



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ
ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΙΔΗΡΟΥΧΟΥ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ
ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

Συγγραφέας: Αλέξανδρος Καρελάκης (Α.Μ.: 45029)

Επιβλέπων: Αθανάσιος Μουρλάς

Αιγάλεω, Ιούλιος 2023



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING**

Diploma Thesis

**EVALUATION OF WELDING TECHNIQUES FOR THE
ELABORATION OF HIGH-THICKNESS STRATIFIED
STRUCTURES OF METAL-MATRIX COMPOSITES**

Student: Alexandros Karelakis (Register No: 45029)

Supervisor: Athanasios Mourlas

Egaleo, July 2023



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ
ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΙΔΗΡΟΥΧΟΥ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/A	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1.	Πανδώρα Ψυλλάκη	Καθηγήτρια	
2.	Γεράσιμος Παναγιωτάτος	Καθηγητής	
3.	Αθανάσιος Μουρλάς	Διδάσκων μέσω προγράμματος ΕΣΠΑ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αλέξανδρος Καρελάκης του Χρήστου, με αριθμό μητρώου 45029, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών



Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θέλω να ευχαριστήσω θερμά, τον επιβλέποντα, κ. *Μουρλά Αθανάσιο*, Ακαδημαϊκό Υπότροφο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών (Διδάσκων μέσω προγράμματος ΕΣΠΑ), της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την κα. *Ψυλλάκη Πανδώρα*, Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για τη βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές της.

Αλέξανδρος Καρελάκης

Αιγάλεω, Ιούλιος 2023

Περίληψη

Στις μέρες μας η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής (AM), τόσο στον χώρο της επιστημονικής όσο και της βιομηχανικής κοινότητας έχει καταφέρει τον άμεσο σχηματισμό αντικειμένων αντικαθιστώντας τις παραδοσιακές προσεγγίσεις σε ορισμένα βιομηχανικά πλαίσια με αποτέλεσμα την πιο σύντομη υλοποίηση του προϊόντος και την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης υλικών.

Συγκεκριμένα, η προσθετική κατασκευή με βολταϊκό τόξο και συρμα (Wire arc Additive Manufacturing-waam) έχει ξεχωρίσει λόγω της αποδοτικότητας και των πλεονεκτημάτων που περιλαμβάνουν κυρίως υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης, αυξημένη απόδοση υλικών, μειωμένο χρόνο παράδοσης, καλύτερες επιδόσεις εξαρτημάτων και μειωμένο κόστος αποθεμάτων. Η τεχνολογία WAAM έχει πολλά κοινά με την συγκόλληση, καθώς περιλαμβάνει εναπόθεση στρώμα προς στρώμα για την δημιουργία μεγάλων εξαρτημάτων με λιγότερες πολυπλοκότητες.

Παρ' όλα αυτά, η συγχώνευση υλικών και διαδικασιών κατασκευής εξελίσσεται ολοένα και περισσότερο με αποτέλεσμα να κρίνεται αναγκαία η αξιολόγηση των θερμικών φορτίων μέσω της χρήσης προγραμμάτων προσομοίωσης και των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων (παραδείγματος χάρη καρβιδίων) σε διασπορά. Με βάση την θεωρητική και πειραματική διαδικασία που θα ακολουθήσει θα εξετασθούν στην παρούσα εργασία όλα τα παραπάνω.

Abstract

Nowadays, additive manufacturing (AM) technology, both in the scientific and industrial community has achieved direct product formation replacing traditional approaches in certain industrial contexts resulting the fastest realization of the product and minimizing material consumption.

In particular, wire-arc additive manufacturing (WAAM) has stood out due to its efficiency and advantages that mainly include high deposition rates, increased material yield, reduced lead time, better part performance and reduced inventory costs. AM technology using WAAM has much in common with welding, as it involves layer-by-layer deposition to create large parts with fewer complexities.

However, the fusion of materials and manufacturing processes is increasingly evolving, making it necessary to evaluate thermal loads through the use of programs and metal matrix composites with TiC particle reinforcement in dispersion. Based on the theoretical and experimental procedure that will follow, all of the above will be considered in this project.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	7
Περίληψη.....	9
Περιεχόμενες εικόνες.....	13
Περιεχόμενες συντομογραφίες.....	17
Συμβολισμοί.....	18
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	20
1.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	20
1.2 Στόχοι και μεθοδολογία έρευνας	21
1.3 Δομή της εργασίας	22
Κεφάλαιο 2 Τεχνικές δημιουργίας στρωματικών δομών.....	23
2.1 Προσθετική κατασκευή (Additive manufacturing-AM).....	23
2.1.1 Λειτουργία προσθετικής κατασκευής	23
2.2 Τεχνικές προσθετικής κατασκευής	25
2.2.1 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τεχνικές εναπόθεσης υλικού.....	26
2.2.2 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τεχνικές σύνδεσης των πρώτων υλών ..	29
2.3 Βιομηχανίες που χρησιμοποιούν την προσθετική κατασκευή.....	32
Κεφάλαιο 3 Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) & Gas Metal Arc Welding (GMAW)	34
3.1 Δομή και λειτουργία (WAAM).....	34
3.1.1 Τρόποι λειτουργίας της WAAM	35
3.2 Gas Metal Arc Welding (GMAW).....	37
3.2.1 Εξοπλισμός και λειτουργία	38
3.2.2 Παράμετροι τεχνικής GMAW	39
3.2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της GMAW	40
3.3 Εφαρμογές Wire Arc Additive Manufacturing	42

Κεφάλαιο 4 Πειραματική Διαδικασία.....	46
4.1 Σκοπός διαδικασίας.....	46
4.2 Εξοπλισμός και υλικά πειραματικής διαδικασίας.....	46
4.3 Χαρακτηριστικά σύρματος πλήρωσης.....	50
4.4 Στοιχεία και παράμετροι διαδικασίας	51
4.5 Κατασκευή αντικειμένου	55
Κεφάλαιο 5 Θερμικό μοντέλο.....	63
5.1. Εισαγωγή.....	63
5.2. Μοντελοποίηση θερμικών και μηχανικών αναλύσεων.....	64
5.2.1. Θερμική ανάλυση.....	64
5.2.2 Μηχανική ανάλυση	68
5.3 Παράμετροι λογισμικού προσομοίωσης	69
5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	70
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	74
Βιβλιογραφία.....	78

Περιεχόμενες εικόνες

Εικόνα 1 Γεωμετρικό Μοντέλο CAD ενός φλυτζανιού με εικόνες που αποτυπώνουν το αποτέλεσμα χρήσης διαφορετικών παχών (Κωστάκης Ιωάννης, 2017)	24
Εικόνα 2 Μοντέλα από διάφορες τεχνικές και υλικά (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)	26
Εικόνα 3 Διάγραμμα της τεχνολογίας FDM και προϊόν εκτυπωμένο από την τεχνολογία FDM (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016).....	27
Εικόνα 4 Διάγραμμα της τεχνολογίας PolyJet και η εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας PolyJet (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016).....	27
Εικόνα 5 Διάγραμμα της τεχνολογίας LENS και η εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας LENS (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016).....	28
Εικόνα 6 Διάγραμμα της τεχνολογίας LOM και η εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας LOM (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016).....	29
Εικόνα 7 Διάγραμμα της τεχνολογίας SL και η εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας SL (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016).....	30
Εικόνα 8 Διάγραμμα της τεχνολογίας LS και η εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας LS (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016).....	30
Εικόνα 9 Διάγραμμα της τεχνολογίας 3DP και εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας 3DP (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016).....	31
Εικόνα 10 Βιομηχανίες που χρησιμοποιούν την προσθετική κατασκευή	32
Εικόνα 11 Λειτουργία WAAM (Pushkar Kumar Pandey, 2019).....	35
Εικόνα 12 GMAW, GTAW, PAW (Mukti Chaturvedi et al., 2021)	36
Εικόνα 13 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας GMAW (Dale Brush, 2018)	38
Εικόνα 14 Propeller 200 x 240 x 240 mm (Dr. Michael J. Fletcher M.Sc.)	42
Εικόνα 15 Bell housing 230 x 280 x 280 mm (Dr. Michael J. Fletcher M.Sc.).....	43
Εικόνα 16 Main structural element of aircraft wing (Dr. Michael J. Fletcher M.Sc.)	43

Εικόνα 17	Κάλυμα ρουλεμάν τροχού (Autonomus Manufacturing, 2018)	44
Εικόνα 18	Κατασκευή ποδηλάτου με WAAM (Tuvie)	45
Εικόνα 19	CNC παντογράφος (ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ, ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΟΥΛΟΣ, 2019)	47
Εικόνα 20	Μηχανή συγκόλλησης τύπου GMAW (Θεοδόσιος Σκάρος, 2022).....	48
Εικόνα 21	Οπτικά πυρόμετρα και IR κάμερα καταγραφής θερμοκρασίας (IRCAM, 2020)	49
Εικόνα 22	Σύρμα συγκόλλησης	49
Εικόνα 23	Μεταλλικό κέλυφος σύρματος και ο πυρήνας του	50
Εικόνα 24	Δομή σύρματος	51
Εικόνα 25	Δεδομένα κατασκευαστή (Gastolin Eutectic).....	51
Εικόνα 26	Δοκιμές ταχύτητας και η επιλογή ταχύτητας.....	52
Εικόνα 27	1 ^{ος} τρόπος εναπόθεση υλικού (H. Abusalma, et al., 2022).....	53
Εικόνα 28	2 ^{ος} τρόπος εναπόθεση υλικού (Johanna Müller, et al., 2021).....	54
Εικόνα 29	Δημιουργία αντικειμένου.....	55
Εικόνα 30	Αρχικές στρώσεις του αντικειμένου	56
Εικόνα 31	Θερμικά φορτία κατά την δημιουργία του αντικειμένου	56
Εικόνα 32	Απεικόνιση στρώσεων στη μέση της διαδικασίας.....	57
Εικόνα 33	Μέτρηση ύψους κατά την δημιουργία (Z = 45 mm)	58
Εικόνα 34	Θερμικά φορτία κατά την δημιουργία	58
Εικόνα 35	Καταγραφή θερμικών φορτίων με τη χρήση θερμικής κάμερας IR	59
Εικόνα 36	Μέτρηση ύψους του τελικού αντικειμένου (Z = 80 mm).....	60
Εικόνα 37	Τελικές διαστάσεις αντικειμένου.....	61
Εικόνα 38	Τελικό πάχος αντικειμένου	61
Εικόνα 39	Σχηματική απεικόνιση του διπλού ελλειψοειδούς μοντέλου θερμικής πηγής (Θεοδόσιος Σκάρος, 2022)	65
Εικόνα 40	Μεταβολή πυκνότητας συνάρτηση της θερμοκρασίας.....	66

Εικόνα 41 Μεταβολή θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	66
Εικόνα 42 Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	67
Εικόνα 43 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	68
Εικόνα 44 Μεταβολή συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας	68
Εικόνα 45 Πυκνότητα πλέγματος	69
Εικόνα 46 Εμφάνιση θέσης της πηγής θερμότητας	70
Εικόνα 47 Θερμικά φορτία κατά το τελικό ύψος του αντικειμένου	71
Εικόνα 48 Ανάπτυξη χρόνου-θερμοκρασίας σε 4 σημεία κατά μήκος του αντικειμένου.....	72
Εικόνα 49 Διάγραμμα χρόνου-ρυθμού ψύξης ανάλογα με το ύψος	73

Περιεχόμενες συντομογραφίες

CNC	Λειτουργία εργαλειομηχανής μέσω H/Y
3D	Τρισδιάστατο
AM	Προσθετική Κατασκευή
WAAM	Προσθετική κατασκευή τόξου σύρματος
SLA	Στερεολιθογραφία
CAD	Σχεδιασμός με τη βοήθεια H/Y
FDM	Εκτύπωση με εξώθηση υλικού
SLS	Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ
SLM	Επιλεκτική τήξη με λέιζερ
DMLS	Απευθείας πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων
DED	Άμεση ενεργειακή εναπόθεση
LENS	Διαμόρφωση δικτύου με λέιζερ
GMAW αερίου	Συγκόλληση τόξου τηκόμενου ηλεκτροδίου και προστασία
GTAW αερίου	Συγκόλληση τόξου ηλεκτροδίου βολφραμίου και προστασία
PAW	Συγκόλληση τόξου πλάσματος
MIG	Συγκόλληση με αδρανές αέριο
MAG	Συγκόλληση με ενεργό αέριο
LOM	Κατασκευή Αντικειμένων με Επάλληλες Στρώσεις
DCEP	Ηλεκτρόδιο συνεχούς ρεύματος αρνητικό
DCEN	Ηλεκτρόδιο συνεχούς ρεύματος θετικό
WFS	Ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος
IR	Θερμική κάμερα
MCT	Τελουρίδιο καδμίου υδραργύρου

Συμβολισμοί

V	Τάση, Volt
I	Ένταση ρεύματος, Ampere
u	Ταχύτητα συγκόλλησης, mm/s
C	Θερμοχωρητικότητα/Ειδική θερμότητα, J/kg°C
ρ	Πυκνότητα, kg/m ³
T	Θερμοκρασία, °C
t	Χρόνος, sec
Q	Ροή θερμότητας, W/m ³
k	Θερμική αγωγιμότητα, W/m°C
q_f, q_r	Κατανομή ροή θερμότητας, W/m ²
Q	Ενέργεια ηλ. τόξου, Watt
η	Βαθμός απόδοσης μεθόδου συγκόλλησης
a, b_f, b_r, c	Διαστάσεις θερμικής πηγής, mm
f_f, f_r	Αδιάστατες μεταβλητές μέρους ενέργειας για κάθε τμήμα της κινούμενης πηγής θερμότητας

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η προσθετική κατασκευή (additive manufacturing-AM) είναι μια διαδικασία που κατασκευάζει τρισδιάστατα αντικείμενα προσθέτοντας υλικό στρώμα προς στρώμα. Η ιδέα της δημιουργίας τρισδιάστατων γεωμετριών με την ανάπτυξη ενός στρώματος κάθε φορά ήταν μια ελκυστική ιδέα που ξεκλείδωσε περισσότερο από τριάντα χρόνια καινοτομίας στα υλικά, την επεξεργασία, το σχεδιασμό και τους ελέγχους. Αν και η AM εφευρέθηκε για την ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων, η τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να απελευθερώσει τους περιορισμούς σχεδιασμού και κατασκευής στη δημιουργία καινοτόμων προϊόντων με μεγάλη γεωμετρική πολυπλοκότητα. (Citarella Roberto & Venanzio Giannella, 2021)

Ως αναδυόμενη τεχνολογία παραγωγής, έχει επιφέρει πρωτοφανείς αλλαγές στους κλάδους και τις αγορές και, κατά συνέπεια, έχει προσελκύσει την προσοχή των ακαδημαϊκών και των επαγγελματιών τα τελευταία χρόνια. (Mojtaba Khorram Niaki et al., 2019) Επιπλέον, έχει αξιοποιηθεί πλήρως σε διάφορες βιομηχανίες, από τα πρωτότυπα έως τα προϊόντα. Η προσαρμογή των προϊόντων αποτελούσε πρόκληση για τους κατασκευαστές λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής προϊόντων προσαρμοσμένων στις ανάγκες των τελικών χρηστών. Από την άλλη πλευρά, η AM είναι σε θέση να εκτυπώνει τρισδιάστατα μικρές ποσότητες εξατομικευμένων προϊόντων με σχετικά χαμηλό κόστος. (Tuan D. Ngo, et al., 2018)

Η προσθετική κατασκευή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες με βάση το υλικό. Ανάλογα με την πρώτη ύλη του υλικού, υπάρχουν έπειτα και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να υλοποιηθεί η διαδικασία και να καταλήξει το προϊόν στην τελική του μορφή. Η AM με χρήση βολταϊκού τόξου και σύρματος (Wire Arc Additive Manufacturing-WAAM), έχει θεωρηθεί ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την παραγωγή μεγάλων μεταλλικών δομών με υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης και χαμηλό κόστος. Ωστόσο για μελλοντικές βιομηχανικές εφαρμογές, οι ιδιότητες της WAAM πρέπει να μελετηθούν σε βάθος. Επιπλέον, θα πρέπει να καταβληθούν περαιτέρω προσπάθειες για τη βελτίωση της διαδικασίας WAAM ώστε

να επιτευχθούν ταχύτεροι ρυθμοί εναπόθεσης και καλύτερος ποιοτικός έλεγχος. (Jin, Wanwan, et al., 2020)

1.2 Στόχοι και μεθοδολογία έρευνας

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής (AM) ή τρισδιάστατη εκτύπωση (3-D Printing), όπως θα δούμε στην συνέχεια έχει γίνει ευρέως γνωστή τα τελευταία χρόνια και με το μεγάλο φάσμα τεχνολογιών της, το οποίο περιέχει διαφορετικά υλικά και λειτουργίες, εφαρμόζεται πλέον σε αρκετές βιομηχανίες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλυθούν οι τεχνολογίες αυτές και οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται. Συγκεκριμένα, για την ανάπτυξη της εργασίας υιοθετείται η τεχνολογία WAAM, με βάση την οποία κατασκευάζεται το αντικείμενο εργασίας.

Σκοπός της εργασίας είναι η θεωρητική και πειραματική έρευνα της παραπάνω τεχνικής, μέσα από την δημιουργία του αντικειμένου και έπειτα η αξιολόγησή της σχετικά με την δημιουργία στρωματικών δομών μεγάλου πάχους από σύνθετα υλικά σιδηρούχου μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων.

Το σύνθετο αυτό υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα παραγεμιστό σύρμα, το οποίο αποτελείται από καρβίδια τιτανίου. Η διερεύνηση αυτού του σύνθετου υλικού αποσκοπεί στο να εξεταστεί η αξιοπιστία του, έτσι ώστε να μπορέσει να ενταχθεί μελλοντικά και αυτό με τη σειρά του στην βιομηχανία.

1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα παρακάτω έξι κεφάλαια:

Στο **πρώτο κεφάλαιο**, γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση για την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής (AM) και έπειτα αναφέρονται οι στόχοι και η δομή της διπλωματικής.

Στο **δύετο κεφάλαιο**, αναλύονται η έννοια και η λειτουργία της προσθετικής κατασκευής και στην συνέχεια πιο συγκεκριμένα οι κατηγορίες και οι τεχνικές στις οποίες χωρίζεται.

