



Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ

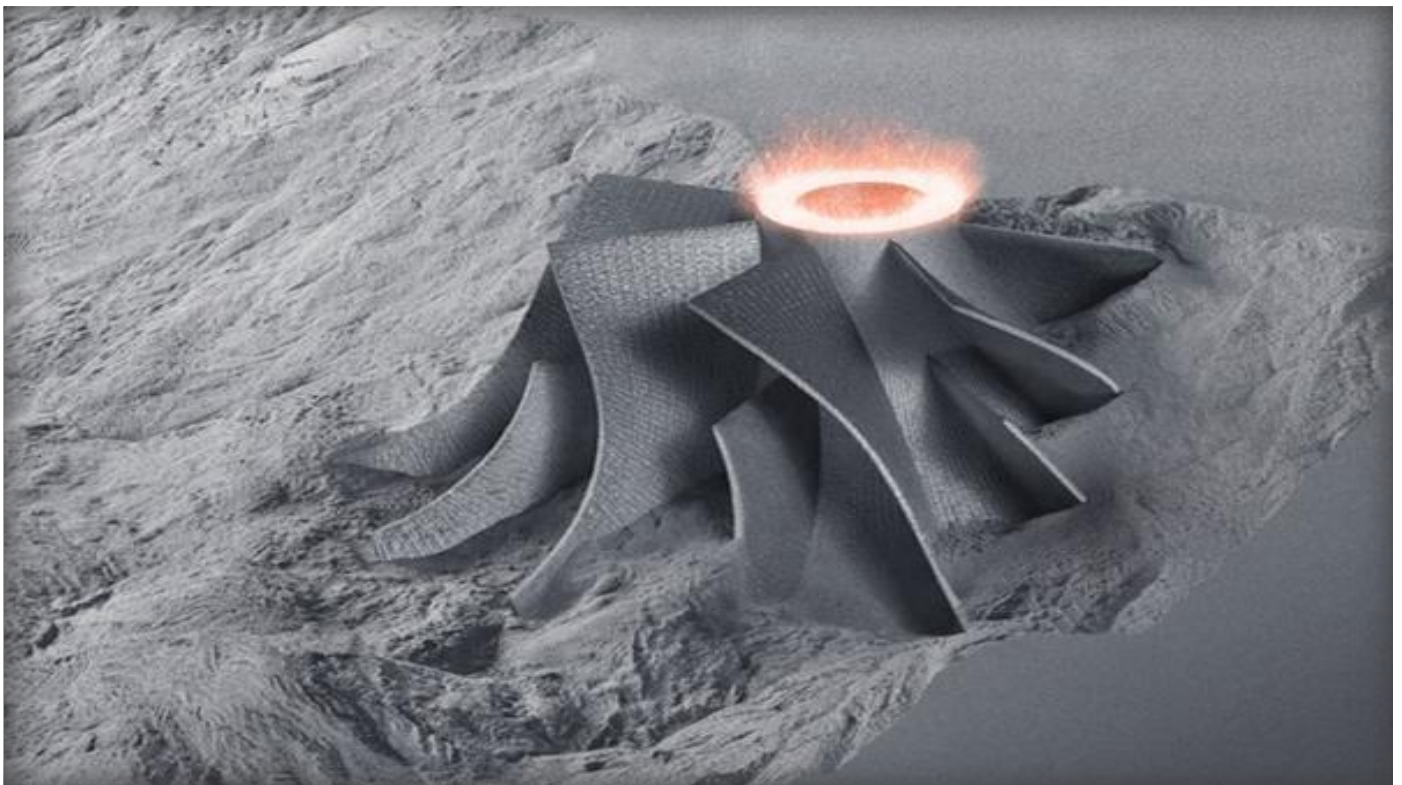
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: Τρισδιάστατοι εκτυπωτές μετάλλων

ΣΥΝΤΑΚΤΗΣ: Κρητικός Ιωάννης

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: Δρ. Βιδάκης Νεκτάριος, Δρ. Πετούσης Μάρκος



Ηράκλειο 2018

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
1. Γενικές πληροφορίες για την τρισδιάστατη εκτύπωση.....	6
1.1 Ιστορικά στοιχεία τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	6
1.2 Αρχή λειτουργίας του 3D εκτυπωτή.....	6
1.2.1 Προετοιμασία του εκτυπωτή.....	6
1.2.2 Τρόπος εκτύπωσης αντικειμένων με την μέθοδο της εξώθησης πολυμερούς υλικού.....	7
1.2.3 Επεξεργασία του αντικειμένου μετά την εκτύπωση.....	7
1.3 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	8
1.4 Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής σε οικιακό-ατομικό επίπεδο.....	9
1.5 Πλεονεκτήματα και καινοτομίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	9
1.5.1 Οι καινοτομίες της 3D τεχνολογίας στον σχεδιασμό.....	10
1.5.2 Εξοικονόμηση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος για την παραγωγή αντικειμένων.....	10
1.5.3 Επιτυγχάνεται η άμεση διάθεση στην αγορά.....	11
1.6 Τρισδιάστατη εκτύπωση και παραδοσιακοί τρόποι κατασκευής προϊόντων.....	11
1.7 Οι κοινωνικές, πολιτικές και οικονομικές επιπτώσεις της ευρείας εξάπλωσης της 3D τεχνολογίας....	12
2. Τεχνολογίες των 3D εκτυπωτών μετάλλου.....	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Τομείς που κάνουν χρήση της 3D εκτύπωσης μετάλλου.....	13
2.3 Τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου στο σπίτι.....	14
2.3.1 Υλικά που υπάρχουν σήμερα για την 3D εκτύπωση μετάλλου στο σπίτι.....	15
2.3.2 Κάποια βασικά στοιχεία του μεταλλικού νήματος.....	15
2.4 Τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου στη βιομηχανία.....	16
2.5 Βασικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται για την 3D εκτύπωση.....	17
2.6 Τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	18
2.6.1 Επιλεκτική τήξη με λέιζερ (Selective Laser Melting).....	18

2.6.2 Ηλεκτρονική δέσμη τήξη (Electron Beam Melting).....	20
2.6.3 Κατασκευή πλαστικοποιημένων αντικειμένων (Laminated Object Manufacturing).....	23
2.6.4 Η μέθοδος NanoParticle Jetting.....	24
2.6.5 Άμεση πυροσυσσωμάτωση μετάλλου με λέιζερ (Direct Metal Laser Sintering).....	26
2.6.6 Ψυχρός ψεκασμός μετάλλου (Cold Spray Metal Printing).....	28
2.6.7 Τρισδιάστατη εκτύπωση Metal Binder Jetting.....	30
2.6.8 Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Direct Energy Deposition).....	32
2.6.9 Τεχνολογία LENS.....	34
2.6.10 Παραγωγή ελεύθερης μορφής δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Freeform).....	36
2.6.11 Εναπόθεση μετάλλου με λέιζερ (Laser Metal Deposition).....	37
2.6.12 Σύνηξη μετάλλου με λέιζερ (Laser Metal Fusion).....	40
2.6.13 Ψηφιακή επεξεργασία φωτός (Digital Light Processing).....	42
2.6.14 Τρισδιάστατη εκτύπωση με τη βοήθεια υπερήχων (Ultrasonic Additive Manufacturing).....	44
2.6.15 Δεσμευμένη εναπόθεση μετάλλου (Bound Metal Deposition).....	46
2.6.16 Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση αναστολής (Selective Inhibition Sintering).....	48
2.6.17 Τεχνολογία υγρής μεταλλικής εκτύπωσης (Liquid Metal Jet Printing).....	50
3. Εμπορικές μηχανές για την τρισδιάστατη μεταλλική εκτύπωση.....	52
3.1 3D εκτυπωτές μετάλλων για την διαδικασία SLM.....	52
3.2 Εκτυπωτές μετάλλων για την διαδικασία EBM.....	57
3.3 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας NPJ.....	61
3.4 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας DMLS.....	62
3.5 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας CSMD.....	64
3.6 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας MBJ.....	65
3.7 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας DEP και LENS.....	68
3.8 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας EBF.....	73
3.9 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας LMD.....	74
3.10 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας LMF.....	76
3.11 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας DLP.....	78

3.12 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας UAM.....	79
3.13 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας BMD.....	80
3.14 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας LMJP.....	81
Συμπεράσματα.....	82
Αναφορές.....	83

Περίληψη

Στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία γίνεται μια αναφορά στην τρισδιάστατη εκτύπωση μεταλλικών αντικειμένων. Αρχικά, παρατίθενται κάποιες γενικές πληροφορίες για την τρισδιάστατη εκτύπωση. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται κάποια ιστορικά στοιχεία για τις πρώτες προσπάθειες τρισδιάστατης εκτύπωσης και έπειτα, γίνεται αναφορά στον τρόπο που εκτυπώνεται ένα αντικείμενο χρησιμοποιώντας πολυμερή υλικά, στον τρόπο δηλαδή που λειτουργεί ένας απλός 3D εκτυπωτής. Στην συνέχεια, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής και συγκρίνεται με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής αντικειμένων. Επίσης, παρουσιάζονται οι τομείς που βρίσκει εφαρμογή η 3D εκτύπωση αλλά και τη δυνατότητα ύπαρξης τρισδιάστατου εκτυπωτή για οικιακή χρήση. Γίνεται επιπλέον αναφορά για τις διάφορες τεχνολογίες που υπάρχουν για την 3D εκτύπωση μεταλλικών αντικειμένων. Τέλος, παρουσιάζονται κάποιες μηχανές που υπάρχουν στο εμπόριο που χρησιμοποιούν τις τεχνολογίες αυτές.

Abstract

The present thesis, make a reference to the 3D printing of metallic objects. Firstly, some general information about 3D printing is provided. More specifically, presented some historical information of the first 3D print attempts and the next reference is made to the way an object is printed using polymeric materials, such as how a simple 3D printer works. Below are the advantages and disadvantages of this technology and are compared with traditional methods of making objects. It also presents the areas where 3D printing can be applied, as well as the possibility of having a 3D printer for the use at home. There is also an indication of the different technologies are available for 3D metallic printing. Finally, there are presented some commercially available machines that use these technologies.

1 ■ Γενικές πληροφορίες για την τρισδιάστατη εκτύπωση

1.1 Ιστορικά στοιχεία τρισδιάστατης εκτύπωσης

Το 1982 ο Chuck Hull είχε σκεφτεί πως αν τοποθετούσε χιλιάδες λεπτά στρώματα πλαστικού το ένα πάνω στο άλλο και αφού τα χάραζε χρησιμοποιώντας το φως, θα μπορούσε να κατασκευάσει τρισδιάστατα αντικείμενα. Ένα χρόνο μετά, πειραματιζόμενος στην ιδέα αυτή, ανέπτυξε ένα σύστημα όπου μια συμπυκνωμένη ακτίνα υπεριώδους φωτός, κατευθυνόμενη από έναν υπολογιστή, καθώς χτυπούσε σε μια δεξαμενή γεμάτη με φωτοπολυμερές υγρό, το υγρό αυτό πολυμερίζονταν και μεταβάλλονταν σε στερεό. Ο Hull κατάλαβε πως το εύρημά του δεν κάλυπτε μόνο τα υγρά στοιχεία αλλά κάθε υλικό που θα ήταν ικανό να στερεοποιηθεί ή να μεταβάλλει τη φυσική του κατάσταση. Από τότε η μέθοδος αυτή ονομάστηκε στερεολιθογραφία ή τρισδιάστατη εκτύπωση.

1.2 Αρχή λειτουργίας του 3D εκτυπωτή

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης εφαρμόζεται σε εκτυπωτές διαφόρων σχημάτων και μεγεθών. Βέβαια, παρόλο που υπάρχουν διάφορα είδη εκτυπωτών και υλικών εκτύπωσης, η διαδικασία της 3D εκτύπωσης ακολουθεί τα ίδια βασικά βήματα. Με τη βοήθεια κάποιου ψηφιακού λογισμικού CAD γίνεται η δημιουργία του τρισδιάστατου σχεδίου του αντικειμένου που πρόκειται να εκτυπωθεί. Βέβαια, το ψηφιακό αυτό μοντέλο μπορεί να προκύψει με τη χρήση κάποιου τρισδιάστατου σαρωτή ή και ακόμα από κάποιο αρχείο που μπορούμε να βρούμε στο διαδίκτυο. Έπειτα το αρχείο αυτό μεταφέρεται στον εκτυπωτή ώστε να ξεκινήσει η εκτύπωση του. Το αντικείμενο εκτυπώνεται στρώμα με στρώμα έως ότου πάρει την τελική του μορφή. Τέλος, αφαιρείται από τον εκτυπωτή και εφόσον χρειάζεται γίνεται κάποια μετεπεξεργασία ώστε να αποκτήσει τις προδιαγραφές που απαιτούνται για την εκάστοτε εφαρμογή.

1.2.1. Προετοιμασία του εκτυπωτή

Αρχικά, η προετοιμασία του εκτυπωτή περιλαμβάνει την εισαγωγή του υλικού που χρειάζεται για την εκτύπωση (πλαστικά, σκόρες μετάλλων κτλ). Το υλικό θα επιλεγεί με βάση τις συγκεκριμένες ιδιότητες που θα πρέπει να έχει το αντικείμενο που πρόκειται να εκτυπωθεί. Υπάρχει πολύ μεγάλη ποικιλία υλικών που χρησιμοποιούνται στους τρισδιάστατους εκτυπωτές όπως πλαστικά, κεραμικά, μέταλλα, γυαλί, άμμο, υφάσματα, βιοϊλικά αλλά ακόμα και τροφή. Έπειτα, θα πρέπει να προετοιμαστεί και η πλατφόρμα εκτύπωσης, δηλαδή η τράπεζα κατασκευής του αντικειμένου.

Η πλατφόρμα αυτή ίσως κάποιες φορές χρειαστεί είτε να καθαριστεί είτε να εφαρμοστεί μια κόλλα που θα αποτρέψει την μετακίνηση ή τη στρέβλωση του αντικειμένου από την θερμότητα κατά την διαδικασία εκτύπωσης. Αφού το ψηφιακό μοντέλο φορτωθεί στον εκτυπωτή, εκείνος με τη σειρά του αναλαμβάνει αυτόματα τη δημιουργία του αντικειμένου. Οι διεργασίες εκτύπωσης ποικίλουν σύμφωνα με τον τύπο της τεχνολογίας του εκτυπωτή. Η εξώθηση υλικού είναι η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται στους επιτραπέζιους 3D εκτυπωτές.

1.2.2. Τρόπος εκτύπωσης αντικειμένων με την μέθοδο της εξώθησης πολυμερούς υλικού

Η μέθοδος της εξώθησης υλικού λειτουργεί σαν ένα πολυβόλο όπλο κόλλας. Το υλικό που έχει επιλεγεί για την εκτύπωση του αντικειμένου, συνήθως κάποιο πλαστικό νήμα, θερμαίνεται μέχρι να υγροποιηθεί και έπειτα εξωθείται από το ακροφύσιο εκτύπωσης. Βάση του ψηφιακού αρχείου, το σχέδιο έχει χωριστεί σε λεπτές δισδιάστατες διατομές, που συνήθως έχουν πάχος 0.1mm. Στη συνέχεια, ο εκτυπωτής θα τοποθετήσει το πολυμερές υλικό, μέσω του ακροφυσίου εξώθησης, στην πλατφόρμα κατασκευής δημιουργώντας το πρώτο στρώμα του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Το πολυμερές στερεοποιείται ταχύτατα και η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει ώστε να τοποθετηθεί και το επόμενο στρώμα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου τοποθετηθούν όλα τα στρώματα και το αντικείμενο που εκτυπώνεται λάβει την τελική του μορφή. Αυτή η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει λίγα λεπτά ως και ημέρες ανάλογα με την πολυπλοκότητα και το μέγεθος του αντικειμένου.

1.2.3. Επεξεργασία του αντικειμένου μετά την εκτύπωση

Μετά την εκτύπωση του αντικειμένου απαιτείται μια μικρή επεξεργασία η οποία περιλαμβάνει απλές ή περισσότερο σύνθετες πρακτικές. Οι πρακτικές αυτές μπορεί να είναι από την απλή αποκόλληση του αντικειμένου από την πλατφόρμα εκτύπωσης, το βούρτσισμα, το φινίρισμα έως και την αφαίρεση δομών στήριξης οι οποίες τυπώνονται για την προσωρινή στήριξη προεξοχών του αντικειμένου. Έτσι στις περισσότερες περιπτώσεις το αντικείμενο που εκτυπώνεται δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως μέχρις ότου γίνουν οι απαραίτητες εργασίες ώστε να ολοκληρωθεί ο αρχικός του σχεδιασμός. Η μετά-επεξεργασία αυτή εξαρτάται άμεσα από το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση.

1.3 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης βρίσκει εφαρμογή σε πάρα πολλούς τομείς όπως των κοσμημάτων, των υποδημάτων, της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής, του βιομηχανικού σχεδιασμού, των κατασκευών (AEC), της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής, της ιατρικής βιομηχανίας και οδοντιατρικής, στην εκπαίδευση, σε έργα πολιτικών μηχανικών, την χαρτογράφηση πληροφοριακών συστημάτων και πολλούς άλλους. Ειδικά με τη χρήση του πλαστικού και 3D σχεδίων που βρίσκονται ελεύθερα στο διαδίκτυο ή που μπορεί να δημιουργήσει κάποιος μόνος του, μπορεί να κατασκευαστεί με ιδιαίτερη ευκολία από το πιο μικρό εξάρτημα έως μια ολόκληρη κατασκευή κομμάτι-κομμάτι.



Εικόνα 1: Ο Chuck Hull ο πατέρας της τρισδιάστατης εκτύπωσης



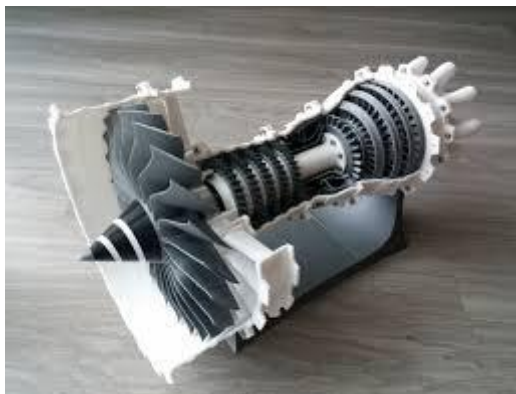
Εικόνα 2: Ο πρώτος 3D εκτυπωτής που δημιουργήθηκε από τον Chuck Hull

1.4 Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής σε οικιακό-ατομικό επίπεδο

Όλο και περισσότερες προσπάθειες γίνονται για την ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή κατάλληλου για οικιακή χρήση, καθιστώντας την τεχνολογία αυτή διαθέσιμη και προσιπή στο ευρύτερο κοινό. Οι περισσότερες προσπάθειες έχουν γίνει από DIY (DoItYourself=Κάντο μόνος σου) κοινότητες που έχουν σχέση τόσο με την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και με χάκερς. Με τη 3D εκτύπωση δίνεται η δυνατότητα στο καθένα να κατασκευάσει αντικείμενα όποτε παραστεί ανάγκη ή επιθυμία. Με τον τρόπο αυτό εμπλέκονται πολλοί άνθρωποι στην παραγωγή ή ακόμα και στην πώληση των δημιουργιών τους παρακάμπτοντας την παραδοσιακή προσέγγιση και τα δίκτυα διανομής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι 3D εκτυπωτές να μεταστρέφουν τους καταναλωτές σε δημιουργούς και κατασκευαστές αντικειμένων. Το *Κίνημα των Δημιουργών (The Maker Movement)*, όπως αποκαλείται η κίνηση αυτή, συμβάλει στην ώθηση της καινοτομίας και στην δημιουργία ενός εντελώς νέου τρόπου της επιχειρηματικής δραστηριότητας. Έτσι, τα προϊόντα δεν θα είναι απαραίτητο να προκύπτουν μέσω της μαζικής παραγωγής, αλλά θα μπορούν να παράγονται σε μικρές παρτίδες ή να τυπώνονται επί τόπου και να προσαρμόζονται στις μοναδικές ανάγκες του κάθε ατόμου.

1.5 Πλεονεκτήματα και καινοτομίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει βοηθήσει πάρα πολύ στη μείωση του χρόνου παραγωγής ενός προϊόντος και στην αποφυγή διαφόρων εμποδίων που μπορεί να υπάρξουν με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Έτσι παραδείγματος χάρη μπορούμε να τυπώσουμε σύνθετα γεωμετρικά σχήματα και να συμπλέξουμε μέρη χωρίς κάποιο δεσμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μοναδικών αντικειμένων σε μικρές ποσότητες με μικρό κόστος και γρήγορη διανομή. Βέβαια, η τεχνολογία της 3D εκτύπωσης είναι λιγότερο αποτελεσματική για την παραγωγή προϊόντων που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες.



Εικόνα 3: Εκτύπωση 3D σχεδίου τομής αεροκινητήρα υπό κλίμακα

1.5.1 Οι καινοτομίες της 3D τεχνολογίας στον σχεδιασμό

- Επιταχύνεται ο κύκλος σχεδιασμού, παραγωγής και ελέγχου δίνοντας την δυνατότητα στον σχεδιαστή να αξιολογήσει άμεσα τη βιωσιμότητα ενός προϊόντος και να πραγματοποιήσει τις απαραίτητες αλλαγές σχεδιασμού όπου κι αν χρειάζεται.
- Με την προσθετική κατασκευή δίνεται η δυνατότητα στον σχεδιαστή να τροποποιήσει ένα σχέδιο σε απευθείας σύνδεση και να δημιουργήσει κάποιο αντικείμενο χωρίς την σπατάλη χρόνου, χρήματος ή υλικών που θα απαιτούνταν με τη χρήση των παραδοσιακών μεθόδων όπως χύτευση, διάτρηση, αφαίρεση υλικού κτλ. Έτσι, καθίσταται μια οικονομική μέθοδος για τη δημιουργία μεμονωμένων αντικειμένων, μικρών παρτίδων και ενδεχομένως κάποιων προϊόντων μαζικής παραγωγής.
- Οι περιορισμοί που θα υπήρχαν με τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού κατά την κατασκευή εξαλείφονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πάρα πολύ περίπλοκων αντικειμένων, που προηγουμένως θεωρούνταν αδύνατον να κατασκευαστούν, επιταχύνοντας πάρα πολύ τον τελικό σχεδιασμό του προϊόντος.
- Η σχέση σχεδιαστών και καταναλωτών πλέον παίρνει άλλη μορφή.

1.5.2 Εξοικονόμηση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος για την παραγωγή αντικειμένων

- Με την προσθετική κατασκευή απαιτείται λιγότερο υλικό από την αφαιρετική μέθοδος κατασκευής.
- Χτίζοντας αντικείμενα σε αλλητάλληλες στρώσεις αντί να αποκόπτεται υλικό, σύμφωνα με τις παραδοσιακές μεθόδους κατεργασίας, παράγονται λιγότερα απόβλητα μειώνοντας τις ανάγκες και το κόστος των υλικών έως και 90%.
- Η τεχνικές αυτές εξοικονομούν ενέργεια αφού εξαλείφονται τα περισσότερα στάδια παραγωγής, χρησιμοποιώντας ουσιαστικά λιγότερο υλικό, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση των υποπροϊόντων.
- Επίσης, οι 3D εκτυπωτές έχουν το πλεονέκτημα-ιδιότητα να αναπαράγουν τον εαυτό τους αφού μπορούν να εκτυπώσουν τα κομμάτια που τους αποτελούν.

1.5.3 Επιτυγχάνεται η άμεση διάθεση στην αγορά

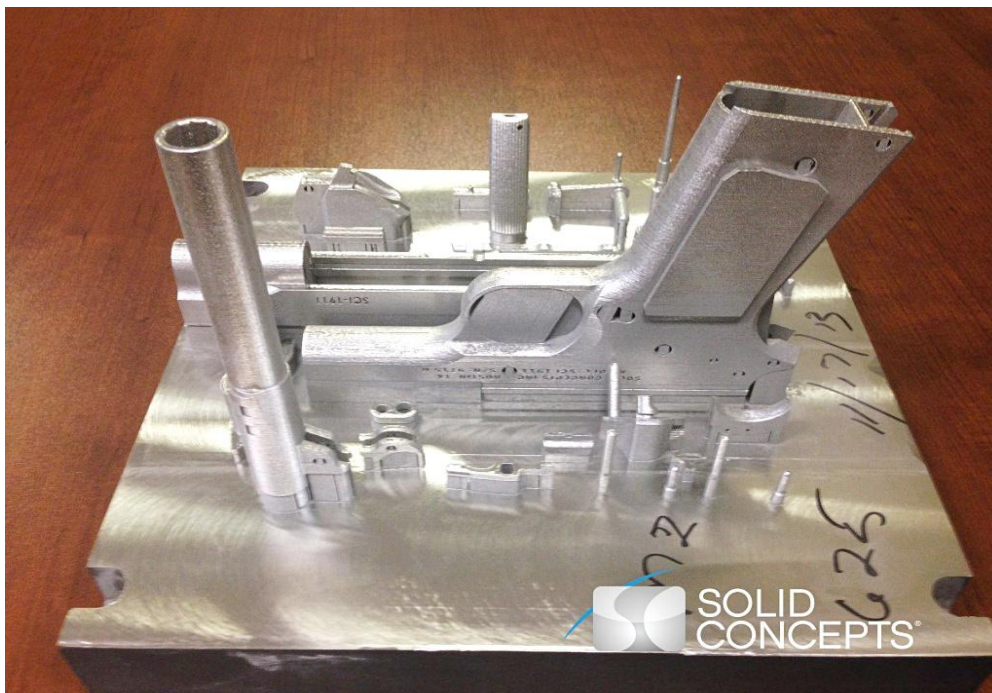
- Τα αντικείμενα μπορούν να κατασκευαστούν μόλις δημιουργηθεί το τρισδιάστατο ψηφιακό σχέδιο, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για ακριβές και χρονοβόρο εξοπλισμό εργαλείων και την κατασκευή πρωτοτύπου με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου διάθεσης του προϊόντος στην αγορά.
- Οι τεχνικές της προσθετικής τεχνολογίας επιτρέπουν την ταχεία αντίδραση στις αγορές και δημιουργούν νέες δυνατότητες παραγωγής εκτός των εργοστασίων, όπως κινητές μονάδες που μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στην πηγή των τοπικών υλικών.
- Πλέον με την τρισδιάστατη εκτύπωση η δημιουργία σύνθετων γραμμών παραγωγής δεν είναι απαραίτητες πριν την έναρξη της παραγωγής.

