



Πολυτεχνείο Κρήτης
Technical University of Crete

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική Εργασία

Ερευνητική Μελέτη των Τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής



Επιμέλεια
Ελένη Α. Μιχάκη

Επιβλέπων Καθηγητής
Τσουρβελούδης Νικόλαος

Εξεταστική Επιτροπή
Αντωνιάδης Αριστομένης
Σπανουδάκης Πολυχρόνης

Χανιά Κρήτη
Ιούνιος 2019

Η διπλωματική μου εργασία αφιερώνεται στους
γονείς μου, Αντώνη και Μελίνα.
Στα αδέρφια και στους φίλους μου.
Στον παππού μου Μιχάλη, που ήταν και είναι με τον τρόπο του παρών.

«Αυτός ο κόσμος μπορεί να αλλάξει Κεμάλ.
Μέσα στις καρδιές, σε πλατείες, σε γραφεία οβάλ.
Θέλει σωστούς χιλιάδες να ‘ναι στους τροχούς.
Να ‘ναι η ψυχή η νύφη και γαμπρός ο νους.»
- Μ. Ρασούλης

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Νικόλαο Τσουρβελούδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την ελευθερία πρωτοβουλιών στην σύνθεση και δομή όλου του περιεχομένου, για την συνεχή παρουσία του όταν καθίσταντο απαραίτητη, καθώς και για την υποστήριξή του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Όσον αφορά την πραγματοποίηση της εργαστηριακής κατασκευής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Πολυχρόνη Σπανουδάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην δημιουργία του εξαρτήματος και για όλη την συνεργασία μας μέχρι την ολοκλήρωση της κατασκευής. Επιπρόσθετα, σημαντική ήταν η βοήθεια του καθηγητή κ.Λευτέρη Δοιτσίδα, ο οποίος μου εμπιστεύτηκε την χρήση του εκτυπωτή τρισδιάστατης εκτύπωσης στο εργαστήριο του για την πραγματοποίηση της κατασκευής.

Θα ήθελα ξεχωριστά να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ.Κίμωνα Βαλαβάνη για την συνομιλία, τις συμβουλές και την ενθάρρυνσή του σχετικά με την ερευνητική μελέτη για τον συγκεκριμένο κατασκευαστικό κλάδο.

Θέλω να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου για όλα αυτά τα χρόνια που μεγαλώσαμε παρέα με ότι αυτό συμπεριελάμβανε.

Το μεγαλύτερο, όμως, ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια μου, για τις συζητήσεις μας, την ουσιαστικά στήριξη τους σε κάθε μου επιλογή καθ' όλη την διάρκεια αυτών των φοιτητικών μου χρόνων, ακόμα και όταν η άποψη τους διέφερε. Για αυτό το ταξίδι που δεν θα πραγματοποιούσα χωρίς να τους έχω συνοδοιπόρους.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	5
Περίληψη στα Αγγλικά.....	6
Λίστα Συντομογραφιών.....	7

Κεφάλαιο 1

1.1 Παρουσίαση της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής.....	9
1.2 Μελέτη της Κατασκευαστικής Διαδικασίας των Τεχνολογιών AM.....	15
1.2.1. Εισαγωγή στα Στάδια Κατασκευής των τεχνολογιών AM.....	15
1.2.2. Ανάπτυξη των σταδίων κατασκευής	16
1.3 Εφαρμογές της Τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής.....	18

Κεφάλαιο 2

Κατασκευή Βάσης Προβολέα Μοτοσυκλέτας

2.1 Εισαγωγή	22
2.2 Πληροφορίες Κατασκευαστικής Διαδικασίας.....	22
2.2.1 Λογισμικό XYZware Pro και Εκτυπωτής Da Vinci 3D.....	22
2.2.2 Μέθοδος Κατασκευής με Σύντηξη Νήματος (FFF).....	23
2.3 Στάδια Κατασκευής Αριστερής Βάσης Προβολέα.....	24
2.3.1 Λογισμικό XYZware Pro και Σχεδιαστικοί Περιορισμοί.....	24
2.3.2 Προετοιμασία Εκτυπωτή Da Vinci 1.0 Pro.....	27
2.3.3 Διαδικασία Εκτύπωσης	27
2.3.4 Αξιολόγηση Κατασκευής.....	29
2.4 Συμπεράσματα	30

Κεφάλαιο 3

Η Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής στον τομέα των μεταλλικών κατασκευών

3.1 Εισαγωγή και Ιστορική Εξέλιξη.....	31
3.2 Πρότυπα και Πιστοποίηση	38
3.3 Μέθοδοι και Συστήματα Προσθετικής Κατασκευής Μεταλλικών Μερών.....	42
3.4 Υλικά και Πρώτες Ύλες.....	53
3.5 Μηχανήματα και Εξοπλισμός.....	57
3.6 Εφαρμογές.....	60

Κεφάλαιο 4

Προκλήσεις και Περιορισμοί στην Κατασκευή Μεταλλικών Μερών με τις Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής

4.1 Εισαγωγή.....	64
4.2 Ο τομέας Πιστοποίησης και Διασφάλισης Ποιότητας.....	65
4.2.1 Πιστοποίηση των Ιδιοτήτων Ρωγμής και Κόπωσης (Fracture & Fatigue).....	65
4.2.2 Αστοχίες στην κατηγορία των Μη Καταστροφικών Δοκιμών (Non Destructive Testing).....	67
4.2.3 Παρακολούθηση της Διαδικασίας σε Δεδομένο Χρόνο (In Situ) και στον Έλεγχο Ανατροφοδότησης.....	72
4.3 Εμφάνιση Αστοχιών στις Μεθόδους Προσθετικής Κατασκευής.....	73
4.4 Προσομοίωση και Μοντελοποίηση των Μεθόδων	

(Simulation & Modelling).....	77
4.5 Επεξεργασία των Υλικών (Material Processing).....	79
4.5.1 Σκόνη Μετάλλου ως Πρώτη Ύλη.....	79
4.5.2 Ευρύτερο σύνολο Ελαττωμάτων.....	81
Κεφάλαιο 5	
Συμπεράσματα και Μελλοντικά Ερευνητικά Πεδία	
5.1 Γενικά Συμπεράσματα.....	86
5.2 Μελλοντικά Ερευνητικά Πεδία.....	87
Παράρτημα 1.....	89
Παράρτημα 2.....	91
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	96

Περίληψη

Στον κλάδο της παγκόσμιας κατασκευαστικής κοινότητας, η μελέτη και η κατασκευή προϊόντων στηρίζεται στην ταχεία πρωτοτυποποίηση. Εξελικτικά, από αυτή την κατασκευαστική γνώση τέθηκαν τα θεμέλια για την ανάπτυξη των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής (additive manufacturing/AM) ή αλλιώς των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης με πολλαπλές εφαρμογές. Η ικανότητα δημιουργίας προϊόντων με πολύπλοκη γεωμετρία και χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με τη χρήση μικρότερης ποσότητας πρώτης ύλης, αποτελεί κινητήριο παράγοντα εξέλιξης. Η ουσιαστική στόχευση αφορά στην κατασκευή μερών με πολύ καλή ποιοτική απόδοση και χαμηλό κόστος παραγωγής.

Η ερευνητική προσέγγιση ξεκινάει με την μελέτη των τεχνολογιών AM και τον τρόπο με τον οποίο έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα, με βάση σημαντικά ερευνητικά αποτελέσματα. Η εδραίωση των μεθόδων παραγωγής κυρίως πλαστικών μερών και η αντίστοιχη αξιοποίησή τους με διάφορους τρόπους και εφαρμογές, υποδεικνύει την σπουδαιότητα αυτής της τεχνολογίας. Με την πραγματοποίηση εργαστηριακής κατασκευής πλαστικού εξαρτήματος αξιοποιώντας τον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου, παρατηρείται στην πράξη ο τρόπος με τον οποίο αποδίδει η μέθοδος κατασκευής τεμαχίου με προσθετική προσέγγιση.

Ο τρόπος με τον οποίο οι τεχνολογίες AM αξιοποιούνται από την παγκόσμια ερευνητική και βιομηχανική κοινότητα όσον αφορά την κατασκευή μεταλλικών μερών, αποτελεί βασικό ερευνητικό πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας. Η ιστορική εξέλιξη και τα συμπεράσματα διαφόρων ερευνητών τόσο για την πορεία όσο και για την μελλοντική απόδοση των τεχνολογιών αυτών, συμπληρώνουν την καταγραφή ενεργειών διασφάλισης ποιότητας και πιστοποίησης για όλες τις φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας. Η ανάλυση των μεθόδων και συστημάτων κατασκευής μεταλλικών μερών κρίνεται σημαντική για την κατανόηση της προσέγγισης αυτής τόσο τεχνολογικά όσο και συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής.

Από την μελέτη διαφόρων εφαρμογών και τα συμπεράσματα επιστημόνων, παρατηρήθηκαν αστοχίες σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας κατασκευής μεταλλικών μερών, οι οποίες συμπληρώνουν το ερευνητικό πλαίσιο αυτής της εργασίας. Όσο οι δραστηριότητες γύρω από την κατασκευή μεταλλικών μερών με τις τεχνολογίες AM επεκτείνονται, τόσο θα εμφανίζονται προκλήσεις και προβλήματα προς επίλυση. Μια αλυσίδα παραγόντων, όπως αναλύθηκαν σε όλο το εύρος της εργασίας και κυρίως στο κεφάλαιο των προκλήσεων, υποδεικνύουν τον δρόμο για την εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας στον κλάδο των μεταλλικών κατασκευών. Ιδιότητες που σχετίζονται με την εσωτερική και εξωτερική δομή του κατασκευασμένου μέρους, αλλά και η ανάπτυξη κάθε μεθόδου ξεχωριστά, αποτελούν στοιχεία αναγνώρισης και βελτίωσης. Ο τομέας της πιστοποίησης και διασφάλισης ποιότητας, της προσομοίωσης και της μοντελοποίησης, της επεξεργασίας των υλικών και όλο το εύρος των προβλημάτων που εμπεριέχονται σε αυτές τις κατηγορίες, συνθέτουν μια εικόνα ενός κατασκευαστικού μοντέλου, το οποίο όντας ήδη θεμελιωμένο, έχει δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης.

Abstract in English

In the global construction community, the study and the manufacturing of components are basing on rapid prototyping. Evolutionary, the foundations of Additive Manufacturing Technologies were laid on this existing technology. The ability to create parts with complex geometry and characteristics, in combination with the usage of less quantity of raw material, constitutes motivated factor of development. The instrumental target is related with the manufacturing of parts with good quality performance and low production cost simultaneously.

Initially, the research study refers to the historic background of Additive Manufacturing technologies and the way that they have been developed and expanded all these years depending on remarkable research outcomes. The magnitude of this technology is pinpointed both via the consolidation of different manufacturing methods and applications, especially with plastic material. The proof that the manufacturing with additive approach can be successful, was fulfilled with the creation of plastic part using the 3D Printer in the laboratory.

A key research framework for this thesis, is the way with which both global research and industrial community are exploiting this technology in order to manufacture metallic parts. Historical references and various researcher's conclusions have been documented concerning the progression and the future efficiency of these technologies. Supplementary, the actions for quality assurance and certification are significant in all stages of production. The analysis of metal AM methods and systems is an effective way to comprehend the importance of this technology, especially in comparison with the conventional manufacturing methods.

In this research study, various challenges are mentioned extensively, as they have been figured out in all stages of production during the manufacturing of metallic parts, regarding studies of diverse applications and scientific outcomes. Since the activities concerning the manufacturing of metallic parts with additive approach are expanding, both challenges and new problems will need resolution. A chain of different parameters and challenges indicate this technology's evolution in all thesis range. Characteristics which are related with the external and internal structure of the manufactured parts and the analysis of each method separately, constitute elements of recognition and improvement for metal AM. The sector of quality assurance and certification, the simulation, the modeling, the materials' elaboration, the post processing and the totality of challenges are included in these fields, compose an image of a technological model, which has been already founded, and it will be expanded further in the future.

Λίστα Συντομογραφιών

RP	Ταχεία Πρωτοτυποποίηση
CAD	Σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή
CAM	Κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή
CNC	Μηχανή αριθμητικού ελέγχου μέσω υπολογιστή
AM	Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής
SLA	Στερεολιθογραφία
FDM	Μοντελοποίηση Συντηκόμενης Εναπόθεσης
LOM	Ελασματοποιημένη Κατασκευή Αντικειμένων
DED	Τεχνολογίες Άμεσης Ενεργειακής Τοποθέτησης
LENS	Μηχανική Ελασματοποίηση χωρίς Διαμόρφωση
EBM	Τεχνολογία Τήξης με χρήση Ακτίνας Ηλεκτρονίου
3DP	Τεχνολογία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης
SLS	Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ
ASTM	Αμερικανικός Σύλλογος Ελέγχου και Υλικών
AMSC	Οργανισμός Συνεργατικής Τυποποίησης των Τεχνολογιών AM
ISO	Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης
AAMI	Ένωση για την Προώθηση των Ιατρικών Οργάνων
ASME	Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών
AWS	Αμερικανική Εταιρεία Συγκόλλησης
IEEE	Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
IPC	Ένωση Σύνδεσης Βιομηχανιών Ηλεκτρονικών Ειδών
MITA	Ιατρική Συμμαχία Τεχνολογικής Απεικόνισης
DICOM	Ψηφιακή Απεικόνιση και Επικοινωνίες στην Ιατρική
NEMA	Εθνική Ένωση Ηλεκτροπαραγωγών Κατασκευαστών
MPIF	Ομοσπονδία Βιομηχανιών Σκόνης Μετάλλων
FFF	Κατασκευή Ελεύθερης Μορφής / Κατασκευή με Σύντηξη Νήματος
DDM	Άμεση Ψηφιακή Κατασκευή
NIST	Εθνικό Ινστιτούτο Πιστοποιήσεων και Τεχνολογίας
DMLS	Τεχνολογία Άμεσης Σύντηξης Μετάλλου με χρήση Λείζερ
CMB	Μηχανή Ελεγχόμενων Μεταλλικών Κατασκευών
MIM	Διεργασία Μορφοποίησης με Έγχυση Μετάλλου
DMD	Συστήματα Άμεσης Απόθεσης Μετάλλων
SLM	Μέθοδος Επιλεκτικής Τήξης με χρήση Λείζερ
PBF	Σύντηξη Σκόνης σε Κλίνη
LENS	Καθαρή Μηχανική Μορφοποίηση με χρήση Λείζερ
FEM	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων
FEA	Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων
FAA	Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ
AFRL	Εργαστήριο Έρευνας Πολεμικής Αεροπορίας
SAE	Σύλλογος Μηχανικών στον τομέα της Αυτοκινητοβιομηχανίας
AMS	Ομάδα Αεροπορικών Υλικών Συστημάτων
GD&T	Γεωμετρικές διαστάσεις και ανοχές
Q&C	Ποιότητα και Πιστοποίηση
R&D	Έρευνα και Ανάπτυξη
NDI	Μέθοδος μη Καταστροφικών Επιθεωρήσεων
PM	Σκόνη για Μεταλλουργικές Διεργασίες
ACOs	Γραφεία Πιστοποίησης Αεροσκαφών
MIDOs	Γραφεία Επιθεώρησης Κατασκευών
FSDO	Περιφερειακό Γραφείο ελέγχου των Προτύπων κάθε Πτήσης
NASA	Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος

DoD	Υπουργείο Αμύνης
FDA	Υπηρεσία Φαγητών και Φαρμάκων
IMTS	Διεθνή Παρουσίαση Κατασκευαστικής Τεχνολογίας
SEM	Μικροσκόπιο Σάρωσης Ηλεκτρονίου
RPI	Εταιρία Rapid Product Innovations
POM	Εταιρία Precision Optical Manufacturing
LPF	Διαμόρφωση Σκόνης με χρήση Λέιζερ
LC	Σταθεροποίηση με χρήση Λέιζερ
EBDM	Άμεση Κατασκευή με χρήση Ακτίνας Ηλεκτρονίου
DPM	Ψηφιακή Υλοποίηση Μερών
PTA-SFFF	Μεταφορά Τόξου Πλάσματος με Επιλεκτική Κατασκευή Ελεύθερης Μορφής
IFF	Διαμόρφωση με Σύντηξη Ιόντων
UAM	Προσθετική Κατασκευή με Υπερήχους
SMD	Εναπόθεση Σχηματιζόμενου Μετάλλου
GTAW	Συγκόλληση Τόξου Αερίου Βολφραμίου
HW-GTAW	Συγκόλληση Τόξου Αερίου Βολφραμίου με Ζεστό Σύρμα
MMC	Σύνθετα Μεταλλικά Πλέγματα
Ra	Μονάδα Μέτρηση Σκληρότητας Επιφάνειας (surface roughness)
EBAM	Προσθετική Κατασκευή με χρήση Ακτίνας Ηλεκτρονίου
VHP-UAM	Πολύ Υψηλής Ενέργειας Προσθετική Κατασκευή με Υπερήχους
DMP	Άμεση Εκτύπωση Μετάλλων
SBIR	Έρευνα για Καινοτομίες Μικρών Επιχειρήσεων
LCF	Χαμηλός Κύκλος Ρωγμών
HCF	Υψηλός Κύκλος Ρωγμών
FM	Μηχανισμοί Κόπωσης
ICME	Οργανισμός Ολοκληρωμένης Υπολογιστικής Μηχανικής Υλικών
NDT	Μη Καταστροφικές Δοκιμές
LEAP	Προωθητική Τεχνολογία Αιχμής της Αεροπορίας
NDT	Μη Καταστροφικές Δοκιμές
LOF	Έλλειψη Σύντηξης
MET	Οπτική Μετρολογία
PCRT	Δοκιμή Αντιστάθμισης Συντονισμού της Μεθόδου
PT	Δοκιμή Διείσδυσης
RT	Δοκιμή Ακτινογραφίας
UT	Υπερηχητική Δοκιμή
CT	Υπολογιστική Τομογραφία
CMM	Μηχανή Μέτρησης Συντονισμού
EMF	Ηλεκτρομαγνητική Συχνότητα
CIFS	Κρίσιμα Αρχικά Μεγέθη Ελαττωμάτων
NNSA	Τμήμα Διοίκησης Εθνικής Ενεργειακής Πυρηνικής Ασφάλειας
CFD	Υπολογιστική Ρευστότητα
ICME	Ενσωματωμένα Εργαλεία Υπολογιστικής Μηχανικής των Υλικών
NSF	Εθνικό Επιστημονικό Ίδρυμα
GA	Ψεκασμός Αερίου
RA	Περιστροφικός Ψεκασμός
PREP	Διαδικασία Περιστροφής Ηλεκτροδίων Πλάσματος
PA	Ψεκασμός Πλάσματος
SEM	Μικροσκόπιο Ηλεκτρονικής Σάρωσης

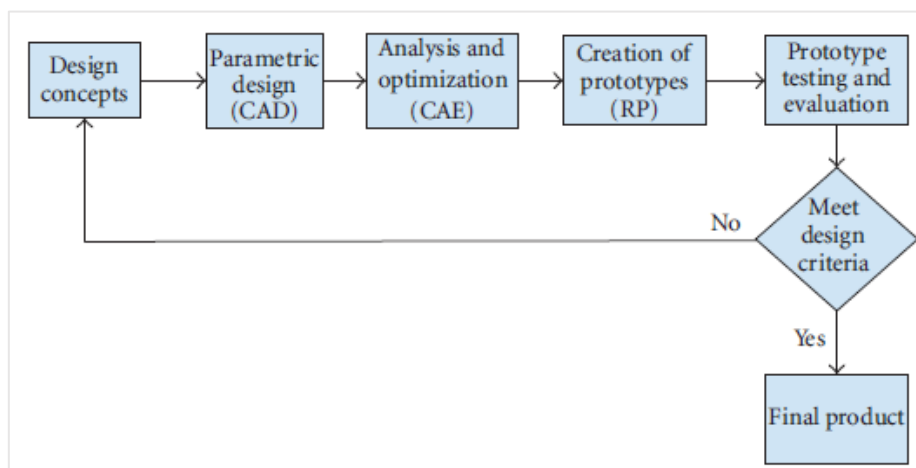
Κεφάλαιο 1

1.1 Παρουσίαση της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής

Ως Ταχεία Πρωτοτυποποίηση ή αλλιώς Rapid Prototyping (RP) περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας ενός ολοκληρωμένου προϊόντος ή μέρος ενός συστήματος με ταχύς ρυθμούς, πριν την φάση της εμπορευματοποίησης. Μέσω μιας γρήγορης κατασκευαστικής διαδικασίας δίνεται έμφαση, είτε στην δημιουργία ενός βασικού μοντέλου που καθίσταται ως πρωτότυπο για την γραμμή παραγωγής είτε στην δημιουργία του επιθυμητού τελικού προϊόντος με στόχο την άμεση εμπορική διάθεση. Καταλυτικός παράγοντας στην κατασκευή πρωτοτύπων αποτελεί η σχεδιαστική φάση μέσω της χρήσης λογισμικού τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Από την σχεδιομελέτη κάθε τεμαχίου προέρχεται ένα ψηφιακό αρχείο, το οποίο αποτελεί την βάση για το τελικό στάδιο της κατεργασίας και κατασκευής του επιθυμητού μοντέλου [1].

Η Ταχεία Πρωτοτυποποίηση εμφανίστηκε ως βοηθητικό μέσω αποτύπωσης του μοντέλου και της γενικότερης σκέψης που έχουν οι μηχανικοί για αυτό που επιθυμούν να δημιουργήσουν. Ο βασικός σκοπός ανάπτυξης αυτής της τεχνολογίας αφορά στην ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου χρόνου και κόστους της κατασκευής, στην αποδοτικότερη επικοινωνία μεταξύ των υπευθύνων κάθε έργου και γενικότερα στην δημιουργία ενός βέλτιστου κύκλου ανάπτυξης προϊόντος, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1 [42]. Αξιοσημείωτη είναι η ικανότητα κατασκευής οποιασδήποτε περίπλοκης μορφής αντικειμένου, γεγονός που καθιστά την ύπαρξη αυτής της τεχνολογίας καταλυτικής σημασίας.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί η αδυναμία κατασκευής τεμαχίων σε πολλαπλές περιπτώσεις, όπου και θεωρείται απαραίτητη η χρήση CNC μηχανής σε κάποια φάση της κατασκευής. Μέσα από τέτοιου είδους περιπτώσεις γίνεται άμεσα αντιληπτή η σπουδαιότητα τεχνολογιών όπως είναι η σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD: computer aided design), η κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή (CAM: computer aided manufacturing), καθώς και η μηχανή αριθμητικού ελέγχου μέσω υπολογιστή (CNC: computer numerical control). Πρόκειται για τις τεχνολογίες, όπου συνδυαστικά αποτέλεσαν την βάση για την ανάπτυξη των τεχνολογιών με ταχεία πρωτοτυποποίηση [5].

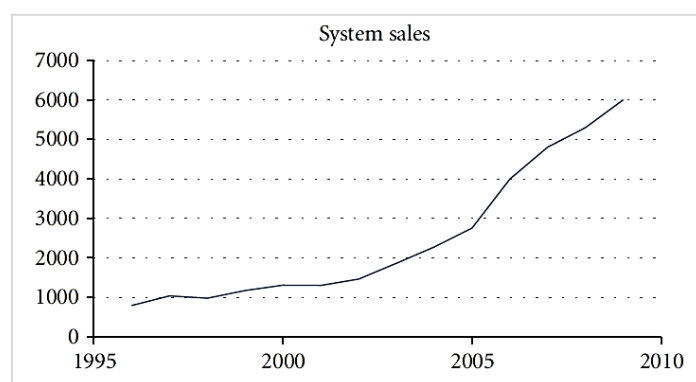


Εικόνα 1: Κύκλος Ανάπτυξης Προϊόντος [42].

Η τεχνολογία αυτή έχει αναπτυχθεί μέσω ποικίλων διαφορετικών διαδικασιών, κυρίως όσον αφορά στους τρόπους και τα μέσα κατεργασίας. Σε κάθε φάση εξέλιξης των διαφόρων τεχνολογιών με στόχο την βέλτιστη κατασκευαστική δημιουργία, δινόταν έμφαση στην μείωση του κόστους, της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και στο αποτύπωμα του διοξειδίου του άνθρακα. Η χρησιμότητα, η γεωμετρική πολυπλοκότητα, η ακρίβεια και η ταχύτητα

αποτελούσαν πάντα κύριο παράγοντα ανάγκης για βελτιστοποίηση της τρέχουσας κατασκευαστικής διαδικασίας [13].

Τα θετικά αποτελέσματα της τεχνολογίας αυτής παρατηρούνται κυρίως στην ανάπτυξη και διεκπεραίωση κατασκευών με χρήση πλαστικού υλικού. Βελτιστοποιώντας και εξελίσσοντας την διαδικασία δημιουργίας πρωτοτύπου, οι μηχανικοί έχουν καταφέρει να προχωρήσουν ένα βήμα ακόμα στην δημιουργία τελειοποιημένου αντικειμένου με άμεση εμπορική δυνατότητα. Αξιοσημείωτη αποτυπώνεται η συνεχόμενη αλλαγή στον τομέα της βιομηχανίας μέσω της αναφοράς του T. Wholers [8], που καταγράφηκε το 2011 διατυπώνοντας τον ολοένα και αυξανόμενο ρυθμό ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής σε μια διάρκεια δεκαπέντε χρόνων, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Παρατηρείται μια σύνθετη τάση αύξησης της βιομηχανικής δραστηριότητας, που εκτιμάται στο 26,2% μέχρι το 2010 [5].



Εικόνα 2: Ανάπτυξη της Ταχείας Πρωτοτυποποίησης.

Εκτιμώντας τις κατασκευαστικές δυνατότητες στον σύγχρονο βιομηχανικό τομέα, η Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής, ή αλλιώς Additive Manufacturing (AM) (αλλιώς Εξελιγμένη Τεχνολογία Μηχανολογικών Κατασκευών με Προσθετική Μέθοδο) αποτελεί την πιο εξελιγμένη φάση της Ταχείας Πρωτοτυποποίησης. Πρόκειται για μια τεχνολογία που είναι ευρέως γνωστή ως τεχνολογία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης με πολλαπλές εφαρμογές. Το βασικό χαρακτηριστικό, μέσω του οποίου η ονομασία αυτή αποδίδεται σε αυτή την τεχνολογία, είναι η κατασκευή κάθε τεμαχίου με προσθετική προσέγγιση. Η χρήση αυτού του όρου, ισχυροποιείται από τον Αμερικανικό Οργανισμό Ελέγχου και Υλικών (ASTM: American Society for Testing and Materials), μέσω του οποίου τονίζεται η σημαντική διαφοροποίηση αυτής της μεθόδου από τις συμβατικές διαδικασίες κατεργασιών [4].

Σύμφωνα με μια νεότερη έκθεση του T. Wholers, το εμπορικό ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες Προσθετικής Μηχανικής αυξήθηκε, με βάση ένα σύνθετο ετήσιο βαθμό κατά 35,2%, στα 4,1 δισεκατομμύρια δολάρια (\$4.1 billion) το 2014. Η βιομηχανία επεκτάθηκε σε βαθμό μεγαλύτερο από 1 δισεκατομμύριο δολάρια το 2014, με 49 κατασκευαστές να παράγουν και να πωλούν βιομηχανικό εξοπλισμό της τεχνολογίας αυτής. Αυτή η κατανάλωση εκτιμάται ότι στηρίζεται στον χαμηλού κόστους "επιτραπέζιο" τρισδιάστατο εκτυπωτή.

Παράλληλα, έντονη αύξηση παρουσιάστηκε και στην χρήση βιομηχανικών συστημάτων προσθετικών μετάλλων για απαιτητικές εφαρμογές παραγωγής στις αεροδιαστημικές και ιατρικές αγορές. Κατ' επέκταση, οι αναφορές μελετητών του βιομηχανικού κλάδου σηματοδοτούν ότι οι τεχνολογίες AM αποτελούν τη βάση για μια σειρά σημαντικών εξελίξεων [6].

Μελετώντας αναλυτικότερα την τεχνολογία αυτή, βασίζεται αρχικά στην δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου κάνοντας χρήση ενός λογισμικού τρισδιάστατης μοντελοποίησης μέσω του συστήματος CAD. Η σημαντική διαφοροποίηση της διαδικασίας αυτής με τις συμβατικές μεθόδους, εμφανίζεται στην απλούστευση της δημιουργίας



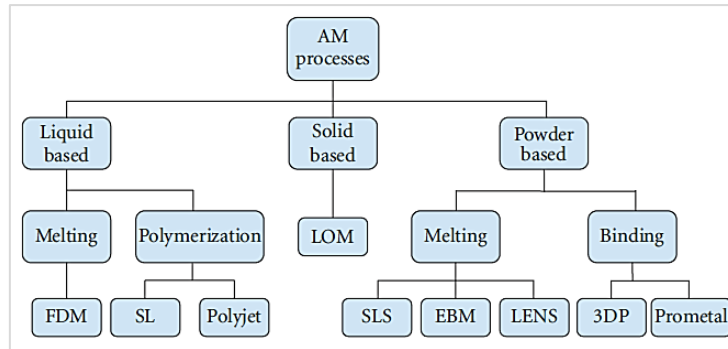
Εικόνα 3: Κατασκευή γέφυρας μέσω της αξιοποίησης των τεχνολογιών AM από την εταιρία MX3D.

τρισδιάστατων μοντέλων απευθείας από το ψηφιακό αρχείο μέσω διαφορετικών ενδιάμεσων ενεργειών. Διαφοροποιούνται οι λεπτομερείς και οι προσεκτικοί έλεγχοι κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης μιας κατασκευής, όσον αφορά στην χρήση ποικίλων κοπτικών εργαλείων και διαφορετικών μεθόδων, καθώς και στην υπολογιστική διαδικασία. Ουσιαστικά με τον καθορισμό των βασικών διαστατικών λεπτομερειών, των υλικών που θα συνθέσουν το τεμάχιο και την κατανόηση της λειτουργίας του μηχανήματος, μπορεί να ολοκληρωθεί στην ολότητα της η κατασκευαστική διαδικασία.

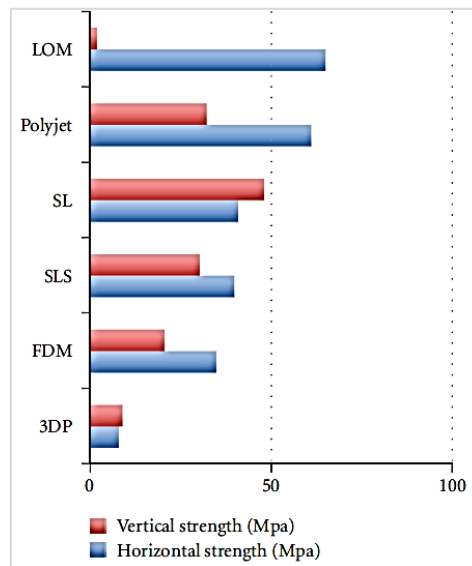
Κατά τη διαδικασία της εκτέλεσης, το τεμάχιο δημιουργείται από διαδοχικές στρώσεις υλικού (layers). Κάθε επίστρωση αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα της διαδικασίας όπως έχει ήδη αναπτυχθεί στο ψηφιακό αρχείο CAD. Σημαντική λεπτομέρεια στην επιτυχή έκβαση της διαδικασίας έχει η δημιουργία πολύ λεπτών στρωμάτων μετρήσιμης πυκνότητας ώστε το αποτέλεσμα να προσεγγίζει το πραγματικό και επιθυμητό. Ωστόσο, καταλυτικό παράγοντα στην δημιουργία των στρωμάτων έχει και η σωστή επιλογή του μηχανήματος. Όλα τα μηχανήματα εμπεριέχουν ένα βασικό σύστημα αναγνώρισης της μεθόδου κατεργασίας μέσω επιστρώσεων, αλλά διαφοροποιούνται στα υλικά που μπορούν να επεξεργαστούν, στον τρόπο δημιουργίας των στρωμάτων, καθώς και στον τρόπο σύνδεσης κάθε διαδοχικής επίστρωσης. Με βάση αυτές τις λεπτομέρειες, καθορίζονται σε κάθε κατασκευαστική περίπτωση παράγοντες όπως, η ακρίβεια του τελικού προϊόντος, οι μηχανικές και μηχανολογικές ιδιότητές, ο χρόνος δημιουργίας κάθε τεμαχίου, η αναγκαία προετοιμασία που πρέπει να προηγηθεί, το μηχάνημα που πρέπει να χρησιμοποιηθεί και το συνολικό κόστος της διαδικασίας [1].

Η τεχνολογία αυτή έχει κατηγοριοποιηθεί σε διαφορετικές μεθόδους ανάλογα με τη βασική μέθοδο επεξεργασίας. Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι έχοντας ως βάση το υγρό στοιχείο (liquid based), το στερεό στοιχείο (solid based), καθώς και τη χρήση σκόνης (powder based). Η Στερεολιθογραφία (Stereolithography-SLA), η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης Polyjet, η Μοντελοποίηση Συντηκόμενης Εναπόθεσης (Fused Deposition Modeling-FMD), η Ελασματοποιημένη Κατασκευή Αντικειμένων (Laminated Object Manufacturing-LOM), η Μηχανική Ελασματοποίηση χωρίς Διαμόρφωση (Laminated Engineered Net Shaping-LENS), η τεχνολογία Τήξης Δέσμης Ηλεκτρονίου (Electron Beam Melting-EBM), η τεχνολογία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης (3D Printing-3DP), η τεχνολογία Prometal, καθώς και η Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λέιζερ (Selective Laser Sintering-SLS) αποτελούν κάποιες από τις σημαντικότερες τεχνολογικές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί με την προσθετική προσέγγιση, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4 [44].

Η εξέλιξη στον τομέα των κατεργασιών καθιστά τις μεθόδους που βασίζονται στο υγρό στοιχείο και στη χρήση σκόνης να αξιοποιούνται τεχνολογικά σε ένα ευρύ φάσμα τόσο εργαστηριακό όσο και βιομηχανικό, γεγονός που ενισχύει την βέβαιη μελλοντική τους εξέλιξη. Αντίθετα, οι μέθοδοι που στηρίζονται στην επεξεργασία με χρήση στερεού υλικού χρησιμοποιούνται λιγότερο, με κύρια έμφαση να αποδίδεται στην σημερινή επικρατούσα τεχνολογία LOM [5].



Εικόνα 4: Κατηγοριοποιημένοι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης [44].



Εικόνα 5: Σύγκριση των τεχνολογιών AM για αντοχή σε εφελκυσμό [45-48].

Για μια αποδοτικότερη εξέταση της προόδου και τη δυναμικής των τεχνολογιών AM, παρατίθενται η Εικόνα 5 στην οποία παρουσιάζεται μια σύγκριση των μεθόδων AM. Πρόκειται για μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους G.D. Kim και Y.T. Oh, οι οποίοι μέσω πολλών δειγμάτων εξέτασαν την αντοχή σε εφελκυσμό κάθε διαδικασίας και διαπίστωσαν την σημαντική διαφοροποίηση στην χρήση των μεθόδων LOM και 3DP [45-48].

Η εδραίωση των τεχνολογιών της Προσθετικής Κατασκευής στον παγκόσμιο βιομηχανικό χάρτη, πραγματοποιήθηκε με τη δημιουργία πρωτοτύπων κάνοντας χρήση τρισδιάστατων συστημάτων Στερεολιθογραφίας (SLA) το 1986. Η άμεση εμπορική διάθεση αυτών των μοντέλων, οδήγησαν το 1990 στην ανάπτυξη των τεχνολογιών της Επιλεκτικής Πυροσυσσωμάτωσης με Λέιζερ (SLS) και της Μοντελοποίησης Συντηκόμενης Εναπόθεσης (FMD), μέσω των οποίων δημιουργήθηκαν αντίστοιχα νέα μοντέλα για εμπορευματοποίηση. Ακολούθως, η συνεχόμενη βελτίωση των υλικών, των διαδικασιών και των μηχανών, οδήγησαν στην ανάπτυξη εφαρμογών με σκοπό τον σχηματισμό πολυμερών διαδικασιών και υλικών μέσω των τεχνολογιών AM με γρήγορο σχηματισμό πρωτοτύπων, τα οποία βαθμιαία χρησιμοποιούνταν ως ολοκληρωμένα μοντέλα.

Μετά από μια ερευνητική δραστηριότητα δέκα χρόνων, οι μηχανικοί των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης άρχισαν να αξιοποιούν το μέταλλο ως βασικό κατασκευαστικό υλικό. Το 2009 συστάθηκε η επιτροπή F42 από τον οργανισμό ASTM (American Society for Testing and Materials) και ακολούθως το 2012 πραγματοποιήθηκε η σύμπραξη και δημιουργία του Εθνικού Ινστιτούτου Καινοτομίας των τεχνολογιών AM (National Additive Manufacturing

Innovation Institute or America Makes). Πρόκειται για δύο οργανισμούς που ισχυροποίησαν την ύπαρξη και εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών και έθεσαν τις βάσεις για την ανάγκη καταγραφής προτύπων και πιστοποιήσεων.

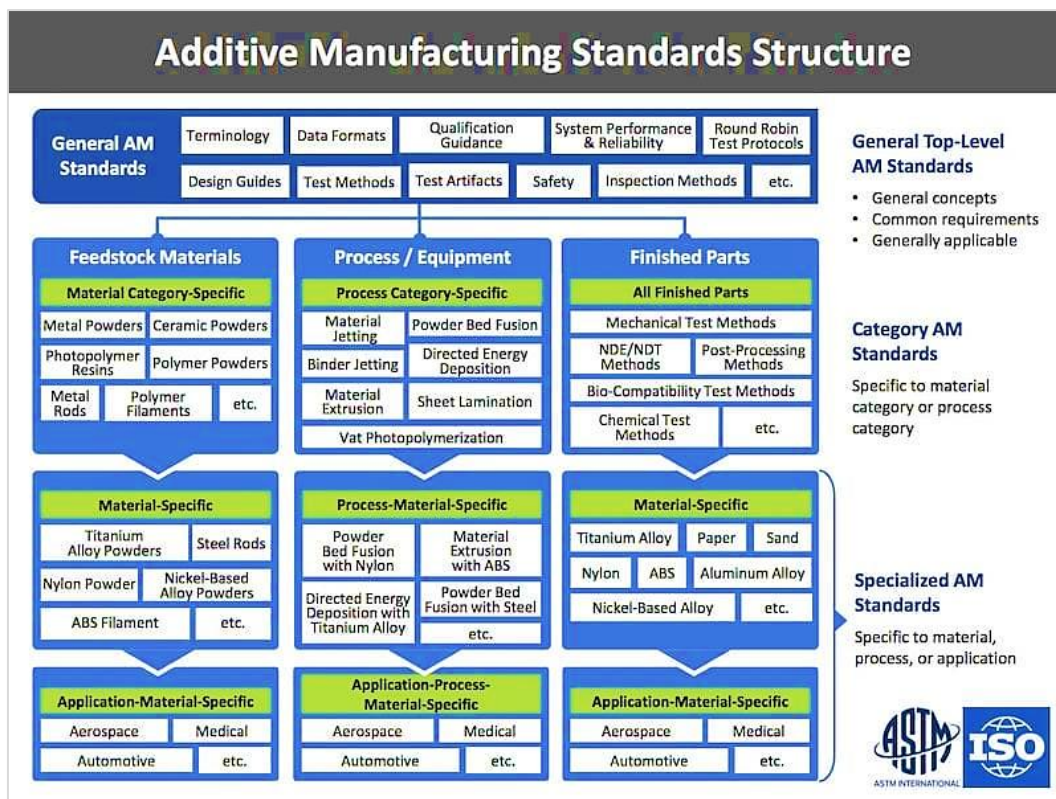
Μέσα από μια διαδικασία συνεχόμενων εξελίξεων, το 2016 δημιουργήθηκε ο οργανισμός Συνεργατικής Τυποποίησης των Τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής ή αλλιώς Additive Manufacturing Standardization Collaborative (AMSC). Ο ουσιαστικός στόχος της ύπαρξης αυτού του οργανισμού ήταν ο συντονισμός και η επιτυχημένη ανάπτυξη βιομηχανικών προτύπων και προδιαγραφών παρασκευής πρόσθετων μοντέλων σύμφωνα με τις ανάγκες των ενδιαφερομένων, η διατήρηση της συνέπειας και η εξάλειψη των αντικρουόμενων απόψεων σε κάθε στάδιο αυτής της τεχνολογίας.

Με βάση αυτό το σκοπό, ορίστηκε ένας οδηγός 89 προτάσεων και σχετικών συστάσεων γύρω από τον τομέα του Σχεδιασμού (Design), των Μεθόδων και των Υλικών (Process and Materials), της Πιστοποίησης και της Ποιότητας (Certification and Qualification), καθώς και της ανάγκης για Μη Καταστροφική Αξιολόγηση και Συντήρηση (Nondestructive Evaluation and Maintenance). Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι ο τομέας των Μεθόδων και των Υλικών κατηγοριοποιήθηκε σε επιμέρους διαδικασίες προς αξιολόγηση, όπως ο Έλεγχος της Μεθόδου (Process Control), η Επακόλουθη επεξεργασία (Post-Processing), τα Πρόδρομα Υλικά (Precursor Materials) και οι Ιδιότητες των Τελικών Υλικών (Finished Materials Properties). Πρόκειται για μια ενέργεια η οποία στην ολότητα της θα τεθεί σε πρακτική εφαρμογή και θα προωθηθεί ευρέως, με τελική στόχευση τα επόμενα έτη να αξιολογηθεί η πρόοδος στην εφαρμογή της και να εντοπιστούν αναδυόμενα θέματα που απαιτούν περαιτέρω συζήτηση [6, 7].

Η συγκρότηση των παραπάνω αναγκαίων ενεργειών καθώς και η δημιουργία του οδηγού Πιστοποίησης, πραγματοποιήθηκε από την σύμπραξη διαφόρων ειδικών και επαγγελματιών γύρω από τον Βιομηχανικό, Ακαδημαϊκό και Κυβερνητικό κλάδο. Ο Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης (International Organization for Standardization-ISO) δημιουργώντας την επιτροπή ISO/TC 261 τονίζει την ύπαρξη ‘‘της Τυποποίησης στον τομέα της Προσθετικής Κατασκευής (AM) σχετικά με τις διαδικασίες, τους όρους και τους ορισμούς, τις αλυσίδες διεργασιών (Hard- and Software), τις διαδικασίες δοκιμών, τις παραμέτρους ποιότητας, τις συμφωνίες προμηθειών και κάθε είδους βασικές αρχές’’. Κατ’ επέκταση, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6, ακολουθεί η συγκρότηση μιας στενής συνεργασίας μεταξύ της επιτροπής ISO/TC 261 και της ASTM F42 με καθολικό σκοπό την ανάπτυξη οδών Πιστοποίησης και Διασφάλισης Ποιότητας των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής [6].

Επιπροσθέτως, στην δημιουργία του οδηγού Πιστοποίησης συνέβαλαν ενεργά η Ένωση για την Προώθηση των Ιατρικών Οργάνων (Association for the Advancement of Medical Instrumentation-AAMI), η Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών (American Society of Mechanical Engineers-ASME), η Αμερικανική Εταιρεία Συγκόλλησης (American Welding Society-AWS), το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute for Electrical and Electronics Engineers-IEEE), η Ένωση Σύνδεσης Βιομηχανιών Ηλεκτρονικών Ειδών (the Association Connecting Electronics Industries-IPC), η Ιατρική Συμμαχία Τεχνολογικής Απεικόνισης (MITA) και Ψηφιακή Απεικόνιση και Επικοινωνίες στην Ιατρική (DICOM) της Εθνικής Ένωσης Ηλεκτροπαραγωγών Κατασκευαστών (NEMA) [(Medical Imaging Technology Alliance-MITA) & (Digital Imaging and Communications in Medicine-DICOM) of the National Electrical Manufacturers Association (NEMA)], η Ομοσπονδία Βιομηχανιών Σκόνης Μετάλλων (Metal Powder Industries Federation-MPIF), καθώς και η SAE International.

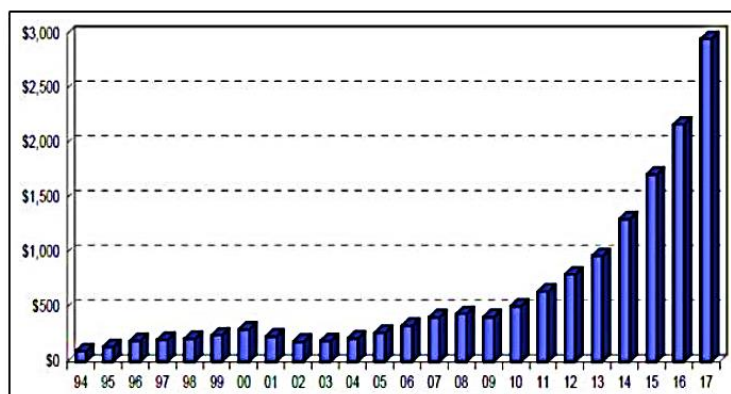
Οι παραπάνω ενέργειες ανάπτυξης οδηγού πιστοποίησης και η ανάγκη για συνεχή βελτίωση των όρων του με βάση τις τεχνολογικές εξελίξεις, είναι ενέργειες που ισχυροποιούνται από τα αποτελέσματα των πιο πρόσφατων μελετών που πραγματοποιούνται πάνω σε αυτό τον τομέα της τεχνολογίας. Συγκεκριμένα, η τελευταία επίσημη αναφορά για το



Εικόνα 6: Δομή Πιστοποίησης εγκεκριμένη από τις επιτροπές ISO TC261 και ASTM F42 [6].

2018 από τον T.Wohlrs, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7, αναφέρει ότι μέσω διαφόρων καταγραφών των υπηρεσιών των ανεξάρτητων προμηθευτών της τεχνολογίας αυτής σε παγκόσμιο επίπεδο, σημείωσαν περίπου 2,955 δισεκατομμύρια δολάρια (\$2.955 billion) πωληθέντων εξαρτημάτων κατά τη διάρκεια του έτους 2017. Το ποσοστό αυτό αυξήθηκε κατά 36% από τα 2,173 δισ. δολάρια (\$2.173 billion) που καταγράφηκαν για το 2016.

Μέσω του γραφήματος, παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις εσόδων (σε εκατομμύρια δολάρια) για τα τελευταία 24 χρόνια. Οι ράβδοι προσδιορίζουν μόνο τα πρωτογενή έσοδα, τα οποία προέρχονται από τα μέρη που παράγονται με τη χρήση του εξοπλισμού της τεχνολογίας AM. Δεν συμπεριλαμβάνονται τα έσοδα από τις δευτερογενείς διαδικασίες, όπως οι εργαλειομηχανές, τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται από αυτά τα εργαλεία, χυτά τμήματα ή μέρη κατεργασμένα με CNC. Επίσης, αποκλείονται οι σχεδιαστικές διαδικασίες, η χρήση CAD/CAM/CAE συστημάτων και ένα γενικότερο φάσμα επιπρόσθετων ενεργειών [8].



Εικόνα 7: Εκτιμήσεις εσόδων από την τεχνολογία AM για την περίοδο 1994 έως 2017 [8].

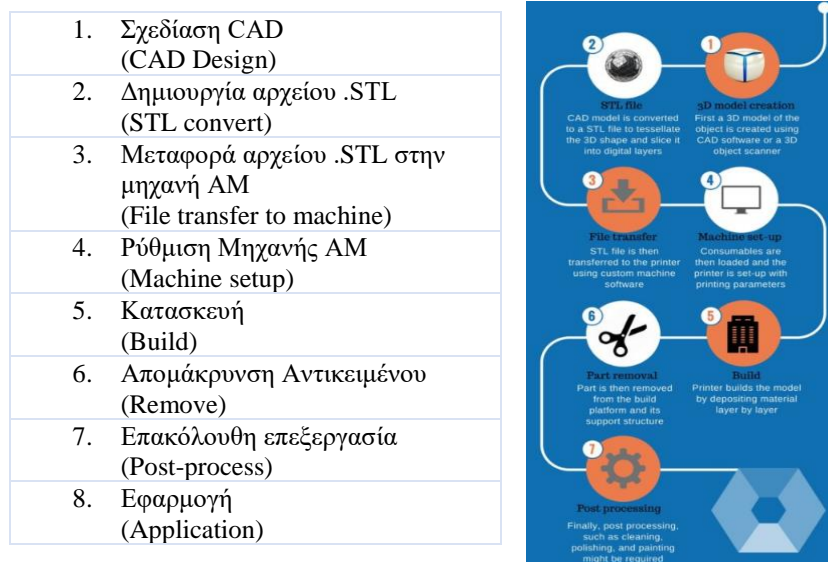
1.2 Μελέτη της Κατασκευαστικής Διαδικασίας των Τεχνολογιών AM

1.2.1 Εισαγωγή στα Στάδια Κατασκευής των τεχνολογιών AM

Η τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής έχει αναπτυχθεί στηριζόμενη στην συνεχή βελτίωση τόσο της ποιότητας των υλικών όσο και της ακρίβειας του τελικού προϊόντος. Το μοντέλο που δημιουργείται παρέχει πληροφορίες στον υπεύθυνο της κατασκευής για το Σχήμα (Form), την Εφαρμογή (Fit) και την Λειτουργία (Function), γεγονός που προσδιορίζεται στον βιομηχανικό κλάδο με τον όρο “3 Fs”. Για την ολοκληρωμένη δημιουργία ενός μοντέλου δρομολογούνται μια σειρά από ενέργειες. Αυτή που καθίσταται ως βασική σε κάθε διαδικασία είναι η επιλογή της μηχανής, αφού διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό την επιτυχή έκβαση της κατασκευαστικής διαδικασίας και κατ’ επέκταση τον υψηλό βαθμό ποιότητας [1].

Στο πρώτο στάδιο της προετοιμασίας κάθε κατεργασίας είναι αναγκαίο να μελετηθεί η τεχνολογία AM που θα χρησιμοποιηθεί, αφού κάθε μοντέλο απαιτεί την χρήση διαφορετικών μέσων κατεργασίας. Για παράδειγμα, για μικρά και σχετικά απλά προϊόντα, μπορεί να γίνει χρήση τεχνολογιών AM μόνο για οπτικοποίηση των μοντέλων, ενώ για μεγαλύτερα και πιο σύνθετα προϊόντα μπορεί να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες AM σε διαφορετικά στάδια κατά την διαδικασία ανάπτυξης του τελικού προϊόντος. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση που στα πρώτα στάδια της διαδικασίας ανάπτυξης του προϊόντος απαιτείται υψηλή τραχύτητα, γίνεται χρήση AM με βάση την ταχύτητα με την οποία μπορούν να κατασκευαστούν τα αντικείμενα. Σε μεταγενέστερα στάδια της διαδικασίας, τα μέρη μπορεί να απαιτούν προσεκτικό καθαρισμό και περαιτέρω επεξεργασία πριν να χρησιμοποιηθούν (όπως λείανση, προετοιμασία της επιφάνειας, βαφή). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι τεχνολογίες αυτές είναι χρήσιμες λόγω της ευκολίας κατασκευής αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένα εργαλεία και εξοπλισμός [1,2].

Επιγραμματικά, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 8, τα στάδια που ακολουθούνται για την δημιουργία ενός μοντέλου μέσω της τεχνολογίας AM είναι τα παρακάτω:



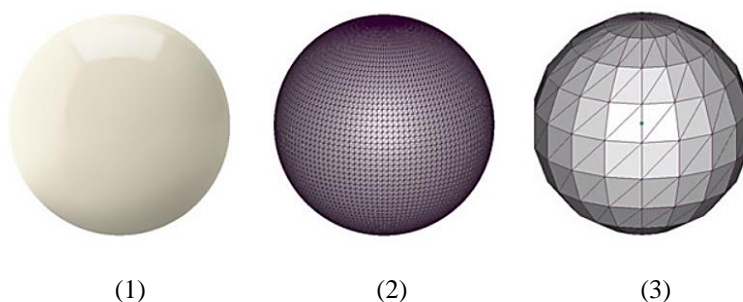
Εικόνα 8: Τα στάδια κατασκευής βήμα προς βήμα.