Προχωρώντας στο **τρίτο κεφάλαιο**, βλέπουμε να παρουσιάζεται λεπτομερώς η τρισδιάστατη εκτύπωση με σύρμα (WAAM), όπως και η μέθοδος συγκόλλησης με τόξο μετάλλων (GMAW), η οποία μας εισάγει στην πειραματική διαδικασία που θα υλοποιηθεί στο τέταρτο κεφάλαιο.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο**, παρουσιάζεται το σύνθετο υλικό, επεξηγείται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Έπειτα, απεικονίζεται μια σειρά φωτογραφιών κατά την δημιουργία του αντικειμένου.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο**, κατασκευάζεται το μοντέλο με χρήση λογισμικού προσομοίωσης με συγκόλληση τόξου, γίνεται η μοντελοποίηση των θερμικών και μηχανικών αναλύσεων του υλικού, αναφέρονται οι παράμετροι του λογισμικού και τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης υπό την μορφή διαγραμμάτων.

Στο **έκτο** και τελευταίο **κεφάλαιο**, γίνεται η αξιολόγηση της τεχνικής της συγκόλλησης με την χρήση του σύνθετου υλικού, και εξάγονται τα συμπεράσματα καθώς και δίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2 Τεχνικές δημιουργίας στρωματικών δομών

2.1 Προσθετική κατασκευή (Additive manufacturing-AM)

Η ταχεία πρωτοτυποποίηση αναπτύχθηκε από τη δεκαετία του 1980 για την παραγωγή μοντέλων και πρωτοτύπων μέχρι την εξέλιξη των τεχνολογιών σήμερα. Σήμερα, οι τεχνολογίες αυτές έχουν άλλα ονόματα, όπως τρισδιάστατη εκτύπωση ή πρόσθετη κατασκευή κ.ο.κ., αλλά όλες έχουν την ίδια προέλευση από την ταχεία πρωτοτυποποίηση. Η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής παρέμεινε η ίδια μέχρι να προκύψουν νέες απαιτήσεις, όπως η καλύτερη ενσωμάτωση στη γραμμή παραγωγής, η μεγαλύτερη σειρά παραγωγής ή η μείωση του βάρους των προϊόντων λόγω του μεγάλου κόστους των μηχανημάτων και των υλικών. Η ικανότητα παραγωγής πολύπλοκων γεωμετριών επιτρέπει την πρόταση λύσεων σχεδιασμού και κατασκευής στον βιομηχανικό τομέα, ώστε να είναι ολοένα και πιο αποτελεσματικές. Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής (AM) αναπτύσσεται ταχύτατα με νέες λύσεις και αγορές που μερικές φορές πρέπει να αποδείξουν την αξιοπιστία τους. Η κοινότητα πρέπει να εξετάσει ορισμένες εξελίξεις, όπως τη νέα μορφή ανταλλαγής, τα ταχύτερα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης, την προηγμένη αριθμητική προσομοίωση ή την εμφάνιση νέων χρήσεων. (Julien Gardan , 2016)

2.1.1 Λειτουργία προσθετικής κατασκευής

Η βασική αρχή των τεχνολογιών AM είναι ότι τα μοντέλα αρχικά σχεδιάζονται με τη χρήση Η/Υ μέσω λογισμικού 3D Computer Aided Design (CAD) και εν συνεχεία κατασκευάζονται απευθείας τα τελικά προϊόντα, χωρίς να απαιτείται προγραμματισμός της διαδικασίας. Παρότι η διαδικασία δεν είναι τόσο απλή όσο περιγράφηκε παραπάνω, ωστόσο με τις τεχνολογίες AM απλοποιείται σημαντικά η διαδικασία παραγωγής πολύπλοκων τρισδιάστατων 3D αντικειμένων απευθείας από δεδομένα CAD. Για την υλοποίηση της κατασκευής πρακτικά χρειάζεται γνώση των βασικών διαστάσεων του αντικειμένου, καλή κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των μηχανών AM και γνώση των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από αυτές. Αντίθετα οι συμβατικές διαδικασίες παραγωγής, απαιτούν προσεκτική και

λεπτομερή ανάλυση της γεωμετρίας του υπό κατασκευή αντικειμένου, για να καθοριστεί η σειρά με την οποία τα διαφορετικά χαρακτηριστικά θα κατασκευαστούν, μελέτη για το τι εργαλεία και ποιες κατεργασίες πρέπει να χρησιμοποιηθούν καθώς και ποια επιπρόσθετα χαρακτηριστικά πρέπει να αποδοθούν. (Κωστάκης Ιωάννης, 2017)

Η βασική αρχή των τεχνολογιών AM είναι ότι τα τμήματα των αντικειμένων γίνονται με την προσθήκη υλικού σε στρώσεις (layer by layer). Συγκεκριμένα, κάθε στρώμα είναι μια λεπτή διατομή του τμήματος και εξάγεται από τα αρχικά δεδομένα CAD. Στην πραγματικότητα, επειδή κάθε στρώση πρέπει να έχει ένα πεπερασμένο πάχος, το προκύπτον τμήμα θα είναι μια προσέγγιση του αρχέτυπου.



Εικόνα 1 Γεωμετρικό Μοντέλο CAD ενός φλυτζανιού με εικόνες που αποτυπώνουν το αποτέλεσμα χρήσης διαφορετικών παχών (Κωστάκης Ιωάννης, 2017)

Σημειώνεται ότι όσο πιο λεπτό είναι το πάχος της κάθε στρώσης τόσο πιο κοντά στις τελικές διαστάσεις θα είναι το τελικό προϊόν σε σχέση με το πρωτότυπο. Όλες οι εμπορικές μηχανές AM που είναι διαθέσιμες έως σήμερα, έχουν ως κοινή αρχή λειτουργίας την εναπόθεση υλικού σε στρώσεις (layer by layer). Οι βασικές διαφορές τους εντοπίζονται στο είδος των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, στον τρόπο δημιουργίας των στρωμάτων καθώς και στον τρόπο με τον οποίο τα στρώματα ενώνονται μεταξύ τους. Οι διαφορές αυτές θα καθορίσουν παράγοντες όπως η ακρίβεια του τελικού αντικειμένου, οι ιδιότητες του υλικού, η ταχύτητα

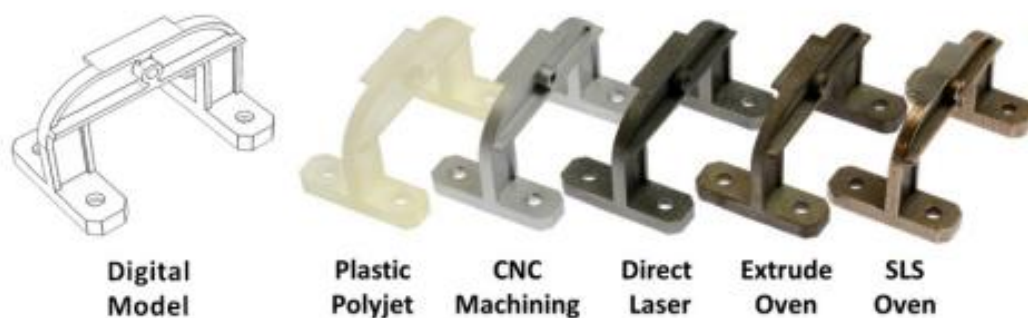
κατασκευής του τελικού προϊόντος, το είδος και το βαθμό της απαιτούμενης επεξεργασίας μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, το μέγεθος της μηχανής AM που απαιτείται καθώς και το συνολικό κόστος της μηχανής και της διαδικασίας. (Κωστάκης Ιωάννης, 2017)

2.2 Τεχνικές προσθετικής κατασκευής

Έχουν δημιουργηθεί και συνεχίζουν να δημιουργούνται ποικίλες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Υπάρχουν εκατοντάδες διαφορετικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές και οι διαφορές που προκύπτουν συναντώνται κυρίως στους τρόπους που οι επάλληλες στρώσεις δημιουργούν την τελική μορφή και στα υλικά που χρησιμοποιούνται.

Για παράδειγμα, στη διαδικασία της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (SLS), οι στρώσεις δημιουργούνται με την τήξη κάποιου υλικού. Παρόμοια διαδικασία εφαρμόζεται στην τεχνολογία μοντελοποίησης με συντηγμένη εναπόθεση (FDM). Αντιθέτως, κατά τη διαδικασία της στερεολιθογραφίας οι επάλληλες στρώσεις εναποθέτονται μέσω της πήξης ρευστού υλικού. Από την άλλη μεριά, η δημιουργία πολύ λεπτών επάλληλων στρώσεων, από υλικά όπως πολυμερή ή μέταλλα, αναφέρεται στην τεχνολογία της κατασκευής αντικειμένων με επάλληλες στρώσεις (LOM).

Η αιτία αυτής της διαφοροποίησης των τρόπων προσθετικής κατασκευής πηγάζει από τις ανάγκες των διαφορετικών εφαρμογών των ποικίλων κλάδων. Όπως για παράδειγμα, η τεχνική της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (SLS) μπορεί να μην είναι τόσο αποτελεσματική, όσο η τεχνική της κατασκευής αντικειμένων με επάλληλες στρώσεις (LOM) σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Το επιθυμητό αποτέλεσμα καθορίζει το είδος του εκτυπωτή και των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Ακόμα, το κόστος παραγωγής, η ταχύτητα εκτύπωσης και άλλα χαρακτηριστικά, όπως οι χρωματικές αποχρώσεις είναι παράγοντες που πρέπει να υπολογιστούν. (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)



Εικόνα 2 Μοντέλα από διάφορες τεχνικές και υλικά (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)

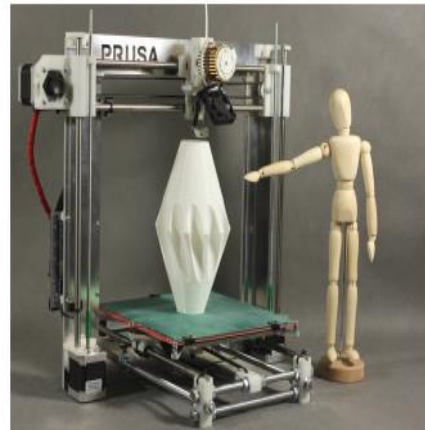
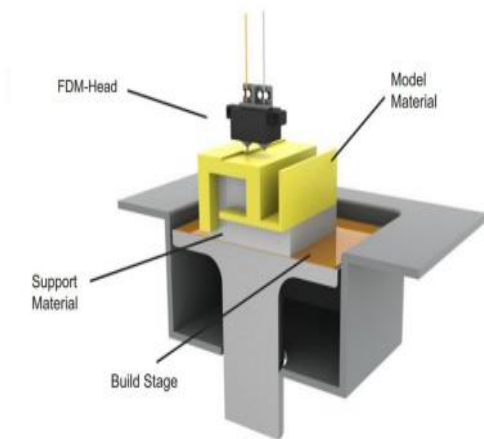
Οι τεχνολογίες της προσθετικής κατασκευής χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία οι εκτυπωτές εναποθέτουν την πρώτη ύλη κατευθείαν σε στρώματα, ενώ στη δεύτερη κατηγορία χρησιμοποιούν διαδικασίες σύνδεσης των πρώτων υλών.

2.2.1 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τεχνικές εναπόθεσης υλικού

Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από κλάσεις εκτυπωτών που εκλύουν, ψεκάζουν ή συμπιέζουν την πρώτη ύλη. Η πρώτη ύλη εξέρχεται από κάποιο συρίγγιο ή ακροφύσιο σε ρευστή, πολτοποιημένη ή κονιοποιημένη μορφή. Οι προσωπικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές, καθώς και αυτοί που χρησιμοποιούν οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις, χρησιμοποιούν τις παραπάνω διαδικασίες.

- Fused Deposition Modeling (FDM) - Μοντελοποίηση με Συντηγμένη Εναπόθεση:

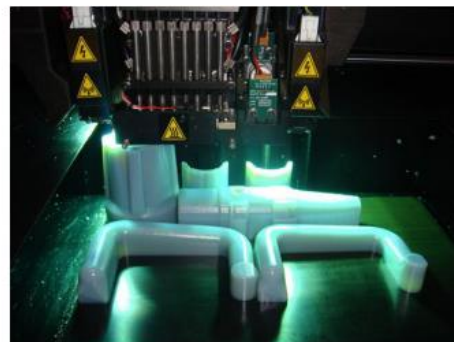
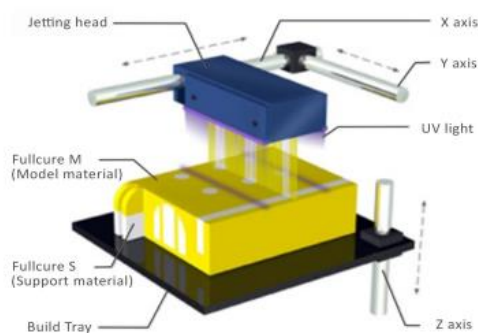
Είναι μια από τις πρώτες τεχνολογίες που εφευρέθηκαν τη δεκαετία του 1980 και είναι η συνηθέστερη τεχνολογία, που χρησιμοποιείται από τους προσωπικούς εκτυπωτές. Συνήθως ένας εκτυπωτής FDM λειτουργεί εναποθέτοντας ίνες πλαστικού από την κεφαλή του, δημιουργώντας αυτοφερόμενα στρώματα. Το χαμηλό κόστος της συναρμολόγησης ενός τέτοιου εκτυπωτή, οι φθηνές πρώτες ύλες που χρησιμοποιεί και η ευκολία στη χρήση, τον καθιστούν ιδανικό για ιδιωτική χρήση. Η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιήσει και άλλες πρώτες ύλες, όπως εδώδιμες ύλες (σοκολάτα, τυρί, ζυμαρικά) ή ακόμα και βλαστοκύτταρα, για την παρασκευή ζωντανών ιστών. (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)



Εικόνα 3 Διάγραμμα της τεχνολογίας FDM και προϊόν εκτυπωμένο από την τεχνολογία FDM (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)

- PolyJet Printing - Εκτύπωση PolyJet:

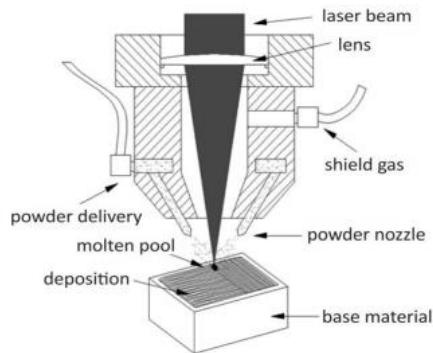
Η τεχνολογία αναπτύχθηκε το 2000 και ακολουθεί μια τεχνική που χρησιμοποιεί διαδικασίες και από τις δύο μεγάλες κατηγορίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης που προαναφέρθηκαν. Χρησιμοποιεί ένα είδος υγρού φωτοπολυμερούς πλαστικού, το οποίο ψεκάζεται από την κεφαλή του εκτυπωτή πάνω σε μια επιφάνεια, ενώ συγχρόνως εκτίθεται σε υπέρυθη ακτινοβολία, η οποία στερεοποιεί το πολυμερές. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι η υψηλή ανάλυση και η ταχύτητα, εκτυπώνοντας στρώματα πάχους ως και 16 μικρομέτρων. Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα εκτύπωσης πολλαπλών υλικών, χρησιμοποιώντας πολλές κεφαλές ταυτόχρονα. Η εκτύπωση PolyJet προορίζεται κυρίως για βιομηχανικές ή ιατρικές εφαρμογές, αφού εκεί η υψηλή ανάλυση και ταχύτητα παίζουν καθοριστικό ρόλο. Τα αρνητικά αυτής της τεχνολογίας είναι η υψηλή εξειδίκευση και το μεγάλο κόστος των υλικών. (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)



Εικόνα 4 Διάγραμμα της τεχνολογίας PolyJet και η εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας PolyJet (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)

- Laser Engineered Net Shaping (LENS) ή Directed Energy Deposition - Εναπόθεση με Κατευθυνόμενη Ενέργεια:

Οι εκτυπωτές LENS ήταν από τους πρώτους που χρησιμοποίησαν το μέταλλο ως πρώτη ύλη. Κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης η κεφαλή ψεκάζει μια μεταλλική πούδρα, η οποία εκτίθεται σε ακτινοβολία laser. Κατά τον ψεκασμό, ένα μέρος της πούδρας πέφτει στη βάση του εκτυπωτή, αλλά το υπόλοιπο τήκεται από την θερμότητα του laser, δημιουργώντας επάλληλες στρώσεις μετάλλου. Επίσης, υφίσταται και η δυνατότητα εκτύπωσης με πολλαπλές κεφαλές, ώστε να ψεκάζονται συγχρόνως πούδρες διαφορετικών μετάλλων, όπως για παράδειγμα τιτάνιο και ασάλι, δημιουργώντας κράματα υψηλής αντοχής. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στους τομείς της αεροδιαστημικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας. (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)

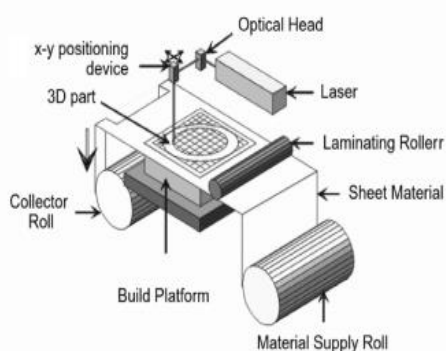


Εικόνα 5 Διάγραμμα της τεχνολογίας LENS και η εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας LENS (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)

- Laminated Object Manufacturing (LOM) - Κατασκευή Αντικειμένων με Επάλληλες Στρώσεις:

Οι εκτυπωτές που ακολουθούν αυτή την τεχνολογία δεν κατέχουν κεφαλές εκτύπωσης, αλλά χρησιμοποιούν φύλλα χαρτιού, πλαστικού ή μετάλλου, που ελασματοποιούνται και μετατρέπονται σε τρισδιάστατα αντικείμενα. Ο υπολογιστής καθορίζει την πορεία της ακτίνας laser, η οποία κόβει την εκάστοτε επιφάνεια, στο σχήμα της οριζόντιας τομής, που αντιστοιχεί στην αντίστοιχη στρώση. Αφού η στρώση ολοκληρωθεί, ένα νέο φύλλο την επικαλύπτει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Στο τέλος, αφού κοπούν όλα τα φύλλα, ασκείται μια δύναμη συμπίεσης, η οποία τα συγχωνεύει και τα μετατρέπει σε ένα στερεό αντικείμενο. Αυτή η τεχνική αποτελεί ένα συνδυασμό προσθετικής και αφαιρετικής κατασκευής,

αφού περιλαμβάνεται αφαίρεση υλικού, κατά τη διαδικασία δημιουργίας. (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)



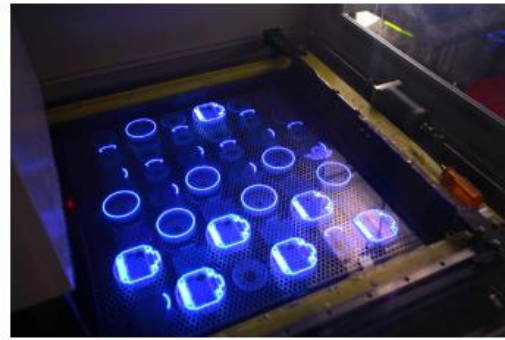
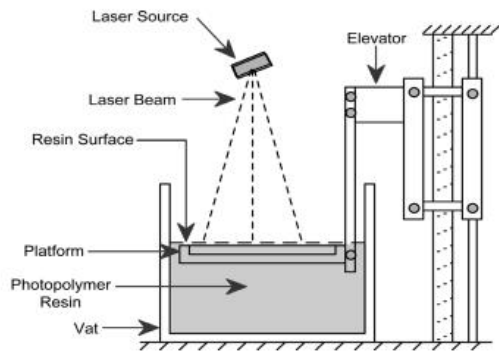
Εικόνα 6 Διάγραμμα της τεχνολογίας LOM και η εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας LOM (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)

2.2.2 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τεχνικές σύνδεσης των πρώτων υλών

Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από κλάσεις εκτυπωτών, που οδηγούν ακτίνες λέιζερ ή κολλώδεις ουσίες, πάνω σε κάποιο είδος πρώτης ύλης. Οι εκτυπωτές αυτής της κατηγορίας εκπέμπουν θερμότητα ή ακτινοβολία πάνω σε κονιοποιημένες ή φωτοευαίσθητες πρώτες ύλες, ώστε να σταθεροποιηθούν.

