



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
University of West Attica

2019

ΠΑΔΑ Τμήμα
Μηχανολόγων
Μηχανικών

Χριστοφακάκη
Μαρία
Α.Μ. 44396

**[ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ
ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.-
CONDUCTING
EXPERIMENTS ON
ADDITIVE
MANUFACTURING (AM)
SPECIMENS.]**

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.

Όνομα σπουδαστή Χριστοφακάκη Μαρία-Χρυσοβαλάντω

Πτυχιακή Εργασία

υποβαλλόμενη για τη μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για το πτυχίο του

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής: Σαγιάς Βασίλειος και Γιαννακόπουλος Κωνσταντίνος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την / / 2019

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Στεργίου Κωνσταντίνος

Σαγιάς Βασίλειος

Γιαννακόπουλος
Κωνσταντίνος

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμια προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Χριστοφακάκη Μαρία, έτος ολοκλήρωσης διατριβής: 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Εικόνα 1 Σχηματικό διάγραμμα διανυσματικής σάρωσης SL.....	21
Εικόνα 2 Σχηματικό διάγραμμα προβολής με μάσκα SL	21
Εικόνα 3 Σύστημα με δύο-φωτόνια	21
Εικόνα 4 Σχηματικά διαγράμματα των τριών προσεγγίσεων της διεργασίας φωτοπολυμερισμού.....	21
Εικόνα 5 Υποσυστήματα της SL τεχνολογίας	26
Εικόνα 6 Υποσυστήματα της SL τεχνολογίας	26
Εικόνα 7 Σχηματική αναπαράσταση μιας συνηθισμένης συσκευής δυο-φωτονίων	33
Εικόνα 8 Σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας επιλεκτικής συσσωμάτωσης με laser..	37
Εικόνα 9 Αξονικός τομογράφος με τις εικόνες τομών.	46
Εικόνα 10 Αρχικό CAD μοντέλο που έχει μετατραπεί σε STL αρχείο με διαφορετικές τιμές για τα ύψη απόκλισης (cusp), παρουσιάζοντας το πώς μεταβάλλεται η ακρίβεια του μοντέλου με βάση την απόκλιση του τριγώνου.....	50
Εικόνα 11 Μία περίπτωση κατά την οποία παραβιάζεται ο κανόνας αντιστοίχισης κορυφών	51
Εικόνα 12 Περίπτωση που παραβιάζεται ο κανόνας αντιστοίχισης κορυφών	52
Εικόνα 13 Δύο τρίγωνα που τέμνουν το ένα το άλλο στον 3D χώρο.....	54
Εικόνα 14 Δύο επιφανειακά τμήματα, τα οποία δεν ταιριάζουν πλήρως το ένα με το άλλο κατά τη συνένωσή τους, σχηματίζοντας κενά	55
Εικόνα 15 Παραστάσεις των καμπυλών τάσης – καταπόνησης που ομαδοποιούνται από τον προσανατολισμό του δείγματος. (Cesar Omar Balderrama-Armendariz, 2018).....	93
Εικόνα 16 Αποτέλεσμα δοκιμών στρέψης	94
Εικόνα 17 Σύγκριση ανάμεσα στις δοκιμές στρέψης και της FEM σε ποικιλία δοκιμαστικών κομματιών. (M. Berzal, 2017).....	94
Εικόνα 18 Εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε: Creality, Ender 3 Pro	95
Εικόνα 19 Παράμετροι εκτύπωσης - Simplify 3D.....	98
Εικόνα 20 Infill pattern – Simplify 3D.....	98
Εικόνα 21 Infill pattern - Youtube	99
Εικόνα 22 Infill pattern – Simplify 3D.....	100
Εικόνα 23 Infill pattern για το περίγραμμα - Simplify 3D	101
Εικόνα 24 Στιγμιότυπο στρώσης - Simplify 3D.....	101
Εικόνα 25 Τέλος διαδικασίας εκτύπωσης του δοκιμίου – Simplify 3D.....	102
Εικόνα 26 Πίνακας στατιστικών - Simplify 3D.....	102
Εικόνα 27 Εξαγωνικό δοκίμιο - Inventor.....	103
Εικόνα 28 Εκτύπωση δοκιμίου - Simplify 3D.....	104
Εικόνα 29 Πίνακας στατιστικών - Simplify 3D.....	104
Εικόνα 30 Τέλος διαδικασίας εκτύπωσης δοκιμίου – Simplify 3D	105
Εικόνα 31 Εκτύπωση εξαγωνικού δοκιμίου - Ender 3 Pro	106
Εικόνα 32 Οθόνη πληροφοριών εκτυπωτή –Ender 3 Pro	107
Εικόνα 33 Τέλος διαδικασίας εκτύπωσης δοκιμίου – Simplify 3D	108
Εικόνα 34 Πίνακας στατιστικών - Simplify 3D.....	108
Εικόνα 35 Μαζική εκτύπωση δοκιμίων - Simplify 3D	109

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Εικόνα 36 Πίνακας στατιστικών - Simplify 3D.....	109
Εικόνα 37 Εξαγωνικό δοκίμιο - αποτέλεσμα τύπωσης.....	110
Εικόνα 38 Μηχάνημα στρέψης όπου πραγματοποιήθηκε το πείραμα.....	113
Εικόνα 39 Μηχάνημα στρέψης όπου πραγματοποιήθηκε το πείραμα.....	113
Εικόνα 40 Μηχάνημα στρέψης όπου πραγματοποιήθηκε το πείραμα.....	114
Εικόνα 41 Μηχάνημα στρέψης και εξαγωνικό δοκίμιο πριν την έναρξη του πειράματος ..	115
Εικόνα 42 Θραύση του δοκιμίου	116
Εικόνα 43 Θραύση του δοκιμίου	117
Εικόνα 44 Θραύση του δοκιμίου	118
Εικόνα 45 Μαζικό διάγραμμα Ροπής Mt (για τον γ άξονα) και Ακτινίων rad (για τον x άξονα), για το πείραμα της στρέψης με κάθετα εκτυπωμένα δοκίμια.....	119
Εικόνα 46 δαινόμενο απολέπισης.....	120
Εικόνα 47 Φαινόμενο απολέπισης.....	121
Εικόνα 48 Φαινόμενο απολέπισης.....	122
Εικόνα 49 Φαινόμενο απολέπισης.....	123
Εικόνα 50 Μαζικό διάγραμμα Ροπής Mt (για τον γ άξονα) και Ακτινίων rad (για τον x άξονα), για το πείραμα της στρέψης με οριζόντια εκτυπωμένα δοκίμια	124
Εικόνα 51 Μηχάνημα QUASAR 100 για το πείραμα του εφελκυσμού	126
Εικόνα 52 Μηχάνημα QUASAR 100	127
Εικόνα 53 Μηχάνημα Quasar 100 και τοποθετημένο το δοκίμιο πριν την έναρξη του πειράματος του εφελκυσμού.....	128
Εικόνα 54 Εφελκυσμός - θραύση δοκιμίου	129
Εικόνα 55 Δοκίμιο μετά τον εφελκυσμό	130
Εικόνα 56 Τελικό αποτέλεσμα εφελκυσμού - θραύση δοκιμίου	131
Εικόνα 57 Αποτέλεσμα εφελκυσμού - θραύση δοκιμίου	132
Εικόνα 58 Δοκίμιο μετά τον εφελκυσμό	133
Εικόνα 59 Δοκίμιο μετά τον εφελκυσμό	134
Εικόνα 60 Διάγραμμα σ-ε.....	135
Εικόνα 61 Παράδειγμα δύο (2) χρωμάτων - Ender 3 Pro	140
Εικόνα 62 Ender 3 Pro Σύνδεση κεφαλής σωληνάκι.....	141
Εικόνα 63 Ender 3 Pro υλικό	141
Εικόνα 64 Σφάλμα εκτύπωσης στις πρώτες στρώσεις - Ender 3 Pro.....	142
Εικόνα 65 Ender 3 Pro Περίγραμμα	143

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	6
Συνοτομογραφίες	8
Κεφάλαιο 1ο.....	9
Θεωρητικό υπόβαθρο.....	9
Ιστορική αναδρομή και εισαγωγικά στοιχεία.....	9
Πλεονεκτήματα AM.....	11
Σύγκριση προσθετικών μορφοποιήσεων με συμβατικές κατεργασίες.....	13
Κεφάλαιο 2ο.....	19
Τεχνολογίες AM.....	19
Κεφάλαιο 3 ^ο	45
Η χρήση της AM σε ιατρικές εφαρμογές.....	45
Εξέλιξη των ιατρικών εφαρμογών της AM.....	47
Κεφάλαιο 4ο.....	48
Μεθοδολογία προσθετικών κατεργασιών.....	48
Το STLαρχείο.....	49
Πρότυπα για πειράματα σε δοκίμια AM.....	56
Μεθοδολογία εργασίας:	59
ΠΡΟΤΥΠΑ ASTM ΚΑΙ ISO :	60
Σύγκριση ASTM D3039 vs ASTM D638:	80
Βασικά στοιχεία θεωρίας στρέψης:.....	89
Βασικά στοιχεία θεωρίας εφελκυσμού:	89
Παράγοντες που λαμβάνονται υπ όψιν πριν τα πειράματα:	90

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Ανάλυση στρέψης της ανισότροπης συμπεριφοράς της τεχνολογίας FDM:.....	91
Κεφάλαιο 5ο.....	95
Μελέτες περιπτώσεων.....	95
Δημιουργία δοκιμίου για Εφελκυσμό- Πείραμα.....	95
Δημιουργία δοκιμίου για Στρέψη – Πείραμα.....	103
Επιλογή ταχυτήτων.....	110
Πείραμα στρέψης.....	112
Φαινόμενο Απολέπισης:.....	120
Πείραμα εφελκυσμού:.....	125
Κεφάλαιο 6ο.....	136
Συζήτηση.....	136
Bibliography.....	145

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Συντομογραφίες

AM - Προσθετικές μορφοποιήσεις = Additive Manufacturing

RP - Ταχεία πρωτοτυποποίηση = Rapid Prototyping

3DP - Τρισδιάστατη εκτύπωση = 3D Printing

LOM - κατασκευή με συγκόλληση επάλληλων φύλλων = Laminated Object Manufacture

SGC - τεχνολογία πολυμερισμού κόκκων = Solid Ground Curing

SLS - διεργασία επιλεκτικής συσσωμάτωσης με laser = Selective Laser Sintering

WYSIWYB - «κατασκευάζεις αυτό ακριβώς που βλέπεις» = what you see is what you build

SL - Στερεολιθογραφία = Stereolithography

VP - φωτοπολυμερισμός σε κάδο = vat polymerization

DMD - ψηφιακή διάταξη μικροκατόπτρων = Digital Micromirror Device

MSL - μικροστερεολιθογραφία = Microstereolithography

IH - στερεολιθογραφία ολοκληρωμένης σκληροποίησης = Integrated Hardened Stereolithography

DXRL - βαθεία λιθογραφία ακτίνων X = Deep X-ray Lithography

2p-VP - διεργασία πολυμερισμού δυο-φωτονίων σε κάδο = two-photon vat photopolymerization

PBF - διεργασία σύντηξης πούδρας σε κλίνη = Powder Bed Fusion

LS - μηχανές συσσωμάτωσης με laser = Laser Sintering

pLS - μηχανές συσσωμάτωσης πολυμερών με laser = Polymer Laser Sintering

mLS- μηχανές συσσωμάτωσης μετάλλου με laser = Metal Laser Sintering

CT – αξονική τομογραφία = computerized tomography

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Κεφάλαιο 1ο

Θεωρητικό υπόβαθρο

Ιστορική αναδρομή και εισαγωγικά στοιχεία

Οι προσθετικές μορφοποιήσεις (Additive Manufacturing - AM) είναι ο **καθιερωμένος πλέον όρος** αυτού που τα προηγούμενα χρόνια αποκαλούνταν «Ταχεία πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping – RP)» και σήμερα είναι γνωστό στο ευρύ κοινό ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing – 3DP).

Η ιστορική **εξέλιξη** των προσθετικών μορφοποιήσεων μπορεί να περιγραφεί με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους. Ήδη στις δεκαετίες του '50 '60 υπήρχε έντονη σχετική δραστηριότητα. Στα πρώτα χρόνια τα πλέον πρωτοποριακά και εμπορικά πετυχημένα συστήματα προέρχονταν από τις ΗΠΑ. Εταιρίες όπως η Stratasy, η 3D Systems και η ZCorp ηγήθηκαν στην πορεία ανάπτυξής τους. Στην Ευρώπη, η κύρια εταιρία με παγκόσμια εμβέλεια στην περιοχή της AM είναι η γερμανική EOS, η οποία έχει σταματήσει να παράγει μηχανές SL μετά τον νομικό διακανονισμό των διαφορών με τη 3D Systems, συνεχίζει να ωστόσο να παράγει συστήματα σύντηξης πούδρας σε κλίνη, τα οποία χρησιμοποιούν lasers για την τήξη άμμου πολυμερών, επικαλυμμένης με συνδετικό υλικό, καθώς και μετάλλων. Εταιρίες από τη Γαλλία, την Ολλανδία, τη Σουηδία και άλλα μέρη της Ευρώπης είναι μικρότερες, ανταγωνιστικές όμως στις αντίστοιχες αγορές. Παραδείγματα εταιριών αποτελούν η Phenix () (ανήκει πλέον στη 3D Systems), η Arcam, η Stratoconception και η Materialise. Από αυτές, η βέλγικη Materialise, έχει γνωρίσει σημαντική επιτυχία στην περιοχή ανάπτυξης εργαλείων λογισμικού για την υποστήριξη της τεχνολογίας AM. Στις αρχές του '80 '90', πολλές ιαπωνικές εταιρίες ασχολήθηκαν με την AM τεχνολογία. Οι εταιρίες αυτές ήταν νέες, όπως η Autostrade (η οποία δεν λειτουργεί πλέον). Με την AM ασχολήθηκαν και μεγαλύτερες ιαπωνικές εταιρίες μέσω των θυγατρικών τους, όπως η Sony και η Kira. Ωστόσο, η εξέλιξη των αναφερόμενων τεχνολογιών δεν είχε φτάσει σε απαιτούμενο επίπεδο πριν από τις αρχές του '80. Το '84 η Ιαπωνία (murutani) η Γαλλία (andre et al.) και οι ΗΠΑ

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

(masters και hull) υπέβαλαν συγχρόνως αιτήσεις για πατέντες. Αυτές οι πατέντες περιέγραφαν μια παρόμοια ιδέα για την κατασκευή ενός 3D αντικειμένου μέσω της επιλεκτικής πρόσθεσης διαδοχικών στρωμάτων υλικού του ενός πάνω στο άλλο. Αν και οι πρώτες εργασίες στην Ιαπωνία είναι πολύ καλά τεκμηριωμένες, η πατέντα του Charles Hull αναγνωρίζεται ως η σημαντικότερη, διότι οδήγησε στην ίδρυση της 3D systems. Αυτή ήταν η πρώτη εταιρία που κυκλοφόρησε εμπορικό σύστημα τεχνολογίας AM με τη συσκευή στερεολιθογραφίας (stereolithography apparatus). Τεχνολογίες AM έχουν αναπτυχθεί και σε άλλες περιοχές της Ασίας – κυρίως στη Κορέα και στην Κίνα. Οι κορεάτικες εταιρίες AM είναι σχετικά νεότερες και πρέπει να περιμένουν κάποιο χρονικό διάστημα για να δουν αν θα καταφέρουν να πετύχουν σημαντικά αποτελέσματα. Οι διαμάχες που υπάρχουν αναφορικά με τις πατέντες των πρώτων συστημάτων αμερικανικού, ιαπωνικού και ευρωπαϊκού σχεδιασμού έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχουν πολλές κινεζικής κατασκευής μηχανές εκτός της Κίνας. Οι πρώτες κινεζικής κατασκευής μηχανές θεωρούνταν αμφιβόλου ποιότητας, αλλά οι σύγχρονες μηχανές έχουν βελτιώσει σημαντικά τις επιδόσεις τους. Οι κινεζικές μηχανές προσομοιάζουν με τα συστήματα SL, FDM, και SLS, που απαντώνται σε άλλες περιοχές του κόσμου. Το Ισραήλ είναι μια χώρα που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον αναφορικά με την ανάπτυξη των τεχνολογιών AM. Επιπλέον πατέντες κατοχυρώθηκαν το '86 οι οποίες οδήγησαν στη ίδρυση τριών επιπλέον εταιριών: 1. Της Helisys (κατασκευή με συγκόλληση επάλληλων φύλλων – Laminated Object Manufacture - LOM), 2. Της Cubital (τεχνολογία πολυμερισμού κόκκων – Solid Ground Curing – SGC), και της DTM με τη διεργασία επιλεκτικής συσσωμάτωσης με laser – Selective Laser Sintering - SLS. Πλέον σήμερα υπάρχει μόνο η SLS ως εμπορικό σύστημα, καθώς το 2001 η DTM συγχωνεύθηκε με την 3D Systems. Μία από τις πρώτες μηχανές AM έχει αναπτυχθεί από την ισραηλινή εταιρία Cubital. Αν και η τεχνολογία αυτή δεν αποτέλεσε εμπορική επιτυχία, είχε να παρουσιάσει πολλές καινοτομίες που δεν διέθεταν άλλες μηχανές, όπως η επεξεργασία ολόκληρης στρώσης διαμέσου μιας μάσκας, η απομάκρυνση του δευτερεύοντος υλικού των στηριγμάτων και η κατεργασία επιπεδοποίησης μέσω του φρεζαρίσματος της στρώσης μετά την κατασκευή της, προκειμένου να

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

υπάρχει σταθερό πάχος. Μερικές από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούσε η Cubital απαντώνται στις μηχανές Sanders, καθώς επίσης και σε μία άλλη μηχανή από το Ισραήλ, την Objet. Μία από τις νεότερες εταιρίες, η Objet (που ανήκει στην Stratasys), χρησιμοποιεί με επιτυχία την τεχνολογία εναπόθεσης σταγονιδίων για να εναποθέτει φωτοπολυμεριζόμενες ρητίνες. Το '89 ο Scott Crump κατοχύρωσε την FDM, ιδρύοντας την Stratasys. Την ίδια χρονιά μια ομάδα από το MIT κατοχύρωσε μια πατέντα διεργασίας της 3D εκτύπωσης (3D Printing – 3DP). Από το '89 και μετά οι διεργασίες αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως, με τις διάφορες παραλλαγές της FDM, να είναι σήμερα οι πλέον επιτυχημένες. Η ομάδα του MIT παρείχε άδειες χρήσης σε πολλές εταιρίες. Η πλέον επιτυχημένη από αυτές τις εταιρίες είναι η ZCorp, η οποία εστίασε το ενδιαφέρον της στα συστήματα χαμηλού κόστους. Το '94 ο Sanders ανέπτυξε την διεργασία ink-jet η οποία εναποθέτει σταγονίδια υλικού πάνω σε ένα υπόστρωμα όπου το υλικό σκληραίνοντας στερεοποιείται σχηματίζοντας έτσι το ίδιο το κομμάτι. Από το 2001 η εταιρία Objet έχει χρησιμοποιήσει αυτή τη τεχνική, προκειμένου να εκτυπώσει φωτοπολυμεριζόμενες ρητίνες υπό μορφή σταγονιδίων. Μια σημαντική εξέλιξη που έχει μεγάλη επίδραση στην ανάπτυξη τεχνολογιών AM είναι ότι πλησιάζει ο χρόνος λήξης των πατεντών πολλών από τις πρώτες κύριες τεχνολογίες AM. Ήδη παρατηρείται μια έκρηξη σε νέους προμηθευτές και νέα συστήματα τεχνολογιών εξώθησης υλικού, μετά την εκπνοή της πατέντας της FDM στις αρχές του 2010. Οι πατέντες στις περιοχές της στερεολιθογραφίας, της συσσωμάτωσης με laser και της LOM λήγουν σύντομα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε θεαματική αύξηση των τεχνολογιών, των διεργασιών, των μηχανών και των αντίστοιχων εταιριών. (Ian Gibson, 2017)

Πλεονεκτήματα AM

Πολλοί ισχυρίζονται ότι η τεχνολογία αυτή έχει φέρει επανάσταση στην ανάπτυξη και την παραγωγή προϊόντων. Κάποιοι έχουν προχωρήσει περαιτέρω, ισχυριζόμενοι ότι η παραγωγή προϊόντων θα πάψει να υπάρχει εάν ακολουθήσουμε την AM μέχρι το απώτερο σημείο της εξέλιξής της, καθώς επίσης και ότι βιώνουμε μία νέα βιομηχανική επανάσταση. Θα ήταν βάσιμο να αναρωτηθεί κανείς: «Τι είναι

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

εκείνο που διαθέτει η AM, και το οποίο ενθουσιάζει και εμπνέει κάποιον σε τέτοιο σημείο, ώστε να προβαίνει στις παραπάνω δηλώσεις;».

Κατ' αρχάς, ο χαρακτήρας αυτής της τεχνολογίας είναι «ταχύς». Το πλεονέκτημα της ταχύτητας δεν αναφέρεται μόνο στον χρόνο που δαπανάται για την κατασκευή ενός κομματιού. Η επιτάχυνση της όλης διαδικασίας ανάπτυξης ενός προϊόντος οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι χρησιμοποιούμε υπολογιστές από την αρχή μέχρι το τέλος. Επειδή ως σημείο εκκίνησης χρησιμοποιείται το 3D CAD σύστημα και η μεταφορά των δεδομένων στη μηχανή AM είναι απρόσκοπτη, υπάρχει μικρότερος προβληματισμός αναφορικά με τη μετατροπή των δεδομένων ή την ερμηνεία του σχεδιαστικού στόχου. Με την AM μπορεί να πει κανείς ότι «κατασκευάζεις αυτό ακριβώς που βλέπεις» (what you see is what you build – WYSIWYB).

Το απρόσκοπτο σε όλη τη διαδικασία αναφέρεται και στη μείωση ακριβώς των σταδίων της διαδικασίας. Άσχετα με τη πολυπλοκότητα του κομματιού που πρόκειται να κατασκευαστεί, η κατασκευή στη μηχανή AM πραγματοποιείται σε ένα και μοναδικό βήμα. Οι περισσότερες από τις άλλες κατασκευαστικές διεργασίες θα απαιτούσαν την εκτέλεση πολλαπλών και επαναληπτικών βημάτων. Καθώς εντάσσονται περισσότερα χαρακτηριστικά στην προτεινόμενη σχεδιαστική λύση, ο αριθμός των βημάτων αυτών μπορεί να αυξηθεί δραματικά. Ακόμα και μια μικρή σχεδιαστική αλλαγή μπορεί να επιφέρει σημαντική αύξηση στον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής με συμβατικές μεθόδους. Η AM, επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί αποτελεσματικό τρόπο υπολογισμού του χρόνου κατασκευής ενός μοντέλου, ανεξάρτητα από το ποιες αλλαγές θα γίνουν κατά τις αρχικές διαμορφωτικές φάσεις της ανάπτυξης ενός προϊόντος.

Ο αριθμός των απαιτούμενων διαδικασιών και πόρων μπορεί να μειωθεί σημαντικά με την AM. Εάν ένας επιδέξιος τεχνίτης αναλάμβανε τη κατασκευή ενός πρωτοτύπου με βάση μια σειρά σχεδίων CAD, θα ανακάλυπτε ότι για την ολοκλήρωση της κατασκευής του θα έπρεπε να ακολουθήσει μια σειρά από πολύ

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

συγκεκριμένα βήματα. Αυτό είναι απόρροια του γεγονότος ότι πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα πλήθος από μεθόδους και τεχνικές που ξεκινούν από την κατεργασία με το χέρι και μέσω τεχνικών χύτευσης και διαμόρφωσης καταλήγουν σε CNC κατεργασία. Η κατεργασία με το χέρι και άλλες ανάλογες τεχνικές είναι ανιαρές, επίπονες και συνοδεύονται από λάθη. Η τεχνική της χύτευσης είναι δύσκολη και μπορεί να δημιουργεί πολλά απορρίμματα, προφανώς δε απαιτεί την κατασκευή ενός ή περισσότερων καλουπιών. Η κατεργασία με εργαλειομηχανές CNC απαιτεί λεπτομερή και προσεκτικό προγραμματισμό, καθώς και μια διαδοχικών σταδίων προσέγγιση, που πολύ πιθανόν να απαιτεί με τη σειρά της τη κατασκευή ιδιοσυσκευών συγκράτησης. Προϋπόθεση για όλα τα παραπάνω είναι αφενός μεν ότι οι προαναφερθείσες κατασκευαστικές μεθοδολογίες είναι άμεσα διαθέσιμες, αφετέρου δε ότι οι τεχνίτες τις γνωρίζουν και είναι σε θέση να τις εκτελέσουν με επιτυχία.

Η AM μπορεί να χρησιμοποιηθεί, προκειμένου να αποφύγουμε πολλές από εκείνες τις διαδικασίες οι οποίες αποτελούνται από πολλές φάσεις. Η AM επικουρούμενη από άλλες τεχνικές όπως η χύτευση πλαστικών με εύκαμπτα καλούπια σιλικόνης, η διάτρηση, η στίλβωση, η λείανση, κ.λ.π., είναι σε θέση να παράγει μεγάλη ποικιλία κομματιών με πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά. Μηχανουργεία που έχουν υιοθετήσει τις τεχνολογίες AM είναι σαφέστατα καθαρότερα, έχουν βελτιώσει τη ροή της εργασίας τους και είναι σε θέση να αναλάβουν τη διεκπεραίωση μεγαλύτερης ποικιλίας εργασιών από οτιδήποτε στο παρελθόν.(Ian Gibson, 2017)

Σύγκριση προσθετικών μορφοποιήσεων με συμβατικές κατεργασίες

Όπως αναφέρθηκε, AM έχει συγγενικό DNA με τη τεχνολογία της κατεργασίας CNC . Η τεχνολογία CNC βασίζεται στους υπολογιστές και χρησιμοποιείται για τη κατασκευής προϊόντων, ενώ διαφέρει κυρίως στο ότι, κατά κύριο λόγο, είναι αφαιρετική διαδικασία και όχι προσθετική διεργασία. Απαιτεί δε ως πρώτη ύλη μια μάζα υλικού που έχει ανάλογες διαστάσεις με εκείνες του κομματιού που πρόκειται να κατασκευαστεί.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- Υλικό : αρχικά η AM αναπτύχθηκε με βάση τα πολυμερή υλικά, τα βιομηχανικά κεριά και τα φύλλα χαρτιού. Στη συνέχεια ακολούθησαν τα συνθετικά υλικά, τα μέταλλα και τα κεραμικά. Οι εργαλειομηχανές CNC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη κατεργασία μαλακών υλικών, όπως το MDF (medium- density fiberboard), αφρώδη υλικά και κεριά που επιδέχονται κατεργασία, ακόμη δε και τα πολυμερή. Η χρήση εργαλειομηχανών CNC για τη κατεργασία μαλακών υλικών περιορίζεται κυρίως στη προετοιμασία μοντέλων/προτύπων που χρησιμοποιούνται σε διεργασίες με πολλές φάσεις, όπως η χύτευση μετάλλων. Όταν η κατεργασία CNC χρησιμοποιείται για τη κατασκευή τελικών προϊόντων, παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα με σκληρά, σχετικά ψαθυρά υλικά, όπως διάφοροι χάλυβες και άλλα κράματα μετάλλων, δημιουργώντας αντικείμενα με υψηλή διαστασιακή ακρίβεια και αυστηρά καθορισμένες ιδιότητες. Αντίθετα, τα κομμάτια που έχουν κατασκευαστεί με AM μπορεί να εμφανίζουν εσωτερικά κενά ή ανισοτροπία, ελαττώματα που οφείλονται στον προσανατολισμό κατασκευής τους, τις τιμές των κατασκευαστικών παραμέτρων ή τον τρόπο εισαγωγής του σχεδίου τους στη μηχανή AM. Παράλληλα, κομμάτια κατασκευασμένα από εργαλειομηχανές CNC είναι συνήθως περισσότερο ομοιογενή, με προβλέψιμη ποιότητα.
- Ταχύτητα : Η υψηλών ταχυτήτων κατεργασίες CNC (high speed machining) αφαιρούν υλικό ταχύτερα από ότι η AM μπορεί να προσθέσει υλικό ανάλογου όγκου. Όμως η AM μπορεί να κατασκευάσει ένα κομμάτι σε μία και μοναδική φάση. Οι εργαλειομηχανές CNC απαιτούν σημαντική προετοιμασία και προγραμματισμό της διεργασίας, κυρίως όταν τα προς κατασκευήν αντικείμενα έχουν πολύπλοκο σχήμα. Αναφορικά με την ταχύτητα θα πρέπει να θεωρήσουμε το συνολικό χρόνο που δαπανάται από τη κάθε διεργασία και όχι απλά και μόνο το χρόνο που αντιστοιχεί στην αφαίρεση ή τη πρόσθεση του αντίστοιχου υλικού. Οι κατεργασίες CNC είναι συνήθως κατασκευαστικές διεργασίες πολλών φάσεων, απαιτούν δε την επανατοποθέτηση ή την επαναμεταφορά του κατασκευαζόμενου κομματιού εντός της ίδιας εργαλειομηχανής ή τη χρησιμοποίηση περισσότερων της μίας εργαλειομηχανών. Η κατασκευή ενός κομματιού σε μια μηχανή AM μπορεί να

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

διαρκέσει μερικές μόνο ώρες, ενώ πολύ συχνά η σύγχρονη κατασκευή πολλαπλών αντικειμένων δρομολογείται ως μια μεμονωμένη εργασία AM. Το φινίρισμα του κομματιού μπορεί να διαρκέσει μερικές ημέρες αν υπάρχει η απαίτηση για καλή τελική ποιότητα. Η εκτέλεση της αντίστοιχης κατεργασίας ακόμη και σε 5-αξόνων υψηλών ταχυτήτων εργαλειομηχανή CNC θα μπορούσε να διαρκέσει εβδομάδες, παρουσιάζοντας σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας αναφορικά με τον εκτιμώμενο χρόνο ολοκλήρωσής της.

- Πολυπλοκότητα : Το πλεονέκτημα της AM ως προς τις κατεργασίες CNC είναι μεγαλύτερο όσο αυξάνει η γεωμετρική πολυπλοκότητα του κομματιού που πρόκειται να κατασκευαστεί. Αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί εργαλειομηχανή CNC για την κατασκευή ενός κομματιού απευθείας σε μια μοναδική μεμονωμένη εργασία, τότε είναι πολύ πιθανόν να υπάρχουν κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα είναι αδύνατον να κατασκευαστούν. Επειδή το κοπτικό εργαλείο της εργαλειομηχανής είναι τοποθετημένο στην άτρακτό της, πολύ πιθανό είναι να υπάρχουν προβλήματα προσβασιμότητας ή σύγκρουσης, τα οποία να εμποδίζουν την κατάλληλη τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου στην επιφάνεια που πρέπει να τύχει κατεργασίας. Τέτοιοι περιορισμοί δεν υφίστανται στην AM, οπότε υποκοπές και εσωτερικά χαρακτηριστικά μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν χωρίς ιδιαίτερο προγραμματισμό της διεργασίας. Υπάρχουν, επίσης, αντικείμενα που είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με κατεργασίες CNC, εκτός και αν διαιρεθούν σε ξεχωριστά κομμάτια τα οποία θα επανασυνδεθούν σε κάποια επόμενη φάση. Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, την περίπτωση που έχουμε να κατεργαστούμε ένα πλοίο το οποίο βρίσκεται στο εσωτερικό ενός μπουκαλιού. Πώς είναι δυνατόν να κατεργαστεί κανείς το πλοίο ενόσω βρίσκεται τοποθετημένο στο εσωτερικό του μπουκαλιού; Το πιθανότερο είναι να κατεργαστεί το καθένα ξεχωριστά και να επινοήσει ένα τρόπο για να τα συναρμολογήσει ή να συνδέσει μεταξύ τους. Με την AM μπορεί να κατασκευαστεί συγχρόνως το πλοίο και το μπουκάλι το ένα μέσα στο άλλο. Ένας ειδικός, επομένως, στις κατεργασίες CNC πρέπει να μελετήσει και να αναλύσει κάθε κομμάτι προτού ξεκινήσει τη κατασκευή του, ώστε να είναι εξασφαλισμένο ότι,

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

πράγματι, το κομμάτι μπορεί να κατασκευαστεί και να καθορίσει ποιες ακριβώς τεχνικές πρέπει να χρησιμοποιήσει. Μολονότι, βεβαίως, είναι δυνατόν να υπάρχουν αντικείμενα που δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με την AM, μια τέτοια περίπτωση σαφέστατα είναι λιγότερο πιθανή, ενώ γενικά υπάρχουν τρόποι που θα μπορούσε κανείς να ξεπεράσει μια τέτοια κατάσταση χωρίς μεγάλη δυσκολία.

- Ακρίβεια : Οι μηχανές AM λειτουργούν με γεωμετρική ανάλυση (resolution) που αγγίζει μερικές δεκάδες μικρά. Είναι δε σύνηθες να έχουν διαφορετική διαστασιολογική ανάλυση κατά μήκος των διαφορετικών ορθογώνιων αξόνων. Κατά κανόνα, ο κάθετος άξονας κατασκευής που αντιστοιχεί στο πάχος της στρώσης έχει χαμηλότερη ανάλυση συγκριτικά με τους άλλους δύο άξονες που προσδιορίζουν το επίπεδο κατασκευής. Η ακρίβεια στο κατασκευαστικό επίπεδο καθορίζεται από τη διάταξη της τοποθέτησης του κατασκευαστικού μηχανισμού, η οποία περιλαμβάνει κάποιου είδους μικρομειωτήρες στροφών και μικροκινητήρες. Ο μηχανισμός, επίσης, αυτός καθορίζει και το ελάχιστο μέγεθος των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που είναι δυνατόν να επιτευχθούν. Για παράδειγμα, η SL χρησιμοποιεί μία δέσμη laser ως τμήμα του κατασκευαστικού της μηχανισμού, η τοποθέτηση/σκόπευση της οποίας επιτυγχάνεται συνήθως με τη βοήθεια κατοπτρικών γαλβανομετρικών οδηγών. Η ανάλυση των γαλβανομέτρων καθορίζει τις συνολικές διαστάσεις των αντικειμένων που κατασκευάζονται, ενώ η διάμετρος της δέσμης laser καθορίζει το ελάχιστο πάχος τοιχώματος. Η ακρίβεια των εργαλειομηχανών CNC, από την άλλη, καθορίζεται κυρίως από μια αντίστοιχη ανάλυση στην τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου, η οποία, όμως, εδώ είναι η ίδια και ως προς τους τρεις ορθογώνιους άξονες, καθώς και από τη διάμετρο του περιστροφικού κοπτικού εργαλείου. Υπάρχουν παράγοντες που προσδιορίζονται από τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, δεδομένου ότι πρόκειται για διεργασία αφαίρεσης υλικού. Και στις δύο περιπτώσεις η επίτευξη πολύ μεγάλης ακρίβειας και λεπτομέρειας είναι συνάρτηση της επιθυμούμενης γεωμετρίας και των ιδιοτήτων του υλικού κατασκευής.

Διεξαγωγή πειραματων για δοκιμα προσθετικων κατεργασιων.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- Γεωμετρία : Ουσιαστικά η AM μετασχηματίζει ένα πολύπλοκο 3D πρόβλημα σε μια αλληλουχία από απλές 2D διατομές που έχουν ένα ονομαστικό πάχος. Με τον τρόπο αυτόν αφαιρείται η σύνδεση των επιφανειών στις τρεις διαστάσεις, ενώ η συνοχή επιτυγχάνεται μέσω της εγγύτητας του ενός στρώματος με το αμέσως γειτονικό του. Δεδομένου ότι τούτο δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί με τις εργαλειομηχανές CNC, η κατεργασία των επιφανειών πρέπει να πραγματοποιηθεί κανονικά στον χώρο των τριών διαστάσεων. Με τις απλούστερες γεωμετρίες, όπως τους κυλίνδρους, τα κυβοειδή, τους κώνους κ.λπ., τούτο συνιστά μια σχετικά εύκολη διαδικασία, η οποία καθορίζεται με τη σύνδεση σημείων κατά μήκος μιας τροχιάς. Τα σημεία απέχουν μεγάλες αποστάσεις το ένα από το άλλο, ο προσανατολισμός, όμως, του κοπτικού εργαλείου παραμένει ο ίδιος. Στην περίπτωση των επιφανειών ελεύθερης μορφής, τα σημεία αυτά μπορεί να βρίσκονται πολύ κοντά το ένα στο άλλο με πολύ συχνές και σημαντικές μεταβολές στον προσανατολισμό του κοπτικού εργαλείου. Τέτοιου είδους γεωμετρικές επιφάνειες είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προκύψουν με τις εργαλειομηχανές CNC, ακόμα και αν αυτές διαθέτουν δυνατότητες 5-αξονικής ή υψηλότερης παρεμβολής. Υποκοπές, κλειστοί εσωτερικοί όγκοι, οξείες εσωτερικές γωνίες και άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά πέραν κάποιου ορίου αστοχούν και δεν μπορούν να κατασκευαστούν.
- Προγραμματισμός : Ο προγραμματισμός μιας εργαλειομηχανής CNC μπορεί να είναι ιδιαίτερα επίπονος και περιλαμβάνει την επιλογή του κοπτικού εργαλείου, τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου, τη θέση και τη γωνία προσέγγισης του κοπτικού εργαλείου στην προς κατεργασία επιφάνεια. Πολλές μηχανές AM απαιτούν σχετική ρύθμιση και επιλογή των τιμών ορισμένων παραμέτρων, όμως το εύρος, η πολυπλοκότητα και οι συνέπειες των επιλογών αυτών είναι ασήμαντες συγκριτικά με τις αντίστοιχες των εργαλειομηχανών CNC. Η χειρότερη δυνατή συνέπεια που θα μπορούσε να έχει ο λανθασμένος προγραμματισμός μιας μηχανής AM θα ήταν τελικά ένα όχι και τόσο καλά κατασκευασμένο αντικείμενο. Λανθασμένος προγραμματισμός μιας

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

εργαλειομηχανής CNC, ωστόσο, θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα σοβαρή βλάβη της εργαλειομηχανής ή και πρόκληση ανθρώπινου τραυματισμού.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Κεφάλαιο 2ο

Τεχνολογίες AM

1)Διεργασίες φωτοπολυμερισμού σε κάδο

Οι διεργασίες φωτοπολυμερισμού χρησιμοποιούν ως πρωταρχικά υλικά υγρά, ρητίνες που «ωριμάζουν»/ στερεοποιούνται όταν ακτινοβοληθούν ή φωτοπολυμερή. Τα περισσότερα φωτοπολυμερή αντιδρούν σε ακτινοβολία μήκους κύματος εντός της υπεριώδους περιοχής (UV). Επίσης χρησιμοποιούνται και ορισμένα συστήματα ορατού φωτός. Υπό την επίδραση της ακτινοβολίας, τα υλικά αυτά αντιδρούν χημικά και στερεοποιούνται. Η αντίδραση αυτή ονομάζεται φωτοπολυμερισμός, κατά κανόνα είναι πολύπλοκη και εξαρτάται από πολλούς εμπλεκόμενους χημικούς παράγοντες.

Τα φωτοπολυμερή αναπτύχθηκαν στο τέλος της δεκαετίας του '60 και αμέσως έτυχαν ευρείας εφαρμογής για εμπορικούς σκοπούς σε πολλές περιοχές, με χαρακτηριστικότερες τις περιπτώσεις της βιομηχανικής παραγωγής υλικών επιστρώσεων και της τοπογραφίας. Οι περισσότερες γυαλιστερές επιστρώσεις σε χαρτί ή σε χαρτόνι, για παράδειγμα, είναι φωτοπολυμερή. Στην **οδοντιατρική**, επίσης, χρησιμοποιούνται φωτο-ωριμάζουσες/στερεοποιούμενες ρητίνες για το σφράγισμα της άνω επιφάνειας των δοντιών και τη συμπλήρωση οδοντικών αυλακώσεων προκειμένου να αποτραπεί ο σχηματισμός μεγάλων οδοντικών οπών. Στις εφαρμογές αυτές, οι επιστρώσεις «ωριμάζουν» με ακτινοβολία που καλύπτει πλήρως όλη τη ρητίνη, χωρίς να υπάρχει ανάγκη εφαρμογής κάποιου μοτίβου τόσο στο υλικό όσο και στην ακτινοβολία. Τούτο άλλαξε με την εμφάνιση της στερεολιθογραφίας, της πρώτης διεργασίας φωτοπολυμερισμού σε κάδο.