1.6 Τρισδιάστατη εκτύπωση και παραδοσιακοί τρόποι κατασκευής προϊόντων

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι απίθανο να αντικαταστήσει τους συνήθεις τρόπους κατασκευής προϊόντων. Βέβαια, η τεχνολογία αυτή προσφέρει την δυνατότητα κατασκευής εξαρτημάτων όποτε είναι απαραίτητο. Αυτό για παράδειγμα είναι περισσότερο κατάλληλο για την κατασκευή ασυνήθιστων εξαρτημάτων σε στρατιωτικά αεροσκάφη παρά για την κατασκευή εκατομμυρίων κονσερβών για την τυποποίηση προϊόντων. Η Boeing έχει ήδη χρησιμοποιήσει 3D εκτυπωτές για την δημιουργία χιλιάδων εξαρτημάτων που έχει τοποθετήσει σήμερα τόσο σε στρατιωτικά όσο και σε πολιτικά αεροσκάφη. Επίσης, η ιατρική βιομηχανία χρησιμοποιεί την τρισδιάστατη εκτύπωση για την κατασκευή μοναδικών αντικειμένων που είναι πολύ δύσκολο να γίνει με τους συνηθισμένους τρόπους. Αμερικανοί χειρουργοί έχουν τοποθετήσει ένα 3D εκτυπωμένο κομμάτι το οποίο αντικατέστησε το 75% του κρανίου του ασθενούς όπως επίσης έχει δημιουργηθεί και ένα τρισδιάστατο εκτυπωμένο πρότυπο για αυτή βιοτεχνολογίας με κύτταρα. Επιπλέον, οι Αμερικανοί στρατιώτες έχουν χρησιμοποιήσει εργαστήρια 3D εκτύπωσης στο Αφγανιστάν επιτυγχάνοντας έτσι την επιτάχυνση του ρυθμού ανανέωσης και καινοτομίας του πεδίου μάχης και γρήγορης προμήθειας των στρατιωτών με αυτό που χρειάζονται. Ακόμα, η NASA εξετάζει το ενδεχόμενο να χρησιμοποιήσει την τρισδιάστατη εκτύπωση για να καταστήσει δυνατή την κατασκευή ανταλλακτικών ή διαστημικών σκαφών σε τροχιά. Τέλος, η εταιρεία ερευνών διαστήματος έχει ακόμη περισσότερα σχέδια σχετικά με την 3D εκτύπωση. Πρόκειται να παράγουν τμήματα των αεροσκαφών τους, συμπεριλαμβανομένων των πτερυγίων για μεγάλα αεροπλάνα.

1.7 Οι κοινωνικές, πολιτικές και οικονομικές επιπτώσεις της ευρείας εξάπλωσης της 3D τεχνολογίας

Με την πτώση του κόστους αλλά και την αύξηση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας των τρισδιάστατων εκτυπωτών υπάρχει η άποψη ότι ανοίγονται νέοι ορίζοντες για την επέκταση της ομότιμης παραγωγής στον υλικό κόσμο. Καθώς εξαπλώνεται η 3D τεχνολογία, είναι φυσικό ότι θα εγείρει και κάποια νομικά ζητήματα, ειδικά όσον αφορά την ευθύνη της πνευματικής ιδιοκτησίας. Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούμε και αγοράζουμε προϊόντα, αλλά συνάμα θα αλλάξει δραματικά τον πραγματικό ρόλο του καταναλωτή και της ευθύνης που θα έχει, καθώς θα έχει συμμετοχή στο νέο αυτό καθεστώς που αφορά την κατασκευαστική οικονομία. Στο βιβλίο «3D Printing Will Rock the World», ο John Hornick, συγγραφέας και δικηγόρος με εξειδίκευση σε ζητήματα πνευματικής ιδιοκτησίας, συζητά για τις πιθανές απροσδόκητες συνέπειες της τρισδιάστατης εκτύπωσης όσον αφορά το πώς θα επηρεάσει τη νομοθεσία της πνευματικής ιδιοκτησίας, των εμπορικών σημάτων, αλλά και του αντίκτυπου που θα έχει η εδραίωση μια μικρής μονάδας κατασκευής αντικειμένων στο σπίτι του καθένα. Επίσης οι ειδικοί για την ασφάλεια ανησυχούν ότι η τεχνολογία αυτή παρέχει τους τρόπους για την αύξηση της ψηφιακής πειρατείας και την ανταλλαγή γνώσεων που θα ήταν θανατηφόρες εάν χρησιμοποιηθούν με λάθος τρόπο. Η Ομάδα του Άμστερνταμ της ομάδας του Τέξας έχει επεκτείνει τα κοινωνικά όρια αναπτύσσοντας το πρώτο τρισδιάστατο τυπωμένο όπλο.



Εικόνα 4: Το πρώτο τρισδιάστατα εκτυπωμένο πυροβόλο όπλο από ανοξείδωτο χάλυβα της Solid Concept

2. Τεχνολογίες των 3D εκτυπωτών μετάλλου

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης γίνεται όλο και πιο δημοφιλής. Κάθε υλικό που χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει μια μεγάλη γκάμα ιδιοτήτων, πρακτικών και αισθητικών, που ταιριάζουν σε ποικίλα προϊόντα. Βέβαια, υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την μεταλλική 3D εκτύπωση, η οποία γνώρισε ανάπτυξη την δεκαετία του '90. Παρατηρήθηκε ότι στην πραγματικότητα ορισμένα τρισδιάστατα τυπωμένα μέρη είναι ήδη, αν όχι καλύτερα, εξίσου καλά με αυτά που κατασκευάζονται με παραδοσιακές μεθόδους. Με τις παραδοσιακές-αφαιρετικές μεθόδους κατασκευής γίνεται σπατάλη υλικού μέχρι την διαμόρφωση του τελικού προϊόντος. Χρησιμοποιούνται πολλά κομμάτια και πολλά πλεονάζοντα υλικά. Για παράδειγμα, οι κατασκευαστές αεροσκαφών κατά την κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων απορρίπτουν το 90% περίπου του υλικού των δοκιμών που χρησιμοποιούν. Επομένως, με την τρισδιάστατη εκτύπωση εξοικονομείται ενέργεια και μειώνονται τα απόβλητα στο ελάχιστο, ιδιαίτερα όταν το τελικό προϊόν 3D εκτύπωσης μπορεί να είναι έως και 60% ελαφρύτερο από το κατεργασμένο τμήμα. Η βιομηχανία των αεροσκαφών εξοικονομεί δισεκατομμύρια δολάρια από αυτή τη μείωση του βάρους κατά κύριο λόγο από τα καύσιμα.

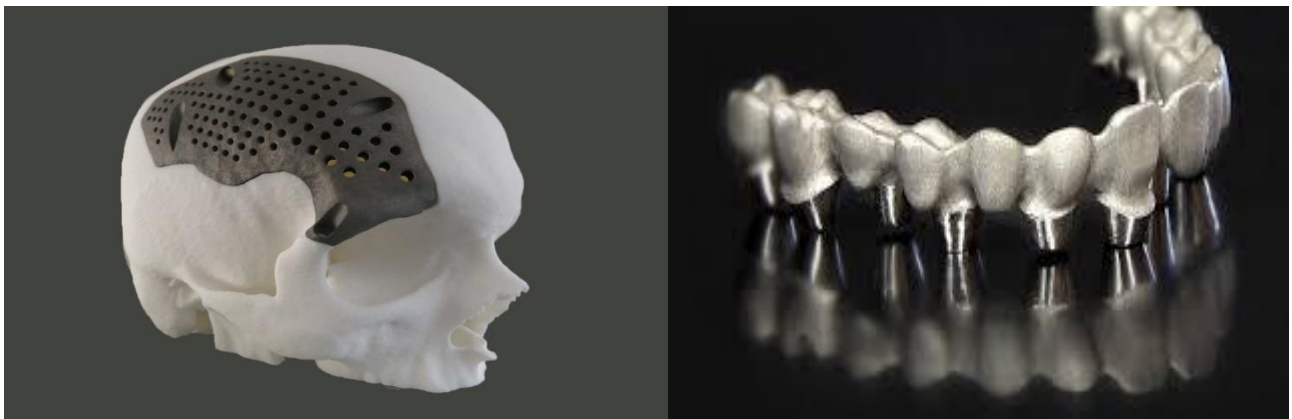
2.2 Τομείς που κάνουν χρήση της 3D εκτύπωσης μετάλλου

Ήδη κάποιοι τομείς της βιομηχανίας χρησιμοποιούν τρισδιάστατους εκτυπωτές μετάλλου για αντικείμενα που χρησιμοποιούνται καθημερινά. Τα πιο συνηθισμένα αντικείμενα είναι τα εξής:

- Τα ιατρικά και οδοντικά εμφυτεύματα, τα οποία αποτελούν πλέον την καλύτερη διαθέσιμη επιλογή για τους ασθενείς αφού προσαρμόζονται με μεγάλη ευκολία στις ατομικές ανάγκες του καθενός.
- Τα κοσμήματα. Στον τομέα αυτό οι περισσότεροι κατασκευαστές μεταβαίνουν από την χύτευση κηρού και την 3D εκτύπωση ρητίνης στην τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου.
- Η αεροδιαστημική βιομηχανία εξαρτάται όλο και πιο πολύ από τα 3D μεταλλικά αντικείμενα εκτύπωσης. Η Ιταλική Ge-AvioAero ήταν το πρώτο ολοκληρωμένο εργοστάσιο στον κόσμο η οποία εκτυπώνει τα εξαρτήματα του κινητήρα LEAP.

- Ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας δεν θα μπορούσε να μην εκμεταλλευτεί την τεχνολογία αυτή. Η BMW, η Audi, η GM, η FCA και όλο και περισσότεροι κατασκευαστές αυτοκινήτων εξετάζουν σοβαρά τη χρήση 3D εκτυπωτών μετάλλου όχι μόνο για τα πρωτότυπα, για τα οποία τη χρησιμοποιούν εδώ και χρόνια, αλλά και για τα μέρη των αυτοκινήτων που θα βγαίνουν από την γραμμή παραγωγής.

Βέβαια πριν αφομοιώσουν κάποιοι τομείς την τεχνολογία αυτή θα χρειαστεί να ξεπεραστούν κάποια εμπόδια. Αρχικά το υψηλό κόστος, το οποίο δεν μπορεί να μειωθεί με τη χρήση καλουπιών, αλλά και η χαμηλή ταχύτητα παραγωγής είναι που κάνουν την τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου προβληματική.



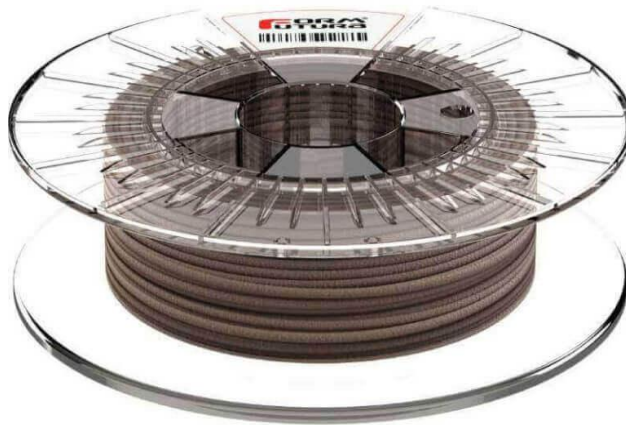
Εικόνα 5: Αριστερά τρισδιάστατα εκτυπωμένο μέρος κρανίου και δεξιά μια εκτυπωμένη οδοντοστοιχία

2.3 Τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου στο σπίτι

Η χρήση ενός κανονικού 3D εκτυπωτή μετάλλου FDM (Fused Deposition Modeling=Μοντελοποίηση εναπόθεσης από σύντηξη) σε οικιακό επίπεδο δεν είναι ακόμα εφικτή. Αυτό συμβαίνει γιατί απαιτούνται εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες για την εκτύπωση μετάλλου. Προς το παρόν δεν υπάρχει τρόπος 3D εκτύπωσης καθαρού μετάλλου στο σπίτι αλλά μάλλον, σύμφωνα με δημοσιεύσεις, μέχρι και το 2020 δεν θα είναι εφικτό. Καθώς βέβαια η νανοτεχνολογία εξελίσσεται, θα μπορούσαμε να δούμε μια σημαντική αύξηση σε νέες εφαρμογές όπως το αγώγιμο 3D εκτυπώσιμο ασήμι που μπορεί να εκτοξευθεί με μελάνι χρησιμοποιώντας ένα σύστημα πολύ παρόμοιο με τον 2D γραφικό εκτυπωτή που έχουμε στο σπίτι. Ακόμα και η ανάμειξη δύο υλικών, όπως τα πλαστικά και τα μέταλλα στο ίδιο αντικείμενο, θα είναι δυνατή.

2.3.1 Υλικά που υπάρχουν σήμερα για την 3D εκτύπωση μετάλλου στο σπίτι

Αφού δεν υπάρχει η δυνατότητα 3D εκτύπωσης καθαρού μετάλλου στο σπίτι σήμερα, μπορούμε να καταφύγουμε σε πλαστικό νήμα με πρόσθετες μεταλλικές σκόνες. Αυτά είναι νήματα που περιέχουν ένα σημαντικό ποσοστό μεταλλικών σκονών παρέχοντας βέβαια αρκετό πλαστικό για εκτύπωση σε χαμηλή θερμοκρασία (200°C έως 300°C) με οποιοδήποτε σχεδόν τρισδιάστατο εκτυπωτή. Βέβαια, περιέχουν αρκετό μέταλλο για να φαίνονται, να έχουν την υφή και να ζυγίζουν σαν ένα μεταλλικό αντικείμενο. Τα νήματα όμως με βάση το σίδηρο μπορούν να σχηματίσουν σκουριά σε ορισμένες συνθήκες. Το νήμα αυτό έχει 50% μεταλλική σκόνη. Η Ολλανδική εταιρεία 3D filament Fort των εκτυπωτών Formfutura ισχυρίζεται ότι έχουν αυξήσει την αναλογία μέχρι 80% μεταλλική σκόνη και 15% PLA. Επίσης, μπορούμε να εκτυπώσουμε σε μέτριες θερμοκρασίες από 190 έως 200 βαθμούς Κελσίου. Τα νήματα αυτά ονομάζονται MetalFil Ancient Bronze και MetalFil Classic Copper.



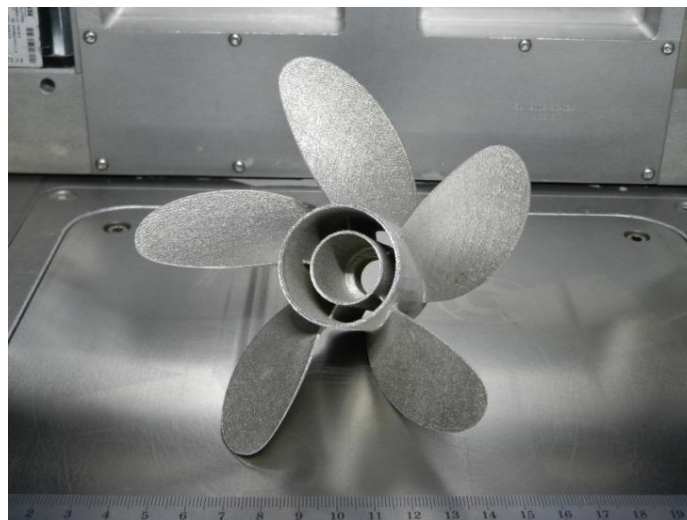
Εικόνα 6: Καρούλι μεταλλικού νήματος 3D εκτυπωτή της Formfutura το "Ancient Bronze"

2.3.2 Κάποια βασικά στοιχεία του μεταλλικού νήματος

- Μοναδικό μεταλλικό φινίρισμα και εμφάνιση
- Υψηλή ανθεκτικότητα
- Ιδανικό για κοσμήματα, αγάλματα, οικιακό υλικό ή αντίγραφα τέχνης
- Χαμηλή ευελιξία που εξαρτάται από τον σχεδιασμό
- Μη διαλυτό
- Δεν θεωρείται ασφαλές για τρόφιμα
- Η γενική περιοχή θερμοκρασίας εκτύπωσης είναι 195°C - 220°C
- Πολύ μικρή συρρίκνωση κατά τη διάρκεια της ψύξης
- Δεν απαιτείται θερμαινόμενη πλατφόρμα
- Η δυσκολία εκτύπωσης είναι υψηλή, απαιτεί λεπτομερή ρύθμιση της θερμοκρασίας του ακροφυσίου, του ρυθμού ροής και της μετεπεξεργασίας.

2.4 Τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου στη βιομηχανία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλων είναι τώρα ο ταχύτερος αναπτυσσόμενος τομέας της βιομηχανίας της 3D εκτύπωσης, γιατί η ζήτηση για μεταλλικές εφαρμογές με εξαρτήματα μικρού όγκου ή με εξατομικευμένη προσαρμογή για προηγμένα εξαρτήματα κινητήρων, ιατρικών εμφυτευμάτων ή ακόμα και ολόκληρων τμημάτων διαφόρων κατασκευών (τμήματα αεροσκαφών, αυτοκινήτων κτλ), είναι πάρα πολύ μεγάλη. Με την τεχνολογία αυτή οι κατασκευαστές εξοικονομούν τεράστια ποσά χρημάτων, ενέργειας και υλικών. Μεγάλοι κατασκευαστές έχουν ήδη ενσωματώσει τρισδιάστατους εκτυπωτές μετάλλων στις γραμμές παραγωγής τους παράγοντας μεταλλικά μέρη για χρόνια, αλλά αναμένεται να εντείνουν δραματικά τη χρήση της τεχνολογίας τα επόμενα χρόνια. Ήδη υπάρχουν βιομηχανίες που εξαρτώνται από τη τεχνολογία αυτή και θα συνεχίσουν να επεκτείνουν τη χρήση της, αλλά και νέες βιομηχανίες και εταιρείες σπεύδουν να την προσθέσουν στην γραμμή παραγωγής τους για να παραμείνουν ανταγωνιστικές. Η αεροδιαστημική, η ιατρική εμφύτευση, η κατασκευή κοσμημάτων και η αυτοκινητοβιομηχανία τα τελευταία χρόνια, είναι οι βιομηχανίες με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και χρήση της τεχνολογίας αυτής για τα πλεονεκτήματα που τους προσφέρει. Ο λόγος που οι μεγάλες εταιρείες δείχνουν τέτοιο ενδιαφέρον για την 3D εκτύπωση μετάλλων είναι γιατί μπορούν να δημιουργήσουν πλήρως αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής που θα μπορούν να παράγουν εξαρτήματα βελτιστοποιημένα στα σημεία που χρειάζονται. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να παραχθεί ένα αντικείμενο και να είναι παχύτερο μόνο εκεί που χρειάζεται δηλαδή στο σημείο με τις μεγαλύτερες καταπονήσεις χωρίς βέβαια να θυσιάζεται η δομική του ακεραιότητα.



Εικόνα 7: Τρισδιάστατα εκτυπωμένη προπέλα εξωλέμβιας μηχανής

2.5 Βασικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη εκτύπωση

Τιτάνιο

Το καθαρό τιτάνιο (Ti64 ή TiAl4V) είναι ένα από τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται συχνότερα για την τρισδιάστατη εκτύπωση και είναι σίγουρα ένα από τα πιο ευέλικτα καθώς είναι ισχυρό αλλά και ελαφρύ. Χρησιμοποιείται σε διαδικασίες σύντηξης κλίνης σε σκόνη όσο και σε διαδικασίες δέσμησης συνθετικού υλικού, κυρίως στο τομέα της ιατρικής και στις βιομηχανίες της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας, των εργαλειομηχανών για την κατασκευή εξαρτημάτων και πρωτοτύπων. Είναι όμως εξαιρετικά αντιδραστικό, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι μπορεί εύκολα να εκραγεί όταν είναι σε μορφή σκόνης, γι αυτό πρέπει να εκτυπωθεί σε κενό ή σε ατμόσφαιρα αερίου αργού.

Ανοξειδωτος χάλυβας

Ένα από τα πιο προσιτά μέταλλα στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ο ανοξειδωτος χάλυβας γιατί ταυτόχρονα είναι πολύ ισχυρό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές βιομηχανικές και καλλιτεχνικές εφαρμογές. Επίσης, ο τύπος ανοξειδωτου χάλυβα που περιέχει κοβάλτιο και νικέλιο έχει εξαιρετική αντοχή ενώ έχει πολύ υψηλές ελαστικές ιδιότητες και χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για βιομηχανικές εφαρμογές.

Inconel

Το Inconel είναι μία οικογένεια ωστενιτικών υπερκράματων με βάση το νικέλιο και το χρώμιο και έχει εξαιρετική αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτός είναι ο λόγος που χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές στον πετρελαϊκό, χημικό και αεροναυπηγικό τομέα.

Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο είναι πλέον ένα από τα δημοφιλέστερα μέταλλα για 3D εκτύπωση λόγω της ελαφρότητας και της ευελιξίας του. Χρησιμοποιείται κυρίως ως διαφορετικά κράματα με βάση το αργίλιο.

Χρώμιο κοβαλτίου

Το κράμα αυτό έχει πολύ μεγάλη ειδική ισχύ. Χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή στροβίλων, οδοντικών εμφυτευμάτων και ορθοπεδικών εμφυτευμάτων, όπου δηλαδή η τρισδιάστατη μεταλλική εκτύπωση γίνεται η προτιμώμενη μέθοδος παραγωγής.

Χαλκός

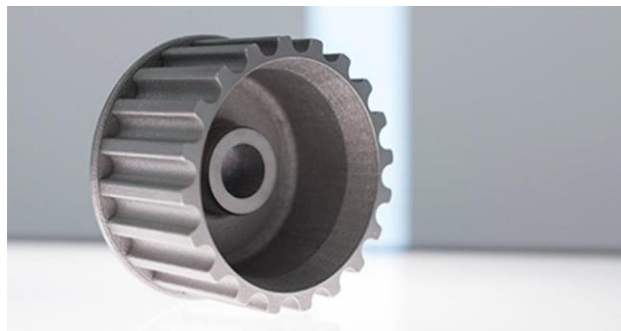
Ο χαλκός χρησιμοποιείται επί το πλείστον σε διαδικασίες χύτευσης κεριού και όχι τόσο σε διαδικασίες σύντηξης κόνεως γιατί έχει ιδιότητες που δεν είναι τόσο ιδανικές για βιομηχανικές εφαρμογές, όμως χρησιμοποιείται περισσότερο στις τέχνες.

Σίδηρος

Ο σίδηρος, ακόμα και ο μαγνητικός, χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση ως επί το πλείστον σαν πρόσθετο στα νήματα με βάση το PLA.

Χρυσός, ασήμι, μπρούτζος και άλλα πολύτιμα μέταλλα

Οι περισσότερες εταιρείες μπορούν να εκτυπώσουν αντικείμενα με πολύτιμα μέταλλα όπως ασήμι, χρυσός και πλατίνα. Η πρόκληση σε αυτή τη περίπτωση είναι να διασφαλιστεί η βελτιστοποίηση της διαχείρισης της πολύτιμης σκόνης και τη διατήρηση των αισθητικών ιδιοτήτων των υλικών. Η χρήση τους είναι για την εκτύπωση κοσμημάτων, ιατρικών και ηλεκτρονικών εφαρμογών.



Εικόνα 8: Τρισδιάστατα εκτυπωμένη τροχαλία στροφάλου κινητήρα εσωτερικής καύσης

2.6 Τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων

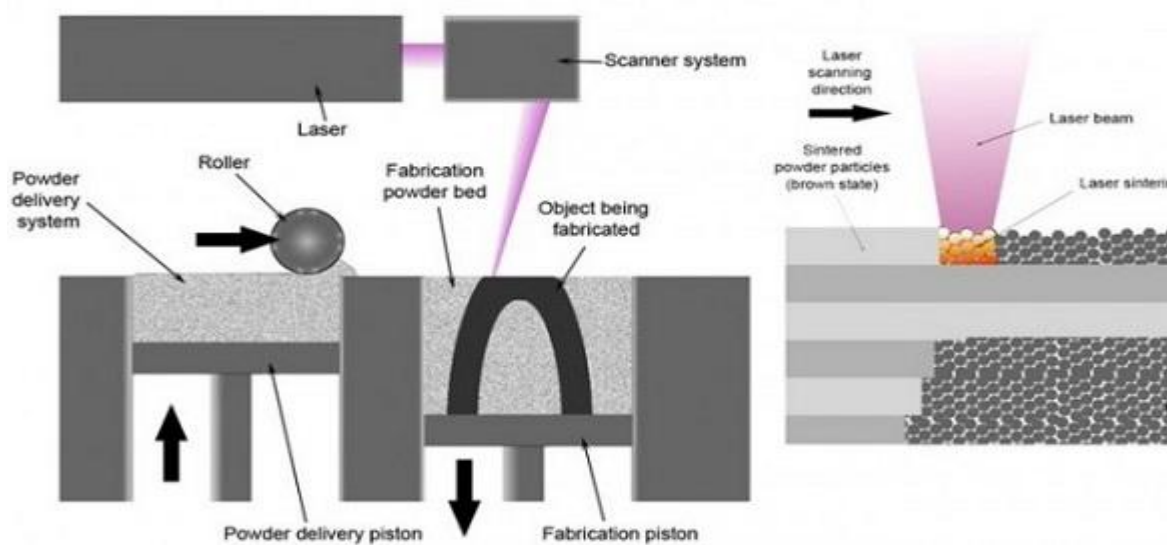
2.6.1 Επιλεκτική τήξη με λέιζερ (**Selective Laser Melting**)

❖ Γενικά στοιχεία

Η επιλεκτική τήξη με λέιζερ είναι μια τεχνική 3D εκτύπωσης που δημιουργεί τρισδιάστατα αντικείμενα μέσω μιας δέσμης λέιζερ υψηλής ισχύος που λιώνει τους κόκκους από τις μεταλλικές σκόνες. Σε πολλές πηγές, η SLM θεωρείται υποκατηγορία της επιλεκτικής σύντηξης με λέιζερ (SLS). Δεν είναι όμως έτσι ακριβώς. Στην διαδικασία SLM λιώνει πλήρως το μεταλλικό υλικό (σκόνη) για να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο αντικείμενο σε αντίθεση με τη επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ. Η SLM ξεκίνησε από το γερμανικό ερευνητικό πρόγραμμα που πραγματοποιήθηκε από την ομάδα του Fraunhofer Institute ILT το 1995.

