



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Δημιουργία στρωματικών δομών με τεχνικές συγκόλλησης.
Μηχανικές ιδιότητες**

Συγγραφέας: Αλέξανδρος ΤΣΑΤΣΑΡΗΣ (Α.Μ: 18392099)

Επιβλέπων: Αθανάσιος ΜΟΥΡΛΑΣ

Αθήνα, Ιούλιος 2023

[κενή σελίδα]



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

Diploma Thesis

**Elaboration of stratified structures with welding techniques.
Mechanical properties**

Student: Alexandros TSATSARIS (Register No: 18392099)

Supervisor: Athanasios MOURLAS

Athens, July 2023

[κενή σελίδα]



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Δημιουργία στρωματικών δομών με τεχνικές συγκόλλησης.
Μηχανικές ιδιότητες

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/Α	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	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 Τσάτσαρης του Αριστείδη, με αριθμό μητρώου 18392099 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 σύνολο 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



Αλέξανδρος Τσάτσαρης

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, κ. Μουρλά Αθανάσιο, Ακαδημαϊκό Υπότροφο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών (Διδάσκων μέσω προγράμματος ΕΣΠΑ), της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερο και ενδιαφέρον θέμα αλλά και για τις πολύτιμες συμβουλές του σε όλη την πορεία της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και την κα. Ψυλλάκη Πανδώρα, Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την ιδιαίτερη βοήθεια και καθοδήγηση της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκείνα τα λίγα άτομα που ήταν στο πλευρό μου κατά την διάρκεια της φοίτησής μου και με βοήθησαν να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

[κενή σελίδα]

Περίληψη

Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής έχουν πλέον εδραιωθεί στους περισσότερους βιομηχανικούς κλάδους και αποτελούν ένα μεγάλο κομμάτι αυτών, αφού αρκετές διαδικασίες και λειτουργίες που στηρίζονταν σε συμβατικά μηχανήματα (CNC), έχουν αντικατασταθεί από σύγχρονες εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης. Με τον όρο Προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing-AM), αποτυπώνεται μια τεράστια ομάδα τεχνολογιών όπου έχουν ως βάση τους την κατασκευή με εναπόθεση υλικού, σε διάφορες δομές και συστάσεις. Μέσω της χρήσης αυτών των μοντέλων λειτουργίας, επιτυγχάνονται καλύτερης ποιότητας τελικά προϊόντα σε μικρότερο χρόνο και ελαχιστοποιημένη χρήση υλικού. Αυτό συνεπάγεται με την μείωση του συνολικού κόστους και την βελτιστοποίηση της όλης διαδικασίας.

Συγκεκριμένα, η χρήση προσθετικής κατασκευής σε συνεργασία με τις τεχνικές συγκόλλησης, δηλαδή με τη χρήση μεταλλικού σύρματος (Wire Arc Additive Manufacturing-WAAM), είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται μέσω ενός σχεδιαστικού προγράμματος, ενός κατευθυνόμενου μηχανήματος (π.χ. ρομποτικός βραχίονας) και της μηχανής συγκόλλησης (μηχανή εναπόθεσης υλικού). Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται η τρισδιάστατη εκτύπωση, με σκοπό τη δημιουργία οποιουδήποτε μεταλλικού αντικειμένου. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της όλης διαδικασίας με βάση τα θερμικά φορτία που αναπτύσσονται, μέσω αντίστοιχων προγραμμάτων.

Με βάση αυτό, κρίνεται αναγκαία η έρευνα πάνω σε αυτό το κομμάτι, αφού ιδιότητες του μετάλλου όπως οι μηχανικές, καθιστούν καλύτερη ή χειρότερη την τελική ποιότητα του τελικού αντικειμένου. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται η θεωρητική και πειραματική έρευνα της εργασίας πάνω στις τελικές ιδιότητες του μεταλλικού προϊόντος που θα αναπαραχθεί μέσω των τεχνικών συγκόλλησης, σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα θερμικά φορτία που προκαλούνται κατά την κατασκευή.

Για την ανάπτυξη της πειραματικής διαδικασίας θα χρησιμοποιηθεί σύρμα συγκόλλησης με προσθήκη καρβιδίων τιτανίου (TiC). Οι ιδιότητες και η δομή του συγκεκριμένου σύρματος είναι αρκετά καλές για τη κατασκευή αντικειμένων με

μεγάλη αντίσταση σε φθορά, έτσι η μελέτη πάνω στο συγκεκριμένο σύρμα είναι απαραίτητη. Εφόσον είναι ικανό να ανταπεξέλθει σε διαδικασίες και λειτουργίες όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση, θα αποτελέσει κίνητρο για περαιτέρω μελέτη αλλά και ανάπτυξη διαδικασιών για ένταξη τέτοιων τεχνολογιών σε περισσότερους βιομηχανικούς τομείς για κατά παραγγελία ζήτηση, αλλά και σε μονάδες παραγωγής.

Λέξεις Κλειδιά: Προσθετική κατασκευή, Τρισδιάστατη εκτύπωση, WAAM, Τεχνικές συγκόλλησης, Μηχανικές ιδιότητες, Θερμικά φορτία

Abstract

Additive manufacturing technologies are now established in most industrial sectors and constitute a large part of them, since several processes and functions that relied on conventional machining and cutting (CNC) have been replaced by modern 3D printing applications. The term Additive manufacturing (AM) describes a huge group of technologies based on material deposition that corresponds to a large range of materials. Through the use of these operating models, better quality of the final products are observed in less total time, with minimized material usage.

Specifically, the use of additive manufacturing with welding techniques, such as wire arc additive manufacturing (WAAM), is a process carried out through a design program, a guided machine (robotic arm) and the material deposition machine. With WAAM, 3D printing is done in order to create any metal product, plus at the same time the entire manufacturing process can be controlled based on the thermal loads that develop through corresponding programs.

Based on this, research on this part is deemed necessary, since properties of the metal products such as mechanical properties, are a crucial factor for the final quality of the product. So, the theoretical and experimental research of the work is carried out on the final properties of the metal product that will be created in combination with the corresponding thermal loads caused during the procedure.

For the development of this procedure welding wire with titanium carbides (TiC) will be used. The properties and structure of the wire are good enough for making objects with high wear resistance, which makes research necessary. Since it is capable of coping with processes and functions such as 3D printing, it will be an incentive for further study and development of procedures for the integration of this technologies in industrial sectors for on-demand and in production parts.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, WAAM, Welding techniques, Mechanical properties, Thermal loads

[κενή σελίδα]

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	vii
Περίληψη.....	ix
Περιεχόμενοι πίνακες.....	xv
Περιεχόμενα σχήματα.....	xvi
Περιεχόμενες συντομογραφίες.....	xix
Συμβολισμοί.....	xxi
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	1
1.2 Στόχοι και μεθοδολογία έρευνας.....	2
1.3 Δομή της εργασίας.....	2
Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής.....	5
2.1 Ο ρόλος και η λειτουργία της προσθετικής κατασκευής.....	5
2.2 Γενικά στάδια τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	7
2.3 Ταξινόμηση προσθετικών κατασκευών.....	13
2.3.1 Εξώθηση υλικού (Material Extrusion).....	14
2.3.2 Φωτοπολυμερισμός σε κάδο-Στερεολιθογραφία (Vat Photopolymerization)	17
2.3.3 Εκτόξευση-Εναπόθεση υλικού (Material Jetting).....	19
2.3.4 Εκτόξευση συνδετικού υλικού (Binder Jetting).....	23
2.3.5 Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion).....	26
2.3.6 Διεργασίες επάλληλων φύλλων (Sheet Lamination).....	31
2.3.7 Άμεση εναπόθεση ενέργειας (Direct Energy Deposition).....	33
2.4 Εφαρμογές και βιομηχανίες προσθετικής κατασκευής.....	36
Κεφάλαιο 3: Προσθετική κατασκευή με τεχνικές συγκόλλησης (WAAM).....	42
3.1 Δομή και λειτουργία WAAM.....	42
3.2 Θερμικοί παράγοντες στη μέθοδο WAAM.....	47
3.2.1 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (FEA).....	48
3.3 Υλικά και εφαρμογές WAAM.....	50

3.4 Χαρακτηριστικά και μελλοντική ανασκόπηση τεχνικής WAAM	57
Κεφάλαιο 4: Μηχανικές ιδιότητες και δοκιμές.....	60
4.1 Εισαγωγή.....	60
4.2 Εφελκυσμός.....	60
4.3 Θλίψη	63
4.4 Κρούση.....	64
4.5 Κάμψη	65
4.6 Στρέψη.....	66
4.7 Κόπωση	67
4.8 Σκληρότητα	69
Κεφάλαιο 5: Πειραματική διαδικασία	71
5.1 Σκοπός διαδικασίας και χαρακτηριστικά σύρματος εναπόθεσης	71
5.2 Στοιχεία και παράμετροι διαδικασίας	74
5.3 Κατασκευή αντικειμένου	80
Κεφάλαιο 6: Πειραματικές και θεωρητικές αναλύσεις.....	87
6.1 Εισαγωγή.....	87
6.2 Θερμικές αναλύσεις	87
6.3 Μηχανικές αναλύσεις.....	92
6.3.1 Εφελκυσμός και σκληρομέτρηση.....	92
6.3.2 Παραμορφώσεις κατασκευής	95
6.3.3 Παραμένουσες τάσεις κατασκευής.....	98
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	103
Βιβλιογραφία	107

Περιεχόμενοι πίνακες

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες και εφαρμογές θερμοπλαστικών υλικών	16
Πίνακας 2.2: Ιδιότητες υλικών των φωτοπολυμερών polyjet της Stratasys και οι εφαρμογές τους	21
Πίνακας 2.3: Ιδιότητες και εφαρμογές υλικών Binder Jetting.....	26
Πίνακας 2.4: Τυπικές μεταλλικές σκόνες SLM.....	28
Πίνακας 2.5: Τυπικές μεταλλικές σκόνες EBM	29
Πίνακας 3.1: Μέταλλα με τους τομείς εφαρμογής τους που χρησιμοποιούν την WAAM.	50
Πίνακας 5.1: Χημική σύσταση σύρματος.....	71
Πίνακας 5.2: Στοιχεία V-A μηχανής εναπόθεσης με βάση τον κατασκευαστή	74
Πίνακας 5.3: Παράμετροι πειραματικής διαδικασίας.....	79

Περιεχόμενα σχήματα

<i>Εικόνα 2.1:</i> FDM εκτυπωτής σε λειτουργία.....	6
<i>Εικόνα 2.2:</i> Στάδια τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	7
<i>Εικόνα 2.3:</i> Παράδειγμα μετατροπής CAD γεωμετρίας σε STL	9
<i>Εικόνα 2.4:</i> Πρόγραμμα εξαγωγής G-κώδικα, slicer	10
<i>Εικόνα 2.5:</i> Διαφορετικές πυκνότητες αντικειμένου (20-100%).....	11
<i>Εικόνα 2.6:</i> Διαφορετικά μοτίβο αντικειμένου.	11
<i>Εικόνα 2.7:</i> Δοκιμή θλίψης για διαφορετικές πυκνότητες και μοτίβο αντικειμένου. .	12
<i>Εικόνα 2.8:</i> Κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	13
<i>Εικόνα 2.9:</i> Στοιχεία και λειτουργία FDM εκτυπωτή	14
<i>Εικόνα 2.10:</i> Αντικείμενα κατασκευασμένα από FDM εκτυπωτή.....	17
<i>Εικόνα 2.11:</i> SLA εκτυπωτής.....	18
<i>Εικόνα 2.12:</i> Αντικείμενα εκτυπωμένα με φωτοπολυμερισμό	19
<i>Εικόνα 2.13:</i> Material Jetting εκτύπωση	20
<i>Εικόνα 2.14:</i> Αντικείμενα εκτυπωμένα μέσω Material Jett.	22
<i>Εικόνα 2.15:</i> Binder Jetting εκτύπωση.....	23
<i>Εικόνα 2.16:</i> Εκτόξευση συνδετικού υλικού.....	25
<i>Εικόνα 2.17:</i> Αντικείμενα εκτυπωμένα μέσω Binder Jett.	25
<i>Εικόνα 2.18:</i> Σύνηξη πούδρας σε κλίνη	27
<i>Εικόνα 2.19:</i> Διεργασία Powder Bed Fusion.	30
<i>Εικόνα 2.20:</i> Πολυμεταλλικά αντικείμενα εκτυπωμένα μέσω PBF.....	30
<i>Εικόνα 2.21:</i> Εκτύπωση μέσω συνένωσης φύλλων	31
<i>Εικόνα 2.22:</i> Carbon fiber εξάρτημα εκτυπωμένο μέσω LOM.....	32
<i>Εικόνα 2.23:</i> Άμεση εναπόθεση ενέργειας.....	34
<i>Εικόνα 2.24:</i> Εκτύπωση με άμεση εναπόθεση ενέργειας.....	35
<i>Εικόνα 2.25:</i> Επιδιόρθωση οδοντωτού τροχού μέσω DED.....	35
<i>Εικόνα 2.26:</i> Κλάδοι προσθετικής κατασκευής	36
<i>Εικόνα 2.27:</i> Εκτυπωμένα γυαλιά οράσεως.....	37
<i>Εικόνα 2.28:</i> Μεταλλικά εκτυπωμένα στηρίγματα airbus	37
<i>Εικόνα 2.29:</i> Εκτυπωμένη κρανιακή πλάκα.....	38

<i>Εικόνα 2.30:</i> Ενεργειακή κατανάλωση τρισδιάστατων διεργασιών σε σχέση με συμβατική.	39
<i>Εικόνα 3.1:</i> Λειτουργία WAAM.	42
<i>Εικόνα 3.2:</i> Συγκόλληση τόξου τηκόμενου ηλεκτροδίου και προστασία αερίου (GMAW: Gas Metal Arc Welding).	44
<i>Εικόνα 3.3:</i> Συγκόλληση τόξου ηλεκτροδίου βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW: Gas Tungsten Arc Welding).	45
<i>Εικόνα 3.4:</i> Συγκόλληση τόξου πλάσματος (PAW: Plasma Arc Welding).	45
<i>Εικόνα 3.5:</i> Παράδειγμα θερμικών αλλαγών κατά την κατασκευή δοκιμίου.	47
<i>Εικόνα 3.6:</i> Παράδειγμα FEA σε κατασκευή.	49
<i>Εικόνα 3.8:</i> Πάνελ αλουμινίου για την κατασκευή ατράκτου αεροπλάνου.	51
<i>Εικόνα 3.10:</i> Προπέλα κατασκευασμένη με τη μέθοδο WAAM.	52
<i>Εικόνα 3.11:</i> Φτερωτή κατασκευασμένη με τη μέθοδο WAAM.	52
<i>Εικόνα 3.11:</i> Τρισδιάστατα εκτυπωμένος γάντζος WAAM της HUISMAN με ικανότητα ανύψωσης φορτίου έως 80.000 kg.	53
<i>Εικόνα 3.12:</i> Γέφυρα στην Ολλανδία κατασκευασμένη με τη μέθοδο WAAM από την εταιρία MX3D.	54
<i>Εικόνα 3.13:</i> Βελτιστοποιημένη κατασκευή μέσω τοπολογίας με τη μέθοδο WAAM από την εταιρία MX3D.	55
<i>Εικόνα 3.14:</i> Ποδήλατο κατασκευασμένο με τη μέθοδο WAAM.	56
<i>Εικόνα 3.15:</i> Μελλοντική ανασκόπηση WAAM.	57
<i>Εικόνα 4.1:</i> Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων.	61
<i>Εικόνα 4.2:</i> Δοκιμή εφελκυσμού και δοκίμιο.	62
<i>Εικόνα 4.3:</i> Παράδειγμα δοκιμής θλίψης.	63
<i>Εικόνα 4.4:</i> Δοκιμή κρούσης κατά Charpy.	64
<i>Εικόνα 4.5:</i> Δοκιμή κάμψης.	65
<i>Εικόνα 4.6:</i> Δοκιμή στρέψης.	66
<i>Εικόνα 4.7:</i> Παράδειγμα διαγράμματος S-N.	68
<i>Εικόνα 4.8:</i> Δοκιμή κόπωσης σε περιστρεφόμενο άξονα.	68
<i>Εικόνα 4.9:</i> Σκληρομέτρηση.	69
<i>Εικόνα 5.1:</i> Δομή σύρματος (α).	72
<i>Εικόνα 5.2:</i> Δομή σύρματος (β).	72
<i>Εικόνα 5.3:</i> Σύρμα εναπόθεσης υλικού (α).	73
<i>Εικόνα 5.4:</i> Σύρμα εναπόθεσης υλικού (β).	73

<i>Εικόνα 5.5:</i> CNC παντογράφος 3-αξόνων.....	75
<i>Εικόνα 5.6:</i> Η χρησιμοποιούμενη μηχανή συγκόλλησης.....	75
<i>Εικόνα 5.7:</i> 1 ^η περίπτωση κατεύθυνσής εναπόθεσης.....	76
<i>Εικόνα 5.8:</i> 2 ^η περίπτωση κατεύθυνσής εναπόθεσης.....	77
<i>Εικόνα 5.9:</i> IR κάμερα καταγραφής θερμοκρασίας.....	78
<i>Εικόνα 5.10:</i> Αρχικές στρώσεις αντικειμένου.....	80
<i>Εικόνα 5.11:</i> Απεικόνιση θερμικού φορτίου κατά τη δημιουργία.....	80
<i>Εικόνα 5.12:</i> Ψύξη κατά τη δημιουργία.....	81
<i>Εικόνα 5.13:</i> Μέτρηση ύψους αντικειμένου στη μέση της διαδικασίας (40mm).....	81
<i>Εικόνα 5.14:</i> Θερμικά φορτία κατά τη δημιουργία.....	82
<i>Εικόνα 5.15:</i> Μετάδοση θερμικών φορτίων.....	82
<i>Εικόνα 5.16:</i> Δημιουργία αντικειμένου.....	83
<i>Εικόνα 5.17:</i> Τελικό ύψος αντικειμένου (80mm).....	84
<i>Εικόνα 5.18:</i> Τελικές διαστάσεις και άξονες αντικειμένου.....	84
<i>Εικόνα 5.19:</i> Τελικό πάχος αντικειμένου.....	85
<i>Εικόνα 6.1:</i> Μοντέλο προσομοίωσης.....	88
<i>Εικόνα 6.2:</i> Διάγραμμα θερμοκρασία-χρόνου.....	89
<i>Εικόνα 6.3:</i> Χρόνος 8/5 συναρτήσει με ύψος.....	90
<i>Εικόνα 6.4:</i> Ρυθμός ψύξης συναρτήσει με ύψος.....	91
<i>Εικόνα 6.5:</i> Δοκιμή εφελκυσμού.....	92
<i>Εικόνα 6.6:</i> Σκληρότητα συναρτήσει του ύψους.....	93
<i>Εικόνα 6.7:</i> Σκληρότητα συναρτήσει του ρυθμού ψύξης.....	94
<i>Εικόνα 6.8:</i> Συνολική παραμόρφωση Y.....	96
<i>Εικόνα 6.9:</i> Συνολική παραμόρφωση X.....	97
<i>Εικόνα 6.10:</i> Παραμένουσες τάσεις κατά διαμήκη άξονα.....	99
<i>Εικόνα 6.11:</i> Παραμένουσες τάσεις κατά διαμήκη άξονα.....	99
<i>Εικόνα 6.12:</i> Παραμένουσες τάσεις κατά εγκάρσιο άξονα.....	100
<i>Εικόνα 6.13:</i> Παραμένουσες τάσεις κατά εγκάρσιο άξονα.....	100
<i>Εικόνα 6.14:</i> Κατανομή παραμενουσών τάσεων.....	101

Περιεχόμενες συντομογραφίες

3D	Τρισδιάστατο
ABS	Ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο
AM	Προσθετική Κατασκευή
ASA	Ακρυλικό στυρένιο ακρυλονιτρίλιο
ASTM	Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών
BJ	Εκτύπωση με εκτόξευση συνδετικού υλικού
CAD	Σχεδιασμός με τη βοήθεια Η/Υ
CMT	Μεταφορά ψυχρού μετάλλου
CNC	Λειτουργία εργαλειομηχανής μέσω Η/Υ
DED	Άμεση ενεργειακή εναπόθεση
DMLS	Απευθείας πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων
DOD	Επιλεκτική εκτόξευση
EBAM	Προσθετική κατασκευή με δέσμη ηλεκτρονίων
EBM	Λιώσιμο με δέσμη ηλεκτρονίων
FDM	Εκτύπωση με εξώθηση υλικού
FEA	Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία
GMAW	Συγκόλληση τόξου τηκόμενου ηλεκτροδίου και προστασία αερίου
GTAW	Συγκόλληση τόξου ηλεκτροδίου βολφραμίου και προστασία αερίου
LENS	Διαμόρφωση δικτύου με λέιζερ
MAG	Συγκόλληση με ενεργό αέριο
MIG	Συγκόλληση με αδρανές αέριο

MJ	Εκτύπωση με εκτόξευση υλικού
PAW	Συγκόλληση τόξου πλάσματος
PBF	Εκτύπωση μέσω σύντηξη πούδρας σε κλίνη
PEI	Πολυθεριμίδιο
PLA	Πολυγαλακτικό οξύ
PPSFU/PPSU	Πολυφαινυλσουλφόνη
PR	Ταχεία πρωτοτυποποίηση
SHS	Επιλεκτική θερμική πυροσυσσωμάτωση
SLA	Στερεολιθογραφία
SLM	Επιλεκτική τήξη με λέιζερ
SLS	Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ
STL	Αρχείο εξωτερικής επιφάνειας μοντέλου
STT	Μεταφορά επιφανειακής τάσης
TPU	Θερμοπλαστική πολουρεθάνη
UV	Υπεριώδης ακτινοβολία
VPP	Φωτοπολυμερισμός σε κάδο
WAAM	Προσθετική κατασκευή τόξου σύρματος

Συμβολισμοί

D	Διάμετρος σύρματος (mm)
E	Ελαστική παραμόρφωση
F	Φορτίο θραύσης
G	Μέτρο διάτμησης
h	Ύψος δοκιμίου
h/d	Λόγος ύψους προς διατομή (δοκιμή θλίψης)
I	Ένταση (Ampere)
L	Απόσταση σημείων στήριξης
l	Μήκος σωληνοειδούς τμήματος
r	Μέση ακτίνα σωλήνα
t	Πάχος σωλήνα στο στενό τμήμα του
u	Ταχύτητα μετακίνησης άκρου μηχανής (mm/min)
U	Ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος (m/min)
V	Τάση (Volt)
W	Πλάτος δοκιμίου
γ	Διατμητική παραμόρφωση
E	Μέτρο ελαστικότητας
E_f	Παραμόρφωση θραύσης
σ	Τάση (Pa= N/m ²)
σ_A	Όριο αναλογίας

σ_{Δ}	Όριο διαρροής
σ_E	Όριο ελαστικότητας
$\sigma_{\text{κάμψης}}$	Αντοχή σε έλεγχο κάμψης τριών σημείων
σ_M	Μέγιστη τάση σε εφελκυσμό
τ	Διατμητική τάση
T	Εφαρμοζόμενη ροπή στρέψης
φ	Γωνία συστροφής σε ακτίνια

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η προσθετική κατασκευή, γνωστή και ως 3D εκτύπωση, βασίζεται στην δημιουργία αντικειμένων από πρώτες ύλες, μέσω της πρόσθεσης υλικού σε στρώσεις (layer by layer), σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής με αφαίρεση υλικού. (Haden, et al., 2017). Η τεχνολογία αυτή προσφέρει «ελευθερία» στον σχεδιασμό και στη κατασκευή πολύπλοκων γεωμετρικών σχημάτων και λειτουργικών δομών με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, σε σχέση με τις μεθόδους αφαίρεσης υλικού, προσφέρουν παραπάνω πλεονεκτήματα όπως μικρότερο χρόνο παραγωγής, λιγότερο όγκο μη αξιοποιήσιμου υλικού αλλά και ελάχιστη απαίτηση για εργαλεία. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων, η τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής -Additive Manufacturing- (AM) έχει αποκτήσει πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς όπως η βιοϊατρική, η αεροδιαστημική, η ναυτιλία και οι κατασκευές. (Srivastava, et al., 2023)

Ένας άλλος ορισμός της παραπάνω διαδικασίας είναι η ταχεία πρωτοτυποποίηση -rapid prototyping (RP)-. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους για να δηλώσει τη ταχεία φυσική αναπαράσταση ενός συστήματος ή ενός αντικειμένου πριν από την εισαγωγή του στην αγορά ως εμπορικού προϊόντος. Η έμφαση δίνεται στην επιτάχυνση της διαδικασίας δημιουργίας του πρωτότυπου ή του βασικού μοντέλου από το οποίο στη συνέχεια θα προκύψουν βελτιωμένα μοντέλα, καθώς και το τελικό προϊόν. (Gibson, et al., 2017)

Γενικά, οι τεχνολογίες AM χωρίζονται ανάλογα το υλικό και τη διαδικασία που ακολουθείται για να πραγματοποιηθεί η λειτουργία στις: εξώθηση υλικού, φωτοπολυμερισμό σε κάδο, εναπόθεση υλικού, εκτόξευση συνδετικού υλικού, σύντηξη πούδρας σε κλίνη, πλαστικοποίηση φύλλων και άμεση εναπόθεση ενέργειας. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία με τη χρήση τεχνικών συγκόλλησης -Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)- εντάσσεται στην κατηγορία «άμεση εναπόθεση ενέργειας» -direct energy deposition-. (Bishwakarma, et al., 2022)

Το σημαντικότερο σε αυτού του είδους την τεχνολογία, και γενικά στη μεταλλική τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι οι ιδιότητες που θα έχει αποκτήσει το τελικό προϊόν μετά τη δημιουργία του. Η δυναμική στερεοποίησης και η σύνδεση των στρωμάτων, οι οποίες διέπονται από τη θερμική κλίση, το ρυθμό ψύξης και τους θερμικούς κύκλους, είναι αυτά που καθορίζουν τη δομή των κόκκων και τις μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων. (Dababneh & Taheri, 2022)

1.2 Στόχοι και μεθοδολογία έρευνας

Όπως αποφαίνεται από τα παραπάνω η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής, πέραν του ότι έχει εδραιωθεί τα τελευταία χρόνια, αναδεικνύει μια ευρεία ομάδα τεχνολογιών με διαφορετικά υλικά και λειτουργίες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύονται όλες οι κατηγορίες που χωρίζονται οι τεχνολογίες αυτές, με ιδιαίτερη έμφαση στην τρισδιάστατη εκτύπωση με τη χρήση τεχνικών συγκόλλησης (WAAM), δηλαδή η τεχνολογία που χρησιμοποιεί βολταϊκό τόξο και σύρμα (wire).

Σκοπός της εργασίας είναι η θεωρητική και πειραματική έρευνα της παραπάνω τεχνικής, μέσω της δημιουργίας μικρού τοιχώματος αντικειμένου, και αφορά στην αξιολόγηση της δυνατότητας χρήσης συμβατικών τεχνικών συγκόλλησης για τη δημιουργία πολυστρωματικών δομών μεγάλου πάχους από σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων καρβίδιων τιτανίου (TiC) σε διασπορά. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται ανάλυση και σχολιασμός των μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού αντικειμένου αλλά και μελέτη των θερμικών φορτίων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του πειράματος, σε συνδυασμό με την σύγκριση των θερμομηχανικών αποτελεσμάτων από το αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης.

1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαμορφώνεται στα παρακάτω επτά (7) κεφάλαια:

Στο **παρόν κεφάλαιο**, απεικονίζεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στη προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing) με την αναφορά της

τρισδιάστατης κατασκευής με τεχνικές συγκόλλησης που είναι το κύριο θέμα της εργασίας, ενώ παράλληλα περιγράφονται οι στόχοι και η δομή αυτής.

Στο **κεφάλαιο 2**, αναλύεται η έννοια της προσθετικής κατασκευής με περισσότερες λεπτομέρειες και περιγράφεται ξεχωριστά η κάθε κατηγορία που χωρίζεται.

Στο **κεφάλαιο 3**, παρουσιάζεται λεπτομερώς η τρισδιάστατη εκτύπωση με τη χρήση τεχνικών συγκόλλησης (WAAM), με στόχο την θεωρητική εισαγωγή για το πειραματικό μέρος της εργασίας.

Στο **κεφάλαιο 4**, παρουσιάζονται σε θεωρητικό υπόβαθρο οι μηχανικές ιδιότητες και οι μηχανικές δοκιμές που πραγματοποιούνται για τη μελέτη ενός υλικού.

Στο **κεφάλαιο 5**, αποτυπώνεται η πειραματική διαδικασία. Γίνεται μια περιγραφή των στοιχείων και παραμέτρων, μια ανάλυση όλων των γεγονότων και ταυτόχρονα παρουσιάζονται στιγμιότυπα του μεταλλικού αντικειμένου κατά την δημιουργία του, για την καλύτερη κατανόηση του πειράματος.

Στο **κεφάλαιο 6**, απεικονίζονται οι αναλύσεις και οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο αντικείμενο, ταυτόχρονα με την παρουσίαση του μοντέλου προσομοίωσης, με στόχο τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και τη σύγκριση των θερμομηχανικών μεταβολών.

Τέλος, το **κεφάλαιο 7**, περιλαμβάνει τα συμπεράσματα και τα σχόλια πάνω στην διπλωματική εργασία που σχετίζονται με τη τεχνική προσθετικής κατασκευής με τη χρήση τεχνικών συγκόλλησης (WAAM), με βάση τα αποτελέσματα, τις αναλύσεις και τη σύγκριση της πειραματικής διαδικασίας και μοντέλου προσομοίωσης.

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής

2.1 Ο ρόλος και η λειτουργία της προσθετικής κατασκευής

Η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής (AM) είναι μία ψηφιακή τεχνολογία κατασκευής για τη διαμόρφωση εξαρτημάτων απευθείας με την προσθήκη στρωμάτων υλικού. (Wang, et al., 2018). Η τεχνική αυτή πρωτοεμφανίστηκε το 1987 με την διαδικασία που ονομάζεται στερεολιθογραφία (SL) από την 3D systems, όπου η λειτουργία της αναλύεται παρακάτω. Η τεχνολογία, μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης εξαρτημάτων, με τη χρήση σταδιακής εναπόθεσης υλικού, είναι ο πρωτεύον ρόλος πίσω από την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, αφού πλέον αποτελεί μια κυρίαρχη κατασκευαστική διαδικασία. (Singh & Khanna, 2021)

Η τεχνική της τρισδιάστατης εκτύπωσης, εξοικονομεί περίπου το 50% του κόστους κατασκευής. Ως αποτέλεσμα, θεωρείται μια οικονομικά αποδοτική, εφαρμόσιμη, εφευρετική και αξιόπιστη τεχνική. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι εξοικονομεί υλικό και χρόνο παραγωγής. Τα τελευταία χρόνια, οι εξελίξεις στην τεχνολογία αυτή, έχουν επιτρέψει την άμεση παραγωγή τελικών εξαρτημάτων, ενώ παράλληλα η χρήση της αυξάνεται σε διάφορους τομείς, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η ιατρική και η ηλεκτρονική (Vora, et al., 2022).

Η κύρια λειτουργία της βασίζεται στη δημιουργία στρωμάτων υλικού με σκοπό την γεωμετρική αναπαράσταση ,στο χώρο, του τελικού αντικειμένου. Συνήθως, το υλικό εξέρχεται από ένα ακροφύσιο και ελεγχόμενα μέσω συντεταγμένων X-Y-Z, πραγματοποιείται συνδυασμένη κίνηση ώστε να δημιουργηθεί στρώση-στρώση το τελικό μοντέλο.

Ενδεικτικά κάποια πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής:

- Γρήγορη αναπαράσταση αντικειμένου
- Μικρότεροι χρόνοι κατασκευής
- Σχεδιαστική ελευθερία
- Μικρότερος προβληματισμός κατά την κατασκευή
- Ακρίβεια
- Διαθεσιμότητα πολλών υλικών
- Οικονομία υλικού
- Μικρότερο κόστος
- «Καθαρή» διαδικασία
- Έλεγχος διαδικασίας από Η/Υ

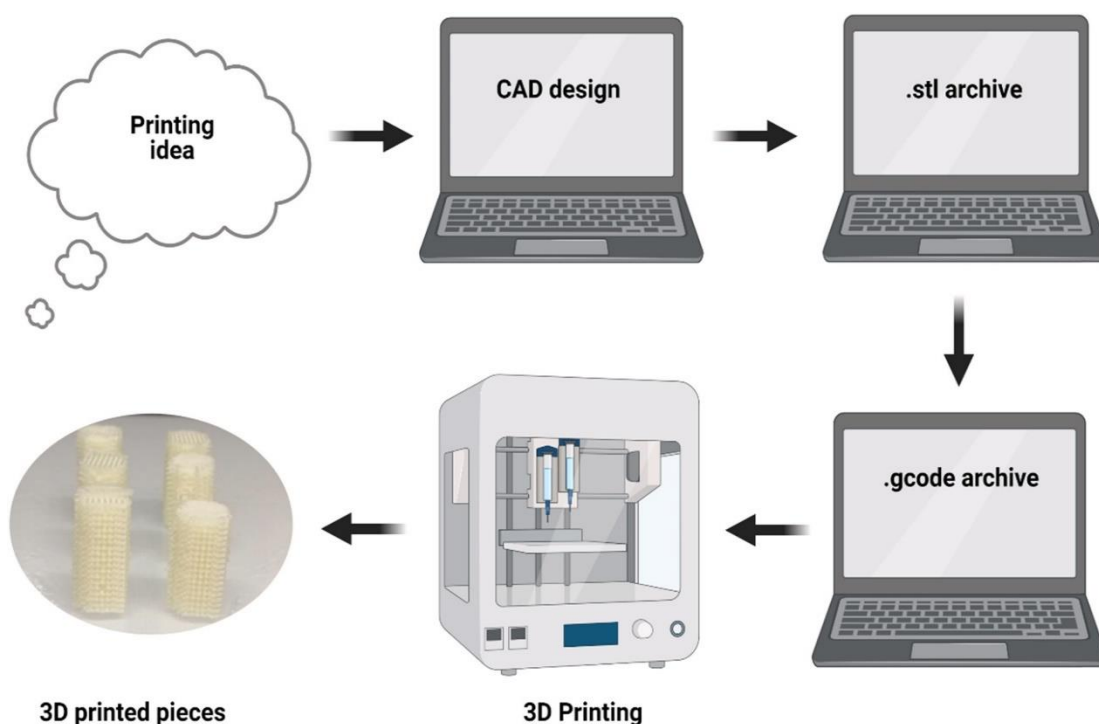


Εικόνα 2.1: FDM εκτυπωτής σε λειτουργία. (RAPID, 2023)

2.2 Γενικά στάδια τρισδιάστατης εκτύπωσης

Από την εικονική αναπαράσταση του συστήματος CAD μέχρι το τελικό φυσικό αποτέλεσμα μεσολαβούν κάποια βήματα που είναι απαραίτητα στην λειτουργία αυτής της τεχνικής. Αυτά παρουσιάζονται ως:

1. Ιδέα της κατασκευής σχεδίου
2. Μοντέλο σχεδίου στον υπολογιστή (CAD)
3. Αρχείο STL
4. Αρχείο G-κώδικα
5. Τρισδιάστατη εκτύπωση
6. Τελικό μοντέλο
7. Μετεπεξεργασία (προαιρετικά)



Εικόνα 2.2: Στάδια τρισδιάστατης εκτύπωσης. (Cano-Vicent, et al., 2021)

3D CAD MONTEΛΟ : Αρχικά, όλα τα κομμάτια που κατασκευάζονται με AM (Additive Manufacturing) δημιουργούνται από ένα ψηφιακό μοντέλο με το οποίο περιγράφεται η εξωτερική γεωμετρία τους. Συνήθως μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε CAD λογισμικό αλλά και συσκευές αντίστροφης μηχανικής -σαρωτές- (reverse engineering). (Gibson, et al., 2017). Γενικά, κάποια από τα πιο δημοφιλή σχεδιαστικά προγράμματα είναι:

- Solidworks
- Fusion 360
- Autodesk Inventor
- Autocad
- Rhino
- CATIA
- TinkerCad

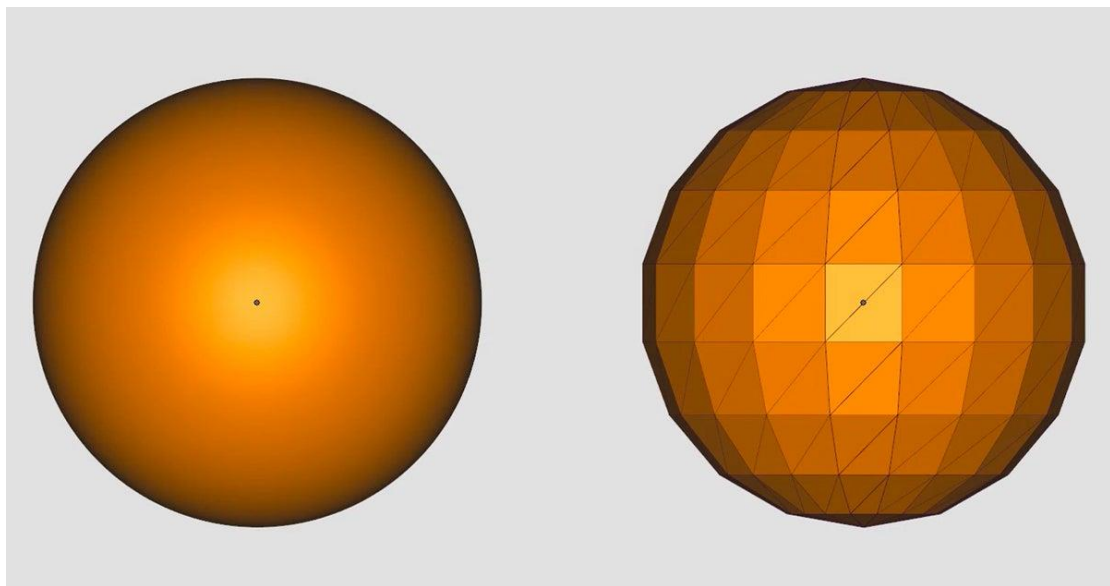
Ορισμένα από αυτά διακρίνονται περισσότερο ως επαγγελματικά εργαλεία για σχεδιασμό προϊόντων, ενώ κάποια άλλα περισσότερο ως εκπαιδευτικά. Σε γενικό βαθμό, υπάρχουν διαφορές μεταξύ των προγραμμάτων αλλά το σημαντικό είναι ότι όλα παρέχουν μεθόδους και λειτουργίες για την πλήρη δημιουργία ενός μοντέλου αλλά και τη σχετική μελέτη του.

