



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη Κατασκευαστικών Δυνατοτήτων Τεχνολογιών Additive Manufacturing Στην Παραγωγή Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

Manufacturing Capabilities Of Additive
Manufacturing Technologies In Unmanned Aerial
Vehicle Production

Κωστάκης Ιωάννης

Επιβλέπων: Μπιλάλης Νικόλαος, Καθηγητής

Χανιά 2017

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά για την πολύτιμη συμβολή του στην διεκπεραίωση της παρακάτω εργασίας τον Καθηγητή κ. Νικόλαο Μπιλάλη.

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στην γυναίκα μου Κατερίνα και στην κόρη μου Μαρίνα.

Περίληψη

Ο όρος Additive Manufacturing (AM) περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνολογιών κατασκευής φυσικών προϊόντων με πολύπλοκες γεωμετρίες απευθείας από τρισδιάστατα μοντέλα δεδομένων (CAD data). Σε αντίθεση με τις έως τώρα συμβατικές κατασκευαστικές τεχνολογίες (κοπή, τórνευση, φρεζάρισμα) που στηρίζονται στην αφαίρεση υλικού, στις AM τεχνολογίες η δημιουργία του τελικού αντικειμένου γίνεται με προσθήκη ακατέργαστου υλικού «στρώμα πάνω σε στρώμα». Η ραγδαία ανάπτυξη τόσο της επιστήμης των υπολογιστών, όσο και της επιστήμης των υλικών, έδωσε τεράστια ώθηση στις τεχνολογίες AM, οι οποίες άρχισαν να αναπτύσσονται από το 1980 περίπου και μέχρι πρόσφατα ήταν γνωστές με τον όρο Rapid Prototyping και Rapid Tooling, καθώς εφαρμόζονταν κυρίως για την κατασκευή πρωτοτύπων και εργαλείων κατά τα στάδια σχεδίασης και ανάπτυξης ενός νέου προϊόντος. Ο όρος AM υιοθετήθηκε για να σηματοδοτήσει τη δυνατότητα που παρέχουν πλέον οι τεχνολογίες αυτές για απευθείας κατασκευή τελικών προϊόντων έτοιμων προς χρήση. Συμβάλουν στην επιτάχυνση της καινοτομίας, στην μείωση του συνολικού χρόνου παραγωγής νέων προϊόντων, στην συρρίκνωση της εφοδιαστικής αλυσίδας, στην μείωση των αποβλήτων καθώς και στην χαμηλότερη κατανάλωση τόσο υλικών όσο και ενέργειας. Οι πολλά υποσχόμενες αυτές τεχνολογίες έχουν διεισδύσει σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, όπως στην αεροπορική βιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και στην βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρονικών.

Στην παρούσα εργασία θα επιχειρηθεί μια διεξοδική μελέτη και παρουσίαση των τεχνολογιών που περιλαμβάνει ο όρος Additive Manufacturing και μια απόπειρα κατηγοριοποίησής τους με βάση το είδος των ακατέργαστων υλικών που χρησιμοποιούνται στην εκάστοτε μέθοδο αλλά και το είδος της βασικής τεχνολογίας με την οποία επιτυγχάνεται η κατασκευή του τελικού προϊόντος. Στη συνέχεια θα διερευνηθεί ποιες από τις παραπάνω τεχνολογίες δύναται να χρησιμοποιηθούν στην αεροπορική βιομηχανία και πιο συγκεκριμένα στην παραγωγή Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών.

Χανιά, Μάρτιος 2017

Κωστάκης Ιωάννης

Abstract

The term Additive Manufacturing (AM) includes a set of manufacturing technologies of natural products with complex geometries directly from three-dimensional data models (CAD data). In contrast to the conventional manufacturing technologies (cutting, turning, milling) based on material removal, AM technologies the finished product is made by adding raw material 'layer by layer'. The rapid development of both computer science and materials science, gave a huge boost to AM technologies, which have been developing since about 1980. Until recently Rapid Prototyping and Rapid Tooling was the term used for AM technologies, as they applied mainly for prototyping and for tools production, during the design and development stages of a new product. The term AM adopted to signal the opportunity offered by these technologies for direct manufacturing of finished products ready to use. AM technologies accelerate innovation, reduce the total time of production of new products, shrink supply chain, reduce waste and lower consumption of both materials and energy. These promising technologies have penetrated many sectors of industry, such as aviation and automotive industries as well as electronic industry.

In this paper an attempt will be made to study and present all the technologies that included in the term Additive Manufacturing. Moreover all these technologies will be categorized according to the type of raw materials used in each method and according to the type of basic technology that is used to achieve the construction of the final product. Then we investigate which of these technologies can be used in the aviation industry and specifically in Unmanned Aerial Vehicle production.

Chania, March 2017

Kostakis Ioannis

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	15
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΟΡΟ ADDITIVE MANUFACTURING	15
1.1 Εισαγωγή.....	16
1.2 Ιστορική Αναδρομή Τεχνολογιών AM	18
1.3 Χρησιμότητα Τεχνολογιών AM.....	21
1.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Τεχνολογιών AM	22
1.4.1 Πλεονεκτήματα Τεχνολογιών AM.....	22
1.4.2 Μειονεκτήματα Τεχνολογιών AM	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	27
ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ AM	27
2.1 Γενικευμένη Διαδικασία Τεχνολογιών AM	28
2.1.1 Στάδιο 1: Σχεδίαση CAD.....	29
2.1.2 Στάδιο 2: Δημιουργία Αρχείου .STL	29
2.1.3 Στάδιο 3: Μεταφορά Αρχείου .STL στη Μηχανή AM	30
2.1.4 Στάδιο 4: Ρύθμιση Μηχανής AM	30
2.1.5 Στάδιο 5: Κατασκευή.....	30
2.1.6 Στάδιο 6: Απομάκρυνση Αντικειμένου.....	30
2.1.7 Στάδιο 7: Περαιτέρω Επεξεργασία.....	30
2.1.8 Στάδιο 8: Εφαρμογή	30
2.2 Πρότυπα και Πιστοποίηση Τεχνολογιών AM	32
2.3 Εναλλακτική Ορολογία Τεχνολογιών AM	35
2.4 Τύποι Αρχείων Μηχανών AM	36
2.4.1 Αρχεία Τύπου STL.....	36
2.4.2 Αρχεία Τύπου AMF.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	43
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ AM	43
3.1 Ταξινόμηση Τεχνολογιών AM	44
3.2 Vat Photopolymerization	48
3.2.1 Στερεολιθογραφία (Stereolithography) – SLA	49
3.2.2 Digital Light Processing - DLP	50
3.3 Material Jetting -MJ	51
3.3.1 Photopolymer Jetting - PJ.....	52

3.4	Binder Jetting -BJ	54
3.4.1	3D Printing – 3DP	54
3.5	Material Extrusion – ME	56
3.5.1	Fused Deposition Modeling – FDM	57
3.6	Powder Bed Fusion – PBF	59
3.6.1	Selective Laser Sintering – SLS	60
3.6.2	Direct Metal Laser Sintering – DMLS	62
3.6.3	Selective Laser Melting – SLM	64
3.6.4	Electron Beam Melting – EBM	65
3.7	Sheet Lamination	68
3.7.1	Laminated Object Manufacturing – LOM	68
3.7.2	Ultrasonic Consolidation – UC	71
3.8	Direct Energy Deposition - DED	72
3.8.1	Direct Metal Deposition – DMD	75
3.8.2	Laser Engineered Net Shape – LENS	76
3.8.3	Laser Consolidation – LC	77
3.8.4	Electron Beam Additive Manufacturing – EBAM	78
3.8.5	Ion Fusion Formation – IFF	80
3.8.6	Rapid Plasma Deposition – RPD	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		85
ΥΛΙΚΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ AM		85
4.1	Κατηγορίες Υλικών Τεχνολογιών AM	86
4.2	Πολυμερή Υλικά – (Polymers)	87
4.2.1	Θερμοπλαστικά – (Thermoplastics)	87
4.2.2	Θερμοσκληρυνόμενα – (Thermosettings)	88
4.2.3	Ελαστομερή – (Elastomers)	88
4.2.4	Φωτοπολυμερή – (Photopolymers)	88
4.2.5	Εμπορικά Διαθέσιμα Πολυμερή Υλικά Κατάλληλα για Τεχνολογίες AM	88
4.3	Μεταλλικά Υλικά	93
4.3.1	Εμπορικά Διαθέσιμα Μεταλλικά Υλικά Κατάλληλα για Τεχνολογίες AM	95
4.4	Κεραμικά	97
4.4.1	Εμπορικά Διαθέσιμα Κεραμικά Υλικά Κατάλληλα για Τεχνολογίες AM	98
4.5	Σύνθετα Υλικά	99
4.5.1	Εμπορικά Διαθέσιμα Σύνθετα Υλικά Κατάλληλα για Τεχνολογίες AM	99
4.6	Λοιπά Υλικά	102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	105
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΜ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ - ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ UAV	105
5.1 Εφαρμογές Τεχνολογιών ΑΜ	106
5.2 Εφαρμογές Τεχνολογιών ΑΜ στην Αεροπορική Βιομηχανία	107
5.3 Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη - UAV	121
5.4 Κατασκευαστικές Δυνατότητες Τεχνολογιών ΑΜ στην Παραγωγή UAV	126
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	133
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	135
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ - ΠΙΝΑΚΩΝ	143

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στις ραγδαία αναπτυσσόμενες τεχνολογίες Additive Manufacturing (AM). Στόχος της εργασίας είναι μια διεξοδική μελέτη και παρουσίαση των τεχνολογιών που περιλαμβάνει ο όρος Additive Manufacturing και μια απόπειρα κατηγοριοποίησής τους με βάση το είδος των ακατέργαστων υλικών που χρησιμοποιούνται στην εκάστοτε μέθοδο αλλά και το είδος της βασικής τεχνολογίας με την οποία επιτυγχάνεται η κατασκευή του τελικού προϊόντος. Επίσης σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων των παραπάνω τεχνολογιών στην αεροπορική βιομηχανία και πιο συγκεκριμένα στην παραγωγή Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών.

Στο Κεφάλαιο 1 δίδεται ο ορισμός του όρου Additive Manufacturing, γίνεται αναφορά στην ιστορική αναδρομή των τεχνολογιών AM, στην χρησιμότητά τους καθώς και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η γενικευμένη διαδικασία των τεχνολογιών AM και τα πρότυπα που ορίζουν τις εν λόγω τεχνολογίες. Ακολουθεί η παρουσίαση των εναλλακτικών όρων που χρησιμοποιούνται έναντι του όρου AM καθώς και τα είδη των αρχείων που απαιτούνται.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται ταξινόμηση των τεχνολογιών AM σε 7 διαφορετικές κατηγορίες, Vat Photopolymerization, Material Jetting, Binder Jetting, Material Extrusion, Powder Bed Fusion, Sheet Lamination και Direct Energy Deposition. Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίασή τους ανά κατηγορία.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι κατηγορίες των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις τεχνολογίες AM, οι οποίες περιλαμβάνουν τα πολυμερή υλικά, τα μεταλλικά υλικά, τα κεραμικά υλικά, τα σύνθετα υλικά και ορισμένα άλλα υλικά.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται εκτενής παρουσίαση των εφαρμογών των τεχνολογιών ΑΜ στην αεροπορική βιομηχανία. Στη συνέχεια δίδεται ο ορισμός των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών και γίνεται κατηγοριοποίησή τους. Τέλος παρουσιάζονται μέσα από εφαρμογές οι κατασκευαστικές δυνατότητες των τεχνολογιών ΑΜ στην κατασκευή UAV.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΟΡΟ ADDITIVE MANUFACTURING

1.1 Εισαγωγή

Ο όρος Additive Manufacturing (AM) ορίζεται από τον παγκόσμιο οργανισμό τυποποίησης American Society for Testing and Material (ASTM) ως «η διαδικασία συνένωσης υλικών, συνήθως στρώμα πάνω σε στρώμα, για την δημιουργία αντικειμένων από τρισδιάστατα μοντέλα δεδομένων, σε αντίθεση με τις αφαιρετικές κατασκευαστικές τεχνολογίες όπως οι συμβατικές μηχανικές κατεργασίες» (ASTM, 2012)

Οι τεχνολογίες που περιγράφονται με τον όρο AM δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως νέες καθώς αναπτύσσονται τα τελευταία 30 χρόνια. Αρχικός στόχος των τεχνολογιών αυτών αποτελούσε η γρήγορη κατασκευή πρωτοτύπων. Για αυτό τον λόγο η πρώτη ονομασία που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τις τεχνολογίες αυτές, ήταν Rapid Prototyping (Ταχεία Πρωτοτυποποίηση). Με το όρο Rapid Prototyping (RP) περιγράφονταν οι τεχνολογίες κατασκευής μοντέλων στρώμα - στρώμα (layer by layer) με εναπόθεση υλικού που μείωνε το χρόνο κατασκευής μοντέλων και πρωτοτύπων κάθε πολυπλοκότητας σε ώρες αντί για ημέρες, εβδομάδες ή ακόμα και μήνες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η τεχνολογία Stereolithography (SLA) ήταν η πρώτη διαδικασία RP που αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Στην πορεία χρησιμοποιήθηκε και ο όρος Rapid Tooling (RT) με το οποίο περιγράφονταν οι τεχνολογίες που υιοθετούσαν τις γρήγορες τεχνικές διαμόρφωσης ενός πρωτοτύπου, δηλαδή τις τεχνικές του RP, εφαρμόζοντάς τις στην κατασκευή τόσο εργαλείων όσο και καλουπιών. Ο όρος AM υιοθετήθηκε για να σηματοδοτήσει τη δυνατότητα που παρέχουν πλέον οι τεχνολογίες αυτές για απευθείας κατασκευή τελικών προϊόντων έτοιμων προς χρήση.

Η βασική αρχή των τεχνολογιών AM είναι ότι τα μοντέλα αρχικά σχεδιάζονται με τη χρήση H/Y μέσω λογισμικού 3D Computer Aided Design (CAD) και εν συνεχεία κατασκευάζονται απευθείας τα τελικά προϊόντα, χωρίς να απαιτείται προγραμματισμός της διαδικασίας. Παρότι η διαδικασία δεν είναι τόσο απλή όσο περιγράφηκε παραπάνω, ωστόσο με τις τεχνολογίες AM απλοποιείται σημαντικά η διαδικασία παραγωγής πολύπλοκων τρισδιάστατων 3D αντικειμένων απευθείας από δεδομένα CAD. Για την υλοποίηση της κατασκευής πρακτικά χρειάζεται γνώση των βασικών διαστάσεων του αντικειμένου, καλή κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των μηχανών AM και γνώση των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από αυτές. Αντίθετα οι συμβατικές διαδικασίες παραγωγής, απαιτούν προσεκτική και λεπτομερή ανάλυση της γεωμετρίας του υπό κατασκευή αντικειμένου, για να καθοριστεί η σειρά με την οποία τα διαφορετικά χαρακτηριστικά θα κατασκευαστούν, μελέτη για το τι εργαλεία και ποιες κατεργασίες πρέπει να χρησιμοποιηθούν καθώς και ποια επιπρόσθετα χαρακτηριστικά πρέπει να αποδοθούν.

Η βασική αρχή των τεχνολογιών AM είναι ότι τα τμήματα των αντικειμένων γίνονται με την προσθήκη υλικού σε στρώσεις (layer by layer). Συγκεκριμένα, κάθε στρώμα είναι μια λεπτή διατομή του τμήματος και εξάγεται από τα αρχικά δεδομένα CAD. Στην πραγματικότητα, επειδή κάθε στρώση πρέπει να έχει ένα πεπερασμένο πάχος, το προκύπτον τμήμα θα είναι μια προσέγγιση του αρχέτυπου, όπως φαίνεται και στη Εικόνα 1.1.



Εικόνα 1 Γεωμετρικό Μοντέλο CAD ενός φλιτζανιού τσαγιού με εικόνες που αποτυπώνουν το αποτέλεσμα χρήσης διαφορετικών παχών στις

Σημειώνεται ότι όσο πιο λεπτό είναι το πάχος της κάθε στρώσης τόσο πιο κοντά στις τελικές διαστάσεις θα είναι το τελικό προϊόν σε σχέση με το πρωτότυπο.

Όλες οι εμπορικές μηχανές AM που είναι διαθέσιμες έως σήμερα, έχουν ως κοινή αρχή λειτουργίας την εναπόθεση υλικού σε στρώσεις (layer by layer). Οι βασικές διαφορές τους εντοπίζονται στο είδος των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, στον τρόπο δημιουργίας των στρωμάτων καθώς και στον τρόπο με τον οποίο τα στρώματα ενώνονται μεταξύ τους. Οι διαφορές αυτές θα καθορίσουν παράγοντες όπως η ακρίβεια του τελικού αντικειμένου, οι ιδιότητες του υλικού, η ταχύτητα κατασκευής του τελικού προϊόντος, το είδος και το βαθμό της

απαιτούμενης επεξεργασίας μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, το μέγεθος της μηχανής AM που απαιτείται καθώς και το συνολικό κόστος της μηχανής και της διαδικασίας.

1.2 Ιστορική Αναδρομή Τεχνολογιών AM¹

Η ιστορική εξέλιξη των τεχνολογιών AM δεν μπορεί να προσδιοριστεί επακριβώς. Ωστόσο, φαίνεται να υπήρχε αρκετή δραστηριότητα από τις αρχές της δεκαετίας του 1960. Συγκεκριμένα, η πρώτη προσπάθεια κατασκευής στερεών αντικειμένων από φωτοπολυμερή υλικά, με χρήση δύο δεσμών Laser διαφορετικών συχνοτήτων, έγινε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 στο Battelle Memorial Institute. Το 1967, ο Wyn Kelly Swainson αιτήθηκε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας με τίτλο «Method of Producing a 3D Figure by Holography» με παρόμοια τεχνική διπλής δέσμης Laser και στην συνέχεια ίδρυσε την εταιρία Formigraphic Engine Co. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, η εταιρία Dynell Electronics Corp. κατοχύρωσε μια σειρά από ευρεσιτεχνίες σχετιζόμενες με την τεχνολογία «solid photography», κατά την οποία γινόταν υπολογιστικά ελεγχόμενη κοπή διατομών (είτε με χρήση φρέζας είτε με laser) και στη συνέχεια οι διατομές αυτές στοιβάζονταν έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο αντικείμενο.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 δημοσιεύτηκαν πολλά άρθρα, σε διαφορετικά Πανεπιστήμια ανά τον κόσμο, τα οποία θεωρούνται ότι οδήγησαν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας της Στερεολιθογραφίας (Stereolithography). Ενδεικτικά αναφέρονται, το άρθρο με τίτλο «Three-Dimensional Data Display by Automatic Preparation» του Hideo Kodama (Ιαπωνία) τον Οκτώβριο του 1980 αλλά και το άρθρο του Alan Herbert (Ηνωμένες Πολιτείες) με τίτλο «Solid Object Generation» που δημοσιεύτηκε τον Αύγουστο του 1982. Είναι επίσης αξιοσημείωτο, ότι το 1984 κατατέθηκαν σχεδόν παράλληλα αιτήσεις για διπλώματα ευρεσιτεχνίας στην Ιαπωνία (Yogi Marutani), τη Γαλλία (Jean-Claude Andre) και τις ΗΠΑ (Charles Hull), τα οποία αναφέρονταν λίγο πολύ στην ιδέα κατασκευής ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με εναπόθεση υλικού σε στρώματα περιγράφοντας ως μέθοδο την Στερεολιθογραφία. Παρά το γεγονός ότι όλα τα παραπάνω άρθρα και τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας ήταν επαρκώς εμπεριστατωμένα και τεχνικά εφαρμόσιμα, η ευρεσιτεχνία που κατοχυρώθηκε στον Charles Hull, ήταν αυτή που έχει αναγνωριστεί διεθνώς ως η πιο σημαντική, η οποία οδήγησε στην εμπορική διάθεση διάταξης της Στερεολιθογραφίας.

¹ Wohlers, T., & Gornet T. (2014). History of additive manufacturing. In *Wohlers Report 2014* Colorado: Wohlers Associates

Η διαδικασία Stereolithography (SL) έγινε διαθέσιμη εμπορικά το 1987, από την εταιρία 3D Systems, ιδρυτής της οποίας ήταν ο Charles Hull. Αποτελέσε την πρώτη τεχνολογία AM, κατά την οποία λεπτά στρώματα φωτοευαίσθητου (UV light-sensitive) υγρού πολυμερούς, στερεοποιούνται με τη χρήση δέσμης laser. Η μηχανή SLS-1 ήταν η πρώτη εμπορικά διαθέσιμη μηχανή AM στον κόσμο.



Εικόνα 2 Η πρώτη μηχανή AM από τον ιδρυτή της 3D Systems Charles Hull

Στη αρχές της δεκαετίας του 1990 διατέθηκαν εμπορικά μία σειρά από νέες τεχνολογίες AM. Χαρακτηριστικά αναφέρονται η τεχνολογία Fused Deposition Modeling (FDM) από την εταιρία Stratasys, η Solid Ground Curing (SGC) από την Cubital, η Laminated Object Manufacturing (LOM) από την Helisys, η Selective Laser Sintering (SLS) από την DTM (η εταιρία DTM το 2001 εξαγοράστηκε από την 3D Systems) και η 3D Printing (3DP) από το Πανεπιστήμιο MIT, τα δικαιώματα της οποίας παραχωρήθηκαν σε διάφορες εταιρίες όπως η Soligen και η Z Corp. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι το 1996 διατέθηκαν στο εμπόριο οι πρώτοι χαμηλού κόστους 3D εκτυπωτές τόσο από την Stratasys (Actua 2100) όσο και από την Z Corp. (Z402 3D printer).

Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, είχαν πλέον δημιουργηθεί σε όλο τον κόσμο (Ηνωμένες Πολιτείες, Ευρώπη, Κίνα, Ιαπωνία, Ισραήλ) πλήθος εταιριών που ασχολούνταν με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και νέων μηχανών AM. Ενδεικτικό της ραγδαίας ανάπτυξης των τεχνολογιών AM, είναι ότι μόνο τον Απρίλιο του 2000 η Object Geometries (Ισραήλ) διέθεσε στο εμπόριο ένα νέο 3D inkjet printer με 1.536 ακροφύσια, η Precision Optical Manufacturing (POM) ανακοίνωσε την διαδικασία Direct Metal Deposition (DMD) - 2 χρόνια αργότερα διέθεσε την πρώτη μηχανή DMD, ενώ η Z Corp. διέθεσε εμπορικά τον πρώτο στον

κόσμο έγχρωμο 3D εκτυπωτή (Z402C). Το 2003 Η EOS κατασκεύασε την πρώτη μηχανή για τη διαδικασία Direct Metal Laser Sintering (DMLS) με όνομα EOSINT M 270. Έως στα μέσα της δεκαετίας του 2000, παρατηρείται να δίνεται μία έμφαση στην βελτίωση των διαδικασιών AM, στη δυνατότητα χρήσης μεταλλικών υλικών αλλά και στην ανάπτυξη νέας γενιάς μηχανών. Από το 2005 και μετά, δίνεται έμφαση στην βελτίωση των διαφορετικών τύπων υλικών, όπως τα θερμοσκληρυντικά, τα θερμοπλαστικά και τα ελαστομερή πολυμερή.

Έως στα τέλη της δεκαετίας του 2000, πέρα από το πλήθος των διαφορετικών διαδικασιών και μηχανών που είχαν δημιουργηθεί, παρουσιάστηκε και πλήθος νέων υλικών, συμβατών με αυτές τις τεχνολογίες (Accura 60 photopolymer από την 3D Systems το 2006, Cobalt-chrome powder από την EOS το 2006, Accura Greystone SL ρητίνη από την 3D Systems το 2007, το υψηλής αντοχής σε χτυπήματα PrimePart DC και το υψηλής επιμήκυνσης PrimePart ST από την EOS το 2007, το βιο-συμβατό ABS-M30i από την Stratasys το 2008, το αεροπορικό υλικό ULTEM 9085 από την Stratasys το 2008, τα κράματα NickelAlloy IN718 και Al-Si10-Mg από την EOS το 2009).

Από τις αρχές του 2010, οι τεχνολογίες AM έχουν υιοθετηθεί ως κύρια μέθοδος παραγωγής σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, ενώ το κύριο ενδιαφέρον των ερευνών επικεντρώνεται στην ευρύτερη επέκταση των διαδικασιών AM σε μεταλλικά υλικά. Παράλληλα, συνεχίζονται οι εργασίες σε όλο τον κόσμο για τη διεθνή τυποποίηση των διαδικασιών και υλικών, για μεγαλύτερη εκβιομηχάνιση των συστημάτων, καθώς και για την προετοιμασία της εφοδιαστικής αλυσίδας για μελλοντική ζήτηση προϊόντων που χρησιμοποιούν αυτές τις διαδικασίες

ΕΤΑΙΡΙΑ	ΧΩΡΑ	ΕΤΟΣ ΙΔΡΥΣΗΣ	ΕΤΟΣ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ AM	ΕΤΑΙΡΙΑ	ΧΩΡΑ	ΕΤΟΣ ΙΔΡΥΣΗΣ	ΕΤΟΣ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ AM
3D Systems	US	1986	1988	Meiko Corp.	Japan	1991	1994
Aaroflex	US	1994	1996	Mitsui Zosen Corp.	Japan	1991	1991
AeroMet	US	1997		Objet Geometries	Israel	1998	2001
Autostrade	Japan		1996	Optomec	US		1998
Beijing Yinhou Laser R&D	China		1998	Precision Optical Manufacturing (POM)	US		
BPM Technology	US	1989	1995	ProMetal	US	1996	1999
BMT	Germany		2001	Quadrax	US	1990	1990
CMET	Japan	1988	1990	Röders	Germany		1999
Cubic Technologies	US	2000	2001	Sanders Design International	US		2000
Cubital	Israel	1987	1991	Schroff Development	US		1996
Denken Eng. Co., Ltd.	Japan	1985	1993	Solidica	US		2001
D-MEC	Japan	1989	1989	Solidimension	Israel		
DTM	US	1987	1992	Solidscape	US	1994	1994
DuPont SOMOS	US	1989	n/a	Soligen	US	1991	1993
EOS	Germany	1989	1990	Sparx AB	Sweden		1991
Fockele & Schwarze	Germany	1991	1994	Stratasys	US	1988	1991
Helisys	US	1985	1991	Teijin Seiki	Japan	1991	1992
Kinergy	Singapore		1996	Toyoda Machine Works	Japan		2000
Kira Corp.	Japan	1992	1994	Ushio Inc.	Japan		1994
Light Sculpting	US	1986					

Πίνακας 1 Οι κυριότερες εταιρίες παραγωγής συστημάτων AM, η χώρα ίδρυσης, το έτος ίδρυσης και το έτος εμπορικής διάθεσης τεχνολογίας AM²

1.3 Χρησιμότητα Τεχνολογιών AM

Η βιομηχανία έχει επισημανθεί ως ένα από τα κλειδιά για τη βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη, δημιουργώντας ανταγωνιστικότητα και μακροπρόθεσμη απασχόληση. Χαρακτηριζόμενη ως προηγμένη τεχνολογία στην βιομηχανική παραγωγή, η τεχνολογία AM έχει αναγνωριστεί ως βασική προτεραιότητα καθώς είναι μια πρωτοποριακή τεχνολογία που παρέχει δυνατότητα να μεταμορφώσει την παγκόσμια μεταποιητική βιομηχανία.

Αρχικά οι τεχνολογίες AM χρησιμοποιούνταν για την απεικόνιση οπτικοποιημένων μοντέλων κατά την φάση ανάπτυξης των προϊόντων. Είναι ευρέως γνωστό ότι τα μοντέλα μπορεί να είναι πολύ πιο χρήσιμα από τα σχέδια ή τις απεικονίσεις στην κατανόηση της πρόθεσης του σχεδιαστή κατά την παρουσίαση του εννοιολογικού σχεδιασμού. Παρότι η

² Wohlers TT (2012) Wohlers report 2012: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report Wohlers Associates, Detroit, MI

δημιουργία ενός σχεδίου είναι ταχύτερη και ευκολότερη, στο τέλος τα μοντέλα είναι σχεδόν πάντα απαραίτητα για την πλήρη αξιολόγηση του σχεδιασμού.

Η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών AM τόσο στο είδος των χρησιμοποιούμενων υλικών όσο και στην ακρίβεια και στην ποιότητα των τελικών αντικειμένων, κατέστησε εφικτή την επέκτασή τους πέρα από τον αρχικό σκοπό που ήταν η απλή κατασκευή μοντέλων. Τα μοντέλα πλέον χρησιμοποιούνται για να παρέχουν πληροφορίες τύπου «Form – Fit – Function». Η έννοια «Form» αναφέρεται στη δυνατότητα που παρέχουν τα μοντέλα για την αποτίμηση του σχήματος του αντικειμένου αλλά και του γενικού σκοπού του σχεδιασμού. Όσον αφορά την έννοια «Fit», η βελτιωμένη ακρίβεια στις διαδικασίες AM, παρέχει τη δυνατότητα στα υπό κατασκευή εξαρτήματα να έχουν τέτοιες ανοχές ώστε να μπορούν να συναρμολογηθούν. Τέλος, όσον αφορά την έννοια «Function», οι βελτιωμένες ιδιότητες των υλικών παρέχουν την δυνατότητα στα υπό κατασκευή εξαρτήματα να αξιολογούνται ως προς την λειτουργικότητά τους.

Συνεπώς ο ισχυρισμός ότι οι τεχνολογίες AM είναι κατάλληλες μόνο για κατασκευή μοντέλων και πρωτοτύπων θα ήταν ανακριβής. Αντιθέτως, ο συνδυασμός τους με άλλες τεχνολογίες στις αλυσίδες παραγωγής μειώνει σημαντικά το χρόνο και το κόστος ανάπτυξης. Μάλιστα, ορισμένες AM τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να είναι εφικτή η κατασκευή τελικών προϊόντων έτοιμων για χρήση. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο επικράτησε η ορολογία Additive Manufacturing σε σχέση με τον όρο Rapid Prototyping. Επιπρόσθετα η χρήση υψηλής ισχύος τεχνολογιών Laser, παρέχει τη δυνατότητα χρήσης ποικιλίας μετάλλων για την απευθείας κατασκευή τελικών προϊόντων επεκτείνοντας ακόμα περισσότερο το εύρος εφαρμογών των τεχνολογιών AM.

1.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Τεχνολογιών AM

Οι τεχνολογίες AM χαρακτηρίζονται από πολλούς ως η 3^η βιομηχανική επανάσταση. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνολογιών αυτών.

1.4.1 Πλεονεκτήματα Τεχνολογιών AM

1. Ελευθερία Σχεδίασης και Πολυπλοκότητα Μοντέλου

Η ανάπτυξη των τεχνολογιών AM έχουν σαν αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό των προϊόντων τα οποία σχεδιάζονται σε ψηφιακό περιβάλλον και τα οποία παρουσιάζουν υψηλό

επίπεδο πολυπλοκότητας, τα οποία δεν θα μπορούσαν να κατασκευαστούν με κανέναν άλλον τρόπο. Το πλεονέκτημα αυτό δεν είναι χρήσιμο μόνο στους σχεδιαστές και τους καλλιτέχνες για την παρουσίαση εντυπωσιακών οπτικών αποτελεσμάτων, αλλά έχει ιδιαίτερα σημαντικό αντίκτυπο σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου είναι εφικτή η κατασκευή εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας χαμηλότερους βάρους και υψηλότερης αντοχής.

2. Ταχύτητα

Οι τεχνολογίες AM δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετριών μέσα σε λίγες μόνο ώρες, με πολύ μικρό αριθμό ανθρώπινων πόρων. Συγκεκριμένα, ο χειριστής του μηχανήματος απαιτείται για την εισαγωγή των δεδομένων CAD και του υλικού, καθώς και για την εκκίνηση της μηχανής, ενώ κατά την διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής δεν απαιτείται καν η φυσική παρουσία του. Το πλεονέκτημα αυτό της ταχύτητας δεν έχει να κάνει μόνο με την μείωση του χρόνου κατασκευής ενός τελικού προϊόντος αλλά με την επιτάχυνση ολόκληρης της διαδικασίας ανάπτυξης ενός νέου προϊόντος καθώς αυτή στηρίζεται εξολοκλήρου στην χρήση Η/Υ. Όπως η χρήση συστημάτων 3D CAD επιτρέπει στον σχεδιαστή, αυτό που βλέπει στην οθόνη του Η/Υ να είναι αυτό που λαμβάνει ως τελικό προϊόν - What You See Is What You Get (WYSIWYG), αντίστοιχα και οι τεχνολογίες AM επιτρέπουν στον σχεδιαστή, αυτό που βλέπει στην οθόνη του Η/Υ να είναι αυτό που τελικά κατασκευάζει - What you See Is What You Build (WYSIWYB).

3. Εξατομίκευση

Οι τεχνολογίες AM επιτρέπουν την μαζική εξατομίκευση (mass customization). Είναι η ικανότητα τα παραγόμενα προϊόντα να είναι εξατομικευμένα ώστε να καλύπτουν τις μεμονωμένες ανάγκες και απαιτήσεις του κάθε πελάτη. Λόγω της φύσης των τεχνολογιών αυτών είναι εφικτή ακόμα και η ταυτόχρονη κατασκευή προϊόντων που πληρούν τις ξεχωριστές απαιτήσεις των τελικών χρηστών χωρίς επιπρόσθετο κόστος.

4. Απουσία Εργαλείων

Η παραγωγή των απαραίτητων εργαλείων για την κατασκευή του τελικού προϊόντος αποτελεί το πιο χρονοβόρο και πιο κοστοβόρο στάδιο κατά την ανάπτυξη ενός προϊόντος. Για χαμηλό και μέσο όγκο παραγωγής, οι τεχνολογίες AM εξαλείφουν την ανάγκη για παραγωγή εργαλείων και κατά συνέπεια μειώνουν το κόστος και το χρόνο που σχετίζονται με το στάδιο αυτό. Αποτελεί εξαιρετική πρόταση και ολοένα και μεγαλύτερος αριθμός κατασκευαστών εκμεταλλεύονται αυτές τις τεχνολογίες. Επιπρόσθετα λόγω του πλεονεκτήματος της πολύπλοκης σχεδίασης, προϊόντα και εξαρτήματα μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να αποφεύγονται απαιτήσεις συναρμολόγησης, εξαλείφοντας έτσι και το κόστος και τον χρόνο συναρμολόγησης.

5. Υπερελαφρύς Κατασκευές

Οι τεχνολογίες AM επιτρέπουν σημαντική μείωση του βάρους στο τελικό προϊόν ή εξάρτημα μέσω βελτιστοποίησης της τοπολογίας.

6. Τεχνολογίες Φιλικές προς το Περιβάλλον

Οι τεχνολογίες AM αναδεικνύονται ενεργειακά αποδοτικές τόσο όσον αφορά την αυτή καθεαυτή διαδικασία κατασκευής, χρησιμοποιώντας το 90% των πρώτων υλών και συνεπώς μειώνοντας σημαντικά τα απόβλητα, αλλά και όσον αφορά τον κύκλο ζωής των παραγόμενων προϊόντων, τα οποία είναι ελαφρύτερα και με μεγαλύτερη αντοχή. Επιπρόσθετα οι εκλύσεις σε οξείδια του άνθρακα είναι σημαντικά μειωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες των παραδοσιακών τεχνολογιών.

7. Μηδενικό Κόστος Αποθήκευσης

Οι τεχνολογίες AM παρέχουν τη δυνατότητα κατασκευής προϊόντων όπως και όποτε απαιτηθεί, χωρίς να είναι απαραίτητη η αποθήκευση και η δημιουργία στοκ έτοιμων προϊόντων, εξαλείφοντας έτσι το κόστος αποθήκευσης.

8. Χαμηλό Κόστος Παραγωγής

Όταν ο όγκος παραγωγής είναι μικρός, το κόστος είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες. Επίσης, η αύξηση της πολυπλοκότητας του τελικού αντικειμένου δεν αυξάνει το κόστος παραγωγής πέραν του σταδίου της σχεδίασης, καθώς από την στιγμή που ολοκληρωθεί η σχεδίαση, η εναπόθεση υλικού σε πιο σύνθετα στρώματα δεν είναι πιο δαπανηρή σε σχέση με τα πιο απλά στρώματα.

9. Βελτίωση Αποδοτικότητας της Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Η ελαχιστοποίηση του κόστους αποθήκευσης, μεταφοράς και διανομής ακατέργαστων υλικών και ενδιάμεσων προϊόντων, καθώς και η δυνατότητα παραγωγής τελικών αντικειμένων χωρίς την ανάγκη χρήσης εργαλείων αποτελεί την βάση για νέες αποτελεσματικότερες λύσεις στην διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας

10. Δημιουργία Νέων Θέσεων Εργασίας

Η ευρεία χρήση των τεχνολογιών AM θα αυξήσει τη ζήτηση για σχεδιαστές νέων προϊόντων με χρήση λογισμικού CAD καθώς και για τεχνικούς που θα μπορούν να λειτουργούν τα μηχανήματα AM.

1.4.2 Μειονεκτήματα Τεχνολογιών ΑΜ

1. Ακρίβεια

Οι τεχνολογίες ΑΜ εξυπηρετούσαν σαν πρωταρχικό σκοπό την ανάγκη των σχεδιαστών για τη εύκολη και γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων. Συνεπώς, μέσω των τεχνολογιών αυτών δημιουργούνταν κυρίως εξαρτήματα για δοκιμή και έλεγχο. Ωστόσο για να είναι ένα εξάρτημα έτοιμο προς χρήση, είναι απαραίτητο να πληροί όλες τις προδιαγραφές ως προς την ακρίβεια των διαστάσεων. Παρά το γεγονός ότι υπάρχει σημαντική πρόοδος στο θέμα της ακρίβειας τα τελευταία χρόνια, για πολλά υλικά από πλαστικό επιτυγχάνεται ακρίβεια της τάξης του ± 0.1 mm που δημιουργεί σημαντικά περιθώρια λάθους.

2. Απομάκρυνση Στηριγμάτων

Όταν ο όγκος παραγωγής είναι μικρός, η απομάκρυνση των στηριγμάτων με αφαίρεση του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα, δεν είναι συνήθως μεγάλο ζήτημα. Όταν όμως ο όγκος παραγωγής είναι μεγάλος αποτελεί σημαντικό ζήτημα.

3. Περιορισμοί Στις Πρώτες Ύλες

Ο αριθμός των πρώτων υλών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις μέρες μας από τα μηχανήματα ΑΜ είναι πάνω από 100, ο οποίος συνεχώς αυξάνεται. Ωστόσο το νούμερο αυτό παραμένει πολύ μικρότερο σε σύγκριση με το τεράστιο φάσμα των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στην παραδοσιακή κατασκευή. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίον γίνεται μεγάλη προσπάθεια και δαπανούνται μεγάλα ποσά για την ανάπτυξη όλο και μεγαλύτερου αριθμού νέων υλικών, τόσο μεταλλικών όσο και σύνθετων, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αντοχή και στιβαρότητα στα τελικά προϊόντα.

4. Κόστος Υλικών

Σήμερα, το κόστος των υλικών για τα περισσότερα συστήματα ΑΜ είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από ότι εκείνων που χρησιμοποιούνται για την παραδοσιακή κατασκευή.

5. Καθορισμός Παραμέτρων

Απαιτείται σημαντική προσπάθεια για το σχεδιασμό της εφαρμογής και για τον καθορισμό των παραμέτρων της διεργασίας ώστε να παραχθεί το τελικό προϊόν.

6. Ιδιότητες Υλικού

Λόγω του περιορισμένου αριθμού διαθέσιμων υλικών ΑΜ, οι ιδιότητες τους (π.χ. αντοχή σε εφελκυσμό, όριο διαρροής, κόπωση κ.α.) δεν έχουν πλήρως περιγραφεί και αποτυπωθεί. Επιπρόσθετα, όσον αφορά την ποιότητα της επιφάνειας, ακόμη και στις βέλτιστες διαδικασίες ΑΜ το τελικό προϊόν πιθανόν να πρέπει να υποστεί δευτερογενή μηχανική κατεργασία (βαφή, φινίρισμα κ.α.) ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας.

7. Πνευματική Ιδιοκτησία

Η ευκολία με την οποία μπορούν να δημιουργηθούν αντίγραφα κατά την χρήση των τεχνολογιών AM εγείρει ζητήματα επί των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα χωρίς κόστος μεγάλης ποικιλίας σχεδίων στο διαδίκτυο μπορεί να αλλάξει, ώστε οι εταιρείες να αποκομίζουν κέρδη από αυτή τη νέα τεχνολογία.

8. Περιορισμός Διαστάσεων

Ένας ακόμα περιορισμός των τεχνολογιών AM, έχει να κάνει με τις διαστάσεις και το μέγεθος του τελικού προϊόντος. Ο περιορισμός αυτός προκύπτει καθώς όλες οι μηχανές AM έχουν περιορισμένο μέγεθος και κατά συνέπεια συγκεκριμένων διαστάσεων θάλαμο μέσα στον οποίο λαμβάνει χώρα οι διεργασίες. Ως εκ τούτου, δεν είναι ακόμα εφικτή η κατασκευή με AM πολύ μεγάλων αντικειμένων.

9. Κόστος Μηχανών AM

Το κόστος για την αγορά ενός 3D Εκτυπωτή εξακολουθεί να μην καθιστά εφικτή την απόκτησή του από τον μέσο άνθρωπο. Επίσης απαιτούνται διαφορετικές μηχανές AM για διαφορετικούς τύπους αντικειμένων, ενώ οι έγχρωμοι 3D εκτυπωτές είναι ακόμα ακριβότεροι.

10. Αδυναμία Ελέγχου Κατασκευής Επικίνδυνων Αντικειμένων

Το Liberator ήταν το πρώτο 3D εκτυπωμένο λειτουργικό πιστόλι στον κόσμο, κατέδειξε πόσο εύκολο ήταν να κατασκευάσει κάποιος τα δικά του όπλα έχοντας βασικές γνώσεις σχεδίασης σε συστήματα CAD και πρόσβαση σε ένα 3D εκτυπωτή. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να επινοηθούν τρόποι και μέσα για να ελέγχει αυτή η επικίνδυνη τάση.

Pros	Cons
Freedom to design and innovate without penalties	Unexpected pre- and post-processing requirements
Rapid iteration through design permutations	High process cost
Excellent for mass customization	Lack of industry standards
Elimination of tooling	Low speed, not suitable for mass production
Green manufacturing	Inconsistent Materials
Minimal material waste	Limited number of materials
Energy efficient	High equipment cost for high-end manufacturing
Enables personalized manufacturing	Poor surface finish and dimensional accuracy

Πίνακας 2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Τεχνολογιών AM

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΜ

2.1 Γενικευμένη Διαδικασία Τεχνολογιών ΑΜ

Οι τεχνολογίες ΑΜ περιλαμβάνουν μια σειρά από βήματα που κινούνται από την εικονική σχεδίαση με χρήση λογισμικού CAD έως το τελικό φυσικό αντικείμενο. Ανάλογα με το είδος του τελικού προϊόντος, δύναται να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τεχνολογίες ΑΜ και με διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα, για μικρά και σχετικά απλά προϊόντα, μπορεί να γίνει χρήση τεχνολογιών ΑΜ μόνο για οπτικοποίηση των μοντέλων, ενώ για μεγαλύτερα και πιο σύνθετα προϊόντα μπορεί να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες ΑΜ σε διαφορετικά στάδια κατά την διαδικασία ανάπτυξης του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, σε περίπτωση που στα πρώτα στάδια της διαδικασίας ανάπτυξης του προϊόντος απαιτείται υψηλή τραχύτητα, γίνεται χρήση ΑΜ λόγω της ταχύτητας με την οποία μπορούν να κατασκευαστούν τα αντικείμενα. Σε μεταγενέστερα στάδια της διαδικασίας, τα μέρη μπορεί να απαιτούν προσεκτικό καθαρισμό και περαιτέρω επεξεργασία (όπως λείανση, προετοιμασία της επιφάνειας και βαφή) πριν να χρησιμοποιηθούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι τεχνολογίες ΑΜ είναι χρήσιμες λόγω τις ευκολίας κατασκευής αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένα εργαλεία και εξοπλισμός. Συνοψίζοντας οι περισσότερες διαδικασίες ΑΜ περιλαμβάνουν, ως ένα βαθμό τουλάχιστον τα παρακάτω 8 στάδια:

Σχεδίαση CAD

Δημιουργία αρχείου .STL

Μεταφορά αρχείου .STL στην μηχανή ΑΜ

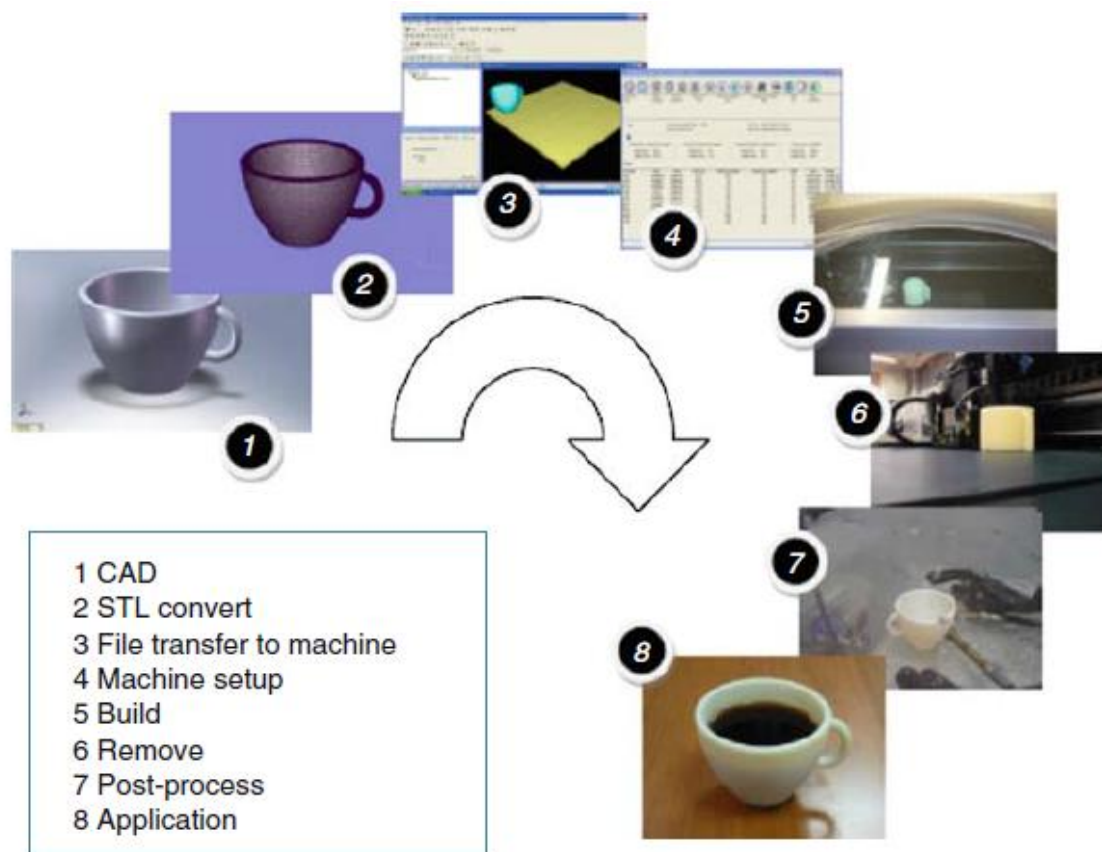
Ρύθμιση Μηχανής ΑΜ

Κατασκευή

Απομάκρυνση Αντικειμένου

Περαιτέρω επεξεργασία

Εφαρμογή



Εικόνα 3 Τα 8 στάδια της γενικευμένης διαδικασίας ΑΜ

2.1.1 Στάδιο 1: Σχεδίαση CAD

Όλα τα αντικείμενα που πρόκειται να κατασκευαστούν με διαδικασίες ΑΜ πρέπει πρώτα να σχεδιαστούν με τη βοήθεια λογισμικού CAD σε τρισδιάστατο μοντέλο, στο οποίο να απεικονίζεται πλήρως η εξωτερική του γεωμετρία. Αυτό είναι εφικτό με τη χρήση σχεδόν οποιουδήποτε λογισμικού CAD με την προϋπόθεση ότι θα είναι δυνατόν να εξαχθεί μία τρισδιάστατη στερεή ή επιφανειακή αναπαράσταση του αντικειμένου. Επιπλέον, σε αυτό το στάδιο είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και εξοπλισμός ανάστροφης μηχανικής (Reverse Engineering) όπως Laser Scanning για την δημιουργία της τρισδιάστατης αναπαράστασης.

2.1.2 Στάδιο 2: Δημιουργία Αρχείου .STL

Σχεδόν όλες οι μηχανές ΑΜ δέχονται αρχεία τύπου .STL, τα οποία είναι ένα “de facto” πρότυπο και σχεδόν όλα τα συστήματα CAD μπορούν να εξάγουν αρχεία αυτής της μορφής. Τα αρχεία τύπου .STL περιγράφουν τις κλειστές εξωτερικές επιφάνειες του πρωτότυπου μοντέλου CAD και δημιουργούν τη βάση για τον υπολογισμό των τομών.

2.1.3 Στάδιο 3: Μεταφορά Αρχείου .STL στη Μηχανή AM

Το αρχείο τύπου .STL το οποίο περιγράφει το υπό κατασκευή αντικείμενο πρέπει να μεταφερθεί στην μηχανή AM. Στο στάδιο αυτό, πρέπει να γίνει επιδέξιος χειρισμός του αρχείου ώστε να είναι σωστά το μέγεθος, η θέση αλλά και ο προσανατολισμός του αντικειμένου.

2.1.4 Στάδιο 4: Ρύθμιση Μηχανής AM

Η μηχανή AM πρέπει να έχει ρυθμιστεί σωστά πριν την έναρξη της κατασκευής. Τέτοιες ρυθμίσεις σχετίζονται με κάποιες παραμέτρους, όπως τον περιορισμό των υλικών, τον περιορισμό της πηγής ενέργειας της μηχανής, το πάχος των στρωμάτων και το συγχρονισμό της μηχανής.

2.1.5 Στάδιο 5: Κατασκευή

Το στάδιο της κατασκευής του αντικειμένου είναι κυρίως μια αυτοματοποιημένη διαδικασία και η μηχανή συνήθως δεν χρειάζεται καν επίβλεψη. Μόνο διακριτική παρακολούθηση της μηχανής απαιτείται, για να εξασφαλιστεί ότι δεν έχουν συμβεί σφάλματα, όπως να χυθεί έξω το υλικό ή να συμβούν δυσλειτουργίες του λογισμικού ή διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος.

2.1.6 Στάδιο 6: Απομάκρυνση Αντικειμένου

Μόλις τελειώσει η μηχανή AM την κατασκευή, το αντικείμενο πρέπει να απομακρυνθεί. Αυτό προφανώς απαιτεί αλληλεπίδραση του χρήστη με τη μηχανή, η οποία πολύ πιθανόν να διαθέτει ασφαλιστικές δικλίδες όπως για παράδειγμα ότι έχει μειωθεί επαρκώς η θερμοκρασία της μηχανής ή ότι δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη σε λειτουργία.