- Stereolithography (SL) – Στερεολιθογραφία:

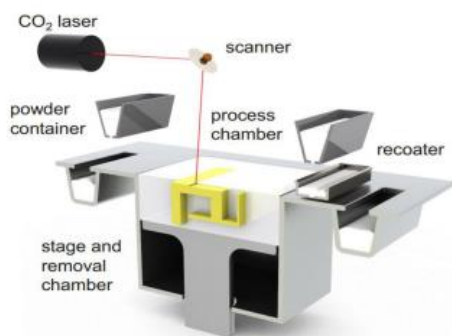
Είναι η πρώτη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιεί υγρά φωτοπολυμερή, τα οποία είναι υπερευαίσθητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία και στερεοποιούνται όταν εκτίθενται σε ακτίνες laser. Ένας εκτυπωτής στερεολιθογραφίας περιλαμβάνει μια δεξαμενή γεμισμένη με το προαναφερθέν υγρό και μια ακτίνα laser ακολουθεί το σχήμα των οριζόντιων διαδοχικών τομών του αντικειμένου. Μέσα στη δεξαμενή υπάρχει μια πλατφόρμα, η οποία μπορεί να μετακινείται κάθετα, και καθώς το laser δημιουργήσει την πρώτη στρώση, η πλατφόρμα βυθίζεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ακόμα, υπάρχουν εκτυπωτές που ακολουθούν την αντίστροφη διαδικασία κατά την οποία το αντικείμενο αναδεύεται από το υγρό. Σε αυτή την περίπτωση η ακτίνα laser προβάλλεται από το κάτω μέρος και το αντικείμενο αρχίζει να δημιουργείται από την κορυφή. (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)



Εικόνα 7 Διάγραμμα της τεχνολογίας SL και η εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας SL (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)

- Laser Sintering (LS) - Πυροσυσσωμάτωση με laser:

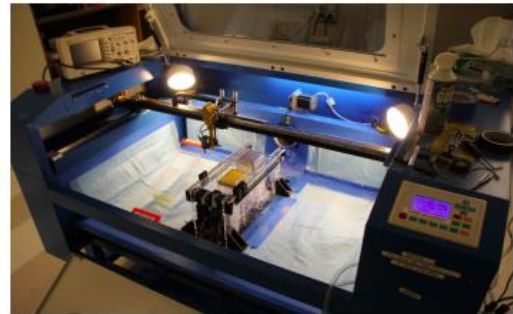
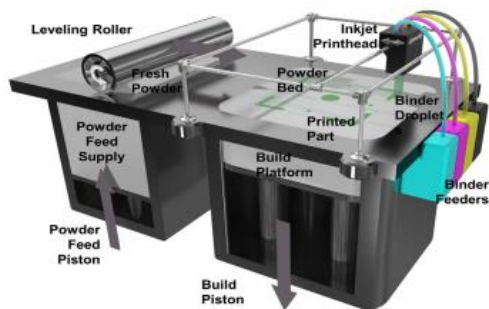
Η τεχνολογία αυτή ακολουθεί μια παρόμοια τεχνική με τη Στερεολιθογραφία, αλλά αντί για ρευστά υλικά, χρησιμοποιεί κονιοποιημένες πρώτες ύλες, με συνηθέστερη την πούδρα μετάλλου. Η διαδικασία ξεκινά με την επίστρωση ενός στρώματος πούδρας στη βάση του εκτυπωτή. Έπειτα η πούδρα εκτίθεται στην ακτίνα laser, η οποία σχηματίζει την πρώτη οριζόντια τομή του αντικειμένου. Με την ολοκλήρωση της εκτύπωσης της πρώτης τομής, μια κυλινδρική βούρτσα εναποθέτει πάνω της ένα νέο στρώμα πούδρας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και τα νέα τμήματα που τήκονται, ενώνονται με τα προηγούμενα. Ένα από τα προτερήματα αυτής της τεχνικής, σε σχέση με την Στερεολιθογραφία, είναι η μεγαλύτερη ποικιλία των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Από την άλλη μεριά, η Πυροσυσσωμάτωση με laser δίνει πιο πορώδη αποτελέσματα σε σχέση με την Στερεολιθογραφία, η οποία προσφέρει υψηλή λειότητα. (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)



Εικόνα 8 Διάγραμμα της τεχνολογίας LS και η εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας LS (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)

- Powder bed and inkjet head 3d printing - Three Dimensional Printing (3DP)
Εκτύπωση σε Τρεις Διαστάσεις:

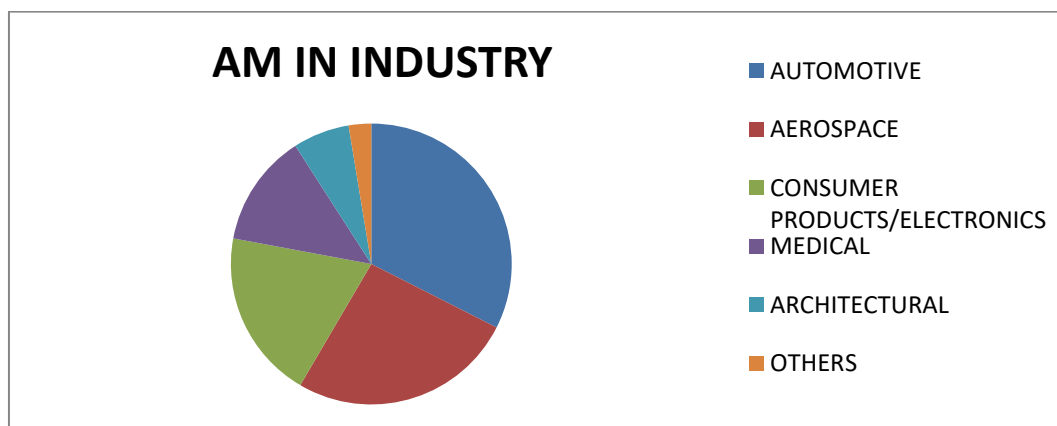
Αποτελεί μια από τις πιο φθηνές και ευπροσάρμοστες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Η διαφορά της σε σχέση με την πυροσυσσωμάτωση με laser είναι ότι σε αυτή τη τεχνική, ο εκτυπωτής χρησιμοποιεί ένα ρευστό συνδετικό μέσο, το οποίο ενοποιεί την πούδρα που εναποτίθεται και την στερεοποιεί. Σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η δυνατότητα προσθήκης χρώματος και το μεγάλο εύρος των κονιοποιημένων υλικών, όπως πούδρες πηλού, γυαλιού και μετάλλων. Το μειονέκτημα της τεχνικής είναι η αδυναμία κατασκευής στρώσεων μικρού πάχους, με αποτέλεσμα τη χαμηλή ανάλυση. (Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)



Εικόνα 9 Διάγραμμα της τεχνολογίας 3DP και εκτυπωτική διαδικασία της τεχνολογίας 3DP
(Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2016)

2.3 Βιομηχανίες που χρησιμοποιούν την προσθετική κατασκευή

Παρόλο που ο κύριος λόγος για τη δημιουργία της προσθετικής κατασκευής ήταν η επιτάχυνση της κατασκευής πρωτοτύπων, λόγω της γρήγορης ανάπτυξης της ανά τα χρόνια, έχει εισαχθεί πλέον σε διάφορους τομείς, εξ' αιτίας της μειωμένης χρήσης υλικών, τη μείωση του κόστους και την επιτάχυνση της παραγωγής, οι οποίοι απεικονίζονται παρακάτω.



Εικόνα 10 Βιομηχανίες που χρησιμοποιούν την προσθετική κατασκευή

➤ **Automotive**

Μια από τις κορυφαίες βιομηχανίες στην αγορά προσθετικής κατασκευής είναι η αυτοκινητοβιομηχανία λόγω της προόδου των μετάλλων που έχουν προσφέρει ευκαιρίες για πιο ευέλικτους, βελτιστοποιημένους και στιβαρούς σχεδιασμούς, ελαφρύτερα, ισχυρότερα και ασφαλέστερα προϊόντα, ταχύτερη προσαρμογή και μειωμένους χρόνους παράδοσης και κόστους. Πολλές εταιρίες εξετάζουν τις δυνατότητες της προσθετικής τεχνολογίας στον τομέα των ανταλλακτικών και της αντικατάστασης κατά παραγγελία, για την αποφυγή κατοχής τεράστιων αποθεμάτων.

➤ **Aerospace**

Οι εταιρείες αεροδιαστημικής ήταν από τις πρώτες που υιοθέτησαν την προσθετική κατασκευή, η οποία τους παρέχει σύνθετα, ενοποιημένα εξαρτήματα με υψηλή αντοχή. Τα λιγότερα υλικά και τα ενοποιημένα σχέδια έχουν ως αποτέλεσμα τη συνολική μείωση του βάρους που είναι σημαντικός παράγοντας στην κατασκευή για την αεροδιαστημική.

➤ **Consumer products/electronics**

Οι κατασκευαστές καταναλωτικών προϊόντων χρησιμοποιούν την τρισδιάστατη εκτύπωση για να βοηθήσουν στην ανάπτυξη επαναλήψεων και στη γρήγορη προσαρμογή του σχεδιασμού. Η προσθετική κατασκευή είναι ιδανική για την παραγωγή λεπτομερών καταναλωτικών ηλεκτρονικών προϊόντων.

➤ **Medical**

Η ιατρική βιομηχανία χρησιμοποιεί την προσθετική κατασκευή για να προσφέρει καινοτομίες σε γιατρούς, ασθενείς και ερευνητικά ιδρύματα με το ευρύ φάσμα υλικών υψηλής αντοχής και βιοσυμβατότητας που προσφέρει η δεύτερη, ανοίγοντας έτσι την πόρτα σε απρόβλεπτες εξελίξεις για συσκευές που σώζουν ζωές.

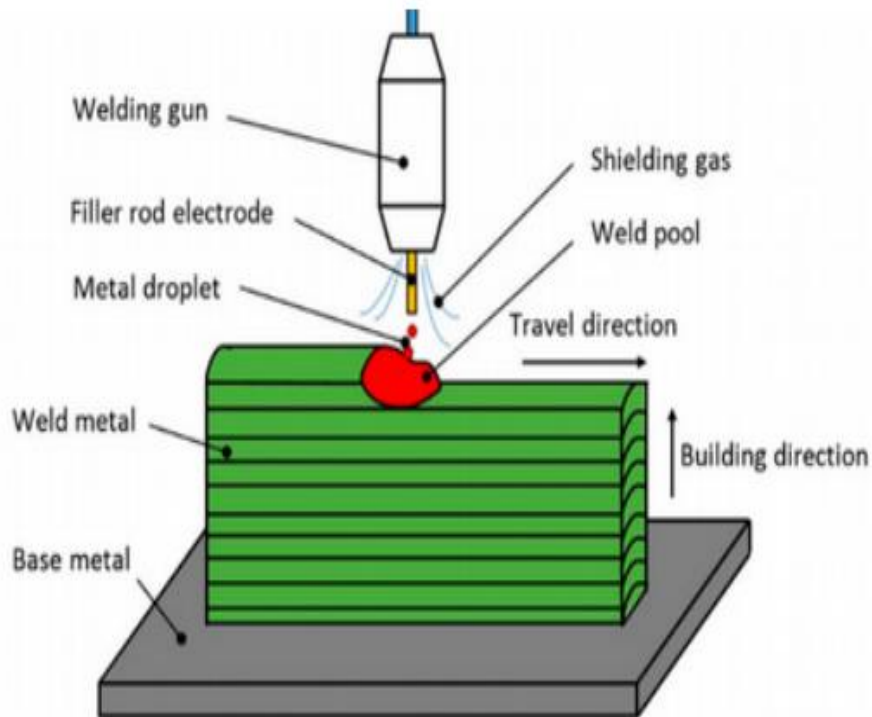
➤ **Architectural**

Στον τομέα της αρχιτεκτονικής, η τρισδιάστατη εκτύπωση εισήχθη αρχικά για την κατασκευή αρχιτεκτονικών μακετών προς αντικατάσταση των πήλινων αρχιτεκτονικών υποδειγμάτων, των ξύλινων μοντέλων και των προπλασμάτων των μοντέρνων κατασκευών, από μέταλλο ή σκυρόδεμα. Γιαυτό και πλέον πολλά αρχιτεκτονικά γραφεία, είτε έχουν το δικό τους τρισδιάστατο εκτυπωτή, είτε προστρέχουν σε επιχειρήσεις, που τους τον παρέχουν.

Κεφάλαιο 3 Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) & Gas Metal Arc Welding (GMAW)

3.1 Δομή και λειτουργία (WAAM)

Η προσθετική κατασκευή με τόξο σύρματος (WAAM) είναι μια αναδύομενη τεχνολογία στην προηγμένη κατασκευή και ανήκει στην κατηγορία άμεσης εναπόθεσης υλικού (Direct Energy Deposition). Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής (AM), η WAAM χρησιμοποιεί ηλεκτρικό τόξο ως πηγή θερμότητας για την εναπόθεση μεταλλικού υλικού, στρώμα προς στρώμα, το οποίο αποτελεί το τελικό εξάρτημα. Ανάλογα με τον τύπο της πηγής θερμότητας, η WAAM έχει συνήθως τρεις τρόπους: Συγκόλληση με τόξο αερίου βολφραμίου (GTAW), συγκόλληση με τόξο αερίου μετάλλου (GMAW) και συγκόλληση με τόξο πλάσματος (PAW). Αυτή η μέθοδος εναπόθεσης ενός ολόκληρου εξαρτήματος με χρήση μετάλλου συγκόλλησης εφαρμόζεται στην πράξη από το 1925. Σε σύγκριση με τις τεχνικές προσθετικής κατασκευής με λέιζερ (AM), η WAAM διαθέτει μια σειρά από διακριτά πλεονεκτήματα. Πρώτον, τα ποσοστά εναπόθεσης των διαδικασιών WAAM είναι συνήθως πολύ υψηλότερα από τα ποσοστά εναπόθεσης με χρήση λέιζερ, καθιστώντας την WAAM πιο κατάλληλη για την παραγωγή σύνθετων εξαρτημάτων μεγάλης κλίμακας. Η WAAM χαρακτηρίζεται επίσης από σχετικά χαμηλό κόστος εξοπλισμού, καθώς χρησιμοποιεί συνήθως βιομηχανική ρομποτική και εξοπλισμό συγκόλλησης τόξου. Σε σύγκριση με τις μεθόδους AM σε σκόνη με λέιζερ, η WAAM διαθέτει επίσης καλύτερη αναλογία χρήσης υλικών και πιο φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία παραγωγής. (Xia Chunyang et. al., 2020)

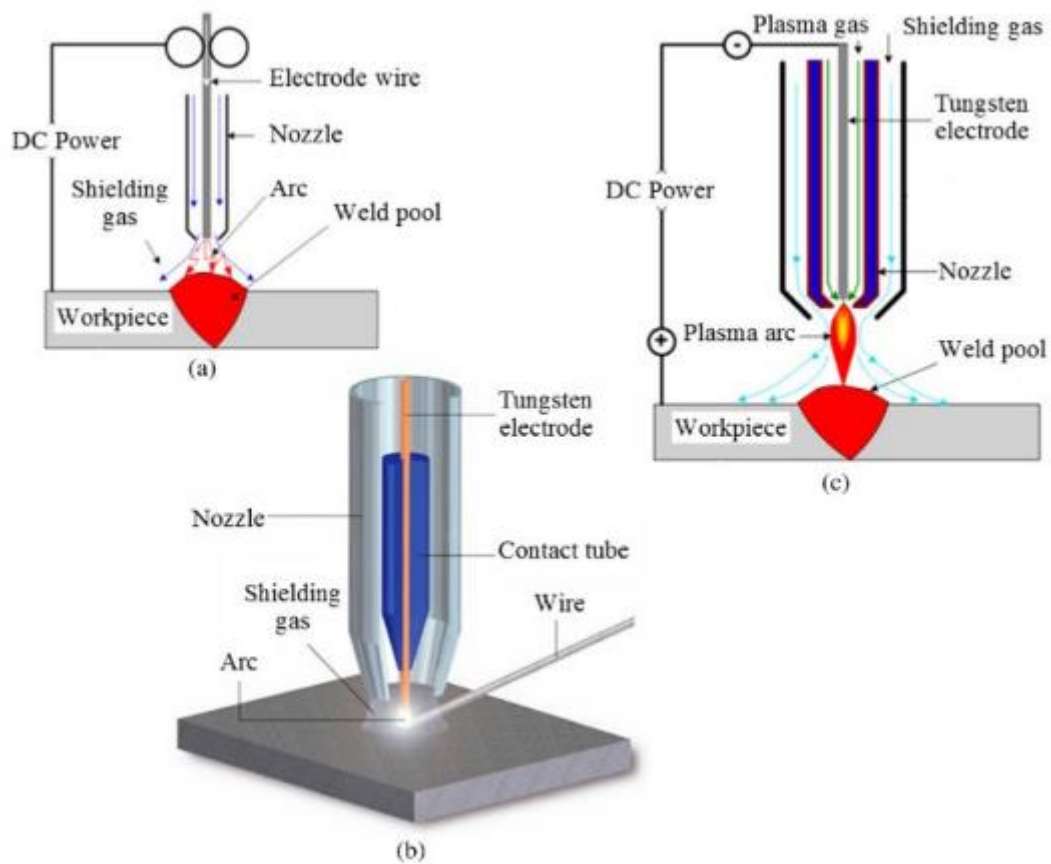


Εικόνα 11 Λειτουργία WAAM (Pushkar Kumar Pandey, 2019)

3.1.1 Τρόποι λειτουργίας της WAAM

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν τρεις τρόποι λειτουργίας της WAAM:

- a. Συγκόλληση με τόξο αερίου μετάλλου (GMAW)
- b. Συγκόλληση με τόξο αερίου βολφραμίου (GTAW)
- c. Συγκόλληση με τόξο πλάσματος (PAW)



Εικόνα 12 GMAW, GTAW, PAW (Mukti Chaturvedi et al., 2021)

Αφού αναρέθηκαν παραπάνω οι τρεις τρόποι λειτουργίας της wire arc additive manufacturing, στην συνέχεια θα αναλυθεί περαιτέρω η μέθοδος gas metal arc welding η οποία έχει εφαρμοστεί στην πειραματική διαδικασία.