Παρατηρώντας τα στάδια της διαδικασίας και συγκρίνοντάς τα με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, γίνεται εμφανής η σπουδαιότητα της δημιουργίας .STL αρχείου αμέσως μετά την σχεδιαστική διαδικασία μέσω CAD συστήματος. Πρόκειται για ένα αρχείο

που δημιουργήθηκε το 1987 από την εταιρία 3D Systems Inc., η οποία έθεσε και τις βάσεις για την εξέλιξη της πρώτης μεθόδου ταχεία πρωτοτυποποίησης, της Στερεολιθογραφίας (STereoLithography). Μέσω αυτής της μεθόδου τέθηκαν οι βάσεις και αποδόθηκε η ονομασία αυτή στο σχετικό αρχείο, ενώ πολλοί ειδικοί χρησιμοποιούν και τον όρο “Πρότυπη Γλώσσα Δημιουργίας Προκαθορισμένου Σχεδίου μέσω Επαναλαμβανόμενης Διαδικασίας με Διάταξη Μορφών Στενά Τοποθετημένων μαζί, χωρίς Κενά ή Αλληλοεπικαλύψεις” (Standard Tessellation Language).

Μέσω της διαδικασίας δημιουργίας ενός αρχείου STL μετατρέπεται κυρίως η συνεχής γεωμετρία του μοντέλου στο αρχείο CAD σε μια κεφαλίδα, μικρά τρίγωνα, ή συντονίζεται ή τριπλή λίστα των συντεταγμένων x, y και z και αποδίδεται το κανονικό διάνυσμα στα τρίγωνα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 9 [5]. Ουσιαστικά, προσεγγίζεται η επιφάνεια του μοντέλου μέσα από μια σειρά διαδοχικών τριγώνων. Το μέγεθος του κάθε τριγώνου υπολογίζεται στην πραγματικότητα με βάση την ελάχιστη απόσταση μεταξύ του επιπέδου που αντιπροσωπεύει το τρίγωνο και της επιφάνειας. Με άλλα λόγια, ένας βασικός εμπειρικός κανόνας είναι να διασφαλιστεί ότι η μετατόπιση του ελάχιστου τριγώνου που θα σχηματιστεί, είναι μικρότερη από την ανάλυση της μηχανής AM που θα χρησιμοποιηθεί. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η διαδικασία μετατροπής ενός αρχείου τρισδιάστατης σχεδίασης σε .STL είναι αυτόματη στα περισσότερα συστήματα CAD, με υπαρκτή, όμως, την πιθανότητα να προκύψουν σφάλματα κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Για αυτό το λόγο, έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος εργαλείων λογισμικού για την ανίχνευση τέτοιων σφαλμάτων και τη διόρθωσή τους στην περίπτωση που αυτή επιτυγχάνεται [1].

Αυτό που καθίσταται δύσκολο μέσα από το αρχείο .STL, είναι η αδυναμία προσέγγισης διαφορών πληροφοριών που αφορούν το μοντέλο, όπως είναι το χρώμα, το υλικό, οι διαστάσεις και κάποια γενικότερα χαρακτηριστικά. Αυτοί οι περιορισμοί, έχουν οδηγήσει στην υιοθέτηση μιας νέας μορφής αρχείου, την AMF, η οποία έχει πιστοποιηθεί από την διεθνή κοινότητα [1].



Εικόνα 9: Οπτική Αναπαράσταση: (1) Μορφής αρχείου από λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης, (2) Μορφής αρχείου .STL υψηλής ανάλυσης, (3) Μορφής αρχείου .STL χαμηλότερης ανάλυσης [3]

1.2.2 Ανάπτυξη των σταδίων κατασκευής

Το πρώτο στάδιο σε κάθε κατασκευαστική διαδικασία αφορά στην σύλληψη της ιδέας και στην παράθεση του στόχου της εκάστοτε κατασκευής. Μελετάται η λειτουργικότητα του, η εμφάνιση του και ουσιαστικά δημιουργείται ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο με βάση την ιδέα που προϋπάρχει. Στις περιπτώσεις των τεχνολογιών AM κρίνεται απαραίτητη η ψηφιοποίηση του φυσικού μοντέλου, σε μορφή συμβατή με τις απαιτήσεις των συστημάτων των συγκεκριμένων τεχνολογιών. Αυτό πραγματοποιείται με την χρήση των λογισμικών συστημάτων τρισδιάστατης μοντελοποίησης CAD, όπου γίνεται ακριβής απεικόνιση του μοντέλου. Υπάρχουν μια πληθώρα τρόπων με τους οποίους επιτυγχάνεται η ψηφιακή τρισδιάστατη απεικόνιση. Συγκεκριμένα, ένας έμπειρος σχεδιαστής τρισδιάστατων μερών

μπορεί να αποδώσει με ακρίβεια το προς κατασκευή μοντέλο. Επίσης ένα λογισμικό ως μέρος ενός αυτοματοποιημένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης, η χρήση εξοπλισμού ανάστροφης μηχανικής για την σάρωση ενός ήδη υφιστάμενου τεμαχίου με χρήση τρισδιάστατου σαρωτή (3D scanning) ή ο συνδυασμός όλων, μπορούν να δημιουργήσουν την ψηφιακή μορφή που επιθυμεί ο κατασκευαστής. Τα περισσότερα σύγχρονα εργαλεία CAD μοντελοποίησης μπορούν να αποδώσουν ξεκάθαρες γεωμετρικές αναπαραστάσεις ενός τμήματος. Ουσιαστικά, αυτό το στάδιο είναι το θεμέλιο για την πραγματοποίηση των επακόλουθων σταδίων.

Η δημιουργία .STL αρχείου ή και άλλων πανομοιότυπων μορφών, όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, πραγματοποιείται από το ήδη υπάρχον CAD αρχείο. Σχεδόν όλα τα μηχανήματα προσθετικής προσέγγισης δέχονται αρχεία αυτής της μορφής, όπου τα αποκωδικοποιούν με βάση το λειτουργικό σύστημα τους για να πραγματοποιηθεί η κατασκευή. Παράλληλα σχεδόν όλα τα συστήματα CAD μπορούν να εξάγουν αυτά τα αρχεία. Η κρισιμότητα αυτού του αρχείου έγκειται στην ικανότητα περιγραφής της κλειστής εξωτερικής επιφάνειας του πρωτότυπου μοντέλου CAD και στην δημιουργία της βάσης για το σχηματισμό των τομών.

Σε επόμενο στάδιο, θεωρείται τελειοποιημένη η δημιουργία και η επιδιόρθωση του αρχείου .STL, ώστε να σταλεί αμέσως στο μηχάνημα AM. Σε αυτή τη φάση πρέπει να ελεγχθούν κάποιες σημαντικές λεπτομέρειες, όπως η επαλήθευση της ορθής απεικόνισης και τοποθέτησης του μέρους, γεγονός που μπορεί να επιτευχθεί μέσα από τα εργαλεία οπτικής παρακολούθησης και χειρισμού που διαθέτουν τα μηχανήματα AM. Πρακτικά ελέγχονται θέματα τοποθέτησης, προσανατολισμού, μεγέθους και λεπτομέρειες που σχετίζονται με την λειτουργία του εκάστοτε μηχανήματος.

Στο στάδιο της ρύθμισης της μηχανής λαμβάνονται υπόψιν μια σειρά παραμέτρων ελέγχων, που διαφοροποιούνται σε κάθε κατασκευή και σχετίζονται κατά κύριο λόγο με την ποιότητα του προς κατασκευή μέρους. Ελέγχεται το πάχος κάθε στρώσης, οι κατασκευαστικοί παράμετροι ανάλογα με την πρώτη ύλη που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και ο χρόνος κατασκευής, ο οποίος επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων. Λανθασμένες ρυθμίσεις μπορούν να επιφέρουν κακό ποιοτικό αποτέλεσμα. Επιπρόσθετα, κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος της ποσότητας της πρώτης ύλης και της ορθής λειτουργίας των εξαρτημάτων κάθε μηχανήματος, όπως της πλάκας κατασκευής (build plate). Πολλές φορές πρόκειται για αυτοματοποιημένες διαδικασίες κατά την εκκίνηση της κατασκευής, αλλά στην πλειονότητα των περιπτώσεων κρίνεται απαραίτητος ο χειροκίνητος έλεγχος από τον εκάστοτε χειριστή.

Η φάση της κατασκευής εξαρτάται ολοκληρωτικά από τον υπολογιστή. Πρόκειται για την διαδικασία της στρωματοποίησης, δηλαδή της δημιουργίας των διαδοχικών στρώσεων. Σε αυτή την διαδικασία, αφού έχουν ελεγχθεί ο μηχανισμός εναπόθεσης της πρώτης ύλης, το ύψος της βάσης τοποθέτησης και κατασκευής του μέρους, καθώς και η κεφαλή του εργαλείου που θα προκαλέσει την απόθεση, πραγματοποιείται η κατασκευή. Σε κάποιες μηχανές πραγματοποιούνται ταυτόχρονα η εναπόθεση της πρώτης ύλης και η στρωματοποίηση, ενώ σε κάποιες άλλες γίνονται ξεχωριστά. Όσο δεν εμφανίζονται σφάλματα, η κατασκευή θα συνεχίζει να εκτυλίσσεται μέχρι να ολοκληρωθεί.

Μετά το πέρας της κατασκευαστικής φάσης, ιδανικά το μέρος πρέπει να είναι έτοιμο για άμεση χρήση χωρίς την ανάγκη επακόλουθης παρέμβασης, γεγονός το οποίο δεν συμβαίνει συχνά. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής, το τεμάχιο είτε απομακρύνεται από την πλατφόρμα που είναι τοποθετημένο είτε αφαιρείται από το πλεονάζον υλικό που το περιβάλλει. Σε αυτό το στάδιο της απομάκρυνσης του αντικειμένου, απαιτείται αρκετή χειρωνακτική εργασία και θεωρείται κρίσιμη η διαχείρισή του από έμπειρους χειριστές ώστε να μην προκληθούν ζημιές κυρίως στην εξωτερική επιφάνεια του μέρους. Σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται στάδιο πρώιμης επεξεργασίας μετά την κατασκευή, ενώ ακολουθεί η μετέπειτα επεξεργασία.

Το στάδιο της επακόλουθης επεξεργασίας, αναφέρεται κυρίως στην χειροκίνητη επεξεργασία που δέχεται το κατασκευασμένο μέρος ώστε να φτάσει στην τελική και επιθυμητή

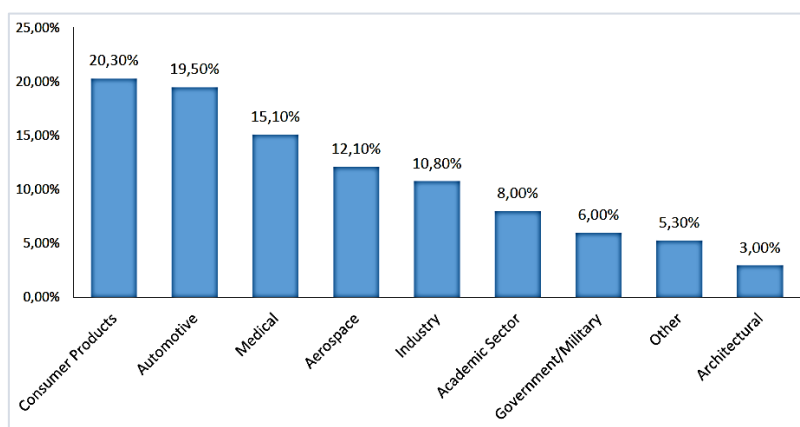
μορφή. Πρόκειται για μια διαδικασία που απαιτεί λεπτό χειρισμό ανάλογα με την ευαισθησία του μέρους και μελέτη του κατάλληλου τρόπου επεξεργασίας, όπως το γυάλισμα ή η αφαίρεση στιγμάτων. Μπορεί να απαιτηθεί χημική ή θερμική επεξεργασία, πάντα με προσοχή να μην προκληθεί αλλοίωση στην ποιότητα της υπάρχουσας κατασκευής. Ουσιαστικά ολοκληρώνεται η κατασκευή με την διόρθωση κάποιων λεπτομερειών.

Όσον αφορά το τελευταίο στάδιο, το κατασκευασμένο μέρος είναι έτοιμο για χρήση. Πολλές φορές το κατασκευασμένο μέρος αποτελεί στοιχείο μιας μεγαλύτερης κατασκευής και χρειάζεται να συνδεθεί με άλλα μηχανικά ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα για να ολοκληρωθεί η αρχική κατασκευή [1,2].

1.3 Εφαρμογές της Τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής

Σκεπτόμενοι ότι ένα πεδίο εφαρμογών στον τομέα της τεχνολογίας ορίζει τις βάσεις του από τα πρώιμα ερευνητικά στάδια, οι δραστηριότητες γύρω από την τεχνολογία της Προσθετικής Κατασκευής πραγματοποιήθηκαν τις δεκαετίες 1950-1960, με τις πρώτες επιτυχημένες ευρεσιτεχνίες να δημιουργούνται την δεκαετία του 1980. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι δράσεις γύρω από τον συγκεκριμένο τομέα πραγματοποιούνταν παράλληλα στην Αμερική, στην Ιαπωνία και στην Γαλλία. Καταλυτικό ρόλο κατείχε η ευρεσιτεχνία του Charles Hull το 1983. Πρόκειται για την άμεση ισχυροποίηση της τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω της εμπορικής διάθεσης που πραγματοποίησε για πρώτη φορά η εταιρία 3D Systems. Οι εταιρίες που ηγήθηκαν γύρω από αυτό τον τομέα ήταν η Stratasys, η 3D Systems, καθώς και η ZCorp. Ακολούθως, ένα σημαντικό ποσοστό εταιριών σε όλο τον κόσμο επέλεξε να δραστηριοποιηθεί σε αυτό τον τομέα, με την Γερμανική εταιρία EOS και την Ισραηλινή Cubital να αποκτούν σημαντικό προβάδισμα μέσω των εξελικτικών και καινοτόμων μεθόδων που εφάρμοσαν [1].

Η τεχνολογίες AM ξεπερνούν τα κατασκευαστικά όρια που επιβάλλονται από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Λειτουργικά στοιχεία με σύνθετες γεωμετρίες και καθορισμένες αεροδυναμικές ιδιότητες μπορούν να κατασκευαστούν γρήγορα και οικονομικά. Επιτρέπεται η παραγωγή πλέγματος δομών με χαμηλή πυκνότητα, υψηλή αντοχή, καλή απορρόφηση ενέργειας και θερμικές ιδιότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως οι εναλλάκτες θερμότητας στις αεροδιαστημικές και ηλεκτρονικές βιομηχανίες, καθώς και στις αυτοκινητοβιομηχανίες. Επιπρόσθετα μπορεί να αυξηθεί η αποδοτικότητα των διαδικασιών R&D, επιτρέποντάς την ταχύτερη διάθεση των προϊόντων στην αγορά και αποφεύγοντας την ανάγκη για αποθήκευση [3].



Εικόνα 10: Κατανομή εφαρμογών των τεχνολογιών AM σε διάφορους κλάδους της βιομηχανίας [12].

Διάφορες έρευνες, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 10, ισχυροποιούν την εδραίωση αυτών των τεχνολογιών στην παγκόσμια βιομηχανία, μέσα από μια σειρά εφαρμογών. Παρατηρείται εξέλιξη στο κόστος της παραγωγής, στις ιδιότητες των υλικών, καθώς και την ποιότητα και την ακρίβεια των εξαρτημάτων. Οι τεχνολογίες αυτές θεωρούνται ευρέως ως μια ευέλικτη και οικονομικά αποδοτική λύση για την παραγωγή τόσο απαιτητικών όσο και πολυσύνθετων προϊόντων [49].

Εστιάζοντας στους διάφορους κατασκευαστικούς τομείς, μια σημαντική εφαρμογή παρατηρείται στην δυνατότητα κατασκευής ελαφριών μηχανισμών (lightweight machines). Τόσο στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας όσο και σε αυτόν της αεροδιαστημικής, ο κύριος στόχος είναι να σχεδιαστεί το πιο ελαφρύ πρακτικό αυτοκίνητο ή αεροσκάφος διατηρώντας τα επίπεδα ασφάλειας και ποιότητας. Μέσω των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής έγινε εφικτή η δημιουργία σύνθετων περιοχών διατομής όπως το κυψελοειδές κύτταρο ή κάθε άλλο υλικό μέρος που περιέχει κοιλότητες και εγκοπές, οι οποίες μειώνουν τη σχέση βάρους-αντοχής. Οι SLS και EBM μέθοδοι αξιοποιούνται από τις αεροναυπηγικές και τις αεροδιαστημικές βιομηχανίες, με τους μηχανικούς να έχουν την δυνατότητα εκτέλεσης σχεδιαστικών μοντέλων εντός των κατασκευαστικών περιορισμών, σε συνδυασμό με την δυνατότητα αξιοποίησης ενός διευρυμένου φάσματος επιλογών.



Εικόνα 11: Κατασκευή μερών εσωτερικής δομής ενός κλασικού VW Caddy (αριστερά) και το drone THOR (δεξιά) με τρισδιάστατη εκτύπωση.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 11, καθώς το εμπρόσθιο μέρος της εσωτερικής δομής του κλασικού VW Caddy περιελάμβανε παθητική ψύξη (passive cooling), σχεδιάστηκαν κανάλια αέρα για να ψύχουν τις μπαταρίες και τα συστήματα πέδησης (braking systems). Επιπλέον ενσωματώθηκαν χαρακτηριστικά ασφάλειας, αποθήκες ρευστών και λειτουργίες που σχετίζονται με την διαχείριση της θερμότητας [50]. Στον τομέα της αεροδιαστημικής, η εταιρία Airbus παρουσίασε το drone THOR (Test of High-Tech Objectives in Reality) στην Διεθνή έκθεση Αεροδιαστημικής το 2016 στο Βερολίνο. Αυτό το γεγονός αποτέλεσε την αρχή μιας σειράς εφαρμογών βασισμένες στην τρισδιάστατη εκτύπωση [51].

Ακολουθώντας, στον κλάδο της αεροναυπηγικής έχουν ήδη δημιουργηθεί λειτουργικά μέρη από την αξιοποίηση των τεχνολογιών AM. Η GE αεροπορία σχεδιάζει έναν καινούργιο κινητήρα αεροσκάφους, ο οποίος θα περιλαμβάνει κρίσιμα μεταλλικά μέρη κατασκευασμένα με την προσθετική προσέγγιση, έχοντας ως στόχο την εξοικονόμηση του βάρους, την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, της αξιοπιστίας και του συνολικού κόστους. Αντιστοίχως, η Boeing χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες αυτές πάνω από μια δεκαετία, για την παραγωγή αγωγών (ducts) και ηλεκτρονικών καλυμμάτων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σήμερα, χρησιμοποιεί την προσθετική μέθοδο για την δημιουργία περισσότερων από 20.000 διαφορετικών μερών σε περισσότερα από 10 στρατιωτικά και εμπορικά αεροσκάφη.

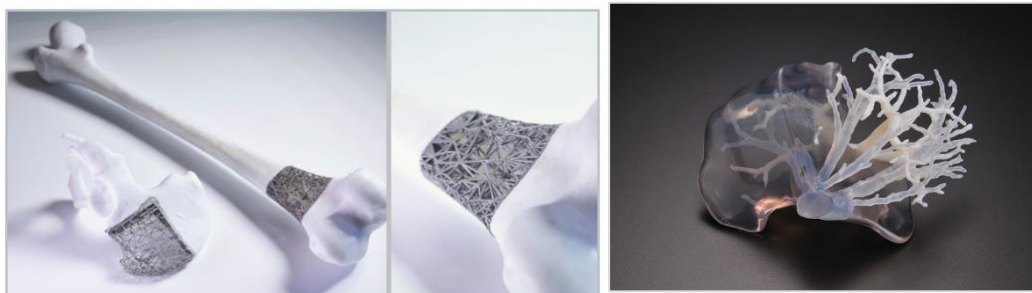
Ένας άλλος τομέας στον οποίο η συμβολή αυτών των τεχνολογικών μεθόδων κρίνεται σπουδαία, είναι ο Αρχιτεκτονικός και ο Αστικός Σχεδιασμός (Architectural Modeling, Civil Construction). Η δημιουργία φυσικών μοντέλων καθίσταται πολύ σημαντική στους τομείς αυτούς, κυρίως για την μελέτη της λειτουργικότητας των χώρων που δημιουργούν και της συνολικής εικόνας που θα παρουσιαστεί στους πελάτες. Η διαδικασία αυτή απλουστεύεται με την δημιουργία των μοντέλων μέσω των τεχνολογιών αυτών. Αυτό που παρατηρείται έντονα είναι η μείωση του συνολικού βάρους του μοντέλου και η δυνατότητα δημιουργίας πολύ πολύπλοκων κατασκευών. Μέσω της μεθόδου της Στερεολιθογραφίας (SLA), οι μηχανικοί αποκτούν το μοντέλο που έχουν σχεδιάσει ψηφιακά με υψηλή ανάλυση εκτύπωσης και πολύ καλή ποιότητα πρώτης ύλης.



Εικόνα 12: Εφαρμογή των τεχνολογιών AM στον κλάδο της αρχιτεκτονικής.

Καταλυτική είναι η αξιοποίηση αυτών των τεχνολογιών από τον Ιατρικό κλάδο. Μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές είναι η δημιουργία οστών για την διαδικασία της μεταμόσχευσης των οστών (bone transplants) και της δημιουργίας οστών προς επιδιόρθωση. Μέσα από μια διαδικασία ανάλυσης της περίπτωσης κάθε ασθενή, οι τεχνολογίες AM επιτρέπουν την σάρωση (scanning) και την κατασκευή ενός ελαττωματικού οστού, δίνοντας την δυνατότητα στον γιατρό να μελετήσει ευκολότερα την μέθοδο που πρέπει να ακολουθήσει. Κατασκευάζοντας ένα οστό με αυτές τις διαδικασίες δεν υπάρχει μόνο λεπτομερής απόδοση στο τελικό αποτέλεσμα, αλλά και καλύτερος συνδυασμός κόστους-χρόνου.

Λόγω της απεριόριστης μορφής ή του σχήματος που θα μπορούσε να κατασκευαστεί, οι γιατροί έχουν την επιλογή να δημιουργήσουν ένα πορώδες ελεγχόμενο υλικό που θα επιτρέπει την οστό-αγωγιμότητα ή τη δημιουργία ενός όμοιου με το πρωτότυπο μεταμόσχευμα από μέταλλο, ανάλογα με το προς αντικατάσταση οστό. Χαρακτηριστικά των μοσχευμάτων όπως η πυκνότητα, το σχήμα και το μέγεθος των πόρων και η διασύνδεση των πόρων είναι σημαντικές παράμετροι που θα επηρεάσουν την ανάπτυξη των ιστών και τις μηχανικές ιδιότητες του εμφυτευμένου οστού. Η μηχανική αντοχή αυτών των εμφυτευμάτων είναι τρεις έως πέντε φορές υψηλότερη σε σύγκριση με τις άλλες διεργασίες, καθώς επίσης μειώνεται η πιθανότητα φλεγμονής που προκαλείται από μικροθραύσματα που διασπώνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας [5].



Εικόνα 13: Οστό και μια λεκάνη με εμφύτευμα από τιτάνιο με μορφή πλέγματος που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Κέντρο RMIT (αριστερά)

Επιπρόσθετα, ένα φάσμα εφαρμογών στον τομέα της Ιατρικής εστιάζεται στην δημιουργία επιπρόσθετων θηκών (prosthetic sockets) μέσω της μεθόδου SLA και όχι μόνο. Τόσο οι οδοντίατροι όσο και άλλες ειδικότητες μπορούν να κατασκευάσουν το μοντέλο που επιθυμούν με έναν πιο αποτελεσματικό τρόπο, ο οποίος θα είναι λιγότερο χρονοβόρος. Παράλληλα, καθίσταται δυνατή η εκτύπωση κελιών (cells) σε μια τρισδιάστατη συστοιχία με τη δυνατότητα της εκτύπωσης σύνθετων σχημάτων και συστοιχιών του ανθρώπινου ιστού. Αυτή η τεχνολογία βοηθάει τους ασθενείς που έχουν απώλεια ιστών (tissue) είτε σε ατυχήματα είτε από άλλους λόγους να ανακάμψουν γρηγορότερα. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση κελιών δίνει τη δυνατότητα κατασκευής αγγείων με τεχνητό αίμα (artificial blood vessels) με πολυδιάστατη εφαρμογή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη χειρουργική επέμβαση στεφανιαίας αρτηριακής παράκαμψης (coronary bypass surgery) ή σε οποιαδήποτε άλλη διαδικασία αιμοφόρων αγγείων ή καρδιαγγειακών ασθενειών. Η εκτύπωση κυττάρων δεν περιορίζεται μόνο στην εκτύπωση ανθρώπινου ιστού, αλλά χρησιμοποιείται και στον τομέα των μοριακών ηλεκτρονικών συστημάτων (molecular electronics). Η ακρίβεια των διαδικασιών υψηλής ανάλυσης όπως η νανολιθογραφία (nanolithography) και η φωτολιθογραφία (photolithography), επιτρέπει τη δημιουργία βιοχημικών και βιοαισθητήρων.

Ο τομέας των καυσίμων έχει εξελιχθεί μέσω των κατασκευαστικών βελτιώσεων των κυψελών καυσίμου (fuel cells). Οι τεχνολογίες AM μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες που απαιτούν την δημιουργία ενός πολύ λεπτού φιλμ συγκεκριμένου υλικού. Στην κατασκευή κυψελών καυσίμου μεμβράνης πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC), είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί με ακρίβεια ένα πολύ λεπτό στρώμα πλατίνας, που απαιτείται για την οξείδωση και τη μείωση των αντιδράσεων. Αυτό καθίσταται κρίσιμο στην περίπτωση μαζικής χρήσης της διαδικασίας αυτής.

Ο τομέας της μόδας, της κατασκευής επίπλων και πολλοί κλάδοι της βιομηχανίας που εστιάζουν στην μαζική παραγωγή και επιδιώκουν την δημιουργία πολυσύνθετων μοντέλων, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους στις τεχνολογίες AM. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι οι τεχνολογίες αυτές αξιοποιούνται και από ένα ευρύτερο φάσμα ανθρώπων που οικειοποιούνται ένα μέρος της τεχνολογίας για δικούς τους προσωπικούς σκοπούς. Πρόκειται για μια επανάσταση που άρχισε το 2007 με την πώληση εκτυπωτών που κόστιζαν έως \$500 και περιλάμβαναν μια παραλλαγή της μεθόδου FDM. Για την σωστή χρήση και την εκτέλεση ολόκληρης της διαδικασίας μοντελοποίησης χρειαζόταν η σχετική γνώση, γεγονός που οδήγησε σε ένα καινούριο πεδίο εφαρμογών. Πληθώρα εταιριών ξεκίνησαν την εξέλιξη των τεχνολογιών AM και στον τομέα της μαζικής εμπορικής διάθεσης.



Εικόνα 14: Λεπτή δομή πλέγματος σκελετού γυαλιών τιτανίου.

Κεφάλαιο 2

Κατασκευή Βάσης Προβολέα Μοτοσυκλέτας

2.1 Εισαγωγή

Η δημιουργία προβολέα (headlight) μοτοσυκλέτας κρίθηκε απαραίτητη για τις ανάγκες μιας εργαστηριακής κατασκευής που πραγματοποιείται από ερευνητική ομάδα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Ο σκοπός ήταν η κατασκευή αριστερής βάσης προβολέα με την αξιοποίηση του υπάρχοντος μηχανήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς και η τελική αξιολόγησή τους όσον αφορά το ποιοτικό αποτέλεσμα.

Η συνεργασία με τον κ.Σπανουδάκη Πολυχρόνη ήταν σημαντική σε κάθε φάση της κατασκευής, ενώ η πραγματοποίηση της έλαβε χώρα στο εργαστήριο Τεχνολογίας Κυκλωμάτων και Αυτοματισμών (Laboratory of Electronic Circuits & Automation) στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Κρήτης (Τ.Ε.Ι Κρήτης), στο τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, με την βοήθεια του κ.Δοϊτσίδα Ελευθέριου.

Η κατασκευή ξεκίνησε με την παραλαβή του αρχείου .stl της σχεδιασμένης βάσης σε πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης. Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε από την ομάδα του έργου, έχοντας γνώση των προδιαγραφών που έπρεπε να πληρούνται και της μορφής που επιθυμούσαν να δώσουν. Τα επόμενα βήματα αφορούσαν στην εγκατάσταση του λογισμικού προγράμματος του εκτυπωτή Da Vinci 3D της εταιρίας XYZprinting στον υπολογιστή και στην κατανόηση λειτουργίας του. Προχωρώντας στην εκτέλεση του έργου, η σωστή τοποθέτηση του αντικειμένου στον ψηφιακό χώρο του λογισμικού XYZware Pro, η επιλογή των κατασκευαστικών παραμέτρων, καθώς και η μετέπειτα διαδικασία εκτύπωσης, καθόρισαν την τελική μορφή του εξαρτήματος.

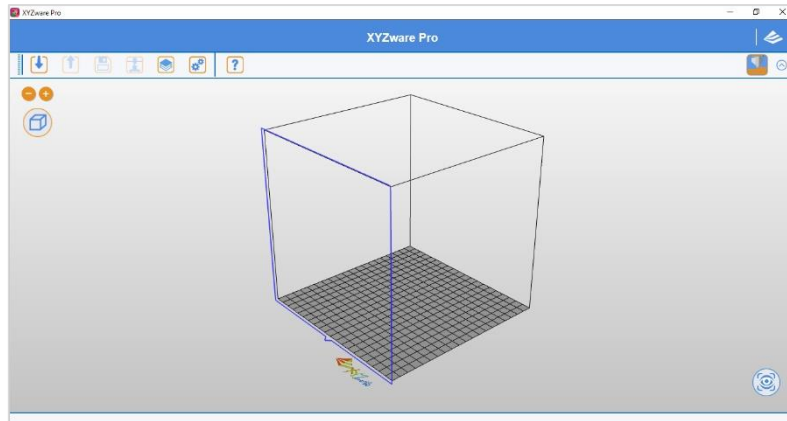
2.2 Πληροφορίες Κατασκευαστικής Διαδικασίας

2.2.1 Λογισμικό XYZware Pro και Εκτυπωτής Da Vinci 3D

Η ψηφιακή εφαρμογή XYZware αποτελεί ένα καινούριο περιβάλλον εργασίας που αναπτύχθηκε από την εταιρία XYZprinting με σκοπό τον σχεδιασμό, την προσαρμογή και την εκτύπωση μοντέλων τρισδιάστατης γεωμετρίας. Αντικείμενα σε μορφή αρχείου .stl μπορούν να εισαχθούν και να προσομοιωθούν ρεαλιστικά με τη βοήθεια της εφαρμογής. Σε συνδυασμό με τη χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών Da Vinci 3D, δίνεται η δυνατότητα κατασκευής πολυμορφικών αντικειμένων, ξεπερνώντας πιθανά εμπόδια και στάδια που εμφανίζονται στους παραδοσιακούς τρόπους κατασκευής.

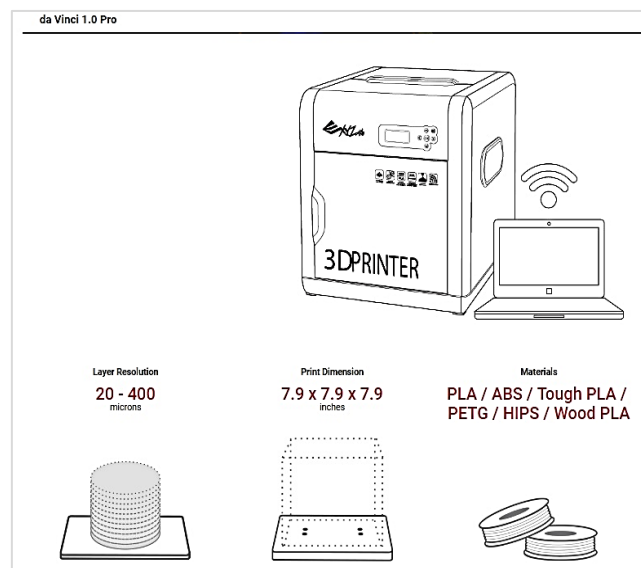
Το περιβάλλον του προγράμματος είναι απλό και κατανοητό, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 15. Πριν την εισαγωγή του αρχείου, γίνεται έλεγχος των βασικών ρυθμίσεων (Settings), όπως είναι η επιλογή γλώσσας - Αγγλικά, η μονάδα απεικόνισης (display unit) σε χιλιοστά (mm), ο εκτυπωτής που θα χρησιμοποιηθεί - da Vinci 1.0 Pro και η χρωματική απεικόνιση του αντικειμένου στο περιβάλλον της εφαρμογής. Όσον αφορά την τελευταία παράμετρο, το χρώμα του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή μπορεί να διαφέρει από αυτό που θα επιλέξουμε να εμφανίζεται στο περιβάλλον την εφαρμογής. Στην περίπτωση μας, έγινε επιλογή χρώματος «μπλε» στο περιβάλλον του λογισμικού, ενώ το τελικό αντικείμενο είχε χρώμα «λευκό».

Ο εκτυπωτής da Vinci 1.0 Pro αποτελεί ένα επαγγελματικό μηχάνημα τρισδιάστατης εκτύπωσης, το οποίο δέχεται ως πρώτη ύλη πλαστικά νήματα (plastic filament) και υποστηρίζει κώδικα-G. Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης νημάτων κατάλληλων για τρισδιάστατη εκτύπωση από υλικά όπως ABS, PLA, PETG και HIPS. Στην περίπτωση μας έγινε χρήση ABS πλαστικού. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η πραγματοποίηση κάθε κατασκευής μόνο μέσω



Εικόνα 15: Περιβάλλον του λογισμικού XYZware Pro.

της ασύρματης σύνδεσης του υπολογιστή με το μηχάνημα. Επιπλέον, ο κατασκευαστής έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει αντικείμενα με ανάλυση στρώσεων (layer resolution) από 20 έως 400 μικρόμετρα. Επιπρόσθετα, η κατασκευή πραγματοποιείται σε κλειστό περιβάλλον, αποδίδοντας πιο σταθερή ποιότητα εκτύπωσης, ενώ το τραπέζι ή κρεβάτι της εκτύπωσης (print bed) είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο και θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Λόγω της θερμότητας επιτυγχάνεται ομοιόμορφη στρώση και μειώνονται οι πιθανότητες κάμψης ή στρέβλωσης (warpage) του υλικού. Ο εκτυπωτής έχει δυνατότητα εκτύπωσης αντικειμένων με διαστάσεις 200 x 200 x 200 mm ή αλλιώς 7.9 x 7.9 x 7.9 inches [52].



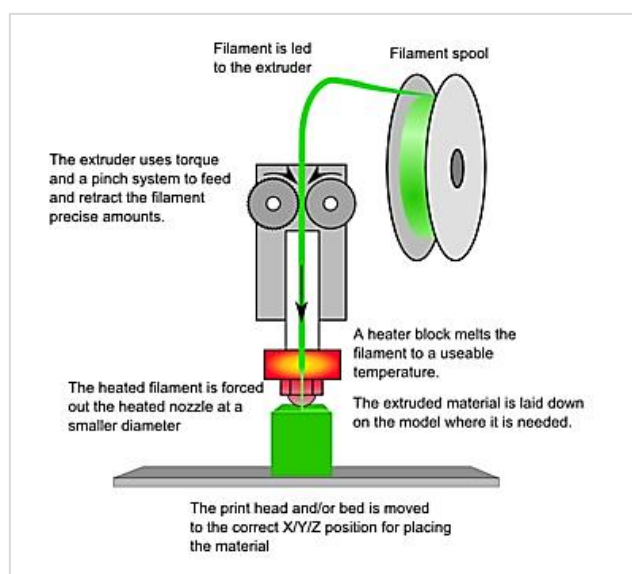
Εικόνα 16: Βασικές παράμετροι του εκτυπωτή da Vinci 1.0 Pro [52].

2.2.2 Μέθοδος Κατασκευής με Σύντηξη Νήματος (FFF)

Η μέθοδος Κατασκευής με Σύντηξη Νήματος αναγνωρίζεται και με τους όρους «Κατασκευή Ελεύθερης Μορφής» (FFF) και «Μοντελοποίηση Συντηκόμενης Εναπόθεσης» (FDM), καθώς πρόκειται για μια από τις πιο χρήσιμες μορφές κατασκευής μερών. Ιστορικά, εφευρέθηκε από τον Scott Crump [53], ο οποίος το 1989 κατοχύρωσε την τεχνολογία ως πατέντα. Η μέθοδος τέθηκε σε εμπορική ισχύ στις αρχές της δεκαετίας του '90 από την εταιρία Stratasys Inc. με την κατασκευή τρισδιάστατων εκτυπωτών όπως ο FDM 300, ο FDM

Maximum και ο FDM Titan. Πρακτικά χρησιμοποιούνται οι ονομασίες FFF από άλλες εταιρίες που αξιοποιούν αυτό τον τρόπο κατασκευής, αφού η εταιρία Stratasys έχει κατοχυρώσει το εμπορικό σήμα FDM.

Η διαδικασία της κατασκευής αποτελείται από συγκεκριμένα στάδια, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 17. Πριν την εκτύπωση, το λογισμικό του εκτυπωτή έχει καθορίσει τον τρόπο με τον οποίο θα πραγματοποιηθούν οι στρώσεις σε κάθε επίπεδο μέχρι την τελική δημιουργία του αντικειμένου. Από την στιγμή που έχει τοποθετηθεί στο μηχάνημα το καρούλι του νήματος (filament spool), ως η πρώτη ύλη, τότε μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία. Το νήμα οδηγείται στο μέσο εξώθησης (extruder), με το οποίο πραγματοποιείται η τροφοδοσία (feed) και η ανάκλαση (retract) της ακριβής ποσότητας του νήματος σε κάθε βήμα. Το μέσο εξώθησης χρησιμοποιεί τη ροπή στρέψης (torque) και ένα σύστημα ρίψης (pitch system) για να δημιουργήσει κάθε στρώση νήματος. Επίσης ένα θερμαινόμενο κομμάτι τήκει το νήμα πριν το στάδιο της τελικής εξώθησης. Με αυτό τον τρόπο, το νήμα που βρίσκεται σε τηκόμενη μορφή περνάει από το θερμαινόμενο ακροφύσιο με μικρότερη διάμετρο και τοποθετείται πάνω στο τραπέζι-βάση της εκτύπωσης στις θέσεις X/Y/Z που έχουν ήδη προγραμματιστεί. Μόλις ολοκληρωθεί η τοποθέτηση μια στρώσης, το τραπέζι της εκτύπωσης αλλάζει θέση προς τα κάτω στην κατεύθυνση του άξονα Z, με σκοπό την πραγματοποίηση τη επόμενης στρώσης. Πρόκειται για μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία.

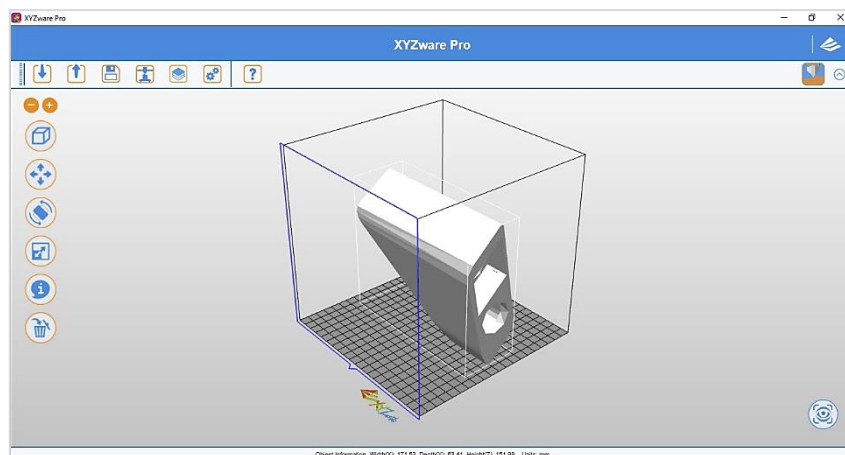


Εικόνα 17: Στάδια μεθόδου Κατασκευής με Σύντηξη Νήματος [54].

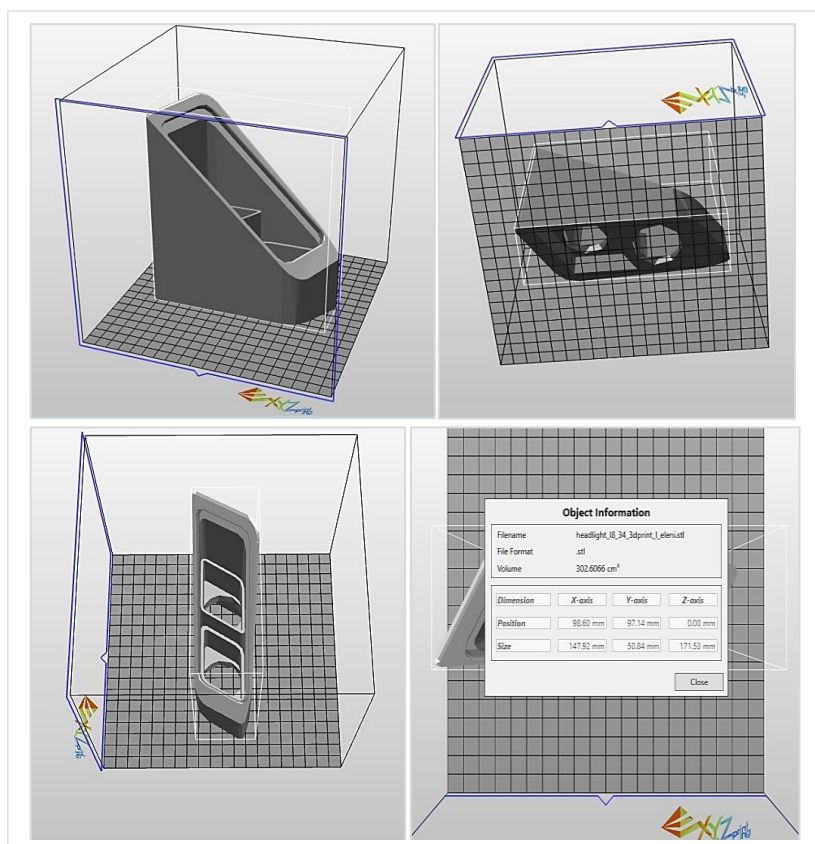
2.3 Στάδια Κατασκευής Αριστερής Βάσης Προβολέα

2.3.1 Λογισμικό XYZware Pro και Σχεδιαστικοί Περιορισμοί

Κάνοντας εισαγωγή το αρχείο .stl της αριστερής βάσης προβολέα (Εικόνα 18), παρατηρήθηκε ότι έπρεπε να αλλάξει η τοποθέτηση του αντικειμένου στον χώρο. Αυξάνοντας την επαφή του αντικειμένου με το τραπέζι της εκτύπωσης επιτυγχάνεται καλύτερη ποιοτική απόδοση. Χρησιμοποιώντας την παράμετρο «Rotate», άλλαξε η θέση του αντικειμένου στον άξονα X κατά 115°, στον άξονα Y κατά 90° και στον άξονα Z κατά 54.9°, επανατοποθετώντας το μέρος όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 18: Εισαγωγή αρχείου .stl στο λογισμικό XYZware Pro.



Εικόνα 19: Τοποθέτηση Αντικειμένου στο τραπέζι εκτύπωσης

Οι διαστάσεις του αντικειμένου είναι 147.92 x 50.84 x 171.53 mm, οι οποίες εισήχθησαν μέσω του αρχείου του σχεδίου. Με βάση το εγχειρίδιο του λογισμικού και την μέθοδο εκτύπωσης, θεωρήθηκε ότι η παραπάνω τοποθέτηση θα αποδώσει ένα καλό ποιοτικό αποτέλεσμα. Βασικός παράγοντας αυτής της επιλογής ήταν η μη χρήση υποστηρικτικού υλικού στα δύο κυκλικά σημεία τοποθέτησης των φωτών. Από την στιγμή που δεν προβλεπόταν η υποστήριξη, η τοποθέτηση αυτής της πλευράς πλησιέστερα στο τραπέζι αύξησε τις πιθανότητες καλύτερου ποιοτικού αποτελέσματος.

Μετέπειτα, ακολούθησε ο καθορισμός των παραμέτρων εκτύπωσης. Συγκεκριμένα έγινε επιλογή του εκτυπωτή και του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί, της θερμοκρασίας του ακροφυσίου και του τραπεζιού εκτύπωσης, παράμετροι σχετικά με το μέγεθος των στρώσεων,

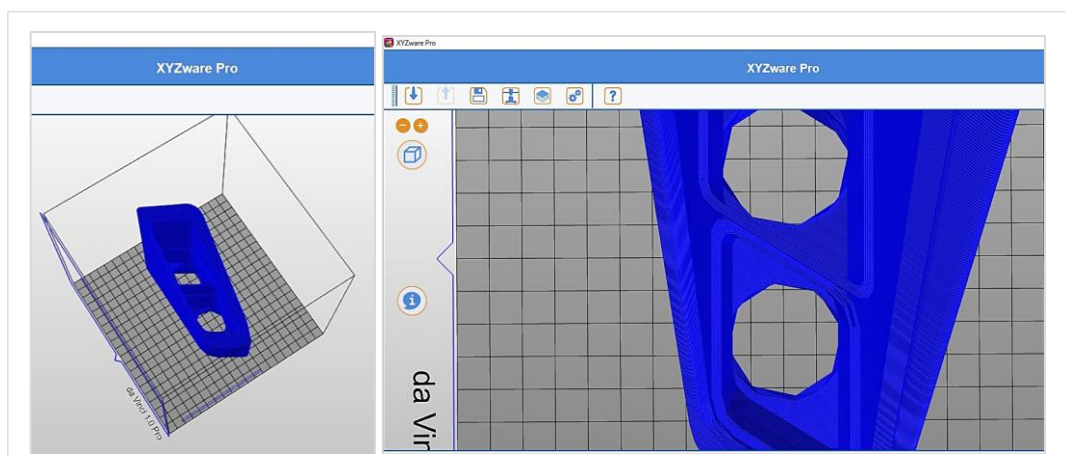
της πυκνότητας και των κελυφών, της ταχύτητας και της ανάκλασης του υλικού. Τα σημαντικότερα σημεία στα οποία έγινε προσεκτική επιλογή τιμών ήταν:

Object Information	
Filename	headlight_16_34_3dprint_l_eleni.3w
File Format	.3w
File Version	XYZWare Pro 1.1.7.5
DRM Protected:	No
Print Count Remaining:	Unlimited
Dimension	X-axis Y-axis Z-axis
Size	147.92 mm 50.84 mm 171.65 mm
Printer	
Material	ABS
Printer Type	da Vinci 1.0 Pro
Estimated Time	11h : 24m : 26s
Estimated UsageCartridge 1	42.131m
Temperature	
Heated Bed Temperature	90°C
Nozzle Temperature	210°C
General	
Layer Height	0.30 mm
Shells	2
Top Surface	3
Bottom Surface	3
Infill Density	Low (10%)
Infill Type	Honey Comb
Speed	
Normal	30 mm/s
Surface	30 mm/s
Small Radius (radius < 2.2mm)	30 mm/s
Normal	30 mm/s
Top Surface	30 mm/s
Solid Infill	30 mm/s
Bridge Printing Speed	20 mm/s
Non-printing movement Speed	45 mm/s
Bottom Layer Speed	20 mm/s
Retract Speed	20 mm/s
Auto Speed Adjustment for small parts	No
Supports	
-- SupportsExtruder	Extruder 1
Raft	No
Brim	No
-- Brim Width	0 mm
Supports	No
-- Density of Supports	High
Retraction	
Retract Length	6 mm
Activate Threshold (minimum travel length)	2 mm
Nozzle Lifting for Retraction	0 mm
Add Extra Filament after Travel < Retraction	0 mm
Retract at beginning of each layer	Yes
Disable retraction within current perimeter	Yes
Extrusion Ratio	
Shell Extrusion Ratio	100 %
Infill Extrusion Ratio	100 %

- Υλικό: ABS
- Το ύψος της στρώσης (layer height) ορίστηκε 0.3 mm, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της χρονικής διάρκειας εκτύπωσης.
- Για το πάχος των κελυφών (shell thickness), δηλαδή τη δομή της επιφάνειας, δόθηκε εντολή να δημιουργηθούν στην βάση και την κορυφή του αντικειμένου (bottom, top) 3 στρώσεις με σκοπό την καλύτερη αντοχή του υλικού, ενώ στην ενδιάμεση επιφάνεια (normal) 2 στρώσεις.
- Για την πυκνότητα της εσωτερικής δομής (infill density) επιλέχθηκε ο σχηματισμός κηρήθρας (honeycomb) και η ποιότητα Low-10% για την ελαχιστοποίηση της χρονικής διάρκειας εκτύπωσης.
- Οι παράμετροι της ταχύτητας δεν τροποποιήθηκαν σε σχέση με τους ήδη υφιστάμενους, δηλαδή κατά μέσο όρο 30 mm/s.
- Το μήκος της ανάκλασης (retract length) του υλικού παρέμεινε 6 mm και η αναλογία εξώθησης (extrusion ratio) στο 100%.
- Η θερμοκρασία του ακροφυσίου 210°C και του τραπεζιού εκτύπωσης 90°C

Μετά την καταχώρηση των παραπάνω τιμών, έγινε η εξαγωγή του αρχείου και αποθηκεύτηκε από το λογισμικό στην μορφή .3w. Αυτή η μορφή αρχείου αναπτύχθηκε συγκεκριμένα για τους εκτυπωτές της

σειράς Da Vinci. Από το αρχείο .stl γίνονται υπολογισμοί για τον τρόπο κατασκευής του αντικειμένου βήμα προς βήμα στον εκτυπωτή, οι οποίοι καθορίζουν το προφίλ της εκτύπωσης στο αρχείο .3w, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20: Μορφή αντικειμένου ως αρχείο .3w, έτοιμο προς εκτύπωση.

2.3.2 Προετοιμασία Εκτυπωτή Da Vinci 1.0 Pro

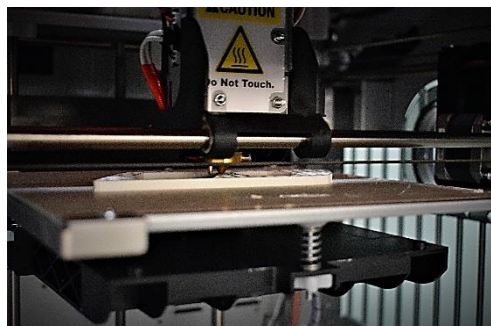
Μετά την επιλογή των παραμέτρων και την δημιουργία του αρχείου προς εκτύπωση, ακολούθησε η ενεργοποίηση και ο έλεγχος του μηχανήματος. Στην πρόσωση του μηχανήματος υπάρχει μικρή οθόνη με δυνατότητα χειροκίνητης επιλογής ρυθμίσεων του και προβολής πληροφοριών. Σημαντικός ήταν ο έλεγχος ποσότητας πρώτης ύλης, όπου από τις στατιστικές πληροφορίες του δοχείου αποθήκευσης (cartridge statistics) διαπιστώθηκε ότι η χωρητικότητα (capacity) ήταν 120m., ενώ η εναπομείνασα ποσότητα (remaining) ήταν 107m. Σε σύγκριση με την εκτιμώμενη ποσότητα που ήταν 42.131 m., όπως είχε υπολογισθεί από το λογισμικό, παρατηρήθηκε ότι η εκτύπωση μπορεί να πραγματοποιηθεί. Η ευθυγράμμιση (calibration) του τραπέζιου της εκτύπωσης ήταν ένα ακόμα σημείο που ελέγχθηκε. Επιπλέον το χρώμα του υλικού ήταν λευκό του πάγου (snow white). Επιπρόσθετες πληροφορίες σχετίζονται με το είδος του ακροφυσίου, το οποίο έχει διάμετρο 0.4 mm. και με τις ρυθμίσεις των παραμέτρων του νήματος που αφορούν στην θερμοκρασία του τραπέζιου και του ακροφυσίου, οι οποίες είχαν ήδη προκαθοριστεί. Ακολούθως, σημαντική πληροφορία αποτελεί η χρονική διάρκεια εκτύπωσης, η οποία είχε εκτιμηθεί σε 11h: 24m: 26s .