Έτσι, με έναν από τους παραπάνω τρόπους, η αρχική ιδέα έχει μετατραπεί σε σχέδιο στον Η/Υ (CAD design).

STL ΑΡΧΕΙΟ: Από το CAD λογισμικό εξάγονται τα δεδομένα σε μορφή STL. Το αρχείο αυτό περιγράφει τη κλειστή εξωτερική επιφάνεια του αρχικού μοντέλου CAD και αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό των στρώσεων. Ένα αρχείο .STL είναι το αρχείο που χρειάζεται το πρόγραμμα οδήγησης του τρισδιάστατου εκτυπωτή, δηλαδή για να μπορεί ο εκτυπωτής να εκτυπώσει το επιθυμητό σχήμα. Ουσιαστικά είναι η κωδικοποίηση της γεωμετρίας της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Το εξαγόμενο του αρχείου αυτού είναι η αναπαράσταση του ορίου του μοντέλου, δηλαδή της εξωτερικής επιφάνειας του, από ένα πλέγμα τριγωνικών «ψηφίδων» όπου παριστάνουν γεωμετρικές μόνο προσεγγίσεις της επιφάνειας ή των στερεών οντοτήτων, οπότε οποιαδήποτε άλλη πληροφορία που αφορά το χρώμα, το υλικό, τις

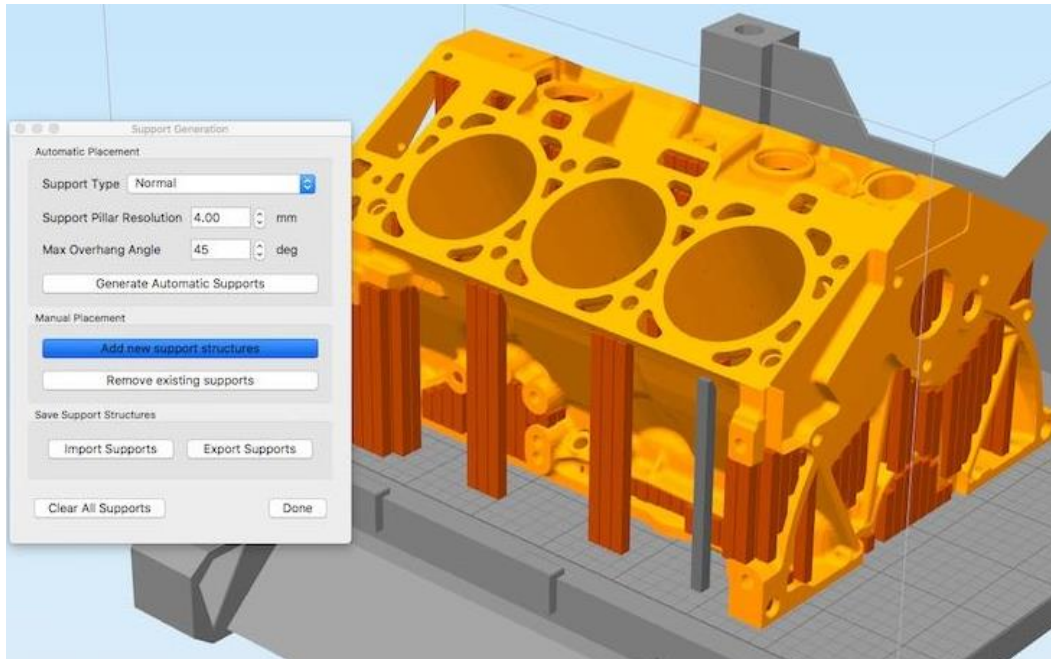
κατασκευαστικές στρώσεις ή το ιστορικό δημιουργίας του μοντέλου αγνοούνται κατά τη διαδικασία μετατροπής και δημιουργίας του αρχείου.

Ένα STL αρχείο αποτελείται από τριγωνικές έδρες. Κάθε τριγωνική έδρα προσδιορίζεται με μοναδικό τρόπο μέσω ενός κάθετου σε αυτή μοναδιαίου διανύσματος και τριών κορυφών ή γωνιών. Το διάνυσμα αυτό καταχωρίζεται στη μνήμη με τρεις αριθμούς που αντιστοιχούν στις συνιστώσες του. Στα περισσότερα συστήματα, η φορά του κάθετου διανύσματος χρησιμοποιείται για να δηλωθεί ο χώρος που βρίσκεται εκτός του στερεού σώματος, ουσιαστικά δηλαδή διευθύνεται προς τα έξω. Σχεδόν όλα τα CAD συστήματα μπορούν να παράγουν STL αρχεία από ένα έγκυρο, πλήρως κλειστό στερεό μοντέλο. (Gibson, et al., 2017)



Εικόνα 2.3: Παράδειγμα μετατροπής CAD γεωμετρίας σε STL. (Kertik, 2017)

ΑΡΧΕΙΟ G-ΚΩΔΙΚΑ: Η μηχανή προσθετικής κατασκευής λειτουργεί με βάση τον G-κώδικα, έτσι το προηγούμενο αρχείο θα πρέπει να υποστεί μια σχετική επεξεργασία μέσω αντίστοιχων προγραμμάτων (slicers), με σκοπό από τη γεωμετρία του αντικειμένου να εξαχθεί ο κώδικας. Παράδειγμα διαδικασίας:



Εικόνα 2.4: Πρόγραμμα εξαγωγής G-κώδικα, slicer. (Top 3D MEDIA, 2019)

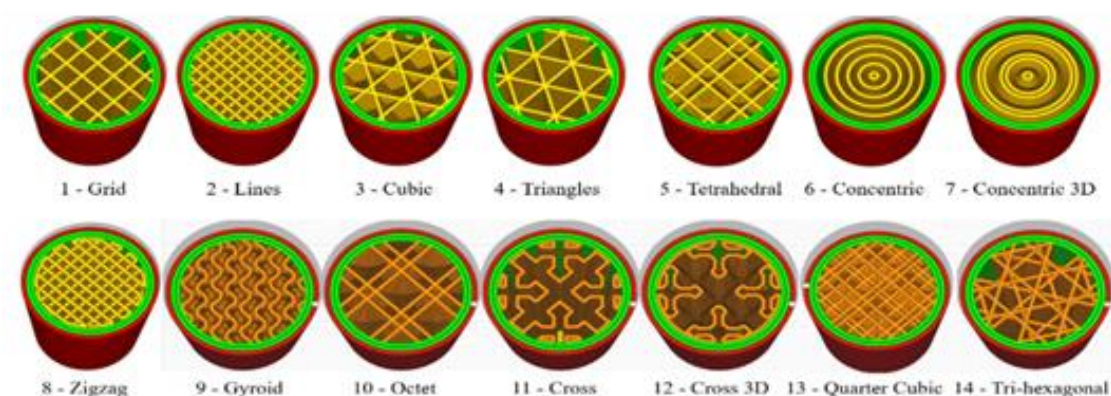
Ακόμη, μέσω των προγραμμάτων αυτών είναι δυνατή η μοντελοποίηση του αντικειμένου μέσω παραμέτρων όπως:

- Πυκνότητα (Infill density)
- Εσωτερικό μοτίβο υλικού (Infill pattern)
- Ύψος στρώσης (Layer height)
- Πάχος τοιχώματος (Wall thickness)
- Ταχύτητα εκτύπωσης (Print speed)
- Θερμοκρασία ακροφυσίου (Printing temperature)
- Θερμοκρασία τραπέζιου (Built plate temperature)
- Προσανατολισμός αντικειμένου στο χώρο
- Χρήση ή όχι υποστηριγμάτων (supports)

Στις παρακάτω εικόνες παρατηρούνται οι διαφορετικές πυκνότητες ενός αντικειμένου αλλά και τα διαφορετικά εσωτερικά μοτίβο που γίνεται η εναπόθεση του υλικού. Αυτά χωρίζονται είτε σε δισδιάστατα (2D) όπως για παράδειγμα το κλασσικό μοτίβο «Grid», είτε σε τρισδιάστατα στο χώρο (3D) όπως το μοτίβο «Cross 3D».

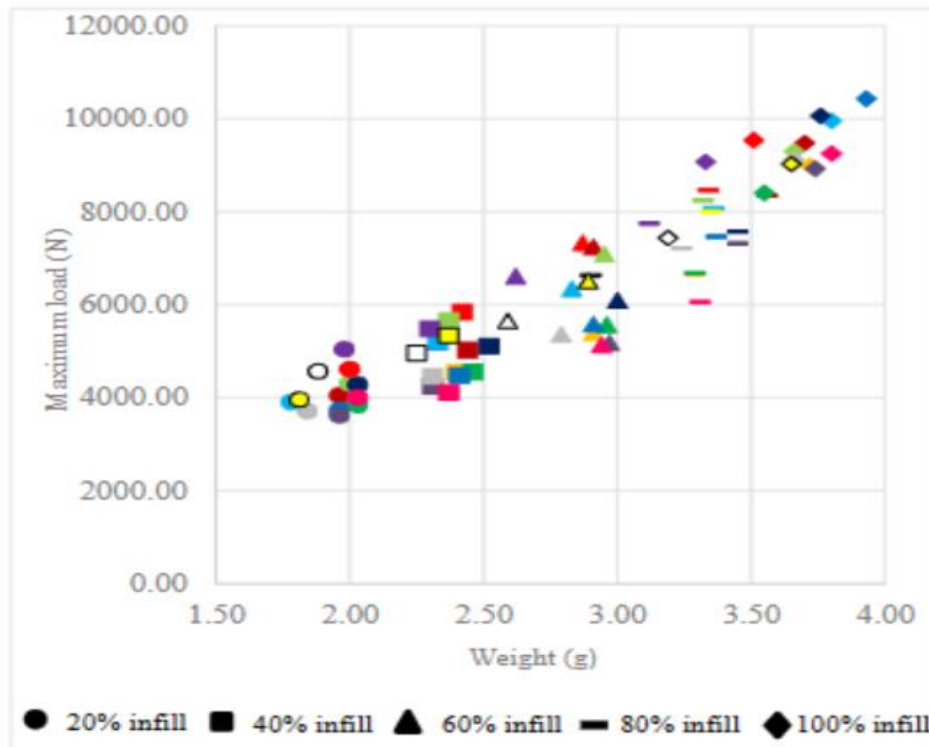


Εικόνα 2.5: Διαφορετικές πυκνότητες αντικειμένου (20-100%). (Pernet, et al., 2022)



Εικόνα 2.6: Διαφορετικά μοτίβο αντικειμένου. (Pernet, et al., 2022)

Προφανώς, ανάλογα την πυκνότητα του αντικειμένου αλλά και το εσωτερικό μοτίβο οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού μοντέλου αλλάζουν. Για παράδειγμα στη παρακάτω έρευνα έχει πραγματοποιηθεί δοκιμή θλίψης σε παρόμοια δοκίμια και για τα 14 εσωτερικά μοτίβο σε διαφορετικές πυκνότητες (20%, 40%, 60%, 80%, 100%). Σε γενικό βαθμό παρατηρείται ότι με την αύξηση της πυκνότητας του υλικού αυξάνεται και το μέγιστο φορτίο. Πιο συγκεκριμένα:



Εικόνα 2.7: Δοκιμή θλίψης για διαφορετικές πυκνότητες και μοτίβο αντικειμένου. (Pernet, et al., 2022)





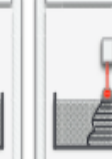


ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ: Τέλος, μετά την επιλογή των παραπάνω παραμέτρων, μπορεί να πραγματοποιηθεί η εκτύπωση, που είναι κυρίως μια αυτοματοποιημένη λειτουργία. Μετά το πέρας της εκτύπωσης, το εξάρτημα μπορεί να χρειαστεί να υποστεί κάποια μετεπεξεργασία (post-process) όπως είναι η αφαίρεση των υποστηριγμάτων (αν υπάρχουν), καθάρισμα ή τρίψιμο και βάψιμο. Επίσης σε μερικές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, το αντικείμενο μπορεί να χρειαστεί κάποιου είδους σκλήρυνσης (curing), όπως για παράδειγμα σκλήρυνση με υπεριώδες φως.

2.3 Ταξινόμηση προσθετικών κατασκευών

Η διαδικασία και τα προηγούμενα στάδια ισχύουν κατεξοχήν στις περισσότερες κατηγορίες προσθετικής κατασκευής με μικρές διαφοροποιήσεις ανάλογα την λειτουργία. Με βάση αυτό είναι χρήσιμο να αναλυθούν οι κατηγορίες αυτές και να επεξηγηθούν οι διαφορές/ομοιότητες τους και ο τρόπος λειτουργίας τους.

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών, τόσο σε εμπορικό επίπεδο όσο και σε ερευνητικό, καθώς το πεδίο εφαρμογών της τεχνολογίας επεκτείνεται συνεχώς και ερευνώνται νέες εφαρμογές, μέθοδοι λειτουργίας και υλικά παραγωγής. Μια πρώτη ταξινόμηση των μεθόδων μπορεί να γίνει σύμφωνα με τη μέθοδο και τα υλικά που χρησιμοποιούν. (Μπιλάλης & Μαραβελάκης, 2014)

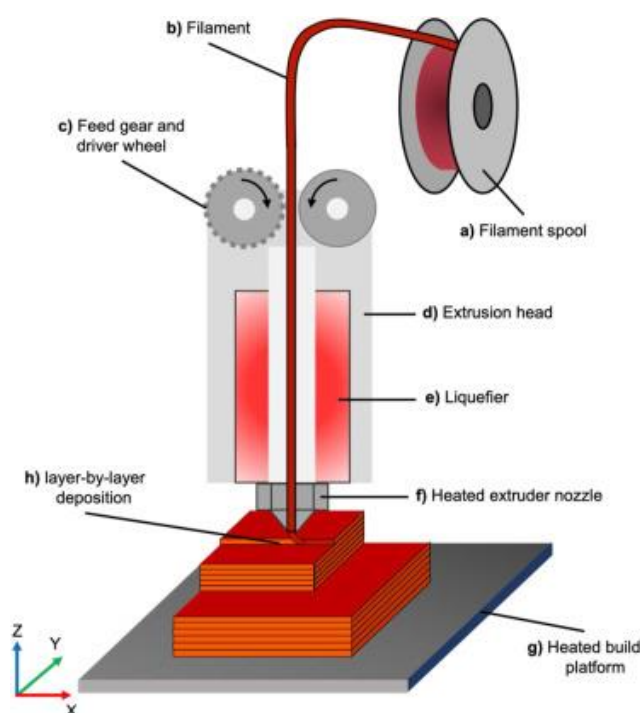
Γενικά, υπάρχουν πολλές εμπορικές τεχνικές και το φάσμα εξελίσσεται συνεχώς. Αρκετοί ερευνητές έχουν ταξινομήσει τις τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών με διαφορετικούς τρόπους. Η Αμερικανική Εταιρία Δοκιμών και Υλικών (ASTM) διέκρινε τις διαδικασίες AM σε επτά (7) κύριες κατηγορίες. (Srivastava, et al., 2023).

	Material Extrusion	Vat Photo-polymerization	Material Jetting	Binder Jetting	Powder Bed Fusion	Direct Energy Deposition	Sheet Lamination
Scheme							
Process	Layer by layer deposition of molten material	Selective curing of photo-curable material in a liquid container	Material deposition and subsequent curing	Selective dispense of binder for joining powder in a bed	Fusing of powder in a bed by melting the selected region	Direct fusion of the material	Bonding of individual sheets of material
Name	FDM RC MJS SFF	SLA DLP LAMP 2PP	DOD MJ NPJ	BJ	SLS SLM DMLS EBM MJF	LENS EBAM DMT	LOM UC

Εικόνα 2.8: Κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. (Dilberoglu, et al., 2017)

2.3.1 Εξώθηση υλικού (Material Extrusion)

Η προσθετική κατασκευή με εξώθηση υλικού (material extrusion), γνωστή και ως fused deposition modeling (FDM), είναι μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές, ειδικά μεταξύ των χρηστών εκτός βιομηχανίας (Golab, et al., 2022). Η τεχνική συνίσταται στην εναπόθεση λιωμένου πολυμερούς υλικού στρώση προς στρώση -η μία πάνω στην άλλη- μέχρι να ολοκληρωθεί το σχεδιασμένο τεμάχιο. (Cano-Vicent, et al., 2021). Το υλικό έρχεται σε νηματώδη μορφή σε ένα καρούλι, το οποίο τροφοδοτείται στο πίσω μέρος της μηχανής. Το νήμα σπρώχνεται μέσω θερμαινόμενων άκρων στο στόμιο καθώς κινείται και εξωθείται. Η κίνηση και προέκταση ελέγχονται έτσι ώστε το υλικό να αποτίθεται παίρνοντας τη μορφή διαδοχικών επιπέδων του τρισδιάστατου μοντέλου. Συνεπώς, η μέθοδος λειτουργίας είναι τήξη και ένωση. (Μπιλάλης & Μαραβελάκης, 2014).



Εικόνα 2.9: Στοιχεία και λειτουργία FDM εκτυπωτή. (Golab, et al., 2022)

Τα εξαρτήματα επισημαίνονται ως:

- α) καρούλι νήματος, το οποίο συγκρατεί το νήμα
- β) το υλικό στη στερεά του μορφή
- γ) γρανάζι τροφοδοσίας και κινητήριος τροχός, το νήμα σύρεται στον υγροποιητή
- δ) κεφαλή εξώθησης που περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα
- ε) Ο υγροποιητής θερμαίνει το νήμα στη λιωμένη του κατάσταση
- στ) Θερμαινόμενο ακροφύσιο εξώθησης, όπου το νήμα εξωθείται
- ζ) Θερμαινόμενη πλατφόρμα κατασκευής, το νήμα εναποτίθεται επιλεκτικά επάνω της
- η) Εναπόθεση στρώμα προς στρώμα, το αντικείμενο κατασκευασμένο σε στρώματα

Όπως αναφέρεται και παραπάνω διάφορες παράμετροι επηρεάζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τελικών αντικειμένων όπως η πυκνότητα (που είναι το ποσοστό του εσωτερικού όγκου που είναι γεμάτο με υλικό), το μοτίβο που αποδίδεται στο αντικείμενο, το οποίο επηρεάζει τη δομική σταθερότητα του στοιχείου, το πάχος των στρώσεων και η θερμοκρασία εξώθησης. (Ambati & Ambatipudi, 2022). Έτσι, η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι επιλεγμένες παράμετροι της διαδικασίας εκτύπωσης επηρεάζουν τη λειτουργία είναι ζωτικής σημασίας για τη λήψη εξαρτημάτων με βελτιστοποιημένη απόδοση. (Chueca de Bruijn, et al., 2023).

Κάποια από τα θερμοπλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη τεχνική FDM:

- ABS
- ASA
- Nylon 12
- PPSF/PPSU
- PEI ή ULTEM
- PLA
- TPU

Παρακάτω στον [Πίνακα 2.1](#) παρατίθενται ενδεικτικά κάποια στοιχεία για μερικά από αυτά τα υλικά.

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες και εφαρμογές θερμοπλαστικών υλικών (Yuan Lee, et al., 2017)

<u>Υλικό</u>	<u>Ιδιότητες</u>	<u>Εφαρμογές/Βιομηχανίες</u>
ABS	Σκληρό και δυνατό	Αυτοκίνηση, αεροδιαστημική, ιατρικές συσκευές
ASA	Μηχανική αντοχή και σταθερότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία	Λειτουργικά πρωτότυπα από βραχίονες και ηλεκτρικά περιβλήματα έως πρωτότυπα αυτοκινήτων και πρακτικά εξαρτήματα παραγωγής για εξωτερική χρήση κάτω από τον ήλιο.
Nylon 12	Καλή χημική αντοχή, υψηλή αντοχή σε κόπωση και σε κρούση	Ιδανικό υλικό για εφαρμογές που απαιτούν αντικραδασμικά προστατευτικά εξαρτήματα και υψηλή αντοχή στην κόπωση, όπως καλύμματα κεραιών, προσαρμοσμένα εργαλεία παραγωγής, ένθετα τριβής και συναρμολογήσεις στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική βιομηχανία.
PLA	Καλή αντοχή σε εφελκυσμό και ποιότητα επιφάνειας	Ιδανικό για μοντέλα και πρωτότυπα που απαιτούν αισθητική λεπτομέρεια και φιλικό προς το περιβάλλον για το σπίτι και το γραφείο
TPU	Εξαιρετική αντοχή σε φθορά και υψηλή αντοχή σε κρούση και σκληρότητα	Εξαιρετική ευκαμψία και αντοχή στη διάβρωση σε πολλά κοινά βιομηχανικά χημικά και έλαια. Εξαιρετικά ευπροσάρμοστο υλικό με τις ιδιότητες τόσο του καουτσούκ όσο και των πλαστικών για ποικίλες βιομηχανικές εφαρμογές



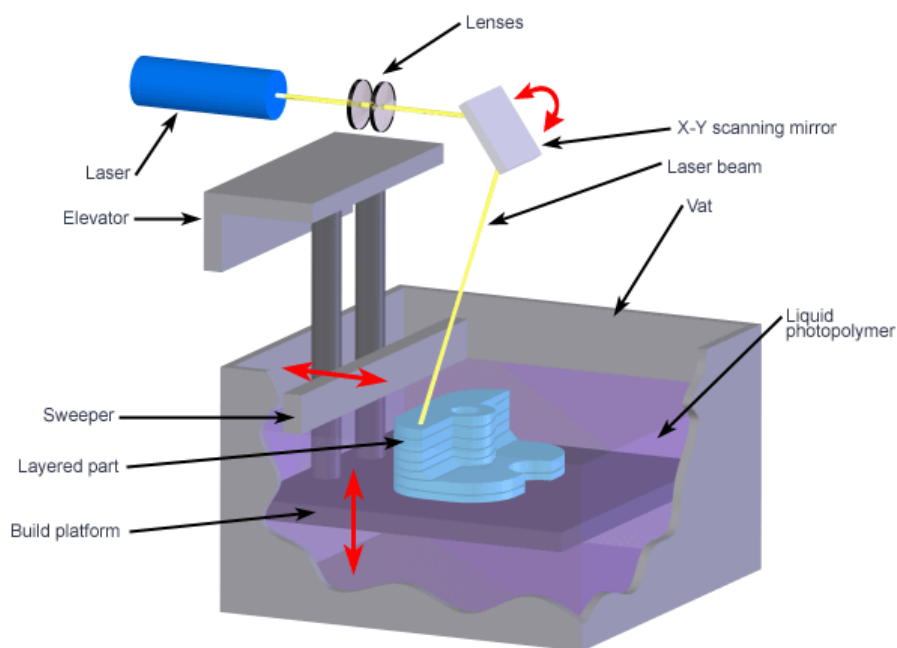
Εικόνα 2.10: Αντικείμενα κατασκευασμένα από FDM εκτυπωτή. (HUBS, n.d.)

2.3.2 Φωτοπολυμερισμός σε κάδο-Στερεολιθογραφία (Vat Photopolymerization)

Η στερεολιθογραφία (SLA) είναι γνωστή και ως οπτική αναπαραγωγή, φωτοστερεοποίηση, στερεά αναπαραγωγή ελεύθερης μορφής και στερεά απεικόνιση. Ο όρος αυτός εισήχθη το 1986 ως μέθοδος για την παραγωγή στερεών αντικειμένων τυπώνοντας διαδοχικά λεπτά επίπεδα το ένα πάνω από το άλλο, χρησιμοποιώντας υλικό ευαίσθητο σε υπεριώδεις ακτινοβολίες (Μπιλάλης & Μαραβελάκης, 2014). Η τρισδιάστατη εκτύπωση μέσω του φωτοπολυμερισμού γνωστή και ως vat photopolymerization (VPP) είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία προσθετικής κατασκευής ικανή να παράγει μοντέλα με υψηλής ανάλυσης μικρο-αρχιτεκτονική και πολύπλοκα σχήματα (D'Andrea, et al., 2023).

Οι διεργασίες φωτοπολυμερισμού χρησιμοποιούν ως πρωταρχικά υλικά υγρά, ρητίνες που «ωριμάζουν»/στερεοποιούνται όταν ακτινοβοληθούν, ή φωτοπολυμερή. Τα περισσότερα φωτοπολυμερή αντιδρούν σε ακτινοβολία μήκους κύματος εντός της υπεριώδους περιοχής (UV). Επίσης χρησιμοποιούνται και ορισμένα συστήματα ορατού φωτός. Υπό την επίδραση της ακτινοβολίας, τα υλικά αυτά αντιδρούν χημικά

και στερεοποιούνται. Η αντίδραση αυτή ονομάζεται φωτοπολυμερισμός (Gibson, et al., 2017).



Εικόνα 2.11: SLA εκτυπωτής. (CUSTOMPART.NET, n.d.)

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας μια ελεγχόμενη από υπολογιστή δέσμη λέιζερ ή έναν ψηφιακό προβολέα φωτός με μια καθοδηγούμενη από υπολογιστή σκηνή δόμησης, ένα σχέδιο φωτίζεται στην επιφάνεια μιας ρητίνης. Ως αποτέλεσμα αυτού, η ρητίνη στο μοτίβο στερεοποιείται σε καθορισμένο βάθος, προκαλώντας την προσκόλλησή της σε μια πλατφόρμα στήριξης. Μετά τον φωτοπολυμερισμό του πρώτου στρώματος, η πλατφόρμα απομακρύνεται από την επιφάνεια και το δομημένο στρώμα επικαλύπτεται εκ νέου με υγρή ρητίνη. Στη συνέχεια, ένα σχέδιο σκληραίνεται σε αυτό το δεύτερο στρώμα. Καθώς το βάθος της σκλήρυνσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το ύψος του βήματος της πλατφόρμας, εξασφαλίζεται καλή προσκόλληση στο πρώτο στρώμα. Αυτά τα βήματα (η κίνηση της πλατφόρμας και η σκλήρυνση ενός μεμονωμένου σχεδίου σε ένα στρώμα ρητίνης) επαναλαμβάνονται για την κατασκευή ενός στερεού, τρισδιάστατου αντικειμένου. Μετά την αποστράγγιση και το ξέπλυμα της περίσσειας ρητίνης, συχνά γίνεται μετα-σκλήρυνση με υπεριώδες φως για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των δομών. (Melchels, et al., 2010)

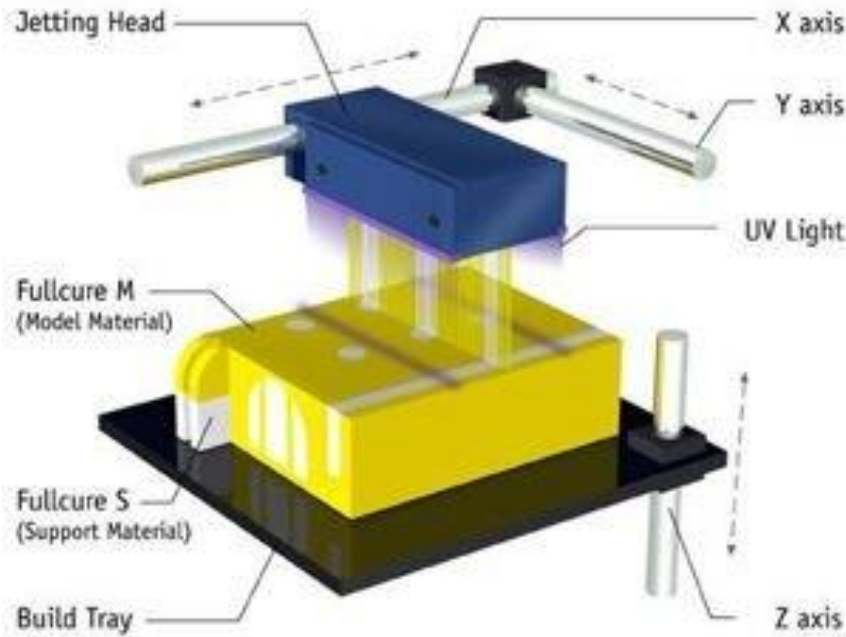


Εικόνα 2.12: Αντικείμενα εκτυπωμένα με φωτοπολυμερισμό. (Mahajan, 2022)

Σε γενικό βαθμό, αυτού του είδους οι εκτυπωτές αποτελούν μια καλή επιλογή διότι, είναι σχετικά οικονομικοί, παρέχουν υψηλή ανάλυση επιφάνειας και ακρίβεια στην κατασκευή, σε συνδυασμό με την καλή ελαστικότητα των τελικών μοντέλων.

2.3.3 Εκτόξευση-Εναπόθεση υλικού (Material Jetting)

Η εκτόξευση υλικών, Material Jetting, (MJ) είναι μια βασική και ανταγωνιστική τεχνική κατασκευής για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών και επιστημονικών εφαρμογών λόγω της οικονομικής αποδοτικότητας, της υψηλής απόδοσης και της επεκτασιμότητας της παραγωγής, καθώς και της ικανότητάς της να επεκτείνει τη λειτουργικότητα μέσω της εκτύπωσης πολλαπλών υλικών (Elkaseer, et al., 2022). Η διαδικασία αυτή είναι μια τεχνική AM που βασίζεται στην εκτόξευση υλικού, εκτοξεύει σταγονίδια μελανιών/διαλυμάτων είτε συνεχώς είτε με τρόπο Drop-On-Demand (DOD) στην κορυφή ενός υποστρώματος για την προσθετική δημιουργία ενός εξαρτήματος. Συγκεκριμένα, ο επιμέρους μηχανισμός σχηματισμού καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση της διαδικασίας και την ποιότητα του προϊόντος. (Segura, et al., 2023)



Εικόνα 2.13: Material Jetting εκτύπωση (Chadwick, 2021)

Οι εκτυπωτές MJ που διατίθενται σήμερα στο εμπόριο δημιουργούν τρισδιάστατα αντικείμενα με βάση δύο βήματα:

1. Εκτύπωση/εκτόξευση
2. Σκλήρυνση.

Κατά το στάδιο της εκτύπωσης, οι κεφαλές εκτύπωσης εκτοξεύουν μικροσκοπικές και ακριβείς σταγόνες μελάνης μέσω ενός αριθμού ακροφυσίων σε ένα υπόστρωμα, όπου οι σταγόνες διαχέονται και συνενώνονται (Segura, et al., 2023). Τα σταγονίδια υγρού εναποτίθενται στην πλατφόρμα εργασίας για να μαλακώσουν μερικώς το προηγούμενο στρώμα υλικού και να στερεοποιηθούν ως ένα κομμάτι κατά τη διαδικασία εκτόξευσης υλικού. Όταν όλα τα στρώματα εναποτεθούν ως ένα κομμάτι, το αντικείμενο απομακρύνεται από την πλατφόρμα κατασκευής για να αφαιρεθεί το υλικό στήριξης (Yuan Lee, et al., 2017). Ο εκτυπωτής εκτοξεύει τουλάχιστον δύο υλικά: το υλικό κατασκευής και το υλικό υποστήριξης, όπου το τελευταίο υλικό υποστηρίζει τα προεξέχοντα χαρακτηριστικά. Η τεχνολογία διαθέτει τεράστιες δυνατότητες για την προσθετική κατασκευή μικροσκοπικών και πολύπλοκων συστημάτων λόγω της

ικανότητάς της να εκτυπώνει πολλαπλά λειτουργικά υλικά με υψηλή ανάλυση, όπως για παράδειγμα μικροσυστήματα που βασίζονται σε διηλεκτρικά και αγωγιμα μελάνια με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά κατά τη διαδικασία κατασκευής, ή τρισδιάστατα εκτυπωμένους οπτικούς φακούς (Elkaseer, et al., 2022)

Η εκτύπωση με εκτόξευση υλικού, έχει καταφέρει να παράγει λειτουργικά εξαρτήματα με πολύπλοκες δομές για εφαρμογές ηλεκτρονικών, ενέργειας, βιοϊατρικής κ.λπ. Για παράδειγμα, έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία συστοιχίες και κυκλώματα τρανζίστορ υψηλής απόδοσης. (Segura, et al., 2023)

Τα υλικά για τη διαδικασία MJ είναι κυρίως φωτοπολυμερή, όπως τα υλικά VisiJet της 3D System και οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες της Stratasys. Πιο συγκεκριμένα:

Πίνακας 2.2: Ιδιότητες υλικών των φωτοπολυμερών polyjet της Stratasys και οι εφαρμογές τους. (Yuan Lee, et al., 2017)

<u>Υλικό</u>	<u>Ιδιότητες</u>	<u>Εφαρμογές/Βιομηχανίες</u>
VeroWhitePlus	Ανθεκτικό, άκαμπτο και υψηλή διαστατική ακρίβεια	Κατάλληλο για μια σειρά από βιομηχανικές εφαρμογές, όπως ηλεκτρονικά περιβλήματα, ιατρικές συσκευές και τεμάχια με περίπλοκα χαρακτηριστικά.
Digital ABS	Υψηλότερη θερμοκρασία θερμικής εκτροπής	Λειτουργικά πρωτότυπα, καλούπια έγχυσης, εργαλεία κατασκευής, ηλεκτρονικά περιβλήματα, ανθεκτικά μοντέλα παρουσίασης, μέρη και καλύμματα κινητήρα
Fullcure RGD 720	Διαφανές με λείο φινίρισμα επιφάνειας	Χρωματική βαφή, ιατρικές εφαρμογές, οπτικοποίηση της ροής υγρών, δοκιμή προσαρμογής διαφανών εξαρτημάτων, όπως γυαλί, γυαλικά και καλλιτεχνική μοντελοποίηση.

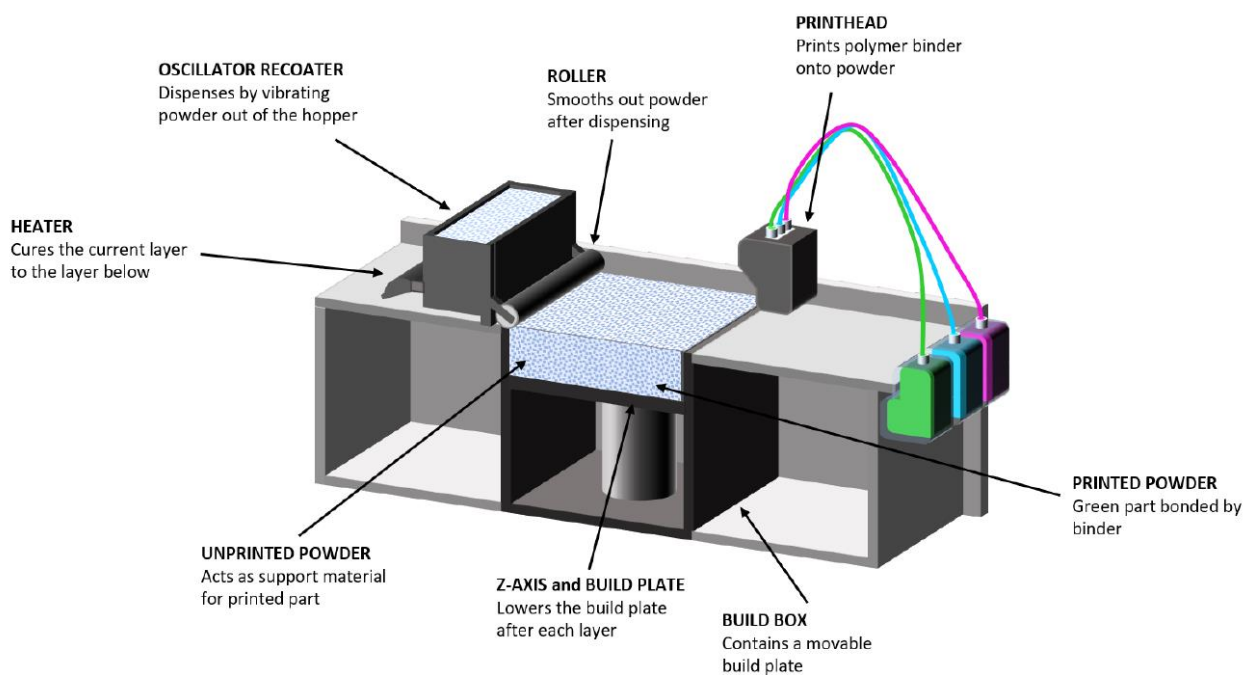
Rigur RGD 450	Φωτεινό λευκό, μιμείται τις ιδιότητες του πολυπροπυλενίου	Ιδανικό υλικό για συσκευασίες, δοχεία πολλαπλών χρήσεων και εύκαμπτα κλεισίματα στις βιομηχανίες της αυτοκινητοβιομηχανίας, των καταναλωτικών αγαθών και των ηλεκτρονικών.
Υλικό υψηλής θερμοκρασίας	Καλή αντοχή στη θερμότητα με καλή σταθερότητα	Ιδανικό υλικό για τη δοκιμή εφαρμογών όπως η ροή ζεστού νερού ή η ροή ζεστού αέρα σε βρύσες και σωλήνες
Οδοντιατρικό υλικό	Καλή αντοχή, υψηλή ακρίβεια και ανθεκτικότητα	Τρεις τύποι οδοντιατρικών υλικών (VeroDent, VeroDentPlus και VeroGlaze) είναι εγκεκριμένοι για τοποθέτηση μέσα στο στόμα, δοκιμαστικές επιστρώσεις όψεων και διαγνωστικές αποτυπώσεις με κερί.