Στα μέσα του '80, ο Charles (Chuck) Hull πειραματιζόταν με UV-«ωριμάζοντα» υλικά, τα οποία εξέθετε σε μία δέσμη laser που εκτελούσε σάρωση παρόμοια με το σύστημα που απαντά στους εκτυπωτές με laser. Ανακάλυψε ότι έτσι ήταν εφικτό να δημιουργηθεί ένα μοτίβο στερεοποιημένου πολυμερούς. Με τη στερεοποίηση μιας στρώσης υλικού επάνω ακριβώς από μια άλλη στρώση που είχε

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

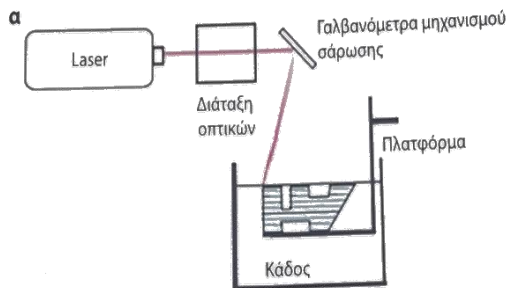
ήδη στερεοποιηθεί μπορούσε να δημιουργήσει ένα στερεό 3D αντικείμενο. Τούτο αποτέλεσε την αρχή της τεχνολογίας της στερεολιθογραφίας (Stereolithography – SL). Στη συνέχεια δημιουργήθηκε η εταιρία 3D Systems, προκειμένου να εμπορευτεί τις SL μηχανές ως μηχανές «ταχείας πρωτοτυποποίησης» στον τομέα ανάπτυξης προϊόντων. Έκτοτε έχει εμφανιστεί ευρύτατη ποικιλία διεργασιών και τεχνολογιών συγγενών προς την SL. Ο όρος «φωτοπολυμερισμός σε κάδο» («vat polymerization») είναι ένας γενικός όρος ο οποίος συμπεριλαμβάνει την SL, καθώς και άλλες συγγενείς με αυτές διεργασίες. Ο όρος «SL» χρησιμοποιείται για να δηλώσει τον σε μεγάλη σχετικά κλίμακα φωτοπολυμερισμό σε κάδο με σάρωση δέσμης laser, αλλιώς, χρησιμοποιείται ο όρος «φωτοπολυμερισμός σε κάδο» - «vat polymerization», ή, συντομογραφικά, VP.

Για τη στερεοποίηση/ωρίμανση των πολυμερών που διατίθενται στο εμπόριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά και διαφορετικά είδη ακτινοβολιών, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται οι ακτίνες γ, οι ακτίνες Χ, οι δέσμες ηλεκτρονίων, η UV ακτινοβολία και, σε ορισμένες περιπτώσεις, το ορατό φως. Στα συστήματα VP χρησιμοποιείται συνήθως ακτινοβολία UV ή ορατού φωτός. Στη βιομηχανία μικροηλεκτρονικών, τα υλικά φωτοεπικάλυψης, είναι συχνά φωτοπολυμερή τα οποία ακτινοβολούνται κατά κανόνα με απώτερη ακτινοβολία UV (far UV), καθώς και δέσμες ηλεκτρονίων. Αντίθετα, στην **οδοντιατρική** χρησιμοποιείται κυρίως το ορατό φως.

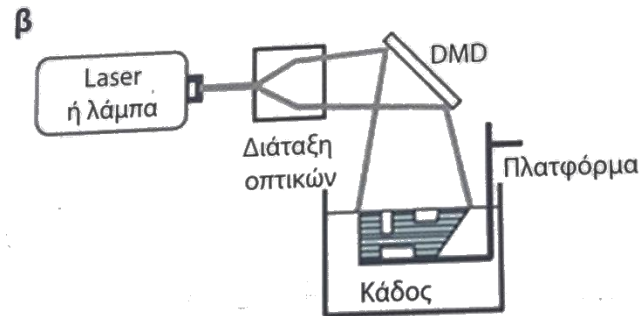
Δύο κύριες μορφές συστημάτων έχουν αναπτυχθεί για τις διεργασίες φωτοπολυμερισμού σε κάδο συν μία επιπλέον μορφή που παρουσιάζει ερευνητικό ενδιαφέρον. Παρόλο που τα φωτοπολυμερή χρησιμοποιούνται επίσης σε κάποιες διεργασίες ink-jet εκτύπωσης.

Μορφές συστημάτων: **A)** VP μηχανές διανυσματικής σάρωσης που, κατά κανόνα, χρησιμοποιούνται στις μηχανές SL του εμπορίου. **B)** φωτοπολυμερισμός σε μικρό-κάδο με διανυσματική σάρωση. **Γ)** πολυμερισμός δύο-φωτονίων σε κάδο.

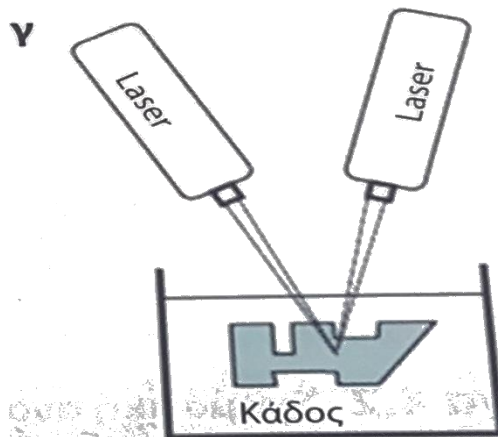
Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 1 Σχηματικό διάγραμμα διανυσματικής σάρωσης SL



Εικόνα 2 Σχηματικό διάγραμμα προβολής με μάσκα SL



Εικόνα 3 Σύστημα με δύο-φωτόνια

Οι τρεις αυτές μορφές συστημάτων παρουσιάζονται σχηματικά στην παραπάνω εικόνα. Στην περίπτωση των προσεγγίσεων της διανυσματικής σάρωσης και των δυο-φωτονίων, χρειάζονται δέσμες lasers και αντίστοιχοι μηχανισμοί σάρωσης, ενώ, στην προσέγγιση της προβολής με μάσκα, απαιτείται μια μεγάλη δέσμη ακτινοβολίας που σχηματίζεται από διαφορετική διάταξη – στη συγκεκριμένη περίπτωση μια ψηφιακή διάταξη μικροκατόπτρων (Digital Micromirror Device –

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

DMD). Στη περίπτωση δύο-φωτονίων, ο φωτοπολυμερισμός (δηλαδή η στερεοποίηση του υλικού) πραγματοποιείται στο σημείο συνάντησης των δύο κινούμενων δεσμών lasers, μολονότι άλλες μορφές συστημάτων χρησιμοποιούν ένα και μοναδικό laser, καθώς και διαφορετικές χημικές διαδικασίες φωτοεκκίνησης. Μία άλλη διαφορά είναι ότι, στην περίπτωση της διανυσματικής σάρωσης ή της προβολής με μάσκα, υπάρχει η ανάγκη για επίστρωση ή εφαρμογή μιας νέας στρώσης ρητίνης, ενώ στην περίπτωση των δυο-φωτονίων, που το αντικείμενο κατασκευάζεται κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της ρητίνης, η διαδικασία της επίστρωσης είναι περιττή. Οι κατασκευαστικές διεργασίες που δεν απαιτούν επίστρωση είναι ταχύτερες και λιγότερο πολύπλοκες.

Υλικά της διεργασίας φωτοπολυμερισμού σε κάδο

Τα φωτοπολυμερή χρησιμοποιούνται, εκτός των άλλων, στη μικροηλεκτρονική ως φωτοαντιστάτες. Η τελευταία αυτή εφαρμογή είχε σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη φωτοπολυμερών εποξειδικής ρητίνης. Οι φωτοαντιστάτες είναι στην ουσία μοναδικού στρώματος SL, με κρίσιμες, όμως απαιτήσεις όσον αφορά την ακρίβεια και την ανάλυση των χαρακτηριστικών τους.

Για τον πολυμερισμό/ωρίμανση των πολυμερών που διατίθενται στο εμπόριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά και διαφορετικά είδη ακτινοβολιών, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται οι ακτίνες γ, οι ακτίνες Χ, οι δέσμες ηλεκτρονίων, η UV ακτινοβολία και, σε ορισμένες περιπτώσεις το ορατό φως, αν και οι πλέον συνηθισμένες είναι η ακτινοβολία UV, καθώς και οι δέσμες ηλεκτρονίων. Στην AM, πολλά από αυτά τα είδη ακτινοβολιών έχουν χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικό επίπεδο, ενώ στα εμπορικά συστήματα χρησιμοποιείται μόνο ακτινοβολία UV ή ορατού φωτός. Στα συστήματα SL, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται αποκλειστικά ακτινοβολία UV, μολονότι γενικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τύποι ακτινοβολιών. Στο SLA-250 σύστημα της 3D Systems, χρησιμοποιείται laser ηλίου-καδμίου (HeCd) με μήκος κύματος 325 nm. Αντίθετα, τα lasers στερεάς κατάστασης που χρησιμοποιούνται σε άλλα SL μοντέλα

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

είναι τα Nd-YVO₄ . Στα συστήματα προβολής με μάσκα που βασίζονται στην DMD χρησιμοποιείται UV και ορατού φωτός ακτινοβολία.

Τα θερμοπλαστικά πολυμερή τα οποία υπόκεινται σε χύτευση με έγχυση έχουν γραμμική ή διακλαδωμένη μοριακή δομή, που τους επιτρέπει τη διαδοχικά επαναλαμβανόμενη τήξη και στερεοποίηση. Αντίθετα, τα VP φωτοπολυμερή έχουν διασταυρωμένη μοριακή δομή, που δεν επιτρέπει τη τήξη τους, εμφανίζουν δε μειωμένα χαρακτηριστικά ερπυσμού και χαλάρωσης.

Οι πρώτες αμερικάνικες πατέντες που περιγράφουν SL ρητίνες εκδόθηκαν το '89 και το '90. Οι ρητίνες αυτές, που προέρχονταν από ακρυλικές ενώσεις (acrylates), εμφάνιζαν έντονη δραστικότητα και οδηγούσαν σε παραγωγή κομματιών με χαμηλή μηχανική αντοχή, λόγω της δημιουργούμενης συρρίκνωσης και κύρτωσης. Στις ρητίνες με βάση τις ακρυλικές ουσίες, η έκθεση του υλικού στη δέσμη του laser, κατά τη διάρκεια της κατασκευαστικής διεργασίας, δεν ήταν σε θέση να πολυμερίσει πλήρως το υλικό, αλλά μέχρι κάποιο βαθμό μόνο, της τάξης του 46%. Όταν, λοιπόν, η επόμενη στρώση του υλικού εκτίθετο στο laser, κάποιο ποσό από την ακτινοβολία αυτή διαπερνούσε τη νέα στρώση, με αποτέλεσμα να αρχίζουν νέες φωτοχημικές αντιδράσεις στην προηγούμενη και μερικώς πολυμερισμένη, από κάτω ευρισκόμενη στρώση. Μετά την επικάλυψή της, ο πολυμερισμός της στρώσης αυτής ήταν λιγότερο εκτεθειμένος στην ανασταλτική δράση του οξυγόνου. Η επιπλέον δημιουργία ισχυρών δεσμών διασταύρωσης μεταξύ των μακρομορίων της στρώσης αυτής προκαλούσε πρόσθετη συρρίκνωση με αύξηση των τάσεων στο εσωτερικό της στρώσης που είχαν ως αποτέλεσμα την κύρτωση του κομματιού που παρατηρείται είτε κατά τη διάρκεια ή μετά το πέρας της διεργασίας της κατασκευής.

Οι πρώτες πατέντες που προδιέγραφαν εποξειδικής σύνθεσης SL ρητίνες εμφανίστηκαν το '88 (ιαπωνικές). Οι εποξειδικές ρητίνες παρήγαν ακριβέστερα, σκληρότερα και ανθεκτικότερα κομμάτια σε σχέση με τα αντίστοιχα των ακρυλικών ρητινών. Ενώ ο πολυμερισμός των ακρυλικών συνθέσεων συνεπάγεται 5%-20%

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

συρρίκνωση, ο ανοικτού δακτυλίου πολυμερισμός των εποξειδικών συνθέσεων οδηγεί σε συρρίκνωση μόνο της τάξης του 1%-2%. Το χαμηλό επίπεδο συρρίκνωσης που συνδέεται με την χημεία των εποξειδικών συνθέσεων συντελεί στην άριστη επικόλληση και τη μειωμένη τάση των εύκαμπτων υποστρωμάτων να κυρτωθούν κατά τον πολυμερισμό/ωρίμανσή τους. Επιπλέον, ο πολυμερισμός των εποξειδικών ρητινών δεν αναστέλλεται από το οξυγόνο του αέρα. Τούτο δίνει τη δυνατότητα για χαμηλές συγκεντρώσεις φωτοεκκινήτων, που προκαλούν χαμηλότερη εναπομένουσα οσμή από ό,τι οι ακρυλικοί σχηματισμοί.

Οι εποξειδικές ρητίνες, όμως, έχουν το μειονέκτημα της χαμηλής φωτοαχύτητας και της ψαθυρότητας των δημιουργούμενων πολυμερισμένων κομματιών. Η πρόσθεση λίγου ακρυλικού στις εποξειδικές ρητίνες είναι απαραίτητη προκειμένου τα κατασκευαζόμενα κομμάτια να αποκτούν ταχύτατα αντοχή τέτοια, που τους εξασφαλίζει επαρκή μηχανική σταθερότητα, ώστε να είναι κανείς σε θέση να τα διαχειριστεί χωρίς την πρόκληση στρεβλώσεων κατά την κατασκευή. Τα ακρυλικά είναι επίσης χρήσιμα για τη μείωση της ψαθυρότητας των εποξειδικών κομματιών. Ένα άλλο μειονέκτημα των εποξειδικών ρητινών είναι η ευαισθησία τους στη υγρασία, η οποία μπορεί να αναστείλει τον πολυμερισμό.

Ως συνέπεια, η πλειονότητα των SL ρητινών που είναι εμπορικά διαθέσιμες σήμερα είναι εποξείδια με σχετικό περιεχόμενο ακρυλικού. Επομένως, είναι αναγκαίο να έχει κανείς και τα δύο συνθετικά στο ίδιο υλικό, προκειμένου να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα και των δύο τύπων πολυμερισμού/ωρίμανσης. Η βελτίωση της κατασκευαστικής ακρίβειας που επιτυγχάνεται από τη χρήση υβριδικών ρητινών έχει δώσει στην SL τρομερή ώθηση.

A) VP μηχανές διανυσματικής σάρωσης

Προς το παρόν (2014) η 3D Systems αποτελεί τον κυριότερο κατασκευαστή VP μηχανών διανυσματικής σάρωσης στον κόσμο, παρόλο που υπάρχουν και πολλές άλλες εταιρείες στην Ιαπωνία, καθώς και αλλού στην Ασία οι οποίες εμπορεύονται VP μηχανές. Η Fockele & Schwarze στη Γερμανία παράγει μια μικρο-

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

μηχανή VP τεχνολογίας, μολονότι εμπορεύεται μόνο σχεδιαστικές και κατασκευαστικές υπηρεσίες. Αρκετές ιαπωνικές εταιρείες παράγουν ή παράγαν μηχανές, μεταξύ των οποίων οι Denken Engineering, CMET (Mitsubishi), Sony, Meiko Corp., Mitsui Zosen και η Teijin Seiki (με άδεια από την Dupont). Η Formlabs, που είναι μια εταιρεία νεοφυούς επιχειρηματικότητας και χρηματοδοτείται μερικώς από μία εταιρεία για την ενίσχυση και την προαγωγή της δημιουργικότητας (Kickstarter campaign), εμπορεύεται μια μικρή υψηλής ανάλυσης SL μηχανή.

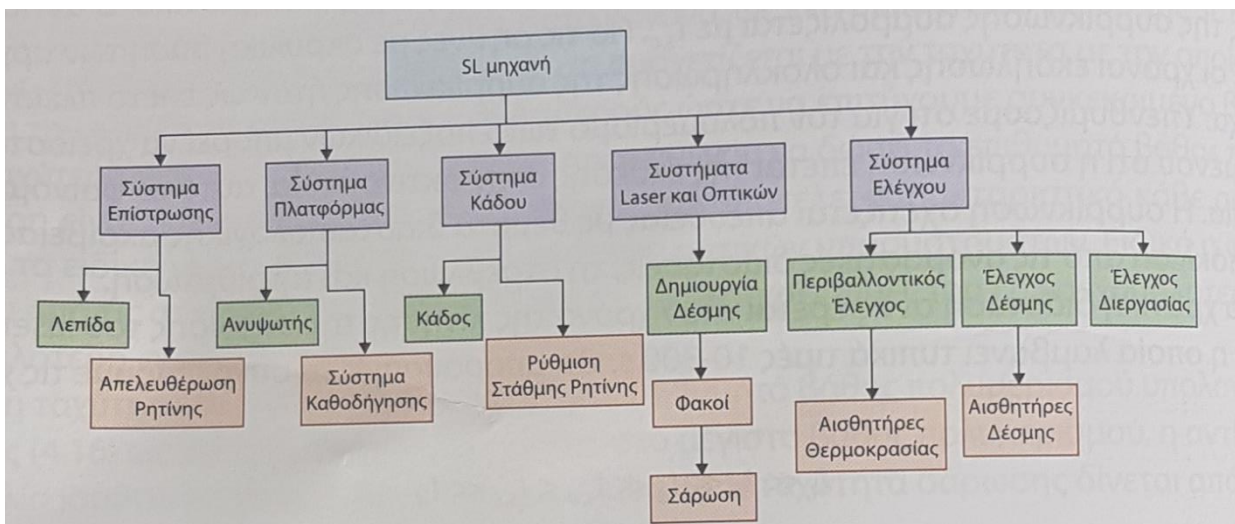
Στην **Εικόνα 2** παρουσιάστηκε σχηματικά μια τυπική VP μηχανή στην οποία φαίνονται τα κύρια υποσυστήματά της, περιλαμβανομένων του laser και των οπτικών, της πλατφόρμας και του ανυψωτή (elevator), του κάδου και του υποσυστήματος διαχείρισης της ρητίνης, καθώς και του επιστρωτή (recoater). Η ιεραρχική δομή των υποσυστημάτων της μηχανής δίνεται στην παρακάτω εικόνα. Ας σημειωθεί ότι τα πέντε βασικά υποσυστήματα είναι: το σύστημα επίστρωσης, το σύστημα της πλατφόρμας, το σύστημα του κάδου, το σύστημα του laser και των οπτικών και το σύστημα ελέγχου.

Κατά κανόνα, η επίστρωση πραγματοποιείται μέσω της σάρωσης μιας ελαφρά βυθισμένης λεπίδας επίστρωσης. Η διαδικασία επίστρωσης μπορεί να είναι η εξής:

- Μετά τον πολυμερισμό/στερεοποίηση μιας στρώσης, η πλατφόρμα βυθίζεται όσο είναι το πάχος της επόμενης στρώσης.
- Η λεπίδα επίστρωσης ολισθαίνει επάνω από όλη την επιφάνεια της κατασκευής αποθέτοντας ένα νέο στρώμα ρητίνης, εξομαλύνοντας επίσης την ελεύθερη επιφάνεια του κάδου.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Ένας τύπος λεπίδας επίστρωσης είναι η λεπίδα «Zephyr», η οποία είναι μια κοίλη λεπίδα πλήρης ρητίνης. Σύστημα κενού ωθεί ρητίνη από τον κάδο εντός της λεπίδας. Καθώς η λεπίδα μετακινείται επάνω στην ελεύθερη επιφάνεια του κάδου, εναποτίθεται ρητίνη στις περιοχές εκείνες όπου κατασκευάστηκε η προηγούμενη διατομή του κομματιού. Όταν η λεπίδα συναντά μια περιοχή στον κάδο όπου δεν υπάρχει ρητίνη, η ρητίνη από τη λεπίδα πέφτει σε εκείνη τη περιοχή, διότι το βάρος της είναι μεγαλύτερο από τη δύναμη του κενού. Η ευθυγράμμιση της λεπίδας είναι κρίσιμη προκειμένου και μπορεί να αποφευχθούν «συγκρούσεις της λεπίδας» όταν η λεπίδα συναντά το κομμάτι που κατασκευάζεται και μπορεί να προκληθεί αποκόλληση της προηγούμενης στρώσης.



Εικόνα 5 Υποσυστήματα της SL τεχνολογίας

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Το κενό της λεπίδας (η απόσταση μεταξύ της κάτω επιφάνειας της λεπίδας και της ελεύθερης επιφάνειας της ρητίνης) και η ταχύτητα της κίνησής της αποτελούν σημαντικές παραμέτρους και βρίσκονται υπό τον έλεγχο του χρήστη.

Το σύστημα της πλατφόρμας αποτελεί από μια κατασκευαστική πλατφόρμα η οποία παρέχει στήριξη στο κατασκευαζόμενο αντικείμενο και έναν ανυψωτή που υποβιβάζει και ανυψώνει την πλατφόρμα. Ο ανυψωτής καθοδηγείται από έναν κοχλία κίνησης. Το σύστημα του κάδου είναι απλά ο κάδος που περιέχει τη ρητίνη σε συνδυασμό με μια συσκευή που ρυθμίζει τη στάθμη της και με μια συνήθως δυνατότητα αυτόματης επαναπλήρωσης του κάδου με ρητίνη.

Το σύστημα οπτικών περιλαμβάνει ένα laser, οπτικά για τη ρύθμιση και την εστίασή του, καθώς και δύο γαλβανόμετρα που καθοδηγούν τη δέσμη laser κατά τη σάρωσή του επί της ελεύθερης επιφάνειας του κάδου. Οι σύγχρονες VP μηχανές διαθέτουν στερεάς κατάστασης lasers, που έχουν περισσότερο σταθερά χαρακτηριστικά από τους πρόγονούς τους, δηλαδή τα διάφορα lasers αερίου. Οι SL μηχανές της 3D Systems διαθέτουν Nd-YVO₄ lasers, που αποδίδουν ακτινοβολία σε μήκος κύματος περίπου 1,062 nm (πλησίον του υπέρυθρου). Επιπλέον, οπτικές συσκευές τριπλασιάζουν τη συχνότητα στα 354 nm, στη UV περιοχή. Αυτά τα lasers έχουν σχετικά χαμηλή ισχύ στην περιοχή των 0,1-1 W, συγκρινόμενα με lasers που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές άλλων διεργασιών AM, καθώς και επεξεργασίας υλικών.

Το σύστημα ελέγχου αποτελείται από τρία κυρίως υποσυστήματα: Πρώτον, ένας ελεγκτής διεργασίας ελέγχει τη διαδοχική σειρά των λειτουργιών της μηχανής. Τούτο ενέχει, ως επί το πλείστον, την εκτέλεση της σειράς των διαδοχικών λειτουργιών όπως περιγράφονται στο κατασκευαστικό αρχείο που έχει προετοιμαστεί, για ένα συγκεκριμένο κομμάτι ή για μια ομάδα αντικειμένων. Εντολές στέλνονται στα διάφορα υποσυστήματα προκειμένου να εκκινήσει η λεπίδα επίστρωσης, να ρυθμιστεί το επίπεδο της ρητίνης, να τροποποιηθεί το ύψος του κάδου ή να ενεργοποιηθεί ο ελεγκτής της δέσμης της ακτινοβολίας.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Χρησιμοποιούνται αισθητήρες που αναγνωρίζουν το ύψος της ρητίνης και την ανάπτυξη δυνάμεων στη λεπίδα επίστρωσης, και έτσι ανιχνεύονται πιθανές συγκρούσεις της λεπίδας. Δεύτερον, ο ελεγκτής της δέσμης μετατρέπει λειτουργικές περιγραφές σε ενέργειες που ρυθμίζουν το μέγεθος του δίσκου εστίασης της δέσμης, το βάθος εστίασης και την ταχύτητα της σάρωσης με την βοήθεια ορισμένων αισθητήρων που παρέχουν ανάδραση. Τρίτον, ο ελεγκτής περιβάλλοντος ρυθμίζει τη θερμοκρασία της ρητίνης στον κάδο και ανάλογα με το μοντέλο της μηχανής ρυθμίζει επίσης τη θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος.

Δύο από τα κύρια πλεονεκτήματα της VP τεχνολογίας έναντι των άλλων τεχνολογιών AM είναι η ακρίβεια του κατασκευαζόμενου αντικειμένου και η ποιότητα της επιφάνειάς του, σε συνδυασμό με μέτριες μηχανικές ιδιότητες που μπορεί να επιτύχει. Αυτά τα χαρακτηριστικά οδήγησαν στην πολύ διαδεδομένη χρήση των VP αντικειμένων ως γεωμετρικών πρωτοτύπων (μορφής), πρωτοτύπων εφαρμογής και, σε μικρότερο βαθμό, ως λειτουργικών πρωτοτύπων. Κατά κανόνα, η ακρίβεια των διαστάσεων στις VP μηχανές εκφράζεται ως ένας λόγος ενός σφάλματος ανά μονάδα μήκους. Για παράδειγμα, η ακρίβεια μιας SLA-250 αναφέρεται ως 0,002 in/in. Οι σύγχρονες VP μηχανές έχουν κατά τι μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ποιότητα της επιφάνειας των SL κομματιών κυμαίνεται από μικρότερη του ενός μικρού Ra, για επιφάνειες που διευθύνονται προς τα άνω, έως άνω των 100 μm Ra για λοξές επιφάνειες υπό γωνία.

Η σύγχρονη εμπορική γραμμή VP προϊόντων από τη 3D Systems περιλαμβάνει δύο οικογένειες μοντέλων: την SLA Viper Si2 και την iPro SLA Centers (iPro 9000XL, iPro 9000 και iPro 8000). Και τα δύο μοντέλα, το SLA Viper Si2 και το iPro, έχουν τη δυνατότητα σχηματισμού δύο μεγεθών δίσκου εστίασης της δέσμης του laser. Η Viper Si2 διαθέτει κατάσταση λειτουργίας «υψηλής ανάλυσης», που δημιουργεί έναν δίσκο εστίασης διαμέτρου περίπου 80 μm, ο οποίος είναι χρήσιμος για την κατασκευή μικρών αντικειμένων με λεπτά χαρακτηριστικά. Αντίθετα, στις iPro μηχανές, η μηχανή επιλέγει από μόνη της μεταξύ της «κανονικής» δέσμης laser διαμέτρου 0,13 mm για τον σχηματισμό των ορίων και τη σάρωση του εσωτερικού των διατομών του αντικειμένου, και της «ευρείας» δέσμης διαμέτρου 0,76 mm

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

κατάλληλης για τα διανύσματα σάρωσης (για σάρωση δηλαδή μεγάλων περιοχών). Η ευρεία δέσμη επιτρέπει τη σημαντικά ταχύτερη κατασκευή αντικειμένων. Η iPro γραμμή αντικαθιστά άλλες μηχανές, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται οι δημοφιλείς μηχανές SLA-3500, SLA-5000 και SLA-7000, αλλά και η SLA Viper Pro. Επιπλέον, η SLA-250 ήταν ένα πολύ δημοφιλές μοντέλο που σταμάτησε να παράγεται από το 2001 με την εισαγωγή του μοντέλου Viper Si2.

Φαινόμενα και σφάλματα της στρωματικής κατασκευής

Διάφορα φαινόμενα πρέπει να επισημανθούν, δεδομένου ότι είναι κοινά σε όλες τις διεργασίες AM με ακτινοβολία και στρωματική προσέγγιση. Το πλέον προφανές φαινόμενο είναι εκείνο της διακριτοποίησης (discretization), π.χ. πολλές στρώσεις διατομών η μία επάνω στην άλλη έχουν ως συνέπεια τη δημιουργία «βαθμίδων κλίμακας» («stair steps») στις κεκλιμένες, λοξά τοποθετημένες ή καμπύλες επιφάνειες. Έτσι, λόγω του στρωματικού χαρακτήρα των περισσότερων διεργασιών AM, οι άκρες των στρώσεων στην εξωτερική επιφάνεια των αντικειμένων είναι ορατές. Από σύμβαση, στις διεργασίες AM του εμπορίου τα αντικείμενα κατασκευάζονται με «ασφαλή για το υλικό» («material safe») τρόπο, ήτοι οι βαθμίδες της κλίμακας σχηματίζονται έξω από τις επιφάνειες του CAD μοντέλου του αντικειμένου. Οι τεχνίτες μπορούν να γυαλοχαρτίσουν ή να φινίρουν το αντικείμενο. Το υλικό δε που αφαιρούν ευρίσκεται εκτός του γεωμετρικού χώρου του αντικειμένου που τελικά επιθυμεί κανείς. Άλλα παραδείγματα διακριτοποίησης αποτελούν οι σαρώσεις της δέσμης laser ή τα pixels δεν είναι ορατά στις επιφάνειες του κομματιού, σε άλλες όμως διεργασίες, όπως εκείνες της εξώθησης του υλικού, είναι δυνατόν να διακρίνουμε τα μεμονωμένα νήματα υλικού.

Καθώς μια δέσμη laser σαρώνει την επιφάνεια της διατομής ή μία λάμπα φωτίζει μια στρώση, το υλικό στερεοποιείται, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την συρρίκνωσή του. Όταν οι ρητίνες φωτοπολυμερίζονται, συρρικνώνονται, διότι ο όγκος που καταλαμβάνουν τα μόρια των μονομερών είναι μεγαλύτερος εκείνου των πολυμερών που προκύπτουν από την αντίδραση πολυμερισμού. Παρόμοια, μετά την τήξη της, η πούδρα κρυσταλλώνει και πήζει, κάτι το οποίο μειώνει τον όγκο του υλικού. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής μιας στρώσης, η συρρίκνωσή της

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

δημιουργεί ελκτικές δυνάμεις στις προηγούμενες στρώσεις, που έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη τάσεων εντός του κομματιού. Κατά κανόνα οι τάσεις αυτές παραμένουν και ονομάζονται **παραμένουσες** τάσεις. Επίσης, οι τάσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν την κύρτωση προς τα άνω των άκρων των κομματιών, καθώς και άλλες στρεβλώσεις και παραμορφώσεις στο κομμάτι.

Το τελευταίο φαινόμενο που εξετάζεται είναι εκείνο των σφαλμάτων λόγω διαπεραστικής εκτύπωσης (print-through error). Στις διεργασίες φωτοπολυμερισμού, είναι αναγκαίο η κατασκευαζόμενη στρώση να πολυμεριστεί εντός της προηγούμενης στρώσης. Στις διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη, η κατασκευαζόμενη στρώση χρειάζεται να τηχθεί εντός της προηγούμενης, ώστε να προκύψει ένα στερεό αντικείμενο και όχι μια στοίβα από μη συγκολληθείσες στερεοποιημένες στρώσεις/διατομές. Η επιπλέον ενέργεια που διαπερνά την κατασκευαζόμενη στρώση και επηρεάζει την περιοχή κάτω από αυτή έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή παχύτερων διατομών για το αντικείμενο. Το επιπλέον αυτό πάχος ονομάζεται σφάλμα λόγω διαπεραστικής εκτύπωσης στην SL και «μπόνους Z» («bonus Z») στη συσσωμάτωση με laser. Τα περισσότερα συστήματα προγραμματισμού της διεργασίας διαθέτουν μεθοδολογία αντιστάθμισης του σφάλματος λόγω διαπεραστικής εκτύπωσης, δίνοντας στον χρήστη την επιλογή να παραλείψει μερικές από τις πρώτες στρώσεις του κομματιού, κάτι το οποίο λειτουργεί ικανοποιητικά, εκτός και αν υπάρχουν σημαντικά χαρακτηριστικά σε αυτές τις πρώτες στρώσεις.

B) φωτοπολυμερισμός σε μικρό-κάδο με διανυσματική σάρωση

Αρκετές διεργασίες αναπτύχθηκαν αποκλειστικά για εφαρμογές μικροκατασκευών οι οποίες βασίζονται στις αρχές του φωτοπολυμερισμού και χρησιμοποιούν lasers και Χ-ακτίνες ως ενεργειακή πηγή. Με τις διεργασίες αυτές κατασκευάζονται πολύπλοκης γεωμετρικής μορφής κομμάτια/αντικείμενα, που έχουν, κατά κανόνα, μέγεθος μικρότερο του 1 mm. οι διεργασίες αυτές αναφέρονται ως μικροστερεολιθογραφία (Microstereolithography - MSL), στερεολιθογραφία ολοκληρωμένης σκληροποίησης (Integrated Hardened Stereolithography – IH), LIGA,

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

βαθεία λιθογραφία ακτίνων Χ (Deep X-ray Lithography – DXRL), καθώς και με άλλα ονόματα.

Σε αντίθεση με τον συμβατικό VP, οι τεχνολογίες διανυσματικής σάρωσης για τη μικροκλίμακα μετακινούν τον κάδο για τις διευθύνσεις x, y, και z, αντί να σαρώνουν κινώντας τη δέσμη του laser. Η εστίαση ενός τυπικού laser σε δίσκο διαστάσεων μικρότερο των 20 μm απαιτεί πολύ μικρό εστιακό μήκος, που προκαλεί δυσκολίες κατά τη διαδικασία της σάρωσης του laser. Για τη μηχανή SLA-250 με laser HeCd μήκους κύματος 325 nm, η δέσμη έχει διάμετρο 0,33 mm και απόκλιση 1,25 mrad κατά την έξοδό της από το laser. Το laser διαδίδεται ελεύθερο σε μία απόσταση 280 mm και κατόπιν συναντά έναν αποκλίνοντα φακό (εστιακής απόστασης – 25 mm), ενώ στα επόμενα 85 mm συναντά έναν συγκλίνοντα φακό (εστιακής απόστασης 100 mm). Χρησιμοποιώντας απλές προσεγγίσεις της θεωρίας των λεπτών φακών, προκύπτει ότι η απόσταση από τον συγκλίνοντα φακό μέχρι το σημείο εστίασης, όπου το μέγεθος του δίσκου του laser ανέρχεται σε 0,2 mm, είναι 940 mm και το εύρος Rayleigh 72 mm. Επομένως, ο δίσκος εστίασης επέχει αρκετά από τις οπτικές διατάξεις εστίασης, ενώ το εύρος Rayleigh είναι αρκούτως υψηλό ώστε να επιτρέπει ευρεία περιοχή σάρωσης και μεγάλη κατασκευαστική επιφάνεια.

Σε αντιδιαστολή παρουσιάζεται εδώ ένα τυπικό υπολογιστικό παράδειγμα για ένα υψηλής ανάλυσης μικρο-SL σύστημα με μέγεθος δίσκου εστίασης laser των 10 μm. Προκειμένου να γίνει κατανοητή μια ιδέα της πρόκλησης που δημιουργείται, έχει θεωρηθεί laser HeCd μήκους κύματος 325 nm που χρησιμοποιείται στη SL. Η δέσμη καθώς εξέρχεται έχει διάμετρο 0,33 mm και απόκλιση 1,25 mrad. Διαδίδεται σε μήκος 280 mm και στη συνέχεια συναντά έναν αποκλίνοντα φακό εστίασης (εστιακής απόστασης -25 mm) και έναν συγκλίνοντα φακό (εστιακής απόστασης 36,55 mm). Η απόσταση από τον συγκλίνοντα φακό μέχρι το σημείο εστίασης είναι 54,3 mm ενώ το εύρος Rayleigh είναι 0,24 mm. Θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να σαρώσει κανείς στον κάδο με αυτή τη δέσμη laser χωρίς σοβαρές παραμορφώσεις του δίσκου εστίασης.

Μικρο-VP συστήματα με σάρωση έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία από το '93 με την εμφάνιση της μεθόδου ολοκληρωμένης σκληροποίησης (Integrated

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Hardening) των Ikuta και Hirowatari. Αυτοί χρησιμοποίησαν ένα laser με διάμετρο δίσκου εστίασης 5 μm που σάρωνε τον κάδο από κάτω για τον πολυμερισμό μιας στρώσης. Παραδείγματα συσκευών που έχουν κατασκευαστεί με αυτή τη μέθοδο αποτελούν σωληνίσκοι, πολλαπλές, ελατήρια και εύκαμπτοι μικροενεργοποιητές αλλά και κανάλια για ρευστά από σιλικόνη. Οι Takagi and Nakajima έχουν δείξει τη χρήση αυτής της τεχνολογίας για τη σύνδεση των οδοντωτών τροχών μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) επάνω σε ένα υπόστρωμα. Τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με μικρο-VP μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εκμαγεία για γαλβανική επιμετάλλωση χαρακτηριστικών μικρότερο του 1 μm.

Προδιαγραφές μιας τυπικής διεργασίας σημειακής (point-wise) μικροστερεολιθογραφίας:

- 5-μm μέγεθος δίσκου εστίασης της UV δέσμης
- Η ακρίβεια τοποθέτησης είναι 0,25 μm (στις x-y διευθύνσεις) και 0,1 μm κατά την z διεύθυνση
- Το ελάχιστο μέγεθος μονάδας στερεοποιούμενου πολυμερούς είναι 5 μm * 5 μm * 3 μm (κατά x,y,z)
- Μέγιστο μέγεθος αντικειμένου που μπορεί να κατασκευαστεί είναι 10 mm * 10 mm * 10 mm

Η δυνατότητα κατασκευής γύρω από ενσωματωμένα εξαρτήματα έχει επίσης αναφερθεί για διάφορα εξαρτήματα όπως μεμβράνες υπερδιήθησης και ηλεκτρικούς αγωγούς. Στις εφαρμογές περιλαμβάνονται τσιπς ρευστών για σύνθεση πρωτεϊνών και βιοανάλυση. Το σύστημα βιοανάλυσης έχει κατασκευαστεί με ενσωματωμένες βαλβίδες και αντλίες με σπονδυλωτό σχεδιασμό στοίβας (stacked modular design), 13 * 13 mm² και 3 mm πάχος το καθένα τσιπ, δε, αναφέρεται σε διαφορετική λειτουργία ρευστού. Ακόμη όμως, δεν έχει καταδειχθεί το πλήρες εύρος δυνατοτήτων από την ολοκληρωμένη επεξεργασία πυριτίου. Τα οφέλη που συνδέονται με τη μεγαλύτερη σχεδιαστική ευελιξία και το χαμηλότερο κόστος κατασκευής μένουν να διαπιστωθούν στο μέλλον.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

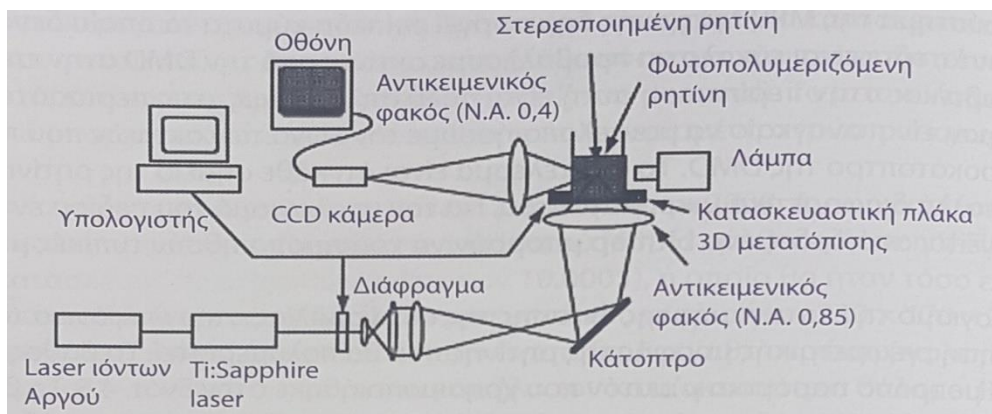
Γ) πολυμερισμός δύο-φωτονίων σε κάδο

Στη διεργασία πολυμερισμού δυο-φωτονίων σε κάδο (two-photon vat photopolymerization – 2p-VP), ο φωτοεκκινητής χρειάζεται να προσβληθεί από δύο φωτόνια, προκειμένου να αποσυντεθεί και να σχηματίσει μια ελεύθερη ρίζα που μπορεί να εκκινήσει τη διαδικασία του φωτοπολυμερισμού. Συνέπεια αυτής της απαίτησης των δυο-φωτονίων είναι η επίτευξη πολύ υψηλότερης ανάλυσης στις διεργασίες πολυμερισμού. Τούτο είναι αληθές, διότι μόνο κοντά στο κέντρο της δέσμης του laser η ένταση της ακτινοβολίας είναι αρκετά υψηλή δίνοντας εκείνη την πυκνότητα φωτονίων που εξασφαλίζει την προσβολή του ίδιου μορίου φωτοεκκινητή από δυο φωτόνια. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μεγέθους 0,2 μm ή και μικρότερα έχουν επιτευχθεί με τη χρήση 2p-VP.

Ο 2p-VP πρωτοεπινοήθηκε τη δεκαετία του '70, προκειμένου να κατασκευαστούν τρισδιάστατα αντικείμενα. Είναι ενδιαφέρον ότι η εμφάνιση του 2p-VP προηγείται της στερεολιθογραφίας περισσότερο από 10 έτη. Στην πρώτη αυτή προσέγγιση χρησιμοποιούνταν δυο laser για να ακτινοβολήσουν σημεία σε ένα κάδο με φωτοπολυμερές. Όταν οι δύο δίσκοι εστίασης των lasers διασταυρώνονταν, η πυκνότητα φωτονίων ήταν αρκούτσως υψηλή για να προκληθεί φωτοπολυμερισμός.

Πιο πρόσφατα, ο 2p-VP έτυχε ερευνητικής προσοχής στα τέλη του '90. Σχηματική παράσταση μιας τυπικής ερευνητικής διάταξης αυτής της διεργασίας φαίνεται στην

Εικόνα 7 Σχηματική αναπαράσταση μιας συνηθισμένης συσκευής δυο-φωτονίων



Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

παρακάτω εικόνα.

Στο σύστημα αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί υψηλής ισχύος laser Ti:Sapphire, με μήκος κύματος 790 nm, εύρος παλμού 200 fs, και μέγιστη ισχύ 50 kW. Ο αντικειμενικός φακός έχει $NA = 0,85$. Παρόμοια με άλλες μικρο-VP προσεγγίσεις, ο κάδος σαρωνόταν με τη βοήθεια μιας 3D κινούμενης κατασκευαστικής πλάκας (3D scanning stage) και όχι από τη δέσμη laser. Τα κομμάτια κατασκευάζονταν από κάτω προς τα πάνω. Η συνεκτικότητα της ρητίνης ήταν αρκετή για να μην επιτρέπει τη μετακίνηση του μικροαντικειμένου εντός της υγρής ρητίνης κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού του. Πολύπλοκα κομμάτια έχουν κατασκευαστεί ταχύτατα από διάφορες ερευνητικές ομάδες.