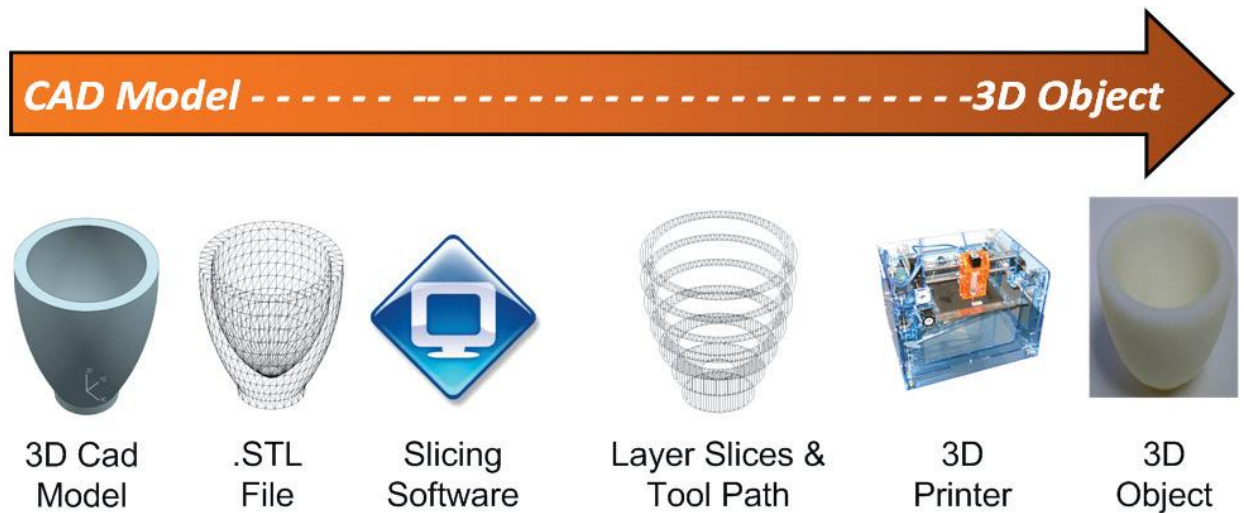
2.1.7 Στάδιο 7: Περαιτέρω Επεξεργασία

Μετά την απομάκρυνση του αντικειμένου από την μηχανή, ίσως απαιτηθεί να προηγηθεί διαδικασία καθαρισμού πριν το προϊόν είναι έτοιμο για χρήση. Επίσης, είναι πιθανόν τα αντικείμενα να έχουν στηρίγματα τα οποία θα πρέπει να αφαιρεθούν. Αυτά συχνά απαιτούν χρόνο και ιδιαίτερα προσεκτικό χειρισμό.

2.1.8 Στάδιο 8: Εφαρμογή

Στο τελευταίο στάδιο τα αντικείμενα είναι πλέον έτοιμα για χρήση. Ωστόσο, ίσως απαιτείται επιπρόσθετη κατεργασία πριν είναι αποδεχτά για χρήση. Για παράδειγμα, ίσως απαιτείται αστάρωμα και χρώση για να δοθεί μια αποδεκτή υφή στην επιφάνεια και στο φινίρισμα. Αυτές οι επιπρόσθετες κατεργασίες μπορεί να είναι επίπονες και χρονοβόρες.

Επιπλέον, ίσως απαιτηθεί να γίνει συναρμολόγηση με άλλα μηχανικά ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα για να δημιουργηθεί το τελικό προϊόν.



Εικόνα 4 Γενικευμένη διαδικασία AM

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι οι μηχανές AM απαιτούν πολύ προσεκτική συντήρηση. Στην πλειοψηφία τους, χρησιμοποιούν είτε εύθραυστα laser είτε εξειδικευμένες τεχνολογίες εκτύπωσης, τα οποία πρέπει να παρακολουθούνται προσεκτικά και απαιτούν καθαρό και μη θορυβώδες περιβάλλον. Παρότι τα μηχανήματα έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν χωρίς επιτήρηση, είναι σημαντικό να περιλαμβάνονται τακτικοί έλεγχοι στο πρόγραμμα συντήρησης τους. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι οι διαδικασίες AM συχνά δεν είναι μέσα στα απαιτούμενα πρότυπα υλικών και διαδικασιών.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται απαιτούν επίσης ιδιαίτερα προσεκτικό χειρισμό. Οι πρώτες ύλες σε ορισμένες διεργασίες AM έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής και πρέπει να διατηρούνται σε συνθήκες που αποτρέπουν τις ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις. Επίσης η έκθεση στην υγρασία, σε περίσσεια φωτός και άλλους ρυπαντές πρέπει να αποφεύγονται. Οι περισσότερες διαδικασίες χρησιμοποιούν υλικά τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, επειδή η επαναχρησιμοποίηση τους για αρκετές φορές μπορεί να υποβαθμίσει τις ιδιότητές τους, απαιτούνται διαδικασίες ανακύκλωσης για την διατήρηση σταθερής της ποιότητάς τους.

2.2 Πρότυπα και Πιστοποίηση Τεχνολογιών ΑΜ

Η αλματώδης ανάπτυξη των τεχνολογιών ΑΜ οδήγησε στην ανάγκη δημιουργίας διεθνών προτύπων για την τυποποίηση και πιστοποίηση των νέων και πολλά υποσχόμενων διαδικασιών βιομηχανικής παραγωγής. Η ανάπτυξη τέτοιων προτύπων είναι κρίσιμης σημασίας για την διάδοση και υιοθέτηση των νέων τεχνολογιών ΑΜ, καθώς αποτελούν την βάση για τη δημιουργία προϊόντων που ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες προδιαγραφές και είναι συμβατά με προϊόντα που παρέχονται από διαφορετικούς προμηθευτές οι οποίοι επιθυμούν την ίδια ποιότητα, απόδοση και εναλλαξιμότητα.

Επιπρόσθετα η ανάπτυξη προτύπων εξασφαλίζει την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την ποιότητα τόσο των διαδικασιών όσο και των προϊόντων. Η έλλειψη προτύπων έχει ως αποτέλεσμα, κάθε εταιρία που υιοθετεί τεχνολογίες ΑΜ, να διεξάγει τις δικές της δοκιμές για να διασφαλίσει την αξιοπιστία του εξοπλισμού και των τελικών προϊόντων, για τις οποίες απαιτείται επιπρόσθετος χρόνος και κόστος. Ενδεικτικά αναφέρεται ως παράδειγμα η απαίτηση δημιουργίας προτύπου που αφορά το λογισμικό διασύνδεσης και «επικοινωνίας» μεταξύ των διαφορετικών μηχανών ΑΜ.

Επίσης, κρίνεται επιβεβλημένη η ανάπτυξη προτύπων που αφορούν τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στις εν λόγω τεχνολογίες. Η επιτακτική ανάγκη ανάπτυξης τέτοιων προτύπων είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας σειράς από επιτροπές σε παγκόσμιο, σε εθνικό αλλά και σε περιφερειακό επίπεδο, οι κυριότερες των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια.

Επιτροπή ASTM F42

Η επιτροπή ASTM F42³ για τεχνολογίες ΑΜ συγκροτήθηκε το 2009 και απαρτίζεται από μέλη από όλο τον κόσμο. Τα μέλη της περιλαμβάνουν άτομα από τον ακαδημαϊκό χώρο, τη βιομηχανία (κατασκευαστές μηχανών ΑΜ και χρήστες) καθώς και κυβερνήσεις. Η επιτροπή έχει ήδη δημοσιεύσει λίστα με την βασική ορολογία ΑΜ, ως τμήμα του φιλόδοξου προγράμματος της για τυποποίηση.

Τεχνική Επιτροπή ISO (TC 261)

Σε μια προσπάθεια να τυποποιηθούν οι διαδικασίες ΑΜ σε παγκόσμια κλίμακα, ο οργανισμός ISO έχει δημιουργήσει μια τεχνική επιτροπή (TC 261)⁴ για να διεξάγει συζητήσεις

³ <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>

⁴ http://www.iso.org/iso/iso_technical_committee?commid=629086

σχετικά με την τυποποίηση των τεχνολογιών ΑΜ, σχετικά με τις διαδικασίες, τους όρους και τους ορισμούς, την εφοδιαστική αλυσίδα (υλικά και λογισμικό), τις διαδικασίες ελέγχων και δοκιμών καθώς και τις παραμέτρους ποιότητας. Οι εργασίες που διεξάγονται είναι ακόμα στα πρώιμα στάδια, ωστόσο είναι φανερό η απόπειρα προώθησης των ανωτέρω τεχνολογιών σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας. Σημειώνεται ότι από τον Ιούνιο του 2013 οι επιτροπές ISO/TC261 και ASTM F42 συμφωνήσαν για την από κοινού συνεργασία στην ανάπτυξη προτύπων ΑΜ καθορίζοντας συγκεκριμένο σχέδιο, κατευθυντήριες αρχές και την τυπική δομή Προτύπων ΑΜ όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3.

Support Action for Standardization in AM (SASAM)

Η Υποστηρικτική Δράση για τυποποίηση στις τεχνολογίες ΑΜ (SASAM - Support Action for Standardisation in Additive Manufacturing)⁵ υποκινήθηκε τον Σεπτέμβριο 2012 στα πλαίσια του 7^{ου} Προγράμματος Πλαισίου της ΕΕ, ως μία προσπάθεια για την ενσωμάτωση και τον συντονισμό των δραστηριοτήτων τυποποίησης τεχνολογιών ΑΜ στην Ευρώπη με στόχο την δημιουργία ενός Οργανισμού τυποποίησης (Scapolo, et al., Δεκέμβριος 2012).

Επιτροπή BSI

Στο Ηνωμένο Βασίλειο, το ίδρυμα BSI⁶ (British Standards Institution) αναπτύσσει πρότυπα για ΑΜ υπό την επιτροπή AMT / 8. Συνολικά, έχουν εκδοθεί 7 πρότυπα ενώ βρίσκονται υπό ανάπτυξη πέντε και αφορούν ορολογία, μεθόδους, διαδικασίες, υλικά και μεθόδους δοκιμών.

CEN / STAIR-AM

Η ομάδα εργασίας STAIR (STAndardization, Innovation and Research group) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για Τυποποίηση (CEN) συμπληρώνοντας το project SASAM (Support Action for Standardisation in Additive Manufacturing)⁷ του 7^{ου} Προγράμματος Πλαισίου, είχε ως αποστολή την συνεισφορά στην ανάπτυξη των τεχνολογιών ΑΜ μέσω της τυποποίησης των διαδικασιών τους σε Ευρωπαϊκό επίπεδο.

UNM 920

Στη Γαλλία, ο οργανισμός AFNOR / UNM αναπτύσσει πρότυπα για τεχνολογίες ΑΜ μέσω της επιτροπής UNM 920⁸. Έχουν δημοσιευτεί 3 πρότυπα σχετικά με ορολογία, τεχνικές προδιαγραφές για υλικά σε μορφή σκόνης, προδιαγραφές και έλεγχοι αποδοχής αντικειμένων κατασκευασμένων με διαδικασίες ΑΜ.

⁵ http://cordis.europa.eu/result/rcn/149448_en.html

⁶ <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/Home/Committee/50226095>

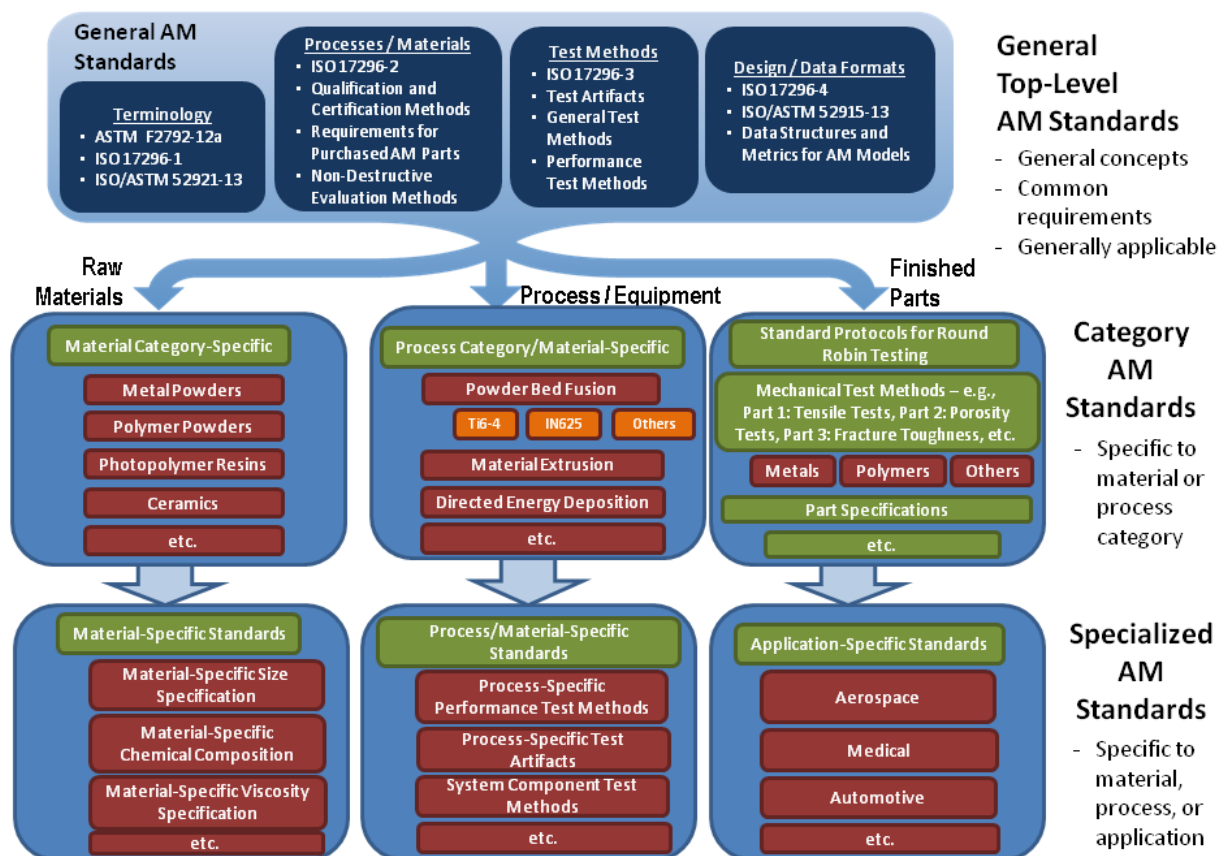
⁷ <http://www.cencenelec.eu/news/events/Pages/EV-2013-07.aspx>

⁸ http://www.unm.fr/main/core.php?pag_id=53&commission=249

America Makes & ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative (AMSC)

Τον Μάρτιο του 2016, συγκροτήθηκε το συντονιστικό όργανο AMSC⁹ με στόχο την επιτάχυνση της ανάπτυξης των προτύπων και προδιαγραφών των τεχνολογιών AM σύμφωνα με τις ανάγκες των ενδιαφερόμενων μερών, ώστε να διευκολυνθεί η υιοθέτηση των εν λόγω τεχνολογιών στην βιομηχανία. Σημειώνεται ότι σκοπός του AMSC δεν είναι η ανάπτυξη νέων προτύπων και προδιαγραφών, αλλά ο συντονισμός και η χάραξη στρατηγικής για την διαχείριση των ήδη υπαρχόντων προτύπων και των προτύπων που αναπτύσσονται. Επιπρόσθετα παρέχει συστάσεις και καθορίζει τους τομείς προτεραιότητας στους οποίους υπάρχει διαπιστωμένη ανάγκη για δημιουργία προτύπων. Η συγκρότηση του AMSC υλοποιήθηκε μεταξύ του Ινστιτούτου America Makes - National Additive Manufacturing Innovation Institute (εθνικός συνεργάτης της Αμερικής σε θέματα AM και 3D Printing) και του Ινστιτούτου American National Standards Institute –ANSI (Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων της Αμερικής).

Structure of AM Standards



Εικόνα 5 Η τυπική δομή των Προτύπων AM όπως συμφωνήθηκε μεταξύ ASTM και ISO τον Ιούλιο του 2013.

⁹ https://ansi.org/standards_activities/standards_boards_panels/amsc/Default.aspx

2.3 Εναλλακτική Ορολογία Τεχνολογιών AM

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστών και του αριθμητικού ελέγχου επέτρεψε την ανάπτυξη της νέας κατηγορίας τεχνολογιών μορφοποίησης, που περιγράφεται στην παρούσα μελέτη με τον όρο Additive Manufacturing (Προσθετικής Κατασκευής). Ο όρος AM καθιερώθηκε σταδιακά για την περιγραφή αυτής της σχετικά νέας ομάδας κατασκευαστικών τεχνολογιών και μεθόδων παραγωγής, γιατί προσδιορίζει το ουσιαστικό κοινό γνώρισμα όλων αυτών των τεχνολογιών, το οποίο είναι η κατασκευή αντικειμένων μέσω διαδικασιών ελεγχόμενης πρόσθεσης υλικού σε στρώματα. Ο όρος AM υιοθετήθηκε και από την τεχνική επιτροπή ASTM F42, που όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, συγκροτήθηκε για να αναπτυχθούν πρότυπα και προδιαγραφές για τις τεχνολογίες AM.

Ωστόσο, επειδή οι νέες αυτές κατασκευαστικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν μεγάλη ποικιλία διαφορετικών ειδών υλικών (φωτοπολυμερή, μέταλλα, θερμοπλαστικά πολυμερή, κεραμικά ή χαρτί) σε διάφορες μορφές (υγρή, σε κόκκους, νήματα ή φύλλα) καθώς και μεγάλη ποικιλία μηχανών και διαδικασιών έως την παραγωγή του τελικού προϊόντος, υπάρχει και ποικιλία διαφορετικών όρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί του AM. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο όρος Layer-based Manufacturing (Στρωματική Κατασκευή) θεωρείται συνώνυμος του όρου AM καθώς οι πρώτες ύλες διαμορφώνονται συνήθως σε λεπτά στρώματα που προστίθενται σταδιακά μέχρι να «χτιστεί» το αντικείμενο. Αντίστοιχα ο όρος Additive Fabrication διαδόθηκε από τον Terry Wohlers¹⁰, ο οποίος είναι πολύ γνωστός για τις ετήσιες εκθέσεις που δημοσιεύει και αφορούν τις εξελίξεις και τις εφαρμογές των τεχνολογιών AM στην βιομηχανία. Παρόλα αυτά, ο όρος «Fabrication» δεν είναι ιδιαίτερα αποδεκτός από πολλούς επαγγελματίες καθώς υπονοεί ότι το αντικείμενο είναι ακόμα «πρωτότυπο» και όχι τελικό προϊόν.

Ένας άλλος διαδεδομένος όρος που χρησιμοποιείται είναι Freeform Fabrication ή Solid Freeform Fabrication, με τον οποίο δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ικανότητα κατασκευής αντικειμένων με πολύπλοκα γεωμετρικά σχήματα. Ουσιαστικά με τον όρο αυτό τονίζεται ότι το σχήμα και η πολυπλοκότητα του υπό κατασκευή αντικειμένου δεν έχει καμία σημασία και καμία επίπτωση στην διαδικασία κατασκευής (για παράδειγμα δεν επηρεάζει το χρόνο κατασκευής).

Συχνά επίσης χρησιμοποιούνται οι όροι Stereolithography και 3D Printing (Τρισδιάστατη Εκτύπωση), οι οποίοι αρχικά περιέγραφαν συγκεκριμένες μηχανές που είχαν κατασκευαστεί και χρησιμοποιούνταν από την Αμερικανική εταιρία 3D Systems και από ερευνητές του MIT

¹⁰ Wohlers TT (2009) Wohlers report 2009: rapid prototyping & tooling state of the industry. Annual worldwide progress report. Wohlers Associates, Detroit, MI

αντίστοιχα. Με τους όρους αυτούς υποδηλώνεται ότι μία ήδη υπάρχουσα 2D διαδικασία (Lithography και Printing) επεκτείνεται και στις τρεις διαστάσεις. Το γεγονός ότι οι περισσότεροι άνθρωποι είναι απόλυτα εξοικειωμένοι με την τεχνολογία της δυσδιάστατης εκτύπωσης, η ιδέα της εκτύπωσης ενός τρισδιάστατου αντικειμένου προξενεί ιδιαίτερη αίσθηση. Μάλιστα θεωρείται ότι ο όρος 3D Printing (3DP) θα επικρατήσει τελικώς και θα είναι ο πιο συνηθισμένος με τον οποίο θα περιγράφονται οι τεχνολογίες AM.

Alternative Names	Additive Technologies
3D Printing (3DP)–Global	Direct metal laser sintering (DMLS)
3D Rapid Manufacturing–Global (historic)	Selective laser melting (SLM)
3D Direct Digital Manufacturing (DDM)–USA	Electron beam melting (EBM)
Freeform Fabrication (FFF)–USA	Fused deposition modeling (FDM)
Solid Freeform Fabrication (SFF)–USA	Stereolithography (SLA)
Generative Manufacturing–Germany	Selective laser sintering (SLS)
eManufacturing–Germany	Laminated object manufacturing (LOM)
Constructive Manufacturing–Germany	Powder bed and inkjet head 3D printing
3D Additive Layer Manufacturing (ALM)–EADS	Plaster-based 3D printing (PP)

Εικόνα 6 Εναλλακτικές Ορολογίες των Τεχνολογιών AM

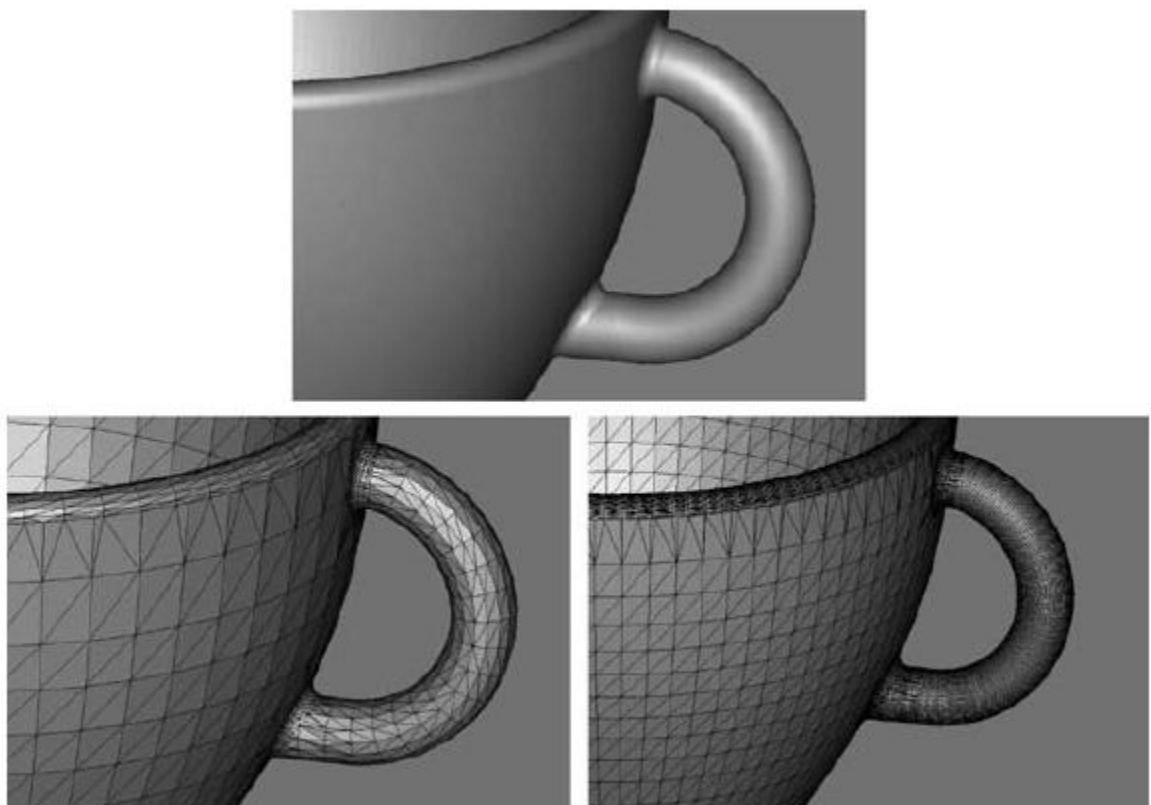
2.4 Τύποι Αρχείων Μηχανών AM

Είναι φανερό ότι οι τεχνολογίες AM στηρίζονται αποκλειστικά στην χρήση των H/Y και των συστημάτων τρισδιάστατης στερεής μοντελοποίησης (CAD). Η εξέλιξη των συστημάτων CAD επιτρέπει την σχεδίαση και μοντελοποίηση στερεών σωμάτων, οποιασδήποτε γεωμετρίας, με μεγάλη αξιοπιστία. Όλα τα εμπορικά λογισμικά CAD παρέχουν την δυνατότητα εξαγωγής αρχείων δεδομένων που χρησιμοποιούνται από τις μηχανές AM, καθώς η μόνη πληροφορία που απαιτείται να έχουν τα αρχεία αυτά, είναι η εξωτερική γεωμετρική μορφή του υπό κατασκευή αντικειμένου.

2.4.1 Αρχεία Τύπου STL

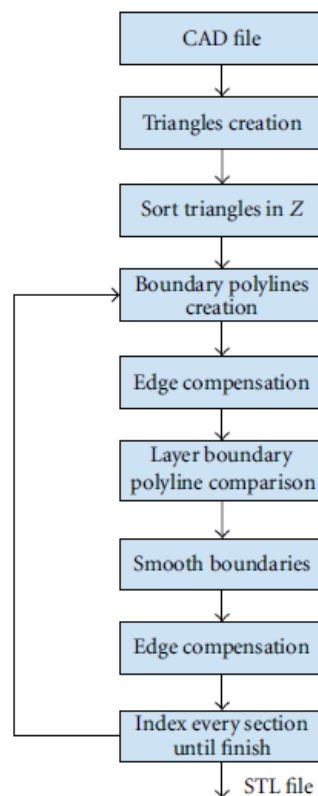
Τα αρχεία δεδομένων που δέχονται οι μηχανές AM, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους, είναι τύπου STL. Η ονομασία STL προέρχεται από την λέξη STereoLithography, που ήταν ουσιαστικά και η πρώτη εμπορική διαδικασία AM που διατέθηκε από την εταιρία 3D Systems το 1987. Σήμερα προτείνεται η ονομασία να ερμηνεύεται ως Surface Tessellation Language ή ως Standard Triangulation Language. Πρόκειται ουσιαστικά για πολυεδρικό πρότυπο (facet format) στο οποίο οι επιφάνειες του τρισδιάστατου μοντέλου

προσεγγίζονται μέσω τριγώνων (Εικόνα 8), κατά την απλούστερη δηλαδή *πολυεδρική προσέγγιση/ψηφιδωτή αναπαράσταση* (tessellated modeling). Τα αρχεία STL χρησιμοποιούν στοιχειώδη επίπεδα και για αυτόν τον λόγο δεν μπορούν να αναπαραστήσουν καμπύλες επιφάνειες, παρά μόνο κατά προσέγγιση. Η αύξηση του αριθμού των στοιχειωδών τριγώνων επιτρέπει καλύτερη προσέγγιση, αλλά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του αρχείου. Συνεπώς, οι σχεδιαστές πρέπει να εξισορροπήσουν τις απαιτήσεις ακρίβειας με τις ανάγκες ευχρηστίας ώστε να κατασκευάσουν ένα χρήσιμο αρχείο. Σημειώνεται ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των τριγώνων τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια και η προσέγγιση στο πραγματικό αντικείμενο. Καθώς πρόκειται για ένα απλό μοντέλο επιφανειών, το αρχείο STL δεν περιέχει επιπλέον πληροφορίες που αφορούν στο χρώμα των επιφανειών, το υλικό ή τις κατασκευαστικές ανοχές.. Τα αρχεία STL διαδοθήκαν λόγω της εύκολης μαθηματικής περιγραφής μιας πολύπλευρης επιφάνειας και λόγω της δημοσίευσης του STL format σε πρώιμο στάδιο. Η ταχεία εξάπλωση αυτής της μορφής αρχείου επισπεύσθηκε, έτσι ώστε σχεδόν κάθε σύστημα CAD και κάθε μηχανή AM να υποστηρίζει αυτόν τον τύπο αρχείου.



Εικόνα 7 Μετατροπή 3D Μοντέλου CAD σε αρχείο STL. Ακρίβεια μοντέλου ανάλογα με χρήση διαφορετικού ύψους ακμής τριγώνων.¹¹

¹¹ I. Gibson, D. W. Rosen , B. Stucker, “**Additive Manufacturing Technologies- Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**”, Springer, pp 343



Εικόνα 8 Διάγραμμα Ροής Δημιουργίας Αρχείου STL¹²

Ο τύπος αρχείου STL εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα που αφορούν κυρίως το πλεόνασμα και την μη αποδοτική οργάνωση των δεδομένων. Πλεονασματική πληροφορία αποτελεί η παράθεση του κάθετου διανύσματος, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι ακολουθείται ο κανόνας του δεξιού χεριού κατά την καταγραφή των τριγώνων. Αντίστοιχα κάθε κορυφή εμφανίζεται στο αρχείο τόσες φορές όσες και το τρίγωνα για το οποία είναι κοινή. Και σε αυτή την περίπτωση η κορυφή θα μπορούσε να αποθηκευθεί μία φορά και να υπάρξουν οι αντίστοιχοι δείκτες στα τρίγωνα, λύση που θα μείωνε σημαντικά το μέγεθος του αρχείου, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι ακολουθούνται οι προαναφερθέντες κανόνες κατά τη εξαγωγή των τριγώνων.

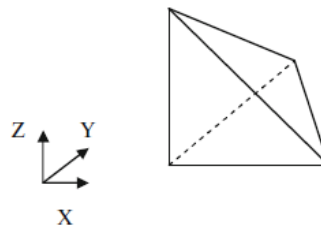
Επιπρόσθετο μειονέκτημα αποτελεί η απουσία οποιασδήποτε άμεσης πληροφόρησης για την τοπολογία των τριγώνων, πληροφορία η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την πιθανή ανασύνθεση των επιφανειών του 3D μοντέλου. Η ταξινόμηση των τριγώνων σε επιφάνειες διευκολύνει σημαντικά τόσο κατά τον τεμαχισμό όσο και τον έλεγχο των STL μοντέλων.

¹² Kaufui V.Wong and Aldo Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing”, ISRN Mechanical Engineering Volume 2012, pp.4

Τέλος, μειονέκτημα του STL αποτελεί η απουσία κατασκευαστικών δεδομένων, όπως ανοχών ακρίβειας και τραχύτητας η οποία θα διευκόλυνε σημαντικά την αυτόματη επιλογή κατασκευαστικών παραμέτρων.

Παρά τα εγγενή μειονεκτήματά του, το αρχείο STL διαθέτει το σημαντικό πλεονέκτημα της απλότητας. Η τριγωνική είναι η απλούστερη δυνατή πολυεδρική προσέγγιση και έτσι η ευκολότερη για τα συστήματα σχεδίασης. Στα περισσότερα μάλιστα συστήματα σχεδίασης είναι ενσωματωμένοι αλγόριθμοι ψηφιοποίησης με τρίγωνα για την φωτοσκίαση των μοντέλων και έτσι η εξαγωγή ενός STL αρχείου δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες, ενώ εξασφαλίζεται και η «ουδετερότητα» του προτύπου (neutral format) αφού δεν εξαρτάται από το λογισμικό σχεδίασης. Επιπλέον, η απλότητα αλλά και το πλεόνασμα πληροφοριών βοήθησε τουλάχιστον, κατά τα πρώτα χρόνια εφαρμογής των τεχνολογιών AM, τον έλεγχο και την επιδιόρθωση σφαλμάτων παραβίασης των προαναφερθέντων κανόνων στην εξαγωγή των STL μοντέλων. Τα τελευταία χρόνια βέβαια η ανάγκη ελέγχου και διόρθωσης των STL αρχείων έχει μειωθεί σημαντικά καθώς η επέκταση των τεχνολογιών AM ώθησε τις εταιρείες λογισμικού CAD στην βελτίωση των αλγόριθμων εξαγωγής τους. Το μέγεθος επίσης των αρχείων δεν αποτελεί πλέον ιδιαίτερο πρόβλημα λόγω της ταχύτατης ανάπτυξης των η/υ και της τεχνολογίας αποθήκευσης δεδομένων.

```
solid triangular_pyramid
  facet normal 0.0 -1.0 0.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 1.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 1.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.0 0.0 -1.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 1.0 0.0
      vertex 1.0 0.0 0.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.0 0.0 -1.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 1.0
      vertex 0.0 1.0 0.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.577 0.577 0.577
    outer loop
      vertex 1.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 1.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 1.0
    endloop
  endfacet
endsolid
```

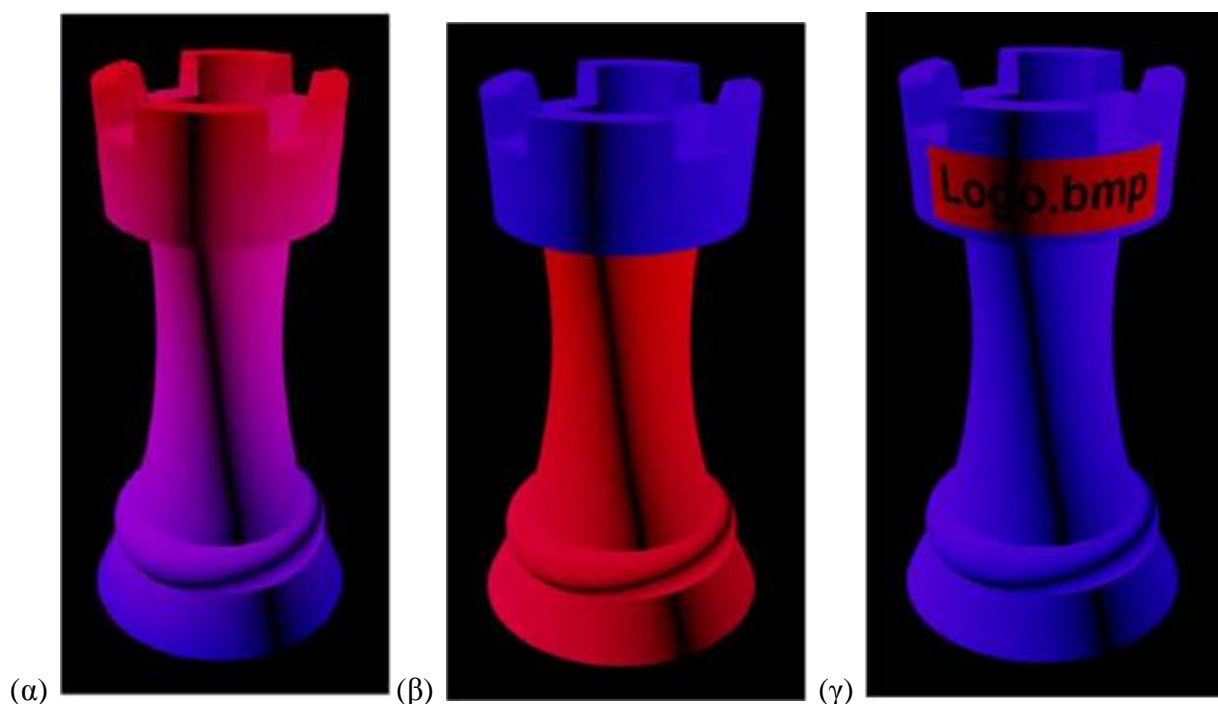


Εικόνα 9 Ορθογώνια Τριγωνική Πυραμίδα όπως περιγράφεται στο αρχείο STL¹³

¹³ I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, “Additive Manufacturing Technologies- Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing”, Springer, pp 344

2.4.2 Αρχεία Τύπου AMF

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τις τρεις τελευταίες δεκαετίες, ο τύπος αρχείου STL αποτελούσε το πρότυπο για την μεταφορά πληροφοριών μεταξύ σχεδιαστικών προγραμμάτων CAD και τεχνολογικού εξοπλισμού AM. Ωστόσο, η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών AM και η μετάβαση από την κατασκευή ομοιογενών σχημάτων αποτελούμενα από ένα υλικό, σε σύνθετες γεωμετρίες αποτελούμενες από πολλά διαφορετικά υλικά, με χρώμα καθώς και η χρήση υλικών Functionally Graded Material – FGM (υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από σταδιακή μεταβολή κατ'όγκο στην σύνθεση και στη δομή τους), οδήγησε στην ανάγκη για εξεύρεση μιας πιο ολοκληρωμένης τυποποιημένης μορφής αρχείου, το οποίο θα μπορούσε να υποστηρίξει τα νέα αυτά χαρακτηριστικά αλλά και να επιλύσει τα προβλήματα που παρουσιάζονταν από την χρήση του STL (Hod Lipson¹⁴).



Εικόνα 10 Γεωμετρία αποτελούμενη από (α) Graded Material –FGM (β)Multiple Materials (γ) Colors & Graphics

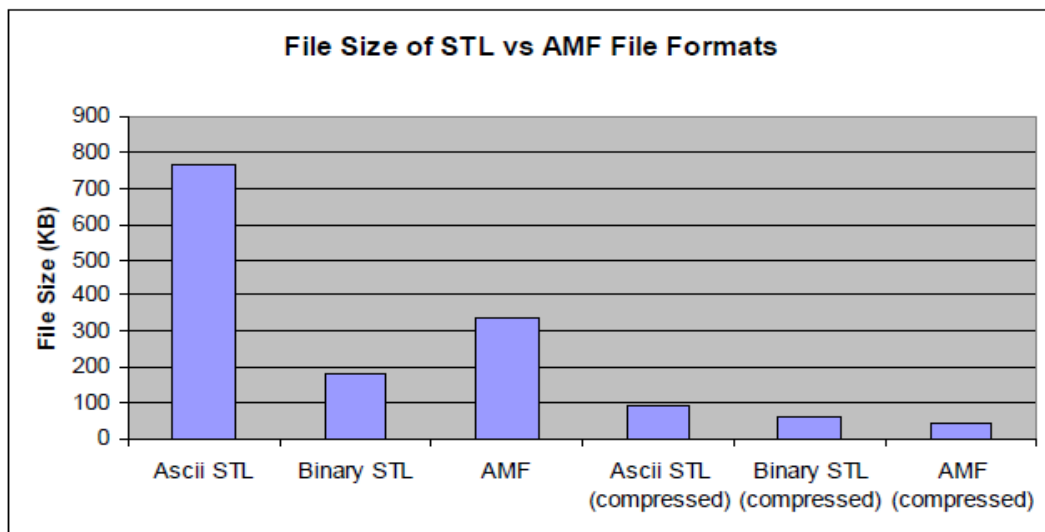
Ο νέος τύπος αρχείου ονομάστηκε Additive Manufacturing File Format (AMF) και με το πρότυπο ASTM F2915¹⁵ καθορίστηκαν οι προδιαγραφές που έπρεπε να πληροί ο νέος αυτός τύπος αρχείου. Σημειώνεται ότι το πρότυπο ASTM F2915 δημιουργήθηκε από την υποεπιτροπή F42.04 που υπάγεται στην επιτροπή ASTM F42. Η τελευταία, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, έχει ως βασικό σκοπό την τυποποίηση των τεχνολογιών AM. Το

¹⁴ <http://www.astmnewsroom.org/default.aspx?pageid=2539>

¹⁵ <http://www.astm.org/Standards/ISOASTM52915.htm>

πρότυπο ASTM F2915 έχει ως στόχο να παρέχει στους σχεδιαστές (αρχιτέκτονες, μηχανικούς, καλλιτέχνες και σε όσους ασχολούνται με την 3D σχεδίαση και εκτύπωση), την απρόσκοπτη μετάβαση από το σχέδιο στο τελικό εκτυπωμένο αντικείμενο, ανεξάρτητα από το είδος του λογισμικού και το είδος του εξοπλισμού ΑΜ που χρησιμοποιήθηκε.

Το αρχείο τύπου AMF είναι ένα ανοιχτό πρότυπο (open standard) για την περιγραφή αντικειμένων που πρόκειται να κατασκευαστούν με τεχνολογίες ΑΜ. Το επίσημο πρότυπο ASTM F2915 είναι μία μορφή που αποθηκεύεται σε πρότυπο XML και έχει σχεδιαστεί ώστε να επιτρέπει σε ένα οποιοδήποτε σύστημα CAD να περιγράφει το σχήμα και τη σύνθεση ενός 3D αντικειμένου προκειμένου να κατασκευαστεί σε οποιαδήποτε μηχανή ΑΜ. Μάλιστα, σε αντίθεση με το πρότυπο STL, το πρότυπο AMF έχει εγγενή υποστήριξη για το χρώμα, τα υλικά και τα πλέγματα. Το αρχείο AMF μπορεί να αναπαριστά ένα αντικείμενο, ή πολλαπλά αντικείμενα τοποθετημένα σε διάταξη αστέρα. Κάθε αντικείμενο περιγράφεται ως ένα σύνολο μη επικαλυπτόμενων όγκων. Κάθε όγκος περιγράφεται από ένα τριγωνικό πλέγμα που αναφέρεται σε ένα σύνολο σημείων (κορυφές). Οι κορυφές αυτές μπορεί να μοιράζονται μεταξύ όγκων που ανήκουν στο ίδιο αντικείμενο. Επιπλέον, το αρχείο AMF μπορεί να προσδιορίζει το χρώμα του κάθε όγκου, καθώς και το χρώμα του κάθε τριγώνου στο πλέγμα. Τέλος, ο εν λόγω τύπος αρχείου μπορεί να συμπίεζεται με τη μορφή συμπίεσης «zip» διατηρώντας όμως την επέκταση «.amf»¹⁶.



Εικόνα 11 Σύγκριση Μεγέθους Αρχείου STL & AMF

¹⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Additive_Manufacturing_File_Format