❖ Τρόπος λειτουργίας

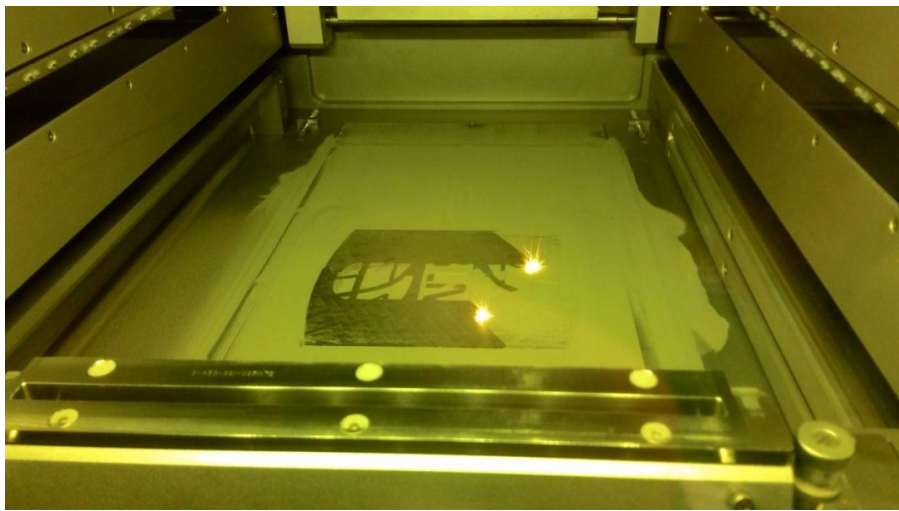
Όπως και σε άλλες μεθόδους 3D εκτύπωσης το αρχείο CAD επεξεργάζεται με ειδικό λογισμικό για να γίνει η περικοπή του αρχείου σε 2D στρώματα. Η μορφή του αρχείου που χρησιμοποιείται από τον εκτυπωτή είναι ένα τυπικό αρχείο .stl. Αφού φορτωθεί το αρχείο, το λογισμικό του 3D εκτυπωτή εκχωρεί παραμέτρους και τιμές για την κατασκευή της “διαδρομής” που θα ακολουθήσει το λέιζερ για την εκτύπωση του αντικειμένου. Η δέσμη λέιζερ κινείται στις κατευθύνσεις X, Y. Η διαδικασία εκτύπωσης ξεκινά με την κατανομή του πρώτου στρώματος της μεταλλικής σκόνης από ένα μηχανισμό επίστρωσης πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής η οποία κινείται στην κατεύθυνση Z. Στη συνέχεια μία δέσμη λέιζερ υψηλής ισχύος (200W) ζεσταίνει και λιώνει επιλεκτικά την μεταλλική σκόνη δημιουργώντας το πρώτο στρώμα του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Έπειτα αφού στερεοποιηθεί η μεταλλική σκόνη ένα νέο στρώμα σκόνης τοποθετείται απ’ τον μηχανισμό και η πλατφόρμα κινείται κάθετα ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί το επόμενο στρώμα του αντικειμένου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθεί το αντικείμενο το οποίο εκτυπώνεται στρώμα με στρώμα. Ολόκληρη η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε ένα θάλαμο με ελεγχόμενη ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου, αργού ή αζώτου, με τα επίπεδα του οξυγόνου να είναι κάτω από 500 μέρη ανά εκατομμύριο.



Εικόνα 9: Λειτουργία SLM 3D εκτυπωτή

❖ Εφαρμογή της SLM 3D εκτύπωσης

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ευρέως για την κατασκευή αντικειμένων με σύνθετες γεωμετρίες και δομές με λεπτά τοιχώματα και κρυφά κενά ή κανάλια. Έχουν εκτυπωθεί πολλά πρωτοποριακά ελαφριά εξαρτήματα με την βοήθεια της τεχνολογίας SLM, για αεροδιαστημική εφαρμογή. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδανική για έργα που αντιμετωπίζουν τέτοιου είδους προβλήματα, όπως τον φυσικό περιορισμό της πρόσβασης εργαλείων για την μηχανική κατεργασία "κρυφών" επιφανειών καθώς και τον περιορισμό του σχεδιασμού εξαρτημάτων. Η τεχνολογία αυτή δεν είναι διαθέσιμη για χρήση σε οικιακούς εκτυπωτές αλλά κυρίως στην βιομηχανία της αεροδιαστημικής και ιατρικής ορθοπεδικής. Μερικά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διαδικασία είναι ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο ανοξείδωτος χάλυβας, χρώμιο κοβαλτίου, τιτάνιο και βολφράμιο.



Εικόνα 10: Η μέθοδος SLM κατά τη διαδικασία εκτύπωσης

2.6.2 Ηλεκτρονική δέσμη τήξης (Electron Beam Melting)

❖ Γενικά στοιχεία

Η τεχνολογία EBM είναι ένας άλλος τρόπος τρισδιάστατης εκτύπωσης μεταλλικών αντικειμένων. Αρχικά δημιουργήθηκε από την Arcam AB Inc. Αυτή η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι μια τεχνική σύντηξης κλίνης σκόνης παρόμοια με την SLM. Η μόνη διαφορά είναι πως η SLM χρησιμοποιεί την δέσμη λέιζερ (φωτόνια) ως πηγή ισχύος της ενώ η EBM χρησιμοποιεί την αντίδραση της δέσμης ηλεκτρονίων (ηλεκτρόνια) για την τήξη της μεταλλικής σκόνης. Αυτή είναι και η κύρια διαφορά των δύο μεθόδων παρόλο που οι υπόλοιπες διαδικασίες είναι ίδιες.

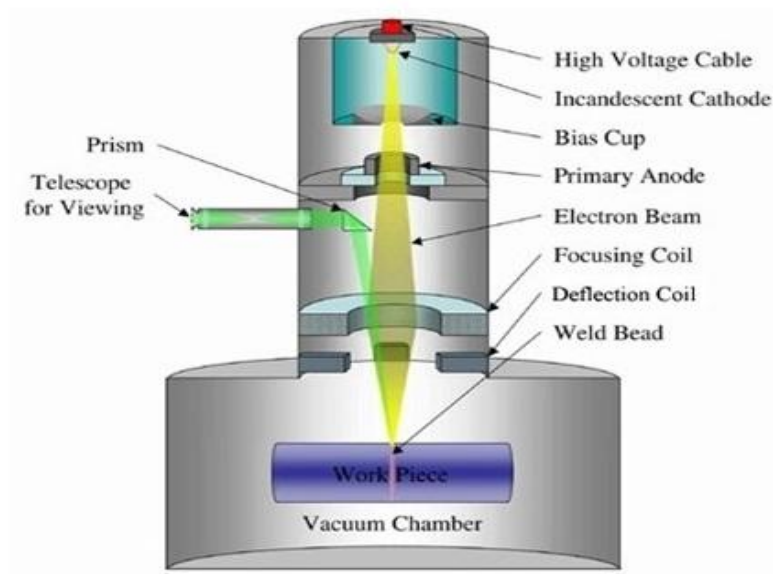
❖ Τρόποι λειτουργίας

- **Σύστημα με βάση τη μεταλλική σκόνη**

Οι μεταλλικές σκόνες μπορούν να στερεοποιηθούν σε μια μάζα χρησιμοποιώντας μια δέσμη ηλεκτρονίων ως πηγή θερμότητας. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής EBM διαβάζει δεδομένα από ένα μοντέλο 3D CAD και καθορίζει τις διαδοχικές στρώσεις του κονιοποιημένου υλικού. Η δέσμη ηλεκτρονίων λιώνει τα στρώματα μεταξύ τους δημιουργώντας τα μέρη του αντικειμένου. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα υπό κενό, καθιστώντας την μέθοδο αυτή κατάλληλη για την κατασκευή εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται υλικά που αντιδρούν με το οξυγόνο π.χ. το τιτάνιο. Η διαδικασία λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες (έως 1000°C) γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε διαφορές σχηματισμού φάσεων μέσω στερεοποίησης και μετασχηματισμού φάσης στερεάς κατάστασης. Σε σύγκριση με τις SLM και DMLS, η EBM έχει γενικά ανώτερη ταχύτητα κατασκευής λόγω της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας και της μεθόδου σάρωσης.

- **Σύστημα με βάση τα μεταλλικά σύρματα**

Μια άλλη προσέγγιση είναι η χρήση δέσμης ηλεκτρονίων για την τήξη σύρματος συγκόλλησης πάνω σε μια επιφάνεια. Η δέσμη ηλεκτρονίων είναι μια εξαιρετικά αποδοτική πηγή ενέργειας που μπορεί να είναι με μεγάλη ακρίβεια εστιασμένη όσο και παραμορφωμένη χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνητικά πηνία σε χιλιάδες Hertz. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι η διαδικασία διεξάγεται μέσα σε περιβάλλον υψηλού κενού 1×10^{-4} Torr ή και μεγαλύτερη παρέχοντας μια ζώνη εργασίας που δεν απαιτείται η χρήση πρόσθετων αδρανών αερίων. Στην μέθοδο αυτή, το υλικό τροφοδοσίας τροφοδοτείται σε λιωμένη δεξαμενή που δημιουργείται από τη δέσμη ηλεκτρονίων. Μέσω της χρήσης CNC (υπολογιστικών στοιχείων ελέγχου), η λιωμένη δεξαμενή μετακινείται σε μια πλάκα υποστρώματος προσθέτοντας υλικό ακριβώς εκεί που χρειάζεται για να παραχθεί το σχεδόν καθαρό σχήμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου παραχθεί το επιθυμητό αντικείμενο. Σύμφωνα με το τμήμα που κατασκευάζεται, τα ποσοστά εναπόθεσης μπορεί να φτάσουν μέχρι 3300cm^3 ανά ώρα και για παράδειγμα αν γίνει χρήση ενός ελαφριού κράματος όπως το τιτάνιο, αυτό μεταφράζεται σε ρυθμό εναπόθεσης σε πραγματικό χρόνο σε 18 κιλά ανά ώρα.



Εικόνα 11: Τρόπος λειτουργίας EBM 3D εκτυπωτή

❖ Εφαρμογές της τεχνολογίας EBM

Τα κράματα τιτανίου χρησιμοποιούνται ευρέως με αυτή την τεχνολογία γεγονός που καθιστά την καταλληλότερη επιλογή για την κατασκευή ιατρικών εμφυτευμάτων. Τα κοτυλιαία κύπελλα (για την αντικατάσταση του ισχίου) πιστοποιημένα με CE είναι σε σειρά παραγωγής με την βοήθεια της EBM από το 2007 από δύο Ευρωπαϊκούς κατασκευαστές ορθοπεδικών εμφυτευμάτων τους Adler Ortho και Lima Corporate. Επίσης, και ο Αμερικανός κατασκευαστής εμφυτευμάτων Exactech έχει λάβει άδεια από το FDA για το κοτυλιαίο κύπελλο που κατασκευάστηκε με την βοήθεια της τεχνολογίας EBM. Και στην αεροδιαστημική και σε άλλες απαιτητικές μηχανικές εφαρμογές υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον της τεχνολογίας αυτής, για παράδειγμα ο πυραυλοκινητήρας Rutherford κατασκευάζεται σε μεγάλο βαθμό από 3D εκτυπωτή τεχνολογίας EBM. Η διαδικασία αυτή της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει αναπτυχθεί και για την κατασκευή εξαρτημάτων με τη χρήση αργιλοειδούς γάμμα τιτανίου (γ -TiAl), όπου αυτή τη στιγμή αναπτύσσεται από την Avio SpA και General Electric για την παραγωγή πτερυγίων στροβίλου για αεροστροβιλοκινητήρες.

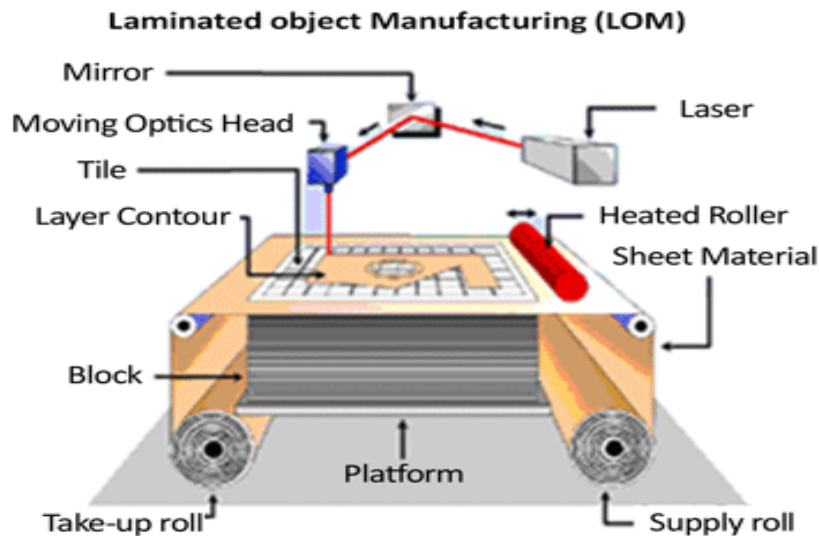
2.6.3 Κατασκευή πλαστικοποιημένων αντικειμένων (Laminated Object Manufacturing)

❖ Γενικές πληροφορίες για την μέθοδο LOM

Η κατασκευή πλαστικοποιημένων αντικειμένων είναι άλλη μια μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης που αναπτύχθηκε από την Helisys Inc.(σημερινή Cubic Technologies) με έδρα την Καλιφόρνια. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, τα στρώματα μετάλλου, πλαστικού ή ακόμα και χαρτιού, συντήκονται μαζί αφού θερμανθούν και πιεστούν και στη συνέχεια κόβονται στο επιθυμητό σχήμα με την βοήθεια λέιζερ ή λεπίδας ελεγχόμενα από υπολογιστή. Παρόλο που η LOM δεν είναι και τόσο διαδεδομένη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης σήμερα, είναι ένας από τους ταχύτερους και πιο οικονομικούς τρόπους δημιουργίας τρισδιάστατων πρωτοτύπων.

❖ Τρόπος λειτουργίας της LOM

Όπως όλα τα 3D αντικείμενα που εκτυπώνονται ξεκινούν ως αρχεία CAD έτσι συμβαίνει και με τα μοντέλα που κατασκευάζονται με τη μέθοδο LOM. Πριν την εκτύπωση του αντικειμένου το αρχείο CAD πρέπει να μετατραπεί σε μορφή που μπορεί να καταλάβει ένας 3D εκτυπωτής (συνήθως STL ή 3DS). Μια συσκευή LOM χρησιμοποιεί ένα συνεχές φύλλο από το υλικό που θα εκτυπωθεί το αντικείμενο (μέταλλο, πλαστικό, χαρτί), το οποίο τραβιέται κατά μήκος μιας πλατφόρμας κατασκευής μέσω συστήματος κυλίνδρων τροφοδοσίας. Τα δομικά υλικά συχνά επικαλύπτονται με κόλλα. Για να σχηματιστεί ένα στρώμα του αντικειμένου, ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάνω από το φύλλο υλικού, λιώνοντας την κόλλα, και πιέζοντας το πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής. Στη συνέχεια ένα λέιζερ ή μια λεπίδα ελεγχόμενα από υπολογιστή, κόβει το υλικό στο επιθυμητό σχέδιο που απαιτεί το κάθε στρώμα. Επίσης, κόβεται και πλεόνασμα υλικού σε μοτίβο crosshatch για να είναι ευκολότερη η αφαίρεση του αντικειμένου αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση. Αφού σχηματιστεί ένα στρώμα του αντικειμένου, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει κατά ένα δέκατο έκτο της ίντσας ($\approx 1,6\text{mm}$). Στη συνέχεια τραβιέται νέο υλικό στην πλατφόρμα και ο θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάλι πάνω από το υλικό συνδέοντας το νέο στρώμα με αυτό που βρίσκεται κάτω από αυτό. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου σχηματιστεί ολόκληρο το αντικείμενο. Αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση το αντικείμενο απομακρύνεται από την πλατφόρμα κατασκευής και απομακρύνεται επίσης και κάθε πλεόνασμα υλικού.



Εικόνα 12: Τρόπος λειτουργίας 3D εκτυπωτή με τη μέθοδο LOM

❖ Εφαρμογές της μεθόδου LOM

Τα μοντέλα που δημιουργούνται με την μέθοδο LOM δεν είναι τόσο ακριβή όσο με αυτά που δημιουργούνται με άλλες μεθόδους 3D εκτύπωσης όπως για παράδειγμα η SLA ή η SLS παρόλα αυτά έχει κάποια πλεονεκτήματα. Επειδή η διαδικασία LOM δεν περιέχει χημικές αντιδράσεις ή να απαιτεί κλειστούς θαλάμους, είναι καταλληλότερη για την κατασκευή μεγάλων μοντέλων. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι φθηνά και εύκολα διαθέσιμα. Όμως, η μέθοδος LOM δεν είναι ιδανική για την κατασκευή αντικειμένων με πολύπλοκες γεωμετρίες και επίσης δεν μπορεί να δημιουργήσει κοίλα αντικείμενα. Παρόλα αυτά, πολλές εταιρίες με τη χρήση της τεχνολογίας αυτής προσφέρουν υπηρεσίες εκτύπωσης προκαθορισμένων τμημάτων όπως κουτιά τηλεφώνου, στυλό, κοσμήματα και πολλά άλλα.

2.6.4 Η μέθοδος NanoParticle Jetting (NPJ)

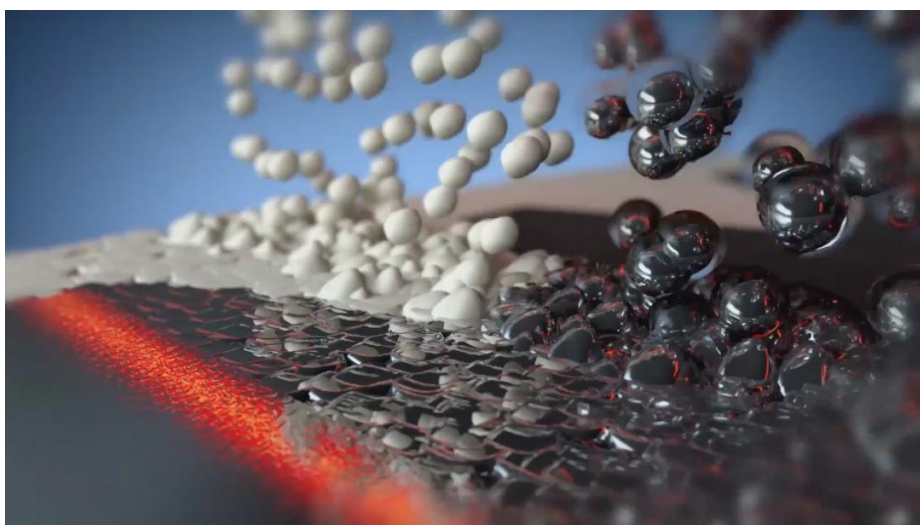
❖ Γενικά για τη μέθοδο NPJ

Η NanoParticle Jetting είναι εντυπωσιακά διαφορετική διαδικασία από τις άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, χρησιμοποιώντας υγρό αντί σκόνης ή σύρματος για την κατασκευή μεταλλικών ή κεραμικών εξαρτημάτων τόσο εύκολα όσο οποιοδήποτε σύστημα εκτύπωσης με μελάνι (inkjet). Η τεχνολογία αυτή καθιστά δυνατή την απεριόριστη σχεδιαστική ευελιξία λεπτών λεπτομερειών και ακριβείας χάρη στα νανοσωματίδια και τα εξαιρετικά λεπτά στρώματα εκτύπωσης. Εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο το “μελάνι” παρέχεται, μέσω σφραγισμένων κασετών, εξαλείφεται η ανάγκη αντιμετώπισης επικίνδυνων σκονών.

Επίσης, το κλειδί για τις μετά-επεξεργασίες είναι ότι το υλικό υποστήριξης δεν τήκεται κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, αλλά όταν το τελικό μέρος τοποθετηθεί στον φούρνο καίγεται εντελώς αφήνοντας μόνο το τυπωμένο αντικείμενο. Η μέθοδος αυτή παρέχει ασυναγώνιστες γεωμετρίες και φυσικές ιδιότητες των αντικειμένων που εκτυπώνονται.

❖ Τρόπος λειτουργίας NPJ

Η διαδικασία εκτύπωσης NPJ είναι σχεδόν η ίδια με αυτή που χρησιμοποιεί κι ένας επιτραπέζιος εκτυπωτής χαρτιού 2D. Βέβαια, η τεχνολογία NanoParticle jetting λειτουργεί με την εναπόθεση μεταλλικών ή κεραμικών νανοσωματιδίων για την εκτύπωση 3D αντικειμένων. Τα νανοσωματίδια αυτά βρίσκονται μέσα σε ένα υγρό εναιώρημα (μελάνη) και εκτοξεύονται από πιεζοηλεκτρικές κεφαλές εκτύπωσης. Ο ρυθμός με τον οποίο εκτοξεύεται η μελάνη με τα νανοσωματίδια φτάνει τα 221 σταγονίδια ανά δευτερόλεπτο. Τα εξαιρετικά λεπτά σταγονίδια, της “μελάνης” αυτής εκτοξεύονται με τη βοήθεια ενός μηχανισμού που σαρώνει την πλάκα εκτύπωσης. Στον ίδιο μηχανισμό σάρωσης βρίσκεται κι ένα στοιχείο θέρμανσης που περνά πάνω από το στρώμα της μελάνης που έχει εναποτεθεί εφαρμόζοντας θερμοκρασίες μέχρι 300°C εξατμίζοντας αποτελεσματικά το υγρό μεταφορικό εναιώρημα της μελάνης αφήνοντας μόνο τα μεταλλικά ή κεραμικά σωματίδια και στη συνέχεια να συνενώσει τα μεταλλικά-κεραμικά σωματίδια μαζί δημιουργώντας το πρώτο στρώμα του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Το στρώμα αυτό είναι τόσο λεπτό όσο ένα micron. Οι σταγόνες που εκτοξεύονται είναι και των δυο υλικών, και των δομικών και των υλικών στήριξης της κατασκευής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε στρώμα του αντικειμένου μέχρι την ολοκλήρωση της εκτύπωσης του. Τα εκτυπωμένα μέρη στη συνέχεια τοποθετούνται σε ένα συμβατικό φούρνο πυροσυσσωμάτωσης για να αφαιρεθούν οι δομές στήριξης ή να αφαιρεθεί το αντικείμενο που εκτυπώθηκε από την μεταλλική πλάκα κατασκευής.



Εικόνα 13: Εναπόθεση δομικών υλικών (μαύρα σφαιρίδια) και υλικών στήριξης (λευκά σφαιρίδια) μαζί με το στοιχείο θέρμανσης



Εικόνα 14: 3D εκτυπωτής NanoParticle jetting της XJET

❖ Εφαρμογή της τεχνολογίας NPJ

Παρόλο που η τεχνολογία της μεθόδου NPJ είναι πρώιμη, έχει υψηλό κόστος και η επιλογή υλικών προς εκτύπωση είναι μικρή, φαίνεται πως έχει εφαρμογή σε πάρα πολλούς τομείς. Τομείς όπως, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η ιατρική και πολλοί άλλοι, θα επωφεληθούν αρκετά από την τεχνολογία αυτή. Η τρισδιάστατη εκτύπωση αντικειμένων με υψηλότερη ακρίβεια, πυκνότητα και ελευθερία σχεδίασης είναι κάποια από τα πλεονεκτήματα της NPJ που στην κυριολεξία θα “λύσουν” τα χέρια των σχεδιαστών με αποτέλεσμα την ευκολότερη κατασκευή αντικειμένων που είτε ήταν αδύνατο να εκτυπωθούν, με τις μεθόδους που υπήρχαν μέχρι σήμερα, είτε η εκτύπωση τους απαιτούσε ακόμα και την αλλαγή του σχεδίου.

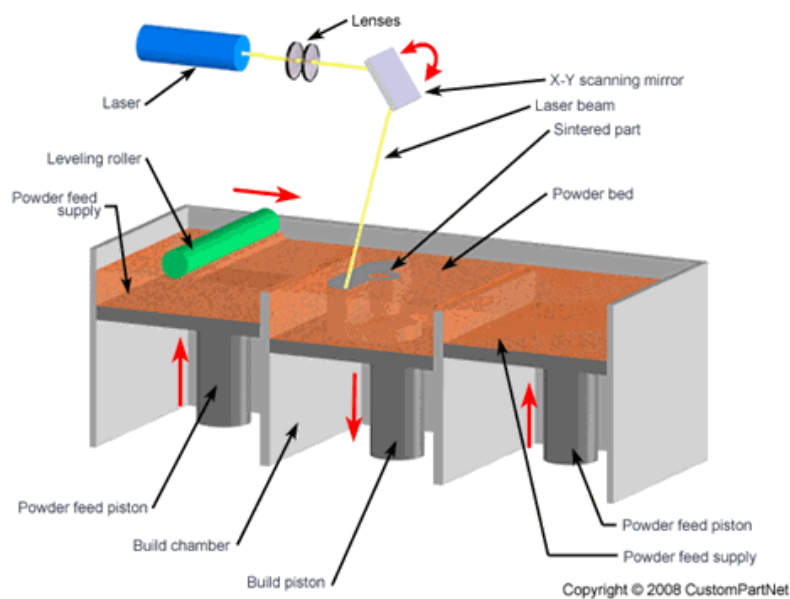
2.6.5 Άμεση πυροσυσσωμάτωση μετάλλου με λέιζερ (Direct Metal Laser Sintering)

❖ Γενικές πληροφορίες για την DMLS

Η μέθοδος DMLS παράγει μεταλλικά αντικείμενα χρησιμοποιώντας ένα λέιζερ για την τήξη λεπτής μεταλλικής κόνεως. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται μια ποικιλία κραμάτων που επιτρέπει στα εκτυπωμένα πρωτότυπα να είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό με τα εξαρτήματα παραγωγής. Επίσης, με την DMLS μπορούν να εκτυπωθούν αντικείμενα με σύνθετη γεωμετρία, εσωτερικά χαρακτηριστικά ή δύσκολες διόδους που δεν θα μπορούσαν να χυτευθούν ή να κατασκευαστούν με άλλο τρόπο. Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS) και την επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLM). Βέβαια, υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στις μεθόδους αυτές. Η SLM πυροσυσσωρεύει σκόνες και καθίσταται ιδανικότερη για την χρήση κραμάτων σε αντίθεση με την SLS που επεξεργάζεται μέταλλα μεμονωμένων στοιχείων και ορισμένων κραμάτων. Η εκτύπωση γίνεται με τη βοήθεια υπολογιστή που τροφοδοτείται με δεδομένα αρχείου CAD.

❖ Τρόπος λειτουργίας της μεθόδου DMLS

Η διαδικασία DMLS ξεκινά κι εκείνη, όπως όλοι οι μέθοδοι, με ένα τρισδιάστατο μοντέλο CAD όπου ένα αρχείο stl δημιουργείται και αποστέλλεται στο πρόγραμμα του υπολογιστή του εκτυπωτή. Όταν το αρχείο μεταφορτωθεί στον εκτυπωτή, ένας τεχνικός επεξεργάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο για την οριοθέτηση του στρώματος της δομής και να προσθέσει δομές στήριξης όπου κι αν χρειάζεται. Αφού ολοκληρωθεί αυτό το αρχείο από τον τεχνικό, το οποίο πλέον έχει "κόψει" σε λεπτά στρώματα στο πάχος που θα εκτυπώνει ο εκτυπωτής το τρισδιάστατο μοντέλο, μεταφορτώνεται στον εκτυπωτή για να ξεκινήσει η κατασκευή. Ο εκτυπωτής DMLS χρησιμοποιεί ένα υψηλής τεχνολογίας λέιζερ οπτικών ινών. Στο θάλαμο εκτύπωσης υπάρχει μια πλατφόρμα διανομής υλικού και μια πλατφόρμα κατασκευής με μία λεπίδα ξαδέματος η οποία χρησιμοποιείται για την μετακίνηση νέας σκόνης πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής. Η ακτίνα λέιζερ λιώνει την μεταλλική σκόνη δημιουργώντας το πρώτο στρώμα, με πάχος 20 μικρομέτρων συνήθως, του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα στρώματα του αντικειμένου μέχρι την ολοκλήρωση του.

