

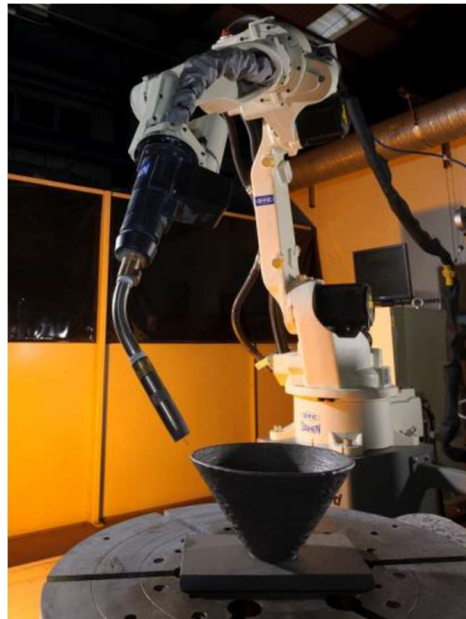


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Π.Μ.Σ. ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΚΑΙ
ΝΑΥΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Η τεχνική Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing) με χρήση ηλεκτρικού τόξου και υλικού προσθήκης (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) και οι εφαρμογές της στη Ναυπηγική»



ΘΩΜΑΣ ΧΑΣΑΠΗΣ

Επιβλέπων:
Επικ. Καθ. Δρ. Σταύρος Κ. Χιονόπουλος

ΑΘΗΝΑ
2023

Διπλωματική εργασία

«Η τεχνική Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing) με χρήση ηλεκτρικού τόξου και υλικού προσθήκης (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) και οι εφαρμογές της στη Ναυπηγική».

Συγγραφέας

ΘΩΜΑΣ ΧΑΣΑΠΗΣ (Α.Μ.: 1820)

Επιβλέπων:

Δρ. Σταύρος Κ. Χιονόπουλος
Επίκ. Καθ. ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

10 / 03 / 2023

Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Σταύρος Κ. Χιονόπουλος
Επίκ. Καθ. ΠΑ.Δ.Α.

Δρ. Ισίδωρος Ιακωβίδης
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Δρ. Μιχαήλ Σέρρης,
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Θωμάς Χασάπης του Αλέξανδρου, με αριθμό μητρώου 1820 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Π.Μ.Σ.) με τίτλο «Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία» 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 διπλώματός μου.

Ο Δηλών



ΘΩΜΑΣ ΧΑΣΑΠΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	ii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	iii
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	1
1.1 Προσθετική Κατασκευή – Ιστορική αναδρομή και παραλλαγές της	1
1.2 Η Τεχνική Προσθετικής Κατασκευής με χρήση Ηλεκτρικού Τόξου και Υλικού Προσθήκης.....	5
1.3 Μέθοδοι WAAM.....	7
1.4 Υλικά που χρησιμοποιούνται στη WAAM.....	9
2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΤΟΞΟΥ ΚΑΙ ΥΛΙΚΟΥ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ	23
2.1 Μορφοποίηση και μηχανικές ιδιότητες της προσθετικής κατασκευής ηλεκτρικού τόξου για βραχίονες ναυτικών ελίκων.....	23
2.2 Υλικά και μέθοδοι	25
2.3 Μικροδομή και απόδοση του βραχίονα της προπέλας.....	27
3. ΣΥΝΗΘΗ ΟΦΕΛΗ ΚΑΙ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΖΟΝΤΑΙ ΜΕ WAAM.....	31
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	37
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ	

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που μου στάθηκαν και με συντρόφευσαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Σταύρο Χιονόπουλο που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το νέο θέμα στην επιστήμη της τεχνολογίας. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για όλη την πολύτιμη βοήθεια που μου έδωσε έτσι ώστε να έχουμε στα χέρια μας αυτήν την έρευνα που έκανα.

Δεν ξεχνάω και θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους μου μεταπτυχιακούς φοιτητές με τους οποίους καθ' όλη τη διάρκεια του προγράμματος μοιράστηκα τις ανησυχίες, τις σκέψεις και το όραμα τους. Έτσι ώστε να με κάνουν να ασχοληθώ με αυτό το νέο θέμα στην επιστήμη με την οποία ασχολούμαι.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καλούς μου φίλους Χρυσόστομο και Αντώνη που με ώθησαν με τον τρόπο τους να ξεκινήσω αυτό το πρόγραμμα. Όπως και τον καλό μου φίλο Χρήστο όπου με την εξέλιξη και την πορεία του πάνω στο κλάδο της ναυπηγικής τον είχα σαν ένα μεγάλο πρότυπο.

Αφιερώνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην ανοχή που έδειξε η εταιρεία με την οποία εργαζόμουν στο διάστημα της παρακολούθησης του μεταπτυχιακού προγράμματος και για τις όποιες υποχωρήσεις έκανε όσο αφορά τις εξεταστικές περιόδους και τις όποιες αλλαγές του προγράμματος τους προκάλεσα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε σε αυτό το μεγάλο επίτευγμα για εμένα και συγκεκριμένα στον Πατέρα μου και την Μητέρα μου που με τον τρόπο τους μου έδιναν δύναμη να συνεχίσω, ενώ δεν θα ξεχάσω και θα είμαι ευγνώμων στην τεράστια δύναμη που αντλούσα όταν έβλεπα τον γιό μου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Προσθετική Κατασκευή Ηλεκτρικού Τόξου (Wire Arc Additive Manufacturing-WAAM) είναι μια από τις λιγότερο γνωστές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων, αλλά έχει τεράστιες δυνατότητες για εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης μεγάλης κλίμακας σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας. Η WAAM είναι μια παραλλαγή της τεχνολογίας Άμεσης Εναπόθεσης Ενέργειας και χρησιμοποιεί μια διαδικασία συγκόλλησης τόξου για την τρισδιάστατη εκτύπωση μεταλλικών μερών.

Σε αντίθεση με τις πιο κοινές διεργασίες Προσθετικής Κατασκευής με σκόνη μετάλλου, η WAAM λειτουργεί λιώνοντας μεταλλικό σύρμα χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρικό τόξο ως πηγή θερμότητας. Η διαδικασία ελέγχεται από ένα ρομποτικό βραχίονα ενώ το αντικείμενο χτίζεται πάνω σε ένα υλικό υποστρώματος (μια πλάκα βάσης) από το οποίο το τμήμα μπορεί να κοπεί μόλις τελειώσει.

Το σύρμα, όταν λιώσει, εξωθείται με τη μορφή σφαιριδίων στο υπόστρωμα. Καθώς τα σφαιρίδια αυτά κολλάνε μεταξύ τους, δημιουργούν ένα στρώμα από μεταλλικό υλικό. Στη συνέχεια, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, στρώση προς στρώση μέχρι να ολοκληρωθεί το μεταλλικό μέρος.

Η WAAM μπορεί να εφαρμοστεί σε μια μεγάλη γκάμα μετάλλων, υπό την προϋπόθεση ότι είναι σε μορφή σύρματος. Η λίστα περιλαμβάνει ανοξείδωτο χάλυβα, κράματα με βάση το νικέλιο, κράματα τιτανίου και κράματα αλουμινίου. Επίσης, οποιοδήποτε μέταλλο μπορεί να συγκολληθεί μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στη WAAM.

Συνοπτικά, το κύριο πλεονέκτημα της WAAM είναι ιδιαίτερη καταλληλότητά της στην κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων μεγάλης κλίμακας. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις μεταλλικές τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής Powder Bed Fusion (PBF), οι οποίες συνήθως παράγουν μικρότερα εξαρτήματα υψηλής ευκρίνειας. Ένα άλλο πλεονέκτημά της αφορά το κόστος υλικού, καθώς το σύρμα συγκόλλησης που χρησιμοποιείται στη διαδικασία εκτύπωσης WAAM είναι σημαντικά φθηνότερο από τη μεταλλική σκόνη που χρησιμοποιείται στην PBF. Αυτό συμβαίνει επειδή η τεχνολογία WAAM βασίζεται στη συγκόλληση, μια καθιερωμένη τεχνολογία κατασκευής από μόνη της. Επιπλέον, το σύρμα είναι συνήθως πιο εύκολο στον χειρισμό από τη σκόνη, η οποία απαιτεί εξειδικευμένο προστατευτικό εξοπλισμό στη χρήση.

Τα εξαρτήματα που παράγονται με WAAM είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτα για την υψηλή πυκνότητα και τις ισχυρές μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες είναι συγκρίσιμες με εξαρτήματα που κατασκευάζονται με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Καθώς η τροφοδοσία του

σύρματος είναι ένα υλικό εισόδου 100% συμπαγές, υπάρχει αμελητέο πορώδες που προκαλείται στη διαδικασία κατασκευής, καταλήγοντας έτσι σε ένα πολύ πυκνό τμήμα.

Η WAAM είναι επίσης μια καλή επιλογή για εργασίες επισκευής και συντήρησης για συγκεκριμένα εξαρτήματα όπως πτερύγια τουρμπίνας, καθώς και για καλούπια και μήτρες. Τα φθαρμένα χαρακτηριστικά ή τα κατεστραμμένα εξαρτήματα μπορούν να επισκευαστούν με τη WAAM εναποθέτοντας νέο υλικό στην επιφάνειά τους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους, καθώς εξαλείφει την ανάγκη παραγωγής ενός νέου ανταλλακτικού από την αρχή.

Μια πρόκληση που σχετίζεται με το WAAM είναι η διαχείριση θερμότητας. Η διαδικασία εκτύπωσης περιλαμβάνει υψηλές θερμοκρασίες, προκαλώντας τη συσσώρευση παραμενουσών τάσεων – ένα πρόβλημα που σχετίζεται συνήθως με την τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλων. Καθώς η παραμένουσα τάση μπορεί συχνά να οδηγήσει σε παραμορφώσεις σε ένα εξάρτημα, η ψύξη πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία.

Επιπλέον, όταν χρησιμοποιούνται ορισμένα υλικά, όπως το τιτάνιο, η θωράκιση είναι απαραίτητη για τη δημιουργία μιας αδρανούς ατμόσφαιρας για τη διασφάλιση των κατάλληλων συνθηκών δόμησης. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία πρέπει να λάβει χώρα σε θάλαμο αδρανούς αερίου. Ωστόσο, ο θάλαμος αδρανούς αερίου περιορίζει το μέγεθος των εξαρτημάτων που μπορούν να παραχθούν με αυτήν την τεχνολογία ενώ η εγκατάσταση ενός τέτοιου θαλάμου θα αυξήσει το κόστος του εξοπλισμού.

Τέλος, η WAAM συνήθως παράγει εξαρτήματα κοντά στο τελικό σχήμα με κακή επιφάνεια. Επομένως, η επιφάνεια ενός εξαρτήματος πρέπει να φινιριστεί μέσω μηχανικής κατεργασίας.

Στο παρόν εισαγωγικό μέρος, δόθηκαν τα βασικά γνωρίσματα, τα πλεονεκτήματα όπως επίσης και οι προκλήσεις και οι περιορισμοί της Προσθετικής Κατασκευής Ηλεκτρικού Τόξου (WAAM). Στα επόμενα εδάφια της παρούσας εργασίας θα επεκταθούμε σε λεπτομέρειες για την πληρέστερη διαφώτιση των ζητημάτων που ανακύπτουν κατά τη συγκεκριμένη κατεργασία όπως επίσης και σε παραδείγματα εφαρμογής της στη ναυπηγική βιομηχανία.

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει γενική περιγραφή της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing) και των διάφορων παραλλαγών της για την παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων ενώ στη συνέχεια θα επικεντρώσουμε στην τεχνική της Προσθετικής Κατασκευής με τη χρήση Ηλεκτρικού Τόξου (Wire Arc Additive Manufacturing). Στο πλαίσιο αυτό και έπειτα από την αναλυτική περιγραφή της μεθόδου, θα αναφερθούμε στα μεταλλικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται, στα πλεονεκτήματα και στα μειονεκτήματά της μεθόδου όπως επίσης και σε γνωστά προβλήματα και σφάλματα που συνήθως απαντώνται κατά την εκτέλεση της μεθόδου.

1.1 Προσθετική Κατασκευή - Ιστορική αναδρομή και παραλλαγές της

Προσθετική κατασκευή (AM) ή προσθετική κατασκευή στρώσεων (ALM) είναι το όνομα βιομηχανικής παραγωγής για την τρισδιάστατη εκτύπωση, μια ελεγχόμενη από υπολογιστή διαδικασία που δημιουργεί τρισδιάστατα αντικείμενα με την εναπόθεση υλικών, συνήθως σε στρώσεις. Υπήρχε πάντα μια συνεχής προσπάθεια από τους ερευνητές για αναβάθμιση των υφιστάμενων διαδικασιών παραγωγής για την ανάπτυξη καλύτερων διαδικασιών για τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων και του χρόνου [1]. Το 1987, η προσθετική κατασκευή (AM) εμφανίστηκε για πρώτη φορά μέσω μιας διαδικασίας, της στερεολιθογραφίας (SL) για τρισδιάστατα συστήματα, που χρησιμοποιεί υπεριώδεις (UV) φωτοευαίσθητο πολυμερές υγρό για στερεοποίηση λεπτών στρωμάτων χρησιμοποιώντας λέιζερ [1]. Η τεχνολογία AM μέσω της νέας τεχνικής της τρισδιάστατης κατασκευής/εκτύπωσης εξαρτημάτων με χρήση της βήμα προς βήμα εναπόθεσης που εισήγαγε, έγινε ο κύριος λόγος πίσω από την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση και μια κύρια διαδικασία παραγωγής. Έχει αναπτυχθεί ως μία καινοτόμος και αξιόπιστη διαδικασία παραγωγής που παράγει το εξάρτημα απευθείας από το μοντέλο CAD. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή εξαρτημάτων με περίπλοκα προφίλ σε ένα βήμα, με φθηνή συναρμολόγηση ή ύπαρξη μη αποσπώμενων τμημάτων για διάφορα εξαρτήματα [4]. Περιοχές που απαιτούν καινοτόμες εφαρμογές μηχανικής όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, ο τομέας της ενέργειας και της υγείας, χρησιμοποιούν ευρέως την τεχνολογία AM. Η Εικ. 2 δείχνει κάποια τμήματα που κατασκευάστηκαν με χρήση WAAM.



Εικόνα 1. Εκτυπωμένος γάντζος HUISMAN από WAAM με ικανότητα ανύψωσης έως 80 τόνους [1]

Χρησιμοποιώντας σχεδιασμό με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) ή σαρωτές αντικειμένων 3D, η προσθετική κατασκευή επιτρέπει τη δημιουργία αντικειμένων με ακριβή γεωμετρικά σχήματα. Αυτά κατασκευάζονται στρώση-στρώση, όπως με μια διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία έρχεται σε αντίθεση με την παραδοσιακή κατασκευή που συχνά απαιτεί μηχανική κατεργασία ή άλλες τεχνικές για την αφαίρεση του πλεονάζοντος υλικού.

Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών διεργασιών AM με τα δικά τους πρότυπα, οι οποίες περιλαμβάνουν τις παρακάτω [1]:

- **Προσθετική κατασκευή με Laser**

Η προσθετική κατασκευή με λέιζερ παρέχει προϊόντα με καλύτερα αποτελέσματα στο φινίρισμα της εξωτερικής και εσωτερικής επιφάνειας με ακριβές σχήμα και σε λιγότερο χρόνο παραγωγής. Έχει τη δυνατότητα να παρέχει κατασκευές που έχουν ομοιόμορφη δομή σε σύγκριση με διαφορετικές τεχνικές AM. Η ακριβής λειτουργία με χαμηλή εισροή θερμότητας εξοικονομεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και προκαλούνται ελάχιστες στρεβλώσεις [17]. Περαιτέρω, η κατασκευή προσθέτων με λέιζερ κατηγοριοποιείται σε δύο τύπους που αφορούν σε μεθόδους που βασίζονται είτε σε σκόνη είτε σε σύρμα. Η σκόνη είναι είτε προ-εναποθετημένη, ή τροφοδοτείται συνεχώς στην περιοχή τήξης της επιφάνειας που βλέπει το λέιζερ ενώ στην περίπτωση μεθόδου με σύρμα συνεχώς γίνεται τήξη αυτού [18]. Οι κύριοι περιορισμοί αυτής της τεχνολογίας είναι η αργή εναπόθεση υλικού, ο περιορισμός μεγέθους των αντικειμένων, η μεγαλύτερος χρόνος της διαδικασίας και το υψηλότερο κόστος κατασκευής.

- **Διαδικασία εναπόθεσης με ψυχρό ψεκασμό**

Είναι η μέθοδος με την οποία χρησιμοποιείται η κινητική ενέργεια του υλικού παρά η χρήση θερμικής ενέργειας για εναπόθεση και ονομάζεται διαδικασία εναπόθεσης ψυχρού ψεκασμού [17]. Αυτή η διαδικασία βασίζεται στην κρίσιμη πλαστική παραμόρφωση σωματιδίων με μέγεθος της τάξης των μm ($<100 \text{ nm}$) [19], όπου τα σωματίδια προσκολλώνται στο υπόστρωμα με συνδυασμό σύντηξης μετάλλου σε μέταλλο και φυσική σύμπλεξη [20]. Τα εξέχοντα χαρακτηριστικά της διαδικασίας ψυχρού ψεκασμού είναι η περιορισμένη ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και η θερμικά επαγόμενη αλλαγή φάσης κατά την εναπόθεση. Για την αποτελεσματική εναπόθεση η ταχύτητα του προσκρούοντος κονιοποιημένου σωματιδίου πρέπει να διατηρηθεί. Πρέπει όμως να λαμβάνεται μεγάλη προσοχή, όταν υπάρχουν διακυμάνσεις κάτω από την κρίσιμη ταχύτητα, όπου η σκόνη χάνει την ιδιότητά της να προσκολλάται. Η διάβρωση των σωματιδίων σκόνης γίνεται εξαιρετικά αναπόφευκτη όταν η ταχύτητά τους υπολείπεται του κατώτερου ορίου. Ολόκληρη η μέθοδος εναπόθεσης ψυχρού ψεκασμού βασίζεται σε παράγοντες όπως η ροή αερίου, το μέγεθος κόκκου και η ταχύτητα απόθεσης [21]. Αυτή η τεχνολογία έχει ορισμένα μειονεκτήματα όπως ότι το διαχυμένο στρώμα δεν έχει σχεδόν καθόλου ολκιμότητα και γι' αυτό το λόγο η περαιτέρω θερμική επεξεργασία είναι απαραίτητη. Αυτή η διαδικασία απαιτεί σωστή ορατότητα ώστε να μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί σε εξωτερικές επιφάνειες σε σύγκριση με εσωτερικές επιφάνειες.

