



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

# Αξιολόγηση των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης BMD και Binder Jetting για την κατασκευή μεταλλικών μητρών συνεχούς διέλασης σύρματος χαλκού.

Διπλωματική εργασία του  
Παναγιώτη Κοντακσή

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2024

## Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των μεθόδων προσθετικής κατασκευής Binder Jetting και Bound Metal Deposition, ως προς την κατασκευή μητρών συνεχούς διέλασης χαλκού. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια εκτενής ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τις διεργασίες διέλασης, επισημαίνοντας τις ιδιαιτερότητες της συνεχούς διέλασης και παρουσιάζοντας προηγούμενες μελέτες επάνω στην κατασκευή εργαλείων με τη χρήση μεθόδων προσθετικής κατασκευής. Στη συνέχεια, εξετάστηκαν διάφορες κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλου, κάνοντας ανάλυση της αρχής λειτουργίας τους, των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους. Μήτρες και δοκίμια σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με τις μεθόδους Binder Jetting και Bound Metal Deposition. Στα εκτυπωμένα εξαρτήματα έγιναν εργαστηριακές μετρήσεις για προσδιορισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών (τραχύτητα, γεωμετρικές - διαστασιολογικές ανοχές) και των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Βάση αυτών των μετρήσεων, σε συνδυασμό με αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και οικονομικής μελέτης ήρθαμε σε θέση να εξάγουμε συμπεράσματα για την επίδοση των εκτυπωμένων εξαρτημάτων κατά τη διέλαση και τις περιπτώσεις στις οποίες η χρήση προσθετικής κατασκευής για την παραγωγή εργαλείων διέλασης είναι οικονομοτεχνικά δικαιολογημένα.

## Abstract

The aim of this thesis is to evaluate the additive manufacturing techniques of Binder Jetting and Bound Metal Deposition, in terms of the fabrication of continuous copper extrusion dies. Initially, a thorough review of the literature on extrusion processes was carried out, highlighting the particularities of continuous extrusion and presenting previous studies on additive manufactured extrusion tooling. Next, various categories of metal 3D printing were examined, with an analysis of their function, advantages and limitations. Dies and samples were designed and fabricated using Binder Jetting and Bound Metal Deposition techniques. The printed components underwent laboratory testing to evaluate their morphological attributes (such as roughness and dimensional accuracy) and mechanical properties. Based on these assessments, combined with finite element analysis and economic evaluation, conclusions were drawn regarding the performance of printed components during extrusion and the circumstances under which utilizing additive manufacturing for producing extrusion tools is technically and economically viable.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, φτάνω στην κατακλείδα των προπτυχιακών σπουδών μου. Όντας σε αυτό το σημείο νιώθω υπόχρεος να ευχαριστήσω όλα τα άτομα που με βοήθησαν να φτάσω μέχρι εδώ και να γίνω ένας εν δύναμει μηχανικός.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Βασίλειο Σπιτά, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την υποστήριξη που έλαβα κατά την διάρκεια την διπλωματικής μου αλλά και των σπουδών μου γενικότερα. Ο ζήλος που έδειχνε στην εργασία του, σε συνδυασμό με τη βαθιά του γνώση αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για μένα και τους συμφοιτητές μου. Δεν έχω τρόπο να μετρήσω τα πράγματα που κέρδισα από τις συζητήσεις μαζί του αλλά του είμαι πραγματικά ευγνώμων.

Ευχαριστώ το Χρήστο Παπαλέξη, ο οποίος με καθοδήγησε καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου. Είμαι πολύ ευχαριστημένος από την συνεργασία μας, ήταν πάντα εκεί για να με βοηθήσει και θεωρώ ότι η συμβολή του ήταν πολύτιμη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Λευτέρη Χαβούζη, διευθύνων σύμβουλο της Lino 3D, για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε και τη χορηγία των εκτυπωμένων εξαρτημάτων.

Επιπλέον ευχαριστώ τον κύριο Νίκο Πετρόπουλο, την κυρία Ευαγγελία Κοντού και τον Δημήτρη Κρυφό για την υποστήριξή τους στην διεξαγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων.

Τέλος, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια, τους φίλους και τους συμφοιτητές μου οι οποίοι με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στη μνήμη του Χρήστου Βακουφτή.  
Μακάρι το όνομά του να ήταν στις ευχαριστίες...

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	1
Abstract.....	1
Ευχαριστίες.....	2
Εισαγωγή.....	6
Διέλαση .....	8
Θερμή διέλαση .....	8
Ψυχρή διέλαση .....	9
Λόγος διέλασης.....	9
Συνεχής διέλαση (Conform Process) .....	9
Αρχή λειτουργίας .....	9
Περίπτωση Cablel .....	10
Μήτρες Διέλασης από προσθετικές κατεργασίες.....	11
Τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου .....	14
Εκτύπωση με σύντηξη σε κλίνη κόνεος (Powder bed fusion - PBF).....	14
Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (Direct Energy Deposition - DED)..	15
Μέθοδοι εκτύπωσης με βάση την πυροσυσσωμάτωση(Sinter Based AM).....	16
Μέθοδοι ψυχρού ψεκασμού / υπερηχητική 3d εναπόθεση (Cold Spray Additive Manufacturing/ supersonic 3d deposition) .....	17
Κατασκευή τεμαχίων με τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης .....	18
Προετοιμασία πριν την εκτύπωση .....	18
BMD (Studio System™ 2) .....	19
Binder Jetting (Shop System™) .....	22
Καλές πρακτικές κατά την σχεδίαση για εκτύπωση με Binder jetting.....	23
Αντίστροφη μηχανική Μήτρας .....	25
Περιγραφή μήτρας Cablel.....	25
Μέτρηση διαστάσεων & εκτίμηση ανοχών.....	25
Επιλογή υλικών .....	26
Σχεδιασμός μήτρας σε CAD και δημιουργία αρχείου STL.....	27
Μηχανικές δοκιμές .....	28
Σχεδιασμός πειραματικού προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων .....	28
Μηχανές εφελκυσμού .....	29
Σχεδιασμός Δοκιμίων.....	30
Πρότυπα.....	30
Πρώτα σχέδια δοκιμίων και προβλήματα πριν τη εκτύπωση.....	31

Δοκιμές εφελκυσμού σε υψηλή θερμοκρασία .....	34
Αποτελέσματα πειραμάτων .....	35
Προσομοίωση πυροσυσσωμάτωσης.....	38
Μεθοδολογία προσομοίωσης πυροσυσσωμάτωσης για αντιστάθμιση .....	38
Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	39
Προσομοίωση της Διέλασης και των φορτίων στην μήτρα. ....	45
Επίδραση της ταχύτητας του καλωδίου τροφοδοσίας .....	45
Επίδραση του αγωγού τροφοδοσίας .....	48
Προσομοίωση Διέλασης στο ANSYS .....	49
Διαδικασία μοντελοποίησης στο ANSYS .....	49
Εργαστηριακές μετρήσεις για την αξιολόγηση των μητρών.....	53
Μετρήσεις CMM.....	53
Μέτρηση Σκληρότητας .....	58
Περιγραφή σκληρομέτρησης.....	59
Μέτρηση Τραχύτητας.....	60
Εκτίμηση της σχετικής πυκνότητας .....	60
Ραδιογραφική απεικόνιση.....	63
Μεθοδολογία ραδιογραφίας.....	63
Κοστολόγηση μήτρας.....	68
Διάρκεια Ζωής Μήτρας.....	69
Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα .....	70
Βιβλιογραφία .....	72
Κατάλογος πινάκων .....	75
Κατάλογος εικόνων.....	77
Παράρτημα Α .....	81
Περιγραφή διαδικασίας προσομοίωσης στο Altair Inspire Print3D .....	81
Περιγραφή διαδικασίας προσομοίωσης στο Altair Inspire Extrude Metal .....	84
Μέρος Πρώτο: Προσομοίωση διέλασης συμπαγούς προφίλ.....	84
Μέρος Δεύτερο: Ανάλυση παραμόρφωσης εργαλείου.....	87
Παράρτημα Β .....	89
Σχέδια μετρήσεων CMM.....	89
Παράρτημα Γ.....	93

## Εισαγωγή

Η διέλαση είναι μια πολύ βασική οικογένεια κατεργασιών, μας δίνει πληθώρα προϊόντων από δομικά στοιχεία, μέχρι οδοντωτούς τροχούς και είναι ίσως ο πιο οικονομικός τρόπος κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων σε μεγάλη κλίμακα. Αντίθετα η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια συγκριτικά νέα τεχνολογία που ειδικεύεται σε ένα ακριβώς αντίθετο πεδίο εφαρμογών. Την κατασκευή μικρού πλήθους αντικειμένων έντονα προσαρμοσμένων στις απαιτήσεις του κάθε πελάτη. Γεννάται το ερώτημα τι πλεονεκτήματα θα μπορούσαν να επιτευχθούν από το συνδυασμό αυτών των δύο κατεργασιών. Αυτή δεν είναι μια καινούρια ιδέα, αξίζει να σχολιαστεί ότι η τεχνολογία FDM, η πιο διαδεδομένη μορφή τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι κατά ένα τρόπο μια μορφή διέλασης. Στη διπλωματική αυτή ωστόσο, η προσέγγισή μας στο ερώτημα αυτό, δεν γίνεται υπό αυτή τη σκοπιά. Αντίθετα διερευνάται αν η φιλοσοφία της ταχείας κατασκευής εργαλείων, που ήδη εφαρμόζεται ευρέως σε άλλες εφαρμογές, μπορεί να δώσει λύσεις και να εξελίξει τη διέλαση όπως γίνεται σήμερα. Τα αποτελέσματα της έρευνας, μας δίνουν στοιχεία για τις δυνατότητες των μεθόδων προσθετικής κατασκευής, μαζί με τα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς και τις ιδιαιτερότητες που προκύπτουν από την εισαγωγή τους στην παραγωγική διαδικασία. Από αυτά εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το αν, και υπό ποιες προϋποθέσεις, η μετάβαση από τις συμβατικές κατεργασίες στην τρισδιάστατη εκτύπωση έχει νόημα στην παραγωγή μητρών διέλασης.

Αφορμή του θέματος αποτέλεσε το συνέδριο IWCC, που έλαβε μέρος η εταιρία HALCOR, το Φεβρουάριο του 2024 στην Ιταλία. Σκοπός της Halcor ήταν να παρουσιάσει στο συνέδριο εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης εργαλείων στη θερμή και ψυχρή διέλαση.

Για την καλύτερη κατανόηση των εννοιών και των φαινομένων των δύο κύριων κατεργασιών που πραγματεύεται το θέμα έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση αυτών. Παρουσιάζονται τα είδη της διέλασης και οι παράμετροι που την επηρεάζουν και γίνεται εμβάθυνση στην υποκατηγορία της συνεχούς διάλυσης (Conform). Ακολουθως παρουσιάζονται οι σύγχρονοι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης μεταλλικών υλικών, η αρχή λειτουργίας και οι ιδιομορφίες τους.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση της καταλληλότητας μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλου, στην κατασκευή μητρών διέλασης χαλκού. Αυτό, στην συγκεκριμένη περίπτωση, θα γίνει εστιάζοντας στην αντικατάσταση των συμβατικών μητρών της κατεργασίας Conform με τρισδιάστατα εκτυπωμένες, με τις μεθόδους BMD και Binder Jetting. Η διπλωματική εστιάζει σε αυτό το συγκεκριμένο εξάρτημα διότι οι διαστάσεις του εξαρτήματος είναι μικρές, οπότε μας δίνεται η δυνατότητα για την κατασκευή πρωτοτύπων. Από τα οποία ωστόσο μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα και για μεγαλύτερες εφαρμογές. Επιπλέον το ρίσκο της αστοχίας του κατά τη λειτουργία και οι πιθανές επιπτώσεις είναι επίσης μικρές, οπότε δίνει την δυνατότητα για πειραματικές δοκιμές στην βιομηχανία.

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στην αξιολόγηση των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης που αναφέρθηκαν για την κατασκευή μητρών συνεχούς διέλασης και περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Αντίστροφο σχεδιασμό μήτρας διέλασης πλακέ καλωδίων (bus bar).
  - Εύρεση διαστάσεων, ανοχών και επιλογή υλικών .
- Κατασκευή αντιγράφων της μήτρας σε τρισδιάστατο εκτυπωτή μετάλλου.
- Εκτέλεση μηχανικών δοκιμών για την εύρεση των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.
- Έλεγχο αντοχής και φθοράς της μήτρας κατά τη λειτουργία, μέσω προσομοιώσεων, πειραμάτων και σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- Διαστασιολογικό έλεγχο της μήτρας και σύγκριση με προβλέψεις προγράμματος προσομοίωσης πυροσυσσωμάτωσης.

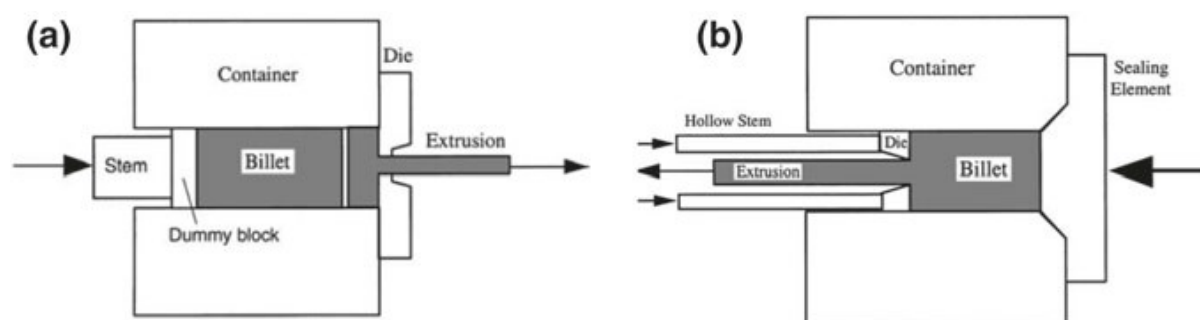
Εκτός πλαισίου της παρούσας εργασίας θεωρήθηκαν τα παρακάτω:

- Βελτίωση του σχεδιασμού για τρισδιάστατη εκτύπωση.
- Σχεδιασμός διατομής που να αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της ροής του χαλκού.
- Σχεδιασμός και ενσωμάτωση αγωγών θέρμανσης/ψύξης.
- Αυτοματοποίηση τρόπου λείανσης του εσωτερικού των μητρών .



## Διέλαση

Η διέλαση είναι μια κατεργασία διαμόρφωσης μέσω πλαστικής παραμόρφωσης, που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αντικειμένων σταθερού προφίλ, με ώθηση υλικού μέσα από μήτρα επιθυμητής διατομής. Τα κύρια πλεονεκτήματα που εμφανίζει, είναι η ικανότητα κατασκευής περίπλοκων διατομών με ικανοποιητική διαστατική ακρίβεια και χαμηλή τραχύτητα επιφανείας[1], [2]. Η διέλαση μπορεί να είναι συνεχής, θεωρητικά παράγοντας απεριόριστα μακρύ προϊόν ή ημι-συνεχής, παράγοντας πολλά διακριτά κομμάτια. Οι ταχύτητες πρόωσης του υλικού τροφοδοσίας φτάνουν μέχρι 0.5 m/s [1]. Οι μικρότερες ταχύτητες προτιμώνται για την κατεργασία μαλακών υλικών (Al, Mg, Cu), ενώ οι μεγαλύτερες τιμές για τα σκληρότερα υλικά (χάλυβες, πυρίμαχα κράματα). Όταν η μήτρα παραμένει σταθερή και το υλικό εμβολίζεται προς αυτή τότε η διέλαση λέγεται άμεση. Στην περίπτωση που η μήτρα είναι αυτή που κινείται τότε έχουμε έμμεση διέλαση. Τα φορτία άμεσης διέλασης είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της έμμεσης διέλασης διότι στην τελευταία οι τριβές είναι πολύ μικρότερες. Στην έμμεση διέλαση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος λόγος διέλασης και οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερες ταχύτητες κατεργασίας και χρήση μπαρών μεγαλύτερου μήκους.[1]



Εικόνα 1: Άμεση (a) και έμμεση(b) διέλαση[3]

Η διέλαση μπορεί να γίνει εν θερμώ ή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο χαρακτηρισμός της κατεργασίας γίνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του τεμαχίου κατά τη διεξαγωγή αυτής, λαμβάνονται υπόψη δύο χαρακτηριστικές θερμοκρασίες του κατεργαζόμενου υλικού:

- η θερμοκρασία τήξης,  $T_M$  και
- η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης,  $T_R = (0.4-0.5)T_M$

## Θερμή διέλαση

Θερμή χαρακτηρίζεται η διέλαση που πραγματοποιείται σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και κάτω από τη θερμοκρασία τήξης. Οι μεγάλες θερμοκρασίες κατεργασίας μειώνουν την τάση ροής ή την αντίσταση σε παραμόρφωση του υλικού. Χαρακτηριστικές θερμοκρασίες θερμής διέλασης για τα διάφορα υλικά είναι: 1200°C για το χάλυβα, 800°C για το χαλκό και 470°C για το αλουμίνιο και τα κράματά τους αντίστοιχα. Ωστόσο η θερμοκρασία κατεργασίας πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής πλαστικότητα στο υλικό και να μην προκαλείται θερμική συστολή. Επιπλέον οι υψηλές θερμοκρασίες εισάγουν προβλήματα οξειδωσης του κατεργαζόμενου υλικού και των εργαλείων διέλασης, προκαλώντας την εξασθένησή τους.

## Ψυχρή διέλαση

Ψυχρή ονομάζεται η διέλαση που εκτελείται κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Λόγω της κράτυνσης του υλικού που σημειώνεται σε κάθε ψυχρή κατεργασία, τα φορτία κατεργασίας είναι σχετικά υψηλά. Γι' αυτό πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή των διαφόρων μερών του εργαλείου διέλασης από απόψεως αντοχής. Προσοχή πρέπει να δίνεται στην ακριβή οδήγηση του εμβόλου προς αποφυγή λυγισμού ή θραύσης του. Ιδιαίτερη σημασία για την απρόσκοπτη εκτέλεση της ψυχρής διέλασης έχει το σύστημα λίπανσης. Χρησιμοποιούνται υψηλής πίεσης λιπαντικά και σάπωνες. Υλικά που έχουν την τάση να «κολλούν» στα τοιχώματα του εργαλείου καλύπτονται συνήθως με ελαφρά επικάλυψη από μαλακό υλικό (πχ. χαλκό, ή μαλακό χάλυβα) που εκτός από λιπαντικό λειτουργεί και ως προστατευτικό επίστρωμα έναντι της ατμόσφαιρας. Συχνά παρατηρείται σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας της τάξης των 500-600°C, λόγω της πρόσδοσης πλαστικού έργου[1], [3].

## Λόγος διέλασης

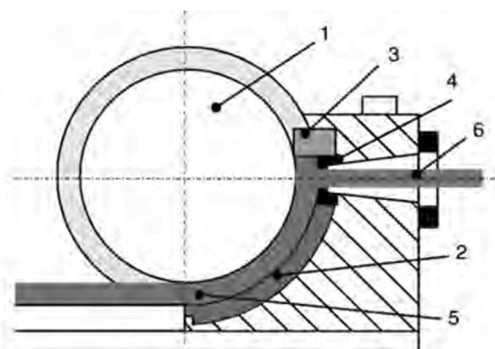
Ο λόγος διέλασης είναι ο λόγος της αρχικής διατομής ως προς την τελική μετά τη διέλαση. Σε μερικά μη σιδηρούχα κράματα μπορεί να φτάσει το 400 ενώ στους χάλυβες περιορίζεται μέχρι το 40[1].

## Συνεχής διέλαση (Conform Process)

Η κατεργασία συνεχούς διέλασης (Conform) είναι μια υποκατηγορία διέλασης, η οποία αναπτύχθηκε το 1972 από το Advanced Metal Forming Group of the Springfield Nuclear Laboratories[3]. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συνεχή διέλαση στερεών ή κοίλων διατομών, για τη δημιουργία επικαλύψεων ή επενδύσεων ινών και καλωδίων από πολυμερή ή μέταλλα[3].

### Αρχή λειτουργίας

Η κατεργασία αξιοποιεί την περιστροφή ενός τροχού για να έλξει το υλικό τροφοδοσίας, που είναι σε μορφή καλωδίου, εντός της μηχανής. Ο περιστρεφόμενος τροχός έχει διάμετρο της τάξης των 500mm και στην περιφέρειά του υπάρχει μία εγκοπή. Το υλικό τροφοδοσίας έλκεται εντός της μηχανής από τη δύναμη τριβής που εμφανίζεται μεταξύ αυτού και της εγκοπής.

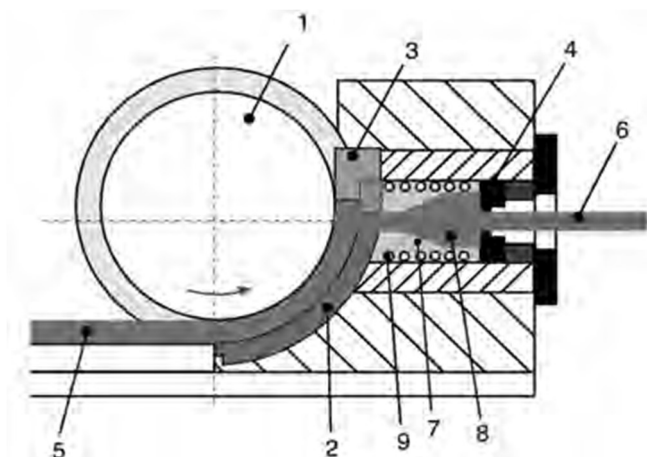


Εικόνα 2: Τα μέρη της Conform. 1: τροχός τριβής, 2: τμήμα σφράγισης(seal segment), 3:κομμάτι σφράγισης (sealing piece), 4: μήτρα, 5: πρώτη ύλη (σύρμα), 6: προφίλ[3]

Η εγκοπή περιορίζεται ακτινικά από ένα ειδικό τμήμα σφράγισης (νούμερο 3 στην εικόνα 2). Ο ρόλος της εγκοπής είναι να αυξάνει την επιφάνεια επαφής του καλωδίου τροφοδοσίας με τον τροχό ώστε να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την περιοχή επαφής τμήματος σφράγισης-υλικού. Έτσι η συνισταμένη δύναμη που προκύπτει από τη διαφορά τριβών που ασκούνται από αυτές τις περιοχές είναι αρκετή ώστε να ωθήσει το υλικό δια της μήτρας. Η εγκοπή που κλείνει από το τμήμα σφράγισης μπορεί να θεωρηθεί ως ένα περιστρεφόμενο δοχείο. Το υλικό που εξωθείται έλκεται σε αυτό το δοχείο από το τριβικό φορτίο του τροχού. Η εγκοπή κλείνει στο άλλο άκρο, έτσι ώστε το υλικό να μπορεί να εξέλθει μόνο από τη μήτρα[3].

Το υλικό που εξωθείται τροφοδοτείται στη μηχανή συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου. Το έργο που απαιτείται για να ξεπεραστεί η τριβή μεταξύ της εγκοπής και του υλικού μετατρέπεται σε θερμότητα. Αυτή ρέει στον τροχό και στο τμήμα σφράγισης, καθώς και στο υπόλοιπο υλικό που βρίσκεται στην εγκοπή. Έτσι, το υλικό καθώς κινείται προς την μήτρα θερμαίνεται και εισέρχεται στην απαραίτητη θερμοκρασιακή ζώνη [3].

Σε κάποιες παραλλαγές της μεθόδου μπορεί να χρησιμοποιηθούν θερμοκρασιακά στοιχεία για την περαιτέρω θέρμανση του υλικού πριν τη διέλαση(εικόνα 3)[3].



Εικόνα 3: 1: τροχός τριβής, 2: τμήμα σφράγισης(seal segment), 3:κομμάτι σφράγισης (sealing piece), 4: μήτρα, 5: πρώτη ύλη (σύρμα), 6: προφίλ, ένθετο προθέρμανσης υλικού, 8: θάλαμος τροφοδοσίας, 9: θερμοκρασιακά στοιχεία [3]

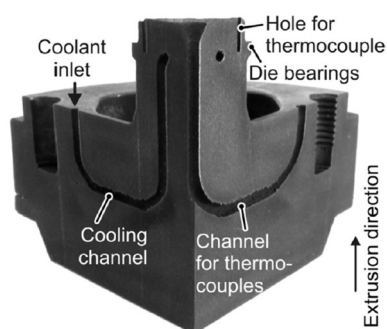
### Περίπτωση Cablel

Στην περίπτωση της Cablel του ομίλου Viohalco, κατεργασία συνεχούς διέλασης χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλακέ καλωδίων από χαλκό. Κατά την τροφοδοσία ο χαλκός εισέρχεται στη μηχανή με τη μορφή καλωδίων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η διάμετρος των καλωδίων είναι 8mm και η ταχύτητα πρόωσης είναι  $11 \pm 1$  m/min . Στην παρούσα μηχανή δεν υπάρχει σύστημα ψύξης, αυτό σημαίνει ότι το υλικό κατά την κατεργασία δεν πρέπει να ξεπερνά τους 500°C. Σε περίπτωση υπέρβασης αυτής της θερμοκρασίας η φθορά των εξαρτημάτων είναι αυξημένη[3].

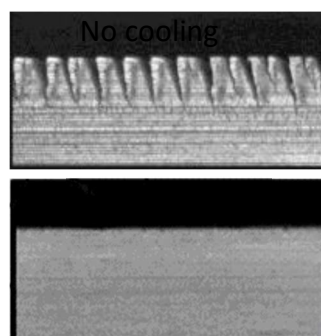
## Μήτρες Διέλασης από προσθετικές κατεργασίες

Η μήτρα είναι ένα από τα κυριότερα εξαρτήματα της κατεργασίας της διέλασης. Η ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι άμεσα συνυφασμένη με την κατάσταση της μήτρας μιας και αυτή είναι που του δίνει την τελική του μορφή. Η χρήση μεθόδων AM για την κατασκευή μητρών διέλασης έχει εφαρμοστεί και στο παρελθόν αλλά περιορισμένα. Μέχρι σήμερα έχουν υπάρξει ήδη μερικές εφαρμογές τρισδιάστατα εκτυπωμένων μητρών από τη βιομηχανία και τον ακαδημαϊκό χώρο. Σε αυτές παρουσιάζονται πλεονεκτήματα που μπορεί να παρέχει η προσθετική κατασκευή, στο σχεδιασμό, το κόστος και την παραγωγικότητα των εργαλείων.

Μια σημαντική έρευνα από το Ramona Hölker και τους συνεργάτες του (2015), εμβαθύνει στη χρήση τρισδιάστατα εκτυπωμένων μητρών στη θερμή διέλαση αλουμινίου. Το εργαλείο που κατασκεύασαν με τη μέθοδο Direct Metal Laser Sintering (DMLS) είχε ενσωματωμένους αγωγούς ψύξης, με στόχο την επίτευξη τοπικής εσωτερικής ψύξης στην ζώνη διέλασης (bearing region). Οι δοκιμές που διεξήχθησαν έδειξαν ότι η τοπική ψύξη καταπολέμησε την εμφάνιση θερμών ρηγμάτων στο τελικό προϊόν δίνοντας τη δυνατότητα για αύξηση της παραγωγής μέχρι και 300%. Οι προσομοιώσεις τους, έδειξαν σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του τεμαχίου εργασίας με μικρή αύξηση της δύναμης διέλασης. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η τραχιά επιφάνεια που προέκυψε από την προσθετική κατασκευή δεν εμποδίζει τη διαδικασία[4].

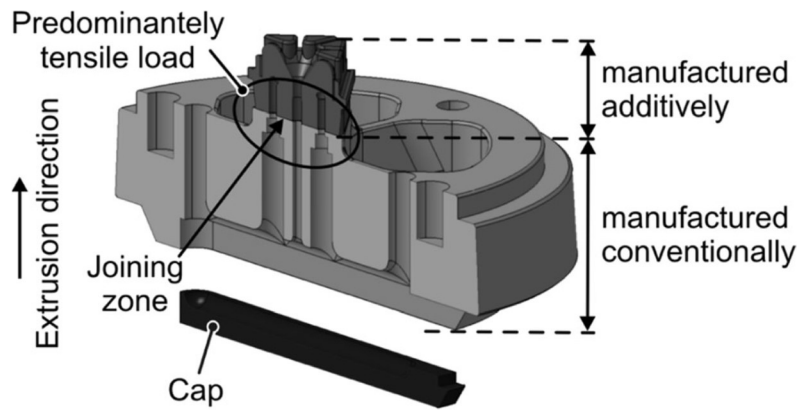


Εικόνα 4: Μήτρα με αγωγούς ψύξης[4].



Εικόνα 5: Επίδραση της ψύξης στο τελικό προϊόν[4].

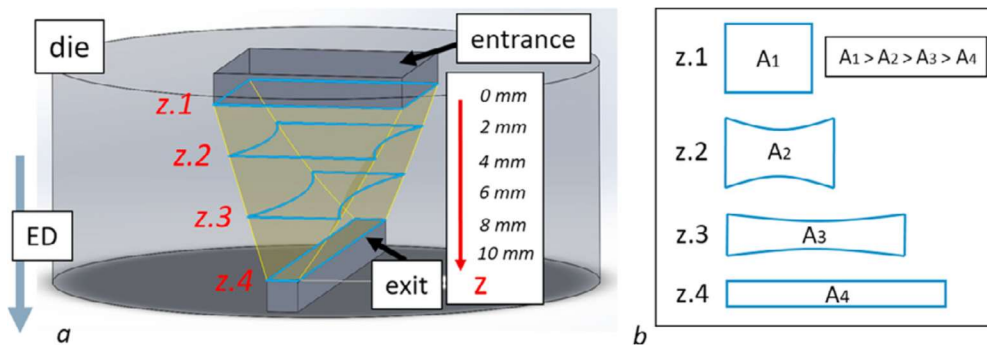
Βασιζόμενοι σε αυτή την έρευνα, ο Hölker και η ομάδα του (2016) προχώρησαν περαιτέρω στο πεδίο και επικεντρώθηκαν στο σχεδιασμό νέας μήτρας, η κατασκευή της οποίας έγινε με συνδυασμό αφαιρετικών και προσθετικών κατεργασιών. Ο υβριδικός αυτός σχεδιασμός στόχευε στη μείωση του κόστους κατασκευής, χρησιμοποιώντας προσθετική κατασκευή μόνο για την παραγωγή γεωμετριών που δεν μπορούν να κατασκευαστούν διαφορετικά. Στην έρευνα αυτή έγινε ειδική μελέτη για την ανοχή του υλικού στο σημείο ένωσης των δύο τεχνολογιών, ενώ εξετάστηκε και η χρήση απομονωμένης ψύξης για περαιτέρω αύξηση της απόδοσης[5].



Εικόνα 6: Υβριδική μήτρα κατασκευασμένη με προσθετικές και αφαιρετικές κατεργασίες[5].

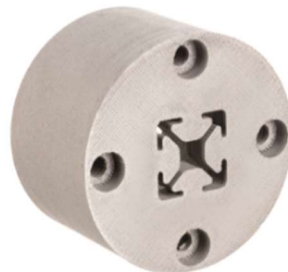
Μια άλλη αξιοσημείωτη έρευνα από τον Zafer Cagatay Oter (2019) διερευνά και αυτή τα οφέλη της μεθόδου DMLS στην παραγωγή μητρών διέλασης αλουμινίου. Η μελέτη καταδεικνύει επιτυχημένη παραγωγή εξαρτημάτων χωρίς την ανάγκη για κατεργασίες λείανσης ή επιφανειακής βαφής. Επισημάνει την ευελιξία σχεδιασμού που προσφέρει η προσθετική κατασκευή και μέσω πειραμάτων στο πεδίο αποδεικνύει ότι εξαρτήματα κατασκευασμένα με αυτές τις τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την βιομηχανία[6].

Επιπλέον, πρόσφατες μελέτες από τους Noomane Ben Khalifa και συνεργάτες (2021) έχουν επικεντρωθεί σε καινοτόμες ιδέες σχεδίασης μητρών, οι οποίες μέσω ελέγχου της ροής του υλικού και των διαδρομών παραμόρφωσης, αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση της ανισοτροπίας στα εξωθημένα προφίλ[7].



Εικόνα 7: Μήτρα με μεταβλητή διατομή[7].

Τέλος, η Desktop Metal κατασκεύασε μήτρα διέλασης πλαστικών προφίλ με τη μέθοδο BMD μειώνοντας το κόστος κατασκευής κατά 52.68%[8].



Εικόνα 8: Μήτρα διέλασης πλαστικού εκτυπωμένη με τη μέθοδο BMD[8].

Στις μελέτες που παρουσιάστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι σύντηξης κόνεος σε κλίνη (powder bed fusion). Οι μέθοδοι αυτοί μπόρεσαν να αποδώσουν εργαλεία ικανά να εκτελέσουν την κατεργασία της διέλασης ωστόσο η διάρκεια ζωής τους ήταν περιορισμένη και η απόκτησή του ακριβή και χρονοβόρα. Ενδεικτικά στην μελέτη του Oster αναφέρεται ότι η εκτυπωμένη μήτρα κατάφερε να παράγει μόνο 3360 kg προϊόντος πριν αστοχήσει[6], τιμή χαμηλή σχετικά με αντίστοιχα εργαλεία.



Εικόνα 9: Μάκρο-ρωγμές στον πόδα της μήτρας.

## Τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου

Η εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης προχωρά με συνεχή έρευνα και ανάπτυξη. Σταδιακά, παρατηρείται η ενσωμάτωσή της στη βιομηχανία, όπου συνυπάρχει με άλλες συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Πλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν περιορίζεται μόνο στη δημιουργία πρωτοτύπων από χαμηλής αντοχής υλικά, αλλά αναδεικνύεται ως εναλλακτική λύση με σημαντικά πλεονεκτήματα, ακόμα και όταν αντιμετωπίζουμε απαιτήσεις για μαζική παραγωγή αντικειμένων που αναμένεται να λειτουργήσουν σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

Στην περίπτωση εκτύπωσης της μήτρας, τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να πετύχουμε είναι υψηλή αντοχή, υψηλή σκληρότητα, ικανοποιητική διαστασιολογική ακρίβεια και χαμηλή ταχύτητα στο εσωτερικό της. Οι διαθέσιμες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλου που μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες: σύντηξης σε κλίνη κόνεος, εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη, πυροσυσσωμάτωσης και ψυχρού ψεκασμού. Το πρότυπο που περιγράφει την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι το ASTM F2792[9].

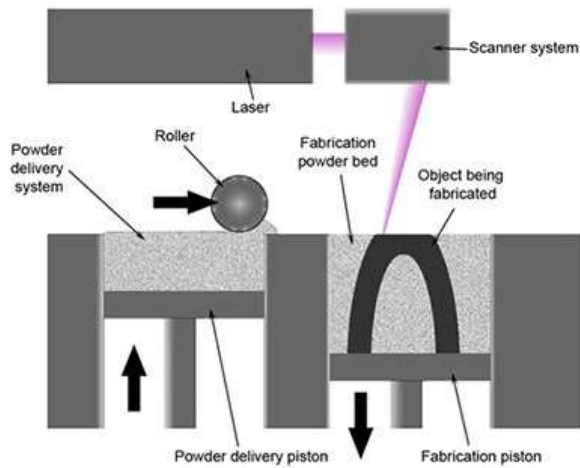
### Εκτύπωση με σύντηξη σε κλίνη κόνεος (Powder bed fusion - PBF)

Η σύντηξη σε κλίνη κόνεος είναι η πιο ώριμη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος προσθετικής κατασκευής μεταλλικών αντικειμένων. Χρησιμοποιεί μία δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων για να λιώσει επιλεκτικά την πρώτη ύλη που είναι σε μορφή σκόνης[9]. Κατά την εκτύπωση ένα ράουλο απλώνει με ακρίβεια ένα στρώμα σκόνης πάνω στην τράπεζα εργασίας και στη συνέχεια η δέσμη σαρώνει τη διατομή του κομματιού που εκτυπώνεται συντηκοντας τα σωματίδια της σκόνης εντός αυτής.

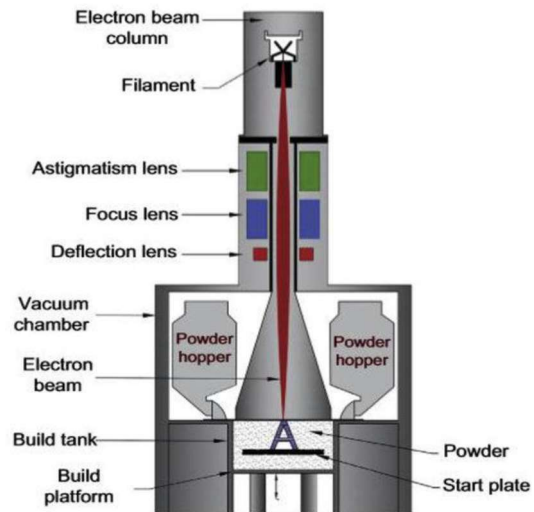
Στην περίπτωση συστημάτων που βασίζονται σε δέσμη ηλεκτρονίων, η διαδικασία πρέπει να εκτελείται σε κενό για να αποτραπεί η αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με τα μόρια του αέρα. Τα συστήματα που βασίζονται σε λέιζερ απαιτούν έναν πλήρως αδρανή θάλαμο για να αποφευχθεί η οξείδωση των μετάλλων [10], [11].

Η μέθοδος αυτή είναι σε θέση να παράγει πολύπλοκα εξαρτήματα που δεν μπορούν να κατασκευαστούν με άλλες συμβατικές κατεργασίες. Ωστόσο τα αποτελέσματα που παράγει έρχονται μαζί με σημαντικές προκλήσεις συμπεριλαμβανομένου του υψηλού κόστους υλικών, των χαμηλών ρυθμών εναπόθεσης και των περιορισμών στα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Λόγω αυτών των περιορισμών, η εμπορική χρήση του PBF περιορίζεται ως επί το πλείστον στη γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων ή σε εξαρτήματα υψηλής αξίας (π.χ. στην αεροδιαστημική ή σε ιατρικά εμφυτεύματα) που αξιοποιούν τις μοναδικές γεωμετρικές που μπορούν να παραχθούν ενώ δικαιολογούν το υψηλό κόστος της τεχνολογίας [10].

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι τεχνικές: Selective Laser Melting (SLM™), Direct Metal Laser Melting (DMLM™), Electron Beam Melting (EBM) κ.α. [12].



Εικόνα 10: Αρχή λειτουργίας της μεθόδου SLM [13]



Εικόνα 11: Αρχή λειτουργίας της μεθόδου EBM[14]

Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (Direct Energy Deposition - DED).

Η εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη χρησιμοποιείται συνήθως για την επισκευή ή την προσθήκη υλικού σε υπάρχοντα εξαρτήματα, αλλά είναι απολύτως δυνατό να κατασκευαστούν εξαρτήματα εξολοκλήρου χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνολογία. Είναι παρόμοια με τη συγκόλληση ή τις τεχνολογίες εξώθησης τηγμένου υλικού και συχνά χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές για την επισκευή πτερυγίων στροβίλων ή προπελών που έχουν υποστεί ζημιά.

Λειτουργεί θερμαίνοντας μια συγκεκριμένη περιοχή στο υπό κατασκευή εξάρτημα έως τη θερμοκρασία τήξης και στη συνέχεια προσθέτοντας υλικό τροφοδοσίας. Η κεφαλή εκτύπωσης έχει συνήθως πολλούς βαθμούς ελευθερίας(4-6) και μπορεί να είναι τοποθετημένη στο άκρο μιας εργαλειομηχανής CNC ή ενός αρθρωτού ρομποτικού βραχίονα. Η κατευθυνόμενη πηγή ενέργειας βρίσκεται στο κέντρο της κεφαλής εκτύπωσης, που ανάλογα με τη μηχανή μπορεί να είναι δέσμη ηλεκτρονίων ή πλάσματος είτε λέιζερ υψηλής ισχύος.

