



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΣΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΕΚΤΥΠΩΤΗ



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ
ΩΤΤΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Η διπλωματική μου εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου, Σταυρούλα και Βασίλη, στην οικογένεια μου και στους φίλους μου, σε αυτούς που με στήριζαν καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο. Τους αφιερώνω την εργασία μου αυτή με όλη την εκτίμηση και το σεβασμό που τους δείχνω και τους οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για τη ψυχολογική και υλική στήριξη που μου προσέφεραν ανιδιοτελώς όλα αυτά τα χρόνια!

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο ψηφιακός εκτυπωτής (3D-Printer) είναι μια συσκευή ικανή να δημιουργεί αντικείμενα από το τίποτα. Το επιθυμητό αντικείμενο θα «εκτυπωθεί» σε διάφορα υλικά όπως πλαστικό, νάilon, μέταλλα και πολλά ακόμη. Θα εκτυπώσει σχέδια κατασκευής, συσκευές τελικού χρήστη, νόμιμα όπλα, εξαρτήματα κινητήρα αεροσκαφών, ακόμη και ανθρώπινα όργανα με πραγματικά κύτταρα ενός ατόμου. Η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing - AM), γνωστή και ως τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι μια από τις κατασκευές που περιλαμβάνουν την προσθήκη υλικών σε διαδοχικές στρώσεις. Ξεκινώντας με ένα τρισδιάστατο ψηφιακό αρχείο (είτε το κατεβάζει κανείς από το Διαδίκτυο είτε το σχεδιάζει με λογισμικό), σύνθετα σχήματα μπορούν να φορτωθούν σε έναν υπολογιστή και να εκτυπωθούν στρώμα-στρώμα σε ένα απτό, χρησιμοποιήσιμο αντικείμενο. Η τρισδιάστατη εκτύπωση απαιτεί έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή, τα κατάλληλα υλικά και ένα τρισδιάστατο σκίσιμο. Τα άτομα μπορεί ακόμη και να επιλέξουν να συνάψουν υπηρεσίες τρισδιάστατης εκτύπωσης εάν δεν διαθέτουν όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα για την εργασία τους ή εάν χρειάζονται βοήθεια για την προετοιμασία ενός προσαρμοσμένου πρωτοτύπου ή τμήματος ως ένα στάδιο ενός μεγαλύτερου έργου. Το μέλλον της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ακόμα αντιληπτό, με επαγγελματίες σε αρκετούς κλάδους να έχουν ήδη κάνει κάποια ρηζικέλευθα βήματα — για αυτόν τον λόγο, ορισμένοι αποκαλούν τον 3D εκτυπωτή προάγγελο της 4ης βιομηχανικής επανάστασης. Η AM μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές βιομηχανίες, όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, ο κατασκευαστικός τομέας και η βιοϊατρική.

ABSTRACT

A 3D-Printer is a device capable of creating objects out of nothing. The desired object will be "printed" on various materials such as plastic, nylon, metal, and much more. It will print construction drawings, end-user devices, legal weapons, aircraft engine components, and even human organs with real human cells. Additive Manufacturing (AM), also known as 3D printing, is one of the constructions that involves the addition of materials in successive layers. Starting with a 3D digital file (either downloaded from the Internet or designed with software), complex shapes can be uploaded to a computer and printed layer-by-layer on a tangible, usable object. 3D printing requires a 3D printer, the right materials and a 3D sketch. Individuals may even choose to contract 3D printing services if they do not have all the necessary components for their work or if they need help preparing a custom prototype or part as part of a larger project. The future of 3D printing is still in its infancy, with professionals in several industries already taking some groundbreaking steps - which is why some call the 3D printer a harbinger of the 4th Industrial Revolution. AM can be applied to many industries, such as the automotive, aerospace and biomedical industries.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT	i
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	2
1.1. Επισκόπηση της προσθετικής κατασκευής	2
1.2. Τρισδιάστατη εκτύπωση	2
1.3. Πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης	4
1.4. Μειονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης	4
2. ΤΡΟΠΟΙ/ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ AM	6
2.1 Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης (Fused Deposition Modeling - FDM).....	6
2.2 Διάμετροι κεφαλών εκτύπωσης.....	14
2.3 Αναλυτικές πληροφορίες για τα νήματα που χρησιμοποιούνται στην FDM.	15
2.4 Powder Bed Fusion - PBF	22
2.5 Contour Crafting.....	24
2.6 Stereolithography (SLA)	26
3. Προσέγγιση ελεύθερης και περιορισμένης επιφάνειας	28
3.1 Στερεολιθογραφία λέιζερ	28
3.2 Πολυμερισμός δύο φωτονίων (TPP)	29
3.3 Ακριβής στερεοποίηση.....	30
3.4 Μαζική λιθογραφία.....	30
3.5 Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (DirectEnergyDeposition - DED)	31
3.6 Κατασκευή εναποθέσης φύλλων Αντικειμένων (LaminatedObjectManufacturing - LOM)	34
4. Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΣΤΗΝ AM.....	37
4.1. PBF	38
4.2. DED.....	38
4.3. Βασικές αρχές της χρήσης του μετάλλου στην AM.....	39
4.4. Διαδικασία DMLS.....	40
5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ AM ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ	42
5.1 Βιοϊατρική	42
5.1.1 Υλικά για ιατρικές εφαρμογές της AM.....	43
5.1.2 Μεθοδολογία κατασκευής	44
5.2 Αεροναυπηγική.....	45
5.2.1 Πιθανές προκλήσεις της AM στην αεροναυπηγική	45
5.3 Οικοδομικές κατασκευές	46
5.3.1 Ευκαιρίες για τον κατασκευαστικό τομέα	47
5.4 Αυτοκινητοβιομηχανία.....	47
5.5 Τεχνική AM Additive Manufacturing για 3D printing Μετάλλου	49
5.5.1 FusedFilamentFabrication (FFF).....	49
5.5.2 BoundPowderExtrusion (BPE)	50
5.5.3 Σύντηξη (PBF)	50
5.5.4 Διαδικασία EBM	51
5.5.5 Διαφορά Υλικών.....	51
5.5.6 Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (DED)	51
5.5.7 Υλικό εκτόξευσης (MJ).....	53
5.5.8 Binder Jetting (BJ)	53
5.6 Εφαρμογή τεχνολογίας 3-D printing μετάλλων	53

5.6.1 Βιομηχανικές Εφαρμογές	53
5.6.2 Αυτοκινητοβιομηχανία	53
5.7 Αεροναυπηγική	54
5.7.1 Ιατρική και Οδοντιατρική	54
5.8 Κατασκευαστικές Εφαρμογές	55
5.9 Ηλεκτρονικά και Επικοινωνία	55
5.10 Πετρέλαιο και φυσικό αέριο	56
5.11 Εξόρυξη	56
5.12 Εργαλεία και καλούπια	56
5.13 Πλεονεκτήματα της AM μετάλλου	57
5.14 Βιομηχανική απόδοση	57
5.15 Μαζική προσαρμογή	57
5.16 Κατασκευή κατά παραγγελία	57
5.16.1 Αποκεντρωμένη παραγωγή	57
5.16.2 Εκτύπωση ολοκληρωμένων συστημάτων	58
5.16.3 Βελτίωση ποιότητας	58
5.16.4 Τροποποιήσεις και επανασχεδιασμοί με χαμηλό κόστος	58
5.16.5 Πρωτοβουλίες βιώσιμης παραγωγής	58
5.16.7 Κατασκευή ανταλλακτικών κατ' απαίτηση	58
5.17 Προκλήσεις	58
5.17.1 Όγκος Παραγωγής	59
5.17.2 Συμμόρφωση με τα πρότυπα	59
5.17.3 Απόκλιση	59
5.17.4 Μετα-επεξεργασία	59
5.17.5 Επισκευές και συντήρηση	60
5.17.6 Εκπαίδευση και δεξιότητες	60
5.17.7 Κόστος μετάλλων AM	60
5.17.8 Σύγκριση διαφορετικών υλικών για τρισδιάστατη εκτύπωση	60
5.17.9 Οικονομικά χαρακτηριστικά της AM μετάλλου	61
6. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΟΔΗΓΙΕΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΥ ΚΛΑΔΟΥ	
ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	63
6.1 Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης και διάθεσης διεργασιών για μεγάλα εξαρτήματα	63
6.2 Δομική ακεραιότητα και λοιπά θέματα	64
6.3 Υλικά και ιδιότητες	65
6.4 Βλάβες	65
6.5 Βλάβες SLA	68
6.6 Η αξιοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλου για καινοτόμο σχεδιασμό	69
6.7 Ευκαιρίες σχεδίασης που χρησιμοποιούν διαφορετικές διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων	70
6.8 Μοντελοποίηση στην τρισδιάστατη εκτύπωση	72
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	73
Προτάσεις για μελλοντική βελτίωση	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Φυσικό μοντέλο ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή που αποδίδεται στο λογισμικό 3D CAD	3
Σχήμα 1.2: Η ροή της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	3
Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα της μοντελοποίησης συντηγμένης εναπόθεσης με την κεφαλή εκτύπωσης να κινείται στο επίπεδο x-y και η πλατφόρμα να πέφτει, στρώμα κατά στρώμα , κατά μήκος του άξονα z.....	8
Σχήμα 2.4: Μηχανή FDM.....	8
Σχήμα 2.5: Μια κεφαλή εκτύπωσης 0.4 mm	9
Σχήμα 2.6: Μπρούτζινες κεφαλές εκτύπωσης	10
Σχήμα 2.7: Κεφαλές εκτύπωσης από σκληρυμένο ατσάλι	11
Σχήμα 2.8: Κεφαλές από ανοξείδωτο χάλυβα.....	12
Σχήμα 2.9: Σύνθετη κεφαλή εκτύπωσης.....	13
Σχήμα 2.10: Διάφοροι διάμετροι της ίδιας κεφαλής εκτύπωσης	14
Σχήμα 2.11: Μηχανολογικό σχέδιο παρασκευής νήματος.....	15
Σχήμα 2.12: Το ABS.....	16
Σχήμα 2.13: Μέταλλο	16
Σχήμα 2.14: Φούρνος μετεπεξεργασίας	17
Σχήμα 2.15: Διάγραμμα Χαλκού- Ψευδαργύρου.....	19
Σχήμα 2.16: Νήμα μπρούτζου από την εταιρία protopasta	19
Σχήμα 2.17: Νήμα από ανοξείδωτο ατσάλι 316L	20
Σχήμα 2.18: Νήμα και τυπωμένο τρισδιάστατο μοντέλο πλαστικού νήματος PLA20	21
Σχήμα 2.19: Pursa - i3.....	21
Σχήμα 2.20: Εξαρτήματα από τον εκτυπωτή Pursa -i3	21
Σχήμα 2.21: Μηχανολογικό σχέδιο Pursa i3 (RepRap.org).....	21
Σχήμα 2.22: Τεχνολογία PBF με λείζερ.....	22
Σχήμα 2.23: Παράδειγμα CC στην κατασκευή ενός σπιτιού.....	25
Σχήμα 2.24: Συγκροτήματα πολλαπλών ακροφυσίων και μονών ακροφυσίων	26
Σχήμα 2.25: Ταξινόμηση του SLA σύμφωνα με τη μέθοδο ακτινοβολίας (αριστερά) και την κατεύθυνση του προσπίπτοντος φωτός (δεξιά)	27
Σχήμα 3.26: Σχηματική ρύθμιση εκτυπωτή laser-SLA (A) Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) εικόνων βιοαντιδραστήρα με τριχοειδή αγγεία κατασκευασμένα με λείζερ-SLA. (B).....	29
Σχήμα 3.27: (A) Εικόνες SEM μικροδομών που κατασκευάστηκαν με TPP.(B) Σχέδιο του TPP έναντι του συμβατικού laser-SLA.....	30
Σχήμα 3.28: Διαδικασία επεξεργασίας πούδρας λείζερ DED	31
Σχήμα 3.29: Σύνθετη δομή μεταλλικής μήτρας Ti/TiC που εναποτίθεται με LENS (τέσσερα στρώματα πάνω σε ένα υπόστρωμα Ti).....	32
Σχήμα 3.30: Κατάθεση CoCrMo στο CoCrMo: (α) πλάγια όψη (κάθε άλλο στρώμα εναποτίθεται κάθετα στο προηγούμενο στρώμα χρησιμοποιώντας μοτίβο 0,90,0) και (β) κάτοψη της κατάθεσης	33
Σχήμα 3.31: Διαδικασία LOM	36
Σχήμα 3.32: Εξοπλισμός Bridge-LOM	36
Σχήμα 4.33: Μια κοινή διαδικασία AM με τη χρήση μετάλλων	38
Σχήμα 4.34: Επισκευή εξαρτήματος με ψεκασμό κρύου αερίου. (α) Πριν από τον ψεκασμό, (β) ψεκασμένο, (γ) ολοκληρωμένο	39
Σχήμα 4.35: Σύγκριση μεταξύ των διαδικασιών PBF και DED	39
Σχήμα 4.36: Τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία DMLS....	40
Σχήμα 4.37: Εκτυπωτής DMLS	41
Σχήμα 5.38: Ταξινόμηση 3d printing	49

Σχήμα 5.39: Εκτυπωτής FFF.....	50
Σχήμα 6.40: Έλλειψη νήματος.....	66
Σχήμα 6.41: Η κεφαλή εκτύπωσης βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια εκτύπωσης.....	66
Σχήμα 6.42: Μπουκωμένη κεφαλή εκτύπωσης.....	67
Σχήμα 6.43: Οι διαχωρισμένες στρώσεις είναι μια βλάβη της εκτύπωσης του τρισδιάστατου εκτυπωτή.	68
Σχήμα 6.44: Εξάρτημα σχεδιασμένο σε λογισμικό προσομοίωσης.....	72

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing - AM), γνωστή και ως τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι μια από τις κατασκευές που περιλαμβάνουν την προσθήκη υλικών σε διαδοχικές στρώσεις. Οι στρώσεις αυτές σχηματίζουν σύνθετες τρισδιάστατες δομές. Η AM είναι μια τεχνική για τη δημιουργία τρισδιάστατων φυσικών μοντέλων χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο μοντέλο με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) (Ngo, et al, 2018; Grant, 2018; Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017). Υπάρχουν έξι διαφορετικές ταξινομήσεις της AM οι οποίες και θα εξεταστούν στην παρούσα εργασία:

- Energy Deposition
 - Powder bed Fusion
 - Contour Crafting
 - Stereo lithography
 - Direct Energy Deposition
 - Laminated Object Manufacturing
- (Ngo, et al, 2018; Grant, 2018; Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017).

Σε κάθε περίπτωση, η νέα τεχνολογία έχει ήδη φέρει επανάσταση στην ανάπτυξη και στην παραγωγή προϊόντων – και το μέλλον είναι δικό της. Κάποιοι αναλυτές εκτιμούν μάλιστα ότι η παραγωγή προϊόντων, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα, σταδιακά θα πάψει να υπάρχει και θα αντικατασταθεί από παραλλαγές των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής.

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε τέσσερα Κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην προσθετική κατασκευή. Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναφέρονται οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί κανείς να κατασκευάσει κάτι με την AM. Στο τρίτο Κεφάλαιο γίνεται ειδική αναφορά στο μέταλλο ως υλικό στην AM. Στο τέταρτο Κεφάλαιο γίνεται συζήτηση για τη χρησιμότητα της AM σε διάφορες βιομηχανίες. Η εργασία κλείνει με κάποια συμπεράσματα.

1. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

1.1. Επισκόπηση της προσθετικής κατασκευής

Καθώς οι κορυφαίες βιομηχανίες μετακινούνται από την «Αναλογική» στην «Ψηφιακή» παρασκευή, η AM είναι μια πραγματικά επαναστατική τεχνολογία που αναπτύσσεται στον τομέα της κατασκευής. Η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται στην προσθετική κατασκευή για να μετατρέψει τα μηχανικά αρχεία σε άκρως χρήσιμες και στιβαρές κατασκευές από άμμο, μέταλλο και γυαλί. Η τεχνολογία δημιουργεί προϊόντα από στρώσεις υλικών. Μόλις τα σωματίδια του στρώματος συνδεθούν με χημικά ή θερμότητα, προστίθεται ένα άλλο στρώμα και ο μηχανισμός σύνδεσης επαναλαμβάνεται. Επιτρέπεται έτσι η ανάπτυξη γεωμετριών που ήταν προηγουμένως ανέφικτες (Ngo, et al, 2018).

Τα στοιχεία πλήρους μορφής δημιουργούνται απευθείας από δεδομένα CAD για εφαρμογές στα αυτοκίνητα, το εμπόριο και άλλες βιομηχανίες. Η AM είναι μια διαδικασία κατασκευής χαμηλού κόστους και είναι φιλική προς το περιβάλλον. Η AM δημιουργεί γρήγορα παραδείγματα προϊόντων, επιτρέποντας στις νέες τεχνολογίες να εισέλθουν γρηγορότερα στην αγορά. Μπορεί επίσης να παράγει γρήγορα ένα είδος ή προσαρμοσμένα μεταλλικά αντικείμενα για να αντικαταστήσει φθαρμένα ή παλαιωμένα βιομηχανικά κομμάτια (Grant, 2018; Attaran, 2017).

1.2. Τρισδιάστατη εκτύπωση

Ο ψηφιακός εκτυπωτής (3D-Printer) είναι μια συσκευή ικανή να δημιουργεί αντικείμενα από το τίποτα. Το επιθυμητό αντικείμενο θα «εκτυπωθεί» σε διάφορα υλικά όπως πλαστικό, πολυμερές όπως νάιλον, μέταλλα και πολλά ακόμη υλικά. Θα εκτυπώσει σχέδια κατασκευής, συσκευές τελικού χρήστη, νόμιμα όπλα, εξαρτήματα κινητήρα αεροσκαφών, ακόμη και ανθρώπινα όργανα με πραγματικά κύτταρα ενός ατόμου (Attaran, 2017).

Σύμφωνα με πολλούς συγγραφείς, η εποχή που διανύει η ανθρωπότητα ονομάζεται Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση. Η AM μας οδηγεί από τις μαζικές γραμμές παραγωγής του Henry Ford σε μια νέα εποχή προσαρμοσμένης και μοναδικής κατασκευής (Ngo, et al, 2018; Grant, 2018; Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017). Το παρακάτω Σχήμα 1.1 δείχνει το φυσικό μοντέλο ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή που αποδίδεται στο λογισμικό 3D CAD. Για να εκτυπωθεί ένα αντικείμενο με τρισδιάστατο εκτυπωτή χρειάζεται ένα αρχείο CAD, το οποίο πρέπει να μετατραπεί σε αρχείο STL. Έπειτα πρέπει να γίνει η εκτύπωση, η οποία παράγει ένα προϊόν, το οποίο πρέπει να επεξεργαστούμε περαιτέρω. (Jandyal et al, 2022)

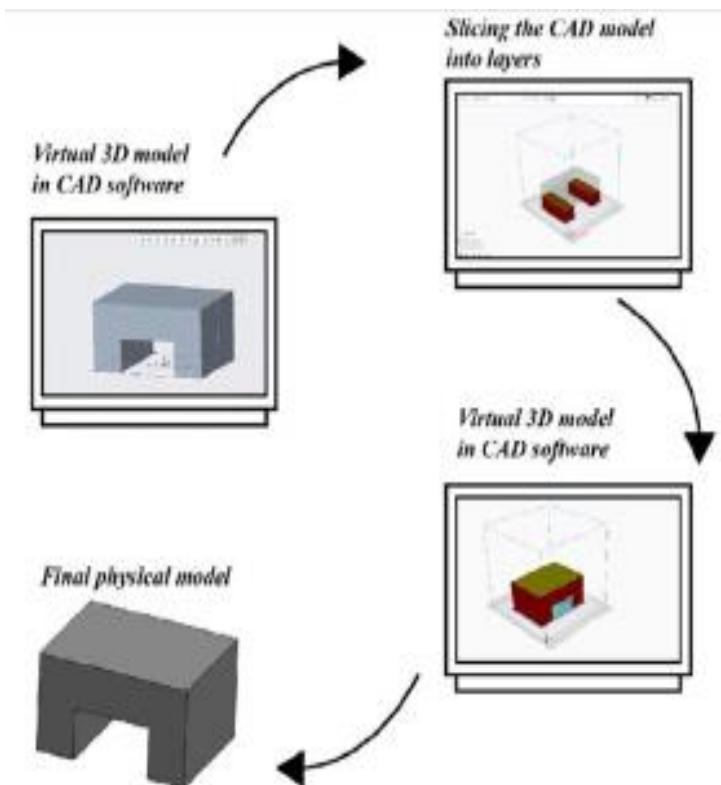
Οι εκτυπωτές 3D χρησιμοποιούν πολλές μεθόδους AM, αλλά όλοι κάνουν το ίδιο πράγμα. Είναι σαν το δισδιάστατο χαρτί, αλλά με μια τρίτη διάσταση να ανεβαίνει. Ο κατακόρυφος προσανατολισμός είναι γνωστός στον άξονα Z. Κάθε τυπωμένο φύλλο είναι μια λεπτή τεμαχισμένη οριζόντια διατομή του τελειωμένου προϊόντος. Μπορεί κανείς να το φανταστεί "ως ένα κέικ πολλαπλών στρωμάτων, όπου ο αρτοποιός τοποθετεί κάθε στρώση ένα προς ένα πριν ολοκληρωθεί το κέικ" (Ligon, et al, 2017).

Στο περιβάλλον 2D, μια έξοδος εκτυπωμένου χαρτιού από έναν εκτυπωτή δημιουργείται σε ένα πρόγραμμα υπολογιστή όπως το Microsoft Word. Το αρχείο είναι ένα έγγραφο του Word που περιέχει οδηγίες εκτύπωσης για τον εκτυπωτή. Απαιτείται επίσης μια βάση δεδομένων. Η εικόνα, η οποία είναι ένα Αρχείο Σχεδίασης με Υπολογιστή, δημιουργείται χρησιμοποιώντας λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Σε αυτήν την περίπτωση, το πρόγραμμα δημιουργεί ένα αρχείο που υποβάλλεται στον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Στην

πορεία, το λογισμικό χωρίζει την μπλε εκτύπωση σε εκατοντάδες, αν όχι χιλιάδες, οριζόντια επίπεδα. Αυτά τα στρώματα θα ξεκινήσουν την εκτύπωση το ένα πάνω στο άλλο πριν ολοκληρωθεί το αντικείμενο (Ngo, et al, 2018; Grant, 2018; Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017). Στο πιο κάτω Σχήμα 1.2, απεικονίζεται τη ροή της τρισδιάστατης εκτύπωσης.



Σχήμα 1.1: Φυσικό μοντέλο ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή που αποδίδεται στο λογισμικό 3D CAD (Attaran, 2017)



Σχήμα 1.2: Η ροή της τρισδιάστατης εκτύπωσης

1.3. Πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης

- 1) Οι παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής δεν επιτρέπουν το σχεδιασμό και την εκτύπωση πιο περίπλοκων σχεδίων, όπως γίνεται με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις θέτουν περιορισμούς σχεδιασμού που δεν είναι πλέον έγκυροι (Ngo, et al, 2018; Grant, 2018; Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017).
- 2) Η τρισδιάστατη εκτύπωση η οποία μπορεί να δημιουργήσει εξαρτήματα σε ώρες, κάνει την όλη διαδικασία πολύ γρήγορη. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι λιγότερο δαπανηρή και ταχύτερη στην κατασκευή εξαρτημάτων, δημιουργώντας πολύ πιο γρήγορες εναλλαγές σχεδιασμού (Ngo, et al, 2018).
- 3) Ένα άλλο πλεονέκτημα της εκτύπωσης είναι ότι σε αντίθεση με τις παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής, δεν απαιτεί μεγάλη ποσότητα προϊόντων στο κατάστημα. Αυτό εξοικονομεί χώρο και χρήματα. Χρησιμοποιώντας λογισμικό 3D, τα αρχεία τρισδιάστατης μοντελοποίησης αποθηκεύονται σε μια εικονική βιβλιοθήκη και διατηρούνται σε μορφή aCAD ή STL (Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017).
- 4) Το πλαστικό είναι το πιο δημοφιλές υλικό για τρισδιάστατη εκτύπωση, αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μέταλλα. Τα πλαστικά έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ελαφρύτερα σε βάρος από τα μέταλλα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική, όπου η μείωση του βάρους είναι απαραίτητη έτσι ώστε να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου. Τα υλικά αυτά έχουν και άλλα θετικά χαρακτηριστικά, όπως αντοχή στη θερμότητα, βελτιωμένη αντοχή ή απωθητικότητα νερού (Grant, 2018; Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017).
- 5) Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους που απορρίπτουν τεράστια κομμάτια μη ανακυκλώσιμων υλικών, η παραγωγή εξαρτημάτων απαιτεί μόνο υλικά που απαιτούνται για το προϊόν, με ελάχιστα ή καθόλου απόβλητα. Έτσι, όχι μόνο εξοικονομείται χρόνος, αλλά μειώνεται επίσης το κόστος των υλικών (Ngo, et al, 2018; Grant, 2018; Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017).
- 6) Δεδομένου ότι αποφεύγεται η σπατάλη πόρων, αυτή η προσέγγιση είναι φιλική προς το περιβάλλον. Καθώς λαμβάνονται υπόψη εκτιμήσεις όπως η βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμου λόγω ελαφρών τρισδιάστατων υλικών εκτύπωσης, τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα είναι πολύ σημαντικά (Ngo, et al, 2018; Grant, 2018; Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017).
- 7) Μειώνονται οι εκπομπές ρύπων, αφού δεν χρειάζονται φούρνοι οι οποίοι καταναλώνουν καύσιμα.(Jandyal et. al,2022).

1.4. Μειονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Εκτός από τα πολλά πλεονεκτήματα, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει και ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

- 1) Ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να παράγει προϊόντα από ένα ευρύ φάσμα πλαστικών και μετάλλων, η επιλογή των πρώτων υλών είναι μικρή. Αυτό συμβαίνει γιατί όλα τα πλαστικά ή τα μέταλλα πρέπει να ελεγχθούν πριν χρησιμοποιηθούν για

- τρισδιάστατη εκτύπωση. Επιπλέον, τα περισσότερα από αυτά τα εκτυπώσιμα αντικείμενα δεν είναι ανακυκλώσιμα (Ngo, et al, 2018; Grant, 2018; Ligon, et al, 2017).
- 2) Περιορισμένο μέγεθος κατασκευής. Ο αριθμός των τμημάτων που μπορούν να εκτυπωθούν περιορίζεται από τους μικρούς θαλάμους που χρησιμοποιούνται στους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Οτιδήποτε πιο μεγάλο θα έπρεπε να εκτυπωθεί σε μέρη και να συναρμολογηθεί. Δεδομένου ότι ο εκτυπωτής πρέπει να παράγει περισσότερα μέρη προτού απαιτηθεί συναρμολόγηση για να συνδεθούν τα μέρη μεταξύ τους, το κόστος και ο χρόνος για τα μεγαλύτερα μέρη μπορεί να αυξηθούν (Grant, 2018; Ligon, et al, 2017).
 - 3) Επειδή τα αντικείμενα θα χρειαστούν μετεπεξεργασία, τα περισσότερα τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα θα χρειαστούν καθαρισμό για την απομάκρυνση των μη επιθυμητών υλικών στήριξης και τη λείανση της εξωτερικής επιφάνειας για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η ποσότητα της μετεπεξεργασίας που απαιτείται καθορίζεται από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος του προϊόντος, η χρήση του και η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία. Ως αποτέλεσμα, ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει τη γρήγορη κατασκευή εξαρτημάτων, η μετεπεξεργασία θα επιβραδύνει τη διαδικασία κατασκευής (Ngo, et al, 2018).
 - 4) Μεγάλες ποσότητες. Σε σύγκριση με πιο παραδοσιακές μεθόδους όπως η χύτευση, η οποία μπορεί να παράγει μεγάλους όγκους με μειωμένο κόστος, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει σταθερή τιμή. Παρόλο που η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει μικρότερη αρχική επένδυση από άλλες διαδικασίες κατασκευής, το κόστος μπορεί να είναι μερικές φορές υψηλό (Ngo, et al, 2018; Grant, 2018; Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017).
 - 5) Δομή μέρους. Η εκτύπωση 3D χρησιμοποιείται για την παραγωγή εξαρτημάτων στρώμα προς στρώμα. Αν και αυτά τα στρώματα προσκολλώνται το ένα στο άλλο, όταν εκτίθενται σε συγκεκριμένες συνθήκες, υπάρχει μια μικρή περίπτωση να αποσυναρμολογηθούν. Αυτό το πρόβλημα επιδεινώνεται με τη μοντελοποίηση με συντηγμένη εναπόθεση και τα μέρη μονής και πολλαπλής πίδακας είναι συχνά πιο εύθραυστα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η χύτευση είναι προτιμότερη επειδή αποδίδει ομοιογενή τμήματα που δεν σπάνε (Ligon, et al, 2017).
 - 6) Ένα άλλο μειονέκτημα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η πιθανή μείωση του ανθρώπινου εργατικού δυναμικού, καθώς η επεξεργασία είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία. Πολλά χώρες από την άλλη πλευρά, εξαρτώνται από φτηνό εργατικό δυναμικό για να κρατήσουν ζωντανές τις οικονομίες τους και αυτή η εφεύρεση έχει τη δυνατότητα να θέσει σε κίνδυνο αυτές τις θέσεις εργασίας κατά την κατασκευή, αφαιρώντας την ανάγκη για ανάπτυξη στο εξωτερικό (Attaran, 2017).
 - 7) Ένα άλλο πρόβλημα με την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ότι συνδέεται άμεσα με τον τύπο του εξοπλισμού ή της διαδικασίας που χρησιμοποιείται, με ορισμένους εκτυπωτές να απαιτούν μικρότερες ανοχές, με αποτέλεσμα τα ολοκληρωμένα κομμάτια να μην είναι ίδια με την αρχική έκδοση. Αυτό μπορεί να διορθωθεί μετά την επεξεργασία, αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι θα αυξήσει το συνολικό χρόνο παραγωγής και το κόστος (Ngo, et al, 2018; Grant, 2018; Ligon, et al, 2017; Attaran, 2017).

2. ΤΡΟΠΟΙ/ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ AM

2.1 Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης (Fused Deposition Modeling - FDM)

Η FDM έχει κερδίσει περισσότερη προσοχή λόγω της παρουσίας τρισδιάστατων εκτυπωτών χαμηλού κόστους. Αρχικά, η τεχνική FDM χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση πρωτοτύπων, αναμνηστικών και άλλων χρήσιμων οικιακών συσκευών. Ωστόσο, η τεχνολογία FDM ωριμάζει γρήγορα και προφανώς δείχνει απεριόριστες δυνατότητες σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των ιατρικών, αυτοκινητοβιομηχανιών και αεροναυτικών τομέων (Rahim, et al, 2019; Mohamed, et al, 2015; Cailleaux, et al, 2020; Guerrilla & Regale, 2012).

Η μέθοδος της μοντελοποίησης συντηγμένης εναπόθεσης αναπτύχθηκε από τον Scott Crump στο τέλος της δεκαετίας του 1980.(Kun, 2016)

Με την ικανότητά της να παράγει τρισδιάστατα αντικείμενα και σχέδια για περίπλοκα μέρη, η τεχνολογία στρώμα-στρώμα (layer-by-layer) της FDM έχει αξιοποιηθεί σε ιατρικές εφαρμογές για την παραγωγή προσθετικών, ιατρικών συσκευών και μοντέλων οργάνων για προεγχειρητική χειρουργική, ανθρώπινους ιστούς, και εξατομικευμένη ιατρική. Το δυναμικό αυτής της τεχνολογίας εξακολουθεί να αυξάνεται με νέες βελτιώσεις και εξελίξεις, ειδικά όσον αφορά τα υλικά αλλά και τους εκτυπωτές (Wang, et al, 2020).

Η τεχνολογία FDM προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα καθώς είναι μια αξιόπιστη μέθοδος κατασκευής ελεύθερης μορφής χωρίς τη χρήση ακριβών καλουπιών και εργαλείων. Η διαδικασία είναι απλή και εύκολη στη χρήση και διασφαλίζει ότι τα υλικά καταναλώνονται αποτελεσματικά, οδηγώντας έτσι σε χαμηλή σπατάλη υλικών. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνικής FDM είναι η συμβατότητά της με ποικίλους τύπους θερμοπλαστικών πολυμερών. Το πιο δημοφιλές υλικό είναι το ABS (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο) και το PLA (πολυγαλακτικόξύ) (Wang, et al, 2020). Μέχρι σήμερα, οι εκτυπωτές FDM μπορούν να εκτυπώσουν και με άλλα θερμοπλαστικά, όπως τα πολυανθρακικά (PC), το πολυστυρόλιο (PS), πολυαμίδιο, πολυαιθεριμίδιο (PEI) και πολυαιθερεθερκετόνη (PEEK), (Salentijn, et al, 2017).Είναι επίσης εφικτό να χρησιμοποιηθούν ως υλικά εκτύπωσης μέχρι και σύνθετα υλικά. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάμειξη αυτών των υλικών με άλλα υλικά σε πούδρα (P.Dudek, 2013).

Παρά τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής, έχουν παρατηρηθεί ορισμένα μειονεκτήματα και περιορισμοί στα τελικά προϊόντα. Το μείζον ζήτημα που παραμένει για όλα τα προϊόντα που κατασκευάζονται με την τεχνική FDM σχετίζονται με τις χαμηλές μηχανικές ιδιότητες των μερών σε σύγκριση με τα συμβατικά μέσα. Ένας από τους λόγους είναι ότι τα μέρη FDM δείχνουν πάντα σημαντικό σχηματισμό πόρων, ενώ η συμπίεση και τα μέρη που έχουν χυθεί με έγχυση (CM και IM) δεν εμφανίζουν σχεδόν καθόλου ορατούς πόρους (Rahim, et al, 2019). Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στα στρώματα μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε αποκόλληση και χαμηλότερη ακεραιότητα (Zhang, et al, 2020).

Τα εξαρτήματα FDM έχουν επίσης περιορισμένη ακρίβεια σε σύγκριση με τα μέρη που παράγονται από συμβατικές και άλλες τεχνικές εκτύπωσης. Η εμφάνιση των λεγόμενων «voxelized» ή μη λείων επιφανειών μπορεί να είναι ο λόγος για το μεγάλο σφάλμα διαστάσεων ($\pm 0,1$ mm) των εξαρτημάτων FDM. Αυτός ο παράγοντας εξαρτάται απλώς από τη ροή του υλικού, όπου η κεφαλή εξώθησης πρέπει να κινείται συνεχώς, αλλιώς το υλικό θα ανασηκώνεται, διακόπτοντας έτσι τη διαδικασία εκτύπωσης (Salentijn, et al, 2017).

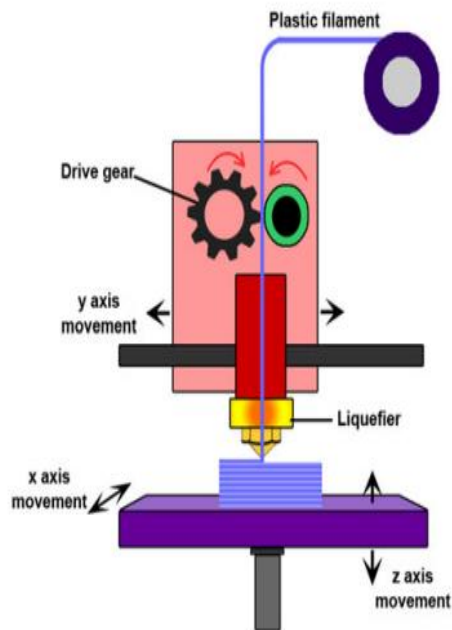
Υπάρχει ένα άλλο ζήτημα που σχετίζεται με τη βιοσυμβατότητα των συμβατικών πολυμερών, δηλ. το ABS, που χρησιμοποιείται για τις ιατρικές εφαρμογές. Η ακριβής επίπτωση της τοξικότητας του ABS στον άνθρωπο είναι ακόμη υπό συζήτηση. Γενικά, το ABS είναι σχετικά ακίνδυνο, καθώς δεν είναι γνωστό είτε ως καρκινογόνο υλικό είτε ως υλικό που προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Κατά συνέπεια, το ABS χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή παιχνιδιών (π.χ. Lego), οικιακών προϊόντων, χειρουργικών εργαλείων και εφαρμογών φαρμακευτικής επεξεργασίας (Wang, et al, 2020). Από προηγούμενες μελέτες, το ABS αποδείχθηκε ότι ήταν ένα σταθερό θερμοπλαστικό πολυμερές που δεν είχε διαρροή τοξικών χημικών ουσιών ή πρόκληση τυχόν ανωμαλιών (Salentijn, et al, 2017). Τον τελευταίο καιρό, ορισμένοι τύποι ABS έχουν επίσης θεωρηθεί ότι είναι συμβατοί με την FDA σε επαφή με τρόφιμα. Παρ'όλα αυτά, είναι ακόμα ακατάλληλο να εκτεθεί για μακροχρόνια επαφή με το ανθρώπινο σώμα, π.χ. ιατρικά εμφυτεύματα ή φάρμακα. Αυτό συμβαίνει επειδή η παρουσία στυρολίου μέσα στη χημική δομή του ABS έχει εγείρει ανησυχίες μεταξύ ειδικών που αναμένουν ότι μπορεί να προκαλέσει καρκίνο. Επομένως, μέχρι τώρα, αυτό το πολυμερές δεν έχει χρησιμοποιηθεί στα ιατρικά εμφυτεύματα (Rahim, et al, 2019).

Βασικές αρχές της FDM

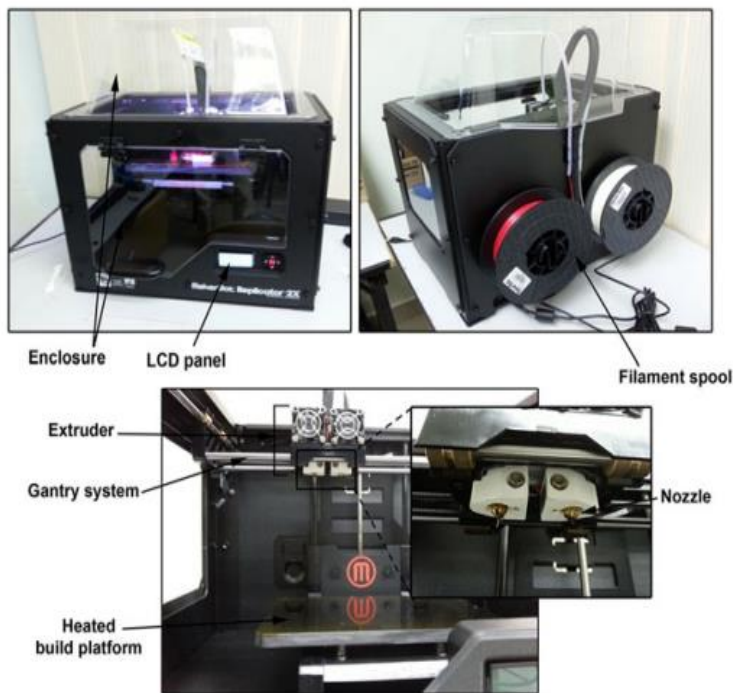
Η FDM βασίζεται στη διαδικασία εξώθησης θερμού τήγματος, όπου το υλικό εναποτίθεται στρώμα προς στρώμα, σύμφωνα με τα δεδομένα του μοντέλου 3D. Η διαδικασία FDM τροφοδοτείται συνήθως από μια πλαστική πρώτη ύλη με διάμετρο νήματος 1,75 mm ή 3,00 mm, η οποία ξετυλίγεται από μια μικρή κουλούρα πλαστικού. Ένας κινητήρας είναι συνδεδεμένος σε ένα από τα γρανάζια μετάδοσης κίνησης για να παρέχει ενέργεια για τη μετακίνηση του νήματος μέσω του συστήματος. Ένα ή και τα δύο γρανάζια κίνησης μπορεί να έχουν αυλακώσεις ή οδοντωτή επιφάνεια για να δημιουργήσουν επαρκή τριβή για να κινήσει ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης το νήμα και να τροφοδοτήσει τον υγροποιητή χωρίς καμία ολίσθηση. Το νήμα στη συνέχεια λιώνει στο θερμαινόμενο υγροποιητικό, ενώ το στερεό τμήμα στο πίσω μέρος θα λειτουργήσει ως έμβολο για να ωθήσει το λιωμένο υλικό μέσα από το ακροφύσιο εκτύπωσης (Zhang, et al, 2020, Kun, 2016).