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<amf units="mm">
  <object id="0">
    <mesh>
      <vertices>
        <vertex>
          <coordinates>
            <x>0</x>
            <y>1.32</y>
            <z>3.715</z>
          </coordinates>
        </vertex>
        <vertex>
          <coordinates>
            <x>0</x>
            <y>1.269</y>
            <z>2.45354</z>
          </coordinates>
        </vertex>
        ...
      </vertices>
      <region>
        <triangle>
          <v1>0</v1>
          <v2>1</v2>
          <v3>3</v3>
        </triangle>
        <triangle>
          <v1>1</v1>
          <v2>0</v2>
          <v3>4</v3>
        </triangle>
        ...
      </region>
    </mesh>
  </object>
</amf>

```

Basic AMF Structure



Addresses vertex duplication and leaks of STL & Units!

Εικόνα 12 Η βασική Δομή Αρχείου AMF

Number of Triangles	STL	AMF (with normals)
20	0.102673	0.006777
80	0.032914	0.000788
320	0.008877	8.28E-05
1,280	0.001893	1.01E-05
5,120	0.000455	1.95E-06
20,480	1.13E-04	4.51E-07
81,920	2.81E-05	1.11E-07
327,680	7.03E-06	2.75E-08
1,310,720	1.76E-06	6.87E-09

Πίνακας 3 Σύγκριση Ακρίβειας Αρχείων STL & AMF¹⁷

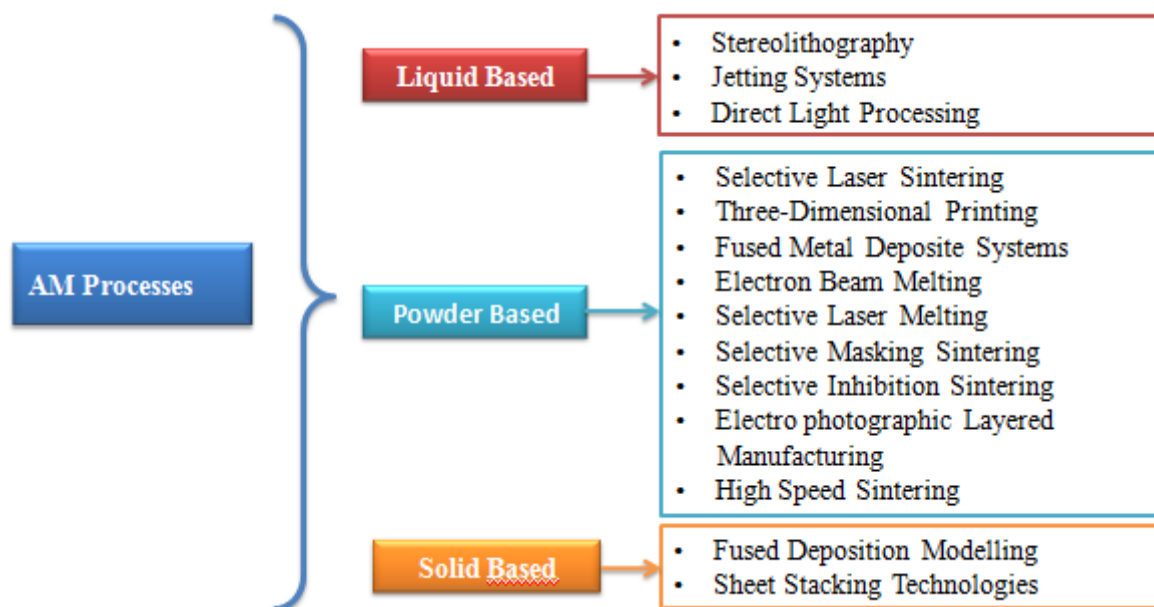
¹⁷ http://amf.wikispaces.com/file/view/AMF_V0.48.pdf

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΜ

3.1 Ταξινόμηση Τεχνολογιών AM

Το σύνολο των τεχνολογιών AM παρουσιάζουν αρκετά κοινά, γενικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Ωστόσο, η ανάπτυξη αλλά και η χρησιμοποίησή τους σε διάφορες εφαρμογές βασίζεται στις επιμέρους δυνατότητες που προσφέρει η εκάστοτε τεχνολογία, όπως αυτές διαμορφώνονται από τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας των αντικειμένων/κομματιών, τη χρησιμοποιούμενη φυσική διαδικασία, καθώς και την απόδοσή της (ταχύτητα κατασκευής, μηχανική αντοχή κλπ.). Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετοί τρόποι με τους οποίους μπορούν να ταξινομηθούν οι τεχνολογίες AM. Η πιο δημοφιλής προσέγγιση περιλαμβάνει την ταξινόμηση των τεχνολογιών σύμφωνα με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, όπως το αν η διαδικασία κατασκευής βασίζεται στην χρησιμοποίηση λέιζερ, τεχνικών ψεκασμού μελάνης (inkjet), μηχανισμών εξώθησης της πρώτης ύλης κλπ. Μια άλλη δημοφιλής προσέγγιση, είναι η κατηγοριοποίηση των ανωτέρω τεχνολογιών ανάλογα με τη μορφή της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης όπως φαίνεται στη Εικόνα 14 . Ωστόσο και οι δύο παραπάνω μέθοδοι ταξινόμησης παρουσιάζουν μειονεκτήματα καθώς κάποιες τεχνολογίες που ταξινομούνται μαζί φαίνεται να είναι παράξενος συνδυασμός (όπως να είναι στην ίδια κατηγορία Selective Laser Sintering και 3D Printing) και κάποιες τεχνολογίες που παράγουν παρόμοια αποτελέσματα (όπως Stereolithography και Objet) ταξινομούνται σε διαφορετικές κατηγορίες.

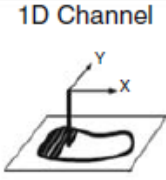
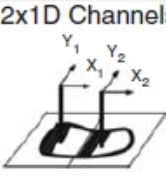
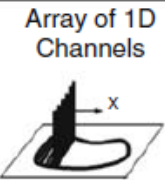
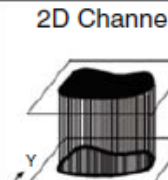


Εικόνα 13 Ταξινόμηση Κύριων Τεχνολογιών AM από Hopkinson & Dickens¹⁸

¹⁸ Hopkinson, Neil, Richard Hague, and Philip Dickens, eds. 2006. «Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age». John Wiley & Sons

Μια ολοκληρωμένη μέθοδος ταξινόμησης ως προς δύο διαστάσεις περιγράφηκε από τον Pham¹⁹ και παρουσιάζεται στην Εικόνα 15. Η πρώτη διάσταση αφορά το είδος της μεθόδου σχηματισμού και συνένωσης των διαδοχικών στρωμάτων. Έτσι παρατηρούμε ότι ένα στρώμα υλικού μπορεί να δημιουργηθεί είτε τμηματικά/σειριακά με τη χρήση ενός ή και περισσότερων μηχανισμών προσθήκης είτε ενιαία, χρησιμοποιώντας τεχνικές πλήρους αποτύπωσης. Η δεύτερη διάσταση αφορά τη μορφή της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης. Μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- Ρευστή πρώτη ύλη (Liquid Polymer)
- Διακριτά σωματίδια, κονιοποιημένη πρώτη ύλη (Discrete Particles – Powder)
- Λιωμένη πρώτη ύλη (Molten Material)
- Πρώτη Ύλη σε φύλλα (Solid Laminated Sheet)

	1D Channel	2x1D Channels	Array of 1D Channels	2D Channel
				
Liquid Polymer	SLA (3D Sys)	Dual beam SLA (3D Sys)	Objet	Envisiontech MicroTEC
Discrete Particles	SLS (3D Sys), LST (EOS), LENS Phenix, SDM	LST (EOS)	3D Printing	DPS
Molten Mat.	FDM, Solidscape		ThermoJet	
Solid Sheets	Solido PLT (KIRA)			

Εικόνα 14 Ταξινόμηση Τεχνολογιών AM από τον Pham (Ενδεικτικά έχουν κατηγοριοποιηθεί διαδεδομένες τεχνολογίες AM)

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι και με την ταξινόμηση του Pham υπάρχουν τεχνολογίες οι οποίες δεν μπορεί να ενταχθούν σε κάποια από τις κατηγορίες που προτείνει (για παράδειγμα τεχνολογίες που χρησιμοποιούν σύνθετα υλικά). Γενικότερα σε όλες τις μεθόδους ταξινόμησης παρουσιάζεται το παραπάνω φαινόμενο.

Στο παρόν κεφάλαιο κρίνεται σκόπιμο, η παρουσίαση των τεχνολογιών AM να γίνει με βάση την ταξινόμηση που έχει καθορίσει η επιτροπή ASTM F42 (αρμόδια επιτροπή για τον καθορισμό των προτύπων και της τυποποίησης των τεχνολογιών AM) μέσω της υποεπιτροπής F42.91. Σύμφωνα λοιπόν με το πρότυπο ISO/ASTM52900-15 (Standard Terminology for

¹⁹ Pham DT, Gault RS (1998) A comparison of rapid prototyping technologies. Int J Mach Tools Manuf 38(10-11):1257–1287

Additive Manufacturing – General Principles – Terminology) όλες οι τεχνολογίες AM ταξινομούνται σε επτά επιμέρους κατηγορίες²⁰ όπως φαίνονται και στον Πίνακα 4 και 5:

1. **Vat Photopolymerization** (Υγρό φωτοπολυμερές στερεοποιείται επιλεκτικά μέσα σε μία δεξαμενή μέσω πολυμερισμού που προκαλείται από παρουσία φωτός)
2. **Material Jetting** (Σταγονίδια πρώτης ύλης εναποτίθενται επιλεκτικά)
3. **Binder Jetting** (Υγρό συνδετικό υλικό εναποτίθεται επιλεκτικά ώστε να συνδεθεί η σκόνη της πρώτης ύλης)
4. **Material Extrusion** (Υλικό διανέμεται επιλεκτικά μέσω ακροφυσίου ή στομίου)
5. **Powder Bed Fusion** (Θερμική ενέργεια συνενώνει επιλεκτικά μέσω τήξης περιοχές σκόνης υλικού που είναι πάνω σε μία επιφάνεια τραπεζιού)
6. **Sheet Lamination** (Φύλλα υλικού συγκολλούνται για να σχηματίσουν ένα αντικείμενο)
7. **Directed Energy Deposition** (Εστιασμένη θερμική ενέργεια συνενώνει υλικά λιώνοντάς τα καθώς το υλικό εναποτίθεται)

Process	Definition	Material	Example Usage
Vat Photopolymerisation	Liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerisation.	Photopolymer and Ceramic	<ul style="list-style-type: none"> Mostly prototypes for fit, form and functionality. Consumer toys and electronics. Some guides, jigs and fixtures.
Material Jetting	Droplets of build material are selectively deposited.	Photopolymer and Wax	<ul style="list-style-type: none"> Casting and non-structural metallic parts. Some metal end-use parts. Marketing prototypes with colour.
Binder Jetting	Liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials.	Metal, Polymer and Ceramic	<ul style="list-style-type: none"> Tooling. Automotive covers/trim kits/dashboards. Consumer electronics.
Material Extrusion	Material is selectively dispensed through a nozzle or orifice.	Polymer	<ul style="list-style-type: none"> 3D objects with low structural property requirements. Tooling. Light and modular structures (hollow spheres).
Powder Bed Fusion	Thermal energy selectively fuses regions of a powder bed.	Metal, polymer, ceramic	<ul style="list-style-type: none"> 3D objects of polymers or metals. Tooling. Secondary/tertiary structures. Orthopaedic and dental implants. Mechanical joints/sub-components/ducting.
Sheet Lamination	A process in which sheets of material are bonded to form an object.	Hybrids, metallic and ceramic	<ul style="list-style-type: none"> Large parts. Tooling. Non-structural parts.
Directed Energy Deposition	A process in which focused thermal energy is used to fuse materials by melting as the material is being deposited.	Metal: powder and wire	<ul style="list-style-type: none"> Re-work of articles. 3D objects. End-use parts with low structural property requirements.

Πίνακας 4 Ταξινόμηση Τεχνολογιών AM σε 7 Κατηγορίες από την Επιτροπή ASTM F42

Σημειώνεται ότι μία αντίστοιχη ταξινόμηση σε 7 κατηγορίες παρουσιάζεται και στο βιβλίο των I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, “*Additive Manufacturing Technologies- Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*”. Σύμφωνα με το ανωτέρω βιβλίο, ο διαχωρισμός σε κατηγορίες γίνεται με βάση τον κοινό τύπο της αρχιτεκτονικής των μηχανών που χρησιμοποιούνται αλλά και με βάση την φυσική που χρησιμοποιείται για την μετατροπή των υλικών σε μορφή κατάλληλη για τη δημιουργία του τελικού αντικειμένου.

²⁰ <https://www.astm.org/Standards/ISOASTM52900.htm>

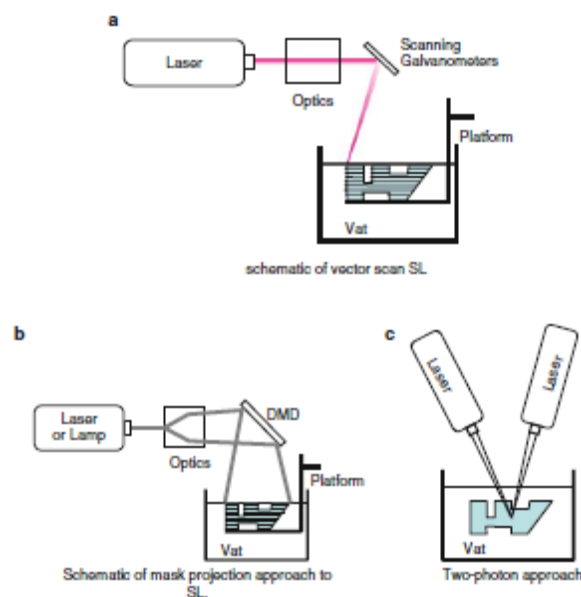
Classification	Technology	Description	Materials	Developers (Country)
Binder Jetting	3D Printing	Creates objects by depositing a binding agent to join powdered material	Metal, Polymer,	ExOne (US)
	Ink-jetting		Ceramic	VoxelJet (Germany)
	S-Print			3D Systems (US)
	M-Print			
Direct Energy Deposition	Direct Metal Deposition	Builds parts by using focused thermal energy to fuse materials as they are deposited on a substrate	Metal: powder and wire	DM3D (US)
	Laser Deposition			NRC-IMI (Canada)
	Laser Consolidation			Irepa Laser (France)
	Electron Beam Direct Melting			Trumpf (Germany) Sciaky (US)
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling	Creates objects by dispensing material through a nozzle to build layers	Polymer	Stratasys (US)
				Delta micro Factory (China)
				3D Systems (US)
Material Jetting	Polyjet	Builds parts by depositing small droplets of build material, which are then cured by exposure to light	Photopolymer,	Stratasys (US)
	Ink-jetting		Wax	LUXeXcel (Netherlands)
	Thermojet			3D Systems (US)
Powder Bed Fusion	Direct Metal Laser Sintering	Creates objects by using thermal energy to fuse regions of a powder bed	Metal, Polymer,	EOS (Germany)
	Selective Laser Melting		Ceramic	Renishaw (UK)
	Electron Beam Melting			Phenix Systems (France)
	Selection Laser Sintering			Matsuura Machinery (Japan)
				ARCAM (Sweden) 3D Systems (US)
Sheet Lamination	Ultrasonic Consolidation	Builds parts by trimming sheets of material and binding them together in layers	Hybrids,	Fabrisonic (US)
	Laminated Object Manufacture		Metallic, Ceramic	CAM-LEM (US)
VAT Photopolymerisation	Stereolithography	Builds parts by using light to selectively cure layers of material in a vat of photopolymer	Photopolymer,	3D Systems (US)
	Digital Light Processing		Ceramic	EnvisionTEC (Germany) DWS Srl (Italy) Lithoz (Austria)

Πίνακας 5 Ταξινόμηση Κυριότερων Τεχνολογιών ΑΜ σε 7 Κατηγορίες σύμφωνα με τη Επιτροπή ASTM F42²¹

²¹ Diego Manfredi, Flaviana Calignano, Manickavasagam Krishnan, Riccardo Canali,,Elisa Paola Ambrosio, Sara Biamino, Daniele Ugues,,Matteo Pavese and Paolo Fino "Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs)" pp7

3.2 Vat Photopolymerization

Η πρώτη κατηγορία τεχνολογιών AM έχει την ονομασία Vat Photopolymerization. Οι τεχνολογίες που περιλαμβάνονται σε αυτή τη κατηγορία, κάνουν χρήση είτε υγρών ρητινών που σκληραίνουν υπό την επίδραση ακτινοβολίας είτε φωτοπολυμερών ως κύρια υλικά. Τα περισσότερα φωτοπολυμερή αντιδρούν σε μήκη κύματος της υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας. Μετά την επίδραση της ακτινοβολίας, υφίσταται χημική αντίδραση, αποτέλεσμα της οποίας είναι τα εν λόγω υλικά να γίνονται στερεά. Αυτή η αντίδραση ονομάζεται φωτοπολυμερισμός. Σημειώνεται ότι τα φωτοπολυμερή αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και σύντομα εφαρμόστηκαν ευρέως σε πολλές εμπορικές εφαρμογές (επικαλύψεις και τεχνολογίες εκτύπωσης). Οι τύποι ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται είναι διάφοροι, όπως ακτίνες γ, ακτίνες X, δέσμες ηλεκτρονίων, υπεριώδης ακτινοβολία (UV) και σε κάποιες περιπτώσεις ακόμα και ορατό φως. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δύο πιο αντιπροσωπευτικές και διαδεδομένες τεχνολογίες της κατηγορίας Vat Photopolymerization, η Stereolithography και η Digital Light Processing.

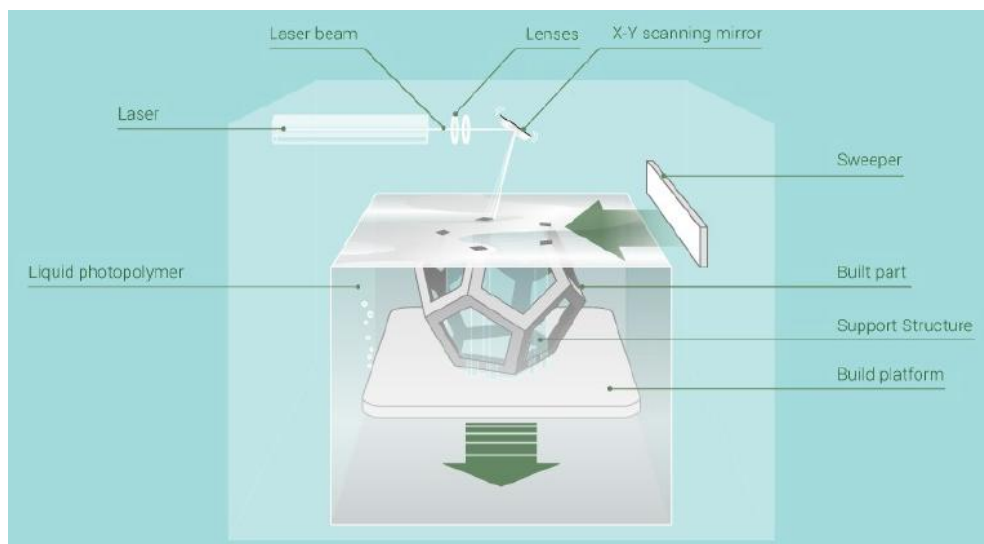


Εικόνα 15 Οι τρεις διαφορετικές παραλλαγές της κατηγορίας Vat Photopolymerization α) Vector Scan β)Mask Protection γ) Two Photon approach²²

²² I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, “Additive Manufacturing Technologies- Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing”, Springer, pp 62

3.2.1 Στερεολιθογραφία (Stereolithography) – SLA

Ο όρος *Στερεολιθογραφία* (Stereolithography - SLA) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1986 από τον Charles W. Hull για να περιγράψει μια μέθοδο (καθώς και την αντίστοιχη συσκευή) κατασκευής στερεών αντικείμενων μέσω διαδοχικής στερεοποίησης στρωμάτων φωτοπολυμερούς ρητίνης. Για τη στερεοποίηση των διαδοχικών διατομών χρησιμοποιείται υπεριώδης ακτινοβολία με τη μορφή εστιασμένης ακτίνας λέιζερ, η οποία σαρώνει την επιφάνεια μίας δεξαμενής με υγρή ρητίνη (Εικόνα 17). Πιο συγκεκριμένα, το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε μια βάση η οποία βυθίζεται σε ένα δοχείο που περιέχει υγρή εποξική ή ακρυλική ρητίνη. Αρχικά, η βάση τοποθετείται σε ελάχιστο βάθος μέσα στο υγρό (ίσο με το πάχος της διατομής που πρόκειται να κατασκευαστεί). Κατόπιν, μια κεφαλή laser υπεριωδών ακτίνων χαμηλής ισχύος, κινούμενη στους άξονες x και y, διαγράφει το σχήμα της διατομής (όπως προβλέπεται από το ψηφιακό σχέδιο) στερεοποιώντας τις αντίστοιχες περιοχές του στρώματος του πολυμερούς (το υπόλοιπο τμήμα του οποίου παραμένει υγρό). Ακολούθως, η βάση βυθίζεται μέσα στο υγρό πολυμερές κατά το πάχος της επόμενης διατομής, ενώ ένας κύλινδρος "απλώνει" και οριζοντιώνει το υγρό πάνω στο στερεοποιημένο τμήμα και η κεφαλή laser χαράσσει τη νέα διατομή πάνω στην πρώτη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου. Στη συνέχεια το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο, πλένεται, αφαιρούνται τα τυχόν στηρίγματά του και κατόπιν τοποθετείται σε ένα "φούρνο" υπεριωδών ακτίνων για τη τελική σκλήρυνση.



Εικόνα 16 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Στερεολιθογραφίας - SLA

Σημειώνεται ότι στη Στερεολιθογραφία απαιτείται η χρήση πλέγματος υποστήριξης για να σταθεροποιήσει το αντικείμενο στην πλατφόρμα κατασκευής, καθώς και για να αποτρέψει δομικές στρεβλώσεις ή την πιθανή καταστροφή του αντικειμένου από τα κινούμενα μέρη της μηχανής. Η υποστηρικτική δομή δημιουργείται αυτόματα κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας των τρισδιάστατων μοντέλων CAD και θα πρέπει να αφαιρεθεί με μεγάλη προσοχή από το ολοκληρωμένο προϊόν, διαδικασία η οποία επαφίεται στην ικανότητα του χειρίστη της μηχανής. Το πρώτο σύστημα Στερεολιθογραφίας SLA-1 σχεδιάστηκε από την 3D Systems και παρουσιάστηκε το Νοέμβριο του 1987 στην έκθεση AUTOFACT. Αντίστοιχα το πρώτο εμπορικό σύστημα Στερεολιθογραφίας τέθηκε σε λειτουργία το 1988. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται η υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και η καλή ποιότητα επιφανειών των αντικειμένων που δύναται να παράγει.

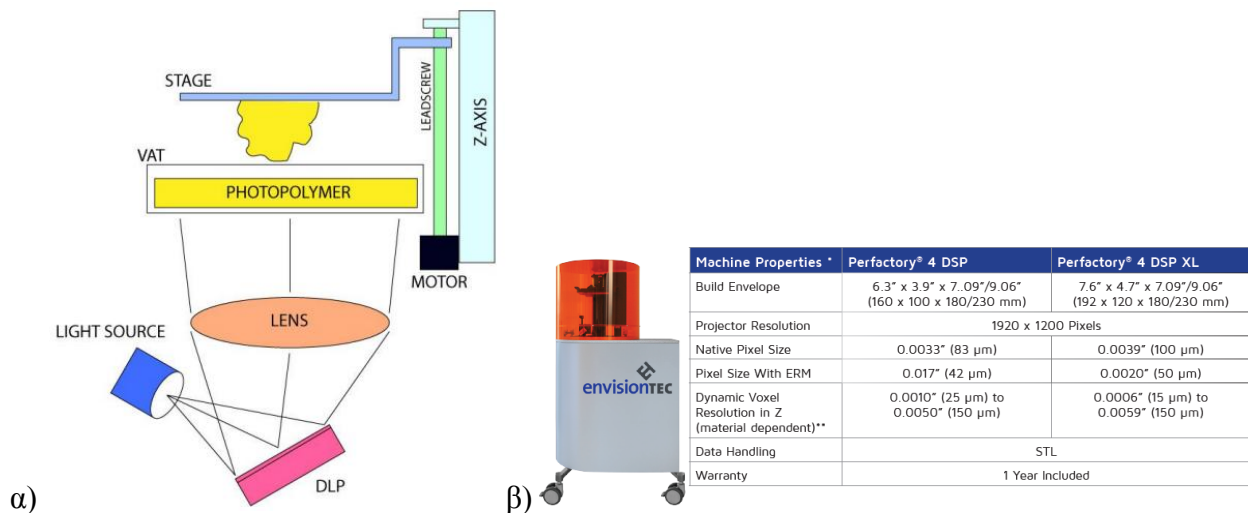


Εικόνα 17 3D Systems ProXTM 950 Stereolithography SLA Production System. Η πιο σύγχρονη και η μεγαλύτερη SLA μηχανή της 3D Systems Inc για βιομηχανική παραγωγή.

3.2.2 Digital Light Processing - DLP

Η τεχνολογία Digital Light Processing (DLP) είναι μία παρόμοια διαδικασία με την Στερεολιθογραφία που λειτουργεί με φωτοπολυμερή. Η βασική διαφορά έγκειται στην πηγή της ακτινοβολίας που χρησιμοποιεί καθώς σε αντίθεση με την Στερεολιθογραφία, στην DLP γίνεται χρήση πιο συμβατικών πηγών φωτός, όπως λάμπα ηλεκτρικού τόξου (arc lamp) με πάνελ υγρού κρυστάλλου ή με συσκευή παραμορφώσιμου καθρέπτη (Deformable Mirror Device – DMD). Η δέσμη της ακτινοβολίας, εφαρμόζεται σε ολόκληρη την επιφάνεια της δεξαμενής που είναι η φωτοπολυμερής ρητίνη σε ένα μόνο πέρασμα, καθιστώντας έτσι την διαδικασία πολύ γρηγορότερη έναντι της SLA. Επιπρόσθετα στην DLP απαιτείται ρηχή δεξαμενή φωτοπολυμερούς παράγοντας έτσι λιγότερα απόβλητα και μειώνοντας το κόστος της

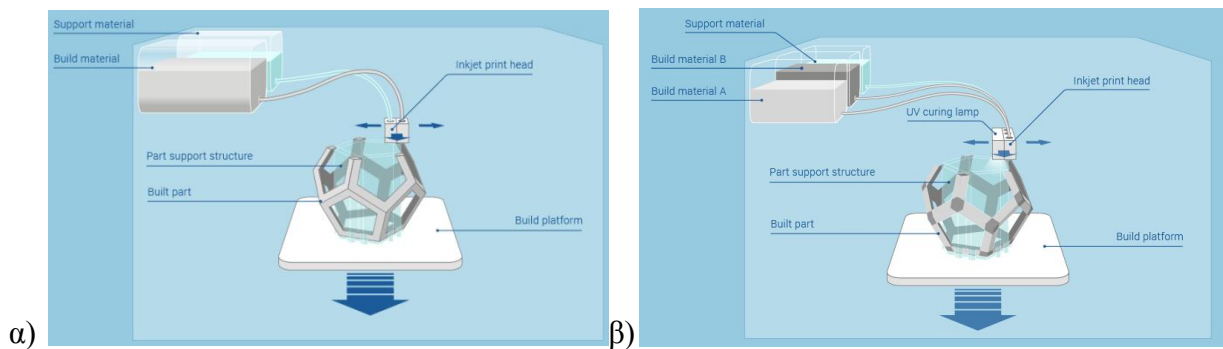
διαδικασίας. Αντίστοιχα με την SLA, η DLP παράγει τελικά προϊόντα με εξαιρετική ακρίβεια και υψηλή ανάλυση. Επίσης απαιτούνται υποστηρικτικές δομές και επεξεργασία μετά την ολοκλήρωσή για την τελική διαμόρφωση του αντικειμένου. Σημειώνεται ότι η εταιρία EnvisionTec χρησιμοποιεί την εν λόγω διαδικασία στην σειρά μηχανών της Perfactory.



Εικόνα 18 α) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Digital Light Processing- DLP β) EnvisionTEC's Perfactory 4 Digital Shell Printer (DSP)

3.3 Material Jetting -MJ

Η δεύτερη κατηγορία τεχνολογιών AM φέρει την ονομασία Material Jetting (MJ) και μοιάζει με την διαδικασία της εκτύπωσης σε χαρτί με την βασική διαφορά, ότι σταγονίδια υγρής πρώτης ύλης, ψεκάζονται επιλεκτικά πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής (build platform). Οι μηχανές αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν κεφαλές εκτόξευσης υγρού υλικού το οποίο στερεοποιείται μόλις κρυώσει έχοντας δημιουργήσει ένα στρώμα. Τα στρώματα αυτά «χτίζονται» ένα-ένα με προσθετικό τρόπο και δημιουργούν το 3D μοντέλο. Για πολύπλοκες γεωμετρίες μαζί με το κύριο υλικό απαιτείται η προσθήκη υποστηρικτικού υλικού (συνήθως τύπου «jel» ή κερί) προς διευκόλυνση της διαδικασίας. Το υποστηρικτικό υλικό αφαιρείται είτε με το χέρι είτε με υψηλής ισχύος εκτόξευση νερού. Με τις τεχνολογίες MJ επιτυγχάνεται πολύ καλή ακρίβεια και καλό φινίρισμα επιφανειών. Ωστόσο τα υλικά που χρησιμοποιούνται (τύπου κερί) είναι περιορισμένα, τα τελικά αντικείμενα είναι σχετικά εύθραυστα και η διαδικασία είναι σχετικά αργή. Σε αυτήν την κατηγορία κυριότερη τεχνολογία είναι η Photopolymer Jetting (PJ).



Εικόνα 19 α) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Material Jetting β) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Photopolymer Jetting

3.3.1 Photopolymer Jetting - PJ

Η τεχνολογία Photopolymer Jetting (PJ) χρησιμοποιεί κεφαλές εκτύπωσης για επιλεκτική εκτόξευση υγρού φωτοπολυμερούς υλικού στην πλατφόρμα κατασκευής. Στη συνέχεια, το φωτοπολυμερές υλικό υπό την επίδραση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), που εκπέμπεται από μία λάμπα, στερεοποιείται επιτρέποντας την κατασκευή στρωμάτων το ένα πάνω στο άλλο. Τα αντικείμενα που παράγονται δεν χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία ενώ οι υποστηρικτικές δομές που απαιτούνται, οι οποίες είναι από διαφορετικό υλικό, αφαιρούνται με το χέρι. Στην Εικόνα 20 φαίνεται, μέσω της σχηματικής αναπαράστασης των τεχνολογιών MJ και PJ, ότι η διαφορά τους έγκειται στην χρήση φωτοπολυμερών υλικών στην PJ που απαιτούν την προσθήκη στη διάταξη μίας λάμπας υπεριώδους ακτινοβολίας. Σημειώνεται ότι η τεχνολογία Material Jetting είναι η μόνη τεχνολογία ΑΜ στην οποία μπορούν να συνδυαστούν διαφορετικά υλικά εκτύπωσης στο ίδιο 3D μοντέλο παρέχοντας τη δυνατότητα κατασκευής λειτουργικών εξαρτημάτων από διαφορετικά υλικά (multi-color , multi-material parts & Functionally Graded Materials). Με την τεχνολογία PJ επιτυγχάνεται πολύ καλή ακρίβεια και καλό φινίρισμα επιφανειών, αλλά λειτουργεί μόνο με φωτοπολυμερή υλικά τα οποία δεν είναι ανθεκτικά στο χρόνο. Συνεπώς τα τελικά αντικείμενα που παράγονται έχουν περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες και δεν είναι ανθεκτικά.

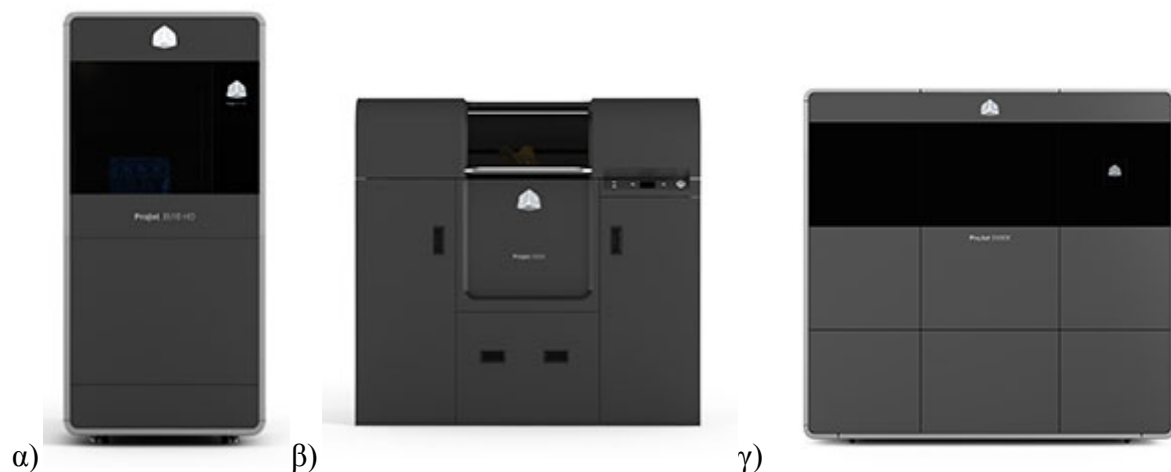
Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι αντιπροσωπευτικές μηχανές σε αυτήν την τεχνολογία διατίθενται εμπορικά από την 3D Systems και την Stratasys. Πιο συγκεκριμένα το 2000 η Ισραηλινή εταιρία Objet Geometries διέθεσε εμπορικά την μηχανή Quadra και το 2001 την QuadraTempo, οι οποίες εκτόξευαν φωτοπολυμερές μέσω κεφαλών εκτύπωσης χρησιμοποιώντας 1536 ακροφύσια. Τον Απρίλιο του 2012 η εταιρία Objet συνενώθηκε με την Stratasys και πλέον διατίθενται από την Stratasys πιο εξελιγμένες μηχανές, χρησιμοποιώντας ως

ονομασία της τεχνολογίας την Polyjet 3D Printing²³. Οι πιο πρόσφατες μηχανές Polyjet 3D Printers της Stratasys για βιομηχανική παραγωγή είναι Objet1000Plus, η Connex3 και η Stratasys J750.



Εικόνα 20 Μηχανές Polyjet 3D Printing από την Stratasys α) Objet1000Plus β) Stratasys J750 (μεγάλης χωρητικότητας και δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης 6 διαφορετικών υλικών) γ) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Objet Polyjet

Το 2003 η εταιρία 3D Systems ανέπτυξε ανταγωνιστική τεχνολογία αντίστοιχη της Objet και διέθεσε εμπορικά τη μηχανή InVision 3D Printer. Στη συγκεκριμένη μηχανή εφαρμόζονταν η τεχνολογία Multi-Jet Modeling που είχε αναπτυχθεί με την Thermojet. Η αντίστοιχη τεχνολογία της 3D Systems σήμερα φέρει το όνομα Multijet Printing (MJP)²⁴. Στην MJP γίνεται χρήση πιεζοηλεκτρικών κεφαλών εκτύπωσης για την εναπόθεση φωτοπολυμερών πλαστικών ρητινών ή κεριού. Οι τελευταίες μηχανές MJP της 3D Systems είναι οι σειρά Projet MJP 3600, η Projet 5000 και η Projet 5500X.



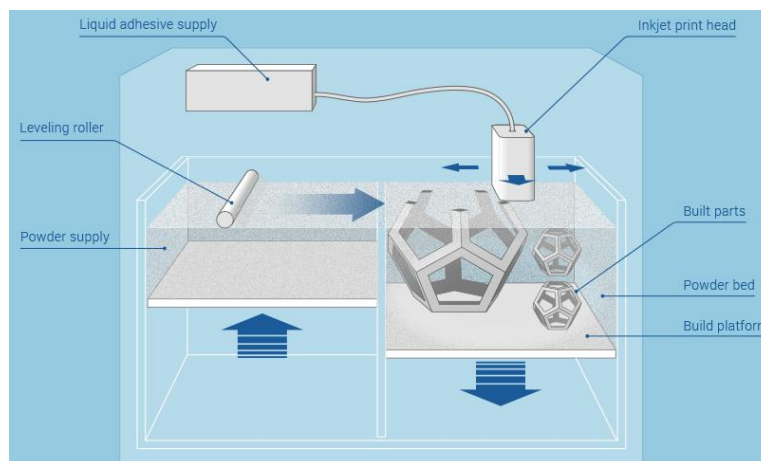
Εικόνα 21 Μηχανές Multijet Printing από την 3D Systems α) Projet MJP 3600 Series β) Projet 5000 γ) Projet 5500X

²³ <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/polyjet-technology>

²⁴ <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/multi-jet-printing/mjp>

3.4 Binder Jetting -BJ

Η τρίτη κατηγορία τεχνολογιών ΑΜ φέρει την ονομασία Binder Jetting (BJ). Η τεχνολογία αυτή ομοιάζει με την κατηγορία Material Jetting, με την βασική διαφορά ότι οι κεφαλές εκτύπωσης εκτοξεύουν ένα υγρό συνδετικό υλικό το οποίο εναποτίθεται επιλεκτικά, ώστε να συγκολληθεί σε λεπτές στρώσεις η σκόνη της πρώτης ύλης. Με την συγκόλληση των σωματιδίων της σκόνης της πρώτης ύλης πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής, το υπό κατασκευή αντικείμενο «χτίζεται» στρώμα με στρώμα. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατέρχεται και το επόμενο στρώμα σκόνης συγκολλάτε. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστεί το τελικό αντικείμενο. Δεν απαιτούνται υποστηρικτικές δομές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλήθος υλικών, αρκεί να είναι σε μορφή σκόνης (πούδρας). Σημειώνεται ότι η διαδικασία είναι αρκετά γρήγορη και φθηνή, με μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων υλικών (μέταλλα, πολυμερή, κεραμικά) ενώ μπορούν να παραχθούν και έγχρωμα αντικείμενα. Ωστόσο, τα τελικά αντικείμενα είναι εύθραυστα και έχουν περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία σε αυτήν την κατηγορία είναι η Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing)

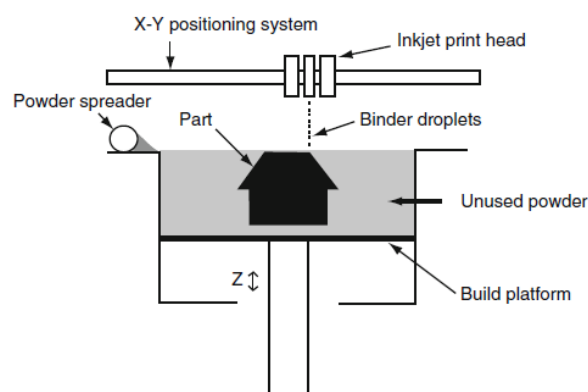


Εικόνα 22 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Binder Jetting

3.4.1 3D Printing – 3DP

Η τεχνολογία της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης (3D Printing) αναπτύχθηκε στο MIT στις αρχές του 1990, και πήρε το όνομά της από την ομοιότητα που παρουσιάζει με την εκτύπωση ψεκασμού (inkjet printing). Στην τρισδιάστατη εκτύπωση, αντί για μελάνι εναποτίθεται μέσω ψεκασμού (jetting) κάποιου είδους συγκολλητική ουσία (glue/binder) στην επιφάνεια μίας δεξαμενής, όπου βρίσκεται τοποθετημένη η πρώτη ύλη σε μορφή σκόνης ή πούδρας (powder). Η κατασκευή ενός αντικειμένου πραγματοποιείται μέσω της επαναληπτικής απόθεσης στρώσεων πρώτης ύλης και του επιλεκτικού ψεκασμού της συγκολλητικής ουσίας, προκειμένου να επιτευχθεί η συγκόλληση των κόκκων της σκόνης. Πιο συγκεκριμένα, τα αντικείμενα

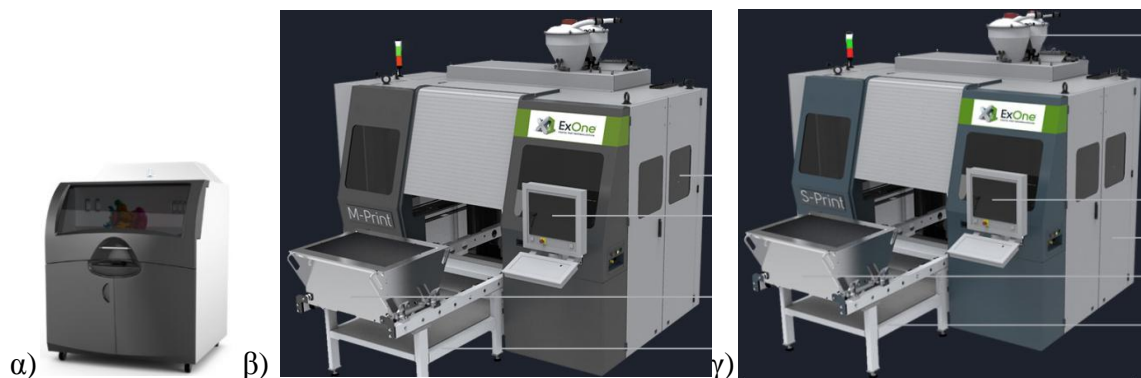
κατασκευάζονται πάνω σε μια βάση η οποία βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο που περιέχει την πρώτη ύλη υπό μορφή σκόνης. Κατά την εκκίνηση της διαδικασίας, η βάση κατέρχεται κατά το πάχος μιας διατομής και μια διάταξη τροφοδοσίας απλώνει πάνω της μια κατάλληλη ποσότητα σκόνης. Κατόπιν, μια κεφαλή ink-jet που κινείται κατά τους άξονες x, y ψεκάζει επιλεκτικά την συγκολλητική ουσία η οποία στερεοποιεί τη σκόνη, διαγράφοντας το επιθυμητό σχήμα της διατομής. Η περίσσεια σκόνης που απομένει χρησιμεύει για τη στήριξη του κατασκευαζόμενου αντικειμένου. Στη συνέχεια, η βάση κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής. Προστίθεται και πάλι η ανάλογη ποσότητα σκόνης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή, το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο και με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα καθαρίζεται από την περίσσεια σκόνης. Τα τελικά τεμάχια εμποτίζονται συνήθως σε κάποιο διάλυμα ενισχυτικού υλικού για την πλήρωση των πόρων μεταξύ των κόκκων, ενώ υπόκεινται και κάποια θερμική επεξεργασία προκειμένου να βελτιωθεί η αντοχή τους και το φινίρισμα της επιφάνειάς τους. Η τεχνική 3DP είναι υψηλής ταχύτητας ενώ χαρακτηρίζεται και ως οικονομική, καθώς δεν απαιτεί την παρουσία laser ή τοξικών υλικών που αυξάνουν το κόστος. Επιπρόσθετα, παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων από μία μεγάλη ποικιλία πρώτων υλών (μέταλλα, πολυμερή, κεραμικά, πλαστικά, βιο-υλικά, σύνθετα υλικά) ενώ θεωρείται ιδανική για παραγωγή έγχρωμων αντικειμένων. Ωστόσο τα παραγόμενα αντικείμενα είναι χαμηλής ακρίβειας, με μέτρια ποιότητα επιφανειών και με σχετικά αδρό φινίρισμα. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με την κατηγορία τεχνολογιών Powder Bed Fusion που θα αναλυθούν στην συνέχεια.



Εικόνα 23 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας 3D Printing

Η τεχνολογία 3DP διατέθηκε από το MIT σε διάφορες εταιρίες οι οποίες διέθεσαν εμπορικά μεγάλο αριθμό 3D Printers. Ενδεικτικά αναφέρεται η εταιρία Z Corp η οποία διέθεσε το 1996 το μοντέλο Z402 3D Printer στο οποίο χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη γύψος (plaster) ή πούδρα με βάση το άμυλο (starch) και ως κόλλα ένα διάλυμα με βάση το νερό. Έως το 2008

διατέθηκαν τα μοντέλα ZPrinter 450 και Spectrum 510 που είχαν τη δυνατότητα έγχρωμης 3D εκτύπωσης ενώ το 2012 η εταιρία εξαγοράστηκε από την 3D Systems. Η εταιρία 3D Systems σήμερα διαθέτει εμπορικά τη σειρά έγχρωμων 3D εκτυπωτών Projet CJP με μοντέλα το 260C, 360, 460Plus, 660Pro και 860Pro. Η εταιρία ExOne διαθέτει 3D εκτυπωτές στους οποίους χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη σκόνη μετάλλων ή άμμο και ως συγκολλητική ουσία ισχυρό πολυμερές υλικό με πιο σύγχρονους τον M-Print (ο μεγαλύτερος metal 3D printer της εταιρίας με θάλαμο διαστάσεων 800x500x400mm) και τον S-Print (sand casting 3D printer με θάλαμο διαστάσεων 800x500x400mm).



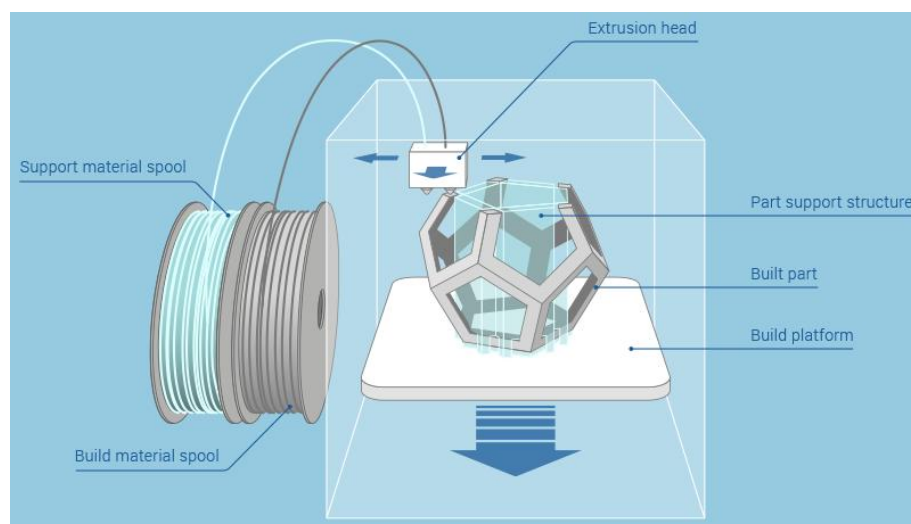
Εικόνα 24α) Έγχρωμος 3D εκτυπωτής Projet CJP860Pro της 3D Systems β) M-Print Metal 3D Printer της ExOne γ) S-Print Sand Casting 3D Printer της ExOne

3.5 Material Extrusion – ME

Η επόμενη κατηγορία τεχνολογιών ΑΜ έχει ονομασία Material Extrusion (ME) καθώς χρησιμοποιεί την τεχνική της εξώθησης για την κατασκευή των αντικειμένων. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη ύλη που βρίσκεται μέσα σε μία δεξαμενή, υπό την επίδραση δύναμης, πιέζεται και εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου. Εάν η πίεση που ασκείται είναι σταθερή, τότε το εξωθούμενο υλικό θα ρέει με σταθερό ρυθμό με αποτέλεσμα η διατομή του να παραμένει σταθερή. Η πρώτη ύλη που εξωθείται πρέπει να είναι σε ημι-στερεά κατάσταση όταν εξέρχεται από το ακροφύσιο. Στη συνέχεια πρέπει να στερεοποιηθεί πλήρως και να συνενωθεί με την υπόλοιπη δομή που έχει ήδη δημιουργηθεί. Ο έλεγχος της κατάστασης στην οποία βρίσκεται η πρώτη ύλη γίνεται είτε μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία του, είτε με χρήση χημικών αντιδράσεων (χρήση διαλυτών, παραγόντων σκλήρυνσης) που προκαλούν τη στερεοποίησή του. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία σε αυτήν την κατηγορία είναι η Fused Deposition Modeling (FDM).

3.5.1 Fused Deposition Modeling – FDM

Η τεχνολογία της κατασκευής μοντέλων με εναπόθεση υλικού (Fused Deposition Modeling- FDM) αναπτύχθηκε εμπορικά από την εταιρία Stratasys το 1990. Εναλλακτικές ονομασίες που χρησιμοποιούνται για την ίδια τεχνολογία είναι Fused Filament Fabrication (FFF) και Fused Layer Modeling/Manufacturing (FLM). Η μέθοδος FDM λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή της διαδοχικής στρωματικής κατασκευής, όπου κάθε στρώση παράγεται μέσω της εξώθησης θερμοπλαστικού υλικού σε υγρή κατάσταση. Η πρώτη ύλη τροφοδοτείται σε μορφή νήματος (filament) σε μια θερμαινόμενη κεφαλή, από όπου και εξωθείται σε θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξης της. Η κεφαλή βρίσκεται τοποθετημένη σε κατάλληλη διάταξη η οποία της επιτρέπει να κινείται σε δύο άξονες x και y έτσι ώστε να είναι δυνατή η ελεγχόμενη εναπόθεση του υλικού πάνω στη πλατφόρμα κατασκευής. Σημειώνεται ότι όλη η διάταξη λειτουργεί εγκλωβισμένη σε θερμαινόμενο θάλαμο, του οποίου η θερμοκρασία είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή εναπόθεση του υλικού στα υπάρχοντα στρώματα και να μειώνονται φαινόμενα παραμόρφωσης λόγω απότομης/ανομοιόμορφης ψύξης του πολυμερούς. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται επίσης μείωση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας που διοχετεύεται στην κεφαλή, προκειμένου να τηχθεί η πρώτη ύλη, και καθίσταται πιο αποδοτική και καλύτερα ελεγχόμενη η διαδικασία. Επίσης, η μέθοδος απαιτεί την κατασκευή υποστηρικτικών δομών, συνήθως από διαφορετικό υλικό που εναποτίθεται από μια δεύτερη κεφαλή. Για την δημιουργία του πλέγματος υποστήριξης έχουν δοκιμασθεί διάφορα υλικά όπως νάilon, πολυμερή και κεριά. Η εισαγωγή του πλαστικού ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene - Συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου) ως πρώτης ύλης, ώθησε εμπορικά την συγκεκριμένη μέθοδο, προσδίδοντας καλύτερη συνοχή μεταξύ των στρωμάτων από τα οποία αποτελείται ένα αντικείμενο και εν τέλει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.



Εικόνα 25 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Fused Deposition Modeling - FDM

Η μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, τα οποία έχουν να κάνουν με την μεγάλη ποικιλία υλικών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη, αλλά και των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων των παραγόμενων αντικειμένων που είναι υψηλότερης αντοχής σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο AM που έχει ως βάση πολυμερή υλικά. Ως επιπρόσθετο πλεονέκτημα της μεθόδου λογίζεται η ευκολία απομάκρυνσης της δομής υποστήριξης, καθώς έχουν γίνει εμπορικά διαθέσιμα υδατοδιαλυτά υλικά κατασκευής του πλέγματος στήριξης. Η επέκταση των επιλογών από πλευράς πρώτης ύλης με την ανάπτυξη νημάτων Polycarbonate (PC), σύνθετων πολυμερών/κεραμικών και μετάλλων χαμηλής τήξης, έχει διευρύνει σημαντικά τις δυνατότητες εφαρμογής της μεθόδου, μειώνοντας τους σχετικούς περιορισμούς που αφορούν την αντοχή και τις ιδιότητες. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συμπεριλαμβάνονται η σχετικά μικρή ταχύτητα, η χαμηλή πυκνότητα του υλικού, η μέτρια ποιότητα επιφάνειας με αδρό φινίρισμα καθώς και το γεγονός ότι τα τελικά αντικείμενα είναι ανισότροπα δηλαδή παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες ως προς τις διάφορες διευθύνσεις και κυρίως ως προς τον άξονα z.



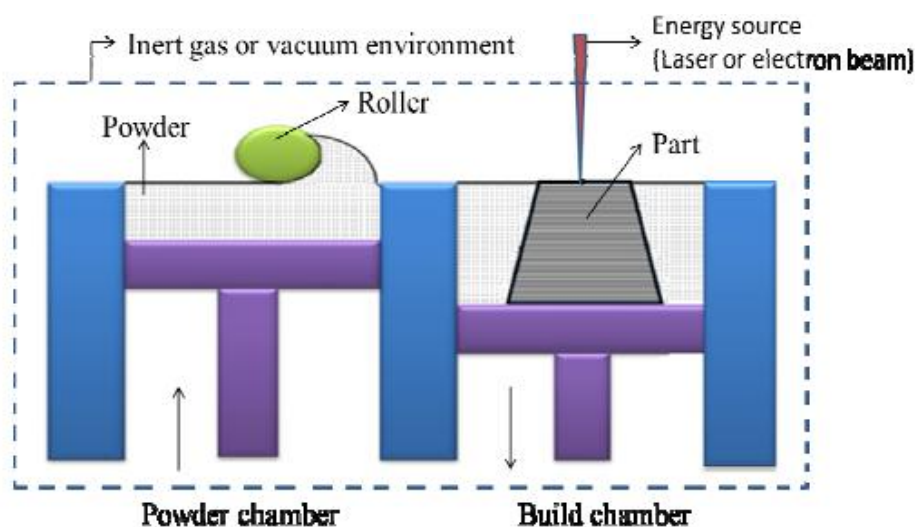
Εικόνα 26 3D Εκτυπωτές Τεχνολογίας FDM της Stratasys α) uPrint SE Plus (Build Size 203x203x152mm) β) Dimension Elite (Build Size 203x203x305mm) γ) Fortus 900mc (Build Size 914.4x609.6x914.4mm)

Οι μηχανές FDM κατασκευάζονται από την εταιρία Stratasys σε μία μεγάλη ποικιλία που περιλαμβάνει μηχανές μικρής κλίμακας, μικρού κόστους και με ελάχιστες μεταβλητές (μικρή ποικιλία υλικών κ.α.) έως πιο μεγάλες, πιο ευέλικτες και πιο εξελιγμένες οι οποίες είναι αναπόφευκτα υψηλού κόστους. Εμπορικά διατίθενται μηχανές για κατασκευή μοντέλων και πρωτοτύπων, για αξιολόγηση της ιδέας στα πρώτα στάδια του κύκλου ανάπτυξης ενός νέου προϊόντος (Μοντέλα Mojo, uPrint SE & uPrint SE Plus). Επίσης, διατίθενται μηχανές κατασκευής πρωτοτύπων ακριβείας για σχεδιαστικούς λόγους (Μοντέλα Dimension 1200es, Dimension Elite & Fortus 250mc). Τέλος, διατίθενται μηχανές για βιομηχανική παραγωγή τόσο

πρωτοτύπων ακριβείας όσο και τελικών προϊόντων (Μοντέλα Fortus 380/450mc & Fortus 900mc).

3.6 Powder Bed Fusion – PBF

Η επόμενη κατηγορία τεχνολογιών ΑΜ φέρει την ονομασία Powder Bed Fusion (PBF). Στις τεχνολογίες της κατηγορίας PBF, σκόνη υλικού που βρίσκεται πάνω σε μία επιφάνεια τραπέζιου, συνενώνεται επιλεκτικά μέσω τήξης υπό την επίδραση θερμικής ενέργειας. Βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών PBF είναι η ύπαρξη μίας ή περισσότερων πηγών θερμικής ενέργειας (laser ή δέσμη ηλεκτρονίων), η ύπαρξη μεθόδου ελέγχου της σύντηξης της σκόνης της πρώτης ύλης σε μία προδιαγεγραμμένη περιοχή κάθε στρώματος καθώς και η ύπαρξη ενός μηχανισμού για την προσθήκη και την εξομάλυνση των στρωμάτων της σκόνης. Η διαδικασία γίνεται σε αδρανή ατμόσφαιρα ή σε μερικό κενό για την θωράκιση της τηγμένης πρώτης ύλης (ειδικά αν πρόκειται για μέταλλα). Η πηγή ενέργειας σαρώνει κάθε στρώμα της ήδη απλωμένης σκόνης, λιώνοντάς την επιλεκτικά, σύμφωνα με το τμήμα της διατομής που λαμβάνεται από το ψηφιακό μοντέλο. Όταν ολοκληρωθεί η σάρωση του πρώτου στρώματος, η επιφάνεια στην οποία είναι απλωμένη η σκόνη του υλικού κατέρχεται μέσω εμβόλου, ενώ ο θάλαμος «αποθήκη» του υλικού ανέρχεται και μέσω ενός περιστροφικού μηχανισμού roller στρώνεται το επόμενο στρώμα σκόνης, συγκεκριμένου πάχους, το οποίο σαρώνεται εκ νέου από την πηγή ενέργειας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστεί το τελικό αντικείμενο το οποίο γίνεται ορατό με τη απομάκρυνση της περίσσειας σκόνης.



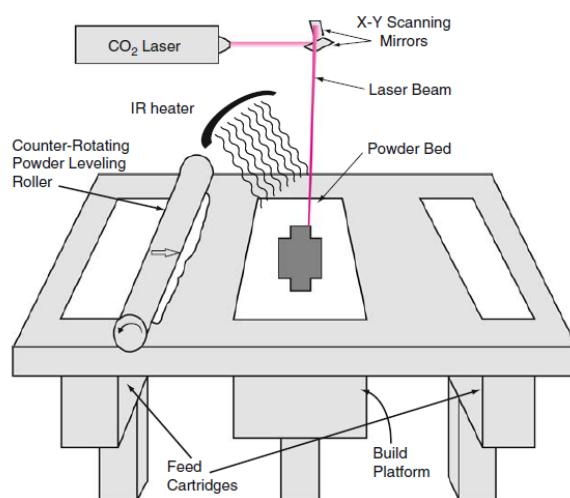
Εικόνα 27 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογιών Powder Bed Fusion - PBF