Εικόνα 2.14: Αντικείμενα εκτυπωμένα μέσω Material Jett.
(engineeringproductdesign, n.d.)

2.3.4 Εκτόξευση συνδετικού υλικού (Binder Jetting)

Η εκτόξευση συνδετικού υλικού είναι μία από τις διεργασίες προσθετικής κατασκευής κατά την οποία σωματίδια σκόνης (πούδρας) ενώνονται μεταξύ τους με την επιλεκτική εναπόθεση ενός υγρού συνδετικού υλικού με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα τρισδιάστατο τεμάχιο με τη συγκόλληση των σωματιδίων μεταξύ τους. Η κεφαλή εκτύπωσης είναι σχεδιασμένη για να ρίχνει συνδετικό παράγοντα πάνω στη σκόνη και η πλατφόρμα στη συνέχεια χαμηλώνει για να απλώσει ένα άλλο στρώμα σκόνης. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής εκτόξευσης συνδετικού υλικού περιλαμβάνουν την ελεύθερη υποστήριξη, την ελευθερία σχεδιασμού, τον μεγάλο όγκο κατασκευής, την υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης και το σχετικά χαμηλό κόστος. (Yuan Lee, et al., 2017)



Εικόνα 2.15: Binder Jetting εκτύπωση (Freemantechology, 2019)

Πιο συγκεκριμένα, σταγονίδια συγκολλητικής ουσίας (διαμέτρου 80 μm) σχηματίζουν σφαιρικά συσσωματώματα της υγρής συγκολλητικής ουσίας με τα σωματίδια πούδρας, παρέχοντας επίσης την απαραίτητη σύνδεση με τη στρώση που έχει ήδη εκτυπωθεί προηγουμένως. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, το εκτυπωμένο αντικείμενο παραμένει μέσα στη κλίνη της πούδρας, προκειμένου να στερεοποιηθεί συγκολλητική ουσία και να αποκτήσει την απαραίτητη αντοχή. (Gibson, et al., 2017).

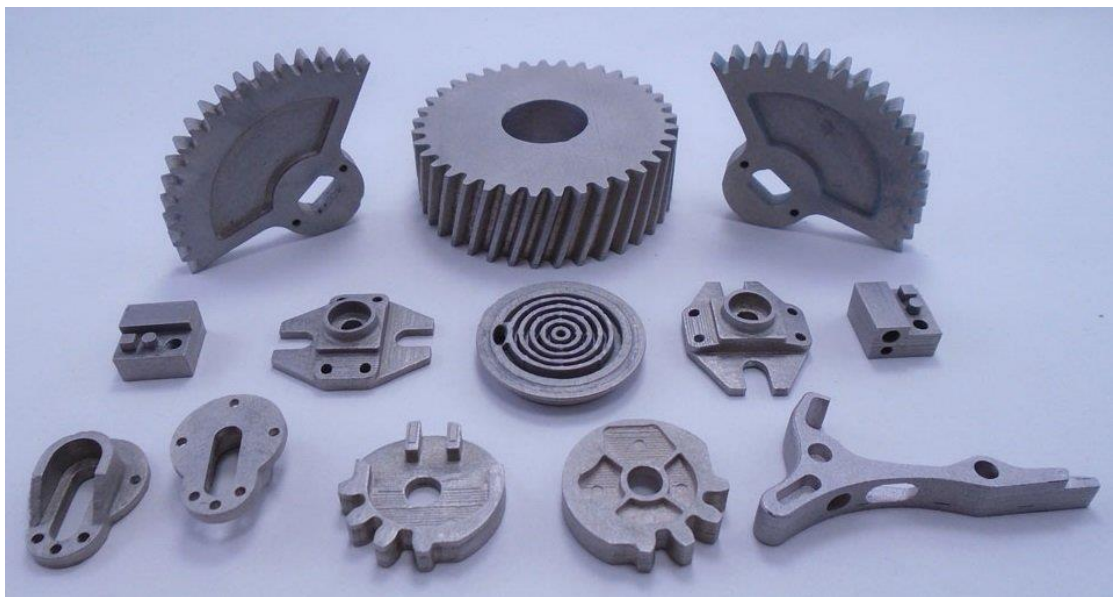
Για την επίτευξη μεγαλύτερης πυκνότητας και αντοχής, τα εξαρτήματα υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία μετά τη διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει ένα στάδιο καύσης (σε θερμοκρασία $\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$) για την πυρόλυση του συνδετικού υλικού, ακολουθούμενο από ένα στάδιο πυροσυσσώματωσης σε υψηλή θερμοκρασία. (Rahman, et al., 2023)

Η διεργασία BJ (Binder Jetting) εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα. Τα κατασκευαζόμενα κομμάτια είναι αυτοστηριζόμενα εντός της πούδρας της κλίνης, οπότε δεν υπάρχει ανάγκη δημιουργίας δομής στηριγμάτων. Παρόμοια με άλλες διεργασίες, πολλά αντικείμενα μπορούν να τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο ή/και να στοιβαχτούν το ένα επάνω στο άλλο. Έτσι μπορούν να κατασκευαστούν συγχρόνως πολλά αντικείμενα, αυξάνοντας σημαντικά την παραγωγικότητα. Επίσης είναι δυνατόν να υλοποιηθούν συναρμολογημένοι σχηματισμοί κομματιών και κινηματικές διατάξεις, δεδομένου ότι μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί η ασύνδετη πούδρα που υπάρχει μεταξύ των συνεργαζόμενων στερεών κομματιών. (Gibson, et al., 2017)

Υπάρχει μια ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων κεραμικών, μετάλλων, γυαλιού, άμμου και πολυμερών, που μπορούν να εκτυπωθούν με την τεχνική εκτόξευσης συνδετικού υλικού. Στο εμπόριο διατίθενται υλικά βιομηχανικής ποιότητας, όπως πυριτική άμμος, ανοξειδωτος χάλυβας, κεραμικά σφαιρίδια, χρωμίτης, ζirkόνιο, βολφράμιο, καρβίδιο βολφραμίου και άλλα. (Yuan Lee, et al., 2017)



Εικόνα 2.16: Εκτόξευση συνδετικού υλικού. (AMFG, 2019)



Εικόνα 2.17: Αντικείμενα εκτυπωμένα μέσω Binder Jet. (AMFG, 2019)

Πίνακας 2.3: Ιδιότητες και εφαρμογές υλικών Binder Jetting (Yuan Lee, et al., 2017)

<u>Υλικό</u>	<u>Ιδιότητες</u>	<u>Εφαρμογές/Βιομηχανία</u>
Ανοξείδωτος χάλυβας	Υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, ανθεκτικό στη θερμότητα και τη διάβρωση	Κατάλληλο για εξαρτήματα που εκτίθενται σε ιδιαίτερα λειαντικά περιβάλλοντα, όπως εξαρτήματα αντλιών και εξαρτήματα για γεωτρήσεις και εξοπλισμό εξόρυξης
Κεραμικά	Καλή θερμική διαστολή και υψηλή διαπερατότητα	Συνιστώνται για τη χύτευση χαλύβδινων κραμάτων ή πυρήνων εκτύπωσης που υπόκεινται σε συνθήκες υψηλής θερμικής καταπόνησης.
Σίδηρος	Καλές μηχανικές ιδιότητες και εξαιρετική αντοχή στη φθορά	Κατάλληλο για εξαρτήματα αυτοκινήτων, εργαλειομηχανές και εργαλεία

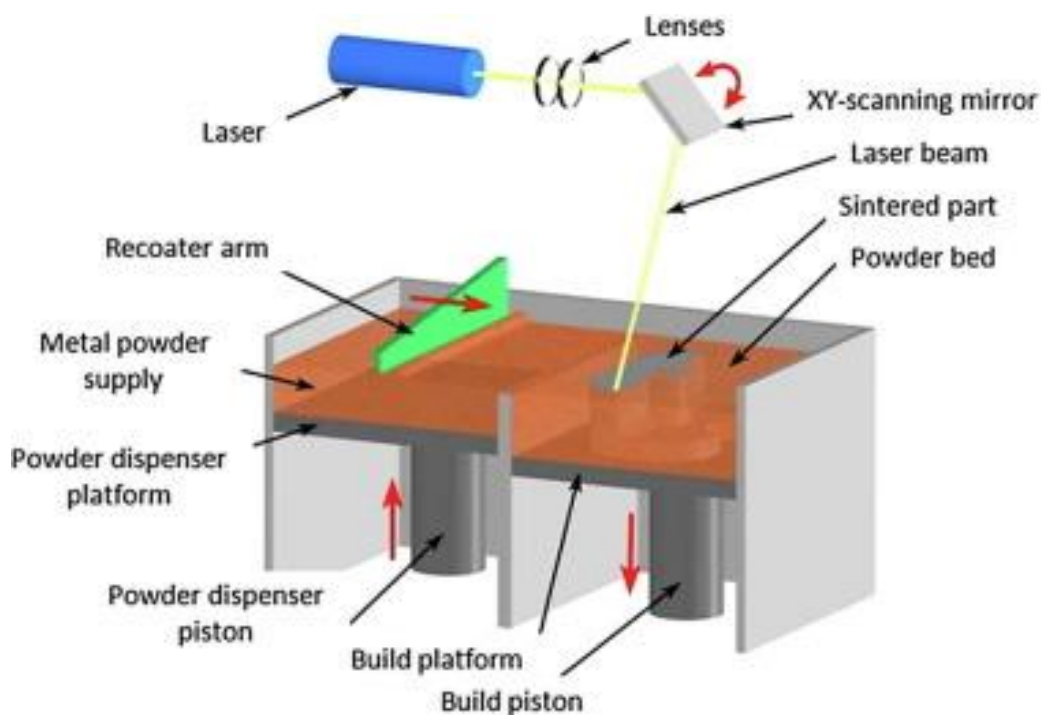
2.3.5 Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion)

Η σύντηξη πούδρας σε κλίνη (PBF) είναι μία από τις διεργασίες προσθετικής κατασκευής στην οποία μια θερμική πηγή, όπως το λέιζερ, χρησιμοποιείται για την μερική ή πλήρη σύντηξη μεταξύ των σωματιδίων σκόνης, όπου ακολουθείται από έναν κύλινδρο ή λεπίδα για την προσθήκη και εξομάλυνση ενός άλλου στρώματος σκόνης. Οι μηχανισμοί σύνδεσης της διαδικασίας PBF είναι κυρίως η πυροσυσσωμάτωση και η τήξη. Η κύρια διαφορά είναι ότι η πυροσυσσωμάτωση θεωρείται ως διαδικασία μερικής τήξης, ενώ η τήξη ως διαδικασία πλήρους τήξης (Yuan Lee, et al., 2017). Οι τύποι διεργασιών PBF είναι (Singh, et al., 2021)

- Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ -Selective Laser Sintering- (SLS)
- Επιλεκτική τήξη με λέιζερ -Selective Laser Melting- (SLM)
- Απευθείας πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων -Direct Metal Laser Sintering- (DMLS)

- Επιλεκτική θερμική πυροσυσσωμάτωση -Selective Heat Sintering- (SHS)
- Λιώσιμο με δέσμη ηλεκτρονίων -Electron Beam Melting- (EBM)

Όλες οι διεργασίες διαθέτουν ένα κοινό βασικό σύνολο χαρακτηριστικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν μια ή περισσότερες πηγές θερμότητας που προκαλούν τη σύντηξη των σωματιδίων της πούδρας, μια μέθοδο ελέγχου της σύντηξης σε συγκεκριμένη περιοχή της κάθε στρώσης, καθώς και μηχανισμούς για την πρόσθεση και την εξομάλυνση των στρώσεων της πούδρας. Η πλέον συνηθισμένη πηγή θερμότητάς είναι τα lasers. (Gibson, et al., 2017)



Εικόνα 2.18: Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Singh, et al., 2021)

Με αυτή τη διαδικασία, αφότου σχηματιστεί και προθερμαθεί κατάλληλη στρώση πούδρας, μια εστιασμένη δέσμη CO₂ laser, που στοχεύει επάνω στη πούδρα της κλίνης, κινείται με τη βοήθεια γαλβανόμετρων κατά τρόπο τέτοιο που να προκαλεί τη θερμική σύντηξη του υλικού. Οι κόκκοι της πούδρας που περιβάλλει την κατασκευή παραμένουν ασύνδετοι μεταξύ τους και χρησιμεύουν ως στήριγμα για τις επόμενες στρώσεις. Μόλις ολοκληρωθεί ο σχηματισμός μιας στρώσης, η κατασκευαστική πλατφόρμα υποβιβάζεται τόσο όσο το πάχος μιας στρώσης και ένα νέο στρώμα πούδρας διαστρώνεται και εξομαλύνεται. Η δέσμη του laser σαρώνει τη στρώση που αντιστοιχεί

στην επόμενη διατομή του κομματιού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να κατασκευαστεί ολόκληρο το κομμάτι (Gibson, et al., 2017).

Παρακάτω στον [Πίνακα 2.4](#) και [Πίνακα 2.5](#) παρατίθενται ενδεικτικά κάποια υλικά για τη σύντηξη πούδρας σε κλίνη. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται πούδρες της τεχνολογίας SLM (Επιλεκτική τήξη με λέιζερ) και EBM (Λιώσιμο με δέσμη ηλεκτρονίων):

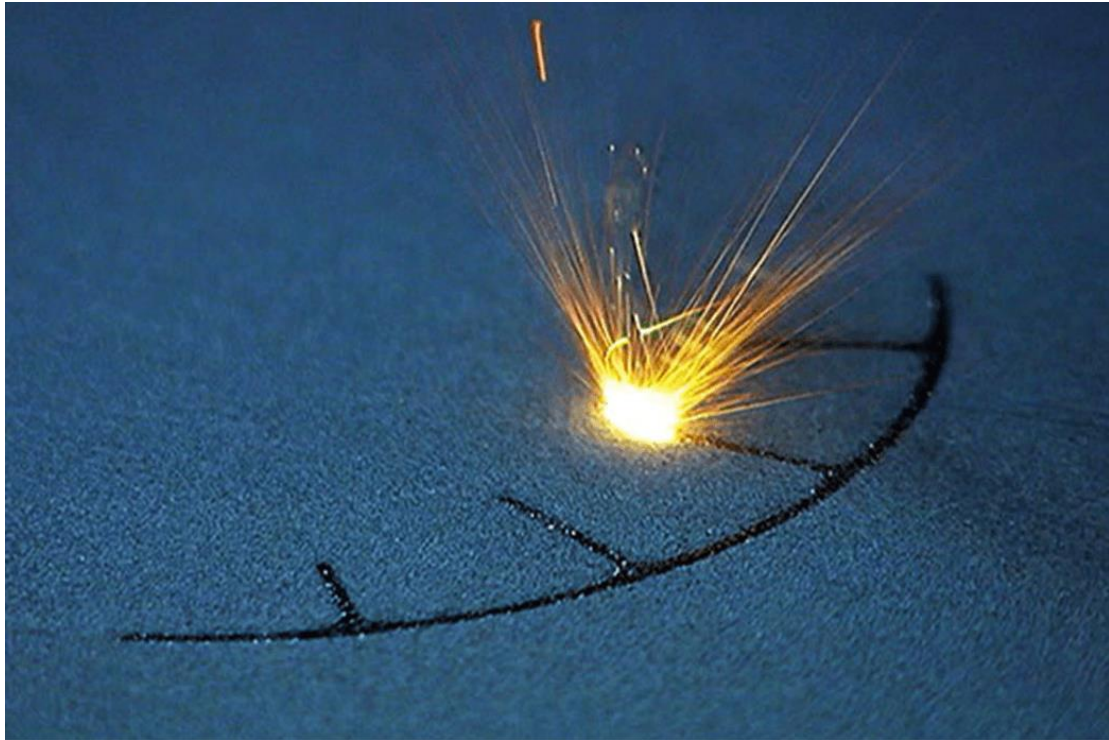
Πίνακας 2.4: Τυπικές μεταλλικές σκόνες SLM. (Yuan Lee, et al., 2017)

<u>Υλικό</u>	<u>Ιδιότητες</u>	<u>Εφαρμογές/Βιομηχανία</u>
Τιτάνιο	Αντοχή στη διάβρωση, βιοσυμβατότητα, χαμηλή θερμική διαστολή, υψηλή αντοχή και χαμηλή πυκνότητα	Τα εξαρτήματα τιτανίου μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η ιατρική τεχνολογία, η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυτιλία, τα κοσμήματα και ο σχεδιασμός
Ανοξείδωτο ατσάλι	Σκληρυνόμενο, υψηλή αντοχή στη φθορά, αντοχή στη διάβρωση, μεγάλη σκληρότητα και υψηλή ολκιμότητα	Οι εφαρμογές των εξαρτημάτων από ανοξείδωτο χάλυβα εντοπίζονται στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην κατασκευή εργαλείων, στη ναυτιλία, στην ιατρική τεχνολογία και στη μηχανολογία
Αλουμίνιο	Καλές ιδιότητες κραματοποίησης, καλή ικανότητα επεξεργασίας και ηλεκτρική αγωγιμότητα, χαμηλή πυκνότητα υλικού και ελαφρύ μέταλλο	Τα εξαρτήματα αλουμινίου είναι ιδανικά για χρήση σε τομείς όπως η αεροδιαστημική μηχανική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η κατασκευή πρωτοτύπων, ιδίως τα εξαρτήματα λεπτών τοιχωμάτων με πολύπλοκες γεωμετρίες
Κοβάλτιο-χρώμιο	Βιοσυμβατό, πολύ υψηλή σκληρότητα, αντοχή στη διάβρωση, υψηλή αντοχή και υψηλή ολκιμότητα	Τα εξαρτήματα από χρώμιο-κοβάλτιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ιατρικές και οδοντιατρικές τεχνολογίες, σε πεδία υψηλών θερμοκρασιών, όπως στους κινητήρες αεριοθούμενων αεροσκαφών

<p>Κράματα με βάση το νικέλιο</p>	<p>Εξαιρετική συγκολλησιμότητα, δυνατότητα σκλήρυνσης, αντοχή στη διάβρωση, εξαιρετική μηχανική αντοχή</p>	<p>Τα εξαρτήματα με βάση το νικέλιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αεροδιαστημική μηχανική, σε πεδία υψηλών θερμοκρασιών, στην κατασκευή εργαλείων</p>
--	--	---

Πίνακας 2.5: Τυπικές μεταλλικές σκόνες EBM. (Yuan Lee, et al., 2017)

<u>Υλικό</u>	<u>Ιδιότητες</u>	<u>Εφαρμογές/Βιομηχανία</u>
<p>Τιτάνιο</p>	<p>Υψηλή αντοχή, χαμηλό βάρος, βιοσυμβατό, ανθεκτικό στη διάβρωση</p>	<p>Άμεση κατασκευή πρωτοτύπων για την αγωνιστική και αεροδιαστημική βιομηχανία, τη θαλάσσια και χημική βιομηχανία, καθώς και για ορθοπεδικά εμφυτεύματα και προθέσεις</p>
<p>Κοβάλτιο-χρώμιο</p>	<p>Υψηλή αντοχή, αντίσταση στη φθορά, βιοσυμβατότητα, θερμοκρασιακή ικανότητα</p>	<p>Χρησιμοποιείται ευρέως στην ορθοπεδική, την αεροδιαστημική, την ηλεκτροπαραγωγή και τον οδοντιατρικό τομέα</p>



Εικόνα 2.19: Διεργασία Powder Bed Fusion. (engineeringproductdesign, n.d.)

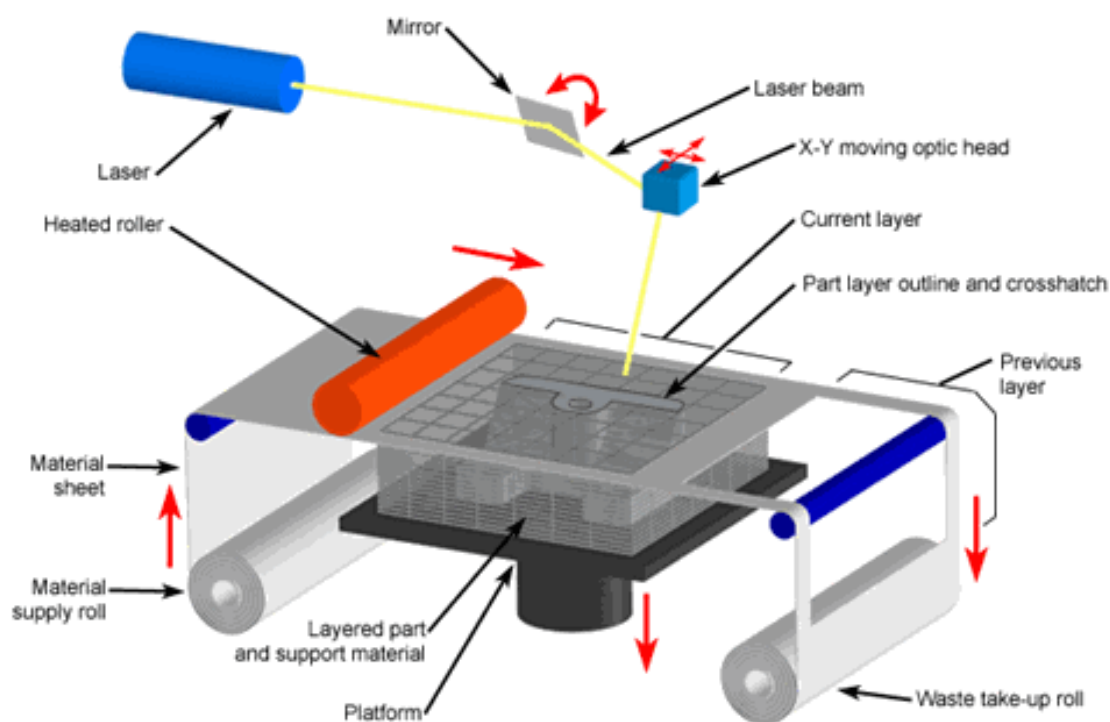


Εικόνα 2.20: Πολυμεταλλικά αντικείμενα εκτυπωμένα μέσω PBF. (Seidel, 2022)

2.3.6 Διεργασίες επάλληλων φύλλων (Sheet Lamination)

Η συγκεκριμένη τεχνική αναφέρεται στη συγκόλληση στρωμάτων από φύλλα χαρτιού, τα οποία κόβονται με Laser CO₂, έτσι ώστε το σχήμα τους να αντιπροσωπεύει τις αντίστοιχες διατομές του CAD μοντέλου του κομματιού. Οι διεργασίες είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σύμφωνα με το μηχανισμό συνένωσης των στρώσεων ως (Gibson, et al., 2017):

- Συγκόλληση με κόλλα (gluing or adhesive bonding)
- Θερμική συνένωση (thermal bonding)
- Σύσφιξη (clamping)
- Συγκόλληση με υπερήχους (ultrasonic welding)



Εικόνα 2.21: Εκτύπωση μέσω συνένωσης φύλλων (CUSTOMPART.NET, n.d.)

Η εκτύπωση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας χαρτί ως πολυστρωματικά υλικά. Χρησιμοποιεί την αρχή "συγκόλληση και μετά κοπή". Ένα φύλλο πλαστικοποιείται στα προηγουμένως τοποθετημένα και συγκολλημένα στρώματα μέσω ενός θερμού κυλίνδρου. Ο κύλινδρος εφαρμόζει θερμότητα και πίεση καθώς κυλάει πάνω στο φύλλο, το οποίο έχει ένα λεπτό στρώμα θερμοπλαστικής κόλλας στην επιφάνεια προς τα κάτω. Αφού συγκολληθεί το νέο στρώμα, μια εστιασμένη δέσμη λέιζερ CO₂ χαράζει το περίγραμμα του τεμαχίου. Η ισχύς του λέιζερ ρυθμίζεται ώστε να κόβει μόνο ένα στρώμα της πλαστικοποίησης. Το αχρησιμοποίητο υλικό αφήνεται στη θέση του, ωστόσο, τεμαχίζεται με εγκάρσια χάραξη σε μικρά κομμάτια που ονομάζονται "πλακάκια" για εύκολη αφαίρεση. Η επαναληπτική διαδικασία συγκόλλησης και κοπής με λέιζερ επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του τελικού στρώματος. Μόλις όλα τα στρώματα έχουν πλαστικοποιηθεί και κοπεί, το πλεονάζον υλικό αφαιρείται για να αποκαλυφθεί το τελικό εξάρτημα. (Chiu, et al., 2003)

Η βασική μέθοδος της περικοπής ενός φύλλου είναι μία γρήγορη διαδικασία, καθώς η κοπή εφαρμόζεται μόνο στο περίγραμμα της στρώσης αντί της ανάγκης για τήξη ή στερεοποίηση όλης της περιοχής της διατομής κατά το σχηματισμό. Έτσι, η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα ταχύτητας σε συνδυασμό με το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί αρκετές παραλλαγές της μεθόδου για αρκετούς τύπους μετάλλων, κεραμικών, πολυμερών και υλικών με βάση το χαρτί. (Gibson, et al., 2017)



Εικόνα 2.22: Carbon fiber εξάρτημα εκτυπωμένο μέσω LOM.
(engineerproductdesign, n.d.)

2.3.7 Άμεση εναπόθεση ενέργειας (Direct Energy Deposition)

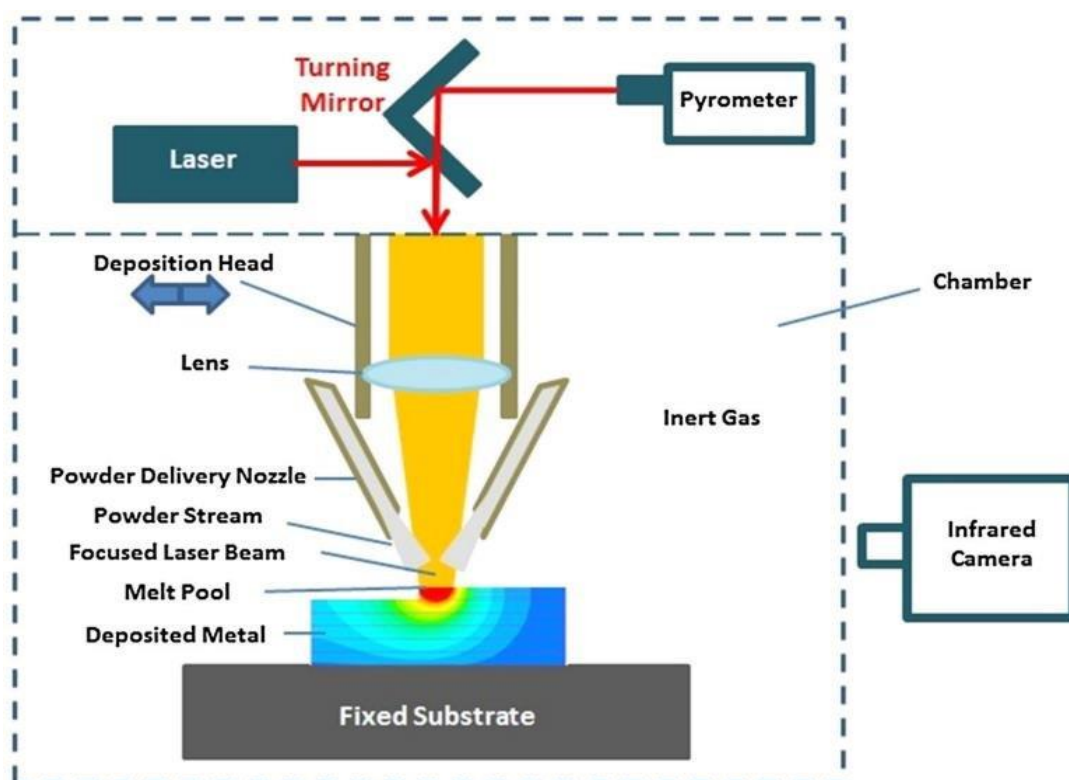
Η άμεση ενεργειακή εναπόθεση -Direct Energy Deposition- (DED) είναι μία από τις διεργασίες προσθετικής κατασκευής κατά την οποία η ενέργεια κατευθύνεται σε μια μικρή περιοχή για να θερμάνει ένα υπόστρωμα και να λιώσει το υλικό που εναποτίθεται. Γενικά, χρησιμοποιείται ένα πολύ ισχυρό λέιζερ για την τήξη των μεταλλικών σκονών και η ποσότητα της μεταλλικής σκόνης που εναποτίθεται για τη διαδικασία DED έχει άμεση επίδραση στην ανάλυση του εκτυπωμένου τεμαχίου. Η αρχή λειτουργίας μιας διαδικασίας DED διαφέρει από εκείνη της σύντηξης κλίνης σκόνης με έναν θεμελιώδη τρόπο: το λέιζερ υψηλής πυκνότητας ισχύος εστιάζεται σε ένα συνεχές ρεύμα μεταλλικής σκόνης που εναποτίθεται στο υπόστρωμα αντί για την προκαταρκτική εναπόθεση ενός στρώματος μεταλλικής σκόνης. Η ανάλυση της διεργασίας DED εξαρτάται από την πηγή ενέργειάς της (π.χ. λέιζερ > δέσμη ηλεκτρονίων > τόξο λόγω εισροής θερμότητας), ενώ η ταχύτητα κατασκευής της διεργασίας DED εξαρτάται από τον ρυθμό εναπόθεσης (π.χ. LENS 0,5 kg/hr << EBAM έως 9 kg/hr < WAAM έως 10 kg/hr). Τυπικά υλικά είναι συνήθεις βιομηχανικές μεταλλικές σκόνες που είναι οικονομικές, όπως ανοξείδωτοι χάλυβες, χαλκός, αλουμίνιο, τιτάνιο, νικέλιο, κοβάλτιο και κασσίτερος. (Yuan Lee, et al., 2017)

- LENS: Laser Engineered Net Shaping
- EBAM: Electron Beam Additive Manufacturing
- WAAM: Wire Arc Additive Manufacturing

Σημαντικές παράμετροι επεξεργασίας είναι:

- το διάστημα σάρωσης μεταξύ διαδοχικών στρώσεων
- ο ρυθμός τροφοδοσίας
- η ταχύτητα σάρωσης της επιφάνειας από τη δέσμη
- η ισχύς της δέσμης και
- το μέγεθος του σημείου εστίασης.

Ο ρυθμός τροφοδοσίας πούδρας, η ισχύς της δέσμης και η ταχύτητα σάρωσης συσχετίζονται. Για παράδειγμα, η αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας έχει παρόμοιο αποτέλεσμα με τη μείωση της ισχύος του laser. Ομοίως, η αύξηση της ισχύος του laser ή του ρυθμού τροφοδοσίας της πούδρας, αλλά και η μείωση της ταχύτητας σάρωσης, συντελούν στην αύξηση του πάχους εναπόθεσης. Παράδειγμα της τεχνολογίας αποτελεί η παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.23: Άμεση εναπόθεση ενέργειας (Dantin, et al., 2018)

Η μετεπεξεργασία της συγκεκριμένης τεχνικής περιλαμβάνει συνήθως:

- Την αφαίρεση υποστηριγμάτων ή του υποστρώματος, εάν το υπόστρωμα δεν προορίζεται να αποτελέσει τμήμα του τελικού εξαρτήματος
- Κατεργασίες κοπής φινιρίσματος αλλά και
- Κάποια θερμική επεξεργασία για την εκτόνωση των παραμενουσών τάσεων. Ανάλογα το υλικό, απαιτείται επιπλέον θερμική επεξεργασία για τη παραγωγή της επιθυμητής μικροδομής. (Gibson, et al., 2017)



Εικόνα 2.24: Εκτύπωση με άμεση εναπόθεση ενέργειας. (Carlota, 2019)

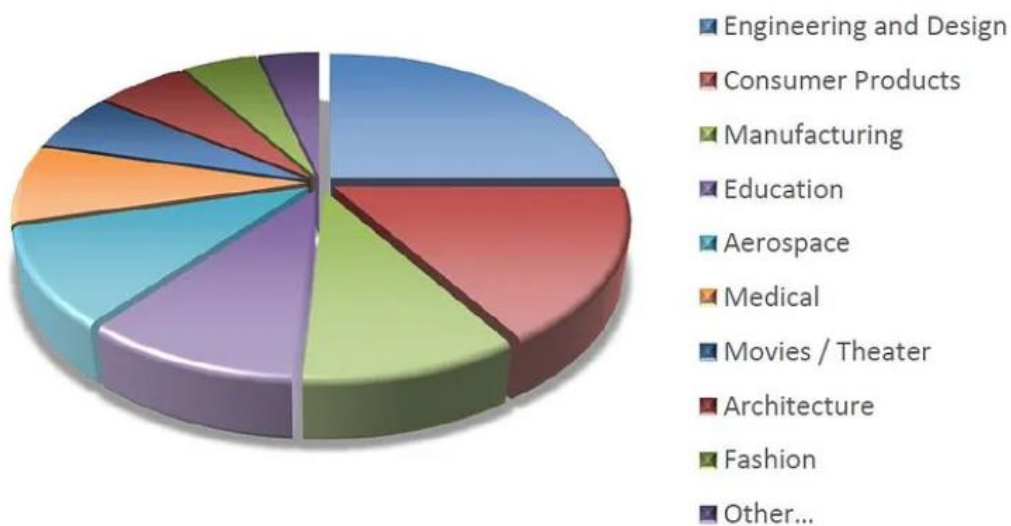
Στη συγκεκριμένη τεχνολογία πέρα από τη τρισδιάστατη εκτύπωση και τη δημιουργία αντικειμένων, πραγματοποιείται και επιδιόρθωση εξαρτημάτων που έχουν υποστεί βλάβες:



Εικόνα 2.25: Επιδιόρθωση οδοντωτού τροχού μέσω DED. (Select Additive, 2019)

2.4 Εφαρμογές και βιομηχανίες προσθετικής κατασκευής

Με βάση τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι οι τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών ταξινομούνται κυρίως με βάση το υλικό και τον τρόπο λειτουργίας τους. Συνολικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί σπουδαίο ρόλο σε αρκετούς κλάδους και βιομηχανίες και έχει αρκετές εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Συγκεκριμένα:



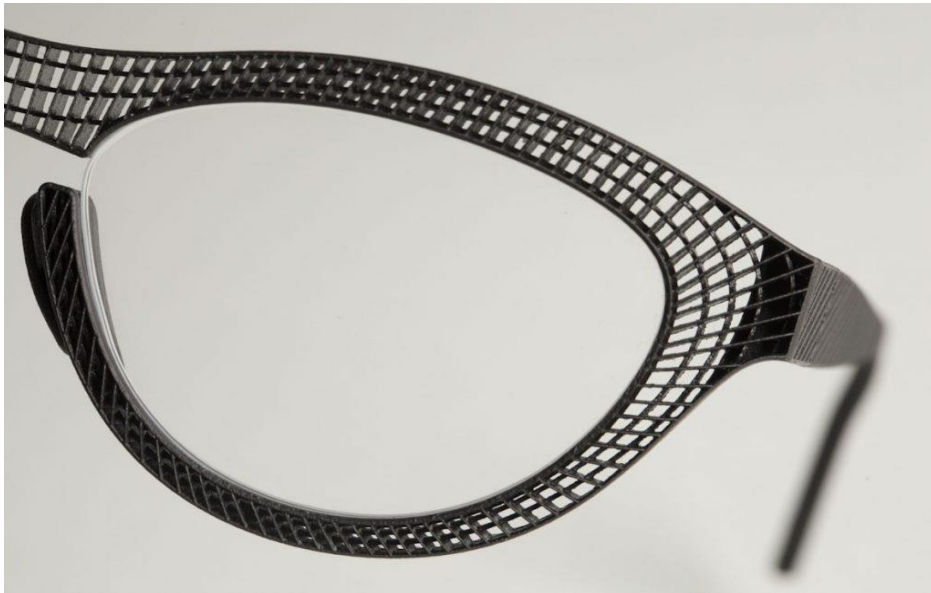
Εικόνα 2.26: Κλάδοι προσθετικής κατασκευής. (Schain, 2017)

Όπως αποτυπώνεται παραπάνω ([Εικόνα 2.26](#)) οι κλάδοι χωρίζονται ως:

- Μηχανολογικός σχεδιασμός
- Καταναλωτικά προϊόντα
- Κατασκευές
- Εκπαίδευση
- Αεροδιαστημική
- Ιατρική
- Αρχιτεκτονική
- Μόδα

Μεγαλύτερο μέρος κατέχει:

- Ο μηχανολογικός σχεδιασμός και τα καταναλωτικά προϊόντα.