Το υλικό τροφοδοσίας μπορεί να παρέχεται με τη μορφή συρμάτινου νήματος ή σκόνης. Το νήμα τροφοδοτείται υπό γωνία, έτσι ώστε να λιώνει στο εστιακό σημείο της πηγής ενέργειας. Η σκόνη, από την άλλη, μεταφέρεται από ένα αδρανές αέριο μέσω ακροφυσίων που είναι διατεταγμένα ομόκεντρα γύρω από την πηγή ενέργειας και κατευθύνονται στο σημείο τήξης.

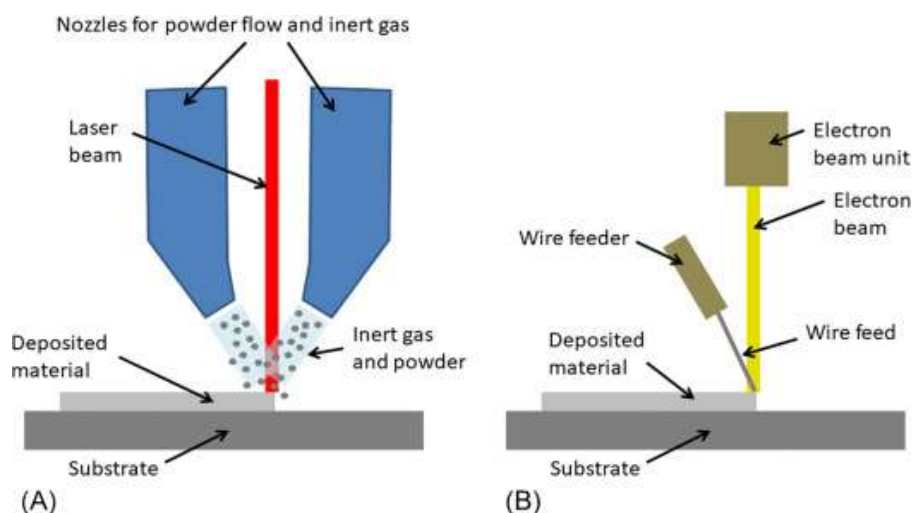
Σχετικά με τις συνθήκες της εκτύπωσης ισχύουν οι ίδιοι περιορισμοί με τις μεθόδους PBF για το αδρανές περιβάλλον με τη διαφορά ότι εδώ υπάρχει και η επιπλέον δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα κάλυμμα προστατευτικού αερίου τοπικά, το οποίο επαρκεί για την προστασία του μετάλλου που εναποτίθεται από την οξείδωση.

Πλεονεκτήματα των τεχνολογιών αυτών είναι ότι η πρώτη ύλη, όταν είναι σε μορφή σύρματος, αποτελεί την πιο προσιτή μορφή μεταλλικού υλικού τρισδιάστατης εκτύπωσης, ενώ από την άλλη ορισμένες μηχανές μπορούν ακόμη και να χρησιμοποιήσουν ταυτόχρονα διαφορετικές μεταλλικές σκόνης για να δημιουργήσουν κράματα και αλλαγές υλικού εντός του κομματιού. Παράλληλα κίνηση σε μηχανές πολλών αξόνων μπορεί να παράγει μοντέλα χωρίς τη χρήση υποστηρικτικών γεωμετριών. Τέλος, ο όγκος κατασκευής είναι μεγαλύτερος



συγκριτικά με άλλες μεθόδους, η πυκνότητα των παραγόμενων εξαρτημάτων είναι υψηλή, οι μηχανικές ιδιότητες είναι καλές και η ταχύτητα εκτύπωσης είναι γρήγορη.

Περιορισμό στις μεθόδους DED αποτελεί η κακή ποιότητα επιφανείας των εξαρτημάτων, ενώ μικρές λεπτομέρειες είναι δύσκολο ή αδύνατο να επιτευχθούν. Για αυτό συχνά απαιτείται επιπλέον κατεργασία αποπεράτωσης με αποτέλεσμα αύξηση στο μηχανολογικό και λειτουργικό κόστος.

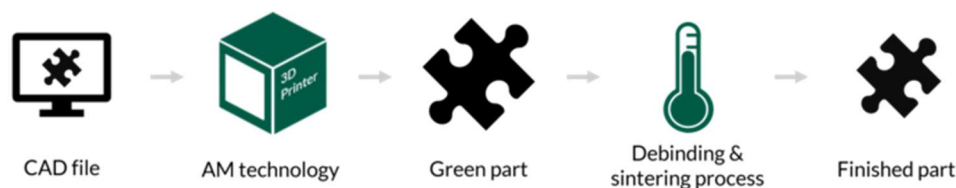


Εικόνα 12: Αρχή λειτουργίας της μεθόδου DED[15]

Μέθοδοι εκτύπωσης με βάση την πυροσυσσωμάτωση (Sinter Based AM).

Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούν ένα πολυμερές συνδετικό μέσο (binder) για να δεσμεύσουν μεταλλική σκόνη στην επιθυμητή γεωμετρία. Μετά την εκτύπωση το αντικείμενο, που είναι εύθραυστο και θεωρείται πως βρίσκεται σε πράσινη κατάσταση (green stage), πυροσυσσωματώνεται για να αποκτήσει τις τελικές του ιδιότητες. Ανάλογα με τη μέθοδο, ενδέχεται να υπάρχει ένα επιπλέον στάδιο πριν την πυροσυσσωμάτωση στο οποίο να γίνεται αποβολή (debinding) ή σταυροσύνδεση (crosslinking) του συνδετικού μέσου[16], [17]. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται συνδετικό μέσο μονού σταδίου που εξαλείφει την ανάγκη για τη διαδικασία αποσύνδεσης. Το συνδετικό είναι τυπικά οργανικής φύσης, επιτρέποντας την εξαχνωσή του στα αρχικά στάδια της διαδικασίας πυροσυσσωμάτωσης, συνήθως σε θερμοκρασίες 200-600°C[18].

Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων αυτών είναι η υψηλή παραγωγικότητα και το χαμηλό κόστος, το οποίο μπορεί να είναι 40-60% χαμηλότερο από τις τεχνολογίες PBF[19]. Επιπλέον, οι ιδιότητες των εξαρτημάτων που επιτυγχάνονται είναι συγκρίσιμες με την καθιερωμένη τεχνολογία χύτευσης σε υψηλή πίεση (MIM)[20].

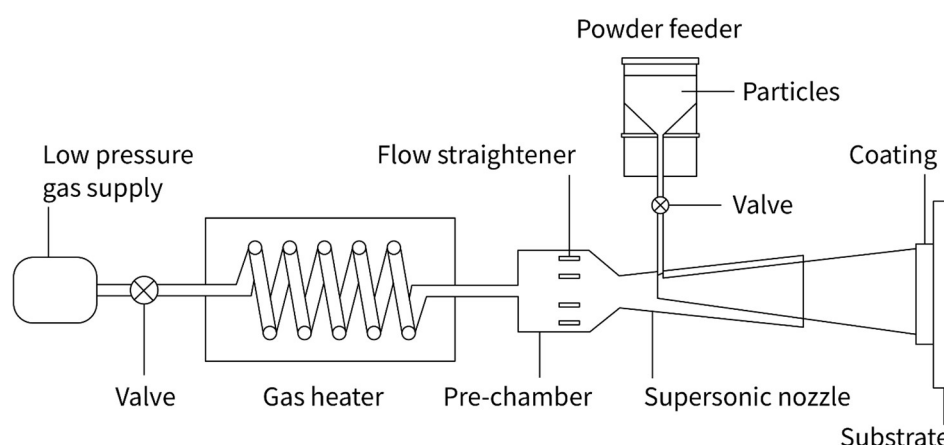


Εικόνα 13: Στάδια εκτύπωσης με μεθόδους πυροσυσσωμάτωσης[20].

## Μέθοδοι ψυχρού ψεκασμού / υπερηχητική 3d εναπόθεση (Cold Spray Additive Manufacturing/ supersonic 3d deposition)

Ο ψυχρός ψεκασμός είναι μια τεχνική που περιλαμβάνει τη χρήση ενός πίδακα αερίου υψηλής ταχύτητας, ώστε να επιταχύνει σωματίδια του υλικού κατασκευής και να τα εκτοξεύσει σε ένα υπόστρωμα. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σχηματίσει μια επίστρωση πάνω σε ένα ήδη υπάρχον εξάρτημα ή να παράγει εξολοκλήρου ένα κομμάτι. Η ταχύτητα του αερίου μπορεί να φτάνει έως και τέσσερις φορές την ταχύτητα του ήχου, ενώ η σχετική κίνηση ακροφυσίου - υποστρώματος γίνεται με χρήση ρομποτικών βραχιόνων. Σε αντίθεση με άλλες τεχνικές, η συσσωμάτωση των σωματιδίων βασίζεται αποκλειστικά στην κινητική ενέργειά τους, για αυτό και η διαδικασία γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χωρίς την ανάγκη για αδρανές περιβάλλον[21].

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του ψυχρού ψεκασμού είναι ότι, επειδή η θερμοκρασία δεν υπερβαίνει τους 800°C, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ευαίσθητα στη θερμοκρασία και στο οξυγόνο υλικά όπως τιτάνιο και αλουμίνιο, καθώς τα σωματίδια δεν λιώνουν. Επιπλέον, ο ρυθμός εναπόθεσης υλικού είναι 100-1000 φορές μεγαλύτερος από τις άλλες μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι δεν μπορούν να αποδοθούν λεπτά χαρακτηριστικά και περαιτέρω κατεργασία σε εργαλειομηχανές είναι συνήθως απαραίτητη [22].



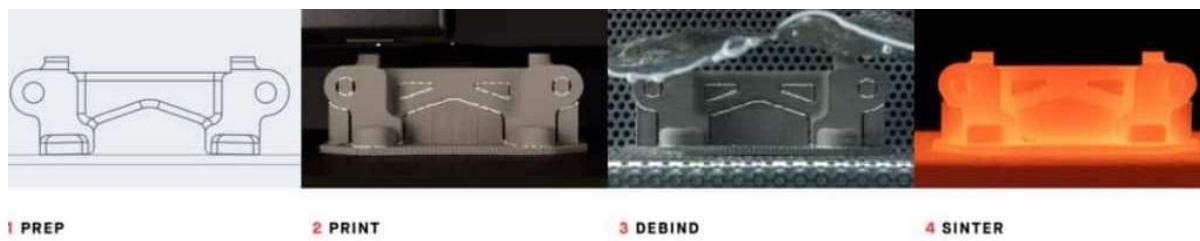
Εικόνα 14: Μονογραμμική αναπαράσταση της μεθόδου ψυχρού ψεκασμού[22].

## Κατασκευή τεμαχίων με τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας συνεργαστήκαμε με την εταιρία LINO3D για την εκτύπωση των μητρών και δοκιμών που χρησιμοποιήσαμε στην έρευνά μας. Συγκεκριμένα μας προμήθευσε με εξαρτήματα από εργαλειοχάλυβα H13 εκτυπωμένα με την μέθοδο Bound Metal Deposition (BMD) και από ανοξείδωτο χάλυβα St.17-4 χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Binder Jetting. Και οι δύο μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι με βάση την πυροσυσσωμάτωση. Η επιλογή αυτής της κατηγορίας μεθόδων έγινε καθώς οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να παράγουν τη γεωμετρία της μήτρας χωρίς να είναι απαραίτητη η αποπεράτωση ενώ το κόστος τους είναι αρκετά χαμηλό.

Η πορεία εργασίας είναι κοινή στο μεγαλύτερο μέρος της και για τις δύο τεχνολογίες και αποτελείται από τα εξής 4 στάδια:

- Προετοιμασία
- Εκτύπωση
- Αποσύνδεση / Σταυροσύνδεση (crosslinking)
- Πυροσυσσωμάτωση



Εικόνα 15: Στάδια κατασκευής με τις μεθόδους BMD/Binder Jetting.

### Προετοιμασία πριν την εκτύπωση

Το κομμάτι εισέρχεται στο στάδιο της προετοιμασίας αποθηκευμένο σε μορφή STL και κατόπιν εισάγεται σε ένα λογισμικό που ονομάζεται slicer. Σε αυτό δημιουργούνται τα υποστηρίγματα και εξάγεται ο Gcode που θα εκτελέσει η κάθε μηχανή. Ο ρόλος των υποστηριγμάτων είναι η στήριξη των κομματιών και ο περιορισμός των παραμορφώσεων. Στη μέθοδο Binder Jetting, η ίδια η πούδρα χρησιμοποιείται ως υποστήριγμα στη φάση της εκτύπωσης, αλλά ενδέχεται να χρειαστεί να τυπωθούν περεταίρω υποστηρίγματα, τα οποία θα συγκρατούν το κομμάτι στη φάση της πυροσυσσωμάτωσης. Μετέπειτα γίνεται αντιστάθμιση των παραμορφώσεων που προβλέπεται να εμφανιστούν κατά την πυροσυσσωμάτωση. Αυτή η εργασία είναι πολύ σημαντική για τη διαστασιολογική ακρίβεια του τελικού αντικειμένου και επεξηγείται αναλυτικά σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

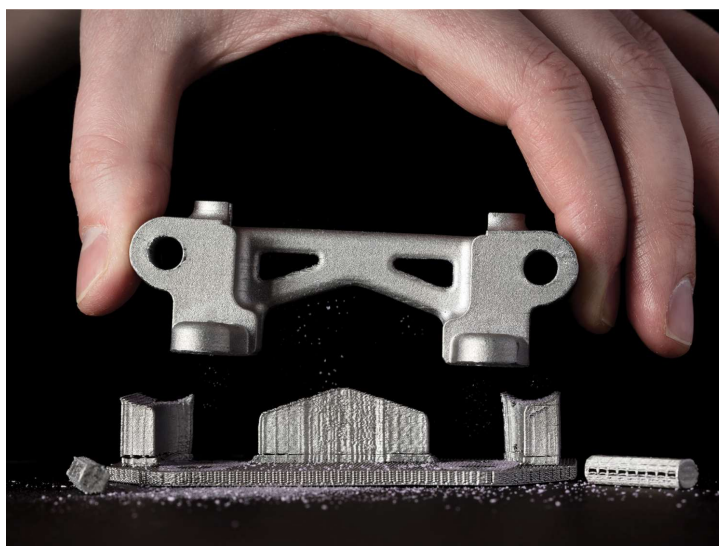
## BMD (Studio System™ 2)

Για τα κομμάτια που τυπωθήκαν με τη μέθοδο BMD χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής Studio System™ 2. Η BMD είναι μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής που βασίζεται στην εξώθηση θερμοπλαστικού μέσου που περιέχει μεταλλική σκόνη με τρόπο αντίστοιχο με την πιο διαδεδομένη μέθοδο εξώθησης τηγμένου υλικού (FFF). Αντί για νήμα ο Studio System™ 2 χρησιμοποιεί ράβδους, μέσα στους οποίους βρίσκεται σκόνη μετάλλου ανακατεμένη με συνδετικό παράγοντα ο οποίος αποτελείται από μίξη κεριού και πολυμερούς. Οι ράβδοι αυτοί αποθηκεύονται σε ειδική κασέτα πάνω στον εκτυπωτή. Κατά την εκτύπωση οι ράβδοι θερμαίνονται από το ακροφύσιο και εξωθούνται στην πλάκα εργασίας, δημιουργώντας το εξάρτημα σε στρώσεις. Η διαδικασία εκτύπωσης ξεκινά με τη δημιουργία μιας πλατφόρμας στήριξης (raft), ακολουθούμενη από το κομμάτι και τις υποστηρίξεις του.



Εικόνα 16: Μηχανήματα της μεθόδου BMD: εκτυπωτής, debinder, κλίβανος πυροσυσσωμάτωσης[8]

Ο εκτυπωτής λειτουργεί χρησιμοποιώντας δύο εξωθητές, ο ένας επικεντρώνεται στην εκτύπωση μετάλλου, ενώ ο άλλος είναι αφιερωμένος στην εξώθηση κεραμικού μέσου διασύνδεσης. Όταν είναι απαραίτητη η χρήση υποστηριγμάτων, μια στρώση από κεραμικό μέσο τα διαχωρίζει από το κυρίως κομμάτι και επιτρέπει την εύκολη αφαίρεσή τους[8], [23].



Εικόνα 17: Αφαίρεση υποστηριγμάτων από εκτυπωμένο κομμάτι[8].

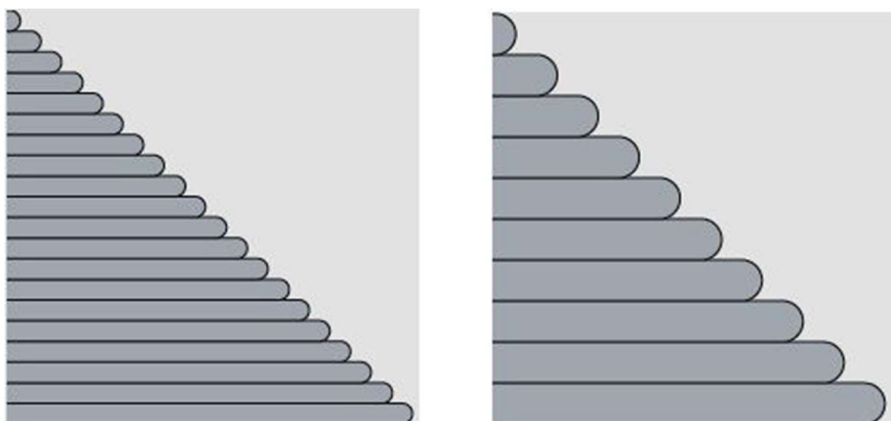
Το αντικείμενο που προκύπτει αμέσως μετά την εκτύπωση, δεν έχει τις τελικές ιδιότητες του μετάλλου, είναι ψαθυρό και εύθραυστο. Σε αυτό το στάδιο λέμε ότι το κομμάτι βρίσκεται σε “πράσινη κατάσταση” (green part). Στο προηγούμενο μοντέλο (Studio System™) το κομμάτι έπρεπε να τοποθετηθεί εντός του debinder, όπου εμβαπτιζόταν σε ειδικό υγρό αποσύνδεσης (debind fluid), το οποίο διέλυε το κέρινο τμήμα του συνδετικού υλικού και άφηνε πίσω μια πορώδη δομή μέσω της οποίας το υπόλοιπο μέρος του συνδετικού μπορεί να διαφύγει κατά τη διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης. Το διαλυτικό υγρό έπρεπε να εμποτίσει πλήρως το κομμάτι και να φτάσει μέχρι το κέντρο του. Το πάχος της διατομής των τοιχωμάτων του κάθε κομματιού επηρεάζει άμεσα το χρόνο που θα χρειαστεί να παραμείνει σε αυτό το στάδιο. Το μοντέλο Studio System™ 2 χρησιμοποιεί διαφορετικής σύστασης υλικά και δεν απαιτεί διαδικασία αποσύνδεσης (debinding), ωστόσο οι περιορισμοί για το μέγιστο πάχος τοιχωμάτων παραμένουν.

Στη συνέχεια, το κομμάτι τοποθετείται στον κλίβανο, όπου θερμαίνεται κοντά στη θερμοκρασία τήξης του. Η θερμοκρασία προκαλεί σύντηξη των μεταλλικών σωματιδίων και παράλληλα εξαχνώνεται το υπόλοιπο συνδετικό υλικό. Αυτό οδηγεί στη συμπίεση των μεταλλικών σωματιδίων και στη συρρίκνωση του κομματιού. Το βήμα της πυροσυσσωμάτωσης στην BMD προϋποθέτει ειδικές σχεδιαστικές απαιτήσεις ως προς την γεωμετρία του κομματιού, τα υποστηρίγματά του, ακόμα και τον προσανατολισμό του στην τράπεζα εκτύπωσης.

Οι κεφαλές του εκτυπωτή διατίθενται σε δύο μεγέθη. Η απλή (standard) κεφαλή με 400μm και η υψηλής ευκρίνειας (High-res) με 250μm διάμετρο. Η μικρότερη διάμετρος της υψηλής ευκρίνειας κεφαλής της επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια με αντάλλαγμα πιο αργή ταχύτητα εκτύπωσης.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα της εκτύπωσης είναι το ύψος του υλικού που εναποτίθεται στην κάθε στρώση. Το ύψος των στρώσεων μπορεί να κυμανθεί από 150-200μm για την απλή κεφαλή και 50μm για την υψηλής ευκρίνειας (High-res). Τα μεγαλύτερα ύψη στρώσης επιτρέπουν ταχύτερους χρόνους εκτύπωσης σε αντάλλαγμα με κατώτερη ποιότητα επιφάνειας. Λεπτομερή χαρακτηριστικά αποδίδονται καλύτερα σε λεπτότερες στρώσεις ώστε να διασφαλιστεί ότι εκτυπώνονται με ακρίβεια. Μεγαλύτερα εξαρτήματα

μπορούν να επωφεληθούν από τη χρήση του χονδροειδούς προφίλ για να εξασφαλίσουν γρήγορους χρόνους εκτύπωσης[23].



Εικόνα 18: Επίδραση του ύψους στρώσης[23].

Η χωροπλήρωση (infill) είναι μια επαναλαμβανόμενη χωρικά γεωμετρία που γεμίζει το χώρο του κομματιού δίνοντάς του στιβαρότητα και μειώνοντας το υλικό που χρησιμοποιείται. Πέρα από την εξοικονόμηση του βάρους, η χωροπλήρωση βοηθά στην καλύτερη απορρόφηση του διαλυτικού παράγοντα στη φάση της αποσύνδεσης .

Το μέγιστο πάχος των τοιχωμάτων ενός κομματιού περιορίζεται στα 4mm ή στα 10mm αν εκτυπωθεί χωρίς χωροπλήρωση. Τα τοιχώματα του εξαρτήματος μαζί με τα πάνω και κάτω στρώματα αποτελούν το κελύφος του κομματιού. Όριο για το μέγιστο πάχος του κελύφους αποτελεί η διαδικασία της αποσύνδεσης. Ο απαραίτητος χρόνος που θα πρέπει το κομμάτι να βρίσκεται στο στάδιο αυτό είναι συνάρτηση του πάχους διατομής. Μέρη με χοντρά τοιχώματα χρειάζονται περισσότερο χρόνο. Για να αποφευχθεί αυτό, το πάχος του κελύφους διατηρείται κάτω από 4mm.



Εικόνα 19: Οδοντωτοί τροχοί τυπωμένοι με διαφορετικό πάχος τοιχώματος και gyroid infill.

Πλεονέκτημα της BMD είναι πως οι μηχανές που την απαρτίζουν έχουν σχετικά μικρό όγκο και η λειτουργία τους δεν σχετίζεται με χαλαρές πούδρες ή λείζερ αποφεύγοντας τα ρίσκα που εισάγουν αυτά, κάνοντάς την έτσι φιλική ως προς το περιβάλλον γραφείου [11].

Επιπλέον πλεονέκτημα της BMD που λείπει από την Binder Jetting είναι η ικανότητα κατασκευής γεμίσματος σε πλήρως κλειστούς όγκους. Αυτό δεν μπορεί να γίνει στην Binder Jetting μιας και η σκόνη δεν θα είχε τρόπο να διαφύγει .

## Binder Jetting (Shop System™)

Ο εκτυπωτής Shop System™ που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή αντικειμένων από St.17-4 βασίζεται στην τεχνολογία Binder Jetting. Το Binder Jetting είναι μια υψηλής ακρίβειας και μεγάλης κλίμακας μέθοδος μεταλλικής τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η τεχνολογία του αντικατοπτρίζει αυτό που χρησιμοποιεί ένας συμβατικός δισδιάστατος εκτυπωτής για την γρήγορη εκτόξευση μελάνης σε χαρτί. Τα μηχανήματα έχουν τη δυνατότητα να εκτυπώνουν πολύ πιο γρήγορα χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεφαλές για ψεκασμό σε πολλά σημεία ταυτόχρονα. Επιπλέον μπορεί να φτιάξει δεκάδες ή και εκατοντάδες εξαρτήματα σε μία παρτίδα. Αυτά τα εξαρτήματα μπορούν να πυροσυσσωματωθούν σε ένα μεγάλο φούρνο για να επιτευχθεί μια διαχειρίσιμη υποδομή παραγωγής παρτίδων. Ως αποτέλεσμα, το Binder Jetting είναι σημαντικά ταχύτερο ανά κομμάτι από οποιονδήποτε άλλο τύπο μεταλλικής εκτύπωσης για αυτό ίσως μπορεί να αντικαταστήσει το SLM ως την κορυφαία μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης με βάση τη χαλαρή πούδρα [16], [24].

Η Binder Jetting χρησιμοποιεί το δομικό υλικό σε μορφή σκόνης σε συνδυασμό με ένα συνδετικό μέσο. Το συνδετικό δρα ως συγκολλητικό μεταξύ των στρωμάτων σκόνης και είναι συνήθως σε υγρή μορφή. Μια κεφαλή κινείται οριζόντια κατά μήκος του μηχανήματος και εναποθέτει εναλλασσόμενα στρώματα της πούδρας και του συνδετικού υλικού. Μετά από κάθε επίπεδο, το αντικείμενο που εκτυπώνεται χαμηλώνει στην πλατφόρμα κατασκευής και νέα στρώση πούδρας απλώνεται από πάνω του. Όπως και με άλλες μεθόδους κατασκευής με βάση τη σκόνη, το αντικείμενο που εκτυπώνεται στηρίζεται από μόνο του εντός του στρώματος πούδρας και αφαιρείται από τη μη δεσμευμένη σκόνη μόλις ολοκληρωθεί η εκτύπωση[16].

Μετά την εκτύπωση, το κουτί κατασκευής (build box) που περιέχει μαζί τα εκτυπωμένα μέρη και τη σκόνη που τα περικλείει τοποθετείται σε φούρνο ξήρανσης (crosslink oven), όπου οι πολυμερικές αλυσίδες του συνδετικού μέσου υφίστανται αντίδραση σταυροσύνδεσης (crosslinking). Η σταυροσύνδεση είναι μια διαδικασία θερμικής ωρίμανσης που δίνει στα τυπωμένα εξαρτήματα, που τώρα βρίσκονται σε «πράσινη κατάσταση», πρόσθετη αντοχή για να είναι λιγότερο πιθανό να σπάσουν κατά την αποκονίωση. Μετά τη σταυροσύνδεση τα κομμάτια θεωρείται ότι βρίσκονται πια σε «καφέ κατάσταση» (brown parts) [16].

Τα ακόμα εντός του κουτιού κατασκευής εξαρτήματα υποβάλλονται σε διαδικασία αποκονίωσης με την εισαγωγή τους σε εξειδικευμένο θάλαμο. Σε αυτό το στάδιο, πραγματοποιείται η ανασκαφή των κομματιών από το κουτί κατασκευής και η συλλογή της περίσσειας σκόνης για επαναχρησιμοποίηση. Η διαδικασία αποκονίωσης εκτελείται μέσα σε ειδικό θάλαμο, εξυπηρετώντας τόσο πρακτικούς σκοπούς, ώστε να αποφευχθεί η διάχυση σκόνης στο περιβάλλον, όσο και για λόγους υγείας, προκειμένου να αποφευχθεί η εισπνοή της από τα άτομα που εργάζονται στο χώρο[16].

Η φάση της πυροσυσσωμάτωσης είναι κοινή και για τις δύο κατεργασίες (BMD-Binder Jetting). Στον κλίβανο, το κομμάτι θερμαίνεται κοντά στη θερμοκρασία τήξης. Το υπόλοιπο συνδετικό υλικό απελευθερώνεται και τα μεταλλικά σωματίδια συσσωματώνονται. Αυτό προκαλεί συμπύκνωση του εξαρτήματος σε ποσοστό έως και 96-99,8%. Ως αποτέλεσμα το εξάρτημα συρρικνώνεται σε περίπου 17-22%, ανάλογα με το υλικό. Η κατανόηση όσο και ο έλεγχος της συρρίκνωσης λόγω της πυροσυσσωμάτωσης είναι σημαντικά για την επίτευξη ακρίβειας διαστάσεων μέσω της αντιστάθμισης της γεωμετρίας στο αρχικό στάδιο[16].

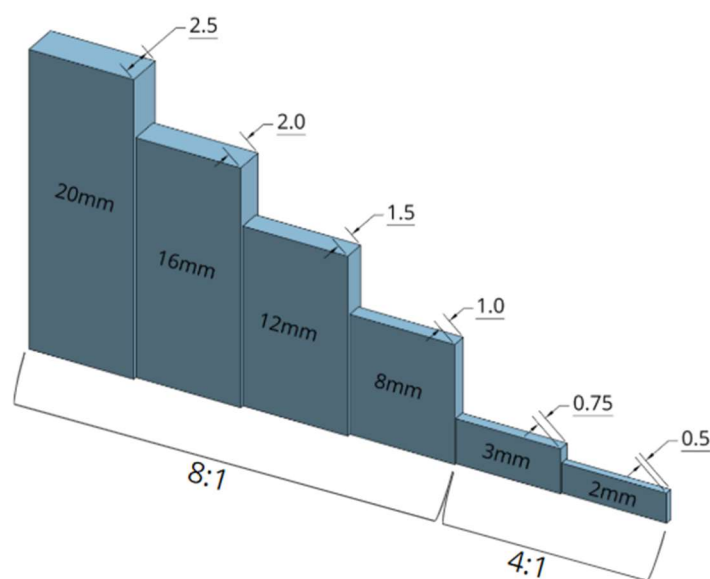
Καλές πρακτικές κατά την σχεδίαση για εκτύπωση με Binder jetting

Τα κομμάτια δε θα πρέπει να έχουν πάχος τοιχώματος πάνω από 25mm. Αυτό γίνεται για να μπορεί το συνδετικό υλικό να διαλυθεί και απομακρυνθεί κατά τη διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης. Αν το πάχος είναι υπερβολικό το συνδετικό μπορεί να παραμείνει και να προκαλέσει ρωγμές και σπάσιμο του κομματιού.

Το πάχος τοιχώματος δε θα πρέπει να είναι κάτω από 0,75mm καθώς το κομμάτι θα είναι πολύ εύθραυστο στην «καφέ κατάσταση» και πιθανότατα θα σπάσει κατά τη διαδικασία της εκσκαφής.

Οι λόγοι διαστάσεων (Aspect ratios) περιορίζουν το επιτρεπόμενο μέγεθος χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα διαστάσεις όπως το πάχος ή το πλάτος περιορίζουν χαρακτηριστικά όπως το μέγιστο εφικτό ύψος τοίχου και το βάθος σχισμής ή οπής. Η αναλογία διαστάσεων ορίζεται ως: ύψος προς πλάτος.

Στην περίπτωση τοιχωμάτων ή κολόνων με μεγάλο λόγο διαστάσεων προβλήματα μπορεί να εμφανιστούν στο στάδιο της πυροσυσσωμάτωσης, όπου κομμάτια να εμφανίζουν υπερβολικά μεγάλες παραμορφώσεις ή ρωγμές. Αν αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν και μικρό πάχος (0.75-2mm) διατρέχουν αυξημένο κίνδυνο να σπάσουν κατά την αποκονίωση[25].

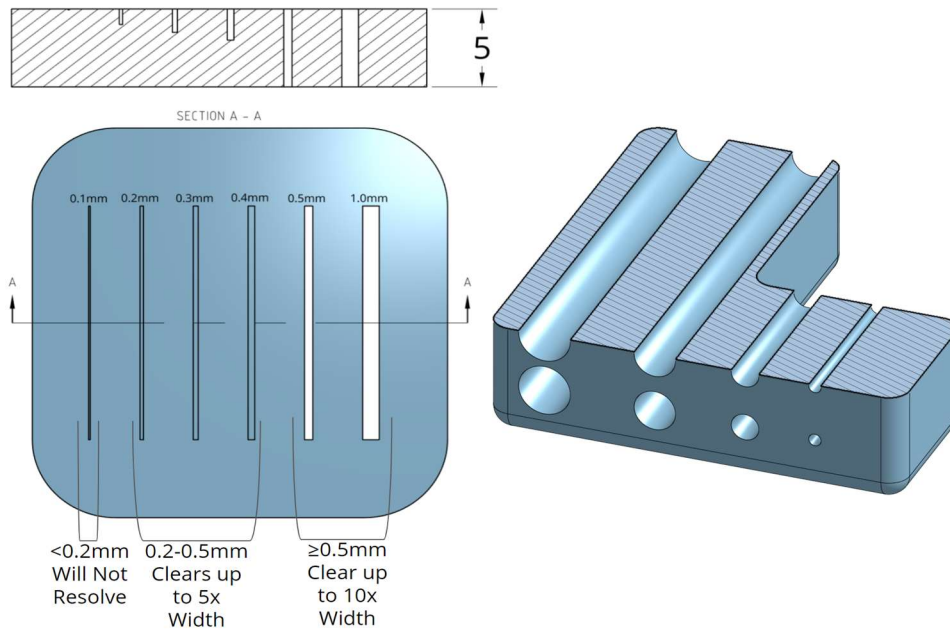


Εικόνα 20: Μέγιστο επιτρεπτό ύψος ανάλογα με το λόγο διαστάσεων [25].

Στις οπές και στις σχισμές, ο λόγος διαστάσεων επηρεάζει την ευκολία με την οποία θα γίνει ο καθαρισμός τους από την ελεύθερη σκόνη κατά την αποκονίωση. Στενές οπές με μεγάλο βάθος μπορεί να παγιδεύσουν σκόνη στο εσωτερικό τους.

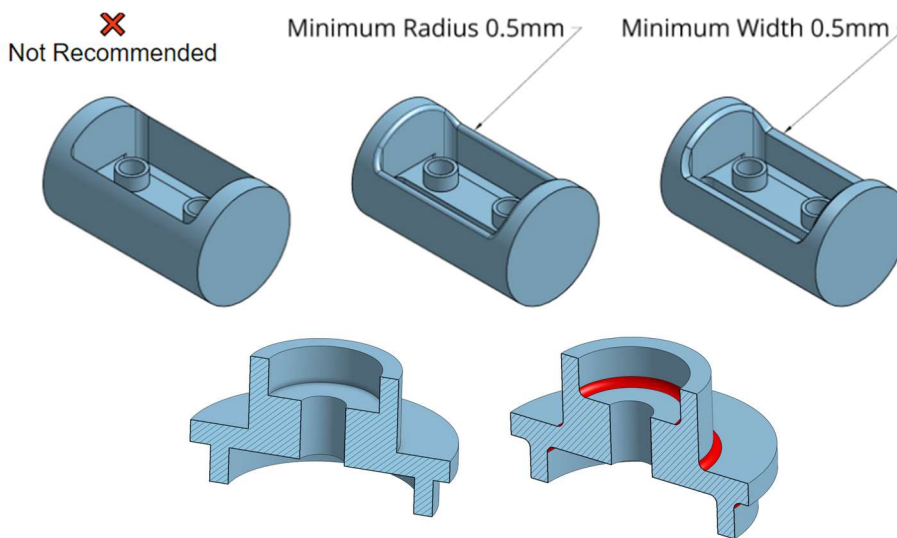
Ο λόγος διαστάσεων της οπής δεν μπορεί να είναι  $>8:1$ , που σημαίνει ότι το βάθος της οπής δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 8 φορές τη διάμετρό του. Για τρύπες μικρότερης διαμέτρου (- 2mm ή λιγότερο), η αναλογία διαστάσεων μειώνεται σε 4:1. Η ελάχιστη επιτρεπτή διάμετρος οπής είναι 0.75mm[25].





Εικόνα 21: Ελάχιστο πλάτος σχισμής και μέγιστο επιτρεπτό βάθος οπής ανάλογα με τη διάμετρο [25].

Συνιστάται η αποφυγή των κοφτερών ακμών και η απότομη αλλαγή διατομής. Οι κοφτερές ακμές είναι πιθανό να σπάσουν κατά την αποκονίωση, ενώ μεγάλες αλλαγές στη διάμετρο εισάγουν θερμικές τάσεις κατά την πυροσυσσωμάτωση και μπορεί να δημιουργήσουν ρωγμές. Συνιστάται τέτοια χαρακτηριστικά να αντικαθιστούνται από ακτίνες καμπυλότητας [25].



Εικόνα 22: Ανάγκη χρήσης ακτινών καμπυλότητας [25].

## Αντίστροφη μηχανική Μήτρας

### Περιγραφή μήτρας Cablel

Οι μήτρες που χρησιμοποιεί μέχρι σήμερα η Cablel κατασκευάζονται στην Κίνα. Διατίθενται σε μερικές προκαθορισμένες διαστάσεις που παράγουν συγκεκριμένα προφίλ. Οι μήτρες αυτές διατίθενται στην ελληνική αγορά με κόστος 35€ περίπου η μια. Οι μεγάλοι χρόνοι αναμονής καθώς και οι περιορισμένες επιλογές κάνουν την εναλλακτική της εκτύπωσης ελκυστική και άξια διερεύνησης. Επίσης δεν υπάρχει επιλογή για μήτρες με ενσωματωμένους εναλλάκτες για ρύθμιση της θερμοκρασίας του υλικού που εξωθείται ούτε για προστασία της μήτρας από υπερθέρμανση.

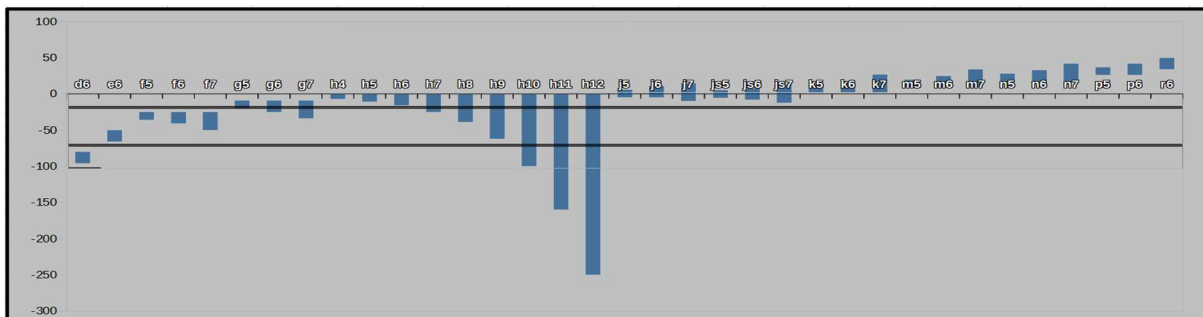
Η υπάρχουσα μήτρα είναι ένα κυλινδρικό εξάρτημα που αποτελείται από μια φωλιά από εργαλειοχάλυβα H13 με ένθετο πυρήνα από καρβίδιο του βολφραμίου για περιορισμό της φθοράς. Η συναρμογή των δύο εξαρτημάτων είναι σφιχτή και μάλλον γίνεται σε πρέσα. Κατόπιν της συναρμολόγησης των δύο κομματιών γίνεται η διάνοιξη της οπής με κάψιμο των υλικών σε ηλεκτροδιάβρωση βύθισης (sink EDM).

### Μέτρηση διαστάσεων & εκτίμηση ανοχών

Η μήτρα συνεργάζεται με άλλα δύο εξαρτήματα που συνολικά αποτελούν τη μητροθήκη. Από αυτά τα εξαρτήματα θα εξαρτηθούν οι ανοχές που θα επιλέξουμε για να εξασφαλίσουμε τη σωστή συναρμογή. Οι διαστάσεις της μήτρας μετρήθηκαν με χρήση παχύμετρου και μηχανής CMM σε δύο μήτρες που μας είχαν αποσταλεί.

Κατόπιν παρατήρησης των μητρών και των εξαρτημάτων με τα οποία συνεργάζονται, συμπεραίνουμε ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που είναι σημαντικά για την τοποθέτηση και σωστή συναρμογή της μήτρας στην μηχανή, είναι η διάμετρος  $D1=31,99\text{mm}$  το ύψος  $h=18\text{mm}$  και ο κώνος  $\phi=60^\circ$  όπως φαίνονται στην εικόνα 25.