Σημειώνεται ότι όταν απαιτούνται υποστηρικτικές δομές, αποτελούνται από το ίδιο υλικό, αφαιρούνται με μηχανική κατεργασία και κατόπιν το τελικό αντικείμενο υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία (shot peening, polishing). Η σύντηξη της πρώτης ύλης στις τεχνολογίες PBF επιτυγχάνεται μέσω 4 διαφορετικών μηχανισμών, solid-state sintering, chemically-induced binding, liquid-phase sintering και full melting. Είναι αξιοσημείωτο ότι έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός διαφορετικών διαδικασιών PBF, με τις διαφορές τους να οφείλονται στον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτείται η σκόνη της πρώτης ύλης, στην διαδικασία της θέρμανσης, στο είδος της ενέργειας που χρησιμοποιείται, καθώς και στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Βασικό πλεονέκτημα της εν λόγω κατηγορίας είναι το μεγάλο εύρος των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Πρακτικά όλα τα υλικά τα οποία μπορούν να λιώσουν και να στερεοποιηθούν ξανά δύναται να χρησιμοποιηθούν. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εξής κατηγορίες υλικών: θερμοπλαστικά, σκόνες πολυαμιδίου, glass-filled polyamides, σκόνες πολυστυρενίου, ελαστομερή θερμοπλαστικά, σύνθετα, κεραμικά, βιο-συμβατά υλικά καθώς και μεγάλη ποικιλία μετάλλων. Η ακρίβεια και η ποιότητα της επιφάνειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες της διαδικασίας καθώς και το μέγεθος των σωματιδίων της σκόνης (όσο μικρότερο είναι το μέγεθος, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια αλλά αυξάνεται και η δυσκολία χειρισμού της πρώτης ύλης). Η μικρή ταχύτητα κατασκευής (χρόνος προθέρμανσης) αποτελεί βασικό μειονέκτημα της μεθόδου. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες PBF είναι η Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM) και Electron Beam Melting (EBM).

3.6.1 Selective Laser Sintering – SLS

Η τεχνολογία Selective Laser Sintering (SLS) αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Τέξας στις Ηνωμένες Πολιτείες από τον Carl Deckard το 1986 και διατέθηκε εμπορικά από την εταιρία DTM Corporation το 1992 (η DTM εξαγοράστηκε από την 3D Systems το 2001). Η διαδικασία χρησιμοποιεί ένα υψηλής ισχύος λέιζερ CO₂, προκειμένου να μπορεί να κατεργαστεί μια ποικιλία υλικών σε μορφή σκόνης/πούδρας (powder). Η δέσμη λέιζερ CO₂ λιώνει λεπτά στρώματα σκόνης τα οποία έχουν απλωθεί με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου σε όλη την επιφάνεια της πλατφόρμας. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε ένα κλειστό θάλαμο γεμάτο με αέριο άζωτο για την ελαχιστοποίηση της οξείδωσης και της υποβάθμισης των ιδιοτήτων της πρώτης ύλης. Η σκόνη της πρώτης ύλης διατηρείται σε αυξημένη θερμοκρασία ακριβώς κάτω από το σημείο τήξης και κάτω από το σημείο υαλώδους μετάβασης του κονιοποιημένου υλικού. Συσκευές θέρμανσης IR (υπέρυθρη ακτινοβολία) βρίσκονται τοποθετημένες τόσο πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής, ώστε να διατηρείται υψηλή η θερμοκρασία γύρω από το υπό κατασκευή αντικείμενο, όσο και πάνω από τα δοχεία τροφοδοσίας με σκόνη, ώστε να

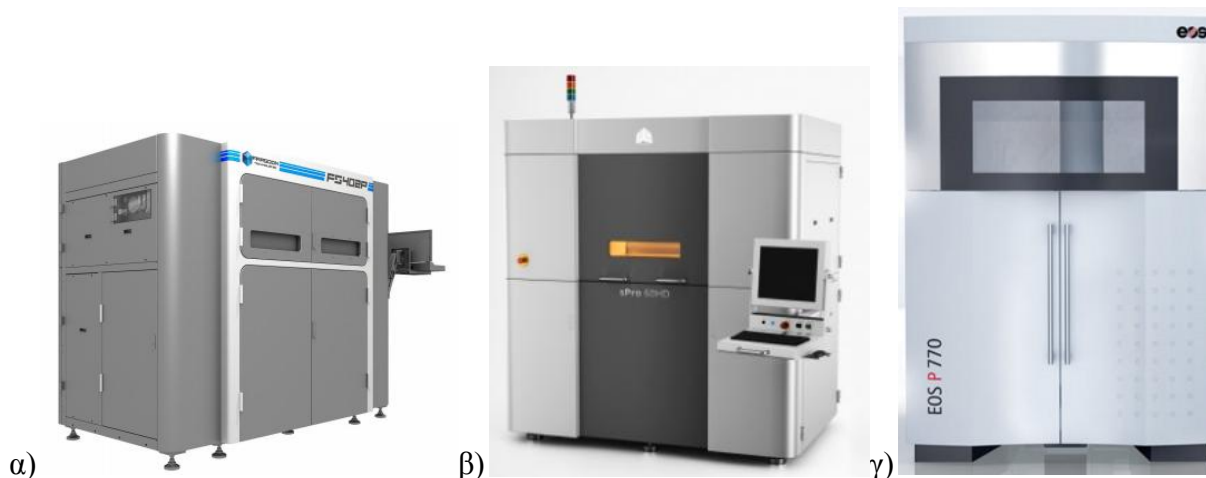
επιτυγχάνεται η προθέρμανση τη σκόνης πριν να απλωθεί επάνω στην πλατφόρμα κατασκευής. Σε κάποιες περιπτώσεις θερμαίνεται με χρήση αντιστάσεων και η πλατφόρμα κατασκευής. Η προθέρμανση της σκόνης και η διατήρηση υψηλής θερμοκρασίας μέσα στο θάλαμο είναι απαραίτητη ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απαιτούμενη ισχύς του Λέιζερ και κατ' επέκταση η απαιτούμενη ενέργεια ώστε να επιτευχθεί η σύντηξη της πρώτης ύλης. Μόλις σχηματιστεί και θερμανθεί το πρώτο στρώμα σκόνης, μία εστιασμένη ακτίνα λέιζερ CO₂ η οποία μετακινείται λιώνει την σκόνη και δημιουργεί μία διατομή. Η περίσσια σκόνη γύρω από την διατομή χρησιμεύει ως υποστήριγμα του υπό κατασκευή αντικειμένου. Μετά την δημιουργία του πρώτου στρώματος, η πλατφόρμα κατασκευής κατέρχεται (όσο το πάχος της διατομής) και μία νέα στρώση σκόνης στρώνεται με τη χρήση του περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Η ακτίνα λέιζερ σαρώνει τη διατομή στην νέα στρώση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστεί το τελικό αντικείμενο. Στη συνέχεια απαιτείται κάποιος χρόνος ώστε να μειωθεί ομοιόμορφα η θερμοκρασία του αντικειμένου πριν την έκθεση του στην φυσική ατμόσφαιρα. Τέλος αφαιρείται η περίσσια σκόνη και το αντικείμενο υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία για βελτίωση των ιδιοτήτων του.



Εικόνα 28 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Powder Bed Fusion – PBF

Στη συγκεκριμένη μέθοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγάλη ποικιλία υλικών όπως νάιλον, γυαλί, ελαστομερή, σύνθετα, κεραμικά καθώς και κράματα μετάλλων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η σχετικά υψηλή μηχανική αντοχή του τελικού αντικειμένου, καθώς και το γεγονός ότι δεν απαιτούνται δομές υποστήριξης (σε κάθε νέα στρώση παρέχεται στήριξη από τα προηγούμενα στρώματα ανεπεξέργαστων κόκκων). Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται η σχετικά μεγάλη τραχύτητα των επιφανειών του τελικού αντικειμένου, η χαμηλή ακρίβεια καθώς και η σχετικά πορώδης υφή του. Μεγάλη ποικιλία μηχανών SLS διατίθενται εμπορικά από διάφορες εταιρίες όπως η 3D Systems, η FARSOON

και η EOS . Ενδεικτικά αναφέρονται από την 3D Systems οι σειρές μηχανών PROX® SLS 500, sPro™140, sPro™230 και sPro™60HD, από την FARSOON οι σειρές 251P, 402P και 403P, από την EOS οι μηχανές EOSINT P 800 και EOS P 770.



Εικόνα 29 Μηχανές SLS για βιομηχανική χρήση α) FS 402P της FARSOON (Build Size 350x350x430 mm) β) sPro™60HD (Build Size 381 x 330 x 460 mm) της 3D Systems γ) EOSINT P 770 της EOS (Build Size 700 mm x 380 mm x 580 mm)

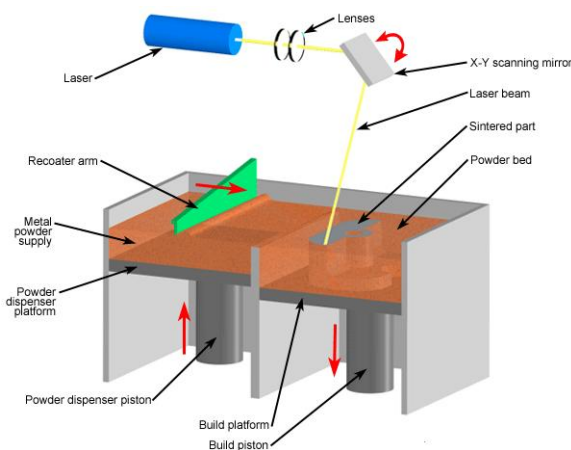
3.6.2 Direct Metal Laser Sintering – DMLS

Μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις των τεχνολογιών ΑΜ αποτέλεσε και η ανάπτυξη μηχανών ΑΜ, οι οποίες μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν μέταλλα σε μορφή σκόνης ως πρώτης ύλης, οι κόκκοι της οποίας δεν διαθέτουν κάποια επικάλυψη. Η τεχνολογία Direct Metal Laser Sintering (DMLS) αναπτύχθηκε το 1994 από κοινού από τις εταιρείες Rapid Prototyping Innovations (RPI) και EOS GmbH και αποτέλεσε την πρώτη εμπορική τεχνολογία ΑΜ για την παραγωγή μεταλλικών αντικειμένων χωρίς να απαιτούνται συνδεδετικά υλικά. Η DMLS βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της SLS, με μόνη διαφορά ότι στην πρώτη χρησιμοποιούνται λέιζερ υψηλότερης ισχύος. Στην DMLS, ένα λέιζερ υψηλής ισχύος, σαρώνει την επιθυμητή διατομή και συσσωματώνει απ' ευθείας τους κόκκους μετάλλου σε ένα στρώμα. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατασκευής κατέρχεται (όσο το πάχος της διατομής) και μία νέα στρώση σκόνης στρώνεται από τη διάταξη επίστρωσης. Η ακτίνα λέιζερ σαρώνει τη διατομή στην νέα στρώση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστεί το τελικό αντικείμενο. Με αυτόν τον τρόπο, το υπό κατασκευή αντικείμενο διατηρεί σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες της αρχικής πρώτης ύλης.

Η απουσία συνδεδετικού υλικού επικάλυψης των κόκκων βοηθά στην κατασκευή ενός μεταλλικού αντικειμένου αρκετά υψηλότερης πυκνότητας (>99%)²⁵ από αυτό που συνήθως

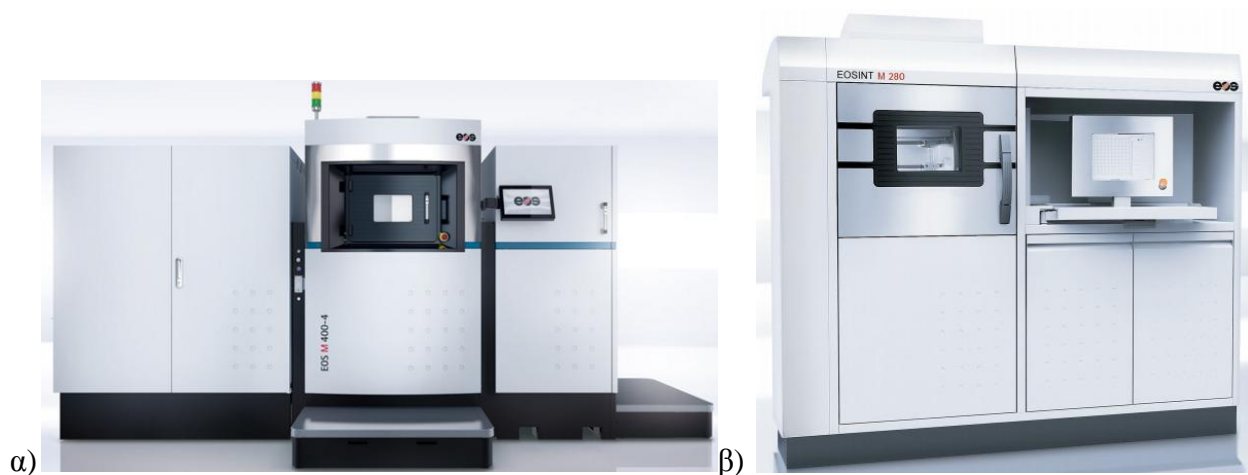
²⁵ <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-melting#read-advantages>

παράγεται με τη μέθοδο SLS (70%)²⁶. Σημαντικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου, είναι το υψηλότερο επίπεδο λεπτομέρειας, εξαιτίας της δυνατότητας επιλογής λεπτότερου πάχους στρώματος κατασκευής και πιο λεπτόκοκκης πρώτης ύλης, οι πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων και το γεγονός ότι αποτελεί κατάλληλη μέθοδο για κατασκευή υπερ-ελαφρών δομών (π.χ. cellular structures). Σε μία δεύτερη παραλλαγή της μεθόδου, η τροφοδοσία της πρώτης ύλης γίνεται μέσω της κινούμενης κεφαλής, τεχνική η οποία προσφέρει θεωρητικά τη δυνατότητα χρήσης περισσότερων από ένα υλικών. Η μέθοδος επιτρέπει την επιλογή πρώτης ύλης από μια ευρεία ποικιλία υλικών (κράματα χάλυβα, ανοξείδωτου χάλυβα, χαλκού, κοβαλτίου-χρωμίου, αλουμινίου, τιτανίου κ.α). Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν το υψηλό κόστος, η σχετικά μικρή ταχύτητα κατασκευής καθώς και η χαμηλή ποιότητα της επιφάνειας του τελικού αντικειμένου.



Εικόνα 30 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Η 3D Systems είναι η βασική εταιρία που διαθέτει εμπορικά μηχανές DMLS. Μοντέλα τέτοιων μηχανών είναι EOS M100, M290, M400, M400-4, EOSINT M280, PRECIOUS M080.

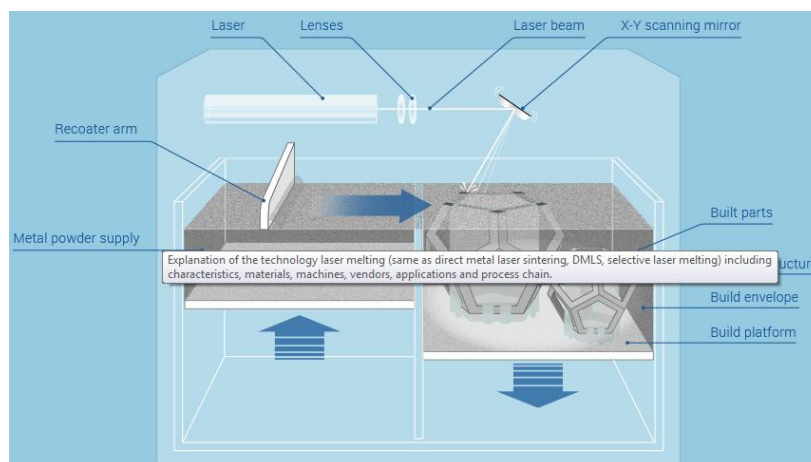


Εικόνα 31 Μηχανές DMLS της 3D Systems α) EOS M400-4 Quad-Laser System (Build Size 400 x 400 x 400 mm) β) EOSINT M280 (Build Size 250 mm x 250 mm x 325 mm)

²⁶ <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>

3.6.3 Selective Laser Melting – SLM

Η τεχνολογία Selective Laser Melting (SLM) αναπτύχθηκε το 1995 στο Ινστιτούτο Fraunhofer ILT της Γερμανίας σε συνεργασία με την F&S Stereolithographie GmbH. Το 2003 διατέθηκε εμπορικά η μηχανή SLM MCP Realizer 250 από την εταιρία MCP HEK GmbH (μετονομάστηκε σε MTT Technology GmbH, σημερινή SLM Solutions). Η SLM ουσιαστικά είναι ίδια μέθοδος με την DMLS και στηρίζεται και αυτή στην αρχή λειτουργίας της SLS. Η βασική διαφορά μεταξύ της SLM και των δύο άλλων τεχνολογιών είναι ότι στην SLM η σκόνη μετάλλου τήκεται πλήρως σε μία στερεή ομογενή μάζα (full melting), ενώ στις άλλες δύο πραγματοποιείται σύντηξη του μετάλλου σε συμπαγή μάζα (sintering) χωρίς να προηγηθεί πλήρη ρευστοποίηση. Επίσης, στην SLM γίνεται χρήση υψηλής ισχύος λέιζερ (Nd:YAG) για να επιτευχθεί η πλήρης τήξη της πρώτης ύλης, ενώ η όλη διαδικασία πραγματοποιείται σε θάλαμο με αδρανές αέριο (Αργό ή Άζωτο). Η υπόλοιπη διαδικασία δεν παρουσιάζει κάποια διαφοροποίηση σε σχέση με την DMLS. Η μέθοδος επιτρέπει την επιλογή πρώτης ύλης από μεγάλη ποικιλία υλικών (κράματα χάλυβα, ανοξείδωτου χάλυβα, κοβαλτίου-χρωμίου, αλουμινίου, τιτανίου κ.α). Βασικό πλεονέκτημα της DMLS, πέραν της ποικιλίας των υλικών, είναι η υψηλή πυκνότητα των τελικών αντικειμένων.



Εικόνα 32 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Selective Laser Melting (SLM)

Μεγάλος αριθμός εταιριών διαθέτουν εμπορικά μηχανές SLM. Ενδεικτικά αναφέρονται η 3D Micro PRINT (Μοντέλο DMP 60GP), Additive Industries (Μοντέλο MetalFAB1), CONCEPT LASER (Μοντέλα M1 Cusing, M2 Cusing, M2 Cusing Multilaser, M3 Linear, Mlab Cusing , Mlab Cusing R, X line 1000R, X line 2000R), RENISHAW (Μοντέλο AM 250), REALIZER (Μοντέλα SLM 50, 125 και 300I), SISMA (Μοντέλα MYSINT100 και MYSINT300), ReaLizer (Μοντέλα SLM 100, 125, 250, 50) και SLM Solutions (Μοντέλα SLM 125HL, 250HL, 280HL, 500HL).



α)



β)



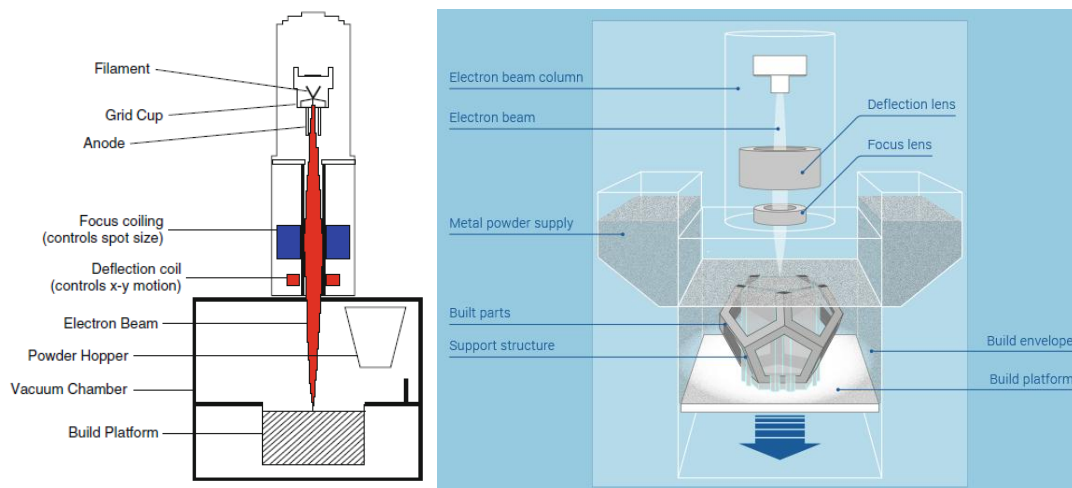
γ)

Εικόνα 33 Μηχανές SLM α) X LINE 2000R της CONCEPTLASER (Build Size 800 x 400 x 500 mm³) β) AM 250 της RENISHAW (Build Size 250 mm × 250 mm × 300 mm) γ) SLM 500 Four quad fiber lasers της SLM Solutions (Build Size 500 x 280 x 365 mm³)

3.6.4 Electron Beam Melting – EBM

Η τεχνολογία Electron Beam Melting (EBM)²⁷ αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Chalmers της Σουηδίας και διατέθηκε εμπορικά από την εταιρία Arcam AB το 2001. Κύριο χαρακτηριστικό της EBM και βασική διαφορά από τις SLS, DMLS & SLM είναι ότι χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων για την επιλεκτική σύντηξη των κόκκων της πρώτης ύλης υπό συνθήκες κενού. Η EBM είναι παρόμοια με την SLM με την μόνη διαφορά ότι η πηγή ενέργειας για την σύντηξη της πρώτης ύλης στην EBM είναι η δέσμη ηλεκτρονίων αντί για λέιζερ. Σημειώνεται ότι η Arcam AB στις συσκευές της χρησιμοποιεί συστήματα υψηλής ενέργειας δέσμης ηλεκτρονίων της τάξης των 3000W. Στην EBM θερμαινόμενο νήμα πυρακτώσεως

²⁷ Valmik Bhavar, Prakash Kattire, Vinaykumar Patil, Shreyans Khot, Kiran Gujar, Rajkumar Singh, 2014 «A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing» Kalyani Centre for Technology and Innovation (KCTI), Bharat Forge Ltd., Pune, India



Εικόνα 34 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας *Electron Beam Melting (EBM)*

βολφραμίου, εκπέμπει ηλεκτρόνια σε υψηλή ταχύτητα τα οποία ελέγχονται από δύο μαγνητικά πεδία. Το ένα μαγνητικό πεδίο λειτουργεί ως μαγνητικός φακός και εστιάζει τη δέσμη ηλεκτρονίων στην επιθυμητή διάμετρο και το δεύτερο εκτρέπει την εστιασμένη δέσμη στο επιθυμητό σημείο σάρωσης του στρώματος της πρώτης ύλης. Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που προσκρούουν πάνω στους κόκκους της πρώτης ύλης, μετατρέπεται σε θερμική, προκαλώντας το λιώσιμο και την συνένωση των κόκκων. Η σάρωση κάθε στρώματος γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής τάσης και μεγάλης ταχύτητας σάρωσης, προθερμαίνει το στρώμα της πρώτης ύλης, ενώ στο δεύτερο στάδιο, χαμηλής τάσης δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει με χαμηλή ταχύτητα το στρώμα λιώνοντας και συνενώνοντας τους κόκκους της πρώτης ύλης. Με την ολοκλήρωση της σάρωσης του πρώτου στρώματος, η πλατφόρμα κατέρχεται, εναποτίθεται το νέο στρώμα της σκόνης της πρώτης ύλης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να κατασκευαστεί το τελικό αντικείμενο. Η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα υπό κενό (10^{-4} έως 10^{-5} mbar) ενώ απαιτούνται και υποστηρικτικές δομές. Η παροχή αέριου Ηλίου κατά την διάρκεια της τήξης, μειώνει περεταίρω την πίεση κενού, επιτρέποντας την ψύξη του υπό κατασκευή αντικειμένου αλλά και την σταθερότητα της δέσμης των ηλεκτρονίων. Βασικοί παράμετροι της διαδικασίας αποτελούν η ισχύς της δέσμης των ηλεκτρονίων, η τάση τους, η διάμετρος εστίασης, η θερμοκρασία προθέρμανσης της πρώτης ύλης καθώς και το πάχος του στρώματος.

Βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας EBM είναι η μεγάλη ποικιλία υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως κράματα τιτανίου (Ti6Al4V, Ti6Al4V EI), κοβαλτίου-χρωμίου, τιτανίου-αργιλιδίου, νικελίου-χρωμίου (Inconel 625 & 718), ανοξείδωτου χάλυβα, χαλκού, αλουμινίου και βηρυλλίου. Επίσης, τα τελικά αντικείμενα έχουν υψηλή πυκνότητα και καλές μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι η διαδικασία γίνεται υπό συνθήκες κενού επιτρέποντας την χρήση υλικών ευαίσθητων στην οξείδωση καθιστώντας

έτσι την μέθοδο ιδανική για την κατασκευή ιατρικών εμφυτευμάτων αλλά και εξαρτημάτων της αεροπορικής βιομηχανίας όπου οι ακαθαρσίες λόγω οξείδωσης απαγορεύονται αυστηρά για λόγους ασφαλείας. Τέλος, σε σύγκριση με την SLM, η θερμική καταπόνηση των υπό κατασκευή αντικειμένων είναι μικρότερη και για τον λόγο αυτόν απαιτούνται λιγότερες υποστηρικτικές δομές ενώ η διαδικασία είναι ταχύτερη. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται η σχετικά μικρή ταχύτητα ενώ το υψηλό κόστος του εξοπλισμού, η μειωμένη ακρίβεια και ο περιορισμός στις διαστάσεις των υπό κατασκευή αντικειμένων (μη διαθεσιμότητα μηχανών με μεγάλους θαλάμους κατασκευής) την καθιστά λιγότερο δημοφιλή σε σχέση με την SLM.

Characteristic	Electron beam melting	Selective laser melting
Thermal source	Electron beam	Laser
Atmosphere	Vacuum	Inert gas
Scanning	Deflection coils	Galvanometers
Energy absorption	Conductivity-limited	Absorptivity-limited
Powder pre-heating	Use electron beam	Use infrared heaters
Scan speeds	Very fast, magnetically-driven	Limited by galvanometer inertia
Energy costs	Moderate	High
Surface finish	Moderate to poor	Excellent to moderate
Feature resolution	Moderate	Excellent
Materials	Metals (conductors)	Polymers, metals and ceramics

Πίνακας 6 Διαφορές Τεχνολογιών EBM & SLM²⁸

Η εταιρία Arcam AB είναι η μοναδική που διαθέτει εμπορικά μηχανές EBM. Οι πιο σύγχρονες μηχανές της είναι η Arcam Q10rplus (για κατασκευή ορθοπεδικών εμφυτευμάτων), η Arcam Q20rplus (για παραγωγή αεροπορικών εξαρτημάτων) και η Arcam A2X (για παραγωγή αεροπορικών εξαρτημάτων).



Εικόνα 35 Μηχανές EBM της Arcam AB α) Arcam Q20rplus (Build Size 350x350x380 mm)
β) Arcam A2X (Build Size 200x200x380 mm)

²⁸ I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, “Additive Manufacturing Technologies- Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing”, Springer, pp 127

3.7 Sheet Lamination

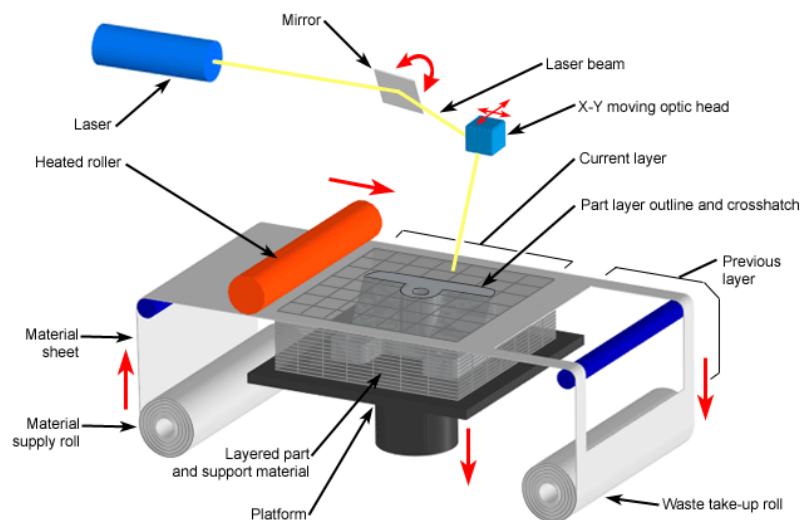
Η επόμενη κατηγορία τεχνολογιών AM φέρει την ονομασία Sheet Lamination. Στην κατηγορία αυτή, οποία φύλλα υλικού τοποθετούνται το ένα επάνω στο άλλο και συγκολλούνται μεταξύ τους για να σχηματίσουν το τελικό αντικείμενο. Στην συγκεκριμένη κατηγορία τεχνολογιών ουσιαστικά η πρώτη ύλη, η οποία είναι σε μορφή ελάσματος (φύλλο), είτε συγκολλάτε με χρήση κάποιας συγκολλητικής ουσίας είτε συνενώνεται με κάποια ηλεκτρική διαδικασία ώστε να σχηματιστεί το τελικό αντικείμενο. Η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικές αλληλουχίες βημάτων. Στην πρώτη περίπτωση το επόμενο έλασμα του υλικού τοποθετείται πάνω στο προηγούμενο στρώμα, συγκολλούνται τα δύο ελάσματα με χρήση συγκολλητικής ουσίας και εν συνεχεία ακολουθεί η κοπή του περιγράμματος μίας διατομής του τμήματος σε κάθε στρώμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με το επόμενο έλασμα δημιουργώντας το επόμενο στρώμα έως ότου κατασκευαστεί το επιθυμητό αντικείμενο. Στην δεύτερη περίπτωση, η κοπή των διατομών γίνεται εκ των προτέρων στα ελάσματα και εν συνεχεία αυτά τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και συνενώνονται με χρήση της συγκολλητικής ουσίας σε στρώματα. Στην εν λόγω κατηγορία, οι τεχνολογίες διαχωρίζονται, κατά κύριο λόγο, με βάση το μηχανισμό με το οποίο επιτυγχάνεται η συγκόλληση σε 4 κατηγορίες²⁹: α) συγκόλληση με χρήση συγκολλητικής ουσίας (gluing or adhesive bonding), β) διεργασίες θερμικής συγκόλλησης (thermal bonding processes), γ) σύσφιξη (clamping), δ) συγκόλληση με υπερήχους (ultrasonic welding). Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες της κατηγορίας Sheet Lamination είναι η τεχνολογία Laminated Object Manufacturing (LOM) και η Ultrasonic Consolidation.

3.7.1 Laminated Object Manufacturing – LOM

Η τεχνολογία Laminated Object Manufacturing (LOM) αναπτύχθηκε από την αμερικανική εταιρία Helisys το 1991, βασιζόμενη στις επιστημονικές εργασίες του Takeji Nakagawa για ταχεία κατασκευή εργαλείων μέσω συγκόλλησης επαλλήλων μεταλλικών φύλλων. Η μέθοδος βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με τη συγκόλληση λεπτών φύλλων υλικού που φέρουν επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας (heat-activated glue). Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν χαρτί, ενώ αργότερα η εταιρία ανέπτυξε και χρησιμοποίησε και άλλα υλικά (αδιάβροχο χαρτί, πλαστικά αλλά και λεπτές ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης). Η μέθοδος περιλαμβάνει μία διάταξη τροφοδοσίας (μορφή συνεχούς ρολού) που τοποθετεί το πρώτο φύλλο χαρτιού πάνω σε μια βάση και κατόπιν ένας θερμαινόμενος

²⁹ I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, “Additive Manufacturing Technologies- Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing”, Springer, pp 207

κύλινδρος περνά πάνω από αυτό, εφαρμόζοντας πίεση, ώστε να κολλήσει πάνω σε αυτήν. Για τη διαμόρφωση της γεωμετρίας κάθε φύλλου, ακτίνα λέιζερ (συνήθως λέιζερ CO₂ ισχύος 25-50 W) κόβει το φύλλο, διατρέχοντας μόνο το εξωτερικό περίγραμμα της αντίστοιχης διατομής, γεγονός που καθιστά την μέθοδο αρκετά ταχύτερη από άλλες μεθόδους AM, που απαιτούν πλήρη σάρωση της διατομής. Οι περιοχές της στρώσης που βρίσκονται εκτός του περιγράμματος της διατομής χαράζονται από το λέιζερ και τέμνονται σε μικρά ορθογώνια τμήματα/ πλακίδια (tiles/cubes), ώστε να διευκολύνεται η απόσπαση του αντικειμένου όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής του. Αφού κοπεί το πρώτο στρώμα, η βάση κατέρχεται, ένα νέο φύλλο προωθείται από τη διάταξη τροφοδοσίας και κατόπιν η βάση ανέρχεται λίγο ώστε ο θερμαινόμενος κύλινδρος να πιέσει και να κολλήσει το δεύτερο φύλλο στο πρώτο. Ακολουθεί η κοπή της νέας διατομής από την ακτίνα λέιζερ και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου, το οποίο θα είναι εγκιβωτισμένο σε ένα μπλοκ υλικού υποστήριξης. Το υλικό αυτό στη συνέχεια αφαιρείται σε κομμάτια κατά μήκος των ευθειών της χάραξης (για ευκολότερη απομάκρυνση το τελικό αντικείμενο θερμαίνεται σε φούρνο). Σημειώνεται ότι όταν χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη χαρτί, το τελικό αντικείμενο έχει υφή ξύλου και απαιτεί επικάλυψη με στεγανωτικό υλικό (χρώμα ή βερνίκι), ώστε να προφυλαχθεί από την υγρασία που επηρεάζει όλα τα προϊόντα ξύλου. Όταν χρησιμοποιούνται ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης το αντικείμενο πρέπει να υποστεί μια διαδικασία "σύντηξης" (sintering) για την αύξηση της αντοχής του.



Εικόνα 36 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας *Laminated Object Manufacturing (LOM)*

Η τεχνολογία LOM είναι κατάλληλη για την κατασκευή αντικειμένων σχετικά μεγάλου όγκου, καθώς το λέιζερ ακολουθεί αναλογικά μικρότερες διαδρομές για την δημιουργία των στρωμάτων. Επίσης, η διαδικασία χαρακτηρίζεται από την ευκολία διαχείρισης μιας ευρείας γκάμας υλικών όπως χαρτί, θερμοπλαστικά (PVC), σύνθετα (TiC-Ni), κεραμικά (SiC, alumina)

καθώς και μέταλλα. Επιπρόσθετα δεν παρατηρούνται προβλήματα στρέβλωσης και παραμενουσών τάσεων. Ένα από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της μεθόδου είναι η παρουσία υλικού υποστήριξης γύρω από το κατασκευαζόμενο κομμάτι. Έτσι καθίσταται περιττή η δημιουργία πλέγματος στήριξης, καθώς το εξάρτημα κατασκευάζεται εγκιβωτισμένο σε ένα μπλοκ υλικού, το οποίο εξασφαλίζει τη σταθερότητα του αντικειμένου κατά την κατασκευαστική φάση. Ωστόσο, μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι ο εγκιβωτισμός του τελικού αντικείμενου δημιουργεί προβλήματα κατά την διαδικασία καθαρισμού, η οποία εκτελείται με το χέρι και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην προκληθεί καταστροφή των εύθραυστων περιοχών του εξαρτήματος. Επιπρόσθετα, όλα τα κοίλα μορφολογικά χαρακτηριστικά με κλειστούς όγκους δεν μπορούν να δημιουργηθούν σαν ένα ενιαίο τμήμα, καθώς με αυτό τον τρόπο παγιδεύεται ανεπιθύμητο υλικό στο εσωτερικό των κοιλοτήτων. Επίσης στη μέθοδο LOM, υπάρχει αρκετά μεγάλο ποσοστό απορριμμάτων, καθώς η μεγαλύτερη ποσότητα του υλικού δεν συνεισφέρει στο ίδιο το κατασκευαζόμενο εξάρτημα. Συνεπώς, το κόστος του άχρηστου υπολείμματος υλικού μπορεί να είναι σημαντικό, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται υλικά πιο ακριβά από το χαρτί. Τέλος, η ακρίβεια της μεθόδου είναι σχετικά χαμηλή (ειδικά ως προς τον άξονα z λόγω διόγκωσης υλικού ή διαφοροποιήσεων στο πάχος των φύλλων) και οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των τελικών αντικειμένων είναι σε μέτριο επίπεδο. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το Νοέμβριο του 2000 η εταιρία Helisys έκλεισε και τον ίδιο μήνα ο ιδρυτής της Michael Feygin ίδρυσε την Cubic Technologies η οποία συνέχισε την εξέλιξη της τεχνολογίας LOM. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σήμερα διατίθεται από την Cubic Technologies μέσω της Solido η μηχανή LOM SD 300Pro (desktop 3D Printer κόστους 14,995\$).



Εικόνα 37 Desktop 3D Printer LOM SD 300Pro της Solido (Build Size 170 x 220 x 145 mm)

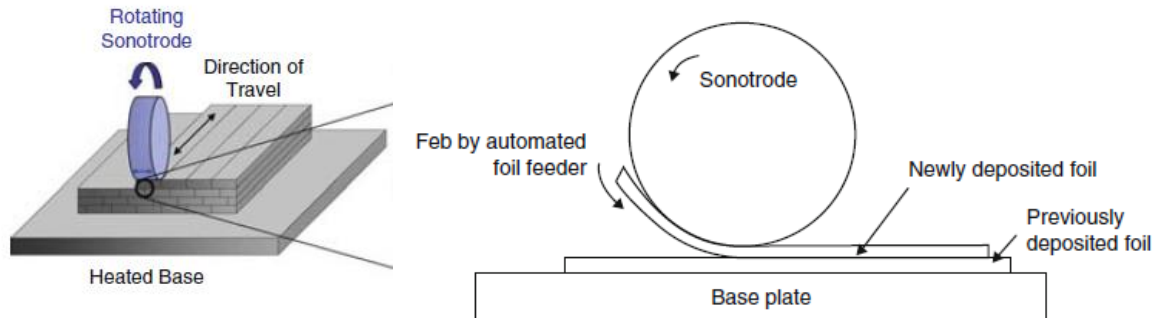
3.7.2 Ultrasonic Consolidation – UC

Η τεχνολογία Ultrasonic Consolidation (UC) είναι μία υβριδική μέθοδος στερεάς κατάστασης (solid state) που συνδυάζει τις αρχές των τεχνολογιών Sheet Lamination, με τη διαφορά ότι η συγκόλληση – συρραφή των ελασμάτων της πρώτης ύλης (κατά βάση μεταλλικών) γίνεται με χρήση υπερήχων, ενώ η κοπή με χρήση μηχανής CNC (Computerized Numerical Control – αφαιρετική διαδικασία). Αναπτύχθηκε στην Αμερική, από την εταιρία Solidica Inc. το 2000 και οι πρώτες μηχανές UC διατέθηκαν εμπορικά τέλη του 2001. Στη μέθοδο UC, το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε μία πλάκα η οποία είναι βιδωμένη πάνω σε μία άλλη θερμαινόμενη πλάκα (οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από θερμοκρασία δωματίου έως και τους 200°) από την επιφάνεια προς τα πάνω. Κάθε στρώμα αποτελείται από πολλά μεταλλικά ελάσματα (φύλλα), τα οποία είναι τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο (side-by-side) και τα οποία κόβονται με χρήση μηχανής CNC. Ένα περιστρεφόμενο εργαλείο που δημιουργεί υπερηχητικές δονήσεις (sonotrode) κινείται κατά μήκος του λεπτού μεταλλικού ελάσματος. Το sonotrode εφαρμόζει κανονική πίεση στο έλασμα, το οποίο συνενώνεται είτε με την πλάκα της βάσης είτε με το προηγούμενο στρώμα. Σημειώνεται ότι το sonotrode ταλαντώνεται εγκάρσια προς την κατεύθυνση της κίνησης, με σταθερή συχνότητα 20kHz και με πλάτος ταλάντωσης που καθορίζεται από το χρήστη. Το επόμενο στρώμα ελασμάτων συνενώνεται με το προηγούμενο με την ίδια διαδικασία. Πρακτικά, 4 στρώματα μεταλλικών ελασμάτων αποτελούν ένα επίπεδο της μεθόδου UC. Μετά την κατασκευή ενός επιπέδου, μία φρέζα CNC διαμορφώνει τις διατομές των 4 στρωμάτων των ελασμάτων. Η διαδικασία (υβριδική additive – subtractive) συνεχίζεται έως ότου κατασκευαστεί το τελικό αντικείμενο. Σημειώνεται ότι η συνένωση των ελασμάτων μπορεί να συμβεί είτε σε κάθε στρώμα είτε αφού τοποθετηθούν μερικά στρώματα (ανάλογα με τις ρυθμίσεις που έχει ορίσει ο χρήστης), ενώ κάθε στρώμα περιλαμβάνει συνδυασμό ελασμάτων τοποθετημένων το ένα δίπλα στο άλλο και όχι σαν ένα ενιαίο μεγάλο έλασμα, όπως είθισται στις SL τεχνολογίες.

Στην UC, η ακρίβεια των διαστάσεων και η ποιότητα της επιφάνειας δεν εξαρτάται από το πάχος του ελάσματος, αλλά από το είδος της κατεργασίας CNC που χρησιμοποιείται. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου λόγω του υβριδικού της χαρακτήρα, είναι η δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων, πολύ-λειτουργικών εξαρτημάτων, αντικειμένων με πολύπλοκα εσωτερικά χαρακτηριστικά, αντικείμενα αποτελούμενα από πολλά διαφορετικά υλικά καθώς και αντικείμενα με ενσωματωμένα καλώδια, αισθητήρες και οπτικές ίνες (smart structures). Επιπλέον, ευρεία ποικιλία μεταλλικών υλικών³⁰ μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως Al 3003

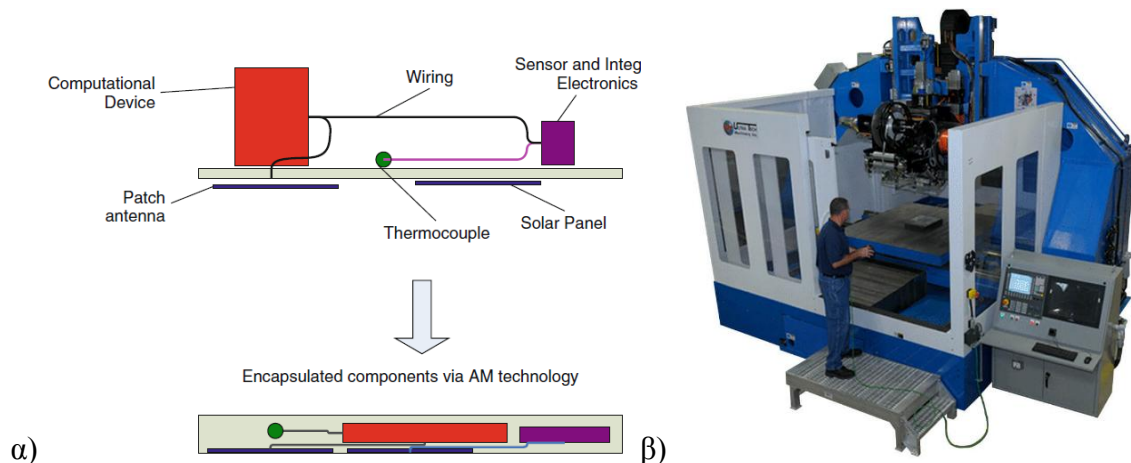
³⁰ I. Gibson, D. W. Rosen , B. Stucker, “Additive Manufacturing Technologies- Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing”, Springer, pp 232

(H18 and O condition), Al 6061, Al 2024, Inconel 600, μπρούντζος, SS 316, SS 347, Ni 201, χαλκός υψηλής καθαρότητας, αλλά σύνθετα υλικά όπως MetPreg1 (alumina fiber-reinforced Al matrix composite tape). Βασικό μειονέκτημα είναι η έλλειψη υποστηρικτικού υλικού, καθιστώντας αδύνατη την κατασκευή αντικειμένων με προεξέχουσες γεωμετρίες καθώς και το ότι οι μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζουν ανισοτροπία.



Εικόνα 38 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Ultrasonic Consolidation (UC)

Η Fabrisonic LLC είναι μία από τις εταιρίες που διαθέτει εμπορικά μηχανές UC (SonicLayer 4000, SonicLayer 7200).

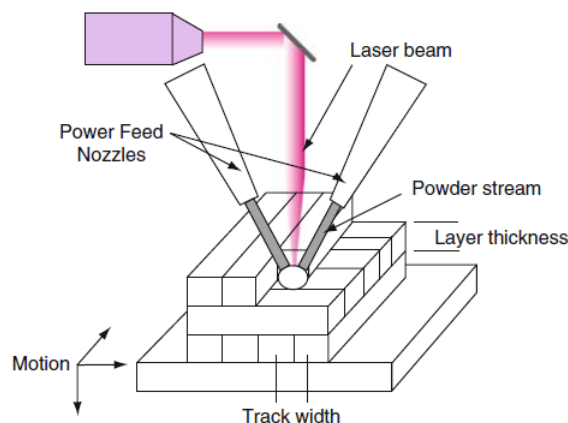


Εικόνα 39 α) Σχηματική Αναπαράσταση Κατασκευής Smart Structure με Ultrasonic Consolidation β) Μηχανή UC SonicLayer 7200 της Fabrisonic LLC (Build Size 2 x 2 x 1.5 m)

3.8 Direct Energy Deposition - DED

Η έβδομη και τελευταία κατηγορία τεχνολογιών AM φέρει την ονομασία Direct Energy Deposition (DED) και περιλαμβάνει όλες τις μεθόδους στις οποίες εστιασμένη θερμική

ενέργεια συνενώνει την πρώτη ύλη, λιώνοντάς την, καθώς το υλικό εναποτίθεται. Η κατηγορία αυτή αναφέρονταν στο παρελθόν και ως Beam Deposition (BM). Η θερμική ενέργεια προέρχεται είτε από ακτίνα λέιζερ είτε από δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam) είτε από τόξο πλάσματος (plasma arc) και δημιουργεί μία «λίμνη λιωμένου υλικού» (molten pool) στο υποστρώμα. Σε αυτήν, εναποτίθεται σκόνη (Powder-fed DED) ή νήμα πρώτης ύλης (Wire-fed DED) με εκτόξευση. Η «λίμνη» ακολουθεί μία καθορισμένη διαδρομή μετακίνησης ώστε να γεμίσει η κορυφή του υποστρώματος και σταδιακά να κατασκευαστεί το τελικό αντικείμενο σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο. Η αρχή λειτουργίας των παραπάνω τεχνολογιών επιτρέπει τη χρήση υλικών όπως πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα, αλλά ωστόσο κυριαρχεί η χρήση των μετάλλων. Σε αντίθεση με την κατηγορία Powder Bed Fusion όπου η πρώτη ύλη τήκεται πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής, που είναι προ-τοποθετημένη, στην DED, τήκεται καθώς εναποτίθεται στην πλατφόρμα κατασκευής.



Εικόνα 40 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογιών Direct Energy Deposition (DED)

Μία τυπική διάταξη των τεχνολογιών DED περιλαμβάνει ένα πολλαπλών αξόνων ρομποτικό βραχίονα στον οποίο είναι τοποθετημένο το ακροφύσιο. Ο βραχίονας κινεί το ακροφύσιο σε διάφορες διευθύνσεις, εκτοξεύοντας την πρώτη ύλη πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος (molten pool). Η πρώτη ύλη, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, τήκεται μετά την εναπόθεσή της μέσα στην λίμνη του λιωμένου υποστρώματος. Με την απομάκρυνση της θερμικής πηγής από την λίμνη του λιωμένου υποστρώματος, η πρώτη ύλη στερεοποιείται. Η διαδικασία συνεχίζεται με το ακροφύσιο να εναποθέτει πρώτη ύλη στα στρώματα που πρέπει να κατασκευαστούν έως ότου ολοκληρωθεί το τελικό αντικείμενο. Σημειώνεται ότι η διαδικασία πραγματοποιείται υπό ελεγχόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες (παρουσία αδρανούς αερίου ή κενού).

Στα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών DED συμπεριλαμβάνονται η ικανότητα κατασκευής υψηλής πυκνότητας λειτουργικών εξαρτημάτων με ελεγχόμενα και εξαιρετικά χαρακτηριστικά

μικροδομής. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα αλλαγής της σύνθεσης της πρώτης ύλης αλλά και του ρυθμού στερεοποίησης, μέσω των αλλαγών στις διάφορες παραμέτρους της μεθόδου, παρέχει στους σχεδιαστές μεγάλη ελευθερία ελέγχου της μικροδομής των τελικών αντικειμένων επιτρέποντας την κατασκευή ακόμα και μονο-κρυσταλλικών δομών. Επίσης, οι τεχνολογίες αυτές είναι ιδανικές για αποτελεσματική επισκευή ελαττωματικών ή κατεστραμμένων εξαρτημάτων υψηλής τεχνολογίας, όπως πτερύγια. Ειδικότερα, την δυνατότητα κατασκευής επί τόπου (in-situ) εξαρτημάτων από σύνθετα και ετερογενή υλικά και τη δυνατότητα εναπόθεσης σε εξαρτήματα λεπτών στρώσεων μετάλλων, υψηλής πυκνότητας και ανθεκτικών στη διάβρωση, ώστε να βελτιωθούν οι επιδόσεις τους αλλά και η διάρκεια ζωής τους. Σε γενικές γραμμές, οι τεχνολογίες DED είναι κατάλληλες για επισκευή, γενική επισκευή (overhaul), προσθήκη χαρακτηριστικών, προσθήκη επικαλύψεων υλικών σε εξαρτήματα για βελτίωση ιδιοτήτων, για αύξηση χρόνου ζωής καλουπιών χύτευσης (die casting & injection casting dies) και βελτίωση χαρακτηριστικών βιο-ιατρικών εμφυτευμάτων.

Στα μειονεκτήματα των τεχνολογιών DED συγκαταλέγονται, η φτωχή ανάλυση και ποιότητα επιφάνειας στα τελικά προϊόντα, η σχετικά μικρή ταχύτητα κατασκευής και η σχετικά χαμηλή ακρίβεια. Για την επίτευξη καλύτερης ακρίβειας, απαιτείται χαμηλότερος ρυθμός εναπόθεσης και χαμηλότερης ισχύος θερμική ενέργεια, με αποτέλεσμα την περεταίρω υποβάθμιση της ποιότητας της επιφάνειας αλλά και ενδεχόμενη αρνητική επίδραση στην μικροδομή. Επιπρόσθετα, σε σύγκριση με τις τεχνολογίες PBF, στις DED, δεν μπορούν να κατασκευαστούν ιδιαίτερα πολύπλοκες γεωμετρίες λόγω του περιορισμού από τις υποστηρικτικές δομές. Τέλος, απαιτείται περεταίρω επεξεργασία στα τελικά προϊόντα για απομάκρυνση των υποστηρικτικών δομών, για βελτίωση των επιφανειών και της ακρίβειας καθώς και για απομάκρυνση παραμενουσών τάσεων.

Οι τεχνολογίες DED περιλαμβάνουν πλήθος διαφορετικών μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί από διαφορετικές εταιρίες. Ενδεικτικά αναφέρονται Laser Engineered Net Shaping (LENS), Metal Deposition (MD) ή Direct Metal Deposition (DMD) ή Laser-Based Metal Deposition (LBMD), Laser Freeform Fabrication (LFF), Laser Direct Casting ή LaserCast, Laser Consolidation (LC), 3D Laser Cladding, Electron Beam Direct Melting (EBDM), Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM), Electron Beam Freeform Fabrication (EBF³) και Ion Fusion Formation (IFF). Όλες οι παραπάνω μέθοδοι στηρίζονται στην ίδια τεχνολογική βάση με τις διαφορές να εντοπίζονται στο είδος και τον τύπο του λέιζερ που χρησιμοποιείται, στη μέθοδο τροφοδότησης της σκόνης ή του νήματος, στον τρόπο παροχής αδρανούς αερίου, στο σύστημα ελέγχου ανάδρασης καθώς και στο είδος ελέγχου της κίνησης. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των πιο διαδεδομένων μεθόδων.

3.8.1 Direct Metal Deposition – DMD

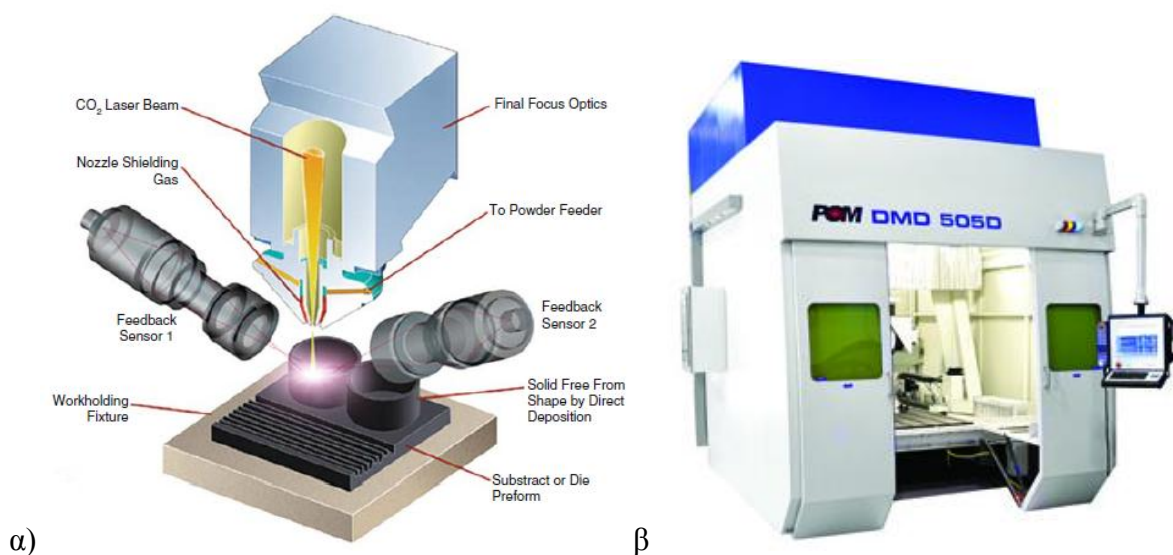
Η τεχνολογία Direct Metal Deposition (DMD) είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος της κατηγορίας DED, όπου η πρώτη ύλη είναι μέταλλο σε μορφή σκόνης και η θερμική ενέργεια προέρχεται από εστιασμένη ακτίνα λέιζερ. Η διάταξη περιλαμβάνει μία ολοκληρωμένη συλλογή οπτικών λέιζερ, ακροφύσιο εκτόξευσης σκόνης, σωληνώσεις αδρανούς αερίου και σε κάποιες περιπτώσεις αισθητήρες. Το υπόστρωμα είναι είτε μία επίπεδη πλάκα πάνω στην οποία θα κατασκευαστεί το αντικείμενο είτε ένα ήδη υπάρχων τμήμα του αντικειμένου όπου θα προστεθεί ένα χαρακτηριστικό. Η εναπόθεση πρώτης ύλης επιτυγχάνεται με σχετική κίνηση του υποστρώματος και του ακροφυσίου, όπου σε άλλες διατάξεις κινείται μόνο το υπόστρωμα, σε άλλες μόνο το ακροφύσιο και σε άλλες κινούνται και τα δύο. Η κίνηση πραγματοποιείται είτε με χρήση συστήματος 3 αξόνων, είτε με χρήση συστήματος 4 ή 5 αξόνων (ρομποτικός βραχίονας). Επειδή η κινητική ενέργεια εναπόθεσης της σκόνης είναι μεγαλύτερη από την επίδραση της βαρύτητας η μη-κάθετη εναπόθεση είναι εξίσου αποτελεσματική και κατά συνέπεια η εναπόθεση μπορεί να γίνεται σε πολλούς διαφορετικούς άξονες. Στις περιπτώσεις που το υπόστρωμα είναι μεγάλων διαστάσεων ή μεγάλου βάρους επιλέγεται να κινείται το ακροφύσιο, διαφορετικά είναι ευκολότερο να κινείται το ίδιο το υπόστρωμα. Είναι συνεπώς φανερό ότι ανάλογα με τις ανάγκες της σχεδίασης και τη γεωμετρία του υπό κατασκευή αντικειμένου οι διατάξεις των τεχνολογιών DMD διαφέρουν.

Η ακτίνα λέιζερ δημιουργεί μία λίμνη λιωμένης πρώτης ύλης στο υπόστρωμα (συνήθως διαμέτρου 0.25-1mm και βάθους 0.1-0.5mm)³¹ στην οποία εναποτίθεται η σκόνη της πρώτης ύλης. Η σκόνη τήκεται μόλις εισέρχεται μέσα στην λίμνη και στερεοποιείται μόλις απομακρυνθεί η ακτίνα λέιζερ. Η σάρωση της ακτίνας λέιζερ δημιουργεί ένα λεπτό κομμάτι του στερεοποιημένου μετάλλου το οποίο συγκολλάτε με το υπόστρωμα ή το προηγούμενο στρώμα. Ένα στρώμα παράγεται από ένα αριθμό διαδοχικών επικαλυπτόμενων κομματιών. Σημειώνεται ότι σε ποσοστό έως και 25% του πάχους του κομματιού, τήκεται εκ νέου και αποτελεί την λίμνη λιωμένης πρώτης ύλης στην οποία εναποτίθεται η νέα σκόνη. Μόλις σχηματιστεί το κάθε στρώμα, το ακροφύσιο απομακρύνεται από το υπόστρωμα κατά ένα πάχος στρώματος (τυπικό πάχος στρώματος 0.25-0.5mm) και η διαδικασία συνεχίζεται έως τη δημιουργία του επόμενου στρώματος έως ότου κατασκευαστεί το τελικό αντικείμενο.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η τεχνολογία DMD συναντάται και με αρκετές άλλες ονομασίες (συνήθως η ονομασία δίδεται από την εταιρία που διαθέτει εμπορικά ένα μηχάνημα DMD) όπως Metal Deposition (MD), Laser Deposition (LD), Laser-Based Metal