Γενικά, η επιλογή της διαμέτρου του νήματος δεν θα επηρεάσει την ποιότητα εκτύπωσης, όσοι ρυθμίσεις του εκτυπωτή είναι καλά ρυθμισμένες. Μια μεγαλύτερη διάμετρος (3 mm) παρέχει πιο ισχυρό νήμα, και κατά συνέπεια, η διαδικασία απαιτεί περισσότερη πίεση αλλά είναι πιο αργή στο να περνά το υλικό από το ακροφύσιο. Λόγω της αυξημένης ακαμψίας του, σταματά κάθε ευελιξία στο σωλήνα PTFE οδηγώντας έτσι σε μια ομαλότερη διαδικασία τροφοδοσίας νημάτων και μειώνει την πιθανότητα θραύσης των νημάτων (Rahim, et al, 2019). Εν τω μεταξύ, ένα νήμα 1,75 mm παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με το νήμα των 3 mm. Με το ίδιο μέγεθος ακροφυσίου, το νήμα μικρότερης διαμέτρου απαιτεί λιγότερη πίεση και ως εκ τούτου, το νήμα μπορεί να τροφοδοτηθεί γρηγορότερα. Επί πλέον, το νήμα των 1,75 mm είναι πολύ πιο εύκαμπτο και ως εκ τούτου χωρά εύκολα μέσα από καμπύλους σωλήνες προς έναν εξωθητήρα (Salentijn, et al, 2017).

Ένα σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας FDM και μια επισκόπηση της μηχανής FDM παρουσιάζονται στις 2 παρακάτω Εικόνες 2.3 και 2.4.



Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα της μοντελοποίησης συνηγμένης εναπόθεσης με την κεφαλή εκτύπωσης να κινείται στο επίπεδο x-y και η πλατφόρμα να πέφτει, στρώμα κατά στρώμα, κατά μήκος του άξονα z (Salntijn et al, 2017)



Σχήμα 2.4: Μηχανή FDM (Salentijn et al, 2017)

Ο λόγος που δίνεται τόσο έμφαση στις FDM εκτυπώσεις βρίσκεται στο γεγονός ότι έχει πολλά προτερήματα.

Η χρήση των κεφαλών εκτύπωσης (nozzle) –Τα είδη των nozzle.

Υπάρχουν τόσα πολλά πράγματα που πρέπει να εξεταστούν κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση. Μπορεί να συνεχίσουμε να απαριθμούμε το πλήθος των ρυθμίσεων που πρέπει

να επανεξεταστούν ακόμη και πριν από την έναρξη μιας εκτύπωσης, καθώς επίσης τις ρυθμίσεις που απαιτούνται για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής ποιότητας εκτυπώσεων. Μια ρύθμιση εξαρτήματος που συχνά παραβλέπεται είναι η κεφαλή εκτύπωσης. Ωστόσο, ως το τελευταίο εξάρτημα που έρχεται σε επαφή με το νήμα, έχει σημαντικό αντίκτυπο στο χρόνο εκτύπωσης και την ποιότητα. Η επιλογή της σωστής κεφαλής εκτύπωσης είναι επομένως ένα σημαντικό επόμενο βήμα για τη βελτίωση των δεξιοτήτων του χρήστη στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

Η γνώση των αποτελεσμάτων και ιδιοτήτων των κεφαλών εκτύπωσης στη συνολική διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι αρκετά σημαντική. Παρακάτω θα εξεταστούν οι διάφορες επιλογές κεφαλών εκτύπωσης, που κυκλοφορούν στην αγορά (Sharma, et.al, 2021).

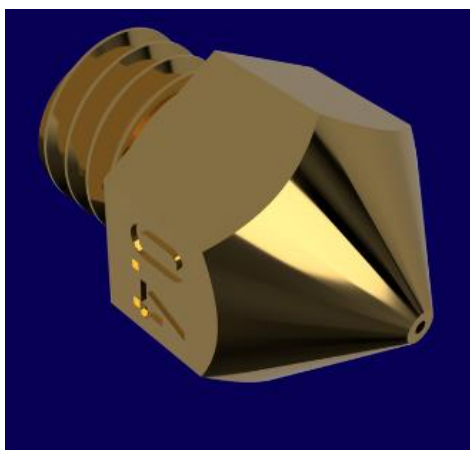
Η σημασία των κεφαλών εκτύπωσης

Η κεφαλή εκτύπωσης είναι το μηχανικό μέρος του τρισδιάστατου εκτυπωτή που εξωθεί το νήμα. Μεταφέρει τη θερμική ενέργεια που παρέχεται από το θερμαινόμενο μελανοδοχείο και το μπλοκ στο νήμα, λιώνοντας το. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, είναι σαφές ότι τρία σημαντικά χαρακτηριστικά είναι αναπόσπαστα για τον σχεδιασμό μιας κεφαλής εκτύπωσης: το μέγεθος, το υλικό και η εσωτερική διάμετρος.

Όσο μεγαλύτερη είναι η κεφαλή εκτύπωσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαθέσιμη μάζα και επιφάνεια για τη μεταφορά θερμότητας στο νήμα, καθιστώντας τη διαδικασία αυτή πιο αποτελεσματική και ικανή για υψηλότερες ταχύτητες εξώθησης. Η θερμική αγωγιμότητα σχετίζεται επίσης με το υλικό της κεφαλής εκτύπωσης, καθώς κάθε υλικό μεταφέρει την ενέργεια με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με τις ιδιότητές του.

Τέλος, η εσωτερική διάμετρος της κεφαλής εκτύπωσης επηρεάζει την ποσότητα πλαστικού που εξωθείται ανά δευτερόλεπτο, μια ιδιότητα γνωστή ως ροή, η οποία καθορίζει επίσης τη μέγιστη ταχύτητα εξώθησης. Η εσωτερική διάμετρος σχετίζεται επίσης με την ακρίβεια του τελικού τεμαχίου: Οι μικρότερες διαμέτροι επιτρέπουν την εκτύπωση λεπτότερων στρωμάτων και τοιχωμάτων.

Συνοπτικά, και τα τρία χαρακτηριστικά της κεφαλής εκτύπωσης μπορούν να έχουν μεγάλο αντίκτυπο στον χρόνο εκτύπωσης του εξαρτήματός σας καθώς και στην ποιότητα του τελικού αντικειμένου. Συνήθως, πρέπει να επιτευχθεί ένας συνδυασμός μεταξύ αυτών των δύο αποτελεσμάτων (Wu, 2020).



Σχήμα 2.5: Μια κεφαλή εκτύπωσης 0.4 mm (GrabCad.com)

Το συνολικό μέγεθος μιας κεφαλής εκτύπωσης θα καθορίσει από το πόσο καλά μπορεί να θερμανθεί το νήμα κατά την εξώθηση. Με τον όρο μέγεθος κεφαλής εκτύπωσης, εννοούμε τη φυσική μάζα και το μήκος του εξαρτήματος.

STANDARD

Δεν υπάρχουν τόσα πολλά διαφορετικά μεγέθη κεφαλής εκτύπωσης στην αγορά, καθώς το μήκος του άξονα του κεφαλής εκτύπωσης υπαγορεύεται από τον τύπο και το μέγεθος του μπλοκ. Οι τρέχουσες τυποποιημένες διαστάσεις για αυτά τα εξαρτήματα συμμορφώνονται με τα θερμά άκρα V6 και τα εξωθητικά MK8, με συνολικό μήκος 12 έως 13 mm από την άκρη έως το άκρο του σπειρώματος M6x1.

VOLCANO

Τα λεγόμενα θερμά άκρα Volcano είναι ειδικά σχεδιασμένα για υψηλότερες ταχύτητες και θερμοκρασίες, με ισχυρισμούς ότι μπορούν να επεξεργαστούν τουλάχιστον τρεις φορές περισσότερο πλαστικό από τα κανονικά θερμά άκρα V6. Για τους λόγους αυτούς, τα Volcano απαιτούν μια μακρύτερη κεφαλή εκτύπωσης, συνήθως 21 mm από άκρο σε άκρο για να προάγουν την καλύτερη θερμική αγωγιμότητα.

SUPERVOLCANO

Η τρίτη επιλογή μεγέθους, αν και σπάνια συναντάται σε τρισδιάστατους εκτυπωτές αποθέματος, είναι το supervolcano. Όπως υποδηλώνει το όνομα, πρόκειται για μια ακόμη μεγαλύτερη έκδοση της κεφαλής εκτύπωσης Volcano, με σχεδόν μήκος 50 mm. Για να διαχειριστεί τέτοιες τεράστιες διαστάσεις, η κασέτα θέρμανσης είναι ονομαστικής ισχύος 80W και μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες 500 °C. Αυτό καταλαβαίνουμε αυτόματα ότι ανεβάζει το κόστος της εκτύπωσης.

Η επόμενη ιδιότητα των κεφαλών εκτύπωσης είναι το υλικό. Όλα οι κεφαλές εκτύπωσης που παράγονται σήμερα είναι κατασκευασμένα από κάποιο είδος μετάλλου λόγω της σχετικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας και των στενών ανοχών κατασκευής. Με αυτό το δεδομένο, χρησιμοποιούνται διαφορετικά μέταλλα στην κατασκευή κεφαλών εκτύπωσης. Το καθένα έχει μοναδικές ιδιότητες, οι οποίες επηρεάζουν τη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης με διαφορετικούς τρόπους. Παραθέτονται μερικά από τα πιο δημοφιλή υλικά κεφαλών εκτύπωσης.

Μπρούτζινες κεφαλές εκτύπωσης



Σχήμα 2.6: Μπρούτζινες κεφαλές εκτύπωσης

Ο ορείχαλκος ή αλλιώς μπρούτζος είναι μακράν το πιο συνηθισμένο μέταλλο που χρησιμοποιείται για κεφαλές τρισδιάστατων εκτυπωτών. Αυτό το κράμα χαλκού-ψευδαργύρου προσφέρει μεγάλη μεταφορά θερμότητας με σχετικά χαμηλό κόστος. Ενώ αυτές οι κεφαλές εκτύπωσης τείνουν να είναι φθηνές, ο ορείχαλκος δεν είναι το πιο ανθεκτικό υλικό και είναι ιδιαίτερα ευάλωτο στη φθορά.

Οι κεφαλές από ορείχαλκο μπορούν να φθαρούν εξωτερικά από κάθε χτύπημα ή γρατζουνιά που μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Παρόλο που αυτό δεν γίνεται άμεσα αντιληπτό, η φθορά συσσωρεύεται αργά με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που μπορεί πραγματικά να θέσει σε κίνδυνο σημαντικές εξωτερικές διαστάσεις της κεφαλής εκτύπωσης.

Τα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως οι ίνες άνθρακα και τα νήματα που είναι γεμάτα μέταλλο, περιέχουν λειαντικά σωματίδια που μπορούν να καταστρέψουν τις εσωτερικές επιφάνειες των κεφαλών εκτύπωσης, εάν χρησιμοποιούνται τακτικά. Μια κατεστραμμένη εσωτερική οπή μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ποιότητα εκτύπωσης και η παγίδα είναι ότι αυτή η διάβρωση είναι σχεδόν αδύνατο να εντοπιστεί και να διαγνωστεί. Για το λόγο αυτό, οι μπρούτζινες κεφαλές εκτύπωσης χρησιμοποιούνται καλύτερα για την εκτύπωση μη λειαντικών υλικών.

Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης: 300 °C

Χρησιμοποιείται καλύτερα με: PLA, ABS, PETG, Nylon και TPE (Hofstaetter, 2015).

Κεφαλές εκτύπωσης από σκληρυμένο ατσάλι



Σχήμα 2.7: Κεφαλές εκτύπωσης από σκληρυμένο ατσάλι

Οι κεφαλές από σκληρυμένο ατσάλι σημαντική αναβάθμιση, καθώς είναι αρκετά ανθεκτικά για συχνή χρήση λειαντικών υλικών και προσφέρουν κυριολεκτικά χρόνια χρήσης χωρίς αντικατάσταση. Ωστόσο, αυτό το υλικό έχει ακόμη χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από την κεφαλή από μπρούτζο και χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να επιτευχθεί η θερμοκρασία.

Η εσωτερική του επιφάνεια δεν είναι τόσο λεία όσο άλλων "μαλακότερων" υλικών, οδηγώντας ενδεχομένως σε χαμηλότερη ποιότητα εκτύπωσης. Λάβετε υπόψη όλα τα παραπάνω προτού αγοράσετε αυτές τις κεφαλές εκτύπωσης, καθώς είναι επίσης πιο δαπανηρά από τα κανονικά.

Μέγιστη θερμοκρασία: 500 °C

Χρησιμοποιείται καλύτερα με: Όλα τα υλικά και ιδιαίτερα των μετάλλων. (Hofstaetter, 2015).

Κεφαλές εκτύπωσης από ανοξείδωτο χάλυβα



Σχήμα 2.8: Κεφαλές από ανοξείδωτο χάλυβα.

Ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι ένα άλλο δημοφιλές υλικό που χρησιμοποιείται στις κεφαλές εκτύπωσης. Αποτρέπει, σε κάποιο βαθμό, το λιωμένο πλαστικό να κολλήσει στις επιφάνειές του, διατηρώντας το καθαρότερο.

Αυτές οι κεφαλές δεν μολύνουν την εκτύπωση με μόλυβδο, κάτι που μπορεί να συμβεί με τις ορειχάλκινες κεφαλές. Ως εκ τούτου, οι κεφαλές από ανοξείδωτο χάλυβα είναι θεωρητικά κατάλληλα για χρήση με υλικά τροφίμων.

Ο ανοξείδωτος χάλυβας επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερης ποικιλίας νημάτων, αλλά εξακολουθεί να μη συνιστάται για βαριά χρήση λειαντικών υλικών. Είναι επίσης λιγότερο θερμικά αγωγίμο σε σύγκριση με τον ορείχαλκο.

Μέγιστη θερμοκρασία: 500 °C

Χρησιμοποιείται καλύτερα με: Μη λειαντικά νήματα και ελαφριά χρήση λειαντικών υλικών, όπως νήματα NylonX, ανθρακονήματα, νήματα που λάμπουν στο σκοτάδι, νήματα γεμισμένα με μέταλλο, ξύλο και κεραμικά.

Σύνθετες κεφαλές εκτύπωσης



Σχήμα 2.9: Σύνθετη κεφαλή εκτύπωσης

Οι σύνθετες κεφαλές εκτύπωσης αποτελούνται από δύο ξεχωριστά μέρη που ενώνονται μεταξύ τους, το καθένα από τα οποία είναι κατασκευασμένο από διαφορετικό υλικό για να αξιοποιήσει τις καλύτερες ιδιότητες του καθενός. Έχουμε ήδη δει ότι ορισμένα υλικά - ο σκληρυμένος χάλυβας, για παράδειγμα - προσφέρουν μικρότερη θερμική αγωγιμότητα, παρόλο που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά.

Οι σύνθετες κεφαλές εκτύπωσης έχουν συνήθως ένα κύριο υλικό που έχει εξαιρετικές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας, ενώ το εσωτερικό μέρος που έρχεται σε επαφή με το νήμα έχει ανθεκτικές και ανθεκτικές στην τριβή ιδιότητες. Η ιδέα είναι να έχουμε το καλύτερο και από τα 2 υλικά σε μια μόνο κεφαλή εκτύπωσης.

Αυτά οι ειδικές κεφαλές συνιστώνται ειδικά για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών και υλικά όπως PEEK και νήματα ινών άνθρακα. Ορισμένες από αυτές τις κεφαλές εκτύπωσης περιλαμβάνουν υλικά υψηλής ποιότητας, όπως το ρουμπίνι. Είναι κατανοητό ότι οι σύνθετες κεφαλές εκτύπωσης είναι πολύ πιο ακριβές από τις κανονικές ποικιλίες ορείχαλκου και ανοξείδωτου χάλυβα.

Μέγιστη θερμοκρασία: Υψηλές θερμοκρασίες, αλλά η ακριβής μέγιστη θερμοκρασία διαφέρει μεταξύ των μοντέλων.

Χρησιμοποιείται καλύτερα με: Όλα τα υλικά, συμπεριλαμβανομένης της βαριάς χρήσης λειαντικών υλικών και τεχνικών πλαστικών, όπως PEEK και Ultem. (Hofstaetter, 2015).

2.2 Διάμετροι κεφαλών εκτύπωσης



Σχήμα 2.10: Διάφοροι διάμετροι της ίδιας κεφαλής εκτύπωσης

Το τελευταίο και ίσως πιο λεπτό χαρακτηριστικό των κεφαλών εκτύπωσης που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η εσωτερική διάμετρος της οπής. Οι διάμετροι των κεφαλών εκτύπωσης κυμαίνονται γενικά από 0,1 mm έως και 1,0 mm. Αυτό παρέχει στον χρήστη του τρισδιάστατου εκτυπωτή μεγάλο βαθμό ευελιξίας.

Η επιλογή της κεφαλής εκτύπωσης έχει να κάνουν με την εξισορρόπηση του πόσο νήμα εξωθείται και πόσο γρήγορα. Το απόλυτο πρότυπο στους τρισδιάστατους εκτυπωτές σήμερα είναι η κεφαλή εκτύπωσης με διάμετρο 0,4 mm, το οποίο βρίσκεται σχεδόν σε όλα τα δημοφιλή μηχανήματα. Αυτή η διάμετρος παρέχει μια εξαιρετική ισορροπία μεταξύ ταχύτητας και ακρίβειας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το συνιστώμενο εύρος ύψους στρώματος εξαρτάται από τη διάμετρο της οπής της κεφαλής εκτύπωσης. Ως γενικός κανόνας, οι μέγιστες τιμές ύψους στρώματος δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 80% της διαμέτρου της οπής της κεφαλής εκτύπωσης. Για παράδειγμα, ένα μια οπή κεφαλής εκτύπωσης 0,4 mm έχει συνιστώμενο μέγιστο ύψος στρώματος 0,32 mm.

Είναι αυτονόητο ότι οι μεγαλύτερες οπές κεφαλών εκτύπωσης θα εξάγουν περισσότερο υλικό μέσω μεγαλύτερου ύψους και πλάτους στρώματος. Από την άλλη πλευρά, οι μικρότερες οπές κεφαλών εκτύπωσης (μικρότερα από 0,4 mm) μπορούν να αποδώσουν εκπληκτικά λεπτομερείς εκτυπώσεις με ελάχιστα ορατά σημάδια στρώματος. Δυστυχώς, αυτό συνοδεύεται από μείωση της ταχύτητας εκτύπωσης και αυξημένη πιθανότητα μπλοκώματος της κεφαλής, καθώς η διάμετρος της οπής είναι τόσο μικρή.

Μεγαλύτερες οπές κεφαλών εκτύπωσης (> 0,4 mm)

- Μειωμένος χρόνος εκτύπωσης
- Λιγότερα σφάλματα εκτύπωσης που σχετίζονται με τις κεφαλές εκτύπωσης.
- Συνιστάται για λειαντικά υλικά (λιγότερο επιρρεπής στην απόφραξη με σωματίδια)

Μικρότερες οπές κεφαλών εκτύπωσης (<0,4 mm)

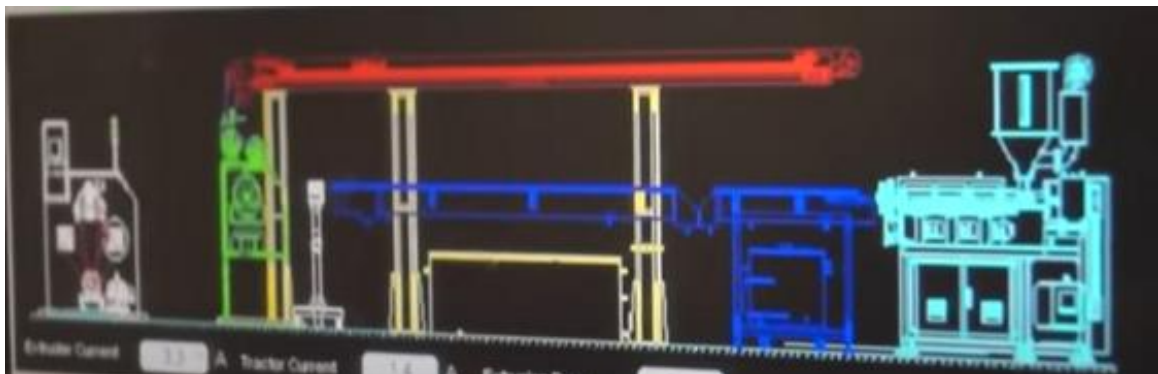
- Υψηλότερη ακρίβεια
- Υψηλότερη ποιότητα προεξοχών
- Τα στηρίγματα αφαιρούνται ευκολότερα.

2.3 Αναλυτικές πληροφορίες για τα νήματα που χρησιμοποιούνται στην FDM.

Η διαδικασία παρασκευής νημάτων

Αρχικά χρησιμοποιούμε ακατέργαστη ρητίνη και τη υλικού στη σωστή αναλογία. Η αναλογία εξαρτάται από το πολυμερές. Έπειτα ανάλογα με την εφαρμογή του υλικού προσθέτουμε σε ποτήρι ζέσεως ή αναδευόμενο αντιδραστήρα. Έπειτα, στεγνώνεται το υλικό (σε συγκεκριμένους βαθμούς ανάλογα με τη χρήση του), γιατί εάν δεν στεγνώσει καλά θα αστοχήσει στην πορεία της διαδικασίας. Μετά πηγαίνουμε σε ένα εξωθητή, ο οποίος είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μηχανήματα κατασκευής. Καθώς βγαίνει από τον εξωθητή, όπου εκεί ανακατεύεται και θερμαίνεται Από τον εξωθητή παράγεται ένα νήμα το οποίο έπειτα ψύχεται ή ζεσταίνεται ανάλογα με τις συνθήκες και τον πολυμερισμό. Στην περίπτωση που έχουμε οβάλ νήμα, οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό που θερμαίνει ή ψύχει το νήμα είναι σε λάθος θερμοκρασία. Έπειτα στεγνώνεται για μερικά μέτρα και τέλος τυλίγεται στα ράουλα και έπειτα στα καρούλια. Η ταχύτητα του συστήματος επηρεάζει το πάχος.

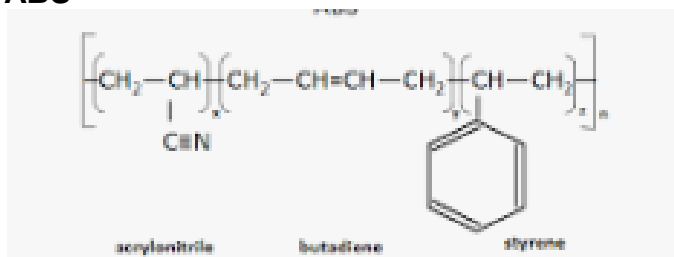
Έτσι για να τραβηχτεί το νήμα γρήγορα θα βγει πιο λεπτό. Εάν τραβηχτεί το νήμα αργά θα βγει πιο χοντρό. Παρατίθεται το μηχανολογικό σχέδιο μια διεργασίας παρασκευής νήματος. (Taylor, 1924)



Σχήμα 2.11: Μηχανολογικό σχέδιο παρασκευής νήματος

Παρατηρείται με γαλάζιο χρώμα το σχήμα του εξωθητή. Με μπλε χρώμα και κόκκινο, τα ψυχόμενα νερά σε μπλε και με κόκκινο η διάταξη για τα θερμά νερά. Τέλος τα ράουλα και το καρούλι που είναι το τελικό αποτέλεσμα.

ABS



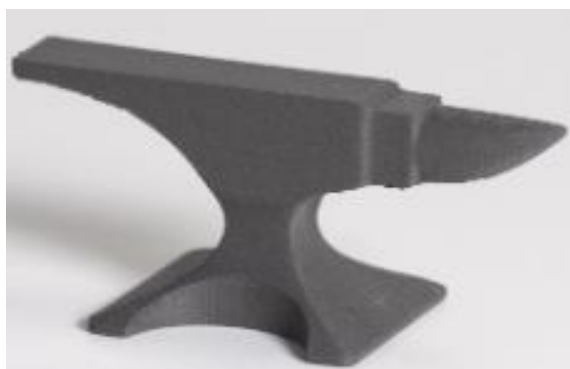
Σχήμα 2.12: Το ABS

Το ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) είναι ένα τριπολυμερές το οποίο αποτελείται από 3 διαφορετικά μακρομόρια, το μακρομόριο του ακρυλονιτριλίου, του βουταδιενίου και του στυρενίου. (Καραγιαννίδης, 2010)

Το ABS είναι το αρχαιότερο υλικό στην τρισδιάστατη εκτύπωση μοντέλων στον κόσμο. Αυτό το υλικό είναι από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στους εκτυπωτές. Οι ιδιότητες του ABS είναι ότι είναι σκληρό και ανθεκτικό σε διαλύτες, που αυτό το κάνει πολύ ισχυρό πολυμερές ή με τη χρήση πρόσθετων –πλαστικό. Παράλληλα, το ABS έχει υψηλή θερμοκρασία τήξεως –δηλαδή θερμοκρασία μετάβασης από την στερεή στην υγρή κατάσταση-που αυτό σημαίνει ότι μπορεί να αντέξει υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να αλλάξει χημική δομή και θέση των μακρομορίων του. Το ABS είναι καλό για εξωτερικές εφαρμογές και υψηλής θερμοκρασίας εφαρμογές. Όταν γίνεται εκτύπωση με ABS καλό θα ήταν να γίνεται σε καλά αεριζόμενο χώρο, αφού το υλικό έχει οσμή. Τέλος το ABS τείνει να συστέλλεται με την ψύξη του οπότε συνιστάται έλεγχος της θερμοκρασίας, έτσι χρειάζεται θερμαινόμενη επιφάνεια σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Η χρήση του ABS έχει χαμηλό κόστος και παίρνουμε ένα καλό φινίρισμα στο μοντέλο (Hwang et al, 2015).

Μεταλλικά υλικά

Τα μεταλλικά νήματα στην τρισδιάστατη εκτύπωση, που αποτελούν μια σύνθετη πούδρα πολύ καλά αλεσμένου μετάλλου και μιας μήτρας (συνήθως πολυμερικής πούδρας). Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι κράματα του διαγράμματος Fe- C (διάγραμμα σιδήρου- άνθρακα) καθώς και άλλων μεταλλουργικών διαγραμμάτων. Αυτά μπορούν να είναι χαλκός, ανοξείδωτο ατσάλι, μπρούτζος καθώς και πολλά άλλα. Τα κράματα αυτά –αναφέρονται ως κράματα καθώς καθαρό μέταλλο (100%) δεν υπάρχει στη φύση (Callister, 2015) - βρίσκονται σε διαφορετικές συστάσεις και διαφορετική αναλογία μήτρας- ενίσχυσης.



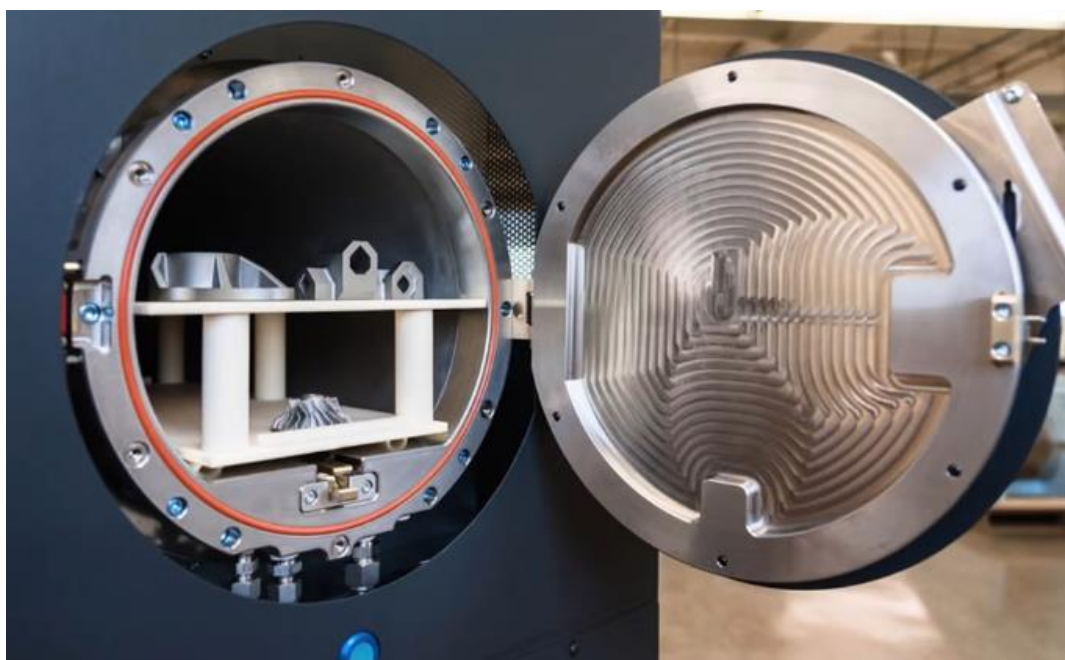
Σχήμα 2.13: Μέταλλο

Η διαφορετικές αναλογίες δίνουν διαφορετικό ειδικό βάρος και βάρος, το οποίο είναι μεγαλύτερο από της μήτρας. Αυτό σημαίνει ότι τα νήματα τα οποία φτιάχνονται από μέταλλο είναι πιο βαριά από τα κλασικά πολυμερικά ή πλαστικά νήματα (όπως το ABS). Πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στη χρήση των κεφαλών εκτύπωσης καθώς πρέπει να είναι συμβατές με το νήμα. Τα μεταλλικά νήματα δίνουν το χαρακτηριστικό μεταλλικό φινίρισμα και την χαρακτηριστική μεταλλική λάμψη. Είναι όμως αρκετά ακριβότερα από τα πολυμερικά και πλαστικά νήματα. Δεν χρειάζεται εκβολέα θερμαινόμενο, ούτε θερμαινόμενη επιφάνεια (όπως το ABS) (Hwang, et al, 2015)

Υπάρχει ένα φαινόμενο που παρατηρείται σε μοντέλα που τυπώνονται με μεταλλικά νήματα. Αυτό είναι το φαινόμενο της συρρίκνωσης. Τα εξαρτήματα υπόκεινται σε συρρίκνωση κατά τη μετεπεξεργασία τους (από 18% έως 25% του αρχικού τους όγκου ανάλογα με το σχέδιο και τη μάρκα του νήματος), επειδή αφαιρείται το πλαστικό υλικό τους και συμπυκνώνεται με το εναπομείναν μέταλλο. Αυτό επιφέρει έναν πρόσθετο βαθμό δυσκολίας κατά την εκτύπωση λειτουργικών εξαρτημάτων όπου η ακρίβεια των διαστάσεων αποτελεί προτεραιότητα. Ωστόσο, ο παράγοντας συρρίκνωσης είναι σταθερός, ώστε να μπορείτε να κλιμακώσετε κατάλληλα τα αρχικά σας μοντέλα CAD.

Τα περισσότερα μέταλλα έχουν ένα στενό παράθυρο συρρίκνωσης 16-17% στον άξονα ΧΥ και 19-20% στον άξονα Ζ. Ο Ζ θα παρουσιάσει διαστολή εάν η διαδικασία αποκόλλησης δεν πάει ομαλά, αλλά θα πρέπει να συρρικνωθεί λίγο περισσότερο από τους Χ και Υ σε έναν επιτυχημένο κύκλο. Συνολικά, η φυσιολογική συρρίκνωση είναι 7-10%, λέει η εταιρεία. Τα τελικά εξαρτήματα θα έχουν πυκνότητα 80-85%, αλλά τα εξαρτήματα μπορούν να πυροσυσσωματωθούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, πράγμα που σημαίνει μεγαλύτερη συρρίκνωση και υψηλότερη πυκνότητα.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση μεταλλικού νήματος δεν αποδίδει ισχυρά ή χρησιμοποιήσιμα μεταλλικά εξαρτήματα αμέσως μετά την εκτύπωση. Οι αρχικές εκτυπώσεις είναι γνωστές ως πράσινα αντικείμενα, τα οποία είναι εύθραυστα και παρουσιάζουν ελάχιστα μεταλλικά χαρακτηριστικά. Η μεταγενέστερη επεξεργασία είναι απαραίτητη.



Σχήμα 2.14: Φούρνος μετεπεξεργασίας

Μετά την εκτύπωση, ένα πράσινο αντικείμενο περνάει από αποδέσμευση, η οποία είναι μια καταλυτική διαδικασία που χρησιμοποιεί οξύ που διαλύει το πλαστικό ή το συστατικό συνδετικό υλικό. Αυτό το βήμα δημιουργεί κανάλια ανοικτών πόρων σε όλο το εξάρτημα. Αυτό το πορώδες μέρος ονομάζεται "καφέ" μέρος.

Το καφέ μέρος στη συνέχεια πυροσυσσωματώνεται σε έναν κλίβανο, ο οποίος θερμαίνει ομοιόμορφα τα μέρη λίγο κάτω από το σημείο τήξης τους, αφαιρώντας τυχόν εναπομείναντα συνδετικά υλικά και συγχωνεύοντας τα μεταλλικά σωματίδια για να σχηματίσουν πυκνά μέρη. Τα περισσότερα μεταλλικά υλικά, μπορούν να πυροσυσσωματωθούν σε κοινό υλικό κλιβάνου, εφόσον μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης για αρκετές ώρες.

Μέρος της οικονομίας της εκτύπωσης με νήμα που έχει εμποτιστεί με μέταλλο είναι ότι δεν χρειάζεστε εξοπλισμό μεταγενέστερης επεξεργασίας. Μπορείτε να στείλετε τα εξαρτήματά σας για επαγγελματική μετεπεξεργασία.

Το μεταλλικό νήμα είναι διαθέσιμο εδώ και αρκετό καιρό και έχει δοκιμαστεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Είναι ισχυρότερο από σχεδόν όλα τα πλαστικά που είναι συμβατά με τις μηχανές FDM και τα τελικά εξαρτήματα παρουσιάζουν όλα τα χαρακτηριστικά που αναζητάτε σε συμπαγή μεταλλικά εξαρτήματα.

Μια πρόσφατη μελέτη διαπίστωσε ότι όταν η κατεύθυνση των στρώσεων είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση εφελκυσμού, τα εξαρτήματα είχαν πολύ χαμηλότερη αντοχή από ότι όταν η κατεύθυνση των στρώσεων ήταν κάθετη προς τη διεύθυνση εφελκυσμού.

Παρ' όλα αυτά, ο σχεδιασμός των τρισδιάστατα εκτυπωμένων εξαρτημάτων και ο προσανατολισμός εκτύπωσης παίζουν καθοριστικό ρόλο. Για να μειωθεί ο κίνδυνος μηχανικής αστάθειας, η Forward AM συνιστά την εκτέλεση μιας "προσομοίωσης σταθερότητας αποδέσμευσης" πριν από την εκτύπωση, ακολουθώντας τις διαδικτυακές οδηγίες της. Αυτό παρέχει μια εκτίμηση των εσωτερικών τάσεων για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας του τεμαχίου κατά τη διάρκεια του καθαρισμού - και παρέχει επίσης μια οπτική ένδειξη για το ποια δομικά χαρακτηριστικά κινδυνεύουν.

Υπάρχουν εργαλεία, μπορείτε να προσδιορίσετε αν η εκτύπωση μεταλλικών νημάτων είναι η βέλτιστη για τα εξαρτήματά σας.

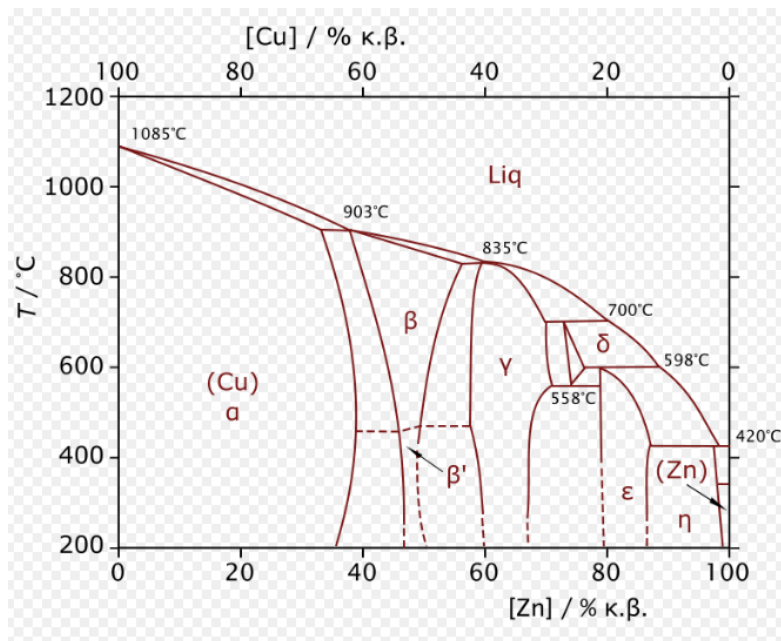
Παρόλο που η τρισδιάστατη εκτύπωση με μεταλλικό νήμα μπορεί να μην είναι κατάλληλη για εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις αντοχής, οι οικονομικοί παράγοντες της παραγωγής πυκνών μεταλλικών μη κρίσιμων εξαρτημάτων σε μια προσιτή μηχανή FDM μπορεί να αντισταθμίσουν την ασυμβατότητά τους για ορισμένες εφαρμογές υψηλής πίεσης.

Νήμα με πούδρα μπρούτζου και μήτρα HTPLA

Το HTPLA σε συνδυασμό με το αληθινής πούδρας μπρούτζου της εταιρίας protopasta δημιουργεί ένα μεταλλικό φινίρισμα. Η εταιρεία protopasta είναι μια εταιρία που ιδρύθηκε το 2013. Κατασκευάζει νήματα για εκτυπώσεις και άλλες εφαρμογές.

Το HTPLA είναι το πολυλακτικό οξύ το οποίο έχει υποστεί θερμική διεργασία.

Ο μπρούτζος (Brass) αποτελεί κράμα του χαλκού (Cu) με τον ψευδάργυρο (Zn) το οποίο μπορεί να έχει διαφορετικές περιεκτικότητες ανάλογα με τη χρήση του. Οι διάφορες περιεκτικότητες βρίσκονται από το διάγραμμα φάσεων του Cu-Zn με τον κανόνα του μοχλού. (J.R. Davis et al, 2002)



Σχήμα 2.15: Διάγραμμα Χαλκού- Ψευδαργύρου

Οι διάφορες περιεκτικότητες σε ψευδάργυρο (Zn) δίνουν διαφορετικές ιδιότητες και χρώμα. (Frunzaverde, D, 1978).

Το νήμα αυτό τυπώνει σαν πλαστικό αλλά έχει τελείωμα σαν αληθινού μετάλλου (φινίρισμα με μεταλλική λάμψη). Το φινίρισμα αυτό δίνει όμορφα και δυνατά μοντέλα.



