντικό χρόνο εγκατάστασης και μπορεί να απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό για ορισμένες εφαρμογές, (J.M. Antonini, 2014).



Εικόνα 1-5. Σχηματική επεξήγηση συγκόλλησης GMAW.(J.M. Antonini, 2014)

1.1.1.5. Συγκόλληση βυθισμένου τόξου

Η συγκεκριμένη συγκόλληση τόξου ξεχωρίζει καθώς χρησιμοποιεί για προστατευτικό μέσο μια παχιά στρώση άτηκτου συλλιπιάσματος σε μορφή κόκκων που τροφοδοτείται από ξεχωριστό άκρο. Το τόξο δημιουργείται μεταξύ ενός αναλισκόμενου ηλεκτροδίου και του μετάλλου βάσης. Το τόξο βρίσκεται βυθισμένο μέσα στη στρώση του συλλιπιάσματος και για αυτό δεν πραγματοποιείται επαφή του λουτρού συγκόλλησης με τα αέρια της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα την εξαιρετική θερμική απόδοση και το περιορισμό των πόρων, (P.T. HOULDCROFT, 1990).



Εικόνα 1-6. Σχηματική επεξήγηση συγκόλλησης SAW.(ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ)

1.1.2. Άλλα είδη Συγκολλήσεων

Πέρα από τις συγκολλήσεις τόξου υπάρχουν και άλλα είδη συγκολλήσεων τήξης όπως οι θερμοχημικές συγκολλήσεις (οξυγόνου, με θερμότητα), οι συγκολλήσεις με δέσμη ενέργειας υψηλής πυκνότητας (λείζερ, δέσμη ηλεκτρονίων, κλπ.) και οι συγκολλήσεις ηλεκτρικής αντίστασης (ραφής, με προεξοχή, σημειακές, κλπ.), (ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ & ΔΙΑΚΟΥΜΑΚΟΣ, 2011). Φυσικά σημαντικό μέρος της παγκόσμιας βιομηχανίας έχουν και οι συγκολλήσεις στερεής κατάστασης όπως οι ψυχρές συγκολλήσεις με πλαστική παραμόρφωση και οι θερμές συγκολλήσεις με ή χωρίς πλαστική παραμόρφωση, (ΚΑΡΑΚΙΖΗΣ, 2018).

1.2. Τεχνολογίες Προσθετικών Κατασκευών

Οι προσθετικές κατασκευές , γνωστή και ως τριοδιάστατη εκτύπωση, είναι μια επαναστατική τεχνολογία που έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει τη βιομηχανία παραγωγής. Αυτού του είδους διεργασία περιλαμβάνει τη δημιουργία φυσικών αντικειμένων από ένα ψηφιακό μοντέλο προσθέτοντας στρώμα-στρώμα υλικού μέχρι να σχηματιστεί το επιθυμητό σχήμα. Η χρήση των προσθετικών κατασκευών έχει αποκτήσει δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια λόγω της ικανότητάς τους να παράγουν εξαιρετικά προσαρμοσμένα, πολύπλοκα και περίπλοκα εξαρτήματα γρήγορα και οικονομικά, (ΒΛΑΣΣΗΣ, 2022).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η ικανότητά της να παράγει εξαρτήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες που είναι δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής. Οι παραδοσιακές μέθοδοι κατασκευής όπως η χύτευση, η σφυρηλάτηση και η μηχανική κατεργασία έχουν περιορισμούς όσον αφορά την παραγωγή πολύπλοκων σχημάτων, αλλά οι προσθετικές κατασκευές μπορούν εύκολα να δημιουργήσουν περίπλοκα σχέδια. Αυτό είναι ιδιαίτερα επωφελές σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου απαιτούνται συχνά εξαρτήματα με περίπλοκη γεωμετρία.

Οι προσθετικές κατεργασίες επιτρέπει επίσης την παραγωγή ανταλλακτικών σε μικρότερες ποσότητες, καθιστώντας το ιδανική λύση για την κατασκευή κατά παραγγελία ή χαμηλού όγκου. Οι παραδοσιακές μέθοδοι κατασκευής απαιτούν συχνά υψηλούς όγκους για να δικαιολογήσουν το κόστος εργαλείων, αλλά με την κατασκευή πρόσθετων, κάθε εξάρτημα μπορεί να προσαρμοστεί χωρίς την ανάγκη ακριβών, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους, εργαλείων. Αυτό καθιστά την προσθετική κατασκευή ιδανική για εφαρμογές όπως η κατασκευή πρωτοτύπων, όπου το κόστος των παραδοσιακών εργαλείων μπορεί να είναι απαγορευτικό.

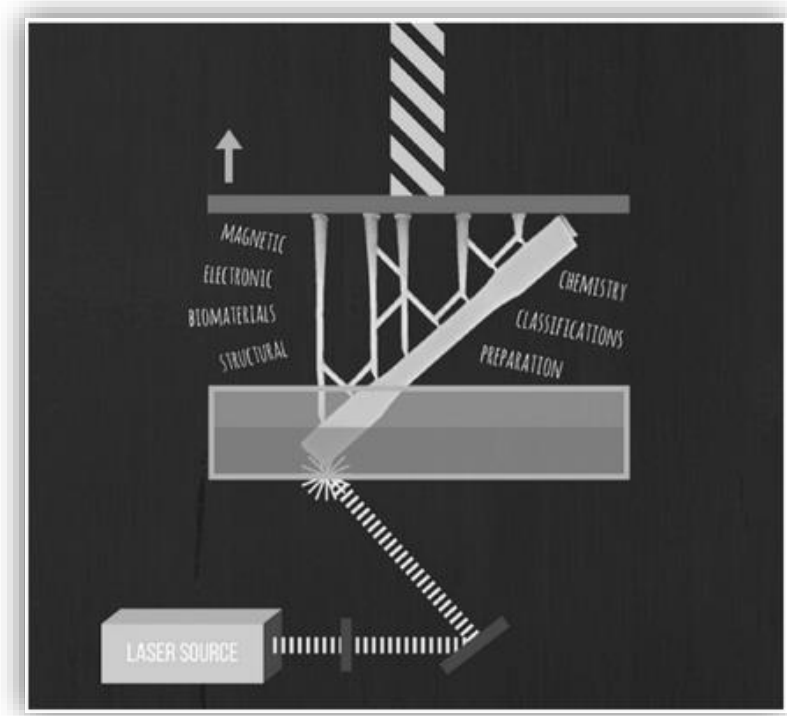
Επιπλέον επειδή οι προσθετικές κατασκευές δημιουργούν ένα προϊόν στρώμα προς στρώμα, αντί να αφαιρούν υλικό από ένα μεγαλύτερο κομμάτι, το χρησιμοποιούμενο υλικό είναι λιγότερο και η φύρα τις περισσότερες φορές ελάχιστη έως μηδαμινή. Στις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, μπορεί να σπαταληθεί μεγάλο μέρος του υλικού. Η προσθετική κατασκευή, αντίθετα, χρησιμοποιεί σχεδόν την ακριβή ποσότητα υλικού που χρειάζεται για να δημιουργηθεί το προϊόν, κάνοντας την πιο αειφόρο και αποδοτική μέθοδο κατασκευής, (Λυδάκη, 2023).

Παρά τα πολυάριθμα οφέλη της τεχνολογίας των προσθετικών κατασκευών , υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν προτού μπορέσει να υιοθετηθεί ευρύτερα. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι η ανάγκη για πιο προηγμένα υλικά που να αντέχουν στα σκληρά περιβάλλοντα και τους στρεσογόνους παράγοντες των εφαρμογών του πραγματικού κόσμου. Επιπλέον, το κόστος των υλικών και του εξοπλισμού μπορεί να είναι υψηλό, καθιστώντας δύσκολη την υιοθέτηση της τεχνολογίας από τις μικρές επιχειρήσεις.

Οι τύποι τεχνολογιών προσθετικών κατασκευών έχουν κατηγοριοποιηθεί με βάση το πρότυπο ISO/ASTM 52900:2021, (ASTM International, 2021).

1.2.1. Φωτοπολυμερισμός (VPP)

Η τεχνολογία του φωτοπολυμερισμού χρησιμοποιεί μια υγρή ρητίνη η οποία έχει τη δυνατότητα να πολυμερίζεται με τη χρήση ακτινοβολίας. Οι πιο διαδεδομένοι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι η SLA και η DLP. Η εκτόπωση SLA (στερεολιθογραφία) χρησιμοποιεί μια υγρή ρητίνη που στερεοποιείται στρώμα προς στρώμα χρησιμοποιώντας UV ακτινοβολία. Τα παραγόμενα τεμάχια είναι αναγκαίο να διαθέτουν μια μορφή πλέγματος στήριξης προκειμένου να αποφευχθούν δομικές παραμορφώσεις και να στηριχθεί το αντικείμενο στην πλατφόρμα κατασκευής. Για την απομάκρυνση της στήριξης απαιτείται χειρωνακτική εργασία καθώς είναι μια δύσκολη και ακριβής διεργασία. Η εκτόπωση αυτή είναι γνωστή για την παραγωγή υψηλής ποιότητας, λεπτομερών εξαρτημάτων με λεία επιφάνεια,(ΒΛΑΣΣΗΣ, 2022). Χρησιμοποιείται συνήθως σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η υγειονομική περίθαλψη για τη δημιουργία πρωτοτύπων, μοντέλων και λειτουργικών ανταλλακτικών. Η εκτόπωση SLA είναι επίσης δημοφιλής στους χομπίστες και τους καλλιτέχνες λόγω της ικανότητάς της να παράγει εξαιρετικά λεπτομερή, περίπλοκα σχέδια. Η DLP τεχνική είναι παρόμοια με την SLS με τη διαφορά ότι η υγρή ρητίνη στερεοποιείται είτε με πηγή υπεριώδους φωτός(UV light) είτε με φωτεινή πηγή διόδου φωτοεκπομπής (LED). Οι κατασκευές με DLP δεν έχουν τόσο καλή ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας αλλά λόγω της μεθόδου που χρησιμοποιεί παράγει πιο γρήγορα και πιο φθηνά τα προς κατασκευή τεμάχια, (Chaudhary et al., 2023).

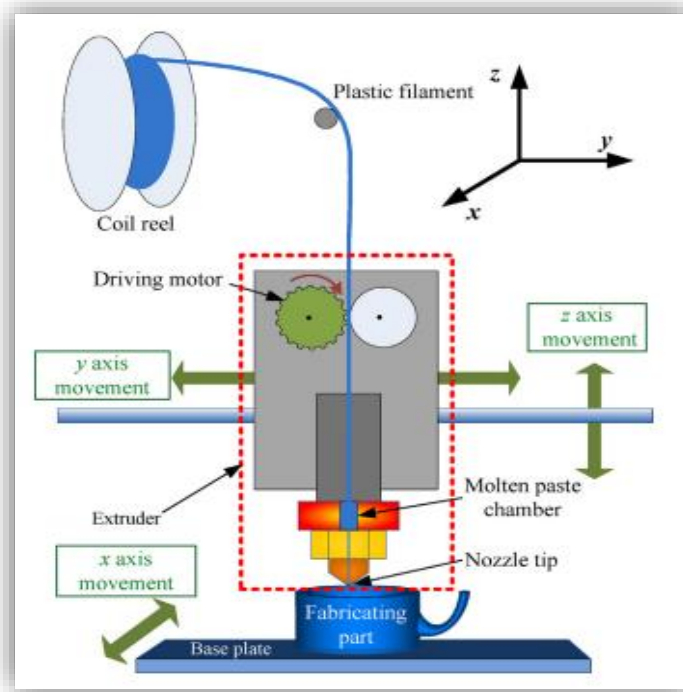


Εικόνα 1-7.Σχηματική επεξήγηση τεχνολογίας VPP.(Chaudhary et al., 2023)

1.2.2. Εξώθηση υλικού (MEX)

Η τεχνολογία εξώθησης υλικού, είναι μια δημοφιλής μέθοδος προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιείται για την κατασκευή αντικειμένων κυρίως από πλαστικό αλλά και από άλλα υλικά. Συχνά συναντάται και με τους όρους FFF ή FDM. Η διαδικασία ξεκινά με έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή, που χρησιμοποιεί ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο εξώθησης για να λιώσει και να εξωθήσει την πρώτη ύλη, που βρίσκεται σε μορφή νήματος/καλωδίου. Το ακροφύσιο κινείται κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής, εναποθέτοντας το λιωμένο νήμα στρώμα-στρώμα για να δημιουργήσει το τελικό αντικείμενο. Το FDM είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες και προσιτές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Χρησιμοποιείται συνήθως για τη δημιουργία πρωτοτύπων, μοντέλων και χαμηλών εξαρτήματα παραγωγής όγκου. Οι εκτυπωτές FDM είναι διαθέσιμοι σε διάφορα μεγέθη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα ευρύ φάσμα θερμοπλαστικών υλικών, συμπεριλαμβανομένων των ABS, PLA, PETG, νάιλον και άλλων, (Λυδάκη, 2023).Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του FDM είναι η ευκολία χρήσης και η προσβασιμότητα του, καθώς δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό ή εκπαίδευση. Ωστόσο, τα εξαρτήματα FDM μπορεί να έχουν ορατές γραμμές στρώματος και μπορεί να μην έχουν το ίδιο επίπεδο ακρίβειας και λεπτομέρειας με τα εξαρτήματα που παράγονται με άλλες τεχνολογίες κατασκευής πρόσθετων. Επιπλέον, τα εξαρτήματα FDM μπορεί να είναι πιο αδύναμα και πιο επιρρεπή σε στρέβλωση ή παραμόρφωση σε σύγκριση με εξαρτήματα που παράγονται με άλλες τεχνολογίες, όπως SLS ή SLA. Επίσης

απαιτείται η δημιουργία πλέγματος υποστήριξης των παραγόμενων αντικειμένων, το οποίο μπορεί να είναι διαφορετικού υλικού, και χρήζει χειρωνακτικής εργασίας για να αφαιρεθεί, (Loh et al., 2020).

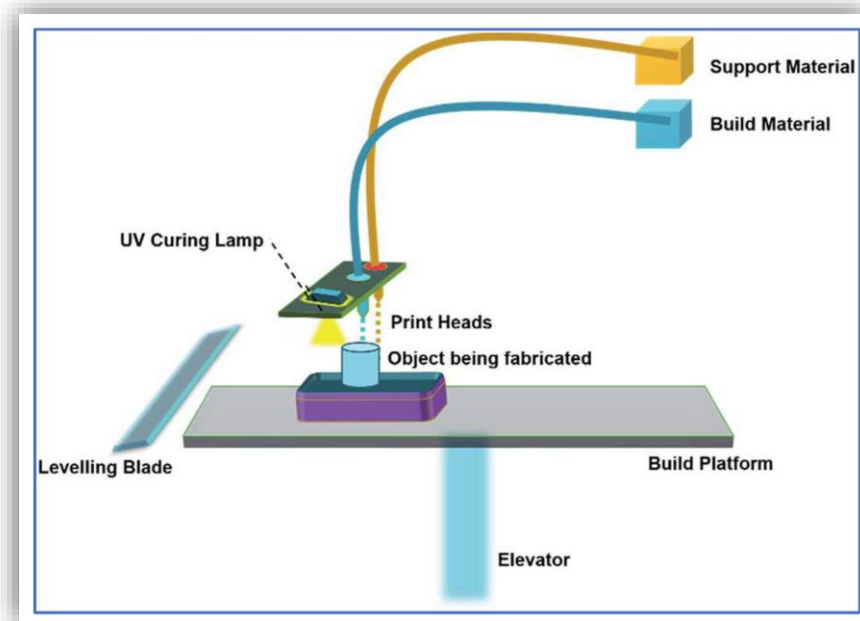


Εικόνα 1-8. Σχηματική απεικόνιση της MEX τεχνολογίας.(Jin et al., 2015)

1.2.3. Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (BJT) - Εναπόθεση υλικού (MIT)

Οι δύο αυτές τεχνολογίες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά μιας και η διαδικασία κατά την οποία παράγονται τα αντικείμενα σχεδόν ίδια. Στις κατασκευές με εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας τα τεμάχια δημιουργούνται όταν ένα υλικό σε σκόνη (συνήθως μέταλλο, πλαστικό ή κεραμικό) στρώνεται στρώση-στρώση στο κρεβάτι κατασκευής. Στη συνέχεια, ένας εκτυπωτής εφαρμόζει ένα συγκολλητικό μέσο (συνήθως κόλλα) πάνω στη στρώση σκόνης σε συγκεκριμένες περιοχές, κατά τρόπο που να δεσμεύει τα σωματίδια στα σημεία αυτά. Έπειτα το κρεβάτι κατασκευής κατεβαίνει προς τα κάτω κατά ύψος μιας στρώση ώστε να είναι εφικτή η νέα στρώση να συγκολληθεί στην προηγούμενη. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε νέα στρώση, δημιουργώντας το τελικό αντικείμενο, (Ziaee & Crane, 2019). Ουσιαστικά η τεχνολογία με εναπόθεση υλικού λειτουργεί με παρόμοια αρχή, μόνο που συνδυάζει και τη λειτουργία φωτοπολυμερισμού. Υγρή ρητίνη εκτοξεύεται υπό μορφή σταγόνων και στερεοποιείται μέσω ακτίνων UV. Ο εξοπλισμός όπως πχ τα ακροφύσια, είναι ίδιος με την τεχνολογία εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας, απλά αλλάζει η πρώτη ύλη. Το γεγονός ότι η πρώτη ύλη είναι υγρή ρητίνη δίνει τη δυνατότητα της εκτύπωσης χρωμάτων. Σχηματικά η εναπόθεση

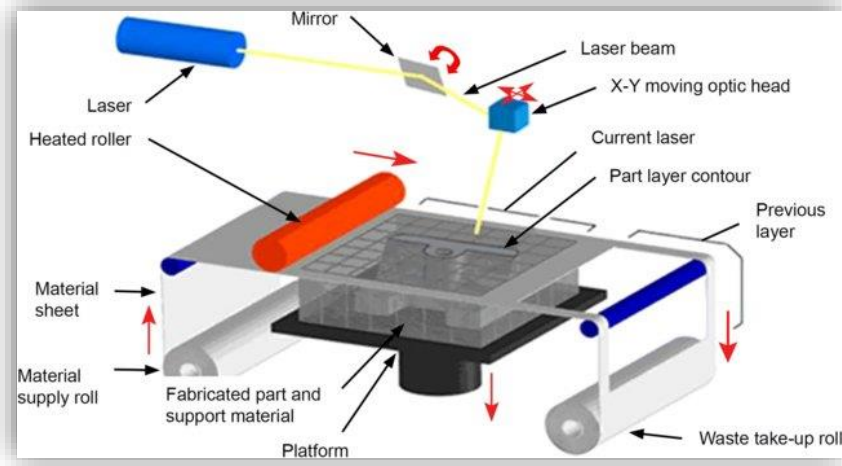
συγκολλητικής ουσίας είναι παρόμοια με σύντηξη πούδρας σε κλίνη, απλά αντί για πηγή θερμότητα υπάρχει ακροφύσιο που εναποθέτει συγκολλητική ουσία, (Yap et al., 2017).



