



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Υπολογιστική διερεύνηση των κατεργασιών επιλεκτικής
πυροσυσσωμάτωσης και τήξης με laser (SLS-SLM)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων : Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιάκος
Αναπλ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ.Γεώργιο Χ. Βοσνιάκο για τις χρήσιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του πάνω στο θέμα, αλλά και για την άμεση βοήθειά του όταν αυτή ήταν απαραίτητη.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και την υπομονή της όλα αυτά τα χρόνια.

Ένα τελευταίο ευχαριστώ θα ήθελα να πω στους συμφοιτητές μου και συνοδοιπόρους.

Περίληψη

Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των κατεργασιών επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης και τήξης με laser. Στην αρχή γίνεται μια εισαγωγή στις μεθόδους της στρωματικής κατασκευής. Έπειτα παρουσιάζονται οι κατεργασίες της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης και τήξης, οι μηχανισμοί ενοποίησης των υλικών, τα προβλήματα των κατεργασιών και διάφοροι τύποι laser ανάλογα με το εκάστοτε υλικό. Στη συνέχεια αναπτύσσεται μαθηματικό θερμικό μοντέλο των κατεργασιών και επιλύεται με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Ακολούθως δίνονται αποτελέσματα για τις κατεργασίες με συνεχόμενο και παλμικό laser και γίνεται μία σύγκριση του μοντέλου με άλλο της βιβλιογραφίας. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

T	θερμοκρασία [K]
A	θερμική αγωγιμότητα [W/m/K]
\dot{E}_s	ρυθμός μεταβολής ενέργειας [W]
Q	ρεύμα θερμότητας [W]
q	παροχή θερμότητας [W/s]
Re	αντανάκλαση του υλικού
I	ισχύς laser [W]
I_0	μέγιστη ισχύς laser [W]
ρ	πυκνότητα [kg/m ³]
E	ενέργεια ενεργοποίησης [kJ/mol]
R	παγκόσμια σταθερά αερίων [J/molK]
A	παράγοντας πυροσυσσωμάτωσης [s ⁻¹]
ϵ	συντελεστής εκπομπής
σ	σταθερά Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴]
h	ειδική συναγωγιμότητα [J/sm ² K]
C_p	ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kgK]
k	ειδική θερμική αγωγιμότητα [W/mK]
$T_{m,n,l}^p$	θερμοκρασία κόμβου m,n,l τη χρονική στιγμή p [K]

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	ii	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii	
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	iv	
Κεφάλαια		
1	Εισαγωγή	1
1.1	Τεχνολογίες Στρωματικής Κατασκευής.....	1
1.2	Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	7
1.2.1	Συνεισφορά	7
1.3	Οργάνωση κειμένου	8
2	Η πρακτική υλοποίησης των κατεργασιών SLS-SLM	9
2.1	Στρωματική κατασκευή με laser σε κλίση κόνης.....	9
2.2	Φαινόμενα ενοποίησης.....	12
2.2.1	Μηχανισμοί.....	12
2.2.2	Προβλήματα.....	15
2.3	Laser και υλικά.....	16
3	Θεωρητικό υπόβαθρο	17
3.1	Μοντέλο Κατεργασίας SLS	17
3.2	Μοντέλο SLM Κατεργασίας.....	20
3.3	Πεπερασμένες Διαφορές.....	21
4	Αριθμητική επίλυση των μοντέλων	25
5	Επίλυση του μοντέλου.....	28
5.1	Αποτελέσματα για SLS.....	30
5.1.1	Συνεχές laser.....	30
5.1.2	Παλμικό laser.....	35
5.2	Αποτελέσματα για SLM	40

5.3	Σύγκριση με άλλο μοντέλο	47
6	Συμπεράσματα και επεκτάσεις	49
6.1	Συμπεράσματα.....	49
6.1.1	Ο ρόλος των παραμέτρων	49
6.1.2	Ο ρόλος του συνεχόμενου και του παλμικού laser.....	50
6.1.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του μοντέλου.....	50
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	51
7	Βιβλιογραφία.....	52
	Παράρτημα Α.....	55
	Παράρτημα Β.....	57

1

Εισαγωγή

1.1 Τεχνολογίες Στρωματικής Κατασκευής

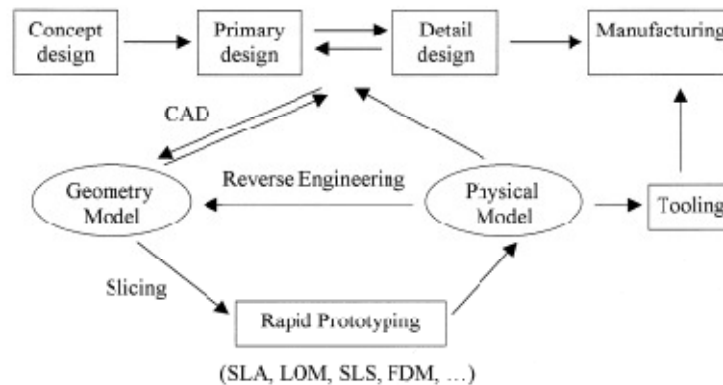
Οι τεχνολογίες της Στρωματικής Κατασκευής (Layer Manufacturing) αφορούν την κατασκευή φυσικών μοντέλων που στηρίζονται στην τεχνική «χτισίματος» στρώμα με στρώμα. Τα στρώματα αυτά προέρχονται από τον τεμαχισμό του ολόκληρου (3D) σχεδίου του κομματιού. Οι τεχνολογίες αυτές είναι γνωστές και ως additive manufacturing και solid-free form fabrication.[1]

Οι τεχνολογίες αυτές πρωτοεμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 80'. Από τις πρώτες ιδέες ήταν η Στερεολιθογραφία (Stereolithography) και στη συνέχεια εμφανίστηκαν πολλές ιδέες και πατέντες προς αυτή την κατεύθυνση. Μια παράσταση των τεχνολογιών χρονολογικά δίνεται στον παρακάτω πίνακα.[2]

Name	Acronym	Development years
Stereolithography	SLA	1986 - 1988
Solid Ground Curing († = year of disappearance)	SGC	1986 - 1988 1999†
Laminated Object Manufacturing	LOM	1985 - 1991
Fused Deposition Modeling	FDM	1988 - 1991
Selective Laser Sintering	SLS	1987 - 1992
3D Printing (Drop on Bed)	3DP	1985 - 1997

Πίνακας 1: τεχνολογίες ΣΚ [2]

Η Στρωματική Κατασκευή (ΣΜ) χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Αυτές είναι η Ταχεία Πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping) και η Ταχεία Κατασκευή (Rapid Manufacturing). Η ΤΠ αφορά την χρήση των παραπάνω τεχνολογιών για την κατασκευή πρωτοτύπων. Αυτά χρησιμοποιούνται ως βοηθήματα στο βιομηχανικό σχεδιασμό προϊόντων και δίνουν μια 3D αίσθηση των σχεδίων. Έτσι επιτυγχάνεται ένας πρώτος έλεγχος του κομματιού για τυχόν σφάλματα σχεδίου ή συναρμολόγησης. Μία σχηματική παράσταση της χρήσης της ΤΠ στο βιομηχανικό σχεδιασμό δίνεται παρακάτω.[3]

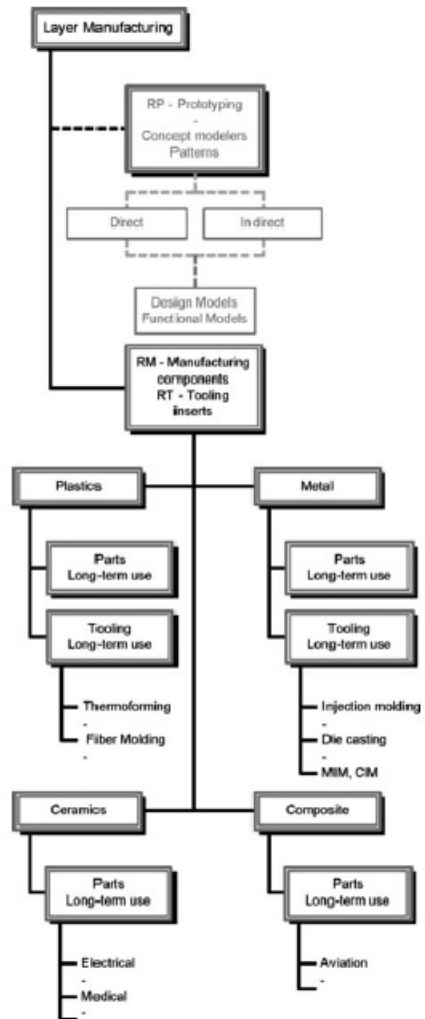


Εικόνα 1: σχηματική αναπαράσταση σχεδιασμού προϊόντος με βάση την ΤΠ [4]

Από την άλλη πλευρά η ΤΚ αφορά την κατασκευή λειτουργικών τμαχιών μακράς διάρκειας, δηλαδή κατασκευή κομματιών που θα έχουν την κατάλληλη γεωμετρία, αλλά και τις επαρκείς μηχανικές ιδιότητες για να ενσωματωθούν σε μία μεγαλύτερη κατασκευή. Σαν υποκατηγορία της ΤΚ είναι η Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων (Rapid Tooling), αυτή αφορά

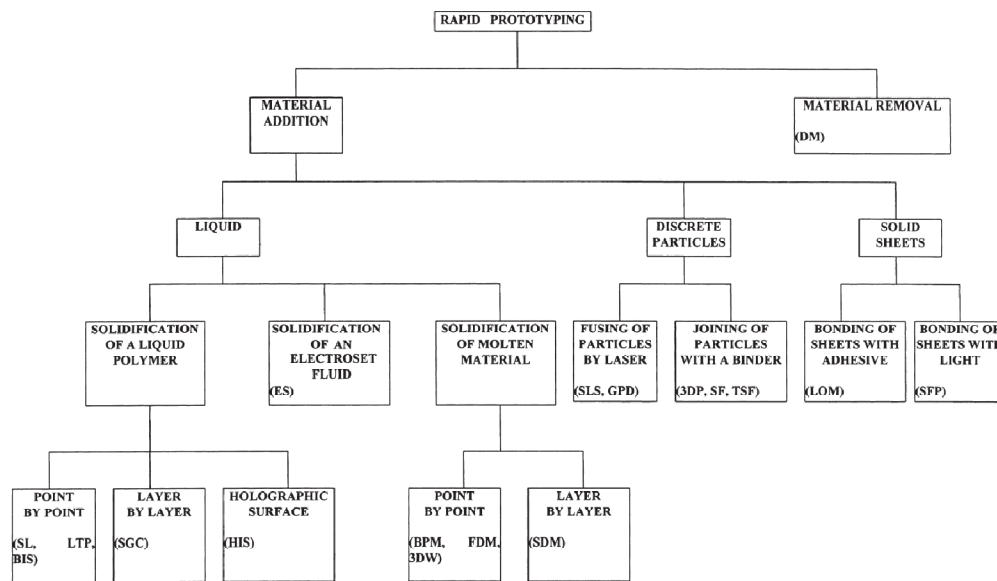
Υπολογιστική διερεύνηση των κατεργασιών επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης και τήξης με laser (SLS-SLM)

την κατασκευή λειτουργικών εργαλείων. Παρακάτω δίνεται ένα παραστατικό διάγραμμα των κατηγοριών της ΣΚ, αλλά και των υλικών τους.[2,3]



Εικόνα 2: κατηγορίες ΣΚ και υλικά [2]

Οι διάφορες κατηγορίες της ΤΠ παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 3: κατηγορίες των μεθόδων ΤΠ [5]

Την περασμένη δεκαετία περισσότερες από 30 εταιρίες κατασκευάζουν και εμπορεύονται μηχανές ΣΚ, που στηρίζονται σε διαφορετικές μεθόδους. Όλες όμως στηρίζονται ότι τα τεμάχια δημιουργούνται στρωματικά και προέρχονται από 3D CAD μοντέλα των γνωστών format (STL, DFX, IGES, STEP, κτλ.).

Οι διάφορες τεχνολογίες ΣΚ μπορούν να διαχωριστούν σε αυτές που χρησιμοποιούν laser και σε αυτές που δεν χρησιμοποιούν, αλλά και με τη μορφή της πρώτης ύλης, ανάλογα με την κάθε τεχνολογία της ΤΠ.

Η χαρακτηριστικότερη ευκολία που κάνει τις διαδικασίες της ΣΚ ανταγωνιστικές είναι ότι γίνεται παραγωγή οποιασδήποτε γεωμετρίας με εύκολο και γρήγορο τρόπο. Όμως ανάλογα με το μέγεθος του κάθε επιθυμητού κομματιού θα πρέπει να επιλέγεται και η κατάλληλη μέθοδος. Οι μέθοδοι της Επιλεκτικής Πυροσυσσωμάτωσης με Laser (SLS), της στερεολιθογραφίας (SLA) και της Εναπόθεσης Λιωμένου Υλικού (FDM) συνήθως χρησιμοποιούνται για μεσαίου μεγέθους κομμάτια. Σήμερα το μέγεθος της κατασκευής μεταλλικών κομματιών με SLS περιορίζεται σε 200 με 300mm, ενώ η Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D printing) μπορεί να κατασκευάσει κομμάτια μεγέθους 1000x500x250mm. Στην κατασκευή κομματιών από πολυμερή η SLS μπορεί να δώσει μεγέθη των 700 με 800mm. Όμως, από την άλλη πλευρά οι διαδικασίες της ΣΚ μπορούν να κατασκευάσουν

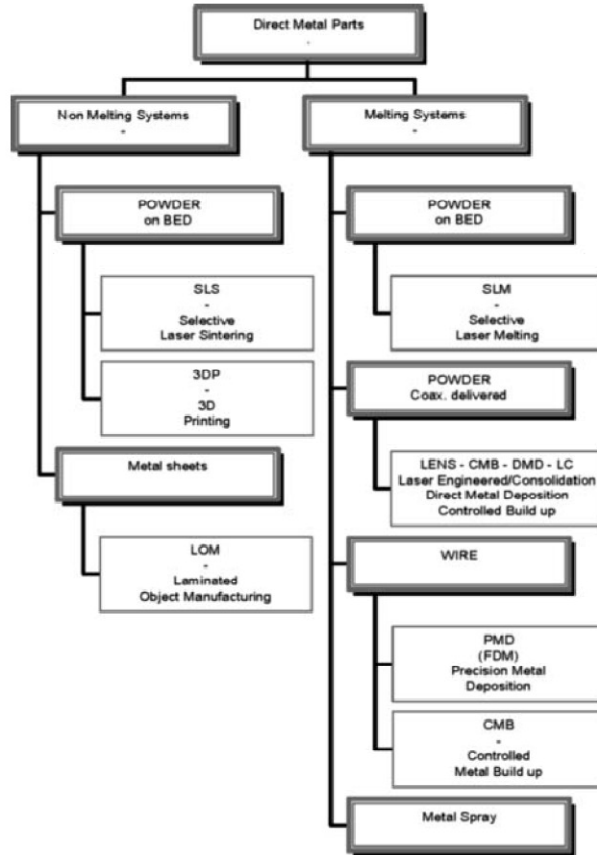
Υπολογιστική διερεύνηση των κατεργασιών επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης και τήξης με laser (SLS-SLM)

και μικρό-κατασκευές. Αυτή η ελευθερία που προσφέρει η ΣΚ στην κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών βρίσκει άριστη εφαρμογή σε ιατρικές εφαρμογές (δόντια, κόκκιαλα, μοσχεύματα, κτλ.). Κάποια παραδείγματα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



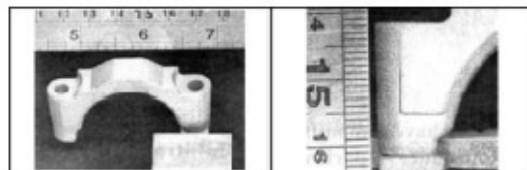
Εικόνα 4: πολύπλοκες γεωμετρίες (SLS αριστερά, SLM δεξιά) [2]

Εκτός από το μέγεθος των κομματιών που μπορούν να κατασκευαστούν με την κάθε μέθοδο, διαφοροποίηση υπάρχει και ως προς το είδος των υλικών, αλλά και την μορφή του κατά την κατεργασία. Παρακάτω δίνεται σχηματικά η διαφορές ορισμένων κατεργασιών ΣΚ ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους αλλά και τη μορφή των υλικών.

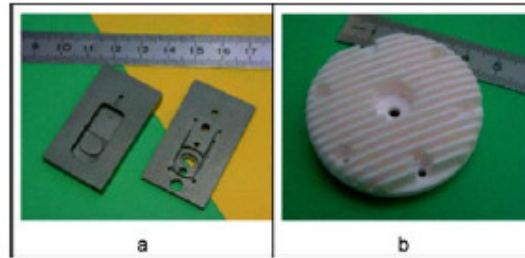


Εικόνα 5: τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες υλικών και επτά διαφορετικές τεχνολογίες [2]

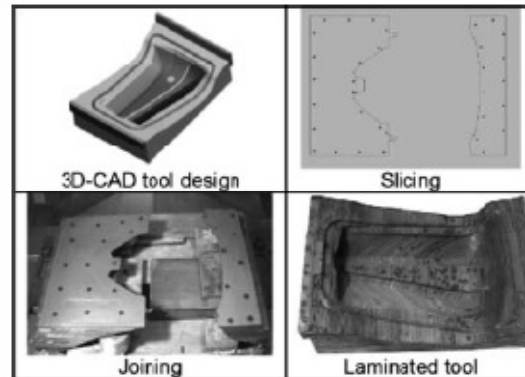
Όπως φαίνεται από την προηγούμενη εικόνα μία άλλη διαφορά των κατεργασιών είναι αν το κατεργαζόμενο υλικό τήκεται ή όχι. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη ΣΚ είναι μέταλλα, κεραμικά και πλαστικά. Μερικά παραδείγματα κατασκευών από διάφορες τεχνικές δίνονται παρακάτω. [2]



Εικόνα 6: αλουμινένιο τεμάχιο (3D Systems) [2]



Εικόνα 7: a) τιτάνιο b) κεραμικό (stereolithography) [2]



Εικόνα 8: παραγωγή τεμαχίου με LOM [2]

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει τα φαινόμενα της μορφοποίησης υλικού με την χρήση laser και να δημιουργήσει ένα θερμικό μοντέλο που να εκθέτει αποτελέσματα για τις διάφορες παραμέτρους της κατεργασίας. Το υλικό θα έχει τη μορφή κόνης και το κάθε στρώμα κόνης θα σαρώνεται με την ακτίνα του laser που θα μορφοποιεί το αντικείμενο.

1.2.1 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της διπλωματικής συνοφίζεται ως εξής:

1. Γίνεται μια εισαγωγή στις τεχνολογίες της Στρωματικής Κατασκευής και πιο συγκεκριμένα στις τεχνολογίες της Επιλεκτικής Πυροσυσσωμάτωσης με Laser (SLS) και Επιλεκτικής Τήξης με Laser (SLM).
2. Παρουσιάζονται παραδείγματα μηχανών των παραπάνω τεχνολογιών.
3. Εκθέτονται οι μηχανισμοί ενοποίησης των υλικών και προβλήματα κατά την κατεργασία.

4. Δημιουργείται μαθηματικό μοντέλο που προσομοιώνει τις παραπάνω τεχνικές και επιλύεται.
5. Τέλος εξάγονται συμπεράσματα για τις τεχνικές παραμέτρους των κατεργασιών.

1.3 Οργάνωση κειμένου

Το κείμενο της διπλωματικής αποτελείται από επτά κεφάλαια. Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις έννοιες της Στρωματικής Κατασκευής, της Ταχείας Πρωτοτυποποίησης, της Ταχείας Κατασκευής και παρουσιάζονται παραδείγματα.

Το 2^ο κεφάλαιο ασχολείται με τις κατεργασίες της Επιλεκτικής Πυροσυσσωμάτωσης με Laser και Επιλεκτικής Τήξης με Laser. Εδώ δίνονται παραδείγματα τέτοιων μηχανών, αλλά και των υλικών που επεξεργάζονται. Επίσης αναλύονται οι ενοποιητικοί μηχανισμοί των κατεργασιών και τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε αυτές. Τέλος αναφέρονται υλικά και η συμπεριφορά τους σε συγκεκριμένους τύπους laser.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται η μαθηματική προτυποποίηση των μοντέλων των κατεργασιών. Αναλύεται η συμπεριφορά του υλικού polycarbonate σε κατεργασία Επιλεκτικής Πυροσυσσωμάτωσης με Laser και δίνεται και ένα μοντέλο για κατεργασία κράματος νικελίου με Επιλεκτική Τήξη με Laser. Στη συνέχεια οι εξισώσεις των μοντέλων διακριτοποιούνται για να λυθούν με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών.

Το 4^ο κεφάλαιο αναφέρει τεχνικές λεπτομέρειες για την δημιουργία του κώδικα που λύνει τις εξισώσεις των μοντέλων και παρουσιάζει τα γραφήματα και παραθέτει το διάγραμμα του.

Έπειτα στο επόμενο κεφάλαιο (5^ο) παρουσιάζονται αποτελέσματα λύσεων για συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων των κατεργασιών (SLS-SLM), για συνεχόμενο και παλμικό laser.

Στο 6^ο κεφάλαιο παραθέτονται χρήσιμα συμπεράσματα που έγιναν, αλλά και μελλοντική επέκταση που μπορεί να γίνει στα μοντέλα.

Τέλος στο κεφάλαιο 7 παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

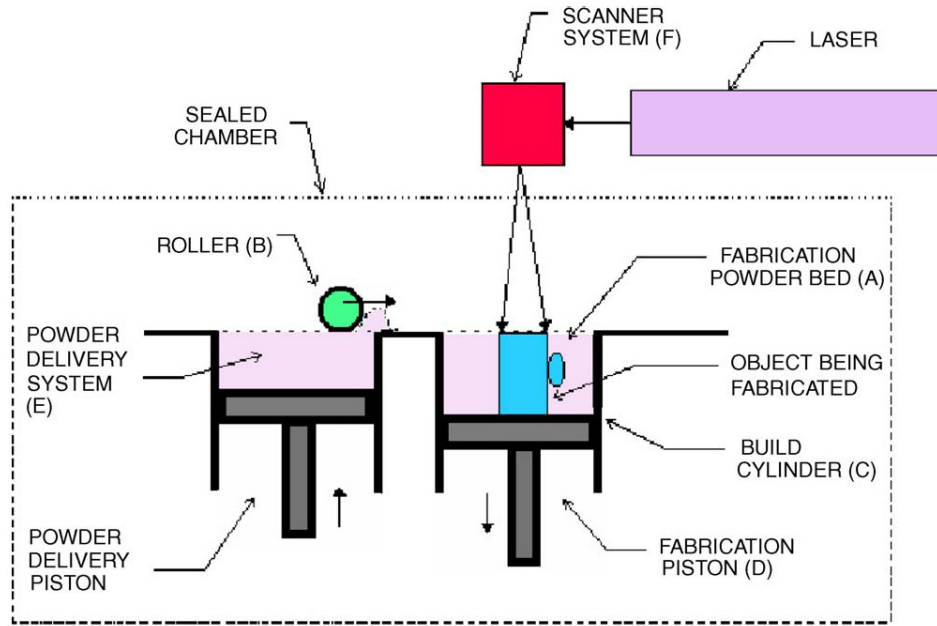
2

Η πρακτική υλοποίησης των κατεργασιών SLS-SLM

2.1 Στρωματική κατασκευή με laser σε κλίνη κόνης

Δύο είναι οι κυριότερες κατεργασίες ΣΚ που χρησιμοποιούν laser για να μορφοποιήσουν κονιοροποιημένο υλικό. Αυτές είναι η Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Laser (SLS) και η Επιλεκτική Τήξη με Laser (SLM).