³¹ I. Gibson, D. W. Rosen , B. Stucker, “Additive Manufacturing Technologies- Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing”, Springer, pp 240

Deposition (LBMD), Laser Direct Metal Printing (DMP) και Laser Powder Forming (LPF). Η τεχνολογία DMD είναι κατάλληλη για επισκευή φθαρμένων ή καταστρεμμένων εξαρτημάτων, για παραγωγή νέων αλλά και για επίστρωση επικαλύψεων, παρέχοντας προστασία από τη φθορά και τη διάβρωση. Μεγάλη ποικιλία υλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως νικέλιο, σίδηρο, κοβάλτιο, κράματα τιτανίου, πυρίμαχα μέταλλα καθώς και σύνθετα κεραμικού-μετάλλου (cermets). Τα παραγόμενα προϊόντα έχουν σχετικά καλές μηχανικές ιδιότητες, ωστόσο βασικά μειονεκτήματα αποτελούν το υψηλό κόστος εξοπλισμού και οι μεγάλες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Εταιρίες που χρησιμοποιούν DMD είναι η DM3D LLC (που εξαγόρασε την POM Group το 2013) με μηχανές όπως DMD 105D/505D (medium-to-large 5-axis machine on CNC platforms), DMD 44R/66R (large, flexible systems with 6-axis industrial robot), DMD IC 106 (small, compact machine with a 6-axis industrial robot inside an inert-gas chamber for processing exotic metals and alloys) και η RPM Innovations Inc με τα μοντέλα 222, 535 και 537 Laser Deposition Systems.

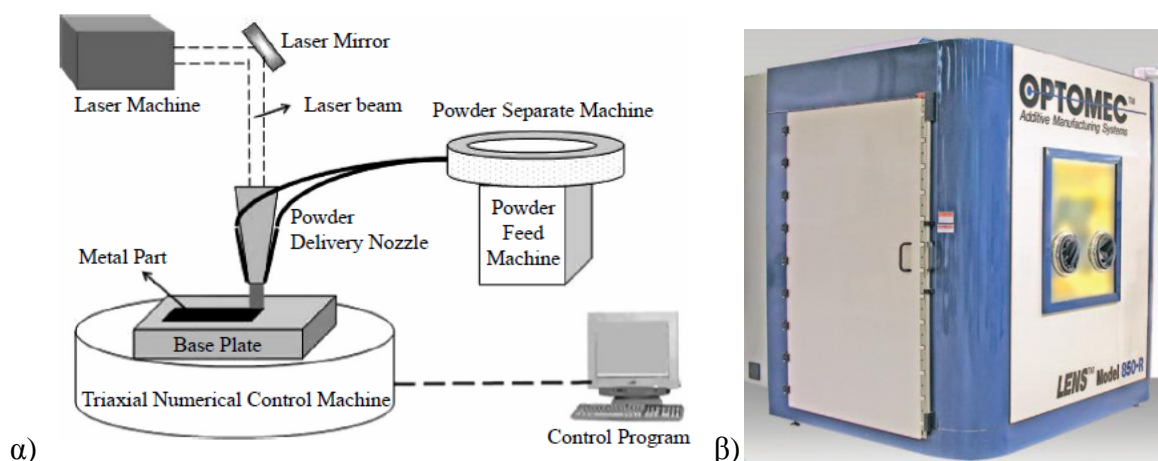


Εικόνα 41 α) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Direct Metal Deposition (DMD) όπως χρησιμοποιήθηκε στις μηχανές της POM β) Μηχανή POM DMD 505D (Build Size 1219 x 600 x 610mm)

3.8.2 Laser Engineered Net Shape – LENS

Η τεχνολογία Laser Engineering Net Shape (LENS) αναπτύχθηκε από το εργαστήριο Sandia National Laboratories και διατέθηκε εμπορικά από την Optomec Inc το 1997 με την μηχανή LENS 750. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε κλειστό θάλαμο με αδρανές αέριο, όπου σκόνη μετάλλου εναποτίθεται και τήκεται ταυτόχρονα. Μια διάταξη σωληνώσεων απομακρύνει το οξυγόνο (κάτω από 10ppm O₂) και ανατροφοδοτεί με αδρανές αέριο (συνήθως Αργό). Μία δεύτερη διάταξη (κεφαλή) διαθέτει δύο ακροφύσια παροχής σκόνης και μία ακτίνα λέιζερ. Η ακτίνα λέιζερ δημιουργεί την λίμνη λιωμένης πρώτης ύλης στο υπόστρωμα και στην συνέχεια τα

ακροφύσια παρέχουν την σκόνη, η οποία εισερχόμενη στην λίμνη (molten pool) τήκεται. Στην συνέχεια το υπόστρωμα μετακινείται στον άξονα X-Y και δημιουργείται το πρώτο στρώμα. Έπειτα η κεφαλή μετακινούμενη πάνω - κάτω στον άξονα Z εναποθέτει πρώτη ύλη δημιουργώντας το επόμενο στρώμα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να κατασκευαστεί το τελικό αντικείμενο. Ο τύπος λέιζερ που χρησιμοποιούνταν αρχικά ήταν Nd-YAG αλλά στην πιο σύγχρονη μορφή της μεθόδου γίνεται χρήση λέιζερ ινών (fiber laser). Επιπλέον, οι πιο σύγχρονες μηχανές που διατίθενται από την Optomec, διαθέτουν σύστημα 5 αξόνων, παρέχοντας τη δυνατότητα εναπόθεσης σκόνης (από την κεφαλή) από οποιοδήποτε προσανατολισμό και διάταξη 4 ακροφυσίων για την παροχή της σκόνης. Επίσης διαθέτουν σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης του ύψους των στρώσεων και του μεγέθους της λίμνης λιωμένου υλικού.



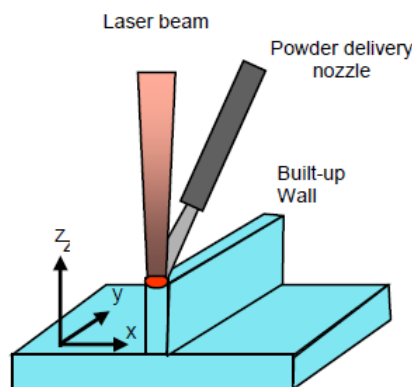
Εικόνα 42 α) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Laser Engineered Net Shape (LENS) β) LENS 850-R Repair & Fabrication of large metal Aerospace components της Optomec (Build Size 900 x 1500 x 900mm)

Σημαντικό πλεονέκτημα της LENS είναι η κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών και υψηλής πυκνότητας μεταλλικών εξαρτημάτων με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Επιπρόσθετα, είναι ιδανική μέθοδος για επισκευή φθαρμένων μεταλλικών εξαρτημάτων. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγάλη ποικιλία μετάλλων όπως κράματα ανοξείδωτου χάλυβα (stainless steel 316, 304L, 309, 174), χάλυβα M300 (maraging steel), υπεκράματα νικελίου (Inco 625, 600, 718, 690), κράματα χάλυβα (tool steel H13), κράματα τιτανίου (6Al-4V) καθώς και σύνθετα υλικά και υλικά FGM (Functionally Graded Material). Μηχανές LENS διατίθενται από την εταιρία Optomec (Μοντέλα LENS 450, 850-R, MR-7).

3.8.3 Laser Consolidation – LC

Η τεχνολογία Laser Consolidation αναπτύχθηκε από το Canadian National Research Council's Integrated Manufacturing Technologies Institute και παρέχει τη δυνατότητα

κατασκευής λειτουργικών μεταλλικών εξαρτημάτων χωρίς να απαιτείται περεταίρω επεξεργασία. Βασικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν την LC από τις υπόλοιπες DED είναι το μικρό μέγεθος στίγματος του λέιζερ, η μεγάλη ακρίβεια ελέγχου της κίνησης καθώς και το γεγονός ότι η σκόνη της πρώτης ύλης παρέχεται από ένα μόνο ακροφύσιο. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή εξαρτημάτων μικρού μεγέθους με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας σε σχέση με άλλες τεχνολογίες DED, υστερώντας όπως είναι φυσικό στην ταχύτητα κατασκευής. Όπως και στις υπόλοιπες τεχνολογίες της κατηγορίας DED, η εστιασμένη ακτίνα λέιζερ (Nd:YAG) δημιουργεί τη λίμνη λιωμένου μετάλλου στην οποία, μέσω του ακροφυσίου, εναποτίθεται ταυτόχρονα σκόνη μετάλλου. Ένα αριθμητικά ελεγχόμενο (NC) σύστημα κίνησης (3 έως και 5 αξόνων) ελέγχει τη σχετική κίνηση μεταξύ ακτίνας λέιζερ και υποστρώματος. Η ακτίνα λέιζερ με το ακροφύσιο κινούνται σε μία προκαθορισμένη διαδρομή (σύμφωνα με το μοντέλο CAD), δημιουργώντας ένα αυλάκι λιωμένης πρώτης ύλης πάνω στο υπόστρωμα, το οποίο στερεοποιείται γρήγορα, σχηματίζοντας το πρώτο στρώμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστεί μία στερεή δομή με λεπτά τοιχώματα. Ο σωστός σχεδιασμός της διαδρομής του λέιζερ οδηγεί στην κατασκευή εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας απευθείας από το μοντέλο CAD χωρίς να απαιτούνται καλούπια ή μήτρες. Στη μέθοδο LC μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετά υλικά, με πιο διαδεδομένα τα κράματα νικελίου (Inco 625, 738), κράματα τιτανίου (Ti-6Al-4V), κράματα κοβαλτίου (Stellite 6 Alloy), κράματα σιδήρου (CPM-9V tool steel).

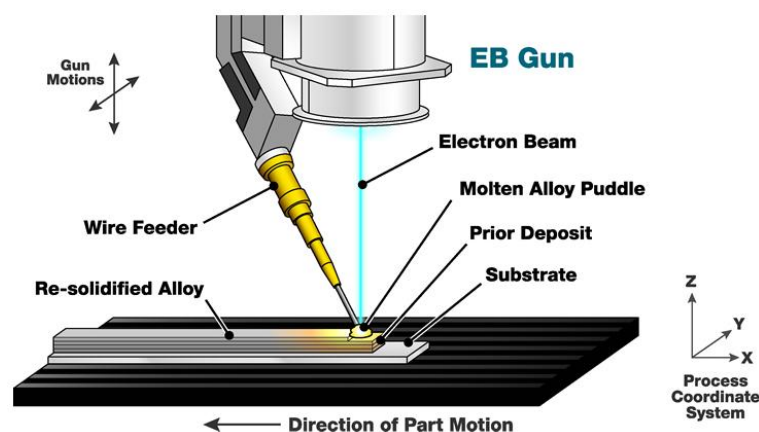


Εικόνα 43 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Laser Consolidation

3.8.4 Electron Beam Additive Manufacturing – EBAM

Η τεχνολογία Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) αναπτύχθηκε από την εταιρία Sciaky Inc από την δεκαετία του 1990 (αρχές του 2000) με στόχο την κατασκευή υψηλής ποιότητας μεταλλικών εξαρτημάτων σε σύντομο χρόνο και με μειωμένο κόστος. Έως το 2009 έφερε την ονομασία Electron Beam Direct Melting (EBDM). Το 2009 έγινε η πρώτη επίσημη παρουσίαση ως EBAM. Κύρια χαρακτηριστικά που τη διαφοροποιούν σε σχέση με τις

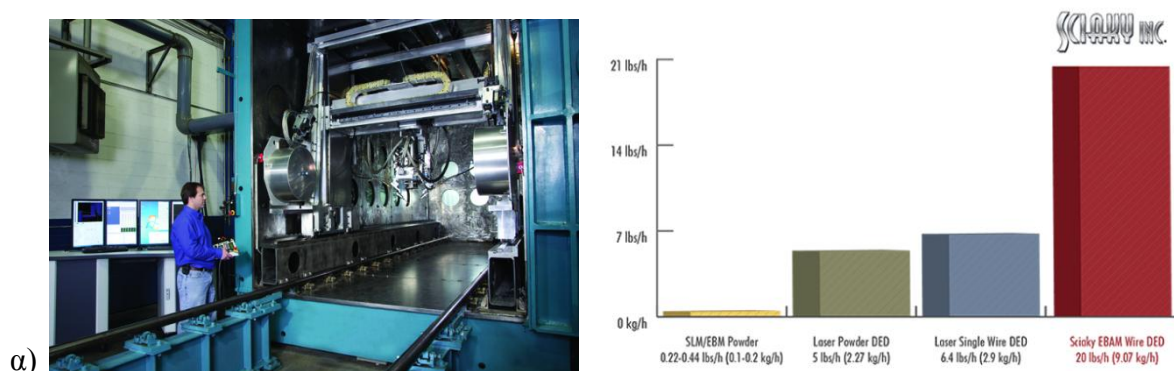
τεχνολογίες DED, που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, είναι η χρήση δέσμης ηλεκτρονίων για τη δημιουργία της λίκνης λιωμένης πρώτης ύλης, καθώς και το είδος της πρώτης ύλης που είναι σε μορφή σύρματος/καλωδίου (Wire-feed Electron Beam Process). Στην EBAM μία διάταξη τροφοδοσίας εναποθέτει την πρώτη ύλη του μετάλλου σε μορφή σύρματος και μία δεύτερη διάταξη δέσμης ηλεκτρονίων (EB Gun) λιώνει την πρώτη ύλη, σχηματίζοντας στρώματα στηριζόμενη στις αρχές των τεχνολογιών DED, έως ότου να κατασκευαστεί ένα εξάρτημα τύπου near-net shape (τεχνική κατασκευής όπου η αρχική παραγωγή ενός εξαρτήματος είναι πολύ κοντά στην τελική όσον αφορά το σχήμα μειώνοντας τις απαιτήσεις για περαιτέρω επεξεργασία όπως λείανση). Ταυτόχρονα, ένα σύστημα αισθητήρων κλειστού βρόγχου που αποτελεί ευρεσιτεχνία της εταιρίας (Sciaky's IRISS® Interlayer Realtime Imaging & Sensing System), εξασφαλίζει την συμμόρφωση του τελικού προϊόντος ως προς την γεωμετρία, τις μηχανικές ιδιότητες, την μικροδομή αλλά και την χημική σύσταση. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε θάλαμο υπό κενό. Επίσης, παρέχεται δυνατότητα διπλής διάταξης τροφοδοσίας πρώτης ύλης, που επιτρέπει το συνδυασμό δύο διαφορετικών μετάλλων στην ίδια λίκνη λιωμένης πρώτης ύλης (custom alloy parts). Επιπλέον, τα δύο διαφορετικά υλικά μπορούν να συνδυαστούν είτε με διαφορετικό βαθμό μίξης δημιουργώντας εξαρτήματα Functionally Graded Parts (η σύνθεσή τους και η δομή τους μεταβάλλεται σταδιακά με τον όγκο) είτε με διαφορετικό διαμέτρημα (thin wire & thick wire).



Εικόνα 44 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)

Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η δυνατότητα κατασκευής πολύ μεγάλων μεταλλικών εξαρτημάτων με διαστάσεις 5.79x1.22x1.22 μέτρα ή με διάμετρο έως και 2.44 μέτρα (η εταιρία παρέχει μηχανή με έναν από τους μεγαλύτερους θαλάμους κατασκευής στον κόσμο). Επίσης στα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι και η ταχύτητα κατασκευής (ρυθμός απόθεσης 9.07kg/h), το σχετικά μειωμένο κόστος, ο συνδυασμός δύο διαφορετικών μεταλλικών υλικών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω καθώς και η σημαντική μείωση αποβλήτων (χαμένης πρώτης ύλης),

σε σχέση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούν σκόνη ως πρώτη ύλη. Τέλος, πλεονέκτημα αποτελεί και η μεγάλη ποικιλία σε υλικά³² που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως τιτάνιο, κράματα τιτανίου, υπερκράματα τιτανίου (Inco 625, 718), ταντάλιο, βολφράμιο, νιόβιο, ανοξείδωτο χάλυβα (300 Series), κράματα αλουμινίου (2319, 4043), χάλυβα 4340, κράματα ζirkονίας, κράμα 70-30 χαλκού-νικελίου και 70-30 νικελίου-χαλκού. Οι μηχανές EBAM που διατίθενται από την Sciaky Inc περιλαμβάνουν τα μοντέλα EBAMTM 300, 150, 110, 88 και 68.



Εικόνα 45 α) Η Μηχανή EBAMTM 300 της Sciaky Inc (Build Size 5.79x1.22x1.22m) με ένα από τους μεγαλύτερους θαλάμους στον κόσμο β) Σύγκριση Ρυθμού Απόθεσης Υλικού Τεχνολογιών Metal Additive Manufacturing

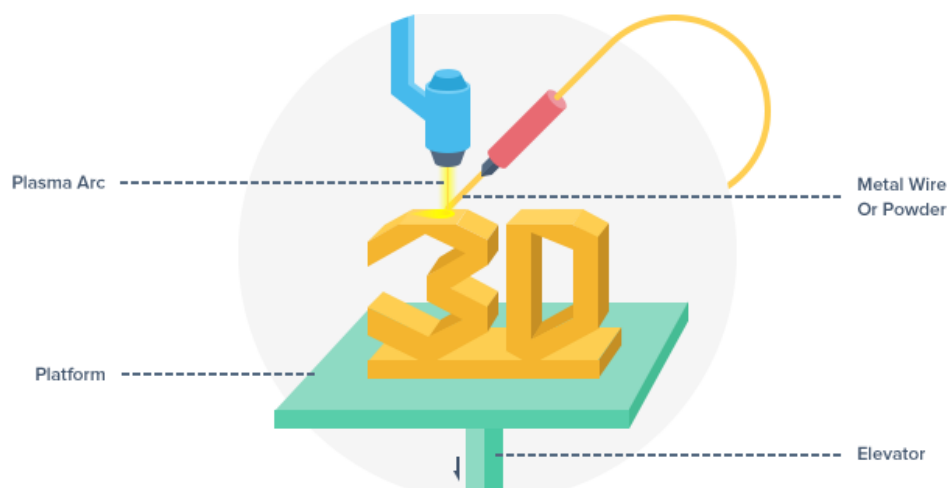
3.8.5 Ion Fusion Formation – IFF

Η τεχνολογία Ion Fusion Formation (IFF) αναπτύχθηκε από την εταιρία Honeywell Aerospace. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της IFF, που την διαφοροποιεί σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες DED, είναι η χρήση τόξου πλάσματος για τη δημιουργία της λίμνης λιωμένης πρώτης ύλης. Η δημιουργία του τόξου πλάσματος γίνεται μέσω ειδικής συσκευής πυράκτωσης, στην οποία χρησιμοποιείται αδρανές αέριο (Αργό) ως αέριο σχηματισμού του τόξου. Η πρώτη ύλη είναι μέταλλο, είτε σε μορφή σύρματος, είτε σε μορφή σκόνης. Στην τεχνολογία IFF, αφότου έχει δημιουργηθεί η λίμνη λιωμένης πρώτης ύλης, εν συνεχεία η πρώτη ύλη εναποτίθεται εκεί που απαιτείται για να σχηματιστεί το πρώτο στρώμα του υπό κατασκευή αντικειμένου. Το πρώτο στρώμα έχει σχηματιστεί όταν ψυχθεί η λίμνη λιωμένης πρώτης ύλης και σκληρύνει. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστούν όλα τα στρώματα, το ένα μετά το άλλο, που αποτελούν το τελικό αντικείμενο.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ελάχιστη παραμόρφωση και η πολύ λεπτή μικροδομή, λόγω του υψηλού ρυθμού ψύξης της μεταλλικής δομής και κατά συνέπεια οι καλές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τελικού αντικειμένου. Ωστόσο, για κάποια υλικά είναι πιθανό να απαιτηθεί περαιτέρω θερμική κατεργασία για βελτίωση των μηχανικών

³² <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>

ιδιοτήτων ενώ εάν η πρώτη ύλη είναι σε μορφή σύρματος, απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία λόγω τραχύτητας της τελικής επιφανείας. Επίσης, η μέθοδος είναι σχετικά οικονομική και δεν απαιτούνται υποστηρικτικές δομές. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η μειωμένη ταχύτητα παραγωγής σε σχέση με μεθόδους DMD και EBAM (σε γενικές γραμμές παρουσιάζει υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης), η χαμηλή ακρίβεια, η χαμηλή ποιότητα της τελικής επιφάνειας. Σημειώνεται ότι η μέθοδος IFF είναι κατάλληλη για επισκευή εξαρτημάτων αεροπορικής βιομηχανίας καθώς είναι καλά προσαρμοσμένη στην κατασκευή near-net shape (τεχνική κατασκευής όπου η αρχική παραγωγή ενός εξαρτήματος είναι πολύ κοντά στην τελική όσον αφορά το σχήμα μειώνοντας τις απαιτήσεις για περαιτέρω επεξεργασία όπως λείανση) εξαρτημάτων κυκλικού/κυλινδρικού τύπου όπως ακροφυσία και σώματα βαλβιδών. Τέλος, στην μέθοδο IFF μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά όπως κράματα χάλυβα, υπερκράματα νικελίου, Ti-6Al-4V, 347 stainless steel, αλουμίνιο (Al A356 και Al 2319), Iron-Nickel Alloy 36, 17-4PH, INCONEL 718 και Rhenium (υπερ-υψηλής θερμοκρασίας πυρίμαχο μέταλλο).



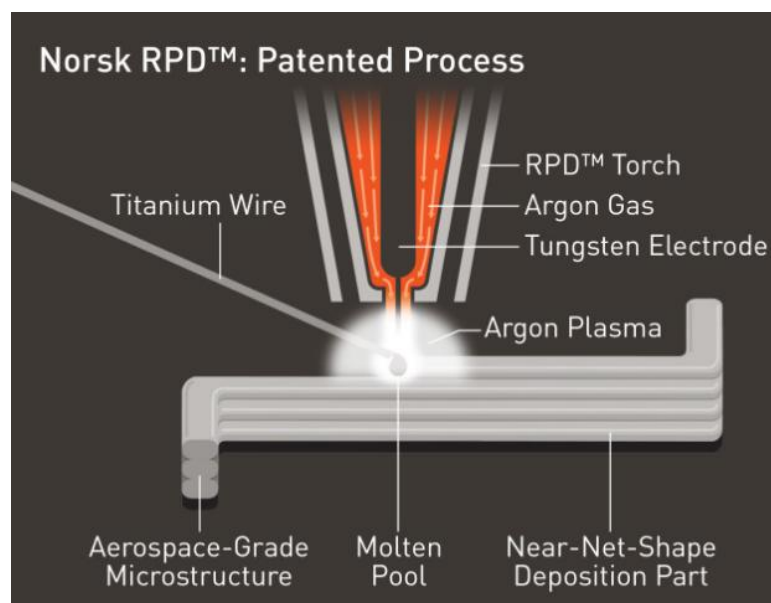
Εικόνα 46 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Ion Fusion Formation (IFF) της εταιρίας Honeywell Aerospace

3.8.6 Rapid Plasma Deposition – RPD

Η τεχνολογία Rapid Plasma Deposition (RPD) αναπτύχθηκε την τελευταία δεκαετία από την Νορβηγική εταιρία Norsk Titanium και επίσημα παρουσιάστηκε τον Ιούλιο του 2016 στην έκθεση του Farnborough International Airshow³³. Η Norsk Titanium ιδρύθηκε το 2006 και

³³ <http://www.businesswire.com/news/home/20160701005132/en/Norsk-Titanium-Reveals-Rapid-Plasma-Deposition%E2%84%A2-2016>

αποτελεί ένα πρωτοποριακό προμηθευτή δομικών αεροπορικών εξαρτημάτων από τιτάνιο, κατασκευασμένα με μεθόδους ΑΜ, έχοντας κατοχυρώσει δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία RPD. Στην RPD, όπως και στην IFF, η λίμνη λιωμένης πρώτης ύλης δημιουργείται από τόξο πλάσματος με χρήση αδρανούς αερίου Αργού (Wire-fed Argon Plasma Technology). Η πρώτη ύλη, τιτάνιο (Ti-6Al-4V) σε μορφή σύρματος σε μεγάλο ρολό, τροφοδοτείται σε θερμοκρασία δωματίου και το τόξο πλάσματος αυξάνει τη θερμοκρασία του σύρματος τιτανίου σε χιλιάδες βαθμούς, ρευστοποιώντας το. Στη συνέχεια, το ρευστοποιημένο τιτάνιο εναποτίθεται και στερεοποιείται αμέσως, σχηματίζοντας το πρώτο στρώμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστούν όλα τα στρώματα, το ένα μετά το άλλο, που αποτελούν το τελικό αντικείμενο. Η διάταξη που χρησιμοποιείται, περιλαμβάνει 10 σερβομηχανισμούς (Bosch Rexroth Indramotion MTX) οι οποίοι ελέγχουν την τροφοδοσία του σύρματος τιτανίου πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής, την κίνηση των φακών του τόξου πλάσματος και άλλες παραμέτρους της μεθόδου.



Εικόνα 47 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Rapid Plasma Deposition (RPD) της εταιρίας Norsk Titanium

Σημειώνεται ότι τα παραγόμενα αεροπορικά εξαρτήματα με την RPD είναι της μορφής near-net shape (εξαρτήματα που είναι πολύ κοντά στην τελική μορφή, όσον αφορά το σχήμα μειώνοντας τις απαιτήσεις για περεταίρω επεξεργασία, όπως λείανση) τα οποία σε 2^ο στάδιο υπόκεινται σε μη καταστροφικούς ελέγχους (Ultrasonic Inspection) για να εξακριβωθεί η ποιότητα και η καταλληλότητά τους για αεροπορική χρήση και έπειτα αποτελούν τελικά εξαρτήματα έτοιμα για συναρμολόγηση. Σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η ταχύτητα κατασκευής, ο

υψηλός ρυθμός απόθεσης (5-10kg/hour) καθώς και οι καλές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τελικού αντικειμένου (λόγου του υψηλού ρυθμού ψύξης). Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί και η μεγάλη μείωση του λόγου buy-to-fly (ποσότητα πρώτης ύλης που απαιτείται για κατασκευή ενός εξαρτήματος, σε σύγκριση με την ποσότητα πρώτης ύλης του τελικού αντικειμένου) σε λόγο 3:1, από λόγο 40:1 περίπου στις παραδοσιακές διαδικασίες κατασκευής με αφαίρεση υλικού. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι τα αεροπορικά εξαρτήματα που παράγονται με την τεχνολογία RPD είναι στο επίπεδο 8 τεχνολογικής ετοιμότητας (Technology Readiness Level Eight - TRL 8), έπειτα από ελέγχους που έχουν εκτελεστεί σε συνεργασία με την Federal Aviation Administration (FAA). Το επίπεδο 8 είναι το υψηλότερο επίπεδο πιστοποίησης κατά την διάρκεια των δοκιμών. Η μηχανή RPDTM MERKE IV της Norsk Titanium είναι η 4^η γενιάς μηχανή που βασίζεται στην τεχνολογία RPD για την κατασκευή μεγάλων αεροπορικών δομικών εξαρτημάτων από τιτάνιο (Build Size 900mm x 600mm x 300mm).



Εικόνα 48 Η μηχανή RPDTM MERKE IV της Norsk Titanium (Build Size 900mm x 600mm x 300mm)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΛΙΚΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΜ

4.1 Κατηγορίες Υλικών Τεχνολογιών AM

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών αποτέλεσε μία από τις προϋποθέσεις για την ευρύτερη ανάπτυξη των τεχνολογιών AM και για την υιοθέτηση τους σε πολλούς διαφορετικούς τομείς της βιομηχανίας. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί και στο πρώτο κεφάλαιο, ο αριθμός των διαφορετικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μηχανήματα AM είναι σχετικά περιορισμένος σε σύγκριση με το τεράστιο φάσμα των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στην παραδοσιακή κατασκευή. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίον γίνεται μεγάλη προσπάθεια και δαπανούνται μεγάλα ποσά για την ανάπτυξη όλο και μεγαλύτερου αριθμού νέων υλικών, τόσο μεταλλικών όσο και σύνθετων, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αντοχή και στιβαρότητα στα τελικά προϊόντα. Σημειώνεται μάλιστα ότι, σχεδόν όλες οι μεγάλες εταιρίες (3D Systems, Arcam, Stratasys, Materialize, EOS, Optomec, Envisiontec κ.α.), που ασχολούνται με την κατασκευή και την εμπορική διάθεση μηχανών AM, παράλληλα, αναπτύσσουν και εξελίσσουν συνεχώς νέα υλικά, κατάλληλα για τις μηχανές αυτές, τα οποία διαθέτουν εμπορικά. Οι δύο βασικές κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες AM είναι τα πλαστικά και τα μέταλλα. Επίσης τα κεραμικά, τα σύνθετα καθώς και ορισμένα άλλα υλικά χρησιμοποιούνται επίσης, χωρίς όμως να είναι ιδιαίτερα συνηθισμένα. Στον πίνακα 7 απεικονίζονται οι κατηγορίες των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις διάφορες κατηγορίες των τεχνολογιών AM. Στην συνέχεια του κεφαλαίου, γίνεται παρουσίαση όλων των κατηγοριών υλικών τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μηχανές AM για την κατασκευή τελικών προϊόντων.

	Material extrusion	Material jetting	Binder jetting	Vat photopolymerization	Sheet lamination	Powder bed fusion	Directed energy deposition
Polymers and polymer blends	x	x	x	x	x	x	
Composites		x	x	x		x	
Metals		x	x		x	x	x
Graded/hybrid metals					x		x
Ceramics			x	x		x	
Investment casting patterns		x	x	x		x	
Sand molds and cores	x		x			x	
Paper					x		

Πίνακας 7 Κατηγορίες Υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανά κατηγορία τεχνολογιών AM³⁴

³⁴ Source: Wohlers, Terry. “Wohlers Report 2012: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry.” Wohlers Associates, Inc. 2012.

4.2 Πολυμερή Υλικά – (Polymers)

Πολυμερή υλικά ονομάζονται οι χημικές ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους οργανικής βάσης, τα λεγόμενα μακρομόρια, που σχηματίζονται από τη σύνδεση πολλών όμοιων μικρών μορίων (μονομερή) και των οποίων η δομική μονάδα είναι η αλυσίδα ατόμων άνθρακα. Τα πολυμερή προκύπτουν από τη χημική αντίδραση των μονομερών που ονομάζεται πολυμερισμός. Είναι ευρέως γνωστά και ως πλαστικά επειδή πολλά από αυτά είναι εύπλαστα, δηλαδή παραμορφώνονται εύκολα. Οι χρήσεις είναι πάρα πολλές εξαιτίας των μηχανικών, οπτικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν. Λόγω της μικρής πυκνότητας που έχουν, η ειδική μηχανική αντοχή (αντοχή/πυκνότητα) είναι πολύ μεγάλη και έτσι χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή και παράλληλα μικρό βάρος (π.χ. αεροπορική βιομηχανία, αυτοκινητοβιομηχανία). Γενικά, όμως, τα πολυμερή υλικά παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ιδιοτήτων (μηχανικών, φυσικών, κ.λπ.) και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ειδών καθημερινής και οικιακής χρήσης (πλαστικά έπιπλα, παιχνίδια, είδη σπορ, επενδύσεις, κόλλες, σακούλες, κ.λπ.), στην κλωστοϋφαντουργία (ίνες, υφάσματα), στην ηλεκτρονική (πλακέτες κυκλωμάτων, πλαίσια), στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυπηγική και αεροναυπηγική. Οι κυριότερες κατηγορίες πολυμερών υλικών που διακρίνονται ανάλογα με τις μηχανοθερμικές τους ιδιότητες και τα οποία χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες ΑΜ, είναι τα θερμοπλαστικά τα θερμοσκληρυνόμενα και τα ελαστομερή.

4.2.1 Θερμοπλαστικά – (Thermoplastics)

Θερμοπλαστικά υλικά ή πλαστομερή ή πλαστικά (thermoplastics) είναι υλικά τα οποία αποτελούνται συνήθως από γραμμικά μακρομόρια και τα οποία κατά την θέρμανση μαλακώνουν και μετατρέπονται σε ρευστά (χαλάρωση των μοριακών δεσμών), διατηρούν δε την κατάσταση αυτή όσο χρόνο διαρκεί η επίδραση της θερμότητας και στη συνέχεια μπορούν εύκολα να μορφοποιηθούν με άσκηση υψηλών πιέσεων. Η ακολουθούσα απόψυξη αποδίδει στερεό υλικό και η όλη διεργασία είναι αντιστρεπτή. Τα θερμοπλαστικά διατίθενται σε υγρή ή στερεά μορφή, είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες και παράγονται με πολυμερισμό προσθήκης ή συμπύκνωσης. Τυπικά θερμοπλαστικά πολυμερή τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις τεχνολογίες ΑΜ είναι τα: Ακρυλονιτρίλιο-Βουταδιένιο-Στυρένιο (ABS), Πολυαιθυλένιο (PE), Χλωριούχο Πολυβινύλιο (PVC), Πολυπροπυλένιο (PP), Πολυστυρένιο (PS), Ακρυλικά, Πολυαιθερικές Κετόνες Αιθέρα (PEEK), Πολυαιθερικές Κετόνες Κετόνες (PEKK), Πολυμεθυλομεθυλακρυλικό PMMA (πλεξιγκλάς), Πολυανθρακικά - Polycarbonates (PB), Πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), Πολυαμίδια (Nylon), Polyetherimide PEI και Ultem.

4.2.2 Θερμοσκληρυνόμενα – (Thermosettings)

Θερμοσκληρυνόμενα υλικά ή θερμοσταθερά (thermosettings) είναι υλικά τα οποία αποτελούνται από μη γραμμικά και σχετικά μικρά μακρομόρια, τα οποία παρουσιάζουν ακριβώς τις αντίθετες ιδιότητες με τα θερμοπλαστικά καθώς με θέρμανση ή υπό πίεση αρχικά μαλακώνουν και μορφοποιούνται, αλλά με περαιτέρω κατεργασία αποκτούν πυκνή δικτυωτή δομή και μετατρέπονται σε σκληρά στερεά κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά είναι άμορφα σκληρά στερεά, άτηκτα και δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία, παράγονται δε με πολυμερισμό συμπίκνωσης. Τυπικά θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις τεχνολογίες AM είναι οι εποξικές ρητίνες και οι πολυεστέρες.

4.2.3 Ελαστομερή – (Elastomers)

Ελαστομερή υλικά ή ελαστικά (elastomers, rubbers) είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες τα οποία εμφανίζουν την ιδιότητα της υπερελαστικότητας, δηλαδή κατά τον εφελκυσμό επιδέχονται πολύ μεγάλη επιμήκυνση και κατά την αποφόρτιση, επιδέχονται ταχύτατη πλήρη επαναφορά. Σε πολλά ελαστομερή η διατήρηση της υπερελαστικής συμπεριφοράς διατηρείται σε ευρεία γκάμα αλλαγών θερμοκρασίας και συνθηκών περιβάλλοντος. Τυπικά ελαστικομερή, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις τεχνολογίες AM, είναι το συνθετικό και φυσικό καουτσούκ, το συνθετικό πολυϊσοπρένιο, το ελαστικό στυρένιο-βουταδιένιο, το πολυχλωροπρένιο και οι σιλικόνες.

4.2.4 Φωτοπολυμερή – (Photopolymers)

Φωτοπολυμερή υλικά είναι πολυμερή, των οποίων οι ιδιότητες αλλάζουν, όταν εκτίθενται σε φως, είτε στην υπεριώδη είτε στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η έκθεση των πολυμερών αυτών στο φως οδηγεί σε αλλαγές στην δομή τους, που κατ' επέκταση μπορούν να οδηγήσουν στην σκλήρυνση του υλικού.

4.2.5 Εμπορικά Διαθέσιμα Πολυμερή Υλικά Κατάλληλα για Τεχνολογίες AM

Μεγάλος αριθμός πολυμερών υλικών έχουν αναπτυχθεί από εταιρίες που κατασκευάζουν μηχανές AM ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις μηχανές αυτές. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα ενότητα γίνεται παρουσίαση πινάκων πολυμερών υλικών που διατίθενται εμπορικά από τις πιο μεγάλες εταιρίες στον χώρο των τεχνολογιών AM. Τα υλικά αυτά ανήκουν σε μία από τις 4 κατηγορίες που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες και πέραν από τις βασικές ιδιότητες που τα χαρακτηρίζουν, κάθε εταιρία έχει προσδώσει επιπρόσθετα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και ιδιότητες (σκληρότητα, χρώμα, βιο-συμβατότητα, αντοχή στην ακτινοβολία

UV, αντοχή στην θερμότητα κ.α.) ώστε να είναι εμπορικά ανταγωνιστικά αλλά και κατάλληλα για διαφορετικές και εξειδικευμένες εφαρμογές.

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ
Accura Xtreme	Plastic / Photopolymer
Accura 25	Plastic / Photopolymer
DuraForm PA	Plastic / PA 12
Accura 60	Plastic / Photopolymer
Accura ClearVue	Plastic / Photopolymer
DuraForm GF	Plastic / PA glass filled
Accura Bluestone	Plastic / Photopolymer
DuraForm Flex	Plastic / PA flexible
Visijet SL Clear	Plastic / Photopolymer
Accura CeraMAX Composite	Plastic / Photopolymer
Accura Xtreme White 200	Plastic / Photopolymer
DuraForm ProX	Plastic / PA 12
Visijet SL Tough	Plastic / Photopolymer
Accura 55	Plastic / Photopolymer
Accura Peak	Plastic / Photopolymer
Visijet Crystal	Plastic / Photopolymer
Accura 48HTR	Plastic / Photopolymer
Accura ABS White	Plastic / Photopolymer
Accura Cast Pro	Plastic / Photopolymer
Duraform EX	Plastic / PA 11
DuraForm FR 100	Plastic / PA with flame retardant
DuraForm HAST Composite	Plastic / PA carbon fibre filled
DuraForm HST	Plastic / PA mineral fibre filled
Visijet SL HighTemp	Plastic / Photopolymer
Visijet SL Impact	Plastic / Photopolymer
Visijet X	Plastic / Photopolymer
Accura ABS Black	Plastic / Photopolymer
Accura Amethyst	Plastic / Photopolymer
CastForm PS	Plastic / PS
Duraform Ex Black	Plastic / PP
Visijet EX200	Plastic / Photopolymer
Visijet M3 Black	Plastic / Photopolymer
Visijet Techplast	Plastic / Photopolymer
VisiJet M5 Black	Plastic / Photopolymer
VisiJet M5-X	Plastic / Photopolymer
Visijet SR200	Plastic / Photopolymer

Πίνακας 8 Πολυμερή Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ Εταιρίας 3D Systems³⁵

³⁵ <https://www.additively.com/en/material>

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ
Somos WaterShed	Plastic / Photopolymer
Somos WaterClear Ultra 10122	Plastic / Photopolymer
Somos Nanotool	Plastic / Photopolymer
Somos Next	Plastic / Photopolymer
Somos 9000 Series	Plastic / Photopolymer
Somos NeXt LV Grey	Plastic / Photopolymer
Somos ProtoGen	Plastic / Photopolymer
Somos 14120	Plastic / Photopolymer
Somos GP Plus 14122	Plastic / Photopolymer
Somos ProtoTherm	Plastic / Photopolymer
Tusk Solidgrey3000	Plastic / Photopolymer
Somos 8110	Plastic / Photopolymer
Somos ProtoCast AF 19120	Plastic / Photopolymer
Somos ProtoGen 18420	Plastic / Photopolymer
Somos 8120	Plastic / Photopolymer
Arnitel ID 2045	Plastic/TPC
Novamid ID 1070	Plastic/PA

Πίνακας 9 Πολυμερή Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ Εταιρίας DSM³⁶

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ
PA 2200	Plastic / PA 12
PA 3200 GF	Plastic / PA glass filled
Alumide	Plastic / PA aluminium filled
PA 1101	Plastic / PA 11
PA 2210 FR	Plastic / PA with flame retardant
CarbonMide	Plastic / PA carbon fibre filled
PA 2241 FR	Plastic / PA with flame retardant
PA 2202 black	Plastic / PA 12
PrimeCast 101	Plastic / PS
PEEK HP3	Plastic / PEEK
PA 2201	Plastic / PA 12

Πίνακας 10 Πολυμερή Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ Εταιρίας EOS³⁷

³⁶ <https://www.additively.com/en/material>

³⁷ <https://www.additively.com/en/material>

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ
ABS-tuff	Plastic / Photopolymer
R5	Plastic / Photopolymer
R5 Gray	Plastic / Photopolymer
R11	Plastic / Photopolymer
RC31	Plastic / Photopolymer
AB-flex	Plastic / Photopolymer
E-Denstone	Plastic / Photopolymer
EC500	Plastic / Photopolymer
LS600	Plastic / Photopolymer
PIC100	Plastic / Photopolymer
WIC100G	Plastic / Photopolymer
E-Dent	Plastic / Photopolymer
E-Partial / EC1000	Plastic / Photopolymer
E-Shell 200 Series	Plastic / Photo-reactive acrylate
E-Shell 300 Series	Plastic / Photo-reactive acrylate
E-Shell 500 Series	Plastic / Photo-reactive acrylate
E-Shell 600 Series	Plastic / Photo-reactive acrylate
E-Shell 3000 Series	Plastic / Photo-reactive acrylate
HTM140	Plastic / Photopolymer
HTM140	Plastic / Photopolymer
Photosilver	Plastic / Photopolymer
Press-E-Cast / WIC300	Plastic / Photopolymer
RC25	Plastic / Photopolymer
PEC 5050 (wax filled)	Plastic / Photopolymer
RCP 130 (ceramic filled)	Plastic / Photopolymer

Πίνακας 11 Πολυμερή Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ Εταιρίας Envisiontec³⁸

³⁸ <https://www.additively.com/en/material>

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ
ABS plus	Plastic / ABS
PC	Plastic / PC
FullCure 830 Vero White	Plastic / Photopolymer
VeroWhitePlus RGD835	Plastic / Photopolymer
ABS-M30	Plastic / ABS
FullCure 720	Plastic / Photopolymer
ULTEM 9085	Plastic / PEI
FullCure 870 Vero Black	Plastic / Photopolymer
FullCure 970 Tango Black	Plastic / Photopolymer
FullCure 950 Tango Gray	Plastic / Photopolymer
VeroBlackPlus RGD875	Plastic / Photopolymer
ABS-like	Plastic / Photopolymer
FullCure 810 Vero Clear	Plastic / Photopolymer
Nylon 12	Plastic / PA 12
Rubber-like	Plastic / Photopolymer
Transparent	Plastic / Photopolymer
PC-ABS	Plastic / PC - ABS blend
ABS-M30i	Plastic / ABS
Digital material	Plastic / Photopolymer
Objet VeroWhitePlus	Plastic / Photopolymer
PC-ISO	Plastic / PC
Polypropylene-like	Plastic / Photopolymer
VeroBlue RGD840	Plastic / Photopolymer
ABSi	Plastic / ABS
High temperature	Plastic / Photopolymer
Objet TangoBlackPlus	Plastic / Photopolymer
Ridig Opaque	Plastic / Photopolymer
ABS-ESD7	Plastic / ABS
FullCure 930 Tango Plus	Plastic / Photopolymer
FullCure 980 Tango Black Plus	Plastic / Photopolymer
Objet ABS-like Digital Material	Plastic / Photopolymer
Objet DurusWhite	Plastic / Photopolymer
ASA	Plastic / ASA
ULTEM 1010 Resin	Plastic / PEI
Bio-compatible	Plastic / Photopolymer
Dental material	Plastic / Photopolymer
Objet VeroGray	Plastic / Photopolymer
Vero Yellow RGD836	Plastic / Photopolymer
Endur RGD450	Plastic / Photopolymer
Objet High Temperature Material	Plastic / Photopolymer
Objet VeroBlackPlus	Plastic / Photopolymer
Objet VeroBlue	Plastic / Photopolymer
Objet VeroCyan	Plastic / Photopolymer
Objet VeroMagenta	Plastic / Photopolymer
Objet VeroYellow	Plastic / Photopolymer
PPSF PPSU	Plastic / PPSF
Vero Cyan RGD841	Plastic / Photopolymer
Vero Magenta RGD851	Plastic / Photopolymer
Clear Bio-compatible	Plastic / Photopolymer
Endur	Plastic / Photopolymer
RGD531	Plastic / Photopolymer

Πίνακας 12 Πολυμερή Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ Εταιρίας Stratasys³⁹³⁹ <https://www.additively.com/en/material>

	ABSplus-P430	ABSi	ABS-ESD7	ABS-M30	ABS-M30i	PC-ABS	PC-ISO	PC	ULTEM-9085	PPSF PPSU
FORTUS 250mc	X	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
FORTUS 360mc	-----	-----	-----	X	-----	X	-----	X	-----	-----
FORTUS 400mc	-----	X	X	X	X	X	X	X	X	X
FORTUS 900mc	-----	-----	X	X	X	X	X	X	X	X
Layer Thickness										
0.013 inch	X	X	-----	X	X	X	X	X	X	X
0.010 inch	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0.007 inch	X	X	X	X	X	X	X	X	-----	-----
0.005 inch	-----	X	-----	X	X	X	-----	-----	-----	-----
Support Structure	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	BASS	BASS	BASS	BASS
Available Colors	Ivory White Black Dark Gray Red Blue Olive Green Nectarine Fluorescent Yellow Custom Colors	Translucent Natural Translucent Amber Translucent Red	Black	Natural White Black Dark Gray Red Blue	Ivory	Black	White Translucent Natural	White	Tan	Tan
Tensile Strength	5,300 psi (37 MPa)	5,400 psi (37 MPa)	5,200 psi (36 MPa)	5,200 psi (36 MPa)	5,200 psi (36 MPa)	5,900 psi (41 MPa)	8,265 psi (57 MPa)	9,800 psi (68 MPa)	10,390 psi (71.64 MPa)	8,000 psi (55 MPa)
Elongation Strength	3.0 %	4.4 %	3.0 %	4.0 %	4.0%	6.0%	4.3%	4.8%	5.9%	3.0%
Flexural Stress	7,600 psi (53 MPa)	8,980 psi (62 MPa)	8,800 psi (61 MPa)	8,800 psi (61 MPa)	8,800 psi (61 MPa)	9,800 psi (68 MPa)	13,089 psi (90 MPa)	15,100 psi (104 MPa)	16,700 psi (115.1 MPa)	15,900 psi (110 MPa)
IZOD Impact, notched	2.0 ft-lb/in (106 J/m)	1.8 ft-lb/in (96 J/m)	2.1 ft-lb/in (111 J/m)	2.6 ft-lb/in (139 J/m)	2.6 ft-lb/in (139 J/m)	3.7 ft-lb/in (196 J/m)	1.6 ft-lb/in (86 J/m)	1.0 ft-lb/in (53 J/m)	2.0 ft-lb/in (106 J/m)	1.1 ft-lb/in (58.73 J/m)
Heat Deflection	204°F (96°C)	188°F (87°C)	204°F (96°C)	204°F (96°C)	204°F (96°C)	230°F (110°C)	271°F (133°C)	280°F (138°C)	307°F (153°C)	372°F (189°C)
Unique Properties	Variety of color options	Translucent material	Static dissipative with a target surface resistance of 10 ⁷ ohms.*	Variety of color options	ISO-10993 certified	Highest impact resistance	ISO 10993 certified	Highest tensile strength	FST (flame, smoke, toxicity) certified material	Highest heat and chemical resistance

Πίνακας 13 Συγκριτικός Πίνακας Θερμοπλαστικών Υλικών Μηχανών Fortus FDM της εταιρίας Stratasys

4.3 Μεταλλικά Υλικά

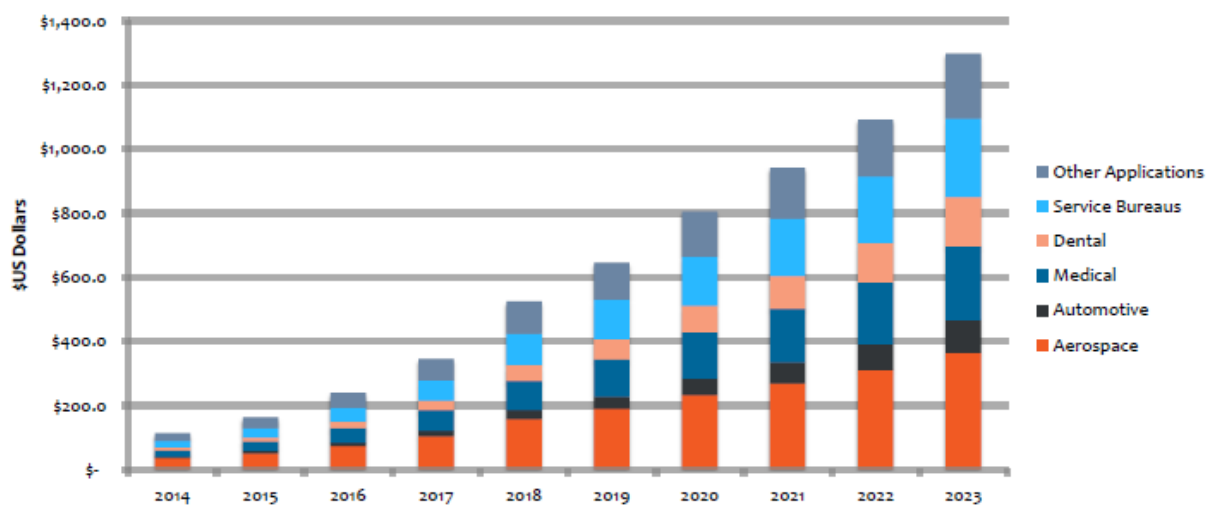
Μεταλλικά υλικά είναι ανόργανες ουσίες, αποτελούμενες από ένα ή περισσότερα μεταλλικά στοιχεία, που είναι δυνατόν να περιέχουν και προσμίξεις αμετάλλων. Τα μεταλλικά στοιχεία είναι χημικά στοιχεία (περίπου 70 τον αριθμό) τα οποία παρουσιάζουν ομοιότητα επί τη βάσει των περισσότερων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων τους όπως είναι το υψηλό ειδικό βάρος, η αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης με τη θερμοκρασία, η μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μεταλλική λάμψη, η υψηλή μηχανική αντοχή και πλαστικότητα. Στην κατηγορία των υλικών αυτών χρησιμοποιείται η έννοια κράμα, όπου κράμα καλείται κάθε μείγμα δύο ή περισσότερων στοιχείων (Α,Β,..., κ.λπ.) από τα οποία το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του κράματος είναι ότι τα συστατικά του στοιχεία συμμετέχουν στη δημιουργία μίας κοινής κρυσταλλικής δομής, η οποία προκαλείται συνήθως με σύντηξη των στοιχείων του κράματος και ακόλουθη στερεοποίηση (πήξη). Τα μεταλλικά υλικά (μέταλλα και κράματά τους) αποτελούν κατηγορία των τεχνικών υλικών που έχουν μεγάλη αντοχή και παραμορφώνονται εύκολα και γι' αυτό εφαρμόζονται εκτεταμένα στον κατασκευαστικό τομέα (αυτοκινητοβιομηχανία, αεροναυπηγική, αεροδιαστημική, κατασκευή κτιρίων κλπ.). Η επιλογή του κατάλληλου μετάλλου ακόμη και για μια απλή κατασκευή καθίσταται δύσκολη λόγω της