Συνηθισμένα φωτοπολυμερή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις 2p-VP μηχανές. Η συχνότερα χρησιμοποιούμενη ρητίνη ήταν SCR500 από την Japan Synthetic Rubber Company, η οποία ήταν μια συνηθισμένη SL ρητίνη στην Ιαπωνία από όπου άρχισε αυτή η έρευνα τη δεκαετία του '90. Η SCR500 αποτελεί μείγμα ουρεθανικοακρυλικών ολιγομερών/μονομερών και συνηθισμένων φωτοεκκινητών που δημιουργούν ελεύθερες ρίζες. Το φάσμα απορρόφησης της ρητίνης δείχνει ότι είναι διαφανής πέραν των 550 nm, κάτι το οποίο αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, διότι τα φωτόνια μπορούν να διεισδύσουν σε μεγαλύτερο βάθος εντός της ρητίνης (το D_p είναι πολύ μεγάλο). Μια συνέπεια είναι ότι τα κομμάτια μπορούν να κατασκευαστούν εντός του κάδου της ρητίνης και όχι μόνο στην ελεύθερη επιφάνεια του κάδου, γεγονός το οποίο καταργεί την ανάγκη επίστρωσης.

Η φωτοευαισθησία μιας 2p-VP ρητίνης μετριέται με βάση τη διατομή απορρόφησης των δύο-φωτονίων (Δ) του μορίου του φωτοεκκινητή που αντιστοιχεί στο μήκος κύματος που χρησιμοποιείται για την ακτινοβόλησή του. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του Δ , τόσο περισσότερο ευαίσθητη είναι η ρητίνη στον πολυμερισμό δυο-φωτονίων, πιθανόν επιτρέποντας τη χρήση lasers μικρότερης ισχύος.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Τα ακρυλικά φωτοπολυμερή συστήματα παρουσιάζουν χαμηλή φωτοευαισθησία, καθώς οι φωτοεκκινητές έχουν μικρή διατομή απορρόφησης δυο-φωτονίων. Συνεπώς, αυτοί οι φωτοεκκινητές απαιτούν υψηλή ισχύ laser και μακρύτερους χρόνους έκθεσης σε ακτινοβολία. Άλλα υλικά έχουν διερευνηθεί για 2p-VP, τα οποία χρησιμοποιούν ειδικούς φωτοεκκινητές με μεγαλύτερο Δ . Οι νέοι τύποι φωτοεκκινητών τείνουν να είναι μακρά μόρια με ειδική μορφή που τους καθιστά κατάλληλους υποψήφιους για αποσύνθεση προς ελεύθερες ρίζες όταν προσβληθούν διαδοχικά εντός του συντόμου χρονικού διαστήματος από δύο φωτόνια. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τον σχεδιασμό των φωτοεκκινητών, είναι δυνατόν να επιτύχουμε μεγάλες διατομές απορρόφησης και χαμηλά κατώφλια ενέργειας πολυμερισμού.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διεργασίας

Δύο από τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας του φωτοπολυμερισμού σε κάδο σε σχέση με άλλες AM τεχνολογίες είναι η γεωμετρική ακρίβεια του κομματιού και η ποιότητα της επιφάνειας. Με την ανάπτυξη του πεδίου της ταχείας πρωτοτυποποίησης, τα χαρακτηριστικά αυτά οδήγησαν στη διαδεδομένη χρήση κομματιών που έχουν κατασκευαστεί με στερεολιθογραφία διανυσματικής σάρωσης, ως πρωτοτύπων μορφής και εφαρμογής, και, σε μικρότερο βαθμό, ως λειτουργικών πρωτοτύπων. Κατά κανόνα, οι διαστασιολογικές ακρίβειες των SL μηχανών συχνά εκφράζονται ως ο λόγος ενός σφάλματος προς τη μονάδα μήκους.

Ένα άλλο πλεονέκτημα των VP τεχνολογιών είναι η ευελιξία τους, καθώς υποστηρίζουν πολλούς διαφορετικούς τύπους μηχανών και πολλές κλίμακες μεγεθών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές φωτεινές πηγές, συμπεριλαμβανομένων των lasers, των λαμπών ή των LEDs, καθώς επίσης και διαφορετικοί τρόποι δημιουργίας των αντίστοιχων ακτινοβολούμενων μορφών, όπως με γαλβανόμετρα σάρωσης ή με DMDs. Το εύρος των μεγεθών που έχουν να επιδείξουν οι VP τεχνολογίες είναι τεράστιο: από κάδο 1,5 m στην iPro 9000XL SLA Center μέχρι μορφολογικά χαρακτηριστικά 100 nm, που είναι κατορθωτά με φωτοπολυμερισμό δύο-φωτονίων.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

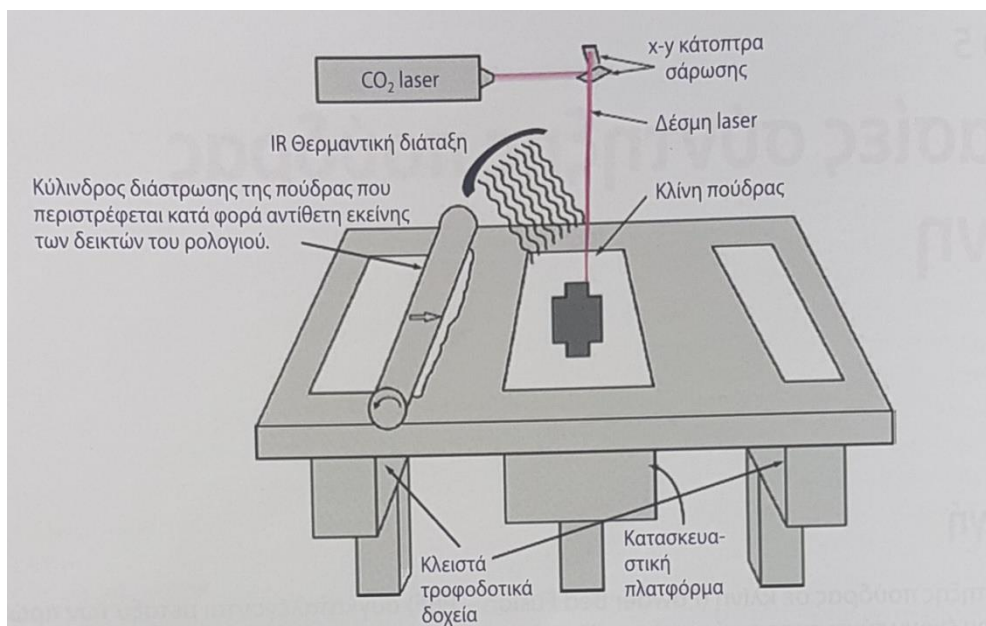
Οι VP τεχνολογίες προβολής με μάσκα παρουσιάζουν ένα ενδογενές πλεονέκτημα ταχύτητας σε σχέση με την SL με σάρωση laser. Χρησιμοποιώντας μια μάσκα, μπορεί να προβληθεί μια ολόκληρη διατομή κομματιού, αντί να πρέπει να σχηματίσουμε η διατομή με διαδοχικές σαρώσεις διανυσματικής μορφής. Γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ της ανάλυσης και του μεγέθους του συγκεκριμένου σχήματος (και μεγέθους της στερεοποιούμενης διατομής) που οφείλεται στην ανάλυση της μάσκας. Για παράδειγμα, συνήθεις DMDs έχουν ανάλυση 1,1024 * 780 ή 1,280 * 720, αν και νεότερες HDTV DMDs έχουν αναλύσεις των 1,920 * 1,080. Εντούτοις, για ανάλυση σε κατασκευασμένο αντικείμενο των 50 μm ή και υψηλότερη, η προβαλλόμενη επιφάνεια μπορεί να είναι κατά μέγιστο 69 * 54 mm.

Ένα μειονέκτημα των VP διεργασιών αποτελεί η χρήση φωτοπολυμερών, δεδομένου ότι οι χημικές συνθέσεις των εμπορικών υλικών είναι περιορισμένες στα ακρυλικά και τα εποξειδικά. Μολονότι υπάρχουν πολλά άλλα συστήματα υλικών που είναι δυνατόν να φωτοπολυμεριστούν, κανένα δεν είχε εκείνη την εμπορική επιτυχία ώστε να εκτοπίσει τις τωρινές χημικές συνθέσεις υλικών. Γενικά, τα τωρινά SL υλικά δε παρουσιάζουν την αντοχή σε κρούση και την ανθεκτικότητα των καλής ποιότητας θερμοπλαστικών της χύτευσης με έγχυση. Επιπροσθέτως, είναι γνωστό ότι γηράσκουν, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζονται οι μηχανικές τους ιδιότητες με την πάροδο του χρόνου. Αυτοί οι περιορισμοί εμποδίζουν τις SL διεργασίες από το να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές παραγωγής προϊόντων.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

2)Διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη:

Οι διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion – PBF) συγκαταλέγονται μεταξύ των πρώτων AM διεργασιών που έχουν τύχει εμπορικής χρήσης. Η επιλεκτική συσσωμάτωση με laser που αναπτύχθηκε στο University of Texas στο Austin, USA, αποτέλεσε την πρώτη PBF του εμπορίου. Η βασική μέθοδος λειτουργίας της φαίνεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 8 Σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας επιλεκτικής συσσωμάτωσης με laser

Όλες οι άλλες PBF διεργασίες τροποποιούν κατά τον έναν ή τον άλλο τρόπο αυτή τη βασική προσέγγιση προκειμένου είτε να αυξήσουν την παραγωγικότητα της μηχανής είτε να επιτρέψουν τη χρήση διαφορετικών υλικών κατασκευής, καθώς και/ή να αποφύγουν ειδικά χαρακτηριστικά πατεντών.

Όλες οι PBF διεργασίες διαθέτουν ένα κοινό βασικό σύνολο χαρακτηριστικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες πηγές θερμότητας, που προκαλούν τη σύντηξη των σωματιδίων της πούδρας, μια μέθοδο ελέγχου της σύντηξης της πούδρας σε συγκεκριμένη περιοχή της κάθε στρώσης, καθώς και μηχανισμούς για τη πρόσθεση και την εξομάλυνση των στρώσεων της πούδρας. Η

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

πλέον συνηθισμένη πηγή θερμότητας για την PBF είναι τα lasers. Οι PBF διεργασίες οι οποίες χρησιμοποιούν lasers είναι γνωστές με την επωνυμία «μηχανές συσσωμάτωσης με laser» (Laser Sintering – LS). Επειδή οι μηχανές συσσωμάτωσης πολυμερών με laser (Polymer Laser Sintering – pLS) διαφέρουν σημαντικά από τις μηχανές συσσωμάτωσης μετάλλου με laser (Metal Laser Sintering – mLS), θα παρουσιαστεί η μία ξεχωριστά από την άλλη. Επιπλέον, επειδή για τη δέσμη ηλεκτρονίων, καθώς και άλλες πηγές θερμότητας απαιτούνται σημαντικά διαφορετικότερες αρχιτεκτονικές για τη μηχανή σε σύγκριση με εκείνες των μηχανών συσσωμάτωσης με laser, οι θερμικές πηγές χωρίς laser θα παρουσιάσουν ξεχωριστά και εκείνες από τις πηγές με laser.

Οι LS διεργασίες αναπτύχθηκαν αρχικά για την παραγωγή πλαστικών πρωτοτύπων με τη χρήση μιας σημειακής τεχνικής σάρωσης με laser. Η προσέγγιση αυτή επεκτάθηκε στη συνέχεια σε πούδρες μεταλλικών και κεραμικών υλικών. Σήμερα χρησιμοποιούνται πρόσθετες πηγές θερμότητας, ενώ παραλλαγές στρωματικής σύντηξης υλικών σε πούδρα εμφανίζονται καθημερινά στο εμπόριο. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι PBF διεργασίες να είναι ευρύτατα διαδεδομένες ανά τον κόσμο, παρουσιάζουν ευρύτατο φάσμα υλικών κατασκευής (συμπεριλαμβανομένων πολυμερών, μεταλλικών, κεραμικών και σύνθετων υλικών) και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την απευθείας κατασκευή τελικών προϊόντων, δεδομένου ότι οι ιδιότητες των υλικών αυτών είναι συγκρίσιμες με εκείνες πολλών πολυμερών, μεταλλικών και κεραμικών υλικών των τεχνικών εφαρμογών της πράξης.

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, στην pLS τήκονται λεπτά στρώματα πούδρας (με πάχος, κατά κανόνα, 0,075 – 0,1 mm), που έχουν διαστρωθεί σε όλη την κατασκευαστική επιφάνεια με έναν κύλινδρο διάστρωσης της πούδρας, ο οποίος περιστρέφεται κατά φορά αντίθετη εκείνης των δεικτών του ρολογιού. Η κατασκευή του κομματιού πραγματοποιείται εντός ενός κλειστού θαλάμου, ο οποίος είναι γεμάτος με αέριο άζωτο, ώστε να ελαχιστοποιούνται η οξείδωση και η αποδόμηση του υλικού της πούδρας. Η πούδρα στην κατασκευαστική πλατφόρμα διατηρείται σε υψηλότερη θερμοκρασία μόλις κάτω από το σημείο τήξης και/ή τη

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του υλικού της πούδρας. Θερμαντικές διατάξεις υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι τοποθετημένες επάνω από την κατασκευαστική πλατφόρμα για να διατηρούν τη θερμοκρασία γύρω από το κατασκευαζόμενο κομμάτι σε υψηλότερα επίπεδα, καθώς επίσης και επάνω από τα κλειστά τροφοδοτικά δοχεία (feed cartridges), ώστε να προθερμαίνεται η πούδρα προτού διαστρωθεί στην κατασκευαζόμενη επιφάνεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις θερμαίνεται και η κατασκευαστική πλατφόρμα με τη χρήση των θερμαντικών διατάξεων με αντιστάσεις που βρίσκονται τοποθετημένες γύρω από αυτήν. Αυτή η προθέρμανση της πούδρας και η διατήρηση υψηλότερης μιας ομοιόμορφης θερμοκρασίας εντός της κατασκευαστικής πλατφόρμας είναι απαραίτητες, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απαιτήσεις της διεργασίας αναφορικά με την ισχύ του laser (με την προθέρμανση απαιτείται λιγότερη ενέργεια από το laser για τη σύντηξη) αλλά και να αποτραπεί η στρέβλωση του κομματιού κατά τη διάρκεια της κατασκευής που οφείλεται στην ανομοιόμορφη θερμική διαστολή και συστολή (που οδηγεί τελικά στην κύρτωση).

Αφότου σχηματιστεί και προθερμανθεί κατάλληλη στρώση πούδρας, μια εστιασμένη δέσμη CO₂ laser, που στοχεύει επάνω στη πούδρα της κλίνης, κινείται με τη βοήθεια γαλβανόμετρων κατά τρόπο τέτοιο που να προκαλεί τη θερμική σύντηξη του υλικού, προκειμένου να σχηματιστεί η διατομή της αντίστοιχης στρώσης. Οι κόκκοι της πούδρας που περιβάλλει την κατασκευή παραμένουν μεταξύ τους ασύνδετοι και χρησιμεύουν ως στήριγμα για τις επόμενες στρώσεις, καταργώντας έτσι την ανάγκη ύπαρξης της δευτερεύουσας δομής στηριγμάτων, που είναι αναγκαία στις διεργασίες φωτοπολυμερισμού σε κάδο. Μόλις ολοκληρωθεί ο σχηματισμός μιας στρώσης, η κατασκευαστική πλατφόρμα υποβιβάζεται τόσο όσο το πάχος μιας στρώσης και ένα νέο στρώμα πούδρας διαστρώνεται και εξομαλύνεται με τον αντίθετα προς του δείκτης του ρολογιού περιστρεφόμενο κύλινδρο διάστρωσης. Η δέσμη του laser σαρώνει τη δέσμη που αντιστοιχεί στην επόμενη διατομή του κομματιού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστεί ολόκληρο το κομμάτι. Κατά κανόνα απαιτείται ένα χρονικό

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

διάστημα στη διάρκεια του οποίου τα κομμάτια ψύχονται σταδιακά, κάτι που είναι απαραίτητο, προκειμένου να αποκτήσουν ομογενώς μια αρκετά χαμηλή θερμοκρασία η οποία να επιτρέπει τη διαχείριση και την έκθεσή τους στην εξωτερική θερμοκρασία και ατμόσφαιρα. Εάν τα κομμάτια και/ή η κλίση της πούδρας εκτεθούν πρόωρα στην εξωτερική θερμοκρασία και την ατμόσφαιρα, οι πούδρες μπορεί να αποδομηθούν με την παρουσία του οξυγόνου και τα κομμάτια μπορεί να στρεβλωθούν λόγω της ακανόνιστης θερμικής συστολής. Στο τέλος τα κομμάτια απομακρύνονται από την κλίση πούδρας, καθαρίζονται από υπολείμματα της ασύνδετης πούδρας που τα περιβάλλει και, αν είναι αναγκαίο, πραγματοποιούνται επιπλέον κατεργασίες φινιρίσματος.

Υλικά:

Θεωρητικά, όλα τα υλικά που μπορούν να υποστούν τήξη και επαναστερεοποίηση δύναται να χρησιμοποιηθούν σε PBF διεργασίες.

Πολυμερή και σύνθετα

Τα θερμοπλαστικά (thermoplastics) υλικά ενδείκνυνται για επεξεργασία με κλίση πούδρας λόγω των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών τήξης, των μικρών θερμικών αγωγιμοτήτων και της μικρής τάσης σχηματισμού σφαιριδίων. Γενικά, τα πολυμερή ταξινομούνται είτε ως θερμοπλαστικά είτε ως θερμοσκληρυνόμενα (thermoset). Κατά κανόνα, τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή δεν χρησιμοποιούνται ως υλικά κατασκευής αντικειμένων με PBF διεργασίες, διότι οι διεργασίες αυτές βασίζονται στη τήξη των σωματιδίων του υλικού για την κατασκευή των διατομών του αντικειμένου. Ωστόσο, τα θερμοσκληρυνόμενα αποδομούνται και δεν τήκονται, αλλά ρευστοποιούνται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Τα θερμοπλαστικά μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε σχέση με την κρυσταλλικότητά τους. Τα άμορφα πολυμερή εμφανίζουν τυχαία μοριακή δομή όπου οι πολυμερικές αλυσίδες είναι κατά τυχαίο τρόπο πελπεγμένες. Αντίθετα, τα κρυσταλλικά πολυμερή έχουν κανονική μοριακή δομή, κάτι το οποίο, όμως, δεν είναι σύνηθες. Περισσότερο συχνά απαντώνται ημι-κρυσταλλικά πολυμερή, τα οποία διαθέτουν περιοχές με

Διεξαγωγή πειραματων για δοκιμα προσθετικων κατεργασιων.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

κανονική δομή, που ονομάζονται κρυσταλλίτες. Στα άμορφα πολυμερή, η τήξη εμφανίζεται σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Καθώς, όμως, η κρυσταλλικότητα των πολυμερών αυξάνεται, η περιοχή θερμοκρασιών όπου εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά της τήξης περιορίζεται γύρω από ένα καλώς καθορισμένο σημείο τήξης.

Σήμερα το πλέον συνηθισμένο υλικό που χρησιμοποιείται στην PBF είναι το πολυαμίδιο, ένα θερμοπλαστικό πολυμερές ευρύτερα γνωστό στις ΗΠΑ ως νάιλον. Τα περισσότερα πολυαμίδια εμφανίζουν αρκετά υψηλό βαθμό κρυσταλλικότητας και κατατάσσονται στα ημικρυσταλλικά υλικά. Έχουν καθορισμένο σημείο τήξης, που καθιστά δυνατή την αξιόπιστη επεξεργασία τους. Δεδομένο ποσό ενέργειας laser τήκει ορισμένη ποσότητα πούδρας, τα σωματίδια της πούδρας στην υγρή κατάσταση συνενώνονται και, στη συνέχεια, ψύχονται ταχύτατα, σχηματίζοντας έτσι μέρος της διατομής του κομματιού. Αντίθετα, τα άμορφα πολυμερή έχουν τη τάση να μαλακώνουν και να τήκονται εντός ενός ευρέος φάσματος θερμοκρασιών, καθώς και να μη δημιουργούν καλώς προσδιορισμένους στερεούς σχηματισμούς. Στην rLS, τα άμορφα πολυμερή έχουν τη τάση να συσσωματώνονται σε σχηματισμούς με υψηλό πορώδες, ενώ τα κρυσταλλικά πολυμερή που κατά κανόνα υφίστανται επεξεργασία με πλήρη τήξη επιτυγχάνονται υψηλότερες πυκνότητες. Το πολυαμίδιο 11 και το πολυαμίδιο 12 διατίθενται στο εμπόριο. Ο αριθμός δηλώνει ακριβώς τον αριθμό των ατόμων άνθρακα που παρέχει ένα μονομερές το οποίο αντιδρά για να σχηματίσει πολυαμίδιο. Εντούτοις, τα κρυσταλλικά πολυμερή παρουσιάζουν μεγαλύτερη συρρίκνωση από τα άμορφα υλικά. Είναι δε περισσότερο ευαίσθητα σε κύρτωση και παραμόρφωση, απαιτώντας μεγαλύτερο έλεγχο για την επίτευξη ομοιόμορφης θερμοκρασίας. Οι μηχανικές ιδιότητες των κομματιών που έχουν κατασκευαστεί με rLS διεργασία με πούδρες πολυαμίδιων πλησιάζουν εκείνες των θερμοπλαστικών κομματιών της χύτευσης με έγχυση, με σημαντικά όμως μειωμένη επιμήκυνση και μοναδικές μικροδομές.

Υλικά με βάση το πολυστυρένιο που έχει χαμηλό περιεχόμενο παραμένουσας τέφρας ενδείκνυται για την κατασκευή με rLS αναλώσιμων

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

προτύπων για χύτευση ακριβείας (μέθοδος του χαμένου κεριού). Είναι ενδιαφέρον ότι το πολυστυρένιο είναι ένα άμορφο πολυμερές, αποτελεί όμως ένα επιτυχημένο παράδειγμα υλικού σε σχέση με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Το πορώδες σε ένα πρότυπο χύτευσης βοηθά στην ολοκληρωτική τήξη και την εξαφάνιση του προτύπου χύτευσης αφότου δημιουργηθεί το κεραμικό κέλυφος. Οι πόροι στην επιφάνεια των κομματιών από πολυστυρένιο που προορίζονται για εφαρμογές χύτευσης ακριβείας πρέπει να φράσσονται ώστε να παρεμποδίζεται το κεραμικό υλικό από το να διεισδύσει στο εσωτερικό του προτύπου και να επιτυγχάνεται υψηλής ποιότητας τελική επιφάνεια.

Ελαστομερή θερμοπλαστικά πολυμερή διατίθενται για την παραγωγή ιδιαίτερα εύκαμπτων κομματιών που έχουν χαρακτηριστικά όπως τα ελαστικά. Αυτά τα ελαστομερή εμφανίζουν μεγάλη αντοχή στην αποδόμησή τους σε αυξημένες θερμοκρασίες, ενώ είναι ανθεκτικά και προς διάφορα χημικά όπως η βενζίνη και τα ψυκτικά αυτοκινήτων. Ελαστομερή υλικά χρησιμοποιούνται για να παραχθούν φλάντζες, βιομηχανικές τσιμούχες, σόλες παπουτσιών και άλλα εξαρτήματα.

Επιπροσθέτως, πολυμερή που είναι εμπορικά διαθέσιμα περιλαμβάνουν φλογοεπιβραδυντικό πολυαμίδιο (flame-retard polyamide) και αιθερική κετόνη του πολυαρυλενίου (polyaryletherketone), γνωστά ως PAEK ή PEEK. Τόσο η 3D Systems όσο και η EOS GmbH προσφέρουν τα περισσότερα από τα υλικά που αναφέρθηκαν.

Ερευνητές έχουν εξετάσει πολλά πολυμερή για βιοϊατρικές εφαρμογές. Αρκετοί τύποι βιοσυμβατών και βιοδιασπώμενων πολυμερών έχουν χρησιμοποιηθεί σε pLS, συμπεριλαμβανομένων της πολυκαπρολακτόνης (polycaprolactone – PCL), του πολυγαλακτικού οξέος (polylactide – PLA) και του πολυ-L-γαλακτικού οξέος (poly-L-lactide – PLLA). Σύνθετα υλικά που αποτελούνται από PCL και κεραμικά σωματίδια, συμπεριλαμβανομένων του υδροξυαπατίτη και του πυριτικού ασβεστίου, έχουν επίσης μελετηθεί για την κατασκευή ικριωμάτων για αντικατάσταση ιστού οστών.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Επιπλέον των καθαρών πολυμερών, τα πολυμερή στην PBF ενδέχεται να περιέχουν πρόσθετα συμπλήρωσης (fillers), τα οποία βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητές τους. Για παράδειγμα, το υλικό Duraform GF, το οποίο είναι πολυαμίδιο 12 με μικρά σφαιρίδια γυαλιού.

Μέταλλα και σύνθετα

Ευρύ φάσμα μετάλλων έχει χρησιμοποιηθεί σε PBF διεργασίες. Γενικά, οποιοδήποτε μέταλλο μπορεί να συγκολληθεί θεωρείται καλό υποψήφιο υλικό προς επεξεργασία με PBF διεργασία. Αρκετοί τύποι χαλύβων, κατά κανόνα οι ανοξείδωτοι και οι χάλυβες εργαλείων, το τιτάνιο και τα κράματά του, κράματα με βάση το νικέλιο, μερικά κράματα αλουμινίου και κράμα κοβαλτίου και χρωμίου έχουν χρησιμοποιηθεί σε PBF διεργασίες και είναι εμπορικά διαθέσιμα. Επιπλέον, ορισμένες εταιρίες σήμερα διαθέτουν PBF με ευγενή μέταλλα, όπως είναι ο αργυρός και ο χρυσός.

Παραδοσιακά πολλές κατοχυρωμένες πούδρες μετάλλων (είτε με επικάλυψη θερμοπλαστικής συγκολλητικής ουσίας είτε με συγκολλητική ουσία σε μείγμα) αναπτύχθηκαν προτού να είναι διαθέσιμες οι σύγχρονες mLS μηχανές. Το RapidSteel, το οποίο έχει αναπτυχθεί από την DTM Corp, αποτέλεσε ένα από τα πρώτα συστήματα μετάλλου/συγκολλητικής ουσίας. Η πρώτη έκδοση του RapidSteel ήταν διαθέσιμη το 1996 και αποτελούνταν από μια θερμοπλαστική συγκολλητική ουσία επικαλυμμένη σε πούδρα 1080 χάλυβα άνθρακα και χαλκό ως διηθητικό υλικό συμπλήρωσης (infiltrant). Κομμάτια που έχουν κατασκευαστεί με RapidSteel αποσυκολλούνταν (σους 350-450°C), συσσωμάτωνονταν (γύρω στους 1.000°C) και, τελικά, διηθούνταν με Cu (στους 1.120°C), προκειμένου να παραχθεί το τελικό κομμάτι με κατά προσέγγιση 60% χαμηλού περιεχομένου άνθρακα χάλυβα και 40% Cu. Αυτό αποτελεί παράδειγμα συσσωμάτωσης υγρής φάσης. Στη συνέχεια, το 1998 κυκλοφόρησε στην αγορά η πούδρα RapidSteel 2.0 για την παραγωγή λειτουργικών εργαλείων, κομματιών και προτύπων για χύτευση με έγχυση. Αυτή ήταν ένα ξηρό μείγμα πούδρας 316 ανοξείδωτου χάλυβα, κρουστικά κονιοποιημένης, με θερμοπλαστικές και θερμοσκληρυνόμενες οργανικές

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

συγκολλητικές ουσίες και μέσο μέγεθος σωματιδίου 33μm. Μετά την πρώτη – «πράσινη» - green, φάση της κατασκευής, το κομμάτι αποσυγκολλούνταν και συσσωματωνόταν σε ατμόσφαιρα υψηλής περιεκτικότητας υδρογόνου. Η διήθηση με μπρούντζο πραγματοποιούνταν ως ξεχωριστή εργασία σε θερμικό κλίβανο προκειμένου να παραχθεί σύνθετο υλικό 50% χάλυβα και 50% μπρούντζου. Το RapidSteel 2.0 ήταν δομικά περισσότερο σταθερό από το αρχικό RapidSteel υλικό, διότι η θερμοκρασία διήθησης του μπρούντζου ήταν χαμηλότερη από την θερμοκρασία συσσωμάτωσης της πούδρας του ανοξείδωτου χάλυβα. Μια επόμενη εξέλιξη υλικού αποτέλεσε το LaserForm ST-100, το οποίο διέθετε ευρύτερο φάσμα μεγέθους σωματιδίων, χωρίς να αποκλείονται τα ιδιαίτερα μικρά σε μέγεθος σωματίδια. Αυτά τα μικρά σωματίδια επιτρέπουν τα σωματίδια του ST-100 να συσσωματώνονται σε κλίβανο σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από ό,τι το RapidSteel 2.0, καθιστώντας δυνατή τη πραγματοποίηση της συσσωμάτωσης και της διήθησης σαν μία μόνο θερμική εργασία. Επιπλέον, οι πούδρες H13 και A6 χάλυβα εργαλείων με πολυμερική συγκολλητική ουσία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές κατασκευής εργαλείων. Οι διαδικασίες επεξεργασίας σε θερμικό κλίβανο (συσσωμάτωση και διήθηση) πρέπει να σχεδιαστούν προσεκτικά με κατάλληλη επιλογή της θερμοκρασίας, των ταχυτήτων θέρμανσης .

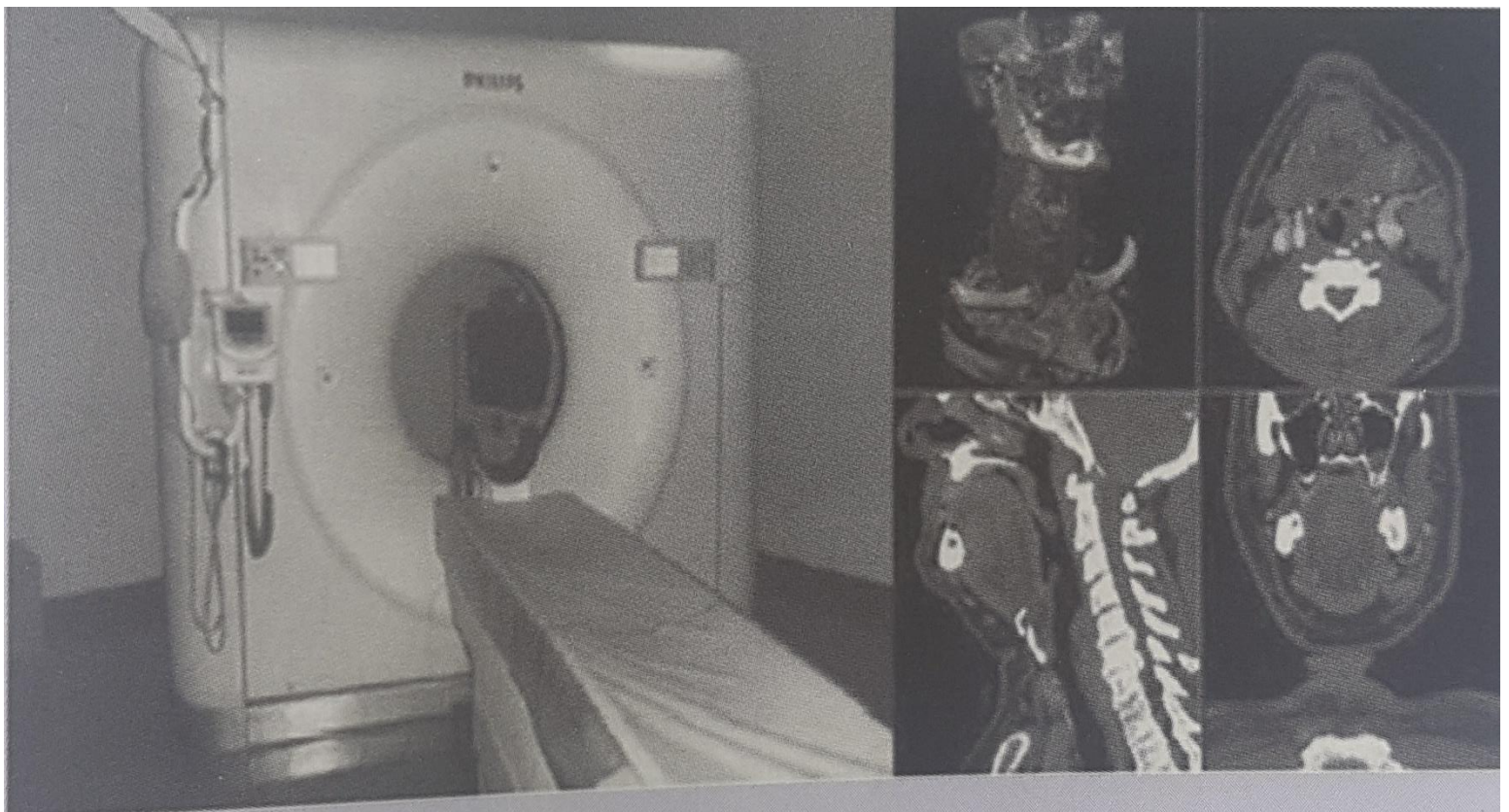
Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Κεφάλαιο 3^ο

Η χρήση της AM σε ιατρικές εφαρμογές

Τα μοντέλα προσθετικών κατεργασιών AM χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές από την αρχή σχεδόν της περιόδου εμπορικής διάθεσης της τεχνολογίας. Η AM δεν θα μπορούσε να υπάρχει πριν από την εμφάνιση του 3D CAD, καθώς η τεχνολογία είναι ψηφιακά καθοδηγούμενη. Η αξονική τομογραφία (Computerized Tomography – CT) είναι ακόμα μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε παράλληλα με τις τεχνικές 3D αναπαράστασης. Στην εικόνα παρουσιάζεται μια CT μηχανή, ένα μοντέλο που έχει παραχθεί απευθείας από τη συγκεκριμένη μηχανή (σε μορφή επάλληλων διατομών) και ένα μοντέλο στο οποίο συνδυάζονται όλα τα επιμέρους τμήματα (επάλληλες διατομές) σε μια 3D εικόνα. Η CT είναι μια τεχνική η οποία βασίζεται στις ακτίνες X και στη σχετική κίνηση των αισθητήρων σε σχέση με την πηγή των ακτίνων X, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο συσχετισμός της θέσης με τα χαρακτηριστικά της απορρόφησης (absorption profile). Συνδυάζοντας πολλές εικόνες, που έχουν ληφθεί κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να δημιουργηθεί μια 3D εικόνα. Το επίπεδο απορρόφησης των ακτίνων X εξαρτάται από την πυκνότητα της ύλης του εξεταζόμενου βιολογικού ιστού/οργάνου, με τα οστά να παρουσιάζονται πολύ καθαρότερα από τους περιβάλλοντες μαλακούς ιστούς, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητάς τους. Εκείνο που δεν αντιλαμβάνονται πολλοί είναι το ότι μπορούν να δημιουργηθούν εικόνες μαλακού ιστού χρησιμοποιώντας την CT τεχνολογία. Οι ιατροί χρησιμοποιώντας την CT τεχνολογία για να δημιουργήσουν 3D εικόνες που θα τους επιτρέψουν να παρατηρήσουν το όργανο που θέλουν να εξετάσουν υπό οποιαδήποτε γωνία και να εκτιμήσουν έτσι καλύτερα την αντίστοιχη κατάστασή του. Επισημαίνεται ότι η CT αποτελεί μια από τις πολλές αναπτυσσόμενες τεχνολογίες 3D απεικόνισης, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται η 3D μαγνητική τομογραφία (3D MRI), η 3D υπερηχογραφία (3D Ultrasound) και η 3D laser σάρωση (για απεικόνιση της εξωτερικής μορφής). Καθώς διευρύνεται η χρήση της τεχνολογίας της 3D ιατρικής απεικόνισης, προέκυψε η ανάγκη οργάνωσης και ανταλλαγής των δεδομένων μεταξύ συστημάτων, η οποία οδήγησε με τη σειρά της στην ανάπτυξη προτύπων ανταλλαγής πληροφοριών, όπως το DICOM από την National Electrical Manufacturers Association στις ΗΠΑ, το οποίο επιτρέπει στους χρήστες να εξετάζουν, χρησιμοποιώντας διάφορα λογισμικά, ιατρικά δεδομένα ασθενών που έχουν δημιουργηθεί από ποικίλα συστήματα απεικόνισης.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμια προσθετικων
κατεργασιων.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 9 Αξονικός τομογράφος με τις εικόνες τομών.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Αρχικά τα δεδομένα της 3D ιατρικής απεικόνισης χρησιμοποιούνταν μόνο για απεικονιστικούς και διαγνωστικούς σκοπούς. Σύντομα, όμως, η χρήση τους επεκτάθηκε και στον χώρο των συστημάτων CAD/CAM, με την AM τεχνολογία να αποτελεί την πιο αποτελεσματική μέθοδο φυσικής υλοποίησης των αντίστοιχων μοντέλων, λόγω ακριβώς της μορφολογικής πολυπλοκότητας που εμφανίζουν από τη φύση τους τα ανθρώπινα όργανα και μέλη. Τα ιατρικά δεδομένα που συλλέγονται από τους ασθενείς είναι ουσιαστικά μοναδικά και ξεχωριστά για κάθε άτομο. Ο αυτόματος και μη εξειδικευμένος χαρακτήρας της AM την καθιστά την προφανή μέθοδο αναπαραγωγής προϊόντων από δεδομένα ασθενών.

Διεργασία που βασίζεται σε AM τεχνικές συμβάλλει σημαντικά σε μία ή και περισσότερες από τις παρακάτω διαφορετικές κατηγορίες ιατρικών εφαρμογών:

- Χειρουργικά και διαγνωστικά βοηθήματα
- Ανάπτυξη/δημιουργία προθέσεων/τεχνητών μελών
- Παραγωγή ιατρικών προϊόντων
- Σχηματισμός/δημιουργία τεχνητών ιστών (μηχανικών ιστών) (Ian Gibson, 2017)

Εξέλιξη των ιατρικών εφαρμογών της AM

Είναι δύσκολο να προσδιορίσει κανείς το κατά πόσο μια AM τεχνολογία είναι κατάλληλη για ιατρικές εφαρμογές. Τούτο συμβαίνει διότι υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η τεχνολογία στο συγκεκριμένο πεδίο. Κάποιος θα μπορούσε να φανταστεί ότι διαφορετικές τεχνολογίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά ιατρικά τμήματα, λόγω ακριβώς των ειδικών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Ωστόσο, οι πλέον συνηθισμένες εμπορικά διαθέσιμες AM τεχνολογίες φαίνεται να είναι σίγουρα οι καταλληλότερες για την προαγωγή ιατρικών μοντέλων που διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ των χειρουργών, του τεχνικού προσωπικού και των ασθενών. Τα μοντέλα αυτά μπορούν, επίσης, να παίξουν τον ρόλο βοηθημάτων για διαγνωστικούς σκοπούς, για τον προγραμματισμό και την εκτέλεση χειρουργικών επεμβάσεων, καθώς και για τη δημιουργία χειρουργικών εργαλείων, ακόμα δε και των ίδιων των προσθέσεων. Για την άμεση, όμως, κατασκευή εμφυτευμάτων και προσθέσεων, η επιλογή κατασκευαστικής τεχνολογίας περιορίζεται στις AM διεργασίες άμεσης επεξεργασίας μετάλλων, που παράγουν κομμάτια από υλικά εγκεκριμένα από την FDA (US Food and Drug Administration), αλλά και τις σχετικά λίγες τεχνολογίες που μπορούν να παράγουν πολυμερικά ικριώματα με χαμηλή μηχανική αντοχή.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Προκειμένου περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες να γίνουν πλήρως αποδεκτές στο ιατρικό πεδίο, ο κλάδος της AM πρέπει να αντιμετωπίσει τα εξής ζητήματα:

- Τις εγκρίσεις
- Την ασφαλιστική κάλυψη
- Την τεχνική εκπαίδευση
- Τη χωροταξική διευθέτηση της τεχνολογίας

(Ian Gibson, 2017)

Κεφάλαιο 4ο

Μεθοδολογία προσθετικών κατεργασιών

Είναι φανερό ότι η προσθετική κατασκευή δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τους υπολογιστές, ενώ δεν θα είχε εξελιχθεί σε τόσο μεγάλο βαθμό εάν δεν είχαν προηγουμένως εξελιχθεί τόσο πολύ τα CAD πακέτα 3Dστερεάς μοντελοποίησης. Η ποιότητα, η αξιοπιστία και η ευχρηστία των 3DCAD συστημάτων σημαίνουν ότι πρακτικά οποιαδήποτε γεωμετρία μπορεί να μοντελοποιηθεί, γεγονός που έχει αυξήσει σημαντικότερα τις σχεδιαστικές ικανότητες των σχεδιαστών. Ορισμένα από τα περισσότερο εντυπωσιακά AM μοντέλα είναι εκείνα στα οποία καταδεικνύεται η ικανότητα της AM να επιτυγχάνει γεωμετρικά πολύπλοκες μορφές και σχήματα σε ένα μοναδικό κατασκευαστικό στάδιο, χωρίς να χρειάζεται συναρμολόγηση ή δευτερεύουσα κατεργασία.