Στην SLS κατεργασία ένα λεπτό στρώμα κόνης εναποτίθεται από τον κύλινδρο του υλικού στον προς κατεργασία κύλινδρο, όπως φαίνεται στην εικόνα 9. Η ακτίνα του laser καθοδηγείται από κάτοπτρα για να δημιουργήσει στερεό υλικό. Το υλικό γύρω από το τεμάχιο λειτουργεί υποστηρικτικά. Έπειτα εναποτίθεται και επόμενο στρώμα για να συνεχίσει η κατασκευή του κομματιού. Το σύνηθες πάχος στρώσης είναι 0.02-0.1mm. Το αποτέλεσμα πολλών στρωμάτων είναι η κατασκευή του 3D κομματιού. Ο θάλαμος της κατασκευής είναι κλειστός και περιέχει αδρανές αέριο για να αποφεύγεται πιθανή οξείδωση στην περίπτωση μεταλλικών κόνεων (άζωτο ή αργό).



Εικόνα 9: sls κατεργασία [1]

Στο στρώμα της κόνης χρησιμοποιείται μείγμα κόνης ή ειδικά διαμορφωμένη κόνη. Ο μηχανισμός της δημιουργίας του κομματιού είναι η πυροσυσσωμάτωση υγρής φάσης (liquid phase sintering). Στην περίπτωση ενός είδους κόνης, η πυροσυσσωμάτωση υγρής φάσης γίνεται λόγω της επιφανειακής τήξης των σωματιδίων και υγρής ροής τους. Όταν χρησιμοποιείται μείγμα κόνης, η κόνη με το χαμηλότερο σημείο τήξης λειτουργεί ως δεσμός για το υλικό. Συνήθως γίνεται περαιτέρω επεξεργασία του κομματιού για να του προσδοθούν η κατάλληλη πυκνότητα και μηχανικές ιδιότητες.

Ο πίνακας 2 δείχνει τα μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή την κατεργασία και της μηχανικές τους ιδιότητες. Το DTM RapidSteel 2.0 είναι ανοξείδωτος χάλυβας 316 που έχει επικαλυφθεί με πολυμερές. Τα κατασκευασμένα κομμάτια επεξεργάζονται περαιτέρω με κλασική πυροσυσσωμάτωση¹ και πρόσθεση χαλκού. Η κόνη DirectMetal από την EOS είναι κονιοροποιημένος χαλκός. Η επιφανειακή τραχύτητα του κομματιού επηρεάζεται από το μέγεθος των κόκκων της κόνης. Γενικά όσο πιο μικροί είναι οι κόκκοι τόσο μικρότερο είναι το κάθε στρώμα της κόνης και τόσο καλύτερη ποιότητα επιφανείας έχει.

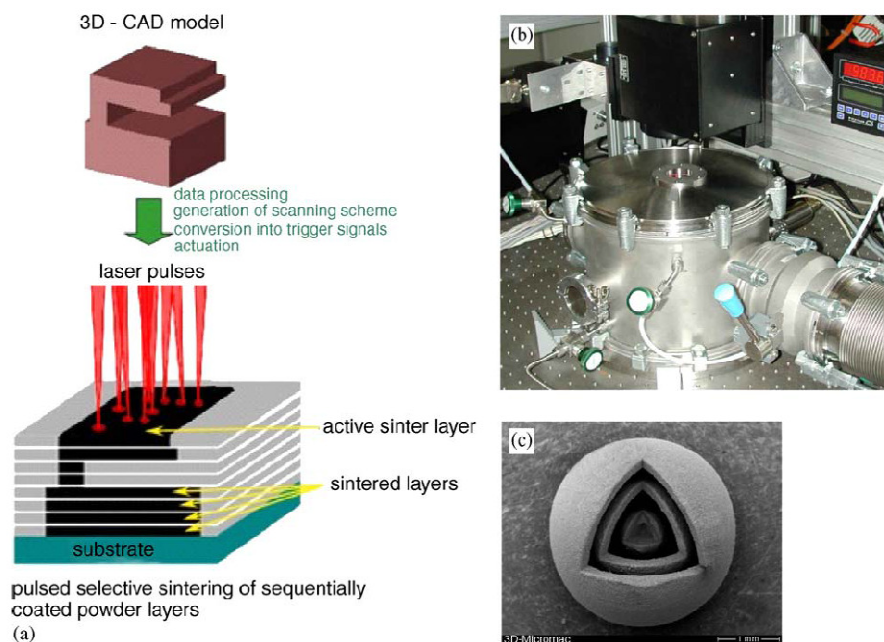
¹ Πρόκειται για θερμική κατεργασία όπου η πύρωση του συμπιέσματος επιτελείται σε κλίβανο με προστατευτική ατμόσφαιρα σε θερμοκρασία κάτω του σημείου τήξης, T_m του βασικού μετάλλου (περίπου $0.7-0.75 T_m$). Με αυτήν επιτυγχάνονται ισχυρές μεταλλουργικές συνδέσεις.[19]

Material	Particle size (μm)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young modulus (GPa)
Reference steel: P20	—	950	751	210
Reference: Ti-6Al-4V	—	1030	925	110
DTM RapidTool 1	50	475	255	210
DTM RapidSteel 2.0	34	580	413	263
DTM LaserForm ST 100	23	510	305	137
DTM LaserForm ST 200	20	435	n.a.	142
EOS Ni-Bronze Sn60Pb infiltrated	100	162	124	60
EOS (Electrolux) DMLS DirectMetal™ 50-V3	100	199	n.a.	n.a.
EOS (Electrolux) DMLS DirectMetal™ 50-V2	50	199	n.a.	n.a.
EOS (Electrolux) DMLS DirectMetal™ 50-V1	50	499	n.a.	n.a.
EOS (Electrolux) DMLS DirectMetal™ 20-V2	20	450	n.a.	n.a.
EOS (Electrolux) DMLS DirectMetal™ 50-V1	20	600	n.a.	n.a.
Inconel 625 superalloy (SLS+HIP)	16-44	855	490	208
Ti-6Al-4V (SLS+HIP)	37-74	962	884.6	110

Πίνακας 2: μηχανικές ιδιότητες υλικών από sls κατεργασία [1]

Στο πανεπιστήμιο του Austin στο Texas έγινε ένας συνδυασμός SLS κατεργασίας και θερμής ισοστατικής πίεσης και εφαρμόστηκε στο υλικό Inconel 625, ανοξείδωτος χάλυβας (17-4 H), Ti-6Al-4V και μολύβδο. Η αρχή ήταν να εδραιωθεί στο εσωτερικό του εξαρτήματος πυκνότητα 80% ή μεγαλύτερη και στην επιφάνεια 92%. Αυτή η μέθοδος μπορεί να παράγει πλήρως πυκνά κομμάτια με μηχανικές ιδιότητες κοντινές στα κανονικά υλικά.

Στο Laser Institut Mittelsachen στο Mittweida της Γερμανίας χρησιμοποιούνται laser Q-sw για την κατασκευή μικρό-κομματιών. Η εικόνα 10 δείχνει την εγκατάσταση. Γίνεται χρήση κόνης με μικρο-σωματίδια και laser Q-sw Nd:YAG, με μέση ισχύ 10W και συχνότητα 100kHz.



Εικόνα 10: (a) αρχές του laser microsintering (b) θάλαμος κατεργασίας (c) κατασκευή [1]

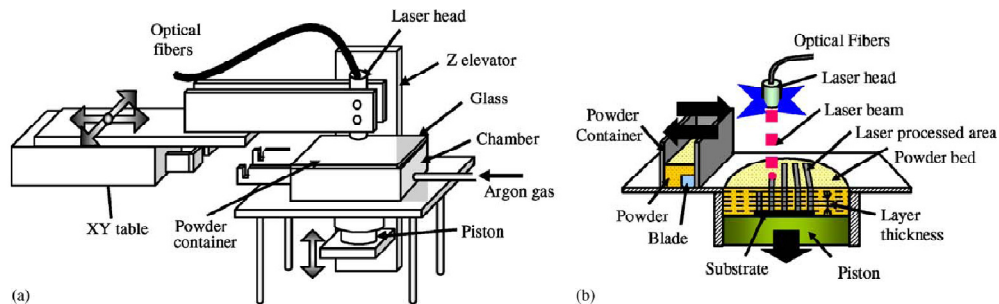
Η SLM κατεργασία είναι παρόμοια με την SLS στον εξοπλισμό, αλλά χρησιμοποιεί laser μεγαλύτερης ισχύος για να λειώνει τη σκόνη.

Η εικόνα 11 δείχνει ένα σύστημα που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Osaka. Αυτό χρησιμοποιεί laser με μέγιστη ισχύ 3kW και μέση 50W. Η ακτίνα οδηγείται με οπτικές ίνες και έχει διάμετρο 0.8mm. Το στρώμα της σκόνης που προστίθεται έχει πάχος 0.05-0.1mm.

Οι κυριότερες εμπορικές μηχανές SLM είναι οι Trumaform LM250, MCP Realizer και η LUMEX 25C. Αυτές οι μηχανές κατασκευάζουν μεταλλικά κομμάτια από τιτάνιο, χάλυβα, χαλκό ή και άλλα υλικά. Πληροφορίες για τις μηχανές δίνονται στο παρακάτω πίνακα.[1]

Machines	Company	Process	Laser	Power
Sinterstation 2000/2500	DTM	DMLS	CO ₂	50 W
EOSINT 250	EOS	DMLS	CO ₂	200 W
EOSINT 270	EOS	DMLS	Ytterbium fibre laser	200 W
LUMEX 25C	MATSUURA	SLM	Pulsed CO ₂	500 W
TrumaForm LF 250	TRUMPF	SLM	Disk laser	250 W
Realizer	MCP	SLM	Nd:YAG	100 W
Lasform	Aeromet	3D laser cladding	CO ₂	10-18 kW
LENS 850	Optomec	3D laser cladding	Nd:YAG	1 kW
Trumaform DMD 505	TRUMPF	3D laser cladding	CO ₂	2-6 kW

Πίνακας 3: εμπορικές μηχανές και laser [1]

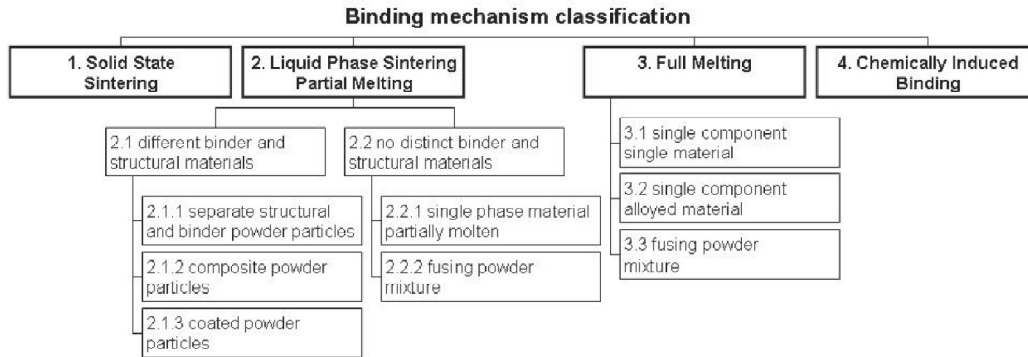


Εικόνα 11: (a) μηχανή (b) αρχή λειτουργίας [1]

2.2 Φαινόμενα ενοποίησης

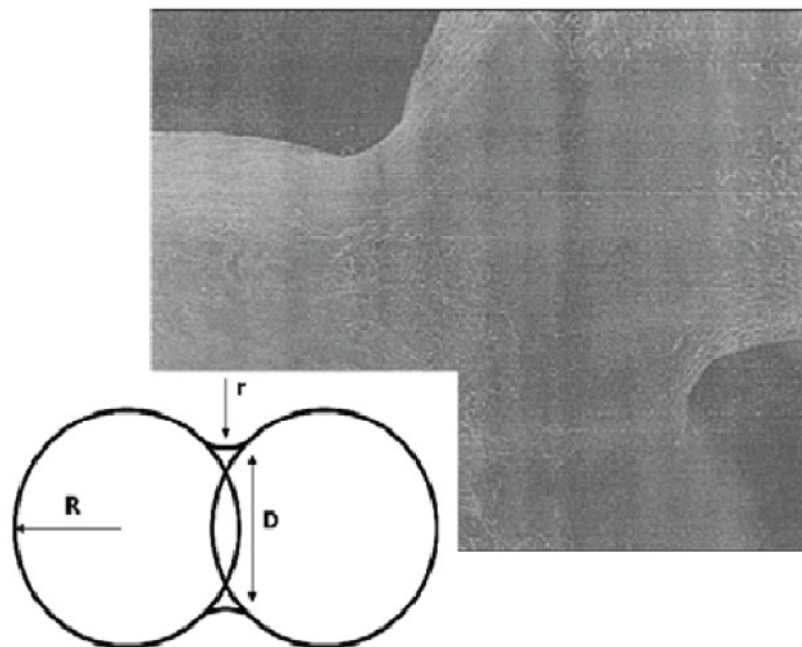
2.2.1 Μηχανισμοί

Γενικά η διάκριση των φαινομένων μεταξύ SLS και SLM είναι δύσκολη και ασαφής. Οι κυριότεροι μηχανισμοί δίνονται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 12: μηχανισμοί ενοποίησης [3]

Ο μηχανισμός της Πυροσυσσώματωσης Στερεάς φάσης (Solid State Sintering, SSS) λαμβάνει χώρα κάτω από το σημείο τήξης του υλικού. Γίνεται μερική τήξη των κόκκων σκόνης έτσι δημιουργούνται λαιμοί μεταξύ τους και ενοποιείται το υλικό (εικόνα 13). Αυτός ο μηχανισμός σπάνια είναι θεμιτός, για το λόγο ότι δεν συμβαδίζει με τις επιθυμητές ταχύτητες laser, που κάνουν οικονομικά εφικτή την κατεργασία. Γενικά, ο μηχανισμός μπορεί να εφαρμοστεί σε κεραμικά υλικά ως διαδικασία μετα-επεξεργασίας.



Εικόνα 13: λαιμός μεταξύ κόκκων σκόνης [3]

Ο μηχανισμός της Πυροσυσσώματωσης Υγρής Φάσης (Liquid Phase Sintering, LPS) αφορά την μερική τήξη του υλικού και εμπεριέχει διάφορους μηχανισμούς ενοποίησης. Το τηγμένο υλικό ρέει ανάμεσα στο στερεό και λειτουργεί σαν συνδετικό υλικό. Αυτό επιτρέπει

πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες laser, από το μηχανισμό του SSS. Το υλικό που λιώνει μπορεί να είναι διαφορετικό από το στέρεο (κόκκοι χαμηλού και υψηλού σημείου τήξης). Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες για το είδος των κόκκων των διπλών υλικών:

- Μείγμα κόνης δύο υλικών
- Κόκκοι κόνης που αποτελούνται από τα δύο υλικά
- Κόκκοι του ενός υλικού που περιβάλλονται από το άλλο υλικό.

Όταν χρησιμοποιούνται δύο υλικά στο ρόλο του συνδετικού υλικού και του δομικού υλικού μπορούν να γίνουν διάφοροι συνδυασμοί, συνδετικό υλικό πολυμερές και δομικό συστατικό μέταλλο ή μέταλλο με κεραμικό ή μέταλλο με μέταλλο.

Μερική τήξη μπορεί να υπάρξει και όταν δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός συνδετικού υλικού και δομικού υλικού. Οι παράμετροι του SLS προσδιορίζονται έτσι ώστε να γίνει μερική τήξη, είτε το στρώμα κόνης αποτελείται από ένα υλικό είτε από δύο.

1. Όταν η θερμότητα που παρέχεται δεν είναι ικανή να λιώσει όλο των κόκκο, τότε λιώνει εξωτερικά δημιουργώντας λαιμούς με τους γύρω κόκκους. Αυτός ο μηχανισμός λειτουργεί σε μέταλλα, αλλά και σε πολυμερή. Στα πολυμερή μπορεί να λειτουργήσει και ο μηχανισμός ενοποίησης στη θερμοκρασία υαλώδους μεταβάσεως (glass transition temperature).
2. Μερική τήξη μπορεί να γίνει και όταν έχουμε ένα υλικό, αλλά το στρώμα κόνης αποτελείται από κόκκους διαφορετικού μεγέθους μεταξύ τους.

Ο μηχανισμός LPS και της μερικής τήξης έχουν πλεονέκτημα ως προς την ολική τήξη, στο ότι επιτρέπουν μεγαλύτερες ταχύτητες laser οπότε οικονομικά καλύτερες λύσεις.

Ο μηχανισμός της πλήρους τήξης μπορεί να κατασκευάσει κομμάτια που δεν χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία. Μεγάλη πρόοδος έχει γίνει στην παραγωγή μεταλλικών τεμαχίων με πυκνότητες 99.9%. Σε σύγκριση με παλιές μηχανές που είχαν laser CO₂, οι σημερινές έχουν παλμικά laser Nd:YAG.

Το πλεονέκτημα της ολικής τήξης είναι ότι παράγει κομμάτια με καλή πυκνότητα, που δεν χρειάζονται άλλη επεξεργασία, αλλά έχει μειονεκτήματα που απαιτούν πολύ καλό έλεγχο της κατεργασίας.

- Οι υψηλές θερμοκρασίες και η γρήγορη ψύξη οδηγούν σε παραμένουσες τάσεις και στρεβλώσεις του υλικού.

- Υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας balling effect², με αποτέλεσμα κακή ποιότητα επιφάνειας.

Τέλος, ο χημικός μηχανισμός ενοποίησης, δεν είναι πολύ συχνός στην αγορά εξοπλισμού LM, αλλά εφαρμόζεται σε πλαστικά, μέταλλα και κεραμικά. Ένα παράδειγμα είναι η αντίδραση του Al με το N₂ της ατμόσφαιρας και δημιουργεί μηχανισμό ενοποίησης για τους κόκκους του Al. Στο παρακάτω πίνακα δίνονται υλικά σε σχέση με τους μηχανισμούς ενοποίησης.

	Solid State Sintering	Liquid Phase Sintering Partial melting	Full melting	Chemical
Polymers	No	Yes (e.g. PS)	Yes (e.g. PA)	Seldom (e.g. partial cross linking PMMA)
Metals	Seldom	Yes (many kinds)	Yes (steel, Ti...)	Yes (e.g. Alu)
Cermets/HM ³	No	Yes (e.g. WC-CO)	No	Yes (e.g. Al ₂ O ₃ – Cu)
Ceramics	Yes (Phenix)	Yes (e.g. SiC)	Yes (e.g. ZrO ₂)	Yes (e.g. SiC)
Other composites	No	Yes	No	Yes

Πίνακας 4: μηχανισμοί ενοποίησης και υλικά [3]

2.2.2 Προβλήματα

Δύο είναι τα κύρια προβλήματα στην ενοποίηση του υλικού. Το πρώτο είναι ότι δεν προλαβαίνουν οι μηχανισμοί ενοποίησης να δράσουν πλήρως στο μικρό χρόνο κατεργασίας (αυτό κυρίως στην SLS κατεργασία), έτσι δημιουργείται πορώδες υλικό. Αυτό συμβαίνει λόγω της ταχύτητας του laser και των τριχοειδών δυνάμεων. Επομένως χρειάζεται επιπλέον κατεργασία για να του προσδοθεί η κατάλληλη πυκνότητα.

Το δεύτερο, συμβαίνει στην πλήρως τήξη και αφορά τον έλεγχο της ροής. Λόγω των επιφανειακών τάσεων είναι δύσκολο η ροή της λιωμένης κόνης να ενωθεί με το κάτω στρώμα, αλλά και να φτιάξει λεία επιφάνεια, για να δεχτεί το επόμενο στρώμα κόνης.

Άλλα προβλήματα είναι το πρόβλημα της οξείδωσης των υλικών και το φαινόμενο balling. Επίσης στην SLM κατεργασία κατά την ψύξη του υγρού δημιουργείται το φαινόμενο Marangoni. Αυτή δημιουργεί δίνες που χαλάνε την ποιότητα της επιφάνειας κατά την στερεοποίηση. Παρακάτω δίνεται ο αδιάστατος αριθμός M_a που ορίζει το φαινόμενο.[3]

$$M_a = \left(\left[\frac{d\gamma}{dx} \right] \left[\frac{w}{\eta} \right] / \left(\frac{\kappa}{w} \right) \right) \equiv \left(\left[\frac{d\gamma}{dx} \right] \left[\frac{dT}{dx} \right] \left[\frac{w}{\eta} \right] / \left(\frac{\kappa}{w} \right) \right)$$

² Balling effect: Φαινόμενο κατά το οποίο κόκκοι λιωμένης κόνης ενώνονται λόγω επιφανειακών τάσεων και δημιουργούν σφαίρες με διάμετρο κοντά στην διάμετρο του laser. Τρόπος αντιμετώπισης είναι σκόνη με υλικά χαμηλού και υψηλού σημείου τήξης. [6]

2.3 Laser και υλικά

Διάφορα είδη laser βρίσκουν εφαρμογή στην SLS κατεργασία. Εμπορικές μηχανές SLS (DTM και EOS) χρησιμοποιούν laser CO₂ με μέγιστη ισχύ από 50 έως 200W.

Η επιλογή του κατάλληλου laser εξαρτάται από το κατεργαζόμενο υλικό. Παράμετροι όπως το μήκος κύματος του laser (τύπος laser), η ενέργεια (ισχύς, ταχύτητα laser) και τα χαρακτηριστικά της κόνης (μέγεθος κόκκων, συστατικά της σκόνης) επηρεάζουν την ποιότητα επιφάνειας και την πυκνότητα του τελικού κομματιού. Το μήκος κύματος του laser θα πρέπει να προσαρμόζεται στο υλικό, αφού αυτό επηρεάζει την απορροφητικότητα του laser. Σχετικά πειραματικά αποτελέσματα δίνονται στο πίνακα 5.

Laser CO₂ με μήκος κύματος 10.6μm ταιριάζουν σε κόνες πολυμερών, αφού αυτά έχουν μεγάλη απορροφητικότητα σε μεγάλα μήκη κύματος. Το ίδιο ισχύει για κεραμικά οξειδίου, ενώ για καρβίδια είναι καλύτερα laser Nd:YAG με μήκος κύματος 1.06μm. Τέλος τα μέταλλα έχουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα σε μικρά μήκη οπότε και σε αυτά προτιμώνται laser Nd:YAG.[7]

Powder materials	Nd:YAG (1.06 μm)	CO ₂ (10.6 μm)
Metals		
Cu (absorption in solid Cu)	59 per cent (2-10 per cent*)	76 per cent (1 per cent)
Fe (absorption in solid Fe)	64 per cent (30 per cent)	45 per cent (4 per cent)
Sn	66 per cent	23 per cent
Ti	77 per cent	59 per cent
Pb	79 per cent	--
Co-alloy (1 per cent C; 28 per cent Cr; 4 per cent W)	58 per cent	25 per cent
Cu-alloy (10 per cent Al)	63 per cent	32 per cent
Ni-alloy 1 (13 per cent Cr; 3 per cent B; 4 per cent Si; 0.6 per cent C)	64 per cent	42 per cent
Ni-alloy 2 (15 per cent Cr; 3.1 per cent Si; 0.8 per cent C)	72 per cent	51 per cent
Ceramics		
ZnO	2 per cent	94 per cent
Al ₂ O ₃	3 per cent	96 per cent
SiO ₂	4 per cent	96 per cent
SnO	5 per cent	95 per cent
CuO	11 per cent	76 per cent
SiC	78 per cent	66 per cent
Cr ₂ C ₃	81 per cent	70 per cent
TiC	82 per cent	46 per cent
WC	82 per cent	48 per cent
Polymers		
Polytetrafluoroethylene	5 per cent	73 per cent
Polymethylacrylate	6 per cent	75 per cent
Epoxypolyether-based polymer	9 per cent	94 per cent
Mixtures		
Fe-alloys (3 per cent C; 3 per cent Cr; 12 per cent V) + 10 per cent TiC	65 per cent	39 per cent
Fe-alloys (1 per cent C; 14 per cent Cr; 10 per cent Mn; 6 per cent Ti) + 66 per cent TiC	79 per cent	44 per cent
Ni-alloy 2 (95 per cent) + Epoxypolyether-based polymer (5 per cent)	68 per cent	54 per cent
Ni-alloy 2 (25 per cent) + Epoxypolyether-based polymer (75 per cent)	23 per cent	76 per cent

Note: *Value varying with gloss, surface roughness, surface oxidation, etc.
Source: Tolochko et al. (2000)

Πίνακας 5: απορροφητικότητα υλικών για διάφορα laser [7]

3

Θεωρητικό υπόβαθρο

3.1 Μοντέλο Κατεργασίας SLS

Εδώ παρουσιάζεται μία θερμική ανάλυση της κατεργασίας. Έχει θεωρηθεί 3D στρώμα κόνης που σαρώνεται με ακτίνα laser. Η μετάδοση θερμότητας γίνεται από το laser προς το στρώμα της κόνης και από το στρώμα φεύγει θερμότητα λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής. Η μετάδοση της θερμότητας μέσα στο υλικό γίνεται με αγωγή.