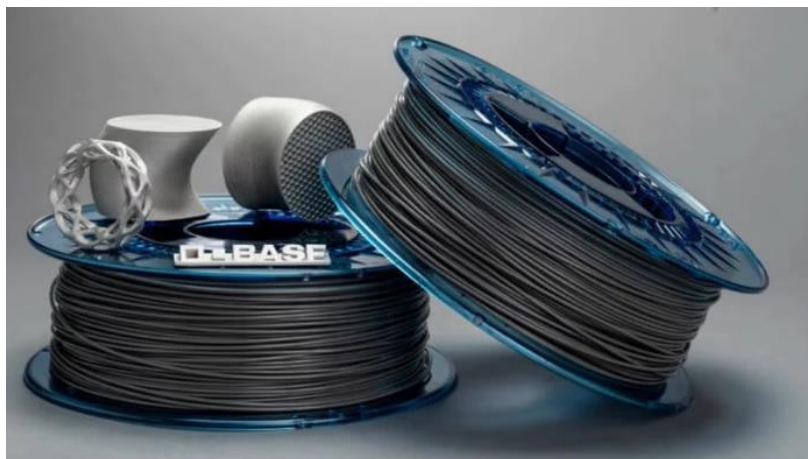
Σχήμα 2.16: Νήμα μπρούτζου από την εταιρία protopasta

Ανάλογα εάν υπάρχει η επιθυμία να τυπωθεί ένα γυαλιστερό φινίρισμα, φινίρισμα όπως για παράδειγμα των λαμπερών νομισμάτων είτε ρουστίκ στυλ με τη χρήση πατίνας. Η πατίνα είναι μια μέθοδος χημικής διάβρωσης είτε φυσικής μορφής (με το πέρασμα του χρόνου) είτε τεχνητής (με την χρήση οξειδίων.) (Χέρμπερτ Ρηντ, 1982)

Το νήμα έχει περιεκτικότητα σε χαλκό (Cu) μικρότερη του 44,1 % και περιεκτικότητα ψευδαργύρου (Zn) μικρότερη του 15 %. Η HTPLA είναι σε αναλογία 37,4 % (Davis et al, 2002).

Νήμα 316L stainless steel

Η εταιρία Zetimix, μια γαλλική εταιρία κατασκευής νημάτων κατασκευάζει νήμα με μεγάλη περιεκτικότητα σε ανοξείδωτο ατσάλι 316 L. Η περιεκτικότητα αυτή κυμαίνεται από 52% μέχρι 55% κατά βάρος μέταλλο μέσα στη μήτρα. Έτσι, έχει χαμηλότερη θερμοκρασία της κεφαλής εκτύπωσης, από άλλες μάρκες. (Dietrich, S. Et al. (2019))



Σχήμα 2.17: Νήμα από ανοξείδωτο ατσάλι 316L

PLA

Το PLA ή αλλιώς πολυλακτικό οξύ, είναι το πιο δημοφιλές νήμα χρήσεως στην τρισδιάστατη εκτύπωση.



Σχήμα 2.18: Νήμα και τυπωμένο τρισδιάστατο μοντέλο πλαστικού νήματος PLA

Μπορεί να τυπώσει τρισδιάστατα μοντέλα σε χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς θερμαινόμενο υπόστρωμα. Είναι το νήμα των αρχαρίων καθώς χρησιμοποιείται πολύ εύκολα και είναι αρκετά φθινό καθώς επίσης δημιουργεί μοντέλα σε μεγάλη ποικιλία. Είναι επίσης φιλικό προς το περιβάλλον καθώς είναι κατά μεγάλο βαθμό βιοδιασπώμενο. Προέρχεται από σοδιές του καλαμποκιού με και του ζαχαροκάλαμου. Κατά την εκτύπωσή του τρισδιάστατου μοντέλου δίνει ένα γλυκό άρωμα, άρα δεν χρειάζεται καλά αεριζόμενους χώρους όπως άλλα νήματα.

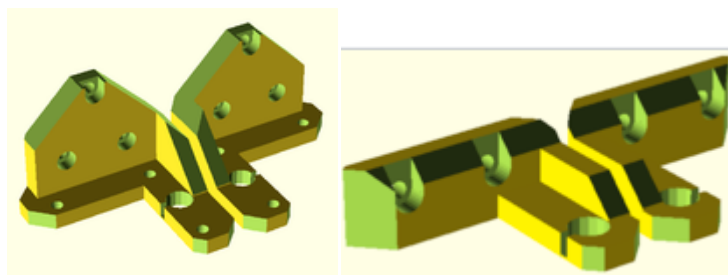
Παράδειγμα σχεδίου μηχανήματος FDM

Εδώ παραθέεται μια μηχανή του εμπορίου (Pursa i3) της εταιρίας pursa research ου βρίσκεται στην αγορά από το 2013.

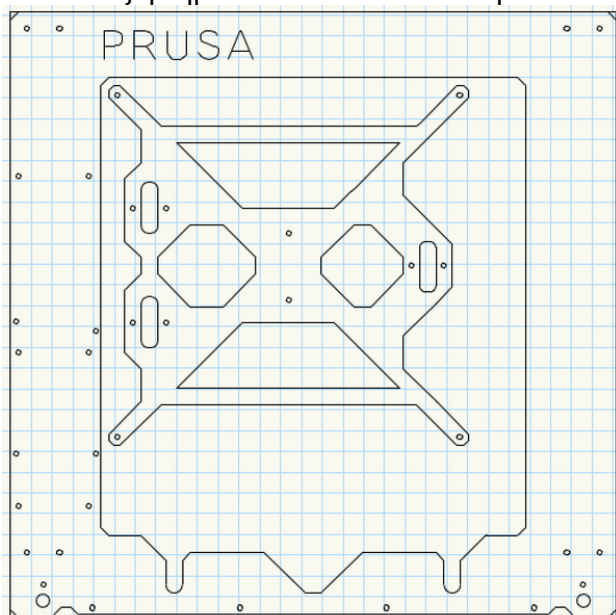


Σχήμα 2.19: Pursa - i3

Παρακάτω βλέπουμε την κάτοψη του μηχανολογικού της σχεδίου. Βλέπουμε πως έχει επιφάνεια τυπώματος και αυτόματη με αυχομείωση των αξόνων με τη χρήση του λογισμικού Marlin. Αποτελείται από πολλές κοχλιώσεις με διαφορετικό μήκος και διάμετρο καθώς και αρκετά εξαρτήματα. Παραθέτονται μερικά από τα εξαρτήματα της Prusa τα οποία ανασύρθηκαν από το πρότζεκτ RepRap.org.



Σχήμα 2.20: Εξαρτήματα από τον εκτυπωτή Pursa -i3



Σχήμα 2.21: Μηχανολογικό σχέδιο Pursa i3 (RepRap.org)

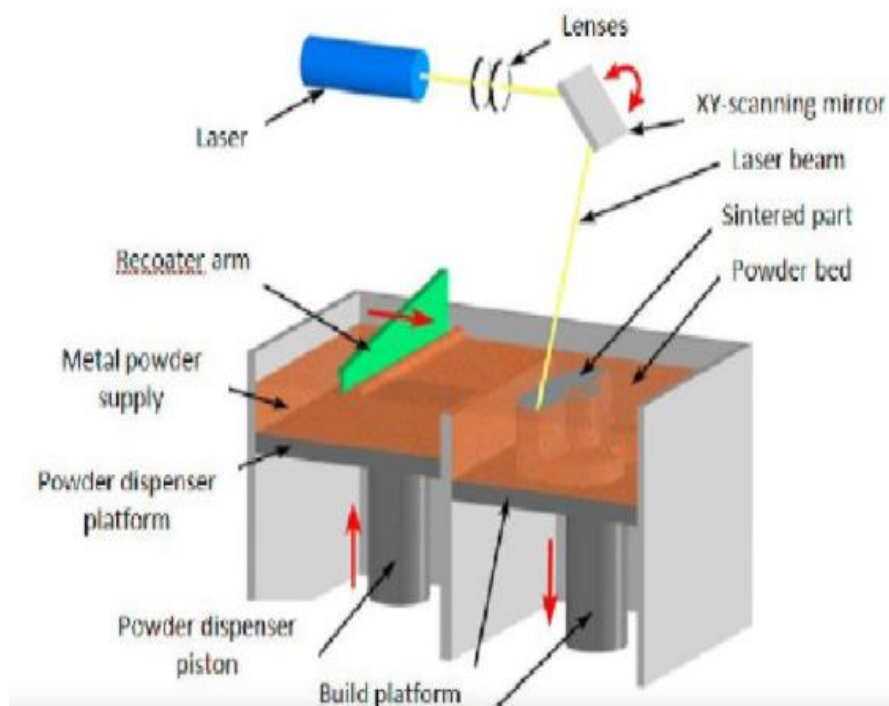
2.4 Powder Bed Fusion - PBF

Οι διαδικασίες παρασκευής πρόσθετων υλικών σύντηξης πούδρας λέιζερ (PowderBedFusion - PBF), θεωρούνται εξαιρετικά ευέλικτες μέθοδοι παραγωγής, επιδεικνύοντας μια σειρά ανταγωνιστικών πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών κατασκευών από την άποψη της δυνατότητας παραγωγής εξατομικευμένων εξαρτημάτων με περίπλοκα εσωτερικά χαρακτηριστικά πλέγματος και σύνθετες εξωτερικές γεωμετρίες χωρίς τη χρήση ειδικών εργαλείων, ουσιαστικά μειώνοντας το χρόνο μεταξύ ψηφιακού σχεδιασμού και κατασκευής (Bhavar, et al, 2017). Επιπρόσθετα, με την προσαρμογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, οι διαδικασίες λέιζερ PBF έχουν τη δυνατότητα παραγωγής ελαφριών ή βελτιστοποιημένων δικτυωτών κατασκευών με κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες (ειδικά όσον αφορά το βάρος) και σύνθεση πολλαπλών υλικών, με ελάχιστη απώλεια υλικού (Gibson, et al., 2015).

Στη νέα γενιά ψηφιακών σκέψεων σχεδιασμού, υπάρχει ένα σημείο ρευστότητας όπου η πολυπλοκότητα, η βελτιστοποίηση βάρους και οι χαμηλές απαιτήσεις παραγωγής των ανταλλακτικών ευνοούν τις προσεγγίσεις AM, με τους υποψηφίους της βιομηχανίας να κυμαίνονται από τον ιατρικό τομέα, έως τις αεροδιαστημικές εφαρμογές (Gibson, et al, 2021).

Τα οφέλη του PBF που βασίζεται σε λέιζερ έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον μεταξύ της ερευνητικής κοινότητας και της βιομηχανίας, με αυξημένη εστίαση σε στρατηγικές για την υπέρβαση ορισμένων από τις υφιστάμενων προκλήσεων που σχετίζονται με την ποιότητα του τμήματος, τη συνέπεια και την επαναληψιμότητα.

Η μέθοδος PBF χρησιμοποιεί μια λεπτή στρώση από πούδρα για να φτιάξει ένα στρώση και ως πηγή ενέργειας ένα λέιζερ, για να τήξει τη πούδρα. Αυτή η διαδικασία αφήνει την τηγμένη πούδρα να απλωθεί σε τρισδιάστατο άξονα. (Jandyal et.al, 2022)



Σχήμα 2.22: Τεχνολογία PBF με λέιζερ

Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, οι διαδικασίες PBF έχουν υψηλό βαθμό ευαισθησίας σε διαταραχές και παραμέτρους της διαδικασίας εισαγωγής, όπως ισχύς λέιζερ, διαδρομή σάρωσης λέιζερ και ταχύτητα σάρωσης. Ο τεράστιος αριθμός ελεγχόμενων και προκαθορισμένων παραμέτρων διαδικασίας έχουν μια πολύπλοκη επίδραση στη μεταβατική θερμική συμπεριφορά της πισίνας τήγματος, που συχνά οδηγεί σε απροσδόκητα ελαττώματα όπως υψηλή τραχύτητα επιφάνειας, θερμική ρωγμή και αποκόλληση, ακούσιες ανισότροπες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, καθώς και ανισότροπη συρρίκνωση (Gibson, et al, 2015).

Η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω του λέιζερ, μπορεί να προκαλέσει το λιώσιμο του υλικού κατά τη διάρκεια της δυναμικής αλληλεπίδρασης λέιζερ-υποστρώματος. Αυτό το είδος ατέλειας έχει συνδεθεί με ανεπαρκή τοπική ισχύ λέιζερ ή υψηλές ταχύτητες σάρωσης (Gibson, et al, 2021).

Η επιφανειακή τραχύτητα και τα επιφανειακά ελαττώματα μπορεί να γίνουν σοβαρά, ειδικά στις λεγόμενες προεξοχές. Σε αυτές τις περιοχές, η αλληλεπίδραση λέιζερ-πούδρας προκαλεί τοπική υπερθέρμανση λόγω κακής αγωγιμότητας και διάχυσης της θερμότητας (Bhavar, et al, 2017). Επιπλέον, οι υψηλοί ρυθμοί ψύξης και η επαναλαμβανόμενη θερμική φόρτιση που προκαλούνται από λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης, παρακείμενες διαδρομές σάρωσης λέιζερ μέσα στο στρώμα, καθώς και θερμότητα που μεταδίδεται από τα επόμενα στρώματα, έχουν σημαντική επίδραση στις τοπικές παροδικές κατανομές θερμοκρασίας και κλίσεις θερμοκρασίας, προκαλώντας κύκλους ταχείας θέρμανσης, τήξης και στερεοποίησης. Αυτές οι επιδράσεις προκαλούν κυρτώματα στις επιφάνειες και αποκλίσεις διαστάσεων του τελικού μέρους (Gibson, et al, 2021).

Ο τεράστιος αριθμός παραμέτρων που αλληλεπιδρούν για να δημιουργήσουν ένα δυναμικό περιβάλλον πισίνας τήγματος θα αυξήσει το επίπεδο πολυπλοκότητας των προσεγγίσεων κατασκευής PBF λέιζερ. Οι τρέχουσες στρατηγικές για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων διεργασίας των αναδυόμενων υλικών ή βελτιώσεων για τα υπάρχοντα υλικά εξακολουθούν να βασίζονται σε δαπανηρές και χρονοβόρες δοκιμές.

Για να ελαχιστοποιήσουν την ανάγκη για τέτοιες επαναλήψεις, οι ερευνητές εργάζονται για την ανάπτυξη μοντέλων AM υψηλής πιστότητας που βασίζονται στη φυσική για να περιορίσουν το εύρος παραμέτρων εισόδου. Ωστόσο, αυτά τα μοντέλα βασίζονται σε ακριβείς ιδιότητες υλικού εισόδου, όπως διάχυση, ανακλαστικότητα και εκπομπή υλικών σε πολλαπλές καταστάσεις συσσωμάτωσης (πούδρα, υγρό, στερεό), οι οποίες είναι προς το παρόν μη διαθέσιμες. Αυτά τα μοντέλα απαιτούν επίσης ακριβείς μετρήσεις για τελειοποίηση και επικύρωση (Bhavar, et al, 2017).

Προκειμένου οι τεχνολογίες AM που βασίζονται σε λέιζερ για να γίνουν αναπόσπαστο μέρος της γενικής παραγωγής, τα παραγόμενα ανταλλακτικά πρέπει να τηρούν αυστηρά πρότυπα ποιότητας, με επαναλαμβανόμενα και αξιόπιστα χαρακτηριστικά. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν κατάλληλες στρατηγικές μέτρησης που θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση που αφορούν τις παραμέτρους διαδικασίας εισόδου και ποιότητας προϊόντων (Gibson, et al, 2015).

Υλικά στην PBF

Όπως είναι αναμενόμενο για μια αναδυόμενη τεχνολογία, τα εμπορικά κράματα που χρησιμοποιούνται για τα συστήματα PBF είναι συνήθως επαναχρησιμοποιημένα από καθιερωμένες τεχνολογίες κατασκευής, ιδίως από εφαρμογές χύτευσης και μεταλλουργίας πούδρας. Αυτά τα εμπορικά διαθέσιμα κράματα επιτρέπουν την επιτάχυνση της τεχνολογίας PBF, δεδομένου ότι η σύνθεση του κράματος και η επεξεργασία είναι τεχνικά κατανοητές και οι πιθανές εφαρμογές είναι οικείες στους πιθανούς τελικούς χρήστες. Ωστόσο, αυτά τα δυνητικά πλεονεκτήματα αντισταθμίζονται κάπως επειδή αυτά τα κράματα δεν είναι προσαρμοσμένα στην ειδική θερμομηχανική επεξεργασία που είναι εγγενής στη διαδικασία PBF. Η ανάπτυξη υλικών βελτιστοποιημένων για PBF παραμένει ένα ανοιχτό εμπορικό έργο.

Ερευνητική ευκαιρία.3

Τα σύγχρονα συστήματα PBF μπορούν να επεξεργαστούν μια σειρά από υποψήφια μέταλλα, συμπεριλαμβανομένων υλικών όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο. Leary, M. (2020))

Παρακάτω, παρατίθεται ο Πίνακας 2.1 με τις ιδιότητες τις κάθε πούδρας:

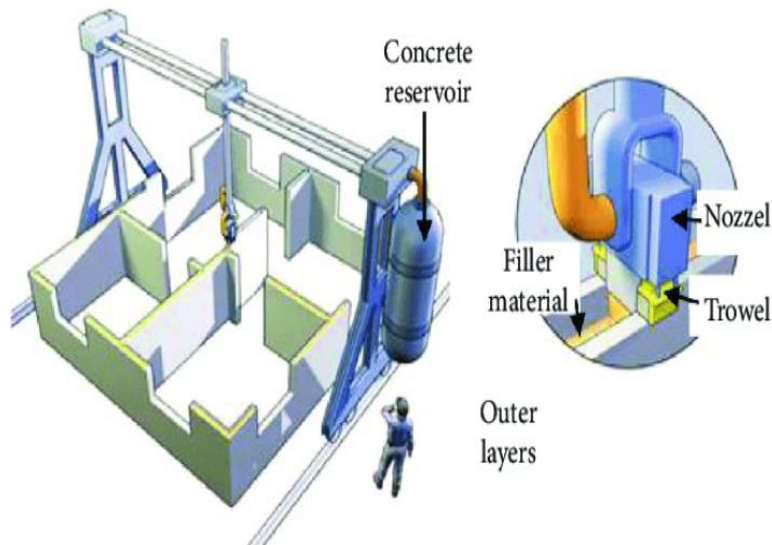
Υλικό	ρ (g/mol)	T_m (C)	k (W/Mk)	C_p (J/kgK)	Συντελεστής Θερμικής διαστολής ($\mu m/mk$)	Σχόλια	Εφαρμογές
Titanium (Ti64)	4430	1604- 1660	6.7	526	8.6	Ελαφρύ κράμα με εξαιρετική βιοσυμβατότητα.	Ιατρικά εμφυτεύματα
Inconel (624)	8440	1290- 1350	9.8	410	12.8	Εξαιρετικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες	Αεριοστρόβιλοι, πύραυλοι κινητήρες
Aluminium (AlSi10Mg)	2670	577	110	915	21	Υψηλής χυτευσιμότητας ελαφρύ κράμα με σχετικά υψηλές μηχανικές ιδιότητες.	Σύνθετα καλούπια
Copper (CuCrZr)	8900	1075- 1080	320	380	17	Κράμα χαλκού σκλήρυνσης με κατακρήμνιση	Ηλεκτρόδια και ηλεκτρικές επαφές.
Tool steel (H13)	7800	1427	24	460	11	Υψηλή σκληρότητα, αντοχή στη φθορά και ανθεκτικότητα	Χύτευση και εργαλεία σφυρηλάτησης.

Πίνακας 2.1 Ιδιότητες διάφορων σκονών της μεθόδου PBF

2.5 Contour Crafting

Το ContourCrafting (CC) είναι μια μέθοδος AM που χρησιμοποιεί έναν υπολογιστή για να εκμεταλλευτεί την ανώτερη ικανότητα σχηματισμού επιφάνειας για να δημιουργήσει λεία και ακριβή πλάνα και επιφάνειες ελεύθερης μορφής. Το βασικό χαρακτηριστικό του ContourCrafting είναι η χρήση δύο σπατουλών, οι οποίες λειτουργούν ως δύο συμπαγείς

επιφάνειες πλάνης, για να δημιουργήσουν επιφάνειες στο αντικείμενο που κατασκευάζεται και είναι ομαλές και ακριβείς (Khoshnevis & Hwang, 2006).



Σχήμα 2.23: Παράδειγμα CC στην κατασκευή ενός σπιτιού

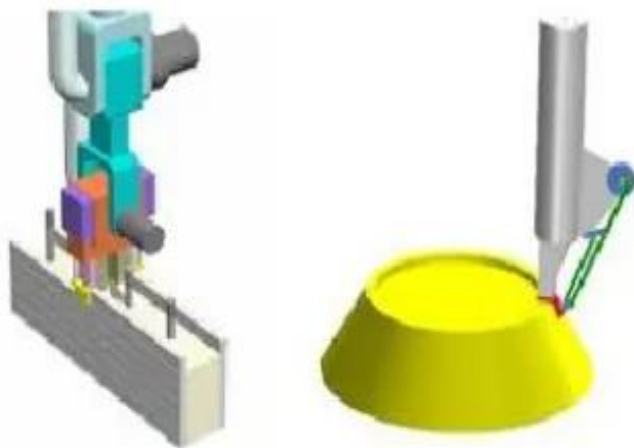
Στο CC, ο έλεγχος υπολογιστή χρησιμοποιείται από τους ειδικούς για να επωφεληθούν από την ανώτερη ικανότητα σχηματισμού επιφάνειας σπάτουλας για τη δημιουργία λείων και ελεύθερων επιφανειών. Η προσέγγιση στρώσεων επιτρέπει τη δημιουργία διαφόρων σχημάτων επιφάνειας. Είναι μια υβριδική μέθοδος που συνδυάζει μια διαδικασία εξώθησης για τη διαμόρφωση των επιφανειών του αντικειμένου και τη διαδικασία έγχυσης για την κατασκευή του πυρήνα του αντικειμένου (Khorramshahi & Mokhtari, 2017).

Μερικές ενδιαφέρουσες πτυχές αυτής της αυτοματοποιημένης κατασκευής είναι οι εξής:

- Μέγιστη ευελιξία για αρχιτεκτονικό σχεδιασμό που επιτρέπει την κατασκευή προσαρμοσμένων σχεδίων απευθείας από το μοντέλο του υπολογιστή.
- Δυνατότητα αυτόματης τοποθέτησης υδραυλικών, ηλεκτρικών και επικοινωνιακών δικτύων.
- Δραματική επίδραση στο κόστος και την ταχύτητα (μια διώροφη κατοικία 200 τ.μ. μπορεί να χτιστεί μέσα σε δύο ημέρες).
- Απλότητα των logistics και διαχείρισης κατασκευών.
- Φιλικότητα προς το περιβάλλον λόγω χαμηλών εκπομπών και λιγότερη σπατάλη υλικών.
- Σημαντικά μειωμένη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής (Fernandes & Feitosa, 2015).

Η διαδικασία CC βασίζεται στη διαδικασία εξώθησης και πλήρωσης. Η διαδικασία εξώθησης σχηματίζει την ομαλή επιφάνεια του αντικειμένου περιορίζοντας την εξωθόμενη ροή στις κάθετες και οριζόντιες κατευθύνσεις με σπάτουλες. Ο προσανατολισμός της πλαϊνής σπάτουλας αλλάζει δυναμικά για καλύτερη εφαρμογή (Khoshnevis & Hwang, 2006).

Η πλαϊνή σπάτουλα επιτρέπει την παχύτερη εναπόθεση υλικού διατηρώντας παράλληλα υψηλό φινίρισμα επιφάνειας. Η παχύτερη εναπόθεση υλικού μειώνει το χρόνο κατασκευής (Fernandes&Feitosa, 2015).Η σπατουλαρισμένη εξωτερική επιφάνεια κάθε στρώματος καθορίζει την ποιότητα τελικής επιφάνειας του αντικειμένου. Η επάνω επιφάνεια κάθε στρώματος είναι επίσης σημαντική για τη δημιουργία ισχυρού δεσμού με το επόμενο στρώμα (Khorramshahi & Mokhtari, 2017).



Σχήμα 2.24: Συγκροτήματα πολλαπλών ακροφυσίων και μονών ακροφυσίων

Σε ένα κτίριο για παράδειγμα, η βασική ιδέα είναι ότι ο εξωθητής περνά από τα περιθώρια του κτιρίου για να κατασκευάσει τους τοίχους (βλ. παραπάνω [Σχήμα 2.24](#)). Όταν τελειώσει ένα επίπεδο, αυτόματα ανεβαίνει για να δημιουργήσει το επόμενο επίπεδο. Άλλα υλικά, όπως στέγες, σωλήνες και κουφώματα θα τοποθετηθούν από άλλο ρομπότ στο αγωγό. Απλώς θα πάρει τα υλικά και θα τα τοποθετήσει την κατάλληλη στιγμή. Στην περίπτωση των γυάλινων παραθύρων εξακολουθεί να χρειάζεται ανθρώπινη εργασία λόγω της ευθραυστότητάς τους (Khoshnevis&Hwang, 2006).

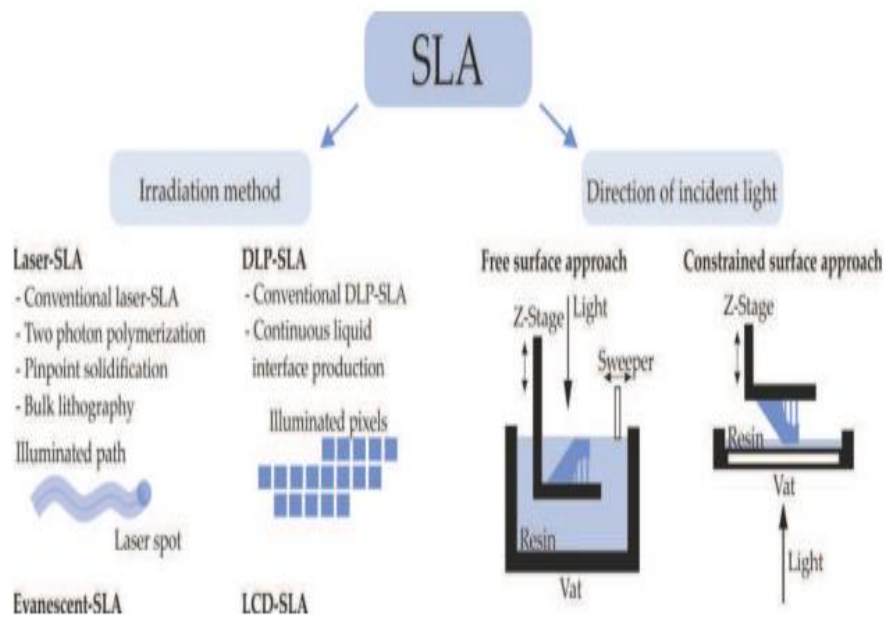
Υπάρχουν δύο βασικά μέρη που καθιστούν το Contour Crafting ανώτερο από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία πολυεπίπεδης κατασκευής. Οι δύο σπάτουλες δημιουργούν κτίρια με αξιοσημείωτες λείες επιφάνειες, ενώ εξαλείφουν κάθε ίχνος των στρωμάτων. Ανάλογα με το σχήμα και τη γωνία μεταξύ των μύλων, μπορούν να κατασκευαστούν διάφορα σχέδια. Η ποιότητα κατασκευής είναι πολύ ανώτερη και ευέλικτη στην κατασκευή κάθε είδους κτιρίου (Fernandes & Feitosa, 2015).

Για να δημιουργηθεί ένα κτίριο με Contour Crafting, οι μηχανικοί ή οι αρχιτέκτονες πρέπει να σχεδιάσουν τα κτίρια σε CAD. Στη συνέχεια, ο σχεδιασμός αναλύεται και επαληθεύεται από πολιτικούς μηχανικούς και θα πρέπει να περάσει όλους τους κανονισμούς. Τα υλικά κατασκευής μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους, το κόστος των υλικών και τον τύπο της κατασκευής (Khorramshahi & Mokhtari, 2017).

2.6 Stereolithography (SLA)

Η στερεολιθογραφία (SLA) είναι μια διαδικασία παραγωγής πρόσθετων που ανήκει στην οικογένεια Φωτοπολυμερισμού. Με την τεχνολογία SLA, ένα αντικείμενο δημιουργείται μέσω επιλεκτικής σκλήρυνσης σε στρώσεις πολυμερούς ρητίνης χρησιμοποιώντας μια υπεριώδη ακτίνα λέιζερ (UV). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι φωτοευαίσθητα και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή τα οποία εισέρχονται σε υγρή μορφή. Ένα μόριο φωτοεκκινητή (PI) στη ρητίνη ανταποκρίνεται στο εισερχόμενο φως και κατά την ακτινοβολία, τοπικά ενεργοποιεί τη χημική αντίδραση πολυμερισμού, η οποία οδηγεί σε ωρίμανση μόνο στις εκτεθειμένες περιοχές. Μετά τη δημιουργία του πρώτου στρώματος με αυτόν τον τρόπο, εφαρμόζεται μια νέα ταινία με ρητίνη, ακτινοβολείται και σκληρύνεται. Έτσι, το τμήμα αυξάνεται σταδιακά στρώμα με στρώμα. Αυτή η αρχή καλύπτει όλες τις διαδικασίες SLA, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την κατεύθυνση του

προσπίπτοντος φωτός ή μέθοδος ακτινοβολήσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.25 (Martinez, et al, 2018).



Σχήμα 2.25: Ταξινόμηση του SLA σύμφωνα με τη μέθοδο ακτινοβολίας (αριστερά) και την κατεύθυνση του προσπίπτοντος φωτός (δεξιά)

Η διαδικασία λειτουργίας του SLA ξεκινάει με ένα αρχείο CAD έπειτα αυτό το αρχείο μετατρέπεται σε STL και οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε η διάτρητη επιφάνεια να βυθίζεται στο δοχείο με το υγρό. Όσο η επιφάνεια πηγαίνει προς τα κάτω, το υγρό πολυμερές συναντά την επιφάνεια στις οπές που έχει. Αμέσως με το που ανεβαίνει η επιφάνεια προς τα επάνω χτυπάει η ακτινοβολία UV και το πολυμερίζει, άρα αυτό σκληραίνει αμέσως. Η επιφάνεια επαναλαμβανόμενα κατεβαίνει κάτω ξανά μέχρι που να γίνει η τελευταία στρώση. Μετά το τέλος της εκτύπωσης το τυπωμένο αντικείμενο βυθίζεται σε μια άλλη ρητίνη η οποία ξεχωρίζει το τυπωμένο μοντέλο από το υγρό πολυμερές. Μετά τη διαδικασία αυτή, υπάρχει καλή συνεκτικότητα μεταξύ των στρωμάτων του τυπωμένου αντικειμένου και τότε το ψήνουμε σε φούρνο UV. Με το ψήσιμο στο φούρνο UV, κερδίζουμε πολλά οφέλη. Αρχικά, όλες οι στρώσεις σκληραίνουν και γίνονται πιο συνεκτικές, μεγαλώνει η αντοχή και το επιθυμητό φινίρισμα επιτυγχάνεται. (Jandyal et al, 2022)

Το απαιτούμενο φως για τη στερεοποίηση της ρητίνης μπορεί να εφαρμοστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Είτε από ψηλά είτε από κάτω μέσω ενός διαφανούς κάδου. Η ακτινοβολήση μπορεί είτε να εφαρμοστεί με σάρωση κάθε σημείου με λέιζερ (για laser-SLA) ή με προβολή ολόκληρης της εικόνας σε ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP) SLA. Μια πιο ασυνήθιστη μέθοδος είναι ο φωτισμός μέσω της οθόνης υγρών κρυστάλλων (LCD) (Kataria & Rosen, 2000).

3. Προσέγγιση ελεύθερης και περιορισμένης επιφάνειας

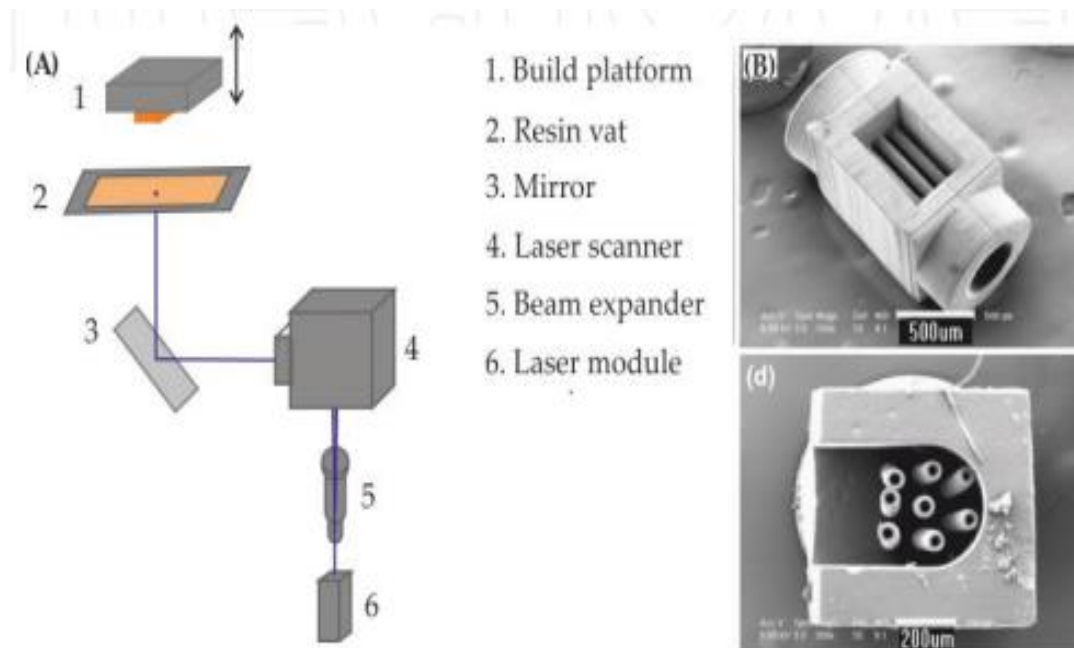
Στην προσέγγιση ελεύθερης επιφάνειας, η πλατφόρμα στην οποία αναπτύσσεται το τυπωμένο τμήμα βρίσκεται σε μια δεξαμενή ρητίνης και επικαλυμμένη με μια μεμβράνη υγρής ρητίνης. Ο φωτισμός της επιθυμητής διατομής, που συμβαίνει από πάνω από τη δεξαμενή ρητίνης, ολοκληρώνει το πρώτο στρώμα. Μετά από κάθε στρώση, η πλατφόρμα με το αναπτυσσόμενο τμήμα (δηλ. το στάδιο z), χαμηλώνει περαιτέρω στη δεξαμενή και η ρητίνη επικαλύπτεται με ένα νέο στρώμα ρητίνης. Αυτό θέτει τη βάση για το επόμενο στρώμα (Huang, et al, 2020).

Πρόσφατα, υπήρξε μια τάση προς την προσέγγιση χαμηλότερης έκθεσης, καθώς έχει ορισμένα πλεονεκτήματα. Η λεία επιφάνεια, η οποία δημιουργείται με ένα στενά καθορισμένο ύψος στρώματος λόγω της ακριβούς κίνησης του σταδίου z με ακρίβεια έως 0,1-1 μm , είναι το κύριο όφελος στη ρύθμιση της περιορισμένης επιφάνειας. Χωρίς ανάγκη για μηχανικό σάρωτρο, αυτό το στρώμα μπορεί να δημιουργηθεί γρηγορότερα από ό, τι στην προσέγγιση ελεύθερης επιφάνειας, μειώνοντας τον χρόνο εκτύπωσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα, το οποίο μειώνει το κόστος, είναι η χαμηλότερη ποσότητα ρητίνης που απαιτείται επειδή το δείγμα δεν χρειάζεται να βυθιστεί εντελώς στον κάδο (Kataria&Rosen, 2000).

Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα της χαμηλής έκθεσης είναι ότι οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ του τυπωμένου μέρους και του δαπέδου του κάδου πρέπει να ξεπεραστούν για κάθε στρώση. Όταν έρχεται το στάδιο z, το στρώμα που προστέθηκε πρόσφατα πρέπει να προσκολληθεί στα παραπάνω στρώματα και μπορεί να μην κολλήσει στην επιφάνεια του κάδου. Οι προσπάθειες μείωσης αυτής της ανεπιθύμητης αλληλεπίδρασης περιλαμβάνουν την εφαρμογή υδρόφοβων επικαλύψεων του δίσκου υλικών και τροποποίηση του μηχανικού μηχανικού διαχωρισμού με βήματα κλίσης ή εφαρμογή δυνάμεων διάτμησης (Huang, et al, 2020).

3.1 Στερεολιθογραφία λέιζερ

Στο Laser-SLA, επίσης γνωστό ως SLA που βασίζεται σε διάνυσμα, ή συχνά αναφέρεται απλά ως SLA, κάθε επίπεδο προστίθεται με σάρωση UV λέιζερ πάνω στη μεμβράνη ρητίνης. Αυτή η κίνηση x-y του λέιζερ υλοποιείται με δύο γαλβανόμετρα σε συνδυασμό με ένα ειδικό οπτικό σύστημα. Ένα παράδειγμα δίνεται στο Σχήμα 3.26 που ακολουθεί. Αυτές οι συμβατικές συσκευές SLA, αν και περισσότερο ακριβές από άλλες τεχνολογίες AM, όπως οι αντίστοιχες που βασίζονται σε εξώθηση, μπορούν να φτάσουν σε αναλύσεις 5-10 μm (Martinez, et al, 2018).



Σχήμα 3.26: Σχηματική ρύθμιση εκτυπωτή laser-SLA (A) Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) εικόνων βιοαντιδραστήρα με τριχοειδή αγγεία κατασκευασμένα με λέιζερ-SLA. (B) (Martinez et al, 2018)

Για να επιτευχθούν αυτές οι αναλύσεις, πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές παράμετροι. Εκτός από την ακρίβεια του σταδίου z και της βελτιστοποιημένης σύνθεσης ρητίνης, οι οποίοι είναι σημαντικοί παράγοντες ειδικά στην ανάλυση z, ο τρόπος με τον οποίο το UV λέιζερ σαρώνεται κατά μήκος της το επιθυμητό στρώμα είναι καθοριστικός. Η γεωμετρία των καθορισμένων γραμμών λέιζερ καθορίζει την πλευρική ανάλυση (Martinez, et al, 2018). Επιπλέον, η ταχύτητα σάρωσης και η διάμετρος του σημείου λέιζερ πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αντίστοιχα, επηρεάζουν το βάθος και το πλάτος σκλήρυνσης των εκτεθειμένων γραμμών λέιζερ και έτσι επηρεάζουν την κάθετη και πλευρική ανάλυση. Μέθοδοι για περαιτέρω βελτίωση η ανάλυση σε περιοχές κάτω από το μικρόμετρο είναι ο πολυμερισμός δύο φωτονίων (TPP) και ο εντοπισμός στερεοποίησης (Kataria & Rosen, 2000).

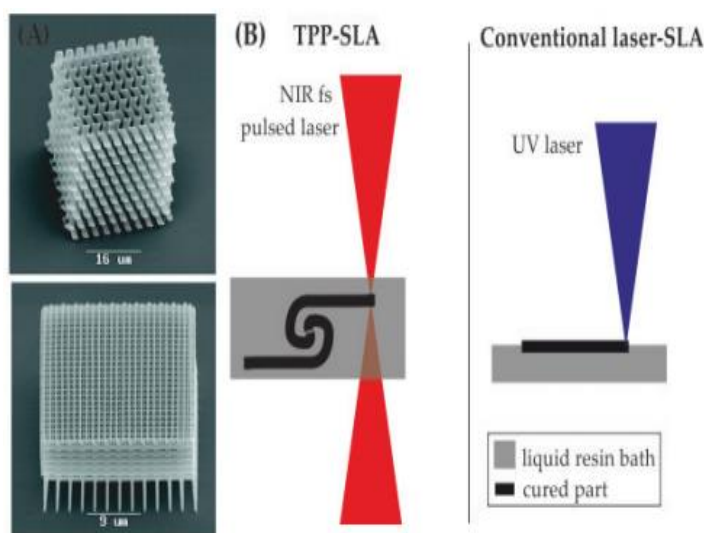
3.2 Πολυμερισμός δύο φωτονίων (TPP)

Ο TPP προτάθηκε για πρώτη φορά ως μέθοδος AM από τους Spangenberg et al. (2013). Καθώς είναι εφικτές ανώτερες αναλύσεις από τα 100 nm με τραχύτητα επιφάνειας κάτω από 10 nm, έχει μελετηθεί εκτενώς έκτοτε, αν και έχει υψηλό κόστος.