Εικόνα 1-9. Σχηματική απεικόνιση MJT.(Gülcan et al., 2021)

1.2.4. Διεργασίες επάλληλων φύλλων (SHL)

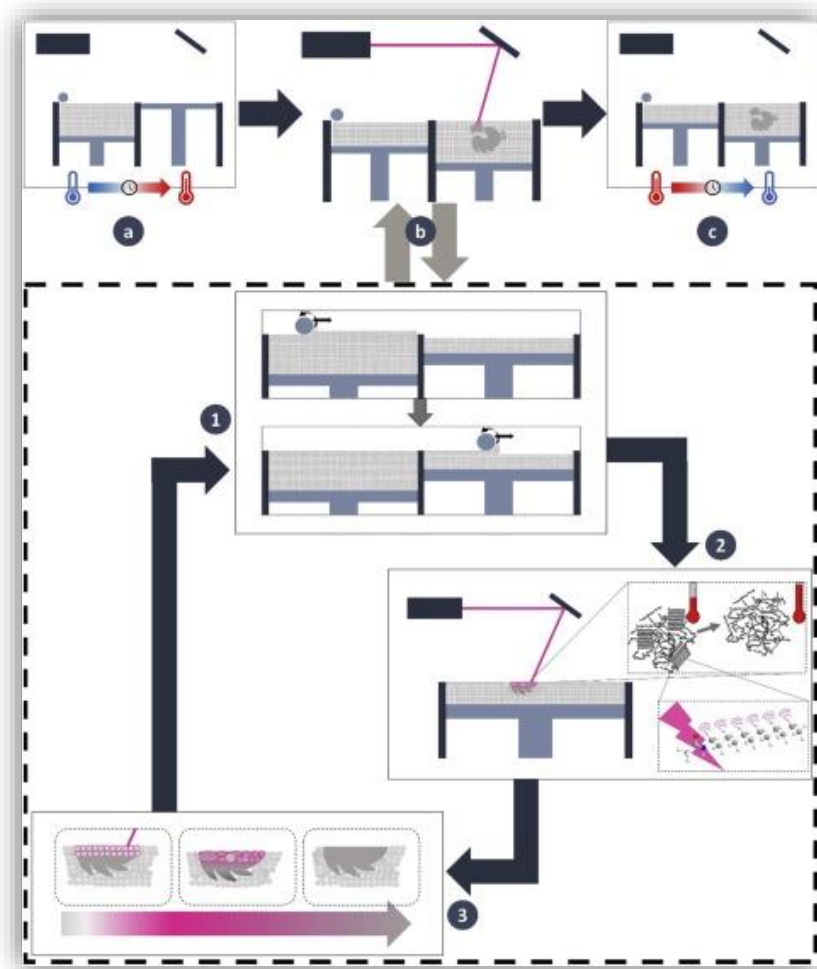
Η διαδικασία SHL ή αλλιώς LOM πραγματοποιείται με ένα ρολό υλικού, συνήθως μέταλλο, και παίρνει σχήμα χρησιμοποιώντας λέιζερ και θερμική κόλλα. Καθώς ξετυλίγεται το ρολό κόβεται μέσω του λέιζερ και συγκολλάται στο υπόστρωμα μέσω ενός κυλίνδρου συγκόλλησης που εφαρμόζει πίεση και θερμότητα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε στρώμα μέχρι να ολοκληρωθεί το τελικό αντικείμενο, (Jose et al., n.d.). Το τελικό τεμάχιο βρίσκεται εντός ενός κόβου του οποίου το περίβλημα είναι υποστηρικτικό υλικό. Με την αφαίρεση του υποστηρικτικού υλικού αποκαλύπτεται το παραγόμενο αντικείμενο. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η ταχύτητα και το χαμηλό κόστος σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες κατασκευής προσθέτων. Είναι σε θέση να παράγει μεγάλα αντικείμενα γρήγορα και οικονομικά, καθιστώντας την ιδανική για τη δημιουργία πρωτοτύπων, μοντέλων και εξαρτημάτων παραγωγής χαμηλού όγκου. Το LOM μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μια ποικιλία υλικών, όπως χαρτί, πλαστικό και μεταλλικά φύλλα. Η επιλογή του υλικού μπορεί να επηρεάσει τις τελικές ιδιότητες του εξαρτήματος, όπως αντοχή, ανθεκτικότητα και φινιρίσμα επιφάνειας. Ωστόσο, τα τεμάχια ενδέχεται να μην έχουν το ίδιο επίπεδο ακρίβειας και λεπτομέρειας με τα εξαρτήματα που παράγονται με άλλες τεχνολογίες κατασκευής πρόσθετων. Τα στρώματα μπορεί να είναι ορατά στην επιφάνεια του τελικού προϊόντος και το τμήμα μπορεί να έχει τραχύ φινιρίσμα επιφάνειας, (ΒΛΑΣΣΗΣ, 2022).



Εικόνα 1-10. Σχηματική επεξήγηση SHL. (Jose et al., n.d.)

1.2.5. Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (PBF)

Η προσθετική τεχνολογία σύντηξης πούδρας έχει ως πρώτη ύλη σε μορφή σκόνης/πούδρας. Για τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου αντικείμενου στρώνεται σε μια πλατφόρμα/κρεβάτι/κλίνη η πούδρα και μέσω μια πηγής θερμότητας συντήκονται επιλεκτικά σημεία ώστε παραχθεί μια στρώση του αντικείμενου. Έπειτα η βάση κατεβαίνει και η διαδικασία συνεχίζεται παρόμοια μέχρι οι στρώσεις να δημιουργήσουν το τελικό αντικείμενο. Ως πηγή ενέργειας για τη σύντηξη της πούδρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε τεχνολογία laser είτε δέσμη ηλεκτρονίων, με συνέπεια την ύπαρξη των μεθόδων SLS-SLM και EBM αντίστοιχα, (Ladani & Sadeghilaridjani, 2021). Υπάρχουν πολλές διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων. Για αρχή οι SLS-SLM έχουν μικρότερο πάχος στρώσης και ο θάλαμος κατασκευής περιέχει προστατευτικό αέριο(αργό ή άζωτο) ενώ η EBM έχει μικρότερο χρόνο παραγωγής, ο θάλαμος κατασκευής βρίσκεται σε κατάσταση υποπίεσης. Οι διεργασίες SLS/SLM ουσιαστικά διαφέρουν ως προς το γεγονός ότι η πρώτη θερμαίνει τη σκόνη μέχρι το σημείο τήξης ενώ η δεύτερη λιώνει τα σωματίδια της σκόνης. Τα τελικά αντικείμενα μπορούν να έχουν γεωμετρική πολυπλοκότητα και υψηλή γεωμετρική ακρίβεια. Για τη κατασκευή συνήθως χρησιμοποιούνται πολυμερή ή μεταλλικά υλικά. Μετά την παραγωγή το προϊόν χρειάζεται εκτενές καθάρισμα από τη σκόνη που βρισκόταν, (ΒΛΑΣΣΗΣ, 2022).

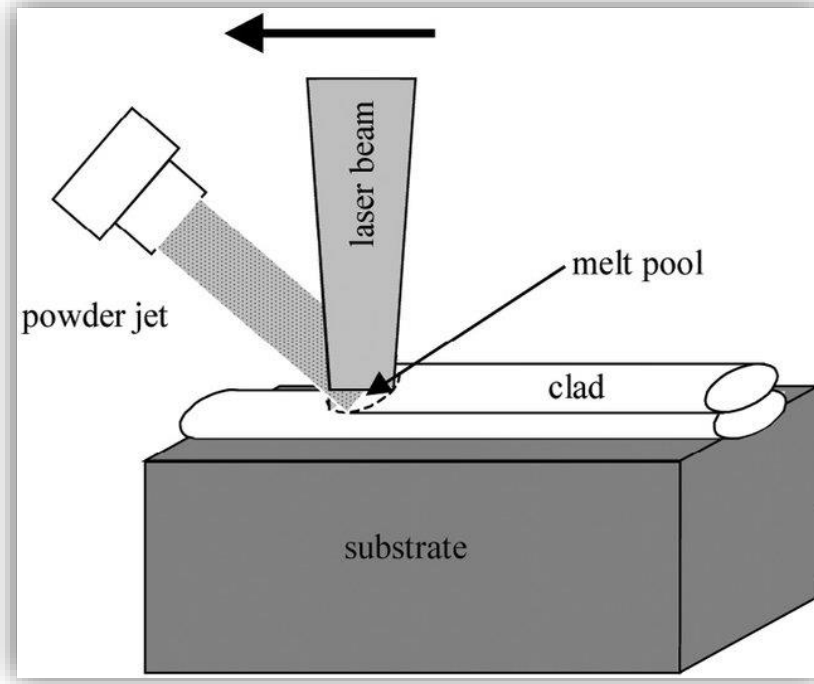


Εικόνα 1-11. Σχηματική απεικόνιση SLS όπου: a) θέρμανση, b) παραγωγή με 1) στρώση πούδρας, 2) εισαγωγή ενέργειας (μέσω laser), 3) σύντηξη πούδρας και c) αποθέρμανση. (Chatham et al., 2019)

1.2.6. Διεργασίες εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (DED)

Σε αυτή την κατηγορία προσθετικών τεχνολογιών η κατασκευή των τριδιάστατων αντικειμένων γίνεται με την αρχή ότι η πηγή ενέργειας είναι συγκεντρωμένη και κατευθυνόμενη στη πρώτη ύλη. Η πρώτη ύλη μπορεί να είναι είτε σε μορφή σκόνης (LENS) είτε σε μορφή καλωδίου (WAAM) και πιθανά υλικά είναι διάφορα μέταλλα με δυνατότητες συγκόλλησης όπως τιτάνιο, αλουμίνιο, ανοξείδωτος χάλυβας, κλπ. Οι δύο μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη παρασκευή μεγάλων αντικειμένων αλλά και για την επισκευή αντικειμένων, (Λυδάκη, 2023). Στη LENS ένα ακροφύσιο με δυνατότητα κίνησης στους 3 άξονες εναποθέτει τη σκόνη στο οριζόντιο επίπεδο και ακολουθείται από ένα βραχίονα που κατευθύνει τη δέσμη laser στην εναποθετημένη σκόνη ώστε να τη τήξει. Συνήθως στο θάλαμο κατασκευής υπάρχει η παρουσία

προστατευτικού αερίου είτε μέσω βραχίονα στο σημείο της τήξης είτε σε όλο το θάλαμο κατασκευής. Η μέθοδος WAAM είναι το κύριο θέμα της διπλωματικής και θα αναλυθεί παρακάτω. Τα τελικά αντικείμενα των δύο τεχνικών είναι σχεδόν γεωμετρικά ακριβή καθώς απαιτείται συνήθως μια επιφανειακή κατεργασία ώστε να έχουν την επιθυμητή ποιότητα επιφανείας, (Ersoy & Çelik, n.d.).



Εικόνα 1-12. Σχηματική απεικόνιση LENS.(Drezet et al., 2004)

2. Συγκολλήσεις τόξου Προσθετικής Τεχνολογίας - Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

2.1. Ανάλυση

Σύμφωνα με το ASTM F2792-12a η προσθετική τεχνολογία συγκολλήσεων τόξου ορίζεται ως ο συνδυασμός ενός ηλεκτρικού τόξου ως πηγή θερμότητας και ενός αναλίσκόμενου καλωδίου ως υλικό παροχής, (Tomar et al., 2022).

Ουσιαστικά η τεχνολογία συνδυάζει τη διαδικασία συγκολλήσεων τόξου με μηχανισμό παροχής μεταλλικού καλωδίου έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Συγκεκριμένα το αντικείμενο κατασκευάζεται ανά στρώσεις οι οποίες αποτελούνται από μεμονωμένες συγκολλήσεις μέσω ρομποτικού βραχίονα ή κινούμενης πλατφόρμας. Το αντικείμενο στο τέλος απαιτεί μια επιφανειακή κατεργασία ώστε να έχει την επιθυμητή επιφανειακή ποιότητα.



Εικόνα 2-1. Προϊόν WAAM όπου απαιτείται επιφανειακή κατεργασία. (ZELINSKI, 2022)

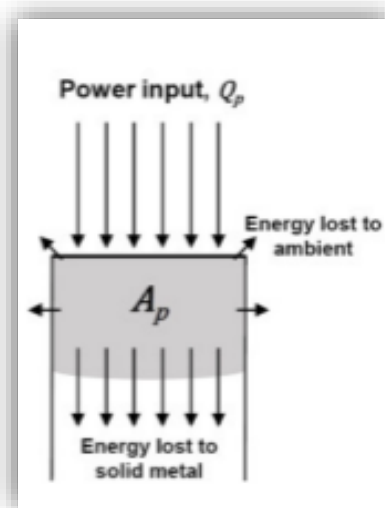
Η κατασκευή δοκιμίου με WAAM αποτελείται από τρία ουσιαστικά βήματα, το σχεδιασμό της διαδικασίας κατασκευής, την κατασκευή και την επεξεργασία του τελικού προϊόντος. Συγκεκριμένα ένα λογισμικό κόβει ένα τρισδιάστατο μοντέλο σε επίπεδα, δημιουργεί στο κάθε επίπεδο τη διαδρομή του βραχίονα συγκόλλησης και επεξεργάζεται ανάλογα τις παραμέτρους της συγκόλλησης και τις παραμέτρους του εξοπλισμού, με σκοπό το τελικό αντικείμενο να είναι γεωμετρικά ακριβές, χωρίς ατέλειες και στα επίπεδα ποιότητας που καθορίζονται. Σήμερα πολύπλοκα μηχανήματα WAAM έχουν εξοπλισμένους διάφορους αισθητήρες που μετρώντας επιπλέον παραμέτρους βοηθάνε στο καλύτερο έλεγχο της κατασκευής και σε υψηλότερης ποιότητας δοκίμια.

Οι τύποι των συγκολλήσεων που μπορεί να συναντήσει κανείς στη WAAM είναι τρεις :

- GMAW. Συγκεκριμένα στη WAAM χρησιμοποιούνται πέρα από τη κλασσική υλοποίηση της MIG/MAG, η υλοποίηση CMT και η υλοποίηση με δύο καλώδια παροχής.
- GTAW, χαμηλότεροι ρυθμοί εναπόθεσης υλικού από τις άλλες μεθόδους
- PAW, ρυθμοί εναπόθεσης μεγαλύτεροι της GTAW αλλά χαμηλότεροι της GMAW. Πιο γρήγορη μετακίνηση του εργαλείου συγκόλλησης και υψηλότερη ποιότητα αλλά ακριβότερα εξαρτήματα.

Οι συγκολλήσεις τόξου, ειδικότερα οι προαναφερθείσες, χρησιμοποιούνται αρκετά χρόνια, με το πεδίο έρευνας που έχει καλυφθεί να είναι εκτενές όσο αφορά την ποιότητα επιφανείας και τη ποιότητα της συγκόλλησης. Επιπλέον, εξαιτίας της μεγάλης προόδου στην τεχνολογία των υπολογιστών και των λογισμικών σχεδίασης και κατασκευών, οι δυνατότητες χρήσης της προσθετικής τεχνολογίας συγκολλήσεων τόξου είναι περισσότερες από ότι στο παρελθόν, (Tomar et al., 2022).

Κάποια από τα τυπικά χαρακτηριστικά της προσθετικής τεχνολογίας συγκολλήσεων τόξου είναι ότι ένα μέσο ύψος στρώματος είναι 1-2mm, η μέση τραχύτητα της επιφάνειας βρίσκεται στα επίπεδα των 500 μ m και ο ρυθμός εναπόθεσης υλικού μπορεί να φτάσει και τα 10kg/hr, (Cunningham et al., 2018). Επιπλέον σε σύγκριση με τις απλές συγκολλήσεις, στη WAAM η θερμότητα μεταφέρετε στο αντικείμενο μόνο σε έναν άξονα, στον κατακόρυφο και συγκεκριμένα με διεύθυνση προς τη βάση ενώ και η ενεργειακή απόδοση είναι υψηλότερη (έως 90%), (Tomar et al., 2022). Η χρήση αναλυσκόμενου καλωδίου βοηθάει εφόσον εξαλείφεται η ανάγκη για ανακύκλωση της σκόνης και το κόστος των αναλυσκόμενων καλωδίων είναι σαφώς μικρότερο από το κόστος υλικών σε μορφή σκόνης.



Εικόνα 2-2. Θερμικές απώλειες στη WAAM.(Kühne et al., 2019)

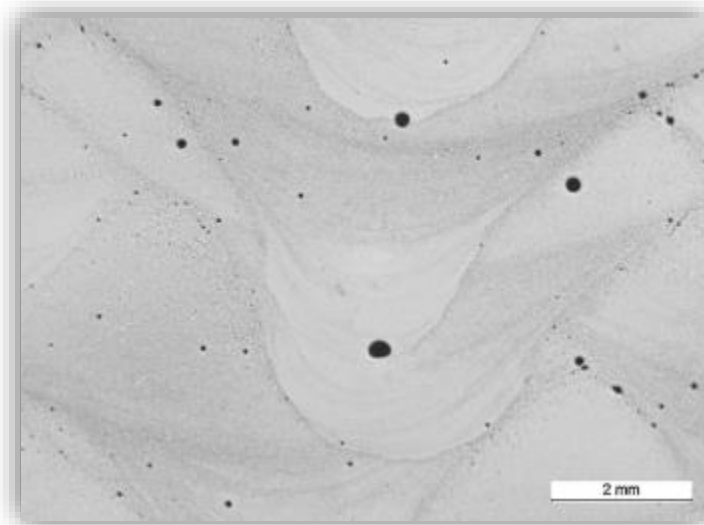
Δυστυχώς η WAAM παρουσιάζει κάποια συνηθισμένα προβλήματα που ο χώρος της βιομηχανίας προσπαθεί να επιλύσει με διάφορους τρόπους. Αναλυτικότερα τα προβλήματα είναι, (B. Wu et al., 2018):

- Παραμόρφωση και παραμένουσα τάση. Η συνεχής διαστολή-συστολή που λαμβάνει χώρα εξαιτίας της αναθέρμανσης από τις συγκολλήσεις οδηγεί σε παραμορφώσεις του τελικού δοκιμίου και στη δημιουργία παραμένουσων τάσεων.