Οι εξισώσεις του μοντέλου είναι οι εξής:

- Εξίσωση αγωγής (fourier)[9]

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \{1\}$$

- Εξίσωση εναλλαγής θερμότητας στο πάνω μέρος του στρώματος [10]

$$\dot{E}_s = Q_{cond} + Q_{laser} - (Q_{rad} + Q_{conv}) \quad \{2\}$$

- Οριακές συνθήκες στις πλευρές και στον πάτο του στρώματος

$$T = const = T_{preheat} \quad \{3\}$$

- Εξίσωση του laser[11]

$$I(r, w) = (1 - R_e)I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad \{4\}, \text{ όπου}$$

$$I_0 = \frac{2P}{\pi w^2} \quad \{5\} \text{ και}$$

$$w = \frac{D/2}{2.146} \quad \{6\}$$

- Εξίσωση πυκνότητας [12,13]

$$\frac{d\rho}{dt} = (\rho_{max} - \rho)A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad \{7\}$$

Η εξίσωση {1} αφορά την μετάδοση της θερμότητας με αγωγή μέσα στο στρώμα. Η εξίσωση {2} στηρίζεται στην αρχή διατήρησης της ισχύος και εκφράζει ότι ο ρυθμός μεταβολής της θερμότητας στο πάνω στρώμα είναι η διαφορά της εισερχόμενης (θερμότητα laser μείων απώλειες) με αυτή που μοιράζεται με αγωγή. Η εξίσωση απώλειας ακτινοβολίας είναι $q = \epsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4)$, όπου ϵ ο συντελεστής εκπομπής και σ η σταθερά ακτινοβολίας μέλανος σώματος. Η εξίσωση απωλειών συναγωγής είναι $q = h(T_1 - T_2)$, όπου h η ειδική συναγωγιμότητα[10]. Η εξίσωση {3} αποτελεί την παραδοχή ότι τα τοιχώματα μακριά από το laser δεν επηρεάζονται και δρουν αδιαβατικά. Η εξίσωση {4} μοντελοποιεί το laser που ακολουθεί κατανομή Gauss. Το R_e είναι η τιμή της αντανάκλασης του υλικού στην ακτίνα του laser. Η εξίσωση {7} αποτελεί παραδοχή ότι η πυροσυσσωμάτωση ακολουθεί τον τύπο του Arrhenius [13].

Στην εξίσωση {1} το α είναι θερμοκρασιακή αγωγιμότητα του υλικού. Αυτό ισούται με $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ [10]. Το k είναι η ειδική θερμική αγωγιμότητα, το ρ είναι η πυκνότητα του υλικού και το C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση. Επειδή η SLS κατεργασία που

θα μελετηθεί αφορά το υλικό polycarbonate οι εξισώσεις που θα αναπτυχθούν παρακάτω αφορούν αυτό[11].

- Εξίσωση ειδικής θερμικής αγωγιμότητας

$$k = k_s(1 - 0.2 \times \beta - 1.73 \times \beta^2) \left(\frac{W}{mK}\right) \{8\}, \text{ όπου}$$

$$k_s = 0.02504 + 0.0005T \text{ (W/mK)} \{9\} \text{ και}$$

$$\beta = \frac{\rho_{max} - \rho}{\rho_{max}} \{10\}$$

- Εξίσωση ειδικής θερμοχωρητικότητας

$$C_p = \begin{cases} -20.56 + 4.103 \times T, & T \leq T_g = 418K \\ 935.34 + 2.284 \times T, & T > T_g = 418K \end{cases} \text{ (J/kgK)} \{11\}$$

T_g είναι η θερμοκρασία υαλώδους αλλαγής. Παρακάτω δίνεται πίνακας με τις σταθερές για το υλικό polycarbonate.

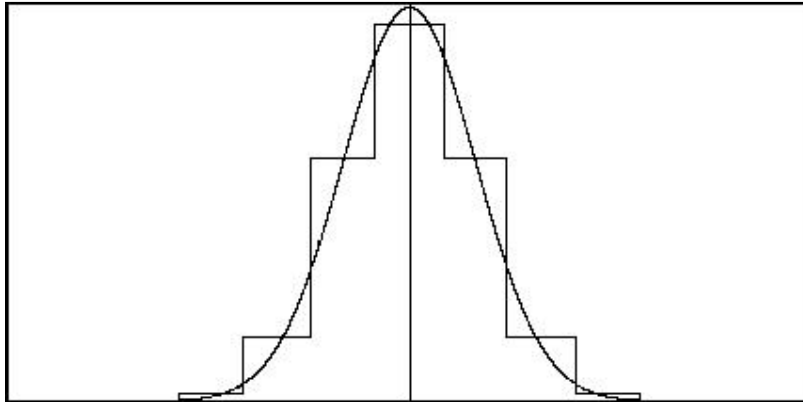
Σταθερά	Τιμή	Μονάδες
Ta	373	K
Tg	418	K
ρ_0	600	kg/m ³
ρ_{max}	1200	kg/m ³
h	2.5	J/sm ² K
ϵ_1	0.75	-
D (laser)	600	μm
A	8.84×10^{16}	1/s
E	149.66	kJ/mol
Re	0.04	-

Πίνακας 6: σταθερές για polycarbonate [8]

Επίσης έγινε περαιτέρω μοντελοποίηση στο laser, από την εξίσωση {4}. Η διάμετρος του χωρίστηκε σε εφτά περιοχές και υπολογίστηκε η μέση τιμή του, από τον τύπο $\bar{f}(x) = \frac{\int_a^b f(x)dx}{b-a}$ [14]. Αυτό εφαρμόστηκε στον τύπο {4},

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b (1 - R_e) I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) dr = \frac{1}{b-a} \left[\frac{\sqrt{\pi}(1-R_e)I_0 \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{2}{w^2}}r\right)}{2\sqrt{\frac{2}{w^2}}} \right]_a^b \quad 3. \quad \text{Μια σχηματική}$$

παράσταση της μοντελοποίησης του laser δίνεται στην εικόνα 14.



Εικόνα 14: μοντελοποίηση Gaussian laser

Επίσης το laser μοντελοποιείται είτε ως συνεχόμενο είτε ως παλμικό.

3.2 Μοντέλο SLM Κατεργασίας

Στη συνέχεια έγινε και μοντελοποίηση για την SLM. Το κεντρικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και της μοντελοποίησης του laser παραμένουν τα ίδια. Δηλαδή οι εξισώσεις {1}, {2}, {3}, {4}, {5}, {6} δεν αλλάζουν. Όμως γίνονται αλλαγές στις εξισώσεις που εκφράζουν τις ιδιότητες του υλικού. Για την SLM το υλικό που έχει επιλεγεί είναι κράμα νικελίου (82.8%Ni, 9.5%Cr, 2.0%B, 3.0%Si, 2.3%Fe, 0.4%C).

- Εξίσωση ειδικής θερμικής αγωγιμότητας
 - C_p για το στερεό υλικό $C_p = C_s$
- Εξίσωση ειδικής θερμοχωρητικότητας
 - k για τους κόκκους $k = k_p$
 - k για το στερεό υλικό $k = k_d$

³ Το ολοκλήρωμα υπολογίστηκε από το <http://www.wolframalpha.com/> [15]

Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας με τις τιμές των σταθερών για το υλικό.

Σταθερά	Τιμή	Μονάδες
Cp	444	J/kgK
Re	0.413	-
e1	0.19	-
kd	11.9	W/(mK)
kp	1.67	W/(mK)
Tm	1443	K
D (laser)	600	μm
h	2.5	J/sm ² K
pmax	8200	kg/m ³
pmin	4100	kg/m ³

Πίνακας 7: σταθερές κράματος νικελίου⁴

3.3 Πεπερασμένες Διαφορές

Τα παραπάνω μοντέλα επιλέχθηκε να λυθούν με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Κάθε εξίσωση μετασχηματίστηκε με διακριτούς χρόνους και μετατοπίσεις. Για την εξίσωση του Fourier ισχύει⁵ [9,16]:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t},$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{(\Delta x)^2} (T_{m+1,n,l}^p + T_{m-1,n,l}^p - 2T_{m,n,l}^p),$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{(\Delta y)^2} (T_{m,n+1,l}^p + T_{m,n-1,l}^p - 2T_{m,n,l}^p),$$

⁴ Οι τιμές προήλθαν από το www.matweb.com [16] και από το άρθρο [8].

⁵ Οι τιμές των δεικτών m,n,l αφορούν τις συντεταγμένες του τυχαίου κόμβου στο τρισδιάστατο σύστημα αξόνων x,y,z.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{(\Delta z)^2} (T_{m,n,l+1}^p + T_{m,n,l-1}^p - 2T_{m,n,l}^p),$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{m,n,l}^{p+1} - T_{m,n,l}^p}{\Delta t}.$$

Έτσι η εξίσωση Fourier μετασχηματίζεται σε

$$\frac{1}{(\Delta x)^2} (T_{m+1,n,l}^p + T_{m-1,n,l}^p - 2T_{m,n,l}^p) + \frac{1}{(\Delta y)^2} (T_{m,n+1,l}^p + T_{m,n-1,l}^p - 2T_{m,n,l}^p) +$$

$$+ \frac{1}{(\Delta z)^2} (T_{m,n,l+1}^p + T_{m,n,l-1}^p - 2T_{m,n,l}^p) = \frac{1}{a} \frac{T_{m,n,l}^{p+1} - T_{m,n,l}^p}{\Delta t} \rightarrow (\Delta x = \Delta y = \Delta z)$$

$$T_{m,n,l}^{p+1} = \frac{a\Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{m+1,n,l}^p + T_{m,n+1,l}^p + T_{m,n,l+1}^p + T_{m-1,n,l}^p + T_{m,n-1,l}^p + T_{m,n,l-1}^p - 6T_{m,n,l}^p) + \left(1 - \frac{6a\Delta t}{(\Delta x)^2}\right) T_{m,n,l}^p \text{ και προέπει[10]}$$

$$M_{3-D} = \frac{(\Delta x)^2}{a\Delta t} \geq 6$$

Ο τύπος αυτός δίνει την αγωγή της θερμότητας στα κατώτερα στρώματα με την πάροδο του χρόνου. Για την εναλλαγή θερμότητας του πάνω στρώματος με το laser και το περιβάλλον θα γίνει χρήση του τύπου {2}.

$$\dot{E}_s = Q_{cond} + Q_{laser} - (Q_{rad} + Q_{conv}) = Aq_{cond} + Aq_{laser} - A(q_{rad} + q_{conv}) \rightarrow$$

$$k\Delta y\Delta z \frac{T_{m-1,n,l}^p - T_{m,n,l}^p}{\Delta x} + k\frac{\Delta x}{2}\Delta z \frac{T_{m,n+1,l}^p - T_{m,n,l}^p}{\Delta y} + k\frac{\Delta x}{2}\Delta z \frac{T_{m,n-1,l}^p - T_{m,n,l}^p}{\Delta y} +$$

$$k\frac{\Delta x}{2}\Delta y \frac{T_{m,n,l+1}^p - T_{m,n,l}^p}{\Delta z} + k\frac{\Delta x}{2}\Delta y \frac{T_{m,n,l-1}^p - T_{m,n,l}^p}{\Delta z} + \Delta y\Delta z (q_{laser} - (q_{rad} + q_{conv})) =$$

$$\rho c \frac{\Delta x}{2} \Delta y \Delta z \frac{T_{m,n,l}^{p+1} - T_{m,n,l}^p}{\Delta t} \rightarrow$$

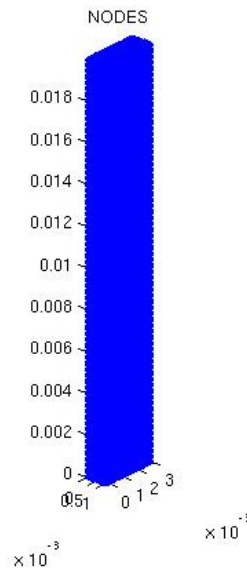
$$T_{m,n,l}^{p+1} = \frac{a\Delta t}{(\Delta x)^2} (2T_{m-1,n,l}^p + T_{m,n+1,l}^p + T_{m,n-1,l}^p + T_{m,n,l-1}^p - 6T_{m,n,l}^p) + T_{m,n,l}^p + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2 \rho c} (q_{laser} - (q_{rad} + q_{conv}))$$

Για το μοντέλο της SLS κατεργασίας στον παραπάνω τύπο θα πρέπει να διακριτοποιηθεί και η πυκνότητα. Έτσι ο τύπος {7} μετασχηματίζεται σε $\rho_{t+\Delta t} = \frac{\rho_t + \Delta t \rho_{max} A \exp(-E/RT)}{1 + \Delta t \exp(-E/RT)}$ [11].

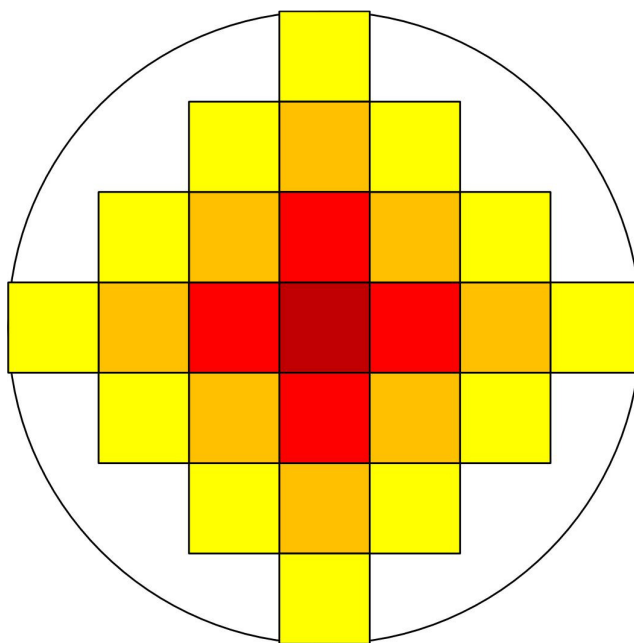
Οι άλλες ποσότητες που χρειάζεται το μοντέλο υπολογίζονται από τους προηγούμενους τύπους {8}, {9}, {10}, {11} για κάθε χρονικό βήμα.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί την explicit μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, δηλαδή υπολογίζει το επόμενο χρονικό βήμα με βάση το προηγούμενο [16]. Εκτός από τον περιορισμό του $M_{3-D} = \frac{(\Delta x)^2}{a\Delta t} \geq 6$, δεν υπάρχει άλλο πρόβλημα σύγκλισης [17].

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κόμβοι του στρώματος σκόνης όπως μοντελοποιήθηκαν στο περιβάλλον του Matlab. Επίσης δίνεται μια σχηματική παράσταση της μοντελοποίησης της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας με την ακτίνα του laser. Ο κάθε κόμβος αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ισχύ που υπολογίζεται από τον τύπο {4}, ανάλογα με την απόσταση του από το κέντρο.



Εικόνα 15: κόμβοι του στρώματος σκόνης



Εικόνα 16: κόμβοι του laser

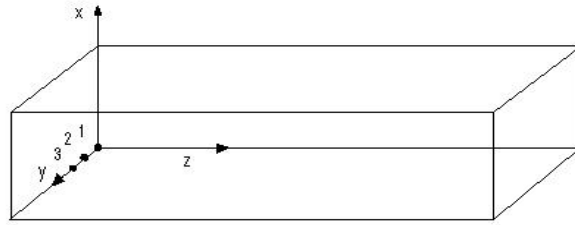
4

Αριθμητική επίλυση των μοντέλων

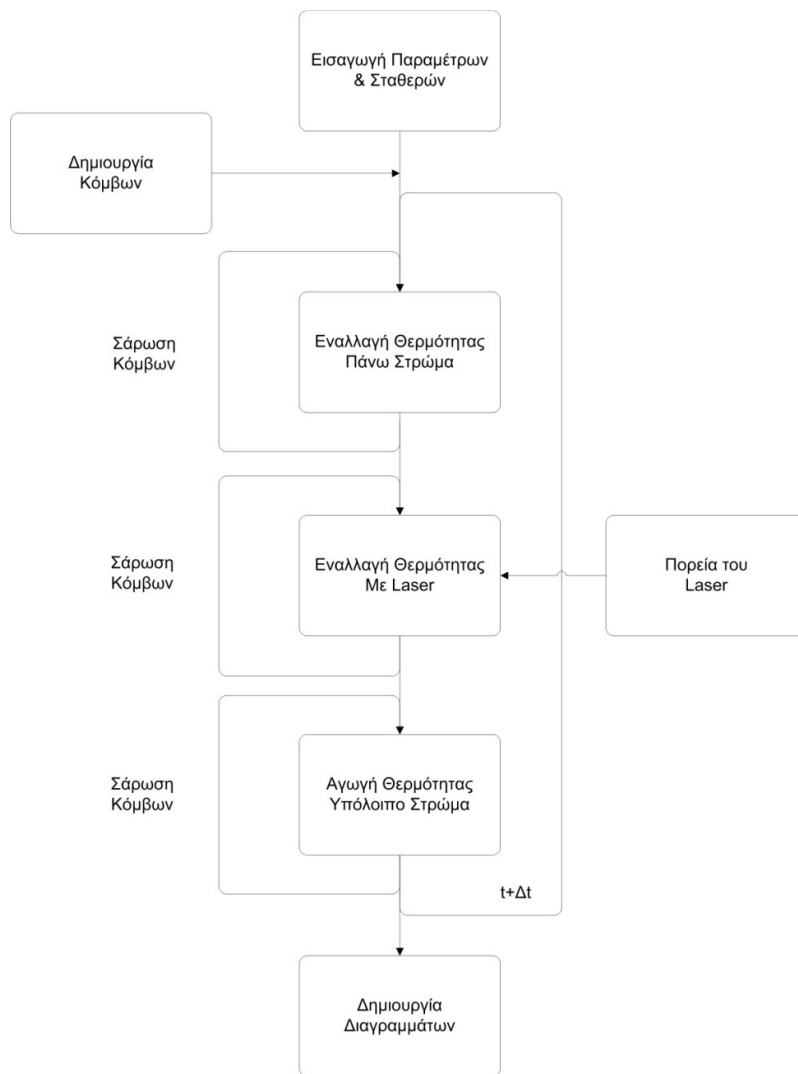
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη του κώδικα για όλες τις περιπτώσεις, αυτός αναπτύχθηκε στο προγραμματιστικό πακέτο matlab⁶ [20]. Το διάγραμμα του κώδικα δίνεται παρακάτω, εικόνα 49. Αυτός αποτελείται από δύο function, το NodesCreation και το LaserCourse, και το βασικό κώδικά για κάθε περίπτωση. Έτσι συνολικά έχουμε τα αρχεία sls.m, sls_pulsed, slm.m, NodesCreation.m, LaserCourse.m, LaserCourse_pulsed.m.

Το function NodesCreation είναι αυτό που κάνει τον υπολογισμό των κόμβων. Χρειάζεται τις διαστάσεις του στρώματος της κόνης και αυτό υπολογίζει με βάση το Δx , τον αριθμό των κόμβων, αλλά και τις συντεταγμένες του κάθε κόμβου. Το σύστημα συντεταγμένων αλλά και η αρίθμηση των κόμβων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

⁶ Παράρτημα Β



Εικόνα 17: σύστημα συντεταγμένων στο στρώμα κόνις



Εικόνα 18: διάγραμμα του κώδικα

Ο κεντρικός κώδικας (sls.m ή sls_pulsed.m ή slm.m), όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα αποτελείται από τρία κομμάτια. Στο πρώτο σαρώνονται οι επιφανειακοί κόμβοι και υπολογίζεται η επόμενη θερμοκρασία του κάθε κόμβου για κάθε νέο χρονικό βήμα. Το χρονικό βήμα εξαρτάται από την ταχύτητα του laser και το Δx , γιατί έχει τεθεί $t_{ls} = \Delta x / u$, όπου t_{ls} ο χρόνος του laser πάνω από κάθε κόμβο και $\Delta t = t_{ls} / 10$ για το συνεχόμενο laser. Σημαντικό για την εκτέλεση του κώδικα είναι να διορθώνεται το Δt σε περίπτωση που καταπατείται η συνθήκη $M \geq 6$. Επίσης από $\Delta t = t_{ls} / \langle \text{κνούμερο} \rangle$ που έχει επιλεγεί θα πρέπει να διορθώνεται και στο αρχείο LaserCourse.m, για να υπολογίζει σωστά το χρόνο που «άθεται» το laser πάνω από τον κάθε κόμβο. Στο παλμικό laser ορίζεται $\Delta t = t_{\text{pulse}}$, με t_{pulse} την χρονική διάρκεια του παλμού και αυτό γιατί πρέπει να μοντελοποιηθεί ο χρόνος κάθε παλμού που είναι πολύ μικρός. Ο κώδικας τρέχει για ολικό χρόνο κατεργασίας t , ο οποίος ζητείται στην αρχή.

Στο δεύτερο κομμάτι σαρώνονται οι κόμβοι της πορείας του laser. Όπως και πριν και εδώ υπολογίζονται οι θερμοκρασίες για το επόμενο χρονικό βήμα. Οι κόμβοι της πορείας του laser δίνονται από το function LaserCourse. Αυτό υπολογίζει ανά πόσες επαναλήψεις χρειάζεται να προχωρήσει ο κώδικας στον επόμενο κόμβο και τον δίνει. Η πορεία έχει οριστεί μία ευθεία γραμμή. Ο κόμβος αυτός που δίνεται είναι το κέντρο του laser και για τον υπολογισμό όλων των κόμβων με βάση τον κεντρικό ορίζεται διάνυσμα \vec{r}_l .

Στο τρίτο κομμάτι συνεχίζεται η σάρωση των εσωτερικών κόμβων. Στο τέλος του ορίζεται $T_{\text{new}} = T_{\text{old}}$ και αποθηκεύονται μεταβλητές χρήσιμες για τα διαγράμματα. Τα χρωματικά διαγράμματα έγιναν με την βοήθεια της εντολής βιβλιοθήκης του matlab, fill [21] και παρουσιάζουν σε άνωψη και τομή το στρώμα κόνης κατά την λειτουργία του laser, αλλά και στο τέλος του χρόνου κατεργασίας. Τα άλλα διαγράμματα είναι γραφικές που απεικονίζουν την πορεία της θερμοκρασίας διαφόρων σημείων σε όλη την διάρκεια της λύσης, αλλά και ρυθμό μεταβολής αυτής κατά την ψύξη. Δηλαδή από την στιγμή που τα σημεία αυτά έφτασαν σε μία ανώτατη θερμοκρασία και μετά.

Η εκτέλεση του κώδικα έγινε σε 32b Matlab R2009b σε υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Ubuntu linux 10.04 32b, επεξεργαστική ισχύ 2.4GHz και μνήμη RAM 2024MB. Ο χρόνος εκτέλεσης για πλήρη αποτελέσματα του αρχείου sls.m και slm.m είναι περίπου μία ώρα. Ενώ το αρχείο sls_pulsed.m χρειάζεται περίπου 6 ώρες σε μικρότερο χώρο και χρόνο λύσης λόγω του πολύ μικρού χρονικού βήματος.