Πρακτικά κάθε εμπορικό CAD σύστημα στερεάς μοντελοποίησης έχει την ικανότητα να εξάγει δεδομένα προς μια AM μηχανή. Αυτό συμβαίνει διότι στις περισσότερες περιπτώσεις η μοναδική πληροφορία που χρειάζεται η AM μηχανή από το CAD σύστημα είναι η γεωμετρία της εξωτερικής μορφής του κομματιού/μοντέλου. Η μηχανή δεν χρειάζεται να γνωρίζει ούτε πώς δημιουργήθηκε το μοντέλο του κομματιού ούτε στοιχεία αναφορικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ή τη λειτουργία του. Υπό την προϋπόθεση ότι έχει

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

καθοριστεί πλήρως η γεωμετρία της εξωτερικής μορφής του κομματιού, μπορούμε να προχωρήσουμε στη κατασκευή του.

Το STL αρχείο

Η ονομασία του STL αρχείου προέρχεται από τη λέξη «Stereolithography» («Στερεολιθογραφία») μολονότι ορισμένοι εισηγούνται ότι η λέξη «STL» παριστάνει τα αρχικά της «StereolithographyTessellationLanguage», δηλαδή γλώσσα της ψηφιοποίησης για στερεολιθογραφία. Τα αρχεία STL δημιουργούνται από 3DCAD δεδομένα μέσα στο ίδιο το CAD σύστημα. Το εξαγόμενο είναι η αναπαράσταση του ορίου του μοντέλου, δηλαδή της εξωτερικής επιφάνειάς του, από ένα πλέγμα τριγωνικών «ψηφίδων».

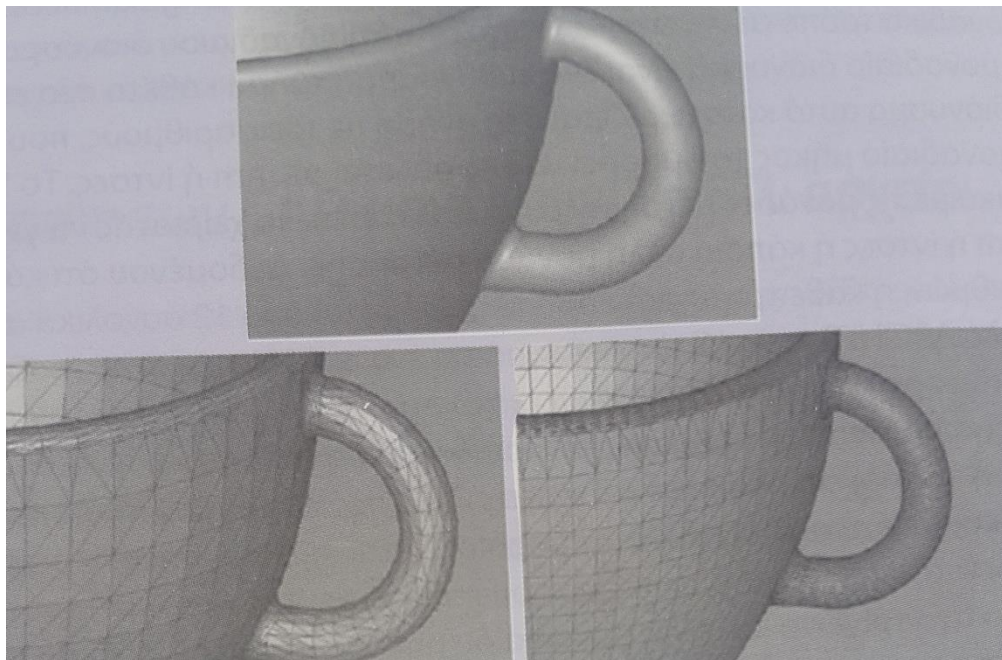
Δημιουργία STL αρχείων, από CAD συστήματα

Σχεδόν όλα τα CAD συστήματα στερεάς γεωμετρικής μοντελοποίησης μπορούν να παράγουν STL αρχεία από ένα έγκυρο, πλήρως κλειστό στερεό μοντέλο. Τα περισσότερα CAD συστήματα μπορούν ταχύτατα να πληροφορήσουν τον χρήστη αν ένα μοντέλο δεν παριστάνει ένα στερεό σώμα. Ο έλεγχος αυτός είναι αναγκαίος για συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνικές επιφανειακής μοντελοποίησης, όπου είναι δυνατόν να δημιουργήσει κανείς ένα αντικείμενο το οποίο δεν είναι εντελώς κλειστό. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται για εφαρμογές γραφικών όπου υπάρχει ανάγκη ισχυρότατης επεξεργασίας λεπτομέρειας της επιφάνειας (όπως με το Autodesk Alias Studio λογισμικό ή το Rhino από την εταιρία Robert McNeel & Associates), παρά κατασκευαστική και τεχνολογική λεπτομέρεια. Τα συστήματα στερεάς μοντελοποίησης στο πλαίσιο της διαδικασίας κατασκευής του μοντέλου, όμως το τελικό αποτέλεσμα είναι πάντα ένα κλειστό στερεό με νόημα, για το οποίο δεν απαιτείται ο παραπάνω έλεγχος.

Τα περισσότερα CAD συστήματα χρησιμοποιούν μια εντολή «Save as» ή «Export» για να μετατρέψουν το εσωτερικό πρότυπο αρχείου (native format) που χρησιμοποιούν σε ένα STL αρχείο. Κατά κανόνα, υπάρχει κάποιος σχετικός έλεγχος στο μέγεθος των τριγωνικών εδρών που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Δεδομένου ότι στο πρότυπο STL χρησιμοποιούνται επίπεδες επιφάνειες/έδρες για την

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

αναπαράσταση καμπύλων επιφανειών, είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερα είναι τα τρίγωνα τόσο χειρότερη είναι η προσέγγιση της αναπαράστασης που επιτυγχάνεται. Τα περισσότερα CAD συστήματα δεν εφαρμόζουν απευθείας κάποιο περιορισμό αναφορικά με το μέγεθος των τριγώνων, διότι είναι επίσης προφανές ότι, για ένα δεδομένο αντικείμενο, όσο μικρότερα είναι τα τρίγωνα, τα οποία παρουσιάζουν 0 απόκλιση μεταξύ του STL αρχείου και του αρχικού CAD μοντέλου. Όμως, λίγα μόνο σχέδια είναι τόσο εύκολα διαχειρίσιμα, οπότε είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίσει κανείς καλή ισορροπία μεταξύ της ικανοποιητικής προσέγγισης της επιφάνειας και του υπερβολικά μεγάλου μεγέθους του αρχείου.



Εικόνα 10 Αρχικό CAD μοντέλο που έχει μετατραπεί σε STL αρχείο με διαφορετικές τιμές για τα ύψη απόκλισης (cusp), παρουσιάζοντας το πώς μεταβάλλεται η ακρίβεια του μοντέλου με βάση την απόκλιση του τριγώνου

Η ακριβής τιμή της απαιτούμενης απόκλισης εξαρτάται κυρίως από την ανάλυση ή κατασκευαστική ακρίβεια της AM διεργασίας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Εάν η απόκλιση είναι μικρότερη από τη βασική ανάλυση της χρησιμοποιούμενης κατασκευαστικής διεργασίας, τότε το να την προδιαγράψει κανείς μικρότερη δεν θα έχει καμία επίδραση στην ακρίβεια του δημιουργούμενου αντικειμένου δεδομένου ότι πολλές AM διεργασίες λειτουργούν με ανάλυση στρώσης γύρω στην τιμή του

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

0,1 mm, τότε μία απόκλιση τριγώνου της τάξης του 0,05 mm ή ελαφρά μικρότερη είναι αποδεκτή για την κατασκευή των περισσότερων κομματιών.

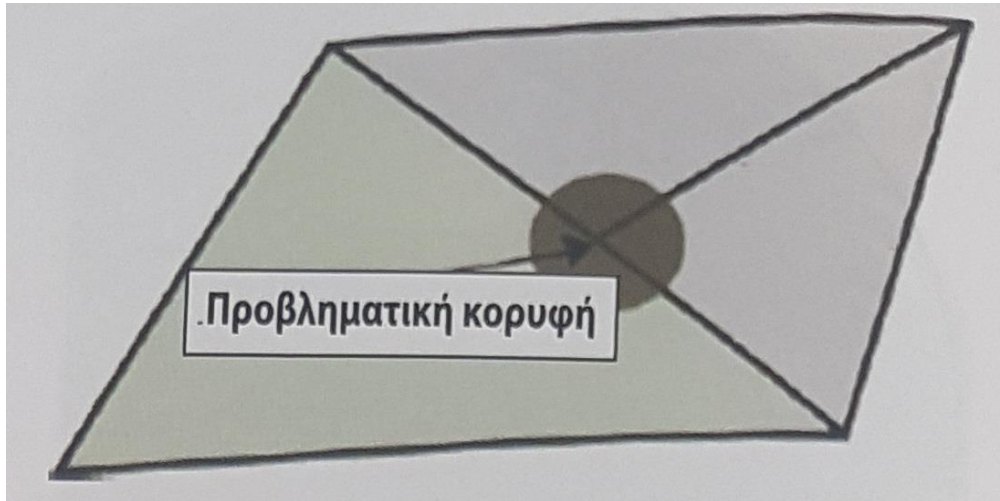
Προβλήματα των STL αρχείων

Μολονότι το STLπρότυπο είναι αρκετά απλό, μπορεί να εμφανιστούν σφάλματα στα αρχεία τα οποία προκύπτουν κατά τη μετατροπή των δεδομένων στα CAD συστήματα. Τα παρακάτω αποτελούν τυπικά προβλήματα ελαττωματικών STL αρχείων:

1. Αλλαγή μονάδων μέτρησης: με την τυπική έννοια των λέξεων τούτο δεν είναι αποτέλεσμα τυχόν ελαττώματος του STLαρχείου. Δεδομένου ότι η αμερικανικής κατασκευής μηχανές συνήθως χρησιμοποιούν το αγγλοσαξονικό/αυτοκρατορικό σύστημα μονάδων, ενώ στην πλειονότητά του ο υπόλοιπος κόσμος χρησιμοποιεί το μετρικό σύστημα μονάδων, ορισμένα αρχεία εμφανίζονται ως μεγεθυμένα, διότι πουθενά στο STL πρότυπο δεν αναφέρονται ευθέως οι μονάδες μέτρησης που μεταχειρίστηκαν. Εάν το άτομο που κατασκευάζει το μοντέλο δεν γνωρίζει τον σκοπό για το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το κατασκευαζόμενο κομμάτι, τότε μπορεί να το κατασκευάσει 25 περίπου φορές (που είναι η σχετική αναλογία μεταξύ ίντσας και χιλιοστού του μέτρου) μεγαλύτερο ή μικρότερο κατά τη μία του διεύθυνση. Επιπροσθέτως, οι μονάδες πρέπει να είναι σε πλήρη αντιστοιχία με τη θέση της αρχής του συστήματος συντεταγμένων εντός της μηχανής που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Αυτό σημαίνει ότι, επειδή η φυσική αρχή του συστήματος μέτρησης της μηχανής ταυτίζεται κανονικά με την κάτω αριστερή γωνία της κατασκευαστικής πλατφόρμας της, οι συντεταγμένες των κορυφών όλων των τριγώνων στο STL αρχείο πρέπει να είναι θετικές. Όμως, αυτό, μπορεί να μην ισχύει για κάποιο συγκεκριμένο κομμάτι που έχει σχεδιαστεί στο CAD σύστημα, οπότε τότε είναι απαραίτητη η εφαρμογή κατάλληλης προσαρμογής/μετατόπισης των δεδομένων του STL αρχείου.
2. Κανόνας αντιστοίχισης κορυφών (vertextovertexrule): δεδομένου ότι δύο γειτονικά τρίγωνα έχουν κοινή πλευρά/ακμή, κάθε δυάδα κορυφών που εμμέσως ορίζει μία πλευρά του τριγώνου πρέπει υποχρεωτικά να ανήκει και σε ένα από τα

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

γειτονικά τρίγωνά του, να αποτελεί δηλαδή δυάδα κορυφών του άλλου τριγώνου. Αυτό σημαίνει, ότι μία πλευρά κάποιου τριγώνου δεν μπορεί να τέμνει μια πλευρά/ακμή ενός οποιουδήποτε άλλου τριγώνου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 12 Περίπτωση που παραβιάζεται ο κανόνας αντιστοίχισης κορυφών

Δεδομένου ότι τούτο δεν αναφέρεται ευθέως στο STL αρχείο, δεν είναι υποχρεωτικό να τηρείται ο παραπάνω κανόνας κατά τη δημιουργία του αρχείου. Εντούτοις, το αρχείο μπορεί να ελεγχθεί με πολλούς τρόπους , προκειμένου να διαπιστωθεί αν έχει παραβιαστεί ο κανόνας αυτός. Για παράδειγμα, ο αριθμός των εδρών ενός καλώς ορισμένου στερεού που περιγράφεται μέσω STL αρχείου πρέπει να είναι άρτιος. Επιπλέον, ο αριθμός των πλευρών/ακμών να διατηρείται με το τρία και να ικανοποιεί την εξίσωση:

$$\frac{\text{αριθμός εδρών}}{\text{αριθμός ακμών}} = \frac{3}{2}$$

3. STL αρχεία με επιφανειακά κενά (leaking STLfiles): όπως αναφέρθηκε, τα STL αρχεία πρέπει να περιγράφουν πλήρως κλειστές επιφάνειες, οι οποίες αναπαριστούν τα στερεά που δημιουργούνται/σχεδιάζονται σε ένα CAD σύστημα. Με άλλα λόγια, τα STL αρχεία δεδομένων πρέπει να σχηματίζουν μία ή

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

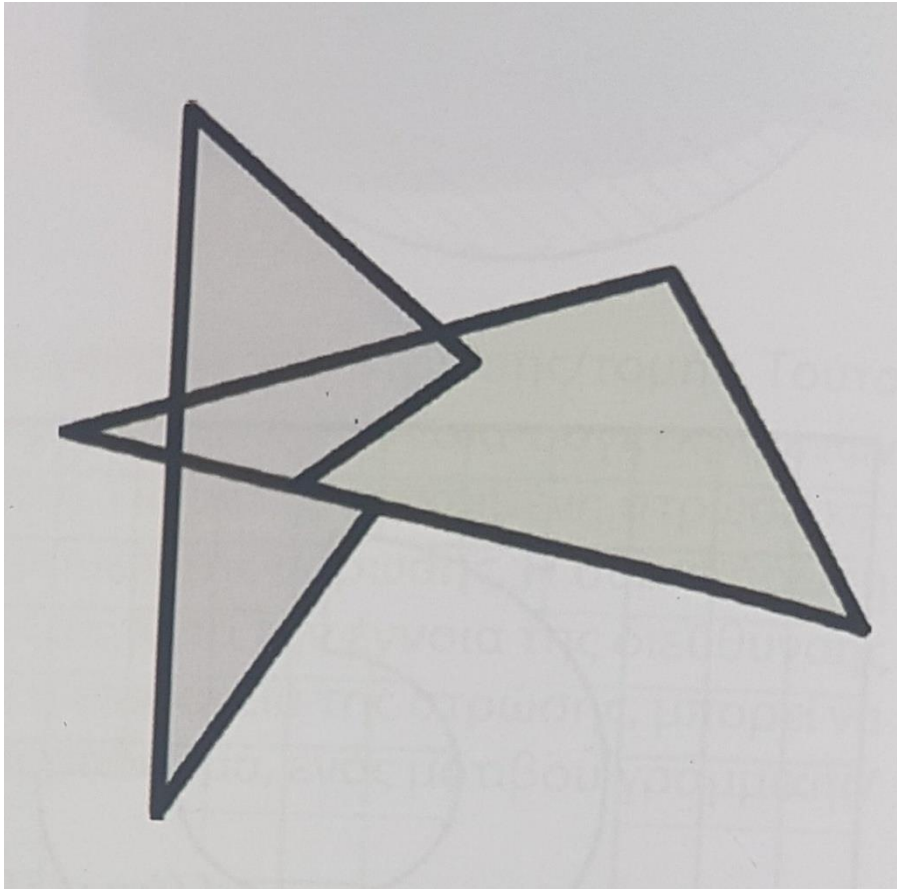
περισσότερες κλειστές γεωμετρικά οντότητες (manifoldentities) χωρίς επιφανειακά κενά, σύμφωνα με τον Κανόνα του Eulerγια τα στερεά σχήματα:

Αριθμός εδρών – Αριθμός ακμών + Αριθμός κορυφών = 2 * Αριθμός σωμάτων

Εάν ο κανόνας αυτός δεν ισχύει, τότε θεωρούμε ότι το STL αρχείο εμφανίζει επιφανειακά κενά και το αρχείο των τομών, δηλαδή των κατασκευαστικών στρώσεων, δεν αντιπροσωπεύει επαρκώς το συγκεκριμένο μοντέλο, μπορεί να υπάρχουν είτε πολύ λιγότερα είτε πολύ περισσότερα ευθύγραμμα τμήματα/διανύσματα για μία συγκεκριμένη τομή. Το λογισμικό τεμαχισμού του μοντέλου μπορεί να προσθέτει διανύσματα, προκειμένου να κλείσει με ένα περίγραμμα ή μπορεί απλά να αγνοεί τα επιπλέον διανύσματα. Μικρά λάθη αγνοούνται πιθανόν με αυτόν τον τρόπο, ενώ μεγάλα κενά στην επιφάνεια του στερεού μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα εντελώς απαράδεκτα τελικά μοντέλα.

Ανοιγματα στην επιφάνεια του στερεού μπορεί να δημιουργηθούν από έδρες οι οποίες τέμνονται μεταξύ τους διαπερνώντας η μία την άλλη στον 3D χώρο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

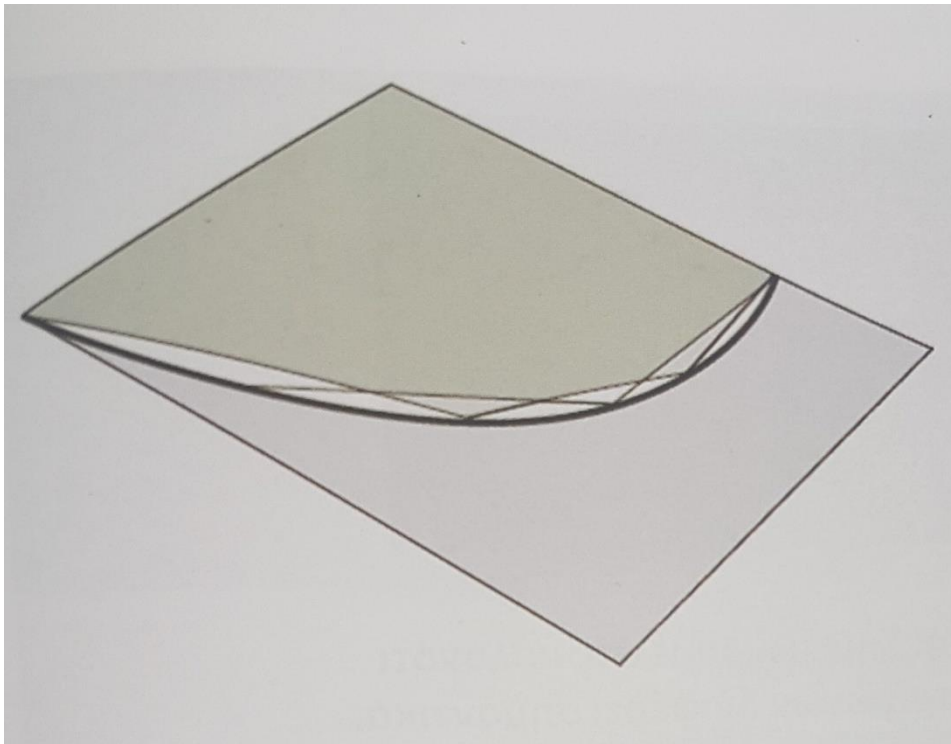


Εικόνα 13 Δύο τρίγωνα που τέμνουν το ένα το άλλο στον 3D χώρο

Τούτο μπορεί να οφείλεται στον πενιχρό τρόπο σχεδιασμού των CAD μοντέλων, κυρίως δε στη μη χρήση των πράξεων του Boole για τη δημιουργία/σχεδίαση των ανάλογων στερεών.

Ένα CAD μοντέλο μπορεί επίσης να δημιουργηθεί με μία μέθοδο η οποία συνενώνει κατάλληλα μεταξύ τους πολλά μικρά τμήματα επιφανειών. Εάν οι τριγωνοποιημένες άκρες δύο τέτοιων διαδοχικών μικρών τμημάτων επιφανειών δεν ταιριάζουν πλήρως η μία με την άλλη κατά τη συνένωσή τους, τότε σχηματίζονται κενά/οπές στην επιφάνεια του στερεού, όπως στην εικόνα παρακάτω.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 14 Δύο επιφανειακά τμήματα, τα οποία δεν ταιριάζουν πλήρως το ένα με το άλλο κατά τη συνένωσή τους, σχηματίζοντας κενά

4. Εκφυλισμένες έδρες (degenerated facets): οι έδρες αυτές προκύπτουν κανονικά λόγω της αποκοπής των τελευταίων δεκαδικών ψηφίων των πραγματικών αριθμών κατά την εκτέλεση των αριθμητικών υπολογισμών. Ένα τρίγωνο μπορεί να είναι όσο μικρό, που πρακτικά οι τρεις κορυφές του συμπίπτουν η μία με την άλλη. Μετά την αποκοπή των δεκαδικών ψηφίων των συντεταγμένων των σημείων, τα τρία σημεία των κορυφών του ταυτίζονται δημιουργώντας ένα τρίγωνο/τριγωνική έδρα με μηδενικό βαθμό. Τούτο μπορεί επίσης να συμβεί όταν το τρίγωνο που προκύπτει μετά την αποκοπή των δεκαδικών ψηφίων των συντεταγμένων των κορυφών του είναι ένα τρίγωνο με μηδενικό ύψος του οποίου και οι τρεις κορυφές κείνται σε μια ευθεία γραμμή. Μολονότι ο αλγόριθμος τεμαχισμού δεν οδηγεί σε λανθασμένες τομές, δημιουργούνται σχετικές δυσκολίες με τη λειτουργία των αλγόριθμων ελέγχου, οπότε τέτοιου είδους εκφυλισμένες τριγωνικές έδρες πρέπει να αφαιρούνται από το STL αρχείο.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Αξίζει να αναφέρει κανείς ότι, παρότι λίγα σφάλματα μπορεί να παρεισφρήσουν σε ορισμένα STL αρχεία, τα περισσότερα τωρινά επαγγελματικά 3DCAD συστήματα παράγουν αποτελέσματα καλής ποιότητας και απαλλαγμένα από σφάλματα. Στο παρελθόν, τα προβλήματα προέρχονταν συνήθως από τα συστήματα επιφανειακής μοντελοποίησης, τα οποία πλέον χρησιμοποιούνται σπανιότερα, ακόμη και σε περιοχές πέραν του μηχανολογικού CAD όπως τη σχεδίαση γραφικών υπολογιστή και 3D λογισμικού παιχνιδιών. Στα πρώτα συστήματα, επίσης, η δημιουργία του STL αρχείου δεν ελεγχόταν κατάλληλα, ενώ τα σφάλματα δεν εντοπιζόνταν εντός του CAD συστήματος. Σήμερα, αντιλαμβάνεται κανείς καλύτερα τα δυνητικά προβλήματα και διαθέτονται πολύ γνωστοί αλγόριθμοι για τον εντοπισμό και τη διόρθωση τέτοιων προβλημάτων. Εντούτοις, η πρόσφατη τάση που παρατηρείται για οικιακή χρήση των 3D εκτυπωτών έχει οδηγήσει στη προσφορά μεγάλης ποικιλίας λογισμικών ρουτινών που διατίθενται ελεύθερα, οι οποίες, όμως, δεν έχουν ελεγχθεί διεξοδικά και πάσχουν πιθανόν από τα προβλήματα που περιγράφηκαν.

Πρότυπα για πειράματα σε δοκίμια AM

Μολονότι το STL αρχείο είναι αποτελεσματικό, παρουσιάζει πολλές δυσκολίες. Καθώς οι AM τεχνολογίες εξελίσσονται ώστε να συμπεριλάβουν πολλαπλά υλικά, δομές πλεγματικής διαμόρφωσης και επιφάνειες διαφορετικής υφής, είναι πολύ πιθανόν ότι θα υπάρξει η ανάγκη ενός εναλλακτικού προτύπου περιγραφής των δεδομένων του μοντέλου. Η ASTM επιτροπή F42 που αφορά τις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής τον Μάιο του 2011 έδωσε στη δημοσιότητα το ASTM 2915-12 Additive Manufacturing File (AMF) Standard Specification Format 1.1 – Πρότυπο Προδιαγραφής Αρχείου Προσθετικής Κατασκευής (www.astm.org/Standards/F2915.htm). Αυτό το πρότυπο αρχείου αποτελεί ακόμη αντικείμενο επεξεργασίας. Όμως, έχει ήδη εφαρμοστεί σε ορισμένα εμπορικά συστήματα και λογισμικά που βρίσκονται στο beta στάδιο ανάπτυξης. Το AMF είναι σημαντικά πιο σύνθετο από ό,τι το STL πρότυπο και στοχεύει στο να συμπεριλάβει ένα πλήθος νέων χαρακτηριστικών περιγραφής των κομματιών τα οποία έχουν

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

αποτελέσει επιβραδυντικούς παράγοντες στην εξέλιξη των σύγχρονων AM τεχνολογιών. Αυτά περιλαμβάνουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. *Τριγωνικές καμπύλες επιφάνειες:* Στο STLπρότυπο η αρχή του διανύσματος του κάθετου στην επιφάνεια (του τριγώνου) ανήκει στο επίπεδο που ορίζεται από τις τρεις κορυφές του. Στο πρότυπο AMF όμως, η αρχή του διανύσματος του κάθετου στην επιφάνεια δεν πρέπει υποχρεωτικά να ανήκει στο επίπεδο αυτό. Στην περίπτωση αυτή η τριγωνική επιφάνεια δεν είναι επίπεδη αλλά καμπύλη. Ο ορισμός της καμπυλότητας είναι τέτοιος ώστε όλες οι καμπυλόγραμμες ακμές αυτού του τριγώνου που συναντώνται σε μία κορυφή είναι κάθετες στο διάνυσμα της καθέτου επιφάνειας και ανήκουν στο επίπεδο που ορίζεται από αυτό και την αντίστοιχη ευθύγραμμη ακμή του αρχικού τριγώνου (δηλαδή του αρχικού τριγώνου που είχε ευθύγραμμες και όχι καμπυλόγραμμες ακμές). Προδιαγράφοντας τα τρίγωνα κατ' αυτόν τον τρόπο χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν πολύ λιγότερα τρίγωνα για την περιγραφή ενός τυπικού CAD μοντέλου. Τούτο αντιμετωπίζει τα προβλήματα που σχετίζονται με μεγάλαSTL αρχεία που προκύπτουν από μοντέλα με πολύπλοκη γεωμετρική μορφή για τα συστήματα υψηλής ανάλυσης. Η μεθοδολογία των τριγωνικών καμπύλων επιφανειών εξακολουθεί να αποτελεί μια προσέγγιση της πραγματικής/σχεδιαστικής γεωμετρίας του μοντέλου, δεδομένου ότι ο βαθμός καμπυλότητας της επιφάνειας δεν μπορεί να είναι πολύ υψηλός. Η συνολική όμως ακρίβεια, η οποία εκφράζεται με βάση το ύψος της απόκλισης από την πραγματική επιφάνεια, βελτιώνεται σημαντικά.
2. *Χρώμα:* Το χρώμα αντιστοιχίζεται κατά έναν τρόπο ένθετου βρόχου, έτσι ώστε το κυρίως χρώμα του κομματιού να χρωματίζεται σύμφωνα με την τιμή που λαμβάνει μια συνάρτηση στα εσωτερικά σημεία του αρχικού σχεδίου του κομματιού. Ο χρωματισμός με κόκκινο, πράσινο και μπλε (RGB), σε συνδυασμό με μια τιμή διαφάνειας, εφαρμόζεται σε κορυφές, τρίγωνα, όγκους, αντικείμενα ή υλικά. Σημειώνεται ότι πολλές AM διεργασίες, όπως ο φωτοπολυμερισμός σε κάδο, έχουν τη δυνατότητα δημιουργίας διάφανων κομματιών, με συνέπεια η τιμή της διαφάνειας να αποτελεί μια σημαντική παράμετρο. Οι τιμές του χρώματος μπορούν

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

να συσχετιστούν με άλλες παραμέτρους με βάση το υλικό, προσφέροντας έτσι έναν ευέλικτο τρόπο ελέγχου της AM διεργασίας.

3. *Υφή:* Η παραπάνω αντιστοίχιση του χρώματος δεν μπορεί να συσχετιστεί απευθείας με την αντιστοίχιση δεδομένων εικόνας στα αντικείμενα. Τούτο, όμως, μπορεί να επιτευχθεί με τον τελεστή υφής. Η υφή αντιστοιχίζεται κατ' αρχήν γεωμετρικά, διαβαθμίζοντάς την ανάλογα με το γεωμετρικό χαρακτηριστικό, έτσι ώστε τα διαφορετικά pixels να αναφέρονται στο αντικείμενο με έναν ομογενή τρόπο. Τα pixels αυτά διαθέτουν ένταση φωτεινότητας, ενώ κατόπιν αποκτούν και χρώμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι τούτο συνιστά περισσότερο μια διεργασία απόδοσης υφής εικόνας παρόμοια με εκείνη των γραφικών υπολογιστή, παρά μια διεργασία απόδοσης φυσικής υφής στην επιφάνεια, μέσω της δημιουργίας μικρών κυματώσεων, κορυφών και βαθουλωμάτων.
4. *Υλικό:* Μπορεί κανείς να προδιαγράψει ώστε διαφορετικά τμήματα του κομματιού να κατασκευαστούν με διαφορετικά υλικά. Οι Connex μηχανές της εταιρείας Stratasys, καθώς και ορισμένα άλλα τμήματα με βάση την εξώθηση υλικού, διαθέτουν σήμερα τη δυνατότητα να κατασκευάσουν κομμάτια από πολλαπλά υλικά. Προς το παρόν ο σχεδιασμός/κατασκευή κομματιών με πολλαπλά υλικά επιτυγχάνεται μέσω μιας ιδιαίτερα κοπιαστικής διαδικασίας επανακαθορισμού του υλικού κατασκευής εντός του λειτουργικού συστήματος της μηχανής. Καθορίζοντας το υλικό κατασκευής εντός του AMF είναι δυνατόν να έχει προδιαγραφεί αυτό ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού.
5. *Παραλλαγές υλικού:* Χρησιμοποιούνται AMF τελεστές για να τροποποιηθεί η βασική δομή ενός κομματιού που πρόκειται να κατασκευαστεί. Για παράδειγμα, σε πολλές εφαρμογές στην ιατρική και την αεροδιαστημική το κατασκευαζόμενο κομμάτι/εξάρτημα απαιτείται να έχει πλεγματική ή πορώδη δομή. Μπορεί να εφαρμοστεί κατάλληλος τελεστής ώστε συγκεκριμένο τμήμα/όγκος κομματιού να κατασκευαστεί με μια πλεγματική εσωτερική δομή ή με ένα πορώδες υλικό. Επιπλέον, με ορισμένες AM τεχνολογίες είναι δυνατόν να κατασκευαστούν κομμάτια από υλικά τα οποία σταδιακά αναμειγνύονται με άλλα. Είναι δυνατόν, επίσης, να εφαρμοστεί για την επιφάνεια ένας περιοδικός τελεστής ο οποίος θα

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

δημιουργήσει μια φυσική επιφανειακή υφή κι όχι τη χρωματική απεικόνιση που αναφέρθηκε προηγουμένως. Είναι ακόμη δυνατόν να εφαρμοστεί ένας τυχαίος τελεστής για να προσδωθούν ασυνήθιστα εφέ στο κατασκευαζόμενο με AM διεργασίες κομμάτι.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ένα κομμάτι το οποίο έχει σχεδιαστεί και κωδικοποιηθεί με το AMF πρότυπο είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα είναι για εντελώς διαφορετικό όταν κατασκευαστεί από διαφορετική μηχανή. Αυτό ισχύει κυρίως για κομμάτια των οποίων η κωδικοποίηση βασίζεται στα διαφορετικά υλικά, χρώματα και υφή επιφανειών. Κάθε μηχανή διαθέτει τη δυνατότητα να δεχθεί και να ερμηνεύσει το AMF σχέδιο ανάλογα με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της. Για παράδειγμα, η λεία επιφανειακή υφή που μπορεί να έχει προδιαγραφεί για ένα κομμάτι δεν είναι δυνατόν να αποδοθεί τόσο καλά από μια AMF διεργασία χαμηλής ανάλυσης. Αδιαφανή υλικά δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουν τη συνάρτηση διαφάνειας. Ορισμένες μηχανές δεν μπορούν να κατασκευάσουν κομμάτια από πολλαπλά υλικά κ.ο.κ. . Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι όλες οι μηχανές θα πρέπει να είναι σε θέση να δέχονται τουλάχιστον τα γεωμετρικά δεδομένα που αντιστοιχούν σε ένα κομμάτι που είναι ορισμένο με το AMF πρότυπο, ώστε να μπορούν να το κατασκευάσουν. Επομένως, το AMF πρότυπο πρέπει να είναι συμβατό προς τα πίσω, ώστε να μπορεί να αποδεχτεί ένα απλό STL αρχείο, με τη δυνατότητα, όμως, να προδιαγραφεί οποιαδήποτε πιθανή μελλοντική σχεδιαστική απαίτηση.(Ian Gibson, 2017)

Μεθοδολογία εργασίας:

Πραγματοποιήθηκε έρευνα για τα χρησιμοποιούμενα πρότυπα ASTM και ISO τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί από διεθνή έρευνα για πειράματα σε προσθετικές κατεργασίες. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχουν πρότυπα τα οποία εξηγούν πώς θα γίνει το κάθε πείραμα. Έπειτα τα πρότυπα αυτά ομαδοποιήθηκαν, καταγράφηκαν και μελετήθηκαν για την εύρεση του καλύτερου πρότυπου για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Βάση αυτών έγιναν τα πειράματα εφελκυσμού και στρέψης.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

ΠΡΟΤΥΠΑ ASTM ΚΑΙ ISO :

Σε αυτό το σημείο της πτυχιακής εργασίας θα αναφερθούν οι πιο χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες AM για τα πολυμερή. Θα παρουσιαστούν τα πιο κοινώς χρησιμοποιούμενα πρότυπα μηχανικών δοκιμών ASTM και ISO που έχουν χρησιμοποιηθεί από διάφορες ερευνητικές ομάδες για τη δοκιμή αντοχής των 3D-τυπωμένων κομματιών. Παρουσιάζονται επίσης σχετικά με την μηχανική καταλληλότητα των 3D-τυπωμένων κομματιών συμπεριλαμβανομένων κατάλληλα υπό διαφορετικούς τύπους φόρτωσης όπως εφελκυσμό, κάμψη, θλίψη, κρούση, και άλλα.(John Ryan C. Dizon, 2018)

1. **ASTM D638:** Για πλαστικά σε δοκιμές εφελκυσμού. Τα δοκίμια έχουν αντοχή σε εφελκυσμό, επιμήκυνση του δοκιμίου όταν εφελκύεται στο όριο διαρροής του συντελεστή ελαστικότητας, επιμήκυνση κατά τη θραύση. (John Ryan C. Dizon, 2018)

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS:**

- ερευνητικοί στόχοι: επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: κενό γεμίματος, πάχος κομματιού
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή στο όριο διαρροής, επιμήκυνση, συντελεστής ελαστικότητας (E. Fodran, 1996)

για υλικό ABS P400:

- ερευνητικοί στόχοι: επίδραση του προσανατολισμού του στρώματος στις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πέντε (5) στρώσεις προσανατολισμού (45/-45, 0, 45, 90, 45/0)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, συντελεστής ερπυσμού, αντίσταση στη κρούση (O.S. Es-Said, 2000)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

για υλικό ABS:

- ερευνητικοί στόχοι: τα κομμάτια FDM με μηχανικό χαρακτηρισμό, ανισοτροπία
- παράμετροι μεταβλητών: προσανατολισμός ενίσχυσεων (εγκάρσια, αξονική), απόσταση από γέμισμα σε γέμισμα, πλάτος δέσμη (E. Fodran, 1996), χρώμα, θερμοκρασία μοντέλου
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή στη συμπίεση, **comparison with injection molding (σύγκριση με χύτευση με έγχυση)**(S.-H. Ahn, 2002)
- ερευνητικοί στόχοι: ανισοτροπικά μηχανικά χαρακτηριστικά
- παράμετροι μεταβλητών: τέσσερις (4) κατευθύνσεις της ενίσχυσης, καθορίζονται οι τιμές για τις παραμέτρους
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή στη κρούση, **flexural impact**(C. Ziemian)

για ABS και PLA υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες σε ρεαλιστικές συνθήκες για διαφορετικούς εκτυπωτές ανοιχτού κώδικα
- παράμετροι μεταβλητών: παραλλαγές πάχους στρώσης και προσανατολισμός ενίσχυσης
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας (B.M. Tymark, 2014)

για ABS υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: αποτυχία αναλύσεων και μηχανικών χαρακτηρισμών
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσεις (δύο (2) επίπεδα), προσανατολισμός ενίσχυσης (τρία (3) επίπεδα)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό (B. Rankouhi, 2016)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- ερευνητικοί στόχοι: επίδραση των στρωματικών παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες – πειραματικά
- παράμετροι μεταβλητών: αριθμός στρώσεων (1-35), προσανατολισμός ενίσχυσης
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας, επιμήκυνση κατά τη θραύση (T. Lechter, 2015)

- ερευνητικοί στόχοι: ποσοστό πλήρωσης που δρα στις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πλήρωση (0-100%), αύξηση 5%
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε κρούση (K.L. Alvarez, 2016)

για ABS P430 υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: χτίζοντας προσανατολισμούς που αντιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πέντε (5) προσδιορισμοί χτισίματος
- μηχανικές ιδιότητες: συμπίεση, εφελκυσμός, ελαστικότητα (R. Hernandes, 2016)

για ABS υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες των εκτυπωμένων αντικειμένων από RepRap3D
- παράμετροι μεταβλητών: διαφορετικά υλικά, χρώμα, δύο (2) προσανατολισμοί χτισίματος
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό (N.G. Tanikella, 2017)

για ABS (Ultimaker)υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι:μηχανικές ιδιότητες του πολυκάρμπον (PC), ABS-πειραματικός χαρακτηρισμός

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- παράμετροι μεταβλητών: ενίσχυση(45/-45;30/-60;15/-75;0/90), προσανατολισμός χτισίματος (επίπεδος, στην άκρη, όρθιο), οι παράμετροι επεξεργασίας είναι σταθεροί αλλά διαφέρουν μεταξύ των εκτυπωτών
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε αστοχία, αναλογία Poisson, μέτροYoung(Cantrell, 2015)

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό PLA:**

για ABS, PLA υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες σε ρεαλιστικές συνθήκες για διαφορετικούς εκτυπωτές ανοιχτού κώδικα
- παράμετροι μεταβλητών: παραλλαγές πάχους στρώσης και προσανατολισμού της ενίσχυσης
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας

για PLA υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: δράση του χρώματος στις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πέντε (5) χρώματα (άσπρο, μαύρο, γκρι, μπλε, φυσικό)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή στον εφελκυσμό (B. Wittbrodt, 2015)

- ερευνητικοί στόχοι: ιδιότητες του υλικού σε Makerbot 3D εκτυπωτή
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης (δυο (2) επίπεδα), προσανατολισμός εκτύπωσης (δυο (2) επίπεδα), ποσοστό γεμίσματος (τρία (3) επίπεδα)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας (A. Lanzotti, 2015)

- ερευνητικοί στόχοι: οι παράμετροι διεργασιών αφορούν τον βαθμό συγκόλλησης και τις μηχανικές ιδιότητες

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- παράμετροι μεταβλητών: ατομική εκτίμηση: του πάχους στρώματος (επτά (7) τιμές), της ταχύτητας απόθεσης (οκτώ (8) τιμές), βαθμός γεμίσματος (έξι (6) τιμές)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό(H. Li, 2018)
- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες του PLA και επιλογή βέλτιστων παραμέτρων
- παράμετροι μεταβλητών: τρεις (3) προσανατολισμοί χτισίματος, τέσσερα (4) πάχη στρώσεων, ρυθμός τροφοδοσίας (τρία (3) επίπεδα)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, **flexural strength**(J.M. Chacon, 2017)

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό PEI και PEEK:**

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες του Ultem 9085 (υλικό)
- παράμετροι μεταβλητών: ενίσχυση με γωνίες, κενό ενίσχυσης με ενίσχυση, κενό ενίσχυσης με περίμετρο (τρία (3) επίπεδα έκαστο), πάχος στρώσης (δύο (2) επίπεδα)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, **comparison to injection molding**(A. Bagsik, 2011)

πρότυπο **ASTM D638-03 Type I** και **Ultem υλικό:**

- ερευνητικοί στόχοι: συνθήκες διεργασίας και επίδραση προσανατολισμού στις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: προσανατολισμός κτισίματος, τοποθέτηση αντικειμένου στο θάλαμο
- μηχανικές ιδιότητες: μηχανική και θερμική συμπεριφορά (R.J. Zaldivar, 2017)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικά Polycarbonate (PC), Poliamide (PA) και Zortrax ιδιόκτητο υλικό:**

Πρότυπο ASTM D638 Type I υλικό PC:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων FDM με τροποποίηση των παραμέτρων διεργασίας
- παράμετροι μεταβλητών: ενίσχυση υπό γωνία, πλάτος περιγράμματος, πλάτος ενίσχυσης, κενό μεταξύ ενισχύσεων
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό (M.S. Hossain, 2013)