- **Διαδικασία κατασκευής πολυστρωματικών αντικειμένων (LOM)**

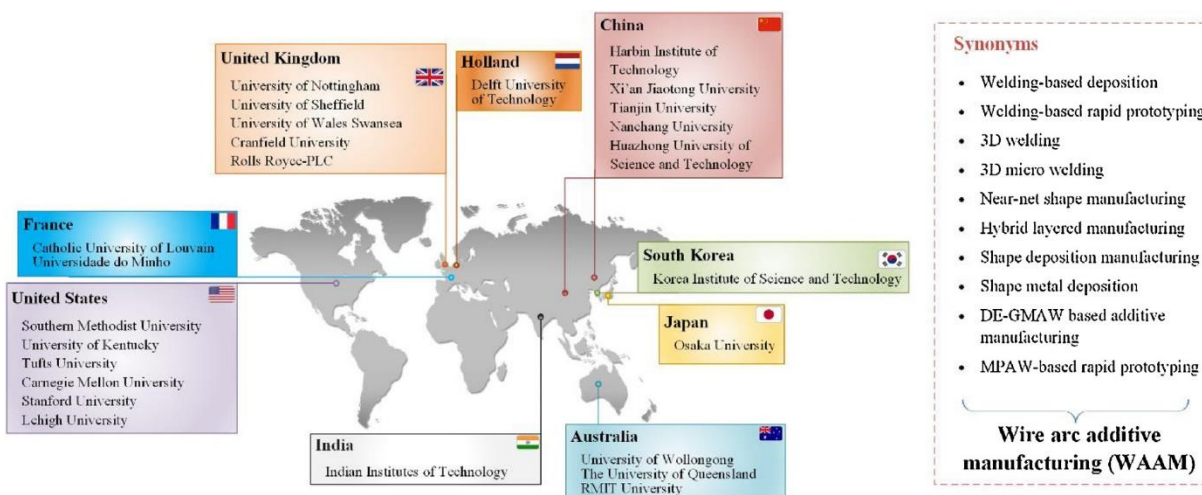
Η LOM είναι μια μέθοδος που απαιτεί ως πρώτη ύλη μεταλλικά φύλλα. Γενικά, η προσθετική κατασκευή με υπερήχους (UAM) ή οι τεχνικές ενοποίησης με υπερήχους (UC) χρησιμοποιούνται για την ακριβή ενοποίηση σωρού κομμένων στρωμάτων μετάλλων με στόχο τη λήψη τρισδιάστατων αντικειμένων [22]. Ο σωρός συμπιέζεται σε κανονική θερμοκρασία χρησιμοποιώντας υπερηχητικά κύματα για διάχυση της διεπαφής και περιορισμό της τήξης. Δεν χρησιμοποιείται πηγή θερμότητας για τη συγκόλληση των στοιβαγμένων φύλλων και την απόκτηση ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Εάν απαιτείται λεπτομερές φινίρισμα, η επιφάνεια γυαλίζεται χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους [23]. Τα προβλήματα που σχετίζονται με αυτή τη μέθοδο είναι η αποδόμηση των κύβων των φύλλων και η κατανάλωση περισσότερου χρόνου και εργασίας.

- **Προσθετική Κατασκευή με χρήση Ηλεκτρικού Τόξου και Υλικού Προσθήκης (Wire Arc Additive Manufacturing)**

Η λειτουργία της διαδικασίας WAAM περιλαμβάνει το τόξο που είναι η θερμογόνος αιτία και το συρμάτινο υλικό ως πρώτη ύλη για την απόθεση τρισδιάστατων αντικειμένων. Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που σχετίζεται με αυτή τη μέθοδο χρονολογείται πίσω στο 1920 [26]. Αυτή η τεχνική αποδεικνύεται χρήσιμη σε σχέση με τις άλλες τεχνικές AM λόγω του χαμηλού κόστους εξοπλισμού και της μειωμένης κατανάλωσης υλικών. Ανάλογα με το μοντέλο CAD, σταγόνες του τηγμένου μετάλλου μετακινούνται συνεχώς στο υπόστρωμα [23]. Η WAAM υπερέρχει για πολλούς λόγους σε σύγκριση με άλλες διεργασίες AM λόγω υψηλότερου ρυθμού παραγωγής, μειωμένου κόστους, 100% αξιοποίηση υλικού και καλύτερη σύντηξη στρωμάτων εντός τμημάτων [24]. Αυτή η τεχνική διευκολύνει την παραγωγή μεγάλων εξαρτημάτων με λιγότερες περιπλοκές με μειωμένη διάρκεια ενώ η δομή που προκύπτει από τη διαδικασία WAAM είναι διαφορετική από αυτή που κατασκευάζεται με παραδοσιακούς τρόπους, αν και η ποιότητα της επιφάνειας του τμήματος είναι υποδεέστερη από την αυτά που κατασκευάζονται από παραδοσιακές ιδέες. Ωστόσο, θέματα όπως εναπομείνουσες τάσεις, ακαθαρσία επιφάνειας, παραμορφώσεις λόγω υπερθέρμανσης και λιγότερη ακρίβεια που συντελεί στη δημιουργία ανωμαλιών, αποτελούν σημαντικούς προβληματισμούς για τη σταθεροποίηση της διαδικασίας WAAM.

1.2 Η Τεχνική Προσθετικής Κατασκευής με χρήση Ηλεκτρικού Τόξου και Υλικού Προσθήκης

Τα τελευταία χρόνια, η προσθετική κατασκευή ηλεκτρικού τόξου (WAAM) έχει προσελκύσει την προσοχή από τον κλάδο της βιομηχανικής μεταποίησης λόγω της ικανότητάς της να δημιουργεί μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα με υψηλό ρυθμό εναπόθεσης, χαμηλό κόστος εξοπλισμού, υψηλή χρήση υλικών και επακόλουθη φιλική χρήση προς το περιβάλλον. Η προέλευση της διαδικασίας WAAM ανάγεται στα 1925 όταν ο Baker πρότεινε τη χρήση ηλεκτρικού τόξου ως πηγή θερμότητας με σύρμα πλήρωσης ως πρώτη ύλη για απόθεση μεταλλικών στοιχείων [2]. Έκτοτε, έχει σημειωθεί σταθερή πρόοδος στην ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας, ιδιαίτερα τα τελευταία 10 χρόνια. Η τεχνική WAAM φέρει διάφορες ονοματολογίες από διαφορετικά ερευνητικά ιδρύματα παγκοσμίως, όπως φαίνεται στην Εικ.2.



Εικόνα 2: Παγκόσμια κατανομή των κύριων ερευνητικών ομάδων στη WAAM [2]

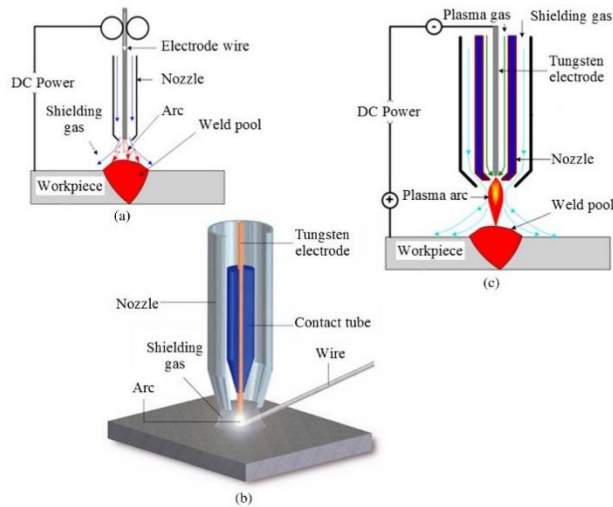
Σε σύγκριση με παραδοσιακή κατασκευή, το σύστημα WAAM μπορεί να μειώσει το χρόνο κατασκευής κατά 40–60% και το χρόνο μετά την κατεργασία κατά 15–20% ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου [3]. Για παράδειγμα, πρόσφατες ανακαλύψεις στην τεχνολογία WAAM κατέστησαν δυνατή την κατασκευή του δικτυώματος του μηχανισμού προσγείωσης αεροσκάφους με εξοικονόμηση περίπου 78% σε πρώτες ύλες σε σύγκριση με την παραδοσιακή διαδικασία [4].

Η WAAM εκτελεί απόθεση συγκαλυμμένων σφαιριδίων στρώση προς στρώση, με αποτέλεσμα ένα μεταλλικό τοίχωμα με ελάχιστο πλάτος 1–2 mm, ακολουθούμενο από κατασκευαστική κατεργασία για να αποκτήσει μια λεία επιφάνεια. Μοιάζει με επένδυση στην οποία η διαδοχική εναπόθεση του τροφοδοτούμενου σύρματος πραγματοποιείται πάνω από ένα υπόστρωμα που

μπορεί να είναι μέρος της τελικής κατασκευής ή μπορεί να αφαιρεθεί με τη διαδικασία κατεργασίας. Η WAAM χαρακτηρίζεται από υψηλούς ρυθμούς απόθεσης, ικανότητα κατασκευής μεγαλύτερων γεωμετριών, συμβατότητα με διαφορετικές πηγές θερμότητας τόξου, όπως επίσης και προσανατολισμούς του ακροφυσίου συγκόλλησης [5]. Ωστόσο, η παραμένουσα τάση και η παραμόρφωση που αναπτύσσεται είναι εμφανείς στα δείγματα από WAAM, και είναι παρόμοια με αυτές που δημιουργούνται κατά την προσθετική κατασκευή (AM) ή συγκόλληση. Η διαχείριση και αποτροπή εμφάνισης των προαναφερθέντων θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Η WAAM δείχνει σκοπιμότητα στην κατασκευή εξαρτημάτων με ένα ευρύ φάσμα υλικών, όπως κράματα με βάση το τιτάνιο, ανοξειδωτο χάλυβα, νικέλιο, μπρούτζο, ταντάλιο και αλουμίνιο. Η WAAM στη βασική της μορφή περιλαμβάνει τη δημιουργία τόξου και την κίνησή του, ένα σύστημα τροφοδοσίας σύρματος και ένα υπόστρωμα το οποίο συσφίγγεται για να συγκρατείται στη θέση του ώστε να είναι δυνατή η ακριβής εναπόθεση. Αυτό επιτυγχάνεται είτε εφαρμόζοντας την τεχνική μεταφοράς ψυχρού μετάλλου (CMT) για τη συγκόλληση με τόξο αερίου βολφραμίου (GTAW) ή με χρήση μεταφοράς πλάσματος [6], τεχνικές στις οποίες θα αναφερθούμε αργότερα.

Η έρευνα πάνω στη WAAM μπορεί να διερευνήσει νέες τεχνικές σχεδιασμού με στόχο την επέκταση της σκοπιμότητας της διαδικασίας και τη λειτουργική ταξινόμηση των υλικών για την κατασκευή εξαρτημάτων με ενσωματωμένα χαρακτηριστικά. Ο ακριβής έλεγχος και ο αυτοματισμός μπορούν να εκτελεστούν μέσω ελεγχόμενων μηχανισμών και παραμετρικής βελτιστοποίησης που ενσωματώνει επιτόπια παρακολούθηση και εξέταση με μη καταστρεπτικές δοκιμές. Διάφορες σχεδιαστικές δυνατότητες που μπορούν να διερευνηθούν και να εφαρμοστούν με τη WAAM περιλαμβάνουν ελαφριές κατασκευές που χρησιμοποιούν κράματα τιτανίου και αλουμινίου ως υλικό πλήρωσης, χάλυβα ως υλικό βάσης για ενώσεις σωληνώσεων και φλάντζες και ενισχύσεις δοκών. Η απόθεση πολλαπλών αξόνων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση της αλλαγής στην κατεύθυνση κατασκευής κατά την απόθεση με τη χρήση περιστρεφόμενου μέρους [7]. Η ενοποίηση της διαδικασίας WAAM με τις διάφορες παραμέτρους, οι οποίες είναι υπό συνεχή έρευνα από ερευνητές για περαιτέρω βελτιώσεις, απεικονίζονται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3. Προσθετική Κατασκευή Τόξου Σύρματος. Αρχή της WAAM με: α) MIG, β) TIG και γ) Τόξο Πλάσματος

Η WAAM προτιμάται επίσης για τις ελάχιστες απαιτήσεις της σε πόρους και ενέργεια. Όλα αυτά τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά προωθούν την εφαρμογή της WAAM στην αεροδιαστημική, στην αεροναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην ιατρική βιομηχανία. Επιπλέον, ο υψηλός ρυθμός εναπόθεσης οδηγεί σε χαμηλότερη ανάλυση και κυματιστό φινίρισμα επιφάνειας, ως εκτούτου. Η προσοχή και η καλή προετοιμασία είναι υποχρεωτική κατά την εργασία με WAAM, λόγω της υψηλής θερμότητας εισόδου που καθορίζει περιορισμούς στην επιλογή των υλικών.

Λόγω της εξαιρετικά περίπλοκης φύσης του WAAM, πολλές διαφορετικές πτυχές της διαδικασίας πρέπει να μελετηθούν, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης της διαδικασίας, της ποιότητας και απόδοσης του υλικού, του σχεδιασμού και του προγραμματισμού της διαδρομής, της διαδικασίας μοντελοποίησης, της παρακολούθησης των διεργασιών και του διαδικτυακού ελέγχου [8].

1.3 Μέθοδοι WAAM

Ανάλογα με τη φύση της πηγής θερμότητας, υπάρχουν συνήθως τρεις τύποι διεργασιών WAAM: Με βάση τη συγκόλληση μετάλλων με τόξο αερίου (GMAW), συγκόλληση τόξου βολφραμίου (GTAW) [2] και συγκόλληση τόξου πλάσματος (PAW). Όπως αναφέρεται στον Πίνακα 1, κάθε συγκεκριμένη κατηγορία τεχνικής WAAM παρουσιάζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Ο ρυθμός εναπόθεσης βάσει της GMAW είναι 2–3 φορές υψηλότερος από αυτόν βάσει της GTAW ή της PAW μεθόδου. Ωστόσο, η WAAM που βασίζεται σε GMAW είναι λιγότερο σταθερή και παράγει περισσότερους καπνούς συγκόλλησης και πιτσιλίσματα λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος που ενεργεί απευθείας στην πρώτη ύλη [2]. Η επιλογή της τεχνικής WAAM

επηρεάζει άμεσα τις συνθήκες επεξεργασίας και το ποσοστό παραγωγής για έναν συγκεκριμένο αντικείμενο.

- **Πηγές θερμότητας που χρησιμοποιούνται στη WAAM**

Οι ερευνητές έχουν ερευνήσει τη WAAM με μια ποικιλία πηγών θερμότητας και έχουν προσαρμόσει το μηχανισμό εισαγωγής θερμότητας ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής που παρουσιάζονται εν συντομία σε αυτή την ενότητα. Η μεταφορά κρύου μετάλλου (CMT) είναι η συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται, λόγω της ελεγχόμενης και αποτελεσματικής μεταφοράς θερμότητας, και εφαρμόζεται σε διάφορες διαμορφώσεις [9-11]. Οι Prado et al. [9] πρότειναν την ενσωμάτωση του CMT και μιας μηχανής CNC τριών αξόνων για τη βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας. Ένας σερβοκινητήρας AC εξοπλισμένος με πιστόλια χωρίς γρανάζια οδήγησαν σε υψηλό ποσοστό εναπόθεσης υλικού. Η ένταση του ρεύματος και η ταχύτητα εναπόθεσης έχουν μεγάλη επίδραση στο πλάτος της συγκόλλησης, αλλά η επίδραση στο ύψος της συγκόλλησης ήταν σημαντικά μικρότερη, λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας υλικού που παρέχεται με αυξημένη ένταση. Οι Zhang et al. [12] ανέλυσαν την επίδραση της λειτουργίας μεταβλητής πολικότητας-CMT (VP-CMT) στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Al από WAAM. Η καθαρή λειτουργία CMT βρέθηκε ότι δημιουργεί ισοαξονικούς κόκκους στο επίπεδο YOZ και στηλοειδείς κόκκους στο επίπεδο XOZ, ενώ η λειτουργία CMT-P είχε μεγαλύτερη αναλογία στηλοειδών κόκκων. Η λειτουργία VP-CMT απέδωσε ομοιόμορφη κατανομή μικρότερων ισοαξονικών κόκκων που έχουν δομή ισοαξονικών δενδριτών. Τυχαία τιμή λανθασμένου προσανατολισμού των ορίων των κόκκων οδηγεί σε ανισοτροπία της τελικής αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) στις λειτουργίες CMT και CMT-P. Οι Shukla et al. [13] διεξήγαγαν έρευνες σχετικά με τη συμπεριφορά του τόξου στη CMT WAAM και τόνισαν ότι το ρεύμα συγκόλλησης είναι ανάλογο με την κατανομή του πλάτους του πλάσματος που διευρύνει το τόξο. Η διακύμανση της έντασης του τόξου συγκόλλησης στις αρχικές στρώσεις επηρεάζει τη συνοχή των σφαιριδίων, η οποία επηρεάζεται από τη μειωμένη θερμική διαφορά στις ανώτερες στρώσεις και τη θερμική ισορροπία μεταξύ της παρεχόμενης θερμότητας και των απωλειών θερμότητας.