Η διάμετρος μετρήθηκε στη μια μήτρα  $31,99\text{mm}$  και στην άλλη  $31,93\text{mm}$ , δεδομένου ότι και οι δύο μήτρες εφαρμόζουν στην ίδια μητροθήκη μπορούμε από αυτό να εξάγουμε μια ανοχή  $[-10,-70\mu\text{m}]$  η οποία είναι σχετικά μεγάλη. Από πίνακα αυτό το εύρος θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε  $h9 [0,-62\mu\text{m}]$  ή  $f8 [-25,-64]$  και άλλες.



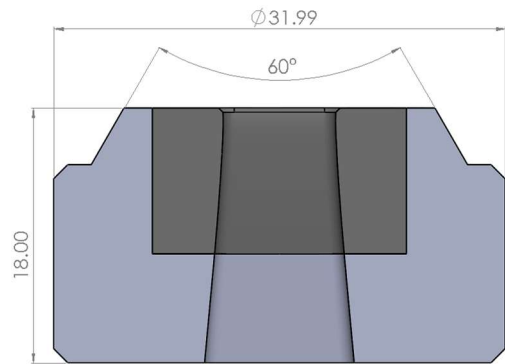
Εικόνα 23: Πεδία ανοχών βασικού άξονα.

Το ύψος  $h$  της μήτρας είναι πολύ βασικό, γιατί σε αυτό βασίζεται η σταθεροποίησή της. Μια πιο κοντή μήτρα δεν θα εξασφάλιζε επαφή με το κωνικό τμήμα της μητροθήκης, άρα θα ήταν απευθυγραμμισμένη με τη μηχανή. Μια πιο μακριά θα ήταν αδύνατο να τοποθετηθεί καθώς το πίσω μέρος της μητροθήκης δε θα έκλεινε.

Η κωνική γεωμετρία εξασφαλίζει την ευθυγράμμιση της μήτρας με τον άξονα της εξώθησης του υλικού. Ωστόσο δε φαίνεται να υπάρχει κάποιο άλλο οδηγητικό χαρακτηριστικό για την ευθυγράμμιση με την έξοδο της μητροθήκης πέρα από την οπή της.



Εικόνα 24: Μητροθήκη



Εικόνα 25: Σκαρίφημα της μήτρας

Εξίσου σημαντικές είναι και οι διαστάσεις της οπής της μήτρας καθώς και η τραχύτητά της. Από την ακρίβεια αυτών των παραμέτρων εξαρτάται η ακρίβεια του τελικού προϊόντος και μπορεί να οδηγήσει στην απόρριψή του αν είναι εκτός προδιαγραφών.

Οι διαστάσεις της οπής είναι χαραγμένες (etched) πάνω στην κάθε μήτρα.



Εικόνα 26: Διαστάσεις οπής μήτρας: 3.15x8.0



Εικόνα 27: Μήτρα της Cablel.

## Επιλογή υλικών

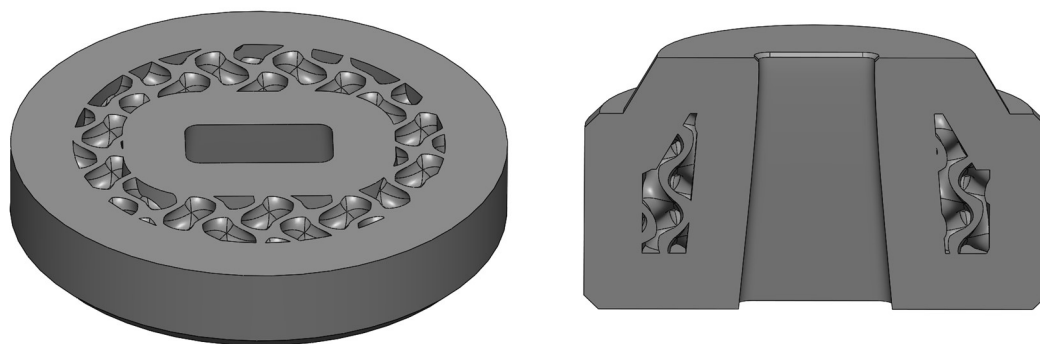
Το υλικό της μήτρας που κάνει τη διέλαση είναι καρβίδιο του βολφραμίου, ωστόσο ο κατασκευαστής δε δίνει προδιαγραφές για τη σκληρότητά του. Για τον προσδιορισμό της σκληρότητας των μητρών έγινε σκληρομέτρηση αυτών στο εργαστήριο μεταλλογραφίας του ΕΜΠ. Η διαδικασία και μεθοδολογία της μέτρησης παρουσιάζονται στο σχετικό κεφάλαιο. Η σκληρότητα που μετρήθηκε είναι 810,7HV.

Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τους χάλυβες H13 και St.17-4 για την εκτύπωση των μητρών. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί τα υλικά αυτά είναι εύκολα διαθέσιμα για τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου αλλά και γιατί τα χρησιμοποιούν ευρέως στην κατασκευή μητρών και καλουπιών. Εν τούτοις όμως η σκληρότητά τους είναι κατώτερη από αυτή του καρβιδίου. Για τη βελτίωση της σκληρότητας οι μήτρες από St.17-4 μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία σύμφωνα με τη βαφή H900.

## Σχεδιασμός μήτρας σε CAD και δημιουργία αρχείου STL

Κατόπιν των μετρήσεων η μήτρα σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα CAD του Solidworks. Μια σημαντική αλλαγή που αναγκαστήκαμε να κάνουμε ώστε η μήτρα να κατασκευαστεί εξ ολοκλήρου με τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης ήταν να σχεδιαστεί ως ένα μονολιθικό κομμάτι και να απορρίψουμε τη χρήση πυρήνα από καρβίδιο. Αυτό γίνεται γιατί την περίοδο συγγραφής αυτής της εργασίας δεν υπάρχει διαθέσιμη τεχνολογία που να επιτρέπει τη ταυτόχρονη εκτύπωση κεραμικών και μεταλλικών υλικών. Η εκτύπωση αμιγώς κεραμικής μήτρας είναι δυνατή, αλλά το κόστος στην παρούσα χρονική στιγμή είναι απαγορευτικό για τη διερεύνησή της. Για να διασφαλίσουμε την συναρμογή μήτρας-μητροθήκης η διάμετρος D1 σχεδιάστηκε 0.05mm μικρότερη δηλαδή 31.94mm.

Η μήτρα από H13 που εκτυπώθηκε με τη μέθοδο BMD δεν εκτυπώθηκε συμπαγής. Κατά το slicing επιλέχθηκε να έχει ένα εξωτερικό τοίχωμα ομοιόμορφου πάχους 4mm και το εσωτερικό της γεμίστηκε με μια δομή γυροειδούς πλέγματος (gyroid lattice structure). Αυτό έγινε για να εξασφαλιστεί η κάθαρση του κομματιού από το συνδετικό μέσο κατά την πυροσυσσωμάτωση. Επιπλέον η μη συμπαγής εκτύπωση συνεπάγεται οικονομία χρόνου και υλικού. Δίνεται έρεισμα για μελέτη σχετικά με την αξιοποίηση των κοιλοτήτων αυτών ως αγωγών ψύξης. Ο τύπος και οι διαστάσεις του χωρικού μοτίβου της χωροπλήρωσης μας δόθηκε από την Lino3D. Η γεωμετρία του πλέγματος σχεδιάστηκε στο CAD ώστε να χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις για την αξιολόγηση της μήτρας.



Εικόνα 28: Εγκάρσια (αριστερά) και διαμήκης (δεξιά) τομή της μήτρας από H13.

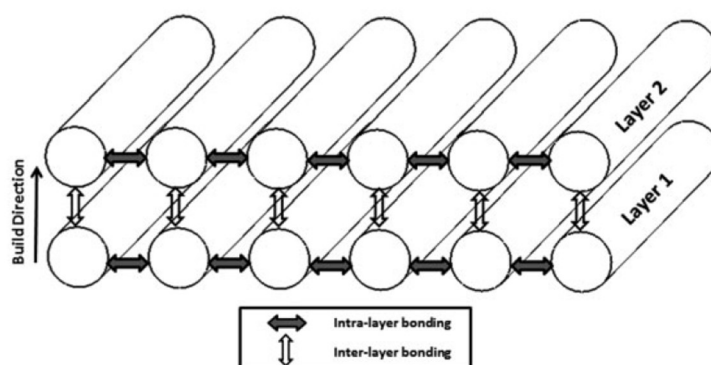
## Μηχανικές δοκιμές

### Σχεδιασμός πειραματικού προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων

Οι μηχανικές ιδιότητες των 3D εκτυπωμένων κομματιών μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από εκείνες των αντίστοιχων κομματιών που κατασκευάζονται με παραδοσιακές κατεργασίες από το ίδιο υλικό.

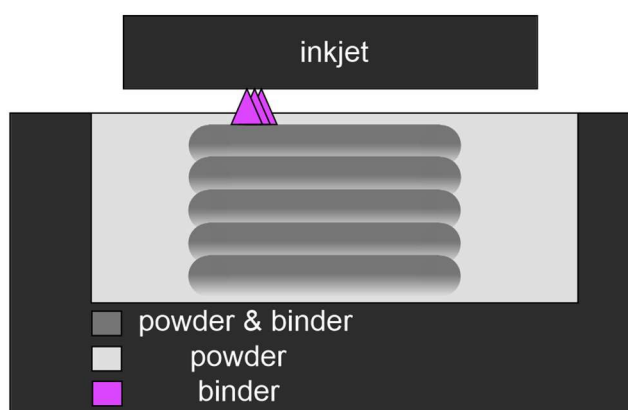
Αρχικά τα αντικείμενα που παράγονται με τις μεθόδους BMD και Binder Jetting, κατά την πυροσυσσωμάτωση αποβάλλουν το συνδετικό μέσο που υπάρχει μέσα τους. Τα κενά που δημιουργούνται, καλύπτονται από την μεταλλική πούδρα, η οποία κινείται υπό την επίδραση της βαρύτητας και δυνάμεων επιφανειακών τάσεων με αποτέλεσμα τα αντικείμενα να συρρικνώνονται. Η συρρίκνωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας του υλικού, ωστόσο δεν απαλλάσσεται εντελώς από το πορώδες. Έτσι οι τελικές ιδιότητες των τρισδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων με βάση τις παραπάνω μεθόδους είναι παρόμοιες με αυτές των χυτών[8].

Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα συχνά εμφανίζουν διαφορετικές ιδιότητες ανάλογα με την κατεύθυνση που κατασκευάστηκαν. Στην BMD (όπως και στην FFF) η κεφαλή εξωθεί τις γραμμές του υλικού σχηματίζοντας την κάθε στρώση. Οι περιοχές ενδοστρωματικής και διαστρωματικής ένωσης είναι σημεία στα οποία ενδέχεται η επιφάνεια επαφής να είναι μικρότερη, να έχουν δημιουργηθεί κενά ή να μην έχει γίνει πλήρης ομογενοποίηση του υλικού μεταξύ διαδοχικών γραμμών. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο έντονο στην ένωση γραμμών που ανήκουν σε διαφορετικές στρώσεις καθώς είναι σύνηθες τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα υλικά της τεχνολογίας FDM να αστοχούν λόγω διαστρωματικής αποκόλλησης.



Εικόνα 29: Ενδοστρωματικές και διαστρωματικές ενώσεις

Στην Binder Jetting ο ψεκασμός του συνδετικού μέσου γίνεται στο πάνω μέρος της κάθε στρώσης. Λόγω της φύσης της κατεργασίας ενδέχεται η πυκνότητα του συνδετικού να διακυμαίνεται ανάλογα με το βάθος εντός μιας στρώσης. Έχουν ήδη αναφερθεί οι επιπτώσεις που έχει το συνδετικό υλικό και θεωρούμε πως η υπόθεση αυτή δημιουργεί υποψίες για ανισότροπη συμπεριφορά. Η θεωρία αυτή αποτυπώνεται οπτικά στην εικόνα 30.



Εικόνα 30: Διακύμανση της πυκνότητας του συνδετικού μέσου σε σχέση με το πάχος στρώσης

Αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού ώστε να αποκτήσουμε την καμπύλη τάσης παραμόρφωσης και από αυτήν να εξάγουμε όριο παραμόρφωσης και διαρροής (YTS, UTS). Πέρα από απλή δοκιμή εφελκυσμού κρίθηκε σημαντικό να γίνουν δοκιμές και σε υψηλή θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία λειτουργίας της μήτρας η οποία είναι 330-370°C. Η Desktop Metal δίνει τις ιδιότητες των υλικών St.17-4 και H13 αλλά μόνο στο επίπεδο XY και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Αναγκαίο κρίθηκε οι δοκιμές να λαμβάνουν υπόψη τη φορά της κατεργασίας, οπότε δοκίμια τυπώθηκαν σε 3 διαφορετικές κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα για κάθε ένα από τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν:

- 9 πειράματα εφελκυσμού, στους 25°C, από τα οποία:
  - 3 για δοκίμια τυπωμένα στο επίπεδο XY του εκτυπωτή.
  - 3 για δοκίμια τυπωμένα στο επίπεδο YZ του εκτυπωτή.
  - 3 για δοκίμια τυπωμένα κατά την κατεύθυνση Z<sup>1</sup>.
- 2 πειράματα εφελκυσμού, στους 350°C και 250°C, τυπωμένα στο επίπεδο XY.

## Μηχανές εφελκυσμού

Δοκιμές του εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στο Κτίριο Αντοχής Υλικών της ΣΕΜΦΕ στο ΕΜΠ. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια Instron 1121 Series IX Automated Material Testing System ονομαστικού φορτίου 10kN σε συνδυασμό με φούρνο (Environmental Chamber) Instron 3119-406-221 μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας 350°C.

Λόγω των περιορισμών των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιήσαμε, ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν δοκίμια τυπωμένα στο επίπεδο YZ και κατά την κατεύθυνση Z, με αρκετά λεπτή διατομή ώστε να μπορούν να σπάσουν από την Instron 1121. Για αυτό το λόγο επιπλέον δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο κτίριο Ξ της σχολής Μηχανολόγων Μηχα-

<sup>1</sup> Με την έκφραση “δοκίμια τυπωμένα κατά την κατεύθυνση (ή άξονα) Z” εννοούμε ότι τα δοκίμια αυτά εκτυπώθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε, όταν εφελκυστούν, να λάβουμε τις ιδιότητες του υλικού στον αντίστοιχο άξονα του συστήματος συντεταγμένων του εκτυπωτή.

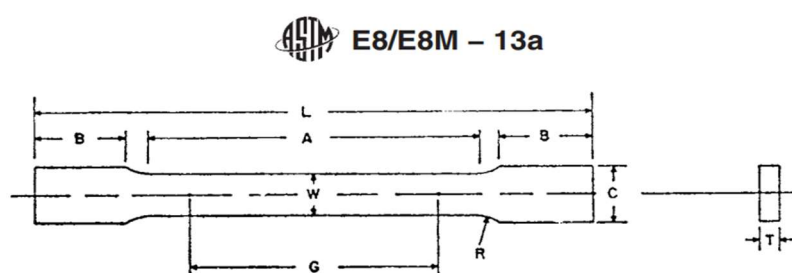
νικών του ΕΜΠ. Η μηχανή που βρίσκεται εκεί είναι μια Instron ονομαστικού φορτίου 100kN πράγμα που επιτρέπει τη χρήση πιο παχίων δοκιμών, ευκολότερων στην κατασκευή.

## Σχεδιασμός Δοκιμών

### Πρότυπα

Τα πρότυπα που καθορίζουν τον τρόπο διεξαγωγής μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού είναι τα ASTM E8[26] για εφελκυσμό μεταλλικών υλικών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (22°C) και το ASTM E21[27] για αυξημένες θερμοκρασίες. Το ASTM E8 παρέχει τον ακόλουθο πίνακα με τις προτεινόμενες διαστάσεις δοκιμών.

Πίνακας 1: Διαστάσεις δοκιμών. Πηγή ASTM E8[26].



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gauge length	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness	thickness of material		
R—Radius of fillet, min	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, min	450	200	100
A—Length of reduced section, min	225	57	32
B—Length of grip section, min	75	50	30
C—Width of grip section, approximate	50	20	10

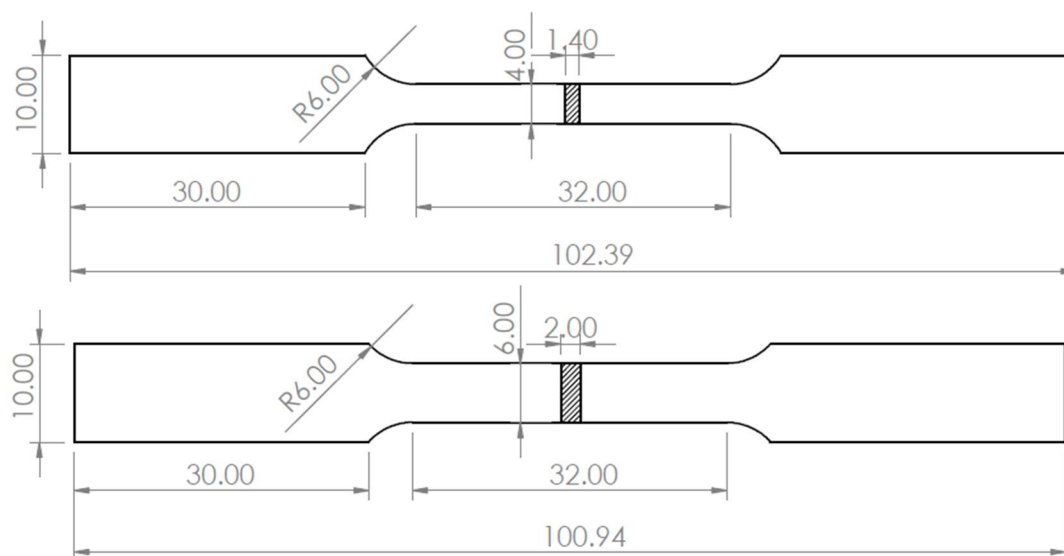
Πρώτα σχέδια δοκιμίων και προβλήματα πριν τη εκτύπωση

Οι διαστάσεις των δοκιμίων βασίστηκαν σε αυτές που καθορίζονται από τα πρότυπα για "Subsize Specimen" και το πάχος επιλέχθηκε  $T=2\text{mm}$ . Ακολούθως υπολογίστηκε το φορτίο στο οποίο θα γίνει η θραύση των δοκιμίων.

Πίνακας 2: Υπολογισμός δύναμης θραύσης

Υλικό	Εμβαδόν διατομής $A[\text{mm}^2]$	UTS	Δύναμη θραύσης $F=P \cdot (W \cdot T)$
St.7-4	12	912 MPa	10,95kN
H13	12	1700 MPa	20,04kN

Παρατηρήθηκε ότι το αναγκαίο φορτίο για τη θραύση είναι ανώτερο του μέγιστου φορτίου που μπορεί να ασκήσει η μηχανή Instron 1121. Για αυτό το λόγο υπολογίστηκε η μέγιστη επιτρεπτή διατομή που να εξασφαλίζει θραύση των δοκιμίων. Αυτή η διατομή, για το H13 που έχει το μεγαλύτερο όριο θραύσης, είναι  $A=F/P=5,88\text{mm}^2$ . Για  $W=4\text{mm}$  και  $T=1,4\text{mm}$  η διατομή προκύπτει  $A=5,6\text{mm}^2$  που εξασφαλίζει τη θραύση των δοκιμίων από H13 στα 9,52kN το οποίο είναι εντός των ορίων της μηχανής. Τα κατασκευαστικά σχέδια των πρώτων δοκιμίων που σχεδιάστηκαν παρουσιάζονται στην εικόνα 31.



Εικόνα 31: Διαστάσεις δοκιμίων με βάση τον πρώτο σχεδιασμό

Τα STEP αρχεία των δοκιμίων στάλθηκαν στην LINO 3D. Τεχνικοί της LINO 3D έκαναν προσομοίωση της πυροσυσσωμάτωσης στο πρόγραμμα Live Sinter™ και παρατήρησαν υπερβολικά μεγάλες παραμορφώσεις στα δοκίμια. Ιδιαίτερο πρόβλημα υπήρχε στα δοκίμια που θα εκτυπωνόνταν κατά τον Z άξονα καθώς και στα λεπτά δοκίμια υψηλών θερμοκρασιών. Παράλληλα ανέφεραν ότι τα πολύ λεπτά δοκίμια ήταν πιθανόν να σπάσουν κατά την διάρκεια της εκσκαφής. Συνολικά τα δοκίμια κρίθηκαν μη κατασκευάσιμα.

Για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προέκυψαν, προτάθηκαν δύο εναλλακτικές. Η πρώτη περιλάμβανε την εκτύπωση πλακών υλικού και την στη συνέχεια την κατεργασία τους



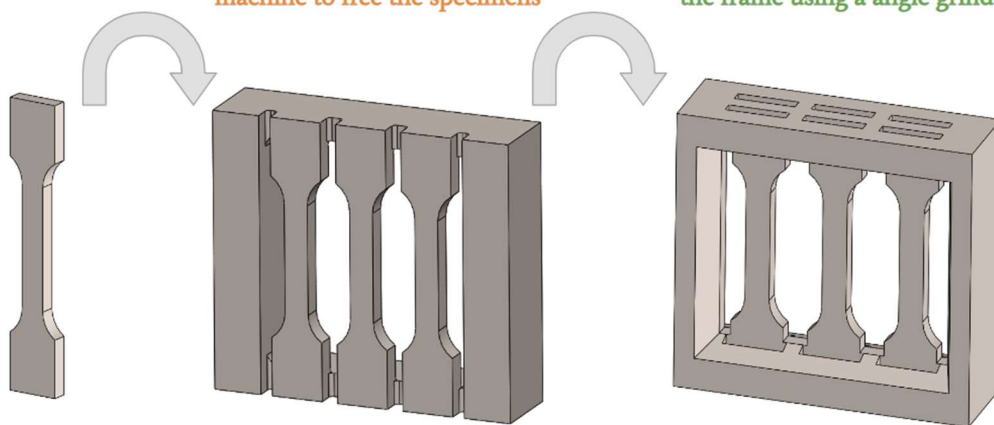
σε μια εργαλειομηχανή CNC. Αν και αυτή η προσέγγιση έχει ακολουθηθεί και από άλλες έρευνες για την κατασκευή δοκιμών, παρόλα αυτά δημιουργεί νέα προβλήματα, όπως η αλλοίωση των αποτελεσμάτων λόγω εισαγωγής παραμενουσών τάσεων, η αύξηση του κόστους, χρόνου αναμονής και της αβεβαιότητας που συνδέεται με τη διαδικασία.

Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη πρόταση περιλάμβανε τον ανασχεδιασμό των δοκιμών με τρόπο κατάλληλο ώστε να ελαττωθούν τα προβλήματα της πυροσυσσωμάτωσης. Αυτή η προσέγγιση παρείχε αναλλοίωτα αποτελέσματα, χωρίς επιπλέον κόστος και καθυστέρηση για αυτό και επιλέχθηκε.

Για τα δοκίμια που τυπώθηκαν στα επίπεδα XY και YZ μειώθηκε το μήκος τους και αυξήθηκε το πάχος τους στα 4mm. Αυτές οι αλλαγές ήταν αρκετές για να μειώσουν τις παραμορφώσεις που προέβλεπαν οι προσομοιώσεις. Η αλλαγή στη διατομή έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζονται θεωρητικά 36kN για τη θραύση των δοκιμών από H13.

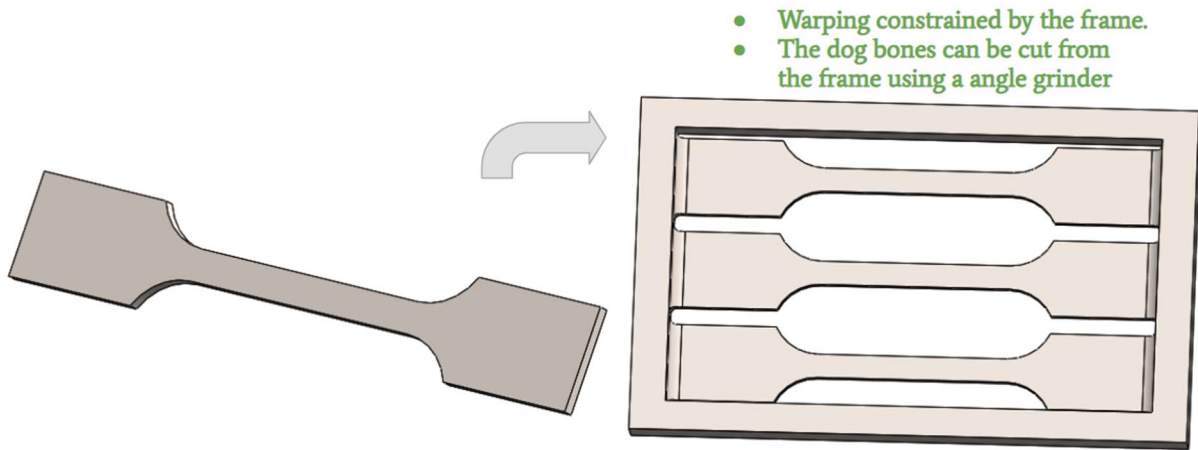
Ο σχεδιασμός των δοκιμών που θα τυπώνονταν κατά τον Z άξονα αποτέλεσε μεγαλύτερη πρόκληση. Επιλέχθηκε η ένωση πολλών δοκιμών σε ένα ενιαίο πλαίσιο ώστε τα ίδια τα δοκίμια να αλληλοστηρίζονται. Το πρώτο σχέδιο σε αυτή την κατεύθυνση έγινε με τη λογική ότι θα χρειαστεί εργαλειομηχανή για την αφαίρεση των δοκιμών από το ενιαίο σώμα, αλλά παρόλα αυτά το σημείο που θα γίνει η θραύση των δοκιμών θα μένει ανέγγιχτο. Στη συνέχεια αυτό το σχέδιο βελτιώθηκε αυξάνοντας κι άλλο τη στιβαρότητα του και τη συμπεριφορά του κατά την πυροσυσσωμάτωση με το επιπλέον πλεονέκτημα ότι τα δοκίμια πια μπορούν να απελευθερωθούν από το πλαίσιο με τη χρήση απλού γωνιακού τροχού.

- excessive warping
- impossible to print
- Notable warping
- Need to post process in milling machine to free the specimens
- negligible warping
- The dog bones can be cut from the frame using a angle grinder

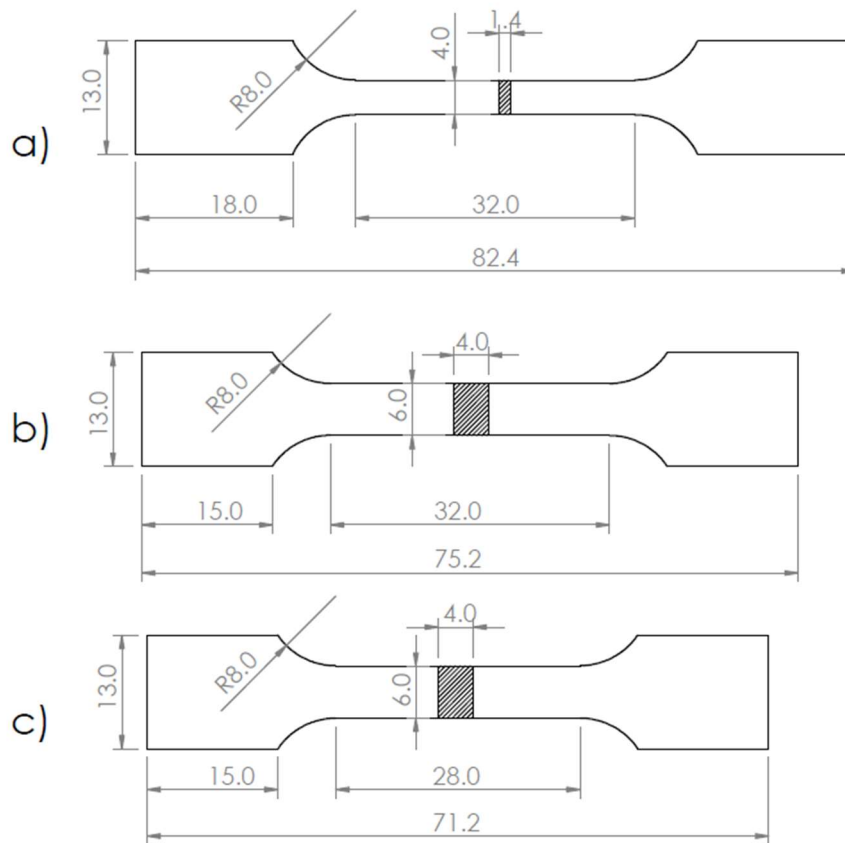


Εικόνα 32: Στάδια ανασχεδιασμού δοκιμών για να τυπωθούν στην κατεύθυνση Z

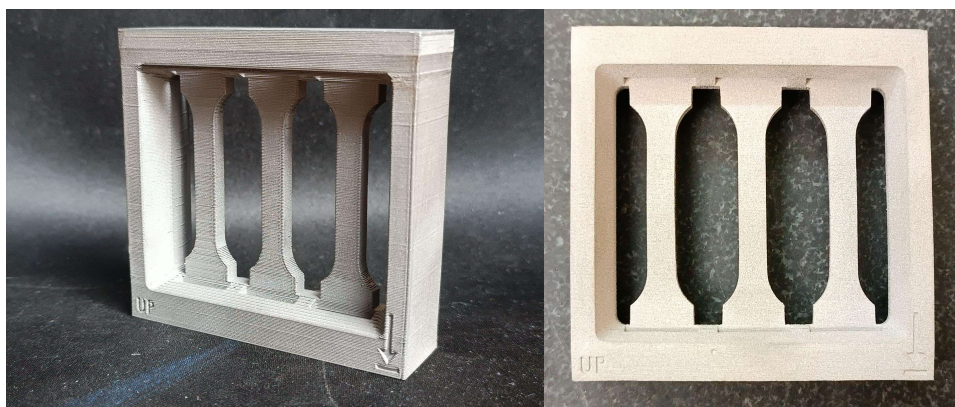
Η ίδια λογική ακολουθήθηκε στον ανασχεδιασμό των δοκιμών υψηλών θερμοκρασιών. Τα δοκίμια ενώθηκαν μεταξύ τους με ένα πλαίσιο από το οποίο μπορούν να κοπούν με γωνιακό τροχό. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και εδώ ήταν ενθαρρυντικά προβλέποντας ελάχιστη παραμόρφωση, ενώ μειώθηκε και η πιθανότητα κάποιο δοκίμιο να σπάσει όσο βρίσκεται σε «πράσινη κατάσταση».



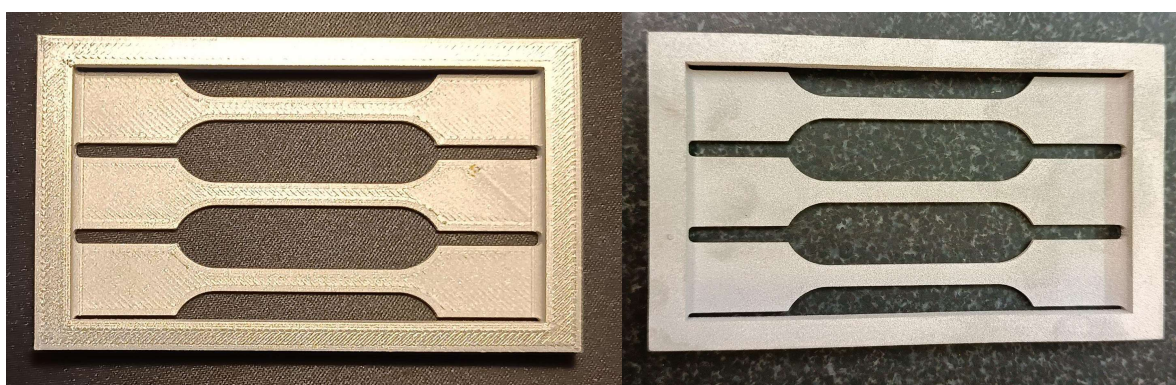
Εικόνα 33: Στάδια ανασχεδιασμού δοκιμίων υψηλών θερμοκρασιών.



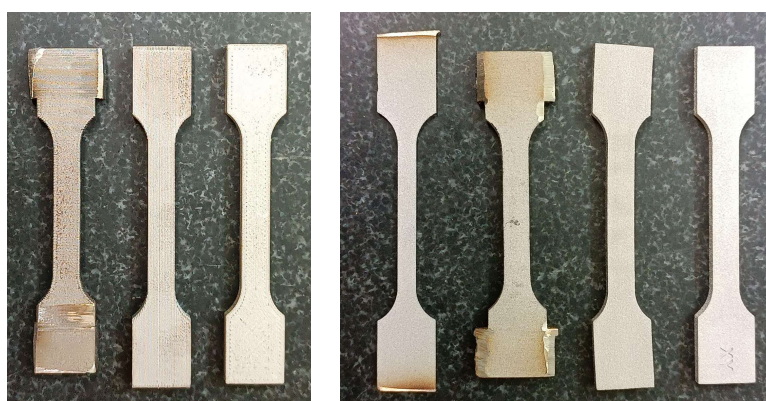
Εικόνα 34: Τελικές διαστάσεις δοκιμίων μετά την κοπή από τα πλαίσια: α) Δοκίμια υψηλών θερμοκρασιών. β) Δοκίμιο για εκτύπωση στην κατεύθυνση X & Y γ) Δοκίμιο για εκτύπωση στην κατεύθυνση Z.



Εικόνα 35: Φωτογραφίες τυπωμένων δοκιμίων κατά την κατεύθυνση Z, αριστερά από H13, δεξιά από St.17-4



Εικόνα 36 : Φωτογραφίες τυπωμένων λεπτών δοκιμίων για εφελκυσμό σε ανεβασμένες θερμοκρασίες, αριστερά από H13, δεξιά από St.17-4



Εικόνα 37: Δοκίμια μετά την κοπή από τα πλαίσιά τους, αριστερά από H13, δεξιά από St.17-4.

Ο σχεδιασμός των πλαισίων για την στήριξη των δοκιμίων και την αποφυγή παραμορφώσεων ήταν αποτελεσματικός και όλα τα δοκίμια εκτυπώθηκαν με επιτυχία. Τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν στο επίπεδο YZ παρουσίασαν ελαφρά κάμψη.

### Δοκιμές εφελκυσμού σε υψηλή θερμοκρασία

Οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου μετρήθηκαν πριν τα πειράματα και παρουσιάζονται στο πίνακα 3.

Πίνακας 3: Διαστάσεις δοκιμών υψηλών θερμοκρασιών.

Δοκίμιο	Ελεύθερο μήκος: L [mm]	Πλάτος [mm]	Πάχος [mm]	Εμβ. διατομής: A [mm]
St17-4 HT 1	32,00	4,05	1,48	5,99
St17-4 HT 2	32,00	4,03	1,48	5,96
St17-4 HT 3	32,00	4,05	1,49	6,03
St17-4 HT 4	32,00	4,07	1,48	6,02
St17-4 HT 5	32,00	4,11	1,46	6,00
St17-4 HT 6	32,00	4,07	1,47	5,98
H13 HT 1	32,00	1,45	4,24	6,15
H13 HT 2	32,00	1,45	4,23	6,13
H13 HT 3	32,00	1,45	4,24	6,15

### Αποτελέσματα πειραμάτων

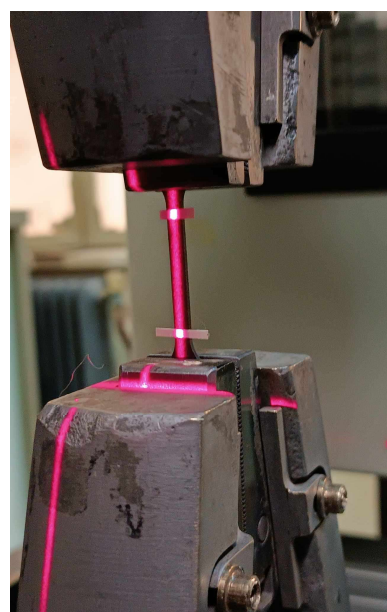
Κατά την διάρκεια των πειραμάτων σε ανεβασμένη θερμοκρασία τα μεγέθη που μετρούνταν άμεσα ήταν η δύναμη που ασκούσαν στις αρπάγες και η μετατόπιση αυτών. Στα πειράματα που έγιναν εκτός του κλιβάνου μετρήθηκε επιπλέον η παραμόρφωση των δοκιμών με χρήση λέιζερ.

Υπολογισμός της τάσης και της παραμόρφωσης έγινε σύμφωνα με τους ακόλουθους τύπους και γράφτηκε κώδικας στο MatLab για την εξαγωγή διαγραμμάτων (εικόνα 40&41).

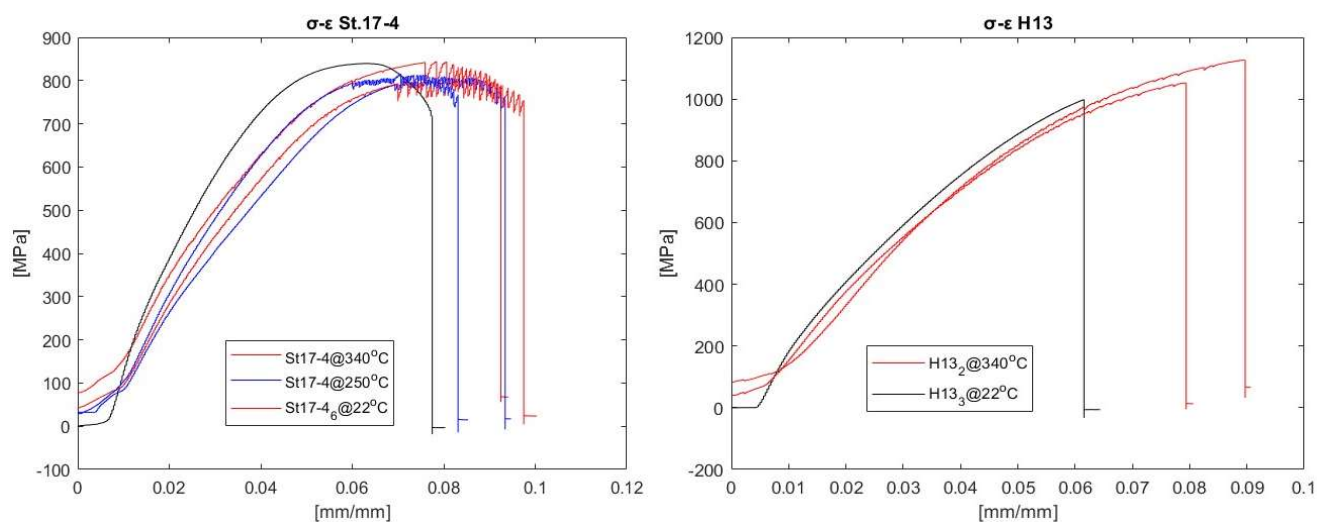
- $\sigma = \frac{P}{A}$ , όπου P το φορτίο και A το εμβαδόν διατομής.
- $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$  όπου L το αρχικό μήκος και  $\Delta L$  η επιμήκυνση.



