ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΕΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΞΗΣ ΜΕ LASER

ΑΡΙΣΤΕΑ ΑΠΟΣΤΟΛΑΚΗ

1056273

Επιβλέπων: ΠΑΝΤΕΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Πάτρα, 2021

Σπουδαστική Εργασία 2 Αριστέα Αποστολάκη

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Αποστολάκη Αριστέα

@2021 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΛΗΨΗ	11
1.1 ПЕРІЛНѰН	11
1.2 ABSTRACT	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	14
2.2 ΕΙΔΗ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	16
2.2.1. Μέθοδος Φωτοπολυμερισμού (Vat Photopolymerisation)	17
2.2.2. Μέθοδος ψεκασμού του υλικού (Material Jetting)	18
2.2.3. Συνδετική Μέθοδος με πίεση ακροφυσίου (Binder Jetting)	19
2.2.4. Μέθοδος εξώθησης του υλικού (Material Extrusion)	21
2.2.5. Μεθοδος Σύντηξης στρώματος σκόνης (Power Bed Fusion)	22
2.2.6. Μέθοδος Συγκόλλησης φύλλων υλικού (Sheet Lamination	23
2.2.7. Μέθοδος Κατευθυνόμενης Εναπόθεσης (Directed Energy Deposition)	24
2.3. ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΩΡΙΑ	26
3.1. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ SLM	26
3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ SLM	28
3.2.1. Μέρη SLM μηχανής	28
3.2.2. Διαδικασίες μεθόδου SLM	30
3.3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥ SLM	35
3.3.1. Τοπολογική Βελτιστοποίηση και μέθοδος SLM	38
3.3.2. Δομές πλέγματος και μέθοδος SLM	41
3.4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ SLM ΕΩΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΡΑ	45
3.4.1. Υψηλό πορώδες υλικού	46
3.4.2. Πυκνότητα υλικού	47
3.4.3. Παραμένουσες τάσεις	48
3.4.5. Διαδικασίες επεξεργασίας μετά την εκτύπωση	50
3.5. ΥΛΙΚΑ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	51
3.5.1. Υλικά για όλους τους τύπους τρισδιάστατης εκτύπωσης	51
3.5.2. Υλικά για την μέθοδο SLM	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΔΟΚΟΥ	57

Σπουδαστική Εργασία 6 Αριστέα Αποστολάκη

4.1. ΣΤΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΔΟΚΟΥ
4.2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΠΑΚΤΩΜΕΝΗΣ ΔΟΚΟΥ
4.2.1. Ανάλυση Τάσεων62
4.2.2. Ανάλυση Παραμορφώσεων66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ 3D PRINTED ΔΟΚΟΥ
5.1. ΣΤΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ 3D ΔΟΚΟΥ
5.2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ 3D ΠΑΚΤΩΜΕΝΗΣ ΔΟΚΟΥ
5.2.1. Ανάλυση Τάσεων79
5.2.2. Ανάλυση Παραμορφώσεων
5.3. ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ 3D ΔΟΚΟΥ90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ - ΘΕΩΡΙΑ ΕΡΓΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ. 92
6.1.ΘΕΩΡΙΑ ΕΡΓΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ- VON MISES CRITERION92
6.2. ΕΠΙΡΡΟΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ SLM
6.3. ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ
ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ SLM97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ
7.1. ΣΧΟΛΙΑ- ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
7.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΟ ΜΕΛΛΟΝ
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Μέθοδος Vat Polymerisation , τεχνολογία Stereolithography	18
Εικόνα 2 Μέθοδος Material Jetting	19
Εικόνα 3 Μέθοδος Binder Jetting	20
Εικόνα 4 Μέθοδος Material Extrusion, τεχνολογία FDM	22
Εικόνα 5 Μέθοδος Power Bed Fusion	23
Εικόνα 6 Μέθοδος Sheet Lamination, τεχνολογία LOM	24
Εικόνα 7 Μέθοδος Directed Energy Deposition, τεχνολογία δέσμης ηλεκτρονίων και υλικό	
σε μορφή σύρματος	25
Εικόνα 8 Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας SLM	27
Εικόνα 9 Σύγκριση τεχνολογίας SLM με συμβατικές μεθόδους	28
Εικόνα 10 Μέρη μηχανής SLM	29
Εικόνα 11 Μηχανές SLM με αυξημένη παραγωγικότητα	31
Εικόνα 12 Παραλληλισμός σε μηχανή SLM	32
Εικόνα 13 Στρατηγικές λειτουργίας μηχανών SLM με διπλο σύστημα σάρωσης	32
Εικόνα 14 Η επιρροή της ισχύος του λέιζερ στο κόστος ενός 3d-printed κομματιού με την	
μέθοδο SLM	33
Εικόνα 15 Μεταβολή του όγκου παραγωγής συναρτήσει του κόστους λειτουργίας μίας	
μηχανής SLM	34
Εικόνα 16 SLM 3D μέθοδος στον τομέα της Ιατρικής και της οδοντιατρικής με υλικό κράμα	χ
τιτανίου, συμβατό με τον ανθρώπινο οργανισμό	35
Εικόνα 17 3D printed εξαρτήματα μεταφοράς νερού για την AUDI W12 μηχανή αυτοκινήτα	วบ
	36
Εικόνα 18 Μηχανή αεριοπροώθησης πυραύλου με μέθοδο SLM 3D εκτύπωσης	37
Εικόνα 19 3D εκτυπωτής σε διαστημικό σταθμό. NASA 2019	37
Εικόνα 20 Τυπικές εφαρμογές και υλικά στην Αεροναυπηγική	38
Εικόνα 21 Εξαρτήματα στην αεροναυπηγική κατασκευασμένα απο τιτάνιο απο CNC	
συμβατική μέθοδο και 3D PRINTING μεθοδο SLM με Topology Optimization	39
Εικόνα 22 Σχέδιο μοχλού κίνησεως αεροπορικής θέσης business class	39
Εικόνα 23 Τελική δομή μοχλού με δυναμική φόρτιση και Topology Optimization	40
Εικόνα 24 Τελικό εξάρτημα μοχλού αεροπορικής θέσης με τρισδιάστατη εκτύπωση	
μεθόδου SLM	41
Εικόνα 25 Σχηματική απεικόνιση της επιρροής της δομής πλέγματος στην πολυπλοκότητα	
του εξαρτήματος	42
Εικόνα 26 Προκλήσεις που προκύπτουν στα εξαρτήματα με δομή πλέγματος	43
Εικόνα 27 Σχεδιάγραμμα των δύο συνηθέστερων στρατηγικών σάρωσης	44
Εικόνα 28 Αποκλίσεις σχετικής πυκνότητας στο αρχικό ζητούμενο μοντέλο CAD	44
Εικόνα 29 Δομές πλέγματος με την μέθοδο Micro-CT για εξακρίβωση ακρίβειας της δομής	;45

Εικόνα 30 Πορώδες υλικού που μεταφέρεται στην στρώση του υλικού. Εικόνα από	
μικροσκόπιο	. 47
Εικόνα 31 Αστοχία σε 3D printed κομμάτι λόγω παραμενουσών τάσεων	. 48
Εικόνα 32 Αστοχία 3D printed εξαρτήματος σε μορφή delamination	. 50
Εικόνα 33 Στρέβλωση εξαρτήματος	. 50
Εικόνα 34 3D printed εξάρτημα πριν και μετά την διεργασία λείανσης επιφάνειας μετά τι	γv
εκτύπωση	. 51
Εικόνα 35 LEGO plastic υλικό (ABS)	. 52
Εικόνα 36 PVA 3D Printed part για στήριξη	. 53
Εικόνα 37 Μοντελοποίηση συμβατικής δοκού στο ΑΝΥS	. 58
Εικόνα 38 Διατομή δοκού	. 59
Εικόνα 39 Ιδιότητες σχεδίασης και υλικό δοκού	. 59
Εικόνα 40 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων κατά μήκος της συμβατικής δοκού	. 60
Εικόνα 41 Μορφή πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στην άκρη της δοκού	. 60
Εικόνα 42 Δεδομένα και Ζητούμενα προβλήματος πακτωμένης δοκού	. 61
Εικόνα 43 Αρχικές συνθήκες φόρτισης και στήριξης της δοκού	. 61
Εικόνα 44 Ανάλυση τάσεων πακτωμένης δοκού σε επιβολή δύναμης 100Ν	. 62
Εικόνα 45 Κατανομή τάσεων στο άκρο x=L της δοκού. Σημείο επιβολής δύναμης	. 62
Εικόνα 46 Κατανομή τάσεων στο σημείο x=0 της δοκού. Σημείο πάκτωσης	. 63
Εικόνα 47 Ανάλυση τάσεων πακτωμένης δοκού σε επιβολή δύναμης 250Ν	. 63
Εικόνα 48 Κατανομή τάσεων στα σημείοα x=0 της δοκού (πάκτωση) , και x=L (σημείο	
επιβολής δύναμης)	. 64
Εικόνα 49 Ανάλυση τάσεων πακτωμένης δοκού σε επιβολή δύναμης 500Ν	. 65
Εικόνα 50 Κατανομή τάσεων στα σημεία x=0 της δοκού (πάκτωση) , και x=L (σημείο	
επιβολής δύναμης)	. 65
Εικόνα 51 Ανάλυση Παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού για επιβολή	
δύναμης 100Ν	. 67
Εικόνα 52 Κατανομή παραμορφώσεων στο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης)	. 67
Εικόνα 53 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένη	٦ς
δοκού για επιβολή δύναμης 100Ν	. 67
Εικόνα 54 Κατανομή ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων στο σημείο x=L (σημείο	
επιβολής δύναμης)	. 68
Εικόνα 55 Ανάλυση Παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού για επιβολή	
δύναμης 250Ν	. 68
Εικόνα 56 Κατανομή παραμορφώσεων στο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης)	. 69
Εικόνα 57 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένη	າເ
δοκού και στο σημείο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης) για επιβολή δύναμης 250	N.
	. 69
Εικόνα 58 Ανάλυση παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού και στο σημείο	
x=L (σημείο άσκησης φόρτισης) για επιβολή δύναμης 500Ν	. 70
Εικόνα 59 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένι	າເ
δοκού και στο σημείο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης) για επιβολή δύναμης 500	N.
 Εικόνα 60 Γεωμετρία πακτωμένης δοκού που πρόκειται να εκτυπωθεί με την μέθοδο της	. /1
τρισδιάστατης εκτύπωσης	. 73
Εικόνα 61 Χαρακτηριστικά πλέγματος που επιλέχθηκε για την γεωμετρία της δοκού	. 74
Εικόνα 62 Εσωτερικό πλάγιας όψης γεωμετρίας της 3D πακτωμένης δοκού μετά την επιλ	ογή
πλέγματος	. 74

Εικόνα 63 Εσωτερικό γεωμετρίας 3D δοκού μετά την επιλογή πλέγματος	′5
Εικόνα 64 Χαρακτηριστικά πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για	χ
την ανάλυση της 3D printed δοκού7	<i>'</i> 6
Εικόνα 65 Γεωμετρία 3D Printed δοκού με πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που	
χρησιμοποιήθηκε	<i>'</i> 6
Εικόνα 66 Γεωμετρία 3D Printed δοκού με πλένμα πεπερασμένων στοιχείων που	
χοησιμοποιήθηκε.Σημείο πάκτωσης	77
Εικόνα 67 Δεδομένα και Ζητούμενα προβλήματος 3D printed πακτωμένης δοκού	/8
Εικόνα 68 Περιοχή κόμβων στην διατομή της 3D printed δοκού, στην οποία ασκείται η	70
	9
εικονά 69 Περίοχη κομβών στην οιάτομη της 3D printed οσκού, στην οποία ασκείται η	
ουναμη	9
Εικονα 70 Αναλυση τασεών κατα μηκός 3D printed πακτώμενης δόκου σε επιβόλη δυναμη 100Ν.	ς 30
Εικόνα 71 Ανάλυση τάσεων 3D printed δοκού στα σημεία της πάκτωσης (x=0) και της	
επιβολής της δύναμης (x=L)	30
Εικόνα 72 Ανάλυση τάσεων κατά μήκος 3D printed πακτωμένης δοκού σε επιβολή δύναμη 250N	ς 31
Εικόνα 73 Ανάλυση τάσεων 3D printed δοκού στο σημείο της πάκτωσης (x=0)	31
Εικόνα 74 Ανάλυση τάσεων 3D printed δοκού στο σημείο της επιβολής της δύναμης (x=L).8	32
Εικόνα 75 Ανάλυση τάσεων κατά μήκος 3D printed πακτωμένης δοκού σε επιβολή δύναμη	c
500N	, }2
Εικόνα 76 Ανάλυση τάσεων 3D printed δοκού στα σημεία της πάκτωσης (x=0) και της	-
επιβολής της δύναμης (x=1)	3
Εικόνα 77 Ανάλυση Παραμορφώσεων κατά μήκος της 3D printed πακτωμένης δοκού για	
επιβολή δύναμης 100Ν	₹4
Εικόνα 78 Κατανομή παραμορφώσεων 3D printed δοκού στο σημείο x=L (σημείο επιβολής	
δύναμης)	, 34
εικόνα 79. Ανάλματι Ισοδύναιμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης	
δοκού για επιβολή δύγαμας 100Ν	, 25
Εικόνα 80 Ανάλματι Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων στο σριμείο x=0. (στιμείο	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
$\pi \dot{\alpha}$ ματά στο χ=1 (σριμείο επιβολής δύναμης) για επιβολή δύναμης 100N	25
Taktuon(ζ) kut oto x=2 (or μετο επιρολής συναμής) για επιρολή συναμής 100 kα	5
εικονά δι Αναλοσή παραμορφωσεών κατά μηκος της 3D printed πακτωμενής σόκου για	26
$c_{\rm res}$.0
E(x) ε κατανόμη παραμορφωσεών 3D printed σόκου στο σημείο x=L (σημείο επιβολης	,)
	90
Εικονά 83 Αναλυση Ισοουναμών ελαστικών παραμορφωσεών κατα μηκός της πακτώμενης	
δοκου για επιβολη δυναμης 250Ν	57
Εικόνα 84 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων στο σημείο x=0 (σημείο $x=0$)	
πάκτωσης) για επιβολή δύναμης 250Ν	57
Εικόνα 85 Ανάλυση Παραμορφώσεων κατά μήκος της 3D printed πακτωμένης δοκού για	
επιβολή δύναμης 500Ν	38
Εικόνα 86 Κατανομή παραμορφώσεων 3D printed δοκού στο σημείο x=L (σημείο επιβολής	,
δύναμης)	38
Εικόνα 87 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης	
δοκού για επιβολή δύναμης 500Ν	39
Εικόνα 88 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων στο σημείο x=0 (σημείο	
πάκτωσης) για επιβολή δύναμης 500Ν8	39

Σπουδαστική Εργασία | 10 Αριστέα Αποστολάκη |

πλέγματος	Εικόνα 89 Τοπολογική Βελτιστοποίηση 3D printed δοκού, ως προς την πυκνότητα του
Εικόνα 90 Τοπολογική βελτιστοποίηση 3D printed δοκού, ως προς την μείωση της μάζας. 91 Εικόνα 91 Αποτελέσματα τοπολογικής βελτιστοποίησης 3D Printed δοκού	πλέγματος90
Εικόνα 91 Αποτελέσματα τοπολογικής βελτιστοποίησης 3D Printed δοκού	Εικόνα 90 Τοπολογική βελτιστοποίηση 3D printed δοκού, ως προς την μείωση της μάζας. 91
Εικόνα 92 Τόπος αστοχίας θεωρίας Von Mises σε 3D επίπεδο του υλικού	Εικόνα 91 Αποτελέσματα τοπολογικής βελτιστοποίησης 3D Printed δοκού
Εικόνα 93 Το κριτήριο Von Mises σε επίπεδη φόρτιση	Εικόνα 92 Τόπος αστοχίας θεωρίας Von Mises σε 3D επίπεδο του υλικού
Εικόνα 94 Είσοδος θερμότητας με laser και απώλειες θερμότητας με συναγωγή και με ακτινοβολία	Εικόνα 93 Το κριτήριο Von Mises σε επίπεδη φόρτιση93
ακτινοβολία	Εικόνα 94 Είσοδος θερμότητας με laser και απώλειες θερμότητας με συναγωγή και με
Εικόνα 95 Τήξη κόκκων υλικού σε σκόνη κατά την μέθοδο SLM	ακτινοβολία95
	Εικόνα 95 Τήξη κόκκων υλικού σε σκόνη κατά την μέθοδο SLM
Εικόνα 96 Απεικόνιση της μεταφοράς θερμότητας σε μία στρώση υλικού κατα την μέθοδο	Εικόνα 96 Απεικόνιση της μεταφοράς θερμότητας σε μία στρώση υλικού κατα την μέθοδο
3D εκτύπωσης SLM	3D εκτύπωσης SLM

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΛΗΨΗ

1.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία της Προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing) αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της κατασκευαστικής βιομηχανίας στις μέρες μας. Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην παγκόσμια αγορά, και μεγάλες εταιρίες κατασκευαστικές και μη έχουν ενσωματώσει την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής στην γραμμή παραγωγής τους. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι πολυάριθμα, όπως ευελιξία, εξατομίκευση, χαμηλό κόστος και υψηλή ταχύτητα συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής αρχικά είχε αντίκρισμα περισσότερο σε εκτύπωση μοντέλων από πλαστικό και περισσότερο για ερασιτέχνες τεχνήτες ή χομπίστες. Τα τελευταία χρόνια όμως έχει σίγουρα μία θέση σε Αυτοκινητοβιομηχανίες και Αεροναυπηγική, καθώς πέρα από πλαστικά εξαρτήματα ή εν γένει εξαρτήματα μικρής αντοχής, μπορούν να εκτυπωθούν μεταλλικά στοιχεία μηχανών με αντίστοιχες ή ακόμα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα εξαρτήματα συμβατικών τεχνολογιών. Η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τρισδιάστατη εκτύπωση μεταλλικών στοιχείων μηχανών είναι η Επιλεκτική Τήξη με δέσμη Λέιζερ (Selective Laser Melting). Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί υλικά στην μορφή κόκκων (σκόνης) και σκοπός είναι η τήξη και στη συνέχεια στερεοποίηση του υλικού με την χρήση λέιζερ υψηλής ισχύος. Η μέθοδος επιλεκτικής τήξης με δέσμη λέιζερ, δείχνει να πληροί τις προϋποθέσεις και να θεωρείται συμφέρουσα για μια κατασκευαστική βιομηχανία, καθώς επιφέρει εξαιρετική ισορροπία, μεταξύ ποιότητας , ποσότητας και κόστους. Ο βασικός λόγος που προβλέπεται η μέθοδος αυτή να επιφέρει μία βιομηχανική επανάσταση στον τομέα της Αεροναυπηγικής στο μέλλον, είναι ότι μπορούν να δημιουργηθούν σε πολύ λίγο χρόνο, εξατομικευμένα εξαρτήματα, τα οποια μπορούν να έχουν επισκευαστικό χαρακτήρα σε συγκεκριμένες περιπτώσεις καθώς και ότι το βάρος τους λόγω της φύσης της προσθετικής κατασκευής μπορεί να είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνταν ως τώρα, γεγονός που αποτελεί σημαντικότατο παράγοντα στην Αεροναυπηγική και Αεροδιαστημική βιομηχανία. Η παρούσα σπουδαστική εργασία προσανατολίστηκε αρχικά στην κατανόηση του θεωρητικού υπόβαθρου και της αρχής λειτουργίας της μεθόδου. Επίσης έμφαση και ιδιαίτερο ενδιαφέρον δώθηκε στο κομμάτι της τοπολογικής βελτιστοποίησης που προσφέρει η μέθοδος, καθώς και στα

πλεονεκτήματα που μπορεί να έχει μία τέτοιου είδους βελτιστοποίηση και ευελιξία στο τελικό εξάρτημα. Η τοπολογική βελτιστοποίηση ενός προϊόντος απαιτεί να υπάρχει ευελιξία κατά τον τρόπο κατασκευής του και οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής είναι οι πλέον κατάλληλες να υλοποιήσουν τέτοιου είδους βελτιώσεις. Η εργασία επικεντρώθηκε στην δημιουργία ενός απλού μοντέλου, μίας δοκού κατασκευασμένης με συμβατική τεχνολογία και μίας κατασκευασμένης με τρισδιάστατη εκτύπωση και οι δύο με κοινές συνοριακές συνθήκες, πάκτωση στο ένα άκρο και άσκηση ενός εύρους δυνάμεων στο ελεύθερο άκρο. Η μοντελοποίηση και τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης έγιναμ με την βοήθεια του λογισμικού Ansys. Ζητούμενα ήταν οι αναλύσεις τάσεων, παραμορφώσεων και ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού και για τις δύο περιπτώσεις καθώς και μία ενδεικτική τοπολογική βελτιστοποίηση στην δοκό τρισδιάστατης εκτύπωσης ώς προς την πυκνότητα του πλέγματος και την μείωση μάζας. Στη συνέχεια συγκρίθηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις για τις δύο διαφορετικές δοκούς και σχολιάστηκε η τοπολογική βελτιστοποίηση της δοκού από μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ιδιαίτερη έμφαση δώθηκε στην κατάλληλη επιλογή πεπερασμένων στοιχείων και για τις δύο δοκούς, καθώς η επιλογή των στοιχείων αυτών επηρεάζει άμεσα την ποιότητα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Τέλος, στην παρούσα σπουδαστική εργασία έγινε προσπάθεια να αναπτυχθεί σε πρώιμο επίπεδο ένα τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας, βασισμένο στην Θεωρία Έργου παραμόρφωσης και εξατομικευμένο στην μέθοδο επιλεκτικής τήξης με λέιζερ. Η αρχική σκέψη ήταν ένα κριτήριο το οποίο να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και να επιφέρει όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σχετικά με την αστοχία του εξαρτήματος, λαμβάνοντας υπόψην τα πραγματικά δεδομένα της διαδικασίας που είναι εκτός από τις κύριες τάσεις που αναπτύσσονται στο εξάρτημα, οι θερμικές και οι παραμένουσες τάσεις.

Λέξεις κλειδιά:

Προσθετική κατασκευή, Επιλετική τήξη με λέιζερ, Τοπολογική βελτιστοποίηση, Τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας.

1.2 ABSTRACT

Additive Manufacturing is an important part of the Production and Manufacturing sector in our days. Additive Manufacturing technologies are predominantly used in the global market; the majority of construction companies have integrated the Additive technology in the production line. The main advantages that this technology offers are; flexibility, customization, low cost and high speed compared to conventional manufacturing methods. As about the early years of Additive Manufacturing, it was initially more common in printing plastic models and adopted mostly by amateur craftsmen or hobbyists. In recent years, however, it has certainly a major role in the Automotive and Aerospace industries, because it cannot only be applied into plastic components or generally low-strength components, but it also enables the printing of metallic machine elements with equivalent or even better mechanical properties than components constructed by conventional technologies. The basic method used for 3D printing of metallic machine elements is the Selective Laser Melting. This method uses materials in the form of powder and the process followed is to melt and then solidify the material using a high power Laser. The method of Selective Laser Melting seems to meet the requirements and is considered to be worthful for a construction industry, as it brings an excellent balance between quality, quantity and cost. The main reason that this method is expected to induce an industrial revolution in the field of Aeronautics in the future, is that it makes able to create customized components in a very short period of time, which can repair the equivalent ones in specific cases. Furthermore, because of the original process of the additive technology, the weight of the components produced can be much lighter than the conventional ones that are used so far, let alone the fact that the weight is a very important factor in the Aerospace and Aerospace industry. The present study was initially oriented towards the understanding of the theoretical background and the basic principles of the method of Additive Manufacturing. It also gave emphasis and showed special interest into the field of Topology Optimization, which is offered by the method, as well as to the advantages that such an optimization and flexibility can have in the final component. In addition, the Topology optimization of a product requires flexibility in the way it is made and additive technologies are the most appropriate to implement such improvements. As about this work, it is focused on the creation of a simple model; a beam constructed by conventional technology and another one with 3D printing. Both of them had common boundary conditions, fixed to one edge and a range of forces constrained to the free edge. The modeling and the final results of the analysis were done with the aid of Ansys Software. The unknown values were the analyzes of stresses, deformations and equivalent elastic deformations along the beam for both cases as well as an suggesting topological optimization in the beam of three-dimensional printing in terms of lattice density and mass reduction. Afterwards, the numerical results from the analyzes for the two different beams were compared and the topological optimization of the 3D printed beam was commented. Special importance was also given in the appropriate selection of finite elements for both beams, as the selection of these elements affects (meshing) the quality of the analysis results. Finally, in the present study, an attempt was made in order to develop a Modified failure criterion at its early stage, based on the of Deformation Theory (Von mises), which was also individualized to the method of Selective Laser Melting.Last but not least, it is referred that the conceptual idea was a criterion that corresponds to reality and be close to realistic results as possible as about the failure of the component, taking into account the actual data of the process which are in addition to the main stresses that developed in the component, the thermal and the remaining stresses too.