5

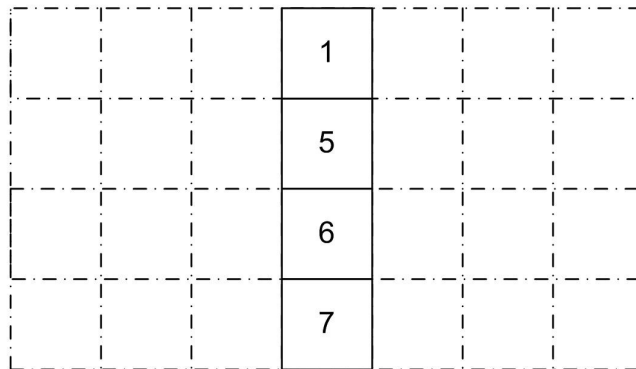
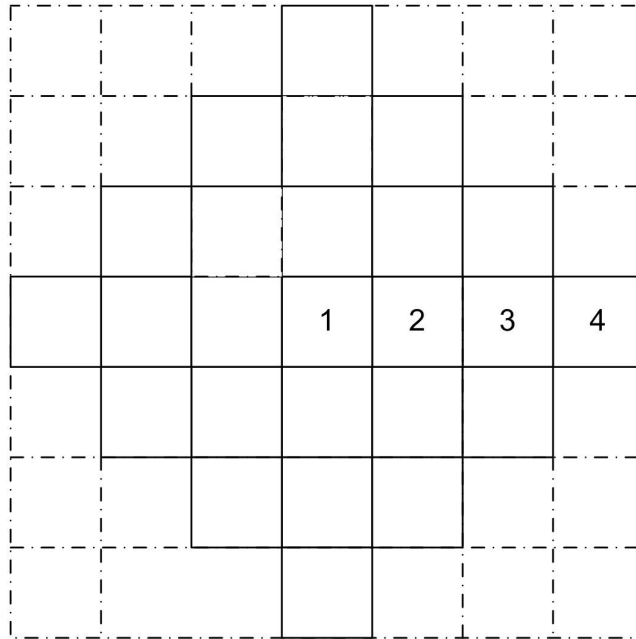
Επίλυση του μοντέλου

Εδώ παρουσιάζονται οι λύσεις των μοντέλων για διάφορες τιμές ταχύτητας σάρωσης και ισχύος του laser καθώς και διάφορες τιμές θερμοκρασίας προθέρμανσης. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε με την δημιουργία γραφικών παραστάσεων $T=f(t)$ για διάφορα σημεία στο στρώμα κόνης, χρωματικών διαγραμμάτων⁷ (contour plots) για τη διανομή της θερμοκρασίας σε όλο το στρώμα σε τυχαία χρονική στιγμή λειτουργίας του laser αλλά και στο πέρας του χρόνου κατεργασίας, γραφικών παραστάσεων $dT/dt=f(t)$, και τέλος παρουσίαση των κόμβων που υπέστησαν αλλαγή. Τα χρωματικά διαγράμματα παρουσιάζουν το στρώμα σε άνωψη και τομή στο κέντρο του laser. Τα σημεία των γραφικών αριθμούνται από το 1 έως 7. Το 1 είναι πάνω στο κέντρο του laser σε κάποιο αρχικό χρόνο, το 2 είναι Δx δεξιότερα, το 3 είναι $2\Delta x$ δεξιότερα του 1 και το 4 είναι $4\Delta x$ δεξιότερα. Το 5 είναι κατά $\Delta x/2$ κάτω από το 1, το 6 είναι κατά $1,5\Delta x$ κάτω από το 1 και το 7 κατά $2,5\Delta x$. Το Δx είναι ίσο με $D/7$, όπου D είναι η διάμετρος του laser. Η επιλογή της ισχύς, της διαμέτρου και συχνότητας του παλμού είναι τέτοια ώστε να είναι ίδια με το laser του εργαστηρίου (Ylfa M20)⁸. Το στρώμα της σκόνης έχει διαστάσεις $20 \times 3 \times 1 \text{mm}$ για την

⁷ Τα χρωματικά διαγράμματα αποτελούν την οπτικοποίηση της θερμοκρασίας των κόμβων στις ενδιάμεσες περιοχές. Αυτές έχουν υπολογιστεί ως ο μέσος όρος των θερμοκρασιών των κόμβων.

⁸ Παράρτημα Α

συνεχόμενη λειτουργία του laser, ενώ για την παλμική το στρώμα μειώνεται σε 10x3x1mm για εξοικονόμηση χρόνου.

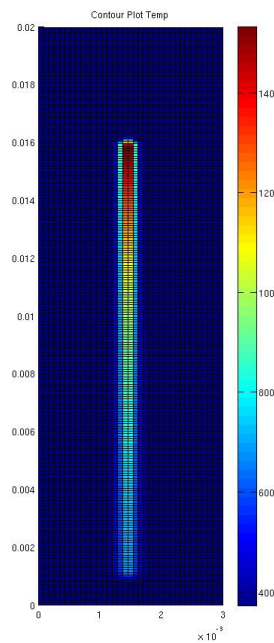


Εικόνα 19: σημεία στο στρώμα κόνης

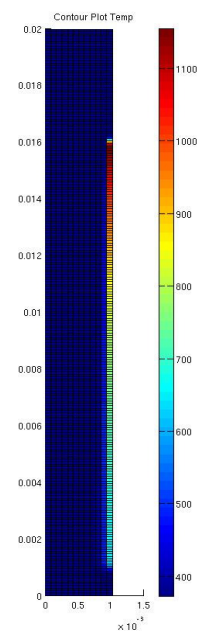
5.1 Αποτελέσματα για SLS

5.1.1 Συνεχές laser

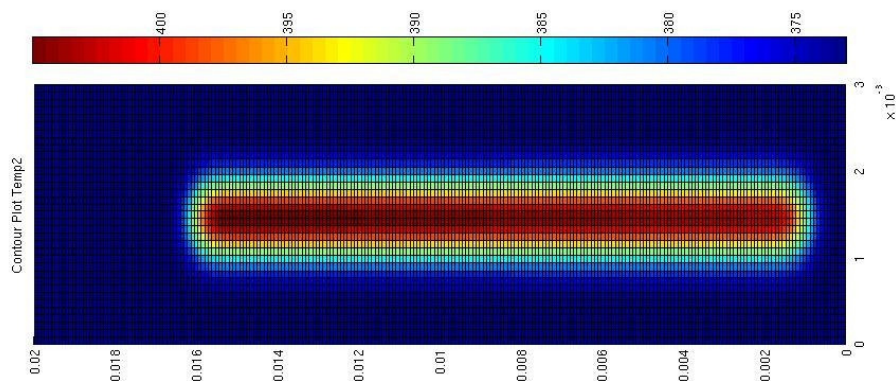
Έγινε επίλυση του μοντέλου για SLS κατεργασία του υλικού polycarbonate. Οι παράμετροι που δόθηκαν είναι η ταχύτητα σάρωσης του laser ίση με 40cm/s, η ισχύς του laser είναι $P=20W$ και η θερμοκρασία προθέρμανσης του στρώματος κόνης είναι $100\text{ }^{\circ}C$. Το μοντέλο επιλύεται για ολικό χρόνο 0.5 sec. Ενοποιημένο υλικό θεωρείται αυτό που ξεπέρασε την θερμοκρασία της υαλώδους μορφής.



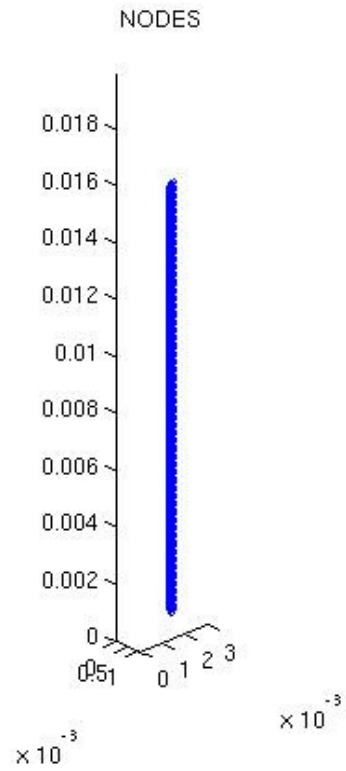
Εικόνα 20: διανομή θερμοκρασίας
άνωψη



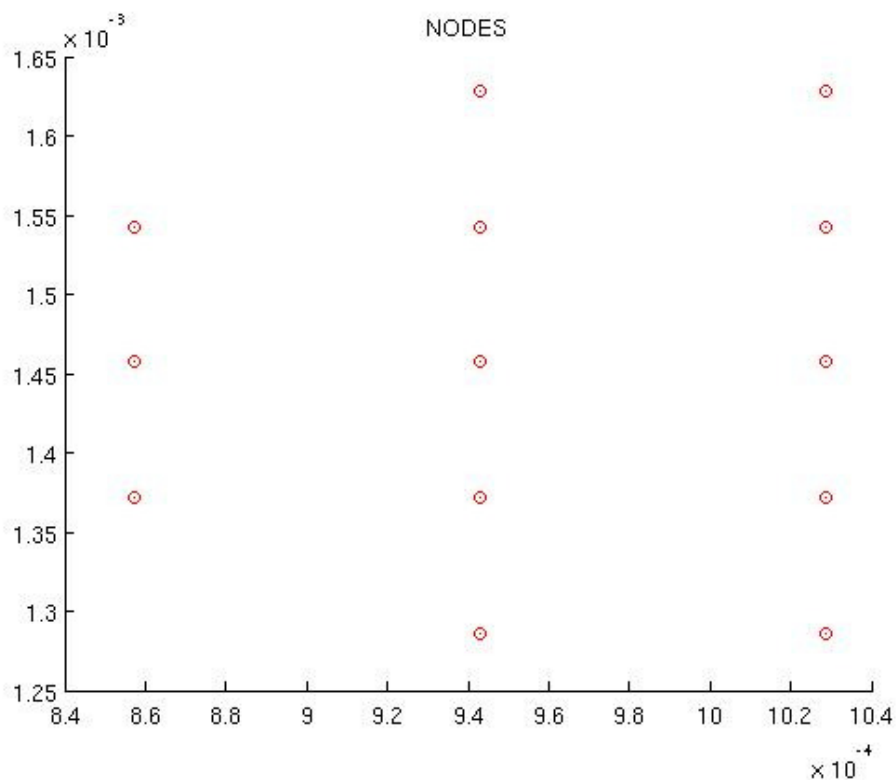
Εικόνα 21: διανομή θερμοκρασίας
τομή



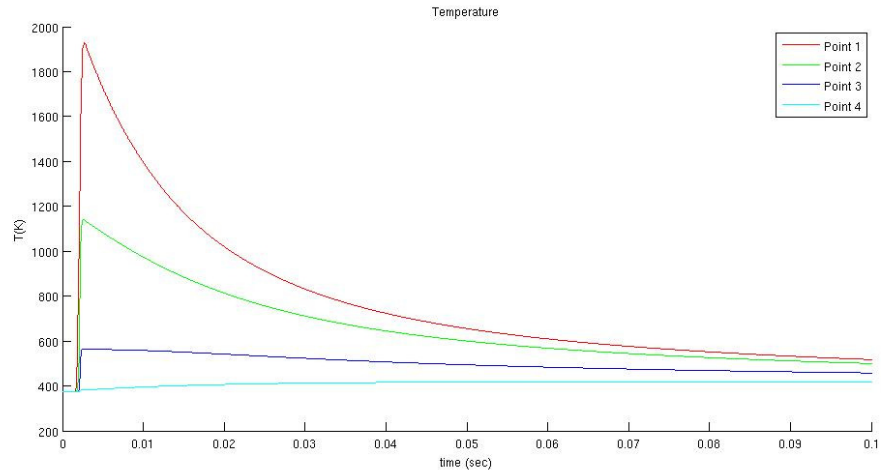
Εικόνα 22: διανομή θερμοκρασίας για $t=0.5\text{sec}$



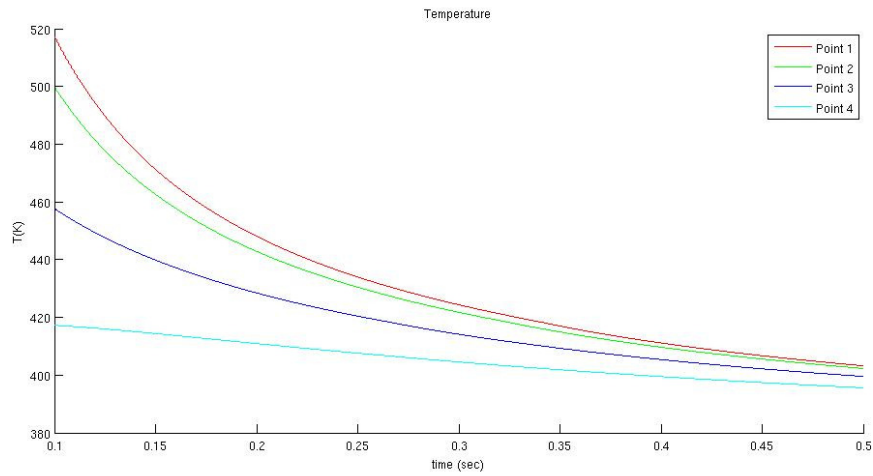
Εικόνα 23: ενοποιημένο υλικό



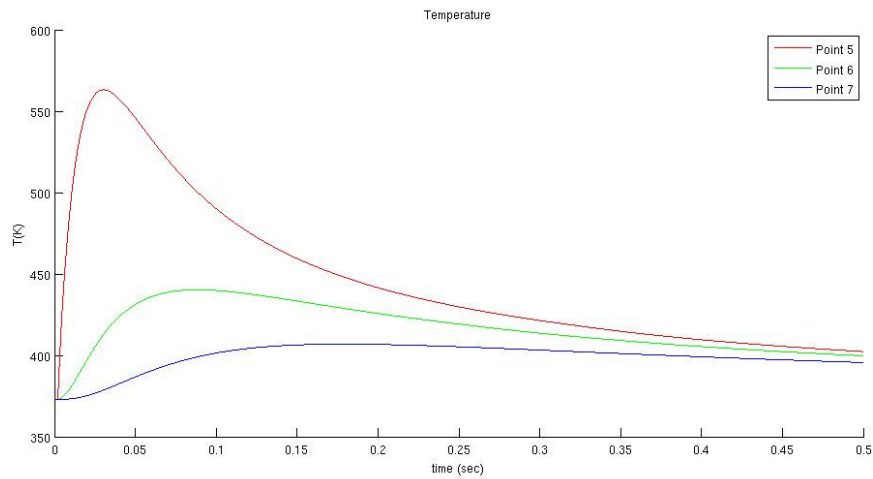
Εικόνα 24: πάχος ενοποιημένου υλικού



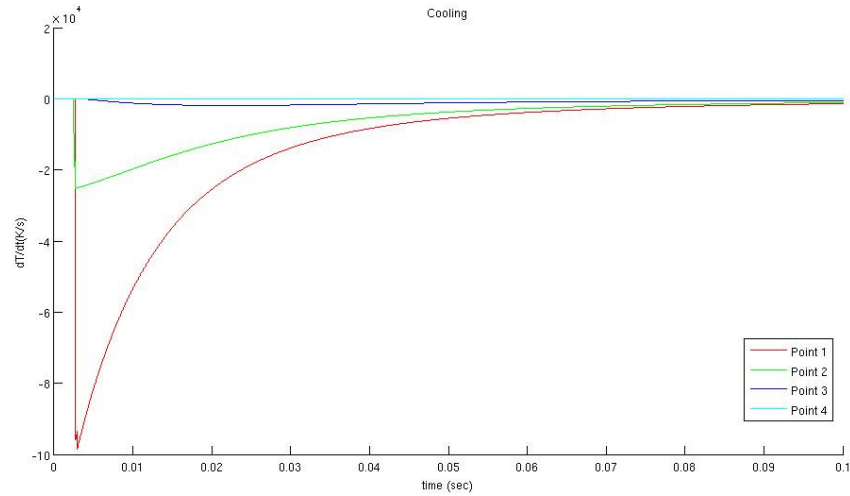
Διάγραμμα 1: θερμοκρασία σημείων 1-4 για χρόνο [0-0.1sec]



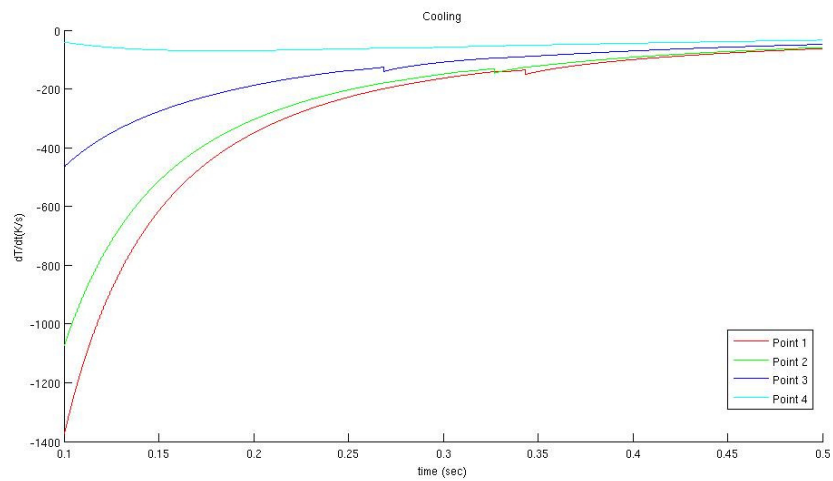
Διάγραμμα 2: θερμοκρασία σημείων 1-4 για χρόνο [0.1-0.5sec]



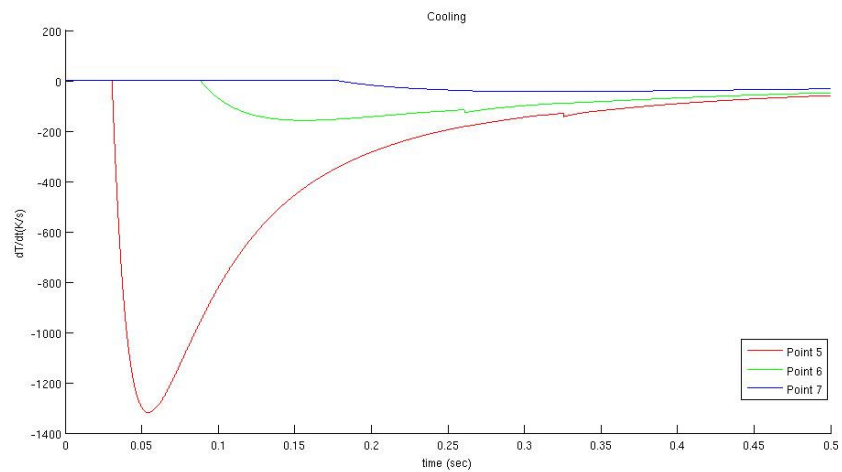
Διάγραμμα 3: θερμοκρασία σημείων 5-7 για χρόνο [0-0.5sec]



Διάγραμμα 4: ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας σημείων 1-4 για χρόνο [0-0.1sec]



Διάγραμμα 5: ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας σημείων 1-4 για χρόνο [0.1-0.5sec]



Διάγραμμα 6: ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας σημείων 5-7 για χρόνο [0-0.5sec]

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία έφτασε στους **~1900K**. Το πάχος του υλικού υπολογίζεται στα **62428 μm^2** και το βάθος του laser έφτασε τα **214 μm** . Από τα διαγράμματα της θερμοκρασίας και της μεταβολής αυτής παρατηρούμε ότι η ψύξη του υλικού είναι ταχύτατη.

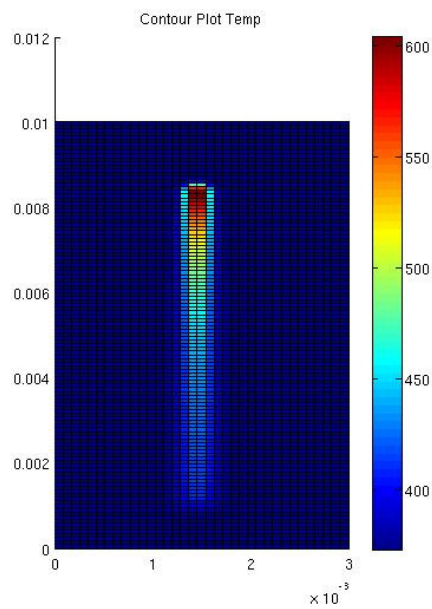
Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει αποτελέσματα μέγιστης θερμοκρασίας, βάρους και εμβαδού ενοποιημένου υλικού για διάφορες τιμές παραμέτρων θερμοκρασίας προθέρμανσης, ισχύος αλλά και ταχύτητα σάρωσης του laser.

Πίνακας 8: διάφορες λύσεις για SLS

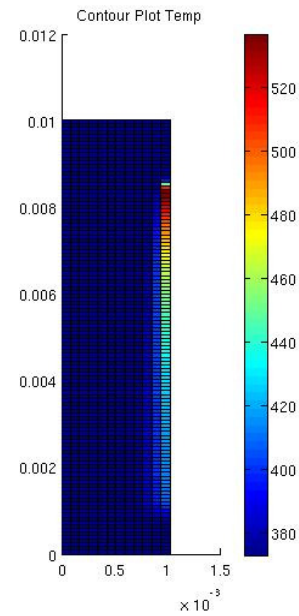
Tprh	P	u	Βάθος	Εμβαδό	Tmax
°C	W	cm/s	μm	μm^2	K
25	10	10	129	55084	2576
25	10	40	129	25706	1367
25	10	80	43	11017	1035
25	20	10	214	77117	3671
25	20	40	129	40395	1919
25	20	80	129	25706	1390
50	10	10	214	62428	2577
50	10	40	129	40395	1372
50	10	80	129	18361	1039
50	20	10	214	84462	3674
50	20	40	129	40395	1923
50	20	80	129	40395	1395
100	10	10	300	135873	2578
100	10	40	214	62428	1381
100	10	80	129	40395	1047
100	20	10	300	172596	3681
100	20	40	214	77117	1931
100	20	80	214	62428	1402

5.1.2 Παλμικό laser

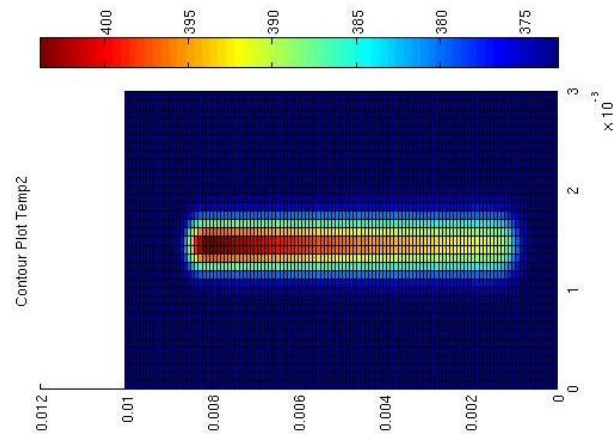
Για το παλμικό laser το στρώμα κόνης μειώθηκε στα 10x3x1mm, αλλά και ο ολικός χρόνος στα 0.2 sec. Αυτό έγινε για να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται στην επίλυση του μοντέλου λόγω του πολύ μικρού χρονικού βήματος. Τα αποτελέσματα της λύσης που θα παρουσιαστούν είναι για τιμές παραμέτρων ταχύτητας σάρωσης του laser 8 cm/s, θερμοκρασία προθέρμανσης 100 °C, ισχύ του laser 20 W, συχνότητα παλμών 100 kHz και χρονική διάρκεια παλμού 180 ns. Ενοποιημένο υλικό θεωρείται αυτό που ξεπέρασε την θερμοκρασία της υαλώδους μορφής.