Στο TPP, η διέγερση του PI στη ρητίνη, και έτσι η ενεργοποίηση της αντίδρασης σκλήρυνσης, δεν εμφανίζεται σε ολόκληρη τη διαδρομή φωτισμού του λέιζερ, όπως στη συμβατική SLA, αλλά μόνο στην περιοχή της εστίασης, που ονομάζεται pixel όγκου ή voxel. Ένα femtosecond παλμικό λέιζερ υψηλής έντασης μπορεί να προκαλέσει τα μόρια να απορροφήσουν δύο φωτόνια ταυτόχρονα. Καθώς η πιθανότητα αυτού του φαινομένου είναι ανάλογο με την τετραγωνισμένη ένταση του παλμού λέιζερ, η διαδικασία περιορίζεται στο εστιακό σημείο του λέιζερ. Αντί για υπεριώδη ακτινοβολία, ένα λέιζερ στο διπλάσιο μήκος κύματος (δηλ. χρησιμοποιείται η μισή ενέργεια) με σχεδόν υπέρυθρο φως (NIR), όπως το λέιζερ τιτανίου στο TPP. Η ενέργεια που είναι απαραίτητη για διέγερση επιτυγχάνεται

ωστόσο με το συνδυασμό της ενέργειας και των δύο μεμονωμένων φωτονίων (Martinez, et al, 2018).

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.27 που ακολουθεί, το χωρικά περιορισμένο τρισδιάστατο voxel στο TPP επιτρέπει τη δημιουργία των σχημάτων μέσα στη δεξαμενή της ρητίνης και όχι μόνο στην επιφάνεια της πλατφόρμας. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για παραγωγή στρώσεων και επιτρέπει την κατασκευή εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετριών, συμπεριλαμβανομένης της ελεύθερης μετακίνησης μερών χωρίς περιττές δομές στήριξης (Kataria & Rosen, 2000).



Σχήμα 3.27: (Α) Εικόνες SEM μικροδομών που κατασκευάστηκαν με TPP. (Β) Σχέδιο του TPP έναντι του συμβατικού laser-SLA (Martinez et al, 2018)

Μία από τις προκλήσεις που παραμένουν στο TPP είναι ο περιορισμός (σε εξαιρετικά μικρές γεωμετρίες) του εύρους mm και η χαμηλή ταχύτητα γραφής των γραμμών λέιζερ. Με μέγιστο όριο μερικά mm/s, αυτό δεν μπορεί να συγκριθεί με εκατοντάδες mm/s, κάτι που είναι εφικτό με συμβατικές μεθόδους laser-SLA. Η ανάπτυξη ενός κατάλληλου PI θα μπορούσε να βοηθήσει στην επιτάχυνση της διαδικασίας. Οι συμβατικοί εκκινητές UV έχουν το μειονέκτημα της χαμηλής δραστηριότητας στο TPP. Προκειμένου να αυξηθεί η ανταπόκρισή τους, ο βέλτιστος σχεδιασμός είναι απαραίτητος (Huang, et al, 2020).

3.3 Ακριβής στερεοποίηση

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται ένα λέιζερ υψηλής εστίασης και όπως και με το TPP, λόγω της υψηλής έντασης στο εστιακό σημείο του λέιζερ, η εφαρμογή της ρητίνης μπορεί να επιτευχθεί μόνο σε αυτό το voxel. Ο μηχανισμός ωστόσο είναι αυτός των συμβατικών πολυμερισμών μονών φωτονίων. Έτσι, έχουν επιτευχθεί αναλύσεις κάτω από 0,4 μm χωρίς τη χρήση ακριβών παλμών λέιζερ fs. Αυτή η διαδικασία δεν έχει ακόμη εμπορευματοποιηθεί και πολύ λίγη έρευνα επενδύεται στην ακριβή στερεοποίηση-SLA (Martinez, et al, 2018).

3.4 Μαζική λιθογραφία

Στη μαζική λιθογραφία, οι τρισδιάστατες υφές μπορούν να δημιουργηθούν με μεταβολή της ενέργειας έκθεσης. Η εφαρμογή σε βάθος, η οποία είναι άμεση συνάρτηση της ισχύος του λέιζερ ή της ταχύτητας σάρωσης (δηλαδή της εφαρμοζόμενης ενέργειας), καθορίζει το βάθος των χαρακτηριστικών. Κάποιος μπορεί έτσι να δει ολόκληρο το μέρος του στρώματος με

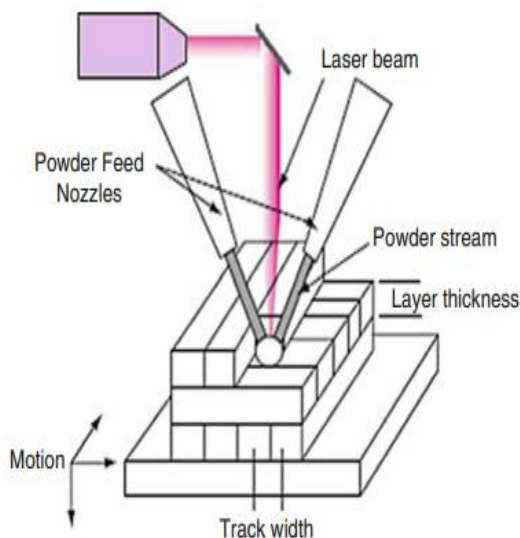
διαφορετικό πάχος (Martinez, et al, 2018). Αυτό εξαλείφει τα μερικές φορές απότομα βήματα προς την κατεύθυνση z, που δημιουργούνται με συμβατικές μεθόδους SLA και επιταχύνουν σημαντικά την εκτύπωση. Παρόλο που αυτή η διαδικασία δεν είναι ικανή να εκτυπώσει αντικείμενα με προεξοχές και περιορίζεται σε γεωμετρίες λεπτότερες από 0,25 mm, θα μπορούσε να έχει μελλοντικές εφαρμογές στην κατασκευή μικροδομών υψηλής απόδοσης (Kataria & Rosen, 2000).

3.5 Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (DirectEnergyDeposition - DED)

Οι διαδικασίες Κατευθυνόμενης Εναπόθεσης Ενέργειας (DED) επιτρέπουν τη δημιουργία τμημάτων με τήξη υλικού κατά την εναπόθεσή του. Αν και αυτή η βασική προσέγγιση μπορεί να λειτουργήσει με πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα πλέγματα μετάλλων, χρησιμοποιείται κυρίως για τις σκόνες μετάλλων. Έτσι, αυτή η τεχνολογία αναφέρεται συχνά ως τεχνολογία «εναπόθεσης μετάλλων» (Shim, et al, 2016).

Η DED επεξεργάζεται ενέργεια σε μια στενή, εστιασμένη περιοχή για να θερμάνει ένα υπόστρωμα. Σε αντίθεση με τις τεχνικές σύντηξης σε πούδρα, οι διαδικασίες DED δεν χρησιμοποιούνται για να λιώσουν ένα υλικό που έχει προ-τοποθετηθεί σε μια πούδρα αλλά χρησιμοποιούνται για την τήξη των υλικών καθώς εναποτίθενται (Ribeiro, et al, 2020; Javidani, et al, 2017).

Οι διαδικασίες DED χρησιμοποιούν μια εστιασμένη πηγή θερμότητας (συνήθως μια δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίου) για να λιώσουν το υλικό πρώτης ύλης και να δημιουργήσουν τρισδιάστατα αντικείμενα με τρόπο παρόμοιο με τις διεργασίες που βασίζονται σε εξώθηση. Κάθε πέρασμα της κεφαλής DED δημιουργεί ένα κομμάτι στερεοποιημένου υλικού και οι παρακείμενες γραμμές υλικού συνθέτουν στρώματα. Η σύνθετη τρισδιάστατη γεωμετρία απαιτεί είτε υλικό υποστήριξης είτε κεφαλή εναπόθεσης πολλαπλών αξόνων (Shim, et al, 2016). Μια σχηματική αναπαράσταση μιας διαδικασίας DED χρησιμοποιώντας το υλικό πρώτης ύλης σε πούδρα και το λέιζερ, φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 3.28.



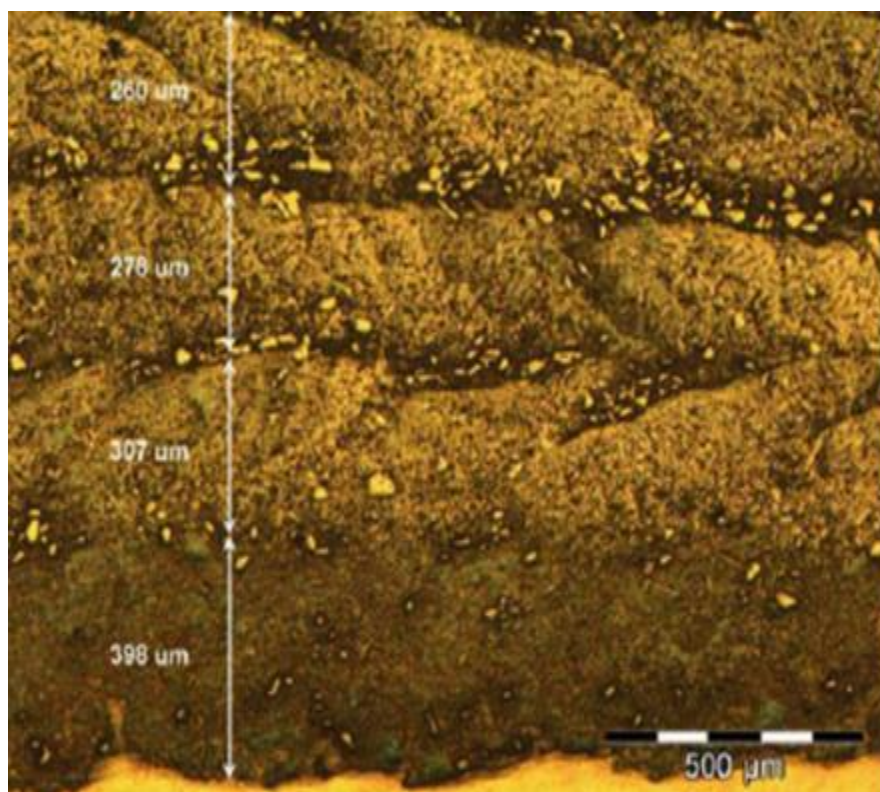
Σχήμα 3.28: Διαδικασία επεξεργασίας πούδρας λέιζερ DED

Οι εμπορικές διαδικασίες DED περιλαμβάνουν τη χρήση δέσμης λέιζερ ή ηλεκτρονίου για τήξη σκονών ή συρμάτων. Οι τεχνικές DED μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούνται οι μηχανές επένδυσης λέιζερ και μηχανές συγκόλλησης πλάσματος (Abbes, et al, 2020).

Ορισμένοι οργανισμοί έχουν αναπτύξει μηχανές DED χρησιμοποιώντας λέιζερ και τροφοδότες σε πούδρα. Αυτά τα μηχανήματα έχουν αναφερθεί ως Laser Engineered Net Shaping (LENS), Directed LightFabrication (DLF), Direct M, et al, Deposition (DMD), 3D Laser Cladding, Laser Generation, Laser-based M, et al, Deposition (LBMD), Laser Freeform Fabrication (LFF), Laser Direct Casting, LaserCast, Laser Consolidation, LasForm και άλλα. Αν και η γενική προσέγγιση είναι η ίδια, οι διαφορές μεταξύ αυτών των μηχανημάτων περιλαμβάνουν συνήθως αλλαγές στα εξής:

- στην ισχύ του λέιζερ
- στο μέγεθος του λέιζερ
- στον τύπο του λέιζερ
- στη μέθοδο παράδοσης πούδρας
- στη μέθοδο παροχής αδρανούς αερίου
- στο σχέδιο ελέγχου ανάδρασης και
- στον τύπο ελέγχου κίνησης που χρησιμοποιείται (Shim, et al, 2016).

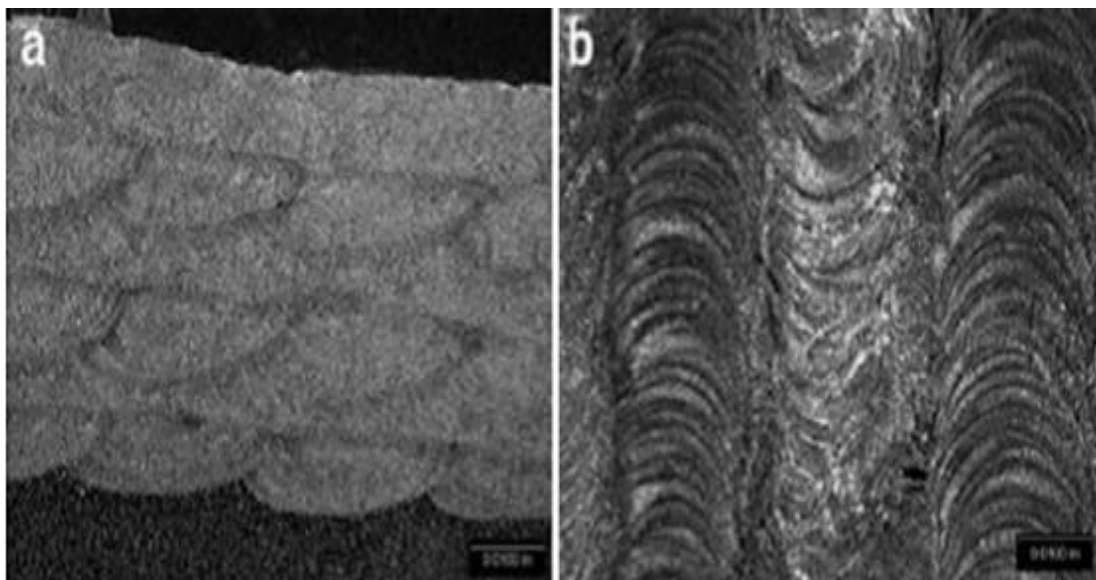
Επειδή όλες αυτές οι διαδικασίες περιλαμβάνουν την εναπόθεση, με την τήξη και τη στερεοποίηση κονιοποιημένου υλικού χρησιμοποιώντας μια περιφερειακή δεξαμενή τήγματος, τα προκύπτοντα μέρη αποκτούν υψηλή πυκνότητα κατά τη διαδικασία κατασκευής. Η μικροδομή τμημάτων κατασκευασμένων από διαδικασίες DED (βλ. παρακάτω [Σχήμα 3.29](#)) είναι παρόμοιες με τις διαδικασίες σύντηξης πούδρας, όπου κάθε διέλευση του λέιζερ ή της πηγής θερμότητας δημιουργεί ένα ίχνος ταχείας στερεοποίησης υλικού (Ribeiro, et al, 2020; Javidani, et al, 2017).



Σχήμα 3.29: Σύνθετη δομή μεταλλικής μήτρας Ti/TiC που εναποτίθεται με LENS (τέσσερα στρώματα πάνω σε ένα υπόστρωμα Ti)

Όπως φαίνεται στο παρακάτω [Σχήμα 3.30](#), η μικροδομή ενός τμήματος DED μπορεί να είναι διαφορετική μεταξύ των στρωμάτων και ακόμη και εντός των στρωμάτων. Στην

κατάθεση Ti/TiC που εμφανίζεται στο παραπάνω σχήμα, τα μεγαλύτερα σωματίδια που υπάρχουν στη μικροδομή είναι καρβίδια που δεν έχουν λιώσει. Η παρουσία λιγότερων μη λιωμένων καρβιδίων σε μια συγκεκριμένη περιοχή οφείλεται σε υψηλότερη συνολική θερμική είσοδο για εκείνη την περιοχή της δεξαμενής τήγματος. Αλλάζοντας τις παραμέτρους της διαδικασίας, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν λιγότερα ή περισσότερα μη λιωμένα καρβίδια μέσα σε ένα στρώμα, και αυξάνοντας την ισχύ λέιζερ, μια μεγαλύτερη ποσότητα από προηγούμενη εναπόθεση στρώματος (ή υποστρώματος για το πρώτο στρώμα) θα λιώσει εκ νέου (Abbes, et al, 2020).



Σχήμα 3.30: Κατάθεση CoCrMo στο CoCrMo: (α) πλάγια όψη (κάθε άλλο στρώμα εναποτίθεται κάθετα στο προηγούμενο στρώμα χρησιμοποιώντας μοτίβο 0,90,0) και (β) κάτοψη της κατάθεσης

Γενική περιγραφή της διαδικασίας DED

Καθώς ο πιο συνηθισμένος τύπος συστήματος DED είναι η εναπόθεση λέιζερ σε σύστημα πούδρας για μέταλλα, θα περιγραφεί μια τυπική διαδικασία LBMD ως διαδικασία πρότυπο με την οποία θα συγκριθούν άλλες διαδικασίες. Στο LBMD, μια «κεφαλή εναπόθεσης» χρησιμοποιείται για την εναπόθεση υλικού στο υπόστρωμα. Μια κεφαλή εναπόθεσης είναι τυπικά μια ολοκληρωμένη συλλογή οπτικών λέιζερ, ακροφύσιου πούδρας, σωλήνων αδρανούς αερίου, και σε ορισμένες περιπτώσεις, αισθητήρων. Το υπόστρωμα μπορεί να είναι είτε μια επίπεδη πλάκα στην οποία υπάρχει ένα νέο μέρος που θα έχει δημιουργηθεί ή ένα υπάρχον τμήμα στο οποίο θα υπάρχει πρόσθετη γεωμετρία. Η εναπόθεση ελέγχεται με σχετική διαφορική κίνηση μεταξύ του υποστρώματος και της κεφαλής εναπόθεσης (Shim, et al, 2016). Αυτή η διαφορική κίνηση επιτυγχάνεται μετακινώντας την κεφαλή εναπόθεσης, μετακινώντας το υπόστρωμα ή με συνδυασμό υποστρώματος και κίνηση της κεφαλής εναπόθεσης. Τα συστήματα 3 αξόνων, όπου η εναπόθεση γίνεται κατακόρυφα, είναι τυπικά. Ωστόσο, τα συστήματα 4 ή 5 αξόνων που χρησιμοποιούν είτε περιστροφικούς πίνακες είτε ρομποτικούς βραχίονες είναι επίσης διαθέσιμα. Επιπλέον, πολλές εταιρείες έχουν αρχίσει να πωλούν κεφαλές εναπόθεσης LBMD ως «εργαλεία» για ένταξη στο CNC πολλαπλών εργαλείων. Με την ενσωμάτωση σε μια μηχανή άλεσης CNC, μια κεφαλή LBMD μπορεί να φέρει νέες δυνατότητες σε μία συσκευή. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για επισκευές (Abbes, et al, 2020).

Η κινητική ενέργεια των σωματιδίων πούδρας που τροφοδοτούνται από ένα ακροφύσιο πούδρας στη δεξαμενή τήξης είναι μεγαλύτερη από την επίδραση της βαρύτητας στις

σκόνες κατά τη διάρκεια της πτήσης. Σαν αποτέλεσμα, η μη κατακόρυφη εναπόθεση είναι εξίσου αποτελεσματική με την κάθετη εναπόθεση. Η κίνηση της κεφαλής εναπόθεσης Multiaxis είναι επομένως δυνατή και πράγματι αρκετά χρήσιμη. Ειδικότερα, εάν το υπόστρωμα είναι πολύ μεγάλο και/ή βαρύ, είναι ευκολότερο να ελέγχεται με ακρίβεια η κίνηση της κεφαλής εναπόθεσης. Αντιστρόφως, εάν το υπόστρωμα είναι μια απλή επίπεδη πλάκα, είναι ευκολότερο να μετακινηθεί το υπόστρωμα από ότι η κεφαλή εναπόθεσης (Javidani, et al, 2017).

Στο LBMD, το λέιζερ δημιουργεί μια μικρή λιωμένη δεξαμενή (τυπικά 0,25-1 mm σε διαμέτρο και 0,1–0,5 mm σε βάθος) στο υπόστρωμα ως ένεση πούδρας στη δεξαμενή. Η πούδρα λιώνει καθώς εισέρχεται στη δεξαμενή και στερεοποιείται καθώς η δέσμη λέιζερ απομακρύνεται. Υπό ορισμένες συνθήκες, η πούδρα μπορεί να λιώσει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και να φτάσει στο υπόστρωμα σε τετηγμένη κατάσταση (Abbes, et al, 2020).

Ανάλογα με το υλικό ή το κράμα που εναποτίθεται, αυτοί οι υψηλοί ρυθμοί ψύξης μπορούν να παράγουν μοναδικές δομές κόκκων στερεοποίησης που δεν είναι δυνατές με την παραδοσιακή επεξεργασία. Σε χαμηλότερους ρυθμούς ψύξης, όπως όταν χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες δυνάμεις δέσμης ή χαμηλότερες ταχύτητες, τα χαρακτηριστικά των κόκκων μεγαλώνουν και μοιάζουν περισσότερο με δομές χυτοσιδήρου (Shim, et al, 2016).

Η διέλευση της δέσμης δημιουργεί ένα λεπτό κομμάτι στερεοποιημένου μετάλλου που εναποτίθεται και συγκολλείται στο στρώμα που είναι από κάτω. Ένα επίπεδο δημιουργείται από έναν αριθμό συνεχόμενων επικαλυπτόμενων κομματιών (Ribeiro, et al, 2020).

3.6 Κατασκευή εναπόθεσης φύλλων Αντικειμένων (Laminated Object Manufacturing - LOM)

Η LOM αποτελεί μια πιο άγνωστη διαδικασία κατασκευής προσθέτων στην οποία ένα αντικείμενο δημιουργείται με διαδοχική στρωματοποίηση φύλλων δομικού υλικού, μέσα από τη συγκόλλησή τους με θερμική ενέργεια και πίεση (Park, et al, 2000; Weisensel, et al, 2004). Έπειτα, κόβονται σύμφωνα με τις ανάγκες του δημιουργού με τη χρήση μιας λεπίδας ή λέιζερ άνθρακα. Η McorTechnologies παρέχει μια πιο σύγχρονη μορφή της διαδικασίας, η οποία είναι γνωστή ως επιλεκτική εναπόθεση φύλλων. Κατά τη διαδικασία αυτή, φύλλα τυπικού χαρτιού A4 ή μεγέθους γραμμάτων κόβονται σε διάφορα σχήματα με τη χρήση μιας λεπίδας καρβιδίου βολφραμίου και έπειτα ενώνονται με σταγονίδια κόλλας. Τα σημεία τα οποία θα αποτελούν το τελικό μέρος παίρνουν περισσότερη κόλλα, ενώ τα σημεία τα οποία είναι για στήριξη παίρνουν λιγότερη (Mekonnen, et al, 2016).

Η εταιρεία που την ανέπτυξε είναι η Helisys (τώρα CubicTechnologies). Η διαδικασία LOM χρησιμοποιεί ένα σύστημα όπου ένα συνεχές φύλλο δομικού υλικού σύρεται στην πλατφόρμα κατασκευής από ένα σύστημα κυλίνδρων τροφοδοσίας. Για χαρτί και πλαστικό, το φύλλο μπορεί να επικαλυφθεί με κόλλα. Στη συνέχεια, ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάνω από το υλικό, λιώνει την κόλλα και πιέζει το υλικό προς τα κάτω στην πλατφόρμα. Στη συνέχεια, μια λεπίδα ή λέιζερ κόβει το επιθυμητό σχέδιο στο υλικό και διασταυρώνει το αχρησιμοποίητο υλικό, ώστε να μπορεί να αφαιρεθεί αργότερα. Ένα ρολό παραλαβής τυλίγει το υπόλοιπο υλικό. Τέλος, η πλατφόρμα κατασκευής μειώνεται στο πάχος ενός στρώματος, νέο υλικό τραβιέται στην πλατφόρμα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται (Dermeik & Travitzky, 2020).

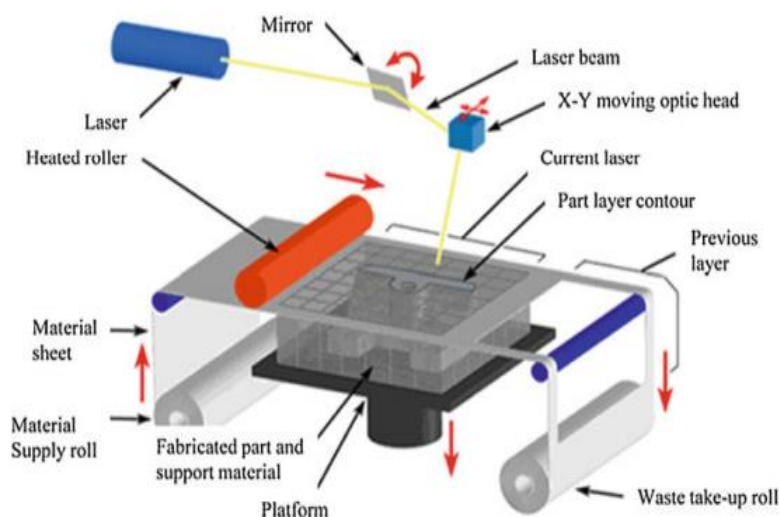
Η ακαμψία του υλικού κατασκευής σημαίνει ότι δεν απαιτείται υλικό στήριξης. Τα εσωτερικά κενά μέσα στο αντικείμενο διασταυρώνονται κατά τη διαδικασία κοπής, επιτρέποντας έτσι

την εύκολη αφαίρεση του υλικού. Η φύση της διαδικασίας σημαίνει ότι δεν απαιτείται κλειστός θάλαμος, αν και πρέπει να διατηρηθούν ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες για τη σωστή τήξη των στρωμάτων (Mekonnen, et al, 2016). Ορισμένα πλεονεκτήματα της διαδικασίας LOM είναι ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι άμεσα διαθέσιμα και κατανυγία (Park, et al, 2000; Weisensel, et al, 2004).

Στα αρνητικά, αυτή η διαδικασία έχει πιο περιορισμένες γεωμετρίες 3D από άλλες διαδικασίες AM. Η στερεότητα του αντικειμένου εξαρτάται επίσης πολύ από τις ρητίνες και τη διαδικασία σκλήρυνσης που χρησιμοποιείται. Οι ρητίνες περιορίζονται σε εκείνα τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με χαρτί ή πλαστικό. Τα μεταλλικά φύλλα συγκολλούνται (είτε με θερμική συγκόλληση είτε με υπερηχητική συγκόλληση) ή βιδώνονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν το τμήμα. Η χρήση μετάλλου στη διαδικασία LOM είναι σπάνια (Dermeik & Travitzky, 2020).

Η CubicTechnologies είναι μια άλλη εταιρεία που χρησιμοποιεί τη διαδικασία LOM. Λειτουργεί με χαρτί, πλαστικό και μέταλλο. Κατά τη διαδικασία του, τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με χαρτί παίρνουν υφή σαν ξύλο και μπορούν να διαμορφωθούν με παρόμοιο τρόπο (Mekonnen, et al, 2016).

Η κατασκευή εναπόθεσης φύλλων αντικειμένων έχει δείξει μεγάλη πρόοδο τα τελευταία 30 χρόνια. Όπως και άλλες γρήγορες τεχνολογίες πρωτοτύπων, υπάρχουν πολλές έρευνες LOM που διεξάγονται από διαφορετικούς μελετητές και ιδρύματα. Οι Dermeik & Travitzky (2020) κατασκεύασαν σύνθετα προϊόντα εναπόθεσης φύλλων. Σε αυτήν την έρευνα, κατασκευάστηκαν σωματιδιακά κεραμικά σύνθετα υλικά, σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας και σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας. Τα σωματιδιακά κεραμικά σύνθετα κατασκευάστηκαν από καρβίδιο πυριτίου (SiC). Οι κεραμικές ταινίες εναποτέθηκαν χρησιμοποιώντας θερμαινόμενο κύλινδρο σε θερμοκρασία 1808 ° C, η οποία είναι αρκετά υψηλή για να λιώσει το συνδετικό υλικό. Σε αυτή τη διαδικασία ελαχιστοποιήθηκε η συρρίκνωση, παράχθηκαν αρκετά δίκτυα, αλλά η συνολική αντοχή δεν ήταν τόσο υψηλή όσο αυτό του εμπορικά παραγόμενου SiC (300–400 MPa). Συνθετικά υλικά κεραμικής μήτρας παράχθηκαν χρησιμοποιώντας συνεχή ίνα SiC/SiC ως βασικό υλικό. Το αντικείμενο αναπτύχθηκε με τη διάταξη χωριστών, εναλλασσόμενων στρωμάτων μονολιθικών κεραμικών ταινιών και μονοκατευθυντικών προεργασιών συνεχών ινών SiC. Σε αυτό το σύστημα, η σφραγίδα του κινητήρα του στροβίλου SiC/SiC κατασκευάστηκε ως δείγμα (Mekonnen, et al, 2016).

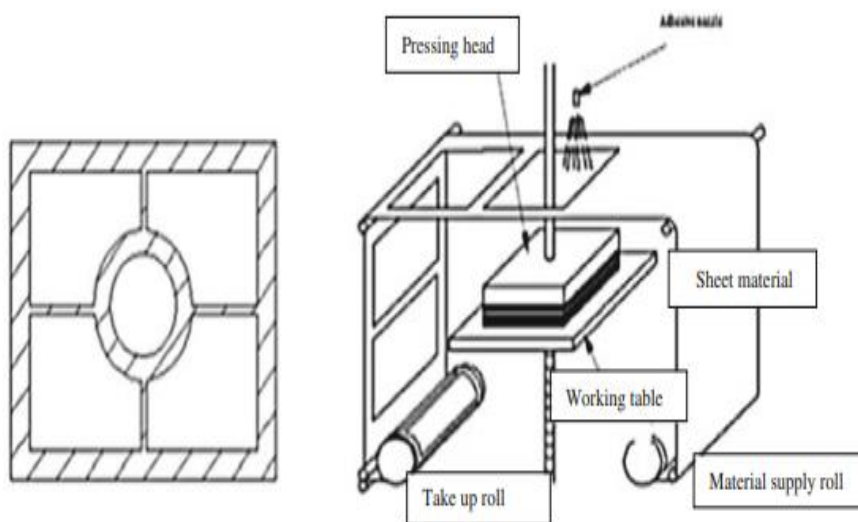


Σχήμα 3.31: Διαδικασία LOM

Σε σύνθετα υλικά πολυμερούς, η διαδικασία LOM πραγματοποιήθηκε με χρήση υαλοπίνακα συνεχούς ίνας. Η εναπόθεση φύλλων και η κοπή πραγματοποιήθηκαν αυτόματα με την τυπική διαδικασία LOM, με αποτέλεσμα, τα μέρη PMC δεν μπορούσαν να ενοποιηθούν πλήρως και να σκληρυνθούν απευθείας στη διαδικασία LOM επειδή ο θερμαντήρας LOM ήταν περιορισμένος για πλήρη συμπίκνωση και πλήρη θεραπεία. Κατά συνέπεια, το ελασματοποιημένο τμήμα μπορεί να έχει συρρίκνωση, παραμόρφωση και αποκόλληση κατά την μετεπεξεργασία (Weisensel, et al, 2004).

Η εναπόθεση φύλλων μεταλλικού υλικού με διαδικασία LOM αντιμετωπίζει πολλά προβλήματα. Μετά την επεξεργασία, ο κόπτης λέιζερ προκαλεί υψηλή ποσότητα θερμικής ενέργειας η οποία μειώνει την αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης μεταξύ των στρωμάτων των φύλλων. Επιπλέον, ο μηχανισμός μεταφοράς διαδικασίας LOM χρησιμοποιείται κυρίως για τη μεταφορά φύλλων για τη συγκόλληση. Αυτός ο μηχανισμός δεν στερεώνεται εύκολα στη σωστή θέση κατά τη μεταφορά, κάτι το οποίο προκαλεί εσφαλμένη ευθυγράμμιση των στρωμάτων (Dermeik&Travitzky, 2020).

Για να ελαχιστοποιηθεί αυτό το πρόβλημα, διερευνήθηκε η διαδικασία κατασκευής ενός άλλου Bridge-LOM. Το σύστημα παραγωγής εκτελείται με την κατασκευή δομής γέφυρας από τα συγκολλημένα στρώματα στο εξωτερικό πλαίσιο του τεμαχίου εργασίας. Αυτή η δομή χρησιμοποιείται για τη στερέωση των στρωμάτων σε θέση για να εξασφαλίσει τη σωστή συγκόλληση και συγκράτηση. Έχουν κατασκευαστεί περίπλοκες γεωμετρίες σκληρών υλικών μεγάλου και μικρού μεγέθους, συμπεριλαμβανομένων μεταλλικών και μη μεταλλικών τύπων με χαμηλό κόστος και χρόνο λειτουργίας. Το Σχήμα 3.32 που ακολουθεί, απεικονίζει τον εξοπλισμό Bridge-LOM (Mekonnen, et al, 2016).



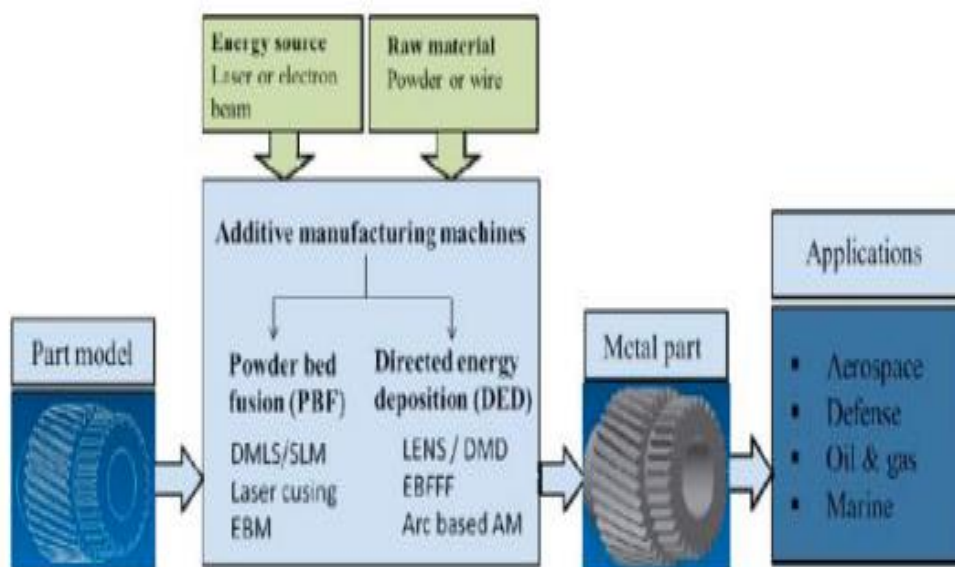
Σχήμα 3.32: Εξοπλισμός Bridge-LOM

Ο Obikawa et al. (1999) ερευνήσε την εναπόθεση φύλλων χάλυβα ως πρώτη ύλη. Ένα προϊόν χάλυβα κατασκευάζεται επαναλαμβάνοντας τις δύο κύριες διαδικασίες συγκόλλησης και συσσώρευσης λεπτών φύλλων χάλυβα κατά στρώμα και κόβοντας μια διατομή ενός μοντέλου 3D-CAD από το επάνω φύλλο χάλυβα. Το τρισδιάστατο σταθερό μοντέλο CAD που έχει αλλάξει σε μορφή STL αποστέλλεται σε ένα σύστημα ελέγχου υπολογιστή. Η λειτουργία συγκόλλησης πραγματοποιείται με επαγωγικό θερμαντήρα χρησιμοποιώντας

θερμή πρέσα και ο μετρητής μετατόπισης λέιζερ χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ύψους του εναποτεθειμένου τεμαχίου εργασίας (Dermeik & Travitzky, 2020).

4. Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΣΤΗΝ AM

Οι δύο κύριες παράμετροι οποιασδήποτε διεργασίας AM μετάλλων είναι το ακατέργαστο υλικό και η πηγή ενέργειας που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του εξαρτήματος (Bhavar, 2014). Το ακατέργαστο υλικό μπορεί να είναι σε μορφή πούδρας ή σύρματος, η πηγή ενέργειας μπορεί να είναι μια δέσμη λέιζερ/ηλεκτρονίου (βλ. παρακάτω [Σχήμα 4.33](#)).



Σχήμα 4.33: Μια κοινή διαδικασία AM με τη χρήση μετάλλων (Duda & Raghavan, 2016)

Οι διαδικασίες AM με μέταλλα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Τεχνολογίες σύνθετης σύντηξη πούδρας (PowderBedFusion, PBF) και
- Τεχνολογίες που βασίζονται σε κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (DirectEnergyDeposition, DED)

Και οι δυο τεχνολογίες μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω με βάση τον τύπο της πηγής ενέργειας που χρησιμοποιείται (Bhavar, 2014).

4.1. PBF

Στις τεχνολογίες που βασίζονται σε PBF, η θερμική ενέργεια συνενώνει τη πούδρα. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες PBF είναι οι εξής:

- Selective laser sintering/melting (SLS/SLM)
- Laser cusing
- Direct M, et al, Laser Sintering (DMLS) (Bhavar, 2014)

Σύμφωνα με τη διαδικασία PBF, η DMLS είναι μια διαδικασία AM ή ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων (RP) που χρησιμοποιεί πούδρα μετάλλου και λέιζερ υψηλής ισχύος για την πυροσυσσωμάτωση του χρησιμοποιήσιμου μέρους. Αυτή η μέθοδος είναι ικανή να παράγει πολύ πυκνά εξαρτήματα, αλλά για να επιτευχθεί στεγανότητα αερίου ή πίεσης, συχνά απαιτείται μετεπεξεργασία. Οι περισσότερες εμπορικές ονομασίες όπως το λέιζερ πυροσυσσωμάτωσης, η επεξεργασία κ.λπ. περιγράφουν την ίδια διαδικασία αλλά όχι τις διαφορετικές τεχνολογίες. Η διαδικασία μοιάζει πολύ με μια τη διαδικασία Selective Laser Sintering (SLS). Τόσο η SLS όσο και η DMLS είναι εννοιολογικά η ίδια διαδικασία, αλλά αντί να χρησιμοποιούνται πολυμερή ή επικαλυμμένες μεταλλικές σκόνες στη θήκη του SLS, η DMLS χρησιμοποιεί μη επικαλυμμένες με κράμα μεταλλικές σκόνες ως υλικό πυροσυσσωμάτωσης (Gratton, 2015). Η τεχνολογία τήξης δέσμης ηλεκτρονίων (ElectronBeamMelting, EBM) χρησιμοποιεί πούδρα από μέταλλο που στη συνέχεια λιώνει και σχηματίζεται το εξάρτημα (Herderick, 2011).