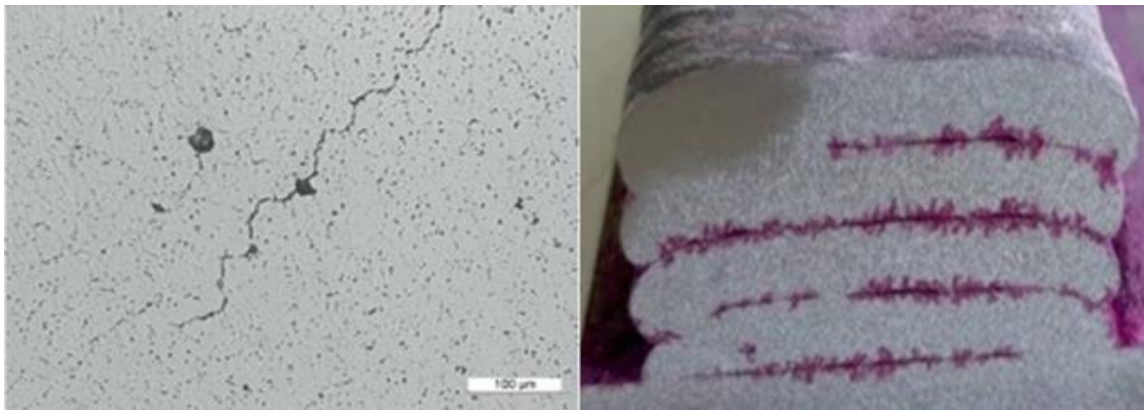
Εικόνα 2-3. Παράδειγμα παραμόρφωσης και παραμένουσας τάσης σε προϊόν WAAM.(Cunningham et al., 2018)

- Πορώδες. Το πορώδες μπορεί να δημιουργηθεί με δύο τρόπους, είτε από τη πρώτη ύλη είτε από τη διαδικασία. Το πορώδες πρώτους ύλης δημιουργείται εξαιτίας ακαθαρσιών που είναι δύσκολο να καθαριστούν τελείως από τα υλικά πριν χρησιμοποιηθούν. Έτσι κατά τη συγκόλληση οι ακαθαρσίες αυτές διεισδύουν στην περιοχή τήξης και κατά τη στερεοποίηση δημιουργούν πορώδες. Το πορώδες του δεύτερου τύπου δημιουργείται εξαιτίας κακής επιλογής διαδρομής ηλεκτρόδιου ή εξαιτίας ασταθούς διαδικασίας συγκόλλησης.



Εικόνα 2-4. Πορώδες σε κατασκευή από WAAM.(Horgar et al., 2018)

- Ρωγμές και αποκόλληση. Οι ρωγμές χωρίζονται στις ρωγμές ορίων κόκκων και στις ρωγμές στερεοποίησης. Οι ρωγμές ορίων κόκκων εμφανίζονται στα όρια κόκκων εξαιτίας της διαφορετικής μορφολογίας των περιοχών ή ακαθαρσιών κατακρήμνισης. Από την άλλη, οι ρωγμές στερεοποίησης εξαρτώνται από τη φύση του υλικού. Η αποκόλληση αναφέρεται στο διαχωρισμό στρώσεων συγκόλλησης και δημιουργείται από ανολοκλήρωτη συγκόλληση ή ανεπαρκή τήξη των υποστρωμάτων κατά τη συγκόλληση. Δυστυχώς η αποκόλληση των στρωμάτων και οι ρωγμές δεν επιλύονται με επεξεργασία του τελικού αντικειμένου. Συνήθως τέτοια προβλήματα εμφανίζουν διμεταλλικά υλικά πχ. Al/Cu, Al/Ti, Al/Fe, κλπ.



Εικόνα 2-5. Ρωγμές(αριστερά) και αποκόλληση(δεξιά) σε τεμάχιο κατασκευασμένο με WAAM.(Mu et al., 2022)

Πέρα από τα συνηθισμένα προβλήματα μπορεί να εμφανιστούν και ιδιαιτερότητες ανάλογα με τις συνθήκες και τις παραμέτρους της κατασκευής. Για παράδειγμα η TIG μέθοδος έχει μερικές ιδιαιτερότητες όσο αφορά την εφαρμογή της στη WAAM επειδή είναι μια μέθοδος που εύκολα μπορεί να χρησιμοποιήσει παραπάνω από ένα καλώδιο παροχής. Το γεγονός ότι το ηλεκτρόδιο είναι σε ξεχωριστό βραχίονα από το καλώδιο παροχής εγκυμονεί κινδύνους κατά την αλλαγή διεύθυνσης της πορείας συγκόλλησης, (Treutler & Wesling, 2021).

Για αυτό το λόγο η πληθώρα των παραμέτρων(πίνακας) πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη παραγωγή αντικειμένων με WAAM.

Παράμετροι μοντέλου CAD	Διεύθυνση επιπέδων, αριθμός επιπέδων, κλπ.
Διαδρομή εργαλείου	Σπειρωτή, Λαβύρινθος, Περιγραμματική, Zig-Zag, κλπ.
Διαδικασία Συγκόλλησης Τόξου	GMAW, GTAW, PAW
Παράμετροι διαδικασίας συγκόλλησης	Ένταση ρεύματος, Διαφορά δυναμικού, Ταχύτητα παροχής υλικού, ταχύτητα κίνησης ηλεκτροδίου, κλπ.
Προστατευτικό μέσο	Είδος, χημική σύσταση, ρυθμός παροχής
Υλικό παροχής	Είδος, χημική σύσταση, μονό/διπλό καλώδιο, διάμετρος

Πίνακας 1. Παράμετροι WAAM.(Tomar et al., 2022)

Όμως η WAAM διαθέτει ως μεγάλο πλεονέκτημα ότι συγκριτικά με άλλες προσθετικές τεχνολογίας το αναγκαίο αρχικό κόστος επένδυσης είναι μικρότερο εξαιτίας της τεράστιας αγοράς γύρω από τη τεχνολογία συγκολλήσεων. Ταυτόχρονα η τεχνολογία των υπολογιστικών συστημάτων έχει γνωρίσει ραγδαία αύξηση τα τελευταία έτη, καθιστώντας την πιο προσιτή στο κοινό για χρήση και έρευνα.

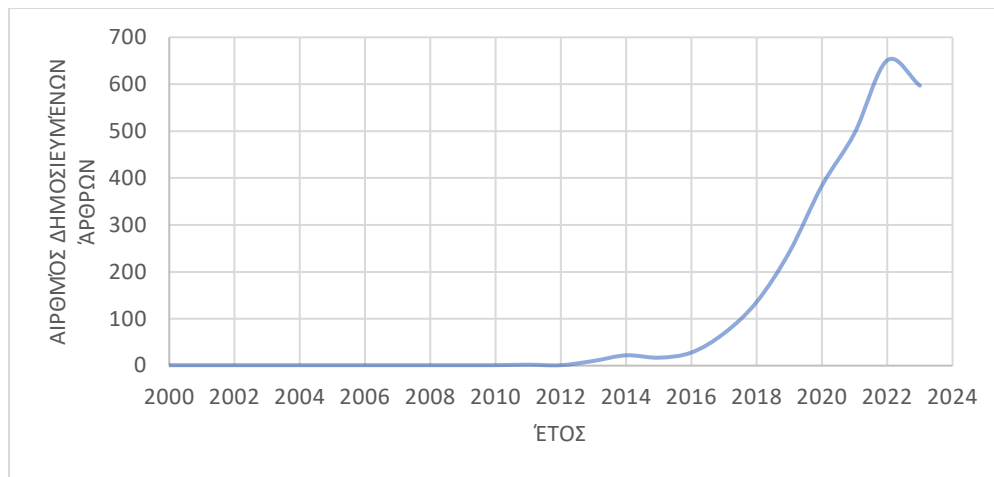
2.2. Ιστορική Αναδρομή

Η Προσθετική Τεχνολογία Συγκολλήσεων τόξου είναι μια τεχνολογία η οποία έχει πολύ ανοδική πορεία τα τελευταία χρόνια. Η WAAM έκανε την εμφάνισή της στις αρχές του 1990 στην Ευρώπη αλλά δεν μπόρεσε να κεντρίσει το ενδιαφέρον και να κερδίσει το χώρο της βιομηχανίας εξαιτίας:

- Της μικρής ακρίβειας που μπορούσε τότε να επιτευχθεί
- Της ποιότητας της επιφάνειας που θεωρούνταν μη αποδεκτή
- Της έλλειψης αυτοματοποιημένων συστημάτων CAM που μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν συγκολλήσεις τόξου
- Της υψηλής εισαγόμενης θερμότητας στο αντικείμενο και οι παραμένουσες τάσεις
- Της αδυναμίας σύντηξης επιπέδων για τη δημιουργία ομαλής επιφάνειας
- Της έλλειψης αισθητήρων και μέσων για τον έλεγχο και την επίβλεψη της κατασκευής.

Πλέον η προσθετική τεχνολογία συγκολλήσεων τόξου έχει αρχίσει να βρίσκει τη θέση της στο κλάδο των κατασκευών. Ήδη πολλά κομμάτια που κατασκευάζονταν από χάλυβα στην αυτοκινητοβιομηχανία κατασκευάζονται εξ ολοκλήρου ή εν μέρει από αλουμίνιο. Επίσης η τεχνολογία αυτή εξαιτίας της φύσης της μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για επισκευή αντικειμένων, (Pan et al., 2018).

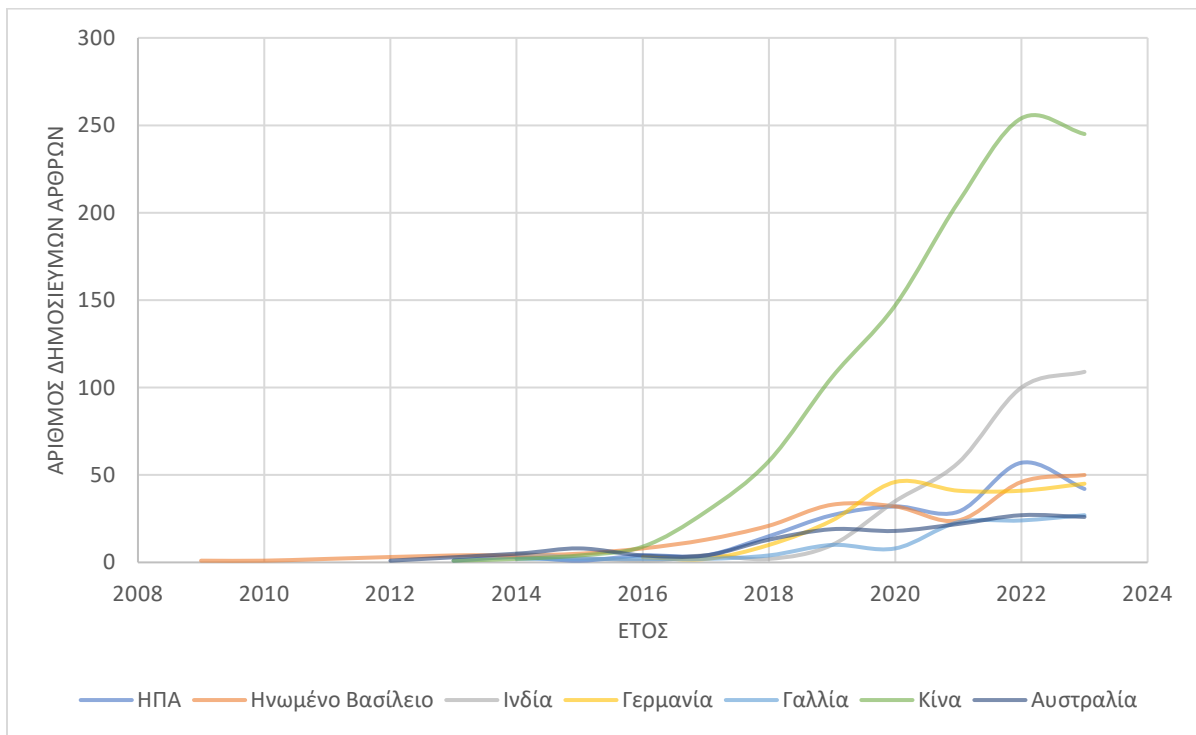
Η δημοτικότητα της προσθετικής τεχνολογίας συγκολλήσεων τόξου μπορεί να γίνει εμφανής στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 1. Σύνολο δημοσιευμένων άρθρων ανά έτος με λέξεις κλειδιά την ορολογία WAAM-Wire Arc Additive Manufacturing.

Υπάρχουν μερικές επιστημονικές αναφορές στη WAAM στη δεκαετία του 1970, του 1990 και του 2000 αλλά είναι μονοψήφιες. Όπως φαίνεται η επιστημονική κοινότητα άρχισε να δείχνει ενδιαφέρον τα τελευταία 10 χρόνια. Η πρωτική τάση αιτιολογείται από το γεγονός ότι τα δεδομένα λήφθηκαν στο μέσο τους έτους 2023.

Οι χώρες που έχουν επενδύσει περισσότερο σε αυτή τη τεχνολογία είναι, κατά σειρά περισσότερης ενασχόλησης, η Κίνα, η Ινδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η Γερμανία, η Αυστραλία και η Γαλλία.



Διάγραμμα 2. Δημοσιευμένα Άρθρα ανά έτος με λέξη κλειδί WAAM-Wire Arc Additive Manufacturing με βάση τις κύριες χώρες του τομέα.

Χώρες με αναπτυσσόμενη δραστηριότητα είναι, σε αλφαβητική σειρά, οι: Αυστρία, Βέλγιο, Βραζιλία, Καναδάς, Ιράν, Ισραήλ, Ιταλία, Ιαπωνία, Μαλαισία, Ολλανδία, Νορβηγία, Πολωνία, Πορτογαλία, Ρωσική Ομοσπονδία, Σιγκαπούρη, Νότια Κορέα, Ισπανία, Σουηδία, Ελβετία, Τουρκία και Βιετνάμ.

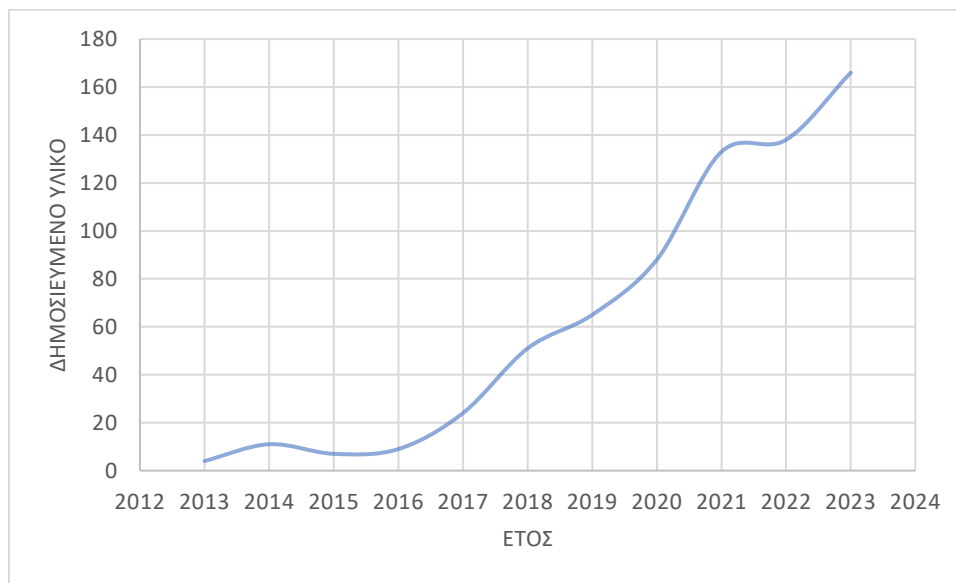
Στη βιομηχανία μπορεί να βρεθεί και με τους όρους "Rapid Prototyping- RP", "Shape Welding-SW", "Shape Melting-SM", "Solid Freeform Fabrication-SFF", "Shape Metal Deposition-SMD" και "3D Welding", (Rodrigues et al., 2019).

3. Υλικά WAAM

Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις συγκολλήσεις τόξου προσθετικής τεχνολογίας ποικίλλουν και διαφέρουν ανάλογα με τη μέθοδο συγκόλλησης που θα επιλεγεί. Γενικά, τα υλικά είναι κράματα αλουμινίου, κράματα τιτανίου, κράματα νικελίου, κράματα μαγνησίου, ανοξείδωτοι χάλυβες και κράματα άλλων μετάλλων όπως κράματα χαλκού. Παρακάτω θα αναλυθεί ένα μέρος της παγκόσμιας έρευνας για τα πρώτα τρία κράματα που αναφέρθηκαν καθώς είναι τα πιο σημαντικά και διαδεδομένα ως προς τη χρήση στη WAAM.

3.1. Κράματα Αλουμινίου

Τα κράματα Αλουμινίου αποτελούν το 2^ο πιο διαδεδομένο υλικό στον τομέα της έρευνας για τις συγκολλήσεις τόξου προσθετικής τεχνολογίας με σχεδόν 700 δημοσιευμένα άρθρα μέχρι και το 1^ο εξάμηνο του 2023.

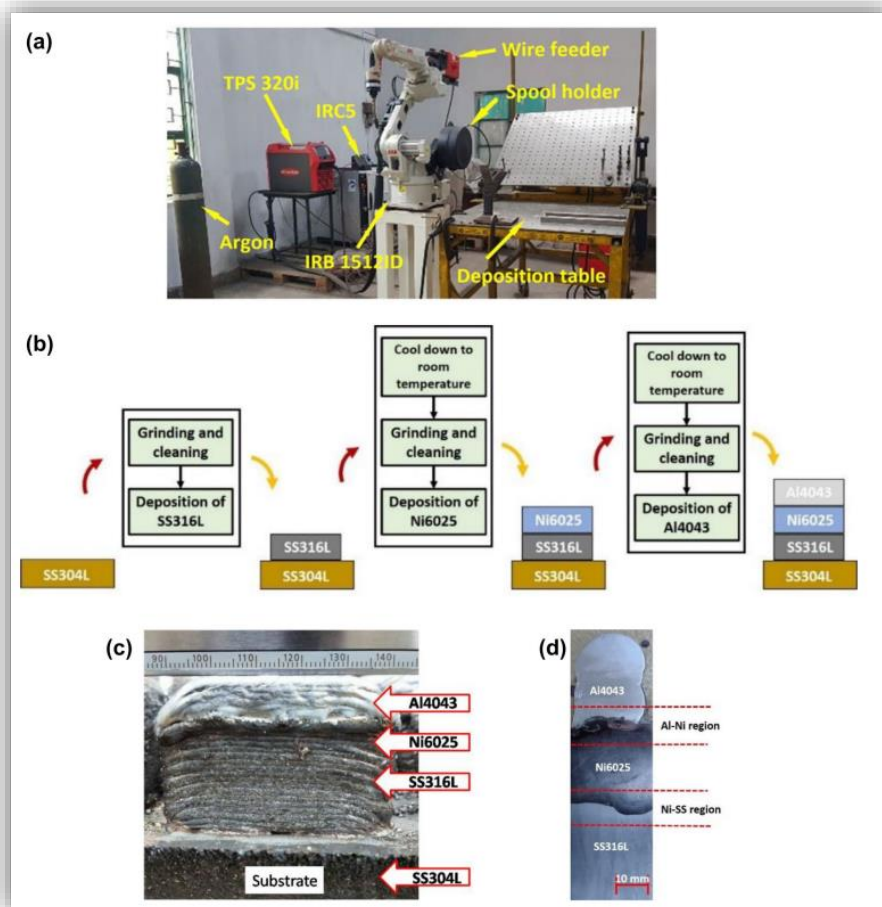


Διάγραμμα 3. Δημοσιευμένο υλικό ανά έτος με λέξεις κλειδιά “Wire are additive manufacturing” και “aluminum”.