πρότυπο ASTM D638 υλικό PC:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικός χαρακτηρισμός ιδιότητας και προσομοίωσης του πολυκάρμπον (PC)
- παράμετροι μεταβλητών: έξι (6) προσανατολισμοί χτισίματος
- μηχανικές ιδιότητες: χαρακτηριστική μήτρα, αντοχή σε εφελκυσμό, προσομοίωση FEA (M. Domingo-Espin, 2015)

πρότυπο ASTM D638 υλικό PA12:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του PA12
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης (τρία (3) επίπεδα), προσανατολισμός χτισίματος (τρία (3) επίπεδα)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, κάμψη, αντοχή σε θλίψη, ανάλυση DSC για θερμικές ιδιότητες (F. Knoor, 2015)

πρότυπο ASTM D638 υλικό Lulzbot TAZ 3.1 και 4:

- ερευνητικοί στόχοι: αντοχή εφελκυσμού εμπορικών υλικών
- παράμετροι μεταβλητών: διαφορετική εξώθηση θερμοκρασίας εξαρτώμενη από το υλικό
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή εφελκυσμού (N.G. Tanikella, 2017)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

πρότυπο ASTM D638 υλικό Z-ABS:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες και μηχανισμοί αποτυχίας
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης, επίπεδο εκτύπωσης, προσανατολισμός εκτύπωσης (τρία (3) επίπεδα έκαστο)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, **compression strength**(M. Uddin, 2017)

2. ASTM D5937-96:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS**:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικός χαρακτηρισμός
- παράμετροι μεταβλητών: έξι (6) προσδιορισμοί χτισίματος, τέσσερις (4) προσανατολισμοί ενίσχυσης
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή στον εφελκυσμό, μέτροYoung, λόγος Poisson(M. Bertoldi, 1998)

3. **ASTM D790**: καλύπτει τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του λυγισμού, συμπεριλαμβανομένων των: αντοχή σε λυγισμό, και τον συντελεστή λυγισμού για πλαστικά υλικά. Έχει δύο (2) διαδικασίες: 1) τα υλικά που σπάνε με μικρή παραμόρφωση (**deflection**) , και 2) υλικά που σπάνε με μεγάλη παραμόρφωση.(John Ryan C. Dizon, 2018)

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικόABS**:

- ερευνητικοί στόχοι: επίδραση του προσανατολισμού του στρώματος στις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πέντε (5) στρώσεις προσανατολισμού (45/-45, 0, 45, 90, 45/0)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, συντελεστής ερπυσμού, αντίσταση στη κρούση (O.S. Es-Said, 2000)
- ερευνητικοί στόχοι: συμπεριφορά εφελκυσμού και κόπωσης
- παράμετροι μεταβλητών: τέσσερις (4) κατευθύνσεις της ενίσχυσης, καθορίζονται οι τιμές για τις παραμέτρους
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή στη κρούση, **flexural impact**(C. Ziemian)(S. Ziemian, 2015)

για ABS P430 υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: χτίζοντας προσανατολισμούς που αντιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πέντε (5) προσδιορισμοί χτισίματος
- μηχανικές ιδιότητες: συμπίεση, εφελκυσμός, ελαστικότητα (R. Hernandez, 2016)

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό PLA:**

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες του PLA και επιλογή βέλτιστων παραμέτρων
- παράμετροι μεταβλητών: τρεις (3) προσανατολισμοί χτισίματος, τέσσερα (4) πάχη στρώσεων, ρυθμός τροφοδοσίας (τρία (3) επίπεδα)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, **flexural strength**(J.M. Chacon, 2017)

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό PEI και PEEK:**

- ερευνητικοί στόχοι: οι παράμετροι διεργασίας δρούν για τις ιδιότητες συμπίεσης

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- παράμετροι μεταβλητών: προσανατολισμός χτισίματος (δύο (2) επίπεδα), γωνία ενίσχυσης (δύο (2) επίπεδα), απόσταση από γέμισμα σε γέμισμα (τρία (3) επίπεδα), γέμισμα (δύο (2) επίπεδα)
- μηχανικές ιδιότητες: δύναμη συμπίεσης (Motarpartī, 2016)

4. **ASTM D256-88:**

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS P400:**

- ερευνητικοί στόχοι: επίδραση του προσανατολισμού του στρώματος στις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πέντε (5) στρώσεις προσανατολισμού (45/-45, 0, 45, 90, 45/0)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, συντελεστής ερπυσμού, αντίσταση στη κρούση (O.S. Es-Said, 2000)

5. **ASTM D3039:** καλύπτει τις εφελκυστικές ιδιότητες των πολυμερή σύνθετων υλικών μήτρας, ειδικά αυτών που ενισχύουν την υψηλή κλίμακα ινών. (JohnRyanC. Dizon, 2018) **Είναι για καθαρά πολυμερή αλλά όχι για Additive Manufacturing, σαν να γίνεται τήξη.(?)**

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS P400:**

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανική συμπεριφορά πειραματική έρευνα, χαρακτηρισμός δομής
- παράμετροι μεταβλητών: απόκλιση ινών και ρυθμός ροής
- μηχανικές ιδιότητες: συμπεριφορά καταπόνησης (J.F. Rodriguez, 2001)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Για υλικό **ABS**:

- ερευνητικοί στόχοι: τα κομμάτια FDM με μηχανικό χαρακτηρισμό, ανισοτροπία
- παράμετροι μεταβλητών: προσανατολισμός ενισχύσεων (εγκάρσια, αξονική), απόσταση από γέμισμα σε γέμισμα, πλάτος δέσμη (E. Fodran, 1996), χρώμα, θερμοκρασία μοντέλου
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή στη συμπίεση, **comparison with injection molding (σύγκριση με χύτευση με έγχυση)**(S.-H. Ahn, 2002)
- ερευνητικοί στόχοι: συμπεριφορά εφελκυσμού και κόπωσης
- παράμετροι μεταβλητών: τέσσερις (4) κατευθύνσεις της ενίσχυσης, καθορίζονται οι τιμές για τις παραμέτρους
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή στη κρούση, **flexural impact**(C. Ziemian)(S. Ziemian, 2015)
- ερευνητικοί στόχοι: δράση γεμίματος σε αντοχή εφελκυσμού για επιτραπέζιο 3D εκτυπωτή
- παράμετροι μεταβλητών: γέμισμα (τρία (3) επίπεδα), μοτίβο πλήρωσης (τρεις (3) τύποι)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή εφελκυσμού (M. Fernandez-Vicente, 2016)

6. **ASTM D1184-98**:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για υλικό **ABS P400**:

- ερευνητικοί στόχοι: δράση συνθηκών επεξεργασίας για τη σύνδεση του υλικού, χαρακτηρισμός δομής

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- παράμετροι μεταβλητών: προκαθορισμένες ρυθμίσεις για τη διατήρηση των παραμέτρων των θερμοκρασιακών προφίλ, μεταβολές στη θερμοκρασία με την τοποθέτηση στο χώρο
- μηχανικές ιδιότητες: θερμική ανάλυση, δοκιμή τριών (3) σημείων (αναλυτικό μοντέλο και δοκιμαστικό) (Q. Sun, 2008)

7. ISO R527:1966:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABSP400**:

- ερευνητικοί στόχοι: παράμετρος διεργασίας για τις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης, προσανατολισμός, γωνία ενίσχυσης, πλάτος ενίσχυσης και κενό
- μηχανικές ιδιότητες: εφελκυσμός, **flexural and impact strength**, αναπτύσσονται εμπειρικά μοντέλα που σχετίζονται με την απόκριση και τις παραμέτρους διεργασίας (A.K. Sood, 2010)

για υλικό ABS:

- ερευνητικοί στόχοι: χαρακτηριστικά και βελτιστοποίηση μηχανικών ιδιοτήτων
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης (δύο (2) επίπεδα), προσανατολισμός κομματιού (δύο (2) επίπεδα), γωνία ενίσχυσης (δύο (2) επίπεδα), πλάτος ενίσχυσης (τέσσερα (4) επίπεδα), και απόσταση από γέμισμα σε γέμισμα (δύο (2) επίπεδα: θετικό και αρνητικό)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό (G.C. Onwubolu)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

8. ISO R178:1975:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS P400**:

- ερευνητικοί στόχοι: παράμετρος διεργασίας για τις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης, προσανατολισμός, γωνία ενίσχυσης, πλάτος ενίσχυσης και κενό
- μηχανικές ιδιότητες: εφελκυσμός, **flexural and impact strength**, αναπτύσσονται εμπειρικά μοντέλα που σχετίζονται με την απόκριση και τις παραμέτρους διεργασίας (A.K. Sood, 2010)

για **υλικό ABS**:

- ερευνητικοί στόχοι: χαρακτηριστικά και βελτιστοποίηση μηχανικών ιδιοτήτων
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης (δύο (2) επίπεδα), προσανατολισμός κομματιού (δύο (2) επίπεδα), γωνία ενίσχυσης (δύο (2) επίπεδα), πλάτος ενίσχυσης (τέσσερα (4) επίπεδα), και απόσταση από γέμισμα σε γέμισμα (δύο (2) επίπεδα: θετικό και αρνητικό)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό (G.C. Onwubolu)

9. ISO604–1973:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABSP400**:

- ερευνητικοί στόχοι: ρυθμίσεις παραμέτρων διεργασίας για τη βελτίωση της θλιπτικής αντοχής
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης, προσανατολισμός, γωνία ενίσχυσης, πλάτος ενίσχυσης, κενό (τρία (3) επίπεδα έκαστο)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε θλίψη (αναλυτική και πειραματική) (K. Sood, 2012)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

10. **ISOR291:1977:**

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS P400:**

- ερευνητικοί στόχοι: ρυθμίσεις παραμέτρων διεργασίας για τη βελτίωση της θλιπτικής αντοχής
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης, προσανατολισμός, γωνία ενίσχυσης, πλάτος ενίσχυσης, κενό (τρία (3) επίπεδα έκαστο)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε θλίψη (αναλυτική και πειραματική) (K. Sood, 2012)

11. **ASTM D638-10:**

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS-M30:**

- ερευνητικοί στόχοι: προβλέποντας τη μηχανική συμπεριφορά όταν είναι γνωστό το πρότυπο ενίσχυσης
- παράμετροι μεταβλητών: σχέδιο ενίσχυσης (διαστάσεις, αριθμός περιγραμμάτων : 1, 4, 7, 10, γωνία ενίσχυσης), προσανατολισμός χτισίματος
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό και ευκρίνεια (αναλυτική και πειραματική) (D. Groccolo, 2013)

12. **ISO 178:2006:**

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS P430:**

- ερευνητικοί στόχοι: πειραματική έρευνα για τη βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων και του κόστους παραγωγής
- παράμετροι μεταβλητών: πέντε (5) γωνίες ενίσχυσης (0°,30°,45°,60°,90°), τρεις (3) προσανατολισμοί χτισίματος (οριζόντιο, κατακόρυφο, κάθετο)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, ελαστικότητα (I. Durgun, 2014)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

13. ISO 527:1997:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS P430**:

- ερευνητικοί στόχοι: πειραματική έρευνα για τη βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων και του κόστους παραγωγής
- παράμετροι μεταβλητών: πέντε (5) γωνίες ενίσχυσης (0°,30°,45°,60°,90°), τρεις (3) προσανατολισμοί χτισίματος (οριζόντιο, κατακόρυφο, κάθετο)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, ελαστικότητα (I. Durgun, 2014)

14. PN-EN ISO 527: χαρακτηρίζει τον εφελκυσμό των πλαστικών. (John Ryan C. Dizon, 2018)

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS**:

- ερευνητικοί στόχοι: δράση προσανατολισμού χτισίματος στην αντοχή στον εφελκυσμό – πειραματική μελέτη
- παράμετροι μεταβλητών: δύο (2) προσανατολισμοί κατά μήκος του άξονα x (0, 90), προσανατολισμός στον άξονα y (0-30, 5° αύξηση)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό (F. Gorski, 2015)

15. ASTM D3479: καλύπτει τις δοκιμαστικές μεθόδους για κόπωση εντάσεων σύνθετων υλικών πολυμερούς μήτρας.(John Ryan C. Dizon, 2018)

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS**:

- ερευνητικοί στόχοι: συμπεριφορά εφελκυσμού και κόπωσης
- παράμετροι μεταβλητών: τέσσερις (4) κατευθύνσεις της ενίσχυσης, καθορίζονται οι τιμές για τις παραμέτρους

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή στη κρούση, **flexural impact**(C. Ziemian)(S. Ziemian, 2015)

16. **ASTM D695**: καλύπτει τη δοκιμή συμπίεσης άκαμπτων πλαστικών, και οι ιδιότητες που λαμβάνονται περιλαμβάνουν αντοχή στη συμπίεση, συντελεστή ελαστικότητας, όριο διαρροής και παραμόρφωση πάνω από το όριο διαρροής. Τα ποσοστά πίεσης που χρησιμοποιούνται είναι σχετικά χαμηλά. Το ISO 604 είναι η αντίστοιχη δοκιμή για τα πρότυπα ISO.

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό ABS**:

- ερευνητικοί στόχοι: συμπεριφορά εφελκυσμού και κόπωσης
- παράμετροι μεταβλητών: τέσσερις (4) κατευθύνσεις της ενίσχυσης, καθορίζονται οι τιμές για τις παραμέτρους
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή στη κρούση, **flexural impact**(C. Ziemian)(S. Ziemian, 2015)

για ABS P430 υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: χτίζοντας προσανατολισμούς που αντιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πέντε (5) προσδιορισμοί χτισίματος
- μηχανικές ιδιότητες: συμπίεση, εφελκυσμός, ελαστικότητα (R. Hernandez, 2016)

17. **ASTM D5379**:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν **για ABS (Ultimaker) υλικό**:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες του πολυκάρμπον (PC), ABS-πειραματικός χαρακτηρισμός

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- παράμετροι μεταβλητών: ενίσχυση(45/-45;30/-60;15/-75;0/90), προσανατολισμός χτισίματος (επίπεδος, στην άκρη, όρθιο), οι παράμετροι επεξεργασίας είναι σταθεροί αλλά διαφέρουν μεταξύ των εκτυπωτών
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε αστοχία, αναλογία Poisson, μέτροYoung(Cantrell, 2015)

18. ASTM D6110:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν **για ABS** υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: ποσοστό πλήρωσης που δρα στις μηχανικές ιδιότητες
- παράμετροι μεταβλητών: πλήρωση (0-100%), αύξηση 5%
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε κρούση (K.L. Alvarez, 2016)

19. DIN EN ISO 527:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν **για ABS, και PLA** υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση ABS και PLA
- παράμετροι μεταβλητών: γέμισμα μοτίβου, ποσοστό γεμίσματος
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικά Polycarbonate (PC), Poliamide (PA) και Zortrax ιδιόκτητο υλικό:**

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του PA12
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης (τρία (3) επίπεδα), προσανατολισμός χτισίματος (τρία (3) επίπεδα)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, κάμψη, αντοχή σε θλίψη, ανάλυσηDSC για θερμικές ιδιότητες (F. Knoor, 2015)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

20. ASTM E143:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν **για PLA** υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: επιδράσεις των παραμέτρων διεργασίας στη στρέψη
- παράμετροι μεταβλητών: πάχος στρώσης, πυκνότητα γεμίματος, χρόνος θερμικής κατεργασίας μετά την επεξεργασία στους 100°C (τρία (3) επίπεδα έκαστο)
- μηχανικές ιδιότητες: διατμητική πίεση (J. Torres, 2016)

- ερευνητικοί στόχοι: βελτιστοποίηση μηχανικών ιδιοτήτων
- παράμετροι μεταβλητών: θερμοκρασία, κατεύθυνση γεμίματος, ποσοστό γεμίματος, πάχος στρώσης (δύο (2) επίπεδα έκαστο)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό (J. Torres, 2016)

21. ASTM D648:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν **για PLA** υλικό:

- ερευνητικοί στόχοι: βελτιστοποίηση μηχανικών ιδιοτήτων
- παράμετροι μεταβλητών: θερμοκρασία, κατεύθυνση γεμίματος, ποσοστό γεμίματος, πάχος στρώσης (δύο (2) επίπεδα έκαστο)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό (J. Torres, 2016)

22. ISO 527-2:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό PEI και PEEK**:

- ερευνητικοί στόχοι: επίδραση της θερμοκρασίας στις μηχανικές ιδιότητες του PEEK, σύγκριση με το υλικό PLA
- παράμετροι μεταβλητών: θερμοκρασίες παραλλαγής για το κρεβάτι και το περιβάλλον (τρεις (3) τιμές έκαστο), βαθμός γεμίματος (δύο (2) τιμές)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό (S. Xίαoyong, 2017)
-

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

23. **ISO 178:2001**:καλύπτει μια μέθοδο που ελέγχει τις ιδιότητες του λυγισμού του άκαμπτου (**rigid**) και ημι-άκαμπτου πλαστικού, ομοίως την αντοχή σε λυγισμό, οι παράμετροι συντελεστών λυγισμού λαμβάνονται με τη χρήση προτύπων (John Ryan C. Dizon, 2018)

Μελέτες που επικεντρώθηκαν για **υλικό PEI και PEEK**:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες δειγμάτων PEEK
- παράμετροι μεταβλητών: θερμοκρασία εκτύπωσης, ταχύτητα εκτύπωσης, πάχος στρώσης, βαθμός γεμίματος (τρία (3) επίπεδα έκαστο)
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, μέτροYoung, επιμήκυνση (X. Deng, 2018)

24. **EN ISO 527-4 τύπος 5**:

Μελέτες που επικεντρώθηκαν **Zortrax ιδιόκτητο υλικό**:

- ερευνητικοί στόχοι: μηχανικές ιδιότητες ενός φθηνού 3D-εκτυπωτή
- παράμετροι μεταβλητών: πέντε (5) δείγματα για κάθε υλικό
- μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό (K. Szykiedans, 2016)

Πληροφορίες για άλλα πρότυπα:

- **ASTMD412**: για δοκιμές εφελκυσμού για ελαστομερή θερμοπλαστικά και **vulcanizedrubber**(JohnRyanC. Dizon, 2018)
- **ASTM D882**:καλύπτει τη δοκιμή εφελκυσμού για λεπτά πλαστικά φύλλα (John Ryan C. Dizon, 2018)
- **ISO 37**: καλύπτει μια μέθοδο που αποκτούν οι εφελκυστικές ιδιότητες των θερμοπλαστικών όπως το **καουτσούκ με θείο(?)** (John Ryan C. Dizon, 2018)
- **ASTM D1938**: καλύπτει τα πρότυπα για τον προσδιορισμό σπασίματος, αντοχή στη διάδοση (**propagation resistance**) μιας πλαστικής μεμβράνης ή φύλλα συγκρίσιμου πάχους. Το δείγμα κόβεται με δύο **trouser legs** . αυτή η μέθοδος δεν εφαρμόζεται για εύθραυστα πλαστικά. (John Ryan C. Dizon, 2018)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- **ISO 34-2:2015:** για πρότυπα δοκιμής σπασίματος για μικρά δείγματα κομματιών (John Ryan C. Dizon, 2018)
- **ISO 34-2:2010:** για γωνία **crescent** και **trouser tear** δοκιμή κομματιών (John Ryan C. Dizon, 2018)
- **ASTM 256 (για Izod Impact tTest) και ASTM D6110 (για Charpy Impact Test):** είναι μέθοδοι που μετράνε την αντοχή στην πρόσκρουση για οδοντωτά πλαστικά δείγματα χρησιμοποιώντας σφυριά εκκρεμούς τύπου. Το ISO έχει αντίστοιχα πρότυπα για **notched impact test specimens for Izod και Charpy impact test** (John Ryan C. Dizon, 2018)
- **ASTM E384:** καλύπτει τον προσδιορισμό της μικροδιάταξης της σκληρότητας των υλικών (συμπεριλαμβανομένων και των πλαστικών) βασισμένο στη Knoop και Vickers κλίμακας σκληρότητας. Από το πρότυπο περιλαμβάνει τη βαθμονόμηση των μηχανών και δοκιμάζει τεμάχια και των δύο δοκιμών.(John Ryan C. Dizon, 2018)
- **ASTM D2240:** για τη δοκιμή ShoreDurometerHardness, καλύπτει τη σχετική σκληρότητα μαλακών υλικών, συνήθως των ελαστομερών. Αυτή η δοκιμή μετράει το βάθος της διείσδυσης της εσοχής μέσα στο υλικό κάτω από συγκεκριμένο φορτίο και χρόνο.(John Ryan C. Dizon, 2018)
- **ASTM D785:** καλύπτει τις δοκιμές για την εύρεση της σκληρότητας Rockwell. Αυτή η μέθοδος μετράει τη σκληρότητα της εσοχής των πλαστικών μετρώντας το βάθος της στο υλικό. Οι εσοχές συνήθως έχουν κυκλική σκληρότητα από σκληρυμένο χάλυβα συγκεκριμένης διαμέτρου.(John Ryan C. Dizon, 2018)
- **ISO 2039-1:** έχει παρόμοια πρότυπα για την σκληρότητα Rockwell, όπου η μέθοδος συνίσταται εξαναγκασμένα τον σκληρυμένο χάλυβα κάτω από ένα ορισμένο φορτίο στην επιφάνεια ενός δείγματος και μετά μετράται το βάθος της εσοχής. (John Ryan C. Dizon, 2018)
- **ISO 2039-2:** όπου η σκληρότητα Rockwell προέρχεται από την καθαρή αύξηση του βάθους της εσοχής ως φορτίο της εσοχής χρησιμοποιώντας **major and minor** ως μεγάλο και μικρό φορτίο. (John Ryan C. Dizon, 2018)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- **ASTM D2990:** καλύπτει τις μεθόδους εφελκυσμού συμπίεσης και κάμψης (**creep analysis**) ερπυσμού, όπως και η ρήξη ερπυσμού στα πλαστικά (**creep modulus**). Το μέτρο ερπυσμού και η ένταση είναι οι συνήθεις παράμετροι που μετρούνται σε αυτή τη δοκιμή. Ο ερπυσμός επηρεάζεται από τη ποσότητα του φορτίου, τη φόρτωση του χρόνου εφαρμογής, και τη θερμοκρασία. Η δοκιμαστική μέθοδος μετράει την ένταση σε ένα δείγμα μετά τη φόρτωση της εφαρμογής. Το ISO έχει παρόμοια πρότυπα για τον εφελκυσμό και τη κάμψη των δοκιμών ερπυσμού.(John Ryan C. Dizon, 2018)
- **ASTM D7791:** καλύπτει τη μέτρηση των ιδιοτήτων της κόπωσης πλαστικών υλικών από μονοαξονική φόρτωση. Παγκόσμιες μηχανές δοκιμών χρησιμοποιούνται γι' αυτή τη μέθοδο. Εδώ, το δείγμα φορτώνεται κάτω από τα αναλογικά όρια του υλικού.(John Ryan C. Dizon, 2018)
 - **ISO 13003:** είναι το πρότυπο για τη δοκιμή κόπωσης των πλαστικών με ενισχυμένες ίνες. (John Ryan C. Dizon, 2018)
 - **ASTM D7774:** καλύπτει τις ιδιότητες κόπωσης πλαστικών υλικών υπό κάμψη. Οι τριών (3) και τεσσάρων (4) σημείων διαδικασίες κάμψης χρησιμοποιούνται γι' αυτή τη μέθοδο. (John Ryan C. Dizon, 2018)
 - **ASTM D5592:** καλύπτει τις ιδιότητες των πολυμερών υλικών που χρειάζονται στον μηχανολογικό σχεδιασμό. Το πρότυπο επίσης καλύπτει τις απαιτήσεις αντοχής κατά την πρακτική εφαρμογή του πλαστικού και άλλες περιβαλλοντικές εκτιμήσεις κατά τη διάρκεια ζωής του υλικού. Πάνω από τον σχεδιασμό θα αποφευχθεί επίσης όταν ακολουθεί αυτό το πρότυπο. Άλλα σχετικά πρότυπα, επίσης, όσον αφορά τις ανοχές, τις αποκλίσεις και **fits** όπως το ISO286-1:2010 είναι σημαντικό εξασφαλίζοντας τις διαστάσεις των κομματιών προς δοκιμή. (John Ryan C. Dizon, 2018)
 - **ASTM E691:** καλύπτει τις τεχνικές για διεξαγωγή μιας διεργασιολογικής μελέτης μιας δοκιμής της μεθόδου. (John Ryan C. Dizon, 2018)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Σύγκριση ASTM D3039 vs ASTM D638:

1. **ASTM D3039:** Ο οριστικός οδηγός για τη δοκιμή εφελκυσμού σύνθετων υλικών

ASTM D3039: Το ASTM D3039 είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο δοκιμής για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων εφελκυσμού σύνθετων υλικών. Λόγω των ελαφρών ιδιοτήτων τους και της υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, τα σύνθετα υλικά ευνοούνται όλο και περισσότερο από την αεροναυπηγική και την αυτοκινητοβιομηχανία και χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση μετάλλων σε πολλές εφαρμογές. Αν και υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι σύνθετων υλικών, το ASTM D3039 εφαρμόζεται μόνο σε εκείνα που αποτελούνται από πολυμερή μήτρα ενισχυμένη με ίνες υψηλής αντοχής.

Ο έλεγχος ASTM D3039 εκτελείται εφαρμόζοντας δύναμη εφελκυσμού σε ένα δείγμα (κουπόνι) και μετρώντας διάφορες ιδιότητες του δείγματος υπό τάση. Διεξάγεται σε μηχανή καθολικής δοκιμής (ονομάζεται επίσης μηχανή δοκιμής εφελκυσμού) και συνδυάζει μονάδες ιντσών-λιβρών και SI σε ένα ενιαίο πρότυπο. Το ASTM D3039 μετρά τις ακόλουθες ιδιότητες εφελκυσμού:

- Αντοχή εφελκυσμού : η μέγιστη τάση που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής (συνήθως η τάση κατά το σπάσιμο)
- Τελική τάση εφελκυσμού : το στέλεχος στο σπάσιμο
- Μέτρο εφελκυσμού : πόσο το υλικό μπορεί να παραμορφωθεί (τεντώσει) σε απόκριση του στρες
- Αναλογία Poisson: ο λόγος της αλλαγής στην εγκάρσια προς τη διαμήκη καταπόνηση μεταξύ δύο διαμήκων σημείων καταπόνησης (συνήθως τα ίδια σημεία με εκείνα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του μέσου, δηλαδή 0,1 έως 0,3%)
- Μεταβατική καταπόνηση: στις περιπτώσεις όπου το υλικό παρουσιάζει μια συμπεριφορά απόδοσης (εμφανίζεται ως αλλαγή κλίσης στην απόκριση

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

καταπόνησης-καταπόνησης), η μεταβατική καταπόνηση είναι η τιμή της καταπόνησης όπου συμβαίνει η μεταβολή της κλίσης

- Τρόπος αποτυχίας: πρέπει να εξεταστούν τα σπασμένα δείγματα και ο τύπος, η περιοχή και η θέση του σφάλματος πρέπει να καταγραφούν με έναν κωδικό τριών χαρακτήρων.

Το ASTM D3039 είναι ειδικό για πλαστικά ενισχυμένα με σωματίδια ή σύντομες ίνες και αποτελεί μία από τις πιο βασικές δοκιμές που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό, την πιστοποίηση και την πιστοποίηση των ιδιοτήτων εφελκυσμού αυτών των υλικών. Ωστόσο, είναι αναγκαία μια ευρεία σειρά άλλων δοκιμών για τον πλήρη χαρακτηρισμό των πολλών διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων των ανισότροπων και ετερογενών σύνθετων υλικών. Όποιος χρειάζεται να ελέγξει τις ιδιότητες συμπίεσης ενός σύνθετου υλικού θα πρέπει να αναφέρεται στην ASTM D695. Εκείνοι που απαιτούν δοκιμή διατμητικής διάτμησης σε σύνθετο υλικό πρέπει να ακολουθούν την ASTM D3846.

ΤΥΠΟΙ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Τα δείγματα ASTM D3039 είναι ορθογωνίου σχήματος με σταθερή διατομή. Το ελάχιστο μήκος του δείγματος είναι ίσο με το συνολικό μήκος πιασίματος + 2 x πλάτος + μήκος μετρητή, αλλά συνιστώνται μεγαλύτερα μήκη προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι τάσεις κάμψης. Το πλάτος και το πάχος του δείγματος πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά του χύδην υλικού σε σχέση με την ποσότητα των ινών. Υπάρχουν τέσσερις συνιστώμενες γεωμετρίες δειγμάτων για 0° μονοκατευθυντικές, 90° μονοκατευθυντικές, ισορροπημένες και συμμετρικές και τυχαίες ασυνεχείς τύπους υλικών. Το ASTM D3039 μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για συνεχείς όσο και για ασυνεχείς ενισχύσεις από ίνες, αλλά η τοποθέτηση του δείγματος πρέπει να είναι ισορροπημένη και συμμετρική ως προς την κατεύθυνση δοκιμής. Είναι συνηθισμένη η πρακτική στις δοκιμές σύνθετων υλικών να

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

χρησιμοποιηθούν γλωττίδες για την προστασία του υλικού από το να υποστεί βλάβη από τις λαβές. Το ASTM D3039 δεν απαιτεί γλωττίδες, αλλά συνιστά τη χρήση τους κατά τη δοκιμή μονής κατεύθυνσης υλικά. Οι γλωττίδες μπορούν είτε να συνδεθούν με το δείγμα είτε να συγκρατηθούν στη θέση τους με τριβή.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Η επιφάνεια εγκάρσιας διατομής του δείγματος πρέπει να μετρηθεί πριν από τη δοκιμή - αυτό γίνεται με τη μέτρηση του πλάτους και του πάχους σε τρία σημεία εντός του μήκους του μετρητή και του μέσου όρου. Όταν μία ή και οι δύο επιφάνειες είναι ακανόνιστες, απαιτείται μέτρηση του πάχους ενός μικρομέτρου με διεπαφή με μπάλα. Αν και οι δύο επιφάνειες είναι επίπεδες, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μικρόμετρο με μπάλα ή επίπεδη επιφάνεια. Για τη μέτρηση του πλάτους δείγματος απαιτείται ένα μικρόμετρο ή πάχος με επίπεδη διεπαφή με άκμονα. Η λειτουργία αυτόματης μέτρησης δειγμάτων στο Bluehill Universal επιτρέπει στους χειριστές να συνδέουν μέχρι δύο συσκευές (μικρομετρικά ή δαγκάνες) στον υπολογιστή και να εισάγουν τα δεδομένα απευθείας στο λογισμικό. Αυτό εξαλείφει τις πιθανότητες των σφαλμάτων εισόδου και αυξάνει την αποδοτικότητα.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ο έλεγχος ASTM D3039 εκτελείται σε ένα μηχάνημα καθολικής δοκιμής μοντέλου τραπέζι. Ένα σύστημα των 30 kN ή 50 kN μπορεί να επαρκεί για τη δοκιμή σύνθετων υλικών από ίνες γυαλιού, αλλά απαιτείται σύστημα 100 ή 250 kN για τη δοκιμή σύνθετων ινών άνθρακα.

ΣΙΑΓΟΝΕΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Οι σιαγόνες που χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση σύνθετων δειγμάτων πρέπει να παρέχουν επαρκώς ισχυρή και ομοιόμορφη πίεση ώστε να αποφεύγεται

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

η ολίσθηση του δείγματος κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Τα σχέδια πρόσοψης της γνάθου πρέπει να είναι κατάλληλα για το υλικό και να είναι σε καλή κατάσταση. Η ευθυγράμμιση των λαβών θα πρέπει να περιορίζει την τάση κάμψης κατά 3-5% σε μέτρια επίπεδα έντασης (> 1000με).

Τα κατάλληλα σχέδια σιαγόνων για το ASTM D3039 περιλαμβάνουν τις χειρολαβές ακριβείας Instron® (2716-028 / 2716-030) και τις υδραυλικές σφήνες σφήνας (2742-401 / 2742-501).Και οι δύο αυτές λαβές χρησιμοποιούν ένα κινούμενο σχεδιασμό αμαξώματος και ενσωματώνουν στάσεις θέσης δειγμάτων για την παροχή αξιόπιστης συγκράτησης σύνθετων υλικών και άλλων υλικών, επιτυγχάνοντας παράλληλα την απαιτούμενη ευθυγράμμιση.

ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗΣ

Διάφορες συσκευές είναι διαθέσιμες για τη μέτρηση της καταπόνησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Οι πιο κοινοί είναι οι μετρητές επιμήκυνσης, οι οποίοι διατίθενται σε ποικίλες διαφορετικές επιλογές ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε εργαστηρίου. Το απλούστερο είναι ένας μετρητής πρόσδεσης μήκους σταθερού μήκους 2630 για την μέτρηση της αξονικής παραμόρφωσης. Ο χειριστής πρέπει να αποσπάσει αυτό το δείγμα απευθείας στο δείγμα στην αρχή κάθε δοκιμής και να το αφαιρέσει πριν το σπάσιμο του δείγματος.

Εάν εξετάζεται ο λόγος Poisson, πρέπει επίσης να προστεθεί ένας εγκάρσιος μετρητής επιμήκυνσης για να μετρηθεί η μεταβολή του πλάτους σε όλη την ελαστική περιοχή του δείγματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αυτόνομος εγκάρσιος μετρητής επιμήκυνσης για να συμπληρώσει ένα υπάρχον κλιπ ή αυτόματο μετρητή επιμήκυνσης ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια διαξονική συσκευή για τη μέτρηση τόσο της αξονικής όσο και της εγκάρσιας καταπόνησης ταυτόχρονα.

Το AutoX750 συνδέεται αυτόματα στο δείγμα χωρίς παρεμβολές από τον χειριστή δοκιμής. Αυτός ο μετρητής επιμήκυνσης είναι χρήσιμος σε εργαστήρια που έχουν υψηλές ανάγκες διακίνησης, καθώς εξαλείφει τη χρονοβόρα ανάγκη

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

χειρωνακτικού χειρισμού από τον χειριστή και παρέχει επίσης πιο συνεπή τοποθέτηση σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων. Η συνεπής τοποθέτηση έχει ως αποτέλεσμα περισσότερες επαναλαμβανόμενες τιμές μέτρησης.

Πολλές φορές τα σύνθετα που δοκιμάζονται τελικά προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες μη περιβαλλοντικές. Για την προσομοίωση αυτών των εφαρμογών τελικής χρήσης, το ASTM D3039 εκτελείται μέσα σε θάλαμο θερμοκρασίας όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί θέρμανση ή ψύξη (LN2 ή CO2). Οι μετρητές τάσης ή τα επεκτάσιμα κλιπ μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι τη μέγιστη θερμοκρασία 200 ° C. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας προηγμένος ενισχυτής μέτρησης βίντεο (AVE2) χωρίς επαφή. Το AVE2 είναι τοποθετημένο έξω από το θάλαμο θερμοκρασίας και χρησιμοποιεί μια κάμερα για την παρακολούθηση παραμορφώσεων στο δείγμα καθ 'όλη τη διάρκεια της δοκιμής, με το πλεονέκτημα ότι οι χειριστές δοκιμών δεν χρειάζεται να ανοίγουν και να κλείνουν την πόρτα του θαλάμου κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ

Οι μετρητές καταπόνησης ηλεκτρικής αντίστασης είναι επίσης χρήσιμοι για τον προσδιορισμό της καταπόνησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής ASTM D3039. Σε αντίθεση με τα εκτενόμετρα, τα όργανα μέτρησης τάσης είναι αναλώσιμα στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της τάσης κατά την αποτυχία. Αυτά τα όργανα μέτρησης αποτελούνται συνήθως από ένα λεπτό πλέγμα από μεταλλικό φύλλο το οποίο είναι συνδεδεμένο με το δείγμα με συγκολλητικό υλικό. Οι μετρητές τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβαλλοντικές συνθήκες από κρυογονικές θερμοκρασίες μέχρι πάνω από 200 ° C, αλλά απαιτούν κλιματισμό για να παράγουν ένα χρήσιμο ηλεκτρικό σήμα. Ένας εύκολος στη χρήση προσαρμογέας είναι διαθέσιμος για χρήση με τα στάντα ηλεκτρονικά σε μια μηχανή δοκιμής Instron. Επειδή τα σύνθετα υλικά δεν παραμορφώνονται ουσιαστικά πριν από την αποτυχία, η ακραία ακρίβεια ενός συγκολλημένου μετρητή τάσεων μπορεί μερικές

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

φορές να είναι προτιμότερη από τη χρήση ενός μετρητή επιμήκυνσης για δοκιμή ASTM D3039.

ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟΣ ΘΑΛΑΜΟΣ

Η δοκιμή σύνθετων υλικών σε συνθήκες μη περιβάλλοντος πραγματοποιείται κανονικά μέσα σε θάλαμο θερμοκρασίας. Αυτοί οι θάλαμοι χρησιμοποιούν εξαναγκασμένη μεταφορά αέρα μαζί με θερμαντικά στοιχεία αντίστασης για να επιτυγχάνουν υψηλές θερμοκρασίες και ψύξη με υγρό άζωτο ή διοξείδιο του άνθρακα για να επιτευχθούν χαμηλές θερμοκρασίες. Η σειρά Instron των περιβαλλοντικών θαλάμων σειράς 3119-600 παρέχει εκτεταμένες δυνατότητες ελέγχου της θερμοκρασίας για την αξιολόγηση ιδιοτήτων υλικών υπό συνθήκες μη συμβατικού περιβάλλοντος. Προσφέρεται πλήρης σειρά συμπληρωματικών λαβών, λαβών και προεκτάσεων.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Το ASTM D3039 απαιτεί η δοκιμή να προκαλέσει βλάβη εντός 1 έως 10 λεπτών. Οι προτεινόμενες ταχύτητες δοκιμής είναι είτε ρυθμός τάσης 0,01 min⁻¹ είτε σταθερή ταχύτητα εγκάρσιας κεφαλής 2 mm / min (0,05 in/min). Η γενική πρακτική είναι η διεξαγωγή της δοκιμής με σταθερή ταχύτητα σταυροειδούς κεφαλής.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ,

Κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι οι όροι ορίζονται σωστά προκειμένου να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με το πρότυπο και να διευκολυνθεί η σύγκριση δεδομένων μεταξύ των διαφόρων εργαστηρίων.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- **Λειτουργία αποτυχίας**

Το ASTM D3039 απαιτεί από τους δοκιμαστές να καταγράψουν και να αναφέρουν τη λειτουργία και τη θέση της αστοχίας του δείγματος. Το λογισμικό Bluehill μπορεί να διαμορφωθεί έτσι ώστε να παρουσιάσει στον χειριστή τη συνιστώμενη λίστα κωδικών βλαβών τριών τεμαχίων μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής.

- **Αντοχή σε εφελκυσμό / αντοχή εφελκυσμού / τελική καταπόνηση εφελκυσμού**

Η τάση εφελκυσμού είναι η δύναμη / μέση περιοχή δειγμάτων και η αντοχή σε εφελκυσμό είναι η μέγιστη δύναμη πριν από την αστοχία / μέση περιοχή δειγμάτων. Η τελική τάση εφελκυσμού είναι η τιμή καταπόνησης κατά την αποτυχία.

- **Μέτρο**

Για τα υλικά που έχουν γραμμική απόκριση τάσης-καταπόνησης και δεν επιδεικνύουν καμία αλλαγή στην κλίση της καμπύλης τάσης-καταπόνησης, το μέτρο ορίζεται ως συντελεστής χορδής σε ένα εύρος τάσης 1000 έως 3000 μη (0,1 έως 0,3%). Αν η απόκριση τάσεως-καταπόνησης του υλικού δείχνει αλλαγή κλίσης εντός της περιοχής από 1000 έως 3000 μη (0,1 έως 0,3%), τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πιο κατάλληλο εύρος τάσεων. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και άλλοι ορισμοί του μέσου ελαστικότητας.

- **Αναλογία Poisson**

Η αναλογία Poisson κανονικά προσδιορίζεται λαμβάνοντας την αναλογία της εγκάρσιας προς την αξονική καταπόνηση επί της ίδιας περιοχής αξονικού τοιχώματος όπως αυτή που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του συντελεστή, δηλαδή 1000 έως 3000 μη (0,1 έως 0,3%). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες περιοχές τάσεων, όπως και άλλοι ορισμοί του λόγου Poisson.

(htt)

2. **Μηχανικές ιδιότητες:**

Τα ASTM πρότυπα υιοθετήθηκαν από ερευνητικές ομάδες κατά την διεξαγωγή των δοκιμών τους.π.χ. το ASTM D638: για δοκιμές εφελκυσμού. Όμως, μερικές ομάδες ακολούθησαν το ASTM D3039 λόγω προβλήματος σχετικά με την γεωμετρία του

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

δείγματος στο πρότυπο ASTM D638 που τείνει να κάνει το δείγμα να αποτύχει πρόωρα, ειδικά στις ακτινικές γωνίες. Άλλοι ακολούθησαν το ISO 527-2. (John Ryan C. Dizon)

3. Ως δοκιμαστές ηγέτες πλαστικών και σύνθετων υλικών, οι εμπειρογνώμονες της Intertek καλούνται συχνά όταν είναι σκόπιμο να εκτελέσουν δοκιμές εφελκυσμού σύμφωνα με την ASTM D638 (Πρότυπη μέθοδος δοκιμής για ιδιότητες εφελκυσμού των πλαστικών) έναντι ASTM D3039 (Πρότυπη μέθοδος δοκιμής για ιδιότητες εφελκυσμού σύνθετων υλικών πολυμερούς μήτρας). Εν ολίγοις, συνιστάται η ASTM D3039 για σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ενισχυμένο πολυουρεθάνιο υψηλής αντοχής και / ή υψηλής αντοχής. Το ASTM D638 συνιστάται για τυποποιημένα, ασυνεχή, μορφοποιημένα ή χαμηλού σπλισμού υλικά ή σύνθετα υλικά με συντελεστή εφελκυσμού μικρότερο από 3 MSI.