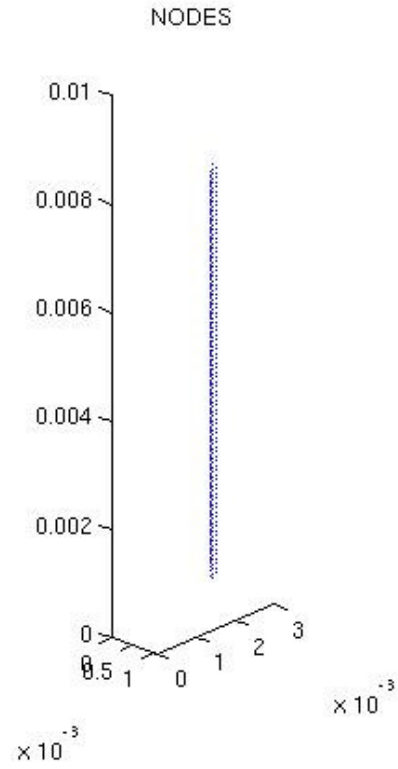
Εικόνα 25: διανομή θερμοκρασία άνωψη



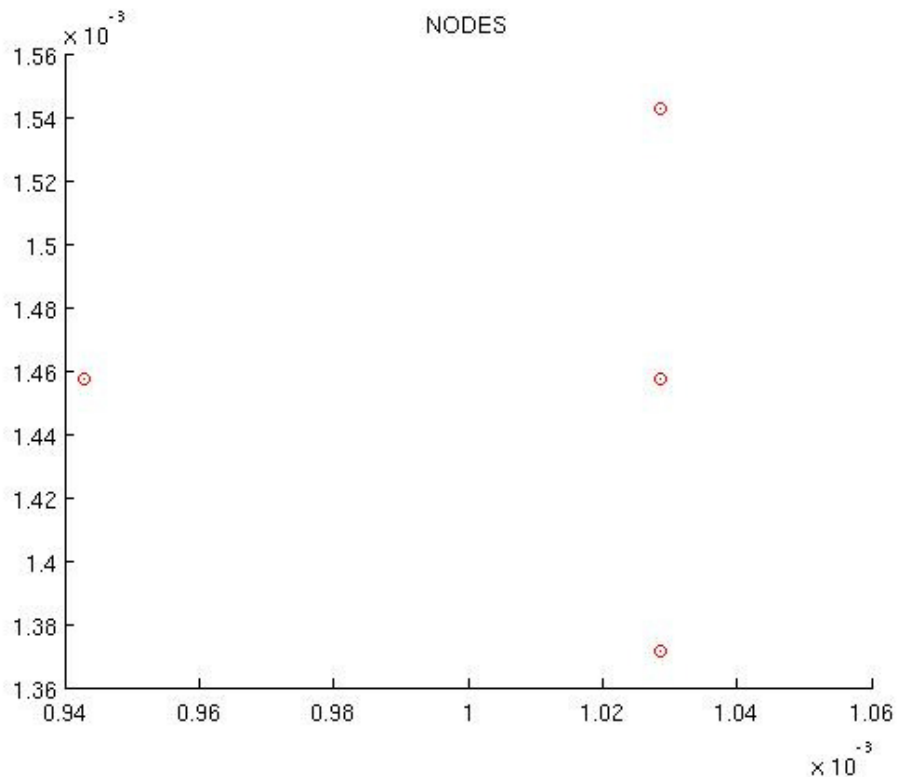
Εικόνα 26: διανομή θερμοκρασίας τομή



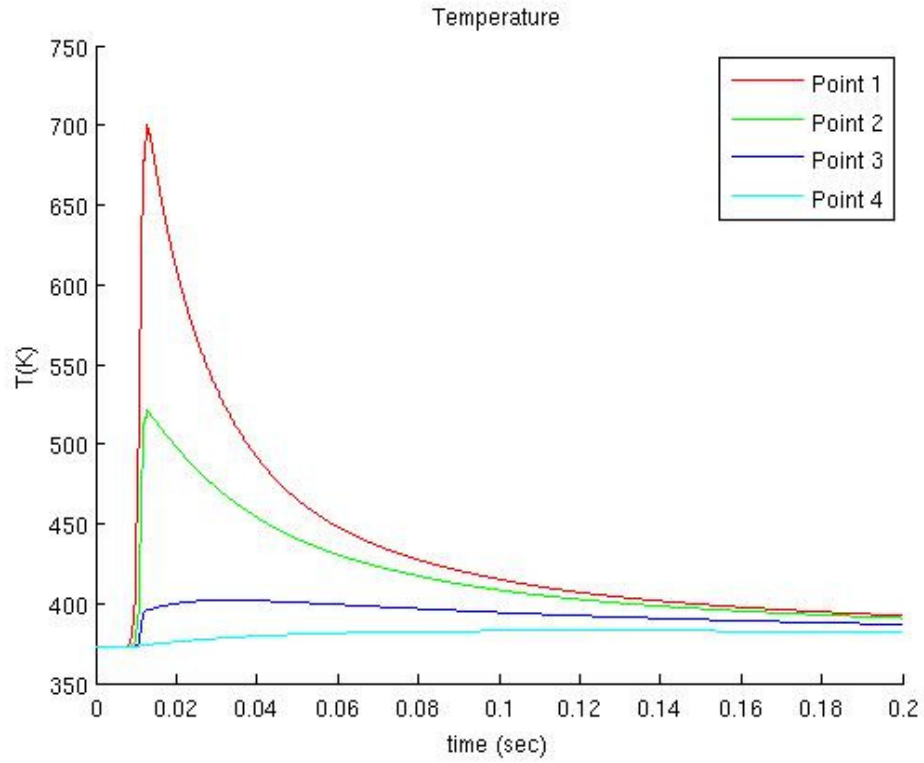
Εικόνα 27: διανομή θερμοκρασίας για t=0.2sec



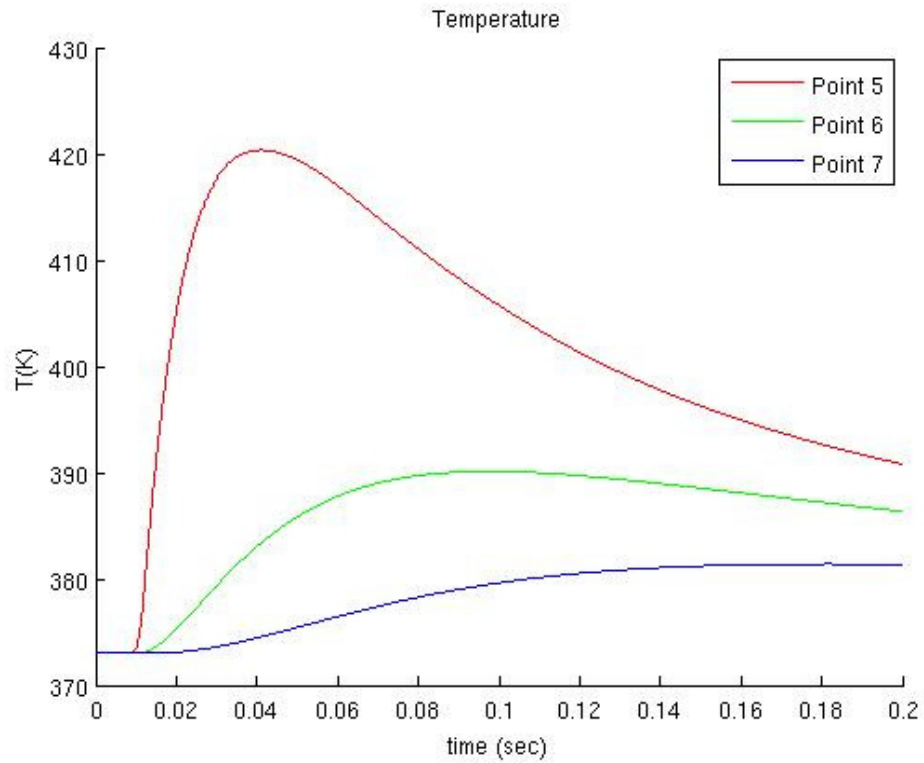
Εικόνα 28: ενοποιημένο υλικό



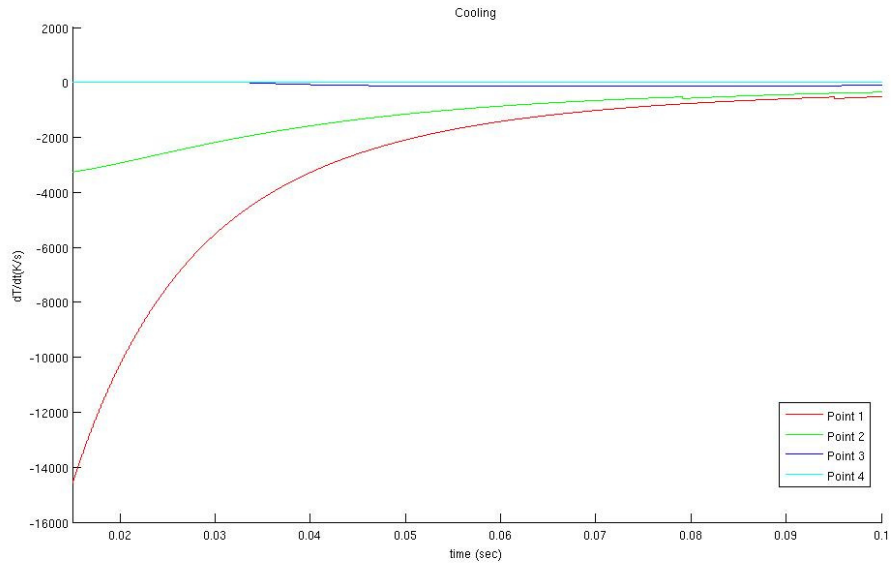
Εικόνα 29: πάχος ενοποιημένου υλικού



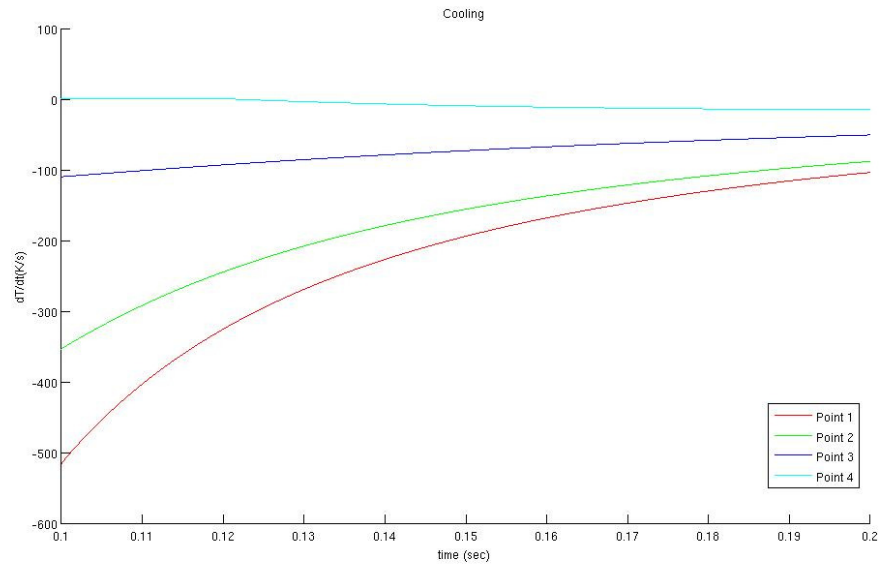
Διάγραμμα 7: θερμοκρασία σημείων 1-4 για χρόνο [0-0.2sec]



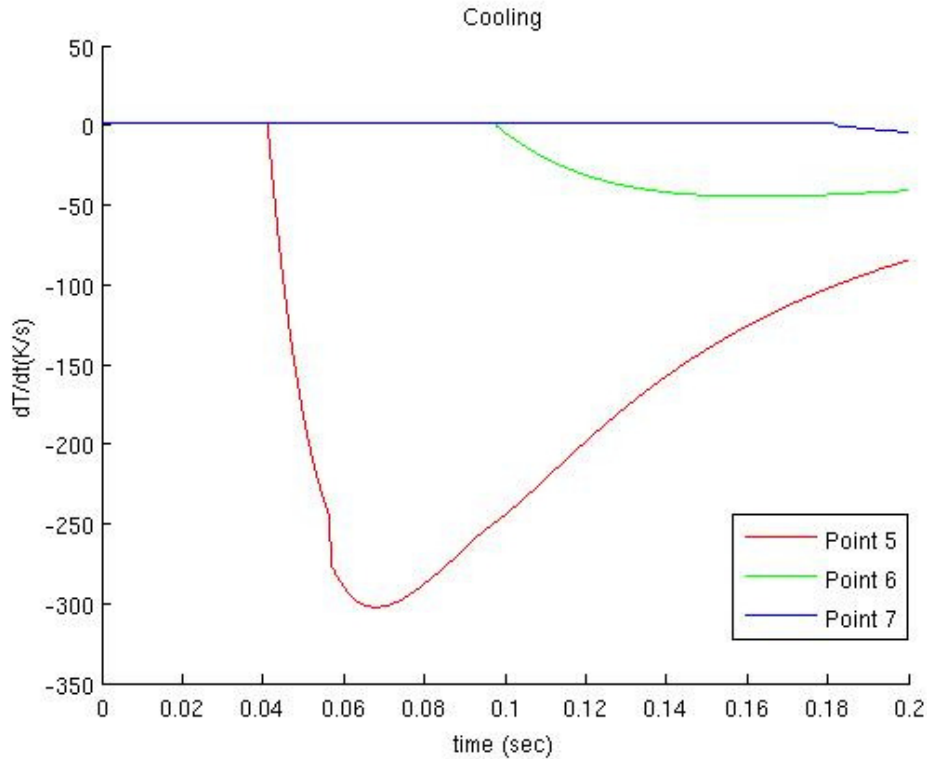
Διάγραμμα 8: θερμοκρασία σημείων 5-7 για χρόνο [0-0.2sec]



Διάγραμμα 9: ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας σημείων 1-4 για χρόνο [0.014-0.1sec]



Διάγραμμα 10: ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας σημείων 1-4 για χρόνο [0.1-0.2sec]

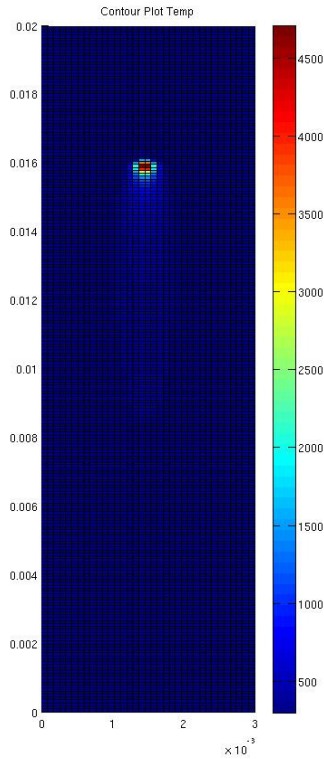


Διάγραμμα 11: ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας σημείων 5-7 για χρόνο [0-0.2sec]

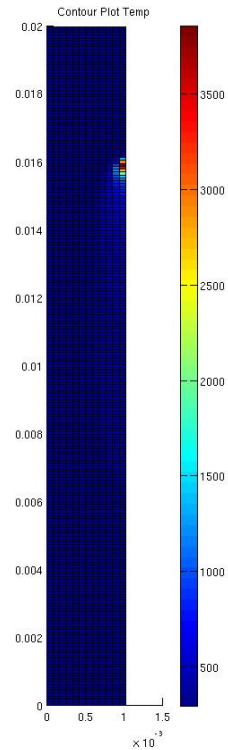
Στο παλμικό laser βλέπουμε πως τα αποτελέσματα διαφέρουν. Παρατηρούμε πως αν και η ταχύτητα είναι αρκετά μικρότερη έχουμε πιο ήπια αποτελέσματα θερμοκρασίας και πάχους υλικού. Η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους **~700 K**, το βάθος είναι **129 μm**, και το πάχος είναι **18361 μm²**. Από τα διαγράμματα του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας βλέπουμε πως η απόψυξη είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μικρότερη απ' ότι στο συνεχές laser. Το διάγραμμα 9 αρχίζει από τα 0.014 sec γιατί η ρουτίνα που υπολογίζει το ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας κατά την ψύξη αρχίζει από το χρόνο που θα φτάσει το σημείο σε μέγιστη θερμοκρασία, όμως στο παλμικό laser όταν φτάνει στη μέγιστη θερμοκρασία δεν έχει τελειώσει απαραίτητα η θέρμανση και γι' αυτό η γραφική μετακινήθηκε χειροκίνητα για να δώσει ευκρίνεια στις τιμές τις ψύξης.

5.2 Αποτελέσματα για SLM

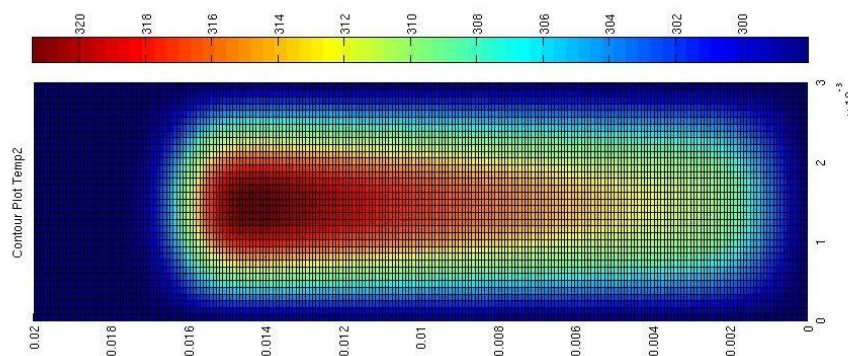
Εδώ θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της κατεργασίας κράματος νικελίου με SLM. Τα αποτελέσματα είναι για παραμέτρους ταχύτητας σάρωσης του laser 7 cm/s, ισχύς 20W και θερμοκρασίας προθέρμανσης 25 °C. Ο ολικός χρόνος της λύσης είναι 0.5 sec. Ενοποιημένο υλικό θεωρείται αυτό που ξεπέρασε την θερμοκρασία τήξεως.



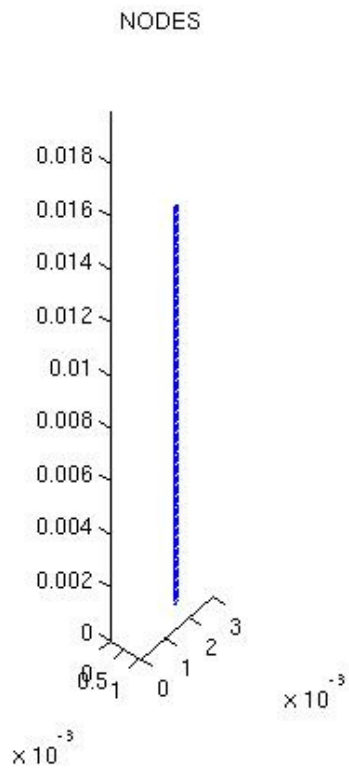
Εικόνα 30: διανομή θερμοκρασία
άνωψη



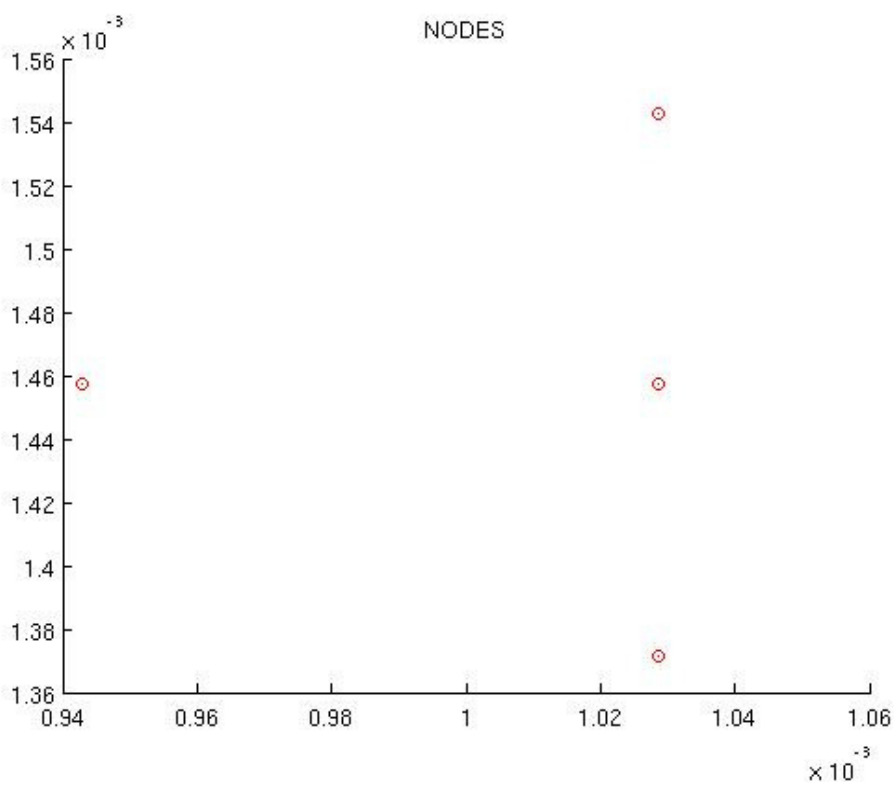
Εικόνα 31: διανομή θερμοκρασίας
τομή



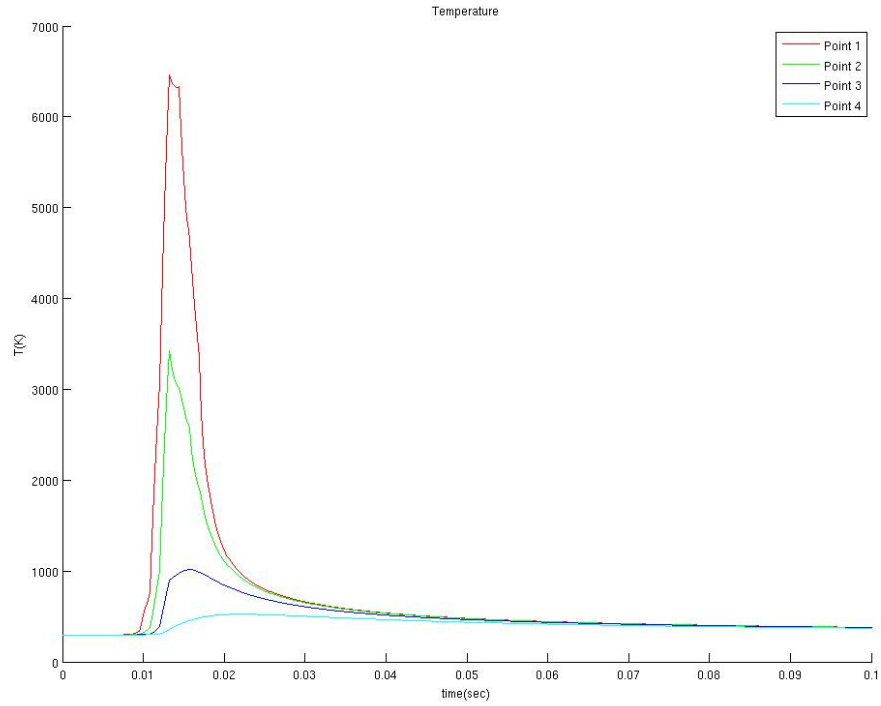
Εικόνα 32: διανομή θερμοκρασίας για $t=0.5\text{sec}$