Key Words:

Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, Topology optimization, Modified failure criterion

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η πρώτη δημοσίευση σχετικά με την τρισδιάστατη τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί ότι έγινε τον Μάιο του 1980 από τον Ιάπωνα Dr. Hideo Kodama του Ινστιτούτου βιομηχανικών ερευνών της Ναγκόγια. Στην συγκεκριμένη δημοσίευση ο Kodama έκανε λόγο για ένα σύστημα ταχείας πρωτοτυποποίησης (rapid prototyping) το οποίο μπορούσε να δημιουργήσει σταθερά τρισδιάστατα αντικείμενα, χτισμένα πάνω σε στρώματα υλικού, μέσω του φωτοπολυμερισμού. Η πατέντα αυτή όμως, λόγω ενός προβλήματος χρηματοδότησης δεν δόθηκε ποτέ ολοκληρωμένη εντός προθεσμίας στην επιστημονική κοινότητα.

Ο Chuck Hull το 1986, συνιδρυτής της εταιρίας 3D Systems ανακάλυψε την στερεολιθογραφία μία μέθοδο που χρησιμοποιούσε υπεριώδες φώς για να δημιουργήσει ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Όλα ξεκίνησαν, όταν ο Hull εργαζόταν σε μία εταιρία που τοποθετούσε στρώσεις πλαστικού στις επιφάνειες επίπλων με την χρήση υπεριώδους φωτός. Η κατασκευαστική τους διαδικασία διαρκούσε σχεδόν 2 μήνες, με αποτέλεσμα ο Hull να είναι πολύ απογοητευμένος με την παραγωγικότητα. Έτσι, πρότεινε να εξεταστεί μία νέα μέθοδος κατασκευής με υπεριώδη ακρινοβολία που είχε ως βασική ιδέα την τοποθέτηση χιλιάδων στρώσεων πλαστικού η μία πάνω στην άλλη , δημιουργώντας έτσι ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Ακολούθησαν πειράματα και δοκιμές σε εργαστήριο της εταιρίας, ώσπου το πρώτο εμπορικό προϊόν με την μέθοδο της στερεολιθογραφίας δημιουργήθηκε το 1988. Αναφορικά με τα υλικά που χρησιμοποίησε , ονομάζονται φωτοπολυμερή και έχουν την δυνατότητα με την έκθεση τους σε υπεριώδες φώς να μετατρέπονται από υγρά σε στερεά, αυτός είναι και ο τρόπος που λειτουργεί η στερεολιθογραφία (SLA).

Το 1987 ο Carl Deckard , προπτυχιακός φοιτητής του Πανεπιστημίου του Τέξας, δημοσίευσε μία πατέντα ευρεσιτεχνίας μίας νέας μεθόδου 3D εκτύπωσης, την επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτινών λέιζερ (Selective Laser Sintering), η οποία εκδόθηκε το 1989.

Επίσης, το 1988 ο Scott Crump εφηύρε μία ακόμη μέθοδο 3D εκτύπωσης, την Μέθοδο Εναπόθεσης τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling). Η ιδέα και η υλοποίηση αυτής έγιναν στο σπίτι του Crumb όπου μετά από πολλά πειράματα και δοκιμές κατάφερε να φτιάξει την πρώτη αυτοματοποιημένη διαδικασίας εκτύπωσης τρισδιάστατων αντικειμένων, πάνω στην οποία βασίζεται η λειτουργία του 50% των 3D εκτυπωτών. Το 1992 ο Scott δημιούργησε τον πρώτο 3D FDM εκτυπωτή.

Στην Ευρώπη το 1989 η EOS χρησιμοποίησε τη μέθοδο SLS και πούλησε το πρώτο σύστημα (stereos) το 1990. Η ποιότητα του συστήματος για την τεχνολογία SLS είναι παγκοσμίως αναγνωρισμένη εως και σήμερα για μέταλλα και πλαστικά.

Επίσης το 1992 παράγεται η πρώτη στερεολιθογραφική μηχανή από την 3D Systems . Πρόκειται για μία μηχανή που αποτελείται από ένα υπεριώδες laser (UD) το οποίο στερεοποιεί το φωτοπολυμερές και κατασκευάσει πολύπλοκη δομή με διαστρωμάτωση (layer-by-layer).

Από το 2000 και μετά οι μέθοδοι 3D εκτύπωσης αποκτούν περισσότερη προβολή στο ευρύ κοινό. Το 2002 το πρώτο νεφρό από τρισδιάστατη εκτύπωση δημιουργείται και εκτελεί την ίδια λειτουργία με το ανθρώπινο νεφρό, αυτό είναι ένα τεράστιο κατόρθωμα στην επιστήμη της ιατρικής, καθώς ανοίγει τον δρόμο για την έρευνα και την δημιουργία και άλλων τεχνητών οργάνων. Όμως, από την ίδεα και την κατασκευή έως την χρήση σε ασθενείς θα μεσολαβήσουν 13 χρόνια.

Το 2004 με 2005 ιδρύεται η RepRap , από τον Dr.Adrian Bowyer στο Πανεπιστήμιο του Bath. Είναι ένα έργο ανοιχτού κώδικα για την εκτύπωση ενός 3D εκτυπωτή από έναν άλλο 3D εκτυπωτή.

To 2005 η ZCorp παρουσιάζει τον Spectrum Z510, πρώτο έγχρωμο 3D εκτυπωτή υψηλής ευκρίνειας.

Το 2008 είναι ακόμα ένα έτος ορόσημο στην ιατρική κοινότητα, καθώς εκτυπώθηκε και ενσωματώθηκε σε άνθρωπο το πρώτο ανθρώπινο προσθετικό μέλος με όλα τα μέρη εκτυπωμένα χωρίς να απαιτείται κάποια συναρμολόγηση.

Το 2009 οι FDM εκτυπωτές αποκτούν δημοσιότητα καθώς γίνονται διαθέσιμοι στο ευρύ κοινό και είναι πλέον προσιτοί και σε χαμηλή τιμή. Την ίδια χρονία η εταιρία Maker Bot Industries βγάζει για πρώτη φοράς προς πώληση τους 3D εκτυπωτές DIY kits ενθαρρύνοντας έτσι και ερασιτέχνες να ασχοληθούν με την τρισδιάστατη εκτύπωση.

Μετά τη λήξη της δεκαετίας, άρχισε πλέον η τρισδιάστατη εκτύπωση να είναι ευρέως γνωστή και προσιτή. Πολλοί περισσότεροι άνθρωποι επαγγελματίες και μη έδειχναν ενδιαφέρον και γνώριζαν τις βασικές αρχές. Η προσθετική κατασκευή αντικειμένων (Additive Manufacturing) ανοίγει πλέον νέους δρόμους στον βιομηχανικό κόσμο.

Το 2010 κατασκευάζεται το Urbee, το πρώτο οικολογικό αυτοκίνητο από 3D εκτύπωση. Το βασικό του κέλυφος ήταν όλοκληρο εκτυπωμένο από έναν 3D εκτυπωτή ανάλογου μεγέθους και το καύσιμο που χρησιμοποιούσε ήταν αιθανόλη. Από εκείνη την χρονιά και έπειτα η μέθοδος Προσθετικης Κατασκευής καταλαμβάνει όλο και περισσότερο χώρο στην αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς οι 3D εκτυπωτές χρησιμοποιούνταν από το κομμάτι του σχεδιασμού ενός νέου αυτοκινήτου, μέχρι και για την εκτύπωση ανταλλακτικών. Σύντομα θα φανεί η πραγματική αξία της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας από τις καινοτομίες που ακολούθησαν.

To 2011 κατασκευάστηκε το πρώτο αεροπλανάκι από 3D εκτυπωτή σε μόλις επτά ημέρες και με πολύ χαμηλό κόστος. Φυσικό το αεροπλάνο ήταν μη επανδρωμένο και οι πτέρυγες του όπως και όλα τα μέλη του είχαν τις ίδες προδιαγραφές με ένα κανονικό αεροσκάφος με στόχο τη βελτίωση της αεροδυναμικής. Επιπλεόν την ίδια χρονιά λαμβάνουν χώρα οι πρώτες εκτυπώσεις από 3D εκτυπωτές με χρυσό και ασήμι, αυτό ανοίγει νέους ορίζοντες στους σχεδιαστές για την οικονομικότερη κατασκευή κοσμημάτων.

To 2012 γίνεται η πρώτη εμφύτευση τρισδιάστατης εκτυπωμένης κάτων σιαγόνας σε ασθενή.

To 2014 ο ερευνητής του Πανεπιστημίου του Nottingham της Μεγάλης Βρετανίας, Richard Arm κατασκευάζει την πρώτη τεχνητή καρδιά από 3D εκτυπωτή. Έπειτα ενισχύθηκε η έρευνα της συνεισφοράς της τρισδιάστατης εκτύπωσης και της πειραματικής χειρουργικής στην Ιατρική επιστήμη.

Στο διάστημα αυτό οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές βελτιώνουν την λειτουργία τους συνέχεια. Γίνονται ταχύτεροι, ακριβέστεροι και παρέχουν πρόσβαση σε όλο και περισσότερα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ακόμη και στον τομέα της αρχιτεκτονικής το σκυρόδεμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τρισδιάστατη εκτύπωση είναι πλέον διαθέσιμο. Έτσι,το 2018 έγινε η πρώτη μετακόμιση οικογένειας σε σπίτι που προήλθε από τρισδιάστατη εκτύπωση. Το σπίτι είναι ασφαλές και κατοικήσιμο, και χρειάστηκαν δύο ημέρες για την εκτύπωσή του.

Πλέον το 2020 η μέθοδος προσθετικής κατασκευής προσφέρει απεριόριστες δυνατότητες εκτύπωσης ανταλλακτικών σε απαιτητικούς τομείς με σύνθετα υλικά προηγμένης τεχνολογίας. Είναι συμβατή με υλικά μεγάλης αντοχής , πολύ μεγάλης ή πολύ μικρής δυσκαμψίας δίνοντας έτσι πλέον την απαρχή μίας πραγματικά αδιαμφισβήτητης βιομηχανικής επανάστασης.

2.2 ΕΙΔΗ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Με το πέρασμα των χρόνων έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, που επεξεργάζονται διαφορετικά υλικά σε διαφορετικές μορφές και με διαφορετικές διεργασίες. Με σκοπό να κατηγοριοποιηθούν οι τεχνολογίες αυτές η Αμερικανική Κοινωνία Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials-ASTM F-45/Additive Manufacturing) δημιούργησε 7 βασικές κατηγορίες – πρότυπα, πάνω στις οποίες βασίζονται οι διάφορες μέθοδοι εως και σήμερα. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι παρακάτω:

Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerisation)

Υλικά με πίεση ακροφυσίου (Material Jetting)

Συνδετική με πίεση ακροφυσίου (Binder Jetting)

Εξώθηση Υλικού (Material Extrusion)

Σύντηξη στρώματος σκόνης (Power Bed Fusion)

Συγκόλληση Φύλλων (Sheet Lamination)

Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (Directed Energy Deposition)

2.2.1. Μέθοδος Φωτοπολυμερισμού (Vat Photopolymerisation).

Οι διαδικασίες φωτοπολυμερισμού δεξαμενής κάνουν χρήση υγρής ρητίνης για την τρισδιάστατη εκτύπωση εξαρτημάτων. Η υγρή ρητίνη που χρησιμοποιείται ανήκει στα φωτοευαίσθητα πολυμερή, τα οποία με την έκθεσή του σε ακτίνες UD ακτινοβολίας υποβάλονται σε χημική αντίδραση και στερεοποιούνται. Έτσι συγκεκριμένη ποσότητα πολυμερούς εκτίθεται σε ελεγχόμενη ακτινοβολία από λάμπες UD δημιουργώντας το εξάρτημα στρώση-στρώση.

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος σε αυτήν την κατηγορία είναι η Στερεολιθογραφία (SLA). Η Στερεολιθογραφία είναι η πρώτη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης που έγινε γνωστή σε ολόκληρο τον κόσμο το 1986. Στη συγκεκριμένη μέθοδο, χρησιμοποιείται μία δέσμη λέιζερ με ακτινοβολία UD συγκεκριμένου μήκους κύμματος που αντανακλά επιλεκτικά με βάση το σχέδιο που πρόκειται να εκτυπωθεί σε μία συγκεκριμένη ποσότητα υγρής ρητίνης που βρίσκεται πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης, βυθισμένη στην δεξαμενη με το υγρό. Μόλις η ρητίνη στερεοποιηθεί μέσω του πολυμερισμού και δημιουργηθεί η στρώση , η πλατφόρμα κινεί την δεξαμενή προς τα κάτω ανάλογα με την διατρομή που επιθυμεί ο σχεδιαστείς και ένας κύλινδρος απλώνει την ποσότητα της υγρής ρητίνης ώστε με τον ίδιο τρόπο να δημιουργηθεί η επόμενη στρώση.

Τα βασικά μέρη της συσκευής της Στερεολιθογραφίας είναι τα εξής:

Laser Υπεριώδους ακτινοβολίας και οπτικά συστήματα εστίασης της δέσμης

Καθρέπτες κατεύθυνσης της ακτίνας UD.

Δεξαμενή που περιέχει το φωτοπολυμεριζόμενο υγρό.

Σύστημα ευθυγράμμισης της επιφάνειας του υγρού (κύλινδρος).

Πλατφόρμα μετακίνησης εντός της δεξαμενής.



Εικόνα 1 Μέθοδος Vat Polymerisation , τεχνολογία Stereolithography [6]

Η Στερεολιθογραφία χρησιμοποιεί κατά βάση υγρά πολυμερή και πλαστικά (UV-curable Photopolymer resin) και παράγει προϊόντα εξαιρετικής ποιότητας και λεπτομέρειας. Θεωρείται γρήγορη η διαδικασία της εκτύπωσης, όμως με σχετικά υψηλό κόστος. Τα εξαρτήματα που παράγονται από SLA τεχνολογία έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή και μπορούν να επεξεργαστούν από CNC μηχανές.

2.2.2. Μέθοδος ψεκασμού του υλικού (Material Jetting)

Στην τεχνολογία αυτή τα υλικά ψεκάζονται με τη μορφή σταγονιδίων από ένα ή πολλαπλά ακροφύσια μικρής διαμέτρου που κινούνται οριζόντια στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Η διαδικασία είναι σχεδόν όμοια με την 2D εκτύπωση ενός κοινού εκτυπωτή inkjet με την μόνη διαφορά ότι ο 3D εκτυπωτής δημιουργεί πολλαπλές στρώσεις επάλληλα. Ο εκτυπωτής μπορεί να ψεκάζει το υλικό στην πλατφόρμα κατασκευής είτε με συνεχή τρόπο ή με την μέθοδο Drop On Demand (DOD). Μετά την δημιουργία κάθε στρώσης το υλικό στερεοποιείται με υπεριώδες φώς (UD). Τα μοντέλα που προκύπτουν από την συγκεκριμένη τεχνολογία μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης και συνήθως δεν χρειάζεται επιπλέον επεξεργασία. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν παίρνοντας μορφή σταγόνας και να έχουν ιξώδη φύση, τέτοια υλικά είναι τα πολυμερή και τα κεριά.

Η διαδικασία περιγράφεται με τα εξής βήματα:

1. Η κεφαλή εκτύπωσης τοποθετείται πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής.

- Σταγονίδια υλικού ψεκάζονται στην πλατφόρμα από το ακροφύσιο όπου χρειάζεται χρησιμοποιόντας θερμική ή πιεζοηλεκτρική μέθοδο.
- 3. Τα σταγονίδια του υλικού στερεοποιούνται και αποτελούν την πρώτη στρώση.
- Επαναλαμβάνεται η διαδικασία με επάλληλες στρώσεις εως ότου να ολοκληρωθεί το 3D μοντέλο.
- 5. Ολόκληρο πλέον το μοντέλο με την βοήθεια ακτινοβολίας UD πολυμερίζεται και στερεοποιείται. Σε αυτή τη φάση της εκτύπωσης γίνεται και η αφαίρετη τυχόν υποστήριξης που εξαρμόστηκε.



Εικόνα 2 Μέθοδος Material Jetting [6]

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα από ένα υλικά για την εκτύπωση ενός μοντέλου λόγω των πολλαπλών ακροφυσίων. Επομένως, μπορούν να δημιουργηθούν εξαρτήματα με ποικίλα χαρακτηριστικά και ιδιότητες από διαφορετικά υλικά. Επίσης τα εξαρτήματα που εκτυπώνονται δύναται να έχουν αυξημένη αντοχή σε θλιψη, εφελκυσμό καθώς και σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω της φύσης των υλικών που χρησιμοποιούνται. Από την άλλη πλευρά αυτή η τεχνολογία χρειάζεται περισσότερο χρόνο από κάποιες άλλες και επίσης συχνά χρειάζονται επιπλέον στηρίξης κατά την εκτύπωση.

2.2.3. Συνδετική Μέθοδος με πίεση ακροφυσίου (Binder Jetting)

Η τεχνολογία της Συνδετικής με πίεση ακροφυσίου είναι μια διαδικασία που ονομάζεται αλλιώς "Three Dimensional Printing", "3DP"," Powder bed and inkjet head 3D printing" κτλ. Η συγκεκριμένη διαδικασία απαιτεί την χρήση δύο διαφορετικών υλικών,το υλικό σε μορφή

σκόνης από το οποίο αποτελείται κατά βάση το εξάρτημα που είναι προς εκτύπωση και ένα συνδετικό υλικό σε μορφή υγρού, που σκοπό έχει αντιδρώντας με την σκόνη να δημιουργήσει μία στερεή πλέον στρώση. Στη συνέχεια η πλαρφόρμα κατασκευής κινείται προς τα κάνω και η διαδικασία επαναλαμβάνεται εως ότου να εκτυπωθεί ολόκληρο το μοντέλο. Αντιλαμβανόμαστε , πως με την καθοδική κίνηση της πλατφόρμας κατασκευής το τελικό εξάρτημα θα βρίσκεται μέσα σε μία δεξαμενή σκόνης. Η παραπάνω διαπίστωση έχει και θετικά και αρνητικά. Το κύριο πλεονέκτημα της ύπαρξης της σκόνης κατά την εκτύπωση είναι ότι αποτελεί στήριξη για το εξάρτημα και δεν χρειάζονται επιπλέον στηρίγματα, από την άλλη πλευρά μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι απαιτείται περεταίρω επεξεργασία για να απορροφηθεί η εναπομείνουσα σκόνη και να καθαριστεί το εξάρτημα, αυτό αυξάνει τον χρόνο κατασκευής και δίνει επιπλέον κόστος.

Η διαδικασία περιγράφεται με τα εξής βήματα:

- 1. Το υλικό σε μορφή κόνεως (σκόνης) απλώνεται με την χρήση ενός κυλίνδρου επάνω στην πλατφόρμα κατασκευής.
- Το ακροφύσιο εναποθέτει το συνδετικό υλικό σε υγρή μορφή επάνω στην σκόνη στα σημεία που απαιτείται δίνοντας το ακριβές σχήμα του μοντέλου που είναι προς εκτύπωση.
- 3. Η πλατφόρμα χαμηλώνει τόσο όσο έχει οριστεί το πάχος της κάθε στρώσης.
- Νέα στρώση σκόνης απλώνεται πάνω από την προηγούμενη με την χρήση κυλίνδρου για ομοιομορφία. Η σκόνη κολλάει εκεί που υπάρχει συνδετικό υλικό σχηματίζοντας το επιθυμητό σχήμα ξανά.
- 5. Η περίσσεια σκόνη παραμένει να περιβάλλει το εξάρτημα και έχει στηρικτικό ρόλο πλεον.
- Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται εως ότου να σχηματιστεί ολόκληρο το μοντέλο.



Εικόνα 3 Μέθοδος Binder Jetting [7]

Σε αυτή τη μέθοδο υπάρχει μεγαλύτερο εύρος υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς είναι συμβατό οποιοδήποτε υλικό είναι σε μορφή σκόνης όπως μέταλλα, πολυμερή,

κεραμικά κτλ. Επίσης υπάρχει μεγάλη ποικιλία χρωμάτων και αυξημένη αντοχή λόγω της φύσης των υλικών που δύναται να χρησιμοποιηθούν σε σχέση με την μέθοδο του Material Jetting. Αντίθετα, το γεγονός ότι σε κάθε στρώση απλώνεται ίδια ποσότητα σκόνης και όχι μόνο εκείνη που χρειάζεται καθαρά για τον σχηματισμό του εξαρτήματος μπορεί να καταστήσει την καθυστέρηση της διαδικασίας. Τέλος, τα εξαρτήματα που εκτυπώνονται με την μέθοδο Binder Jetting δεν είναι πολύ υψηλής ποιότητας και δεν έχουν λείες επιφάνειες.

2.2.4. Μέθοδος εξώθησης του υλικού (Material Extrusion)

Η Εξώθηση υλικού είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης έως και σήμερα, αυτό συμβαίνει καθώς είναι πλήρως προσιτή στον γενικό πληθυσμό με μία καλή σχέση ποιότητας και τιμής. Δίνει την ευκαιρία σε ερασιτέχνες με γενικές γνώσεις πάνω στους τρισδιάστατους εκτυπωτές να χρησιμοποιήσουν και να εκτυπώσουν τα μοντέλα τους. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην επιλεκτική εναπόθεση υλικού δημιουργώντας αλλεπάλληλες στρώσεις δίνοντας το τελικό ολοκληρωμένο σχήμα στο εξάρτημα. Η πιο γνωστή τεχνολογία που βασίζεται σε αυτήν την μέθοδο είναι η Μοντελοποίηση εναπόθεσης τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling-FDM) κάποιες αναφέρεται και ως Κατασκευή τηγμένου νήματος (Fused Filament Fabrication- FFF).

Η βασική αρχή λειτουργίας της FDM έχει ως εξής:

Το υλικό σε νηματώδη μορφή ξετυλίγεται από ένα καρούλι τροφοδοτώντας συνεχόμενα την μηχανή. Στη συνέχεια το νήμα τήκεται σε ειδικά διαμορφωμένο θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας (ανάλογα το υλικό που χρησιμοποιείται) και με μία πίεση που ασκείται στο ακροφύσιο γίνεται η εξώθησή του στην πλατφόρμα κατασκευής. Το ακροφύσιο έχει την ικανότητα να κινείται και στους 3 άξονες (x-y-z) και να σχεδιάζει με το τηγμένο υλικό απευθείας την μορφή του μοντέλου που θέλουμε. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι το υλικό κατά την εξώθηση του είναι σε ημίρρευστη κατάσταση και για αυτόν τον λόγο η πλατφόρμα κατασκευής είναι θερμαινόμενη, ώστε να αποφευχθούν τυχόν αστοχίες ή θραύσεις του υλικού. Το υλικό με την τοποθέτησή του στην πλατφόρμα κατασκευής ψύχεται ομαλά καθώς η θερμοκρασία της βάσης είναι σαφώς χαμηλότερη από αυτήν του υλικού αλλά και λόγω των ανεμιστήρων που υπάρχουν για την τροφοδότηση ψυχρού αέρα. Το ακροφύσιο απενεργοποιεί και ενεργοποιεί την εξώθηση ανάμεσα σε κάθε στρώση, ώστε να κατέβει η πλατφόρμα εκτύπωσης και να τοποθετηθεί η επόμενη στρώση. Συχνά στην FDM χρησιμοποιούνται και δομές στήριξης καθώς σε πολύπλοκες γεωμετρίες είναι απαραίτητες. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται εως ότου εκτυπωθεί ολόκληρο το εξάρτημα.



Εικόνα 4 Μέθοδος Material Extrusion, τεχνολογία FDM [8]

Αυτή η μέθοδος είναι οικονομικότερη από τις περισσότερες και χρησιμοποιεί κατά βάση σαν υλικά εκτύπωσης, πλαστικά και πολυμερή που βρίσκονται σε μορφή νήματος. Η ποικιλία χρωμάτων είναι τεράστια καθώς μιλάμε για νήματα πλαστικού υλικού κυρίως. Επίσης σαφώς και η ποιότητα του τελικού αποτελέσματος δεν είναι η καλύτερη δυνατή, καθώς οι στρώσεις είναι εμφανής στο τελικό προϊόν, όμως είναι μία τεχνολογία οικονομική, κατανοητή σε κάθε ανειδίκευτο χρήστη και είναι προσιτή σε όλους.