Γρήγορος οδηγός αναφοράς για τον προσδιορισμό κατάλληλων μεθόδων δοκιμής εφελκυσμού για πολυμερή και σύνθετα υλικά ASTM D638 έναντι ASTM D3039:

- Σιαγόνες συγκράτησης : Και οι δύο ASTM D638 και D3039 απαιτούν σταθερή ή αυτοεξόρθωση, ωστόσο για την ευθυγράμμιση ASTM D3039 συνιστάται η κάμψη <3 έως 5% να θεωρείται ορθή πρακτική δοκιμών λόγω του γεγονότος ότι έχει γενικά αποδειχθεί ότι πάνω από 5% κάμψη μειώνει την τελική ισχύ αστοχίας. Η Intertek PTL εκτελεί το ASTM D3039 σε μια παγκόσμια δοκιμασία με το τελευταίο μοντέλο ευθυγράμμισης και μέχρι 100 kN.
- Δείκτες επέκτασης: Το ASTM D638 χρησιμοποιεί αποκλειστικά τα extensometers. Ωστόσο, το D3039 επιτρέπει μετρητές τάσης και ακριβέστερα μετρητικά δείγματα για ακριβέστερη μέτρηση τελικής αντοχής.
- Το ASTM D638 Extensometers μετρά το Ελαστικό Μοντέλο σύμφωνα με το ASTM E83 B2. Χαμηλές μετρήσεις επέκτασης από την κλάση C ή +/- 1% της

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

ενδεικνυόμενης τιμής - όποια από τις δύο είναι καλύτερη. και για Υψηλή επέκταση:
+/- 10% της ενδεικνυόμενης τιμής .

- Τα ASTM D3039 Extensometers αποτυπώνουν το Ελαστικό Μοντέλο σύμφωνα με την ASTM E83 B1, την εγκάρσια τάση: ASTM E83 B1 ή A1 για σκληρά υλικά. Οι συστάσεις του Strain Gage είναι 0.250 "ενεργό μήκος μετρήσεως, 350 Ohm, $\pm 3\%$, διέγερση 1 έως 2 V, γραμμική ή αναλογία Poisson Rosette. Υλικό σύρματος και μετρητή βάσει των συνθηκών δοκιμής.

- Τύποι δειγμάτων: Το **ASTM D638** περιγράφει μια ποικιλία δειγμάτων για φύλλα, πλάκες και χυτά πλαστικά. Το **ASTM D3039** χρησιμοποιεί ορθογώνια διατομή με συνιστώμενη γλωττίδα για μονόδρομο υλικό.

- Ψύξη :

Το ASTM D638 ακολουθεί το ASTM D618 στη διαδικασία A και το τμήμα 7, 40+ ώρες $23 \pm 2^\circ\text{C}$ σε $50 \pm 10\% \text{ RH}$. Ωστόσο, η προδιαγραφή υλικών μπορεί να δώσει οδηγίες διαφορετικά.

Για το ASTM D3039, συνιστάται η ASTM D5229 / D5229 M (Πρότυπη μέθοδος δοκιμής για τις ιδιότητες απορρόφησης υγρασίας και την ρύθμιση ισορροπίας των σύνθετων υλικών πολυμερούς μήτρας). Ωστόσο, δεν απαιτείται αν δεν έχει δοθεί εντολή από τον αιτούντα. Πρέπει να αναφέρονται οι συνθήκες έκθεσης και η περιεκτικότητα σε υγρασία.

- Συνιστώμενες ταχύτητες δοκιμής:

Το ASTM D638 είναι 5 έως 500 mm / min (0,2 έως 20 in / min) χρησιμοποιώντας τη χαμηλότερη ταχύτητα που ρωγμάρει το δείγμα μέσα σε $\frac{1}{2}$ έως 5 λεπτά.

Το ASTM D3039 είναι 2 mm / min (0,05 in / min), 0,1 min⁻¹ χρησιμοποιώντας τη χαμηλότερη ταχύτητα που διαρρηγνύει το δείγμα μέσα σε 1 έως 10 λεπτά.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

- Αναφορά δεδομένων:

ASTM D638 και ASTM D3039 καταγράφουν τις καμπύλες φορτίου έναντι επέκτασης και άλλα σημεία δεδομένων ενδιαφέροντος, ωστόσο η ASTM D3039 καταγράφει επίσης τη λειτουργία αστοχίας. (interek)

Βασικά στοιχεία θεωρίας στρέψης:

Λέγεται ότι μία ράβδος με ευθύγραμμο άξονα καταπονείται σε στρέψη αν ενεργούν ζεύγη δυνάμεων των οποίων τα επίπεδα είναι κάθετα επάνω στον άξονα.

Ροπή στρέψης σε μία διατομή της ράβδου ονομάζεται το αλγεβρικό άθροισμα των ροπών όλων των προς τα αριστερά της διατομής ενεργούντων ζευγών σε σχέση με παρατηρητή ο οποίος παρατηρεί τη ράβδο και εκείνη είναι οριζόντια. Η δράση της ροπής στρέψης δημιουργεί στο υλικό της ελαστικής ράβδου εσωτερικές διατμητικές τάσεις με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια συστροφή των διατομών μεταξύ τους.

Στη στρέψη μελετούνται δύο ζητήματα: ο προσδιορισμός των διατμητικών τάσεων τ οι οποίες ονομάζονται ειδικότερα **τάσεις στρέψης τ** , και ο υπολογισμός της γωνίας στροφής των διατομών.

Με τη θεωρία της **Ελαστικότητας** δίνονται λύσεις στις περιπτώσεις που η διατομή της ράβδου έχει απλό γεωμετρικό σχήμα (κύκλος, δακτύλιος, έλλειψη κ.λ.π.)

Για την μελέτη του προβλήματος κάνουμε τη γενική παραδοχή: σημεία που βρίσκονται πριν από την παραμόρφωση επάνω σε μία επίπεδη τομή κάθετη στον άξονα της ράβδου παραμένουν στο ίδιο επίπεδο ακόμα και μετά την παραμόρφωση. Τα σημεία αυτά παθαίνουν μια κοινή περιστροφή γύρω από τον άξονα, σαν να ήταν η διατομή ένας απόλυτα στερεός δίσκος.(Χαρώνης, 2002)

Βασικά στοιχεία θεωρίας εφελκυσμού:

Σε κάθε στερεό σώμα που αποτελείται από μόρια υπάρχουν εσωτερικές δυνάμεις που τα συγκρατούν μεταξύ τους και αντιστέκονται στις επιδράσεις των **εξωτερικών δυνάμεων** που μπορεί να προκαλέσουν **παραμόρφωση** ή κατάλυση

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

της συνέχειας, δηλαδή **θραύση**. Αν όμως ο ανταγωνισμός των εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων δεν επιφέρει καμία παραμόρφωση θεωρείται τότε ότι υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ τους και λέγεται ότι το υλικό βρίσκεται σε μια **εντατική κατάσταση** ή απλώς ότι βρίσκεται σε μία **καταπόνηση** ή **εξαίτηση**.

Εμείς θα ασχοληθούμε με μια από τις σπουδαιότερες καταπονήσεις, δηλαδή με τον εφελκυσμό.

Το σώμα τότε τείνει να διασπασθεί από δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις. Το σώμα έχει ένα ευθύγραμμο κεντροβαρικό άξονα στον οποίο ενεργούν οι δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις και τότε **ο εφελκυσμός αυτός λέγεται αξονικός ή κεντρικός** σε αντίθεση με τον **έκκεντρο εφελκυσμό** στον οποίο οι δυνάμεις αυτές είναι μεν παράλληλοι αλλά δεν βρίσκονται στον ίδιο άξονα (π.χ. σχοινιά, ιμάντες μηχανών, ήλοι σύσφιξης κ.λ.π.) .

Νόμος του Hooke

Το 1678 ο Άγγλος Hooke μετά από απ ευθείας πειράματα επί πρισματικών ράβδων βρήκε για τα περισσότερα από τα υλικά των κατασκευαστών και εφ' όσον η φόρτιση είναι εντός ορισμένων ορίων τότε θα ισχύει: **η επιμήκυνση της ράβδου είναι ανάλογος του φορτίου**. Ο νόμος αυτός λέγεται και **νόμος της Ελαστικότητας** και είναι η σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων.

Η επιμήκυνση της ράβδου ανάγεται στην μονάδα μήκους της ράβδου και σημειώνεται με ϵ και λέγεται *ειδική παραμόρφωση εφελκυσμού*. Η ειδική παραμόρφωση από τον ορισμό της θα είναι: $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ ειδική παραμόρφωση είναι **αδιάστατη**.(Χαρώνης, 2002)

Παράγοντες που λαμβάνονται υπ όψιν πριν τα πειράματα:

Επαναληψιμότητα: ορίζεται η δυνατότητα της μεθόδου να δίνει το ίδιο αποτέλεσμα σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του ίδιου δείγματος και είναι

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

συνώνυμο με τη συνέπεια (consistency). Μας δείχνει το βαθμό διασποράς των τιμών της ανάλυσης κατά τον προσδιορισμό μιας ουσίας με μία συγκεκριμένη μέθοδο. Η επαναληψιμότητα μας δείχνει το μέγεθος των τυχαίων λαθών που μπορεί να οφείλονται σε ποικίλους παράγοντες, όπως διαφορετικά όργανα μέτρησης, λάθος τοποθέτηση του δοκιμίου στο μηχανάνημα, αλλαγή προσωπικού στην εργαστηριακή ανάλυση, κα.

Ακρίβεια: αναφέρεται στη διαφορά (σφάλμα, error) μεταξύ του μέσου όρου μιας σειράς μετρήσεων και της τιμής μ , η οποία γίνεται αποδεκτή ως η αληθής (true) ή ορθή (correct) τιμή της μετρούμενης ποσότητας. Οι κύριοι περιορισμοί στη ακρίβεια προέρχονται από:

- Τα τυχαία σφάλματα
- Τα συστηματικά σφάλματα της διαδικασίας μετρήσεων (θετική ή αρνητική απόκλιση του μέσου αποτελέσματος από τη γνωστή ή θεωρούμενη αληθή τιμή)

Μία ακριβής μέτρηση είναι αυτή που στερείται συστηματικού σφάλματος και είναι επαναλήψιμη.

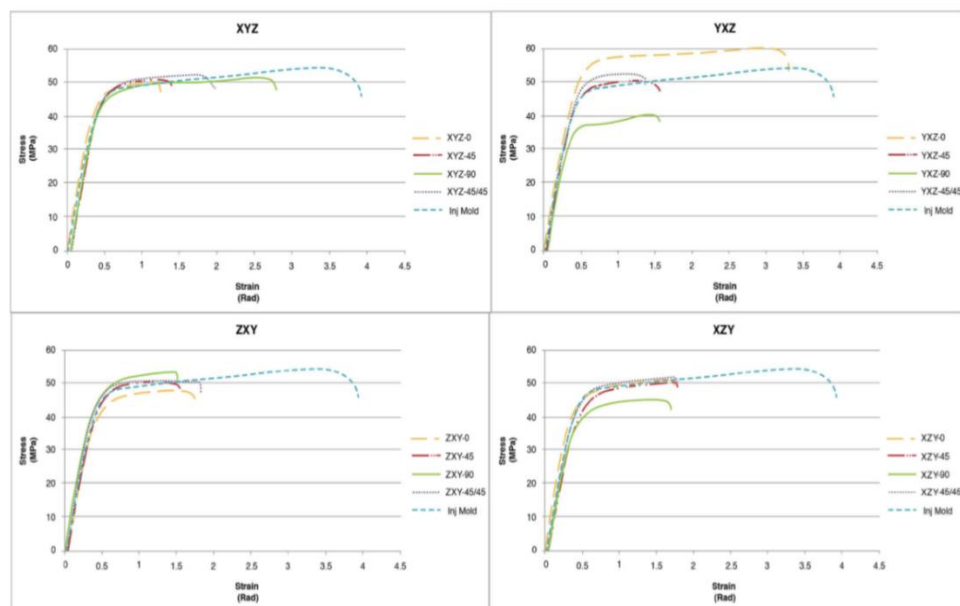
Ανάλυση στρέψης της ανισότροπης συμπεριφοράς της τεχνολογίας FDM:

Υλικό ABS:

Αρκετές εκθέσεις έχουν μελετήσει μηχανικές ιδιότητες της διαδικασίας παραγωγής πρόσθετου εξώθησης υλικού, που αναφέρεται ειδικά ως μοντελοποίηση εναπόθεσης σύντηξης (FDM) που αναπτύχθηκε από την Stratasys. Καθώς οι εφαρμογές για τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα συνεχίζουν να αυξάνονται σε ποικιλία (π.χ. γρανάζια, έλικες και έδρανα), οι συνθήκες φόρτωσης που εφαρμόζονται στα τυπωμένα εξαρτήματα έχουν γίνει πιο περίπλοκες και η ανάγκη λεπτομερούς χαρακτηρισμού είναι πλέον πρωταρχικής σημασίας για την αυξημένη υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Για να διευρυνθεί η κατανόηση των ιδιοτήτων της στρέψεως, η μελέτη επικεντρώθηκε στην αντοχή της διάτμησης των δειγμάτων για να παρατηρηθεί η πρόσκρουση από την Παρασκευή προσθέτων . Λαμβάνοντας υπ' όψιν τον προσανατολισμό και την γωνία γεμίσματος ως παράγοντες με όλες τις δυνατές τιμές, η τελική δύναμη διάτμησης, η ισχύς απόδοσης 0,2%, το μέτρο διατμήσεως και το (fracture strain) , χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές απόκρισης για τον προσδιορισμό των πλέον βέλτιστων παραμέτρων κατασκευής. Επίσης παρουσιάζονται διαγράμματα καταπόνησης που δείχνουν διαφορές πλαστικής και ελαστικής περιοχής με την παραδοσιακή χύτευση με έγχυση. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια αλληλεπίδραση παραγόντων σε όλες τις μηχανικές μεταβλητές ενώ ο προσανατολισμός και η κατεύθυνση της δέσμης ήταν εφικτές. Σε σύγκριση με την έγχυση, τα δείγματα FDM ήταν παρόμοια για όλες τις μετρημένες μεταβλητές στρέψης, αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η διαδικασία FDM μπορεί να κατασκευάζει εξαρτήματα με παρόμοιες ελαστικές ιδιότητες αλλά με λιγότερη ολκιμότητα από την χύτευση με έγχυση. Ο προσανατολισμός στο XYZ με τη γωνία γεμίσματος (raster) σε 00 είχε σαν αποτέλεσμα τον πιο κατάλληλο συνδυασμό που προσδιορίστηκε στην ανάλυση βελτιστοποίηση της απόκρισης.



Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Εικόνα 15 Παραστάσεις των καμπυλών τάσης – καταπόνησης που ομαδοποιούνται από τον προσανατολισμό του δείγματος. (Cesar Omar Balderrama-Armendariz, 2018)

Υλικό PLA:

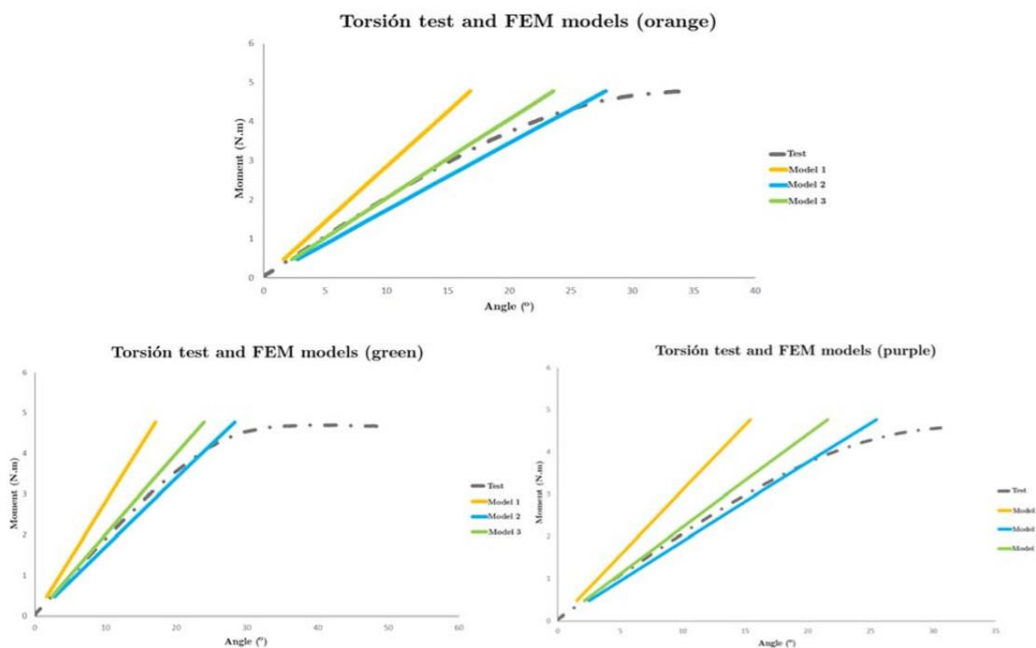
Για κάθε τύπο νημάτων PLA, έγινε μια σειρά από κύλινδρους δοκιμής μήκους $120 \pm 0,20$ mm και με διάμετρο $10 \pm 0,20$ mm με 3D εκτύπωση εφαρμόζοντας τις παραμέτρους **(να τις δω)**.

Εκτελέστηκε σειρά δοκιμών στρέψης για να ληφθεί το ειδικό μέτρο διάτμησης για κάθε έναν κύλινδρο PLA που κατασκευάστηκαν με βάση τα παραπάνω. Οι κύλινδροι τοποθετήθηκαν 20 mm σε κάθε σφιγκτήρα, κατά τη διάρκεια των δοκιμών, εφαρμόστηκαν χαμηλές ταχύτητες περιστροφής περίπου 0,05 rpm λόγω της μεγάλης ακαμψίας των δοκιμαστικών δειγμάτων που παρέχονται από τα νήματα. Η γωνία θραύσης για όλα τα δείγματα ήταν κάτω από 180 μοίρες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών στρέψης που λαμβάνονται για τα σύνορα πράσινων, πορτοκαλί και μωβ κυλίνδρων παρουσιάζονται παρακάτω.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.

Colour	Max. Angle (°)	G (MPa)
Green	48.600	775.482
Orange	31.021	793.547
Purple	20.420	866.627

Εικόνα 16 Αποτέλεσμα δοκιμών στρέψης



Εικόνα 17 Σύγκριση ανάμεσα στις δοκιμές στρέψης και της FEM σε ποικιλία δοκιμαστικών κομματιών. (M. Berzal, 2017)

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμια προσθετικων κατεργασιων.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Κεφάλαιο 5ο

Μελέτες περιπτώσεων



Εικόνα 18 Εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε: Creality, Ender 3 Pro

Δημιουργία δοκιμίου για Εφελκυσμό- Πείραμα

Με βάση το πρότυπο ASTM D3039

Στο πρώτο στάδιο με την βοήθεια του μηχανολογικού σχεδιαστικού προγράμματος Inventor της εταιρίας Autodesk, σχεδιάστηκε το ορθογωνικό δοκίμιο.

Διάσταση δοκιμίου: 8mm*8mm*120mm

Εν συνεχεία, μετατράπηκε σε αρχείο .stl για να επιτευχθεί η μεταφορά του στη μηχανή AM και η επεξεργασία του αρχείου. Έπειτα, ακολούθησε η προετοιμασία της μηχανής, και ρύθμιση του θερμαινόμενου κρεβατιού και της μύτης (nozzle) να απέχουν όσο το πάχος μιας σελίδας A4, έτσι ώστε το τηγμένο υλικό PLA να μπορέσει να κολληθεί σωστά στο κρεβάτι και να δημιουργηθεί το αντικείμενο.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Με την βοήθεια του προγράμματος Simplify3D, περάστηκε το αρχείο και δόθηκαν οι παρακάτω τιμές στις παραμέτρους:

Infill/γέμισμα: 100%- Καθορίζει την εσωτερική σταθερότητα του μοντέλου

Θερμοκρασία κρεβατιού: 63°C – Ορίζει τη θερμοκρασία σε κάθε στρώμα δημιουργίας, αλλά και σε ολόκληρη τη κατασκευή.

Θερμοκρασία extruder/μύτης:215°C - Ορίζει τη θερμοκρασία σε κάθε στρώμα δημιουργίας, αλλά και σε ολόκληρη τη κατασκευή.

Πρωταρχικό ύψος στρώματος/primary layer height: 0,2mm – Πάχος του κάθε τυπωμένου περιγράμματος στρώματος.

Κορυφαία στερεά στρώματα/top solid layers: 4– Αριθμός στερεών στρώσεων που απαιτούνται στην κορυφή του αντικειμένου.

Κάτω στερεά στρώματα/bottom solid layers: 4 - Αριθμός στερεών στρώσεων που απαιτούνται στο κάτω μέρος του αντικειμένου.

Περιγράμματα – περιμετρικά κελύφη/outline – perimeter shells: 2 – Αριθμός των κελύφων που θα χρησιμοποιηθούν για το εξωτερικό μέρος του αντικειμένου.

Ύψος πρώτου στρώματος/first layer height: 95%- Το ύψος του πρώτου στρώματος είναι συνήθως τροποποιημένο για να βελτιώσει την πρόσφυσή του, και έχει υπόψιν τις ανώμαλες επιφάνειες.

Πλάτος πρώτου στρώματος/first layer width: 105%- Το πλάτος εξώθησης του πρώτου στρώματος μπορεί να αυξηθεί για να βοηθήσει με την πρόσφυση.

Ταχύτητα πρώτου στρώματος/first layer speed: 40%- Οι βραδύτερες ταχύτητες του πρώτου στρώματος συμβάλλουν στη βελτίωση της πρόσφυσης του στρώματος.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Ψύξη : ταχύτητα ανεμιστήρα στην πρώτη στρώση 60% - Ταχύτητα του ανεμιστήρα για εφαρμογή στο καθορισμένο επίπεδο.

Ταχύτητα ανεμιστήρα από τη δεύτερη στρώση μέχρι την τελευταία 100%

Ταχύτητες: προκαθορισμένη ταχύτητα εκτύπωσης/default printing speed 40,0 mm/sec–Αρχική ταχύτητα που χρησιμοποιείται για όλες τις κινήσεις της εκτύπωσης.

Περιγράμματος/outline underspeed: 50.0 mm/sec– Τροποποιεί την ταχύτητα εκτύπωσης για το μεγαλύτερο μέρος του εξωτερικού περιγράμματος.

Στερεάς πλήρωσης/solid infill underspeed: 80.0 mm/sec – Τροποποιεί την ταχύτητα εκτύπωσης για τα άνω και κάτω συμπαγή στρώματα (χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της εξωτερικής επιφάνειας).

Δομής στήριξης/support structure: 80,0 mm/sec

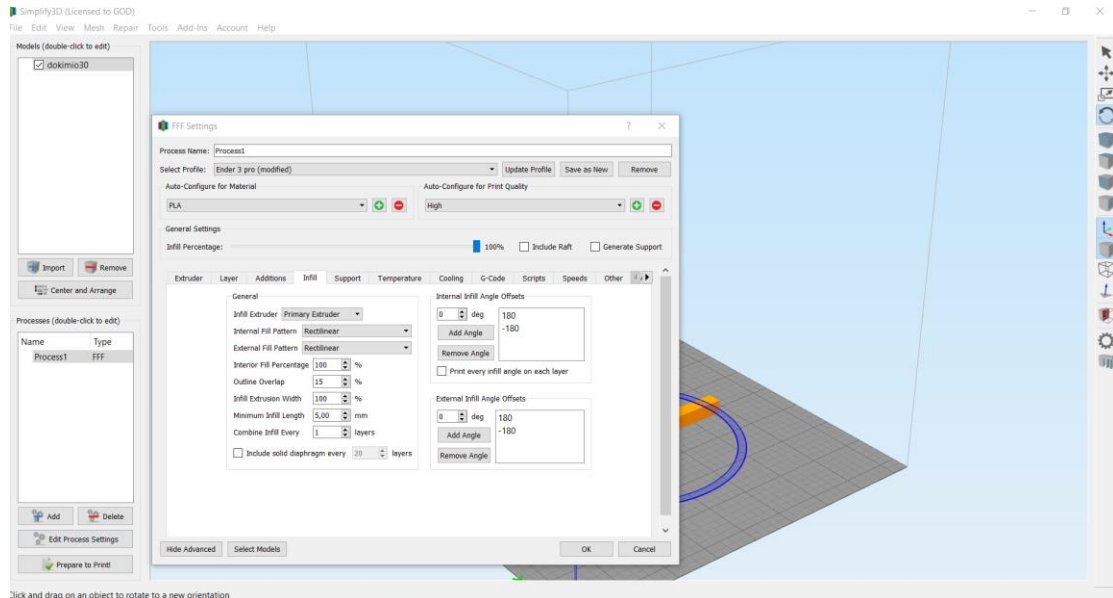
Κίνησης των αξόνων X/Y / X/Y axis movement speed : 80,0 mm/sec – Γρήγορη ταχύτητα μετακίνησης για του άξονες X/Y όταν η μηχανή δεν τυπώνει.

Κίνησης του άξονα Z/ Z axis movement speed: 16.7 mm/sec – Γρήγορη ταχύτητα μετακίνησης για τον άξονα Z όταν η μηχανή δεν τυπώνει. Θα πρέπει να ταιριάζει με την πραγματική ταχύτητα της κίνησης του άξονα Z μεταξύ των στρώσεων για ακριβείς χρόνους εκτύπωσης.

Εσωτερική μετατόπιση γωνίας πλήρωσης /Internal infill angle offsets : 180° / -180°
. Οι γωνίες πλήρωσης θα χρησιμοποιηθούν η μία μετά την άλλη για κάθε διαδοχική στρώση.

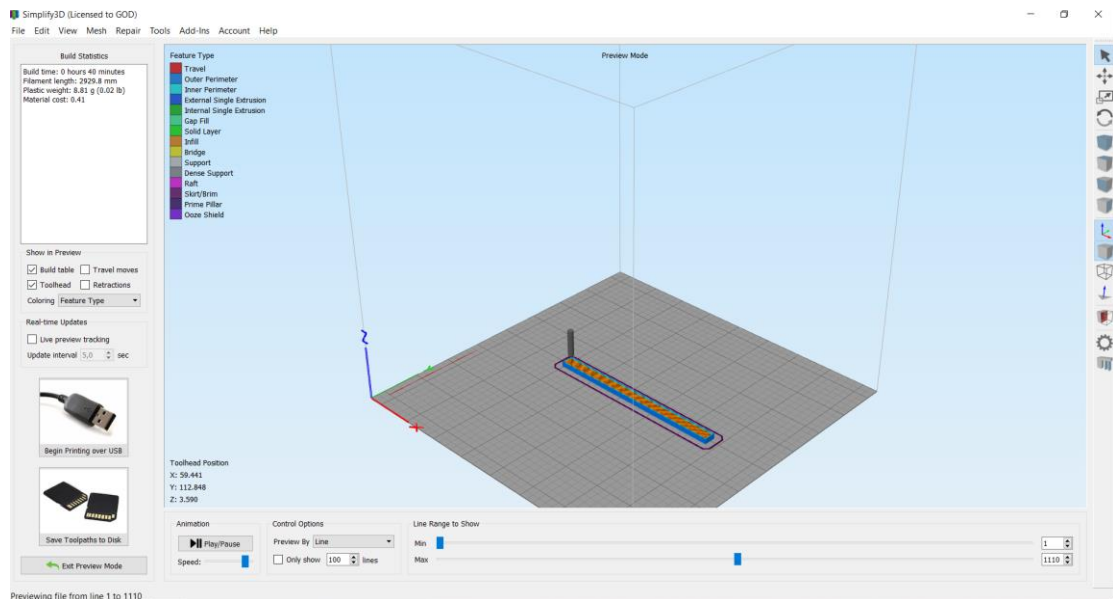
Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Ο παρακάτω πίνακας ρυθμίσεων του προγράμματος παρουσιάζει κάποιες από τις τιμές που αναφέρθηκαν:



Εικόνα 19 Παράμετροι εκτύπωσης - Simplify 3D

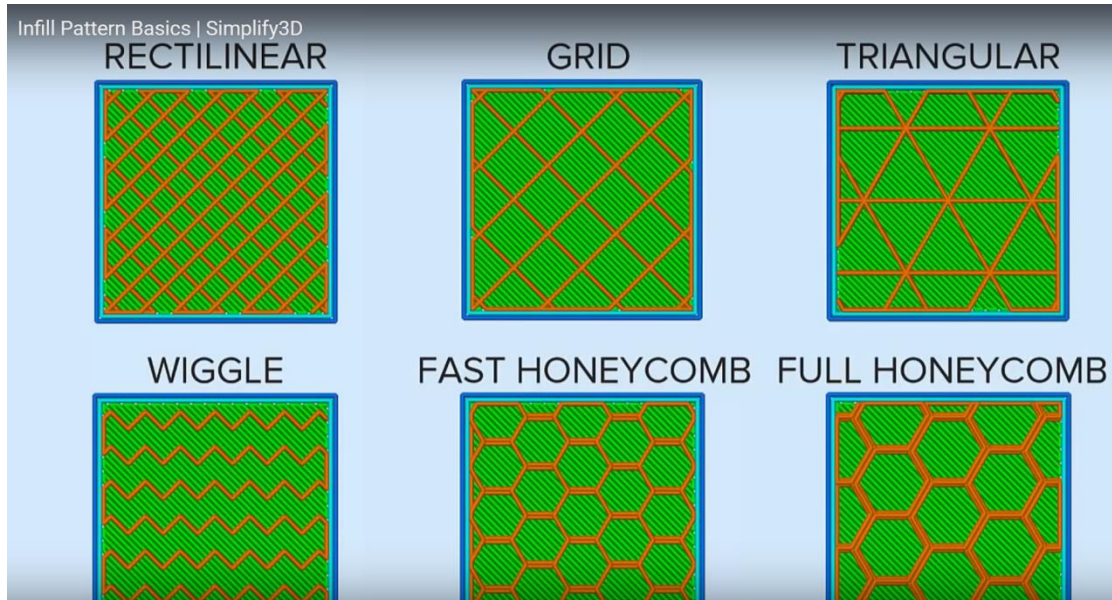
Ήταν επιλογή να γίνει ένα συμπαγές κομμάτι, δηλαδή το γέμισμα να είναι ευθύγραμμο (rectilinear) διότι το δοκίμιο θα υποστεί εφελκυσμό, όπως φαίνεται στο σχέδιο με το πορτοκαλί σκούρο χρώμα.



Εικόνα 20 Infill pattern – Simplify 3D

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Υπάρχουν και άλλοι τύποι γεμίσματος, όπως φαίνονται παρακάτω, οι οποίοι παίζουν μεγάλο ρόλο στην αντοχή του αντικειμένου, και στην διάρκεια της τύπωσης:



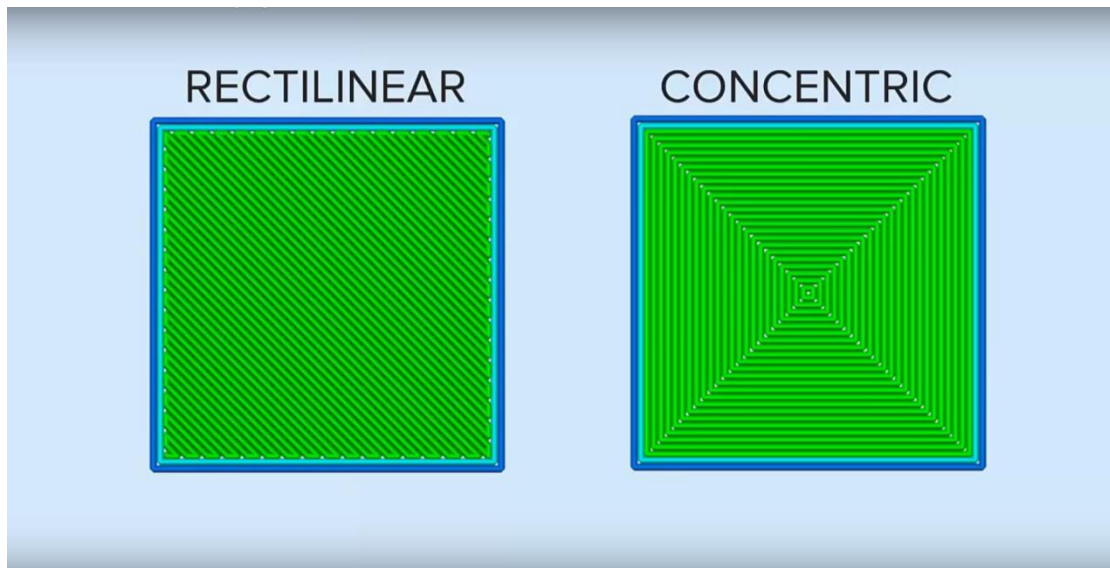
Εικόνα 21 Infill pattern - Youtube

Rectilinear / Ευθύγραμμο : καλή ισορροπία ισχύος και ταχύτητας εκτύπωσης

Grid – Triangular /Πλέγμα - Τριγωνικό: παρέχουν ισχυρότερη εκτύπωση σε βάρος κάποιου επιπλέον χρόνου.

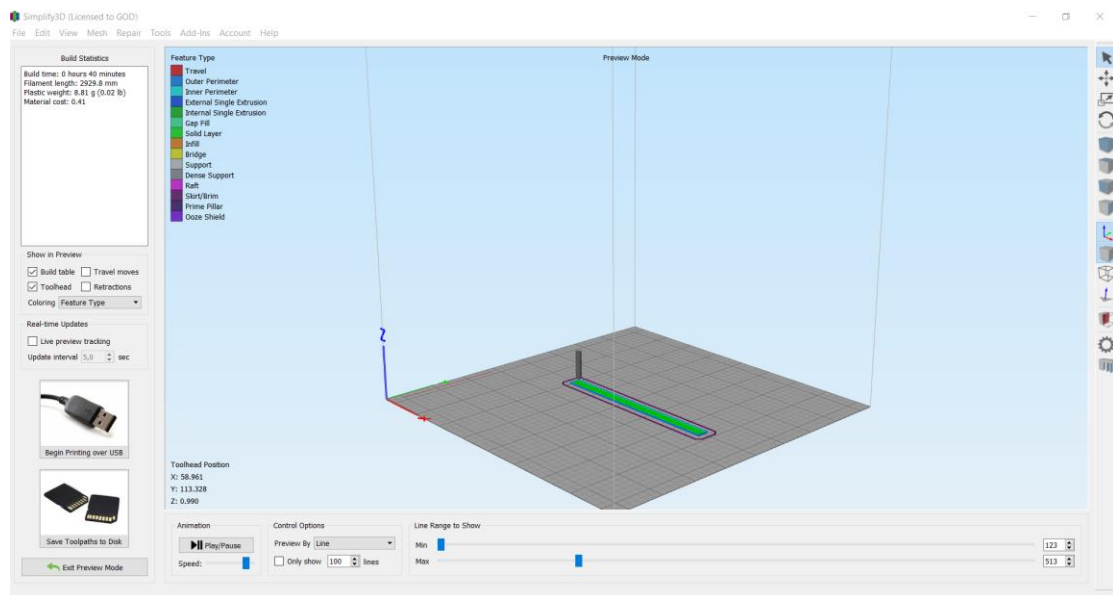
Wiggle – Fast honeycomb / Κυματιστό – Γρήγορο κυψελωτό :χρησιμοποιούνται περισσότερο για αισθητικούς σκοπούς, και επιλέγεται αυτό που είναι καλύτερο για την κάθε εκτύπωση.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.



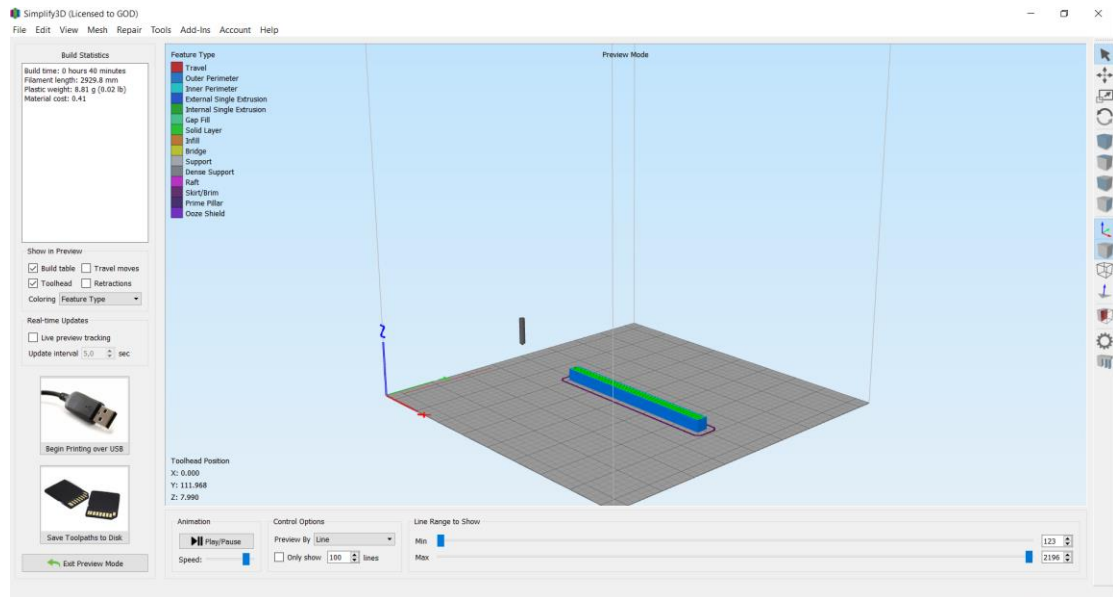
Εικόνα 23 Infill pattern για το περίγραμμα - Simplify 3D

(htt1)



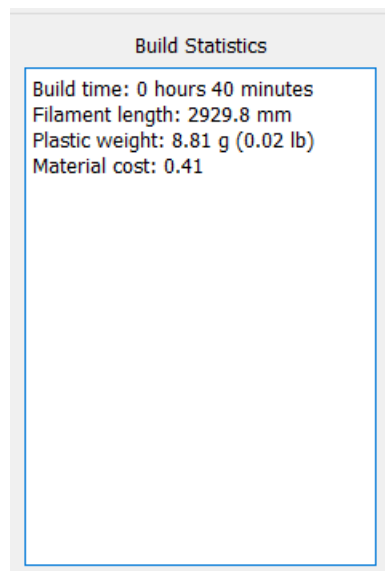
Εικόνα 24 Στιγμιότυπο στρώσης - Simplify 3D

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμια προσθετικων κατεργασιων.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 25 Τέλος διαδικασίας εκτύπωσης του δοκιμίου – Simplify 3D

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση, το Simplify3D, όταν έχουν δοθεί όλες οι παράμετροι και το αντικείμενο είναι έτοιμο για εκτύπωση, υπάρχει ένα κουτί πάνω αριστερά το οποίο δίνει τις στατιστικές της δημιουργίας (Build statistics).



Εικόνα 26 Πίνακας στατιστικών - Simplify 3D

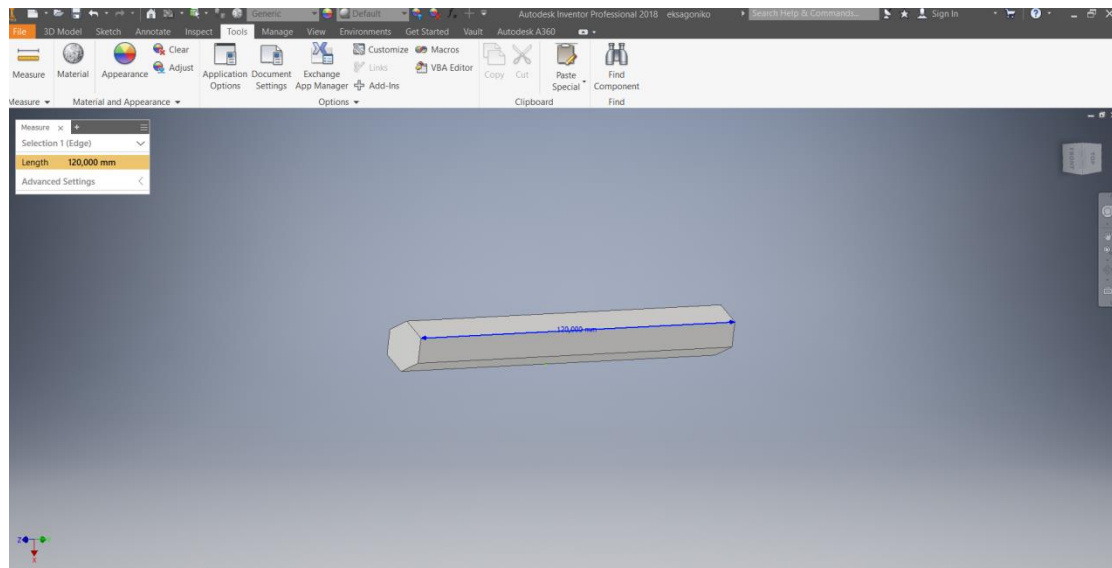
Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Το οποίο δηλώνει πόσο χρόνο θα κάνει να εκτυπωθεί το αντικείμενο, πόσο υλικό θα χρειαστεί, πόσο θα ζυγίζει το τελικό αντικείμενο, και πόσο κοστίζει το υλικό που χρησιμοποιήθηκε.