4.2. DED

Στις τεχνολογίες που βασίζονται στη DED χρησιμοποιείται εστιασμένη θερμική ενέργεια για τη συγχώνευση των υλικών (πούδρα ή σύρμα). Μερικές από τις πιο χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη DED είναι οι εξής:

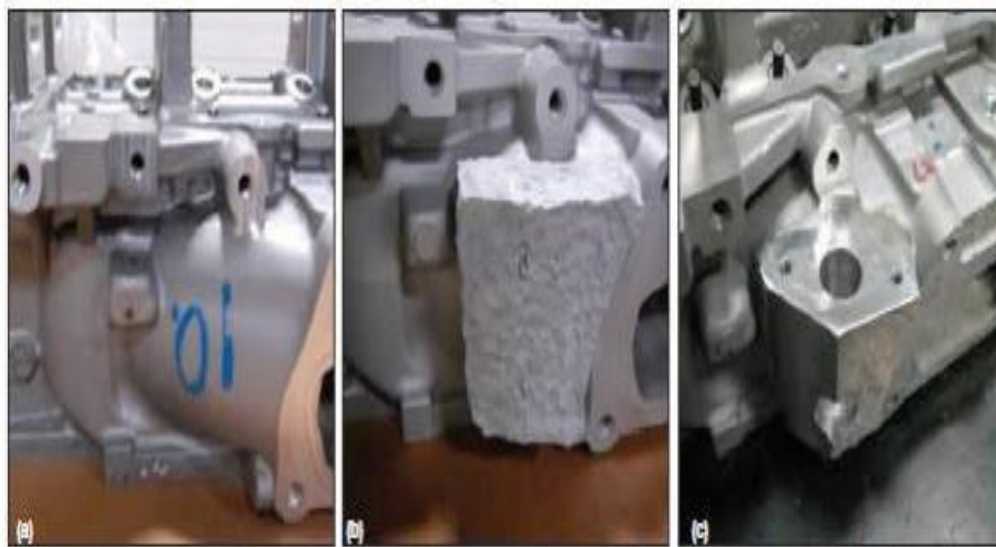
- Laser Engineered Net Shaping (LENS)
- Άμεση απόθεση μετάλλων (Direct M, et al, Deposition, DMD)
- Electron Beam Free Form Fabrication (EBFFF) και
- ηArc based AM (Bhavar, 2014).

HDMD βασίζεται σε ένα σύστημα έγχυσης πούδρας που συνδέεται με ένα λέιζερ ινών σε ρομποτικό βραχίονα. Η DMD είναι κατάλληλη για επισκευή εργαλείων, πρόσθεση χαρακτηριστικών σε μεγάλα εξαρτήματα ή την κατασκευή νέων ανταλλακτικών (Herderick, 2011).

Η EBFFF χρησιμοποιεί μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων για να δημιουργήσει μια λιωμένη πισίνα σε ένα μεταλλικό υπόστρωμα.

Η DED για την AM με μέταλλα είναι λιγότερο διαδεδομένη για την κατασκευή πρόσθετων ενός ολόκληρου εξαρτήματος, κυρίως λόγω χαμηλότερης ακρίβειας και της απαιτούμενης

μετεπεξεργασίας. Από την άλλη πλευρά όμως, η DED έχει παράδοση στις επισκευές. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες στο χώρο αυτό είναι ο Ψεκασμός Ψυχρού Αερίου (όπως φαίνεται στο ακόλουθο [Σχήμα 4.34](#)), ο Ψεκασμός οξυγόνου υψηλής ταχύτητας και η εναπόθεση μετάλλου με λέιζερ (Duda & Raghavan, 2016).



Σχήμα 4.34: Επισκευή εξαρτήματος με ψεκασμό κρύου αερίου: (α) Πριν από τον ψεκασμό, (β) ψεκασμένο, (γ) ολοκληρωμένο (Duda&Raghavan, 2016)

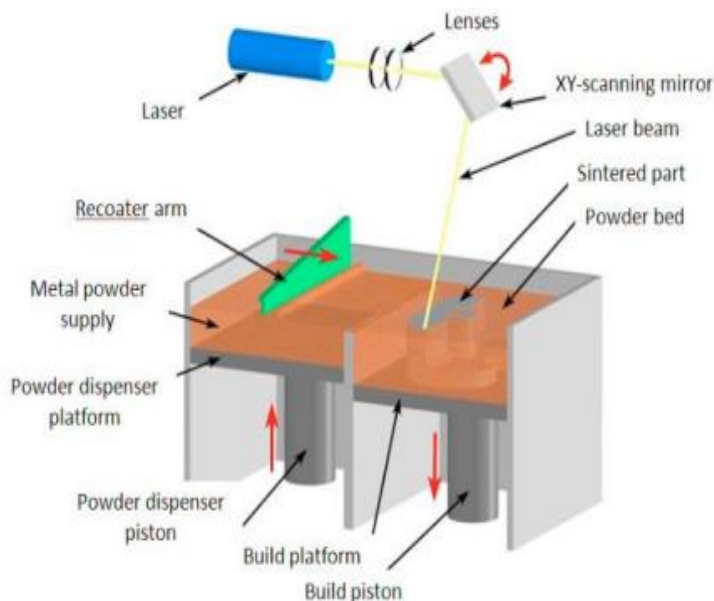
Το επόμενο [Σχήμα 4.35](#) παρέχει μια σύγκριση μεταξύ των διαδικασιών PBF και DED:

CRITERIA	LASER POWDER BED FUSION	DIRECTED ENERGY DEPOSITION
Build speed	5-20 cm ³ /h (~40-160 g/h)	Up to 0.5 kg/h (~70 cm ³ /h)
Accuracy	+/- 0.02-0.05 mm/25 mm	+/- 0.125-0.25 mm/25 mm
Detail capability	0.04-0.2 mm	0.5-1.0 mm
Surface quality	Ra 4-10 μm	Ra 7-20 μm
Max. part size	500 mm x 280 mm x 325 mm	2,000 mm x 1,500 mm x 750 mm
Avg. system price	EUR 450,000-600,000	EUR 500,000-800,000
FOCUS AREA	<ul style="list-style-type: none"> > Rapid prototyping > Direct manufacturing of parts 	<ul style="list-style-type: none"> > Repair of worn components > Modification of tooling for re-use

Σχήμα 4.35: Σύγκριση μεταξύ των διαδικασιών PBF και DED (Duda & Raghavan, 2016)

4.3. Βασικές αρχές της χρήσης του μετάλλου στην AM

Η DMLS είναι μια μέθοδος που βασίζεται σε λέιζερ και δημιουργεί πρωτότυπα και εργαλεία με μια ενιαία διαδικασία. Τα πολύπλοκα μέρη μπορούν να κατασκευαστούν απευθείας από μοντέλα 3D-CAD με στρώματα μεταλλικής πούδρας (Synaenen, 2008). Το παρακάτω [Σχήμα 4.36](#) δείχνει τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία DMLS.



Σχήμα 4.36: Τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία DMLS (Duda & Raghavan, 2016)

Η βασική αρχή της τεχνολογίας DMLS είναι να λιώνει λεπτές στρώσεις (20 - 60 μm) μεταλλικής πούδρας με ηλεκτρονική δέσμη λέιζερ (200W). Τα σημαντικά μέρη μιας μηχανής DMLS είναι:

- η πλατφόρμα κτιρίου
- η μονάδα διανομέα
- η μονάδα recoater
- το σύστημα λέιζερ
- τα οπτικά ακριβείας όπως ο φακός Ftheta ή variscan
- ένας σαρωτής υψηλής ταχύτητας και
- ο υπολογιστής με λογισμικό διεργασιών (Surel, 2008)

Η μεταλλική πούδρα αποθηκεύεται στη μονάδα διανομής και το recoater χρησιμοποιείται για να δώσει ομοιόμορφο πάχος στη στρώση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαδικασίες SLM, SLS και DMLS περιγράφουν την ίδια διαδικασία, με κύρια διαφορά τη φύση της πούδρας (Duda & Raghavan, 2016).

4.4. Διαδικασία DMLS

Μια χαλύβδινη πλάκα τοποθετείται στη βάση της πλατφόρμας. Το καλούπι κατασκευάζεται στη βάση της πλατφόρμας. Μια στρώση μεταλλικής πούδρας με κόκκο μεγέθους μικρότερο από 6 μm απλώνεται σε μια ασάλινη πλάκα βάσης. Η δέσμη λέιζερ πυροσυσσωματώνει την πρώτη στρώση. Η πλατφόρμα κατεβαίνει κατά 20 μm . Αν το πάχος του στρώματος πούδρας είναι 20 micron, η πούδρα πρέπει να γίνει πολύ μικρότερη σε μέγεθος. Ο ρυθμός κατασκευής εξαρτάται από την ακρίβεια την και τραχύτητα. Το recoater κινείται προς τον διανομέα. Ο διανομέας κινείται προς τα πάνω έτσι ώστε να λαμβάνεται αρκετή πούδρα το recoater για να απλώσει μια νέα στρώση πούδρας στην ήδη πυροσυσσωματωμένη στρώση. Το λέιζερ πυροσυσσωματώνει το δεύτερο στρώμα και έτσι η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί το εξάρτημα (Gratton, 2015).

Διαφορετικά μέρη μπορούν να κατασκευαστούν σε μία διάταξη σε μία πλάκα βάσης. Με τη διαδικασία στρώμα-στρώμα, είναι δυνατή η κατασκευή κάθε είδους σχήματος και

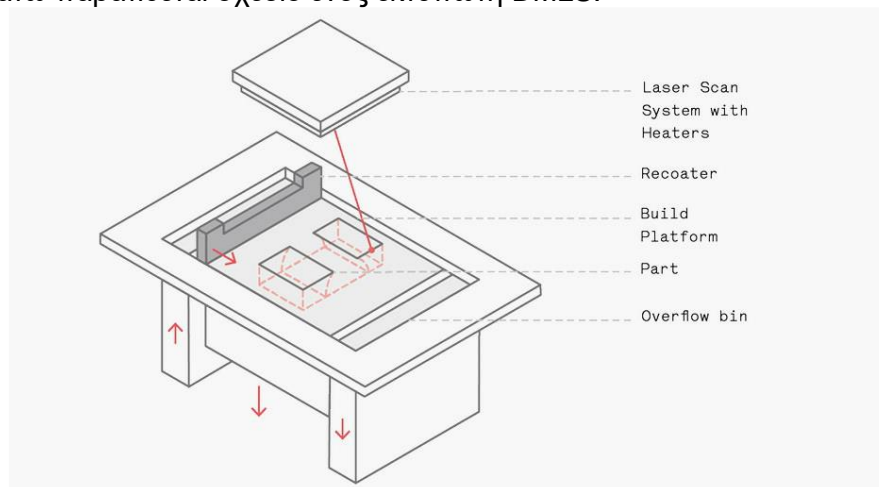
γεωμετρίας, ακόμη και αυτές που είναι αδύνατο να αποκτηθούν με άλλες τεχνολογίες. Η ακρίβεια είναι $\pm 0,05 \text{ mm}$. Τα 3D εκτυπωμένα εξαρτήματα DMLS που προκύπτουν έχουν διαφορετική υλική δομή / μηχανικές ιδιότητες από αυτές που λαμβάνονται μέσω συμβατικές τεχνικές. Τα βήματα που ακολουθούνται στην κατασκευή ενός πρωτότυπου εξαρτήματος/καλουπιού σε μια μηχανή AM έχει ως εξής:

- Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου CAD πρωτότυπου εξαρτήματος/καλουπιού.
- Μετατροπή του μοντέλου CAD σε μορφή STL.
- Ορισμός δομής υποστήριξης και εξομάλυνση των γωνιών και των άκρων
- Κόπτε του μοντέλου STL σε λεπτές στρώσεις
- Το αρχείο SLI τροφοδοτείται στο DMLS – AM (Duda&Raghavan, 2016).

Η διαδικασία αυτή όμως έχει και κάποια προβλήματα, τα οποία είναι τα εξής:

- Αναμένονται διαφορετικά θερμικά όρια κατά την κατασκευή
- Ανάλογα με την οπτική, τα αποτελέσματα των δοκιμών δεν μπορούν να μεταφερθούν (φακός F-θήτα έναντι βαριοσκάνωσης)
- Σταθερότητα διασταυρούμενης ροής argon
- Σταθερότητα βούρτσας/επαναβαφής
- Τυχαία διαδρομή λέιζερ και μοτίβο υλικού
- Διάσπαση της δεξαμενής τήξης
- Ακρίβεια επικαλυπτόμενων διαδρομών λέιζερ (σε περίπτωση πολλαπλών λέιζερ).
- Δύσκολος χειρισμός πούδρας
- Καθαρότητα πούδρας (εφοδιαστική αλυσίδα- υψηλότερες απαιτήσεις σε σύγκριση με την εφαρμογή θερμικού ψεκασμού)
- Καθαρισμός εξαρτημάτων (Alvarez, 2014).

Παρακάτω παρατίθεται σχέδιο ενός εκτυπωτή DMLS.



Σχήμα 4.37: Εκτυπωτής DMLS

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ AM ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ

5.1 Βιοϊατρική

Η AM επηρεάζει την ιατρική επιστήμη με διάφορους σημαντικούς τρόπους, με τον πιο σημαντικό να είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ιατρικών συσκευών και οργάνων. Οποιοσδήποτε τομέας όπου η μείωση του χρόνου ανάπτυξης προϊόντων και η ταυτόχρονη παροχή λειτουργικών επιδόσεων στους χρήστες είναι επιτακτική ανάγκη, η AM μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη (Petrovic, et al, 2012). Επομένως, προκύπτει ότι δεδομένου ότι η ανθρώπινη ζωή εξαρτάται από την ποιότητα και την ευκολία χρήσης πολλών ιατρικών προϊόντων, υπάρχει ένα πρόσθετο πλεονέκτημα για τη χρήση τεχνολογιών AM στην ανάπτυξη και παραγωγή τους. Για παράδειγμα, τα ιατρικά όργανα που έχουν σχεδιαστεί με την τεχνολογία AM περιλαμβάνουν νυστέρια, χειρουργικά στοιχεία στερέωσης, συστήματα οθόνης κ.λπ. (Piqué & Serra, 2018).

Ακολουθούν οι κυριότεροι λόγοι πίσω από την αυξανόμενη χρήση των διαδικασιών AM στον ιατρικό τομέα:

- Σύνθετες και περίπλοκες γεωμετρίες όπως σπονδυλικά εμφυτεύματα, οστικά μοντέλα και πρωτότυπα μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν, κάτι που δεν είναι δυνατό με συμβατικές μεθόδους.
- Λιγότεροι περιορισμοί στο σχεδιασμό προϊόντων όπως η κεφαλή ενός οστού.
- Απόλυτα ακριβή μοντέλα και εμφυτεύματα.
- Δεν υπάρχει κόστος εργαλείων αφού δεν απαιτούνται εξαρτήματα.
- Μπορούν να κατασκευαστούν πλήρως προσαρμοσμένα εμφυτεύματα και προσθετικά.

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ευρύ φάσμα υλικών, από κράματα τιτανίου, πλέγμα από ανοξείδωτο χάλυβα έως βιοδιασπώμενες πολυμερείς ρητίνες που ταιριάζουν σε διαφορετικές ιατρικές απαιτήσεις (Jiang, et al, 2021).

Οι κύριες ιατρικές εφαρμογές της AM είναι οι εξής:

- Πλήρως προσαρμοσμένα εμφυτεύματα
- Ειδική προσθετική ασθενούς
- Επισκευή οστών και μηχανική ιστών
- Οδοντιατρική αποκατάσταση και προσθετική
- Βιοσυμβατές δοκιμές και ανάπτυξη σύνθετων υλικών (Petrovic, et al, 2012).

Οι χειρουργοί χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο μοντέλα AM για το σχεδιασμό, διάγνωση και εξήγηση σύνθετων επεμβάσεων, όπως γναθοπροσωπικές και κρανιοπροσωπικές επεμβάσεις (Al-Dulimi, et al, 2020). Ένα διαφανές ή έγχρωμο μοντέλο που κατασκευάστηκε με στερεολιθογραφία ή τρισδιάστατη εκτύπωση αποδεικνύεται πολύ χρήσιμο για τη διακριτή απεικόνιση όγκων ή άλλων ανωμαλιών στους γύρω ιστούς ή οστά σε έναν χειρουργό και την ομάδα του πριν από την πραγματική χειρουργική επέμβαση. Επιστήμονες όπως οι παλαιοντολόγοι, οι ανθρωπολόγοι και οι ιατροδικαστές χρησιμοποιούν επίσης μοντέλα AM για τον εντοπισμό σκελετών και απολιθωμάτων, την ανάπτυξη ακριβών αντιγράφων σπάνιων ευρημάτων και την κατασκευή μοντέλων εκθέσεων μουσείων (Piqué & Serra, 2018).

Υπάρχουν αντικείμενα που πρέπει να προσαρμοστούν για κάθε ασθενή και αναγνωρίζονται ότι κατασκευάζονται πρόσθετα, για παράδειγμα, σχεδόν όλα τα ακουστικά βαρηκοΐας σήμερα κατασκευάζονται είτε με SLA είτε με SLS. Πρόσφατες βελτιώσεις στην τεχνολογία της AM οδηγούν στην αυξημένη χρήση RP για την αντικατάσταση δοντιών, οδοντοστοιχιών κ.λπ.. Η AM χρησιμοποιείται επίσης για την κατασκευή μορφών δοσολογίας φαρμάκων, οι οποίες θα ήταν δύσκολο αν όχι αδύνατο να γίνουν με τη χρήση συμβατικής κατασκευής. Είναι δυνατή η κατασκευή δισκίων με ακριβή και σύνθετα χαρακτηριστικά απελευθέρωσης χρόνου ή αυτά που διαλύονται και σχεδόν αμέσως χορηγούν τη δοσολογία (Piqué & Serra, 2018). Τα φάρμακα μπορούν να γίνουν πιο αποτελεσματικά και ασφαλέστερα με αυτόν τον τρόπο και οι εταιρείες φαρμάκων μπορεί να είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν μεγαλύτερες ροές εσόδων. Διερευνάται επίσης η άμεση κατασκευή βιολογικά ενεργών εμφυτευμάτων. Είναι δυνατή η εκτύπωση σκληρών τμημάτων όπως οστά καθώς και σύνθετων δομών μαλακών ιστών όπως το συκώτι των νεφρών, η καρδιά κ.λπ. χρησιμοποιώντας τεχνολογίες AM (Jiang, et al, 2021).

5.1.1 Υλικά για ιατρικές εφαρμογές της AM

Υπάρχουν πολλά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις ιατρικές εφαρμογές της AM. Η επιλογή του υλικού εξαρτάται από τον σκοπό του μοντέλου AM, όπως προσαρμοσμένα εμφυτεύματα, προσθετικά άκρα, χειρουργικά εργαλεία κ.λπ. Εκτός από αυτό, τα υλικά πρέπει να δείχνουν βιολογική συμβατότητα (Tejo-Otero, et al, 2020). Έχουν διερευνηθεί και βρεθεί κατάλληλα για τις παραπάνω ιατρικές εφαρμογές, υλικά όπως:

- Ακρυλικές ρητίνες (Al-Dulimi, et al, 2020).
- Μέταλλα (ανοξείδωτο ατσάλι, κράματα τιτανίου, κοβάλτιο, κράματα χρωμίου, κράματα μαγνησίου) (Al-Dulimi, et al, 2020).
- Προηγμένα βιοκεραμικά υλικά (αλουμίνα, ζirkονία), βιοκεραμικά με βάση το φωσφορικό ασβέστιο, πορώδη κεραμικά κ.λπ. (Al-Dulimi, et al, 2020).
- Πολυμερή-κεραμικά από πολυπροπυλένιο-φωσφορικό τρικάλιο (PP-TCP), PCL και PCL-υδροξυαπατίτη για FDM, PLGA, πολυμερή με άμυλο, πολυκαπρολακτόνη (PCL) και πολυαιθερεθερκετόνη-υδροξυαπατίτη (PEEK-HA) (Petrovic, et al, 2012).

- Νέο συνδετικό πούδρας φωσφορικού ασβεστίου γνωστό ως τσιμέντο οστού που είναι μίγμα φωσφορικού τετρακαλίου (TTCP) και βήτα φωσφορικού ασβεστίου (TCP) και παρόμοια υλικά, πολυμεθυλομεθακρυλικό (PMMA), πολυμερές φωσφορικό ασβέστιο τσιμέντο σύνθετα για υποκατάστατα οστού και χόνδρου, εμφυτεύματα και πρόθεση (Tejo-Otero, et al, 2020).

5.1.2 Μεθοδολογία κατασκευής

Η διαδικασία κατασκευής 3D ιατρικών μοντέλων που χρησιμοποιούν AM περιλαμβάνει τα ακόλουθα τέσσερα βασικά βήματα:

1) Δημιουργία ψηφιακής εικόνας 2D

Μια ψηφιακή εικόνα 2D μπορεί να ληφθεί χρησιμοποιώντας σαρωτή CT ή MRI. Αυτές οι τεχνολογίες απεικόνισης χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των εσωτερικών δομών του ανθρώπινου σώματος, δηλαδή των οστών, μαλακών ιστών κ.λπ. (Piqué & Serra, 2018).

2) Μεταφορά δεδομένων με επεξεργασία και τμηματοποίηση

Το αρχείο DICOM είναι μια εικόνα 2D. Ορισμένες από αυτές τις 2D εικόνες υπερτίθενται για να αποκτήσουν ένα τρισδιάστατο μοντέλο του σαρωμένου μέρους του σώματος ή του οργάνου. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται ένα κατάλληλο πακέτο λογισμικού όπως το Mimics, το DeVide κ.λπ. Αυτά τα πακέτα λογισμικού επιτρέπουν την κατάτμηση εφαρμόζοντας την τεχνική κατωφλίου λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα των ιστών (Jiang, et al, 2021). Έτσι, στο τέλος της διαδικασίας τμηματοποίησης εικόνας, έχουμε μόνο εικονοστοιχεία με τιμή ίση ή υψηλότερη από την τιμή κατωφλίου. Το εικονικό μοντέλο εσωτερικών δομών του ανθρώπινου σώματος, το οποίο απαιτείται για την τελική γενιά τρισδιάστατου φυσικού μοντέλου, απαιτεί πολύ καλή κατάτμηση με καλή ανάλυση και υψηλή πυκνότητα εικονοστοιχείων (Piqué & Serra, 2018). Απαιτείται πολύ καλή γνώση και εμπειρία, έτσι ώστε οι μηχανικοί σχεδιασμού να μπορούν να αποκλείσουν όλα τα αντικείμενα που δεν χρειάζονται και να επιλέξουν τα απαραίτητα, Κάνουν δηλαδή διαχωρισμό των οστών από ιστούς, συμπερίληψη συγκεκριμένου τμήματος οστού, αποκλεισμό περιπτώσεων και ανώμαλων αντικειμένων κλπ.. Αυτό το βήμα απαιτεί συνήθως τη συνεργασία ανάμεσα σε ακτινολόγους και χειρουργούς με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μοντέλου 3D CAD με την απαιτούμενη ακρίβεια (Petrovic, et al, 2012).

3) Αξιολόγηση του σχεδίου

Σε αυτό το βήμα το δημιουργημένο τρισδιάστατο μοντέλο εισάγεται σε κατάλληλο πακέτο λογισμικού τρισδιάστατης μοντελοποίησης με σκοπό την προβολή του και την αξιολόγηση των διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με το μοντέλο. Οι μηχανικοί σχεδιασμού μαζί με τον χειρουργό και του γιατρούς αποφασίζουν πώς πρέπει να τροποποιηθεί το μοντέλο έτσι ώστε να πληροί τις απαιτήσεις του ασθενούς. Το τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να εξαχθεί απευθείας ως αρχείο STL και να τροφοδοτηθεί σε μηχανή AM για κατασκευή εξαρτημάτων ή μπορεί να τροποποιηθεί για να αποκτήσει το επιθυμητό σχήμα, μορφή και χαρακτηριστικά εάν το μέρος πρέπει να προσαρμοστεί πλήρως, για παράδειγμα προσθετικό, εμφύτευμα, ακοή βοήθεια, οδοντοστοιχία κλπ. (Tejo-Otero, et al, 2020).

Τέλος, το τρισδιάστατο μοντέλο εξάγεται ως αρχείο STL και η μετα -επεξεργασία του αρχείου STL πραγματοποιείται για την απομάκρυνση διαφόρων σφαλμάτων που ενδέχεται να έχουν διαρρεύσει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συρρίκνωσης (Jiang, et al, 2021).

4) Κατασκευή ιατρικού μοντέλου AM

Σε αυτό το βήμα επιλέγεται η κατάλληλη διαδικασία AM σύμφωνα με την τελική χρήση του ίδιου του μοντέλου καθώς και την ακρίβεια της επιφάνειας, το φινίρισμα, αντοχή, εμφάνιση, επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Έτσι, το δημιουργημένο μοντέλο 3D CAD εισάγεται στο

μηχάνημα AM για την κατασκευή του μοντέλου του αντικειμένου. Η ποιότητα του κατασκευασμένου μοντέλου επηρεάζεται από την ποιότητα του αρχείου STL που χρησιμοποιείται ως είσοδο, τον προσανατολισμό του μοντέλου στο μηχάνημα AM και τις παραμέτρους διαδικασίας για την κατασκευή του μοντέλου στην ίδια μηχανή (Tejo-Otero, et al, 2020).

5.2 Αεροναυπηγική

Η AM έχει ευρύ πεδίο εφαρμογής στην αεροναυπηγική. Είναι μια τεχνολογία που διαφέρει από την παραδοσιακή κατασκευή από άποψη ελαφρού βάρους, βελτιωμένης απόδοσης, αυξημένη οικονομία καυσίμου, αυξημένη απόδοση συστήματος, κλπ. Το βάρος, η οικονομία καυσίμου και η αποδοτικότητα του συστήματος έχουν μεγάλη σημασία για τις αεροναυπηγικές εφαρμογές. Η AM στην αεροναυπηγική είναι σε πάρα πολύ καλό δρόμο, με τη δυναμική της αγοράς και την αύξηση της τεχνικής γνώσης να επιτρέπουν στην AM να αναπτυχθεί περαιτέρω (Kumar & Nair, 2017; Hiemenz, 2014; Kalender, et al, 2019; Shapiro, et al, 2016).

Όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου, αν σκεφτεί κανείς ότι το βάρος παίζει πολύ μεγάλο ρόλο σε ένα αερομεταφερόμενο αντικείμενο, τα ελαφρύτερα εξαρτήματα κάνουν μεγάλη διαφορά. Αναμφίβολα, εάν το εξάρτημα είναι ελαφρύ, θα έχει καλύτερη κατανάλωση καυσίμου ή θα βελτιώσει την απόδοση του συστήματος. Για μια γεωστατική τροχιά, το ωφέλιμο φορτίο ζυγίζει τόνους. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το μειωμένο βάρος των εξαρτημάτων μπορεί να βοηθήσει στην οικονομία του καυσίμου. Στην πολιτική αεροπορία, κάθε κιλό έχει κόστος εκατοντάδες δολάρια ετησίως, ανά αεροσκάφος, αεροπορική εταιρεία ή πύραυλο. Εάν προσθέσει κανείς το βάρος και το κόστος του προσωπικού των αεροσκαφών, το συνολικό κόστος είναι τεράστιο (Kumar & Nair, 2017; Hiemenz, 2014; Kalender, et al, 2019; Shapiro, et al, 2016).

5.2.1 Πιθανές προκλήσεις της AM στην αεροναυπηγική

Στη συνέχεια παρατίθενται μερικά από τα ζητήματα που παρατηρούνται ως προκλήσεις:

- Το υλικό είναι ο πιο αποφασιστικός παράγοντας για τη μείωση του τελικού βάρους των εξαρτημάτων και της αξιοπιστίας τους. Η ανάλυση πούδρας μετάλλων για την αεροδιαστημική βιομηχανία περιλαμβάνει τη μέτρηση του μέσου μεγέθους της πούδρας, πούδρα κατανομής μεγέθους, επιφάνειας, ροής, παρατηρήσιμης πυκνότητας, υγρασίας και του πορώδους του προϊόντος. Για αρκετές περιπτώσεις, αυτές οι λεπτομέρειες είναι απαραίτητες για τον τελικό καταναλωτή (Kumar & Nair, 2017).

- Η εγγενής ανισότροπη ιδιότητα του τυπωμένου μέρους είναι ένα άλλο μειονέκτημα της AM. Το ελάττωμα αυτό επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες (Hiemenz, 2014; Kalender, et al, 2019; Shapiro, et al, 2016).

- Οι ανεπαρκείς πληροφορίες για τις ιδιότητες των υλικών της AM μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένη εκτίμηση της αντοχής και υλική εφαρμογή (Kumar & Nair, 2017; Hiemenz, 2014; Kalender, et al, 2019; Shapiro, et al, 2016).

- Η τρισδιάστατη εκτύπωση ισχύει για μικρά εξαρτήματα, ενώ η εφαρμογή στα αεροσκάφη απαιτεί μεγάλα εξαρτήματα, κάτι το οποίο επιβραδύνει την πρόοδο αυτής της τεχνολογίας (Kumar & Nair, 2017; Hiemenz, 2014; Kalender, et al, 2019; Shapiro, et al, 2016).

- Η πιστοποίηση προϊόντων ποιότητας και διασφάλιση αυτών είναι ένα ουσιαστικό βήμα πριν από την προώθηση του τελικού προϊόντος AM στην αγορά (Kumar & Nair, 2017; Hiemenz, 2014; Kalender, et al, 2019; Shapiro, et al, 2016).

- Το κόστος παραγωγής υλικών AM είναι υψηλότερο από τις συμβατικές μεθόδους γιατί χρειάζεται τις απαιτούμενες διαδικασίες για τη μετατροπή του περιεχομένου του υλικού σε σωστά εξαρτήματα για πράξεις AM (Shapiro, et al, 2016).

5.3 Οικοδομικές κατασκευές

Τα συστήματα AM έχουν αναπτυχθεί κυρίως για εφαρμογές μικρής κλίμακας και εργοστασιακή παραγωγή. Τα κτίρια ή τα μέρη των κτιρίων είναι συχνά μεγάλα και συχνά είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν εκτός ελεγχόμενου περιβάλλοντος. Μερικά από τα συστήματα AM προσαρμόστηκαν, γεγονός που οδήγησε σε διάφορες λύσεις. Στην πραγματικότητα, η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζει η πρόσθετη κατασκευή είναι η μεταφορά τεχνολογιών AM σε μεγάλη κλίμακα (Paolini, et al, 2019). Στη συνέχεια περιγράφονται οι τρέχουσες τεχνολογικές λύσεις για τον κατασκευαστικό τομέα:

- Το σύστημα Gantry αποτελείται από έναν γιγαντιαίο τρισδιάστατο εκτυπωτή όπου η κεφαλή εκτύπωσης είναι προσαρτημένη σε ένα κινητό πλαίσιο που έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας σύμφωνα με τον άξονα X, Y και Z στις καρτεσιανές συντεταγμένες. Αυτή η λύση είναι σχετικά δύσκολη στην εγκατάσταση. Οι κύριες διαδικασίες που βασίζονται σε αυτό το σύστημα είναι η εξώθηση υλικού και η εκτόξευση συνδετικού υλικού. Αντί αυτού, η διαδικασία σύντηξης σε πούδρα χρησιμοποιείται για μέταλλα και υλικά πολυμερών (Sartipi & Sartipi, 2020).

- Η πλατφόρμα με καλωδιακή ανάρτηση είναι μια εναλλακτική λύση όπου βελτιώνεται η δυνατότητα μεταφοράς του συστήματος. Με τη λύση αυτή είναι δυνατό να επιλυθούν προβλήματα που σχετίζονται με το μέγεθος των προς παραγωγή αντικειμένων, τα οποία είναι συνδεδεμένα με το μέγεθος του εκτυπωτή. Επιπλέον, τα καλωδιακά ρομπότ είναι σχετικά φθηνά και είναι εύκολο να αποσυναρμολογηθούν, να μεταφερθούν και να συναρμολογηθούν (Sartipi & Sartipi, 2020).

- Η τεχνική Swarm θυμίζει τη συμπεριφορά ενός σμήνους (swarm) και αγκαλιάζει την προσέγγιση της συλλογικής εργασίας. Ένα από τα πλεονεκτήματα της προσέγγισης σμήνους είναι η απόλυτη ελευθερία κατά την κατασκευή και το γεγονός ότι δεν χρειάζεται να παρέμβει ο άνθρωπος. Η προσέγγιση σμήνους είναι εξαιρετικά ευεργετική σε εξωγήινα περιβάλλοντα όπως το διάστημα, τη Σελήνη ή τον Άρη, επειδή είναι δυνατό η AM να φτάσει και να χτίσει εκεί όπου οι άνθρωποι δεν μπορούν (Paolini, et al, 2019).

- Οι ρομποτικοί βραχίονες είναι μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση για την κατασκευή κτιρίων ή εξαρτημάτων επειδή κάθε βραχίονας μπορεί να εκτελέσει κινήσεις σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Επίσης, κάθε βραχίονας μπορεί να εκτελέσει διαφορετικές εργασίες. Επομένως, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί ένα ολόκληρο κτίριο ή τα εξαρτήματά του με λύσεις ρομποτικής πολλαπλών χρήσεων σε συνδυασμό με αυτοματοποιημένες λύσεις συναρμολόγησης, χρησιμοποιώντας πρόσθετες κατασκευές επί τόπου (Ghaffar et al, 2018).

- Οι λύσεις αναδίπλωσης και αυτοσυναρμολόγησης είναι ένας συνδυασμός σχεδιασμού με δυνατότητα ανάπτυξης ή αυτοσυναρμολόγησης με τεχνολογία AM που ονομάζεται AssembledAdditiveManufacturing (AAM). Είναι δυνατή η μετατροπή της

τρισδιάστατης δομής σε δομή 2D, αυξάνοντας την ταχύτητα κατασκευής (Ghaffar, et al, 2018).

5.3.1 Ευκαιρίες για τον κατασκευαστικό τομέα

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια αύξηση της έρευνας σχετικά με τις μεθόδους εκτύπωσης και τις εξελίξεις που μπορούν να αποδοθούν σε πολλά πλεονεκτήματα και ευκαιρίες που προσφέρει η AM αναφορικά με τον κατασκευαστικό τομέα:

- Αυτοματοποίηση της διαδικασίας κατασκευής: Η AM επιτρέπει την πλήρως αυτοματοποιημένη κατασκευή κτιρίων ή εξαρτημάτων, τόσο επί τόπου όσο και εκτός τόπου (Paolini, et al, 2019).

- Ελευθερία στις γεωμετρίες: με την AM, είναι δυνατό να δημιουργηθούν σύνθετα και προσαρμόσιμα σχήματα και γεωμετρίες που θα μπορούσαν να είναι πιο δύσκολες και ακριβότερες με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής (Ghaffar, et al, 2018).

- Η AM (και διαδικασίες βελτιστοποίησης δομών) καθιστά δυνατή την εύκολη υλοποίηση ελαφρών δομών (ελαχιστοποίηση υλικών) των οποίων η γεωμετρία μπορεί να σχεδιαστεί κατάλληλα για να καθορίσει τοπικά τη δομική της απόκριση (Sartipi & Sartipi, 2020).

- Το δυναμικό του λογισμικού μοντελοποίησης και προσομοίωσης σε συνδυασμό με την εγγυημένη ακρίβεια και ελευθερία στη γεωμετρία από την AM οδηγεί σε εξαιρετικά καινοτόμες δομικές και αρχιτεκτονικές λύσεις (Ghaffar, et al, 2018).

- Διαβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού και των στοιχείων: μπορούν να παραχθούν παραλλαγές εντός των τρισδιάστατων στοιχείων (δηλαδή, διαβαθμισμένες δομές) χρησιμοποιώντας τεχνικές AM (Ghaffar, et al, 2018).

- Λειτουργική και τοπολογική βελτιστοποίηση δομικών και μη δομικών στοιχείων: είναι εύκολο να ελεγχθεί η θέση των υλικών και να ενσωματωθούν λειτουργικές λεπτομέρειες (Sartipi & Sartipi, 2020).

- Μείωση υλικών αποβλήτων: Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να υπάρξει μείωση έως και 60% του συνολικού κόστους (Ghaffar, et al, 2018).

- Ασφάλεια στο χώρο εργασίας: Η AM μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο τραυματισμού και θανάτου στους χώρους εργασίας χάρη στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας κατασκευής, τη δυνατότητα εκτέλεσης επικίνδυνων εργασιών χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση (π.χ. σε υψηλές σκαλωσιές, επιθετικά περιβάλλοντα ή δύσκολα προσβάσιμες θέσεις) (Sartipi & Sartipi, 2020).

5.4 Αυτοκινητοβιομηχανία

Όπως και οι προαναφερθείσες βιομηχανίες, έτσι και η αυτοκινητοβιομηχανία μπορεί να επωφεληθεί πάρα πολύ από τη χρήση της AM. Οι κορυφαίοι κατασκευαστές αυτοκινήτων βασίζονται στην AM όχι μόνο για να επιταχύνουν τον κύκλο ανάπτυξης του προϊόντος αλλά και για να μειώσουν την κατανάλωση πόρων όπως ο χρόνος και η ενέργεια. Η κατασκευή προσθέτων μεταμορφώνει ήδη τις ροές εργασιών παραγωγής αυτοκινήτων, επηρεάζοντας τα πάντα, από την Ε&Α έως την αλυσίδα εφοδιασμού και την παραγωγή.

Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- Επαναληπτική Έρευνα και Ανάπτυξη. Η AM έχει φέρει επανάσταση στην E&A για τους κατασκευαστές οχημάτων - χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για τη μείωση του χρόνου ανάπτυξης, τη βελτίωση των ροών εργασιών δημιουργίας πρωτοτύπων και την παροχή καινοτόμων ανταλλακτικών που δεν θα ήταν δυνατά χρησιμοποιώντας παραδοσιακές τεχνικές. Σε αρκετούς μεγάλους κατασκευαστές αυτοκινήτων στις ΗΠΑ, το 80 με 90 τοις εκατό κάθε αρχικής διάταξης πρωτοτύπου έχει εκτυπωθεί 3D. Μερικά από τα πιο δημοφιλή εξαρτήματα είναι οι εισαγωγές αέρα, τα μέρη της εξάτμισης και οι αγωγοί. Αυτά τα εξαρτήματα σχεδιάζονται ψηφιακά, εκτυπώνονται 3D και τοποθετούνται σε ένα αυτοκίνητο με σύντομη σειρά, και στη συνέχεια δοκιμάζονται με πολλαπλές επαναλήψεις. Η γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων επιτρέπει μια συντομότερη φάση ανάπτυξης και μειωμένο χρόνο για το τελικό μέρος.

- Αποφυγή διακοπής της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι περισσότεροι κατασκευαστές αυτοκινήτων χρησιμοποιούν την έγκαιρη κατασκευή, όπου μεγάλες ποσότητες ανταλλακτικών φτάνουν στη γραμμή παραγωγής αμέσως πριν από τη συναρμολόγηση για να μειώσουν την ανάγκη για δαπανηρούς χώρους αποθήκης. Η AM μπορεί να διευκολύνει αυτήν τη διαδικασία για τη δημιουργία εξαρτημάτων παραγωγής επί τόπου, εάν υπάρξουν διακοπές στην αλυσίδα εφοδιασμού ενός κατασκευαστή. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια μιας πρόσφατης προγραμματισμένης κυκλοφορίας ενός νέου αυτοκινήτου, το εργαλείο για το κουτί που περιείχε τη μονάδα ελέγχου κινητήρα (ECU) κατασκευάστηκε λανθασμένα. Ως αποτέλεσμα, η κυκλοφορία αυτού του νέου οχήματος ήταν προγραμματισμένη να καθυστερήσει. Για να αποφευχθεί ο χρόνος αναμονής για νέα εργαλεία από τρίτο προμηθευτή, χρησιμοποιήθηκε η AM. Τα πρώτα αρκετές εκατοντάδες αυτοκίνητα που κατασκευάστηκαν σε αυτή τη σειρά περιελάμβαναν ECU που στεγάζονταν σε κουτιά που δημιουργήθηκαν με άμεση ψηφιακή παραγωγή. Το αρχείο CAD βελτιστοποιήθηκε για τρισδιάστατη εκτύπωση, με αποτέλεσμα ένα τμήμα παραγωγής τελικής χρήσης σε ένα κλάσμα του χρόνου που απαιτείται για την εκ νέου επεξεργασία εργαλείων.