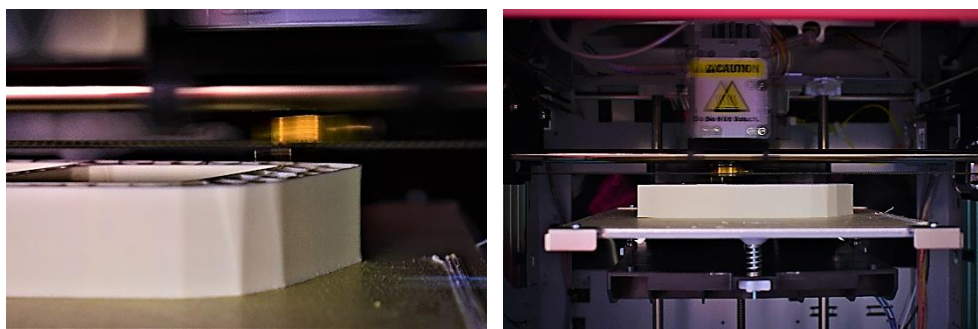
Εικόνα 21: Όψεις του εκτυπωτή Da Vinci 1.0 Pro

2.3.3 Διαδικασία Εκτύπωσης

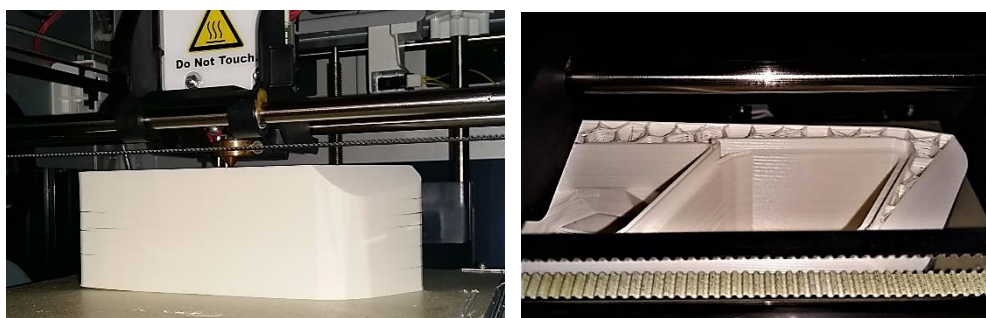
Με βάση τα παραπάνω δυο στάδια προετοιμασίας των παραμέτρων του αντικειμένου και του εκτυπωτή, η διαδικασία της εκτύπωσης ήταν το πιο απλό στάδιο αλλά ταυτόχρονα και το πιο χρονοβόρο. Η εντολή έναρξης δόθηκε από το λογισμικό πρόγραμμα του υπολογιστή, όπου το αρχείο εισήχθη και αποθηκεύτηκε στον εκτυπωτή. Το πρώτο βήμα ήταν η θέρμανση του τραπέζιου της εκτύπωσης η οποία διήρκεσε λίγα δευτερόλεπτα. Έπειτα το τραπέζι αυτόματα ανυψώθηκε στο ύψος του ακροφυσίου για να ξεκινήσει η εκτύπωση. Το ακροφύσιο ενεργοποιήθηκε και πραγματοποίησε την διαδικασία βήμα προς βήμα, με τον τρόπο που περιγράφεται η μέθοδος κατασκευής με σύντηξη νήματος και όπως παρουσιάζεται παρακάτω.



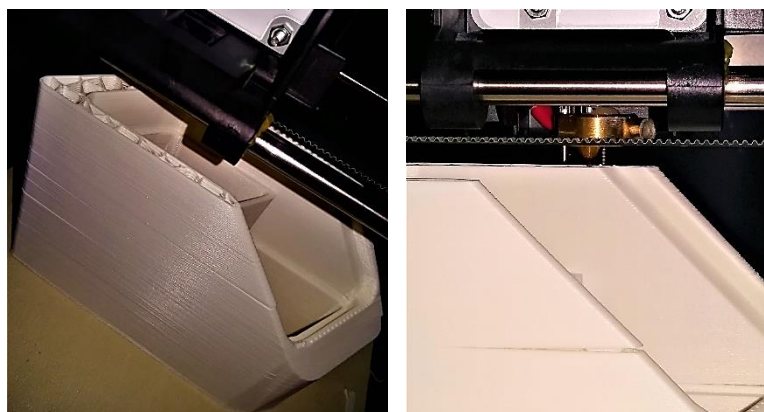
Εικόνα 22: Δημιουργία πρώτων στρώσεων.



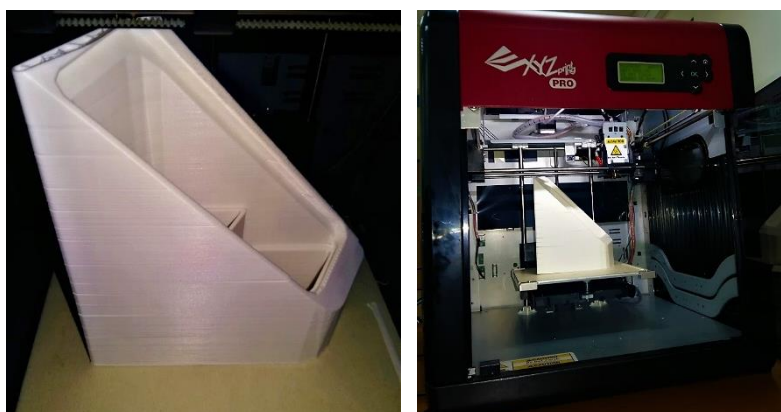
Εικόνα 23: Αποτύπωση λεπτομεριών στην εσωτερική δομή και στην εξωτερική μορφή του αντικειμένου (αριστερά). Το τραπέζι της εκτύπωσης έχει μετατοπιστεί με φορά προς τα κάτω (δεξιά).



Εικόνα 24: Κατασκευή σημαντικού τμήματος της βάσης προβολέα και εμφάνιση αστοχιών αποκόλλησης (αριστερά). Έλεγχος εσωτερικής δομής και δημιουργίας κρηθρών (δεξιά).



Εικόνα 25: Δημιουργία διαδοχικών στρώσεων και έλεγχος εσωτερικής δομής (αριστερά). Κίνηση ακροφυσίου κατά την δημιουργία επίστρωσης και εμφανή αποκόλληση δύο στρώσεων (δεξιά).



Εικόνα 26: Τοποθέτηση τελευταίων στρώσεων και ολοκλήρωση κατασκευής μετά από 12h : 33m.



Εικόνα 27: Διαφορετικές όψεις αριστερής βάσης προβολέα μοτοσυκλέτας με τρισδιάστατη εκτύπωση

2.3.4 Αξιολόγηση Κατασκευής

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, ακολούθησε έλεγχος του αντικειμένου με έμφαση στην παρατήρηση των αστοχιών που είχαν δημιουργηθεί. Σε συζήτηση με τον εργαστηριακό καθηγητή κ. Πολυχρόνη, ως υπεύθυνο της ομάδας για την δημιουργία αυτού του έργου, διαπιστώθηκε η επιτυχημένη έκβαση της κατασκευής στην ολότητα της, καθώς επίσης τονίστηκαν αλλαγές που θα μπορούσαν να γίνουν σε κάποιες παραμέτρους στην κατασκευή της δεξιάς βάσης προβολέα, ώστε να μειωθεί η εμφάνιση κάποιων αστοχιών.

Προχωρώντας σε πιο λεπτομερή εξέταση του αντικειμένου και των αστοχιών που δημιουργήθηκαν και ερευνώντας μελέτες [όπως η 41] σχετικά με τις κατασκευαστικές προκλήσεις που παρουσιάζονται όταν γίνεται χρήση υλικού ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:

- Εμφάνιση χορδών ή αλλιώς λεπτών ινών υλικού (stringing) στα δύο πολυγωνικά σημεία κοντά στη βάση του τεμαχίου. Όπως παρατηρείται στην πάνω δεξιά φωτογραφία της Εικόνας 27, το ακροφύσιο έπρεπε να διασχίσει απόσταση σε κενό χώρο για την δημιουργία αυτών των τμημάτων. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, το ακροφύσιο δημιούργησε τέτοιες ίνες υλικού σε ορισμένα σημεία κατά την κίνησή του. Δεν είναι εμφανή στην φωτογραφία γιατί έχουν αφαιρεθεί στον επακόλουθο έλεγχο του αντικειμένου.
- Σημαντική είναι η δημιουργία αποκολλήσεων (delamination) ή αλλιώς η αποτυχημένη κόλληση δύο γειτονικών στρώσεων σε ορισμένα σημεία. Όπως είναι εμφανές στην κάτω αριστερή φωτογραφία της Εικόνας 27, σημεία που βρίσκονται κυρίως στις γωνίες του τεμαχίου εμφανίζουν ανά διαδοχικά διαστήματα αποκολλήσεις. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην θερμοκρασία του ακροφυσίου, στην ταχύτητα και στην γρήγορη ψύξη (rapid cooling) της κάθε στρώσης. Όσο το ακροφύσιο τοποθετεί υλικό σε σημεία απομακρυσμένα από την θερμαινόμενη βάση, αυξάνονται οι πιθανότητες εμφάνισης τέτοιων αστοχιών.
- Σε δυο σημεία παρουσιάζεται ατελής συμπλήρωση υλικού (incomplete infill), το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία κενών (voids). Αυτό τις περισσότερες φορές συμβαίνει λόγω ταχείας ψύξης, της ταχύτητας πλήρωσης (infill speed) ή της πυκνότητας πλήρωσης (infill density).
- Η συνολική εμφάνιση της βάσης προβολέα μοτοσυκλέτας, οι λεπτομέρειες τόσο στην εσωτερική δομή όσο και στην εξωτερική επιφάνεια και η διαστατική ακρίβεια επιβεβαιώνουν το θετικό αποτέλεσμα της κατασκευής. Η μετέπειτα επεξεργασίες (post processing) που απαιτούνται κρίνονται ως ελάχιστες.

2.4 Συμπεράσματα

Η κατασκευή της αριστερής βάσης προβολέα μοτοσυκλέτας πραγματοποιήθηκε με σκοπό την παρακολούθηση της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής στην πράξη. Ξεκινώντας με την κατανόηση της λειτουργίας του λογισμικού XYZware Pro, την εισαγωγή του αρχείου και την επιλογή των τιμών στις παραμέτρους που σχετίζονται με την τελική ποιότητα του τεμαχίου, προχώρησα στην κατανόηση της λειτουργίας του εκτυπωτή da Vinci 1.0 Pro. Σημαντικός παράγοντας ήταν η μελέτη της μεθόδου κατασκευής με σύντηξη νήματος (FFF), ώστε να πραγματοποιηθεί σωστά η τελική αξιολόγηση μετά το πέρας της διαδικασίας.

Κατά την διάρκεια της διαδικασίας, πραγματοποιούνταν έλεγχος ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με στόχο την παρατήρηση της δημιουργίας της εσωτερικής δομής σε μορφή κηληθρών, αλλά και της κατασκευής στο σύνολό της. Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση όσον αφορά το ποιοτικό αποτέλεσμα και τις αστοχίες που είχαν προκληθεί. Το τελικό συμπέρασμα ήταν θετικό, με ουσιαστική προσοχή να δίνεται στην μορφή της εξωτερικής επιφάνειας και στην ακριβή δημιουργία κάθε σχεδιαστικής λεπτομέρειας. Η θετική έκβαση εστιάζεται στην ανάγκη λίγων μετέπειτα επεξεργασιών, ώστε το τεμάχιο να πάρει την μορφή που επιθυμεί η ομάδα του έργου.

Μελετώντας το θεωρητικό υπόβαθρο της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής, ισχυροποιήθηκε η πεποίθηση ότι η κατασκευή με προσθετική προσέγγιση μπορεί να επιφέρει σημαντικά κατασκευαστικά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 3

Η Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής στον τομέα των Μεταλλικών Κατασκευών

3.1 Εισαγωγή και Ιστορική Εξέλιξη

«Η παγκόσμια βιομηχανία βρίσκεται στην πορεία μιας ευρύτερης εκβιομηχάνισης», συμπεραίνει ο N. Williams στην τελευταία αναφορά του 2018 για την εξέλιξη στον τομέα των μεταλλικών κατασκευών [14]. Μια σειρά πειραμάτων και ενεργειών από τον προηγούμενο αιώνα, έχουν ωθήσει την παγκόσμια βιομηχανική κοινότητα να στρέψει το ενδιαφέρον της για την εξέλιξη των κατασκευών από μέταλλο στις τεχνολογίες της Προσθετικής Κατασκευής. Το 2010, ο W.E. Frazier εξέφρασε το όραμα για την δημιουργία τεμαχίων στον κλάδο του Ναυτικού, τόσο μέσα σε συγκεκριμένα χρονικά πλαίσια όσο και με το επιθυμητό τελικό ποιοτικό αποτέλεσμα. Εκπληρώνοντας αυτό τον στόχο θα είχε επιτύχει σημαντική βελτίωση στις λειτουργικές προδιαγραφές, στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας αλλά και του συνολικού κόστους της κατασκευής των ναυτικών αεροσκαφών. Από το πείραμα που πραγματοποιήσε, διαπίστωσε ότι η άμεση ψηφιακή κατασκευή (Direct Digital Manufacturing-DDM) μεταλλικών εξαρτημάτων καθίσταται οικονομικά αποδεκτή και δημιουργεί αεροσκάφη με ανθεκτική δομή. Επιπλέον, μέσα από αυτό, τονίστηκε η ανάγκη για τον καθορισμό συγκεκριμένων ποσοτικών στόχων στον τομέα του καινοτόμου δομικού σχεδιασμού (Innovative Structural Design), της ποιότητας και πιστοποίησης (Qualification and Certification), καθώς και της διατήρησης και επιδιόρθωσης (maintenance and repair) [4,55].

Ακολούθως, μέσα στα επόμενα δύο χρόνια, έχουν καταγραφεί δύο σημαντικές πειραματικές ενέργειες που ενισχύουν την σπουδαιότητα της κατασκευής μεταλλικών μερών με τις τεχνολογίες της Προσθετικής Κατασκευής, ορίζοντας ταυτόχρονα διάφορα εμπόδια και προβλήματα που χρήζουν αντιμετώπισης. Ο E.Herderick δημοσίευσε το 2011 μια κριτική μέσα από την οποία παρουσιάζει την πληθώρα των τεχνολογιών AM για την κατασκευή μεταλλικών μερών, αλλά και τις βιομηχανίες που ήδη πρωτοπορούν στον τομέα αυτό κατασκευάζοντας τον απαραίτητο εξοπλισμό. Εκείνη την περίοδο τα κατασκευαστικά μέσα που ήταν ευρέως αξιοποιήσιμα ήταν το σύστημα κατασκευής σε κλίνη με τοποθέτηση σκόνης (powder bed system), το σύστημα έγχυσης σκόνης με χρήση λέιζερ (laser powder injection system), και η κατασκευή ελεύθερης μορφής (free form fabrication-FFF) [4,13].



Εικόνα 28: Κατασκευή εξαρτήματος αλουμινίου πολύπλοκης γεωμετρίας με χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής.

Τη ίδια χρονική περίοδο, το Εθνικό Ινστιτούτο Πιστοποιήσεων και Τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology-NIST), διοργάνωσε ένα επιστημονικό εργαστήριο και πραγματοποίησε μετρήσεις για την κατασκευή μεταλλικών μερών μέσω των τεχνολογιών AM. Από την δημοσίευση των αποτελεσμάτων το 2013, διαπιστώθηκε η ανάγκη για εκτενέστερη μελέτη γύρω από την χρήση των πρώτων υλών, των διαδικασιών και του αντίστοιχου εξοπλισμού, καθώς και των μεθόδων προσομοίωσης. Αξιοσημείωτο είναι το συμπέρασμα της επιστημονικής κοινότητας, που χαρακτηρίζει τις τεχνολογίες αυτές ως «μετασχηματιστικές» (transformative), εξηγώντας το αντίκτυπο που θα επιφέρουν σε στοιχεία

του κατασκευαστικού κλάδου, όπως στην μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής, στον σχεδιασμό, στα παγκόσμια επιχειρηματικά μοντέλα και στις εφοδιαστικές αλυσίδες, αλλά και στην ελάττωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος [4,57].

Τα θεμέλια για την ανάπτυξη των τεχνολογιών ΑΜ στις μεταλλικές κατασκευές και την ικανότητα διεκπεραίωσης ποικίλων εργαστηριακών πειραμάτων τόσο σε εκπαιδευτικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο, έχουν τεθεί από τις αρχές της δεκαετίας του 1990. Καταλυτικό ρόλο κατείχαν σημαντικές εταιρίες που οραματίστηκαν την ικανότητα αξιοποίησης της κατασκευής μεταλλικών τεμαχίων με την μέθοδο της προσθετικής προσέγγισης και χρηματοδότησαν μια σειρά πειραμάτων και διαδικασιών. Η τεχνολογία αυτή, μέχρι εκείνη την περίοδο, είχε ήδη αξιοποιηθεί ποικιλότροπος για την δημιουργία κυρίως πλαστικών μερών. Με βάση αυτή την εξέλιξη, προβλεπόταν και η άμεση αξιοποίηση της από τον κλάδο του μετάλλου, αφού είναι ευρέως γνωστό ότι ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας βιομηχανίας στηρίζεται στις μεταλλικές κατασκευές.

Συνεπώς, το 1994 η εταιρία EOS παρουσίασε το πρωτότυπο μηχάνημα EOSINT M160 βασισμένο στην τεχνολογία Άμεσης Σύντηξης Μετάλλου με χρήση Λείζερ (Direct Metal Laser Sintering-DMLS). Το 1995 ξεκίνησε η λειτουργία του EOSINT M250 της εταιρείας, επιτρέποντας την ταχεία παραγωγή μεταλλικών εργαλείων. Αυτά τα συστήματα ήταν ικανά να κατασκευάζουν μεταλλικά μέρη με πυροσυσσωμάτωση της σκόνης, αλλά σε πολλές περιπτώσεις τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών ήταν περισσότερο συγκρίσιμα με τα σύνθετα υλικά (composites) παρά με τα κράματα μετάλλων (metal alloys). Αυτό συνέβαινε λόγω του συνδυασμού ενός υλικού με χαμηλό σημείο τήξης (π.χ. καλούπι με χάλκινη βάση/bronze-based matrix) με ένα άλλο υλικό με υψηλή αντοχή (π.χ. ανοξείδωτο ατσάλι ή εργαλείο από χάλυβα/stainless or tool steel).

Το 1998, η εταιρία Optomec εμπορευματοποίησε το σύστημα τοποθέτησης μεταλλικής σκόνης (metal powder system) με Μηχανική Ελασματοποίηση χωρίς Διαμόρφωση (Laser-Engineered Net Shaping/LENS) βασισμένο στην τεχνολογία που αναπτύχθηκε στο Εθνικό εργαστήριο Sandia στις ΗΠΑ. Έπειτα, το 1999, η γερμανική εταιρία Röders, ξεκίνησε την προώθηση της Μηχανής Ελεγχόμενων Μεταλλικών Κατασκευών (Controlled Metal Buildup machine/CMB) με βάση την τεχνολογία που αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Fraunhofer για την εξέλιξη του παραγωγικού κλάδου της Γερμανίας. Ακολούθως το ίδιο έτος, η εταιρία ExtrudeHone παρουσίασε το Σύστημα Ταχείας Κατεργασίας Prometal (Prometal Rapid Tooling System) RTS-300. Πρόκειται για έναν τρόπο κατασκευής μεταλλικών εξαρτημάτων και εργαλείων, που προήλθε από την εμπορική υλοποίηση της διαδικασίας που πραγματοποίησε το MIT. Παρόμοια με τη χρήση των πολυμερών και των κεριών για την προετοιμασία της πρώτης ύλης, με σκοπό την Διεργασία Μορφοποίησης με Έγχυση Μετάλλου (Metal Injection Moulding/MIM), αυτό το σύστημα ήταν ικανό να κατασκευάζει ένα συνδετικό υλικό (binder) σε μια κλίνη σκόνης (powder bed), να συνδέσει τα σωματίδια μετάλλου (metal particles) και να παράγει "πράσινα μέρη-green parts", τα οποία στη συνέχεια έπρεπε να αποδεσμευτούν, να δεχτούν τη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης και να διεισδύσουν, ώστε να αποκτήσουν εντελώς πυκνή δομή. Αργότερα, το 2002, η κατασκευαστική εταιρία Precision Optical ξεκίνησε τις πωλήσεις των Συστημάτων Άμεσης Απόθεσης Μετάλλων (Direct Metal Deposition /DMD) με επένδυση λέιζερ. Πρόκειται για μια διαδικασία που παράγει και επισκευάζει εξαρτήματα χρησιμοποιώντας μεταλλική σκόνη.

Αυτή τη στιγμή, αρκετές εταιρείες δημιουργούν συστήματα προσεγγίζοντας την μέθοδο πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ, γεγονός που τις καθιστά σε θέση να παράγουν απευθείας μεταλλικά μέρη, κατέχοντας μια εναλλακτική λύση στην παραγωγή απευθείας τεμαχίων σε διαδικασίες πολλαπλών σταδίων. Η συνεχής ανάπτυξη των συστημάτων ΑΜ επέτρεψε την κατασκευή εύχρηστων εξαρτημάτων που κατασκευάστηκαν τόσο μέσα στο επιθυμητό χρονικό πλαίσιο και με το επιλεγόμενο υλικό, όσο και μέσα σε ένα στάδιο της γραμμής παραγωγής. Τώρα είναι δυνατή η κατασκευή σχεδόν 100% πυκνών λειτουργικών σχεδίων. Με την πάροδο του χρόνου αυτά τα συστήματα έχουν γίνει πιο αξιόπιστα και πιο

αποτελεσματικά, καθώς η ποσότητα των κατάλληλων προς χρήση υλικών αυξάνεται σημαντικά.



Εικόνα 29: Κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων με τις τεχνολογίες της Προσθετικής Κατασκευής.

Η εξέλιξη των τεχνολογιών AM στον κατασκευαστικό κλάδο των μετάλλων είναι εμφανής σε πολλά εργαστηριακά περιβάλλοντα ανά τον κόσμο. Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτελεί σημαντικό τμήμα των εξελιγμένων κατασκευών σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες και σε μεμονωμένα τεχνολογικά περιβάλλοντα, δημιουργώντας την νέα κατασκευαστική τάξη πραγμάτων στον παραγωγικό τομέα. Το εργαστήριο τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων και δομικών υλικών (3D-Printing Lab for Metal and Structural Materials), που στεγάζεται στο Fraunhofer EMI (Fraunhofer Institute for High-Speed Dynamics, Ernst-Mach-Institute, EMI), διαθέτει έναν από τους πιο εμπορικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές και μπορεί να κατασκευάσει μεταλλικές δομές με διαστάσεις μεγαλύτερες από 40cm, χρησιμοποιώντας την Μέθοδο Επιλεκτικής Τήξης με χρήση Λέιζερ Selective Laser Melting/SLM). Οι ερευνητές συνδυάζουν τις δυνατότητες των τεχνολογιών AM με τον έξυπνο ελαφρύ σχεδιασμό τεμαχίων, σε μια προσπάθεια μεγιστοποίησης της αποδοτικότητας των πόρων που χρησιμοποιούν. Ουσιαστικά, πραγματοποιούν ενέργειες γύρω από την οικονομική δυνατότητα των τεχνολογιών σε σχέση με τους πόρους που έχουν και εξετάζουν τον βαθμό στον οποίο τόσο το λειτουργικό κόστος όσο και το κόστος των υλικών καθίσταται ευνοϊκότερο σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους καταργασίας [18]. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι οι συγκεκριμένες ενέργειες και σκέψεις αποτελούν καταλυτικό κριτήριο για ολόκληρη την κοινότητα των μηχανικών που ερευνούν την εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών, με απώτερο σκοπό την άμεση χρήση τους στις γραμμές παραγωγής.

Εξετάζοντας σε βάθος τις μελέτες της συγκεκριμένης ομάδας ερευνητικών, εστιάζεται το ενδιαφέρον σε μια πειραματική τους δραστηριότητα. Πρόκειται για την κατασκευή ενός ευρέως διαδεδομένου εξαρτήματος, τον φορέα τροχού (wheel carrier) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ελαφρύ όχημα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 30. Όπως σημειώνει ο Klaus Hoschke, επιστήμονας και υπεύθυνος καθοδηγητής της ομάδας στο Fraunhofer EMI, υπήρξε η δυνατότητα ποσοτικοποίησης της επίδρασης της ελαφριάς κατασκευής, και συγκεκριμένα της χρήσης των μεθόδων δομικής βελτιστοποίησης, στους πόρους που χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία κατασκευής με τη μέθοδο SLM. Δόθηκε έμφαση στην ανάλυση των στοιχείων που αφορούν στην κατανάλωση ενέργειας και υλικών, στον χρόνο κατασκευής και στις εκπομπές CO₂ που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της παραγωγής μικρής κλίμακας δώδεκα τροχών [18].



Εικόνα 30: Δομικά βελτιστοποιημένο στήριγμα τροχού (wheel bearing) για εξαιρετικά ελαφρύ όχημα (αριστερά). Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού του στηρίγματος τροχού και αριθμητική βελτιστοποίηση του σχεδιασμού για ελαχιστοποίηση της μάζας του εξαρτήματος χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργικότητα και σχεδιαστική απόδοση του εξαρτήματος μέσω πρότυπου αρχείου CAD (δεξιά)

Σημαντικό στάδιο, τόσο στην εξέλιξη της διαδικασίας όσο και στα τελικά συμπεράσματα, αποτέλεσε η χρήση της αριθμητικής Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method/FEM), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 31. Με βάση αυτήν την μέθοδο, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση και η ανάλυση της σωστής γεωμετρικής δομής μέσω της δομικής βελτιστοποίησης, η οποία οδήγησε στην δημιουργία βελτιστοποιημένου ελαφριού σχεδίου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, την κατασκευή στηρίγματος τροχού εντός των προκαθορισμένων σεναρίων προσφέροντας ταυτόχρονα μέγιστη απόδοση. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητας του τεμαχίου, οι δομές αυτές δεν θα μπορούσαν να κατασκευαστούν με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, όπως η έλαση (milling) ή η τόννευση (turning). Επιπλέον, ο K. Hoshcke, διατύπωσε το συμπέρασμα ότι κάνοντας χρήση ενός ελαφρύτερου μοντέλου, υπήρξε η δυνατότητα εξοικονόμησης τεράστιων ποσοτήτων πρώτων υλών, αφού χρησιμοποιήθηκε μικρότερη ποσότητα ύλης για την δημιουργία κάθε εξαρτήματος. Αν πολλαπλασιαστεί ο αριθμός των μονάδων σε μια μικρή κλίμακα, τότε χρειάζεται λιγότερος χρόνος, πρώτη ύλη και ενέργεια για την κατασκευή κάθε τεμαχίου. Ταυτόχρονα, η μείωση του όγκου της χρήσης υλικών υψηλότερης αντοχής προσφέρει τις μεγαλύτερες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας [18].

Πρακτικά, τα αποτελέσματα για την δημιουργία του στηρίγματος τροχού με τη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης, αναφέρουν ότι χρειάστηκε 15% λιγότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, 10kWh για τον αριθμητικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό σε αντίθεση με τον συμβατικό σχεδιασμό που απαιτεί 12kWh, 14% μείωση του συνολικού χρόνου κατασκευής, 19% μείωση των εκπομπών CO₂, καθώς και 28% ελάττωση της κατανάλωσης πρώτων υλών. Ο Hoshcke διατύπωσε ως γενικότερο συμπέρασμα, ότι είναι λογικό να πραγματοποιείται ο σχεδιασμός ενός τεμαχίου με μειωμένο βάρος και όγκο, όταν πρόκειται να κατασκευαστεί με μέθοδο Προσθετικής Κατασκευής, γιατί με αυτό τον τρόπο μειώνεται και το συνολικό κόστος της κατασκευής [18].

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα μιας σειράς παραγωγής μικρής κλίμακας εξαρτημάτων, όπως το εργαστηριακό παράδειγμα που διατυπώθηκε προηγουμένως, υποδεικνύουν ότι οι τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής μπορούν να αξιοποιηθούν και στις περιπτώσεις που ένα εξάρτημα δεν χρειάζεται βελτιστοποίηση στην δομή του. Σε γενικότερο επίπεδο, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης δομής και οι προσομοιώσεις αριθμητικής βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται ήδη για την τρισδιάστατη εκτύπωση εξαρτημάτων. Ουσιαστικά, αξιοποιούνται όταν το τεμάχιο πρέπει να είναι εξαιρετικά ελαφρύ, όπως τα εξαρτήματα αεροσκαφών που έχουν σχεδιαστεί για να μειώνουν την κατανάλωση καυσίμου κατά την λειτουργική φάση.

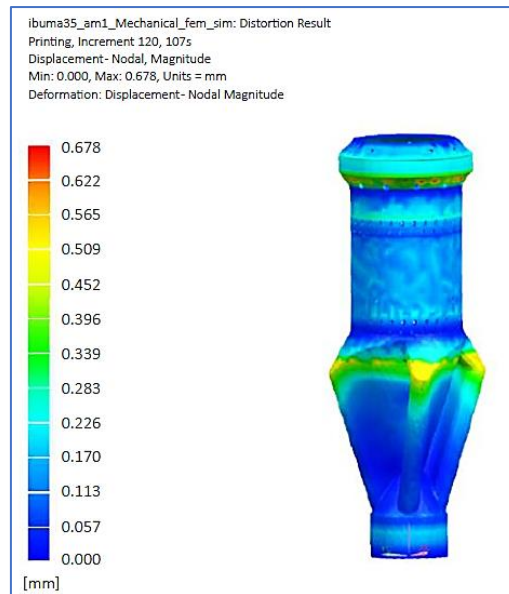
Μελετώντας εκτενέστερα τις φάσεις εξέλιξης των τεχνολογιών AM στις μεταλλικές κατασκευές, παρατηρείται ο καταλυτικός ρόλος της εταιρίας Siemens. Από το 2009, η εταιρία αξιοποίησε τεχνολογικό εξοπλισμό από την πρωτοπόρα εταιρία στον κλάδο αυτό, EOS GmbH. Ο υπεύθυνος της ομάδας για τις τεχνολογίες AM στην περιοχή Finspång, Andreas Graichen, είχε διατυπώσει την άποψη ότι οι δυσκολίες που αντιμετώπισαν μέχρι να προσαρμοστούν στις νέες τεχνολογικές απαιτήσεις ήταν πολύ περισσότερες από ό,τι αρχικά πιστεύανε. Παράλληλα, όμως, οι μηχανικοί συνειδητοποίησαν τον καταλυτικό ρόλο των τεχνολογιών αυτών στην δημιουργία τόσο νέων όσο και εφεδρικών εξαρτημάτων. Το 2012, με την κατασκευή ενός ειδικού μηχανήματος για επιδιορθώσεις καυστήρα (burner repair), ισχυροποίησαν την αρχική τους πρόβλεψη. Δύο χρόνια αργότερα, δημιουργήθηκε το Κέντρο Ανάπτυξης Προσθετικής Κατασκευής, το οποίο προχώρησε στην ψηφιοποίηση των τεχνολογιών για γρήγορο σχεδιασμό, κατασκευή και επιδιόρθωση. Έπειτα, το 2016, έγινε εγκατάσταση ενός ειδικού τμήματος Προσθετικής Κατασκευής με οχτώ νέα μηχανήματα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 31 [14].



Εικόνα 31: Ένα τμήμα της εγκατάστασης νέων μηχανημάτων για την ανάπτυξη Τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής που πραγματοποίησε η εταιρία Siemens στο Finspång [14].

Με βάση τα τωρινά δεδομένα, η εταιρία έχει ισχυροποιήσει τη θέση της στον παγκόσμιο βιομηχανικό χάρτη των τεχνολογιών Προσθετικής Μηχανικής με την κατασκευή αεριοστρόβιλων (gas turbines). Η τεχνολογική εγκατάσταση γύρω από αυτήν την κατασκευή αποτελείται από μια αλυσίδα εργασιών που συνδέονται μεταξύ τους με απόλυτη συνοχή. Περιλαμβάνει μια ομάδα σχεδιασμού των αεριοστρόβιλων, μια εγκατάσταση ελέγχου των κινητήρων, μια σύγχρονη γραμμή παραγωγής για την κατασκευαστική φάση της διαδικασίας και μια υπηρεσία οργάνωσης και παροχής των απαραίτητων σχολίων σε κάθε φάση της παραγωγής.

Όσο οι δυνατότητες των τεχνολογιών AM αυξανόταν, οι υπεύθυνοι μηχανικοί συνειδητοποίησαν ότι η ικανότητα κατασκευής μεταλλικών μερών υψηλής ποιότητας με αυτές τις μεθόδους πρέπει να συνοδεύεται από μια ολοκληρωμένη διαδικασία, η οποία με τη σειρά της θα στηρίζεται σε ένα αξιόπιστο λογισμικό πρόγραμμα. Η υπεύθυνη ομάδα τόνισε ότι η ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού αποτέλεσε καταλυτικό παράγοντα για τον σχεδιασμό προϊόντων με ενεργειακό αποτύπωμα και στον απαιτούμενο όγκο. Με την χρήση του λογισμικού Siemens NX Additive Manufacturing, συνδυάστηκαν οι γνώσεις πρωτοτυποποίησης και οι μέθοδοι επιδιόρθωσης καυστήρων (burners), διευκολύνοντας την ομάδα στον σχεδιασμό και στην παραγωγή ποιοτικών εξαρτημάτων καυστήρα σε κλίμακα. Ουσιαστικά χωρίς την ανάπτυξη αυτού του λογισμικού δεν θα πραγματοποιούνταν ορθά η εξέλιξη από την πρωτοτυποποίηση στην σειριακή παραγωγή (serial production), όπως τονίζει ο D. Madeley [14]. Καθοριστικό ρόλο κατείχε, επίσης, η σωστή χρήση και ανάμειξη ανακυκλώσιμων υλικών, τα οποία μελετήθηκαν από την αντίστοιχη ομάδα ερευνητών.



Εικόνα 32: Προσομοίωση κατασκευής καυστήρα στον υπολογιστή από την ομάδα της Siemens κάνοντας χρήση του νέου λογισμικού [14].

Σύμφωνα με τον D. Madeley, αυτό που συνέβαλλε θετικά στην ανάπτυξη των τεχνολογιών AM στην εταιρία τους, ήταν η συνεργασία και αλληλοϋποστήριξη με άλλες τεχνολογικές μονάδες και ερευνητές. Ειδικότερα, η εξέλιξη στην κατασκευή των καυστήρων των αεριοστρόβιλων, αποτέλεσε μια καινοτόμα ενέργεια που προήλθε από διάφορες συνεργασίες. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, η εταιρία ενθαρρύνει την συνεργατικότητα στο πλαίσιο ανάπτυξης των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής, θεωρώντας ότι είναι ο μόνος δρόμος για να προλάβει κάθε κατασκευαστής τις τεχνολογικές εξελίξεις. Επιπρόσθετα, μέσα από το ερευνητικό της πλαίσιο, τονίζεται η ύπαρξη διαφόρων δυσκολιών που χρήζουν αντιμετώπισης για να οδηγηθεί η τεχνολογία αυτή στην ουσιαστική εκβιομηχάνιση της [14].

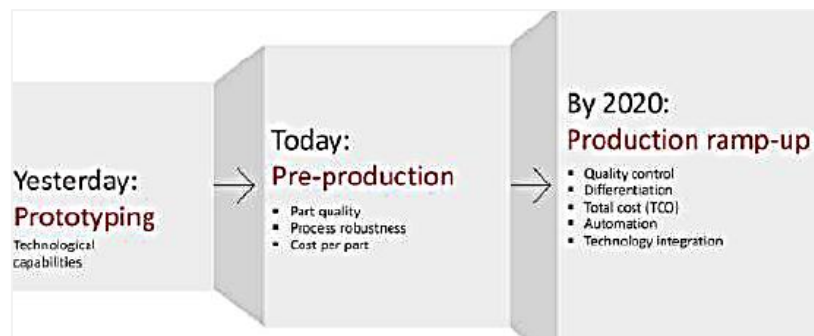
Μια σημαντική συνεργασία πραγματοποιείται τα τελευταία χρόνια μεταξύ των εταιριών HP, GKN Powder Metallurgy και Volkswagen. Η σκοπιμότητα αυτής της συνεργασίας αφορά στην έρευνα και υιοθέτηση των νέων τεχνολογικών μεθόδων AM και κυρίως της τεχνολογίας εκροής συγκολλητικού υλικού (binder jetting), με άμεση εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία και τη βιομηχανία γενικότερα. Σύμφωνα με τον P. Oberparleiter ο σχεδιασμός και η κατασκευή μεταλλικών μερών μέσα σε 24 ώρες με χρήση τεχνολογίας αιχμής μηχανημάτων AM σε διάφορες κατασκευαστικές εταιρίες, αποτελεί όραμα της GKN. Ουσιαστικά στοχεύουν στην εκβιομηχάνιση των τεχνολογιών AM μέσω της δημιουργίας πρωτοτύπων και μικρής κλίμακας σειριακών γραμμών παραγωγής. Επιπρόσθετα, στη Διεθνή Παρουσίαση Κατασκευαστικής Τεχνολογίας (International Manufacturing Technology Show/IMTS), που πραγματοποιήθηκε το 2018 στο Chicago, Illinois, στις ΗΠΑ, η εταιρία GKN ανακοίνωσε ότι θα είναι η πρώτη εταιρία που θα αξιοποιήσει τη νέα τεχνολογία κατασκευής μεταλλικών μερών που δημιούργησε η εταιρία HP, με σκοπό να δημιουργήσει εξαρτήματα για τις εταιρίες Volkswagen και Wilo. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η εταιρία HP ανέπτυξε και κατασκεύασε πρόσφατα το δικό της σύστημα συγκόλλησης μετάλλων (HP's Metal Jet system), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 33. Πρακτικά υποστηρίζεται, ότι παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής μεταλλικών μερών χαμηλότερου κόστους και με 50 φορές υψηλότερη παραγωγική δύναμη σε σύγκριση τόσο με την μέθοδο εκροής συγκολλητικού υλικού (binder jetting) όσο και με την τεχνολογία εναπόθεσης σκόνης σε κλίνη (powder bed fusion) [16].



Εικόνα 33: Τα πρώτα μηχανήματα κατασκευής μεταλλικών μερών με σύστημα συγκόλλησης από την εταιρία HP [14].

Παράλληλα με την εξέλιξη των εταιριών αυτών όσον αφορά τις μεθόδους της Προσθετικής Κατασκευής, η εταιρία EOS όντας πρωτοπόρα στην ανάπτυξη των τεχνολογιών AM και στην κατασκευή μερών από μέταλλο και πολυμερή υλικό, κατέχει ένα σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια βιομηχανία των κατασκευών. Συγκεκριμένα, έχει αναπτύξει πάνω από 3000 συστήματα Προσθετικής Κατασκευής σε όλο τον κόσμο, έχει γραφεία εξυπηρέτησης και συμβουλευτικής σε 15 χώρες, 6 κέντρα ανάπτυξης καινοτομίας και πάνω από 260 άτομα ειδικευμένο προσωπικό στις τεχνολογίες AM. Ουσιαστικά οι έρευνες που πραγματοποιεί στον τομέα αυτό, στοχεύουν στην ανάπτυξη τόσο οικονομικών όσο και βιώσιμων συστημάτων με μακροχρόνια διάσταση, καθώς και στην παροχή σημαντικών ανταγωνιστικών πακέτων στους πελάτες της. Ο T. Weitlaner [18], βασιζόμενος στο ερευνητικό του έργο, τονίζει ότι με την εφαρμογή κατάλληλων ποιοτικών ελέγχων, την διαφοροποίηση και την βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους κάθε έργου, καθώς και με την αξιοποίηση μεθόδων αυτοματισμού, οι νέες τεχνολογίες AM θα ενσωματωθούν σε έναν μεγάλο αριθμό εταιριών μέχρι το 2020. Ταυτόχρονα, στις Ευρωπαϊκές Ημέρες Αριστείας της εταιρίας EOS (EOS's European Excellence Days), η πλειοψηφία των εταιριών τόνισε την ύπαρξη εργοστασίων με ενσωματωμένα ψηφιακά συστήματα σε όλο το φάσμα της παραγωγής, μέχρι το 2025. Ουσιαστικά γίνεται ευρέως συζητήσιμη η έκταση που θα έχει η 4^η Βιομηχανική Επανάσταση ή αλλιώς Industry 4.0 [18].

Πρακτικά το 2017, η εταιρία EOS προωθώντας το πρόγραμμα NextGenAM σε συνεργασία με τις εταιρίες Premium AEROTEC και Daimler, ισχυροποίησε την πεποίθησή της για την εφαρμογή των τεχνολογιών AM για μεταλλικές κατασκευές σε σειριακές γραμμές παραγωγής μεγάλης κλίμακας και την δημιουργία του μοντέλου του μελλοντικού εργοστασίου. Ο κύριος στόχος του προγράμματος είναι ο πλήρης αυτοματισμός των μεθόδων Προσθετικής Κατασκευής, εστιάζοντας στην διαδικασία μεταφοράς της σκόνης μετάλλου και των απαραίτητων εργασιών μετά την διεργασία, καθώς και στην υιοθέτηση και πιστοποίηση περισσότερων υλικών, όπως το αλουμίνιο, με σκοπό την διευκόλυνση στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών. Παράλληλα, διάφορες έρευνες των εταιριών Siemens και SEW Eurodrive³⁹, αποδεικνύουν την ουσιαστική διαφορά στην οργάνωση της ροής εργασιών με ψηφιοποιημένη παραγωγή σε σύγκριση με τους συμβατικούς τρόπους κατασκευής. Αριθμητικά αναφέρεται ότι οι κατασκευαστές που ενσωμάτωσαν νέες μεθόδους, παρατήρησαν 75% οφέλη από την αυτοματοποίηση, 25% αύξηση της παραγωγικότητας και του αποτελέσματος, 20% μείωση στις εργοστασιακές επενδύσεις, 50% μείωση στο απόθεμα και συνολικές αποταμιεύσεις 0.5€ εκατομμύρια (χρόνο/γραμμή). Σημαντική διαπίστωση ήταν, επίσης, η συνολική ποιότητα των προϊόντων που κατασκευάστηκαν, η οποία είχε ποσοστό επιτυχίας 99.9988% [18].



Εικόνα 34: Η εξέλιξη των τεχνολογιών AM στην εταιρία EOS [18].

Μελετώντας την απήχηση των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής στον παγκόσμιο χάρτη, σημαντική καθίσταται και η εξέλιξη που έχει πραγματοποιηθεί σε διάφορες περιοχές της Κίνας. Το πανεπιστήμιο Tsinghua μελέτησε σε ερευνητικό επίπεδο την εξώθηση (extrusion) των υλικών και τα συστήματα στρωματοποίησης των φύλλων (sheet lamination systems). Επίσης, το 2017, η κυβέρνηση της Κίνας καθοδηγούμενη από το Υπουργείο Βιομηχανίας και Πληροφορικής (Ministry of Industry and Information Technology), ανακοίνωσε το πλάνο δράσης της για την ανάπτυξη των τεχνολογιών AM σε βιομηχανικό επίπεδο τα έτη 2017-2020 και την στόχευση της για την απόκτηση περίπου \$3 δισεκατομμύρια κερδών. Σύμφωνα με μια αναφορά του Wohlers για το 2018, περίπου το 18% των παγκόσμιων πωλήσεων από τις τεχνολογίες AM πραγματοποιείται από αντίστοιχα εργοστάσια που εδρεύουν στην Κίνα [23].

3.2 Πρότυπα και Πιστοποίηση

Οι τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής έχουν αποκτήσει μια καταλυτική θέση στην παγκόσμια βιομηχανία, τόσο στον κλάδο της αεροδιαστημικής τεχνολογίας όσο και σε αυτόν της κατασκευής ιατρικών εξαρτημάτων και αμυντικών συστημάτων. Έχει διαπιστωθεί ότι τα οφέλη των εταιριών που αξιοποιούν και επενδύουν στις τεχνολογίες αυτές είναι πολλαπλά, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στην μείωση του συνολικού χρόνου κατασκευής, στην δυνατότητα κατασκευής μερών με γεωμετρική πολυπλοκότητα, στην μείωση της πυκνότητας του υλικού, καθώς και σε πολλά ακόμα. Είναι δεδομένο, ότι ο τομέας μεταλλικών κατασκευών δεν θα μπορούσε να μην συμμετέχει στις τεχνολογικές εξελίξεις, όπως διαπιστώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Η εταιρία General Electrics (GE) έχει συγκροτήσει την καινούρια μονάδα GE Additive, μέσω της οποίας σκοπεύει να κατασκευάσει 10.000 μηχανήματα τεχνολογιών AM μέσα στα επόμενα 10 χρόνια [58]. Παράλληλα πολλοί Κατασκευαστές Πρωτότυπου Εξοπλισμού (Original Equipment Manufacturers/OEMs) επενδύουν στις τεχνολογίες αυτές, γεγονός που υποδεικνύει τις μελλοντικές εξελίξεις στον κατασκευαστικό κλάδο. Η ουσιαστική εξέλιξη κάθε τεχνολογίας στηρίζεται στην ύπαρξη πιστοποιήσεων σε κάθε φάση της κατασκευής. Όπως έχει διατυπωθεί στο 1^ο Κεφάλαιο, οι απαραίτητες ενέργειες και μελέτες γύρω από αυτή τη φάση έχουν ήδη ξεκινήσει με σημαντική επιτυχία [15].

Όσον αφορά τις μεταλλικές κατασκευές, οι δραστηριότητες για την δημιουργία κατοχυρωμένων προτύπων έλαβαν χώρα το 2009 από την Επιτροπή F42 του Αμερικανικού Συλλόγου Ελέγχου και Υλικών (ASTM), η οποία δημιούργησε έναν οδηγό ανάπτυξης διεθνών προτύπων για τις τεχνολογίες AM. Την ίδια χρονιά δημιουργήθηκε η πιστοποίηση ASTM F2792, που αφορούσε στην ορολογία των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής. Ακολούθως το 2011, συντάσσεται η πιστοποίηση του σχεδιαστικού αρχείου (file format) για τις πρώτες φάσεις της κατασκευαστικής διαδικασίας. Αυτό το αρχείο επιτρέπει τη μεταφορά αρχείων από διαφορετικά λογισμικά hardware σε software συστήματα και αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει

την δημιουργία γεωμετριών με μικροδομή και πολλαπλές υλικές βαθμίδες. Το 2012, εκτιμήθηκε η δημιουργία του προτύπου ASTM F2924 για την χρήση του υλικού Τιτανίου-6 Αλουμινίου-4 Βαναδίου (Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium) στην μέθοδο σύντηξης σκόνης σε κλίνη (powder bed fusion) [4,57].

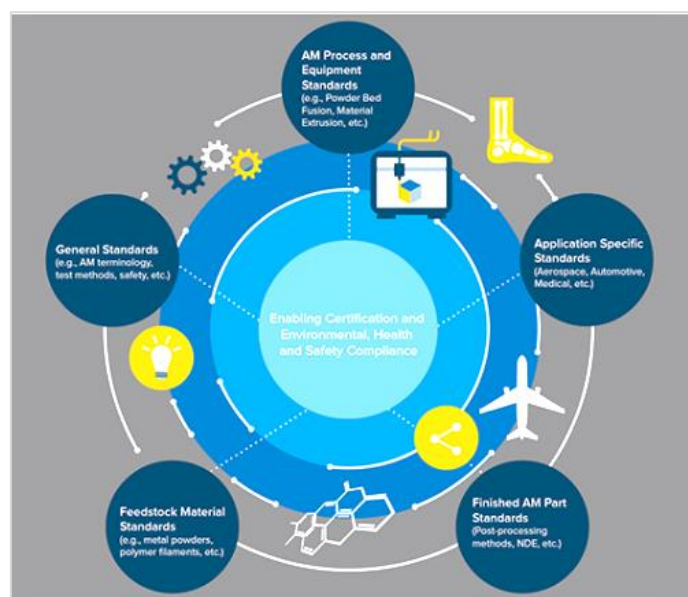
Ταυτόχρονα με την διεξαγωγή των παραπάνω ενεργειών, το 2013, η Αμερικανική Εταιρεία Συγκόλλησης (AWS) δημιούργησε την επιτροπή D20, η οποία στόχευε στην ανάπτυξη προτύπων που θα αφορούσαν στην ενσωμάτωση των απαιτήσεων για την δημιουργία μεταλλικών εξαρτημάτων με τις τεχνολογίες AM. Πρακτικά, προχώρησε στην καταγραφή προτύπων και κωδικών που σχετιζόταν με τις απαιτήσεις των υλικών, την σχεδιαστική ποιότητα, τις διάφορες διαδικασίες, καθώς και το ανθρώπινο δυναμικό. Σε παρόμοια κατεύθυνση, το 2015, ο Σύλλογος Μηχανικών στον τομέα της Αυτοκινητοβιομηχανίας (Society of Automotive Engineers/SAE), ίδρυσε την νέα επιτροπή SAE AMS-AM για τις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής, υπό την αιγίδα της ομάδας Αεροπορικών Υλικών Συστημάτων (Aerospace Materials Systems/AMS). Αυτή η επιτροπή έδωσε έμφαση στην δημιουργία τεχνολογικών αναφορών γύρω από τους τομείς των μεθόδων AM, των πρόδρομων υλικών (precursor materials), των απαιτήσεων του συστήματος, της προεργασίας των υλικών, της διαδικασίας μετά την κατεργασία, τον μη καταστροφικό έλεγχο (nondestructive testing) και τη διασφάλιση της ποιότητας. Επιπρόσθετα, η Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών (ASME) ίδρυσε την επιτροπή Y14.64, η οποία εστίασε σε θέματα γεωμετρικών διαστάσεων και ανοχών (geometric dimensioning and tolerancing/GD&T) [59].

Σε γενικότερο πλαίσιο, η ταχεία ανάπτυξη διαφόρων εφαρμογών στον τομέα της Προσθετικής Κατασκευής, έθεσε τις βάσεις για την συγκρότηση κοινοπραξιών, συνεδρίων και ειδικά διαμορφωμένων θεματικών ταξιδιών και εκδηλώσεων γύρω από αυτή την επιστήμη. Πολλοί οργανισμοί τείνουν να εστιάζουν στην προώθηση αυτών των τεχνολογιών αναπτύσσοντας εξελιγμένα μοντέλα μέσω καινοτόμων εφαρμογών και παροτρύνοντας την ευρύτερη επιστημονική κοινότητα να λάβει δράση σε αυτή την σημαντική αλλαγή. Το 2015 στο Dayton , OH, στις ΗΠΑ οργανώθηκε το πρώτο εργαστήριο που εστίασε στην ανάπτυξη μεθόδων διασφάλισης Ποιότητας και Πιστοποίησης (Qualification and Certification/Q&C) για τις τεχνολογίες AM. Πρόκειται για μια κοινοπραξία της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (Federal Aviation Administration/FAA) και του Εργαστηρίου Έρευνας της Πολεμικής Αεροπορίας (Air Force Research Laboratory/AFRL), όπου συμμετείχαν ειδικοί από τον χώρο της βιομηχανίας, της εκπαίδευσης και της πολιτικής [60].

Ένα χρόνο μετά, το 2016, οργανώνεται με τον ίδιο τρόπο ένα εργαστήριο που αποσκοπούσε στην περαιτέρω εμβάθυνση στις απαιτήσεις γύρω από τον τομέα της πιστοποίησης στις τεχνολογίες αυτές. Θεωρείται καταλυτική η δημιουργία στοχευμένων αναφορών που θα ενισχύουν την εξέλιξη των τεχνολογιών αυτών σε γραμμή παραγωγής μεγάλης κλίμακας και θα ευνοούν την ταχεία ανάπτυξη του περιβάλλοντος της εφοδιαστικής αλυσίδας. Επιπρόσθετα, δόθηκε έμφαση στην ανάγκη μελέτης γύρω από την δυνατότητα παραλλαγής των μεθόδων, τον έλεγχο της διαδικασίας, τα χαρακτηριστικά και τον έλεγχο που σχετίζεται με τα ελαττώματα και τις ανωμαλίες που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και την επίδραση τους στην διάρκεια ζωής του τεμαχίου, την ποιότητα και τον έλεγχο του ακατέργαστου υλικού (raw material/feedstock), την διαδικασία κατεργασίας και την επιρροή της στην διάρκεια ζωής του τεμαχίου και των γενικότερων απαιτήσεων της διαδικασίας [61].