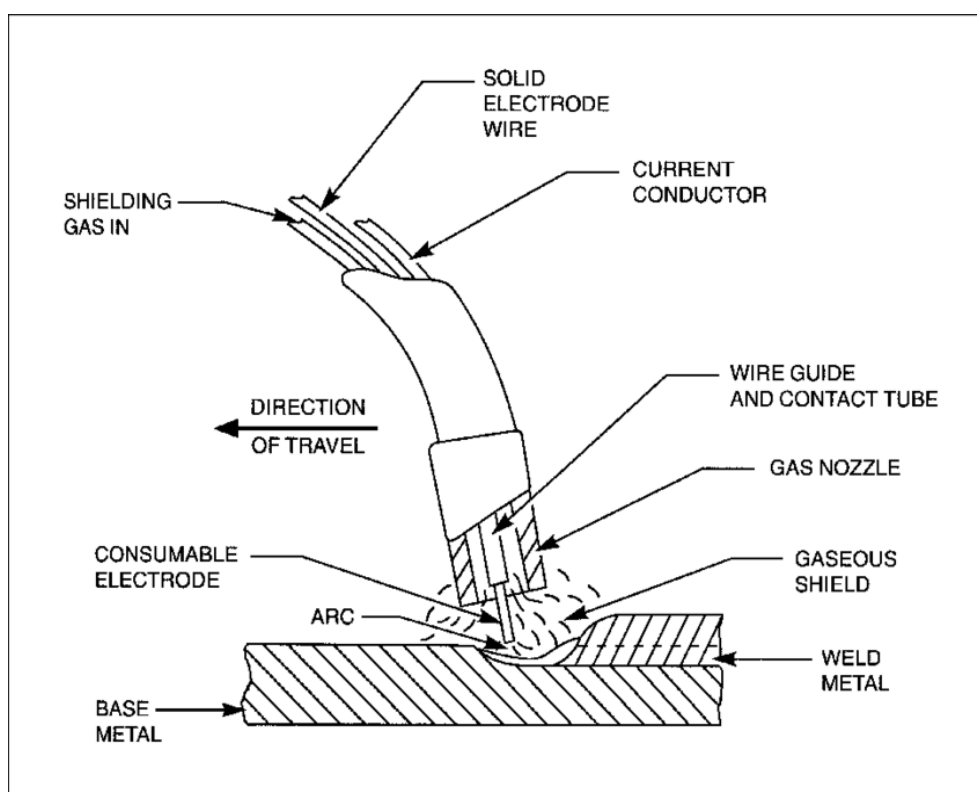
3.2 Gas Metal Arc Welding (GMAW)

Η συγκόλληση από τόξο μετάλλων με αέριο (GMAW) χρησιμοποιείται ευρέως στις βιομηχανίες, που έχουν ήδη αναφερθεί παραπάνω, για τη συγκόλληση μεγάλης ποικιλίας σιδηρούχων και μη σιδηρούχων υλικών. Η τεχνική εφαρμογής τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων (ακρωνυμία GMA ή MIG/MAG) ξεκίνησε με την πατέντα του Alexander το 1926 και τώρα είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τις συγκολλητές κατασκευές. (ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΔΟΥΛΟΣ & ΝΙΚΟΛΑΟΣ Π. ΚΑΛΔΕΛΗΣ, 2017) Επιτυγχάνει τη συνένωση των μετάλλων με την τήξη συνεχώς τροφοδοτούμενου ρευματοφόρου σύρματος. Ωστόσο, η ελκυστική GMAW χρειάζεται συνεπείς, υψηλής ποιότητας διαδικασίες συγκόλλησης για την επίτευξη καλής ποιότητας. Η ανάγκη αυτή οφείλεται στη συνεχή ελεγχόμενη μεταφορά μετάλλων που είναι απαραίτητη στη GMAW. (Praveen P., P.K.D.V. Yarlagadda, M.J. Kang, 2005)

Το αναμμένο τόξο, προστατευόμενο με ακρίβεια ανάμεσα στο τηκόμενο ηλεκτρόδιο (σύρμα) και στο υπόστρωμα, εξασφαλίζει ότι η σχηματιζόμενη επιφάνεια γίνεται σε πολύ ωφέλιμες θερμικές και μεταλλουργικές συνθήκες. Άρα, η εναπόθεση GMA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή υψηλής ποιότητας επιφανειών με τη χρησιμοποίηση τόξου. Σ' αυτά τα υλικά ανήκουν οι ανθρακοχάλυβες, οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες, οι χάλυβες που είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση, οι ειδικοί χάλυβες, το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, ο χαλκός, το νικέλιο και τα κράματα του, όπως ,επίσης, το τιτάνιο και τα κράματα του. (ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΔΟΥΛΟΣ & ΝΙΚΟΛΑΟΣ Π. ΚΑΛΔΕΛΗΣ, 2017)

3.2.1 Εξοπλισμός και λειτουργία

Ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την GMAW περιλαμβάνει μια πηγή ενέργειας, ένα πιστόλι συγκόλλησης, το υλικό και τα καλώδια του πυρσού, τροφοδότη σύρματος και παροχή προστατευτικού αερίου. Η ισχύς συγκόλλησης παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στον πυρσό συγκόλλησης, όπου δημιουργείται τόξο μεταξύ του αναλώσιμου συρμάτινου ηλεκτροδίου, που προεξέχει από το πιστόλι, και του αντικειμένου εργασίας. Το τόξο λιώνει το υλικό εργασίας και το ηλεκτρόδιο σύρματος, το οποίο παρέχεται από τον τροφοδότη, υπό ένα περίβλημα προστατευτικού αερίου. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η διαδικασία GMAW. (Dale Brush, 2018)



Εικόνα 13 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας GMAW (Dale Brush, 2018)

Όπως φαίνεται στην [εικόνα 13](#), η GMAW χρησιμοποιεί ένα συμπαγές συρμάτινο ηλεκτρόδιο ως μέταλλο πλήρωσης. Το συρμάτινο ηλεκτρόδιο διέρχεται μέσα από ένα σωλήνα επαφής (άκρο επαφής), ο οποίος συνδέεται με έναν αγωγό ρεύματος που ονομάζεται καλώδιο πυρσού. Το ρεύμα συγκόλλησης ρέει μέσα από το καλώδιο του πυρσού, στο άκρο επαφής και στο ηλεκτρόδιο σύρματος. Το τόξο συγκόλλησης δημιουργείται μεταξύ του ηλεκτροδίου και του βασικού μετάλλου. Το τόξο λιώνει

τόσο το ηλεκτρόδιο όσο και το αντικείμενο εργασίας, αφήνοντας ένα στρώμα μετάλλου συγκόλλησης. Το λιωμένο μέταλλο προστατεύεται από το περιβάλλον με παροχή προστατευτικού αερίου που ρέει μέσω του ακροφυσίου αερίου. (Dale Brush, 2018)

3.2.2 Παράμετροι τεχνικής GMAW

Οι **βασικοί παράμετροι** τεχνικής της GMAW είναι:

- **Ο τύπος και η ένταση ρεύματος**
- **Η τάση του τόξου**
- **Η ταχύτητα συγκόλλησης**
- **Το είδος και η ένταση ροής του προστατευτικού αερίου**
- **Η διάμετρος σύρματος ηλεκτροδίου**
- **Το ελεύθερο μήκος προεξοχής ηλεκτροδίου**
- **Η ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος ηλεκτροδίου**
- **Η κλίση της σύνδεσης ή του ηλεκτροδίου**

Για να υλοποιηθεί σωστά η συγκόλληση, διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο ο έλεγχος των παραπάνω παραμέτρων, εφόσον για το επιθυμητό αποτέλεσμα θα πρέπει να έχουν άμεση εξάρτηση μεταξύ τους. Οι ιδιότητες της συγκόλλησης επηρεάζονται από αυτές τις παραμέτρους. Οι πρωταρχικές μεταβλητές είναι το ρεύμα συγκόλλησης, η ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος (WFS), η επέκταση του ηλεκτροδίου και η τάση του τόξου.

Το ρεύμα συγκόλλησης, ή ρεύμα τόξου, είναι η κύρια πηγή τήξης. Η θερμική ενέργεια παράγεται από τη σύγκρουση των ηλεκτρονίων και των ιόντων του τόξου με το ηλεκτρόδιο και το κομμάτι εργασίας. Τα υψηλότερα ρεύματα έχουν ως αποτέλεσμα περισσότερες συγκρούσεις και παράγεται περισσότερη θερμότητα. Για το GMAW το ρεύμα συγκόλλησης είναι σχεδόν πάντα στο DCEP (θετικό ηλεκτρόδιο συνεχούς ρεύματος) πολικότητα. Αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια ρέουν από το κομμάτι εργασίας (αρνητική πλευρά) προς το σύρμα ηλεκτροδίου (θετική πλευρά). Η απόπειρα συγκόλλησης με τη χρήση GMAW στο DCEN (συνεχές ρεύμα ηλεκτρόδιο αρνητικό) πολικότητα οδηγεί σε αστάθεια του τόξου και δημιουργία πιτσιλίσματος. Η ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος (WFS) είναι η ταχύτητα με την οποία το σύρμα τροφοδοτείται προς τα εμπρός στο τόξο. Είναι μία από τις δύο

παραμέτρους που μπορούν να ρυθμιστούν σε έναν τυπικό πίνακα ελέγχου πηγής ισχύος GMAW. (Dale Brush, 2018)

Η τάση τόξου είναι η παράμετρος που καθορίζει το μήκος τόξου. Σε τυπικές GMAW εφαρμογές, η τάση είναι και μια άλλη ρύθμιση εκτός από την WFS που μπορεί να γίνει στη συγκόλληση πίνακα ελέγχου της πηγής ισχύος της συγκόλλησης. Οι περισσότερες πηγές ισχύος GMAW είναι σταθερής τάσης (CV), που σημαίνει ότι προσπαθούν να διατηρήσουν σταθερή τάση καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης.

3.2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της GMAW

➤ Πλεονεκτήματα

1. Η GMAW έχει ευρύ φάσμα ρυθμών εναπόθεσης που καθιστά δυνατή την ταχεία δημιουργία τόσο μεσαίου όσο και μεγάλου μεγέθους χαρακτηριστικά σε ένα εξάρτημα
2. Είναι εύκολα αυτοματοποιημένη επειδή:
 - Χρησιμοποιεί σχετικά απλό εξοπλισμό
 - Συνήθως δεν απαιτεί εκκινήτες τόξου υψηλής συχνότητας, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα προβληματικοί στα αυτοματοποιημένα/ρομποτικά συστήματα με υπολογιστή.
 - Η διαδικασία είναι φυσικά αυτορυθμιζόμενη, οπότε η συνεχής παρακολούθηση του τόξου είναι περιττή.
 - Η ομοαξονικότητα του αναλώσιμου ηλεκτροδίου με το σώμα του πυρσού έχει ως αποτέλεσμα την απλούστερη διαδρομή του εργαλείου.
3. Έχει τη δυνατότητα συγκόλλησης όλων των εμπορικών μετάλλων και κραμάτων.
4. Μπορεί να συγκολλήσει σε όλες τις θέσεις.
5. Είναι μια σχετικά καθαρή διαδικασία που απαιτεί ελάχιστο καθαρισμό μετά τη συγκόλληση.
6. Διαθέτει πολλούς διαφορετικούς μηχανισμούς μεταφοράς μετάλλων για διάφορες συγκολλήσεις.
7. Δεν υπάρχουν περιορισμοί στο μήκος του ηλεκτροδίου όπως σε άλλες μεθόδους.

8. Μπορεί να γίνει σε μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με άλλες μεθόδους .
9. Η συνεχής τροφοδοσία ηλεκτροδίου επιτρέπει τη εναπόθεση μεγάλου μήκους χωρίς διακοπές.
10. Δεν απαιτείται μεγάλη ικανότητα χειρισμών από το συγκολλητή διότι το μήκος του τόξου διατηρείται σταθερό σε σχετικά μεγαλύτερες αυξομειώσεις στην απόσταση ανάμεσα στο ακροφύσιο και το προς συγκόλληση μέταλλο.

Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν τη μέθοδο κατάλληλη για υψηλούς ρυθμούς παραγωγής και σε αυτοματοποιημένες εφαρμογές. Με την έλευση της ρομποτικής, η επιλογή της GMAW είναι όλο και συχνότερη.

➤ **Μειονεκτήματα**

1. Η GMAW δεν έχει τη δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου του ρεύματος συγκόλλησης και του μετάλλου πλήρωσης προσθήκης (WFS).
 - Τα χαμηλά ποσοστά εναπόθεσης είναι δύσκολο να επιτευχθούν χωρίς να μειωθεί το ρεύμα σε σημείο αστάθειας του τόξου.
 - Υψηλά ποσοστά εναπόθεσης δεν μπορούν να επιτευχθούν χωρίς υψηλή εισροή θερμότητας.
2. Η GMAW έχει περιορισμένη χρήση στη συγκόλληση τιτανίου
 - Τα περιπλανώμενα τόξα προκαλούν αστάθεια του τόξου και κακή ποιότητα της ράβδου συγκόλλησης.
 - Η υψηλή επιφανειακή τάση καθιστά απρόβλεπτη τη μεταφορά σταγονιδίων.
3. Οι συμβατικές εκκινήσεις τόξου με βραχυκύκλωμα παράγουν γενικά πιτσιλιές, ανεξάρτητα από τον μηχανισμό μεταφοράς που χρησιμοποιείται.
4. Τα σχετικά υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας και η ένταση του τόξου μπορεί να δυσκολέψουν το χειριστή να κρίνει την ποιότητα της συγκόλλησης.

3.3 Εφαρμογές Wire Arc Additive Manufacturing

- Εφαρμογές στην Ναυτιλία

Η ναυτιλιακή βιομηχανία γενικά έχει αργήσει να αγκαλιάσει την έννοια της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η χρήση της συνεχούς εναπόθεσης υγρών μετάλλων με αριθμητικό έλεγχο μέσω υπολογιστή δημιούργησε ευκαιρίες για την παραγωγή πολύπλοκων σχημάτων, όπως σφυρηλατημένα και χυτά κομμάτια, αποφεύγοντας παράλληλα την ανάγκη για ακριβή εργαλεία και τις χρονικές καθυστερήσεις στην κατασκευή καλουπιών. (Dr. Michael J. Fletcher M.Sc.)

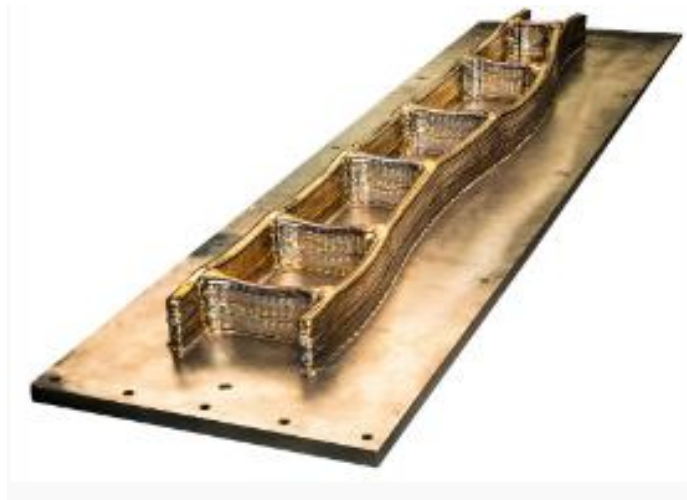
Έχουν γίνει αρκετές εφαρμογές της τρισδιάστατης παραγωγής και είναι κατάλληλες για να καταδείξουν τις δυνατότητες στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Αυτές απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 14 Propeller 200 x 240 x 240 mm (Dr. Michael J. Fletcher M.Sc.)



Εικόνα 15 Bell housing 230 x 280 x 280 mm (**Dr. Michael J. Fletcher M.Sc.**)



Εικόνα 16 Main structural element of aircraft wing (**Dr. Michael J. Fletcher M.Sc.**)

- **Γενικές εφαρμογές**

- **Εφαρμογή σε σιδηρόδρομο**

Η γερμανική εταιρεία σιδηροδρόμων, Deutsche Bahn, έχει υιοθετήσει από νωρίς την τρισδιάστατη εκτύπωση για ανταλλακτικά. Τα τελευταία χρόνια, η Deutsche Bahn έχει εντοπίσει περισσότερες από 100 περιπτώσεις χρήσης που μπορούν να επωφεληθούν από την τρισδιάστατη εκτύπωση. Τα περισσότερα ανταλλακτικά έχουν σχέση με τη διαθεσιμότητα, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να είναι δύσκολο να προμηθευτούν, προκαλώντας πολύμηνη διακοπή λειτουργίας των οχημάτων. (Autonomus Manufacturing, 2018)

Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου εξαρτήματος αφορά ένα κάλυμμα ρουλεμάν τροχού για μια ατμομηχανή κατηγορίας 294. Αυτό το μοντέλο τέθηκε σε λειτουργία τη δεκαετία του 1960 και του '70 και τα ανταλλακτικά για ορισμένα εξαρτήματα, όπως αυτό το κάλυμμα, λείπουν.



Εικόνα 17 Κάλυμμα ρουλεμάν τροχού (Autonomus Manufacturing, 2018)

- **Εφαρμογή σε κατασκευή ποδηλάτου**

Αυτό το ποδήλατο σχεδιάστηκε στο πλαίσιο ενός ερευνητικού έργου στο AMS Building Fieldlab σχετικά με τη βιωσιμότητα του WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing, μιας τεχνικής τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζεται στη συγκόλληση MIG. Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει κερδίσει δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια, αλλά για όσους θέλουν να εκτυπώσουν αντικείμενα μεσαίας και μεγάλης κλίμακας, πρέπει ακόμα να αντιμετωπίσουν σημαντικούς περιορισμούς της τεχνολογίας. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται σε αυτό το έργο καθιστά δυνατή την παραγωγή μεταλλικών αντικειμένων μεσαίας και μεγάλης κλίμακας με σχεδόν πλήρη ελευθερία μορφής. Οι μαθητές αποδεικνύουν επίσης την αντοχή του σκελετού οδηγώντας το ποδήλατο στην πόλη, ακόμη και στους κακοτράχαλους λιθόστρωτους δρόμους της πόλης, το ποδήλατο εξακολουθεί να αποδίδει πολύ καλά. (Tuvie)



Εικόνα 18 Κατασκευή ποδηλάτου με WAAM (Tuvie)

Κεφάλαιο 4 Πειραματική Διαδικασία

4.1 Σκοπός διαδικασίας

Η παρούσα πειραματική διαδικασία αποσκοπεί στο να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας, με ενίσχυση σωματιδίων TiC σε διασπορά, σε τεχνολογία προσθετικής κατασκευής (Τρισδιάστατη Εκτύπωση), με τεχνική συγκόλλησης σύρματος (WAAM).