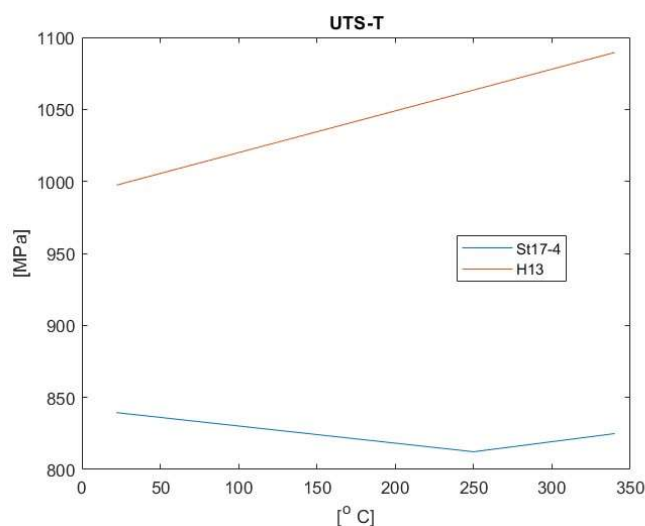
Εικόνα 38: Δοκίμια εντός του φούρνου.



Εικόνα 39: Μέτρηση της παραμόρφωσης με Laser.



Εικόνα 40: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης

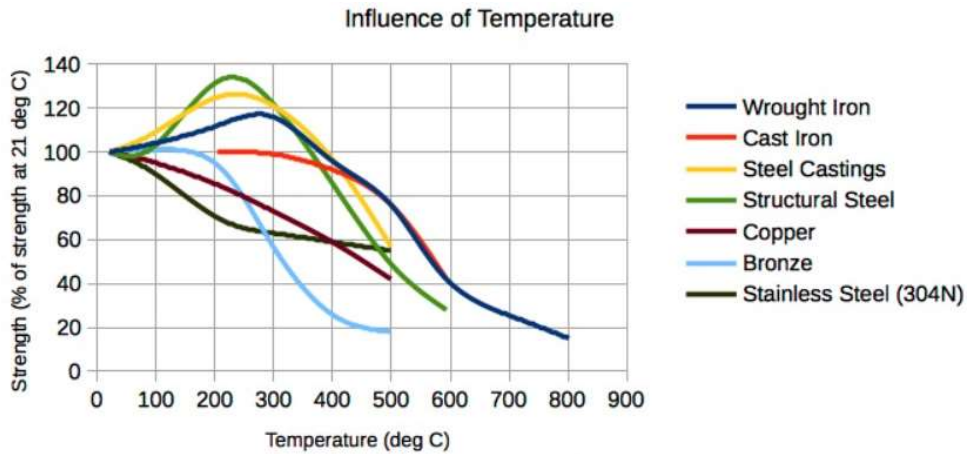


Εικόνα 41: Διακύμανση του ορίου θραύσης σε σχέση με την θερμοκρασία

Η τάση θραύσης στη θερμοκρασία περιβάλλοντος για το St.17-4 βρέθηκε στα 839MPa και για το H13 στα 997Μpa.

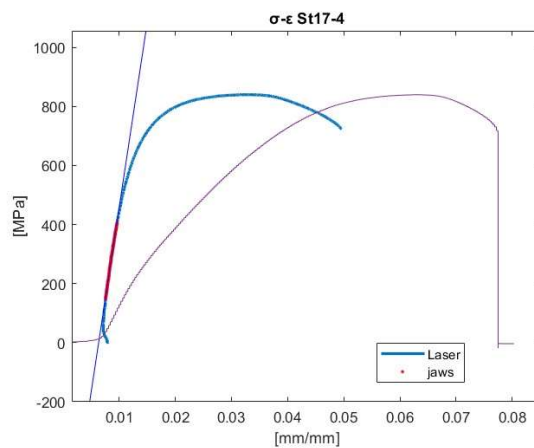
Το H13 φαίνεται να γίνεται πιο ανθεκτικό με αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό πιθανόν γίνεται επειδή απαλείφονται οι θερμικές παραμένουσες τάσεις που είχαν δημιουργηθεί κατά την πυροσυσσωμάτωση και έτσι αυξάνεται η ικανότητα παραλαβής φορτίου από το υλικό.

Από τα πειράματα είδαμε ότι η τάση διαρροής για το St.17-4 ήταν πρακτικά αμετάβλητη σε σχέση με την θερμοκρασία ενώ για το H13 φαίνεται να αυξάνεται κατά 9,4%. Βασιζόμενοι στο διάγραμμα στην εικόνα 42 βλέπουμε πως αυτή η συμπεριφορά σε σχέση με τη θερμοκρασία συμπίπτει με την αντοχή του χυτοσιδήρου (cast iron) για το St.17-4 και με το wrought iron . Από το ίδιο διάγραμμα βλέπουμε πως στους 500°C η αντοχή των υλικών αυτών πέφτει στο 75% αυτής που έχουν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι εκτιμούμε ότι η τάση διαρροής του St.17-4 στους 500°C είναι 629.5MPa και 748.0MPa για το H13.

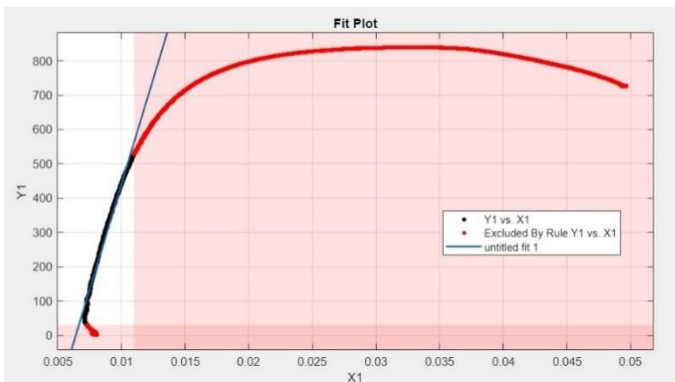


Εικόνα 42: Διακύμανση του ορίου θραύσης σε σχέση με τη θερμοκρασία για διάφορα υλικά [28]

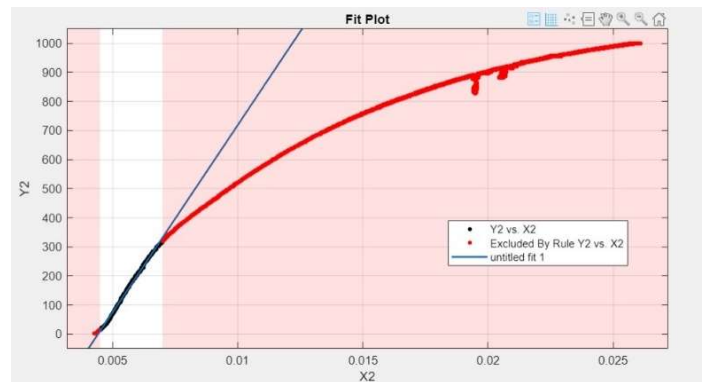
Στις μετρήσεις που έγιναν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, χρησιμοποιήθηκε συσκευή λέιζερ που επιτρέπει τη μέτρηση της παραμόρφωσης με μεγαλύτερη ακρίβεια (εικόνα 43). Μέσω του εργαλείου του Matlab curve fitter, έγινε επεξεργασία των δεδομένων και υπολογίστηκε η κλίση της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης στη γραμμική περιοχή. Από την επεξεργασία προέκυψε ότι η ελαστικότητα του St.17-4 είναι 122GPa και του H13 128GPa. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά χαμηλότερες από το μέτρο Young των αντίστοιχων υλικών που έχουν κατασκευαστεί με συμβατικές κατεργασίες.



Εικόνα 43: Σύγκριση καμπυλών σ-ε: Μέτρηση της μετακίνησης των αρπαγών - Μετρήσεις του λέιζερ.



Εικόνα 44: MatLab curve fitter tool: εύρεση μέτρου Young για το St.17-4



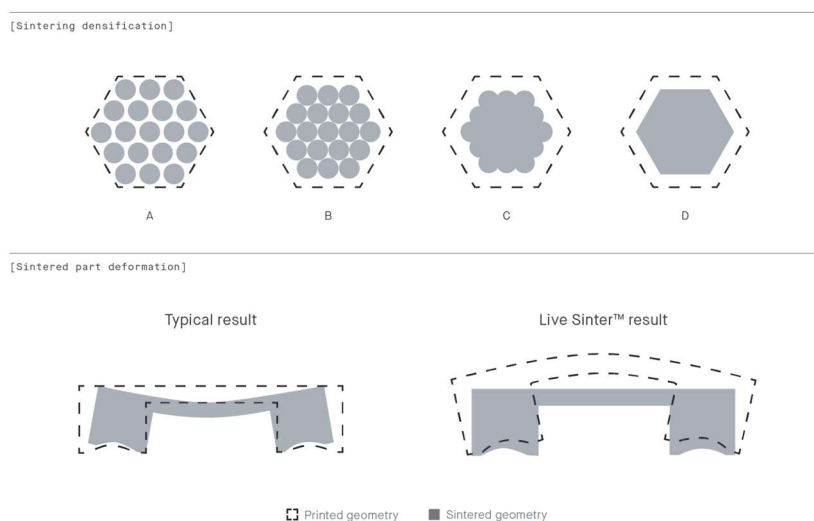
Εικόνα 45: MatLab curve fitter tool: εύρεση μέτρου Young για το H13.

## Προσομοίωση πυροσυσσωμάτωσης

### Μεθοδολογία προσομοίωσης πυροσυσσωμάτωσης για αντιστάθμιση

Στις μεθόδους BMD και Binder Jetting η γεωμετρία των κομματιών αλλάζει σημαντικά κατά την πυροσυσσωμάτωση τους. Τότε τα κομμάτια συρρικνώνονται και λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που φτάνει κοντά στο σημείο τήξης του υλικού τους, μαλακώνουν και κάμπτονται κάτω από το βάρος τους (εικόνα 46).

Για να επιτευχθεί η επιθυμητή γεωμετρία του κομματιού μετά την πυροσυσσωμάτωση, χρησιμοποιούνται ειδικά προγράμματα όπως το Altair Inspire Print3D ή το Live sinter™ τα οποία κάνουν αντιστάθμιση της γεωμετρίας του STL αρχείου που πρόκειται να εκτυπωθεί. Τα προγράμματα αυτά προσομοιώνουν τη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης. Μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας υπολογίζονται οι παραμορφώσεις και έπειτα βρίσκεται η απόκλιση της προκύπτουσας γεωμετρίας από την ιδεατή. Το λογισμικό παραμορφώνει το STL αρχείο του «πράσινου κομματιού» αντίθετα από την κατεύθυνση που προέκυψε από την προσομοίωση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ο κύκλος τελειώνει, όταν η απόκλιση του τελικού κομματιού από το ιδεατό είναι κάτω από κάποιο καθορισμένο όριο.

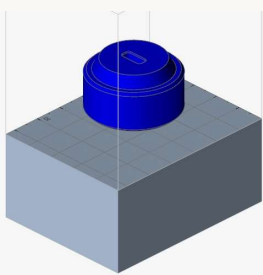
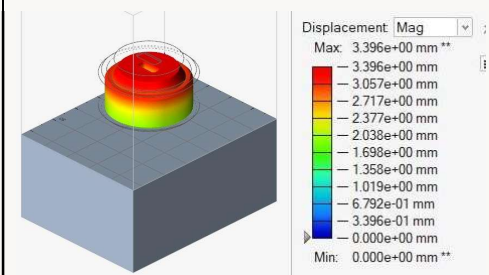
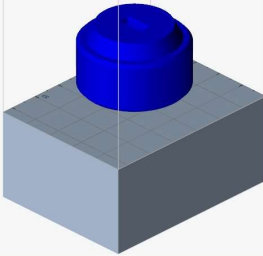
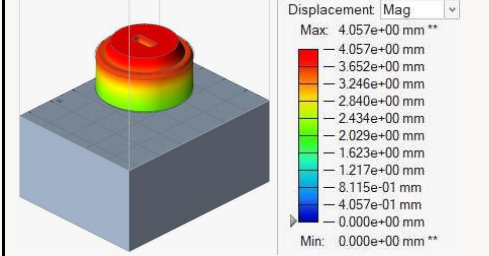


Εικόνα 46: Αλλαγή της μορφής κατά τη πυροσυσσωμάτωση.

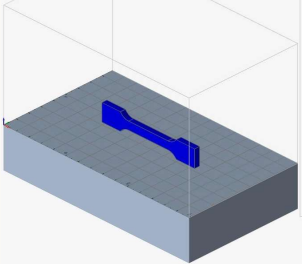
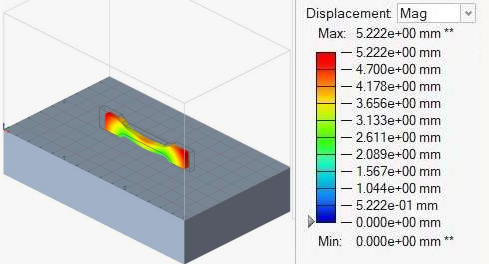
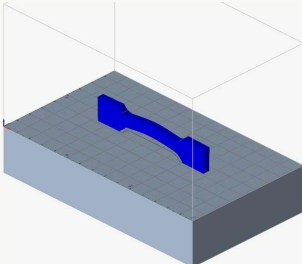
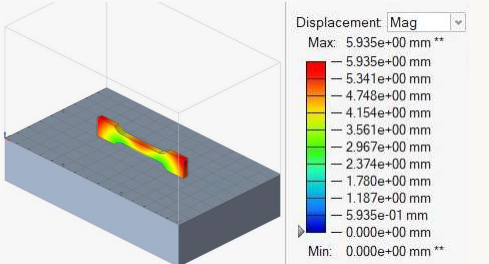
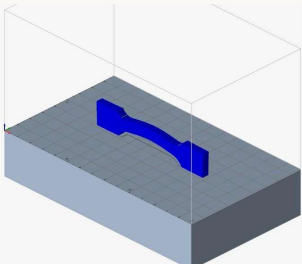
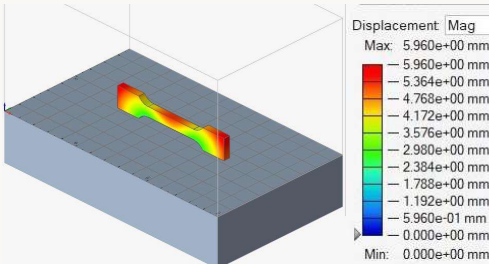
Η Lino 3D χρησιμοποίησε το Live sinter™ για την προετοιμασία των κομματιών. Το Live sinter™ είναι το επίσημο λογισμικό της Desktop Metal για χρήση με τους εκτυπωτές της. Προσομοιώσεις ήταν σημαντικό να γίνουν, για να βεβαιωθούμε για την κατασκευασιμότητα των εξαρτημάτων, πριν την τελική παραγγελία, ωστόσο το πρόγραμμα αυτό δεν μας ήταν διαθέσιμο και για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε το Altair Inspire που έχει παρόμοιες δυνατότητες. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση όλων των κομματιών που εκτυπώθηκαν περιγράφεται αναλυτικά στο παράρτημα Α.

## Αποτελέσματα προσομοίωσης

Πίνακας 4: Προσομοίωση πυροσ/σης μήτρας.

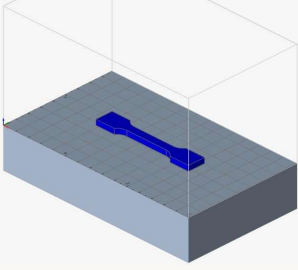
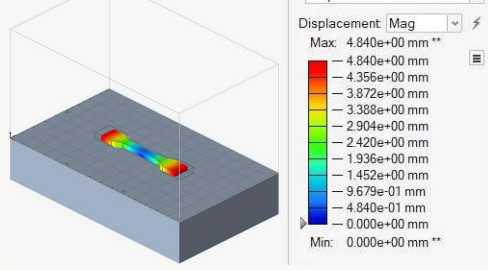
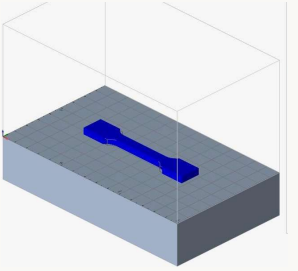
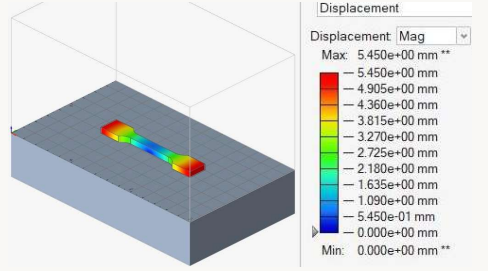
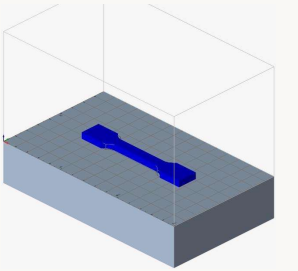
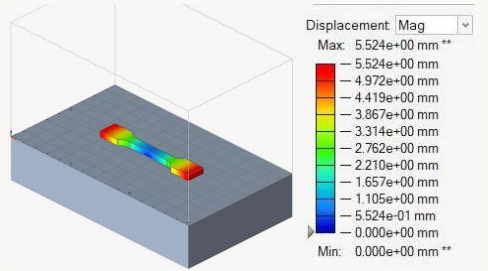
Αριθμός επανάληψης	Πράσινο κομμάτι	Κομμάτι μετά την πυροσυσσώματωση
Αρχική γεωμετρία		
Επανάληψη 1		

Πίνακας 5: Προσομοίωση πυροσ/σης δοκιμών εκτυπωμένων κάθετα στην τράπεζα.

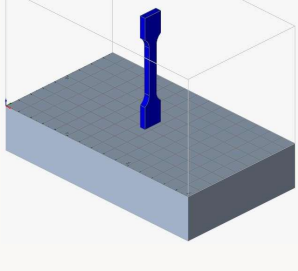
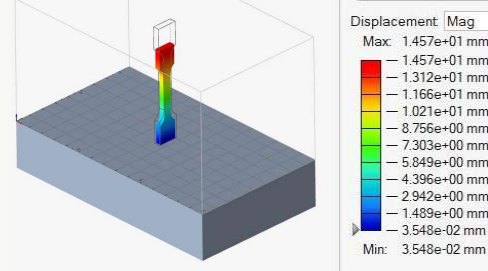
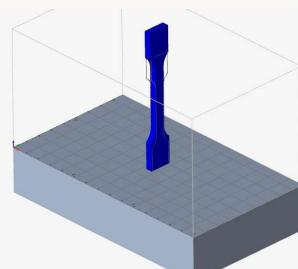
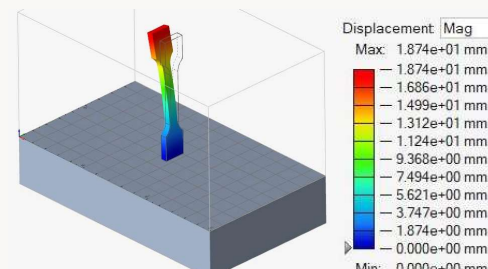
Αριθμός επανάληψης	Πράσινο κομμάτι	Κομμάτι μετά την πυροσυσσώματωση
Αρχική γεωμετρία		
Επανάληψη 1		
Επανάληψη 2		



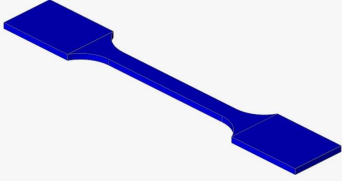
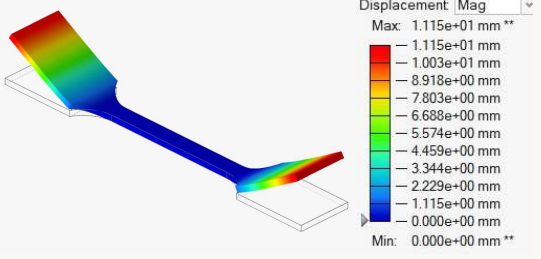
Πίνακας 6: Προσομοίωση πυροσ/σης δοκιμών εκτυπωμένων εφαπτόμενα στην τράπεζα.

Αριθμός επανάληψης	Πράσινο κομμάτι	Κομμάτι μετά την πυροσυσσώματωση
Αρχική γεωμετρία		
Επανάληψη 1		
Επανάληψη 2		

Πίνακας 7: Προσομοίωση πυροσ/σης δοκιμών εκτυπωμένων κατά τον άξονα Z.

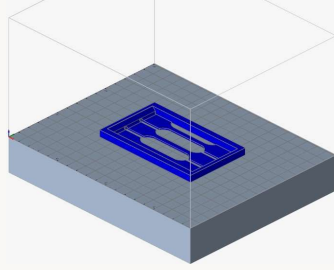
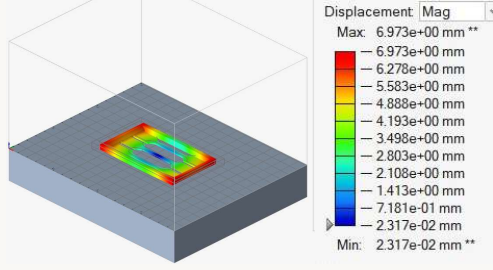
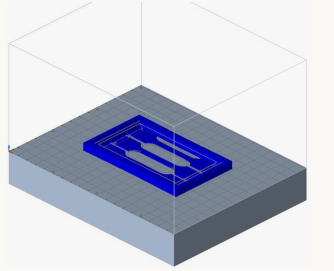
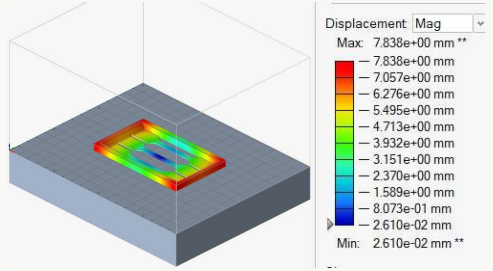
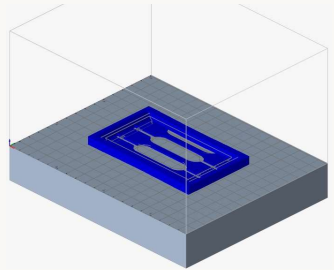
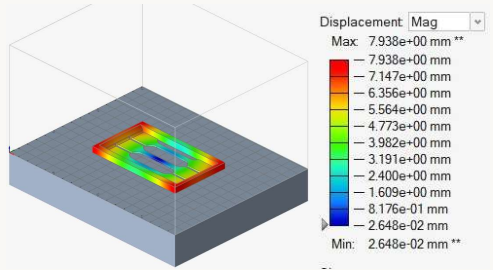
Αριθμός επανάληψης	Πράσινο κομμάτι	Κομμάτι μετά την πυροσυσσώματωση
Αρχική γεωμετρία		
Επανάληψη 1		

Πίνακας 8: Προσομοίωση πυροσ/σης λεπτών δοκιμών εκτυπωμένων εφαιπτόμενα στην τράπεζα.

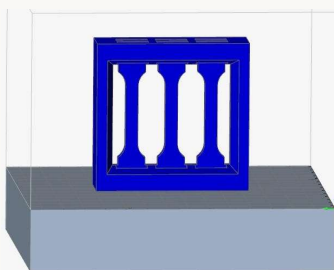
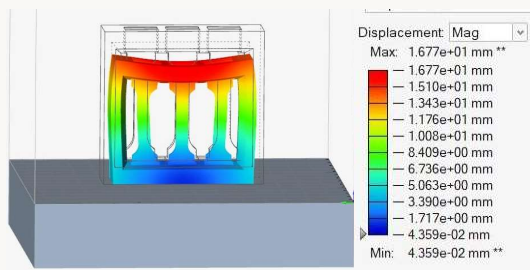
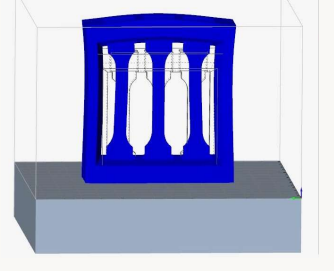
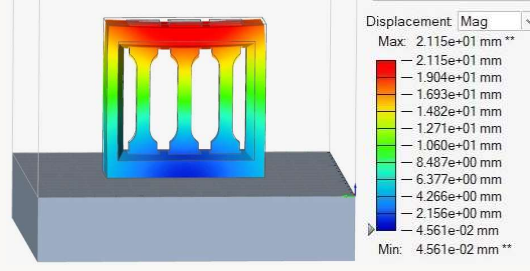
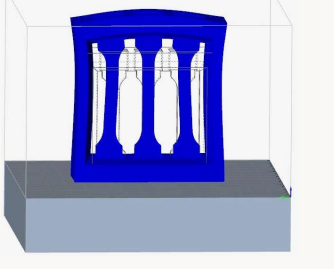
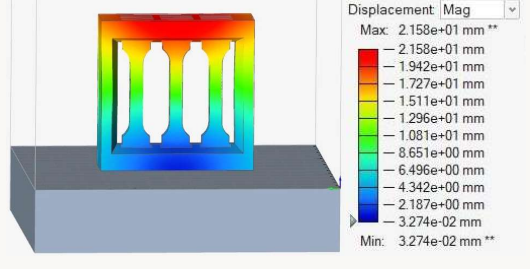
Αριθμός επανάληψης	Πράσινο κομμάτι	Κομμάτι μετά την πυροσυσσώματωση
Αρχική γεωμετρία		

Σε μερικά κομμάτια η γεωμετρία τους ήταν τέτοια που ανεξάρτητα την αντιστάθμιση δε γινόταν να επιτευχθεί η επιθυμητή γεωμετρία. Συγκεκριμένα δοκίμια εκτυπωμένα κατά τη διεύθυνση Z ήταν ασταθή και επικίνδυνο να πέσουν κατά τη διάρκεια της πυροσυσσώματωσης. Από την άλλη τα λεπτά δοκίμια κάμπτονταν έντονα λόγω θερμικών τάσεων. Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίστηκαν με ανασχεδιασμό και αύξηση της στιβαρότητας των κομματιών (πίνακας 9 & 10).

Πίνακας 9: Προσομοίωση πυροσ/σης 3 λεπτών δοκιμών εκτυπωμένων εφαιπτόμενα στην τράπεζα.

Αριθμός επανάληψης	Πράσινο κομμάτι	Κομμάτι μετά την πυροσυσσώματωση
Αρχική γεωμετρία		
Επανάληψη 1		
Επανάληψη 2		

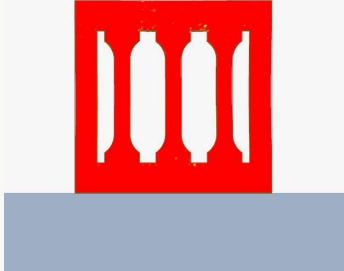
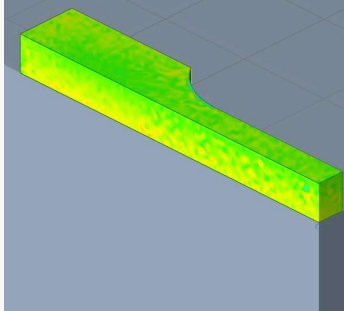
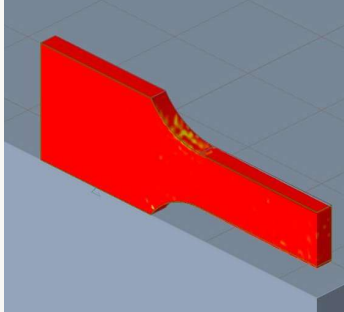
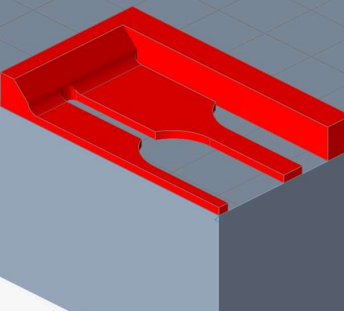
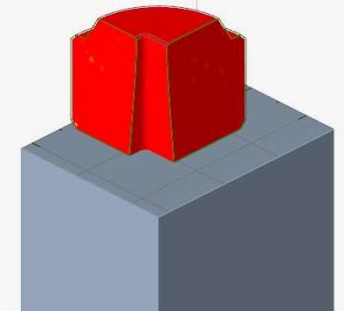
Πίνακας 10: Προσομοίωση πυροσ/σης 3 δοκιμών εκτυπωμένων κατά τον άξονα Z με πλαίσιο υποστήριξης.

Αριθμός επανάληψης	Πράσινο κομμάτι	Κομμάτι μετά την πυροσυσωμάτωση
Αρχική γεωμετρία		
Επανάληψη 1		
Επανάληψη 2		

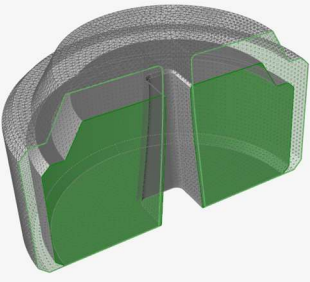
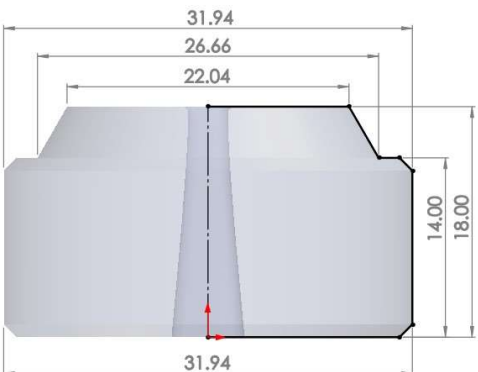
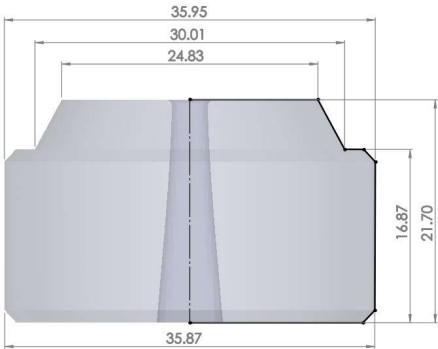
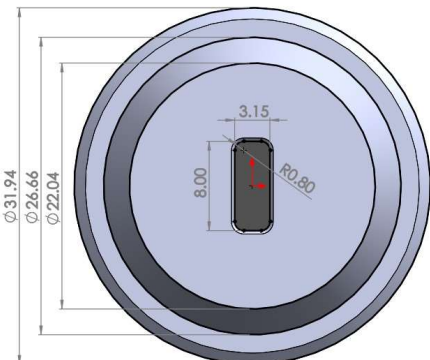
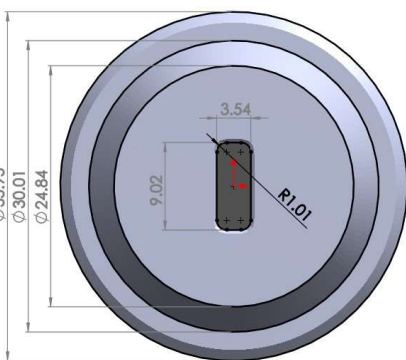
Μέσω της προσομοίωσης στο Altair μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες και για τη σχετική πυκνότητα του τελικού αντικειμένου. Στον πίνακα 11 υπολογίστηκε στο  $97.8 \pm 0.1\%$  του αρχικού υλικού σε όλα τα κομμάτια και χωρίς σημαντική διακύμανση εντός αυτών. Οι τιμές αυτές είναι σύμφωνες με τις τιμές του κατασκευαστή για τις μεταλλικές πούδρες που χρησιμοποιήθηκαν.

Επιπλέον παρατηρήθηκε (πίνακας 12) πως η αντιστάθμιση κατά τις διευθύνσεις x,y είναι κοινή  $\approx 12.5\%$  ενώ κατά την Z είναι αυξημένη, στο  $20.5\%$ , λόγω της επίδρασης της βαρύτητας.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοίωσης υπολογισμού σχετικής πυκνότητας.

<p>Τρία δοκίμια εκτυπωμένα κατά τον άξονα Z με πλαίσιο υποστήριξης.</p>		<p>Relative Density: Max: 9.780e-01 ** Min: 9.764e-01 **</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 9.780e-01</li> <li>— 9.778e-01</li> <li>— 9.777e-01</li> <li>— 9.775e-01</li> <li>— 9.773e-01</li> <li>— 9.772e-01</li> <li>— 9.770e-01</li> <li>— 9.769e-01</li> <li>— 9.767e-01</li> <li>— 9.765e-01</li> <li>— 9.764e-01</li> </ul>
<p>Δοκίμια εκτυπωμένα στο επίπεδο XY(εφαπτόμενα στην τράπεζα).</p>		<p>Relative Density: Max: 9.753e-01 ** Min: 9.752e-01 **</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 9.753e-01</li> <li>— 9.753e-01</li> <li>— 9.753e-01</li> <li>— 9.753e-01</li> <li>— 9.753e-01</li> <li>— 9.753e-01</li> <li>— 9.752e-01</li> <li>— 9.752e-01</li> <li>— 9.752e-01</li> <li>— 9.752e-01</li> <li>— 9.752e-01</li> </ul>
<p>Δοκίμια εκτυπωμένα στο επίπεδο YZ.</p>		<p>Relative Density: Max: 9.780e-01 ** Min: 9.761e-01 **</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 9.780e-01</li> <li>— 9.778e-01</li> <li>— 9.776e-01</li> <li>— 9.774e-01</li> <li>— 9.772e-01</li> <li>— 9.771e-01</li> <li>— 9.769e-01</li> <li>— 9.767e-01</li> <li>— 9.765e-01</li> <li>— 9.763e-01</li> <li>— 9.761e-01</li> </ul>
<p>Τρία δοκίμια υψηλών θερμοκρασιών εκτυπωμένα εφαπτόμενα στην τράπεζα μαζί με πλαίσιο υποστήριξης.</p>		<p>Relative Density: Max: 9.780e-01 ** Min: 6.200e-01 **</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 9.780e-01</li> <li>— 9.422e-01</li> <li>— 9.064e-01</li> <li>— 8.706e-01</li> <li>— 8.348e-01</li> <li>— 7.990e-01</li> <li>— 7.632e-01</li> <li>— 7.274e-01</li> <li>— 6.916e-01</li> <li>— 6.558e-01</li> <li>— 6.200e-01</li> </ul>
<p>Μήτρα.</p>		<p>Relative Density: Max: 9.780e-01 ** Min: 9.778e-01 **</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 9.780e-01</li> <li>— 9.780e-01</li> <li>— 9.780e-01</li> <li>— 9.779e-01</li> <li>— 9.779e-01</li> <li>— 9.779e-01</li> <li>— 9.779e-01</li> <li>— 9.779e-01</li> <li>— 9.778e-01</li> <li>— 9.778e-01</li> <li>— 9.778e-01</li> <li>— 9.778e-01</li> </ul>

Πίνακας 12: Μεταβολή του όγκου green part - αρχικού κομματιού.

		<p>Αρχικός όγκος = 12.30ml                  Όγκος αντισταθμισμένου = 24.61ml                  100.08% αύξηση του όγκου</p>	
<p>Αρχικό κομμάτι</p>		<p>Πράσινο κομμάτι</p>	
			
			
	Αρχικό κομμάτι	Πράσινο κομμάτι	Ποσοστιαία αύξηση
Διάσταση	31,94	35,95	+12,55%
	26,66	30,01	+12,57%
	22,04	24,83	+12,66%
	14	16,87	+20,50%
	18	21,7	+20,56%
	8	9,02	+12,75%
	3,15	3,54	+12,38%
	0,8	1,01	+26,25%

## Προσομοίωση της διέλασης και των φορτίων στη μήτρα.

Η προσομοίωση της πλαστικής ροής του χαλκού κρίθηκε απαραίτητη για τον υπολογισμό των φορτίων που ασκούνται στη μήτρα. Για τη μοντελοποίηση της ροής του χαλκού και τον υπολογισμό των φορτίων στη μήτρα από St.17-4 χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Extrude Metal της σουίτας Altair Inspire. Οι τάσεις στη μήτρα από H13 υπολογίστηκαν στο ANSYS, καθώς η σύνθετη γεωμετρία της χωροπλήρωσης που είχε, δεν ήταν δυνατό να μοντελοποιηθεί στο Altair.

### Επίδραση της ταχύτητας του καλωδίου τροφοδοσίας

Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για να αξιολογήσουμε την επίδραση της ταχύτητας πρόωσης του υλικού στις τάσεις που εμφανίζονται στη μήτρα. Το καλώδιο γνωρίζουμε ότι εξέρχεται από την Conform με  $11 \pm 1$  m/min για αυτό οι ταχύτητες που αποφασίσαμε να ελέγξουμε ήταν 166, 183 και 200mm/s που αντιστοιχούν στην ελάχιστη, μέση και μέγιστη ταχύτητα εξόδου. Από την εξίσωση διατήρησης της μάζας υπολογίζουμε την ταχύτητα πρόωσης του χαλκού εντός του αγωγού τροφοδοσίας:

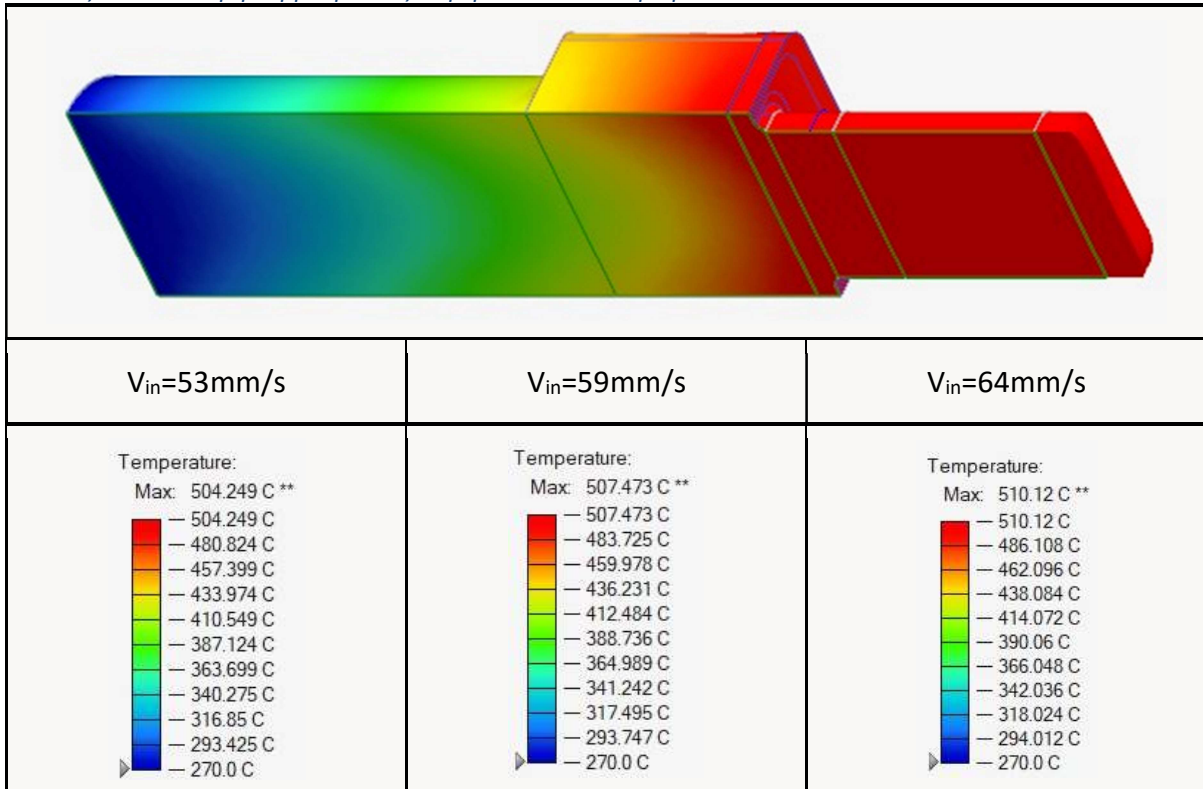
$$V_{in} = \frac{A_{out}}{A_{in}} \cdot V_{out}$$

$A_{out}$ : η διατομή του τελικού προϊόντος,  $A_{out} = 24,65 \text{mm}^2$

$A_{in}$ : Το εμβαδόν διατομής του αγωγού τροφοδοσίας,  $D=10\text{mm}$ ,  $\Rightarrow A_{in} = 78.53 \text{mm}^2$

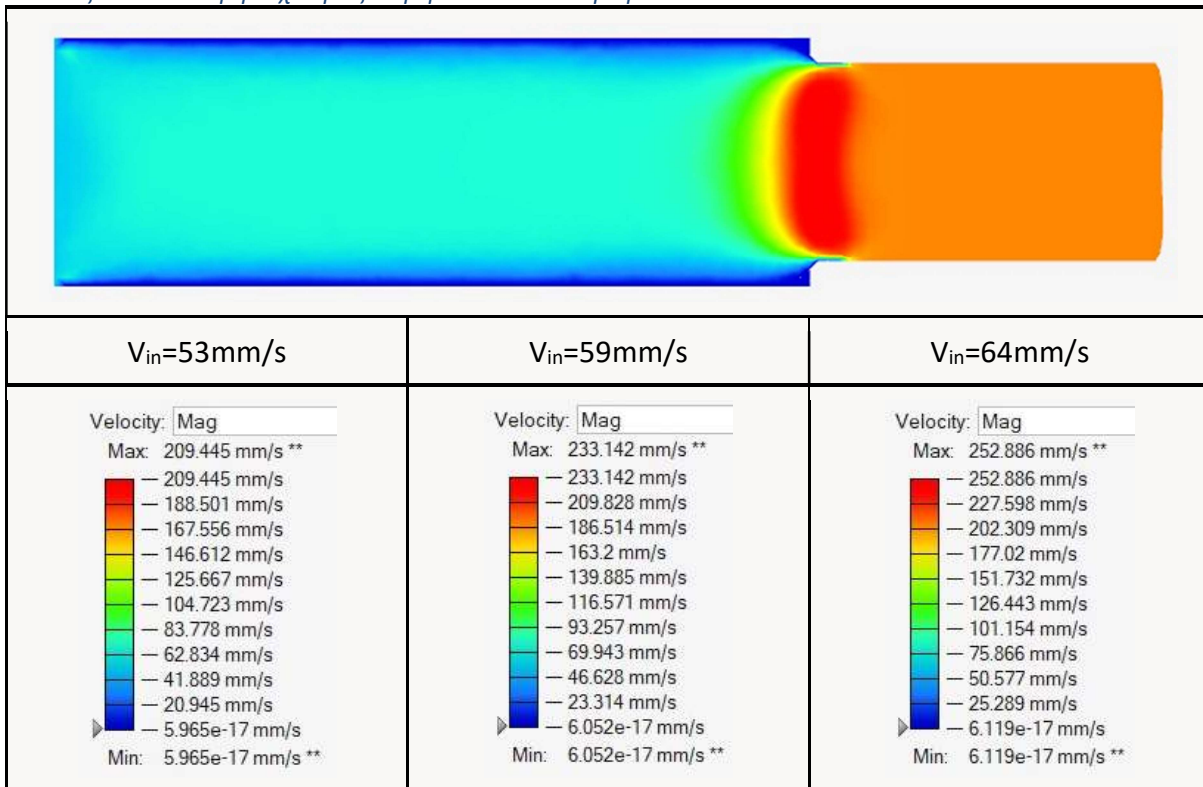
Έτσι προκύπτουν οι ταχύτητες  $V_{in}$ : 53, 59, και 64mm/s.