Σημαντική καθίσταται η αναφορά στο εργαστήριο που πραγματοποιήθηκε το 2016 στο San Antonio, TX, στις ΗΠΑ, από τον Αμερικανικό Σύλλογο Ελέγχου και Υλικών (ASTM) και το Εθνικό Ινστιτούτο Πιστοποιήσεων και Τεχνολογίας (NIST). Ο κύριος σκοπός αυτής της διοργάνωσης ήταν ο καθορισμός συγκεκριμένων αναγκών γύρω από τις τεχνολογίες AM και συγκεκριμένα τις εφαρμογές με εμφάνιση κοπώσεων και κρίσιμων θραυσμάτων (fatigue and fracture-critical applications), ώστε οι τεχνολογίες αυτές να γίνουν ευρέως αναγνωρίσιμες. Το

εργαστήριο πραγματοποιήθηκε με ειδικούς από το χώρο της βιομηχανίας (αεροπορία, ιατρική, κατασκευαστές μηχανημάτων AM, κτλ.), την ακαδημαϊκή αλλά και την πολιτική κοινότητα, με παρόμοιο τρόπο όπως και το προηγούμενο εργαστήριο [15,62].



Εικόνα 35: Ανάπτυξη προτύπων για τις τεχνολογίες της Προσθετικής Κατασκευής.

Μια από τις σημαντικότερες ανάγκες που διατυπώθηκαν, ήταν η έλλειψη εμπειριστωμένης δομής γύρω από την σύνδεση των μεθόδων, των υλικών και των ιδιοτήτων κόπωσης και ρωγμών. Ουσιαστική θεωρήθηκε η ανάγκη αξιολόγησης των υπάρχοντων μεθόδων ελέγχου κόπωσης και ρωγμών, με σκοπό να κριθούν αξιόπιστα για χρήση στις τεχνολογίες AM. Επιπρόσθετα, τονίστηκε η σπουδαιότητα που πρέπει να δοθεί στην επέκταση των πλαισίων διασφάλισης ποιότητας μέσω της δημιουργίας νέων τεχνικών ελέγχου. Την ίδια περίοδο διεξαγωγής του παραπάνω εργαστηρίου, πραγματοποιούνταν ένα άλλο εργαστήριο που αφορούσε στις τεχνολογίες AM για των τομέα των Ιατρικών και Χειρουργικών Μηχανημάτων και Εξαρτημάτων, το οποίο οργανώθηκε από την επιτροπή F04 του συλλόγου ASTM.

Καταλυτικό ρόλο στην ανάπτυξη όλων των παραπάνω διαδικασιών πιστοποίησης και δημιουργίας προτύπων στις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής, κατείχε ο τομέας της αεροπορίας και της κατασκευής εξαρτημάτων για τα αεροσκάφη (aircraft parts). Παραδοσιακά, το επίπεδο των απαιτήσεων ποιότητας και πιστοποίησης (Q&C) για τα τμήματα των αεροσκαφών έχει συνδεθεί με το επίπεδο αξιολόγησης των μερών, το οποίο με τη σειρά του ορίζεται με διάφορες εξειδικευμένες διαδικασίες. Ανεξάρτητα από τους διαφορετικούς τρόπους, υπάρχει ένας κοινός παρονομαστής στον έλεγχο της εκτίμησης ανοχής βλαβών για τεμάχια υψηλής κρισιμότητας. Πρακτικά η εκτίμηση αυτή πραγματοποιούνταν με την ανάλυση ανάπτυξης κρούσεων κόπωσης (fatigue crack growth analysis) και με την μέθοδο των μη Καταστροφικών Επιθεωρήσεων (Non-destructive Inspections/NDI), οι οποίες βασίστηκαν σε αποδεκτά πρότυπα και μεθοδολογίες από το σύνολο της βιομηχανικής κοινότητας.

Ταυτόχρονα, καθώς η ανάγκη αξιολόγησης των μερών που κατασκευάζονται με τεχνολογίες AM στην αεροπορία αναμένεται να έχει αυξητική πορεία, κρίνεται χρήσιμο να επικεντρωθούν περισσότερες προσπάθειες στον χαρακτηρισμό και στην κατανόηση των ιδιοτήτων κόπωσης και θραύσης (fatigue and fracture) των υλικών και των αντίστοιχων μεθοδολογιών που θα χρησιμοποιηθούν [63]. Εν συνεχεία των συμβατικών μηχανισμών εκκίνησης ρωγμών κρυσταλλογραφικής κόπωσης (crystallographic fatigue crack initiation mechanisms) σε ομοιογενή υλικά υποστρώματος, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η

εκκίνηση των ρωγμών λόγω της παρουσίας ανωμαλιών στο υλικού που χρησιμοποιήθηκε, όπως το πορώδες, η έλλειψη ελαττωμάτων σύντηξης (fusion defects) ή εγκλεισμάτων (inclusions) [15,64].

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι ο χαρακτηρισμός στις ανωμαλίες των υλικών τόσο για κρίσιμα αεροσκάφη όσο και για εξαρτήματα του κινητήρα πρέπει να στηρίζεται σε ρεαλιστικές αποκλίσεις όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών, την μικροδομή και τα ελαττώματα των υλικών που αντιπροσωπεύουν το περιβάλλον παραγωγής. Η αποτυχία εφαρμογής αυτών των αποκλίσεων μπορεί να φέρει αρνητικά αποτελέσματα, όπως αυτό που παρουσιάστηκε την αρχική περίοδο χρήσης της σκόνης για μεταλλουργικές διεργασίες (powder metallurgy/PM) [63].

Λόγω του ευρύ φάσματος των πιθανών εφαρμογών των τεχνολογιών AM στην αεροπορία, το οποίο περιλαμβάνει τον σχεδιασμό και την παραγωγή νέων εξαρτημάτων, ανταλλακτικών αλλά και μεθόδων επισκευής, η FAA κατέγραψε και δημοσίευσε πρόσφατα μια σειρά αρχείων και εσωτερικών υπομνημάτων καθοδήγησης προς τα Γραφεία Πιστοποίησης Αεροσκαφών (Aircraft Certification Offices/ACOs) και τα Περιφερειακά Γραφεία Επιθεώρησης Κατασκευών (Manufacturing Inspection District Offices/MIDOs). Σε αυτά αναγράφονται οι λόγοι για την πιστοποίηση εξαρτημάτων μέσω κατασκευαστικών μεθόδων AM, καθώς επίσης περιλαμβάνεται η ειδοποίηση προς τους επιθεωρητές των Περιφερειακών Γραφείων ελέγχου των Προτύπων κάθε Πτήσης (Flight Standards District Offices/FSDO) για την σωστή χρήση των τεχνολογιών AM στις φάσεις της συντήρησης και των επισκευών των αεροσκαφών και των εξαρτημάτων των κινητήρων [65].

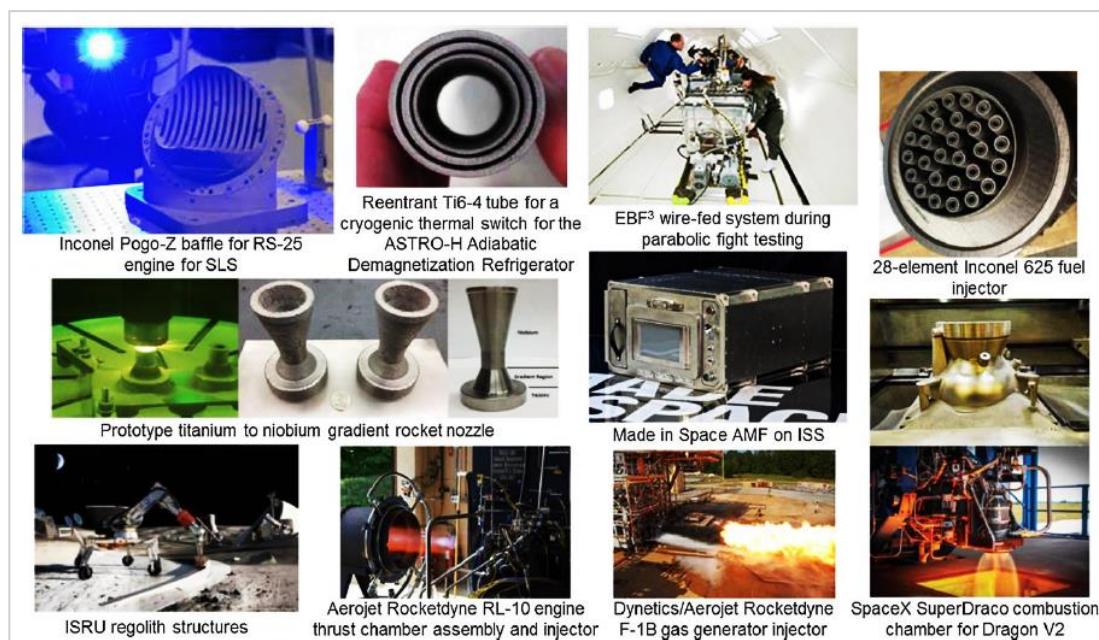
Παράλληλα με τις δράσεις της FAA, η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος (National Aeronautics and Space Administration/NASA) και η Υπηρεσία Φαγητών και Φαρμάκων (Food and Drug Administration/FDA) πραγματοποίησαν δραστηριότητες καταγραφής προτύπων και πιστοποιήσεων [15]. Με βάση μια αναφορά του 2017, η NASA διατύπωσε την άποψη ότι η δημιουργία πιστοποιήσεων όσον αφορά την δομική ακεραιότητα (structural integrity) των τεμαχίων, αποτελεί θεμελιώδη πρόκληση για τον τομέα διασφάλισης ποιότητας. Στηριζόμενοι στην έρευνα και εξέταση του προτύπου MSFC-STD-3716 για την κατασκευή Hardware Λογισμικού Πτήσης με Διαστημόπλοιο μέσω της μεθόδου Σύντηξης Σκόνης με χρήση Λέιζερ πάνω σε κλίνη (Laser Powder Bed Fusion), η υπηρεσία στοχεύει στην ορθή λύση αυτής της πρόκλησης. Σημαντική, επίσης, είναι η κατανόηση των κινδύνων σε κάθε φάση της διαδικασίας και η ανάπτυξη μεθοδολογιών για την ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας, κυρίως για μικρής κλίμακας ελαττωμάτων [17].



Εικόνα 36: Εργαστηριακά πειράματα για την ανάπτυξη προτύπων στην NASA [17].

Καταλυτικό παράγοντα στην αποτελεσματική ανάπτυξη και καταγραφή προτύπων και πιστοποιήσεων για όλες τις φάσεις και τις μεθόδους των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής, έχει η δημιουργία του Οργανισμού Συνεργατικής Τυποποίησης των Τεχνολογιών AM (AMSC). Με την δημιουργία αυτού του οργανισμού το έτος 2016, όπως περιγράφεται

αναλυτικά στο 1^ο Κεφάλαιο, ενισχύθηκαν οι δράσεις γύρω από αυτή τη στόχευση και κυρίως η συμβολή των διαφόρων φορέων που επιθυμούν την εξέλιξη αυτού του κατασκευαστικού μοντέλου [6]. Πρακτικά, το 2017, διοργανώθηκαν δύο τεχνολογικά συνέδρια από τα οποία, το πρώτο εστίασε σε θέματα γύρω από την έρευνα για την σχέση των διαδικασιών, των δομών και των ιδιοτήτων και το δεύτερο στις μεθόδους αξιολόγησης και ανάπτυξης των διαδικασιών όσον αφορά την κόπωση, θραύση και μη καταστροφική επιδιόρθωση [15]. Συμπερασματικά, η ολοκληρωμένη δομή πιστοποίησης για τις τεχνολογίες Προσθετικής Μηχανικής περιγράφεται από την κωδικοποίηση ASTM F42/ISO TC261, όπου συμπεριλαμβάνονται αναλυτικά όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για κάθε φάση των διαφόρων μεθόδων των τεχνολογιών AM. Όσο οι τεχνολογίες εξελίσσονται, τόσο η ανάγκη για πιστοποίηση θα κρίνεται απαραίτητη.



Εικόνα 37: Αντιπροσωπευτικές ενέργειες της NASA στον τομέα της προσθετικής κατασκευής [56].

3.3 Μέθοδοι και Συστήματα Προσθετικής Κατασκευής Μεταλλικών Μερών

Τα πρώτα πειράματα για την κατασκευή μεταλλικών μερών ξεκίνησαν με τον σχηματισμό σκόνης πολυμερούς υλικού σε τρισδιάστατο μοντέλο. Το πρώτο μεταλλικό μέρος κατασκευάστηκε από κράματα μετάλλων σε μορφή σκόνης το 1990 από τους Manriquez-Frayre και Bourell. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SLS και υλικά όπως ο χαλκός (copper), ο κασσίτερος (tin) και η συγκόλληση μόλυβδου-κασσίτερου (Pb-Sn solder) [22]. Ακολουθώντας μια σειρά ερευνητικών σταδίων και πειραμάτων οι τεχνολογικές διαδικασίες κατασκευής μεταλλικών εξαρτημάτων εξελίσσονται μέχρι και σήμερα. Είναι σημαντικό, ωστόσο, να παρουσιαστούν οι φάσεις εξέλιξης και οι μέθοδοι πάνω στις οποίες στηρίζονται μεταγενέστερα πολλές εταιρίες και ερευνητές για την ανάπτυξη νέων μοντέλων και καινοτόμων μηχανημάτων.

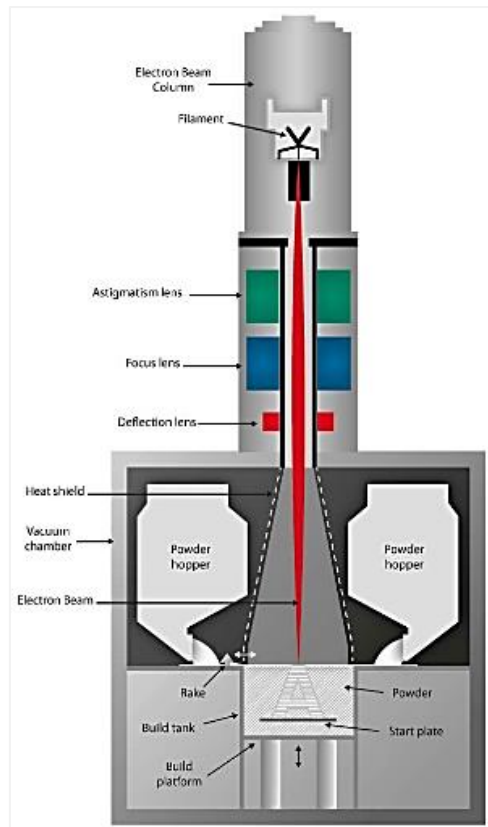
Καταλυτικό ρόλο κατέχουν τα κατασκευαστικά *Συστήματα με Σκόνη σε Κλίνη (Powder Bed Systems)*. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από έναν εσώκλειστο θάλαμο (chamber), ο οποίος λειτουργεί με ή χωρίς τη χρήση κάποιου ευγενές αερίου (inert gas). Κάνοντας χρήση κάποιου αερίου προστατεύεται η κατασκευή από την πιθανή οξείδωση που μπορεί να προκληθεί λόγω της αντίδρασης των σωματιδίων της σκόνης μετάλλου (αλουμίνιο ή τιτάνιο) που θα χρησιμοποιηθεί. Στο κέντρο του θαλάμου είναι τοποθετημένη μια δεξαμενή

(reservoir) όπου εμπεριέχεται η σκόνη και από αυτήν θα προκληθεί η δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου μέσα από ένα σύστημα στρωματοποίησης. Συγκεκριμένα, ο θάλαμος προθερμαίνεται με βάση μια προκαθορισμένη θερμοκρασία που έχει οριστεί από τον μηχανικό. Για τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται με τη χρήση ακτίνας λέιζερ (laser beam) η θερμοκρασία είναι περίπου 100°C, ενώ για τη χρήση ακτίνας ηλεκτρονίου (electron beam) είναι περίπου 700 °C. Η ενεργειακή πηγή προγραμματίζεται ώστε να μεταφέρει ενέργεια ή πιο πρακτικά να σαρώσει (scan) την επιφάνεια της σκόνης μετάλλου με βάση το σχέδιο (pattern) του τεμαχίου που θα κατασκευαστεί. Σχηματίζεται μια μονή επίστρωση με πάχος συνήθως μεταξύ 20 και 200 μm. Η δεξαμενή χαμηλώνει επίπεδο μετά από την ολοκλήρωση δημιουργίας κάθε στρώσης και ακολουθεί την ίδια σαρωτική διαδικασία με επαναληπτικό ρυθμό μέχρι τη στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής. Σημαντικά πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων είναι η δυνατότητα διαστατικού ελέγχου και η απόδοση χαρακτηριστικών υψηλής ανάλυσης [2,13].

Μελετώντας τα συγκεκριμένα συστήματα, παρατηρείται η πληθώρα των μεθόδων που έχουν δομηθεί με αυτήν την κατασκευαστική λογική. Οι διαδικασίες που έχουν αναπτυχθεί στηρίζονται στην επιλεκτική τήξη (melt) ή πυροσυσσωμάτωση (sinter) ενός στρώματος σκόνης σε κλίνη και αναγνωρίζονται με τον μεταγενέστερο όρο, *Σύντηξη Σκόνης σε Κλίνη (Powder Bed Fusion/PBF)*. Το 1997, η Σουηδική εταιρία ARCAM [66], ανέπτυξε τη μέθοδο *Τήξης με χρήση Ακτίνας Ηλεκτρονίου (Electron Beam Melting/EBM)*. Η τεχνολογία αυτή τήκει τη σκόνη μετάλλου μέσα σε κενό (vacuum) θάλαμο σχηματίζοντας διαδοχικές στρώσεις και κάνοντας χρήση ακτίνας ηλεκτρονίου. Καταλυτική είναι η ύπαρξη Μικροσκοπίου Σάρωσης Ηλεκτρονίου (Scanning Electron Microscope/SEM) υψηλής δυναμικής, το οποίο για να λειτουργήσει αποδοτικά χρειάζεται την ύπαρξη νήματος πυράκτωσης και μαγνητικών πηνίων (magnetic coils), ώστε η ακτίνα να εκτραπεί και να ευθυγραμμιστεί σταδιακά στο επιθυμητό σημείο. Επίσης, η σκόνη τοποθετείται μέσα σε ένα σύστημα που αποτελείται από χοάνη (hopper) και ειδικά διαμορφωμένες μεταλλικές τσουγκράνες (metal rake). Όταν η διαδικασία ολοκληρωθεί, όπως έχει περιγράψει παραπάνω, η δεξαμενή εμπεριέχει το κατασκευασμένο τμήμα και το πλεόνασμα της πρώτης ύλης που χρησιμοποιήθηκε. Περνώντας από μια φάση ψύξης και ένα σύστημα ανάκτησης (recovery), αφαιρείται το πλεόνασμα με σκοπό την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του και παραμένει εμφανές το τελειοποιημένο μοντέλο. Το μοντέλο όντας κατασκευασμένο πάνω σε ένα υπόστρωμα, που του παρέχει μηχανική υποστήριξη σε όλη τη φάση της κατασκευής, πρέπει να αποδεσμευτεί. Αυτό συνήθως πραγματοποιείται με τη χρήση πριονιού λείανσης (abrasive saw) και σύρματος EBM [13,20].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μικρή πιθανότητα εμφάνισης παραμενουσών τάσεων (residual stress) και παραμορφώσεων (distortions), λόγω της διατήρησης της θερμοκρασίας στο θάλαμο μεταξύ 700-1000°C. Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι η μέθοδος αυτή ευνοεί το κατεργασμένο υλικό Ti-6Al-4V προσδίδοντάς του αντοχή εφελκυσμού και δυνατότητα επιμήκυνσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι πρόκειται για μια διαδικασία που μπορεί να εκτελεστεί χρονικά γρηγορότερα από την αντίστοιχη μέθοδο με χρήση λέιζερ, αλλά ταυτόχρονα χρίζεται απαραίτητο τις περισσότερες φορές να πραγματοποιηθούν ακόλουθες εργασίες κατεργασίας για να μειωθεί η τραχύτητα που δημιουργείτε στο μοντέλο. Σε γενικότερο επίπεδο, πρόκειται για μια μέθοδο που αποδίδει μοντέλα με υψηλή διάρκεια ζωής και ποιότητας. Δίνει τη δυνατότητα κατασκευής πρωτοτύπων και έχει μεγάλη πρακτική εφαρμογή στον κλάδο της ιατρικής, όπως παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες.

Την ίδια κατασκευαστική λογική και βασική μεθοδολογία κατέχει και η *Μέθοδος Επιλεκτικής Τήξης με χρήση Λέιζερ (Selective Laser Melting/SLM)* [68]. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από την ομάδα MTT Technologies Group of Stones, στην Αγγλία, και βασίζεται στην τεχνική τήξης σκόνης με χρήση λέιζερ. Η ενέργεια υψηλής ισχύος CO₂ χρησιμεύει στην επιτυχή συγκόλληση των σωματιδίων της σκόνης μετάλλου που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του επιθυμητού μοντέλου. Πρακτικά, από τη δεξαμενή που είναι τοποθετημένη η σκόνη μετάλλου, μεταφέρεται ένα στρώμα σκόνης με μια σαρωτική κίνηση από έναν



Εικόνα 38: Σύστημα κατασκευής μεταλλικών μερών με την μέθοδο EBM [67].

κυλινδρικό κυλιστή (roller) στην πλατφόρμα κατασκευής. Αμέσως, το λέιζερ καταγράφοντας δισδιάστατη πορεία, συγκολλάει τους κόκκους μέσα σε ένα αδρανή (vacuum) περιβάλλον. Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας μιας επίστρωσης, η πλατφόρμα μετακινείται με φορά προς τα κάτω ανάλογα με το πάχος του στρώματος που θα κατασκευαστεί στην συνέχεια. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά σε αυτή την λογική.

Τυπικά χρησιμοποιείται ένα σύστημα φακών (lenses) και ένας σαρωτικός καθρέφτης (canning mirror) ή γαλβανόμετρο (μέτρηση έντασης ρεύματος/galvanometer), για να πραγματοποιηθεί η μετακίνηση της ακτίνας στην επιθυμητή θέση. Η τοποθέτηση της σκόνης στην πλατφόρμα κατασκευής του τεμαχίου, γίνεται με τη χρήση χοάνης (hopper) ή ενός συστήματος τροφοδοσίας (feeding system) και με τη χρήση λεπίδων (blades) που σέρνουν τη σκόνη στην επιφάνεια κατασκευής. Με μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία δημιουργίας διαδοχικών στρώματων, ένα κάθε φορά, ολοκληρώνεται η δημιουργία του τεμαχίου. Σημαντικό καθίσταται το γεγονός, ότι το προς κατασκευή τεμάχιο, στην πλατφόρμα όπου είναι τοποθετημένο, υποβοηθάτε από την σκόνη που δεν συγκολλάτε και στο τελικό στάδιο αφαιρείται ως πλεόνασμα. Τα τελικά τεμάχια αυτής της μεθόδου έχουν υψηλή λειτουργική δυνατότητα και διάρκεια ζωής. Ωστόσο, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, είναι πιθανή η ατμοποίηση (vaporization) του υλικού και η δημιουργία λεκέδων (spatter). Επιπρόσθετα, η εμφάνιση τραχύτητας (roughness) στην επιφάνεια του τεμαχίου, προκαλείται από την τήξη των σωματιδίων της σκόνης, την σταθερότητα της τηκόμενης λωρίδας και τους μηχανισμοί επαναστερεοποίησης [13,20,69].

Η τεχνολογία SLM και ο τρόπος που έχει αναπτυχθεί, έχει δώσει τις βάσεις της για την δημιουργία μιας μεθόδου που ονομάζεται, **Laser Cusing**. Αναπτύχθηκε από την εταιρία Concept Laser [70], η οποία είναι θυγατρική της Hoffman Innovation Group, στην Γερμανία. Ο όρος ‘‘Cusing’’ έχει δημιουργηθεί από το αρχικό γράμμα C της λέξης ‘‘Concept’’, το οποίο έχει αντικαταστήσει το πρώτο γράμμα της λέξης ‘‘Fusing’’. Οπότε, γίνεται αντιληπτό ότι

πρόκειται για μια ιδέα που στηρίζεται στην ολοκληρωμένη τήξη. Καθώς αναπτύσσεται με την ίδια μεθοδολογία, η σκόνη μετάλλου στέλνεται στην πλατφόρμα κατασκευής του αντικειμένου και το λέιζερ τήκει τα σωματίδια, ώστε να δημιουργηθεί μια στρώση. Μέσα από την επαναλαμβανόμενη διαδικασία, δομείται το τεμάχιο.

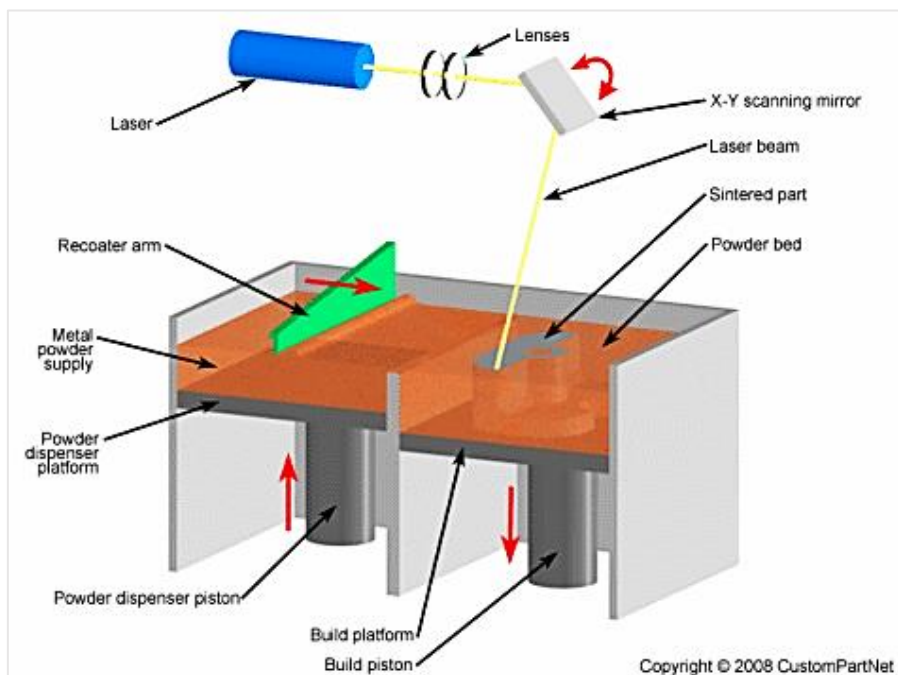
Σε αυτή την μέθοδο η εκτροπή του λέιζερ κατευθύνεται από μια σειρά άμεσα καθοδηγούμενων κινητήρων και καθρεπτών, γεγονός που τη διαφοροποιεί από την λογική της χρήσης φακών στις άλλες μεθόδους. Το fiber-λέιζερ που χρησιμοποιείται είναι 200 W και η κατασκευή γίνεται με τη χρήση αζώτου στον θάλαμο. Μια ιδιαιτερότητα που υπάρχει, είναι η στρατηγική στοχαστικής έκθεσης που ακολουθείται υπό την αρχή που καλείται ως “island principle”. Τα τμήματα κάθε επίστρωσης καλούνται “islands”, τα οποία κατασκευάζονται με μια αλληλουχία που σκοπό έχει την εξάλειψη των τάσεων του εξαρτήματος. Έτσι, δημιουργούνται στερεά μέρη μεγάλης κλίμακας με ελάχιστες παραμορφώσεις (warping). Πρακτικά, όμως, διευκολύνεται η κατασκευή μερών μικρής κλίμακας με εξαιρετική απόδοση [70,71].

Σε μια παρόμοια κατασκευαστική λογική με την μέθοδο SLM, η εταιρία EOS GmbH και η Rapid Product Innovations (RPI) ξεκινώντας την συνεργασία τους το 1994, ανέπτυξαν την μέθοδο *Άμεσης Σύντηξης Μετάλλου με χρήση Λέιζερ (Direct Metal Laser Sintering/DMLS)*. Η κατασκευαστική μεθοδολογία και το σύστημα είναι σχεδόν ίδιο με την προηγούμενη μέθοδο, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 39. Το λέιζερ παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την τήξη των σωματιδίων της σκόνης μετάλλου και οι στρώσεις δημιουργούνται με την ίδια κατασκευαστική λογική. Στο εσώκλειστο προστατευτικό περιβάλλον η ατμόσφαιρα εμπεριέχει άζωτο (nitrogen) ή αργό (argon).

Ουσιαστικά, πρόκειται για μια εμπορικά διαδεδομένη και αξιοποιήσιμη μέθοδο. Παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους, όπως η δημιουργία τελικής επιφάνειας με τιμή 8.75 Ra (surface roughness), μια τιμή τραχύτητας πολύ καλύτερη από αυτή που δίνει η μέθοδος EBM, καθώς επίσης αποδίδει 95% πιο πυκνά τεμάχια χάλυβα. Επίσης, λόγω της δημιουργίας λεπτών στρωμάτων είναι ευκολότερος ο έλεγχος της εσωτερικής δομής του τεμαχίου σε σύγκριση με τη μέθοδο SLS. Ταυτόχρονα, είναι ασυνήθιστη η εμφάνιση παραμενουσών τάσεων, γεγονός που ευνοεί την αξιοποίηση της μεθόδου από τις αυτοκινητοβιομηχανίες και την αεροδιαστημική. Αντίθετα πολλές φορές καθίσταται αναγκαία η επακόλουθη επεξεργασία του τεμαχίου στους άξονες x-y και z ώστε να θεωρείται τελειοποιημένο [72,73].

Μια ακόμα μέθοδος που βασίζεται στα συστήματα κατασκευής με σκόνη σε κλίνη, είναι η *Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λέιζερ (Selective Laser Sintering/SLS)*. Πρόκειται για ένα σύστημα που αναπτύχθηκε από την εταιρία Phenix Systems, στην Γαλλία, η οποία κατά κύριο λόγο κατασκευάζει τα αντίστοιχα μηχανήματα. Ιστορικά, έχει αναπτυχθεί από το Πανεπιστήμιο του Τέξας και θεωρείται ως πατέντα από το 1989. Επίσης, παρομοιάζεται με την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας (SLA) και η τεχνική που ακολουθείται είναι ίδια με αυτή της μεθόδου DMLS. Η ιδιαιτερότητα αυτής της διαδικασίας στηρίζεται στην δυνατότητα κατασκευής μεταλλικών και κεραμικών μερών σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 900°C.

Πρόκειται για μια μέθοδο που χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία κατασκευής με ένα Yb-fiber λέιζερ 200 W σε ένα εσώκλειστο περιβάλλον όπου εμπεριέχεται ή όχι άζωτο στην ατμόσφαιρα. Υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής τεμαχίου με μέγιστη διάμετρο 250mm και ύψος 300mm. Στην κατασκευή μεταλλικών μερών η διαστατική ακρίβεια σε κάθε σημείο είναι περίπου 10μm και ακολουθείται μια επιπλέον επεξεργασία αμμοβολής (sand blasting) ή γυαλίσματος (polishing) [13].



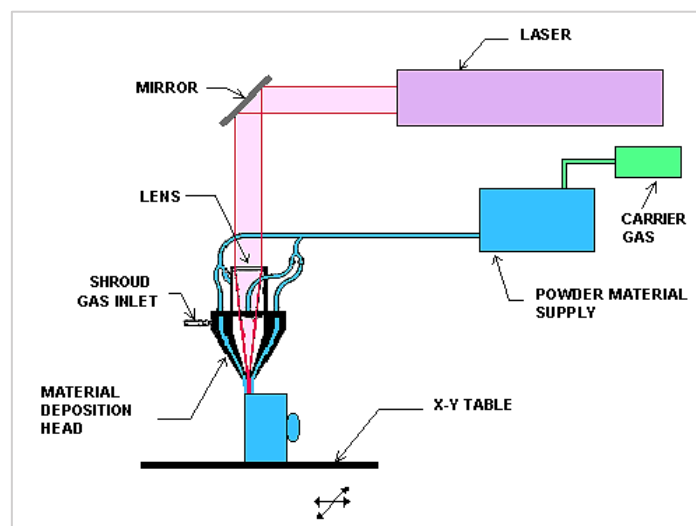
Εικόνα 39: Μέθοδος Άμεσης Σύντηξης Μετάλλου με χρήση Λείζερ (DMLS).

Μια εναλλακτική προσέγγιση στην κατασκευή μεταλλικών μερών και στην βελτίωση των τεχνολογιών επεξεργασίας σκόνης σε κλίνη, πραγματοποιείται με την έγχυση σκόνης (powder injection). Οι τεχνολογίες που στηρίζονται σε αυτή τη μέθοδο ονομάζονται Μέθοδοι Έγχυσης Σκόνης με χρήση Λείζερ (**Laser Powder Injection**). Μεταγενέστερα αναγνωρίζονται και ως τεχνολογίες Άμεσης Ενεργειακής Τοποθέτησης (**Direct Energy Deposition/DED**) ή Διαμόρφωση Σκόνης με χρήση Λείζερ (**Laser Powder Forming/LPF**). Εμπεριέχονται όλες οι μέθοδοι στις οποίες η ενέργεια δημιουργεί μια τηκόμενη περιοχή πάνω στην οποία θα συντεθεί το τεμάχιο από την πρώτη ύλη (feedstock) που θα τοποθετηθεί. Η πρώτη ύλη μπορεί να είναι είτε σκόνη είτε σύρμα. Σε γενικότερο πλαίσιο, θεωρείται ότι η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην παραδοσιακή μέθοδο της συγκόλλησης (welding) [74].

Μια από πιο σημαντικότερες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν σε αυτή τη λογική είναι η Καθαρή Μηχανική Μορφοποίηση με χρήση Λείζερ (**Laser Engineered Net Shaping/LENS**). Αποτελεί ένα ορθό μέσο αποτύπωσης του τρόπου εκτέλεσης της τεχνολογίας άμεσης ενεργειακής τοποθέτησης. Αναπτύχθηκε από το εργαστήριο Sandia National Laboratory και σήμερα βελτιώνεται και αξιοποιείται από την εταιρία Optomec [75]. Κατασκευαστικά, το λογισμικό σύστημα του μηχανήματος ελέγχεται αυτόματα από τους αισθητήρες που εμπεριέχονται στο σύστημα. Η σκόνη, όντας τοποθετημένη σε χοάνη, εγχέεται μέσα από ένα ακροφύσιο (nozzle), το οποίο τήκεται και δημιουργεί σταδιακά το στερεοποιημένο κομμάτι. Επιπρόσθετα, η σκόνη μεταφέρεται από ένα φορέα ευγενούς αερίου (inert carrier gas) ή ένα σύστημα τροφοδότησης βαρύτητας (gravity feed). Ταυτόχρονα, χρησιμοποιείται ένα προστατευτικό αέριο (shielding gas), όπως άζωτο ή αργό, με το οποίο αποφεύγεται η πιθανότητα οξείδωσης του σημείου που έχει τηχθεί, κυρίως όταν γίνεται η χρήση μετάλλων τιτανίου και νιόβιου (niobium). Υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν είναι απαραίτητη η χρήση αερίου. Είναι πολλές οι φορές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια αντλία και ένα σύστημα εκκαθάρισης ενός μέρους του οξυγόνου που περικλείεται στον θάλαμο κατασκευής. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής το πλεόνασμα της σκόνης αφαιρείται από τον θάλαμο και σε πολλές περιπτώσεις επαναχρησιμοποιείται [13,20].

Όλη η κατασκευή πραγματοποιείται πάνω σε ένα ειδικά διαμορφωμένο τραπέζι, το οποίο μπορεί να είναι είτε στατικό για την κατασκευή σε τρισδιάστατο σύστημα (3 axis) είτε

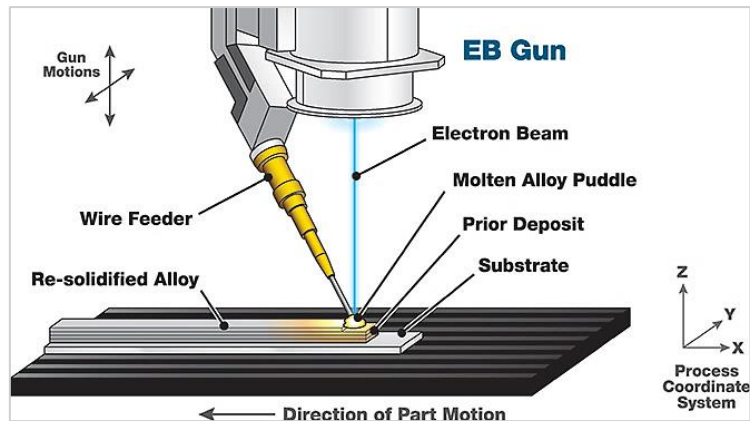
περιστρεφόμενο για την κατασκευή σε σύστημα 5 διαστάσεων και άνω (5+ axis), αναλόγως με τον σχεδιαστικό αλγόριθμο κάθε τεμαχίου. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, το τεμάχιο δέχεται περαιτέρω επεξεργασία με σκοπό την βελτίωση των μηχανικών του ιδιοτήτων, όπως η μείωση των παραμένοντων τάσεων. Πρακτικά, οι μέθοδοι που αναπτύσσονται με αυτή την τεχνολογία, αξιοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για διαδικασίες δημιουργίας επένδυσης (cladding) και επιδιόρθωσης. Σε σύγκριση με την μέθοδο SLM, με αυτή την τεχνική κατασκευάζονται μέρη μεγαλύτερης κλίμακας [13].



Εικόνα 40: Μέθοδος Καθαρής Μηχανικής Μορφοποίησης με χρήση Λείζερ [76].

Στην παραπάνω μεθοδολογία έχει βασιστεί και η ανάπτυξη του Συστήματος *Άμεσης Απόθεσης Μετάλλων* (**Direct Metal Deposition/DMD**) από την εταιρία Precision Optical Manufacturing (POM) [77]. Η ιδιαιτερότητα της τεχνολογίας αυτής έγκειται στην δημιουργία συστήματος σκόνης με έγχυση κάνοντας χρήση fiber-λείζερ, το οποίο είναι τοποθετημένο σε ρομποτικό βραχίονα. Χρησιμοποιείται ως μέθοδος προσθήκης υλικού και μέρους σε ήδη κατασκευασμένα τμήματα ή και στην δημιουργία μεμονωμένων μερών [13].

Μια τεχνολογία που εκτελείται με τη χρήση σύρματος στην βασική φάση της κατασκευής, είναι η *Άμεση Κατασκευή με χρήση Ακτίνας Ηλεκτρονίου* (**Electron Beam Direct Manufacturing/EBDM**). Πρόκειται για μια μέθοδο Άμεσης Ενεργειακής Τοποθέτησης που στηρίζεται στην μεθοδολογία της τεχνολογίας LENS. Ταυτόχρονα, αναγνωρίζεται και ως μέθοδο Κατασκευής Ελεύθερης Μορφής. Από το 2009, αξιοποιείται και εξελίσσεται αποκλειστικά από την εταιρία Sciaky. Κατασκευαστικά, το μεταλλικό σύρμα τήκεται και η πρώτη ύλη συνθέτει το τεμάχιο μέσα σε ένα κενό θάλαμο. Γίνεται χρήση μιας ψηφιακά ελεγχόμενης συγκολλητικής ακτίνας ηλεκτρονίου (electron beam welding), η οποία οδηγούμενη από ένα ρομποτικό σύστημα, τήκει το υλικό και δομεί το τεμάχιο πάνω σε ένα ειδικά διαμορφωμένο τραπέζι. Το πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας βρίσκεται στην χρήση της ακτίνας ηλεκτρονίου, η οποία θεωρείται ένα αποτελεσματικό μέσο κατασκευής. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι μπορεί να εστιαστεί και να εκτραπεί με μεγάλη ακρίβεια στην επιφάνεια κατασκευής λόγω της χρήσης ηλεκτρομαγνητικών σπειρωμάτων, σε συνδυασμό με την ύπαρξη μη μολυσμένης ατμόσφαιρας κατά την κατασκευαστική φάση. Πρακτικά, δημιουργεί τελειοποιημένα μέρη μεγάλης κλίμακας [12,78].



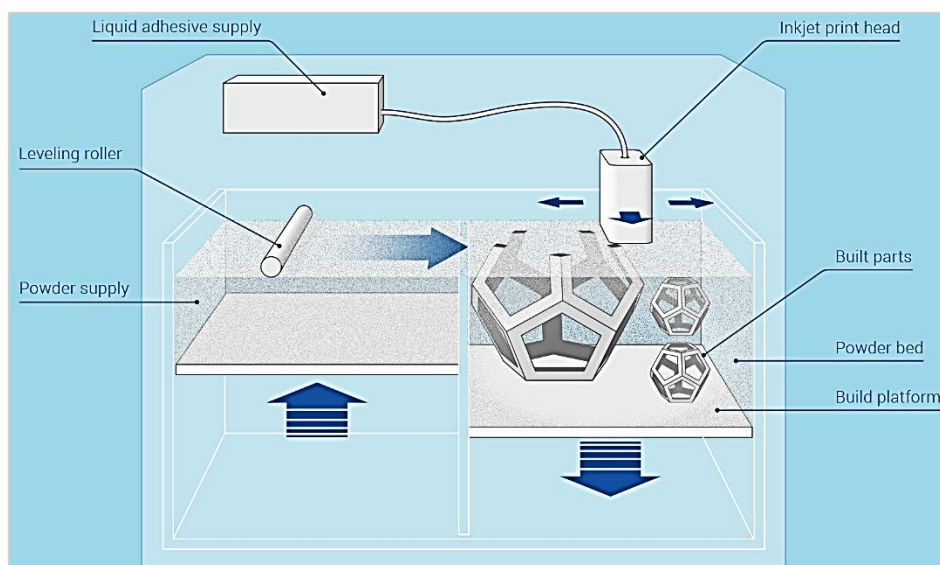
Εικόνα 41: Μέθοδος Άμεσης Κατασκευής με χρήση Ακτίνας Ηλεκτρονίου (EBDM).

Στην ίδια κατηγορία, ανήκει η μέθοδος *Σταθεροποίησης με χρήση Λέιζερ (Laser Consolidation/LC)*. Πρόκειται για έναν εναλλακτικό τρόπο διείσδυσης (infiltration) με τον οποίο μπορούν να παραχθούν στερεοποιημένα κράματα. Έχει βασιστεί στην λογική της μεθόδου LENS και αναπτύχθηκε από την συνεργασία της εταιρίας GE Global Research και του Ινστιτούτου Κατασκευής Ενσωματωμένων Τεχνολογιών του Εθνικού Συμβουλίου Ερευνών του Καναδά (Integrated Manufacturing Technologies of the National Research Council of Canada). Η βάση της μεθόδου έγκειται στον σχεδιασμό της γεωμετρίας της παραμόρφωσης, ώστε να δομηθεί ορθά η ομοιόμορφη συρρίκνωση (uniform shrinkage) κατά τη φάση της τήξης των σωματιδίων. Λόγω της δυσκολίας ορθής αποτύπωσης της παραμόρφωσης, υπάρχει η πιθανότητα δημιουργίας μη ομοιόμορφης σταθεροποίησης και μη αναμενόμενων κρεμασμάτων (sagging) του υλικού. Επίσης, η φάση της τήξης διαρκεί όσο χρειαστεί μέχρι να δημιουργεί η επιθυμητή γεωμετρία. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία, μέσω της οποίας έχει αποδειχθεί ότι η τραχύτητα της επιφάνειας του τεμαχίου μειώνεται σημαντικά [20,79].

Εξελίσσοντας και διαφοροποιώντας τις τεχνολογίες DED, δημιουργείται η ομάδα μεθοδολογιών που αναγνωρίζεται ως *Τοποθέτηση Συγκολλητικής Ουσίας με Ποσότητα Υγρού που βγαίνει λόγω πίεσης (Binder Jetting)*. Πρόκειται για μια βελτιωμένη εκδοχή της τεχνολογίας *Ψηφιακής Υλοποίησης Μερών (Digital Part Materialization/DPM)*, που αναπτύχθηκε στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (Massachusetts Institute of Technology/MIT). Σήμερα, ως μέθοδος αξιοποιείται και αδειοδοτείται από την εταιρία ExOne, η οποία θεωρείται ως η κύρια εταιρία κατασκευής εξοπλισμού αυτής της τεχνολογίας. Συγκεκριμένα, ως τεχνολογία πραγματοποιείται με την τοποθέτηση της συγκολλητικής ουσίας στην σκόνη μετάλλου, προκαλώντας την άμεση σύνδεση των σωματιδίων της. Μπορεί να αποδοθεί μέσω της τήξης (sintering) ή της σταθεροποίησης (consolidating) της σκόνης, διεισδύοντας (infiltrating) με ένα δεύτερο μέταλλο, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 42. Με την διείσδυση ενός ελάσματος με χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης, επιτυγχάνεται η δημιουργία τελικού τεμαχίου με πυκνή δομή. Ωστόσο, η εμφάνιση πορώδους (porosity) είναι συχνό φαινόμενο, αφού γίνεται χρήση της σκόνης μετάλλου. Η περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθεί, επεξηγεί την ιδιαιτερότητα αυτής της μεθόδου.

Η διαδικασία είναι ευρέως γνωστή για την διείσδυση ορείχαλκου στην πορώδη επιφάνεια του σιδήρου. Ουσιαστικά πραγματοποιείται επιλεκτική τοποθέτηση υγρής συγκολλητικής ουσίας πάνω στην σκόνη μετάλλου μέσα από ένα ειδικά κατασκευασμένο στόμιο μελανιού (inkjet). Όταν η συγκολλητική ουσία ομογενοποιηθεί και σκληρύνει, τότε το εύθραστο μείγμα μεταλλικής συγκολλητικής ουσίας, που αναφέρεται και ως «πράσινο σώμα» (green body), μπορεί να αφαιρεθεί από το σύστημα. Με μια μετέπειτα επεξεργασία 6-12 ωρών, το μείγμα αυτό μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις μηχανικές του ιδιότητες. Ύστερα, ακολουθείται μια διαδικασία συγκόλλησης περίπου στους 1100°C για 24-36 ώρες, όπου και

δημιουργείται ένα συντηγμένο τμήμα με πυκνότητα 60%. Η διείσδυση επιτυγχάνεται όταν το μερικώς συντηγμένο τμήμα συνδεθεί με μια τηκόμενη περιοχή ενός δεύτερου υλικού με χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης. Όλη αυτή η διαδικασία οδηγεί στην δημιουργία πυκνών μερών, γεγονός που αποδεικνύεται από την διείσδυση ορείχαλκου από ανοξείδωτο χάλυβα (stainless), όπου επιτυγχάνεται 95% τελική πυκνότητα. Επιπρόσθετα, η χρήση κρύου κλιβάνου (furnace cool) επιφέρει την επιθυμητή ανόπτηση (anneal) και αύξηση της ολκιμότητας (ductility) του τεμαχίου. Μελετώντας την διαφορά που παρουσιάζει η διαδικασία αυτή με την αντίστοιχη διαδικασία της σταθεροποίησης, τα συμπεράσματα καταγράφονται στην περιγραφή της μεθόδου LC παραπάνω [12,20] .



Εικόνα 42: Κατασκευαστική διαδικασία με τη μέθοδο Binter Jetting.

Συμπληρωματικά με τις παραπάνω μεθόδους Προσθετικής Κατασκευής, έχουν αναπτυχθεί διάφορα νέα μοντέλα και διαδικασίες που συνεχώς εξελίσσονται. Σε κάθε διαδικασία διαφοροποιείται τόσο η πρώτη ύλη όσο και ο τρόπος εισαγωγής της ενέργειας. Γίνεται χρήση συγκολλητών ακτίνας ηλεκτρονίου (electron beam welders), εξοπλισμού με συγκολλητικό τόξο (arc welding equipment) και υπερηχητικής ενέργειας (ultrasonic energy). Ως ένα γενικότερο συμπέρασμα από ποικίλες πειραματικές και ερευνητικές μελέτες και πειράματα, έχει διαπιστωθεί ότι οι τεχνολογίες που αξιοποιούν αυτούς τους τρόπους ενεργειακής τοποθέτησης, συνθέτουν μέρη μεγαλύτερης κλίμακας, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να παρουσιάσουν χαμηλότερη διαστατική ακρίβεια. Αναγνωρίζονται στην παγκόσμια κοινότητα ως *Κατασκευές Ελεύθερης Μορφής* (**Free Form Fabrications**) [13].

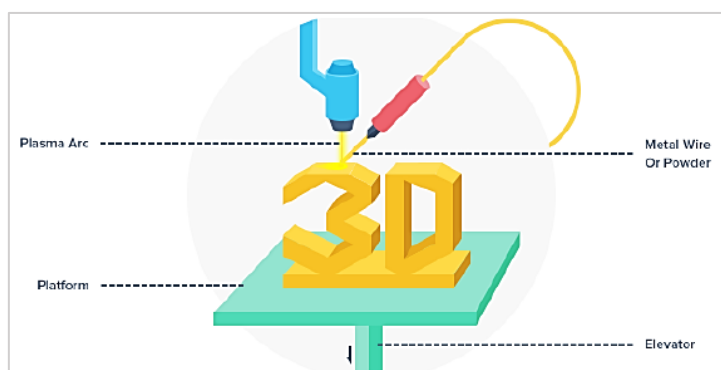
Η εταιρία MER Corporation ανέπτυξε την μέθοδο *Μεταφοράς Τόξου Πλάσματος με Επιλεκτική Κατασκευή Ελεύθερης Μορφής* (**Plasma Transferred Arc Selective Free Form Fabrication/PTA-SFFF**), η οποία χρησιμοποιεί ως υλικά πλήρωσης το σύρμα και τη σκόνη για να δομήσει την μεταλλική κατασκευή. Πρακτικά, ένας φακός Μεταφοράς Τόξου πλάσματος (PTA) και μια τοποθετημένη πλατφόρμα ελέγχονται από ένα ρομπότ ή ελεγκτή πολλαπλών αξόνων (multi-axis controller), ενώ παράλληλα η κατεύθυνση που θα ακολουθηθεί έχει ήδη προγραμματιστεί. Η σκόνη εισάγεται ταυτόχρονα μέσα από ένα στόμιο αερίου (orifice gas) και ένα προστατευτικό αέριο, καθώς επίσης το σύστημα συγκόλλησης με χρήση του τόξου πλάσματος παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για την τήξη.

Το μηχάνημα που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο δίνει τη δυνατότητα κατασκευής τεμαχίου με 2x2 ft στο επίπεδο x-y και ύψος 17 ft. Αυτή η κατασκευαστική δυνατότητα του μηχανήματος, αναγνωρίζεται ως μια από τις πιο αποδοτικές στην δημιουργία μερών με μεγάλες διαστάσεις. Όσον αφορά την λειτουργία του μηχανήματος, γίνεται χρήση επεκτατικών φυσούνων, οι οποίες ενεργοποιούν την εισχώρηση ευγενών προστατευτικών αερίων. Επιπλέον,

η διαδικασία δεν εκτελείται μέσα σε ερμητικά σφραγισμένο περιβάλλον. Ως τεχνολογία έχει αξιοποιηθεί ευρέως από την πολεμική και αεροδιαστημική βιομηχανία [80].