2.2.5. Μεθοδος Σύντηξης στρώματος σκόνης (Power Bed Fusion)

Στην κατηγορία της Σύντηξης στρώματος σκόνης ανήκουν οι μέθοδοι "Selective Laser Sintering", "Selective Laser Melting", "Direct Metal Laser Sintering", "Selective Heat Sintering" και "Electron Beam Melting". Η "Selective Laser Sintering" ήταν μία από τις πρώτες τεχνολογίες που κυκλοφόρησαν ενώ οι υπόλοιπες βασίστηκαν πάνω σε αυτήν και με διάφορες τροποποιήσεις εδραιώθηκαν. Όλες οι τεχνολογίες έχουν κάποια βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας που προέρχονται από την αρχική ιδέα της μεθόδου Power Bed Fusion. Υπάρχουν κατηγορίες πηγών ενέργειας, η τήξη με λέιζερ, η σύντηξη με δέσμη ηλεκτρονίων και η τήξη με θερμότητα. Αυτές οι πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται ώστε να θερμάνουν και να λιώσουν τα σωματίδια του υλικού που είναι σε σκόνη (συνήθως μέταλλα αλλά και πλαστικά), στερεοποιώντας και συντήκωντάς τα επιλεκτικά με βάση το σχέδιο του μοντέλου που πρόκειται να εκτυπωθεί.

Ένας εκτυπωτής που λειτουργεί με βάση αυτήν την μέθοδο αποτελείται από δύο θαλάμους, τον θάλαμο κατασκευής και τον θάλαμο που περιέχει το υλικό σε μορφή σκόνης. Ένας κύλινδρος και μια λεπίδα (εάν χρειάζεται) στρώνουν το υλικό από τον θάλαμο σκόνης επάνω στον θάλαμο κατασκευής δίνοντας στην στρώση το επιθυμητό πάχος και λειαίνοντας την επιφάνεια όσο καλύτερα γίνεται. Στη συνέχεια η πηγή ενέργειας με όποια μορφή υπάρχει στο μηχάνημα, λιώνει και συντήκει τα σωματίδια της σκόνης σχηματίζοντας με βάση το σχέδιο την στρώση του εξαρτήματος. Στη συνέχεια οι δύο θάλαμοι κινούνται ταυτόχρονα η πλαρφόρμα κατασκευής που βρίσκεται στον θάλαμο κατασκευής κινείται καθοδικά και ο θάλαμος που περιέχει την σκόνη ανοδικά. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται



εως ότου ολοκληρωθεί το 3D εξάρτημα. Η περίσσεια σκόνης και εδώ λειτουργεί υποστηρικτικά για το εξάρτημα, έτσι δεν χρειάζεται επιπλέον στήριξη.

Εικόνα 5 Μέθοδος Power Bed Fusion. [6]

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πολλά υποσχόμενη για εφαρμογές στο μέλλον, καθώς πλέον μιλάμε για μια διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιεί κατά βάση σαν υλικά μέταλλα, κράματα αλουμινίου, τιτανίου, σύνθεση αυτών κτλ. Η μορφή του υλικού σε σκόνη μας δίνει την δυνατότητα να παράγουμε όσο ισχυρές μηχανικές ιδιότητες επιθυμούμε, ανάλογα με την πυκνότητα του υλικού. Μπορούμε να πετύχουμε εξαρτήματα ανάλογα αυτών που δημιουργούνται παραδοσιακές κατεργασίες και ακόμη καλύτερα υπό τις σωστές προδιαγραφές εκτύπωσης. Αρνητικά αυτής είναι η υψηλή ποσότητα ενέργειας που χρειάζεται καθώς και οι μεγάλοι χρόνοι διεργασιών, όμως αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για μαζική παραγωγή εξαρτημάτων, καθώς μέσα στον θάλαμο κατασκευής μπορεί να υπάρχουν περισσότερα από ένα εξαρτήματα ταυτόχρονα.

2.2.6. Μέθοδος Συγκόλλησης φύλλων υλικού (Sheet Lamination

Η τεχνολογία Συγκόλλησης φύλλων υλικού βασίζεται σε δύο μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης αυτές είναι η συγκόλληση υπερήχων (Ultrasonic Additive Manufacturing-UAM) (Laminated Object Manufacturing-LOM). Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί φύλλα ή λωρίδες από μέταλλο των οποίων τις στρώσεις ενώνονται μεταξύ τους μέσω υπερήχων, αμέσως μετά την συγκόλληση των στρώσεων απαιτούνται πρόσθετες διεργασίες από CNC μηχανές με σκοπό την αφαίρεση του μη δεσμευμένου μετάλλου. Η δεύτερη μέθοδος LOM λειτουργεί τήκωντας ή πλαστικοποιώντας φύλλα πλαστικού ή χαρτιού και ενώνοντάς τα με την χρήση πίεσης ή θερμοκρασίας. Γενικά η τεχνολογία συγκόλλησης φύλλων υλικού κυρίως μετάλλων και πλαστικών όπου μπορούν να τυλιχτούν σε ρολό απαιτεί χαμηλή

ενέργεια για να πραγματοποιηθεί, καθώς δεν επιθυμούμε την τήξη των στρώσεων κατά την τοποθέτηση.

Η διαδικασία της μεθόδου έχει ως εξής:

- Αρχικά το υλικό τοποθετείται επάνω στην πλατφόρμα κατασκευής στην θέση κοπής.
- Η στρώση (φύλλο) κάθε υλικού συγκολλάται με την προηγούμενη με την κόλλα που χρησιμοποιούμε στην εκάστοτε περίπτωση.
- Μετά την τοποθέτηση κάθε στρώσης το δοκίμιο κόβεται στο απαιτούμενο σχήμα, είτε με laser είτε με χρήση μαχαιριού.
- 4. Τα βήματα 2 και 3 μπορούν να αντιστραφούν και το σχήμα του εξαρτήματος που βρίσκεται προς εκτύπωση να δωθεί πριν γίνει η συγκόλληση του κάθε φύλλου στην πλατφόρμα εκτύπωσης.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο.



Εικόνα 6 Μέθοδος Sheet Lamination, τεχνολογία LOM. [9]

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας είναι η ταχύτητα με την οποία ολοκληρώνεται η εκτύπωση, καθώς και τα χαμηλού κόστους εύχρηστα και προσιτά υλικά που χρησιμοποιεί. Επίσης δεν απαιτούνται χημικές κατεργασίες κατά την διάρκεια αυτής της μεθόδου και η πολυπλοκότητα του κομματιού δεν αποτελεί πρόβλημα. Αντίθετα, ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το αποτέλεσμα είναι λιγότερο ποιοτικό και ακριβές από άλλες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς και ότι συχνά απαιτούνται περεταίρω διεργασίες μετά την εκτύπωση, ώστε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

2.2.7. Μέθοδος Κατευθυνόμενης Εναπόθεσης (Directed Energy Deposition)

Η μέθοδος Κατευθυνόμενης Εναπόθεσης Ενέργειας (Directed Energy Deposition) βασίζεται στην κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων μέσω της τήξης του υλικού κατά την εναπόθεσή του. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί υλικά είτε σε μορφή σύρματος είτε σε μορφή σκόνης όπως είναι τα πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα υλικά μεταλλικής βάσης. Η τεχνολογία συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως Κατευθυνόμενη τεχνολογία εναπόθεσης μετάλλου (Directed Metal Deposition Technology) καθώς κατά βάση χρησιμοποιεί μεταλλικά υλικά σε σκόνη.Η DED διεργασία διαφέρει από τις υπόλοιπες τεχνικές προσθετικής κατασκευής καθώς το υλικό τήκεται κατά την εναπόθεσή του επάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης και όχι μετά την τοποθέτηση όπως στην Power Bed Fusion. Η τήξη του υλικού γίνεται συνήθως με χρήση laser ή δέσμης ηλεκτρονίων και η δημιουργία του τρισδιάστατου αντικειμένου γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της μεθόδου Εξώθησης Υλικού.

Μία τυπική μηχανή τρισδιάτατης εκτύπωσης βασισμένη στην DED μέθοδο αποτελείται από ένα ακροφύσιο τοποθετημένο ώστε να κινείται με έναν βραχίονα σε πολλαπλούς άξονες επάνω από την πλατφόρμα εκτύπωσης δίνοντας το σχήμα του εξαρτήματος, και από ένα λέιζερ ή δέσμη ηλεκτρονίων το οποίο έρχεται σε επαφή με το υλικό που εξέρχεται από το ακροφύσιο και το λιώνει κατά την εναπόθεση. Σε αυτό το σημείο δεν μπορούμε να παραλείψουμε ότι η συγκεκριμένη μέθοδος έχει δυνατότητα να τοποθετεί το υλικό σε πολλαπλές γωνίες καθώς το ακροφύσιο κινείται σε 4 ή 5 άξονες κατά την εκτύπωση, αυτό αφήνει ελευθερία σχεδιασμού εξαρτημάτων και η πολυπλοκότητα δεν αποτελεί πρόβλημα.



Εικόνα 7 Μέθοδος Directed Energy Deposition, τεχνολογία δέσμης ηλεκτρονίων και υλικό σε μορφή σύρματος. [6]

Διεργασίες βασισμένες σε αυτήν την μέθοδο χρησιμοποιούνται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς από εργαστήρια και οργανισμούς με σκοπό την ανάπτυξη νέων κραμάτων συνθέτων υλικών. Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ταχύτητά της και η ποιότητα σε μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων που εκτυπώνονται. Επίσης δεν υπάρχει σπατάλη επιπλέον υλικού και ευρύ φάσμα υλικών συμβατά με την συγκεκριμένη μέθοδο. Αντίθετα ένα από τα βασικά της μειονεκτήματα είναι ότι η ποιότητα του τελικού αντικειμένου μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται και να χρειάζονται επιπλέον διεργασίες επιδιόρθωσης. Εν γένει η χρήση της συγκεκριμένης

μεθόδου σήμερα έχει επιδιορθωτικό χαρακτήρα και χρησιμοποιείται για αντικατάσταση και επιδιόρθωση ήδη υπαρχόντων ελαττωματικών εξαρτημάτων με εναπόθεση υλικού απευθείας επάνω στο σημείο του εξαρτήματος που υπάρχει η βλάβη. Η λειτουργία της και η εξέλιξη της βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο.

2.3. ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία συνεισφέρει με την δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου εξομοίωσης τάσεων και παραμορφώσεων στατικής ανάλυσης στοιχείων μηχανών καθώς και τοπολογική βελτιστοποίηση της γεωμετρίας τους σε σχέση με την δομική τους ακεραιότητα. Επίσης στην εργασία διατυπώθηκε πρωτολείως ένα τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας βασισμένο στην διαδικασία παραγωγής τεμαχίων με την μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης SLM και στο αρχικό κριτήριο θεωρίας έργου παραμόρφωσης για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητάς τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΩΡΙΑ

3.1. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ SLM

Η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής SLM βασίζεται στην μέθοδο Σύντηξης στρώματος σκόνης (Power Bed Fusion) και αναπτύχθηκε με σκοπό την τήξη και στερεοποίηση υλικού σε σκόνη με την χρήση laser υψηλής συχνότητας ισχύος. Όλα δείχνουν ότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η χρυσή τομή στο δίλημμα που υπάρχει ανάμεσα στην ποιότητα και στην ποσότητα στην βιομηχανία μαζικής κατασκευής προϊόντων. Δεδομένου ότι, στις κατασκευαστικές βιομηχανίες σήμερα σημειώνονται σημαντικές αλλαγές λόγω της αύξησης της ψηφιοποίησης δεδομένων στην παραγωγή , μπορούμε πλέον να μιλήσουμε με βεβαιότητα για μία βιομηχανική επανάσταση που προκύπτει από την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτές οι αλλαγές που έχουν ήδη γίνει με την εισαγωγή της ψηφιοποίησης στην βιομηχανία, πρόκειται να είναι τόσο σημαντικές όσο εκείνες που προέκυψαν στο παρελθόν με την εισαγωγή της μηχανοποίησης και της μαζικής παραγωγής στον κλάδο της κατασκευής. Εν γένει προκειμένου να λειτουργήσει μία καινούρια

κατασκευή με χρήση δεδομένων ψηφιοποίησης απαιτούνται μέθοδοι που εξασφαλίζουν , την ταχύτητα, την ποιότητα, το βιώσιμο κόστος και την ευελιξία του προϊόντος, η μέθοδος SLM δείχνει να πληρεί τις προϋποθέσεις.

Με την τεχνολογία SLM, η οποία βασίζεται σε κατασκευή εξαρτημάτων με στρώσεις υλικού διαδοχικά η μία επάνω στην άλλη, μπορούν να κατασκευαστούν πολύπλοκες γεωμετρίες εξαρτημάτων και εργαλείων χωρίς στηρίξεις ή καλούπια. Το σχέδιο στο 3D CAD μοντέλο χωρίζεται κατάλληλα σε στρώσεις ώστε να εξυπηρετεί τη δέσμη laser να αφήσει τα ίχνη της και να σχηματίσει το εξάρτημα κατά την διάρκεια της εκτύπωσης. Αρχικά το υλικό σε μορφή σκόνης εναποτίθεται στην πλατφόρμα εκτύπωσης ως λεπτό στρώμα (συνήθως 30-50μm) , το laser λιώνει επιλεκτικά το υλικό ανάλογα με το σχήμα της στρώσεις με βάση το μοντέλο CAD και στην συνέχεια το υλικά στερεοποιείται μετά την τήξη του. Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης στρώσης η πλατφόρμα εκτύπωσης κατεβαίνει τόσο όσο είναι και το προκαθορισμένο πάχος της στρώσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθεί το εξάρτημα. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης υπάρχει ελευθερία στον σχεδιασμό του εξαρτήματος αλλά και στην δομή του κατά την εκτύπωση, καθώς μπορούν να κατασκευαστούν εξαρτήματα χωρίς πλέγμα στο εσωτερικό τους με 100% πυκνότητα δηλαδή, αλλά και εξαρτήματα με αραιό πλέγμα ή κενό στο εσωτερικό τους.



Εικόνα 8 Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας SLM[12].

Η τεχνολογία SLM παρατηρείται να έχει μια εντελώς διαφορετική σχέση κόστους , μεγέθους παρτίδας εξαρτημάτων και πολυπλοκότητας στην γεωμετρία σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Αρχικά δεν υπάρχει αύξηση στο κόστος εάν επιθυμούμε να παράξουμε μία μικρή παρτίδα προϊόντων σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξατομικευμένη εξυπηρέτηση του πελάτη και την τροποποίηση της κατασκευής χωρίς επιπλέον κόστος. Το ίδιο ισχύει και στην σχέση κόστους και γεωμετρίας του εξαρτήματος . Στην μέθοδο SLM το κόστος δεν αυξάνεται αν το εξάρτημα έχει υψηλή περιπλοκότητα γεωμετρίας, πράγμα που στις συμβατικές μεθόδους κατασκευής σαφώς δεν είναι εφικτό διότι υπάρχουν επιπλέον

διεργασίες για την ολοκλήρωση του προϊόντος οι οποίες επιφέρουν κόστη ανάλογα της περιπλοκότητας του εξαρτήματος.



Εικόνα 9 Σύγκριση τεχνολογίας SLM με συμβατικές μεθόδους [10].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των παραπάνω είναι ότι στις συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής, όπως είναι η χύτευση , το κόστος του κάθε κομματιού εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της παρτίδας που πρόκειται να παραχθεί. Με βάση την Οικονομία κλίμακας (economy of scale) όσο αυξάνεται το μέγεθος της παρτίδας που πρέπει να παραχθεί τόσο μειώνεται το κόστος κάθε κομματιού, και αυτό ισχύει σε όλα τα προϊόντα. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την εξατομίκευση κομματιών και κατασκευή μικρών παρτίδων προϊόντων χωρίς περιορισμούς στην ποσότητα και χωρίς αύξηση του κόστους. Επίσης καθιστά την σχέση κόστους και πολυπλοκότητας γεωμετρίας σχεδόν ανεξάρτητη, καθώς ένα πολύπλοκο σχηματικά εξάρτημα δεν αυξάνει το κόστος κατασκευής. Ακόμα, σε μερικές περιπτώσεις με πολύπλοκες γεωμετρίες το κόστος κατασκευής μπορεί και να μειωθεί καθώς υπάρχει η δυνατότητα βελτιστοποίησης του εξαρτήματος στον σχεδιασμό με σκοπό τη μείωση βάρους και κατ' επέκτασην μείωση υλικού που χρησιμοποιείται. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας (Topology Optimization) είναι μια προσέγγιση κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ενός προϊόντος που σκοπό έχει να μειώσει στο ελάχιστο το βάρος και τον όγκο του εξαρτήματος που πρόκειται να εκτυπωθεί λαμβάνοντας υπόψιν τις εκάστοτε συνθήκες φόρτισης και τις γενικότερες προδιαγραφές.

3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ SLM

3.2.1. Μέρη SLM μηχανής.

Η SLM είναι μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής που κυριαρχεί στην εκτύπωση μεταλλικών εξαρτημάτων από υλικά σε σκόνη. Λειτουργεί με βάση την επιλεκτική τήξη του υλικού με δέσμη laser, και τα μέρη της SLM μηχανής φαίνονται παρακάτω.





Ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής SLM αποτελείται από:

- Laser
- Καθρέπτες ανακατεύθυνσης δέσμης laser ανάλογα με την γεωμετρία που βρίσκεται προς εκτύπωση (Mirror scanner).
- Κύλινδρος για ομαλή κατανομή του υλικού σε σκόνη επάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης (Roller/Scraper).
- Δοχείο ανατροφοδότησης υλικού (Feed container).
- Πλατφόρμα εκτύπωσης (base plate/print bed).
- Κύλινδρος στήριξης πλατφόρμας (build cylinder).
- Δοχείο υπερχείλισης (overflow container).

Μετά την εκτύπωση προκύπτουν εξαρτήματα έτοιμα για χρήση χωρίς να απαιτούνται επιπλέον διεργασίες ή διορθώσεις. Είναι εφικτό να παραχθούν μεταλλικά εξαρτήματα υψηλής αντοχής με μηχανικές ιδιότητες ικανές να συγκριθούν με αυτές των εξαρτημάτων που προέρχονται από συμβατικές διεργασίες. Κατά την διάρκεια της εκτύπωσης το σημαντικότερο σημείο η σύντομη αλληλεπίδραση που έχει το υλικό σε σκόνη με την πλατφόρμα εκτύπωσης και την δέσμη laser. Όταν το laser αντανακλά επάνω στο υλικό δημιουργούνται υψηλές θερμοκρασίες τήκωντας το αστραπιαία και σχεδόν ταυτόχρονα, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας της πλατφόρμας εκτύπωσης το υλικό στερεοποιείται στο σημείο που σχημάτισε το laser. Αυτή η γρήγορη μετατροπή φάσης του υλικού από σκόνη σε υγρό(τήξη) και έπειτα σε στερεό οφείλεται στην υψηλή ταχύτητα της δέσμης του laser.

3.2.2. Διαδικασίες μεθόδου SLM

Αύξηση Παραγωγικότητας SLM

Οι υπερσύγχρονες μηχανές SLM είναι συνήθως εξοπλισμένες με πηγή λέιζερ 400W και με διαθέσιμο κατασκευαστικό χώρο 250X250X300 mm³.Υπάρχουν πολλοί τρόποι να αυξηθεί η παραγωγικότητα μίας μηχανής SLM κυρίως όσο αφορά τον ρυθμό κατασκεύης. Η παραγωγικότητα μπορεί να αυξηθεί με τους τρόπους που ακολουθούν παρακάτω:

Αυξάνοντας την ισχύς του laser, αυξάνεται και η ταχύτητα που σκανάρει την επιφάνεια. Χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο πάχος στρώσης σκόνης στην πλάκα που χτίζουμε το υλικό και μεγαλύτερο πάχος στην δέσμη laser έχουμε μεγαλύτερη ταχύτητα εκτύπωσης του υλικού.

Αυξάνοντας τον ρυθμό παραγωγής, συνεπώς θα παράγονται περισσότερα κομμάτια ανά διεργασία .

Με τον παραλληλισμό των εργασιών, δηλαδή με τη χρήση πολλαπλών δεσμών laser και laser-scanning systems σε ένα μηχάνημα. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί είτε με τον πολλαπλασιασμό της περιοχής εκτύπωσης του μηχανήματος, είτε τον πολλαπλασιασμό των laser που χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα μηχανών SLM οι οποίες κατασκευάστηκαν με σκοπό να αυξήσουν την παραγωγικότητά τους είναι:

Η SLM machine X-line 1000R της Concept Lasers που παρουσιάστηκε στο Euromold (2012). Η συγκεκριμένη μηχανή αποτελείται από έναν μεγάλο χώρο κατασκευής (630 × 400 × 500 mm³) που τον επεξεργάζεται ένα σύστημα σάρωσης με laser το οποίο κινείται πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής. Αυτή η μηχανή είναι εξοπλισμένη με 2 θαλάμους επεξεργασίας οι οποίοι είναι περιστρεφόμενοι όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η μηχανή λειτουργεί με παραλληλισμό εργασιών και κατ' επέκταση αύξηση του ρυθμού παραγωγής της μηχανής. Όσο στον ένα θάλαμο λαμβάνει χώρα η εκτύπωση του εξαρτήματος, στον δεύτερο θάλαμο γίνεται προετοιμασία για την έναρξη της επόμενη εκτύπωσης.

Άλλη μία μηχανή με αυξημένο όγκο κατασκευής είναι η SLM500HL από την SLM Solutions. Ο χώρος κατασκευής της είναι 500 × 280 × 335 mm³ και έχει την ιδιαιτερότητα ο θάλαμος επεξεργασίας της να μετακινείται μέσα και έξω από την μηχανή, δίνοντας την δυνατότητα στον χρήστη να πραγματοποιεί οποιαδήποτε προετοιμασία ή παρέμβαση στον θάλαμο εκτύπωσης έξω από την μηχανή. Η SLM500HL μπορεί να εξοπλιστεί με έως και 4 δέσμες λέιζερ που θα κάνουν την εκτύπωση ταυτόχρονα και με αυξημένη ταχύτητα. Στην συγκεκριμένη μηχανή λόγων των πολλαπλών δεσμών laser, μπορεί να εφαρμοστεί και η λεγόμενη Skin-core μέθοδος. Κατά την Skin-core μέθοδο μία δέσμη laser με μικρό πάχος(dS=80μm) και ισχύ έως και 400W χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κατασκευή του εξωτερικού σχήματος του εξαρτήματος, ενώ μία δέσμη με μεγαλύτερο πάχος (dS=700μm) και ισχύ εως και 1kW χρησιμοποιείται για τον εσωτερικό πυρήνα του εξαρτήματος , αυξάνοντας ταυτόχρονα τον χρόνο εκτύπωσης.



Εικόνα 11 Μηχανές SLM με αυξημένη παραγωγικότητα [10]

Παραλληλισμός σε μηχανές SLM

Στα πλαίσια του Cluster of Excellence σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε μία μηχανή SLM πολλαπλής σάρωσης και εκτύπωσης που χρησιμοποιεί 2 σαρωτές και 2 laser. Τα δύο αυτά συστήματα μπορούν είτε να λειτουργούν μεμονωμένα δουλεύοντας σε διαφορετικά πεδία κατασκευής ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, είτε να δουλεύουν πάνω στο ίδιο εξάρτημα ταυτόχρονα όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 12 Παραλληλισμός σε μηχανή SLM. [12]

Strategy 1: Parallel processing of	 f two scanning fields Scanning strategy 1: Parallel processing of two scanning fields → Increase in productivity → Increase in build volume 	
Strategy 2: Parallel processing of one scanning field		
Scan field 2	 Scanning strategy 2: Processing one part simultaneously with two laser beams → New laser process strategies 	



Στην **Εικόνα 13** παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να λειτουργήσει μία μηχανή SLM σε παραλληλισμό.

1ος τρόπος σάρωσης: Τα δύο πεδία σάρωσης δημιουργούνται διαδοχικά το ένα δίπλα στο άλλο, με μία ελαφριά κοινή επικάλυψη της δέσμης laser. Αυτή η διάταξη των παράλληλων διεργασιών δίνει την δυνατότητα αυξημένης παραγωγής σε λιγότερο χρόνο.

2^{ος} τρόπος σάρωσης: Τα δύο πεδία σάρωσης ασκούνται ταυτόχρονα στο ίδιο εξάρτημα σε έναν χώρο κατασκευής. Αυτό δίνει τη δυνατότητα αύξησης της παραγωγής και μείωση του χρόνου κατασκευής.

Επιπλέον, αρκετές ακόμα στρατηγικές σάρωσης με χρήση 2 συστημάτων σάρωσης μπορούν να αναπτυχθούν. Όπως για παράδειγμα, η μία δέσμη λέιζερ να προετοιμάζει το υλικό ψύχοντας το, και στη συνέχεια η δεύτερη δέσμη λέιζερ να λιώνει την σκόνη τοπικά.