- Για αλουμίνιο 2319 και αλουμίνιο 5087 το πορώδες που εμφανίζεται περιορίζει τις δυνατότητες στις προσθετικές κατασκευές συγκολλήσεων τόξου. Αποδείχθηκε όμως σε δοκίμια GMAW-CMT ότι αν κατά τη δημιουργία ασκηθεί πίεση φορτίου 45 kN με ράουλο ανά στρώμα, τότε οι πόροι διαμέτρου >5μm εξαλείφονται, είτε γίνει αναθέρμανση του δοκιμίου είτε όχι, παρόλο που η αναθέρμανση μεγεθύνει τους πόρους, (Gu, Ding, Williams, Gu, Ma, et al., 2016).

- Για το κράμα αλουμινίου 2319 με GMAW-CMT βρέθηκε ότι η θερμική κατεργασία T6 (αναθέρμανση από θερμοκρασία δωματίου στους 535 με ρυθμό 200°/ώρα, στους 535 για 90 λεπτά, βαφή σε νερό, αναθέρμανση στους 175 με ρυθμό 100/ώρα από θερμοκρασία δωματίου και αποθέρμανση σε θερμοκρασία δωματίου με ρυθμό αποθέρμανσης φούρνου) του τελικού δοκιμίου είχε καλύτερη βελτίωση σημείο UTS και ορίου διαρροής από ότι η άσκηση πίεσης φορτίου 45 kN με τη εφαρμογή πίεσης μέσω ράουλου ανά στρώμα. Βέβαια ο συνδυασμός των δύο μεθόδων έδωσε τις μέγιστες τιμές αντοχών διαρροής και εφελκυσμού και τη μέγιστη δυνατή επιμήκυνση, (Gu, Ding, Williams, Gu, Bai, et al., 2016).
- Δοκίμιο αλουμινίου AA-5183 κατασκευάστηκε πάνω σε βάση από αλουμίνιο AA6082-T6 με GMAW και βρέθηκαν αρκετές ρωγμές παραπάνω από ότι συνήθως. Όριο διαρροής και αντοχή σε εφελκυσμό μετρήθηκαν 145 MPa και 293MPa αντίστοιχα. Η σκληρότητα ήταν ίδια σε κάθετο και οριζόντια άξονα. Οι μετρήσεις αυτές διαθέτουν υψηλότερες τιμές από πολλά συγκρίσιμα δημοσιευμένα δεδομένα, (Horgar et al., 2018).
- Πραγματοποιήθηκε κατασκευή από κράμα αλουμινίου μαγνησίου ER5356 μέσω GMAW-CMT. Βρέθηκε ότι για διαφορετικές τιμές ταχύτητας εργαλείου(TS) και ταχύτητας παροχής υλικού(WFS) οι μηχανικές ιδιότητες παρέμειναν σχετικά σταθερές με διακύμανση από 5% έως 10%. Παράλληλα παρατηρήθηκαν ρωγμές και πόροι στο επίπεδο που δημιουργείται μεταξύ δύο στρώσεων υλικών. Το πάχος του δοκιμίου βρέθηκε να αυξάνεται ανάλογα με το WFS και δυσανάλογα με το TS. Η μικροσκληρότητα μεταβάλλεται μόνο με αλλαγή στο WFS και όχι με TS. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η μέθοδος έδωσε καλύτερες ιδιότητες στο αντικείμενο από τη μέθοδο της χύτευσης, (Mu et al., 2022).
- Έγινε πειραματικός έλεγχος σε δοκίμιο από αλουμίνιο AA2319 που παράχθηκε με GMAW-CMT όπου εξετάστηκαν πώς επηρεάζουν το πορώδες διάφοροι παράγοντες όπως διάφορες λειτουργίες CMT, αλλαγές σε WFS-TS και η ποιότητα του καλωδίου ανάλογα τον κατασκευαστή. Αποδείχτηκε ότι ο κύριος παράγοντας είναι η ποιότητα του καλωδίου καθώς οι αλλαγές στις λειτουργίες CMT, WFS και στην αναλογία WFS/TS δεν έφεραν μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα. Αναλυτικότερα βρέθηκε ότι η ποιότητα επιφανείας του καλωδίου παροχής είναι η κύρια αιτία διαφοράς των καλωδίων, (Ryan et al., 2018).
- Δοκίμια από AlSi7Mg0.6 παράχθηκαν μέσω GMAW-CMT για να μελετηθούν. Τα δοκίμια συγκρίθηκαν με αντίστοιχα χυτά και βρέθηκε ότι η μικροδομή του συγκολλημένου τεμαχίου ήταν πολύ καλύτερη από αυτή του χυτού ενώ το δοκίμιο στο οποίο είχαν προστεθεί σωματίδια TiB2 κατά τη διάρκεια της κατασκευής παρουσίασε ακόμα μικρότερους κόκκους. Παρόλα αυτά υπήρχαν αρκετοί χονδροειδείς κόκκοι και στα δύο δοκίμια. Μετά από θερμική κατεργασία T6 όλα τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν μέσω WAAM παρουσίασαν αυξημένη αντοχή διαρροής, βελτιωμένο UTS και εξάλειψη των χονδροειδών κόκκων, (Q. Yang et al., 2022).

- Δοκίμιο παράχθηκε από αλουμίνιο, ανοξείδωτο χάλυβα και ενδιάμεση ενίσχυση από νικέλιο με GMAW, ώστε να μελετηθεί εάν η ύπαρξη νικελίου μπορεί να βελτιώσει τη σύντηξη του ανοξείδωτου χάλυβα με το αλουμίνιο. Βρέθηκε ότι οι ενδιάμεσες φάσεις του αλουμινίου και του νικελίου είναι τρεις που έχουν έντονο διαχωρισμό μεταξύ τους, $AlNi$ στο κέντρο Al_3Ni στη πλευρά του αλουμινίου και $AlNi_3$ στη πλευρά του νικελίου. Αντίθετα στη μίξη ανοξείδωτου χάλυβα και νικελίου παρόλο που οι φάσεις είναι και εδώ τρεις, $NiFe-NiFe_3-Ni_3Fe$, δεν υπάρχει έντονος διαχωρισμός και αυτές είναι αναμειγμένες. Οι ενδιάμεσες μεταλλικές φάσεις στο αλουμίνιο-νικέλιο επηρεάζονται από την εισαγμένη θερμότητα, από τις αποστάσεις μεταξύ των πρωτεύοντων δενδριτών και τη γωνία των δενδριτών, ενώ αντίστοιχα για το χάλυβα-νικέλιο επιρροή έχει μόνο η εισαγμένη θερμότητα. Η σκληρότητα παρατηρείται να συναντά μέγιστη τιμή στη περιοχή του Al_3Ni με τις υπόλοιπες φάσεις αλουμινίου-νικελίου να ακολουθούν και στο τέλος οι φάσεις χάλυβα-νικελίου. Επίσης παρατηρήθηκε για όλες τις φάσεις ότι αν αυξηθεί η θερμότητα που εισάγεται κατά τη συγκόλληση αυξάνεται και η τελική σκληρότητα, (Paul et al., 2022).

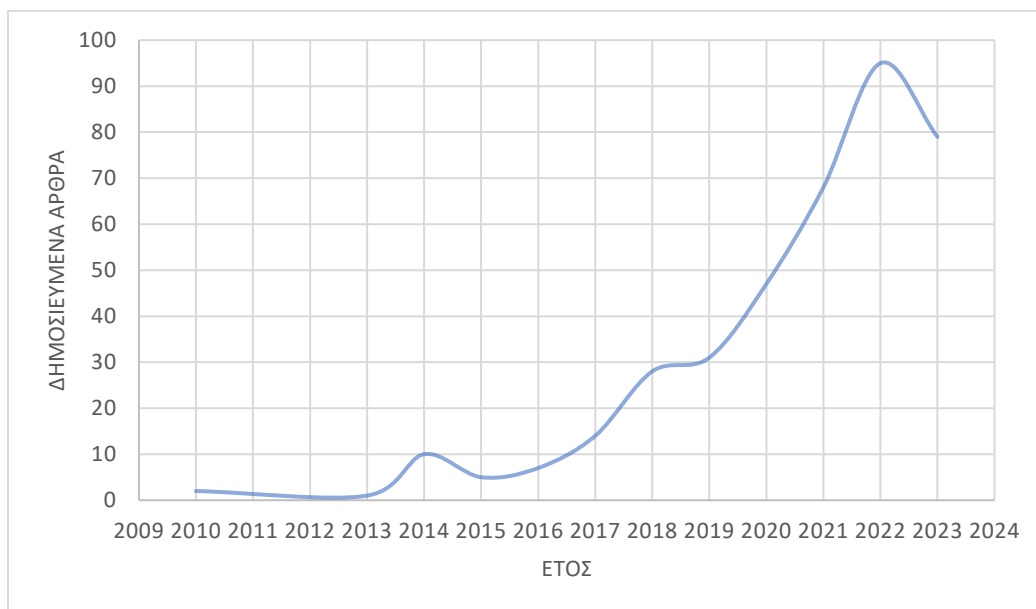


Εικόνα 3-1. α) Διάταξη β) Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας κατασκευής γ) Εξήγηση μετάλλων εναπόθεσης δ) Τομή τεμαχίου και ανάλυση μεταλλικών περιοχών. (Paul et al., 2022)

- Έγιναν τρεις πειραματικές κατασκευές με CMT-GMAW ώστε να γίνει εφικτή η μελέτη τριών τρόπων διατήρησης της επιπεδότητας των στρώσεων σε κράμα αλουμινίου ER4043. Η πρώτη μέθοδος είναι η κίνηση του ηλεκτροδίου υπό εναλλασσόμενη διαγώνια διεύθυνση (zig zag), η δεύτερη μέθοδος είναι ο έλεγχος της ενεργοποίησης και της απενεργοποίησης του τόξου και η τρίτη η μέτρηση και το φρεζάρισμα της στρώσης. Η κάθε μέθοδος μπόρεσε να επιδράσει θετικά στην αντιμετώπιση της μεταβλητότητας του επιπέδου της στρώσης. Ειδικότερα η τρίτη μέθοδος προβλέφθηκε ότι με ρομποτικούς βραχίονες υψηλότερης ποιότητας(καλύτερη ικανότητα φρεζαρίσματος και πιο ακριβείς κινήσεις) από ότι αυτοί του πειράματος θα μπορούσε να καταναλώσει λιγότερο χρόνο. Αποδείχθηκε ότι συνδυάζοντας τις τρεις μεθόδους τη επιπεδότητα των συγκολλήσεων και συνεπώς της στρώσης μπορεί να επιτύχει ελαχιστοποίηση σφάλματος σε ανεκτά επίπεδα, (Ma et al., 2019).
- Με GMAW-CMT πραγματοποιήθηκε κατασκευή από ER5356 για να μελετηθεί εάν είναι εφικτή η αποφυγή δημιουργίας επιτακτικών κόκκων σε διάταξη στηλών και ο περιορισμός του πορώδους μέσω μιας παραλλαγής της διεύθυνσης της κίνησης του ηλεκτροδίου. Κατά την παραλλαγή αυτή, το ηλεκτρόδιο για κάθε θεωρημένη απόσταση x στη προκαθορισμένη διεύθυνση, θα κάνει μια αντιστροφή πορείας και θα πραγματοποιήσει μια επιπλέον απόσταση y στην αντίθετη της προκαθορισμένης διεύθυνση. Η απόσταση y είναι μικρότερη της απόστασης x , ενώ η ταχύτητα TS παραμένει ίδια και για τις δύο διευθύνσεις. Ουσιαστικά η κίνηση αυτή θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως “μπροστά-πίσω”. Παρατηρήθηκε ότι η παραλλαγή που δοκιμάστηκε μπόρεσε να μειώσει τη δημιουργία των επιτακτικών κόκκων σε μορφή στηλών και να παρεμποδίσει την εμφάνιση πορώδους. Επίσης έπειτα από πειραματική ανάλυση των πειραματικών τεμαχίων βρέθηκε ότι η διεύθυνση των κόκκων ήταν ομοιόμορφη και παράλληλη με τη διεύθυνση κίνησης του ηλεκτροδίου, (Yehorov et al., 2019).
- Μελέτη έλαβε χώρα ώστε να γίνει σύγκριση διάφορων κραμάτων αλουμινίου στις τεχνικές συγκολλήσεων τόξου προσθετικής τεχνολογίας, δηλαδή σε WAAM με GMAW,GTAW,GMAW-CMT. Σε δοκίμια από ER1100,ER4043,ER4943,ER4047 και ER5356 τα οποία κατασκευάστηκαν με την απλή GMAW, το υψηλότερο πορώδες παρουσίασε το ER5356 ενώ το χαμηλότερο πορώδες με τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες παρουσίασε το ER4043. Με τη τεχνική GMAW-CMT δοκίμια από κράματα 2319 και 5087 βρέθηκαν με σημαντική μείωση στο πορώδες μετά από εφαρμογή πίεσης μέσω ράουλο και θερμική κατεργασία ενδιάμεσα στην κατασκευή των στρώσεων. Για τη τεχνική GTAW έγινε σύγκριση με δοκίμια κατασκευασμένα από ER2024 και ER5087, τα οποία υπέστησαν βαφή και αποδείχθηκε ότι η μικροσκληρότητα, η επιμήκυνση και η εφελκυστική αντοχή βελτιώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας βαφής, (Z. Wang & Zhang, 2021).

3.2. Κράματα Τιτανίου

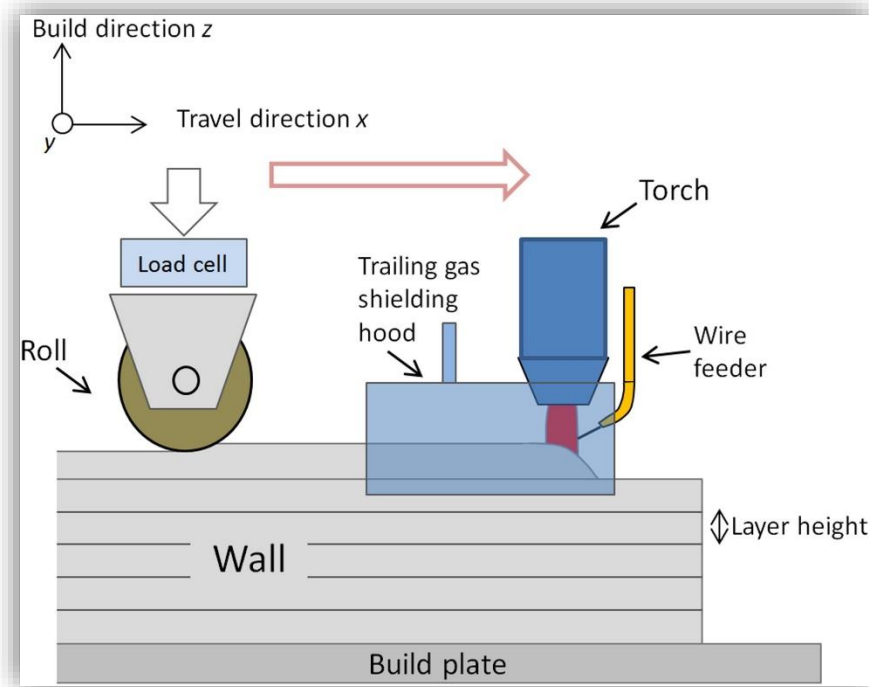
Τα κράματα τιτανίου είναι πολύ διαδεδομένα στην αεροδιαστημική βιομηχανία εξαιτίας του ελαφρού βάρους και των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων του. Το δημοσιευμένο έργο πάνω στις συγκολλήσεις τόξου προσθετικών κατασκευών είναι μικρό ακόμα αλλά αρκετό για να μπορέσει να γίνει κάλυψη του ως ενός σημείου.



Διάγραμμα 4. Δημοσιευμένο έργο με λέξεις-κλειδί "Wire Arc Additive Manufacturing" και "Titanium".

- Κατά τη κατασκευή ενός Ti-6Al-4V δοκιμίου με GTAW παρατηρούνται πάντα χονδροειδείς β' κόκκοι σε στήλες, κάτι που οδηγεί σε ανισότροπες μηχανικές ιδιότητες. Όμως βρέθηκε ότι μέσω μια διαδικασίας εφαρμογής πίεσης μέσω ράουλου, το μέγεθος των κόκκων αυτών μειώνεται σε σημαντικό βαθμό (από 10mm σε έως και <100μm). Επιπλέον οι κόκκοι φάσεων α' και β' εμφανίζονται πλέον τυχαία ακόμα και με ελάχιστη εφαρμογή πίεσης (8%-20%), ενώ η βελτιστοποίηση της δομής των β' κόκκων δείχνει να λαμβάνει χώρα με αυξημένα επίπεδα πίεσης, (Donoghue et al., 2016).
- Διενεργήθηκε κατασκευή δοκιμίου από Ti-5Al-4V με GTAW/TIG και έγινε σύγκριση με αντίστοιχο υλικού δοκίμιο κατασκευασμένο με LENS στο τομέα της παραμένουσα τάσης και του διαμοιρασμού της τάσης. Βρέθηκε ότι οι υψηλότερες παραμένουσες τάσεις βρίσκονται στο σημείο μετάβασης του δοκιμίου και του κρεβατιού και στις δύο μεθόδους με τη WAAM να εμφανίζει υψηλότερες τιμές. Η αφαίρεση της βάσης-κρεβατιού μείωσε αισθητά τις μικρές παραμένουσες τάσεις στο διαμήκη άξονα και στις δύο μεθόδους. Επιπλέον και στις δύο μεθόδους βρέθηκαν ευθείες και καμπύλες ζώνες στρώσεων. Οι διαφορές που εντοπίστηκαν αφορούν τη μικροδομή και τις παραμορφώσεις. Αναλυτικότερα στη WAAM οι

κόκκοι ήταν μεγάλοι και σε σήλες ενώ στη CLAD οι κόκκοι ήταν στενοί και κυματώδεις. Επιπλέον στη WAAM οι συμπιεσμένες περιοχές βρέθηκαν στη κορυφή του δοκιμίου ενώ στη CLAD στη βάση. Τέλος στη WAAM παρατηρήθηκε και ένας είδος ανύψωσης στα άκρα του δοκιμίου στη βάση κατά το διαμήκη άξονα, (Szost et al., 2016).