- Εξατομίκευση στην Ειδική Αυτοκινητοβιομηχανία. Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα παραδείγματα παραγωγής ανταλλακτικών σε πραγματικό κόσμο είναι με ειδικούς κατασκευαστές αυτοκινήτων όπως σπορ αυτοκίνητα και πολυτελή αυτοκίνητα. Αυτοί οι κατασκευαστές παράγουν αυτοκίνητα χαμηλού όγκου και υψηλού κύρους για τους πιο απαιτητικούς πελάτες. Λόγω των μοναδικών οχημάτων που κατασκευάζουν, αναζητούν επίσης τρόπους να δημιουργήσουν ανταλλακτικά για αυτά τα αυτοκίνητα που δεν είναι συνηθισμένα. Σε αυτήν την περίπτωση, η AM χρησιμοποιείται για τη δημιουργία προσαρμοσμένων βραχιόνων, διαχωριστών και δακτύλων, καθώς και σύνθετων, εξειδικευμένων μονάδων που κατασκευάζονται σύμφωνα με τις ατομικές απαιτήσεις του αγοραστή. Ένα παράδειγμα είναι η δημιουργία εξατομικευμένων επιγραφών για εσωτερικά εξαρτήματα όπως το ταμπλό ή οι πόρτες.

- Ηλεκτρικά οχήματα. Τα ηλεκτρικά οχήματα γίνονται δημοφιλή στους καταναλωτές ως ένα «φιλικότερο προς το περιβάλλον» μέσο μεταφοράς. Η ενσωμάτωση της ισχύος της μπαταρίας έναντι ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης δεν έχει αφαιρέσει τις απαιτήσεις για μείωση βάρους και ψύξη του κινητήρα από την εξίσωση της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ενώ έχουν γίνει πρόσφατες πρόοδοι για τη μείωση του βάρους των μπαταριών που τροφοδοτούν τα ηλεκτρικά οχήματα, συνεχίζουν να αποτελούν ένα από τα βαρύτερα εξαρτήματα του οχήματος. Το αυξημένο βάρος του οχήματος επηρεάζει την απόδοση και την απόδοση. Ως εκ τούτου, καθώς οι μηχανικοί σχεδιάζουν εξαρτήματα για αυτά τα οχήματα, αναζητούν τρόπους μείωσης του βάρους σε κάθε εξάρτημα. Το Design for Additive Manufacturing (DfAM) αναγκάζει τους μηχανικούς να ξανασκεφτούν τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούν εξαρτήματα – επιτρέποντάς τους να παράγουν εξαρτήματα με τρόπους που δεν είναι δυνατοί με τις παραδοσιακές τεχνολογίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα εξαρτήματα με μοναδικές γεωμετρίες – συχνά με μειωμένο βάρος – που μπορούν να

παραχθούν ως ένα μόνο τελικό εξάρτημα έναντι πολλών τεμαχίων που απαιτούν συναρμολόγηση. Το αποτέλεσμα είναι μειωμένη επιβάρυνση του συστήματος μετάδοσης κίνησης που συμβάλλει στην αύξηση της αυτονομίας του οχήματος.

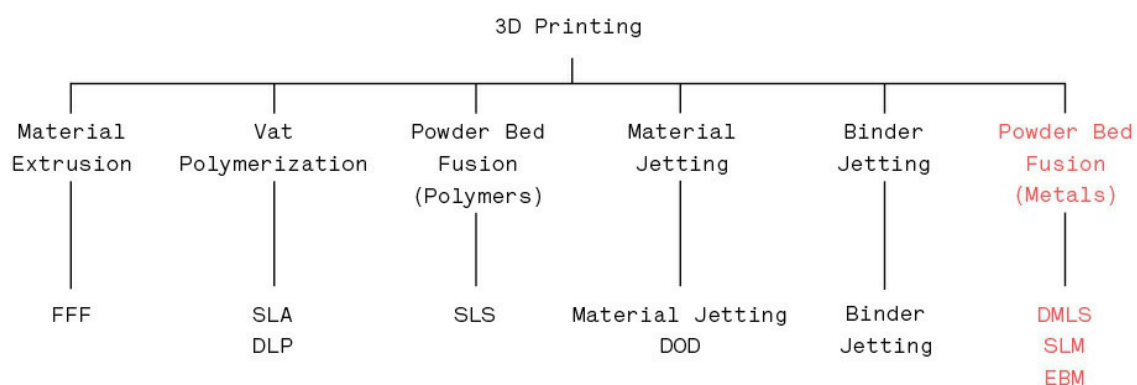
5.5 Τεχνική AM Additive Manufacturing για 3D printing Μετάλλου

Τα τελευταία χρόνια, η Additive Manufacturing (AM), που ονομάζεται επίσης τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου, έχει επεκταθεί σε αρκετούς βιομηχανικούς τομείς λόγω της τεχνολογίας που παρέχει ευκαιρίες όσον αφορά τη βελτιωμένη λειτουργικότητα, παραγωγικότητα και ανταγωνιστικότητα. Ενώ οι τεχνολογίες AM έχουν σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες και το εύρος των εφαρμογών τους έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, οι βιομηχανίες έχουν αντιμετωπίσει προκλήσεις όσον αφορά την υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών και την αντιμετώπιση των κραδασμών αγοράς (Berman, 2012).

Η πρόσθετη κατασκευή (AM) μετάλλου ή η τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση μετάλλου είναι μια διαδικασία κατασκευής που επιτρέπει την κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων με διαδοχική εκτύπωση στρώμα επί στρώσης καθοδηγούμενη από ένα ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο. Αυτό το μοναδικό χαρακτηριστικό επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών που είναι σχεδόν αδύνατο να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας συμβατικά συστήματα. Αναμένεται ότι η ανάπτυξη της βιομηχανίας AM θα συνεχιστεί τα επόμενα χρόνια και η πώληση της προβλέπεται να ξεπεράσει τα 22,9 δισ. AU\$ (15,8 \$) παγκοσμίως ανά κλάδους της βιομηχανίας (DebRoy, et al., 2019).

Οι τεχνολογίες AM μπορούν να χρησιμοποιήσουν διάφορα υλικά, αλλά μεταξύ αυτών των υλικών, τα μέταλλα διεκδικούν την προσοχή της βιομηχανίας και των ερευνητών. Η τεχνική AM μετάλλου μπορεί να προσφέρει ορισμένα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα όπως λιγότερη σπατάλη, βελτίωση ποιότητας, λιγότερες εκπομπές ρύπων και κατασκευή ανταλλακτικών κατά παραγγελία αλλά περιορίζεται επί του παρόντος σε λίγους κλάδους της βιομηχανίας όπως η οδοντιατρική, ο οικοδομικός-κατασκευαστικός τομέας και η αεροναυπηγική (Berman, 2012).

Εδώ σχηματικά φαίνεται ποιες μέθοδοι τυπώνουν μέταλλα και άλλα υλικά.



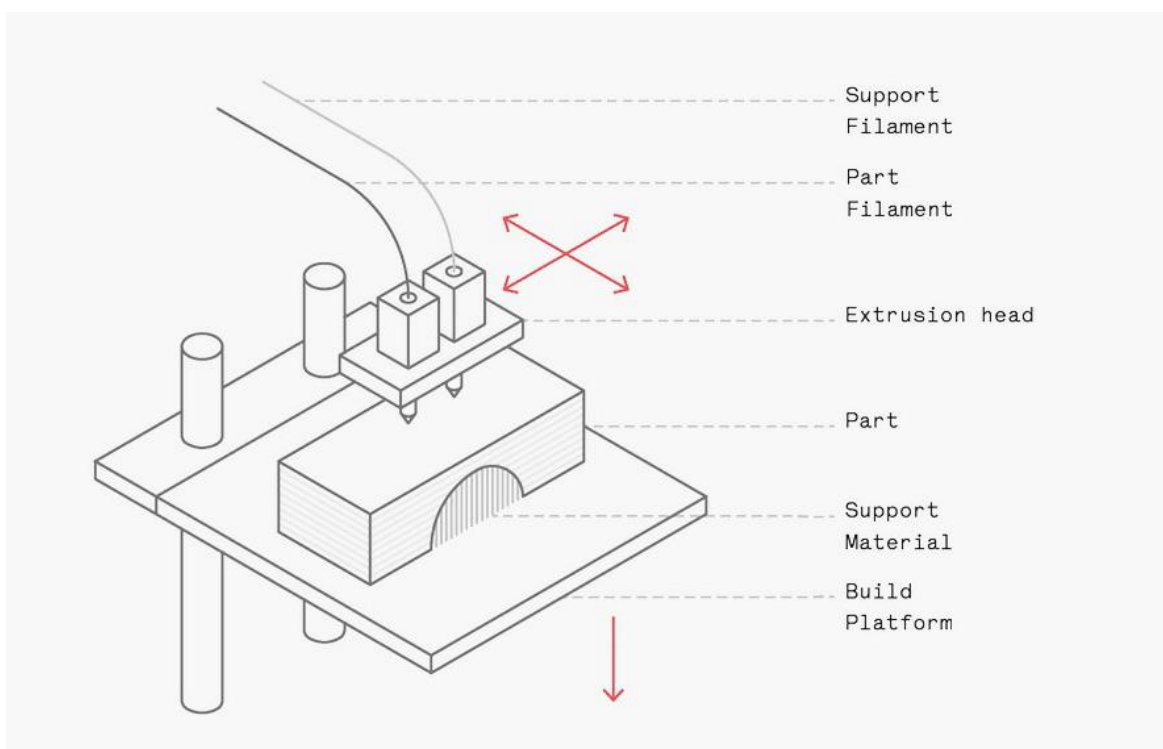
Σχήμα 5.38: Ταξινόμηση 3d printing (Redwood.B,2017)

5.5.1 Fused Filament Fabrication (FFF)

Η Stratasys Ltd. κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τη διαδικασία Fused Deposition Modeling (FDM), η οποία χρησιμοποιεί θερμοπλαστικά πολυμερή, το 1989. Το 2009, τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας έληξαν και άλλοι κατασκευαστές άρχισαν να κατασκευάζουν νέες εκδόσεις του FDM, οι οποίες ονομάζονται Fused Filament Fabrication (FFF). Μία από τις πρόσφατες εξελίξεις στην αγορά μεταλλικών AM είναι η ανάπτυξη νημάτων με πλήρωση

μετάλλου, τα οποία μπορούν να εκτυπωθούν χρησιμοποιώντας μηχανές FFF (DebrRoy, et al., 2019). Σε αυτό το νήμα, η μεταλλική πούδρα εγχέεται σε ένα τυπικό νήμα ABS ή PLA και το ποσοστό πούδρας μπορεί να ποικίλλει. Οι εκτυπώσεις που γίνονται με αυτά τα νήματα δεν είναι καθαρά μεταλλικά μέρη, αλλά αποτελούνται μάλλον από μεταλλικά σωματίδια σε μια μήτρα πολυμερούς, ενώ είναι εύθραυστα και απαιτούν προσοχή κατά το χειρισμό των εκτυπωμένων αντικειμένων. Τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται με αυτές τις διεργασίες δεν είναι μεταλλικά μέρη, αλλά εξαρτήματα με περιεκτικότητα σε μέταλλο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αντοχή των νημάτων μειώνεται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε μεταλλικά σωματίδια. Ωστόσο, η θερμική αγωγιμότητα των νημάτων αυξάνεται και μπορεί να τα κάνει κατάλληλα για την κατασκευή κυκλωμάτων και ηλεκτρομαγνητικών μερών (DebrRoy, et al., 2019).

Παρακάτω παρατίθεται το Σχήμα 5.39 που δείχνει πως λειτουργεί ένας εκτυπωτής FFF.



Σχήμα 5.39: Εκτυπωτής FFF(Redwood.B,2017)

5.5.2 BoundPowderExtrusion (BPE)

Το BoundPowderExtrusion (BPE) είναι μια άλλη πρόσφατη εξέλιξη ME στην αγορά μεταλλικών AM. Σε αυτή την τεχνολογία, το νήμα αποτελείται από ένα πλαστικό συνδετικό μέσο και λεπτή μεταλλική πούδρα που εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου (Davidson, 2019). Το επιθυμητό τμήμα εκτυπώνεται στρώμα-στρώμα με τρόπο σχεδόν πανομοιότυπο με τη συμβατική εκτύπωση FFF. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία ακολουθείται από δύο πρόσθετες εργασίες μετά την επεξεργασία: πλύση και πυροσυσσωμάτωση, για την παραγωγή ενός τελικού υψηλής πυκνότητας πλήρως μεταλλικού εξαρτήματος (DebrRoy, et al., 2019).

5.5.3 Σύντηξη (PBF)

PowderBedFusion (PBF) Η πλειονότητα των συστημάτων AM μετάλλου εφαρμόζει διεργασίες σύντηξης κλίνης σε πούδρα (PBF) και το 54% της αγοράς AM μετάλλου ανήκει σε αυτές τις διεργασίες από το 2020. Συνήθεις διεργασίες PBF μετάλλων είναι η άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων (DMLS), η επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLM), η τήξη

δέσμης ηλεκτρονίων (EBM) και η άμεση τήξη με λέιζερ μετάλλων (DMLM). Γενικά, δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στις εκδόσεις αυτών των τεχνολογιών λέιζερ που κατασκευάζονται από διαφορετικές εταιρείες (Kybeloy, 2021).

5.5.4 Διαδικασία EBM

Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες PBF, η δέσμη ηλεκτρονίων τήξης (EBM) χρησιμοποιεί μια δέσμη υψηλής ενέργειας (ηλεκτρόνια) και όχι ένα λέιζερ (φωτόνια) για να προκαλέσει τη σύντηξη μεταξύ των σωματιδίων του μετάλλου πούδρας. Μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει ένα λεπτό στρώμα πούδρας, προκαλώντας τοπική τήξη και στερεοποίηση σε μια συγκεκριμένη περιοχή διατομής. Τα στρώματα αυτά προστίθενται για να δημιουργηθεί ένα στερεό τεμάχιο. Σε σύγκριση με τη DMLS, η EBM έχει γενικά μεγαλύτερη ταχύτητα κατασκευής, λόγω της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας. Ωστόσο, το ελάχιστο μέγεθος χαρακτηριστικών, μέγεθος σωματιδίων πούδρας, πάχος στρώματος και επιφανειακό φινίρισμα είναι συνήθως μεγαλύτερα. Τα εξαρτήματα EBM παράγονται σε κενό και η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με αγωγίμα υλικά (Redwood, 2017).

5.5.5 Διαφορά Υλικών

Υπάρχει μικρή διαφορά στα υλικά που χρησιμοποιούνται μεταξύ των διαφορετικών μηχανών και μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών PBF. Μεταξύ αυτών των τεχνολογιών, οι διαδικασίες SLM και DMLS χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων (Jeong, 2016). Γενικά, αυτές οι δύο τεχνολογίες χρησιμοποιούν την ίδια βασική αρχή. Το SLM, το οποίο ονομάζεται επίσης LaserM, et al, Fusion (LMF), χρησιμοποιείται κυρίως για μέταλλα ενός συστατικού όπως το αλουμίνιο και το DMLS χρησιμοποιείται συνήθως για κράματα μετάλλων όπως το αλουμίνιο και τα κράματα τιτανίου. Η διαδικασία DMLM είναι πολύ παρόμοια με τη διαδικασία DMLS, με τη διαφορά ότι στη διαδικασία DMLM, οι ακτίνες λέιζερ δημιουργούν εξαιρετικά λεπτά μεταλλικά στρώματα και παρέχουν μια ομοιογενή δεξαμενή τήγματος. Η βελτιωμένη ποιότητα επιφάνειας και τα χαμηλότερα επίπεδα πορώδους είναι βασικά πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας σε σχέση με το DMLS. Στην τεχνολογία EBM, μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας χρησιμοποιείται για τη σύντηξη μεταλλικής πούδρας, αντί για λέιζερ σε εκτυπωτές SLM (Jeong, 2016).

5.5.6 Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (DED)

Το DED καλύπτει το 16% της αγοράς του AM μετάλλου και μπορεί να ομαδοποιηθεί σε δύο κύριες κατηγορίες από ενεργειακή άποψη: ψυχρός ψεκασμός και θερμική ενέργεια. Ο ψυχρός ψεκασμός, γνωστός και ως κινητική ενέργεια, προσθέτει υλικό με τη μορφή λεπτών σωματιδίων σε ένα υπόστρωμα με επαρκή κινητική ενέργεια για να δημιουργήσει μια πυκνή επίστρωση ή στρώμα (Herzog, et al., 2016). Η άλλη ομάδα συστημάτων DED εστιάζει στη θερμική ενέργεια, μέσω της χρήσης δέσμης λέιζερ, δέσμης ηλεκτρονίων, πλάσματος ή τόξου. Αυτή η ομάδα λιώνει επιλεκτικά το υλικό πρώτης ύλης, το οποίο είναι είτε σύρμα είτε πούδρα, και το προσθέτει διαδοχικά στην πλατφόρμα κατασκευής. Οι τεχνολογίες DED χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων. Αυτή η ομάδα AM εφαρμόζει διαδικασίες ρομποτικής συγκόλλησης για εκτύπωση σε υψηλότερους ρυθμούς εναπόθεσης, αλλά με χαμηλότερη ανάλυση (Almotairy et al, 2020).

- Άλλες μορφές της τεχνολογίας DED είναι:
- Κατασκευή πρόσθετων δέσμης ηλεκτρονίων (EBEAM)
- Κατασκευή πρόσθετων συρμάτων και τόξου (WAAM)
- Εκτύπωση Joule με βάση σύρμα
- Διαμόρφωση δικτύου με τεχνολογία λέιζερ (LENS)
- Επένδυση Laser (LC)
- Υβριδικά συστήματα (HS)

Στο EBEAM, το οποίο ονομάζεται επίσης EBAM, η πηγή ενέργειας και το υλικό είναι μια δέσμη ηλεκτρονίων και σε συρματίνη μορφή, αντίστοιχα. Η τεχνολογία WAAM είναι μια προσέγγιση διαδικασίας DED που βασίζεται σε σύρμα, όπου η τροφοδοσία σύρματος υπόκειται σε τήξη μέσω ενός ηλεκτρικού τόξου που αποτελεί την πηγή ενέργειας και το λιωμένο υλικό εναποτίθεται στο στρώμα. Τρεις κοινές τεχνολογίες συγκόλλησης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα WAAM είναι η συγκόλληση τόξου μετάλλου αερίου (GMAW), η συγκόλληση τόξου με αέριο βολφραμίου (GTAW) ή η συγκόλληση τόξου πλάσματος (PAW) (DebrRoy, et al., 2019).

Για παράδειγμα, το RapidPlasmaDeposition (RPD) είναι ένα σύστημα WAAM που χρησιμοποιεί ένα τόξο πλάσματος για να λιώσει το σύρμα από κράμα τιτανίου σε ένα αδρανές περιβάλλον αερίου αργού. Μια άλλη τεχνολογία είναι το σύστημα εκτύπωσης Joule, το οποίο έχει υποστηριχθεί από τις Boeing, LincolnElectric, KhoslaVentures και G20 Ventures(DebrRoy, et al., 2019). Σε αυτήν την τεχνολογία, το ηλεκτρικό ρεύμα περνά μέσα από την πρώτη ύλη του σύρματος για να λιώσει και να το συντήξει στο προηγούμενο στρώμα για να κολλήσει πλήρως τα στρώματα. Δεδομένου ότι δεν δημιουργείται τόξο και η τοποθέτηση και η τήξη της πρώτης ύλης πραγματοποιείται σε ένα βήμα, η διαδικασία εκτύπωσης Joule είναι μια απλή και γρήγορη διαδικασία. Επιπλέον, οποιοδήποτε μεταλλικό υλικό σε μορφή σύρματος μπορεί να εκτυπωθεί με αυτήν την τεχνολογία (DebrRoy, et al., 2019).

Σε αντίθεση με άλλες διεργασίες πούδρας AM, αυτές οι τεχνολογίες δεν βασίζονται σε στρώμα πούδρας, αλλά η πούδρα και η δέσμη λέιζερ εστιάζονται στο υπόστρωμα για να εναποθέσουν το μεταλλικό υλικό. Πράγματι, η μεταλλική πούδρα εισάγεται σε μια δεξαμενή λιωμένου μετάλλου και η πηγή θερμότητας είναι μια εστιασμένη δέσμη λέιζερ που επιτρέπει την κατασκευή εξαρτημάτων με ελάχιστο πάχος και με υψηλή ακρίβεια. Επιπλέον, ένα αδρανές αέριο καλύμματος χρησιμοποιείται για να καλύψει τηγμένο μέταλλο και σκόνες από οξυγόνο (Jeong, 2020). Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή επιστρώσεων με καθορισμένες ιδιότητες για την επισκευή φθαρμένων ή κατεστραμμένων εξαρτημάτων καθώς και για την προσθήκη χαρακτηριστικών σε μια επιφάνεια εξαρτήματος. Το LENS είναι μία από τις τεχνολογίες BPT όπου μια εστιασμένη, υψηλής ισχύος δέσμη λέιζερ χρησιμοποιείται για την τήξη της μεταλλικής πούδρας (Jeong, 2020).

Στη διαδικασία LENS, η μεταλλική πούδρα εφαρμόζεται μόνο εκεί που προστίθεται πούδρα στο υπόστρωμα εκείνη τη στιγμή. Εκτός από τα παραπάνω, το BPT περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές όπως Laser M, et al, Deposition (LMD), Laser Solid Forming (LSF), Direct Laser M, et al, Deposition (DLMD), Direct Laser Deposition (DLD), Direct Light Fabrication (DLF), Συγκόλληση με εναπόθεση (LDW), Συγκόλληση με σύντηξη σε πούδρα (PFW), Κατασκευή κατευθυνόμενου φωτός (DLF), Κατασκευή απευθείας δέσμης ηλεκτρονίων (EBDM) και άμεσο μεταλλικό εργαλείο (DMT) ανάλογα με την εφαρμογή ή τις προδιαγραφές της μεθόδου (Herzog, et al., 2016).

Μεταξύ αυτών των τεχνολογιών, η LMD έχει λάβει την προσοχή από ερευνητές και βιομηχανίες τα τελευταία χρόνια. Σε αυτή τη διαδικασία, μια μεταλλική πούδρα, η οποία μεταφέρεται από ένα αδρανές αέριο, τήκεται χρησιμοποιώντας μια δέσμη λέιζερ υψηλής ισχύος. Στο πλαίσιο αυτής της διαδικασίας, το υλικό ψεκάζεται μέσω ενός ακροφυσίου που έχει μια ομοαξονική δέσμη λέιζερ που διέρχεται από αυτό. Αυτή η διαδικασία έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή προϊόντων υψηλής ακρίβειας κοντά σε σχήμα διχτυού και την επισκευή υψηλών πολύπλοκων σχημάτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η προκύπτουσα επηρεασμένη από τη θερμότητα ζώνη αυτής της διεργασίας είναι μικρή, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλή παραμόρφωση (Jeong, 2020).

Το LC είναι μια άλλη διαδικασία της διαδικασίας DED κατά την οποία εφαρμόζεται μια πηγή θερμότητας λείζερ για την εναπόθεση ενός λεπτού στρώματος προτοποθετημένων υλικών σε ένα υπόστρωμα, το οποίο μετακινείται χρησιμοποιώντας ένα ελεγχόμενο σύστημα. Σύμφωνα με τους Toyserkani et al.(2019), το LC χρησιμοποιεί τις ακόλουθες μεθόδους τροφοδοσίας: μια διαδικασία ενός σταδίου που περιλαμβάνει τροφοδοσία πάστας, τροφοδοσία με σύρμα και μια διαδικασία δύο σταδίων, η οποία ονομάζεται αντικατεστημένη πούδρα. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ενός σταδίου, τα υλικά επένδυσης εναποτίθενται στο υπόστρωμα και δημιουργείται ταυτόχρονα ένα ρηχό λιμνάζον υπόστρωμα. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας δύο σταδίων, το υλικό επένδυσης, το οποίο έχει τη μορφή πούδρας, εναποτίθεται στην επιφάνεια του υποστρώματος και στη συνέχεια στοχεύεται με τη δέσμη Laser (Almotairy, et al., 2020).

Μια άλλη τεχνολογία διεργασίας DED που βασίζεται στη θερμότητα είναι το υβριδικό σύστημα (HS), όπου μια διεργασία DED συνδυάζεται με διαδικασίες αφαίρεσης, όπως η άλεση σε ένα μόνο μηχάνημα, για να παρέχει περισσότερες αντοχές και δυνατότητες πολλαπλών εργασιών (Jeong, 2020).

5.5.7 Υλικό εκτόξευσης (MJ)

Οι διεργασίες εκτόξευσης υλικού (MJ) και εκτόξευσης συνδετικού υλικού (BJ) αποτελούν το 16% της αγοράς AM μετάλλου το 2020. Η τεχνολογία MJ χρησιμοποιεί τα φωτοπολυμερή ως υλικό και εφαρμόζει υπεριώδη ακτινοβολία για να σκληρύνει επιλεκτικά το τυπωμένο στρώμα, ενώ το Nano Particle Jetting (NPJ) είναι μία από τις τεχνολογίες MJ που επιτρέπει την παραγωγή μεταλλικών μερών μέσω της χρήσης σύνθετων ρητινών που είναι εμποτισμένες με μεταλλικά νανοσωματίδια όπως ο ανοξειδωτος χάλυβας (Almotairy, et al., 2020).

5.5.8 Binder Jetting (BJ)

Η τεχνολογία BJ χρησιμοποιεί μεταλλική πούδρα μαζί με ένα συνδετικό υγρής κατάστασης για την εκτύπωση των επιθυμητών μεταλλικών μερών σε στρώσεις. Σε αυτή τη διαδικασία, τα σταγονίδια συνδετικού υλικού ενοποιούν τα κονιοποιημένα υλικά μέσα και μεταξύ των κομμένων στρωμάτων. Η τεχνολογία BJ δεν απαιτεί δομές στήριξης και εκτυπώνει πολύ πιο ακριβή αντικείμενα σε σύγκριση με τη σύντηξη κρεβατιού με μεταλλική πούδρα. Ο Πίνακας 1 παρέχει περισσότερες πληροφορίες για αυτήν την τεχνολογία (Jeong, 2020).

5.6 Εφαρμογή τεχνολογίας 3-D printing μετάλλων

5.6.1 Βιομηχανικές Εφαρμογές

Το AM μετάλλου ανοίγει νέες ευκαιρίες για τη βελτίωση της ικανότητας παραγωγής. Οι σύντομοι χρόνοι παράδοσης, η πρόσβαση σε νέα υλικά, η μείωση των απορριμμάτων υλικών και η κατασκευή καινοτόμων πολύπλοκων γεωμετριών και υλικών είναι βασικοί παράγοντες που ενθαρρύνουν τους κλάδους της βιομηχανίας να υιοθετήσουν τεχνολογίες AM μετάλλων (Davidson, 2012).

5.6.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

Μία από τις κορυφαίες βιομηχανίες στην αγορά ΔΑ είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, με μέση ανάπτυξη της ΔΑ 3,6% τα τελευταία χρόνια (Ladd, et al., 2013). Οι εξελίξεις στο μεταλλικό AM έχουν προσφέρει ευκαιρίες για πιο ευέλικτα, βελτιστοποιημένα και στιβαρά σχέδια, ελαφρύτερα, ισχυρότερα και ασφαλέστερα προϊόντα, ταχύτερη προσαρμογή και μειωμένο χρόνο παράδοσης και κόστος. Ως εκ τούτου, διαφορετικές αυτοκινητοβιομηχανίες αρχίζουν να χρησιμοποιούν την τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου. Η Formula Student Germany 2012 χρησιμοποίησε την τεχνολογία EOS DMLS για να κατασκευάσει ένα ελαφρύ εξάρτημα, και το βάρος αυτού του εξαρτήματος μειώθηκε κατά 35% σε σύγκριση με το

υπάρχον χυτό έκδοχο του. Η εταιρεία αυτοκινήτων με έδρα τη Γερμανία, η BMW Group, είναι μακροχρόνιος συνεργάτης της HP και της EOS και χρησιμοποιεί μια ποικιλία τεχνολογιών AM μετάλλου από αυτές τις δύο εταιρείες (Jeong, 2020). Για παράδειγμα, η BMW κατασκεύασε μια ράγα οδηγού παραθύρου στο i8 Roadster χρησιμοποιώντας τον 3D εκτυπωτή μετάλλου HP Multi Jet Fusion. Επιπλέον, το i8 Roadster περιλαμβάνει ένα άλλο 3D εκτυπωμένο εξάρτημα, ένα εξάρτημα της μαλακής οροφής, το οποίο είναι κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου. Αυτό το εξάρτημα είναι 44% ελαφρύτερο από το πλαστικό εξάρτημα καλουπωμένου με έγχυση που εφαρμόστηκε αρχικά, αλλά είναι δέκα φορές πιο άκαμπτο. Η BMW λανσάρει επίσης έναν καινοτόμο κινητήρα, ο οποίος αντικαθιστά τον κινητήρα S55 (Jeong, 2020). Αυτός ο κινητήρας ενοποιεί πολλά εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένης μιας κυλινδροκεφαλής που κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας έναν μεταλλικό εκτυπωτή AM PBF. Η Bugatti, μια γαλλική αυτοκινητοβιομηχανία, αποκάλυψε μια σειρά από μεταλλικά εξαρτήματα AM (Almotairy, 2020).

Η Audi, μια γερμανική αυτοκινητοβιομηχανία, συνεργάζεται με την SLM Solution Group για την παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων, ανταλλακτικών και ανταλλακτικών που ζητούνται σπάνια. Για παράδειγμα, ένας προσαρμογέας νερού για τον κινητήρα Audi W12 έχει κατασκευαστεί πρόσθετα μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλου. Η εταιρεία Honda Motor, η ιαπωνική αυτοκινητοβιομηχανία, χρησιμοποιεί επίσης τεχνολογίες AM μετάλλου για να κατασκευάσει τα μέρη του αμαξώματος του διαμορφώσιμου ηλεκτρικού της αυτοκινήτου (Jeong, 2020).

5.7 Αεροναυπηγική

Ένας από τους πρώτους τομείς που υιοθέτησαν τις τεχνολογίες AM είναι η αεροδιαστημική βιομηχανία. Όλοι οι τομείς αυτής της βιομηχανίας, όπως τα εμπορικά αεροσκάφη, οι στρατιωτικές εφαρμογές και τα συστήματα πυραύλων εφαρμόζουν τεχνολογίες AM. Η ικανότητα της AM μετάλλου να δημιουργεί εργαλεία και να τα επισκευάζει, να κατασκευάζει ελεύθερες και σύνθετες γεωμετρίες και να ενοποιεί μέρη, την καθιστά ιδανική για εφαρμογές αεροδιαστημικής. Επιπλέον, τα εξαρτήματα της αεροδιαστημικής είναι συνήθως κατασκευασμένα από δύσκολα υλικά, όπως υπερκράματα υψηλής αντοχής (Herzog, et al., 2016).

Η General Electric (GE) Aviation χρησιμοποιεί μεταλλικούς εκτυπωτές Concept Laser και Arcam για την κατασκευή ακροφυσίων καυσίμου για τον νέο της κινητήρα LEAP, το ακροφύσιο αυτό είναι 25% ελαφρύτερο και ισχυρότερο από το αρχικό ακροφύσιο. Το πιο σημαντικό, αυτό το εξάρτημα ενισχύει την απόδοση καυσίμου του κινητήρα έως και 15% υψηλότερα από τους προηγούμενους καλύτερους κινητήρες CFM56 (Chen, et al., 2019).

Επιπλέον, η Airbus χρησιμοποιεί μηχανές EOS και Concept Laser για την κατασκευή μεταλλικών βραχιόνων και σωλήνες εξαέρωσης για τα αεροσκάφη της. Επιπλέον, αυτή η εταιρεία παράγει μεγάλης κλίμακας εξαρτήματα ατράκτου AM σε συνεργασία με την Arconic (Jeong, 2020).

Σύμφωνα με μια έκθεση που δημοσιεύτηκε από τους Raja et al. (2019), η αεροδιαστημική βιομηχανία επωφελείται από τις τεχνολογίες AM με διάφορους τρόπους ως εξής: Ο χρόνος παράδοσης μειώνεται έως και 70%. Το μη επαναλαμβανόμενο κόστος μειώνεται έως και 45%. και η μάζα μειώνεται κατά 35% ή περισσότερο.

5.7.1 Ιατρική και Οδοντιατρική

Η ιατρική και η οδοντιατρική βιομηχανία είναι κατάλληλες για την εφαρμογή μεταλλικών τεχνολογιών AM για την κατασκευή προϊόντων τελικής χρήσης. Οι τεχνολογίες M, et al, AM

επιτρέπουν σε αυτές τις βιομηχανίες να κατασκευάζουν προσαρμοσμένα μοντέλα προσαρμοσμένα στις ανάγκες των ασθενών και στην πρόσβαση σε νέα υλικά. Για παράδειγμα, η εταιρεία LimaCorporate με έδρα την Ιταλία αναπτύσσει ορθοπεδικές συσκευές από κράμα τιτανίου με τεχνολογίες M, et al, PBF και EBM της Arcam (Kashani, 2018).

Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο σπονδυλικός κλωβός Titanium AM που παράγεται από την Nexxt Spine με έδρα τις ΗΠΑ. Σύμφωνα με αυτήν την εταιρεία, η χειρουργική της σπονδυλικής στήλης γίνεται πιο συνηθισμένη λόγω γήρανσης, όγκων της σπονδυλικής στήλης ή τραύματος. Ως εκ τούτου, η Nexxt Spine αναπτύσσει πορώδη εμφυτεύματα σπονδυλικής στήλης τιτανίου που κατασκευάζονται πρόσθετα. Ένα άλλο παράδειγμα είναι τα προσαρμοσμένα ορθοπεδικά εμφυτεύματα που βασίζονται στην ακριβή σύλληψη των οστικών δομών. Οι Harrysson et al. (2019) ανέπτυξε ολοκληρωμένα εμφυτεύματα βασισμένα σε αξονική τομογραφία και κατασκεύασε τα προσαρμοσμένα εμφυτεύματα, τα οποία ήταν κατασκευασμένα από Ti6Al4V, μέσω των τεχνολογιών EBM ή DMLS. Ορισμένες εταιρείες που έχουν χρησιμοποιήσει τεχνολογίες AM για την κατασκευή οδοντιατρικών/ιατρικών συσκευών είναι οι Osseus Fusion Systems, OMX Solutions, Egan Dental Laboratory, Johnson & Johnson Medical Devices και Endocon GmbH (Jeong, 2020).

Εκτός από τις παραπάνω εφαρμογές, οι ερευνητές ερεύνησαν τις εφαρμογές της AM μετάλλου στην ιατρική βιομηχανία. Για παράδειγμα, οι Vilardell et al. (2019) ανέπτυξε βελτιστοποιημένη τοπολογία για τον άνθρωπο χρησιμοποιώντας δομές με δομή πλέγματος που είχαν εκτυπωθεί τρισδιάστατα από κράματα μετάλλου. Οι νέες γεωμετρίες κατασκευάστηκαν από Ti6Al4V και τυπώθηκαν από έναν εκτυπωτή SLM EOS M28. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα νέα σχέδια μπορούν να βελτιώσουν τις εφαρμογές εμφυτευμάτων.

5.8 Κατασκευαστικές Εφαρμογές

Η κλίμακα χρήσης των τεχνολογιών AM μετάλλων για κατασκευαστικές εφαρμογές είναι επί του παρόντος χαμηλή λόγω των μεγάλων χρόνων εκτύπωσης, των μικρών όγκων εκτύπωσης, του υψηλού αρχικού κόστους και των περιβαλλοντικών ζητημάτων. Ωστόσο, συνεχώς αυξάνεται. Για παράδειγμα, η Arup Group, μια διεθνής εταιρεία συμβούλων μηχανικών, ανέπτυξε έναν βελτιστοποιημένο κόμβο τοπολογίας. Αυτό το εξάρτημα είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα και είναι 75% ελαφρύτερο από τον αρχικό κόμβο, ο οποίος κατασκευάζεται με παραδοσιακές μεθόδους (Jeong, 2020).

Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής AM μετάλλου είναι η γέφυρα MX3D. Το Joris Laarman Lab και το Arup χρησιμοποιούν ένα σύστημα WAAM, το οποίο είναι προσαρτημένο σε έναν ρομποτικό βραχίονα για την εκτύπωση ανοξείδωτων στοιχείων της γέφυρας του Άμστερνταμ.

Η βιβλιογραφία (Yan&Chen, 2019) δείχνει ότι η AM μετάλλου δίνει τη δυνατότητα στον κατασκευαστικό κλάδο να δημιουργήσει πολύπλοκα δομικά σχήματα με ελάχιστο βάρος και μειωμένο χρόνο παραγωγής. Επί του παρόντος, το AM μετάλλου χρησιμοποιείται για την παραγωγή προσαρμοσμένων εξαρτημάτων κατά παραγγελία.

5.9 Ηλεκτρονικά και Επικοινωνία

Τα τελευταία χρόνια, η AM μετάλλου έχει λάβει την προσοχή από ερευνητές και βιομηχανίες για να κάνει σημαντικές εισβολές στο σχεδιασμό και την κατασκευή νέων ηλεκτρονικών και επικοινωνιακών εξαρτημάτων όπως αντιστάσεις, πλακέτες κυκλωμάτων, κεραίες,

κυματοδηγοί και ζεύκτες (couplers) (Yan & Chen, 2019). Αυτά τα ηλεκτρονικά και επικοινωνιακά εξαρτήματα είναι κατασκευασμένα από λειτουργικά υλικά όπως μέταλλο, ημιαγωγό και πολυμερές χρησιμοποιώντας τεχνολογίες εκτύπωσης ή/και σχεδίασης. Μεταξύ αυτών των υλικών, τα μέταλλα/ανόργανα χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτόν τον κλάδο της βιομηχανίας, καθώς προσφέρουν καλή αγωγιμότητα και ανθεκτικότητα. Για παράδειγμα, οι κεραίες που είναι κατασκευασμένες από αγωγίμα υλικά, όπως ο φερρίτης, είναι βασικά στοιχεία στο ασύρματο επικοινωνιών. Αυτά τα προϊόντα απαιτούν μικρότερες δομές για να παρέχουν υψηλό επίπεδο φέρουσας συχνότητας κεραιών (Zhang, et al., 2021).

Πολλοί ερευνητές έχουν εξερευνήσει τεχνικές AM για να αναπτύξουν κεραίες μοναδικού σχήματος. Για παράδειγμα, οι Goh, et al, (2020) χρησιμοποίησε έναν εκτυπωτή inkjetFujifilmDimatixDMP-2800 για την κατασκευή κεραιών patch για ασύρματες εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης. Σε σύγκριση με μια αντίστοιχη συμβατικά κατασκευασμένη κεραία, η κεραία AM παρέχει πλεονεκτήματα όπως εξοικονόμηση βάρους 95%, μείωση κόστους παραγωγής 20% και μείωση χρόνου παράδοσης από έντεκα μήνες σε δύο μήνες. Ένα άλλο παράδειγμα της εφαρμογής AM μετάλλου είναι η ανάπτυξη μεταλλικών κυματοδηγών υψηλής απόδοσης. Οι Verploegh, et al, (2019) ανέπτυξε ένα στοιχείο W-band, το οποίο περιλαμβάνει ένα ευθύ κομμάτι κυματοδηγού 10 cm και έναν συζευκτήρα 20 dB. Αυτό το εξάρτημα κατασκευάστηκε με τεχνολογίες DMLS σε χάλυβα Maraging (MS), το οποίο παρέχει δομική ακεραιότητα και λογική αγωγιμότητα.