Αξιολόγηση μεθόδου SLM

Για την σύγκριση και την αξιολόγηση διαφόρων μηχανών SLM δεν αρκεί να ληφθεί υπόψιν μόνο το κόστος επένδυσης σε αυτήν αλλά και το κόστος λειτουργίας της καθ' όλη την διάρκεια ζωής της. Αρχικά λοιπόν για να βρεθεί η κατάλληλη μηχανή μία πρώτη προσέγγιση είναι να υπολογιστεί το κόστος ζωής της, το οποίο περιλαμβάνει το κόστος αγοράς της μηχανής, το ενεργειακό κόστος και το κόστος που απαιτείται για συντήρηση. Συνήθως για τον υπολογισμό του κόστους σε ένα τυπικό μοντέλο μηχανής SLM χρησιμοποιείται η ισχύς που καταναλώνει η μηχανή κατά την λειτουργεία της ανά ώρα. Στην τελική τιμή του κόστους εκτός από τα παραπάνω περιλαμβάνεται και τυχόν επιπλέον κόστη ή χρόνος που απαιτούνται για την προετοιμασία και επίβλεψη της μηχανής κατά την εκτύπωση.

Αναλυτικότερα λοιπόν, σε μία ανάλυση κόστους ζωής μιας μηχανής SLM συμπεριλαμβάνονται ποσοστιαία τα επιμέρους κόστη, 73% του συνολικού κόστους ανήκει στο κόστος αγοράς της μηχανής, 11% στο κόστος υλικού που χρησιμοποιείται, 7% στο ενεργειακό κόστος που απαιτείται κατά την λειτουργία της και στις προπαρασκευαστικές και διαδικασίες προετοιμασίας αναλογεί το 4%. Σε κανένα μοντέλο κόστους μηχανής δεν αναφέρεται ξεχωριστά η επίδραση των επιμέρους χαρακτηριστικών της μηχανής, όπως η ισχύς του laser, το μέγεθος του κατασκευαστικού χώρου κτλ για αυτό και τα παραπάνω συγκεκριμένα κόστη δεν έχουν υπολογιστεί αναλυτικά. Ένα μοντέλο ανάλυσης κόστους χρησιμοποιείται για σύγκριση ανάμεσα σε μηχανές SLM και όχι ανάμεσα σε μηχανές διαφορετικού τύπου. Όμως για να είμαστε πιο ακριβής παρακάτω ακολουθεί μια λεπτομερέστερη ανάλυση που έγινε στα πλαίσια του Cluster of Excellence Integrative Production Technology for High-Wage Countries, Aachen University ώστε να δούμε πως τα χαρακτηριστικά μίας μηχανής επηρεάζουν το συνολικό κόστος. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται πως το κόστος του υλικού σε σκόνη αλλάζει σε συνάρτηση με την ισχύ που έχει το laser της μηχανής.



Εικόνα 14 Η επιρροή της ισχύος του λέιζερ στο κόστος ενός 3d-printed κομματιού με την μέθοδο SLM[12]

Στην παραπάνω ανάλυση για λόγους απλότητας θα μπορούσε το συνολικό κόστος να διαιρεθεί σε σταθερό και μεταβλητό. Σταθερό κόστος μίας μηχανής είναι το κόστος αγοράς της μηχανής και η ισχύς του laser και μεταβλητό κόστος θεωρείται το κόστος του υλικού το κόστος της ενέργειας κατά την λειτουργία και κόστος προπαρασκευαστικών διεργασιών. Στην περίπτωση που βλέπουμε παραπάνω η διάρκεια ζωής της μηχανής είναι 7 έτη με δυνατότητα απόδοσης 70%, ο χώρος κατασκευής υπολογίζεται σε 250 × 250 × 325 mm³ και το τμήμα που πρόκειται να κατασκευαστεί έχει ακριβώς ίδιες διαστάσεις. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται μόνο ένα σύστημα σάρωσης με laser ισχύος εως και 1 kW, εάν επιθυμούσαμε μεγαλύτερη ισχύς από αυτήν θα κάναμε χρήση πολλαπλών laser σε παράλληλη λειτουργία. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την ανάλυση είναι τα εξής:

- Το κόστος του υλικού μειώνεται όταν χρησιμοποιείται αυξημένη ισχύς στο laser καθώς ταυτόχρονα αυξάνεται η παραγωγικότητα της μηχανής.
- Το ελάχιστο κόστος υλικού αντιστοιχεί σε μία ισχύ laser ίση με 3kW.
- Με μία αύξηση της ισχύος laser >3kW παρατηρούμε αύξηση του ενεργειακού κόστους επομένως και αύξηση του κόστους κατασκευής.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους ζωής μια μηχανής το κατέχει το κόστος αγοράς της ίδιας της μηχανής, όμως και τα επιμέρους χαρακτηριστικά της επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό. Η αξιολόγηση και σύγκριση κόστους ζωής των μηχανών SLM είναι απαραίτητη, καθώς το κόστος της μηχανής επηρεάζει άμεσα και τον όγκο παραγωγής. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η μεταβολή του όγκου παραγωγής μίας μηχανής συναρτήσει του κόστους λειτουργίας της.



Εικόνα 15 Μεταβολή του όγκου παραγωγής συναρτήσει του κόστους λειτουργίας μίας μηχανής SLM [12]

Στο πρώτο διάγραμμα εξάγεται το λογικό συμπέρασμα ότι μία αύξηση της παραγωγικότητας της μηχανής επιφέρει αύξηση του κόστους λειτουργίας, κάτι που ωθεί τον χρήστη να αναζητήσει τη χρυσή τομή στην χρήση της μηχανής για να έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Στο δεύτερο διάγραμμα παρατηρείται η επιρροή που μπορεί να έχει στο κόστος λειτουργίας της μηχανής, μία αλλαγή μεγέθους του κατασκευαστικού χώρου εκτύπωσης είτε στο επίπεδο Χ-Υ , είτε εκτύπωση κατά το ύψος Ζ.

3.3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥ SLM

Η τρισδιάστατη εκτύπωση ανεξάρτητα τεχνολογίας και υλικού ολοένα και κερδίζει έδαφος στην κατασκευαστική βιομηχανία σήμερα. Παρόλα αυτά υπάρχουν ακόμα πολλά σημεία που οι συμβατικές μέθοδοι κατασκευής υπερτερούν από την 3D εκτύπωση ειδικά στην μαζική παραγωγή, αυτό όμως δεν αναιρεί το γεγονός ότι η εξατομικευμένη κατασκευή εξαρτημάτων είτε σε μικρές παρτίδες είτε για ανταλλακτική χρήση υλοποιείται με την τρισδιάστατη εκτύπωση με χαμηλό κόστος. Έτσι δεν είναι λίγοι οι τομείς που η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτέλεσε ορόσημο για την λύση σημαντικών προβλημάτων παραγωγής.

Συγκεκριμένα η τρισδιάστατη εκτύπωση με μεταλλικά υλικά με την μέθοδο SLM παρέχει καινοτόμες προοπτικές για εκτύπωση εξαρτημάτων που είναι αν όχι ποιοτικότερα, το ίδιο ποιοτικά με αυτά που κατασκευάζονται με συμβατικές μεθόδους κατεργασίας. Έχουν κατασκευαστεί υλικά από τρισδιάστατους εκτυπωτές με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και δυνατότητες ελαχιστοποίησης βάρους και υλικού. Μερικοί από τους σημαντικότερους κλάδους της βιομηχανίας που εφαρμόζεται η 3D εκτύπωση είναι οι εξής:

- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Ιατρική-Πειραματική Χειρουργική
- Αεροναυπηγική- Αεροδιαστημική
- Χρυσοχοΐα-Χύτευση κοσμημάτων



Εικόνα 16 SLM 3D μέθοδος στον τομέα της Ιατρικής και της οδοντιατρικής με υλικό κράμα τιτανίου, συμβατό με τον ανθρώπινο οργανισμό [11]



Εικόνα 17 3D printed εξαρτήματα μεταφοράς νερού για την AUDI W12 μηχανή αυτοκινήτου [11]

Εφαρμογές στην Αεροναυπηγική-Αεροδιαστημική

Συγκεκριμένα στην Αεροναυπηγική και στην Αεροδιαστημική, η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης με μέταλλο έχει αποτελέσει έναν πολλά υποσχόμενο κλάδο για το μέλλον. Σήμερα όλο και περισσότερες αεροναυπηγικές βιομηχανίες κατασκευάζουν επιμέρους μέρη αεροσκαφών με την χρήση SLM εκτυπωτών, καθώς η μείωση του βάρους των εξαρτημάτων αντιστοιχεί σε μείωση καυσίμου, που είναι το σημαντικότερο ζητούμενο στην αύξηση της αποδοτικότητας ενός αεροσκάφους σε όλα τα επίπεδα. Για παράδειγμα με συμβατικές μεθόδους, για την κατασκευή ενός αεροναυπηγικού εξαρτήματος ο κατασκευαστής απορρίπτει περίπου το 90% του υλικού των δοκιμίων που χρησιμοποιεί, ενώ σε μία 3D εκτύπωση με την μείωση του βάρους του εξαρτήματος έως και στο 60% ,εξοικονομείται ενέργεια και τα απόβλητα μειώνονται στο ελάχιστο. Στην αεροδιαστημική βιομηχανία επίσης έχει μεγάλη απήχηση η τρισδιάστατη εκτύπωση εξαρτημάτων δορυφόρου για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιπλέον, έχουν τοποθετηθεί 3D εκτυπωτές σε διαστημικούς σταθμούς έτσι ώστε ένα εξάρτημα που θα έπαιρνε πολύ χρόνο να αποσταλεί στον διαστημικό σταθμό, τώρα μπορεί αμέσως να εκτυπωθεί εκεί.


Εικόνα 18 Μηχανή αεριοπροώθησης πυραύλου με μέθοδο SLM 3D εκτύπωσης [10]



Εικόνα 19 3D εκτυπωτής σε διαστημικό σταθμό. NASA 2019 [10]

Σπουδαστική Εργασία 38 Αριστέα Αποστολάκη

Application	Example part	Requirements	Recommended Process	Recommended Material
Engine compartment	Tarmac nozzle bezel	Heat resistant functional parts	SLS	Glass-filled Nylon
Cabin accessories	Console control part	Customized functional knobs	SLA	Standard Resin
Air ducts	Air flow ducting	Flexible ducts and bellow directors	SLS	Nylon 12
Full size panels	Seat backs & entry doors	Large parts with smooth surface finish	SLA	Standard Resin
Casted metal parts	Brackets and door handles	Metal parts casted using 3D printed patterns	SLA & Material Jetting	Castable Resin or Wax
Metal components	Suspension wishbone & GE Jet Engine	Consolidated, lightweight, functional metal parts	DMLS/SLM	Titanium or Aluminum
Bezels	Dashboard interface	End use custom screen bezels	Material Jetting	Digital ABS
Lights	Headlight prototypes	Fully transparent, high-detail models	Material Jetting & SLA	Transparent Resin

Εικόνα 20 Τυπικές εφαρμογές και υλικά στην Αεροναυπηγική [12]

Συμπερασματικά, η μέθοδος SLM λόγω τεχνολογικών πλεονεκτημάτων όπως την εξατομίκευση της κατασκευής χωρίς επιπλέον κόστος και την ελευθερία στον σχεδιασμό του εξαρτήματος, είναι η μέθοδος που επιλέγεται για μικρές ή μεσαίες παρτίδες εξαρτημάτων και για παραγωγή προσαρμοσμένων σχεδίων. Για να αξιοποιηθούν αυτά τα πλεονεκτήματα της SLM πρέπει η τελευταία να προσαρμοστεί στα χαρακτηριστικά του Additive Manufacturing, την βελτιστοποίηση τοπολογίας (Topology Optimization) και τον σχεδιασμό δομής πλέγματος.

3.3.1. Τοπολογική Βελτιστοποίηση και μέθοδος SLM

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας που χρησιμοποιούν επιπλέον επεξεργασίες για αφαίρεση υλικού, στην μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης SLM κύριο παράγοντας που επηρεάζει το κόστος της διεργασίας είναι ο χρόνος που απαιτείται για να εκτυπωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός εξαρτημάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στην τρισδιάστατη εκτύπωση να χρειάζεται να μειωθεί ο όγκος των εξαρτημάτων που βρίσκονται προς εκτύπωση, τόσο όσο χρειάζεται ώστε να κρατήσουμε την παραγωγικότητα σε υψηλά επίπεδα. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας γίνεται στο στάδιο του σχεδιασμού του εξαρτήματος σε CAD, όπου με βάση τα φορτία που δέχεται και την ανάλυση σε πεπερασμένα στοιχεία, δημιουργείται η βέλτιστη γεωμετρία του εξαρτήματος.

Όλα τα φορτία τα οποία δρούν ή επηρεάζουν με οποιονδήποτε τρόπο το εξάρτημα (δυνάμεις, πακτώσεις, πιέσεις, ροές αέρα κτλ.) θα πρέπει να ορίζονται με ακρίβεια για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Μόλις οριστούν οι δυνάμεις, ο αλγόριθμος κάνει επαναληπτικές διαδικασίες σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο της γεωμετρίας με σκοπό να υπολογίσει τις τάσεις σε όλη την επιφάνεια. Στη συνέχεια τα στοιχεία που λαμβάνουν τις λιγότερες δυνάμεις και δεν αναπτύσσουν αξιοσημείωτες τάσεις ή πιέσεις, αφαιρούνται από την γεωμετρία με αποτέλεσμα να μένουν μόνο τα απαραίτητα στοιχεία για την σωστή

λειτουργία του εξαρτήματος. Η βέλτιστη τοπολογία εξαρτημάτων είναι χρήσιμη σε πολύπλοκα εξαρτήματα και με την μέθοδο SLM εκτυπώνονται έτοιμα για χρήση με μειωμένο βάρος χωρίς να απαιτούνται επιπλέον διεργασίες όπως τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής.



Εικόνα 21 Εξαρτήματα στην αεροναυπηγική κατασκευασμένα απο τιτάνιο απο CNC συμβατική μέθοδο και 3D PRINTING μεθοδο SLM με Topology Optimization [10]

Στην αεροναυπηγική βιομηχανία το βάρος του αεροσκάφους είναι ο σημαντικότερος παράγοντας στο στάδιο του σχεδιασμού. Το αεροσκάφος έχει δύο βασικές αρχές, το βάρος να είναι το ελάχιστο έτσι ώστε η κατανάλωση καυσίμου να είναι ελάχιστη και η ασφάλεια μέγιστη. Είναι εύκολο να αντιληφθεί κάποιος πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η βελτιστοποίηση τοπολογίας κατά τον σχεδιασμό σε όλα τα επιμέρους εξαρτήματα του αεροσκάφους. Ένας κατασκευαστής εσωτερικού μέρους του αεροσκάφους διερεύνησε τις δυνατότητες εξοικονόμησης βάρους σχετικά με τις θέσεις business class ενός επιβατικού αεροσκάφους.



Εικόνα 22 Σχέδιο μοχλού κίνησεως αεροπορικής θέσης business class. [11]

Παραπάνω φαίνεται η ανάλυση που έγινε σε έναν μοχλό που βρίσκεται στο κάθισμα με σκοπό να γίνει τοπολογική βελτιστοποίηση κατά τον σχεδιασμό, και στην συνέχεια να εκτυπωθεί με την μέθοδο SLM. Δεξιά φαίνεται ολόκληρος ο μοχλός πριν την τοπολογική βελτιστοποίηση με επισήμανση κόκκινου χρώματος επάνω στην σύνδεση του μοχλού με την θέση του αεροσκάφους, ώστε να είναι αποτελεσματική η συναρμολόγηση μετά την εκτύπωση και η αφαίρεση υλικού να έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Οι περιοχές διασύνδεσης (κόκκινες) καθορίζονται ως frozen regions και δεν αποτελούν χώρο για βελτιστοποίηση καθώς για λόγους συναρμολόγησης πρέπει οι συγκεκριμένες περιοχές να παραμείνουν ως έχουν.

Η παραπάνω τοπολογική βελτιστοποίηση έγινε δεδομένου ότι ο μοχλός δέχεται στατικά φορτία, δηλαδή ότι η πλάτη του καθίσματος του επιβάτη βρίσκεται σε όρθια θέση. Κάτι τέτοιο όμως δεν καλύπτει όλες τις περιπτώσεις, καθώς εάν ο επιβάτης κινούσε τον μοχλό και τοποθετούσε το κάθισμα του σε θέση ύπνου, ο μοχλός θα φορτιζόταν με δυναμικά φορτία. Σε αυτήν την περίπτωση είναι αναγκαίο να γίνει μία δυναμική ανάλυση φορτίων κατά τον σχεδιασμό του μοχλού κίνησης και να επαναληφθεί η διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης έτσι ώστε η τελική γεωμετρία πριν εκτυπωθεί να καλύπτει όλες τις δυνατές περιπτώσεις. Επομένως για να γίνει αυτό, πρέπει το δυναμικό φορτίο να χωριστεί σε 5 επιμέρους στατικά φορτία, τα οποία αφορούν τις 5 μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται στον μοχλό σε 5 διαφορετικά σημείο της κίνησής του.



Εικόνα 23 Τελική δομή μοχλού με δυναμική φόρτιση και Topology Optimization [11]



Εικόνα 24 Τελικό εξάρτημα μοχλού αεροπορικής θέσης με τρισδιάστατη εκτύπωση μεθόδου SLM [11]

Ένα βασικό κριτήριο της βελτιστοποίησης είναι η μείωση του όγκου κατά 15% σε σχέση με την υπάρχουσα γεωμετρία και με βάση την δυσκαμψία. Πριν την τελική εκτύπωση του εξαρτήματος με SLM, οι επιφάνειες εξομαλύνονται για να βελτιώσουν την εμφάνισή του. Σύμφωνα με τα στοιχεία, το βάρος του μοχλού μειώθηκε κατά 15%, έφτασε δηλαδή 70g βάρος από τα 90g που ζύγιζε αρχικά. Είναι σαφές βέβαια, ότι για να φτάσουμε σε μαζική παραγωγή εξαρτημάτων όπως το παραπάνω, απαιτούνται επιπλέον ενέργειες για βελτίωση της παραγωγικότητα της μεθόδου.

3.3.2. Δομές πλέγματος και μέθοδος SLM

Η ελευθερία στην πολυπλοκότητα των 3D printed εξαρτημάτων με την μέθοδο SLM , προσφέρει νέες ευκαιρίες στον σχεδιασμό ελαφρών κατασκευών με τη χρήσης πλέγματος. Ο συνδυασμός των μοναδικών ιδιοτήτων που διαθέτουν αυτά τα εξαρτήματα (καλή αναλογία δυσκαμψίας και βάρους, μεγάλη απορρόφηση ενέργειας κλπ.) και του χαμηλού όγκου τους, ορίζουν μία νέα πραγματικότητα στην τρισδιάστατη εκτύπωση με δομές προσαρμοσμένου πλέγματος με την χρήση της μεθόδου SLM.



Εικόνα 25 Σχηματική απεικόνιση της επιρροής της δομής πλέγματος στην πολυπλοκότητα του εξαρτήματος [10]

Αντίθετα με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής, το κόστος ενός εξαρτήματος που πρόκειται να εκτυπωθεί με την μέθοδο SLM δεν επηρεάζεται από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας, αλλά από τον χρόνο που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η εκτύπωση. Ο χρόνος διεργασίας συχνά έχει να κάνει με τον όγκο του κομματιού. Οι δομές πλέγματος μπορούν να μειώσουν τον όγκο του εξαρτήματος και ταυτόχρονα να κρατήσουν στο ακέραιο τις μηχανικές του ιδιότητες. Εάν ξεπεραστούν τα παρακάτω τρία προβλήματα αναφορικά με τις δομές πλέγματος, τότε θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν λειτουργικά ευρέως στην βιομηχανία.

- Δεν υπάρχει ολοκληρωμένη μελέτη για τις μηχανικές ιδιότητες που αναπτύσσονται σε δομές πλέγματος υπό πίεση, εφελκυσμό, διάτμηση και δυναμικό φορτίο. Έχουν γίνει πολλές έρευνες σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες σε πολλά διαφορετικά πλέγματα εξαρτημάτων, όμως παρ' όλα αυτά δεν έχει ξεπεραστεί το πρόβλημα.
- Δεν υπάρχει ολοκληρωμένη μελέτη για τους μηχανισμούς παραμόρφωσης και αστοχίας της δομής.
- Ένα πεδίο μελέτης το οποίο είναι εν εξελίξει, είναι για την ακριβή επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες.



Εικόνα 26 Προκλήσεις που προκύπτουν στα εξαρτήματα με δομή πλέγματος [10]

Όπως προαναφέρθηκε ένα από τα προβλήματα που δεν έχει εδραιωθεί ακόμη η τρισδιάστατη εκτύπωση με δομές πλέγματος είναι το νέο πεδίο έρευνας που έχει προκύψει σχετικά με το πως επηρεάζουν οι παράμετροι ή οι στρατηγικές σάρωσης της διεργασίας τις τελικές μηχανικές ιδιότητες του εξαρτήματος. Δύο είναι οι πλέον συνηθέστερες στρατηγικές σάρωσης που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο SLM.

- Contour-Hatch scan strategy
- Pointlike Exposure

Η πρώτη Contour-Hatch scan strategy είναι η πιο συνηθισμένη από τις δύο. Χρησιμοποιείται στις περισσότερες εκτυπώσεις με SLM, οι σαρώσεις γίνονται με μεγάλα κενά ανάμεσά τους δημιουργώντας ανεπιθύμητες καθυστερήσεις σάρωσης κατά την εκτύπωση. Στην δεύτερη στρατηγική σάρωσης Pointlike Exposure, ολόκληρη η πολύπλοκη γεωμετρία μετατρέπεται σε ένα σύνολο σημείων που έρχεται σε έκθεση σημειακά κατά την σάρωση. Αυτό σαφώς μειώνει αισθητά τις καθυστερήσεις καθώς γίνονται λιγότερα κενά μεταξύ των σαρώσεων.



Εικόνα 27 Σχεδιάγραμμα των δύο συνηθέστερων στρατηγικών σάρωσης [11]

Με σκοπό να βρεθεί η επιρροή των δύο σαρώσεων στις μηχανικές ιδιότητες του εξαρτήματος, διεξήχθη έρευνα στα πλαίσια του Cluster of Excellence Integrative Production Technology of High-Wage Countries, Aachen University, κατά την οποία κατασκευάστηκαν εξαρτήματα με διαφορετικές δομές πλέγματος, όπως φαίνεται παρακάτω. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη έρευνα είναι ανοξείδωτος χάλυβας 316L, οι παράμετροι του εξαρτήματος βελτιστοποιήθηκαν κατ' επανάληψη σε ένα μοντέλο με μικρή απόκλιση γεωμετρίας από το αρχικό σχέδιο CAD. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μία μέτρηση σχετικής πυκνότητας του πλέγματος. Η σχετική πυκνότητα χαρακτηρίζει τον βαθμό πυκνότητας του πλέγματος του εξαρτήματος που βρίσκεται προς εκτύπωση, και χρησιμοποιείται για να καθοριστούν οι γεωμετρικές αποκλίσεις της δομής. Διερευνήθηκαν 3 παραμέτροι της Contour-Hatch (Ισχύς laser 100-130 W, ταχύτητα σάρωσης 700 – 900 mm/s) και μία της Pointlike Exposure στρατηγικής (ισχύς laser 182 W).



Εικόνα 28 Αποκλίσεις σχετικής πυκνότητας στο αρχικό ζητούμενο μοντέλο CAD [11]

Όπως φαίνεται και παραπάνω από το διάγραμμα των αποκλίσεων, η σχετική πυκνότητα της σάρωσης Pointlike Exposure είναι 4% μεγαλύτερη από αυτήν του ζητούμενου μοντέλου CAD και σε συνολική εικόνα ο στόχος για να επιτευχθεί το μοντέλο CAD απαιτεί χαμηλές αποκλίσεις της σχετικής πυκνότητας.

Για να γίνει περεταίρω διερεύνηση στην επιρροή των δύο σαρώσεων στις παραμέτρους του εξαρτήματος, χρησιμοποιήθηκε μία τεχνική Micro-CT. Η τεχνική Micro-CT (Micro Computed Tomography) είναι μία τεχνική προβολής του εσωτερικού 3D αντικειμένου, στρώση με στρώση. Παρακάτω φαίνεται το εσωτερικό πλέγμα του εξαρτήματος με μέθοδο Micro-CT και για τους 2 τύπους σάρωσης.



Εικόνα 29 Δομές πλέγματος με την μέθοδο Micro-CT για εξακρίβωση ακρίβειας της δομής [10]

Συμπερασματικά από την παραπάνω εικόνα δομές πλέγματος που κατασκευάστηκαν με Contour-Hatch σάρωση, δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα κενά μεταξύ των στρώσεων ή συσσώρευση σε λανθασμένα σημεία, επίσης τα στήριγμα σε κάθετη και διαγώνια διεύθυνση φαίνεται να έχουν το ίδιο πάχος. Αντίθετα δεξιά στην εικόνα, όπου υπάρχει η δομή πλέγματος κατασκευασμένη με τον τύπο σάρωσης Pointlike Exposure , παρατηρούμε μία ελαφριά αποκόλληση και διάσπαση στους κόμβους του πλέγματος καθώς και αποκλίσεις μεταξύ των κάθετων και διαγώνιων στηριγμάτων.