Για την διερεύνηση αυτή πραγματοποιήθηκε η κατασκευή αντικειμένου στο χώρο με την βοήθεια εξοπλισμού που θα αναφερθεί παρακάτω.

Έπειτα, εφόσον ολοκληρώθηκε το δοκίμιο θα γίνει ανάλυση μέσω μοντέλου, έτσι ώστε να παρουσιαστούν και να εξεταστούν τα θερμικά φορτία με αποτέλεσμα να μπορέσει να αξιολογηθεί.

4.2 Εξοπλισμός και υλικά πειραματικής διαδικασίας

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία αποτελείται από τον CNC παντογράφο, την μηχανή συγκόλλησης τύπου GMAW, κάμερα IR με ανιχνευτή θερμοκρασίας MCT και τέλος το έλασμα όπου θα πραγματοποιηθεί η συγκόλληση και το παραγεμιστό σύρμα TiC.

- **CNC παντογράφος:**

Ο CNC παντογράφος με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και την χρήση λογισμικού (Mach 3) καλείται να αντιγράψει μέσω του G κώδικα το σχέδιο που του έχει δοθεί με X, Y, Z συντεταγμένες στις προκαθορισμένες διαστάσεις που έχουν εισαχθεί σε αυτόν, έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει μετατόπιση για το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Εικόνα 19 CNC παντογράφος (ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ, ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΠΑΠΑΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΟΥΛΟΣ, 2019)

- **Μηχανή συγκόλλησης τύπου GMAW:**

Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, ο βασικός εξοπλισμός της μηχανής συγκόλλησης τύπου GMAW, περιλαμβάνει μια πηγή ενέργειας, ένα πιστόλι συγκόλλησης, το υλικό και τα καλώδια του πυρσού και τροφοδότη σύρματος.



Εικόνα 20 Μηχανή συγκόλλησης τύπου GMAW (Θεοδόσιος Σκάρος, 2022)

- EQUUS 327k SM

Χρησιμοποιείται κατάλληλη οπτική κάμερα IR με ανιχνευτή θερμοκρασίας MCT για τον έλεγχο της εναλλαγής της θερμότητας.



Εικόνα 21 Οπτικά πυρόμετρα και IR κάμερα καταγραφής θερμοκρασίας (IRCAM, 2020)

- **Έλασμα:**

Για την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο έλασμα, για να αποτελέσει την βάση, από κατασκευαστικό χάλυβα ποιότητας S355 με διαστάσεις (μήκος-πλάτος-ύψος)

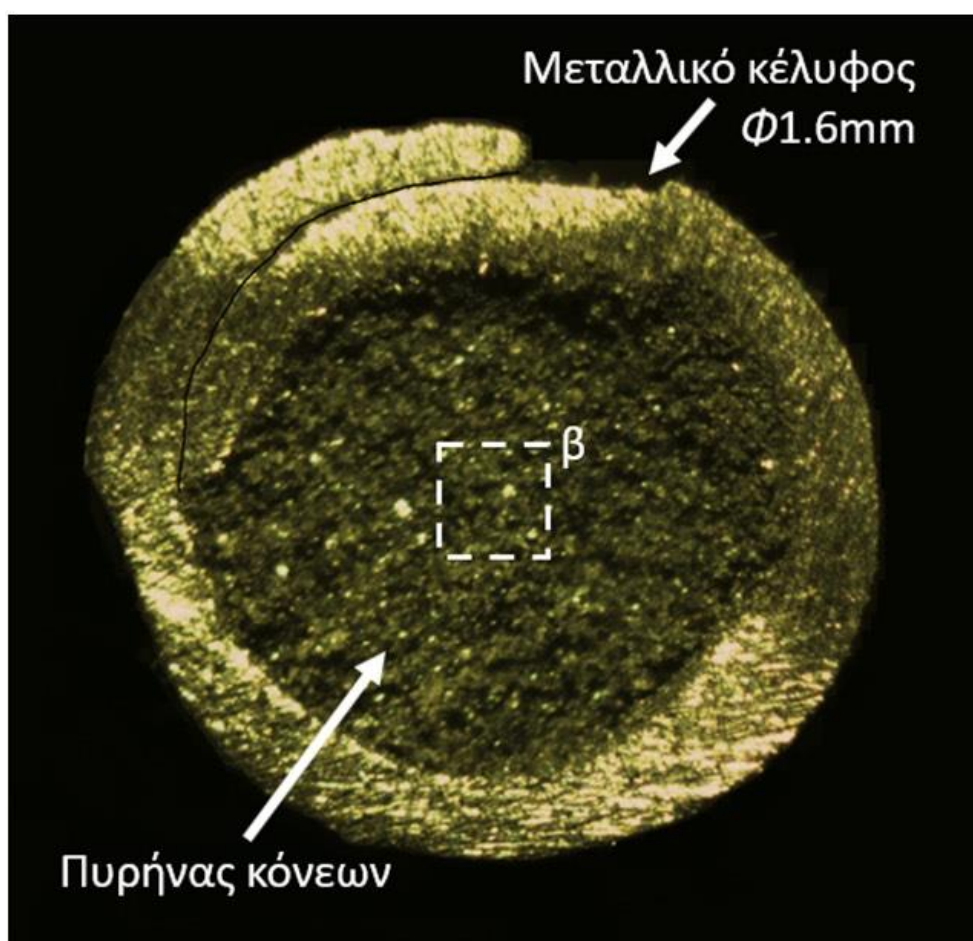
- **Σύρμα συγκόλλησης TiC:**



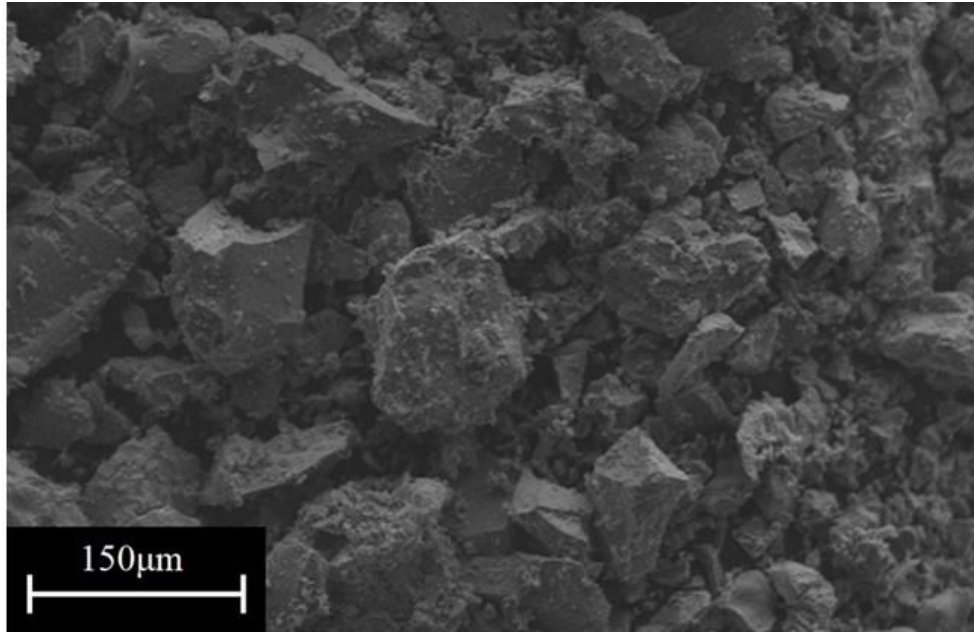
Εικόνα 22 Σύρμα συγκόλλησης

4.3 Χαρακτηριστικά σύρματος πλήρωσης

Το σύρμα TeroMatec OA 4923 που χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό στάδιο περιέχει μια λεπτή διασπορά εξαιρετικά σκληρών καρβίδια τιτανίου σε μια σκληρή, μαρτενσιτική μήτρα, παρέχοντας εξαιρετική αντοχή στη συνδυασμένη φθορά από τριβή, κρούση και πίεση. Αυτό το σύρμα κράματος με πυρήνα ροής είναι ειδικά για συγκολλήσεις συντήρησης και επισκευής στο χώρο του εργοταξίου χοντρών, βαρέων εξαρτημάτων όπου η ταχύτερη εναπόθεση συγκόλλησης, ρυθμοί συγκόλλησης είναι επιθυμητοί. Επιπλέον, το OA 4923 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χειροκίνητες ή πλήρως αυτόματες εργασίες σκλήρυνσης. (Gastolin Eutectic)



Εικόνα 23 Μεταλλικό κέλυφος σύρματος και ο πυρήνας του



Εικόνα 24 Δομή σύρματος

4.4 Στοιχεία και παράμετροι διαδικασίας

Με βάση την παρακάτω εικόνα, την οποία δίνει ο κατασκευαστής, βλέπουμε πως θα πρέπει να υπάρξουν όρια όσο αναφορά την ένταση (A) και την τάση (V). Με γνώμονα την διάμετρο του σύρματος όπου θα χρησιμοποιηθεί $D = 1,6 \text{ mm}$, η ένταση κυμαίνεται από 190-210 A και η τάση από 25-27 V.

Diameter (in) (mm)	CURRENT RANGE (A)		VOLTAGE RANGE (V)		WIRE EXTENSION (CONTACT TIP)*	
	Globular	Fine Globular	Globular	Fine Globular	Globular	Fine Globular
1/16" (1.6)	190-210	150-190	25-27	24-27	1/2" ± 1/8"	1/2" ± 1/8"
7/64" (2.8)	350-380	200-250	27-31	26-29	1.5" ± 1/8"	1.5" ± 1/8"

Εικόνα 25 Δεδομένα κατασκευαστή (Gastolin Eutectic)

Πραγματοποιώντας κάποιες δοκιμές με συγκεκριμένη ταχύτητα τροφοδοσίας του σύρματος και εναλλαγές τάσης-έντασης με τα συγκεκριμένα όρια καταλήγουμε ότι:

- **V = 25 V (τάση)**
- **I = 200 A (ένταση)**
- **U = 4,6 m/s (ταχύτητα)**

Όπως έχουμε αναφέρει και στο τρίτο (3) κεφάλαιο μια πολύ σημαντική παράμετρος είναι η ταχύτητα συγκόλλησης, δηλαδή η ταχύτητα που μετακινείται η τσιμπήδα για να δημιουργηθεί η στρώση. Η ταχύτητα αυτή προσδιορίζει την τελική γεωμετρία της κάθε στρώσης, παραδείγματος χάρη, όσο μεγαλύτερη ταχύτητα τόσο πιο λεπτή η στρώση που θα δημιουργηθεί και το αντίστροφο. Επίσης, η ταχύτητα συγκόλλησης συνδέεται άμεσα με τα θερμικά φορτία που θα υποστεί το κομμάτι κατασκευής, παραδείγματος χάρη, όσο μικρότερη ταχύτητα τόσο μεγαλύτερη θερμότητα θα παραχθεί και αντίστοφα.

Με διάφορες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο και γνωρίζοντας τις παραπάνω παραμέτρους που μας δίνει ο κατασκευαστής για το συγκεκριμένο σύρμα, καταληξαμε ότι η κατάλληλη ταχύτητα συγκόλλησης για την επιθυμητή γεωμετρία των στρώσεων είναι **U = 550 mm/min.**

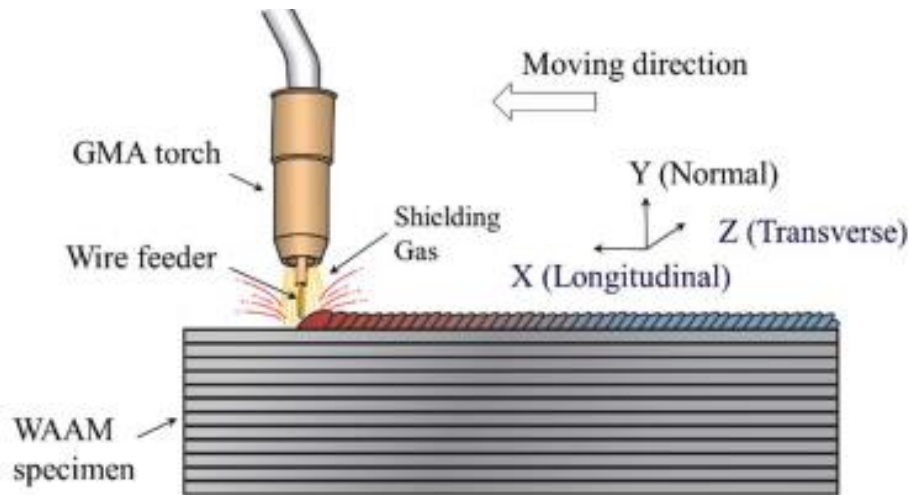


Εικόνα 26 Δοκιμές ταχύτητας και η επιλογή ταχύτητας

Επιπλέον, σημαντικός παράγοντας που απαιτείται για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα είναι η κατεύθυνση εναπόθεσης υλικού, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται οι στρώσεις. Με βάση το συγκεκριμένο μηχάνημα που κατασκευάστηκε το αντικείμενο υπάρχουν δύο τρόποι:

- **1^{ος} τρόπος:**

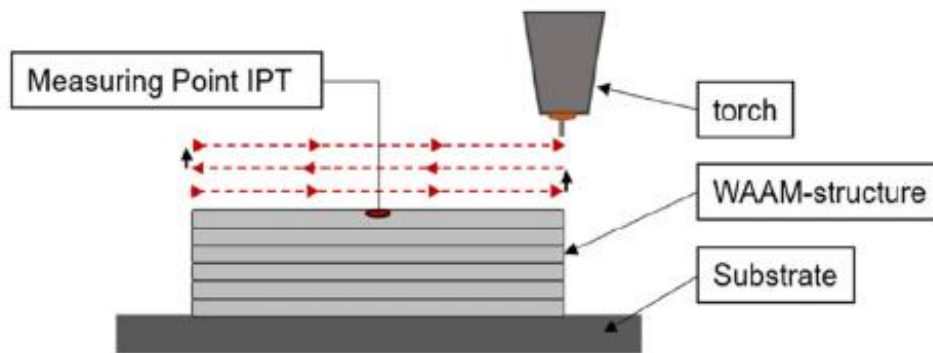
Ξεκινάει η εναπόθεση υλικού προς την κατεύθυνση X και δημιουργείται μια στρώση, έπειτα σηκώνεται η τσιμπήδα ως προς Z κατεύθυνση σε συγκεκριμένο ύψος, το οποίο έχει οριστεί από πριν, και επανέρχεται στην αρχική του θέση χωρίς να εναποθέτει υλικό και αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσει το αντικείμενο στην τελική του μορφή.



Εικόνα 27 1^{ος} τρόπος εναπόθεση υλικού (H. Abusalma, et al., 2022)

- **2^{ος} τρόπος:**

Ξεκινάει η εναπόθεση υλικού προς την κατεύθυνση X και δημιουργείται μια στρώση, έπειτα σηκώνεται η τσιμπήδα προς Z κατεύθυνση σε συγκεκριμένο ύψος και επανέρχεται στην αρχική θέση εναποθέτοντας υλικό και αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσει το αντικείμενο στην αρχική του μορφή.

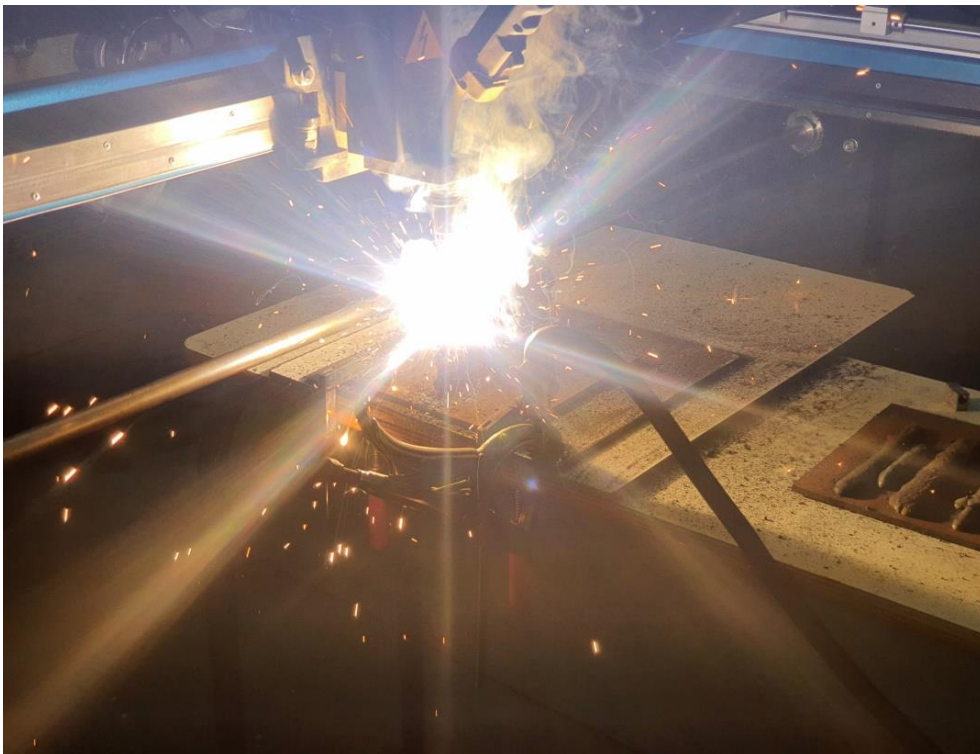


Εικόνα 28 2^{ος} τρόπος εναπόθεση υλικού (Johanna Müller, et al., 2021)

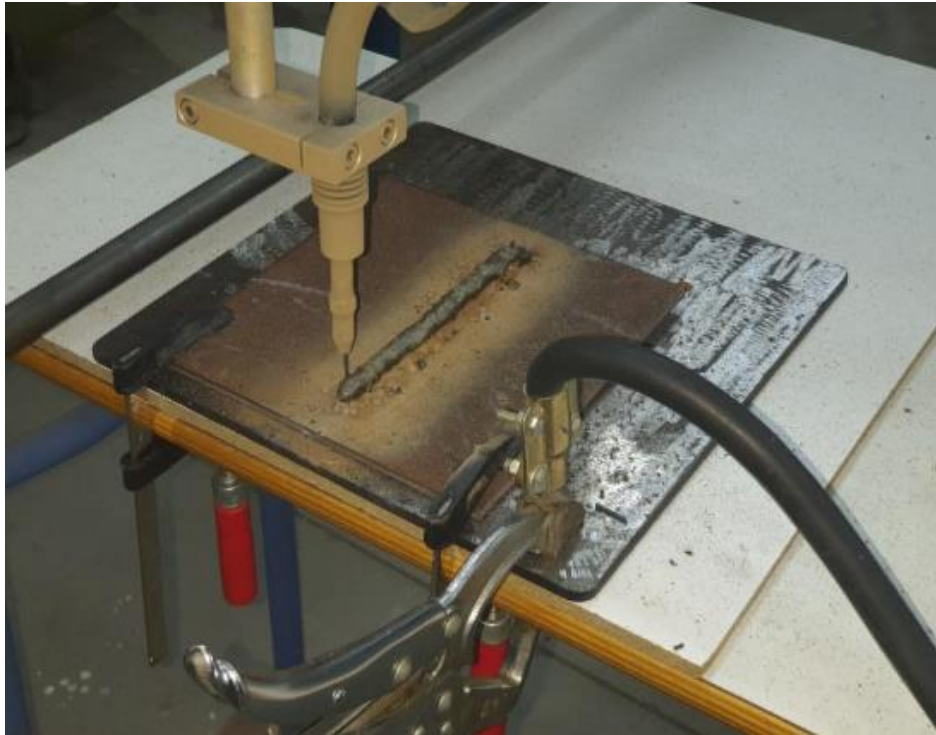
Μετά από δοκιμές και των δύο παραπάνω περιπτώσεων και λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία και τις παραμέτρους διαδικασίας καταλήξαμε στον πρώτο τρόπο, λόγω των μικρότερων θερμικών φορτίων που δέχεται η κάθε στρώση, τα οποία επηρεάζουν τις τελικές ιδιότητες του αντικειμένου.