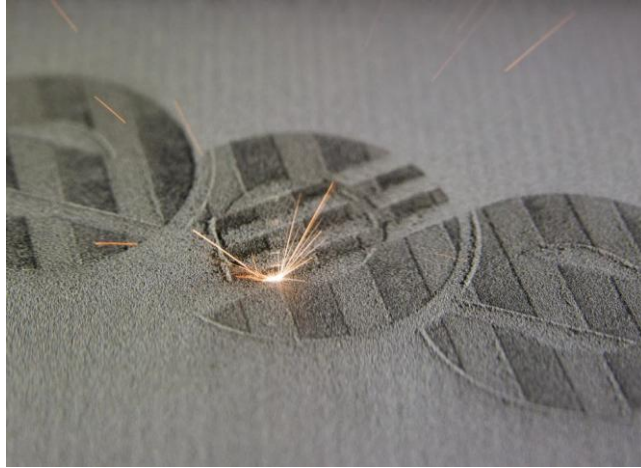


Εικόνα 15: Τρόπος λειτουργίας μεθόδου DMLS

❖ Εφαρμογές της μεθόδου DMLS

Η μέθοδος DMLS χρησιμοποιείται για την κατασκευή εξαρτημάτων σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας όπως της αεροδιαστημικής, της οδοντιατρική και ιατρικής, την κατασκευή εργαλείων για εργαλειομηχανές και γενικότερα για την κατασκευή εξαρτημάτων με εξαιρετικά πολύπλοκες γεωμετρίες. Η τεχνολογία αυτή είναι πολύ δαπανηρή και χρονοβόρα παρόλα αυτά χρησιμοποιείται τόσο για την ταχεία παραγωγή

πρωτοτύπων όσο και για τη μείωση του χρόνου ανάπτυξης νέων προϊόντων. Επίσης, με ένα απλό τρισδιάστατο εκτυπωτή τεχνολογίας DMLS μπορούν να εκτυπωθούν ταυτόχρονα πολλά και διαφορετικά εξαρτήματα. Το Βορειοδυτικό Πανεπιστήμιο της Κίνας χρησιμοποιεί ένα παρόμοιο σύστημα για την κατασκευή δομικών εξαρτημάτων πιτανίου για αεροσκάφη. Το Μάιο του 2014 ο αεροδιαστημικός κατασκευαστής SpaceX παρουσίασε το πρώτο πλήρως εκτυπωμένο κινητήρα πυραύλου SuperDraco.



Εικόνα 16: Εκτύπωση μεταλλικών αντικειμένων με την τεχνολογία DMLS

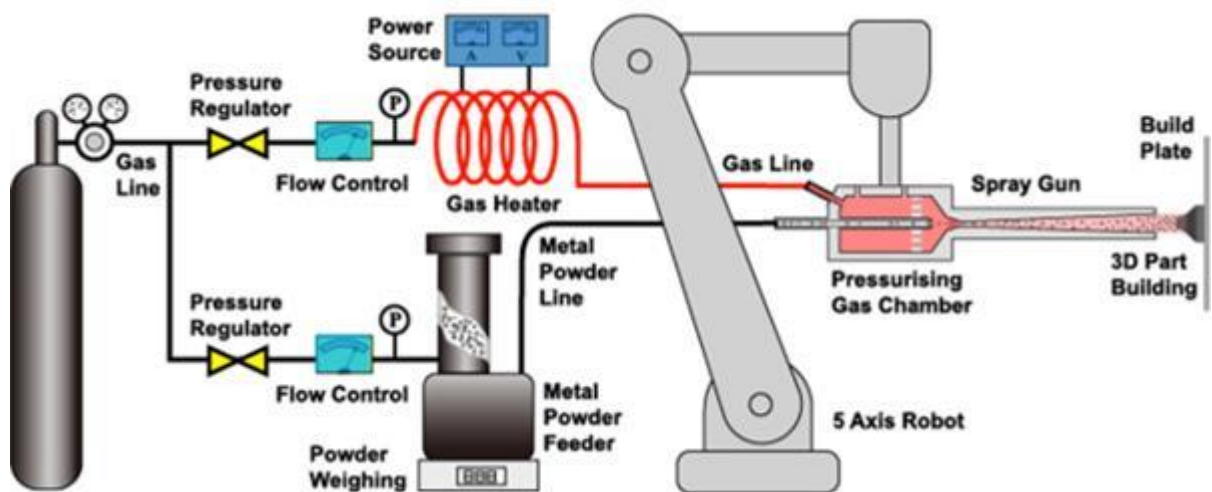
2.6.6 Ψυχρός ψεκασμός μετάλλου (Cold Spray Metal Printing)

❖ Γενικές πληροφορίες για την CSMP

Η CSMP είναι από τις ταχύτερες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλου. Ο ψυχρός ψεκασμός μετάλλου είναι μια τεχνική επίστρωσης που περιλαμβάνει την εκτόξευση σωματιδίων σε μία επιφάνεια για την δημιουργία ενός φυσικού αντικειμένου. Η τεχνολογία αυτή εφευρέθηκε στη Ρωσία τη δεκαετία του '80. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε από την NASA για την κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων στο διάστημα. Η μεγαλύτερη εφαρμογή στις ΗΠΑ ήταν για τον αμερικανικό στρατό που επισκεύαζε εξαρτήματα ελικοπτέρου από κράμα μαγνησίου. Σήμερα χρησιμοποιείται περισσότερο για κατασκευές με τη χρήση μαλακών κραμάτων όπως ο χαλκός, το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα ελκυστική για την παραγωγή μεγάλων δομών σε σχέση με άλλες μεθόδους που έχουν περιορισμό λόγω του μεγέθους του εξοπλισμού. Τα οφέλη της εκτύπωσης με ψυχρό ψεκασμό μετάλλου, περιλαμβάνουν εκτεταμένη διάρκεια ζωής του προϊόντος και μειωμένο χρόνο κατασκευής και κόστους, τα οποία μεταφράζονται σε σημαντικά οφέλη για τον πελάτη. Οι κατασκευαστές υποστηρίζουν πως είναι η φθηνότερη από τις δημοφιλείς μεθόδους εκτύπωσης μετάλλου.

❖ Τρόπος λειτουργίας του ψυχρού ψεκασμού μετάλλου

Η διαδικασία GSMP είναι μια μέθοδος εναπόθεσης επίστρωσης όπου στερεές μεταλλικές σκόνες, διαμέτρου 1-50 μικρομέτρων, επιταχύνονται σε μια δέσμη αερίων σε ταχύτητες ως 4Mach. Τα αέρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δέσμη είναι συνήθως το άζωτο και το ήλιο σε πιέσεις άνω των 1,5MPa. Τα σωματίδια εκτοξεύονται σε ένα υπόστρωμα (ικρίωμα του εκτυπωτή), όπου κατά την πρόσκρουση με το υπόστρωμα αυτό υφίστανται πλαστική παραμόρφωση και προσκολλώνται στην επιφάνεια. Μετά την πρόσκρουση τα σωματίδια ψήχονται γρήγορα σχηματίζοντας ένα δεσμό ατομικής σύντηξης. Ένας ρομποτικός βραχίονας κινεί το ακροφύσιο ώστε να σχηματιστεί το κάθε στρώμα του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Σε αντίθεση με τις τεχνικές θερμού ψεκασμού οι μεταλλικές σκόνες δεν τήκονται κατά την διάρκεια της διαδικασίας ψεκασμού



Εικόνα 17: Σχέδιο απεικόνισης 3D εκτυπωτή ψυχρού ψεκασμού μετάλλου

❖ Εφαρμογές της 3D εκτύπωσης με ψυχρό ψεκασμό μετάλλου

Τα μέταλλα, τα πολυμερή, τα κεραμικά, τα σύνθετα υλικά και οι νανοκρυσταλλικές σκόνες μπορούν να εναποτεθούν χρησιμοποιώντας την τεχνολογία ψυχρού ψεκασμού. Εκτός από την εκτύπωση νέων εξαρτημάτων αυτό που είναι ενδιαφέρον για τον ψυχρό ψεκασμό ως μια καινοτόμο 3D διαδικασία είναι ότι προσφέρει την ευκαιρία της επαναφοράς των φθαρμένων εξαρτημάτων χρησιμοποιώντας υλικά που αντικατοπτρίζουν τις ιδιότητες του ίδιου του αρχικού τμήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επέκταση της διάρκειας ζωής των εκτυπωμένων εξαρτημάτων κατά έτη ή ακόμα και δεκαετίες. Επομένως, η τεχνολογία του ψυχρού ψεκασμού προσφέρει ιδιαίτερα οφέλη για την βιομηχανία και ιδιαίτερα για την αεροναυπηγική εξοικονομώντας χρόνο, υλικά, περιπτώ βάρος, ενέργεια και χρήματα.

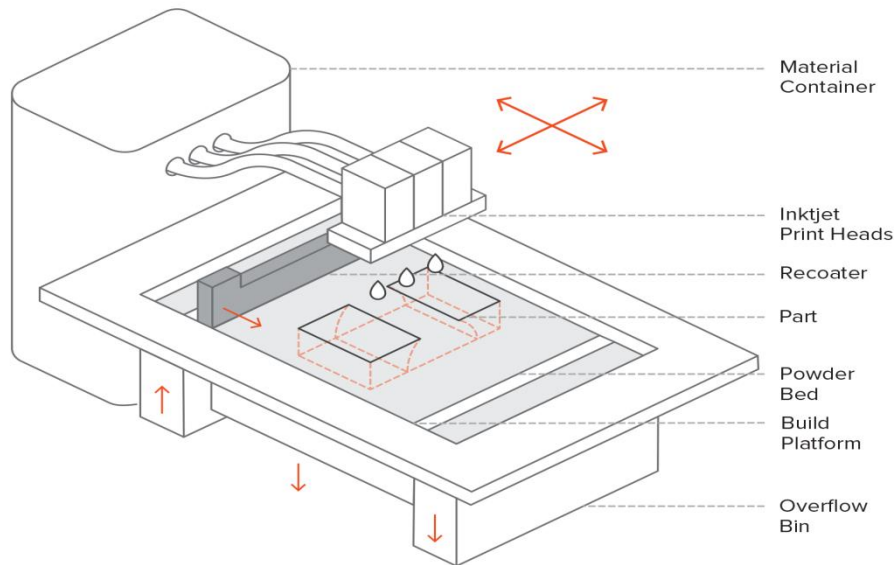
2.6.7 Τρισδιάστατη εκτύπωση **Metal Binder Jetting**

❖ Τι είναι το **Binder Jetting**

Το Binder Jetting είναι μια οικογένεια διαδικασιών παρασκευής προσθέτων. Στη μέθοδο αυτή, ένα συνδετικό υλικό εναποτίθεται επιλεκτικά επί της κλίνης κόνεως, συνδέοντας αυτές τις περιοχές μαζί σχηματίζοντας ένα στρώμα κάθε φορά του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αυτή είναι συνήθως μέταλλα, άμμος και κεραμικά τα οποία είναι σε κοκκώδη μορφή. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, όπως για την κατασκευή πρωτοτύπων πλήρους χρώματος, για την εκτύπωση τρισδιάστατων μεταλλικών μερών χαμηλού κόστους και την παραγωγή καλουπιών χύτευσης άμμου. Βέβαια, λόγω της διαφορετικότητας των εφαρμογών της μεθόδου Binder Jetting, ο σχεδιαστής που θα θελήσει να χρησιμοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες της, θα πρέπει να κατανοήσει την βασική μηχανική της διαδικασίας, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της.

❖ Λειτουργία **Binder Jetting**

Αρχικά μια λεπίδα επαναβαφής απλώνει ένα λεπτό στρώμα σκόνης πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής. Στη συνέχεια ένα φορείο με ακροφύσια ψεκασμού, τα οποία είναι παρόμοια με τα ακροφύσια που χρησιμοποιούνται σε επιτραπέζιους εκτυπωτές 2D, περνά πάνω από την κλίση και εναποθέτει επιλεκτικά σταγονίδια ενός συνδετικού παράγοντα, μιας κόλλας δηλαδή, που συνδέει τα σωματίδια σκόνης μεταξύ τους. Στο έγχρωμο Binder jetting το έγχρωμο μελάνι εναποτίθεται κατά τη διάρκεια αυτού του βήματος της διαδικασίας. Το μέγεθος κάθε σταγόνας είναι περίπου 80μm σε διάμετρο ώστε να επιτευχθεί καλή ανάλυση. Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης στρώσης του αντικειμένου που εκτυπώνεται η πλατφόρμα κατασκευής κινείται προς τα κάτω και η λεπίδα απλώνει το επόμενο στρώμα σκόνης. Η διαδικασίες αυτές επαναλαμβάνονται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. Μετά την εκτύπωση το αντικείμενο βρίσκεται ενθυλακωμένο στη σκόνη και αφήνεται για να στεγνώσει η κόλλα και να αποκτήσει αντοχή. Στη συνέχεια το εκτυπωμένο αντικείμενο αφαιρείται από τον κάδο σκόνης και η μη συνδεδεμένη σκόνη καθαρίζεται με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα.



Εικόνα 18: Σχέδιο ενός εκτυπωτή Binder Jetting 3D

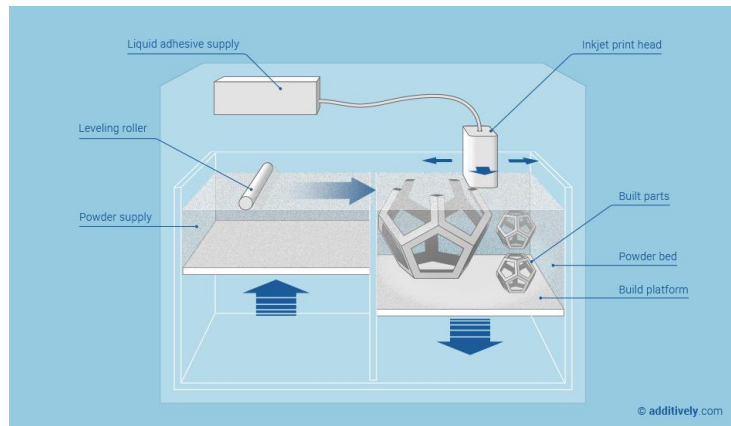
❖ Επεξεργασίες των μεταλλικών αντικειμένων μετά την εκτύπωση

Τα μεταλλικά αντικείμενα απαιτούν μια δευτερεύουσα διαδικασία μετά την εκτύπωση, όπως η διείσδυση ή η πυροσυσσωμάτωση για να επιτευχθούν οι καλές μηχανικές τους ιδιότητες, καθώς τα τυπωμένα τμήματα αποτελούνται από μεταλλικά σωματίδια που συνδέονται μαζί με ένα συγκολλητικό πολυμερές. Οι διαδικασίες είναι οι εξής:

- **Διείσδυση:** Μετά την εκτύπωση το αντικείμενο τοποθετείται σε φούρνο υψηλής θερμοκρασίας όπου το συνδετικό υλικό καίγεται αφήνοντας κενά. Στο σημείο αυτό το αντικείμενο είναι 60% περίπου πορώδες. Έπειτα, χρησιμοποιείται ο χαλκός για να διεισδύσει στα κενά μέσω της τριχοειδούς δράσης καθιστώντας το εκτυπωμένο αντικείμενο με χαμηλό πορώδες και καλή αντοχή. Η διείσδυση παράγει 90% πυκνά αντικείμενα.
- **Πυροσυσσωμάτωση:** Και σε αυτή τη διαδικασία τα εκτυπωμένα μέρη τοποθετούνται σε φούρνο υψηλής θερμοκρασίας όπου το συνδετικό υλικό καίγεται και τα υπόλοιπα μεταλλικά σωματίδια συγχωνεύονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα τα αντικείμενα να αποκτήσουν χαμηλό πορώδες. Η πυροσυσσωμάτωση παράγει 97% πυκνά αντικείμενα.

❖ Εφαρμογή της μεθόδου Metal Binder Jetting

Η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης Metal Binder Jetting είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη δημιουργία μοναδικών μεταλλικών μερών με καλό φινίρισμα επιφάνειας. Με αυτή τη τεχνολογία μπορούν να δημιουργηθούν πολύ σύνθετα σχήματα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Δεδομένου ότι η μέθοδος Metal Binder Jetting έχει μέσες μηχανικές ιδιότητες την καθιστά καταλληλότερη για την εκτύπωση διακοσμητικών αντικειμένων και κοσμημάτων. Παρόλα αυτά, για τον ανοξειδωτο χάλυβα 420 BR η διαδικασία διείσδυσης προσθέτει αντοχή στο υλικό και το καθιστά χρήσιμο για πολλές εφαρμογές.



Εικόνα 19: Λειτουργία 3D εκτυπωτή τεχνολογίας Binder Jetting

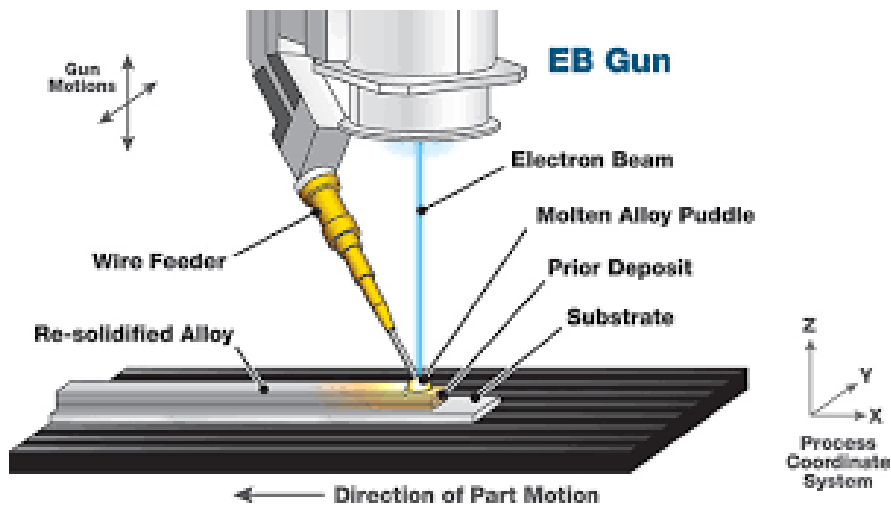
2.6.8 Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition)

❖ Γενικές πληροφορίες για τις τεχνολογίες DED

Η κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας είναι μια σειρά από όμοιες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Σε όλες αυτές τις τεχνολογίες η τρισδιάστατη εκτύπωση γίνεται με την εναπόθεση λιωμένου σύρματος ή μεταλλικής σκόνης. Η τεχνική της DED χρησιμοποιείται αρκετά συχνά για την κατασκευή τρισδιάστατων εξαρτημάτων από καθαρά μέταλλα ή κράματα. Επίσης, χρησιμοποιείται και για την επιδιόρθωση μεταλλικών εξαρτημάτων αλλά και για την προσθήκη επεκτάσεων σε υπάρχοντα μεταλλικά αντικείμενα. Η τυπική συσκευή τρισδιάστατης εκτύπωσης κατευθυνόμενης ενεργειακής εναπόθεσης αποτελείται από μία κεφαλή για την παροχή του συρματινού υλικού ή της μεταλλικής σκόνης, τοποθετημένη σε ένα βραχίονα που κινείται κατά μήκος πολλών αξόνων, έπειτα μια συσκευή παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων ή δέσμης λέιζερ υψηλής ισχύος λιώνει το σύρμα ή τη σκόνη κατευθύνοντας την ακτινοβολία υψηλής ισχύος. Λόγο της χρήσης ακτίνας λέιζερ η κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας είναι γνωστή και ως μηχανική χάραξη με λέιζερ ή 3D επένδυση με λέιζερ. Επιπλέον, λόγω της χρήσης μεταλλικού σύρματος ή σκόνης η τεχνολογία αυτή αναφέρεται μερικές φορές και με τον όρο άμεση εναπόθεση μετάλλου.

❖ Πώς λειτουργεί η διαδικασία DED

Όπως και στις άλλες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης έτσι και στην DED το μοντέλο που εκτυπώνεται χιζείται στρώμα με στρώμα σε μια επιφάνεια, η οποία δεν είναι απαραίτητα επίπεδη, από κάτω προς τα πάνω. Στη διαδικασία αυτή το ακροφύσιο, το οποίο είναι τοποθετημένο σε ένα βραχίονα 4 ή 5 βαθμών ελευθερίας, τροφοδοτεί τη μεταλλική σκόνη ή το σύρμα στην επιφάνεια εκτύπωσης. Έπειτα μια δέσμη λέιζερ κατευθύνεται προς το υλικό εκτύπωσης που έχει εναποτεθεί στην επιφάνεια κατασκευής. Το υλικό τήκεται και στην συνέχεια στερεοποιείται δημιουργώντας ένα ενιαίο σώμα. Έτσι δημιουργείται το κάθε στρώμα του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Επομένως, η εναπόθεση σκόνης μετάλλων ή σύρματος και η τήξη μεταξύ τους συμβαίνει συνεκτικά. Ανάλογα με το σχήμα του αντικειμένου η ταχύτητα και η γωνία εναπόθεσης μεταλλικού σύρματος ή σκόνης στην επιφάνεια αλλάζει.



Εικόνα 20: Σχέδιο απεικόνισης ενός 3D εκτυπωτή τύπου DED

❖ Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διαδικασίας DED

Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας DED για την κατασκευή και επισκευή τρισδιάστατων μοντέλων είναι η ακρίβεια της εκτύπωσης. Η εναπόθεση των κόκκων της μεταλλικής σκόνης ή του σύρματος μπορεί να ελεγχθεί σε μεγάλο βαθμό πράγμα που επιτρέπει την εκτύπωση λεπτών τεμαχίων. Ωστόσο, η διαδικασία στερείται ταχύτητας και πολλές φορές τα εκτυπωμένα αντικείμενα απαιτούν επιπλέον επεξεργασία. Επίσης, άλλο ένα μειονέκτημα είναι οι περιορισμένες επιλογές των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην μέθοδο αυτή. Επιπλέον, η διαδικασία αυτή δεν φαίνεται να έχει περιθώρια για περαιτέρω εξέλιξη όπως συμβαίνει με τις άλλες διεργασίες 3D εκτύπωσης με βάση την σύντηξη και γι' αυτό το λόγο κάποιες βιομηχανικές παραγωγές δεν την θεωρούν τεχνολογία 3D εκτύπωσης.

❖ Εφαρμογές της διαδικασίας DED

Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή τμημάτων με τη χρήση υλικών όπως το τιτάνιο, το ταντάλιο και το κοβάλτιο. Η διαδικασία δεν προτιμάται για μοντέλα γυαλιού, κεραμικών ή πλαστικών. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η χρήση της μεθόδου αυτής περιορίζεται στους τομείς της αεροδιαστημικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας.

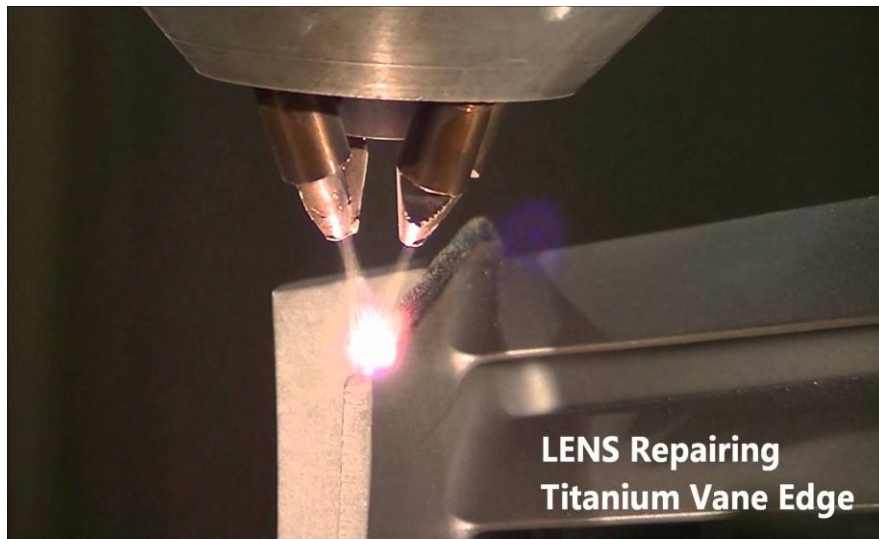
2.6.9 Τεχνολογία LENS

❖ Τι είναι η τεχνολογία LENS

Η LENS είναι μια μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων(σχεδόν ίδια με την DED) η οποία χρησιμοποιεί το λέιζερ και τις μεταλλικές σκόνες για την παραγωγή τυπωμένων δομών. Η μέθοδος αυτή, όπως και πολλές άλλες που χρησιμοποιούν λέιζερ για την εκτύπωση μεταλλικών αντικειμένων, απαιτεί ερμητικά κλειστό θάλαμο, τυπικά καθορισμένο από οξυγόνο με τη χρήση αργού ώστε τα επίπεδα οξειδωσης να διατηρούνται όσο χαμηλά είναι εφικτό. Τα λέιζερ LENS κυμαίνονται από 500 W μέχρι 4kW. Παρά τις δυσκολίες διατήρησης του θαλάμου χωρίς οξυγόνο η μέθοδος αυτή επιτρέπει στους χρήστες ένα βαθμό ακρίβειας και ελέγχου που λίγες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι σε θέση να επιτύχουν.

❖ Τρόπος λειτουργίας της μεθόδου LENS

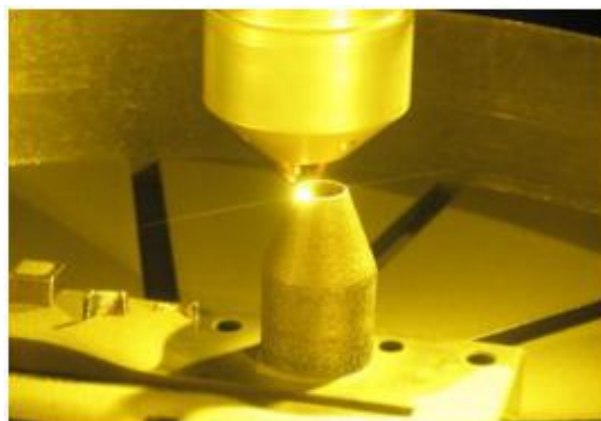
Τα συστήματα LENS χρησιμοποιούν λέιζερ υψηλής ισχύος για την τήξη των κονιοποιημένων μετάλλων σε πλήρως πυκνές τρισδιάστατες δομές. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μετάλλων LENS χρησιμοποιούν τις γεωμετρικές πληροφορίες που περιέχονται σε ένα συμπαγές μοντέλο CAD για να οδηγήσουν αυτόματα τις διαδικασίες LENS για να εκτυπώσουν στρώμα με στρώμα ένα αντικείμενο. Επίσης, πρόσθετο λογισμικό και έλεγχοι διαδικασιών κλειστού βρόχου διασφαλίζουν τη γεωμετρική και μηχανική ακεραιότητα του ολοκληρωμένου τμήματος. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα σε ένα θάλαμο που είναι ερμητικά κλεισμένος ο οποίος καθαρίζεται με αέριο αργό έτσι ώστε τα επίπεδα οξυγόνου και υγρασίας να παραμένουν κάτω από 10 μέρη ανά εκατομμύριο. Με τον τρόπο αυτό εμποδίζεται η οξειδωση. Έπειτα, η πρώτη ύλη μεταλλικής σκόνης παραδίδεται στην κεφαλή εναπόθεσης υλικού από το σύστημα τροφοδοσίας σκόνης το οποίο είναι σε θέση να ρυθμίζει με ακρίβεια τη ροή μάζας. Μόλις εναποτεθεί ένα στρώμα, η κεφαλή εναπόθεσης υλικού μετακινείται στην επόμενη στρώση. Έτσι, το αντικείμενο εκτυπώνεται στρώμα με στρώμα. Ο ρυθμός εναπόθεσης της μεταλλικής σκόνης φτάνει και τα 0,5kg ανά ώρα. Όταν ολοκληρωθεί το εξάρτημα αφαιρείται και μπορεί να υποβληθεί σε θερμική κατεργασία, με θερμο-ισοστατική πίεση, ή να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε άλλος τρόπος μετεπεξεργασίας.