3.4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ SLM ΕΩΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΡΑ

Για πολλούς μηχανικούς η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η κατασκευαστική μέθοδος η οποία διαθέτει όλες τις προοπτικές να αλλάξει μια για πάντα την κατασκευαστική βιομηχανία. Η μέθοδος SLM δίνει τη δυνατότητα κατασκευής μεταλλικών εξαρτημάτων με περίπλοκη γεωμετρία χωρίς απαίτηση περεταίρω διεργασιών με εξαρτήματα εκτυπωμένα και έτοιμα για χρήση. Έχει εφαρμογή σε πολλές διαφορετικές βιομηχανίες και μπορεί να φανεί εξαιρετικά χρήσιμη στη δημιουργία ελαφρών κατασκευών λόγω της βελτιστοποίησης βάρους και πυκνότητας που διαθέτει. Από την άλλη πλευρά όμως, ερευνώντας λεπτομερώς την διαδικασία εκτύπωσης SLM με χρήση μεταλλικού υλικού σε σκόνη προκύπτουν κάποια προβλήματα, που αν δεν λάβει υπ' όψην του ο μηχανικός κινδυνεύει να χάσει τις επιθυμητές ιδιότητες το εξάρτημα που βρίσκεται προς εκτύπωση. Όμως, παρόλο που υπάρχει μια σειρά προβλημάτων που η αποτελεσματική λύση τους βρίσκεται υπο διερεύνηση ακόμα και σήμερα, η κατανόηση και η βάση του κάθε προβλήματος ξεχωριστά είναι το πρώτο βήμα της παραγωγής αξιόπιστων εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας.

Μερικά από τα συχνότερα προβλήματα καθώς και οι τρόπου με τους οποίους αυτά μπορούν βελτιωθούν παρουσιάζονται παρακάτω.

3.4.1. Υψηλό πορώδες υλικού

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των μεταλλικών εξαρτημάτων που εκτυπώνονται με την μέθοδο SLM είναι το υψηλό πορώδες. Το πορώδες των υλικών αυξάνεται κατά την διαδικασία της εκτύπωσης καθώς λόγω της σύστασής του (σκόνη) σχηματίζονται μικρές οπές και κοιλότητες στο εσωτερικό του εξαρτήματος με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μικροσκοπικοί πόροι . Όσο περισσότεροι πόροι δημιουργούνται στο εσωτερικό, τόσο χαμηλότερη είναι η τελική πυκνότητα του εξαρτήματος. Επίσης η σημαντικότερη επίπτωση για ένα υλικό με υψηλό πορώδες είναι η επιρροή στις μηχανικές του ιδιότητες. Το υλικό γίνεται επιρρεπές σε ρωγμές ή άλλες βλάβες με αποτέλεσμα , όταν δέχεται υψηλά φορτία να αστοχεί γρηγορότερα.

Πορώδες στο τελικό εξάρτημα μπορεί να προκύψει, είτε από την πρώτη ύλη, δηλαδή τον τύπο του υλικού σε σκόνη, είτε από την ίδια την διαδικασία της εκτύπωσης SLM. Στην πρώτη περίπτωση, το μέγεθος των κόκκων της σκόνης του υλικού και το πως έχει κατασκευαστεί το υλικό είναι σημαντικό για να καθοριστεί το πορώδες που θα έχει πριν ακόμη εισέλθει σε διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης, γι' αυτό απαιτείται μία παραπάνω προσοχή στην ποιότητα και στον προμηθευτή του υλικού. Συνηθέστερη περίπτωση είναι η δεύτερη, όπου το πορώδες αυξάνεται σε ένα υλικό κατά την εκτύπωση. Για παράδειγμα, μία πολύ χαμηλή ισχύς laser, δεν θα λιώσει σωστά στα σημεία που πρέπει τόσο όσο να το στερεοποιήσει σωστά και θα δημιουργηθούν κενά ανάμεσα στις στρώσεις με αποτέλεσμα να αυξηθεί το πορώδες. Από την άλλη πλευρά και μία πολύ υψηλή ισχύς του laser μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα, καθώς θα λιώσει τόσο πολύ το υλικό που οι σταγόνες ή το λιωμένο υλικό θα πέφτει και θα εκτοξεύεται σε γύρω περιοχές εκτός γεωμετρίας δημιουργώντας και πάλι πορώδες στο τελικό εξάρτημα (spatter ejection). Επίσης πόροι στη γεωμετρία μπορούν να δημιουργηθούν εάν δεν γίνει η κατάλληλη επιλογή υλικού και οι κόκκοι είναι μεγαλύτεροι ή μικρότεροι (άρα και πολύ χαλαροί) από την στρώση της γεωμετρίας που επιθυμούμε να εκτυπώσουμε.



Εικόνα 30 Πορώδες υλικού που μεταφέρεται στην στρώση του υλικού. Εικόνα από μικροσκόπιο. [12]

Για την αντιμετώπιση της αύξησης του πορώδους στο τελικό εξάρτημα, θα πρέπει να γίνουν ενέργειες για την πρόληψη των παραπάνω αιτιών. Αρχικά με δεδομένο ότι η προμήθεια υλικού σε σκόνη γίνει από έναν αξιόπιστο προμηθευτή με γνώμονα την υψηλή ποιότητα, θα πρέπει να γίνει ρύθμιση παραμέτρων στον 3D εκτυπωτή. Οι παράμετροι του εκτυπωτή, όπως η ισχύς του laser , το μέγεθος και το σχήμα της δέσμης πρέπει να έχουν συγκεκριμένες ρυθμίσεις για κάθε υλικό και μέγεθος κόκκου, ώστε το μηχάνημα να το επεξεργάζεται κατάλληλα. Συγκεκριμένα για την μέθοδο SLM που εξετάζεται υπάρχει μία ειδική ρύθμιση για την δέσμη του laser γνωστή ως «pulse shaping» ικανή να λιώνει το υλικό σταδιακά και έτσι να αποφευχθεί τυχόν εκτόξευση υλικού σε περιοχές εκτός γεωμετρίας (spatter ejection).

3.4.2. Πυκνότητα υλικού

Στη βιομηχανία, η τρισδιάστατη εκτύπωση με χρήση μεταλλικού υλικού σε σκόνη απαιτεί την δημιουργία εξαρτημάτων και υψηλές μηχανικές ιδιότητες και κυρίαρχο ρόλο σε αυτό το αποτέλεσμα παίζει η πυκνότητά του. Όταν ένα εξάρτημα λειτουργεί σε συνθήκες κυκλικής καταπόνησης, η πυκνότητά του είναι αυτή που θα καθορίσει εαν το εξάρτημα αστοχήσει υπο φορτίο ή όχι. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η πυκνότητα του εξαρτήματος που βρίσκεται προς εκτύπωση είναι αντιστρόφως ανάλογη με το πορώδες, όσο αυξάνεται το πορώδες , τόσο μειώνεται η πυκνότητα του εξαρτήματος κάνοντας το επιρρεπές σε αστοχία υπό πίεση και σε δημιουργία ρωγμών. Η τεχνολογία SLM μπορεί να δημιουργήσει εξαρτήματα με πυκνότητα άνω του 98%, ποσοστό που είναι απαραίτητο για κρίσιμες κατασκευές με σύνθετες καταπονήσεις.

Εκτός από τον έλεγχο του πορώδους που αναφέρθηκε παραπάνω, επίσης αξιοσημείωτοι είναι οι τρόποι που μπορεί να αυξηθεί η πυκνότητα του εξαρτήματος. Σημαντικό είναι τόσο το μέγεθος των κόκκων του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, όσο και η μορφολογία τους, καθώς ένα υλικό που αποτελείται από σφαιρικούς κόκκους θα βελτιώσει

την ικανότητα ροής της σκόνης κατά την τήξη και κατά συνέπεια θα επέλθει βελτίωση και της πυκνότητας. Επίσης βελτίωση της πυκνότητας θα μπορούσε να επέλθει από μία ευρεία κατανομή των διάφορων μεγεθών κόκκων σκόνης, έτσι ώστε οι λεπτότεροι κόκκοι να καλύψουν τυχόν κενά ανάμεσα σε μεγαλύτερους και να ομογενοποιήσουν το τελικό εξάρτημα. Βέβαια αυτός ο τρόπος βελτίωσης της πυκνότητας μπορεί να μειώσει την ικανότητα ροής του υλικού, πράγμα το οποίο ίσως προκαλέσει τραχιά επιφάνεια και αύξηση του πορώδους. Είναι σημαντικό όμως να βρεθεί η χρυσή τομή με σκοπό να δημιουργηθούν σφιχτές στρώσεις υλικού για να εκτυπωθεί ένα στιβαρό εξάρτημα με υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

3.4.3. Παραμένουσες τάσεις

Οι παραμένουσες τάσεις είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης σε μέταλλα. Οι τάσεις αυτές προκύπτουν από τους συνδυασμούς θέρμανσης ψύξης και διαστολής συστολής που δημιουργούνται κατά την εκτύπωση με την μέθοδο SLM. Οι παραμένουσες τάσεις του υλικού έχουν αρνητικά αποτελέσματα στο τελικό εξάρτημα, καθώς εάν οι τάσεις αυτές ξεπεράσουν την αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού ή της βάσης εκτύπωσης, μπορεί να προκληθεί αστοχία στο υλικό, δημιουργίες ρωγμών ή και στρέβλωση της βάσης. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση παραμενουσών τάσεως βρίσκεται στην διεπιφάνεια της πλατφόρμας εκτύπωσης και της βάσης του υλικού (στρώση επαφής). Η παραμένουσες τάσεις έχουν συμπιεστική μορφή στο κέντρο του εξαρτήματος και εφελκυστική κατεύθυνση στις άκρες. Τέλος, όταν το εξάρτημα αφαιρεθεί από την βάση εκτύπωσης απελευθερώνεται από τις παραμένουσες τάσεις, όμως είναι επιρρεπές να παραμορφωθεί εξ' αιτίας αυτών κατά την αφαίρεση.



Εικόνα 31 Αστοχία σε 3D printed κομμάτι λόγω παραμενουσών τάσεων. [11]

Οι ερευνητές του Εθνικού Εργαστηρίου Lawrence στο Livermore της Καλιφόρνια, έχουν υποδείξει μία μέθοδο με την οποία μπορούν να μειωθούν οι παραμένουσες τάσεις. Ρυθμίζοντας το μήκος του φορέα σάρωσης του laser να είναι μεταβλητό και όχι σταθερό βασισμένο σε ένα συνεχές μοντέλο σάρωσης καθ' όλη την διάρκεια της εκτύπωσης, οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι με αυτόν τον τρόπο θα κανονικοποιηθούν οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας έχοντας θετικά αποτελέσματα στο πρόβλημα. Επίσης αναφέρεται στην έρευνα ότι μία περιστροφή του φορέα σάρωσης ανάλογα με το μέγεθος του εξαρτήματος θα είχε επίσης θετικά αποτελέσματα σχετικά με τις παραμένουσες τάσεις. Ακόμα μία μέθοδος που δεν είναι τόσο εύκολα εφαρμόσιμη στην μέθοδο SLM για την μείωση των παραμενουσών τάσεων αλλά παρ' όλα αυτά έχει θετικά αποτελέσματα σε άλλες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι μέσω της θερμικής επεξεργασίας της πλατφόρμας εκτύπωσης με σκοπό την προθέρμανση του υλικού πριν επέλθει η τήξη του από την δέσμη laser. Συνοπτικά, η ύπαρξη υψηλών παραμενουσών τάσεων μπορεί να κάνει την διαφορά μεταξύ ενός επιτυχημένου εξαρτήματος με αυτό στο οποίο θα επέλθει αστοχία για αυτό είναι σημαντικό να γίνουν οι σωστές ρυθμίσεις στις παραμέτρους τις μηχανής και να οριστεί η κατάλληλη επεξεργασία (απαιτούμενη θερμοκρασία, πάχος στρώσης κτλ.) για τα διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται.

3.4.4. Αστοχία εξαρτήματος και στρέβλωση

Η αστοχία του τρισδιάστατου εξαρτήματος κατά την διαδικασία της εκτύπωσης μπορεί να είναι με την μορφή ρωγμής, είτε όταν το τηγμένο μέταλλο στερεοποιείται καθώς με μία πολύ υψηλή ισχύ laser μπορεί να συσσωρευτεί πίεση στο σημείο, είτε κατά την διάρκεια περεταίρω θέρμανσης μιας περιοχής. Επίσης μπορεί να συμβεί αστοχία στο εξάρτημα με την μορφή διαστρωματικής αποκόλλησης (delamination) ανάμεσα στις στρώσεις συνήθως αυτό συμβαίνει όταν δεν έχει επέλθει επαρκής τήξη του υλικού. Για να γίνει αποτελεσματικά η εκτύπωση ενός εξαρτήματος με την μέθοδο SLM το εξάρτημα εκτυπώνεται πάνω σε μία βάση από τηγμένο υλικό η οποία αφαιρείται με διεργασίες CNC αμέσως μετά την εκτύπωση. Ωστόσο, η στρέβλωση είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται επάνω στην βάση εκτύπωσης , εάν η θερμική τάση που αναπτύσσεται εκεί, ξεπεράσει την αντοχή του υλικού. Στην περίπτωση της στρέβλωσης προκαλείται σφάλμα κατά την διαδικασία εκτύπωσης καθώς δεν επιτρέπει την σωστή και ομοιόμορφη κατανομή των επόμενων στρωμάτων σκόνης για να συνεχιστεί η διαδικασία.

Πρόληψη ρωγμών και στρέβλωσης μπορεί να γίνει με δύο βασικούς τρόπους. Αρχικά μία επιλογή είναι να γίνει προθέρμανση της πλατφόρμα εκτύπωσης, και άλλη επιλογή είναι να βελτιωθεί η πρόσφυση του εξαρτήματος κατά την εκτύπωσης επάνω στην πλατφόρμα. Επίσης σκόπιμο θα ήταν να εισαχθούν οι κατάλληλες δομές στήριξης του εξαρτήματος ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες παραμορφώσεις.



Εικόνα 32 Αστοχία 3D printed εξαρτήματος σε μορφή delamination. [10]



Εικόνα 33 Στρέβλωση εξαρτήματος. [11]

3.4.5. Διαδικασίες επεξεργασίας μετά την εκτύπωση

Τις περισσότερες φορές τα μεταλλικά μέρη δεν είναι έτοιμα για την τελική τους εφαρμογή αμέσως μετά την εκτύπωση με SLM μέθοδο. Χρειάζεται να υποβληθούν σε διαδικασίες επιπλέον επεξεργασίας, όπως αφαίρεση σκόνης ή στηριγμάτων που τυχόν έχουν εισαχθεί, θερμική επεξεργασία και φινίρισμα επιφάνειας. Συχνά εμφανίζονται προβλήματα κατά την διάρκεια αυτών των μετέπειτα διαδικασιών. Αναλυτικότερα, ενδέχεται να υπάρξουν σφάλματα σχετικά με την αποκοπή των δομών στήριξης, εάν οι δομές αυτές έχουν εισαχθεί σε σημεία οπών, σωληνώσεων και εν γένει σε σημεία με συγκέντρωση τάσεων μπορεί να προκύψει βλάβη και αστοχία του εξαρτήματος. Σχετικά με την τραχύτητα, είναι ένα χαρακτηριστικό των εξαρτημάτων προσθετικής κατασκευής που συχνά αποτελεί πρόβλημα όταν απαιτείται χρήση σε δομή υψηλών προδιαγραφών. Τα τυπωμένα μέρη από SLM εκτυπώνονται έχοντας τραχιές επιφάνειες και απαιτούν πρόσθετη επεξεργασία λείανση με στόχο το καλύτερο φινίρισμα της επιφάνειας. Η τραχύτητα της επιφάνειας σχετίζεται άμεσα με το πάχος της στρώσης του εξαρτήματος, κατά συνέπεια αυτό το πρόβλημα μπορεί να μετριαστεί εάν γίνει η εκτύπωση με μικρότερο πάχος στρώσης. Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε τέτοια περίπτωση θα αυξηθεί κατά πολύ ο χρόνος εκτύπωσης, καθώς η διάρκεια είναι αντιστρόφως ανάλογη με το πάχος της στρώσης. Τραχύτητα στις επιφάνειες επίσης μπορεί να προκύψει από αναποτελεσματική τήξη της σκόνης, αυτό συμβαίνει όταν η ενέργεια που εφαρμόστηκε για να τήξει το μέταλλο είναι ανεπαρκής, σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να επέλθει βελτίωση, απλά με μία αύξηση της ισχύος του laser.



Εικόνα 34 3D printed εξάρτημα πριν και μετά την διεργασία λείανσης επιφάνειας μετά την εκτύπωση. [11]

3.5. ΥΛΙΚΑ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Ευρεία και ολοένα αυξανόμενη είναι η ποικιλία των υλικών που υποστηρίζονται από τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή, σύνθετα και προηγμένα υλικά ρευστά ή στερεά, σε μορφή σκόνης, κόκκων, νήματος , αλοιφής και πηκτώματος, μπορούν να συνδυαστούν με διάφορους διαφορετικούς τρόπους, δημιουργώντας μοναδικές γεωμετρίες και συστάσεις που μέχρι πριν κάποια χρόνια μπορούσαμε να συναντήσουμε μόνο στην φύση. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι τόσα, όσα τα προϊόντα που είναι δυνατόν να προκύψουν από αυτήν την διαδικασία. Η επιλογή υλικού είναι ένα σημαντικό βήμα στην διαδικασία καθώς καθορίζει τις ιδιότητες που μπορεί να έχει εν τέλει το εκτυπωμένο εξάρτημα. Τα υλικά μπορούν να καθορίσουν το αν το εξάρτημα που πρόκειται να κατασκευαστεί θα είναι ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες, ελαφρύ μέταλλο ή βαρύ και στιβαρό πλαστικό καθώς επίσης και αν θα είναι βιοσυμβατό ή ασφαλές για χρήση σε τρόφιμα. Εν γένη, όλα δείχνουν ότι το πλαστικό θα είναι το πλέον κυρίαρχο υλικό με το οποίο η τρισδιάστατη εκτύπωση θα εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου, ώς το πλέον αποτελεσματικότερο και το πιο οικολογικό όλων. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στην τρισδιάστατη εκτύπωση κατά κόρον.

3.5.1. Υλικά για όλους τους τύπους τρισδιάστατης εκτύπωσης

1. Πλαστικό

Από όλες τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας για την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης το πλαστικό είναι το πιο διαδεδομένο. Το πλαστικό μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για εκτύπωση ευρείας ποικιλίας κομματιών τόσο σε επίπεδο χόμπι, όσο και σε επίπεδο βιομηχανίας όπως πλαστικά παιχνίδια, σκεύη μαγειρικής , είδη γραφείου ή διακοσμητικά καθώς και διαφόρων ειδών μινιατούρες. Είναι διαθέσιμο σε διάφανη μορφή αλλά και το πιο εύκολο υλικό να χρωματιστεί σε ό,τι χρώμα επιθυμούμε με μικρό κόστος. Το πλαστικό για τρισδιάστατη εκτύπωση συνήθως διατίθεται σε καρούλια και μπορεί ο κατασκευαστής να επιλέξει την υφή του νήματος είτε ματ είτε γυαλιστερή, τραχιά ή λεία. Με βάση τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό το πόσο ελκυστικό μπορεί να γίνει σαν υλικό το πλαστικό, ειδικά σε κάποιον που ασχολείται σαν χόμπι με το 3D Printing, προσφέρει ευελιξία, επιθυμητή εμφάνιση (χρώμα και υφή) και χαμηλό κόστος. Πλαστικό υλικό χρησιμοποιούν κυρίως οι FDM εκτυπωτές , οι οποίοι λιώνουν τα νήματα πλαστικού και διαμορφώνουν το σχήμα του εξαρτήματος στρώση με στρώση, τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται για αυτήν την διαδικασία είναι τα παρακάτω:

• PLA (Polyastic acid)

Το PLA είναι μία από τις φιλικότερες προς το περιβάλλον επιλογές πλαστικού καθώς προέρχεται από φυσικά προϊόντα όπως ζαχαροκάλαμο και άμυλο καλαμποκιού, ως εκ τούτου είναι βιοδιασπώμενο. Διατίθεται στο εμπόριο σε μαλακές και σκληρές μορφές, το σκληρό PLA είναι ισχυρότερο επομένως και προτιμότερο σε μία ευρύτερη γκάμα προϊόντων. Το συγκεκριμένο υλικό αναμένεται να κυριαρχήσει στην τρισδιάστατη βιομηχανία εκτύπωσης τα επόμενα χρόνια καθώς η βιωσιμότητα των υλικών είναι ένα από τα βασικά ζητούμενα σχεδόν σε όλες τις βιομηχανίες και αγορές.

• ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)

Κατάλληλη επιλογή για οικιακούς τρισδιάστατους εκτυπωτές καθώς είναι αξιολογημένο για την ασφάλειά του και την αντοχή του. Εναλλακτικά ονομάζεται και ως LEGO plastic είναι υλικό που διατίθενται σε νήματα που έχουν την μορφή μακαρονιών και προσδίδουν στο υλικό ευελιξία και σταθερότητα ταυτόχρονα. Είναι υλικό σε προσιτή τιμή και μεγάλη ποικιλία σε χρώματα και υφές, χρησιμοποιείται κυρίως για παιχνίδια, διακοσμητικά, κοσμήματα και αγγεία.



Εικόνα 35 LEGO plastic υλικό (ABS). [14]

• PVA (Polyvinyl Alcohol Plastic)

Υλικό χαμηλού κόστους και αυτό για εκτυπωτές οικειακής χρήσης. Είναι κατάλληλο υλικό για στήριξη ρευστών υλικών κατά την εκτύπωση, ενώ δεν είναι κατάλληλο για εξαρτήματα που απαιτούν υψηλή αντοχή. Συνήθως το PVA χρησιμοποιείται σαν μία επιλογή χαμηλού κόστους για προϊόντα προσωρινής χρήσης λόγω της χαμηλότερης ποιότητάς του συγκριτικά με τα υπόλοιπα.



Εικόνα 36 PVA 3D Printed part για στήριξη [14]

• PC (Polycarbonate)

Αυτό το υλικό έχει σπανιότερη χρήση σε εκτυπωτές που αναφέρθηκαν παραπάνω, ενώ χρησιμοποιείται σε εκτυπωτές που δίνουν σχήμα στο υλικό μέσω ακροφυσίου και λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Μεταξύ άλλων το πολυανθρακικό, χρησιμοποιείται για την κατασκευή πλαστικών συνδέσεων και δίσκων –καλουπιών χύτευσης, διάφορων ειδών χαμηλού κόστους.

2. Σκόνη

Οι πιο σύγχρονοι εκτυπωτές στις μέρες μας χρησιμοποιούν υλικά στη μορφή σκόνης για την εκτύπωση εξαρτημάτων. Η διαδικασία έχει ως εξής, η σκόνη τήκεται στο εσωτερικό του εκτυπωτή και κατανέμεται σε στρώσεις στο κατάλληλο πάχος, υφή και γεωμετρία. Οι σκόνες μπορεί να προέρχονται από διάφορες πρώτες ύλες με τις συνηθέστερες να είναι:

• Polyamide (Nylon)

Με την υψηλή του αντοχή και ευελιξία το Nylon είναι ένα υλικό που επιτρέπει μεγάλη λεπτομέρεια στην επιφάνεια του εξαρτήματος που πρόκειται να εκτυπωθεί. Το υλικό χρησιμοποιείται κατά βάση σε συνδετικά εξαρτήματα σε μία μεγαλύτερη κατασκευή αλλά και σε πολλά άλλα όπως λαβές, εξαρτήματα ένωσης άλλων εξαρτημάτων , μινιατούρες κτλ.

Alumide

Το Αλουμίδιο είναι ένα μείγμα από σκόνη αλουμινίου, γκρι αλουμίδιο και πολυαμίδιο και χρησιμοποιείται για την εκτύπωση εξαρτημάτων υψηλής αντοχής. Αυτό το υλικό έχει μία χαρακτηριστική όψη σκόνης με έντονη αμμώδη και κοκκώδη εμφάνιση και το συναντάμε κυρίως σε βιομηχανικά μοντέλα και πρωτότυπα. Σε μορφή σκόνης , υλικά όπως ο χάλυβας, ο χαλκός και άλλοι τύποι μετάλλων είναι εύκολο να μεταφερθούν να λιωθούν και να τροποποιηθούν στο επιθυμητό σχήμα. Όπως και με την χρήση ορισμένων πλαστικών τα υλικά σε μορφή σκόνης επεξεργάζονται σε συγκεκριμένες υψηλές θερμοκρασίες έτσι ώστε να λάβουν το επιθυμητό σχήμα στρώση με στρώση.