5.10 Πετρέλαιο και φυσικό αέριο

Το παγκόσμιο οικονομικό φόρουμ έχει υπολογίσει ότι η AM μετάλλου θα μπορούσε τελικά να εξοικονομήσει κόστος περίπου 44 δισεκατομμυρίων AU \$ (30 δισεκατομμύρια \$ ΗΠΑ) στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αυτό είναι ένα σημαντικό δυναμικό για την εφαρμογή τεχνολογιών AM και τη μέση αλυσίδα αξίας πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ένα άλλο όφελος της AM μετάλλου στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι η μείωση των χρόνων παράδοσης και κατά συνέπεια η βελτίωση της αποτελεσματικότητας της αλυσίδας εφοδιασμού (Buchanan, et al., 2017). Ωστόσο, αυτή η βιομηχανία αργεί να προσανατολιστεί προς την AM μετάλλου για την κατασκευή προϊόντων τελικής χρήσης, αλλά υπάρχουν μερικές επιτυχημένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, η πολλαπλή πύλης AM του Titanium για αγωγούς σχεδιάστηκε από την SaferPlugCompany (SPC) και εκτυπώθηκε από την εταιρεία παραγωγής AM 3TRPD χρησιμοποιώντας ένα σύστημα PBF. Ο Lloyd's ισχυρίζεται ότι η παραγωγή αυτού του εξαρτήματος με συμβατικά συστήματα κατασκευής είναι σχεδόν αδύνατη λόγω πολύπλοκων εσωτερικών καναλιών. Σήμερα, η GE χρησιμοποιεί την ικανότητα των μεταλλικών τεχνικών AM για την κατασκευή εξαρτημάτων βαλβίδας ελέγχου με πολύπλοκα σχήματα και διαμορφώσεις, όπως κοίλες δομές, καμπύλα σχήματα, πλέγματα κ.λπ. για χρήση σε διαφορετικές εφαρμογές στον ενεργειακό τομέα.

5.11 Εξόρυξη

Τα έργα εξόρυξης εκτελούνται συχνά σε απομακρυσμένες τοποθεσίες και τοποθεσίες υψηλού κινδύνου. Έτσι, όταν τα εξαρτήματα του εξοπλισμού αποτυγχάνουν, οι αλυσίδες ανεφοδιασμού διακυβεύονται λόγω περιορισμού πρόσβασης, χρόνου διακοπής λειτουργίας και καθυστερήσεων στην παραγωγή λόγω των προθεσμιών για την απόκτηση ανταλλακτικών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η AM μετάλλου μπορεί να είναι κατάλληλη, ιδιαίτερα για την κατασκευή ανταλλακτικών κατ' απαίτηση (Yan & Chen, 2019).

5.12 Εργαλεία και καλούπια

Η AM μετάλλου υιοθετείται σταδιακά από τους κατασκευαστές καλουπιών και εργαλείων. Σε αυτή τη βιομηχανία, το μεταλλικό AM χρησιμοποιείται για την κατασκευή εργαλείων όπως ένθετα καλουπιών, εξαρτήματα, εξαρτήματα και μετρητές (Yan & Chen, 2019).

5.13 Πλεονεκτήματα της AM μετάλλου

Η AM μετάλλου ανοίγει νέες ευκαιρίες και προσφέρεται για πολλές δυνατότητες για εταιρείες που θέλουν να βελτιώσουν την παραγωγική απόδοση. Η AM εξορθολογίζει σημαντικά τις παραδοσιακές μεθόδους και έχει τη δυνατότητα να γίνει ο κανόνας την επόμενη δεκαετία. Σύμφωνα με διάφορες ακαδημαϊκές μελέτες, η AM είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη μείωση της πολυπλοκότητας στην εφοδιαστική αλυσίδα σε μια ποικιλία προσεγγίσεων (Jeong, 2016).

Συνοπτικά, υπάρχουν πέντε βασικά πλεονεκτήματα που έχει η AM μετάλλου σε σχέση με την παραδοσιακή κατασκευή: Κόστος, ταχύτητα, ποιότητα, καινοτομία/μετασχηματισμός και αντίκτυπος.

Η AM δεν θα αντικαταστήσει τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Ωστόσο, αναμένεται να φέρει επανάσταση σε πολλές εξειδικευμένες περιοχές.

5.14 Βιομηχανική απόδοση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση μεταλλικών εξαρτημάτων που είναι διαθέσιμα στον καταναλωτή θα μπορούσε να είναι μια πρόσθετη πτυχή της βιομηχανίας που μεταβλήθηκε σημαντικά από την τεχνολογία 3-Dprinting. Η 3-Dprinting τεχνολογία θα επιτρέψει στους καταναλωτές να εκτυπώσουν τα δικά τους μεταλλικά εξαρτήματα για τη διόρθωση των προϊόντων που αγοράζουν. Τα απλά ανταλλακτικά θα πωλούνται κυρίως παγκοσμίως με τη λήψη ενός αρχείου εκτύπωσης 3-D. Οι καταναλωτές μπορούν να γίνουν και μικροκατασκευαστές (Herzog, et al., 2016).

5.15 Μαζική προσαρμογή

Η τεχνολογία επιτρέπει τη μαζική προσαρμογή με χαμηλό κόστος. Οι έμποροι λιανικής μπορούν να σχεδιάσουν και να εξατομικεύσουν τα προϊόντα χωρίς μεγάλο χρόνο παράδοσης (Jeong, 2016).

5.16 Κατασκευή κατά παραγγελία

Η κατασκευή πρόσθετων διευκολύνει την εύκολη, κατ' απαίτηση κατασκευή ανταλλακτικών. Η τεχνολογία καθιστά δυνατή την εκτύπωση εξαρτημάτων σε απομακρυσμένες τοποθεσίες από τοπικούς διανομείς και παρόχους υπηρεσιών. Επομένως, η παράδοση αγαθών δεν αποτελεί πλέον περιορισμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συντόμευση της αλυσίδας εφοδιασμού και την εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος, καθώς η αποστολή και η αποθήκευση αποθεμάτων δεν είναι απαραίτητη. Η ανάγκη για μεγάλα αποθέματα θα ανήκει στο παρελθόν (Jeong, 2016).

5.16.1 Αποκεντρωμένη παραγωγή

Η τεχνολογία θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει την ανάγκη για logistics καθώς τα σχέδια θα μπορούσαν να μεταφερθούν ψηφιακά, οδηγώντας σε αποκέντρωση της κατασκευής. Κατασκευάζοντας είδη πιο κοντά στον τελικό προορισμό, μειώνουμε το κόστος

υλικοτεχνικής υποστήριξης και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό μειώνει επίσης το χρόνο από την παραγωγή μέχρι την πώληση (Herzog, et al., 2016).

5.16.2 Εκτύπωση ολοκληρωμένων συστημάτων

Η τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να εκτυπώνει πλήρη συστήματα ή υποσυστήματα. Αυτή η δυνατότητα πολυυλικών θα βοηθήσει, καθώς τα περισσότερα τελικά προϊόντα είναι κατασκευασμένα από περισσότερα από ένα υλικά που συμπεριλαμβάνουν το μέταλλο. Άλλοι τομείς που εργάζονται περιλαμβάνουν υλικά, μεθόδους εκτύπωσης και συνδυασμό πρόσθετων και παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής (Herzog, et al., 2016).

5.16.3 Βελτίωση ποιότητας

Η τεχνολογία AM μετάλλου έχει τη δυνατότητα βελτίωσης της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Για παράδειγμα, μέσω των τρισδιάστατων εκτυπωμένων εμφυτευμάτων και προσθετικών, οι ασθενείς σε όλο τον κόσμο αντιμετωπίζουν βελτιωμένη ποιότητα φροντίδας. Η τεχνολογία θα βοηθήσει επίσης τις εταιρείες να βελτιώσουν τις υπηρεσίες aftermarket. Καθώς η μεταποίηση πλησιάζει τους καταναλωτές, ο καταναλωτής μετατρέπεται γρήγορα σε παραγωγό-καταναλωτή (Jeong, et al., 2016).

5.16.4 Τροποποιήσεις και επανασχεδιασμοί με χαμηλό κόστος

Η AM δεν αφορά μόνο τη φυσική δημιουργία ενός εξαρτήματος. Διευκολύνει το σχεδιασμό και την καινοτομία χωρίς κυρώσεις χρόνου ή κόστους. Αυτό είναι τόσο σημαντικό όταν συν δεδομένου ότι πάνω από το 60% των σχεδίων που υποβάλλονται για εργαλεία τροποποιούνται κατά την παραγωγή. Αυτό μπορεί γρήγορα να οδηγήσει σε σημαντικές αυξήσεις στο κόστος και τις χρονικές καθυστερήσεις. Η AM επιτρέπει στους μηχανικούς να δοκιμάζουν πολλαπλές επαναλήψεις ταυτόχρονα με ελάχιστο πρόσθετο κόστος (Shapiro, et al., 2016).

Η αυξημένη ικανότητα εφοδιαστικής αλυσίδας θα μπορούσε να επιτρέψει τη δημιουργία ανταλλακτικών σε ένα ψηφιακό εργοστάσιο κοντά στις εγκαταστάσεις παραγωγής όταν και όπου χρειάζονται, εξαλείφοντας τον χαμένο χρόνο και το κόστος που σχετίζεται με την αποστολή ανταλλακτικών παγκοσμίως (Herzog, et al., 2016). Επιπλέον, η AM επιτρέπει την προβολή σε πραγματικό χρόνο για την παραγωγή και την παραλαβή ανταλλακτικών. Ο γενικός χρόνος και το κόστος κατασκευής ελαχιστοποιούνται μέσω της διαδικασίας (Shapiro, et al., 2016).

5.16.5 Πρωτοβουλίες βιώσιμης παραγωγής

Η AM μετάλλου αφήνει μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η τεχνολογία παράγει ελάχιστα απόβλητα καθώς χρησιμοποιούνται μόνο τα απαραίτητα υλικά (Herzog, et al., 2016).

5.16.7 Κατασκευή ανταλλακτικών κατ' απαίτηση

Η δυνατότητα πρόσβασης εξαρτημάτων σχεδόν στιγμιαία επιτρέπει μια πιο ρευστή διαδικασία ανάπτυξης και σχεδίασης προϊόντων (Herzog, et al., 2016).

5.17 Προκλήσεις

Η επιτυχής εφαρμογή της AM στη βιομηχανία απαιτεί τον εντοπισμό των εμποδίων στην υιοθέτηση και μια ισχυρή κατανόηση των νέων τεχνολογιών και των μελλοντικών τους επιπτώσεων στο πρώιμο στάδιο της λήψης αποφάσεων. Ως εκ τούτου, αυτή η ενότητα εξετάζει ορισμένες σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με την υιοθέτηση των τεχνολογιών AM μετάλλων (Davidson, 2012).

5.17.1 Όγκος Παραγωγής

Οι περισσότερες από τις επί του παρόντος διαθέσιμες τεχνολογίες AM μετάλλων είναι κατάλληλες μόνο για παραγωγή χαμηλού όγκου προσαρμοσμένων προϊόντων και γεωμετρίες υψηλής πολυπλοκότητας. Αυτό, ωστόσο, αρχίζει να αλλάζει, καθώς ορισμένες εταιρείες εισάγουν συστήματα μεγαλύτερου όγκου, όπως τα συστήματα MJF της HP ή το σύστημα παραγωγής Desktop M, et al,. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι ότι συνήθως, το κόστος παραγωγής με χρήση AM μετάλλου είναι υψηλότερο από ότι με τα συμβατικά συστήματα κατασκευής λόγω του κόστους των υλικών και της διαφοράς στον χρόνο κύκλου για εξαρτήματα με παρόμοια γεωμετρία, και επομένως η AM μετάλλου συνιστάται για εφαρμογές όπου μεγαλύτερη ευελιξία και πολύ χαμηλό κόστος ανά ανταλλακτικό δεν χρειάζονται (Berman, 2012).

5.17.2 Συμμόρφωση με τα πρότυπα

Τα περιβάλλοντα παραγωγής μεταλλικών AM τελικής χρήσης απαιτούν πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από εκείνα για εφαρμογές δημιουργίας πρωτοτύπων. Αντίστοιχα, τα προσόντα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε ένα περιβάλλον παραγωγής (Herzog, et al., 2016). Αυτό καλύπτει τα προσόντα του εξοπλισμού, των υλικών και του προσωπικού AM, καθώς και τις τεχνικές και τα όργανα ποιοτικού ελέγχου. Η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα των κατασκευασμένων προϊόντων είναι σημαντικές σε ολόκληρη την εκτύπωση, μεταξύ των εκτυπώσεων και σε διαφορετικές μάρκες εκτυπωτή. Επί του παρόντος, η αδυναμία του μεταλλικού AM να εγγυηθεί την ακρίβεια διαστάσεων και τις ιδιότητες του υλικού για ένα δεδομένο προϊόν είναι ένα ζήτημα που προσδιορίζεται σε σχέση με την υιοθέτηση του AM στη βιομηχανία. Ένας από τους κύριους λόγους για αυτό το πρόβλημα είναι η έλλειψη ευρέως αποδεκτών τεχνικών προτύπων εντός της AM μετάλλου (DebRoy, et al., 2019).

5.17.3 Απόκλιση

Ένα άλλο πρόβλημα είναι η απόκλιση του τυπωμένου τμήματος από την πραγματική του γεωμετρία και το μέγεθός του. Η ακρίβεια και η ακρίβεια των τεχνολογιών AM μετάλλων έχουν περιοριστεί σοβαρά από γεωμετρικές αποκλίσεις και ανοχές. Εκτός από αυτά τα προβλήματα, παραμορφώσεις μπορεί να προκληθούν από παραμένουσες τάσεις και επίσης η ακρίβεια του εξαρτήματος μπορεί να επηρεαστεί από το λογισμικό κοπής που προκαλεί το φαινόμενο της σκάλας (Jeong, et al., 2020). Επιπλέον, η μεταφορά μοντέλων 3DCAD σε μορφή τρισδιάστατου εκτυπωτή όπως το StereoLithography (STL) μπορεί να οδηγήσει σε ορισμένες απροσδόκητες ανακρίβειες και ελαττώματα, ιδιαίτερα σε κεκλιμένα και καμπύλα προφίλ (DebRoy, et al., 2019).

5.17.4 Μετα-επεξεργασία

Ανάλογα με την τεχνολογία AM μετάλλων, απαιτούνται επεξεργασίες μετά από κάθε εκτύπωση. Αυτές οι εργασίες μπορεί να περιλαμβάνουν αφαίρεση πούδρας, ανακούφιση από καταπόνηση, αφαίρεση εξαρτημάτων και δομής στήριξης, εργασίες μηχανικής κατεργασίας και την ποιότητα των εξαρτημάτων μειώνοντας ή εξαλείφοντας ελαττώματα που προκαλούνται από την εκτύπωση, όπως η έλλειψη σύντηξης και το πορώδες, αλλά αυξάνει το κόστος στη διαδικασία (DebRoy, et al., 2019). Μεταξύ αυτών των εργασιών, μια εργασία ανακούφισης από τάσεις απαιτεί περισσότερη προσοχή και γενικά απαιτείται για κατασκευασμένα μεταλλικά μέρη που χρησιμοποιούν τις περισσότερες τεχνολογίες AM μετάλλων, καθώς οι υπολειπόμενες τάσεις προκαλούνται από τους γρήγορους θερμικούς κύκλους και την ταυτόχρονη τήξη του νέου στρώματος και την εκ νέου τήξη του πρώτου στερεοποιημένα στρώματα. Αυτό περιλαμβάνει τις ακόλουθες λειτουργίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μείωση των εσωτερικών ελαττωμάτων, τη βελτίωση της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων των εξαρτημάτων AM και είναι απαραίτητες για όλα σχεδόν τα μεταλλικά εξαρτήματα AM (DebRoy, et al., 2019).

5.17.5 Επισκευές και συντήρηση

Η AM μετάλλου παρέχει μια εξαιρετική ευκαιρία για ενοποίηση εξαρτημάτων για την ελαχιστοποίηση της σπατάλης και του βάρους. Ωστόσο, τα συγκροτήματα όπως τυπώνονται δημιουργούν μια πρόκληση για την τακτική συντήρηση ή επισκευή καθώς η αποσυναρμολόγηση εξαρτημάτων καθίσταται αδύνατη (Lewandowski & Seifi, 2016). Σε περίπτωση αστοχίας, πρέπει να αντικατασταθεί ολόκληρο το εξάρτημα καθώς η αποσυναρμολόγηση και η επανασυναρμολόγηση του ενοποιημένου εξαρτήματος είναι αδύνατη. Επιπλέον, είναι δύσκολο να αποσυναρμολογηθεί και/ή να ανακυκλωθεί τα ενσωματωμένα εξαρτήματα και τα συγκροτήματα πολλαπλών υλικών. Αυτό, σαφώς, αυξάνει τα απόβλητα και το κόστος σε όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος (Lewandowski & Seifi, 2016).

5.17.6 Εκπαίδευση και δεξιότητες

Ένας από τους περιορισμούς στην εκμετάλλευση του μεταλλικού AM είναι η έλλειψη ειδικευμένου και καταρτισμένου εργατικού δυναμικού, το οποίο απαιτεί ειδική εκπαίδευση, όπως σχεδιασμός για την κατασκευή προσθέτων (DFAM), υλικά, διεργασίες, μηχανές και συντήρηση και επισκευή, που σχετίζονται με τη διαχείριση στην παραγωγή, τον ποιοτικό έλεγχο και τα πρότυπα, τη μοντελοποίηση κόστους και την ασφάλεια. Ορισμένοι ερευνητές πίστευαν ότι η έλλειψη ευαισθητοποίησης του κοινού, εκπαιδευτικών προγραμμάτων και κατάλληλων δεξιοτήτων εμποδίζουν την υιοθέτηση των τεχνολογιών AM μετάλλου (Jeong, 2016). Ως εκ τούτου, απαιτείται να αναπτυχθούν αποτελεσματικά προγράμματα εκπαίδευσης και απαιτείται μια στροφή προς νέες λύσεις που ενσωματώνουν πλατφόρμες επιστήμης, μηχανικής και διαχείρισης για την πλήρη χρήση των πλεονεκτημάτων και των ευκαιριών που παρέχουν οι τεχνολογίες AM μετάλλου.

5.17.7 Κόστος μετάλλων AM

Για να εφαρμοστεί με επιτυχία η AM μετάλλου στη βιομηχανία, τα προϊόντα AM πρέπει να είναι εφικτά από τεχνική και οικονομική άποψη. Η ανάλυση σκοπιμότητας είναι μία από τις απαραίτητες αναλύσεις, η οποία διευκολύνει τις αποφάσεις της επιχείρησης για την επιλογή του συστήματος παραγωγής (Lewandowski & Seifi, 2016). Η παραγωγή AM μετάλλου δεν είναι απλή, ούτε φθηνή.

5.17.8 Σύγκριση διαφορετικών υλικών για τρισδιάστατη εκτύπωση

Μια ποικιλία υλικών μπορεί να εκτυπωθεί 3D ως αποτέλεσμα της γρήγορης εξέλιξης στις τεχνολογίες παραγωγής πρόσθετων. Υλικά με τη μορφή νημάτων, σύρματος, πούδρας, πάστας, φύλλων και μελανιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τρισδιάστατη εκτύπωση. Τα πολυμερή θεωρούνται ως τα πιο κοινά υλικά που έχουν αναπτυχθεί για την αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία, τον αθλητισμό, την ιατρική, την αρχιτεκτονική και τη βιομηχανία παιχνιδιών (Herzog, et al., 2016). Η αεροδιαστημική, η αμυντική βιομηχανία και η αυτοκινητοβιομηχανία εκμεταλλεύονται την τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλων και κραμάτων για την κατασκευή περίπλοκων εξαρτημάτων διαφόρων μεγεθών (Lewandowski & Seifi, 2016). Τα μέταλλα είναι κυρίως σε μορφή πούδρας (ή συρμάτων). Οι SLS, SLM και DED είναι οι κύριες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζονται όλες στη σύντηξη σκονών με τήξη ή πυροσυσσωμάτωση χρησιμοποιώντας δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων. Μια περιορισμένη επιλογή μετάλλων και κραμάτων κατάλληλων για τρισδιάστατη εκτύπωση είχε ως αποτέλεσμα τη συνεχή έρευνα και ανάπτυξη για την αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων κραμάτων και σύνθετων πολυμερών-μετάλλων, την υιοθέτηση των σύγχρονων τεχνικών σε ένα ευρύτερο φάσμα υλικών και επίσης την ανάπτυξη σύνθετων δομών (Herzog, et al., 2016).

5.17.9 Οικονομικά χαρακτηριστικά της AM μετάλλου

Από μια συνολική προοπτική, η AM είναι πιο συμφέρουσα σε περιβάλλοντα αγοράς που χαρακτηρίζονται από ζήτηση για προσαρμογή, ευελιξία, πολυπλοκότητα σχεδιασμού και υψηλό κόστος μεταφοράς για την παράδοση των τελικών προϊόντων (Gibson, et al, 2010). Η AM διευκολύνει την καινοτομία προϊόντων επειδή οι επαναλήψεις σχεδιασμού είναι σχετικά φθηνές και τα εξαρτήματα μπορούν να παραχθούν γρήγορα (Ngo, et al., 2018). Η τεχνολογία AM απελευθερώνει το χώρο λύσεων για σχέδια προϊόντων, περιορίζοντας τον στην ουσία στη δημιουργικότητα και τους φυσικούς νόμους των σχεδιαστών. Θεωρητικά, η τεχνολογία AM μετάλλου είναι ικανή να παράγει οποιοδήποτε φυσικώς εφικτό σχέδιο προϊόντος σε τρισδιάστατο μοντέλο, επειδή τα προϊόντα κατασκευάζονται στρώμα προς στρώμα. Έτσι, τα σχέδια προϊόντων μπορούν να βελτιστοποιηθούν σύμφωνα με την επιθυμητή λειτουργία τους αντί να περιορίζονται από την τεχνολογία παραγωγής ή τους περιορισμούς της αλυσίδας εφοδιασμού (Berman, 2012).

Επιπλέον, οι εταιρείες είναι σε θέση να προσφέρουν εξαιρετικά προσαρμοσμένα προϊόντα που ταιριάζουν με τις προτιμήσεις των πελατών. Η προσαρμογή προϊόντος δυνητικά αποφέρει αύξηση στην αντιληπτή αξία του προϊόντος από τους πελάτες και, ως εκ τούτου, μεγαλύτερη προθυμία πληρωμής (Ngo, et al., 2018).

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι εταιρείες μπορούν να χρεώνουν ένα ασφάλιστρο τιμής. Το AM μετάλλου δίνει τη δυνατότητα στους πελάτες να συν-σχεδιάζουν προϊόντα που ταιριάζουν απόλυτα στη ζήτηση τους. Ορισμένοι ιστότοποι επιτρέπουν ήδη στους καταναλωτές να δημιουργούν μεμονωμένα προϊόντα αλλάζοντας διακριτές παραμέτρους σχεδίασης εντός ενός διαμορφωτή τρισδιάστατου προϊόντος – τα εξατομικευμένα τρισδιάστατα μοντέλα παράγονται στη συνέχεια απευθείας με την τεχνολογία AM μετάλλου (Ngo, et al., 2018).

Ως αποτέλεσμα, η ποικιλία των προϊόντων μετάλλου μπορεί ενδεχομένως να γίνει άπειρη χωρίς να επιβαρυνθεί με πρόσθετο κόστος στην κατασκευή. Αντίθετα, οι συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής απαιτούν αρθρωτές αρχιτεκτονικές προϊόντων για την παροχή εξατομικευμένων προϊόντων με αποτελεσματικό τρόπο, συνδυάζοντας προσυναρμοσμένα, αρθρωτά μέρη, με αποτέλεσμα διακριτές παραλλαγές προϊόντων. Έτσι, οι στρατηγικές αναβολής επιδιώκονται για να αποκτήσουν αποτελεσματικότητα μαζικής παραγωγής, που συνήθως περιλαμβάνουν πολλαπλά στάδια παραγωγής (Go&Hart, 2016) . Ωστόσο, κάθε παραλλαγή δημιουργεί πρόσθετη πολυπλοκότητα και κόστος σε μια αλυσίδα εφοδιασμού που βασίζεται στη συμβατική τεχνολογία παραγωγής, κάτι που δεν συμβαίνει με την AM μετάλλου (Duta & Froes, 2015).

Ως εκ τούτου, η τεχνολογία AM μετάλλου έχει τη δυνατότητα να επιλύσει το «δίλημμα πεδίου κλίμακας» από την πλευρά του κόστους: δεν υπάρχουν κυρώσεις που να σχετίζονται με υψηλότερο βαθμό ποικιλίας προϊόντων. Επιπλέον, οι χρόνοι παράδοσης για την παραγωγή μεμονωμένων παρτίδων παραλλαγών προϊόντων μπορούν να μειωθούν σε μεγάλο βαθμό, ενώ οι παραλλαγές προϊόντων μπορούν να παραχθούν με οποιαδήποτε σειρά χωρίς πρόσθετο χρόνο μετάβασης ή κόστος μεταγωγής (Ngo, et al., 2018). Έτσι, η AM μετάλλου επιτρέπει δυνητικά ένα αποτελεσματικό μέγεθος παρτίδας χωρίς δαπανηρά αποθέματα ημικατεργασμένων και τελικών προϊόντων. Έτσι, ο βαθμός στον οποίο οι σχεδιαστές μπορούν να δημιουργήσουν προϊόντα που ανταποκρίνονται στη ζήτηση των μεμονωμένων πελατών είναι πιθανό να γίνει βασικός παράγοντας για τις εταιρείες που θέλουν να επωφεληθούν από την AM μετάλλου (Ngo, et al., 2018).

Η AM θα έχει επίσης αντίκτυπο στις αποφάσεις που λαμβάνονται σχετικά με τον τόπο κατασκευής. Το σχετικά χαμηλό σταθερό κόστος για βασικές μηχανές AM και εγκατάσταση,

σε συνδυασμό με τη σκοπιμότητα της οικονομικής παραγωγής μικρών μεγεθών παρτίδων, θα επιτρέψει ενδεχομένως την τοπική παραγωγή κοντά ή ακόμα και στο σημείο χρήσης (Dutta & Froes, 2015). Το ο υψηλό κόστος μεταφοράς για την παράδοση των τελικών προϊόντων που υπερβαίνει το κόστος μεταφοράς για τις πρώτες ύλες καθώς και οι κυρώσεις για καθυστερημένη παράδοση μπορούν επίσης να μετατοπίσουν την τοποθεσία παραγωγής προς το σημείο χρήσης. Ως αποτέλεσμα, τα πλεονεκτήματα κόστους της παραγωγής σε χώρες με χαμηλούς μισθούς ενδέχεται να μειωθούν μακροπρόθεσμα. Επιπλέον, οι νέες υπηρεσίες διευκολύνουν την πρόσβαση στις τοπικές παραγωγικές ικανότητες AM, γεγονός που μειώνει τα εμπόδια εισόδου στην αγορά. Για παράδειγμα, νεοφυείς επιχειρήσεις όπως το TechShop με έδρα τις ΗΠΑ και καθιερωμένοι παίκτες όπως οι εταιρείες logistics UPS ή η γαλλική La Poste παρέχουν τοπικές παραγωγικές δυνατότητες, έτσι ώστε οι μικρές επιχειρήσεις και οι καταναλωτές να μπορούν να παράγουν τρισδιάστατα σχέδια σε ένα τοπικό κατάστημα εξοπλισμένο με τεχνολογία AM. Η AM προσφέρει ένα ευρύ φάσμα οικονομικών ευκαιριών (Siram, et al., 2019). Οι κατασκευαστές, ωστόσο, αντιμετωπίζουν επίσης διάφορους περιορισμούς. Μερικά από αυτά μπορεί να μειωθούν ως αποτέλεσμα περαιτέρω έρευνας και τεχνολογικής προόδου. Άλλα, ωστόσο, είναι εγγενή στα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας AM και η ικανότητα διαχείρισης της αντιστάθμισης μεταξύ των πλεονεκτημάτων και των προκλήσεων της AM θα γίνει σημαντική πηγή ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος (Siram, et al., 2019).

6. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΟΔΗΓΙΕΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.

Ο κατασκευαστικός τομέας απασχολεί περισσότερους από 12 εκατομμύρια πολίτες της ΕΕ. Αυτός ο τομέας, όπως και άλλοι, θα πρέπει σύντομα να υποστεί σημαντικές αλλαγές προς την ψηφιοποίηση και τη ρομποτική, οι οποίες θα αλλάζουν συνεχώς τα προφίλ εργασίας στον κατασκευαστικό τομέα. Ειδικά στον τομέα της μεταποίησης, οι τρέχουσες διαδικασίες χειρωνακτικού εργατικού δυναμικού θα μετατραπούν σε μια βιομηχανοποιημένη διαδικασία σχεδιασμού (Ulu, et al., 2019).

Η εισαγωγή της μεταλλικής τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία σύγχρονων τύπων εργασιών στον κατασκευαστικό τομέα, όπως η εκτύπωση μετάλλων και οι χειριστές ρομπότ, οι σύγχρονοι μηχανικοί και οι αρχιτέκτονες με νέες ψηφιακές δεξιότητες. Τέτοιες νέες θέσεις εργασίας θα προστατεύσουν τους εργαζόμενους κατά τη νέα βιομηχανική μετάβαση και θα βελτιώσουν την ασφάλεια και την ποιότητα του εργασιακού τους περιβάλλοντος (Ulu, et al., 2019). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την υιοθέτηση της μεταλλικής τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό κλάδο, και επομένως διαφορετικοί πιθανοί τομείς εφαρμογής εξειδικευμένων θέσεων. Ένα σημαντικό θα ήταν η δημιουργία μεταλλικών εξαρτημάτων με τις σωστές λειτουργικές λύσεις στις κατασκευαστικές προκλήσεις, που καθιστούν βιώσιμη την μεταλλική τρισδιάστατη εκτύπωση παρά το υψηλότερο κόστος που συνεπάγεται τέτοια στοιχεία (Siram, et al., 2019).

6.1 Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης και διάθεσης διεργασιών για μεγάλα εξαρτήματα

Οι διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων ποικίλλουν ως προς τις λειτουργικές αρχές, τους τύπους πρώτης ύλης, τις γεωμετρικές δυνατότητες και το μέγεθος. Οι τομείς των κατασκευών αντιμετωπίζουν επί του παρόντος τέσσερα σημαντικά ζητήματα στην τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλων (Siram, et al., 2019):

- Διαθεσιμότητα υλικών: τα διαθέσιμα μέταλλα για τρισδιάστατη εκτύπωση δεν είναι απαραίτητα συμβατά με τις απαιτήσεις πολιτικών κατασκευών.
- Περιορισμοί μεγέθους μηχανών: οι μηχανές κατασκευάζονται κυρίως για προϊόντα μικρού έως μεσαίου μεγέθους.
- Υψηλό κόστος: η χαμηλή παραγωγικότητα και οι ακριβές πρώτες ύλες αυξάνουν το κόστος παραγωγής.
- Απαιτήσεις φινιρίσματος: τα παραγόμενα μέρη ενδέχεται να απαιτούν μετα-επεξεργασία και θερμική επεξεργασία για το φινίρισμα της επιφάνειας και τις μηχανικές ιδιότητες.

Οι οικογένειες διεργασιών σύντηξης σε κλίνη πούδρας (PBF) και κατευθυνόμενης εναπόθεσης ενέργειας (DED: LMD, LMWD, WAAM) είναι οι κύριες τεχνικές που

χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων, όπου χρησιμοποιούνται σήμερα εναλλακτικές λύσεις μοντελοποίησης λιωμένης εναπόθεσης (FDM) και εκτόξευσης συνδετικού υλικού (BJ) (Yan & Chen, 2019). Το FDM προσαρμόζεται τώρα στα μέταλλα ενσωματώνοντας φάσεις αποσύνδεσης και πυροσυσσωμάτωσης. Το BJ είναι μια πολλά υποσχόμενη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης που αναπτύσσεται με υψηλούς ρυθμούς κατασκευής για μέταλλα που απαιτεί επίσης φάσεις αποσύνδεσης και πυροσυσσωμάτωσης. Οι διεργασίες PBF (LPBF και EBPBF) και DED (LMD, LMWD, WAAM) έχουν αποδειχθεί ότι διαθέτουν επαρκείς μηχανικές ιδιότητες που παρέχονται από τα χαμηλά επίπεδα πορώδους ($< 0,5\%$) και τις προσαρμοσμένες θερμικές επεξεργασίες που αναπτύχθηκαν με την πάροδο του χρόνου (Yan&Chen, 2019). Αναμφισβήτητο η πιο ώριμη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων ξεχωρίζει ως η τεχνική σύντηξης κλίνης με πούδρα λείζερ (LPBF) (Zhang, et al., 2021)

Η διαδικασία προσφέρεται για εξαιρετικά λεπτομερή προϊόντα και εξαιρετικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται κυρίως από τους τομείς της αεροδιαστημικής, των εργαλείων, της ιατρικής και της ενέργειας. Τα μεγέθη μηχανών και οι διαθεσιμότητες υλικών περιορίζονται στις προσδοκίες αυτών των τομέων. Όσον αφορά τις αστικές κατασκευές, η χρήση χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα δεν είναι άμεσα διαθέσιμη από συμβατικούς κατασκευαστές μηχανών, ενώ τα υλικά υψηλής ποιότητας όπως κράματα Ti-, Ni-, Al-κράματα και ανοξείδωτοι χάλυβες είναι από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα (Zhang, et al., 2021). Η έλλειψη υλικού οφείλεται τόσο στην περιορισμένη ανάπτυξη της διαδικασίας που απαιτείται από τους περιορισμένους τομείς όσο και στη χαμηλή δυνατότητα επεξεργασίας των περισσότερων συμβατικών κραμάτων κατά τη φάση ταχείας ψύξης της διαδικασίας.

Η παραλλαγή της σύντηξης κλίνης πούδρας δέσμης ηλεκτρονίων (EBPBF) λειτουργεί υπό κενό καθώς τα ηλεκτρόνια απαιτούν τέτοιες συνθήκες. Το EBPBF χρησιμοποιείται σήμερα κυρίως για κράματα Ti, όπου έχουν γίνει πρόσφατες εξελίξεις προς νέα κράματα Ni- και Cu. Ειδικότερα, οι χάλυβες κατασκευής δεν συγκαταλέγονται σε αυτούς που έχουν ήδη υποστεί επεξεργασία με τις διεργασίες PBF με πρόσφατες εξελίξεις γύρω από παρόμοιες χημικές συνθέσεις (Yan & Chen, 2019).

Μπορεί να φανεί ότι το πιο κοινό μέγεθος μηχανής είναι ένα κυβικό σχήμα με μήκος περίπου 300 mm σε όλες τις διαστάσεις. Πιο εξειδικευμένα συστήματα ξεπερνούν τα 800 mm ύψος κατασκευής, αλλά μια συνολική αύξηση του όγκου κατασκευής δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί. Αυτό οφείλεται στα προβλήματα διαχείρισης μιας μεγάλης ποσότητας πούδρας που πρέπει να αποθηκευτεί στα εξαρτήματα του μηχανήματος, στο υπόστρωμα πούδρας και να ανακυκλωθεί σε όλη τη διαδικασία (Zhang, et al., 2021). Τέτοιες συνθήκες δημιουργούν ζητήματα ασφάλειας σχετικά με την πιθανότητα έκρηξης, ειδικά όταν πρόκειται για μέταλλα υψηλής αντίδρασης όπως το Ti και το Al. Επιπλέον, ένας μεγαλύτερος όγκος κατασκευής απαιτεί περισσότερες πηγές λείζερ για να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις χρόνου κατασκευής (Ngo, et al., 2019). Η διαχείριση διαδρομής σάρωσης λείζερ, το θερμικό φορτίο στη δομή του μηχανήματος και τα σημεία σύνδεσης των διαφορετικών λείζερ είναι μεταξύ των παραγόντων που αυξάνουν την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού του μηχανήματος (Yan & Chen, 2019).

6.2 Δομική ακεραιότητα και λοιπά θέματα

Μία από τις μεγαλύτερες δυσκολίες της μεταλλικής τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η ασυνεπής μηχανική συμπεριφορά των εξαρτημάτων που παράγονται με αυτήν την τεχνολογία, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από διάφορους παράγοντες όπως μικροδομικές διαφορές του υλικού, πιθανούς τύπους ελαττωμάτων στα παραγόμενα μέρη,

επιφάνεια φαινόμενα τραχύτητας, υπολειπόμενες τάσεις και πολλά άλλα (Ngo, et al, 2019). Λόγω των ταχέων ρυθμών ψύξης, της θερμικής αναθέρμανσης κατά τη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλου και της κατευθυντικής στερεοποίησης, τα μεταλλικά εξαρτήματα αντιπροσωπεύουν μικροδομές και τρισδιάστατες αρχιτεκτονικές πολλαπλών κλιμάκων διαφορετικές από τις συμβατικές αντίστοιχες χυτές και σφυρήλατες . Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέταλλα έχουν συνήθως λεπτούς κόκκους και ανισότροπες μικροδομές επιμήκεις κατά μήκος της κατεύθυνσης εκτύπωσης (Ulu, et al, 2019). Τα εσωτερικά πορώδες είναι μεταξύ των χαρακτηριστικών μικροδομικών χαρακτηριστικών των μεταλλικών εξαρτημάτων που κατασκευάζονται με μεταλλική τρισδιάστατη εκτύπωση . Αυτά τα πορώδες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες πόρων αερίου και έλλειψη σύντηξης (Ngo, et al, 2019). Ενώ οι πόροι αερίου σχηματίζονται κανονικά κατά τη στερεοποίηση των μετάλλων και μπορούν να παγιδευτούν από το περιβάλλον αέριο, η έλλειψη ελαττωμάτων σύντηξης αναπτύσσεται λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας της πηγής θερμότητας , που οδηγεί σε ανεπαρκή δεσμό τήξης ανάμεσα στα λιωμένα στρώματα (Ulu, et al, 2019).

Ως αποτέλεσμα της φύσης της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων και των μερικώς λιωμένων σκονών (στην περίπτωση της κατασκευής πρόσθετων με βάση τη πούδρα), τα παραγόμενα εξαρτήματα έχουν συνήθως υψηλή τραχύτητα επιφάνειας σε κατάσταση κατασκευής. Κατά τη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων, η εμφάνιση των μεγάλων θερμικών κλίσεων της δεξαμενής τήξης, η ταχεία και ανομοιόμορφη ψύξη του λιωμένου υλικού και η επανάληψη αυτής της διαδικασίας οδηγεί σε εντοπισμένες υπολειμματικές τάσεις στα 3D εκτυπωμένα μεταλλικά εξαρτήματα. Αυτές οι υπολειμματικές τάσεις αναφέρεται ότι είναι επιζήμιες για τις μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων εξαρτημάτων και ενδέχεται να οδηγήσουν σε παραμόρφωση ή ρωγμή του 3D εκτυπωμένου μεταλλικού τμήματος κατά τη διάρκεια ή μετά τη διαδικασία κατασκευής (Ulu, et al, 2019).

Οι αναφερόμενοι παράγοντες (δηλαδή, ανισότροπες μικροδομές, εσωτερικό πορώδες, τραχύτητα επιφάνειας, υπολειπόμενη τάση) επηρεάζουν άμεσα τη δομική ακεραιότητα των 3D εκτυπωμένων μεταλλικών μερών. Ως εκ τούτου, πολυάριθμες ερευνητικές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην προσαρμογή των παραμέτρων της διαδικασίας, τις προσπάθειες ποιοτικού ελέγχου, τις μη καταστροφικές δοκιμές κατά τη διαδικασία και την επιθεώρηση των τελικών εξαρτημάτων και τη μετεπεξεργασία των εξαρτημάτων για την αφαίρεση και τον μετριάσμό πολλών από τα ελαττώματα που προκαλούν επιζήμιες αστοχίες (Zhang, et al, 2021)

6.3 Υλικά και ιδιότητες

Αξίζει να αναφερθεί ότι η κόπωση των υλικών που φτιάχνονται από τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μικρότερη από την κόπωση υλικών που φτιάχνονται με μεταλλουργικές διαδικασίες παρόλο που γίνεται μετεπεξεργασία (όπως HIP).