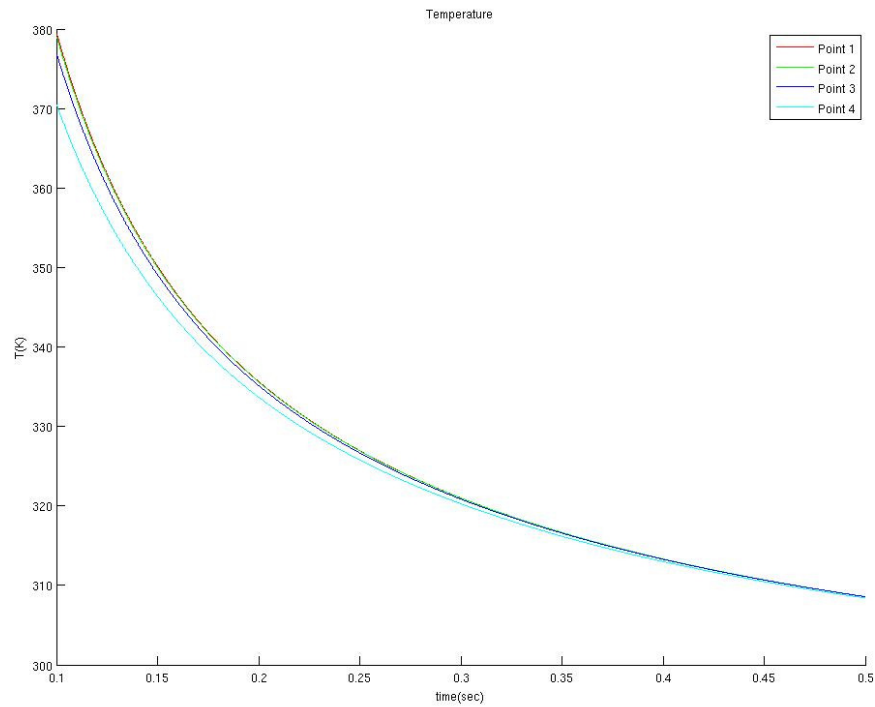
Εικόνα 33: ενοποιημένο υλικό



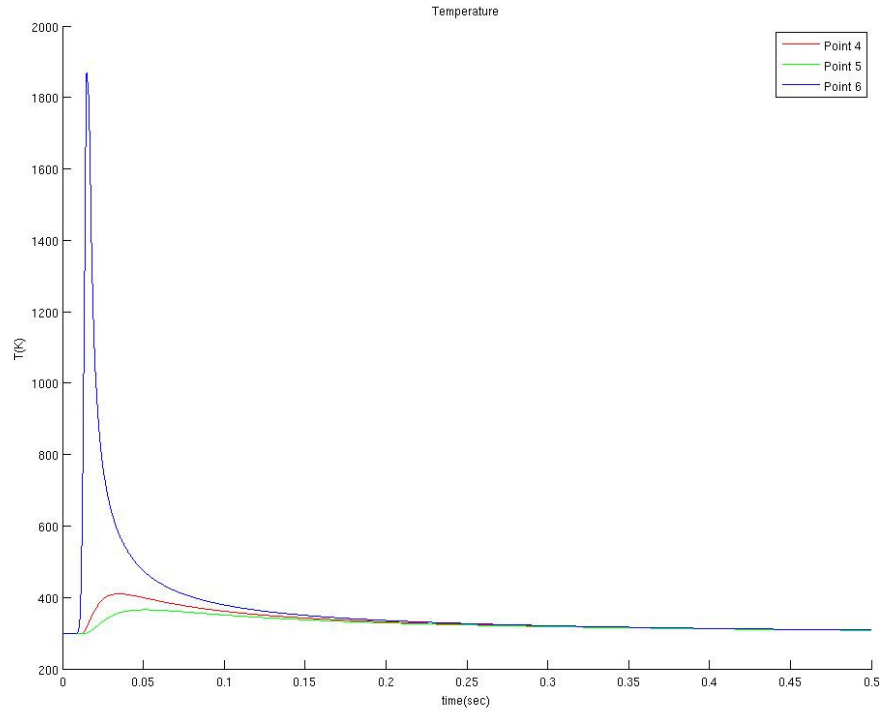
Εικόνα 34: πάχος ενοποιημένου υλικού



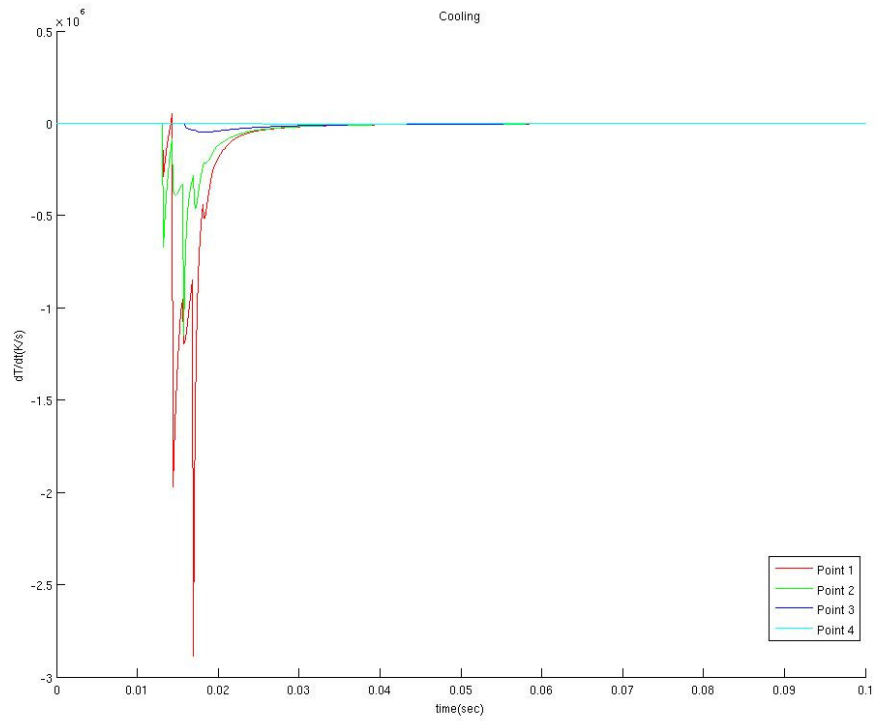
Διάγραμμα 12: θερμοκρασία σημείων 1-4 για χρόνο [0-0.1sec]



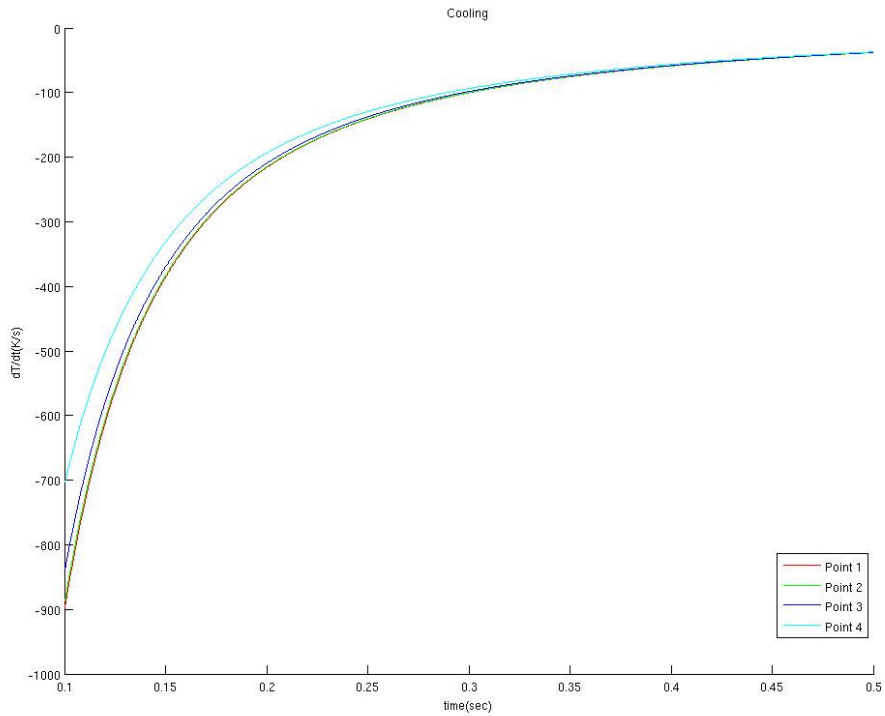
Διάγραμμα 13: θερμοκρασία σημείων 1-4 για χρόνο [0.1-0.5sec]



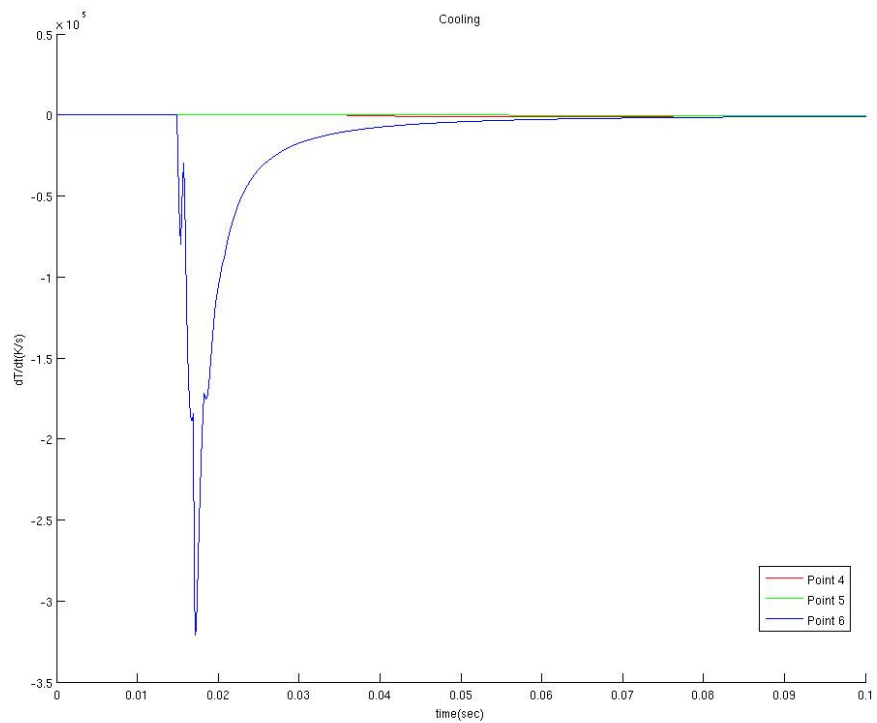
Διάγραμμα 14: θερμοκρασία σημείων 5-7 για χρόνο [0-2sec]



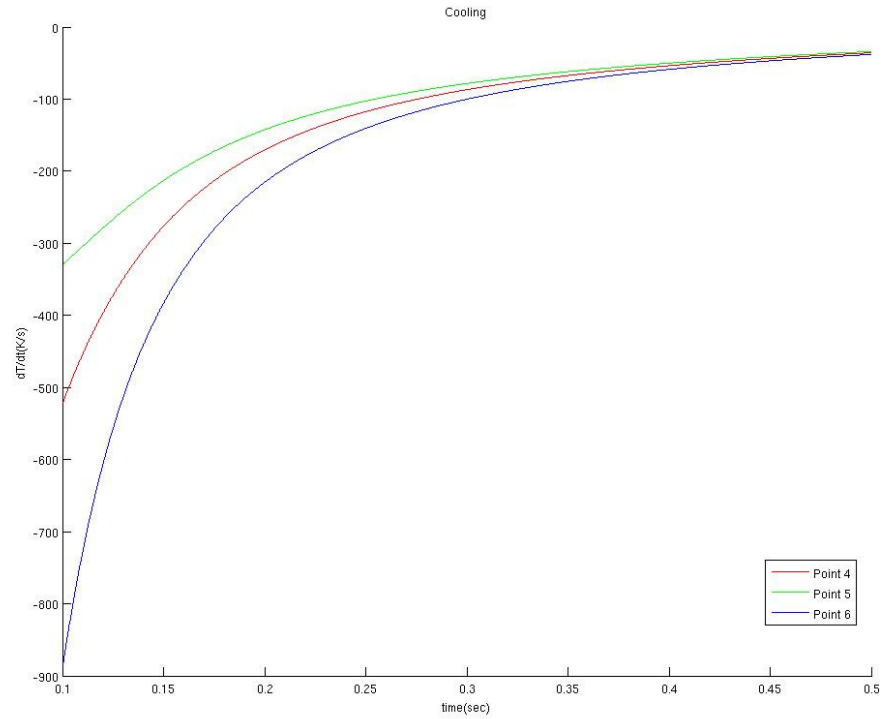
Διάγραμμα 15: ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας σημείων 1-4 για χρόνο [0-0.1sec]



Διάγραμμα 16: ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας σημείων 1-4 για χρόνο [0.1-0.5 sec]



Διάγραμμα 17: ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας σημείων 5-7 για χρόνο [0-0.1sec]



Διάγραμμα 18: ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας σημείων 5-7 για χρόνο [0.1-0.5sec]

Σε αυτήν την κατεργασία βλέπουμε ότι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πολύ μεγαλύτερες. Στο αποτέλεσμα που παρουσιάστηκε παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία έφτασε τους **~6500K**, το πάχος του υλικού τα **18361 μm^2** και το βάθος **129 μm** . Επίσης βλέπουμε πως και οι ρυθμοί απόψυξης είναι πολύ μεγάλοι.

Στην συνέχεια δίνεται πίνακας που παρουσιάζει αποτελέσματα για διάφορες τιμές των παραμέτρων.

Πίνακας 8: διάφορες λύσεις για SLM

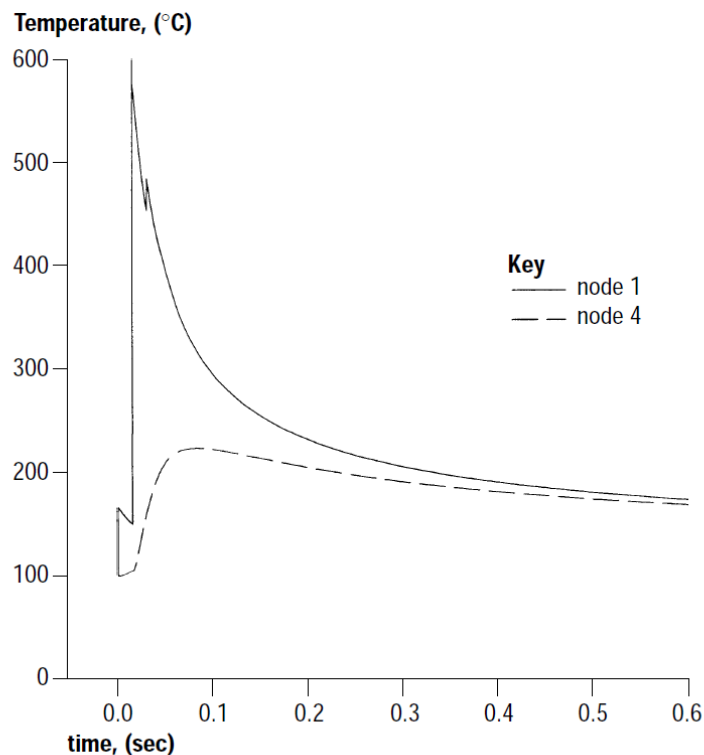
Tprh	P	u	Βάθος	Εμβαδό	Tmax
K	W	cm/s	μm	μm ²	K
25	10	4	129	18361	4629
25	10	7	43	11017	3404
25	10	10	43	3672	2854
25	20	4	129	40395	8919
25	20	7	129	18361	6465
25	20	10	43	11017	5363
150	10	4	129	18361	4754
150	10	7	43	11017	3528
150	10	10	43	11017	2978
150	20	4	129	40395	9051
150	20	7	129	18361	6585
150	20	10	129	18361	5481
300	10	4	129	18361	4906
300	10	7	43	11017	3677
300	10	10	43	11017	3127
300	20	4	214	47739	9216
300	20	7	129	33050	6731
300	20	10	129	18361	5623

5.3 Σύγκριση με άλλο μοντέλο

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί σύγκριση του θερμικού μοντέλου με άλλο αντίστοιχο της βιβλιογραφίας. Αυτό γίνεται λόγω έλλειψης πειραματικών αποτελεσμάτων που θα βοηθούσαν στην αξιολόγηση του μοντέλου.

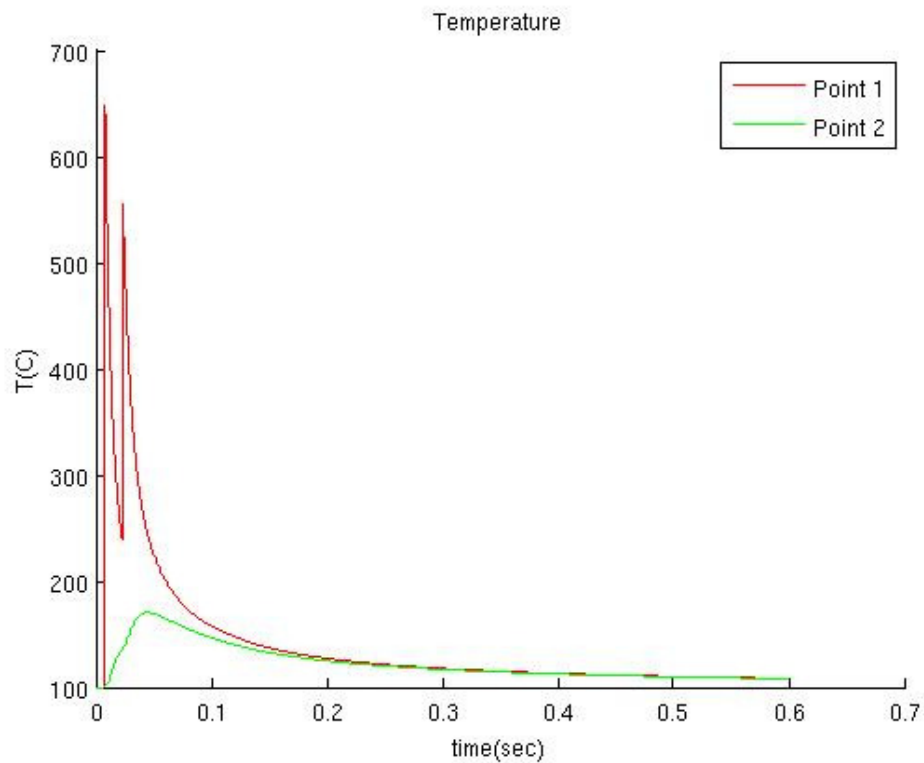
Σύμφωνα με το άρθρο [23], στρώμα κόνης σαρώνεται με laser ταχύτητας 1.64m/s για 25.4mm και στη συνέχεια το laser επανέρχεται στην αρχική του θέση μετατοπισμένο κατά 76.2μm. Η ισχύς του laser είναι 10W και η διάμετρός του 300μm. Το υλικό της κόνης είναι το polycarbonate. Τα θερμοκρασιακά αποτελέσματα για σημείο στη μέση της πορείας του laser και στο μέσο της μετατόπισης των 76.2mm στην επιφάνεια του στρώματος, καθώς και για σημείο 0.1mm κατακόρυφα κάτω από το προηγούμενο δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.

Figure 7 Simulated temperature profile at the surface and at the bottom of the layer, (-) node 1 and (- -) node 4 respectively: $A_N = 80\text{kJ/m}^2$, $D = 304.8\mu\text{m}$, $HS = 76.2\mu\text{m}$, $L = 25.4\text{mm}$



Διάγραμμα 19: θερμοκρασία σημείων από βιβλιογραφία

Το μοντέλο μας προσαρμοστικέ στις συνθήκες της προηγούμενης λύσης με την διαφορά ότι δόθηκαν 85.7μm μετατόπισης στο laser και αντλήθηκαν αποτελέσματα θερμοκρασιακής μεταβολής για τα παραπάνω σημεία. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 20: θερμοκρασία σημείων από μοντέλο

Παρατηρούμε ότι υπάρχει ομοιότητα στις τιμές των αποτελεσμάτων. Η κύρια διαφορά τους βρίσκεται στο ότι το παρόν μοντέλο εντοπίζει περισσότερες απώλειες θερμοκρασίας λόγω της αγωγής προς το υπόλοιπο στρώμα και περιβάλλον ενώ της βιβλιογραφίας εντοπίζεται σε μικρότερη λύση στρώματος κόνης. Επίσης ρόλο στην διαφοροποίηση έπαιξε και η μεγαλύτερη παράλληλη μετατόπιση του laser στην δική μας λύση.

6

Συμπεράσματα και επεκτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Πρέπει να τονισθεί ότι μεγάλη σημασία στην παρούσα μοντελοποίηση έχουν οι θερμικές ιδιότητες των υλικών. Αυτές θα πρέπει να ταιριάζουν με αυτές της κόνης και του πορώδους υλικού που κατασκευάζεται.

Για την SLS κατεργασία τηρήθηκε η παραπάνω συνθήκη και παρουσιάστηκε μοντέλο που έδινε την ειδική θερμότητα και θερμοχωρητικότητα σε σχέση με το κατεργαζόμενο υλικό. Στην SLM λόγω έλλειψης τέτοιου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν ιδιότητες του μασίφ υλικού για λειωμένο υλικό και προσεγγίστηκε μία αρκετά μικρότερη ειδική θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα για την κόνη. Επίσης έλλειψη δεδομένων υπάρχει στις θερμικές σταθερές κατά την αλλαγή φάσης του υλικού, έτσι στην SLM θεωρήθηκε ένα σταθερό C_p σε όλη την λύση.

6.1.1 Ο ρόλος των παραμέτρων

Όπως έγινε αντιληπτό από τα προηγούμενα αποτελέσματα, οι παράμετροι που τα καθορίζουν είναι η ταχύτητα σάρωσης του laser, η θερμοκρασία προθέρμανσης και η ισχύς του laser.

Τα αποτελέσματα της αύξησης της ισχύος του laser για την SLS και την SLM είναι ότι:

- Η μέγιστη θερμοκρασία πάνω στο στρώμα της κόνης αυξάνεται.
- Το βάθος του ενοποιημένου στρώματος αυξάνεται.
- Γίνεται αύξηση του εμβαδού του υλικού.

Τα αποτελέσματα της αύξησης της θερμοκρασίας προθέρμανσης για την SLS είναι ότι:

- Το βάθος του ενοποιημένου στρώματος αυξάνεται.
- Γίνεται αύξηση του εμβαδού του υλικού.
- Η μέγιστη θερμοκρασία παραμένει περίπου σταθερή.

Τα αποτελέσματα της αύξησης της θερμοκρασίας προθέρμανσης για την SLM είναι παρόμοια με αυτά της SLS, όμως είναι λιγότερο εμφανή. Αυτό συμβαίνει γιατί στην SLM απαιτούνται πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

Τα αποτελέσματα της αύξησης της ταχύτητας σάρωσης του laser για την SLS και SLM είναι ότι:

- Το βάθος του ενοποιημένου στρώματος μειώνεται.
- Το εμβαδό του υλικού μειώνεται
- Και τέλος μείωση γίνεται και στη μέγιστη θερμοκρασία.

6.1.2 Ο ρόλος του συνεχόμενου και του παλμικού laser

Παρατηρούμε ότι υπήρξαν πολύ μεγάλες διαφορές στη συμπεριφορά των δύο τύπων laser, παλμικό και συνεχόμενο. Αυτές μπορούν να συνοψιστούν ως εξής, για την ίδια ταχύτητα και ισχύ:

- 1 Το συνεχόμενο παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση με το παλμικό.
- 2 Στο συνεχόμενο παρουσιάζονται μεγαλύτερα πάχη και βάθη του υλικού.
- 3 Το παλμικό επιφέρει πολύ μικρότερους ρυθμούς μεταβολής της θερμοκρασίας κατά την ψύξη.

6.1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του μοντέλου

Τα θετικά χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι:

- Ότι παρέχει αποτελέσματα για όλες τις παραμέτρους χωρίς να εξειδικεύεται σε ορισμένο υλικό, γιατί εξαρτάται από πειραματικά δεδομένα.
- Μπορεί να δώσει λύσεις για SLS και SLM.
- Μοντελοποιεί συνεχόμενο και παλμικό laser

- Παρέχει ευκολία στην αλλαγή των παραμέτρων για εκτέλεση πολλών προσομοιώσεων.

Τα αρνητικά χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι:

- Η εξάρτηση του από πειραματικά δεδομένα λόγω τις έλλειψης αυτών.
- Το ότι δεν προσομοιώνει φαινόμενα συνεκτικότητας του λιωμένου υλικού
- Το ότι δεν λαμβάνει υπόψη την συρρίκνωση του υλικού λόγω του διαφεύγοντος αέρα που υπάρχει ανάμεσα στη κόνη.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Οι επεκτάσεις που μπορούν να γίνουν στο παρόν μοντέλο είναι οι εξής:

- Βελτίωση της ταχύτητας λύσεως του παλμικού laser. Αυτό μπορεί να γίνει με ορισμό δύο Δt ένα για την διάρκεια της λειτουργίας του laser και ένα για τον υπόλοιπο χρόνο ψύξης. Επίσης θα μπορούσαν να ξαναοριστούν οι μεταβλητές του μοντέλου ως «διχοτομημένες» για να μπορεί να γίνει λύση και σε πολυπύρηνους υπολογιστές.
- Εισαγωγή της λανθάνουσας θερμότητας τήξης στο μοντέλο του SLM και ορισμού ενός C_p για την αλλαγή φάσης σύμφωνα με τον τύπο $C_{app} = \frac{\int c(T)dT+L}{(T_1-T_2)}$, όπου L η λανθάνουσα θερμότητα [22]. Η δυσκολία στην εφαρμογή είναι η έλλειψη δεδομένων κατά την αλλαγή φάσης.
- Το παρόν μοντέλο θα μπορούσε να υποστηρίξει μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων πάνω στους ίδιους κόμβους που θα υπολογίζον παραμένουσες τάσεις κατά την ψύξη.