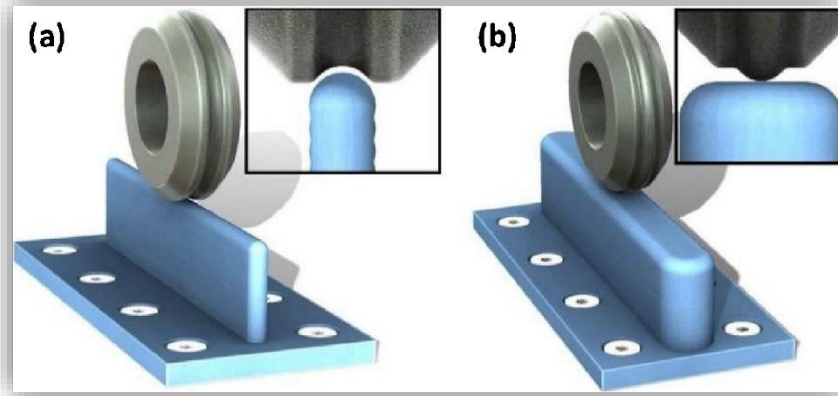
Εικόνα 3-2. Διαδικασία παραγωγής WAAM με εφαρμογή φορτίου με ράουλο. (Donoghue et al., 2016)

- Σε σύγκριση δοκιμίων Ti-6Al-4V κατασκευασμένα με SLM, SLM με θερμική κατεργασία, WAAM και παραδοσιακή έλαση βρέθηκε ότι η αντίσταση διάβρωσης της WAAM είναι μεγαλύτερη από την παραδοσιακή έλαση και SLM με θερμική κατεργασία ενός σταδίου αλλά μικρότερη από SLM και SLM με θερμική κατεργασία 2 σταδίων, (J. Yang et al., 2017).
- Δοκίμια από Ti-6Al-4V κατασκευασμένα με GTAW-WAAM μετρήθηκαν να έχουν ελάχιστα (περίπου 10%) μικρότερα σημεία ορίου διαρροής και σημείου UTS από ότι αντίστοιχα χυτά δοκίμια. Αλλά η ολκιμότητα ήταν παρόμοια και η αντοχή σε καταπόνηση πολύ καλύτερη. Παρατηρήθηκε επίσης ότι ρόλο έπαιξε και η διεύθυνση της κατασκευής των δοκιμίων, με τα δοκίμια που κόπηκαν οριζόντια να έχουν υψηλότερη αντοχή σε κόπωση αλλά μικρότερη ολκιμότητα από αυτά κομμένα κάθετα. Σημαντικό ρόλο έπαιξε και το πορώδες καθώς για να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω μετρήσεις έπρεπε τα δοκίμια να μην εμφανίσουν πόρους, κάτι που έγινε σε μερικά δοκίμια, (F. Wang et al., 2013).

- Κατασκευάστηκαν δύο δοκίμια από TC4-DT μέσω WAAM εκ των οποίων στο ένα ασκήθηκε φορτίο μέσω ράουλου ανά στρώση κατά τη κατασκευή. Με την ολοκλήρωση της κατασκευής τα δύο τεμάχια δέχτηκαν θερμική κατεργασία κατά την θερμάνθηκαν στους 995 βαθμούς για 15 λεπτά, μετά αποθερμάνθηκαν σε αέρα μέχρι τους 700 βαθμούς, έπειτα αναθερμάνθηκαν στους 730 για δύο ώρες ώπου να ψυχθούν μέσω αέρα. Βρέθηκε ότι το δείγμα στο οποίο ασκήθηκε πίεση είχε λιγότερο ρυθμό δημιουργίας ρωγμών λόγω κόπωσης. Επιπλέον στο δείγμα αυτό όλα τα σημάδια κόπωσης βρέθηκαν κάτω από το κρίσιμο όριο που καθορίστηκε πειραματικά. Βέβαια στο βελτιωμένο δείγμα βρέθηκαν πολλαπλές δευτερεύουσες ρωγμές κοντά στην επιφάνεια κόπωσης, (Gao et al., 2021).
- Με GTAW δημιουργήθηκαν τρία τεμάχια από TC11 για τη δοκιμή επισκευής πτερυγίων από TC17. Το ένα δείγμα ήταν σκέτο TC11, το δεύτερο δείγμα είχε προσθήκη 2% κ.β. κασίτερου ανά στρώση κατασκευής και το τρίτο 4% κ.β. χρώμιο. Η προσθήκη του κασίτερου οδήγησε στη δημιουργία επιτακτικών κόκκων β φάσης σε διάταξη στηλών, στη βελτίωση των κόκκων α' φάσης και στη μεταφορά του σημείου δημιουργίας ρωγμής από τη περιοχή της συγκόλλησης στο μέταλλο υποστήριξης. Τα δύο τελευταία έλαβαν χώρα και στο τεμάχιο με τη προσθήκη χρωμίου. Η προσθήκη χρωμίου οδήγησε σε ισοαξονικούς κόκκους και οι υπάρχοντες επιμηκυμένοι κόκκοι β' φάσης αφαιρέθηκαν. Επιπλέον και στα δυο δοκίμια η περιοχή που επιδράται από τις υψηλές θερμοκρασίες του μετάλλου (HAZ) έγινε το πιο ευάλωτο σημείο του δοκιμίου, (Zhuo, Yang, Fan, & Lin, 2021).
- Έγινε κατασκευή δοκιμίου από Ti-6Al-4V με PAW κατά την οποία τη συγκόλληση ακολουθούσε προσθήκη ύττριου έτσι ώστε να μειωθούν οι χονδροειδείς β' κόκκοι. Η προσθήκη αυτή βοήθησε στη μείωση των χονδροειδών β' κόκκων αλλά δεν οδήγησε στη δημιουργία ισοαξονικών κόκκων. Μάλιστα βρέθηκε ότι δημιουργούνταν σωματίδια ύττριου με οξυγόνο (Y₂O₃) με αποτέλεσμα να υπάρχει τάση συρρίκνωσης του πορώδους, (Kennedy et al., 2022).
- Δοκίμια παράχθηκαν με WAAM από Ti-6Al-4V έπειτα από μηχανική κατεργασία ώστε να έχουν διαφορετική τραχύτητα επιφάνειας και να βρεθούν διαφορές σε δοκιμή κόπωσης. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν ένα δοκίμιο με λεία επιφάνεια, ένα με κυματοειδή επιφάνεια και ένα με ένα είδος τραπεζοειδούς επιφάνειας. Βρέθηκε η αντοχή σε κόπωση επηρεάζεται άμεσα από το είδος της επιφάνειας αντικειμένων με χαρακτηριστικά όπως αυτά των δοκιμίων, ειδικά η τραχύτητα και η ακτίνα καμπυλότητας της επιφάνειας, (Peng et al., 2022).
- Κατασκευάστηκε δοκίμιο από κράμα τιτανίου με GMAW-CMT ώστε να μελετηθεί η επίδραση του οξυγόνου που βρίσκεται στο χώρο κατά τη δημιουργία του αντικειμένου για να αποφευχθεί η πιθανή ψαθυροποίηση του δοκιμίου. Βρέθηκε ότι κατά τη διάρκεια συγκόλλησης η συγκέντρωση του οξυγόνου φτάνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο και επηρεάζεται από την αύξηση της θερμοκρασίας του δοκιμίου. Οπτικά οι διαφοροποιήσεις ήταν στο χρώμα (μεταλλικό ασημί, μπλε-βιολετί, ελαφρύ μπλε σε γκρι ματ) καθώς και στο πάχος του στρώματος οξειδίου

το οποίο αυξανόταν αναλογικά με το ύψος της κατασκευής. Επίσης εντοπίστηκε ότι η συγκέντρωση το οξυγόνου στα τελικά δοκίμια ήταν αυξημένη σε σχέση με τη συγκέντρωση του οξυγόνου στο καλώδιο παροχής, είτε στο θάλαμο υπήρχε υψηλή συγκέντρωση(6000ppm) είτε χαμηλή (2000ppm). Επιπλέον η υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου βοήθησε στην αύξηση της σκληρότητας κατά τον κάθετο άξονα μόνο, με τους οριζόντιους άξονες να μένουν ανεπηρέαστοι από τη συγκέντρωση οξυγόνου στο θάλαμο. Τέλος μετρήθηκε ότι για υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου θαλάμου η αντοχή διαρροής και αντοχή εφελκυσμού αυξήθηκαν στα 863 MPA και 917 MPA αντίστοιχα, (Halisch et al., 2023).

- Σε δοκίμιο από τιτάνιο TC11 που κατασκευάστηκε με GTAW έγινε μελέτη για την εύρεση μεθόδου που θα βελτιώνει τη μετάβαση από επιμηκνυμένους σε ισοαξονικούς β' κόκκους (CET). Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρεις μέθοδοι. Η πρώτη περιλαμβάνει τόξο υψηλής παλμικής συχνότητας(17.5 kHz) και ταυτόχρονη εισαγωγή σωματιδίων βορίου (HP-S method). Η δεύτερη εισήγαγε υπερηχητικά κύματα στη περιοχή συγκολλήσεως και ταυτόχρονη προσθήκη σωματιδίων βορίου (UV-S method). Στη τρίτη μέθοδο χρησιμοποιήθηκε τόξο χαμηλής παλμικής συχνότητας (5kHz) και προστίθενται ταυτόχρονα σωματίδια βορίου (LP-S method). Το βόριο χρησιμοποιήθηκε καθώς πολύ μεγάλο συντελεστή περιορισμού μεγέθυνσης κόκκων (Q factor). Η HP-S και η UV-S μέθοδοι δεν είχαν εμφανή διαφορά στη μορφολογία των β' κόκκων. Από την άλλη η LP-S μέθοδος είχε δραστικά αποτελέσματα με θετική κατάληξη. Συγκεκριμένα κατά τη στερεοποίηση βρέθηκε ότι σημαντικό ρόλο παίζουν η υπερψύξη από τη προσθήκη του βορίου, η παλμική συχνότητα του τόξου και η ταχύτητα της συγκόλλησης, (Zhuo, Yang, Fan, Lin, et al., 2021).
- Διεξήχθη πείραμα κατά το οποίο μελετήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας ράουλου και της μεταβολής του φορτίου που αυτό ασκεί σε δοκίμιο Ti-6Al-4V. Τα τρία διαφορετικά ράουλα που χρησιμοποιήθηκαν διέθεταν εξωτερική καμπυλότητα ακτίνας 1mm,2mm και 3mm. Επιπλέον κάθε ράουλο δοκιμάστηκε με φορτίο 60KN και 90 KN. Βρέθηκε ότι και τα έξι δοκίμια είχαν βελτιωμένη μικροδομή σε σχέση με το δοκίμιο που δεν εφαρμόστηκε κανένα ράουλο. Έπειτα το μεγαλύτερο φορτίο είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη βελτίωση ενώ η μεγαλύτερη ακτίνα του ράουλου είχε μεγαλύτερη περιοχή κρυσταλλοποίησης. Επιπλέον μέσω EBSD παρατηρήθηκε ότι η πλειοψηφία των επιμηκνυμένων κόκκων δημιουργείται στις ακμές της επιφάνειας που εφαρμόζει το ράουλο και μέχρι και 3 χιλιοστά κάτω από το επίπεδο που εφαρμόζεται το ράουλο, (McAndrew et al., 2018).



Εικόνα 3-3. Διαφορετική γεωμετρία ράουλο όπου a) με εσωτερική αύλακα και b) με εξωτερική καμπολότητα.(McAndrew et al., 2018)

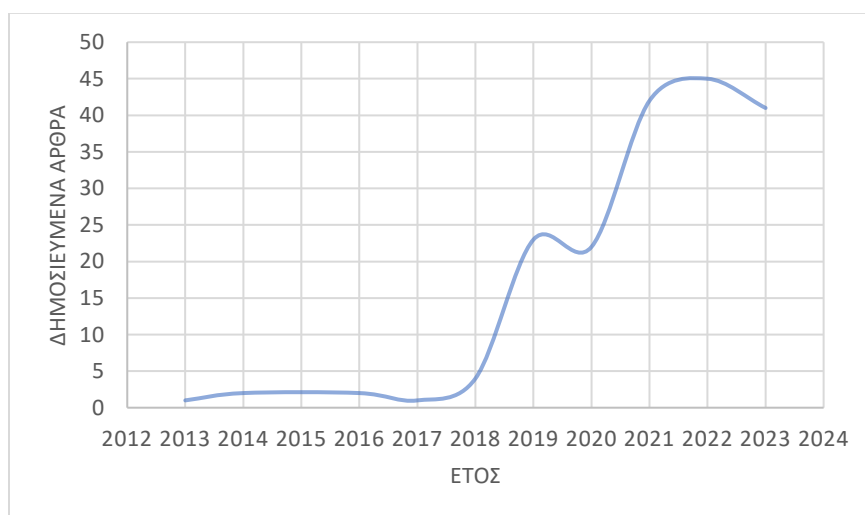
- Σε δοκίμιο κατασκευασμένο από Ti17 μέσω GTAW-TIG δοκιμάστηκε θερμική κατεργασία (600 βαθμοί για 4 ώρες) και επιφανειακή κατεργασία LSP ώστε να βελτιωθεί η μικροδομή και να αφαιρεθεί η παραμένουσα τάση. Βρέθηκε ότι η μικροσκληρότητα βελτιώνεται κατά 50 HV και ότι μετά τη θερμική κατεργασία η ομογενής παραμένουσα εφελκιστική τάση σχεδόν εξαλείφεται ενώ μετά το πέρας και των δύο κατεργασιών αυτό μετατρέπεται σε συμποκνωμένη παραμένουσα τάση με μέγιστη τιμή 740 MPa, (Chi et al., 2020).
- Έγινε κατασκευή δοκιμών με GTAW από TZM κράμα στα οποία μεταβαλλόταν η θερμική ενέργεια του τόξου μέσω μεταβολής του έντασης ώστε να διαπιστωθούν οι αλλαγές και οι σχέσεις στο πορώδες, τη μικροδομή, τις μηχανικές ιδιότητες και των ελαττωμάτων. Συγκεκριμένα έγιναν δοκιμές με 180Amp, 200Amp, 220Amp και 240Amp. Σε κάθε δοκίμιο υπήρχαν πόροι διαφόρων μεγεθών, με το μεγαλύτερο ποσοστιαία πορώδες να βρίσκεται στο δοκίμιο των 240A και με το μικρότερο σε αυτό με τα 200Amp. Η μικροσκληρότητα βρέθηκε σε κάθε δείγμα να είναι μικρότερη από ενός παρόμοιου δοκιμίου κατασκευασμένο μέσω μεταλλουργίας σκόνης. Το υψηλότερο σημείο UTS βρέθηκε στο δείγμα των 200A, ενώ σε κάθε δείγμα η επιμήκυνση ήταν <2%. Κάθε δοκίμιο είχε ψαθυρή μικροδομή με ρωγμές να περνάνε μέσα από κόκκους και όχι στα όρια αυτών ενώ βρέθηκαν και ακαθαρσίες οξυγόνου σε κάθε δοκίμιο βοηθώντας έτσι στην εξασθένηση των ορίων των κόκκων, (Islam et al., 2023).
- Δοκίμια από Ti64 κατασκευάστηκαν με GTAW με τη προσθήκη σωματιδίων Τιτανίου-Νικελίου (TiN) και Ζιρκονίου-Νικελίου (ZrN) αποσκοπώντας στη βελτίωση της μικροδομής και συγκεκριμένα τη μεταποίηση των β' κόκκων από μεγάλους επιμηκωμένους σε μικρούς ισοαξονικούς (CET). Αναλυτικότερα η προσθήκη της κάθε ένωσης έγινε ανά στρώση με τη βοήθεια υγρής πολυουρεθάνης για να μπορέσει να εφαρμοστεί ως επιφανειακή βαφή. Τα σωματίδια TiN αποδείχθηκαν πολύ αποτελεσματικά καθώς υπήρξε σμίκρυνση των κόκκων από τάξη εκατοστού σε μέση τάξη 300μm και αντικατάσταση των χονδροειδών κόκκων

- σε στήλες με τυχαίους ισοαξονικούς κόκκους. Σε αντίθεση τα σωματίδια ZrN, παρόλο που έδειξαν θετικές μεταβολές σε σχέση με το απλό δοκίμιο, η επίδραση ήταν μικρή. Επίσης προτάθηκε ότι η μέθοδος εισαγωγής των σωματιδίων βελτίωσης της μικροδομής χρειάζεται σημαντική βελτίωση, (Kennedy et al., 2021).
- Δοκίμιο παραγμένο από Ti64 με GTAW χρησιμοποιήθηκε για να μελετηθεί η χρήση της τεχνολογίας RRI ως μέσο μετρήσεων μήκους, πλάτους, ύψους και εμβαδού κατά τη διάρκεια της κατασκευής τεμαχίων με . Τα πλεονεκτήματα που εντοπίστηκαν είναι ότι:
 - Το εργαλείο μέτρησης RRI είναι ανεξάρτητο της κίνησης του εργαλείου κίνησης συγκόλλησης.
 - Υπήρξε αξιοπιστία μετρήσεων ($\pm 0.05\text{mm}$) για το υλικό Ti64 το οποίο διαθέτει υψηλή ανακλαστικότητα.
 - Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αρκετά σημεία μέτρησης ώστε να παραχθεί ολόκληρο ως 3D αντικείμενο το υπό κατασκευή δείγμα και ταυτόχρονα αυξάνουν την ακρίβεια. (Hallam et al., 2022)
 - Δημιουργήθηκαν δοκίμια από καθαρό τιτάνιο εμπορίου με SLM, LENS και WAAM. Το δοκίμιο από τη SLM είχε διαφορετική α' μικροδομή από τα δοκίμια των LENS, WAAM. Το υψηλότερο LED βρέθηκε στη WAAM και το χαμηλότερο στη SLM. Επίσης το δοκίμιο από WAAM είχε την υψηλότερη ολκιμότητα, ενώ την υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού και την υψηλότερη αντοχή διαρροής είχε το SLM. Και τα 3 δοκίμια είχαν παρόμοιες, αν όχι βελτιωμένες, μηχανικές ιδιότητες με αντίστοιχα χυτά δοκίμια. Επιπλέον το SLM παρουσίασε και την καλύτερη αντίσταση στη φθορά. Τέλος προτείνεται ότι το SLM παρουσιάζει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα WAAM και LENS σε γενικούς όρους, (Attar et al., 2019).
 - Δοκίμια από αλουμινίδιο τιτανίου κατασκευάστηκαν από WAAM-GTAW με δύο καλώδια υλικών που παρέχονταν ταυτόχρονα (ένα με καθαρό αλουμίνιο και ένα με καθαρό τιτάνιο). Σκοπός ήταν η πειραματική εφαρμογή μέτρησης παραμένουσας τάσης με διάχυση ηλεκτρονίων. Βρέθηκε ότι σε δοκίμιο με 2 ώρες στους 1150 η παραμένουσα τάση στο διαμήκη άξονα μειώνεται σε σημαντικό βαθμό. Επιπλέον παρόλο που δεν παρατηρήθηκε αλλαγή φάσης στη $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ φάση του δοκίμιο, η παραμένουσα τάση μειώθηκε και στους τρεις άξονες, (Shen et al., 2022).
 - Κατασκευάστηκαν δοκίμια από καθαρό τιτάνιο με WAAM για τα οποία αποδείχθηκε ότι :
 - Με χαμηλή υπέρτηξη και αργή στερεοποίηση, η ομογενής πυρονοποίηση θα δώσει χονδροειδείς κόκκους τιτανίου 1mm με τυχαία κρυσταλλική κατανομή δίνοντας έτσι σκληρότητα και στους τρεις άξονες.