Οι Xiong et al. [11] ερευνήσαν έναν μηχανισμό εναπόθεσης επίπεδης θέσης για κεκλιμένα λεπτά εξαρτήματα, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα πολλαπλών επιπέδων GMAW μονής διέλευσης. Αναλύθηκαν η εξάρτηση της γωνίας κλίσης στην απόσταση μετατόπισης, ο ρυθμός τροφοδοσίας συρμάτων και η ταχύτητα διαδρομής. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν

ότι η γωνία κλίσης είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον ρυθμό πεδίου και ευθέως ανάλογη της ταχύτητας διαδρομής.

Οι ερευνητές εστίασαν επίσης στην απόδοση του παλμικού [14] ή του μη παλμικού τόξου [15] στην απόδοση κατασκευής. Οι Luo et al. [14] ανέλυσαν την επίδραση του παλμού στο τόξο και στη μεταφορά των σταγονιδίων. Υψηλότερη συχνότητα μεταφοράς σταγονιδίων με μικρότερο μέγεθος σταγονιδίων επιτεύχθηκε με παλμικό τόξο, γεγονός που υποδεικνύει υψηλότερη απόδοση παραγωγής. Η διαδοχική διάταξη ακροφυσίων βρέθηκε ότι είναι κατάλληλη για τη διατήρηση της σταθερότητας της διαδικασίας σε υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης. Μία συγκριτική μελέτη παλμικού και μη παλμικού τόξου, που έγινε από τους Zhu et al. [15], έδειξε ότι το παλμικό τόξο και η λειτουργία μεταφοράς παλμικών σταγονιδίων είναι κατάλληλες για τη διαδικασία WAAM. Η σφαιρική μεταφορά και η λειτουργία μεταφοράς με ψεκασμό βρέθηκε να δίνει τη μέγιστη ισχύ εξόδου. Το παλμικό τόξο και η λειτουργία μεταφοράς παλμικών σταγονιδίων απέδωσαν υψηλότερη αντοχή, θερμικές ιδιότητες, και υψηλή αναλογία ύψους προς πλάτος, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλότερη απόδοση διαμόρφωσης και βελτιωμένη εναπόθεση στρώματος.

1.4 Υλικά που χρησιμοποιούνται στη WAAM

Οι διαδικασίες WAAM χρησιμοποιούν εμπορικά διαθέσιμα σύρματα που παράγονται για τη βιομηχανία συγκολλήσεων και διατίθεται σε μορφή καρουλιού και σε ένα ευρύ φάσμα κραμάτων ως πρώτη ύλη. Ο Πίνακας 2 δείχνει τα κράματα που χρησιμοποιούνται συνήθως και τις διάφορες εφαρμογές τους στη WAAM. Η κατασκευή ενός δομικά στιβαρού, χωρίς ελαττώματα, αξιόπιστου εξαρτήματος απαιτεί την κατανόηση των διαθέσιμων επιλογών της διαδικασίας, της υποκείμενης φυσικής της διεργασίας, της πρώτης ύλης, των μεθόδων ελέγχου των διεργασιών και την εκτίμηση των αιτιών διαφόρων κοινών ελαττωμάτων και των διορθωτικών τους μέτρων. Αυτή η ενότητα εξετάζει τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται συνήθως στη WAAM, με ιδιαίτερη έμφαση στη μικροδομή και στις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων που κατασκευάζονται προσθετικά.

Πίνακας 1. Μέταλλα που συνήθως απαντώνται σε εφαρμογές WAAM [1]

Applications	Alloys				
	Ti-based	Al-based	Steel-based	Ni-based	Bimetal
Aerospace	-	-	-	-	-
Automotive	-	-	-	-	-
Marine	-	-	-	-	-
Corrosion resistance	-	-	-	-	-
High temperature	-	-	-	-	-
Tools and molds	-	-	-	-	-

• Κράματα Τιτανίου

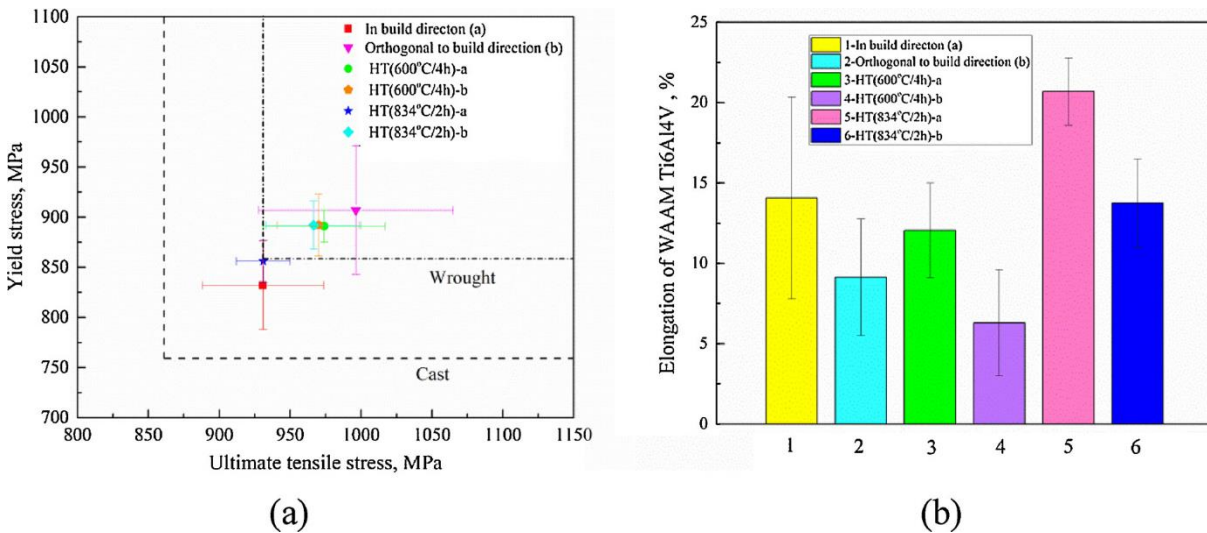
Τα κράματα τιτανίου έχουν μελετηθεί ευρέως για την εφαρμογή στην προσθετική κατασκευή εξαρτημάτων στη αεροδιαστημική λόγω της υψηλής τους αναλογίας αντοχής και βάρους και του εγγενώς υψηλού τους κόστους. Υπάρχουν αυξανόμενες απαιτήσεις για πιο αποτελεσματικές και χαμηλότερου κόστους εναλλακτικές από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής, οι οποίες υποφέρουν από πολύ χαμηλή αναλογία τιμών αγοράς για πολλές σχεδιάσεις εξαρτημάτων. Υπάρχουν πολλές επιχειρηματικές ευκαιρίες για τη διαδικασία WAAM, ιδιαίτερα για μεγάλου μεγέθους εξαρτήματα από τιτάνιο με πολύπλοκες δομές [26]. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η μικροδομή του προϊόντος εξαρτάται από το θερμικό του ιστορικό κατά τη διαδικασία κατασκευής. Ο διακριτός Θερμικός κύκλος WAAM, ο οποίος περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενη θέρμανση και ψύξη [16,17], παράγει μετα-σταθερές μικροδομές και ανομοιογενείς συνθέσεις στο κατασκευασμένο μέρος [18]. Για παράδειγμα, οι Baufeld et al [17] ερεύνησαν τις μικροδομές του Ti6-Al4-V που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας σύστημα WAAM που βασίζεται σε GTAW και βρήκαν δύο διακριτές περιοχές στο κατασκευασμένο υλικό. Στην κάτω περιοχή, όπου οι εναλλασσόμενες ζώνες είναι κάθετες προς την κατεύθυνση κατασκευής, παρατηρείται μια κυματομορφή Widmanstätten με στρώση φάσης α , ενώ στην άνω περιοχή, όπου δεν εμφανίζονται τέτοιες ζώνες, βελονοειδούς μορφής ίζημα είναι η κύρια δομή. Παρόμοια μικροδομική εξέλιξη έχει επίσης παρατηρηθεί σε διαδικασία που βασίζεται σε PAW. Οι Lin et al [19,20] ανέφεραν μια διαβαθμισμένη μικροδομή κατά μήκος της διεύθυνσης κατασκευής και προσδιόρισαν τη δομή μαρτενσίτη α' , τη δομή Widmanstätten και την κυματομορφή από το κάτω προς το άνω τμήμα του κατασκευασμένου εξαρτήματος, όπως φαίνεται στο Σχ.3. Μία επιταξιακή¹ ανάπτυξη των κόκκων β με διακριτή κατεύθυνση παρατηρείται επίσης κατά μήκος της κατασκευαστικής διεύθυνσης λόγω της θερμικής διαφοράς [21], που συνήθως παρατηρείται σε προσθετικά κατασκευασμένα εξαρτήματα από κράμα τιτανίου.

¹ Ως επιταξιακή χαρακτηρίζεται η ανάπτυξη ενός λεπτού στρώματος στην επιφάνεια κρυσταλλικής δομής, ίδιας μικροδομής με το προϋπάρχον υλικό.

Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες (αντοχή εφελκυσμού, σημείο διαρροής και επιμήκυνση) των δειγμάτων Ti6-Al4-V κατασκευασμένων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνολογίες WAAM. Οι ελάχιστες προδιαγραφές σφυρήλατων και χυτών κατασκευών από τα πρότυπα ASTM αναφέρονται επίσης για σύγκριση. Όπως φαίνεται στην Εικ.5, η ιδιότητα εφελκυσμού δειγμάτων Ti6-Al4-V είναι κοντά σε αυτό του σφυρήλατου Ti6Al4V και υπερβαίνει αυτό του χυτού Ti6-Al4-V όπως ορίζεται από τα πρότυπα ASTM. Επιπλέον, τα δείγματα Ti6Al4V που κατασκευάζονται με WAAM παρουσιάζουν ανισότροπες ιδιότητες με χαμηλότερη αντοχή και υψηλότερες τιμές επιμήκυνσης στην κατεύθυνση κατασκευής (Z) σε σύγκριση με την κατεύθυνση εναπόθεσης (X), η οποία αποδίδεται κυρίως στο μέγεθος κόκκου των στρώσεων α και ο προσανατολισμός των επιμήκων κόκκων β.

Πίνακας 2. Μηχανικές ιδιότητες αντικειμένων από Ti6-Al4-V σε κατασκευές WAAM [2]

Process	Condition	Microstructure	YS [MPa]	UTS s [MPa]	EL [%]	Reported by	
Cast	/	/	758 (min)	860 (min)	> 8	ASTM F1108	
Wrought	/	/	860 (min)	930 (min)	> 10	ASTM F1472	
GTAW	AF	Columnar prior β grains + Widmanstätten α/β	/	929 ± 41 ^a 965 ± 39 ^b	9 ± 1.2 ^a 9 ± 1 ^b	Baufeld et al. [13]	
	AF	α phase lamella basket weave structures	/	939 ± 24 ^a 1033 ± 32 ^b	16 ± 3 ^a 7.8 ± 2.3 ^b	Baufeld et al. [67]	
	HT (600 °C/4 h/ FC)	lamellar structure	/	972 ± 41 ^a 977 ± 14 ^b	12.5 ± 2.5 ^a 6 ± 3 ^b		
	HT (834 °C/2 h/ FC)	lamellar structure	/	931 ± 19 ^a 971 ± 28 ^b	21 ± 2 ^a 14 ± 2 ^b		
	AF	Widmanstätten α + banded coarsened lamella α	803 ± 15 ^a 950 ± 21 ^b	918 ± 17 ^a 1033 ± 19 ^b	14.8 ^a 11.7 ^b	Wang et al. [74]	
	AF	/	861 ± 14 ^a 892 ± 31 ^b	937 ± 21 ^a 963 ± 22 ^b	16.5 ± 2.7 ^a 7.8 ± 2 ^b	Brandl et al. [71]	
	HT (600 °C/2 h/ FC)	/	891 ± 16 ^a 915 ± 14 ^b	976 ± 35 ^a 981 ± 8 ^b	11.6 ± 2.4 ^a 6.6 ± 2.6 ^b		
	AN(834 °C/2 h/ FC)	/	856 ± 21 ^a 893 ± 24 ^b	931 ± 17 ^a 962 ± 29 ^b	20.4 ± 1.8 ^a 13.5 ± 2 ^b		
	Plasma	AF 600 °C/840 °C	Widmanstätten α/β + Columnar β grains	/	/	/	Martina et al. [75]
	Pulsed-PAM	AF	Prior columnar β + Martensite α'	909 ± 13.6 ^b	988 ± 19.2 ^b	7 ± 0.5 ^b	Lin et al. [65]
PAM	AF	Prior columnar β + martensite α'+ fine basket-weave structure	877 ± 18.5 ^b	968 ± 12.6 ^b	11.5 ± 0.5 ^b	Lin et al. [64]	



Εικόνα 5. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων κατασκευών από WAAM με κράμα Ti6-Al4-V: **(a)** Μέγιστη αντοχή και όριο διαρροής, **(b)** Επιμήκυνση

- **Κράματα Αλουμινίου**

Διάφορες εναλλακτικές για την κατασκευή έχουν πραγματοποιηθεί με επιτυχία για διάφορες σειρές κραμάτων αλουμινίου όπως, Αλουμίνιο-Χαλκός (2xxx), Αλουμίνιο-Πυρίτιο (4xxx) και Αλουμίνιο-Μαγνήσιο (5xxx). Η τεχνολογία WAAM δικαιολογείται εμπορικά για περίπλοκα μέρη με μεγάλα και λεπτά τοιχώματα, αφού η συμβατική κατεργασία κοστίζει λίγο στην περίπτωση απλών και μικρών αντικειμένων [25]. Αλλά οι μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων από εναποτιθέμενο κράμα αλουμινίου είναι κατώτερες από το billet υλικό. Για να αποκτηθεί μεγαλύτερη αντοχή, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και για να τελειοποιηθεί η μικροδομή πρέπει το τμήμα αλουμινίου να υποστεί θερμική επεξεργασία μετά τη διαδικασία WAAM. Το Αλουμίνιο έχει περιορισμένη εφαρμογή βάσει αυτής της τεχνικής, καθώς η συγκόλληση κραμάτων όπως το Al 7xxx και το 6xxx είναι δύσκολη λόγω ελαττωμάτων συγκόλλησης και σχηματισμού τυρβώδους δεξαμενής τήγματος κατά την εναπόθεση. Σημαντικό ελάττωμα που συναντήθηκε στην απόθεση αλουμινίου είναι το πορώδες. Ο συνδυασμός βέλτιστων συνεργατικών λειτουργικών παραμέτρων και συρμάτων καλής ποιότητας πρώτης ύλης μπορούν να εξαλείψουν το πορώδες.

Σειρά ερευνητικών προσπαθειών μελέτησε τις ιδιότητες αντικειμένων που προέρχονται από WAAM και αποτελούνται από διάφορους τύπους κραμάτων αλουμινίου. Συγκεκριμένα, οι Geng et al. [25] διερεύνησαν τους γεωμετρικούς περιορισμούς και τα χαρακτηριστικά εφελκυσμού εξετάζοντας τη WAAM κράματος αλουμινίου 5A06 με πάχος 1,2 mm. Παρατηρήθηκε ότι οι ιδιότητες εφελκυσμού επηρεάζονται προφανώς από την κατεύθυνση

κατασκευής και τον προσανατολισμό της υφής, που δείχνει ισοτροπία στην κατεύθυνση κατασκευής, αλλά ανισοτροπία ως προς τον προσανατολισμό της υφής. Λόγω της επικάλυψης των σφαιριδίων συγκόλλησης που μπορεί να προκύψει λόγω της μεγάλης λιωμένη δεξαμενής και της επίδρασης της επιφανειακής τάσης, η WAAM με πλάτος στρώσης τα 7,2 mm δεν μπορεί να εφαρμοστεί για επίπεδα σχήματα με συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως αιχμηρές γωνίες μικρότερες από 20° ή καμπυλότητες μεγαλύτερες από 10 mm. Σε περίπτωση αξονικής φόρτισης, ενεργώντας κάθετα στον προσανατολισμό της ύφανσης, γίνεται ένας μεγάλος αριθμός ορίων κόκκων ανθεκτικός στην παραμόρφωση, ενώ σε παράλληλη φόρτιση προς τον προσανατολισμό της ύφανσης, ολίσθηση του ορίου των κόκκων εμφανίστηκε στην περιοχή οριοθέτησης, καθορίζοντας τη μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό.

Οι Horgar et al. [26] μελέτησαν τη σκοπιμότητα της WAAM σε κράμα AA5183 διαμέτρου 1,2 mm χρησιμοποιώντας ως σύρμα και πλάκες AA6082-T6 πάχους 20 mm ως υλικό βάσης. Παρατηρήθηκε ότι οι ιδιότητες εφελκυσμού και σκληρότητας ήταν ανισότροπες σε επίπεδο προσανατολισμό και στην κατεύθυνση της εναπόθεσης. Η μακροσκοπική επιθεώρηση της συγκόλλησης έδειξε διακοκκώδεις θερμές ρωγμές στο τμήμα υψηλής θερμοκρασίας της θερμαινόμενης περιοχής με ισοαξονισμένους κόκκους. Η αραίωση του AA5183 με AA6082 δημιουργεί το σχηματισμό θερμής ρωγμής, η οποία μπορεί να μειωθεί με προσθήκη Ti, B, Sc, Er ή Zr στη σύνθεση του υλικού του σύρματος. Με την επίδραση της βελτίωσης των νανοσωματιδίων των κόκκων, τα πρόσθετα έχουν θετική επίδραση στον εφελκυσμό και στις όλκιμες ιδιότητες και στην ελαχιστοποίηση της τάσης εμφάνισης ρωγμών.

Οι Qi et al. [27] ανέπτυξαν το σύστημα πλάσματος διπλού σύρματος για WAAM από κράμα Al-6.3Cu και πρόσθεσαν Mg στο κράμα Al-Cu με στόχο τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Η ποσότητα Cu και Mg προσαρμόστηκε στην ταχύτητα τροφοδοσίας του σύρματος. Η αντοχή σε εφελκυσμό και η επιμήκυνση παρατηρήθηκε ότι ήταν ισότροπες και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η μικροδομή έδειξε μη ομοιόμορφη κατανομή χονδροειδών στηλών και λεπτών ισοαξονικών κόκκων στο εσωτερικό στρώμα, ενώ η περιοχή μεταξύ των στρώσεων είχε ισοαξονισμένους κόκκους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14.