4.5 Κατασκευή αντικειμένου

Η εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας υλοποιήθηκε με τα δεδομένα που προαναφέρθηκαν, δηλαδή τον απαιτούμενο εξοπλισμό και τις παραμέτρους για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετήθηκε το έλασμα βάσης, δηλαδή το υπόστρωμα με διαστάσεις 200 x 200 x 6 mm πάνω στο έδρανο με διαστάσεις 350 x 350 x 6 mm, το οποίο βρίσκεται πάνω στο τραπέζι εργασίας που συγκρατείται με σφηκτῆρες και από τις δύο πλευρές έτσι ώστε να παραμείνει επακτωμένο για την αποφυγή παραμορφώσεων λόγω της θερμότητας. Διαμορφώθηκε η μηχανή συγκόλλησης τύπου GMAW με βάση τις κατάλληλες παραμέτρους και δημιουργήθηκε G κώδικας για τις συντεταγμένες, με σκοπό να δοθεί η κατεύθυνση της τσιμπίδας. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν όλα τα μέσα ατομικής προστασίας, όπως ειδικά υποδήματα, δερμάτινα γάντια και στολή εργασίας και ειδικά γυαλιά συγκολλήσεων.



Εικόνα 29 Δημιουργία αντικειμένου



Εικόνα 30 Αρχικές στρώσεις του αντικειμένου



Εικόνα 31 Θερμικά φορτία κατά την δημιουργία του αντικειμένου

Από τις παραπάνω εικόνες μπορούμε να διακρίνουμε την τσιμπίδα, η οποία αρχικά είναι στο σημείο μηδέν και ξεκινάει το χτίσιμο ως προς X κατεύθυνση την οποία έχουμε ορίσει στον υπολογιστή με το σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD στην αρχή της διαδικασίας. Έπειτα, κατά την διαδικασία του χτισίματος παρατηρούμε να εμφανίζονται απότομες μεταβολές θερμότητας, εξ' αιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται και της γρήγορης ψύξης που ακολουθεί όσο απομακρύνεται η τσιμπίδα κατά την πορεία της.

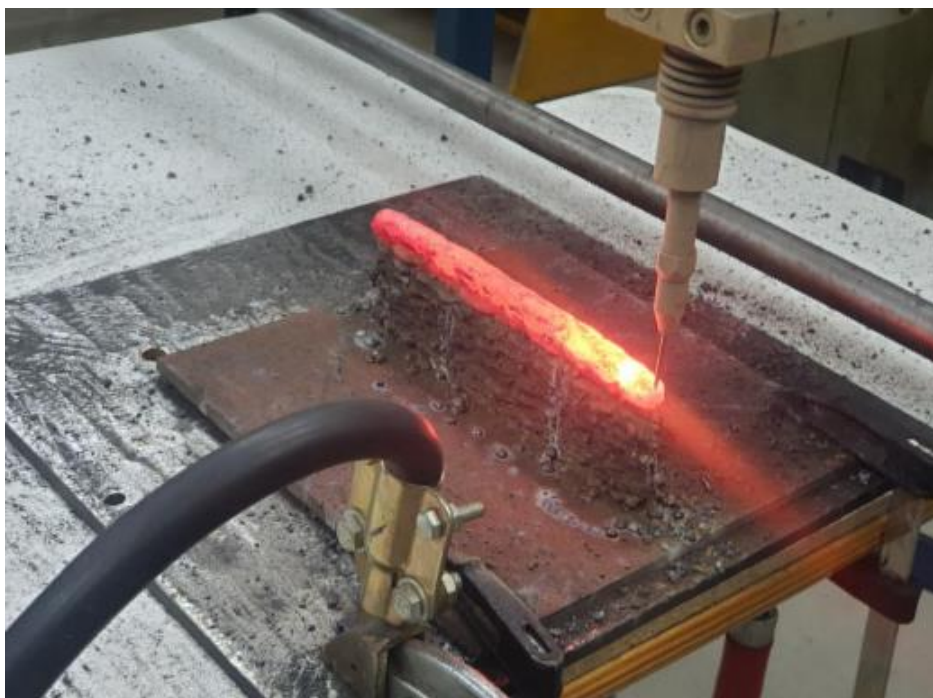


Εικόνα 32 Απεικόνιση στρώσεων στη μέση της διαδικασίας

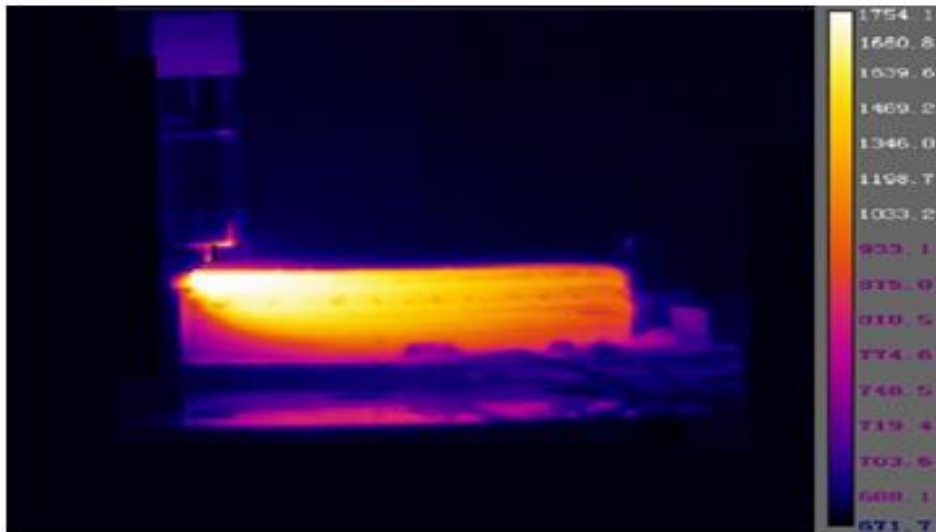


Εικόνα 33 Μέτρηση ύψους κατά την δημιουργία ($Z = 45 \text{ mm}$)

Όπως βλέπουμε σιγά σιγά να χτίζονται οι στρώσεις η μία πάνω στην άλλη παρατηρούμε πως μέχρι στιγμής έχουμε την επιθυμητή γεωμετρία και πως το ύψος των στρώσεων έχει αυξηθεί κατά 45 χιλιοστά ως προς Z κατεύθυνση.



Εικόνα 34 Θερμικά φορτία κατά την δημιουργία

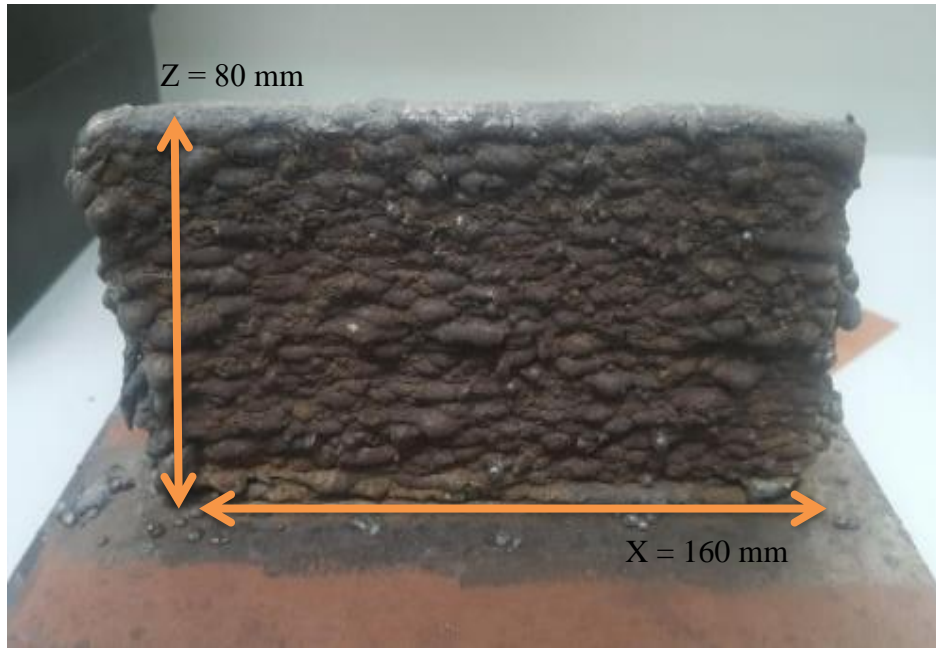


Εικόνα 35 Καταγραφή θερμικών φορτίων με τη χρήση θερμικής κάμερας IR



Εικόνα 36 Μέτρηση ύψους του τελικού αντικειμένου ($Z = 80 \text{ mm}$)

Στη συνέχεια, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, βλέπουμε ξανά να αναπτύσσονται θερμικά φορτία και γίνεται και η καταγραφή τους με τη χρήση θερμικής κάμερας IR κατά την δημιουργία της στρώσης, τα οποία επηρεάζουν και τις παρακάτω στρώσεις. Μετρώντας ξανά το ύψος κατά κατεύθυνση Z βλέπουμε πως έχει φτάσει στα 80 χιλιοστά.



Εικόνα 37 Τελικές διαστάσεις αντικειμένου



Εικόνα 38 Τελικό πάχος αντικειμένου

Τέλος, απεικονίζονται οι τελικές διαστάσεις του αντικειμένου οι οποίες είναι **ύψος Z = 80 mm, μήκος X = 160 mm και πλάτος 14 mm.**

Κεφάλαιο 5 Θερμικό μοντέλο

5.1. Εισαγωγή

Η μοντελοποίηση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής με συρμάτινο τόξο είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για την προσαρμογή των βέλτιστων παραμέτρων καθώς και για την κατανόηση και τη διαχείριση των ακολουθιών της εναπόθεσης στρώμα προς στρώμα. Ορισμένες από αυτές τις παραμέτρους όπως η διαδρομή εργαλείων, τα διαστήματα εναπόθεσης και η ισχύς της πηγής θερμότητας παίζουν σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της διαδικασίας της βιωσιμότητας και της αποδοτικότητας του κόστους. (Kohei Oyama, Spyros Diplas, Mohammed M'hamdi, Anette E. Gunnæs, Amin S. Azar, 2019)

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στο να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι διαφορετικές θερμομηχανικές ιδιότητες του υλικού μας στις παραμορφώσεις που δημιουργούνται λόγω των συγκολλήσεων. Αυτή η διερεύνηση γίνεται στα πλαίσια προσομοιώσεων και γιαυτό χρειάζεται να γίνει πρώτα εξακρίβωση των μέσων προσομοίωσης. Εκτελείται, δηλαδή, προσομοίωση συγκόλλησης για το υλικό μας. Έπειτα, μέσω της προσομοίωσης υπάγονται συμπεράσματα σε μορφή διαγραμμάτων για να επιβεβαιωθεί ότι ταιριάζουν τα πειραματικά δεδομένα με τα θεωρητικά, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη αξιολόγηση της διαδικασίας.

Κατά την διάρκεια της εναπόθεσης υλικού έγινε καταγραφή των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών με χρήση θερμικής κάμερας και με την λήξη του δοκιμίου έγινε μέτρηση των γωνιακών παραμορφώσεων του δοκιμίου με τη χρήση μετρητικών ορολογιών με αποτέλεσμα την σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα αντίστοιχα πειραματικά.

5.2. Μοντελοποίηση θερμικών και μηχανικών αναλύσεων

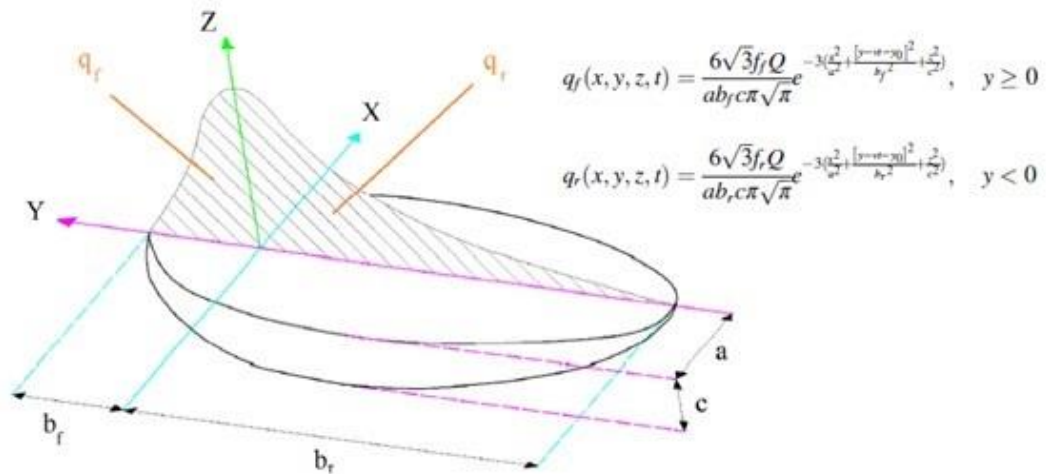
5.2.1. Θερμική ανάλυση

Η θερμική ανάλυση είναι ένα απαραίτητο εργαλείο για την αξιολόγηση των θερμοκρασιακών φαινομένων κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Αυτά τα φαινόμενα περιγράφονται ως συναρτήσεις του χρόνου (t) και των χωρικών συντεταγμένων (x, y, z) και περιγράφονται από την εξίσωση μη γραμμικής μετάδοσης θερμότητας (βλ. Εξίσωση 5.1).

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial x^2} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad \text{Εξίσωση 5.1}$$

Στην Εξίσωση 5.1, οι μεταβλητές C , ρ , T , t , Q και k περιγράφουν την θερμοχωρητικότητα σε $J/kg^\circ C$, την πυκνότητα σε kg/m^3 , την θερμοκρασία σε $^\circ C$, τον χρόνο σε sec , την ροή θερμότητας σε W/m^3 και, τέλος, την θερμική αγωγιμότητα σε $W/m^\circ C$.

Σημαντικό βήμα στην θερμική ανάλυση των προσομοιώσεων συγκολλήσεων αποτελεί και η μοντελοποίηση της πηγής θερμότητας. Στην βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα διαφορετικών μοντέλων, ωστόσο η παρούσα μελέτη βασίζεται στο διπλό ελλειψοειδές, που προτάθηκε από τους (Goldak, Chakravarti, & Bibby, 1984). Το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζεται στην Εικόνα 39, όπου φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα από το ηλεκτρικό τόξο στο μέταλλο βάσης και στο υλικό πλήρωσης.