Εικόνα 21: Επισκευή άκρης πτερυγίου από τιτάνιο με τη μέθοδο LENS

❖ Εφαρμογές της μεθόδου LENS

Με τη χρήση λέιζερ υψηλής ισχύος και τον πλήρη έλεγχο περιβάλλοντος η διαδικασία LENS υποστηρίζει πολλά μέταλλα υψηλής απόδοσης όπως το τιτάνιο, ο ανοξείδωτος χάλυβας και το Inconel με την απαιτούμενη ποιότητα για κρίσιμες εφαρμογές. Λόγο της φύσης της διαδικασίας αυτής είναι δυνατός ένας υψηλός βαθμός ελέγχου και επεξεργασίας. Η τεχνολογία LENS διατίθεται είτε σε διαμορφώσεις συστήματος με το χέρι είτε ως αρθρωτή μηχανή εκτύπωσης που μπορεί να ενσωματωθεί σε υπάρχοντα ή καινούργια μηχανήματα CNC. Η διαδικασία αυτή είναι ιδανική για εφαρμογές που κυμαίνονται από την εκπαίδευση και την έρευνα έως την κατασκευή εξαρτημάτων, την επισκευή και την προηγμένη επίστρωση στις βιομηχανίες αεροδιαστημικής, άμυνας, ηλεκτροπαραγωγής και ιατρικών συσκευών.

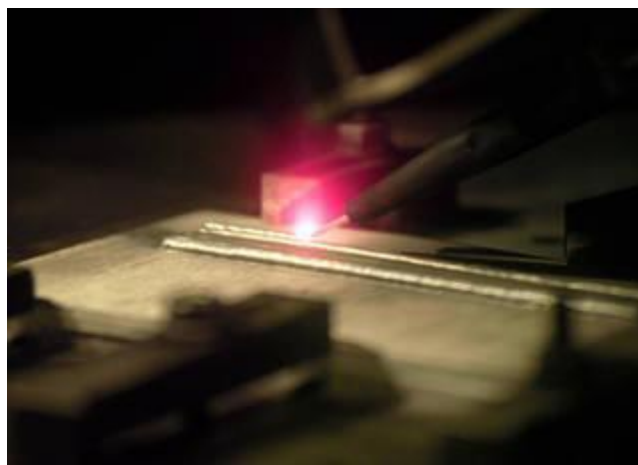


Εικόνα 22: 3D εκτύπωση μεταλλικού αντικειμένου με τη βοήθεια της τεχνολογίας LENS

2.6.10 Παραγωγή ελεύθερης μορφής δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Freeform)

❖ Τι είναι η παραγωγή ελεύθερης μορφής δέσμης ηλεκτρονίων

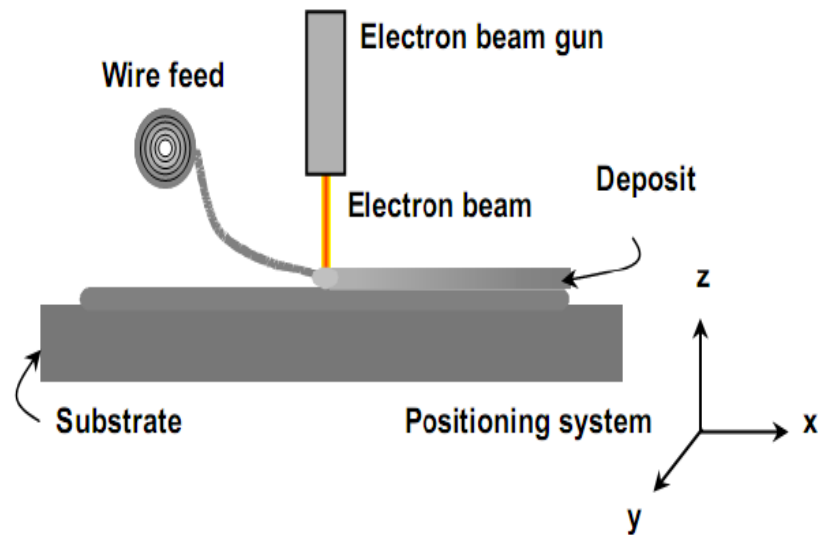
Η παραγωγή ελεύθερης μορφής ηλεκτρονίων (EBF) είναι μια διαδικασία παραγωγής πρόσθετων που αναπτύχθηκε από την NASA για τη δημιουργία μεταλλικών μερών στο διάστημα. Όπως και πολλές άλλες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης έτσι και η EBF χρησιμοποιεί σχέδια CAD και ένα 3D εκτυπωτή για τη δημιουργία εργαλείων και εξαρτημάτων, τα οποία θα εξοικονομήσουν χρόνο και χρήματα από τη NASA, επιτρέποντας στους επιστήμονες να δημιουργούν εξαρτήματα ανάλογα με τις ανάγκες τους αντί να μεταφέρουν υλικά στο διαστημικό λεωφορείο κάτι που μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρό.



Εικόνα 23: Κοντινή φωτογραφία της δέσμης ηλεκτρονίων

❖ Πως λειτουργεί η EBF

Η διαδικασία EBF χρησιμοποιεί εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων σε περιβάλλον κενού για να δημιουργήσει μια λιωμένη πισίνα σε μεταλλικό υπόστρωμα. Αρχικά, δημιουργείται ένα μοντέλο λογισμικού CAD και έπειτα μεταφράζεται σε κώδικα G. Μετά, ο κώδικας G αποστέλλεται στον εκτυπωτή. Έπειτα, μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων λιώνει το μεταλλικό σύρμα, που τροφοδοτείται αυτόματα, δημιουργώντας μια δεξαμενή μεταλλικού τήγματος. Η στρώση αυτή της λιωμένης δεξαμενής στερεοποιείται μετά τη διέλευση της δέσμης ηλεκτρονίων δημιουργώντας το πρώτο στρώμα του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Αφού το στρώμα στερεοποιηθεί, η διαδικασία ξεκινά από την αρχή εκτυπώνοντας το επόμενο στρώμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση ολόκληρου του τμήματος που εκτυπώνεται.



Εικόνα 24: Σχέδιο απεικόνισης της λειτουργίας της διαδικασίας EBF

❖ Εφαρμογές της EBF

Η διαδικασία EBF αναπτύχθηκε κυρίως από την Karen Taminger για τις ανάγκες της NASA, για την κατασκευή εργαλείων και εξαρτημάτων στο διάστημα. Η διαδικασία όμως αυτή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή εξαρτημάτων στην αεροναυπηγική. Μπορούν να εκτυπωθούν κάποια εξαρτήματα εξοικονομώντας υλικά, ηλεκτρική ενέργεια και δημιουργώντας λιγότερα απόβλητα. Βέβαια τα πρώτα μέρη που κατασκευάστηκαν με την βοήθεια της τεχνολογίας αυτής ήταν απλά, όμως στο μέλλον θα μπορούν να εκτυπωθούν πιο σύνθετα που θα βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα και την αντοχή. Επίσης, στη διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει και η ταυτόχρονη χρήση διαφορετικών μεταλλικών συρμάτων για την εκτύπωση τμημάτων.

2.6.11 Εναπόθεση μετάλλου με λέιζερ (Laser Metal Deposition)

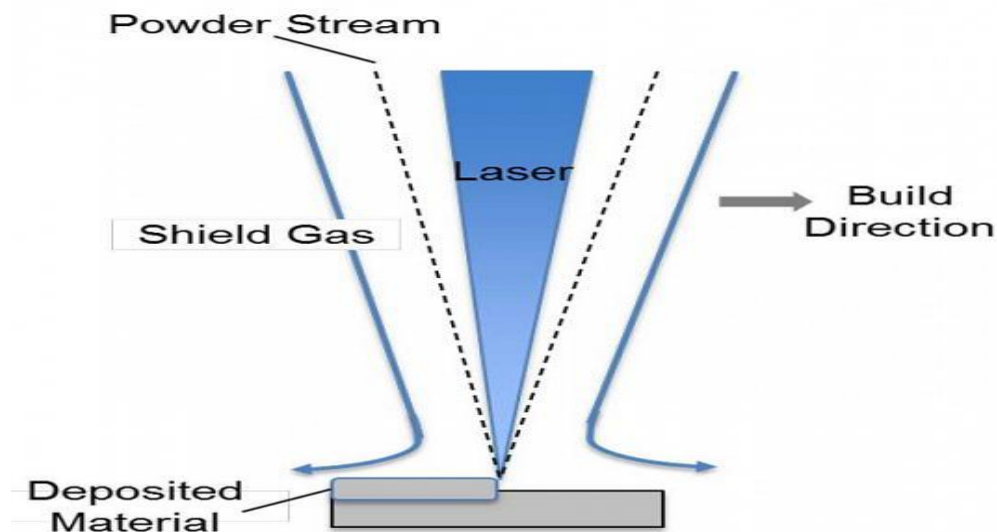
❖ Γενικά για την εναπόθεση μετάλλου με λέιζερ

Η εναπόθεση μετάλλου με λέιζερ είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που υιοθετείται για την αύξηση και, σε ορισμένες περιπτώσεις, την αντικατάσταση παραδοσιακών μεθόδων για την κατασκευή, την επένδυση με λέιζερ και την εκτύπωση τρισδιάστατων μεταλλικών αντικειμένων. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί μια δέσμη λέιζερ ως πηγή ενέργειας για την τήξη μεταλλικής σκόνης. Σε αντίθεση με τις περισσότερες από τις άλλες τεχνολογίες, δεν βασίζεται σε κλίση σκόνης, αλλά χρησιμοποιεί ένα ακροφύσιο τροφοδοσίας για να προωθήσει τη σκόνη στη δέσμη λέιζερ. Επίσης, ένα σύστημα LMD μπορεί να περιλαμβάνει και ένα αφαιρετικό χαρακτηριστικό έτσι ώστε να είναι σε θέση να τελειοποιεί τις επιφάνειες των αντικειμένων που εκτυπώνονται.

Επομένως, οι μηχανές LMD κατατάσσονται στην κατηγορία των υβριδικών μηχανών. Το πλεονέκτημα αυτό τις καθιστά ικανές να μπορούν να ενσωματωθούν με μεγάλη ευκολία σε γραμμές παραγωγής δίνοντας τη δυνατότητα στους κατασκευαστές να εξοικονομήσουν χρόνο και χρήματα.

❖ Πως λειτουργεί η LMD

Η εναπόθεση μετάλλου με λέιζερ είναι μια μέθοδος παραγωγής προσθέτων που χρησιμοποιεί μια δέσμη λέιζερ επικεντρωμένη σε ένα υπόστρωμα μέσω ενός ακροφυσίου για να δημιουργήσει μια δεξαμενή τήγματος. Στη συνέχεια, το υλικό που έχει οριστεί για την εκτύπωση, προστίθεται στην δεξαμενή αυτή του τήγματος σε μορφή σκόνης ή σύρματος. Τα λιωμένα σωματίδια τήκονται και μετά στερεοποιούνται καθώς το ακροφύσιο κινείται γύρω από το υπόστρωμα για να σχηματίσει το πρώτο στρώμα του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου η οποία γίνεται στρώμα με στρώμα. Η διαδρομή του ακροφυσίου καθορίζεται από ένα μοντέλο CAD το οποίο έχει τεμαχιστεί σε στρώματα με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού CAM. Η ταχύτητα την διαδικασίας, η αποδοτικότητα και η ποιότητα μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις διαφόρων εφαρμογών. Η προσαρμογή της διαδικασίας επιτυγχάνεται με την μεταβολή της ισχύος του λέιζερ, του πλάτους των τηγμένων μεταλλικών σφαιριδίων, της ταχύτητας κίνησης και των ρυθμών τροφοδοσίας σκόνης.



Εικόνα 25: Σχέδιο απεικόνισης ακροφυσίου σκόνης με ομοαξονικά ευθυγραμμισμένο υλικό εναπόθεσης και λέιζερ σε ένα υπόστρωμα

❖ Εφαρμογές της LMD

Η εναπόθεση μετάλλων με λέιζερ μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε οποιαδήποτε βιομηχανία που απαιτεί τη δημιουργία ή την επισκευή εξαρτημάτων υψηλής αξίας ακόμα και αντικειμένων μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, η τεχνολογία LMD έχει κερδίσει το ενδιαφέρον στους κλάδους της αεροδιαστημικής, των εργαλείων, των μεταφορών, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου λόγω της επεκτασιμότητας της και των ποικίλων δυνατοτήτων που μπορεί να προσφέρει. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για εφαρμογές επένδυσης, όπως για παράδειγμα σε έδρες βαλβίδων ή κατά μήκος της ακμής λεπίδων κοπής, όπου και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται υψηλή αντοχή στην φθορά. Οι επισκευές πτερυγίων και στροβίλων, καθώς και τμήματα κινητήρων νίζελ (έμβολα, κεφαλές) είναι επίσης εξαιρετικά εφικτές εφαρμογές. Σε αυτό έχει συνεισφέρει και η γκάμα των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αυτή τη μέθοδο όπως το τιτάνιο, το νικέλιο, το αλουμίνιο, το χάλυβα και το κοβάλτιο. Επίσης, η ολλανδική ομάδα MX3D χρησιμοποίησε αυτήν την τεχνολογία για να χτίσει μια μεταλλική γέφυρα με ειδικά σχεδιασμένους εκτυπωτές για να κινηθούν πάνω στη γέφυρα που εκτυπώνουν.



Εικόνα 26: 3D μεταλλική εκτύπωση με τη τεχνολογία LMD

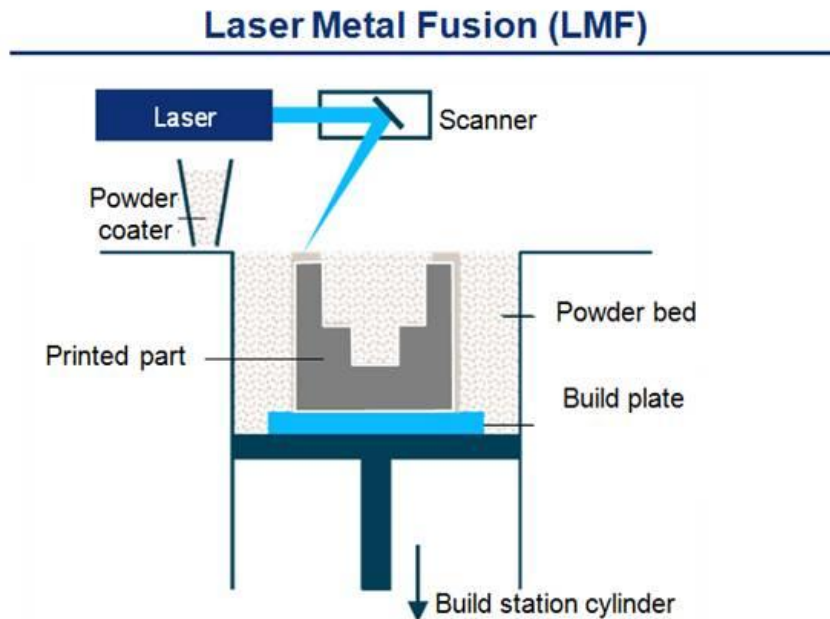
2.6.12 Σύντηξη μετάλλων με λέιζερ LMF(**L**aser **M**etal **F**usion)

❖ Γενικά για την LMF

Η LMF είναι μια διαδικασία σύντηξης με λέιζερ που βασίζεται σε κλίνη σκόνης, η οποία μετατρέπει τα τρισδιάστατα ψηφιακά δεδομένα σε φυσικά μέρη στρώμα με στρώμα. Το ψηφιακό 3D μοντέλο προετοιμάζεται σε ειδικό λογισμικό που «τεμαχίζει» το όγκο του σε πολύ λεπτά στρώματα που έχουν συνήθως πάχος 20-100μm. Μια λεπτομερής σάρωση εφαρμόζεται σε κάθε στρώμα για να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα σύντηξης, η πυκνότητα του τμήματος και η διαχείριση της θερμότητας καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής. Με την πολύ υψηλή ανάλυση της διαδικασίας LMF είναι δυνατή η κατασκευή λεπτών και πολύπλοκων δομών, σε βαθμό που οι γεωμετρίες που κάποτε απαιτούσαν την συναρμολόγηση αρκετών κατεργασμένων τμημάτων μπορούν τώρα να επανασχεδιαστούν και να εκτυπωθούν ως ένα ενιαίο τμήμα με την ίδια ή ακόμα και βελτιωμένη λειτουργικότητα.

❖ Τρόπος λειτουργίας της LMF

Η διαδικασία LMF ξεκινά με την εφαρμογή ενός στρώματος μεταλλικής σκόνης σε μια πλάκα υποστρώματος. Μια δέσμη λέιζερ η οποία κατευθύνεται μέσω ενός οπτικού σαρωτή περνά πάνω από την μεταλλική σκόνη, λιώνοντας την, δημιουργώντας έτσι την επιθυμητή διατομή του τμήματος που εκτυπώνεται. Μετά την σάρωση η πλάκα κατασκευής χαμηλώνει και εφαρμόζεται το επόμενο στρώμα σκόνης ώστε να εκτυπωθεί το επόμενο στρώμα του τμήματος. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. Μόλις ολοκληρωθεί η κατασκευή, το τμήμα πρέπει να αφαιρεθεί από τον εκτυπωτή και στη συνέχεια να υποβληθεί σε κάποια βήματα μετεπεξεργασίας, όπως θερμική επεξεργασία, την αφαίρεση δομών υποστήριξης και της πλάκας κατασκευής και οποιεσδήποτε τελικές επεξεργασίες επιφανειών χρειάζεται (π.χ. αμμοβολή).



Εικόνα 27: Διάγραμμα απεικόνισης διαδικασίας LMF

❖ Εφαρμογή της τεχνολογίας LMF

Υπάρχουν αρκετές βιομηχανίες που χρησιμοποιούν ήδη την 3D εκτύπωση LMF συμπεριλαμβανομένων των οδοντιατρικών και ιατρικών αγορών. Τα εμφυτεύματα αρθρώσεων ισχίων και οι γέφυρες που κατασκευάζονται από υλικά όπως το τιτάνιο, οι ανοξείδωτοι χάλυβες και το χρώμιο του κοβαλτίου αποτελούν παράδειγμα αυτών των εφαρμογών. Μια από τις ενδιαφέρουσες πτυχές των ιατρικών βιομηχανιών είναι ότι, αν και η ποσότητα των παραγόμενων εξαρτημάτων είναι υψηλή, δεν υπάρχει σειριακή παραγωγή κάθε τμήμα δηλαδή είναι μοναδικό. Επίσης, η LMF δίνει την δυνατότητα στην αεροδιαστημική βιομηχανία να δημιουργεί σχέδια που δεν ήταν εφικτά έως τώρα με συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Η διαδικασία LMF επιτρέπει στους χρήστες να επισκευάζουν και να κατασκευάζουν εξαρτήματα που έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με συμβατικά παραγόμενα εξαρτήματα και μπορεί να εξαλείψει ακόμα και την ανάγκη για συναρμολόγηση. Η ακρίβεια της διαδικασίας επιτρέπει στους σχεδιαστές να βελτιώσουν τα χαρακτηριστικά των υλικών όπου είναι απαραίτητο ανοίγοντας νέες μεταλλουργικές ικανότητες που μπορούν να συμπληρώσουν ή και να αντικαταστήσουν διαδικασίες που ήδη χρησιμοποιούνται.

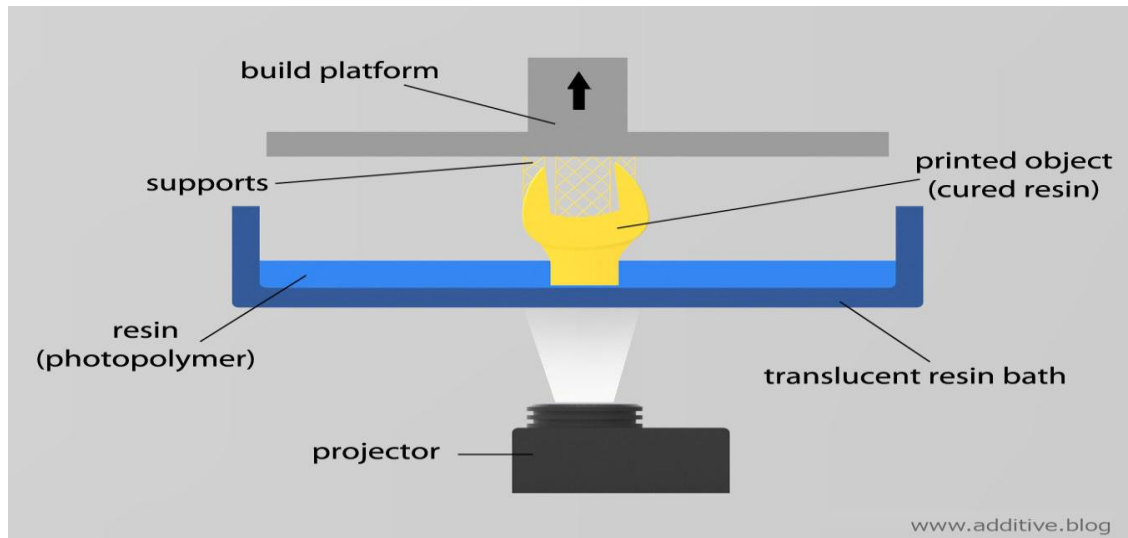
2.6.13 Ψηφιακή επεξεργασία φωτός (Digital Light Processing)

❖ Γενικά για την DLP

Διάφορες δοκιμές που έχουν γίνει έδειξαν ότι η τεχνολογία DLP, που αναπτύχθηκε από το Κέντρο Ερευνών της Ολλανδίας (ECN) και τους συνεργάτες της για την τρισδιάστατη εκτύπωση κεραμικών υλικών, μπορεί επίσης να γίνει κατάλληλη για την εκτύπωση μεταλλικών αντικειμένων. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια εναλλακτική λύση υψηλότερης ποιότητας στις υπάρχουσες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων. Η αρχή λειτουργίας στηρίζεται στη ρήψη υπεριώδους ακτινοβολίας πάνω σε μια φωτοευαίσθητη ρητίνη, η οποία αποτελεί το συνδετικό υλικό της μεταλλικής σκόνης. Το πλεονέκτημα είναι ότι με αυτή τη διαδικασία δεν γίνεται τήξη των μετάλλων όπως σε άλλες διαδικασίες (SLS, EBM, κτλ), με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν που εκτυπώνεται να είναι καλά ομογενοποιημένο, οι τιμές τραχύτητας της επιφανείας του να είναι χαμηλές, και επομένως η ποιότητα του υψηλότερη. Ήδη η ολλανδική εταιρία Admatec Europe BV έχει ενώσει τις δυνάμεις της με το ECN για την ανάπτυξη ενός νέου υπερσύγχρονου μεταλλικού εκτυπωτή τεχνολογίας DLP. Επίσης και η Prodways έχει αναπτύξει ένα 3D εκτυπωτή της ίδιας τεχνολογίας για την εκτύπωση μεταλλικών αντικειμένων.

❖ Τρόπος λειτουργίας της DLP

Τα συστήματα DLP χρησιμοποιούν έναν έως δυο προβολείς, τοποθετημένους σε ένα σύστημα XY τύπου Gantry, οι οποίοι ρίχνουν υπεριώδη ακτινοβολία πάνω σε μία δεξαμενή φωτοευαίσθητης ρητίνης που είναι αναμεμιγμένη με τη μεταλλική σκόνη. Οι προβολείς κινούνται από το σύστημα για να δημιουργήσουν το σχήμα του κάθε στρώματος του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Η υπεριώδης ακτινοβολία σκληραίνει τη ρητίνη δημιουργώντας μια παχύρρευστη μεταλλική πάστα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε στρώμα του εξαρτήματος που εκτυπώνεται έως ότου ολοκληρωθεί. Στη συνέχεια το τυπωμένο αντικείμενο τοποθετείται σε φούρνο όπου το συνδετικό υλικό καίγεται και στο τέλος παραμένει ένα πυκνό μεταλλικό αντικείμενο.



Εικόνα 28: Σχέδιο που απεικονίζει την διαδικασία εκτύπωσης DLP

❖ Πλεονεκτήματα και εφαρμογές της DLP

Με την τεχνολογία DLP η διαμόρφωση του αντικειμένου που εκτυπώνεται πραγματοποιείται από το σύστημα του εκτυπωτή όμως οι ιδιότητες του υλικού προέρχονται από τον φούρνο πυροσυσσωμάτωσης. Έτσι με το πλεονέκτημα αυτό δίνεται η δυνατότητα στον κατασκευαστή να μπορεί να επιτύχει καλύτερες ιδιότητες υλικού από ότι θα είχε με άλλη μέθοδο, για παράδειγμα την επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLM). Επίσης, με τη μέθοδο DLP το τελικό φινίρισμα είναι αρκετά ομαλό, σύμφωνα με τους κατασκευαστές των εκτυπωτών αυτών, οπότε η μετεπεξεργασία των εξαρτημάτων που έχουν εκτυπωθεί είναι είτε ανύπαρκτη είτε ελάχιστη. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτή τη μέθοδο είναι πολλά. Προς το παρόν οι εκτυπωτές DLP μπορούν να εκτυπώσουν αντικείμενα από ανοξείδωτο χάλυβα 316L, βολφράμιο, τιτάνιο και Inconel. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τεχνολογία αυτή να βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς. Στον τομέα της ιατρικής για εμφυτεύματα οστών, στην οδοντιατρική, την βιομηχανία των γυαλιών οράσεως, εξαρτήματα μικροηλεκτρικών συσκευών που σχετίζονται με τον διαχωρισμό των καυσίμων και για εξαρτήματα υψηλής τεχνολογίας όπου απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες.