Δημιουργία δοκιμίου για Στρέψη – Πείραμα

Με βάση το πρότυπο ASTM D3039

Ομοίως με το πρώτο δοκίμιο, δημιουργήθηκε ένα εξαγωνικό με διαστάσεις $D = 13\text{mm}$ $d = 12\text{mm}$ και μήκος $L = 120\text{mm}$

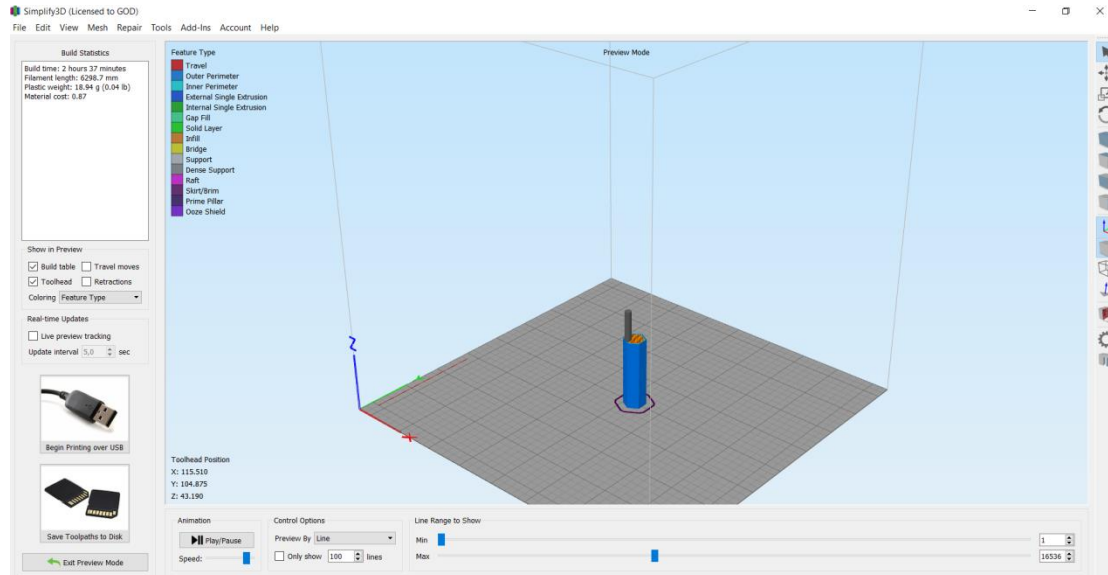


Εικόνα 27 Εξαγωνικό δοκίμιο - Inventor

Εν συνεχεία μεταφέρθηκε στο πρόγραμμα Simplify3D για την μεταφορά στην μηχανή AM.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Δοκιμή σε κάθετη τύπωση:

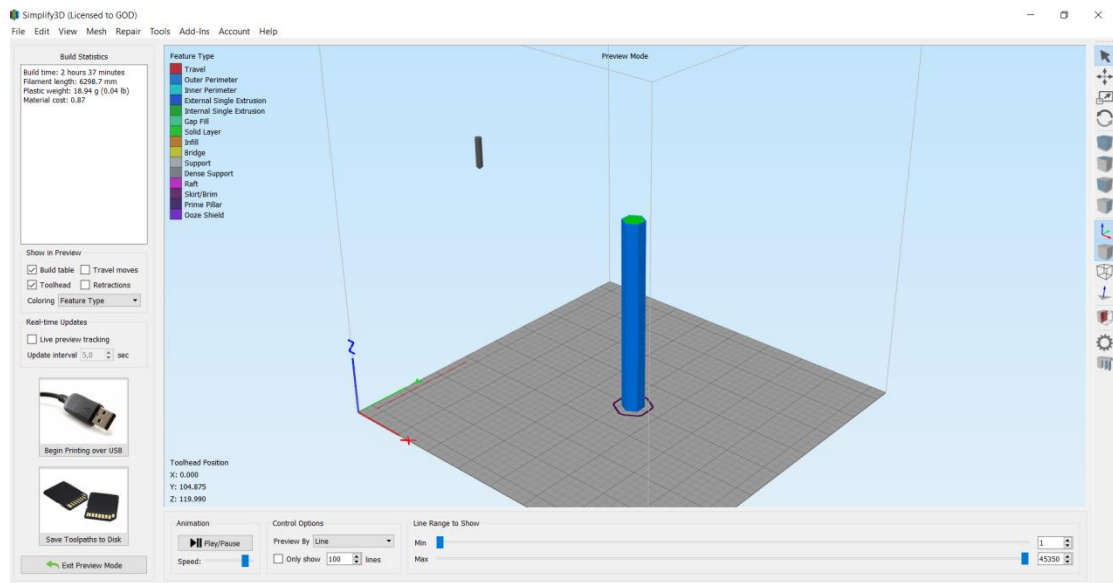


Εικόνα 28 Εκτύπωση δοκιμίου - Simplify 3D

Build Statistics
Build time: 2 hours 37 minutes
Filament length: 6298.7 mm
Plastic weight: 18.94 g (0.04 lb)
Material cost: 0.87

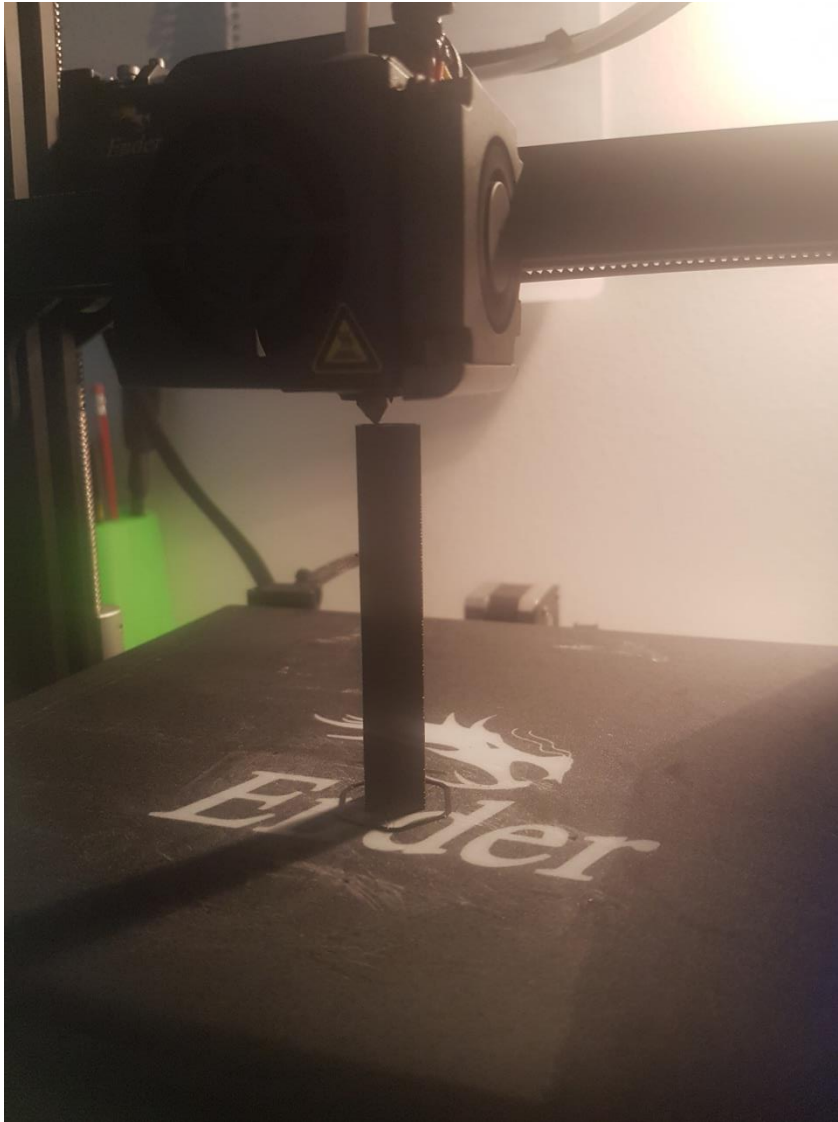
Εικόνα 29 Πίνακας στατιστικών - Simplify 3D

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμια προσθετικων κατεργασιων.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 30 Τέλος διαδικασίας εκτύπωσης δοκιμίου – Simplify 3D

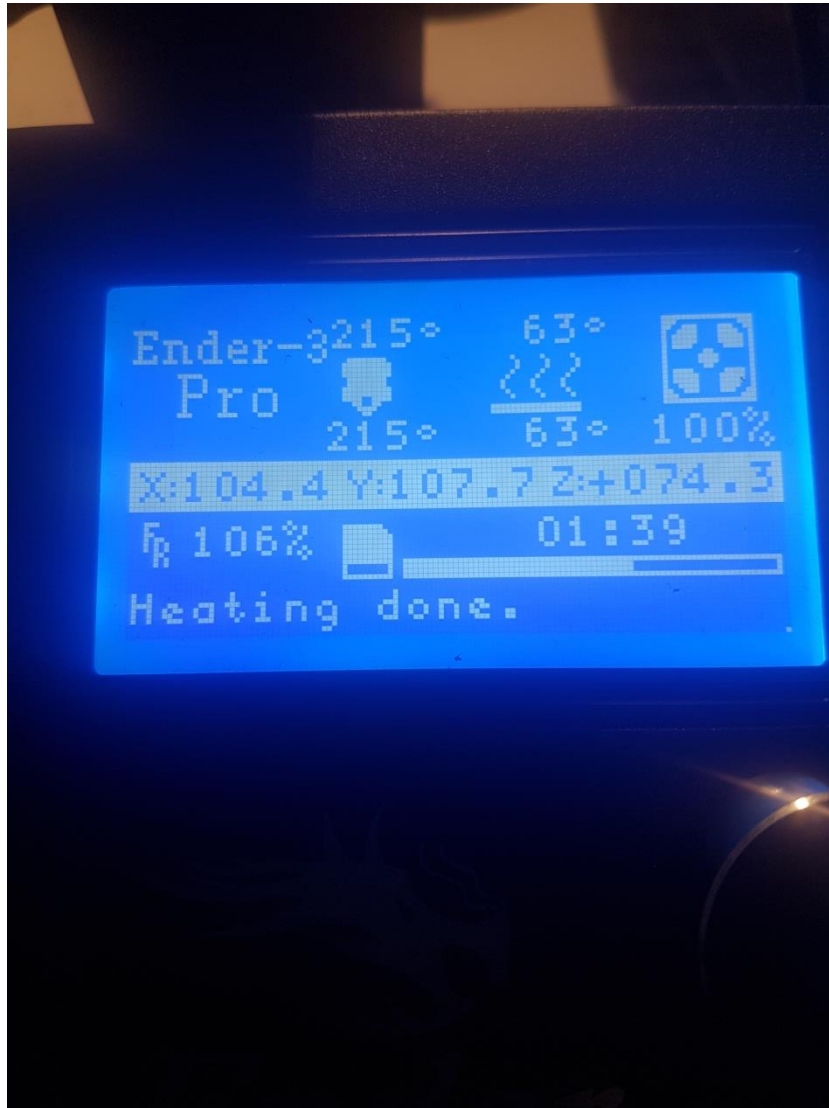
Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 31 Εκτύπωση εξαγωνικού δοκμίου - Ender 3 Pro

Ο κάθε 3D εκτυπωτής διαθέτει μία οθόνη στην οποία βλέπει κανείς ό,τι πληροφορία χρειάζεται, και ένα περιστρεφόμενο κουμπί για την λειτουργία του. Η οθόνη αυτή παρουσιάζεται παρακάτω:

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

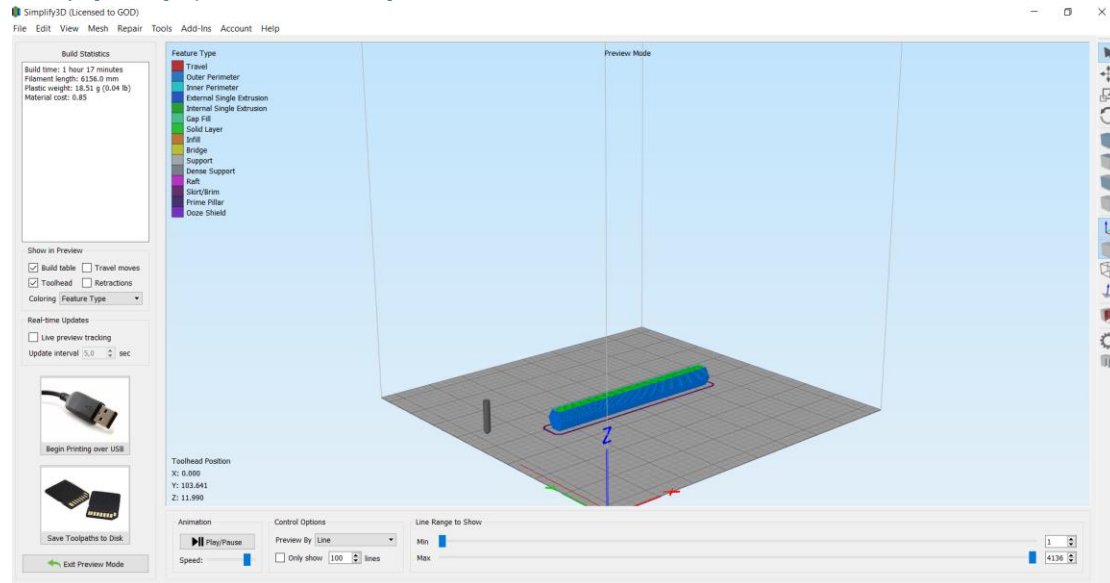


Εικόνα 32 Οθόνη πληροφοριών εκτυπωτή –Ender 3 Pro

Από την οθόνη μπορεί κανείς να αντλήσει πληροφορίες για την θερμοκρασία της μύτης όπου γίνεται η εξώθηση του υλικού, θερμοκρασία του κρεβατιού, το ποσοστό επί τις εκατό (100) για τη λειτουργία του ανεμιστήρα όπου ψύχει το υλικό, τις συντεταγμένες των αξόνων XYZ, και τον χρόνο που έχει κάνει ως εκείνη τη στιγμή.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Δοκιμή σε οριζόντια τύπωση:



Εικόνα 33 Τέλος διαδικασίας εκτύπωσης δοκιμίου – Simplify 3D

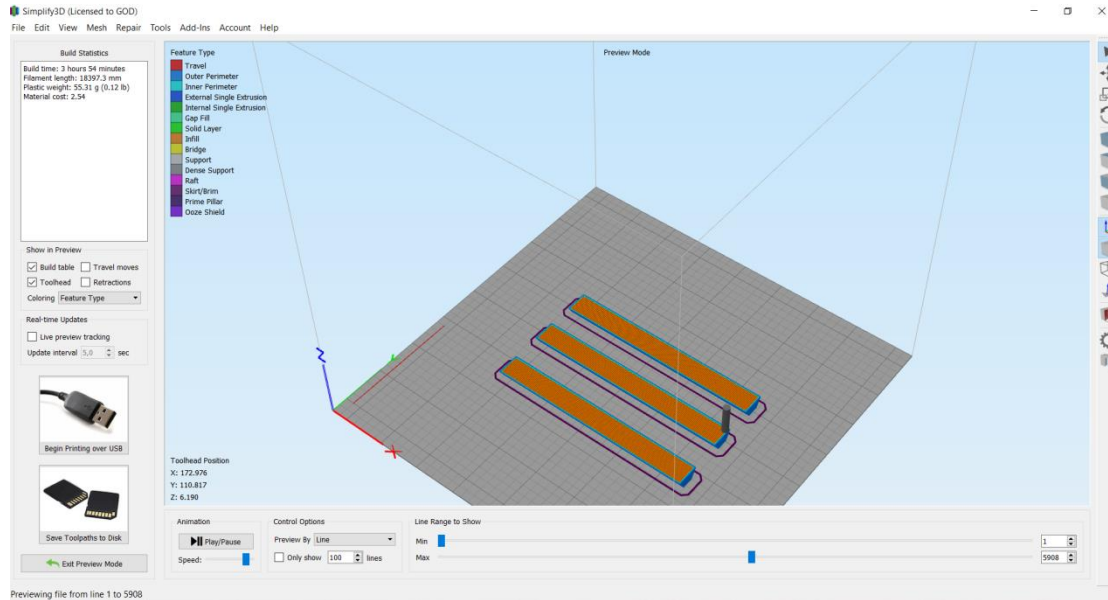
Με διαφορές που παρατηρούνται στον παρακάτω πίνακα:

Build Statistics
Build time: 1 hour 17 minutes
Filament length: 6156.0 mm
Plastic weight: 18.51 g (0.04 lb)
Material cost: 0.85

Εικόνα 34 Πίνακας στατιστικών - Simplify 3D

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Είναι δυνατή και η μαζική τύπωση: την επιλέγουμε για να επιτύχουμε ίδιες συνθήκες όπως υγρασία και θερμοκρασία.



Εικόνα 35 Μαζική εκτύπωση δοκιμών - Simplify 3D

Πίνακας στατιστικών μαζικής τύπωσης:

Build Statistics
Build time: 3 hours 54 minutes
Filament length: 18397.3 mm
Plastic weight: 55.31 g (0.12 lb)
Material cost: 2.54

Εικόνα 36 Πίνακας στατιστικών - Simplify 3D

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 37 Εξαγωνικό δοκίμιο - αποτέλεσμα τύπωσης

Επιλογή ταχυτήτων

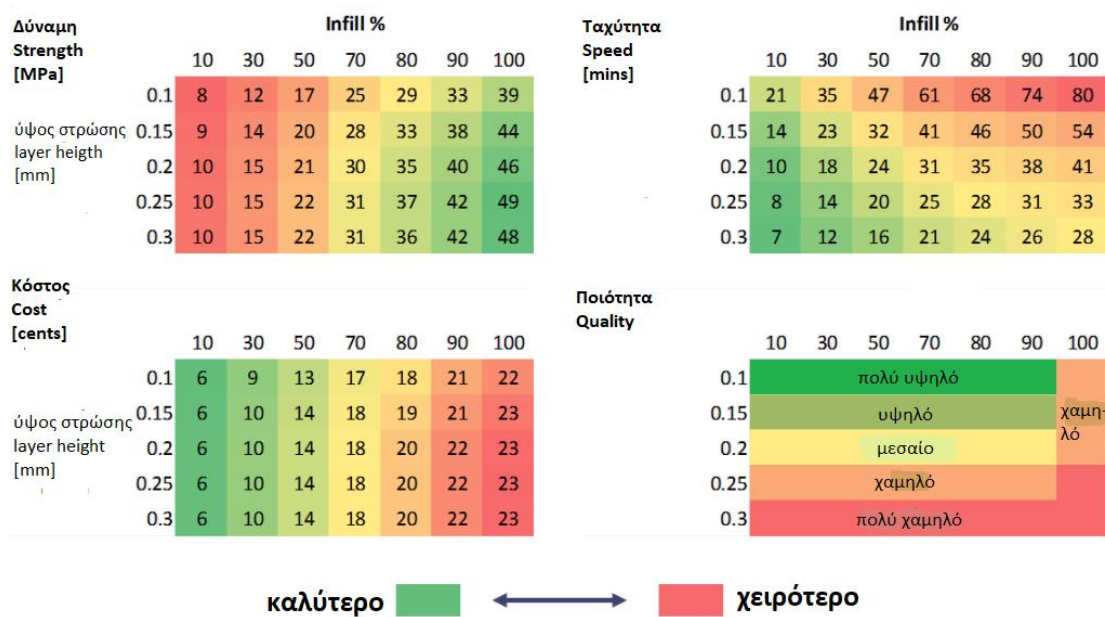
Συγκεντρώθηκε μεγάλη ποσότητα δεδομένων και παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις προτιμώμενες ρυθμίσεις, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Τα ερωτήματα που μπορεί κανείς να σκεφτεί είναι αν χρειάζεται τη δύναμη εκτύπωσης ή την ποιότητα. Επίσης, προσπαθεί κανείς να ελαχιστοποιήσει το κόστος, ή προσπαθεί να εξοικονομήσει χρόνο; Ή μήπως είναι, όπως συμβαίνει συχνά, ένας συνδυασμός αυτών των απαιτήσεων;

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

απαιτήσεις				ρυθμίσεις	
Strength	Quality	Low Cost	Speed	Infill %	Layer height
×				100	0.25
	×			10	0.1
		×		10	0.1
			×	10	0.3
×	×			90	0.15
×		×		70	0.2
×			×	90	0.3
	×	×		10	0.1
	×		×	10	0.15
		×	×	10	0.3
×	×	×		80	0.15
×	×		×	90	0.2
×		×	×	70	0.3
	×	×	×	10	0.15
×	×	×	×	70	0.2

Τα παραπάνω αποτελέσματα βασίστηκαν στις παρακάτω μετρήσεις:



Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Οι πίνακες της αντοχής , της ταχύτητας, και του κόστους προέκυψαν από μηχανικές δοκιμές:

- Η αντοχή αντιστοιχεί στην μέγιστη τάση που μπορεί να λάβει το δείγμα από το σπάσιμο
- Η ταχύτητα περιγράφει τον χρόνο εκτύπωσης ενός δείγματος
- Το κόστος προκύπτει από το πραγματικό βάρος του δείγματος και προϋποθέτει 30€/kg
- Η ποιότητα σχετίζεται με την γενική πλευρά των τυπωμένων μερών με βάση το ύψος τους στρώματός τους
(htt2)

Στη συνέχεια, θα μετρηθούν οι αντοχές των δοκιμίων στο εργαστήριο της Αντοχής των υλικών στον χώρο του Πανεπιστημίου με την βοήθεια του καθηγητή Κωνσταντίνου Γιαννακόπουλου.

Πείραμα στρέψης

Για το πείραμα στρέψης υποβάλλαμε τρία (3) εξαγωνικά δοκίμια κάθετης εκτύπωσης από υλικό PLA σε στρέψη στη μηχανή στρεπτικής καταπόνησης *TecQuipmentSM-21*.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 38 Μηχάνημα στρέψης όπου πραγματοποιήθηκε το πείραμα



Εικόνα 39 Μηχάνημα στρέψης όπου πραγματοποιήθηκε το πείραμα

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 40 Μηχάνημα στρέψης όπου πραγματοποιήθηκε το πείραμα

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 41 Μηχάνημα στρέψης και εξαγωνικό δοκίμιο πριν την έναρξη του πειράματος

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Δοκίμια Κάθετης Εκτύπωσης:

Δοκίμιο Νο1:



Εικόνα 42 Θραύση του δοκμίου

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Δοκίμιο Νο2



Εικόνα 43 Θραύση του δοκιμίου

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

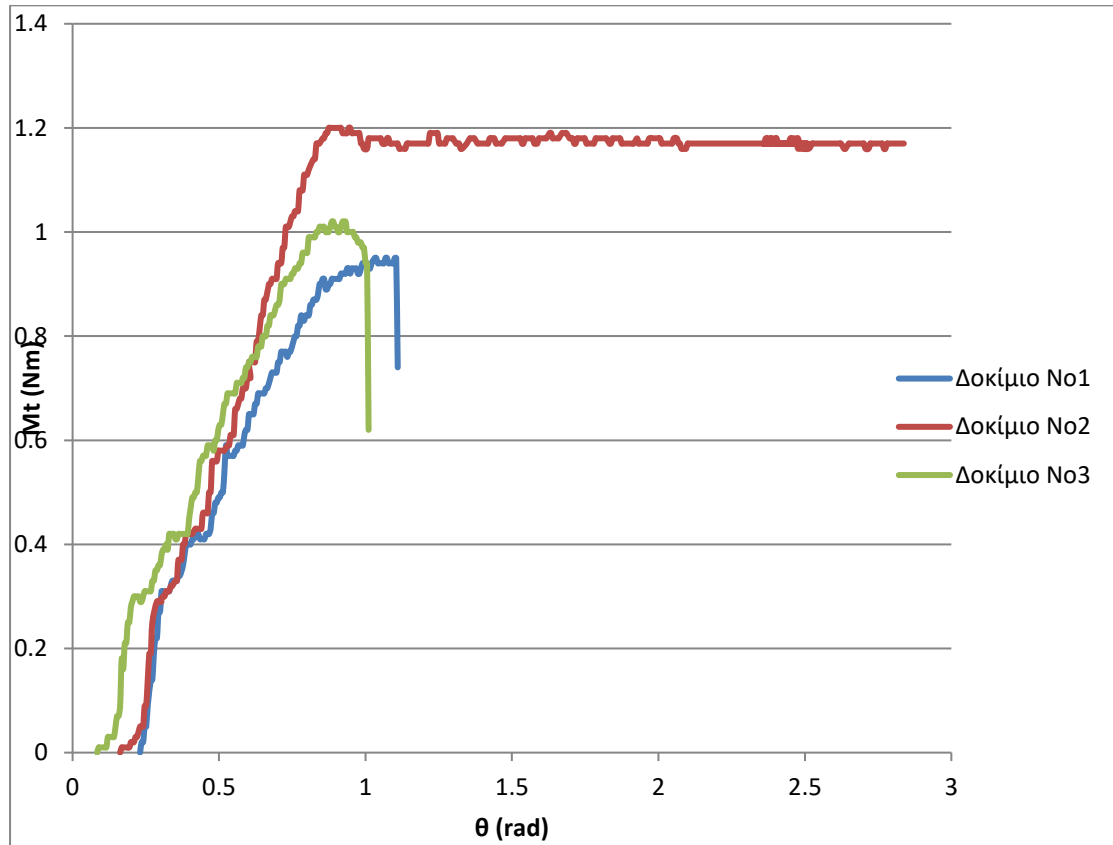
Δοκίμιο Νο3:



Εικόνα 44 Θραύση του δοκιμίου

Από τις μετρήσεις που ελήφθησαν για το κάθε δοκίμιο, δημιουργήθηκε ένα μαζικό διάγραμμα Ροπής M_t (για τον y άξονα) και Ακτινίων rad (για τον x άξονα), όπως φαίνεται παρακάτω.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 45 Μαζικό διάγραμμα Ροπής Mt (για τον γ άξονα) και Ακτινίων rad (για τον x άξονα), για το πείραμα της στρέψης με κάθετα εκτυπωμένα δοκίμια

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Δοκίμια Οριζόντιας Εκτύπωσης:

Δοκίμιο Νο1:



Εικόνα 46 δαινόμενο απολέπισης

Φαινόμενο Απολέπισης:

Κατά τη στρέψη του δοκιμίου στη στρεπτική μηχανή, αρχίζει να ξεφλουδίζει όταν ξεπερνάει το όριο αντοχής του. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται και αποφλοίωση.

Υπάρχει ανεπαρκής πίεση θερμοκρασίας σκλήρυνσης και διάρκεια σκλήρυνσης στους θύλακες αέρα και στα εγκλείσματα. Η διεπαφή είναι ασθενέστερη σε εγκάρσια αντοχή σε σύγκριση με τις στρώσεις. Έτσι, η αποτυχία του κυριαρχείται από τις εγκάρσιες καταπονήσεις.

Εγκοπή: η εγκοπή στα ελάσματα λειτουργεί σαν μια εξωτερική ρωγμή που δημιουργεί υψηλή τρισδιάστατη τάση στην ολότητα της εγκοπής.

Αποτελέσματα απολέπισης: Μειώνει την δύναμη και την ακαμψία. Προκαλεί συμπύκνωση τάσεως σε φέρουσες τάσεις στρωμάτων, και τοπική αστάθεια που οδηγεί στην ανάπτυξη

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

απολέπισης/αποελασματοποίησης η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αποτυχία θραύσης του ελασματοποιημένου υλικού. (htt3)



Εικόνα 47 Φαινόμενο απολέπισης

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

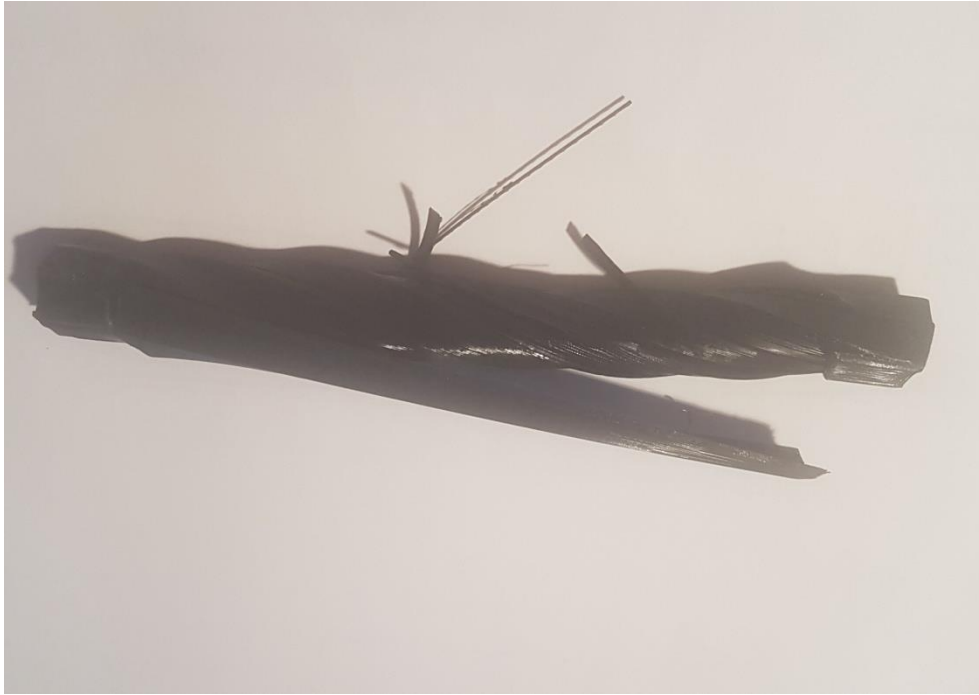
Δοκίμιο Νο2:



Εικόνα 48 Φαινόμενο απολέπισης

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

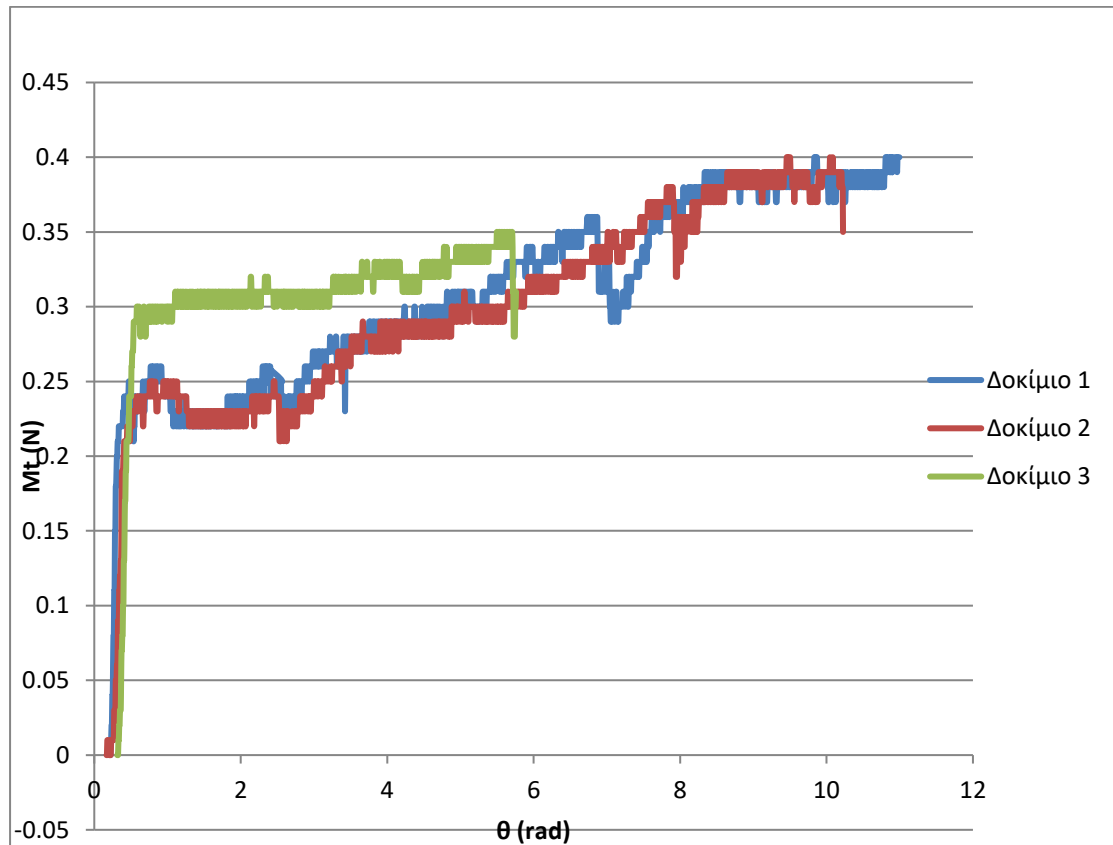
Δοκίμιο Νο3:



Εικόνα 49 Φαινόμενο απολέπισης

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Από τις μετρήσεις που ελήφθησαν για το κάθε δοκίμιο, δημιουργήθηκε ένα μαζικό διάγραμμα Ροπής M_t (για τον y άξονα) και Ακτινίων rad (για τον x άξονα), όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 50 Μαζικό διάγραμμα Ροπής M_t (για τον y άξονα) και Ακτινίων rad (για τον x άξονα), για το πείραμα της στρέψης με οριζόντια εκτυπωμένα δοκίμια

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Πείραμα εφελκυσμού:

Τυπολόγιο που χρησιμοποιήθηκε:

Η Ανοιγμένη παραμόρφωση σ υπολογίζεται με τη χρήση του τύπου $\sigma = \frac{F(N)}{A(m^2)}$, όπου F η δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο, και $A = 0,12 * 0,08 = 0,096 m^2$ η επιφάνεια που υποβάλλεται σε εφελκυσμό.

Για την τάση ϵ χρησιμοποιήθηκε ο τύπος $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \%$, όπου Δl το μήκος που εφελκύστηκε και l_0 το ωφέλιμο μήκος.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 51 Μηχάνημα QUASAR 100 για το πείραμα του εφελκυσμού

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 52 Μηχάνημα QUASAR 100

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 53 Μηχάνημα Quasar 100 και τοποθετημένο το δοκίμιο πριν την έναρξη του πειράματος του εφελκυσμού

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Δοκίμιο Νο1:

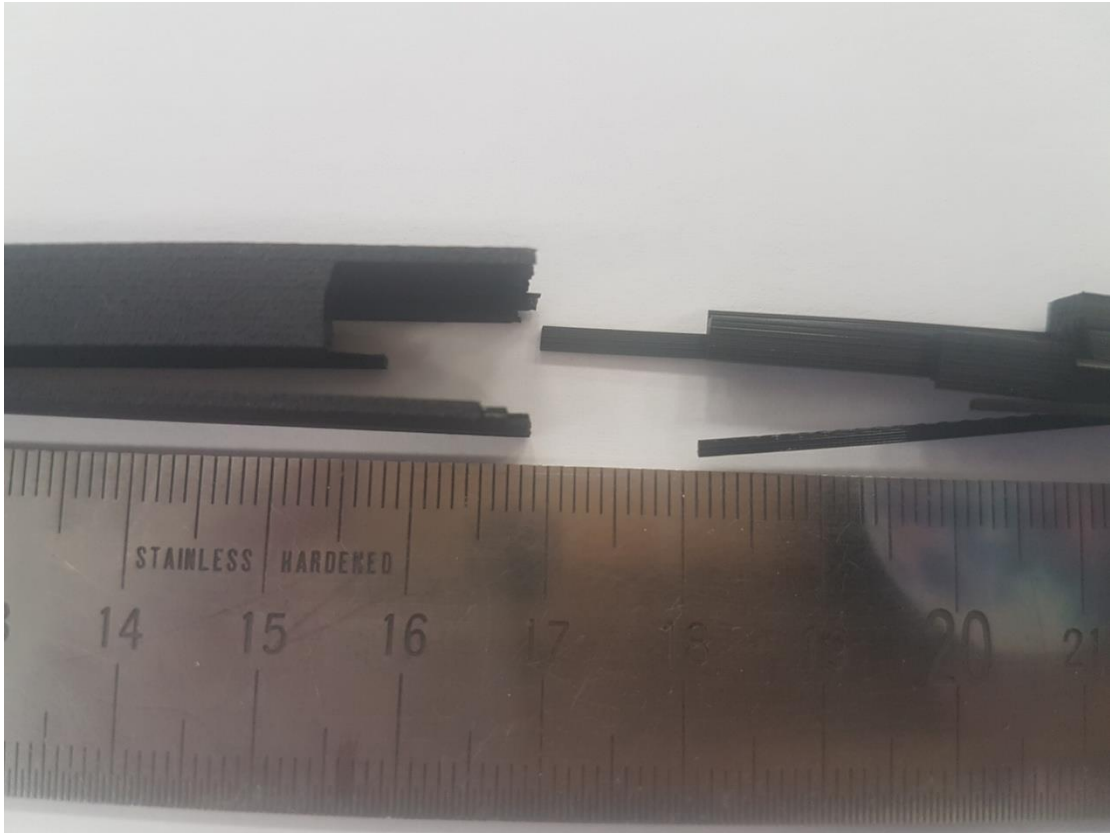
Με ωφέλιμο μήκος $l_0=80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$ και

ρυθμό φόρτισης $\dot{\epsilon}= 10^{-1} \text{sec}^{-1}$



Εικόνα 54 Εφελκυσμός - θραύση δοκμίου

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 55 Δοκίμιο μετά τον εφελκυσμό

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Δοκίμιο Νο2:

Με ωφέλιμο μήκος $l_0=78 \text{ mm} = 0,078 \text{ m}$ και ρυθμό φόρτισης $\dot{\epsilon}= 10^{-1}\text{sec}^{-1}$

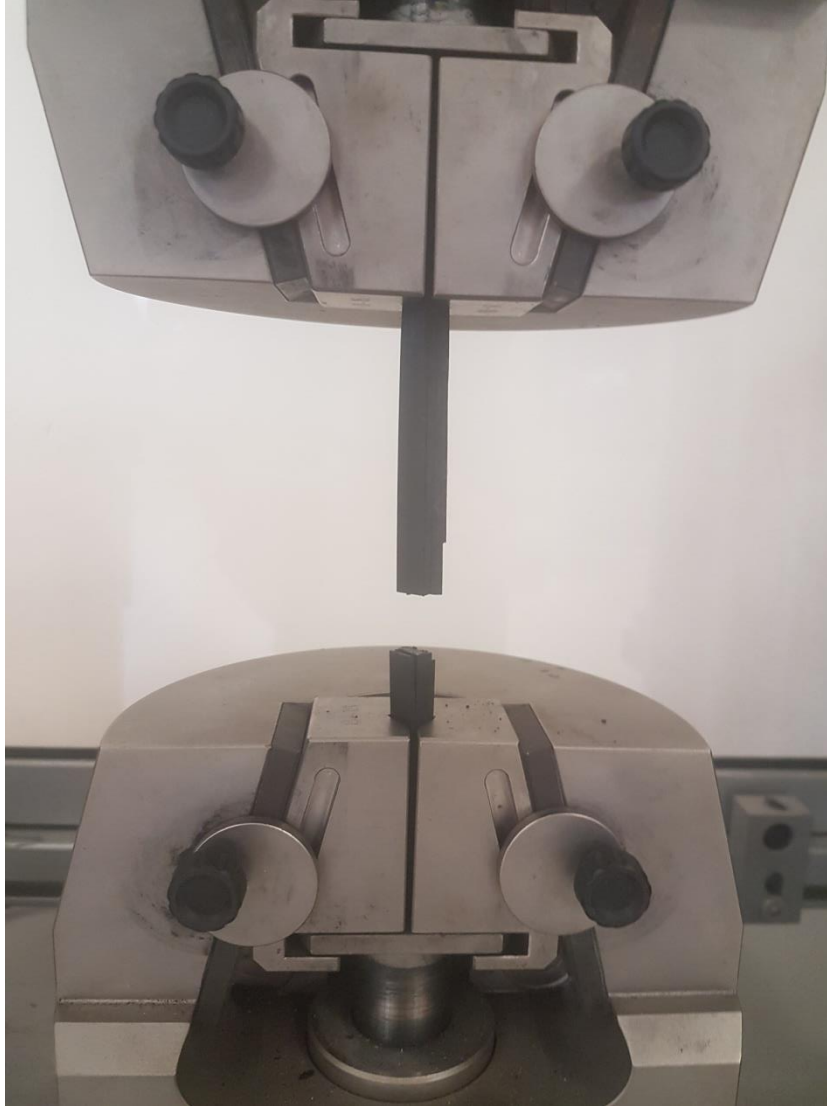


Εικόνα 56 Τελικό αποτέλεσμα εφελκυσμού - θράυση δοκιμίου

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Δοκίμιο Νο3:

Με ωφέλιμο μήκος $l_0=83 \text{ mm} = 0.083 \text{ m}$ και ρυθμό φόρτισης $\dot{\epsilon} = 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$