ποικιλίας των διατιθέμενων υλικών, εξαρτάται δε από το είδος της κατασκευής-εφαρμογής, τις συνθήκες λειτουργίας (φυσικό περιβάλλον, ανθρώπινο δυναμικό), τη λειτουργική χρήση και τον οικονομικό παράγοντα.

Τα μεταλλικά υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις τεχνολογίες ΑΜ παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία και είναι τα ακόλουθα: το Αλουμίνιο (Al) και τα κράματα Al, ο Ορείχαλκος (Brass) που είναι κράμα χαλκού (Cu) και ψευδαργύρου (Zn), ο Μπρούντζος (Bronze) που είναι κράμα χαλκού (Cu) με Κασσίτερο, ο Χρωμίτης (Chromite) που είναι ένα ορυκτό οξείδιο του σιδήρου (Fe) και του χρωμίου (Cr), το Κοβάλτιο (Cobalt) και τα κράματα Cb, ο Χαλκός (Cu), ο Χρυσός (Au), ο Σίδηρος (Fe) και τα κράματα Fe, το Νικέλιο (Ni) και κράματα Ni, ο Λευκόχρυσος (Platinum), τα Πυρίμαχα Μέταλλα (Refractory metal) όπως Βολφράμιο, ο Αργυρός (Ag) ή Ασήμι (Silver) και το Τιτάνιο (Ti) και τα κράματα Ti.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν ορισμένα κράματα τα οποία τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής στις τεχνολογίες ΑΜ. Τέτοια είναι οι χάλυβες (Steel) που είναι κράματα σιδήρου (Fe) και Άνθρακα (C) και πιο συγκριμένα οι Απλοί Ανθρακούχοι Χάλυβες (Plain Carbon Steel) των οποίων η περιεκτικότητα σε Άνθρακα είναι μέχρι 1,7% και οι οποίοι περιέχουν κυρίως Μαγγάνιο, οι Χάλυβες Εργαλείων (Tool Steel) οι οποίοι περιέχουν συνήθως μεγάλα ποσοστά κραματικών στοιχείων (W, Mo, Cr, V), τα οποία ευνοούν την αύξηση της σκληρότητας και της αντίστασης σε φθορά-τριβή και οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κοπής (κοπτικά τόννου, φρέζας, πλάνης, κ.λπ.) ή διαμόρφωσης (μήτρες, έμβολα, καλούπια χύτευσης και διαμόρφωσης) καθώς και οι Ανοξειδωτοι Χάλυβες (Stainless Steel) των οποίων η περιεκτικότητα σε Χρώμιο είναι τουλάχιστον 12% και οι οποίοι έχουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Επίσης τα κράματα Κοβαλτίου – Χρωμίου τα οποία έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τον ανοξειδωτο χάλυβα αλλά μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία για βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Ιδιαίτερα διαδεδομένα στις τεχνολογίες ΑΜ είναι και τα υπερκράματα Νικελίου-Χρωμίου, τα οποία είναι κράματα Ni-Cr-Co-Mo-Ti-Al και Ni-Cr-Co-Fe-Mo-Ti-Al-W, που σκληραίνουν σε μεγάλο βαθμό με κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και οξείδωση υψηλών θερμοκρασιών, καθώς επίσης και μεγάλη αντοχή στον ερπυσμό, με χαρακτηριστικότερα τα Inconel 625, 718 και Hasteloy C. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθούν και τα κράματα Αλουμινίου (ελαφρύ μέταλλο) τα οποία εμφανίζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, μεγάλη μηχανική αντοχή και χαμηλό βάρος και αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο σε κατασκευές στην αυτοκινητοβιομηχανία και κυρίως την αεροναυπηγική. Αντίστοιχα, είναι και τα κράματα Τιτανίου (ελαφρύ μέταλλο) τα οποία παρουσιάζουν χαμηλό ειδικό βάρος, μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και πυριμαχικότητα (αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες) και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική (στην

κατασκευή τμημάτων αεριοθούμενων κινητήρων και αεροσυμπιεστών, πτερυγίων αεροστροβίλων κ.α.). Ένα άλλο κράμα με βάση το Αλουμίνιο είναι το Scalmalloy, το οποίο αναπτύχθηκε από την AIRBUS GROUP και είναι κράμα Αλουμινίου-Μαγνησίου-Σκανδίου (AlMgSc) σε μορφή σκόνης, με υψηλή μηχανική αντοχή, υψηλή αντοχή σε κόπωση και διάβρωση, σχεδιασμένο για χρήση σε τεχνολογίες Laser Powder Bed Additive Layer Manufacturing. Τέλος, αναφέρεται το υλικό Alumide, το οποίο είναι ουσιαστικά νάιλον, που γεμίζεται με σκόνη αλουμινίου και χρησιμοποιείται ευρύτατα σε τεχνολογίες 3D Printing.



Εικόνα 49 Συνολικά Έσοδα Πώλησης Μεταλλικών Υλικών σε μορφή σκόνης για Τεχνολογίες AM ανά Βιομηχανία⁴⁰

4.3.1 Εμπορικά Διαθέσιμα Μεταλλικά Υλικά Κατάλληλα για Τεχνολογίες AM

Μεγάλη ποικιλία μεταλλικών υλικών έχουν αναπτυχθεί από εταιρίες που κατασκευάζουν μηχανές AM ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις μηχανές αυτές. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα ενότητα γίνεται παρουσίαση πινάκων μεταλλικών υλικών που διατίθενται εμπορικά από τις πιο μεγάλες εταιρίες στον χώρο των τεχνολογιών AM. Στα υλικά αυτά πέραν από τις βασικές ιδιότητες που τα χαρακτηρίζουν, κάθε εταιρία έχει προσδώσει επιπρόσθετα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και ιδιότητες ώστε να είναι εμπορικά ανταγωνιστικά αλλά και κατάλληλα για διαφορετικές και εξειδικευμένες εφαρμογές.

⁴⁰ SmarTech Markets Publishing, *Opportunities in Metal Additive Manufacturing*

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ
Ti6Al4V	Metal / titanium
Ti6Al4V ELI	Metal / titanium
CoCr ASTM F75	Metal / cobalt-chromium alloys
Ti Grade 2	Metal / titanium

Πίνακας 14 Μεταλλικά Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ Εταιρίας Arcam⁴¹

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ
CL 20ES / 1.4404	Metal / stainless steel
CL 50WS	Metal / hot work steel
CL 100NB / Inconel 718	Metal / nickel-based alloys
CL 31AL / AlSi10Mg	Metal / Aluminium
CL 30AL / AlSi12	Metal / Aluminium
CL 91RW	Metal / hot work steel
CL 20	Metal / stainless steel
Remanium Star CL	Metal / cobalt-chromium alloys
CL 50WS	Metal / tool steel
CL 41TI ELI	Metal / titanium
CL 92PH	Metal / stainless steel
CL 42TI	Metal / titanium
CL 60 DG	Metal / hot work steel
CL 80CU	Metal / copper-based alloys
CL 101NB	Metal / nickel-based alloys
RemaTitan CL	Metal / titanium

Πίνακας 15 Μεταλλικά Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ Εταιρίας Concept Laser⁴²

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ
AlSi10Mg	Metal / Aluminium
Ti64	Metal / titanium
CoCr MP1	Metal / cobalt-chromium alloys
MaragingSteel MS1	Metal / tool steel
GP1	Metal / stainless steel
IN625	Metal / nickel-based alloys
IN718	Metal / nickel-based alloys
PH1	Metal / stainless steel
CoCr SP2	Metal / cobalt-chromium alloys
Stainless Steel 316L	Metal / stainless steel
NickelAlloy HX	Metal / nickel-based alloys

Πίνακας 16 Μεταλλικά Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ Εταιρίας EOS⁴³

⁴¹ <https://www.additively.com/en/material>

⁴² <https://www.additively.com/en/material>

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ
12709	Metal / hot work steel
1.4404 / 316L	Metal /stainless steel
Al Si10 Mg	Metal /Aluminium
Ti Al6V4	Metal / titanium
Al Si12	Metal / Aluminium
1.2344 / H13	Metal / stainless steel
1.4542 / 17-4PH	Metal / stainless steel
CoCr ASTM F75	Metal / cobalt-chromium alloys
Ti Al6Nb7	Metal / titanium
1441	Metal / stainless steel
cp-titanium	Metal / titanium
M333	Metal / stainless steel

Πίνακας 17 Μεταλλικά Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ Εταιρίας Renishaw⁴⁴

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ
AlSi10Mg	Metal / Aluminium
Ti6Al4V	Metal / titanium
14404	Metal / stainless steel
Hastelloy X	Metal / nickel-based alloys
Inconel 718	Metal / nickel-based alloys
1.2344 H13	Metal / hot work steel
AlSi7Mg	Metal / Aluminium
AlSi12	Metal / Aluminium
Inconel 625	Metal / nickel-based alloys

Πίνακας 18 Μεταλλικά Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ Εταιρίας SLM Solutions⁴⁵

4.4 Κεραμικά

Τα κεραμικά υλικά είναι ανόργανα μη μεταλλικά υλικά, τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000 °C) είτε κατά το στάδιο της επεξεργασίας του είτε κατά το στάδιο της εφαρμογής τους και καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα χημικών συστάσεων και φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Τα πλεονεκτήματα των κεραμικών είναι η σχετικά χαμηλή τους πυκνότητα, το υψηλό σημείο τήξης τους, το υψηλό μέτρο ελαστικότητάς τους, η χαμηλή θερμική και ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, η καλή τους αντίσταση σε θλίψη, η πολύ υψηλή τους σκληρότητα καθώς και η πυρίμαχη, η αντιδιαβρωτική και η αντιτριβική τους συμπεριφορά. Μειονεκτήματα των κεραμικών αποτελούν η μικρή τους αντίσταση σε

⁴³ <https://www.additively.com/en/material>

⁴⁴ <https://www.additively.com/en/material>

⁴⁵ <https://www.additively.com/en/material>

εφελκυσμό, η ευθραυστότητά τους, το υψηλό κόστος παραγωγής ορισμένων από αυτά, η εύκολη διάδοση των ρωγμών, η μεγάλη επίδραση της μικροδομής, των δευτερευουσών φάσεων και του πορώδους στην αντοχή σε θραύση και στις φυσικές τους ιδιότητες, η μικρή αντοχή τους σε κόπωση, λυγισμό και κρούση καθώς και η έλλειψη ειδικών μεθόδων μη καταστροφικών δοκιμών για τον έλεγχό τους. Τα κεραμικά υλικά ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες:

- Παραδοσιακά κεραμικά (μίγμα αργίλου, άμμου και ορυκτών της ομάδας των αργιλοπυριτικών μετά από έψησή του στους 850-1200 °C)
- Προηγμένα κεραμικά (οξειδία, καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια, πυριτίδια, φθορίδια, όπως το οξείδιο αργιλίου ή αλουμίνα, η ζirkονία, το καρβίδιο του πυριτίου, το νιτρίδιο του πυριτίου, τα SiAlONs, ο άνθρακας κ.α.)
- Γυαλιά
- Ορυκτά κεραμικά
- Τσιμέντο

Στις τεχνολογίες AM χρησιμοποιείται σχετικά περιορισμένος αριθμός κεραμικών όπως η αλουμίνα (οξείδιο του αργιλίου – Al_2O_3), η ζirkονία (ZrO_2), η πορσελάνη (Mullite), πυρίτιο (silica), καρβίδιο του πυριτίου (SiC), νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4), γύψος, γραφίτης, cermet και Beta-tricalcium phosphate (beta-TCP).

4.4.1 Εμπορικά Διαθέσιμα Κεραμικά Υλικά Κατάλληλα για Τεχνολογίες AM

Ο αριθμός των κεραμικών υλικών που έχουν αναπτυχθεί από εταιρίες που κατασκευάζουν μηχανές AM ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις μηχανές αυτές είναι σχετικά περιορισμένος και στον πίνακα 19 απεικονίζονται τα κεραμικά ανά εταιρία.

Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type	Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type
3DCeram	Alumina (3DCeram)	Ceramic	Alumina	ExOne	Black Iron Oxide	Ceramic	
3DCeram	Zirconia ($\text{ZrO}_2/\text{MgO-PSZ}$)	Ceramic	Zirconia	ExOne	Ceramic Beads	Ceramic	Zircon
3DCeram	Zirconia ($\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3\text{:TZP}$)	Ceramic	Zirconia	ExOne	Chromite	Ceramic	
DWS Systems	IRIX Digital Stone	Ceramic	Gypsum	ExOne	Soda Lime Glass	Ceramic	Glass
DWS Systems	RDECO (Digital Impression Resin)	Ceramic	Gypsum	Lithoz	LithaCon 3Y 610 Purple (ZrO_2)	Ceramic	Zirconia
DWS Systems	TEMPORIS	Ceramic		Lithoz	LithaLox HP 500 (Al_2O_3)	Ceramic	Alumina
EnvisionTEC	E-Denstone	Ceramic	Gypsum				
EnvisionTEC	E-Denstone M	Ceramic	Gypsum				

Πίνακας 19 Κεραμικά Υλικά Τεχνολογιών AM⁴⁶

⁴⁶ http://senvol.com/5_material-search/

4.5 Σύνθετα Υλικά

Σύνθετα υλικά είναι τα υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συστατικά, τα οποία συνδυάζονται για να επιτευχθούν ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, που κανένα από τα συμμετέχοντα συστατικά δεν μπορεί από μόνο του να επιτύχει. Τα συνθετικά υλικά χαρακτηρίζονται από την συνύπαρξη δυο τουλάχιστον μακροσκοπικά διακρινόμενων συστατικών, από τα οποία το ένα, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο υλικό εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Ανάλογα με την μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: α) Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (Fibrous Composites), β) Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (Particulate Composites), γ) Στρωματικά σύνθετα υλικά (Laminar Composites). Ανάλογα με το υλικό της μήτρας τα σύνθετα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: α) Πολυμερικής Μήτρας (Polymer Matrix Composites – PMC), β) Μεταλλικής Μήτρας (Metal Matrix Composites – MMC) γ) Κεραμικής Μήτρας (Ceramic Matrix Composites – CMC).

Στις τεχνολογίες AM χρησιμοποιείται σχετικά μεγάλος αριθμός σύνθετων υλικών τόσο κεραμικής μήτρας⁴⁷ (ZrO_2 , Y_2O_3 , Al, Al_2O_3 , TiO_2 , TiC/Al_2O_3) όσο και μεταλλικής μήτρας⁴⁸ (Fe-graphite, Ti-graphite/diamond, Ti-SiC, AlSi-SiC, AlMg-SiC, Co-WC, Fe-SiC and Cu, Ni, Ti, C, Cu-TiC and Cu, Ni, Ti, B_4C , Cu-TiB₂) καθώς και Reinforced Al-4.5Cu-3Mg⁴⁹.

4.5.1 Εμπορικά Διαθέσιμα Σύνθετα Υλικά Κατάλληλα για Τεχνολογίες AM

Ο αριθμός των σύνθετων υλικών που έχουν αναπτυχθεί από εταιρίες που κατασκευάζουν μηχανές AM ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις μηχανές αυτές είναι μεγάλος και στους πίνακες που ακολουθούν απεικονίζονται ανά εταιρία.

⁴⁷ Kumar S, Kruth JP. Composites by rapid prototyping technology. Mater. Des. 2010; 31 (2): 850–856.

⁴⁸ Kumar S, Kruth JP. Composites by rapid prototyping technology. Mater. Des. 2010; 31 (2): 850–856.

⁴⁹ Ghosh SK, Saha P, Kishore S. Influence of size and volume fraction of SiC particulates on properties of ex situ reinforced Al-4.5Cu-3Mg metal matrix composite prepared by direct metal laser sintering process. Mater. Sci. Eng. A, 2010; 527 (18–19): 4694–4701.

Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type	Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type	Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type
3D Systems	Accura Bluestone	Composite		3DXTech	3DXMax Carbon Fiber Reinforced Nylon Filament	Composite	PA-Carbon	3DXTech	CarbonX Carbon Fiber Reinforced Nylon 3D Filament	Composite	PA-Carbon
3D Systems	Accura Bluestone	Composite									
3D Systems	Accura CeraMAX	Composite		3DXTech	3DXMax Carbon Fiber Reinforced PETG Filament	Composite	PETG-Carbon	3DXTech	CarbonX Carbon Fiber Reinforced PETG 3D Filament	Composite	PETG-Carbon
3D Systems	Accura CeraMAX	Composite									
3D Systems	DuraForm GF	Composite	PA-Glass	3DXTech	3DXMax Glass Fiber Reinforced PETG Filament	Composite	PETG-Glass	3DXTech	CarbonX Carbon Fiber Reinforced PLA 3D Filament	Composite	PLA-Carbon
3D Systems	DuraForm HST	Composite		3DXTech	3DXNano ESD ABS Carbon Nanotube Filament	Composite	ABS-Carbon	3DXTech	Firewire Carbon Fiber Reinforced PEEK Filament	Composite	PEEK-Carbon
3D Systems	Visijet PXL	Composite	Gypsum								
3D Systems	Visijet PXL	Composite	Gypsum	3DXTech	3DXNano ESD PETG Carbon Nanotube Filament	Composite	PETG-Carbon				
3D Systems	Visijet PXL	Composite	Gypsum	3DXTech	CarbonX Carbon Fiber Reinforced ABS 3D Filament	Composite	ABS-Carbon				
3DXTech	3DXMax Carbon Fiber Reinforced ABS Filament	Composite	ABS-Carbon								

Πίνακας 20 Σύνθετα Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ εταιριών 3D Systems και 3DXTech⁵⁰

Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type	Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type
Optomec	Composite CrC	Composite	Carbon-Metal Composite	Prodways	PA11-GF 3450 Black	Composite	PA-Glass
Optomec	Composite TiC	Composite	Carbon-Metal Composite	Prodways	PA12-CF 6500	Composite	PA-Carbon
Optomec	Composite WC	Composite	Carbon-Metal Composite	Prodways	PA12-GF 2500	Composite	PA-Glass
Oxford Performance Materials	OXFAB ESD 15% Carbon Filled	Composite	PEKK	Prodways	PA12-GFX 2550	Composite	PA-Glass
Prodways	PA11-GF 3450	Composite	PA-Glass	Prodways	PA12-MF 6150	Composite	PA-Mineral

Πίνακας 21 Σύνθετα Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ εταιριών Optomec, Oxford Performance Materials & Prodways⁵¹

⁵⁰ http://senvol.com/5_material-search/

⁵¹ http://senvol.com/5_material-search/

Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type	Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type
addwii	CMYK Full Color	Composite	Gypsum	Arevo Labs	Quantevo-CF	Composite	PAEK-Carbon
ALM	PA 415-GS	Composite	PA-Glass	Arevo Labs	Wear Grade PEEK	Composite	PEEK-Composite
ALM	PA 601-CF	Composite	PA-Carbon	Arevo Labs	Xanevo-GF	Composite	PARA-Glass
ALM	PA 605-A	Composite	PA-Metal	CRP Technology	Windform EL	Composite	PA-Glass
ALM	PA 614-GS	Composite	PA-Glass	CRP Technology	Windform GF 2.0	Composite	PA-Glass
ALM	PA 615-GS	Composite	PA-Glass	CRP Technology	Windform GT	Composite	PA-Glass
ALM	PA 616-GS	Composite	PA-Glass	CRP Technology	Windform SP	Composite	PA-Carbon
ALM	PA 620-MF	Composite	PA-Mineral	CRP Technology	Windform XT 2.0	Composite	PA-Carbon
ALM	PA 802-CF	Composite	PA-Carbon	EnvisionTEC	E-Appliance	Composite	
Arevo Labs	Katevo-CF	Composite	PEEK-Carbon	EnvisionTEC	Photosilver (RCP130)	Composite	

Πίνακας 22 Σύνθετα Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ εταιριών ALM, Arevo Labs, CRP Technology & EnvisionTEC⁵²

Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type	Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type
EnvisionTEC	Press-E-Cast	Composite		ExOne	Tungsten Carbide	Composite	Carbon-Metal Composite
EnvisionTEC	Press-E-Cast M	Composite		Hunan Farsoon	FS3250MF	Composite	PA-Mineral
EnvisionTEC	RC31	Composite		Hunan Farsoon	FS3400 GF	Composite	PA-Glass
EnvisionTEC	RC70	Composite		Hunan Farsoon	FS3400CF	Composite	PA-Carbon
EnvisionTEC	RC90	Composite		LPW	LPW WC CoCr	Composite	Cermet
EnvisionTEC	RCP30	Composite		MarkForged	Carbon Fiber FFF	Composite	PA-Carbon
EnvisionTEC	WIC100G	Composite		MarkForged	Fiberglass FFF	Composite	PA-Glass
EOS	Alumide	Composite	PA-Metal	MarkForged	HSHT Fiberglass	Composite	PA-Glass
EOS	CarbonMide	Composite	PA-Carbon	MarkForged	Kevlar FFF	Composite	PA-Aramid
EOS	PA 3200 GF	Composite	PA-Glass	MarkForged	Onyx	Composite	PA

Πίνακας 23 Σύνθετα Υλικά Τεχνολογιών ΑΜ εταιριών EnvisionTEC, EOS, ExOne, Human Farsoon, LPW & MarkForged⁵³

⁵² http://senvol.com/5_material-search/

⁵³ http://senvol.com/5_material-search/

4.6 Λοιπά Υλικά

Στις τεχνολογίες ΑΜ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ορισμένα άλλα υλικά τα οποία δεν είναι ιδιαίτερα συνηθισμένα. Τέτοια υλικά είναι τα οργανικά υλικά, όπως το κερί, το χαρτί καθώς και η άμμος. Επιπρόσθετα, τέτοια υλικά είναι τα βιο-συμβατά υλικά ή βιολυτικά τα οποία είναι υλικά που προορίζονται για τη διασύνδεση με βιολογικά συστήματα με στόχο την αξιολόγηση, τη θεραπεία, την αύξηση ή την αντικατάσταση ενός ιστού ή ενός οργάνου. Βιο-συμβατά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις τεχνολογίες ΑΜ είναι τα ακόλουθα: Polycaprolactone (PCL), polypropylene-tricalcium phosphate, (PP-TCP), PCL-hydroxyapatite (HA), polyetheretherketone-hydroxyapatite, (PEEK-HA), tetracalcium phosphate (TTCP), beta – tricalcium phosphate (TCP), Polymethyl methacrylate (PMMA). Επίσης, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά Functionally Graded Material (FGM) τα οποία είναι υλικά των οποίων η σύνθεση και η δομή μεταβάλλεται σταδιακά κατ' όγκο, με αποτέλεσμα αντίστοιχες αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού. Τέλος αξίζει να αναφερθεί και η χρήση τροφίμων για την παραγωγή φαγητού από 3D εκτυπωτές.

Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type	Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type
3D Systems	Visijet Hi-Cast	Wax	Wax	DWS Systems	DC700	Wax	Wax
3D Systems	Visijet Prowax	Wax	Wax	DWS Systems	RF065	Wax	Wax
Asiga	SuperCAST	Wax	Wax	DWS Systems	RF068	Wax	Wax
Asiga	SuperCAST v3	Wax	Wax	DWS Systems	RF080	Wax	Wax
DWS Systems	DC100	Wax	Wax	EnvisionTEC	Easy Cast EC500	Wax	Wax
DWS Systems	DC300	Wax	Wax	EnvisionTEC	Easy Cast EC500 M	Wax	Wax
DWS Systems	DC400	Wax	Wax	Soldiscap	3Z LabCAST	Wax	
DWS Systems	DC500	Wax	Wax	Soldiscap	3Z Model	Wax	
DWS Systems	DC550	Wax	Wax	Stratasys	CrownWorx TrueCast	Wax	Wax
DWS Systems	DC600	Wax	Wax	Stratasys	FrameWorx TrueCast	Wax	Wax

Πίνακας 24 Υλικά Κατηγορίας Άμμου Τεχνολογιών ΑΜ εταιριών 3D Systems, Asiga, DWS Systems, EnvisionTEC, Soldiscap & Stratasys

Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type	Material Supplier ▲	Material Name	General Material Type	Specific Material Type
EOS	Ceramics 5.2	Sand	Silicate	voxeljet	Kerphalit (Furan Direct Binding)	Sand	Silicate
EOS	Quartz 4.2	Sand	Silicate	voxeljet	Silica Sand - GS 14 (Furan Direct Binding)	Sand	Silicate
EOS	Quartz 5.7	Sand	Silicate				
EOS	Quartz 5.7	Sand	Silicate	voxeljet	Silica Sand - GS 19 (Furan Direct Binding)	Sand	Silicate
ExOne	FS 001 ExOne silica sand	Sand	Silicate	voxeljet	Silica Sand - GS 25 (Furan Direct Binding)	Sand	Silicate
ExOne	FS 003 ExOne silica sand for higher core permeability	Sand	Silicate				
ExOne	FS 005 ExOne silica sand	Sand	Silicate	voxeljet	Silica Sand - Inorganic binder	Sand	Silicate
ExOne	FS 052 ExOne synthetic sand	Sand	Silicate				
ExOne	Silica Sand	Sand					
ExOne	Zircon	Sand					

Πίνακας 25 Υλικά Κατηγορίας Κερνού Τεχνολογιών ΑΜ εταιριών EOS, ExOne & Voxeljet

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΜ ΣΤΗΝ
ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ -
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ UAV**

5.1 Εφαρμογές Τεχνολογιών ΑΜ

Οι τεχνολογίες ΑΜ έχουν τεράστιο εύρος βιομηχανικών εφαρμογών και για τον λόγο αυτό δαπανώνται τεράστια ποσά ετησίως στην έρευνα και ανάπτυξη τόσο των υλικών, όσο και των μηχανών ΑΜ. Έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια ότι αρχικά οι τεχνολογίες ΑΜ υιοθετήθηκαν ως μέσο κατασκευής φυσικών πρωτοτύπων και μοντέλων κατά την φάση σχεδιασμού και ανάπτυξης νέων προϊόντων (Ταχεία Πρωτοτυποποίηση – Rapid Prototyping). Στην συνέχεια, οι τεχνολογίες ΑΜ υιοθετήθηκαν για την ταχεία κατασκευή εργαλείων παραγωγής (Rapid Tooling), ενώ στην πορεία κατέστη εφικτή η παραγωγή αντικειμένων τα οποία προορίζονταν είτε να διατεθούν άμεσα στον τελικό χρήστη (τελικά προϊόντα) είτε ως συστατικά μέρη – εξαρτήματα ενός ολοκληρωμένου προϊόντος. Οι τομείς της βιομηχανίας στους οποίους βρίσκουν εφαρμογή είναι η αεροπορική βιομηχανία, η αμυντική βιομηχανία, η αυτοκινητοβιομηχανία, η βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου και αερίου, η βιομηχανία ηλεκτρονικών, η βιομηχανία κατασκευής επίπλων, η βιομηχανία της ενέργειας, η βιομηχανία τροφίμων, η βιομηχανία της μόδας και των κοσμημάτων. Επίσης, εφαρμογές των ανωτέρω τεχνολογιών συναντώνται στην τέχνη – γλυπτική και στην εκπαίδευση.

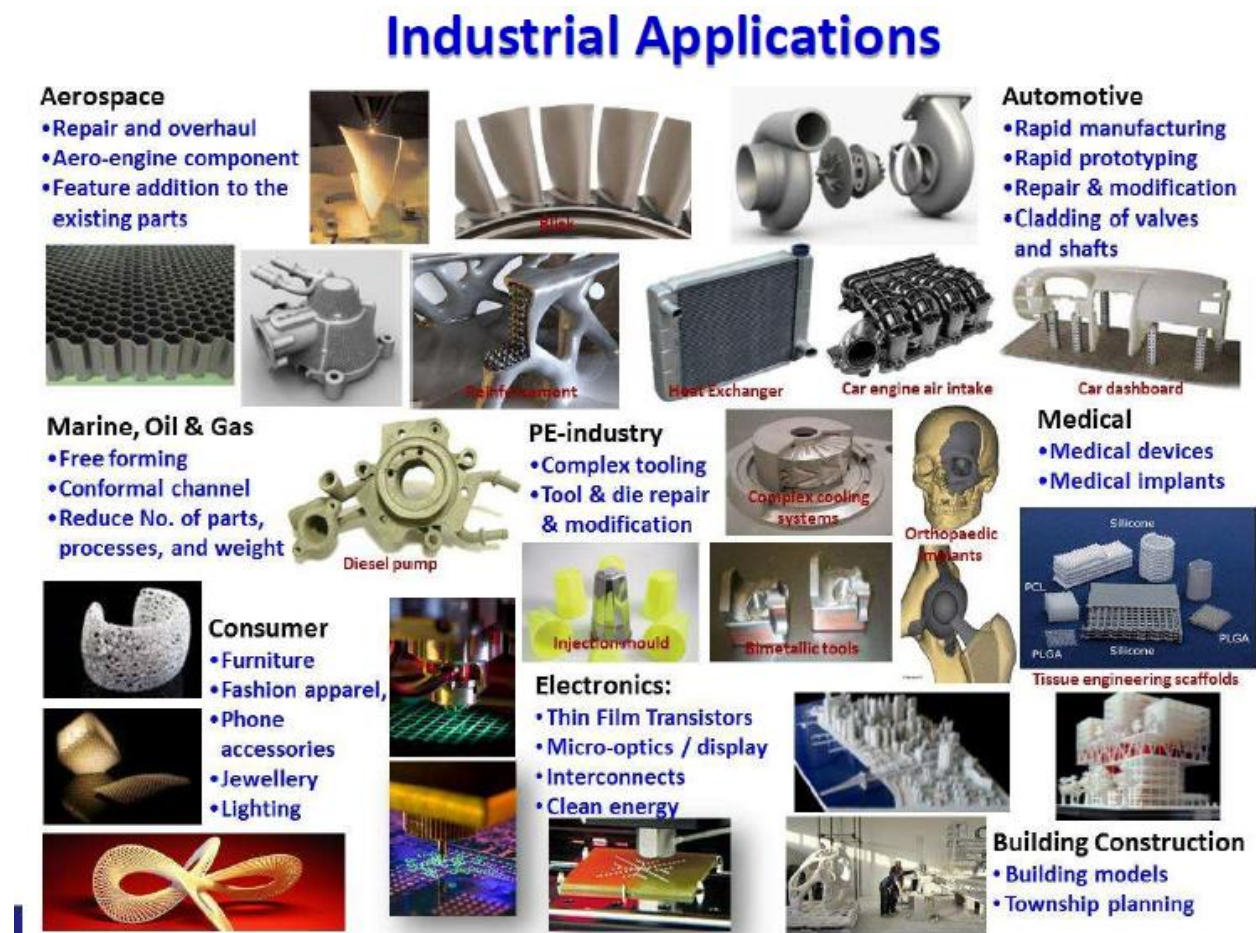


Εικόνα 50 Η πρώτη 3D printed μοτοσικλέτα «Light Rider» βάρους μόλις 35 κιλών, κατασκευασμένη από Scalmalloy (ειδικό κράμα αλουμινίου που συνδυάζει το χαμηλό βάρος του αλουμινίου και την αντοχή του τιτανίου) από την εταιρία Apworks που είναι θυγατρική της Airbus.⁵⁴

Τέλος, ιδιαίτερης σημασίας είναι οι δυνατότητες που παρέχουν οι τεχνολογίες ΑΜ στην ιατρική, για κατασκευή εξειδικευμένων χειρουργικών εργαλείων, εμφυτευμάτων, ακουστικών βαρηκοΐας, οδοντοστοιχιών ενώ είναι πολλά υποσχόμενες για την παραγωγή ιστών και συμβατών ανθρώπινων ζωτικών οργάνων για μεταμόσχευση. Μάλιστα, το Μάρτιο του 2015 Ρώσοι επιστήμονες της εταιρίας 3D Bioprinting Solutions, κατασκεύασαν έναν τεχνητό θυρεοειδή αδένα χρησιμοποιώντας έναν 3D εκτυπωτή και στην συνέχεια το μεταμόσχευσαν σε

⁵⁴ <https://www.lightrider.apworks.de/en>

ένα ζωντανό ποντίκι με ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα⁵⁵. Στην παρούσα διπλωματικά κρίθηκε σκόπιμο να αναπτυχθούν και να παρουσιαστούν οι εφαρμογές των τεχνολογιών ΑΜ στην αεροπορική βιομηχανία.



Εικόνα 51 Βιομηχανικοί τομείς εφαρμογής τεχνολογιών ΑΜ

5.2 Εφαρμογές Τεχνολογιών ΑΜ στην Αεροπορική Βιομηχανία

Η αεροπορική βιομηχανία χρησιμοποιεί αυστηρές προδιαγραφές ποιότητας στα εξαρτήματα, τα οποία πρόκειται να τοποθετηθούν σε αεροσκάφη, καθώς και στις διαδικασίες που ακολουθούνται, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια στις αεροπορικές μεταφορές. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σύμφωνα με τους κανονισμούς της FAA (Federal Aviation Administration) «η καταλληλότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται για αεροπορικά εξαρτήματα, η αστοχία των οποίων θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά την ασφάλεια, πρέπει να καθοριστεί με βάση τις δοκιμές ή την εμπειρία χρήσης τους. Επίσης τα υλικά αυτά θα πρέπει να συμμορφώνονται με τις εγκεκριμένες προδιαγραφές (βιομηχανικές προδιαγραφές,

⁵⁵ <https://3dprint.com/103721/3dbioprintingsolutions-thyroid/>

στρατιωτικές προδιαγραφές ή διεθνή τεχνικά πρότυπα) που εξασφαλίζουν ότι έχουν την αντοχή και τις ιδιότητες που υπολογίστηκαν κατά την φάση της σχεδίασης. Τέλος για την καταλληλότητα των υλικών αυτών λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία) κατά την διάρκεια της χρήσης τους⁵⁶».

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες πέραν της ποιότητας για τα αεροπορικά εξαρτήματα είναι το βάρος, το οποίο σχετίζεται άμεσα με το κόστος. Σύμφωνα με εκτιμήσεις της εταιρίας General Electric, μείωση στο βάρος ενός αεροσκάφους κατά 1 κιλό, μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση στο κόστος του καυσίμου έως και 3000\$. Είναι προφανές ότι η υιοθέτηση των τεχνολογιών ΑΜ στην αεροπορική βιομηχανία επιφέρει πολλαπλά οφέλη και για τον λόγο αυτό παρατηρείται ιδιαίτερο ενδιαφέρον προς αυτήν την κατεύθυνση. Τα σημαντικότερα οφέλη που παρέχουν οι τεχνολογίες ΑΜ στην αεροπορική βιομηχανία είναι η ελευθερία σχεδιασμού, τα πολύ καλύτερα ποσοστά στον λόγο buy-to-fly (ποσότητα πρώτης ύλης που απαιτείται για κατασκευή ενός εξαρτήματος σε σύγκριση με την ποσότητα πρώτης ύλης του τελικού αντικειμένου), η δυνατότητα κατασκευής ελαφρών κατασκευών, η βελτιστοποίηση της απόδοσης της εφοδιαστικής αλυσίδας, η απλοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας, η βελτίωση της απόδοσης του καυσίμου, η μείωση του κόστους του κύκλου ζωής των υλικών, η αύξηση της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων και η καλύτερη απόδοση των χρησιμοποιούμενων υλικών. Επιπρόσθετα η ταχύτατη παραγωγή ανταλλακτικών μέσω των παραπάνω τεχνολογιών θα μπορούσε να αποτελέσει λύση τόσο για την μείωση του υψηλού κόστους που συνεπάγεται η καθήλωση ενός αεροσκάφους για λόγους αναμονής ανταλλακτικών όσο και για την καλύτερη αντιμετώπιση των απρόβλεπτων διακυμάνσεων ζήτησης ανταλλακτικών.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται αντιληπτός ο λόγος που όλες οι μεγάλες εταιρίες που δραστηριοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία (Boeing, General Electric, Pratt & Whitney, Lockheed Martin κ.α.) δαπανούν τεράστια ποσά για έρευνα, ανάπτυξη και πιστοποίηση των τεχνολογιών αυτών. Δεδομένου ότι οι εφαρμογές των τεχνολογιών ΑΜ στην αεροπορική βιομηχανία είναι πολλές, στην συνέχεια παρατίθενται οι πιο σημαντικές από αυτές.

Η εταιρία Boeing χρησιμοποιεί την τεχνολογία Selective Laser Sintering για την παραγωγή αεροπορικών εξαρτημάτων από το 2002, τόσο για στρατιωτικά όσο και για πολιτικά αεροσκάφη της. Συγκεκριμένα, έχει παράγει περίπου 300 διαφορετικά εξαρτήματα σε 10 διαφορετικούς τύπους αεροσκαφών, ενώ χρησιμοποιεί πάνω από 50.000 εξαρτήματα σε στρατιωτικά και πολιτικά αεροσκάφη⁵⁷. Μόνο το μαχητικό αεροσκάφος F/A-18 Super Hornet φέρει περίπου 150 εξαρτήματα στην εμπρόσθια περιοχή της ατράκτου του, τα οποία έχουν

⁵⁶ Federal Aviation Regulations, Title 14, Section 25, Subpart D, Subsection 25.603

⁵⁷ <http://www.boeing.com/features/2016/08/record-books-08-16.page>

παραχθεί με τεχνική SLS⁵⁸. Επίσης, η εταιρία Boeing έχει κατοχυρώσει μία ευρεσιτεχνία⁵⁹. Ειδικότερα, έχει κατασκευάσει μία συσκευή η οποία περιλαμβάνει μία βιβλιοθήκη με κατασκευαστικά σχέδια πλήθους εξαρτημάτων, μία βάση δεδομένων η οποία έχει ρυθμιστεί ώστε να μπορεί να αποθηκεύει καταχωρήσεις για 3D εκτύπωση εξαρτημάτων από το πλήθος των κατασκευαστικών σχεδίων καθώς και ένα σύστημα διαχείρισης, που έχει ρυθμιστεί ώστε να λαμβάνει αιτήματα για εκτύπωση συγκεκριμένου εξαρτήματος, και στην συνέχεια να εντοπίζει το σωστό αρχείο από τη βιβλιοθήκη με τα κατασκευαστικά σχέδια και να αποθηκεύει μια καταχώρηση προσδιορίζοντας την εκτύπωση του σωστού εξαρτήματος. Με τον τρόπο αυτό η εταιρία αντί να αποθηκεύει εξαρτήματα σε διάφορους κόμβους αποθήκευσης τα οποία θα πρέπει να τα αποστέλλει όπου απαιτηθεί, θα μπορεί να αποστείλει ένα αρχείο για το συγκεκριμένο εξάρτημα και αυτό να κατασκευάζεται μέσα σε λίγα λεπτά ή σε λίγες ώρες όπου υπάρχει διαθέσιμη η μηχανή AM. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι η Boeing, τον Μάιο του 2016, σε συνεργασία με το εργαστήριο Oak Ridge National Laboratory (ORNL) του U.S. Department of Energy κατασκεύασαν το μεγαλύτερο 3D στερεό εκτυπωμένο αντικείμενο⁶⁰ κερδίζοντας το παγκόσμιο ρεκόρ Guinness. Το συγκεκριμένο αντικείμενο είναι ένα εργαλείο διάτρησης και ισοστάθμισης (wing trim and drill tool) της πτέρυγας του αεροσκάφους, το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την επόμενη γενιά αεροσκαφών της τύπου 777X. Το εν λόγω εργαλείο έχει μήκος 17.5 ft, πλάτος 5,5 ft και ύψος 1,5 ft και ζυγίζει 1.650 pds. Ο χρόνος παραγωγής του ήταν μόλις 30 ώρες ενώ υπολογίζεται ότι με συμβατικές μεθόδους κατασκευής θα έφτανε τους 3 μήνες.

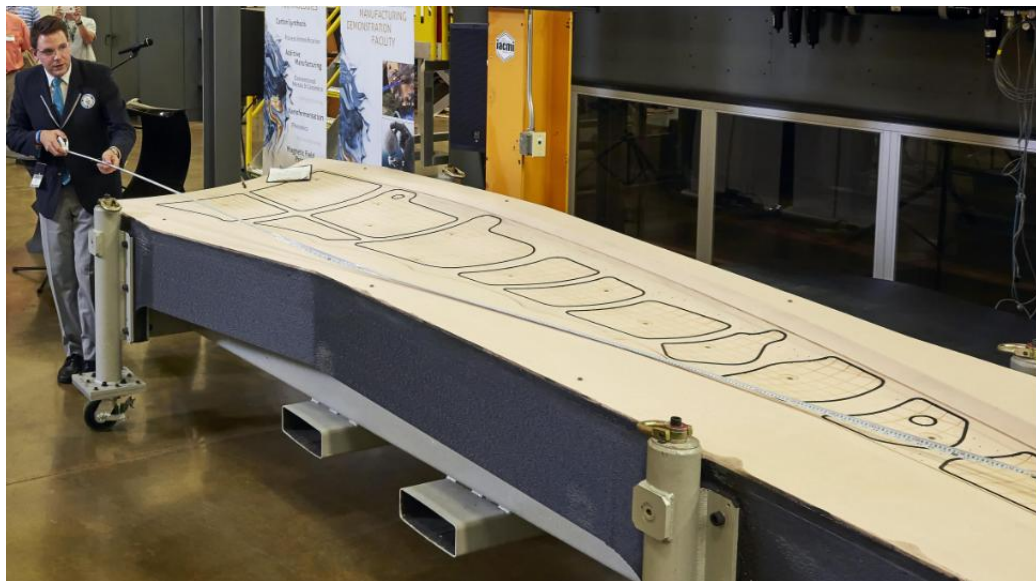


Εικόνα 52 Αεροπορικά εξαρτήματα εταιρίας Boeing από Πολυαμίδιο (Environmental Control System Ducting) κατασκευασμένα με την τεχνική Selective Laser Sintering

⁵⁸ <https://3dprint.com/49489/boeing-3d-print/>

⁵⁹ <http://appft1.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PG01&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.html&r=1&f=G&l=50&s1=20150064299.PGNR>.

⁶⁰ <http://www.boeing.com/features/2016/08/record-books-08-16.page>



Εικόνα 53 Εργαλείο Wing Trim and Drill Tool που κατασκευάστηκε από την Boeing σε συνεργασία με το Oak Ridge National Laboratory (ORNL) και κέρδισε το παγκόσμιο ρεκόρ Guinness ως το μεγαλύτερο 3D στερεό εκτυπωμένο αντικείμενο.

Η εταιρία GE Aviation (General Electric) αναπτύσσει τις τεχνολογίες ΑΜ από τις αρχές της δεκαετίας του 1990. Τα τελευταία χρόνια ωστόσο έχει επενδύσει τεράστια χρηματικά ποσά εξαγοράζοντας το 2013, την Morris Technologies και την Rapid Quality Manufacturing (RQM), ενώ το φθινόπωρο του 2016, απέκτησε το 75%, της Arcam και το 76% της Concept Laser. Πλέον, οι τεχνολογίες που έχει στην διάθεσή της μεταξύ άλλων, περιλαμβάνουν τις: Direct Metal Laser Melting (DMLM), Electron Beam Melting (EBM), Laser Powder Forming (LPF), Electron Beam Free Form (EBFF), Hot Wire, Metal Injection Molding (MIM) και Binder Jet.

GE Aviation Metal Additive Toolkit

			Metal	Heat Source	Speed	Preci	Size	Comments
Powder Bed	DMLM Direct Metal Laser Melting		Powder Bed	Laser				LEAP Fuel Nozzle
	EBM Electron Beam Melting		Powder Bed	Electron Beam				Alternate Process for Castings
Deposition	LPF Laser Powder Forming		Powder Deposition	Laser				Large Prototypes
	EBFF Electron Beam Free Form		Wire	Electron Beam				Large Prototypes
	Hot Wire		Wire	TIG/ Laser				Large Prototypes
Consolidation	MIM Metal Injection Molding		Binder Injection	Consolidation				Small Part, High Volume
	Binder Jet		Binder Jet	Consolidation				



Εικόνα 54 Είδη Τεχνολογιών ΑΜ που έχει στην διάθεσή της η εταιρία General Electric

Το πρώτο εξάρτημα της GE, κατασκευασμένο με τεχνολογίες ΑΜ, πήρε έγκριση από την FAA να χρησιμοποιηθεί σε εμπορικούς κινητήρες jet τον Απρίλιο του 2015 και ήταν ένα έδρανο⁶¹ (housing) για τον αισθητήρα T25 που βρίσκεται στην είσοδο του συμπιεστή υψηλής πίεσης του κινητήρα και ο οποίος παρέχει μετρήσεις πίεσης και θερμοκρασίας για το σύστημα ελέγχου του κινητήρα.

Επίσης, η GE ανέπτυξε ένα 3D εκτυπωμένο ακροφύσιο καυσίμου (LEAP Fuel Nozzle)⁶² το οποίο με τον παραδοσιακό τρόπο κατασκευής αποτελούνταν από 20 διαφορετικά κομμάτια ενώ με χρήση της μεθόδου Direct Metal Laser Melting κατασκευάστηκε σαν ένα ενιαίο εξάρτημα. Το συγκεκριμένο ακροφύσιο είναι 25% ελαφρύτερο και πέντε φορές πιο ανθεκτικό και έχει τοποθετηθεί στους νέας γενιάς κινητήρες jet CFM LEAP οι οποίοι είναι μία συμπαραγωγή της GE και της Snecma (SAFRAN) αλλά και στους κινητήρες GE9X. Οι κινητήρες CFM LEAP έχουν 19 τέτοια ακροφύσια μέσα στο θάλαμο καύσης τους και προορίζονται να τοποθετηθούν σε νέας γενιάς αεροσκάφη όπως το Airbus A30neo, το Boeing 737MAX και το Boeing 777X.

Σημειώνεται ότι τον Απρίλιο του 2016 παραδόθηκαν από την GE στην Airbus οι δύο πρώτοι κινητήρες LEAP-1A, για το μοντέλο Airbus A320neo, οι οποίοι φέρουν τα 3D printed fuel nozzles από cobalt-chrome superalloy⁶³, ενώ σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της εταιρίας έως το 2020 θα υπάρχουν περίπου 100.000 3D εκτυπωμένα ακροφύσια στους εν χρήση κινητήρες jet (GE9X και LEAP). Η εταιρία GE έχει εγκατεστημένες στο εργοστάσιο της στο Cameri της Ιταλίας 20 μηχανές Electron Beam Melting της εταιρίας Arcam, με τις οποίες κατασκευάζονται περύγια της τουρμπίνας χαμηλής πίεσης για τους κινητήρες GE9X από υλικό TiAl.



Εικόνα 55 α) 3D Printed Housing για τον T25 Sensor που βρίσκεται στην είσοδο του συμπιεστή υψηλής πίεσης κινητήρων jet της εταιρίας GE β) 3D Printed Fuel Nozzle εταιρίας GE για τους κινητήρες GE9X και CFM LEA γ) Πτερύγια τουρμπίνας χαμηλής πίεσης κατασκευασμένα με την μέθοδο Electron Beam Melting από υλικό TiAl για τους κινητήρες GE9X της GE

⁶¹ <http://www.gereports.com/post/116402870270/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly/>

⁶² <https://3dprint.com/127906/ge-smart-factory/>

⁶³ <http://www.gereports.com/airbus-gets-1st-production-jet-engines-with-3d-printed-parts-from-cfm/>

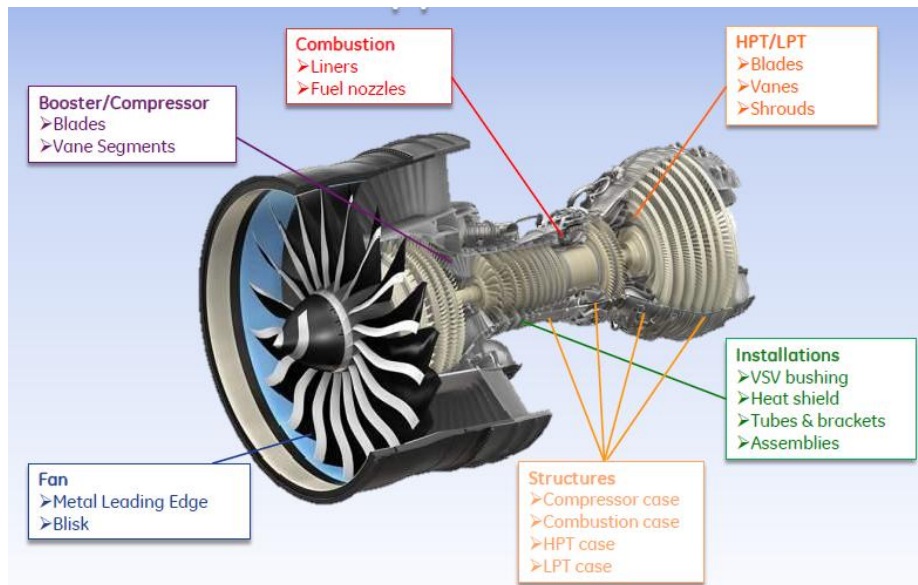
Επιπρόσθετα αξίζει να αναφερθεί ότι η GE ανακοίνωσε τον Οκτώβριο του 2016 μία επένδυση αξίας 400 εκατομμυρίων \$ με σκοπό την ανάπτυξη ενός στροβιλοελικοφόρου (turboprop) κινητήρα με την ονομασία Advanced Turboprop (ATP)⁶⁴ ο οποίος προορίζεται να τοποθετηθεί στην νέα γενιά αεροσκαφών της Textron Aviation, το Cessna Denali. Στόχος της GE, είναι ο κινητήρας με χρήση τεχνολογιών ΑΜ να ενσωματώνει τα περίπου 845 διαφορετικά εξαρτήματα σε 11 μεγάλα εξαρτήματα μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα και το βάρος του, την κατανάλωση καυσίμου κατά 20%, επιταχύνοντας την παραγωγική διαδικασία αλλά και αυξάνοντας την ισχύ κατά 10%. Σημειώνεται τέλος ότι το Σεπτέμβριο του 2016, μηχανικοί από το εργαστήριο τεχνολογιών ΑΜ της GE (GE Aviation's Additive Development Center) στο Cincinnati κατασκεύασαν ένα μίνι κινητήρα jet αποτελούμενο εξολοκλήρου από 3D εκτυπωμένα εξαρτήματα, ο οποίος δοκιμάστηκε και δούλεψε στις 33000rpm⁶⁵.



Εικόνα 56α) Ο μίνι κινητήρας jet της GE αποτελούμενος εξολοκλήρου από 3D printed εξαρτήματα
β) Ο κινητήρας Advanced Turboprop (ATP) της GE όπως παρουσιάστηκε στο Oshkosh airshow προορισμένος για το αεροσκάφος Cessna Denali της Textron Aviation

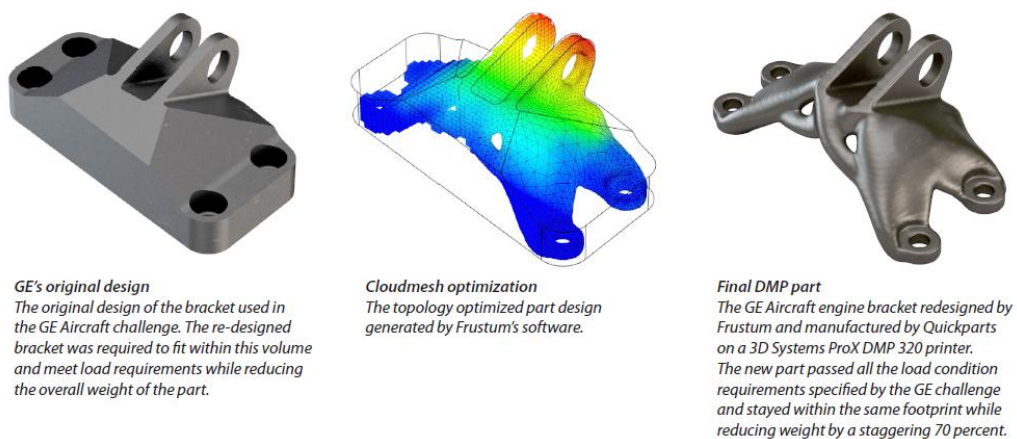
⁶⁴ <http://www.gereports.com/ges-new-aviation-plant-heart-europe-will-build-3d-printed-engines-next-gen-cessna-planes/>