Πίνακας 13: Κατανομή θερμοκρασίας στην μπιέτα και το προφίλ.

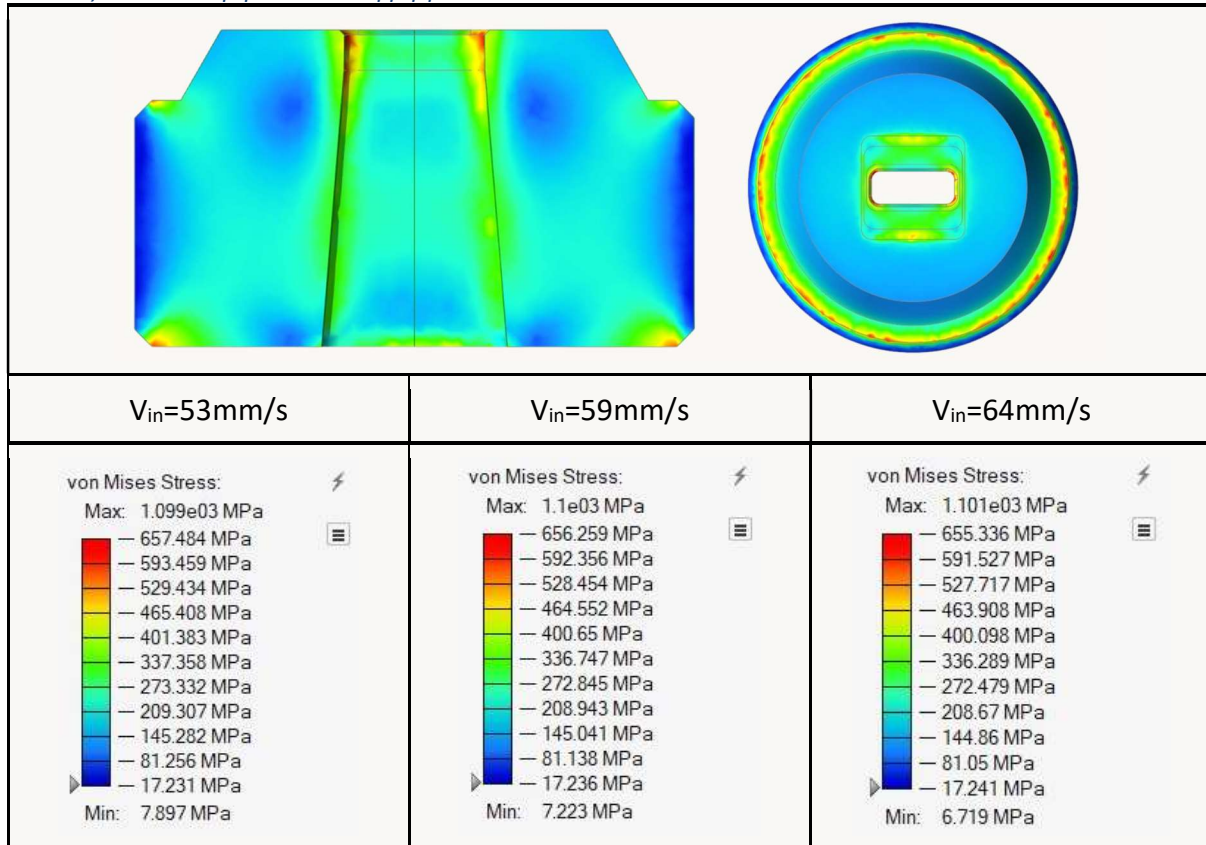


Η σχετική κατανομή των φορτίων και των θερμοκρασιών ήταν ίδια και στις τρεις περιπτώσεις και αλλαγές παρουσιάστηκαν μόνο στο μέτρο αυτών των τιμών.

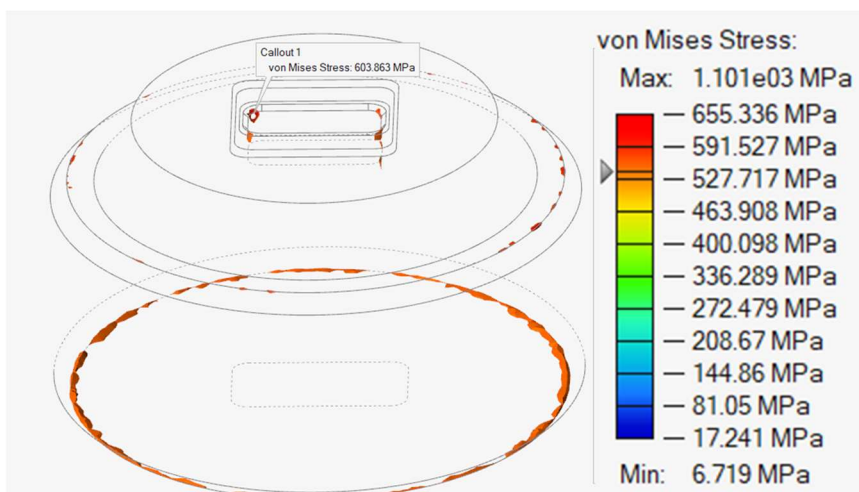
Πίνακας 14: Κατανομή ταχύτητας στην μπιέτα και το προφίλ.



Πίνακας 15: Κατανομή τάσεων στη μήτρα.



Η διακύμανση του φορτίου λόγω μεταβολής της ταχύτητας πρόωσης είναι πρακτικά αμελητέα, οπότε δεν υπάρχει κίνδυνος κόπωσης από κυκλική φόρτιση. Το ίδιο ισχύει και για την θερμοκρασία στην οποία 11,3% αύξηση της ταχύτητας συνεισφέρει μόνο σε 0,6% αύξηση της θερμοκρασίας. Προβληματισμό προκαλούν οι αρκετά υψηλές τάσεις που παρατηρούνται στο υπόμνημα, ωστόσο αν δούμε τα σημεία που αυτές οι τάσεις εμφανίζονται και το χώρο που καταλαμβάνουν, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αποτελούν σφάλματα (artifacts) του προγράμματος επίλυσης και στη πραγματικότητα δεν υπάρχει ουσιαστικός όγκος υλικού με τάσεις πάνω από 620MPa.



Εικόνα 47: Περιοχές όπου οι τάσεις υπερβαίνουν τα 620MPa.



Επίδραση του αγωγού τροφοδοσίας

Επιπλέον προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικές διατομές του αγωγού εισόδου του υλικού (feeder plate). Αυτό έγινε γιατί οι διαστάσεις του αγωγού δεν μας έγιναν γνωστές και εκτιμήθηκαν με βάση φωτογραφιών (εικόνα 48) που μας είχαν σταλεί.



Εικόνα 48: Μητροθήκη.

Σε όλες τις προσομοιώσεις η θερμοκρασία στη μήτρα κατά τη διάρκεια της διέλασης θεωρήθηκε σταθερή, ίση με 500°C.

Πίνακας 16: Επίδραση του αγωγού τροφοδοσίας.

Διάσταση αγωγού τροφοδοσίας		
9x9mm	10x10mm	12x12mm
<p>von Mises Stress:</p> <p>Max: 1.136e03 MPa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 830.468 MPa</li> <li>— 749.208 MPa</li> <li>— 667.948 MPa</li> <li>— 586.689 MPa</li> <li>— 505.429 MPa</li> <li>— 424.17 MPa</li> <li>— 342.91 MPa</li> <li>— 261.651 MPa</li> <li>— 180.391 MPa</li> <li>— 99.132 MPa</li> <li>— 17.872 MPa</li> </ul> <p>Min: 17.872 MPa</p>	<p>von Mises Stress:</p> <p>Max: 1.144e03 MPa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 800.939 MPa</li> <li>— 722.686 MPa</li> <li>— 644.432 MPa</li> <li>— 566.179 MPa</li> <li>— 487.926 MPa</li> <li>— 409.673 MPa</li> <li>— 331.42 MPa</li> <li>— 253.166 MPa</li> <li>— 174.913 MPa</li> <li>— 96.66 MPa</li> <li>— 18.407 MPa</li> </ul> <p>Min: 14.544 MPa</p>	<p>von Mises Stress:</p> <p>Max: 1.099e03 MPa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 657.484 MPa</li> <li>— 593.459 MPa</li> <li>— 529.434 MPa</li> <li>— 465.408 MPa</li> <li>— 401.383 MPa</li> <li>— 337.358 MPa</li> <li>— 273.332 MPa</li> <li>— 209.307 MPa</li> <li>— 145.282 MPa</li> <li>— 81.256 MPa</li> <li>— 17.231 MPa</li> </ul> <p>Min: 7.897 MPa</p>

Οι μέγιστες τάσεις εξακολουθούν να παραμένουν κάτω από τα επιθυμητά όρια. Επιπλέον παρατηρούμε αύξηση του φορτίου στη μήτρα όταν ο αγωγός εισαγωγής μεγαλώνει πράγμα λογικό, αφού αυξάνεται ο λόγος διέλασης.

## Προσομοίωση Διέλασης στο ANSYS

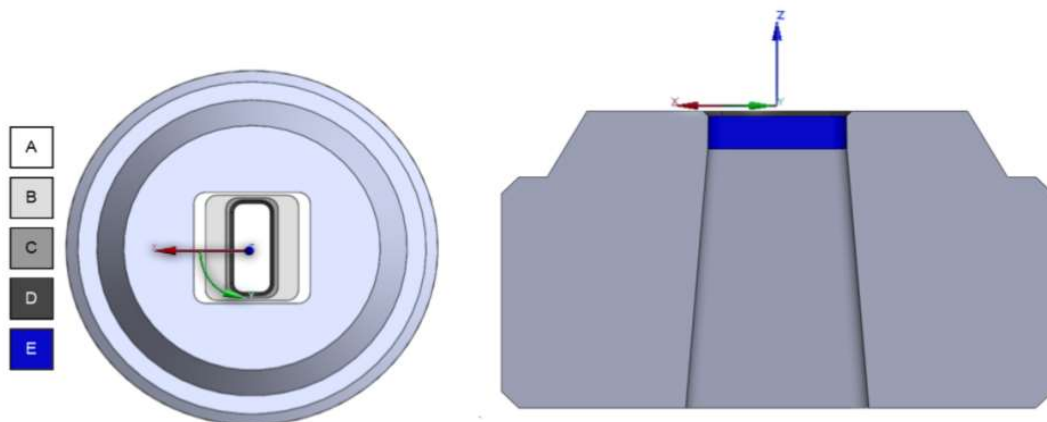
Το πρόγραμμα Altair Extrude Metal ήταν αρκετά αποτελεσματικό στην προσομοίωση της ροής του χαλκού και στον υπολογισμό των φορτίων της συμπαγούς μήτρας από St.17-4 ωστόσο ο τρόπος λειτουργίας του δημιούργησε προβλήματα στην μοντελοποίηση της γυροειδούς χωροπλήρωσης (gyroid infill) στη μήτρα από H13. Συγκεκριμένα αγνοούσε την απουσία υλικού εντός της χωροπλήρωσης και έλυσε το πρόβλημα σαν να πρόκειται για συμπαγή μήτρα.

Αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το Ansys για τον υπολογισμό των τάσεων στην μήτρα από H13 αλλά πρώτα το μοντέλο εφαρμόστηκε σε συμπαγή μήτρα από St17-4 για να συγκριθούν τα αποτελέσματα μεταξύ Ansys- Altair. Σαν είσοδο χρησιμοποιήθηκαν τα φορτία που εξήχθησαν από την ανάλυση ροής του χαλκού δια της μήτρας στο Altair. Συγκεκριμένα πίεση και διατμητική τάση. Δεν ήταν δυνατόν να γίνει αυτόματα εξαγωγή ολόκληρου του προφίλ φορτίων σε μορφή που να είναι αναγνώσιμη από το ANSYS. Χωρίσαμε την επιφάνεια της μήτρας σε σημεία στα οποία τα φορτία είναι σχετικά σταθερά και σε αυτά εφαρμόσαμε κατά προσέγγιση τη μέση τιμή του φορτίου που είδαμε από την ανάλυση ροής χαλκού στο Altair.

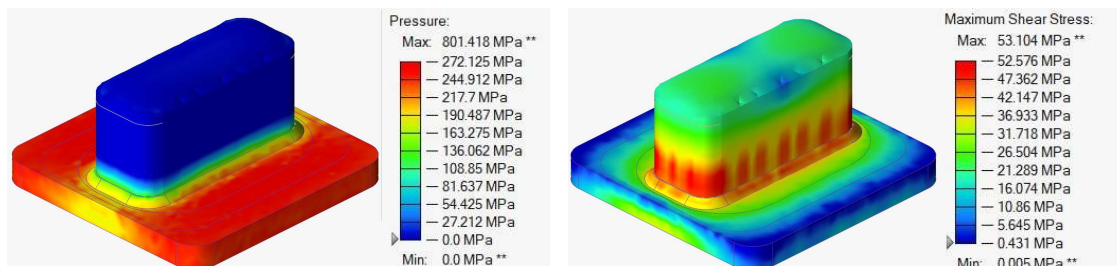
### Διαδικασία μοντελοποίησης στο ANSYS

Δημιουργήθηκε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων στην επιφάνεια εισόδου της μήτρας. Το σύστημα αυτό βοήθησε στην εφαρμογή της κατεύθυνσης των διατμητικών τάσεων.

Η μήτρα χωρίστηκε στις παρακάτω περιοχές(A-B-C-D-E) με βάση τα αποτελέσματα του Altair.

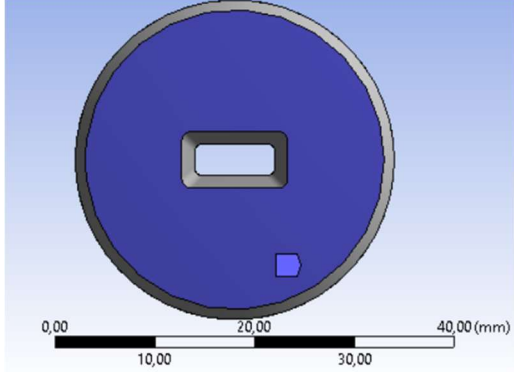
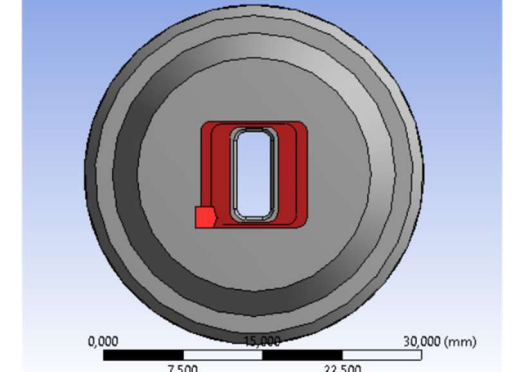
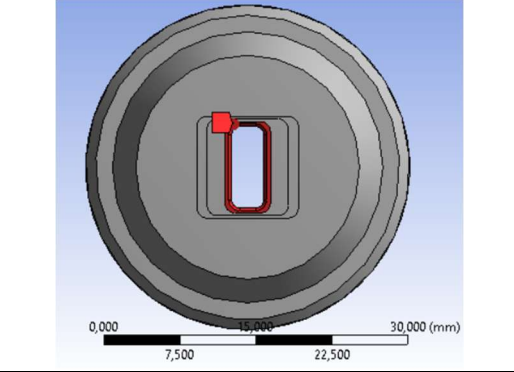
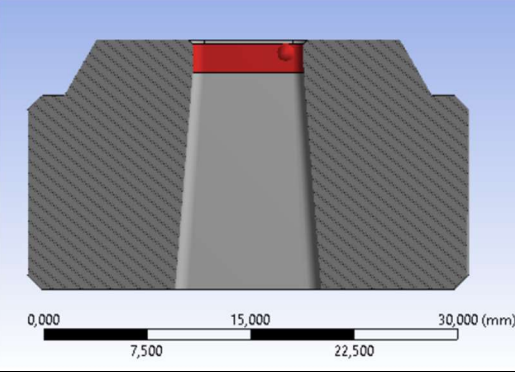
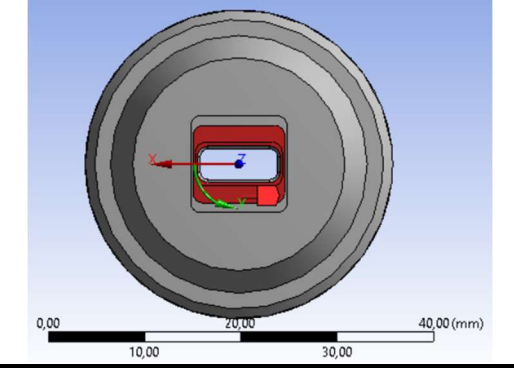
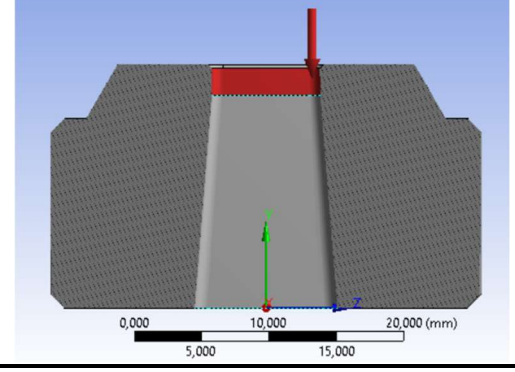
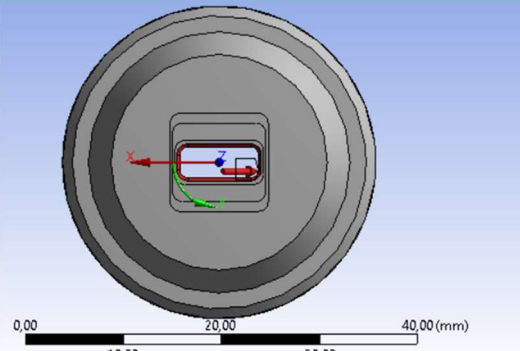


Εικόνα 49: Επιφάνειες παραλαβής φορτίου

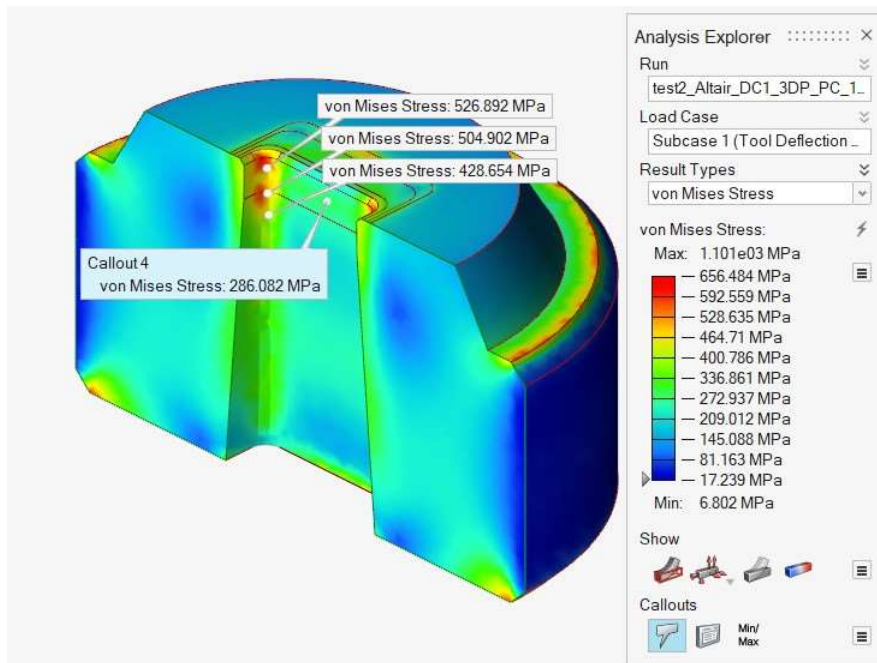


Εικόνα 50: Κατανομή πίεσης (αριστερά) και διατμητικής τάσης (δεξιά) στο σημείο επαφής του χαλκού με τη μήτρα.

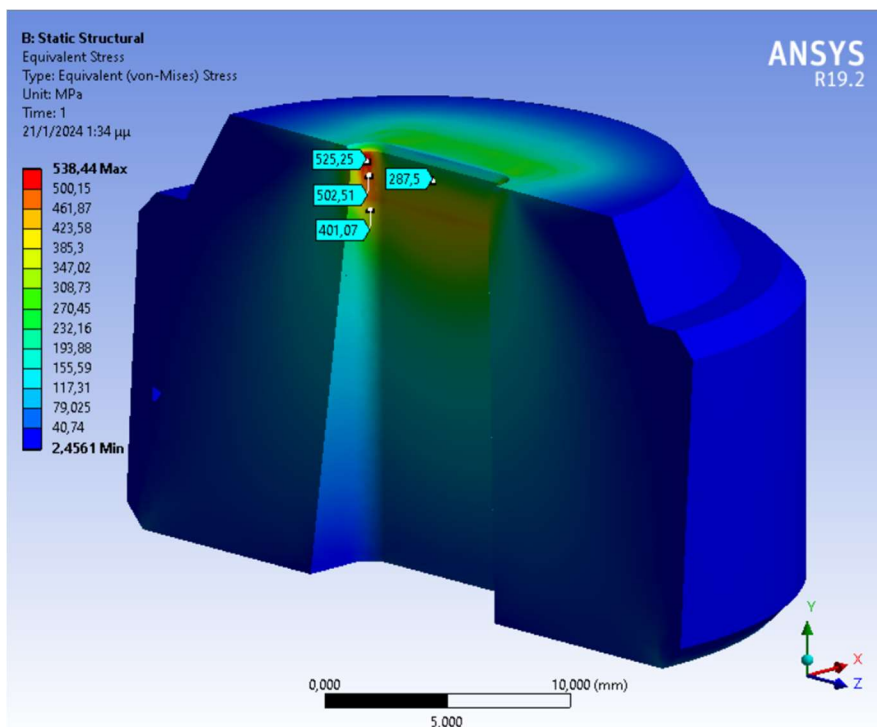
Πίνακας 17: Φορτία και οριακές συνθήκες

<p>Πάκτωση στο κάτω πρόσωπο της μήτρας</p>	<p>Πίεση 335MPa Εφαρμόζεται στις επιφάνειες A,B</p>
	
<p>Πίεση 250MPa Εφαρμόζεται στις επιφάνειες C,D</p>	<p>Πίεση 10MPa Εφαρμόζεται στην επιφάνεια E</p>
	
<p>Πίεση κατά τον άξονα X μέτρου -30MPa Εφαρμόζεται στις επιφάνειες B,C</p>	<p>Πίεση κατά τον άξονα Y μέτρου -70MPa Εφαρμόζεται στην επιφάνεια D</p>
	
<p>Πίεση κατά τον άξονα X μέτρου -35MPa και κατά τον άξονα Z μέτρου -35MPa Εφαρμόζεται στην επιφάνεια D</p>	
	

Με βάση την μοντελοποίηση αυτή τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων για τη συμπαγή μήτρα από St.17-4 ήταν ικανοποιητικά κοντά τόσο ως προς την κατανομή όσο και προς το μέτρο των τάσεων. Στο Altair η μέγιστη τάση ήταν περίπου 580MPa ενώ στο Ansys 538MPa. Αυτό μας διαβεβαιώνει ότι το μοντέλο που σήσαμε στο ANSYS είναι αξιόπιστο για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την μήτρα από H13.

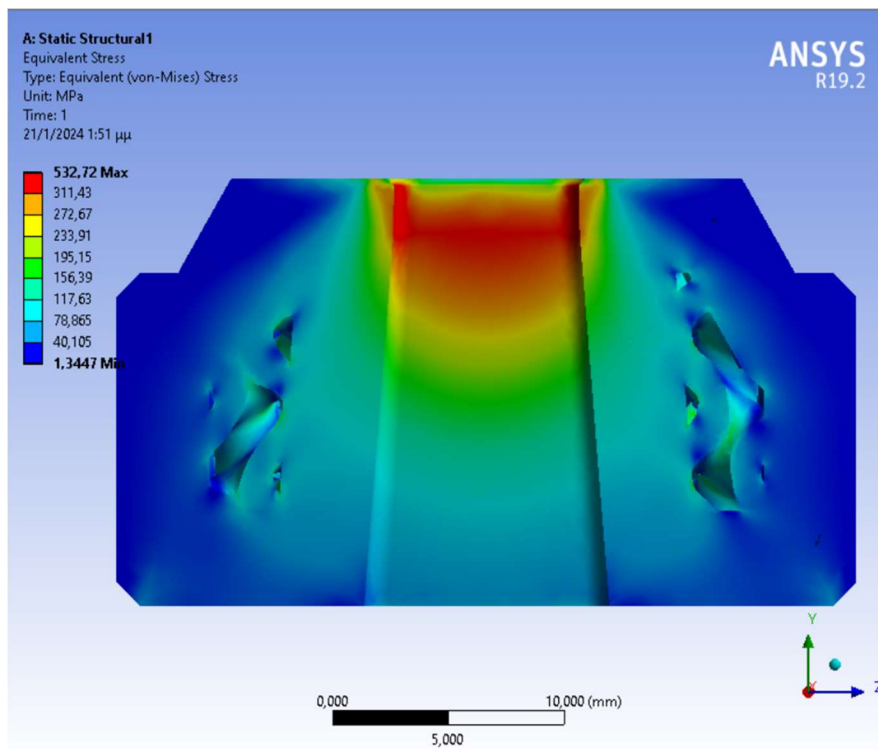


Εικόνα 51: Υπολογισμός τάσεων στη μήτρα από St.17-4 μέσω του Altair Inspire.



Εικόνα 52: Υπολογισμός τάσεων στη μήτρα από St.17-4 μέσω του ANSYS.

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση της μήτρας από H13, τα φορτία και οι οριακές συνθήκες ήταν ακριβώς οι ίδιες με την περίπτωση του St.17-4. Εδώ η μέγιστη τάση που παρατηρείται είναι 532MPa. Η ύπαρξη των κενών της χωροπλήρωσης φαίνεται να μην επηρεάζει την αντοχή της μήτρας.



Εικόνα 53: Υπολογισμός τάσεων στη μήτρα από H13 μέσω του ANSYS

## Εργαστηριακές μετρήσεις για την αξιολόγηση των μητρών.

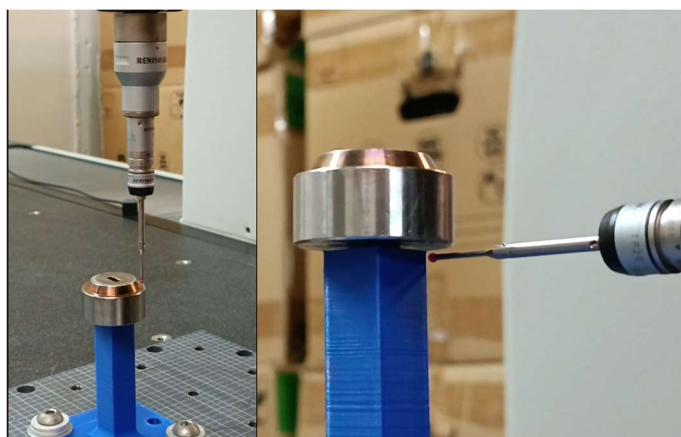
### Μετρήσεις CMM

Για τη μέτρηση της αρχικής μήτρας και την αξιολόγηση των μητρών που κατασκευάστηκαν με τις μεθόδους BMD και Binder Jetting χρησιμοποιήθηκε η μετρητική μηχανή συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machine -CMM) DEA Global Classic που βρίσκεται στο RP Lab του κτιρίου Μ της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.



Εικόνα 54: Μηχανή CMM του εργαστηρίου ταχείας κατασκευής Πρωτοτύπων του ΕΜΠ.

Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ειδική βάση (jig) που να συγκρατεί τις μήτρες στην ίδια θέση. Η βάση ανυψώνει τις μήτρες πάνω από την τράπεζα και επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων σε όλες τις σημαντικές γεωμετρίες τους με ένα πιάσιμο.

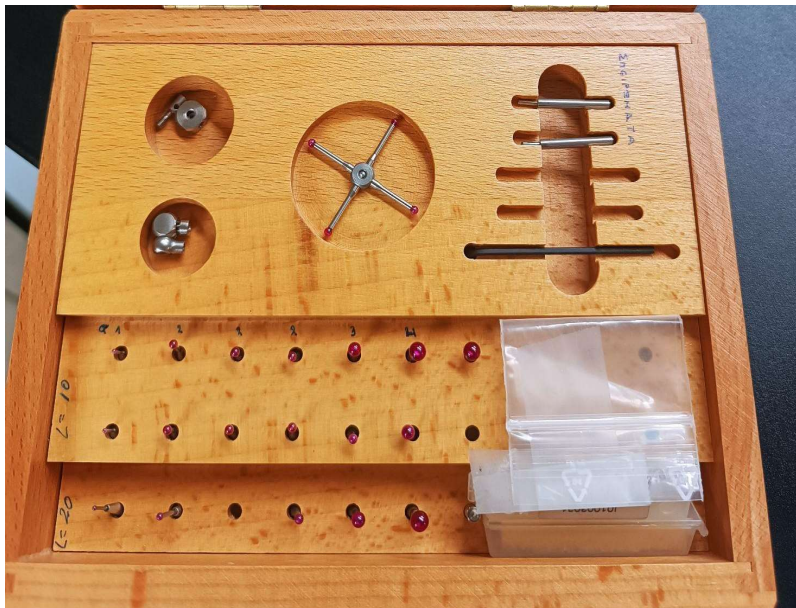


Εικόνα 55: Μετρήσεις περιμετρικά της μήτρας.

Η βάση δέθηκε με κοχλίες πάνω στην τράπεζα της CMM για να μην κουνηθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Η πρώτη μήτρα τοποθετήθηκε και μετρήθηκαν οι διαστάσεις και οι γεωμετρικές ανοχές που φαίνονται στην εικόνα 57.

Η αλληλουχία των κινήσεων της μηχανής αποθηκεύτηκε και γράφτηκε πρόγραμμα για την αυτόματη μέτρηση των επόμενων μητρών. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων είναι το PC-DMIS .

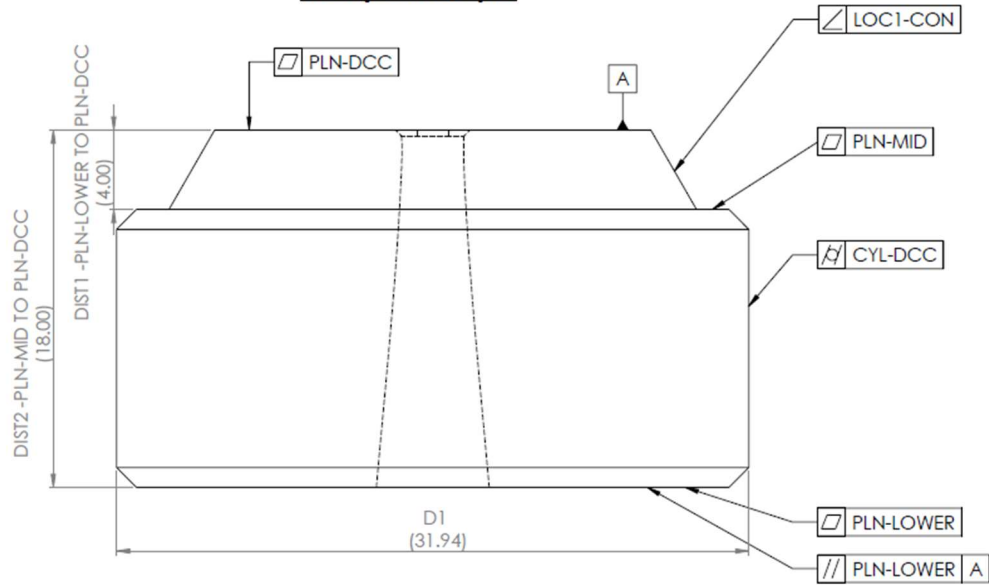
Ένας σημαντικός παράγοντας κατά τη μέτρηση είναι η επιλογή της κατάλληλης μύτης (probe). Ο γενικός κανόνας είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μύτη τόσο καλύτερη είναι και η ακρίβεια της μέτρησης. Από την άλλη, υπερβολικά μεγάλες μύτες έχουν το μειονέκτημα ότι δεν είναι πολύ ευέλικτες και μπορεί να μη μπορούν να φτάσουν να μετρήσουν μερικές γεωμετρίες. Στην περίπτωσή μας αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε μια μύτη 2mm.



Εικόνα 56: Κασετίνα με Probes CMM διαφόρων διαμέτρων.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της μήτρα που μετρήθηκαν με την CMM. Πλήρη σχέδια με τις μετρήσεις των μητρών καθώς και το αρχείο εξόδου (output file) του προγράμματος της CMM υπάρχουν στο παράρτημα Β .

**Ονοματολογία**



Εικόνα 57: Σκαρίφημα με τις γεωμετρικές που αξιολογήθηκαν κατά τις μετρήσεις.

Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL
<b>FCFFLAT1</b> MM $\square$ 0.01						
PLN-DCC	0.0000	0.0100		0.0038	0.0038	0.0000
PLN-MID	0.0000	0.0100		0.2453	0.2453	0.2353
PLN-LOWER	0.0000	0.0100		0.0662	0.0662	0.0562
<b>←→</b> MM DIST1 - PLN-MID TO PLN-DCC						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL
M	3.999	0.010	0.010	4.261	0.262	0.252
<b>←→</b> MM DIST2 - PLN-LOWER TO PLN-DCC						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL
M	17.993	0.010	0.010	18.320	0.327	0.317
<b>FCFPARL1</b> MM $\parallel$ 0.01 A						
PLN-LOWER	0.0000	0.0100	0.0000	0.1266	0.1266	0.1166
<b>#</b> MM LOC1 - CON						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL
A	58.735	0.010	0.010	59.256	0.521	0.511
<b>FCFCYL1</b> MM $\text{C}$ 0.01						
CYL	0.0000	0.0100		0.0363	0.0363	0.0263
<b>FCFLOC1 Size</b> MM 1X $\phi$ 31.983017 0.01/0.01						
CYL	31.9830	0.0100	0.0100	31.7588	-0.2243	0.2143
<b>FCFLOC1 Position</b> MM $\oplus$ $\text{M}$ 0.01 $\text{M}$ A						
CYL	0.0000	0.0100		0.0287	0.0287	0.0000
						2.4607

Εικόνα 58: Αρχείο εξόδου του προγράμματος της CMM.



Πίνακας 18: Αποτελέσματα μετρήσεων CMM.

[mm]	Αρχική μήτρα	A	B	C	D	E
επιπεδότητα: PLN-DCC	0,0011	0,0088	0,0112	0,0047	0,0038	0,0217
επιπεδότητα: PLN-MID	0,0076	0,0076	0,0270	0,0849	0,2453	0,2098
επιπεδότητα: PLN-LOWER	0,0123	0,0576	0,0568	0,0468	0,0662	0,0396
απόσταση : DIST 1 -PLN-MID TO PLN-DCC	3,999	3,980	3,955	3,995	4,261	4,116
απόσταση : DIST 2 -PLN-LOWER TO PLN-DCC	17,993	17,809	17,993	17,854	18,320	18,241
παραλληλία: PLN-DCC - PLN-LOWER	0,0202	0,1177	0,0823	0,0693	0,1266	0,1554
γωνία κώνου: LOC1-CON	58,735	62,556	60,634	62,061	59,256	59,393
κυλινδρικότητα : CYL-DCC	0,0046	0,0629	0,0440	0,0629	0,0363	0,0437
Διάμετρος: D1	31.997	31,6667	31,8265	31,7541	31,7588	31,9830

Πίνακας 19: Προσεγγιστικές τιμές των ανοχών που μπορούν να επιτευχθούν με την κάθε μέθοδο

	Συμβατικές Κατεργασίες	Binder Jetting (Shop system)	BMD (Studio 2)
Επιπεδότητα	5μm	50μm	30μm
Κυλινδρικότητα	5μm	50μm	40μm
Παραλληλία	20μm	80μm	120μm
Ακρίβεια διάστασης	±2μm	±100μm	±100μm

Και οι δύο εκτυπωτές φαίνεται να είναι αδύνατο να παράγουν εξαρτήματα που να φτάνουν τη γεωμετρική ακρίβεια των αρχικών μητρών. Παρατηρούμε μεγάλη διακύμανση στις ονομαστικές διαστάσεις μεταξύ των εκτυπωμένων μητρών (πίνακας 20), της τάξης δέκατου

του χιλιοστού. Μιας και όλα τα κομμάτια που τυπώθηκαν από τον ίδιο εκτυπωτή προκύπτουν από το ίδιο αντισταθμισμένο αρχείο αυτό σημαίνει πως το πρόβλημα της ακρίβειας δεν μπορεί να λυθεί κάνοντας καλύτερη αντιστάθμιση της αρχικής γεωμετρίας του πράσινου κομματιού και αποτελεί περιορισμό της τεχνολογίας αυτής. Αν θέλουμε να πετύχουμε αυτές τις ανοχές τότε είναι απαραίτητο να προβούμε σε επιπλέον κατεργασίες μετά την εκτύπωση.