Εικόνα 57 Αποτέλεσμα εφελκυσμού - θραύση δοκιμίου

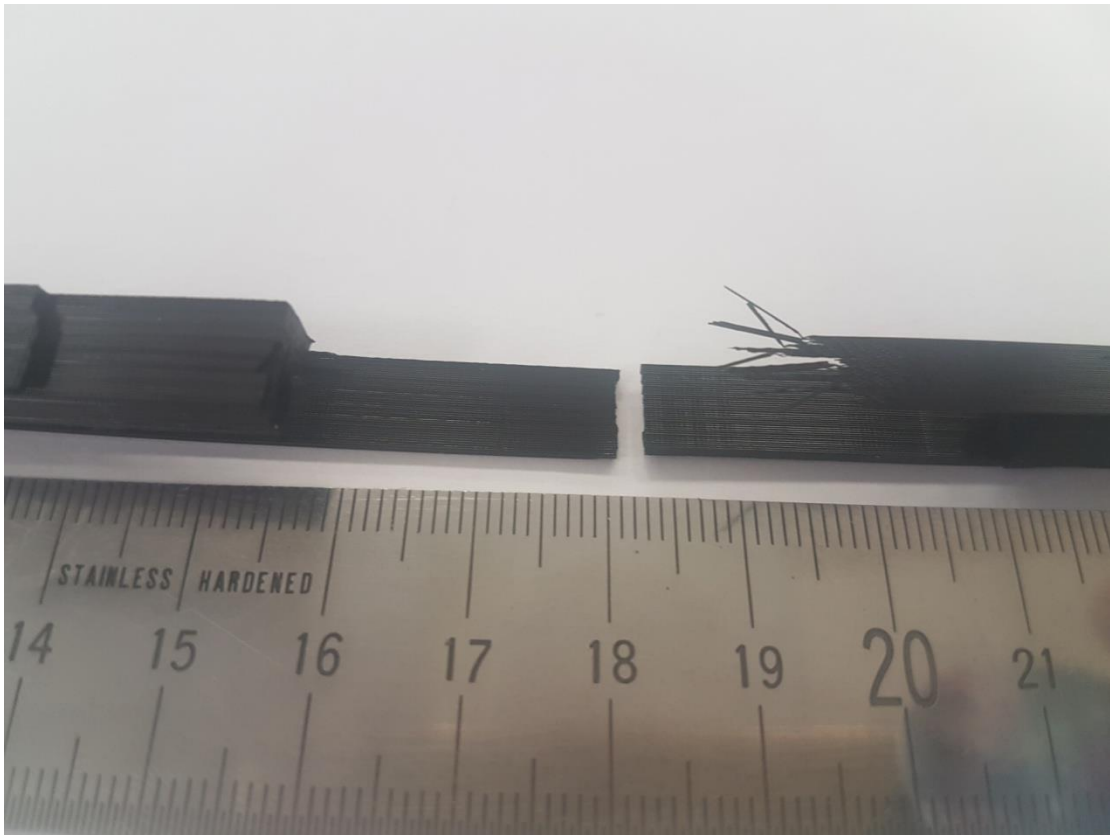
Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Δοκίμιο Νο4:

Με ωφέλιμο μήκος $l_0=70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$ και ρυθμό φόρτισης $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{sec}^{-1}$

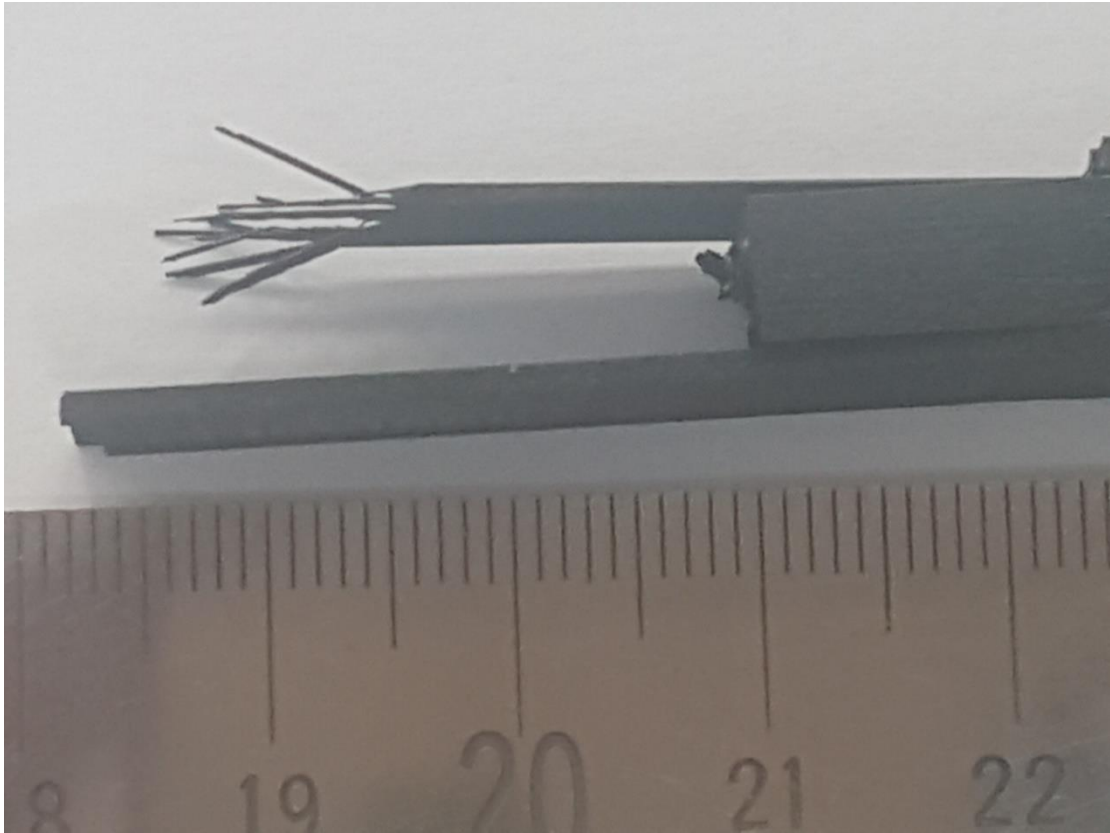
Δοκίμιο Νο5:

Με ωφέλιμο μήκος $l_0=84 \text{ mm} = 0.084 \text{ m}$ και ρυθμό φόρτισης $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{sec}^{-1}$



Εικόνα 58 Δοκίμιο μετά τον εφελκυσμό

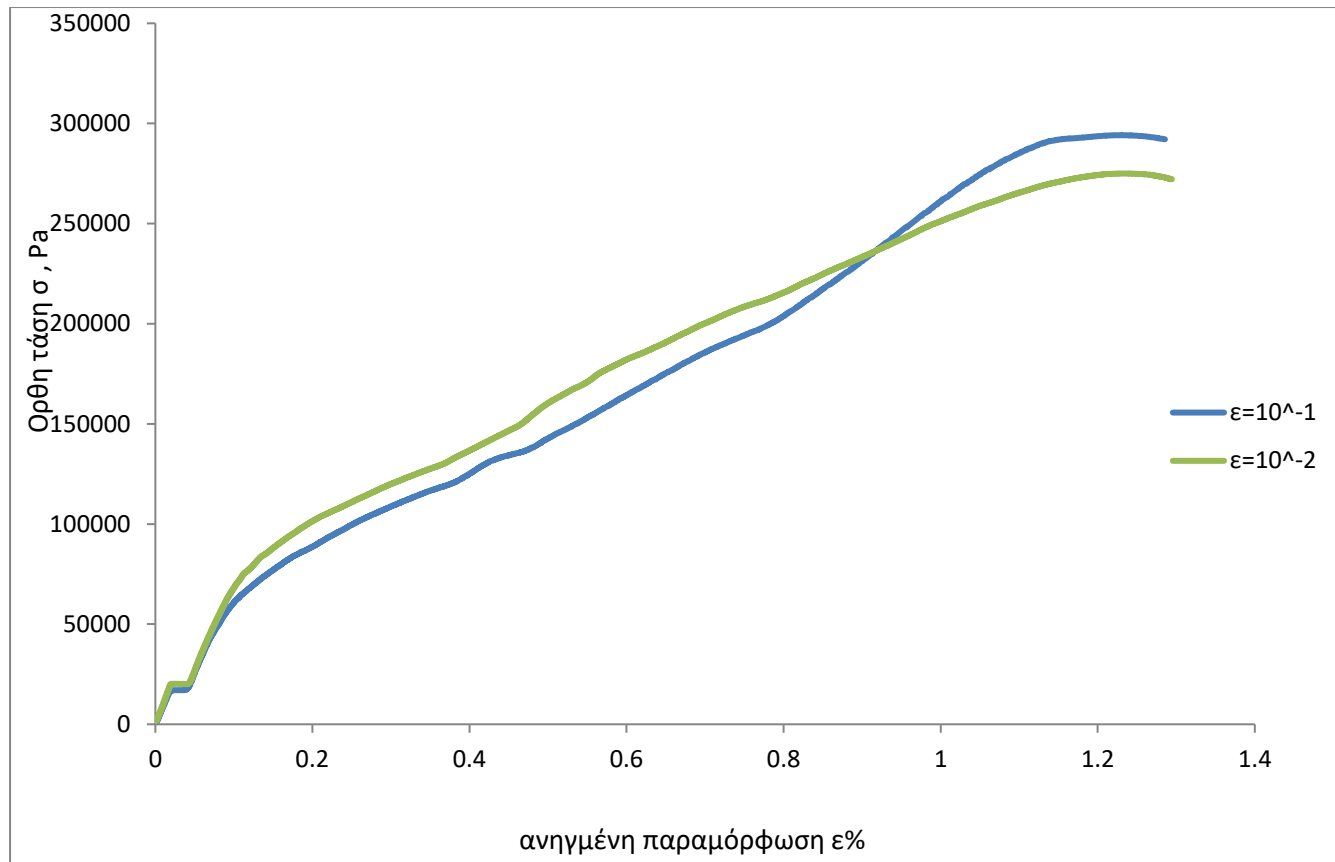
Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκίμια προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 59 Δοκίμιο μετά τον εφελκυσμό

Από τις μετρήσεις που ελήφθησαν για το κάθε δοκίμιο, δημιουργήθηκε ένα μαζικό διάγραμμα Ορθής Τάσης σ (για τον y άξονα) και Ανοιγμένης παραμόρφωσης ϵ (για τον x άξονα), όπως φαίνεται παρακάτω. Το διάγραμμα με την μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει τα δοκίμια 1 2 και 3, και με την πράσινη τα δοκίμια 4 και 5. Αυτή η ομαδοποίηση έγινε διότι τα χαρακτηριστικά των πέντε (5) δοκιμών είναι τα ίδια, και το μόνο που αλλάζει είναι ο ρυθμός φόρτισης έ στα δύο τελευταία.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.



Εικόνα 60 Διάγραμμα σ - ϵ

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Κεφάλαιο 6ο

Συζήτηση

Εφελκυσμός:

Όλα τα δοκίμια που δημιουργήθηκαν έχουν στο εσωτερικό τους πολυστρώματα υλικού (infill) στα οποία αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις λόγω της επιβαλλόμενης φόρτισης, οι οποίες προκαλούν θραύση.

Δοκίμιο Νο1: Έσπασε γρήγορα, πιθανόν το πείραμα να έγινε λάθος.

Δοκίμιο Νο2: παρατηρείται μεγάλη διαφορά από το Δοκίμιο Νο1. Λόγω διάτμησης υπήρξε αποκόλληση των πολυστρωμάτων . Οι ορθές τάσεις γίνονται διατμητικές. Συμπεραίνουμε ότι η μία στρώση με την άλλη δεν έχουν υψηλή αντοχή σε πρόσφυση.

Δοκίμιο Νο3: έσπασε γρήγορα σε δύο (2) κομμάτια. Από το διάγραμμα παρατηρείται πως υπάρχει διαφορά με το Δοκίμιο Νο2 περίπου 400Nt.

Δοκίμιο Νο4: έγινε αλλαγή στον ρυθμό φόρτισης για να δούμε πόσο θα επηρεάσει η ενδοτράχυνση. Από το διάγραμμα παρατηρείται πως έχει λιγότερη αντοχή.

Δοκίμιο Νο5: : έσπασε σε δύο (2) κομμάτια. Έγινε αλλαγή στον ρυθμό φόρτισης για να δούμε πόσο θα επηρεάσει η ενδοτράχυνση.

Εμφανίζεται πλαστικότητα στα δοκίμια.

Υπάρχει παραμόρφωση με μέγιστη τάση της τάξης των 27KPa.

Το δοκίμιο με το γρηγορότερο ρυθμό φόρτισης έδειξε μεγαλύτερο UTS λόγω γρηγορότερου ρυθμού φόρτισης.

Η εικόνα 60 απεικονίζει τη συμπεριφορά σε μονοαξονικό εφελκυσμό υπό διαφορετικούς ρυθμούς ανηγμένης παραμόρφωσης (10^{-1}sec^{-1} και 10^{-2}sec^{-1}) δύο (2) δοκιμίων τρισδιάστατης εκτύπωσης . Τα δοκίμια αποτελούνται

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμια προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

από το ίδιο υλικό και οι συνθήκες εκτύπωσής τους είναι όμοιες, Όπως παρατηρείται από τις δύο (2) καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, το δοκίμιο με τον υψηλότερο ρυθμό ανηγμένης παραμόρφωσης εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή μεγίστου ορίου αντοχής και ορίου θραύσεως από το αντίστοιχο με το χαμηλότερο ρυθμό ανηγμένης παραμόρφωσης.

Σε ότι αφορά την ολκιμότητα των δοκιμίων, η αλλαγή του ρυθμού ανηγμένης παραμόρφωσης φαίνεται να μην επηρέασε την ολκιμότητα θραύσης των. Από το διάγραμμα επίσης παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι το μέτρο ελαστικότητας των δύο (2) δοκιμίων είναι ακριβώς το ίδιο.

Στρέψη:

Εμφανίστηκαν μέγιστες τάσεις όπως ήταν προβλεπόμενο στο εξωτερικό της περιφέρειας για αυτό και η αστοχία ξεκίνησε από την περιφέρεια προς το κέντρο για αυτό το λόγο δεν κόπηκαν, παρ'όλο που οι εξωτερικές στιβάδες υπέστησαν θραύση, γιατί η μεγαλύτερη αντοχή της ήταν μικρότερη από την επιβαλλόμενη διατμητική τάση.

Γενικά:

Από τον πίνακα στατιστικών παρατηρούμε ότι η κάθετη τοποθέτηση του αντικειμένου προς εκτύπωση είναι πιο χρονοβόρα διαδικασία.

Δοκίμια οριζόντιας εκτύπωσης: κατά το πείραμα της στρέψης παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια το φαινόμενο της απολέπισης (Delominate) λόγω των διατμητικών τάσεων που αναπτύχθηκαν λόγω στρέψης.

Δοκίμια κάθετης εκτύπωσης: δεν παρουσιάστηκε το φαινόμενο της απολέπισης, το δοκίμιο έσπασε στα δύο.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμια προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Για το πείραμα αυτό υποβάλλαμε πέντε (5) δοκίμια ορθογωνικής διατομής από υλικό PLA σε εφελκυσμό με τη χρήση του εφελκυστικού μηχανήματος GALDABINI που βρίσκεται στον χώρο του εργαστηρίου της Αντοχής των υλικών.

Με την βοήθεια του προγράμματος Graphwork 5 ελήφθησαν οι μετρήσεις για την δύναμη F (N) και το μήκος Δl (mm) και δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα για το κάθε πείραμα.

Προβλήματα κατά την εκτύπωση:

Κατά την μαζική κάθετη τύπωση τριών (3) εξαγωνικών δοκιμίων, μετά από αρκετή ώρα εκτύπωσης τα δοκίμια σιγά σιγά ξεκόλλησαν από το θερμαινόμενο κρεβάτι. Λόγω του ότι δεν έγινε «Διακοπή εκτύπωσης» έγκαιρα, ο εκτυπωτής συνέχισε να εκτυπώνει, μάταια μιν, και στο τέλος υπήρξε ένα αποτέλεσμα που θα το παρουσίαζε κανείς σαν «κουβάρι μαλλιά». Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι δεν είχε γίνει εκ νέου ευθυγράμμιση του θερμαινόμενου κρεβατιού με την μύτη εξώθησης του υλικού. Αυτό σημαίνει ότι πριν από κάθε εκτύπωση πρέπει να γίνεται σωστή ευθυγράμμιση του κρεβατιού για να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ή μπορεί να οφείλεται στη θερμοκρασία του θερμαινόμενου κρεβατιού ότι δεν επαρκούσε για να κρατήσει τα δοκίμια.

Κατά την μεταφορά του αρχείου από το Inventor στο Simplify 3D, εμφανίστηκε σφάλμα στο δεύτερο πρόγραμμα ενημερώνοντας ότι το αρχείο που μεταφέρθηκε είναι πολύ μικρό. Αυτό συνέβη διότι ναι μιν, σχεδιάστηκε σε χιλιοστά (mm), αλλά κατά την μεταφορά στις ρυθμίσεις ήταν περασμένες ίντσες (inch), και για αυτό το λόγο δεν μπορούσε να εμφανιστεί το αντικείμενο στο Simplify 3D.

Όταν μια εκτύπωση τελειώνει, χρειάζεται χρόνος γύρω στα δέκα (10) λεπτά μέχρις ότου να κρυώσει το αντικείμενο. Σε περίπτωση που τελειώσει η εκτύπωση,

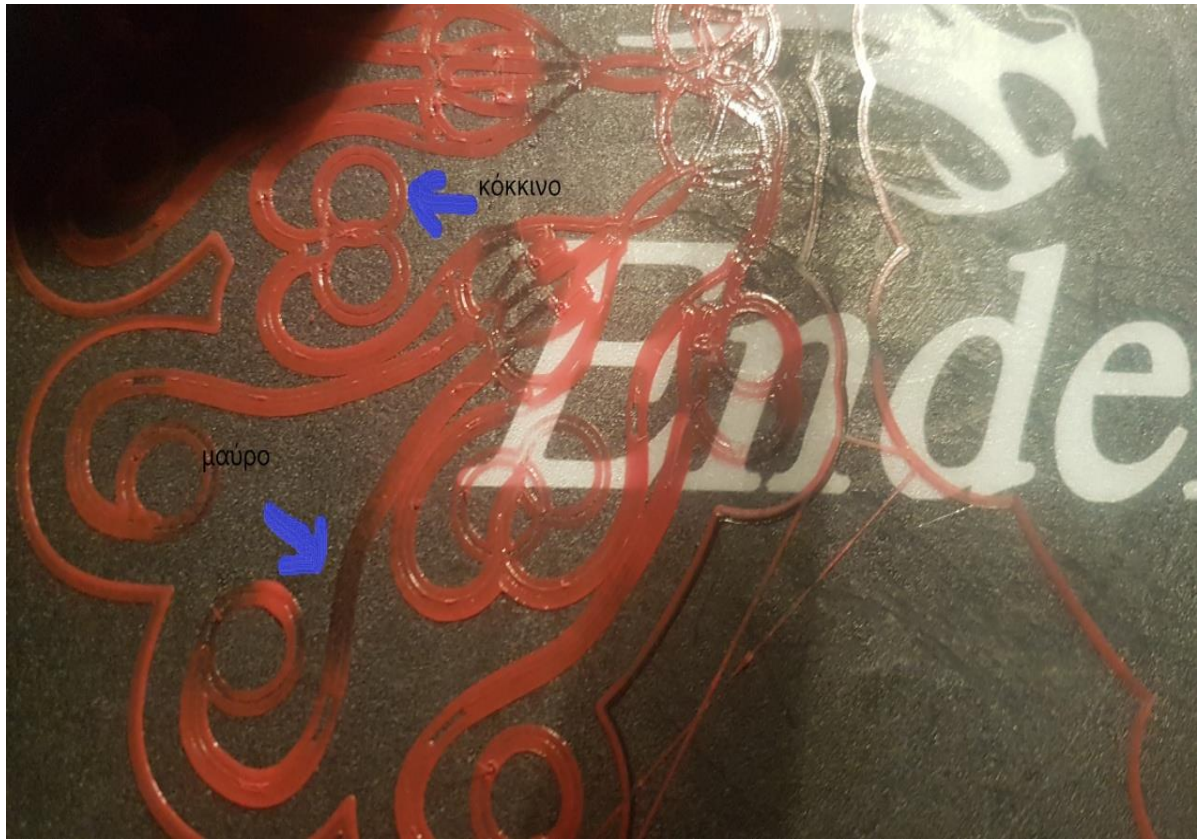
Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

και αφαιρέσει κανείς αμέσως το αντικείμενο από το θερμαινόμενο κρεβάτι, αυτό θα λυγίσει και θα κρυώσει απότομα, παίρνοντας κλίση, που σημαίνει ότι πρέπει να γίνει εκτύπωση εκ νέου.

Το θερμαινόμενο κρεβάτι πρέπει να έχει την κατάλληλη απόσταση από την μύτη εξώθησης του υλικού, έτσι ώστε όταν λιώνει το υλικό να πατάει κατευθείαν στην επιφάνεια και να σχηματίζεται το αντικείμενο.

Έστω ότι θέλει κανείς να αλλάξει υλικό (π.χ. από μαύρο σε κόκκινο): Στον εκτυπωτή υπάρχει ειδική επιλογή/εντολή η οποία ονομάζεται “Preheat PLA” (“Προθέρμανση PLA”), η οποία προθερμαίνει το υλικό στην μύτη εξώθησής του (φτάνει μέγιστη θερμοκρασία 185°C), για να μπορεί να αφαιρεθεί το υλικό. Αν παραβλεφθεί αυτό το βήμα, δεν θα είναι εφικτή η απομάκρυνση του υλικού, διότι μέσα είναι παγωμένο και στερεό. Στη συνέχεια περνάμε το υλικό στην κατάλληλη υποδοχή και διαμέσου ενός σωλήνα το ωθούμε να πάει ως την μύτη (nozzle). Επίσης, υπάρχει πιθανότητα κατά την εκτύπωση του αντικειμένου στις πρώτες στρώσεις να διακρίνουμε και τα δύο (2) χρώματα σε μία στρώση.

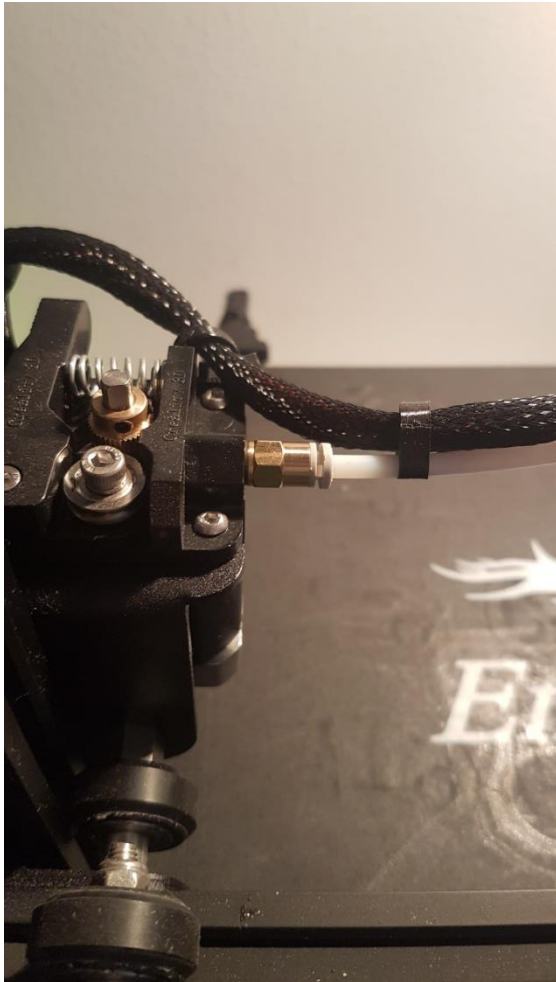
Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.



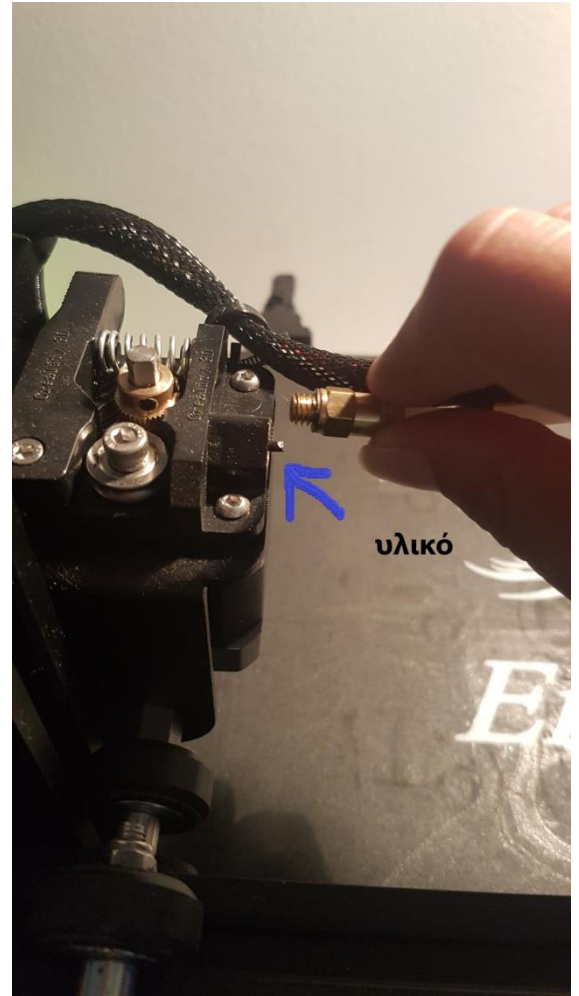
Εικόνα 61 Παράδειγμα δύο (2) χρωμάτων - Ender 3 Pro

Για την τοποθέτηση του υλικού στο σωληνάκι που οδηγεί στην μύτη, υπάρχει περίπτωση να έχει περάσει από μία οπή, αλλά δεν μπορεί να μετακινηθεί προς το σωληνάκι, έτσι πρέπει να ξεβιδωθεί το σημείο σύνδεσης, κεφαλής – σωλήνα, έτσι ώστε να περαστεί χειροκίνητα και μετά να βιδωθεί πάλι.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμαία προσθετικών
κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive
Manufacturing (AM) specimens.



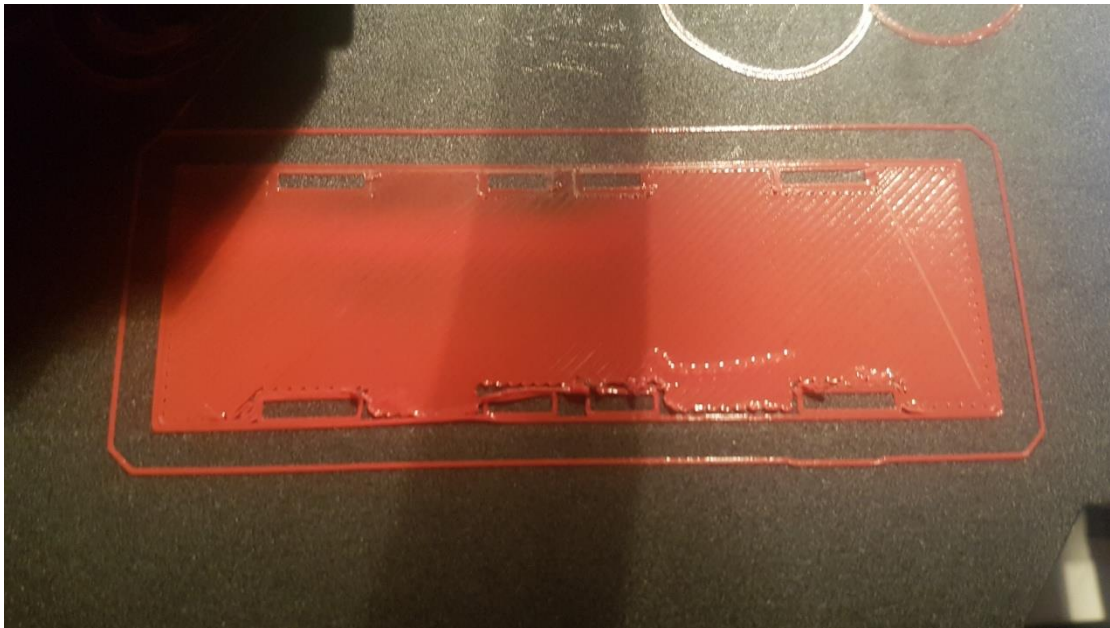
Εικόνα 62 Ender 3 Pro Σύνδεση κεφαλής σωληνάκι



Εικόνα 63 Ender 3 Pro υλικό

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Όταν φτάσει η στιγμή για την αφαίρεση του εκτυπωμένου αντικειμένου από το θερμαινόμενο κρεβάτι, φέρνουμε προς το μέρος μας το κρεβάτι, το βγάζουμε από την επιφάνεια και το λυγίζουμε και παίρνουμε το τελικό αποτέλεσμα. Σε περίπτωση που δεν είναι εύκολη η αφαίρεση με το χέρι, χρησιμοποιούμε μία σπάτουλα και αφαιρούμε σιγά σιγά από όποια άκρη του αντικειμένου είναι πιο εύκολο, με προσοχή να μην φθείρουμε το κρεβάτι. Με τον καιρό και με τις πολλές εκτυπώσεις είναι απαραίτητη η αντικατάστασή του, διότι μπορεί να συναντήσουμε πρόβλημα με την εκτύπωση άλλων αντικειμένων. Ένα παράδειγμα είναι ότι κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, στις πρώτες στρώσεις, υπάρχει πιθανότητα να περάσει η μύτη από το θερμαινόμενο κρεβάτι με το υλικό αλλά το κρεβάτι να μην μπορεί να «κρατήσει» το υλικό.

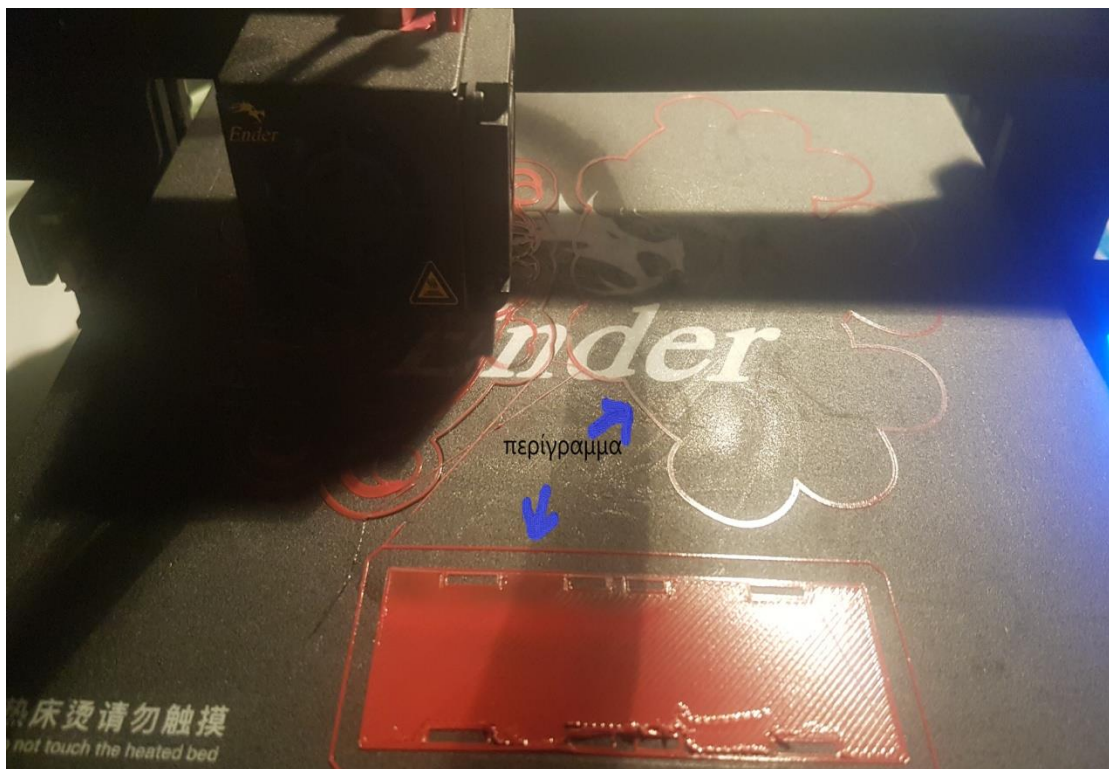


Εικόνα 64 Σφάλμα εκτύπωσης στις πρώτες στρώσεις - Ender 3 Pro

Όταν αρχίζει η εκτύπωση, το πρώτο στάδιο είναι η δημιουργία του περιγράμματος του προς εκτύπωση αντικειμένου. Στο τέλος της εκτύπωσης και αφαίρεσης του αντικειμένου από το κρεβάτι, πρέπει να αφαιρεθεί και το περίγραμμά του. Για την εύκολη και γρήγορη αφαίρεσή του, ψεκάζουμε με ειδικό υγρό (Ισοπροπυλική αλκοόλη της εταιρίας Chemco), το οποίο δεν καταστρέφει/φθείρει το θερμαινόμενο κρεβάτι, και με την βοήθεια της σπάτουλας,

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

αφαιρούμε το περίγραμμα. Χρειάζεται προσοχή γιατί δεν είναι φιλικό προς τον ανθρώπινο οργανισμό, έχει έντονη μυρωδιά, που σημαίνει ότι δεν πρέπει να ψεκάσουμε αλόγιστα. Είναι επιθυμητή η χρήση μάσκας. Μάλιστα, ο ψεκασμός και η αφαίρεση πρέπει να γίνονται όσο το δυνατόν ταυτόχρονα και γρήγορα , γιατί το υγρό στεγνώνει γρήγορα πάνω στο θερμαινόμενο κρεβάτι.



Εικόνα 65 Ender 3 Pro Περίγραμμα

Για τη τοποθέτηση του εκτυπωτή μέσα στο σπίτι, είναι προτιμότερο να τοποθετηθεί σε χώρο εκτός του υπνοδωματίου, διότι οι εκτυπωτές είναι, συνήθως, θορυβώδης, και κατά τη διάρκεια μιας εκτύπωσης απλώνονται στον χώρο διάφορες μυρωδιές της καύσης του υλικού, οι οποίες μπορεί να αποδειχθούν βλαβερές για τον ανθρώπινο οργανισμό.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής Ender 3 Pro της Creality, ο οποίος μπορεί να εκτυπώσει διαστάσεις 220 mm * 220 mm * 250 mm. Υπάρχουν διάφορων μεγεθών εκτυπωτές. Αν επιθυμεί κανείς να δημιουργήσει ένα μεγαλύτερο αντικείμενο, με έναν τέτοιο εκτυπωτή, πρέπει να δημιουργήσει στο σχεδιαστικό πρόγραμμα ένα συναρμολόγημα (assembly). Έτσι, θα εκτυπωθούν ξεχωριστά σε κομμάτια, και εν συνεχεία θα συναρμολογηθούν ή θα κολληθούν και θα βγει το τελικό αποτέλεσμα.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Bibliography

[Online] <https://www.instron.us/en-us/testing-solutions/by-standard/astm/multiple-testing-solutions/astm-d3039?region=North%20America>.

www.astm.org/Standards/F2915.htm. [Online]

[Online] <https://www.youtube.com/watch?v=BMWTK2ZgJCM>.

[Online] <https://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/>.

[Online] <https://www.slideshare.net/soorajndt22/delamination-in-composites>.

A. Bagsik, V. Schoepner. 2011. mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with Ultem 9085, proceedings of the ANTEC, plastics: Annual technical conference proceedings. 2011.

A. Lanzotti, M. Grasso, G. Staiano, M. Martorelli. 2015. the impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3D printer. 2015, pp. 604-617.

A.K. Sood, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra. 2010. parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. 2010, pp. 287-295.

B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, T. Letcher. 2016. failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation. 2016, pp. 467-481.

B. Wittbrodt, J.M. Pearce. 2015. the effects of PLA color on material properties of 3D-printed components. 2015, pp. 110-116.

B.M. Tymark, M. Kreiger, L.M. Pearce. 2014. mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. 2014, pp. 242-246.

C. Ziemian, M. Sharma, S. Ziemian. intechopen. [Online] <http://www.intechopen.com/books/mechanical-engineering/anisotropicmechanical-properties-of-abs-parts-fabricated-by-fused-deposition-modeling>.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

Cantrell, J. 2015. experimental characterization of the mechanical properties of 3D printed ABS and polycarbonate parts. 2015, pp. 110-116.

Cesar Omar Balderrama-Armendariz, Eric MacDonald, David Espalin, David Cortes-Saenz, Ryan Wicker, Aide Maldonado Macias. 2018. Torsion analysis of the anisotropic behavior of FDM. 10 Ιανουάριος 2018.

D. Groccolo, M. De agostinis, G. Olmi. 2013. experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behavior of fused deposition processed parts made of ABS-M30. 2013, pp. 506-518.

E. Fodran, M. Koch, U. Menon. 1996. mechanical and dimensional characteristics of fused deposition modeling build styles, Solid freeform fabrication proceedings. 1996.

F. Gorski, R. Wichniarek, W. Kuezko, J. Andrzejewski. 2015. experimental determination of critical orientation of ABS parts manufactured using fused deposition modelling technology. 2015, pp. 121-132.

F. Knoop, V. Schoeppner. 2015. mechanical and thermal properties of FDM parts manufactured with polyamide 12, solid freeform fabrication symposium. 2015, pp. 935-948.

G.C. Onwubolu, F. Rayegani. [Online] <http://doi.org/10.1155/2014/598531>.

H. Li, T. Wang, J. Sun, Z. Yu. 2018. The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties. 2018, pp. 80-92.

I. Durgun, R. Ertan. 2014. experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. 2014, pp. 228-235.

Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. 2017. τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. σ.λ. : Κριτική, 2017, pp. 329-350.

—. **2017.** *Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής - Τρισδιάστατη εκτύπωση, ταχεία πρωτοτυποποίηση και άμεση ψηφιακή κατασκευή.* Αθήνα : Κριτική, 2017.

interek. [Online] <file:///C:/Users/User/Desktop/23-5-19/Testing%20for%20Tensile%20Properties.pdf>.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

J. Torres, M. Cole, A. Owji, Z. DeMastry, A.P. Gordon. 2016. an approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. 2016, pp. 387-404.

J.F. Rodriguez, J.P. Thomas, J.E. Renaud. 2001. mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. *experimental investigation*. 2001, pp. 148-158.

J.M. Chacon, M.A. Caminero, E. Garcia-Plaza, P.J. Nunez. 2017. additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effects of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. 2017, pp. 143-157.

John Ryan C. Dizon, Alejandro H. Espera Jr., Qiyi Chen, Rigoberto C. Advincula. mechanical characterization of 3D-printed polymers. [Online] file:///C:/Users/User/Desktop/1-s2.0-S2214860417302749-main.pdf.

—. **2018.** Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Elsevier*. 2018.

K. Sood, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra. 2012. experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. 2012, pp. 81-90.

K. Szykiedans, W. Credo. 2016. mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3D-prints. 2016, pp. 257-262.

K.L. Alvarez, R.F. Lagos, M. Aizpun. 2016. Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. s.l. : 110-116, 2016.

M. Bertoldi, M. Yardimci, C. Pistor, S. Guceri, G. Sala. 1998. mechanical characterization of parts processed via fused deposition. *Proceedings of solid freeform Fabrication*. 1998, pp. 557-565.

M. Berzal, C. Barajas, D. del Mazo, J. Caja, P. Maresca. 2017. simple filling patterns to model mechanical behaviour of FDM's test pieces under torsion. *ScienceDirect*. 2017.

M. Domingo-Espin, J.M. Puigoriol-Forcada, A.A. Garcia-Granada, J.L.S. Borros, G. Reyes. 2015. mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling polycarbonate parts. 2015, pp. 670-677.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz, A. Conejero. 2016. effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. 2016, pp. 183-192.

M. Uddin, M. Sidek, M. Faizal, R. Ghomashchi, A. Pramanik. 2017. evaluating mechanical properties and failure mechanisms of fused deposition modeling acrylonitrile butadiene styrene parts. 2017.

M.S. Hossain, et al. 2013. improving tensile mechanical properties of FDM - manufactured specimens via modifying build parameters. *solid freeform fabrication proceedings*. 2013, pp. 380-392.

Motaparti, K.P. 2016. Effect of Build Parameters on Mechanical Properties of Ultem 9085 Parts by Fused Deposition Modeling. *Masters Theses*. 2016.

N.G. Tanikella, B. Wittbrodt, J.M. Pearce. 2017. tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication. 2017, pp. 40-47.

O.S. Es-Said, J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth, B.A. Pregger. 2000. effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. 2000, pp. 107-122.

phenix. Metal RP technology. [Online] www.phenix-systems.com.

Q. Sun, G.M. Rizvi, C.T. Bellehumeur, P. Gu. 2008. effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. 2008, pp. 72-80.

R. Hernandes, D. Slaughter, D. Whaley, J. Tate, B. Asiabanpour. 2016. analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling. 2016, pp. 939-950.

R.J. Zaldivar, et al. 2017. influence of processing and orientation print effects on the mechanical and thermal behavior of 3D printed ULTEM 9085 material. 2017, pp. 71-80.

S. Xiaoyong, C. Liangcheng, M. Honglin, G. Peng, B. Zhanwei, L. Cheng. 2017. experimental analysis of high temperature PEEK materials on 3D printing test. 2017, pp. 13-16.

S. Ziemian, M. Okwara, C.E. Ziemian. 2015. tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene. 2015, pp. 270-278.

Διεξαγωγή πειραμάτων για δοκιμα προσθετικών κατεργασιών.-Conducting experiments on Additive Manufacturing (AM) specimens.

S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, P.K. Wright. 2002. anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, rapid prototyping J. 8. 2002, pp. 248-257.

T. Lechter, B. Rankouhi, S. Javadpour. 2015. experimental study of mechanical properties of additively Manufactured abs plastic as a function of layer parameters. 2015.

X. Deng, et al. 2018. mechanical properties optimization of poly-ether-ether-ketone via fused deposition of modeling. 2018, pp. 1-11.

Χαρώνης, Παναγιώτης Γ. 2002. αντοχή των υλικών. σ.λ. : σύγχρονη εκδοτική, 2002.