Διάβρωση και πατίνα

Μπορούμε να δημιουργήσουμε διάφορες πατίνες στα μεταλλικά μπρούτζινα αντικείμενα με τη χρήση διάφορων τρόπων διάβρωσης.

6.4 Βλάβες

Η βελτίωση των εκτυπώσεων είναι πολύ σημαντική για τον κλάδο των τρισδιάστατων εκτυπώσεων. Η διόρθωση βλαβών και βελτίωση των εκτυπώσεων ειδικά στην Ελλάδα είναι αρκετά σημαντική καθώς δεν είναι χώρα που παράγει τρισδιάστατους εκτυπωτές (Canesa, et al, 2013).

Σε αυτό το σημείο παραθέτονται βασικές βλάβες σε ένα τρισδιάστατο εκτυπωτή:

Βλάβες FDM

Το μηχάνημα δεν τυπώνει τίποτε.

Δεν λειτουργεί το μηχάνημα δηλαδή δεν βγαίνει από την κεφαλή του μηχανήματος νήμα. Αυτό μπορεί να προκληθεί από πολλούς παράγοντες.

Έλλειψη νήματος (Out of filament)



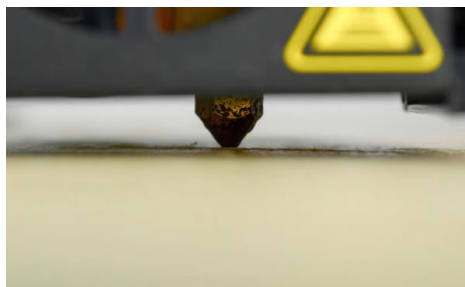
Σχήμα 6.40: Έλλειψη νήματος

Χαρακτηριστικά αυτής της βλάβης είναι ότι δεν τυπώνεται τίποτε, παρόλο που το μοντέλο του εκτυπωτή έχει εγκατασταθεί σωστά. Ωστόσο, μπορείτε να προσπαθήσετε να ξαναστείλετε την εκτύπωση στο εκτυπωτή. Αν συνεχίζει να βγάζει την ίδια βλάβη τότε απορρίψτε το περίσσιο νήμα που προεξέχει απ' την κεφαλή του εκτυπωτή.

Αυτό συμβαίνει διότι είτε έχει εγκλωβιστεί στο εσωτερικό του μηχανήματος του εκτυπωτή, είτε το νήμα έχει εγκλωβιστεί στο πίσω μέρος του εκτυπωτή.

Υπάρχουν λογισμικά τα οποία ενημερώνουν τον χρήστη που βρίσκεται το νήμα, είτε αν είναι σε έλλειψη, ή δεν υπάρχει καθόλου. Αξίζει να αναφερθεί ότι η διαθεσιμότητα του νήματος είναι κάτι μπορεί να ελεγχθεί και χειροκίνητα απλά με τον έλεγχο της διάταξης εκτύπωσης.

Η κεφαλή είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια της εκτύπωσης για να γίνει η εκτύπωση



Σχήμα 6.41: Η κεφαλή εκτύπωσης βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια εκτύπωσης.

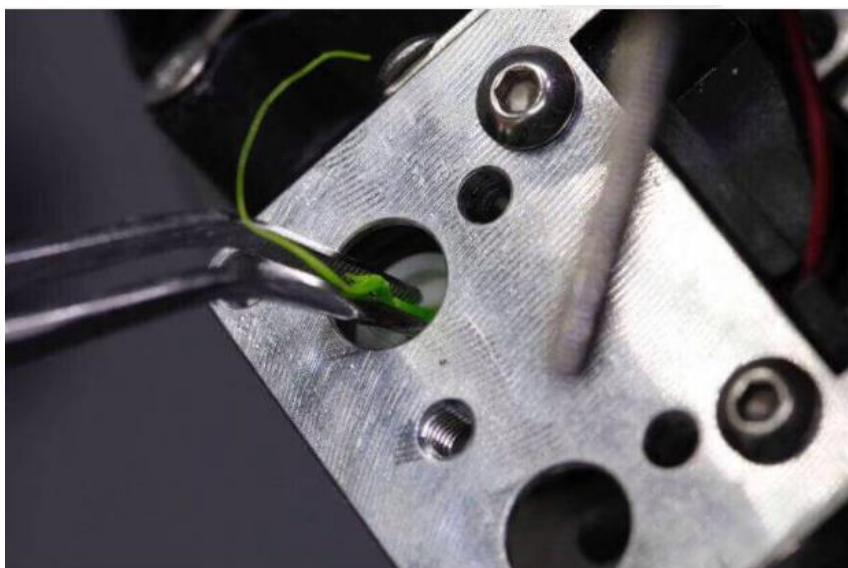
Είναι αρκετά απλή βλάβη, μάλλον η κεφαλή είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια της εκτύπωσης για να γίνει η εκτύπωση. Η περίπτωση της κεφαλής η οποία είναι πολύ κοντά

στην επιφάνεια της εκτύπωσης με σκοπό να μην γίνεται η εκτύπωση, ένα αποτέλεσμα το οποίο τις πιο πολλές φορές προκαλείται όταν μετακινείται η εκτύπωση μερικά μικρόμετρα από την κεφαλή. Η μετακίνηση μερικών μικρομέτρων του υποστρώματος από την κεφαλή, έχει ως αποτέλεσμα την το λιωμένο νήμα να έχει χώρο να ξεφύγει. Στην καλύτερη το εκτυπωμένο μοντέλο θα έχει έλλειψη μερικών στρώσεων. Παράλληλα οι στρώσεις δεν θα κολλήσουν καλά αφού το νήμα δεν βγαίνει σωστά. Στη χειρότερη περίπτωση, όταν η κεφαλή είναι πολύ κοντά για να γίνει η εκτύπωση, πιθανότατα θα γίνει συσσώρευση λιωμένου νήματος στο ζεστό άκρο, που πιθανόν θα οδηγήσει σε μπουκώμα της κεφαλής.

Αυτή η βλάβη διορθώνεται με την αύξηση του ύψους της κεφαλής εκτύπωσης. Οι περισσότεροι τρισδιάστατοι εκτυπωτές επιτρέπουν στον χρήστη να θέσει μια τιμή στον άξονα Z. Για να ανυψωθεί η κεφαλή εκτύπωσης πρέπει ο χρήστης του λογισμικού να θέσει τιμές στον θετικό άξονα. Στην περίπτωση που θέλει ο χρήστης να πλησιάσει την κεφαλή εκτύπωσης στην της επιφάνειας εκτύπωσης, τότε βάζει τιμές -μέσω του προγράμματος- στον άξονα του Z οι οποίες είναι αρνητικές.

Διαφορετικά, μπορεί κανείς να ρυθμίσει το γεγονός ότι η κεφαλή είναι πολύ κοντά στην της επιφάνειας εκτύπωσης με το να κατεβάσει το υπόστρωμα (αν το επιτρέπει ο εκτυπωτής). Η διαδικασία για να κατεβεί το υπόστρωμα, δημιουργεί πολλά προβλήματα. Μετά το κατέβασμα της επιφάνειας εκτύπωσης πρέπει να γίνει επαναρύθμιση της συσκευής (καλιμπράρισμα).

Μπουκωμένη κεφαλή εκτύπωσης



Σχήμα 6.42: Μπουκωμένη κεφαλή εκτύπωσης

Το πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι ξεκινά μια εκτύπωση και τίποτε δεν βγαίνει έξω από την κεφαλή εκτύπωσης. Με την εξαγωγή του νήματος και την εισαγωγή του νήματος ξανά δεν υπάρχει αλλαγή στην κατάσταση.

Αυτό σημαίνει ότι κατά την αλλαγή του κουβαριού μένουν μικρά υπολείμματα στην κεφαλή, τις περισσότερες φορές λόγω σπασίματος του νήματος στα άκρα. Με το γέμισμα του νέου νήματος, το κομμάτι του νήματος το οποίο έχει παραμείνει μέσα στην κεφαλή εκτύπωσης, δεν αφήνει το νέο νήμα να εξέλθει.

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί με συχνή συντήρηση. Με τη συντήρηση θα βρεθεί το μπουκώμα πριν καν εμφανιστεί σαν πρόβλημα. Τα σημάδια του μπουκώματος δεν είναι απόλυτα εμφανή. Στην πραγματικότητα μπορεί να είναι απλά εκεί για μήνες το σπασμένο νήμα χωρίς να καταλάβει κανείς την ύπαρξη του. Παρόλα αυτά ,στην περίπτωση που υπάρχει κομμάτι νήματος, θα υπάρχουν σημάδια στην ποιότητα των εκτυπωμένων μοντέλων.

Τα σημάδια αυτά είναι κυρίως παραβλέψιμα, όπως για παράδειγμα μικρές εγκοπές στους εξωτερικούς τοίχους των εκτυπωμένων μοντέλων, μικρές κηλίδες από μαύρο νήμα και γενικότερα μικρές αλλαγές στην ποιότητα του τυπωμένου μοντέλου. Μια μέθοδος καθαρισμού είναι η Atomic Pull ή Cold Pull.

Η Atomic Pull εκμεταλλεύεται τα σημεία τήξης των διαφόρων πολυμερικών νημάτων και με την εναλλαγή (Π.χ PLA σε ABS)- όπου το ABS έχει μεγαλύτερο σημείο τήξεως- οι μικρή ποσότητα PLA η οποία έχει μείνει στην κεφαλή εκτύπωσης, θερμαίνεται πάνω από το σημείο τήξης της και καίγεται με αποτέλεσμα την απομάκρυνση της.

Εάν το μικρό κομμάτι νήματος είναι ακόμα μπλοκαρισμένο στο εσωτερικό της κεφαλής εκτύπωσης, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα άλλο κομμάτι νήματος για να το ξεμπλοκάρει.

6.5 Βλάβες SLA

Οι στρώσεις είναι διαχωρισμένες.

Το πρόβλημα εντοπίζεται όταν κάποιο κομμάτι έχει ξεκολλήσει από τις στρώσεις δηλαδή οι στρώσεις δεν κολλάνε μεταξύ τους καθόλου ή όχι τόσο καλά.



Σχήμα 6.43: Οι διαχωρισμένες στρώσεις είναι μια βλάβη της εκτύπωσης του τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Όταν οι στρώσεις ενός τυπωμένου μοντέλου δεν κολλάνε καλά ,υπάρχουν πολλές περιπτώσεις.

Αρχικά, είναι πιθανόν ότι δεν έχει προσανατολιστεί σωστά ο εκτυπωτής. Με αυτόν τον αποπροσανατολισμό ,η εκτύπωση γίνεται με κακό τρόπο και ακανόνιστα και γενικά καταστρέφει τα τυπωμένα μοντέλα. Ο πειραματισμός με τις γωνίες δεν είναι καλός γενικά για τον εκτυπωτή. Σιγουρευτείτε ότι όλες οι γωνίες και τα σημεία δεν είναι συνδεδεμένα στο πλατό της χρήσης του εκτυπωτή (Bell, 2014).

6.6 Η αξιοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλου για καινοτόμο σχεδιασμό

Από άποψη αντοχής, αξιοπιστίας, μορφοποίησης και ολκιμότητας, ο χάλυβας έχει πολύ καλύτερες ιδιότητες από άλλα δομικά υλικά, καθιστώντας τον ένα αναντικατάστατο υλικό στη σύγχρονη κατασκευαστική βιομηχανία. Ακόμη και όταν η μεταλλική τρισδιάστατη εκτύπωση υιοθετείται ως μέθοδος παραγωγής και πρέπει να επιλυθούν ορισμένα σοβαρά ζητήματα, όπως η ανισοτροπία υλικού και η δημιουργία ελαττωμάτων ειδικά για τη διαδικασία εκτύπωσης, η πιθανή υπεροχή του υλικού δεν θα κλονιστεί (Chierici, et al, 2021). Από την άλλη πλευρά, η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων (π.χ. το μοναδιαίο κόστος ανά βάρος) μπορεί να είναι κατώτερη από άλλα δομικά υλικά και τεχνολογίες. Επομένως, μια ευνοϊκή χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης μέταλλου για την κατασκευή είναι στην εκτύπωση εξαρτημάτων (π.χ. κόμβοι) όπου αναμένεται ελευθερία σχήματος, αντοχής και αξιοπιστίας και η παραγωγή μέσω παραδοσιακών τεχνικών θα ήταν δύσκολη (Langi, et al, 2021).

Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την τρισδιάστατη εκτύπωση από σκυρόδεμα (3DCP), η οποία χρησιμοποιείται συχνά για την κατασκευή τοίχων που αντέχουν δυνάμεις σε ολόκληρο το επίπεδο. Το 3DCP είναι μια τεχνολογία που παρουσιάζει τεράστια ανάπτυξη στον κατασκευαστικό τομέα προς το παρόν, και η τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου μπορεί να ωφεληθεί από αυτήν την εξέλιξη (Chierici, et al, 2021) .

Οι μεταλλικοί τρισδιάστατοι εκτυπωμένοι κόμβοι δίνουν πλεονεκτήματα που δεν επιτυγχάνονται με άλλες τεχνικές. Οι παραδοσιακά συναρμολογημένοι σύνδεσμοι είναι οικονομικοί και έχουν επαρκή δυνατότητα προσαρμογής, ειδικά για εξαρτήματα μικρής διατομής, αλλά συχνά δεν είναι ούτε αισθητικά ούτε αποδοτικά από άποψη πόρων (Ulu, et al, 2019). Ενώ ο χυτός χάλυβας μπορεί να προσφέρει υψηλή ποιότητα και ευχάριστη αισθητική, απαιτεί μεγάλους χρόνους παράδοσης λόγω πολύ εξειδικευμένων κατασκευαστών, οι οποίοι μπορούν να μειωθούν με τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του εξαρτήματος και την παραγωγή του μέσω μεταλλικής τρισδιάστατης εκτύπωσης (Chierici, et al, 2021) .

Ένα άλλο πλεονέκτημα που συνάδει με το σχεδιασμό του κτιρίου είναι η ψηφιακή σύνδεση μεταξύ της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων και των διαδικασιών μηχανικής με τη βοήθεια υπολογιστή (π.χ. διαδικασία μηχανικής που βασίζεται σε AI). Η πλήρης ενοποίηση με τη μοντελοποίηση πληροφοριών κτιρίου (BIM) επιτρέπει τη συνεργασία μεταξύ του δομικού σχεδιασμού και όλων των φάσεων παραγωγής (π.χ. προγραμματισμός παραγωγής, υλικοτεχνική υποστήριξη, εκτίμηση κόστους και χρόνου και μακροπρόθεσμη διαχείριση) (Ulu, et al, 2019).

Πράγματι, η διαδικασία σχεδιασμού περιλαμβάνει τον ορισμό της γεωμετρίας, τις ανάγκες παραγωγής και συναρμολόγησης, δίνοντας στον σχεδιαστή περισσότερες ευθύνες και μεγαλύτερες ευκαιρίες σχεδίασης. Η τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλων επιτρέπει μια δραστική αύξηση στον αριθμό και το εύρος των προσπαθειών σχεδιασμού, διευρύνοντας τη φύση του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Ωστόσο, εξακολουθεί να λείπει μια κατάλληλη ροή εργασιών σχεδιασμού (Ulu, et al, 2019). Όταν προκύψει ένα προκλητικό σχεδιασμένο έργο που εκμεταλλεύεται πλήρως αυτό το χαρακτηριστικό, η εκμετάλλευση της μεταλλικής τρισδιάστατης εκτύπωσης θα εισέλθει σε μια νέα φάση διάδοσης (Laghi, et al, 2021).

6.7 Ευκαιρίες σχεδίασης που χρησιμοποιούν διαφορετικές διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων

Πολλές πτυχές του τομέα των κατασκευών από χάλυβα είναι τυποποιημένες. Για παράδειγμα, υπάρχουν τυπικές διαστάσεις για προφίλ θερμής φινιρίσματος και τυπικές λεπτομέρειες αρμών. Επιπλέον, τα πρισματικά τμήματα και οι απλές λεπτομέρειες συνήθως ευνοούνται για την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής (Ulu, et al, 2019). Μια τέτοια προσέγγιση είναι αποτελεσματική, οικονομική και διευκολύνει τον σχεδιασμό και την κατασκευή, αλλά γενικά δεν ελαχιστοποιεί τη χρήση υλικών, τα απόβλητα ή τον ενσωματωμένο άνθρακα και ενέργεια. Μια πρόσφατη μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μέση χρησιμοποίηση της χωρητικότητας των δομικών στοιχείων από χάλυβα είναι κάτω του 50% . Σημαίνει ότι, κατά μέσο όρο, ο μισός χάλυβας στις κατασκευές δεν χρησιμοποιείται για να αντέξει τα φορτία σχεδιασμού. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μικρότερα τμήματα για να έχουν μια αποτελεσματική δομή από άποψη δομικής και υλικής χρήσης, αλλά ο εξορθολογισμός είναι γενικά πιο δαπανηρός από το υπερμεγέθη της δομής (Ulu, et al, 2019).

Ένα σημαντικό πιθανό πλεονέκτημα της χρήσης μεταλλικής τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές είναι ότι το υλικό μπορεί να τοποθετηθεί στη βέλτιστη διαμόρφωση για να αντέχει στην εφαρμοζόμενη φόρτωση χωρίς την ποινή του υπερβολικού κόστους κατασκευής που σχετίζεται με χειροκίνητες εργασίες και προσαρμοσμένες γεωμετρίες. Ως εκ τούτου, θα μπορούσε να επιτευχθεί σχεδόν βέλτιστη χρήση του υλικού, καθώς και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO₂ (Ngo, et al, 2019).

Μερικές συγκριτικές αξιολογήσεις κύκλου ζωής έχουν πραγματοποιηθεί μεταξύ συμβατικών και τρισδιάστατων εκτυπωμένων μεταλλικών εξαρτημάτων, υπογραμμίζοντας ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση μεταλλικής τρισδιάστατης εκτύπωσης αυξάνονται εάν το σχήμα των εξαρτημάτων μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό, λόγω της αλλαγής της νοοτροπίας από το σχεδιασμό για την παραγωγή σε σχεδιασμός για λειτουργία (Ulu, et al, 2019).

Εκτός από τη γεωμετρική βελτιστοποίηση, υπάρχει επίσης μεγαλύτερο περιθώριο για την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων των (Ngo, et al, 2018):

1. ιδιοτήτων μικτού υλικού (π.χ. υλικό υψηλότερης αντοχής σε περιοχές με μεγάλη πίεση και υλικό χαμηλότερης αντοχής όπου οι απαιτήσεις ελαστικότητας είναι μεγαλύτερες),
2. ανισοτροπίας (π.χ. προσανατολισμός της κατεύθυνσης του στρώματος εκτύπωσης έτσι ώστε η ακαμψία της κατασκευής να μεγιστοποιείται) και
3. θερμική προέντασης (π.χ. χρησιμοποιώντας μια στρατηγική σάρωσης που οδηγεί σε παραμένουσες τάσεις που είναι αντίθετες κατά μία έννοια από τις τάσεις που θα προκύψει από την επακόλουθη εφαρμογή φορτίου).

Η γέφυρα MX3D (όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα) έδειξε ότι είναι δυνατή η εκτύπωση, χρησιμοποιώντας στοιχεία WAAM, ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 308LSi σε κλίμακα που επιτρέπει ουσιαστική χρήση στην κατασκευή (Chen, et al, 2019). Έχει επίσης αποδειχθεί, μετά από ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα φυσικών δοκιμών και αριθμητικής μοντελοποίησης, ότι μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη δομική απόδοση για την ικανοποίηση των απαιτήσεων της φόρτισης τελικής οριακής κατάστασης που καθορίζονται στα πρότυπα σχεδιασμού.

Η βιομηχανία κατασκευών από χάλυβα χρησιμοποιεί συχνά χαλύβδινα σωληνοειδή στοιχεία για την κατασκευή κατασκευών υψηλής απόδοσης και αρχιτεκτονικά ελκυστικές

(Ulu, et al, 2019). Χάρη στην υψηλή πολυκατευθυντική αξονική και αδράνεια κάμψης, αποτελούν εξαιρετική επιλογή για την επίτευξη υψηλής αντοχής με ελάχιστο βάρος . Επιπλέον, τα χαλύβδινα σωληνωτά πλαίσια απαιτούν λιγότερη αντιδιαβρωτική και πυροπροστασία από άλλους τύπους πλαισίων με παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες (Herzog, et al, 2016). Για σωληνοειδείς κατασκευές, ένα από τα κύρια ζητήματα είναι ο τοπικός λυγισμός των μελών συμπίεσης, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στον κατασκευαστικό κλάδο ως κολώνες, σε δοκούς και ως στοιχεία στήριξης (Lewandowski & Seifi, 2016) .

Σε αυτή τη βάση, πρόσφατες εργασίες (Almotairy, et al, 2020, Chen, et al, 2019, Benzing, et al, 2019) κατέδειξαν τη σκοπιμότητα και τα σημαντικά οφέλη που προκύπτουν μέσω της δομικής βελτιστοποίησης των σωληνοειδών στοιχείων από ανοξείδωτο χάλυβα, που εκτυπώνονται σε 3D σε μικρότερη κλίμακα χρησιμοποιώντας σύντηξη κλίνης πούδρας . Στο υπό μελέτη σενάριο, η αξονική φέρουσα ικανότητα βελτιστοποιημένων «Aster» και «κυματιστών» κελυφών αξιολογήθηκε σε σχέση με ένα κυκλικό κέλυφος αναφοράς ουσιαστικά του ίδιου όγκου.

Αυξήσεις της χωρητικότητας έως και περίπου 40% παρατηρήθηκαν πειραματικά, ενώ ακόμη μεγαλύτερα οφέλη, με περαιτέρω γεωμετρική βελτίωση, προβλέφθηκαν . Για την ευρύτερη εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων, ο κατασκευαστικός τομέας χρειάζεται μεγαλύτερη εμπιστοσύνη, περαιτέρω προηγούμενα, μεγαλύτερη έμφαση στις φυσικές δοκιμές και τις προηγμένες αριθμητικές προσομοιώσεις και την καθιέρωση έγκυρων οδηγιών σχεδιασμού (Ulu, et al, 2019). Για το τελευταίο, απαιτείται μεγαλύτερη γνώση σχετικά με τα θεμελιώδη υλικά και τις γεωμετρικές ιδιότητες των τρισδιάστατων εκτυπωμένων μεταλλικών εξαρτημάτων.

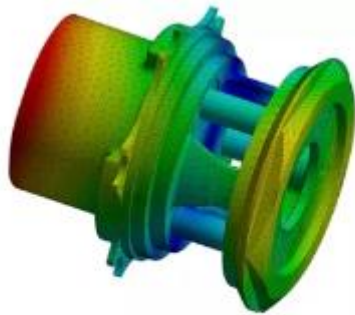
Η έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση έχει ήδη ξεκινήσει , (Ulu, et al, 2019) αλλά χρειάζονται ακόμη σημαντικά περισσότερα. Μια σχετική μελέτη για την αξιολόγηση ιδιοτήτων τρισδιάστατων εκτυπωμένων μεταλλικών εξαρτημάτων εφάρμοσε σάρωση λέιζερ για τη λήψη στατιστικών δεδομένων σχετικά με τη γεωμετρική μεταβλητότητα των δειγμάτων WAAM . Παρά τις προόδους στη ρομποτική και τα υλικά, που επί του παρόντος ξεπερνούν τα πρότυπα δομικού σχεδιασμού, μια άλλη πτυχή που πρέπει να μελετηθεί είναι η δυνατότητα εφαρμογής των υφιστάμενων κανόνων δομικού σχεδιασμού και οι απαιτούμενες τροποποιήσεις για εφαρμογή σε 3D εκτυπωμένα μεταλλικά προϊόντα. Η έρευνα που παρουσίασαν οι Kyvelou et al (2021) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, υπό τον όρο ότι το αποτέλεσμα εξασθένησης των κυματισμών της επιφάνειας που είναι χαρακτηριστικές του δομημένου υλικού WAAM, οι υπάρχοντες κανόνες σχεδιασμού λυγισμού πλακών είναι γενικά κατάλληλοι για εφαρμογή σε στοιχεία WAAM. Ενώ έχει ξεκινήσει κάποια αρχική έρευνα για την ανάπτυξη κανόνων δομικού σχεδιασμού , η μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των 3D εκτυπωμένων μεταλλικών εξαρτημάτων είναι σε μεγάλο βαθμό άγνωστη και απαιτείται πολύ περισσότερη δουλειά. Μια προσέγγιση για τη βέλτιστη χρήση της πολυπλοκότητας που προσφέρει η μεταλλική τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η χρήση αρχών βιομιμητικής σχεδίασης όπως αναλύονται στο , οδηγώντας σε οργανικά και κυψελωτά σχέδια ελαχιστοποιώντας τη χρήση υλικού και βελτιστοποιώντας τη λειτουργική απόδοση (Ngo, et al, 2018). Η τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλων είναι πιθανό να συμπληρώνει, αντί να αντικαθιστά, τις υπάρχουσες μεθόδους παραγωγής (π.χ. θερμής έλασης και ψυχρής διαμόρφωσης) στις κατασκευές (Jeong, 2016). Προβλέπεται λοιπόν ότι, ενώ θα συνεχίσουν να αναδύονται περαιτέρω κατασκευές κύρους, ο μεγαλύτερος όγκος 3D εκτυπωμένων μεταλλικών στοιχείων θα είναι σε υβριδικές εφαρμογές, όπως χαλύβδινα μέλη θερμής έλασης με τυπωμένες αρθρώσεις και λεπτομέρειες, καθώς και σε ενίσχυση και επισκευή (Ngo, et al, 2018).

Οι σχεδιαστές θα πρέπει να εξοικειώνονται ολοένα και περισσότερο με το Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), δηλαδή να σχεδιάζουν και να βελτιστοποιούν ένα στοιχείο έχοντας κατά νου τη διαδικασία κατασκευής, λαμβάνοντας δεόντως υπόψη μια σειρά περιορισμών.

6.8 Μοντελοποίηση στην τρισδιάστατη εκτύπωση

Με τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης και με τα κατάλληλα λογισμικά κατασκευάζονται σχήματα τα οποία δεν μπορούν να κατασκευαστούν με τη συμβατική μέθοδο. Με αυτόν τον τρόπο ανοίγονται σημαντικοί ορίζοντες για νέες εφευρέσεις.

Τα λογισμικά σχεδιασμού και προσομοιώσεων (όπως το ANSYS, SolidWorks) λειτουργούν με την μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιούν εξισώσεις και οριακές τιμές με το συνδυασμό αλγορίθμων και παράγουν διάφορα χρήσιμα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί η βελτιστοποίηση τοπολογίας. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι πολύ σημαντική. Ο ρόλος της είναι να προσδιορίζει τάσεις και δυνάμεις. Αυτό με την κρίση του μηχανικού μπορεί να δώσει πολλά αποτελέσματα. Αυτά μπορούν να μας προβλέψουν την επιλογή υλικού με συγκεκριμένες ιδιότητες. Έτσι αποφεύγονται λάθη και εξοικονομείται υλικό και χρήμα. (Rosinha, et al, 2015)



Σχήμα 6.44: Εξάρτημα σχεδιασμένο σε λογισμικό προσομοίωσης (Rosinha, et al, 2015)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αναμφίβολα φέρνει επανάσταση στη μηχανική, ακόμη και στις πιο πολύπλοκες και εξειδικευμένες βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική. Αυτός ο κλάδος βασίζεται σε δύο θεμελιώδεις έννοιες: ελαχιστοποίηση βάρους και υψηλή ασφάλεια. Η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς μειώνει το βάρος των εξαρτημάτων.

Στη αεροδιαστημική βιομηχανία, η τρισδιάστατη εκτύπωση αναμφίβολα θα αναπτυχθεί. Δημιουργεί νέες προοπτικές και διευρύνει τις δυνατότητες για διάφορους τομείς να αυξήσουν την παραγωγική ανταγωνιστικότητα και τον εξορθολογισμό των παραδοσιακών διαδικασιών παραγωγής. Το ίδιο ισχύει και για άλλες βιομηχανίες, όπως την αυτοκινητική και κατασκευαστική βιομηχανία.

Με τόσα πολλά πιθανά οφέλη, δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση επεκτείνεται σε μια μεγάλη ποικιλία τομέων και γίνεται γρήγορα μια αγαπημένη τεχνική προοπτικών αγορών. Όταν εξετάζουμε τα διάφορα πλεονεκτήματα, εφαρμογές και πιθανές δυνατότητες των τρισδιάστατων εκτυπωτών και των τεχνολογιών τους, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αποτελεσματικότητα στην επόμενη βιομηχανική επανάσταση.

Προτάσεις για μελλοντική βελτίωση

- Μείωση του κόστους των εκτυπωτών
- Αύξηση της ταχύτητας εκτύπωσης
- Έρευνα στα υλικά-νήματα και σκόνες εκτύπωσης

- [1] Almotairy, S.M.: Boostani, A.F.: Hassani, M.; Wei, D.: Jiang, Z. (2020) Effect of hot isostatic pressing on the mechanical properties of aluminium m, et al, matrix nanocomposites produced by dual speed ball milling. *J. Mater. Res. Technol.* 2020, 9, 1151–1161.
- [2] Benzing, J.: Hrabe, N.: Quinn, T.: White, R.: Rentz, R.: Ahlfors, M. (2019) Hot isostatic pressing (HIP) to achieve isotropic microstructure and retain as-built strength in an additive manufacturing titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Mater. Lett.* 2019, 257, 126690
- [3] Berman, B. (2012) 3-D printing: the new industrial revolution. *Bus. Horiz.* 55 (2), 155–162.
- [4] Brody, P., Pureswaran, V. (2013). The new software-defined supply chain. IBM Institute for Business Value. available online at < <http://ibm.com/business/value/software-defined-supply-chain>>
- [5] Buchanan, V.-P. Matilainen, A. Salminen, L. (2017) Structural performance of additive manufactured m, et al,lic material and cross-sections, *J. Constr. Steel Res.* 136 (2017) 35–48, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.05.002>.
- [6] Chen, C.; Xie, Y.; Yan, X.; Yin, S.: Fukanuma, H.: Huang, R.: Zhao, R.: Wang, J.: Ren, Z.: Liu, M. (2019) Effect of hot isostatic pressing (HIP) on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy fabricated by cold spray additive manufacturing. *Addit. Manuf.* 2019, 27, 595–605.
- [7] Chierici, F. Berto, A. Kanyilmaz, F.(2021) Resource-efficient joint fabrication by welding m, et al, 3D-printed parts to conventional steel: a structural integrity study, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 44 (2021) 1271–1291, <https://doi.org/10.1111/ffe.13428>.
- [8] Davidson, P. (2012) 3-D printing could remake U.S. manufacturing. *USA Today* October 7, 2012. Available online at < <http://usatoday30.usatoday.com/money/industries/manufacturing/story/2012-07-10/digital-manufacturing/56135298/> 1>
- [9] DebRoy, T, Mukherjee, T, Milewski, J. O, Elmer, J. W, Ribic, B, Blecher, J. J, & Zhang, W. (2019). *Scientific, technological and economic issues in m, et al, printing and their solutions. Nature Materials.* doi:10.1038/s41563-019-0408-2
- [10] Dutta, B.; Froes, F.H.S. (2015) The additive manufacturing (AM) of titanium alloys. In *Titanium Powder M, et al,urgy*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015; pp. 447–468
- [11] Go, J.: Hart, A.J. (2016) A framework for teaching the fundamentals of additive manufacturing and enabling rapid innovation. *Addit. Manuf.* 2016, 10, 76–87.
- [12] Herzog, D.: Seyda, V.: Wycisk, E. Emmelmann, C. (2016) Additive manufacturing of m, et al,s. *Acta Mater.* 2016, 117, 371–392.
- [13] Horst, O.; Rutttert, B.; Bürger, D.; Heep, L.; Wang, H.; Dlouhý, A.; Theisen, W.; Eggeler, G. (2019) On the rejuvenation of crept Ni-Base single crystal superalloys (SX) by hot isostatic pressing (HIP).
- [14] Jeong, H.Y.; An, S.-C.; Lim, Y.; Jeong, M.J.; Kim, N.; Jun M. (2020) Y.C. 3D and 4D Printing of Multistable Structures. *Appl. Sci.* 10, 7254.
- [15] Kyvelou, P. Huang, L. Gardner, C. Buchanan (2021), Structural testing and design of wire arc m, et al, additively manufactured square hollow sections, *J. Struct. Eng.* 147 (12) (2021), 04021218, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003188](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003188)
- [16] Kyvelou, Π. Slack, D. Daskalaki Mountanou, M.A. Wadee, T.B. Britton, C. Buchanan, L. (2020), Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material, *Mater. Des.* 192 (2020), 108675, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108675>.
- [17] Ladd, J. H. So, J. Muth, M. D. Dickey J. (2013) 3D printing of free standing liquid m, et al, microstructures. *Adv. Mater.* 2013, 25, 5081.

- [18] Laghi, M. Palermo, G. Gasparini, V.A. Girelli, T. Trombetti (2021), On the influence of the geometrical irregularities in the mechanical response of Wire-and-Arc Additively Manufactured planar elements, *J. Constr. Steel Res.*, 106490, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106490>.
- [19] Lewandowski, J.J.; Seifi, M. (2016) M, et al, additive manufacturing: A review of mechanical properties. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2016, 46, 151–186.
- [20] Lux Research, (2013) Led by Auto, Medical and Aerospace, 3D Printing to Grow into \$8.4 Billion Market in 2025. Available online at (<http://www.luxresearchinc.com/news-and-events/press-releases/164.html>)
- [21] Mei, Y. X. Gao, H. Y. Li, Z. S. Deng, J. Liu,(2013) Thermally induced porous structures in printed gallium coating to make transparent conductive film. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 102, 041905.
- [22] Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.; Hui, D. (2018) Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B Eng*, 143, 172–196.
- [23] Santos, M. Shiomi, K. Osakada, T. Laoui, G (2006) Rapid manufacturing of m, et al, components by laser forming. *Int. J. Mach. Tool. Manu.* , 46, 1459.
- [24] Shapiro, A.; Borgonia, J.; Chen, Q.; Dillon, R.; McEnerney, B.; Polit-Casillas, R.; Soloway, L (2016) Additive manufacturing for aerospace flight applications. *J. Spacecr. Rocket.* 2016, 952–959.
- [25] Sriram, V.; Shukla, V.; Biswas, S. (2019) M, et al, Powder Based Additive Manufacturing Technologies—Business Forecast. In *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019; pp. 105–118.
- [26] Ulu, E.; Huang, R.; Kara, L.B.; Whitefoot, K.S (2019). Concurrent Structure and Process Optimization for Minimum Cost M, et al, Additive Manufacturing. *J. Mech. Des.* 2019, 141, 061701.
- [27] Yan, Y. Chen, F (2019) Additive manufacturing of functionally graded m, et al,lic materials using laser m, et al, deposition, *Addit. Manuf.* 31 (2020), 100901, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100901>.
- [28] Zhang, C. Buchanan, V.P. Matilainen, D. Daskalaki-Mountanou, T.B. Britton, H. Piili, A. Salminen, L. (2021) Mechanical properties and microstructure of additively manufactured stainless steel with laser welded joints, *Mater. Des.* 208 (2021), 109921, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109921>.
- [29] Kun K,(2016) Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology, *Procedia Engineering* 149 (2016) 203 -211, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.657>
- [30] P.Dudek, FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements, *Archives of M, et al,urgy and Materials* (2013), Vol.58,iss. 4, 1415-1418, <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0186>
- [31] A.Jandyal et. al,3D printing – A review of process,materials and applications in the industry 4.0,*Sustainable Operations and computers* 3 (2022),33-42, <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>
- [32] Bell, C. (2014). Maintaining and troubleshooting your 3D printer. *Apress*.
- [33] Canessa, E, Fonda, C, Zennaro, M, & Deadline, N. (2013). Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development. *Low-Cost 3D Printing*, 11(1).
- [34] Γιώργος Π. Καραγιαννίδης(2010),Χημεία Πολυμερών, Εκδόσεις Ζήτη
- [35] Aumnate, C, Pongwisuthiruchte, A, Pattananuwat, P, & Potiyaraj, P. (2018). Fabrication of ABS/graphene oxide composite filament for fused filament fabrication (FFF) 3D printing. *Advances in Materials Science and engineering*, 2018.
- [36] Hwang, S, Reyes, E. I, Moon, K. S, Rumpf, R. C, & Kim, N. S. (2015). Thermo-mechanical characterization of m, et al,/polymer composite filaments and printing parameter

study for fused deposition modeling in the 3D printing process. *Journal of Electronic Materials*, 44(3), 771-777.

[37] Callister W.,(2015),Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών,5^η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα

[38] Camargo, J. C, Machado, Á. R, Almeida, E. C, & Silva, E. F. M. S. (2019). Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5), 2423-2443.

[39] Brus, J, & Barvíř, R. (2015). Coping with integrating low-cost 3D printing and surface models: A case study on Prusa i3. In *Surface Models for Geosciences* (pp. 45-59). Springer, Cham.

[40] https://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Build_Manual

[41] J.R. Davis et al. ,M, et al,s Handbook, τόμ. 2, Properties of Non-ferrous Alloys,10η έκδ, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, pp. 216–402,2002.

[42] Frunzaverde, D, Cojocar, V, Ciubotariu, C. R, Miclosina, C. O, Ardeljan, D. D, Ignat, E. F, & Marginean, G. (2022). The Influence of the Printing Temperature and the Filament Color on the Dimensional Accuracy, Tensile Strength, and Friction Performance of FFF-Printed PLA Specimens. *Polymers*, 14(10), 1978.

[43] Χέρμπερτ Ρηντ, κ.ά, Λεξικό Εικαστικών Τεχνών, εκδ. Υποδομή, Αθήνα, 1986, σελ. 255.

[44] Taylor, G. F. (1924). A method of drawing m, et al,lic filaments and a discussion of their properties and uses. *Physical Review*, 23(5), 655.

[45] Damon, J, Dietrich, S, Gorantla, S, Popp, U, Okolo, B. and Schulze, V. (2019), "Process porosity and mechanical performance of fused filament fabricated 316L stainless steel", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 25 No. 7, pp. 1319-1327. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2019-0002>

[46] Leary, M. (2020). Powder bed fusion. *Design for Additive Manufacturing*, 295–319. doi:10.1016/b978-0-12-816721-2.00011-7

[46] Sharma, V, Roozbahani, H, Alizadeh, M, & Handroos, H. (2021). 3D printing of plant-derived compounds and a proposed nozzle design for the more effective 3D FDM printing. *IEEE Access*, 9, 57107-57119.

[47] Hofstaetter, T, Pimentel, R, Pedersen, D. B, Mischkot, M, & Hansen, H. N. (2015). Simulation of a downsized fdm nozzle. *transfer*, 20, 25.

[48] Rosinha, I. P, Gernaey, K. V, Woodley, J. M, & Krühne, U. (2015). Topology optimization for biocatalytic microreactor configurations. K. V. Gernaey, J. K. Huusom, & R. Gani (Επιμ.), 12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (σσ. 1463–1468). doi:10.1016/B978-0-444-63577-8.50089-9

[49] Benedetti, M, Cazzolli, M, Fontanari, V, & Leoni, M. (2016). Fatigue limit of Ti6Al4V alloy produced by Selective Laser Sintering. *Procedia Structural Integrity*, 2, 3158–3167. doi:10.1016/j.prostr.2016.06.394

[50] Redwood, B, Garrett, B, & Schöffner, F. (2017). *The 3D printing handbook: Technologies, design and applications*. 3D Hubs

[51] Η διάβρωση και προστασία των μετάλλων με απλά λόγια” Α. Λεκάτου, Εκδ. Νημερτής (2013), ISBN 978-960-99591-2-4.