7

Βιβλιογραφία

- [1] Edson Costa Santos, Masanari Shiomi, Kozo Osakada, Tahar Laoui, Rapid manufacturing of metal components by laser forming, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 1459-1468.
- [2] Gideon N. Levy, Ralf Schindel, J.P. Kruth, Rapid Manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives
- [3] J.P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T.H.C. Childs, Consolidation phenomena in laser and powder-bed based manufacturing
- [4] Detlef Kochan, Chua Chee Kai, Du Zhaohui, Rapid prototyping issues in the 21th century, *Computers in Industry* 39 (1999) 3-10
- [5] D.T. Pham, R.S. Gault, A comparison of rapid prototyping technologies, *Industrial Journal of Machine Tools & Manufacture* 38 (1998) 1257-1287

- [6] Chad Konrad, Yuwen Zhang, Analysis of heat transfer in subcooled metal powder subjected to pulsed laser heating, Thesis presented to the Graduate School University of Missouri-Columbia
- [7] J.P. Kruth, X. Wang, T. Laoui, L. Froyen, Lasers and materials in selective laser sintering
- [8] M. Matsumoto, M. Shiomi, K. Osakada, F. Ade, Finite element analysis of single forming on metallic powder bed in rapid prototyping by selective laser processing, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 61-67
- [9] J.P. Holman, Heat Transfer Ninth Edition, International Edition 2002
- [10] Ξενοφών Κ. Κακάτσιος, Μετάδοση Θερμότητας, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2004
- [11] I. Dong, A. Makradi, S. Ahzi, Y. Remond, Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 700-706.
- [12] T.H.C. Childs, M. Berzins, G.R. Ryder, A. Tontowi, Selective laser sintering of an amorphous polymer-simulations and experiments
- [13] J. Christian Nelson, Samuel Xue, Joel W. Barlow, Joseph J Beaman, Harris L. Marcus, David L. Bourell, Model of the selective laser sintering of bisphenol-A polycarbonate, Ind. Eng. Chem. Res 1993, 32, 2305-2317
- [14] Ε. Γ. Γαλάνη, Εισαγωγή στην πραγματική ανάλυση, Έκδοση 4^η
- [15] www.wolframalpha.com
- [16] Adrian Bejan, Heat transfer, John Wiley & sons 1993

- [17] Γεωρ. Χρ. Μπεργελές, Οι πεπερασμένες διαφορές στη μηχανική των ρευστών, Αθήνα 1983
- [18] www.matweb.com
- [19] Α. Μάμαλης, Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: μη συμβατικές κατεργασίες, Αθήνα 2000
- [20] Γ. Γεωργίου, Χ. Ξενοφώντος, Εισαγωγή στο Matlab, Λευκωσία 2007
- [21] Matlab Help
- [22] M. Salcudean, Z. Abdullah, On the numerical modeling of heat transfer during solidification processes, International Journal For Numerical Methods In Engineering, vol. 25, 445-473(1988)
- [23] John D. Williams, Carl R. Deckard, Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process, Rapid Prototyping Journal Volume 4 Number 2 1998 pp. 90-100

Παράρτημα Α



Ytterbium Lasers for Industrial Applications



Ylia M20
High Energy Pulsed Fiber Laser

Ylia M10 and M20 series of laser products from Quantel are rugged compact pulsed fiber lasers intended for integration into industrial equipment. These lasers offer 10W or 20W average power which is delivered via a flexible output fiber and collimating optics. These high peak power pulses are suitable for applications such as marking, engraving, micromachining, and surface treatments.

Pulse repetition rate and output power can be controlled either by 8-bits TTL signal or USB, providing the user both fast communication and **user-friendly** interfaces at the same time.

Due to excellent pump to signal efficiency in the optical fiber, these powerful air-cooled laser systems are **maintenance free** with **significantly low operational costs**.

The standard systems come with an optical output isolator. Additional beam expander, focusing lens, and red aiming beam are optional.

Quantel – 2bis avenue du Pacifique – BP23 – 91941 – Les Ulis cedex – France
Tel: +33 1 69 29 17 00 – Fax: +33 1 69 29 17 29 – Email: quantel@quantel.fr – www.quantel-laser.com



Typical specifications

Mode of operation	Unit	M10	M20
		Pulsed Typ.	Pulsed Typ.
Average Output Power	W	10	20
Central operating wavelength	μm	1,06	1,06
Pulse energy	mJ	Up to 0.5	Up to 1
Pulse duration @ Full Width Half Max	ns	100	100
Pulse duration @ Full Width 10% Max	ns	160	160
Pulse repetition frequency	kHz	20 -100	20 -100
Output peak power	kW	Up to 5	Up to 10
Output beam shape		Gaussian	Gaussian
Output collimated beam diameter	μm	600	600
Beam Expander Option	mm	7 to 9	7 to 9
Focusing Lens Option	mm	100	100
Power consumption	W	250	250
Electrical supply voltage	VDC	24	24
Operating temperature	°C	5 40	5 40
Storage temperature	°C	-20 55	-20 55
Weight	kg	<10	
Dimensions L x W x H	mm	215 x 286 x 95	

Options

- Red aiming beam
- Beam expander and focusing optics
- 24V_{DC} Power Supply
- Delivery fiber cable lengths on request
- Shorter pulse durations on request



04/07 - Quantel reserves the right to change specifications without prior notice



2bis avenue du Pacifique - Z.A. de Courtaboeuf - BP23 - 91941 Les Ulis Cedex - France
 Tel: +33 1 69 29 17 00 - Fax: +33 1 69 29 17 29 - e-mail: quantel@quantel.fr - www.quantel-laser.com

Παράρτημα Β

NodesCreation.m

```
function [ a,b,c,X,Y,Z,Dx,nodes ] = NodesCreation( Ld,zl,yl,xl )
%Calculates the number of nodes also giving them coordinates, and the partitions
Dx=Ld/7;
a=round(zl/Dx);
b=round(yl/Dx);
c=round(xl/Dx);
nodes=(a+1)*(b+1)*(c+1);
X=zeros(1,nodes);
Y=zeros(1,nodes);
Z=zeros(1,nodes);
for i=1:a+1
    Z(1,(i-1)*(b+1)+1:(b+1)*i)=(i-1)*Dx;
end
for i=1:c
    Z(1,i*(b+1)*(a+1)+1:(i+1)*(b+1)*(a+1))=Z(1,1:(b+1)*(a+1));
end
for i=1:b+1
    Y(1,i)=(i-1)*Dx;
end
for i=1:a
    Y(1,i*(b+1)+1:(b+1)*(i+1))=Y(1,1:b+1);
end
for i=1:c
    Y(1,i*(b+1)*(a+1)+1:(i+1)*(b+1)*(a+1))=Y(1,1:(b+1)*(a+1));
end
for i=1:c+1
    X(1,(i-1)*(b+1)*(a+1)+1:i*(b+1)*(a+1))=(i-1)*Dx;
end
end
```

LaserCourse.m

```
function [ r ] = LaserCourse( a,b,c,iteration )
% Calculates the nodes that merge to the laser's course
r=c*(b+1)*(a+1)+round((b+1)/2)+(fix(iteration/10)+c)*(b+1);
end
```


LaserCourse_pulsed.m

```
function [ r ] = LaserCourse_pulsed( a,b,c,iteration,forlaser )
% Calculates the nodes that merge to the laser's course
r=c*(b+1)*(a+1)+round((b+1)/2)+(fix(iteration/forlaser)+c)*(b+1);
end
```

sls.m

```
%          SLS_MODEL          %
clear all
clc
tic
%          PARAMETRES          %
Tprh=373;    %[K]    % PREHEATING TEMPRATURE
u=0.4;      %[m/s]  % LASER SPEED
t=0.5;      %[s]    % TOTAL PROCESSING TIME
P=20;       %[W]    % LASER POWER
tlaser=0.0375; %[s]  % TIME OF WORKING LASER
Tm=418;     %[K]    % GLASS TRASITION TEMPERATURE
%          INPUT DATA          %
% SLS DATA
Ld=0.0006;  %[m]    % LASER DIAMETER
zl=0.02;    %[m]    % Z-AXIS POWDER BED LENGTH
yl=0.003;   %[m]    % Y-AXIS POWDER BED LENGTH
xl=0.001;   %[m]    % X-AXIS POWDER BED LENGTH
% MATERIAL DATA
R=8.31447;  %[J/molK] % UNIVERSAL GAS CONSTANT
E=171038;   %[J/mol]  % ACTIVATION ENERGY
A=8.84e+16; %[1/s]    % SINTERING PRE-EXPONENTIAL FACTOR
h=2.5;      %[W/m2K] % CONVECTION COEFFICIENT
pmax=1200;  %[kg/m3]  % FULLY DENCE MATERIAL
pmin=600;   %[kg/m3] % POWDER DENSITY
e1=0.75;    %          % SURFACE EMISSIVITY
sigma=5.67e-8; %          % STEFAN-BOLTZMANN CONSTANT
Re=0.04;    %          % REFLECTIVITY OF THE POWDER BED SURFACE
%          START          %
[ a,b,c,X,Y,Z,Dx,nodes ] = NodesCreation( Ld,zl,yl,xl );
disp('starting solution...')
tls=Dx/u;    % TIME OF WORKING LASER PER NODE
Dt=tlsl/10;
in=fix(t/Dt);
Tnew=Tprh*ones(1,nodes);
Told=Tnew;
pnew=pmin*ones(1,nodes);
pold=pnew;
Tpoint1=ones(1,in);
Tpoint2=ones(1,in);
Tpoint3=ones(1,in);
Tpoint4=ones(1,in);
Tpoint5=ones(1,in);
Tpoint6=ones(1,in);
Tpoint7=ones(1,in);
% average laser power
w=Ld/(2*2.146);
alpha=(1-Re)*2*P/(pi*w^2);
```

```

vita=-2/w^2;
ql1=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*-
Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
ql2=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*3*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-
vita)*Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
ql3=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*5*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-
vita)*3*Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
ql4=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*7*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-
vita)*5*Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
% laser power distribution
ql=[ql4
    ql4
    ql3
    ql4
    ql4
    ql3
    ql2
    ql3
    ql4
    ql4
    ql3
    ql2
    ql1
    ql2
    ql3
    ql4
    ql4
    ql3
    ql2
    ql3
    ql4
    ql4
    ql3
    ql4
    ql4];
%points
point1=c*(b+1)*(a+1)+round((b+1)/2)+(c+10)*(b+1);
point2=point1+1;
point3=point1+2;
point4=point1+3;
point5=point1-(b+1)*(a+1);
point6=point1-2*(b+1)*(a+1);
point7=point1-3*(b+1)*(a+1);
dd=fix(tlaser/(Dt));
for interation=1:in
%           HEAT LOSS UPPER SURFACE           %
for i=1:a-1
    for n=c*(b+1)*(a+1)+i*(b+1)+2:c*(b+1)*(a+1)+(i+1)*(b+1)-1
        if Tnew(1,n)>=Tm
            pnew(1,n)=(pold(1,n)+Dt*pmax*A*exp(-E/(R*Tnew(1,n))))/(1+Dt*A*exp(-E/(R*Tnew(1,n))));
        end
        vita=(pmax-pnew(1,n))/pmax;
        ks=0.02504+0.0005*Tnew(1,n);
        ke=ks*(1-0.2*vita-1.73*vita^2);
        if Tnew(1,n)<=Tm
            Cp=-20.56+4.103*Tnew(1,n);
        else

```

```

    Cp=935.34+2.284*Tnew(1,n);
end
aa=ke/(pnew(1,n)*Cp);
qb=e1*sigma*(Tnew(1,n)^4-Tprh^4);
qa=h*(Tnew(1,n)-Tprh);
Tnew(1,n)=aa*Dt/Dx^2*(2*Told(1,n-(b+1)*(a+1))+Told(1,n+1)+Told(1,n-
1)+Told(1,n+b+1)+Told(1,n-b-1)-6*Told(1,n))+Told(1,n)-2*Dt/(Dx*pnew(1,n)*Cp)*(qa+qb);
if Dx^2/(aa*Dt)<6
    disp('error')
    M=Dx^2/(aa*Dt)
end
end
end
%
% LASER UPPER SURFACE %
if interation*Dt<=tlaser
    [ r ] = LaserCourse( a,b,c,interation );
    %laser imprint
    rl=[r+3*(b+1)
        r+2*(b+1)-1
        r+2*(b+1)
        r+2*(b+1)+1
        r+(b+1)-2
        r+(b+1)-1
        r+(b+1)
        r+(b+1)+1
        r+(b+1)+2
        r-3
        r-2
        r-1
        r
        r+1
        r+2
        r+3
        r-(b+1)-2
        r-(b+1)-1
        r-(b+1)
        r-(b+1)+1
        r-(b+1)+2
        r-2*(b+1)-1
        r-2*(b+1)
        r-2*(b+1)+1
        r-3*(b+1)];
    for i=1:25;
        if Tnew(1,rl(i))>=Tm
            pnew(1,rl(i))=(pold(1,rl(i))+Dt*pmax*A*exp(-E/(R*Tnew(1,rl(i)))))/(1+Dt*A*exp(-
            E/(R*Tnew(1,rl(i)))));
        end
        vita=(pmax-pnew(1,rl(i)))/pmax;
        ks=0.02504+0.0005*Tnew(1,rl(i));
        ke=ks*(1-0.2*vita-1.73*vita^2);
        if Tnew(1,rl(i))<=Tm
            Cp=-20.56+4.103*Tnew(1,rl(i));
        else
            Cp=935.34+2.284*Tnew(1,rl(i));
        end
        aa=ke/(pnew(1,rl(i))*Cp);
        qb=e1*sigma*(Tnew(1,rl(i))^4-Tprh^4);
    end
end

```

```

    qa=h*(Tnew(1,rl(i))-Tprh);
    Tnew(1,rl(i))=aa*Dt/Dx^2*(2*Told(1,rl(i)-(b+1)*(a+1))+Told(1,rl(i)+1)+Told(1,rl(i)-
1)+Told(1,rl(i)+b+1)+Told(1,rl(i)-b-1)-6*Told(1,rl(i))+Told(1,rl(i))+2*Dt/(Dx*pnew(1,rl(i))*Cp)*(ql(i)-qb-
qa);
    if Dx^2/(aa*Dt)<6
        disp('error')
        M=Dx^2/(aa*Dt)
    end
end
end
end
%           HEAT CONDACTION INTERNAL NODES           %
for j=1:c-1
    for i=1:a-1
        for n=j*(b+1)*(a+1)+i*(b+1)+2*j*(b+1)*(a+1)+(i+1)*(b+1)-1
            if Tnew(1,n)>=Tm
                pnew(1,n)=(pold(1,n)+Dt*pmax*A*exp(-E/(R*Tnew(1,n)))/(1+Dt*A*exp(-E/(R*Tnew(1,n)))));
            end
            vita=(pmax-pnew(1,n))/pmax;
            ks=0.02504+0.0005*Tnew(1,n);
            ke=ks*(1-0.2*vita-1.73*vita^2);
            if Tnew(1,n)<=Tm
                Cp=-20.56+4.103*Tnew(1,n);
            else
                Cp=935.34+2.284*Tnew(1,n);
            end
            aa=ke/(pnew(1,n)*Cp);
            Tnew(1,n)=aa*Dt/Dx^2*(Told(1,n+(b+1)*(a+1))+Told(1,n-(b+1)*(a+1))+Told(1,n+1)+Told(1,n-
1)+Told(1,n+b+1)+Told(1,n-b-1))+(1-6*aa*Dt/Dx^2)*Told(1,n);
            if Dx^2/(aa*Dt)<6
                disp('error')
                M=Dx^2/(aa*Dt)
            end
        end
    end
end
end
Told=Tnew;
pold=pnew;
Tpoint1(1,interation)=Tnew(1,point1);
Tpoint2(1,interation)=Tnew(1,point2);
Tpoint3(1,interation)=Tnew(1,point3);
Tpoint4(1,interation)=Tnew(1,point4);
Tpoint5(1,interation)=Tnew(1,point5);
Tpoint6(1,interation)=Tnew(1,point6);
Tpoint7(1,interation)=Tnew(1,point7);
if interation==dd
    Tdeigma=Tnew;
end
end
end
Tdeigma2=Tnew;
%           PLOTS           %
% POINTS TEMPRATURE PLOTS
time=[0:Dt:t-Dt];
figure(1)
hold on
plot(time,Tpoint1,'r')
plot(time,Tpoint2,'g')
plot(time,Tpoint3,'b')

```

```

plot(time,Tpoint4,'c')
hold off
figure(2)
hold on
plot(time,Tpoint5,'r')
plot(time,Tpoint6,'g')
plot(time,Tpoint7,'b')
hold off
% NODES PLOT
disp('starting plot of powder bed...')
figure(10)
hold on
plot3(X,Y,Z,'b.')
title('NODES')
hold off
axis equal
axis([0 c*Dx 0 b*Dx 0 a*Dx])
% MANUFACTURED MATERIAL PLOTS
disp('starting plot of manufactured material...')
data=find(pnew>pmin);
[g,h]=size(data);
figure(11)
hold on
for i=1:h
n=data(i);
plot3(X(1,n),Y(1,n),Z(1,n))
title('NODES')
end
hold off
axis equal
axis([0 c*Dx 0 b*Dx 0 a*Dx])
figure(12)
hold on
for i=1:h
n=data(i);
plot(X(1,n),Y(1,n),'-ro')
title('NODES')
end
hold off
% PLEGMA PLOT
Elem=ones(a*b,4);
s=1;
for j=1:a
for i=1:b
Elem(s,:)=i+(j-1)*(b+1) i+1+(j-1)*(b+1) (b+1)+i+1+(j-1)*(b+1) (b+1)+i+(j-1)*(b+1)];
s=s+1;
end
end
% CONTOUR PLOT OF TEMP_LAYOUT
Telem=ones(1,a*b);
surf=c*(a+1)*(b+1);
s=1;
for j=1:a
for i=1:b
Telem(1,s)=0.25*(Tdeigma(1,surf+i+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,surf+i+1+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,surf+(b+1)+i+1+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,surf+(b+1)+i+(j-1)*(b+1)));
s=s+1;

```

```

end
end
figure(13)
hold on
for i=1:a*b
    fill(Y([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Z([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Telem(1,i))
    title ('Contour Plot Temp')
end
hold off
% CONTOUR PLOT OF TEMP_INTERSECTION
Elem2=ones(a*b,4);
st=round((b+1)/2);
s=1;
for j=1:a
    for i=1:c
        Elem2(s,:)=st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1) st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-1)*(b+1) st+(i-
1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-1)*(b+1)+(a+1)*(b+1) st+i*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1)];
        s=s+1;
    end
end
Telem2=ones(1,a*c);
s=1;
for j=1:a
    for i=1:c
        Telem2(1,s)=0.25*(Tdeigma(1,st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,st+(i-
1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-
1)*(b+1)+(a+1)*(b+1))+Tdeigma(1,st+i*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1)));
        s=s+1;
    end
end
figure(14)
hold on
for i=1:a*c
    fill(X([Elem2(i,:),Elem2(i,1)]),Z([Elem2(i,:),Elem2(i,1)]),Telem2(1,i))
    title ('Contour Plot Temp')
end
hold off
% CONTOUR PLOT OF TEMP_LAYOUT2
Telem=ones(1,a*b);
surf=c*(a+1)*(b+1);
s=1;
for j=1:a
    for i=1:b
        Telem(1,s)=0.25*(Tdeigma2(1,surf+i+(j-1)*(b+1))+Tdeigma2(1,surf+i+1+(j-
1)*(b+1))+Tdeigma2(1,surf+(b+1)+i+1+(j-1)*(b+1))+Tdeigma2(1,surf+(b+1)+i+(j-1)*(b+1)));
        s=s+1;
    end
end
figure(15)
hold on
for i=1:a*b
    fill(Y([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Z([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Telem(1,i))
    title ('Contour Plot Temp2')
end
hold off
%COOLING
[xx,ff]=size(time);

```

```
f=ff-1;
da1=find(Tpoint1==max(Tpoint1));
rithmos1=ones(1,f);
for i=da1:f
    rithmos1(1,i)=(Tpoint1(1,i+1)-Tpoint1(1,i))/Dt;
end
da2=find(Tpoint2==max(Tpoint2));
rithmos2=ones(1,f);
for i=da2:f
    rithmos2(1,i)=(Tpoint2(1,i+1)-Tpoint2(1,i))/Dt;
end
da3=find(Tpoint3==max(Tpoint3));
rithmos3=ones(1,f);
for i=da3:f
    rithmos3(1,i)=(Tpoint3(1,i+1)-Tpoint3(1,i))/Dt;
end
da4=find(Tpoint4==max(Tpoint4));
rithmos4=ones(1,f);
for i=da4:f
    rithmos4(1,i)=(Tpoint4(1,i+1)-Tpoint4(1,i))/Dt;
end
da5=find(Tpoint5==max(Tpoint5));
rithmos5=ones(1,f);
for i=da5:f
    rithmos5(1,i)=(Tpoint5(1,i+1)-Tpoint5(1,i))/Dt;
end
da6=find(Tpoint6==max(Tpoint6));
rithmos6=ones(1,f);
for i=da6:f
    rithmos6(1,i)=(Tpoint6(1,i+1)-Tpoint6(1,i))/Dt;
end
da7=find(Tpoint7==max(Tpoint7));
rithmos7=ones(1,f);
for i=da7:f
    rithmos7(1,i)=(Tpoint7(1,i+1)-Tpoint7(1,i))/Dt;
end
figure(9)
hold on
plot(time(1,1:f),rithmos1,'r')
plot(time(1,1:f),rithmos2,'g')
plot(time(1,1:f),rithmos3,'b')
plot(time(1,1:f),rithmos4,'c')
hold off
figure(10)
hold on
plot(time(1,1:f),rithmos5,'r')
plot(time(1,1:f),rithmos6,'g')
plot(time(1,1:f),rithmos7,'b')
hold off
%                               END                               %
toc
```

slm.m

```

%          SLM_MODEL          %
clear all
clc
tic
%          PARAMETRES          %
Tprh=298;    %[K]    % PREHEATING TEMPRATURE
u=0.07;      %[m/s]  % LASER SPEED
t=0.5;       %[s]    % TOTAL PROCESSING TIME
P=20;        %[W]    % LASER POWER
tlaser=0.2143; %[s]  % TIME OF WORKING LASER
Tm=1443;     %[K]    % MELTING TEMPERATURE
%          INPUT DATA          %
% SLS DATA
Ld=0.0006;   %[m]    % LASER DIAMETER
zl=0.02;     %[m]    % Z-AXIS POWDER BED LENGTH
yl=0.003;    %[m]    % Y-AXIS POWDER BED LENGTH
xl=0.001;    %[m]    % X-AXIS POWDER BED LENGTH
% MATERIAL DATA
Cp=444;      %[J/kgK] % SPECIFIC HEAT
kd=11.9;     %[W/mK] % HEAT CONDUCTIVITY DENSE
kp=1.67;     %[W/mK] % HEAT CONDUCTIVITY POWDER
h=2.5;       %[W/m2K] % CONVECTION COEFFICIENT
pmax=8200;   %[kg/m3] % FULLY DENCE MATERIAL
pmin=4100;   %[kg/m3] % POWDER DENSITY
e1=0.19;     % SURFACE EMISSIVITY
sigma=5.67e-8; % STEFAN-BOLTZMANN CONSTANT
Re=0.413;    % REFLECTIVITY OF THE POWDER BED SURFACE
%          START          %
[ a,b,c,X,Y,Z,Dx,nodes ] = NodesCreation( Ld,zl,yl,xl );
disp('starting solution...')
tIs=Dx/u;     % TIME OF WORKING LASER PER NODE
Dt=tIs/10;
in=fix(t/Dt);
Tnew=Tprh*ones(1,nodes);
Told=Tnew;
p=pmin*ones(1,nodes);
ke=kp*ones(1,nodes);
Tpoint1=ones(1,in);
Tpoint2=ones(1,in);
Tpoint3=ones(1,in);
Tpoint4=ones(1,in);
Tpoint5=ones(1,in);
Tpoint6=ones(1,in);
Tpoint7=ones(1,in);
Tpoint8=ones(1,in);
Tpoint9=ones(1,in);
Tpoint10=ones(1,in);
% average laser power
w=Ld/(2*2.146);
alpha=(1-Re)*2*P/(pi*w^2);
vita=-2/w^2;
q11=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*-
Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
q12=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*3*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-