Οι Gu et al. [28] πρότειναν την υβριδική τεχνική WAAM, ενσωματώνοντας την κύλιση και τη θερμική επεξεργασία, για τον έλεγχο του πορώδους και τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας. Παρατήρησαν ότι, αυξάνοντας τα φορτία κύλισης των ενδιάμεσων στρώσεων, οι ιδιότητες εφελκυσμού του κράματος από WAAM βελτιώθηκαν, ενώ η

επιμήκυνση μεταβλήθηκε. Κατά τη θερμική επεξεργασία, τα δείγματα εκτέθηκαν σε θερμοκρασία ομογενοποίησης και στη συνέχεια σβήστηκαν σε κρύο νερό ενεργοποιώντας το μικροδιαχωρισμό. Μετά τη θερμική επεξεργασία, οι κενοί χώροι δημιούργησαν έναν αυξημένο αριθμό ακανόνιστων μικροπόρων.

Οι Li et al. [29] ανέφεραν αύξηση της απόστασης των βραχιόνων του δευτερογενούς δενδρίτη και της φάσης Fe όταν η θερμότητα εισόδου, που παράγεται από τη WAAM με διαδικασία CMT για Al-7Si-0,6Mg, αυξήθηκε. Η αύξηση της εισροής θερμότητας, με αντίστοιχη μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης, καθορίζει μια αύξηση του πάχους και του ύψους της στρώσης, καθώς και μια αύξηση του μέγεθος πρωτογενούς κόκκου α -Al και ευτηκτικών κόκκων Al-Si. Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, όπως UTS, YS και επιμήκυνση, επισημάνθηκε ότι η θερμότητα εισόδου έχει καθοριστικό ρόλο στην τροποποίησή τους.

Οι Qi et al. [30] ερεύνησαν τη διεργασία WAAM διπλού σύρματος, με τα δείγματα AA2024 να υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία με στόχο την υπέρβαση των περιορισμών κατασκευής των εξαρτημάτων από WAAM με μονο σύρμα. Οι θερμικές επεξεργασίες T4 και T6 περιλαμβάνουν θερμική επεξεργασία, ακολουθούμενη από φυσική και τεχνητή γήρανση αντίστοιχα, για να επιτευχθεί ουσιαστική σταθερή κατάσταση. Μετά τη θερμική επεξεργασία, η μικροδομική ανάλυση αποκάλυψε ότι η μορφολογία των δενδριτών άλλαξε από α -Al + Al₂Cu + Al₂CuMg σε α -Al + Al₂Cu. Ως υλικά πλήρωσης της πλάκας AA2024 από WAAM πάχους 12 mm, χρησιμοποιήθηκαν συμπαγή σύρματα ER2319 (Al-6.3Cu) και ER5087 (Al-5Mg) διαμέτρου 1.2 mm. Διαπιστώθηκε ότι η μικροσκληρότητα αυξήθηκε σημαντικά μετά τη διαδικασία θερμικής επεξεργασίας T4 και T6. Η θερμική επεξεργασία επέφερε αύξηση της αντοχής, ενώ η επιμήκυνση στην οριζόντια κατεύθυνση αυξήθηκε και μειώθηκε στην κατακόρυφη κατεύθυνση οπότε, επιτεύχθηκε βελτίωση της ιδιότητας εφελκυσμού στην οριζόντια κατεύθυνση. Παρατηρήθηκαν κυρίως διακοκκώδη κατάγματα με μερικά λακκάκια (Εικόνα 15).

Οι Ünsal et al. [31] χρησιμοποίησαν το κράμα EN AW6016, ως σύρμα για τη WAAM, για την κατασκευή ακατέργαστου υλικού με λιγότερο από 1% πορώδες. Η σκληρότητα της κατασκευής δεν ήταν συγκρίσιμη με το συμβατικό υλικό λόγω της επίπτωσης της υψηλής θερμοκρασίας. Το θερμικά επεξεργασμένο υλικό παρουσιάζει σκληρότητα συγκρίσιμη ή ακόμη μεγαλύτερη από το συμβατικό υλικό. Κατά την αρχική εναπόθεση των στρώσεων, η εισροή θερμότητας ελέγχονταν με υψηλή ένταση ρεύματος (110–140 A). Για εναποθέσεις

υψηλότερων στρώσεων, η ταχύτητα συγκόλλησης κυμαινόταν με τον έλεγχο της θερμότητας εισόδου.

Οι Wang et al. [32] ερεύνησαν τη WAAM του κράματος Al-Cu-Sn και παρατήρησε ότι αυξάνοντας την εισροή θερμότητας, η λιωμένη δεξαμενή διευρύνεται, το μέγεθος των κόκκων μεγαλώνει και εμφανίζονται ελαττώματα όπως η ανάπτυξη πόρων στο αποτιθέμενο υλικό. Το φαινόμενο του πορώδους σχετίζεται με την αύξηση της διαλυτότητας του υδρογόνου σε διάλυμα Al με τη θερμοκρασία και στην ταχύτερη πυρήνωση των πόρων που καθορίζεται από τη μεγαλύτερη εισροή θερμότητας. Η ομοιομορφία των κόκκων μειώθηκε με τη θερμοκρασία και ο αριθμός και το μέγεθος των αδιάλυτων φάσεων η αυξάνεται μετά την επεξεργασία διαλύματος, αλλάζοντας τις μηχανικές ιδιότητες.

Τέλος, οι Yang et al. [33] μελέτησαν τη WAAM που βασίζεται σε CMT για την κατασκευή ελασμάτων AZ31 και ανέφεραν μια ενίσχυση των ιδιοτήτων εφελκυσμού στην κατεύθυνση εναπόθεσης του μετάλλου. Η μικροδομική ανάλυση αποκάλυψε κατακόρυφους δενδρίτες και ευθυγράμμιση των αλλαγμένων στηλοειδών δενδριτών στη σειρά καθώς και ισοαξονικούς κόκκους στις ανώτερες στρώσεις. Η λεπτότοιχη απόθεση αποτελείται από στηλώδεις δενδριτικές συστοιχίες, συμπεριλαμβανομένης της μήτρας άλφα Mg, μεταξύ των ευτηκικών δενδριτών και μερικών διάσπαρτων φάσεων Al-Mg. Οι ιδιότητες εφελκυσμού εξαρτώνται από την κατεύθυνση στερεοποίησης των δενδριτών και από το κλάσμα όγκου της ευτηκτικής μεσοδενδριτικής.

- **Κράματα με βάση το Νικέλιο**

Τα κράματα με βάση το νικέλιο έχουν την ικανότητα να διατηρούν υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες που το καθιστούν ένα άλλο δημοφιλές υλικό που ερευνήθηκε στην εφαρμογή μεθόδων AM. Αυτό το υλικό έχει βρει μεγάλη εμπορική εφαρμογή στην τεχνική WAAM καθώς το κόστος κατασκευής με τη χρήση συμβατικών μεθόδων είναι υψηλό. Από τα διάφορα κράματα, το Inconel 718 και το Inconel 625 έχουν εξεταστεί κυρίως και έχουν αναλυθεί οι ιδιότητές τους. Η WAAM κατασκεύασε το Inconel 718 έχοντας μία μικροδομή που περιέχει μεγάλους στηλώδεις κόκκους με δενδριτικά όρια. Το όριο διαρροής, η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού και η επιμήκυνση των εναποτιθέμενων κραμάτων νικελίου είναι είτε συγκρίσιμα είτε ελαφρώς υποδεέστερα από αυτά των σφυρήλατων και χυτών υλικών. Δεδομένα πρόσφατων ερευνητικών προσπαθειών φανέρωσαν τα παρακάτω.

Οι Xu et al. [34] μελέτησαν τη μικροδομή και την απόκριση έναντι γήρανσης του κράματος Inconel 718 που προσδιορίστηκε από τις διαδικασίες WAAM. Η αντοχή της συγκόλλησης βρέθηκε χαμηλότερη από την αντοχή του σφυρηλατημένου υλικού. Πρότειναν τη χρήση ενδιάμεσης κύλισης με στόχο τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Η θερμομηχανική επεξεργασία χρησιμεύει για να ενισχυθεί η αντοχή και να μειωθεί η ανισοτροπία του υλικού και η απόκριση γήρανσης που δημιουργείται με τη διαδικασία WAAM. Η μικροδομή του δείγματος, το οποίο υποβλήθηκε σε ενδιάμεση κύλιση, παρουσιάζει μικρότερους σπληνοειδείς κόκκους ευθυγραμμισμένους με τις πλευρές του τοιχώματος και διπλή δομή κόκκων με ανακρυσταλλωμένο πυρήνα που εκτείνεται μέχρι το μισό του πάχους του τοιχώματος.

Οι Seow et al. [35] διερεύνησαν τα ζητήματα που δημιουργούνται από τη διαδικασία εναπόθεσης WAAM στο υλικό IN718, όπως ο μικρο-διαχωρισμός, που προκάλεσε σχηματισμό ανεπιθύμητης φάσης Laves στις μεσοδενδρικές περιοχές και πρότειναν μια τροποποιημένη θερμική επεξεργασία. Αυτή η μέθοδος στοχεύει στη διάλυση της φάσης Laves και στη μείωση της ανισοτροπίας στη δομή των κόκκων, επιτυγχάνοντας ισοτροπικές ιδιότητες εφελκυσμού σε υψηλή θερμοκρασία. Η θερμική επεξεργασία των φάσεων αποτελούνται από ομογενοποίηση στους 1100 C για 1 ώρα, ψύξη με αέρα και στη συνέχεια επεξεργασία διαλύματος στους 980 C για 1 ώρα ακολουθούμενη από ψύξη αέρα, σύμφωνα με το AMS 5383 και τροποποιημένη κατεργασία ομογενοποίησης στους 1186 C για 40 λεπτά και ψύξη με αέρα.

Η επεξεργασία υψηλής θερμοκρασίας επιτρέπει τη διάλυση της φάσης Laves με διάχυση στη μήτρα. Αυτή η διάλυση θα μπορούσε να αναπτύξει περιοχές εμπλουτισμένες με Nb όπου η φάση δέλτα μπορεί να ιζηματοποιηθεί. Λόγω της καθίζησης των σωματιδίων γάμμα στη μήτρα, προωθούμενη από τη θεραπεία γήρανσης, το αποτέλεσμα σκλήρυνσης θα μπορούσε να ενισχυθεί. Από την άλλη, η ανάπτυξη χονδροειδών κόκκων καθορίζει τη χαμηλότερη σκληρότητα και τις ιδιότητες εφελκυσμού στο δείγματα που υποβλήθηκαν στην προτεινόμενη τροποποιημένη θερμική επεξεργασία [35].

Οι Yangfan et al. [36] ερεύνησαν τις επιπτώσεις της ταχύτητας διαδρομής του ακροφύσιου στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος Inconel 625 που αποτίθεται από WAAM με βάση την τεχνική CMT. Η ανάλυση αποκάλυψε μια τροποποίηση της μικροδομής σε διαφορετικές στρώσεις. Η κατεύθυνση εναπόθεσης αντιστράφηκε μετά από κάθε στρώση και αυτό είχε ως αποτέλεσμα μια καλά καθορισμένη διεπαφή σφαιριδίων και στρώσης, Εικόνα 19. Λόγω της βραδύτερης διάχυσης θερμότητας στη μεσαία περιοχή, μια κυτταρική

δενδριτική δομή με κάποιο δευτερεύοντα δενδρίτη αναπτύχθηκε, ενώ δημιουργήθηκε μια πιο τραχιά δενδριτική δομή στην επάνω περιοχή λόγω της συνεχούς συσσώρευσης θερμότητας σε αυτήν την περιοχή. Έτσι, η μικροδομή που επιτυγχάνεται είναι λεπτότερη και η μικροσκληρότητα αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας διαδρομής του ακροφυσίου. Κατά συνέπεια, η τάση διαρροής (YS), η τελική αντοχή εφελκυσμού (UTS) και η επιμήκυνση των δειγμάτων που κατασκευάζονταν σταδιακά αυξήθηκε καθώς αυξανόταν η ταχύτητα του ακροφυσίου.

- **Κράματα Ανοξειδωτου Χάλυβα**

Αν και η εργασία εστιάζει στον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς μη σιδηρούχων δομών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας WAAM, η τεχνική υιοθετείται ευρέως και για κράματα χάλυβα. Η υψηλή ολκιμότητα και η αντοχή στη διάβρωση είναι οι βασικοί λόγοι που προσελκύουν αριθμό ερευνών με στόχο την κατασκευή ανοξειδωτων αντικειμένων από χάλυβα χρησιμοποιώντας την τεχνική WAAM. Οι μελέτες δείχνουν ότι η WAAM έχει την ικανότητα να παράγει αντικείμενα ανοξειδωτου χάλυβα με καλές μηχανικές ιδιότητες και μικροδομή [37]. Καθώς η μικροδομή χάλυβα περιέχει κυρίως ωστενιτική φάση, κατά τη συγκόλληση ή εναπόθεση, μια συνδυασμένη μορφή ωστενίτη και φερρίτη μπορεί να βρεθεί [38]. Σημαντικοί παράγοντες που διέπουν το κλάσμα φάσης του ανοξειδωτου χάλυβα είναι ο θερμικός κύκλος και η χημική σύνθεση [39]. Ο ρυθμός ψύξης επηρεάζει κυρίως την ποσότητα φερρίτη στο αντικείμενο ενώ ένα κλάσμα όγκου έως και 30% φερρίτη μπορεί να ληφθεί [40, 41]. Μια σωστή επιλογή παραμέτρου της διαδικασίας είναι ζωτικής σημασίας για την κατασκευή μιας ισορροπημένης μικροδομής ανοξειδωτου χάλυβα. Η ταχεία ψύξη όχι μόνο οδηγεί σε περιορισμένους ωστενιτικούς σχηματισμούς αλλά επιφέρει και την καταβύθιση επίσης μη ισορροπημένων νιτριδίων από πλευρά σε πλευρά [42, 43]. Τα αντικείμενα παρουσιάζουν ελαφρά ανισοτροπία αλλά με κατάλληλη θερμική επεξεργασία μετά τη διεργασία μπορούν να εξαιρεθούν με επιτυχία και επιτευχθείσες ιδιότητες μπορεί να είναι παρόμοιες με το συμβατικά παραγόμενο προϊόν. Τα αντικείμενα ανοξειδωτου χάλυβα που έχουν εναποτεθεί με χρήση της WAAM έχουν επίσης βρει τεράστια εφαρμογή στην κατασκευή εξαρτημάτων από κράματα υψηλής απόδοσης [81]. Από πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες βρίσκουμε τα εξής.

Οι Haden et al. [44] μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων SS304 και ER70S που επιτεύχθηκε με τη WAAM. Στην περίπτωση του SS304, βρέθηκε ότι η διαρροή και η αντοχή σε εφελκυσμό είναι ισότροπες κατά την κατεύθυνση της εναπόθεσης. Ομοίως, για

τον μαλακό χάλυβα ER70S, παρατηρήθηκε ανισοτροπία σε κάθετη και οριζόντια κατεύθυνση. Μια βελτίωση των κόκκων παρατηρήθηκε επίσης στην κατασκευή SS, καθώς ενισχύσεις Hall-Petch παρατηρήθηκαν κάτω από τις ουλές φθοράς. Η YS αυξήθηκε τόσο προς την κατεύθυνση της απόθεσης συγκόλλησης όσο και προς την κατεύθυνση Z. Η μικροδομή του SS304 φανέρωσε μια παραλλαγή από τη μορφολογία του ωστενιτικού σε μικτό φερρίτη, λόγω της επίδρασης των τοπικών θερμικών διακυμάνσεων. Όσον αφορά το ER-70S, παρουσίασε μια τυπική μικροδομή φερρίτη με μικρές περιοχές περλίτη στα όρια των κόκκων.

Οι Feng et al. [45] παρατήρησαν μια βελτίωση όσον αφορά την εμφάνιση σφαιριδίων, το ρυθμό απόθεσης, τις μικροδομές και τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης κατά τη διαδικασία κατασκευής WAAM που βασίζεται σε τόξο πλάσματος με τροφοδοσία διπλού σύρματος. Η μακροσκοπική ανάλυση, που πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικά δείγματα, έδειξε μείωση του ύψους του εναποτιθέμενου τοιχώματος, σχηματισμό επιφάνεια και κυματισμό, λόγω της αύξησης της ταχύτητας εναπόθεσης. Παρατηρήθηκε επίσης παρουσία φάσης φερρίτη σε λεπτότερη μήτρα ωστενίτη. Με την αύξηση της ταχύτητας εναπόθεσης, η πλήρως ανεπτυγμένη δομή κόκκων ισοαξονικού φερρίτη (CGEF) και, στη συνέχεια, οι μηχανικές ιδιότητες βελτιώθηκαν. Η διαδικασία τροφοδοσίας διπλού σύρματος βρέθηκε ότι είναι μια κατάλληλη διαδικασία για την κατασκευή εξαρτημάτων από ανοξείδωτο χάλυβα Cr-Ni.