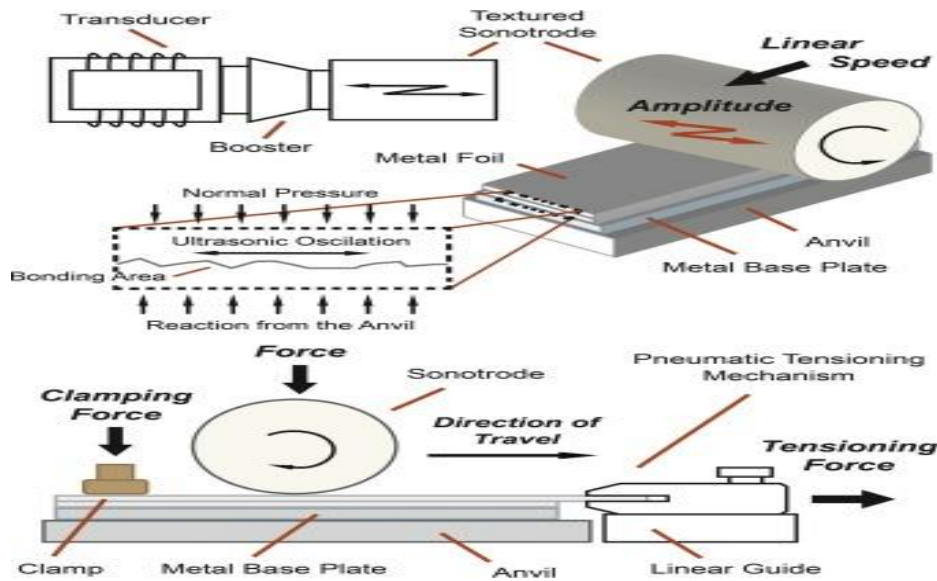
2.6.14 Τρισδιάστατη εκτύπωση με τη βοήθεια υπερήχων(Ultrasonic Additive Manufacturing)

❖ Γενικά για την μέθοδο 3D εκτύπωσης UAM

Η μέθοδος UAM είναι μια υβριδική διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης που περιλαμβάνει τη συγκόλληση με υπερήχους (συχνότητας > 20kHz) μεταλλικών φύλλων σε στερεά κατάσταση με περιοδική μηχανική κατεργασία CNC για την επίτευξη του επιθυμητού τρισδιάστατου σχήματος. Η διαδικασία αυτή παράγει πραγματικούς μεταλλουργικούς δεσμούς με πλήρη πυκνότητα και λειτουργεί με διάφορα μέταλλα. Η τεχνολογία υπερηχητικής συγκόλλησης μπορεί να επιτευχθεί σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Στα αλουμίνια για παράδειγμα οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι κάτω από 250° F και για όλα τα μέταλλα η θερμοκρασία σύνδεσης είναι σημαντικά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προστασία των ιδιοτήτων των υλικών δεδομένου ότι τα υλικά θερμαίνονται ελάχιστα και δεν παρουσιάζουν μεταβολές στο μέγεθος των κόκκων. Επίσης, η συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων είναι εφικτή χωρίς τα προβλήματα που παρατηρούνται στην συγκόλληση με βάση τη σύντηξη. Ωστόσο, τα αντικείμενα που εκτυπώνονται με τη χρήση της τεχνολογίας UAM, έχουν ένα πολύ ομαλό φινιρίσμα με πάρα πολύ μικρές ανοχές. Ακόμα, πολλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα συμπεριλαμβανομένων των μικροεπεξεργαστών, των αισθητήρων και των εξαρτημάτων τηλεμετρίας έχουν ενσωματωθεί επιτυχώς σε στερεά μεταλλικά μέρη χρησιμοποιώντας την τεχνολογία UAM.

❖ Πως λειτουργεί ένα σύστημα τεχνολογίας UAM

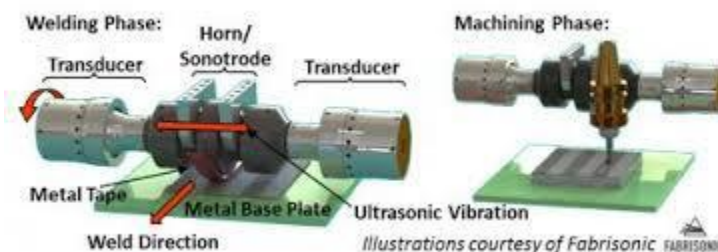
Ένα υβριδικό σύστημα UAM περιλαμβάνει ένα κυλιόμενο σύστημα υπερήχων συγκόλλησης που αποτελείται από δύο υπερηχητικούς μοφροτροπείς, το κύλινδρο συγκόλλησης που ονομάζεται sonotrode, το σύστημα CNC και την τράπεζα εκτύπωσης των μεταλλικών αντικειμένων. Κατά την διάρκεια της συγκόλλησης το sonotrode πιέζει με σταθερή δύναμη το μεταλλικό φύλλο το οποίο έχει τροφοδοτηθεί αυτόματα και συγκρατείται στη θέση του πάνω σε ένα μεταλλικό υπόστρωμα με ένα μηχανισμό σύσφιξης ή τάνυσης. Το sonotrode κυλά πάνω από το φύλλο και ταυτόχρονα ταλαντεύεται με μια σταθερή συχνότητα (περίπου 20kHz) κάθετα προς την κατεύθυνση που κινείται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δεσμού στερεάς κατάστασης μεταξύ των διεπιφανειών του φύλλου και του μεταλλικού υποστρώματος ή του μεταλλικού φύλλου που έχει τοποθετηθεί πρωτίτερα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό ύψος. Μετά την σύνδεση πολλών στρωμάτων εισάγεται ένα στάδιο επεξεργασίας CNC για να δώσει την επιθυμητή μορφή στα συνδεδεμένα μεταλλικά φύλλα. Ο κύκλος συγκολλήσεως μεταλλικών φύλλων επί του προηγουμένως κατασκευασμένου και μορφοποιημένου τμήματος και η κατεργασία των νεοεισερχόμενων στρώσεων επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ολοκληρωθεί ολόκληρο το τμήμα που εκτυπώνεται.



Εικόνα 29: Σχέδιο απεικόνισης της λειτουργίας της τεχνολογίας UAM

❖ Εφαρμογή της τεχνολογίας UAM

Με την χρήση της τεχνολογίας UAM μπορούν να κατασκευαστούν σύνθετες 3D εσωτερικές και εξωτερικές γεωμετρίες για εφαρμογές που απαιτούν για παράδειγμα κανάλια ψύξης ή ενσωματωμένα χαρακτηριστικά. Οι μοναδικές ιδιότητες που προσφέρει η τεχνολογία UAM έχουν αξιοποιηθεί στο παρελθόν επιτρέποντας την ενσωμάτωση διαφόρων ηλεκτρονικών δομών σε μεταλλικό πλέγμα. Επίσης, με την τεχνολογία αυτή είναι δυνατή η εναπόθεση διαφορετικών μεταλλικών φύλλων σε διαφορετικά επιθυμητά στρώματα ή τοποθεσίες κατά την διάρκεια της διαδικασίας. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στον κατασκευαστή να μπορεί να βελτιστοποιήσει τη θερμική αγωγιμότητα του αντικειμένου που θέλει να εκτυπώσει, την αντίσταση στην φθορά, την αντοχή του, την ολκιμότητα του και άλλων ιδιοτήτων είτε σε ολόκληρο το τμήμα είτε σε συγκεκριμένες θέσεις. Δεδομένου ότι η UAM λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας, πολλοί τύποι οπτικών ινών μπορούν να εναποτεθούν χωρίς ζημιά. Οι συνηθέστερα ενσωματωμένες είναι από καρβίδιο του πυριτίου οπτικές ίνες μέσα σε μήτρες αλουμινίου αλλά μπορούν να ενσωματωθούν μεταξύ ανόμοιων υλικών.



Εικόνα 30: Αριστερά το κυλιόμενο σύστημα υπερήχων και δεξιά το σύστημα CNC

2.6.15 Δεσμευμένη εναπόθεση μετάλλου (Bound Metal Deposition)

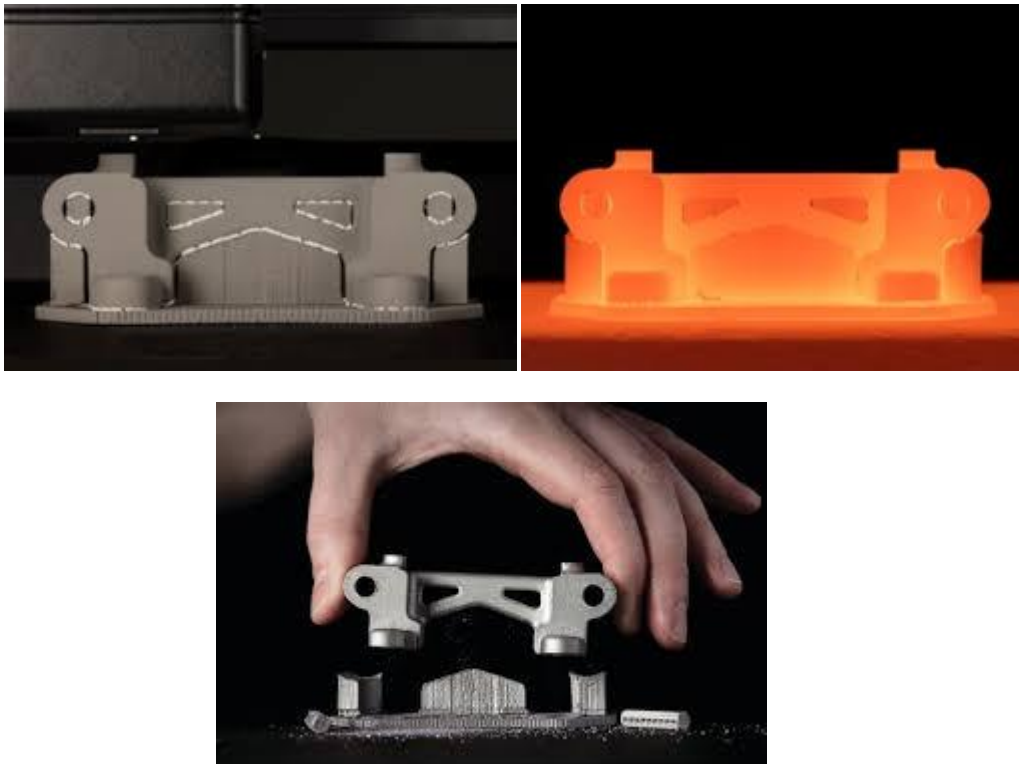
❖ Γενικά για την τεχνολογία BMD

Η εταιρία Desktop Metal, με σκεπτικό την δημιουργία ενός συστήματος εκτύπωσης μετάλλων που θα είναι πιο προσιτό και πιο φιλικό στην χρήση, ανέπτυξε δυο μοντέλα εκτυπωτών βασισμένα στην τεχνολογία BMD. Η μέθοδος αυτή είναι μια ένωση των τεχνολογιών της χύτευσης με έγχυση μετάλλου (Metal Injection Molding) και της ευρέως χρησιμοποιούμενης για πλαστικά 3D εκτύπωσης FDM (Fused deposition Modeling). Η BMD χρησιμοποιεί τεχνολογία εξώθησης για να παράγει ακριβή και επαναλαμβανόμενα φυσικά μέρη με υψηλή ταχύτητα και χαμηλό κόστος. Σε αντίθεση με τα συστήματα που βασίζονται σε λείζερ τα οποία τήκουν επιλεκτικά τη μεταλλική σκόνη, η BMD εξωθεί μια μεταλλική ράβδο κονιοποιημένου μετάλλου που έχει συνδεθεί μαζί με ένα συνδετικό ρητίνης. Στην ουσία το κονιοποιημένο μέταλλο συνδέεται με την ρητίνη απλά για την στερεοποίηση του σε μεταλλικές ράβδους. Στη συνέχεια για την δημιουργία ενός αντικειμένου από καθαρό μέταλλο, το εκτυπωμένο τμήμα ξεπλένεται με διαλύτη από το πρωταρχικό συνδετικό υλικό μέσω ενός ενσωματωμένου σταθμού καθαρισμού στο σύστημα. Έπειτα, το τμήμα τοποθετείται στο σταθμό πυροσυσσωμάτωσης, πυκνώνοντας τη μεταλλική σκόνη και δημιουργώντας το τελικό προϊόν. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελεί η ευκολία αφαίρεσης της υποστηρικτικής δομής που γίνεται με το χέρι. Τα σύστημα BDM λειτουργούν με ένα ευρύ φάσμα υψηλής ποιότητας κραμάτων που είναι απαραίτητα για την 3D εκτύπωση. Συνολικά 7 διαφορετικά μεταλλικά κράματα όπως ανοξείδωτοι χάλυβες, χάλυβας 4140, χαλκού, χάλυβα invar Kovar, Inconel και H-13 είναι διαθέσιμα στην αγορά προς το παρόν με περισσότερα από 31 να βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Η τεχνολογία αυτή δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να εργάζονται με ασφαλέστερο τρόπο στον ίδιο χώρο που λειτουργεί ένας εκτυπωτής BMD καθώς δεν υπάρχουν επικίνδυνες σκόνες, επικίνδυνα λείζερ και εργαλεία κοπής σε αντίθεση με άλλες μεθόδους τρισδιάστατης μεταλλικής εκτύπωσης.

❖ Τρόπος λειτουργίας της BMD

Όπως σε κάθε διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης έτσι και στην BMD η διαδικασία ξεκινά με ένα αρχείο CAD. Αντί όμως να περιορίζεται μόνο σε μορφή .STL, το λογισμικό που χρησιμοποιεί η Desktop Metal δέχεται επίσης φυσικές μορφές αρχείων CAD δημιουργώντας αυτόματα υποστηρίγματα και παραμέτρους ελέγχου με βάση τη γεωμετρία και το υλικό. Έπειτα από την προετοιμασία του ψηφιακού μοντέλου έρχεται η εκτύπωση του με παρόμοιο τρόπο που δουλεύει ένας εκτυπωτής τεχνολογίας FDM. Αλλά αντί για την εξώθηση πλαστικού, στον εκτυπωτή τεχνολογίας BMD γίνεται θέρμανση και εξώθηση μεταλλικών σκονών που συγκρατούνται μαζί με ένα είδος ρητίνης ώστε να στερεοποιηθούν. Η τεχνολογία ονομάζεται Single Pass Jetting. Το SPJ συνδυάζει δυο συσκευές διασκορπισμού σκόνης και μια μονάδα εκτύπωσης, τόσο για την εξάπλωση της μεταλλικής σκόνης όσο και για την εκτύπωση σε ένα ενιαίο πέρασμα χωρίς άσκοπη κίνηση. Μια απλή διέλευση ξεκινά από τον κατανεμητή σκόνης όπου ένα σύστημα

μέτρησης εναποθέτει ακριβής ποσότητα μεταλλικής σκόνης και ένα σύστημα συμπίεσης, μια μπάρα, συμπιέζει την μεταλλική σκόνη σχηματίζοντας ένα στρώμα τόσο λεπτό όσο 50μm. Η ράβδος εκτύπωσης ακολουθεί τον κατανομητή σκόνης, εκτοξεύοντας ένα συνδετικό μέσο πάνω από τη σκόνη σε εκατομμύρια σταγονίδια ανά δευτερόλεπτο για να σχηματίσουν το πρώτο στρώμα του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Στη συνέχεια εναποτίθενται παράγοντες κατά της σύντηξης, για την ευκολότερη απομάκρυνση των υποστρωμάτων μετά την ολοκλήρωση του εξαρτήματος. Και έπειτα ένας λαμπτήρας υπεριώδους ακτινοβολίας «στεγνώνει» το στρώμα που έχει δημιουργηθεί. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε στρώμα του αντικειμένου μέχρι την ολοκλήρωσή του. Μόλις εκτυπωθεί, ένα μέρος του συνδετικού υλικού αφαιρείται από το ενσωματωμένο σύστημα καθαρισμού του εκτυπωτή με τη βοήθεια διαλύτη. Μετά τοποθετείται σε ένα φούρνο πυροσυσσωμάτωσης θερμαίνοντας το ομοιόμορφα ακριβώς κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του (μέγιστη 1400 °C) ανάλογα με το υλικό, έτσι το υπόλοιπο συνδετικό υλικό συσσωματώνεται , και τα σωματίδια μετάλλου συνενώνονται για να σχηματίσουν μια τελική δομή με πυκνότητα έως 99,8%. Αυτό επιτυγχάνεται συνδυάζοντας τα θερμαντικά στοιχεία SiC με τα υψηλής ισχύος μικροκύματα παρέχοντας θερμοσυσσωμάτωση βιομηχανικής αντοχής. Και τέλος η αφαίρεση των υποστηρικτικών δομών μπορούν να αφαιρεθούν ακόμα και με το χέρι μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα χωρίς να απαιτείται κάποια μηχανική διαδικασία ακόμα και για τα πιο περίπλοκα στηρίγματα, αφού δεν είναι συνδεδεμένα με το κυρίως τμήμα. Φυσικά, μπορεί να γίνει οποιαδήποτε επεξεργασία του αντικειμένου για το φινίρισμα της επιφάνειάς του π.χ. λείανση.



Εικόνα 31: Τα στάδια που ακολουθεί το αντικείμενο που εκτυπώνεται με την χρήση της BMD

❖ Εφαρμογή της τεχνολογίας BMD

Το σύστημα BMD είναι σε θέση να παράγει τμήματα 100 φορές ταχύτερα από τα σημερινά συστήματα παραγωγής προσθέτων, να χρησιμοποιεί σχετικά φθηνά υλικά και να καινοτομήσει σε εφαρμογές όπου η απόδοση είναι χαμηλή όπως για παράδειγμα η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία. Τα συστήματα BMD έχουν σχεδιαστεί για να παράγουν σύνθετα, υψηλής απόδοσης μεταλλικά μέρη για βιομηχανίες όπως των αυτοκινήτων και της βιομηχανίας των καταναλωτικών προϊόντων. Η BMW και Lowe είναι μεταξύ των μεγάλων επενδυτών της εταιρίας Desktop Metal που ανέπτυξε την τεχνολογία αυτή. Πέρα από τους κλάδους αυτούς πολλοί άλλοι θα μπορούσαν να ωφεληθούν που για διάφορους λόγους (π.χ. λόγω κόστους) μέχρι σήμερα η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλου ήταν απλησίαστη.

2.6.16 Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση αναστολής (Selective Inhibition Sintering)

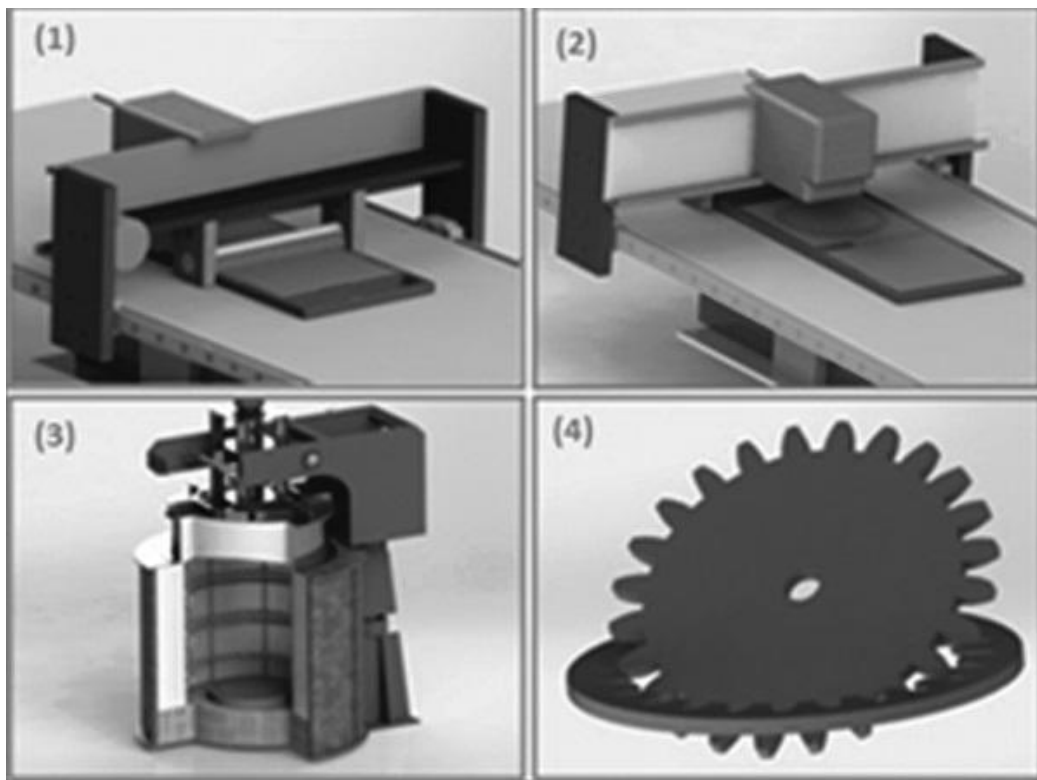
❖ Γενικά για την μέθοδο SIS

Η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης SIS αναπτύχθηκε από τον Dr. Behrokh Khoshnevis και την ομάδα του στο πανεπιστήμιο της νότιας Καλιφόρνιας. Η SIS είναι μια αρκετά καινοτόμος τεχνική αφού δεν βασίζεται στην τήξη των μετάλλων για την εκτύπωση μεταλλικών τμημάτων αλλά το αντίθετο. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται μια κεφαλή, παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σε ένα απλό εκτυπωτή χαρτιού, η οποία ψεκάζει ένα διάλυμα σε μια κλίνη που περιέχει μεταλλική σκόνη ώστε να δημιουργηθεί στην ουσία ένα καλούπι από το αντικείμενο που θέλουμε να εκτυπώσουμε. Στη συνέχεια το καλούπι αυτό τήκεται σε υψηλή θερμοκρασία δημιουργώντας το τελικό προϊόν. Λόγω του γεγονότος ότι δεν απαιτείται μια δαπανηρή γεννήτρια λέιζερ ή δέσμης ηλεκτρονίων αλλά αντίθετα χρειάζεται μια κεφαλή ικανή να ψεκάζει έναν υγρό αναστολέα σακχαρόζης ($C_{12}H_{22}O_{11}$), καθιστά την τεχνολογία αυτή πολύ πιο προσιτή για περισσότερο κοινό σε σχέση με άλλες μεθόδους. Επίσης, η ταχύτητα εκτύπωσης είναι αρκετά πιο γρήγορη αφού μόνο τα όρια του αντικειμένου εκτυπώνονται κι όχι ολόκληρο το αντικείμενο. Βέβαια η τεχνολογία αυτή απαιτεί κάποια βελτίωση προτού κυκλοφορήσει στην αγορά όπως στην ποιότητα και την συρρίκνωση της επιφανείας των τμημάτων που εκτυπώνονται και στο λογισμικό.

❖ Λειτουργία της τεχνολογίας SIS

Όπως και σε άλλες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης όπου τα αντικείμενα σχεδιάζονται με κάποιο πρόγραμμα CAD έτσι και στην μέθοδο SIS συμβαίνει το ίδιο. Στη συνέχεια τα αρχεία STL φορτώνονται στο λογισμικό του εκτυπωτή για να ξεκινήσει η διαδικασία. Αρχικά, μια μηχανή τροφοδότησης μεταλλικής σκόνης τοποθετεί ένα στρώμα σκόνης στην κλίνη εκτύπωσης. Έπειτα, μια πιεζοηλεκτρική κεφαλή εκτύπωσης τοποθετεί ένα υγρό διάλυμα το οποίο ενεργεί ως αναστολέας πυροσυσσωμάτωσης.

Ο αναστολέας αυτός αποτελείται από σακχαρόζη η οποία στη συνέχεια διαλύεται σε νερό με οργανικό επιφανειοδραστικό. Η κεφαλή εκτύπωσης ψεκάζει μόνο σε μία περιοχή που αντιπροσωπεύει το όριο της πραγματικής εκτύπωσης. Με το ψεκασμό του αναστολέα η μεταλλική σκόνη συσσωρεύεται και σκληραίνει. Το πάχος του κάθε στρώματος που δημιουργείται είναι 120μm. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε στρώμα του αντικειμένου που εκτυπώνεται δημιουργώντας τελικά το καλούπι του. Το καλούπι αυτό περιέχει τη μεταλλική σκόνη που στη συνέχεια αφού τοποθετηθεί σε φούρνο πυροσυσσωμάτωσης η σκόνη τήκεται και δημιουργείται το τελικό προϊόν.



Εικόνα 32: Τα 4 βήματα που ακολουθεί η διαδικασία SIS για την εκτύπωση μεταλλικών τμημάτων

❖ Η εξέλιξη της τεχνολογίας SIS

Η τεχνολογία SIS βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και εξελίσσεται ακόμη. Βέβαια, στα εργαστήρια τους οι επιστήμονες έχουν εκτυπώσει με επιτυχία διάφορα χάλκινα αντικείμενα χρησιμοποιώντας τον SIS 3D εκτυπωτή τους. Όπως υποστηρίζουν και οι ίδιοι, η μέθοδος SIS, είναι μια διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης υψηλής ανάλυσης και οικονομικά πολύ προσιτή. Βέβαια, ολόκληρη η διαδικασία εξελίσσεται ώστε το τελικό αποτέλεσμα που θα βγει στην αγορά να μπορέσει να σταθεί ανταγωνιστικά στις υπάρχουσες μεθόδους 3D μεταλλικής εκτύπωσης. Η εξέλιξη αυτή αποτελεί την βελτίωση του λογισμικού, τη

χρήση της τεχνολογίας και σε άλλα κράματα, την μελέτη του πορώδους και της αντοχής των τελικών προϊόντων όπως και της συστολικής συρρίκνωσης. Επίσης, η υπερπλήρωση του υγρού αναστολέα έχει ως αποτέλεσμα επιφανειακές ανωμαλίες σε επιφάνειες που βλέπουν προς τα πάνω των τμημάτων που εκτυπώνονται, έτσι σχεδιάζεται μια ρύθμιση της εναπόθεσης αναστολέα για την αποφυγή αυτών των ελαττωμάτων.

2.6.17 Τεχνολογία υγρής μεταλλικής εκτύπωσης (**Liquid Metal Jet Printing**)

❖ **Γενικά για την τεχνολογία LMJP**

Η τεχνολογία LMJP 3D μεταλλικής εκτύπωσης η οποία αναπτύχθηκε και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τη Vader Systems, χρησιμοποιεί μια μέθοδο μαγνητούδροδυναμικού συστήματος Inkjet για την δημιουργία 3D τμημάτων αλουμινίου με μεγαλύτερη ταχύτητα, ασφάλεια και αποτελεσματικότητα από τις τρέχουσες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν μεταλλικές σκόρες. Αυτό το πετυχαίνει με την τήξη σύρματος αλουμινίου σε κεραμικό ακροφύσιο και έπειτα την εκτόξευση του σε υγρά σταγονίδια σε συχνότητες 500-1000Hz. Η τεχνολογία αυτή βέβαια δεν περιορίζεται στην εκτύπωση αλουμινίου ή σε αυτές τις ταχύτητες εκτόξευσης. Ο πειραματικός εκτυπωτής της Vader εκτυπώνει με αλουμίνιο 4043, ενώ τα 6061,365 και 7075 κράματα αλουμινίου και χαλκός βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Η Vader έχει πλέον κινηθεί πέρα από τον πειραματικό εκτυπωτή MK1 και αναπτύσσει νέα συστήματα και τεχνολογίες για την 3D μεταλλική εκτύπωση.

❖ **Τρόπος λειτουργίας της L MJJ**

Η τεχνολογία LMJP είναι εκπληκτικά απλή. Αρχικά, ένα μεταλλικό σύρμα τροφοδοτείται σε ένα θάλαμο κεραμικής κατασκευής όπου θερμαίνεται στους 1200°C μέχρι όπου λιώσει και υγροποιηθεί. Στη συνέχεια το τετηγμένο μέσο προωθείται ηλεκτρομαγνητικά από ένα ακροφύσιο όπου το στόμιο του έχει διάμετρο 300μm. Το σύστημα της Vader παρέχει 1000 σταγονίδια ανά δευτερόλεπτο με μέγεθος 200 micron και είναι ικανό να εναποθέσει 1 lb (0.454 Kg) ανά ώρα σε ένα εύρος κατασκευής 12X12X12 in. Η διαδικασία μιμείται την τεχνολογία ψεκασμού μελάνης και βασίζεται στις αρχές του χειρισμού των αγώγιμων υγρών με τη χρήση μαγνητικού πεδίου. Καθώς τα σταγονίδια εκτοξεύονται από το ακροφύσιο με ταχύτητα περίπου 2,5m/s, προσπίπτουν στην επιφάνεια του κινούμενου υποστρώματος, που αποτελεί την πλατφόρμα εκτύπωσης των αντικειμένων. Η πλατφόρμα κινείται σύμφωνα με το σχέδιο του τμήματος που εκτυπώνεται. Τα αντικείμενα και σε αυτή τη διαδικασία εκτυπώνονται στρώμα με στρώμα.



Εικόνα 33: Μοντέλο 3D μεταλλικού εκτυπωτή της Vader

❖ Εφαρμογή και εξέλιξη της τεχνολογίας LMJP από τη Vader

Η εταιρία Vader έχει εξελίξει τον πειραματικό εκτυπωτή της MK1 σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα μεταλλικής εκτύπωσης, τον οποίο ονόμασε Vader Polaris. Ταυτόχρονα εξέλιξε και νέα συστήματα που είτε μπορούν να ενσωματωθούν σε είδη υπάρχουσες τεχνολογίες μηχανικής κατεργασίας είτε για την παραγωγή μεταλλικών σκονών. Αυτά είναι, το υποσύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης υγρού μετάλλου Magnet-o-Jet και το σύστημα Ares Microsphere για την παραγωγή μικροσφαιριδίων. Το υποσύστημα Magnet-o-Jet έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί σε υπάρχουσες τεχνολογίες κατασκευής, όπως για παράδειγμα σε ένα κέντρο κατεργασίας CNC, δημιουργώντας υβριδικά συστήματα κατασκευής μεταλλικών αντικειμένων. Οι επιλογές υλικών για το υποσύστημα περιλαμβάνουν σύρματα συγκόλλησης αλουμινίου 4043, 4047 και 1100 ενώ υπό ανάπτυξη βρίσκεται η μέθοδος για την χρήση χαλκού και κραμάτων αλουμινίου 365, 6061 και 7075. Το σύστημα Ares Microsphere βασισμένο στην τεχνολογία Magnet-o-Jet έχει σχεδιαστεί για την παραγωγή μεταλλικής σκόνης για τα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιούν μεταλλικές σκόνες. Το μέγεθος των κόκκων αυτών είναι 160μm με δεδομένη τυπική απόκλιση 10μm. Βέβαια, το σύστημα στοχεύει σε μικρότερες παρτίδες υλικού ενδεχομένως χρήσιμες για ερευνητικές ομάδες. Η Vader Systems υποστηρίζει ότι οι λύσεις που προσφέρει για την μεταλλική εκτύπωση είναι κατάλληλες για μια σειρά αγορών όπως η βαριά βιομηχανία, η αυτοκινητοβιομηχανία, η βιομηχανία της άμυνας και των καταναλωτικών προϊόντων.

3. ■ Εμπορικές μηχανές για την τρισδιάστατη μεταλλική εκτύπωση

3.1 3D εκτυπωτές μετάλλων για την διαδικασία SLM

- Η εταιρία **Shining 3D** παράγει δυο μοντέλα τρισδιάστατων εκτυπωτών μετάλλων τεχνολογίας SLM αυτά είναι το **EP-M100T** και το **EP-M250** τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

EP-M100T

Χαρακτηριστικά:

- 1) Υψηλή ποιότητα εκτύπωσης που οφείλεται στην μικροσκοπική ακτίνα λέιζερ και το λεπτό στρώμα σκόνης που κατανέμεται στην πλάκα.
- 2) Ευφυής μέθοδος κατανομής της μεταλλικής σκόνης και μεγαλύτερη ταχύτητα σάρωσης.
- 3) Έλεγχος του οξυγόνου μέσα στον θάλαμο εκτύπωσης που εξασφαλίζουν καλύτερη ποιότητα των αντικειμένων που εκτυπώνονται.
- 4) Μεγάλη γκάμα υλικών που μπορεί να εκτυπώσει όπως ανοξειδωτος χάλυβας, χάλυβας μαρτενγήρανσης, κράμα νικελίου υψηλής θερμοκρασίας, κράμα κοβαλτίου χρωμίου, χάλυβας υψηλής αντοχής και χαλκός.
- 5) Ταχύτητα σάρωσης 8 m/s.
- 6) Πάχος στρώσης 0,015mm – 0.05mm.
- 7) Ο μέγιστος όγκος των αντικειμένων που μπορεί να εκτυπώσει είναι 120 x 120 x 80 mm.
- 8) Ο όγκος του εκτυπωτή είναι 940 x 1300 x 1980 mm (Π x Υ x Β) και το βάρος του 500 Kg.



Εικόνα 34: Ο EP-M100T 3D μεταλλικός εκτυπωτής

EP-M250

Χαρακτηριστικά:

- 1) Χρησιμοποιεί λέιζερ χαμηλής ισχύος που μπορεί να λιώσει ταχύτατα τις μεταλλικές σκόνες.
- 2) Μπορεί να εκτυπώσει σύνθετες μεταλλικές δομές χωρίς κάποια μηχανική κατεργασία.
- 3) Τα εκτυπωμένα μεταλλικά μέρη έχουν σχεδόν 100% πυκνότητα.
- 4) Η γκάμα των υλικών που μπορεί να εκτυπώσει είναι Ανοξειδωτος χάλυβας, χάλυβας μαρτενγήρανσης, κράμα νικελίου υψηλής θερμοκρασίας, τιτάνιο, αλουμίνιο, χάλυβας υψηλής αντοχής, cobalt chromium, χαλκός, βολφράμιο.
- 5) Η ταχύτητα σάρωσης της επιφάνειας εκτύπωσης είναι 8 m/s.
- 6) Πάχος στρώσης 0.02 – 0.1 mm.
- 7) Ο μέγιστος όγκος των αντικειμένων που μπορεί να εκτυπώσει είναι 250 x 250 x 300 mm.
- 8) Ο όγκος του εκτυπωτή είναι 2500 x 1000 x 2100 mm (Π x Υ x Β) και το βάρος του 1350 Kg.



Εικόνα 35: Ο EP-M250 3D μεταλλικός εκτυπωτής

- Η **SLM Solution** έχει στην γκάμα της τρία μοντέλα τα οποία είναι τα **SLM@500**, **SLM@280 2.0** και **SLM@125**.

SLM@500

Χαρακτηριστικά:

- 1) Παρέχει την κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τεχνολογία πολλαπλών ακτινών με 4 λέιζερ IPG που λειτουργούν ταυτόχρονα.
- 2) Υψηλή παραγωγικότητα.
- 3) Πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία διαχείρισης της μεταλλικής σκόνης.
- 4) Τριπλάσια παροχή αδρανούς αερίου.
- 5) Μπορεί να εκτυπώσει όλους τους τύπους μεταλλικών σκονών.
- 6) Ταχύτητα σάρωσης: 10 m/s.
- 7) Το πάχος της κάθε στρώσης κυμαίνεται από 20 μm έως 75 μm .
- 8) Ο μέγιστος όγκος των αντικειμένων που μπορεί να εκτυπώσει είναι 500 x 280 x 365 mm^3 .
- 9) Οι διαστάσεις της μηχανής είναι 5200mm x 2800mm x 2700mm (Μαζί με PSV & PRS).
- 10) Βάρος της μηχανής: 2400 Kg με σκόνη – 3100 Kg χωρίς σκόνη.
- 11) Ποσοστό κατασκευής έως 171 cm^3 / h .



Εικόνα 36: Ο SLM@500 3D μεταλλικός εκτυπωτής

SLM®280 2.0

Χαρακτηριστικά:

- 1) Διαθέτει την πατενταρισμένη τεχνολογία των πολλαπλών ακτινών με 2 λέιζερ.
- 2) Είναι εξοπλισμένο με 2 + 1 φίλτρα εξασφαλίζοντας χαμηλή συγκέντρωση μικροσωματιδίων.
- 3) Θερμαινόμενη πλάκα υποστρώματος με θερμοκρασία που φτάνει τους 550 °C για υλικά όπως το τιτάνιο για την αποφυγή εσωτερικών καταπονήσεων και ρωγμών.
- 4) Χρησιμοποιεί όλους τους τύπους των μεταλλικών σκονών.
- 5) Ταχύτητα σάρωσης: 10 m/s.
- 6) Το πάχος της κάθε στρώσης κυμαίνεται από 20 μm έως 75μm.
- 7) Ο μέγιστος όγκος των αντικειμένων που μπορεί να εκτυπώσει είναι 280 x 280 x 365 mm³
- 8) Οι διαστάσεις της μηχανής είναι 2600 mm x 1200 mm x 2700 mm.
- 9) Βάρος μηχανής: 1300 Kg με σκόνη – 1800 Kg χωρίς σκόνη.
- 10) Ποσοστό κατασκευής έως 88 cm³ / h.



Εικόνα 37:Ο SLM@280 2.0 μεταλλικός εκτυπωτής

SLM@125

Χαρακτηριστικά:

- 1) Εξοπλισμένο με ένα λέιζερ.
- 2) Οικονομική λύση αλλά παράγει υψηλής ποιότητας μεταλλικά μέρη.
- 3) Παρέχει τα υψηλότερα ποσοστά κατασκευής στην κατηγορία του χάρης την κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αμφίδρομη επίστρωση.
- 4) Κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας λειτουργία ρύθμισης της ροής του αερίου διεργασίας.
- 5) Ταχύτητα σάρωσης: 10 m / s
- 6) Το πάχος της κάθε στρώσης κυμαίνεται από 20 μm έως 75 μm .
- 7) Ο μέγιστος όγκος των αντικειμένων που μπορεί να εκτυπώσει είναι 125 x 125 x 125 mm^3 .
- 8) Οι διαστάσεις της μηχανής είναι 1400 mm x 900mm x 2460mm.
- 9) Βάρος της μηχανής: 750 Kg με σκόνη – 700Kg χωρίς σκόνη.
- 10) Ποσοστό κατασκευής έως 25 cm^3 / h .



Εικόνα 38: Ο SLM@125 3D μεταλλικός εκτυπωτής

3.2 Εκτυπωτές μετάλλων για την διαδικασία EBM

- Η εταιρία Arcam διαθέτει τέσσερα μοντέλα 3D εκτυπωτών μετάλλων τεχνολογίας EBM τα οποία είναι το **Arcam Spectra H**, το **Arcam Q10plus**, το **Arcam Q20plus** και το **Arcam A2X** τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Arcam Spectra H

Χαρακτηριστικά:

- 1) Διαθέτει μια εκτεταμένη πλατφόρμα που δίνει τη δυνατότητα εκτύπωσης μεγαλύτερων τμημάτων και την παραγωγή περισσότερων εξαρτημάτων ταυτόχρονα.
- 2) Διαθέτει επίσης και υψηλή θερμική ικανότητα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιήσουν κράματα επιρρεπή σε ρωγμές όπως το τιτάνιο.
- 3) Διατηρεί την ακεραιότητα της σκόνης για βέλτιστη παραγωγή τμημάτων.
- 4) 100% αύξηση ισχύος και έως και 50% ταχύτερους χρόνους κατασκευής.
- 5) Το αυτοματοποιημένο σύστημα μειώνει την εξάρτηση του χειριστή και εξασφαλίζει το βέλτιστο έλεγχο της ποιότητας και απλοποιημένη λειτουργία.
- 6) Λιγότερος χρόνος για την παραγωγή εξαρτημάτων υψηλότερης ποιότητας.
- 7) Διαστάσεις πλατφόρμας κατασκευής: Διάμετρος 250mm και ύψος 430mm.
- 8) Αυτόματο σύστημα κλειστού βρόγχου για την κατανομή και την ανάκτηση της μεταλλικής σκόνης.
- 9) Διαθέτει κινητές ασπίδες θερμότητας για βελτιωμένη μόνωση.
- 10) Σύστημα αναρρόφησης και μαγνητικοί διαχωριστές για μέγιστο έλεγχο της σκόνης.



Εικόνα 39: Ο 3D μεταλλικός εκτυπωτής Arcam Spectra H της Arcam EBM

Arcam Q10plus

Χαρακτηριστικά:

- 1) Ίδανικός εκτυπωτής για την παραγωγή ιατρικών εμφυτευμάτων.
- 2) Αποτελεσματική διαχείριση της μεταλλικής σκόνης.
- 3) Παρέχει ευκολία στη χρήση για τον χειριστή.
- 4) Τελευταίας τεχνολογίας συσκευή παραγωγής της δέσμης ηλεκτρονίων (3000W).
- 5) Μέγεθος εκτυπωτή: 2060 mm x 1066 mm x 2680 mm.
- 6) Μέγιστος όγκος τμήματος που μπορεί να εκτυπώσει: 200 x 200 x 180 mm.
- 7) Βάρος μηχανής: 1681 Kg.



Εικόνα 40: Ο Q10plus εκτυπωτής της Arcam EBM

Arcam Q20plus

Χαρακτηριστικά:

- 1) Έχει κατασκευαστεί ειδικά για οικονομικά αποδοτική παραγωγή αεροδιαστημικών εξαρτημάτων.
- 2) Τελευταίας τεχνολογίας συσκευή παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων (3000W).
- 3) Εύκολη χρήση από τον χειριστή.
- 4) Αποτελεσματική διαχείρισης της μεταλλικής σκόνης.
- 5) Μέγιστος όγκος τμήματος που μπορεί να εκτυπώσει: 350 x 380(Δ x Υ).
- 6) Μέγεθος μηχανής: 2400 X 1300 X 2945 mm³
- 7) Βάρος Μηχανής: 2900 Kg



Εικόνα 41: Ο Arcam Q20plus 3D μεταλλικός εκτυπωτής

Arcam A2X

Χαρακτηριστικά:

- 1) Έχει σχεδιαστεί για την επεξεργασία κραμάτων τιτανίου καθώς και για υλικά που απαιτούν αυξημένες θερμοκρασίες επεξεργασίας όπως αργίλιο τιτανίου και κράμα 718.
- 2) Κατάλληλος για την έρευνα και την ανάπτυξη υλικών.
- 3) Θάλαμος κατασκευής ειδικά σχεδιασμένος για να αντέχει σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες έως και 1000°C.
- 4) Μέγιστος όγκος που μπορεί να εκτυπώσει: 200 X 200 X 380 mm³
- 5) Μέγεθος μηχανής: 1850 X 900 X 2200 mm³
- 6) Βάρος μηχανής: 1700 Kg



Εικόνα 42: Ο Arcam A2X 3D μεταλλικός εκτυπωτής

- Η σειράς, **EBAM® 68**, **EBAM® 88**, **EBAM® 110**, **EBAM® 150**, **EBAM® 300** αποτελούν τις προτάσεις της Sciaky για την παραγωγή υψηλής απόδοσης 3D μεταλλικές κατασκευές.

Υλικά:

Τα είδη των μετάλλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα συστήματα είναι τα κράμματα τιτανίου, βολφράμιο, inconel 718 & 625, ταντάλιο, νιόβιο, αλουμίνιο 4043 & 2319, χάλυβας 4340, κράμματα ζirkονίου, νικέλιο χαλκού και επιπλέον για την σειρά EBAM®300 ο ανοξειδωτος χάλυβας .

Χαρακτηριστικά συστημάτων Sciaky:

- 1) Αποκλειστική διαδικασία διπλής τροφοδοσίας της EBAM που επιτρέπει την τροφοδοσία δυο διαφορετικών μεταλλικών κραμάτων σε ένα ενιαίο τήγμα.
- 2) Πατενταρισμένη τεχνολογία κλειστού βρόχου IRISS (Interlayer Real-time Imagine & Sensing System) που εξασφαλίζει επαναληψιμότητα και ανιχνευσιμότητα της διαδικασίας.
- 3) Τα συστήματα εναπόθεσης της δέσμης ηλεκτρονίων της Sciaky μεγιστοποιούν τους ρυθμούς εναπόθεσης υλικών κατά 3,18 έως 11,34 Kg ανά ώρα.
- 4) Πέρα από την 3D εκτύπωση μεταλλικών τμημάτων, τα συστήματα EBAM μπορούν να επισκευάσουν εξαρτήματα επεκτείνοντας την διάρκεια ζωής τους.
- 5) Τα συστήματα EBAM της Sciaky διατίθενται σε μεγάλης κλίμακας (EBAM 150 & 110) και μεσαίας κλίμακας(EBAM 88 & 68) διαμορφώσεις αλλά και σε “Mega – Scale” (EBAM 300).

Διαστάσεις συστημάτων:

Μοντέλο	Διαστάσεις εκτυπωτή	Διαστάσεις τμημάτων που μπορούν να εκτυπωθούν
EBAM 68	1727mm x 1727mm x 2794mm	711mm x 635mm x 1600mm
EBAM 88	2235mm x 2235mm x 2794mm	1219mm x 889mm x 1600mm
EBAM 110	2794mm x 2794mm x 2794mm	1778mm x 1194mm x 1600mm
EBAM 150	3810mm x 3810mm x 3048mm	2794mm x 1575mm x 1575mm
EBAM 300	7620mm x 2743mm x 3353mm	5791mm x 1219mm x 1219mm

3.3 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας NPJ

- Η XJet, που ανέπτυξε και κατοχύρωσε την τεχνολογία NanoParticle Jetting, διαθέτει δυο μηχανές στην γκάμα της, την **XJet Carmel 700** και την **XJet Carmel 1400**.

XJet Carmel 700

Χαρακτηριστικά:

- 1) Εμβαδόν πλατφόρμας κατασκευής: 500mm x 140mm (700cm²)
- 2) Διαστάσεις μηχανής: 310cm x 212cm x 185cm
- 3) Βάρος μηχανής: 2.760 Kg

XJet Carmel 1400

Χαρακτηριστικά:

- 1) Εμβαδόν πλατφόρμας κατασκευής: 500mm x 280mm (1400cm²)
- 2) Μέγιστο ύψος αντικειμένων που μπορούν να εκτυπωθούν: 200 mm
- 3) Διαθέτει και εφαρμογή για κινητό.
- 4) Διαστάσεις μηχανής: 310 cm x 212 cm x 185 cm
- 5) Βάρος μηχανής: 3.000 Kg



Εικόνα 43: Εκτυπωτής τεχνολογίας NPJ της XJet

3.4 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας DMLS

- Οι τρισδιάστατοι μεταλλικοί εκτυπωτές τεχνολογίας DMLS της EOS είναι οι **EOS M 100**, **EOS M 290**, **EOS M 400**, **EOS M 400 – 4**(με 4 λέιζερ), **EOSINT M 280**, **PRECIOUS M 080**.

Χαρακτηριστικά:

Μοντέλο	Διαστάσεις πλατφόρμας κατασκευής	Διαστάσεις εκτυπωτή	Βάρος εκτυπωτή
EOS M 100	∅ 100 mm x 95 mm	800 mm x 950 x 2250mm	580 Kg
EOS M 400	400mm x 400mm x 400mm	4.181mm x 1.613mm x 2.355mm	4.635 Kg
EOS M 400-4	400mm x 400mm x 400mm	4.181mm x 1.613mm x 2.355mm	4.835 kg
EOSINT M 280	250mm x 250mm x 325mm	2.200mm x 1.070mm x 2.290mm	1.250 Kg
EOS M 290	250mm x 250mm x 325mm	2.500mm x 1.300mm x 2.900mm	1.250 Kg
PRECIOUS M 080	∅ 80 mm x 95 mm	800mm x 950mm x 2.250mm	580 Kg



Εικόνα 44: Δεξιά ο EOS M 100, στη μέση ο EOS M 400 και δεξιά ο EOS M 400-4



Εικόνα 45: Αριστερά ο EOSINT M 280, στη μέση ο EOS M 290 και δεξιά ο PRECIOUS M 080

- Η εταιρεία 3D Systems, ο πρόδρομος της τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι ο κατασκευαστής των **ProX DMP Dental 100**, **ProX DMP Flex 100**, **ProX DMP 200 Dental**, **ProX DMP 200**, **ProX DMP 300** και **ProX DMP 320** 3D συστημάτων τεχνολογίας DMLS.

Χαρακτηριστικά:

ProX DMP Dental 100, ProX DMP Flex 100

- Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μεταλλικών οδοντικών προσθέτων (γέφυρες κτλ.)
- Μέγιστες διαστάσεις αντικειμένων που εκτυπώνουν: 100mm x 100mm x 80mm
- Χρήση πιστοποιημένων υλικών CoCr που δεν περιέχουν Ni
- Ισχύς λέιζερ: 100 W

ProX DMP 200 Dental, ProX DMP 200

- Έχει σχεδιαστεί για την παραγωγή υψηλής ποιότητας μεταλλικών οδοντικών προσθέτων με μεγάλη ταχύτητα
- Μέγιστες διαστάσεις αντικειμένων που εκτυπώνει: 140mm x 140mm x 125mm
- Χρήση πιστοποιημένων υλικών CoCr που δεν περιέχουν Ni

ProX DMP 300

- Μέγιστες διαστάσεις αντικειμένων που εκτυπώνει: 250mm x 250mm x 330mm
- Ιδανικό για την παραγωγή τμημάτων υψηλής ποιότητας με μεγαλύτερες ταχύτητες
- Διαθέτει αυτόματο σύστημα φόρτωσης και ανακύκλωσης υλικών



Εικόνα 46: Αριστερά ο ProX DMP Dental-Flex 100, δεξιά ο ProX DMP 200 - Dental και κάτω ο ProX DMP 300 3D εκτυπωτής

ProX DMP 320

- i. Υψηλής απόδοσης 3D μεταλλικός εκτυπωτής που προσφέρει πολύ πυκνά και καθαρά μεταλλικά τμήματα
- ii. Μέγιστες διαστάσεις αντικειμένων που εκτυπώνει: 275mm x 275mm x 420mm
- iii. Γρήγορη εναπόθεση σκόνης διπλής κατεύθυνσης



Εικόνα 47: Ο ProX DMP 320 μεταλλικός εκτυπωτής

3.5 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας CSMP

- Η Αυστραλιανή SPEED3D έχει κατασκευάσει τον LIGHTSPEED3D τρισδιάστατο εκτυπωτή τεχνολογίας CSMP.

Χαρακτηριστικά:

- 1) Υλικά που μπορεί να εκτυπώσει: Αλουμίνιο, χαλκός
- 2) Η διαδικασία είναι πολύ οικονομική.
- 3) Μπορεί να εκτυπώσει ένα αντικείμενο σε μόλις 10 λεπτά.
- 4) Ιδανικός για εργασιακό περιβάλλον.
- 5) Ρομποτικός βραχίονας 6 αξόνων.



Εικόνα 48: Ο LIGHTSPEED3D μεταλλικός εκτυπωτής της SPEED3D

- Η Αυστραλιανή επίσης εταιρεία Titomic κατασκεύασε ένα μεταλλικό 3D εκτυπωτή ικανό να εκτυπώσει ακόμα και φτερά αεροπλάνων. Ο γιγάντιος αυτός εκτυπωτής είναι ικανός να εκτυπώσει εξαρτήματα μήκους έως 9 μέτρων, πλάτους 3 μέτρων και ύψους 1,5 μέτρων.



Εικόνα 49: Ο γιγάντιος 3D μεταλλικός εκτυπωτής της Titomic

3.6 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας MBJ

- Η ExOne διαθέτει δυο εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας MBJ οι οποίοι είναι ο **M-PRINT** και ο **M-FLEX**. Τα υλικά που χρησιμοποιούν προς το παρόν τα συστήματα της ExOne είναι, ανοξείδωτος χάλυβας (420, 316, 316L, 17-4PH), Inconel (625, 718), κράματα σιδήρου-χρωμίου-αλουμινίου, κράμα κοβαλτίου-χρωμίου και καρβίδιο βολφραμίου.

M-PRINT - M-FLEX

Χαρακτηριστικά:

- 1) Μέγιστες διαστάσεις αντικειμένων που μπορεί να εκτυπώσει: 400mm x 250mm x 250mm
- 2) Ταχύτητα εκτύπωσης: 30 – 60 δευτερόλεπτα / στρώμα
- 3) Ελάχιστο πάχος στρώσης: 0.15mm
- 4) Διαστάσεις εκτυπωτή: 1675mm x 1400mm x 1855mm
- 5) Βάρος εκτυπωτή: 1.020 Kg



Εικόνα 50: Αριστερά ο M-FLEX μεταλλικός εκτυπωτής και δεξιά ο M-PRINT

- Το περασμένο χρόνο η Digital Metal ξεκίνησε την παραγωγή ενός 3D μεταλλικού εκτυπωτή τεχνολογίας MBJ τον οποίο ονόμασε **DM P2500**.

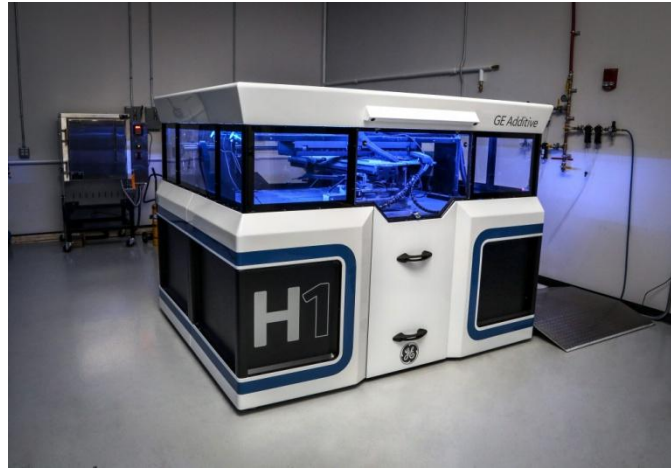
Χαρακτηριστικά:

- 1) Υλικά που μπορεί να εκτυπώσει: Ανοξείδωτο χάλυβα (216L, 17-4PH) και κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V.
- 2) Μέγιστες διαστάσεις αντικειμένου που μπορεί να εκτυπώσει: 203mm x 120mm x 69mm
- 3) Παραγωγικότητα: 60 - 100 cm³ / h
- 4) Διαστάσεις μηχανής: 3300mm x 1000 x 1700mm
- 5) Βάρος μηχανής: 2.250 Kg



Εικόνα 51: Ο 3D μεταλλικός εκτυπωτής DM P2500 τεχνολογίας MBJ

- Στα μέσα του 2018 η GE Additive θα κυκλοφορήσει το πρώτο 3D μεταλλικό εκτυπωτή για την εταιρεία, ο οποίος θα χρησιμοποιεί τεχνολογία MBJ, με όνομα **H1**. Τα χαρακτηριστικά του εκτυπωτή δεν έχουν ανακοινωθεί επίσημα, ωστόσο η GE ισχυρίζεται πως ο H1 θα μπορεί να εκτυπώσει μεγάλα τμήματα και μια σειρά υλικών όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, νικέλιο και κράματα σιδήρου.