Εικόνα 2.27: Εκτυπωμένα γυαλιά οράσεως. (AMFG, 2018)

- Στη συνέχεια, οι κατασκευές και η εκπαίδευση αποτελούν μεγάλο μέρος των κλάδων τρισδιάστατης εκτύπωσης, σε συνδυασμό με την αεροδιαστημική δημιουργώντας αρκετά μεταλλικά εκτυπωμένα εξαρτήματα και μοντέλα.



Εικόνα 2.28: Μεταλλικά εκτυπωμένα στηρίγματα airbus. (GARCIA, 2018)

- Έπειτα, ο κλάδος της **ιατρικής**, που συμβάλλει στην δημιουργία αντικειμένων όπως προσθετικά άκρα (συνήθως τιτανίου), αλλά και εμφυτεύματα κυρίως στον τομέα της οδοντιατρικής. Επίσης, εκτός από αυτού του είδους τις εκτυπώσεις, σημαντικές ενέργειες πραγματοποιούνται στον κλάδο της βιο-εκτύπωσης (bioprinting), όπου δημιουργούνται δομές παρόμοιες με όργανα και επιτρέπουν σε ζωντανά κύτταρα να πολλαπλασιάζονται.

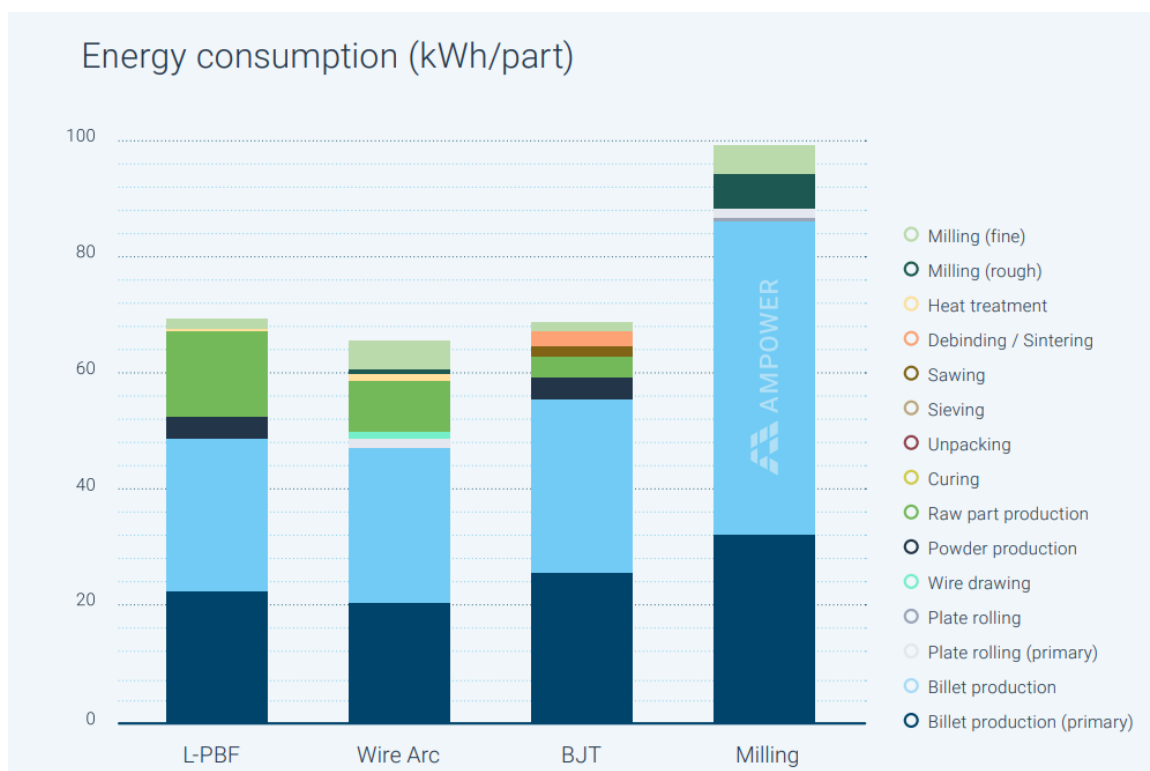


Εικόνα 2.29: Εκτυπωμένη κρανιακή πλάκα. (E-PLUS-3D, χ.χ.)

- Τέλος, απεικονίζονται κλάδοι όπως η **μόδα** και η **αρχιτεκτονική** όπου στον τελευταίο κλάδο έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές κατασκευές, αλλά βρίσκεται ακόμη σε αναπτυσσόμενα στάδια. Στη συγκεκριμένη βιομηχανία, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία κατασκευαστικών στοιχείων ή για την "εκτύπωση" ολόκληρων κτιρίων. Οι κατασκευές είναι κατάλληλες για τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς πολλές από τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για τη δημιουργία ενός αντικειμένου υπάρχουν ως αποτέλεσμα της διαδικασίας σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή. Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να επιτρέψει την ταχύτερη και ακριβέστερη κατασκευή σύνθετων ή κατά παραγγελία αντικειμένων, καθώς και τη μείωση του κόστους εργασίας και την παραγωγή λιγότερων αποβλήτων. (DESIGNING BULDINGS, 2022)

Σε συνδυασμό με τα προηγούμενα, παρατηρείται στην [Εικόνα 2.30](#) μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση ορισμένων τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης σε σχέση με την συμβατική τεχνική φρεζαρίσματος:

Τα παρακάτω διαγράμματα έχουν δημιουργηθεί εν μέσω έρευνας της εταιρίας AMPOWER:



Εικόνα 2.30: Ενεργειακή κατανάλωση τρισδιάστατων διεργασιών σε σχέση με συμβατική. (Wycisk, et al., n.d.)

Στο παραπάνω διάγραμμα αποτυπώνεται μια σχετική σύγκριση μεταξύ:

1. PBF (Σύντηξη πούδρας σε κλίνη)
2. WAAM (Προσθετική κατασκευή με τεχνικές συγκόλλησης)
3. BJT (Εκτόξευση συνδετικού υλικού)
4. Συμβατικής τεχνικής φρεζαρίσματος

Παρατηρείται η κατανάλωση διαφόρων διεργασιών της εκάστοτε τεχνολογίας σε σχέση με την ολική ενέργεια που καταναλώνεται ανά τεμάχιο (Kwh/Part). Για παράδειγμα διακρίνεται ότι η πρωτογενής παραγωγή τεμαχίου κατέχει σημαντικό ποσοστό στην κάθε τεχνική. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι λιγότερη ενέργεια για

την παραγωγή ενός τεμαχίου καταναλώνει η τεχνική WAAM και στη συνέχεια οι BJ και PDF. Σε γενικά πλαίσια και οι τρεις αυτές τεχνικές κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα, αντιθέτως με τη συμβατική τεχνική του φρεζαρίσματος όπου η ενέργεια για την παραγωγή ενός τεμαχίου είναι αρκετά υψηλότερη. Λόγω της δυνατότητας κατασκευής βελτιστοποιημένων ως προς το βάρος σχεδίων, η εισροή υλικών και συνεπώς η ενσωματωμένη ενέργεια είναι σημαντικά μικρότερη και αντισταθμίζει την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαδικασία κατασκευής του εξαρτήματος.

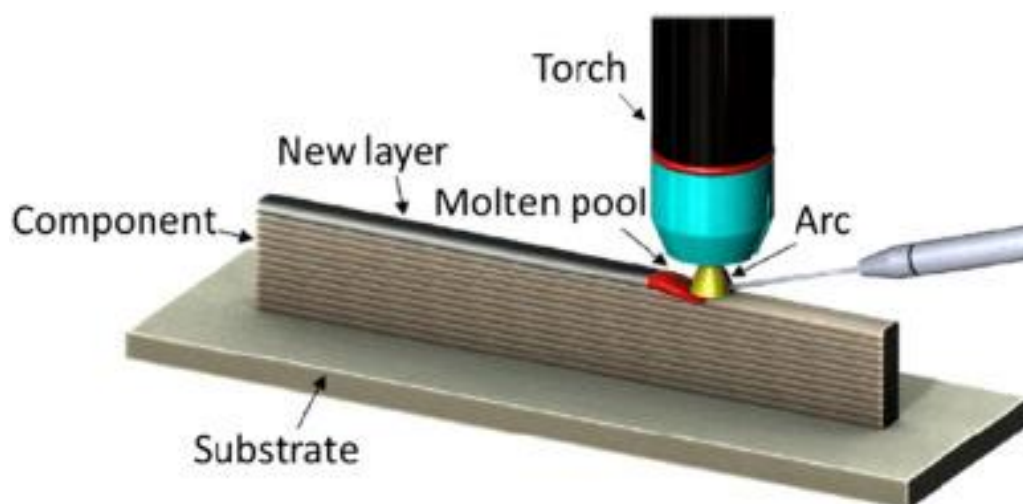
Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκαν όλες οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης και οι εφαρμογές τους. Επίσης αναγνωρίστηκαν ορισμένες από τις βιομηχανίες που έχουν αφομοιώσει τις λειτουργίες αυτές και αποτυπώθηκαν κάποια δεδομένα που αφορούν την ενεργειακή κατανάλωση αυτών. Στο επόμενο κεφάλαιο, αναλύεται πλήρως η τεχνολογία WAAM -Wire Arc Additive Manufacturing- (προσθετική κατασκευή με τεχνικές συγκόλλησης) με σκοπό την κατανόηση του θεωρητικού υπόβαθρου της τεχνικής για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας.

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 3: Προσθετική κατασκευή με τεχνικές συγκόλλησης (WAAM)

3.1 Δομή και λειτουργία WAAM

Η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής με χρήση των τεχνικών συγκόλλησης (WAAM) αποτελεί και αυτή μια μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης όπου η λειτουργία της βασίζεται στο σχεδιασμό αντικειμένων στρώση προς στρώση (στρωματικές δομές). Η τεχνική αυτή ανήκει στην κατηγορία άμεσης εναπόθεσης ενέργειας (Direct Energy Deposition). Η κατασκευή συνήθως πραγματοποιείται με μια μηχανή συγκόλλησης μεταλλικού σύρματος ενσωματωμένη πάνω σε ένα ρομποτικό βραχίονα ή σε κάποιο μηχάνημα CNC. Με αυτόν τον τρόπο το άκρο της μηχανής εναπόθεσης υλικού θα πραγματοποιεί συγκεκριμένη πορεία κατασκευής (εκτύπωσης), αφού η διαδικασία είναι προγραμματισμένη και ελεγχόμενη μέσω G-κώδικα -κώδικας που χρησιμοποιείται με βάση τις συντεταγμένες στο χώρο.



Εικόνα 3.1: Λειτουργία WAAM (Srivastava, et al., 2023).

Η WAAM είναι μια καινοτόμος τεχνολογία μεταλλικής προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί ηλεκτρικό τόξο για την παραγωγή θερμότητας. Χρησιμοποιεί σύρμα από το σύστημα τροφοδοσίας σύρματος το οποίο λιώνει από την πηγή ενέργειας ηλεκτρικού τόξου για τη δημιουργία μιας τρισδιάστατης δομής. Η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω υπολογιστή για να διευκολυνθεί η εναπόθεση μετάλλων με ελεγχόμενο τρόπο. Η δημιουργία τρισδιάστατης δομής γίνεται μέσω εναπόθεσης υλικού στρώμα προς στρώμα, όπως φαίνεται και παραπάνω. Αν και η πρώτη πατέντα που σχετίζεται με την WAAM κατατέθηκε γύρω στο 1925, εντούτοις η χρήση της WAAM ως τεχνικής AM σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς απέκτησε δυναμική κυρίως κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες. (Srivastava, et al., 2023)

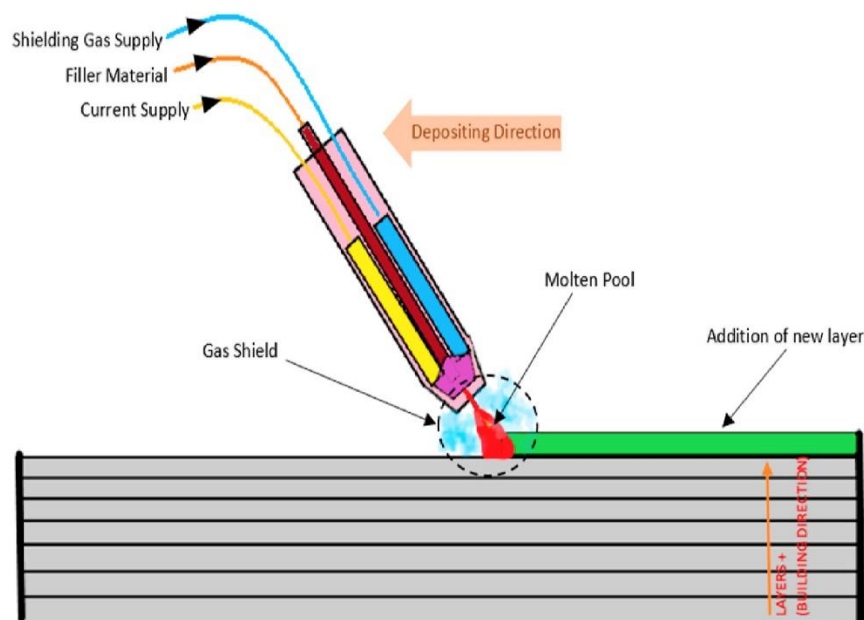
Οι ιδιότητες των υλικών μιας δομής WAAM επηρεάζονται σημαντικά από τη μικροδομή της, η οποία μπορεί να είναι παρόμοια με εκείνη των συγκολλήσεων. Ωστόσο, διαφορετικές στρατηγικές εκτύπωσης (π.χ. παράλληλη διαδρομή ή εναλλασσόμενη κατεύθυνση σάρωσης) μπορεί να οδηγήσουν σε διαφοροποιήσεις στη μικροδομή. Στις τυπικές συγκολλήσεις, οι κόκκοι αναπτύσσονται προς τον κεντρικό άξονα της λίμνης τήγματος, ωστόσο, όταν η κατεύθυνση σάρωσης μεταβάλλεται μεταξύ των στρώσεων κατά τη διάρκεια της κατασκευής, οι κόκκοι μπορούν να αναπτυχθούν πιο όρθιοι.

Τα τελικά αντικείμενα τέτοιου είδους τεχνολογίας εκτύπωσης είναι επιρρεπή σε ατέλειες όπως το πορώδες και αυτές οι ατέλειες μπορεί να λειτουργήσουν ως συγκέντρωση τάσεων και να μειώσουν τη διάρκεια ζωής σε κόπωση της κατασκευής. Αυτό είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη σε περιπτώσεις όπου μπορεί να εμφανιστεί φόρτιση κόπωσης. Διαφορετικοί τύποι πορώδους εντοπίζονται στις κατασκευές WAAM, συμπεριλαμβανομένων ακανόνιστων πόρων (λόγω συρρίκνωσης, έλλειψης σύνδεσης/σύντηξης/ τήξης ή έλλειψης τροφοδοσίας υλικού) και σφαιρικών πόρων (λόγω παγιδευμένου αερίου θωράκισης και εξάτμισης υλικού). Η έλλειψη τήξης είναι συνήθως η πιο επιζήμια για τις ιδιότητες κόπωσης λόγω του επιμήκους σχήματος και των αιχμηρών γωνιών των ατελειών, ενώ ορισμένα κράματα είναι πιο ευαίσθητα σε αυτή τη μορφή ατέλειας από άλλα. Η θέρμανση του υποστρώματος είναι πιθανό να αυξήσει το πορώδες της έλλειψης τήξης και, επομένως, θα πρέπει να αποφεύγεται.

Το πορώδες μπορεί να μειωθεί περισσότερο με τη μείωση της εισροής θερμότητας και με τη μείωση του ρυθμού ροής του προστατευτικού αερίου, η οποία μπορεί επίσης να συμβάλει στη μείωση του κόστους παραγωγής μεγάλων εξαρτημάτων WAAM, καθώς αυτό έχει αναγνωριστεί ως βασικός παράγοντας κόστους. (Evans, et al., 2022)

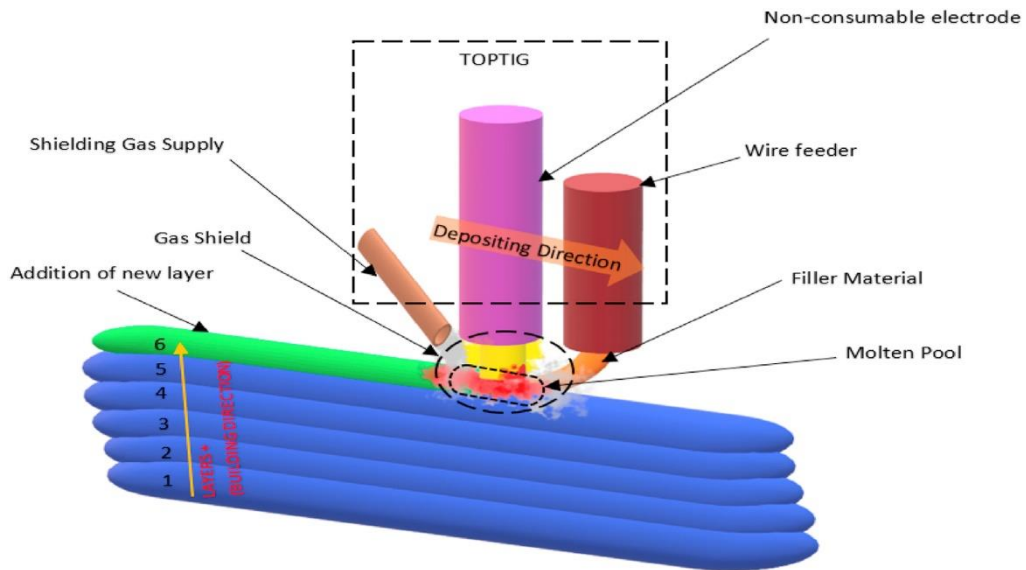
Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τα εξαρτήματα και τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου, υπάρχουν τρεις (3) κατηγορίες που χωρίζεται η WAAM και διαφοροποιούνται με βάση τη μέθοδο συγκόλλησης (ή εναπόθεσης) υλικού:

1. Συγκόλληση τόξου τηκόμενου ηλεκτροδίου και προστασία αερίου (GMAW)



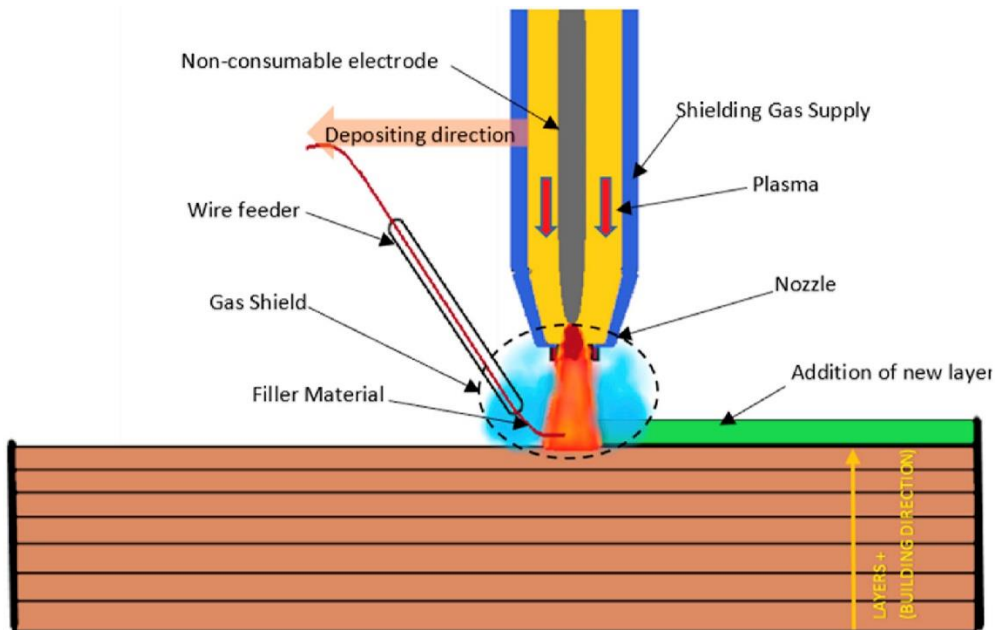
Εικόνα 3.2: Συγκόλληση τόξου τηκόμενου ηλεκτροδίου και προστασία αερίου (GMAW: Gas Metal Arc Welding).

2. Συγκόλληση τόξου ηλεκτροδίου βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW)



Εικόνα 3.3: Συγκόλληση τόξου ηλεκτροδίου βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW: Gas Tungsten Arc Welding).

3. Συγκόλληση τόξου πλάσματος (PAW)



Εικόνα 3.4: Συγκόλληση τόξου πλάσματος (PAW: Plasma Arc Welding).

Η πιο κοινή παράμετρος εργασίας και των τριών μεθόδων εναπόθεσης που απαιτούνται για την WAAM είναι η δημιουργία τόξου και η υψηλή θερμοκρασία τήξης που δημιουργείται. Πιο συγκεκριμένα, η ενεργειακή απόδοση των μεθόδων GMAW και GTAW μπορεί να υπερβαίνει το 90% ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία. (Kumar, et al., 2022)

Σήμερα, η μέθοδος GMAW είναι η πιο διαδεδομένη στη τρισδιάστατη εκτύπωση με τεχνικές συγκόλλησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχει μεγαλύτερα ποσοστά εναπόθεσης, το κόστος εξοπλισμού είναι περιορισμένο, υπάρχει η δυνατότητα συγκόλλησης ευρύτερου φάσματος υλικών και υπάρχει σχεδόν τέλεια ευθυγράμμιση του μεταλλικού σύρματος (σύρματος πλήρωσης υλικού) με το ακροφύσιο, γεγονός που απλοποιεί το προγραμματισμό του συστήματος κίνησης. Στο πλαίσιο της GMAW υπάρχουν διάφορες διεργασίες:

- Συμβατική MIG/MAG (metal inert gas/metal active gas)- (αδρανές ή ενεργό αέριο)
- Παλμική MIG/MAG
- Μεταφορά επιφανειακής τάσης (STT: Surface Tension transfer)
- Μεταφορά ψυχρού μετάλλου (CMT: Cold Metal Transfer)

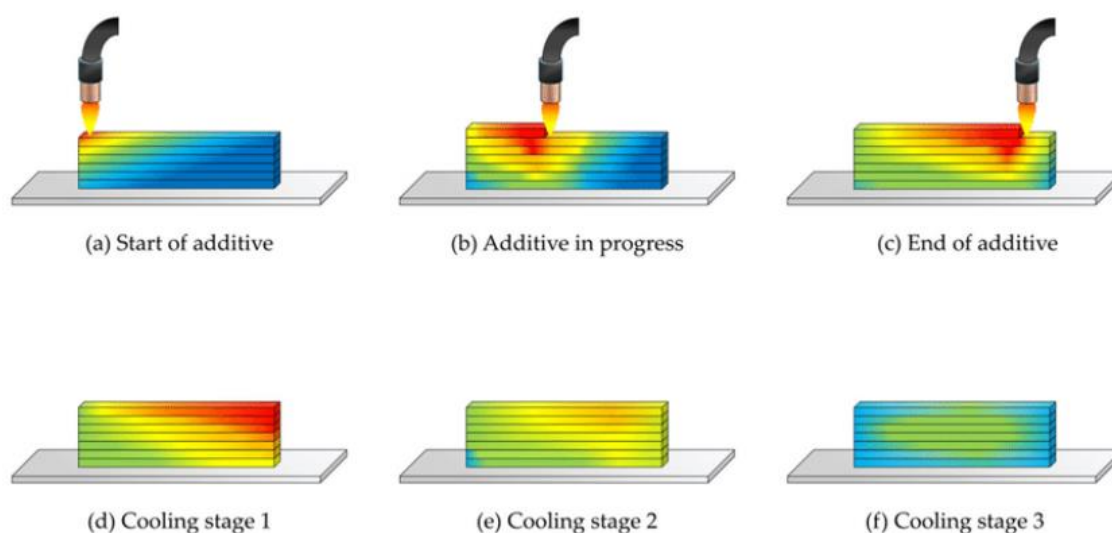
Η CMT χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στην WAAM λόγω της χαμηλής εισροής, της καλύτερης σταθερότητας του τόξου και της εναπόθεσης χωρίς πιτσιλιές (splatters). Είναι μία προηγμένη διεργασία GMAW, που χρησιμοποιεί ελεγχόμενο ρεύμα κυματομορφής για το σχηματισμό μιας σταγόνας και τον έλεγχο της ανάπτυξής της, και ένα συγκεκριμένο μηχανισμό τροφοδοσίας σύρματος για την εναπόθεση μιας μεταλλικής σταγόνας με ελάχιστη θερμότητα, γεγονός που επιτρέπει την παραγωγή εξαρτημάτων με πολύ λεπτότερα τοιχώματα από τη συμβατική διαδικασία GMAW. (Chernovol, et al., 2020)

3.2 Θερμικοί παράγοντες στη μέθοδο WAAM

Η τεχνολογία WAAM -Wire Arc Additive Manufacturing- αποτελεί μια τεχνική μεταλλικής τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι κατά τη διάρκεια της κατασκευής αναπτύσσονται θερμοκρασίες που έχουν άμεση επιρροή με την δομή και λειτουργία του τελικού αντικειμένου.

Τυπικά, η WAAM χρησιμοποιεί εισροές θερμότητας που κυμαίνονται από δεκάδες έως εκατοντάδες J/mm, και η θερμότητα αυτή διαχέεται συνήθως με:

- Αγωγή μέσω των εξαρτημάτων και των υποστρωμάτων
- Εξαναγκασμένη συναγωγή μέσω του αερίου θωράκισης
- Ακτινοβολία προς το περιβάλλον



Εικόνα 3.5: Παράδειγμα θερμικών αλλαγών κατά την κατασκευή (Chen, et al., 2021).

Ωστόσο, η ψύξη μέσω αγωγιμότητας γίνεται δύσκολη όσο αυξάνεται ο αριθμός των στρωμάτων, καθώς η μεγάλη επιφάνεια του υποστρώματος προκαλεί απαγωγή της θερμότητας στα στρώματα που εναποτίθενται πρώτα, μειώνοντας έτσι τη συσσώρευση θερμότητας. Αυτή η μεταφορά θερμότητας στα ήδη εναποτεθειμένα στρώματα είναι μείζονος σημασίας, καθώς επηρεάζει τον ρυθμό ψύξης και τους θερμικούς κύκλους τόσο των προηγουμένως όσο και των τρεχουσών εναποτεθειμένων στρωμάτων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μικροδομικές αλλαγές κατά μήκος του τεμαχίου. Η θερμοκρασία μεταξύ των στρωμάτων θεωρείται μία από τις σημαντικότερες πτυχές

που σχετίζονται με την επιφανειακή κυμάτωση και την κατανομή της θερμοκρασίας των τεμαχίων κατά τη διάρκεια της κατασκευής- ως εκ τούτου, πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά ώστε να αποφεύγεται η ανεπιθύμητη μόλυνση από ξένα στοιχεία που ανήκουν στα προηγουμένως εναποθεθειμένα στρώματα. Ωστόσο, ο έλεγχος της διαδικασίας με βάση τη θερμοκρασία μεταξύ των στρώσεων είναι δύσκολος, καθώς ορισμένοι από τους κατάλληλους χρόνους παραμονής μπορεί να είναι αρκετά μεγάλοι, μειώνοντας την παραγωγικότητα της εναπόθεσης, ή πολύ μικροί, προτρέποντας, για παράδειγμα, τη χρήση πολλαπλών πυρσών συγκόλλησης. (Rodrigues, et al., 2019)

Ένας συνήθης τρόπος αποτροπής της συσσώρευσης θερμότητας είναι η καθιέρωση χρόνων αδράνειας μεταξύ των στρώσεων, δηλαδή, να αφήνεται το τεμάχιο να κρυώσει σε μια "ασφαλή" θερμοκρασία πριν από την εναπόθεση της επόμενης στρώσης. Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι οι χρόνοι αδράνειας που απαιτούνται για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας μεταξύ των στρώσεων μπορεί να είναι σημαντικά υψηλοί σε σύγκριση με τον πραγματικό χρόνο εναπόθεσης, με αποτέλεσμα την απώλεια παραγωγικότητας. Μια προσέγγιση για τη μείωση των χρόνων αδράνειας μεταξύ των στρώσεων είναι η χρήση ενεργών συστημάτων ψύξης για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας προς το περιβάλλον, δηλαδή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. (Hackenhaar, et al., 2020)

3.2.1 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (FEA)

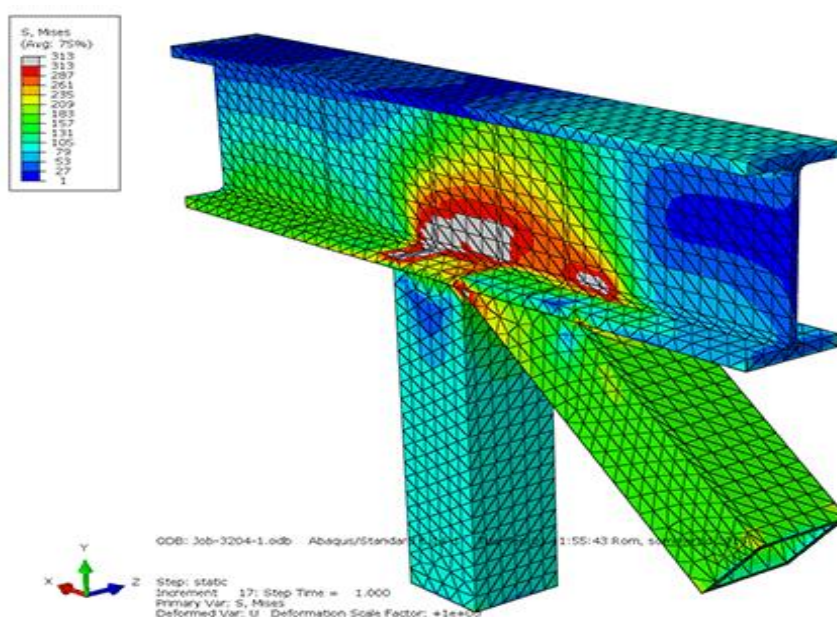
Η Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA) είναι η προσομοίωση οποιουδήποτε φυσικού φαινομένου με τη χρήση της αριθμητικής τεχνικής που ονομάζεται Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM). Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν το λογισμικό FEA για να μειώσουν τον αριθμό των φυσικών πρωτοτύπων και των πειραμάτων και να βελτιστοποιήσουν τα εξαρτήματα στη φάση του σχεδιασμού τους, ώστε να αναπτύξουν καλύτερα προϊόντα ταχύτερα και παράλληλα να εξοικονομήσουν έξοδα.

Είναι απαραίτητη η χρήση μαθηματικών για την ολοκληρωμένη κατανόηση και ποσοτικοποίηση οποιουδήποτε φυσικού φαινομένου, όπως η συμπεριφορά δομικών στοιχείων ή ρευστών, η θερμική μεταφορά, η διάδοση κυμάτων και η ανάπτυξη. Οι περισσότερες από αυτές τις διαδικασίες περιγράφονται με τη χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Αυτές οι μερικές διαφορικές εξισώσεις είναι πολύπλοκες

εξισώσεις που πρέπει να επιλυθούν προκειμένου να υπολογιστούν τα σχετικά μεγέθη μιας κατασκευής (όπως τάσεις, παραμορφώσεις) προκειμένου να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της κατασκευής υπό δεδομένη φόρτιση. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι η FEA δίνει μόνο μια προσεγγιστική λύση του προβλήματος και αποτελεί μια αριθμητική προσέγγιση για να πάρουμε το πραγματικό αποτέλεσμα αυτών των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Χρησιμοποιείται ως βάση για τα σύγχρονα λογισμικά προσομοίωσης και βοηθά τους μηχανικούς να βρουν αδύνατα σημεία και περιοχές έντασης. Τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης που βασίζεται στη μέθοδο FEA απεικονίζονται συνήθως μέσω μιας χρωματικής κλίμακας που δείχνει, για παράδειγμα, την κατανομή της πίεσης πάνω στο αντικείμενο. (SIMSCALE, 2023)

Γενικά μπορούν να γίνουν αναλύσεις για:

- Τάσεις και παραμορφώσεις
- Κινηματική ανάλυση
- Μεταφορά θερμότητας
- Ροή ρευστών
- Μεταφορά μάζας
- Ηλεκτρομαγνητικό υλικό
- Προσομοίωση κοπής



Εικόνα 3.6: Παράδειγμα FEA σε κατασκευή. (KI Consulting Engineers, n.d.)

3.3 Υλικά και εφαρμογές WAAM

Η τρισδιάστατη εκτύπωση με τεχνικές συγκόλλησης έχει πλέον ενταχθεί σε αρκετές βιομηχανίες και καλύπτει ευρέως ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών, λόγω της ταχύτητας παραγωγής σε συνδυασμό με τον μεγάλο ρυθμό εναπόθεσης που κατέχει. Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας σχετικά με τα υλικά και τις αντίστοιχες βιομηχανίες:

Πίνακας 3.1: Μέταλλα με τους τομείς εφαρμογής τους που χρησιμοποιούν την WAAM. (Singh & Khanna, 2021)

Εφαρμογές	Κράματα				
	Ti-based	Al-based	Steel-based	Ni-based	Διμεταλλικά
Αεροδιαστημική			-		
Αυτοκινητοβιομηχανία	-			-	
Ναυτιλία		-		-	-
Αντοχή στη διάβρωση		-	-		
Υψηλές θερμοκρασίες		-	-		
Εργαλεία και καλούπια	-	-		-	-

- Αεροδιαστημικές εφαρμογές



Εικόνα 3.7: Πάνελ αλουμινίου για την κατασκευή ατράκτου αεροπλάνου.

Η γαλλική εταιρεία κατασκευής αεροκατασκευών STELIA Aerospace κατασκεύασε πάνελ αλουμινίου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της ατράκτου ενός αεροπλάνου ([Εικόνα 3.7](#)).

Τα πάνελ είναι προϊόν ενός έργου που ξεκίνησε η STELIA το 2014 σε συνεργασία με τη γαλλική σχολή μηχανικών Centrale Nantes, την εταιρεία συμβούλων μηχανικών CT Ingenierie και την ολλανδική εταιρεία αλουμινίου Constellium. Λόγω της επιτυχίας του έργου, η STELIA αισιοδοξεί ότι η WAAM θα αντικαταστήσει τελικά τα παραδοσιακά μέσα παραγωγής για τα πάνελ της ατράκτου του αεροπλάνου, εξαλείφοντας την ανάγκη για κάποιες περαιτέρω στερεώσεις και συγκολλήσεις. (Jackson, 2017)

- Εφαρμογές στη ναυτιλία



Εικόνα 3.8: Προπέλα κατασκευασμένη με τη μέθοδο WAAM. (Schwaar, 2022).

Επίσης, στην [Εικόνα 3.9](#) απεικονίζεται φτερωτή από ανοξείδωτο χάλυβα που χρησιμοποιείται ως στροβιλοσυμπιεστής για ναυτικούς κινητήρες ντίζελ, όπου κατασκευάστηκε με την τεχνολογία WAAM από την Gefertec.