Ο Wang [46] μελέτησε την επίδραση των λειτουργιών του τόξου, δηλαδή της ταχύτητας παλμού και της ταχύτητας του τόξου, που χρησιμοποιείται στην κατασκευή WAAM ανοξείδωτου χάλυβα SS316L. Η μορφολογία της διατομής των συστατικών παρουσίασαν δομή χωρίς ελαττώματα και για τις δύο μεθόδους. Η ακτινογραφία δειγμάτων εφελκυσμού δεν παρουσίαζε ρωγμές ή ελαττώματα πορώδους. Η μικροδομή αποκάλυψε κατανομή ωστενίτη στην αρχική φάση της κατασκευής από WAAM. Η διαφορά ως προς τη σκληρότητα Vickers, και για τις δύο λειτουργίες τόξου, είναι αμελητέα στις κάτω στρώσεις. Ωστόσο, επειδή η ποσότητα θερμότητας αυξάνεται με την επακόλουθη εναπόθεση στρώσεων, η διάχυση θερμότητας εξελίσσεται πιο αργά. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στη μείωση των δευτερογενών αποστάσεων μεταξύ των βραχιόνων δενδρίτη (SDAS) και, επιπλέον, επιτυγχάνεται υψηλότερη σκληρότητας Vickers για μέθοδο WAAM βασισμένη στην ταχύτητα του τόξου. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι οι ιδιότητες UTS και η επιμήκυνση είναι υψηλότερες για τη μέθοδο τόξου ταχύτητας σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο.

Οι Dirisu et al. [47] ανέλυσαν τα κατασκευασμένα από WAAM μέρη του ER70S-6 και καθιέρωσαν την επίδραση της διαδικασίας έλασης στη μείωση του κυματισμού της επιφάνειας του εναποτιθέμενου υλικού. Αναφέρθηκε ότι οι θλιπτικές τάσεις, που προκαλούνται από την κύλιση, μείωσαν τον επιφανειακό κυματισμό και τη συγκέντρωση τάσεων, και, κατά συνέπεια, βελτιώθηκε η διάρκεια ζωής έναντι κόπωσης. Επισημάνθηκε επίσης ότι ο κυματισμός της επιφάνειας μειώθηκε με την αύξηση του φορτίου κύλισης. Όσον αφορά την αντοχή σε εφελκυσμό, βρέθηκε ότι είναι ανάλογη με το φορτίο κύλισης. Για παράδειγμα, εφαρμόζοντας μέγιστο φορτίο κύλισης, επιτυγχάνεται μέγιστη αντοχή εφελκυσμού με το μικρότερο ποσοστό επιμήκυνσης. Η πλαστική παραμόρφωση, που επέρχεται από τη διαδικασία κύλισης, υποστηρίζει το αποτέλεσμα της εργασίας-σκληρυνσης και προκαλεί τη μείωση της επιμήκυνσης. Η σκληρότητα είναι επίσης ανάλογη με το φορτίο κύλισης. Διαπιστώθηκε ότι η κύλιση στην εναποτιθέμενη επιφάνεια δημιουργεί στρεβλώσεις που προκαλούν σκλήρυνση και μείωση του μεγέθους των κόκκων. Επιπλέον, η κύλιση πυροδοτεί την πυρήνωση του ωστενίτη που προκαλεί τη μείωση μεγέθους των κόκκων.

- **Βολφράμιο**

Το βολφράμιο είναι ένα συστατικό υψηλής απόδοσης και βρίσκει εφαρμογή στους αντιδραστήρες πυρηνικής σύντηξης και άλλα συστήματα παραγωγής και μετατροπής ενέργειας υψηλής θερμοκρασίας. Μερικά από τα φυσικά χαρακτηριστικά, όπως η υψηλή θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και η χαμηλή αντοχή στη θραύση, δημιουργούν δυσκολίες στη συμβατική κατασκευή εξαρτημάτων βολφραμίου. Οι παραμετροποιήσιμες παράμετροι της διαδικασίας WAAM και η ικανότητα παραγωγής λειτουργικά διαβαθμισμένων στοιχείων επιτρέπουν την ανάπτυξη των απαιτούμενων χαρακτηριστικών στις δομές βολφραμίου. Οι Marinelli et al. [19] μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας WAAM στις γραμμικές δομές από μη κραματοποιημένο βολφράμιο. Ο ακριβής προσανατολισμός του υποστρώματος και ο κατάλληλος σχεδιασμός του συστήματος σύσφιξης οδήγησαν στην εξάλειψη των πλευρικών ρωγμών που μπορούν να αναπτυχθούν κατά τη διαδικασία εναπόθεσης. Σε σύγκριση με το μηχανισμό μπροστινής τροφοδοσίας συρμάτων, η πλαϊνή τροφοδοσία σύρματος έχει δημιουργήσει πιτσιλίσματα, κενά, ρωγμές και έλλειψη σύντηξης, όπως φαίνεται στο.

Παρατηρήθηκε αστάθεια Kelvin-Helmholtz στη διαδικασία απόθεσης πλευρικού σύρματος λόγω διαφοράς μεταξύ των πυκνοτήτων του υγρού βολφραμίου και πλάσματος ηλίου που προκαλεί διάσπαση των λιωμένων επιφανειών και διάσπαση των σωματιδίων σε λεπτά

σταγονίδια. Η γρήγορη στερεοποίηση και η σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα του βολφραμίου οδήγησαν στην ανάπτυξη ισοαξονισμένων κόκκων. Το πάνω μέρος της κατασκευής είχε μεγάλους και επιμήκεις κόκκους γιατί η θερμική αγωγιμότητα μειώθηκε σε υψηλές θερμοκρασίες.

• Ταντάλιο

Οι Marinelli et al. [20] ανέπτυξαν μεγάλης κλίμακας εξαρτήματα από μη κραματοποιημένο τανταλίο χρησιμοποιώντας WAAM με δύο διαφορετικά σύρματα Ta και τόνισαν ότι τα αποτιθέμενα τοιχώματα έχουν υψηλή γεωμετρική ακαμψία και καμία παραμόρφωση. Χρησιμοποιήθηκε συμβατική τεχνική TIG για εναπόθεση Ta σε ένα μόνο σφαιρίδιο. Η μονοκατευθυντική εναπόθεση διατηρήθηκε σε κάθε στρώση με τροφοδοσία πλευρικού σύρματος στη δεξαμενή συγκόλλησης. Η δομή του τοιχώματος δεν είχε παραμορφώσεις λόγω υψηλής γεωμετρικής ακαμψίας και εντοπισμό πλαστικής παραμόρφωσης στη διεπαφή υποστρώματος-τοιχώματος. Η ανάλυση μικροδομής αποκάλυψε ότι οι σπηλοειδείς κόκκοι αναπτύχθηκαν επιταξιακά προς την κατεύθυνση εναπόθεσης κατά τη στερεοποίηση. Λόγω επαναλαμβανόμενων θερμικών κύκλων που προκάλεσαν περαιτέρω τοπική αλλαγή των κόκκων σε διαδοχικές στρώσεις, παρατηρήθηκε η ανάπτυξη μακροσκοπικών ζωνών σε κάθε στρώση. Η ανάλυση σκληρότητας αποκάλυψε μια παραλλαγή στην κατεύθυνση κατασκευής λόγω των θερμικών κύκλων που επέφεραν το αποτέλεσμα της σκλήρυνσης στο κάτω μέρος της κατασκευής. Βρέθηκε ότι οι εναποτιθέμενες δομές χαρακτηρίζονταν από υψηλότερη τάση διαρροής λόγω της περιεκτικότητάς τους σε οξυγόνο και από μειωμένη επιμήκυνση που προκαλείται από το διαφορετικό μέγεθος και σχήμα των κόκκων μεταξύ υποστρώματος και δειγμάτων. Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές κατασκευής, αυτή η μέθοδος κατασκευής έχει το πλεονέκτημα του μειωμένου κόστους και χρόνου παραγωγής μεγάλης κλίμακας δομών.

• Χαλκός

Οι Wang et al. [21] μελέτησαν τη WAAM με βάση το CMT χάλκινης πλάκας πάχους 10 mm με σύρματα που περιέχουν Cu ή Al και Si (CuSi3, AlSi5-ER4043). Η ρύθμιση του πειράματος περιλάμβανε ένα μηχάνημα τροφοδοσίας συρμάτων που τροφοδοτεί τα δύο σύρματα σε μια ενιαία λιωμένη δεξαμενή. Το ποσοστό των συστατικών που εναποτίθενται στη χάλκινη πλάκα 10 mm ελέγχονται από τη διακύμανση του ρυθμού τροφοδοσίας του σύρματος. Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη Si επιτρέπει την ομοιόμορφη ανάμειξη μετάλλων και τη μείωση του σχηματισμού διμεταλλικών φάσεων.

Λόγω της διαλυτότητας με Cu και Al, το Si αυξάνει τη ρευστότητα του τηγμένου μετάλλου. Παρατηρήθηκε ότι, αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε Al, μια αύξηση επιτεύχθηκε στις ιδιότητες UTS και YS, ενώ προσθέτοντας Si στο κράμα Cu-Al, μια βελτίωση παρατηρήθηκε στη σκληρότητα, στην αντοχή σε εφελκυσμό και στην αντοχή έναντι διαρροής. Οι συχνοί κύκλοι θέρμανσης-ψύξης και οι θερμικές τάσεις προκαλούν κακή σύνδεση μεταξύ της στρώσης που έχει εναποτεθεί στη βάση και στο υπόστρωμα. Η σταθεροποιημένη θερμική διακύμανση ελέγχει την αύξηση του πλάτους του τοιχώματος στην κατεύθυνση της κατασκευής. Το ύψος της στρώσης παρατηρήθηκε ότι μειώνεται προς την κατεύθυνση της κατασκευής. Εξάλλου, η αυξημένη σκληρότητα προκαλείται από την ενισχυτική επίδραση ενός στερεού διαλύματος Al, με το σχηματισμό διμεταλλικών φάσεων και με την προσθήκη Si.

Η δομή της ενδιάμεσης στρώσης έδειξε μια μικτή και άτακτη δομή όπου ήταν δίδυμη, συνυπάρχοντας χονδροειδείς στηλοειδείς και λεπτοί ελαστικοί κρύσταλλοι. Η επίδραση της οξειδωσης είναι ορατή με τη μορφή μαύρων στηλών κρυστάλλων στη μικροδομή. Τροποποιώντας το ρυθμό απαγωγής θερμότητας, μια διαφορετική μορφολογία των εναποτιθέμενων στρωμάτων προκύπτει στην κατεύθυνση της κατασκευής και σε όλη τη δομή.

2. Εφαρμογές της Προσθετικής Κατασκευής με Χρήση Ηλεκτρικού Τόξου και Υλικού Προσθήκης

Σύμφωνα με τη [48] η προσθετική κατασκευή κραμάτων αλουμινίου, ειδικά Al-Si, κερδίζει ευρεία δημοτικότητα στον τομέα του αυτοκινήτου και της αεροδιαστημικής λόγω της καλής μορφοποιησιμότητας, της υποδειγματικής μηχανικής αντοχής και τις εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής έναντι διάβρωσης. Κράματα μαγνησίου χρησιμοποιούνται επίσης στην αυτοκινητοβιομηχανία. Το κράμα Al-Si (ER4043) είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σύρμα πλήρωσης, το οποίο έχει καλή ρευστότητα και ουσιαστικά λιγότερα ελαττώματα στις κατασκευές μέσω μεθόδων προσθετικής κατασκευής. Η WAAM με βάση τη συγκόλληση CMT είναι μια ευέλικτη και γρήγορη τεχνική κατασκευής που χρησιμοποιείται για την παραγωγή προϊόντων υψηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας.

Στην παρούσα εργασία ωστόσο θα επικεντρωθούμε σε εφαρμογές της WAAM στη ναυπηγική βιομηχανία οι οποίες προς ώρας σχετίζονται με την κατασκευή του βραχίονα της προπέλας.

2.1 Μορφοποίηση και μηχανικές ιδιότητες της προσθετικής κατασκευής ηλεκτρικού τόξου για βραχίονες ναυτικών ελίκων

Παραδοσιακά, η χύτευση είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία θαλάσσιων ελίκων, αλλά απαιτεί μεγάλους χρόνους παράδοσης, καθώς η διαδικασία περιλαμβάνει την κατασκευή ενός καλουπιού, τη χύτευσή του και στη συνέχεια την επεξεργασία του. Επιπλέον, οι περισσότερες εταιρείες σφυρηλάτησης και χύτευσης δεν βρίσκονται πλέον στην Ευρώπη, πράγμα που σημαίνει ότι χρειάζεται ακόμη περισσότερος χρόνος για την απόκτηση ανταλλακτικών. Τέλος, οι περισσότερες από αυτές τις εταιρείες απαιτούν παραγγελίες για ποσότητες μεγαλύτερες του ενός εξαρτήματος, πράγμα που σημαίνει την αποθήκευση ενός μεγάλου αποθέματος εξαρτημάτων που ενδέχεται να μην χρησιμοποιηθούν ποτέ.

Από την [49] διαβάζουμε ότι το στήριγμα ναυτικής προπέλας είναι ένα σημαντικό τμήμα μεγάλων πλοίων, το οποίο χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της προπέλας που περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα. Έχει υψηλές απαιτήσεις για ακρίβεια διαστάσεων και μηχανικές ιδιότητες. Το στήριγμα της προπέλας αποτελείται από την πλήμνη, το υποστηρικτικό μπράτσο και τον εγκάρσιο βραχίονα. Προς το παρόν, η μέθοδος συνδυασμού χύτευσης και συγκόλλησης χρησιμοποιείται για την κατασκευή του.

Επειδή το στήριγμα της προπέλας κατασκευάζεται με τη χρήση χάλυβα ZG230-450 που έχει κακή ρευστότητα και το πάχος της πλήμνης είναι γενικά μεγαλύτερο από 200 mm, συρρίκνωση και πορώδες είναι εύκολο να εμφανιστούν κατά τη διαδικασία χύτευσης. Κατά τη συγκόλληση των συνδέσεων μεταξύ της πλήμνης, του βραχίονα στήριξης και του εγκάρσιου βραχίονα, οι κόκκοι της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα μεγεθύνονται, οι μηχανικές ιδιότητες υποβαθμίζονται και δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις. Για το λόγο αυτό μία νέα μέθοδος όπως η WAAM εφαρμόζεται με σκοπό να αποκτηθούν βραχίονες υψηλής ακρίβειας και καλής απόδοσης.

Η WAAM χρησιμοποιεί το τόξο ως πηγή θερμότητας ώστε να λιώσουν τα μεταλλικά σύρματα. Το αντικείμενο σχηματίζεται με συσσώρευση λιωμένου μετάλλου στρώση προς στρώση. Μπορεί να αποφύγει τη συρρίκνωση και το πορώδες του στηρίγματος κατά τη διαδικασία παραγωγής. Η WAAM είναι μια ολοκληρωμένη μέθοδος κατασκευής, η οποία μπορεί να αποφύγει τις αδυναμίες των χονδροειδών κόκκων και τη χαμηλή απόδοση στη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα κατά τη διαδικασία συγκόλλησης. Είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για την κατασκευή εξαρτημάτων βραχίονα υψηλής απόδοσης.

Η ακρίβεια του στρώματος εναπόθεσης δεν σχετίζεται μόνο με την ακριβή θέση του ακροφυσίου του τόξου, αλλά εξαρτάται επίσης από τη σταθερότητα της διαδικασίας διαμόρφωσης. Στη διαδικασία της WAAM, αρχικά, το στοιχείο θα παράγει θερμικές τάσεις και θερμικές παραμορφώσεις όσο η θερμοκρασία αλλάζει με την πρόοδο της κατασκευής. Δεύτερον, το μέγεθος και το περίγραμμα του στρώματος εναπόθεσης θα παραμορφωθούν λόγω διακυμάνσεων στις παραμέτρους της διαδικασίας κατά τη διαδικασία παραγωγής. Τέλος, υπάρχει ένα σφάλμα στην ακρίβεια του σύρματος λόγω της φθοράς του άκρου. Αυτοί οι παράγοντες θα προκαλέσουν τη μετακίνηση της θέσης του στρώματος εναπόθεσης από την προκαθορισμένη θέση. Κατά την κατασκευή εξαρτημάτων από WAAM, η ακρίβεια των διαστάσεων κάθε στρώματος εναπόθεσης θα επηρεάσει την ακρίβεια των ίδιων των εξαρτημάτων. Δεδομένου ότι η WAAM αφορά την εναπόθεση πολλαπλών διελεύσεων, όταν το κέντρο της διατομής της κάθε στρώσης είναι μετατοπισμένο, προκαλείται η δομική παραλλαγή του βραχίονα. Προκειμένου να ληφθούν εξαρτήματα υψηλής ακρίβειας, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί όχι μόνο η ακρίβεια μεγέθους κάθε στρώσης, αλλά και η μετατόπιση του κέντρου της διατομής μεταξύ των στρωμάτων. Τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος μέτρησης του μεγέθους του στρώματος εναπόθεσης σε πραγματικό χρόνο και προσαρμογής των παραμέτρων διεργασίας έχουν χρησιμοποιηθεί για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος του μεγέθους της στρώσης.

Κατά τη διαδικασία σχηματισμού, είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα η μετατόπιση του κέντρου του ολοκληρωμένου τμήματος της στρώσης απόθεσης για τη βελτίωση της ακρίβειας των τυπωμένων εξαρτημάτων. Αρχικά, είναι απαραίτητο να συλλεχθούν οι πλήρεις πληροφορίες του περιγράμματος της στρώσης, και στη συνέχεια μία κατάλληλη μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ληφθεί η ακριβής μετατόπιση του κέντρου της διατομής. Ο ελαφρύς και τρισδιάστατος σαρωτής επιφανείας υιοθετεί την τεχνολογία σάρωσης με πλέγμα, η οποία έχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής απόδοσης, της υψηλής ακρίβειας, της αυτόματης σύνδεσης διακριτών σημείων μέσω ενός ευρέος φάσματος απεικόνισης. Επομένως, χρησιμοποιώντας το μπορεί να συλλεγούν αρχεία σημείων ολόκληρου του περιγράμματος της κάθε στρώσης με υψηλή ταχύτητα και υψηλή ποιότητα. Επί του παρόντος, το μεγαλύτερο μέρος των μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων τρισδιάστατης μέτρησης της στρώσης εναπόθεσης στη WAAM με βάση την ανάλυση κλίμακας του γκρι εφαρμόζονται για τη λήψη των γεωμετρικών διαστάσεων της διατομής της κάθε στρώσης.