Εικόνα 39 Σχηματική απεικόνιση του διπλού ελλειψοειδούς μοντέλου θερμικής πηγής (Θεοδόσιος Σκάρος, 2022)

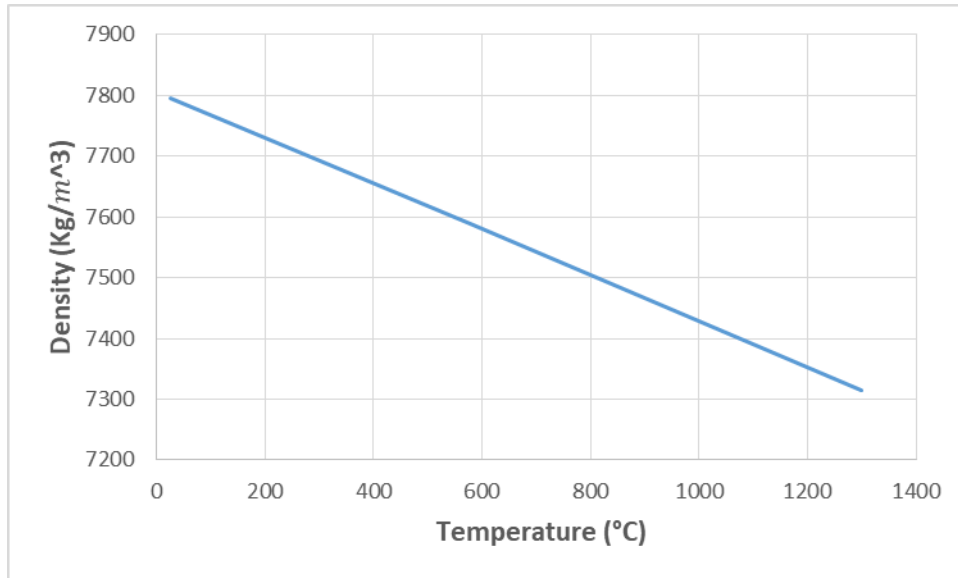
Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 39** το μαθηματικό μοντέλο ορίζει δύο κατανομές ροής θερμότητας, μία για το εμπρός μισό τμήμα και μία για το πίσω, όπως περιγράφονται και από τις εξισώσεις q_f και q_r , αντίστοιχα, του σχήματος. Ως προς τις εξισώσεις, η μεταβλητή Q περιγράφει την ενέργεια του ηλεκτρικού τόξου και υπολογίζεται ως το γινόμενο της τάσης V , της έντασης ρεύματος I και του συντελεστή απόδοσης της μεθόδου συγκόλλησης η . Έπειτα, οι μεταβλητές a , b_f , b_r και c αποτελούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη – διαστάσεις της θερμικής πηγής. Οι αδιάστατες μεταβλητές f_f και f_r περιγράφουν το μέρος της ενέργειας που αποδίδεται στο εμπρός και πίσω τμήμα της θερμικής πηγής, αντίστοιχα. Οι μεταβλητές f_f και f_r συνδέονται μεταξύ τους με την παρακάτω σχέση (**Εξίσωση 5.2**): (Θεοδόσιος Σκάρος, 2022)

$$f_r + f_f = 2$$

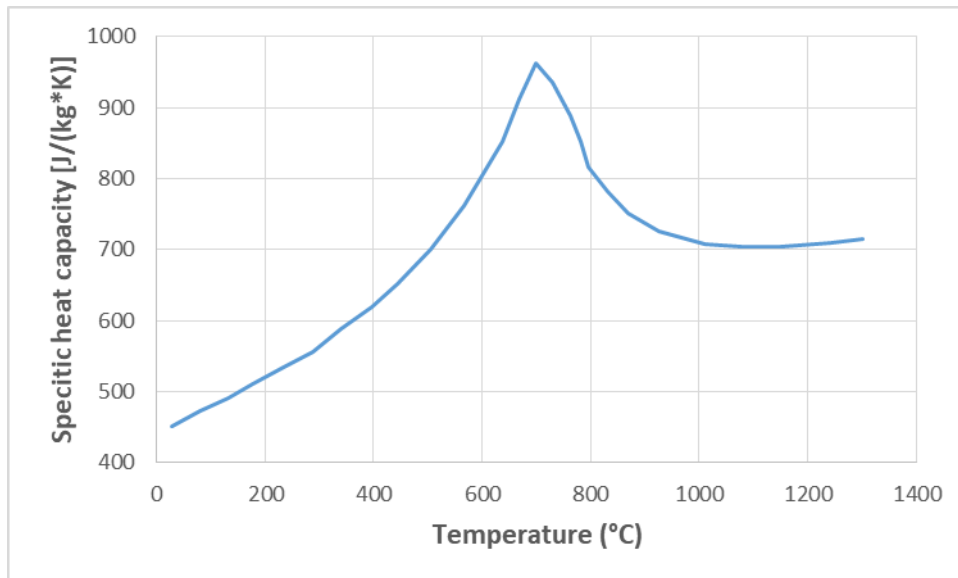
Εξίσωση

5.2

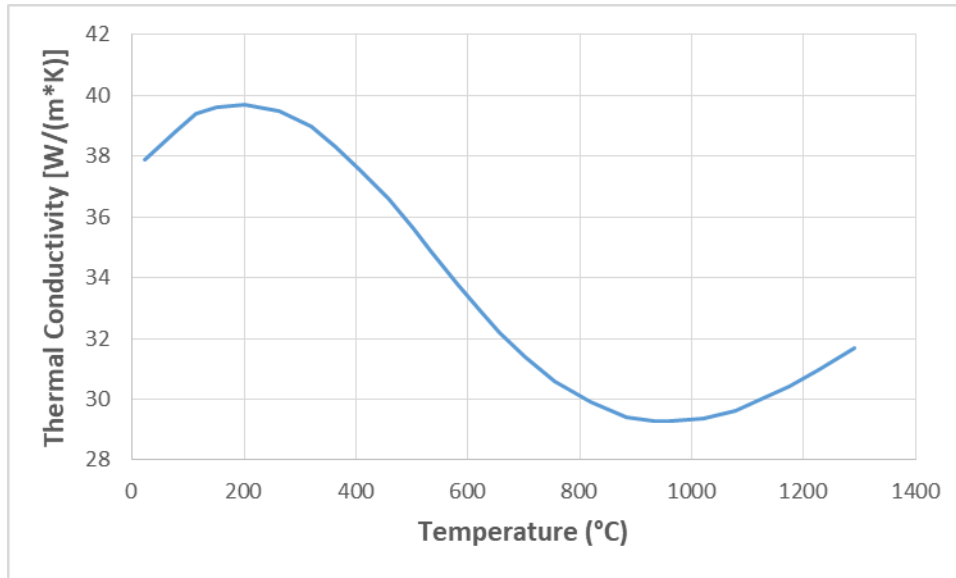
Παρακάτω θα δούμε να απεικονίζονται, με βάση την εξίσωση 5.1 η πυκνότητα (density), η θερμοχωρητικότητα (heat capacity) και η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity), δηλαδή οι θερμικές ιδιότητες του υλικού, οι οποίες είναι απαραίτητες για την θερμική ανάλυση.



Εικόνα 40 Μεταβολή πυκνότητας συνάρτηση της θερμοκρασίας



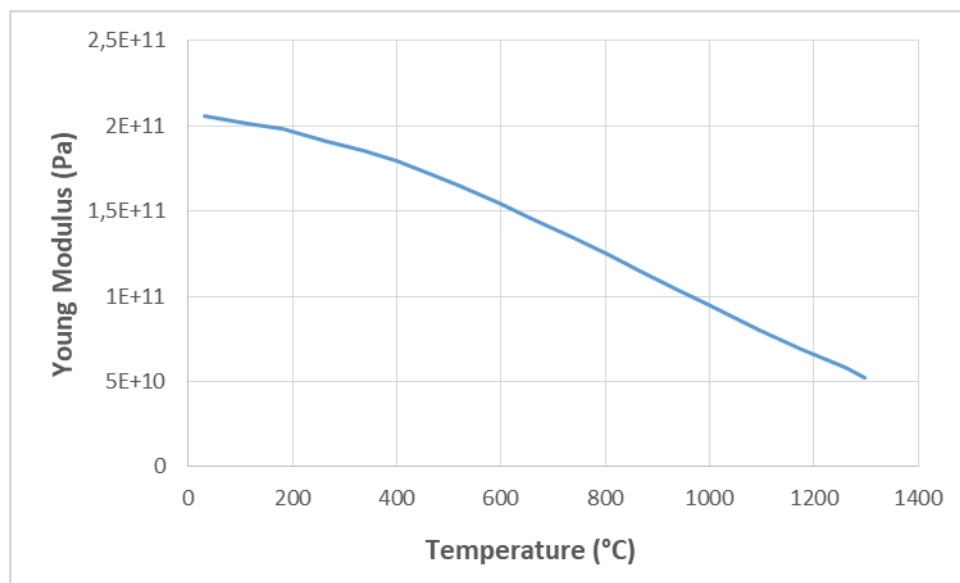
Εικόνα 41 Μεταβολή θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας



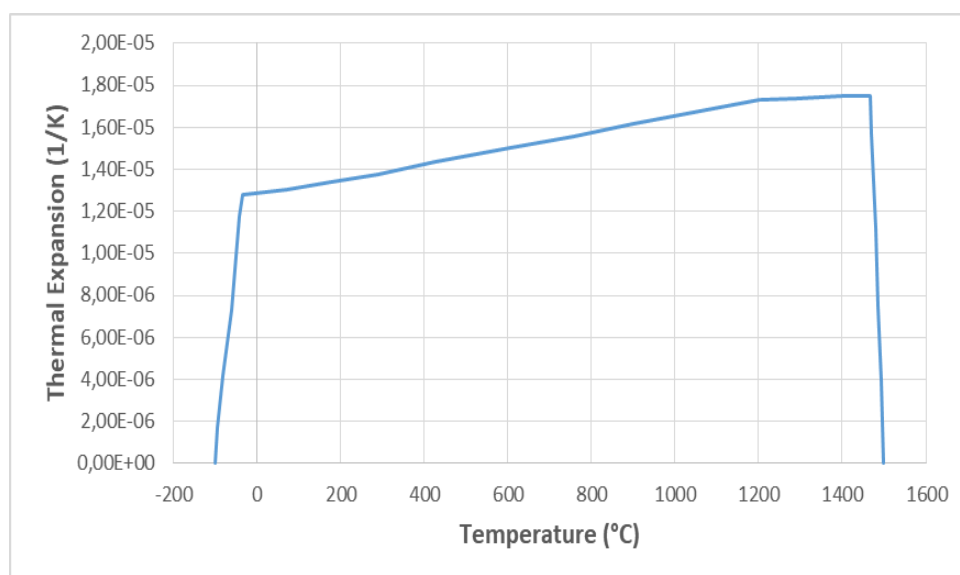
Εικόνα 42 Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας

5.2.2 Μηχανική ανάλυση

Απαραίτητη είναι επίσης και η μηχανική ανάλυση στην οποία παίζουν σημαντικό ρόλο οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού που επηρεάζεται από την θερμοκρασία και το μοντέλο που χρησιμοποιείται το οποίο βασίζεται στο αντίστοιχο πειραματικό. Σημαντικές ιδιότητες για την μηχανική ανάλυση είναι το μέτρο ελαστικότητας (young modulus) και ο συντελεστής θερμικής διαστολής (thermal expansion), οι οποίες απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



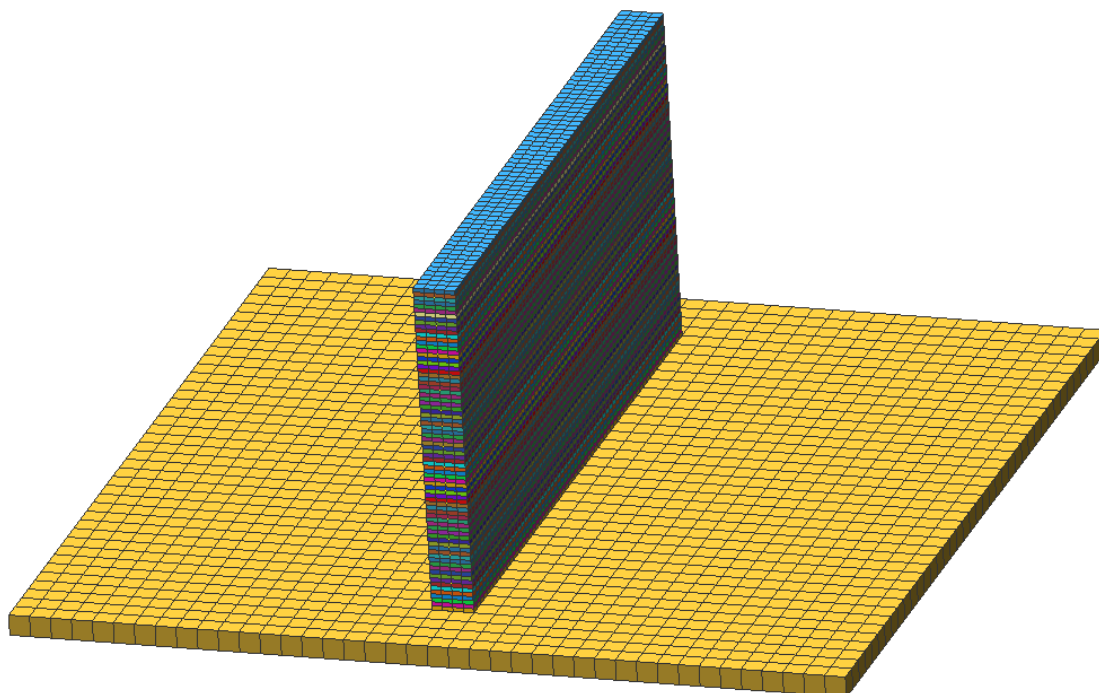
Εικόνα 43 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας



Εικόνα 44 Μεταβολή συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας

5.3 Παράμετροι λογισμικού προσομοίωσης

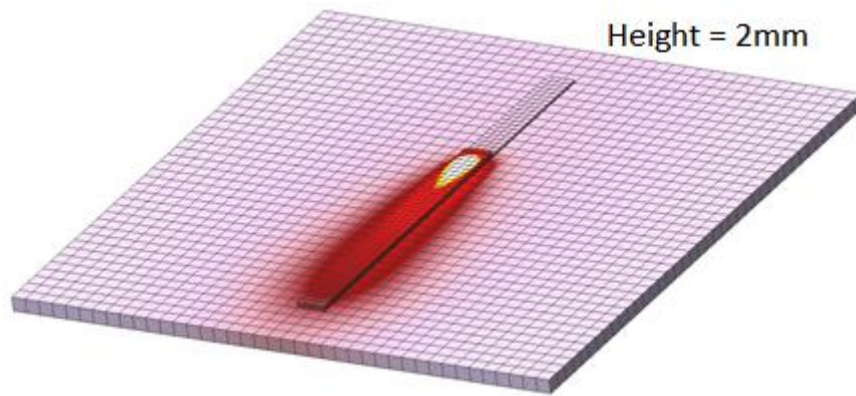
Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων της διεργασίας και συγκεκριμένα για μια ολοκληρωμένη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να οριστεί αρχικά η σωστή πυκνότητα του πλέγματος καθώς και η γεωμετρία, έτσι ώστε να έχουμε τα πιο αξιόπιστα και πιο ακριβή αποτελέσματα. Για την επίτευξη αυτού έγιναν δοκιμές με διαφορετικές πυκνότητες καταλήγοντας στην πιο κατάλληλη.



Εικόνα 45 Πυκνότητα πλέγματος

Μιμούμενοι, έπειτα, τις πειραματικές συνθήκες το υπόστρωμα (έδρανο) τοποθετήθηκε στον πάγκο εργασίας. Χρησιμοποιήθηκαν δύο σφικτήρες για την στερέωση του υποστρώματος (200 x 200 x 6 mm) στο έδρανο (350 x 350 x 6 mm) . Το κέντρο κάθε κυλίνδρου σύσφιξης τοποθετήθηκε σε απόσταση 20 χιλιοστών από τα άκρα της βάσης. Το βάθος και η ακτίνα των σφικτήρων ήταν 10 χιλιοστά. Οι σφικτήρες είναι απαραίτητοι τόσο για την αποφυγή μετακίνησης όσο και για την γωνιακή παραμόρφωση της πλάκας κατά την διάρκεια της εναπόθεσης.

Η θερμοκρασία ρυθμίστηκε στους 20 °C (θερμοκρασία δωματίου) κατά την έναρξη της προσομοίωσης όπως υπήρξε και ρύθμιση για την θερμοκρασία της τήξης του συγκεκριμένου υλικού για την εμφάνιση της θέσης της πηγής θερμότητας.



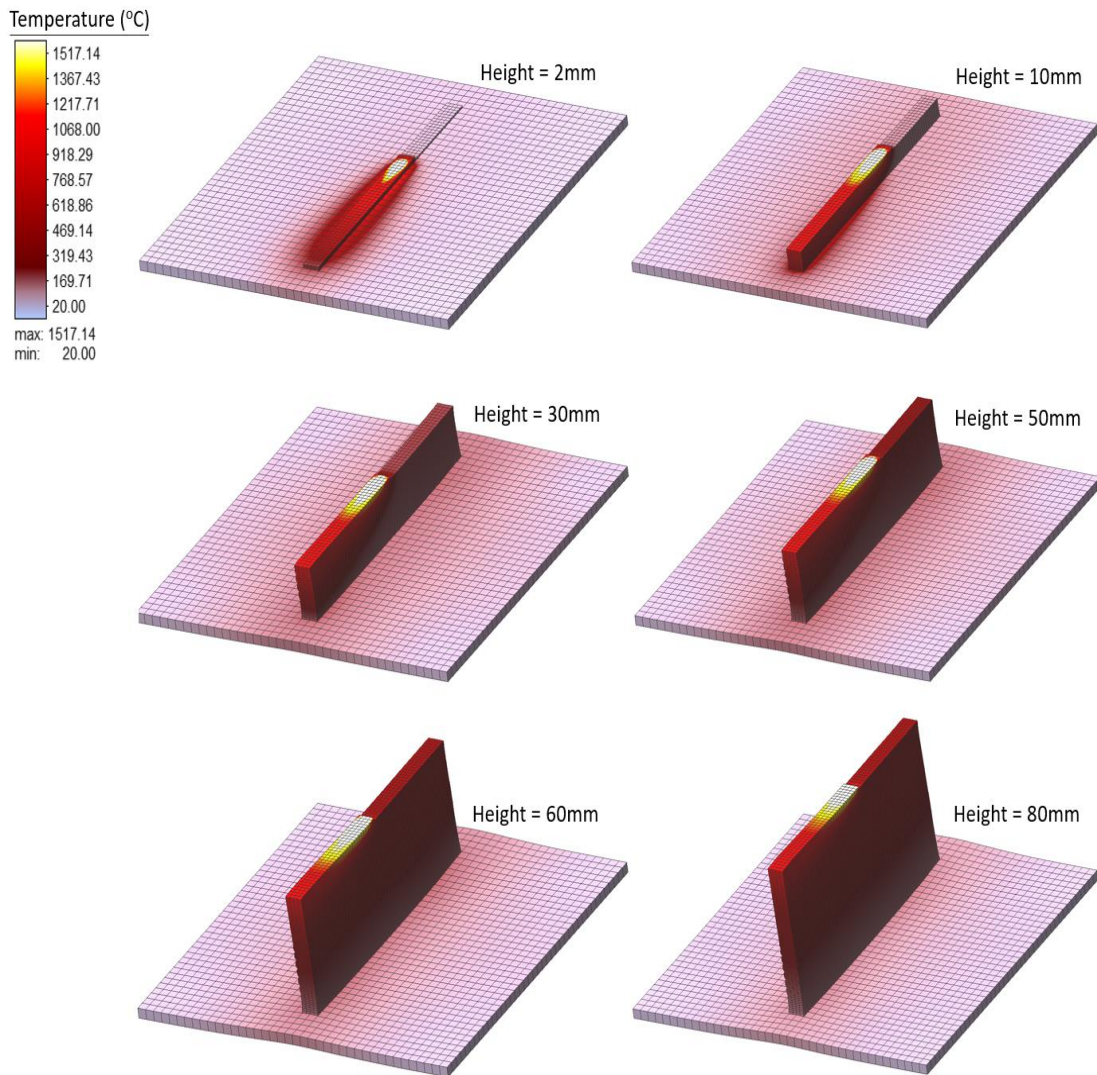
Εικόνα 46 Εμφάνιση θέσης της πηγής θερμότητας

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για το υπόστρωμα και το έδρανο ήταν χάλυβας S235. Το εξεταζόμενο υλικό εναπόθεσης και οι εξαρτώμενες από την θερμοκρασία φυσικές και μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

Χρησιμοποιώντας το υλικό με τον τρόπο που έχει επιλεγθεί και έχει προαναφερθεί, τα σφαιρίδια εναποτέθηκαν κατά μήκος μιας και μόνο κατεύθυνσης από άκρη σε άκρη χωρίς διαστήματα μεταξύ δύο επικαλυπτόμενων σφαιριδίων (για την αποφυγή διαστημάτων γίνεται χρήση πολλαπλών περασμάτων πηγών εναπόθεσης).