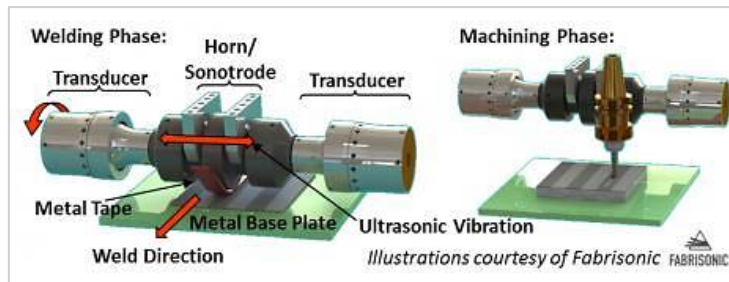
Η μέθοδος *Διαμόρφωσης με Σύντηξη Ιόντων* (**Ion Fusion Formation/IFF**) είναι μια διαφορετική προσέγγιση κατασκευής μερών με προσθετική προσέγγιση. Δημιουργήθηκε και αξιοποιείται αποκλειστικά από την εταιρία Honeywell Aerospace. Πρακτικά, τήκεται σύρμα ή σκόνη μετάλλου με ένα φακό συγκόλλησης με πλάσμα, ώστε να συντεθεί το επιθυμητό τεμάχιο. Το πλάσμα των θερμαινόμενων ιόντων αργού (heated argon ions) επεξεργάζεται την πρώτη ύλη σύρματος ή σκόνης και δημιουργεί το τεμάχιο. Ο μηχανισμός τοποθέτησης υλικού ελέγχεται από έναν υπολογιστή και κατασκευάζει το στρώμα στην ήδη τηκόμενη περιοχή. Το στρώμα (layer) σχηματίζεται όσο η τηκόμενη περιοχή ψύχεται και σκληραίνει. Η διαδικασία συνεχίζεται με τον σχηματισμό μιας επίστρωσης κάθε φορά. Ως τελικό αποτέλεσμα, δημιουργείται μια λεπτή μικροδομή και ελαφριά παραμόρφωση, λόγω του υψηλού βαθμού ψύξης του μετάλλου. Επιπλέον, το τελικό τεμάχιο έχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, εκτός από αυτό που δημιουργείται με σύρμα. Με τη χρήση σύρματος, κρίνεται απαραίτητη περαιτέρω επεξεργασία λόγω της δημιουργίας τραχείας επιφάνειας [12,81].

Μια σημαντική κατηγορία των κατασκευών ελεύθερης μορφής, θεωρείται η *Στρωματοποίηση των Φύλλων* (**Sheet Lamination**). Πρόκειται για διάφορες τεχνικές που στοχεύουν στην συγκόλληση ή αλλιώς ένωση των μεταλλικών φύλλων μεταξύ τους. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στην ικανότητα δημιουργίας τεμαχίου από μεταλλικά φύλλα διαφορετικής προέλευσης και με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Οι τεχνικές με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί μια τέτοια κατασκευή, είναι η συγκόλληση με ορείχαλκο (brazing), η συγκόλληση με χρήση λέιζερ (laser welding), η συγκόλληση με αντίσταση (resistance welding) και η υπερηχητική σταθεροποίηση (ultrasonic consolidation).



Εικόνα 43: Μέθοδος Διαμόρφωσης με Σύντηξη Ιόντων (IFF) [12].

Η μέθοδος *Προσθετικής Κατασκευής με Υπερήχους* (**Ultrasonic Additive Manufacturing/UAM**) αποτελεί μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε το 2003 από την συνεργασία των εταιριών EWI και Solidica [82]. Πρόκειται για μια τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως για την στρωματοποίηση των φύλλων μετάλλου. Ένα περιστρεφόμενο εργαλείο που είναι γνωστό ως «sonotrode», κινείται από πιεζοηλεκτρικούς μορφοτροπείς (piezoelectric transducers) και εφαρμόζει υπερηχητικές δονήσεις (vibrations > 20 kHz) σε ένα φύλλο. Κατά αυτό τον τρόπο δημιουργούνται τριβή (scrubbing action) και πλαστική παραμόρφωση (plastic deformation) μεταξύ του φύλλου και του υλικού στο οποίο συγκολλάτε, το οποίο συχνά μπορεί να είναι μια μεταλλική βάση, ένα τμήμα ή άλλα φύλλα. Στην φάση της τριβής μετατοπίζονται τα οξείδια και οι ρύποι που βρίσκονται στην επιφάνεια. Πολλές φορές γίνεται χρήση CNC μηχανής ώστε να αφαιρεθεί ανεπιθύμητο υλικό από την επιφάνεια ή ακόμα να δοθεί διαστατική ακρίβεια. Η χρήση αυτής της μεθόδου είναι ιδανική για την κατασκευή μερών υψηλής ποιότητας, λόγω του συνδυασμού πολλαπλών μετάλλων με αποτελεσματική σύνδεση. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής στρωμάτων με πάχος περίπου 200μm.



Εικόνα 44: Ανάπτυξη Μεθόδου Προσθετικής Κατασκευής με Υπερήχους (UAM).

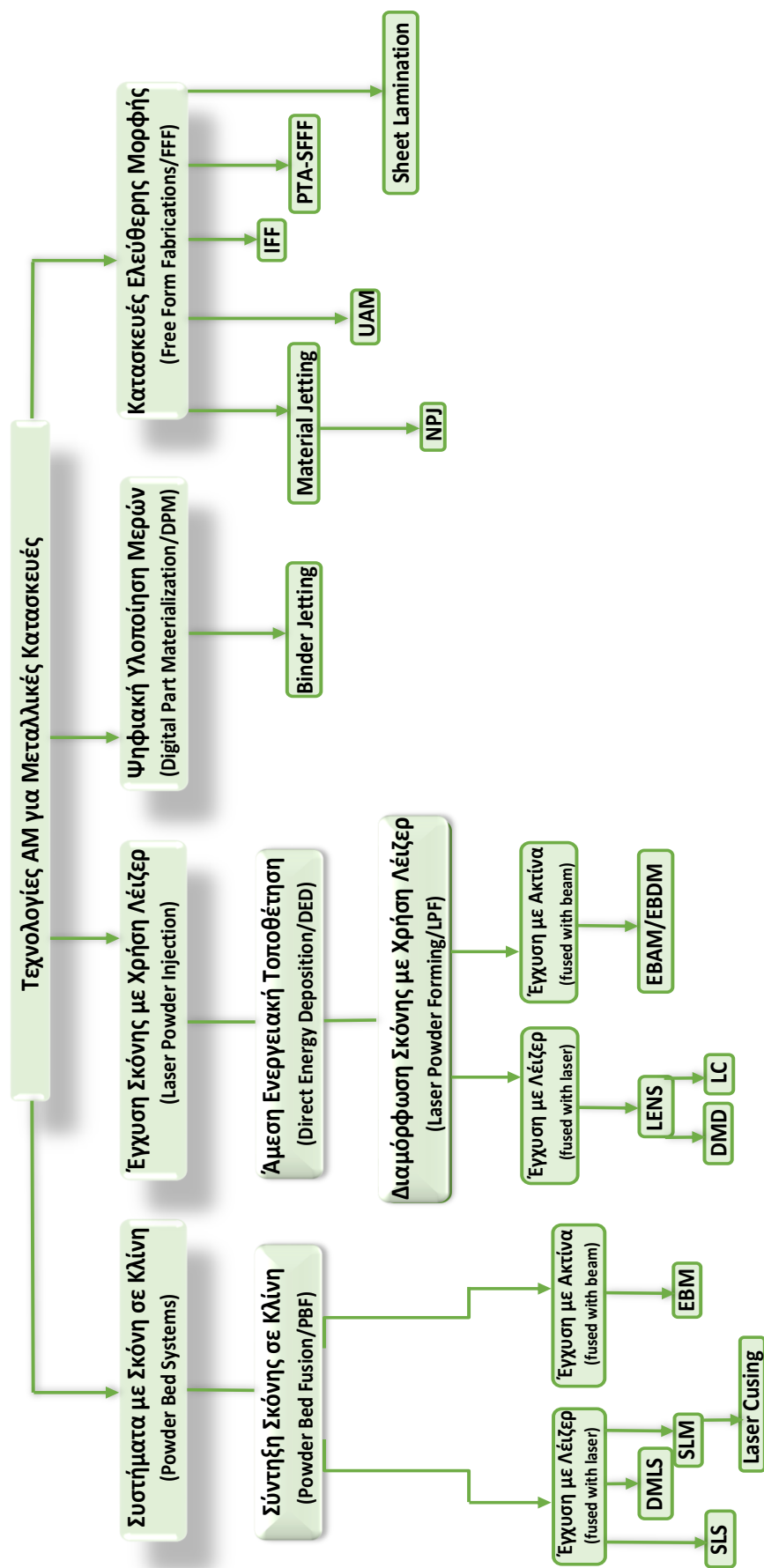
Στην κατηγορία των τεχνολογιών ελεύθερης σχεδίασης έχουν αναπτυχθεί διάφορες πατέντες, κυρίως από τα ερευνητικά εργαστήρια εταιριών. Μια τέτοια μέθοδος είναι η *Εναπόθεση Σχηματιζόμενου Μετάλλου (Shaped Metal Deposition/SMD)*, η οποία αναπτύχθηκε από την εταιρία Rolls Royce και μετέπειτα δόθηκε για περαιτέρω έρευνα στο Πανεπιστήμιο Sheffield. Κατασκευαστικά, γίνεται χρήση μιας ενεργειακής πηγής συγκόλλησης τόξου αερίου βολφραμίου (gas tungsten arc welding/GTAW) μέσω ελεγχόμενου υπολογιστή, ο οποίος ενσωματώνεται με ένα ρομπότ. Όσο η τεχνολογία αυτή βελτιώνεται, τόσο πιο αυτοματοποιημένη γίνεται. Επίσης η εταιρία EWI ανέπτυξε μια προσέγγιση Συγκόλλησης Τόξου Αερίου Βολφραμίου με Ζεστό Σύρμα (hot wire gas tungsten arc welding/HW-GTAW) [13].

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής εξελίσσονται συνεχώς. Στην Εικόνα 55 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά κάποιες από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν παραπάνω, καθώς και οι εταιρίες από τις οποίες αξιοποιούνται και βελτιώνονται. Είναι γεγονός ότι η εμπορική διάθεση του εξοπλισμού κατασκευής μερών είναι ακόμα περιορισμένη, αλλά όλες οι έρευνες δείχνουν ότι αυτό θα ανατραπεί στο άμεσο μέλλον. Στο Σχεδιάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το σύνολο των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής στον τομέα των μετάλλων, με βάση τον τρόπο ανάπτυξης της πλειοψηφίας των μεθόδων που καταγράφηκαν σε αυτή την ενότητα.

System	Process	Build volume (mm)	Energy source
Powder bed			
ARCAM (A2)(a)	EBM	200 × 200 × 350	7 kW electron beam
EOS (M280)(b)	DMLS	250 × 250 × 325	200-400 W Yb-fiber laser
Concept laser cusing (M3)(b)	SLM	300 × 350 × 300	200 W fiber laser
MTT (SLM 250)(b)	SLM	250 × 250 × 300	100-400 W Yb-fiber laser
Phenix system group (PXL)(c)	SLM	250 × 250 × 300	500 W fiber laser
Renishaw (AM 250)(d)	SLM	245 × 245 × 360	200 or 400 W laser
Realizer (SLM 250)(b)	SLM	250 × 250 × 220	100, 200, or 400 W laser
Matsuura (Lumex Advanced 25)(e)	SLM	250 × 250 diameter	400 W Yb fiber laser; hybrid additive/subtractive system
Powder feed			
Optomec (LENS 850-R)(f)	LENS	900 × 1500 × 900	1 or 2 kW IPG fiber laser
POM DMD (66R)(f)	DMD	3,200° × 3°, 670° × 360°	1-5 kW fiber diode or disk laser
Accufusion laser consolidation(g)	LC	1,000 × 1,000 × 1,000	Nd:YAG laser
Irepa laser (LF 6000)(c)	LD		Laser cladding
Trumpf(b)	LD	600 × 1,000 long	
Huffman (HC-205)(f)	LD		CO ₂ laser cladding
Wire feed			
Sciaky (NG1) EBFFF(f)	EBDM	762 × 483 × 508	> 40 kW @ 60 kV welder
MER plasma transferred arc selected FFF(f)	PTAS FFF	610 × 610 × 5,182	Plasma transferred arc using two 350A DC power supplies
Honeywell ion fusion formation(f)	IFF		Plasma arc-based welding
Country of Manufacturer: (a) Sweden, (b) Germany, (c) France, (d) United Kingdom, (e) Japan, (f) United States, and (g) Canada			

Εικόνα 45: Συστήματα κατασκευής μεταλλικών μερών με μεθόδους Προσθετικής Κατασκευής. Παρουσίαση των κατασκευαστικών δυνατοτήτων και των ενεργειακών πηγών που χρησιμοποιούνται σε κάθε τεχνολογία ξεχωριστά [4].

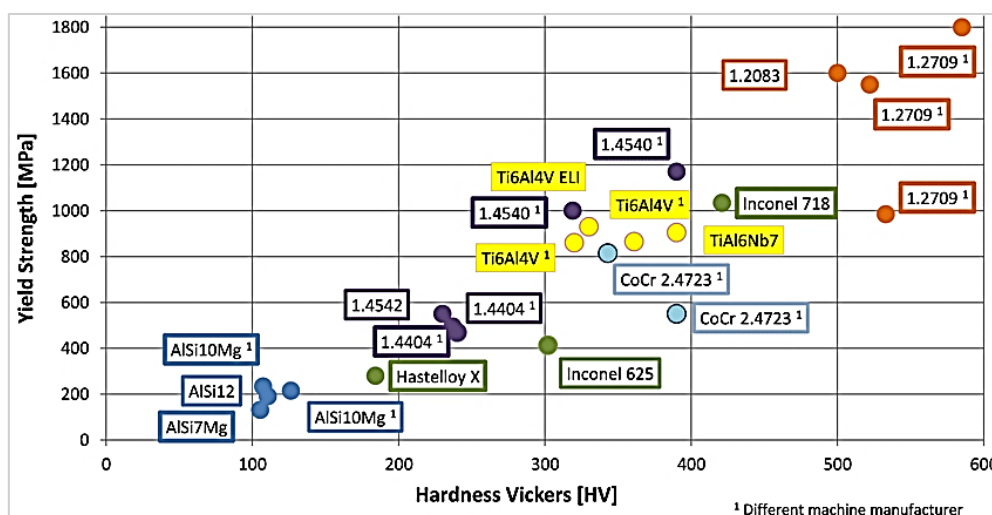
Σχεδιάγραμμα: Ανάπτυξη Μεθόδων Προσθετικής Κατασκευής στον Κλάδο των Μεταλλικών Κατασκευών



3.4 Υλικά και Πρώτες Ύλες

Το φάσμα των διαθέσιμων υλικών Προσθετικής Κατασκευής μεγαλώνει όσο οι τεχνολογίες εξελίσσονται και επεκτείνονται. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται εκτενώς είναι το ατσάλινο εργαλείο (tool steel), το ανοξείδωτο ατσάλι (stainless steel), το καθαρό τιτάνιο (pure titanium), τα κράματα τιτανίου (titanium alloys), τα κράματα χύτευσης αλουμινίου (aluminum casting alloys), τα υπερκράματα βάσης νικελίου (nikel-based superalloys), τα κράματα κοβάλτιου-χρωμίου (cobalt-chromium alloys), ο χρυσός και το ασήμι [83]. Για την πλήρη αξιοποίηση κάθε υλικού κρίνεται απαραίτητη μια επιπλέον επεξεργασία. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλαπλές μελέτες γύρω από τα υλικά που ήδη χρησιμοποιούνται, αλλά υπάρχουν ακόμα ζητήματα προς διερεύνηση, όπως η μόλυνση (contamination), ο χημικός έλεγχος κατά τη διαδικασία της τήξης, η δημιουργία ραγισμάτων (cracking) κατά την στερεοποίηση, καθώς και διάφορα άλλα.

Ουσιαστικά μικρές αλλαγές στην χημική σύσταση της μικροδομής του υλικού μπορούν να βελτιώσουν τα τελικά αποτελέσματα, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, η ανοχή, η κόπωση και η δύναμη. Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει αδυναμία προσδιορισμού αυτών των λεπτομερειών, λόγω του ανεπαρκούς ελέγχου, της ελλιπής γνώσης για την ανάπτυξη κάποιων μεθόδων και της έλλειψης τυποποιημένων μεθόδων ελέγχου των υλικών. Σε γενικότερο πλαίσιο, για την επιλογή κάθε υλικού χρειάζεται η σωστή μελέτη της αντίστοιχης μεθόδου από την οποία θα αξιοποιηθεί, ώστε να κατασκευαστεί το επιθυμητό τεμάχιο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, πραγματοποιείται τήξη των μεταλλικών υλικών και άμεση παραγωγή ενός τεμαχίου με πλήρη πυκνότητα και βασικές μηχανικές ιδιότητες [26].



Εικόνα 46: Κατανομή πρώτων υλών για τεχνολογίες AM με βάση την αντοχή διαρροής και την σκληρότητα τους, όπως ερευνήθηκε από διαφορετικούς μελετητές. (Κράματα αλουμινίου (μπλε χρώμα), Κράματα βάσης Νικελίου (πράσινο χρώμα), Ανοξείδωτο Ατσάλι (γκρι χρώμα), Κράματα Τιτανίου (κίτρινο χρώμα), Κράματα βάσης Κοβάλτιου-Χρωμίου (γαλάζιο χρώμα), Ατσάλινο Εργαλείο (πορτοκαλί χρώμα)).

Η διαφοροποίηση που παρατηρείται στις τεχνολογίες AM σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, προσδιορίζεται στην χρήση σκόνης μετάλλου. Σε μικροσκοπική μελέτη, τα σωματίδια των κόκκων έχουν σφαιρική γεωμετρία, η οποία έχει προκύψει από την διάσπαση του αερίου. Η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων εξαρτάται από το πάχος της στιβάδας και είναι περίπου 10-15 μm . Οι ιδιότητες του υλικού, όπως η αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength), η σκληρότητα (hardness) και η επιμήκυνση (elongation), χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς για την απόφαση του μηχανικού σχετικά με την επιλογή του υλικού που

ταιριάζει με την κατασκευή που επιθυμεί να δημιουργήσει. Μια ενδεικτική βοηθητική πληροφορία για την επιλογή ενός υλικού με βάση την αντοχή διαρροής (yield strength) και την σκληρότητα που έχει αποδειχθεί από τον έλεγχο Vicker (Hardness Vickers), παρατίθεται στην Εικόνα 46 [84].

Μελετώντας εκτενέστερα τις διαθέσιμες πρώτες ύλες, σημαντική κρίνεται η χρήση της *Καθαρής Σκόνης Μετάλλου (Pure Metals Powder)*, η οποία έχει εφαρμοστεί σε πολλές τεχνολογίες και εμπεριέχει τα υλικά Τιτανίου (Titanium/**Ti**), Ταντάλιου (Tantalum/**Ta**), Χαλκού (Copper/**Cu**) και Χρυσού (Gold/**Au**). Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση αυτών των καθαρών μετάλλων, σε σύγκριση με τη χρήση κραμάτων, είναι λιγότερη λόγω της αδυναμίας ορθής τήξης τους από τους μηχανισμούς που ακολουθούνται. Για παράδειγμα, τόσο οι αδύναμες μηχανολογικές ιδιότητες όσο και οι ανεπαρκείς ικανότητες αντίστασης στην οξείδωση που δημιουργούνται κατά την κατασκευαστική φάση, θεωρούνται δεσμευτικοί παράγοντες για τις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής. Ταυτόχρονα, σε μεθόδους που γίνεται χρήση τιτανίου, όπως η τεχνολογία SLS, ο μηχανισμός τήξης δημιουργεί ετερογενείς μικροδομές με περιοχές πυρήνα με μη τηκόμενους κόκκους και υπολειπόμενους πόρους (residual pores). Επιπλέον, η αντίδραση μεταξύ των σωματιδίων της σκόνης και της ακτίνας λέιζερ, μπορεί να δημιουργεί διαφορετικές πορώδεις δομές με βάση την ταχύτητα σάρωσης. Ωστόσο, η βελτίωση της μεθόδου SLM αποδίδει εξαρτήματα από μη σιδηρούχα (nonferrous) καθαρά μέταλλα.

Εστιάζοντας στον τρόπο παραγωγής σκόνης τιτανίου, παρατηρούνται σημαντικές ενέργειες βελτίωσης του, κυρίως για οικονομικούς λόγους. Κατασκευαστικά, η δομή τιτανίου δέχεται μια επεξεργασία κατά την οποία τήκεται μέσα σε μια ειδικά διαμορφωμένη φόρμα και μετά κονιορτοποιείται (atomized) σε σκόνη. Πρόκειται για μια διαδικασία που είναι οικονομικά επιβαρυντική και απαιτεί εξονυχιστική εργαστηριακή παρακολούθηση. Μια διαδικασία μεταλλοποίησης είναι η παραγωγή σκόνης τιτανίου από άμμο ρουτιλίου (rutile) μέσω της χρήσης ηλεκτρόλυσης. Αποτελεί μια οικονομικά προσοδοφόρα διαδικασία, καθώς επίσης ενθαρρύνει τη χρήση σκόνης τιτανίου για την διεκπεραίωση κατασκευών με τις τεχνολογίες AM, κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Σημαντική καθίσταται η αναφορά στη χρήση *Κραμάτων Σκόνης (Alloys Powder)*, η οποία αξιοποιείται ευρέως και αφορά στα κράματα με βάση Τιτανίου-Ti, Νικελίου-Ni, Σιδήρου-Fe, Χαλκού-Cu και Αλουμινίου-Al. Όσον αφορά τα κράματα τιτανίου (**Ti**), πιο αξιοποιήσιμη θεωρείται η σύνθεση Ti-6Al-4V, η οποία παρουσιάζει σημαντικές μηχανικές και χημικές ιδιότητες. Σε αυτό το κράμα εμπεριέχονται 6% αλουμίνιο και 4% βανάδιο. Παρατηρείται έντονη διαφορά στην αντοχή σε εφελκυσμό των κατασκευασμένων μερών με την μέθοδο SLM σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Αυτό αιτιολογείται από την μικροδομή του Ti-6Al-4V, που χαρακτηρίζεται ως συμπαγής κλειστή εξαγωνική (hexagonal close packed/hcp). Επιπρόσθετα, η ολκιμότητα είναι χαμηλότερη λόγω της επακόλουθης επεξεργασίας με θερμή διαδικασία, γεγονός που μπορεί να βελτιωθεί μέσω της σταθεροποίησης της δομής του τεμαχίου με παραλλαγμένες διαδικασίες SLM. Στην ευρύτερη βιομηχανία η σύνθεση αυτών των κραμάτων είναι γνωστή ως ένα κράμα ‘α + β’, το οποίο μπορεί να δεχθεί μια θερμή διαδικασία και να αυξήσει την δυναμική του απόδοση. Ταυτόχρονα, η δημιουργία μερών με ελαφρύ βάρος, αντίσταση στην οξείδωση και ικανότητα μορφοποίησης, καθιστά το υλικό αυτό άμεσα αξιοποιήσιμο από την αεροπορική βιομηχανία. Γενικότερα, οι ιδιότητες του υλικού αυτού, όπως το μέγεθος των κόκκων, η κρυσταλλογραφική δομή και η μορφολογία διαμορφώνονται κατά τη φάση της στερεοποίησης. Παράλληλα, υπάρχουν πολλές μεταβλητές που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντων διαμορφώνοντας χαρακτηριστικά όπως το πορώδες, η επιφάνεια, οι παραμένουσες τάσεις, η μικροδομή και η υφή. Οι μεταβλητές αυτές μπορεί να είναι χαρακτηριστικά του λέιζερ που χρησιμοποιείται σε κάποιες τεχνολογίες AM, όπως το είδος, το μέγεθος, η ενέργεια, η ταχύτητα και άλλα [85].

Τα μέρη που κατασκευάζονται με βάσεις υπερ-κραμάτων Νικελίου (**Ni**) αφορούν κυρίως κατασκευές στροβιλοκινητήρων, τουρμπινών αερίου, κρυογόνων αποθηκευτικών

δεξαμενών (cryogenic storage tanks) και πετροχημικών εφαρμογών (petrochemical applications). Τέτοια κράματα είναι το Inconel ή το κράμα Rene, τα οποία αναπτύσσουν αντίσταση στην οξείδωση (corrosion resistance), ανοχή στις βλάβες (damage tolerance), εφελκυστικές ιδιότητες (tensile properties) και ισορροπία στην παρείσφρηση (balance of creep). Τα κράματα Rene περιέχουν ένα ποσοστό 6 wt% από στοιχεία των Al και Ti. Τα κράματα Inconel είναι κράματα νιόβιου (Niobium/Nb) τα οποία τροποποιούνται σε υπερκράματα Ni και προκαλούν ευκολότερα την εμφάνιση ραγισμάτων στην επιφάνεια του κατασκευασμένου τεμαχίου. Για τον λόγο αυτό χρίζεται απαραίτητη η επακόλουθη επεξεργασία, με σκοπό την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Ένα κράμα, που χρησιμοποιείται και στην μέθοδο SLM, είναι το Inconel 718. Αποτελείται από νικέλιο και χρώμιο και θεωρείται πιο εξελιγμένη μορφή όσον αφορά την σκληρότητα, από το κράμα Inconel 625. Έχει υποστεί καθίζηση σκλήρυνσης (precipitation hardenable) και έχει αντοχή στην παρείσφρηση ρωγμών (creep rupture strength) σε θερμοκρασίες πάνω από 700°C. Επιπλέον η αντοχή διαρροής και εφελκυσμού μπορεί να εμφανιστεί πιο σπάνια, καθώς επίσης τα τελικά τεμάχια που δημιουργούνται παρουσιάζουν εξαιρετική συγκολλησιμότητα [12].

Τα κράματα αλουμινίου (Al) αξιοποιούνται σημαντικά από την ευρύτερη βιομηχανία και ειδικότερα από την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική. Με την χρήση τους επιτυγχάνεται η κατασκευή μερών με σωστή κατανομή του βάρους σε όλο το εύρος του υλικού, καθώς επίσης καλή αντίσταση στην μεταλλική οξείδωση και κόπωση. Επιπλέον λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητας της μικροδομής τους και της αντίστοιχης κατανομής των κόκκων τους, ευνοούνται οι κατασκευές με προσθετική προσέγγιση. Ταυτόχρονα, η υποστηρικτική λεπτή ταινία οξειδίου (adherent thin oxide film) στο τηκόμενο κράμα αλουμινίου μειώνει την απορρόφηση υγρασίας (wettability). Ωστόσο, το οξείδιο μπορεί να εισχωρήσει μέσα στην τηκόμενη περιοχή δημιουργώντας μια αδύναμη δομή. Επίσης, κατά την φάση της τήξης απαιτείται η χρήση μεγαλύτερης δύναμης λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας (thermal conductivity) των κραμάτων αυτών.

Κάποια από τα πιο αξιοποιήσιμα κράματα είναι το AlSi10Mg, το οποίο αξιοποιείται από την μέθοδο SLM, και το AlSi12. Τα συγκεκριμένα κράματα χαμηλής πυκνότητας έχουν την ικανότητα να αντιστέκονται στα υψηλά φορτία εξαιτίας της δομικής τους σκληρότητας και της αντοχής στην κόπωση. Επιπλέον, παρουσιάζουν υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και μπορούν εύκολα να επεξεργάζονται. Το AlSi10Mg αξιοποιείται για αεροδιαστημικές και αυτοκινητιστικές εφαρμογές, το AlSi12 θεωρείται ωφέλιμο επίσης στον τομέα της ιατρικής, καθώς και το AlSi7Mg0,6 είναι χρήσιμο στις εφαρμογές όπου απαιτείται η χρήση υψηλής τάσης (high voltage) [86].

Τα κράματα χαλκού (Cu) παρουσιάζουν σημαντική αντίσταση στην οξείδωση. Το πιο δημοφιλές είδος χαλκού είναι ο μπρούτζος (bronze), στον οποίο προστίθεται κασσίτερος (tin) και ορείχαλκος (brass), καθώς και ψευδάργυρος (zinc). Ο μπρούτζος θεωρείται πολύ πιο σκληρό υλικό και καλός αγωγός θερμότητας από ότι ο απλός χαλκός, καθώς επίσης αντιστέκεται στην κόπωση και την οξείδωση σε σχέση με τον χάλυβα. Επιπρόσθετα, το περιεχόμενο του ψευδάργυρου βρίσκεται σε ποσοστό μικρότερο από 40%, ενώ όταν είναι λιγότερο από 15% μπορεί να μειώσει την αντίσταση στην οξείδωσης του χαλκού. Τα κράματα με βάση χαλκού θεωρούνται χαμηλότερης ποιότητας από αυτά της βάσης νικελίου. Σε γενικότερο επίπεδο, μια από τις τεχνολογίες που έχει αξιοποιήσει αυτά τα κράματα είναι η DMD, ενώ ακόμα οι επενδύσεις για την αξιοποίησή τους δεν είναι πολλές [86].

Τα κράματα βάσης κοβαλτίου-χρωμίου (CoCr) χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αντίσταση στην οξείδωση, στις υψηλές θερμοκρασίες και στην φθορά. Επιλέγονται για κατασκευές ιατρικών εμφυτευμάτων μακροχρόνιας χρήσης, λόγω της δημιουργίας μερών με υψηλές τιμές σκληρότητας και βιοσυμβατότητα (bio-compatibility) στην δομή τους. Στις κατασκευαστικές μεθόδους σκόνης σε κλίνη που δέχονται επεξεργασία σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 850°C, γίνεται χρήση του κράματος ASTM F75 CoCr για να επιτευχθεί μείωση των παραμένουσων τάσεων. Παράλληλα τα κράματα αυτά αξιοποιούνται από τις

αγωνιστικές αυτοκινητιστικές ομάδες για την κατασκευή εξαρτημάτων, καθώς και από την ευρύτερη βιομηχανία για την κατασκευή στροβιλοκινητήρων και τουρμπινών αερίου. Σε σύγκριση με την παραδοσιακή μέθοδο της χύτευσης, η δημιουργία μερών από αυτά τα κράματα με τρισδιάστατη εκτύπωση, θεωρείται προσοδοφόρα οικονομικά. Επιπρόσθετα, τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται από κράματα χρωμίου-κοβαλτίου επωφελούνται συχνά από μια διαδικασία θερμής ισοστατικής συμπίεσης (hot isostatic pressing/HIP), η οποία συνδυάζει υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, με σκοπό να προκληθεί μια πολύπλοκη διαδικασία διάχυσης που θα ενισχύσει τις δομές των κόκκων, παράγοντας πλήρως πυκνά μεταλλικά μέρη.

Ο ανοξείδωτος χάλυβας (**Stainless Steel**) παρουσιάζει μια σειρά μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η σκληρότητα, η αντοχή σε εφελκυσμό, η δυνατότητα σχεδιαστικής διαμόρφωσης και η αντίσταση στην κρούση, γεγονός που τον καθιστά αξιοποιήσιμο από την ευρύτερη βιομηχανία και κυρίως τους κλάδους της ιατρικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και των τροφίμων. Οι μεταλλικές σκόνες από ανοξείδωτο χάλυβα που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες AM όπως η μέθοδος DMLM, αξιοποιεί υλικά όπως το 316L (χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα), το 17-4PH, ο χάλυβας που προορίζεται για θερμές εργασίες (hot work) και ο χάλυβας “maraging” (κράμα χάλυβα που περιέχει πάνω από 25% νικέλιο και άλλα μέταλλα).

Ο ανοξείδωτος χάλυβας 316L καθίσταται κατάλληλη επιλογή για μη μαγνητικές εφαρμογές. Επίσης θεωρείται πιο εύπλαστο υλικό από το 17-4PH και προσφέρει μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση (corrosion resistance). Παράλληλα, προσφέρει σχετικά καλύτερη συγκολλησιμότητα (weldability), καθώς και υψηλότερο ρυθμό κατασκευής, αν και δεν είναι θερμικά επεξεργασμένο (heat treatable). Η σύνθεση αυτού του ανοξείδωτου χάλυβα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, το καθιστά ιδανικό για χρήση στην κατασκευή τροφίμων και χημικών επεξεργασιών. Επιπλέον, λόγω της υψηλής αντοχής στη διάβρωση, το 316L χρησιμοποιείται στις θαλάσσιες εφαρμογές και στην δημιουργία ιατρικών οργάνων, ιδιαίτερα όταν απαιτούνται προσαρμοσμένες διαμορφώσεις (customized configurations).

Μελετώντας τον ανοξείδωτο χάλυβα 17-4PH, παρατηρούμε ότι προσφέρει σχετικά χαμηλότερο ρυθμό κατασκευής από το 316L, αλλά παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Πρακτικά είναι μαγνητικό, θερμικά επεξεργασμένο και σκληρότερο από το 316L και χρησιμοποιείται για την κατασκευή λειτουργικών πρωτοτύπων, εξαρτημάτων αυτοκινήτων και βιομηχανικών εξαρτημάτων. Παράλληλα, οι ανοξείδωτοι χάλυβες θερμής εργασίας αποτελούν μέταλλα υψηλής φόρτωσης (high load) και είναι ιδανικά για την παραγωγή εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται σε χύτευση με έγχυση (injection) μεγάλου όγκου. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες “maraging” προτιμώνται για την κατασκευή εργαλείων με σύμμορφη ψύξη (conformal cooling), που χρησιμοποιούνται στην χύτευση επενδύσεων και στη χύτευση με έγχυση.

Η χρήση κραμάτων σιδήρου (**Fe**) είναι περιορισμένη στον τομέα των κατασκευών Προσθετικής Κατασκευής. Ο συνδυασμός σιδήρου και χρωμίου (Cr) ενισχύει την δημιουργία οξειδωσης στο τελικό τεμάχιο, γεγονός που συνεπάγεται με χαμηλά επίπεδα μηχανικών ιδιοτήτων. Πρόκειται για ένα γεγονός που αντικρούεται στον στόχο κάθε κατασκευής με τις τεχνολογίες AM, αφού οι χημικές ιδιότητες της πρώτης ύλης καθίστανται καταλυτικές για το αποτέλεσμα. Ωστόσο, γίνονται σημαντικές βελτιώσεις με σκοπό την πιο ουσιαστική αξιοποίησή τους [86].

Συμπληρωματικά με τα παραπάνω υλικά, σημαντική καθίσταται και η χρήση των Σύνθετων Μεταλλικών Πλεγμάτων (Metal Matrix Composites/**MMC**). Η σύνθεση αυτή αποτελείται από μεταλλικά πλέγματα και κεραμικές ενισχύσεις (ceramic reinforcements), τα οποία προσδίδουν δυσκαμψία (stiffness) και δύναμη. Πραγματοποιούνται ενέργειες βελτίωσης των ιδιοτήτων της σύνθεσης αυτής ώστε να υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της σε μοναδικές περιπτώσεις όπου η χρήση κράματος ή απλού μετάλλου δεν θα είναι επαρκής. Όταν τα σωματίδια της κεραμικής ενίσχυσης εισχωρήσουν στο μεταλλικό πλέγμα το MMC χαρακτηρίζεται ως “ex situ”. Το συγκολλημένο καρβίδιο (cemented carbide/WC-Co) αποτελεί το πιο ωφέλιμο και γνωστό υλικό MMC, γιατί δημιουργεί αποτελεσματικές δομές στα εξαρτήματα που πρέπει να αντέχουν σε κάθε είδος φθοράς, όπως η τριβή ολίσθησης, η

διάβρωση, η οξείδωση, καθώς επίσης να έχουν υψηλό βαθμό σκληρότητας. Ένα εμπόδιο στην απόδοση του υλικού εμφανίζεται στην δημιουργία μικρορωγμών στο σημείο επαφής του κεραμικού με το μέταλλο λόγω της παγίδευσης αερίου, γεγονός που αντιμετωπίζεται με την δημιουργία μεταλλικής επικάλυψης στα σωματίδια των κεραμικών ενισχύσεων. Ουσιαστικά, τα σημεία επαφής στο εσωτερικό της δομής αυτών των υλικών είναι συμβατά και χαρακτηρίζονται από δυνατή συνδεσμολογία, δίνοντας την δυνατότητα κατασκευής μερών με καλές μηχανικές ιδιότητες. Η ανάγκη για περαιτέρω μελέτη και αξιοποίηση του υλικού αυτού κρίνεται απαραίτητη [12].

Στο Παράρτημα 1 παρατίθεται μια λίστα με την κατηγοριοποίηση των υλικών, των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων τους, των χαρακτηριστικών της σκόνης και του τρόπου αξιοποίησης τους από τις μεθόδους Προσθετικής Κατασκευής.

3.5 Μηχανήματα και Εξοπλισμός

Έχοντας καταγράψει τις θεμελιώδεις κατασκευαστικές μεθόδους των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής, καθώς και τα περισσότερα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες, καθίσταται απαραίτητος ο προσδιορισμός των αντίστοιχων μηχανημάτων. Μέσα από διάφορα τεχνολογικά εργαστήρια, κυρίως βιομηχανικών μονάδων, έχουν κατασκευαστεί μια σειρά μηχανημάτων που εξυπηρετούν κάθε μέθοδο ξεχωριστά. Μια σημαντική διαπίστωση είναι η αντιστοίχιση κάθε μηχανήματος με την πρώτη ύλη. Πρόκειται για θεμελιώδεις πειραματικές μελέτες που διαφοροποιούν κάθε εταιρία και εξοπλισμό. Μέσα από πολλαπλές μελέτες έχουν προκύψει οι αδυναμίες των τεχνολογιών AM αλλά και οι περαιτέρω τρόποι εξέλιξης και ενδυνάμωσης, ώστε σήμερα να θεωρείται δεδομένη η ύπαρξη της 4^η Βιομηχανικής Επανάστασης.

Η εταιρία Arcam έχει κατασκευάσει τα μηχανήματα A1 (το 2009) και A2, όπου αφορούν στην κατασκευή ιατρικών εξαρτημάτων και αεροδιαστημικών μερών αντίστοιχα. Και τα δύο στηρίζονται στην τεχνολογία EBM και είναι εξοπλισμένα με μια ακτίνα ηλεκτρονίου η οποία μπορεί να παράξει ενέργεια πάνω από 3500W. Το A1 έχει δυνατότητα κατασκευής τεμαχίου με διαστάσεις 200 x 200 x 300 mm, ενώ το A2 με 200 x 200 x 180 mm. Επίσης, ο ρυθμός κατασκευής, κάνοντας χρήση υλικού Ti-6Al-4V, είναι 55cm³/hr για την δημιουργία τελικής επιφάνειας με υψηλή ποιότητα, ενώ η γρηγορότερη κατασκευή πραγματοποιείται με ρυθμό 80cm³/hr. Η σκληρότητα της τελικής επιφάνειας συνήθως είναι μεταξύ 25-33 Ra (surface roughness/Ra). Επιπλέον, τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι Ti-6Al-4V, ELI Ti, CP-Ti, CoCr, γ-TiAl και άλλα που βρίσκονται σε πειραματική διαδικασία [13].

Το 2009, η εταιρία EOS κατασκευάζει το 1^ο μηχάνημα Προσθετικής Κατασκευής, το M270, επιτυγχάνοντας μετά από δύο χρόνια την δημιουργία του μηχανήματος M280, με το οποίο κατασκευάζει επιδιορθωτές καυστήρα (burner repair). Τα μηχανήματα αυτά αξιοποιούν την τεχνολογία DMLS, έχουν κατασκευαστική δυνατότητα τεμαχίου με διαστάσεις 250 x 250 x 320 mm και είναι εφοδιασμένα σύστημα Yb-fiber λέιζερ 200 ή 400 W. Τα μέρη κατασκευάζονται από υλικά όπως Al-Si-10Mg, υπερκράμα CoCr, ατσάλινο εργαλείο, ανοξείδωτο χάλυβα, Ti-6Al-4V βαθμού 5 και 23, CP-Ti, κράματα νικελίου 625 και 718 [13,18].

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η εταιρία, ακολουθώντας την εξελικτική της πορεία, έχει δημιουργήσει ένα ρομποτικό βραχίονα, ο οποίος είναι ικανός να αποσύρει την πλεονάζουσα σκόνη από το μηχάνημα M280 όπου έχει κατασκευαστεί ο καυστήρας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 47. Με αυτό το γεγονός, ενισχύεται η ασφάλεια των εργαζομένων που ασχολούνται με αυτή την φάση της κατασκευής. Επιπρόσθετα έχει κατασκευάσει τα μοντέλα Precious M080 και EOS M100. Παράλληλα με τις ενέργειες αυτής της εταιρίας, η SLM Solutions, χρησιμοποιεί τα μηχανήματα SLM 500, SLM 280 2.0 και SLM 125 στηριζόμενα στην μέθοδο DMLS, για την κατασκευή περίπλοκων μεταλλικών μερών

στερεοποιώντας μη σιδηρούχα υλικά, ατσάλινα εργαλεία, ανοξείδωτο χάλυβα και ελαφριά κράματα [13,18,28].

Η εταιρία Concept Laser, της οποίας ένα μέρος ανήκει στην εταιρία GE Additive, αναπτύσσοντας την μέθοδο Laser Cusing, κατασκεύασε και τα αντίστοιχα μηχανήματα M1, M2 και M3. Το μηχάνημα M3 αποτελεί το μεγαλύτερο σε κλίμακα μηχάνημα τεχνολογίας τοποθέτησης σκόνης σε κλίνη με χρήση λέιζερ στην αγορά. Έχει δυνατότητα κατασκευής μερών με διαστάσεις 300 x 350 x 300 mm και ως πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται υλικά όπως ανοξείδωτο ατσάλι, εργαλεία χάλυβα, κράματα αλουμινίου, CoCr, Ti-6Al-4V και κράμα 718. Τα μηχανήματα αυτά δίνουν την δυνατότητα σχηματισμού μοτίβων και κοπής με το λέιζερ, καθώς και με τον συνδυασμό τους με τις μεθόδους απόθεσης λέιζερ (laser deposition) [13]. Εκτός από την ανάπτυξη αυτού του εξοπλισμού, η εταιρία αυτή είναι αναγνωρίσιμη από το μηχάνημα X Line 2000R. Έχει δυνατότητα κατασκευής τεμαχίου με διαστάσεις 800 x 400 x 500 mm, χρησιμοποιεί διπλό σύστημα λέιζερ και θεωρείται το μεγαλύτερο μηχάνημα τήξης μετάλλου στον κόσμο, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 48.



Εικόνα 47: Ρομποτικός βραχίονας αφαίρεσης της πλεονάζουσας σκόνης από το μηχάνημα M280 της εταιρίας EOS μετά την κατασκευαστική φάση [14].

Η εταιρία MTT Technologies Group of Stone ανέπτυξε την μέθοδο SLM και παράλληλα το μηχάνημα SLM 250, με το οποίο κατασκευάζονται μέρη με διαστάσεις 250 x 250 x 300 mm. Τα πλεονεκτήματα των μοντέλων που κατασκευάζονται σε αυτή την εταιρία, αφορούν στην ανάγκη συγκέντρωσης μικρότερης ποσότητας οξυγόνου και μείωση διαρροής του αερίου. Επίσης, τα διαθέσιμα υλικά για αυτές τις μεθόδους είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες 316L και 17-4PH, το ατσάλινο εργαλείο H13, τα κράματα αλουμινίου Al-Si-12Mg και Al-Si-10Mg, το τιτάνιο CP, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, CoCr και τα κράματα βάσης νικελίου 625 και 718. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η εταιρία δίνει τη δυνατότητα στους πελάτες να συνθέσουν την δική τους πρώτη ύλη με βάση τις ανάγκες της κατασκευής [13].



Εικόνα 48: Μηχάνημα X Line 2000R της εταιρίας Concept Laser για την κατασκευή μερών με την μέθοδο Laser Cusing.

Η μέθοδος SLS αποτελεί μια βασική τεχνολογία AM και κατασκευαστικά αναπτύχθηκε από την εταιρία Phenix Systems. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται από αυτή τη μέθοδο είναι οι σκόνες μετάλλου και κεραμικών που είναι διαθέσιμες στο εμπόριο. Όσον αφορά τις μεταλλικές πρώτες ύλες μπορεί να είναι υπερκράματα, ανοξείδωτοι χάλυβες, ατσάλινα εργαλεία ή CoCr. Όταν, το 2013, η εταιρία αγοράστηκε από την εταιρία 3D Systems, συνεχίστηκαν επιτυχώς οι μελέτες για την εξέλιξη της τεχνολογίας και κατασκευάστηκαν τα μηχανήματα ProX DMP 200 και ProX DMP 300 [13].

Μελετώντας τις μεθόδους έγχυσης σκόνης με χρήση λέιζερ, τα μηχανήματα που αναπτύχθηκαν για την τεχνολογία LENS από την εταιρία Optomec είναι το MR-7, το LENS 450, το LENS 750 και το LENS 850-R. Όσον αφορά το μηχάνημα MR-7, κατασκευάζει μέρη με διαστάσεις 300 x 300 x 300 mm, μέσα σε περιβάλλον όπου εμπεριέχεται ευγενές αέριο και με ένα σύστημα 3 αξόνων, με τη χρήση IPG fiber λέιζερ 500W. Αυτό που πετυχαίνει είναι τόσο η ταχεία στερεοποίηση όσο και η ταχεία διαλογή κραμάτων. Αντίθετα τα μηχανήματα LENS 750 και LENS 850-R, αξιοποιούνται για εφαρμογές όπως η ταχεία κατασκευή, η βελτίωση της ανάπτυξης του προϊόντος και η διαμόρφωση και επιδιόρθωση εξαρτημάτων για τις εφαρμογές της αεροδιαστημικής και των αμυντικών συστημάτων. Συγκεκριμένα, το μηχάνημα LENS 750 χρησιμοποιεί τριαξονικό σύστημα και fiber λέιζερ 500 W, 1 ή 2 kW 1PG, για την κατασκευή μερών με διαστάσεις 300 x 300 x 300 mm. Το μηχάνημα LENS 850-R αποτελείται από 5-αξονικό σύστημα, με fiber λέιζερ 1 ή 2 kW 1PG και δίνει τη δυνατότητα κατασκευής μερών με διαστάσεις 900 x 1500 x 900 mm.



Εικόνα 49: Μηχάνημα LENS 450 της εταιρίας Optomec [28].

Η εταιρία POM, στηριζόμενη στην τεχνολογία DMD που ανέπτυξε, κατασκεύασε δυο διαφορετικά μηχανήματα. Το DMD 105D αποτελείται από έναν ερμητικά κλειστό θάλαμο μέσα στον οποίο εμπεριέχεται δίσκος λέιζερ ή δίοδος λέιζερ. Αντίστοιχα το δεύτερο μηχάνημα είναι εξοπλισμένο με ζευγάρι fiber δίσκων λέιζερ ή διόδων λέιζερ 1 ως 5 kW και εμπεριέχεται ένας ρομποτικός βραχίονας ικανότητας κίνησης σε 6 διαστάσεις. Έχει αναπτυχθεί το μηχάνημα Montel 44R, το οποίο δέχεται φορτίο 60 kg και έχει δυναμική λειτουργία στους 1.96 x 2.14 m x 330 βαθμούς (degrees), ενώ το Montel 66R δέχεται φορτίο 125 kg και έχει δυναμική λειτουργία στους 3.2 x 3.67 m x 360 βαθμούς. Το ρομποτικό σύστημα των μηχανημάτων DMD έχει συμβάλει στην αποκατάσταση σημαντικών εξαρτημάτων ακριβείας, όπως τα ακροφύσια (stub shafts), τα διαφράγματα (diaphragms) και τα πτερύγια τουρμπινών (turbine blades) που έχουν ως πρώτες ύλες το τιτάνιο, τα εργαλεία χάλυβα, τους Stellites και το Inconel [13].

Με βάση τις κατασκευαστικές μεθόδους ελεύθερης μορφής και συγκεκριμένα αυτές της άμεσης ενεργειακής απόθεσης DED, η εταιρία Sciaky ανέπτυξε την μέθοδο EBDM ή αλλιώς EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing/EBAM) και αντίστοιχα το σύστημα Sciaky με συγκολλητή 60 kW/ 60 kV. Πρόκειται για ένα σύστημα που διευκολύνει την κατασκευή πολλαπλών μερών με απόθεση υλικού, λόγω της ηλεκτρονικά εστιασμένης ακτίνας ηλεκτρονίου καθώς και της κλιμάκωσης της ενέργειας σε ένα ευρύ φάσμα επιλογών. Η πρώτη ύλη Ti-6Al-4V χρησιμοποιείται με ποσοστό απόθεσης 40 lb/hr και η τραχύτητα της επιφάνειας είναι 35 Ra. Μεταγενέστερα η εταιρία κατασκεύασε τα μηχανήματα EBAM 300 και EBAM 150, στα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη μέταλλο ή σκόνη μετάλλου [13].

Όταν οι εταιρίες EWI και Solidica εξέλιξαν την μέθοδο κατασκευής με υπερήχους UAM και δημιούργησαν την Πολύ Υψηλής Ενέργειας Προσθετική Κατασκευή με Υπερήχους (Very High-Power Ultrasonic Additive Manufacturing/VHP-UAM), ταυτόχρονα κατασκεύασαν το αντίστοιχο μηχάνημα. Χρησιμοποιεί 10 φορές περισσότερη ενέργεια και πρώτες ύλες όπως τα κράματα τιτανίου, το αλουμίνιο και ο χάλυβας. Επιπλέον, η κατασκευαστική του ικανότητα για το αλουμίνιο είναι περίπου 14 lb/hr και για το ανοξείδωτο ατσάλι 20 lb/hr, καθώς επίσης παράγει μέρη με διαστάσεις 6 x 6 x 3 ft [13].



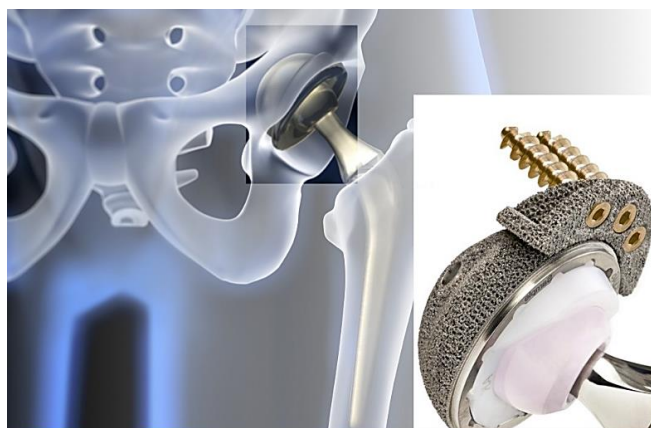
Εικόνα 50: Μηχάνημα EBAM 300 από την εταιρία Sciaky.

Κάθε μέθοδος Προσθετικής Κατασκευής έχει δεχθεί μια πληθώρα πειραμάτων από διαφορετικές εταιρίες. Οι εξελίξεις και η δημιουργία νέων μεθόδων είναι συχενή. Στηριζόμενοι σε πρόσφατες μελέτες, μπορούν να παρουσιαστούν κάποιες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί παράλληλα με την κατασκευή των αντίστοιχων μηχανημάτων. Μια καταγραφή των πιο αξιοσημείωτων μηχανημάτων και του τρόπου αναγνώρισης και αξιοποίησής τους έχει πραγματοποιηθεί στο κείμενο που προηγήθηκε. Στο Παράρτημα 2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα μηχανήματα με τα πιο ουσιαστικά χαρακτηριστικά τους όπως αποτυπώνονται στον παγκόσμιο χάρτη σήμερα.

3.6 Εφαρμογές

Μελετώντας τα παραπάνω δεδομένα, είναι εύκολο να συμπεράνει κανείς ότι η 4^η Βιομηχανική Επανάσταση κυρίως μέσα από τον τομέα των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής είναι γεγονός. Τα πλεονεκτήματα και η διαφοροποιήσεις που προκαλούνται από αυτές τις νέες μεθόδους είναι θεμελιώδη, ενώ πολλοί ειδικοί ακόμα ερευνούν τις δυνατότητες και τα εμπόδια γύρω από την προσθετική προσέγγιση. Αυτό που θεωρείται ως δεδομένο είναι τα κατασκευαστικά αποτελέσματα αυτών των ερευνών και ο τρόπος που έχουν γίνει ήδη αξιοποιήσιμα κυρίως από μια σειρά βιομηχανικών μονάδων.