Πίνακας 20: Ποσοστιαία διακύμανση ακρίβειας.

	Διακύμανση τιμών: max-min [mm]			
	Binder Jetting (Shop System)		BMD (Studio 2)	
επιπεδότητα: PLN-DCC	0,0065	78,95%	0,0179	140,39%
επιπεδότητα: PLN-MID	0,0773	194,06%	0,0355	15,60%
επιπεδότητα: PLN-LOWER	0,0108	20,10%	0,0266	50,28%
απόσταση: DIST 1 -PLN-MID TO PLN-DCC	0,0400	1,01%	0,145	3,46%
απόσταση: DIST 2 -PLN-LOWER TO PLN-DCC	0,1840	1,03%	0,079	0,43%
παραλληλία: PLN-DCC-PLN-LOWER	0,0484	53,92%	0,0288	20,43%
γωνία κώνου: LOC1-CON	1,9	3,11%	0,137	0,23%
κυλινδρικότητα: CYL-DCC	0,0189	33,39%	0,0074	18,50%
Διάμετρος: D1	0,1598	0,50%	0,2242	0,70%

## Μέτρηση Σκληρότητας

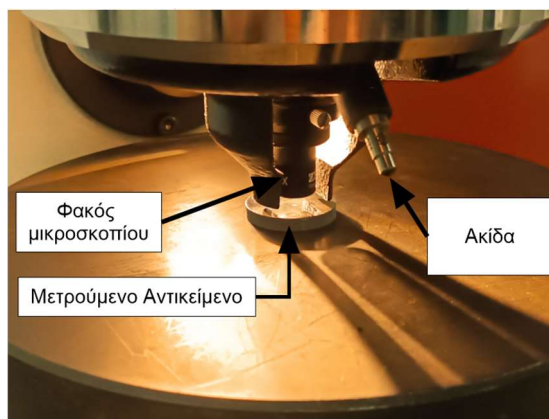
Η σκληρότητα του υλικού της μήτρας παίζει καθοριστικό ρόλο στην αντοχή και στη διάρκεια ζωής της. Οι μετρήσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις μήτρες έγιναν στο εργαστήριο μεταλλογραφίας του κτιρίου Ξ της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Wolpert Dia Testor 2Rc.

Η μέτρηση της σκληρότητας έγινε κατά Vickers. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής βασίζεται στην παρατήρηση της ικανότητας ενός υλικού να αντισταθεί στην πλαστική παραμόρφωση την οποία προκαλεί ένας αδαμάντινος διεισδυτής, σχήματος πυραμίδας, ο οποίος εισέρχεται στην επιφάνεια υπό σταθερή δύναμη για καθορισμένο χρονικό διάστημα. Το αποτύπωμα μετριέται και από εκεί προκύπτει η τιμή σκληρότητας κατά Vickers.

Η δοκιμή Vickers μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλα τα μέταλλα και έχει μια από τις ευρύτερες κλίμακες μεταξύ των δοκιμών σκληρότητας. Η μονάδα σκληρότητας που δίνεται από τη δοκιμή είναι γνωστή ως Αριθμός Πυραμίδας Vickers (HV) ή Σκληρότητα Πυραμίδας Διαμαντιού (DPH). Ο αριθμός σκληρότητας μπορεί να μετατραπεί σε μονάδες Pascal, αλλά δεν πρέπει να συγχέεται με την πίεση, η οποία χρησιμοποιεί τις ίδιες μονάδες. Ο αριθμός σκληρότητας καθορίζεται από το φορτίο στην επιφάνεια της εσοχής και όχι από την περιοχή κάθετη προς τη δύναμη, και επομένως δεν είναι πίεση[29].



Εικόνα 59: Μέρη της μηχανής σκληρομέτρησης.



Εικόνα 60: Μέρη της μηχανής σκληρομέτρησης.

### Περιγραφή σκληρομέτρησης

Το αντικείμενο προς μέτρηση τοποθετείται πάνω στην τράπεζα. Το ύψος της τράπεζας ρυθμίζεται μέσω του τιμονιού που βρίσκεται στη βάση της, μέχρι η επιφάνεια του αντικείμενου που θέλουμε να μετρήσουμε να φαίνεται καθαρά μέσω του μικροσκοπίου. Σημαντικό είναι η επιφάνεια να είναι παράλληλη με την τράπεζα. Το φορτίο που θα ασκηθεί κατά τη μέτρηση επιλέγεται ανάλογα με το πάχος και τη σκληρότητα που περιμένουμε να έχει το αντικείμενο που μετράμε. Ένας τύπος για το προτεινόμενο φορτίο είναι:

$$F = \frac{H \cdot T^2}{1.854}$$

Όπου F το φορτίο σε kp, H η εκτιμώμενη σκληρότητα και T το πάχος του δοκιμίου.

Η διαδικασία της μέτρησης ξεκινά με το τράβηγμα του μοχλού που φαίνεται στην εικόνα 59. Αυτόματα το μικροσκόπιο απομακρύνεται και στη θέση του έρχεται και ευθυγραμμίζεται η ακίδα. Στην συνέχεια η ακίδα κατεβαίνει, έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο και ασκεί σταθερό φορτίο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Όταν το διάστημα αυτό παρέλθει τότε ο φακός του μικροσκοπίου επανέρχεται στη θέση του και βλέπουμε στην οθόνη το αποτύπωμα που άφησε η ακίδα. Χρησιμοποιώντας την κινητή κλίμακα που βρίσκεται πάνω την οθόνη μετράμε τις δύο διαγωνίους της πυραμίδας.

Στα πειράματα που κάναμε, το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε ήταν 62,5kp .

Η σκληρότητα Vickers(HV) δίνεται από τον τύπο:

$$HV = 1,854 \cdot F / d^2 ,$$

όπου F το φορτίο σε kp και d ο μέσος όρος των διαγωνίων σε mm.

Πίνακας 21: Μετρήσεις σκληρότητας.

Μέτρηση	α/α	D1 [mm]	D2 [mm]	F [kp]	HV	Μέση τιμή HV
Αρχική μήτρα πυρήνας από καρβίδιο	1	0,395	0,385	62,5	761,8	810,7
	2	0,375	0,370	62,5	835,1	
	3	0,370	0,375	62,5	835,1	
Αρχική μήτρα φωλιά από H13	1	0,465	0,460	62,5	541,7	545,7
	2	0,460	0,465	62,5	541,7	
	3	0,455	0,460	62,5	553,6	
Τρισδιάστατα εκτυπωμένη μήτρα από St.17-4	1	0,590	0,590	62,5	332,9	331,0
	2	0,590	0,590	62,5	332,9	
	3	0,595	0,595	62,5	327,3	
Τρισδιάστατα εκτυπωμένη μήτρα από H13 3D	1	0,555	0,555	62,5	376,2	376,2
	2	0,550	0,555	62,5	379,6	
	3	0,560	0,555	62,5	372,8	

## Μέτρηση Τραχύτητας

Από την τραχύτητα της μήτρας εξαρτάται η τραχύτητα του τελικού προϊόντος. Επιπλέον από την τραχύτητα επηρεάζεται η ροή του υλικού εντός της μήτρας και ως αποτέλεσμα τα φορτία και η αύξηση της θερμοκρασίας που εφαρμόζονται σε αυτή.

Η μέτρηση της τραχύτητας έγινε με το όργανο Surtronic 3+ της Taylor Hobson. Η τραχύτητα μετρήθηκε κατά τη φορά που θα γινόταν θεωρητικά η διέλαση, σε μήτρες οι οποίες είχαν τυπωθεί μισές όπως φαίνεται στην εικόνα 61. Η τραχύτητα μετρήθηκε σε δύο μισές μήτρες από H13 και St.17-4 των οποίων η επιφάνεια δεν είχε υποστεί καμία κατεργασία και δύο στις οποίες έχει λειανθεί. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 22.



Εικόνα 61: Μέτρηση λειασμένης μήτρας από St.17-4







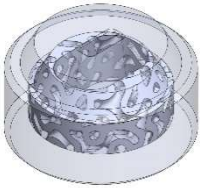
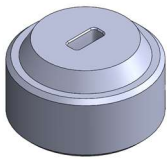
Πίνακας 23: Μετρήσεις τραχύτητας.

[ $\mu\text{m}$ ]	St.17-4	St.17-4 (με λείανση)	H13	H13 (με λείανση)
Μέτρηση 1	9,0	0,24	5,8	0,32
Μέτρηση 2	9,8	0,22	6,0	0,28
ΜΟ	9,4	0,23	5,9	0,30

## Εκτίμηση της σχετικής πυκνότητας

Λόγω της φύσης της κατεργασίας του Binder Jetting, αναπόφευκτα εντός των εκτυπωμένων κομματιών θα υπάρχει πορώδες. Το πορώδες αυτό φαίνεται στην παρατήρηση μιας λειασμένης επιφάνειας στο μικροσκόπιο. Οι μήτρες ζυγίστηκαν και το βάρος τους συγκρίθηκε με το θεωρητικό που θα έπρεπε να είχαν αν ήταν φτιαγμένες από μασίφ υλικό. Το θεωρητικό βάρος υπολογίστηκε μέσω της εντολής Mass Properties του Solidworks.

Πίνακας 24: Μετρήσεις βάρους.

Αρχική μήτρα	A (St.17-4)	B(St.17-4)
		
C(St.17-4)	D(H13)	E(H13)
		
CAD H13 Die		CAD St.17-4 Die
 81.73 gr		 94.75 gr

Υπολογισμός σχετικής πυκνότητας

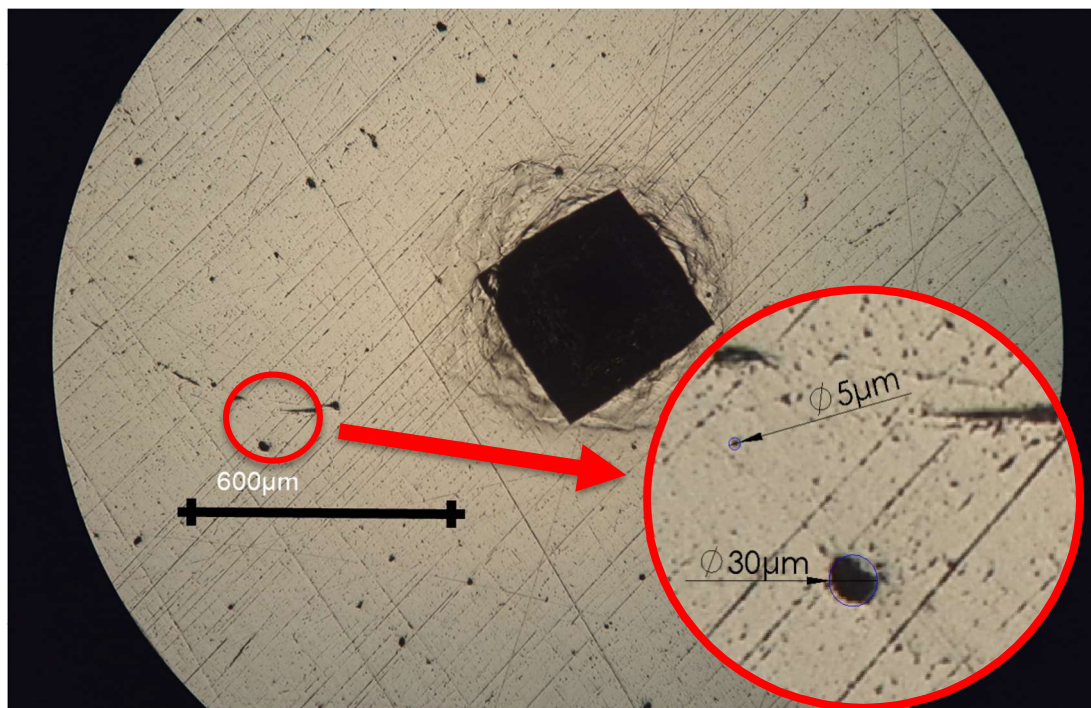
$\Sigma\Pi = \frac{m}{M}$  Όπου M: θεωρητική μάζα και m : η πραγματική μάζα.

Πίνακας 25: Υπολογισμός σχετικής πυκνότητας.

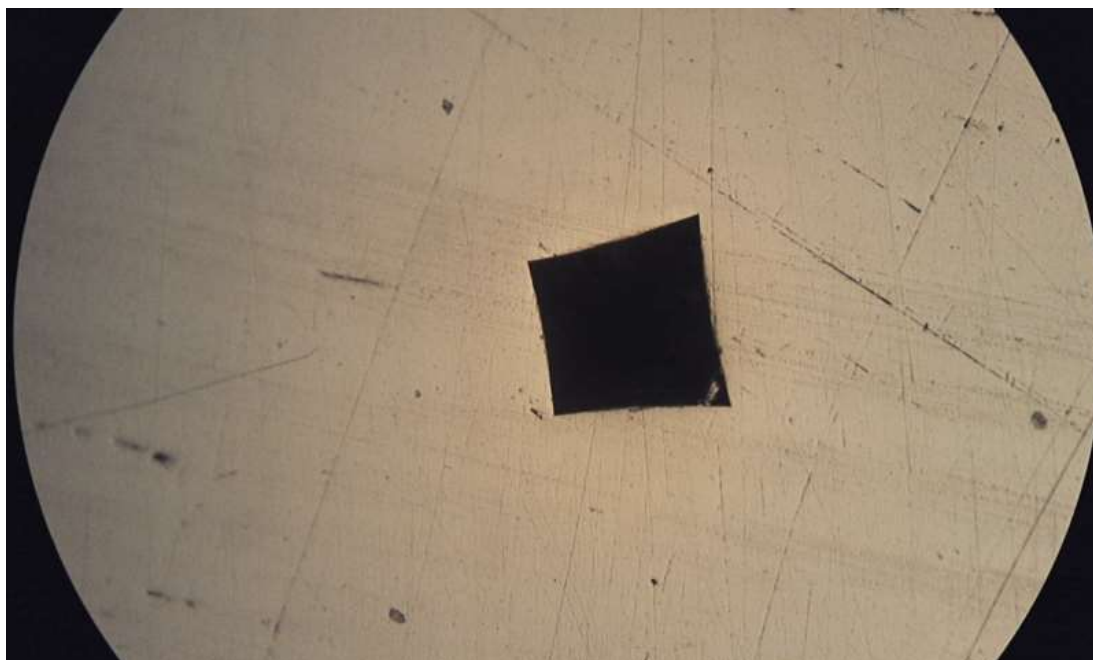
Μήτρα	Μάζα	Σχετική Πυκνότητα (ΣΠ)
A (St.17-4)	92,52	97,65%
B (St.17-4)	92,63	97,76%
C (St.17-4)	92,51	97,64%
D (H13)	76,88	94,07%
E (H13)	77,08	94,31%

Στις φωτογραφίες που τραβήχτηκαν σε μικροσκόπιο από τα σημεία μέτρησης της σκληρότητας μπορούμε να δούμε την ύπαρξη του πορώδους στα δύο υλικά. Όπως φαίνεται και στις εικόνες 62 και 63, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα που βρήκαμε με βάση τη ζύγιση, βλέπουμε ότι το H13 έχει πολύ λιγότερους πόρους από το ST17-4. Στο ST17-4 εμφανίζονται κρατήρες μεγέθους από 5 έως 30 μικρόμετρα περίπου.

Από το φύλλο δεδομένων της DM για τα εκτυπωμένα St17-4 και H13 η πυκνότητα τους είναι 7.5-7.66 και 7.35gr/cm<sup>3</sup> αντίστοιχα, ενώ τα συμβατικά St17-4 και H13 έχουν 7.8gr/cm<sup>3</sup>. Από αυτά η σχετική πυκνότητα προκύπτει 96,15-98,20% και 94,23% που συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Εικόνα 62: Πορώδες στην περιοχή μέτρησης της σκληρότητας, μεγέθυνση x10, υλικό St17-4.



Εικόνα 63: Περιοχή μέτρησης της σκληρότητας, μεγέθυνση x10, υλικό H13.

Ο υπολογισμός του πορώδους με την διαδικασία της ζύγισης επηρεάζονται από παράγοντες όπως η ακρίβεια του ζυγού και κυρίως την υπόθεση ότι η πραγματική γεωμετρία συμπίπτει ακριβώς με τη θεωρητική του CAD. Για αυτούς τους λόγους αποτελεί μόνο τρόπο εκτίμησης και τα αποτελέσματά της δε θεωρούνται ακριβή.

## Ραδιογραφική απεικόνιση

Για την παρατήρηση εσωτερικών ατελειών τα δοκίμια ραδιογραφήθηκαν. Οι ραδιογραφίες έγιναν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ.

### Μεθοδολογία ραδιογραφίας

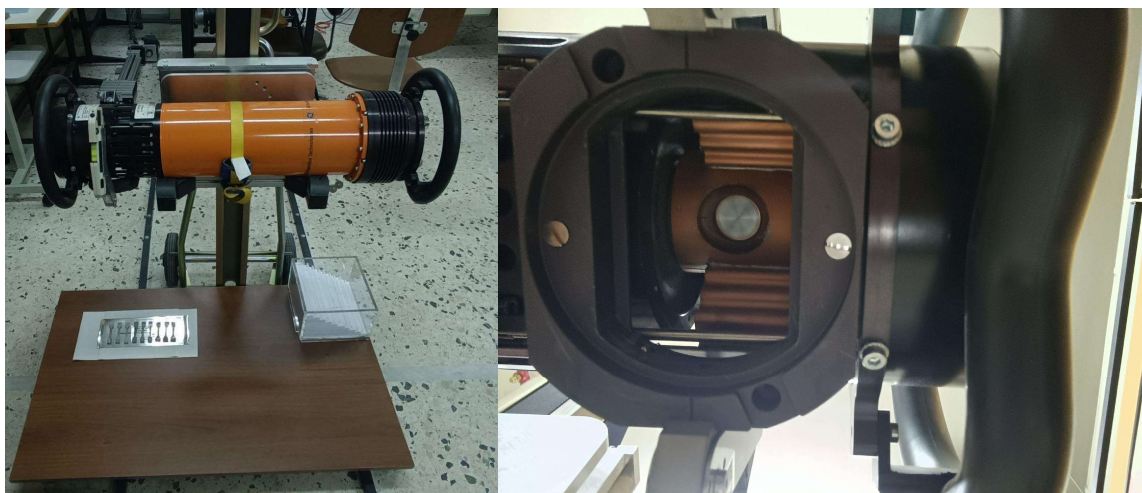
Τα αντικείμενα που πρόκειται να ραδιογραφηθούν τοποθετούνται πάνω στο φιλμ απέναντι από την πηγή της ακτινοβολίας. Η ένταση της ακτινοβολίας ρυθμίζεται ανάλογα με την πυκνότητα των δοκιμίων ώστε να έχουμε πιο ευκρινή εικόνα. Ειδικές καρτέλες με βαθμονομημένα σύρματα (image quality indicators) τοποθετούνται πάνω στα μετρούμενα αντικείμενα. Το μικρότερο σύρμα που μπορούμε να διακρίνουμε μας ορίζει τη διάσταση του μικρότερου χαρακτηριστικού που μπορούμε να παρατηρήσουμε στην συγκεκριμένη ραδιογραφία. Αυτό πάει να πει ότι αν υπάρχουν χαρακτηριστικά όπως ρωγμές ή φυσαλίδες εντός του υλικού μικρότερα από το πάχος του σύρματος δεν θα είναι εμφανή.

Η διάρκεια της εκπομπής ήταν 10 λεπτά, στο χρόνο αυτό ο χώρος εγκαταλείπεται για να αποφευχθεί η έκθεση σε ακτινοβολία.

Μετά την έκθεση οι ραδιογραφίες βγαίνουν από τον μεταλλικό φάκελο που είναι σφραγισμένες και τοποθετούνται σε τρία διαδοχικά λουτρά για να εμφανιστούν :

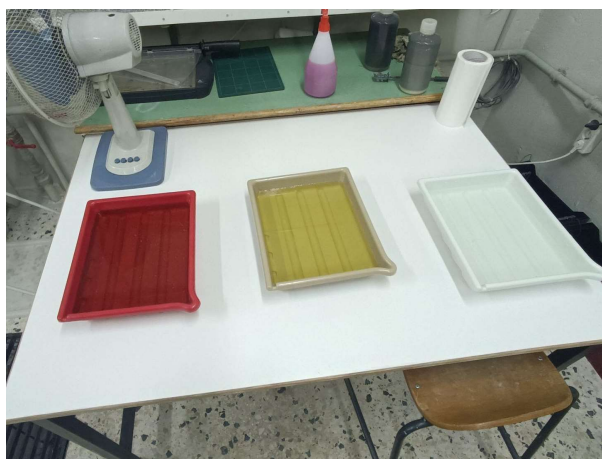
- εμφανιστής (παραμονή 250sec)
- σταθεροποιητής (παραμονή 300sec)
- πλύση (παραμονή 300sec)

Ο χρόνος παραμονής τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος την ώρα της εμφάνισης.



Εικόνα 64: Πηγή ακτινοβολίας.

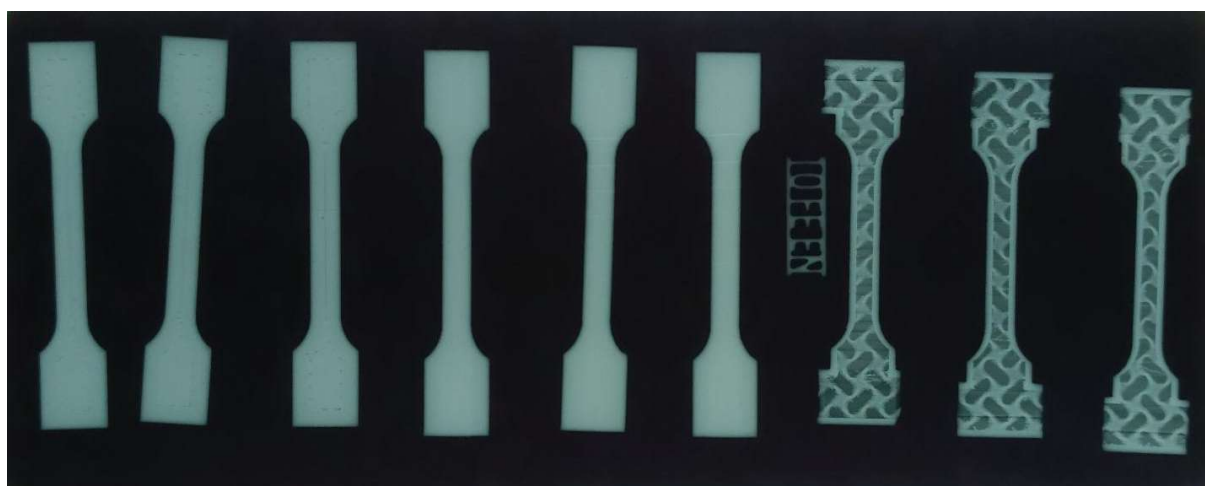




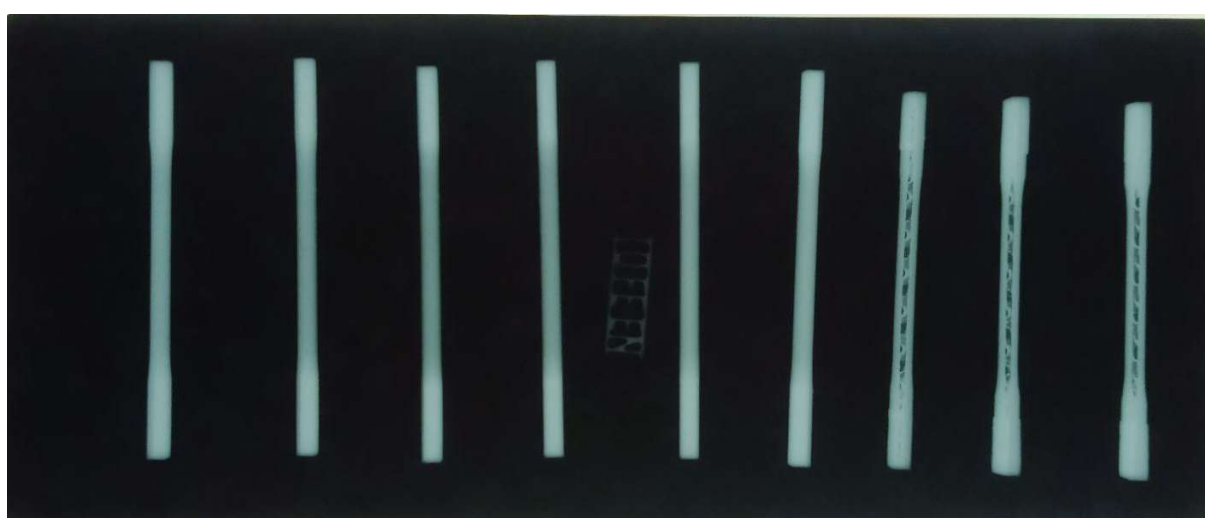
Εικόνα 65: Υγρά εμφάνιση ραδιογραφιών. Από αριστερά προς δεξιά : εμφανιστής, σταθεροποιητής, υγρό πλύσης.

Πίνακας 26: Παράμετροι ραδιογραφιών.

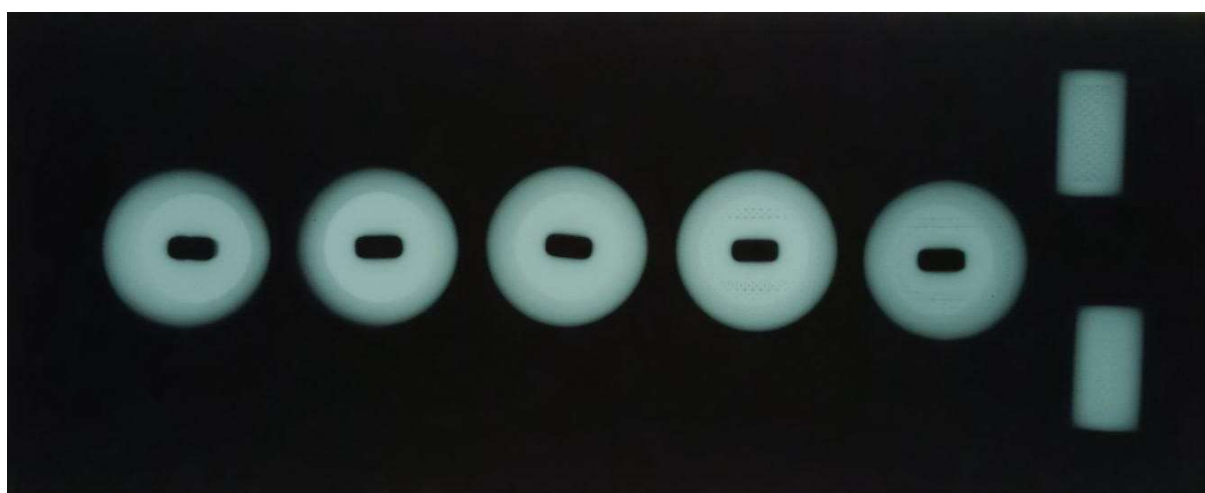
No.	Περιγραφή	Πάχος	Απόσταση	Τάση	Φορτίο	Image quality indicator:
1	Δοκίμια οριζόντια υλικό:H13	4mm	70cm	70KV	24mAmin	10Fe50
2	Δοκίμια κάθετα υλικό:H13	6mm	70cm	70KV	32mAmin	10Fe50
3	Μήτρες υλικό:H13,St.17-4	18mm	70cm	80KV	58mAmin	6Fe50
4	Δοκίμια οριζόντια υλικό:St.17-4	4mm	70cm	70KV	32mAmin	-
5	Δοκίμια κάθετα υλικό:St.17-4	6mm	70cm	70KV	48mAmin	-
6	Δοκίμια λεπτά υλικό:H13, St.17-4	1,5mm	70cm	70KV	13mAmin	-



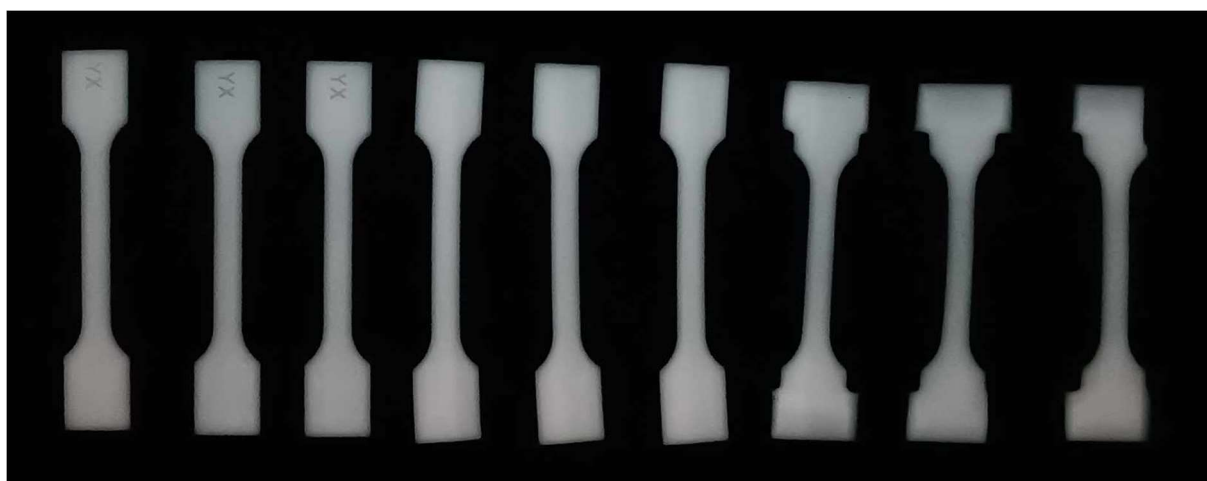
Εικόνα 66: Ραδιογραφία 1: Δοκίμια από H13, εκτυπωμένα εφαπτομενικά στην τράπεζα (3 αριστερά), εκτυπωμένα κάθετα στην τράπεζα(3 στο κέντρο), εκτυπωμένα κατά την κατεύθυνση Z(3 δεξιά).



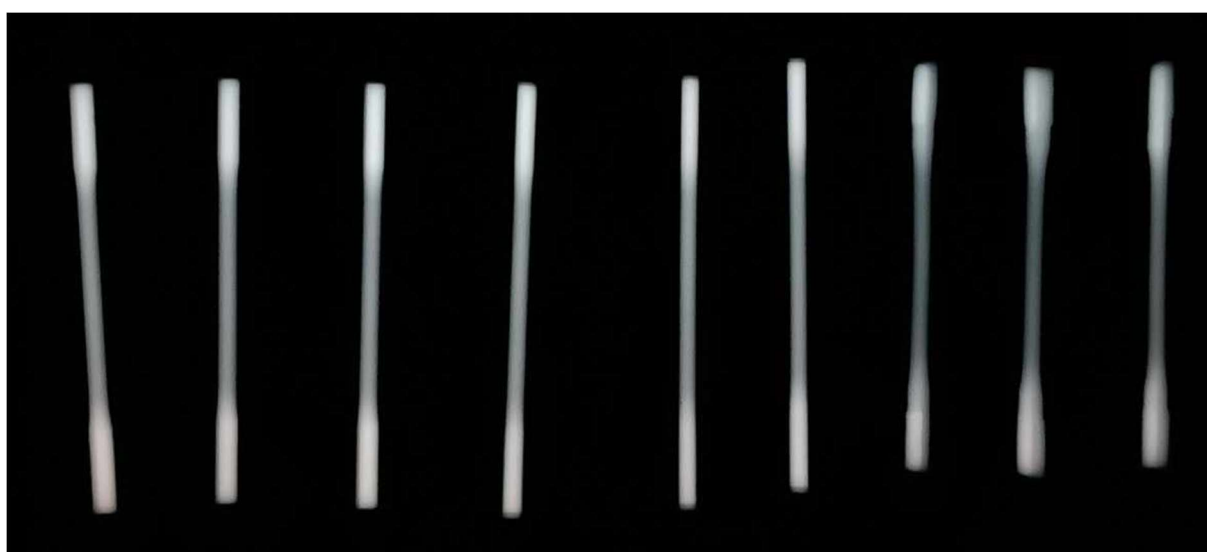
Εικόνα 67: Ραδιογραφία 2: Δοκίμια από H13, εκτυπωμένα εφαπτομενικά στην τράπεζα (3 αριστερά), εκτυπωμένα κάθετα στην τράπεζα(3 στο κέντρο), εκτυπωμένα κατά την κατεύθυνση Z(3 δεξιά).



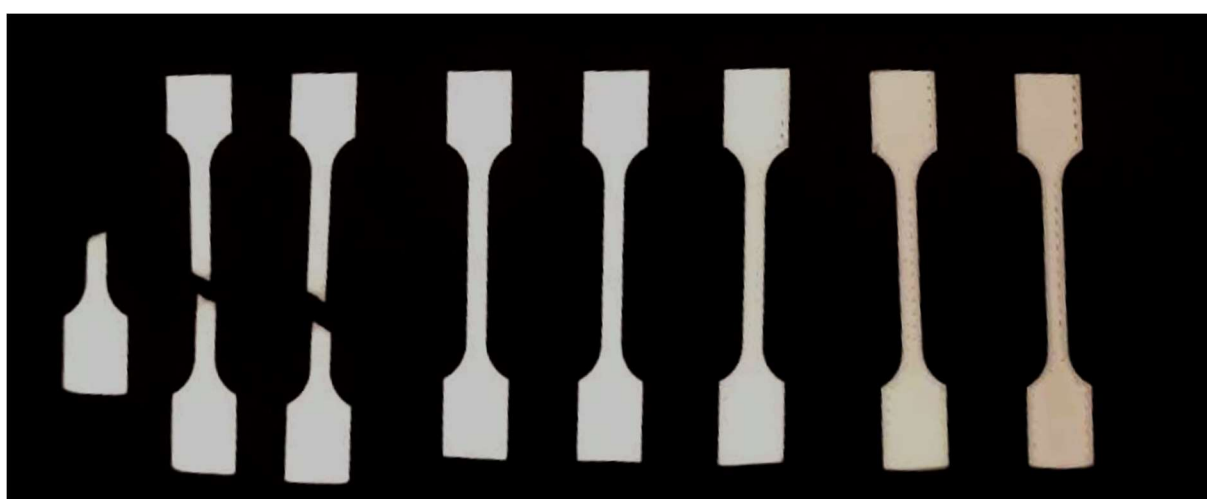
Εικόνα 68: Ραδιογραφία 3: μήτρες από St.17-4 (3 από αριστερά), μήτρες από H13(2 δεξιά), κύλινδρος από H13 πάνω δεξιά, κύλινδρος από St.17-4 κάτω δεξιά.



Εικόνα 69: Ραδιογραφία 4: Δοκίμια από St.17-4, εκτυπωμένα εφαπτομενικά στην τράπεζα (3 αριστερά), εκτυπωμένα κάθετα στην τράπεζα(3 στο κέντρο), εκτυπωμένα κατά την κατεύθυνση Z(3 δεξιά).

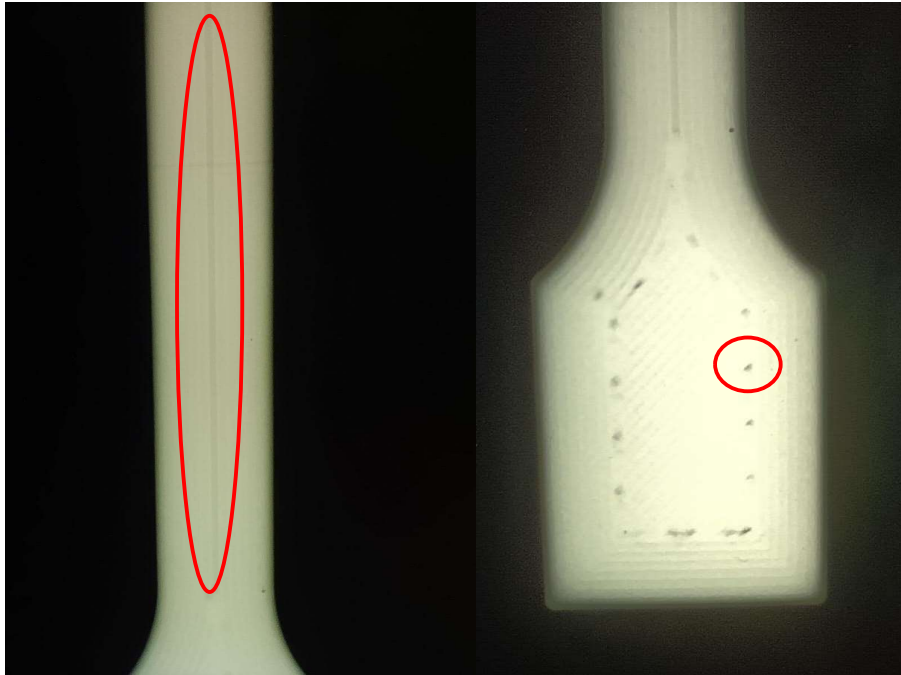


Εικόνα 70: Ραδιογραφία 5: Δοκίμια από St.17-4, εκτυπωμένα εφαπτομενικά στην τράπεζα (3 αριστερά), εκτυπωμένα κάθετα στην τράπεζα(3 στο κέντρο), εκτυπωμένα κατά την κατεύθυνση Z(3 δεξιά).



Εικόνα 71: Ραδιογραφία 6: Λεπτά δοκίμια υψιλών θερμοκρασιών από H13(3 δεξιά) και St.17-4. Τα τρία πρώτα, ραδιογραφήθηκαν μετά τη θραύση τους σε εφελκισμό.

Παρατηρήθηκαν κενά εντός των δοκιμίων από H13 ιδιαίτερα σε αυτά που τυπώθηκαν εφαπτόμενα στο επίπεδο XY. Η γραμμή στην εικόνα 72 [αριστερά] φαίνεται να οφείλεται σε σφάλμα του εκτυπωτή να εξωθήσει τη σωστή ποσότητα υλικού ενώ τα κενά που φαίνονται στην εικόνα 72 [δεξιά] πιθανότατα οφείλονται στην απότομη αλλαγή στην κατεύθυνση του ακροφυσίου, όταν εκτύπωνε τα σημεία αυτά. Παρατηρούμε αλλαγή στη διαπερατότητα των αντικειμένων όσο πλησιάζουμε στα άκρα τους. Αυτό δεν σημαίνει αλλαγή στην πυκνότητα του υλικού, αλλά οφείλεται στη διάθλαση της ακτινοβολίας.



Εικόνα 72: Ατέλειες στη δομή δοκιμίων από H13.

## Κοστολόγηση μήτρας

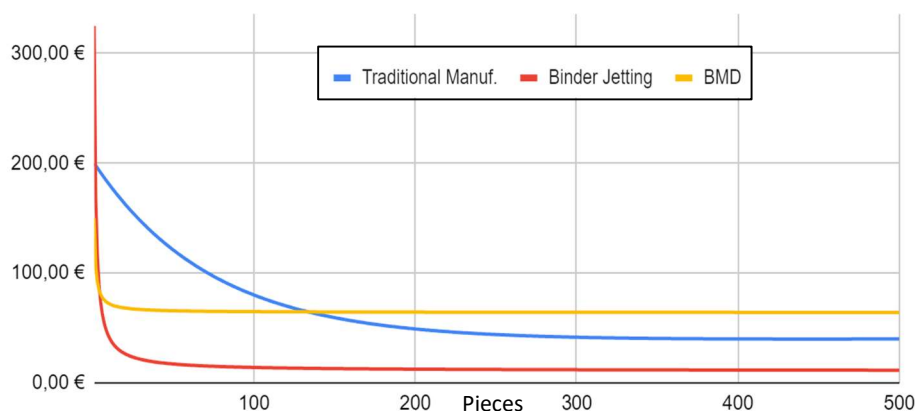
Για την παραγωγή τυποποιημένων μητρών η αγορά αποτελεί την καλύτερη επιλογή. Ο πάροχος στην Κίνα παράγει τις μήτρες σε πολύ μεγάλες ποσότητες με εξειδικευμένο εξοπλισμό οπότε εκμεταλλευόμενος την οικονομία κλίμακας μπορεί να παρέχει καλής ποιότητας προϊόντα σε πολύ ανταγωνιστική τιμή (35€/ τεμάχιο).