Με την ανάλυση στην κλίμακα του γκρι, μπορεί να ληφθεί το μέγεθος της διατομής της στρώσης, ώστε να μην μπορούν να μετρηθούν γρήγορα οι πληροφορίες διατομής ολόκληρου του στρώματος. Επομένως, είναι απαραίτητο να μελετηθεί μια μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων από σημειακά νέφη απόθεσης ώστε να μπορέσει να πραγματοποιηθεί ανάδραση σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τη μετατόπιση του κέντρου της διατομής. Σύμφωνα με την ανάδραση αυτή, η προκαθορισμένη διαδρομή εκτύπωσης τροποποιείται για τη βελτίωση της δομικής ακρίβειας των διαστάσεων των εξαρτημάτων. Είναι επίσης γνωστό ότι οι διαφορετικές διαδρομές εκτύπωσης θα επιφέρουν μεγάλες διαφορές στις μηχανικές ιδιότητες των αντικειμένων. Προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια των διαστάσεων της δομής των εξαρτημάτων τροποποιώντας τη διαδρομή εκτύπωσης, είναι επίσης απαραίτητο να αναλυθεί η συνολική ακρίβεια και οι μηχανικές ιδιότητες του σχηματισμένου αντικειμένου.

2.2 Υλικά και μέθοδοι

Το υλικό εναπόθεσης των συρμάτων που χρησιμοποιείται στην προσθετική κατασκευή του βραχίονα της προπέλας αποτελείται από ένα μεταλλικό σύρμα με πυρήνα ροής με διάμετρο 1,2 mm, του οποίου η χημική σύσταση φαίνεται στο Πίνακα 3. Το σύστημα διαμόρφωσης αποτελείται από ένα ρομπότ KUKA KR30HA και μία μηχανή συγκόλλησης ψυχρού μετάλλου

μεταφοράς (CMT) Fronius. Ο βραχίονας της προπέλας είναι κατασκευασμένος σε χαλύβδινο υπόστρωμα 500 mm × 500 mm × 50 mm Q235.

Πίνακας 3. Χημική σύσταση του τρισδιάστατα εκτυπωμένου βραχίονα της έλικας

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	B	Fe
0.06-0.08	≤0.40	1.00-1.30	0.50-0.80	2.80-3.40	0.20-0.40	0.05-0.20	≤0.015	≤0.01	Bal.

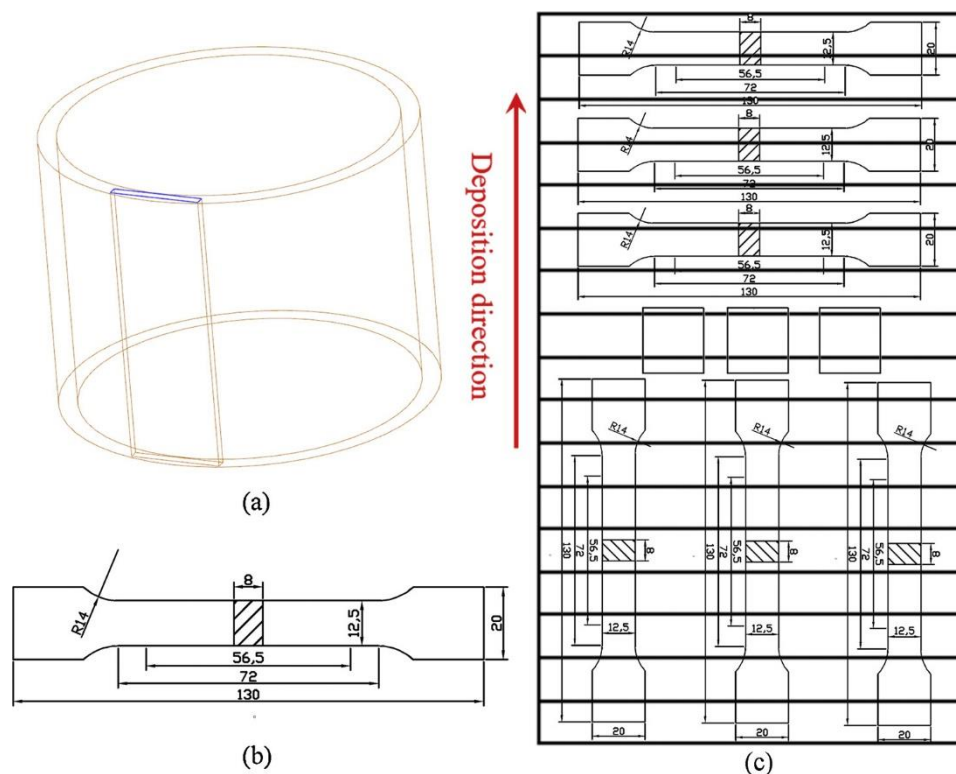
Το ρεύμα απόθεσης είναι 185 A, η τάση εναπόθεσης είναι 24,4 V, η ταχύτητα εναπόθεσης είναι 400 mm/min και το προστατευτικό αέριο είναι 80% CO₂ και 20% Ar. Το υπόστρωμα πρέπει να επεξεργασθεί και να καθαριστεί πριν την εκτύπωση και το ακροφύσιο του τόξου να διατηρηθεί κάθετο στην επιφάνεια του λιωμένου υλικού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης. Η εναπόθεση με ένα πέρασμα έχει πλάτος 7.4 mm και ύψος 2.0 mm. Πριν από την απόθεση, η ακρίβεια της μεθόδου μέτρησης των συντεταγμένων του κέντρου του τμήματος πρέπει να επαληθευτεί.

Στη διαδικασία κατασκευής, η τρισδιάστατη μέτρηση του στρώματος εναπόθεσης πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον σαρωτή 3D Powerscan αφού σχηματιστεί κάθε στοίβα και λαμβάνεται το αρχείο του νέφους των σημείων του πλήρους περιγράμματος της τρέχουσας στρώσης εναπόθεσης. Ο σαρωτής Powerscan 3D έχει ανάλυση 1,3 megapixel και το τρισδιάστατο όργανο μέτρησης έχει ακρίβεια ±0,02 mm. Η επεξεργασία του νέφους των σημείων γίνεται σε πρόγραμμα που βασίζεται στο λογισμικό MATLAB και χρησιμοποιείται για να ληφθεί η μετατόπιση του κέντρου του τμήματος της στρώσης ενώ προσαρμόζεται και η διαδρομή εκτύπωσης σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με τη μετατόπιση για να βελτιωθεί η ακρίβεια εκτύπωσης του βραχίονα.

Πριν από την απόθεση, η ακρίβεια της μεθόδου μέτρησης των συντεταγμένων του κέντρου του τμήματος πρέπει να επαληθευτεί. Αρχικά, ατσάλινη πλάκα Q235 500 mm×500 mm× 50 mm είναι στερεωμένη στον ρυθμιστή θέσης ενώ το κέντρο της τετράγωνης πλάκας ορίζεται ως το σημείο αναφοράς; στη συνέχεια τοποθετείται ένα τυπικό κυκλικό μέλος με διάμετρο 100 mm στο κέντρο του υποστρώματος; τέλος, η κεντρική συντεταγμένη του τυπικού κυκλικού μέλους μετράται με τη μέθοδο μέτρησης των συντεταγμένων από το κέντρο του τμήματος. Ακολουθούν οι κεντρικές συντεταγμένες του τρίτου στρώματος και η ακτίνα όπου μετρήθηκαν και τοποθετήθηκαν ώστε να είναι (0,0417, -0,0523, 0,0459) και 99,867 mm αντίστοιχα. Το μέσο σφάλμα των κεντρικών συντεταγμένων του τμήματος είναι ±0,0467 mm και το σφάλμα προσαρμογής της ακτίνας είναι 0,13 %. Μετά την επαλήθευση, η ακρίβεια της μεθόδου μέτρησης ικανοποιεί τις κατασκευαστικές απαιτήσεις του βραχίονα της προπέλας. Το μέσο

σφάλμα των κεντρικών συντεταγμένων του τμήματος είναι $\pm 0,0467$ mm και το σφάλμα προσαρμογής της ακτίνας είναι 0,13 %. Μετά την επαλήθευση, η ακρίβεια της μεθόδου μέτρησης ικανοποιεί τις κατασκευαστικές απαιτήσεις του βραχίονα της προπέλας.

Μετά την εναπόθεση, ο βραχίονας της προπέλας μετριέται συνολικά, ενώ στη συνέχεια τα δεδομένα του νέφους σημείων συλλέγονται και συγκρίνονται τρισδιάστατα χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό Geomagis. Εν τω μεταξύ, αναλύεται το συνολικό σφάλμα διαμόρφωσης. Το δείγμα φαίνεται στην Εικ. 6. Αρχικά, λαμβάνεται ένα ορθογώνιο δείγμα με μέγεθος 140 mm × 300 mm × 10 mm στην πλήρη του βραχίονα της έλικας από WAAM, όπως φαίνεται στο Σχ. 6(a); μετά λαμβάνονται τρία δείγματα κατά μήκος της κατεύθυνσης εναπόθεσης και τρία δείγματα κάθετα προς την κατεύθυνση εναπόθεσης του ορθογώνιου δείγματος, όπως φαίνεται στο Σχ. 6 (c). Στη συνέχεια γίνεται λήψη δειγμάτων στο στήριγμα της προπέλας για τη δοκιμή των μηχανικών ιδιοτήτων, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής σε εφελκυσμό, του σημείου διαρροής και της δοκιμής κρούσης στους -20°C , ενώ η μικροδομή των διαμορφωμένων εξαρτημάτων αναλύεται με οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (TEM), αντίστοιχα.



Εικόνα 6. Σχήμα του ορθογώνιου δείγματος (α), (β) οι διαστάσεις του δείγματος εφελκυσμού και (c) οι δειγματοληπτικές θέσεις

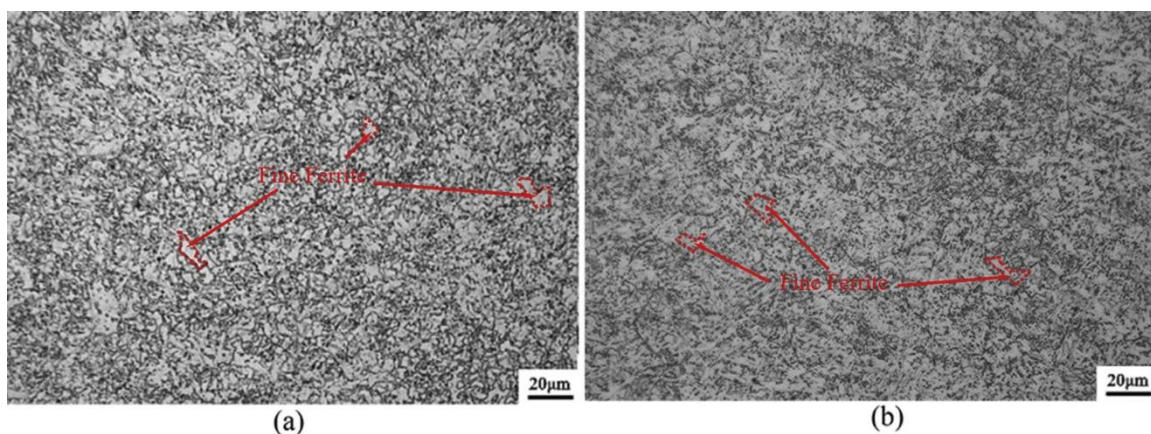
2.3 Μικροδομή και απόδοση του βραχίονα της προπέλας

Οι μηχανικές ιδιότητες του βραχίονα της προπέλας φαίνονται στον Πίνακα 4. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η αντοχή εφελκυσμού, η τάση διαρροής και η αντοχή σε κρούση στους $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ του βραχίονα της προπέλας από WAAM είναι υψηλότερη από το χυτό υλικό.

Η επιμήκυνση είναι βασικά ίδια με του χυτού υλικού. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4, οι μηχανικές ιδιότητες του βραχίονα της έλικας είναι ουσιαστικά ομοιόμορφες στην κατεύθυνση κάθετα στην εναπόθεση και κατά μήκος της κατεύθυνσης εναπόθεσης. Όπως φαίνεται στο Εικ. 7, η μικροδομή του βραχίονα της έλικας αποτελείται από λεπτό φερρίτη και μπαινίτη σε διεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση εναπόθεσης και κάθετα αυτής. Στη διαδικασία κατασκευής WAAM του βραχίονα της έλικας, η μικροδομή μετατρέπεται από χονδροειδή στερεοποιημένη δομή σε ομοιόμορφο ομοαξονικό φερρίτη αφού η συσσωρευμένη στρώση έχει υποστεί πολλαπλούς θερμικούς κύκλους. Η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες είναι ομοιόμορφες και δεν έχουν σχεδόν καθόλου ανισοτροπία. Η μικροδομή του βραχίονα της προπέλας φαίνεται στην Εικ. 7, και αποτελείται από λεπτό φερρίτη και μπαινίτη. Η χημική σύνθεση του βραχίονα της έλικας είναι όπως φαίνεται στον Πίνακα 6, ενώ είναι το Mn και το Ni που διευρύνουν τη ζώνη φάσης ωστενίτη, κατά συνέπεια καθυστερούν τη μεταμόρφωση του ωστενίτη. Ο μετασχηματισμός της φάσης του ωστενίτη συμβαίνει σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Σε αυτή τη στιγμή, το στοιχείο C δεν διαχέεται εύκολα, το στερεό διάλυμα C στο φερρίτη έχει ως αποτέλεσμα φερρίτη υψηλότερης περιεκτικότητας σε C, ο οποίος μετατρέπεται σε μπαινίτη μετά τη διαδικασία ψύξης.

Πίνακας 4. Μηχανικές ιδιότητες του εκτυπωμένου βραχίονα της έλικας

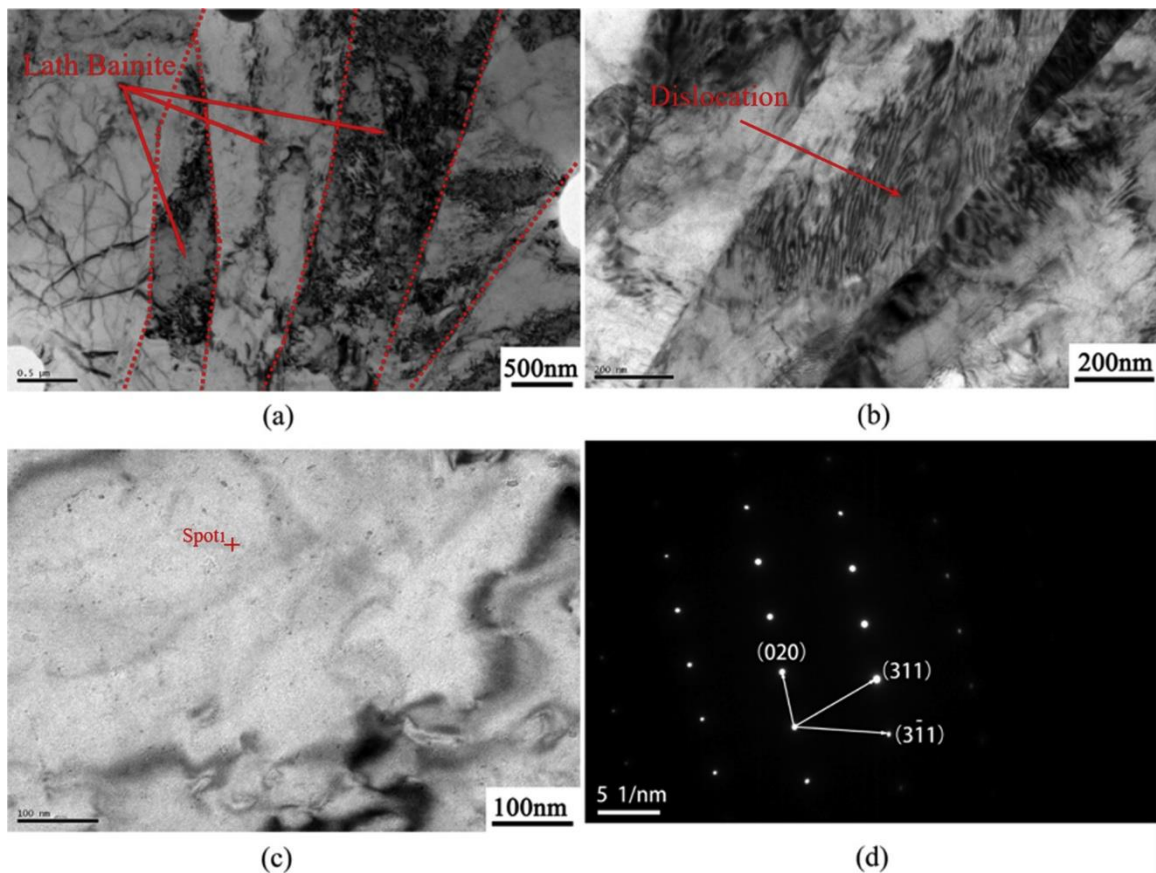
Material	Yield strength Rp0.2/MPa	Tensile strength Rm/MPa	Elongation A/%	Impact toughness (-20°C)A _K /J
Casting propeller bracket	≥ 200	≥ 400	≥ 25.0	≥ 30
Forming part (Perpendicular the deposition direction)	660	796	26.0	53
Forming part (Along the deposition direction)	651	778	23.0	48



Εικόνα 7. Η μικροδομή του βραχίονα προπέλας όπως φαίνεται από (a) οπτικό μικροσκόπιο και (b) μικροσκόπιο SEM

Το μέγεθος της σφήνας μπαινίτη είναι μεταξύ 0,5 μm και 1 μm , όπως φαίνεται στην Εικ. 8α, ενώ υπάρχουν ζώνες υψηλής πυκνότητας, όπως φαίνεται στην Εικ. 8β. Επομένως, ο βραχίονας προπέλας από WAAM έχει εξαιρετική σκληρότητα. Ένα μεγάλος αριθμός ιζημάτων δεύτερης φάσης κατακρημνίστηκαν κατά την εναπόθεση του μετάλλου, όπως φαίνεται στην Εικ. 8γ.