- Δημιουργείται υψηλή αντιδιαβρωτική προστασία εξαιτίας της ομογενούς δομής η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από παρόμοιο δοκίμια τιτανίου κατασκευασμένα με SLM.
- Η μικροδομή, οι μηχανικές και οι ηλεκτροχημικές ιδιότητες είναι ίδιας τάξης με αυτές του χυτού τιτανίου. (Palacios et al., 2023)

3.3. Κράματα Νικελίου

Το νικέλιο θεωρείται ένα σπάνιο και ακριβό υλικό, λόγω των ιδιοτήτων του, που μπορεί να συναντήσει κανείς μόνο σε ειδικές και κοστοβόρες εφαρμογές, συνήθως αεροναυπηγικής, αεροδιαστημικής και αυτοκινητοβιομηχανίας. Για το λόγο αυτό το ποσοστό κάλυψης του σε μια τεχνολογία που προσαρμόζεται για ειδικές κατασκευές με ακριβά υλικά θα περίμενε κανείς ότι είναι μεγαλύτερο από 7%(περίπου) της συνολικής βιβλιογραφίας.

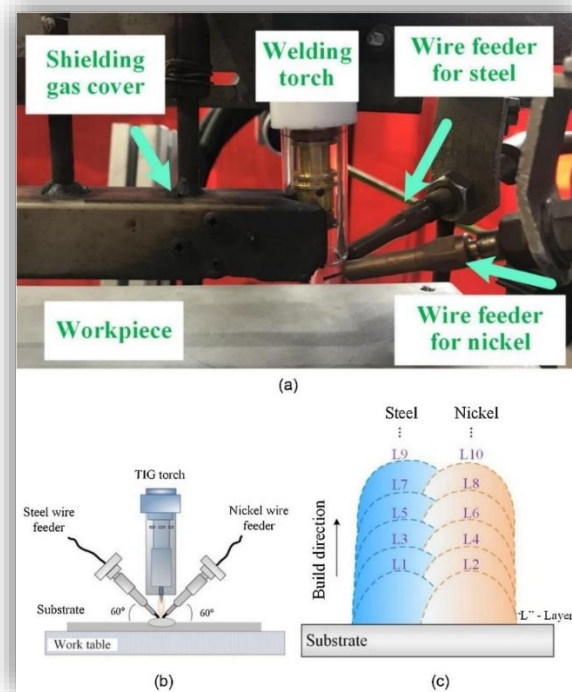


Διάγραμμα 5. Δημοσιευμένο έργο ανά έτος με λέξεις-κλειδί "Wire Arc Additive Manufacturing" και "Nickel".

- Δοκίμια κατασκευάστηκαν από κράμα νικελίου Inconel625 μέσω τεχνολογίας GMAW-CMT. Η αύξηση της ταχύτητας του εργαλείου βελτίωσε τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού αντικειμένου. Από τη βάση του δοκιμίου προς τη κορυφή η μικροσκληρότητα άρχισε να αυξάνεται, έπειτα να μειώνεται και στα τελευταία επίπεδα να αυξάνεται πάλι. Παράλληλα όσο αυξανόταν το ύψος, η μικροδομή είχε μορφή δενδρίτη με δευτερεύοντα κλαδιά δενδριτών, ενώ τα τελευταία στρώματα παρουσίασαν μορφή ισοαξονικών κρυστάλλων. Τέλος οι ιδιότητες των δοκιμίων, με εξαίρεση το σημείο UTS, βρέθηκαν βελτιωμένες σε σχέση με αντίστοιχα δοκίμια κατασκευασμένα μέσω χύτευσης, (Yangfan et al., 2019).
- Έρευνα έδειξε ότι τα κράματα νικελίου Inconel 625, Inconel 718, WASPALOY, Rene-41 και ATI-718 Plus όταν κατασκευάστηκαν επιτυχώς με διάφορες τεχνικές

WAAM διέθεταν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με αντίστοιχα κατασκευασμένα με συμβατικές μεθόδους, (Dhinakaran et al., 2020).

- Σε δοκίμιο Νικελίου-Τιτανίου κατασκευασμένο με GTAW βρέθηκε ότι στα πρώτα επίπεδα οι κόκκοι είναι επιμηκυσμένοι ενώ στα υψηλότερα οι κόκκοι ήταν ισοαξονικοί. Επιπλέον παρατηρήθηκε υπερελαστική συμπεριφορά σε συνθήκες εφελκυσμού και σχεδόν πλήρως ωστενιτική μικροδομή σε θερμοκρασία δωματίου, (Zeng et al., 2020).
- Δοκίμιο κατασκευασμένο μέσω GTAW όπου η μια πλευρά είναι από νικέλιο και η άλλη από χάλυβα χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή δειγμάτων. Τα δείγματα δοκιμάστηκαν και βρέθηκαν ότι ο δεσμός των δύο μεταλλικών υλικών ήταν επιτυχής. Αποτέλεσμα αυτού του επιτυχούς δεσμού ήταν η εξαιρετική αντοχή σε εφελκυσμό (634MPa έναντι 537 MPa για χάλυβα και 455MPa για νικέλιο). Επιπλέον εξαιτίας του γεγονότος ότι όσο χιζόταν το τοίχος η θερμότητα αυξανόταν, μεταβλήθηκε ο ρυθμός ψύξης με συνέπεια τη καθίζηση καρβιδίων που βελτίωσαν τη σκληρότητα σε όλους τους άξονες. Βέβαια το κομμάτι του νικελίου ήταν το πρώτο το οποίο αστόχησε στις δοκιμές καθώς διέθετε πιο μαλακή μικροδομή, (B. Wu et al., 2020).



Εικόνα 3-4. Κατασκευή με δύο καλώδια παροχής υλικού, όπου α) σχηματική απεικόνιση εξοπλισμού, β) σχηματική απεικόνιση κατασκευής και γ) θεωρητική τομή του τεμαχίου.(B. Wu et al., 2020)

- Μέσω PAW κατασκευάστηκε τεμάχιο από ERNiFeCr-2 ώστε να μελετηθούν οι πιθανές αστοχίες που μπορούν να προκύψουν υπό διάφορες συνθήκες. Το δείγμα αναλύθηκε και βρέθηκε ότι μπορούν να δημιουργηθούν ρωγμές κάτω από

ποικιλία συνθηκών με μεγάλο ρόλο να παίζει και η διαδρομή που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του τεμαχίου. Αυτές οι ρωγμές βρίσκονται στο κέντρο του σημείου συγκόλλησης και για να μελετηθούν χρησιμοποιήθηκαν μη καταστρεπτικοί μέθοδοι ανάλυσης. Η αντοχή βρέθηκε να είναι παρόμοια με αυτή του αντίστοιχου χυτού όταν το φορτίο ήταν κάθετα στις ατέλειες. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή το φορτίο κατά τη δοκιμή είχε διεύθυνση παράλληλη με των ρωγμών, η αντοχή ήταν υποδιπλάσια του χυτού. Για αυτό η αντοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως ανισοτροπική, (Seow et al., 2020).

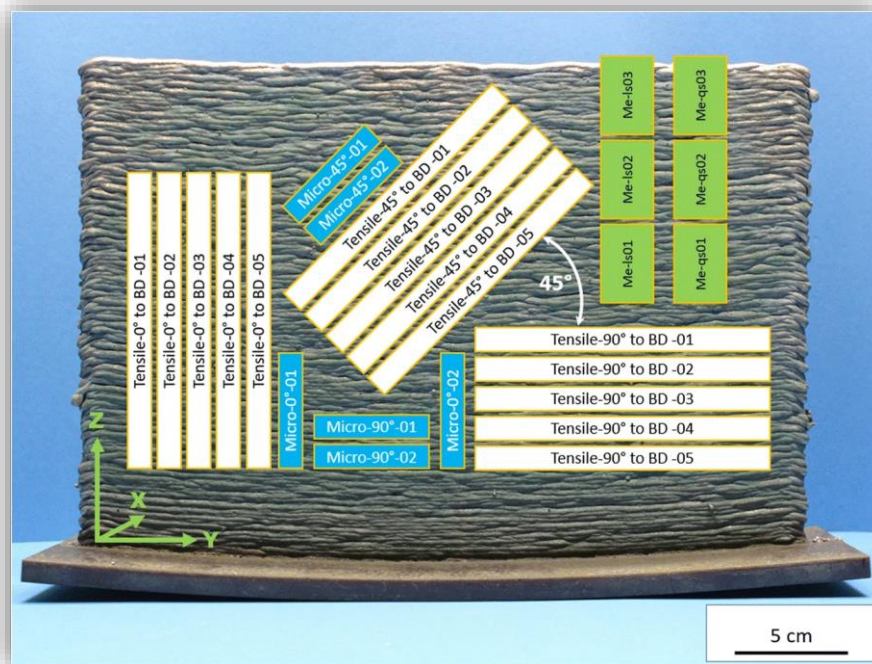
- Κράμα Νικελίου-Τιτανίου δημιουργήθηκε μέσω δύο παροχών υλικού και κατασκευάστηκε δοκίμιο μέσω GTAW ώστε να εξακριβωθούν η κρυσταλλική δομή/μορφή, ο μετασχηματισμός των φάσεων και οι μηχανικές ιδιότητες σε διάφορες περιπτώσεις θερμοκρασίας βάσης. Βρέθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας της βάσης από 150 μέχρι 350 βαθμούς οδήγησε σε μεγέθυνση των B2 κόκκων και των ορίων κόκκων μεγάλης γωνίας (HAGB). Επίσης εντοπίστηκαν ανομοιογενή σωματίδια Ni_4Ti_3 τα οποία γινόντουσαν πιο χονδροειδή. Επιπλέον η αντοχή διαρροής και εφελκυσμού μειώθηκε κατά σχεδόν 20% και 10% αντίστοιχα. Τέλος το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε κόπωση μειώθηκε δραστικά. Συμπερασματικά η αύξηση της θερμοκρασίας του “κρεβατιού” επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα, (J. Wang et al., 2021).
- Δοκίμια κατασκευασμένο από Ni690 με GTAW σε τρεις διαφορετικές εκδοχές (μία χωρίς προσθήκη σωματιδίων TiC, μία με 0.5% κ.β. TiC και μία με 1% κ.β. TiC) ώστε να μελετηθούν η μικροδομή, οι μηχανικές ιδιότητες και η αντίσταση στη διάβρωση. Για το δείγμα με 1% TiC βρέθηκε ότι η προσθήκη TiC μείωσε το μήκος των γ' κόκκων κατά 65% και η μικροδομή από επιμηκυσμένοι δενδρίτες έγιναν ισοαξονικοί δενδρίτες. Η διαφορά μεταξύ του κάθετου και του οριζόντιου διαχωρισμού των μηχανικών ιδιοτήτων που διαθέτει το Ni690 απαλείφθηκε εξαιτίας της ετερογενούς πυρονοποίησης. Επιπλέον η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού αυξήθηκε κατά 10% σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς TiC. Επιπρόσθετα μέσω EIS και XPS διαπιστώθηκε η αυξημένη αντίσταση στη διάβρωση, (Jiang et al., 2022).
- Σύστημα GTAW κατασκεύασε δοκίμιο από ErNiCrMo-4 με συνεχές ρεύμα και με εναλλασσόμενο ρεύμα. Βρέθηκε ότι το δείγμα με εναλλασσόμενο ρεύμα είχε μικρό μέσο μέγεθος κόκκου και συνεπώς υψηλότερη αντοχή, σκληρότητα και ολκιμότητα, (Barath Kumar & Manikandan, 2023).
- Παράχθηκαν με GTAW δύο δοκίμια όπου και τα δύο διέθεταν δύο υλικά με τη μόνη διαφορά να είναι ότι στο ένα δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε PSC. Αποδείχθηκε ότι το PSC αύξησε την αντίσταση στη διάβρωση και είχε 9% μεγαλύτερη επιμήκυνση. Επίσης η εξωτερική σκληρότητα αυξήθηκε κατά 4%, (Ramar & Kanagasabapathy, 2023).
- Δοκίμιο από Cu-Ni κατασκευάστηκε μέσω MIG για να συγκριθεί με αντίστοιχο δοκίμιο ίδιας υλικής σύστασης κατασκευασμένο με συμβατικές μεθόδους.

Μετρήθηκε ότι το WAAM δοκίμιο δε διαθέτει σημαντικές ατέλειες. Στη μικροδομή παρατηρήθηκαν στο μεγαλύτερο φάσμα δενδρίτες και TiO_2 . Επιπλέον βρέθηκε ότι το δείγμα διαθέτει υψηλή ηλεκτρική και διαβρωτική αντίσταση. Συνεπώς το δείγμα ήταν ανώτερο του αντίστοιχου κατασκευασμένου με συμβατικές μεθόδους, (Guo et al., 2021).

- Έγινε μελέτη και παρουσιάστηκε ότι το κόστος των διαφορετικών κραμάτων νικελίου είναι λιγότερο όταν έχει μορφή καλωδίου παροχής από ότι σε σκόνη. Επιπρόσθετα η WAAM χρησιμοποιεί περισσότερη θερμική ενέργεια δημιουργώντας άνισα χαρακτηριστικά στο υπό κατασκευή τεμάχιο, έτσι τεχνικές όπως CMT-MIG και CMT-TIG που βοηθάνε στη μείωση της εισαγόμενης θερμότητας είναι ιδανικότερες. Επιπλέον με την προσθήκη θερμικής κατεργασίας μετά την κατασκευή τα προϊόντα της WAAM έχουν σημαντικά βελτιωμένη μικροδομή, μηχανικές ιδιότητες, σκληρότητα και αντοχή σε κόπωση. Βέβαια έχουν υπάρξει τεμάχια που είτε με είτε χωρίς θερμική κατεργασία παρουσίασαν μειωμένη αντίσταση στη διάβρωση, (Bhuvanesh Kumar et al., 2023).
- Έγινε κατασκευή δοκιμίου από C-22 με GTAW ώστε να γίνει πειραματικός έλεγχος διαφόρων συνθηκών με μεταβλητές όπως ταχύτητα κίνησης, ταχύτητα συγκόλλησης, συχνότητα παλμών, ρυθμός παροχής καλωδίου, κύκλος εργασίας. Σε επίπεδο μικροδομής, το πάνω μέρος του δοκιμίου αποτελείται από ισοαξονικούς δενδρίτες, το μεσαίο επίπεδο από κυψελωτούς κόκκους και το κάτω μέρος από κόκκους σε διάταξη στηλών. Η δομή είναι ετερογενής εξαιτίας των διαφορετικών διανομών θερμοκρασίας από τις διαφορετικές παραμέτρους. Το μέγεθος των κόκκων στο διαμήκη άξονα μικρότερο κατά 20% από αυτό στο κάθετο άξονα(x-z). Το γεγονός ότι η πλειοψηφία των εναλλαγών κατευθύνσεων των κόκκων αποτελείται από όρια κόκκων υψηλής γωνίας βοήθησε στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Επιπλέον μετρήθηκε ότι στο επίπεδο μεταξύ των δενδριτών υπάρχει μικρότερη συγκέντρωση Νικελίου και υψηλότερη Μολυβδαίνιου και Βολφραμίου από ότι στις δενδριτικές περιοχές, (Madesh & Kumar, 2023).
- Κατασκευάστηκε δοκίμιο από νικέλιο C-276 με GTAW για λήψη δειγμάτων με διαμήκης, εγκάρσια και διαγώνια διεύθυνση. Στο δοκίμιο βρέθηκε ότι τα πάνω στρώματα είχαν μικροδομή ισοαξονικών σταυρών, στα μεσαία κυψελωτή μικροδομή και στα κάτω στρώματα μορφή στηλών. Στη διεύθυνση κατασκευής τα μεγάλης γωνίας όρια κόκκων(HAGB) ήταν 43% και τα μικρής γωνίας όρια κόκκων(LAGB) 57%. Αντίθετα στην διεύθυνση συγκόλλησης τα μεγάλης γωνίας όρια κόκκων ήταν 52% και τα μικρής γωνίας όρια κόκκων 48%. Επιπλέον στην διεύθυνση συγκολλησεως παρατηρήθηκε μεγαλύτερη παραμένουσα τάση εφελκυσμού και μικρότερη παραμένουσα τάση θλίψης από ότι στη διεύθυνση κατασκευής. Τέλος η υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού μετρήθηκε στον οριζόντιο άξονα 745 ± 6.2 MPa, (Kumar & Manikandan, 2022).
- Κατασκευάστηκε με GMAW μια σειρά δοκιμίων τα οποία υπέστησαν επαναφορά για 30-60-120 λεπτά στους 980 και μετά βαφή σε νερό. Παρατηρήθηκε ότι η μορφή

της μικροδομής δεν αλλάζει σημαντικά με το χρόνο στην θερμοκρασία επαναφοράς. Όμως αυτό που αλλάζει είναι το μέγεθος των MC Nb και το ποσοστό της δ' φάσης, τα οποία αυξάνονται αναλογικά με το χρόνο επαναφοράς. Επιπλέον στα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμική καταργασία δεν βρέθηκε η διμεταλλική φάση που εντοπίζεται συνήθως, (Tanvir et al., 2019).

- Δοκίμιο από κράμα νικελίου κατασκευάστηκε από GTAW. Το δοκίμιο βρέθηκε χωρίς ατέλειες και η μικροδομή του αποτελείται από κυψελωτούς, ισοαξονικούς και επιμηκυμένους σε στήλες δενδρίτες στη βάση, τη μέση και το πάνω κομμάτι αντίστοιχα. Λήφθηκαν δείγματα κάθετου και οριζόντιου προσανατολισμού τα οποία δοκιμάστηκαν σε εφελκυσμό και βρέθηκε ότι το δείγμα με οριζόντιο προσανατολισμό είχε καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, εκτός της επιμήκυνσης. Κατά τις δοκιμές επίσης παρατηρήθηκε ότι η ολκιμότητα ήταν σε ικανοποιητικά επίπεδα. Η σκληρότητα μετρήθηκε μεταξύ 244HV και 286HV. Τέλος βρέθηκε ότι το δοκίμιο έχει εξαιρετικές ηλεκτροχημικές ιδιότητες, (Avinash et al., 2023).
- Μέσω CMT-GMAW φτιάχτηκε δοκίμιο από κράμα νικελίου παρόμοιο του Inconel 617. Αποδείχτηκε ότι κάθετα και οριζόντια δείγματα από το δοκίμιο είχαν συγκρίσιμες μηχανικές ιδιότητες. Μεγαλύτερη αντοχή παρουσίασε δείγμα που βρισκόταν σε γωνία 45 μοιρών σε σχέση με τον κάθε άξονα, παρόλο που είχε ταυτόχρονη μείωση στην επιμήκυνση και τη λιγότερη σκληρότητα. Επιπλέον αποδείχθηκε η σχέση μεταξύ διεύθυνσης και μηχανικών ιδιοτήτων, καθιστώντας την WAAM μέθοδο εξαρτημένη από τη διεύθυνση κατασκευής, (Hassel & Carstensen, n.d.).