Εικόνα 3.9: Φτερωτή κατασκευασμένη με τη μέθοδο WAAM. (Schwaar, 2022)



Εικόνα 3.10: Τρισδιάστατα εκτυπωμένος γάντζος WAAM της HUISMAN με ικανότητα ανύψωσης φορτίου έως 80.000 kg. (Singh & Khanna, 2021)

Η Huisman, ένας παγκόσμιος πάροχος και κατασκευαστής βαρέως κατασκευαστικού εξοπλισμού με έδρα την Ολλανδία, ανακοίνωσε την πρώτη επιτυχή δοκιμή φορτίου ενός τρισδιάστατα εκτυπωμένου γάντζου γερανού ([Εικόνα 3.10](#)). Για χρήση σε υπεράκτιες εργασίες ανύψωσης, ο γάντζος, ο οποίος ζυγίζει περίπου 1.000 kg, κατασκευάστηκε με τη χρήση WAAM. Σύμφωνα με την Huisman, η τεχνική είναι ανταγωνιστική σε σχέση με τα παραδοσιακά χαλύβδινα σφυρηλατημένα και χυτά κομμάτια και η εταιρεία σκοπεύει να διερευνήσει τις δυνατότητές της για άλλα πολύπλοκα, εμπορικά ανέφικτα εξαρτήματα.

Ο τρισδιάστατα εκτυπωμένος γάντζος γερανού της Huisman είναι κατασκευασμένος από χάλυβα υψηλής ποιότητας εφελκυσμού. Σε μια δοκιμή φορτίου, ο γάντζος απέδειξε ότι είναι ικανός να μεταφέρει έως και 80 μετρικούς τόνους, που ισοδυναμούν με 80.000 κιλά, και πέρασε όλους τους αυστηρούς ποιοτικούς ελέγχους της Huisman. Η WAAM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γάντζους γεραμών, αλλά επιτρέπει επίσης στην εταιρία να κατασκευάζει και άλλα εξαρτήματα με πολύπλοκα σχήματα, με μειωμένο χρόνο παράδοσης και ένα πιο σταθερό επίπεδο ποιότητας. (JACKSON, 2018)

- **Εφαρμογές στις κατασκευές**



Εικόνα 3.11: Γέφυρα στην Ολλανδία κατασκευασμένη με τη μέθοδο WAAM από την εταιρία MX3D (Schwaar, 2022).

Η γέφυρα 12 μέτρων, η οποία κατασκευάστηκε από ράβδους ανοξείδωτου χάλυβα από ρομποτικούς βραχίονες έξι αξόνων εξοπλισμένους με εξοπλισμό συγκόλλησης, ονομάστηκε MX3D Bridge και σχεδιάστηκε από το ολλανδικό στούντιο Joris Laarman Lab σε συνεργασία με την MX3D. Χρησιμοποιήθηκαν 4.500 κιλά ανοξείδωτου χάλυβα, ο οποίος εκτυπώθηκε τρισδιάστατα από ρομποτικούς βραχίονες σε ένα εργοστάσιο σε διάστημα έξι μηνών, προτού τοποθετηθεί με γερανό στη θέση του πάνω από το κανάλι. Η καμπυλωτή του μορφή σε σχήμα S και τα κάγκελα με τις διατρήσεις τύπου πλέγματος σχεδιάστηκαν με τη χρήση λογισμικού παραμετρικής μοντελοποίησης. Η ομάδα ισχυρίστηκε ότι η τεχνική αυτή έδειξε πώς η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματικές κατασκευές που χρησιμοποιούν λιγότερα υλικά. Αυτό προκαλεί σημαντική μείωση του βάρους και μειωμένο αντίκτυπο για εξαρτήματα που κατασκευάζονται στις βιομηχανίες εργαλείων, πετρελαίου και φυσικού αερίου και κατασκευών. Επίσης, το Ινστιτούτο Alan Turing και η Arup εφοδίασαν την κατασκευή με ένα δίκτυο αισθητήρων που επιτρέπει στη γέφυρα να συλλέγει δεδομένα και να δημιουργεί έναν ψηφιακό δίδυμο για να παρακολουθεί την απόδοση και την υγεία της. Ο ψηφιακός δίδυμος θα παρακολουθεί τη διάβρωση, τις μεταβολές του φορτίου, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη χρήση από τους πεζούς, σε μια προσπάθεια να προωθηθεί ο σχεδιασμός με

επίκεντρο τα δεδομένα. Η γέφυρα έχει υποστεί πολλαπλές αλλαγές από τότε που ξεκίνησε το έργο το 2015, ενώ τα εγκαίνια είχαν αρχικά προγραμματιστεί για το 2017. Το αρχικό σχέδιο προέβλεπε την εκτύπωση της δομής κατά μήκος του καναλιού επί τόπου, με ρομπότ να εργάζονται και από τις δύο όχθες και να συγκολλούν τη γέφυρα από κάτω τους μέχρι να συναντηθούν στη μέση. Στην τελική δημιουργία, η γέφυρα κατασκευάστηκε σε δύο μέρη σε εγκαταστάσεις εκτός του εργοταξίου. Το μεγαλύτερο μέρος της ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 2018, ενώ το κατάστρωμα εκτυπώθηκε τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Τέλος, η δομή ενισχύθηκε για να είναι περισσότερο σύμφωνη με τους κανονισμούς του συμβουλίου και για να προστατεύεται από τυχόν συγκρούσεις σκαφών. (Parkes, 2021)

Ακόμη ένα παράδειγμα εκτυπωμένης κατασκευής στο χώρο:



Εικόνα 3.12: Βελτιστοποιημένη κατασκευή μέσω τοπολογίας με τη μέθοδο WAAM από την εταιρία MX3D (Schwaar, 2022).

- Γενικές εφαρμογές

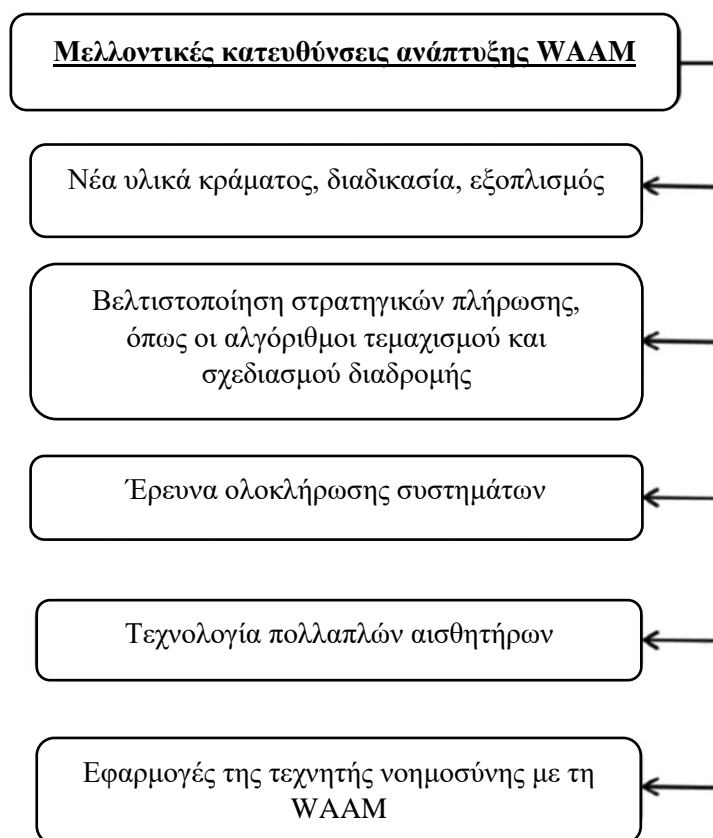


Εικόνα 3.13: Ποδήλατο κατασκευασμένο με τη μέθοδο WAAM.

Ακόμη μια κατασκευή της εταιρίας MX3D, με έδρα το Άμστερνταμ όπου, χρησιμοποίησε την προσθετική κατασκευή τόξου σύρματος (WAAM) με ρομποτικό βραχίονα και εξειδικευμένο λογισμικό για τη δημιουργία του Arc Bike II ([Εικόνα 3.13](#)). Το Arc II χρησιμοποιεί αλουμίνιο για τον σκελετό του για εξοικονόμηση βάρους. Ωστόσο, το πλήρες ποδήλατο ζυγίζει στα 29,7 κιλά - σε σύγκριση με τον μέσο όρο των 17 κιλών για τα ποδήλατα δρόμου και των 21-29 κιλών για τα ποδήλατα βουνού - λόγω της ακόμα αναπτυσσόμενης τεχνολογίας της εταιρείας. Το ποδήλατο από αλουμίνιο είναι ένα από τα παραδείγματα της MX3D για το πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό WAAM για ευέλικτη εκτύπωση κατά παραγγελία. (LIGHT METAL AGE, 2019)

3.4 Χαρακτηριστικά και μελλοντική ανασκόπηση τεχνικής WAAM

Γενικά, η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες παρόμοιες και βρίσκεται ακόμα σε αρχικά στάδια υλοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι οι θεωρητικές και πειραματικές έρευνες πάνω στη τεχνική ολοένα και αυξάνονται με αποτέλεσμα να διευρύνεται το πεδίο εφαρμογών της και συνεχώς να εξελίσσεται. Στην [Εικόνα 3.14](#) γίνεται μια μελλοντική ανασκόπηση της συγκεκριμένης τεχνικής:



Εικόνα 3.14: Μελλοντική ανασκόπηση WAAM. (Rosli, et al., 2021)

Για να ωριμάσει και να ενταχθεί πλήρως η τεχνική WAAM για ποικίλες βιομηχανικές εφαρμογές, υπάρχει ανάγκη για έρευνα και ανάπτυξη σε ορισμένους τομείς και ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν με θετικό τρόπο:

- Για την πρόβλεψη ελαττωμάτων και την ακριβέστερη ανάλυση, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) έχει αποδειχθεί χρήσιμη, οπότε η περαιτέρω ενσωμάτωσή της θα καταστήσει την WAAM πιο ισχυρή μέθοδο.
- Οι μέθοδοι εισαγωγής χαμηλής θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καταστεί δυνατή η εναπόθεση σταγονιδίων μικρού μεγέθους με μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση καταναγκαστικής συστολής (CC-WAAM) για τη ρύθμιση της κίνησης και της συμπεριφοράς του τόξου. Πρόκειται για μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για την απόκτηση στρωμάτων με ομοιογενώς κατανεμημένη μικροδομή, καθώς δεν σχηματίζεται όριο μεταξύ αυτών.
- Επεξεργαστικές μελέτες για το χρόνο κατασκευής τελικών εξαρτημάτων μεγάλης κλίμακας και για τη βελτίωση των μεταλλουργικών ιδιοτήτων τους.
- Μπορεί επίσης να γίνει και να ερευνηθεί η κατασκευή λειτουργικά διαβαθμισμένων εξαρτημάτων με τη χρήση νεοαναπτυχθέντων συρμάτων από κράματα, μικτών συρμάτων από κράματα ή συρμάτων με επίστρωση σκόνης.
- Θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά ένα σύστημα για την ενσωμάτωση διαφόρων πτυχών στο λογισμικό WAAM με τη βοήθεια υπολογιστή, όπως ο σχεδιασμός διαδρομής, η στρατηγική κατασκευής, ο έλεγχος τάσεων και παραμορφώσεων, η επιγραμμική παρακολούθηση της διαδικασίας και ο μη καταστροφικός έλεγχος, ώστε να κατασκευάζονται με επιτυχία εξαρτήματα χωρίς ελαττώματα. (Singh & Khanna, 2021)

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 4: Μηχανικές ιδιότητες και δοκιμές

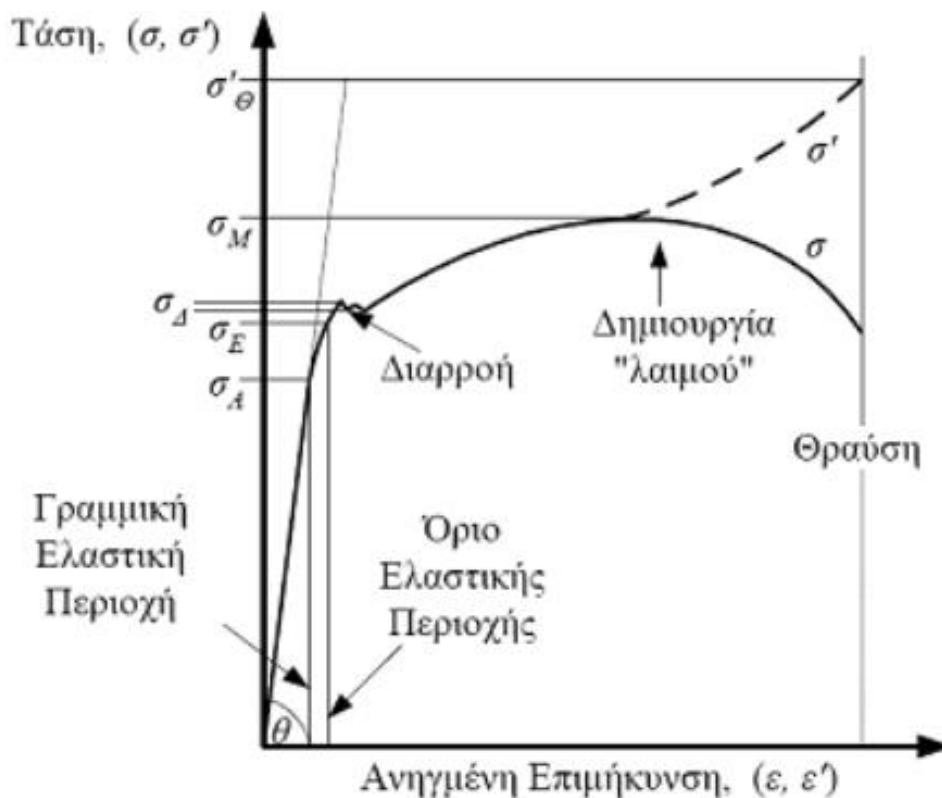
4.1 Εισαγωγή

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού είναι οι ικανότητες να αντιμετωπίζει ένα εύρος εφαρμοζόμενων εξωτερικών δυνάμεων, όπως τάσεις, φορτία, καιρικές συνθήκες και χρόνος. Οι μηχανικοί μπορούν να μετρήσουν την ικανότητα του υλικού να αντιστέκεται σε αυτού του είδους τις παραμορφώσεις υπό ένα δεδομένο σύνολο συνθηκών. Αφού καθοριστούν, αυτές οι μηχανικές ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαπιστωθεί αν το υλικό μπορεί να αντέξει ξαφνικές τάσεις και φορτία, καθώς και η καταλληλότητα του για συγκεκριμένες εργασίες. (Technoweld, 2019)

4.2 Εφελκυσμός

Υπάρχουν αρκετά είδη δυνάμεων ή τάσεων που σχετίζονται με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Γενικά ως **τάση (σ)** ορίζεται η δύναμη που ασκείται ανά μονάδα επιφάνειας, στην οποία επιβάλλεται η δύναμη και συνήθως εκφράζεται σε Pa (N/m^2) ή psi (pounds/in²), ενώ ως **παραμόρφωση** ορίζεται η αλλαγή μιας διάστασης ανά μονάδα μήκους. Η παραμόρφωση χωρίζεται σε ελαστική (είναι πλήρως αναστρέψιμη) και πλαστική (μόνιμη παραμόρφωση). (ASKELAND & WRIGHT, 2020)

Η **δοκιμή εφελκυσμού** (tension test) είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών όπως η αντοχή, η ολκιμότητα, η δυσθραυστότητα, το μέτρο ελαστικότητας και η ικανότητα κράτυνσης. Η δοκιμή απαιτεί τη προετοιμασία κατάλληλου δοκιμίου (test specimen). Τα περισσότερα δοκίμια εφελκυσμού είναι συμπαγή και κυλινδρικά, αλλά μπορούν επίσης να είναι επίπεδες λωρίδες (πλακώδη) ή σωληνωτά, κατά κανόνα σύμφωνα με τις προδιαγραφές κατά ASTM. (Kalpakjian & Schmid, 2021)



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. (M-K Έλεγχος & Αξιολόγηση Κατασκευών, χ.χ.)

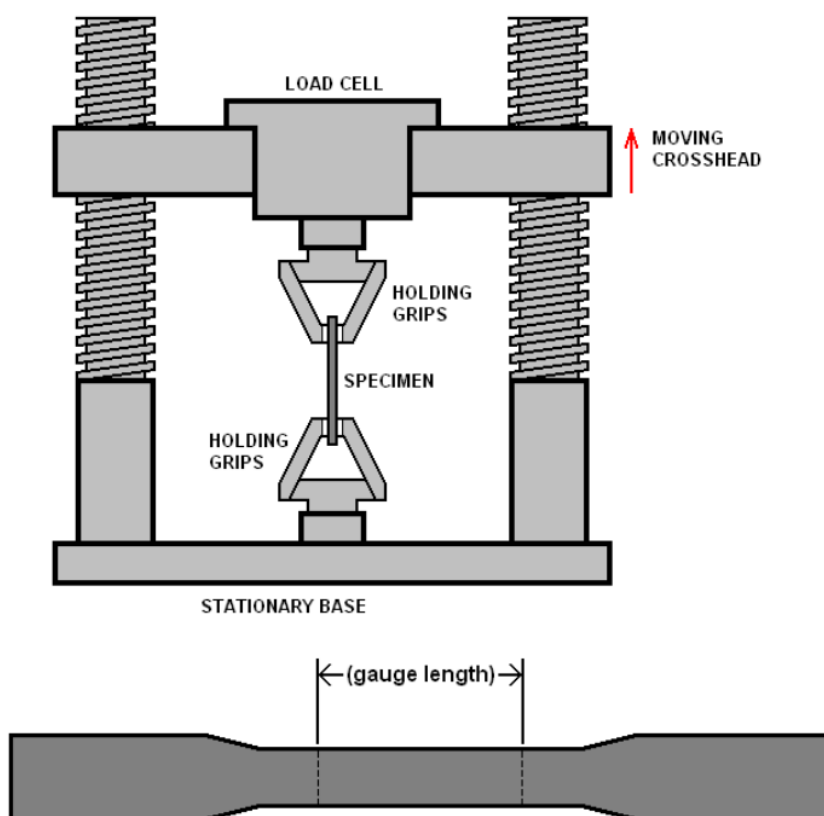
Ο γραμμικός νόμος που ισχύει μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης σε ένα ελαστικό στερεό (ελαστική περιοχή), είναι γνωστός ως νόμος του Hooke και ισχύει ότι:

- $\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon}$, όπου \mathbf{E} : το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young. (Kalpakjian & Schmid, 2021)

Αν κατά τη διάρκεια της αρχικής φάσης της φόρτισης, όπου το υλικό εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά, αποσυρθεί η δύναμη, τότε το δοκίμιο επιστρέφει στις κανονικές του διαστάσεις. Ωστόσο, τα περισσότερα μεταλλικά υλικά όταν εφελκυσθούν πάνω από περίπου 0,1% παραμόρφωση, εμφανίζουν αντιστρεπτές μεταβολές στο σχήμα και μέγεθος τους, που είναι γνωστές ως **πλαστικές παραμορφώσεις**. Μετά το στάδιο της ελαστικής παραμόρφωσης, το δοκίμιο παραμορφώνεται πλαστικά, αυξάνοντας το μήκος του και μειώνοντας το πλάτος του. Μετά το πέρασμα από το μέγιστο φορτίο, εμφανίζεται τοπική ελάττωση της διατομής (λαιμός) και οδηγεί το υλικό σε θραύση.

Παρουσιάζονται ορισμένα μεγέθη όπως:

- **σ_A : όριο αναλογίας.** Είναι η τάση μέχρι την οποία το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά και γραμμικά.
- **σ_E : όριο ελαστικότητας.** Είναι η τιμή της τάσης μέχρι την οποία το υλικό συνεχίζει να συμπεριφέρεται ελαστικά αλλά όχι και γραμμικά.
- **σ_D : όριο διαρροής.** Είναι η τάση πάνω από την οποία εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση.
- **σ_M : μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό.** Είναι η μέγιστη τάση στο διάγραμμα πάνω από την οποία εμφανίζεται λαιμός.
- **ϵ : παραμόρφωση θραύσης.** Είναι η παραμόρφωση που παρουσιάζεται μετά τη θραύση του υλικού. (ΧΡΥΣΟΥΛΑΚΗΣ & ΠΑΝΤΕΛΗΣ, 2008)

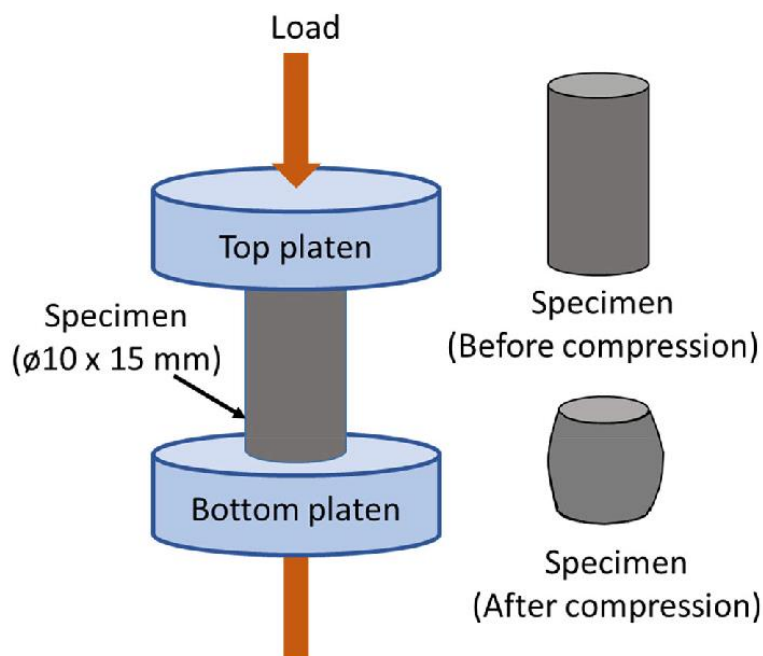


Εικόνα 4.2: Δοκιμή εφελκυσμού και δοκίμιο. (ENGINEERING ARCHIVES, 2012)

4.3 Θλίψη

Η **δοκιμή θλίψης** (compression test), κατά την οποία το δοκίμιο υποβάλλεται σε θλιπτικό φορτίο, δίνει πληροφορία η οποία βοηθά στην εκτίμηση των δυνάμεων και των απαιτήσεων ισχύος για αρκετές λειτουργίες. Η δοκιμή διεξάγεται συνήθως συμπιέζοντας ένα συμπαγές κυλινδρικό δοκίμιο ανάμεσα σε δύο επίπεδες πλάκες που έχουν λιπανθεί καλά. Λόγω της τριβής που αναπτύσσεται ανάμεσα στο δοκίμιο και τις πλάκες, η κυλινδρική επιφάνεια του δοκιμίου «φουσκώνει», φαινόμενο γνωστό ως βαρελοποίηση (barreling). (Kalpakjian & Schmid, 2021).

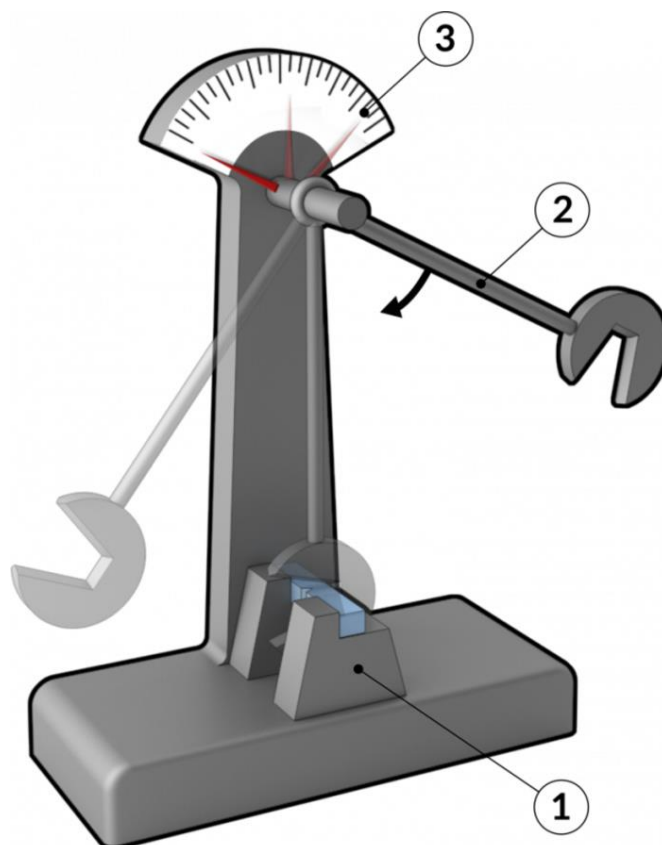
Εάν ένα δοκίμιο υποστεί δοκιμή θλίψης, η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης είναι ίδια με εκείνη του εφελκυσμού μόνο για μικρές παραμορφώσεις, ενώ για μεγαλύτερες οι δύο καμπύλες αποκλίνουν. Αν ο λόγος του ύψους προς τη διατομή του δοκιμίου είναι μικρότερος του 3 ($h/d < 3$), η θλίψη δεν οδηγεί στη θραύση του δοκιμίου, αλλά σε αύξηση της διατομής του, (θεωρητικά απεριόριστα). Όταν $h/d > 3$, δεν πρόκειται για θλίψη αλλά για λυγισμό. (ΧΡΥΣΟΥΛΑΚΗΣ & ΠΑΝΤΕΛΗΣ, 2008)



Εικόνα 4.3: Παράδειγμα δοκιμής θλίψης. (Sivasankaran & Fahad, 2020)

4.4 Κρούση

Σε αρκετές περιπτώσεις τα υλικά υποβάλλονται σε κρούση ή δυναμική φόρτωση (impact, dynamic loading). Μια τυπική δοκιμή κρούσης για τον καθορισμό των ιδιοτήτων κρούσης υλικών συνίσταται στην θέρμανση ενός χαραγμένου (με εγκοπές) δοκιμίου σε μια διάταξη δοκιμής κρούσης και το σπάσιμο του δοκιμίου με ένα εκκρεμές. Στη δοκιμή Charpy το δοκίμιο στηρίζεται και στα δύο άκρα, ενώ στη δοκιμή Izod στηρίζεται στο ένα άκρο (παρόμοια με πρόβολο). Από την κίνηση του εκκρεμούς, μπορεί να υπολογιστεί η ενέργεια που καταναλώνεται κατά το σπάσιμο του δοκιμίου. Αυτή η ενέργεια αντιπροσωπεύει τη **δυσθραυστότητα σε κρούση** (impact toughness) του υλικού. (Kalpakjian & Schmid, 2021)

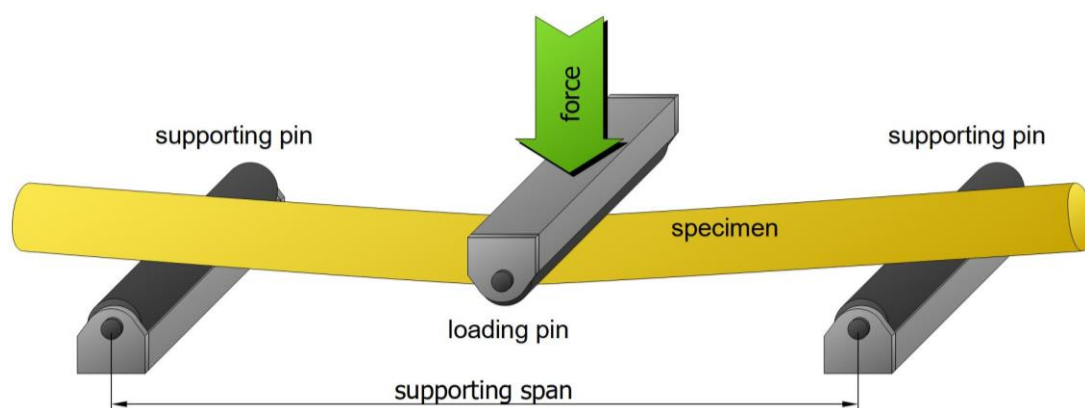


Εικόνα 4.4: Δοκιμή κρούσης κατά Charpy. (MANUFACTURINGGUIDE, n.d.)

4.5 Κάμψη

Σε πολλά ψαθυρά υλικά δεν μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα η συνήθης δοκιμή εφελκυσμού, εξαιτίας της παρουσίας επιφανειακών ελαττωμάτων δομής, τα οποία συχνά μπορούν να προκαλέσουν ρωγμάτωση ακόμη και κατά την απλή τοποθέτηση ενός δοκιμίου ψαθυρού υλικού στις λαβές μιας μηχανής εφελκυσμού. Τέτοια υλικά μπορούν να υποβληθούν σε **δοκιμή κάμψης** (bend test). Το φορτίο ασκείται στο μέσον του δοκιμίου και στα δύο σημεία στήριξης αναπτύσσονται αντιστάσεις ίσες προς το ήμισυ της φόρτισης. Με τον τρόπο αυτό προκαλείται κάμψη, αναπτύσσονται εφελκυστικές δυνάμεις στο κέντρο της αντίθετης (προς τη φόρτιση) πλευράς του δοκιμίου και η θραύση ξεκινά στο σημείο αυτό. Η αντοχή σε κάμψη (flexural strength) ή μέτρο διάρρηξης (modulus of rupture), περιγράφει την αντοχή του υλικού: (ASKELAND & WRIGHT, 2020)

- Αντοχή σε κάμψη για έλεγχο κάμψης τριών σημείων $\sigma_{\text{κάμψη}} = \frac{3FL}{2wh^2}$,
 - F: φορτίο θραύσης
 - L: απόσταση σημείων στήριξης
 - W: πλάτος δοκιμίου
 - h: ύψος δοκιμίου



Εικόνα 4.5: Δοκιμή κάμψης. (tec-science, 2018)

4.6 Στρέψη

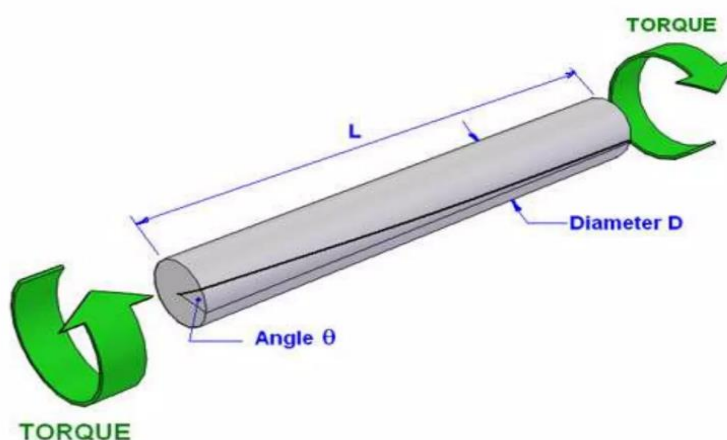
Η μέθοδος που χρησιμοποιείται γενικά για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών σε διάτμηση είναι η **δοκιμή στρέψης** (torsion test). Η δοκιμή αυτή εκτελείται συνήθως σε ένα λεπτό, σωληνοειδές δοκίμιο προκειμένου να επιτευχθεί προσεγγιστικά ομοιόμορφη κατανομή τάσης και παραμόρφωσης κατά μήκος της διατομής του. Το χρησιμοποιούμενο δοκίμιο έχει συνήθως μειωμένη διατομή, έτσι ώστε η παραμόρφωση να περιορίζεται σε μια στενή ζώνη. Η διατμητική τάση (shear stress), τ , μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο: $\tau = \frac{T}{2\pi tr^2}$, όπου: (Kalpakjian & Schmid, 2021)

- T: εφαρμοζόμενη ροπή στρέψης
- r: μέση ακτίνα του σωλήνα
- t: πάχος σωλήνα στο στενό τμήμα του

Επίσης η διατμητική παραμόρφωση (shear strain), γ , υπολογίζεται:

- $\gamma = \frac{r\phi}{l}$, όπου:
 - l: μήκος σωληνοειδούς τμήματος
 - ϕ : γωνία συστροφής σε ακτίνια

Ο λόγος της διατμητικής τάσης προς τη διατμητική παραμόρφωση στην ελαστική περιοχή αναφέρεται ως μέτρο διάτμησης (shear modulus) G. Το μέτρο διάτμησης συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας E ως: $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$



Εικόνα 4.6: Δοκιμή στρέψης. (Barry, 2012)

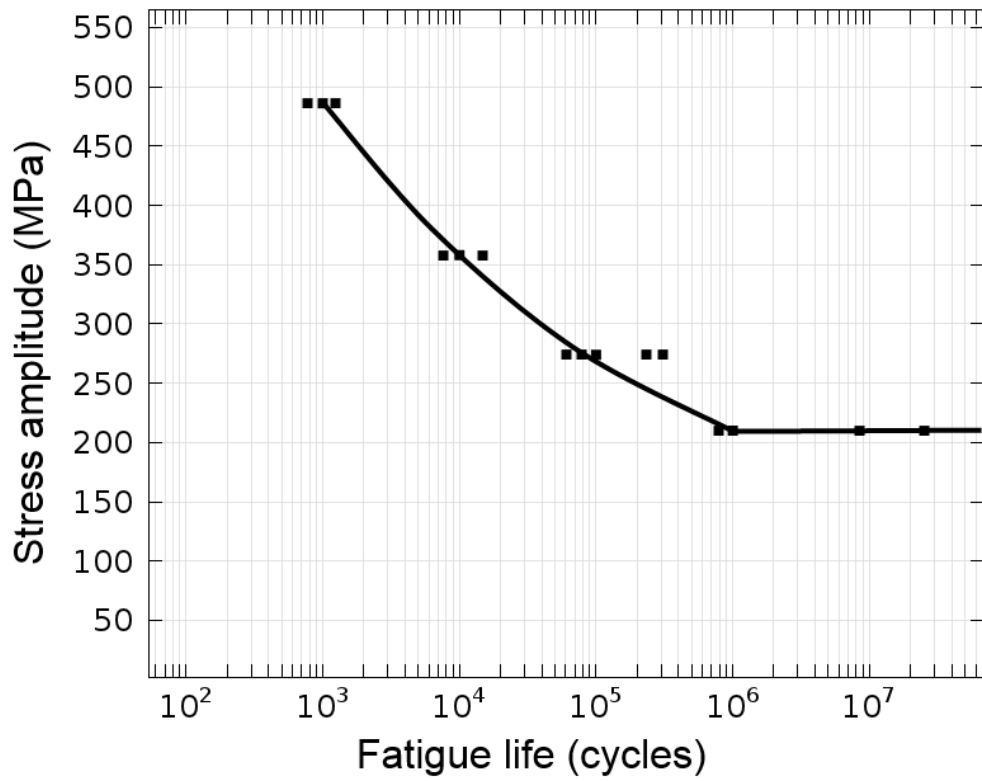
4.7 Κόπωση

Πολλά εξαρτήματα υποβάλλονται σε ταχέως μεταβαλλόμενα (κυκλικά ή περιοδικά φορτία), επιπρόσθετα με τυχόν στατικά φορτία. Κυκλικές τάσεις-καταπονήσεις (cyclic stresses) μπορούν να προκληθούν από κυμαινόμενα μηχανικά φορτία σε περιπτώσεις όπως:

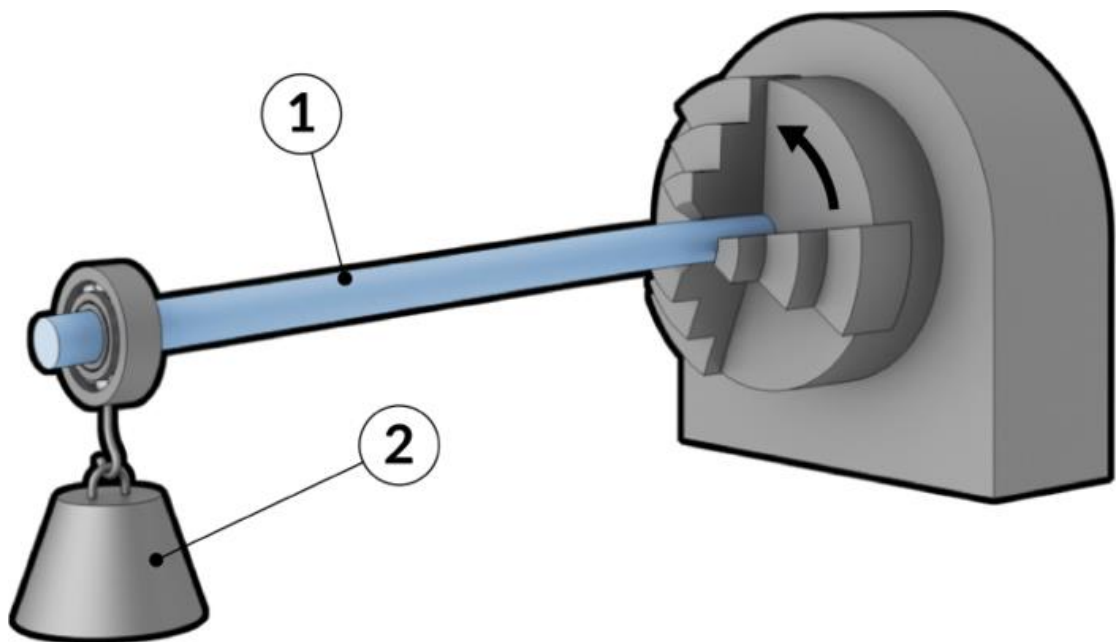
- Οδοντώσεις τροχών ή παλινδρομικούς μηχανισμούς κίνησης
- Περιστρεφόμενα στοιχεία μηχανών υπό σταθερές καμπτικές τάσεις (συνήθως σε άξονες)
- Θερμικές τάσεις

Υπό αυτές τις συνθήκες το εξάρτημα αστοχεί σε στάθμες καταπόνησης χαμηλότερες από αυτή στην οποία θα αστοχούσε υπό στατικό φορτίο. Η εξέταση τέτοιων αστοχιών καταδεικνύει ότι αυτές σχετίζονται με ρωγμές που αναπτύσσονται με κάθε κύκλο καταπόνησης και διαδίδονται μέσω του υλικού μέχρι ένα κρίσιμο μήκος ρωγμής, στο οποίο το υλικό υφίσταται θραύση. Γνωστό ως αστοχία λόγω κόπωσης (fatigue failure), το φαινόμενο αυτό είναι υπεύθυνο για την πλειονότητα των αστοχιών σε μηχανικά εξαρτήματα.