Η Εικ. 14δ δείχνει το σημείο περίθλασης του ιζήματος, η απόσταση του κρυσταλλικού επιπέδου και της γωνίας του κρυστάλλου μετράται και συγκρίνεται με μία τυπική κάρτα καρβιδίου βαναδίου PDF (αρχείο διάθλασης ισχύος) (VC). Έτσι τα ιζήματα μπαινίτη και VC εξασφαλίζουν υψηλή αντοχή του στηρίγματος της προπέλας.



Εικόνα 8. Φωτογραφία TEM του βραχίονα της προπέλας όπου φαίνονται (a) Σφήνα μπαινίτη, (b) Μετατόπιση της σφήνας μπαινίτη, (c) ιζήμα και (d) Σημάδια περίθλασης φωτός λόγω ιζήματος

3. Συνήθη οφέλη και ελαττώματα εξαρτημάτων που κατασκευάζονται με WAAM

Συνοπτικά, τα οφέλη των αντικειμένων που κατασκευάζονται με χρήση της WAAM παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Ικανότητα τρισδιάστατης εκτύπωσης μεγάλων μεταλλικών αντικειμένων**

Η WAAM είναι ιδιαιτέρως κατάλληλη στην κατασκευή μεγάλης κλίμακας μεταλλικών αντικειμένων. Αυτό αντίκειται στις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής από σύντηξη μεταλλικής σκόνης (PBF), που γενικά χρησιμοποιούνται στην παραγωγή μικρότερων και υψηλής ακρίβειας αντικειμένων. Σε αντίθεση με μηχανές PBF AM, που έχουν ένα περιορισμένο εύρος κατασκευών, ο ρομποτικός βραχίονας μίας μηχανής WAAM έχει μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων, κάτι που σημαίνει ότι το μέγεθος ενός αντικειμένου δεν περιορίζεται στο χώρο αλλά μόνο από την απόσταση στην οποία μπορεί να φτάσει ο βραχίονας. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή μεγάλων αντικειμένων, κάτι που δεν θα μπορούσε να ήταν εφικτό στην περίπτωση της διεργασίας PBF.

- **Μικρότερο κόστος κατεργασίας των υλικών**

Όσον αφορά το κόστος υλικού, το σύρμα συγκόλλησης που χρησιμοποιείται στη διαδικασία εκτύπωσης WAAM είναι σημαντικά φθηνότερο από τη μεταλλική σκόνη που χρησιμοποιείται στη διεργασία PBF. Αυτό συμβαίνει επειδή η τεχνολογία WAAM βασίζεται στη συγκόλληση, μια καθιερωμένη τεχνολογία κατασκευής. Το υλικό WAAM περιλαμβάνει συνήθως εξοπλισμό συγκόλλησης άμεσα διαθέσιμου, ο οποίος είναι λιγότερο ακριβός από πολλούς μεταλλικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές που διατίθενται στην αγορά. Επίσης, το σύρμα συνήθως είναι ευκολότερο στη χρήση από τη σκόνη, η οποία απαιτεί συγκεκριμένο προστατευτικό εξοπλισμό κατά τη χρήση.

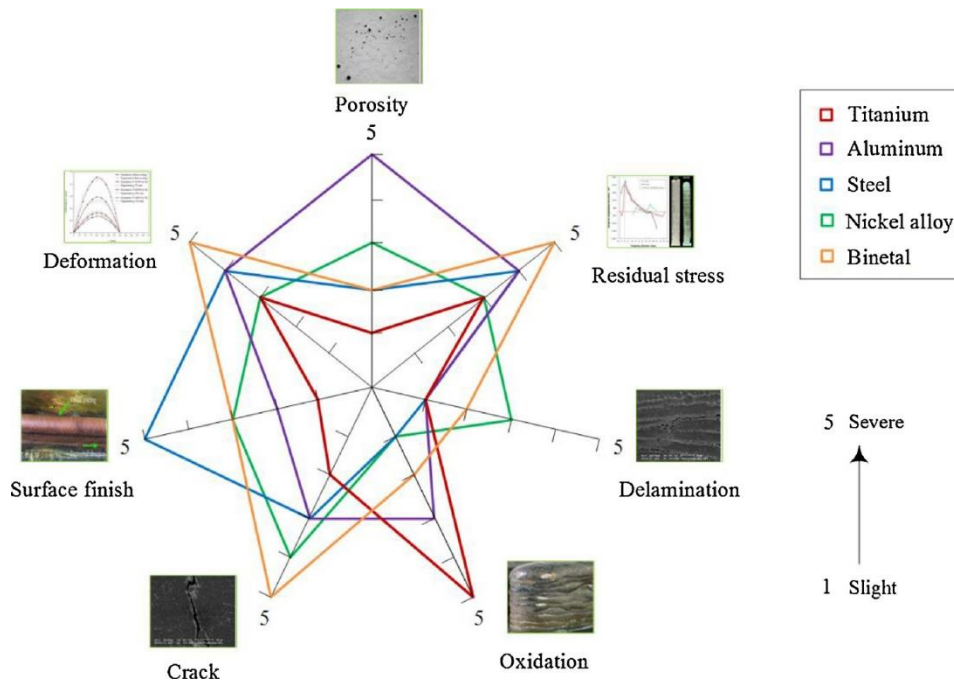
- **Κατάλληλη διαδικασία για εργασίες επισκευής**

Η WAAM είναι επίσης μια καλή επιλογή για εργασίες επισκευής και συντήρησης για συγκεκριμένα εξαρτήματα όπως πτερύγια τουρμπίνας, καθώς και καλούπια και μήτρες. Τα φθαρμένα τμήματα ή τα κατεστραμμένα εξαρτήματα μπορούν να επισκευαστούν με τη WAAM με την εναπόθεση νέου υλικού στην επιφάνειά του. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους, καθώς εξαλείφει την ανάγκη παραγωγής ενός νέου αντικειμένου από την αρχή.

- **Παραγωγή αντικειμένων υψηλής ποιότητας**

Τα αντικείμενα που παράγονται με WAAM είναι αξιοσημείωτα για την υψηλή πυκνότητα και τις υψηλές μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες είναι συγκρίσιμες με αντικείμενα που κατασκευάζονται με παραδοσιακές μεθόδους. Καθώς η τροφοδοσία του σύρματος αποτελείται από ένα υλικό εισόδου 100% πυκνό, υπάρχει αμελητέο πορώδες που υπεισέρχεται στη διαδικασία κατασκευής, που οδηγεί σε ένα πολύ πυκνό αντικείμενο τελικά.

Αν και οι μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται από τη WAAM είναι σε πολλές περιπτώσεις συγκρίσιμες με αυτές των αντίστοιχων συμβατικών επεξεργασμένων αντικειμένων, υπάρχουν ωστόσο ορισμένα ελαττώματα των κατεργασιών προσθετικής κατασκευής που πρέπει να αντιμετωπιστούν για κρίσιμες εφαρμογές. Το πορώδες, το υψηλό επίπεδο παραμενουσών τάσεων και οι ρωγμές πρέπει να αποφεύγονται, ιδιαίτερα για μέρη που εκτίθενται σε ακραία περιβάλλοντα όπου αυτά τα ελαττώματα μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία λειτουργίας όπως η κόπωση σε υψηλή θερμοκρασία. Μπορεί να προκύψουν ελαττώματα στη WAAM για διάφορους λόγους, όπως η κακή στρατηγική προγραμματισμού, η ασταθής δυναμική συγκόλλησης λόγω κακής ρύθμισης παραμέτρων, οι θερμικές παραμορφώσεις σχετιζόμενες με συσσώρευση θερμότητας [95], η περιβαλλοντική επίδραση (όπως μόλυνση λόγω αερίου) και άλλες δυσλειτουργίες του μηχανήματος. Όπως φαίνεται στην Εικ. 4, ορισμένα υλικά τείνουν να είναι ευάλωτα σε συγκεκριμένα ελαττώματα. Για παράδειγμα, σοβαρή οξειδωση κραμάτων τιτανίου, εμφάνιση πορώδους σε κράματα αλουμινίου, κακή τραχύτητα επιφάνειας σε χάλυβα καθώς και σοβαρή παραμόρφωση και ρωγμές σε διμεταλλικά συστατικά έχουν βρεθεί ότι συνήθως εμφανίζονται.



Εικόνα 4. Συσχέτιση μεταξύ υλικών και ελαττωμάτων στη WAAM

- **Παραμόρφωση και Παραμένουσες Τάσεις**

Όπως και σε άλλες διαδικασίες προσθετικής κατασκευής, παραμόρφωση και παραμένουσες τάσεις είναι εγγενείς στη διαδικασία της WAAM και είναι αδύνατο να αποφευχθεί εντελώς η δημιουργία τους. Οι παραμένουσες τάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε παραμόρφωση του τμήματος, απώλεια γεωμετρικής ανοχής, αποκόλληση των στρώσεων κατά την εναπόθεση, καθώς και επιδείνωση της απόδοσης έναντι κόπωσης και της αντίστασης σε θραύση των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται προσθετικά. Επομένως, ο έλεγχος και η ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης και της παραμένουσας τάσης είναι ουσιώδεις ερευνητικές περιοχές.

Διάφοροι τύποι παραμορφώσεων εμφανίζονται σε κατασκευασμένα εξαρτήματα από WAAM, συμπεριλαμβανομένης της διαμήκου και εγκάρσιας συρρίκνωσης, της καμπτικής παραμόρφωσης, της γωνιακής παραμόρφωσης και της περιστροφικής παραμόρφωσης [50]. Οι στρεβλώσεις που προκαλούνται από θερμική διαστολή και συρρίκνωση του εξαρτήματος κατά την επαναληπτική διεργασία τήξης και ψύξης, είναι ένα ιδιαίτερα ζήτημα για μεγάλες κατασκευές με λεπτά τοιχώματα [51]. Η παραμένουσα τάση είναι η τάση που παραμένει στο υλικό όταν αφαιρεθούν όλες οι εξωτερικές φορτίσεις. Εάν οι παραμένουσες τάσεις είναι αρκετά υψηλές, μπορεί να είναι ένας κρίσιμος παράγοντας επιρροής των μηχανικών ιδιοτήτων και της απόδοσης έναντι

κόπωσης των αντικειμένων. Εάν η παραμένουσα τάση υπερβαίνει την τοπική αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό, θα γίνει ράγισμα, ενώ αν είναι υψηλότερη από το τοπικό όριο διαρροής αλλά χαμηλότερο από τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, θα συμβεί πλαστική παραμόρφωση [52]. Οι Ding et al. [32] διαπίστωσαν ότι η παραμένουσα τάση κατανέμεται ομοιόμορφα στο εναποτεθειμένο με WAAM υλικό και η παραμένουσα τάση στο προηγούμενο στρώμα έχει μικρή επίδραση στα μελλοντικά στρώματα. Μετά την απελευθέρωση της σύσφιξης, ωστόσο, η εσωτερική πίεση ανακατανέμεται με πολύ χαμηλότερη τιμή στην κορυφή του αναπόσπαστου μέρους από ότι στη διεπαφή με το υπόστρωμα, με αποτέλεσμα την καμπτική παραμόρφωση του εξαρτήματος. Ο σχεδιασμός της διαδρομής προκαλεί επίσης την παραμόρφωση και την εξέλιξη της παραμένουσας τάσης στη διαδικασία WAAM [53]. Εάν σχεδιασθεί κατάλληλη διαδρομή απόθεσης, θα βοηθήσει σημαντικά στη βελτίωση αυτών των ελαττωμάτων, ειδικά στην κατασκευή μεγάλων μετάλλων. Μια αναλυτική επισκόπηση της προέλευσης της παραμένουσας τάσης υπερβαίνει τους σκοπούς αυτού του άρθρου.

Μεταξύ όλων των υλικών που κατασκευάζονται με WAAM, διμεταλλικά εξαρτήματα παρουσιάζουν υψηλού επιπέδου παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις λόγω της διαφοράς στη θερμική διαστολή των υλικών. Ως εκ τούτου, απαιτείται ακριβής έλεγχος της ενδιάμεσης θερμοκρασίας όταν χρησιμοποιούνται διμεταλλικά υλικά. Το κατασκευασμένο με WAAM κράμα Inconel έχει συγκριτικά χαμηλότερα επίπεδα παραμενουσών τάσεων, αλλά είναι πιο ευαίσθητο σε ελαττώματα διεργασίας όπως αποκόλληση, λυγισμός και στρέβλωση, δεδομένου ότι η παραμένουσα τάση του είναι συνήθως υψηλότερη από την τάση διαρροής του [54]. Άλλα συγκριτικά μαλακότερα υλικά, όπως τα κράματα αλουμινίου, υπόκεινται εύκολα σε ελαττώματα παραμόρφωσης λόγω του υψηλού τους συντελεστή θερμικής διαστολής. Καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του υλικού στη διαδικασία WAAM απαιτείται για τον έλεγχο των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων κατά την εναπόθεση.

Η παραμόρφωση και η παραμένουσα τάση συνδέονται με πολλές παραμέτρους της διεργασίας, όπως το ρεύμα συγκόλλησης, η τάση συγκόλλησης, ο ρυθμός τροφοδοσίας, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, ο ρυθμός ροής προστατευτικού αερίου κ.λπ. Υπάρχει ακόμη έλλειψη συστηματικών μεθόδων για τον έλεγχο των ελαττωμάτων μέσω βελτιστοποιημένης επιλογής ή ρύθμισης αυτών των παραμέτρων. Ευτυχώς, αρκετές τεχνικές μετά τη διαδικασία έχει αποδειχθεί ότι μετριάζουν αποτελεσματικά τις παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις.

- **Πορώδες**

Η ύπαρξη πορώδους είναι ένα άλλο κοινό ελάττωμα στη διαδικασία WAAM που χρειάζεται να ελαχιστοποιηθεί λόγω δυσμενών επιπτώσεων στις μηχανικές ιδιότητες [55]. Πρώτον, το πορώδες θα οδηγήσει σε ένα εξάρτημα με χαμηλή αντοχή λόγω της επίδρασης μικρορωγμών, και δεύτερον, συνήθως προκαλεί χαμηλά χαρακτηριστικά έναντι κόπωσης λόγω της χωρικής κατανομής διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών. Γενικά, αυτού του είδους τα ελαττώματα ταξινομούνται κυρίως ως προκαλούμενα είτε από πρώτες ύλες [56] είτε από τις διεργασίες.

Η πρώτη ύλη στη WAAM, συμπεριλαμβανομένου του ληφθέντος σύρματος και του υποστρώματος, έχει συχνά έναν βαθμό επιφανειακής μόλυνσης, από υγρασία, γράσο και άλλες ενώσεις υδρογονανθράκων που μπορεί να είναι δύσκολο να αφαιρεθούν εντελώς. Αυτοί οι ρύποι μπορούν εύκολα να απορροφηθούν από το λιωμένο υλικό και στη συνέχεια να δημιουργήσουν πορώδες μετά τη στερεοποίηση. Μεταξύ κοινών υλικών, το κράμα αλουμινίου είναι το πιο ευαίσθητο σε αυτό το ελάττωμα καθώς η διαλυτότητα του υδρογόνου σε στερεό και υγρό (0,036 έναντι 0,69 cm³/100 g σε σημείο τήξης 660°C, αντίστοιχα) είναι σημαντικά διαφορετική. Ακόμη και μικρές ποσότητες διαλυμένου υδρογόνου σε υγρή κατάσταση μπορεί να οδηγήσουν σε υπέρβαση του ορίου διαλυτότητας μετά τη στερεοποίηση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πορώδους. Ως εκ τούτου, η καθαρότητα των πρώτων υλών είναι κρίσιμη, ειδικά για τα κράματα αλουμινίου.

Το πορώδες που προκαλείται από τη διαδικασία είναι συνήθως μη σφαιρικό και προκαλείται κυρίως από κακό σχεδιασμό της διαδρομής ή ασταθή διαδικασία εναπόθεσης. Όταν η διαδρομή εναπόθεσης είναι πολύπλοκη ή η διαδικασία κατασκευής είναι μεταβλητή, ανεπαρκής μόχλευση ή πιπίλισμα παράγεται εύκολα, δημιουργώντας κενά στις επηρεαζόμενες περιοχές.

Για τον έλεγχο του πορώδους, μπορούν να υιοθετηθούν οι ακόλουθες μέθοδοι: (1) Προτιμάται διεργασία που βασίζεται σε AC GMAW ή διαδικασία με βάση το CMT-PADV (βελτιωμένη παλμική μεταφορά κρύου μετάλλου, ελεγχόμενη μεταφορά μέσω διεργασίας βραχυκυκλώματος GMAW), ειδικά για το αλουμίνιο: (2) Συνιστάται ισχυρά η χρήση υψηλότερης ποιότητας προστατευτικού αερίου με σφιχτές ενώσεις, μη οργανικές σωληνώσεις και μικρά μήκη σωλήνων, (3) οι επιφάνειες του σύρματος και του υποστρώματος να είναι όσο το δυνατόν πιο καθαρές πριν την κατασκευή, (4) υψηλής ποιότητας πρώτη ύλη πρέπει να χρησιμοποιείται, (5) το σχήμα του εναποτιθέμενου

σφαιριδίου πρέπει να βελτιστοποιείται, (6) το θερμικό προφίλ κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας πρέπει να παρακολουθείται και να ελέγχεται, (7) μπορεί να εφαρμοστεί επεξεργασία μετά την εναπόθεση, όπως έλαση.