Εικόνα 3-5. Σχηματική απεικόνιση από τη λήψη δειγμάτων από δοκίμιο κατασκευασμένο με WAAM. Παρατηρείται και παραμόρφωση βάσης λόγω των παραμένουσων τάσεων. (Hassel & Carstensen, n.d.)

4. Τομείς Εφαρμογής – Παραδείγματα

Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, όσο αφορά τα υλικά, δύο στόχοι είναι πάντα στο στόχαστρο. Πρώτον η ελαχιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων υλικών και η χρήση ελαφρύτερων υλικών, πάντα με γνώμονα την αξιοπιστία, την ασφάλεια και το κόστος. Για να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι, οι σχεδιαστές πρέπει να έχουν όσο μεγαλύτερη ευελιξία γίνεται στη γεωμετρία των αντικειμένων. Για αυτό το λόγο έχει καθιερωθεί η χρήση των προσθετικών τεχνολογιών. Στον πίνακα που ακολουθεί βρίσκονται κάποια κράματα μετάλλων που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική βιομηχανία και μπορούν να κατασκευαστούν με WAAM, (Pant et al., 2023).

ΥΛΙΚΟ	ΚΡΑΜΑ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ
Τιτάνιο	Καθαρό Τιτάνιο Ti-5Al-2.5Sn	Δομικά στοιχεία τουρμπινών, βραχίονες, κέλυφος αεροσκάφους
	IMI685 IMI829 Ti-1100	Κελύφη αεροσκάφους, βραχίονες, κελύφη στροβιλομηχανών, πτερύγια συμπίεστών
	Ti-6Al-4V	Πτερύγια στροβίλων, πλαίσια παραθύρων, συστήματα καυσαερίων, συστήματα προσγείωσης, μέρη υδραυλικού εξοπλισμού, μέρη πλαισίου, προστατευτικά εξαρτήματα, αντικατάσταση ειδών από χάλυβα για μείωση βάρους
	Ti-10V-2Fe-3Al	Επίπεδα επιφάνειες, πατώματα αεροσκάφους, βραχίονες, ελατήρια, αγωγοί, πλαίσια πτερυγίων,
	Ti-22V-4Al	Εναλλάκτες θερμότητας, μη δομικά μέρη
	AlMg5Mn	Δομικά στοιχεία, ελαφροί βραχίονες
Αλουμίνιο	5A06 5356	Κυρτά μέρη πλαισίου Βραχίονες, Συγκολλημένες συνδέσεις
	7A55-Sc 2219	Βραχίονες, Κομμάτια πλαισίου Βραχίονες, Κομμάτια πλαισίου
	7075	Μεγάλα κομμάτια πλαισίου

Νικέλιο

Inconel 718	Κρυογενικές δεξαμενές, καβούκια, εξαρτήματα ακραίων θερμοκρασιών
Inconel 625	Σωλήνες, αντλίες, βαλβίδες, ακροφύσια, πτερύγια στροβίλων, συστήματα καυσαερίων
Invar 36	Εναλλάκτες θερμότητας, βραχιόνες αισθητήρων, Συστήματα οργάνων, εξαρτήματα ευαίσθητα στη θερμότητα

Πίνακας 2. Εφαρμογές υλικών στον τομέα της αεροδιαστημικής. (Pant et al., 2023)

Η τεχνολογία των προσθετικών κατασκευών συγκολλήσεων τόξου έχει βρει θέση και στις υπόλοιπες βιομηχανίες ανάλογα με τα υλικά που η καθεμία χρειάζεται.

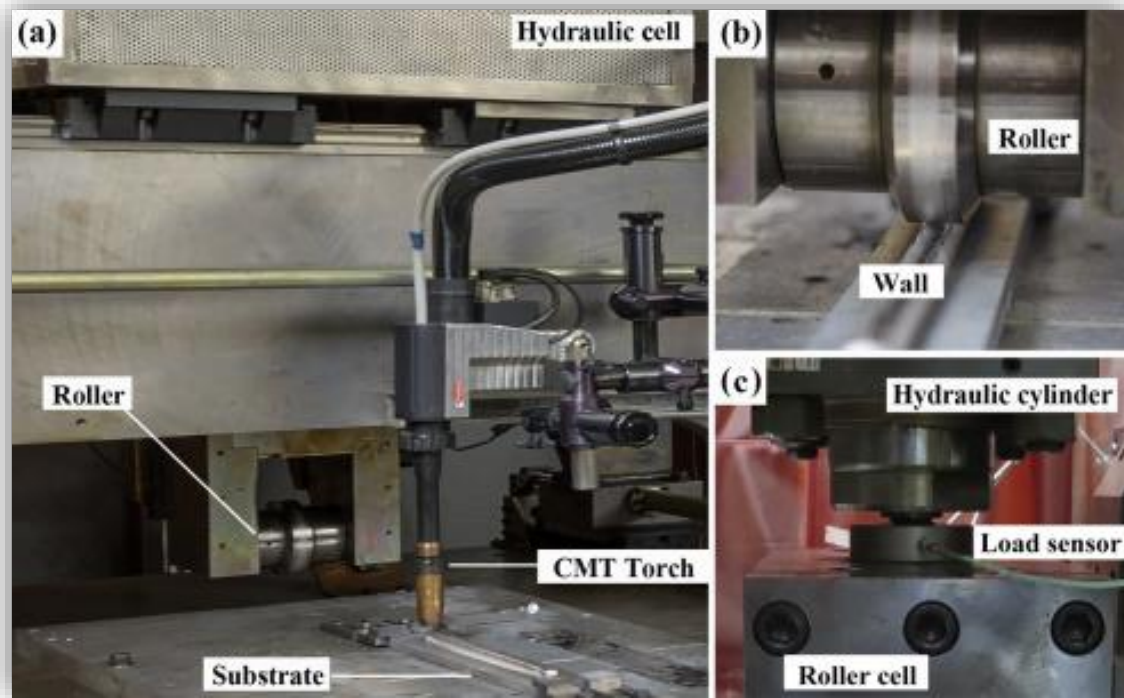
Εφαρμογές	Τιτάνιο	Αλουμίνιο	Χάλυβας	Νικέλιο	Διμεταλλικά
Αεροδιαστημική	√	√	-	√	√
Αυτοκινητοβιομηχανία	-	√	√	-	√
Ναυπηγική	√	-	√	-	-
Αντιδιαβρωτικά	√	-	-	√	√
Πυρίμαχα	√	-	-	√	√
Εργαλεία και καλούπια	-	-	√	-	-

Πίνακας 3. Υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στη WAAM ανά κλάδο/χρήση. (B. Wu et al., 2018)

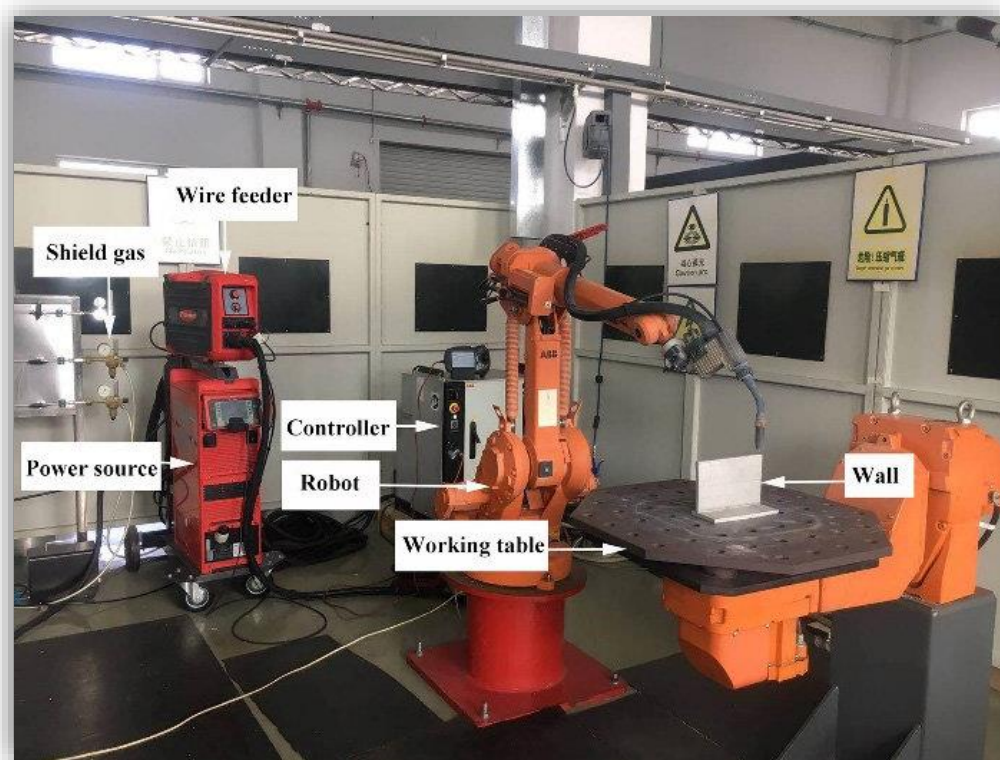
Παραδείγματα διατάξεων και κατασκευών WAAM:



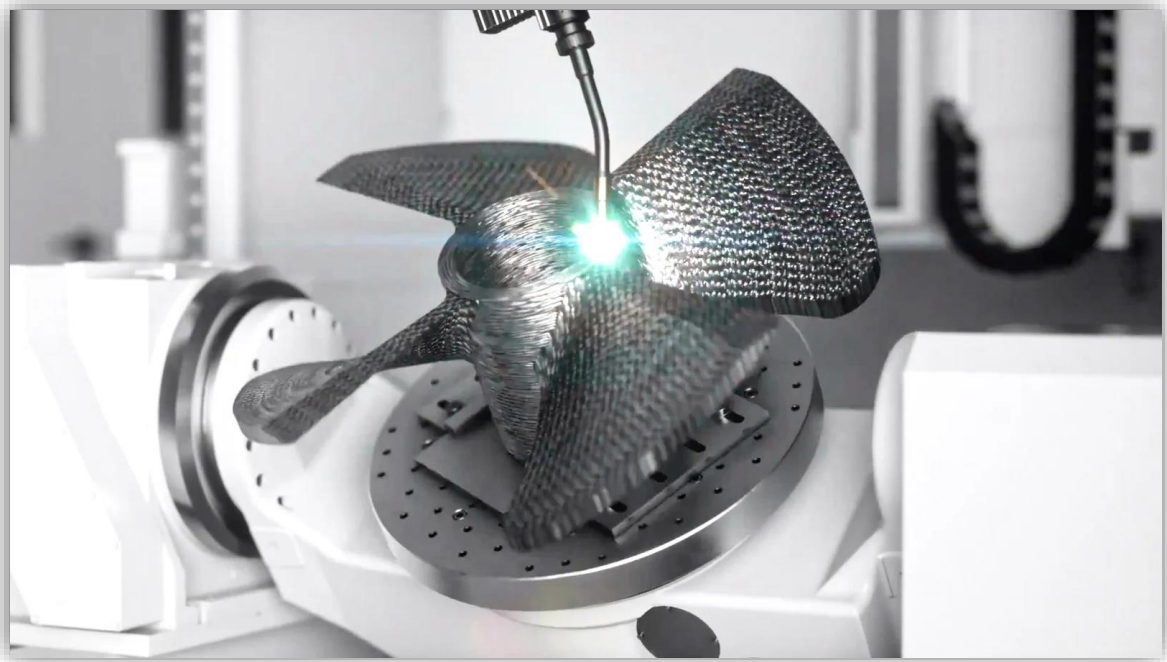
Εικόνα 4-1. Διάταξη WAAM με ρομποτικό βραχίονα και βάση πολλών αξόνων από τη YASKAWA. (YASKAWA, n.d.)



Εικόνα 4-2. Διάταξη WAAM με βάση χωρίς κίνηση και δυνατότητα εφαρμογής πίεσης μέσω ρόλου. (Z. Wang & Zhang, 2021)



Εικόνα 4-3. Επεξήγηση διάταξης WAAM με ρομποτικό βραχίονα και πολυ-αξονική βάση (Ren et al., 2020).



Εικόνα 4-4. Προπέλα κατά τη κατασκευή της με WAAM.(GEFERTEC, n.d.)



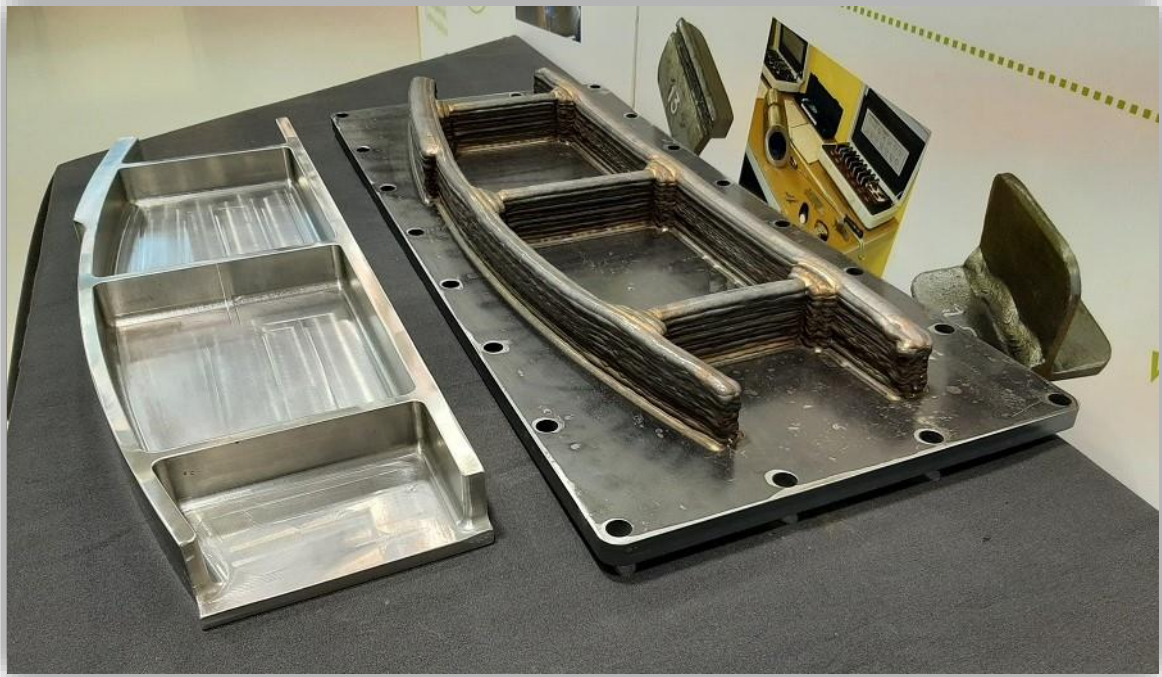
Εικόνα 4-5. Προπέλα κατασκευασμένη με WAAM, κατά την τελική επιφανειακή επεξεργασία.(Huntingdon Fusion, n.d.)



Εικόνα 4-6. Πτερωτή κατασκευασμένη με WAAM κατά την τελική επιφανειακή επεξεργασία. (LASER WELDING SOLUTIONS, n.d.)



Εικόνα 4-7. Πτερωτή υδροστροβίλου Pelton κατά την κατασκευή της με WAAM. (Posch et al., 2014)



Εικόνα 4-8. Κομμάτι πλαισίου αεροναυπηγικής από την ΤΚΝΙΚΑ, πριν και μετά την τελική επιφανειακή κατεργασία.(ΤΚΝΙΚΑ, n.d.)



Εικόνα 4-9. Γέφυρα κατασκευασμένη με WAAM στην Ολλανδία.

5. Σχόλια-Συμπεράσματα

Με το πέρας της έρευνας για την πρόοδο όσο αφορά την χρήση των κραμάτων αλουμινίου, τιτανίου και νικελίου στις συγκολλήσεις τόξου προσθετικής τεχνολογίας μπορούμε να συμπεράσουμε ότι:

- Για ορισμένα προβλήματα που δημιουργούνται εξαιτίας της μεθόδου WAAM έχουν βρεθεί λύσεις που έχουν αποδοτικότητα, ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Άρα μπορούν να θεωρηθούν ορθές (στη πλειοψηφία κατεργασίες μετά την κατασκευή όπως θερμικές κατεργασίες).
- Για άλλα ορισμένα προβλήματα, οι λύσεις που βρέθηκαν διαθέτουν περιθώρια βελτίωσης ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν σε μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών, μιας και η υλοποίησή τους ήταν καθαρά για επιστημονικούς σκοπούς και όχι ως εφαρμογή για βιομηχανική παραγωγή.(πχ εφαρμογή ενώσεων σε μορφή σωματιδίων μεταξύ των στρωμάτων για αποφυγή μικροδομής μεγάλων κόκκων)
- Η τεχνολογία βρίσκεται στα αρχικά στάδια εξέλιξής της, μιας και το δημοσιευμένο υλικό έρευνας αποτελείται από 2,500 (περίπου) άρθρα την ίδια στιγμή που η τεχνολογία των συγκολλήσεων, στην οποία βασίζεται η WAAM, διαθέτει δημοσιευμένο υλικό πάνω από 250,000(περίπου) άρθρα.
- Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι ένα μεγάλο ποσοστό της έρευνας αποτελείται από πειράματα τα οποία βασίζονται σε κατασκευή τεμαχίου γεωμετρίας λεπτού τοίχους από το οποίο γίνεται λήψη δοκιμίων για να διεξαχθούν δοκιμές, με συνέπεια την έλλειψη πειραματικών κατασκευών από τεμάχια με πρακτικές εφαρμογές όπως φαίνεται στις εικόνες της ενότητας 4. Γεγονός που δείχνει πόσο μπορεί να μελετηθεί ο τομέας αυτός.

Οι συγκολλήσεις τόξου προσθετικής τεχνολογίας είναι μία νέα σχετικά τεχνολογία που μπορεί να ανατρέψει τα δεδομένα στην παραγωγή και την επισκευή μεγάλων μεταλλικών αντικειμένων, με την προϋπόθεση να δοθεί η απαραίτητη προσοχή και ο απαιτούμενος χρόνος για να μπορέσει η επιστημονική κοινότητα να μελετήσει όλα τα πιθανά προβλήματα και τις πιθανές παραμέτρους που μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη τεχνολογία αυτή.