Ερευνήθηκε η περίπτωση παραγωγής μήτρας κάποιου ειδικού προφίλ το οποίο δεν υπάρχει στο εμπόριο. Από μηχανουργείο δόθηκαν εκτιμήσεις για το κόστος κατασκευής διαφόρων ποσοτήτων μητρών με βάση συμβατικές κατεργασίες ενώ παράλληλα το κόστος εκτύπωσης των ίδιων μητρών μας δόθηκε από την Lino 3D. Οι τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα 26.

Πίνακας 27: Κόστος για συγκεκριμένες τιμές ανάλογα με την μέθοδο κατασκευής.

Συμβατικές Κατεργασίες		BMD		Binder Jetting	
Πλήθος	Μοναδιαίο κόστος	Πλήθος	Μοναδιαίο κόστος	Πλήθος	Μοναδιαίο κόστος
1	200,00 €	1	150,00 €	1	325,00 €
100	80,00 €	10	73,00 €	10	41,70 €
400	40,00 €	50	67,20 €	24	16,70 €
500	40,00 €	200	64,40 €	50	12,74 €

Η τιμή του μοναδιαίου κόστους ανεξάρτητα από τη μέθοδο κατασκευής θεωρήθηκε ότι μπορεί να εκφραστεί από μια εξίσωση της μορφής  $y = a + b/x$  όπου  $x$  το πλήθος των κομματιών. Οι συντελεστές  $a$  και  $b$  βρέθηκαν με χρήση του εργαλείου Curve Fitter του MatLab για την κάθε μέθοδο. Ο σταθερός όρος  $a$  ανταποκρίνεται στο κόστος των πρώτων υλών και των αναλώσιμων που καταναλώνονται για την παραγωγή της κάθε μια μήτρας. Από την άλλη το  $b$  στις συμβατικές κατεργασίες εκφράζει κόστη, όπως το κόστος ιδιοκατασκευών και ειδικών εργαλείων που κατασκευάστηκαν για την κατασκευή των μητρών, ενώ στις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης περιλαμβάνει κυρίως το κόστος λειτουργίας του κλιβάνου κατά την πυροσυσσωμάτωση. Τα κόστη αυτά είναι ανεξάρτητα από την ποσότητα της παραγγελίας και για αυτό κατανέμονται σε όλο το πλήθος των κομματιών.



Εικόνα 73: Μοναδιαίο κόστος παραγωγής συναρτήσει του πλήθους τεμαχίων.

Αξίζει να σχολιαστεί ότι ο χρόνος απόκτησης με χρήση μεθόδων προσθετικής κατασκευής είναι αρκετά μικρότερος. Χρησιμοποιώντας συμβατικές κατεργασίες ο χρόνος αναμονής είναι της τάξης των 1,5 μηνών για την παραγωγή 5 μητρών. Αντίθετα η μέθοδος Binder Jetting μπορεί να παράγει 1-200 μήτρες εντός 56 ωρών ενώ η BMD 1-14 εντός 2 εβδομάδων.

## Διάρκεια Ζωής Μήτρας

Για να είναι ουσιαστική η σύγκριση των μητρών θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η διάρκεια ζωής, δηλαδή οι τόνοι προϊόντος που μπορεί να παράγει η κάθε μία ανάλογα με τον τρόπο κατάσκευής της. Οι συμβατικές μήτρες που χρησιμοποιούνται από την Cablel μπορούν να παράγουν 5-10 τόνους προϊόντος πριν αντικατασταθούν. Η διάρκεια ζωής των μητρών εξαρτάται από την αντοχή τους σε επιφανειακή φθορά η οποία υπολογίζεται από τον τύπο του Archard.

$$Q = \frac{K \cdot W \cdot L}{H}, \text{ όπου:}$$

Q, ο συνολικός όγκος υλικού που αποβάλλεται λόγω φθοράς.

K, αδιάστατη σταθερά.

W, το συνολικό φορτίο κάθετο στην επιφάνεια φθοράς.

L, η απόσταση ολίσθησης που στην περίπτωσή μας ταυτίζεται με το μήκος προϊόντος που παράγεται.

H, η σκληρότητα του υλικού.

Θεωρώντας ότι οι όροι K,W είναι κοινοί μεταξύ συμβατικών και τρισδιάστατα εκτυπωμένων μητρών και ότι η προδιαγραφή για τη φθορά τους (Q) είναι επίσης κοινή, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο λόγος μήκους παραγόμενου προϊόντος ισούται με το λόγο της σκληρότητας των μητρών, δηλαδή:

$$\frac{L_{3D \text{ printed}}}{L_{original}} = \frac{H_{3D \text{ printed}}}{H_{original}}, \text{ οπότε με βάση τις σκληρότητες που μετρήσαμε έχουμε:}$$

$$L_{St.17-4} = \frac{H_{3D \text{ printed}}}{H_{original}} \cdot L_{original} = \frac{331}{810.7} \cdot L_{original} = 2.44 \cdot L_{original}$$

$$L_{H13} = \frac{376.2}{810.7} \cdot L_{original} = 2.17 \cdot L_{original}$$

Επομένως, η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής της εκτυπωμένης μήτρας από St.17-4 και H13 είναι 2.44 και 2.17 φορές μικρότερη από αυτήν που παρουσιάζει η συμβατική μήτρα αντίστοιχα.

## Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία ερευνήθηκαν οι μέθοδοι τρισδιάστατης προσθετικής κατασκευής, που βασίζονται στην πυροσυσσωμάτωση, Binder jetting και Bound Metal Deposition, ως προς τη χρήση τους στην κατασκευή μητρών συνεχούς διέλασης χαλκού.

Η διπλωματική ξεκίνησε με βιβλιογραφική ανασκόπηση των κατεργασιών της διέλασης. Επεξηγήθηκαν οι ιδιαιτερότητες της συνεχούς διέλασης και παρουσιάστηκαν μελέτες ερευνητών που έχουν ασχοληθεί με την κατασκευή εργαλείων διέλασης χρησιμοποιώντας μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Στη συνέχεια έγινε αναφορά σε μερικές από τις πιο διαδεδομένες κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης εξηγώντας την αρχή λειτουργίας τους, τα πλεονεκτήματα και τις ελλείψεις της κάθε μίας.

Μήτρες και δοκίμια σχεδιάστηκαν και κατόπιν εκτυπώθηκαν με τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζονται στη πυροσυσσωμάτωση. Τα εκτυπωμένα αντικείμενα χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογηθούν οι μέθοδοι που τα παρήγαγαν ως προς την αντοχή, την ποιότητα επιφανείας και τη διαστασιολογική ακρίβεια. Συγκεκριμένα έγιναν μετρήσεις τραχύτητας, σκληρότητας, δοκιμές εφελκυσμού, λήφθηκαν ραδιογραφίες για έλεγχο της εσωτερικής δομής και έγιναν μετρήσεις σε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM) για την εύρεση της γεωμετρικής και διαστασιολογικής ακρίβειας των εκτυπωμένων κομματιών.

Διεξήχθησαν αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία για την προσομοίωση της διαδικασίας της πυροσυσσωμάτωσης των εκτυπωμένων κομματιών και της διέλασης του χαλκού δια των μητρών.

Τέλος, έγινε σύγκριση του κόστους, του χρόνου κατασκευής και της διάρκειας ζωής των μητρών ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής τους.

Ανακεφαλαιώνοντας, από τη μελέτη που έγινε, βλέπουμε ότι η αντοχή των εκτυπωμένων υλικών είναι χαμηλότερη από τα αντίστοιχα συμβατικά. Τα υλικά αυτά, λόγω του τρόπου κατασκευής τους, έχουν κενά και πορώδεις στην εσωτερική τους δομή, που τα καθιστά πιο αδύναμα. Επιπλέον, η ποιότητα επιφάνειας και η γεωμετρική ακρίβεια τους είναι κατώτερες από αυτές που επιτυγχάνονται με τις εδραιωμένες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Παρόλα αυτά οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι οι εκτυπωμένες μήτρες αντέχουν τα φορτία της διέλασης και από τη βιβλιογραφία είδαμε αντίστοιχες μήτρες να παράγουν αποδεκτό προϊόν παρά την τραχιά τους επιφάνια.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των μεθόδων που μελετήσαμε πέρα από τη σχεδιαστική ελευθερία είναι η ταχύτητα κατασκευής και το χαμηλό κόστος σε λίγα κομμάτια. Κομμάτια αυτών των μεθόδων μπορεί να είναι έτοιμα για αποστολή μέσα σε λίγες μέρες σε αντίθεση με τους μήνες που συχνά χρειάζονται διαφορετικά.

Το κόστος ανά τεμάχιο είναι αρκετά μικρότερο οπότε συμφέρει για μικρές παρτίδες όπου δεν υπάρχει διαθέσιμο εργαλείο στο εμπόριο ή δεν υπάρχει διαθέσιμος χρόνος για αναμονή της άφιξής του.

Αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν χρήσιμο εργαλείο στη φάση του σχεδιασμού και στην ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων. Πολλές φορές στην κατασκευή μητρών, η τελική γεωμετρία μπορεί να επιτευχθεί μέσω δοκιμών. Ενσωματώνοντας τεχνικές προσθετικής κατασκευής

μπορούν αν εκτυπωθούν πολλές φτηνές παραλλαγές των εργαλείων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, ώστε να γίνει η λεπτή ρύθμιση της γεωμετρίας, πριν γίνει η επένδυση στον ακριβό εξοπλισμό που θα κάνει τη μαζική παραγωγή.

Αποτελεσματικά εργαλεία διέλασης είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με τρισδιάστατη εκτύπωση, αλλά καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν από το συνδυασμό προσθετικών και αφαιρετικών κατεργασιών.

Σε μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να δοθεί έμφαση στην αξιοποίηση αγωγών ψύξης εντός της μήτρας. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας ενδέχεται να βελτιώσει τη διάρκεια ζωής της μήτρας και να δώσει δυνατότητα για αύξηση της παραγωγής. Η χωροπλήρωση που χρησιμοποιήσαμε στις μήτρες από H13 αποτελεί βάση για μια τέτοια μελέτη.

Επιπλέον θα μπορούσε να γίνει εμβάθυνση στις μηχανικές ιδιότητες των εκτυπωμένων υλικών. Τα πειράματα της συγκεκριμένης διπλωματικής ήταν περιορισμένα, αλλά έδειξαν ότι υπάρχει ερευνητικό ενδιαφέρον για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους.

Τέλος, επικύρωση των αποτελεσμάτων αυτής της έρευνας θα μπορούσε να γίνει μέσω δοκιμών των μητρών που εκτυπώσαμε στη βιομηχανία. Έτσι θα μπορούσαν να εξαχθούν συμπεράσματα για την ποιότητα του τελικού προϊόντος και τη διάρκεια ζωής των εργαλείων που μπορεί να επιτευχθεί με την κάθε μέθοδο εκτύπωσης.



## Βιβλιογραφία

- [1] '6b\_extrusion.pdf'. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/6b\\_extrusion.pdf](http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/6b_extrusion.pdf)
- [2] 'Extrusion', *Wikipedia*. 26 Ιανουάριος 2024. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Extrusion&oldid=1199290004>
- [3] M. Bauser, G. Sauer, και K. Siegert, Επιμ., *Extrusion*, 2ο έκδ. ASM International, 2006. doi: 10.31399/asm.tb.ex2.9781627083423.
- [4] R. Hölker, M. Haase, N. B. Khalifa, και A. E. Tekkaya, 'Hot Extrusion Dies with Conformal Cooling Channels Produced by Additive Manufacturing', *Mater. Today Proc.*, τ. 2, τχ. 10, Part A, σσ. 4838–4846, Ιανουαρίου 2015, doi: 10.1016/j.matpr.2015.10.028.
- [5] R. Hölker και A. E. Tekkaya, 'Advancements in the manufacturing of dies for hot aluminum extrusion with conformal cooling channels', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, τ. 83, τχ. 5, σσ. 1209–1220, Μαρτίου 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7647-4.
- [6] Z. C. Oter κ.ά., 'Benefits of laser beam based additive manufacturing in die production', *Optik*, τ. 176, σσ. 175–184, Ιανουαρίου 2019, doi: 10.1016/j.ijleo.2018.09.079.
- [7] N. B. Khalifa, J. Isakovic, και J. Bohlen, 'New concepts of extrusion dies to reduce the anisotropy of extruded profiles by means of additive manufacturing', *CIRP Ann.*, τ. 70, τχ. 1, σσ. 231–234, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.006.
- [8] D. Metal, 'Studio System™', Desktop Metal. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.desktopmetal.com/products/studio>
- [9] F42 Committee, 'Terminology for Additive Manufacturing Technologies', ASTM International. doi: 10.1520/F2792-12A.
- [10] 'What is Powder Bed Fusion? Process Definition and Advantages'. Ημερομηνία πρόσβασης: 23 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-powder-bed-fusion.aspx>
- [11] 'Types of 3D Printing in Metal'. Ημερομηνία πρόσβασης: 12 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>
- [12] 'Powder Bed Fusion (PBF)', Digital Alloys. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Μάρτιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.digitalalloys.com/blog/powder-bed-fusion/>
- [13] Materialgeeza, *SLS system schematic*. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selective\\_laser\\_melting\\_system\\_schematic.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selective_laser_melting_system_schematic.jpg)

- [14] P. Ninpetch, P. Kowitwarangkul, S. Mahathanabodee, P. Chalermkarnnon, και P. Ratanadecho, 'A review of computer simulations of metal 3D printing', παρουσιάστηκε στο AIP Conference Proceedings, Οκτωβρίου 2020, σ. 050002. doi: 10.1063/5.0022974.
- [15] H. Soliman και M. Elbestawi, 'Titanium aluminides processing by additive manufacturing – a review', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, τ. 119, Απριλίου 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08728-w.
- [16] 'Binder Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University'. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- [17] '(13) Binder Jetting | K.M.Eazhil | SNS Institutions | LinkedIn'. Ημερομηνία πρόσβασης: 22 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.linkedin.com/pulse/binder-jetting-i-kmeazhil-sns-institutions-eazhil-k-m/>
- [18] 'Sintering and Additive Manufacturing'. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Μάρτιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.gasbarre.com/2021/02/23/sintering-and-additive-manufacturing/>
- [19] matzesl, 'Evaluation of Sinter-based Technologies such as Binder Jetting', AMPOWER. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Μάρτιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://ampower.eu/insights/additive-manufacturing-sinter-based-technologies/>
- [20] 'Technologies | sinter-based additive manufacturing'. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Μάρτιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.metshape.com/technologies>
- [21] C. S, 'All You Need to Know About Cold Spray Additive Manufacturing', 3Dnatives. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Μάρτιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.3dnatives.com/en/all-you-need-to-know-about-cold-spray-additive-manufacturing-070420234/>
- [22] 'The World's Fastest Metal Parts Using Cold Spray', SPEE3D. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Μάρτιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.spee3d.com/the-worlds-fastest-metal-parts-using-cold-spray/>
- [23] 'BMD Design guide 2.28.19\_2.pdf'. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [https://www.metal3d.gr/documents/BMD%20Design%20guide%202.28.19\\_2.pdf](https://www.metal3d.gr/documents/BMD%20Design%20guide%202.28.19_2.pdf)
- [24] D. Metal, 'Shop System™', Desktop Metal. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.desktopmetal.com/products/shop>

- [25] 'Metal Binder Jetting 3D Printing Design Guidelines', Proto3000. Ημερομηνία πρόσβασης: 12 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://proto3000.com/service/3d-printing-services/materials/overview/design-guidelines/metal-binder-jetting/>
- [26] E28 Committee, 'Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials', ASTM International. doi: 10.1520/E0008\_E0008M-13A.
- [27] E28 Committee, 'Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials', ASTM International. doi: 10.1520/E0021-20.
- [28] 'Metals - Strength vs. Temperature'. Ημερομηνία πρόσβασης: 11 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [https://www.engineeringtoolbox.com/metal-temperature-strength-d\\_1353.html#gsc.tab=0](https://www.engineeringtoolbox.com/metal-temperature-strength-d_1353.html#gsc.tab=0)
- [29] 'Vickers hardness test', *Wikipedia*. 18 Νοέμβριος 2023. Ημερομηνία πρόσβασης: 7 Μάρτιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vickers\\_hardness\\_test&oldid=1185725158](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vickers_hardness_test&oldid=1185725158)

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Διαστάσεις δοκιμίων. Πηγή ASTM E8[26].	30
Πίνακας 2: Υπολογισμός δύναμης θραύσης	31
Πίνακας 3: Διαστάσεις δοκιμίων υψηλών θερμοκρασιών.	35
Πίνακας 4: Προσομοίωση πυροσ/σης μήτρας.	39
Πίνακας 5: Προσομοίωση πυροσ/σης δοκιμίων εκτυπωμένων κάθετα στην τράπεζα.	39
Πίνακας 6: Προσομοίωση πυροσ/σης δοκιμίων εκτυπωμένων εφαπτόμενα στην τράπεζα.	40
Πίνακας 7: Προσομοίωση πυροσ/σης δοκιμίων εκτυπωμένων κατά τον άξονα Z.	40
Πίνακας 8: Προσομοίωση πυροσ/σης λεπτών δοκιμίων εκτυπωμένων εφαπτόμενα στην τράπεζα.	41
Πίνακας 9: Προσομοίωση πυροσ/σης 3 λεπτών δοκιμίων εκτυπωμένων εφαπτόμενα στην τράπεζα.	41
Πίνακας 10: Προσομοίωση πυροσ/σης 3 δοκιμίων εκτυπωμένων κατά τον άξονα Z με πλαίσιο υποστήριξης.	42
Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοίωσης υπολογισμού σχετικής πυκνότητας.	43
Πίνακας 12: Μεταβολή του όγκου green part - αρχικού κομματιού.	44
Πίνακας 13: Κατανομή θερμοκρασίας στην μπιέτα και το προφίλ.	46
Πίνακας 14: Κατανομή ταχύτητας στην μπιέτα και το προφίλ.	46
Πίνακας 15: Κατανομή τάσεων στη μήτρα.	47
Πίνακας 16: Επίδραση του αγωγού τροφοδοσίας.	48
Πίνακας 17: Φορτία και οριακές συνθήκες.	50
Πίνακας 18: Αποτελέσματα μετρήσεων CMM.	56
Πίνακας 19: Προσεγγιστικές τιμές των ανοχών που μπορούν να επιτευχθούν με την κάθε μέθοδο	56
Πίνακας 20: Ποσοστιαία διακύμανση ακρίβειας.	57
Πίνακας 21: Μετρήσεις σκληρότητας.	59
Πίνακας 22: Μετρήσεις τραχύτητας.	60
Πίνακας 23: Μετρήσεις βάρους.	61

Πίνακας 24: Υπολογισμός σχετικής πυκνότητας. ....	61
Πίνακας 25: Παράμετροι ραδιογραφιών. ....	64
Πίνακας 26: Κόστος για συγκεκριμένες τιμές ανάλογα με την μέθοδο κατασκευής. ....	68

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Άμεση (a) και έμμεση(b) διέλαση[3] .....	8
Εικόνα 2: Τα μέρη της Conform. 1: τροχός τριβής, 2: τμήμα σφράγισης(seal segment), 3:κομμάτι σφράγισης (sealing piece), 4: μήτρα, 5: πρώτη ύλη (σύρμα), 6: προφίλ[3] .....	10
Εικόνα 3: 1: τροχός τριβής, 2: τμήμα σφράγισης(seal segment), 3:κομμάτι σφράγισης (sealing piece), 4: μήτρα, 5: πρώτη ύλη (σύρμα), 6: προφίλ, ένθετο προθέρμανσης υλικού, 8: θάλαμος τροφοδοσίας, 9: θερμαντικά στοιχεία [3] .....	10
Εικόνα 4: Μήτρα με αγωγούς ψύξης[4]. .....	11
Εικόνα 5: Επίδραση της ψύξης στο τελικό προϊόν[4].....	11
Εικόνα 6: Υβριδική μήτρα κατασκευασμένη με προσθετικές και αφαιρετικές κατεργασίες[5]. .....	12
Εικόνα 7: Μήτρα με μεταβλητή διατομή[7].....	12
Εικόνα 8: Μήτρα διέλασης πλαστικού εκτυπωμένη με τη μέθοδο BMD[8].....	12
Εικόνα 9: Μάκρο-ρωγμές στον πόδα της μήτρας. ....	13
Εικόνα 10: Αρχή λειτουργίας της μεθόδου SLM [13] .....	15
Εικόνα 11: Αρχή λειτουργίας της μεθόδου EBM[14] .....	15
Εικόνα 12: Αρχή λειτουργίας της μεθόδου DED[15] .....	16
Εικόνα 13: Στάδια εκτύπωσης με μεθόδους πυροσυσσωμάτωσης[20]. ....	16
Εικόνα 14: Μονογραμμική αναπαράσταση της μεθόδου ψυχρού ψεκασμού[22].....	17
Εικόνα 15: Στάδια κατασκευής με τις μεθόδους BMD/Binder Jetting.....	18
Εικόνα 16: Μηχανήματα της μεθόδου BMD: εκτυπωτής, debinder, κλίβανος πυροσυσσωμάτωσης[8] .....	19
Εικόνα 17: Αφαίρεση υποστηριγμάτων από εκτυπωμένο κομμάτι[8]. ....	20
Εικόνα 18: Επίδραση του ύψους στρώσης[23]. ....	21
Εικόνα 19: Οδοντωτοί τροχοί τυπωμένοι με διαφορετικό πάχος τοιχώματος και gyriod infill. ....	21
Εικόνα 20: Μέγιστο επιτρεπτό ύψος ανάλογα με το λόγο διαστάσεων [25].....	23
Εικόνα 21: Ελάχιστο πλάτος σχισμής και μέγιστο επιτρεπτό βάθος οπής ανάλογα με τη διάμετρο [25].....	24
Εικόνα 22: Ανάγκη χρήσης ακτινών καμπυλότητας [25].....	24

Εικόνα 23: Πεδία ανοχών βασικού άξονα.....	25
Εικόνα 24: Μητροθήκη.....	26
Εικόνα 25: Σκαρίφημα της μήτρας.....	26
Εικόνα 26: Διαστάσεις οπής μήτρας: 3.15x8.0.....	26
Εικόνα 27: Μήτρα της Cablel.....	26
Εικόνα 28: Εγκάρσια (αριστερά) και διαμήκης (δεξιά) τομή της μήτρας από H13.....	27
Εικόνα 29: Ενδοστρωματικές και διαστρωματικές ενώσεις.....	28
Εικόνα 30: Διακύμανση της πυκνότητας του συνδετικού μέσου σε σχέση με το πάχος στρώσης.....	29
Εικόνα 31: Διαστάσεις δοκιμίων με βάση τον πρώτο σχεδιασμό.....	31
Εικόνα 32: Στάδια ανασχεδιασμού δοκιμίων για να τυπωθούν στην κατεύθυνση Z.....	32
Εικόνα 33: Στάδια ανασχεδιασμού δοκιμίων υψηλών θερμοκρασιών.....	33
Εικόνα 34: Τελικές διαστάσεις δοκιμίων μετά την κοπή από τα πλαίσια: α)Δοκίμια υψηλών θερμοκρασιών. β)Δοκίμιο για εκτύπωση στην κατεύθυνση X & Y γ)Δοκίμιο για εκτύπωση στην κατεύθυνση Z.....	33
Εικόνα 35: Φωτογραφίες τυπωμένων δοκιμίων κατά την κατεύθυνση Z, αριστερά από H13, δεξιά από St.17-4.....	34
Εικόνα 36 : Φωτογραφίες τυπωμένων λεπτών δοκιμίων για εφελκυσμό σε ανεβασμένες θερμοκρασίες, αριστερά από H13, δεξιά από St.17-4.....	34
Εικόνα 37: Δοκίμια μετά την κοπή από τα πλαίσιά τους, αριστερά από H13, δεξιά από St.17-4.....	34
Εικόνα 38: Δοκίμια εντός του φούρνου.....	35
Εικόνα 39: Μέτρηση της παραμόρφωσης με Laser.....	35
Εικόνα 40: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης.....	36
Εικόνα 41: Διακύμανση του ορίου θραύσης σε σχέση με την θερμοκρασία.....	36
Εικόνα 42: Διακύμανση του ορίου θραύσης σε σχέση με τη θερμοκρασία για διάφορα υλικά [28].....	37
Εικόνα 43: Σύγκριση καμπυλών σ-ε: Μέτρηση της μετακίνησης των αρπαγών - Μετρήσεις του λέιζερ.....	37
Εικόνα 44: MatLab curve fitter tool: εύρεση μέτρου Young για το St.17-4.....	37

Εικόνα 45: MatLab curve fitter tool: εύρεση μέτρου Young για το H13.....	37
Εικόνα 46: Αλλαγή της μορφής κατά τη πυροσυσσωμάτωση. ....	38
Εικόνα 47: Περιοχές όπου οι τάσεις υπερβαίνουν τα 620MPa. ....	47
Εικόνα 48: Μητροθήκη.....	48
Εικόνα 49: Επιφάνειες παραλαβής φορτίου .....	49
Εικόνα 50: Κατανομή πίεσης (αριστερά) και διατμητικής τάσης (δεξιά) στο σημείο επαφής του χαλκού με τη μήτρα. ....	49
Εικόνα 51: Υπολογισμός τάσεων στη μήτρα από St.17-4 μέσω του Altair Inspire. ....	51
Εικόνα 52: Υπολογισμός τάσεων στη μήτρα από St.17-4 μέσω του ANSYS. ....	51
Εικόνα 53: Υπολογισμός τάσεων στη μήτρα από H13 μέσω του ANSYS .....	52
Εικόνα 54: Μηχανή CMM του εργαστηρίου ταχείας κατασκευής Πρωτοτύπων του ΕΜΠ..	53
Εικόνα 55: Μετρήσεις περιμετρικά της μήτρας. ....	53
Εικόνα 56: Κασετίνα με Probes CMM διαφόρων διαμέτρων. ....	54
Εικόνα 57: Σκαρίφημα με τις γεωμετρίες που αξιολογήθηκαν κατά τις μετρήσεις.....	55
Εικόνα 58: Αρχείο εξόδου του προγράμματος της CMM.....	55
Εικόνα 59: Μέρη της μηχανής σκληρομέτρησης. ....	58
Εικόνα 60: Μέρη της μηχανής σκληρομέτρησης. ....	58
Εικόνα 61: Μέτρηση λειασμένης μήτρας από St.17-4 .....	60
Εικόνα 62: Πορώδες στην περιοχή μέτρησης της σκληρότητας, μεγέθυνση x10, υλικό St17-4. ....	62
Εικόνα 63: Περιοχή μέτρησης της σκληρότητας, μεγέθυνση x10, υλικό H13. ....	62
Εικόνα 64: Πηγή ακτινοβολίας. ....	63
Εικόνα 65: Υγρά εμφάνιση ραδιογραφιών. Από αριστερά προς δεξιά : εμφανιστής, σταθεροποιητής , υγρό πλύσης.....	64
Εικόνα 66: Ραδιογραφία 1: Δοκίμια από H13, εκτυπωμένα εφαπτομενικά στην τράπεζα (3 αριστερά), εκτυπωμένα κάθετα στην τράπεζα(3 στο κέντρο), εκτυπωμένα κατά την κατεύθυνση Z(3 δεξιά).....	65
Εικόνα 67: Ραδιογραφία 2: Δοκίμια από H13, εκτυπωμένα εφαπτομενικά στην τράπεζα (3 αριστερά), εκτυπωμένα κάθετα στην τράπεζα(3 στο κέντρο) , εκτυπωμένα κατά την κατεύθυνση Z(3 δεξιά).....	65




Εικόνα 68: Ραδιογραφία 3: μήτρες από St.17-4 (3 από αριστερά), μήτρες από H13(2 δεξιά), κύλινδρος από H13 πάνω δεξιά , κύλινδρος από St.17-4 κάτω δεξιά.....	65
Εικόνα 69: Ραδιογραφία 4: Δοκίμια από St.17-4, εκτυπωμένα εφαπτομενικά στην τράπεζα (3 αριστερά), εκτυπωμένα κάθετα στην τράπεζα(3 στο κέντρο), εκτυπωμένα κατά την κατεύθυνση Z(3 δεξιά).....	66
Εικόνα 70: Ραδιογραφία 5: Δοκίμια από St.17-4, εκτυπωμένα εφαπτομενικά στην τράπεζα (3 αριστερά), εκτυπωμένα κάθετα στην τράπεζα(3 στο κέντρο), εκτυπωμένα κατά την κατεύθυνση Z(3 δεξιά).....	66
Εικόνα 71: Ραδιογραφία 6: Λεπτά δοκίμια υψιλών θερμοκρασιών από H13(3 δεξιά) και St.17-4 . Τα τρία πρώτα, ραδιοφραγήθηκαν μετά τη θραύση τους σε εφελκισμό.....	66
Εικόνα 72: Ατέλειες στη δομή δοκιμίων από H13.....	67
Εικόνα 73: Μοναδιαίο κόστος παραγωγής συναρτήσει του πλήθους τεμαχίων. ....	68
Εικόνα 74: Επιλογή της γεωμετρίας που θα εκτυπωθεί. ....	81
Εικόνα 75: Διαστασιολόγηση του κλιβάνου.....	82
Εικόνα 76: Παράμετροι της προσομοίωσης.....	82
Εικόνα 77: Συρρίκνωση κομματιών μετά την πυροσυσσωμάτωση. Αριστερά μήτρα που τυπώθηκε ως έχει. Δεξιά μήτρα με αντισταθμισμένη γεωμετρία.....	83
Εικόνα 78: Διάγραμμα διέλασης.....	84
Εικόνα 79: Επιλογή των κομματιών και εξαγωγή του Flow Volume.....	84
Εικόνα 80: Όγκος ροής της μήτρας.....	85
Εικόνα 81: Οργάνωση του όγκου. ....	85
Εικόνα 82: Ορισμός διαστάσεων μπιέτας. ....	86
Εικόνα 83: Επιλογή υλικού τεμαχίου.....	86
Εικόνα 84: Παράμετροι της ανάλυσης. ....	87
Εικόνα 85: Επιφάνειες παραλαβής φορτίων.....	88
Εικόνα 86: Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	88

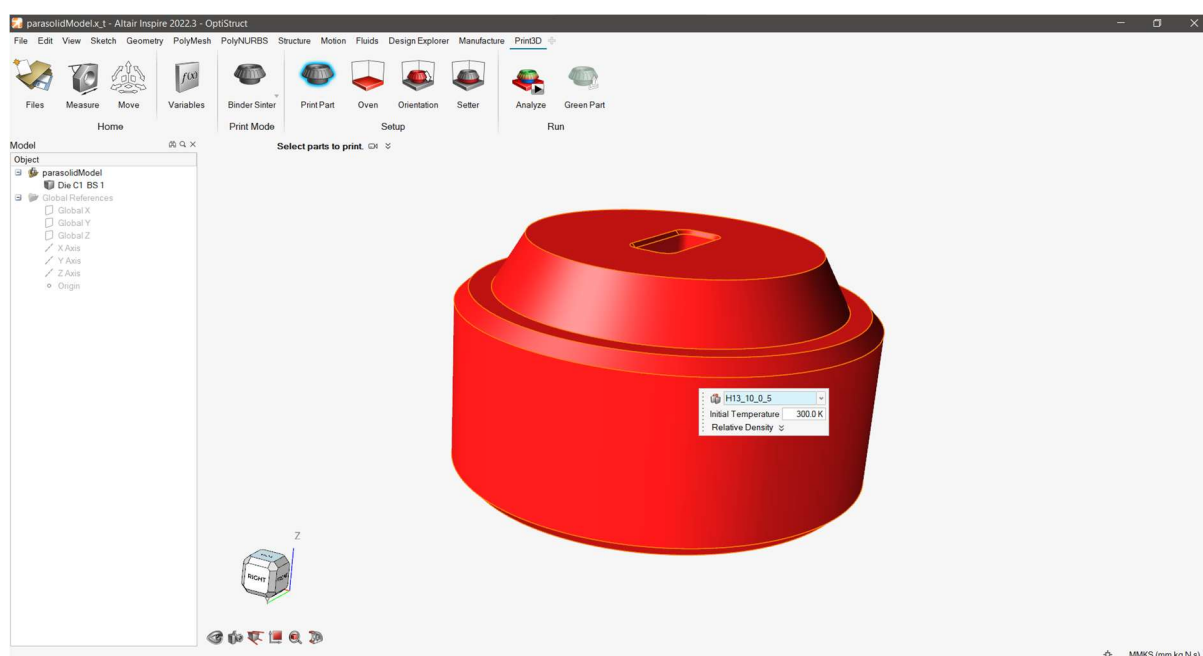
## Παράρτημα Α

### Περιγραφή διαδικασίας προσομοίωσης στο Altair Inspire Print3D



Ανοίγουμε το Altair Inspire και πηγαίνουμε στην καρτέλα Print3D. Φορτώνουμε τη γεωμετρία στην οποία θέλουμε να κάνουμε ανάλυση κάνοντας drag and drop το αρχείο της εντός του Altair.

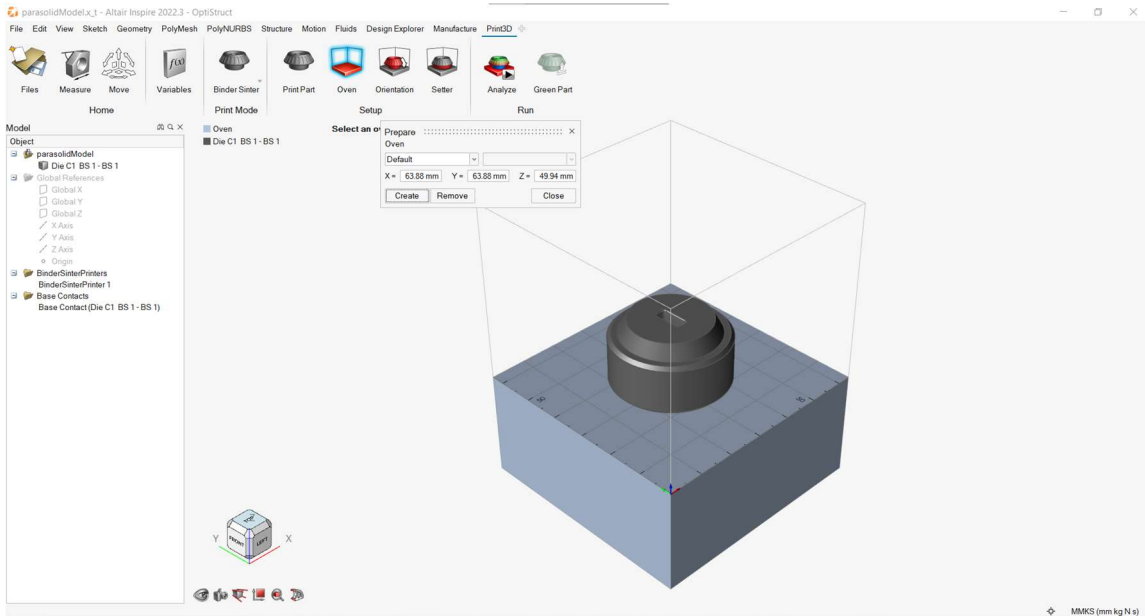
Για να προσομοιάσουμε τις τεχνολογίες Binder Jetting και BMD επιλέγουμε την τεχνολογία εκτύπωσης Binder Sinter .

Επιλέγουμε τη γεωμετρία στην οποία θα κάνουμε προσομοίωση, επιλέγουμε το υλικό και τη θερμοκρασία του κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Στην περίπτωση μας το υλικό είναι το H13 tool steel και η θερμοκρασία 300K.




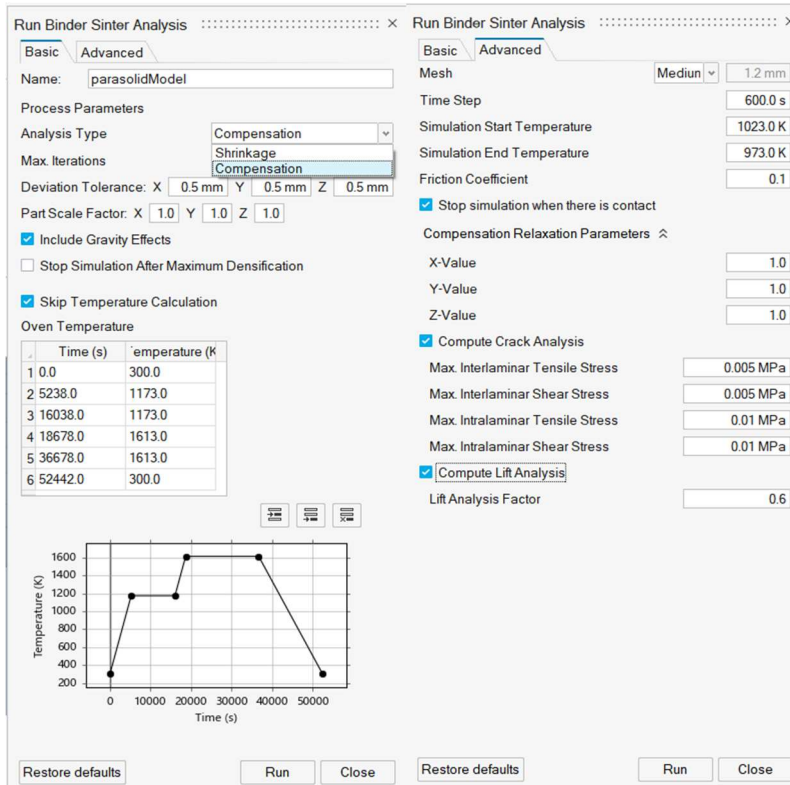
Εικόνα 74: Επιλογή της γεωμετρίας που θα εκτυπωθεί.

Θέτουμε τις διαστάσεις του κλιβάνου όπως φαίνεται στην εικόνα 75. Επιλέγουμε τον προσανατολισμό εκτύπωσης μέσω της εντολής Orientation  και δημιουργούμε κεραμικές επιφάνειες μέσω της εντολής Setters  για στήριξη του κομματιού όπου χρειάζεται.



Εικόνα 75: Διαστασιολόγηση του κλιβάνου

Πατάμε Analize  για να θέσουμε τις παραμέτρους της προσομοίωσης. Εδώ επιλέγουμε το προφίλ (ράμπα) της θερμοκρασίας μέσα στον κλιβάνο (εικόνα 76). Στο analysis type επιλέγουμε αν θέλουμε να υπολογίσουμε τη συρρίκνωση ενός κομματιού ή αν θέλουμε να αντισταθμίσουμε το κομμάτι μας μέχρι να πετύχουμε την επιθυμητή γεωμετρία. Στην καρτέλα Advanced ελέγχουμε την ποιότητα του πλέγματος, ενώ μπορούμε να επιλέξουμε να κάνουμε έλεγχο για δημιουργία ρωγμών ή αποκόλλησης του κομματιού από την τράπεζα του κλιβάνου.