- **Ρωγμές και αποκόλληση**

Ομοίως με τις παραμένουσες τάσεις και τις παραμορφώσεις, ρωγμές και αποκολλήσεις δεν αφορούν μόνο τα θερμικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας, αλλά σχετίζονται και με τα χαρακτηριστικά του υλικού απόθεσης. Συνήθως, μια ρωγμή κατηγοριοποιείται είτε ως ρωγμή στερεοποίησης είτε οριακή ρωγμή κόκκου λόγω της WAAM διαδικασίας [52]. Ο πρώτος τύπος ρωγμής εξαρτάται κυρίως από τη στερεοποιητική φύση του υλικού και συνήθως προκαλείται από την παρεμπόδιση της ροής στερεοποιημένων κόκκων ή την υψηλή καταπόνηση στη δεξαμενή τήγματος. Συχνά, ρωγμές στα όρια των κόκκων δημιουργούνται κατά μήκος των ορίων τους λόγω των διαφορών μεταξύ της οριακής μορφολογίας και τον πιθανό σχηματισμό ή τη διάλυση ιζήματος. Αποκόλληση ή διαχωρισμός παρακείμενων στρωμάτων συμβαίνει λόγω ατελούς τήξης ή ανεπαρκούς επανατήξης του υποκείμενου στερεού μεταξύ των στρώσεων. Γενικά, αυτή η ανεπάρκεια είναι ορατή και δεν μπορεί να επιδιορθωθεί με επεξεργασία μετά τη διαδικασία. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό το ελάττωμα, πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο επεξεργασίας όπως για παράδειγμα προθέρμανση του υποστρώματος. Οι συνδυασμοί διμεταλλικών υλικών, όπως Al/Cu, Al/Ti και Al/Fe, είναι αρκετά επιρρεπείς σε ρωγμές και αποκόλληση όταν κατασκευάζεται με τη διαδικασία WAAM. Τα ανόμοια μέταλλα έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους στην αμοιβαία διαλυτότητα και στη χημική αντιδραστικότητα με συνέπεια η διαμεταλλικό φάση ισορροπίας να σπάει ελεύθερα, προκαλώντας έτσι την ανάπτυξη ρωγμών κατά μήκος των ορίων των κόκκων. Επίσης, το κράμα Inconel δημιουργεί εύκολα ζητήματα ρωγμών στερεοποίησης λόγω της ύπαρξης υγρού φιλμ στην τελική στερεοποίηση. Και οι δύο αυτοί τύποι υλικών θα πρέπει να τύχουν ιδιαίτερης προσοχής για την αποφυγή ρωγμών και αποκόλλησης.

Για τον έλεγχο των ελαττωμάτων των ρωγμών, μπορούν να ληφθούν αντίστοιχα μέτρα όπως τα εξής: (1) Μικτά σύρματα και βελτιστοποίηση των συνθέσεων τους, (2) Μείωση του ρυθμού ψύξης κατά τη διαδικασία εναπόθεσης, (3) Άλλα μέτρα για τη βελτίωση της αντοχής μέσω δημιουργίας διαφορετικών στερεών διαλυμάτων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την παρούσα βιβλιογραφική επισκόπηση επιχειρήθηκε να δοθεί μια λεπτομερής παρουσίαση των πρόσφατων τεχνολογικών εξελίξεων σχετικά με τη διαδικασία WAAM, με έμφαση στη μικροδομή, στα χρησιμοποιούμενα υλικά, στις μηχανική ιδιότητες και στα οφέλη και τα ελαττώματα κατασκευασμένων μερών με χρήση της εν λόγω διεργασίας.

Στη διαδικασία WAAM με μεταλλικά υλικά, είναι θεμελιώδεις οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της χημικής σύστασης του υλικού και της μικροδομής κι αυτές έχουν αποτέλεσμα στις ιδιότητες του υλικού και την ποιότητα κατασκευής. Δεδομένου ότι η διαδικασία WAAM είναι εγγενώς μία μη ισορροπημένη θερμικά διεργασία, είναι δύσκολο να το προσδιοριστεί και να ελεγχθεί η μικροδομική, η οποία είναι υπεύθυνη για τη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων στο αποτεθειμένο τμήμα. Περαιτέρω ερευνητική προσοχή θα πρέπει να δοθεί στη μελέτη της υποκείμενης φυσικής, των υποκείμενων φυσικών και χημικών μεταλλουργικών μηχανισμών στη διαδικασία WAAM ώστε να παρασχεθεί καθοδήγηση για τη βελτιστοποίηση και τον έλεγχο της διαδικασίας. Τα ελαττώματα που δημιουργούνται στο τμήμα που παράγεται από WAAM σχετίζονται στενά με τα χαρακτηριστικά του υλικού-στόχου και τις παραμέτρους της διεργασίας.

Καθώς η WAAM ωριμάζει ως εμπορική παραγωγική διαδικασία, η ανάπτυξη ενός εμπορικά διαθέσιμου συστήματος WAAM για μεταλλικά εξαρτήματα είναι μια διεπιστημονική πρόκληση, η οποία ενσωματώνει τη φυσική ανάπτυξη διεργασιών συγκόλλησης, την επιστήμη των υλικών, τη θερμομηχανική, τα μηχανοτρονικά και το σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου. Παρόλο που πολλή έρευνα έχει διεξαχθεί τα τελευταία χρόνια σε διάφορους τομείς, όπως ο σχεδιασμός διαδικασιών, ο προγραμματισμός και η μελέτη υλικού, ένα γενικό σύστημα WAAM παρόμοιο με αυτό που διατίθεται στο εμπόριο για τη σύντηξη με κλίνη σκόνης, δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί.

Όσον αφορά στις εφαρμογές της μεθόδου στη ναυπηγική βιομηχανία αυτές προς το παρόν περιορίζονται στην κατασκευή του βραχίονα της έλικας πλοίων (είτε απλή είτε συνεργατική) όπου η προσαρμογή της διαδρομής εκτύπωσης γίνεται σε πραγματικό χρόνο για τη βελτίωση της ακρίβειας του βραχίονα της προπέλας και στην επιδιόρθωση κατασκευών αλουμινίου σε θαλάσσιες κατασκευές όπου προσφέρεται η δυνατότητα εξοικονόμησης υλικού και ως εκτούτου περιορισμού του κόστους.

Λόγω της ποικιλίας στις απαιτήσεις διαφορετικών υλικών και της ποικίλης κατασκευαστικής κλίμακας, πολλά διαφορετικά σχέδια συστημάτων WAAM αναμένεται να αναπτυχθούν και να

βελτιστοποιηθούν για συγκεκριμένες εφαρμογές, αντί για ένα ενιαίο σύστημα που είναι ικανό να αντιμετωπίσει όλα τα πιθανά προβλήματα.

Εξάλλου, η διαδικασία υπόσχεται σημαντική μείωση της σπατάλης υλικού και κόστους, καθώς και αυξημένη ελευθερία σχεδιασμού και προσαρμογής των πολύπλοκων εξαρτημάτων. Η ανάπτυξη στρατηγικών ή βοηθητικών διαδικασιών για την αντιμετώπιση των ελαττωμάτων είναι πρωταρχικής σημασίας. Με την απαίτηση υψηλής ποιότητας αντικειμένων από WAAM, το προτεινόμενο πλαίσιο που βασίζεται στην ποιότητα θα έχει ευρεία εφαρμογή τα επόμενα χρόνια.

BIBΛIOΓPAΦIA – ΠHΓEΣ

- [1] S. R. Singh, P. Khanna, Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials, *Materials Today: Proceedings* 44 (2021) 118-128.
- [2] B. Wua, Z. Pana, D. Dingb, D. Cuiuria, H. Lia, J. Xuc, J. Norrisha, A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, *J. of Manufacturing Processes* 35 (2018) 127-139.
- [3] Reduce costs and increase output with robotic welding, in, <https://www.scottautomation.com/applications/metal-fabrication/welding/>.
- [4] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove, Wire + arc additive manufacturing. *Mater Sci Technol* 32 (2016) 641-647.
- [5] M. Chaturvedi, E. Scutelnicu, C. C. Rusu, L. R. Mistodie, D. Mihailescu, A. V. Subbiah, Wire Arc Additive Manufacturing: Review on Recent Findings and Challenges in Industrial Applications and Materials Characterization, *Metals* 11 (2021)
- [6] S. Ríos, P.A. Colegrove, S.W. Williams, Metal transfer modes in plasma Wire + Arc additive manufacture, *J. Mater. Process. Technol.* 264 (2019) 45–54.
- [7] J. Zhang, F. Liou, Multi-Axis Planning of a Hybrid Material Deposition and Removal Combined Process, *J. Mach. Manuf. Autom.*, 2 (2013) 46–57.
- [8] C. Cunningham, J. Flynn,; A. Shokrani, V. Dhokia, S. Newman, Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing, *Addit. Manuf.* 22 (2018) 672–686.
- [9] J. Prado-Cerqueira, J. Diéguez, A. Camacho, Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM), *Procedia Manuf.* 13 (2017) 895–902.
- [10] P. Shukla, B. Dash, D. V. Kiran, S. Bukkapatnam, Arc Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Process, *Procedia Manuf.*, 48 (2020) 725–729.
- [11] J. Xiong, Y. Lei, H. Chen, G. Zhang, Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition, *J. Mater. Process. Technol.*, 240 (2017) 397–403.
- [12]. C. Zhang, Y. Li, M. Gao, X. Zeng, Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source, *Mater. Sci. Eng. A*, 711 (2018) 415–423.
- [13] Shukla, P.; Dash, B.; Kiran, D.V.; Bukkapatnam, S. Arc Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Process, *Procedia Manuf.*, 48 (2020) 725–729.
- [14] Y. Luo, J. Li, J. Xu, L. Zhu, J. Han, C. Zhang, Influence of pulsed arc on the metal droplet deposited by projected transfer mode in wire-arc additive manufacturing, *J. Mater. Process. Technol.*, 259 (2018) 353–360.

- [15] L. Zhu, Y. Luo, J. Han, C. Zhang, J. Xu, D. Chen, Energy characteristics of droplet transfer in wire-arc additive manufacturing based on the analysis of arc signals, *Measurement*, 134 (2019) 804–813.
- [16] X. Xu, S. Ganguly, J. Ding, C. E. Seow, S. Williams, Enhancing mechanical properties of wire + arc additively manufactured INCONEL 718 super alloy through in-process thermomechanical processing, *Mater. Des.*, 160 (2018) 1042–1051.
- [17]. C. E. Seow, H. Coules, G. Wu, R. H. Khan, X. Xu, S. Williams, Wire + Arc Additively Manufactured Inconel 718: Effect of post-deposition heat treatments on microstructure and tensile properties, *Mater. Des.*, 183 (2019) 108157.
- [18]. W. Yangfan, C. Xizhang, S. Chuanchu, Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing, *Surf. Coatings Technol.*, 374 (2019) 116–123.
- [19] G. Marinelli, F. Martina, S. Ganguly, S. Williams, Development of Wire + Arc additive manufacture for the production of large-scale unalloyed tungsten components, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 82 (2019) 329–335.
- [20] G. Marinelli, F. Martina, S. Ganguly, S. Williams, Microstructure, hardness and mechanical properties of two different unalloyed tantalum wires deposited via wire + arc additive manufacture, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 83 (2019) 104974.
- [21] Y. Wang, X. Chen, S. Konovalov, C. Su, A. N. Siddiquee, N. Gangil, In-situ wire-feed additive manufacturing of Cu-Al alloy by addition of silicon, *Appl. Surf. Sci.*, 487 (2019) 1366–1375. [CrossRef]
- [22] L. Zhu, Y. Luo, J. Han, C. Zhang, J. Xu, D. Chen, D, Energy characteristics of droplet transfer in wire-arc additive manufacturing based on the analysis of arc signals, *Measurement* 134 (2019) 804–813.
- [23] J. Huang, W. Yuan, S. Yu, L. Zhang, X. Yu, D. Fan, Droplet transfer behavior in bypass-coupled wire arc additive manufacturing, *J. Manuf. Process.*, 49 (2020) 397–412.
- [24] S. Li, L.-J. Zhang, J. Ning, X. Wang, G.-F. Zhang, J.-X. Zhang, S.-J. Na, B. Fatemeh, Comparative study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas. *Addit. Manuf.*, 34 (2020).
- [25] H. Geng, J. Li, J. Xiong, X. Lin, F. Zhang, Geometric Limitation and Tensile Properties of Wire and Arc Additive Manufacturing 5A06 Aluminum Alloy Parts, *J. Mater. Eng. Perform.*, 26 (2016) 621–629.
- [26] A. Horgar, H. Fostervoll, B. Nyhus, X. Ren, M. Eriksson, O. Akselsen, Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire, *J. Mater. Process. Technol.*, 259 (2018) 68–74.
- [27] Z. Qi, B. Cong, B. Qi, H. Sun, G. Zhao, J. Ding, Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys, *J. Mater. Process. Technol.*, 255 (2018) 347–353.

- [28] J. Gu, S. Yang, M. Gao, J. Bai, Y. Zhai, J. Ding, Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling, *Mater. Des.*, 186 (2020).
- [29] C. Li, H. Gu, W. Wang, S. Wang, L. Ren, Z. Wang, Z. Ming, Y. Zhai, Effect of Heat Input on Formability, Microstructure, and Properties of Al–7Si–0.6Mg Alloys Deposited by CMT-WAAM Process, *Appl. Sci.*, 10 (2019) 70.
- [30] Z. Qi, B. Qi, B. Cong, H. Sun, G. Zhao, J. Ding, Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2024 aluminum alloy components: As-deposited and post heat-treated, *J. Manuf. Process.*, 40 (2019) 27–36.
- [31] I. Ünsal, M. Hirtler, A. Sviridov, M. Bambach, Material Properties of Features Produced from EN AW6016 by Wire-Arc Additive Manufacturing, *Procedia Manuf.*, 47 (2020) 1129–1133.
- [32] S. Wang, H. Gu, W. Wang, C. Li, L. Ren, Z. Wang, Y. Zhai, P. Ma, The Influence of Heat Input on the Microstructure and Properties of Wire-Arc-Additive-Manufactured Al-Cu-Sn Alloy Deposits, *Metals*, 10 (2020) 79.
- [33] X. Yang, J. Liu, Z. Wang, X. Lin, F. Liu, W. Huang, E. Liang, Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured AZ31 magnesium alloy using cold metal transfer process, *Mater. Sci. Eng. A*, 774 (2020) 138942.
- [34] X. Xu, S. Ganguly, J. Ding, C. E. Seow, S. Williams, Enhancing mechanical properties of wire + arc additively manufactured INCONEL 718 super alloy through in-process thermomechanical processing, *Mater. Des.*, 160 (2018) 1042–1051.
- [35] C.E. Seow, H. Coules, G. Wu, R. H. Khan, X. Xu, S. Williams, Wire + Arc Additively Manufactured Inconel 718: Effect of post-deposition heat treatments on microstructure and tensile properties, *Mater. Des.*, 183 (2019).
- [36] W. Yangfan, C. Xizhang, S. Chuanchu, Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing, *Surf. Coatings Technol.*, 374 (2019) 116–123.
- [37] F. Hejripour, D.T. Valentine, D. K. Aidun, Study of mass transport in cold wire deposition for Wire Arc Additive Manufacturing, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 125 (2018) 471–484.
- [38] F. Hejripour, F. Binesh, M. Hebel, D. K. Aidun, Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel, *J. Mater. Process. Technol.*, 272 (2019) 58–71.
- [39] Y. Li, Y. Sun, Q. Han, G. Zhang, I. Horváth, Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts, *J. Mater. Process. Technol.*, 252 (2018) 838–848.
- [40] Y. Li, X. Huang, I. Horváth, G. Zhang, GMAW-based additive manufacturing of inclined multi-layer multi-bead parts with flat-position deposition, *J. Mater. Process. Technol.*, 262 (2018) 359–371.
- [41] H. Geng, J. Li, J. Xiong, X. Lin, F. Zhang, F. Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.*, 243 (2017) 40–47.

- [42] K. Oyama, S. Diplas, M. M'Hamdi, A. E. Gunnæs, A. S. Azar, Heat source management in wire-arc additive manufacturing process for Al-Mg and Al-Si alloys, *Addit. Manuf.*, 26 (2019) 180–192.
- [43] F. Montevecchi, G. Venturini, N. Grossi, A. Scippa, G. Campatelli, Heat accumulation prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing using air jet impingement, *Manuf. Lett.*, 17 (2018) 14–18.
- [44] C. V. Haden, G. Zeng, F. M. Carter, C. Ruhl, B. A. Krick, D. G. Harlow, Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties. *Addit. Manuf.*, 16 (2017) 115–123.
- [45] Y. Feng, B. Zhan, J. He, K. Wang, The double-wire feed and plasma arc additive manufacturing process for deposition in Cr-Ni stainless steel. *J. Mater. Process. Technol.*, 259 (2018) 206–215.
- [46] L. Wang, J. Xue, Q. Wang, Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel, *Mater. Sci. Eng. A*, 751 (2019) 183–190.
- [47] P. Dirisu, G. Supriyo, F. Martina, X. Xu, S. Williams, Wire plus arc additive manufactured functional steel surfaces enhanced by rolling. *Int. J. Fatigue*, 130 (2020).
- [48] M. Vishnukumar, R. Pramod, A. Rajesh Kannan, Wire arc additive manufacturing for repairing aluminium structures in marine applications, *Material Letters*, 299 (2021).
- [49] H. Tianying, Y. Shengfu, S. Yusheng, A. Huang, Forming and mechanical properties of wire arc additive manufacture for marine propeller bracket, *J. of Manufacturing Processes*, 52 (2020) 96-105.
- [50] Masubuchi, K. *Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their Consequences*, (2013).
- [51] Colegrove, P.A., Coules, H.E., Fairman, J., Martina, F., Kashoob, T., Mamash, H. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling, *J Mater Process Technol* 213 (2013) 1782-91.
- [52] Sames, W. J., List, F., Pannala, S., Dehoff, R. R., Babu, S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *Int Mater Rev*, 61 (2016) 315-60.
- [53] Wang, H., Kovacevic, R. Variable polarity GTAW in rapid prototyping of aluminum parts. *Proceedings of the 11th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium* (2000).
- [54] Mukherjee T, Zhang W, DebRoy T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing, *Comput Mater Sci* 126 (2017) 360-72.
- [55] Edwards, P., O' Conner, A., Ramulu, M. Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance, *J Manuf Sci Eng* 135 (2013).
- [56] Busachi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P., Martina, F., Ding, J. Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications, *Procedia Cirp* 37 (2015) 48-53.