3. Ρητίνη

Η ρητίνη είναι ένα από τα πιο περιοριστικά υλικά επομένως και το λιγότερο χρησιμοποιούμενο υλικό στην τρισδιάστατη εκτύπωση σήμερα. Η εκτύπωση με ρητίνες προσφέρει περιορισμένη ευελιξία και αντοχή. Κατασκευασμένη από υγρό πολυμερές, η ρητίνη για να φτάσει στην τελική της κατάσταση χρειάζεται να εκτεθεί σε υπεριώδες φως (UV). Εν γένει η ρητίνη εντοπίζεται σε μαύρο, λευκό και διάφανο χρώμα αλλά υπάρχουν ορισμένα εκτυπωμένα προϊόντα ρητίνης σε πορτοκαλί, κόκκινο, μπλε και πράσινο χρώμα.

• Ρητίνες υψηλής λεπτομέρειας (High-detail resins)

Τέτοιου είδους ρητίνες χρησιμοποιούνται κατά βάση σε μικρά μοντέλα που απαιτούν υψηλή ακρίβεια στην λεπτομέρεια και περιπλοκότητα στην επιφάνεια τους.

• Ρητίνη που μπορεί να βαφτεί (Paintable resins)

Χρησιμοποιούνται σε εκτυπώσεις που απαιτούν λεία επιφάνεια και είναι ρητίνες υψηλής αισθητικής. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται σε ειδώλεια που απαιτούν ειδικές λεπτομέρειες στο πρόσωπο.

• Διάφανη ρητίνη (Transparent resins)

Αυτή είναι η κατηγορία ρητινών με την υψηλότερη αντοχή και επομένως η καταλληλότερη για μεγαλύτερη ποικιλία εξαρτημάτων. Κατά βάση χρησιμοποιείται για μοντέλα που πρέπει να είναι πολύ πυκνά στην αφή και διάφανα στην όψη.

4. Μέταλλο

Το δεύτερο πιο διαδεδομένο υλικό στην βιομηχανία της τρισδιάστατης εκτύπωσης μετά το πλαστικό είναι το μέταλλο., το οποίο χρησιμοποιείται μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως άμεση τήξη μετάλλων με λέιζειρ (DMLS) η οποία αναλύθηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα μέταλλα χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος βιομηχανιών, όπως η αεροναυπηγική, στην κατασκευή κοσμημάτων σε μεγάλες ποσότητες χωρίς λεπτομέρειες και περίπλοκα σχήματα. Επίσης ένας ακόμα λόγος που το μέταλλο χρησιμοποιείται όλο και συχνότερα στην βιομηχανία της κατασκευής κοσμημάτων είναι ότι η χάραξη επάνω στο μεταλλικό κόσμημα μπορεί να γίνει κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, μειώνοντας κόστος και χρόνο στην παραγωγή καθώς διεργασίες που μπορεί να απαιτούσαν περισσότερα εργατικά χέρια και μεγαλύτερο κόστος απλοποιούνται σε μία μόνο προγραμματισμένη διαδικασία του 3D Printer. Η ποικιλία μετάλλων που χρησιμοποιεί η DMLS τρισδιάστατη εκτύπωση είναι εξίσου εκτενής όπως αυτή στα πλαστικά:

Ανοξείδωτο ατσάλι (Stainless-steel)

Το ανοξείδωτο ατσάλι είναι ιδανικό για εκτύπωση μαγειρικών σκευών και γένει για προϊόντα που πρόκειται να έρθουν σε επαφή με το νερό.

Χαλκός (Bronze)

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή διακοσμητικών βάζων, αγγείων και άλλων.

Χρυσός (Gold)

Κατά κανόνα χρησιμοποιείται για την εκτύπωση κοσμημάτων.

Νικέλιο (Nickel)

Κατάλληλο υλικό για τρισδιάστατη εκτύπωση νομισμάτων.

• Αλουμίνιο (Aluminum)

Κατάλληλο υλικό για εκτύπωση λεπτών μεταλλικών αντικειμένων με ελάχιστο βάρος.

Τιτάνιο (Titanium)

Η πλέον προτιμότερη επιλογή υλικού για στιβαρά στερεά εξαρτήματα υψηλής αντοχής.

Στην διαδικασία εκτύπωσης το μέταλλο είναι σε μορφή σκόνης. Η σκόνη πυροδοτείται για να επιτευχθεί η κατάλληλη σκληρότητα της κάθε στρώσης, αυτό επιτρέπει στους εκτυπωτές να παρακάμπτουν την διαδικασία της χύτευσης και να χρησιμοποιούν άμεσα την μεταλλική σκόνη για τον σχηματισμό του εξαρτήματος.

Μέρα με την μέρα κυκλοφορούν νέα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση, επιτρέποντας την δημιουργία ολοκαίνουριων εξαρτημάτων με μοναδικές ιδιότητες και νέα πλεονεκτήματα.

3.5.2. Υλικά για την μέθοδο SLM

Η μέθοδος εκτύπωσης SLM είναι η διαδικασία η οποία αναφέρθηκε εκτενώς στην συγκεκριμένη εγρασία σε προηγούμενα κεφάλαια. Είναι μία από τις πιο ευέλικτες τεχνολογίες καθώς μπορεί να επεξεργαστεί μία μεγάλη ποικιλία υλικών , ιδιαίτερα μετάλλων και κραμάτων τους.

Τα πιο κοινά υλικά σε σκόνη που χρησιμοποιούνται είναι:

- Κράματα χάλυβα σιδήρου
- Κράματα νικελίου
- Κράματα τιτανίου
- Κράματα αλουμινίου
- Alumina
- Silicon carbide
- Yttria stabilised zirconia

Οι ιδιότητες των υλικών(κραμάτων) καθώς και εφαρμογές και παραδείγματα, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Υλικά	Ιδιότητες	Εφαρμογές	Κράματα
Κράματα Χάλυβα - Σιδήρου	Υψηλή αντοχή σε διάβρωση Υψηλή μηχανική αντοχή Σκληρότητα επιφάνειας Σχετική πυκνότητα (>90%) Micro+hardness	Ιατρική και βϊοιατρική Οδοντιατρική Εναλλάκτες θερμότητας Ελαφρές κατασκευές	Fe-Ni Fe3Al Fe-Ni-Cr Fe-Ni-Cu-P 304L stainless steel H20 tool steel Ultra-high carbon steel
Κράματα Τιτανίου	Υψηλή Σχετική πυκνότητα (>98%) Σκληρότητα επιφάνειας Χαμηλό πορώδες Ανώτερη αντοχή σε διάτμηση	Ιατρική Ελαφρές κατασκευές Αεροναυπηγικά εξαρτήματα	CP-Ti Ti-6Al-4V Ti-6Al-7Nb Ti-24nb-4Zr-8Sn Ti-13Zr-Nb Ti-13Nb-13Zr
Κράματα Νικελίου	Υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία Αντοχή σε κόπωση Υψηλή αντοχή σε διάβρωση Αντοχή στη φθορά Καλή συγκολησιμότητα Σχετική πυκνότητα (περίπου 100%)	Θάλαμοι καύσης Μοντέλα κύλισης για bevel γρανάζια Πορώδη μέσα Μηχανές αεροσκαφών	Inconel 625 Inconel 718 Chromel Hastelloy X Nimonic 263 IN738LC MAR-M-247 Ni-Ti
Άλλα μέταλλα(αλουμίνιο, χαλκός, μαγνήσιο, κοβάλτιο-χρώμιο, χρυσός, ασήμι)	Υψηλή σχετική πυκνότητα αλουμινίου και κοβαλτίου-χρωμίου (>96%) και άλλων μετάλλων (82%- 85%) Υψηλή αντοχή αλουμινίου Αυξημένη σκληρότητα όταν	Ιατρική Οδοντιατρική Αυτοκινητοβιομηχανία Εναλλάκτες θερμότητας	Al6061 AlSi10Mg Cu+Cu10Sn+Cu8.4P CoCr

Σπουδαστική Εργασία 57 Αριστέα Αποστολάκη

	προστεθεί χαλκός σε σκόνη	Κοσμήματα	24 Carat gold Tungsten K220 CuNi15C18400
Κεραμικά	Υψηλές θερμοκρασίες τήξης Εύθραυστα Υψηλή τραχύτητα επιφάνειας	Ιατρική Οδοντιατρική Λεπτά τοιχώματα δομών Ηλεκτρικές και θερμικές μονώσεις Επίστρωμα αντοχής σε φθορά	Glass-ceramics Alumina Silica Yttria stabilized zirconia Tri-calcium phosphate Alumina zirconia Mixture Porcelain Silicon Carbide

Πίνακας 1 Υλικά που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο SLM. [14]

Η τεχνολογία SLM χρησιμοποιεί γενικά υλικά με μεγέθη σωματιδίων που κυμαίνονται μεταξύ 20 και 50 mm και πάχους στρώσης μεταξύ 20 και 100 mm. Πρόσφατες προσπάθειες πειραμάτων και έρευνας κατάφεραν να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σωματίδια μικρότερα από 10mm και πάχος στρώσης μικρότερο των 10 mm. Αυτή η τεχνολογία είναι μία παραλλαγή της SLM ,ονομάζεται micro SLM και αναμένεται με την συνεχή εξέλιξή της να βρει εφαρμογές στην κυτταρική βιολογία, την βιοιατρική επιστήμη και την κλινική διάγνωση. Αναφορικά με τον τομέα της αεροδιαστημικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας μία τέτοιου είδους εξέλιξη της SLM προβλέπει την εγκατάσταση συσκευών και αισθητηρίων σε μικροκλίμακα και νανοκλίμακα με σκοπό τον ακριβή έλεγχο μακροδομών. Μία άλλη βιομηχανία που θα συνεχίσει να εξελίσσεται παράλληλα με την SLM είναι αυτή των κοσμημάτων , καθώς προβλέπονται προσπάθειες να συμπεριλάβει σε υλικά εκτύπωσης πολύτιμα μέταλλα όπως χρυσό, πλατίνα και κράματα παλλαδίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΔΟΚΟΥ

4.1. ΣΤΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΔΟΚΟΥ

Στην παρούσα Σπουδαστική εργασία έγινε σχεδίαση και μοντελοποίηση μίας δοκού τετραγωνικής διατομής κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα. Η μοντελοποίηση έγινε με το πρόγραμμα ANSYS 2019 R1. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η γεωμετρία της δοκού πριν την εφαρμογή δυνάμεων.



Εικόνα 37 Μοντελοποίηση συμβατικής δοκού στο ANYS.

Click an object. Double-click to select an edge loop	Triple-click to select a solid.	ANSYS 2019 R1
Ŧ	Y	
z + (<u>x</u>)	2	

Εικόνα 38 Διατομή δοκού.

De	Details of "SYS\Solid" 4		
+	Graphics Properties		
Ŧ	Definition		
Ξ	Material		
	Assignment	Structural Steel	
	Nonlinear Effects	Yes	
	Thermal Strain Effects	Yes	
÷	Bounding Box		
Ŧ	Properties		
÷	Statistics		
Ξ	CAD Attributes		
	PartTolerance:	0.00000001	
	Color:143.175.143		

Εικόνα 39 Ιδιότητες σχεδίασης και υλικό δοκού.

Στην συνέχεια για να μπορέσει να γίνει η ανάλυση στην γεωμετρία της δοκού καθώς και να εξαχθούν τα απαραίτητα αποτελέσματα σχετικά με τις κατανομές τάσεων και παραμορφώσεων χρειάστηκε να εισαχθεί στο μοντέλο της δοκού ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων τέτοιο ώστε να μας εξάγει τα ακριβέστερα δυνατά αποτελέσματα. Παρακάτω παρουσιάζεται το ακριβές πλέγμα πεπερασμένων που χρησιμοποιήθηκε (meshing) για να εξαχθούν τα αποτελέσματα. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς το πλέγμα δεν έχει στοιχεία ίδιου τύπου σε όλο το μήκος της δοκού. Αντίθετα συνδυάζει πολλούς διαφορετικούς τύπους πεπερασμένων στοιχείων ανάλογα με τις ανάγκες της γεωμετρίας της δοκού στη συγκεκριμένη θέση. Φαίνεται το πλέγμα να είναι πυκνότερο στην άκρη της δοκού και να προσαρμόζεται με διαφορετικό τρόπο στις διάφορες γεωμετρίες της δοκού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εξαχθούν συμπεράσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια από το να χρησιμοποιούνταν ένας τύπος πλέγματος για ολόκληρη την δοκό.



Εικόνα 40 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων κατά μήκος της συμβατικής δοκού.



Εικόνα 41 Μορφή πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στην άκρη της δοκού.

4.2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΠΑΚΤΩΜΕΝΗΣ ΔΟΚΟΥ

Στη συνέχεια της μοντελοποίησης της δοκού, χρειάστηκε να οριστούν οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες της δοκού, καθώς και οι δυνάμεις που θα ασκηθούν σε αυτήν, με σκοπό την διεξαγωγή πειραμάτων. Για τους σκοπούς αυτούς σχεδιάστηκε μία συμβατική δοκός πακτωμένη στο ένα άκρο με μία δύναμη σταθερού μέτρου να ασκείται στο άλλο άκρη της. Παρακάτω φαίνονται τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα τα οποία είναι η αρχικές συνθήκες φόρτισης και στήιριξης της δοκού, το υλικό της και ο τύπος του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και τα ζητούμενα που θέλαμε να έχουμε μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης που είναι η κατανομή ισοδύναμων τάσεων, παραμορφώσεων και κατανομή ισοδύναμης ελαστικής παραμόρφωσης.



Εικόνα 42 Δεδομένα και Ζητούμενα προβλήματος πακτωμένης δοκού.



Εικόνα 43 Αρχικές συνθήκες φόρτισης και στήριξης της δοκού.

4.2.1. Ανάλυση Τάσεων

Η συμπεριφορά της δοκού μελετήθηκε ακριβέστερα με την επιβολή 3 διαφορετικών δυνάμεων στο άκρος της και εξαγωγή όμοιων αποτελεσμάτων και στις 3 περιπτώσεις. Αρχικά στην δοκό επιβλήθηκε δύναμη 100Ν στην συνέχεια 250Ν και τέλος 500 Ν. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση τάσεων κατά μήκος της δοκού για τις διάφορες δυνάμεις που ασκήθηκαν.

Για υποβολή δύναμης 100Ν.

Στην περίπτωση της επιβολής δύναμης 100N η ανάλυση τάσεων φαίνεται στις παρακάτω εικόνες που προέκυψαν από την μοντελοποίηση του προβλήματος της δοκού στο Ansys.



Εικόνα 44 Ανάλυση τάσεων πακτωμένης δοκού σε επιβολή δύναμης 100Ν.



Εικόνα 45 Κατανομή τάσεων στο άκρο x=L της δοκού. Σημείο επιβολής δύναμης.



Εικόνα 46 Κατανομή τάσεων στο σημείο x=0 της δοκού. Σημείο πάκτωσης.

Για επιβολή δύναμης μέτρου 100 N η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται κατά μήκος της δοκού είναι 10.006 MPα και συναντάται όωπς είναι αναμενόμενο στο σημείο της πάκτωσης.

Για επιβολή δύναμης 250Ν.

Στην συνέχεια της μοντελοποίησης έγινε επιβολή δύναμης 250 N και η ανάλυση τάσεων για αυτή την φόρτιση φαίνεται στις παρακάτω εικόνες που προέκυψαν από την μοντελοποίηση του προβλήματος της δοκού στο Ansys.



Εικόνα 47 Ανάλυση τάσεων πακτωμένης δοκού σε επιβολή δύναμης 250Ν.



Εικόνα 48 Κατανομή τάσεων στα σημείοα x=0 της δοκού (πάκτωση), και x=L (σημείο επιβολής δύναμης).

Στην περίπτωση των 250 Ν επίσης παρατηρούμε την μέγιστη τάση να εμφανίζεται στο σημείο της πάκτωσης καθώς και αυξημένη τάση παρατηρείται στο σημείο που ασκείται η δύναμη, δηλαδή στο άκρο της δοκού. Η τιμή της μέγιστης τάσης έχει μεταβληθεί στα 25.015 ΜΡα συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση.

Για επιβολή δύναμης 500Ν.

Τελευταία παρουσιάζεται η περίπτωση στην οποία επιβάλλεται στην δοκό δύναμη 500N η οποία είναι η μέγιστη δύναμη που θα ασκηθεί και με βάση αυτήν θα δημιουργηθούν οι δυσμενέστερες συνθήκες φόρτισης για την εξαγωγή των ασφαλέστερων συμπερασμάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή τάσεων σε εικόνες που προέκυψαν από την μοντελοποίηση του προβλήματος της δοκού στο Ansys.



Εικόνα 49 Ανάλυση τάσεων πακτωμένης δοκού σε επιβολή δύναμης 500Ν.



Εικόνα 50 Κατανομή τάσεων στα σημεία x=0 της δοκού (πάκτωση) , και x=L (σημείο επιβολής δύναμης).

Σαφώς και σε αυτήν την περίπτωση αναπτύσσεται μέγιστη τάση μεγαλύτερη και από τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις και η τιμή της είναι 50.031MPa. Επαναλαμβάνεται η παρατήρηση ότι η μέγιστη τάση εντοπίζεται στο σημείο της πάκτωσης, καθώς επίσης αρκετά υψηλή είναι και η τάση που παρατηρείται στο σημείο άσκησης της φόρτισης.

Δύναμη(N)	σ _{max} (Mpa)	σ _{min} (Mpa)
100	10.006	0.003128
250	25.015	0.007821
500	50.031	0.015642

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα από την ανάλυση τάσεων στην δοκό σε επιβολή 3 διαφορετικών δυνάμεων, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2 Αποτελέσματα ανάλυσης τάσεων σε διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης.

Παρατηρείται και στις 3 περιπτώσεις ότι η μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων βρίσκεται στο σημείο που ασκείται η δύναμη αλλά και στην πάκτωση, γεγονός που δεν μας κινεί το ενδιαφέρον καθώς συνάδει με τις γνώσεις μας έως τώρα σχετικά με την ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σε πακτωμένη δοκό.

4.2.2. Ανάλυση Παραμορφώσεων

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε και ανάλυση παραμορφώσεων για τις τρεις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης που επιβλήθηκαν στην δοκό. Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις παραμορφώσεις και τις ισοδύναμες ελαστικές παραμορφώσεις για τις τρεις περιπτώσεις, 100N, 250N και 500N.

Για υποβολή δύναμης 100Ν.

Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες από την ανάλυση παραμορφώσεων και ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην δοκό, υπο την επιβολή δύναμης 100N. Η ανάλυση έγινε στο Ansys υπο τις ίδιες συνθήκες με την ανάλυση τάσεων που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Σπουδαστική Εργασία 67 Αριστέα Αποστολάκη



Εικόνα 51 Ανάλυση Παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού για επιβολή δύναμης 100Ν.



Εικόνα 52 Κατανομή παραμορφώσεων στο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης).



Εικόνα 53 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού για επιβολή δύναμης 100Ν.



Εικόνα 54 Κατανομή ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων στο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης).

Στην πρώτη περίπτωση της επιβολής δύναμης 100Ν παρατηρείται τιμή μέγιστης παραμόρφωσης 0.0027561mm. Η τιμή της συγκεκριμένης παραμόρφωσης μπορεί να θεωρηθεί μικρή όπως είναι αναμενόμενο κατ' αντιστοιχία με την δύναμη που ασκείται. Η μέγιστη παραμόρφωση παρατηρείται στο άκρο της δοκού x=L στο σημείο που ασκείται η δύναμη, καθώς μηδενική παραμόρφωση παρατηρείται στην πάκτωση της δοκού.

Για επιβολή δύναμης 250Ν.

Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες από την ανάλυση παραμορφώσεων και ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην δοκό, υπο την επιβολή δύναμης 250N.



Εικόνα 55 Ανάλυση Παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού για επιβολή δύναμης 250Ν.

Σπουδαστική Εργασία 69 Αριστέα Αποστολάκη



Εικόνα 56 Κατανομή παραμορφώσεων στο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης).



Εικόνα 57 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού και στο σημείο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης) για επιβολή δύναμης 250N.

Στις παραπάνω εικόνες φαίνονται οι παραμορφώσεις κατά μήκος της δοκού και στο σημείο x=L (σημείο άσκησης της δύναμης) για επιβολή δύναμης 250 Ν. Παρατηρείται ότι η μέγιστη

τιμή της παραμόρφωσης είναι 0.068902 mm και βρίσκεται στο μέγιστο μήκος της δοκού x=L , στο σημείο δηλαδή που ασκείται η δύναμη 250 Ν. Αντίθετα, μηδενικές παραμορφώσεις παρατηρούνται στο σημείο της πάκτωσης.

Για επιβολή δύναμης 500Ν.

Τρίτη και τελευταία παρουσιάζεται η περίπτωση επιβολής δύναμης 500Ν. Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες από την ανάλυση που έγινε κατά μήκος της δοκού στο Ansys και φαίνονται οι κατανομές παραμόρφωσης και ισοδύναμης ελαστικής παραμόρφωσης στα κρίσιμα σημεία της διατομής.



Εικόνα 58 Ανάλυση παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού και στο σημείο x=L (σημείο άσκησης φόρτισης) για επιβολή δύναμης 500N.

Σπουδαστική Εργασία 71 Αριστέα Αποστολάκη



Εικόνα 59 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού και στο σημείο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης) για επιβολή δύναμης 500N.

Στα παραπάνω σχήματα φαίνεται η κατανομή των παραμορφώσεων, υπό την υποβολή μέγιστης δύναμης 500N στο άκρο του δοκιμίου. Παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση ότι στο μέγιστο μήκος x=L της δοκού εμφανίζεται η μέγιστη παραμόρφωση, της οποίας η τιμή ισούται με 0.1378 mm. Επίσης μηδενική παραμόρφωση υφίσταται η δοκός στο σημείο της πάκτωσης. Η τελευταία περίπτωση όπου επιβάλλεται δύναμη 500N αποτελεί την δυσμενέστερη συνθήκη φόρτισης εκ των τριών και από αυτήν θα καθοριστεί ο χαρακτηρισμός της δοκού σχετικά με την αντοχή της σε αστοχία.

Συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, τα αποτελέσματα για την παραμόρφωση και την ισοδύναμη ελαστική παραμόρφωση για κάθε μία από τις τρεις συνθήκες φόρτισης.

Σπουδαστική Εργασία 72 Αριστέα Αποστολάκη

Δύναμη (N)	ε _{max}	ε _{eq. max}	ε _{eq. min}
100	0.027561	5.0669 e-5	2.987 e-8
250	0.068902	0.00012667	7.4686e-8
500	0.1378	0.00025334	1.4937e-7

Πίνακας 3 Αποτελέσματα ανάλυσης για τις παραμορφώσεις και τις ισοδύναμες ελαστικές παραμορφώσεις για 3 διαφορετικές συνθήκες φόρτισης της δοκού.

Στα σημεία μέγιστης παραμόρφωση της δοκού (μέγιστο μήκος της δοκού x=L) είναι διακριτό το βέλος κάμψης που δημιουργείται στην διατομή λόγω παραμόρφωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ 3D PRINTED ΔΟΚΟΥ

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας έγινε μοντελοποίηση της δοκού η οποία σε αυτήν την περίπτωση προορίζεται να κατασκευαστεί με την μέθοδο του 3D Printing. Η περιγραφή του προβλήματος, οι παραδοχές καθώς και οι συνθήκες φόρτισης είναι ίδιες με την περίπτωση της πακτωμένης δοκού που κατασκευάζεται με συμβατικές μεθόδους.

5.1. ΣΤΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ 3D ΔΟΚΟΥ

Αρχικά, παρουσιάζεται η γεωμετρία της δοκού που πρόκειται να κατασκευαστεί με την μέθοδο της προσθετικής κατασκευής (3D Printing). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η γεωμετρία του μοντέλου της δοκού τετραγωνικής διατομής, όπως αυτό σχεδιάστηκε στο Ansys με τα ίδια χαρακτηριστικά και ιδιότητες της δοκού του κεφαλαίου 4.


Εικόνα 60 Γεωμετρία πακτωμένης δοκού που πρόκειται να εκτυπωθεί με την μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στην περίπτωση της δοκού του προηγούμενου κεφαλαίου, είχαμε σχεδιάσει μία συμπαγή δοκό τετραγωνικής διατομής ανοξείδωτου χάλυβα, πακτωμένη στο αριστερό άκρο και ελεύθερη στο δεξί. Στην περίπτωση της σχεδίασης μίας δοκού που πρόκειται να εκτυπωθεί με τρισδιάστατη εκτύπωση, η κύρια διαφορά είναι ότι η δοκός παύει να είναι συμπαγής στο εσωτερικό της και αποτελείται από πλέγμα. Το πλέγμα των 3D printed εξαρτημάτων έχει διττό ρόλο, αρχικά σε επίπεδο διεργασίας έχει υποστηρικτικό ρόλο, καθώς συγκρατεί τις στρώσεις του υλικού κατά την εκτύπωση και δεύτερον σε επίπεδο λειτουργικότητας του εξαρτήματος έχει πρακτικό ρόλο να κάνει την δοκό όσο στιβαρή χρειάζεται έτσι ώστε να συγκρατήσει το μέγιστο των φορτίων που πρόκειται να δεχτεί στην εφαρμογή που προορίζεται.