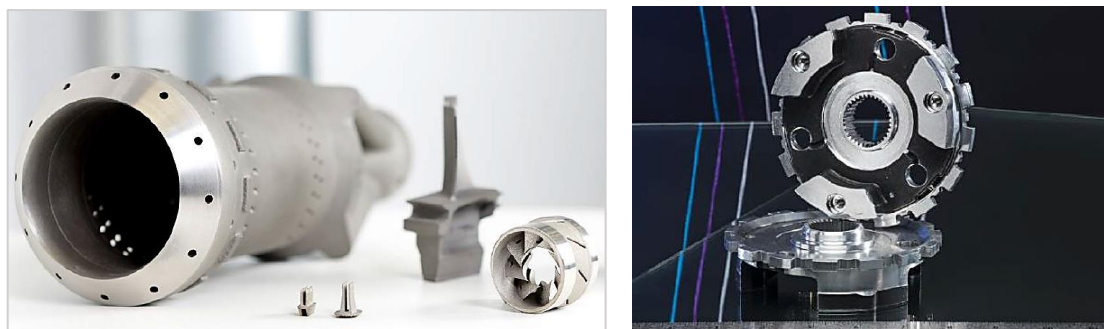
Η εταιρία Arcam συνεργάστηκε με την Adler Ortho για την δημιουργία ειδικής θήκης (acetabular cup) για τα εμφυτεύματα του ισχίου (hip implants) με την τεχνολογία EBM. Μέχρι το 2007 είχαν παραχθεί πάνω από 10000 εμφυτεύματα και περίπου 1000 είχαν αξιοποιηθεί από την ιατρική κοινότητα με πολύ θετικά αποτελέσματα. Παράλληλα με τα συγκεκριμένα μέρη, ξεκίνησαν οι διαδικασίες κατασκευής εμφυτευμάτων για τα γόνατα (knee) και το πρόσωπο (facial), ενώ το κέντρο Walter Reed Army Medical στην Ουάσιγκτον προμηθεύτηκε ένα μηχάνημα της τεχνολογίας EBM με σκοπό την επιτόπου κατασκευή εμφυτευμάτων σε τραυματισμένους στρατιώτες [13]. Σε γενικότερο επίπεδο, ο κλάδος της Ιατρικής έχει επηρεαστεί σημαντικά από την εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών κυρίως σε τρεις τομείς. Αυτοί είναι η δημιουργία ιατρικών μοντέλων, για παροχή βοήθειας σε χειρουργικές επεμβάσεις ή διαγνώσεις, η καθοδήγηση των χειρουργικών διαδικασιών μέσα από την οπτικοποίηση (optimization), και κυρίως η κατασκευή εμφυτευμάτων, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 51.



Εικόνα 51: Εμφύτευμα ισχύος (hip socket implant) κατασκευασμένο με προσθετική προσέγγιση.

Μια πολύ σημαντική εφαρμογή στην βιομηχανική κοινότητα, είναι η δημιουργία καυστήρα (burner) τουρμπίνας από την εταιρία Siemens. Με την δημιουργία αυτού του εξαρτήματος, η εταιρία δημιούργησε ένα λογισμικό, το οποίο θα αξιοποιηθεί για τον ενεργειακό σχεδιασμό πολλών προϊόντων στο μέλλον. Η ουσιαστική επιτυχία του νέου τρόπου κατασκευής του καυστήρα έγκειται στο γεγονός ότι όλα του τα μέρη δομούνται σαν μια μάζα, ενώ μέχρι πρότινος πραγματοποιούνταν ξεχωριστή κατασκευή και συγκόλληση 13 επιμέρους μερών. Σύμφωνα με τον Graichen, ο κύκλος των εργασιών έχει μειωθεί κατά 70%. Εκτός από αυτήν την κατασκευή, η εταιρία έχει προχωρήσει στην δημιουργία διαφόρων μεταλλικών εξαρτημάτων για τον τομέα της αεροδιαστημικής, της παραγωγής ενέργειας και τον τομέα των μοτοσικλετών [14].

Η εταιρία GKN Powder Metallurgy, ως η μεγαλύτερη σε δράση κατασκευαστική εταιρία τεμαχίων με σκόνη μετάλλου, αξιοποιεί και βελτιώνει συνεχώς τις μεθόδους binder jetting. Σημαντικές συνεργασίες με άλλες κατασκευαστικές εταιρίες και κατ' επέκταση η δημιουργία διαφόρων τεμαχίων, την οδήγησαν στην βράβευση του 2018 MPIF για τα μεταλλικά PM εξαρτήματα φορέων πλανητικής αντίδρασης (planetary reaction carrier components) για τις ανάγκες της εταιρίας General Motors, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 63. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σαν εταιρία κατασκευάζει 13 εκατομμύρια τηχόμενα μέρη (13 million sintered parts) κάθε μέρα [16]. Ένας τομέας που αξιοποιεί τις μεθόδους προσθετικής προσέγγισης, είναι αυτός της αεροδιαστημικής. Η εταιρία GE Aviation κατασκευάζει ακροφύσια καυσίμου (fuel nozzles) 25% πιο ελαφριά και με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, σε σχέση με αυτά που κατασκευάζονται από τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 64.



Εικόνα 52: Επιλεγόμενα μεταλλικά εξαρτήματα κατασκευασμένα από την εταιρία Siemens. Στην αριστερή πλευρά της εικόνας παρουσιάζεται ο καυστήρας (αριστερά). Βραβευμένο εξάρτημα φορέα πλανητικής αντίδρασης από την εταιρία GKN Powder Metallurgy (δεξιά) [14,16].

Σύμφωνα με τον G.Morris, θα εγκατασταθούν 19 ακροφύσια καυσίμου σε κάθε Προωθητική Τεχνολογία Αιχμής της Αεροπορίας (Leading Edge Aviation Propulsion/LEAP) στις μηχανές των αεροσκαφών που κατασκευάζονται από την εταιρία CFM International. Συγκεκριμένα υπάρχει ο προγραμματισμός παραγωγής 40000 ακροφυσίων μέχρι το 2020. Η σπουδαιότητα αυτού του τρόπου κατασκευής έγκειται τόσο στην δημιουργία τεμαχίων με 25% ελαφρύτερη δομή, όσο και στην μείωση των απαιτούμενων συγκολλήσεων από 25 σε 5. Επιπρόσθετα, οι πολύπλοκες διαδρομές ψύξης (intricate cooling pathways) που πραγματοποιούνται, καθώς και οι υποστηρικτικοί σύνδεσμοι (support ligaments) συνεισφέρουν στην κατασκευή ακροφυσίων με 5 φορές καλύτερη αντοχή. Παράλληλα με την χρήση του υλικού CoCr και της τεχνολογίας DMLS για την κατασκευή των ακροφυσίων, διεξάγονται διαδικασίες επιθεώρησης που καταλαμβάνουν το 25% του συνολικού χρόνου κατασκευής και συμβάλλουν στην επιτάχυνση του παραγωγικού ρυθμού [34].

Όσον αφορά την κατασκευή εγχυτή καυσίμου πυραύλου (rocket fuel injector) από την NASA (Εικόνα 53), έχουν παρατηρηθεί μέσα από σχετικές ενέργειες, ότι ο χρόνος κατασκευής με την χρήση της προσθετικής προσέγγισης μειώνεται στους 4 μήνες, σε σύγκριση με τον 1 χρόνο κατασκευής που απαιτούσαν οι συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας. Αξιοσημείωτη καθίσταται επίσης η ανάγκη δημιουργίας δύο μερών για την ολοκληρωμένη κατασκευή του εγχυτή, ενώ στο παρελθόν απαιτούνταν η κατασκευή 163 μεμονομένων κομματιών. Με βάση αυτά τα νέα δεδομένα παρατηρείται 70% μείωση του απαιτούμενου κόστους κατασκευής [34].

Μια κατασκευή που κρίνεται καταλυτική στον τομέα της αεροδιαστημικής είναι αυτή του πυραυλοκινητήρα SuperDraco (Εικόνα 54), ο οποίος κατασκευάζεται από την εταιρία Inconel με έναν εκτυπωτή τρισδιάστατης εκτύπωσης της εταιρίας EOS. Η δυνατότητα κατασκευής κραμάτων με υψηλή αντοχή από τον συγκεκριμένο εκτυπωτή, συνέβαλε ουσιαστικά στην αποδοτικότερη διαμόρφωση των καναλιών ψύξης (cooling channels), της κεφαλής του εγχυτήρα (injector head) αλλά και του μηχανισμού του μοχλού ισχύος (throttling mechanism). Πρόκειται για στοιχεία που δυσκόλευαν σε σημαντικό βαθμό την ορθή κατασκευή του συγκεκριμένου πολύπλοκου κινητήρα. Στην κατασκευή αυτών των προωθητηρίων έχει εστιάσει και η εταιρία SpaceX μέσω της εκτέλεσης δοκιμαστικών πτήσεων του διαστημικού αεροσκάφους Dragon, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να μεταφέρει αστροναύτες, όσο η εταιρία προετοιμάζεται να ξεκινήσει αποστολές εξερεύνησης του διαστήματος με βάση το ανθρώπινο δυναμικό. Σύμφωνα με τον E.Musk, μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να κατασκευαστούν δυνατά και με υψηλή απόδοση μηχανικά μέρη σε ένα πιο οικονομικό και χρονικά ωφέλιμο πλαίσιο σε σύγκριση με τους συμβατικούς τρόπους κατασκευής [34].



Εικόνα 53: Ακροφύσιο καυσίμου για αεροδιαστημικές εφαρμογές από την εταιρία GE Aviation (πάνω). Εγχυτής Καυσίμου κατασκευασμένο με την μέθοδο LPBF (κάτω).



Εικόνα 54: Ο πυραυλοκινητήρας SuperDraco της εταιρίας SpaceX.

Κεφάλαιο 4

Προκλήσεις και Περιορισμοί στην Κατασκευή Μεταλλικών Μερών με τις Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής

4.1 Εισαγωγή

Το 2012, το Ινστιτούτο Αμυντικής Ανάλυσης (Institute of Defense Analysis, Science and Technology Policy Institute), αναφερόμενο στις δυνατότητες των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής και συμπληρώνοντας το περιεχόμενο των πηγών R&D, προσδιόρισε τις τεχνικές προκλήσεις που παρουσιάζονται στην ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών και κυρίως στους τομείς της μοντελοποίησης και του ελέγχου των μεθόδων [87]. Καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη τόσο μεθόδων όσο και αισθητήρων προσαρμοσμένων σε πραγματικές συνθήκες και βασισμένων σε μια διαδικασία κλειστού βρόγχου (closed-loop) με σκοπό να εξασφαλιστεί η ποιότητα, η σταθερότητα (consistency) και η δυνατότητα αναπαραγωγής (reproducibility) ενός μέρους. Από την στιγμή που οι τεχνολογίες AM άρχισαν να συνδέονται άμεσα με τους παραδοσιακούς τρόπους ελέγχου και επεξεργασίας, όπως η θερμοκρασία κατασκευής ή η γεωμετρία του τεμαχίου, κατασκευάστηκαν αισθητήρες που μετρούσαν την μορφή και το μέγεθος της σχηματιζόμενης τηκόμενης περιοχής, καθώς και την θερμοκρασία. Αυτοί οι έλεγχοι πραγματοποιούνταν κυρίως από τα προγράμματα του Navy SBIR (Small Business Innovation Research). Ουσιαστικά ο συνδυασμός αυτών των δεδομένων και των αλγορίθμων που είχαν ήδη προβλεφθεί, ήταν απαραίτητος για τον καθορισμό των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο, ώστε να διασφαλιστούν τα παραπάνω στοιχεία ποιότητας [88].

Λίγα χρόνια αργότερα, το 2018, ο πρόεδρος του εμπορικού τμήματος της εταιρίας GKN Powder Metallurgy, C.Franks, αναφερόμενος στις ριζοσπαστικές αλλαγές που επιφέρει ο τομέας των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής, τονίζει την σπουδαιότητα της προσαρμοστικότητας στις νέες κατασκευαστικές τεχνολογίες. Αυτό που επισημαίνει είναι ότι κάθε ενδιαφερόμενος επιστήμονας και κατασκευαστής πρέπει να μπορεί να ακολουθήσει τα νέα κατασκευαστικά μοντέλα, με σκοπό να παραμείνει ανταγωνιστικός στον παγκόσμιο χώρο. Επιπρόσθετα, μια σημαντική πρόκληση αποδίδεται στην αντιμετώπιση του πελάτη που πρόκειται να αξιοποιήσει την υπάρχουσα τεχνολογία. Όπως αναφέρει, καταλυτική είναι η φάση της εκπαίδευσης και σχετικής κατάρτισης πάνω στις μεθόδους που βασίζονται στην χρήση λέιζερ (laser-based) και συγκολλητικής ουσίας (binder-based). Μετά από αυτή την επίτευξη μπορεί όχι μόνο να αναπτυχθεί μια αποδοτική συνεργασία αλλά να προκύψουν και τεχνολογικές εξελίξεις. Πρακτικά, η εταιρία στην ολότητα της υποστηρίζει την ανάπτυξη συνεργασιών για την μετέπειτα εξέλιξη των τεχνολογιών AM, όπως με το παράδειγμα της εταιρίας Volkswagen. Όντας χρόνια στον κλάδο της κατασκευής γνωρίζει ότι τα αποτελέσματα της υιοθέτησης μιας νέας τεχνολογίας μπορεί να προκύψουν μετά από πολλές γενιές, όμως οι ειδικοί είναι πλήρως συνειδητοποιημένοι για την σπουδαιότητα του εγχειρήματος που έχουν κάνει. Παράλληλα η εταιρία GKN μέσα από το δικό της ερευνητικό πλαίσιο, τονίζει τις προκλήσεις που έχουν εμφανιστεί στον τομέα ασφάλειας και ποιότητας των υλικών που κατασκευάζονται με προσθετική προσέγγιση [16].

Καθίσταται εμφανές ότι η ανάπτυξη των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής στον κλάδο της κατασκευής μεταλλικών εξαρτημάτων, όχι μόνο έχει υιοθετηθεί από πλήθος εταιριών και την ευρύτερη επιστημονική κοινότητα, αλλά ταυτόχρονα έχει επιφέρει σημαντικά προβλήματα προς διερεύνηση. Με βάση διάφορα πειράματα και συνεχείς έρευνες έχουν διαπιστωθεί προβλήματα τόσο μηχανικής όσο και άλλης φύσεως που επηρεάζουν την τελική δημιουργία ενός μέρους.

Μελετώντας τον τομέα κατασκευών και επεξεργασίας μετάλλων, έχουν ήδη καταγραφεί και εξετάζονται για χρόνια αστοχίες που προκύπτουν κατά την κατασκευή

μεταλλικών μερών με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Συνεπώς, οι υπάρχουσες γνώσεις και δομές συμβάλλουν θετικά στην παρατήρηση και ορθή αξιολόγηση των νέων αυτών μοντέλων. Ωστόσο, όπως παρουσιάζεται και στη συνέχεια, οι διαφοροποιήσεις και η ανάγκη για ανάπτυξη νέων τρόπων αξιολόγησης των προβλημάτων κάθε κατασκευής είναι πολλαπλές.

4.2 Ο τομέας Πιστοποίησης και Διασφάλισης Ποιότητας

Όσο οι τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής αξιοποιούνται ολοένα και περισσότερο από την παγκόσμια κατασκευαστική κοινότητα, καθίσταται καταλυτική η ύπαρξη συγκεκριμένων πιστοποιήσεων για κάθε φάση της κατασκευής. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, τα βήματα προς την κατεύθυνση καταγραφής τέτοιων κωδικών διασφάλισης ποιότητας και αξιοπιστίας είναι ήδη σημαντικά και πραγματοποιούνται από διάφορες εταιρίες σε συνεργασία με οργανισμούς αποτύπωσης προτύπων και πιστοποιήσεων. Καθώς πραγματοποιείται έρευνα και από τις δύο ομάδες, έχουν διαπιστωθεί περιορισμοί και δυσκολίες που σχετίζονται με την μικροδομή, τις μηχανικές ιδιότητες, καθώς και την ρωγμή και κόπωση (fracture & fatigue) των κατασκευασμένων μερών.

4.2.1 Πιστοποίηση των Ιδιοτήτων Ρωγμής και Κόπωσης (Fracture & Fatigue)

Παρόλο που οι ιδιότητες των μεταλλικών μερών που κατασκευάζονται με τις τεχνολογίες AM είναι καλύτερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες που δημιουργούνται από την κατεργασία με τις συμβατικές μεθόδους, εμφανίζονται σημαντικές δυσκολίες στην υιοθέτηση αυτού του τρόπου κατασκευής μερών από τους τομείς της βιοιατρικής, της αεροδιαστημικής και των αμυντικών συστημάτων, λόγω της ελλιπής γνώσης γύρω από την συμπεριφορά σημαντικών μεταβλητών [26]. Με τη χρήση αυτών των μεθόδων δημιουργούνται ελαττώματα που επηρεάζουν τόσο τον Χαμηλό όσο και τον Υψηλό Κύκλο εμφάνισης Ρωγμών (Low & High Cycle Fatigue(LCF & HCF)) [64]. Πρακτικά γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να υιοθετηθούν συγκεκριμένα μοντέλα που αφορούν στην αντοχή στην κόπωση (fatigue resistance), ώστε οι τεχνολογίες αυτές να αξιοποιηθούν ευρέως. Συγκεκριμένα έχουν καταγραφεί προβληματισμοί που σχετίζονται με την παρουσία ελαττωμάτων, την τραχύτητα της επιφάνειας (surface roughness), την εμφάνιση ανισοτροπίας (anisotropy) και την ομοιότητα μεταξύ των παραστατικών ελέγχου, που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της κόπωσης και των ρωγμών, με τα πραγματικά μέρη (similitude between the test coupons and actual parts) [15].

Μελετώντας την περίπτωση εμφάνισης ελαττωμάτων στο υλικό, έχει παρατηρηθεί ότι είναι πιθανή η δημιουργία ρωγμών και οι ενέργειες που πρέπει να γίνουν στηρίζονται στην κατηγοριοποίηση του πληθυσμού των ρωγμών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εξέταση της συχνότητας που προκαλούνται, καθώς και της κατανομής του μεγέθους που έχουν, σε συνδυασμό με την χρήση υπερβατικών καμπύλων (exceedance curves) [84]. Παράλληλα με αυτό, ο προσανατολισμός του κάθε στρώματος μπορεί να επηρεάσει την μηχανική εμφάνιση του μέρους που κατασκευάζεται, προκαλώντας ανισοτροπίες στην περίπτωση εμφάνισης ρωγμών. Δηλαδή, δεν υπάρχει ομοιομορφία στην δομή του τεμαχίου. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι οριζόντια δομημένα δείγματα παρουσιάζουν υψηλότερη μηχανική δυναμική σε σύγκριση με δείγματα που κατασκευάστηκαν με κάθετο και διαγώνιο προσανατολισμό [15].

Οι συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας παρέχουν δεδομένα προς αξιολόγηση της ανισοτροπίας στις ρωγμές και στην κόπωση, όμως η ουσιαστική πρόκληση εστιάζεται στον τρόπο χρήσης αυτών των υπάρχοντων πληροφοριών για την αξιολόγηση του σχεδιασμού και της ποιότητας της εργασίας. Η πιο εύκολη προσέγγιση αφορά στην χρήση των πιο συντηρητικών ιδιοτήτων δημιουργίας κατεύθυνσης λαμβάνοντας το υπάρχον υλικό ως ιστροπικό, δηλαδή με ομοιόμορφη δομή προς όλες τις κατευθύνσεις. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αυτή η

προσέγγιση πολλές φορές μπορεί να καταστεί αδύνατη και ασύμφορη, γι' αυτό δημιουργούνται εναλλακτικοί τρόποι δημιουργίας κατεύθυνσης, οι οποίοι παρουσιάζουν επακόλουθα προβλήματα [15].

Συγκεκριμένα, η δυνατότητα δημιουργίας πολυαξονικών (multiaxial) μερών με τις τεχνολογίες AM, μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία ρωγμών σε πολλαπλές κατευθύνσεις, γεγονός που καθίσταται περίπλοκο και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης ειδικά στην περίπτωση ύπαρξης ισοτροπικών ιδιοτήτων. Είναι χρήσιμο να αναπτυχθούν πλαίσια (frameworks) προσαρμοσμένα σε αυτές τις ανάγκες. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση ανάλυσης διάδοσης ρωγμών (crack propagation analysis) ακόμα και τα σχετικά απλά μοντέλα ρωγμών, όπως η επίπεδη ανάπτυξη ρωγμών με δύο βαθμούς ελευθερίας, θα πρέπει να εφαρμόσουν τις ανισοτροπικές ιδιότητες του ελέγχου da/dN^* σε δυο κατευθύνσεις. Τόσο τα συμβατικά εργαλεία για τους μηχανισμούς κόπωσης (fracture mechanisms/FM), όσο και οι ιδιότητες da/dN για την κατασκευή μερών με προσθετική προσέγγιση σε τρισδιάστατη κλίμακα, πρέπει να προσαρμοστούν σε νέα πρότυπα αναλύσεων [15].

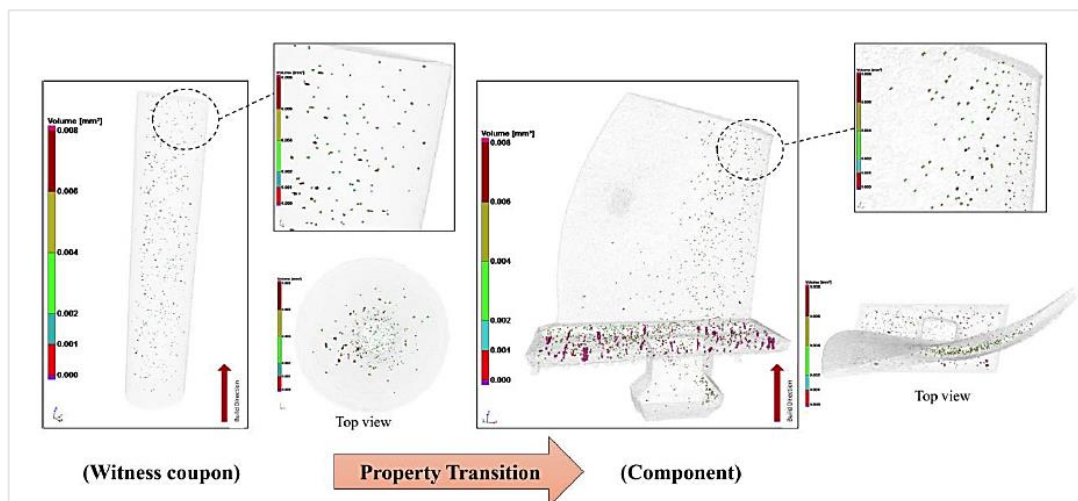
Συμπληρωματικά με τους τρόπους που επιφέρουν ελαττώματα ρωγμών και κοπώσεων στα μεταλλικά μέρη που κατασκευάζονται με προσθετική προσέγγιση, άλλες πηγές που μπορούν να αποτελέσουν πρόβλημα είναι, για παράδειγμα, το υλικό που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη, η μικροδομή και η τραχύτητα της επιφάνειας. Είναι γνωστό ότι η επακόλουθη επεξεργασία (post-processing) με σκοπό την απόδοση της ολοκληρωμένης μορφής του μέρους, μπορεί να επιφέρει βελτιώσεις, οι οποίες ταυτόχρονα μπορούν να μειώσουν την δυναμική δομή του. Επίσης, η μεταγενέστερη θερμική επεξεργασία μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση νέων ελαττωμάτων. Παράλληλα είναι γνωστό ότι η ύπαρξη τραχύτητας στην επιφάνεια του μεταλλικού υλικού επηρεάζει αρνητικά την αντοχή στην κόπωση. Οπότε, μειώνοντας την ύπαρξη της, επιτυγχάνεται βέλτιστη απόδοση σε αυτή την ιδιότητα του υλικού. Πρακτικά, κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω απόκτηση γνώσης όσον αφορά τις ιδιότητες πολλών κραμάτων που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες AM, καθώς και της συμπεριφοράς τους στην εμφάνιση ρωγμών και κόπωσης. Είναι σημαντικό να διερευνηθεί ο τρόπος που επηρεάζεται η επιφάνεια ενός μέρους τόσο από την μέθοδο και τις παραμέτρους που ακολουθούνται όσο και από την γεωμετρία του εκάστοτε μεταλλικού μέρους και να δημιουργηθούν οι σχετικοί μηχανισμοί εξάλειψης της εμφάνισης παρόμοιων ελαττωμάτων [15].

Μελετώντας τις επιπτώσεων που δημιουργούνται από την ομοιότητα μεταξύ των παραστατικών ελέγχου, που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της κόπωσης και των ρωγμών, με τα πραγματικά μέρη (similitude between the test coupons and actual parts), παρατηρείται ότι πρόκειται για ένα σημαντικό ζήτημα που έχει αντίκτυπο στην ακρίβεια των μεθόδων AM και στην ποιότητα των μερών. Τα μέσα παραστατικών ελέγχων που χρησιμοποιούνται ευρέως περιλαμβάνουν παραστατικά άμεσα αποκοπτόμενα από τα μεταλλικά μέρη ή σκοπίμως κατασκευασμένα όπως είναι οι επιμηκύνσεις (prolongations) ή τα λεγόμενα «witness coupons», δηλαδή ένας έμμεσος δείκτης ένδειξης της ποιοτικής συμπεριφοράς ενός μέρους μέσω συμπερασμάτων [34]. Το ουσιαστικό τεχνικό πρόβλημα παρουσιάζεται στο γεγονός ότι οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις στηρίζονται σε συγκεκριμένες κατασκευαστικές παραμέτρους, οι οποίες μπορεί να διαφέρουν για το μέρος και το σκοπίμως κατασκευασμένο παραστατικό. Το θερμικό περιβάλλον μέσα στο οποίο εξελίσσεται η διαδικασία μπορεί να επηρεάσει τη σχέση

*Δοκιμή Ανάπτυξης Ρωγμών σε περιπτώσεις εμφάνισης Κόπωσης (Fatigue Crack Growth Testing): χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τον ρυθμό με τον οποίο θα αναπτυχθεί μια προϋπάρχουσα ρωγμή, καθοδηγούμενη από το χρόνο μεταβολή της κινητήριας δύναμης των ρωγμών.

αυτή και έτσι να προκληθεί ελάττωμα. Επιπρόσθετα, σημαντική καθίσταται και η περίπτωση χρήσης ενός παραστατικού, είτε στην αρχική διαδικασία αξιολόγησης της ποιότητας της μεθόδου, είτε την ανάπτυξη των σχεδιαστικών ιδιοτήτων στις βάσεις δεδομένων [90].

Εκτενέστερα, οι μετρήσιμες ιδιότητες κόπωσης σε ένα παραστατικό ελέγχου σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται στην κατασκευή του μεταλλικού μέρους μπορούν να διαφέρουν κυρίως λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας του παραστατικού και του μέρους. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 55, τα χρωματιστά σημεία επιδεικνύουν την διαφορετική κατανομή, το μέγεθος και τη μορφή των ελαττωμάτων που έχουν δημιουργηθεί στο περύγιο τουρμπίνας, κατασκευασμένο με σκόνη gamma Ti-Al χρησιμοποιώντας την μέθοδο EBM, σε σύγκριση με το αντίστοιχο witness coupon.



Εικόνα 55: Αποτελέσματα ελέγχου μεταφοράς χαρακτηριστικών στο εξάρτημα, περύγιο τουρμπίνας, από το αντίστοιχο witness coupon και απεικόνιση δημιουργίας ελαττωμάτων [15].

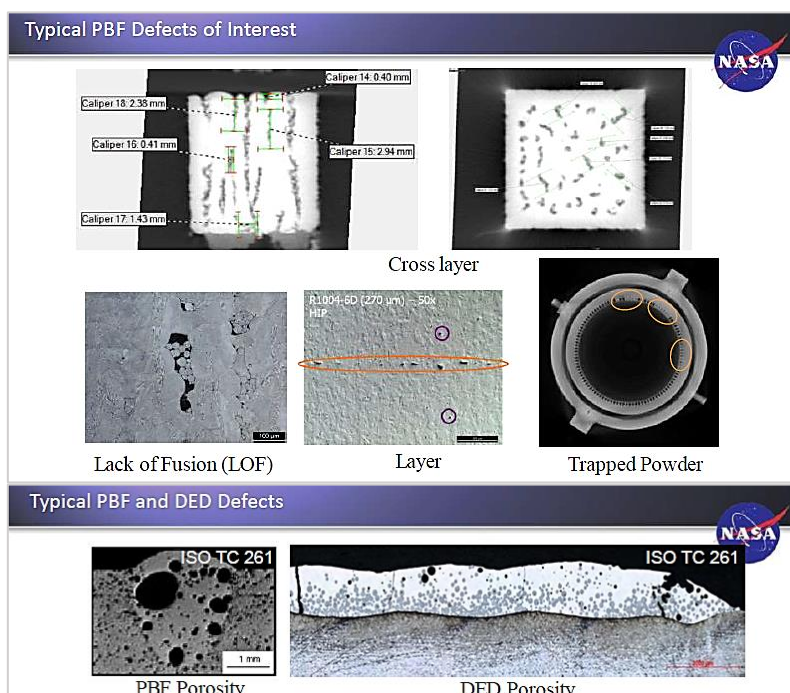
Η δημιουργία αναγνωρισμένων ελέγχων για την πιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μεταλλικών μερών, όπως η αντοχή εφελκυσμού και κόπωσης, καθίσταται καταλυτική. Οποιαδήποτε αλλαγή στην γεωμετρία του μέρους, στον ρυθμό κατασκευής και στις σχεδιαστικές παραμέτρους (όπως ο προσανατολισμός κάθε στρώσης, η δομή υποστήριξης της κατασκευής, το πρότυπο λέιζερ) μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την θερμική απόδοση, η οποία με την σειρά της θα μεταβάλλει ουσιαστικά στοιχεία της μικροδομής του μέρους και θα ενθαρρύνει την εμφάνιση ελαττωμάτων. Κατά αυτό τον τρόπο επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η συμπεριφορά των μεταλλικών μερών στην κόπωση. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία συνδυαστικών προτύπων σε κάθε φάση της κατασκευής ενός μέρους με τις μεθόδους AM. Ο οργανισμός Ολοκληρωμένης Υπολογιστικής Μηχανικής Υλικών (Integrated Computational Materials Engineering/ICME) ασχολείται με την ανάπτυξη τέτοιων δεδομένων για διάφορα κυβερνητικά κέντρα και εταιρίες [15].

4.2.2 Αστοχίες στην κατηγορία των Μη Καταστροφικών Δοκιμών (Non Destructive Testing)

Η πληθώρα μεθόδων Προσθετικής Κατασκευής, οι επιμέρους παράμετροι, οι πρώτες ύλες και ο μηχανολογικός εξοπλισμός, καθώς και η ύπαρξη επακόλουθης επεξεργασίας, συνεισφέρουν στην δημιουργία διαφόρων διακυμάνσεων και αποκλίσεων κατά την κατασκευαστική διαδικασία. Ο μετριασμός αυτών των αποκλίσεων, η προσπάθεια ελαχιστοποίησης των αστοχιών και η ανίχνευση των ελαττωμάτων επιτυγχάνεται με την χρήση των Μη Καταστροφικών Δοκιμών (Non Destructive Testing/NDT). Παράγοντες όπως η

γεωμετρική πολυπλοκότητα και η τραχύτητα τη επιφάνειας, αποτελούν προκλήσεις που σχετίζονται με την συγκεκριμένη μορφή ελέγχου. Επιπρόσθετα, στον τομέα των κατασκευών χρησιμοποιούνται ήδη πρότυπα NDT για τον έλεγχο των κατεργασιών συγκόλλησης (welding) και χύτευσης (casting). Ο έλεγχος των τεχνολογιών AM καθίσταται αδύνατος με την χρήση των υπάρχοντων προτύπων των συμβατικών μεθόδων λόγω των σημαντικών διαφορών που παρουσιάζουν με αυτές τις νέες τεχνολογίες κατά την φάση της κατεργασίας. Ταυτόχρονα γίνεται ευκολότερη η διαμόρφωση θεωρητικού υπόβαθρου για τους αντίστοιχους ελέγχους των κατασκευών με προσθετική προσέγγιση.

Στις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής, διάφορες ανωμαλίες και ελαττώματα μπορούν να προκληθούν κατά την φάση της κατασκευής, της επακόλουθης επεξεργασίας, καθώς και τη φάση της συντήρησης. Η συνεργασία της ομάδας ASTM Committee E07 με την ISO TC 261, έφερε σημαντικά αποτελέσματα όσον αφορά την καταγραφή στοιχειωδών μορφών ελαττωμάτων και αστοχιών που μπορούν να παρουσιαστούν μέσω της κατασκευής με προσθετική προσέγγιση. Τα συμπεράσματά τους, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, αφορούν τις μεθόδους AM, όπως την DED και την PBF, ενώ κάποια άλλα σχετίζονται με ένα μεγαλύτερο εύρος κατασκευαστικών μεθόδων που περιλαμβάνει και τους παραδοσιακούς τρόπους κατεργασίας. Σε γενικότερες γραμμές, κάθε ελάττωμα διαφοροποιείται ανάλογα με την μέθοδο AM και τις αντίστοιχες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται, καθώς επίσης πολλές φορές καθίσταται αδύνατος ο μετρισμός του με τη χρήση μεταγενέστερων μέσων επεξεργασίας [80]. Ένα από τα μεγαλύτερα ερευνητικά κέντρα, η NASA, έχοντας πραγματοποιήσει μια πληθώρα κατασκευών και μελετώντας τις αστοχίες που έχουν δημιουργηθεί, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 56, κινείται προς την κατεύθυνση εξέλιξης και περαιτέρω επεξεργασίας των τεχνικών NDT [34].



Εικόνα 56: Ελαττώματα στην επίστρωση, εγκλωβισμένη σκόνη, πορώδες και έλλειψη σύντηξης, που προκλήθηκαν σε κατασκευές με προσθετική προσέγγιση στα εργαστήρια της NASA [34].

Επεξήγηση Συντομογραφιών Πίνακα 1: LOF lack of fusion (έλλειψη σύντηξης), MET optical metrology (οπτική μετρολογία), PCRT process compensated resonance testing (δοκιμή αντιστάθμισης συντονισμού της μεθόδου), PT penetrant testing (δοκιμή διείσδυσης), RT radiographic testing (δοκιμή ακτινογραφίας), UT ultrasonic testing (υπερηχητική δοκιμή), CT computed tomography (υπολογιστική τομογραφία), CMM coordinate measuring machine (μηχανή μέτρησης συντονισμού), EMF electromagnetic frequency (ηλεκτρομαγνητική συχνότητα)

Ελάττωμα / Ατέλεια	Μέθοδος Προσθετικής Κατασκευής	Αιτίες Πρόκλησης Αστοχιών	Ανίχνευση στην Επακόλουθη Επεξεργασία
Πορώδες (Porosity)	PBF DED	Ανεπαρκής επιλογής παραμέτρων, υγρασία, μόλυσμένη πρώτη ύλη ή περιβαλλον κατασκευής, ανεπαρκής χειρισμός, αποθήκευση, ατμοποίηση μικρών συστατικών των κραμάτων που εξαρτώνται από την πρώτη ύλη, λανθασμένη εκτίμηση στην ακρίβεια της μεταφοράς της ακτίνας	Εξαρτάται από την γεωμετρία του δείγματος και το μέγεθος του πορώδους, μπορεί να ανιχνευθεί χρησιμοποιώντας CT/ PCRT/ RT/ UT
Κενά (Voids)	PBF DED	Εξάντληση ποσότητας σκόνης, αλλαγές στην πυκνότητα της ενέργειας της ακτίνας που προσκρούεται και δημιουργεί την τηκόμενη περιοχή ή καταστάσεις ατμοποίησης που δημιουργούν σφαιρικές τηκόμενες περιοχές με μορφή οπών	Εξαρτάται από την γεωμετρία του δείγματος και το μέγεθος των κενών, μπορεί να ανιχνευθεί χρησιμοποιώντας CT/ PCRT/ RTR/ UT
Ελαττώματα στην Επίστρωση (Layer defects)	PBF	Διακοπή παροχής σκόνης, σφάλματα των οπτικών συστημάτων (λέιζερ) ή των δεδομένων (data), μόλυνση του καθαρού περιβάλλοντος κατασκευής (διακοπή παροχής ευγενούς αερίου ή άλλες διαδικασίες διακοπής, όπως η αλλαγή της ίνας του πομπού και του μέσου εκτόξευσης ακτίνας ηλεκτρονίου)	Εξαρτάται από την γεωμετρία του δείγματος και το μέγεθος του ελαττώματος, μπορεί να ανιχνευθεί χρησιμοποιώντας CT/ PCRT/ RT/ UT
Διασπασμένα Ελαττώματα στην Επίστρωση (Cross-layer defects)	PBF	Ανεπαρκής επιλογής παραμέτρων, μόλυνση ή υποβάθμιση του περιβάλλοντος ανάπτυξης της μεθόδου, ο αποχρωματισμός (όπως, DED πλάσμα τόξου από κράματα Ti) που μπορεί να καταστήσει αδύνατο τον έλεγχο της διαδικασίας, λανθασμένη εκτίμηση στην ακρίβεια της μεταφοράς της ακτίνας	Εξαρτάται από την γεωμετρία του δείγματος και το μέγεθος του ελαττώματος, μπορεί να ανιχνευθεί χρησιμοποιώντας CT/ PCRT/ RT/ UT
Εσωτερική επιφάνεια τηκόμενου υλικού/ Μη Ενοποιημένη Σκόνη (Under melted material/ unconsolidated powder(LOF))	PBF	Ανεπαρκής επιλογής παραμέτρων, ελλιπής ανάπτυξη και έλεγχος της μεθόδου, λανθασμένη εκτίμηση στην ακρίβεια της μεταφοράς της ακτίνας	Πιθαμή χρήση CT και PCRT, η ανιχνευσιμότητα εξαρτάται από τη γεωμετρία και το μέγεθος του PCRT
Ρωγμή (Cracking)	PBF DED	Αποτυχημένος ολοκληρωτικός καθαρισμός ενός κράματος σκόνης πριν την τοποθέτηση του επακόλουθου, πληθώρα μεταλλουργικών θεμάτων που σχετίζονται με την ευαισθησία στην εμφάνιση ρωγμών, διάφορες θερμικές και μηχανολογικές καταστάσεις	Εξαρτάται από την γεωμετρία του δείγματος και το μέγεθος της ρωγμής, μπορεί να ανιχνευθεί χρησιμοποιώντας CT/ PCRT/ ECT/ RT/ UT

Μειωμένος βαθμός Μηχανολογικών Ιδιοτήτων (Reduced mechanical properties)	PBF DED	Νέα σκόνη εκτός των προδιαγραφών ή υποβαθμισμένης ποιότητας λόγω επαναχρησιμοποίησης, ανεπαρκής ανάπτυξη και έλεγχος της μεθόδου, διακοπή παροχής πρώτης ύλης	Έλεγχος της σκόνης (περίθλαση ακτίνας χ) στο τέλος της μεθόδου και των μηχανολογικών ιδιοτήτων του τελικού μέρους, μεμονωμένη συχνότητα PCRT
Μη ικανοποιητική ακρίβεια (Poor accuracy)	PBF DED	Εξισορρόπηση παραγόντων που επηρεάζονται από την γεωμετρία του μέρους, ένταση της ακτίνας και πυκνότητα της σκόνης των μεθόδων PBF ή SLM, οπτικά προβλήματα σάρωσης στη μέθοδο EBM, παρουσία ανάμειξης ηλεκτρομαγνητικής συχνότητας (EMF)	Συνήθως εύκολη οπτική ανίχνευση στην επιφάνεια του μέρους, η δημιουργία τοπικών ελαττωμάτων ίσως απαιτεί την χρήση λέιζερ CMM, η ανίχνευση εσωτερικών αποκλίσεων γίνεται με τη σύγκριση του CT με το CAD αρχείο ή με αυτή του PCRT με το μοντέλο.
Ενσωματώσεις (Inclusions)	PBF DED	Θραύσματα από κατασκευές με τις τεχνολογίες AM ή ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία	Εξαρτάται από την φύση της μόλυνσης και την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του μέρους, κάποιες ενσωματώσεις είναι ανιχνεύσιμες με CT/ PCRT/ RT/ UT
Παραμένουσες Τάσεις (Residual Stress)	PBF DED	Ανεπαρκής επιλογή παραμέτρων	Συνήθως εύκολη οπτική ανίχνευση στην επιφάνεια του μέρους, η δημιουργία τοπικών ελαττωμάτων ίσως απαιτεί την χρήση λέιζερ CMM, η ανίχνευση εσωτερικών αποκλίσεων γίνεται με τη σύγκριση του CT με το CAD αρχείο ή με αυτή του PCRT με το μοντέλο.
Ελαττώματα "Stop/Start"	PBF DED	Συνέπεια μακροχρόνιων κατασκευών ή διακοπή παροχής πρώτης ύλης με σκοπό την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων	Έλεγχος των μηχανολογικών ιδιοτήτων του τελικού μέρους, μεμονωμένη συχνότητα PCRT
Ελαττώματα επιφάνειας (Surface flaws)	PBF DED	Μερικώς τηκόμενη σκόνη, γραμμικές ή επίπεδες καταστάσεις ή ανωμαλίες, ασυνήθιστες σταγόνες, κτλ.	PT, MET
Εγκλωβισμένη σκόνη (Trapped powder)	PBF		Πιθανή χρήση CT και PCRT, η ανιχνευσιμότητα εξαρτάται από τη γεωμετρία και το μέγεθος του μέρους

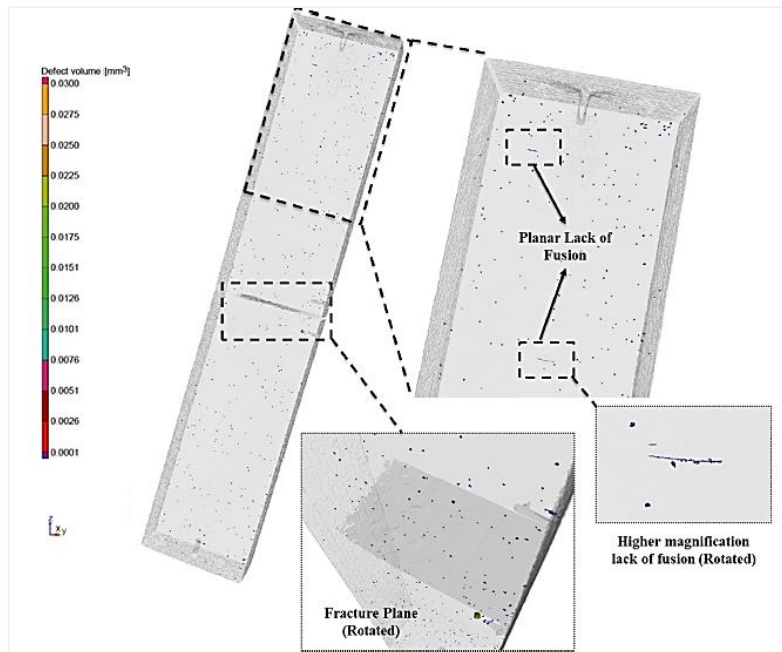
Πίνακας 1: Ανίχνευση ελαττωμάτων στις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής με την χρήση των Μη Καταστροφικών Δοκιμών [50].

Η σημαντικότερη πρόκληση που αντιμετωπίζουν η NASA, η FAA, το DoD και ο εμπορικός αεροδιαστημικός τομέας έγκειται στην πιστοποίηση των κρίσιμων ρωγμών (fracture-critical) που δημιουργούνται στα τεμάχια που κατασκευάζονται με τις τεχνολογίες AM χρησιμοποιώντας έλεγχο NDT ή αποδεικτικές δοκιμές (proof tests). Αυτή η δυσκολία εμφανίζεται περισσότερο στις περιπτώσεις εφαρμογών όπου τα δομικά περιθώρια είναι περιορισμένα και υπερισχύει η περίπτωση αποτυχημένης κατασκευής. Μέχρι σήμερα, τα μεγέθη των ελαττωμάτων που προέρχονταν από τον εξοπλισμό των συμβατικών μεθόδων κατασκευής δεν ταυτίζονταν με τον αντίστοιχο εξοπλισμό των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής, ειδικότερα στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνταν NDT τεχνικές όπως το δινορευτικό ρεύμα* (eddy current) και οι έλεγχοι διείσδυσης χρωστικών (dye penetrant testing). Για την ποσοτικοποίηση του ρίσκου που σχετίζεται με αυτά τα μέρη, καθίσταται υποχρεωτικός ο ορισμός κρίσιμων αρχικών μεγεθών ελαττωμάτων (critical initial flaw sizes/CIFS) από την επιστημονική διαρθρωτική κοινότητα αξιολόγησης, όπως η ASTM Committee E08 σε θέματα εμφάνισης ρωγμής και κόπωσης. Η γνώση των CIFS θα επιτρέψει τόσο τον αποδοτικότερο έλεγχο των ρωγμών όσο και την καλύτερη αξιολόγηση των ρίσκων από την ευρύτερη κοινότητα που ασχολείται με τις δοκιμές NDT [43].

Σε γενικότερες γραμμές δεν υπάρχει επικρατούσα άποψη για τα πρότυπα των Μη Καταστροφικών Δοκιμών στις τεχνολογίες AM ούτε από την ομάδα ASTM E07 ούτε από την F42. Ωστόσο είναι ευρέως αποδεκτό ότι η υιοθέτηση πιστοποιημένων αναφορών για τα NDE (Non-Destructive Evaluation), ή αλλιώς NDT, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα εξέλιξης των τεχνολογιών που στηρίζονται στην προσθετική προσέγγιση. Οι προϋπάρχοντες μέθοδοι NDE δεν μπορούν να αξιοποιηθούν από τις μεθόδους και τα υλικά των τεχνολογιών AM, ενώ ταυτόχρονα θεωρούνται σημαντικά εργαλεία αξιολόγησης. Παράδειγμα αποτελεί ο τρόπος με τον οποίον η μικρό-ηλεκτρονική τομογραφία (micro-computerized tomography), με μέτρηση σε μ CT, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ελαττωμάτων κυρίως στο στάδιο της επακόλουθης επεξεργασίας. Ο έλεγχος αυτός αξιοποιείται ευρέως τόσο λόγω της υπόδειξης της τοποθεσίας της αστοχίας, όσο και λόγω της επιβεβαίωσης για την αποτελεσματικότητα της επακόλουθης επεξεργασίας που θα χρειαστεί. Τα κυριότερα ελαττώματα, όπως είναι η έλλειψη σύντηξης (LOF), το πορώδες, τα κενά και τα ελαττώματα στην επίστρωση, παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 1.

Στην Εικόνα 57 παρουσιάζεται μια πλάκα που έχει καμφθεί (bend bar), με διαστάσεις 10mm x 20 mm x 100mm. Πρόκειται για ένα δείγμα από υλικό Ti-6Al-4V, στο οποίο εμφανίζονται πληθώρα ελαττωμάτων με την μέθοδο της ηλεκτρονικής τομογραφίας. Συγκεκριμένα, λόγω της ύπαρξης θερμής ισοστατικής πίεσης (hot isostatic pressing), φαίνεται να έχει εγκλωβιστεί πορώδες, να υπάρχει μεγάλο ποσοστό μη ενοποιημένης σκόνης και ουσιαστικά έλλειψη σύντηξης [26].

* ένα ηλεκτρικό ρεύμα, τοποθετημένο σε συγκεκριμένο σημείο, το οποίο διοχετεύεται σε έναν αγωγό από ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο



Εικόνα 57: Αποτέλεσμα ελέγχου δείγματος Ti-6Al-4V με τη μέθοδο της ηλεκτρονικής τομογραφίας. Εγκλωβισμός πορώδους, μη ενοποιημένης σκόνης και έλλειψη σύντηξης.

4.2.3 Παρακολούθηση της Διαδικασίας σε Δεδομένο Χρόνο (In Situ) και στον Έλεγχο Ανατροφοδότησης

Η παρακολούθηση και ο έλεγχος μιας διαδικασίας σε δεδομένο χρόνο, αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα και την πιστοποίηση των τεμαχίων που κατασκευάζονται με τις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής. Κρίνεται απαραίτητο να έχουν υψηλό βαθμό ποιότητας, κυρίως όταν αφορούν εφαρμογές στον τομέα της ιατρικής και της αεροδιαστημικής. Η ικανότητα παραγωγής πολύπλοκων μερών με συνέπεια, σχετίζεται άρρηκτα με τη χρήση των μηχανημάτων, τους χειριστές και τις εγκαταστάσεις παραγωγής. Κρίνεται απαραίτητη η ενσωμάτωση ποικίλων μορφών παρακολούθησης της διαδικασίας και μετρήσεις των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν. Ο προσεκτικός και ταυτόχρονα συνεπής έλεγχος μιας μεθόδου μπορεί να περιορίσει την μεταβλητότητα της, ενώ η έλλειψη επαρκών μεθόδων μέτρησης καθυστερεί περισσότερο την ευρύτερη αξιοποίηση των τεχνολογιών αυτών. Ο πρόσφατος έλεγχος των μεθόδων που βασίζεται σε πειραματικά και νέας μορφής δεδομένα, έχει επιφέρει περιορισμένες βελτιώσεις στο ζήτημα της ποιότητας των κατασκευασμένων μερών. Όπως αναφέρθηκε σε μια πρόσφατη αναφορά του NIST, πρέπει να αναπτυχθούν εξακριβωμένοι μέθοδοι διαστατικής και θερμικής μετρολογίας για τον έλεγχο κλειστού βρόγχου σε διαδικασίες AM σε πραγματικό χρόνο [40].

Η μεταβλητότητα στις μηχανές και η πηγή ενέργειας και ακτινών που χρησιμοποιούνται κατά την φάση της κατασκευής, μπορούν να δημιουργήσουν ασυνέχεια στην μικροδομή, παρουσία ελαττωμάτων, καθώς και μεταβλητότητα στην μηχανική απόδοση. Η παρακολούθηση σε δεδομένο χρόνο αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό από τις μεθόδους DED, ενώ στις περιπτώσεις των διαδικασιών PBF προκύπτουν προβλήματα που σχετίζονται με την περιορισμένη οπτική πρόσβαση στην τηκόμενη περιοχή, γεγονός που περιπλέκεται περισσότερο από την ύπαρξη υψηλότερης ταχύτητας επεξεργασίας. Σε αυτή την κατεύθυνση, οι πρόσφατες προσπάθειες για την παρακολούθηση των μεθόδων εστίαστηκαν τόσο στην ανίχνευση των ελαττωμάτων όσο και στον χαρακτηρισμό της τηκόμενης περιοχής, που μπορούν να διερευνηθούν τον δεδομένο χρόνο που χρειάζεται. Συγκεκριμένα, η

παρακολούθηση της τηκόμενης περιοχής χρησιμοποιείται για την καταγραφή της διανομής της θερμοκρασίας στις τοποθετημένες επιστρώσεις, με σκοπό την δημιουργία ενός θερμικού χάρτη, ο οποίος μπορεί να συγκριθεί με το μέγεθος της περιοχής.

Ωστόσο, η επεξεργασία και η απόκτηση δεδομένων μεγάλης έκτασης μπορούν να οδηγήσουν στην δημιουργία μεγάλων συνόλων δεδομένων, τα οποία έχουν δύσκολη διαχείριση και ταυτόχρονα καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο αποθήκευσης. Παρόλα αυτά, πληθώρα μηχανημάτων έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούν τις επιλογές για την παρακολούθηση της μεθόδου ως στοιχείο του εξοπλισμού τους. Για παράδειγμα, η εταιρία Concept Laser παρέχει συστήματα επιβεβαίωσης ελέγχου ποιότητας, όπως το QMmeltpool 3D, το οποίο τείνει να ανιχνεύει ελαττώματα στα πρώιμα στάδια της κατασκευής και να αποτελεί ένα μέσο βελτιστοποίησης της. Στην επακόλουθη γενιά μηχανημάτων η εξέλιξη συνδέεται με την απομνημόνευση των πληροφοριών για την τοποθέτηση των αξόνων x-y καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευαστικής διαδικασίας. Παράλληλα δημιουργείται υψηλής ανάλυσης τρισδιάστατη απόδοση των σημάτων των αισθητήρων (sensor signals). Πρακτικά έχει δημιουργηθεί η εντύπωση ότι αυτή η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τρόπος επιβεβαίωσης της ποιότητας, όμοιος με αυτό της Μη Καταστροφικής Δοκιμής, όπως η περίπτωση ελέγχου με ηλεκτρονική τομογραφία. Παρόμοια συστήματα παρέχονται από ένα ευρύτερο σύνολο προμηθευτών, όπως η εταιρία Arcam (LayerQam), η SLM Solutions και η EOS. Από πρόσφατες αναφορές έχει διαπιστωθεί ότι η παρακολούθηση της μεθόδου καθίσταται απαραίτητη και έχει σημαντικό ενδιαφέρον. Όσον αφορά όμως τις τεχνολογίες PBF, η έρευνα γύρω από αυτό το ζήτημα βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο [39,40].