⁶⁵ <http://www.gereports.com/post/118394013625/these-engineers-3d-printed-a-mini-jet-engine-then/>



Εικόνα 57 Υποψήφια μέρη κινητήρα Jet τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν με τεχνολογίες ΑΜ σύμφωνα με την εταιρία GE

Η εταιρία Morris Technologies (εξαγοράστηκε το 2013 από την GE Aviation) έχει κατασκευάσει με τεχνική Selective Laser Sintering ρότορα (rotor) από κράμα νικελίου IN718, δακτύλιο στάτορα (stator ring) από IN718 και Cobalt-Chrome καθώς και ακροφύσιο ψεκασμού καυσίμου (swirler) από κράμα Cobalt-Chrome MP1 και αντίστοιχο fuel injector από IN718 με μέθοδο DMLS (από 8 επιμέρους τμήματα με DMLS προκύπτει ένα ενιαίο) για αεριοστροβίλους.



Εικόνα 58 Επανασχεδιασμένο Engine Bracket της GE από την Frustum και κατασκευασμένο από την Quickparts σε μηχανή 3D Systems ProX DMP 320 printer (τεχνολογία Direct Metal Printing), το οποίο πληρούσε όλες τις προδιαγραφές της GE με μειωμένο βάρος κατά 70%

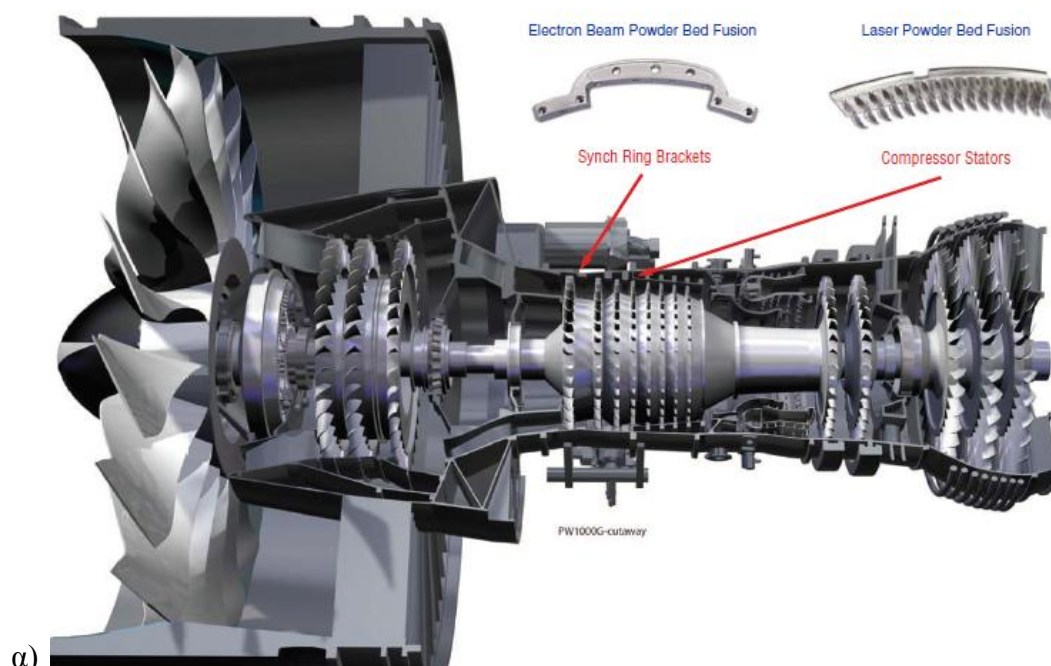


Εικόνα 59 α) Stator ring από NickelAlloy IN718 β) Swirler από Cobalt Chrome MPI για gas turbine applications γ) Fuel Injector NickelAlloy IN718 τα οποία είναι κατασκευής της Morris Technologies⁶⁶

Η εταιρία Pratt & Whitney έχει υιοθετήσει τις τεχνολογίες ΑΜ από την δεκαετία του 1980 εφαρμόζοντας αρχικά μεθόδους ταχείας προτυποποίησης με χρήση πλαστικών ως πρώτη ύλη. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την P&W, έχουν κατασκευαστεί πάνω από 100.000 πρωτότυπα τα τελευταία 25 χρόνια με μεθόδους ΑΜ. Την τελευταία δεκαετία γίνεται χρήση τεχνολογιών Powder Bed Fusion με πρώτη ύλη μέταλλα. Σε δοκιμές παραγωγής εξαρτημάτων, η εταιρία έχει διαπιστώσει εξοικονόμηση έως και 15 μήνες στον χρόνο παραγωγής, σε σχέση με τις συμβατικές διαδικασίες κατασκευής, καθώς και μείωση του βάρους ενός εξαρτήματος έως και 50%. Τον Απρίλιο του 2015 η P&W παρέδωσε τους πρώτους κινητήρες jet, PurePower® PW1500G, στην Bombardier για τα μοντέλα αεροσκαφών της CSeries. Οι εν λόγω κινητήρες, ήταν οι πρώτοι εν χρήσει κινητήρες της εταιρίας, οι οποίοι έφεραν εξαρτήματα που είχαν κατασκευαστεί με τεχνολογίες ΑΜ. Συγκεκριμένα οι στάτορες του συμπιεστή (compressor stators) κατασκευάστηκαν με χρήση τεχνολογιών Laser Powder Bed Fusion και τα στηρίγματα των δακτυλίων συγχρονισμού (synch ring bracket) με χρήση Electron Beam Powder Bed Fusion⁶⁷.

⁶⁶ https://www.eos.info/press/press_material

⁶⁷ <http://www.pw.utc.com/Press/Story/20150401-1500/2015/All%20Categories>



α)



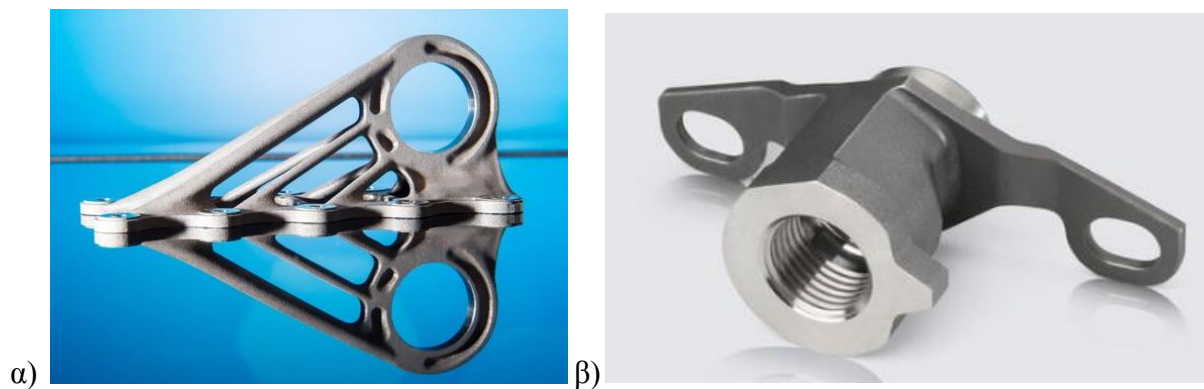
β)

Εικόνα 60 α) Εξαρτήματα κινητήρα PurePower® PW1500G κατασκευασμένα με τεχνολογίες ΑΜ
β) Υπό δοκιμή εξαρτήματα κινητήρων P&W κατασκευασμένα με τεχνολογίες ΑΜ

Η εταιρία Airbus, που αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους κατασκευαστές αεροσκαφών παγκοσμίως, σύμφωνα με αποκαλύψεις της εταιρίας Stratasys, έχει τοποθετήσει στο νέο αεροσκάφος της, τύπου A350 XWB πάνω από 1.000 εξαρτήματα, τα οποία έχουν κατασκευαστεί με την μέθοδο Fused Deposition Modeling, επιταχύνοντας με αυτόν τον τρόπο, την παραγωγική διαδικασία. Τα εξαρτήματα αυτά παραδόθηκαν από την Stratasys στην Airbus το Δεκέμβριο του 2014 και κατασκευάστηκαν σε μηχανές FDM 3D Production Systems από το πιστοποιημένο από την Airbus υλικό (ρητίνη) ULTEM 9085, το οποίο έχει υψηλή αναλογία

αντοχής προς βάρος και είναι ανθεκτικό σε φλόγες, καπνούς και τοξικότητα (FST) καθιστώντας το κατάλληλο για χρήση στο εσωτερικό αεροσκαφών⁶⁸. Επιπλέον, η εταιρία έχει τοποθετήσει στο ίδιο αεροσκάφος, A350 XWB, το διάσημο υποστήριγμα ζώνης (seat bracket connector), το οποίο κατασκευάστηκε με τεχνολογία Laser Melting της Concept Laser από τιτάνιο και ήταν κατά 30% ελαφρύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο που κατασκευάζονταν από αλουμίνιο με συμβατικές κατεργασίας αφαίρεσης υλικού. Μάλιστα, το συγκεκριμένο υλικό (seat bracket connector) ήταν από τους φιναλίστ στον διαγωνισμό «2014 German Industry Innovation Award»⁶⁹.

Επίσης, η Airbus έχει αναθέσει στην εταιρία MTU Aero Engines την κατασκευή των κινητήρων για το νέο μοντέλο A320neo το οποίο θα φέρει τον κινητήρα PurePower®PW1000G (ο κινητήρας αναπτύσσεται από την Pratt & Whitney σε συνεργασία με την MTU). Για το συγκεκριμένο project της Airbus, η MTU στοχεύει στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 15% χρησιμοποιώντας 7 διαφορετικές μηχανές AM (τεχνολογίας Direct Metal Laser Sintering) της εταιρίας EOS για την μαζική παραγωγή εξαρτημάτων «borescope bosses» από κράμα νικελίου, τα οποία αποτελούν μέρος του περιβλήματος του στροβίλου του κινητήρα PurePower®PW1000G και τα οποία επιτρέπουν την διέλευση ενδοσκοπίου στο εσωτερικό του στροβίλου, για την περιοδική οπτική επιθεώρηση των πτερυγίων για φθορές⁷⁰.



Εικόνα 61 α) Εξάρτημα Seat Bracket κατασκευασμένο από Τιτάνιο από την Concept Laser για το Airbus A350 XWB β) Borescope Boss κατασκευασμένο από κράμα Νικελίου από την εταιρία MTU Aero Engines με χρήση μηχανών DMLS της EOS για να τοποθετηθεί σε κινητήρα PurePower®PW1000G

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η Airbus, τον Απρίλιο του 2016, ανέθεσε στην εταιρία Arconic την προμήθεια εξαρτημάτων της ατράκτου και των πυλώνων στήριξης των κινητήρων (engine pylon), που κατασκευάζονται από τιτάνιο με τεχνολογίες AM, για τα νέας

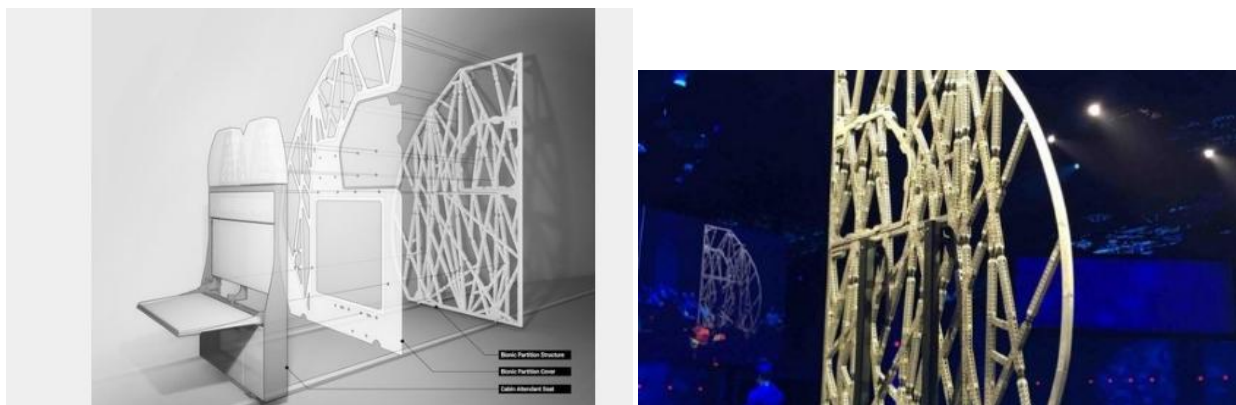
⁶⁸ <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/over-1000-3d-printed-parts-on-airbus-a350-xwb-aircraft/>

⁶⁹ <http://www.tctmagazine.com/tct-events/formnext-powered-by-tct/tct-show-exhibitors-concept-laser/>

⁷⁰ <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/mtu-aero-powers-airbus-jetliner-additive-manufacturing/>

γενιάς της εμπορικά αεροσκάφη. Την συμφωνία αυτή επέκτεινε τον Δεκέμβριο του ίδιου έτους για την προμήθεια σωληνώσεων (μεταφοράς θερμού αέρα από τον κινητήρα σε άλλα σημεία της ατράκτου) από υπερκράματα νικελίου υψηλής αντοχής σε θερμικές καταπονήσεις καθώς και την προμήθεια υποστηρίγματα (bracket) ατράκτου από τιτάνιο για το μοντέλο A320⁷¹. Επίσης η εταιρία επέκτεινε τις κατασκευαστικές της δυνατότητες εγκαθιστώντας μία μηχανή Sciaky Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) 110.

Τέλος, η Airbus σε συνεργασία με την Autodesk και την APWorks, αναπτύσσουν το μεγαλύτερο έως σήμερα εξάρτημα καμπίνας αεροσκάφους. Πρόκειται για μία βελτιωμένη έκδοση του ήδη υπάρχοντος διαχωριστικού τείχους του A320 ανάμεσα στα καθίσματα και στο χώρο προετοιμασίας των γευμάτων το οποίο περιλαμβάνει και το πτυσσόμενο κάθισμα των αεροσυνοδών. Για την κατασκευή του συγκεκριμένου στοιχείου καμπίνας (bionic partition) χρησιμοποιήθηκαν προηγμένα υλικά και συνδυασμός τεχνολογιών ΑΜ. Συγκεκριμένα, για την κατασκευή αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι μηχανές Concept Laser M2 και EOS M400 για την 3D εκτύπωση 122 τμημάτων από υλικό Scalmalloy (2^{ης} γενιάς κράμα αλουμινίου-μαγνησίου-σκανδίου της APWorks) και 40 τμημάτων από αλουμίνιο. Το στοιχείο καμπίνας προέκυψε από την συναρμολόγηση των παραπάνω τμημάτων, ενώ το βάρος του είναι κατά 45% μειωμένο. Η νέα αυτή σχεδιαστική προσέγγιση αναμένεται να εξοικονομήσει έως 460.000 μετρικούς τόνους εκπομπών CO₂ ετησίως. Η πρώτη φάση δοκιμών του στοιχείου έχουν ολοκληρωθεί με επιτυχία ενώ έως το 2018 αναμένεται να είναι τοποθετημένο σε εν χρήσει αεροσκάφη⁷².



Εικόνα 62 Airbus Bionic Partition - Το μεγαλύτερο υπό ανάπτυξη 3D εκτυπωμένο εξάρτημα καμπίνας αεροσκάφους A320 αποτελούμενο από 122 τμήματα από Scalmalloy και 40 από αλουμίνιο⁷³

⁷¹ <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/airbus-extends-additive-manufacturing-potential-arconic-sciaky/>

⁷² <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/autodesk-teams-with-airbus-on-3d-printed-bionic-partition/>

⁷³ <http://www.airbusgroup.com/int/en/story-overview/Pioneering-bionic-3D-printing.html>

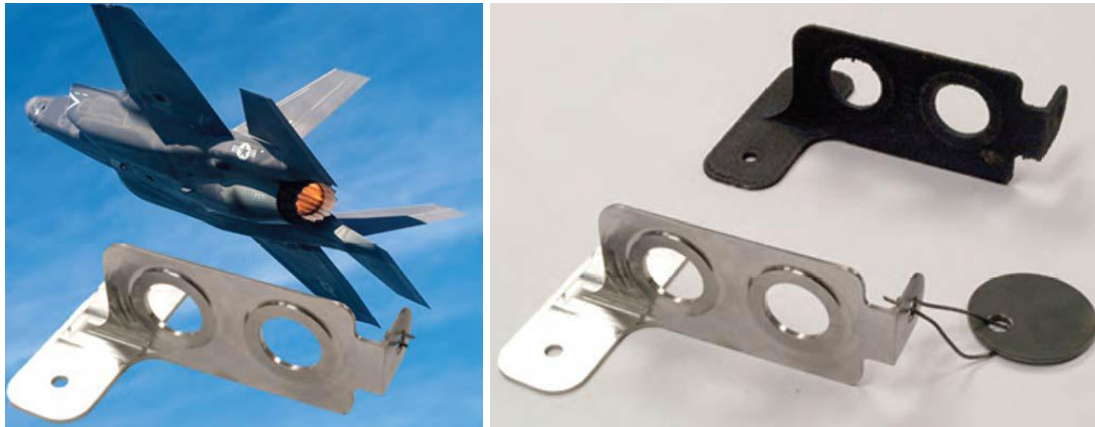
Η εταιρία EOS έχει κατασκευάσει με τη μέθοδο Direct Metal Laser Sintering, όργανα μέτρησης ταχύτητας αεροσκαφών και θερμοκρασίας αεροστροβίλων και έχει επανασχεδιάσει βελτιστοποιώντας την τοπολογία πολλά εξαρτήματα αεροσκαφών (A380 door hinge, titanium bracket κ.α.)



Εικόνα 63 Αεροπορικά εξαρτήματα κατασκευής εταιρίας EOS με μέθοδο DMLS α) Όργανο μέτρησης της ροής αέρα β) Όργανο μέτρησης συνολικής πίεσης ενός αεροστροβίλου γ) Bracket χάλυβα συμβατικής σχεδίασης (αριστερά) και αλουμινίου βελτιστοποιημένης τοπολογίας (δεξιά) δ) Bracket ανοξείδωτου χάλυβα συμβατικής σχεδίασης (πίσω) και βελτιστοποιημένης τοπολογίας αεροσκάφους Airbus A380

Η εταιρία Lockheed Martin (LM) την τελευταία δεκαετία έχει δημιουργήσει πολλές ερευνητικές ομάδες με στόχο την εφαρμογή των τεχνολογιών ΑΜ στους διάφορους τομείς δραστηριότητάς της, όπως στην παραγωγή αεροσκαφών και δορυφόρων. Μηχανές ΑΜ χρησιμοποιούνται από την LM για την παραγωγή πρωτοτύπων με χρήση πολυμερών υλικών, για την παραγωγή εργαλείων καθώς και για την παραγωγή τελικών αεροπορικών και διαστημικών εξαρτημάτων από τιτάνιο, αλουμίνιο και νικέλιο (Inconel). Το μέγεθος των τελικών εξαρτημάτων κυμαίνεται από το αντίστοιχο μέγεθος ενός τραπουλόχαρτου έως και 1,5 μέτρο (η παραγωγή μεγάλων εξαρτημάτων γίνεται σε μηχανές διαστάσεων δωματίου). Σύμφωνα με την

εταιρία⁷⁴, πάνω από 100 μηχανές ΑΜ χρησιμοποιούνται στις διάφορες εγκαταστάσεις της ανά την Αμερική, εφαρμόζοντας τεχνολογίες όπως Fused Deposition Modeling (FDM) της Stratasys⁷⁵ και Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) της Sciaky⁷⁶. Χαρακτηριστικό αεροπορικό εξάρτημα της LM που χρησιμοποιείται στο 5^{ης} γενιάς αεροσκάφος F-35 Joint Strike Fighter στο θερμό τμήμα που βρίσκεται ο κινητήρας, είναι ένα υποστήριγμα (Bleed Air Leak Detect Bracket - BALD) κατασκευασμένο από Ti-6Al-4V με τη μέθοδο Electron Beam Melting μειώνοντας το λόγο buy-to-fly από 33:1 στο 1:1 .



Εικόνα 64 Εξάρτημα Bleed Air Leak Detect Bracket της LM Aero για το F-35 Joint Strike Fighter κατασκευασμένο από Ti-6Al-4V με τη μέθοδο Electron Beam Melting

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η LM έχει κατασκευάσει και πλήθος εξαρτημάτων που είναι ήδη τοποθετημένα σε δορυφόρους και διαστημόπλοια τα οποία είναι στο διάστημα⁷⁷. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το διαστημόπλοιο Juno που έφτασε στον Δία στις 4 Ιουλίου του 2016, ήταν το πρώτο της LM που έφερε ένα σετ από 8 υποστηρίγματα κυματοδηγών (waveguide brackets) κατασκευασμένα από τιτάνιο με μεθόδους ΑΜ. Μάλιστα, αναφέρεται ότι τα εν λόγω brackets έχουν διανύσει πάνω από 1,7 δισεκατομμύρια μίλια στο διάστημα. Επίσης, ο τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος A2100 φέρει μία καθολική δομή στήριξης (Universal Backing Structure Connectors) της κεραίας, κατασκευασμένη από τιτάνιο με μέθοδο Electron Beam Melting. Επιπλέον, τον Δεκέμβριο του 2014, στην δοκιμαστική πτήση του διαστημοπλοίου Orion (το οποίο προορίζεται μελλοντικά να μεταφέρει ανθρώπους στον Άρη) χρησιμοποιήθηκαν 4 αεραγωγοί (vents) για να διατηρηθούν τα απαραίτητα επίπεδα πίεσης στο

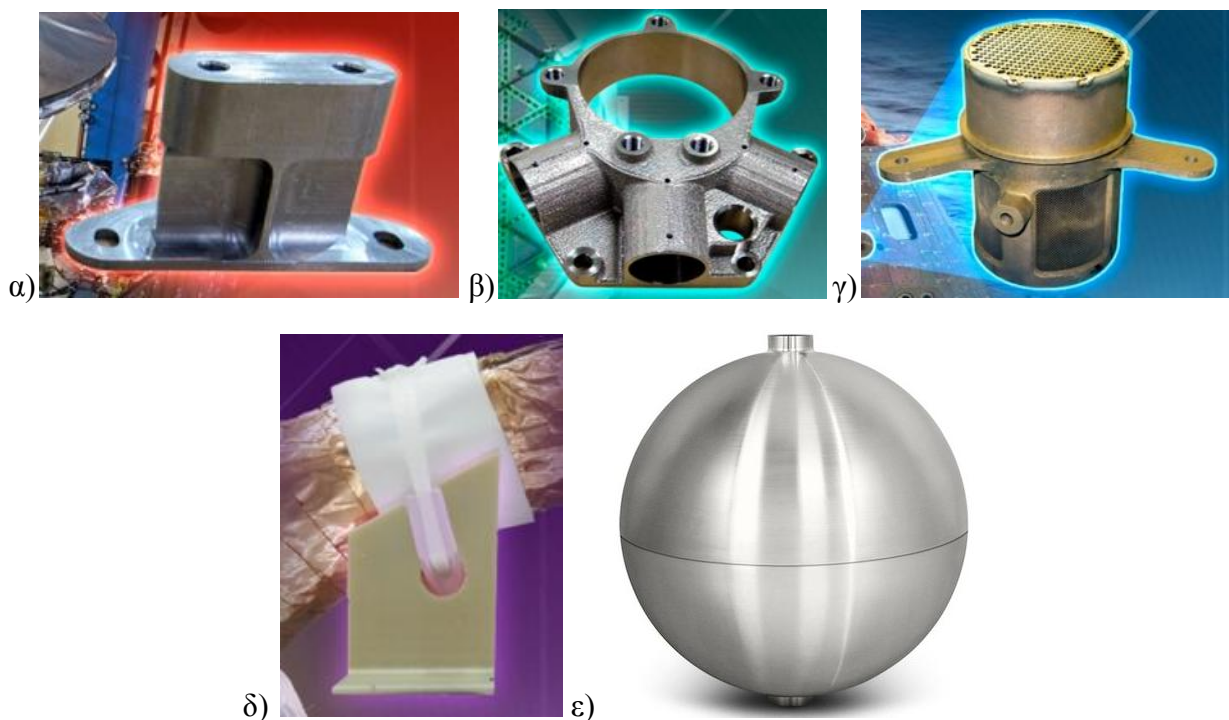
⁷⁴ <http://www.lockheedmartin.com/us/news/features/2015/by-the-numbers-3dprintingatlockheedmartin.html>

⁷⁵ https://www.stratasysdirect.com/case-studies/lockheed-martin-3d-printing/?utm_source=release&utm_medium=wire&utm_content=lockheed&utm_campaign=pr

⁷⁶ <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/sciaky-provide-ebam-solution-to-lockheed-martin/>

⁷⁷ <http://www.lockheedmartin.com/us/news/features/2015/additive-manufacturing-space.html>

εσωτερικό της καμπίνας του πληρώματος, οι οποία είχαν κατασκευαστεί από κράμα νικελίου με τεχνολογία AM. Επίσης, στο διαστημόπλοιο OSIRIS-REx χρησιμοποιήθηκε ένα 3D εκτυπωμένο υποστήριγμα (ski ramp bracket) κατασκευασμένο από σκόνη πολυμερούς. Τέλος, με την χρήση μηχανής EBAM της Sciaky η δεξαμενή καυσίμου ενός διαστημοπλοίου (από τιτάνιο) μπορεί να κατασκευαστεί περίπου σε δύο εβδομάδες έναντι 18 με 20 μήνες που απαιτείται με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Σημειώνεται ότι η δεξαμενή καυσίμου είναι το πιο απαιτητικό σε πιστοποιήσεις εξάρτημα που έχει κατασκευαστεί με μεθόδους AM, λαμβάνοντας υπόψη ότι λειτουργεί στο διάστημα όπου δέχεται τεράστιες εσωτερικές πιέσεις καθώς και δυνάμεις της τάξης των 54Gs κατά την εκτόξευση.

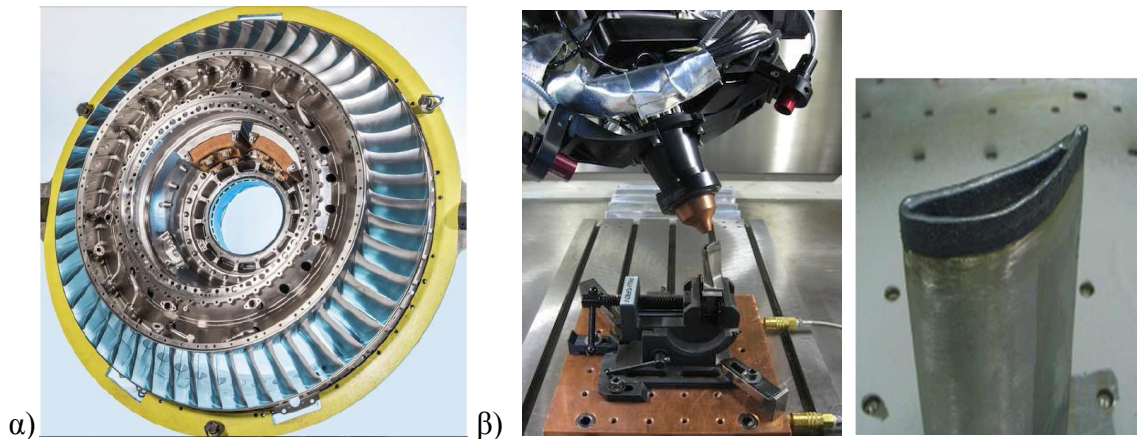


Εικόνα 65 3D εκτυπωμένα εξαρτήματα διαστημοπλοίων και δορυφόρων της εταιρίας LM α) Juno Waveguide Bracket β) A2100 Universal Backing Connectors γ) Orion Vents δ) Osiris-Rex Bracket ε) Titanium Fuel Tank

Η εταιρία Rolls Royce έχει τοποθετήσει στον αεροκινητήρα turbofan Trent XWB-97 (έναν από τους αποδοτικότερους κινητήρες jet με συνολική ισχύ 97.000 pds που αναμένεται να παραδοθεί εντός του 2017 για το Airbus A350-1000) το μεγαλύτερο 3D εκτυπωμένο εξάρτημα κινητήρα, ένα εμπρόσθιο περίβλημα τριβέα (front bearing housing) στο οποίο είναι τοποθετημένες 48 αεροτομές. Το συγκεκριμένο εξάρτημα είναι κατασκευασμένο με τη μέθοδο Electron Beam Melting της Arcam και έχει διάμετρο 1.5 μέτρα και 0.5 μέτρα πάχος⁷⁸. Επίσης, η εταιρία έχει αναπτύξει τη διαδικασία επισκευής τμημάτων της τουρμπίνας για τους κινητήρες

⁷⁸ <https://www.rolls-royce.com/media/insights/simon-burr.aspx>

Trent 500 εφαρμόζοντας της μέθοδο Laser Metal Deposition (LMD), μειώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος του κύκλου ζωής των παραπάνω κινητήρων. Αντίστοιχη μέθοδο επισκευής housing έχει αναπτύξει η εταιρία Honeywell Repair and Overhaul εφαρμόζοντας την τεχνολογία Ion Fusion Formation.



Εικόνα 66 α) 3D Εκτυπωμένο Front Bearing Housing κινητήρα Trent XWB-97 της εταιρίας Rolls Royce β) Επισκευή πτερυγίου τουρμπίνας με τεχνολογία Direct Metal Deposition

5.3 Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη - UAV

Ο όρος Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Unmanned Aerial Vehicle ή Remotely Piloted Systems) αναφέρεται σε κάθε είδος ιπτάμενο μηχανήμα που κινείται στον αέρα (πάνω από την επιφάνεια της Γης), στην επιφάνεια της θάλασσας και υπό τη θάλασσα, αυτόνομα (χωρίς πιλότο ή κυβερνήτη), προγραμματισμένα ή τηλεκατευθυνόμενα, σε μορφή μικρού αεροπλάνου ή ελικοπτέρου με έναν ή περισσότερους κινητήρες και έλικες συντονισμένους για πλήρως ελεγχόμενη πτήση από ειδικό πρόγραμμα ή χειριστήριο εδάφους⁷⁹. Αντίστοιχα, ο ορισμός που δίδεται στην Stanag 4671 (Standardization Agreement του NATO – Συμφωνία Τυποποίησης που ορίζει τις διαδικασίες, τους όρους και τις προϋποθέσεις για κοινές μεταξύ των μελών του NATO στρατιωτικές ή τεχνικές διαδικασίες) που καθορίζει τις απαιτήσεις για την αξιοπλοϊμότητα των UAV είναι ο εξής: «Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα είναι ένα αεροσκάφος σχεδιασμένο να λειτουργεί χωρίς άνθρωπο ως πιλότο, το οποίο δεν φέρει προσωπικό, είναι ικανό για διαρκή πτήση με χρήση αεροδυναμικών μέσων, τηλε-κατευθύνεται εξ αποστάσεως ή πετάει αυτόματα ακολουθώντας προγραμματισμένο προφίλ πτήσης, μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί και δεν ανήκει στην κατηγορία των καθοδηγούμενων όπλων (guided weapons) ή παρόμοιων συσκευών

⁷⁹ <https://el.wikipedia.org/wiki>

μίας χρήσης για εκτόξευση πυρομαχικών».⁸⁰ Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστεί ότι ο όρος Σύστημα Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (Unmanned Aerial System – UAS) περιλαμβάνει το ιπτάμενο όχημα (UAV), τον επίγειο σταθμό ελέγχου και όλα τα επιμέρους στοιχεία, που είναι αναγκαία για την πτήση, όπως συστήματα επικοινωνίας, βοηθητικά στοιχεία απογείωσης και προσγείωσης κ.α. Επίσης, πρέπει να γίνει διάκριση των όρων «UAV», «Drone» (δεν υφίσταται ακριβής απόδοση στην ελληνική γλώσσα) και «Radio-Controlled model aircraft» (ελεγχόμενο με ραδιοκύματα μοντέλο αεροχήματος)⁸¹. Τα ραδιοελεγχόμενα μοντέλα είναι οι γνωστές από το χώρο του αερομοντελισμού κατασκευές, που εξυπηρετούν κυρίως σκοπούς αναψυχής και προϋποθέτουν την άμεση οπτική επαφή με το χειριστή. Τα αεροχήματα τύπου Drone δεν απαιτούν οπτική επαφή. Δεν διαθέτουν όμως και την απαραίτητη «νοημοσύνη» που θα τα καταστήσει «αυτόνομα» κατά τη διάρκεια της πτήσης τους. Απλώς, εκτοξεύονται και ακολουθούν μια προγραμματισμένη πορεία χωρίς να μεταδίδουν στον χειριστή τα δεδομένα που λαμβάνουν, παρά μόνο όταν και εφόσον περισυλλεχθούν μετά το πέρας της πτήσης τους. Ο όρος UAV αντίθετα, αναφέρεται σε αεροχήματα που χαρακτηρίζονται από κάποιο βαθμό «νοημοσύνης». Το στοιχείο αυτό τους επιτρέπει την άμεση ανταλλαγή δεδομένων με τον χειριστή, τόσο αυτών που λαμβάνονται από τα εποχούμενα μέσα καταγραφής όσο και αυτών που αφορούν την κατάσταση τους (ταχύτητα, υψόμετρο, στάθμη καυσίμων κτλ.). Επίσης, τους επιτρέπει επίσης (σε πιο εξελιγμένες περιπτώσεις) την αυτόματη διάγνωση και επίλυση προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια τις αποστολής τους.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1960, τα RPV (Remotely Piloted Vehicles) και νυν UAV, αξιοποιούνται πέραν της αρχικής τους χρήσης ως εναέριοι στόχοι, σε αποστολές ISR (Intelligence, Surveillance, Reconnaissance) αλλά και σχετικά πρόσφατα σε αποστολές ISTAR (Intelligence, Surveillance Target Acquisition and Reconnaissance). Στις αποστολές ISTAR, το UAV παρέχει την δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων στους σταθμούς εδάφους σε πραγματικό χρόνο, οι οποίοι με την σειρά τους αφού προβούν σε επεξεργασία των στοιχείων (μπορεί να έχουν την μορφή συντεταγμένων στόχου), μπορούν να τα αναμεταδώσουν στα αεροσκάφη κρούσης. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται χάρις στις ζεύξεις δεδομένων και η όλη διαδικασία ονομάζεται «sensor to shooter loop». Εσχάτως, τα UAV χρησιμοποιούνται και για αποστολές κρούσης, ενώ ήδη δρομολογείται η ανά-πτυξη Μη Επανδρωμένων Οχημάτων Μάχης (UCAV Unmanned Combat Air Vehicle) που θα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε αποστολές εναέριας μάχης ή κρούσης. Η χρήση των UCAV σε αποστολές κρούσης θα είναι περισσότερο αποδοτική

⁸⁰ Stanag 4671 «UAV Systems Airworthiness Requirements (USAR) for North Atlantic Treaty Organization (NATO) Military UAV Systems», Edition 1, 3-9-2009.

⁸¹ Austin, Reg. 2010. *Unmanned Air Systems_ UAV Design, Development and Deployment*. s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2010.

στην προσβολή σταθερών στόχων σε «γνωστή θέση». Τα Αμερικανικά Predator-A (MQ-1L) αξιοποιούνται ήδη επιχειρησιακά από τα τέλη του 2001 στο Αφγανιστάν, χρησιμοποιώντας τέσσερα βλήματα AGM-114 Hellfire και από το 2006 έχει συγκροτηθεί η 19η Μοίρα Επίθεσης.

Συνοπτικά πέραν των τυπικών αποστολών ISR και παροχής δεδομένων στόχευσης, τα UAV μπορούν να αξιοποιηθούν σε πλήθος αποστολών όπως:

- Αναμετάδοση ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών
- Αποστολές Συνοδείας επανδρωμένων αεροσκαφών
- Συλλογή ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών και τηλεπικοινωνιών (ESM/ELINT και COMINT)
- Εκτέλεση παρεμβολών (ECM)
- Ναυτική περιπολία
- Επιτήρηση εγκαταστάσεων υψηλής στρατηγικής σημασίας
- Αποστολές καταστολής αεράμυνας (Suppression of Enemy Air Defence - SEAD)
- Επιτήρηση της εχθρικής κατάστασης
- Μεταφορά και εκτόξευση πυρών
- Εντοπισμός και περιγραφή Ραδιολογικών-Βιολογικών-Χημικών (PBX) απειλών
- Αποστολές Έρευνας και Διάσωσης

Επιπλέον τα UAV μπορούν να αποδειχθούν χρήσιμα σε ειρηνική περίοδο σε μη στρατιωτικές εφαρμογές και σε τομείς όπως:

- Σε επιστημονικές έρευνες
- Στην μετεωρολογία
- Στην εναέρια φωτογράφιση - χαρτογράφηση περιοχών
- Στην παρακολούθηση καταστροφών
- Στην επιτήρηση δασών κατά την καλοκαιρινή περίοδο
- Στην αστυνόμευση
- Στην επιτήρηση λιμένων, συνόρων και στη δίωξη λαθρεμπορίου
- Στην παρακολούθηση της οδικής κυκλοφορίας

Η ποικιλομορφία και η συνεχής εξέλιξη των UAV καθιστά δύσκολη την ακριβή κατηγοριοποίηση τους κατά συγκεκριμένο τρόπο. Ωστόσο, ως βασικά κριτήρια έχουν

επικρατήσει αυτά των δυνατοτήτων και του μεγέθους τους. Βάσει αυτών, προκύπτουν οι εξής κατηγορίες⁸²:

i. Αντοχή σε Μεγάλο Υψόμετρο (HALE – High altitude long endurance)

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται UAV που επιχειρούν σε υψόμετρο μέχρι και 15000 μέτρα επί 24ωρο. Επίσης, δύνανται να φέρουν οπλισμό και ο χειρισμός τους γίνεται από σταθερές βάσεις-σταθμούς ελέγχου.

ii. Αντοχή σε Μεσαίο Υψόμετρο (MALE – Medium altitude long endurance)

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται UAV που έχουν τη δυνατότητα να επιχειρούν σε υψόμετρο 5000–15000 μέτρα επί 24ωρο. Επίσης, έχουν μικρότερη ακτίνα δράσης σε σχέση με την προηγούμενη κατηγορία αλλά μεγαλύτερη των 500 χιλιομέτρων.

iii. Μέσης ακτίνας δράσης ή Τακτικά UAV (TUA –Medium Range or Tactical UAV)

Πρόκειται για UAV με ακτίνα δράσης 100-300 χιλιόμετρα.

iv. Μικρής ακτίνας δράσης (Close-Range UAV)

Πρόκειται για UAV με ακτίνα δράσης έως 100 χιλιόμετρα.

v. Mini UAV (MUAV)

Πρόκειται για UAV με ακτίνα δράσης έως 30 χιλιόμετρα και βάρος 20 κιλών περίπου.

vi. Micro UAV (MAV)

Πρόκειται για UAV που χρησιμοποιούνται εντός κτιρίων και έχουν ανάπτυγμα πτερύγων μικρότερο από 150 χιλιοστά.

vii. Nave Air Vehicles (NAV)

Πρόκειται για UAV σε μέγεθος μούρου για χρήση σε σμήνη, προκειμένου να προκαλέσουν σύγχυση σε εχθρικά ραντάρ.

Ένα ακόμα κριτήριο με βάση το οποίο μπορούν να κατηγοριοποιηθούν τα UAV είναι η μέθοδος ανύψωσης και πτήσης που τα χαρακτηρίζει κατασκευαστικά. Σύμφωνα με αυτό, προκύπτουν οι εξής κατηγορίες⁸³:

a. Σταθερών πτερύγων (Fixed-wing UAV)

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται UAV που προϋποθέτουν ύπαρξη αεροδιαδρόμου ή συστήματος εκτόξευσης για την απογείωσή τους. Επίσης, επιτυγχάνουν πτήσεις μεγάλης διάρκειας και ταχύτητας

⁸² ⁸² Austin, Reg. 2010. *Unmanned Air Systems_ UAV Design, Development and Deployment*. s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2010.

⁸³ Angelov, Plamen «*Sense and Avoid in UAS_Research and Applications*», 2012, John Wiley & Sons, Ltd

β. Περιστρεφόμενων πτερύγων ή Καθέτου Απογείωσης-Προσγείωσης (Rotarywing or vertical take-off and landing UAV)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα UAV, τα οποία χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα αιώρησης και ευχέρειας επίτευξης ελιγμών

γ. UAV τύπου μικρού αερόστατου (Blimps)

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται UAV που είναι χαρακτηριστικά για τη μορφή και το μεγάλο μέγεθος τους. Επίσης, επιτυγχάνουν πτήσεις μεγάλης διάρκειας αλλά χαμηλής ταχύτητας

δ. Παλλόμενων Πτερύγων (Flapping-wing UAV)

Πρόκειται για UAV που ίπτανται προσομοιώνοντας τον τρόπο πτήσης των πουλιών

ε. Υβριδικά ή μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών (Hybrid configurations or convertible configurations)

Πρόκειται για UAV που συνδυάζουν κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα των 2 πρώτων κατηγοριών.



Εικόνα 67 α) Το UAV PEGASUS II κατηγορίας MALE της Ελληνικής Πολεμικής Αεροπορίας β) Το UAV MQ-1 Predator κατηγορίας MALE της General Atomics γ) Το UAV RQ-4 Global Hawk κατηγορίας MALE της Northrop Grumman

Είναι αυτονόητο ότι οι επιχειρησιακές απαιτήσεις για χρήση ενός UAV, καθορίζουν παραμέτρους όπως η σχεδίαση της ατράκτου, το βάρος του, το ωφέλιμο φορτίο του, το εκπέτασμα πτερύγων, τον τύπο του κινητήρα του και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό που θα φέρει. Πρωτοπόροι στην ανάπτυξη και χρήση UAV είναι οι Αμερικανοί και Ισραηλινοί. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι Αμερικανοί χρησιμοποίησαν εκτεταμένα τα UAV, στον Πόλεμο του Κόλπου, στο Ιράκ και το Αφγανιστάν, ενώ οι Ισραηλινοί τα χρησιμοποίησαν στον Πόλεμο του 1982 και στην πρόσφατη εισβολή στο Λίβανο. Μάλιστα, στην επιχείρηση «Καταιγίδα της Ερήμου» χρησιμοποιήθηκαν τις τρεις πρώτες ημέρες της σύγκρουσης 137 «ψευδοστόχοι» AN/ADM-141A TALD, οι οποίοι προσμοιάζαν σε μαχητικά της USAF, εκπέμποντας ανάλογα σε συγκεκριμένες συχνότητες, ενώ στην πιο πρόσφατη επιχείρηση «Αυγή της Οδύσσειας» στην Λιβύη, χρησιμοποιήθηκαν Predator-A (MQ-1L) με βλήματα AGM-114 Hellfire.

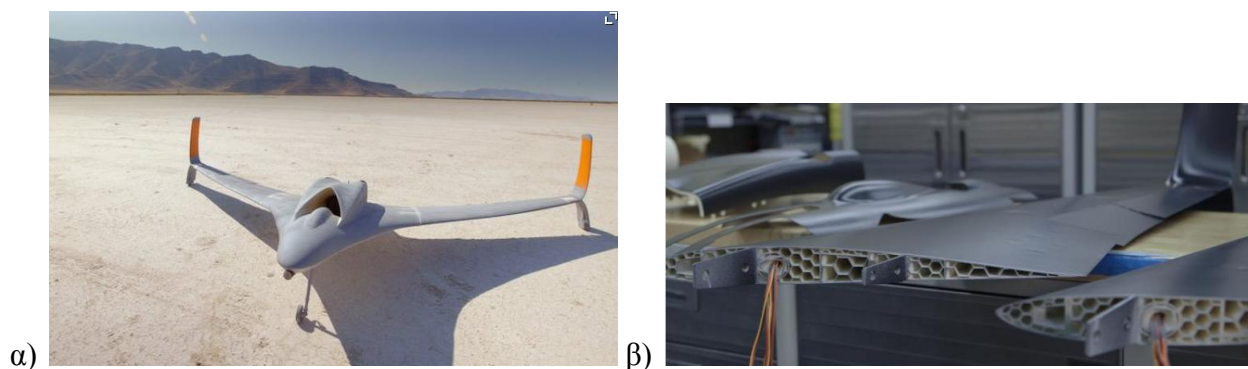
5.4 Κατασκευαστικές Δυνατότητες Τεχνολογιών ΑΜ στην Παραγωγή UAV

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογιών δεν μπορούσε να μην επηρεάσει και τον τομέα της παραγωγής Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών. Λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη ποικιλία κατηγοριών UAV καθώς και τους περιορισμούς που ακόμη διέπουν τις τεχνολογίες ΑΜ, όσον αφορά το είδος των χρησιμοποιούμενων υλικών αλλά το μέγεθος των παραγόμενων προϊόντων, είναι προφανές ότι δεν είναι εφικτή η παραγωγή ενός ενιαίου UAV μέσα σε μία μηχανή ΑΜ παρά μόνο για σκοπούς προτυποποίησης. Αυτό βεβαίως οφείλεται και στο γεγονός ότι για να είναι επιχειρησιακό ένα UAV, πρέπει να αποτελείται από διάφορα τμήματα τα οποία εκ των πραγμάτων πρέπει να είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά, δυνατότητα που έως τώρα δεν παρέχουν οι τεχνολογίες ΑΜ. Κατά συνέπεια, με τις τεχνολογίες ΑΜ είναι εφικτή η κατασκευή υπο-συγκροτημάτων ενός UAV και εν συνεχεία συναρμολόγησή τους ώστε να παραχθεί το τελικό UAV. Σημειώνεται ωστόσο ότι έχουν γίνει πολύ αξιόλογες προσπάθειες από διάφορες εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον χώρο των τεχνολογιών ΑΜ οι σημαντικότερες των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Το Νοέμβριο του 2015, στο Dubai Air Show, οι εταιρίες Stratasys και Aurora Flight Sciences παρουσίασαν το αποτέλεσμα της συνεργασίας τους, το μεγαλύτερο, γρηγορότερο και πιο πολύπλοκο από πλευράς κατασκευής UAV το οποίο είχε κατασκευαστεί κατά 80% από τεχνολογίες ΑΜ⁸⁴. Από τα συνολικά 34 υποσυγκροτήματά του, τα 26 παρήχθησαν με μεθόδους

⁸⁴ https://www.pddnet.com/news/2015/11/photos-day-worlds-first-jet-powered-3d-printed-uav-tops-150-mph?et_cid=4937356&et_rid=45591169&type=headline

ΑΜ. Το εν λόγω UAV (το πρώτο Jet-Powered 3D Printed UAV) μπορούσε να επιτύχει ταχύτητα 150mph (240km/h), είχε βάρος 30lbs (15 κιλά), εκπέτασμα 9ft (3 μέτρα), ενώ ο χρόνος που απαιτήθηκε για την σχεδίαση και την κατασκευή του ήταν μειωμένος κατά 50% σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες συμβατικές τεχνολογίες. Το μεγαλύτερο μέρος του κατασκευάστηκε με την μέθοδο ΑΜ της Stratasys Fused Deposition Modeling (FDM). Τα τμήματα του UAV⁸⁵ κατασκευάστηκαν με τη μηχανή Fortus 450mc στις εγκαταστάσεις της Aurora και ορισμένα εξ αυτών στις εγκαταστάσεις της Stratasys. Το κύριο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το θερμοπλαστικό ASA (UV-Stable, Production Grade Thermoplastic) για τις πτέρυγες και την άτρακτο παρέχοντας την απαραίτητα αντοχή και ακαμψία σε συνδυασμό με το χαμηλό βάρος. Για το κάλυμμα του αεραγωγού χρησιμοποιήθηκε υλικό ULTEM 1010 (High – Performance Thermoplastic resin) το οποίο μάλιστα πληροί τα κριτήρια FST (Flame, Smoke, Toxicity) της FAA, καθιστώντας το έτσι ιδανική επιλογή για αεροπορικές εφαρμογές. Η κατασκευή της δεξαμενής καυσίμου έγινε με τεχνολογία Laser Sintering (LS) της Stratasys από υλικό Nylon ενώ τα ακροφύσια της εξαγωγής (exhaust nozzle) κατασκευάστηκαν με τεχνολογία Direct Metal Laser Sintering από υλικό Inconel 718 (απαίτηση λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στην εξαγωγή της τάξης των 1300F). Με την παραγωγή του συγκεκριμένου UAV είναι σαφές ότι με την μέθοδο FDM είναι εφικτή η κατασκευή κλειστών, κοίλων δομών οι οποίες επιτρέπουν, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, την παραγωγή μεγάλων αντικειμένων.

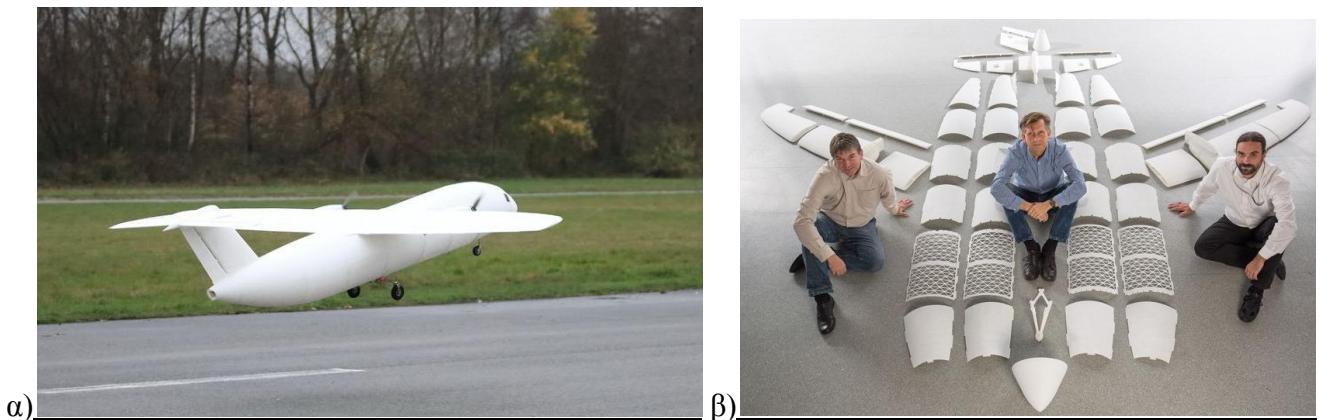


Εικόνα 68 α) Το πρώτο Jet-Powered 3D Printed UAV αποτέλεσμα συνεργασίας της Aurora Flight Sciences και της Stratasys β) Η δομή της πτέρυγας του Jet-Powered 3D Printed UAV συνεργασία της Aurora και της Stratasys

Τον Ιούνιο του 2016 η εταιρία Airbus, στο ILA Berlin Air Show, παρουσίασε το πρωτότυπο μοντέλο δοκιμών THOR (Test of High-tech Objectives in Reality), το οποίο είναι ένα UAV κατασκευασμένο σχεδόν εξ ολοκλήρου από τεχνολογίες ΑΜ. Μόνο οι 2 κινητήρες του (1,5KW ηλεκτροκινητήρες με έλικα) και τα ηλεκτρονικά του είναι κατασκευασμένα με τις

⁸⁵ <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/game-of-drones-3d-printing/>

παραδοσιακές μεθόδους. Το μήκος του είναι 3.5 μέτρα, το εκπέτασμά του 3,0 μέτρα και το μέγιστο βάρος απογείωσης του 23 κιλά⁸⁶. Το 90% των δομικών εξαρτημάτων του είναι κατασκευασμένα με τεχνολογίες ΑΜ από υλικό πολυαμίδιο και το βάρος του είναι σχεδόν 21 κιλά. Αποτελείται από περίπου 60 διαφορετικά 3D εκτυπωμένα δομικά τμήματα τα οποία παράχθηκαν σε χρόνο 7 εβδομάδων περίπου, συναρμολογήθηκαν σε 1 εβδομάδα και χρειάστηκαν άλλες 3 εβδομάδες για την τελική συναρμολόγηση των σωληνώσεων και των ηλεκτρονικών του, προτού είναι έτοιμο για πτήση⁸⁷. Η πρώτη πτήση του THOR έγινε τον Νοέμβριο του 2015 και απλά δοκιμάστηκε ότι είναι ικανό να πετάξει. Στην δεύτερη έκδοση του, στόχος είναι να δοκιμαστούν νέες ιδέες, όπως πτέρυγες πλήρως εναλλάξιμες μεταξύ τους, πτέρυγες με εξαγωνικό σχήμα και κυψελοειδή δομή, μεταλλικές πτέρυγες από αλουμίνιο καθώς και εύκαμπτες πτέρυγες κατασκευασμένες από πλαστικό με ενίσχυση ανθρακονημάτων. Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών για τις πτέρυγες, το project THOR θα επικεντρωθεί στην τεχνητή νοημοσύνη με στόχο να μπορεί να προσγειώνεται μόνο του και να μπορεί να αποφεύγει εμπόδια στο διάδρομο τροχοδρόμησης.



Εικόνα 69 α) Το πρωτότυπο μοντέλο του 3D printed UAV της Airbus «THOR» κατά την απογείωσή του στις 21 Νοεμβρίου 2015 β) 3D εκτυπωμένα τμήματα του UAV της Airbus «THOR»

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί η προσπάθεια που είχε προηγηθεί από το Πανεπιστήμιο του Southampton, όπου το Μάιο του 2011, ξεκίνησε η κατασκευή του πρώτου 3D printed UAV με ονομασία SULSA (Southampton University Laser Sintered Aircraft), το οποίο έκανε την πρώτη του επιτυχημένη πτήση στις 8 Ιουνίου του 2011⁸⁸. Το SULSA αποτελούνταν από 4 δομικά μέρη (την κύρια άτρακτο, τα πηδάλια, το ρύγχος και τις πτέρυγες), τα οποία είχαν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Selective Laser Sintering (SLS) με μηχανή της εταιρίας 3T PRD

⁸⁶ http://www.ila-berlin.de/ila2016/airshow/flugg_liste_e.cfm?kat=8

⁸⁷ <http://www.airbus.com/newsevents/news-events-single/detail/airbus-tests-high-tech-concepts-with-an-innovative-3d-printed-mini-aircraft/>

⁸⁸ <https://www.3trpd.co.uk/portfolio/university-of-southampton-am-aircraft-takes-flight/>

Ltd από υλικό Nylon 12. Τα 4 αυτά δομικά μέρη συναρμολογήθηκαν μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα UAV με εκπέτασμα 1.2 μέτρα. Μάλιστα με τη βοήθεια των μηχανικών της 3T Ltd, δεν απαιτήθηκαν βίδες για τη συναρμολόγηση, αλλά έγινε με τη μέθοδο «snap fit», ενώ σχεδιάστηκαν και όλες οι απαραίτητες υποδοχές, ώστε να τοποθετηθούν τα υπόλοιπα 14 εξαρτήματα όπως ο ηλεκτροκινητήρας, το σύστημα GPS, οι δύο μπαταρίες, οι 4 σερβο-μηχανισμοί με τις καλωδιώσεις τους κ.α. Επιπρόσθετα, η μέθοδος SLS επέτρεψε την κατασκευή «hinges» από πλαστικό οι οποίοι επέτρεπαν την κίνηση των πτερυγίων κλίσης του UAV. Το SULSA είχε αυτονομία 30 λεπτών και μέγιστη ταχύτητα 90mph (145km/h)⁸⁹.

Το 2014 στο ερευνητικό κέντρο του Πανεπιστημίου του Sheffield, Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC), κατασκευάστηκε ένα Fixed Wing Powered UAV με τεχνολογίες AM. Συγκεκριμένα η άτρακτος κατασκευάστηκε με τη μέθοδο FDM σε μηχανή

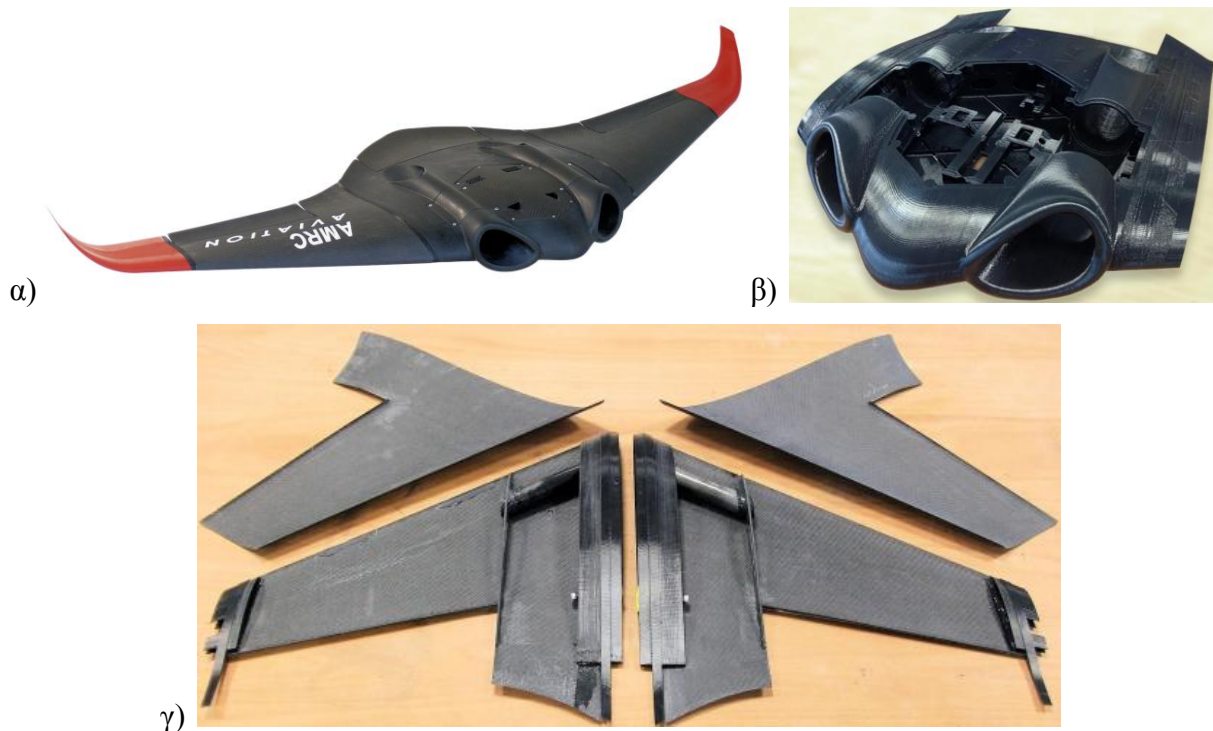


Εικόνα 70 Το 3D Printed UAV SULSA του Πανεπιστημίου του Southampton σε συνεργασία με τη 3T Ltd

Fortus 900mc της Stratasys, με το κύριο σώμα της ατράκτου να είναι κατασκευασμένο ως ένα ενιαίο κομμάτι μαζί με τους δύο αεραγωγούς των κινητήρων και με πολύπλοκες εσωτερικές κοιλότητες⁹⁰. Το UAV είχε 2 ηλεκτρικούς κινητήρες, το υλικό της ατράκτου και των ακροπτερυγίων ήταν ABS, ενώ σε πολλά σημεία του UAV (jigs, fixtures, wing skins, tail, hatch) χρησιμοποιήθηκαν ανθρακονήματα (συμβατική μέθοδος κατασκευής Vacuum Infusion). Το βάρος του ήταν 3.5 κιλά και η ταχύτητα πτήσης περίπου 20m/s.

⁸⁹ http://www.southampton.ac.uk/~decode/index_files/Page804.htm

⁹⁰ <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/university-of-sheffield-amrc-printed-uav/>



Εικόνα 71 α) Το 3D Printed UAV του Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC) του Πανεπιστημίου του Sheffield β) Το ενιαίο κεντρικό κομμάτι της ατράκτου του UAV κατασκευασμένο με μέθοδο FDM από ABS γ) Οι πτέρυγες από ABS του AMRC UAV και οι άνω επιφάνειες έτοιμες για συναρμολόγηση

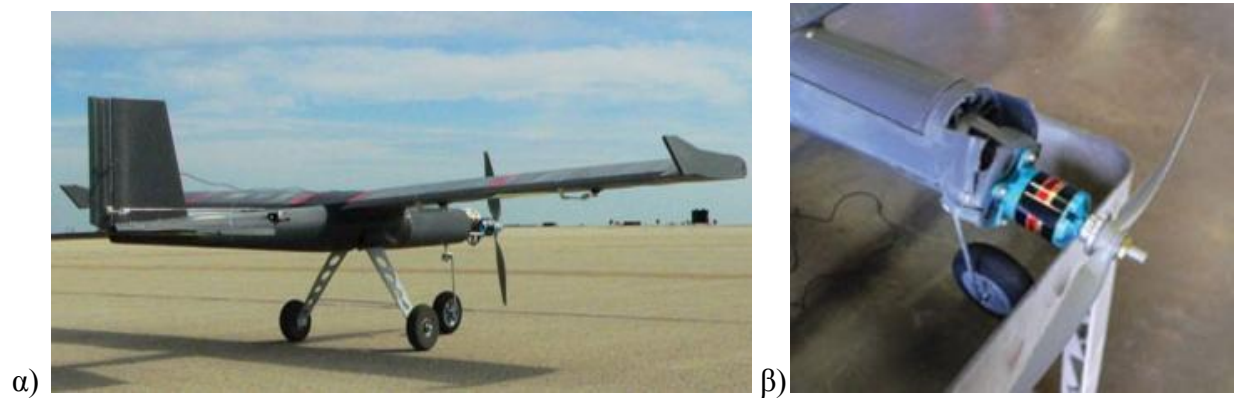
Η εταιρία SelectTech Geospatial κατασκεύασε ένα UAV με εκπέτασμα 4ft (1.2 μέτρα) με τη μέθοδο FDM της Stratasys σε μηχανή Dimension FDM. Το UAV σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού SolidWorks Premium. Η άτρακτός του αποτελούνταν εξ ολοκλήρου από υλικό ABS⁹¹. Κατά τη δοκιμαστική τροχοδρόμηση, το UAV απογειώθηκε χωρίς να φέρει σύστημα ελέγχου πτήσης (Flight Control) με αποτέλεσμα την «βαριά» προσγείωσή του και την καταστροφή των ακροπερυγίων και του ρύγχους. Από τη σύλληψη της ιδέας μέχρι την επιτυχή δοκιμαστική πτήση χρειάστηκαν περίπου 8 μήνες.

Επίσης αξίζει να αναφερθεί η συνεργασία μεταξύ της Stratasys και της Optomec με σκοπό την ενοποίηση των τεχνολογιών ΑΜ και των ηλεκτρονικών, προκειμένου να δημιουργήσουν τις πρώτες πλήρως «εκτυπωμένες» υβριδικές δομές. Το πρώτο υπό έρευνα εγχείρημα, ήταν η κατασκευή «έξυπνης πτέρυγας»⁹² για ένα UAV με ενσωματωμένα λειτουργικά ηλεκτρονικά. Στο σύστημα Aerosol Jet της Optomec κατασκευάστηκε ένας αισθητήρας, μία κεραία καθώς και τα κυκλώματα απευθείας πάνω στην πτέρυγα του UAV. Η πτέρυγα είχε «εκτυπωθεί» με την

⁹¹ <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/aerospace/selecttech-geospatial>

⁹² <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/3d-printing-is-merged-with-printed-electronics/>

μέθοδο FDM της Stratasys. Τα κατασκευαστικά σχέδια για τον αισθητήρα και τα ηλεκτρονικά παραχωρήθηκαν από την Aurora Flight Sciences.



Εικόνα 72 α) Το 3D Printed UAV της SelectTech Geospatial β) Καταστροφή του ρύγχους του 3D Printed UAV της SelectTech λόγω «βαριάς» προσγείωσης κατά τη διάρκεια των δοκιμών