6. Βιβλιογραφία

- ASTM International. (2021). *Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary*. ASTM International. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/482823e1-57b2-481f-87e7-11da730ba16f/iso-astm-52900-2021>
- Attar, H., Bermingham, M. J., Ehtemam-Haghighi, S., Dehghan-Manshadi, A., Kent, D., & Dargusch, M. S. (2019). Evaluation of the mechanical and wear properties of titanium produced by three different additive manufacturing methods for biomedical application. *Materials Science and Engineering: A*, 760, 339–345. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.06.024>
- Avinash, B., Subramanian, K. M., & Rajkumar, V. (2023). Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Inconel 617 Superalloy Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(14), 6270–6280. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07571-0>
- Barath Kumar, M. D., & Manikandan, M. (2023). Effect of continuous and pulsed current techniques on wire-arc additive manufacturing of a nickel-based superalloy. *Materials Letters*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134080>
- Barhorst, S., & Cary, H. (1985, October). SYNERGIC PULSED GMAW - IN PERSPECTIVE. *Welding for Challenging Environments*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-031866-0.50006-8>
- Bhuvanesh Kumar, M., Sathiya, P., & Senthil, S. M. (2023). A critical review of wire arc additive manufacturing of nickel-based alloys: principles, process parameters, microstructure, mechanical properties, heat treatment effects, and defects. In *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (Vol. 45, Issue 3). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04077-1>
- Chatham, C. A., Long, T. E., & Williams, C. B. (2019). A review of the process physics and material screening methods for polymer powder bed fusion additive manufacturing. In *Progress in Polymer Science* (Vol. 93, pp. 68–95). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.03.003>
- Chaudhary, R., Fabbri, P., Leoni, E., Mazzanti, F., Akbari, R., & Antonini, C. (2023). Additive manufacturing by digital light processing: a review. In *Progress in Additive Manufacturing* (Vol. 8, Issue 2, pp. 331–351). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00336-0>
- Chi, J., Cai, Z., Wan, Z., Zhang, H., Chen, Z., Li, L., Li, Y., Peng, P., & Guo, W. (2020). Effects of heat treatment combined with laser shock peening on wire and arc additive manufactured Ti17 titanium alloy: Microstructures, residual stress and mechanical

properties. *Surface and Coatings Technology*, 396.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125908>

Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. In *Additive Manufacturing* (Vol. 22, pp. 672–686). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>

Dhinakaran, V., Ajith, J., Fathima Yasin Fahmidha, A., Jagadeesha, T., Sathish, T., & Stalin, B. (2020). Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process of nickel based superalloys-A review. *Materials Today: Proceedings*, 21, 920–925.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.159>

Donoghue, J., Antonysamy, A. A., Martina, F., Colegrove, P. A., Williams, S. W., & Prangnell, P. B. (2016). The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V. *Materials Characterization*, 114, 103–114.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.02.001>

Drezet, J. M., Pellerin, S., Bezençon, C., & Mokadem, S. (2004). Modelling the Marangoni convection in laser heat treatment. *Journal De Physique. IV: JP*, 120, 299–306.
<https://doi.org/10.1051/jp4:2004120034>

Ersoy, K., & Çelik, B. B. (n.d.). *Utilization of Additive Manufacturing to Produce Tools*.
www.intechopen.com

Gao, Y., Wu, C., Peng, K., Song, X., Fu, Y., Chen, Q., Zhang, M., Wang, G., & Liu, J. (2021). Towards superior fatigue crack growth resistance of TC4-DT alloy by in-situ rolled wire-arc additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 1395–1407. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.152>

GEFERTEC. (n.d.). *3DMP process - The industrial WAAM solution*. Retrieved October 4, 2023, from <https://www.gefertec.de/en/3dmp-process/#waam-technology>

Gu, J., Ding, J., Williams, S. W., Gu, H., Bai, J., Zhai, Y., & Ma, P. (2016). The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 651, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.101>

Gu, J., Ding, J., Williams, S. W., Gu, H., Ma, P., & Zhai, Y. (2016). The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 230, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.006>

Gülcan, O., Günaydın, K., & Tamer, A. (2021). The state of the art of material jetting – a critical review. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 16). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/polym13162829>

Guo, C., Kang, T., Wu, S., Ying, M., Liu, W. M., & Chen, F. (2021). Microstructure, mechanical, and corrosion resistance of copper nickel alloy fabricated by wire-arc

additive manufacturing. In *MRS Communications* (Vol. 11, Issue 6, pp. 910–916). Springer Nature. <https://doi.org/10.1557/s43579-021-00120-1>

Halisch, C., Milcke, B., Radel, T., Rentsch, R., & Seefeld, T. (2023). Influence of oxygen content in the shielding gas chamber on mechanical properties and macroscopic structure of Ti-6Al-4V during wire arc additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(3–4), 1065–1076. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10214-2>

Hallam, J. M., Kissinger, T., Charrett, T. O. H., & Tatam, R. P. (2022). In-process range-resolved interferometric (RRI) 3D layer height measurements for wire + arc additive manufacturing (WAAM). *Measurement Science and Technology*, 33(4). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac440e>

Hassel, T., & Carstensen, T. (n.d.). *Properties and anisotropy behaviour of a nickel base alloy material produced by robot-based wire and arc additive manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00971-7/Published>

Horgar, A., Fostervoll, H., Nyhus, B., Ren, X., Eriksson, M., & Akselsen, O. M. (2018). Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire. *Journal of Materials Processing Technology*, 259, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.014>

Huntingdon Fusion. (n.d.). *WP-309 3-D Printing for the Marine Industry*. Retrieved October 4, 2023, from <https://www.huntingdonfusion.com/index.php/it/technical-support/white-papers-40017/3156-3-d-printing-for-the-marine-industry-1/10>

Islam, S., Seo, G. J., Ahsan, M. R. U., Villarraga-Gómez, H., Lee, H. J., & Kim, D. B. (2023). Investigation of microstructures, defects, and mechanical properties of titanium-zirconium-molybdenum alloy manufactured by wire arc additive manufacturing. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.106042>

Jiang, X., Di, X., Li, C., Wang, D., & Hu, W. (2022). Improvement of mechanical properties and corrosion resistance for wire arc additive manufactured nickel alloy 690 by adding TiC particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 928. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167198>

Jin, Y. A., Li, H., He, Y., & Fu, J. Z. (2015). Quantitative analysis of surface profile in fused deposition modelling. *Additive Manufacturing*, 8, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.10.001>

J.M. Antonini. (2014). Health Effects Associated with Welding. *Comprehensive Materials Processing*, 8, 49–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00807-4>

Jose, F., Rivera, M., Jose, A., & Arciniegas, R. (n.d.). *Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications*. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05663-6/Published>

- Kennedy, J. R., Davis, A. E., Caballero, A. E., Byres, N., Williams, S., Pickering, E. J., & Prangnell, P. B. (2022). β Grain refinement by yttrium addition in Ti-6Al-4V Wire-Arc Additive Manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 895. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162735>
- Kennedy, J. R., Davis, A. E., Caballero, A. E., Williams, S., Pickering, E. J., & Prangnell, P. B. (2021). The potential for grain refinement of Wire-Arc Additive Manufactured (WAAM) Ti-6Al-4V by ZrN and TiN inoculation. *Additive Manufacturing*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101928>
- Kühne, R., Feldmann, M., Citarelli, S., Reisgen, U., Sharma, R., & Oster, L. (2019). 3D printing in steel construction with the automated Wire Arc Additive Manufacturing. *Ce/Papers*, 3(3-4), 577-583. <https://doi.org/10.1002/cepa.1103>
- Kumar, M. D. B., & Manikandan, M. (2022). Evaluation of Microstructure, Residual Stress, and Mechanical Properties in Different Planes of Wire + Arc Additive Manufactured Nickel-Based Superalloy. *Metals and Materials International*, 28(12), 3033-3056. <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01185-w>
- Ladani, L., & Sadeghilaridjani, M. (2021). Review of powder bed fusion additive manufacturing for metals. In *Metals* (Vol. 11, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/met11091391>
- LASER WELDING SOLUTIONS. (n.d.). 3D PRINTING. Retrieved October 4, 2023, from <https://laserweldingsolutions.com/3d-printing/>
- Lebar, A., Selak, L., Vrabič, R., & Butala, P. (2012). Online monitoring, analysis, and remote recording of welding parameters to the welding diary. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 58(7-8), 444-452. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2012.341>
- Loh, G. H., Pei, E., Gonzalez-Gutierrez, J., & Monzón, M. (2020). An overview of material extrusion troubleshooting. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 14). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10144776>
- Ma, G., Zhao, G., Li, Z., Yang, M., & Xiao, W. (2019). Optimization strategies for robotic additive and subtractive manufacturing of large and high thin-walled aluminum structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5-8), 1275-1292. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3009-3>
- Madesh, R., & Kumar, K. G. (2023). Development of Metallurgical and Mechanical Properties of Nickel-Based Superalloy Employed by Wire Arc Additive Manufacturing Technique. *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08399-y>
- McAndrew, A. R., Alvarez Rosales, M., Colegrove, P. A., Hönnige, J. R., Ho, A., Fayolle, R., Eytayo, K., Stan, I., Sukrongpang, P., Crochemore, A., & Pinter, Z. (2018). Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*, 21, 340-349. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>

- Miller Electric Mfg. Co. (2013). *Processes Stick (SMAW) Welding Guidelines For Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*. www.MillerWelds.com
- Mu, H., Chen, Z., He, F., Li, Y., Xia, C., Commins, P., & Pan, Z. (2022). Defect Detection and Process Monitoring for Wire Arc Additive Manufacturing Using Machine Learning. In *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing* (pp. 3–22). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3902-0_1
- Palacios, B., Paul, T., Mohammed, S. M. A. K., Orikasa, K., John, D., Rodriguez, K., Thomas, T., Langan, S., Michelson, A., & Agarwal, A. (2023). Role of structural hierarchy on mechanics and electrochemistry of wire arc additive manufactured (WAAM) single phase titanium. *Journal of Manufacturing Processes*, 93, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.03.025>
- Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cuiuri, D., Li, H., & Norrish, J. (2018). Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review. In *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing* (pp. 3–24). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5355-9_1
- Pant, H., Arora, A., Gopakumar, G. S., Chadha, U., Saeidi, A., & Patterson, A. E. (2023). Applications of wire arc additive manufacturing (WAAM) for aerospace component manufacturing. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 127, Issues 11–12, pp. 4995–5011). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11623-7>
- Paul, A. R., Mukherjee, M., Singh, D., & Mondal, M. K. (2022). Interfacial characterization of additively manufactured stainless steel to aluminium thin wall with nickel interlayer. *Journal of Materials Research*, 37(21), 3629–3645. <https://doi.org/10.1557/s43578-022-00732-w>
- Peng, D., Jones, R., Ang, A. S. M., Champagne, V., Birt, A., & Michelson, A. (2022). A Numerical Study into the Effect of Machining on the Interaction between Surface Roughness and Surface Breaking Defects on the Durability of WAAM Ti-6Al-4V Parts. *Metals*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/met12071121>
- Posch, G., Welding, B., Gerhard, P., Ferdinand, K., Heinz, H., & Harald, C. (2014). *MANUFACTURING OF TURBINE BLADES BY SHAPE GIVING CMT-WELDING*. *Welding of creep resistant steels View project Wire Arc Additive Manufacturing View project MANUFACTURING OF TURBINE BLADES BY SHAPE GIVING CMT-WELDING*. <https://www.researchgate.net/publication/268778936>
- P.T. HOULDCROFT. (1990). *Submerged-Arc Welding*. ABINGTON PUBLISHING.
- Ramar, M., & Kanagasabapathy, H. (2023). Effect of plasma spray FeCrAl_y coating on microstructural and mechanical properties of Ni₆₁Cr₂₂Mo₉Fe₅ - ER2209 nickel based alloy fabricated using wire arc additive manufacturing process. *Journal of Alloys and Compounds*, 964. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171173>

- Ren, L., Gu, H., Wang, W., Wang, S., Li, C., Wang, Z., Zhai, Y., & Ma, P. (2020). The microstructure and properties of an Al-Mg-0.3Sc alloy deposited by wire arc additive manufacturing. *Metals*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/met10030320>
- Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/ma12071121>
- Ryan, E. M., Sabin, T. J., Watts, J. F., & Whiting, M. J. (2018). The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319. *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 577–584. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.030>
- Seow, C. E., Zhang, J., Coules, H. E., Wu, G., Jones, C., Ding, J., & Williams, S. (2020). Effect of crack-like defects on the fracture behaviour of Wire + Arc Additively Manufactured nickel-base Alloy 718. *Additive Manufacturing*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101578>
- Shen, C., Ma, Y., Reid, M., Pan, Z., Hua, X., Cuiuri, D., Paradowska, A., Wang, L., & Li, H. (2022). Neutron diffraction residual stress determinations in titanium aluminide component fabricated using the twin wire-arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 74, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.009>
- Szost, B. A., Terzi, S., Martina, F., Boisselier, D., Prytuliak, A., Pirling, T., Hofmann, M., & Jarvis, D. J. (2016). A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components. *Materials and Design*, 89, 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.115>
- Tanvir, A. N. M., Ahsan, M. R. U., Ji, C., Hawkins, W., Bates, B., & Kim, D. B. (2019). Heat treatment effects on Inconel 625 components fabricated by wire + arc additive manufacturing (WAAM)—part 1: microstructural characterization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03828-6>
- TKNIKA. (n.d.). *Manufacturing of a demonstrator using WAAM technology on the Addilan V0.1 machine*. ADDIMAT: Spanish Association of Additive Manufacturing Technologies and 3D. www.tknika.eus
- Tomar, B., Shiva, S., & Nath, T. (2022). A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances. In *Materials Today Communications* (Vol. 31). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103739>
- Treutler, K., & Wesling, V. (2021). The current state of research of wire arc additive manufacturing (Waam): A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app11188619>

- Wang, F., Williams, S., Colegrove, P., & Antonysamy, A. A. (2013). Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 44(2), 968–977. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>
- Wang, J., Pan, Z., Carpenter, K., Han, J., Wang, Z., & Li, H. (2021). Comparative study on crystallographic orientation, precipitation, phase transformation and mechanical response of Ni-rich NiTi alloy fabricated by WAAM at elevated substrate heating temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 800. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140307>
- Wang, Z., & Zhang, Y. (2021). A review of aluminum alloy fabricated by different processes of wire arc additive manufacturing. *Medziagotyra*, 27(1), 18–26. <https://doi.org/10.5755/j02.ms.22772>
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. In *Journal of Manufacturing Processes* (Vol. 35, pp. 127–139). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
- Wu, B., Qiu, Z., Pan, Z., Carpenter, K., Wang, T., Ding, D., Duin, S. Van, & Li, H. (2020). Enhanced interface strength in steel-nickel bimetallic component fabricated using wire arc additive manufacturing with interweaving deposition strategy. *Journal of Materials Science and Technology*, 52, 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.019>
- Wu, C. S., Wang, L., Ren, W. J., & Zhang, X. Y. (2014). Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(1), 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.004>
- Yang, J., Yang, H., Yu, H., Wang, Z., & Zeng, X. (2017). Corrosion Behavior of Additive Manufactured Ti-6Al-4V Alloy in NaCl Solution. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 48(7), 3583–3593. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4087-9>
- Yang, Q., Xia, C., Wang, H., Zhou, M., Gao, S., Li, B., & Liu, S. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of TiB₂/AlSi7Mg0.6 Composites Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing Based on Cold Metal Transfer (WAAM-CMT). *Materials*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/ma15072440>
- Yangfan, W., Xizhang, C., & Chuanchu, S. (2019). Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, 374, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.079>
- Yap, Y. L., Wang, C., Sing, S. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y., & Wei, J. (2017). Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision Engineering*, 50, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.015>

- YASKAWA. (n.d.). *MOTOMAN GP Series Handling & General Application*.
www.yaskawa.eu
- Yehorov, Y., da Silva, L. J., & Scotti, A. (2019). Exploring the use of switchback for mitigating homoepitaxial unidirectional grain growth and porosity in WAAM of aluminium alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(1-4), 1581-1592. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03959-w>
- ZELINSKI, P. (2022). The Way Ahead for Wire Arc Additive Manufacturing. *ADDITIVE MANUFACTURING*. <https://www.additivemanufacturing.media/articles/the-way-ahead-for-wire-arc-additive-manufacturing>
- Zeng, Z., Cong, B. Q., Oliveira, J. P., Ke, W. C., Schell, N., Peng, B., Qi, Z. W., Ge, F. G., Zhang, W., & Ao, S. S. (2020). Wire and arc additive manufacturing of a Ni-rich NiTi shape memory alloy: Microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101051>
- Zhuo, Y., Yang, C., Fan, C., & Lin, S. (2021). Effects of trace Sn and Cr addition on microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy repaired by wire arc additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 888. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161473>
- Zhuo, Y., Yang, C., Fan, C., Lin, S., Chen, Y., Chen, C., & Cai, X. (2021). Grain refinement of wire arc additive manufactured titanium alloy by the combined method of boron addition and low frequency pulse arc. *Materials Science and Engineering: A*, 805. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140557>
- Ziaee, M., & Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. In *Additive Manufacturing* (Vol. 28, pp. 781-801). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>
- ΑΛΕΞΙΟΥ Γ. ΚΑΡΜΙΡΗ. (1997). *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ*. ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ.
- ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, Α., & ΔΙΑΚΟΥΜΑΚΟΣ, Κ. (2011). *ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ*. ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ».
- ΒΛΑΣΣΗΣ, Μ. (2022). *Μηχανικές ιδιότητες δοκιμών SLS προσθετικών κατασκευών*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ.
- ΕΜΠΟΡΙΚΟ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ. (2007). *Τεχνικός Συγκολλήσεων*. ΕΜΠΟΡΙΚΟ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ.
- ΚΑΡΑΚΙΖΗΣ, Π. (2018). *ΜΕΛΕΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.
- ΚΥΡΓΙΑΖΟΓΛΟΥ, Α. (n.d.). *Γενικές Αρχές Συγκολλήσεων*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ.

Λυδάκη, Α. Ε. (2023). *Αξιοποίηση Σύνθετων Υλικών στην Προσθετική Κατασκευή*. ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ.

Μαρόπουλος, Δ. Σ. (n.d.). *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ*.

ΜΗΓΙΑΚΗΣ, Κ. (2010). *ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΥΠΕΡ-ΔΙΠΛΟΦΑΣΙΚΩΝ(SUPER-DUPLEX) ΧΑΛΥΒΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟΥ ΤΟΞΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.

ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ, Γ. (n.d.). *Επιστήμη και Τεχνολογία Συγκολλήσεων Ενότητα 2: Μέθοδοι Συγκόλλησης*. Πολυτεχνική Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών .

ΨΥΛΛΑΚΗ, Π. (2022a). *ΗΛΕΚΤΡΟΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΒΟΛΦΡΑΜΙΟΥ ΜΕ ΑΔΡΑΝΕΣ ΑΕΡΙΟ(TIG)-ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ “ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ.”*

ΨΥΛΛΑΚΗ, Π. (2022b). *ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΟ ΑΕΡΙΟ (GMAW)-ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ “ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ.”* ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ.