



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

Διπλωματική εργασία με θέμα:

Ανασκόπηση των τεχνολογιών προσθήκης υλικού



Επιβλέπων: Άγγελος Μαρκόπουλος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Φοιτητής: Βασίλειος Αλέξανδρος Παπαστεργιάδης

ΑΜ: 02105096

Αθήνα, 2015

Περίληψη

Οι απαιτήσεις της βιομηχανίας όσον αφορά την ταχύτητα κατασκευής, την πολυπλοκότητα των αντικειμένων και την εξοικονόμηση υλικού και πόρων αυξάνονται συνεχώς. Οι κατεργασίες προσθήκης υλικού (Additive Manufacturing) αποτελούν μια εξαιρετικά σημαντική τεχνολογία, η οποία έρχεται να αντιμετωπίσει με πρωτοποριακό τρόπο τις δυσκολίες κατασκευής που παρουσιάζονται με τις συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Πρώτη φορά εμφανίστηκαν μέσω της ταχείας πρωτοτυποποίησης, με την οποία ήταν εφικτή η εύκολη δημιουργία πρωτοτύπων ενός αντικειμένου από ψηφιακά μοντέλα, πριν τη μαζική παραγωγή του ώστε να εξεταστεί άμεσα η λειτουργικότητα και η καταλληλότητά του για το σκοπό για τον οποίο προοριζόταν. Παλαιότερα, η διαδικασία της κατασκευής τρισδιάστατων μοντέλων και πρωτότυπων συνίστατο στη χρονοβόρα και υψηλού κόστους κατασκευή πρωτότυπων από έμπειρους και επιδέξιους τεχνίτες με τη χρήση εργαλείων χειρός και μικρών εργαλειομηχανών ακριβείας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αρχικά μια επισκόπηση των τεχνολογιών προσθήκης υλικού, όπως μεταξύ άλλων η στερεολιθογραφία και η τρισδιάστατη εκτύπωση. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα καθώς και οι εφαρμογές των περιγραφόμενων τεχνολογιών. Γίνεται σύντομη αναφορά στα πλαστικά ως υλικό προσθήκης, λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων που προσδίδουν στο τελικό αντικείμενο. Στη συνέχεια της εργασίας οι μέθοδοι προσθήκης υλικού κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με την πηγή θερμότητας και περιγράφονται αναλυτικά.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στις κατεργασίες προσθήκης υλικού με laser και συγκεκριμένα στη συσσωμάτωση, την τήξη και την εναπόθεση υλικού με laser. Γίνεται αναφορά στα υλικά που είναι κατάλληλα για την κάθε κατεργασία, ενώ παρουσιάζονται και πειραματικά αποτελέσματα που έχουν αναφερθεί από διάφορους ερευνητές. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συστήματα προσθήκης μετάλλου με πηγή δέσμης ηλεκτρονίων. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες της μεθόδου, καθώς και οι περιορισμοί της, ενώ παράλληλα επισημαίνονται οι σημαντικές παράμετροι της διεργασίας μέσα από διερεύνηση πειραματικών αποτελεσμάτων από τη βιβλιογραφία για την κατεργασία τιτανίου, χαλκού και κοβαλτίου. Τέλος παρουσιάζονται τα συστήματα προσθήκης μετάλλου με πηγή πλάσματος, τα χαρακτηριστικά και οι διαφορές τους σε σύγκριση με τα υπόλοιπα συστήματα και παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών για διαφορετική μορφή του υλικού εναπόθεσης.

Τέλος συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε και αναφέρονται οι μελλοντικές

προοπτικές για τις μεθόδους προσθήκης υλικού, ώστε να υιοθετηθούν σε μεγαλύτερο βαθμό από τη βιομηχανία και σε εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας.

Λέξεις κλειδιά: Κατεργασίες προσθήκης υλικού, μεταλλικά υλικά, προσθήκη υλικού με laser, προσθήκη υλικού με δέσμη ηλεκτρονίων, προσθήκη υλικού με πηγή πλάσματος

Thesis:

Review of the additive manufacturing technologies

Abstract

Global industry's requirements in terms of design speed, object's complexity and material saving are constantly increasing. Additive Manufacturing (AM) represents an important technological field, which can contribute in dealing with manufacturing constraints encountered in conventional material removal processes. Rapid Prototyping (RP) was its first application, by which the creation of an original product from a CAD model, before its mass production, became possible. So, it was possible to directly test the functionality and suitability of a product for the purpose for which it was intended.

This diploma thesis presents an overview of additive manufacturing technologies, such as stereolithography and 3D printing. The advantages, disadvantages and applications of each technology are mentioned. Also, there is a brief reference in plastics as an additive manufacturing material because of its unique properties. Then, the additive manufacturing technologies are categorized according to the heat source provided. The next chapter refers to laser sintering, laser melting and laser metal deposition, as well as to the materials suitable for each technology. Experimental results mentioned from various authors are presented. The description of Electron Beam Manufacturing follows, along with the presentation of experimental results for titanium, copper and cobalt manufacturing from the literature review. Furthermore, the plasma arc manufacturing technologies are summarized. Finally the conclusions based on this literature review are drawn and also the future prospects of additive manufacturing technologies are reported, in order to be adopted to a greater extent in large scale applications.

Key words: Additive manufacturing, Metals, Laser Sintering, Laser Melting, Laser Metal Deposition, Electron Beam Manufacturing, Plasma Deposition Manufacturing, Plasma Wire Deposition

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στην Τεχνολογία Προσθήκης Μετάλλου (Metal Additive Manufacturing).....	14
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία	14
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	16
1.3 Κυριότερες μέθοδοι προσθήκης υλικού	17
1.4 Ταχεία πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping-RP).....	17
1.4.1 Οφέλη.....	21
1.4.2 Συνήθεις εφαρμογές.....	22
1.5 Μέθοδοι προσθήκης υλικού (AM processes).....	26
1.5.1 Στερεολιθογραφία (Stereolithography- SL).....	26
1.5.2 Δημιουργία αρχείων στερεολιθογραφίας (STL file) μέσω μετρήσεων με τη βοήθεια ακτίνας laser.....	30
1.5.3 Τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing - 3DP).....	30
1.5.4 Εναπόθεση τήγματος θερμοπλαστικού νήματος (Fused deposition modeling – FDM).....	31
1.5.5 Στερεοποίηση σκόνης με τη βοήθεια επικεντρωμένης ακτίνας laser (Selective laser sintering - SLS),	34
1.5.6 Laser Engineered Net Shaping (LENS).....	35
1.5.7 Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron BeamMelting).....	36
1.5.8 Κατασκευή πρωτότυπου με επάλληλες στρώσεις φύλλων υλικού (Laminated Object Manufacturing, LOM)	36
1.5.9 Polyjet	38
1.6 Εξατομικευμένη παραγωγή αντικειμένων Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
1.6.1 Ταχεία παραγωγή (Rapid Manufacturing) Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
1.7 Κυριότερες εφαρμογές	38
1.7.1 Ιατρικές και βιοϊατρικές εφαρμογές.....	38
1.7.2 Αυτοκινητοβιομηχανία	40

1.7.3	Στρατιωτικές εφαρμογές	41
1.7.4	Ιδιωτική χρήση	41
1.8	Μελλοντικές προοπτικές.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Πολυμερή υλικά για μεθόδους προσθήκης υλικού		44
2.1	Εισαγωγή	44
2.2	Πολυμερή.....	45
2.3	Λειτουργικά χαρακτηριστικά πλαστικών.....	46
2.3.1	Κόστος υλικών.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Συστήματα προσθήκης μετάλλου με laser.....		51
3.1	Συσσωμάτωση με laser.....	52
3.2	Τήξη με laser	55
3.3	Εναπόθεση μετάλλου με laser	57
3.4	Συνήθη μεταλλικά υλικά και κράματα	61
3.4.1	Σκόνες καθαρού μετάλλου.....	61
3.4.2	Κράματα Ti	62
3.4.3	Κράματα Ni.....	62
3.4.4	Κράματα Fe.....	63
3.4.5	Κράματα Al.....	64
3.5	Απόδοση της μεθόδου προσθήκης υλικού με laser	64
3.5.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	65
3.5.2	Ανάλυση παραμέτρων πειράματος	66
3.5.3	Αποτελέσματα	68
3.6	Εφαρμογές	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συστήματα προσθήκης μετάλλου με δέσμη ηλεκτρονίων		73
4.1	Προσθήκη μετάλλου με δέσμη ηλεκτρονίων	73
4.1.1	Χαρακτηριστικά μεθόδου.....	73
4.2	Δυνατότητες μεθόδου.....	74
4.3	Κατασκευαστικοί περιορισμοί.....	75
4.4	Η Μηχανή ARCAM	75
4.5	Σημαντικές παράμετροι της διεργασίας	79
4.5.1	Ιδιότητες της σκόνης.....	79

4.6 Κατεργασία κράματος Ti μέσω EBM.....	84
4.6.1 Παρουσίαση πειραματικής διαδικασίας και αποτελεσμάτων	85
4.7 Κατεργασία χαλκού μέσω EBM.....	87
4.8 Κατεργασία υπερκράματος Co μέσω EBM.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συστήματα προσθήκης μετάλλου με πηγή πλάσματος.90	
5.1 Εισαγωγή στην εναπόθεση υλικού με πηγή πλάσματος.....	90
5.2 Περιγραφή μεθόδου εναπόθεσης σκόνης υλικού με πηγή πλάσματος	91
5.2.1 Μικροδομή εναπόθεσης	95
5.2.2 Έλεγχος σκληρότητας	97
5.2.3 Εναπόθεση μετάλλου σε μορφή σύρματος και πηγής τόξου πλάσματος	97
5.3 Εφαρμογή της εναπόθεσης συρμάτων υλικού με τόξο πλάσματος για επιδιόρθωση ελαττωματικών μητρών.....	100
5.3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης και συνθηκών.....	100
5.3.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	103
5.4 Σημεία προσοχής κατά την εναπόθεση συρμάτων υλικού με πηγή πλάσματος	105
5.5 Προοπτικές της εναπόθεσης υλικού με πλάσμα	108
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και Προοπτικές	110
6.1 Συμπεράσματα.....	110
6.2 Μελλοντικές προοπτικές.....	111
Βιβλιογραφία.....	114

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Διαδικασία κατασκευής ενός αντικειμένου με τη μέθοδο της προσθήκης υλικού (Diegel, 2010).....	14
Εικόνα 1.2: Γενική επισκόπηση των κύριων διαδικασιών προσθήκης υλικού (Wong, 2012)	17
Εικόνα 1.3: Κύκλος σχεδίασης και παραγωγής ενός προϊόντος (Noorani et al., 2006).....	19
Εικόνα 1.4: Εξέλιξη της ενσωμάτωσης ταχείας πρωτοτυποποίησης (Wohlers, 2010).....	20
Εικόνα 1.5: Αντικείμενα και εφαρμογές της Ταχείας Πρωτοτυποποίησης (RP) (Hopkinson N. et al. 2006)	20
Εικόνα 1.6: Χρονική εξέλιξη των αλλαγών που έχουν γίνει στις ανάγκες των βιομηχανιών (Cooper, 2001).....	23
Εικόνα 1.7: Σημασία του χρόνου που αφιερώνεται στην ανάπτυξη ενός προϊόντος (Hopkinson, 2006)	24
Εικόνα 1.8: Πλάγια όψη μιας διάταξης στερεολιθογραφίας (Pham et al., 2000)	27
Εικόνα 1.9: Το μηχάνημα στερεολιθογραφίας, μοντέλο SLA5000 της 3D Systems Inc (Kim et al., 2010)	28
Εικόνα 1.10: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας της στερεολιθογραφίας (Diegel, 2010)	29
Εικόνα 1.11: Μηχάνημα στερεολιθογραφίας και το αντίστοιχο παραγόμενο αντικείμενο (Diegel, 2010).....	29
Εικόνα 1.12: Παραγόμενα πρωτότυπα από μηχάνημα τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DP) (Wohlers, 2012)	31
Εικόνα 1.13: Το νέο σύστημα FDM της Stratasys (Wong, 2012)	32
Εικόνα 1.14: Το νέο μηχάνημα FDM Quantum με Τεχνολογία MagnaDrive (Wong, 2012)	33
Εικόνα 1.15: Εσωτερική και συνολική άποψη ενός μηχανήματος μεθόδου FDM (Diegel, 2010)	33
Εικόνα 1.16: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας SLS (Slavko et al., 2010)	34
Εικόνα 1.17: Αντικείμενα τα οποία έχουν κατασκευαστεί με την τεχνική SLS (Slavko et al., 2010)	35
Εικόνα 1.18: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου LENS (Xiong, 2009)	35

Εικόνα 1.19: Σχηματική αναπαράσταση της συνολικής διάταξης LOM (Wong, 2012).....	37
Εικόνα 1.20: Πλάγια όψη μιας διάταξης LOM (Wong, 2012).....	37
Εικόνα 1.21: Εφαρμογή κρανιοπλαστικής με τη δημιουργία εμφυτεύματος και του αντίστοιχου καλουπιού του (Rengier et al., 2010)	39
Εικόνα 1.22: Το μοντέλο αυτοκινήτου που δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα EDAG Genesis (Frazier, 2014)	41
Εικόνα 2.1: Χρησιμοποιούμενες σκόνες πλαστικών σε διαδικασίες προσθήκης υλικού (Thomas Büsgen, 2013)	44
Εικόνα 2.2: Πλαστικό εξάρτημα αεραγωγού το οποίο κατασκευάστηκε με ανακυκλωμένου πλαστικό υλικό (Ljunberg, 2007)	45
Εικόνα 2.3: Χρησιμοποιούμενα υλικά για τη μέθοδο Στερεολιθογραφίας (SL) (e-Manufacturing Solutions)	47
Εικόνα 2.4: Χρησιμοποιούμενα υλικά για τη μέθοδο FDM (e-Manufacturing Solutions).....	47
Εικόνα 2.5: Χρησιμοποιούμενα υλικά για τη μέθοδο SLS (e-Manufacturing Solutions).....	48
Εικόνα 2.6: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των πλαστικών υλικών με αντίστοιχα μεταλλικά υλικά (e-Manufacturing Solutions).....	49
Εικόνα 3.1: Γενική αναπαράσταση κλίνης σκόνης ενός συστήματος κατεργασιών προσθήκης (Frazier, 2014).....	51
Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση της συσκευής συσσωμάτωσης με laser (Gu et. al., 2012).....	52
Εικόνα 3.3: Μικροδομή κατεργασμένης σκόνης (a) Cu-SCuP και (b) Ni-CuSn-CuP μέσω συσσωμάτωσης με laser (Gu et. al., 2012)	54
Εικόνα 3.4: Ιδανικό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων θερμοκρασίας-σύστασης για προκραματωμένο σύστημα (Gu et. al., 2012)	55
Εικόνα 3.5: Μορφολογία επιφάνειας χάλυβα M2 (a) από τήξη με laser και (b) από συσσωμάτωση με laser (Simchi , 2006)	56
Εικόνα 3.6: Στρέβλωση και δημιουργία ρωγμών σε κατεργασμένη σκόνη Cu-H13 με laser (Pogson et al. ,2004).....	57
Εικόνα 3.7: Εξοπλισμός εναπόθεσης μετάλλου με laser (Frazier, 2014)	58
Εικόνα 3.8: Σχηματική απεικόνιση συστήματος εναπόθεσης μετάλλου κλειστού βρόχου (Dutta et al., 2011)	59
Εικόνα 3.9: (a) Φωτογραφία της κατασκευής μιας γραμμής μέσω εναπόθεσης με laser και (b) πλευρική όψη του μεταλλικού λουτρού με τις θερμοκρασίες σε K (Gu et. al., 2012).....	60

Εικόνα 3.10: (a) ετερογενής μικροδομή Ti ύστερα από συσσωμάτωση με laser και (b) μερικώς τηγμένη επιφάνεια σωματιδίου ύστερα από εναπόθεση με laser (Xue et. al., 2007)	61
Εικόνα 3.11: Σχηματισμός ρωγμών (a) σε Rene 88DT (Zhao et. al., 2009)...	63
Εικόνα 3.12: Τρισδιάστατο μοντέλο της μονής διαδρομής του δοκιμίου (Matilainen et al., 2014)	66
Εικόνα 3.13: Διάγραμμα απεικόνισης μικρών και μεγάλων τιμών WDA και WDR (Matilainen et al., 2014)	68
Εικόνα 3.14: Πυκνότητα ενέργειας ως προς το βάθος διείσδυσης (Matilainen et al., 2014).....	69
Εικόνα 3.15: Πυκνότητα ενέργειας ως προς WDA (Matilainen et al., 2014)...	70
Εικόνα 3.16: Πυκνότητα ενέργειας ως προς WDR (Matilainen et al., 2014)...	71
Εικόνα 4.1: Δημιουργία τηγμένου λουτρού με δέσμη ηλεκτρονίων (www.ifam.fraunhofer.de).....	73
Εικόνα 4.2: Πτερύγιο στροβίλου βαθμίδας χαμηλής πίεσης κατασκευασμένο μέσω της μεθόδου EBM για την εταιρία Avio S.p.A. (www.ifam.fraunhofer.de)	74
Εικόνα 4.3: Το σύστημα Arcam A2 (Murr et al., 2012).....	77
Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση συστήματος τήξης δέσμης ηλεκτρονίων ..	78
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα ροής της κατεργασίας EBM (www.ifam.fraunhofer.de)	79
Εικόνα 4.6: Ιδανική διάταξη σύμπλεξης σωματιδίων διαφορετικού μεγέθους (a) Κάτοψη, (b) πλάγια όψη σύμπλεξης μικρών σωματιδίων και (c) πλάγια όψη σύμπλεξης μεγάλων σωματιδίων (Murr et al., 2012)	80
Εικόνα 4.10: Φωτογραφίες υλικού από μικροσκόπιο (a) για υψηλή πυκνότητα ενέργειας 6 mA και (b) για χαμηλή πυκνότητα ενέργειας 4 mA (Safdar et al., 2012).....	81
Εικόνα 4.11: Στερεοποίηση της επιφάνειας που προκύπτει μέσω EBM με διαφορετική απόσταση περασμάτων της δέσμης (line offset). (Gong et al., 2013).....	82
Εικόνα 4.12: Σχηματική αναπαράσταση του τηγμένου λουτρού με αυξημένη απόκλιση γραμμών κατά τη διαδικασία EBM (Gong et al., 2013)	83
Εικόνα 4.13: Στερεοποιημένες επιφάνειες μέσω της μεθόδου EBM με μεταβολή της απόκλισης εστίασης (Gong et al., 2013)	83
Εικόνα 4.14: Σχηματική αναπαράσταση του τηγμένου λουτρού με αύξηση της απόκλισης εστίασης κατά την EBM (Gong et al., 2013)	84

Εικόνα 4.15: Μικροδομή του υλικού Ti-6Al-4V σε δύο διαφορετικές μεγεθύνσεις (Facchini et al., 2007)	86
Εικόνα 4.16: Τρισδιάστατη απεικόνιση τεμαχίου Cu κατασκευασμένου μέσω EBM (αριστερά) και απεικόνιση των ατελειών σε μεγέθυνση (δεξιά) (Murr et al., 2012).....	87
Εικόνα 4.17: Απεικόνιση στο μικροσκόπιο των συστοιχιών ιζημάτων CuO του τεμαχίου που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.16 (Murr L. et al., 2012)	88
Εικόνα 4.18: Τρισδιάστατη απεικόνιση τεμαχίου υπερκράματος Co κατασκευασμένου μέσω EBM (αριστερά) και απεικόνιση των ατελειών σε μεγέθυνση (δεξιά) (Murr et al., 2012).....	89
Εικόνα 5.1: (α)Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας εναπόθεσης μετάλλου με πλάσμα (PDM) και (b) σύστημα PDM (Zhang et al., 2003).....	92
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της αρχικής σκόνης ύστερα από επεξεργασία με τη μέθοδο περιστρεφόμενου ηλεκτροδίου πλάσματος (Zhang H. et al., 2003)...	93
Εικόνα 5.3: Στιγμιότυπο απεικόνισης της κατεργασίας εναπόθεσης με πλάσμα(Zhang et al., 2003).....	94
Εικόνα 5.4: Μεταλλικά αντικείμενα κατασκευασμένα με τη μέθοδο PDM (Zhang H. et al., 2003)	95
Εικόνα 5.5: Μικροδομή που προκύπτει από την εναπόθεση σε κάθε μια από τις τρεις κατευθύνσεις (x, y και z, αντίστοιχα) (Zhang et al., 2003)	96
Εικόνα 5.6: Διακύμανση της σκληρότητας σε διαφορετικές κατευθύνσεις (Zhang et al., 2003).....	97
Εικόνα 5.7: Αρχή λειτουργίας της τεχνικής της Norsk Titanium (Norsk Titanium, 2012).....	99
Εικόνα 5.8: Αντικείμενο σε διαφορετικές φάσης της διαδικασίας (Lajer, 2012)	99
Εικόνα 5.9: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης για την εναπόθεση μ-PTA (Jhavar et al.,2014)	101
Εικόνα 5.10: Παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα της εναπόθεσης (Jhavar et al.,2014).....	104
Εικόνα 5.11: Προφίλ μικρο-σκληρότητας στρωμάτων εναπόθεσης (Jhavar et al. ,2014).....	105
Εικόνα 5.12: Σχηματική αναπαράσταση του πειραματικού εξοπλισμού εναπόθεσης συρμάτων με πλάσμα (Martina et al., 2012).....	106
Εικόνα 5.13: Παράδειγμα τοιχώματος Ti6Al4V κατασκευασμένο μέσω PWD (οι κύριες διαστάσεις του χάρακα είναι σε cm) (Martina et al., 2012)	107

Εικόνα 5.14: Εμφάνιση κοιλοτήτων (a,b) και επιφανειακή οξείδωση (c) στα δείγματα του υλικού (Martina et al., 2012) 108

Ευρετήριο Πινάκων

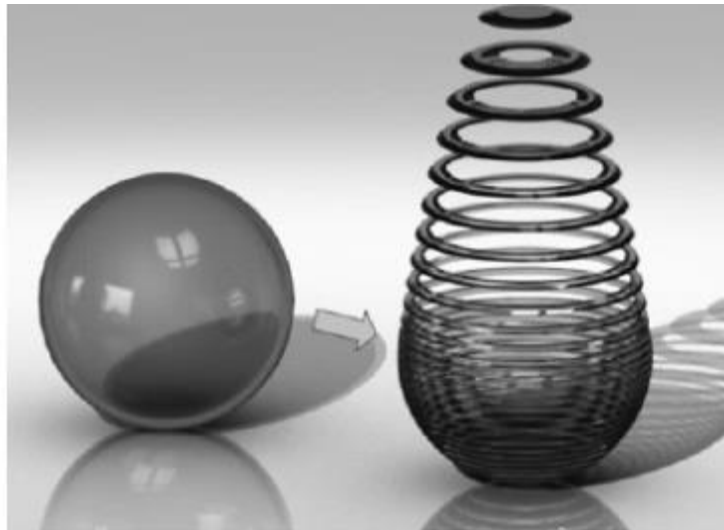
Πίνακας 2.1: Κόστος υλικού ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο προσθήκης υλικού (www.plasticker.de ; Büsgen, 2013)	50
Πίνακας 3.1: Σύσταση υλικού EOS 17-4PH (Matilainen et al., 2014).....	65
Πίνακας 3.2: Παράμετροι κατεργασίας δοκιμών με LUT Laser 200 W (Matilainen et al., 2014)	66
Πίνακας 3.3: Παράμετροι κατεργασίας δοκιμών EOS Φιλανδίας 325 W (Matilainen et al., 2014)	67
Πίνακας 4.1: Ονομαστική χημική σύσταση της προκραματωμένης σκόνης Ti-6Al-4V για χρήση σε κατεργασίας EBM (Facchini et al., 2007)	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στην Τεχνολογία Προσθήκης Μετάλλου (Metal Additive Manufacturing)

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Ορισμός: Η Society of Manufacturing Engineers (SME) ορίζει την τεχνολογία προσθήκης υλικού ως τη διαδικασία κατασκευής ενός φυσικού αντικειμένου μέσω προσθήκης υλικού στρώμα – στρώμα και επεξεργασία του μέσω σύντηξης, συσσωμάτωσης ή πολυμερισμού του υλικού (SME, 2010).

Η διαδικασία ξεκινάει με την υιοθέτηση ενός 3D αρχείου υπολογιστή, το οποίο στη συνέχεια κόβεται σε πολύ λεπτές «φέτες» (πάχους από 0,01 mm έως 0,25 mm, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία). Στη συνέχεια το μηχάνημα προσθήκης υλικού κατασκευάζει το μοντέλο, κατά μια στρώση τη φορά, όπου κάθε στρώση τοποθετείται στην προηγούμενης δημιουργηθείσα στρώση, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 1.1. Το αποτέλεσμα είναι ένα ψηφιακό 3D μοντέλο, μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας και κατασκευής, να μετατραπεί σε ένα φυσικό αντικείμενο ή προϊόν (Hopkinson et al, 2006).



Εικόνα 1.1: Διαδικασία κατασκευής ενός αντικειμένου με τη μέθοδο της προσθήκης υλικού (Diegel, 2010)

Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές τεχνολογίες προσθήκης υλικού, οι οποίες διαφέρουν ως προς το υλικό που χρησιμοποιούν για την κατασκευή του εκάστοτε αντικειμένου, τα οποία συνήθως είναι σκόνη, νήματα (σύρματα) ή υγρά, αλλά και ως προς τη διαδικασία δημιουργίας των στρωμάτων.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση και γενικότερα οι μέθοδοι προσθήκης υλικού θέτουν σοβαρή υποψηφιότητα για τον τίτλο της «τεχνολογίας της δεκαετίας του 2000», μιας και υπόσχονται να αλλάξουν με απροσδόκητους τρόπους την οικονομία και την καθημερινή ζωή. Αν και δεν θα πρέπει να καλλιεργούνται υπερβολικές ελπίδες σχετικά με τις δυνατότητες των νέων αυτών τεχνολογιών, οι προοπτικές που ανοίγονται στον χώρο της κατασκευής πρωτότυπων, μοντέλων, καλουπιών, αλλά και εργαλείων, ανταλλακτικών, εξαρτημάτων και αντικειμένων ευρείας χρήσης είναι εντυπωσιακές (Diegel 2010).

Η μετατροπή μιας ιδέας σε σχέδιο και κατόπιν σε αντικείμενο, είναι μια σύνθετη διαδικασία με λιγότερα ή περισσότερα ενδιάμεσα στάδια που αποτελούσε και αποτελεί αυτό που ονομάζεται γενικά «παραγωγή». Για τη μετάβαση από τον ιδεατό κόσμο του σχεδίου στον φυσικό κόσμο των αντικειμένων, απαιτείτο (παλαιότερα) η μεσολάβηση ενός αριθμού εργατών και τεχνιτών, οι οποίοι χρησιμοποιώντας τη δύναμη, την πείρα, τις δεξιότητες και τα εργαλεία τους, έδιναν μορφή και υλική υπόσταση στο σχέδιο. Εδώ και τρεις δεκαετίες περίπου τη μεσολάβηση αυτή σε πολλούς τομείς της παραγωγής, αναλαμβάνουν ολοένα και περισσότερο αυτοματοποιημένα συστήματα που βασίζονται στη ρομποτική.

Σήμερα, η ανάπτυξη νέων μηχανών και τεχνικών ανοίγει τον δρόμο στο επόμενο στάδιο εξέλιξης της αυτοματοποίησης, το οποίο περιγράφεται ως «άμεση ή ταχεία παραγωγή» (direct/rapid manufacturing) και συνίσταται στην απευθείας μετάβαση από τον κόσμο του ψηφιακού πλέον σχεδίου ή μοντέλου στον κόσμο των φυσικών αντικειμένων. Για παράδειγμα, οι μηχανές τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιούν τα δεδομένα ψηφιακών αρχείων, τα οποία έχουν δημιουργηθεί/σχεδιαστεί είτε από κάποιον μηχανικό είτε έχουν προκύψει από τη σάρωση ενός φυσικού αντικειμένου, για να κατασκευάσουν, «τυπώνοντας» σε τρεις διαστάσεις, το φυσικό αντικείμενο. Η χρήση του όρου «τρειςδιάστατη εκτύπωση» (3D Printing) για την περιγραφή των εν λόγω μηχανών και κατασκευαστικών μεθόδων, αντανάκλα τις ιδιαίτερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται, οι οποίες θυμίζουν (ή και προέρχονται) σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο λειτουργίας των σημερινών εκτυπωτών λείζερ ή ink-jet.

Οι τεχνικές της τρισδιάστατης εκτύπωσης παρουσιάζουν μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τις μεθόδους κατασκευής (παραδοσιακές ή μη) διαφόρων προϊόντων οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα: Πρέπει να επισημανθεί ότι αντίθετα με τις τεχνολογίες αφαίρεσης υλικού, όπου το υλικό αφαιρείται από ένα μεγάλο κομμάτι, μέχρι να δημιουργηθεί το επιθυμητό τελικό αντικείμενο, οι διαδικασίες προσθήκης υλικού δεν απαιτούν περίσσεια διαθέσιμου υλικού (Diegel, 2010). Το σύνολο των κατασκευαστικών αυτών μεθόδων βασίζεται ουσιαστικά στην αφαίρεση υλικού από ακατέργαστα, χυτά, σφυρήλατα ή πρεσσαριστά τεμάχια, είτε με τη χρήση εργαλείων χειρός, είτε με τη χρήση εργαλειομηχανών (τόρνων, φρεζών, δραπάνων κλπ.), είτε με τη χρήση

αυτοματοποιημένων μηχανών CNC ή κέντρων κατεργασίας ελεγχόμενων από υπολογιστή, μέχρις ότου το αντικείμενο λάβει την επιθυμητή μορφή.

Στις κατεργασίες προσθήκης υλικού, για κάθε αντικείμενο που κατασκευάζεται, το αρχικό υλικό που είναι σε μορφή σκόνης ή υγρού που δεν έχει υποστεί κάποια μεταβολή από τη διαδικασία επεξεργασίας, μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την κατασκευή άλλων. Επίσης, οι εν λόγω διαδικασίες δεν απαιτούν σημαντική δαπάνη χρόνου για την αφαίρεση περίσσειας υλικού, κατά συνέπεια μειώνεται ο χρόνος και το κόστος, ενώ και τα παραγόμενα απόβλητα είναι ελάχιστα. (Wohlers, 2009).

1.2 Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες υλοποιήσεις τρισδιάστατων εκτυπωτικών μηχανών εμφανίστηκαν την δεκαετία του 1980, αν και τότε οι συγκεκριμένοι εκτυπωτές ήταν μεγάλοι, ακριβοί και με αρκετούς περιορισμούς ως προς το τι μπορούσαν να εκτυπώσουν και να παράγουν.

Η στερεολιθογραφία κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1987 από τον Chuck Hull.

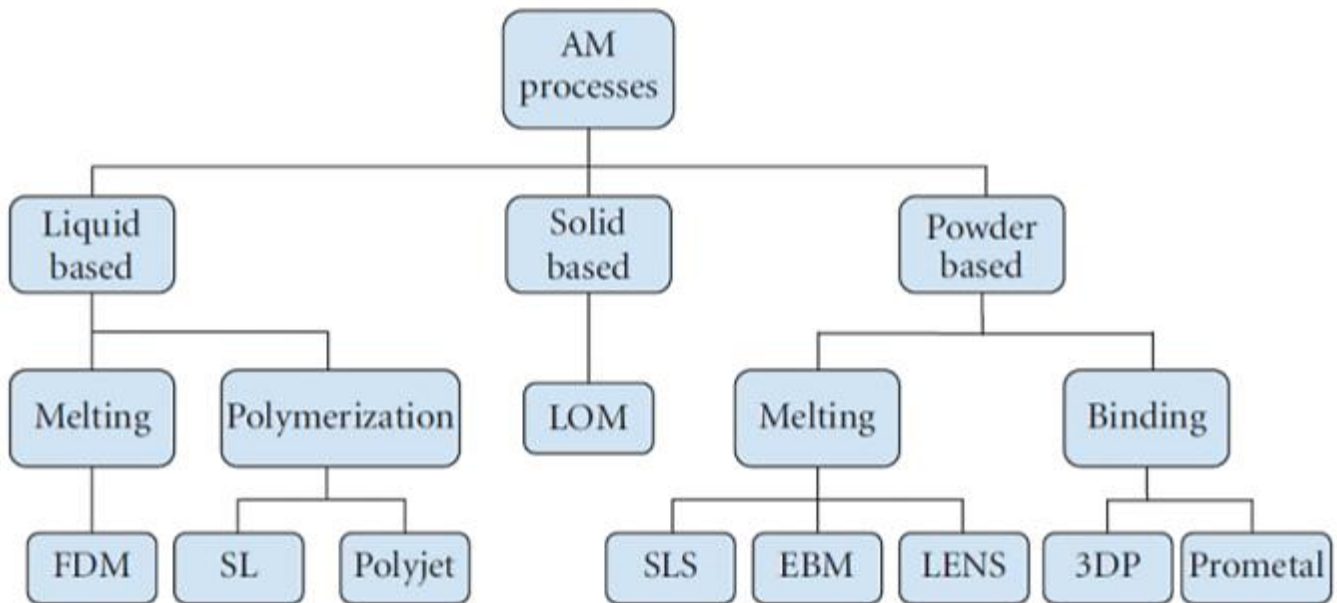
Η επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ (SLS) αναπτύχθηκε και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Δρ. Carl Deckard του Πανεπιστημίου του Τέξας στο Όστιν στα μέσα της δεκαετίας του 1980, υπό την αιγίδα της DARPA. Μια παρόμοια διαδικασία είχε κατοχυρώσει με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, χωρίς να περάσει στην παραγωγή ο R. F. Housholder το 1979.

Ο όρος «3D εκτύπωση» επινοήθηκε στο MIT το 1995, όταν οι τότε μεταπτυχιακοί φοιτητές Jim Bredt και Tim Anderson τροποποίησαν έναν inkjet εκτυπωτή, ώστε να εξάγει ένα διάλυμα σε ένα τραπέζι με σκόνη, αντί για μελάνι πάνω σε χαρτί. Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που ακολούθησε οδήγησε στη δημιουργία της σύγχρονης εταιρίας 3D εκτύπωσης Z Corporation (που ιδρύθηκε από τους Bredt και Anderson) και ExOne.

Η μοντελοποίηση με εναπόθεση τηγμένου υλικού (fused deposition modeling) αναπτύχθηκε από τον S. Scott Crump στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και απέκτησε εμπορικές εφαρμογές το 1990 (Bourell, 2009).

1.3 Κυριότερες μέθοδοι προσθήκης υλικού

Στην Εικόνα 1.2 που ακολουθεί φαίνεται μια γενική επισκόπηση των κύριων μεθόδων προσθήκης υλικού, οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.



Εικόνα 1.2: Γενική επισκόπηση των κύριων διαδικασιών προσθήκης υλικού (Wong, 2012)

1.4 Ταχεία πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping-RP)

Η επανάσταση στο συγκεκριμένο χώρο τεχνολογίας ξεκίνησε με την ανάπτυξη των τεχνικών ταχείας πρωτοτυποποίησης (Rapid Prototyping, RP) κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1980, οι οποίες αποσκοπούσαν στην εξάλειψη των ατελειών και στη δραστική μείωση του χρόνου κατασκευής των πρωτοτύπων διαφόρων προϊόντων (Ashley, 1991).

Η κατασκευή πρωτότυπων αποτελούσε πάντα μέρος της διαδικασίας σχεδίασης και ανάπτυξης ενός προϊόντος, παίζοντας σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της λειτουργικότητάς του και στην ενσωμάτωση σε αυτό διαφόρων επιθυμητών χαρακτηριστικών. Οι μηχανικοί και οι σχεδιαστές που αναπτύσσουν τμήματα μηχανισμών, ή αντικείμενα πολύπλοκης μορφής, μπορούν να αποκτήσουν, να μεταφέρουν ή να εξηγήσουν σε άλλους πολύ περισσότερα στοιχεία και πληροφορίες διαθέτοντας ένα χειροπιαστό, ακριβές,

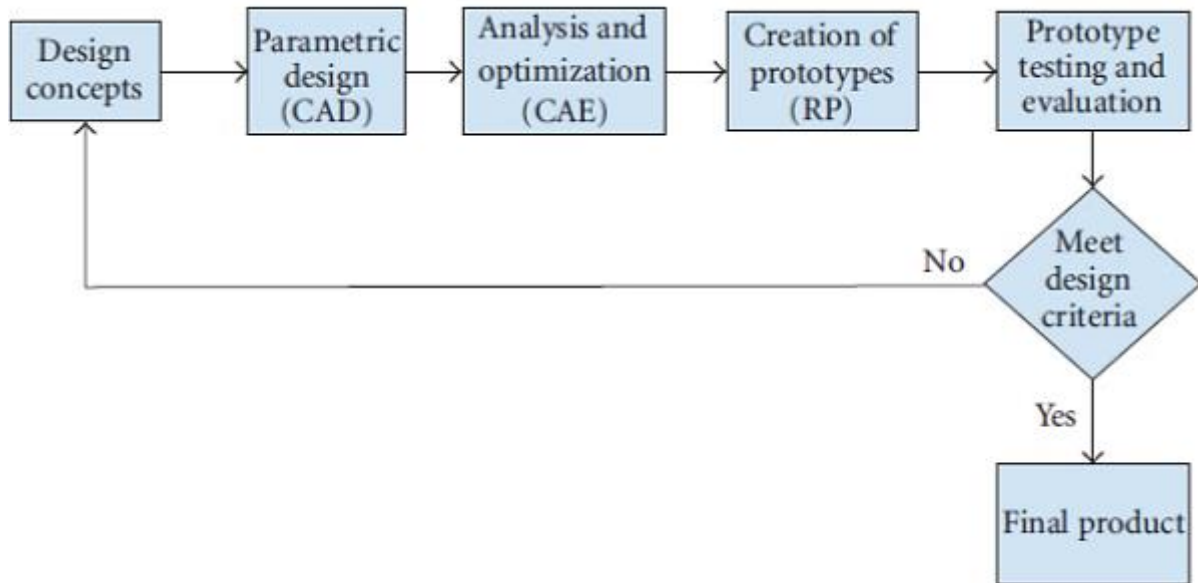
τρισδιάστατο μοντέλο, αντί ενός σχεδίου ή μιας απεικόνισης του αντικειμένου στην οθόνη ενός υπολογιστή.

Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός ακριβούς πρωτοτύπου του εξαρτήματος κάποιου κινητήρα, επιτρέπει στους μηχανικούς να διαπιστώσουν με ευχέρεια αν το συγκεκριμένο τμήμα ταιριάζει από την άποψη των διαστάσεων και της μορφής του με το υπόλοιπο λειτουργικό σύνολο. Κατ' ανάλογο τρόπο, οι υπεύθυνοι της προώθησης στην αγορά ενός καταναλωτικού προϊόντος μπορούν, έχοντας στα χέρια τους ένα ακριβές πρωτότυπο του αντικειμένου που προτείνει το σχεδιαστικό τμήμα, να διαπιστώσουν εύκολα και έγκαιρα εάν αυτό έχει τις επιθυμητές αναλογίες, το σχήμα ή τα άλλα χαρακτηριστικά που απαιτεί το κοινό στο οποίο απευθύνεται (Ashley, 1991 ; Diegel, 2010).

Παλαιότερα, η διαδικασία της κατασκευής τρισδιάστατων μοντέλων και πρωτότυπων συνίστατο στη χρονοβόρα και υψηλού κόστους κατασκευή πρωτότυπων από έμπειρους και επιδέξιους τεχνίτες με τη χρήση εργαλείων χειρός και μικρών εργαλειομηχανών ακριβείας. Εκτός από τον χρόνο και το κόστος, η διαδικασία της παραδοσιακής πρωτοτυποποίησης, ενείχε πάντα ένα στοιχείο ασάφειας, καθώς μεταξύ του αρχικού σχεδίου και του μοντέλου μεσολαβούσε πάντα σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό το χέρι και η αντίληψη του κατασκευαστή μοντέλων.

Η κατάσταση αυτή άρχισε να αλλάζει με τη χρησιμοποίηση εργαλειομηχανών ελεγχόμενων από υπολογιστή, καθώς οι παράμετροι του κατασκευαζόμενου πρωτοτύπου μπορούσαν να ελεγχθούν εξαρχής ώστε να ανταποκρίνονται με ακρίβεια στο βασικό σχέδιο. Και πάλι όμως η διαδικασία ήταν χρονοβόρα και ακριβή, ιδίως στην περίπτωση που τυχόν μικρότερες ή μεγαλύτερες τροποποιήσεις επέβαλλαν την εκ νέου κατασκευή του μοντέλου.

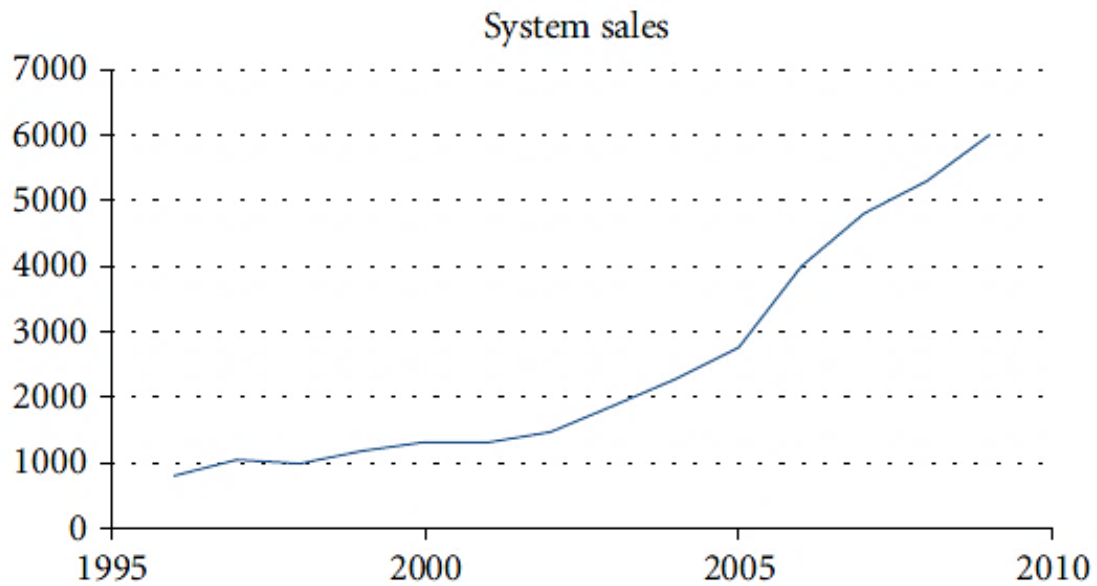
Η ανάπτυξη των μηχανημάτων προσθήκης υλικού, αποτέλεσε το καθοριστικό σημείο τομής με το παρελθόν. Οι νέες μηχανές, επέτρεψαν την κατασκευή πρωτότυπων ή αντιγράφων ακριβείας, απευθείας από ψηφιακά μοντέλα των αντικειμένων δημιουργημένα με τη χρήση λογισμικού CAD (Computer Aided Design), με μικρότερο κόστος και μέσα σε διάστημα ωρών αντί των εβδομάδων ή των μηνών που απαιτούσαν οι παλαιότερες διαδικασίες (Noorani, 2006 ; Diegel, 2010).



Εικόνα 1.3: Κύκλος σχεδίασης και παραγωγής ενός προϊόντος (Noorani et al., 2006)

Η δραστική μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής των πρωτότυπων, βελτιστοποιεί τη διαδικασία της ανάπτυξης ενός προϊόντος, παρέχοντας στους κατασκευαστές τη χρονική άνεση να τελειοποιήσουν τα προϊόντα τους στο πιο κρίσιμο στάδιο της ανάπτυξής τους, αυτό της βασικής σχεδίασης, με αποτέλεσμα να φθάνουν στην αγορά ολοκληρωμένα, ταχύτερα και με μικρότερο κόστος (Εικόνα 1.3). Ήδη από το 1994 οι τεχνικοί της εταιρίας αεροπορικών κινητήρων Pratt & Whitney δήλωναν ότι η εισαγωγή τεχνικών ταχείας πρωτοτυποποίησης για την κατασκευή χυτών ακριβείας, επέτρεψε μείωση του κόστους και του χρόνου κατασκευής της τάξης του 70 έως 90%.

Ας επισημανθεί στο σημείο αυτό πως «ταχεία» πρωτοτυποποίηση δεν σημαίνει «στιγμιαία»: στην πράξη, όλα σχεδόν τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με τις μεθόδους αυτές απαιτούν 3 έως και 72 ώρες, ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητά τους. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση συνοδεύεται ακόμη από αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά το μέγεθος των αντικειμένων που μπορούν να κατασκευαστούν (όχι μεγαλύτερα των 0,125 m³) και τα χρησιμοποιούμενα υλικά (η κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων είναι σχετικά δύσκολη) (Noorani et al., 2006).



Εικόνα 1.4: Εξέλιξη της ενσωμάτωσης ταχείας πρωτοτυποποίησης (Wohlers, 2010)

Ακολουθώς οι τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης που είναι διαθέσιμες στην αγορά σήμερα θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην επόμενη ενότητα (Hopkinson N. et al., 2006).



Εικόνα 1.5: Αντικείμενα και εφαρμογές της Ταχείας Πρωτοτυποποίησης (RP) (Hopkinson N. et al. 2006)

1.4.1 Οφέλη

Τα οφέλη από την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων είναι πολλαπλά. Πρώτον, τα πρωτότυπα διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ όλων των συντελεστών της παραγωγής, διότι η κατανόηση των τρισδιάστατων αντικειμένων είναι ευκολότερη από την ανάγνωση δισδιάστατων σχεδίων. Σήμερα, η επικοινωνία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς πολλά επιμέρους τμήματα της παραγωγικής διαδικασίας εκτελούνται ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, η ταχεία κατασκευή και ανταλλαγή πρωτοτύπων στο στάδιο της σχεδίασης, επιτρέπει στο τμήμα παραγωγής μιας κατασκευάστριας εταιρίας να ετοιμάσει τα κατάλληλα εργαλεία και να αρχίσει να εγκαθιστά τις γραμμές παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα το καλλιτεχνικό τμήμα μπορεί να αρχίσει τη σχεδίαση της συσκευασίας πριν ακόμη οριστικοποιηθεί το σχέδιο του προϊόντος.

Δεύτερον, η κατασκευή πρωτοτύπων η οποία ήταν ανέκαθεν αναγκαία για τη διεξαγωγή μετρήσεων και δοκιμών στο στάδιο της σχεδίασης ενός προϊόντος, ώστε να διαπιστωθούν έγκαιρα τυχόν προβλήματα λειτουργικότητας, αντοχής κ.ά. επιταχύνεται και διευρύνεται με τη χρήση μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι οποίες καθιστούν εύκολη πλέον την ταχεία κατασκευή ενός πρωτοτύπου ώστε να μελετηθούν και να εντοπιστούν τυχόν ατέλειες και κατόπιν την επανασχεδίασή του και την κατασκευή νέου πρωτοτύπου κ.ο.κ., διαδικασία ιδιαίτερα χρονοβόρα με τις παλαιότερες μεθόδους κατασκευής πρωτοτύπων (Ashley, 1991 ; Grimm, 2004).

Τρίτον, εκτός από το πλεονέκτημα της ταχύτητας, κάθε μέθοδος προσθήκης υλικού προσφέρει δυνατότητες που δεν προσφέρουν τα παλαιότερα, μεταλλικά συνήθως, πρωτότυπα. Για παράδειγμα οι τεχνικοί της Porsche χρησιμοποίησαν πρωτότυπα από διαφανές πλαστικό για το κάλυμμα του συστήματος μετάδοσης των μοντέλων της σειράς 911, κατασκευασμένο με την τεχνική της στερεολιθογραφίας, για να μελετήσουν παραστατικά την κυκλοφορία της βαλβολίνης, ενώ η γαλλική SNECMA που κατασκευάζει στροβιλοκινητήρες χρησιμοποίησε το πρωτότυπο ενός στροβίλου το οποίο κατασκευάστηκε επίσης με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας, για να μελετήσει την καταπόνηση των πτερυγίων του με τη βοήθεια φωτοελαστικών μεθόδων ανάλυσης.

Αλλά τα σημαντικότερα οφέλη αναμένονται από τη μεταφορά των συγκεκριμένων τεχνικών από τον χώρο της ταχείας πρωτοτυποποίησης, στην ταχεία κατασκευή εργαλείων (Rapid Tooling) και κυρίως στην ταχεία παραγωγή έτοιμων προς διάθεση προϊόντων (Rapid Manufacturing) (Cooper, 2001 ; Hopkinson, 2006).

1.4.2 Συνήθειες εφαρμογές

Οι περισσότερες υπηρεσίες ταχείας πρωτοτυποποίησης εντοπίζονται στις εξής βιομηχανίες: σχεδιασμός προϊόντων και λύσεις μηχανολογικών εφαρμογών (design and engineering), MME, καταναλωτικά προϊόντα, ηλεκτρονική, αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανίες, ρομποτική, ηλεκτρικές συσκευές, τηλεπικοινωνίες, ορθοπαιδική, υγειονομική περίθαλψη, οδοντοτεχνική, μεταλλουργία, καύσιμα, πετροχημική, παιχνίδια και πλαστικά αντικείμενα.

Η ταχεία πρωτοτυποποίηση έχει αμέτρητες εφαρμογές: τα πρωτότυπα αποτελούν εξαιρετικά οπτικά μέσα για παρουσίαση ιδεών σε συνεργάτες ή πελάτες. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για δοκιμή σχεδιασμού, π.χ. ένας μηχανικός αεροδιαστημικής θα μπορούσε να τοποθετήσει ένα πρωτότυπο αεροτομής σε μία αεροσήραγγα για να μετρήσει τις δυνάμεις άνωσης και αντίστασης. Οι σχεδιαστές πάντα χρησιμοποιούν την ταχεία πρωτοτυποποίηση καθώς δημιουργεί πρωτότυπα σε σύντομο διάστημα και με λιγότερο κόστος.

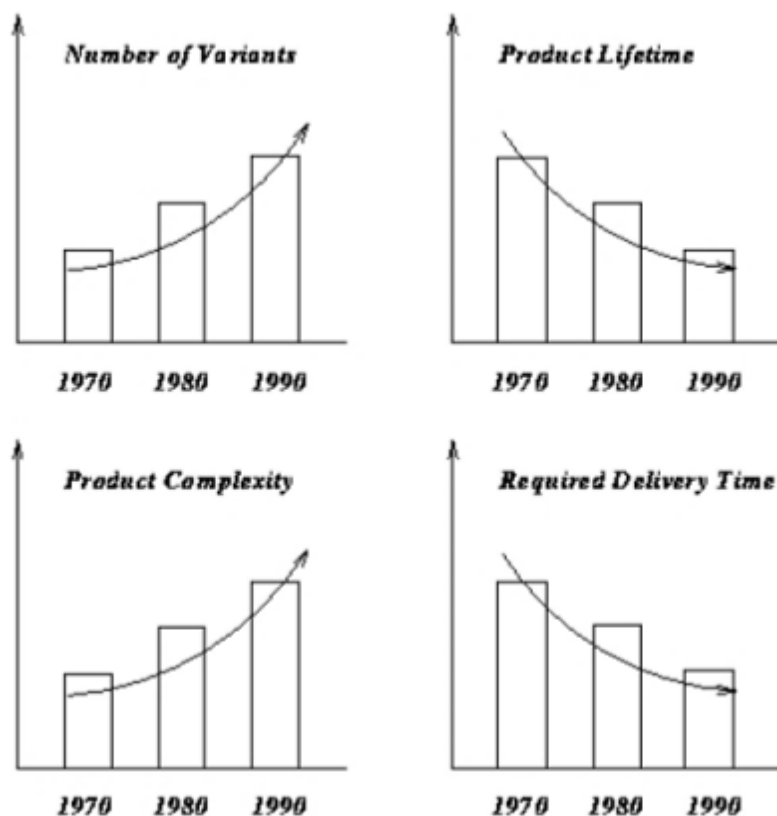
Εκτός από την κατασκευή μοντέλων, οι τεχνικές ΤΠ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για να κάνουν κατεργασία (γνωστή ως ταχεία κατεργασία) και να δημιουργήσουν προϊόντα ποιότητας (ταχεία κατασκευή). Η ταχεία πρωτοτυποποίηση είναι η καταλληλότερη διαθέσιμη διαδικασία κατασκευής για μικρό όγκο παραγωγής και περίπλοκα αντικείμενα. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε, ο όρος «ταχεία» είναι σχετικός. Η μεγάλη αυτή εξοικονόμηση χρόνου δίνει την δυνατότητα στους κατασκευαστές να εισάγουν στην αγορά προϊόντα σε σύντομο χρόνο και χωρίς μεγάλο κόστος (Noorani, 2006).

Επιπλέον, τα πρωτότυπα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δοκιμές αγοράς πριν την εισαγωγή κάποιου προϊόντος στην τελική παραγωγή και το στάδιο εμπορευματοποίησης. Εφόσον λοιπόν, η ΤΠ βασίζεται σε τεχνολογικές αλλαγές ή βελτιώσεις, η δημιουργία αυτών των μοντέλων συνήθως πραγματοποιείται από τεχνολόγους οι οποίοι δεν υπολογίζουν το κόστος της παραγωγής (το κόστος εξαρτάται από τα υλικά, το επιπλέον προσωπικό, την εκπαίδευση αυτού του προσωπικού και τις αλλαγές στο σύστημα). Η γρήγορη ανάπτυξη των μοντέλων θα είναι επιτυχημένη μόνο εφόσον ισχύουν τα εξής: (Noorani, 2006):

1. Κάθε πρωτότυπο πρέπει να δίνει απαντήσεις σε συγκεκριμένα ερωτήματα.
2. Το πρωτότυπο πρέπει να είναι όσο πιο λεπτομερές και σύνθετο χρειάζεται ώστε να παρέχει τις απαιτούμενες πληροφορίες.
3. Εάν υπάρχουν πολλαπλές δοκιμές, χρειάζεται να δημιουργηθούν και πολλαπλά πρωτότυπα.
4. Οι αποφάσεις πρέπει να λαμβάνονται κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του πρωτοτύπου και όχι στο τελευταίο στάδιο.

5. Όσο ταχύτερη είναι η δημιουργία πρωτοτύπου, τόσο ταχύτερη είναι η συνολική ανάπτυξη του νέου προϊόντος.

Η Εικόνα 1.6 δείχνει την εξέλιξη των απαιτήσεων της βιομηχανίας, οι οποίες έχουν αλλάξει τις 3 προηγούμενες δεκαετίες.

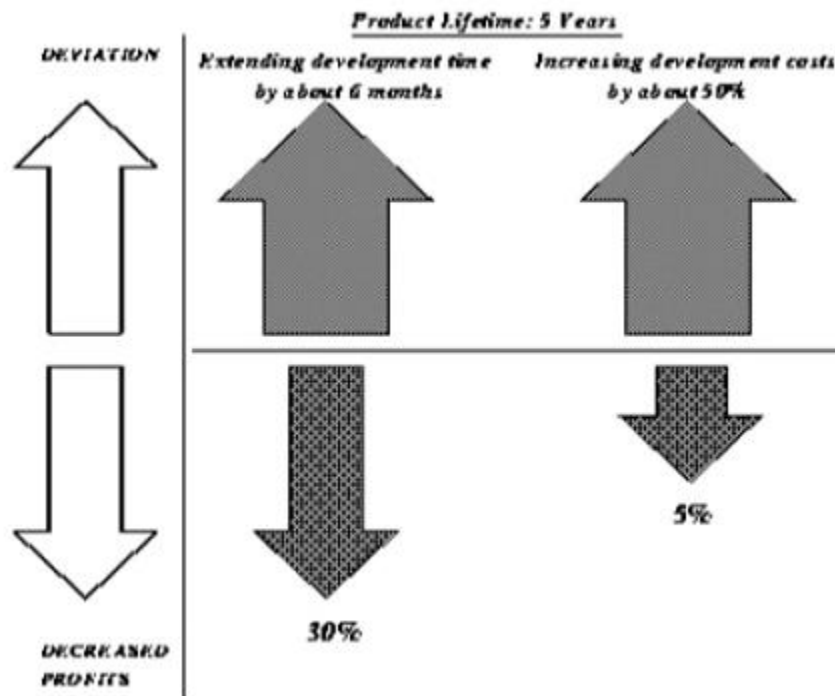


Εικόνα 1.6: Χρονική εξέλιξη των αλλαγών που έχουν γίνει στις ανάγκες των βιομηχανιών (Cooper, 2001)

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάπτυξης, κάθε υπεύθυνος βρίσκεται συχνά αντιμέτωπος με την επιλογή ή να επεκτείνει το χρόνο ανάπτυξης ή να αυξήσει τους πόρους, για να προλάβει τις προθεσμίες. Κάτω από αυτές τις περιστάσεις, ο χρόνος έχει ταυτισθεί σαν παράγοντας κλειδί στην αποδοτικότητα. Περισσότερο σημαντικό για τα αποτελέσματα, είναι ο χρόνος ανάπτυξης και όχι το κόστος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.7 (Cooper, 2001).

Αυτό το σενάριο απαιτεί αλλαγές στον τρόπο ανάπτυξης του προϊόντος. Διαφορετικές ομάδες σχεδιασμού, μάρκετινγκ, παραγωγής πρέπει να συνεργαστούν περισσότερο στενά προς ένα κοινό στόχο και να εργαστούν παράλληλα. Ο στόχος πρέπει να είναι ξεκάθαρος σε όποιον αναμειγνύεται για να είναι αποτελεσματική η συνεργασία, αλλά και για να αποφεύγονται προβλήματα επικοινωνίας. Η ΤΠ επιτρέπει να ετοιμάζεται ένα φυσικό μοντέλο,

όσο γρήγορα ετοιμάζεται και ένα μοντέλο σε τρισδιάστατη μορφή σε ένα σύστημα CAD.



Εικόνα 1.7: Σημασία του χρόνου που αφιερώνεται στην ανάπτυξη ενός προϊόντος (Hopkinson, 2006)

Επιπρόσθετα, τα μοντέλα που παράγονται μέσω της ΤΠ χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τεστ λειτουργικότητας και για την επίτευξη εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν για δοκιμές πριν την παραγωγή. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατόν τα λάθη να εντοπισθούν σε πιο πρώιμο στάδιο, όπου οι αλλαγές δεν κοστίζουν πολύ. Οι απαιτήσεις είναι δυνατόν να ξεκαθαριστούν και να κατανοηθούν καλύτερα, οδηγώντας σε καλύτερα προϊόντα που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της αγοράς. Έχει εκτιμηθεί πως εφαρμόζοντας αποτελεσματικά την RP, ο χρόνος ανάπτυξης ενός εργαλείου μπορεί να μειωθεί στο μισό (Hopkinson, 2006).

Άλλη μια σημαντική όψη είναι το κόστος της εισαγωγής αλλαγών στο σχεδιασμό ενός προϊόντος. Υπό την εκτίμηση αυτή, η ανάπτυξη ενός φυσικού προϊόντος δεν διαφέρει από την ανάπτυξη λογισμικού: το κόστος εισαγωγής αλλαγών αυξάνει σημαντικά όσο πλησιάζουμε στα τελευταία στάδια της ανάπτυξης. Η RP μπορεί να αποτελέσει σημαντικό μέσο για την απόκτηση ενός σχεδίου πριν να γίνουν δαπανηρές δεσμεύσεις, οι οποίες θα επηρεάσουν το κόστος της μηχανικής κατεργασίας και το συνολικό κόστος του προϊόντος. Ωστόσο, η RP δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την ανάπτυξη

προϊόντων, αν δεν χρησιμοποιείται ένα 3D σύστημα CAD για να δημιουργηθεί το αρχικό μοντέλο του προϊόντος (Hopkinson, 2006).

1.5 Εξατομικευμένη παραγωγή αντικειμένων

Η μέθοδος της προσαρμογής στις ανάγκες του πελάτη ή η μέθοδος της εξατομικευμένης παραγωγής (mass customization) απαιτεί την χρήση ευέλικτων υπολογιστικών συστημάτων παραγωγής για την κατασκευή εκείνων των προϊόντων που θα διαθέτουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά που έχει ορίσει ο πελάτης.

Οι Kaplan και Haenlein (2006) όρισαν την μέθοδο της εξατομικευμένης παραγωγής ως μια στρατηγική που δημιουργεί αξία μέσω κάποιας μορφής αλληλεπίδρασης μεταξύ επιχείρησης και πελατών στο στάδιο της κατασκευής και της συναρμολόγησης για την κατασκευή προϊόντων προσαρμοσμένα απολύτως στις ανάγκες των πελατών.

Η μέθοδος της εξατομικευμένης παραγωγής είναι το νέο σύνορο στον ανταγωνισμό των επιχειρήσεων που ανήκουν στον κλάδο της βιομηχανίας και των υπηρεσιών (Pine, 1992). Μέσω της εξατομικευμένης παραγωγής οι επιχειρήσεις μπορούν να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα αφού προσφέρουν υπηρεσίες που ικανοποιούν στον μέγιστο βαθμό τις απαιτήσεις των πελατών τους.

Η εφαρμογή όμως της εξατομικευμένης παραγωγής σήμερα με την έννοια που παραθέσαμε παραπάνω δεν συναντάται εύκολα και ο λόγος είναι ότι για μια μεσαία επιχείρηση η πιθανότητα για καθαρό κέρδος σε σύντομο χρονικό διάστημα δεν είναι μεγάλη. Είναι κατανοητό ότι η τεχνική της εξατομικευμένης παραγωγής απαιτεί την πλήρη αναμόρφωση της παραγωγικής της διαδικασίας, γεγονός που μπορεί να είναι εξαιρετικά δαπανηρό. (T. Grimm, 2004)

Σε απάντηση, οι επιχειρήσεις εφαρμόζουν την τεχνική του mass customization ή μαζικής εξατομικευμένης παραγωγής, η οποία αναφέρεται στην μαζική παραγωγή επί παραγγελία προϊόντων σε χαμηλές τιμές, σύμφωνα όμως με τις προδιαγραφές κάθε πελάτη ή τις απαιτήσεις κάθε αγοράς. Η φιλοσοφία δηλαδή είναι ίδια, καθώς παράγονται εξατομικευμένα προϊόντα σύμφωνα με τις επιμέρους απαιτήσεις των πελατών. Η ειδοποιός διαφορά είναι ότι τα προσαρμοσμένα αυτά προϊόντα παράγονται σε μεγάλες ποσότητες και είναι διαθέσιμα στον πελάτη σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η τεχνική της μαζικής εξατομικευμένης παραγωγής απαιτεί τον συγχρονισμό των διαδικασιών της παραγγελίας, της κατασκευής και της διανομής με στόχο την προσφορά στον πελάτη μαζικών βιομηχανοποιημένων προϊόντων που έχουν κατασκευαστεί με τις προδιαγραφές που αυτός έχει ορίσει και πολλές φορές σύμφωνα με (διεθνή) πρωτότυπα κατασκευής (Grimm, 2004).

1.5.1 Ταχεία παραγωγή (Rapid Manufacturing)

Το Rapid Manufacturing όπως έχει γίνει γνωστό ευρύτερα είναι η αυτοματοποιημένη παραγωγή έτοιμων προς πώληση προϊόντων, κατευθειάν από ψηφιακά δεδομένα CAD, αποτελεί την πλέον εντυπωσιακή και υποσχόμενη εξέλιξη της Ταχείας Πρωτοτυποποίησης. Τα πλεονεκτήματα της ταχείας παραγωγής δεν περιορίζονται μόνο στην αύξηση της ταχύτητας, στην ορθολογικοποίηση της παραγωγής και στη συνακόλουθη μείωση χρόνου και κόστους, αλλά επεκτείνονται και στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες (μηχανικές και άλλες) των κατασκευαζόμενων με τις τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης προϊόντων. Για παράδειγμα, ο έλεγχος σε μικροσκοπικό επίπεδο της δομής των προϊόντων μέσω της προσεκτικής επιλογής του υλικού, του πάχους και της μορφής των διαδοχικών διατομών, μπορεί να επιτρέψει την κατασκευή στιβαρότερων τεμαχίων από τα αντίστοιχα που κατασκευάζονται με συμβατικές τεχνικές χύτευσης ή σφυρηλάτησης.

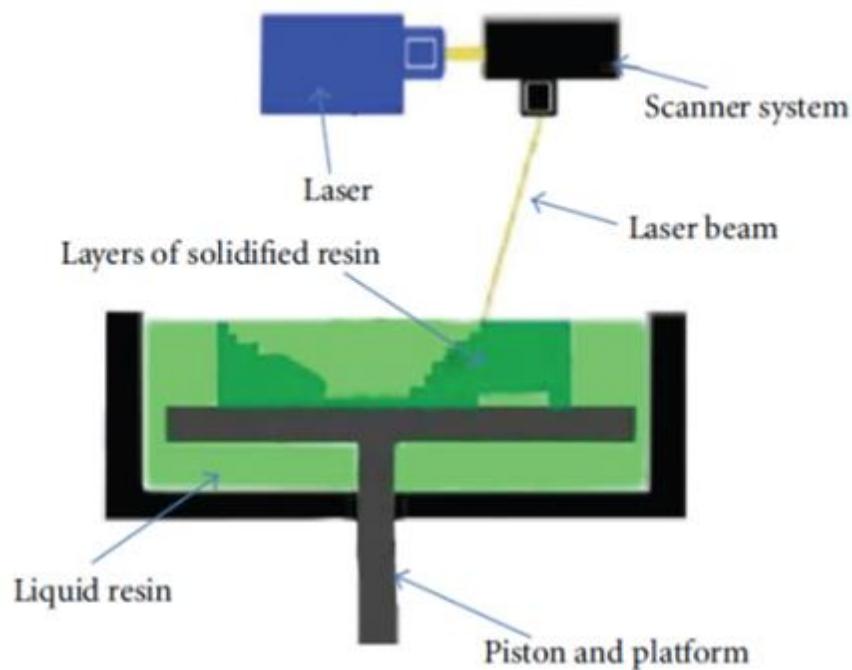
Επίσης, είναι δυνατή η εξοικονόμηση βάρους, καθώς η διαδικασία επιτρέπει την ενίσχυση με υλικό ακριβώς εκείνων των περιοχών όπου αυτό είναι αναγκαίο. Ακόμη, διευκολύνεται η κατασκευή πολύπλοκων μορφών, οι οποίες αν και βέλτιστες από σχεδιαστική άποψη, θα ήταν πολύ δύσκολο ή αντιοικονομικό να κατασκευαστούν με τις συμβατικές μεθόδους. Τέλος, είναι δυνατή η παρασκευή προϊόντων με ειδικά χαρακτηριστικά, όπως τα χάπια της αμερικανικής εταιρίας Therics, τα οποία κατασκευάζονται με την απόθεση διαδοχικών στρώσεων διαφορετικών υλικών, επιτρέποντας την απελευθέρωση συγκεκριμένων δόσεων φαρμάκου ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (Grimm, 2004).

1.6 Μέθοδοι προσθήκης υλικού (AM processes)

1.6.1 Στερεολιθογραφία (Stereolithography- SL)

Η στερεολιθογραφία είναι η παλαιότερη τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης. Εφευρέθηκε το 1984 από τον Charles Hall και κατοχυρώθηκε το 1986. Με την τεχνική αυτή κατασκευάζονται τρισδιάστατα αντικείμενα από υγρά φωτοευαίσθητα πολυμερή, τα οποία στερεοποιούνται όταν εκτεθούν σε υπεριώδη ακτινοβολία. Το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε μια βάση, η οποία βυθίζεται σε ένα δοχείο που περιέχει υγρή εποξική ή ακρυλική ρητίνη. Αρχικά, η βάση τοποθετείται σε ελάχιστο βάθος μέσα στο υγρό (ίσο με το πάχος της διατομής που πρόκειται να κατασκευαστεί). Κατόπιν μια κεφαλή laser

υπεριωδών ακτίνων χαμηλής ισχύος κινούμενη στους άξονες x και y, διαγράφει το σχήμα της διατομής (όπως προβλέπεται από το ψηφιακό σχέδιο) φωτίζοντας και στερεοποιώντας τις αντίστοιχες περιοχές του στρώματος του πολυμερούς (τα υπόλοιπα τμήματα του οποίου παραμένει υγρό). Κατόπιν η βάση βυθίζεται μέσα στο υγρό πολυμερές κατά το πάχος της επόμενης διατομής, ενώ ένας κύλινδρος «απλώνει» και οριζοντιώνει το υγρό πάνω στο στερεοποιημένο τμήμα και η κεφαλή laser χαράσσει τη νέα διατομή πάνω στην πρώτη (Εικόνα 1.8) (Pham et al., 2000 ; Kim et al., 2010).



Εικόνα 1.8: Πλάγια όψη μιας διάταξης στερεολιθογραφίας (Pham et al., 2000)

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου. Στη συνέχεια το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο, πλένεται, αφαιρούνται τα τυχόν στηρίγματά του και κατόπιν τοποθετείται σε ένα «φούρνο» υπεριωδών ακτίνων για τη τελική σκλήρυνση. Ας αναφέρουμε ότι κατά τα πρώτα χρόνια της στερεολιθογραφίας, τα κατασκευαζόμενα αντικείμενα ήταν σχετικά εύθραυστα, ενώ εμφάνιζαν διάφορες στρεβλώσεις και παραμορφώσεις κατά τη φάση της σκλήρυνσης, αλλά τα προβλήματα αυτά διορθώθηκαν αργότερα. Οι πρώτες μηχανές στερεολιθογραφίας κατασκευάστηκαν από την εταιρία 3D Systems που εδρεύει στη Valencia της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ το 1988 και η οποία παραμένει έως σήμερα επικεφαλής της αγοράς στον τομέα των μηχανών ταχείας πρωτοτυποποίησης (Pham et al., 2000).

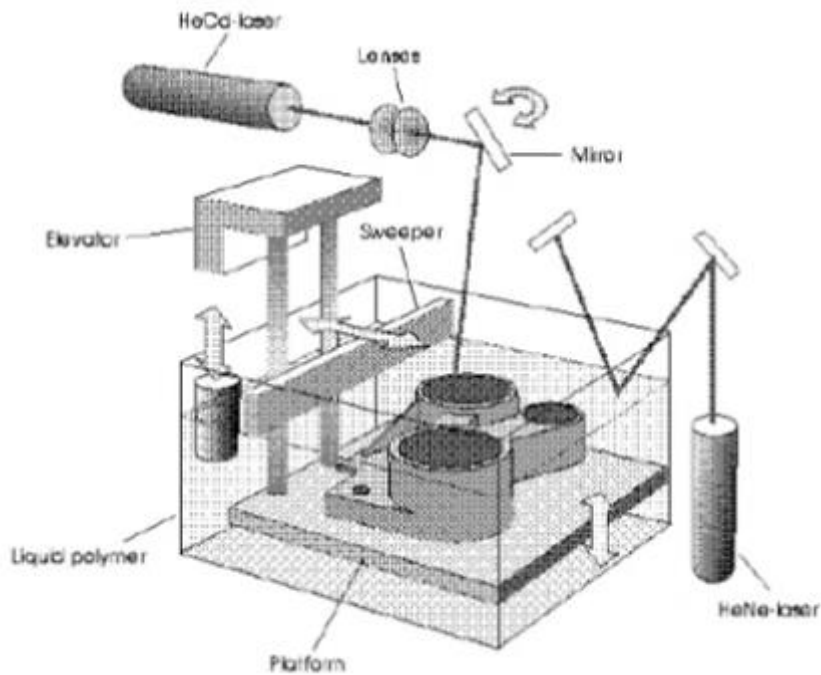
Ακολούθως στην Εικόνα 1.9 φαίνεται ένα μοντέλο διατάξεων στερεολιθογραφίας, το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρία 3D Systems Inc.



Εικόνα 1.9: Το μηχάνημα στερεολιθογραφίας, μοντέλο SLA5000 της 3D Systems Inc (Kim et al., 2010)

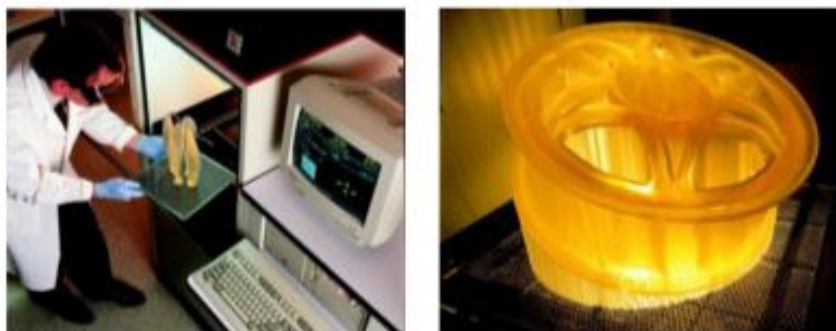
- Περιγραφή αρχής λειτουργίας

Αρχικά, ο ανελκυστήρας βρίσκεται σε μια απόσταση από την επιφάνεια του ρευστού ίση με το πάχος του πρώτου στρώματος. Η ακτίνα laser σαρώνει την επιφάνεια. Το ρευστό είναι φωτο-πολυμερές και με τις υπεριώδεις ακτίνες laser στερεοποιείται. Ο ανελκυστήρας μετακινείται προς τα κάτω και με την ίδια διαδικασία παράγεται το επόμενο επίπεδο. Στο τέλος το μοντέλο αφαιρείται από το διάλυμα και το παγιδευμένο στο εσωτερικό του μοντέλου ρευστό, αφαιρείται σε ειδικό φούρνο (Εικόνα 1.10) (Diegel, 2010).



Εικόνα 1.10: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας της στερεολιθογραφίας (Diegel, 2010)

Η ακτίνα laser που στερεοποιεί το ρευστό είναι η ακτίνα HeCd. Μια δεύτερη ακτίνα laser χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώνει ότι η επιφάνεια του ρευστού βρίσκεται στη σωστή θέση. Ο σαρωτής σπάει τις επιφανειακές εντάσεις, επιβεβαιώνει ότι επιτυγχάνεται επίπεδη επιφάνεια και ελαχιστοποιεί το χρόνο διαδικασίας για κάθε στρώμα. Απαιτούνται υποστηρικτικές κατασκευές που αφαιρούνται συνήθως χειροκίνητα στο τέλος. Ο χρόνος σάρωσης εξαρτάται από την γεωμετρία των περιγραμμάτων και την ταχύτητα του laser (Diegel, 2010).



Εικόνα 1.11: Μηχάνημα στερεολιθογραφίας και το αντίστοιχο παραγόμενο αντικείμενο (Diegel, 2010)

1.6.2 Δημιουργία αρχείων στερεολιθογραφίας (STL file) μέσω μετρήσεων με τη βοήθεια ακτίνας laser

Το πρώτο αρχείο STL δημιουργήθηκε το 1987 από την 3D Systems Inc. Η χρήση της τεχνολογίας στρωματικής εναπόθεσης υλικού γίνεται με την χρήση εικονικών σχεδίων Computer Aided Design (CAD). Στη συνέχεια τα τεμαχίζει σε λεπτές, εικονικές, οριζόντιες εγκάρσιες τομές και δημιουργεί διαδοχικές στρώσεις μέχρι το μοντέλο είναι πλήρες. Είναι μια διαδικασία WYSIWYG (What You See Is What You Get) όπου το εικονικό μοντέλο και το φυσικό μοντέλο είναι σχεδόν ταυτόσημα.

Η πρότυπη διεπαφή δεδομένων μεταξύ λογισμικού CAD και των μηχανημάτων είναι η μορφή αρχείου STL. Ένα αρχείο STL προσεγγίζει το σχήμα ενός εξαρτήματος ή ενός πλήθους συναρμολογημένων εξαρτημάτων με τρίγωνα. Οι μικρότερες έδρες των τριγώνων παράγουν υψηλότερη ποιότητα επιφάνειας. Τα VRML (ή WRL) αρχεία συχνά χρησιμοποιούνται ως είσοδος για τεχνολογίες 3D εκτύπωσης που είναι σε θέση να εκτυπώνουν σε πλήρη κλίμακα χρωμάτων (Diegel, 2010).

1.6.3 Τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing - 3DP)

Η τεχνική αναφέρεται σε μια κατηγορία μηχανών που χρησιμοποιούν τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης ink-jet. Όπως αναφέρθηκε, η πρώτη από τις μηχανές αυτές (γνωστή ως 3D Printing, 3DP) αναπτύχθηκε από το MIT το οποίο χορήγησε δικαιώματα κατασκευής σε έναν αριθμό εταιριών (Soligen Corporation, Extrude Hone, Z Corporation και άλλες). Ο εκτυπωτής ZCorp 3D της Z Corporation αποτελεί τυπικό παράδειγμα της κλάσης: Τα αντικείμενα κατασκευάζονται πάνω σε μια βάση η οποία βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο που περιέχει το υλικό υπό μορφή σκόνης. Κατά την εκκίνηση της διαδικασίας, η βάση κατέρχεται κατά το πάχος μιας διατομής και μια διάταξη τροφοδοσίας απλώνει πάνω της μια κατάλληλη ποσότητα σκόνης. Κατόπιν μια κεφαλή ink-jet που κινείται κατά τους άξονες x, y ψεκάζει επιλεκτικά ένα συγκολλητικό υγρό το οποίο στερεοποιεί τη σκόνη διαγράφοντας το επιθυμητό σχήμα της διατομής. Η περίσσεια σκόνης που απομένει χρησιμεύει για τη στήριξη του κατασκευαζόμενου αντικειμένου. Στη συνέχεια η βάση κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής. Προστίθεται και πάλι η ανάλογη ποσότητα σκόνης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή, το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο και με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα καθαρίζεται από την περίσσεια σκόνης. Τα τελειωμένα τεμάχια μπορούν να ψεκάστουν με κερί, κυανοακρυλική κόλλα ή με άλλες ουσίες για να βελτιωθεί η αντοχή τους και το φινίρισμα της επιφάνειάς τους. Το τυπικό πάχος κάθε

διατομής είναι 0,1 mm. Η τεχνική είναι υψηλής ταχύτητας, ενώ παράγει αντικείμενα με σχετικά αδρό φινίρισμα. Η Z Corp χρησιμοποιεί δύο διαφορετικά υλικά, μια σκόνη με βάση αμύλου (η οποία δεν παράγει στιβαρά αντικείμενα, αλλά μπορεί να καεί και συνεπώς να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή χυτών ακριβείας) και μία κεραμική σκόνη. Προφέρει επίσης τη δυνατότητα εισαγωγής χρωμάτων στην κατασκευή. (Rengier et al. 2010)

Οι μηχανές 3D ink-jet Printing της εταιρίας 3D Systems (γνωστές και ως Thermo ή Multi-jet Printers) χρησιμοποιούν μια γραμμική διάταξη κεφαλών ink-jet για την ταχεία κατασκευή μοντέλων από θερμοπλαστικό υλικό. Εάν το αντικείμενο έχει μικρό πλάτος, είναι δυνατή η κατασκευή κάθε διατομής με μία μόνο διέλευση της κεφαλής, αλλιώς εκτελούνται περισσότερες διελεύσεις μέχρι να κατασκευαστεί η διατομή.

Οι μηχανές της σειράς Model Maker της εταιρίας Sanders Prototype χρησιμοποιούν μια διαφορετική τεχνική ink-jet: Οι μηχανές διαθέτουν δύο κεφαλές ink-jet, από τις οποίες η μία εναποθέτει θερμοπλαστικό υλικό χαμηλού σημείου τήξης και η άλλη κερί για τη στήριξη του κατασκευαζόμενου αντικειμένου. Μετά την εκτύπωση κάθε διατομής, μια κεφαλή με κοπτικό εργαλείο φρεζάρει τη διατομή ώστε να αποκτήσει ομοιόμορφο πάχος. Η διαδικασία αυτή αποδίδει πρωτότυπα εξαιρετικής ακριβείας και για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιείται στην κατασκευή κοσμημάτων (Rengier et al. 2010).



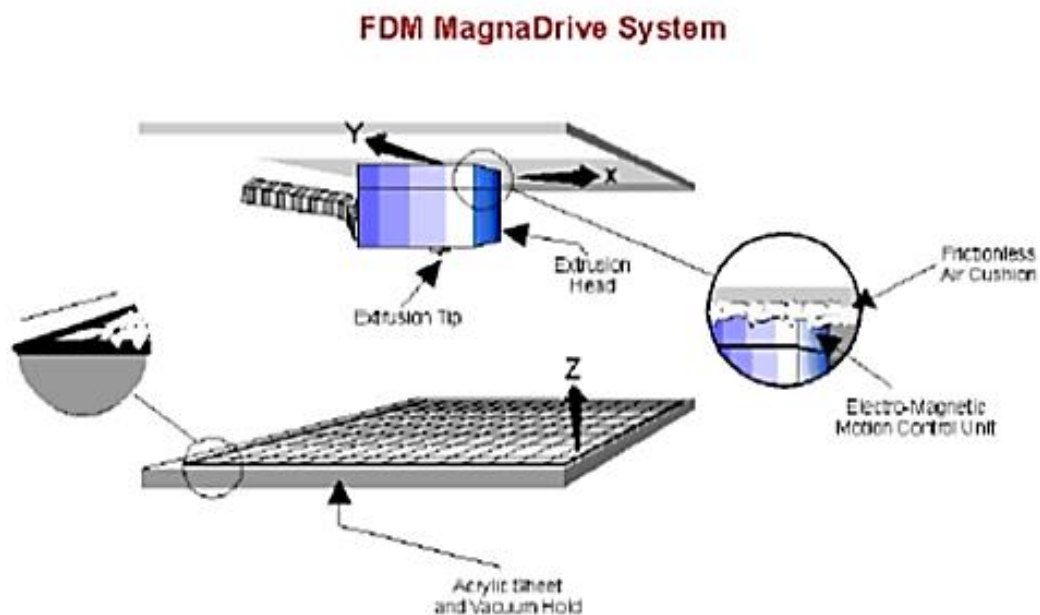
Εικόνα 1.12: Παραγόμενα πρωτότυπα από μηχανήμα τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DP) (Wohlert, 2012)

1.6.4 Εναπόθεση τήγματος θερμοπλαστικού νήματος (Fused deposition modeling – FDM)

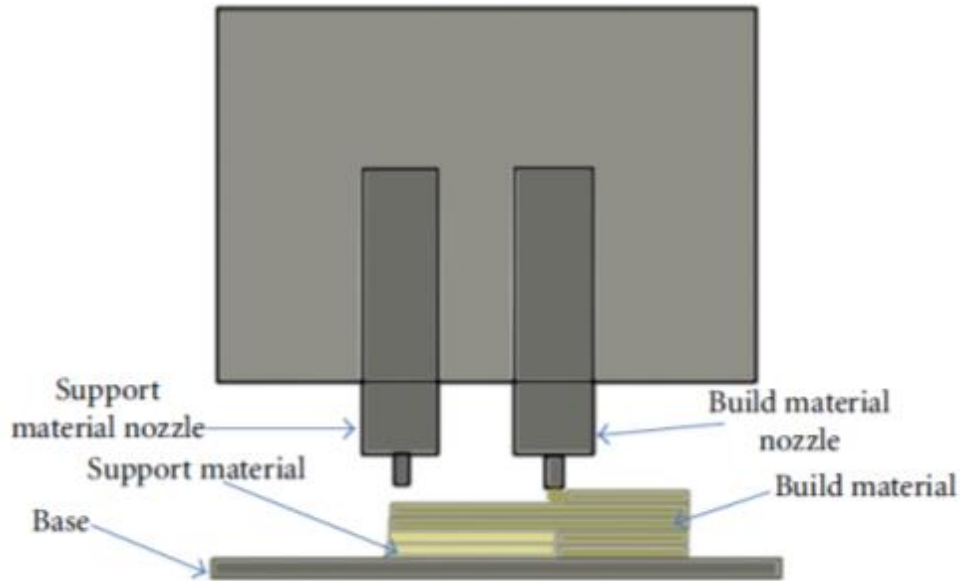
Στην τεχνική αυτή ίνες θερμού πλαστικού υλικού εξέρχονται από μια κεφαλή η οποία κινείται στο επίπεδο x-y. Η κεφαλή εναποθέτει λεπτές στρώσεις του πλαστικού πάνω σε μια βάση κατά τρόπο παρόμοιο με την εναπόθεση κρέμας πάνω σε ένα κέικ από έναν ζαχαροπλάστη, διαγράφοντας την πρώτη διατομή. Επειδή η βάση βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, το υλικό στερεοποιείται

γρήγορα. Κατόπιν η βάση κατέρχεται και η κεφαλή εναποθέτει το δεύτερο στρώμα πάνω στο πρώτο. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου. Μηχανές FDM κατασκευάζονται από την αμερικανική εταιρία Startasys σε δύο εκδόσεις: μία για την ταχεία κατασκευή μοντέλων που αποδίδουν τη γενική ιδέα ενός σχεδίου και μία βραδείας εκτύπωσης που επιτρέπει την κατασκευή πρωτοτύπων ακριβείας. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά περιλαμβάνουν ABS, διάφορα ελαστομερή, πολυκαρβονικά υλικά, πολυφαινολσουλφονάλη κλπ (Wong, 2012).

Η διαδικασία FDM αναπτύχθηκε από την εταιρεία Stratasys Inc (Εικόνα 1.13). Υλοποιείται εξωθώντας λιωμένο υλικό διαμέσου ενός x-y ελεγχόμενου στομίου, πάνω σε ένα αφρώδες υπόστρωμα. Το υλικό έρχεται σε νηματώδη μορφή σε ένα καρούλι, το οποίο τροφοδοτείται στο πίσω μέρος της μηχανής. Το νήμα σπρώχνεται μέσω θερμαινόμενων άκρων στο στόμιο καθώς κινείται και εξωθείται. Η κίνηση και προέκταση ελέγχονται έτσι ώστε το υλικό να κατατίθεται παίρνοντας τη μορφή διαδοχικών στρωμάτων ενός τρισδιάστατου μοντέλου (Wong, 2012).

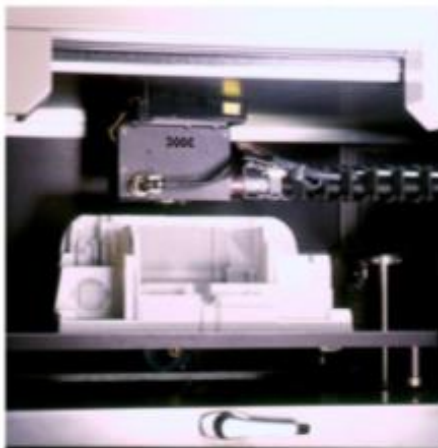


Εικόνα 1.13: Το νέο σύστημα FDM της Stratasys (Wong, 2012)



Εικόνα 1.14: Το νέο μηχάνημα FDM Quantum με Τεχνολογία MagnaDrive (Wong, 2012)

Η κεφαλή εξώθησης του συγκεκριμένου συστήματος (Εικόνα 1.14), περιέχει μια μονάδα ελέγχου ηλεκτρομαγνητικής κίνησης και κινείται πάνω από τη μεταλλική πλάκα. Η κεφαλή απωθείται από την πλάκα από ένα κύμα αέρα για να διατηρείται στο επιθυμητό ύψος. Αυτός ο τρόπος επιτρέπει στην κεφαλή να κινείται με μεγάλες ταχύτητες, όταν οι προστριβές τείνουν στο μηδέν. Το σύστημα Quantum έχει τη δυνατότητα να κατασκευάσει μοντέλα με διαστάσεις ως 600x500x600 mm (Wong, 2012).

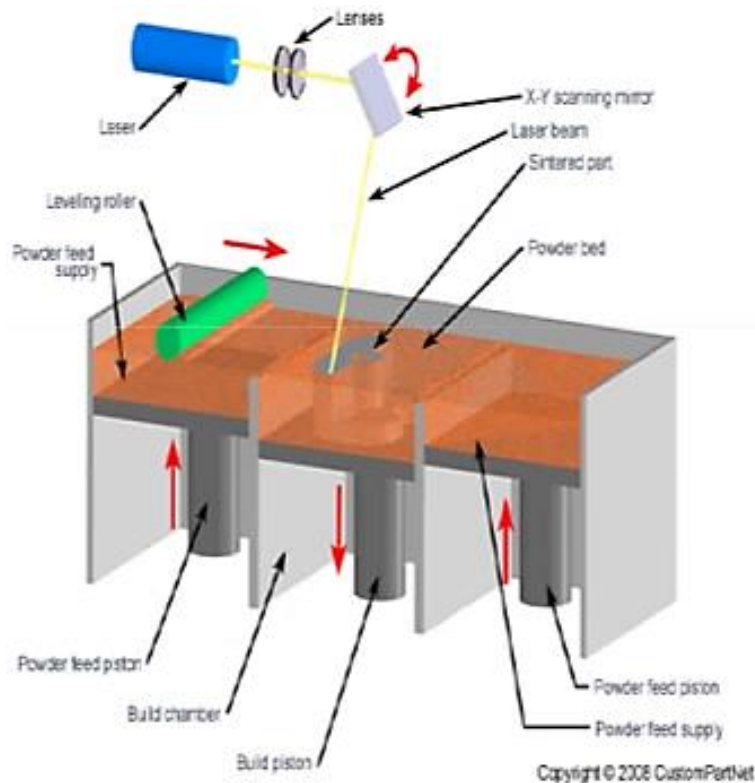


Εικόνα 1.15: Εσωτερική και συνολική άποψη ενός μηχανήματος μεθόδου FDM (Diegel, 2010)

1.6.5 Στερεοποίηση σκόνης με τη βοήθεια επικεντρωμένης ακτίνας laser (Selective laser sintering - SLS),

Η τεχνική SLS αναπτύχθηκε από τον Carl Deckard στο Πανεπιστήμιο του Texas και κατοχυρώθηκε το 1989. Στην τεχνική αυτή μια ακτίνα laser λιώνει και στερεοποιεί διάφορα υλικά (νάιλον, ελαστομερή ή μέταλλα) τα οποία βρίσκονται σε μορφή σκόνης. Ένας κύλινδρος «στρώνει» μια ποσότητα σκόνης κατάλληλου πάχους πάνω σε μια επιφάνεια και μια κεφαλή laser διαγράφει το σχήμα της πρώτης διατομής λιώνοντας και στερεοποιώντας επιλεκτικά την σκόνη. Κατόπιν η επιφάνεια κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής, τοποθετείται εκ νέου σκόνη την οποία στρώνει ο κύλινδρος και η κεφαλή laser διαγράφει την επόμενη διατομή στερεοποιώντας την πάνω στην πρώτη. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου (Εικόνα 1.16). Η περίσσεια της σκόνης κάθε στρώματος λειτουργεί ως υποστήριγμα του κατασκευαζόμενου αντικειμένου (Εικόνα 1.17). Αντίθετα με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν πιο πριν, όπου υπάρχει μόνο μια μεταβατική φάση, στην διαδικασία SLS υπάρχουν δύο: από στερεό σε ρευστό και πίσω πάλι σε στερεό (Kruth et al. 2005 ; Murr et al. 2012).

Τη μέθοδο αυτή την εκμεταλλεύεται εμπορικά η εταιρεία DTM Corp. Επίσης η εταιρεία EOS GmbH έχει παρουσιάσει στην αγορά μια διαδικασία που διεξάγεται με τις ίδιες αρχές (Slavko et al., 2010).



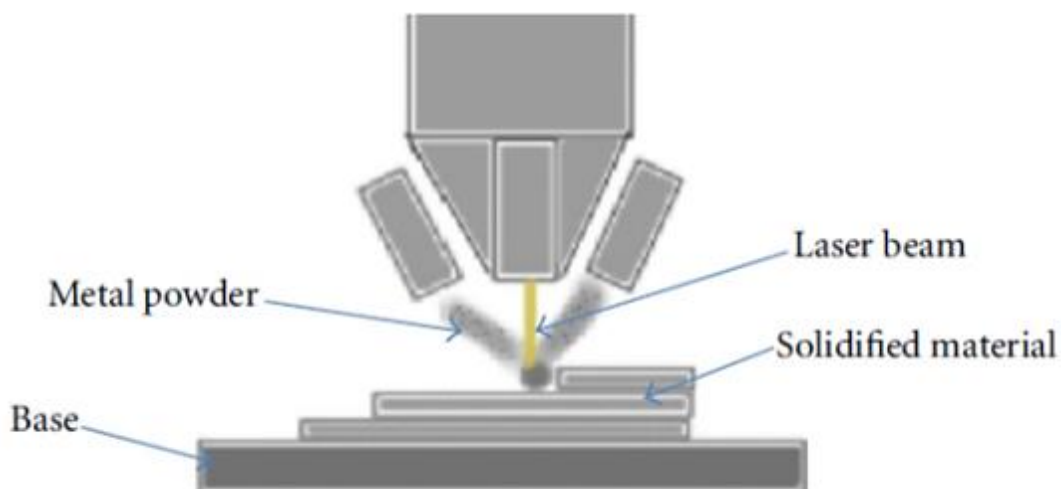
Εικόνα 1.16: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας SLS (Slavko et al., 2010)



Εικόνα 1.17: Αντικείμενα τα οποία έχουν κατασκευαστεί με την τεχνική SLS (Slavko et al., 2010)

1.6.6 Laser Engineered Net Shaping (LENS)

Μια άλλη τεχνική που αφορά την απευθείας κατασκευή εργαλείων κατεργασίας μετάλλων, χρησιμοποιεί ως υλικά ανοξείδωτο χάλυβα, inconel 625 (έναν χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο), χάλυβα κατασκευής εργαλείων H13, βολφράμιο, και καρβίδια τιτανίου. Μια κεφαλή laser προκαλεί την επιλεκτική τήξη ενός λεπτού άνω στρώματος του υλικού διαγράφοντας την προβλεπόμενη διατομή, πάνω στην οποία ψεκάζεται κατόπιν σκόνη μετάλλου η οποία στερεοποιείται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε διαδοχικά στρώματα έως ότου σχηματισθεί η επιθυμητή μορφή του εργαλείου (Εικόνα 1.18). Η τεχνική αυτή γνωστή ως LENS (Laser Engineered Net Shaping) έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή τεμαχίων υψηλής πυκνότητας με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, καθώς η προστιθέμενη σκόνη συντήκεται με το βασικό υλικό, αλλά προς το παρόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την κατασκευή αντικειμένων με απλές, ομοιόμορφες διατομές. (Xiong, 2009)



Εικόνα 1.18: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου LENS (Xiong, 2009)

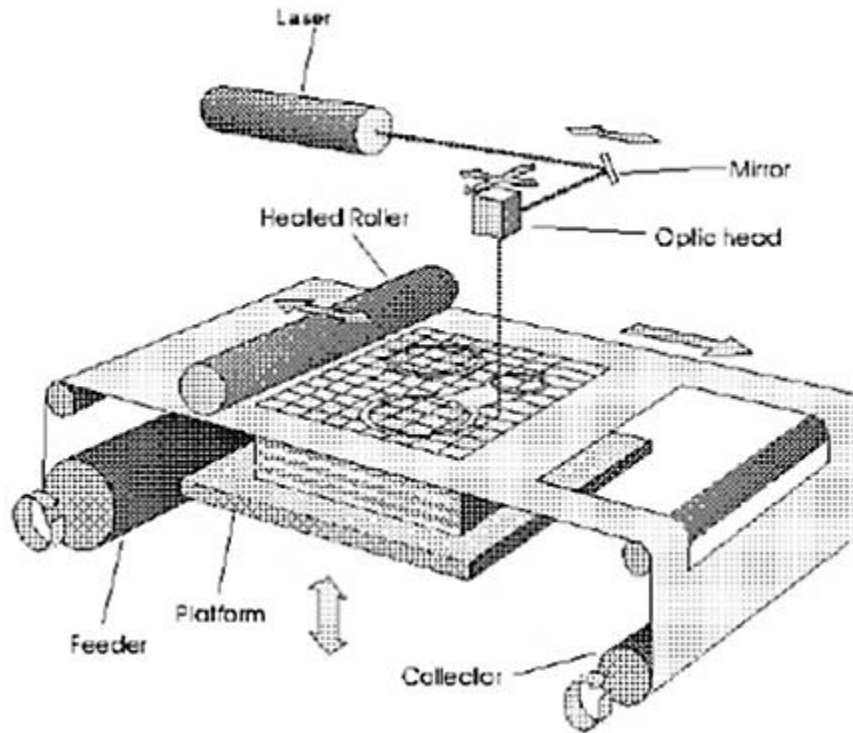
1.6.7 Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting)

Η τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM) είναι μια διαδικασία παρόμοια με την SLS. Πρόκειται για μια σχετικά νέα μέθοδο αλλά πολλά υποσχόμενη και ταχύτατα εξελισσόμενη. Με τη μέθοδο αυτή, η σκόνη τήκεται από μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής τάσης, συνήθως 30 με 60 kV. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε ένα θάλαμο κενού για την αποφυγή οξειδωσης, μιας και αφορά συνήθως μεταλλικά αντικείμενα. Μια μελλοντική εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι να υιοθετηθεί σε διαστημικές αποστολές/εφαρμογές, μιας και όλα συμβαίνουν υπό κενό. (Murr et al., 2012)

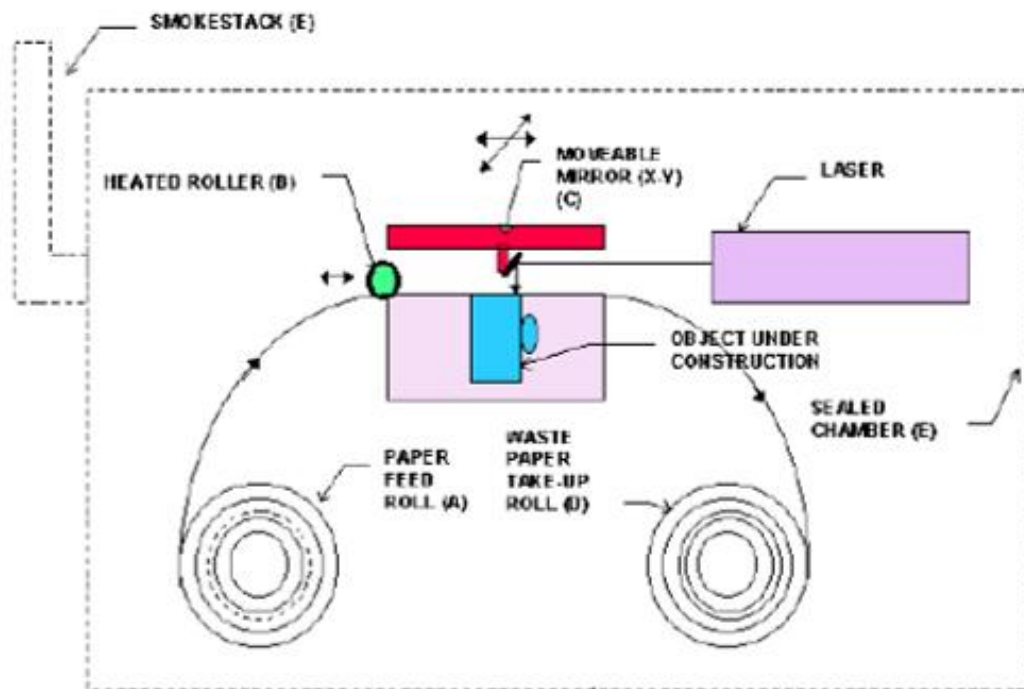
1.6.8 Κατασκευή πρωτότυπου με επάλληλες στρώσεις φύλλων υλικού (Laminated Object Manufacturing, LOM)

Η τεχνική LOM, η οποία αναπτύχθηκε από την αμερικανική εταιρία Helisys, βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με τη συγκόλληση λεπτών φύλλων υλικού που φέρουν επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας (heat-activated glue). Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν χαρτί, ενώ αργότερα η εταιρία ανέπτυξε και χρησιμοποίησε και άλλα υλικά (αδιάβροχο χαρτί, πλαστικά αλλά και λεπτές ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης). Οι συσκευές LOM λειτουργούν ως εξής (Εικόνα 1.19): Μια διάταξη τροφοδοσίας τοποθετεί το πρώτο φύλλο χαρτιού πάνω σε μια βάση και κατόπιν ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάνω από αυτό πιέζοντάς το ώστε να κολλήσει πάνω σε αυτήν. Στη συνέχεια μια κεφαλή laser «κόβει» το σχήμα της διατομής πάνω στο χαρτί και κατόπιν χαράζει μικρά τετράγωνα στο υπόλοιπο τμήμα του ώστε να διευκολύνεται η απόσπαση του αντικειμένου όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής του (Εικόνα 1.20).

Αφού κοπεί το πρώτο στρώμα, η βάση κατέρχεται, ένα νέο φύλλο προωθείται από τη διάταξη τροφοδοσίας και κατόπιν η βάση ανέρχεται λίγο ώστε ο θερμαινόμενος κύλινδρος να πιέσει και να κολλήσει το δεύτερο φύλλο στο πρώτο. Ακολουθεί η κοπή της νέας διατομής από την κεφαλή laser και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου, το οποίο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται χαρτί θα έχει την υφή ξύλου. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η επικάλυψη του αντικειμένου με χρώμα ή βερνίκι ώστε να μη προσβάλλεται και παραμορφώνεται από την υγρασία. Όταν χρησιμοποιούνται ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης το αντικείμενο πρέπει να υποστεί μια διαδικασία «σύντηξης» (συσσωμάτωσης - sintering) για την αύξηση της αντοχής του. Ας σημειωθεί εδώ ότι από το 2001 η εταιρία Helisys δεν δραστηριοποιείται πλέον στην αγορά (Wong, 2012).



Εικόνα 1.19: Σχηματική αναπαράσταση της συνολικής διάταξης LOM (Wong, 2012)



Εικόνα 1.20: Πλάγια όψη μιας διάταξης LOM (Wong, 2012)

1.6.9 Polyjet

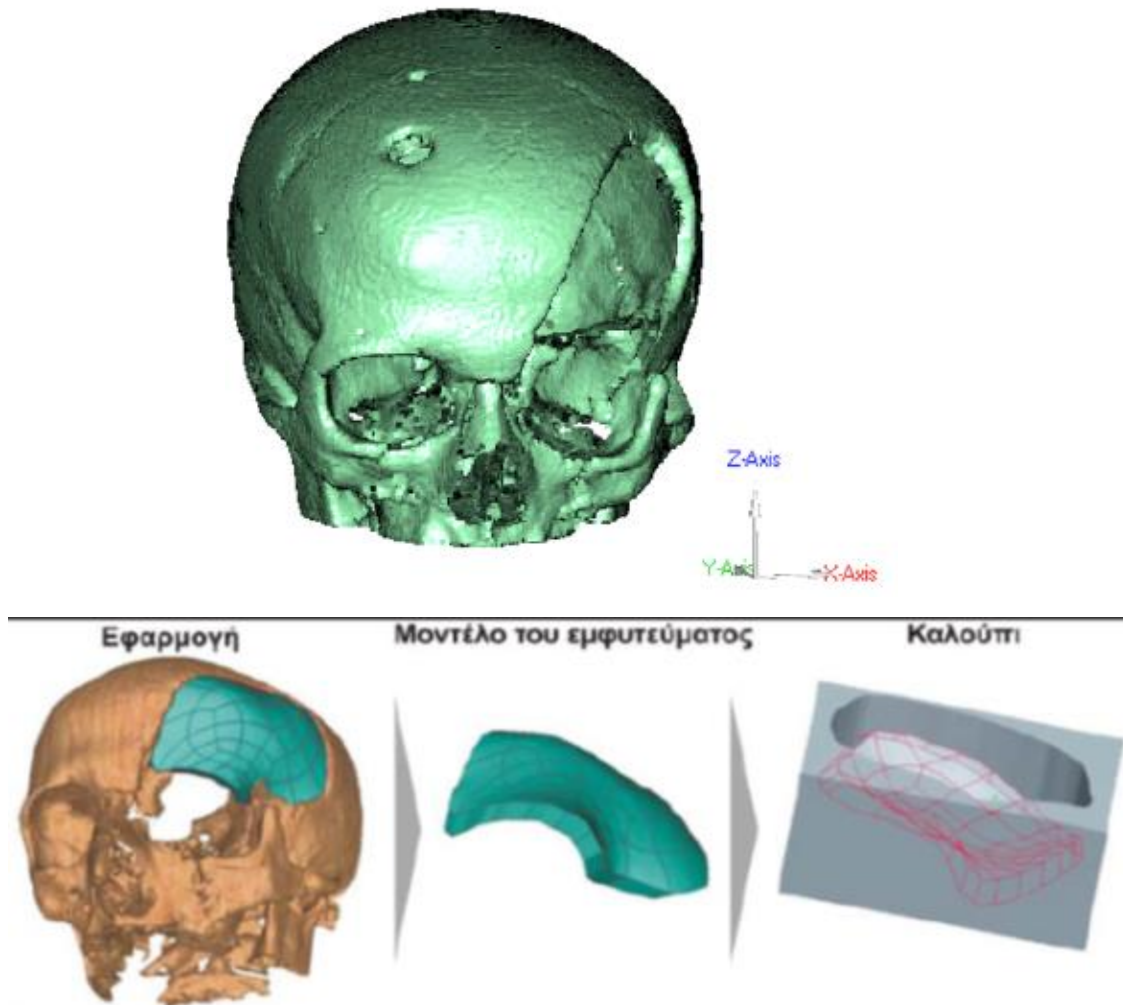
Πρόκειται για μια μέθοδο με χρήση τεχνολογίας inkjet για την κατασκευή φυσικών μοντέλων. Η κεφαλή μετακινείται κατά τους άξονες x και y αποθέτοντας ένα φωτοπολυμερές, το οποίο δέχεται υπεριώδη ακτινοβολία με την ολοκλήρωση κάθε στρώματος. Το πάχος κάθε στρώματος είναι 16 μm, με συνέπεια τα δημιουργούμενα αντικείμενα να είναι υψηλής ανάλυσης και ποιότητας. Το αρνητικό είναι ότι τα παραγόμενα μοντέλα είναι μικρότερης αντοχής σε σύγκριση με άλλων μεθόδων, όπως της στερεολιθογραφίας ή της SLS (Vaurotic et al., 2006).

1.7 Κυριότερες εφαρμογές

Οι τομείς της παραγωγής στους οποίους έχουν ήδη εισαχθεί τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, περιλαμβάνουν την κατασκευή αεραγωγών και άλλων εξαρτημάτων για κινητήρες jet και πυραυλοκινητήρες, καλυμμάτων για τα ηλεκτρικά συστήματα αγωνιστικών αυτοκινήτων, ηλεκτρονικών και ηλεκτρομηχανικών εξαρτημάτων από κεραμικά υλικά, κεραμικών φίλτρων υψηλής απορροφητικότητας, μικρών γранаζιών, εξαρτημάτων αντλιών, βοηθημάτων ακοής, ιατρικών εμφυτευμάτων και προσθετικών οστών, τρισδιάστατων αρχιτεκτονικών μοντέλων, τρισδιάστατων τοπογραφικών μοντέλων για τον σχεδιασμό στρατιωτικών επιχειρήσεων, αλλά και αντιγράφων αρχαιολογικών ευρημάτων (Frazier, 2014).

1.7.1 Ιατρικές και βιοϊατρικές εφαρμογές

Η τρισδιάστατη εκτύπωση εφαρμόζεται για τη δημιουργία ιατρικών μοντέλων από δεδομένα CT/MRI. Έτσι οι χειρουργοί μπορούν να κρατήσουν στα χέρια τους ένα πραγματικό ιατρικό μοντέλο και να προσομοιώσουν την εγχείρηση που θα ακολουθήσει, μειώνοντας έτσι τον χρόνο της εγχείρησης και τη πιθανότητα μετεγχειρητικών επιπλοκών. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η κρανιοπλαστική, για την προσθήκη εμφυτεύματος σε έναν ασθενή (Stoodley et al., 1996), όπως φαίνεται από την αντίστοιχη διαδικασία στην Εικόνα 1.21.



Εικόνα 1.21: Εφαρμογή κρανιοπλαστικής με τη δημιουργία εμφυτεύματος και του αντίστοιχου καλούπιού του (Rengier et al., 2010)

Οι μέθοδοι προσθήκης υλικού είναι επίσης ιδανικές για την κατασκευή προϊόντων κατά παραγγελία: Για παράδειγμα, με βάση το τρισδιάστατο μοντέλο του κρανίου ενός ατόμου, είναι δυνατή η κατασκευή ενός κράνους με εξαιρετική εφαρμογή στο συγκεκριμένο άτομο. Επίσης, είναι γνωστό ότι η NASA πειραματίζεται με τη χρήση μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή γαντιών και άλλων τμημάτων διαστημικών στολών, τα οποία θα ταιριάζουν απόλυτα στις σωματικές αναλογίες και διαστάσεις του αστροναύτη που θα τα φορέσει (Rengier et al., 2010).

Ένα σχετικά νέο πεδίο εφαρμογής είναι η χρήση βιοϋλικών για βιοϊατρικές εφαρμογές. Αυτό που καθιστά την τεχνολογία αυτή ελκυστική για τέτοιες εφαρμογές, είναι η δυνατότητα απευθείας χρήσης ιατρικών απεικονίσεων (όπως η μαγνητική και η αξονική τομογραφία) για την παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων για τον ασθενή, καθώς και η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων μεγάλης γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Οι καταγεγραμμένες περιπτώσεις τέτοιων εφαρμογών αφορούν, τον σχεδιασμό

και κατασκευή εμφυτευμάτων για επεμβάσεις προσθετικής, αποκατάσταση και πλαστική χειρουργική, καθώς και την κατασκευή πορωδών εμφυτευμάτων που λειτουργούν ως ικριώματα για ανάπτυξη ιστού. Επίσης, έχουν καταγραφεί εφαρμογές κατασκευής ιατρικών μικροσυσκευών για την ελεγχόμενη αποδέσμευση φαρμακευτικών ουσιών στο ανθρώπινο σώμα (<http://www.biomaterials.org.gr/Hmerides-EEB/7h-Dihmerida-EEB2012/Abstracts/ABSTRACT-Kantaros.pdf>).

1.7.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες έχουν φέρει επανάσταση στον τομέα της κατασκευής αυτοκινήτων, ιδιαίτερα μέσω του προγράμματος EDAG Genesis, που παρουσιάστηκε στο Geneva Motor Show, και αποτελεί ένδειξη του μέλλοντος στον χώρο. Το συγκεκριμένο concept παρουσιάστηκε ως απόδειξη ότι το 3D printing μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τμημάτων αυτοκινήτων σε φυσικό μέγεθος.

Σύμφωνα με το Wired, πριν καταλήξει στο 3D printing, η δοκίμασε και άλλες μεθόδους, όπως η SLS (selective laser sintering), η SLM (selective laser melting) και η SLA (στερεολιθογραφία). Ωστόσο, η τελική μέθοδος που επελέγη ήταν μία τροποποιημένη εκδοχή του FDM (fused-deposition modeling). Το EGM Genesis κατασκευάστηκε μέσω της δημιουργίας ενός θερμοπλαστικού μοντέλου του εσωτερικού ενός οχήματος, αν και η εταιρεία υποστηρίζει ότι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ίνες άνθρακα για να γίνει η δομή ελαφρύτερη και ανθεκτικότερη (Frazier, 2014).

Η EDAG οραματίζεται το Genesis ως περιβαλλόμενο από ένα εξωτερικό πλαίσιο από ατσάλι ή αλουμίνιο. Ειδικότερα, το EDAG Genesis βασίζεται στο «μοντέλο» του κελύφους της χελώνας, το οποίο λειτουργεί προστατευτικά και αντικραδασμικά, ενώ αποτελεί τμήμα της σκελετικής δομής του ζώου. Αν και δεν είναι η πρώτη φορά που η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία, το σχέδιο της EDAG έχει την πρωτοτυπία του ότι επιδεικνύει πως μέσω της χρήσης κατάλληλου εξοπλισμού είναι δυνατή η δημιουργία δομών σε μεγάλη κλίμακα, αντί της εκτύπωσης πολλών μικρών κομματιών και συναρμολόγησής τους. Κατά συνέπεια το Genesis υποδεικνύει ένα μέλλον όπου τα αυτοκίνητα θα μπορούν να κατασκευάζονται σε λιγότερα «βήματα».



Εικόνα 1.22: Το μοντέλο αυτοκινήτου που δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα EDAG Genesis (Frazier, 2014)

Η διάδοση των τεχνολογιών προσθήκης υλικού αναμένεται να έχει σημαντικές επιπτώσεις στον τομέα των ανταλλακτικών αυτοκινήτων και άλλων οχημάτων. Οι κατασκευαστές δεν θα χρειάζεται πλέον να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ανταλλακτικών, ούτε οι πελάτες να περιμένουν ημέρες για την άφιξη τους, καθώς οι παραγωγοί θα μπορούν να κατασκευάζουν ανταλλακτικά γρήγορα και κατά παραγγελία. Επίσης, θα διευκολυνθεί η προμήθεια προϊόντων περιορισμένης παραγωγής και η κατασκευή παλαιότερων ή δυσεύρετων εξαρτημάτων και ανταλλακτικών (Frazier, 2014).

1.7.3 Στρατιωτικές εφαρμογές

Ο Αμερικανικός Στρατός έχει δώσει μια νέα διάσταση στην τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς μελετά την κατασκευή κινητών μονάδων τοποθετημένων σε φορητά, οι οποίες θα μπορούν να συνοδεύουν τεθωρακισμένα και άλλα οχήματα στο πεδίο της μάχης και να κατασκευάζουν επιτόπου ανταλλακτικά, με βάση ψηφιακά αρχεία ή το επιτόπου σκανάρισμα των αντικειμένων (Diegel, 2010).

1.7.4 Ιδιωτική χρήση

Οι δυνατότητες της χρήσης τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα αυτό είναι ανεξάντλητες, καθώς αυτή επιτρέπει το customizing μιας μεγάλης ποικιλίας συσκευών, αντικειμένων προσωπικής χρήσης, παιχνιδιών ή προϊόντων για χομπίστες. Αρκετοί ερευνητές και κατασκευαστές μιλούν για την προοπτική της διάθεσης μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης απευθείας στους καταναλωτές και για τις πραγματικά επαναστατικές αλλαγές που θα επέφεραν αυτές στη λειτουργία της παραγωγής και της οικονομίας.

Έχοντας στο γραφείο ή στο σπίτι του ένα μηχάνημα τρισδιάστατης εκτύπωσης, ο κάθε καταναλωτής θα μπορούσε να κατασκευάζει ο ίδιος αντικείμενα, εξαρτήματα, ανταλλακτικά, παιχνίδια κ.λπ., είτε προμηθευόμενος ψηφιακά σχέδια, είτε σκανάροντας φυσικά αντικείμενα. Προς το παρόν, πάντως, το κόστος των μηχανημάτων αυτών δεν επιτρέπει την απόκτησή τους από οποιονδήποτε καταναλωτή. Αρκετοί αναλυτές εκτιμούν πως ακόμη και αν το κόστος των μηχανών αυτών πέσει στα 10.000 δολάρια μέσα στην επόμενη δεκαετία, οι κύριοι χρήστες θα ήταν ένας αριθμός αυτοαπασχολούμενων τεχνικών οι οποίοι θα κατασκεύαζαν πρωτότυπα ή custom προϊόντα, καθώς και οι χομπίστες εκείνοι οι οποίοι θα ήταν διατεθειμένοι να διαθέσουν τα απαραίτητα χρήματα. Για μεγάλης κλίμακας διάθεση των μηχανών αυτών σε καταναλωτές, δεν μπορεί να γίνει λόγος αν η τιμή τους δεν πέσει στο επίπεδο των 1000 δολαρίων. (Frazier, 2014)

Οι προσδοκίες πάντως που έχουν εκφραστεί κατά καιρούς από διάφορες πλευρές, οι οποίες υπαινίσσονται την περίπου γενικευμένη χρήση των παραπάνω μηχανών σε βαθμό που το σύνολο σχεδόν των τομέων της παραγωγής θα εξοπλιστεί με μηχανήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης και κάθε καταναλωτής θα μπορεί να κατασκευάσει άμεσα το αντικείμενο της αρεσκείας του, αρκεί να προμηθευτεί ένα μηχάνημα λίγο μεγαλύτερο από έναν εκτυπωτή, φαίνονται μάλλον εξωπραγματικές τουλάχιστον για το άμεσο μέλλον. Αλλωστε, είναι αμφίβολο αν οι τεχνικές Ταχείας Παραγωγής θα αντικαταστήσουν άλλες μεθόδους και ιδίως τις τεχνικές μαζικής παραγωγής, οι οποίες είναι οικονομικότερες όταν πρόκειται να παραχθούν μεγάλες ποσότητες προϊόντων (Frazier, 2014).

1.8 Μελλοντικές προοπτικές

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης και γενικότερα των μεθόδων προσθήκης υλικού αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς σε πολλές χώρες του κόσμου. Οι ΗΠΑ θεωρούνται επικεφαλής στον τομέα, αλλά η Γερμανία, η Ιαπωνία και το Ισραήλ έχουν πραγματοποιήσει αξιοσημείωτη πρόοδο, ενώ αναμένεται ότι η τεχνολογία θα βρει σημαντική ανταπόκριση και σε λιγότερο ανεπτυγμένες τεχνολογικά χώρες. Μια από τις πλέον ενδιαφέρουσες εξελίξεις θα είναι η ανάπτυξη της λεγόμενης Παραγωγής επί Παραγγελία από Απόσταση (Distance Manufacturing On-Demand), η οποία συνδυάζει τεχνικές Ταχείας Παραγωγής με το Internet και θα επιτρέπει τόσο την αποστολή ψηφιακών σχεδίων προς τις κατασκευάστριες εταιρίες για άμεση παραγωγή, όσο και την προμήθεια/αγορά έτοιμων ψηφιακών σχεδίων για παραγωγή από τους ενδιαφερόμενους.

Οι πρόοδοι στο λογισμικό αριθμητικού ελέγχου (numerical control), αλλά και στις δυνατότητες των μηχανημάτων αυτών, οδήγησαν στην αύξηση της

ταχύτητας και της ακρίβειας των κατεργασιών. Τα σύγχρονα κέντρα κατεργασίας διαθέτουν μηχανήματα με πολλαπλούς άξονες, η ταχύτητα των οποίων μπορεί να φθάσει έως και 100.000 στρ./λεπτό, με ανάλογη αύξηση των ταχυτήτων πρόωσης των εργαλείων, επιτρέποντας εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού, οι οποίοι μεταφράζονται σε ταχείς ρυθμούς παραγωγής. Αναμφίβολα, οι εργαλειομηχανές και τα κέντρα κατεργασίας θα εξακολουθήσουν και στο μέλλον να αποτελούν βασική συνιστώσα της παραγωγής (κυρίως όταν πρόκειται για την κατεργασία μετάλλων) και είναι ασφαλέστερο να υποθέσουμε ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση μάλλον θα συμπληρώσει παρά θα υποκαταστήσει τις μεθόδους αυτές (Wohlens, 2012 ; Frazier, 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Πολυμερή υλικά για μεθόδους προσθήκης υλικού

2.1 Εισαγωγή

Για την παραγωγή καινοτόμων εξαρτημάτων σε συμφωνία με τα πιο απαιτητικά βιομηχανικά πρότυπα, τα πλαστικά υλικά διατίθενται για ευρεία χρήση και υιοθέτησή τους. Η προσθήκη τους προσφέρει καλύτερη ευκαμψία στο παραγόμενο προϊόν και οδηγεί σε σημαντικές εφαρμογές που απαιτούν ακόμη πρωτοποριακότερο σχεδιασμό. Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από τις ιδιαίτερες ιδιότητές του, οι οποίες υποστηρίζουν βέλτιστα τη δομή και την εφαρμογή του εκάστοτε τελικού προϊόντος.

Τα χαρακτηριστικά που προσφέρουν τα πλαστικά είναι αυξημένη ανθεκτικότητα, καλύτερη αντίσταση σε κρούσεις, θερμοκρασιακή και διαστατική σταθερότητα. Επίσης αρκετά υλικά έχουν βιοσυμβατότητα, πράγμα το οποίο τα καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμα για βιολογικές και ιατρικές εφαρμογές. (Kruth, 2003) Τα πιο συνήθη είναι τα πολυαμίδια (polyamides - PA), το πολυστυρένιο (polystyrene - PS), η πολυαιθερική κετόνη (polyether ketone - PEEK) και τα θερμοπλαστικά τα οποία θα παρουσιαστούν ξεχωριστά στην ακόλουθη ενότητα.



Εικόνα 2.1: Χρησιμοποιούμενες σκόνες πλαστικών σε διαδικασίες προσθήκης υλικού (Thomas Büsgen, 2013)

Επίσης, αρκετές εταιρίες προσφέρουν προγράμματα και διαδικασίες ανακύκλωσης της σκόνης του αρχικού υλικού, για καλύτερη εξοικονόμηση πρώτης ύλης και μείωσης του τελικού κόστους του προϊόντος. Με την συλλογή της περίσσειας πρώτης ύλης, το υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές συσσωμάτωσης χωρίς laser.



Εικόνα 2.2: Πλαστικό εξάρτημα αεραγωγού το οποίο κατασκευάστηκε με ανακυκλωμένου πλαστικού υλικό (Ljunberg, 2007)

2.2 Πολυμερή

Τα θερμοπλαστικά, ή πολυμερή, είναι μεταξύ των φθηνότερων υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία προσθήκης υλικού, ενώ είναι και τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά από εμπορικά διαθέσιμους 3D εκτυπωτές οικιακής χρήσης.

Τα κύρια θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται από τις τεχνολογίες προσθήκης υλικούς είναι: (Kruth, 2003 ; Kim, 2010)

- Ακρυλονιτρίλιο-βουταδιένιο-στυρένιο (Acrylonitrile butadiene styrene - ABS)
- Πολυλακτικό οξύ (Polylactic acid - PLA)
- Πολυβινυλ-αλκοόλη (Polyvinyl alcohol - PVA)
- Πολυκαρβονικά (Polycarbonate)

Το ABS είναι ένας τύπος πολυμερούς ο οποίος είναι αρκετά διαδεδομένος και μπορεί να περιγραφεί παραστατικά ως ο τύπος του πλαστικού που φτιάχνονται τα παιχνίδια LEGO. Από την άλλη, τελευταία αυξάνεται η χρήση του PLA λόγω της ευκαμψίας του, και είναι εμπορικά διαθέσιμο και σε άκαμπτη μορφή και σε μαλακά φινιρίσματα. Επίσης, υπάρχει ένας τρίτος τύπος PLA ο οποίος παρέχει πιο ελαστική δομή (σαν γόμα), παραμένοντας εξαιρετικά εύκαμπτο.

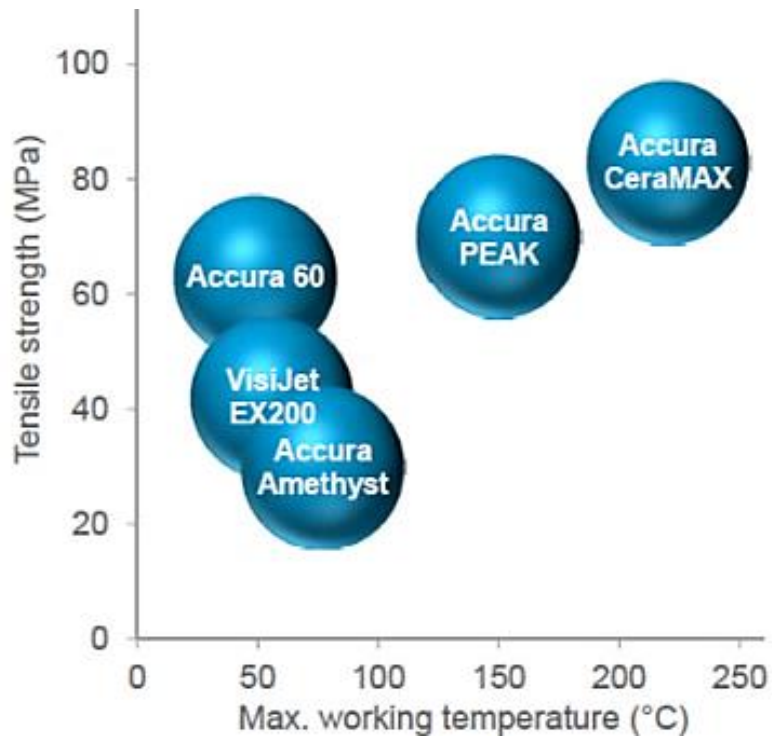
Η PVA χρησιμοποιείται ως υλικό για τη δημιουργία υποστηριγμάτων στη βιομηχανία μεθόδων προσθήκης υλικού, μιας και είναι εξαιρετικά ευδιάλυτο. Τα στηρίγματα αυτά μπορούν να αφαιρεθούν με την ολοκλήρωση του τελικού σχεδίου, ενώ μπορεί, μιας και είναι διαλυτή, να εκπλυθεί.

Τα Πολυκαρβονικά είναι υλικά, πολλά υποσχόμενα για το μέλλον, τα οποία είναι ακόμα σε διαδικασία ανάπτυξης, μιας και απαιτούν ακροφύσιο υψηλής θερμοκρασίας. Επίσης, οι μέθοδοι προσθήκης υλικού επιτρέπουν το συνδυασμό των πλαστικών με ίνες άνθρακα. Το αποτέλεσμα είναι η ενίσχυση της αντοχής του τελικού προϊόντος, χωρίς την προσθήκη επιπλέον βάρους στο αντικείμενο (<http://www.jklasers.com/additive-manufacturing-materials>).

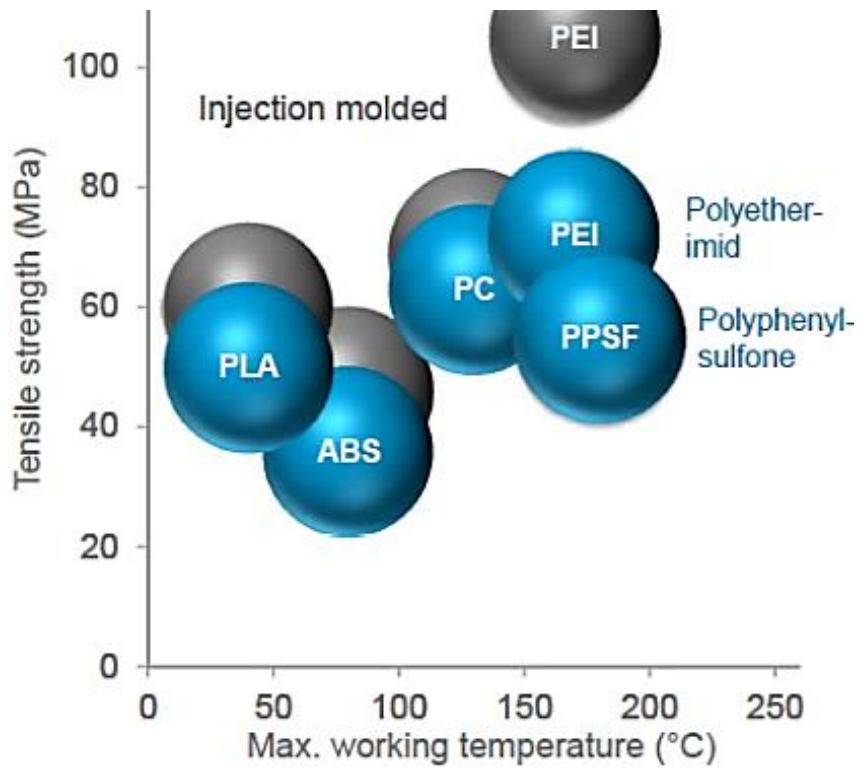
2.3 Λειτουργικά χαρακτηριστικά πλαστικών

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού εξαρτάται σημαντικά από την χρησιμοποιούμενη μέθοδο προσθήκης υλικού και σε δεύτερο βαθμό από την εφαρμογή που προορίζεται. Κάθε μέθοδος απαιτεί συγκεκριμένα κατηγορία υλικού ώστε να αποδώσει το επιθυμητό τελικό αντικείμενο. Τα υλικά που επιλέγονται συνήθως έχουν ανισοτροπικές ιδιότητες λόγω της αναγκαίας στρωματικής κατασκευής του τελικού μοντέλου. (Ljunberg, 2007)

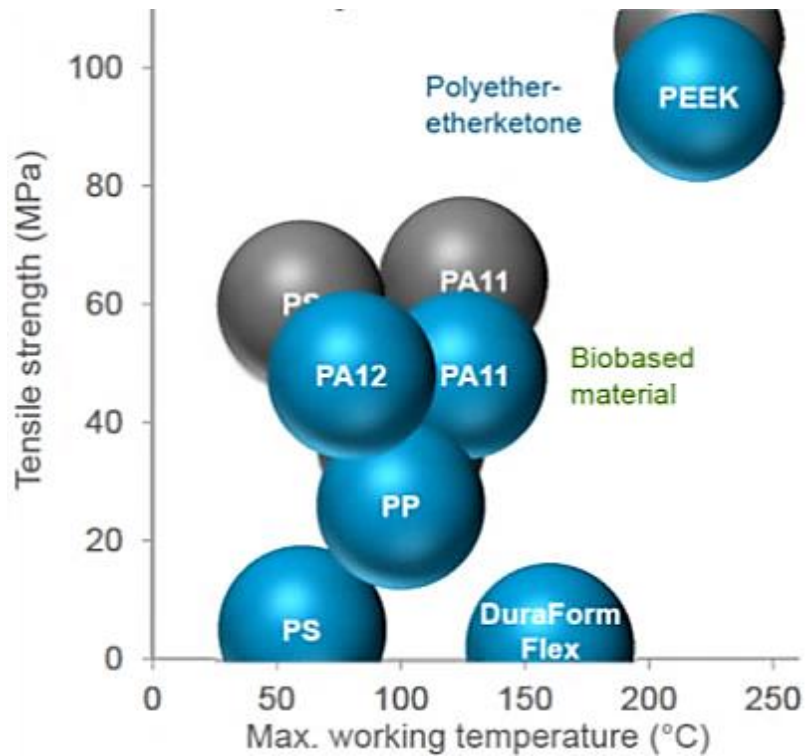
Έτσι στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται διαγράμματα που παρουσιάζουν την αντοχή σε εφελκυσμό καθώς και τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας πλαστικών υλικών για 3 βασικές μεθόδους προσθήκης υλικού. Έτσι, ο χρήστης κάθε μεθόδου μπορεί να επιλέξει το κατάλληλο υλικό ώστε να πληροί τις απαραίτητες ιδιότητες για την εκάστοτε εφαρμογή που προορίζεται.



Εικόνα 2.3: Χρησιμοποιούμενα υλικά για τη μέθοδο Στερεολιθογραφίας (SL) (e-Manufacturing Solutions)

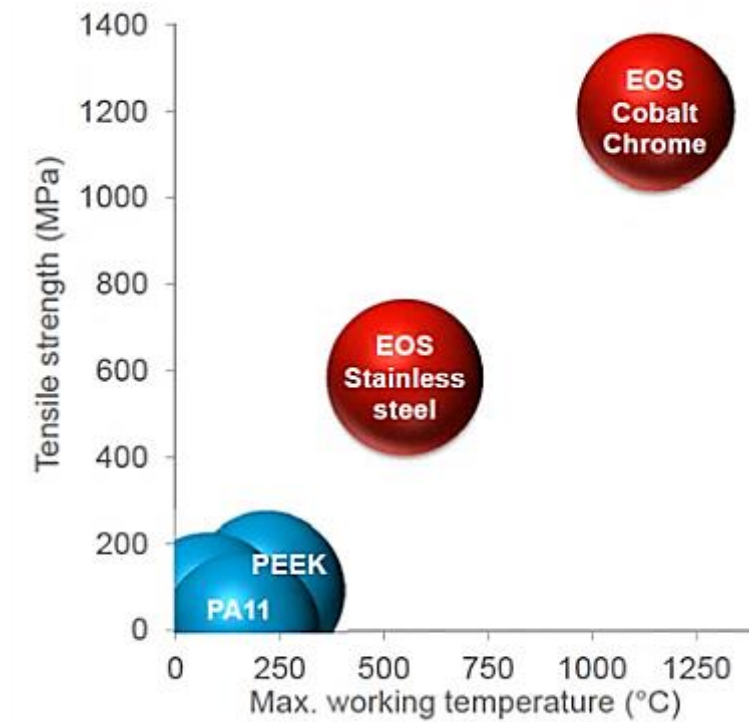


Εικόνα 2.4: Χρησιμοποιούμενα υλικά για τη μέθοδο FDM (e-Manufacturing Solutions)



Εικόνα 2.5: Χρησιμοποιούμενα υλικά για τη μέθοδο SLS (e-Manufacturing Solutions)

Επίσης, στην Εικόνα 2.6 φαίνεται μια σύγκριση των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων αντοχής σε εφελκυσμό και μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας, μεταξύ των ανθεκτικότερων πλαστικών με δυο κράματα μετάλλου. Παρατηρούμε ότι τα πλαστικά υλικά είναι αρκετές κλίμακες χαμηλότερα και ως προς τα δυο χαρακτηριστικά μεγέθη σε σύγκριση με τα μεταλλικά κράματα.



Εικόνα 2.6: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των πλαστικών υλικών με αντίστοιχα μεταλλικά υλικά (e-Manufacturing Solutions)

Στις μέρες μας υπάρχει ανάγκη για ευρύτερη γκάμα διαθέσιμων πολυμερών υλικών, τα οποία θα φέρουν και αντίστοιχο εύρος ιδιοτήτων (Kim, 2010).

2.3.1 Κόστος υλικών

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει ενδεικτικά το κόστος προμήθειας διαφόρων πλαστικών υλικών σε \$/kg, και ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο προσθήκης υλικού.

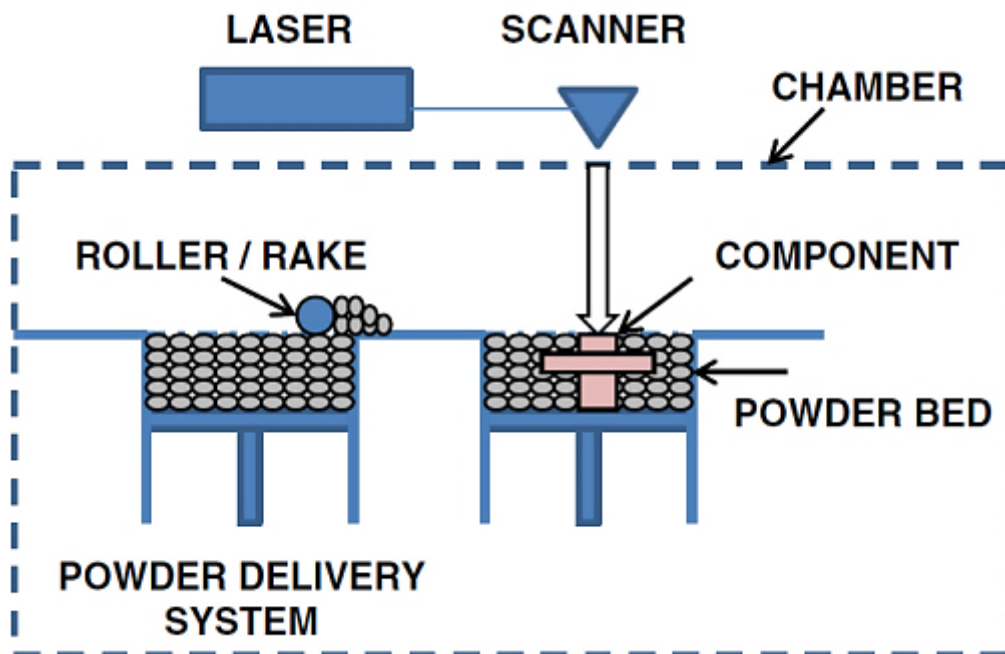
Πίνακας 2.1: Κόστος υλικού ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο προσθήκης υλικού (www.plasticker.de ; Büsgen, 2013)

Υλικό/Μέθοδος	Κόστος (\$/kg)
Φωτοπολυμερικές ρητίνες για SLA	175 - 225
Κόνεις (PA12) για SLS	85 - 100
3D εκτυπωτές (FDM) για προσωπική χρήση	15 - 50
ABS και PC για 3D εκτυπωτές (FDM) επαγγελματικής χρήσης	250
PEEK και PEI για μηχανήματα FDM	500
PA11	7 - 13
PEI	15 - 20
PEEK	34 - 68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Συστήματα προσθήκης μετάλλου με laser

Τα συστήματα κατεργασιών προσθήκης υλικού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως προς την πρώτη ύλη, την πηγή ενέργειας, τον όγκο που κατασκευάζεται κ.λπ.

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται ένα σύστημα κλίνης σκόνης. Μια κλίνη σκόνης παράγεται ωθώντας σκόνη κατά μήκος της περιοχής εργασίας. Η πηγή ενέργειας είναι έτσι προγραμματισμένη, ώστε να παρέχει ενέργεια στην επιφάνεια της κλίνης, προκαλώντας την τήξη της σκόνης ή τη δημιουργία συσσωματωμάτων στην επιθυμητή μορφή. Στη συνέχεια πρόσθετη σκόνη οδηγείται στην περιοχή εργασίας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δημιουργηθεί ένα συμπαγές τρισδιάστατο στοιχείο. Στα πλεονεκτήματα του συστήματος συγκαταλέγονται η δυνατότητά του για χαρακτηριστικά υψηλής ανάλυσης, εσωτερικά περάσματα και διατήρηση του ελέγχου των διαστάσεων.



Εικόνα 3.1: Γενική αναπαράσταση κλίνης σκόνης ενός συστήματος κατεργασιών προσθήκης (Frazier, 2014)

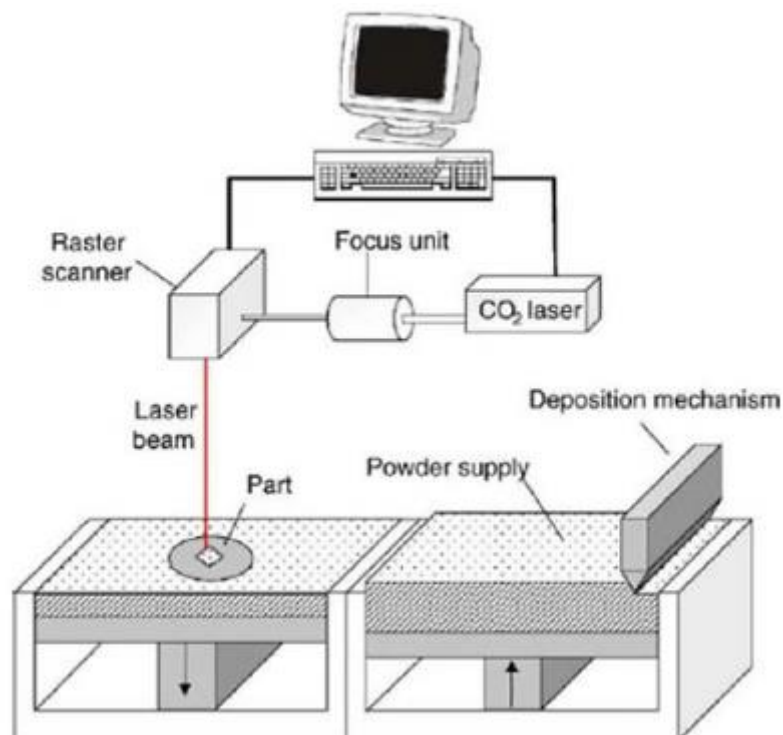
Ανάλογα με την αλληλεπίδραση μεταξύ laser και σκόνης (π.χ. προδιασκορπισμός της σκόνης στην κλίνη πριν τη σάρωση με το laser ή ομοαξονική τροφοδοσία της σκόνης από ακροφύσιο με ταυτόχρονη σάρωση laser) και ανάλογα με τους μηχανισμούς μεταλλουργίας (π.χ. μερική ή πλήρης τήξη) η κυρίαρχη τεχνολογία προσθήκης υλικού για την κατασκευή μεταλλικών στοιχείων έχει συνήθως τρεις βασικές διαδικασίες: συσσωμάτωση με laser (LS-

Laser Sintering), τήξη με laser (LM-Laser Melting) και Εναπόθεση Μετάλλου με Laser (LMD- Laser Metal Deposition).

3.1 Συσσωμάτωση με laser

Η συσσωμάτωση με laser είναι μια συνήθης κατεργασία προσθήκης υλικού που βασίζεται στο διασκορπισμό σκόνης κατά στρώματα και στην επακόλουθη συσσωμάτωση. Το σύστημα συσσωμάτωσης με laser αποτελείται από ένα laser, μια αυτόματη συσκευή στρωματοποίησης της σκόνης, έναν υπολογιστή για τον έλεγχο της διαδικασίας και ορισμένους βοηθητικούς μηχανισμούς (π.χ. σύστημα προστασίας αδρανούς αερίου και σύστημα προθέρμανσης της κλίνης σκόνης). Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι laser, όπως CO₂, Nd:YAG, laser ινών, laser δίσκου κ.λπ. (Fischer et. al., 2005) Η επιλογή του laser είναι σημαντική διότι έχει σημαντική επίδραση στην πύκνωση της σκόνης, κυρίως διότι:

- i. η απορροφητικότητα του laser από τα υλικά εξαρτάται από το μήκος κύματος του laser,
- ii. ο λειτουργικός μεταλλουργικός μηχανισμός πύκνωσης της σκόνης προσδιορίζεται από την ενεργειακή πυκνότητα εισόδου του laser.



Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση της συσκευής συσσωμάτωσης με laser (Gu et. al., 2012)

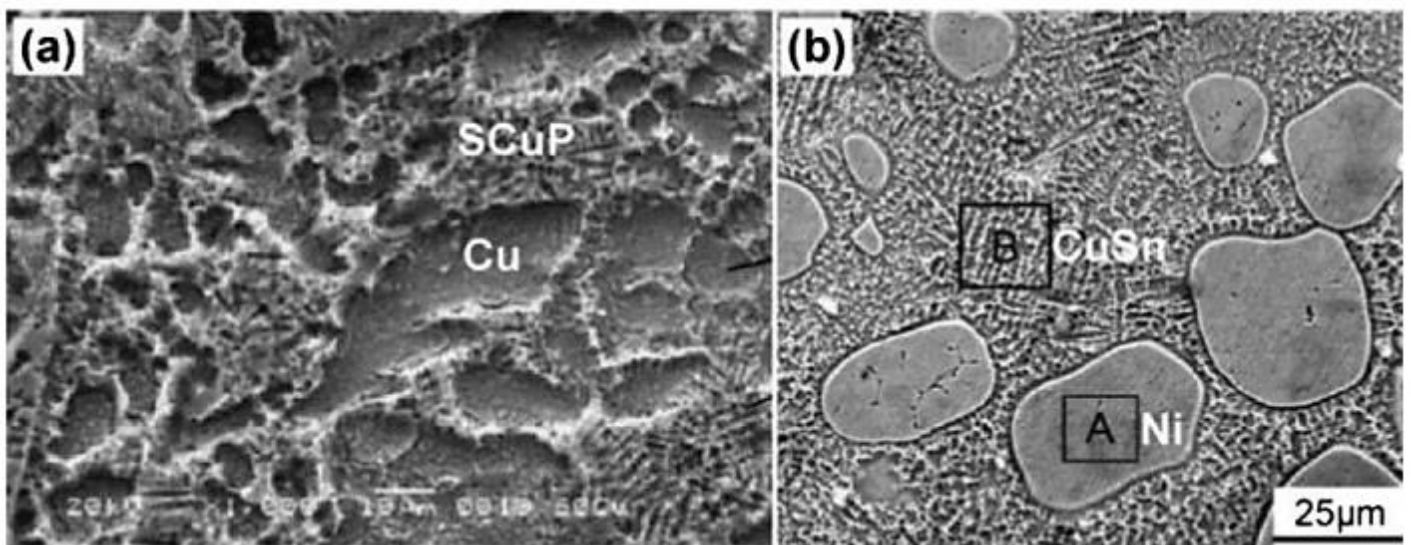
Οι γενικές διαδικασίες που περιλαμβάνει η συσσωμάτωση με laser είναι οι ακόλουθες:

- i. ένα υπόστρωμα για μερική επεξεργασία εισάγεται στην πλατφόρμα κατασκευής και σταθεροποιείται,
- ii. το προστατευτικό αδρανές αέριο τροφοδοτείται στο στεγανό θάλαμο ώστε να μειωθεί το οξυγόνο στο εσωτερικό κάτω από ένα απαιτούμενο όριο
- iii. ένα λεπτό στρώμα σκόνης με πάχος κάτω από 100 μm εναποτίθεται στο υπόστρωμα κατά στρώματα
- iv. η ακτίνα του laser σαρώνει την επιφάνεια της κλίνης σκόνης ώστε να σχηματιστούν τα κατάλληλα προφίλ ανάλογα με τα δεδομένα CAD των στοιχείων που πρόκειται να κατασκευαστούν.
- v. Οι παραπάνω διαδικασίες, συμπεριλαμβανομένου του διασκορπισμού της σκόνης και της κατεργασίας με το laser επαναλαμβάνονται και τα στοιχεία κατασκευάζονται στρωματικά μέχρι να ολοκληρωθούν (Kaiser et. al., 2007).

Κατά τη συσσωμάτωση με laser, η ακτίνα laser σε κάθε σωματίδιο σκόνης εξαρτάται από το μέγεθος της δέσμης και την ταχύτητα σάρωσης και είναι συνήθως μέχρι 25 ms (Agarwala et. al., 1995). Υπό αυτόν τον εξαιρετικά σύντομο θερμικό κύκλο, ο μηχανισμός κατεργασίας πρέπει να είναι ταχύς και άρα δεν είναι εφικτός ένας μηχανισμός συσσωμάτωσης στερεής κατάστασης. Η προσέγγιση τήξης/ στερεοποίησης είναι ο μόνος μηχανισμός που είναι κατάλληλος για την ταχεία πύκνωση της σκόνης κατά τη διάρκεια της συσσωμάτωσης με laser (Chatterjee et. al., 2003). Η διαδικασία βασίζεται στο μηχανισμό συσσωμάτωσης υγρής φάσης, ο οποίος συμπεριλαμβάνει την μερική τήξη της σκόνης. Ως τώρα, ο συσσωμάτωση με laser έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας μεταλλικής και προκραματωμένης σκόνης (Kruth et. al., 2007). Τα χαρακτηριστικά της σκόνης και οι συνθήκες κατεργασίας με το laser πρέπει να είναι προσεκτικά προσδιορισμένες ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός μεταλλουργικός μηχανισμός για την πύκνωση της σκόνης.

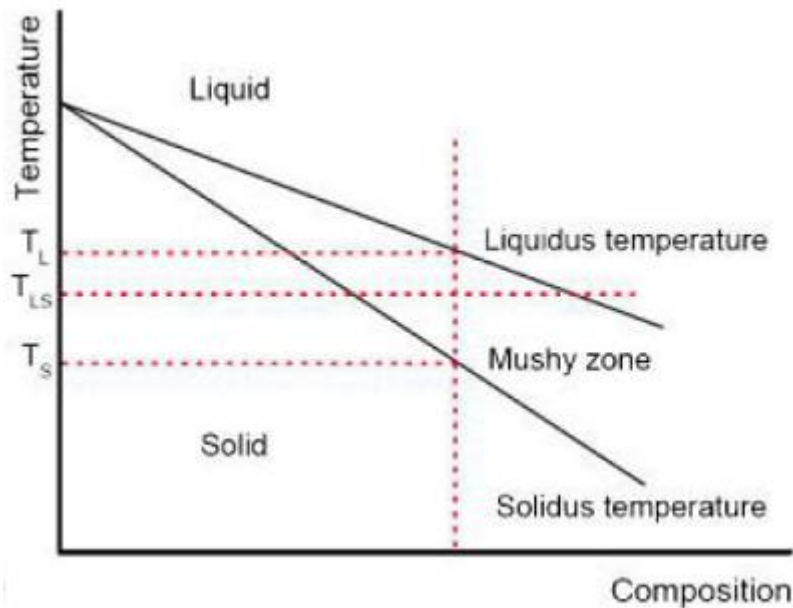
Το μίγμα σκόνης πολλών συνιστωσών συντίθεται γενικά από μια μεταλλική συνιστώσα με υψηλό σημείο τήξης, που λειτουργεί ως δομικό μέταλλο, τη μεταλλική συνιστώσα με χαμηλό σημείο τήξης, που λειτουργεί ως συνδετικό και ένα μικρό ποσό πρόσθετων όπως μέσο ροής ή αποξειδωτικό (Khainig et. al., 2001). Η θερμοκρασία λειτουργίας της συσσωμάτωσης με laser προσδιορίζεται προσεκτικά μεταξύ των δύο διαφορετικών θερμοκρασιών τήξης ρυθμίζοντας τις παραμέτρους λειτουργίας του laser. Το συνδετικό τότε τήκεται πλήρως και σχηματίζει την υγρή φάση, ενώ το δομικό μέταλλο διατηρεί το στέρεο πυρήνα στο υγρό. Η πύκνωση του συστήματος στερεού/υγρού προκύπτει ως αποτέλεσμα της αναδιάταξης των στερεών σωματιδίων υπό την επίδραση των τριχοειδών δυνάμεων που ασκούνται πάνω τους από το υγρό διαβροχής. Τα

χαρακτηριστικά διαβροχής υγρού/ στερεού και η τριχοειδής δύναμη που ασκείται στα σωματίδια προσδιορίζουν το ρυθμό αναδιάταξης και την επιτυχία της μεθόδου. Οι Zhu et al.(2004) μελέτησαν τη σκόνη πολλών στοιχείων με βάση το Cu και προκραματωμένη σκόνη SCuP. Το SCuP με χαμηλότερο σημείο τήξης (645°C) λειτουργεί ως συνδετικό, ενώ ο Cu με το υψηλότερο σημείο τήξης (1083°C) λειτουργεί ως δομικό μέταλλο. Οι Gu et al.(2012) εφάρμοσαν την συσσωμάτωση με laser για να επεξεργαστούν ένα σύστημα Ni-CuSn-CuP που αποτελείται από Ni με υψηλό σημείο τήξης ως δομικό μέταλλο (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Μικροδομή κατεργασμένης σκόνης (a) Cu-SCuP και (b) Ni-CuSn-CuP μέσω συσσωμάτωσης με laser (Gu et. al., 2012)

Σε αντίθεση με τα καθαρά μέταλλα που έχουν καθορισμένο σημείο τήξης, οι προκραματωμένες σκόνες εμφανίζουν μια ζώνη τήξης μεταξύ των καμπυλών solidus και liquidus, εντός της οποίας συνυπάρχουν η στερεή και η υγρή φάση κατά τη διάρκεια της τήξης/στερεοποίησης (Εικόνα 3.4). Καθώς βελτιστοποιούνται οι παράμετροι λειτουργίας του laser, η επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας βρίσκεται στην διφασική περιοχή ώστε να προκύψει ημιστερεό σύστημα.



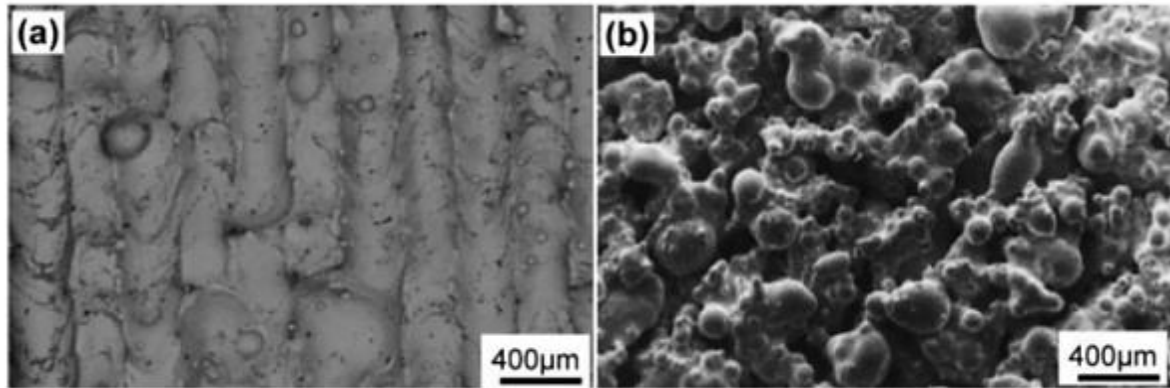
Εικόνα 3.4: Ιδανικό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων θερμοκρασίας-σύστασης για προκραματωμένο σύστημα (Gu et. al., 2012)

Η διαδικασία αυτή απαιτεί αυστηρό έλεγχο των παραμέτρων ώστε να προκύψει η τήξη των σωματιδίων. Είναι δύσκολο να διατηρηθεί η θερμοκρασία συσσωμάτωσης μεταξύ της solidus και της liquidus, πράγμα το οποίο δυσχεραίνει την επιτυχή ολοκλήρωση του μηχανισμού. Στη συσσωμάτωση με laser προκραματωμένων σκονών τείνουν να εμφανίζονται προβλήματα όπως ανεπαρκής πύκνωση, ετερογενής μικροδομή και ιδιότητες κ.λπ. Συνεπώς απαιτούνται κατεργασίες φινιρίσματος ώστε να προκύψουν οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

3.2 Τήξη με laser

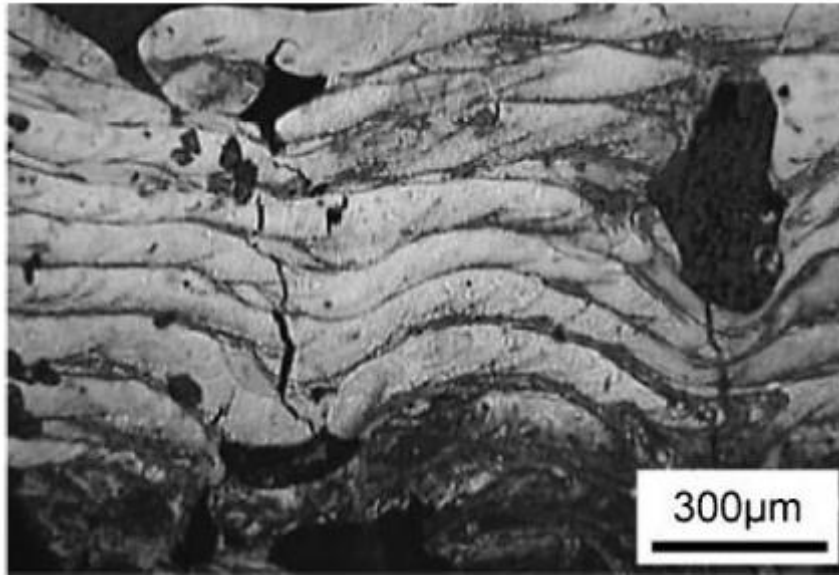
Λόγω της ανάγκης παραγωγής πλήρως συμπαγών στοιχείων με μηχανικές ιδιότητες συγκρίσιμες με εκείνες των χύδην υλικών και για να αποφευχθούν οι κατεργασίες φινιρίσματος, έχει αναπτυχθεί η μέθοδος τήξης με laser. Η τήξη με laser πραγματοποιείται στον ίδιο εξοπλισμό με τη διαδικασία συσσωμάτωσης. Η μόνη διαφορά είναι ότι η τήξη της μεταλλικής σκόνης βασίζεται στο μηχανισμό *πλήρους* τήξης/στερεοποίησης. Η ιδέα της πλήρους τήξης υποστηρίζεται από τις βελτιωμένες ιδιότητες του laser, π.χ. υψηλότερη ισχύς, μικρότερο σημείο εστίασης, μικρότερο πάχος στρώματος κ.λπ., οδηγώντας σε σημαντικά βελτιωμένες δομικές και μηχανικές ιδιότητες σχετικά με τα στοιχεία που έχουν υποστεί συσσωμάτωση με laser (Kruth et. al., 2005). Οι Simchi (2006) και Niu et al. (2000) επεξεργάστηκαν σκόνη χάλυβα M2 χρησιμοποιώντας

συσσωμάτωση και τήξη με laser. Ο ρυθμός πύκνωσης, η ομαλότητα της επιφάνειας και η ομοιογένεια της μικροδομής του υλικού που προέκυψε μέσω τήξης παρουσίασαν σημαντική βελτίωση σε σύγκριση με το υλικό από συσσωμάτωση.



Εικόνα 3.5: Μορφολογία επιφάνειας χάλυβα M2 (a) από τήξη με laser και (b) από συσσωμάτωση με laser (Simchi , 2006)

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της τήξης με laser είναι η δυνατότητα επεξεργασίας καθαρών μη σιδηρούχων μετάλλων, π.χ. Ti, Al, Cu τα οποία σήμερα δε μπορούν να υποστούν ικανοποιητική επεξεργασία μέσω του μηχανισμού μερική τήξης. Παρόλα αυτά η τήξη με laser απαιτεί υψηλά επίπεδα ενέργειας, τα οποία παράγονται από ακτίνα καλής ποιότητας, υψηλή ισχύ laser και μικρό πάχος στρώματος σκόνης. Συνεπώς, η τεχνική τήξης με laser παρουσιάζει σημαντικό κίνδυνο αστάθειας του μεταλλικού λουτρού λόγω του μηχανισμού πλήρους τήξης. Κατά το μετασχηματισμό υγρού σε στερεό παρατηρείται μεγάλη συρρίκνωση, συσσωρεύοντας μεγάλες τάσεις στα επεξεργασμένα τμήματα. Οι παραμένουσες τάσεις κατά την ψύξη αποτελούν σημαντικό παράγοντα για ενδεχόμενη αποκόλληση του τελικού προϊόντος. Σύμφωνα με τη μελέτη των Rogson et al. (2004) στην τήξη Cu-75%H13 με laser προέκυψε ότι η ενσωμάτωση Cu σε εργαλείο από χάλυβα παράγει μια περιοχή υψηλή σε Cu γύρω από τα ωστενιτικά όρια των κόκκων, πράγμα το οποίο αυξάνει τον κίνδυνο ρωγμών με τη θέρμανση (Εικόνα 3.6).



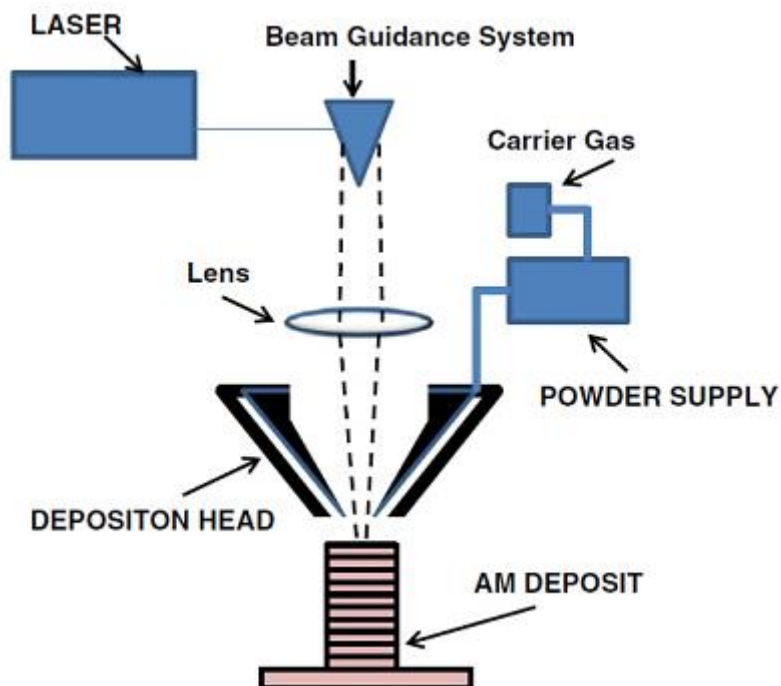
Εικόνα 3.6: Στρέβλωση και δημιουργία ρωγμών σε κατεργασμένη σκόνη Cu-H13 με laser (Pogson et al. ,2004)

Επίσης, τα τηγμένα ασταθή μέρη μπορούν να οδηγήσουν σε δημιουργία σφαιρών στο υγρό μεταλλικό λουτρό και στο εσωτερικό πορώδες. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η επιλογή τόσο του είδους της κατεργασίας με laser όσο και των παραμέτρων της σκόνης εναπόθεσης, ώστε να επιτευχθεί μια μέτρια θερμοκρασία και να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του συστήματος τήξης.

3.3 Εναπόθεση μετάλλου με laser

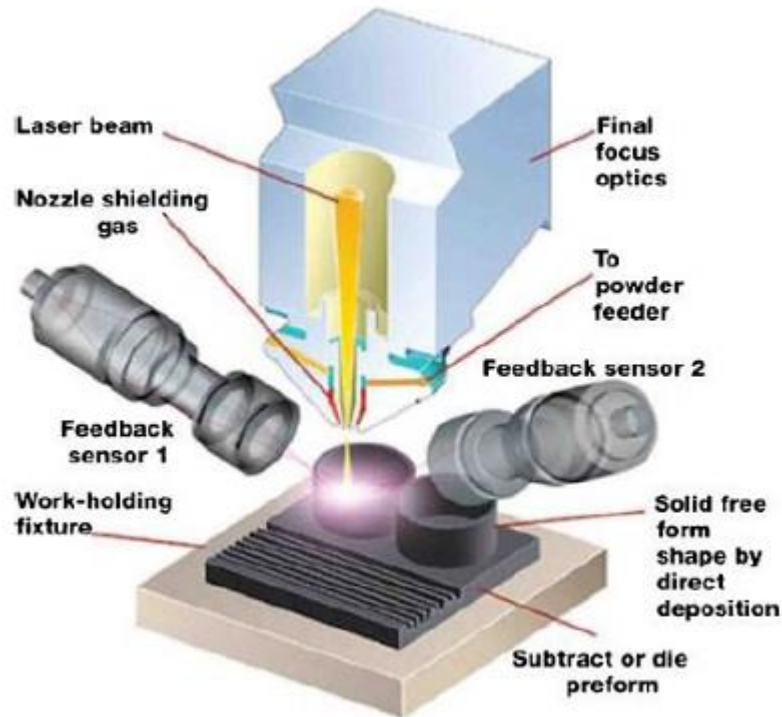
Μια γενική αναπαράσταση του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7. Οι όγκοι που κατασκευάζονται με τα συστήματα αυτά είναι γενικά μεγαλύτεροι (π.χ. $>1,2 \text{ m}^3$ για τη μονάδα Optomec LENS 850-R). Στα συστήματα αυτά, η σκόνη μεταφέρεται μέσω ακροφυσίου επάνω στην δημιουργούμενη επιφάνεια. Χρησιμοποιείται laser ώστε να τήξει μια στοιβάδα στρώματος σκόνης ή και περισσότερες στο επιθυμητό σχήμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώστε να δημιουργηθεί ένα συμπαγές τρισδιάστατο στοιχείο. Στην αγορά κυριαρχούν δύο τύποι τέτοιων συστημάτων:

- Το τεμάχιο παραμένει ακίνητο, ενώ οι κεφαλές εναπόθεσης κινούνται
- Η κεφαλή εναπόθεσης παραμένει ακίνητη, ενώ το τεμάχιο κινείται.



Εικόνα 3.7: Εξοπλισμός εναπόθεσης μετάλλου με laser (Frazier, 2014)

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου περιλαμβάνουν τη δημιουργία μεγαλύτερου όγκου, όπως αναφέρθηκε, αλλά και τη δυνατότητα του να χρησιμοποιείται για την αναπαλαίωση φθαρμένων ή κατεστραμμένων στοιχείων. Παρόλο που η στρατηγική της μεθόδου ακολουθεί τη γενική αρχή της βηματικής κατεργασίας υλικού, η σκόνη δεν έχει ήδη διασκορπιστεί αλλά τροφοδοτείται ομοαξονικά. (Frazier, 2014)

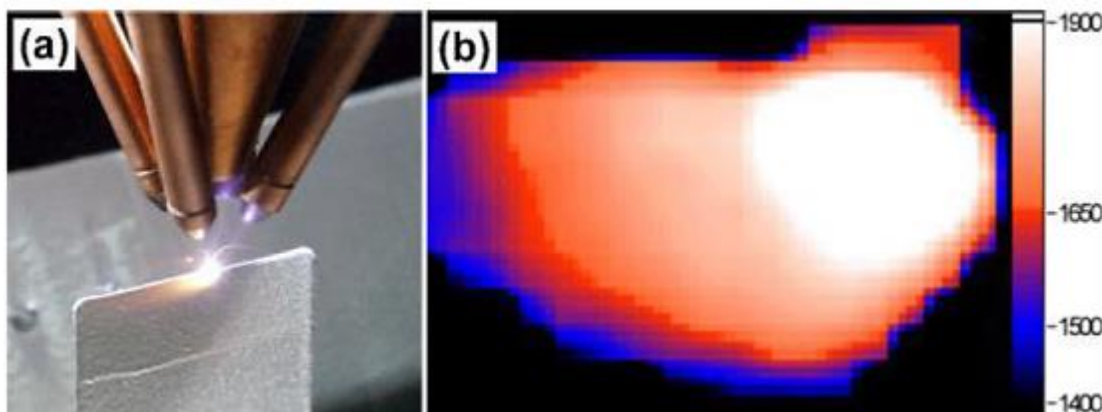


Εικόνα 3.8: Σχηματική απεικόνιση συστήματος εναπόθεσης μετάλλου κλειστού βρόχου (Dutta et al., 2011)

Το σύστημα τροφοδοσίας της σκόνης αποτελείται από τον ειδικά διαμορφωμένο μηχανισμό τροφοδοσίας το οποίο παρέχει τη σκόνη σε ένα σύστημα αερίου διανομής μέσω των ακροφυσίων. Η ακτίνα laser υψηλής ενέργειας παρέχεται κατά τον άξονα z στο κέντρο της συστοιχίας ακροφυσίων και συγκεντρώνεται από φακούς κοντά στο τεμάχιο. Η μετακίνηση των φακών και των ακροφυσίων σκόνης ελέγχει το ύψος στο οποίο εστιάζει το laser και η σκόνη. Το τεμάχιο μετακινείται στο επίπεδο x-y από ένα σύστημα οδηγούμενο από υπολογιστή κάτω από τη ζώνη αλληλεπίδρασης ακτίνας/σκόνης ώστε να σχηματιστεί η διατομή της επιθυμητής γεωμετρίας. Προστίθενται διαδοχικά στρώματα, οδηγώντας στην παραγωγή ενός τρισδιάστατου στοιχείου. Με την ενσωμάτωση συστημάτων εναπόθεσης πολλών αξόνων, πολλαπλασιάζεται η δυνατότητα τροφοδοσίας υλικού (Koch et al., 2000). Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία και μπορεί να εφαρμοσθεί για την κατασκευή καινούργιων στοιχείων ή για την ανακατασκευή φθαρμένων ή σοβαρά κατεστραμμένων, και για την προσθήκη επικαλύψεων για αντοχή στη φθορά και στη διάβρωση. Η ανακατασκευή στοιχείων που προηγουμένως θεωρούνται μη επισκευάσιμα έχει βρει σημαντική εφαρμογή πτερύγια στροβίλων (Dutta et al., 2011). Η συγκεντρωμένη θερμότητα από το laser, κυρίως από laser Nd:YAG και laser ινών, επιτρέπει την ανακατασκευή του ακροπτερυγίου με ελάχιστη παραμόρφωση. Μια ακόμη εφαρμογή της μεθόδου είναι η επισκευή των αξόνων στο τιμόνι των αυτοκινήτων (Mudge et. al., 2007). Οι επιφάνειες των εδράνων, των στεγανώσεων και των συνδέσμων, που συνήθως

θεωρούνται μη επισκευάσιμες με βάση τις συμβατικές τεχνικές συγκόλλησης, μπορούν να επισκευαστούν μέσω της εναπόθεσης μετάλλου με laser. Επιπλέον, η σύνδεση που επιτυγχάνεται με το υπόστρωμα είναι μεταλλουργική και όχι μηχανική, όπως η χρωμίωση.

Κατά την εναπόθεση μετάλλου με laser, η ακτίνα του laser δημιουργεί ένα κινητό μεταλλικό λουτρό στο υπόστρωμα στο οποίο εγχέεται η σκόνη. Είναι πολύ σημαντικό η τροφοδοσία να είναι συνεχής, σταθερή και ακριβής. Άρα, το μέγεθος του μεταλλικού λουτρού είναι κρίσιμη παράμετρος για τη διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών κατασκευής (Wang et. al., 2008). Η φωτογραφία μιας γραμμής εναπόθεσης με laser ανοξείδωτου χάλυβα 316 από τους Hofmeister et al. (1999) δείχνει την παρουσία ενός μεταλλικού λουτρού με ξεκάθαρο περίγραμμα. Είναι επιθυμητή η δημιουργία ενός σταθερού σε διαστάσεις μεταλλικού λουτρού με μικρή θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και με συνεχές μέτωπο στερεοποίησης. Η θερμική απεικόνιση του μεταλλικού λουτρού σε πραγματικό χρόνο και η μορφολογία του χρησιμοποιούνται ως μηχανισμός ανάδρασης για τον προσδιορισμό της κλίσης της θερμοκρασίας και του ρυθμού ψύξης ώστε να ελέγχεται η μέθοδος. Οι επιδράσεις των παραμέτρων του laser (π.χ. ισχύς laser και ταχύτητα σάρωσης) έχουν μελετηθεί τόσο μέσω προσομοίωσης (Zheng et al., 2008) όσο και πειραματικά (Xiong et. al, 2009) (Εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9: (a) Φωτογραφία της κατασκευής μιας γραμμής μέσω εναπόθεσης με laser και (b) πλευρική όψη του μεταλλικού λουτρού με τις θερμοκρασίες σε K (Gu et. al., 2012)

Για σταθερή ταχύτητα σάρωσης, η γεωμετρία του μεταλλικού λουτρού εξαρτάται από την κατανομή της θερμοκρασίας εισόδου. Η ισχύς του laser ρυθμίζεται ώστε το μέγεθος του λουτρού να βρίσκεται εντός του προκαθορισμένου εύρους. Η ψύξη του λουτρού γίνεται μέσω αγωγής από το τεμάχιο και το υπόστρωμα. Ανάλογα με τη θερμοκρασία του υποστρώματος και την ενέργεια εισόδου του laser, οι ρυθμοί ψύξης στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού κυμαίνονται από 10^3 ως 10^4 K/s (Zheng et al., 2008). Αυτή η ευελιξία επιτρέπει

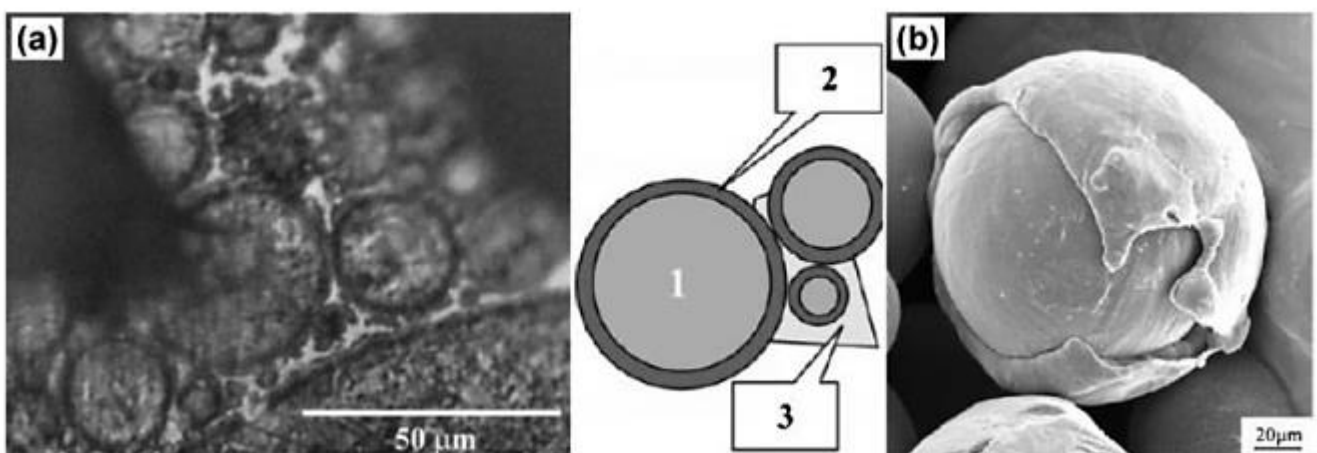
τον έλεγχο της τελικής μικροδομής και των ιδιοτήτων των κατεργασμένων στοιχείων.

3.4 Συνήθη μεταλλικά υλικά και κράματα

3.4.1 Σκόνες καθαρού μετάλλου

Τα καθαρά μέταλλα βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορες κατεργασίες προσθήκης υλικού. Σε σχέση με τα κράματα, τα καθαρά μέταλλα δε συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον της τεχνολογίας για δύο κυρίως λόγους. Πρώτον, η σχετικά ασθενής φύση των μετάλλων, π.χ. περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες και η ελάχιστη αντοχή απέναντι στην οξείδωση και τη διάβρωση, καθιστούν τα μέταλλα λιγότερο ελκυστικά για κατεργασίες προσθήκης υλικού. Δεύτερον, οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν για τη μερική τήξη των καθαρών μετάλλων, δεν παρουσίασαν επιτυχία (Kruth et. al., 2007). Για παράδειγμα, το Ti που υφίσταται συσσωμάτωση με laser, λόγω του μηχανισμού μερικής τήξης, παρουσιάζει ετερογενή μικροδομή και αποτελείται από τρεις διαφορετικές περιοχές (Εικόνα 3.10):

1. τους πυρήνες των μη τηγμένων κόκκων
2. την τηγμένη επιφάνεια των κόκκων
3. τους παραμένοντες πόρους



Εικόνα 3.10: (a) ετερογενής μικροδομή Ti ύστερα από συσσωμάτωση με laser και (b) μερικώς τηγμένη επιφάνεια σωματιδίου ύστερα από εναπόθεση με laser (Xue et. al., 2007)

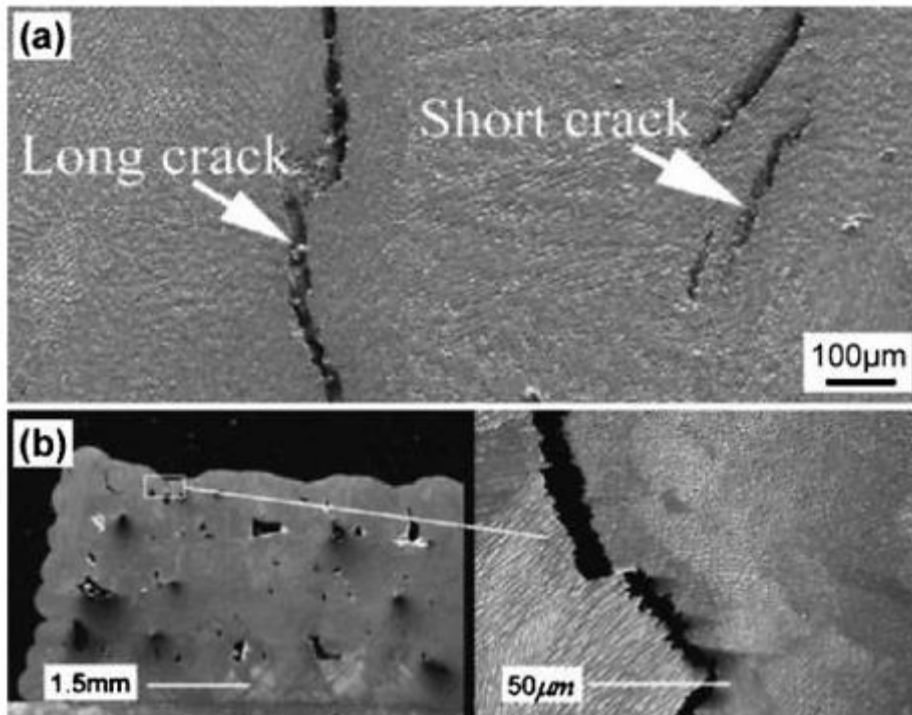
Η μετάβαση από τη συσσωμάτωση στην τήξη με laser αποτελεί μια σημαντική πρόοδο στις κατεργασίες προσθήκης με σιδηρούχων καθαρών μετάλλων στη βιομηχανική πρακτική. Έως σήμερα, έχει χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο πλήθος προκραματωμένων σκονών για διάφορες κατεργασίες προσθήκης υλικού. Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται σε κραματωμένες σκόνες με βάση το Ti, το Ni και το Fe, ενώ κάποιες από τις εφαρμογές τους βρίσκονται ήδη σε ώριμο στάδιο. Το επόμενο σημείο στο οποίο θα επικεντρωθεί η έρευνα των κατεργασιών προσθήκης υλικού είναι οι σκόνες με βάση το Al. (Vandenbroucke et. al., 2007)

3.4.2 Κράματα Ti

Τα κράματα που χρησιμοποιούνται στις κατεργασίες προσθήκης υλικού είναι συνήθως Ti-6Al-4V, και βρίσκουν εφαρμογή στην αεροδιαστημική και στην ιατρική, λόγω των μοναδικών χημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του καθώς και της αποδεδειγμένης βιοσυμβατότητάς του. Οι Facchini et al. (2010) παρουσίασαν τη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων από τη μικροδομή του Ti-6Al-4V μέσω της τήξης με laser. Λόγω της δημιουργίας μοναδικής μαρτενσιτικής μικροδομής, η αντοχή σε εφελκυσμό είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα μέρη που έχουν υποστεί θερμή επεξεργασία, ενώ η ολκιμότητα είναι μικρότερη. Με θερμική επεξεργασία αυξάνεται η ολκιμότητα και μειώνεται η αντοχή. Η σταθεροποίηση της μικροδομής συνεισφέρει στη βελτίωση της ολκιμότητας. (Facchini et al., 2010)

3.4.3 Κράματα Ni

Τα υπερκράματα νικελίου, π.χ. Inconel 625, 718 και Rene 41, 88DT λόγω των βελτιωμένων μηχανικών ιδιοτήτων τους χρησιμοποιούνται συνήθως σε κινητήρες jet και αεριοστροβίλους. Η συνολική ποσότητα στοιχείων Al και Ti στα κράματα Rene είναι 6wt%. Κατά την εναπόθεση υπερκραμάτων Ni είναι πιθανός ο σχηματισμός ρωγμών λόγω του μεγάλου πλήθους κραματικών στοιχείων. Κατά την εναπόθεση μετάλλων με laser οι ρωγμές κυρίως εμφανίζονται στη ζώνη επικάλυψης μεταξύ δύο γειτονικών περασμάτων. Ο βαθμός επικάλυψης έχει σημαντική επίδραση στο μέγεθος και στην ποσότητα των ρωγμών. Δύο βασικά είδη ρωγμών εμφανίζονται: οι επιμήκεις ρωγμές (3-10 mm) και οι μικρές ρωγμές (100-300 μm). Η εμφάνιση των μικρών ρωγμών αποδίδεται κυρίως στην υγροποίηση στα όρια. Είναι δύσκολο να αποφευχθούν οι μικρές ρωγμές μόνο ρυθμίζοντας τις παραμέτρους της μεθόδου. Απαιτούνται και περαιτέρω στάδια κατεργασίας για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Αντιθέτως, ο σχηματισμός των στοιχείων από Waspaloy μέσω τήξης μπορεί να ελεγχθεί από τις συνθήκες της κατεργασίας. (Zhao et. al., 2009)



Εικόνα 3.11: Σχηματισμός ρωγμών (a) σε Rene 88DT (Zhao et. al., 2009) κατά την εναπόθεση με laser και (b) Waspaloy (Mumtaz et al., 2008) κατά την τήξη με laser

3.4.4 Κράματα Fe

Σχετικά με την πύκνωση, η πυκνότητα που επιτυγχάνεται στους χάλυβες μέσω κατεργασιών προσθήκης υλικού δεν φτάνει στην πλήρη πυκνότητα. Συνεπώς, οι κατεργασίες προσθήκης υλικού σε χάλυβες βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της προσπάθειας δημιουργίας πλήρως συμπαγών στοιχείων. Η δυσκολία στην επεξεργασία των χαλύβων έγκειται στις ειδικές χημικές ιδιότητες των κύριων στοιχείων στο χάλυβα. Τόσο ο Fe όσο και το πρωτεύον κραματικό στοιχείο Cr αντιδρούν έντονα με το οξυγόνο. Συνεπώς ένας βαθμός οξειδωσης δε μπορεί να αποφευχθεί κατά την κανονική διαχείριση της σκόνης στις κατεργασίες προσθήκης υλικού. Επίσης, το περιεχόμενο των χαλύβων σε άνθρακα είναι μια κρίσιμη παράμετρος στον προσδιορισμό της κατεργασιμότητας τους. Οι μελέτες των Wright et al. (2006) έδειξαν ότι καθώς το περιεχόμενο σε άνθρακα αυξάνεται, αυξάνεται και το στρώμα άνθρακα που διαχωρίζεται στην τηγμένη επιφάνεια. Αυτό το στρώμα έχει την ίδια αρνητική επίδραση με ένα στρώμα οξειδίων, μειώνοντας τη διαβρεκτικότητα και οδηγώντας το τηγμένο υλικό σε σφαιροποίηση αντί να ρέει. Επιπλέον, ο σχηματισμός καρβιδίων στα όρια των κόκκων αυξάνει την ψαθυρότητα των επεξεργασμένων υλικών με υψηλό ποσοστό άνθρακα (Wright et al., 2006)

3.4.5 Κράματα Al

Οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για τη χρήση των κραμάτων Al σε κατεργασίες προσθήκης υλικού με τήξη με laser ή εναπόθεση με laser, πέραν από τις μελέτες των Mazumder et al. (2000), Louvis et al. (2011) και Buchbinder et al. (2009) είναι περιορισμένες. Υπάρχουν αρκετές δυσκολίες για την επιτυχή χρήση τους, όπως η υψηλή ανακλαστικότητα τους (>91%) και η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του Al, που οδηγούν σε σημαντική αύξηση της απαιτούμενης ισχύος από το laser. Η μεγάλη ευκολία με την οποία οξειδώνεται το Al αποτελεί βασικό εμπόδιο για την αποτελεσματική τήξη του. Το λεπτό φιλμ οξειδίων που δημιουργείται στο τηγμένο Al μειώνει την διαβρεκτικότητά του. Τα οξείδια προκαλούν επίσης προβλήματα όταν εισάγονται στο μεταλλικό λουτρό, διότι το εγκλωβισμένο οξυγόνο παράγει αδύναμες περιοχές εντός του στοιχείου. Επιπλέον η τήξη με laser εξαρτάται σημαντικά από τη δυνατότητα διασκορπισμού ενός λεπτού στρώματος σκόνης, πράγμα το οποίο είναι δύσκολο διότι οι σκόνες Al είναι ελαφριές με μικρή ευχέρεια ροής. Συνεπώς, οι σκόνες Al δεν είναι κατάλληλες για τους υπάρχοντες μηχανισμούς απόθεσης, παρόλο που είναι αποτελεσματικές για άλλες μεταλλικές σκόνες ίδιου σχήματος σωματιδίου και κατανομής μεγέθους (Louvis et al., 2011). Η περαιτέρω έρευνα στην τήξη με laser κραμάτων Al θα έπρεπε να κατευθυνθεί προς την ανεύρεση μεθόδων για τον έλεγχο της οξειδωσης και την απομάκρυνση των σχηματιζόμενων φιλμ οξειδίων.

3.5 Απόδοση της μεθόδου προσθήκης υλικού με laser

Ο χρόνος κατεργασίας μπορεί να χωριστεί στη χρονική διάρκεια της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας διαδικασίας. Η χρονική διάρκεια της πρωτεύουσας κατεργασίας συνίσταται στο χρόνο που απαιτείται για να γίνει η τήξη κάθε στρώματος επιθυμητής γεωμετρίας. Η χρονική διάρκεια της βοηθητικής κατεργασίας αφορά λειτουργίες όπως το χαμήλωμα της πλάκας κατεργασίας και ο διασκορπισμός της σκόνης. (Schleifenbaum et al., 2010; Kelbassa et al., 2012). Σύμφωνα με μελέτες ο χρόνος της πρωτεύουσας διαδικασίας περιλαμβάνει το 80% του συνολικού για μεγάλους όγκους. Σύμφωνα με τους Schleifenbaum et al. (2011) ο ρυθμός παραγωγής είναι σημαντική παράμετρος στις κατεργασίες προσθήκης υλικού. Επηρεάζεται από την ταχύτητα σάρωσης, το πάχος του στρώματος και την απόσταση τροφοδοσίας. Η ταχύτητα σάρωσης και το πάχος του στρώματος περιορίζονται από τη διαθέσιμη ισχύ του laser. Η απόσταση τροφοδοσίας περιορίζεται από τη διάμετρο της εστιασμένης ακτίνας laser, η οποία πρέπει να είναι όση η διάμετρος της ακτίνας ώστε να προκύψει δομή χωρίς πόρους (Buchbinder et al., 2011).

Για να αυξηθεί ο ρυθμός κατεργασίας, ένας τρόπος είναι να αυξηθεί η ισχύς του laser ώστε να αυξηθεί και το πάχος του στρώματος. Είναι επίσης εφικτό να αυξηθεί η ταχύτητα σάρωσης με αύξηση της ισχύος του laser, ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία. Όμως, μόνο με αυτούς τους δύο τρόπους η αύξηση θα είναι περιορισμένη, αν η διάμετρος της δέσμης παραμείνει σταθερή. Διατηρώντας τη διάμετρο της ακτίνας σταθερή και αυξάνοντας την ισχύ του laser, αυξάνεται η ένταση στο σημείο της κατεργασίας. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο ρυθμό εξάτμισης και σε μεγαλύτερο βαθμό εκτόξευσης μετάλλου, πράγμα το οποίο έχει αρνητική επίδραση στην κατεργασία.

3.5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Οι Matilainen et al. (2014) μελέτησαν την αλληλεπίδραση μεταξύ της δέσμης laser και του υλικού της σκόνης στην κατεργασία προσθήκης μεταλλικού υλικού. Χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο συσχέτισης των παραμέτρων εισόδου με τις παραμέτρους εξόδου, εξέτασαν ποιες από τις παραμέτρους εισόδου επιδρούν στην έξοδο και δημιούργησαν κατάλληλες εξισώσεις. Οι εξισώσεις αυτές λειτούργησαν στη συνέχεια ως εργαλείο για την αξιολόγηση της απόδοσης της κατεργασίας. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν σκόνη EOS από Ανοξειδωτο Χάλυβα 17-4PH (Πίνακας 3.1). Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιείται συχνά σε μηχανολογικές εφαρμογές στις οποίες απαιτείται στιβαρότητα, ολκιμότητα και αντίσταση στη διάβρωση.

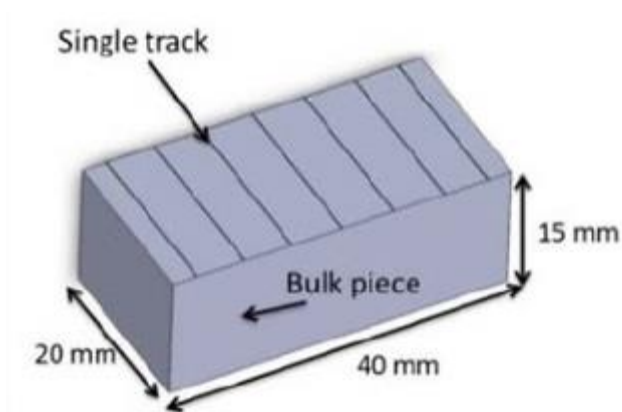
Πίνακας 3.1: Σύσταση υλικού EOS 17-4PH (Matilainen et al., 2014)

Material	Fe	Ni	Mo	Cu	Cr	Mn	Si	C	P	S	O	N	Nb
Composition [%]	73.7	4.2	0.4	3.9	15.8	0.7	0.7	0.01	0.02	0.01	0.04	0.14	0.29

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τη μονάδα laser, το θάλαμο κατεργασίας και τον υπολογιστή ελέγχου της κατεργασίας. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δύο συστήματα laser. Αποτελούνται από πηγή laser ινών με ισχύ 200 W και 400 W, αντίστοιχα. Ο εξοπλισμός των 200 W βρίσκεται στο Εργαστήριο Laser Επεξεργασίας Υλικών του Πανεπιστημίου Lappeenranta της Φιλανδίας. Ο εξοπλισμός αυτός είναι παρόμοιος με τον EOS – EOSINT σειράς M, ο οποίος παράγει μήκος κύματος 1070 nm και έχει μήκος εστίασης 400 mm. Το σύστημα των 400 W βρίσκεται στην εταιρία EOS της Φιλανδίας και είναι εμπορικά διαθέσιμος ως EOS EOSINT M280.

Κατασκευάστηκαν δοκίμια με μονές διαδρομές μεταβάλλοντας τη θερμότητα εισόδου ώστε να εξεταστεί η επίδρασή της στο σχηματισμό των γραμμών και

στο βάθος διείσδυσης. Οι διαδρομές αυτές κατασκευάστηκαν στο πάνω μέρος του δοκιμίου και είχαν διαστάσεις 20x40x15 mm. Το τρισδιάστατο μοντέλο μιας διαδρομής παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.12.



Εικόνα 3.12: Τρισδιάστατο μοντέλο της μονής διαδρομής του δοκιμίου (Matilainen et al., 2014)

3.5.2 Ανάλυση παραμέτρων πειράματος

Οι βασικές παράμετροι των πειραμάτων παρουσιάζονται ακολούθως (Πίνακας 3.2, Πίνακας 3.3). Οι παράμετροι αυτές μεταβάλλονται διατηρώντας όμως σταθερή την ισχύ στα 200 W για τα πειράματα που έγιναν στο LUT Laser και στα 325 W για τις δοκιμές στο EOS Φιλανδίας. Μεταβλήθηκε η ταχύτητα σάρωσης και άρα και η πυκνότητα ισχύος.

Πίνακας 3.2: Παράμετροι κατεργασίας δοκιμών με LUT Laser 200 W (Matilainen et al., 2014)

Parameter	St_{-3}	St_{-2}	St_{-1}	St_0	St_1	St_2	St_3
Laser power [W]	200	200	200	200	200	200	200
Scan speed [mm/s]	1600	1400	1200	1000	800	600	400
Layer thickness [mm]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Laser spot size [mm]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Energy density [J/mm ³]	63	71	83	100	125	167	250
Laser interaction time [s]	$6.3 \cdot 10^{-5}$	$7.1 \cdot 10^{-5}$	$8.3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$

Πίνακας 3.3: Παράμετροι κατεργασίας δοκιμών EOS Φιλανδίας 325 W (Matilainen et al., 2014)

Parameter	St_3	St_2	St_1	St_0	St_1	St_2	St_3
Laser power [W]	325	325	325	325	325	325	325
Scan speed [mm/s]	2600	2275	1950	1625	1300	975	650
Layer thickness [mm]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Laser spot size [mm]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Energy density [J/mm ³]	63	71	83	100	125	167	250
Laser interaction time [s]	$3.9 \cdot 10^{-5}$	$4.4 \cdot 10^{-5}$	$5.1 \cdot 10^{-5}$	$6.2 \cdot 10^{-5}$	$7.7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$

Η πυκνότητα ενέργειας εισόδου προσδιορίστηκε με βάση την εξίσωση (1.1).

$$ED = \frac{P}{v \cdot LT \cdot h} \quad (1.1)$$

όπου ED είναι η ενεργειακή πυκνότητα,

P η ισχύς του laser,

v η ταχύτητα σάρωσης του laser,

LT το πάχος του στρώματος,

h η απόσταση τροφοδοσίας των τμημάτων.

Στην περίπτωση των μεμονωμένων διαδρομών, η απόσταση τροφοδοσίας τίθεται ίση με το μέγεθος ακτίνας του laser. Το εμβαδόν πλάτους επί το βάθος(WDA) ορίζει το εμβαδόν διείσδυσης. Υπολογίζεται από την εξίσωση (1.2):

$$WDA = BW \cdot PD \quad (1.2)$$

όπου WDA το εμβαδόν του πάσσου διείσδυσης,

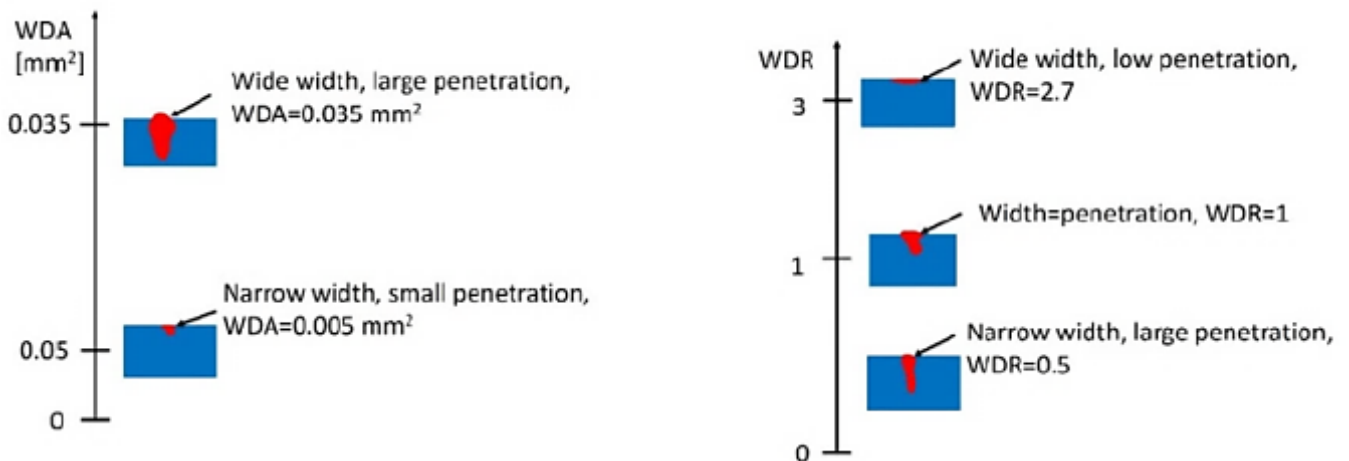
BW το εύρος του πάσσου

PD το βάθος διείσδυσης.

Υπολογίστηκε επίσης η παράμετρος του λόγου του πλάτους προς το βάθος (WDR) του πάσσου, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$WDR = \frac{BW}{PD} \quad (1.3)$$

Μέσω του λόγου αυτού είναι εύκολο να συμπεράνει κανείς αν το πάσσο είναι μεγάλο και η διείσδυση χαμηλή ή το αντίθετο. Διάφορες περιπτώσεις παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.13.

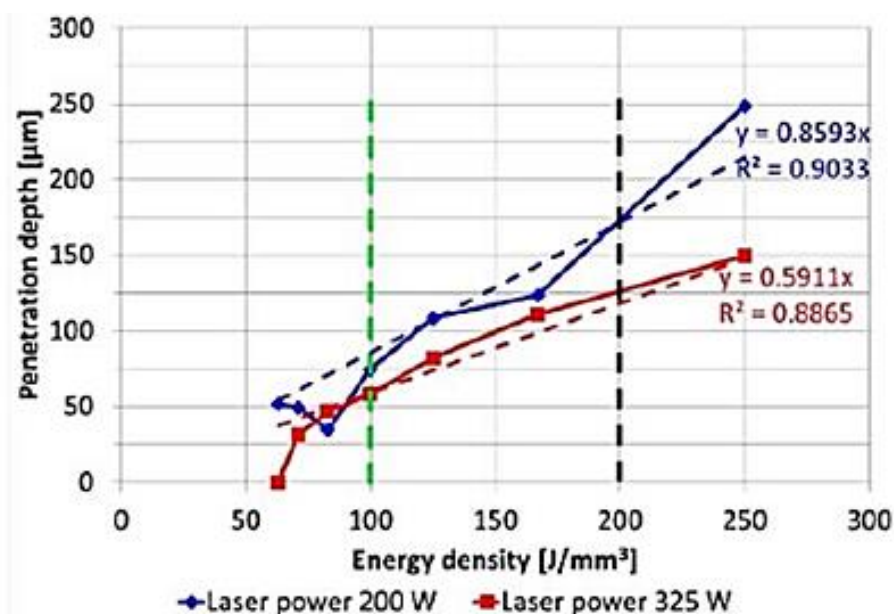


Εικόνα 3.13: Διάγραμμα απεικόνισης μικρών και μεγάλων τιμών WDA και WDR (Matilainen et al., 2014)

3.5.3 Αποτελέσματα

Πυκνότητα ενέργειας ως προς το βάθος διείσδυσης

Στην Εικόνα 3.14 παρουσιάζεται η πυκνότητα ενέργειας εισόδου ως προς το βάθος κοπής για ισχύ laser 200 W και 325 W, αντίστοιχα.

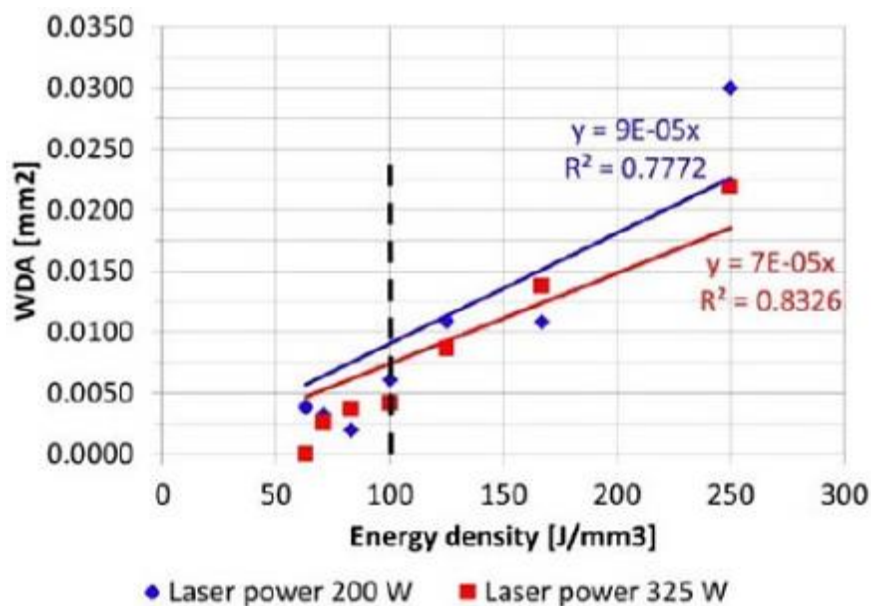


Εικόνα 3.14: Πυκνότητα ενέργειας ως προς το βάθος διείσδυσης (Matilainen et al., 2014)

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 3.14 τα βάθη διείσδυσης στην περίπτωση του laser 200 W ήτα σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις μεγαλύτερα από την περίπτωση του laser 325 W. Αυτό οφείλεται στο ότι σύμφωνα με τα δεδομένα του πειράματος, οι διαδρομές στην περίπτωση του laser 200 W ήταν για περισσότερο χρονικό διάστημα εκτεθειμένα στην ακτινοβολία του laser. Συνεπώς το βάθος διείσδυσης αυξάνεται, όταν αυξάνεται η πυκνότητα ενέργειας του laser. Το βάθος διείσδυσης εξαρτάται γραμμικά από την ενεργειακή πυκνότητα. Η διαφορά στο βάθος διείσδυσης μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι 10-20 μm, όταν οι πυκνότητες ενέργειας είναι μικρότερες από 200 J/mm³. Όταν η πυκνότητα ενέργειας υπερβαίνει τα 200 J/mm³, το βάθος διείσδυσης αυξάνεται δραστικά στην περίπτωση του laser 200 W. (Matilainen et al., 2014)

Πυκνότητα ενέργειας ως προς WDA

Υπολογίζεται το εμβαδόν των διαδρομών και συγκρίνεται για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις, 200 W και 325 W. Η πυκνότητα ενέργειας ως προς το WDA παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.15.

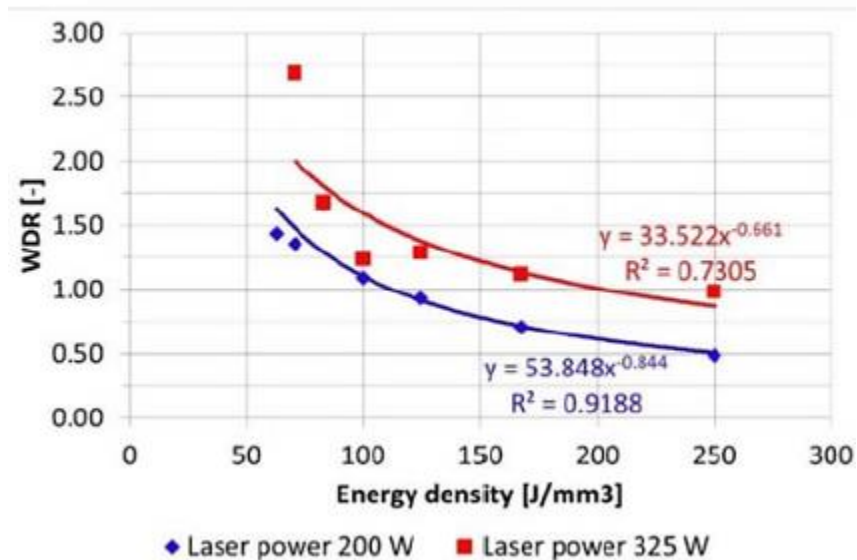


Εικόνα 3.15: Πυκνότητα ενέργειας ως προς WDA (Matilainen et al., 2014)

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, οι τιμές των WDA βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους όταν η πυκνότητα ενέργειας εισόδου είναι μικρότερη από 100 J/mm^3 . Η τιμή του WDA για την περίπτωση των 200 W αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η πυκνότητα ενέργειας εισόδου. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο βάθος διείσδυσης των μονών διαδρομών στο δοκίμιο. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για την περίπτωση του laser 325 W (Matilainen et al., 2014).

Πυκνότητα ενέργειας ως προς WDR

Στην Εικόνα 3.16 παρουσιάζεται η πυκνότητα ενέργειας ως προς το WDR.



Εικόνα 3.16: Πυκνότητα ενέργειας ως προς WDR (Matilainen et al., 2014)

Όπως φαίνεται, το WDR μειώνεται με αύξηση της πυκνότητας ενέργειας. Στην περίπτωση του laser 200 W, οι τιμές του WDR μειώνονται καθώς η πυκνότητα ενέργειας εισόδου αυξάνεται. Όταν χρησιμοποιήθηκε το laser 325 W, οι τιμές του WDR ήταν μεγαλύτερες. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην χαμηλότερη ταχύτητα σάρωσης του laser 200 W, το οποίο προκαλούσε πιθανώς μεγαλύτερη διείσδυση.

Από τα παραπάνω προέκυψε ότι πυκνότητα ενέργειας εισόδου έχει επίδραση στο βάθος διείσδυσης και στο εύρος του πάσσου κάθε διαδρομής. Με αύξηση της πυκνότητας ενέργειας, το βάθος διείσδυσης αυξάνεται επίσης. Η παράμετρος WDA αυξάνεται επίσης με αύξηση της πυκνότητας ενέργειας εισόδου, ενώ ο λόγος WDR μειώνεται. Τα αποτελέσματα αυτά βοηθούν στον καλύτερο σχεδιασμό των συστημάτων προσθήκης υλικού με laser. (Matilainen et al., 2014)

3.6 Εφαρμογές

Η τεχνολογία προσθήκης μεταλλικών υλικών και κραμάτων αποτελεί μια τεχνολογία «νέας γενιάς», ανταγωνιστική προς τις συμβατικές τεχνολογίες σχετικά με το κόστος, την ταχύτητα, την αξιοπιστία και την ακρίβεια. Μπορούν

να παραχθούν πρωτότυπα σε λίγες ώρες , ανάλογα με τον τύπο της μηχανής και το μέγεθος, το πλήθος και την πολυπλοκότητα των μερών που πρέπει να παραχθούν ταυτόχρονα. Η ιδέα της «γρήγορης» κατεργασίας αφορά στην άμεση διαμόρφωση από χύδην σκόνη, χωρίς να απαιτείται επιπρόσθετο κόστος για εργαλεία.

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας εκτείνονται σε διάφορους τομείς όπως αεροδιαστημική, πολεμική βιομηχανία, αυτοκίνηση, οδοντιατρική και ιατρική κ.λπ. Η βασική εφαρμογή αφορά στην κατασκευή πολύπλοκων στοιχείων μηχανών από υλικά δύσκολα προς επεξεργασία (Mazumder et al., 1997). Η τεχνολογία προσθήκης υλικού παράγει μορφές πολύ κοντά στο τελικό προϊόν και μειώνει την απαίτηση για περαιτέρω επεξεργασία. Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές αφορά στην κατασκευή πλαστικών εργαλείων έγχυσης και μητρών (Mazumder et al., 2000). Εφαρμόζεται ευρέως στον τομέα της χειρουργικής και στην κατασκευή προσθετικών. Τα ιατρικά εμφυτεύματα πρέπει να είναι εξαιρετικά εύκαμπτα για να ταιριάζουν σε κάθε ασθενή. Επίσης το βάρος τους πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερο, ενώ παράλληλα να διατηρεί τα κατάλληλα δομικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό προτιμώνται κυρίως τα πορώδη μεταλλικά μέρη με κατάλληλη διαμόρφωση.

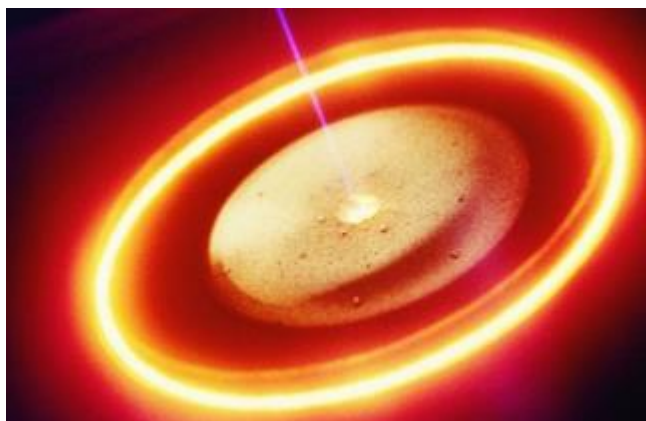
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συστήματα προσθήκης μετάλλου με δέσμη ηλεκτρονίων

4.1 Προσθήκη μετάλλου με δέσμη ηλεκτρονίων

4.1.1 Χαρακτηριστικά μεθόδου

Η τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων είναι μια κατεργασία προσθήκης υλικού σε στρωματική μορφή που οδηγεί στην κατασκευή πλήρως συμπαγών τεμαχίων από σκόνη τιτανίου (κράματος Ti6Al4V) ή σκόνη κράματος CoCr. Η πηγή υψηλής ενέργειας είναι μια δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία έχει μοναδικές δυνατότητες όπως η πολλαπλή δέσμη (multibeam) και η ικανότητα επίτευξης θέρμανσης, συσσωμάτωσης ή πλήρους τήξης της σκόνης. Επιπλέον, σε κάθε στρώμα, η δέσμη ηλεκτρονίων συσσωματώνει ολόκληρο το στρώμα σκόνης και το θερμαίνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, από αυτές που επιτυγχάνονται μέσω της προσθήκης υλικού με laser (SLM), π.χ. για τη σκόνη Ti6Al4V επιτυγχάνονται θερμοκρασίες γύρω στους 750°C.

Με τη βοήθεια ενός θαλάμου προσθήκης υλικού υπό μερικό κενό, ο οποίος μειώνει τη θερμική συναγωγή, υπάρχει μικρή θερμοκρασιακή κλίση εντός της κλίνης σκόνης και του τεμαχίου και συνεπώς ήπιες θερμικές διαταραχές. Με τη μέθοδο αυτή είναι εφικτή η κατασκευή τεμαχίων με καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με όσα προέρχονται από τήξη ή σφυρηλάτηση (Murr et al., 2009). Η ταχύτητα προσθήκης είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα της συσσωμάτωσης με laser αλλά οι ποιότητα διαστάσεων και επιφάνειας είναι συνήθως κατώτερη (Karunakaran et al., 2012). Ο μόνος κατασκευαστής είναι η σουηδική εταιρία Arcam AB.



Εικόνα 4.1: Δημιουργία τηγμένου λουτρού με δέσμη ηλεκτρονίων
(www.ifam.fraunhofer.de)

4.2 Δυνατότητες μεθόδου

Οι εξαιρετικά πολύπλοκες γεωμετρίες δεν μπορούν να επιτευχθούν με συμβατικές μεθόδους. Σε αντίθεση με το φρεζάρισμα και την τórνευση όπου τα καταλληλότερα γεωμετρικά σχήματα για κατεργασία είναι το επίπεδο και ο κύλινδρος, οι κατεργασίες προσθήκης υλικού σε στρώματα είναι κατάλληλες για την κατεργασία οποιασδήποτε γεωμετρικής μορφής, χωρίς να απαιτείται πολύπλοκη προ-επεξεργασία. Η κατάτμηση της κατεργασίας ενός πολύπλοκου τεμαχίου (π.χ. ενός πτερυγίου στροβίλου) σε μια διατομή τη φορά, κάνει την κατεργασία απλή όσο ενός πρισματικού τμήματος, εφόσον φυσικά λαμβάνονται υπόψη οι κατασκευαστικοί περιορισμοί.



Εικόνα 4.2: Πτερύγιο στροβίλου βαθμίδας χαμηλής πίεσης κατασκευασμένο μέσω της μεθόδου EBM για την εταιρία Anio S.p.A. (www.ifam.fraunhofer.de)

Επιπλέον, η προσθήκη υλικού μπορεί να γίνει μόνο όπου απαιτείται ώστε να είναι εφικτές οι λειτουργίες του τεμαχίου (π.χ. να φέρει ένα φορτίο, για αποφυγή αστοχίας κ.λπ.). Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται σημαντική ποσότητα υλικού. Αν το τεμάχιο πρέπει να είναι άκαμπτο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλέγματα 2D και 3D, αντί για συμπαγή όγκο υλικού. Οι δομές αυτές χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακαμψία, χαμηλή πυκνότητα, ενώ παράλληλα διευκολύνουν την απομάκρυνση της σκόνης (Vayre et al., 2012)

4.3 Κατασκευαστικοί περιορισμοί

Η κατεργασία με δέσμη ηλεκτρονίων και άλλες κατεργασίες στρωματικής προσθήκης υλικού έχουν κατασκευαστικούς περιορισμούς ως προς την ακρίβεια των διαστάσεων, την ποιότητα της επιφάνειας και τις μεταλλουργικές ιδιότητες, που υπάρχουν επίσης και στις συμβατικές κατεργασίες (Vayre et al., 2012). Τα κριτήρια αυτά είναι πολύ σημαντικά όταν πρέπει να αξιολογηθεί η κατεργασιμότητα ενός δεδομένου τεμαχίου, καθώς και όταν πρέπει να προβλεφθεί η ανάγκη για κατεργασίες αποπεράτωσης. Υπάρχουν επίσης ειδικοί κατασκευαστικοί περιορισμοί, όπως η ανάγκη απομάκρυνσης της μη τηγμένης σκόνης μετά το τέλος της κατεργασίας και σε ορισμένες περιπτώσεις η ανάγκη χρήσης υποστηρικτικών δομών για την απομάκρυνση της ενέργειας από το τηγμένο λουτρό προς το σώμα της μηχανής (Vayre et al., 2013).

4.4 Η Μηχανή ARCAM

Η ARCAM είναι μια Σουηδική εταιρία που ιδρύθηκε το 1997 με κύριο αντικείμενο την κατασκευή μηχανημάτων που βασίζονται σε τεχνολογίες κατεργασίας τήξης με δέσμη ηλεκτρονίων. (www.arcam.com) Η τεχνολογία αυτή απαιτεί μια θερμαινόμενη κλίνη σκόνης μετάλλου που τήκεται και κατεργάζεται το υλικό στη συνέχεια κατά στρώματα, χρησιμοποιώντας ως πηγή την ενέργεια δέσμης ηλεκτρονίων, όπως και ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Τα μηχανήματα που κατασκεύασε η ARCAM είναι τα μοντέλα A1 και A2, ενώ σήμερα ένα από τα τελευταία μοντέλα είναι το A10. Το μηχάνημα A1 έχει κατασκευαστεί ειδικά για ιατρικές εφαρμογές, ενώ το A2 για αεροδιαστημικές και άλλες εφαρμογές. Καθένα από τα δύο είναι εξοπλισμένο με δέσμη ηλεκτρονίων που μπορεί να παρέχει ισχύ μέχρι 3500 W. Ο μέγιστος όγκος που μπορεί να κατασκευαστεί με το μηχάνημα A1 είναι $200 \times 200 \times 180 \text{ mm}^3$ ενώ με το A2 $200 \times 200 \times 350 \text{ mm}^3$. Ο ρυθμός κατασκευής έχει βρεθεί βέλτιστος στα $55 \text{ cm}^3/\text{hr}$ για κράμα Ti-6Al-4V για υψηλή ποιότητα επιφάνειας και $80 \text{ cm}^3/\text{hr}$ για ταχεία κατεργασία κατασκευής. Το μηχάνημα λειτουργεί σε κενό 4-10 mbar και με τη νέα τεχνολογία πολλαπλής δέσμης μπορεί να σαρώσει ταυτόχρονα από 1-100 σημεία. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται από την ARCAM περιλαμβάνουν τα Ti-6Al-4V, ELI Ti, CP Ti, CoCr, γ – TiAl, ενώ πολλά άλλα βρίσκονται σε ερευνητικό επίπεδο (www.arcam.com).

Τα μηχανήματα τήξης με δέσμη ηλεκτρονίων χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές και η ARCAM εισήγαγε το μηχάνημα A1 στο τέλος του 2009 ειδικά για την ιατρική αγορά. Η ARCAM συνεργάστηκε με την εταιρία Adler Ortho από το Μιλάνο για την κατασκευή προσθετικού για το γοφό. Από το 2007 έχουν κατασκευαστεί πάνω από 10000 προσθετικά μέλη και πάνω από 1000 έχουν

γίνει δεκτά από τους ασθενείς, σύμφωνα με τους γιατρούς τους. Μέσω αυτής της τεχνολογίας είναι εφικτή η εξατομικευμένη κατασκευή προσθετικών για το γόνατο και το πρόσωπο επίσης. Το στρατιωτικό νοσοκομείο της Washington (Walter Reed Army Medical Center) έχει αγοράσει μηχάνημα ARCAM ώστε να κατασκευάζει επιτόπου εξατομικευμένα μοσχεύματα για τους τραυματισμένους στρατιώτες.

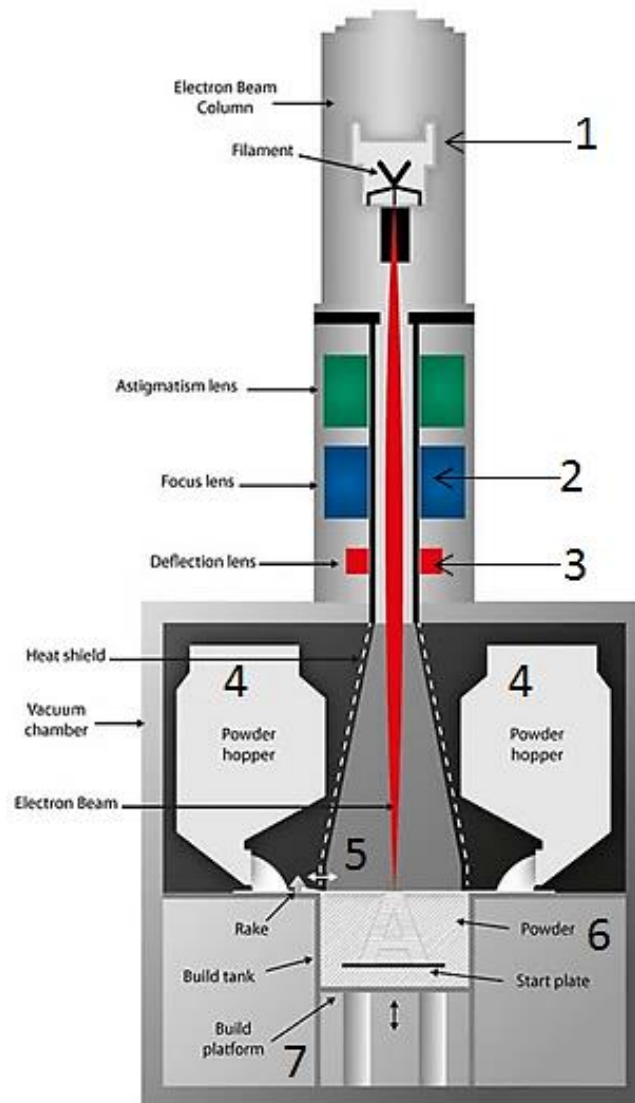
Η Anio μια ιταλική αεροδιαστημική εταιρία έχει συνεργαστεί με την ARCAM για να ενισχύσει την κατασκευή διαμεταλλικών τμημάτων γ -TiAl για εφαρμογή σε πτερύγια στροβίλου ή σε άλλες περιοχές υψηλής θερμοκρασίας του κινητήρα. Όμως, λόγω της διαμεταλλικής δομής το υλικό είναι ψαθυρό και δύσκολα κατεργάσιμο με συμβατικές μεθόδους (www.arcam.com).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης της τεχνολογίας τήξης με δέσμη ηλεκτρονίων είναι ότι ο θάλαμος προσθήκης υλικού διατηρείται θερμός, συνήθως μεταξύ 700°C και 1000° C. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερες τάσεις στα τεμάχια λόγω των μικρότερων ψυκτικών ποσών κατά τη διάρκεια ενός κύκλου κατασκευής. Έχει βρεθεί ότι το κράμα Ti-6Al-4V που υφίσταται κατεργασία με δέσμη ηλεκτρονίων έχει συγκρίσιμη αντοχή και ιδιότητες με υλικό που έχει υποστεί σφυρηλάτηση. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ο υψηλότερος ρυθμός κατασκευής σε σχέση με τα συστήματα κίνησης σκόνης με laser. Όμως, η επιφανειακή τραχύτητα τους είναι υψηλότερη και απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία σε πολλές εφαρμογές (Herderick, 2011).



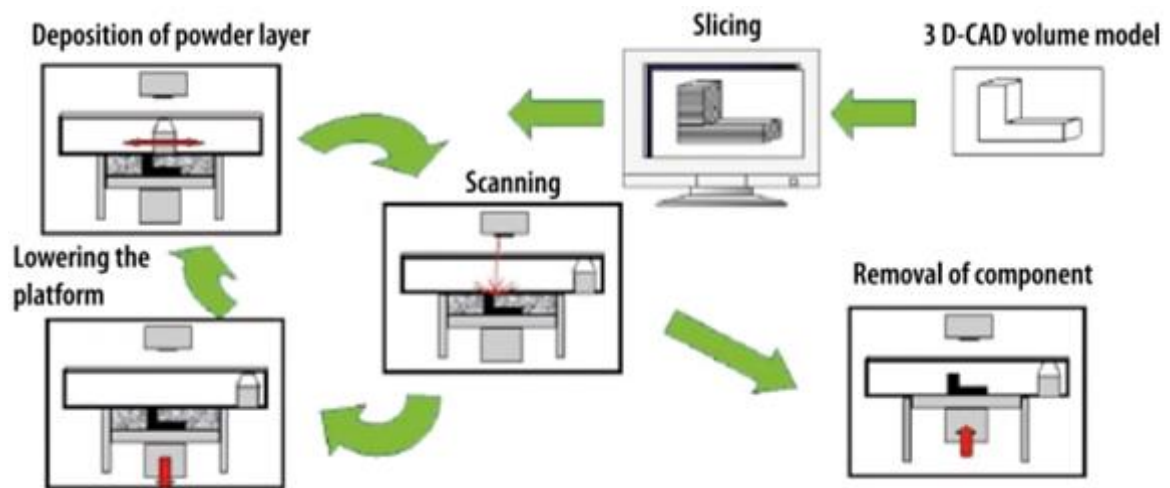
Εικόνα 4.3: Το σύστημα Arcam A2 (Murr et al., 2012)

Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται το σύστημα Arcam A2. Το τμήμα ελέγχου και καταγραφής βρίσκεται στο αριστερό μέρος, ενώ το δεξί τμήμα (που υποδεικνύεται στην εικόνα με το βέλος EBM) περικλείει το σύστημα διαμόρφωσης της δέσμης ηλεκτρονίων.



Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση συστήματος τήξης δέσμης ηλεκτρονίων

Το σύστημα αυτό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4, μοιάζει με μια τυπική οπτική στήλη ηλεκτρονίων παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων ή σε ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης όπου μια ριπή ηλεκτρονίων στο (1) παράγει την αρχική δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία επιταχύνεται σε δυναμικό 60 kV, μέσω ενός συστήματος συγκεντρωτικών φακών (2) και ενός συστήματος πηνίων μαγνητικής σάρωσης (3). Η εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνεται επιλεκτικά πάνω από το στρώμα σκόνης, οδηγούμενη βάσει ενός μοντέλου CAD. Το στρώμα σκόνης δημιουργείται από τη σκόνη που τροφοδοτείται πέρα από το σημείο (5) προερχόμενη από τις αποθήκες σκόνης στις θέσεις (4). Το τεμάχιο (6) κατασκευάζεται με προθέρμανση και επιλεκτική τήξη. Η βάση κατασκευής (7) οδηγείται προς τα κάτω ώστε να υπάρχει χώρος για την κατασκευή των στρώσεων του τεμαχίου. Η προθέρμανση της σκόνης επιτυγχάνεται μέσω της διαδοχικής, γρήγορης σάρωσης με τη δέσμη.



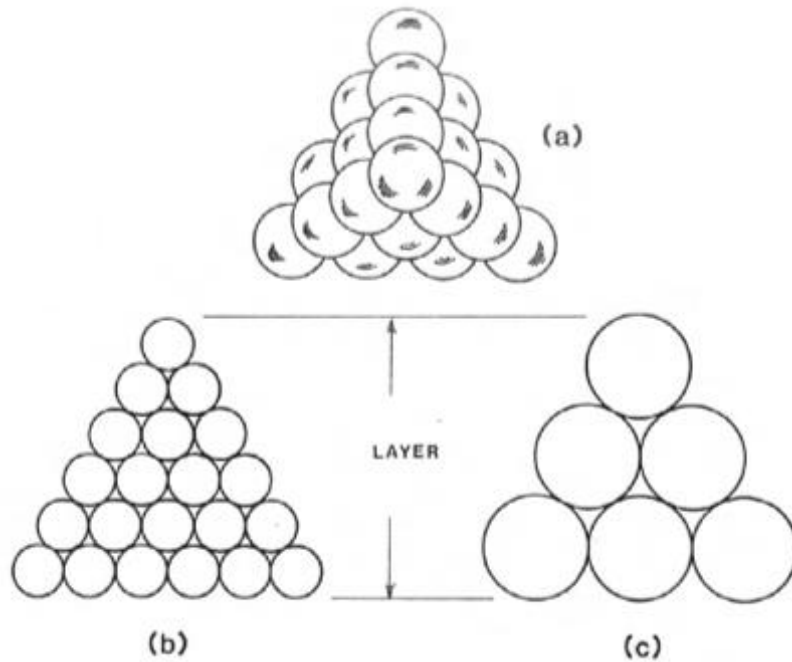
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα ροής της κατεργασίας EBM (www.ifam.fraunhofer.de)

4.5 Σημαντικές παράμετροι της διεργασίας

4.5.1 Ιδιότητες της σκόνης

Οι ιδιότητες της σκόνης είναι εξαιρετικά σημαντικές. Η ροή της και η δυνατότητα συνένωσης των στρωμάτων της σκόνης υπαγορεύουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η ρευστότητα της σκόνης είναι ένα περίπλοκο ζήτημα ενώ η συμπεριφορά της ροής είναι πολυδιάστατη και πολυπαραμετρική. Οι ιδιότητες ροής περιλαμβάνουν την πυκνότητα (ή συμπίεστικότητα), τη συνεκτική δύναμη και την τριβή τοιχωμάτων καθώς και τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις και τις δυνάμεις van der Waals που δρουν επάνω στα σωματίδια της σκόνης, την επιφανειακή τάση και τα χαρακτηριστικά σύμπλεξης των μορίων, τα οποία προσδιορίζονται από το μέγεθος των σωματιδίων και την κατανομή μεγέθους τους. (Carlson et al., 1998 ; Prescott et al., 2000)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6, τα μεγάλα σωματίδια ενός μόνο μεγέθους περιέχουν μεγαλύτερα ενδιάμεσα κενά που μπορούν να συμπληρωθούν με μικρότερα μεγέθη σωματιδίων, ενώ τα πολύ μικρά σωματίδια ενός μόνο μεγέθους μπορούν να συμπλεχθούν πιο αποτελεσματικά, αφήνοντας λιγότερο ενδιάμεσο χώρο που πρέπει να συμπληρωθεί.



Εικόνα 4.6: Ιδανική διάταξη σύμπλεξης σωματιδίων διαφορετικού μεγέθους (a) Κάτοψη, (b) πλάγια όψη σύμπλεξης μικρών σωματιδίων και (c) πλάγια όψη σύμπλεξης μεγάλων σωματιδίων (Murr et al., 2012)

4.5.2 Ιδιότητες της δέσμης ηλεκτρονίων

Η πυκνότητα ενέργειας χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μέση ενέργεια που προσδίδεται ανά μονάδα όγκου υλικού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Οι σημαντικές παράμετροι συσχετίζονται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}$$

όπου

P είναι η ισχύς της δέσμης ηλεκτρονίων,

v η ταχύτητα σάρωση

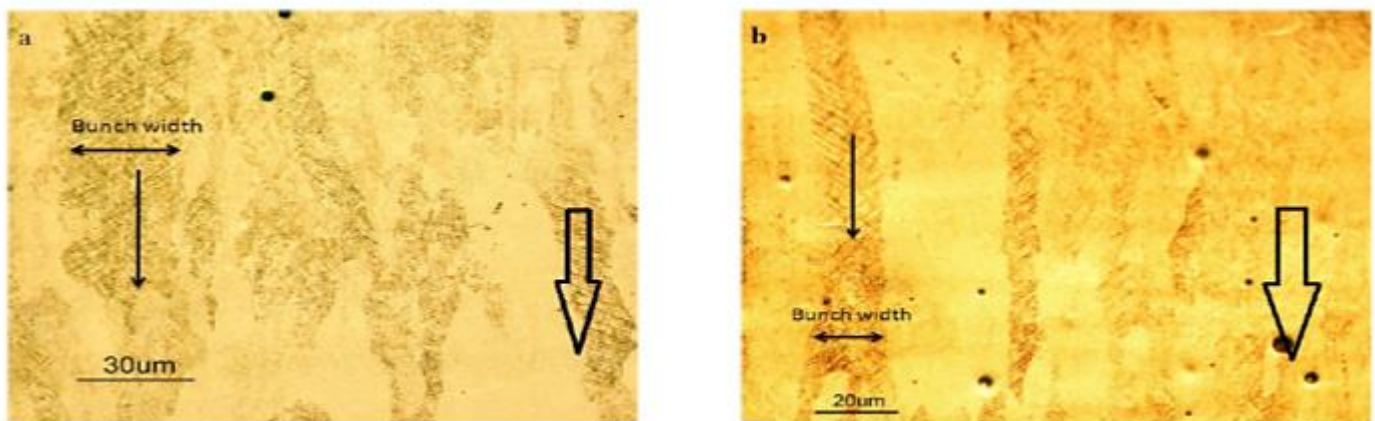
h η απόσταση των γραμμών περάσματος της δέσμης

t το πάχος του στρώματος.

Η μεταβλητή h περιγράφεται και ως απόκλιση γραμμής (line offset), ενώ σημαντική είναι και η απόκλιση εστίασης (focus offset), η οποία θα αναλυθεί ακολούθως (Gong et al., 2013).

Λόγω του ότι είναι δύσκολο να μετρηθεί το μέγεθος τα δέσμης, η στρατηγική βελτιστοποίησης του μεγέθους ή των συνθηκών εστίασης της δέσμης, χρησιμοποιείται μια απόκλιση εστίασης, κατά την οποία δοκιμαστικά τεμάχια κατασκευάζονται σε διαφορετικές συνθήκες απόκλισης και ακολούθως εξετάζονται οι μικροδομές τους σε κατάλληλο επίπεδο ανάλυσης.

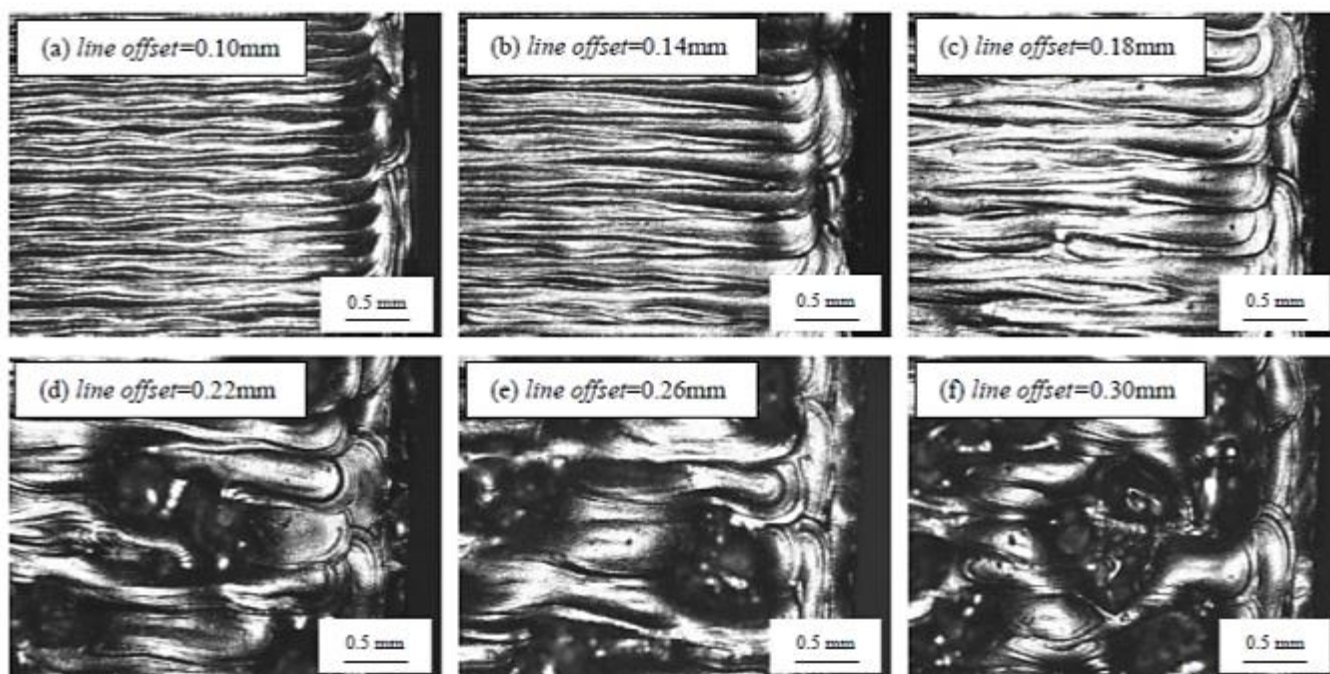
Η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας ενέργειας της δέσμης, η οποία είναι συνάρτηση του ρεύματος της δέσμης, της απόκλισης εστίασης και της ταχύτητας σάρωσης. Η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης αυξάνεται με αύξηση του ρεύματος της δέσμης και μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας σάρωσης και της απόκλισης εστίας. (Safdar al., 2012)



Εικόνα 4.7: Φωτογραφίες υλικού από μικροσκόπιο (a) για υψηλή πυκνότητα ενέργειας 6 mA και (b) για χαμηλή πυκνότητα ενέργειας 4 mA (Safdar et al., 2012)

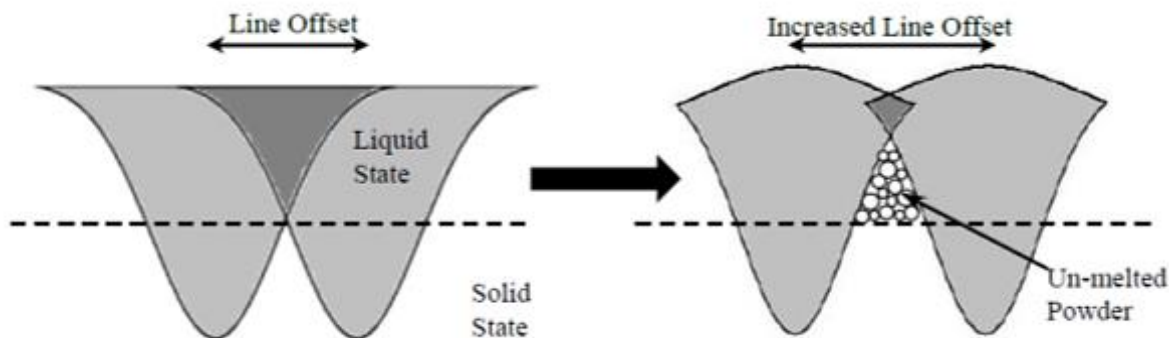
Έχει γενικά παρατηρηθεί ότι με αύξηση της πυκνότητας ενέργειας, αυξάνεται το πλήθος των κόκκων μορφής κολόνας (Εικόνα 4.7). Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι με μείωση της πυκνότητας ενέργειας, οι κόκκοι αυτοί κλίνουν κατά 20° περίπου προς την κατεύθυνση της σάρωσης, ενώ στην περίπτωση υψηλής πυκνότητας ενέργειας ακολουθούν την κατεύθυνση της κατασκευής του τεμαχίου. Με αύξηση του μήκους σάρωσης, οι κόκκοι γίνονται μεγαλύτεροι και πιο χονδροειδείς. Αυτό οφείλεται στο ότι στο σημείο αλλαγής κατεύθυνσης η ταχύτητα σάρωσης της δέσμης αυξάνεται κατά συνέπεια η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης μειώνεται. Ένας ακόμη λόγος για την εμφάνιση του φαινομένου αυτού είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ δύο διαδοχικών περασμάτων της δέσμης από ένα συγκεκριμένο σημείο. Στην περίπτωση του μικρού μήκους σάρωσης η χρονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών περασμάτων της δέσμης από ένα δεδομένο σημείο είναι πολύ μικρή, και άρα είναι μικρότερος ο χρόνος που δίνεται στο τηγμένο λουτρό για να στερεοποιηθεί, ενώ στην περίπτωση του μεγάλου μήκους σάρωσης το χρονικό διάστημα είναι λίγο μεγαλύτερο. Η μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων τήξης παρέχει τη δυνατότητα στο προηγούμενο στρώμα να

σταθεροποιηθεί και έτσι να προκύψει μια πιο χονδροειδής μικροδομή (Safdar et al., 2012)



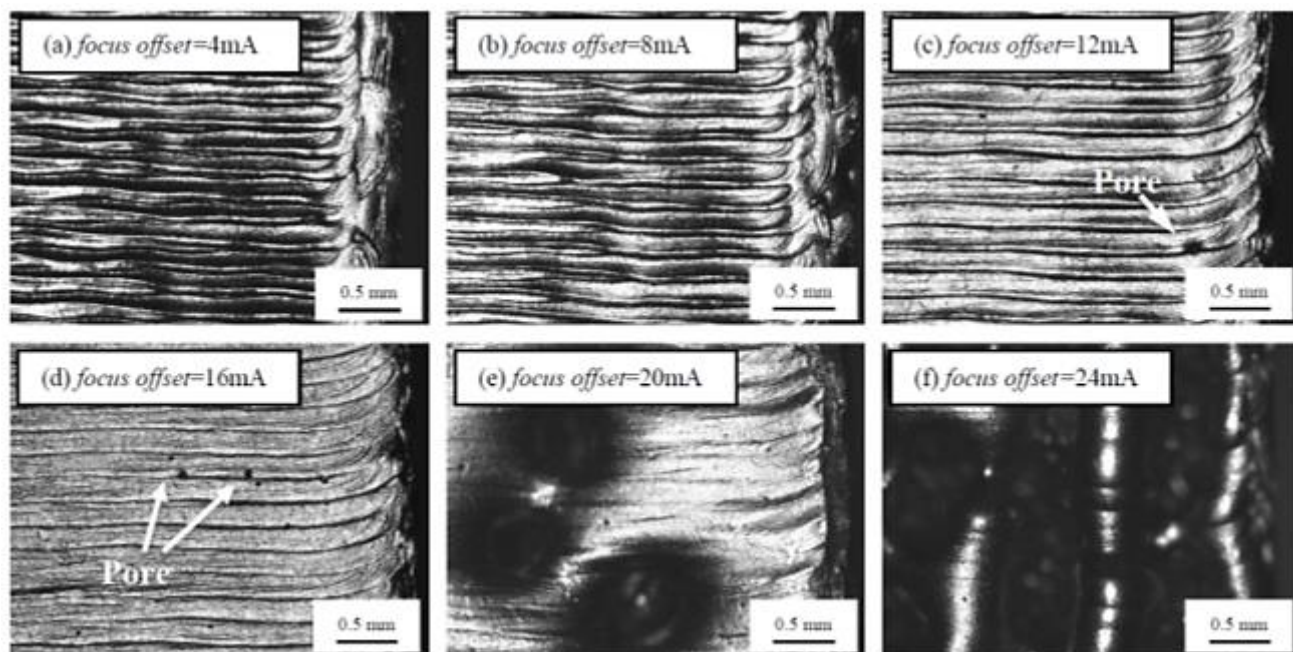
Εικόνα 4.8: Στερεοποίηση της επιφάνειας που προκύπτει μέσω EB3D με διαφορετική απόσταση περασμάτων της δέσμης (line offset). (Gong et al., 2013)

Όταν η απόσταση γραμμών είναι 0,1 mm (προκαθορισμένη τιμή), τα ίχνη των στερεοποιημένων γραμμών βρίσκονται σε ίσες αποστάσεις. Δε σχηματίζονται εμφανείς πόροι ή ελαττώματα μεταξύ των γραμμών. Όμως, η επικάλυψη μεταξύ των γραμμών μειώνεται αν αυξηθεί η απόσταση σε 0,14 mm και 0,18 mm. Παρότι δεν υπάρχουν ορατοί πόροι ή κενά στην επάνω επιφάνεια (Εικόνα 4.8 (b) και (c)), είναι ορατό ένα ποσοστό πορώδους, το οποίο οφείλεται στη μη τηγμένη σκόνη, κατά από τις γειτονικές γραμμές ιχνών. Αυτό σημαίνει ότι αν αυξάνεται η απόσταση των ιχνών, παραμένουν μη τηγμένες περιοχές σκόνης, οι οποίες οδηγούν σε ατέλειες. Το πορώδες δεν είναι εμφανές έως ότου η απόκλιση των γραμμών αυξηθεί στα 0,22 mm. Υπάρχουν ορατά ελαττώματα στην επιφάνεια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8(d). Όταν η απόκλιση των γραμμών αυξηθεί πάνω από 0,26 mm και 0,30 mm, το τηγμένο λουτρό δεν μπορεί να έρθει σε επαφή με το προηγούμενο ίχνος, πράγμα το οποίο οδηγεί σε άσχημες συνθήκες διαβροχής. Για να μειωθεί η συνολική ελεύθερη ενέργεια της επιφάνειας, η τηγμένη σκόνη συγκεντρώνεται και ρέει πάνω από τη μη τηγμένη σκόνη, προκαλώντας κενά μεταξύ των ιχνών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8 (d)-(f).



Εικόνα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση του τηγμένου λουτρού με αυξημένη απόκλιση γραμμών κατά τη διαδικασία EBM (Gong et al., 2013)

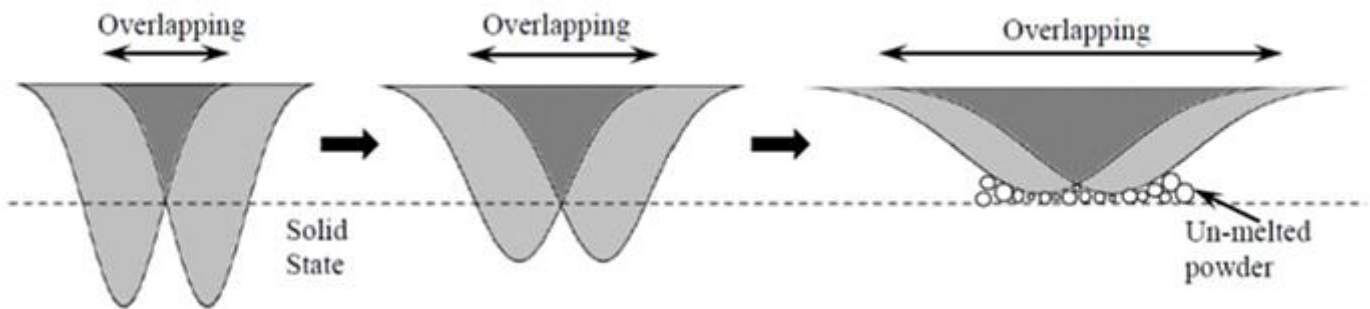
Η απόκλιση εστίασης είναι το πρόσθετο ρεύμα που διέρχεται μέσω του αντίστοιχου ηλεκτρομαγνητικού πηνίου και μπορεί να μεταφραστεί σε απόκλιση του επιπέδου εστίασης από τη μηδενική θέση (Schwerdtfeger et al., 2012). Η αύξηση της τιμής απόκλισης εστίασης οδηγεί σε μεγαλύτερη διάμετρο δέσμης κατά τη διάρκεια της EBM, πράγμα το οποίο καταλήγει σε μικρότερη συγκέντρωση ενέργειας. Άρα η πυκνότητα ενέργειας μειώνεται. Η στερεοποιημένη επιφάνεια κάτω από μικροσκόπιο έχει τη μορφή που αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.10 (Gong et al., 2013).



Εικόνα 4.10: Στερεοποιημένες επιφάνειες μέσω της μεθόδου EBM με μεταβολή της απόκλισης εστίασης (Gong et al., 2013)

Μια μικρή απόκλιση εστίασης καταλήγει σε συγκεντρωμένη δέσμη ηλεκτρονίων και ικανό βάθος τήξης. Συνεπώς, το βάθος διείσδυσης της δέσμης ηλεκτρονίων

στο στρώμα της σκόνης είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τη διεύθυνση μιας δέσμης laser (Zäh et al., 2010). Κάθε στερεοποιημένο ίχνος σχηματίζει μια κορυφή και οδηγεί σε τραχιά επιφάνεια. Αυξάνοντας την απόκλιση εστίασης, η μορφολογία του τηγμένου λουτρού μεταβάλλεται. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.11, η οριζόντια διάσταση του τηγμένου λουτρού αυξάνεται ενώ το βάθος τήξης μειώνεται.



Εικόνα 4.11: Σχηματική αναπαράσταση του τηγμένου λουτρού με αύξηση της απόκλισης εστίασης κατά την EBM (Gong et al., 2013)

Το αυξημένο εμβαδόν επικάλυψης βελτιώνει σημαντικά την τραχύτητα της επιφάνειας όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.10 (c)-(d), αλλά μπορούν να δημιουργηθούν μικροί πόροι τοπικά σε ορισμένα σημεία. Αυτοί οι σφαιρικοί πόροι προκύπτουν από εγκλωβισμένα αέρια στα σωματίδια της σκόνης. Η τηγμένη σκόνη απελευθερώνει τα παγιδευμένα αέρια, το οποίο προκαλεί τις ατέλειες. Όταν η τιμή της απόκλισης εστίασης είναι μεγαλύτερη από 16 mA, το αυξημένο εμβαδόν επικάλυψης και το μειωμένο βάθος τήξης δημιουργούν ένα ασταθές λουτρό τήξης λόγω της υποκείμενης μη τηγμένης σκόνης (Εικόνα 4.11).

4.6 Κατεργασία κράματος Ti μέσω EBM

Το κράμα Ti-6Al-4V είναι το πιο διαδεδομένο κράμα τιτανίου. Ο εξαιρετικός συνδυασμός ειδικού βάρους και μηχανικών ιδιοτήτων (ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες) έχει βοηθήσει στη χρήση του σε εφαρμογές αεροναυτιλίας. Χάρη στη βιολογική και χημική αδράνειά του, η εφαρμογή του έχει επεκταθεί και στο χώρο των τροφίμων, καθώς και στην ορθοπεδική και στην οδοντιατρική χειρουργική (Ping et al., 2006). Οι ιδιότητες του Ti-6Al-4V εξαρτώνται σημαντικά από τη μικροδομή του. Κατά βάση, μια μικροδομή σε μορφή ελασμάτων βελτιώνει την αντίσταση στη διάδοση ρωγμών λόγω κόπωσης, στον ερπυσμό και στην οξείδωση, ενώ μια σφαιρική μικροδομή ευνοεί την αντοχή και την ολκιμότητα (Leyens and Peters, 2003). Συνεπώς οι τεχνολογικές ιδιότητες του

συγκεκριμένου κράματος εξαρτώνται σημαντικά από τη μέθοδο παρασκευής, η οποία οδηγεί σε αισθητές διαφορές στην προκύπτουσα μικροδομή.

Μέσω της κατεργασίας EBM είναι εφικτή η κατασκευή περίπλοκων 3D σχημάτων, απευθείας μέσω σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή, σε ένα βήμα. Το κύριο πλεονέκτημα των τεχνολογιών αυτών είναι η δυνατότητα επεξεργασίας της επιφάνειας κατασκευάζοντας ένα επιφανειακό πορώδες στρώμα (Hollander et al., 2006 ; Ponader et al., 2007). Λόγω του υψηλού ρυθμού στερεοποίησης, η μικροδομή του κράματος Ti όταν υφίσταται επεξεργασία με αυτή τη μέθοδο χαρακτηρίζεται από βελονοειδή/ ελασματοειδή μορφολογία (Facchini et al., 2007)

4.6.1 Παρουσίαση πειραματικής διαδικασίας και αποτελεσμάτων

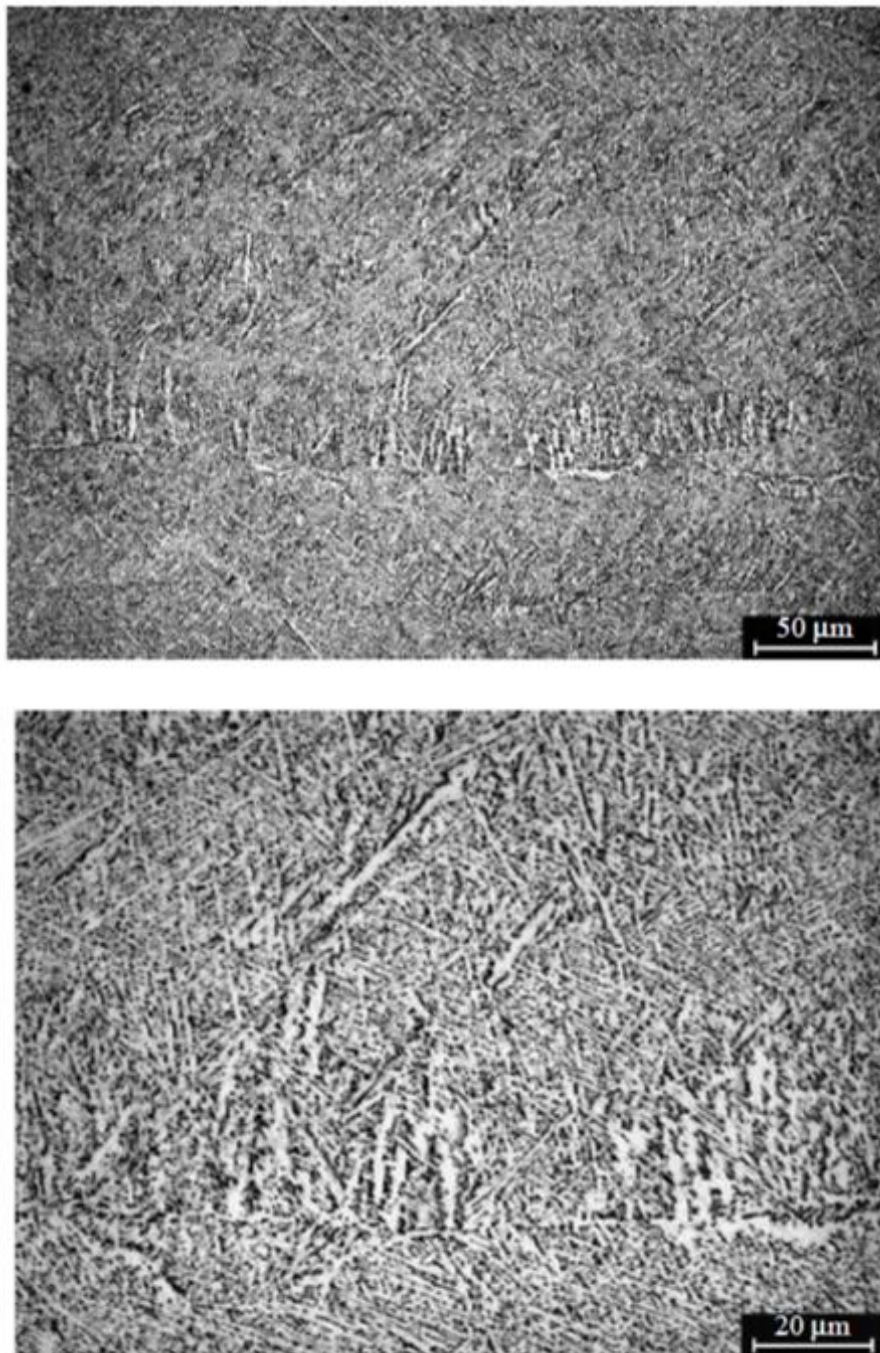
Στο ακόλουθο πείραμα οι Facchini et al. (2007) χρησιμοποίησαν σκόνη Ti-6Al-4V με σφαιρική μορφολογία και κοκκομετρία 45/100 μm. Η ονομαστική χημική σύστασή του παρουσιάζεται ακολούθως (Πίνακας 4.1). Η κατεργασία εκτελείται σε κενό (σε θάλαμο, στα 5×10^{-3} mbar στην αρχή ως 2×10^{-5} mbar στο τέλος της κατεργασίας) και τα τεμάχια κατασκευάζονται σε στρώματα πάχους 100 μm. Η διάμετρος της δέσμης ήταν 0,5 mm και η ισχύς της 4 kW.

Πίνακας 4.1: Ονομαστική χημική σύσταση της προκραματωμένης σκόνης Ti-6Al-4V για χρήση σε κατεργασία EBM (Facchini et al., 2007)

Chemical element	%	Required %
Al	6.0	5.5/6.75
V	4.0	3.5/4.5
Fe	0.1	< 0.3
O	0.1	< 0.2
N	0.01	< 0.05
H	< 0.003	< 0.01
C	0.03	< 0.1
Ti	Balance	Balance

Note: Standard requirements reported

Η μικροδομή μελετήθηκε στο οπτικό μικροσκόπιο ύστερα από καθαρισμό.

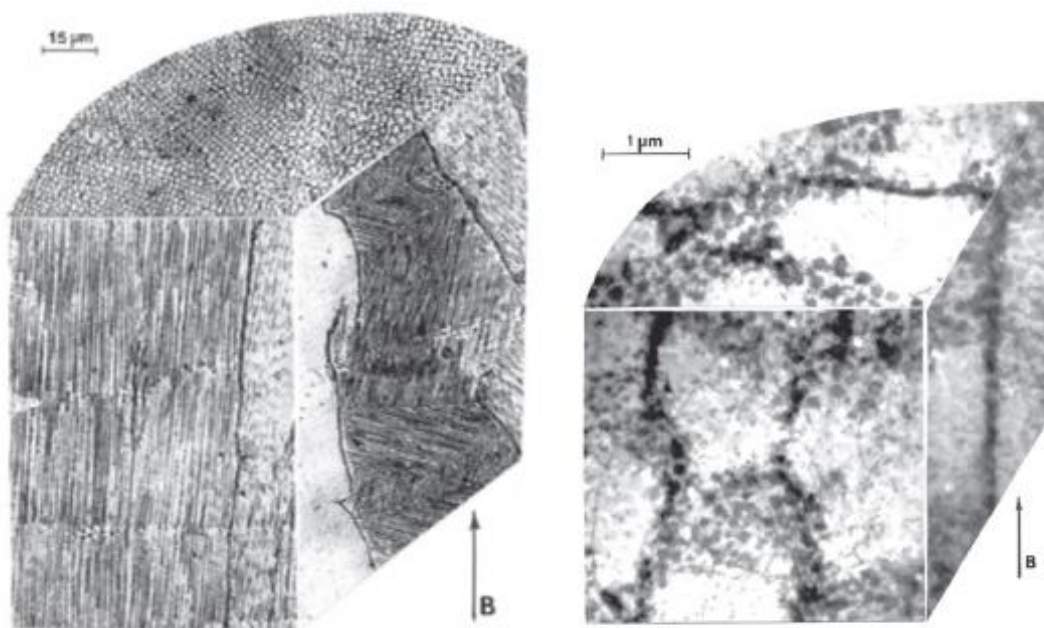


Εικόνα 4.12: Μικροδομή του υλικού Ti-6Al-4V σε δύο διαφορετικές μεγεθύνσεις (Facchini et al., 2007)

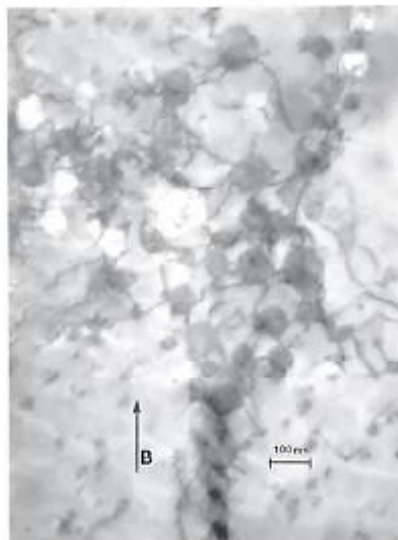
Στην Εικόνα 4.12 παρουσιάζεται η μικροδομή του υλικού σε διαφορετικές μεγεθύνσεις. Είναι ελασματοειδής και αρκετά λεπτόκοκκη. Με βάση τη μικροδομή που έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία για το ίδιο κράμα, είναι πιο λεπτόκοκκη σε σχέση με αυτό που προκύπτει από τη χύτευση του μετάλλου (Kobryn and Semiatin, 2003). Δεν παρατηρούνται πόροι, καθώς η πυκνότητά του υλικού είναι 99,4% ως προς τη θεωρητική.

4.7 Κατεργασία χαλκού μέσω EBM

Στην Εικόνα 4.13 (αριστερά) παρουσιάζεται ένα κυλινδρικό στοιχείο κατασκευασμένο από χαλκό μέσω της μεθόδου EBM. Το οριζόντιο επίπεδο παρουσιάζει κοκκώδη διάταξη με διάμετρο 2-3 μm , η οποία αντιστοιχεί στην συνήθη διάσταση τηγμένου λουτρού. Τα κατακόρυφα επίπεδα παρουσιάζουν διάταξη σε μορφή στήλης. Άλλες ζώνες, όπως το δεξί κάθετο τμήμα, παρουσιάζουν διακοπές σε αυτή την κατακόρυφη μορφή της επιφάνειας, οι οποίες οφείλονται στις ατέλειες σάρωσης της δέσμης. Οι ανωμαλίες αυτές παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην Εικόνα 4.13 (δεξιά). Στα σημεία συνένωσης της κοκκώδης μορφής με τη μορφή στήλης παρατηρείται η παρουσία οξειδίων χαλκού. Τα ιζήματα αυτά παρουσιάζονται αρχικά στην πρόδρομη σκόνη Cu και στη συνέχεια σχηματίζονται επίσης κατά την διαδικασία EBM, ενσωματώνοντας τα ίχνη οξυγόνου που υπάρχουν στο περιβάλλον κενού. Κυμαίνονται σε μέγεθος από 25 nm ως 100 nm.



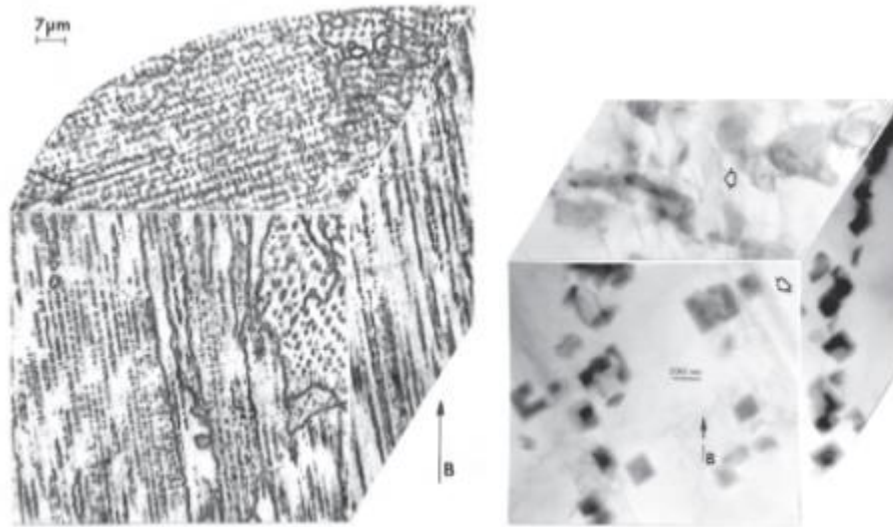
Εικόνα 4.13: Τρισδιάστατη απεικόνιση τεμαχίου Cu κατασκευασμένου μέσω EBM (αριστερά) και απεικόνιση των ατελειών σε μεγέθυνση (δεξιά) (Murr et al., 2012)



Εικόνα 4.14: Απεικόνιση στο μικροσκόπιο των συστοιχιών ιζημάτων CuO του τεμαχίου που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.13 (Murr L. et al., 2012)

4.8 Κατεργασία υπερκράματος Co μέσω EBM

Στην Εικόνα 4.15 (αριστερά) παρουσιάζεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση ενός υπερκράματος Co-26Cr-6Mo-0.2C που έχει υποστεί κατεργασία μέσω EBM. Στην περίπτωση αυτή προκύπτουν ιζήματα $Cr_{23}C_6$, τα οποία παρουσιάζονται σε μεγέθυνση στην Εικόνα 4.15 (δεξιά). Οι στήλες ιζημάτων δημιουργούνται πρώτα στο κέντρο του τηγμένου λουτρού. Οι ατέλειες στη δέσμη σάρωσης δημιουργούν ατέλειες στη διάταξη των ιζημάτων. Στην εικόνα το βέλος B δείχνει την κατεύθυνση της κατασκευής, ενώ τα λευκά βέλη επισημαίνουν τις ατέλειες του υλικού. Η μέση διάσταση των ιζημάτων είναι ~100 nm.



Εικόνα 4.15: Τρισδιάστατη απεικόνιση τεμαχίου υπερκράματος Co κατασκευασμένου μέσω EBM (αριστερά) και απεικόνιση των ατελειών σε μεγέθυνση (δεξιά) (Murr et al., 2012)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συστήματα προσθήκης μετάλλου με πηγή πλάσματος

5.1 Εισαγωγή στην εναπόθεση υλικού με πηγή πλάσματος

Στις κατεργασίες εναπόθεσης υλικού, το υλικό προστίθεται μέσω τήξης μιας συνεχούς ροής και εναπόθεσης του υλικού κατά στρώματα. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της διαδικασίας αυτής. Το υλικό μπορεί να ρέει σε σκόνη ή μορφή σύρματος, ενώ η πηγή θερμότητας μπορεί να είναι laser, τόξο πλάσματος ή δέσμη ηλεκτρονίων. Διαφορετικά συστήματα διανομής χρησιμοποιούν διαφορετικούς συνδυασμούς υλικού και πηγής θερμότητας, αλλά ο πιο συνηθής είναι σκόνη υλικού με πηγή laser. Υπάρχει επίσης μέθοδος απόθεσης υλικού όπου χρησιμοποιούνται φύλλα υλικού.

Όταν πρόκειται για περίπλοκα σχήματα, οι μέθοδοι εναπόθεσης υλικού έχουν πιο περιορισμένες δυνατότητες σε σχέση με τις μεθόδους κλίνης σκόνης. Οι μέθοδοι εναπόθεσης απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία του υλικού ή ειδική διαμόρφωση για τη δημιουργία εντομής ή κοιλοτήτων. Το πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι ο χώρος εργασίας δεν περιορίζεται από το μέγεθος της κλίνης σκόνης αλλά από τους περιορισμούς χώρου της ρομποτικής κεφαλής που κινεί το ακροφύσιο εναπόθεσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι καν απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί κλειστός θάλαμος για την περιοχή εργασίας, καθώς το ακροφύσιο περιλαμβάνει κανάλια τα οποία διοχετεύουν το προστατευτικό αέριο όπου υπάρχει τηγμένη περιοχή υλικού. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής μεγάλων αντικειμένων, καθώς και επισκευής υπαρχόντων αντικειμένων (Gibson, 2010).

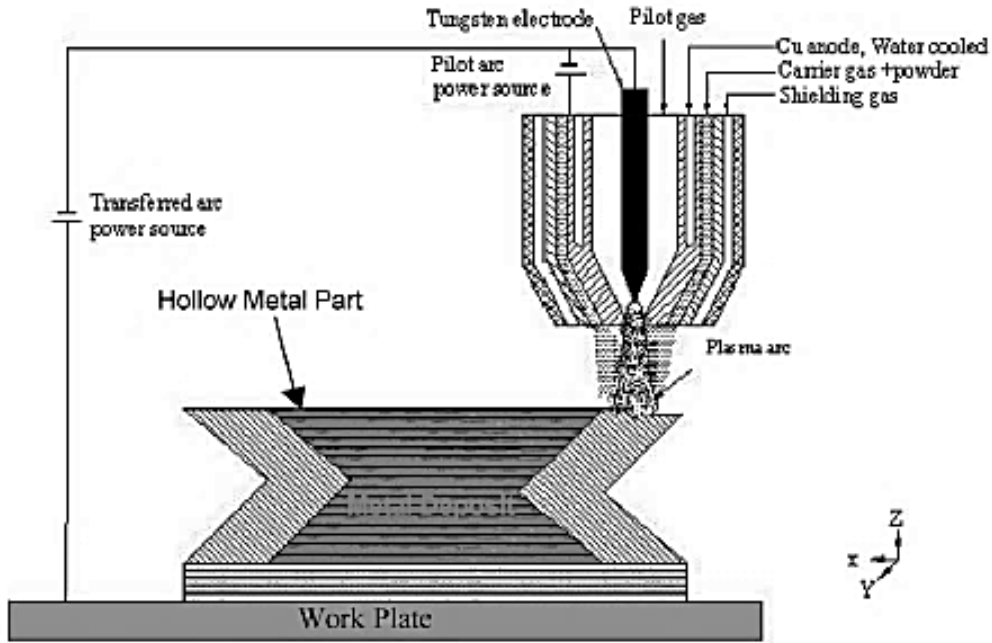
Η πηγή ενέργειας αποτελεί σημαντικό παράγοντα διαφοροποίησης μεταξύ των διαφόρων μεθόδων εναπόθεσης υλικού. Για τα μεταλλικά υλικά, η δέσμη laser, η δέσμη ηλεκτρονίων και το τόξο πλάσματος είναι οι κύριες χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας. Η δέσμη laser και η δέσμη ηλεκτρονίων είναι πιο ακριβείς πηγές ενέργειας σε σχέση με το τόξο πλάσματος και συνεπώς προτιμώνται όταν πρόκειται για εναπόθεση μικρών διαστάσεων. Αλλά ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι η χαμηλή απόδοση μετατροπής της ενέργειας, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την κατασκευή των τμημάτων. Η χρήση αποδοτικών πηγών ενέργειας και η αύξηση του ρυθμού εναπόθεσης είναι δύο βασικά ζητήματα στις κατεργασίες αυτές. Οι Suryakumar et al. (2011) αναφέρουν ότι ο ρυθμός εναπόθεσης που επιτυγχάνεται μέσω δέσμης laser ή ηλεκτρονίων είναι της τάξης των 2-10 g/min ενώ η εναπόθεση τόξου πλάσματος μπορεί να επιτύχει ρυθμούς στο εύρος 50-130 g/min. Συνεπώς, οι τεχνικές εναπόθεσης που βασίζονται σε τόξο πλάσματος

προτιμώνται όταν πρόκειται για εναπόθεση μεγάλης ποσότητας μεταλλικού υλικού.

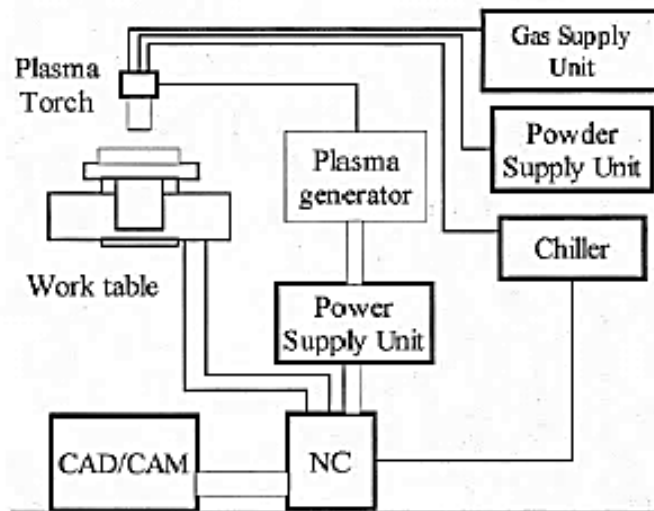
Οι Jandric et al. (2004) κατασκεύασαν επιτυχώς τρισδιάστατα μεταλλικά τμήματα χρησιμοποιώντας συγκόλληση τόξου βολφραμίου για την εναπόθεση του υλικού. Το τμήμα που κατασκευάστηκε δεν είχε ρωγμές ή πορώδη δομή, ενώ επετεύχθη ομοιόμορφη μικροδομή σε όλη την έκτασή του. Η εναπόθεση μικροτόξου είναι μια από τις πιο φιλόδοξες τεχνικές για εφαρμογές επιδιόρθωσης και για κατασκευή μεσαίας κλίμακας. Οι Horii et al. (2009) πέτυχαν την κατασκευή τρισδιάστατων δομών με χρήση σύρματος μικροδιαστάσεων για εναπόθεση μικρών διαστάσεων («μινιατούρας») με σύστημα συγκόλλησης μικρο-βολφραμίου (μ-TIG).

5.2 Περιγραφή μεθόδου εναπόθεσης σκόνης υλικού με πηγή πλάσματος

Ο εξοπλισμός για την πειραματική μέθοδο εναπόθεσης με πλάσμα μπορεί να βασιστεί σε υπάρχων εξοπλισμό πλάσματος μεταφερόμενου τόξου. Ο συνολικός εξοπλισμός περιλαμβάνει τη μονάδα παραγωγής πλάσματος, τη μονάδα παροχής ισχύος, τον έλεγχο κινήσεων και τη μονάδα ψύξης, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1.



(a)



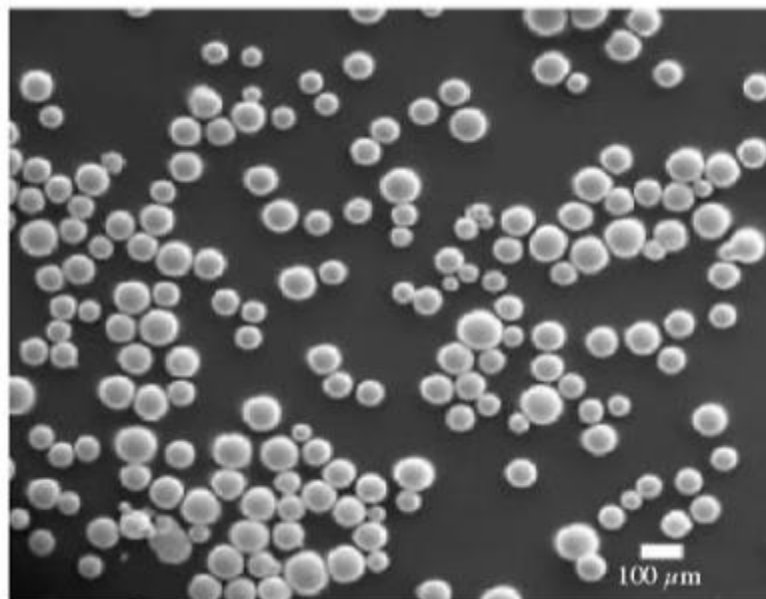
(b)

Εικόνα 5.1: (a)Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας εναπόθεσης μετάλλου με πλάσμα (PDM) και (b) σύστημα PDM (Zhang et al., 2003)

Κατά τη διαδικασία αυτή παρέχεται μια συνεχής τροφοδοσία σκόνης στην τηκόμενη από το πλάσμα ζώνη, όπου η σκόνη τήκεται και επανα-στερεοποιείται στο τηγμένο λουτρό, καθώς η δέσμη πλάσματος σαρώνει το στρώμα εναπόθεσης. Η επεξεργασία πραγματοποιείται συνήθως σε περιβάλλον αδρανούς αερίου όπως το αργό, το ήλιο, το άζωτο, για να μειώνεται η οξείδωση.

Πολλαπλές συστάσεις σκόνης μπορούν να τροφοδοτηθούν ταυτόχρονα ή διαδοχικά, για να προκύψει κραμάτωση στη ζώνη τήξης ή για να παρέχεται η επιλογή του υλικού ανάλογα με την επιθυμητή θέση στο τμήμα. Η διαδρομή κίνησης παρέχει τις εντολές ελέγχου για το πλάσμα, την τροφοδοσία της σκόνης και το σύστημα κίνησης, ώστε να παράγει γραμμικές εναποθέσεις του υλικού με ένα καθορισμένο ποσοστό επικάλυψης. Κάθε στρώση συνήθως ξεκινά και σταματά στο άκρο του τμήματος, έως ότου σχηματιστεί ένα ολόκληρο κάθετο επίπεδο στρώμα, μέσω της εναπόθεσης επικαλυπτόμενων στρώσεων. Όπως προέκυψε πειραματικά, η ισχύς, ο ρυθμός τροφοδοσίας της σκόνης, η ταχύτητα σάρωσης, η θερμοκρασία και η παροχή του αερίου είναι παράμετροι κλειδιά που πρέπει να ρυθμίζονται κατά τη διεργασία (Zhang et al., 2003).

Για να μελετηθεί η καταλληλότητα αυτής της μεθόδου κατεργασίας των υλικών, διερευνήθηκαν ορισμένες περιπτώσεις αυτής της νέας τεχνολογίας προσθήκης υλικού σε μέταλλο με υψηλή θερμοκρασία τήξης και χαμηλή κατεργασιμότητα, όπως το υπερκράμα FGH95, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της αεροπορίας λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του σε υψηλές θερμοκρασίες. Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζεται η μορφή της αρχικής σκόνης, η οποία προέκυψε ύστερα από επεξεργασία με τη μέθοδο του περιστρεφόμενου ηλεκτροδίου πλάσματος (PRE) (Zhang et al., 2003).



Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της αρχικής σκόνης ύστερα από επεξεργασία με τη μέθοδο περιστρεφόμενου ηλεκτροδίου πλάσματος (Zhang H. et al., 2003)

Η πλάκα βάσης που χρησιμοποιήθηκε για την προσθήκη της σκόνης ήταν από ανοξείδωτο χάλυβα. Στην Εικόνα 5.3 παρουσιάζεται το σημείο εναπόθεσης υλικού (Zhang et al., 2003).



Εικόνα 5.3: Στιγμιότυπο απεικόνισης της κατεργασίας εναπόθεσης με πλάσμα(Zhang et al., 2003)

Στην Εικόνα 5.4 παρουσιάζονται δύο από τα αντικείμενα που κατασκευάστηκαν μέσω της μεθόδου PDM, από τα οποία το πρώτο έχει τη μορφή κοίλου ιπτάμενου δίσκου ενώ το δεύτερο έχει τη μορφή βάζου. Με βάση τις συμβατικές κατεργασίες, τα αντικείμενα αυτά είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν, διότι απαιτούν πολλές ενδιάμεσες κατεργασίες. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής βέβαια, όπως και όλων των κατεργασιών προσθήκης υλικού είναι η χαμηλή ποιότητα επιφάνειας, η οποία είναι αναπόφευκτη λόγω της κατασκευής κατά στρώματα. Για να βελτιωθεί η ποιότητα της επιφάνειας απαιτείται κατεργασία αποπεράτωσης της επιφάνειας (Zhang et al., 2003).



(a)

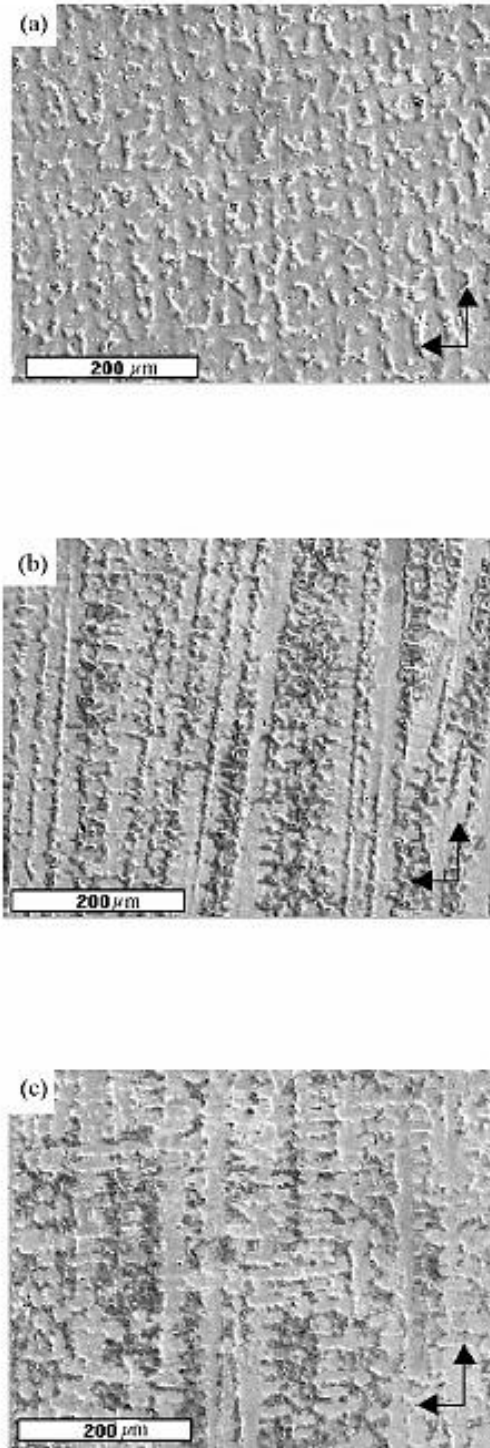


(b)

Εικόνα 5.4: Μεταλλικά αντικείμενα κατασκευασμένα με τη μέθοδο PDM (Zhang H. et al., 2003)

5.2.1 Μικροδομή εναπόθεσης

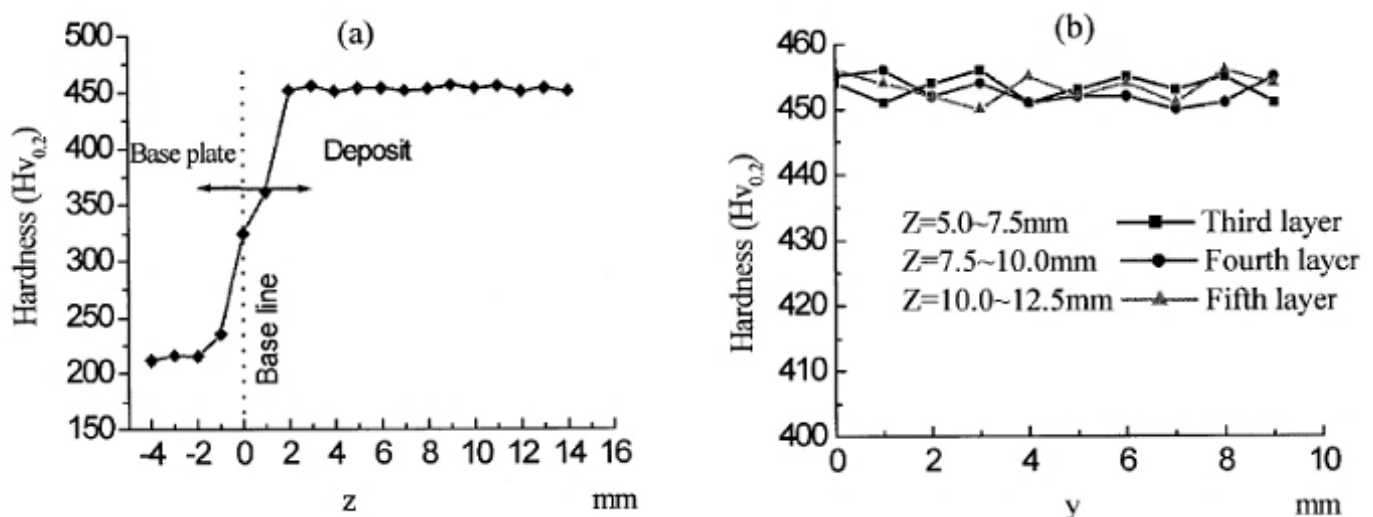
Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζονται οι μικρογραφικές εικόνες του υλικού που έχει εναποτεθεί κατά την κατεύθυνση x (επίπεδο $y-z$), y (επίπεδο $x-z$) και z (επίπεδο $x-y$). Είναι εμφανές ότι η μικροδομή απαρτίζεται από πυκνή ομοιόμορφη δενδριτική δομή και έχει τα συνήθη χαρακτηριστικά της στερεοποίησης σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, ενώ δεν παρατηρείται πορώδες. Κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης, η κλίση της θερμοκρασίας κατά την κατεύθυνση z είναι πιο έντονη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κατευθύνσεις λόγω της ψύξης της πλάκας βάσης, και έτσι η ανάπτυξη των δενδριτών έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση. Οι δενδρίτες είναι παράλληλοι μεταξύ τους και ως προς την πλάκα βάσης (Zhang et al., 2003).



Εικόνα 5.5: Μικροδομή που προκύπτει από την εναπόθεση σε κάθε μια από τις τρεις κατευθύνσεις (x, y και z, αντίστοιχα) (Zhang et al., 2003)

5.2.2 Έλεγχος σκληρότητας

Η μικροσκληρότητα του μετάλλου που έχει εναποτεθεί ελέγχεται κατά μήκος της κατεύθυνσης z και κατά την κατεύθυνση y (στο τρίτο, τέταρτο και πέμπτο στρώμα), ώστε να αξιολογηθούν οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού και η κατάσταση σύνδεσης μεταξύ των στρωμάτων. Στην Εικόνα 5.6α παρουσιάζεται η κατανομή της μικροσκληρότητας από την πλάκα βάσης ως την κορυφή κατά μήκος της κατεύθυνσης z. Λόγω της αραίωσης, η σκληρότητα του πρώτου στρώματος είναι υψηλότερη από του υποστρώματος, αλλά χαμηλότερη από τη σκληρότητα των επόμενων στρωμάτων εναπόθεσης. Αγνοώντας το πρώτο στρώμα που αραιώνεται από το υπόστρωμα, η σκληρότητα είναι ιδιαίτερως ομοιόμορφη κατά μήκος των διαδοχικών στρωμάτων (κατεύθυνση z), αλλά και σε μεμονωμένα στρώματα (κατεύθυνση y, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6b). (Zhang et al., 2003)



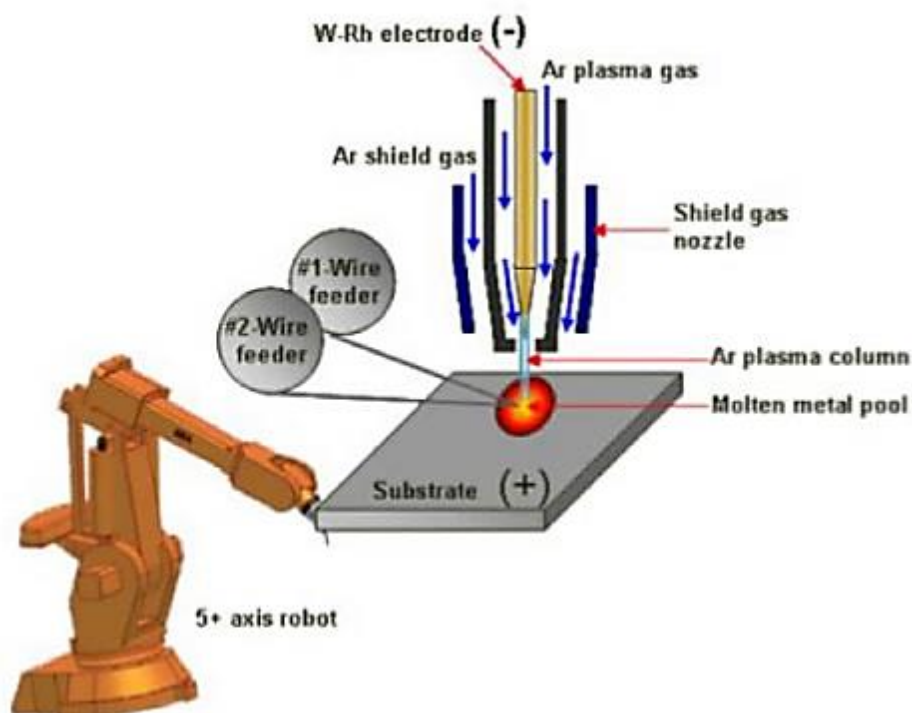
Εικόνα 5.6: Διακύμανση της σκληρότητας σε διαφορετικές κατευθύνσεις (Zhang et al., 2003)

5.2.3 Εναπόθεση μετάλλου σε μορφή σύρματος και πηγής τόξου πλάσματος

Το σχήμα του υλικού είναι σημαντική παράμετρος κατά τις διαδικασίες εναπόθεσης. Μπορεί να είναι σε μορφή σύρματος, σκόνης μικρών διαστάσεων ή και συνδυασμός τους. Σύμφωνα με τους Paul et al. (2012), η εναπόθεση σε μορφή σκόνης είναι καταλληλότερη για συνδυασμό με laser, ενώ το σχήμα σύρματος είναι καταλληλότερο για συνεχή εναπόθεση γιατί οι ενδιάμεσες

εκκινήσεις και παύσεις οδηγούν σε ασυνέχεια στο υλικό που εναποτίθεται. Η χρήση σύρματος οδηγεί επίσης σε σχεδόν 100% χρησιμοποίηση του υλικού. Οι Kukreja et al. (2012) απέδειξαν ότι η απόδοση χρησιμοποίησης του υλικού σε μορφή σκόνης εξαρτάται από την περιοχή δράσης της πηγής ενέργειας. Αν το υλικό σκόνης βρίσκεται εκτός της περιοχής αυτής, απαιτείται συνήθως ανακύκλωσή του για περιβαλλοντικούς λόγους και λόγους μείωσης κόστους. Επίσης είναι απαιτητική η αποθήκευσή τους. Συνεπώς, η χρήση του υλικού σε μορφή σύρματος είναι προτιμότερη, διότι είναι πιο απλή, φιλική προς το περιβάλλον και με λιγότερους κινδύνους για την υγεία.

Η νορβηγική εταιρία Norsk Titanium χρησιμοποιεί συνδυασμό τροφοδοσίας υλικού σε σύρματα και πηγής θερμότητας από τόξο πλάσματος. Χρησιμοποιούν κυρίως Ti6Al4V (Τάξης 5) και τιτάνιο τάξης 2 και κλειστό θάλαμο με αργό ως προστατευτικό αέριο. Για την ανάφλεξη δημιουργείται ένα τόξο οδηγός μεταξύ του ηλεκτροδίου βολφραμίου και της ανόδου στο εσωτερικό ακροφύσιο. Το τεμάχιο έχει θετικό φορτίο που ξεπερνά την άνοδο στο ακροφύσιο και δημιουργεί ένα μεταφερόμενο τόξο μεταξύ του ηλεκτροδίου βολφραμίου και του τεμαχίου καθώς ξεκινά η διαδικασία. Το τόξο σταθεροποιείται από τη ροή αργού υψηλής πίεσης εντός του εσωτερικού ακροφυσίου που μεταφέρει τη θερμότητα έξω από το ακροφύσιο. Υπάρχει επίσης και εξωτερικό ακροφύσιο με προστατευτικό αέριο από αργό που χρησιμοποιείται για την ψύξη του τηγμένου υλικού και τη σταθεροποίηση του τόξου. Η ενέργεια του τόξου κατευθύνεται σε ένα ή δύο ταυτόχρονα τροφοδοτούμενα σύρματα τιτανίου, τα οποία αποτελούν το υλικό εναπόθεσης. Στα νέα μηχανήματα της Norsk Titanium το ηλεκτρικό ρεύμα οδηγείται μέσω των συρμάτων πραγματοποιώντας συγκόλληση MIG για την εναπόθεση υλικού. Το ηλεκτρόδιο έχει αρνητικό φορτίο όπως το ηλεκτρόδιο της δέσμης πλάσματος και το τεμάχιο έχει θετικό φορτίο ώστε να προκύψει το μεταφερόμενο τόξο. Στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της τεχνικής που χρησιμοποιεί η εταιρία Norsk Titanium.



Εικόνα 5.7: Αρχή λειτουργίας της τεχνικής της Norsk Titanium (Norsk Titanium, 2012)

Η δέσμη πλάσματος καθιστά εφικτή την επίτευξη πολύ υψηλών ρυθμών εναπόθεσης, μέχρι 5,1 kg/h. Όμως, η εναπόθεση υλικού δεν είναι λεπτομερής και μπορεί να δημιουργήσει σχήματα, τα οποία στη συνέχεια πρέπει να υποστούν επεξεργασία για να αποκτήσουν την επιθυμητή μορφή. Το υλικό εναποτίθεται κατά στρώματα σε μια πλάκα βάσης από το ίδιο υλικό, ενώ είναι δυνατή και η εναπόθεση υλικού και στις δύο πλευρές της πλάκας βάσης. Αυτό είναι θετικό καθώς η πλάκα αυτή μπορεί να λειτουργήσει ως φυσικό τμήμα του τελικού αντικειμένου (Norsk Titanium, 2012) (Εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8: Αντικείμενο σε διαφορετικές φάσεις της διαδικασίας (Lajer, 2012)

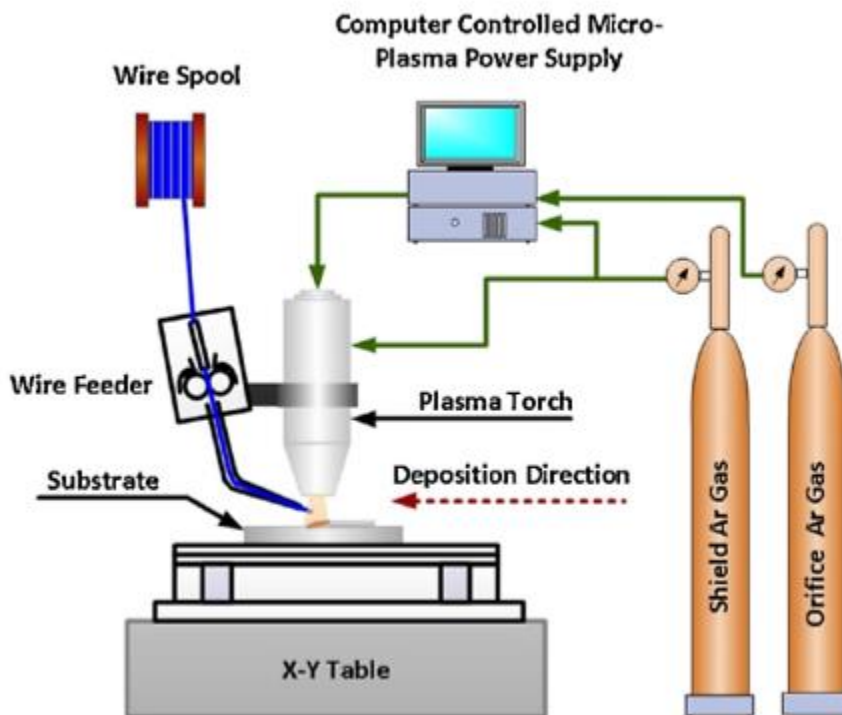
Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ο υψηλός ρυθμός εναπόθεσης υλικού, ο οποίος είναι εφικτός μόνο κατά τη δημιουργία αντικειμένων «ημι-τελικής μορφής», διότι έχουν λιγότερες απαιτήσεις ανοχών. Το τόξο πλάσματος είναι επίσης ενεργειακά ιδιαίτερα αποδοτικό και παρέχει οικονομικά πλεονεκτήματα. Η διαδικασία εξώθησης συρμάτων υλικού είναι πιο αποδοτική και δεν απαιτεί προηγμένο εξοπλισμό όπως η διαδικασία κονιοποίησης της σκόνης. Άρα το ακατέργαστο υλικό είναι φθηνότερο, πράγμα το οποίο είναι ωφέλιμο για την επίτευξη υψηλών ρυθμών παραγωγής. Όταν το υλικό είναι σε σύρματα είναι συνήθως καθαρότερο σε σύγκριση με την περίπτωση όπου το υλικό είναι σε μορφή σκόνης, λόγω της μικρότερης επαφής της επιφάνειάς του με το περιβάλλον. Αυτό είναι σημαντικό για υλικά που είναι ευαίσθητα στο οξυγόνο, όπως το τιτάνιο, μιας και δεν θα οξειδωθεί από τον αέρα (Brandl, Leyens & Palm, 2009).

5.3 Εφαρμογή της εναπόθεσης συρμάτων υλικού με τόξο πλάσματος για επιδιόρθωση ελαττωματικών μητρών

Τα διάφορα ελαττώματα που εμφανίζονται στις μήτρες και τα καλούπια, όπως η πλαστική παραμόρφωση, οι μικρο-ρωγμές και οι καταπονημένες πλευρές αναπτύσσονται κυρίως λόγω τοπικών προσκρούσεων, θερμικών τάσεων και διάβρωσης. Αν τα ελαττώματα αυτά αναγνωριστούν σε αρχικό στάδιο, μπορούν να διορθωθούν μέσω της εναπόθεσης μικρών διαστάσεων. Οι Jhavar et al. (2013) κατέγραψαν τους διάφορους τρόπους αστοχίας μητρών και καλουπιών και τις επιλογές επιδιόρθωσης και συμπέραναν ότι η χρήση ενεργειακά αποδοτικών μεθόδων εναπόθεσης υλικού για την επιδιόρθωση των ελαττωματικών μητρών και καλουπιών βελτιώνει σημαντικά την απόδοσή τους και τη διάρκεια ζωής τους. Η χρήση τεχνικών υψηλής ενέργειας (π.χ. δέσμη laser ή ηλεκτρονίων) για την επιδιόρθωσή τους είναι περιορισμένη λόγω του πολύ υψηλού αρχικού κόστους και του υψηλού λειτουργικού κόστους. Συνεπώς, υπάρχει σημαντική ζήτηση για την ανάπτυξη μιας μεθόδου χαμηλού κόστους και αποδοτικής στην κατανάλωση υλικού και ενέργειας για την επιδιόρθωση ελαττωματικών μητρών και καλουπιών. Οι Jhavar et al. (2014) προσπάθησαν να καλύψουν την ανάγκη αυτή δημιουργώντας μια μέθοδο εναπόθεσης σε σύρματα με μεταφερόμενο τόξο μικροπλάσματος. (μ-PTA).

5.3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης και συνθηκών

Οι Jhavar et al. (2014) διεξήγαγαν μια συστηματική μελέτη αναγνώρισης των βέλτιστων παραμέτρων της διαδικασίας και χαρακτηρισμού της απόδοσής της σε διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων εισόδου. Κατασκευάστηκε ένας πειραματικός εξοπλισμός για την εναπόθεση συρμάτων χάλυβα AISI P20 διαμέτρου 300 μm σε υπόστρωμα από ίδιο υλικό. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.9. Κατασκευάστηκε μέσω της ενσωμάτωσης ενός συστήματος συγκόλλησης μικροπλάσματος σε ένα σύστημα τροφοδοσίας σύρματος με μια τράπεζα εργασίας X-Y στην οποία ήταν στερεωμένο το υπόστρωμα. Ο κύλινδρος τυλίγματος του σύρματος προστέθηκε στο σύστημα τροφοδοσίας σύρματος, το οποίο μπορεί να τροφοδοτεί σύρμα με ρυθμό 850, 1275 και 1700 mm/min. Το ακροφύσιο του συστήματος συγκόλλησης μικροπλάσματος τροποποιήθηκε κατάλληλα για την τροφοδοσία του σύρματος στο τηγμένο λουτρό. Το αέριο αργό χρησιμοποιήθηκε τόσο για την παραγωγή του πλάσματος όσο και για προστασία κατά της οξειδωσης. Δημιουργήθηκε τόξο μεταξύ του ηλεκτροδίου βολφραμίου εντός του πυρσού πλάσματος και του ακροφυσίου χαλκού μέσω της φόρτισης του αερίου πλάσματος που ρέει μεταξύ τους. Το τόξο μεταφέρθηκε στο τεμάχιο μέσω ενός πρόσθετου κυκλώματος μεταξύ του ακροφυσίου πλάσματος και του υποστρώματος (Jhavar et al.,2014).



Εικόνα 5.9: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης για την εναπόθεση μ-PTA (Jhavar et al.,2014)

Η έντονη θερμότητα που παράγεται μέσω του πλάσματος προκαλεί τήξη του σύρματος, σε συνδυασμό με μικρή τήξη του υποστρώματος. Το τηγμένο λουτρό προστατεύεται με το αέριο αργό καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Το

σύστημα αυτό έχει μέγιστη ισχύ πλάσματος 450 W με ρεύμα που κυμαίνεται στο εύρος 0,1-18 A. Το μέγιστο μήκος μεταφοράς της τράπεζας εργασίας είναι 300 mm στην κατεύθυνση X και 160 mm στην κατεύθυνση Y και έχει μέγιστη ταχύτητα 100 mm/min.

Κατά τα δοκιμαστικά-πilotικά πειράματα που διεξήχθησαν προσδιορίστηκε το εύρος στο οποίο πρέπει να κυμαίνονται οι παράμετροι εισόδου, όπως η ισχύς της πηγής πλάσματος (P), η ταχύτητα της τράπεζας εργασίας (v) ο ρυθμός τροφοδοσίας του σύρματος (f) καθώς και να επιλεγούν οι βέλτιστες τιμές για τη γωνία τροφοδοσίας του σύρματος, την απόσταση μεταξύ ακροφυσίου και υποστρώματος και την παροχή του αερίου πλάσματος και του αερίου θωράκισης. Βρέθηκε ότι ο μεγαλύτερος ρυθμός εναπόθεσης προκύπτει για γωνία τροφοδοσίας σύρματος 45°, πράγμα το οποίο συμφωνεί και με προηγούμενες μελέτες των Abioye et al. (2013).

Η βέλτιστη απόσταση μεταξύ ακροφυσίου και υποστρώματος (stand-off distance) βρέθηκε ίση με 5 mm, καθώς επέτρεπε την ομαλή τροφοδοσία του σύρματος στη ζώνη τήξης, ενώ μεγαλύτερη απόσταση οδηγούσε σε μειωμένη ισχύ πηγής πλάσματος. Αυτό συμφωνεί με τα αποτελέσματα των Wang et al.(2003), οι οποίοι μελέτησαν τη μεταβολή της ισχύος πηγής πλάσματος με την απόσταση μεταξύ ακροφυσίου και υποστρώματος (SOD) και το ρεύμα της πηγής και βρήκαν ότι η μέγιστη ισχύς της πηγής προκύπτει για SOD 4-6 mm.

Η παροχή αερίου πλάσματος 0,4 l/min ήταν επαρκής για τη μεταφορά της ισχύος του πλάσματος στο υπόστρωμα ενώ παροχή προστατευτικού αερίου ίση με 5 l/min ήταν επαρκής για την προστασία του τηγμένου λουτρού από οξειδωση λόγω του ατμοσφαιρικού αέρα. Παρατηρήθηκε ότι χαμηλότερες παροχές προστατευτικού αερίου επέτρεπαν στα αέρια της ατμόσφαιρας να αντιδράσουν με το τηγμένο λουτρό, οδηγώντας σε πορώδη και ανομοιογενή εναπόθεση και διασκορπισμό κατά τη διαδικασία της εναπόθεσης, ενώ υψηλότερες τιμές προκάλεσαν διασκορπισμό του τηγμένου λουτρού, προκαλώντας αίσθηση κοιλωμάτων στην τελευταία στρώση εναπόθεσης.

Από τα pilotικά πειράματα προέκυψε επίσης ότι η ελάχιστη ισχύς πλάσματος για την τήξη του σύρματος διατομής 300 μm ήταν 300 W. Απαιτείται όμως ένα μικρό ποσό θερμότητας και για την τήξη του υποστρώματος κατά την εναπόθεση μ-PTA, η οποία ονομάζεται εμποτισμός (wetting), η οποία είναι απαραίτητη για τη δημιουργία ισχυρών δεσμών μεταξύ του υποστρώματος και των διαδοχικών στρωμάτων. Συνεπώς, η ισχύς του πλάσματος έπρεπε να βρίσκεται στο εύρος μεταξύ 350-450 W. Αν η ταχύτητα της τράπεζας εργασίας ήταν μεγαλύτερη από 100 mm/min για το μέγιστο ρυθμό τροφοδοσίας παρατηρούνταν ασυνεχή ίχνη, συνεπώς η ταχύτητα περιορίζεται στο εύρος 40-100 mm/min.

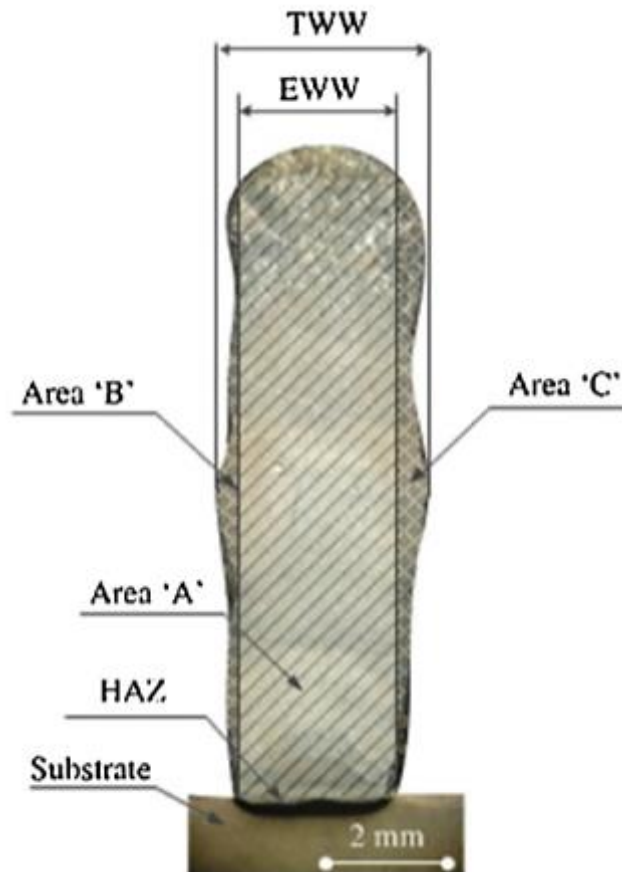
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι η χρήση υψηλότερων τιμών για την ισχύ του πλάσματος και χαμηλότερου ρυθμού τροφοδοσίας σύρματος προκαλούσε υπερβολική τήξη της βάσης και του υλικού, ακόμη και

εξάτμιση του υλικού που είχε εναποτεθεί, πράγμα το οποίο οδηγούσε σε ασυνέχειες, σχηματισμό κοιλοτήτων και ελάχιστη ή και καθόλου εναπόθεση. Αντιθέτως, η χρήση χαμηλότερης ισχύος πλάσματος και υψηλότερου ρυθμού τροφοδοσίας οδηγούσε σε χαλαρότερη σύνδεση μεταξύ του υποστρώματος και του νέου υλικού λόγω της ανεπαρκούς τήξης ή και της σύγκρουσης του με το υπόστρωμα σε ακραίες περιπτώσεις

5.3.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Ανάλογα με την επιλογή των παραμέτρων εισόδου, οι διαστάσεις πλάτους και ύψους του ίχνους που εναποτίθεται είναι μεταξύ 1,3-2 mm και 0,6-1 mm, αντίστοιχα. Η γεωμετρία του ίχνους που εναποτίθεται εξαρτάται από την αλληλεπίδραση του μικροπλάσματος, δηλ. της πηγής θερμότητας, και του είδους του υλικού εναπόθεσης. Δύο παράμετροι, η ενέργεια πλάσματος ανά μονάδα μήκους (E_l) και η ογκομετρική παροχή τροφοδοσίας ανά μονάδα μήκους (V_l) καθορίζουν την κατανάλωση ενέργειας και την τροφοδοσία του υλικού, προσδιορίζοντας έτσι το ρυθμό εναπόθεσης (G). Η ενέργεια πλάσματος ανά μονάδα μήκους και η ογκομετρική παροχή σύρματος ανά μονάδα μήκους βρέθηκε ότι πρέπει να έχουν τιμές μεγαλύτερες από 262 J/mm και 10,6 mm³/mm αντίστοιχα για κανονική και ομαλή εναπόθεση, οδηγώντας σε ρυθμό εναπόθεσης 28,1 g/h.

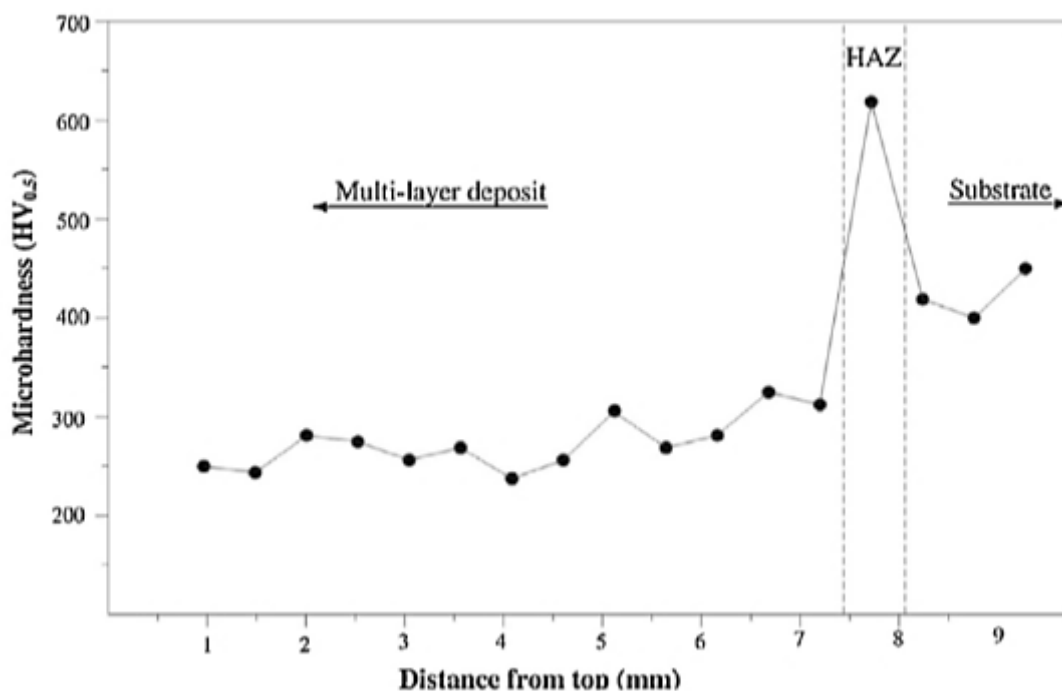
Το τοίχωμα που κατασκευάστηκε μέσω της εναπόθεσης αναλύεται περαιτέρω ώστε να υπολογιστεί το συνολικό πλάτος του τοιχώματος (TWW), το ενεργό πλάτος του τοιχώματος (EWW) και η απόδοση εναπόθεσης (Εικόνα 5.10). Για το λόγο αυτό, το τοίχωμα τέμνεται σε κατεύθυνση κάθετη από την κατεύθυνση της εναπόθεσης. Τα τοιχώματα ήταν ανομοιόμορφα ως προς τις πλευρικές επιφάνειες, λόγω κυμάτωσης μεταξύ των στρωμάτων και άρα είναι απαραίτητο το τελικό φινίρισμα. Από την μικροσκοπική απεικόνιση των δειγμάτων προέκυψε ότι δεν παρουσιάστηκε πορώδες μεταξύ των στρωμάτων και οι εναποθέσεις ήταν ομαλές με ισχυρές δυνάμεις σύνδεσης με το υπόστρωμα και μεταξύ των στρωμάτων. Συνεπώς η εναπόθεση με πηγή πλάσματος (μ -PTA) παρείχε τη δυνατότητα κατασκευής τοιχώματος, το οποίο ήταν ευθύ και είχε TWW=2,45 mm και EWW=2,1 mm. Η απόδοση εναπόθεσης είναι 87% με μέγιστο ρυθμό εναπόθεσης 42 g/h. Η κυμάτωση της επιφάνειας ήταν ίση με 0,17 mm (Jhavar et al.,2014).



Εικόνα 5.10: Παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα της εναπόθεσης (Jhavar et al.,2014)

Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζεται η μικροσκληρότητα του υλικού που έχει εναποτεθεί ως προς το ύψος της εναπόθεσης. Η ελάχιστη τιμή μικροσκληρότητας (253 HV) μετρήθηκε κοντά στο υψηλότερο στρώμα και η υψηλότερη τιμή (616 HV) μέσα στη ζώνη HAZ. Μέσα σε ένα συγκεκριμένο στρώμα παρατηρήθηκε μικρή διακύμανση της μικρο-σκληρότητας, όμως υπάρχει σημαντική μεταβολή μεταξύ των στρωμάτων εναπόθεσης. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κοντά στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (HAZ), η οποία καταλαμβάνει μερικά χιλιοστά. Η μικρο-σκληρότητα των επόμενων στρωμάτων προς την κορυφή μειώνεται ελαφρώς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αρχικά στρώματα εναποτίθενται επάνω σε υπόστρωμα θερμοκρασίας δωματίου, το οποίο δρα ως καταβόθρα θερμότητας και άρα παρέχοντας υψηλότερο ρυθμό ψύξης σε σχέση με τα υπόλοιπα στρώματα. Το υψηλότερο περιεχόμενο άνθρακα του υποστρώματος μπορεί να οδηγήσει επίσης σε υψηλότερες τιμές σκληρότητας κοντά στο υπόστρωμα. Η σκληρότητα στη HAZ μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας ένα προθερμασμένο υπόστρωμα ή χρησιμοποιώντας μια θερμική επεξεργασία ύστερα από την εναπόθεση. Η σκληρότητα των υπόλοιπων στρωμάτων ομαλοποιείται και οι τιμές

σκληρότητας στις ζώνες αυτές είναι κοντά στην τιμή σκληρότητας του υποστρώματος (Jhavar et al.,2014).

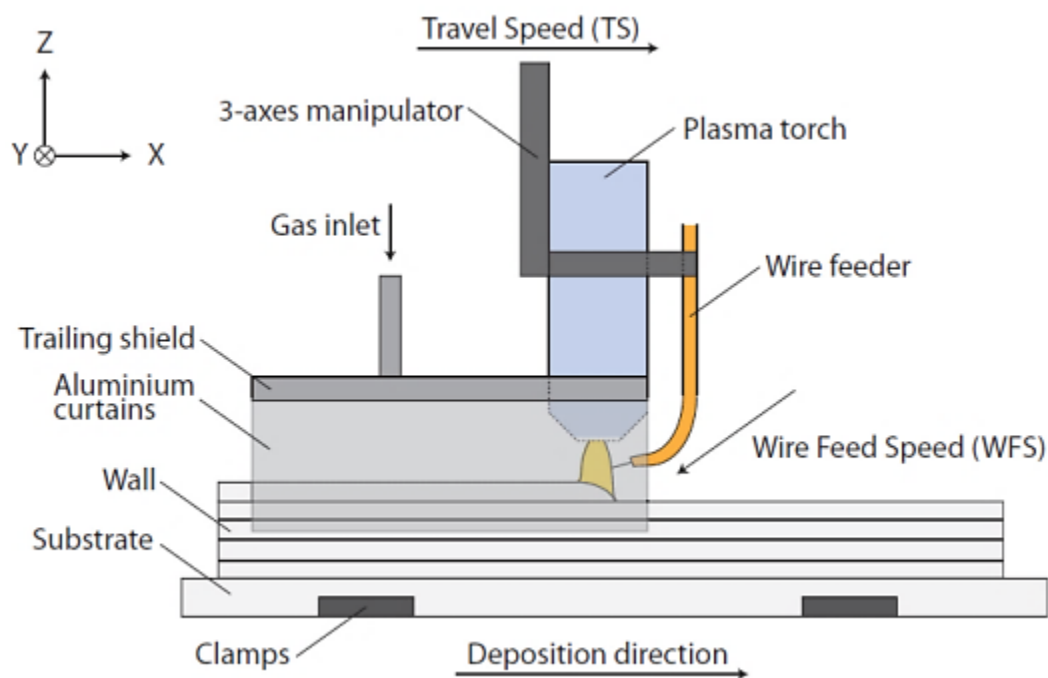


Εικόνα 5.11: Προφίλ μικρο-σκληρότητας στρωμάτων εναπόθεσης (Jhavar et al. ,2014)

Σύμφωνα με τη μελέτη των Jhavar et al. (2014), η μέθοδος εναπόθεσης σύρματος με πηγή μικρο-πλάσματος (μ-PTA) είναι μια διαδικασία ενεργειακά αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική, ενώ έχει παράλληλα τη δυνατότητα να αποτελέσει εναλλακτική επιλογή για την επιδιόρθωση και την ανακατασκευή ελαττωματικών μητρών και καλουπιών και άλλων μηχανολογικών εξαρτημάτων υψηλής αξίας.

5.4 Σημεία προσοχής κατά την εναπόθεση συρμάτων υλικού με πηγή πλάσματος

Στην Εικόνα 5.12 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός PWD που χρησιμοποιήθηκε από τους Martina et al. (2012), ο οποίος αποτελείται από πυρσό πλάσματος με πλάκα μεταφοράς μήκους 100 mm και πηγή ισχύος. Το αέριο αργό χρησιμοποιήθηκε τόσο για το πλάσμα όσο και ως προστατευτικό αέριο. Η απόσταση μεταξύ πυρσού και υποστρώματος ήταν 7 mm, αρκετά μεγάλη ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση.



Εικόνα 5.12: Σχηματική αναπαράσταση του πειραματικού εξοπλισμού εναπόθεσης συρμάτων με πλάσμα (Martina et al., 2012)

Στην Εικόνα 5.13 παρουσιάζεται ένα τυπικό αποτέλεσμα της μεθόδου εναπόθεσης με πλάσμα. Ο μέγιστος ρυθμός εναπόθεσης που επιτεύχθηκε με βάση τη μέθοδο αυτή είναι 1,8 kg/h. Όμως περιοριζόταν από το όριο των 100 mm/s για την τροφοδοσία του σύρματος. Από τη διαδικασία αυτή φάνηκε η δυνατότητα αύξησης του ρυθμού εναπόθεσης. Η κυμάτωση της επιφάνειας ήταν στο εύρος 0,35 mm ως 1,51 mm, με μέση τιμή στα 0,70 mm. Η μέση απόδοση της εναπόθεσης ήταν 93%, ενώ κυμάνθηκε από 85% ως 98%. Ο χρόνος εναπόθεσης 14 στρωμάτων, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τον καθαρό χρόνο εναπόθεσης, κυμάνθηκε από 3 min και 16 sec ως 16 min και 20 sec, ανάλογα με την ταχύτητα μεταφοράς (Martina et al., 2012).

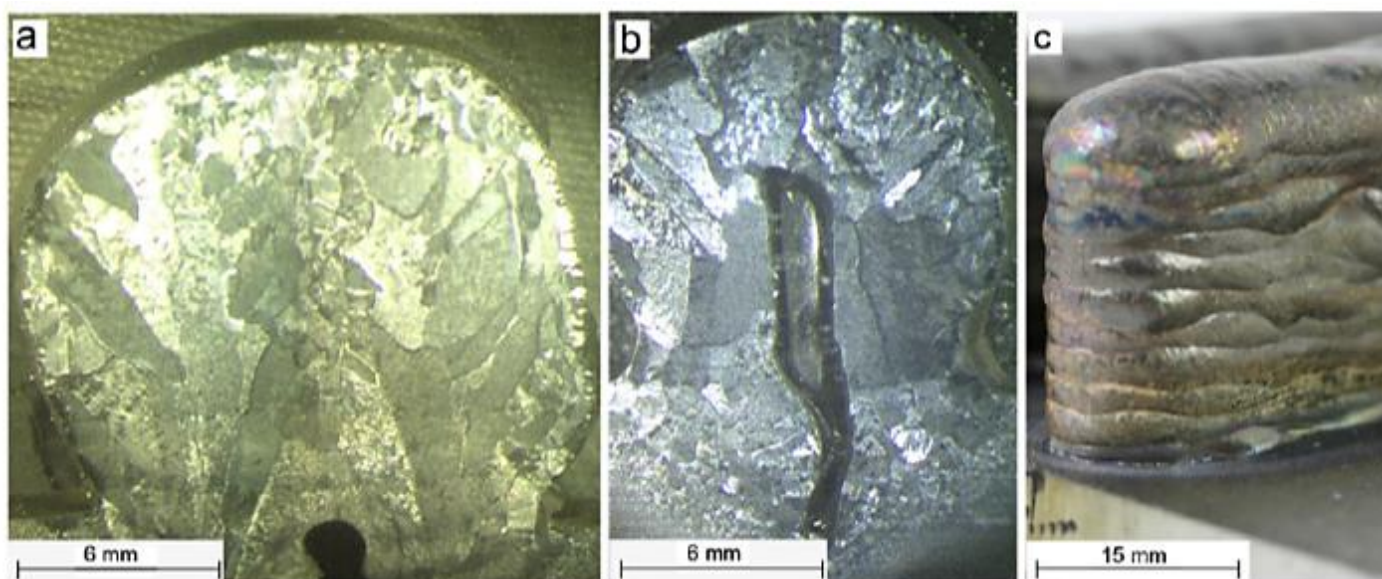


Εικόνα 5.13: Παράδειγμα τοιχώματος Ti6Al4V κατασκευασμένο μέσω PWD (οι κύριες διαστάσεις του χάρακα είναι σε cm) (Martina et al., 2012)

Κατά τη διαδικασία της εναπόθεσης ήταν απαραίτητη η αναμονή ώστε να ψυχθεί το υλικό στους 100 °C, πριν εναποτεθεί το επόμενο στρώμα. Η θερμική αγωγιμότητα του Ti6Al4V είναι σχετικά χαμηλή (7,2 W/mK) και άρα ο χρόνος αναμονής μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον πραγματικό χρόνο εναπόθεσης. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.13, το ύψος του τοιχώματος δεν είναι ομοιόμορφο. Στην αρχή παρουσιάζεται ένα εμφανές εξόγκωμα και μια μείωση του ύψους προς το άκρο του. Αυτή η μείωση είναι πιθανό να οφείλεται στη συσσώρευση θερμότητας λόγω της απουσίας καταβόθρας θερμότητας μπροστά από τον πυρσό. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί μειώνοντας το ρεύμα στο τέλος της διαδρομής. Το εξόγκωμα που παρουσιάζεται στην έναρξη της διαδρομής είναι πιθανό να οφείλεται στο θερμικό φαινόμενο λόγω της εναπόθεσης στην κρύα πλάκα βάσης. Και τα δύο προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με αλλαγή στρατηγικής εναπόθεσης: αντί να ξεκινά η εναπόθεση κάθε στρώματος από το ίδιο σημείο, το επόμενο στρώμα μπορεί να ξεκινά από το τέλος του προηγούμενου (μια στρατηγική που ακολουθήθηκε από τους Jhavar et al. (2014), όπως ήδη περιγράφηκε). Με τον τρόπο αυτό, τα εξογκώματα και οι μειώσεις του ύψους μπορούν να διανεμηθούν ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του υλικού.

Σε 4 δείγματα από τα 32 πειράματα που διεξήχθησαν παρατηρήθηκε κοιλότητα κατά τη διαμήκη κατεύθυνση (Εικόνα 5.14). Στα δείγματα αυτά, ο ρυθμός ψύξης ήταν αρκετά υψηλός ώστε να εμποδίσει το τηγμένο μέταλλο να καλύψει την κοιλότητα που είχε σχηματιστεί από τη δέσμη πλάσματος. Στα δύο από τα δείγματα, οι κοιλότητες παρατηρήθηκαν μόνο στο υλικό της πλάκας βάσης (Εικόνα 5.14a) ενώ στα άλλα δύο η κοιλότητα εκτείνεται και στα στρώματα εναπόθεσης (Εικόνα 5.14b). Ο σχηματισμός κοιλότητας είναι ανεπιθύμητος σε βιομηχανικές εφαρμογές (Martina et al., 2012).

Η οξείδωση αποτελεί σημαντικό πρόβλημα σε αυτή τη φάση. Σε πολλά από τα δείγματα παρουσιάστηκε αποχρωματισμός της επιφάνειας ύστερα από την εναπόθεση (Εικόνα 5.14c). Το χρώμα μπορεί να κυμαίνεται από κιτρινωπό μέχρι σκούρο γκρι και ήταν πιο συνηθισμένο να εμφανίζεται ο αποχρωματισμός με αύξηση του μήκους εναπόθεσης λόγω της δυσκολίας επαρκούς προστασίας του τεμαχίου. Για τις περιπτώσεις που η εναπόθεση δεν πραγματοποιείται σε ειδικό θάλαμο, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν πιο αποτελεσματικές μέθοδοι προστασίας έναντι της οξείδωσης. Τέλος είναι εμφανείς οι παραμένουσες τάσεις στα στρώματα εναπόθεσης, οι οποίες είναι σημαντικές και πρέπει να αντιμετωπιστούν κατάλληλα. (Martina et al., 2012)



Εικόνα 5.14: Εμφάνιση κοιλοτήτων (a,b) και επιφανειακή οξείδωση (c) στα δείγματα του υλικού (Martina et al., 2012)

5.5 Προοπτικές της εναπόθεσης υλικού με πλάσμα

Η τεχνολογία πλάσματος, ως τεχνική επιφανειακής επεξεργασίας, υφίσταται πάνω από 40 χρόνια και άρα πρόκειται για ώριμη τεχνολογία που διαθέτει και τον κατάλληλο εξελιγμένο εξοπλισμό. Όμως, ως τρισδιάσταση συγκόλληση, εμφανίζονται διάφορα προβλήματα, όπως ρωγμές λόγω της συσσώρευσης τάσεων κατά το σχηματισμό των στρωμάτων αλλά και λόγω της έλλειψης γνώσης ελέγχου της διαδικασίας για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας επιφάνειας. Όλα τα προβλήματα αυτά, και κυρίως η εξάλειψη των σχεδιαστικών ελαττωμάτων, αλλά και η συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων της διαδικασίας, μπορούν να επιλυθούν μόνο με συστηματική έρευνα και θεωρητική ανάλυση (Zhang et al., 2003).

Τα υπάρχοντα θεωρητικά μοντέλα είναι ιδιαίτερα απλουστευτικά και ομογενή, ενώ τα περισσότερα βασίζονται στην υπόθεση ότι το υλικό είναι ήδη τοποθετημένο στην πλάκα βάσης και εξετάζεται μόνο η θερμική επίδραση, πράγμα το οποίο οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές. Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία εναπόθεσης είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν οι ακόλουθες μελέτες: αλληλεπίδραση μεταξύ των σκόνης και της δέσμης πλάσματος, κινητική και θερμοδυναμική μελέτη της συμπεριφοράς της εναπόθεσης και της ανάπτυξης, τρισδιάσταση αριθμητική προσομοίωση της διαδικασίας εναπόθεσης και κυρίως του μοντέλου σύζευξης που εξετάζει την επίδραση της επαφής της σκόνης με το τηγμένο λουτρό, μελέτη της συναγωγής στο τηγμένο λουτρό, καθώς και του πεδίου τάσεων και παραμορφώσεων. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος κατανόησης των εγγενών νόμων της διαδικασίας εναπόθεσης είναι η παρακολούθηση της μεθόδου σε πραγματικό χρόνο (Zhang et al., 2003).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και Προοπτικές

6.1 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η παρουσίαση των κυριότερων τεχνολογιών προσθήκης υλικού με έμφαση στα μεταλλικά υλικά και κράματα. Έτσι προς αυτή την κατεύθυνση έχει αναπτυχθεί και πληθώρα μεθόδων και διαδικασιών προσθήκης μετάλλου.

Η διαδικασία κατασκευής που ακολουθείται περιλαμβάνει τμήματα μεταλλικών υλικών ή κραμάτων, τη θερμική τους επεξεργασία, την κατευθυνόμενη θερμική εξαγωγή, την επαναλαμβανόμενη τήξη και ταχεία στερεοποίηση. Αυτοί οι παράγοντες αλλά και άλλοι, εισάγουν πολυπλοκότητα στην ανάλυση της εξέλιξης της μικροδομής και των ιδιοτήτων του αντικειμένου, οι οποίες δεν συναντώνται στις συμβατικές κατεργασίες.

Ο υψηλός ρυθμός ψύξης που επιτυγχάνεται με τις τεχνολογίες προσθήκης υλικού οδηγεί σε μείωση της τμηματοποίησης και μείωση του μεγέθους των κόκκων. Αναφορικά με τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες των παραχθέντων αντικειμένων έχουν σημαντική ανισοτροπία, με τον άξονα Z να αποτελεί την πιο ασθενή κατεύθυνση. Τα ελαττώματα και οι ατέλειες που προκύπτουν από την εκάστοτε μέθοδο προσθήκης υλικού (όπως το μικροπορώδες και το φινίρισμα της επιφάνειας) μπορεί να οδηγήσουν σε κόπωση των παραχθέντων κραμάτων.

Ένα από τα θέματα που αντιμετωπίζουν οι τεχνολογίες προσθήκης υλικού είναι ο ποιοτικός έλεγχος και η πιστοποίηση, και αποτελούν πρόκληση αναφορικά με την υιοθέτηση τους και την ευρύτερη εφαρμογή τους και σε βιομηχανική κλίμακα. Επίσης, ανασταλτικός παράγοντας αποτελεί το υψηλό κόστος και η χρονοβόρα διαδικασία. Η οικονομική βιωσιμότητα των τεχνολογιών προσθήκης υλικού εξαρτάται σημαντικά από τη μείωση του σταθερού κόστους της διαδικασίας, όπως των πρώτων υλών για την κατασκευή των αντικειμένων.

Η στερεοποίηση σκόνης με τη βοήθεια επικεντρωμένης ακτίνας λέιζερ (Selective laser sintering – SLS) αν και είναι μια ώριμη μέθοδος προσθήκης υλικού, δημιουργεί μαρτενσιτική φάση στη μικροδομή του αντικειμένου, η οποία είναι αρκετά ισχυρή και σκληρή αλλά πιο ψαθυρή δομή από την πιο φυλλιδωτή - πλακοειδή που δημιουργείται από τη μέθοδο EBM. Παρόλα αυτά έχει καλύτερη ακρίβεια και φινίρισμα επιφάνειας, ενώ μετά τη διαδικασία της ανόπτησης, το υλικό μπορεί να έχει αποδεκτή ολκιμότητα.

Από αυτές οι μέθοδοι κλίσης σκόνης προσφέρουν πλήρη ελευθερία σχεδιασμού και εξοικονόμησης υλικού, αλλά περιορίζονται από τους μικρούς θαλάμους κατασκευής. Οι μέθοδοι εναπόθεσης υλικού έχουν τη δυνατότητα κατασκευής

μεγαλύτερων αντικειμένων, αλλά απαιτούν περισσότερη κατεργασία, ενώ δεν προσφέρει καμία ελευθερία σχεδιασμού σε σχέση με τις συμβατικές κατεργασίες.

Οι διαδικασίες EBM και τόξου πλάσματος είναι δυνατό να εκτελεστούν χωρίς θερμική επεξεργασία, ενώ οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν laser απαιτούν την ύπαρξη θερμικής επεξεργασίας για την απαλλαγή από την ψαθυρή φάση λόγω ταχείας ψύξης.

Επίσης η τραχύτητα της επιφάνειας που προκύπτει με τη μέθοδο EBM ποικίλλει ανάλογα με τη θέση της επιφάνειας. Οι οριζόντιες επιφάνειες έχουν 10-20 μm τραχύτητα, ενώ οι κατακόρυφες ή κεκλιμένες επιφάνειες μπορεί να έχουν τραχύτητα ίση με 60 μm λόγω άτηκτης σκόνης.

Αναφορικά με τη μικροδομή που δημιουργείται υπάρχει ποικιλία λόγω και της πληθώρας των θερμικών διαδικασιών που χρησιμοποιούνται. Έτσι σε μεθόδους laser με βάση το κράμα Ti-6Al-4V μπορεί να περιέχει μαρτενσιτική φάση. Από την άλλη, οι μέθοδοι πλάσματος μπορεί να έχουν ελασματώδη φάση, παρόμοια με την μικροδομή συγκόλλησης τόξου, λόγω της υψηλής ενέργειας που χρησιμοποιείται στη διαδικασία. Οι μέθοδοι EBM δημιουργούν καλύτερες μικροδομές σε σχέση με αυτές των μεθόδων πλάσματος, αλλά όχι μαρτενσιτική φάση λόγω της ταχείας ψύξης αλλά με ανυψωμένη θερμοκρασία επεξεργασίας. Η μικροδομή που επιτυγχάνεται με τις μεθόδους EBM ονομάζεται βελονοειδής α φάση σε β κόκκους.

6.2 Μελλοντικές προοπτικές

Με την πληθώρα των διαθέσιμων τεχνολογιών προσθήκης υλικού και πιο ειδικά μετάλλου, αλλά και των διαθέσιμων υλικών, όπως κράματα τιτανίου, νικελίου, ανοξειδωτους χάλυβες υψηλής ποιότητας, κ.ά. είναι δυνατό να κατασκευαστούν τελικά προϊόντα ποικίλων σχημάτων και μορφών. Εξάλλου πρόκειται για ένα δυναμικό και συνεχώς εξελισσόμενο τομέα έρευνας και ανάπτυξης, μιας και οι επιστήμονες του χώρου προσπαθούν να βελτιώσουν το state-of-the-art της εν λόγω τεχνολογίας, αλλά και να δημιουργήσουν νέους συνδυασμούς χρησιμοποιούμενων υλικών και διαδικασιών προς εμπορική εκμετάλλευση. Μέχρι σήμερα, ο αριθμός των εμπορικά εκμεταλλεύσιμων τμημάτων είναι χαμηλός λόγω των απαιτήσεων συστημάτων υψηλής απόδοσης αλλά και του επακόλουθου υψηλού κόστους (Kristofer, 2014).

Με τη χρήση των τεχνολογιών προσθήκης υλικού είναι δυνατή η μείωση του υλικού που απαιτείται για την κατασκευή ενός αντικειμένου, με ταυτόχρονη τελικά μείωση του τελικού του κόστους και επίσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, μετατρέποντας έτσι τις τεχνικές AM σε «πράσινη κατασκευή αντικειμένων». Επίσης η μείωση αυτή της απαιτούμενης πρώτης ύλης είναι

ελκυστική για αεροδιαστημικές εφαρμογές. Επίσης σημαντική είναι η συμβολή τους σε ιατρικές εφαρμογές, όπου υπάρχει δυνατότητα παραγωγής οδοντικών εμφυτευμάτων, ορθοπεδικών και ακουστικών βοηθημάτων ώστε να ταιριάζουν στη μοναδική φυσιολογία κάθε ανθρώπου.

Το μέλλον των τεχνολογιών AM σχετίζεται άμεσα με το ψηφιακό τους σκέλος, το οποίο είναι η δημιουργία ψηφιακού σχεδίου του εκάστοτε πρωτοτύπου με τη βοήθεια υπολογιστή, χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα πακέτα εργαλείων και τεχνικών δεδομένων τα οποία αφορούν διαφορετικά υλικά, και τη μοντελοποίηση τους, ως προς τις μεταλλουργικές και τις μηχανικές τους ιδιότητες ανάλογα με την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη διαδικασία. Έτσι ανοίγεται σημαντική προοπτική για χρήση τους σε προηγμένες αρχιτεκτονικές κατασκευές (Kristofer, 2014).

Μια από τις πολλά υποσχόμενες προοπτικές είναι η υιοθέτηση τους σε εφαρμογές όπου δεν είναι δυνατό να κατασκευαστούν με τις συμβατικές διαδικασίες κατεργασίας. Συγκεκριμένα παραδείγματα περιλαμβάνουν ιατρικά εμφυτεύματα συγκεκριμένης γεωμετρίας η οποία έχει προκύψει από MRI ή κατασκευή πτερυγίων στροβίλων τα οποία θα διαθέτουν ειδικά σχεδιασμένα κανάλια για την ψύξη τους. Προφανώς, μιας και πρόκειται για πολύ σύγχρονη τεχνολογία οι καινοτόμες εφαρμογές και οι εξειδικευμένες χρήσεις της προκύπτουν μέρα με τη μέρα.

Ένα άλλο μελλοντικό βήμα αφορά τη βιομηχανοποίηση των εν λόγω τεχνικών μιας και πρόκειται κυρίως για εργαστηριακής κλίμακας μηχανήματα. Από τα κύρια μέρη που χρήζουν έρευνας και ανάπτυξης είναι ο έλεγχος της τροφοδοσίας κλειστού βρόγχου έτσι ώστε να ενσωματωθεί με επιτυχία στη συνολική διαδικασία μαζικής κατασκευής αντικειμένων. Επίσης υπάρχουν θέματα με τη ποικιλία των ιδιοτήτων και της διαφορετικής ποιότητας τελικών αντικειμένων που προκύπτουν αναλόγως με το μηχάνημα που χρησιμοποιείται καθώς και με το υλικό κατεργασίας. Επίσης, μελλοντικά θα ήταν χρήσιμη η ανακάλυψη μεθοδολογιών μη καταστροφικής αξιολόγησης και επιθεώρησης των αντικειμένων που δημιουργούνται, για την ύπαρξη επαρκούς ποιοτικού ελέγχου (Kristofer, 2014).

Αναφορικά με το θεωρητικό κομμάτι της τεχνολογίας, η προσθήκη μεταλλικού υλικού είναι πιο σύγχρονη μέθοδος η οποία απαιτεί ακόμη αρκετά χρόνια έρευνας για να ωριμάσει. Οι παράμετροι αυτών των τεχνικών, όπως και των περισσότερων, έχουν προσδιοριστεί εμπειρικά. Έτσι υπάρχει ανάγκη κατανόησης της μικροδομής των υλικών, αλλά και των ιδιοτήτων των τελικών προϊόντων που προκύπτουν αναλόγως βέβαια και από τη χρησιμοποιούμενη τεχνική. Οι περισσότερες μελέτες μέχρι σήμερα επικεντρώνονταν στην αντοχή σε εφελκυσμό και επιμήκυνση συναρτήσεως της σύνθεσης του υλικού κατεργασίας. Έτσι η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να στραφεί στην επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας σε δυναμικό φορτίο κύκλων χαμηλής και

υψηλής φόρτισης, καθώς και στην αντοχή και σε περιπτώσεις ερπυσμού, για τη διαπίστωση της συμπεριφοράς του αντικειμένου σε ανάλογες συνθήκες. Εξάλλου, πρόσφατα δημιουργήθηκε συμβουλευτική επιτροπή ASTM F-42 η οποία θα ασχολείται με τη συγγραφή πρότυπων διαδικασιών που θα καλύπτουν ευρύ φάσμα αναγκών και εφαρμογών. (Harris, 2013)

Οι μηχανικές ιδιότητες των μερών που κατασκευάζονται μπορεί να ποικίλλουν σημαντικά αναλόγως με τη μέθοδο, το υλικό, τις παραμέτρους της διαδικασίας, την κατεύθυνση του φορτίου αλλά και επακόλουθες θερμικές και επιφανειακές μεθόδους επεξεργασίας. Έτσι, μπορεί να απαιτούνται ειδικά σχέδια όπως υποστηρίγματα και καταβόθρες θερμότητας, ώστε να διασφαλίσεις την απαιτούμενη γεωμετρική ακρίβεια.

Όσον αφορά τις μελλοντικές προοπτικές σχετικά με τα χρησιμοποιούμενα υλικά, η πλειονότητα των ερευνών έχει εστιάσει στο κράμα Ti-6Al-4V, και ελάχιστες περιπτώσεις άλλων κραμάτων και υλικών. Το γεγονός είναι κατανοητό και οφείλεται στο υψηλό του κόστος και στη χρησιμότητα και σημασία του σε αεροδιαστημικές και ιατρικές εφαρμογές. Υπάρχει όμως πληθώρα άλλων εφαρμογών που απαιτούν άλλα μεταλλικά κράματα όπως νικελίου, αλουμινίου ή ανακλαστικών μετάλλων, τα οποία είναι δυνατό να κατασκευαστούν με χρήση των τεχνολογιών AM και δεν έχουν διερευνηθεί ή μελετηθεί μέχρι σήμερα. (Harris, 2013)

Βιβλιογραφία

Abioye T.E., Folkes J., Clare A.T., 2013. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition. *Journal of Materials Processing Technology* 212,203–210.

Agarwala M., Bourell D., Beaman J., Marcus H. and Barlow J.: *Rapid Prototyping J.*, 1995.

Ashley S., “Rapid prototyping systems,” *Mechanical Engineering*, vol. 113, no. 4, p. 34, 1991.

Bourel David L. I, Beaman Joseph J., Ming C. Leu and Rosen David W., *A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead*, US – TURKEY Workshop On Rapid Technologies, September 24 – 24, 2009.

Brandl E., Leyens, C. and Palm, F. (2009), “Mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V using wire and powder based processes”, *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, Vol. 26, Conference 1.

Buchbinder D., Meiners W., Wissenbach K., Muller- Lohmeier K., Brandl E. and Skrynecki N.: ‘Rapid manufacturing of aluminum parts for serial production via selective laser melting (SLM)’, *Proc. Int. Conf. on ‘Rapid manufacturing’*, Loughborough, UK, July 2009.

Büsgen Thomas, *Plastics for Additive Manufacturing*, Bayer MaterialScience AG, 3D Printing & Additive Manufacturing, Industrial Applications Summit 2013, London.

Chatterjee A. N. et al., *Mater. Process Technol.*, 2003, 136.

Cooper K., *Rapid Prototyping Technology*, Marcel Dekker, 2001.

Diegel Olaf, Sarat Singamneni, Stephen Reay & Andrew Withell, *Journal of Sustainable Development* Vol. 3, No. 3; September 2010.

Dutta B. et al., Palaniswamy S., Choi J., Song L. J. and Mazumder J.: *Adv. Mater. Process.*, 2011, 169.

e-Manufacturing Solutions, Plastic and Metal Materials for Additive Manufacturing, Munich, Germany.

Facchini L., E. Magalini, P. Robotti, A. Molinari, S. Höges and K. Wissenbach: *Rapid Prototyping J.*, 2010, 16.

Fischer P., Romano V., Blatter A. and Webe H. P. r: *Laser Phys. Lett.*, 2005.

Frazier E. William, *Metal Additive Manufacturing: A Review*, 2014.

Frazier William E., *Metal Additive Manufacturing: A Review*, *JMEPEG* (2014) 23:1917–1928.

Gibson I., Rosen D.W. and Stucker, B. (2010), Additive Manufacturing Technologies, Springer, London

Gong Haijun, Rafi Khalid, Starr Thomas, Stucker Brent, The Effects of Processing Parameters on Defect Regularity in Ti-6Al-4V Parts Fabricated By Selective Laser Melting and Electron Beam Melting, 2013.

Grimm T., User's Guide to Rapid Prototyping, Society of Manufacturing Engineers, 2004.

Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K. and Poprawe R., Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, International Materials Reviews 2012, Vol. 57.

Haiou Zhang, Xu Jipeng, Wang Guilan, Fundamental study on plasma deposition manufacturing, Surface and Coatings Technology 171 (2003) 112–118.

Harris Ian D., Development and Implementation of Metals Additive Manufacturing, EWI, Columbus, 2013.

Herderick E., Additive Manufacturing of Metals: A Review, Materials Science and Technology (MS&T) 2011.

Hofmeister W., M. Wert, J. Smugeresky, J. A. Philliber, M. Griffith and M. Ensz: JOM, 1999, 51, <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9907/Hofmeister/Hofmeister-9907.html>.

Hopkinson, N., Hague, R.J.M. and Dickens, P.M. (2006). Rapid Manufacturing an Industrial Revolution for the digital age, Wiley, 2006.

Horii T., Kirihaara S., Miyamoto Y., 2009. Freeform fabrication of superalloy objects by 3D micro welding. Materials & Design 30, 1093–1097.

<http://www.biomaterials.org.gr/Hmerides-EEB/7h-Dihmerida-EEB2012/Abstracts/ABSTRACT-Kantaros.pdf>

<http://www.innosupport.net/index.php?id=2211&L=4>

<http://www.jklasers.com/additive-manufacturing-materials>

Jandric Z., Labudovic, M., Kovacevic, R., 2004. Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 785–796.

Jhavar Suyog, Jain N.K., Paul C.P., Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications, Journal of Materials Processing Technology 214 (2014), 1102-1110.

Jhavar, S., Paul C.P., Jain N.K., 2013. Causes of failure and repairing options for dies and molds: a review. Engineering Failure Analysis 34, 519–535.

- Kaiser T. and Albrecht G. J.: *Laser Techn. J.*, 2007, 4, 54–57.
- Kaplan, A.M; Haenlein, M (2006), "Toward a parsimonious definition of traditional and electronic mass customization", *Journal of product innovation management*.
- Karunakaran K.P. , Bernard A., Simhambhatla S., Dembinski L., Taillandier G., 2012, Rapid manufacturing of metallic objects, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 18, Issue 4, pp 264-280.
- Kelbassa I., Gasser A., Meiners W., Backes G., Müller B., 2012, High speed LAM, Conference proceedings of the 37th International MATADOR Conference, University of Manchester, July 2012.
- Khaing M. W., Fuh J. Y. H. and Lu L.: *J. Mater. Process. Technol.*, 2001, 113.
- Kim H., Jae-Won C., and Wicker R., "Scheduling and process planning for multiple material stereolithography," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 232–240, 2010.
- Koch J. and Mazumder J.: 'Apparatus and methods for monitoring and controlling multi-layer laser cladding', US patent no. 6122564, 2000.
- Kristofer Ek, Additive Manufactured Material, Master of Science Thesis Stockholm, Sweden, 2014.
- Kruth J. and Vandenbroucke B.: *Rapid Prototyping J.*, 2007, 13.
- Kruth J. P., Levy G., Klocke F. and Childs T. H. C.: *CIRP Ann.*, 2007, 56.
- Kruth J. P., Mercelis P., van Vaerenbergh J., Froyen L., and Rombouts M., "Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 26–36, 2005.
- Kruth J. P., Wang X., Laoui T., and Froyen L., "Lasers and materials in selective laser sintering," *Assembly Automation*, vol. 23, no. 4, pp. 357–371, 2003.
- Kukreja L.M., Kaul R., Paul C.P., Ganesh P., Rao B.T., 2012. Emerging laser materials processing techniques for future industrial applications. In: Manna, Majumder J. (Eds.), *Laser Assisted Fabrication of Materials*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 423–478.
- Ljunberg L.Y. (2007). Materials selection and design for sustainable products, *Materials and Design*, 28: 466-479.
- Louvis E., Fox P. and Sutcliffe C. J.: *J. Mater. Process. Technol.*, 2011.
- Martina F., J. Mehnen, S.W. Williams, P. Colegrove, F. Wang, Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti6Al4V, *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012), 1377-1386.

Matilainena Ville, Heidi Piili, Antti Salminen, Tatu Syvänen, Olli Nyrhilä, Characterization of Process Efficiency Improvement in Laser Additive Manufacturing, *Physics Procedia* 56 (2014) 317 – 326.

Mazumder J., Choi J., Nagarathnam K., Koch J. and Hetzner D.: *JOM*, 1997, 49.

Mazumder J., Dutta D., Kikuchi N. and Ghosh A.: *Opt. Laser Eng.*, 2000, 34.

Mudge R. P. and Wald N. R.: *Weld J.*, 2007, 86, 44–48.

Mumtaz K. A., Erasenthiran P. and Hopkinson N.: *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, 195.

Murr L. E., Esquivel E. V., Quinones S. A., Gaytan S. M., Lopez M. I., Martinez E. Y., Medina F., Hernandez D. H., Martinez E., Martinez J. L., Stafford S. W., Brown D. K., Hoppe T., Meyers W., Lindhe U., Wicker R. B., 2009, Microstructures and mechanical properties of electron beam rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V, *Materials Characterization*, vol. 60, no 2, p. 96 105.

Murr L. E., Martinez J. L., Gaytan S. M, Hernandez D. H., *Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science*, *Journal of Materials Research and Technology*, 2012

Murr L., Gaytan S., Ramirez D., “Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 1–14, 2012.

Niu J. and Chang I. T. H.: *J. Mater. Sci.*, 2000, 35.

Noorani R., *Rapid Prototyping—Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 2006.

Norsk Titanium (2012), “Norsk Titanium Components – Innovative technology for Titanium component production”, *Titanium Day at Eggemoen Aviation & Technology Park*, 2012 June 27, Eggemoen.

Paul C.P., Bhargava P., Kumar A., Pathak A.K., Kukreja L.M., 2012. Laser rapid manufacturing: technology, applications, modeling and future prospects. In: Davim, J.P. (Ed.), *Lasers in Manufacturing*. Wiley-ISTE, London, pp. 1–67.

Pham D. T. and Ji C., “Design for stereolithography,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 214, no. 5, pp. 635–640, 2000.

Pine II J. (1992), “Mass Customization: The New Frontier in Business Competition”

Pogson S., Fox P., O’Neill W. and Sutcliffe C. J.: *Mater. Sci. Eng. A*, 2004, A386.

Rengier F., Mehndiratta A., von Tengg-Kobligk H., “3D printing based on imaging data: review of medical applications,” *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 5, no. 4, pp. 335–341, 2010.

Safdar A. et al., Evaluation of microstructural development in Electron Beam Melted Ti-6Al-4V, *Materials Characterization* 65 (2012) 8–15.

Schleifenbaum H., Diatlov A., Hinke C., Bültmann J., Voswinckel H., 2011, Direct photonic production: towards high speed additive manufacturing of individualized goods, *Production Engineering*, Volume 5, Issue 4, p. 359-371, Springer-Verlag, Online ISSN: 1863-7353.

Schleifenbaum H., Meiners W., Wissenbach K., Hinke C., 2010, Individualized production by means of high power Selective Laser Melting, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 2, Issue 3, Elsevier Ltd. ISSN: 1755-5817.

Schwerdtfeger J., Singe R. F., Korner C.. In situ flaw detection by IR-imaging during electron beam melting. *Rapid Prototyping Journal*, 18(4), 2012, 259-263

Simchi A. : *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, A428, 148–158.

Slavko D. and Matic K., “Selective laser sintering of composite materials technologies,” *Annals of DAAAM & Proceedings*, p.p 1527, 2010.

SME. (2010). http://www.sme.org/cgi-bin/communities.pl?/communities/techgroups/ddm/what_is_ddm.htm&&SME

Stoodley M. A., Abbott J. R., and Simpson D. A., “Titanium cranioplasty using 3-D computer modelling of skull defects,” *Journal of Clinical Neuroscience*, vol. 3, no. 2, pp. 149–155, 1996.

Suryakumar S., Karunakaran K.P., Bernard A., Chandrasekhar U., Raghavender N., Sharma D., 2011. Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing. *Computer- Aided Design* 43, 331–344.

Vaupotic B., Brezocnik M., and Balic J., “Use of PolyJet technology in manufacture of new product,” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 18, no. 1-2, pp. 319–322, 2006.

Vayre B. F. Vignat, F. Villeneuve, Identification on some design key parameters for additive manufacturing: application on Electron Beam Melting, *Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2013.

Vayre B., Vignat F., Villeneuve F., 2012, Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects, *Mechanics & Industry*, vol. 13, no 02, p. 89-96.

Wang, H., Jiang, W., Valant, M., Kovacevic, R., 2003. Microplasma powder deposition as a new solid freeform fabrication process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 217, 1641–1650.

Wohlers T., "Additive Manufacturing Advances," Manufacturing Engineering, vol. 148, no. 4, pp. 55–56, 2012.

Wohlers, T. (2009). Worldwide progress report on the rapid prototyping, tooling, and manufacturing state of the industry, Wohlers Report 2009, Wohlers Associates, USA.

Wong Kaufui V. and Hernandez Aldo, A Review of Additive Manufacturing, International Scholarly Research Network, ISRN Mechanical Engineering, Volume 2012.

Wright C. S., Youseffi M., Akhtar S. P., Childs. H. C., Hauser C., Fox P. and Xie J.: Mater. Sci. Forum, 2006.

www.arcam.com

www.plasticker.de

Xiong Y. H., Smugeresky J. E. and Schoenung J. M.: J. Mater. Process. Technol., 2009, 209.

Xiong Y., Investigation of the laser engineered net shaping process for nanostructured cermets [ProQuest Dissertations], University of California, 2009.

Xue W. C., Krishna W. C., Bandyopadhyay A. and Bose S.: Acta Biomater., 2007, 3.

Zäh M. F., Lutzmann S.. Modelling and simulation of electron beam melting. Prod. Eng. Res. Devel. 4, 2010, 15-23.

Zhao X. M., Lin X., Chen J., Xue L. and Huang W. D.: Mater. Sci. Eng. A, 2009, A 504.

Zheng B., Zhou Y., Smugeresky J. E., Schoenung J. M. and E. Lavernia J.: Metall. Mater. Trans. A, 2008, 39A.

Zhu H. H., Lu L. and H. Fuh J. Y.: Mater. Sci. Eng. A, 2004, A 371.