Με βάση τα φορτία που έχουν οριστεί από το πρόβλημα της πακτωμένης δοκού, το οποίο πραγματεύεται η παρούσα εργασία, παρακάτω παρουσιάζεται το πλέγμα που επιλέχθηκε στο εσωτερικό της δοκού. Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Επιλέχθηκε πλέγμα το οποίο να έχει στοιχεία κυβικής γεωμετρίας, έτσι ώστε να παραλαμβάνει τα φορτία για τα οποία προορίζεται η δοκός, καθώς και να υπάρχει κέλυφος πάχους 1 mm. στην εξωτερική επιφάνεια της δοκού. Επίσης δόθηκαν οι διαστάσεις του πλέγματος, το πόσο πυκνό ή αραιό επιθυμούμε να είναι και ως προς ποια κατεύθυνση να κινείται. Έπειτα από μια σειρά δοκιμών και αποτελεσμάτων επιλέχθηκε το πλέγμα να καλύπτει το 33,2% της δοκού καθώς με βάση τις φορτίσεις που προορίζεται να δεχτεί είναι επαρκές.

Options	무			
🐼 Shell				
Thicken direction Inside Outside Thickness 1mm Keep original bodies 				
🔯 Infill				
Type: None Basic Custom				
Shape: Lattices				
🕸 🕸 🖄 🚯				
∞ ⊗				
🕸 🌑 🍩 🕸				
None				
 Remove partial segments 				
 Boundary conforming 				
Sizing:				
Fill %33.2% ▼				
Length 7.91mm •				
Thickness 2.97mm				
Preview:				
Direction X-Axis 🔻 🚇				
Offset 🔻 🏷				

Εικόνα 61 Χαρακτηριστικά πλέγματος που επιλέχθηκε για την γεωμετρία της δοκού.







Εικόνα 63 Εσωτερικό γεωμετρίας 3D δοκού μετά την επιλογή πλέγματος

Αφού δημιουργήθηκε το εσωτερικό πλέγμα της δοκού, απαιτείται να γίνει ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία κατά μήκος της γεωμετρίας. Αυτό προϋποθέτει την χρήση κατάλληλων στοιχείων έτσι ώστε να γίνει η βέλτιστη δυνατή ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων. Σε γενικές γραμμές η επιλογή πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται να είναι μία απλή διαδικασία, καθώς εύκολα μπορεί να διακριθεί ποια στοιχεία ικανοποιούν μία διατομή σε όλα της τα σημεία. Τα πράγματα όμως αλλάζουν όταν πρόκειται να πρέπει να δημιουργηθούν πεπερασμένα στοιχεία κατά μήκος μίας επιφάνειας που δεν είναι συμπαγής στο εσωτερικό της. Η κατανομή των δυνάμεων θα αλλάξει και έτσι χρειάζεται διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία σε κάθε σημείο. Παρακάτω φαίνονται λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά των πεπερασμένων στοιχείων που επιλέχθηκαν για την συγκεκριμένη ανάλυση.

De	Details of "Patch Independent" - Method 4			
=	Scope			
	Scoping Method	Geometry Selection		
	Geometry	1 Body		
Ξ	Definition			
	Suppressed	No		
	Method	Tetrahedrons		
	Algorithm	Patch Independent		
	Element Order	Use Global Setting		
Ξ	Advanced			
	Defined By	Approx number of Ele		
	Approx number of Elements per Part	5.e+005		
	Feature Angle	30.0°		
	Mesh Based Defeaturing	Off		
	Refinement	Proximity and Curvature		
	Min Size Limit	5.0 mm		
	Num Cells Across Gap	Default		
	Curvature Normal Angle	Default		
	Smooth Transition	Off		
	Growth Rate	Default		
	Minimum Edge Length	0.0 mm		
	Write ICEM CFD Files	No		

Εικόνα 64 Χαρακτηριστικά πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της 3D printed δοκού.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η δοκός με την τελική επιλογή πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση που ακολουθεί.



Εικόνα 65 Γεωμετρία 3D Printed δοκού με πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε.

Σπουδαστική Εργασία 77 Αριστέα Αποστολάκη



Εικόνα 66 Γεωμετρία 3D Printed δοκού με πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε.Σημείο πάκτωσης.

Στις παραπάνω εικόνες μπορεί εύκολα να διακριθούν οι ασυνέχειες του πλέγματος κατά μήκος της διατομής και συγκεκριμένα στα σημεία που η γεωμετρία έχει γωνίες. Συγκεκριμένα στο σημείο της πάκτωσης και στις πλευρές της δοκού, φαίνονται έντονες ασυνέχειες των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς λόγω του πλέγματος δεν είναι λεία η επιφάνεια ώστε να καλυφθεί ομοιόμορφα από τα στοιχεία. Παρ' όλα αυτά μετά από δοκιμές διαφορετικών πεπερασμένων στοιχειων το πλέγμα που φαίνεται παραπάνω έδινε τα ακριβέστερα αποτελέσματα στην ανάλυση.

Στη συνέχεια ορίζεται στο Ansys το γνωστό σε εμάς από το κεφάλαιο 4 πρόβλημα της πακτωμένης δοκού. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, εισάγεται στο μοντέλο η πάκτωση στο αριστερό άκρο, η δύναμη στο δεξί ελεύθερο άκρο, τα δεδομένα χαρακτηριστικά της δοκού καθώς φαίνονται και τα ζητούμενα της ανάλυσης, που είναι η ανάλυση τάσεων, παραμορφώσεων και ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων.



Εικόνα 67 Δεδομένα και Ζητούμενα προβλήματος 3D printed πακτωμένης δοκού.

Ακόμα μία διαφοροποίηση στην μοντελοποίηση δοκού όταν αυτή πρόκειται να εκτυπωθεί με την μέθοδο 3D printing είναι η επιβολή αρχικών συνθηκών. Όπως στην προετοιμασία για ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, έπρεπε να φτιάξουμε κατάλληλα στοιχεία για να έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα λόγω της ασυνέχειας του πλέγματος στο εσωτερικό της δοκού, έτσι και στην περίπτωση εισαγωγής αρχικών συνθηκών απαιτείται μία διαφοροποιημένη διαδικασία. Για την επιβολή πάκτωσης ή δύναμης στα άκρα της δοκού, είναι αδύνατον να επιλέξουμε συγκεκριμένη πλευρά, λόγω του πλεγματος που έχει εισαχθεί εσωτερικά της διατομής, έτσι επιλέγουμε ένα σύνολο κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων κατά μήκος της διατομής. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η περιοχή στην οποία ασκείται η δύναμη και η πάκτωση που επιθυμούμε. Οι περιοχές κόμβων στις οποίες εφαρμόζονται οι αρχικές συνθήκες φόρτισης και πάκτωσης φαίνονται ως έγχρωμες στις παρακάτω εικόνες.

fixed 6/2/2021 1:07 AM fixed		
Geometry / Print Preview / Report Preview /	0.00 40.00 80.00 (mm) 20.00 60.00	

Εικόνα 68 Περιοχή κόμβων στην διατομή της 3D printed δοκού, στην οποία ασκείται η πάκτωση.



Εικόνα 69 Περιοχή κόμβων στην διατομή της 3D printed δοκού, στην οποία ασκείται η δύναμη.

5.2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ 3D ΠΑΚΤΩΜΕΝΗΣ ΔΟΚΟΥ

Αφού ολοκληρώθηκε η κατασκευή του μοντέλου της 3D πακτωμένης δοκού, παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις τάσεων, παραμορφώσεων και ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Για λόγους σύγκρισης και εξαγωγής συμπερασμάτων ανάμεσα στην πακτωμένη δοκό συμβατικής κατασκευής και σε αυτήν που πρόκειται να κατασκευαστεί με τρισδιάστατη εκτύπωση παρουσιάζονται οι ζητούμενες αναλύσεις για τρεις διαφορετικές δυνάμεις.

5.2.1. Ανάλυση Τάσεων

Για επιβολή δύναμης 100Ν.

Αρχικά παρουσιάζεται η ανάλυση τάσεων για το μοντέλο της τρισδιάστατης δοκού για επιβολή δύναμης 100N όπως αυτό σχεδιάστηκε στο Ansys.



Εικόνα 70 Ανάλυση τάσεων κατά μήκος 3D printed πακτωμένης δοκού σε επιβολή δύναμης 100Ν.



Εικόνα 71 Ανάλυση τάσεων 3D printed δοκού στα σημεία της πάκτωσης (x=0) και της επιβολής της δύναμης (x=L).

Για επιβολή δύναμης 100 N η τιμή της μέγιστης τάσης είναι 20.968MPa και παρατηρείται στην περιοχή προς την πάκτωση και προς την περιοχή που ασκείται η δύναμη. Γεγονός το οποίο θεωρείται αναμενόμενο με βάση τις γνώσεις μας και παρατηρείται αντιστοιχία με την περίπτωση της δοκού του κεφαλαίου 4. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω του εσωτερικού πλέγματος της 3D printed δοκού και της ανομοιογένειας στην επιφάνεια, πλέον αναφερομαστε σε περιοχές με μέγιστη τάση και όχι σε συγκεκριμένες επιφάνειες ή σημεία.

Για επιβολή δύναμης 250 Ν.

Στην δεύτερη περίπτωση παρουσιάζεται η ανάλυση τάσεων για επιβολή δύναμης 250 Ν. Είναι μία μέση κατάσταση δύναμης για λόγους συγκρίσης και εξαγωγής συμπερασμάτων.







Εικόνα 73 Ανάλυση τάσεων 3D printed δοκού στο σημείο της πάκτωσης (x=0).

E: Static Structural Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa				ANSYS 2019 R1
Time: 1	Min			
6/2/2021 1:19 AM	Max	120		
52.421 Max				
46.596		y		
40.772				
34.947				
29.123				
23.298				
1/4/4				
11.649 5.0245				
9.4240 P.4240				Y
- 0.43192-0 Will				A
				• T
				•
				Z 🛶 🛶 🌢
	0.00	50.00	100.00 (mm)	
	0.00	50.00		
	25	00 75.	00	

Εικόνα 74 Ανάλυση τάσεων 3D printed δοκού στο σημείο της επιβολής της δύναμης (x=L).

Σε αυτήν την περίπτωση της επιβολής δύναμης 250 Ν έχουμε μέγιστη τιμή τάσης 52.421MPα και οι περιοχές που αυτή παρατηρείται είναι στο επάνω και κάτω μέρος της πάκτωσης, και στο σημείο που ασκείται η δύναμη.

Για επιβολή δύναμης 500Ν.

Τέλος, παρουσιάζεται η ανάλυση τάσεων κατά μήκος της δοκού όταν ασκείται δύναμη 500N στο άκρος της , η οποία αποτελεί και την δυσμενέστερη φόρτιση για το μοντέλο. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η ανάλυση στο Ansys.



Εικόνα 75 Ανάλυση τάσεων κατά μήκος 3D printed πακτωμένης δοκού σε επιβολή δύναμης 500Ν.



Εικόνα 76 Ανάλυση τάσεων 3D printed δοκού στα σημεία της πάκτωσης (x=0) και της επιβολής της δύναμης (x=L).

Για επιβολή δύναμης 500 N η μέγιστη τιμής τάσης είναι 104.84 Mpa. Επίσης παρατηρείται σε όμοιες περιοχές όπως τις άλλες δύο περιπτώσεις δυνάμεων στα 250N και 100 N.

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ανάλυσης για τις τρις διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης στην 3D printed δοκό.

Δύναμη(N)	σ _{max} (Mpa)	σ _{min} (Mpa)
100	20.968	3.2917 e-8
250	52.421	8.4319 e-8
500	104.84	1.6793 e-7

Πίνακας 4 Αποτελέσματα ανάλυσης τάσεων για τις τρεις περιπτώσεις φόρτισης σε 3D printed δοκό.

Από τα παραπάνω συγκεντρωτικά αποτελέσματα τιμών τάσεων που αναπτύσσονται στο μοντέλο, παρατηρείται ότι συγκριτικά με την συμβατική δοκό, η τιμή των μέγιστων τάσεων σχεδόν διπλασιάστηκε και οι ελάχιστες τάσεις μειώθηκαν.

5.2.2. Ανάλυση Παραμορφώσεων

Εν συνεχεία, στο δεύτερο σκέλος της ανάλυσης 3D printed δοκού στο Ansys παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης παραμορφώσεων και ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων για την δοκό στις τρεις γνωστές περιπτώσεις φόρτισης.

Για επιβολή δύναμης 100Ν.

Αρχικά, με την επιβολή δύναμης 100 N η ανάλυση παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 77 Ανάλυση Παραμορφώσεων κατά μήκος της 3D printed πακτωμένης δοκού για επιβολή δύναμης 100Ν.



Εικόνα 78 Κατανομή παραμορφώσεων 3D printed δοκού στο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης).



Εικόνα 79 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού για επιβολή δύναμης 100Ν.





Εικόνα 80 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων στο σημείο x=0 (σημείο πάκτωσης) και στο x=L (σημείο επιβολής δύναμης) για επιβολή δύναμης 100N.

Στην περίπτωση της φορτισης με δύναμη 100N η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης είναι 0.05777mm και όπως είναι αναμενόμενο παρατηρείται στο μέγιστο μήκος της διατομής στο ελέυθερο άκρο που ασκείται η δύναμη. Μηδενική είναι η μετατόπιση στο σημείο της πάκτωσης

Για επιβολή δύναμης 250Ν.

Δεύτερη περίπτωση είναι η φόρτιση με 250Ν. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παραμορφώσεων και ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων φαίνονται στις εικόνες παρακάτω.



Εικόνα 81 Ανάλυση Παραμορφώσεων κατά μήκος της 3D printed πακτωμένης δοκού για επιβολή δύναμης 250N.



Εικόνα 82 Κατανομή παραμορφώσεων 3D printed δοκού στο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης).

Σπουδαστική Εργασία 87 Αριστέα Αποστολάκη



Εικόνα 83 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού για επιβολή δύναμης 250Ν.



Εικόνα 84 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων στο σημείο x=0 (σημείο πάκτωσης) για επιβολή δύναμης 250Ν.

Στην περίπτωση της φορτισης με δύναμη 250N η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης είναι 0.14443mm και όπως είναι αναμενόμενο και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται στο μέγιστο μήκος της διατομής στο ελέυθερο άκρο που ασκείται η δύναμη. Μηδενική είναι η μετατόπιση στο σημείο της πάκτωσης.

Για επιβολή δύναμης 500Ν.

Τέλος, παρακάτω παρουσιάζεται η ανάλυση παραμορφώσεων και ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων για τη δυσμενέστερη συνθήκη του προβλήματός μας, την εποβολή δύναμης 500N.



Εικόνα 85 Ανάλυση Παραμορφώσεων κατά μήκος της 3D printed πακτωμένης δοκού για επιβολή δύναμης 500N.



Εικόνα 86 Κατανομή παραμορφώσεων 3D printed δοκού στο σημείο x=L (σημείο επιβολής δύναμης).



Εικόνα 87 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της πακτωμένης δοκού για επιβολή δύναμης 500N.



Εικόνα 88 Ανάλυση Ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων στο σημείο x=0 (σημείο πάκτωσης) για επιβολή δύναμης 500N.

Στην περίπτωση της φορτισης με δύναμη 500N η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης είναι 0.28885mm και όπως είναι αναμενόμενο και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται στο μέγιστο μήκος της διατομής στο ελέυθερο άκρο που ασκείται η δύναμη. Μηδενική είναι η μετατόπιση στο σημείο της πάκτωσης.

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από την ανάλυση παραμορφώσεων και ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων και για τις τρεις περιπτώσεις φόρτισης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Δύναμη (N)	ε _{max}	ε _{eq. max}	ε _{eq. min}
100	0.05777	0.00016546	3.011 e-13
250	0.14443	0.00041365	7.2283e-13
500	0.28885	0.00082729	1.4473e-12

Πίνακας 5 Αποτελέσματα ανάλυσης για τις παραμορφώσεις και τις ισοδύναμες ελαστικές παραμορφώσεις για 3 διαφορετικές συνθήκες φόρτισης της 3D printed δοκού.

5.3. ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ 3D ΔΟΚΟΥ

Σε συνέχεια της εργασίας, πραγματοποιήθηκε τοπολογική βελτιστοποίηση της δοκού η οποία πρόκειται να εκτυπωθεί με 3D Printing. Η βελτιστοποίηση σχετικά με την γεωμετρία της δοκού χωρίστηκε σε δύο σκέλη. Αρχικά έγινε μία βελτιστοποίηση στην δοκό σχετικά με την πυκνότητα του εσωτερικού πλέγματος που βρίσκεται στο <<σώμα>> της δοκού και στη συνέχεια έγινε μία ανάλυση έτσι ώστε να μειωθεί η μάζα της δοκού στο ελάχιστον δυνατό, τόσο όσο να μην επηρεάζεται η λειτουργικότητά της δεδομένου των συνθηκών που έχουν οριστεί. Παρακάτω φαίνεται η τοπολογική βελτιστοποίηση ως προς την πυκνότητα του πλέγματος της δοκού.



Εικόνα 89 Τοπολογική Βελτιστοποίηση 3D printed δοκού, ως προς την πυκνότητα του πλέγματος.

Από την ανάλυση είναι φανερό με βάση την άσκηση μέγιστης δύναμης, σε ποια σημεία απαιτείται πυκνότερο πλέγμα υλικού και σε ποια αραιότερο ή και καθόλου.

Τέλος παρουσιάζεται η μορφή της τρισδιάστατης δοκού μετά την τοπολογική βελτιστοποίηση με σκοπό την μείωση μάζας για συνθήκες μέγιστης φόρτισης, που στην περίπτωσή μας είναι 500N.



Εικόνα 90 Τοπολογική βελτιστοποίηση 3D printed δοκού, ως προς την μείωση της μάζας.

Είναι φανερό ότι η τελική μορφή της γεωμετρίας διατήρησε στιβαρό και πυκνό το πλέγμα στην διάταξη σα σημεία που υπάρχει συγκέντρωση τάσεων και απαιτούνται για να διατηρηθούν οι μηδενικές παραμορφώσεις δηλαδή στο σημείο της πάκτωσης , αλλά αφαιρέθηκε υλικό από την δοκό στα σημεία που δεν χρειάζεται για άσκηση μέγιστης δύναμης 500Ν. Η μείωση μάζας είναι εξαιρετικά σημαντική καθώς μπορεί να μειώσει το τελικό βάρος της δοκού έως και στο μισό σε σχέση με το βάρος που θα είχε η ίδια δοκός εάν είχε κατασκευαστεί με συμβατικές μεθόδους.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα αποτέλεσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης της δοκού, καθώς και η μάζα σε kg που αφαιρέθηκε από την δοκό ως αποτέλεσμα.

Results		11 Minimum	1 - 003
Minimum	1.e-003	Minimum	1.e-005
Maximum	1.	Maximum	1.
Average	0.66957	Average	0.63868
Original Volume	6.5e+005 mm ³	Original Volume	2.559e+005 mm ³
Final Volume	3.9509e+005 mm ³	Final Volume	1.5632e+005 mm3
Percent Volume of Original	60.783	Percent Volume of Original	61.086
Original Mass	5.1025 kg	Original Mass	2.0088 kg
Final Mass	3.1015 kg	Final Mass	1.2271 kg
Percent Mass of Original	60.783	Percent Mass of Original	61.086
Visibility			

Εικόνα 91 Αποτελέσματα τοπολογικής βελτιστοποίησης 3D Printed δοκού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ - ΘΕΩΡΙΑ ΕΡΓΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

6.1. ΘΕΩΡΙΑ ΕΡΓΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ- VON MISES CRITERION

Η θεωρία του κριτηρίου έργου παραμόρφωσης διατυπώθηκε από τον Von Mises το 1913, όμως η φυσική ερμηνεία της δόθηκε 20 χρόνια αργότερα. Σύμφωνα με την ερμηνεία της θεωρίας ένα υλικό αστοχεί όταν η αποθηκευμένη σε αυτό ενέργεια, η οποία μπορεί να προκαλέσει οποιαδήποτε γεωμετρική παραμόρφωση, ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο κρίσιμο όριο. Έτσι το κριτήριο αστοχίας Von Mises ονομάζεται και Maximum distortion strain energy criterion το οποίο προκύπτει από την σχέση που συνδέει όριο διαρροής με την ενέργεια παραμόρφωσης.

Ο τύπος που συνδέει το όριο διαρροής του υλικού σε σύνθετη καταπόνηση με την ενέργεια παραμόρφωσης είναι ο παρακάτω:

$$W_D = \frac{J_2}{2G}$$

Όπου το J_2 προκύπτει από την παρακάτω συνάρτηση του ορίου διαρροής σε μία κατάσταση σύνθετης καταπόνησης.

$$f(J_2) = J_2 - k^2$$

Η μαθηματική έκφραση του κριτηρίου είναι η ακόλουθη, η οποία δημιουργήθηκε με την βοήθεια του τανυστή των τάσεων.

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^{2} + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^{2} + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^{2} + 6(\sigma_{yz}^{2} + \sigma_{zx}^{2} + \sigma_{xy}^{2}) = 6k^{2}$$

Όπου:

k είναι η τάση διαρροής του υλικού υπο καθαρή διατμητική τάση. Υπολογίζεται με ένα απλό πείραμα στρέψης και είναι μία σταθερά για κάθε υλικό.

Παρακάτω φαίνεται η γεωμετρική αναπαράσταση του κριτηρίου στον χώρο των τάσεων και σε επίπεδη εντατική φόρτιση αντίστοιχα. Για την πρώτη περίπτωση όπου γίνεται αναπαράσταση στον χώρο των τάσεων οποιοσδήποτε συνδυασμός τάσεων αντιστοιχεί σε σημείο εντός της κυλινδρικής επιφάνειας θεωρείται αποδεκτός και δεν οδηγεί σε αστοχία.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση δισδιάστατου προβλήματος η κυλινδρική επιφάνεια απεικονίζεται ως ελλειπτική γραμμή, όπου και πάλι οποιοσδήποτε συνδυασμός εκτός της παραπάνω περιοχής οδηγεί σε αστοχία του υλικού και θεωρείται μη αποδεκτός.



Εικόνα 92 Τόπος αστοχίας θεωρίας Von Mises σε 3D επίπεδο του υλικού. [22]



Εικόνα 93 Το κριτήριο Von Mises σε επίπεδη φόρτιση. [22]

Παρόλο που το κριτήριο αστοχίας Von Mises είναι ευρείας χρήσης και ανταποκρίνεται στις περισσότερες φορτίσεις λόγω της σαφούς του φυσικής σημασίας, υπάρχουν και ορισμένα σημεία που παρατηρούνται μειονεκτήματα στη χρήση του. Οι συγκεκριμένες περιπτώσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η μαθηματική του θεμελίωση απαιτεί ίδια αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό και θλίψη, έτσι είναι εύκολα αντιληπτό ότι περιορίζεται η εφαρμογή του αποκλειστικά και μόνο σε όλκιμα υλικά.
- Προβλέπει άπειρη αντοχή των υλικών όταν αυτά φορτίζονται με υδροστατική θλίψη ή με ομογενή τριαξονικό εφελκυσμό. Στην πρώτη περίπτωση η υπόθεση είναι ανεκτή και έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά από τον Bridgman. Απεναντίας η δεύτερη περίπτωση δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί ούτε από μαθηματικής ούτε από πειραματικής άποψης, όμως είναι εξαιρετικά ασυνήθιστη στις εφαρμογές της.
- Εν γένει οι προβλέψεις του κριτηρίου είναι ικανοποιητικές στις περισσότερες των περιπτώσεων, όμως στην περίπτωση της διαξονικής φόρτισης συνδυασμένου εφελκυσμού και θλίψης τα αποτελέσματα δεν είναι ακριβή. Οι περιπτώσεις αυτές απεικονίζονται στο δεύτερο και τέταρτο τεταρτημόριο του σχήματος της επίπεδης φόρτισης.

Κατά την διάρκεια του σχεδιασμού στοιχείων μηχανών είναι καθήκον κάθε μηχανικού να διατηρήσει την τιμή της τάσης Von Mises , κάτω από την τιμή του ορίου διαρροής του υλικού ώστε να θεωρηθεί η λειτουργία του εξαρτήματος ασφαλής. Το συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας βρίσκει συχνά ευρεία χρήση στην ανάλυση εξαρτημάτων με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, στις περισσότερες των περιπτώσεων στην ανάλυση σωληνώσεων ή δομικών δοκών, χρησιμοποιείται η θεωρία Von Mises ώστε να θεωρηθεί το εξάρτημα ασφαλές σε διάφορες συνθήκες φόρτισης.

6.2. ΕΠΙΡΡΟΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ SLM

Όπως έγινε αναφορά και στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας η μέθοδος SLM είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους της τρισδιάστατης εκτύπωσης με την χρήση μεταλλικών υλικών σε σκόνη. Κατά την γνωστή διαδικασία της SLM το laser λιώνει τους κόκκους του υλικού στο σημείο το οποίο δημιουργείται μία στιγμιαία λίμνη τήγματος (melt pool) με σκοπό να ενοποιήσει στη συνέχεια με ψύξη τις στρώσεις του εξαρτήματος που βρίσκεται προς εκτύπωση.

Η θερμοκρασία που εισάγει το λέιζερ στις στρώσεις του υλικού, είναι η αιτία για τις περισσότερες αστοχίες που μπορούν να επέλθουν στο εξάρτημα που έχει εκτυπωθεί με την μέθοδο SLM. Όπως στην αστοχία από παραμένουσες τάσεις, ανεπιθύμητες ιδιότητες επιπλέον υλικού καθώς και διαστρωματική αποκόλληση λόγω υψηλών θερμικών τάσεων. Συμπερασματικά, είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς ότι η θερμοκρασία είναι ένας σημαντικός παράγοντας σε μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιεί ακτίνες laser και για αυτό απαιτεί μεγάλη ακρίβεια στην κατανομή της. Για την βελτίωση του εξαρτήματος απαιτείται πλήρης κατανοήση και επίγνωση των θερμικών χαρακτηριστικών σε πραγματικό χρόνο. Η απαραίτητη θερμότητα ώστε να γίνει τήξη του υλικού και να δημιουργηθεί το εξάρτημα καθορίζεται από το λέιζερ. Η αλληλεπίδραση λέιζερ και υλικού είναι το κρισιμότερο σημείο για να μπορέσει κάποιος να μοντελοποιήσει την διαδικασία SLM. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις μοντελοποίησης του πεδίου θερμότητας κατά την μέθοδο SLM. Κάθε μοντέλο για να δημιουργηθεί χρειάστηκε τις δικές του παραδοχές, όπως άγνωστη θερμοκρασία, αμελητές ιδιότητες υλικού, αμελητέα

ενέργεια αλλαγής φάσης υλικού κτλ. Πρακτικά όμως είναι δύσκολο το να γίνει κάποια μέτρηση της θερμοκρασίας επι τόπου κατά την εκτύπωση, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και τις περιορισμένης προσβασιμότητας. Μερικές από τις μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς με σκοπό να εξαχθούν τα επιθυμητά απότελέσματα είναι, μέτρηση θερμοκρασίας εξ επαφής με την εισαγωγή ενσωματωμένων θερμοστοιχείων (embedded thermocouples) και χωρίς επαφή με την χρήση πυρόμετρων ακτινοβολίας (infrared pyrometer) ή κάμερας υπερύθρων (infrared camera). Το πυρόμετρο μετράει τυπικά την θερμοκρασία επάνω στην πλάκα εκτύπωσης, ενώ η θερμική κάμερα μετράει την θερμοκρασία μόνο στα σημεία που εκτίθενται στο λέιζερ, δηλαδη μόνο κατά μήκος της γεωμετρίας του εξαρτήματος που βρίσκεται προς εκτύπωση.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μοντέλο του εξαρτήματος που βρίσκεται προς εκτύπωση με σκοπό να βρεθεί η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της στρώσης του υλικού. Αρχικά, για να εξάγουμε ολοκληρωμένα και ασφαλή αποτελέσματα , θα πρέπει να λάβουμε υπόψη την θερμοκρασιακή είσοδο αλλά και τις απώλειες κατά την μέθοδο SLM. Σαν είσοδο έχουμε την ενέργεια από το λέιζερ που μεταφέρεται στην στρώση του υλικού είτε εν κινήσει είτε στατικά κατά μήκος του άξονα x, και ως έξοδο έχουμε την απώλεια θερμότητας με συναγωγή και με ακτινοβολία.

Όπου:

 Q_{conv} = απώλειες θερμότητας με συναγωγή

 $\mathbf{Q}_{\mathsf{rad}}$ = απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία



Εικόνα 94 Είσοδος θερμότητας με laser και απώλειες θερμότητας με συναγωγή και με ακτινοβολία.[26]

Η αναλυτική εξίσωση που περιγράφει όλη την μεταφορά θερμότητας και αύξηση θερμοκρασίας μέσω της ακτινοβολίας που μεταφέρει στην στρώση του υλικού το laser είναι βασισμένη στην εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου για στερεά υλικά:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho h V}{\partial x} = \nabla (k \nabla T) + \dot{q}$$

Όπου:

u είναι η εσωτερική ενέργεια, h η ενθαλπία, ρ η πυκνότητα, V η ταχύτητα κίνησης της πηγής θερμότητας (laser), t ο χρόνος της διαδικασίας, x η απόσταση, k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, T η θερμοκρασία και ġ είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την διεργασία.



Εικόνα 95 Τήξη κόκκων υλικού σε σκόνη κατά την μέθοδο SLM.[28]

Η σημειακή αύξηση της θερμοκρασίας όταν η πηγή θερμότητας βρίσκεται εν κινήσει, δίνεται από την εξίσωση αγωγιμότητας της θερμότητας ως εξής:

$$\theta_L(x, y, z, t) = \frac{P\eta}{2Rk_p \pi^{\frac{3}{2}}} \exp\left(\frac{Vx}{2k_p}\right) \int_{\frac{R}{2\sqrt{kt}}}^{\infty} \exp\left[-\xi^2 - \left(\frac{V^2 R^2}{16\kappa_p^2 \xi^2}\right)\right] d\xi$$

Όπου:

 θ_L είναι η αύξηση της θερμοκρασίας στην θέση (x,y,z) και σε χρόνο t.

η είναι η απορροφητικότητα του laser.

R είναι η απόσταση από την πηγή θερμότητας όπου $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

ξ είναι μεταβλητή συσχετιζόμενη με τον χρόνο, για λόγους αμεσότητας.

Εάν θεωρήσουμε ότι η μεταφορά θερμότητας από το λέιζερ γίνεται στατικά δηλαδή V=0, και ότι δεν λαμβάνουμε υπόψην μας τον τύπο του λέιζερ, γνωρίζοντας ότι:

$$Q_{\text{conv}} = A. h(T_s - T_0)$$
$$Q_{rad} = A. \varepsilon. \sigma(T_s^4 + T_0^4)$$

Όπου:

Α είναι το εμβαδόν της περιοχής του τήγματος, h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, ε είναι η εκπομπή ακτινοβολίας, σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann, Ts είναι η θερμοκρασία της λίμνης τήγματος και Το η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Επομένως, η εξίσωση αγωγιμότητας της θερμότητας για την λίμνη τήγματος γίνεται:

Σπουδαστική Εργασία 97 Αριστέα Αποστολάκη

$$\theta_s(x, y, z, t) = \frac{A[h(T_s - T_0) + \varepsilon. \sigma(T_s^4 + T_0^4)]}{2Rk_p \pi^{\frac{3}{2}}} \int_{\frac{R}{2\sqrt{kt}}}^{\infty} exp(-\xi^2) d\xi$$

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η στρώση του εξαρτήματος που πρόκεται να εκτυπωθεί με SLM καθώς και η είσοδος της θερμότητας και οι απώλειες θερμότητας από συναγωγή και ακτινοβολία ως ένα ενιαίο άθροισμα.



Εικόνα 96 Απεικόνιση της μεταφοράς θερμότητας σε μία στρώση υλικού κατα την μέθοδο 3D εκτύπωσης SLM. [25]

Είναι σαφές ότι στο τελικό αποτέλεσμα σημαντικό ρόλο παίζει και το υλικό που χρησιμοποιείται, η πυκνότητα του, η θερμικοί συντελεστές του, οι θερμομηχανικές ιδιότητες του υλικού καθώς και το μέγεθος των κόκκων του. Όλα αυτά συμβάλλουν στον τρόπο με τον οποίο η θερμοκρασία από την πηγή θερμότητας θα επηρεάσει τις στρώσεις του υλικού και κατ΄επέκτασην τις τελικές ιδιότητες του υλικού.

6.3. ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ SLM

Τελικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πρώιμη αναφορά και ανάπτυξη ενός τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας εξειδικευμένο για εξαρτήματα τα οποία πρόκειται να εκτυπωθούν με την μέθοδο 3D printing. Το ζητούμενο κριτήριο είναι βασισμένο στην κλασική θεωρία Έργου Παραμόρφωσης, και προσαρμοσμένο στην διαδικασία SLM.

Συμπληρωματικά με όσα αναφέρθηκαν και στην παράγραφο 6.1. για την θεωρία Έργου παραμόρφωσης, αξίζει να υπογραμμιστεί το γεγονός ότι η θεωρία έργου παραμόρφωσης προέρχεται από την παρατήρηση ότι όλκιμα υλικά σε υδροστατική τάση εμφανίζουν αντοχή σε διαρροή πολύ μεγαλύτερη από τις τιμές που δίνονται για τον απλό εφελκυσμό. Έτσι,

θεωρήθηκε ως δεδομένο ότι η διαρροή υλικού δεν είναι απλά ένα φαινόμενο εφελκυσμού ή θλίψη αλλά ότι προφανώς συνδέεται και την γωνιακή παραμόρφωση του πό τάση στοιχείου. Για να μπορέσουμε να αντιληφθούμε καλύτερα την θεωρία και πάνω σε αυτήν να εισάγουμε το τροποποιημένο κριτήριο αστοχιας, θεωρούμε ένα στοιχείο μοναδιαίου όγκου το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.Στο στοιχείο (a) φαίνονται τρεις κύριες τάσεις όπου σ1>σ2>σ3. Η εντατική κατάσταση στο σχήμα είναι υδροστατικού τύπου , εφελκυστική λόγω των τασεων σ_{αν}= (σ1+σ2+σ3)/3. Επομένω το στοιχείο (b) υφίσταται καθαρή μεταβολή όγκου χωρίς γωνιακές παραμορφώσεις. Τέλος, από τα δύο στοιχεία της παρακάτω εικόνας (a) , (b), προκύπτει το στοιχείο (c) όπου φαίνεται η καθαρή γωνιακή παραμόρφωση χωρίς αλλαγή στον όγκο.



Εικόνα 97 Στοιχεία όγκου με κύριες τάσεις, μέσο όρο κύριων τάσεων και καθαρές γωνιακές παραμορφώσεις χωρίς μεταβολή όγκου.

Επομένως από την θεωρία Έργου παραμόρφωσης προκύπτει ότι η συνολική Ενέργεια παραμόρφωσης σε ένα στοιχείο μοναδιαίου όγκου με τρις κύριες τάσεις σ1,σ2 και σ3 είναι:

$$U = \frac{1}{2}(\sigma 1\varepsilon 1 + \sigma 2\varepsilon 2 + \sigma 3\varepsilon 3)$$

Όπου:

$$\varepsilon 1 = \frac{1}{E} (\sigma 1 - \nu \sigma 2 - \nu \sigma 3)$$
$$\varepsilon 2 = \frac{1}{E} (\sigma 2 - \nu \sigma 3 - \nu \sigma 1)$$
$$\varepsilon 3 = \frac{1}{E} (\sigma 3 - \nu \sigma 1 - \nu \sigma 2)$$

Επομένως εάν θεωρήσουμε ότι το στοιχείο καταπονείται από μία μέση τάση:

$$\sigma_{\alpha\nu}$$
= (σ 1+ σ 2+ σ 3)/3

προκύπτει ότι η μέση ενέργεια παραμόρφωσης που οφείλεται καθαρά στην μεταβολή του όγκου θα είναι:

$$U_{a\nu} = \frac{3(1-2\nu)}{2E}\sigma_{\alpha\nu}^2$$

Άρα εφόσον γνωρίζουμε ότι η ενέργεια η οποία οφείλεται μόνο στην παραμόρφωση του στοιχείου θα είναι:

$$U_d = U - U_{av}$$

Άρα, όταν η τάση έχει φτάσει να γίνει ίση με το όριο διαρροής η ενέργεια παραμόρφωσης σε ένα απλό πείραμα εφελκυσμού είναι:

$$U_d = \frac{1+\nu}{2E} S_y^2$$

Τέλος, με την γνωστή σε εμας διαδικασία καταλήγουμε ότι η ισοδύναμη τάση για τρισδιάστατη εντατική κατάσταση ισούται με:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \le \frac{S_y}{N}$$

Στη συνέχεια με τον ίδιο συλλογισμό, προχωρήσαμε σε μία πρώτη διατύπωση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας, με εξειδικευμένη εφαρμογή σε εξαρτήματα που πρόκειται να εκτυπωθούν με την μέθοδο SLM. Αρχική σκέψη, ήταν στις τάσεις που ασκούνται στο δοκίμιο λόγω εφελκυσμού, να προστεθούν και οι θερμικές τάσεις καθώς και οι παραμένουσες, οι οποίες κατά την πραγματική διεργασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης προσδίδονται στο εξάρτημα και τελικά να δημιουργηθεί μία έκφραση που σε θεωρητικό πλαίσιο να αντιπροσωπεύει την διαδικασία της SLM.

Οι θερμικές τάσεις και οι παραμένουσες τάσεις που αναπτύσσονται κατά την εκτύπωση, λόγω των πολλαπλών στρώσεων και της ισχύος του λείζερ, δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να θεωρηθούν αμελητεές καθώς οι αλλαγές φάσης που επέλχονται στο εξάρτημα κατά την εκτύπωσή του, καθώς και οι παραμένουσες τάσεις ανάμεσα στις στρώσεις είναι οι κυριότερες αιτίες για την υποβάθμιση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων του τελικού εξαρτήματος. Οπότε εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση ενός συμβατικού κριτηρίου αστοχίας, όπως η θεωρία έργου παραμόρφωσης, θα ήταν σφάλμα να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό του τελικού εξαρτήματος, καθώς δεν λαμβάνει υπόψην σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν τις τελικές ιδιότητες.

Οι θερμικές τάσεις καθορίζονται από την θερμοκρασία που απορροφά και αποβάλλει η κάθε στρώση του εξαρτήματος. Επομένως στην δική μας περίπτωση, η θερμοτητα που δέχεται το σώμα είναι η ισχύς από το λέιζερ και αυτή που αποβάλλει είναι η θερμότητα μέσω συναγωγής και από ακτινοβολία.

$$\sigma_{con} = Q_{conv} = A.h(T_s - T_0)$$

$$\sigma_{rad} = Q_{rad} = A.\varepsilon.\sigma(T_s^4 + T_0^4)$$

Επομένως, η ενέργεια παραμόρφωσης σε ένα εξάρτημα SLM είναι:

$$U = \frac{1}{2}(\sigma_{1}\varepsilon_{1} + \sigma_{2}\varepsilon_{2} + \sigma_{3}\varepsilon_{3} + \sigma_{con} + \sigma_{rad} + \sigma_{res}) <=>$$

$$U = \frac{1}{2}(\sigma_{1}\varepsilon_{1} + \sigma_{2}\varepsilon_{2} + \sigma_{3}\varepsilon_{3} + (A.h(T_{s} - T_{0})) + (A.\varepsilon.\sigma(T_{s}^{4} + T_{0}^{4})) + \sigma_{res}) <=>$$

$$<=>U = \frac{1}{2}(\sigma_{1}\varepsilon_{1} + \sigma_{2}\varepsilon_{2} + \sigma_{3}\varepsilon_{3}) + A.[h(T_{s} - T_{0}) + \varepsilon.\sigma(T_{s}^{4} + T_{0}^{4})] + \sigma_{res})$$

Η ενέργεια παραμόρφωσης θα περιλαμβάνει έναν όρο για κάθε τάση που δημιουργείται, ένας όρος θα ποροέρχεται από τις κύριες τάσεις, ένας από την θερμότητα που λαμβάνει και αποβάλλει το σώμα, και ένας όρος θα συμβολίζει τις παραμένουσες τάσεις.

Η εφαρμογή του τροποποιημένου αυτού κριτηρίου αστοχίας, ξεπερνάει τα όρια της παρούσας εργασίας και αποτελεί μέρος για μελλοντική μελέτη. Υπάρχει το θεωρητικό υπόβαθρο και μένει να διαπιστωθεί, εάν είναι εφικτό να λειτουργήσει πρακτικά και αν επιφέρει και αριθμητικά τα ορθά αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1. ΣΧΟΛΙΑ- ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Ο βασικός στόχος στην παρούσα εργασία ήταν να κατασκευαστεί ένα απλό μοντέλο δοκού με συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες κατασκευασμένο από συμβατικές τεχνολογίες στην πρώτη περίπτωση και από τρισδιάστατη εκτύπωση (SLM) στην δεύτερη. Έγινε ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία και στις δύο περιπτώσεις ώστε να εξαχθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Τα ζητούμενα ήταν κατανομές τάσεων, παραμορφώσεων και ισοδύναμων ελαστικών παραμορφώσεων καθώς και τελικός σκοπός ήταν να εξεταστεί κατά πόσο είναι σκόπιμη μία τοπολογική βελτιστοποίηση της 3D δοκού.

Έπειτα από την μέλετη και την μοντελοποίηση του προβλήματος, και λαμβάνοντας υπόψην τις συνθήκες κάτω από τςι οποίες δόθηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ένα ομογενές και ισότροπο υλικό όταν επέλθει μία

κατάλληλη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, μπορεί να αποδώσει υψηλή αξιοπιστία και να επιφέρει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας με τιμές κοντά στην πραγματικότητα.

Ένα ακόμα βασικό συμπέρασμα από την εκπόνηση τις συγκεκριμένης εργασίας είναι ότι διαπιστώθηκε ότι με την τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να εφαρμοστεί τοπολογική βελτιστοποίηση χωρίς να αλλάξει η δομική ακεραιότητα της δοκού. Στο παράδειγμα της δοκού που είδαμε αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο στο οποίο έγινε τοπολογική βελτιστοποίηση ως προς την πυκνότητα του πλέγματος και ως προς την μάζα, είδαμε ότι είχαμε σημαντική μείωση μάζας, επομένως και υλικού και κατασκευαστικού κόστους, χωρίς υποβάθμιση της δομικής ακεραιότητας της δοκού υπό τα ασκούμενα φορτία.

Τέλος, διατυπώθηκε ένα Τροποποιημένο Κριτήριο αστοχίας, που είχε ως βάση την Θεωρία Έργου παραμόρφωσης και προσαρμόστηκε στην μέθοδο Επιλέκτικής τήξης με λέιζερ. Το κριτήριο διατυπώθηκε σε θεωρητικό υπόβαθμο, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις τάσεις που ασκούνται σε ένα εξάρτημα κατά την διάρκεια της εκτύπωσης του, όλα δείχνουν ότι τα αποτελέσματα που θα επιφέρει θα είναι ακριβέστερα και πιο κοντά στην πραγματικότητα από οποιαδήποτε άλλη συμβατική θεωρία αστοχίας.

7.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

Το πεδίο της προσθετικής κατασκευής είναι αναμφισβήτητα ένας χώρος που μέρα με την μέρα κερδίζει έδαφος στην κατασκευαστική βιομηχανία. Όλο και περισσότερα υλικά σύνθετα και βιώσιμα γίνονται συμβατά με την συγκεκριμένη τεχνολογία, κάνοντας ακόμα πιο ευρύ το πεδίο χρήσης της. Χαρακτηριστικοί είναι οι παρακάτω τομείς, στους οποίους τα επόμενα χρόνια προβλέπεται να γίνει σημείο αναφοράς το 3D Printing και να φέρει την δική του βιομηχανική επανάσταση:

Βϊοιατρική: Οι εφαρμογές του 3D Printing στην βϊοιατρική είναι ήδη πολυάριθμες, προβλέπεται όμως να γίνουν πολύ περισσότερες. Μπορεί εύκολα να προβλέψει κανείς τι πλεονεκτήματα μπορεί να επιφέρει στο μέλλον το 3D Printing στον συγκεκριμένο τομέα και γενικότερα στην ιατρική. Γίνονται ήδη έρευνες με θετικά αποτελέσματα, στο κατά πόσο είναι εφικτό να εκτυπωθούν τεχνητά μέλη, μέλη για πλαστική χειρουργική καθώς και τεχνητά όργανα, αφού είναι γνωστό ότι οι δότες είναι λιγοστοί αναλογικά με την ζήτηση και οι πιθανότητες να βρεθεί κάποιος δότης μειώνονται ακόμα περισσότερο όταν λαμβάνεται υπόψην και η συμβατότητα. Θα ήταν ιδανικό λοιπόν να μπορούσαν να εκτυπωθούν τεχνητά όργανα εξατομικευμένα για κάθε ασθενή , συμβατά και λειτουργικά. Σε αυτήν την περίπτωση θα αναφερόμασταν σε ένα μεγάλο επίτευγμα για την επιστήμη και ολόκληρη την ανθρωπότητα.

Αρχιτεκτονική: Και σε αυτόν τον τομέα τα πράγματα σχετικά με το 3D Printing εξελίσσονται κάθε μέρα και περισσότερο. Τα πλεονεκτήματα όμως θα είναι θεαματικά εάν μπορούσαν να κατασκευαστούν ολόκληρες οικοδομές και σπίτια από υλικά οικονομικά, ανθεκτικά στα καιρικά φαινόμενα με μόνωση και βιώσιμα υλικά φιλικά προς το περιβάλλον.

Οι παραπάνω κατηγορίες βιομηχανιών είναι μόνο η αρχή, καθώς σχεδόν σε κάθε πεδίο έρευνας το 3D Printing μπορεί να προσφέρει θετικά αποτελέσματα. Είναι σίγουρο ότι η προσθετική κατασκευή δεν έχει φτάσει στο όριό της και όλα δείχνουν ότι το μέλλον της ανήκει.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] <u>https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/</u>

[2] Καλτσής Αλέξανδρος, Τρισδιάστατη εκτύπωση & στρατιωτικές εφαρμογές,Μεταπτυχιακή διατριβή,2017

[3] <u>https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/</u>

[4] https://blogs.lawrence.edu/makerspace/history/

[5] Additive Manufacturing and its future impact in logistics, Jorge V. L. Silva, Rodrigo A. Rezende,2013

[6] https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/

[7] https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/

[8] <u>https://www.firetrace.com/fire-protection-blog/additive-manufacturing#vat-photo</u>

[9] https://3dinsider.com/3d-printer-types/

[10] K.-H. Leitz, C. Grohs, P. Singer, B. Tabernig, A. Plankensteiner, H. Kestler, L. S. Sigl ,Fundamental analysis of the influence of powder characteristics in selective laser melting of molybdenum based on a multi-physical simulation model, 19th Plansee Seminar

[11] Xu Song,Wei Zhai,Rui Huang, Jin Fu,Mingwang Fu, Feng Li.-Metal-Based 3d-printed micro parts and structures, 2020

[12] Reinhart Poprawe, Christian Hinke, Wilhelm Meiners, Johannes Schrage, Sebastian Bremen and Simon Merkt, SLM Production Systems: Recent Developments in Process Development, Machine Concepts and Component Design

[13] Κρητικός Ιωάννης, Τρισδιάστατοι εκτυπωτές μετάλλων ,2018

[14] https://www.engineering.com/story/7-issues-to-look-out-for-in-metal-3d-printing

[15] <u>https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5056273</u>

[16] <u>https://amfg.ai/2018/05/01/5-problems-faced-when-3d-printing-metals-and-how-to-fix-them/</u>

[17] https://sci-hub.se/https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-04105-2

[18] Ελένη Ε. Γκάρτζου, Νέα υλικά για τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, 2016

[19] https://www.sharrettsplating.com/blog/materials-used-3d-printing/

[20] https://matmatch.com/learn/material/materials-used-in-selective-laser-melting-slm

[21] Σταύρου Κ. Κουρκούλη, Θεωρίες Αστοχίας υλικών υπο σύνθετη παραμόρφωση, Κεφ.18,2018.

[22] https://www.engineersedge.com/material_science/von_mises.htm

[23] <u>https://whatispiping.com/von-mises-stress/</u>

[24] M. Islama , T. Purtonena , H. Piilia , A. Salminena, b, O. Nyrhiläc , Temperature profile and imaging analysis of laser additive manufacturing of stainless steel ,2013

[25] Elham Mirkoohi , Daniel E. Seivers, Hamid Garmestani and Steven Y. Liang , Heat Source Modeling in Selective Laser Melting, 2019

[26] Jinqiang Ning , Wenjia Wang , Xuan Ning , Daniel E. Sievers , Hamid Garmestani and Steven Y. Liang, Analytical Thermal Modeling of Powder Bed Metal Additive Manufacturing Considering Powder Size Variation and Packing,2020

[27] Hyub Lee, Chin Huat Joel Lim, Mun Ji Low, Nicholas Tham, Vadakke Matham Murukeshan, and Young-Jin Kim, Lasers in Additive Manufacturing: A Review,2017

[28] H. Wessels, T. Bode, C. Weißenfels, P. Wriggers, T. I. Zohdi, Investigation of heat source modeling for selective laser melting, 2018

[29] Θεωρίες Αστοχίας Στοιχείων Μηχανών