Στην ερευνητική κοινότητα, οι προσεγγίσεις που σχετίζονται με τον Έλεγχο Ανατροφοδότησης πραγματοποιούνται από το Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon University (CMU). Για τις μεθόδους LENS, ο έμμεσος έλεγχος της μικροδομής μέσω θερμικής απεικόνισης, καθώς και ο έλεγχος της τηκόμενης περιοχής, επιδιώκονται από το πανεπιστήμιο Penn State και την εταιρία Stratonics μέσω της σύνδεσης της παρατήρησης των διαστάσεων της τηκόμενης περιοχής με το σχηματισμό των χαρακτηριστικών μικροδομών. Ο θερμικός έλεγχος της μεθόδου Arcam εφαρμόζεται μέσω θερμικής απεικόνισης ολόκληρης της κατασκευής μετά από την έγχυση των επιστρώσεων μέσω ενός συστήματος υπέρυθρων (infrared), το οποίο εγκαταστάθηκε στο Πανεπιστήμιο του Τέξας στο El Paso. Οι κατευθυντήριες γραμμές που έχουν δοθεί από το CMU, χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τις αλλαγές τόσο στην ενέργεια όσο και στην ταχύτητα της ακτίνας λόγω της μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας κατά την κατασκευή, αποδίδοντας μικροδομή με συνεπές μέγεθος [26].

4.3 Εμφάνιση Αστοχιών στις Μεθόδους Προσθετικής Κατασκευής

Μέθοδοι PBF

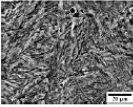
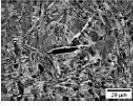
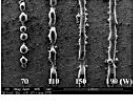
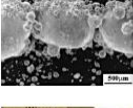

Οι μέθοδοι που αναπτύσσονται με την τεχνολογία Σύντηξης Σκόνης σε Κλίνη (PBF) χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας είτε το λέιζερ είτε την ακτίνα ηλεκτρονίου. Ο τρόπος με τον οποίο εκτυλίσσονται οι δυο διαδικασίες είναι όμοιος και παράλληλα κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη σημαντικού αριθμού εισερχόμενων παραμέτρων, οι οποίοι επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Για την μέθοδο PBF με χρήση λέιζερ, ο M. Van Elsen [38] απαρίθμησε πάνω από πενήντα πειραματικές μελέτες, οι οποίες αφορούσαν στην εκτίμηση του αποτελέσματος της χρήσης παραμέτρων όπως η πυκνότητα της ενέργειας, η πορεία της ταχύτητας και η διάταξη της χάραξης (hatch spacing). Αυτά τα δεδομένα συνδέονται με την βελτιστοποίηση της ποιότητας της κατασκευής και την ουσιαστική μείωση των ευδιάκριτων ασυνεχειών που παρατηρούνται στο κατασκευασμένο μέρος μετά το πέρας της διαδικασίας.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των αστοχιών, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 58, δημιουργείται κατά την φάση της κατασκευής και αφορά κυρίως στην δημιουργία κενών, τα

οποία βρίσκονται χύμα στο εγχυμένο υλικό ή ανάμεσα στις επιστρώσεις με επιμηκυμένη μορφή (elongated pores) ή μέσα στην κάθε στρώση με μορφή αερίου (gas pores). Ένα σύνολο ερευνητών, όπως και ο Dr. Hooyar Attar [33], αναφέρουν ότι η εμφάνιση πόρων αερίου οφείλεται στην ύπαρξη μερικής ποσότητας μη τηκόμενης σκόνης, η οποία τοποθετείται με χαμηλή αλλά συνεχόμενη ενέργεια. Αντιστρόφως, η υπερβολική τήξη μπορεί να επιφέρει αναταραχές στην περιοχή που τήκεται, καθώς και περίσσεια εξάτμιση (evaporation), προκαλώντας πόρους αερίου στον συνολικό όγκο του υλικού. Επιπρόσθετα, ο Dr. Samuel Tammam-William [29] και άλλοι επιστήμονες, στην κατασκευή μερών με δομή από Ti6Al4V, η οποία πραγματοποιείται με μια μέθοδο PBF-ακτίνας ηλεκτρονίου σε συνδυασμό με την χρήση υπολογιστικής τομογραφία στον άξονα X της ακτίνας (XCT), αποδεικνύουν ότι ο σχηματισμός κενών σχετίζεται άμεσα με τις παραμέτρους που έχουν επιλεγεί και το αντίστοιχο καθεστώς σάρωσης (scanning regime). Παρομοίως, ερευνητές όπως και ο Alphons A. Antonysamy [28] έχουν ανακαλύψει ότι η δομή των κόκκων και η ανάπτυξη της υφής στα μέρη που αποτελούνται από υλικό Ti6Al4V και παράγονται από μια μέθοδο PBF-ακτίνας ηλεκτρονίου, διαφοροποιεί την δομή των κόκκων σε σχέση με τον όγκο του υλικού. Αυτό συμπεραίνεται κυρίως μέσω της σαρωτικής διαδικασίας ανάγνωσης που ακολουθείται και ενισχύει τα παραπάνω δεδομένα που σχετίζονται με τους τρόπους με τους οποίους μπορούν να δημιουργηθούν ασυνέχειες.

Σύμφωνα με τις μελέτες επιστημόνων και συγκεκριμένα του H. Attar, στην κατασκευή μερών με τις μεθόδους PBF-λείζερ έχουν παρατηρηθεί σημαντικές αστοχίες, με τις κυριότερες αυτών να είναι η δημιουργία επιμήκους πορώδους και η εμφάνιση μη τηκόμενων σωματιδίων κυρίως στην κατασκευή εμπορικά καθαρής σκόνης τιτανίου. Παρατηρήθηκε ότι παράμετροι της διαδικασίας, όπως η ανεπαρκής ενέργεια του λείζερ που είχε ως συνέπεια την εμφάνιση μη ισορροπημένου ιξώδους στην υγρή δεξαμενή (viscosity of liquid pool), αποτέλεσαν τις αιτίες για τον σχηματισμό αυτών των ασυνεχειών. Εκτός από αυτές τις ασυνέχειες, συχνό φαινόμενο θεωρείται η δημιουργία εξογκωμάτων με σφαιρική μορφή, γνωστά ως "Balling". Πρόκειται για μια μορφή που παίρνει η σκόνη όταν δέχεται επεξεργασία σε περιβάλλον που γίνεται χρήση λείζερ με υψηλή ενέργεια και υπάρχει παρουσία οξυγόνου σε ποσοστό μεγαλύτερο από 0,1% στον θάλαμο κατασκευής. Σαν εξόγκωμα υπερβαίνει την επιφάνεια της στρώσης και ουσιαστικά προκαλείται οξειδωση. Επιπρόσθετα μέσω άλλων πειραματικών διαδικασιών έχει διαπιστωθεί ότι το ίδιο φαινόμενο μπορεί να εμφανισθεί στην περίπτωση χρήσης σκόνης από ανοξείδωτο ατσάλι, όπου η ενέργεια που χρησιμοποιείται δεν επαρκεί ώστε να την τήξει πλήρως.

Εκτός από τα παραπάνω, πιθανή θεωρείται και η εμφάνιση παραμένουσων τάσεων στα εξαρτήματα που κατασκευάζονται με τις μεθόδους PBF-λείζερ. Συνήθως αυτό αναπτύσσεται κατακόρυφα στην κατεύθυνση της σάρωσης που πραγματοποιείται ως ένα στάδιο της διαδικασίας. Ένας τρόπος ελαχιστοποίησης της εμφάνισης των τάσεων είναι η αντιστάθμιση της θερμοκρασιακής κλίσης, θερμαίνοντας την πλάκα κατασκευής. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι μια αλλαγή στην στρατηγική σάρωσης επηρεάζει την δημιουργία ρωγμών, οι οποίες είναι αποτέλεσμα των τάσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αλλαγή της συμπεριφοράς ψύξης [31].

Material discon.	Photo	Description	Typical sizes
(Gas) pores		Entrapped gas pores within the bulk of the material. Material dependent.	~9.9 μm (electron beam-PBF) 5–20 μm (laser-PBF)
(Elongated) pores		Lack of fusion pores in between layers of the AM process.	50–500 μm
Balling		Molten material is not a flat layer, but instead creates large spherically shaped particles on the surface.	Part dependent — theoretically up to the length of the part.
Unfused powder		The melt pool varies in size and unfused powder is present.	Satellite powder clumps: 100–150 μm.
Cracking		Cracks can be within the component or more commonly, a disconnection of the part from the baseplate is seen.	Parts on bed: residual stress in the range of materials yield strength. Parts removed from bed: deformation may occur without heat treatment or further processing.

Εικόνα 58: Οι πιο σημαντικές αστοχίες/ασυνέχειες που εμφανίζονται στις μεθόδους PBF [31].

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι έχει πραγματοποιηθεί σημαντική προεργασία στην παρακολούθηση των συστημάτων των μεθόδων PBF-λείζερ σε δεδομένο χρόνο (in-situ), η οποία επικεντρώνεται στον έλεγχο της τηκόμενης περιοχής. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με την χρήση ελεγχόμενης κάμερας (in-line camera), σε συνδυασμό με φωτοδιόδους* (photodiodes) και τον έλεγχο της θερμοκρασίας της τηκόμενης περιοχής με έλεγχο κλειστού βρόγχου. Ταυτόχρονα, έχουν αναπτυχθεί περίπλοκα συστήματα εκτός δικτύου (off-line), τα οποία δεν χρειάζονται υποστήριξη με μηχανήματα και έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη κατανοητών δεδομένων για την περαιτέρω εξήγηση του φαινομένου δημιουργίας “balling” ασυνεχειών. Παράδειγμα αποτελούν οι πυρομετρικές τεχνικές** (pyrometric techniques), οι οποίες έχουν αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό, αλλά ο περιορισμένος τρόπος προβολής και ρυθμός συλλογής των δεδομένων, αποτελούν παράγοντες που συμβάλλουν αρνητικά στην υιοθέτηση τέτοιου συστήματος κλειστού βρόγχου. Επιπρόσθετα τα συστήματα IR*** συμβάλλουν θετικά στην επιθεώρηση των διαδικασιών PBF-λείζερ για δεδομένο χρόνο, χωρίς όμως να έχουν ενσωματωθεί σαν τεχνολογία στα αντίστοιχα μηχανήματα. Η παρακολούθηση της τηκόμενης περιοχής σε συνδυασμό με την ανίχνευση των ασυνεχειών του υλικού, όπως είναι οι πόροι, έχει ολοκληρωθεί σε σημαντικό βαθμό.

Όσον αφορά τις μεθόδους PBF που γίνεται χρήση ακτίνας ηλεκτρονίου έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές ενέργειες παρακολούθησης μιας διαδικασίας με αξιοποίηση των συστημάτων IR, σε αντίθεση με τις μεθόδους PBF-λείζερ. Επιπλέον, οι ασυνέχειες που προκαλούνται στο μέρος εξαιτίας της υπερβολικής τήξης, μπορούν να αναγνωρισθούν και ακολούθως να επιλυθούν μέσω του ελέγχου ανατροφοδότησης. Ωστόσο, σε αυτές τις περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω μελέτη και υιοθέτηση τεχνικών για τον χειρισμό κλειστού βρόγχου. Επιπρόσθετα, η μικροδομή του υλικού μπορεί να επηρεαστεί από την

*Μια φωτοηλεκτρική συσκευή ημιαγωγού για την ανίχνευση και συχνά τη μέτρηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας.

**Τεχνικές με τις οποίες πραγματοποιείται μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας ενός υλικού, από τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας που εκπέμπεται.

***Πρόκειται για συστήματα κάμερας με τα οποία γίνεται ανίχνευση της υπέρυθρης ενέργειας. Αποτελούν συσκευές που ανιχνεύουν την υπέρυθρη ενέργεια, χωρίς να έρθουν σε επαφή με το τεμάχιο, και την μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα. Το σήμα δέχεται μια μορφή επεξεργασίας με σκοπό την παραγωγή θερμικής εικόνας σε μια οθόνη και την πραγματοποίηση θερμοκρασιακών υπολογισμών. (<https://www.flir.com/discover/how-does-an-ir-camera-work/>)

θερμοκρασία σε όλο το εύρος της κλίνης όπου τοποθετείται η σκόνη, γεγονός που μελετάτε μέσω της ανάπτυξης ενός συστήματος ελέγχου το οποίο να επιτρέπει την αυξομείωσή της.

Παράλληλα, τα ηλεκτρομαγνητικά ελατήρια (coils) που χρησιμοποιούνται για να εκτρέψουν την ακτίνα ηλεκτρονίου κατά την διάρκεια της κατασκευαστικής φάσης, εμποδίζουν την εφαρμογή ομοαξονικού (co-axial) χειρισμού. Επιπλέον, η εξάτμιση και η υγροποίηση (condensation) του μετάλλου στην περιοχή που τήκεται, μπορεί να δημιουργήσει επιμετάλλωση (metallisation) στο παράθυρο οπτικής παρακολούθησης του μηχανήματος. Ταυτόχρονα, η διαδικασία που λαμβάνει χώρα μέσα στον θάλαμο, περιορίζει την ενσωμάτωση εξοπλισμού επιθεώρησης μέσα στο μηχάνημα, καθώς επίσης η αξιοποίηση των πυρομετρικών τεχνικών καθίστανται αδύνατη λόγω της γρήγορης και παροδικής φύσης της πηγής ενέργειας που χρησιμοποιείται [31].

Μέθοδοι DED

Οι αστοχίες που εμφανίζονται στις τεχνολογίες Άμεσης Ενεργειακής Τοποθέτησης (DED) οφείλονται κυρίως στην διαφορετική διαδικασία τήξης που ακολουθείται. Όσον αφορά τις μεθόδους που χρησιμοποιούν την τεχνική μεταφοράς σκόνης (DED-powder), όπως η μέθοδος LENS, έχουν δημιουργηθεί σημαντικές τεχνολογίες επιθεώρησης που βελτιώνουν την γεωμετρική ακρίβεια των κατασκευασμένων εξαρτημάτων. Ωστόσο οι πιο συνηθισμένες ασυνέχειες που μειώνουν την ποιότητα, είναι η εμφάνιση πορώδους και ρωγμών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι ασυνέχειες που προκαλούνται στις μεθόδους DED-powder παρατηρούνται και στις τεχνολογίες DED με χρήση σύρματος (DED-wire).

Συγκεκριμένα, δημιουργούνται δύο διαφορετικά είδη πορώδους, όπου το ένα αφορά στην ύπαρξη εγκλωβισμένου αερίου και το άλλο οφείλεται στην ελλιπή έγχυση μεταξύ των στρωμάτων. Το πορώδες αυτό δημιουργείται εξαιτίας της ανεπαρκούς πυκνότητας της ενέργειας στην τηκόμενη περιοχή, ενώ το πορώδες με μορφή αερίου οφείλεται στην μεγάλο ρυθμό ροής της σκόνης. Ακολουθώς, η εμφάνιση ρωγμών πραγματοποιείται είτε από τις διαφορές των συντελεστών θερμικής διαστολής (thermal expansion coefficients) είτε από την ύπαρξη μολυσμένης σκόνης. Εκτός από τα παραπάνω, οι τεχνολογίες που στηρίζονται στην μέθοδο αυτή, μελετώνται και βελτιώνονται κυρίως ως προς την χρήση πολλαπλών υλικών. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός των νέων ασυνεχειών που θα προκύψουν, λόγω των διαφορετικών μηχανικών και οπτικών ιδιοτήτων των νέων υλικών.

Διάφοροι ερευνητές έχουν αναλύσει την ικανότητα παρακολούθησης των μεθόδων DED-powder αξιοποιώντας τρόπους ελέγχου όπως είναι οι πυρομετρικές και IR κάμερες. Πολλές φορές ο έλεγχος των μεθόδων πραγματοποιήθηκε σε συνδυασμό με την εισαγωγή δεδομένων και στοιχείων με σκοπό την ικανότητα ελέγχου με κλειστό βρόγχο. Έτσι ταυτόχρονα μελετήθηκαν η μορφολογία και ο έλεγχος της θερμοκρασίας της τηκόμενης περιοχής και δόθηκε έμφαση στην περαιτέρω ανάγκη έρευνας των εξαρτημάτων και των υλικών. Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε ότι οι τηκόμενες περιοχές μπορούν να έχουν διαφορετικό μέγεθος αλλά ίδιο θερμοκρασιακό προφίλ, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την περαιτέρω έρευνα και έλεγχος σε σχέση με τα θερμικά χαρακτηριστικά τόσο της σκόνης μετάλλου όσο και των υλικών των υποστρωμάτων (substrate materials). Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της λεπτής επιφάνειας της επίστρωσης ενισχύει των σχηματισμό ρωγμών, εξαιτίας του υψηλού ρυθμού ψύξης [31].

4.4 Προσομοίωση και Μοντελοποίηση των Μεθόδων (Simulation & Modelling)

Η έρευνα τον τομέα της μοντελοποίησης κρίνεται απαραίτητη για την υιοθέτηση υπολογιστικών προσεγγίσεων όσον αφορά την μοντελοποίηση μιας μεθόδου, της δομής, των ιδιοτήτων καθώς και της συμπεριφοράς και τοπολογίας. Πρόκειται για ένα σύνολο στοιχείων το οποίο θα διευκολύνει την μηχανική και την γενικότερη ποιότητα των υλικών σύμφωνα με τις αντίστοιχες απαιτήσεις σε κάθε περίπτωση. Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους της μοντελοποίησης για τις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής σχετίζεται με τη μείωση της χρήσης των πειραματικών δοκιμών και των λανθασμένων βελτιστοποιήσεων της κατασκευαστικής διαδικασίας που αφορούν τις μεταβλητές της σκόνης, του σχεδιασμού, της εισερχόμενης ενέργειας, της ακολουθίας κάθε στρώσης (layer sequencing), καθώς και τις επακόλουθες θερμικές επεξεργασίες [20, 32].

Ουσιαστικές προσπάθειες στον τομέα της μοντελοποίησης καταβάλλει το Τμήμα Διοίκησης της Εθνικής Ενεργειακής Πυρηνικής Ασφάλειας⁷⁹ (Department of Energy National Nuclear Security Administration/NNSA) της Αμερικής, σύμφωνα με το οποίο ο καθορισμός των ελαττωμάτων και οι παραμένουσες τάσεις που εμφανίζονται σε ένα μέρος, αποτελούν δεδομένα τα οποία η μοντελοποίηση της μεθόδου μπορεί να τα αναγνωρίσει σε ευρεία κλίμακα (macro-scale). Στις δικές τους πειραματικές διαδικασίες σε ευρεία κλίμακα, η προσομοίωση των διαδικασιών στερεοποίησης πραγματοποιείται με το λογισμικό Υπολογιστικής Ρευστότητας (Computational Fluid Dynamics/CFD) και τα αποτελέσματα των παραμένουσων τάσεων υπολογίζονται τυπικά από το λογισμικό FEA. Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στην μοντελοποίηση με CFD είναι η περιγραφή της επιφανειακής τάσης (surface tension) και οι τοπικές παραλλαγές με την θερμοκρασιακή και χημική σύνθεση, οι οποίες επηρεάζουν την μορφή και το βάθος της τηκόμενης περιοχής. Παράλληλα, η ακριβής προσομοίωση της γεωμετρίας της τηκόμενης περιοχής και ο πιθανός εγκλωβισμός αερίου στα δημιουργημένα κενά, αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για την τελική πρόβλεψη της ποιότητας του μέρους [32].

Σε γενικότερο επίπεδο τα πειράματα που σχετίζονται με την μοντελοποίηση λαμβάνουν χώρα για μεγάλο χρονικό διάστημα και απαιτούν σημαντική οικονομική υποστήριξη. Θεωρείται απαραίτητη η δυνατότητα προσομοίωσης και η ύπαρξη μοντέλων τα οποία να μπορούν να προβλέψουν την εμφάνιση των μερών, να υποστηρίξουν την στρατηγική ανάπτυξης της μεθόδου και των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν και πρακτικά να διευκολύνουν το σχεδιασμό των υλικών στο υπάρχον περιβάλλον. Η επικρατούσα άποψη στην ακαδημαϊκή και βιομηχανική κοινότητα, καθώς και στα εθνικά εργαστήρια υποστηρίζει την ανάγκη αξιοποίησης των υπαρχόντων Ενσωματωμένων Εργαλείων Υπολογιστικής Μηχανικής των Υλικών (Integrated Computational Materials Engineering/ ICME) για την εξάλειψη των προκλήσεων σε αυτόν τον τομέα. Ωστόσο, απαιτείται πολύ έρευνα και μελέτη για την δημιουργία εργαλείων τα οποία να σχετίζονται με τις ανάγκες των τεχνολογιών AM και να έχουν την ικανότητα πρόβλεψης των θερμομηχανικών κύκλων (thermo-mechanical cycles), της στερεοποίησης, του μετασχηματισμού της στερεής κατάστασης (solid-state transformation), των παραμένουσων τάσεων, της γεωμετρικής παραμόρφωσης (geometric distortion) και των μηχανικών ιδιοτήτων.

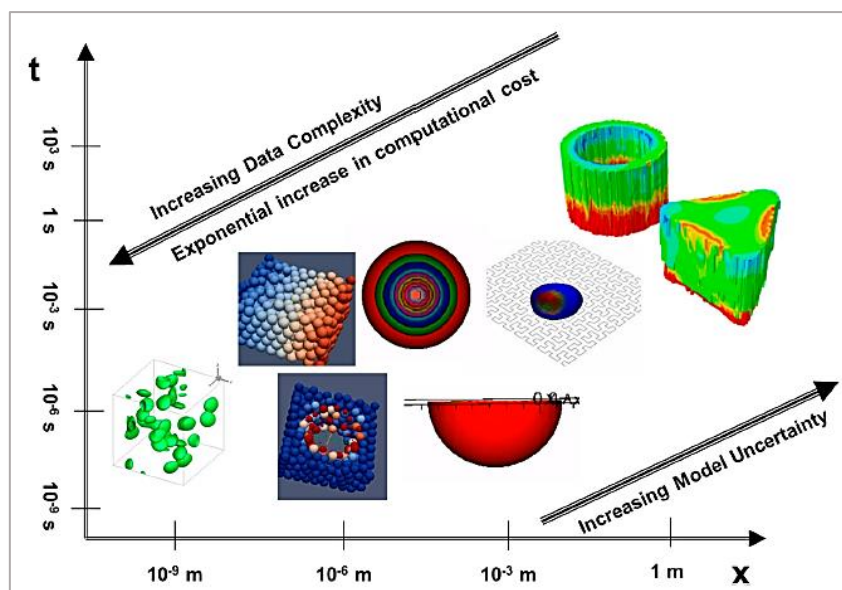
Τα εμπόδια που εμφανίζονται ποικίλουν και αποτελούν υπολογιστικές προκλήσεις που εμποδίζουν την ανάπτυξη της μοντελοποίησης. Ο μεγάλος αριθμός των σωματιδίων της σκόνης που χρησιμοποιείται στις μεθόδους, καταλαμβάνει έναν σημαντικό όγκο στην επεξεργασία της μηχανής (processing volume). Δηλαδή κάθε 1m^3 επεξεργασία μηχανής περιλαμβάνει περίπου 10^{12} σωματίδια και περίπου 10^9m γραμμή συγκόλλησης (weld line), υποθέτοντας $50\mu\text{m}$ σωματίδια. Ταυτόχρονα, η υψηλή θερμοκρασιακή κλίση αποτελεί αποτέλεσμα ταχείας θέρμανσης και ψύξης, και αιτιολογεί την χρήση ενός λεπτού πλέγματος στη δεδομένη περιοχή επεξεργασίας, γεγονός το οποίο στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν συμβαίνει. Επιπλέον, η περιοχή επεξεργασίας περιορίζεται σε μικρή περιοχή, ενώ κανονικά χρειάζεται περιοχή με υψηλή ετερογένεια (highly heterogeneous) και πολλαπλής κλίμακας. Ακολουθώς, ο χρόνος

κατασκευής κρίνεται ως ένα στοιχείο που δύσκολα μπορεί να συγχρονιστεί με τον χρόνο της προσομοίωσης, καθώς επίσης δεν υπάρχουν υπολογιστικά εργαλεία τα οποία να προβλέπουν τις παραμένουσες τάσεις, την γεωμετρία και την ποιότητα της κατασκευής.

Παράλληλα, υπάρχει έλλειψη δεδομένων που αφορά στις ενσωματωμένες και αξιόπιστες δυνατότητες δυναμικής αλλαγής φάσης (phase change dynamics), συμπεριλαμβανομένων των παραμένουσων τάσεων, της επιφανειακής τάσης, της μικροδομής και άλλων. Επιπρόσθετα, η ταχύτητα της ακτίνας, η εστίαση της πηγής θερμότητας και η βελτιστοποίηση της συχνότητας τοποθέτησης υλικού αποτελούν δεδομένα, τα οποία ως συνάρτηση του χώρου και του χρόνου μπορούν να αξιοποιηθούν από ένα μεγάλο εύρος διαστατικών παραμέτρων. Ωστόσο, πρόκειται για μια δύσκολη διαδικασία ως προς τον υπολογιστικό και πειραματικό υπολογισμό της. Ο μεγάλος αριθμός των θερμοφυσικών (thermo-physical) και άλλων παραμέτρων σε συνδυασμό με την ελλιπή κατανόηση της αλληλεπίδρασης της ακτίνας με το υπόστρωμα, αυτή των μικροδομικών (microstructural) αλλαγών σε συνάρτηση με την δυναμική αλλαγή φάσης και διάφορες άλλες περιορίζουν την ανάπτυξη στον τομέα αυτό. Ακόμα, η αξιοπιστία θεωρείται δύσκολη καθώς η διαμόρφωση του μη παρεμβατικού χαρακτηρισμού (non-intrusive characterization) στις τρέχουσες μηχανές περιορίζεται κυρίως στις επιφανειακές και οριακές μετρήσεις μέσω παραθύρων προβολής, ή μέσω του χαρακτηρισμού των μικροδομών μετά το πέρας της κατασκευής.

Στην Εικόνα 59 χρησιμοποιούνται τα γραφικά αποτελέσματα των διαθέσιμων υπολογιστικών μεθόδων που σχετίζονται με την μοντελοποίηση και την προσομοίωση των τεχνολογιών AM και απεικονίζονται οι συνεχόμενες προσπάθειες μοντελοποίησης που σχετίζονται με την αξιοποίηση των ICME σε πολλές κλίμακες. Στις περιπτώσεις των μεθόδων PBF και DED, οι προσομοιώσεις διαφοροποιούνται σε κάθε κλίμακα ως εξής [20]:

- *Μικρή Κλίμακα (Micro-scale), από $10^{-9}m$ μέχρι $10^{-6}m$* : Μοντέλο φάσης-πεδίου (phase-field modelling) για την πρόβλεψη της μικροδομής του στερεοποιημένου υλικού (περιλαμβάνει μοντελοποίηση της στερεοποίησης, μετασχηματισμό φάσης στερεάς κατάστασης, εκτράχυνση των κόκκων, κτλ.)
- *Κλίμακα Σωματιδίων (Particle scale), από $10^{-6}m$ μέχρι $10^{-3}m$* : Προσομοιώσεις επιπέδου σωματιδίων με σκοπό την ενίσχυση της κατανόησης των μικρών όγκων κατασκευής και την ανάπτυξη τερματισμών (closures) για μακροσκοπικές προσομοιώσεις (δηλαδή, αλληλεπιδράσεις σκόνης-ακτίνας και προσομοιώσεις ενοποίησης της σκόνης)
- *Μεσαία Κλίμακα (Meso-scale), $10^{-3}m$* : Προσομοιώσεις ευρείας κλίμακας που έχουν επιλυθεί με διαδρομή (path-resolved)(δηλαδή, υπολογισμοί θερμοκρασιακού προφίλ που στηρίζονται στην μετακίνηση της πηγής ενέργειας) και περιλαμβάνουν την δυναμική αλλαγή φάσης και ροής του ρευστού, με σκοπό την μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων της διαδρομής
- *Ευρεία Κλίμακα (Macro-scale), από $10^{-3}m$ μέχρι $1m$* : Εκτράχυνση των κόκκων ή ομογενείς θερμομηχανικές προσομοιώσεις σε κατασκευασμένο τεμάχιο με σκοπό την αξιολόγηση της μορφής της ποιότητας και της παραμόρφωσης, των παραμένουσων τάσεων κτλ.



Εικόνα 59: Ιεραρχική απεικόνιση προσεγγίσεων μοντελοποίησης για τις τεχνολογίες AM [20].

4.5 Επεξεργασία των Υλικών (Material Processing)

Παρόλο που οι μέθοδοι PBF και DED παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές, υπάρχουν κάποια όμοια θέματα που αφορούν στην επεξεργασία των υλικών και εξερευνώνται σε διάφορα ερευνητικά κέντρα. Όπως έχει διαπιστωθεί στους συμβατικούς τρόπους κατεργασίας, έτσι και στις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής μεταλλικών μερών η εμφάνιση πορώδους αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά ελαττώματα. Ταυτόχρονα, παρατηρείται η δημιουργία παραμένουσων τάσεων, αποκόλλησης (delamination), ρωγμών, και εξογκωμάτων (swellings), ενώ καταλυτικό ρόλο στην τελική ποιότητα του κατασκευασμένου μέρους κατέχουν και τα εισερχόμενα καταχωρημένα δεδομένα (inputs). Πρόκειται για στοιχεία που σχετίζονται με το λογισμικό και τον εξοπλισμό της δεδομένης κατασκευαστικής μεθόδου, τη στρατηγική σάρωσης, την θερμοκρασία καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας, την πρώτη ύλη, την ατμόσφαιρα στον θάλαμο κατασκευής και διάφορα άλλα. Κατ' επέκταση τα εξερχόμενα δεδομένα αφορούν τις μηχανικές ιδιότητες (στατικές και δυναμικές), οι οποίες ελαχιστοποιούν την ύπαρξη αποτυχημένων κατασκευών και τις γεωμετρικές παραμορφώσεις.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι θερμικές αλληλεπιδράσεις λόγω της εφαρμοσμένης ενέργειας, οι αλληλεπιδράσεις των ακτινών, η μεταφορά θερμότητας και η θερμοκρασία κατά την κατασκευαστική φάση, αποτελούν δεδομένα που αν ρυθμιστούν σωστά, θα δημιουργήσουν ένα δυναμικό θερμοκρασιακό περιβάλλον. Το περιβάλλον αυτό θεωρείται ένα από το πιο καθοριστικά δεδομένα για την επιτυχημένη έκβαση μιας μεθόδου Προσθετικής Κατασκευής [20].

4.5.1 Σκόνη Μετάλλου ως Πρώτη Ύλη

Η ποιότητα της σκόνης που χρησιμοποιείται στις τεχνολογίες AM καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την τελική ποιότητα του κατασκευασμένου τεμαχίου. Η ποιότητα της μπορεί να καθοριστεί από το μέγεθος, την μορφή, την μορφολογία της επιφάνειας, καθώς και την εσωτερική σύνθεση. Ουσιαστικά η σκόνη διαμορφώνει την ποιότητα κάποιων φυσικών μεταβλητών, όπως είναι η ρευστότητα (flowability) και η φαινομενική πυκνότητα (apparent density) [20]. Σε παγκόσμιο επίπεδο, έχουν γίνει και συνεχίζονται οι προσπάθειες

αναγνώρισης, καταγραφής και λύσης των προκλήσεων που σχετίζονται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών και εμποδίζουν την ευρύτερη υιοθέτηση των τεχνολογιών AM. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, οργανισμοί όπως ο NIST και το Εθνικό Επιστημονικό Ίδρυμα (National Science Foundation/NSF), καθώς και πλήθος επιστημόνων, ακαδημαϊκών και ερευνητικών κέντρων, έχουν καταγράψει σχετικούς τεχνικούς περιορισμούς που χρήζουν αντιμετώπισης.

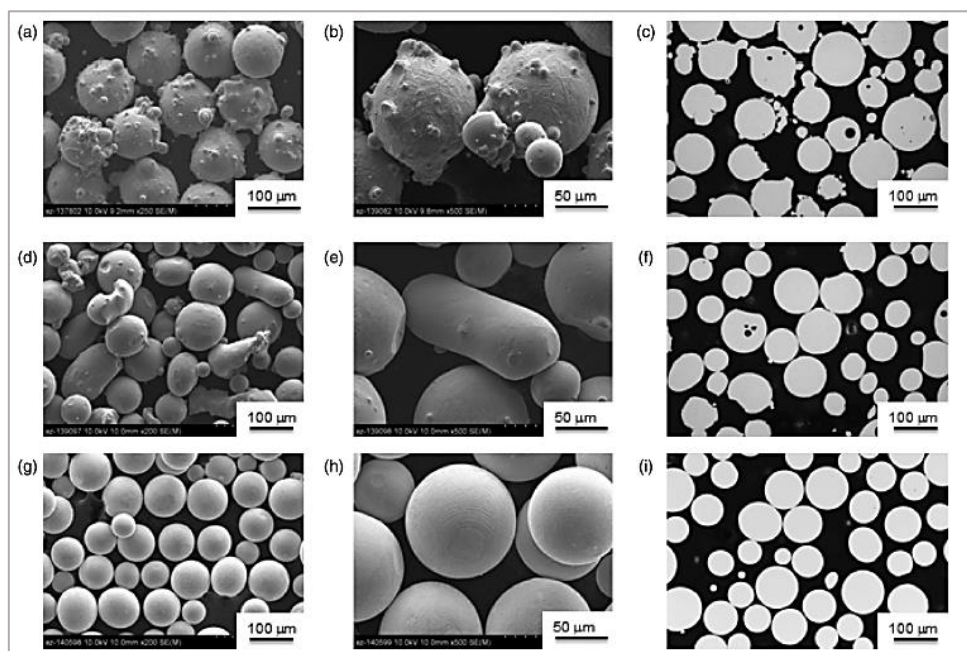
Έχει διαπιστωθεί η περιορισμένη γνώση όσον αφορά την σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων των υλικών και της σκόνης που χρησιμοποιείται. Επίσης, δεν έχει γίνει πλήρως αντιληπτή η διαφοροποίηση στην μεταβλητότητα των βασικών παραγόντων (underlying factors) από μηχανή σε μηχανή και σε κάθε χρονικό διάστημα. Ακολούθως, απαιτείται αποδοτικότερη κατανόηση και χαρακτηρισμός των υλικών AM που χρησιμοποιούνται, συμπεριλαμβανομένων και των εισερχόμενων υλικών, όπως το μέγεθος, το σχήμα και η χημική σύσταση της σκόνης. Παράλληλα, κρίσιμη θεωρείται η έλλειψη μεθόδων πιστοποίησης και διασφάλισης ποιότητας, κυρίως όσον αφορά την γνώση ως προς τις διαφορές ανάμεσα στην καθαρή και στην ήδη χρησιμοποιημένη σκόνη μετάλλου [36].

Η ποιότητα της σκόνης μετάλλου καθορίζεται από την τεχνική παραγωγής. Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι είναι ο ψεκασμός αερίου (gas atomization/GA), ο περιστροφικός ψεκασμός (rotary atomization/RA), η διαδικασία περιστροφής ηλεκτροδίων πλάσματος (plasma rotating electrode process/PREP) και ο ψεκασμός πλάσματος (plasma atomization/PA). Στην Εικόνα 60 [27] απεικονίζεται η επιφάνεια και η μορφολογία σκόνης, καθώς και οι διατομές για την ανάλυση του εσωτερικού πορώδους, με χρήση ενός Μικροσκοπίου Ηλεκτρονικής Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy/SEM). Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις παρουσιάζεται η μορφή μέσω της Ελασματοποιημένης Κατασκευής Αντικειμένων (LOM). Η εμφάνιση πορώδους είναι χαρακτηριστική στην πλειονότητα των τεχνικών παραγωγής που χρησιμοποιούνται, όπως η περίπτωση χρήσης του GA, το οποίο εγκλωβίζει ευγενές αέριο κατά την φάση της παραγωγής. Συγκεκριμένα, το εγκλωβισμένο αέριο μεταφέρεται στο τεμάχιο λόγω της ταχείας στερεοποίησης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πορώδους στο ολοκληρωμένο κατασκευασμένο μέρος [20, 36].

Ο Jamie Clayton, ερευνώντας το πεδίο των τεχνικών προβλημάτων, επισήμανε την ανάγκη δημιουργίας δεδομένων τα οποία σχετίζονται με την σκόνη που θα χρησιμοποιηθεί σε μια διαδικασία, ως ένα επακόλουθο και αποδοτικότερο βήμα σε σύγκριση με την απλή μέτρηση των χαρακτηριστικών της σκόνης. Σύμφωνα με αυτόν, οι σημερινές εφαρμοζόμενες μέθοδοι μέτρησης της σκόνης που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες AM δεν καλύπτουν την αναγνώριση όλου του εύρους των δυνατοτήτων της. Επιπλέον, καθίσταται σπουδαία η ενσωμάτωση συνδυαστικών μετρήσεων οι οποίες να σχετίζονται τόσο με τις διατμητικές όσο και με την δυναμικές ιδιότητες των κυττάρων της σκόνης. Με αυτό τον τρόπο θα γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά ροής της σκόνης στα συστήματα AM [36].

Δεδομένου ότι η ρευστότητα και η πυκνότητα επηρεάζουν σημαντικά την ποιοτική σύσταση ενός μέρους, έχουν αναπτυχθεί σχετικές μέθοδοι μέτρησης που ονομάζονται Hall Flow Meters [96], καθώς επίσης έχουν συνταχθεί τα πρότυπα πιστοποίησης ASTM B213-13 και B212-13. Το πρώτο αφορά στη ρευστότητα και το δεύτερο στην πυκνότητα [20]. Αυτός ο τρόπος μέτρησης αποτελεί έναν τρόπο χαρακτηρισμού της σκόνης μετάλλου, καθώς επίσης περιλαμβάνει περιορισμούς και ιδιότητες σωματιδίων, όπως η μορφολογία, η τραχύτητα και η χημική σύσταση της επιφάνειας, το μέγεθος της κατανομής και οι περιβαλλοντικές καταστάσεις. Πρόκειται για δεδομένα που μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Ο O. Lyckfeldt [25], αξιοποιώντας αυτές τις μεθόδους, έδειξε ότι διαφορετικές ομάδες σκόνης από ατσάλι (batches of steel powder) κατάλληλες για τις τεχνολογίες AM μπορούν να έχουν διαφορετικές ιδιότητες ροής και να επηρεάσουν την εμφάνιση του τεμαχίου, ασχέτως με το γεγονός ότι μπορούν να παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή μεγέθους σωματιδίων.

Όσον αφορά τις μετρήσεις κατανομής μεγέθους (size distribution measurements) μιας ομάδας σωματιδίων, χρησιμοποιούνται εκτενώς οι μετρήσεις περίθλαση (diffraction) με λέιζερ και στις μεθόδους AM. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι αυτή η μέτρηση αποδίδει ακριβή αποτελέσματα στην μέτρηση σφαιρικών σωματιδίων, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις των τεχνολογιών AM η μορφή των σωματιδίων της σκόνης είναι διαφορετική. Αυτό οδηγεί στην εμφάνιση αβεβαιοτήτων για τον χαρακτηρισμό της σκόνης που θα χρησιμοποιηθεί. Παράλληλα, μια άλλη μέθοδος χαρακτηρισμού της σκόνης που παρουσιάζει περιορισμούς, είναι η χρήση Hall χοανών (Hall funnels) που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του συντελεστή τριβής (coefficient of friction). Ο συντελεστής αυτός συμβάλλει στην ορθή κατανόηση του τρόπου ροής και σύστασης δομής της σκόνης στις τεχνολογίες AM. Με σωστή διαχείριση μπορεί να επιφέρει θετικά αποτελέσματα, όπως η μείωση εμφάνισης πορώδους και ο σχηματισμός πιο ομοιόμορφων πόρων. Εκτός από αυτά, ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την ροή και την πυκνότητα είναι το περιβάλλον και κυρίως η σχετική υγρασία. Στην περίπτωση ύπαρξης υψηλής υγρασίας η σκόνη μπορεί να ενοποιηθεί λανθασμένα επηρεάζοντας την πορεία της ροής [36].



Εικόνα 60: Σύγκριση ποιότητας σκόνης: (a) SEM 250x της μεθόδου GA, (b) SEM 500x της μεθόδου GA, (c) LOM της μεθόδου GA, (d) SEM 200x της μεθόδου RA, (e) SEM 500x της μεθόδου RA, (f) LOM της μεθόδου RA, (g) SEM 200x της μεθόδου PREP, (h) SEM 500x της μεθόδου PREP, (i) LOM της μεθόδου PREP [27]

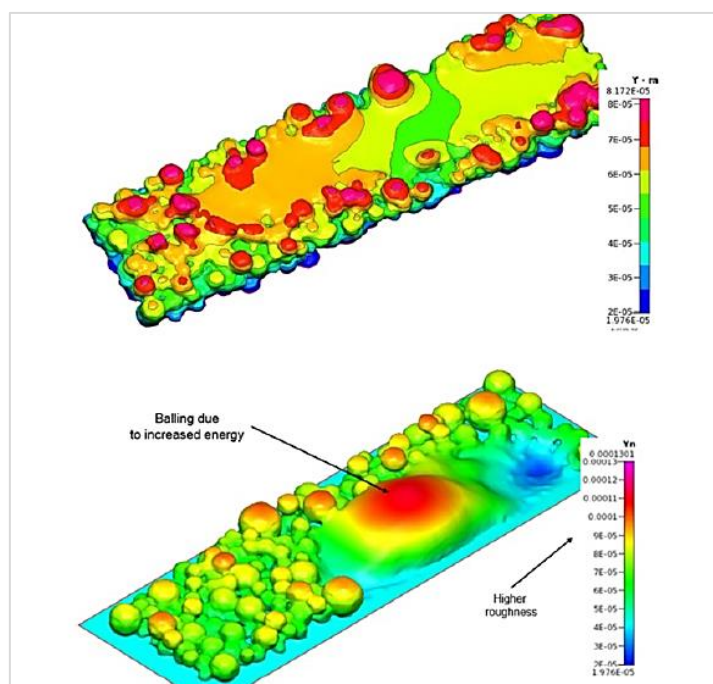
4.5.2 Ευρύτερο σύνολο ελαττωμάτων

Τραχύτητα Επιφάνειας (Surface Roughness)

Στην κατασκευή μερών με τις Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής η μελέτη της τραχύτητας της επιφάνειας αποτελεί ένα βασικό στοιχείο για τον έλεγχο της ποιότητας της τελικής κατασκευής. Οι τρόποι με τους οποίους ελέγχεται η ύπαρξη αυτού του στοιχείου, είναι με την αναγνώριση των μη επίπεδων άκρων στο στρώμα (non-flat layer edges) ή την εμφανή τραχύτητα του στρώματος, καθώς και με την πραγματική τραχύτητα της επιφάνειας του μετάλλου. Έχει διαπιστωθεί, ότι με την χρήση μικρότερων τιμών όσον αφορά την λεπτότητα του στρώματος, επιτυγχάνεται μείωση της εμφάνισης αυτού του φαινομένου. Αυτό,

ταυτόχρονα, συνεπάγεται με περισσότερο χρόνο κατασκευής, ο οποίος καθορίζεται από τον αριθμό των στρώσεων.

Η πραγματική τραχύτητα ενός υλικού εξαρτάται από τις λεπτομέρειες της μηχανής που θα παράξει ένα μέρος. Συνήθως στις τεχνολογίες DED πραγματοποιείται κατασκευή με σκοπό την δημιουργία μεγαλύτερου πάχους στρώσης, το οποίο περιορίζει την αξιοποίηση των σχημάτων “near-net”. Πρόκειται για σχήματα που παράγονται κοντά στην επιθυμητή τελική γεωμετρία του μέρους, αλλά ακολούθως πρόκειται να τελειοποιηθούν σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό. Όσον αφορά τις μεθόδους PBF, δημιουργούν λεπτότερο πάχος στρώσης και καλύτερη διακριτότητα, αλλά είναι επιρρεπείς στον σχηματισμό δορυφόρων (satellite formation) λόγω της πυροσυσσωμάτωσης της σκόνης σε ορισμένα σημεία. Πρακτικά, η ύπαρξη σκόνης με λεπτότερη δομή επιφέρει ελαχιστοποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας [20]. Στην Εικόνα 61 απεικονίζονται δύο διαφορετικά κατασκευαστικά σενάρια, στα οποία μελετάτε το φαινόμενο αυτό. Στην περίπτωση της πρώτης μορφής έχει χρησιμοποιηθεί χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, η οποία προκαλεί μεταβολές στο ύψος της επιφάνειας μέχρι 60μm στην άκρη της επεξεργασμένης περιοχής και 25 μm γύρω από το κέντρο. Στην δεύτερη μορφή παρουσιάζεται μια επιφάνεια με υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, όπου η αυξημένη ρευστότητα της τηκόμενης περιοχής σε συνδυασμό με την υψηλή επιφανειακή τάση, έχουν προκαλέσει την δημιουργία των αστοχιών “balling” και τραχύτητα της επιφάνειας της τάξεως των 110μm [35].



Εικόνα 61: Διαφορετικά σενάρια δημιουργίας τραχύτητας σε επιφάνεια σκόνης μετά από επεξεργασία [35].

Πορώδες (Porosity)

Το πορώδες αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες ενός μεταλλικού μέρους. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να προκληθεί ποικίλουν και έχουν ήδη αναφερθεί και σχολιαστεί σε προηγούμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, το πορώδες μπορεί να εμφανισθεί στη σκόνη, κατά την διάρκεια της κατασκευής ή ως ένα τεχνητό δημιούργημα κατά τη φάση της στερεοποίησης. Σημαντική θεωρείται η δημιουργία πόρων αερίου (gas pores) κατά τη φάση ψεκασμού της σκόνης, οι οποίοι έχουν σφαιρική μορφή και μεταφέρονται απευθείας στο κατασκευασμένο μέρος.

Σε κάθε κατασκευαστική διαδικασία, κρίνεται απαραίτητος ο σωστός καθορισμός των παραμέτρων, ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση πορώδους. Η περίπτωση εμφάνισης πόρων μέσω της διαδικασίας κατασκευής (process-induced porosity), λαμβάνει χώρα όταν η απαιτούμενη ενέργεια για την τήξη δεν επαρκεί ή όταν προκαλείται ένα φαινόμενο εκτόξευσης σκόνης με μορφή σταγόνων (spatter ejection). Οι πόροι που δημιουργούνται δεν έχουν σφαιρική μορφή και το μέγεθός τους ποικίλει. Επιπρόσθετα, όταν μια περιοχή με σκόνη δεν τροφοδοτείται με την απαραίτητη ενέργεια, μπορεί να προκληθεί έλλειψη σύντηξης. Τα σημεία στα οποία εμφανίζεται αυτή η έλλειψη αναγνωρίζονται τα σωματίδια που δεν έχουν τηχθεί και είναι εμφανή μέσα ή δίπλα στους πόρους.

Παράλληλα, όταν η εφαρμοσμένη ενέργεια είναι υψηλή, η εκτόξευση σκόνης με μορφή πιτσιλιών μπορεί να προκληθεί σε μια μέθοδο που είναι γνωστή ως σχηματισμό κλειδαρότρυπας (keyhole formation). Στην μέθοδο SLM έχει παρατηρηθεί ότι ο σχηματισμός αυτός μπορεί να παράξει κενά στην περιοχή της κατασκευής, και ο μόνος τρόπος για να περιοριστεί η ύπαρξη του συνδέεται με την υιοθέτηση νέας στρατηγικής επεξεργασίας των υλικών. Εκτός από αυτά, το πορώδες που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της κατασκευής εμφανίζει άλλα χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης της ενοποιημένης σκόνης. Η σκόνη κατανέμεται στην επιφάνεια επεξεργασίας και περιλαμβάνει σωματίδια μεγαλύτερα σε διάμετρο από το πάχος της στρώσης, τα οποία κατά την τήξη προορίζονται να στερεοποιηθούν σε ένα στρώμα με σωστό ύψος.

Ένα άλλο είδος που μπορεί να προκύψει είναι το Πορώδες Συρρίκνωσης (Shrinkage Porosity), το οποίο σχετίζεται με την ατελή ροή του μετάλλου στην επιθυμητή περιοχή τήξης. Σε γενικότερες γραμμές, με βελτιστοποιημένες παραμέτρους τήξης, το πορώδες που δημιουργείται κατά την διάρκεια της κατασκευής μπορεί να έχει πολύ χαμηλά επίπεδα στις κατασκευαστικές μεθόδους DED, SLM και EBM. Επιπρόσθετα, η σχέση μεταξύ της ελλιπούς σύντηξης, των περιοχών συρρίκνωσης και των ρωγμών, δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς ώστε να υπάρξει ουσιαστική γνώση για τον χαρακτηρισμό και την επίλυση τους [20].

Παραμένουσες Τάσεις (Residual Stresses)

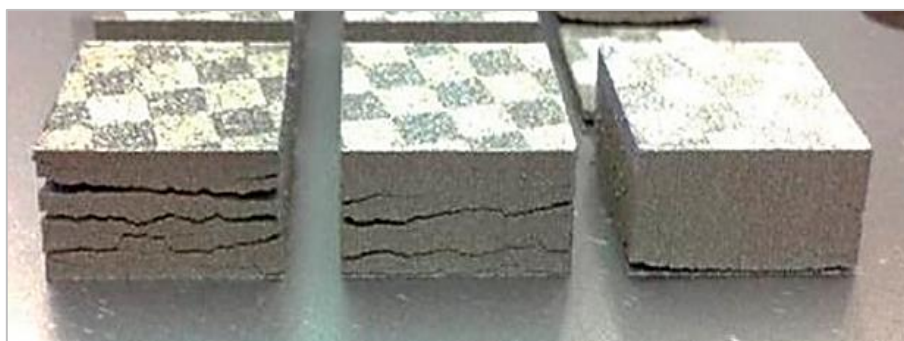
Η δημιουργία παραμένουσων τάσεων αποτελεί ένα κρίσιμο και συνηθισμένο φαινόμενο, το οποίο προκαλείται στα μεταλλικά υλικά των τεχνολογιών ΑΜ. Αποτελεί ένα μέσο που επηρεάζει αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών και την δομή των κόκκων. Ουσιαστικά πρόκειται για μια τάση που συνεχίζει να υπάρχει μέσα στο υλικό ακόμα και μετά από την απομάκρυνση των τάσεων που εφαρμόζονται σε αυτό. Εάν αυτή η τάση υπερβεί τις τάσεις που αποδίδονται τοπικά στο υλικό, τότε μπορεί να προκύψει στρέβλωση (warping) ή πλαστική παραμόρφωση (plastic deformation). Επιπλέον, αν υπερβεί την τοπική αντοχή εφελκυσμού, εμφανίζονται ρωγμές και άλλα ελαττώματα. Οι παραμένουσες τάσεις σε μακροσκοπική κλίμακα επηρεάζουν δραματικά την συμπεριφορά της μάζας (bulk) των μερών ΑΜ, ενώ οι επιδράσεις σε μικροσκοπικό επίπεδο από ιζήματα (precipitates) ή ανωμαλίες των ατόμων (atomic dislocations) απορροφούνται ομαλότερα.