Οι μέθοδοι δοκιμών κόπωσης συνίσταται στον έλεγχο δοκιμών υπό διάφορες εντατικές καταστάσεις, συνήθως με ένα συνδυασμό εφελκυσμού και κάμψης. Η δοκιμή διεξάγεται σε διάφορα πλάτη τάσης (S) και καταγράφεται το πλήθος των κύκλων (N) έως την ολική αστοχία του δοκιμίου. Τυπικές γραφικές παραστάσεις, γνωστές ως καμπύλες S-N απεικονίζονται για τη κατανόηση των αποτελεσμάτων. Δοκιμές τέτοιου τύπου μπορούν επίσης να εκτελούνται σε ένα περιστρεφόμενο άξονα, με κάμψη τεσσάρων σημείων. (Kalpakjian & Schmid, 2021)



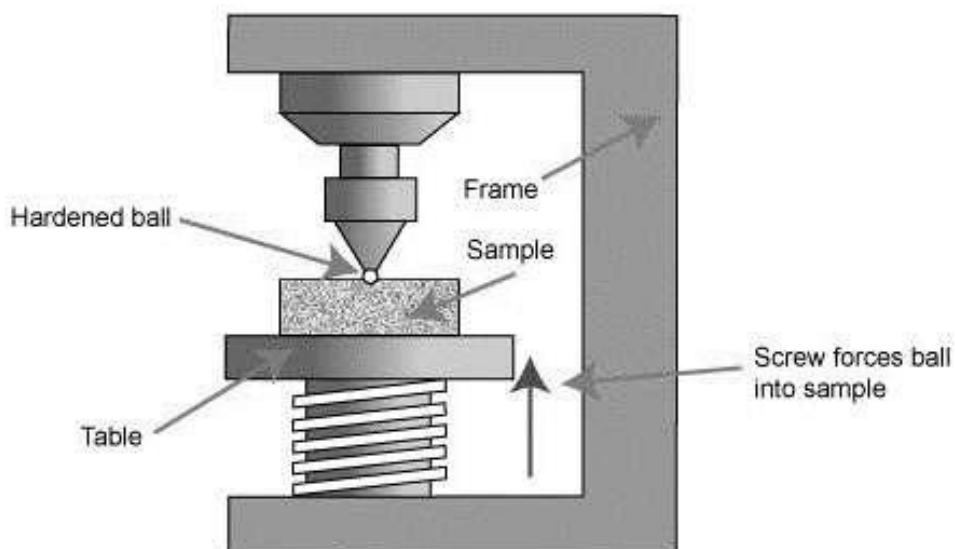
Εικόνα 4.7: Παράδειγμα διαγράμματος S-N. (Stec, 2014)



Εικόνα 4.8: Δοκιμή κόπωσης σε περιστρεφόμενο άξονα. (MANUFACTURINGGUIDE, χ.χ.)

4.8 Σκληρότητα

Με τη δοκιμή της **σκληρότητας ή σκληρομέτρηση** (hardness test) μετρούμε την αντίσταση της επιφάνειας ενός υλικού στη διείσδυση ενός σκληρού αντικειμένου. Η σκληρότητα ως όρος δεν καθορίζεται ακριβώς. Ανάλογα με τα συμφραζόμενα, μπορεί να εκφραστεί σε εκδορά (scratching) ή σε χάραξη (indentation) και αποτελεί ένα ποιοτικό μέτρο αντοχής του υλικού. Εν γένει, σε μετρήσεις μακροσκληροτητας (macrohardness) το επιβαλλόμενο φορτίο είναι 2N. Έχει αναπτυχθεί μια ποικιλία δοκιμών μέτρησης της σκληρότητας, αλλά αυτές που έχουν ευρύτερη εφαρμογή σε μεταλλικά υλικά είναι οι δοκιμές Rockwell και Brinell. (ASKELAND & WRIGHT, 2020)



Εικόνα 4.9: Σκληρομέτρηση. (Gyurko & Nemes, 2018)

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 5: Πειραματική διαδικασία

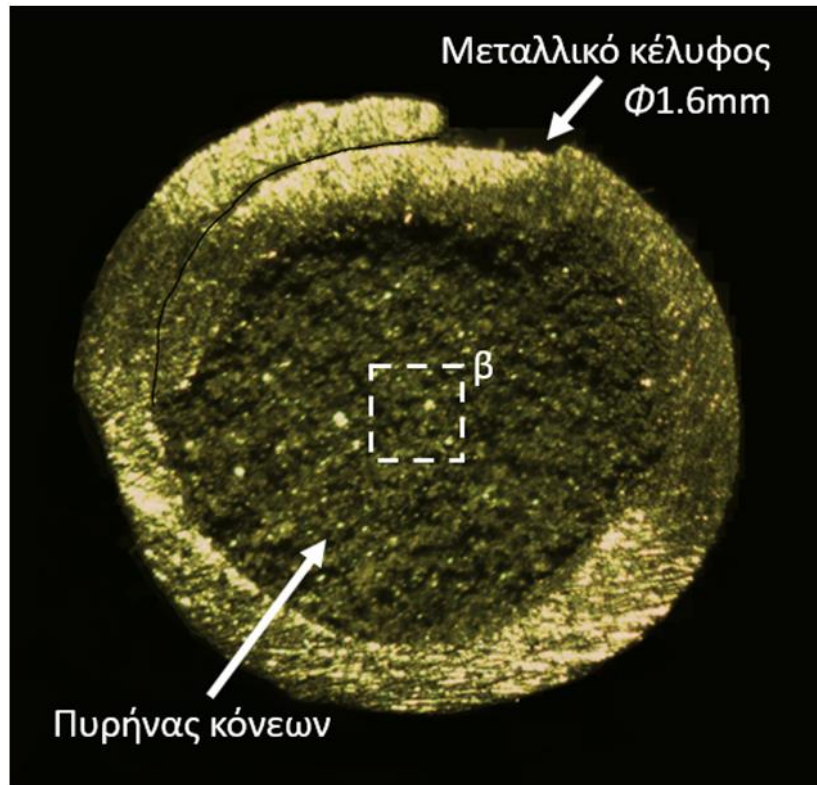
5.1 Σκοπός διαδικασίας και χαρακτηριστικά σύρματος εναπόθεσης

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η κατασκευή αντικειμένου (τρισδιάστατη εκτύπωση), με τη χρήση τεχνικών συγκόλλησης (WAAM). Στο τελικό προϊόν που κατασκευάστηκε, μετά από κάποια μετεπεξεργασία, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και μετρήσεις με σκοπό την ανάλυση των μηχανικών του ιδιοτήτων. Παράλληλα καταγράφηκαν οι θερμοκρασίες κατά την διάρκεια της κατασκευής με σκοπό την ανάλυση και τη σύγκριση με τις θεωρητικές.

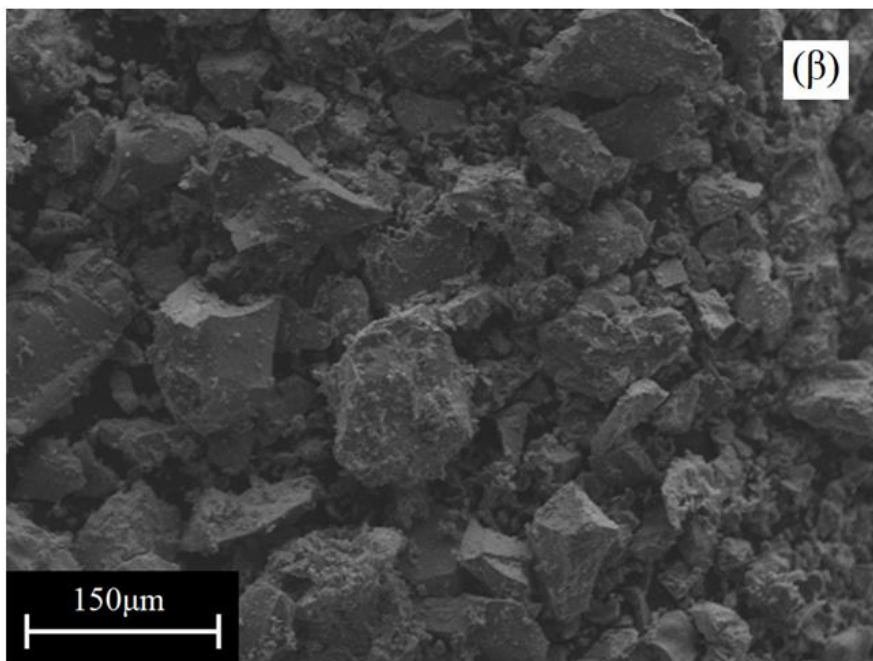
Το σύρμα εναπόθεσης που χρησιμοποιήθηκε **TeroMatec OA 4923** περιέχει μια λεπτή διασπορά εξαιρετικά σκληρών καρβιδίων τιτανίου σε μια σκληρή, μαρτενιτική μήτρα, παρέχοντας εξαιρετική αντοχή στη συνδυασμένη φθορά από τριβή, κρούση και πίεση. Αυτό το παραγεμιστό σύρμα (μεταλλικός σωλήνας που στον πυρήνα του περιέχει σκόνη συλλιπάσματος -flux-) κράματος είναι ειδικό για συγκολλήσεις συντήρησης και επισκευής στο χώρο του εργοταξίου χοντρών, βαρέων εξαρτημάτων όπου η ταχύτερη εναπόθεση συγκόλλησης και οι ρυθμοί συγκόλλησης είναι επιθυμητοί. Επιπλέον, το **OA 4923** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χειροκίνητες ή πλήρως αυτόματες εργασίες σκλήρυνσης. (Eutectic, n.d.). Στον [Πίνακα 5.1](#) παρουσιάζεται η χημική σύσταση του σύρματος.

Πίνακας 5.1: Χημική σύσταση σύρματος (wt%)

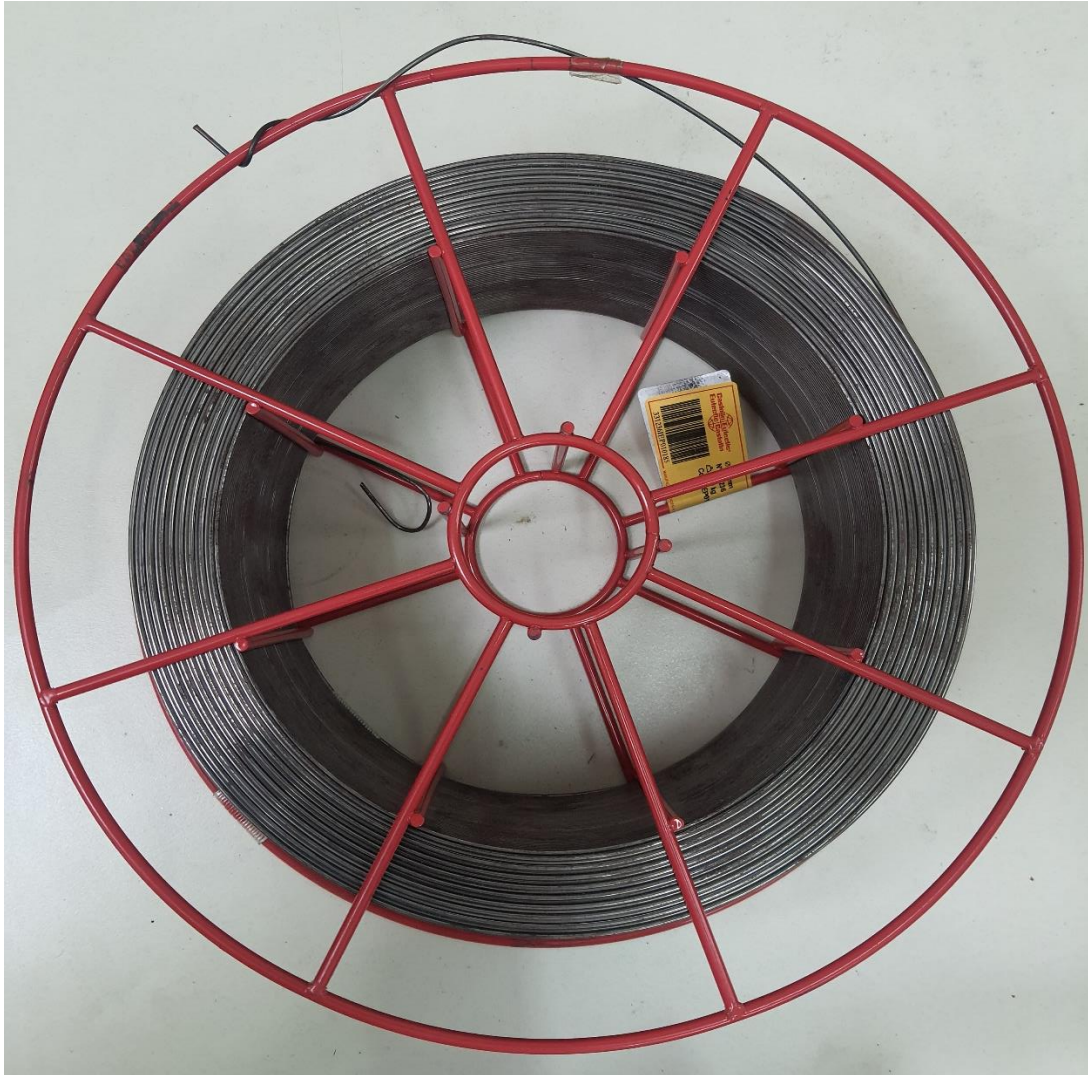
Υλικό	C	Cr	Mo	Ti
OA 4923	1.9	6.5	1.5	5.5



Εικόνα 5.1: Δομή σύρματος (α).



Εικόνα 5.2: Δομή σύρματος (β).



Εικόνα 5.3: Σύρμα εναπόθεσης υλικού (α).



Εικόνα 5.4: Σύρμα εναπόθεσης υλικού (β).

5.2 Στοιχεία και παράμετροι διαδικασίας

Ο κατασκευαστής παρουσιάζει ενδεικτικά για το συγκεκριμένο σύρμα κάποια όρια για την τάση (V) και ένταση (A) που πρέπει να έχει η μηχανή εναπόθεσης υλικού κατά την λειτουργία:

Πίνακας 5.2: Στοιχεία V-A μηχανής εναπόθεσης με βάση τον κατασκευαστή (Eutectic, n.d.)

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"

Λαμβάνοντας αυτές τις ενδεικτικές τιμές για διάμετρο σύρματος $D=1.6\text{mm}$, σε συνδυασμό με δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την ακριβή προσέγγιση αυτών των παραμέτρων, έχουμε ότι:

- $V= 25 \text{ V}$
- $I= 200 \text{ A}$
- $U= 4.6 \text{ m/min}$ (Ταχύτητα τροφοδοσίας του σύρματος από τη μηχανή εναπόθεσης)

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε CNC παντογράφο 3-αξόνων, το οποίο έχει κατασκευαστεί στο τμήμα μέσω πτυχιακής εργασίας το 2019 με τίτλο «Μελέτη, σχεδιασμός και κατασκευή CNC παντογράφου 3-αξονων για την κοπή και συγκόλληση μετάλλων». Το μηχάνημα αυτό έχει τη δυνατότητα αριθμητικού ελέγχου μέσω χρήσης H/Y, τριών αξόνων κατεργασίας X, Y και Z, συνεπώς είναι επιθυμητό για την πραγματοποίηση της λειτουργίας. Επίσης, για την εκτέλεση της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε η μηχανή συγκόλλησης τύπου GMAW του Εργαστηρίου Συγκολλήσεων, του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, της Σχολής Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Παρακάτω απεικονίζονται οι μηχανές:



Εικόνα 5.5: CNC παντογράφος 3-αξόνων.



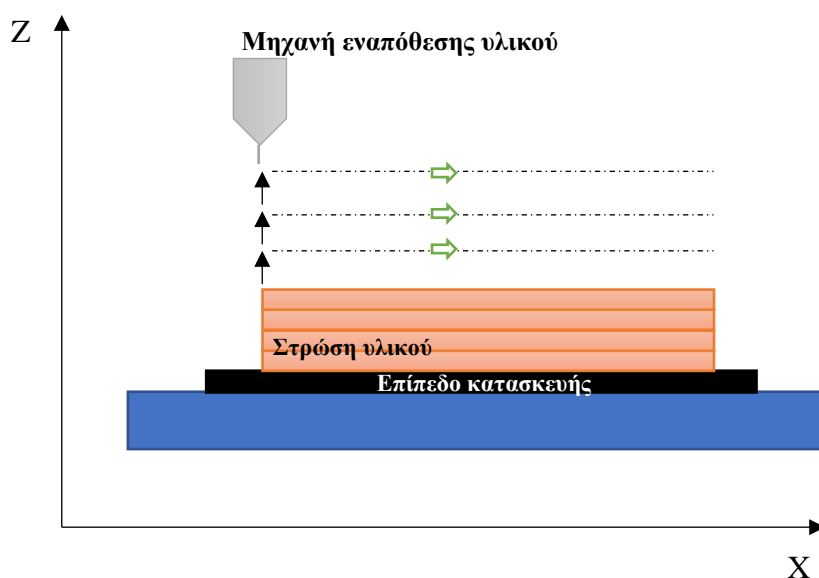
Εικόνα 5.6: Η χρησιμοποιούμενη μηχανή συγκόλλησης.

Άλλος ένα πολύ σημαντικός παράγοντας είναι η ταχύτητα μετακίνησης του πυρσού (τσιμπίδας) σε σχέση με το επίπεδο που πραγματοποιείται η κατασκευή. Η ταχύτητα αυτή όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μικρότερο χρόνο (πέρασμα) κάνει ώστε να πραγματοποιηθεί η μία στρώση του υλικού και αντίστροφα. Επίσης, ο παράγοντας αυτός συνδέεται άμεσα με τα θερμοκρασιακά πεδία και τις θερμοκρασιακές μεταβολές που δημιουργούνται κατά το φαινόμενο.

Για την σωστή επιλογή αυτής της ταχύτητας με γνώμονα τις παραπάνω παραμέτρους, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε διαφορετικές ταχύτητες, ώστε να προσδιοριστεί η κατάλληλη γεωμετρία των στρώσεων, με σκοπό την βέλτιστη απεικόνιση και κατασκευή του τελικού μοντέλου. Έτσι, διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα μετακίνησης είναι **$u=550 \text{ mm/min}$** .

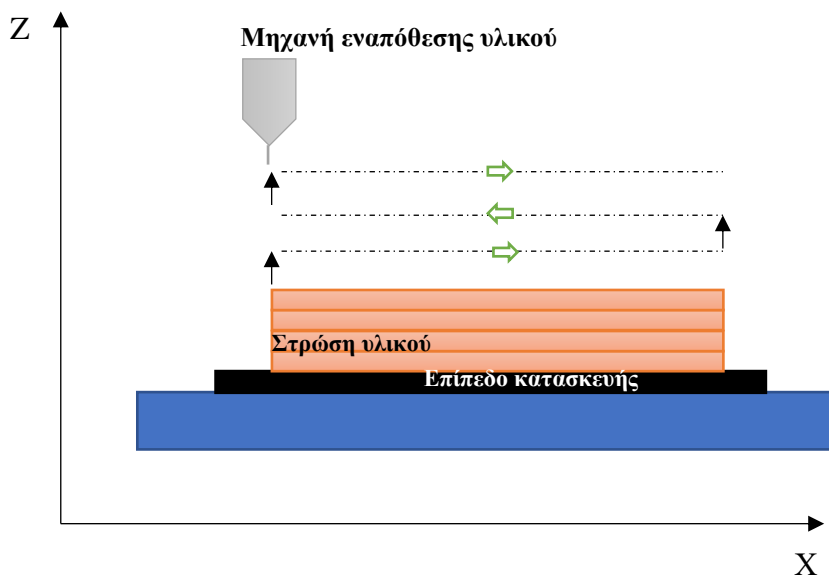
Τέλος, για την κατάλληλη δημιουργία του αντικείμενου, καθορίστηκε ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται οι στρώσεις (κατεύθυνση εναπόθεσης υλικού). Υπάρχουν δύο περιπτώσεις δημιουργίας:

1^η περίπτωση: Η μηχανή εναπόθεσης υλικού πραγματοποιεί μια στρώση (πέρασμα), κατά φορά X. Έπειτα σηκώνεται σε σταθερό ύψος Z και επανέρχεται στην αρχική θέση (χωρίς να εναποθέτει υλικό). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώσπου να ολοκληρωθεί το αντικείμενο.



Εικόνα 5.7: 1^η περίπτωση κατεύθυνσης εναπόθεσης.

2^η περίπτωση: Η μηχανή εναπόθεσης υλικού πραγματοποιεί μια στρώση (πέραςμα), κατά φορά X. Έπειτα σηκώνεται σε σταθερό ύψος Z και επανέρχεται στην αρχική θέση ενώ συνεχίζεται η εναπόθεση (διαδοχικές επικαλύψεις). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώσπου να ολοκληρωθεί το αντικείμενο.



Εικόνα 5.8: 2^η περίπτωση κατεύθυνσης εναπόθεσης.

Με βάση τις παραπάνω εικόνες, πληροφορίες και τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, επιλέχθηκε η **1η περίπτωση** κατεύθυνσης εναπόθεσης, κυρίως λόγω των μεγαλύτερων ρυθμών ψύξης, σε συνδυασμό με τα μικρότερα θερμικά φορτία που δέχεται η κάθε στρώση, που επιδρούν άμεσα στις τελικές ιδιότητες του αντικειμένου.

Ακόμη, για την καταγραφή των θερμοκρασιών και των θερμοκρασιακών πεδίων του φαινομένου, σε συνδυασμό με τον περαιτέρω έλεγχο και σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών, χρησιμοποιήθηκε IR κάμερα καταγραφής θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια χαρακτηριστικά:

- Φασματικό εύρος: 1,5 5,0 (SM) / 3,7 4,8 μm (M)
- Μορφή: 327 680 (640 x 512 pixel)
- Μέγεθος ανιχνευτή: 9,60 mm x 7,68 mm
- Βήμα εικονοστοιχείου: 15 μm
- Ταχύτητα πλήρους καρέ: 117/120 Hz
- Διαστάσεις (mm): L=240, W=125, H=150
- Βάρος: < 5 kg
- Τάση εισόδου: 24 V
- Βαθμονόμηση θερμοκρασίας



Εικόνα 5.9: IR κάμερα καταγραφής θερμοκρασίας. (IRcam, 2020)

Πίνακας 5.3: Παράμετροι πειραματικής διαδικασίας

<u>Στοιχείο-Παράμετρος</u>	<u>Σύμβολο</u>	<u>Τιμή</u>
Σύρμα κατασκευής	<u>TeroMatec OA 4923</u>	-
Διάμετρος σύρματος	D	1,6 mm
Τάση μηχανής συγκόλλησης	V	25 V
Ένταση μηχανής συγκόλλησης	I	200 A
Ταχύτητα τροφοδοσίας του σύρματος από τη μηχανή εναπόθεσης	U	4,6 m/min
Ταχύτητα μετακίνησης του άκρου της μηχανής (τσιμπίδας)	u	550 mm/min
Κατεύθυνση εναπόθεσης υλικού	<p><u>1^η περίπτωση</u></p>	

5.3 Κατασκευή αντικειμένου

Με γνώμονα όλα τα παραπάνω παρουσιάζεται σε στάδια όλη η κατασκευή του αντικειμένου. Αρχικά, παρατηρούνται οι πρώτες στρώσεις (Εικόνα 5.10) του αντικειμένου. Οι αρχικές στρώσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές στη γεωμετρία του, στην σταθερότητα αλλά και στην ομαλή διεξαγωγή της κατασκευής. Παρακάτω απεικονίζονται κάποια στιγμιότυπά αυτών.

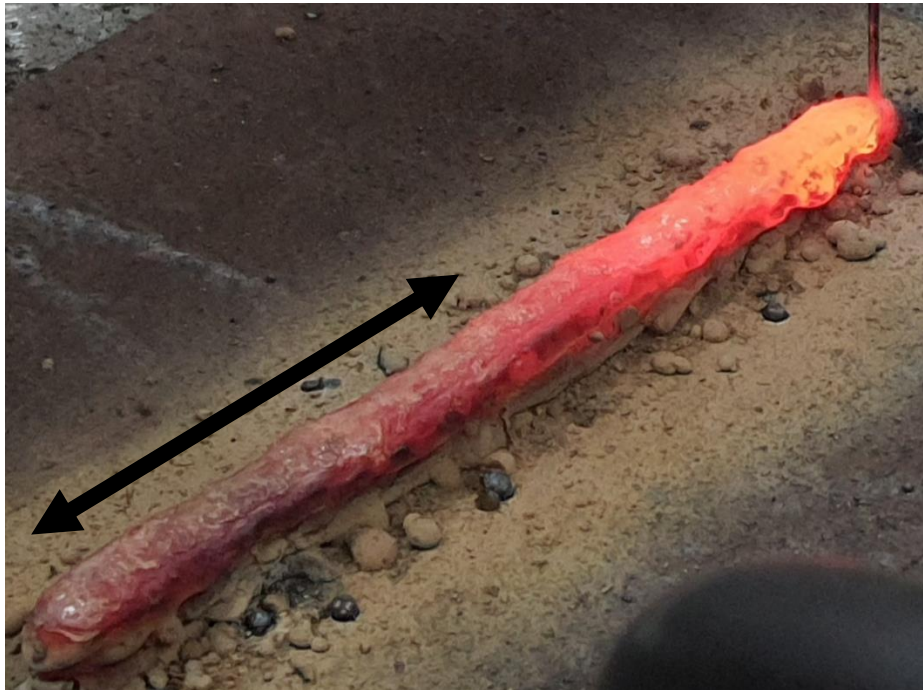


Εικόνα 5.10: Αρχικές στρώσεις αντικειμένου.



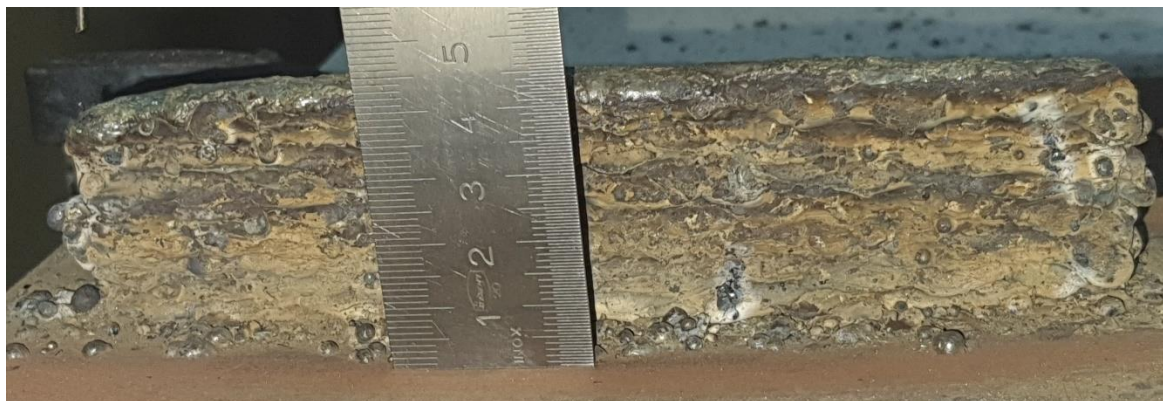
Εικόνα 5.11: Απεικόνιση θερμικού φορτίου κατά τη δημιουργία.

Παρακάτω στην [Εικόνα 5.12](#) απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο του ρυθμού με τον οποίο ψύχεται η στρώση. Ο χρόνος αυτός είναι αρκετά σημαντικός, ιδιαίτερα ο χρόνος ψύξης μεταξύ (800-500) °C, αφού οι τελικές ιδιότητες του αντικειμένου επηρεάζονται άμεσα από τα θερμικά φορτία και το ρυθμό ψύξης, όπου στο συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος γίνεται και ο μετασχηματισμός των δομών:



Εικόνα 5.12: Ψύξη κατά τη δημιουργία.

Έπειτα πραγματοποιείται μέτρηση του ύψους του αντικειμένου στη μέση της διαδικασίας (40 mm):



Εικόνα 5.13: Μέτρηση ύψους αντικειμένου στη μέση της διαδικασίας (40 mm).

Στην [Εικόνα 5.14](#) απεικονίζεται το θερμικό φορτίο στα 40 mm (στη μέση της κατασκευής), αλλά και ο τρόπος μετάδοσης του σε όλο το μήκος της στρώσης. Προφανώς η θερμότητα μεταδίδεται και στις προηγούμενες στρώσεις υλικού, συνεπώς το αντικείμενο συνεχώς θερμαίνεται με διαφορετικές θερμοκρασίες ανάλογα την απόσταση της κάθε στρώσης:



Εικόνα 5.14: Θερμικά φορτία κατά τη δημιουργία.

Ακόμη στην [Εικόνα 5.15](#) παρουσιάζεται άλλο ένα παράδειγμα μετάδοσης θερμικών φορτίων σε μεγαλύτερο ύψος αντικειμένου:

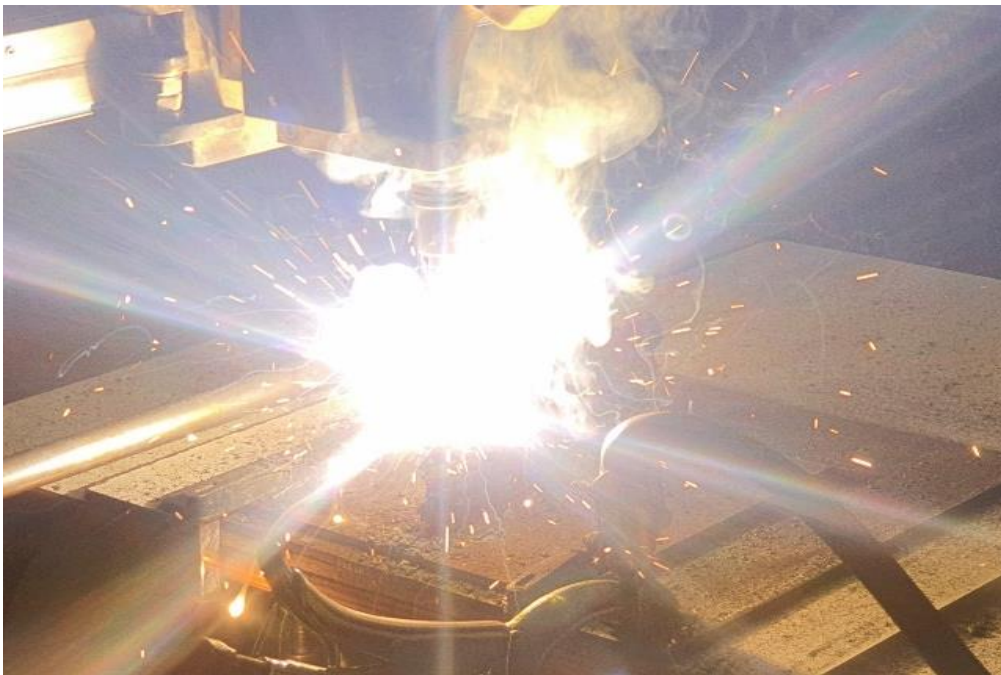


Εικόνα 5.15: Μετάδοση θερμικών φορτίων.

Παρακάτω ([Εικόνα 5.16](#)) φαίνονται κατά τη κατασκευή η ακτινοβολία που προκαλείται από το ηλεκτρικό τόξο σε συνδυασμό με τις αναθυμιάσεις που παράγονται. Έτσι, απαραίτητα για την ομαλή και ασφαλή διεξαγωγή της κατασκευής είναι τα μέσα ατομικής προστασίας όπως:

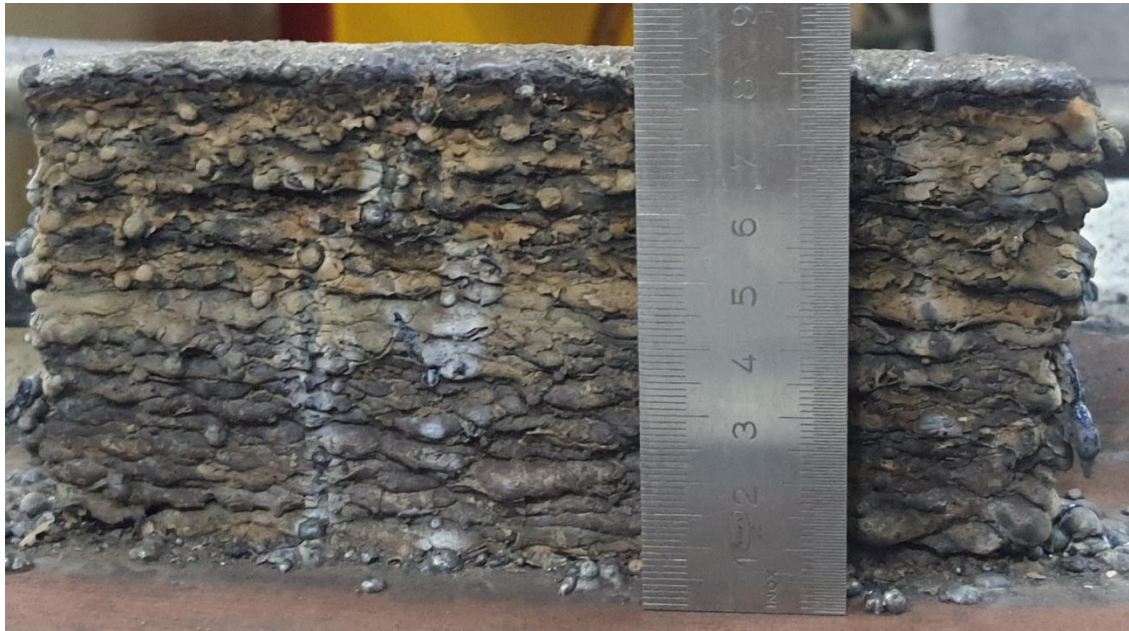
- Μάσκες ειδικές για ηλεκτροσυγκόλληση
- Δερμάτινη ποδιά ή ειδική στολή
- Γάντια
- Ειδικά δερμάτινα παπούτσια

Σε συνδυασμό με το καλό αερισμό του χώρου, με σκοπό την αντιμετώπιση των αναθυμιάσεων.



Εικόνα 5.16: Δημιουργία αντικειμένου.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν οι τελικές μετρήσεις του εξαρτήματος:



Εικόνα 5.17: Τελικό ύψος αντικειμένου (80mm).



Εικόνα 5.18: Τελικές διαστάσεις και άξονες αντικειμένου.

Στην παρακάτω φωτογραφία (Εικόνα 5.19) κατά την μέτρηση του πάχους, παρατηρείται ότι το αντικείμενο έχει σχεδόν μηδενική στρέβλωση κατά τον άξονα. Τέτοιου είδους σφάλματα είναι αρκετά συνηθισμένα στις συγκολλήσεις (γενικότερα στις διεργασίες που δημιουργούνται θερμικά φορτία), έτσι στη συγκεκριμένη περίπτωση η κατασκευή (τριδιάστατη εκτύπωση με τεχνικές συγκόλλησης-WAAM) κρίνεται ως αποδοτική σε μεγάλο βαθμό λόγω των, διαστασιολογικά και μηχανικά, θετικών αποτελεσμάτων της .



Εικόνα 5.19: Τελικό πάχος αντικειμένου.

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 6: Πειραματικές και θεωρητικές αναλύσεις

6.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν ορισμένες ενέργειες και λειτουργίες με σκοπό την εξαγωγή και επεξεργασία δεδομένων για την ολοκληρωμένη έρευνα και σχετική σύγκριση της τεχνικής που εφαρμόστηκε. Κατά τη θεωρητική ανάλυση δημιουργήθηκε μοντέλο μέσω λογισμικού προσομοίωσης, όπου αναλύεται στο [Κεφάλαιο 6.2](#). Στη παρούσα διπλωματική εργασία, οι δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν είναι τα θερμικά φορτία, η κατανομή τους και ο ρυθμός ψύξης κατά τη κατασκευή και οι μηχανικές ιδιότητες του αντικείμενου που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο WAAM, σε συνδυασμό με τις παραμορφώσεις και τις παραμένουσες τάσεις της κατασκευής παράλληλα με τη σύγκριση με το θεωρητικό μοντέλο.