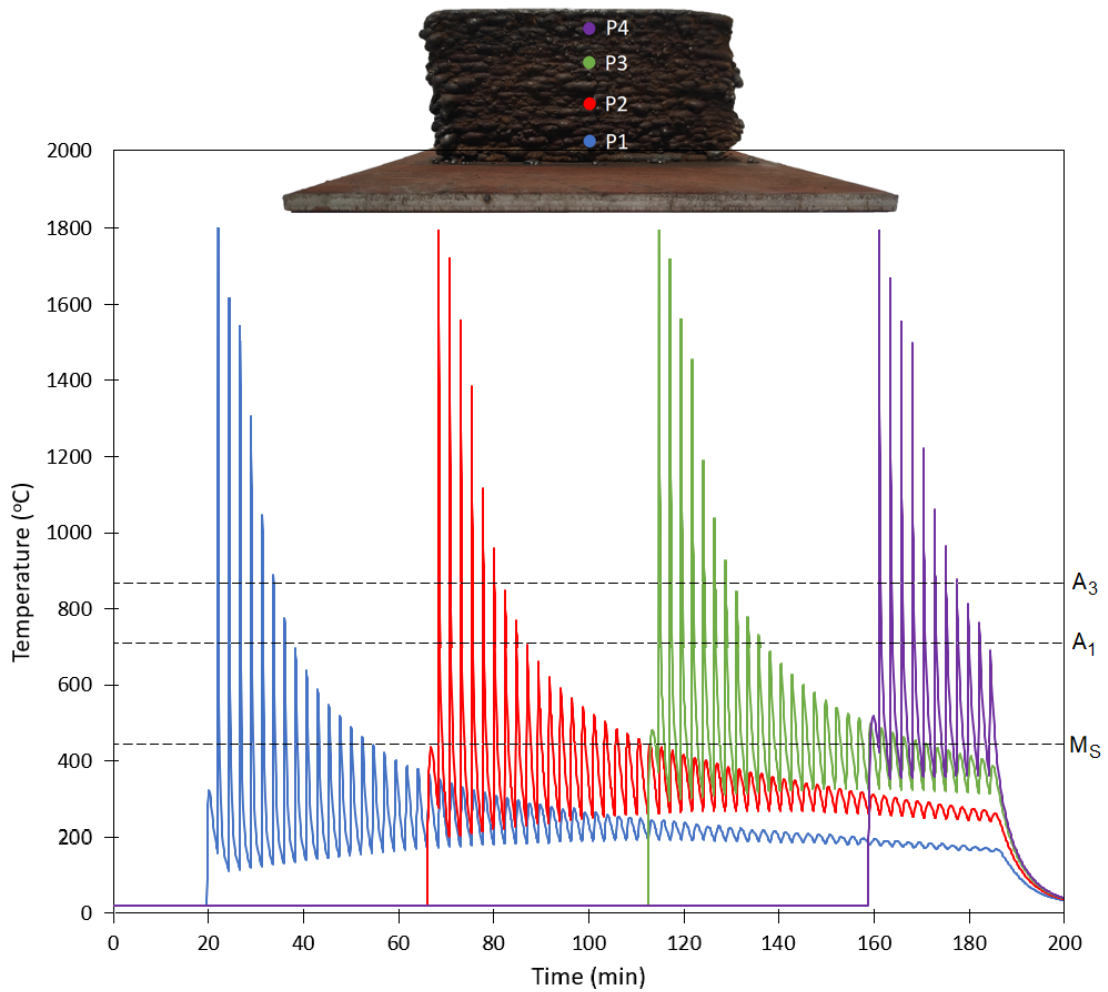
5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Όσον αφορά τα θερμικά φορτία, στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να διακρίνουμε την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία που δημιουργείται κατά την εναπόθεση καθώς αυξάνονται οι στρώσεις και το ύψος του δοκιμίου. Επίσης, όπως απεικονίζεται, το σημείο τήξης είναι περίπου στους 1.500 °C, ενώ η παραμένουσα θερμοκρασία είναι περίπου στους 500 °C.



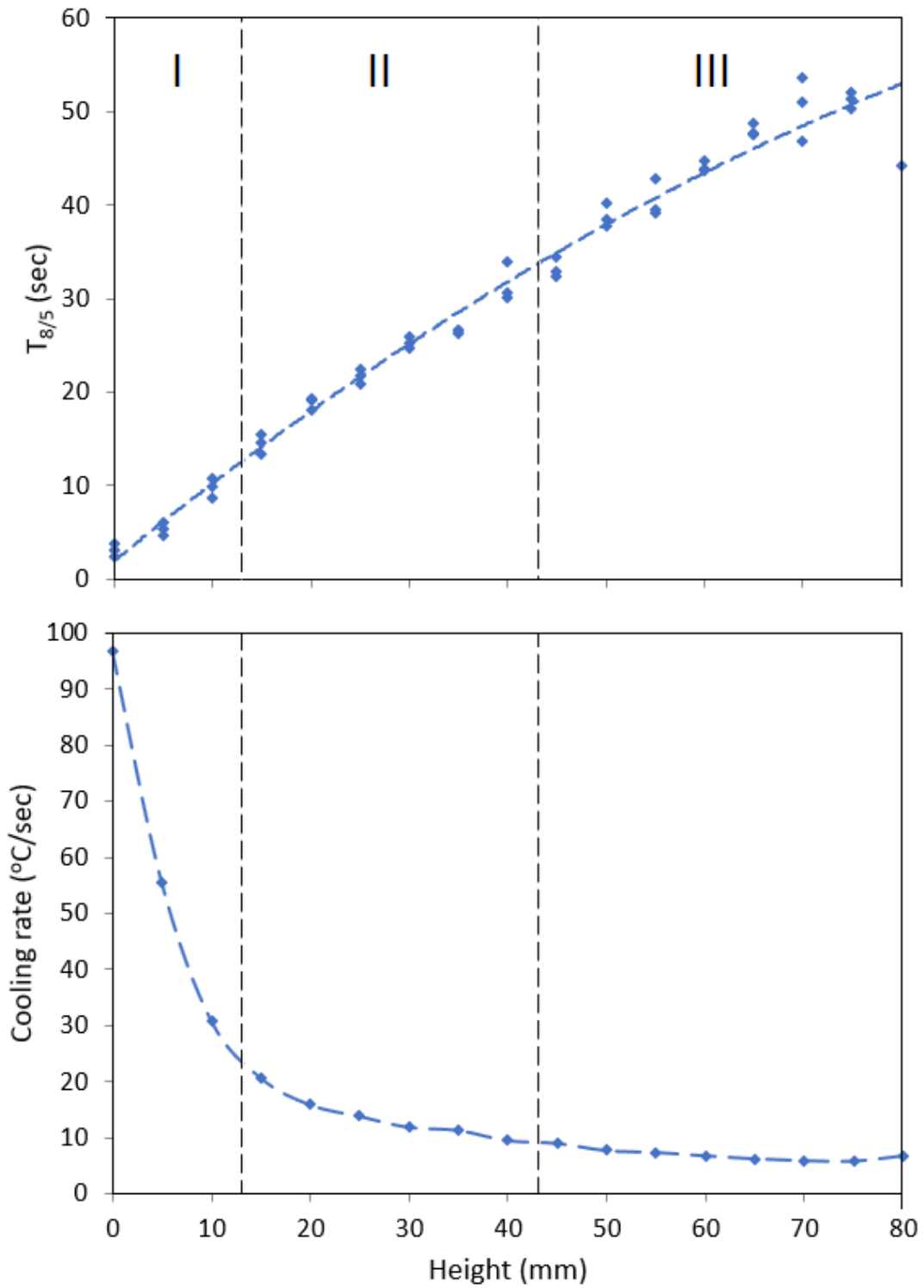
Εικόνα 47 Θερμικά φορτία κατά το τελικό ύψος του αντικειμένου

Στην συνέχεια, στην **εικόνα 48** παρουσιάζεται ενδεικτικά η εξέλιξη χρόνου-θερμοκρασίας σε τέσσερα μεμονωμένα σημεία στο μέσο του τοιχώματος. Αυτό μπορεί να φανεί, για παραδειγμα, από το γεγονός ότι το σημείο P4 έχει μεγάλο χρόνο παραμονής πάνω από το A1 και σύντομο χρόνο παραμονής στο θερμοκρασιακό διάστημα μεταξύ A1 και Ms (θερμοκρασία μαρτενσίτη) που είναι βασικά το θερμοκρασιακό εύρος όπου σχηματίζεται ο φερρίτης και ο σεμεντίτης, με αποτέλεσμα την μικροδομή του μαρτενσίτη, του μπενίτη, του περλίτη ή φερρίτη, ανάλογα με τον χρόνο ψύξης. Ως αποτέλεσμα, τα ανώτερα ή κατώτερα στρώματα μπορεί να έχουν άλλη μικροδομή και γι'αυτό οι μηχανικές ιδιότητες κατά μήκος του κομματιού μπορεί να διαφέρουν.



Εικόνα 48 Ανάπτυξη χρόνου-θερμοκρασίας σε 4 σημεία κατά μήκος του αντικειμένου

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα εξάγονται τα παρακάτω διαγράμματα, τα οποία αποτελούνται από τον χρόνο που βρίσκεται στους 800-500 °C και τον ρυθμό ψύξης ανάλογα με το ύψος. Σε αυτά υπάρχουν τρεις περιοχές που παρουσιάζουν τρεις διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης και ανάλογα την ψύξη αναμένεται διαφορετική δομή και ιδιότητες του αντικειμένου.



Εικόνα 49 Διάγραμμα χρόνου-ρυθμού ψύξης ανάλογα με το ύψος

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε τόσο η πειραματική όσο και η υπολογιστική μελέτη σχετικά με την προσθετική κατασκευή και συγκεκριμένα με την κατηγορία άμεσης εναπόθεσης υλικού χρησιμοποιώντας σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων TiC σε διασπορά. Στην πειραματική μελέτη υλοποιήθηκε η κατασκευή αντικειμένου, ενώ κατά την υπολογιστική μελέτη πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της διαδικασίας με τη χρήση λογισμικού για την διερεύνηση θερμικών κύκλων, με σκοπό την αξιολόγηση των εξαγόμενων πληροφοριών. Με αυτόν τον τρόπο παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μελέτη που αναλύει σε ευρύ φάσμα ό,τι αφορά την προσθετική κατασκευή και ειδικά την κατασκευή δοκιμίου με τη χρήση WAAM και την μέθοδο GMAW.

Σημαντική, για την καλύτερη δυνατή αξιολόγηση της τεχνικής συγκόλλησης, φαίνεται να είναι η αλληλεξάρτηση μεταξύ πειράματος και μοντέλου προσομοίωσης. Η κατασκευή αντικειμένου διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο για την εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο προσομοίωσης και για την καλύτερη ερμηνεία της υπολογιστικής απεικόνισης με την πραγματική κατάσταση. Συγκεκριμένα, στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται πολυστρωματικές δομές μεγάλου πάχους από σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων TiC σε διασπορά με τη χρήση συμβατικών τεχνικών συγκόλλησης, καθώς και διερευνήθηκε ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι διαφορετικές εξαρτημένες από την θερμοκρασία θερμομηχανικές ιδιότητες στα θερμοκρασιακά πεδία που δημιουργούνται εξ' αιτίας των συγκολλήσεων τόξου.

Στην συνέχεια, έγινε υλοποίηση του πειραματικού σταδίου από του οποίου τα δεδομένα αντλήθηκαν για την εκτέλεση του μοντέλου προσομοίωσης με συγκόλληση τόξου. Έχοντας τις παραπάνω πληροφορίες και τα διαγράμματα από το μοντέλο προσομοίωσης μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα και να κάνουμε προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Αρχικά, με τον κατάλληλο εξοπλισμό και τις συγκεκριμένες παραμέτρους που αναφέρθηκαν στο πειραματικό κομμάτι συμπεραίνουμε πως είναι εφικτή η δημιουργία πολυστρωματικών δομών από σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων TiC σε διασπορά.
- Αξίζει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα μαζί με την τάση και την ένταση, η γεωμετρία και τα θερμικά φορτία είναι άρρηκτα συνδεδεμένα για την κατασκευή αντικειμένου. Παρατηρήθηκε δηλαδή ότι ανάλογα με την ταχύτητα, τάση και ένταση διαμορφώνεται η γεωμετρία της στρώσης και αυτό γιατί όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα, τόσο μεγαλύτερο θα είναι το θερμικό φορτίο που θα υποστεί η στρώση και το αντίστροφο.
- Σημαντικός επίσης είναι και ο τρόπος εναπόθεσης του υλικού, δηλαδή η κατεύθυνση που θα ακολουθήσει η τσημπίδα για την δημιουργία των πολυστρωματικών δομών. Με το συγκεκριμένο υλικό είδαμε πως ο πιο κατάλληλος τρόπος εναπόθεσης είναι προς μια κατεύθυνση λόγω των μικρότερων θερμικών φορτίων που δέχεται η κάθε στρώση, τα οποία επηρεάζουν τις τελικές ιδιότητες του αντικειμένου.
- Παρατηρήθηκε πως με το μοντέλο προσομοίωσης έχουμε ακρίβεια στα αναπτυσσόμενα θερμοκρασιακά πεδία στη μορφή της κατανομής καθώς και στις τιμές των παραμορφώσεων.
- Με βάση το μοντέλο προσομοίωσης και το εξαγόμενο διάγραμμα χρόνου-θερμοκρασίας είδαμε ότι υπάρχουν τρεις περιοχές που παρουσιάζουν τρεις διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης και ανάλογα με την ψύξη αναμένεται διαφορετική δομή και ιδιότητες του αντικειμένου.

Όσον αφορά τις προτάσεις για περαιτέρω έρευνα συμπληρωματικά των ανωτέρω προτείνεται:

- Η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του αντικειμένου.
- Η διερεύνηση των παραμένων τάσεων.
- Η μεταλλογραφική ανάλυση.
- Η μελέτη των τριβολογικών ιδιοτήτων του αντικειμένου.
- Η μελέτη της επίδρασης της ακολουθίας της συγκόλλησης, με σκοπό να διερευνηθεί αν υπάρχει κάποια ακολουθία συγκόλλησης που μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα, κυρίως σε ό,τι αφορά τις παραμένουσες τάσεις και τις παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης τόξου.

Βιβλιογραφία

- Dr. Michael J. Fletcher M.Sc. (n.d.). *WP-309 3-D Printing For The Marine Industry*. Ανάκτηση από https://www.huntingdonfusion.com/index.php/en_gb/
- Tuan D. Ngo, et al. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* 143.
- BBC NEWS | Technology | Printers produce copies in 3D*. (2003). Ανάκτηση από [News.bbc.co.uk](https://www.bbc.co.uk)
- Autonomus Manufacturing*. (2018, May 29). Ανάκτηση από <https://amfg.ai/2018/05/29/3d-printing-transforming-spare-parts-industry/ge-additive>. (2023). Ανάκτηση από <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- Brian Evans. (2012). *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing*. New York.
- Citarella Roberto & Venanzio Giannella. (2021). Additive manufacturing in industry. *Applied Sciences*.
- D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri and H. Li. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal.
- Dale Brush. (2018). CONTROL OF GAS METAL ARC WELDING USING PROCESS SENSING.
- Dinesh W. Rathod. (2021). *Comprehensive analysis of gas tungsten arc welding technique for Ni-base weld overlay*. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/gas-tungsten-arc-welding>
- Gastolin Eutectic*. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.castolin.com/en-US>
- Gill D. (2016). *Laser Engineered Net Shaping*.
- Goldak, J., Chakravarti, A., & Bibby, M. (1984, Ιούνιος). A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. *Metallurgical Transactions*.
- H. Abusalma, et al. (2022, March). Parametric Study of Residual Stress Formation in Wire and Arc Additive Manufacturing .
- Jin, Wanwan, et al. (2020). Wire arc additive manufacturing of stainless steels: a review. *Applied sciences*, 1563.
- Johanna Müller, et al. (2021). Mechanical properties of wire and arc additively manufactured high-strength steel structures.

Julien Gardan . (2016). Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. *International Journal of Production Research*. *International Journal of Production Research*, 3118-3132.

Kohei Oyama, Spyros Diplas, Mohammed M'hamdi, Anette E. Gunnæs, Amin S. Azar. (2019). Heat source management in wire-arc additive manufacturing process for AlMg and Al-Si alloys. *Elsevier*.

Mojtaba Khorram Niaki et al. (2019). Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability. *Journal of cleaner production*.

Mukti Chaturvedi et al. (2021). Wire Arc Additive Manufacturing: Review on Recent Findings and Challenges in Industrial Applications and Materials Characterization. *MDPI*.

nabertherm. (n.d.). Ανάκτηση από https://nabertherm.com/en/products/industry/additive-manufacturing?gclid=EAIaIQobChMIyavo7O6a_wIVhsp3Ch0NIQB7EAAAYASAAEgJOVvD_BwE

Palermo E. (2009). *What is Laminated Object Manufacturing*. Ανάκτηση από LiveScience.com

Polyjet Technology. (n.d.). Ανάκτηση από Stratasys.com

Praveen P., P.K.D.V. Yarlagadda, M.J. Kang. (2005). Advancements in pulse gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 1119.

Pushkar Kumar Pandey. (2019, June). Manufacturing of Large Metallic Components through Wire and Arc Additive Manufacturing(WAAM).

Selective Laser Sintering, B. (2012). *Department of Mechanical Engineering*.

Stereolithography. (n.d.). Ανάκτηση από Manufacturing.materialise.com

Thompson, Mary Kathryn. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP annals*.

Tiago A. Rodrigues. (2019). Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials* .

Tuvie. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.tuvie.com/arc-3d-printed-stainless-steel-bicycle-uses-wire-and-arc-additive-manufacturing-method-to-produce-the-frame/>

William E. Frazier. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*.

Xia Chunyang et. al. (2020). A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system. *Journal of Manufacturing Systems*.

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ, ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΠΑΠΑΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΟΥΛΟΣ. (2019). ΜΕΛΕΤΗ,

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ CNC ΠΑΝΤΟΓΡΑΦΟΥ 3-ΑΞΟΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΟΠΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ. Αθήνα.

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΔΟΥΛΟΣ & ΝΙΚΟΛΑΟΣ Π. ΚΑΛΔΕΛΗΣ. (2017, Νοέμβριος). ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΡΑΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΓΟΜΩΣΗΣ. Αιγάλεω.

Θεοδόσιος Σκάρος. (2022, Οκτώβριος). ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΟΞΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ. Αθήνα.

Κυριακόπουλος Κυριάκος. (2016, Φεβρουάριος). Προς μια τρισδιάστατα εκτυπώσιμη αρχιτεκτονική/Towards a 3D Printed Architecture. Θεσσαλονίκη.

Κωστάκης Ιωάννης. (2017). Manufacturing Capabilities Of Additive Manufacturing Technologies In Unmanned Aeria Vehicle Productionl. Chania.