Το φαινόμενο των παραμένουσων τάσεων θεωρείται ανησυχητικό εξαιτίας της δημιουργίας παραμορφώσεων στην τελική γεωμετρία του μέρους και γι' αυτό το λόγο έχουν μελετηθεί ποικίλες τεχνικές μέτρησής του. Συνήθως παρατηρείται με συμπιεσμένη μορφή στο κέντρο των κατασκευασμένων μερών, με εφελκυστική μορφή στις άκρες και με μεγαλύτερη συγκέντρωση κοντά στο υπόστρωμα (surface interface). Η μοντελοποίηση των θερμικών κύκλων για τις τεχνολογίες DED με τροφοδότηση σύρματος, η οποία πραγματοποιείται με μετρήσεις από την μέθοδο FEA, έχει επιβεβαιώσει την ύπαρξη υψηλών παραμένουσων τάσεων κοντά στο υπόστρωμα. Πρακτικά, η κατανόηση της προέλευσης των τάσεων απαιτεί λεπτομερή γνώση του ιστορικού του θερμικού κύκλου και η διερεύνηση των μεθόδων που μπορούν να εξαλείψουν ή να μειώσουν την ύπαρξή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί στην επακόλουθη επεξεργασία (post-processing).

Ρωγμή, Αποκόλληση & Στρατηγική Σάρωσης (Cracking, Delamination & Scan Strategy)

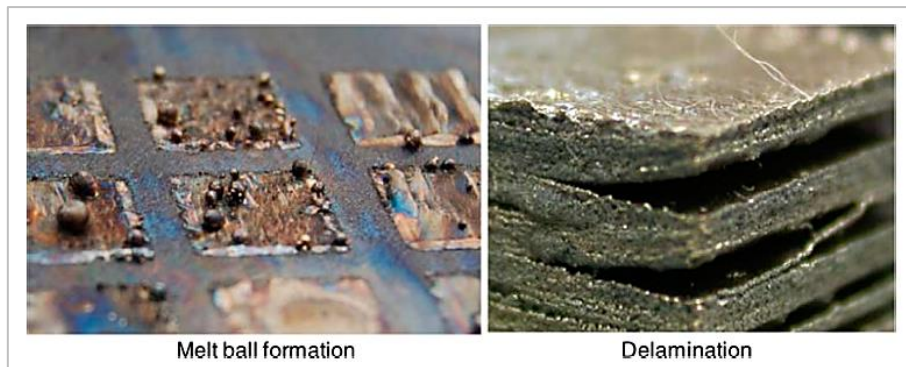
Η δημιουργία των ελαττωμάτων εξαρτάται ουσιαστικά από το θερμοκρασιακό προφίλ της κάθε μεθόδου Προσθετικής Κατασκευής. Οι ρωγμές στην μικροδομή ενός μέρους μπορούν να εμφανιστούν κατά τη φάση της στερεοποίησης ή την επακόλουθη θέρμανση (subsequent heating). Μακροσκοπικές ρωγμές ίσως συνδέονται με άλλες αστοχίες, όπως είναι η εμφάνιση πορώδους. Παράδειγμα αποτελεί η Εικόνα 74, στην οποία παρουσιάζεται ένα φαινόμενο αποκόλλησης που οδηγεί στην δημιουργία ενδιάμεσων ρωγμών (interlayering cracking). Στην περίπτωση που η θερμοκρασία είναι υψηλή, ο συνδυασμός του μεγέθους της τηκόμενης περιοχής και η επιφανειακή τάση, προκαλούν την δημιουργία εξογκωμάτων (swelling) ή τις αστοχίες “balling”. Ουσιαστικά, αν οι συνθήκες εργασίας ελεγχθούν σοβαρά, πολλά από τα ελαττώματα μπορούν να αποφευχθούν.

Μελετώντας τις ρωγμές, οι στερεοποιημένες ρωγμές (solidification cracking) προκύπτουν στην περίπτωση που εφαρμοστεί υπερβολική ποσότητα ενέργειας, η οποία θα ανακύψει από την τάση που θα τροφοδοτηθεί ανάμεσα στις στερεοποιημένες περιοχές που έχουν τηχθεί ή πρόκειται να δεχθούν τήξη. Αυτός ο τύπος ρωγμής εξαρτάται από την στερεοποιημένη φύση των υλικών, η οποία μπορεί να είναι δένδριτική, κυτταρική ή επίπεδη (dendritic, cellular, planar), και τυπικά προκαλείται από μεγάλη τάση στην περιοχή τήξης ή ανεπαρκή ροή υγρού. Παράλληλα, η ύπαρξη οριακών ρωγμών των κόκκων (Grain boundary cracking) εμφανίζεται στον πυρήνα (nucleate) ή κατά μήκος των ορίων των κόκκων του σχηματιζόμενου υλικού. Η προέλευση αυτού του τύπου ρωγμών είναι σημαντικής σημασίας και οφείλεται στην διάσπαση του ιζήματος (dissolution precipitate) και στην μορφολογία των ορίων των κόκκων.



Εικόνα 62: Εμφάνιση του φαινομένου αποκόλλησης και ρωγμών με την μέθοδο SLM [20].

Έχει διαπιστωθεί, ότι η αποκόλληση αποτελεί τον διαχωρισμό των γειτονικών στρωμάτων και την εμφάνιση τους ως ξεχωριστά τμήματα, εξαιτίας της ατελούς τήξης τους. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε λόγω της ανεπαρκούς τήξης της σκόνης είτε λόγω της αποτυχίας τήξης του υπάρχοντος στερεού σε επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Ενώ τα αποτελέσματα των ελαττωμάτων έλλειψης σύντηξης μπορούν να εντοπιστούν στην εσωτερική δομή του κατασκευασμένου μέρους και να μετριάστούν με την επακόλουθη επεξεργασία, τα αποτελέσματα της αποκόλλησης θεωρούνται μακροσκοπικής φύσεως και δεν μπορούν να επιλυθούν με την αντίστοιχη επεξεργασία. Εκτός από αυτά, η συνύπαρξη αποκόλλησης με χαμηλές θερμοκρασίες, μπορεί να επιφέρει την δημιουργία σχηματισμού τηκόμενων σφαιρών (melt ball formation), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 75. Πρόκειται για ένα φαινόμενο στερεοποίησης σε σφαιρική αντί επίπεδη μορφή και προκαλείται κυρίως λόγω της επιφανειακής τάσης.



Εικόνα 63: Σχηματισμός τηκόμενων σφαιρών και αποκολλήσεων σε κατασκευή από ανοξείδωτο ατσάλι με την μέθοδο EBM [20].

Όσον αφορά την στρατηγική σάρωσης, αποτελεί την διαδρομή που ακολουθεί η πηγή θερμότητας στην φάση της επιλεκτικής τήξης ή της εναπόθεσης λέιζερ ή ακτίνας ηλεκτρονίου. Παράλληλα με την εξέλιξη των μεθόδων κατασκευής έχουν δημιουργηθεί ποικίλες μορφές στρατηγικής σάρωσης και κατ' επέκταση έχουν παρατηρηθεί κάποια προβλήματα. Οι βασικότεροι παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο αυτό είναι η πηγή θερμότητας και η ταχύτητα της. Πρόκειται για στοιχεία που πρέπει να μελετώνται εκτενώς και να βελτιστοποιούνται, ώστε να υπάρχει το αντίστοιχο αντίκτυπο και στην διαδικασία της σάρωσης. Σαν δεδομένα μελετώνται τόσο στον θερμικό κύκλο και στην μεταφορά θερμότητας όσο και στην στερεοποίηση. Η ύπαρξη ισορροπίας ανάμεσα σε αυτές τις δύο παραμέτρους συμβάλλει στην εξάλειψη της εμφάνισης πορώδους κατά την διαδικασία κατασκευής και καθορίζει την μορφολογία των κόκκων της σκόνης. [20]

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Μελλοντικά Ερευνητικά Πεδία

5.1 Γενικά Συμπεράσματα

Η Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής (AM), αναγνωρίζεται ως η μέθοδος μηχανολογικών κατασκευών με προσθετική προσέγγιση και αποτελεί την πιο εξελιγμένη φάση της ταχείας πρωτοτυποποίησης. Οι πρώτες ενέργειες πραγματοποιήθηκαν με την χρήση πλαστικής πρώτης ύλης και την δημιουργία αντίστοιχων εξαρτημάτων μέσω μηχανημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η συνεχόμενη βελτίωση των υλικών, των διαδικασιών και των μηχανών, οδήγησαν στην ανάπτυξη εφαρμογών με σκοπό τον σχηματισμό πολυμερών διαδικασιών και υλικών μέσω των τεχνολογιών AM με γρήγορο σχηματισμό πρωτοτύπων, τα οποία βαθμιαία χρησιμοποιούνταν ως ολοκληρωμένα μοντέλα. Κυρίως από μελέτες του T. Wohlers, γίνεται εμφανές το εμπορικό ενδιαφέρον και οι επεκτατικές δραστηριότητες προς την κατεύθυνση αυτής της νέα τεχνολογίας μετά το 2014. Με την κατανόηση των σταδίων κατασκευής και την άμεση σύγκριση των νέων μεθόδων με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, εξηγείται η ολοένα και συνεχόμενη ανάπτυξη των τεχνολογιών AM.

Εξελικτικά, καταλυτικό ρόλο κατείχε η σύσταση των οργανισμών AMSC, η επιτροπή F42 από τον οργανισμό ASTM και η επιτροπή ISO/TC 261, οι οποίοι με την σύνταξη οδηγού πιστοποίησης και παραλληλες ενέργειες, ισχυροποίησαν την ύπαρξη αυτών των τεχνολογιών και έθεσαν τις βάσεις για την ανάγκη καταγραφής προτύπων και πιστοποιήσεων. Παράλληλα η συνεχόμενη κατασκευή αντικειμένων στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική, στην ιατρική και σε ένα μεγάλο εύρος χρήσιμων προϊόντων καθημερινής χρήσης, ενίσχυσε την ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η πραγματοποίηση κατασκευής εξαρτήματος με μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης σε εργαστηριακό περιβάλλον, συνέβαλλε στην ουσιαστική κατανόηση αυτού του τεχνολογικού μοντέλου. Η κατασκευή βάσης προβολέα μοτοσυκλέτας, ως εξάρτημα ενός ευρύτερου εργαστηριακού έργου, πραγματοποιήθηκε με την αξιοποίηση του λογισμικού XYZware Pro και του τρισδιάστατου εκτυπωτή Da Vinci 1.0 Pro. Τόσο το στάδιο του καθορισμού των κατασκευαστικών παραμέτρων, όσο και η διαδικασία της εκτύπωσης με την μέθοδο κατασκευής με σύντηξη νήματος (FFF), αποτέλεσαν σημαντική πηγή γνώσης. Αξιοσημείωτος ήταν επίσης ο επακόλουθος έλεγχος και η αναγνώριση των αστοχιών που προκλήθηκαν κατά την κατασκευαστική διαδικασία.

Σύμφωνα με την τελευταία αναφορά του N. Williams για το 2018 σχετικά με τον τομέα των μεταλλικών κατασκευών, η παγκόσμια βιομηχανία βρίσκεται στην πορεία μιας ευρύτερης εκβιομηχάνισης. Ιστορικά ενέργειες διαφόρων ερευνητών και βιομηχανιών, κυρίως μέσω της ανάπτυξης μηχανημάτων και μεθόδων προσθετικής κατασκευής από το 1990 και μετά, ενισχύουν την σπουδαιότητα ενσωμάτωσης των τεχνολογιών AM στην κατασκευή μεταλλικών μερών. Διερευνώντας τους τρόπους εξέλιξης αυτών των τεχνολογιών, παρατηρείται ότι ο κλάδος της αεροδιαστημικής, της ιατρικής και των αμυντικών συστημάτων έχει επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα μέσω διαφόρων πειραματικών διεργασιών. Αντίστοιχες εταιρίες, όπως η GE Electrics, συγκροτούν νέες μονάδες για την ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών και την αξιοποίηση τους στην γραμμή παραγωγής τους. Παράλληλα από το 2009 πραγματοποιούνται ενέργειες για την δημιουργία κατοχυρωμένων προτύπων, και τους τρόπους αξιολόγησης και ανάπτυξης διαδικασιών που σχετίζονται με την κόπωση, την θραύση και την μη καταστροφική επιδιόρθωση.

Όλες οι δράσεις που πραγματοποιούνται στον τομέα των μεταλλικών κατασκευών βασίζονται στην ανάπτυξη μεθόδων κατεργασίας καθώς και στην ύπαρξη κατάλληλης πρώτης ύλης. Σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους, παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση στην

κατηγοριοποίηση των υλικών, στις μηχανικές και θερμικές τους ιδιότητες και ουσιαστικά στα χαρακτηριστικά της σκόνης και στους τρόπους που αξιοποιείται από τις διάφορες μεθόδους. Διαπιστώνεται, ότι οι ήδη υπάρχουσες μέθοδοι κατασκευής με προσθετική προσέγγιση στον τομέα των πλαστικών κατασκευών, ευνοούν την ανάπτυξη και υιοθέτηση μεθόδων στον κλάδο των μετάλλων με ουσιαστικότερο τρόπο. Η δυναμική υπόσταση τόσο των πρώτων υλών όσο και των μεθόδων, γίνεται εμφανής μέσα από την συνεχόμενη κατασκευή μηχανημάτων από εταιρίες και εργαστήρια σε όλο τον κόσμο. Ακολουθώντας, τα κατασκευαστικά αποτελέσματα όλων των παραπάνω αλυσιδωτών ενεργειών είναι εμφανή και ισχυροποιούν τις υπάρχουσες διαδικασίες.

Η ερευνητική μελέτη και καταγραφή των περιορισμών και των τεχνικών προκλήσεων που έχουν εμφανιστεί σε πολλές φάσεις της κατασκευής μεταλλικών μερών, συντελεί στην αποτύπωση μιας ολοκληρωμένης εικόνας σχετικά με το τεχνολογικό μοντέλο AM. Τα προβληματικά πλαίσια που μελετήθηκαν σχετικά με την πιστοποίηση και διασφάλιση ποιότητας, σχετίζονται με την εμφάνιση ρωγμών και κόπωσης, τις μη καταστροφικές δοκιμές, την παρακολούθηση της διαδικασίας σε δεδομένο χρόνο και τον έλεγχο ανατροφοδότησης. Επιπρόσθετα, η καταγραφή των πιο ουσιαστικών αστοχιών στις μεθόδους PBF και DED, συνέβαλε τόσο στην αποδοτικότερη κατανόηση τούτων, όσο και στην αναγνώριση στοιχείων που χρήζουν βελτίωσης. Ακολουθώντας, η έρευνα στον τομέα της μοντελοποίησης κρίθηκε εύστοχη για την υιοθέτηση υπολογιστικών προσεγγίσεων που σχετίζονται με μια μέθοδο, με την δομή, τις ιδιότητες, την συμπεριφορά και την τοπολογία της. Τα προβληματικά πεδία όσον αφορά στην επεξεργασία των υλικών προσδιορίζονται μέσω των προβλημάτων που παρουσιάζει η σκόνη ως πρώτη ύλη, αλλά και μέσω ενός ευρύτερου συνόλου ελαττωμάτων που σχετίζεται με ιδιότητες όπως είναι η τραχύτητα της επιφάνειας, το πορώδες, οι παραμένουσες τάσεις, οι ρωγμές, οι αποκολλήσεις και η στρατηγική σάρωσης.

Μελετώντας εκτενώς ένα κατασκευαστικό μοντέλο που είναι συνεχώς αναπτυσσόμενο και πολλά υποσχόμενο, γίνεται κατανοητή η φράση του Ν.Καζαντζάκη από το έργο του “Ασκητική” «Η στερνή, η πιο ιερή μορφή θεωρίας είναι η πράξη».

5.2 Μελλοντικά Ερευνητικά Πεδία

Σύμφωνα με την παγκόσμια κατασκευαστική κοινότητα, το μέλλον των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής θεωρείται πολλά υποσχόμενο. Η ικανότητα δημιουργίας προϊόντων με πολύπλοκη γεωμετρία και χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με τη χρήση μικρότερης ποσότητας πρώτης ύλης, αποτελεί κινητήριο παράγοντα εξέλιξης. Η ουσιαστική στόχευση αφορά την κατασκευή μερών με πολύ καλή ποιοτική απόδοση και χαμηλό κόστος παραγωγής. Η εύρεση νέων υλικών και κατ’ επέκταση κραμάτων, παράλληλα με την συνεχόμενη μελέτη και βελτίωση της δομής και του σχηματισμού των κόκκων, θα διευκολύνουν την ανάπτυξη των τεχνολογιών AM μέσω της επιτυχημένης δημιουργίας της μικροδομής του κάθε μέρους.

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι τα μέρη που κατασκευάζονται με τις τεχνολογίες AM συνήθως χρειάζονται προεργασία και επακόλουθη επεξεργασία μετά το πέρας της κατασκευής. Με βάση μια έρευνα που διεξάχθηκε παράλληλα με την αναφορά του Wohlers για το 2018, διαπιστώθηκε ότι αυτές οι φάσεις επεξεργασίας καταλαμβάνουν το 46% του συνολικού κόστους κατασκευής. Αντίστοιχα, σε έρευνα των εταιριών NextGenAM project, EOS, Daimler και Premium AEROTEC, εκτιμήθηκε ότι το κόστος αυτών των φάσεων μπορεί να είναι περίπου 70% υψηλό. Επιπρόσθετα, πολλοί μελετητές, εκτιμώντας την σπουδαιότητα μεθόδων όπως είναι η θερμική επεξεργασία, το τελικό φινιρίσμα της επιφάνειας και η επιθεώρηση του κατασκευασμένου μέρους, θεωρούν ότι οι επακόλουθες αναγκαίες διεργασίες (post-processing) θα επιτευχθούν με την αξιοποίηση των ήδη υπαρχόντων συμβατικών εργαλείων και CNC μηχανών. Συνεπώς, η αγορά συμβατικών κατασκευαστικών εξαρτημάτων θα εκτοξευθεί και η έρευνα γύρω από αυτές τις φάσεις είναι επιτακτική [14].

Όσον αφορά την έρευνα για τις φάσεις επεξεργασίας πριν και μετά την κατασκευαστική διαδικασία, έχει παρατηρηθεί ότι πρόκειται για μη ολοκληρωμένα αυτοματοποιημένες διαδικασίες, γεγονός που αιτιολογεί την ανάγκη ύπαρξης χειριστών (operators) με ειδικευμένες γνώσεις και ικανότητες. Κάθε υπεύθυνος θα πρέπει να γνωρίζει τον προσανατολισμό με τον οποίο θα τοποθετήσει το προς κατασκευή μέρος, καθώς και την υποστηρικτική δομή που θα πρέπει να χρησιμοποιήσει. Ταυτόχρονα, πρέπει να υπάρχει σχετική γνώση για τις κατασκευαστικές παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη τήξη του μετάλλου και η καλύτερη ποιοτική απόδοση του.

Ένας άλλος παράγοντας που θεωρείται κρίσιμος για την εξέλιξη των τεχνολογιών AM, είναι η δημιουργία πιο γρήγορου ρυθμού εναπόθεσης (deposition rate). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η κατασκευή μεγάλης ποσότητας τεμαχίων σε αντίστοιχα υπολογισμένο χρόνο. Για αυτή την επίτευξη, πρέπει να αυξηθούν οι περιορισμοί που αφορούν στην εισερχόμενη ενέργεια και κατ' επέκταση στην αύξηση των πηγών ενέργειας. Σε γενικότερο, επίπεδο, ο έλεγχος ποιότητας (quality control) αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα και ανησυχία στην κατασκευαστική κοινότητα. Είναι απαραίτητο να διαπιστωθούν όλες οι λεπτομέρειες που πρέπει να πληροί κάθε μέθοδος AM. Σύμφωνα με τον NIST, το σχέδιο δράσης προς την βελτιστοποίηση του ελέγχου ποιότητας πρέπει να περιλαμβάνει την ανάπτυξη προτύπων και πρωτοκόλλων, τεχνικών μέτρησης και ελέγχου των δεδομένων, καθώς και συστήματα κλειστού βρόγχου για κάθε τεχνολογία AM.

Μέσα από το ευρύτερο σύνολο των αστοχιών και των ελαττωμάτων που δημιουργούνται κατά την κατασκευαστική φάση, καταλυτικός είναι ο παράγοντας της αξιοπιστίας του μηχανήματος (machine reliability) που χρησιμοποιείται. Θεωρείται ουσιαστική η συνεργασία των χειριστών, των κατασκευαστών του εξοπλισμού και των ερευνητών για την βελτίωση των μηχανημάτων, με στόχο την ελαχιστοποίηση των αποτυχημένων κατασκευών από τον χειρισμό του εκάστοτε μηχανικού. Παράλληλα, τα εξελιγμένα λογισμικά συστήματα μπορούν να συμβάλλουν στην επιτυχημένη κατασκευή με την βέλτιστη διαμόρφωση του προσανατολισμού. Κατ' επέκταση, κρίνεται καταλυτική η συνεχόμενη γνώση από την μεριά των μηχανικών [14,20].

Μια αλυσίδα παραγόντων, όπως αναλύθηκαν σε όλο το εύρος της εργασίας και κυρίως στο κεφάλαιο των προκλήσεων, υποδεικνύουν τον δρόμο για την εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας στον κλάδο των μεταλλικών κατασκευών. Ιδιότητες που σχετίζονται με την εσωτερική και εξωτερική δομή του κατασκευασμένου μέρους, αλλά και η ανάπτυξη κάθε μεθόδου ξεχωριστά, αποτελούν στοιχεία αναγνώρισης και βελτίωσης. Ο τομέας της πιστοποίησης και διασφάλισης ποιότητας, τη προσομοίωσης και της μοντελοποίησης, της επεξεργασίας των υλικών και όλο το εύρος των προβλημάτων που εμπεριέχονται σε αυτές τις κατηγορίες, συνθέτουν μια εικόνα ενός κατασκευαστικού μοντέλου, το οποίο όντας ήδη θεμελιωμένο, έχει δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης. Έτσι, ως μια σύγχρονη τεχνολογία που εξελίσσεται ραγδαία, όσο γίνεται ευρέως γνωστή και όσο υιοθετείται από ένα πλήθος εταιριών και οργανισμών, τόσο θα κρίνεται απαραίτητη η μελέτη και η έρευνα της.

Παράρτημα 1: Ιδιότητες μεταλλικών υλικών που παράγονται από τεχνολογίες AM [12].

Πρώτη Ύλη	Μέθοδος AM	Χαρακτηριστικά Σκόνης	Μηχανικές Ιδιότητες	Θερμικές Ιδιότητες*	
Ti - based	Ti6Al4V	SLM	spherical shape (25-45 μm)	~ 100% density UTS >1000 MPa; BE 12%;	TC 6.7 W/mK; CTE 8.6 μm/m°C; MP 1604 - 1660 °C
	Ti6Al4V	DMD	spherical shape (-100+325 mesh)	UTS 1163 MPa; YTS 1105 MPa (as deposited)	
	Ti6Al4V	LPF	spherical shape (25-45 μm)	UTS 1211; YTS 1100; BE 13.0%	
	Ti6Al4V	LENS	N/A	UTS 955 MPa; YTS 848 MPa; BE 15%	
	Ti6Al4V	LC	N/A	UTS 1157 MPa; YTS 1062 MPa; BE 6%	
	Ti6Al4V	EBM		UTS 1020 MPa YTS 950 MPa BE 14%	
Al - based	AlSi10Mg (EOS GmbH, Germany)	SLM	N/A	~ 100% density; UTS 355 MPa (horizontal); YTS 250 MPa;	TC 113 W/mK ; CTE 20.9 μm/m°C; MP 557-596 °C
	Al 6061	SLM	near spherical shape; (mean particle size 50μm)	89% density;	TC 180 W/mK; CTE 23.6 μm/m°C; MP 582 - 651.7°C
Ni - based	Inconel 718	LPF	Gas atomized; spherical shape (44 – 150 μm)	UTS 1240 MPa; YTS 1133 MPa (heat treated);	TC 13 W/mK; CTE 13 μm/m°C;





				BE 11%	MP 1260 - 1336 °C
	Inconel 718	SLM	N/A	UTS 1200 MPa; YTS 950 MPa; BE 24%	
	Inconel 718	EBM	N/A	UTS 1238 MPa; YTS 1154 MPa; BE 7%	
	Inconel 625	SLM		UTS 682 MPa; YTS 410 MPa; BE 30%	
	Inconel 625	LENS	N/A	UTS 930 MPa; YTS 579 MPa; BE 38%	
	Rene 88DT	LPF	Spherical shape (44 – 150 μm)	UTS 1400-1440 MPa; YTS 1010-1030 MPa; BE 17.5% (HIP)	
<i>Fe - based</i>	Stainless Steel 316	SLM	Spherical shape (53-173 μm)	UTS 826 MPa; YTS 419 MPa	TC 16 W/mK CTE 16 μm/m°C; MP 1371 - 1399 °C
	Stainless Steel 316	LENS	N/A	UTS 661 MPa; YTS 276 MPa; BE 67%	
	EOS stainless steel 17-4	DMLS	N/A	UTS 1000 MPa; YTS 950 MPa; BE 25%	TC 12.9 W/mK;
<i>Cu - based</i>	Cu30Ni	DMD	Spherical shape; (-100/+325 mesh)	UTS 240 MPa; YTS 317 MPa; BE 14%	








* Τιμές θερμικών ιδιοτήτων των ίδιων υλικών που παράγονται με τις συμβατικές κατασκευαστικές μεθόδους.

Παράρτημα 2: Καταγραφή των πιο σημαντικών μηχανημάτων και των ιδιοτήτων τους για τις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής για μεταλλικά μέρη το έτος 2018.

Μηχάνημα	Χαρακτηριστικά
ProX DMP 300 	Κατασκευαστής: 3D Systems Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: DMP (DMLS, MLS) Ακρίβεια: 50 μm Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 250 x 250 x 330 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://www.3dsystems.com/
ProX DMP 200 	Κατασκευαστής: 3D Systems Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: DMP (DMLS, MLS) Ακρίβεια: 50 μm Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 140 x 140 x 125
RenAM 500M 	Κατασκευαστής: Renishaw Χώρα: Αγγλία (UK) Μέθοδος AM: DMLS Διάμετρος Στομίου Ακτίνας: 75 μm Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 250 x 250 x 350 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://www.renishaw.com/en/renishaw-enhancing-efficiency-in-manufacturing-and-healthcare--1030
RenAM 500Q 	Κατασκευαστής: Renishaw Χώρα: Αγγλία (UK) Μέθοδος AM: DMLS Διάμετρος Στομίου Ακτίνας: 75 μm Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 250 x 250 x 350
Renishaw AM250 	Κατασκευαστής: Renishaw Χώρα: Αγγλία (UK) Μέθοδος AM: DMLS Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 250 x 250 x 300
Renishaw AM400 	Κατασκευαστής: Renishaw Χώρα: Αγγλία (UK) Μέθοδος AM: DMLS Διάμετρος Στομίου Ακτίνας: 70 μm Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 250 x 250 x 300

SLM 500		<p>Κατασκευαστής: SLM Solutions Χώρα: Γερμανία (Germany) Μέθοδος AM: SLM Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 500 x 280 x 365 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://slm-solutions.com/</p>
SLM 280 2.0		<p>Κατασκευαστής: SLM Solutions Χώρα: Γερμανία (Germany) Μέθοδος AM: SLM Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 280 x 280 x 365</p>
SLM 125		<p>Κατασκευαστής: SLM Solutions Χώρα: Γερμανία (Germany) Μέθοδος AM: SLM Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 125 x 125 x 125</p>
Arcam A2X		<p>Κατασκευαστής: Arcam Χώρα: Σουηδία (Sweden) Μέθοδος AM: EBM Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 200 x 200 x 380 Ιστοσελίδα Εταιρίας: http://www.arcam.com/technology/additive-manufacturing/</p>
Sisma mysint100		<p>Κατασκευαστής: Sisma Χώρα: Γαλλία (France) Μέθοδος AM: SLS Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 100 x 100 x 100 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://www.sisma.com/</p>
Sisma mysint300		<p>Κατασκευαστής: Sisma Χώρα: Γαλλία (France) Μέθοδος AM: SLS Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 300 x 400</p>
Trumpf TruPrint 3000		<p>Κατασκευαστής: Trumpf Χώρα: Γερμανία (Germany) Μέθοδος AM: DMLS Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 300 x 300 x 400 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://www.trumpf.com/de_INT/</p>

<p>Trumpf TruLaser Cell 3000</p> 	<p>Κατασκευαστής: Trumpf Χώρα: Γερμανία (Germany) Μέθοδος AM: LMF & LMD Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 800 x 400</p>
<p>FormUp 350</p> 	<p>Κατασκευαστής: AddUp (κοινοπραξία των εταιριών Michelin και Fives) Μέθοδος AM: SLM Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 350 x 350 x 350 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://www.addupsolutions.com/en/</p>
<p>LENS 450</p> 	<p>Κατασκευαστής: Optomec Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: LENS Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 100 x 100 x 100 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://www.optomec.com/</p>
<p>LENS 850-R</p> 	<p>Κατασκευαστής: Optomec Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: LENS Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 900 x 1500 x 900</p>
<p>EBAM 300 System</p> 	<p>Κατασκευαστής: Sciaky Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: EBAM Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 5791 x 1219 x 1219 Ιστοσελίδα Εταιρίας: http://www.sciaky.com/</p>
<p>EBAM 150 System</p> 	<p>Κατασκευαστής: Sciaky Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: EBAM Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 2794 x 1575 x 1575</p>
<p>BeAM Mobile</p> 	<p>Κατασκευαστής: BeAM Χώρα: Γαλλία (France) Μέθοδος AM: DMLS Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 400 x 250 x 200 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://www.beam-machines.com/</p>

BeAM Magic 2.0 	Κατασκευαστής: BeAM Χώρα: Γαλλία (France) Μέθοδος AM: DMLS Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 1200 x 800 x 800
BeAM Modulo 	Κατασκευαστής: BeAM Χώρα: Γαλλία (France) Μέθοδος AM: DMLS Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 650 x 400 x 400
ExOne M-Flex 	Κατασκευαστής: ExOne Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: Binder Jetting Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 400 x 250 x 250 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://www.exone.com/
ExOne M-Print 	Κατασκευαστής: ExOne Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: Binder Jetting Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 800 x 500 x 400
DM P2500 	Κατασκευαστής: Digital Metal Χώρα: Σουηδία (Sweden) Μέθοδος AM: Binder Jetting Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 203 x 180 x 69 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://digitalmetal.tech/
Studio System 	Κατασκευαστής: Desktop Metal Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: BMD* Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 300 x 300 x 200 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://www.desktopmetal.com/
Production System 	Κατασκευαστής: Desktop Metal Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: Single Pass Jetting Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 330 x 330 x 330

Metal X		<p>Κατασκευαστής: Markforged Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: Atomic Diffusion AM Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 330 x 220 x 180 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://markforged.com/</p>
XJet Carmel 1400		<p>Κατασκευαστής: XJet Χώρα: Ισραήλ (Israel) Μέθοδος AM: NanoParticle Jetting Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://xjet3d.com/</p>
Vader MK1		<p>Κατασκευαστής: Vader Systems Χώρα: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA) Μέθοδος AM: MagnetoJet Μέγιστη Κατασκευαστική Απόδοση (mm): 300 x 300 x 300 Ιστοσελίδα Εταιρίας: https://vadersystems.com/</p>

* Bound Metal Deposition (μέθοδος παρόμοια με την FMD)

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Ian Gibson, David Rosen and Brent Stucker, “Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing”, Springer, Second Edition, 2015.
(<https://www.springer.com/gp/book/9781493921126>)
- [2] Κωστάκης Ιωάννης, “Μελέτη Κατασκευαστικών Δυνατοτήτων Τεχνολογιών Additive Manufacturing στην Παραγωγή Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2017.
- [3] Μαριάννα Παπαγεωργίου, “3D Printing: Ανάλυση Τεχνολογιών και Μεθοδολογία Εφαρμογών”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2016.
- [4] William E. Frazier, “Metal Additive Manufacturing: A Review”, Journal of Materials Engineering and Performance, ASM International, (<https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-014-0958-z>), 2014.
- [5] Kauful V. Wong and Aldo Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing”, ISRN Mechanical Engineering, Article, (<https://www.hindawi.com/journals/ism/2012/208760/>), 2012.
- [6] “Standardization Roadmap for Additive Manufacturing”, Roadmap, Version 1.0, Prepared by America Makes & ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative (AMSC), February 2017. (http://additivebiomanufacturing.org/wpcontent/uploads/2017/06/AMSC_Roadmap_February_2017s.pdf)
- [7] Alex Price, “Additive Manufacturing – Standards”, Presentation, Prepared by BSI. Group-The British Standards Institution, 2013. (<https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/advanced-manufacturing-technology-research-group/documents/manufacturing-metrology-team/qcam-17/bsi.pdf>)
- [8] Wohler’s T., “Wohler’s Report 2010”, Wohlers Associates, Ft Collins, 2010.
(<https://wohlersassociates.com/state-of-the-industry-reports.html>)
- [9] Karel Kellens, Raya Mertens, Dimos Paraskevas. Wim Dewulf and Joost R. Duflou, “Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing?”, Article, Published by Elsevier B.V., 2017.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116313130>)
- [10] Thierry Rayna and Ludmila Striukova, “From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation”, Int. Journal Technological Forecasting and Social Change, Volume 102, Published by Elsevier Inc., January 2016.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162515002425>)
- [11] Ruth Jiang, Robin Kleer and Frank T. Piller, “Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030”, Int. Journal Technological Forecasting and Social Change, Volume 117, Published by Elsevier Inc., April 2017.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162517300276>)
- [12] Alexandros Beiker Kair and Konstantinos Sofos, “Additive Manufacturing and Production of Metallic Parts in Automotive Industry”, Master Thesis, KTH Royal Institute of Technology, (<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:740682/FULLTEXT01.pdf>), Stockholm, June 2014.
- [13] E. Herderick, “Additive Manufacturing of Metals: A Review”, Proceedings of Materials Science and Technology (MS&T), Additive Manufacturing of Metals, EWI, Columbus, OH USA, 2011.
(<https://www.asminternational.org/documents/10192/23826899/cp2011mstp1413.pdf/04f142d0-f1ca-44d4-8a10-891992e5529a>)
- [14] Aaron Frankel and Ashley Eckhoff, “Siemens: Digitalization enables the industrialization of metal Additive Manufacturing at Finspång”, Article, The Magazine for the Metal Additive Manufacturing Industry, Vol.4 No.3, Inovar Communications Ltd., Autumn 2018.
(<https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-magazine-archive/archive-2018/>)
- [15] Mohsen Seifi, Michael Gorelik, Jess Waller, Nik Hrabe, Nima Shamsaei, Steve Daniewicz and John J. Lewandowski, “Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification”, Official Contribution of NIST, National Institute of Standards and Technology, February 2017. (<https://www.nist.gov/publications/metal-additive-manufacturing-standardization-support-qualification-and-certification>)
- [16] Markus Josten, “GKN Powder Metallurgy: Moving metal Additive Manufacturing towards mass production with HP”, Article, The Magazine for the Metal Additive Manufacturing Industry, Vol.4 No.3, Inovar Communications Ltd., Autumn 2018.
(<https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-magazine-archive/archive-2018/>)

- [17] Doug Wells, NASA MSFC and Huntsville AL, “Standardization in Additive Manufacturing: Challenges in Structural Integrity Assurance”, Presentation, NRC Headquarters, Bethesda MD, November 2017. (<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170012455.pdf>)
- [18] “EOS: Developing metal Additive Manufacturing for a truly digital factory”, Article, The Magazine for the Metal Additive Manufacturing Industry, Vol.4 No.3, Inovar Communications Ltd., Autumn 2018. (<https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-magazine-archive/archive-2018/>)
- [19] Simon Ford and Melanie Despeisse, “Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges”, Journal of Cleaner Production, Volume 137, Published by Elsevier Ltd, November 2016. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616304395>)
- [20] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff and S. S. Babu, “The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing”, Journal of International Materials Reviews, Published by Taylor & Francis, March 2016. (<https://pdfs.semanticscholar.org/03c1/867519a689e4145aacde88dce5fe5a6f8177.pdf>)
- [21] Valmik Bhavar, Prakash Kattire, Vinaykumar Patil, Shreyans Khot, Kiran Gujar and Rajkumar Singh, “A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing”, Conference Paper, Proceeding of Research.net, 4th International conference and exhibition on Additive Manufacturing Technologies-AM, Bangalore, India, 2014. (<https://pdfs.semanticscholar.org/308b/dde088f0ea7d0dbc45c6e25de0cfa3c4751a.pdf>)
- [22] I.A. Manriquez-Frayre and D.L. Bourell, “Selective Laser Sintering of Binary Metallic Powder”, Conference Proceeding, International Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas at Austin, 1990. (<http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1990/1990-09-Frayre.pdf>)
- [23] Joseph Kowen, “Metal Additive Manufacturing in China: An overview of systems manufacturers”, Article, The Magazine for the Metal Additive Manufacturing Industry, Vol.4 No.3, Inovar Communications Ltd., Autumn 2018. (<https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-magazine-archive/archive-2018/>)
- [24] Ryan Castells, “DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing”, Article, Published by Element Materials Technology, June 2016. (<https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>)
- [25] O. Lyckfeldt, “Proceedings of the Euro PM2013 Congress & Exhibition”, Vol. 2, Shrewsbury, U.K.: European Powder Metallurgy Association, 2013.
- [26] Monsen Seifi, Ayman Salem, Jack Beuth, Ola Harrysson and John J. Lewandowski, “Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing”, The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), Volume 68, Issue 3, March 2016. (<https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-015-1810-0>)
- [27] W. J. Sames, F. Medina, W. H. Peter, S. S. Babu and R. R. Dehoff, “Effect of process control and powder quality on Inconel 718 produced using electron beam melting in ‘Superalloy 718 and derivatives’”, Article, Published by Wiley Online Library, Pittsburgh, PA, November 2014.
- [28] A.A. Antonyamy, J. Meyer and P.B. Prangnell, “Effect of build geometry on the β -grain structure and texture in additive manufacture of Ti6Al4V by selective electron beam melting”, Article, Journal Materials Characterization, Volume 84, October 2013. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580313002131>)
- [29] S. Tammas-Williams, H. Zhao, F. Léonard, F. Derguti, I. Todd and P.B. Prangnell, “XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti–6Al–4V components manufactured by selective electron beam melting”, Article, Journal Materials Characterization, Volume 102, April 2015. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S104458031500039X>)
- [30] Dr. Héctor Rafael Siller, “Additive Manufacturing in Metals - Applications Review”, Conference Presentation, Published by 3D Printing Metal Magazine, Mexico Additive Manufacturing and 3D Printing Conference, Tecnológico de Monterrey, Mexico, June 2017. (<http://www.3dmpmag.com/assets/issue/images/conferences/mxam/presentations/HectorSiller.pdf>)
- [31] Sarah K. Everton, Matthias Hirscha, Petros Stravroulakis, Richard K. Leach and Adam T. Clare, “Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing”, Article, Journal Materials & Design, Volume 95, April 2016. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516300995>)
- [32] M. M. Francois, A. Sun, W. E. King, et al., “Modeling of additive manufacturing processes for metals: Challenges and opportunities”, Article, Journal Current Opinion in Solid State and Materials Science, Volume 21, Issue 4, USA, August 2017 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359028616300833?via%3Dihub>)

- [33] H. Attar, M. Calin, L.C. Zhang, S. Scudino and J. Eckert, “Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium”, Article, Journal Materials Science and Engineering: A, Volume 593, January 2014.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509313012665>)
- [34] Jess M. Waller and NASA-JSC WSTF, “Nondestructive Testing of Additive Manufactured Metal Parts Used in Aerospace Applications”, Presentation, ASTM International Webinar, February 2018.
(<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20180001858.pdf>)
- [35] Mustafa Megahed, Hans-Wilfried Mindt, Narcisse N’Dri, Hongzhi Duan and Olivier Desmaison, “Metal additive-manufacturing process and residual stress modeling”, Article, Journal Integrating Materials and Manufacturing Innovation, Volume 5, Issue 1, December 2016,
(<https://link.springer.com/article/10.1186/s40192-016-0047-2>)
- [36] John A. Slotwinski and Edward J. Garboczi, “Metrology Needs for Metal Additive Manufacturing Powders”, Article, Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), Volume 67, Issue 3, March 2015. (<https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-014-1290-7>)
- [37] A. Townsenda, N. Seninb, L. Blunta, R.K. Leachb and J.S. Taylor, “Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review”, Article, Journal Precision Engineering, Volume 46, October 2016. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635916300721>)
- [38] M. Van Elsen, “Complexity of Selective Laser Melting: A New Optimisation Approach”, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2007.
- [39] “Concept Laser’s QMmeltpool 3D: In-situ quality assurance with real-time monitoring down to the micron level”, Article, vol. 1, no. 2, Inovar Communications Ltd, 2015.
- [40] M. Mahesh, B. Lane, A. Donmez, S. Feng, S. Moylan, and R. Fesperman, “NISTIR 8036, Measurement Science Needs for Real-time Control of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes”, SAE International, 2015. (<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2015/NIST.IR.8036.pdf>)
- [41] Bryan D. Vogt, Fang Peng, Emily Weinheimer and Miko Cakmak, “FDM from a polymer processing perspective: challenges and opportunities”, Presentation, Dept of Polymer Engineering, University of Akron, (https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/mml/Session-4_2-Vogt.pdf)
- [42] R. Noorani, “Rapid Prototyping—Principles and Applications”, John Wiley & Sons, 2006.
- [43] NASA-STD-5009, “Nondestructive Evaluation Requirements for Fracture Critical Metallic Components,” NASA Technical standards system. NASA Technical Standard, Washington, 2008.
- [44] P. P. Kruth, “Material in-process manufacturing by rapid prototyping techniques,” CIRP Annals Manufacturing Technology, 1991.
- [45] J. P. Kruth, X. Wang, T. Laoui, and L. Froyen, “Lasers and materials in selective laser sintering,” Assembly Automation, 2003.
- [46] L. Facchini, E. Magalini, P. Robotti, and A. Molinari, “Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced by electron beam melting of pre-alloyed powders”, Rapid Prototyping Journal, 2009.
- [47] R. Shivpuri, X. Cheng, K. Agarwal, and S. Babu, “Evaluation of 3D printing for dies in low volume forging of 7075 aluminum helicopter parts,” Rapid Prototyping Journal, 2005.
- [48] Y. Xiong, “Investigation of the laser engineered net shaping process for nanostructured cermets” [ProQuest Dissertations], University of California, 2009.
- [49] EOS. (2013). Industries and Markets. Last accessed 30th May 2014.
(http://www.eos.info/industries_markets)
- [50] ASTM WK47031, “Standard Guide for Post-Process Nondestructive Testing of Metal Additively Manufactured Parts Used in Aerospace Applications.” West Conshohocken, PA, p. Work in Progress, 2017.
- [51] Lt Gen Prakash Katoch, “Military Applications of 3D Printing – where are we?”, (<http://www.indiandefencereview.com/news/military-applications-of-3d-printing-where-are-we/>)
- [52] Da Vinci 1.0 Pro Printer, official source- <https://www.xyzprinting.com/en-US/product/da-vinci-pro>
- [53] Article-“Inventor of FDM 3D Printing and Co-Founder of Stratasys, Scott Crump, Inducted in to the TCT Hall of Fame”, (<http://investors.stratasys.com/news-releases/news-release-details/inventor-fdm-3d-printing-and-co-founder-stratasys-scott-crump>), 2017.
- [54] N. Hrabe, N. Barbosa, S. R. Daniewicz, and N. Shamsaei, “Findings from the NIST/ASTM Workshop on Mechanical Behavior of Additive Manufacturing Components,” in NIST Advanced Manufacturing Series, 2016.
- [55] W.E. Frazier, “Digital Manufacturing of Metallic Components: Vision and Roadmap”, Solid Free Form Fabrication Proceedings, University of Texas at Austin, Austin TX, 2010.

- [56] J. M. Waller, B. H. Parker, K. L. Hodges, E. R. Burke, J. L. Walker, and E. R. Generazio, "NASA Technical Memorandum- NASA/TM—2014–218560-Nondestructive Evaluation of Additive Manufacturing State-of-the-Discipline Report Prepared for," Hampton, VA 23681, 2014.
- [57] NIST, "Measurement Science Roadmap for Metal-based Additive Manufacturing", US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology Prepared by Energetics Incorporation, May 2013.
- [58] GE Additive (www.geadditive.com), Accessed Dec 2016.
- [59] America Makes & ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative (AMSC), "Standardization Roadmap for Additive Manufacturing." ANSI, p. Public Draft, 2017.
- [60] B. A. Cowles, "Summary Report : Joint Federal Aviation Administration – Air Force Workshop on Qualification / Certification of Additively Manufactured Parts," Dayton, OH, 2016.
- [61] B. A. Cowles, "Summary Report : The Second Joint Federal Aviation Administration – Air Force Workshop on Qualification / Certification of Additively Manufactured Parts," Dayton, OH, 2017.
- [62] N. Hrabe, N. Barbosa, S. R. Daniewicz, and N. Shamsaei, "Findings from the NIST/ASTM Workshop on Mechanical Behavior of Additive Manufacturing Components", in NIST Advanced Manufacturing Series, 2016.
- [63] M. Gorelik, "Additive Manufacturing in the Context of Structural Integrity", Int. J. Fatigue, 2017.
- [64] J. J. Lewandowski and M. Seifi, "Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties," Annu.Rev. Mater. Res., 2016.
- [65] U.S. Department of Transportation- Federal Aviation Administration Notice N 8900.391, "Additive Manufacturing in Maintenance, Preventive Maintenance, and Alteration of Aircraft, Aircraft Engines, Propellers, and Appliances", Washington D.C., 2016.
- [66] Murr L.E., Gaytan S.M., Ceylan A., Martinez E., Martinez J.L., et al, "Characterization of Titanium Aluminide Alloy Components Fabricated by Additive Manufacturing using Electron Beam Melting", Acta Materialia, 58, 1887-1894, (www.arcam.com) 2010.
- [67] Arcam-AB: 'EBM hardware', 2015. Available at (<http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware>)
- [68] Louvis E., Fox P., and Sutcliffe C.J., "Selective Laser Melting of Aluminum Components," J. Materials Processing Technology, (www.mtt-group.com/selective-laser-melting.html) 2011.
- [69] Mumtaz, K.A., Hopkinson, N. "Selective Laser Melting of thin wall parts using pulse shaping". Journal of Materials Processing Technology, 2010.
- [70] Yasa E., Craeghs T., Badrossamay M., and Kruth J.P., "Rapid Manufacturing Research at the Catholic University of Leuven", RapidTech 2009: US-Turkey workshop on Rapid Technologies,
- [71] ConceptLaser, Hofmann Innovation Group. LaserCUSING® - Laser melting with metals. (<http://www.concept-laser.de/en/technology/lasercusingr.html>), Last accessed 13th Feb 2014.
- [72] Bertol L.S., Junior W.K., da Silva F.P., and Aumund-Kopp C., "Medical Design: Direct Metal Laser Sintering of Ti-6Al-4V", Materials and Design, (www.eos.info), 2010.
- [73] 3D Printing Systems. Additive Manufacturing using metals. (<http://3dprintingsystems.com/additive-manufacturing-using-metals/>) . Last accessed 5th Feb 2014.
- [74] R. P.Mudge and N. R.Wald, "Laser engineered net shaping advances additive manufacturing and repair", Weld. J., 2007.
- [75] Costello A. and Sears J., "Repair Opportunities for aerospace components through laser powder deposition," ICALEO Congress Proceedings, (www.optomec.com) 2006.
- [76] Courtesy of Y. Xiong, E.J. Lavernia, J.M. Schoenung W.H. Hofmeister, Z. Cheng and J.E. Smugeresky, "Nonlinear Heat Transfer Analysis of The Laser Deposition Process" (<http://www.adina.com/newsgH68.shtml>)
- [77] Dutta B., Natu H., and Mazumder J., "Near Net Shape Repair and Manufacturing of High Value Components using DMD," Supplemental Proc. Vol. 1 Fabrication, Materials, Processing, and Properties TMS, (www.pomgroup.com) 2009.
- [78] Heck D. P., Slattery K., Salo R., and Stecker S., "Electron Beam Deposition of Ti 6-4 for Aerospace Structures," IAA Space Conference and Exposition Proceedings, (www.sciaky.com) 2007.
- [79] Xue L. and Islam M. U., "Laser Consolidation – A Novel One-Step Manufacturing Process for Making Net-Shape Functional Components," Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing, (www.accufusion.com) 2006.
- [80] Withers J.C., Storm R.S., and Loutfy R.O., "Low Cost Fabrication of Titanium Alloy Components Directly from Sponge," Innovations in Titanium Technology, (www.mercorp.com) 2007.
- [81] Adams R., "Ion Fusion Formation: An Alternative Additive Manufacturing Approach," SAE Proceedings, 2008.
- [82] Hu Y., Fadel G.M., Blouin V.Y., and White D.R., "Optimal Design for Additive

Manufacturing of Heterogeneous Objects using Ultrasonic Consolidation,” Virtual and Physical Prototyping, (www.solidica.com) 2006.

[83] W.E. Frazier, J. Mater. Eng. Perform. 23, 2014.

[84] M. Gorelik, “Additive Manufacturing in the Context of Structural Integrity,” Int. J. Fatigue, 2017.

[85] P. A. Kobryn, S. L. Semiatin., “The laser additive manufacture of Ti-6Al-4V”, *JOM*. 2001.

[86] D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach and R. Poprawe., “Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms.” International Materials Reviews. 57 (3), 2012.

[87] J. Scott, N. Gupta, C. Weber, S. Newsome, T. Wohlers, and T. Caffrey, “Additive Manufacturing: Status and Opportunities”, IDA, Science and Technology Policy Institute, Washington, DC, 2012.

[88] DoD SBIR/STTR Database (<https://www.dodsbir.net>) Nov 2013.

Επιπρόσθετες Διαδικτυακές Πηγές

- <https://mx3d.com/about/>
- <https://www.nbins.com/fr/blog/fabrication/impression-3d-fabrication/>
- <http://engineeringproductdesign.com/additive-manufacturing-process-steps/>
- <https://www.lpfrg.com/en/professionals/architects/>
- <https://www.lasertoday.com/2017/02/lam-2017/>
- <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/medical-3d-printing-applications>
- https://www.eos.info/case_studies/raytech-3d-printed-titanium-eyeglass-frames
- https://www.trumpf.com/en_GB/applications/additive-manufacturing/
- <https://www.siemens.com/press/en/feature/2014/corporate/2014-03-3d-druck.php>
- <https://www8.hp.com/us/en/contact-hp/ww-contact-us.html>
- <https://www.gknpm.com/en/our-businesses/gkn-sinter-metals/>
- https://www.volkswagenag.com/en/news/2018/09/volkswagen_3d_printing.html
- <https://www.astm.org/standardization-news/?q=update/additive-manufacturing-standards-support-industry-accreditation>
- https://www.3dsystems.com/3d-printers#metal-printers?utm_source=phenix-systems.com&utm_medium=301
- <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-am-vs-powder-am>
- <https://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting>
- <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>
- <https://uam.engineering.osu.edu/content/what-uam>
- <https://www.rolls-roycemotorcars.com/en-GB/home.html>
- <https://www.hardnesstesters.com/test-types/vickers-hardness-testing> (Vickers Hardness Test Method)
- <https://www.lpwtechnology.com/wp-content/uploads/2017/06/Hall-Flow-Datasheet.pdf> (Hall Flow Testing for Metal Powders)
- <https://all3dp.com/2/fused-filament-fabrication-fff-3d-printing-simply-explained/> (Fused Filament Fabrication/FFF)
- <https://www.labtesting.com/services/materials-testing/fracture-mechanics/fatigue-crack-growth-testing/> (fatigue crack growth testing)
- <https://tractus3d.com/3d-printing-materials/abs-material/> (ABS Material in 3D Printing)
- <https://www.sheffield.ac.uk/news/nr/3d-printing-titanium-1.332731>
- <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/metal-additive-manufacturing-materials>
- <https://www.3dnatives.com/en/metal-3d-printer-manufacturers/>
- <https://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/applications-for-additive-manufacturing-technology/>
- <http://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/characterising-powders-to-optimize-additive-manufacturing/>
- <https://www.machinedesign.com/3d-printing/3d-printing-digs-deeper-auto-industry>
- <http://investors.stratasys.com/news-releases/news-release-details/inventor-fdm-3d-printing-and-co-founder-stratasys-scott-crump>
- https://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication
- <https://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-powders-the-raw-materials/>

AMazing Technology

Build the future

What you see is what you build

If it's thinkable, we make it buildable.

State of the art !



Where ideas take shape

Revolutionary manufacturing technology

Complexity for free

Ελένη Μιχάκη