Εικόνα 52: Ο H1 μεταλλικός εκτυπωτής της GE Additive

3.7 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας DED και LENS

- Η Γαλλική BEAM διαθέτει τρία μοντέλα εκτυπωτών μετάλλων τεχνολογίας DED, το **Modulo 250**, το **Modulo 400** και το **Magic 800**.

Modulo 250

Χαρακτηριστικά:

- 1) Διαθέτει μηχανή 5 αξόνων.
- 2) Μέγεθος αντικειμένου που μπορεί να εκτυπώσει: 400mm x 250mm x 300mm
- 3) Πλάτος απόθεσης: 0,8 – 1,2 mm
- 4) Ποσοστό κατασκευής: 10 – 70 cm³ / h



Εικόνα 53: Ο 3D μεταλλικός εκτυπωτής Modulo 250

- **Modulo 400**

Χαρακτηριστικά:

- 1) Διαθέτει μηχανή 5 αξόνων.
- 2) Μέγεθος αντικειμένου που μπορεί να εκτυπώσει: 600mm x 400mm x 400mm
- 3) Πλάτος απόθεσης: 0,8 – 1,2 mm
- 4) Ποσοστό κατασκευής: 10 – 70 cm³ / h



Εικόνα 54: Ο Modulo 400 3D μεταλλικός εκτυπωτής

- **Magic 800**

Χαρακτηριστικά:

- 1) Διαθέτει μηχανή 5 αξόνων
- 2) Διαστάσεις αντικειμένων που μπορεί να εκτυπώσει: 1200mm x 800mm x 800mm
- 3) Πλάτος απόθεσης: 0,8 – 1,2 mm
- 4) Ποσοστό κατασκευής: 10 – 70 cm³ / h



Εικόνα 55: Ο Magic 800 3D μεταλλικός εκτυπωτής

- Μια άλλη Αμερικάνικη εταιρεία, η Optomec, που έχει αναπτυχθεί από τον κλάδο της άμυνας παρέχει εξοπλισμό που μπορεί να προστεθεί σε υπάρχουσες μηχανές CNC ή να χρησιμοποιηθεί ως ανεξάρτητο σύστημα. Τα συστήματα αυτά είναι, ο **LENS 450**, ο **LENS MR-7** και ο **LENS 850-R**.

LENS 450

Χαρακτηριστικά:

- 1) Διαστάσεις αντικειμένων που μπορεί να εκτυπώσει: 100mm x 100mm x 100mm
- 2) Σύστημα ελέγχου CNC τριών αξόνων
- 3) Σύστημα καθαρισμού θαλάμου εργασίας με αργό
- 4) Ενσωματωμένος τροφοδότης μεταλλικής σκόνης



Εικόνα 56: Ο LENS 450 3D μεταλλικός εκτυπωτής της Optomec

LENS MR-7

Χαρακτηριστικά:

- 1) Διαστάσεις αντικειμένων που μπορεί να εκτυπώσει: 300mm x 300mm x 300mm
- 2) Σύστημα ελέγχου CNC τριών αξόνων
- 3) Ενσωματωμένοι τροφοδότες δύο μεταλλικών σκονών
- 4) Υβριδικό σύστημα



Εικόνα 57: Ο LENS MR-7 3D μεταλλικός εκτυπωτής της Optomec

LENS 850-R

Χαρακτηριστικά:

- 1) Διαστάσεις αντικειμένων που μπορεί να εκτυπώσει: 900mm X 1500mm X 900mm
- 2) Σύστημα ελέγχου CNC 5 αξόνων
- 3) Ενσωματωμένοι τροφοδότες δύο μεταλλικών σκονών

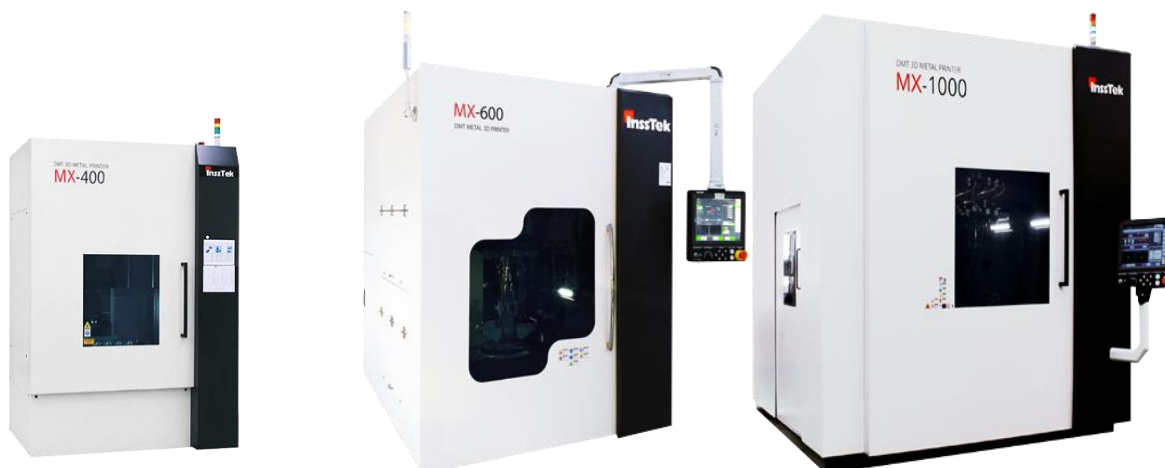


Εικόνα 58: Ο LENS 850-R 3D μεταλλικός εκτυπωτής της Optomec

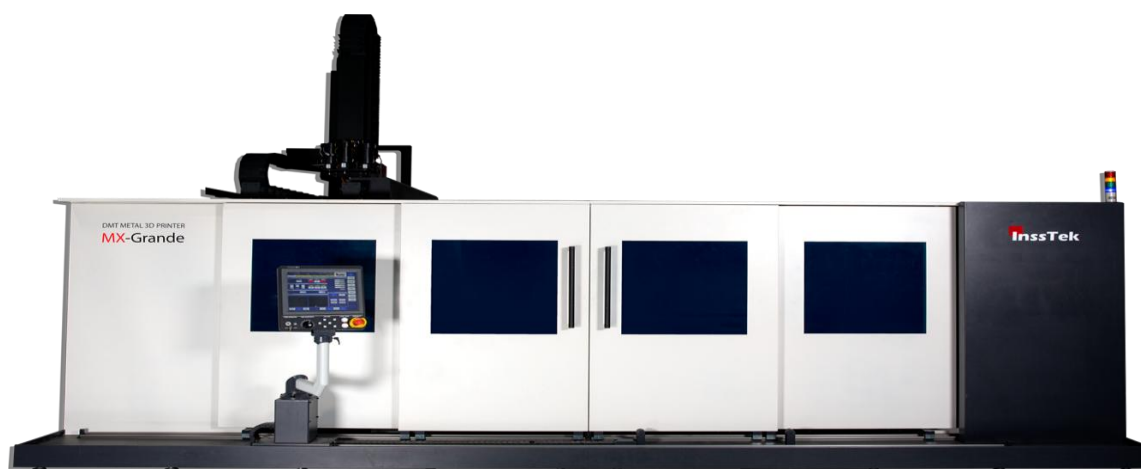
- Μια εταιρία της Νότιας Κορέας, η InssTek, αναπτύσσει προσαρμοσμένες μονάδες για βιομηχανικές εφαρμογές και μια σειρά από μικρά έως μεγάλα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλου. Τα συστήματα είναι τα εξής: **MX-400**, **MX-600**, **MX-1000**, **MX-Grande**, **MPC** και **MX-Mini**.

Χαρακτηριστικά:

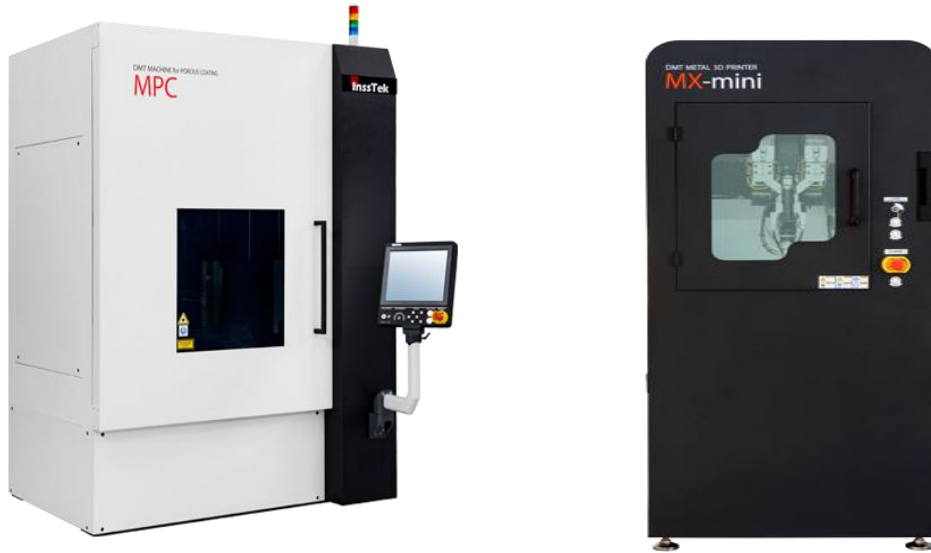
Μοντέλο	Υλικά που χρησιμοποιεί	Αριθμός αξόνων CNC	Διαστάσεις αντικειμένου που εκτυπώνει	Βάρος μηχανής
MX-400	Inconel, Χάλυβα	3 ή 5	400mm x 450mm x 300mm	4.000 Kg
MX-600	Inconel, Χάλυβα	3 ή 5	450mm x 600mm x 350mm	4.500 Kg
MX-1000	Inconel, Χάλυβα	3 ή 5	1.000mm x 800mm x 650mm	6.000 Kg
MX-Grande	Ανάλογα με τις ανάγκες του πελάτη	6	4.000mm x 1.000mm x 1.000mm	17.500 Kg
MPC	Τιτάνιο	6	-	3.000 Kg
MX-Mini	-	5	200mm x 200mm x 200mm	300 Kg



Εικόνα 59: Αριστερά ο MX-400, στη μέση ο MX-600 και δεξιά ο MX-1000 μεταλλικοί εκτυπωτές της InssTek



Εικόνα 60: Ο X-Grande 3D μεταλλικός εκτυπωτής της InssTek



Εικόνα 61: Αριστερά ο MPC και δεξιά ο MX-Mini μεταλλικοί εκτυπωτές της InssTek

3.8 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας EBF

- Η διαδικασία EBF αναπτύχθηκε από την NASA για την κατασκευή μεταλλικών τμημάτων σε περιβάλλοντα μηδενικής βαρύτητας όπου και χρησιμοποιείται. Η EBF δεν άμεσα διαθέσιμη για το ευρύ κοινό αλλά μπορεί να είναι στο εγγύς μέλλον.



Εικόνα 62: Η παρουσίαση του πρωτότυπου 3D μεταλλικού εκτυπωτή τεχνολογίας EBF από τη NASA στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό

3.9 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας LMD

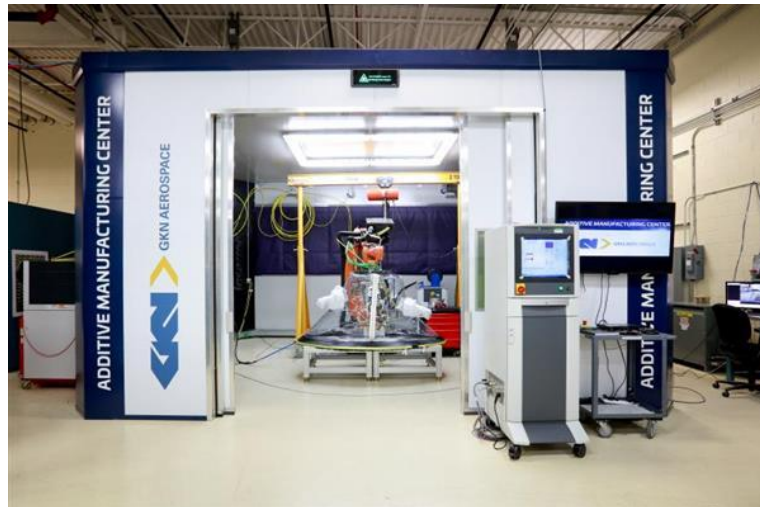
- Η Αμερικάνικη εταιρεία Trumpf με έδρα τη Γερμανία παράγει δυο συστήματα εκτύπωσης μεταλλικών αντικειμένων τεχνολογίας LMD. Αυτά είναι: **TruLaser Cell 3000**, **TruLaser Cell 7020** και **TruLaser Cell 7040**.

Μοντέλο	Μέγιστη ικανότητα εκτύπωσης (mm)	Ενέργεια εξόδου λέιζερ	Ακρίβεια περιστροφικού άξονα Β	Ακρίβεια αξόνων X,Y,Z
TruLaser Cell 3000	800 x 600 x 400	8 kW	0.01 °	0.01mm
TruLaser Cell 7020	1540 x 1540 x 520	2 kW – 6 kW	0.015 °	0.08mm
TruLaser Cell 7040	3540 x 1540 x 520	2 kW – 6 kW	0.015 °	0.08mm



Εικόνα 63: Πάνω αριστερά ο TruLaser Cell 3000, δεξιά ο TruLaser Cell 7020 και κάτω ο TruLaser Cell 7040

- Η GKN Aerospace σε συνεργασία με το εθνικό εργαστήριο του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ Oak Ridge, έχει αναπτύξει ένα 3D μεταλλικό εκτυπωτή τεχνολογίας LMD για την παραγωγή μεγάλων εξαρτημάτων αεροδιαστημικής από τιτάνιο.

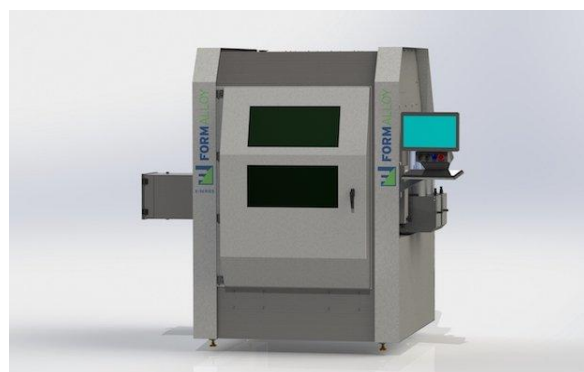


Εικόνα 64: Το σύστημα 3D εκτύπωσης μεταλλικών τμημάτων αεροσκαφών της GKN τεχνολογίας LMD

- Η Formallooy διαθέτει δύο σειρές συστημάτων τεχνολογίας LMD, την **X-Series** και την **L-Series**.

Χαρακτηριστικά:

Μοντέλο	Κατασκευαστική ικανότητα	Ρυθμός εναπόθεσης	Ενέργεια λείζερ	Ανάλυση
X-Series	Από χιλιοστά έως μέτρα (επιλογή του πελάτη)	Από 7 Kg / h	8 kW	0.5-8mm
L-Series	Από 300mm x 300mm x 200mm	Από 2 Kg / h	2 kW	0.5-3mm



Εικόνα 65: Αριστερά το σύστημα της σειράς L-Series και δεξιά της σειράς X-Series

3.10 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας LMF

- Τα συστήματα τεχνολογίας LMF της Trumpf είναι, ο **TruPrint 1000**, ο **TruPrint 3000** και ο **TruPrint 5000**.

Χαρακτηριστικά:

Μοντέλο	Ικανότητα εκτύπωσης (Διάμετρος x Ύψος)	Μέγεθος στρώσης	Ισχύς λέιζερ
TruPrint 1000	100mm x 100mm	10 - 50 μm	200 W
TruPrint 3000	300mm x 400mm	20 – 150 μm	500 W
TruPrint 5000	300mm x 400mm	20 – 150 μm	3 X 500 W



Εικόνα 66: Αριστερά πάνω ο TruPrint 1000, δεξιά ο TruPrint 3000 και κάτω ο TruPrint 5000 3D εκτυπωτής

- Η SISMA διαθέτει τους **MYSINT 100** και **MYSINT 300** 3D μεταλλικούς εκτυπωτές τεχνολογίας LMF.

Χαρακτηριστικά:

Μοντέλο	Ικανότητα εκτύπωσης (Διάμετρος x Ύψος)	Πάχος στρώσης	Διαστάσεις μηχανής	Βάρος μηχανής
MYSINT 100	100mm x 100mm	15 – 30 μm	1390mm x 1600mm x 777mm	650 Kg
MYSINT 300	300mm x 400mm	20 – 50 μm	3400mm X 1400mm X 1970mm	3500 Kg



Εικόνα 67: Αριστερά ο MYSINT 100 και δεξιά ο MYSINT 300 3D μεταλλικός εκτυπωτής

3.11 Εκτυπωτής μετάλλων τεχνολογίας DLP

- Η Admatec διαθέτει τον **ADMAFLEX 130** 3D μεταλλικό εκτυπωτή τεχνολογίας DLP.

Χαρακτηριστικά:

Υλικά που χρησιμοποιεί: Οξειδίο αργιλίου, οξειδίο ζirkονίου, διοξειδίο του πυριτίου

Μοντέλο	Ικανότητα εκτύπωσης	Πάχος στρώσης	Διαστάσεις μηχανής	Βάρος μηχανής
ADMAFLEX 130	96mm x 54mm x 120mm	25 – 100 μm	575mm x 880mm x 1760mm	300 Kg



Εικόνα 68: Ο Admaflex 130 3D μεταλλικός εκτυπωτής

3.12 Εκτυπωτές μετάλλων τεχνολογίας UAM

- Η Fabrisonic διαθέτει στην γκάμα της τρία μοντέλα 3D μεταλλικών εκτυπωτών τεχνολογίας UAM τα οποία είναι : το **SonicLayer R200**, το **SonicLayer 400** και το **SonicLayer 7200**.

Χαρακτηριστικά:

Μοντέλο	Ικανότητα εκτύπωσης (In)	Υπερηχητική ισχύς
SonicLayer R200	22 X 12 X 10	9 kW
SonicLayer 4000	40 x 24 x 24	9 kW
SonicLayer 7200	72 X 72 X 63	9 kW



Εικόνα 69: Αριστερά ο SonicLayer R200 και δεξιά ο SonicLayer 4000 3D μεταλλικός εκτυπωτής τεχνολογίας UAM



Εικόνα 70: Ο SonicLayer 7200 3D μεταλλικός εκτυπωτής τεχνολογίας UAM

3.13 Εκτυπωτής μετάλλων τεχνολογίας BMD

- Η Desktop Metal AM System διαθέτει ένα συστήματα μεταλλικής εκτύπωσης τεχνολογίας BMD το οποίο είναι το **Studio System**.

Χαρακτηριστικά εκτυπωτή:

- 1) Ικανότητα εκτύπωσης: 300mm x 200mm x 200mm
- 2) Διαστάσεις εξαρτήματος μετά τη συρρίκνωση: 255mm x 170mm x 170mm
- 3) Ελάχιστο πάχος στρώσης: 50 μm



Εικόνα 71: Το σύστημα 3D μεταλλικής εκτύπωσης Studio System τεχνολογίας BMD

3.14 Εκτυπωτής μετάλλων τεχνολογίας LMJP

- Η Vader, η οποία ανέπτυξε και κατοχύρωσε την τεχνολογία LMSP, διαθέτει ένα 3D μεταλλικό εκτυπωτή τον οποίο έχει ονομάσει **Polaris**.

Χαρακτηριστικά:

- 1) Ικανό όγκο κατασκευής: 305mm x 305mm x 305mm
- 2) Ρυθμός εναπόθεσης: 454 gr / h
- 3) Υλικό: Αλουμίνιο 4043



Εικόνα 72: Ο Polaris 3D εκτυπωτής της Vader Systems

Συμπεράσματα

Όπως προκύπτει και από την παρούσα πτυχιακή εργασία, η τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλων παρόλο που βρίσκεται σε πρώιμα στάδια η εξέλιξη της είναι ταχύτερη. Ολοένα και περισσότεροι κλάδοι της βιομηχανίας δείχνουν ενδιαφέρον την τεχνολογία αυτή λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει όπως την εξοικονόμηση των πρώτων υλών, την ελευθερία στην σχεδίαση των αντικειμένων, την κατασκευή πολύπλοκων δομών και τελικά την εξοικονόμηση χρημάτων. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι 3D εκτύπωσης μετάλλου που μπορούν να καλύψουν σχεδόν κάθε ανάγκη. Παρόλα αυτά, οι εταιρείες που κατασκευάζουν τρισδιάστατους εκτυπωτές μετάλλων εξελίσσουν διαρκώς την τεχνολογία των εκτυπωτών τους ώστε να βελτιώσουν τις διαδικασίες εκτύπωσης. Επίσης πολλές εταιρείες έχουν αναπτύξει και νέες δικές τους μεθόδους μεταλλικής εκτύπωσης εξίσου ανταγωνιστικές με αυτές που υπάρχουν εδώ και χρόνια.

Βέβαια, η 3D μεταλλική εκτύπωση δεν θα μπορούσε να μην έχει και μειονεκτήματα. Ένα από τα μεγαλύτερα που αντιμετωπίζουν οι εταιρείες που κατασκευάζουν εκτυπωτές μετάλλων είναι η ένταξη των συστημάτων τους σε μεγάλες γραμμές παραγωγής. Μπορεί με την εκτύπωση να έχουν εξοικονομηθεί πρώτες ύλες και τελικά χρήματα, όμως ο χρόνος που χρειάστηκε για το τελικό προϊόν να είναι ένα μειονέκτημα. Ένα ακόμα θέμα που πρέπει να ξεπεραστεί είναι ο όγκος των αντικειμένων που μπορούν να εκτυπωθούν. Για παράδειγμα, μέθοδοι που χρησιμοποιούν αδρανή αέρια για την εκτύπωση έχουν περιορισμένο όγκο που μπορούν να εκτυπώσουν λόγω και των περιορισμών που υπάρχουν στον όγκο του θαλάμου κατασκευής. Επίσης κάποιες τεχνολογίες είναι αρκετά δαπανηρές, όπως για παράδειγμα εκείνες που χρησιμοποιούν λέιζερ για την τήξη των μετάλλων. Άλλο ένα πρόβλημα που θα έπρεπε να ξεπεραστεί είναι η ποιότητα των αντικειμένων που εκτυπώνονται με κάποιες μεθόδους, όπως η αντοχή τους, η ποιότητα επιφανείας τους κ.α.

Παρόλα αυτά, η 3D εκτύπωση μετάλλου είναι μια πολύ ενδιαφέρον τεχνολογία που υπόσχεται εκπληκτικά αποτελέσματα στο εγγύς μέλλον. Ήδη κάποιοι κλάδοι της βιομηχανίας, όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική και οδοντιατρική και τελευταία η αυτοκινητοβιομηχανία, έχουν επωφεληθεί αρκετά. Και σίγουρα με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τον ανταγωνισμό που υπάρχει η μεταλλική εκτύπωση θα εξελιχθεί τόσο που θα ενσωματωθεί πλήρως στις γραμμές παραγωγής.

Αναφορές

1. <https://www.sculpteo.com/blog/2017/02/14/metal-3d-printer-manufacturers-and-models-of-2017/>
2. <http://www.titomic.com/titomic-kinetic-fusion.html>
3. <https://pinshape.com/blog/3d-printing-metal/>
4. <http://www.fortunegreece.com/article/trisdiastati-ektiposi-beni-stin-metalliki-epochi/>
5. <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>
6. <https://3dprint.com/144859/metal-3dp-fastest-growing/>
7. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-metal-printing-market>
8. <http://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/>
9. <http://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/background-to-additive-manufacturing/>
10. <https://www.3yourmind.com/blog/metal-3d-printing-on-the-rise-part-1>
11. <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
12. <https://www.3ders.org/articles/20171025-xjet-announces-new-carmel-1400-and-700-ceramic-and-metal-npj-3d-printers.html>
13. https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting
14. <https://www.3ders.org/articles/20131114-ge-new-cold-spray-3d-printing-technology-to-build-up-and-repair-parts.html>
15. <http://aptgadget.com/a-real-thing-3d-printing-with-metal-how-it-works/>
16. <https://3dprinting.com/metal/types-of-metal-3d-printing/>
17. <https://www.sculpteo.com/en/materials/binder-jetting-material/>
18. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>
19. <https://3dstartpoint.com/3d-printing-metal-fff-style/>
20. <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
21. <https://3dprint.com/182367/directed-energy-deposition/>
22. <http://www.3dprinterpro.com/electron-beam-freeform-fabrication/>
23. <https://www.nasa.gov/topics/technology/features/ebf3.html>
24. <http://ss.whiteclouds.com/3dpedia-index/electron-beam-freeform-fabrication-ebf>
25. <http://www.twiadditivemanufacturing.com/capabilities/metal-processing/laser-metal-deposition/>
26. <https://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/additive-manufacturing/laser-metal-deposition/>
27. https://www.trumpf.com/en_GB/applications/additive-manufacturing/laser-metal-deposition-lmd/

28. <https://www.thefabricator.com/article/additive/an-overview-of-laser-metal-deposition>
29. <https://www.makepartsfast.com/what-is-dlp-3d-printer/>
30. <https://www.think3d.in/digital-light-processing-dlp-3d-printing-technology-overview/>
31. <http://ss.whiteclouds.com/3dpedia-index/digital-light-processing-dlp>
32. <https://3dprintingindustry.com/news/breakthrough-digital-light-processing-metals-26396/>
33. <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14801/Admatec-Introduces-DLP-Metal-3D-Printing-to-the-Market.aspx>
34. <https://www.designnews.com/materials-assembly/neurotechnology-builds-prototype-3d-printer-based-on-ultrasonic-particle-manipulation/41559843357375>
35. <https://3dprint.com/12075/ultrasonic-3d-printing-uam/>
36. <https://www.fabtechexpo.com/blog/2016/09/20/3d-printing-metal-room-temperature-uam>
37. <https://fabrisonic.com/ultrasonic-additive-manufacturing-overview/>
38. <http://3dinsider.com/3d-printer-types/>
39. <http://engineering.buffalo.edu/chemical-biological/research/areas.host.html/content/shared/engineering/chemical-biological/Research/research-projects/ed-furlani/Magnetohydrodynamic-Liquid-Metal-3D-Printing.detail.html>
40. <http://www.sciaky.com/largest-metal-3d-printer-available>