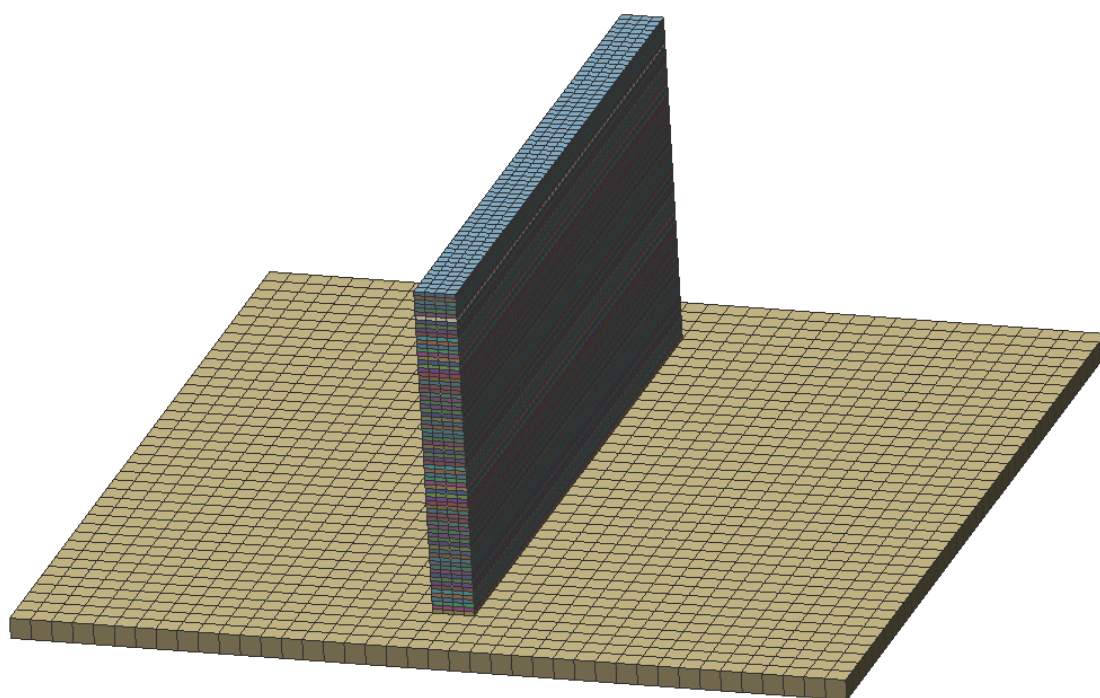
6.2 Θερμικές αναλύσεις

Είναι σημαντικό η διαδικασία να αποτυπωθεί θεωρητικά για τη περαιτέρω ανάλυση της τεχνικής και τη σύγκριση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε κατάλληλος σχεδιασμός και μελέτη της διαδικασίας μέσω λογισμικού προσομοίωσης.

Πιο συγκεκριμένα, για την εκτέλεση της προσομοίωσης, σχεδιάστηκε ίδιων διαστάσεων αντικείμενο (το ύψος είναι 80 mm, το μήκος του 160 mm και το πάχος του 14 mm, ενώ το ύψος της κάθε στρώσης 1 mm). Ακόμη ίδιων διαστάσεων είναι και η πλάκα που πραγματοποιήθηκε πάνω η κατασκευή, για την καλύτερη δυνατή απεικόνιση των θερμοκρασιακών μεταβολών αλλά και των μηχανικών αποτελεσμάτων. Το μοντέλο έχει την ίδια χημική σύσταση με το πειραματικό και μοντελοποιήθηκε με το αντίστοιχο πλέγμα (mesh), όπου κρίνεται κατάλληλο σχετικά με την αναλογία ποιότητας-χρόνου αποτελεσμάτων, για την βέλτιστη προσέγγιση και ανάλυση των αντίστοιχων θερμομηχανικών δεδομένων, όπως απεικονίζεται στην [Εικόνα 6.1](#).

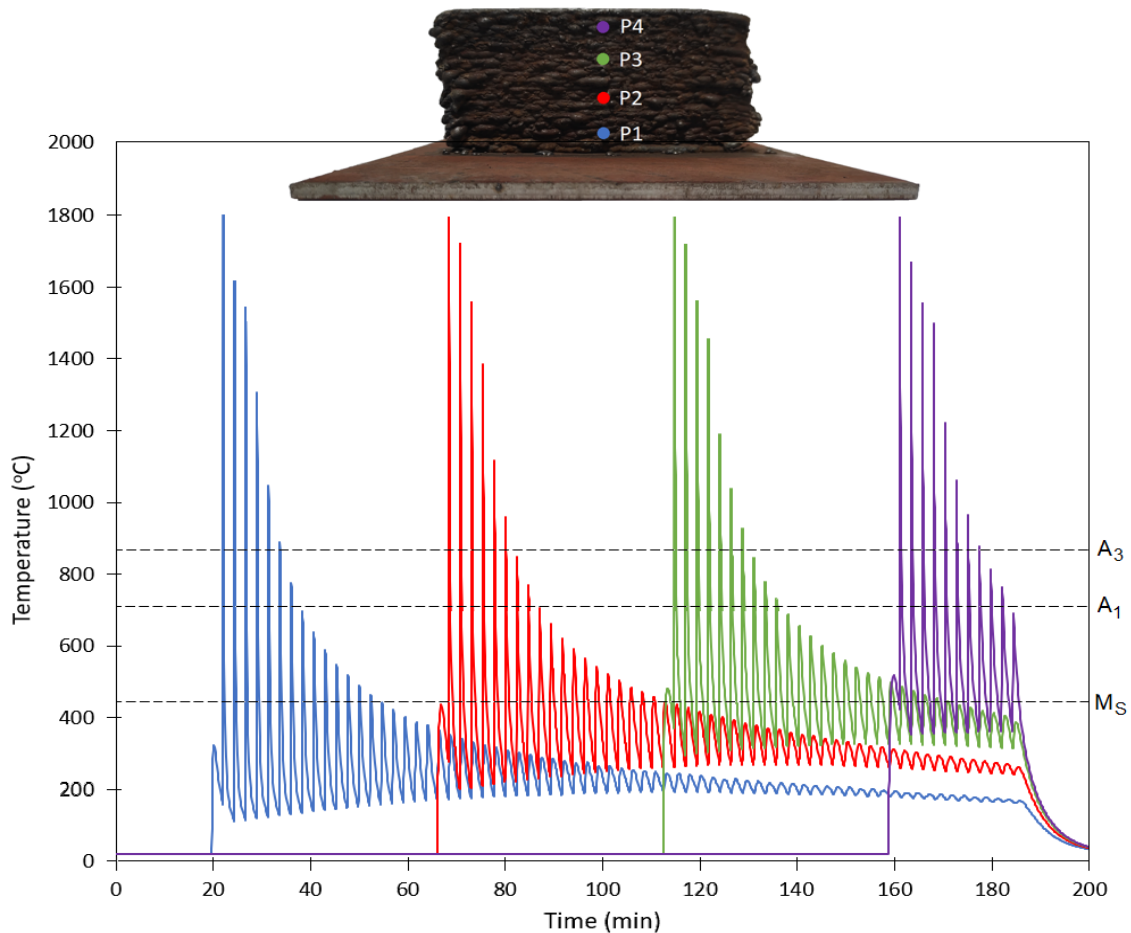
Τέλος, και στις δύο περιπτώσεις κατασκευής πραγματοποιήθηκε πάυση ενός λεπτού (1 min), μεταξύ της εναπόθεσης των στρωμάτων για καλύτερη ψύξη. Σκοπός της δημιουργίας μοντέλου μέσω προγράμματος προσομοίωσης είναι η επαλήθευση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά. Επίσης, μέσω του προγράμματος είναι δυνατόν να μειωθούν οι ατέλειες και να βελτιστοποιηθεί η κατασκευή.

Παρακάτω παρουσιάζεται το αντικείμενο:



Εικόνα 6.1: Μοντέλο προσομοίωσης

Για την καλύτερη κατανόηση και ανάλυση των θερμοκρασιακών μεταβολών παρουσιάζονται παρακάτω ([Εικόνα 6.2](#)) τέσσερις καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου που αντιστοιχούν σε τέσσερα σημεία κατά ύψος του αντικειμένου (P1,P2,P3,P4). Τα σημεία P1,P2,P3,P4 έχουν μεταξύ τους απόσταση 20 mm και απόσταση 10 mm από το κατώτερο και ανώτερο σημείο του αντικειμένου, καλύπτοντας τα συνολικά 80 mm που είναι το ολικό ύψος του.



Εικόνα 6.2: Διάγραμμα θερμοκρασία-χρόνου.

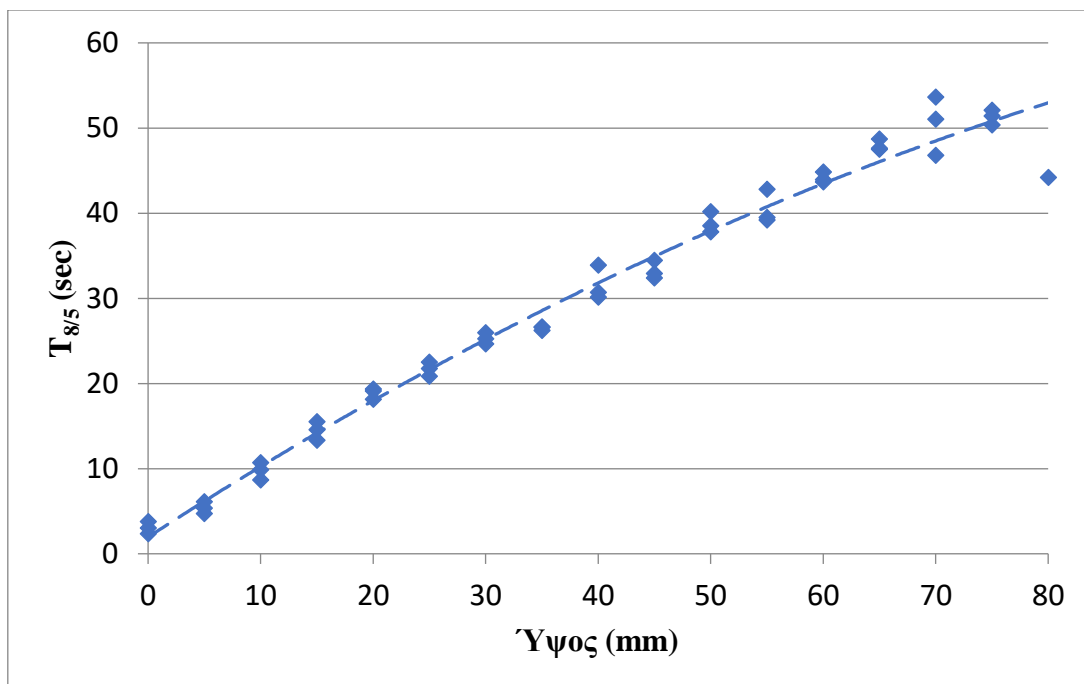
Από τα παραπάνω, παρατηρείται ότι:

- Μέγιστες θερμοκρασίες παρουσιάζονται κοντά στους 1800 οC στιγμιαία σε κάθε περιοχή. Έπειτα η θερμοκρασία αυτή μειώνεται με το χρόνο και τη πάροδο της διαδικασίας.
- Ms: Θερμοκρασία έναρξης σχηματισμού μαρτενσίτη.
- A1, A3: Κρίσιμες θερμοκρασίες μετασχηματισμού (Ανάλογα τη χημική σύσταση του υλικού).
- Παρατηρείται ότι με την αύξηση των στρωμάτων (από την γαλάζια στην μωβ περιοχή) αποτυπώνεται γενική αύξηση των τιμών της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα οι ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας στην μωβ περιοχή (P4-πάνω μέρος του αντικειμένου) είναι σαφώς υψηλότερες από τις ελάχιστες τιμές στην γαλάζια περιοχή (P1-κάτω μέρος του αντικειμένου). Αυτό είναι λογικό, διότι

οι στρώσεις σε μεγαλύτερα ύψη είναι ήδη θερμικά επηρεασμένες από τις προηγούμενες.

- Μέχρι το τέλος της διεργασίας οι πρώτες περιοχές ακόμα εμφανίζουν θερμοκρασίες -περίπου 250 °C- όπου αυτές μεταβάλλονται σε πολύ μικρό βαθμό (ημιτονοειδής μορφή), όπου με την πάροδο του χρόνου μειώνονται αφού η κατασκευή ψύχεται.

Έπειτα παρουσιάζεται καμπύλη χρόνου συναρτήσει του ύψους του αντικειμένου, κατά τη ψύξη από τους 800 στους 500 °C, εξαγόμενη από τα θερμοκρασιακά πεδία στην [Εικόνα 6.2](#).



Εικόνα 6.3: Χρόνος 8/5 συναρτήσει με ύψος.

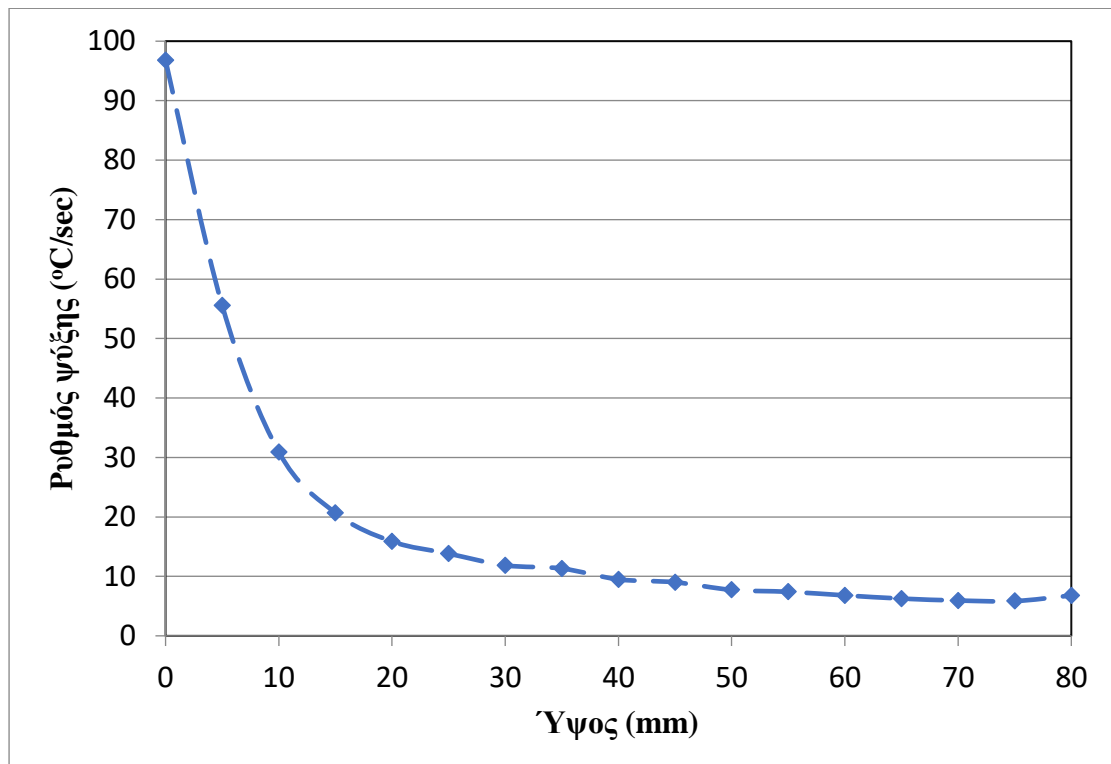
Ο χρόνος που ψύχεται το αντικείμενο από τους 800 στους 500 °C είναι ιδιαίτερα σημαντικός διότι, όπως αναφέρεται και στο [Κεφάλαιο 5](#) σε αυτό το χρονικό διάστημα πραγματοποιούνται οι μετασχηματισμοί που αποσκοπούν άμεσα στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι:

- Ο χρόνος αυτός αυξάνεται με την αύξηση του ύψους του αντικειμένου.
- Αυτό συνδυάζεται με το προηγούμενο διάγραμμα. Οι αρχικές στρώσεις δημιουργούνται πάνω σε μεταλλική πλάκα που βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ οι επόμενες στρώσεις δημιουργούνται πάνω στις ήδη

υπάρχουσες που έχουν ήδη υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, οι μεταγενέστερες στρώσεις ψύχονται αρκετά πιο αργά, άρα ο χρόνος ψύξης από τους 800 στους 500 °C ($T_{8/5}$) θα αυξάνεται.

- Τέλος, αποτυπώνεται ότι το σημείο στα 80 mm έχει μικρότερη τιμή σε σχέση με τα προηγούμενα. Αυτό είναι κάτι που αναμενόταν, αφού το σημείο αυτό είναι η τελευταία στρώση της κατασκευής και σαφώς θα ψυχθεί πιο γρήγορα σε σχέση με τα αμέσως προηγούμενα, με αποτέλεσμα ο χρόνος ($T_{8/5}$) σε εκείνο το σημείο να μειωθεί ελάχιστα.

Παρομοίως, αρκετά σημαντικό είναι να διατυπωθεί και ο ρυθμός ψύξης (°C/sec) συναρτήσει με το ύψος του αντικειμένου. Παρατηρείται ότι στις πρώτες στρώσεις ο ρυθμός είναι αρκετά υψηλός, ενώ αργότερα (από τα 30 mm και μετά), ο ρυθμός ψύξης παραμένει περίπου σταθερός σε περίπου 7 °C/sec. Αυτό επαληθεύει τα προηγούμενα διαγράμματα, όπου οι αρχικές στρώσεις ψύχονται αρκετά πιο γρήγορα σε σχέση με τις επόμενες.

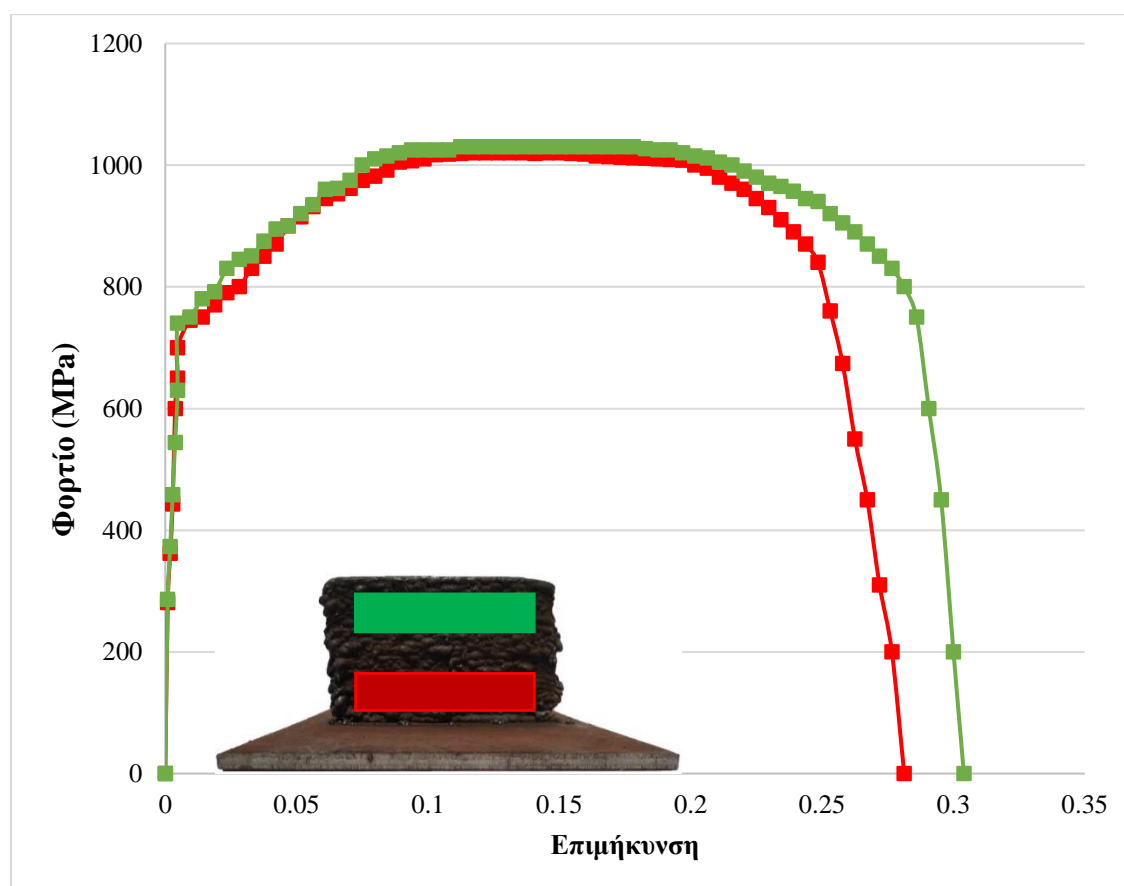


Εικόνα 6.4: Ρυθμός ψύξης συναρτήσει με ύψος.

6.3 Μηχανικές αναλύσεις

6.3.1 Εφελκυσμός και σκληρομέτρηση

Πέρα από τα θερμικά δεδομένα και τις αναλύσεις, εξίσου σημαντικές είναι και οι μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου. Συγκεκριμένα, στη παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκαν δοκιμή εφελκυσμού και σκληρομέτρηση αλλά και θεωρητική απεικόνιση μηχανικών δεδομένων σε σύγκριση με βιβλιογραφικά πλαίσια, από το αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε δοκιμή εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E8 σε δύο διαφορετικά ύψη αντικειμένου (πράσινη και κόκκινη περιοχή).

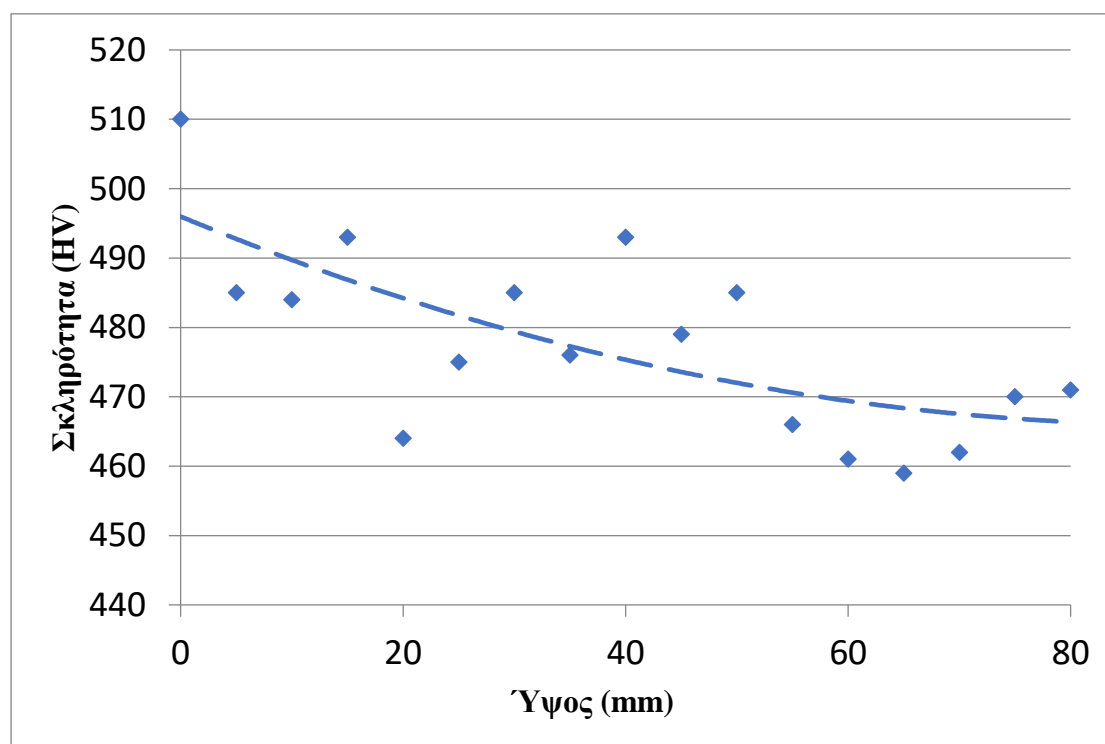


Εικόνα 6.5: Δοκιμή εφελκυσμού.

Από την παραπάνω δοκιμή παρατηρούνται:

- Σε γενικό βαθμό υψηλά φορτία εφελκυσμού.
- Το πάνω δοκίμιο του αντικειμένου (πράσινη περιοχή) έχει μεγαλύτερη επιμήκυνση σε σχετικά παρόμοια υψηλά φορτία με το κάτω δοκίμιο (κόκκινη περιοχή). Αυτό σημαίνει ότι η κόκκινη περιοχή αποτυπώνεται ως πιο ψαθυρή.
- Όπως είναι λογικό, αναλόγως τη θέση αλλά και τον προσανατολισμό των εξαγόμενων δοκιμίων πάνω στο αντικείμενο (κατακόρυφα, οριζόντια ή σε κλίση), αλλάζουν και οι εκάστοτε μηχανικές ιδιότητες. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με τα θερμικά φορτία και το ρυθμό ψύξης που επηρέασαν την κάθε περιοχή κατά την κατασκευή, με αποτέλεσμα να μεταβάλλουν τη δομή των δοκιμίων, άρα και τις τελικές ιδιότητες αυτών.

Έπειτα παρουσιάζονται οι τιμές σκληρότητας συναρτήσει του ύψους του αντικειμένου:

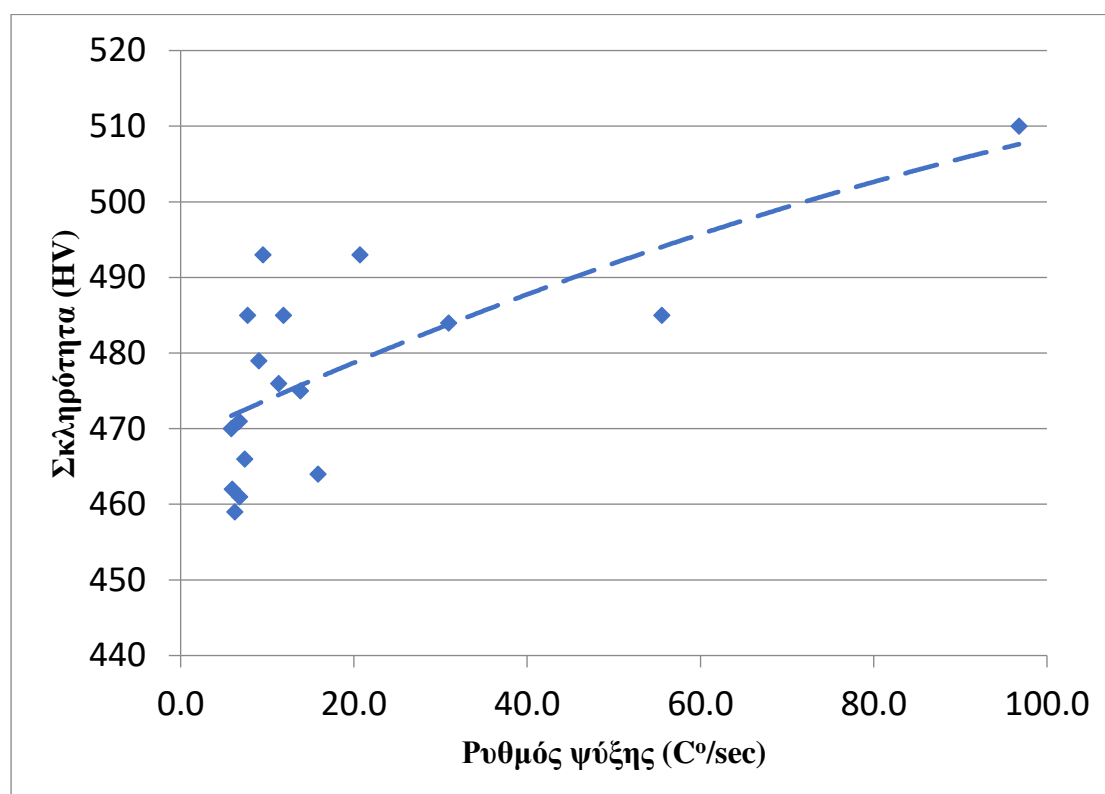


Εικόνα 6.6: Σκληρότητα συναρτήσει του ύψους.

Διαπιστώνεται ότι:

- Παρατηρούνται καλές τιμές σκληρότητας.
- Οι τιμές της σκληρότητας μειώνονται για μεγαλύτερα ύψη αντικειμένου. Αυτό είναι λογικό, διότι οι υψηλότερες στρώσεις όπως παρατηρήθηκε παραπάνω δεν ψύχονται με γρήγορο ρυθμό. ([Εικόνα 6.4](#))

Το γεγονός αυτό επαληθεύεται καλύτερα παρακάτω στο διάγραμμα σκληρότητας-ρυθμού ψύξης.



Εικόνα 6.7: Σκληρότητα συναρτήσεως του ρυθμού ψύξης.

- Με την αύξηση του ρυθμού ψύξης η σκληρότητα αυξάνεται. Έτσι, σε χαμηλότερα ύψη (που επικρατεί υψηλός ρυθμός ψύξης) είναι λογικό να διαπιστώνονται μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας, ενώ αντίστοιχα σε μεγαλύτερα ύψη (που επικρατεί χαμηλός ρυθμός ψύξης) διαπιστώνονται μικρότερες τιμές σκληρότητας. Αυτό επαληθεύεται και από την [Εικόνα 6.4](#) και [Εικόνα 6.6](#)

6.3.2 Παραμορφώσεις κατασκευής

Ένας παράγοντας που συνδέεται με τις μηχανικές ιδιότητες και επιδρούν στο τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή λόγω των παραμενουσών τάσεων. Οι παραμορφώσεις αυτές εάν δεν ελεγχθούν, μπορεί να οδηγήσουν σε διαστασιακές μεταβολές, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τις ανοχές που έχουν προδιαγραφεί. Οι βασικές παραμορφώσεις είναι:

- Εγκάρσια συστολή (transverse shrinkage)
- Επίπεδη περιστροφή (rotational distortion)
- Γωνιακή μεταβολή (angular change)
- Διαμήκης συστολή (longitudinal shrinkage)
- Διαμήκης καμπτική παραμόρφωση (longitudinal bending distortion)
- Λυγισμός (buckling distortion)

Έτσι η σωστή αντιμετώπιση των παραπάνω παραμορφώσεων αναλύεται σε τρία επίπεδα:

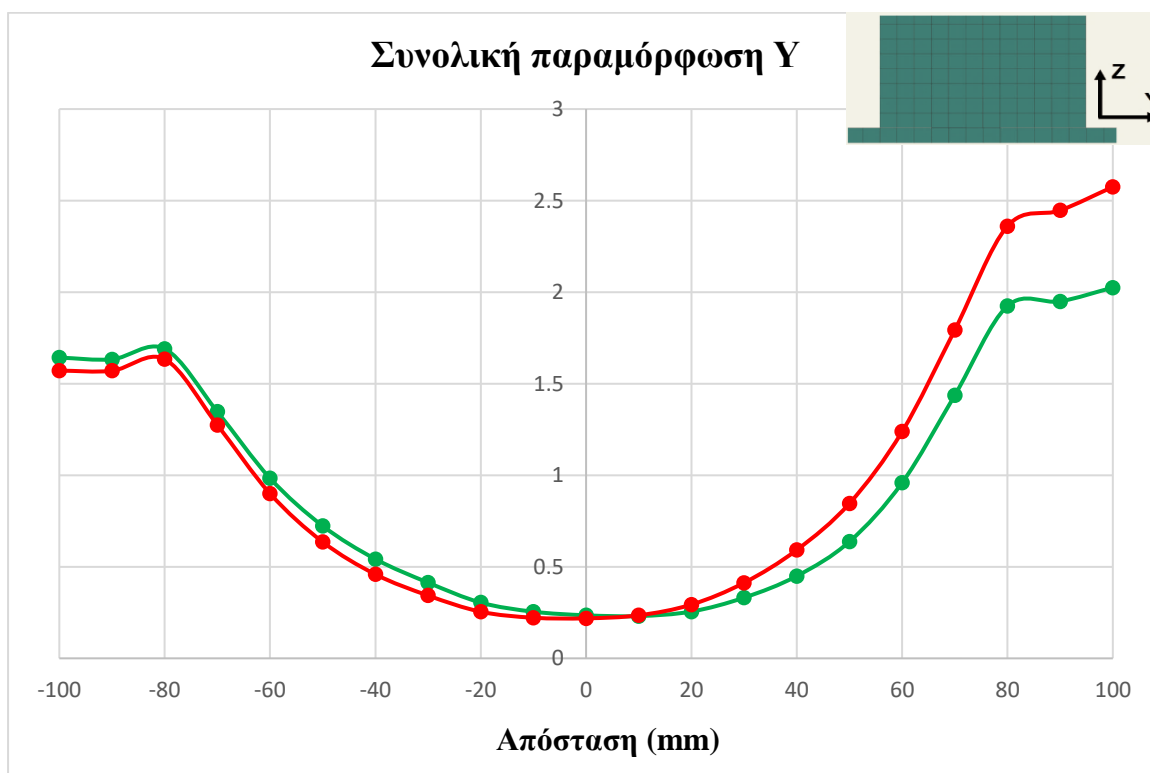
1. Στον **σχεδιασμό της διαδικασίας**, έτσι ώστε να προκύψουν οι ελάχιστες δυνατές παραμορφώσεις. Στον σχεδιασμό περιλαμβάνονται διάφοροι παράγοντες όπως η γεωμετρία της σύνδεσης, η μέθοδος και οι συνθήκες συγκόλλησης και η επιμέρους ανάλυση.
2. Στην ανάπτυξη προδιαγραφών για ανοχές παραμορφώσεων, δηλαδή στη θέσπιση ορίων για **επιτρεπτές παραμορφώσεις**
3. Στην εφαρμογή μεθόδων για τη **διόρθωση των παραμορφώσεων** μετά το πέρας της διαδικασίας όπως θέρμανση ή σφυρηλάτηση. (Παντελής, et al., 2017)

Με την 1^η μέθοδο αντιμετώπισης των παραμορφώσεων καλύπτεται ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών για την ελαχιστοποίηση αυτών, πριν την πραγματοποίηση της κατασκευής.

Συνεπώς, σε συνδυασμό με τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε η θεωρητική επεξεργασία δεδομένων από το μοντέλο προσομοίωσης συνδυαστικά με τις επιμέρους παραμορφώσεις κατά τη δημιουργία του αντικειμένου ανά άξονες όπως απεικονίζονται παρακάτω ([Εικόνα 6.8](#) και [Εικόνα 6.9](#)):

Σημειώνεται ότι

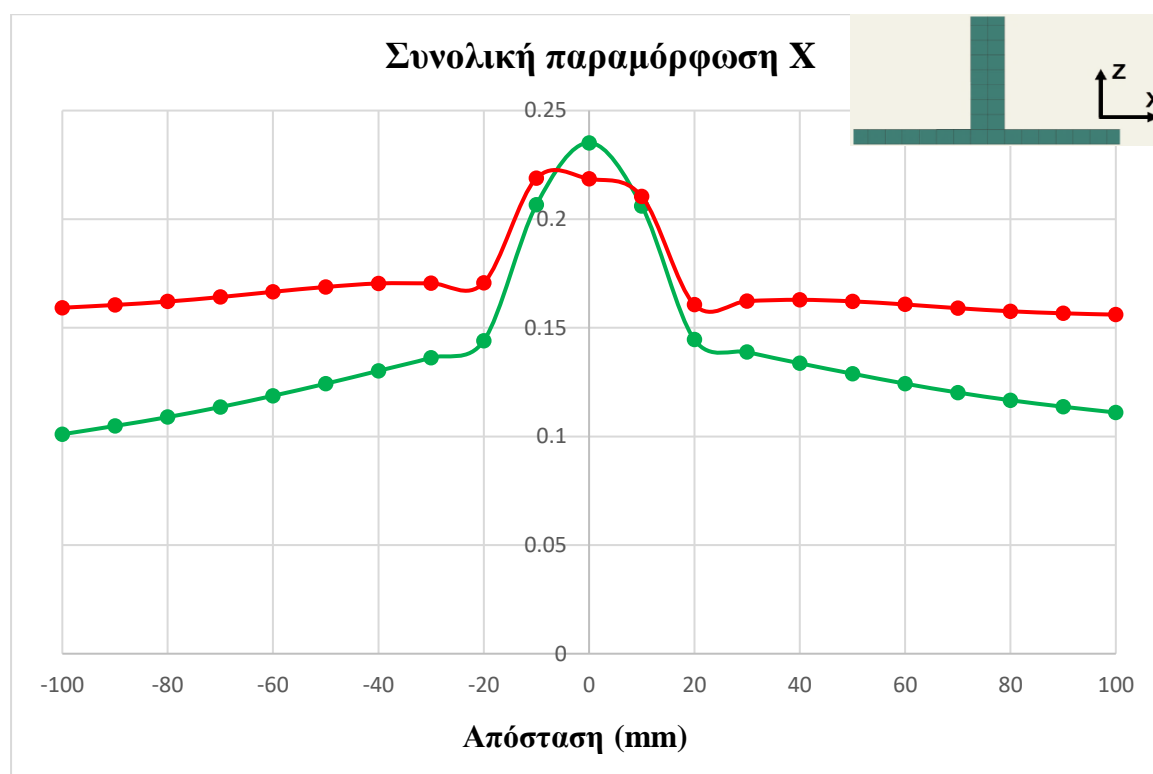
- Οι πράσινες καμπύλες απεικονίζουν τη παραμόρφωση ακριβώς στο τέλος της διεργασίας, ενώ
- Οι κόκκινες καμπύλες απεικονίζουν τη παραμόρφωση αφού το αντικείμενο έχει ψυχθεί.