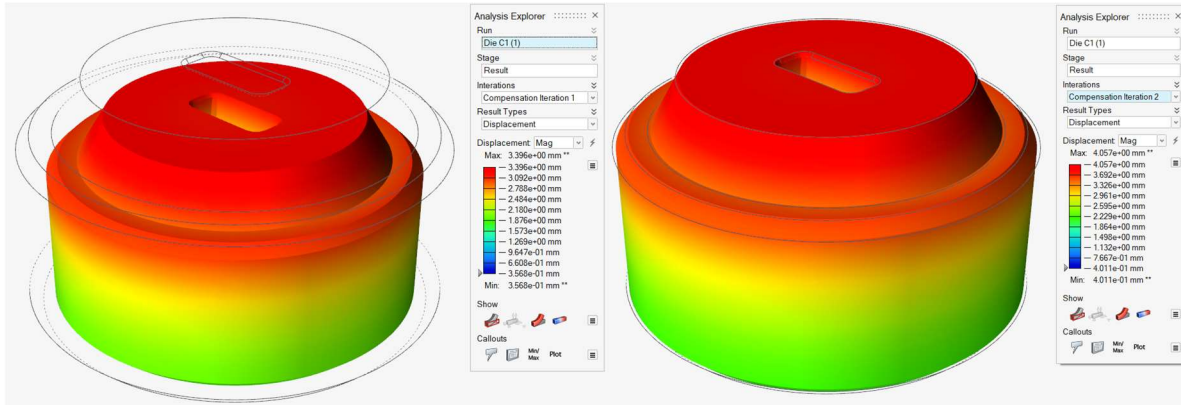


Εικόνα 76: Παράμετροι της προσομοίωσης

Μετά το τέλος της ανάλυσης μπορούμε να δούμε αποτελέσματα όπως η παραμόρφωση, η διακύμανση στην πυκνότητα και η συρρίκνωση του κομματιού.

Παρακάτω φαίνεται η αρχική γεωμετρία του αντικειμένου, που αποκλίνει πολύ από το επιθυμητό μέγεθος και στην συνέχεια η γεωμετρία που προέκυψε από την αντιστάθμιση (εικόνα 77). Παρατηρούμε ότι για να πετύχουμε τις επιθυμητές τελικές διαστάσεις πρέπει να τυπώσουμε μια πολύ μεγαλύτερη μήτρα από αυτή που είχαμε σχεδιάσει αρχικά.


Μετά το τέλος την προσομοίωσης η αντισταθμισμένη γεωμετρία μπορεί να αποθηκευτεί ως STL και να εκτυπωθεί.

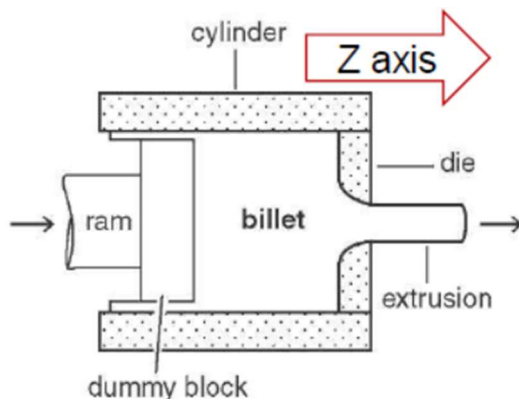


Εικόνα 77: Συρρίκνωση κομματιών μετά την πυροσυσσωμάτωση. Αριστερά μήτρα που τυπώθηκε ως έχει. Δεξιά μήτρα με αντισταθμισμένη γεωμετρία.

## Περιγραφή διαδικασίας προσομοίωσης στο Altair Inspire Extrude Metal

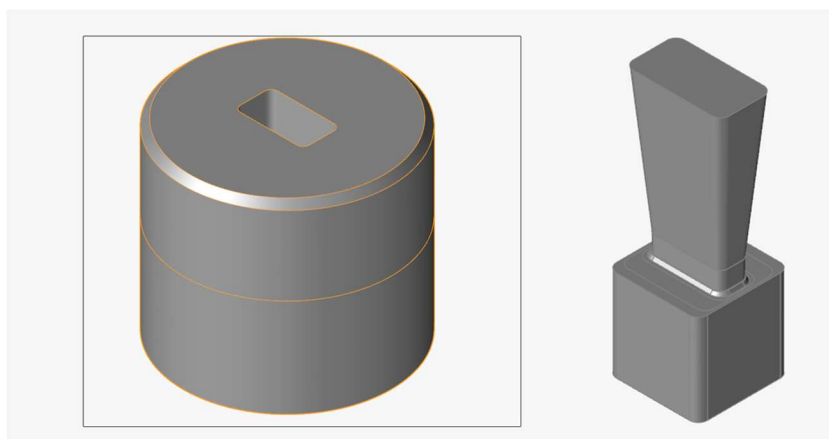
Μέρος Πρώτο: Προσομοίωση διέλασης συμπαγούς προφίλ

Αφού ανοίξουμε το Altair Inspire Extrude Metal εισάγουμε τη γεωμετρία της μήτρας είτε από το File menu είτε κάνουμε drag and drop το αρχείο μέσα στο παράθυρο του Inspire. Στην συνέχεια ορίζουμε τον προσανατολισμό της μήτρας πατώντας το εικονίδιο Orient . Τα θετικά του άξονα Z ταυτίζονται με την κατεύθυνση της ροής του υλικού όπως φαίνεται στην εικόνα 78.



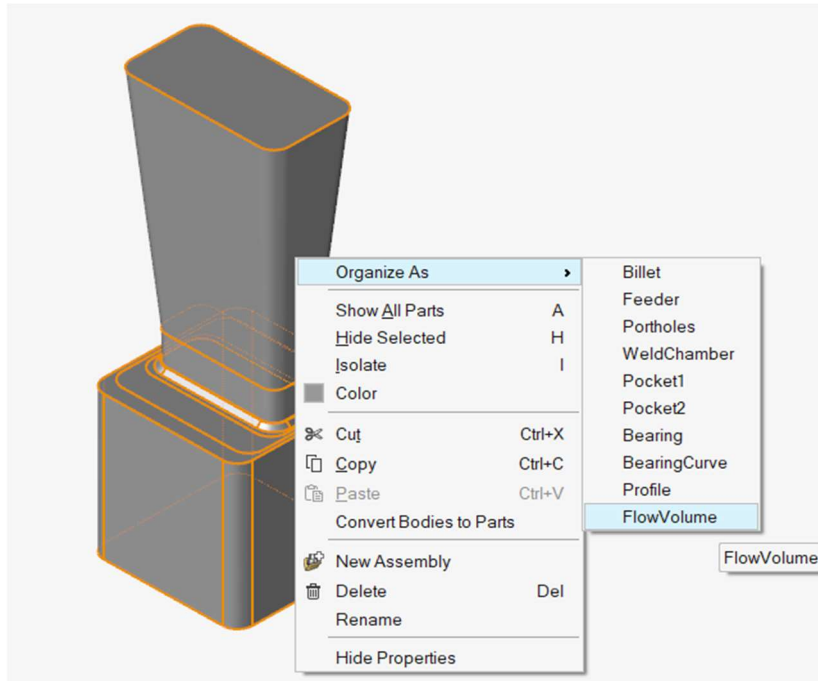
Εικόνα 78: Διάγραμμα διέλασης

Για να προσομοιώσουμε τη ροή του μετάλλου εντός της μήτρας πρέπει πρώτα να ορίσουμε τον όγκο που προκύπτει από την επιφάνεια της μήτρας που έρχεται σε επαφή με το μέταλλο. Αυτό γίνεται επιλέγοντας όλα τα κομμάτια της μήτρας και πατώντας το εικονίδιο Flow Volume




Εικόνα 79: Επιλογή των κομματιών και εξαγωγή του Flow Volume.


Στον όγκο που προκύπτει κάνουμε δεξί κλικ και επιλέγουμε Organize As > FlowVolume.

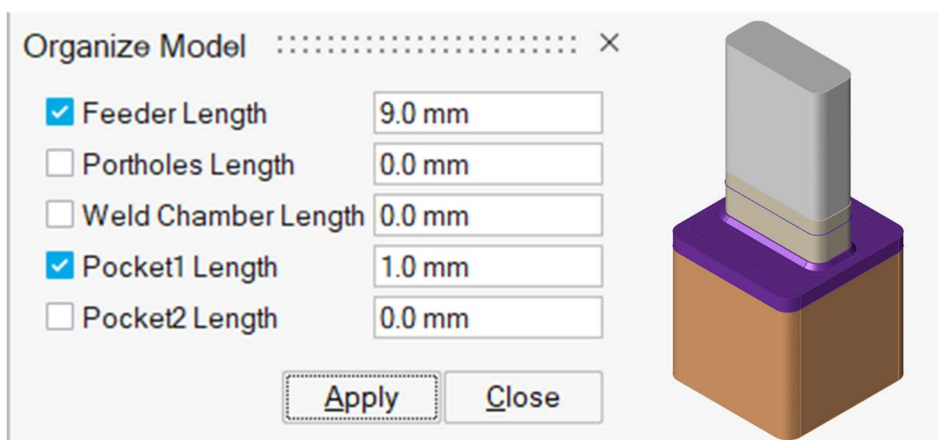


Εικόνα 80: Όγκος ροής της μήτρας


Ορίζουμε Bearing Region κάνοντας κλικ στο εικονίδιο Bearing  και επιλέγοντας την επιφάνεια που ξεκινά η ζώνη της διέλασης. Το πρόγραμμα θα σαρώσει αυτόματα τη γεωμετρία και θα απορρίψει την περιοχή ξεθυμάσματος (relief region) και θα δημιουργήσει τα στερεά bearing και προφίλ.

Για την καλύτερη οπτικοποίηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων, μπορούμε να οργανώσουμε τα στερεά σε διαφορετικά εξαρτήματα χρησιμοποιώντας τη χειροκίνητη λειτουργία κοπής ή εισάγοντας προκαθορισμένα μήκη σωμάτων. Αυτό βελτιώνει την ικανότητα δημιουργίας πλέγματος καλής ποιότητας με λιγότερα στοιχεία. Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη μέθοδος.

Για να το κάνουμε αυτό πρώτα επιλέγουμε το εικονίδιο Organize volumes  .Στο μικρό παράθυρο που εμφανίζεται, καθορίζουμε τα μήκη των στοιχείων και κάνουμε κλικ στο Apply.




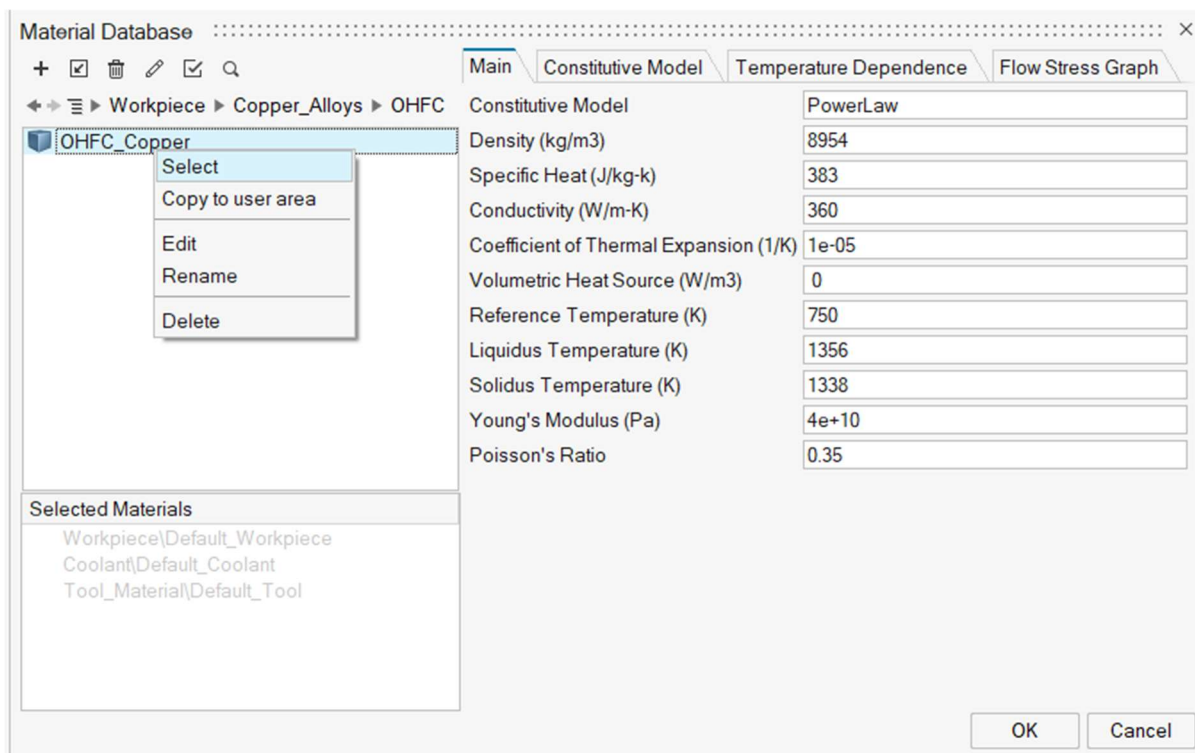
Εικόνα 81: Οργάνωση του όγκου.

Στη συνέχεια δημιουργούμε και καθορίζουμε τις διαστάσεις της μπιέτας κάνοντας κλικ στο εικονίδιο Billet  . Οι διαστάσεις της μπιέτας φαίνονται στην εικόνα 82




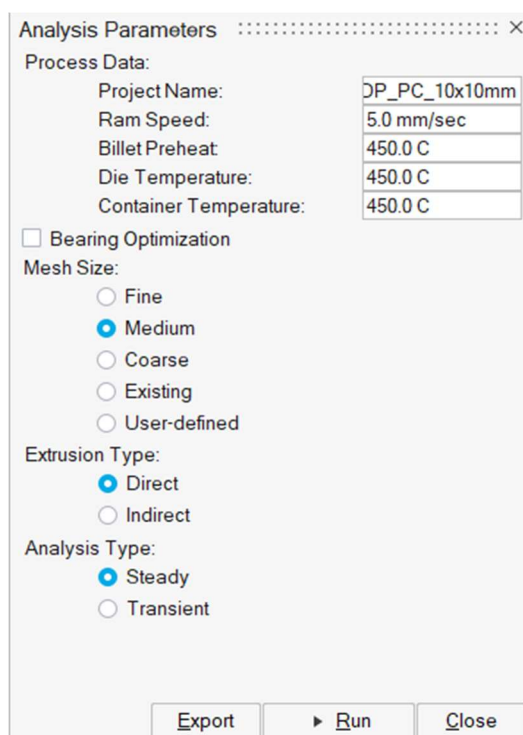
Εικόνα 82: Ορισμός διαστάσεων μπιέτας.

Κάνουμε κλικ στο εικονίδιο Materials  και επιλέγουμε το κράμα του τεμαχίου (Workpiece alloy) πατώντας δεξί κλικ στο επιθυμητό υλικό και μετά Select. Στην προσομοίωση επιλέχθηκε ο χαλκός OHFC (Oxygen-free high thermal conductivity copper).




Εικόνα 83: Επιλογή υλικού τεμαχίου.

Επιλέγουμε το εικονίδιο  Submit job for analysis για να ξεκινήσουμε την προσομοίωση. Στο παράθυρο που εμφανίζεται εισάγουμε τις επιθυμητές παραμέτρους και πατάμε Run.




Εικόνα 84: Παράμετροι της ανάλυσης.

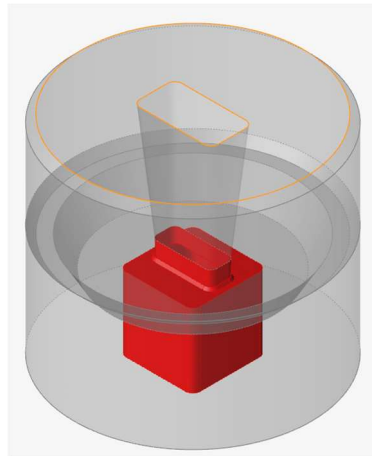
Πατώντας στο εικονίδιο Show Analysis Results  βλέπουμε το αποτέλεσμα της τελευταίας προσομοίωσης που κάναμε. Από την καρτέλα Analysis Explorer μπορούμε να επιλέξουμε τον τύπο των αποτελεσμάτων που θέλουμε να δούμε όπως την κατανομή ταχύτητας, θερμοκρασίας, πίεσης κ.α. εντός του υλικού.

Μέρος Δεύτερο: Ανάλυση παραμόρφωσης εργαλείου.


Αφού λάβουμε τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της ροής ανοίγουμε ένα καινούργιο αρχείο (File> New) και φορτώνουμε τα αρχεία με τη γεωμετρία των μητρών. Για να υπολογίσουμε την καταπόνηση της μήτρας κάνουμε κλικ στην καρτέλα Tool Deflection.


Το υλικό του τεμαχίου εργασίας που ρέει μέσα στη μήτρα ασκεί ένα φορτίο στις επιφάνειές της. Αυτές ονομάζονται επιφάνειες φορτίου (Load Faces). Επιφάνειες όπως σπές πείρων και περιοχές ανακούφισης δεν έρχονται σε επαφή με το τεμάχιο εργασίας και δεν πρέπει να αποτελούν μέρος των επιφανειών φορτίου. Δημιουργούμε τις επιφάνειες στις οποίες το υλικό εφάπτεται στη γεωμετρία του εργαλείου επιλέγοντάς τες και πατώντας το εικονίδιο Load Faces .






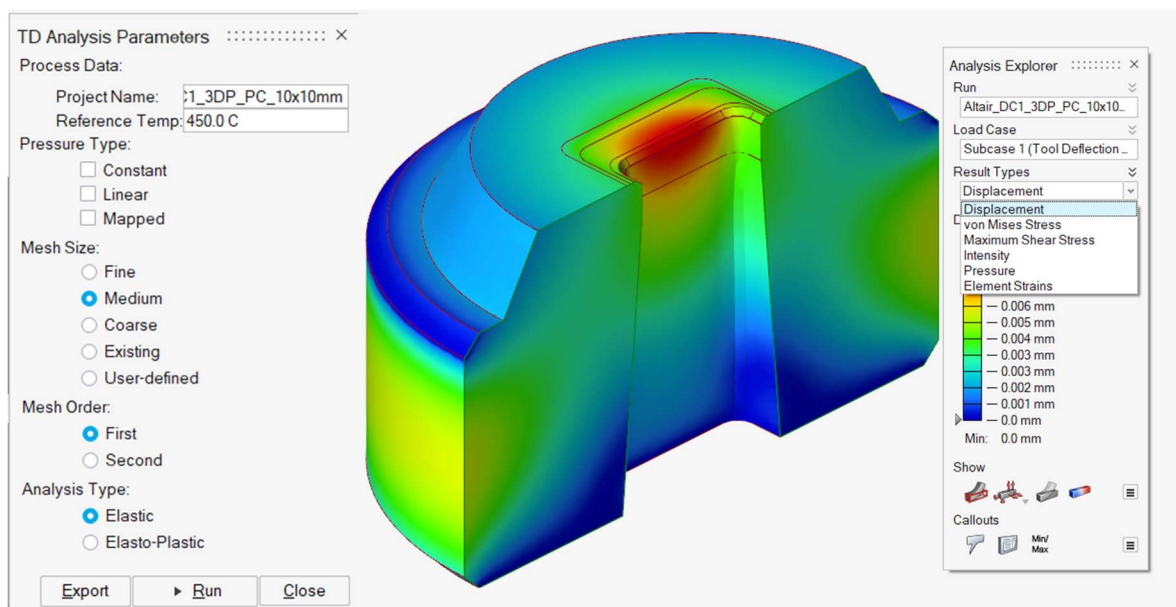
Εικόνα 85: Επιφάνειες παραλαβής φορτίων.

Το εργαλείο BCS  χρησιμοποιείται για τη χειροκίνητη δημιουργία περιορισμών κίνησης σε κατάλληλες επιφάνειες.

Η επιλογή του υλικού του εργαλείου γίνεται όμοια με τον τρόπο που έγινε στην ανάλυση ροής πατώντας το εικονίδιο . Στις προσομοιώσεις που έγιναν επιλέχθηκε προσαρμοσμένο υλικό με τις ιδιότητες του St.17-4.

Τέλος, καθορίζουμε τις παραμέτρους της προσομοίωσης πατώντας στο εικονίδιο Submit job for analysis . Στο παράθυρο που εμφανίζεται, η επιλογή Mapped μας δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε απευθείας τα φορτία από τη προσομοίωση της διέλασης για να βρούμε την καταπόνηση στη μήτρα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούμε να τα δούμε στο Analysis Explorer.

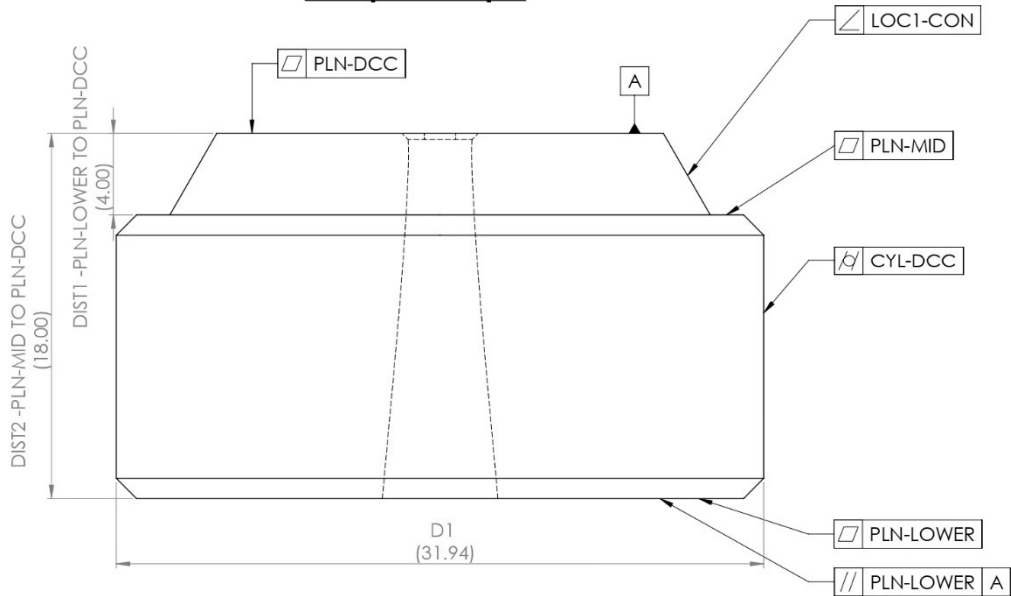


Εικόνα 86: Αποτελέσματα προσομοίωσης.

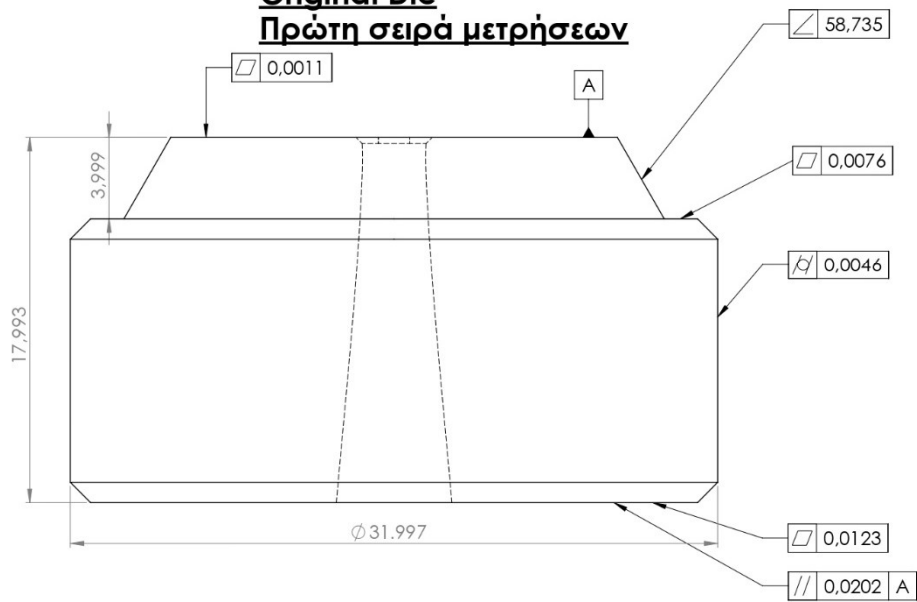
## Παράρτημα Β

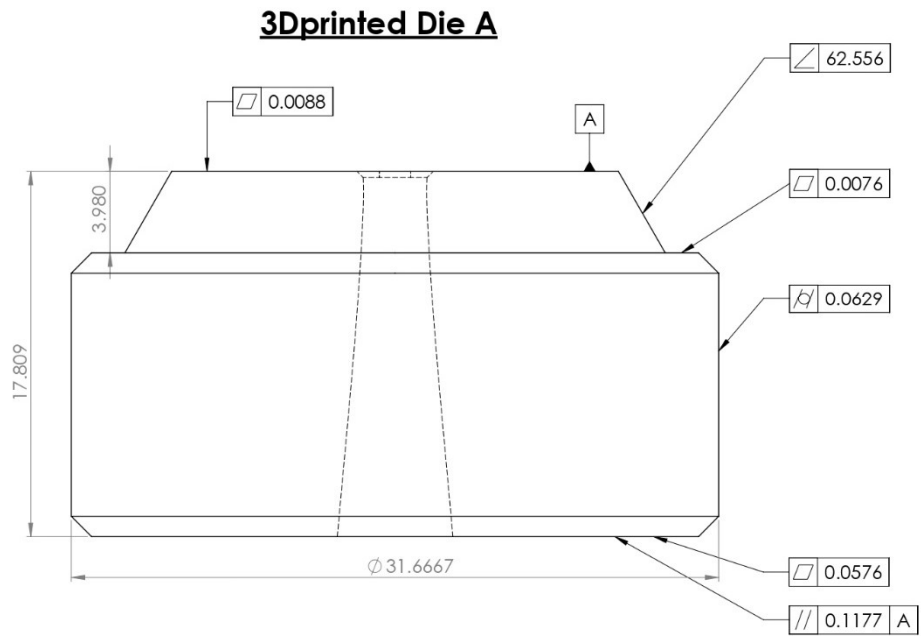
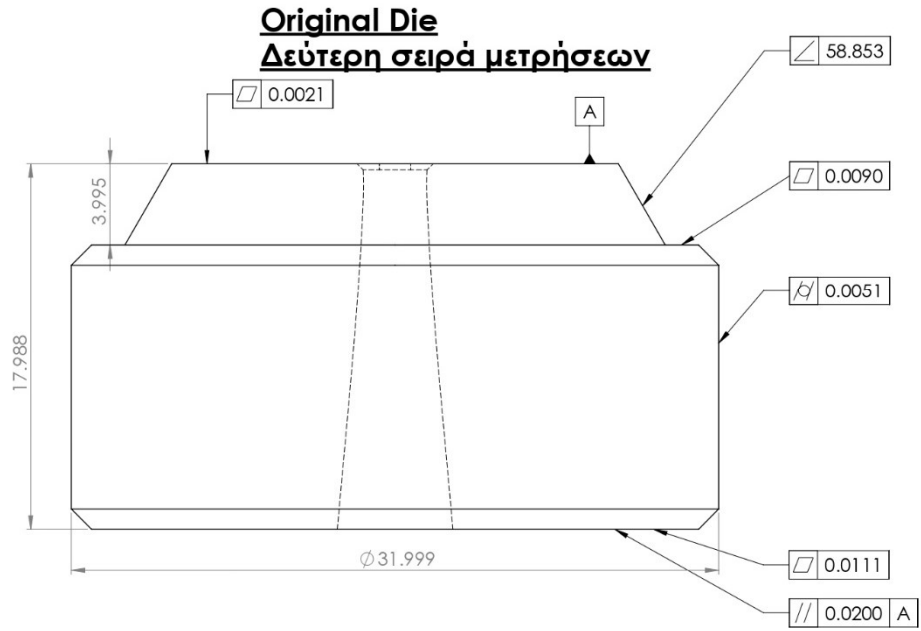
Σχέδια μετρήσεων CMM

### Ονοματολογία

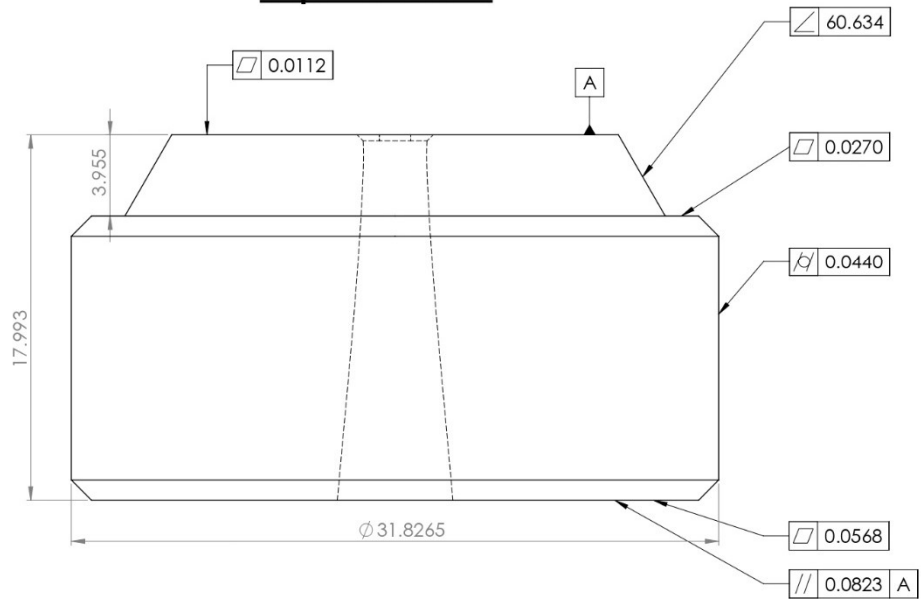


### Original Die Πρώτη σειρά μετρήσεων

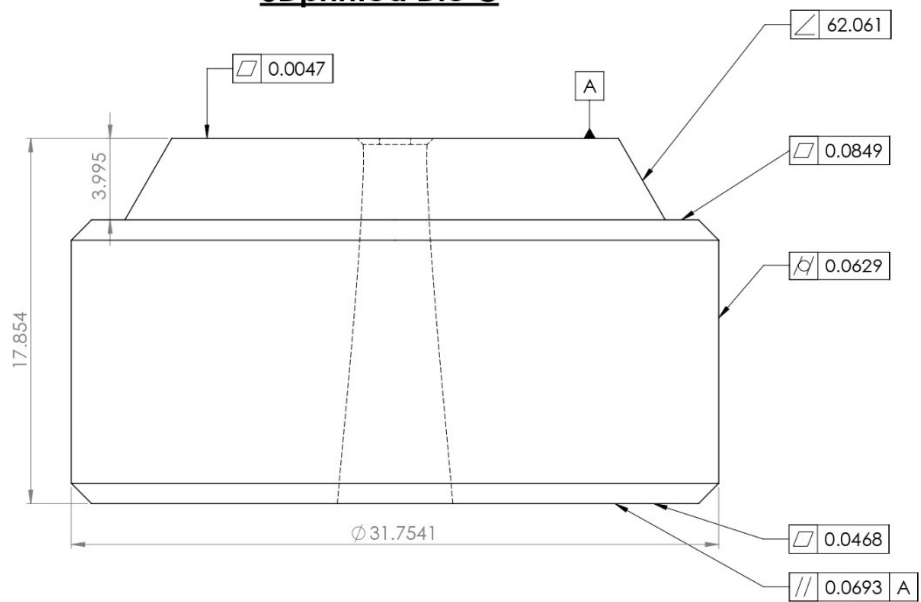




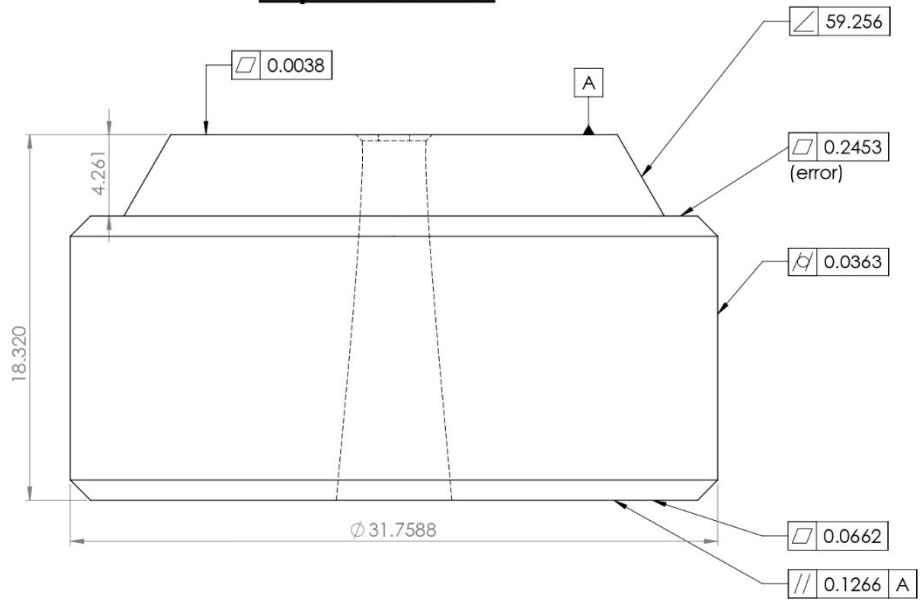
**3Dprinted Die B**



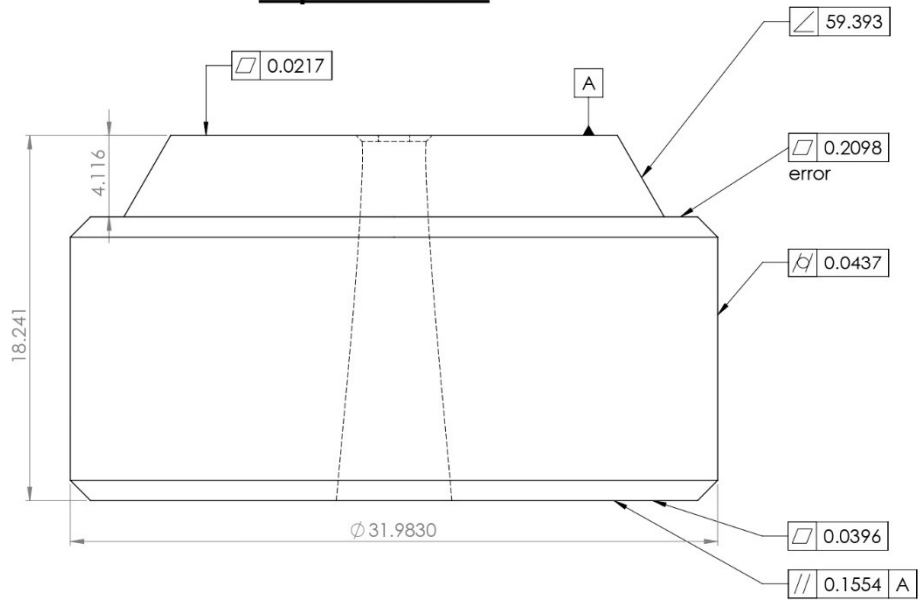
**3Dprinted Die C**



**3Dprinted Die D**



**3Dprinted Die E**



## Παράρτημα Γ

Κώδικας για την επεξεργασία των δεδομένων από τα πειράματα εφελκυσμού.

```
% data processing of the tensile tests.
clear all
clc

data{1}=load('St17_4_HT_1.txt');
data{2}=load('St17_4_HT_2.txt');
data{3}=load('St17_4_HT_3.txt');
data{4}=load('St17_4_HT_4.txt');
data{5}=load('St17_4_HT_6.txt');
data{6}=load('H13_HT_1.txt');
data{7}=load('H13_HT_2.txt');
data{8}=load('H13_HT_3.txt');
data{9}=load('laser_St174_22C_dogbone5.txt');
data{10}=load('laser_St174_22C_dogbone6.txt');
data{11}=load('laser_H13_22C_dogbone3.txt');

A =[5.99;5.96;06.03;06.02;6.00;5.98;6.15;6.13;6.15];
L=32;

% removal of ends due to slippage of grippers
DL{1}=data{1}(16000:end,3);
DL{2}=data{2}(3100:end,3);
DL{3}=data{3}(3104:end,3);
DL{4}=data{4}(2230:end,3);
DL{5}=data{5}(:,3);
DL{6}=data{6}(4717:end,3);
DL{7}=data{7}(2885:end,3);
DL{8}=data{8}(:,3);

for i=1:8
    DL{i}=DL{i}-DL{i}(1);
end

F{1}=data{1}(16000:end,2);
F{2}=data{2}(3100:end,2);
F{3}=data{3}(3104:end,2);
F{4}=data{4}(2230:end,2);
F{5}=data{5}(:,2);
F{6}=data{6}(4717:end,2);
F{7}=data{7}(2885:end,2);
F{8}=data{8}(:,2);

for i=1:8
    epsilon{i}=DL{i}/L;
    sigma{i}=F{i}*1000/A(i);
    UTS{i}=max(sigma{i});
    xIndex(i) = find(sigma{i} == max(sigma{i}), 1, 'first');
    maxXValue{i} = epsilon{i}(xIndex(i));
end

figure(1)
plot(epsilon{1},sigma{1},'r')
hold on
plot(epsilon{3},sigma{3},'b')
```

```

plot(epsilon{5},sigma{5},'k')
plot(epsilon{2},sigma{2},'r')
plot(epsilon{4},sigma{4},'b')

title('σ-ε St.17-4')
xlabel(' [mm/mm]')
ylabel(' [MPa]')
legend( ...
    'St17-4@340^oC', ...
    'St17-4@250^oC', ...
    'St17-4_6@22^oC')

figure(2)
plot(epsilon{6},sigma{6},'r')
hold on
plot(epsilon{8},sigma{8},'k')
plot(epsilon{7},sigma{7},'r')
title('σ-ε H13')
xlabel(' [mm/mm]')
ylabel(' [MPa]')
legend( ...
    'H13_2@340^oC', ...
    'H13_3@22^oC')

% Comparison of Displacement Measurement Methods
%-----Jaws-Laser-----
figure(3)
plot(data{9}(1:40600,2)/100+0.008,data{9}(1:40600,1)/1e6)
hold on
plot(epsilon{5},sigma{5})
title('σ-ε St17-4_6')
xlabel(' [mm/mm]')
ylabel(' [MPa]')
legend( ...
    'Laser', ...
    'jaws')

figure(4)
plot(data{11}(1:31535,2)/100+0.0043,data{11}(1:31535,1)/1e6)
hold on
plot(epsilon{8},sigma{8})
title('σ-ε H13_3')
xlabel(' [mm/mm]')
ylabel(' [MPa]')
legend( ...
    'Laser', ...
    'jaws')

% Effect of temperature on strength
T1=[22,250,340];
T2=[22,340];
T_st174=[UTS{5}, mean([UTS{3},UTS{4}]),mean([UTS{1},UTS{2}])];
T_h13=[UTS{8},mean([UTS{6},UTS{7}])];

figure(5)
plot(T1,T_st174)
hold on
plot(T2, T_h13)
title('UTS-T')
xlabel(' [^o C]')

```

```
ylabel('MPa')
legend( ...
    'St17-4', ...
    'H13')
```

Κώδικας για την οικονομική σύγκριση των εναλλακτικών.

```
% Process cost analysis
clear all
clc

shopY=[325 41.7 16.7 12.74 12.74 ]';
shopX=[ 1 10 50 200 300]';

studioY=[150 73 67.2]';
studioX=[1 10 24 ]';

traditionalY=[200 80 40 40 ]';
traditionalX=[1 100 400 500 ]';

x=[1:500]';
    a1 =      165;
    b1 =   -0.01362;
    c1 =     37.25;
    d1 =   0.0001335;
Traditional = a1*exp(b1*x) + c1*exp(d1*x);

Shop= 10.91 + 314./x;
Studio=63.99+83.03./x;

figure(1)
plot(x,Traditional,'b')
hold on
plot(x,Shop,'r')
plot(x,Studio,'color',[0.9290 0.6940 0.1250])
plot(traditionalX,traditionalY,'b.','Linewidth',5)
plot(shopX,shopY,'r.','Linewidth',5)
plot(studioX,studioY,'.','color',[0.9290 0.6940 0.1250],'Linewidth',5)
ylabel('[€]')
xlabel('[Pieces]')
legend('Traditional Manuf.','Binder Jetting','BMD')
```