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από όλα τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι, οι τεχνολογίες AM παρέχουν σημαντικές δυνατότητες στην κατασκευή Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών. Όπως προαναφέρθηκε, η μεγάλη ποικιλία κατηγοριών UAV, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που έχουν οι τεχνολογίες AM, όσον αφορά το είδος των χρησιμοποιούμενων υλικών ανά μέθοδο κατασκευής, αλλά και το μέγεθος των παραγόμενων προϊόντων από τις διαθέσιμες μηχανές AM, δεν καθιστούν εφικτή την παραγωγή ενός ενιαίου UAV. Ειδικότερα, το μέγεθος του θαλάμου κατασκευής των διαθέσιμων μηχανών AM δεν παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής ενός ενιαίου UAV, ενώ και τα επιμέρους τμήματα του αεροσκάφους, αποτελούμενα από διαφορετικά υλικά, δεν μπορούν να παραχθούν με μία μόνο μέθοδο των τεχνολογιών AM και από μία μηχανή AM. Επιπλέον, μέρη του Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους, όπως ο κινητήρας και τα ηλεκτρονικά συστήματά του, δεν μπορούν ακόμα να κατασκευαστούν με τις υπάρχουσες μεθόδους AM, ως ενιαία τμήματα. Επομένως, για την κατασκευή ενός UAV, μέσω των τεχνολογιών AM, είναι σκόπιμο να γίνει διαχωρισμός, ώστε κάθε τμήμα του αεροσκάφους να παραχθεί με τη βέλτιστη μέθοδο κατασκευής και τα καταλληλότερα υλικά που η εκάστοτε μέθοδος διαθέτει, ώστε να δημιουργηθεί ένα UAV που να πληροί τις προδιαγραφές του μεγέθους για το οποίο σχεδιάστηκε και του ρόλου που θέλουμε να επιτελέσει.

Δοθέντων όλων των ανωτέρω και μελετώντας τις επιμέρους δυνατότητες παραγωγής των τμημάτων του UAV, μπορούν να επισημανθούν τα ακόλουθα:

Όσον αφορά την κατασκευή τμημάτων ενός UAV που δεν υφίστανται μεγάλες αεροδυναμικές καταπονήσεις, όπως η άτρακτος, το ρύγχος (nose fuselage cone), το κάθετο σταθερό κ.α. οι δυνατότητες τεχνολογιών όπως η Fused Deposition Modeling με χρήση θερμοπλαστικών ρητινών είναι ιδιαίτερα κατάλληλη. Αντίστοιχα, σε περίπτωση που τα παραπάνω μέρη επιλεχθεί να γίνουν από μεταλλικά υλικά ή σύνθετα, κατάλληλες κατηγορίες τεχνολογιών είναι οι Power Bed Fusion (Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Selective Laser Melting, Electron Beam Melting) καθώς και οι Direct Energy Deposition (Direct

Metal Deposition, Laser Engineered Net Shape, Laser Consolidation, Electron Beam Additive Manufacturing, Ion Fusion Formation, Rapid Plasma Deposition). Ειδικότερα, για την κατασκευή του ρύγχους (nose cone) η μέθοδος Curved Laminated Object Manufacture κρίνεται ιδιαίτερως κατάλληλη, καθώς επιτρέπει την κατασκευή κωνικών τμημάτων από σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες.

Επίσης, για την κατασκευή οργάνων μέτρησης πίεσης και ταχύτητας του UAV (pitot tubes) οι μέθοδοι Direct Metal Laser Sintering και Electron Beam Melting είναι από τις καταλληλότερες της κατηγορίας Power Bed Fusion. Για τους αγωγούς αέρα (ψύξης ηλεκτρονικών κ.α.) και τις σωληνώσεις του UAV καταλληλότερη μέθοδος κρίνεται η Selective Laser Sintering. Όσον αφορά τις πτέρυγες του UAV, επειδή δέχονται και τις περισσότερες καταπονήσεις, μέθοδοι όπως Fused Deposition Modeling και Selective Laser Sintering φαίνεται να είναι πιο κατάλληλες στις περιπτώσεις που επιλέγεται η πτέρυγα να κατασκευαστεί από μη μεταλλικά υλικά. Για πτέρυγες με μεταλλικά υλικά ακόμα δεν φαίνεται να προκρίνεται κάποια μέθοδος ιδιαίτερα, καθώς τίθεται το θέμα της καταλληλότητας των υλικών όσον αφορά τις απαραίτητες πιστοποιήσεις σε θέματα ιδιοτήτων τους. Ομοίως για τα σκέλη προσγείωσης του UAV, ειδικά αν επιλεχθεί σχεδιαστικά να είναι ανασυρόμενα, οι μέθοδοι των κατηγοριών Power Bed Fusion, Direct Energy Deposition και Material Jetting είναι κατάλληλες, με την πλέον υποσχόμενη, την Rapid Plasma Deposition. Ωστόσο και στη περίπτωση των σκελών προσγείωσης δεν υπάρχουν ακόμα επαρκή δεδομένα όσον αφορά τις απαιτούμενες ιδιότητες των διαθέσιμων υλικών.

Τέλος, οι επιφάνειες ελέγχου ενός UAV (πηδάλια κλίσης, ailerons, flapperons, flaps, elevators, rudder, slats κ.α.) ανάλογα με τη σχεδίαση, συνήθως αποτελούνται από σύνθετα υλικά. Συνεπώς, οι μέθοδοι των κατηγοριών Sheet Lamination, Powder Bed Fusion (SLS) και Direct Energy Deposition (Direct Metal Deposition) φαίνεται να είναι κατάλληλες για την παραγωγή τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Μπιλάλης Ν., Μαραβελάκης Ε, «**Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση**» Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, 2014.
2. Παντελής Δ., «**Μη Μεταλλικά Υλικά**», Παπασωτηρίου, 1996
3. Χρυσουλάκης Ι., Παντελής Δ., «**Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών**» Παπασωτηρίου, 1996
4. «**Ανάπτυξη Περιβάλλοντος Εικονικής Πραγματικότητας Εργαστηρίου Ταχείας Παραγωγής Πρωτοτύπων Και Εργαλείων**», Ερευνητική μεταπτυχιακή διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων απόκτησης Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στον Κύκλο των Συστημάτων Παραγωγής, Κωστάκης Ιωάννης, 2010
5. «**Παρουσίαση μεθόδων Rapid Tooling εφαρμογή στο σύστημα MK Mini-Vacuum Casting** », Παπαγιάννης Γεώργιος, Μπιλάλης Νικόλαος , 2002
6. «**Μελέτη Ασύρματων Ζεύξεων Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων (MEA) UAVs** », Διπλωματική Εργασία, Ματσούκας Γεώργιος, 2015
7. Παπαθανάσης Ηλίας, «**Η τεχνολογία της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης**», Περιοδικό ΠΕΡΙΣΚΟΠΙΟ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ, Τεύχος 297, Οκτώβριος 2005
8. «**Η τρισδιάστατη εκτύπωση και η επίδραση της στην εφοδιαστική αλυσίδα και στα Logistics. Μελέτη επίδρασης της τεχνολογίας στην εταιρία Nike**», Διπλωματική Εργασία που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων απόκτησης Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Δουλαδέλη Μαρία, 2015
9. «**Τρισδιάστατοι εκτυπωτές και εφαρμογές τους στην Βιοϊατρική τεχνολογία**», Διπλωματική Εργασία, Αναστασοπούλου Αθανασία, Δεκέμβριος 2014
10. «**Διερεύνηση Παραμέτρων Ταχείας Πρωτοτυποποίησης και Συναρμολόγησης Τρισδιάστατου Εκτυπωτή**», Διπλωματική Εργασία, Μιχαλοδημητράκη Νικολέτα, 2015

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. I. Gibson, D. W. Rosen , B. Stucker, “**Additive Manufacturing Technologies- Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**”, Springer, 2010
 2. Wanlong Wang, Henry W. Stool, James G. Conley, “**Rapid Tooling Guidelines For Sand Casting**”, Springer, 2010
 3. Kaufui V. Wong and Aldo Hernandez, “**A Review of Additive Manufacturing**”, ISRN Mechanical Engineering Volume 2012
-

4. Wohlers, T., & Gornet T.,” **History of additive manufacturing. In Wohlers Report 2014**”,Colorado: Wohlers Associates, 2014
5. Wohlers TT (2012) Wohlers report 2012 “ **Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report**” ,Wohlers Associates, Detroit, MI, 2012
6. Wohlers TT (2009) Wohlers report 2009 “ **Rapid prototyping & tooling state of the industry. Annual worldwide progress report**”. Wohlers Associates, Detroit, MI, 2009
7. Hopkinson, Neil, Richard Hague, and Philip Dickens,. “**Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age**”. John Wiley & Sons, 2006
8. Pham DT, Gault RS (1998) “**A comparison of rapid prototyping technologies.**”, Int J Mach Tools Manuf, 1998
9. Diego Manfredi, Flaviana Calignano, Manickavasagam Krishnan, Riccardo Canali,,Elisa Paola Ambrosio, Sara Biamino, Daniele Ugues,,Matteo Pavese and Paolo Fino “**Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs)**”
10. Valmik Bhavar, Prakash Kattire, Vinaykumar Patil, Shreyans Khot, Kiran Gujar, Rajkumar Singh, 2014 “**A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing**” *Kalyani Centre for Technology and Innovation (KCTI), Bharat Forge Ltd., Pune, India, 2014*
11. SmarTech Markets Publishing, “**Opportunities in Metal Additive Manufacturing**”
12. Kumar S, Kruth JP. “**Composites by rapid prototyping technology.**” Mater. Des. 2010; 31 (2): 850–856.
13. Ghosh SK, Saha P, Kishore S. “**Influence of size and volume fraction of SiC particulates on properties of ex situ reinforced Al-4.5Cu-3Mg metal matrix composite prepared by direct metal laser sintering process.**” Mater. Sci. Eng. A, 2010; 527 (18–19): 4694–4701.
14. Federal Aviation Regulations, Title 14, Section 25, Subpart D, Subsection 25.603
15. Stanag 4671 “**UAV Systems Airworthiness Requirements (USAR) for North Atlantic Treaty Organization (NATO) Military UAV Systems**”, Edition 1, 3-9-2009.
16. Austin, Reg. 2010. “**Unmanned Air Systems_ UAV Design, Development and Deployment**”. s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2010.
17. Angelov, Plamen “**Sense and Avoid in UAS_Research and Applications**”,2012, John Wiley & Sons, Ltd
18. Bhaskar Dutta, Francis H. Froes , “**Additive Manufacturing of Titanium Alloys, State of the Art, Challenges and Oppurtunities**”, Elsevier Inc 2016
19. ASTM F2921-11, “**Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies**”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011
20. ASTM F2792-12a, “**Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
21. ASTM F2915-12, “**Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AFM) Version 1.1**”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
22. ASTM F2924-12, “**Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion**”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
23. Thymiadis M., Achillas Ch., Tzetzis D., Iakovou E., “**Modern Additive Manufacturing Technologies: An Up-to Date Synthesis and Impact on Supply Chain Design**”, 2012
24. Daneshmand S., Aghanajafi C., “**Description and Modeling of the Additive Manufacturing Technology for Aerodynamic Coefficients Measurement**”, Journal of Mechanical Engineering, 2012
25. QMI Solutions, “**Additive Manufacturing**”, White Paper, 2013

-
26. Gausemeier J, Echterhoff N., Wall M., **“Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Innovation Roadmapping of Required Advancements”**, Direct Manufacturing Research Center, 2013
 27. GE Capital, **“Additive Manufacturing – Redefining What’s Possible”**, 2013
 28. Harris I., **“Development and Implementation of Metals Additive Manufacturing”**, 2011
 29. Diegel O., Singamneni S., Reay S., Withell A., **“Tools for Sustainable Product Design: Additive Manufacturing”**, Journal of Sustainable Development, 2010
 30. Jeff Allen, **“An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs Machine from Solid Aero Engine Parts”**, Manufacturing Technology Rolls-Royce plc, 2006
 31. The National Academy of Sciences, **“3D Printing in Space”**, 2014
 32. Christopher Bryant Williams, **“Design and Development of a Layer-Based Additive Manufacturing Process for the Realization of Metal Parts of Designed Mesostructure”**, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2008
 33. Allison A., Scudamore R., **“Additive Manufacturing Strategic Research Agenda”**, AM SRA, 2014.
 34. Gary Coykendall, **“Standard Specification for Additive manufacturing File Format (AMF)”**, Edmonds Community College, 2013
 35. European Commission, **“ Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020” Report from EC Workshop on Additive Manufacturing**, June 2014
 36. Filip Geerts, **“Measuring the Competitive Benefits of Additive Manufacturing: the perspective of the Machine Tool Industry”**, The European Association of the Machine Tool Industries, June 2015
 37. Stephen Mellor, **“An Implementation Framework for Additive Manufacturing”**, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Engineering, University of Exeter, March 2014
 38. Mootaz M. Ghazy, **“Development of an Additive Manufacturing Decision Support System (AMDSS)”**, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy to the Faculty of Science, Agriculture and Engineering, October 2012
 39. Douglas S. Thomas, Stanley W. Gilbert, **“Cost and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing”** National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, December 2014
 40. Peter Rosker, **“Roadmap for Additive Manufacturing in Aerospace”**, EOS, March 2015
 41. Roar Nelissen Leirvag, **“Additive Manufacturing for Large Products”**, Norwegian University of Science and Technology, February 2013
 42. Greg Morris, **“ Additive Road to Production”**, GE AVIATION
 43. SmarTech Markets Publishing, **“Additive Manufacturing in Aerospace: Strategic Implications”**, August 2014
 44. John Coykendall, Mark Cotteleer, Jonathan Holdowsky, Monika Mahto, **“3D Opportunity in Aerospace and Defence: Additive Manufacturing takes flight”**, Deloitte University Press, 2014
 45. Tim Hope, **“Development and Industrialisation of Additive Manufacturing Processes”**, GKN Additive Manufacturing Centre Filton, 2015
 46. Brett Lyons, **“Additive Manufacturing in Aerospace: Examples and Research Outlook”**, Boeing Research & Technology, 2011
 47. William E. Frazier, **“Metal Additive Manufacturing: A Review”**, ASM International, February 2014

-
48. Carlos Ozores, “**Additive Manufacturing: Aerospace’s Next Disruptive Technology**”, ICF International, January 2015
 49. Jesse Boyer, “**Additive Manufacturing**”, Pratt & Whitney, April 2015
 50. Christopher W. Fink, “An Overview of Additive Manufacturing, Part II”, AMMTIAC Quarterly, Vol. 4, No. 3
 51. Chris Root, Tom Naguy, Stacey Clark Kerwein, “**Additive Manufacturing Opportunities within DoD Maintenance**”, U.S. DoD
 52. N.K. Dey, F.W.Liou, C. Nedic, “Additive Manufacturing Laser Deposition of Ti-6Al-4V for Aerospace Repair Application”, International SFF Symposium, August 2013
 53. “**Metal AM**” Magazine Vol.1 No.1 Spring 2015
 54. “**Metal AM**” Magazine Vol.1 No.2 Summer 2015
 55. “**Metal AM**” Magazine Vol.1 No.3 Autumn 2015
 56. “**Metal AM**” Magazine Vol.1 No.4 Winter 2015
 57. “**PIM International**” Magazine Vol.10 No.1 March 2016
 58. Giordano Bruno Antoniazzi Ronconi, Thais Jessinski Batista, Victor Merola, “**The Utilization of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for Military Action in Foreign Airspace**”, ISSN:2318-3195|v.2,2014|p.137-180
 59. John Klein, “**Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass**”, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science to the Program in Media Arts and Sciences, School of Architecture at Massachusetts Institute of Technology, September 2015
 60. Sharon L.N. Ford, “**Additive Manufacturing Technology: Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness**”, U.S. International Trade Commission, September 2014
 61. Lauren Margolin, “**Ultrasonic Droplet Generation Jetting Technology for Additive Manufacturing: An Initial Investigation**”, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, December 2006
 62. Toimi Teelahti, “**Implementing Additive Manufacturing in Microfactories**”, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Faculty of Engineering Sciences, Tampere University of Technology, 2014
 63. Terry Khales, “**Additive Manufacturing (AM)**”, Federal Aviation Administration, August 2015
 64. Mark J. Cotteleer, “**3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation and growth**”, Deloitte Services, October 2014
 65. John Olorushola Obielodan, “**Fabrication of Multi-Material Structures Using Ultrasonic Consolidation and Laser-Engineered Net Shaping**”, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Utah State University, 2010
 66. Matthew L. Swank, “**Support Materials Development and Integration for Ultrasonic Consolidation**”, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Master of Science in Mechanical Engineering, Utah State University, 2010
 67. Dawn R. White, “**Ultrasonic Consolidation: Status Report on Development of Solid State Net Shape Processing for Direct Manufacturing**”, Solidica Inc, May 2006.
 68. Alexander Jay Dunbar, “**Analysis of the Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process through Experimental Measurement and Finite Element Modeling**”, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy, Pennsylvania State University, May 2016

-
69. W.J. Sames, F.A. List, S. Pannala, R.R. Dehoff, S.S. Babu, “**The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing**”, International Materials Reviews, March 2016
 70. Herderick E, “**Additive Manufacturing of Metals: A Review**”, Materials Science and Technology, 2011
 71. Alexandros Beiker Kair, Konstantinos Sofos, “**Additive Manufacturing and Production of Metallic Parts**”, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Master of Science in Production Engineering and Management, KTH Royal Institute of Technology, University, June 2014
 72. Francis H. Froes, Bhaskar Dutta, “**Additive Manufacturing of Titanium Alloys, State of the Art, Challenges and Opportunities**”, 2016 Elsevier Inc

Πηγές από το διαδίκτυο

1. <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>
2. <http://www.iso.org/iso/iso technical committee?commid=629086>
3. http://cordis.europa.eu/result/rcn/149448_en.html
4. <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/Home/Committee/50226095>
5. <http://www.cencenelec.eu/news/events/Pages/EV-2013-07.aspx>
6. http://www.unm.fr/main/core.php?pag_id=53&commission=249
7. <https://www.ansi.org/>
8. <https://www.americamakes.us/index.php>
9. https://ansi.org/standards_activities/standards_boards_panels/amsc/Default.aspx
10. <http://www.astmnewsroom.org/default.aspx?pageid=2539>
11. <http://www.astm.org/Standards/ISOASTM52915.htm>
12. https://en.wikipedia.org/wiki/Additive_Manufacturing_File_Format
13. http://amf.wikispaces.com/file/view/AMF_V0.48.pdf
14. <https://www.astm.org/Standards/ISOASTM52900.htm>
15. <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/polyjet-technology>
16. <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/multi-jet-printing/mjp>
17. <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-melting#read-advantages>
18. <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
19. <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>
20. <http://www.businesswire.com/news/home/20160701005132/en/Norsk-Titanium-Reveals-Rapid-Plasma-Deposition%E2%84%A2-2016>
21. <https://www.additively.com/en/material>
22. http://senvol.com/5_material-search/
23. <https://www.lightrider.apworks.de/en>
24. <https://3dprint.com/103721/3dbioprintingsolutions-thyroid/>
25. <http://www.boeing.com/features/2016/08/record-books-08-16.page>
26. <https://3dprint.com/49489/boeing-3d-print/>

-
27. <http://appft1.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PG01&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.html&r=1&f=G&l=50&s1=20150064299.PGNR>.
 28. <http://www.boeing.com/features/2016/08/record-books-08-16.page>
 29. <http://www.gereports.com/post/116402870270/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly/>
 30. <https://3dprint.com/127906/ge-smart-factory/>
 31. <http://www.gereports.com/airbus-gets-1st-production-jet-engines-with-3d-printed-parts-from-cfm/>
 32. <http://www.gereports.com/ges-new-aviation-plant-heart-europe-will-build-3d-printed-engines-next-gen-cessna-planes/>
 33. <http://www.gereports.com/post/118394013625/these-engineers-3d-printed-a-mini-jet-engine-then/>
 34. https://www.eos.info/press/press_material
 35. <http://www.pw.utc.com/Press/Story/20150401-1500/2015/All%20Categories>
 36. <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/over-1000-3d-printed-parts-on-airbus-a350-xwb-aircraft/>
 37. <http://www.tctmagazine.com/tct-events/formnext-powered-by-tct/tct-show-exhibitors-concept-laser/>
 38. <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/mtu-aero-powers-airbus-jetliner-additive-manufacturing/>
 39. <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/airbus-extends-additive-manufacturing-potential-arconic-sciaky/>
 40. <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/autodesk-teams-with-airbus-on-3d-printed-bionic-parition/>
 41. <http://www.airbusgroup.com/int/en/story-overview/Pioneering-bionic-3D-printing.html>
 42. <http://www.lockheedmartin.com/us/news/features/2015/by-the-numbers-3dprintingatlockheedmartin.html>
 43. https://www.stratasysdirect.com/case-studies/lockheed-martin-3d-printing/?utm_source=release&utm_medium=wire&utm_content=lockheed&utm_campaign=pr
 44. <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/sciaky-provide-ebam-solution-to-lockheed-martin/>
 45. <http://www.lockheedmartin.com/us/news/features/2015/additive-manufacturing-space.html>
 46. <https://www.rolls-royce.com/media/insights/simon-burr.aspx>
 47. <https://el.wikipedia.org/wiki>
 48. https://www.pddnet.com/news/2015/11/photos-day-worlds-first-jet-powered-3d-printed-uav-tops-150-mph?et_cid=4937356&et_rid=45591169&type=headline
 49. <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/game-of-drones-3d-printing/>
 50. http://www.ila-berlin.de/ila2016/airshow/flugg_liste_e.cfm?kat=8
 51. <http://www.airbus.com/newsevents/news-events-single/detail/airbus-tests-high-tech-concepts-with-an-innovative-3d-printed-mini-aircraft/>
 52. <https://www.3trpd.co.uk/portfolio/university-of-southampton-am-aircraft-takes-flight/>
 53. http://www.southampton.ac.uk/~decode/index_files/Page804.htm
 54. <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/university-of-sheffield-amrc-printed-uav/>

-
55. <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/aerospace/selecttech-geospatial>
 56. <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/3d-printing-is-merged-with-printed-electronics/>
 57. www.premium-aerotec.com
 58. <http://www.metal-am.com/>
 59. <http://www.pim-international.com/>
 60. <https://www.smartechpublishing.com/>
 61. <http://www.norsktitanium.com/>
 62. <http://www.sciaky.com/>

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ - ΠΙΝΑΚΩΝ

Εικόνα 1 Γεωμετρικό Μοντέλο CAD ενός φλιτζανιού τσαγιού με εικόνες που αποτυπώνουν το αποτέλεσμα χρήσης διαφορετικών παχών στις.....	17
Εικόνα 2 Η πρώτη μηχανή AM από τον ιδρυτή της 3D Systems Charles Hull.....	19
Εικόνα 3 Τα 8 στάδια της γενικευμένης διαδικασίας AM	29
Εικόνα 4 Γενικευμένη διαδικασία AM	31
Εικόνα 5 Η τυπική δομή των Προτύπων AM όπως συμφωνήθηκε μεταξύ ASTM και ISO τον Ιούλιο του 2013.	34
Εικόνα 6 Εναλλακτικές Ορολογίες των Τεχνολογιών AM	36
Εικόνα 7 Μετατροπή 3D Μοντέλου CAD σε αρχείο STL. Ακρίβεια μοντέλου ανάλογα με χρήση διαφορετικού ύψους ακμής τριγώνου.	37
Εικόνα 8 Διάγραμμα Ροής Δημιουργίας Αρχείου STL	38
Εικόνα 9 Ορθογώνια Τριγωνική Πυραμίδα όπως περιγράφεται στο αρχείο STL	39
Εικόνα 10 Γεωμετρία αποτελούμενη από (α) Graded Material –FGM (β)Multiple Materials (γ) Colors & Graphics	40
Εικόνα 11 Σύγκριση Μεγέθους Αρχείου STL & AMF	41
Εικόνα 12 Η βασική Δομή Αρχείου AMF	42
Εικόνα 13 Ταξινόμηση Κύριων Τεχνολογιών AM από Hopkinson & Dickens	44
Εικόνα 14 Ταξινόμηση Τεχνολογιών AM από τον Pham (Ενδεικτικά έχουν κατηγοριοποιηθεί διαδεδομένες τεχνολογίες AM)	45
Εικόνα 15 Οι τρεις διαφορετικές παραλλαγές της κατηγορίας Vat Photopolymerization α) Vector Scan β)Mask Protection γ) Two Photon approach	48
Εικόνα 16 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Στερεολιθογραφίας - SLA	49
Εικόνα 17 3D Systems ProX TM 950 Stereolithography SLA Production System. Η πιο σύγχρονη και η μεγαλύτερη SLA μηχανή της 3D Systems Inc για βιομηχανική παραγωγή.	50
Εικόνα 18 α) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Digital Light Processing- DLP β) EnvisionTEC's Perfactory 4 Digital Shell Printer (DSP)	51

Εικόνα 19 α) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Material Jetting β) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Photopolymer Jetting.....	52
Εικόνα 20 Μηχανές Polyjet 3D Printing από την Stratasys α) Objet1000Plus β) Stratasys J750 (μεγάλης χωρητικότητας και δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης 6 διαφορετικών υλικών) γ) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Objet Polyjet	53
Εικόνα 21 Μηχανές Multijet Printing από την 3D Systems α) Projet MJP 3600 Series β) Projet 5000 γ) Projet 5500X.....	53
Εικόνα 22 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Binder Jetting	54
Εικόνα 23 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας 3D Printing	55
Εικόνα 24α) Έγχρωμος 3D εκτυπωτής Projet CJP860Pro της 3D Systems β)M-Print Metal 3D Printer της ExOne γ) S-Print Sand Casting 3D Printer της ExOne	56
Εικόνα 25 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Fused Deposition Modeling - FDM	57
Εικόνα 26 3D Εκτυπωτές Τεχνολογίας FDM της Stratasys α) uPrint SE Plus (Build Size 203x203x152mm) β) Dimension Elite (Build Size 203x203x305mm) γ) Fortus 900mc (Build Size 914.4x609.6x914.4mm)	58
Εικόνα 27 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογιών Powder Bed Fusion - PBF	59
Εικόνα 28 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Powder Bed Fusion – PBF	61
Εικόνα 29 Μηχανές SLS για βιομηχανική χρήση α) FS 402P της FARSOON (Build Size 350x350x430 mm) β) sPro™60HD (Build Size 381 x 330 x 460 mm) της 3D Systems γ) EOSINT P 770 της EOS (Build Size 700 mm x 380 mm x 580 mm)	62
Εικόνα 30 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	63
Εικόνα 31 Μηχανές DMLS της 3D Systems α) EOS M400-4 Quad-Laser System (Build Size 400 x 400 x 400 mm) β) EOSINTM280 (Build Size 250 mm x 250 mm x 325 mm)	63
Εικόνα 32 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Selective Laser Melting (SLM)	64
Εικόνα 33 Μηχανές SLM α) X LINE 2000R της CONCEPTLASER (Build Size 800 x 400 x 500 mm ³) β) AM 250 της RENISHAW (Build Size 250 mm x 250 mm x 300 mm) γ)SLM 500 Four quad fiber lasers της SLM Solutions (Build Size 500 x 280 x 365 mm ³)	65
Εικόνα 34 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Electron Beam Melting (EBM).....	66
Εικόνα 35 Μηχανές EBM της Arcam AB α) Arcam Q20plus (Build Size 350x350x380 mm)	67
Εικόνα 36 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Laminated Object Manufacturing (LOM)	69
Εικόνα 37 Desktop 3D Printer LOM SD 300Pro της Solido (Build Size 170 x 220 x 145 mm)	70
Εικόνα 38 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Ultrasonic Consolidation (UC).....	72
Εικόνα 39 α) Σχηματική Αναπαράσταση Κατασκευής Smart Structure με Ultrasonic Consolidation β) Μηχανή UC SonicLayer 7200 της Fabrisonic LLC (Build Size 2 x 2 x 1.5 m)	72

Εικόνα 40 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογιών Direct Energy Deposition (DED)....	73
Εικόνα 41 α) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Direct Metal Deposition (DMD) όπως χρησιμοποιήθηκε στις μηχανές της POM β) Μηχανή POM DMD 505D (Build Size 1219 x 600 x 610mm)	76
Εικόνα 42 α) Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Laser Engineered Net Shape (LENS) β) LENS 850-R Repair & Fabrication of large metal Aerospace components της Optomec (Build Size 900 x 1500 x 900mm).....	77
Εικόνα 43 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Laser Consolidation	78
Εικόνα 44 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)	79
Εικόνα 45 α) Η Μηχανή EBAM™ 300 της Sciaky Inc (Build Size 5.79x1.22x1.22m) με ένα από τους μεγαλύτερους θαλάμους στον κόσμο β) Σύγκριση Ρυθμού Απόθεσης Υλικού Τεχνολογιών Metal Additive Manufacturing	80
Εικόνα 46 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Ion Fusion Formation (IFF) της εταιρίας Honeywell Aerospace.....	81
Εικόνα 47 Σχηματική Αναπαράσταση Τεχνολογίας Rapid Plasma Deposition (RPD) της εταιρίας Norsk Titanium	82
Εικόνα 48 Η μηχανή RPD™ MERKE IV της Norsk Titanium (Build Size 900mm x 600mm x 300mm)	83
Εικόνα 49 Συνολικά Έσοδα Πώλησης Μεταλλικών Υλικών σε μορφή σκόνης για Τεχνολογίες AM ανά Βιομηχανία	95
Εικόνα 50 Η πρώτη 3D printed μοτοσικλέτα «Light Rider» βάρους μόλις 35 κιλών, κατασκευασμένη από Scalmalloy (ειδικό κράμα αλουμινίου που συνδυάζει το χαμηλό βάρος του αλουμινίου και την αντοχή του τιτανίου) από την εταιρία Arworks που είναι θυγατρική της Airbus.	106
Εικόνα 51 Βιομηχανικοί τομείς εφαρμογής τεχνολογιών AM	107
Εικόνα 52 Αεροπορικά εξαρτήματα εταιρίας Boeing από Πολυαμίδιο (Environmental Control System Ducting) κατασκευασμένα με την τεχνική Selective Laser Sintering ...	109
Εικόνα 53 Εργαλείο Wing Trim and Drill Tool που κατασκευάστηκε από την Boeing σε συνεργασία με το Oak Ridge National Laboratory (ORNL) και κέρδισε το παγκόσμιο ρεκόρ Guinness ως το μεγαλύτερο 3D στερεό εκτυπωμένο αντικείμενο.	110
Εικόνα 54 Είδη Τεχνολογιών AM που έχει στην διάθεσή της η εταιρία General Electric	110
Εικόνα 55 α) 3D Printed Housing για τον T25 Sensor που βρίσκεται στην είσοδο του συμπιεστή υψηλής πίεσης κινητήρων jet της εταιρίας GE β) 3D Printed Fuel Nozzle εταιρίας GE για τους κινητήρες GE9X και CFM LEA γ) Πτερύγια τουρμπίνας χαμηλής πίεσης κατασκευασμένα με την μέθοδο Electron Beam Meltig από υλικό TiAl για τους κινητήρες GE9X της GE	111
Εικόνα 56α) Ο μίνι κινητήρας jet της GE αποτελούμενος εξολοκλήρου από 3D printed εξαρτήματα β) Ο κινητήρας Advanced Turboprop (ATP) της GE όπως παρουσιάστηκε στο Oshkosh airshow προορισμένος για το αεροσκάφος Cessna Denali της Textron Aviation	112

Εικόνα 57 Υποψήφια μέρη κινητήρα Jet τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν με τεχνολογίες AM σύμφωνα με την εταιρία GE	113
Εικόνα 58 Επανασχεδιασμένο Engine Bracket της GE από την Frustum και κατασκευασμένο από την Quickparts σε μηχανή 3D Systems ProX DMP 320 printer (τεχνολογία Direct Metal Printing), το οποίο πληρούσε όλες τις προδιαγραφές της GE με μειωμένο βάρος κατά 70%	113
Εικόνα 59 α) Stator ring από NickelAlloy IN718 β) Swirler από Cobalt Chrome MPI για gas turbine applications γ) Fuel Injector NickelAlloy IN718 τα οποία είναι κατασκευής της Morris Technologies	114
Εικόνα 60 α) Εξαρτήματα κινητήρα PurePower® PW1500G κατασκευασμένα με τεχνολογίες AM β) Υπό δοκιμή εξαρτήματα κινητήρων P&W κατασκευασμένα με τεχνολογίες AM	115
Εικόνα 61 α) Εξάρτημα Seat Bracket κατασκευασμένο από Τιτάνιο από την Concept Laser για το Airbus A350 XWB β) Borescope Boss κατασκευασμένο από κράμα Νικελίου από την εταιρία MTU Aero Engines με χρήση μηχανών DMLS της EOS για να τοποθετηθεί σε κινητήρα PurePower®PW1000G	116
Εικόνα 62 Airbus Bionic Partition - Το μεγαλύτερο υπό ανάπτυξη 3D εκτυπωμένο εξάρτημα καμπίνας αεροσκάφους A320 αποτελούμενο από 122 τμήματα από Scalmalloy και 40 από αλουμίνιο	117
Εικόνα 63 Αεροπορικά εξαρτήματα κατασκευής εταιρίας EOS με μέθοδο DMLS α) Όργανο μέτρησης της ροής αέρα β) Όργανο μέτρησης συνολικής πίεσης ενός αεροστροβίλου γ) Bracket χάλυβα συμβατικής σχεδίασης(αριστερά) και αλουμινίου βελτιστοποιημένης τοπολογίας (δεξιά) δ) Bracket ανοξείδωτου χάλυβα συμβατικής σχεδίασης (πίσω) και βελτιστοποιημένης τοπολογίας αεροσκάφους Airbus A380.....	118
Εικόνα 64 Εξάρτημα Bleed Air Leak Detect Bracket της LM Aero για το F-35 Joint Strike Fighter κατασκευασμένο από Ti-6Al-4V με τη μέθοδο Electron Beam Melting	119
Εικόνα 65 3D εκτυπωμένα εξαρτήματα διαστημοπλοίων και δορυφόρων της εταιρίας LM α) Juno Waveguide Bracket β) A2100 Universal Backing Connectors γ) Orion Vents δ) Osiris-Rex Bracket ε) Titanium Fuel Tank	120
Εικόνα 66 α) 3D Εκτυπωμένο Front Bearing Housing κινητήρα Trent XWB-97 της εταιρίας Rolls Royce β)Επισκευή πτερυγίου τουρμπίνας με τεχνολογία Direct Metal Deposition	121
Εικόνα 67 α) Το UAV PEGASUS II κατηγορίας MALE της Ελληνικής Πολεμικής Αεροπορίας β)Το UAV MQ-1 Predator κατηγορίας MALE της General Atomics γ) Το UAV RQ-4 Global Hawk κατηγορίας MALE της Northrop Grumman	125
Εικόνα 68 α)Το πρώτο Jet-Powered 3D Printed UAV αποτέλεσμα συνεργασίας της Aurora Flight Sciences και της Stratasyς β) Η δομή της πτέρυγας του Jet-Powered 3D Printed UAV συνεργασία της Aurora και της Stratasyς	127
Εικόνα 69 α) Το πρωτότυπο μοντέλο του 3D printed UAV της Airbus «THOR» κατά την απογείωσή του στις 21 Νοεμβρίου 2015 β) 3D εκτυπωμένα τμήματα του UAV της Airbus «THOR»	128
Εικόνα 70 Το 3D Printed UAV SULSA του Πανεπιστήμιο του Southampton σε συνεργασία με τη 3T Ltd	129

Εικόνα 71 Το 3D Printed UAV του Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC) του Πανεπιστημίου του Sheffield β) Το ενιαίο κεντρικό κομμάτι της ατράκτου του UAV κατασκευασμένο με μέθοδο FDM από ABS γ) Οι πτέρυγες από ABS του AMRC UAV και οι άνω επιφάνειες έτοιμες για συναρμολόγηση130

Εικόνα 72 α) Το 3D Printed UAV της SelectTech Geospatial β) Καταστροφή του ρύγχους του 3D Printed UAV της SelectTech λόγω «βαριάς» προσγείωσης κατά τη διάρκεια των δοκιμών131

Πίνακας 1 Οι κυριότερες εταιρίες παραγωγής συστημάτων AM, η χώρα ίδρυσης, το έτος ίδρυσης και το έτος εμπορικής διάθεσης τεχνολογίας AM21

Πίνακας 2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Τεχνολογιών AM26

Πίνακας 3 Σύγκριση Ακρίβειας Αρχείων STL & AMF42

Πίνακας 4 Ταξινόμηση Τεχνολογιών AM σε 7 Κατηγορίες από την Επιτροπή ASTM F4246

Πίνακας 5 Ταξινόμηση Κυριότερων Τεχνολογιών AM σε 7 Κατηγορίες σύμφωνα με τη Επιτροπή ASTM F42..... 47

Πίνακας 6 Διαφορές Τεχνολογιών EBM & SLM67

Πίνακας 7 Κατηγορίες Υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανά κατηγορία τεχνολογιών AM86

Πίνακας 8 Πολυμερή Υλικά Τεχνολογιών AM Εταιρίας 3D Systems..... 89

Πίνακας 9 Πολυμερή Υλικά Τεχνολογιών AM Εταιρίας DSM90

Πίνακας 10 Πολυμερή Υλικά Τεχνολογιών AM Εταιρίας EOS.....90

Πίνακας 11 Πολυμερή Υλικά Τεχνολογιών AM Εταιρίας Envisiontec91

Πίνακας 12 Πολυμερή Υλικά Τεχνολογιών AM Εταιρίας Stratasys92

Πίνακας 13 Συγκριτικός Πίνακας Θερμοπλαστικών Υλικών Μηχανών Fortus FDM της εταιρίας Stratasys93

Πίνακας 14 Μεταλλικά Υλικά Τεχνολογιών AM Εταιρίας Arcam96

Πίνακας 15 Μεταλλικά Υλικά Τεχνολογιών AM Εταιρίας Concept Laser96

Πίνακας 16 Μεταλλικά Υλικά Τεχνολογιών AM Εταιρίας EOS96

Πίνακας 17 Μεταλλικά Υλικά Τεχνολογιών AM Εταιρίας Renishaw97

Πίνακας 18 Μεταλλικά Υλικά Τεχνολογιών AM Εταιρίας SLM Solutions97

Πίνακας 19 Κεραμικά Υλικά Τεχνολογιών AM98

Πίνακας 20 Σύνθετα Υλικά Τεχνολογιών AM εταιριών 3D Systems και 3DXTech..... 100

Πίνακας 21 Σύνθετα Υλικά Τεχνολογιών AM εταιριών Optomec, Oxford Performance Materials & Prodways100

Πίνακας 22 Σύνθετα Υλικά Τεχνολογιών AM εταιριών ALM, Arevo Labs, CRP Technology & EnvisionTEC	101
Πίνακας 23 Σύνθετα Υλικά Τεχνολογιών AM εταιριών EnvisionTEC, EOS, ExOne, Human Farsoon, LPW & MarkForged	101
Πίνακας 24 Υλικά Κατηγορίας Άμμου Τεχνολογιών AM εταιριών 3D Systems, Asiga, DWS Systems, EnvisionTEC, Soldiscap & Stratasys	102
Πίνακας 25 Υλικά Κατηγορίας Κεριοῦ Τεχνολογιών AM εταιριών EOS, ExOne & Voxeljet	103