Εικόνα 6.8: Συνολική παραμόρφωση Y.

Στην [Εικόνα 6.8](#) (άξονας Y), παρατηρείται μεγαλύτερη παραμόρφωση στις άκρες της μεταλλικής πλάκας, ελαφρώς μεγαλύτερη από τη μία πλευρά πιθανόν οφειλόμενη από τη κατεύθυνση εναπόθεσης υλικού που επιλέχθηκε, ενώ μικρότερη στη μέση του αντικειμένου.

Στην [Εικόνα 6.9](#) (άξονας X), παρατηρείται μεγαλύτερη παραμόρφωση στη μέση, ακριβώς στο τέλος της διεργασίας (πράσινη καμπύλη) και μικρότερη στις άκρες, όπου η παραμόρφωση του αντικειμένου αφού έχει ψυχθεί (κόκκινη καμπύλη) είναι μεγαλύτερη. Σε γενικό βαθμό δεν παρατηρούνται μεγάλες τιμές παραμορφώσεων κατά αυτόν τον άξονα.



Εικόνα 6.9: Συνολική παραμόρφωση X.

6.3.3 Παραμένουσες τάσεις κατασκευής

Παραμένουσες τάσεις είναι οι τάσεις που επιδρούν σε ένα σώμα μετά την απομάκρυνση όλων των εξωτερικών φορτίων (δυνάμεων ή ροπών). Οι παραμένουσες τάσεις παραμένουν μετά το πέρας της διαδικασίας (συγκόλλησης) και μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στη μηχανική αντοχή της κατασκευής. Οι υψηλές εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις μπορεί να προκαλέσουν ρωγμάτωση ή και πρόωρη αστοχία της κατασκευής, ενώ οι θλιπτικές μπορεί να μειώσουν της αντοχή σε λυγισμό.

Οι παραμένουσες τάσεις ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το μηχανισμό που της προκαλεί:

- Τάσεις που προκαλούνται από **εξαναγκασμένη συναρμογή** κατασκευαστικών στοιχείων.
- Τάσεις που προκαλούνται από **ανομοιόμορφη κατανομή** πλαστικών και θερμικών παραμορφώσεων.

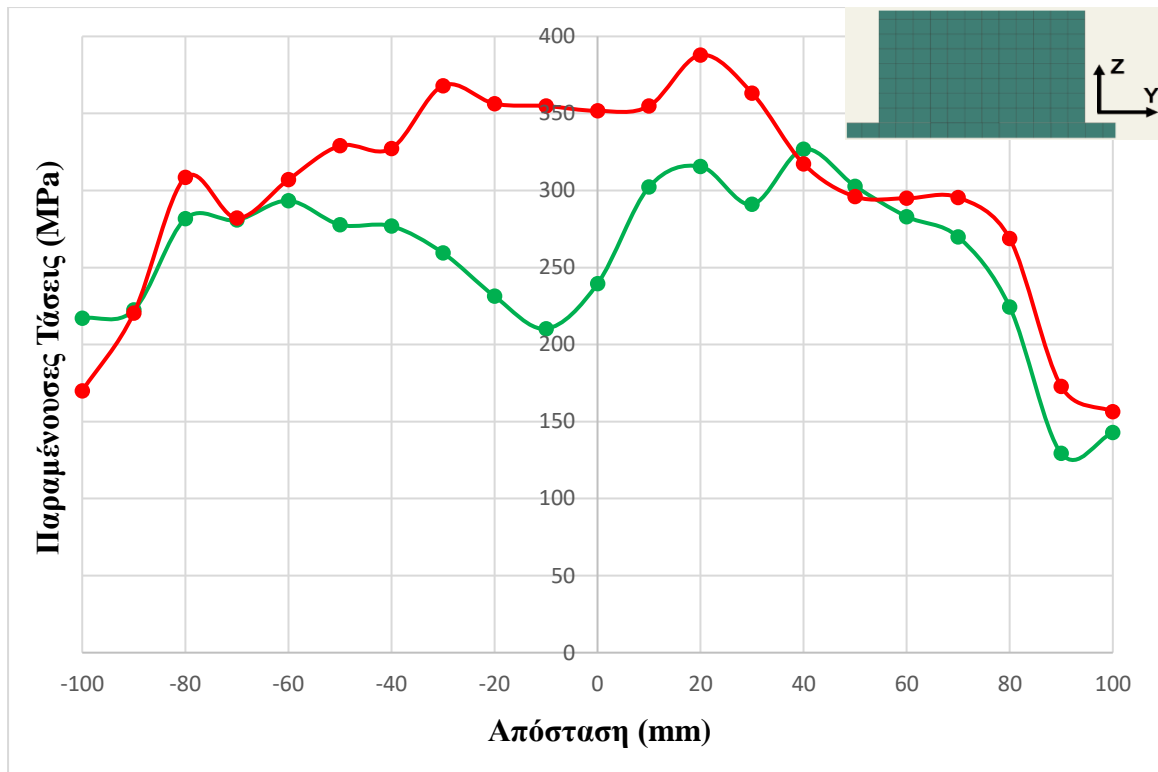
Πολλές φορές είναι αναγκαία η μέτρηση των παραμενουσών τάσεων, έτσι έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές κάποιες καταστρεπτικές και κάποιες μη καταστρεπτικές. (Παντελής, et al., 2017)

Οι τεχνικές αυτές διακρίνονται γενικά σε τρεις κατηγορίες:

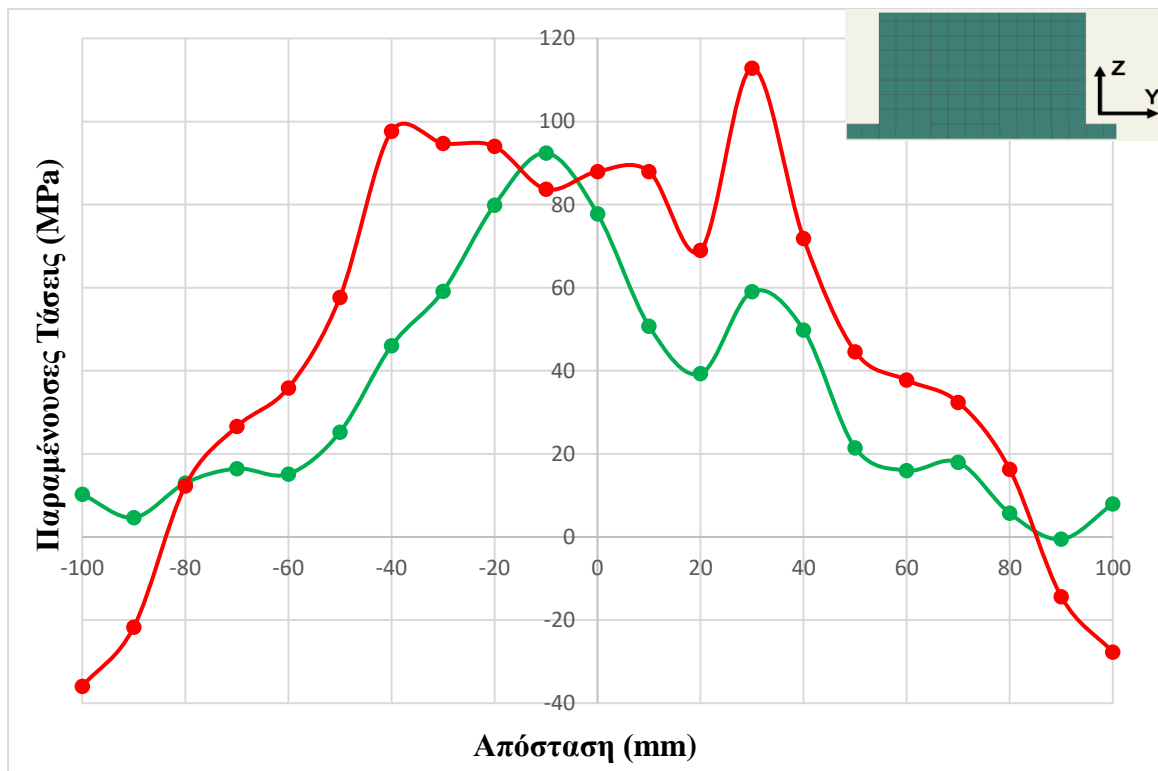
- Τεχνικές χαλάρωσης τάσεων
- Τεχνικές περιθλασιμετρίας
- Τεχνικές ρωγμάτωσης

Παρακάτω απεικονίζονται οι παραμένουσες τάσεις κατά διαμήκη ([Εικόνα 6.10](#) και [Εικόνα 6.11](#)) και εγκάρσιο άξονα κατασκευής ([Εικόνα 6.12](#) και [Εικόνα 6.13](#)) και σημειώνεται ότι:

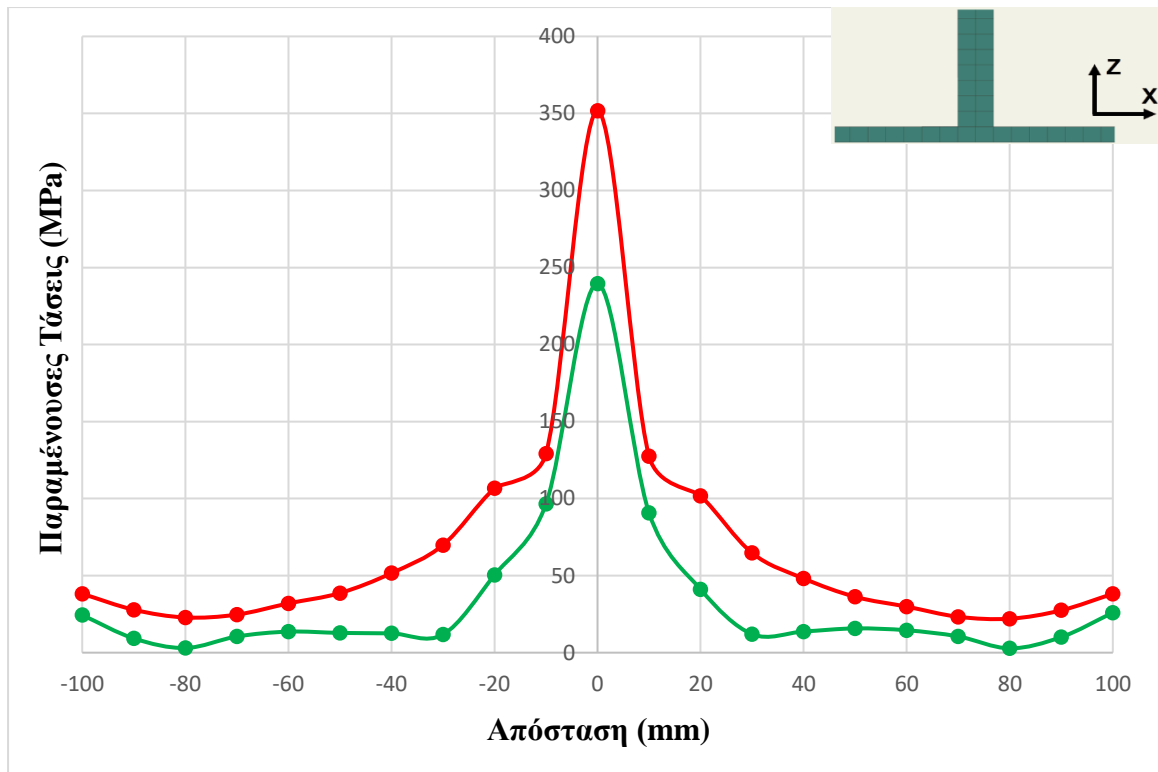
- Οι πράσινες καμπύλες απεικονίζουν τη παραμόρφωση ακριβώς στο τέλος της διεργασίας, ενώ
- Οι κόκκινες καμπύλες απεικονίζουν τη παραμόρφωση αφού το αντικείμενο έχει ψυχθεί.



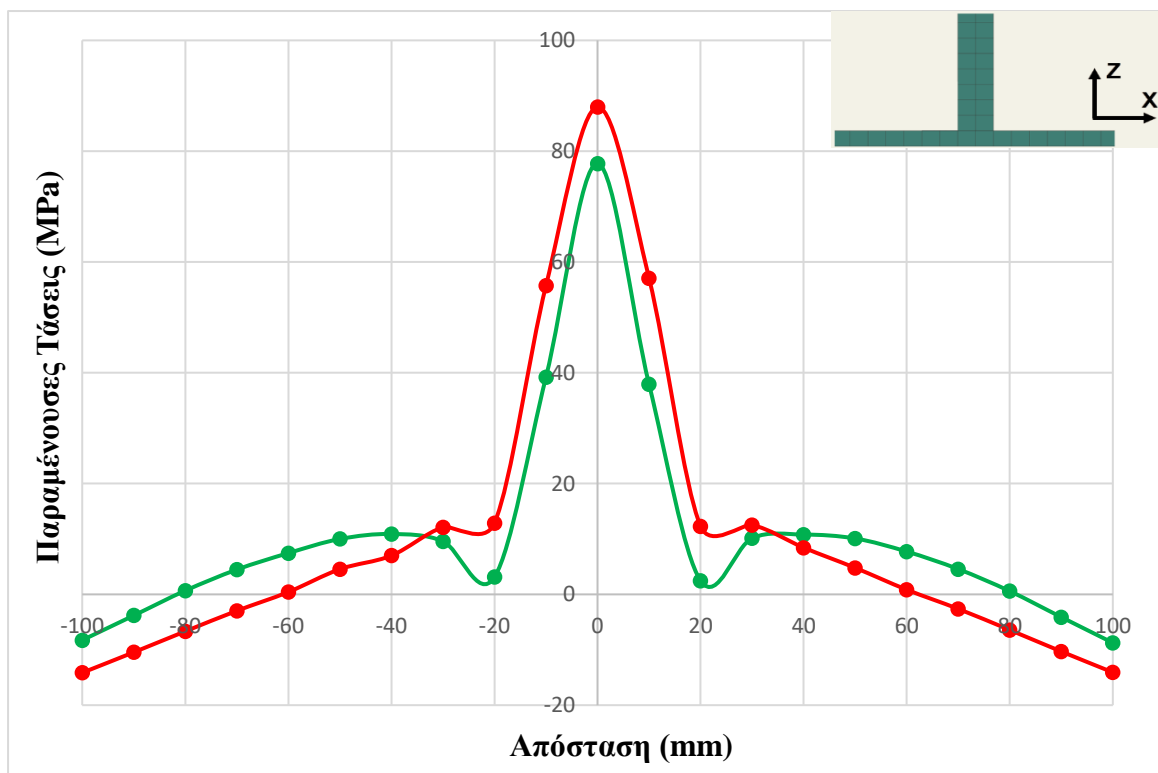
Εικόνα 6.10: Παραμένουσες τάσεις κατά διαμήκη άξονα.



Εικόνα 6.11: Παραμένουσες τάσεις κατά διαμήκη άξονα.



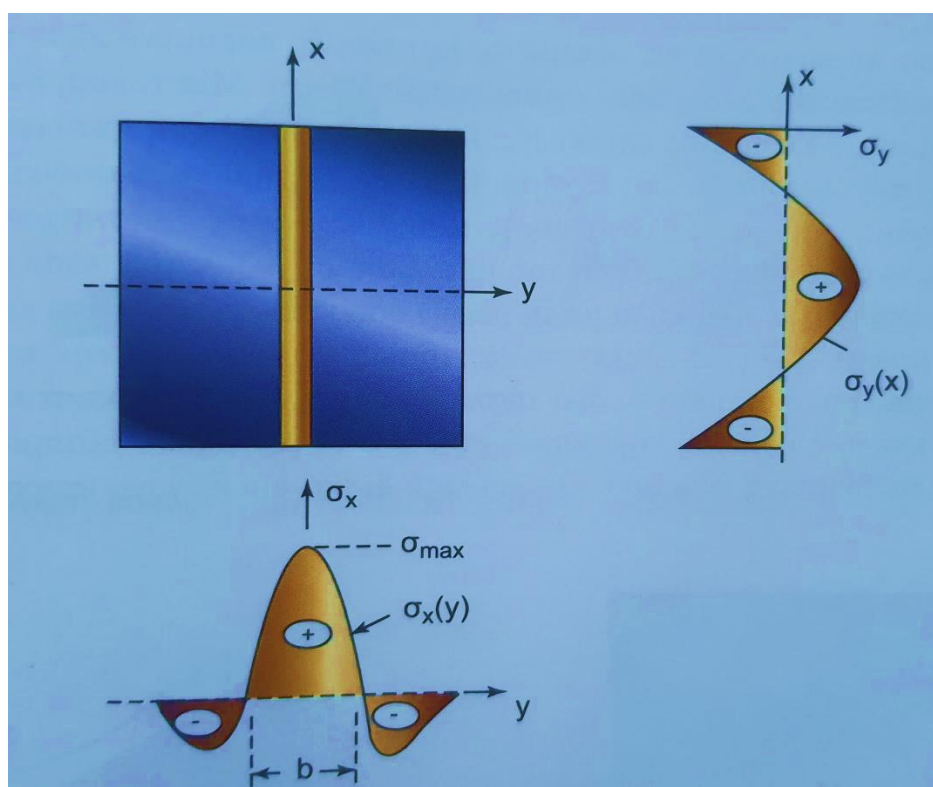
Εικόνα 6.12: Παραμένουσες τάσεις κατά εγκάρσιο άξονα.



Εικόνα 6.13: Παραμένουσες τάσεις κατά εγκάρσιο άξονα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνεται ότι αφού το αντικείμενο έχει ψυχθεί (κόκκινες καμπύλες) παρουσιάζονται μεγαλύτερες τιμές παραμενουσών τάσεων, δεδομένο που αναμενόταν. Πιο συγκεκριμένα, οι παραμένουσες τάσεις προκαλούνται από την ανομοιόμορφη κατανομή των θερμικών παραμορφώσεων και ειδικότερα τη συστολή που λαμβάνει χώρα κατά τη ψύξη του υλικού της ραφής. Γενικά, όπως παρατηρείται και παραπάνω, εφελκυστικές τάσεις (+) επικρατούν στο μέσο της ραφής, ενώ στα άκρα οι τάσεις είναι θλιπτικές (-). Ακόμη, όπως είναι λογικό, οι κατανομές αυτές μεταβάλλονται εάν επιβληθούν εξωτερικοί περιορισμοί (π.χ. πακτωμένες άκρες ελάσματος).

Έτσι διαπιστώνεται ότι το πρόγραμμα προσομοίωσης είναι ικανό να εκφέρει αποτελεσματικές λύσεις των παραμενουσών τάσεων σχηματικά, που ακολουθούν τις βιβλιογραφικά προβλεπόμενες των συγκολλητών κατασκευών, όπως απεικονίζονται παρακάτω στην [Εικόνα 6.14](#).



Εικόνα 6.14: Κατανομή παραμενουσών τάσεων. (Παντελής, et al., 2017)

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται ο κλάδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης με έμφαση στη προσθετική κατασκευή με τεχνικές συγκόλλησης. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί ένα κλάδο της μεταλλικής τρισδιάστατης εκτύπωσης που συνεχώς αναπτύσσεται και εξελίσσεται. Η έρευνα πάνω στο τομέα της θεωρητικής προσομοίωσης του αντικειμένου προς κατασκευή και της πειραματικής διαδικασίας είναι αναγκαία, διότι τα δύο αυτά φαινόμενα αλληλεξαρτώνται.

Συγκεκριμένα, στη παρούσα μελέτη, πραγματοποιήθηκε πειραματική και θεωρητική έρευνα στη συγκεκριμένη τεχνολογία (WAAM) με σκοπό τη μελέτη, ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στη πειραματική έρευνα κατασκευάστηκε αντικείμενο με τη χρήση σύρματος συγκόλλησης αποτελούμενο από ποσοστό καρβιδίων τιτανίου (TiC) και παρουσιάστηκαν μηχανικές δοκιμές και αναλύσεις εξαγόμενα από το προϊόν, σε συνδυασμό με μετρήσεις θερμικών φορτίων. Από την άλλη, στη θεωρητική μελέτη του φαινομένου αναπτύχθηκε μοντέλο, παρόμοιο με το αντικείμενο του πειράματος, από λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιεί ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Η θεωρητική μοντελοποίηση και προσομοίωση παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την διαδικασία. Τα μοντέλα αυτά βοηθούν στην πρόβλεψη των επιδράσεων των παραμέτρων της διεργασίας, στη κατανομή των θερμοκρασιών αλλά και στα μηχανικά φαινόμενα, με αποτέλεσμα να μειώνονται ελαττώματα όπως το πορώδες και οι ατέλειες, που αποτελούν τα κύρια ελαττώματα των συγκολλήσεων, και να βελτιστοποιείται η διαδικασία. Σε τέτοιου είδους κατασκευές η θεωρητική απεικόνιση του αντικειμένου είναι αρκετά σημαντική και χωρίς αυτή το πείραμα θα παρουσίαζε αρκετές δυσκολίες αλλά και ατέλειες.

Με τη κατασκευή του αντικειμένου μέσω της τεχνικής WAAM, τη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης αλλά και μέσω της σύγκρισης πειραματικού και θεωρητικού μέρους προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η συγκεκριμένη τεχνολογία καθίσταται ικανή να δημιουργήσει δύσκολες γεωμετρίες στο χώρο με αυξημένες ταχύτητες, λόγω του υψηλού ρυθμού εναπόθεσης που την αντιπροσωπεύει.
- Το σύρμα συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε για τη πειραματική διαδικασία αποτελεί καλό υλικό για διεργασίες που χρησιμοποιούνται υψηλής αντοχής προϊόντα.
- Παρατηρείται από τις μηχανικές αναλύσεις και δοκιμές, ότι το συγκεκριμένο υλικό κρίνεται αρκετά σκληρό.
- Ανάλογα το ύψος του αντικειμένου μεταβάλλεται η σκληρότητα του υλικού, γεγονός που οφείλεται στα θερμοκρασιακά πεδία που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του φαινομένου, που επιφέρουν αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες σε συνδυασμό με το χρόνο και το ρυθμό ψύξης του κάθε σημείου.
- Σε γενικό βαθμό, τα μοντέλα προσομοίωσης, προβλέπουν με μεγάλη ακρίβεια τις θερμοκρασιακές μεταβολές αλλά και τα θερμομηχανικά φορτία της κατασκευής.
- Ένας παράγοντας που ελαττώνεται με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης είναι οι ατέλειες που δημιουργούνται κατά την εναπόθεση. Αυτό πραγματοποιείται διότι από το λογισμικό, εντοπίζονται οι βέλτιστες συνθήκες κατασκευής και έπειτα εφαρμόζονται στο πείραμα.
- Τέλος, εφαρμόζεται άρτια η συνεργασία πειραματικού-θεωρητικού μέρους και αποτυπώνεται ένα αρκετά καλό, ποιοτικά, τελικό προϊόν.

Σχετικά με ορισμένες προτάσεις της παρούσας εργασίας για περαιτέρω έρευνα, μελέτη και διεξαγωγή του φαινομένου προτείνεται συμπληρωματικά:

- Μεταλλογραφική ανάλυση κάθετης εξαγόμενης λωρίδας από το αντικείμενο με σκοπό την μελέτη και ανάδειξη της μικροδομής σε διάφορα υποστρώματα του άξονα Z (κατά ύψος).
- Έλεγχο εφελκυσμού σε εξαγόμενα δοκίμια από το αντικείμενο κατά διάφορες διευθύνσεις, διαφορετικές από τη παρούσα εργασία, αλλά και σε διαφορετικά σημεία (π.χ. οριζόντια, κατακόρυφα και σε κλίση), με σκοπό την περαιτέρω μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και τη σύγκριση των επιμέρους, ανάλογα την κατεύθυνση.
- Έλεγχο σε κρούση από επιμέρους δοκίμια, με σκοπό τη περαιτέρω διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων του αντικειμένου και
- Δημιουργία αντικειμένου με άμεση ψύξη (active cooling) με σκοπό τη σύγκριση των τελικών μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με την ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

[κενή σελίδα]

Βιβλιογραφία

3D SYSTEMS, χ.χ. *3D SYSTEMS*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.3dsystems.com/customer-stories/scott-summit-puts-personal-design-and-manufacturing-prosthetic-leg-fairings>

Ambati, S. S. & Ambatipudi, R., 2022. Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts. *materialstoday: PROCEEDINGS*, Τόμος 64, pp. 804-807.

AMFG, 2018. *AMFG*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://amfg.ai/2018/06/08/3d-printing-consumer-goods-industry-5-benefits/>

[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].

AMFG, 2019. *AMFG*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://amfg.ai/2019/07/03/metal-binder-jetting-all-you-need-to-know/>

[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].

ASKELAND, D. R. & WRIGHT, W. J., 2020. *ΥΑΙΚΑ ΔΟΜΗ, ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ*. 7η επιμ. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑΣ.

Barry, S. D., 2012. *slideshare*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.slideshare.net/sulaimandawood/torsion-testing-experiment-instructor>

Bishwakarma, H. και συν., 2022. Fabrication of multilayer thin wall by WAAM technique and investigation of its microstructure and mechanical properties. *materialstoday:PROCEEDINGS*, Τόμος 56, pp. 927-930.

Cano-Vicent, A. και συν., 2021. Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. *Additive Manufacturing*, Τόμος 47.

Carlota, v., 2019. *3D natives*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/#!>

[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].

Chadwick, B., 2021. *BOWMAN3D*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.bowmanap.com/blog/a-deeper-dive-into-material-jetting-additive-manufacturing>

Chen, F., Yang, Y. & Feng, H., 2021. Regional Control and Optimization of Heat Input during CMT by Wire Arc Additive Manufacturing: Modeling and Microstructure Effects. *Materials*.

Chernovol, N., Lauwers, B. & Rymenant, P. V., 2020. *Development of low-cost production process for prototype components*. s.l., s.n.

- Chiu, Y. Y., Liao, Y. S. & Hou, C. C., 2003. Automatic fabrication for bridged laminated object manufacturing (LOM) process. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), pp. 179-184.
- Chueca de Bruijn, A. και συν., 2023. Optimization of a combined thermal annealing and isostatic pressing process for mechanical and surface enhancement of Ultem FDM parts using Doehlert experimental designs. *Journal of Manufacturing Processes*, Τόμος 85, pp. 1096-1115.
- CUSTOMPART.NET, χ.χ. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- CUSTOMPART.NET, χ.χ. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- Dababneh, F. & Taheri, H., 2022. Investigation of the influence of process interruption on mechanical properties of metal additive manufacturing parts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, August, Τόμος 38, pp. 706-716.
- D'Andrea, L. και συν., 2023. Mechanical characterization of miniaturized 3D-printed hydroxyapatite parts obtained through vat photopolymerization: an experimental study. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Τόμος 141.
- Dantin, M., Furr, W. & Priddy, M. W., 2018. *TOWARDS AN OPEN-SOURCE, PREPROCESSING FRAMEWORK FOR SIMULATING MATERIAL DEPOSITION FOR A DIRECTED ENERGY DEPOSITION PROCESS*. s.l., s.n.
- DESIGNING BULDINGS, 2022. *DESIGNING BULDINGS*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D_printing_in_construction [Πρόσβαση 27 Απριλίου 2023].
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U. & Dolen, M., 2017. *The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0*. Modena, Procedia MANUFACTURING.
- Elkaseer, A. και συν., 2022. Material jetting for advanced applications: A state-of-the-art review, gaps and future directions. *Additive Manufacturing*, Τόμος 60.
- ENGINEERING ARCHIVES, 2012. *ENGINEERING ARCHIVES*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: http://www.engineeringarchives.com/les_mom_tensiletest.html
- engineeringproductdesign, χ.χ. *engineeringproductdesign*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/powder-bed-fusion/>
[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].
- engineeringproductdesign, χ.χ. *engineeringproductdesign*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-jetting/>
[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].
- engineerproductdesign, χ.χ. *engineerproductdesign*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>
[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].
- E-PLUS-3D, χ.χ. *E-PLUS-3D*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.eplus3d.com/manufacturing-and-materials-of-3d-printed->

[cranial-plates.html](#)

[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].

Eutectic, C., χ.χ. *Castolin Eutectic*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.castolin.com/teromatecr-0a-4923>

Evans, S. I. και συν., 2022. A review of WAAM for steel construction – Manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions. *Structures*, Οκτώβριος, Τόμος 44, pp. 1506-1522.

Fletcher, M. J., χ.χ. *AM powered by ASME*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://additivemanufacturing.com/2019/08/27/the-future-for-waam/>

Freemantechology, 2019. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.freemantech.co.uk/news/developing-an-effective-metal-powder-specification-for-binder-jet-3d-printing>

GARCIA, M., 2018. *Aircraft interiors INTERNATIONAL*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.aircraftinteriorsinternational.com/features/3d-printing-aircraft-interiors.html>

[Πρόσβαση 20 Απρίλιος 2023].

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., 2017. *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ*. 1η επιμ. σ.λ.: Εκδόσεις Κριτική.

Golab, M., Massey, S. & Moultrie, J., 2022. How generalisable are material extrusion additive manufacturing parameter optimisation studies? A systematic review. *Heliyon*, 8(11).

Gyurko, Z. & Nemes, R., 2018. Energy-based evaluation of hardness testing with discrete element method. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*.

Hackenhaar, W., Mazzaferro, J. A., Montevicchi, F. & Campatelli, G., 2020. An experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, Τόμος 52, pp. 58-65.

Haden, C. V. και συν., 2017. Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties. *Additive Manufacturing*, August, Τόμος 16, pp. 115-123.

HUBS, χ.χ. *HUBS*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>

[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].

IRcam, 2020. *IRcam*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.findlight.net/uploads/products/datasheet/EQUUS-327k-SMM.pdf>

[Πρόσβαση 11 Ιουνίου 2023].

Jackson, B., 2017. *3D Printing Industry*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://3dprintingindustry.com/news/stelia-aerospace-use-waam-build-airplane-fuselage-129192/>

JACKSON, B., 2018. *3D Printing Industry*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://3dprintingindustry.com/news/huismans-3d-printed-waam-hook-lifts-80000-kg-load-127564/>

[Πρόσβαση 26 Απριλίου 2023].

Kalpakjian, S. & Schmid, S. R., 2021. *ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗ Επιστήμη & Τεχνολογία*. 7η επιμ. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

Kertik, A., 2017. *materialise*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.materialise.com/en/academy/industrial/magics/tutorials/difference-between-cad-stl-files>

[Πρόσβαση 20 Απρίλιος 2023].

KI Consulting Engineers, χ.χ. *KI Consulting Engineers*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://ki.dk/en/fea/>

[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].

Kumar, N. και συν., 2022. Wire Arc Additive Manufacturing – A revolutionary method in additive manufacturing. *Materials Chemistry and Physics*, Τόμος 285..

LIGHT METAL AGE, 2019. *LIGHT METAL AGE*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/applications-design/mx3d-software-enables-the-3d-printing-of-an-aluminum-bike-in-24-hours/>

Mahajan, P., 2022. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.selfcad.com/blog/how-to-make-resin-3d-prints-less-brittle>

MANUFACTURINGGUIDE, χ.χ. *MANUFACTURINGGUIDE*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.manufacturingguide.com/en/charpy-impact-test>

Melchels, F. P., Feijen, J. & Grijpma, D. W., 2010. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), pp. 6121-6130.

Parkes, J., 2021. *dezeen*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.dezeen.com/2021/07/19/mx3d-3d-printed-bridge-stainless-steel-amsterdam/>

[Πρόσβαση 21 Απριλίου 2023].

Pernet, B., Nagel, J. K. & Zhang, H., 2022. *Compressive Strength Assessment of 3D Printing Infill Patterns*. Belgium, Procedia Cirp, pp. 682-687.

Rahman, K. M., Wei, A., Miyanaji, H. & Williams, C. B., 2023. Impact of binder on part densification: Enhancing binder jetting part properties through the fabrication of shelled geometries. *Additive Manufacturing*, Τόμος 62.

RAPID, H., 2023. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://hlhrapid.com/knowledge/what-is-fdm-3d-printing/>

Rodrigues, T. A. και συν., 2019. Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, Τόμος 27, pp. 440-450.

Rosli, N. A. και συν., 2021. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. *Journal of Materials Research and Technology*, Τόμος 11, pp. 2127-2145.

Schain, S., 2017. *Medium*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://medium.com/autodesk-university/real-world-applications-of-3d-printing-388dcb210d6e>

- Schwaar, C., 2022. *ALL3DP*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://all3dp.com/1/waam-what-is-wire-arc-additive-manufacturing/>
[Πρόσβαση 24 Μαρτίου 2022].
- Segura, L. J., Li, Z., Zhou, C. & Sun, H., 2023. Droplet evolution prediction in material jetting via tensor time series analysis. *Additive Manufacturing*, Τόμος 66.
- Seidel, C., 2022. *METAL AM*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.metal-am.com/articles/multi-material-metal-parts-by-powder-bed-fusion-new-application-opportunities/>
[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].
- Select Additive, 2019. *Select Additive*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.selectadditive.com/post/ded-for-repair-of-industrial-components-how-3d-metal-printing-saves-time-and-lowers-costs>
[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].
- SIMSCALE, 2023. *SIMSCALE*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/fea-finite-element-analysis/what-is-fea-finite-element-analysis/>
[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].
- Singh, D. D., Mahender, T. & Reddy, A. R., 2021. Powder bed fusion process: A brief review. *materialstoday: PROCEEDINGS*, Τόμος 46, pp. 350-355.
- Singh, S. R. & Khanna, P., 2021. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. *materialstoday: PROCEEDINGS*, Τόμος 44, pp. 118-128.
- Sivasankaran, S. & Fahad, A.-M., 2020. Influence of Strain Rate and Percentage of Cold Work on Room-Temperature Deformation Behaviour of AISI 1015 Carbon Steel: Detailed Microstructures and Cold Workability Map Investigations.
- Srivastava, M., Rathee, S., Tiwari, A. & Dongre, M., 2023. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour. *MATERIALS CHEMISTRY AND PHYSICS*, 15 January. Τόμος 294.
- Stec, M., 2014. *COSMOL*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-obtain-fatigue-model-parameters/>
[Πρόσβαση 20 Απρίλιος 2023].
- Technoweld, 2019. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://technoweld.com.au/2019/06/11/mechanical-properties-of-metals/>
- tec-science, 2018. *TEC-SCIENCE*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/bending-flexural-test/>
- Top 3D MEDIA, 2019. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://top3dshop.com/blog/best-slicer-software>
- Vora, J. και συν., 2022. Experimental investigations on mechanical properties of multi-layered structure fabricated by GMAW-based WAAM of SS316L. *Journal of Materials Research and Technology*, Τόμος 20, pp. 2748-2757.

- Wang, T., Zhang, Y., Wu, Z. & Shi, C., 2018. Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire. *Vacuum*, Τόμος 149, pp. 185-189.
- Wang, Y. και συν., 2021. Applications of additive manufacturing (AM) in sustainable energy generation and battle against COVID-19 pandemic: The knowledge evolution of 3D printing. *Journal of Manufacturing Systems*, Τόμος 60, pp. 709-733.
- Williamson, J., 2014. *THE MANUFACTURER*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.themanufacturer.com/articles/3d-printing-market-set-to-increase-10-fold-by-2025/>
- Wycisk, E., Haskamp, F., Schmidt-Lehr, M. & Munsch, M., χ.χ. *AMPOWER*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://ampower.eu/insights/additive-manufacturing-startups/>
[Πρόσβαση 20 Απριλίου 2023].
- Yuan Lee, J., An, J. & Chua, C. K., 2017. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *APPLIES materialstoday*, Τόμος 7, pp. 120-133.
- Μ-Κ Έλεγχος & Αξιολόγηση Κατασκευών , χ.χ. *Μ-Κ Έλεγχος & Αξιολόγηση Κατασκευών (ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ & ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ)*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/105Kataponisi.html>
- Μπιλάλης, Ν. & Μαραβελάκης, Ε., 2014. *ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD/CAM & ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ*. 2η επιμ. Αθήνα: ΚΡΙΤΙΚΗ.
- Παντελής, Δ. Ι., Παπάζογλου, Β. Ι. & Χαϊδεμενόπουλος, Γ. Ν., 2017. *ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ*. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.
- ΧΡΥΣΟΥΛΑΚΗΣ, Γ. Δ. & ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ. Ι., 2008. *ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ*. 2η επιμ. Αθήνα : Παπασωτηρίου ΕΚΔΟΣΕΙΣ.