```



```

vita)*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))/Dx;
    q13=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*5*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-
vita)*3*Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
    q14=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*7*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-
vita)*5*Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
% laser power distribution
    ql=[q14
        q14
        q13
        q14
        q14
        q13
        q12
        q13
        q14
        q14
        q13
        q12
        q11
        q12
        q13
        q14
        q14
        q13
        q12
        q13
        q14
        q14
        q13
        q12
        q13
        q14
        q14
        q13
        q14];
%points
point1=c*(b+1)*(a+1)+round((b+1)/2)+(c+10)*(b+1);
point2=point1+1;
point3=point1+2;
point4=point1+3;
point5=point1+4;
point6=point1+5;
point7=point1-(b+1)*(a+1);
point8=point1-2*(b+1)*(a+1);
point9=point1-3*(b+1)*(a+1);
point10=point1-4*(b+1)*(a+1);
dd=fix(tlaser/(Dt));
for iteration=1:in
%           HEAT LOSS UPPER SURFACE           %
for i=1:a-1
    for n=c*(b+1)*(a+1)+i*(b+1)+2:c*(b+1)*(a+1)+(i+1)*(b+1)-1
        if Tnew(1,n)>=Tm
            p(1,n)=pmax;
            ke(1,n)=kd;
        end
        aa=ke(1,n)/(p(1,n)*Cp);
        qb=e1*sigma*(Tnew(1,n)^4-Tprh^4);
        qa=h*(Tnew(1,n)-Tprh);
        Tnew(1,n)=aa*Dt/Dx^2*(2*Told(1,n-(b+1)*(a+1))+Told(1,n+1)+Told(1,n-
1)+Told(1,n+b+1)+Told(1,n-b-1)-6*Told(1,n))+Told(1,n)-2*Dt/(Dx*p(1,n)*Cp)*(qa+qb);
        if Dx^2/(aa*Dt)<6

```

```

disp('error')
M=Dx^2/(aa*Dt)
end
end
end
% LASER UPPER SURFACE %
if interation*Dt<=tlaser
[r ] = LaserCourse( a,b,c,interation );
%laser imprint
rl=[r+3*(b+1)
r+2*(b+1)-1
r+2*(b+1)
r+2*(b+1)+1
r+(b+1)-2
r+(b+1)-1
r+(b+1)
r+(b+1)+1
r+(b+1)+2
r-3
r-2
r-1
r
r+1
r+2
r+3
r-(b+1)-2
r-(b+1)-1
r-(b+1)
r-(b+1)+1
r-(b+1)+2
r-2*(b+1)-1
r-2*(b+1)
r-2*(b+1)+1
r-3*(b+1)];
for i=1:25;
if Tnew(1,n)>=Tm
p(1,n)=pmax;
ke(1,n)=kd;
end
aa=ke(1,n)/(p(1,n)*Cp);
qb=e1*sigma*(Tnew(1,rl(i))^4-Tprh^4);
qa=h*(Tnew(1,rl(i))-Tprh);
Tnew(1,rl(i))=aa*Dt/Dx^2*(2*Told(1,rl(i)-(b+1)*(a+1))+Told(1,rl(i)+1)+Told(1,rl(i)-1)+Told(1,rl(i)+b+1)+Told(1,rl(i)-b-1)-6*Told(1,rl(i)))+Told(1,rl(i))+2*Dt/(Dx*p(1,n)*Cp)*(ql(i)-qb-qa);
if Dx^2/(aa*Dt)<6
disp('error')
M=Dx^2/(aa*Dt)
end
end
end
% HEAT CONDACTION INTERNAL NODES %
for j=1:c-1
for i=1:a-1
for n=j*(b+1)*(a+1)+i*(b+1)+2;j*(b+1)*(a+1)+(i+1)*(b+1)-1
if Tnew(1,n)>=Tm
p(1,n)=pmax;
ke(1,n)=kd;

```

```

    end
    aa=ke(1,n)/(p(1,n)*Cp);
    Tnew(1,n)=aa*Dt/Dx^2*(Told(1,n+(b+1)*(a+1))+Told(1,n-(b+1)*(a+1))+Told(1,n+1)+Told(1,n-
1)+Told(1,n+b+1)+Told(1,n-b-1))+(1-6*aa*Dt/Dx^2)*Told(1,n);
    if Dx^2/(aa*Dt)<6
        disp('error')
        M=Dx^2/(aa*Dt)
    end
    end
end
end
Told=Tnew;
Tpoint1(1,interation)=Tnew(1,point1);
Tpoint2(1,interation)=Tnew(1,point2);
Tpoint3(1,interation)=Tnew(1,point3);
Tpoint4(1,interation)=Tnew(1,point4);
Tpoint5(1,interation)=Tnew(1,point5);
Tpoint6(1,interation)=Tnew(1,point6);
Tpoint7(1,interation)=Tnew(1,point7);
Tpoint8(1,interation)=Tnew(1,point8);
Tpoint9(1,interation)=Tnew(1,point9);
Tpoint10(1,interation)=Tnew(1,point10);
if interation==dd
    Tdeigma=Tnew;
end
end
Tdeigma2=Tnew;
%          PLOTS          %
% POINTS TEMPRATURE PLOTS
time=[0:Dt:t-Dt];
figure(1)
hold on
plot(time,Tpoint1,'r')
plot(time,Tpoint2,'g')
plot(time,Tpoint3,'b')
plot(time,Tpoint4,'c')
hold off
figure(2)
hold on
plot(time,Tpoint5,'r')
plot(time,Tpoint6,'g')
plot(time,Tpoint7,'b')
hold off
% NODES PLOT
disp('starting plot of powder bed...')
figure(3)
hold on
plot3(X,Y,Z,'b.')
title('NODES')
hold off
axis equal
axis([0 c*Dx 0 b*Dx 0 a*Dx])
% MANUFACTURED MATERIAL PLOTS
disp('starting plot of manufactured material...')
data=find(p>pmin);
[g,h]=size(data);
figure(4)

```

```

hold on
for i=1:h
n=data(i);
plot3(X(1,n),Y(1,n),Z(1,n))
title('NODES')
end
hold off
axis equal
axis([0 c*Dx 0 b*Dx 0 a*Dx])
figure(5)
hold on
for i=1:h
n=data(i);
plot(X(1,n),Y(1,n),'-ro')
title('NODES')
end
hold off
% PLEGMA PLOT
Elem=ones(a*b,4);
s=1;
for j=1:a
for i=1:b
Elem(s,:)=i+(j-1)*(b+1) i+1+(j-1)*(b+1) (b+1)+i+1+(j-1)*(b+1) (b+1)+i+(j-1)*(b+1)];
s=s+1;
end
end
% CONTOUR PLOT OF TEMP_LAYOUT
Telem=ones(1,a*b);
surf=c*(a+1)*(b+1);
s=1;
for j=1:a
for i=1:b
Telem(1,s)=0.25*(Tdeigma(1,surf+i+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,surf+i+1+(j-
1)*(b+1))+Tdeigma(1,surf+(b+1)+i+1+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,surf+(b+1)+i+(j-1)*(b+1)));
s=s+1;
end
end
figure(6)
hold on
for i=1:a*b
fill(Y([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Z([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Telem(1,i))
title('Contour Plot Temp')
end
hold off
% CONTOUR PLOT OF TEMP_INTERSECTION
Elem2=ones(a*b,4);
st=round((b+1)/2);
s=1;
for j=1:a
for i=1:c
Elem2(s,:)=st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1) st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-1)*(b+1) st+(i-
1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-1)*(b+1)+(a+1)*(b+1) st+i*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1)];
s=s+1;
end
end
Telem2=ones(1,a*c);
s=1;

```

```

for j=1:a
    for i=1:c
        Telem2(1,s)=0.25*(Tdeigma(1,st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-1)*(b+1)+(a+1)*(b+1))+Tdeigma(1,st+i*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1)));
        s=s+1;
    end
end
figure(7)
hold on
for i=1:a*c
    fill(X([Elem2(i,:),Elem2(i,1)]),Z([Elem2(i,:),Elem2(i,1)]),Telem2(1,i))
    title ('Contour Plot Temp')
end
hold off
% CONTOUR PLOT OF TEMP_LAYOUT2
Telem=ones(1,a*b);
surf=c*(a+1)*(b+1);
s=1;
for j=1:a
    for i=1:b
        Telem(1,s)=0.25*(Tdeigma2(1,surf+i+(j-1)*(b+1))+Tdeigma2(1,surf+i+1+(j-1)*(b+1))+Tdeigma2(1,surf+(b+1)+i+1+(j-1)*(b+1))+Tdeigma2(1,surf+(b+1)+i+(j-1)*(b+1)));
        s=s+1;
    end
end
figure(8)
hold on
for i=1:a*b
    fill(Y([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Z([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Telem(1,i))
    title ('Contour Plot Temp2')
end
hold off
%COOLING
[xx,ff]=size(time);
f=ff-1;
da1=find(Tpoint1==max(Tpoint1));
rithmos1=ones(1,f);
for i=da1:f
    rithmos1(1,i)=(Tpoint1(1,i+1)-Tpoint1(1,i))/Dt;
end
da2=find(Tpoint2==max(Tpoint2));
rithmos2=ones(1,f);
for i=da2:f
    rithmos2(1,i)=(Tpoint2(1,i+1)-Tpoint2(1,i))/Dt;
end
da3=find(Tpoint3==max(Tpoint3));
rithmos3=ones(1,f);
for i=da3:f
    rithmos3(1,i)=(Tpoint3(1,i+1)-Tpoint3(1,i))/Dt;
end
da4=find(Tpoint4==max(Tpoint4));
rithmos4=ones(1,f);
for i=da4:f
    rithmos4(1,i)=(Tpoint4(1,i+1)-Tpoint4(1,i))/Dt;
end
da5=find(Tpoint5==max(Tpoint5));

```

```

rithmos5=ones(1,f);
for i=da5:f
    rithmos5(1,i)=(Tpoint5(1,i+1)-Tpoint5(1,i))/Dt;
end
da6=find(Tpoint6==max(Tpoint6));
rithmos6=ones(1,f);
for i=da6:f
    rithmos6(1,i)=(Tpoint6(1,i+1)-Tpoint6(1,i))/Dt;
end
da7=find(Tpoint7==max(Tpoint7));
rithmos7=ones(1,f);
for i=da7:f
    rithmos7(1,i)=(Tpoint7(1,i+1)-Tpoint7(1,i))/Dt;
end
figure(9)
hold on
plot(time(1,1:f),rithmos1,'r')
plot(time(1,1:f),rithmos2,'g')
plot(time(1,1:f),rithmos3,'b')
plot(time(1,1:f),rithmos4,'c')
hold off
figure(10)
hold on
plot(time(1,1:f),rithmos5,'r')
plot(time(1,1:f),rithmos6,'g')
plot(time(1,1:f),rithmos7,'b')
hold off
%                               END                               %
toc
    
```

sls_pulsed.m

```

%                               SLS_MODEL_PULSED                               %
clear all
clc
tic
%                               PARAMETRES                               %
Tprh=373;           %[K]   % PREHEATING TEMPRATURE
u=0.08;            %[m/s] % LASER SPEED
t=0.2;             %[s]   % TOTAL PROCESSING TIME
P=20;              %[W]   % LASER POWER
tlaser=0.09375;   %[s]   % TIME OF WORKING LASER
Tm=418;           %[K]   % GLASS TRASITION TEMPERATURE
tp=0.00001;       %[sec] % fpulse=100kHz
tpulse=180*10^(-9); %[sec] % pulse duration
%                               INPUT DATA                               %
% SLS DATA
Ld=0.0006;         %[m]   % LASER DIAMETER
zl=0.01;           %[m]   % Z-AXIS POWDER BED LENGTH
yl=0.003;          %[m]   % Y-AXIS POWDER BED LENGTH
xl=0.001;          %[m]   % X-AXIS POWDER BED LENGTH
% MATERIAL DATA
R=8.31447;         %[J/molK] % UNIVERSAL GAS CONSTANT
E=171038;          %[J/mol] % ACTIVATION ENERGY
A=8.84e+16;        %[1/s]  % SINTERING PRE-EXPONENTIAL FACTOR
h=2.5;            %[W/m2K] % CONVECTION COEFFICIENT
    
```

```
pmax=1200;    %[kg/m3]  % FULLY DENCE MATERIAL
pmin=600;    %[kg/m3]  % POWDER DENSITY
e1=0.8;      % SURFACE EMISSIVITY
sigma=5.67e-8; % STEFAN-BOLTZMANN CONSTANT
Re=0.04;     % REFLECTIVITY OF THE POWDER BED SURFACE
%           START           %
[ a,b,c,X,Y,Z,Dx,nodes ] = NodesCreation( Ld,zl,yl,xl );
disp('starting solution...')
tls=Dx/u;     % TIME OF WORKING LASER PER NODE
Dt=tpulse;
forlaser=tls/Dt;
in=fix(t/Dt);
Tnew=Tprh*ones(1,nodes);
Told=Tnew;
pnew=pmin*ones(1,nodes);
pold=pnew;
Tpoint1=ones(1,in);
Tpoint2=ones(1,in);
Tpoint3=ones(1,in);
Tpoint4=ones(1,in);
Tpoint5=ones(1,in);
Tpoint6=ones(1,in);
Tpoint7=ones(1,in);
% average laser power
w=Ld/(2*2.146);
alpha=(1-Re)*2*pi*w^2;
vita=-2/w^2;
q11=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*-
Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
q12=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*3*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-
vita)*Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
q13=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*5*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-
vita)*3*Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
q14=(sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-vita)*7*Dx/2)/(2*sqrt(-vita))-sqrt(pi)*alpha*erf(sqrt(-
vita)*5*Dx/2)/(2*sqrt(-vita)))/Dx;
% laser power distribution
ql=[ql4
ql4
ql3
ql4
ql4
ql3
ql2
ql3
ql4
ql4
ql3
ql2
ql1
ql2
ql3
ql4
ql4
ql3
ql2
ql3
ql4
```

```

    ql4
    ql3
    ql4
    ql4];
%points
point1=c*(b+1)*(a+1)+round((b+1)/2)+(c+10)*(b+1);
point2=point1+1;
point3=point1+2;
point4=point1+3;
point5=point1-(b+1)*(a+1);
point6=point1-2*(b+1)*(a+1);
point7=point1-3*(b+1)*(a+1);
dd=fix(tlaser/(Dt));
pulse=round(tp/Dt);
for interation=1:in
%           HEAT LOSS UPPER SURFACE           %
for i=1:a-1
    for n=c*(b+1)*(a+1)+i*(b+1)+2:c*(b+1)*(a+1)+(i+1)*(b+1)-1
        if Tnew(1,n)>=Tm
            pnew(1,n)=(pold(1,n)+Dt*pmax*A*exp(-E/(R*Tnew(1,n))))/(1+Dt*A*exp(-E/(R*Tnew(1,n))));
        end
        vita=(pmax-pnew(1,n))/pmax;
        ks=0.02504+0.0005*Tnew(1,n);
        ke=ks*(1-0.2*vita-1.73*vita^2);
        if Tnew(1,n)<=Tm
            Cp=-20.56+4.103*Tnew(1,n);
        else
            Cp=935.34+2.284*Tnew(1,n);
        end
        aa=ke/(pnew(1,n)*Cp);
        qb=e1*sigma*(Tnew(1,n)^4-Tprh^4);
        qa=h*(Tnew(1,n)-Tprh);
        Tnew(1,n)=aa*Dt/Dx^2*(2*Told(1,n-(b+1)*(a+1))+Told(1,n+1)+Told(1,n-
1)+Told(1,n+b+1)+Told(1,n-b-1)-6*Told(1,n))+Told(1,n)-2*Dt/(Dx*pnew(1,n)*Cp)*(qa+qb);
    end
end
%           LASER UPPER SURFACE           %
if (interation*Dt<=tlaser) && (mod(interation,pulse)==0)
    [ r ] = LaserCourse_pulsed( a,b,c,interation,forlaser );
    %laser imprint
    rl=[r+3*(b+1)
        r+2*(b+1)-1
        r+2*(b+1)
        r+2*(b+1)+1
        r+(b+1)-2
        r+(b+1)-1
        r+(b+1)
        r+(b+1)+1
        r+(b+1)+2
        r-3
        r-2
        r-1
        r
        r+1
        r+2
        r+3
        r-(b+1)-2

```



```

r-(b+1)-1
r-(b+1)
r-(b+1)+1
r-(b+1)+2
r-2*(b+1)-1
r-2*(b+1)
r-2*(b+1)+1
r-3*(b+1)];
for i=1:25;
    if Tnew(1,rl(i))>=Tm
        pnew(1,rl(i))=(pold(1,rl(i))+Dt*pmax*A*exp(-E/(R*Tnew(1,rl(i)))))/(1+Dt*A*exp(-
E/(R*Tnew(1,rl(i)))));
    end
    vita=(pmax-pnew(1,rl(i)))/pmax;
    ks=0.02504+0.0005*Tnew(1,rl(i));
    ke=ks*(1-0.2*vita-1.73*vita^2);
    if Tnew(1,rl(i))<=Tm
        Cp=-20.56+4.103*Tnew(1,rl(i));
    else
        Cp=935.34+2.284*Tnew(1,rl(i));
    end
    aa=ke/(pnew(1,rl(i))*Cp);
    qb=e1*sigma*(Tnew(1,rl(i))^4-Tprh^4);
    qa=h*(Tnew(1,rl(i))-Tprh);
    Tnew(1,rl(i))=aa*Dt/Dx^2*(2*Told(1,rl(i)-(b+1)*(a+1))+Told(1,rl(i)+1)+Told(1,rl(i)-
1)+Told(1,rl(i)+b+1)+Told(1,rl(i)-b-1)-6*Told(1,rl(i))+Told(1,rl(i))+2*Dt/(Dx*pnew(1,rl(i))*Cp)*(ql(i)-qb-
qa);
    end
end
%           HEAT CONDACTION INTERNAL NODES           %
for j=1:c-1
    for i=1:a-1
        for n=j*(b+1)*(a+1)+i*(b+1)+2:j*(b+1)*(a+1)+(i+1)*(b+1)-1
            if Tnew(1,n)>=Tm
                pnew(1,n)=(pold(1,n)+Dt*pmax*A*exp(-E/(R*Tnew(1,n))))/(1+Dt*A*exp(-E/(R*Tnew(1,n)))));
            end
            vita=(pmax-pnew(1,n))/pmax;
            ks=0.02504+0.0005*Tnew(1,n);
            ke=ks*(1-0.2*vita-1.73*vita^2);
            if Tnew(1,n)<=Tm
                Cp=-20.56+4.103*Tnew(1,n);
            else
                Cp=935.34+2.284*Tnew(1,n);
            end
            aa=ke/(pnew(1,n)*Cp);
            Tnew(1,n)=aa*Dt/Dx^2*(Told(1,n+(b+1)*(a+1))+Told(1,n-(b+1)*(a+1))+Told(1,n+1)+Told(1,n-
1)+Told(1,n+b+1)+Told(1,n-b-1))+1-6*aa*Dt/Dx^2)*Told(1,n);
        end
    end
end
Told=Tnew;
pold=pnew;
Tpoint1(1,iteration)=Tnew(1,point1);
Tpoint2(1,iteration)=Tnew(1,point2);
Tpoint3(1,iteration)=Tnew(1,point3);
Tpoint4(1,iteration)=Tnew(1,point4);
Tpoint5(1,iteration)=Tnew(1,point5);

```

```

Tpoint6(1,iteration)=Tnew(1,point6);
Tpoint7(1,iteration)=Tnew(1,point7);
if iteration==dd
    Tdeigma=Tnew;
end
end
Tdeigma2=Tnew;
%          PLOTS          %
% POINTS TEMPRATURE PLOTS
time=[0:Dt:t-Dt];
figure(1)
hold on
plot(time,Tpoint1,'r')
plot(time,Tpoint2,'g')
plot(time,Tpoint3,'b')
plot(time,Tpoint4,'c')
hold off
figure(2)
hold on
plot(time,Tpoint5,'r')
plot(time,Tpoint6,'g')
plot(time,Tpoint7,'b')
hold off
% NODES PLOT
disp('starting plot of powder bed...')
figure(3)
hold on
plot3(X,Y,Z,'b.')
title('NODES')
hold off
axis equal
axis([0 c*Dx 0 b*Dx 0 a*Dx])
% MANUFACTURED MATERIAL PLOTS
disp('starting plot of manufactured material...')
data=find(pnew>pmin);
[g,h]=size(data);
figure(4)
hold on
for i=1:h
    n=data(i);
    plot3(X(1,n),Y(1,n),Z(1,n))
    title('NODES')
end
hold off
axis equal
axis([0 c*Dx 0 b*Dx 0 a*Dx])
figure(5)
hold on
for i=1:h
    n=data(i);
    plot(X(1,n),Y(1,n),'-ro')
    title('NODES')
end
hold off
% PLEGMA PLOT
Elem=ones(a*b,4);
s=1;

```

```

for j=1:a
    for i=1:b
        Elem(s,:)=i+(j-1)*(b+1) i+1+(j-1)*(b+1) (b+1)+i+1+(j-1)*(b+1) (b+1)+i+(j-1)*(b+1)];
        s=s+1;
    end
end
% CONTOUR PLOT OF TEMP_LAYOUT
Telem=ones(1,a*b);
surf=c*(a+1)*(b+1);
s=1;
for j=1:a
    for i=1:b
        Telem(1,s)=0.25*(Tdeigma(1,surf+i+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,surf+i+1+(j-
1)*(b+1))+Tdeigma(1,surf+(b+1)+i+1+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,surf+(b+1)+i+(j-1)*(b+1)));
        s=s+1;
    end
end
figure(6)
hold on
for i=1:a*b
    fill(Y([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Z([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Telem(1,i))
    title ('Contour Plot Temp')
end
hold off
% CONTOUR PLOT OF TEMP_INTERSECTION
Elem2=ones(a*b,4);
st=round((b+1)/2);
s=1;
for j=1:a
    for i=1:c
        Elem2(s,:)=st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1) st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-1)*(b+1) st+(i-
1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-1)*(b+1)+(a+1)*(b+1) st+i*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1)];
        s=s+1;
    end
end
Telem2=ones(1,a*c);
s=1;
for j=1:a
    for i=1:c
        Telem2(1,s)=0.25*(Tdeigma(1,st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,st+(i-
1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-1)*(b+1))+Tdeigma(1,st+(i-1)*(a+1)*(b+1)+(b+1)+(j-
1)*(b+1)+(a+1)*(b+1))+Tdeigma(1,st+i*(a+1)*(b+1)+(j-1)*(b+1)));
        s=s+1;
    end
end
figure(7)
hold on
for i=1:a*c
    fill(X([Elem2(i,:),Elem2(i,1)]),Z([Elem2(i,:),Elem2(i,1)]),Telem2(1,i))
    title ('Contour Plot Temp')
end
hold off
% CONTOUR PLOT OF TEMP_LAYOUT2
Telem=ones(1,a*b);
surf=c*(a+1)*(b+1);
s=1;
for j=1:a

```

```

for i=1:b
    Telem(1,s)=0.25*(Tdeigma2(1,surf+i+(j-1)*(b+1))+Tdeigma2(1,surf+i+1+(j-1)*(b+1))+Tdeigma2(1,surf+(b+1)+i+1+(j-1)*(b+1))+Tdeigma2(1,surf+(b+1)+i+(j-1)*(b+1)));
    s=s+1;
end
end
figure(8)
hold on
for i=1:a*b
    fill(Y([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Z([Elem(i,:),Elem(i,1)]),Telem(1,i))
    title ('Contour Plot Temp2')
end
hold off
%Cooling
[xx,ff]=size(time);
f=ff-1;
da1=find(Tpoint1==max(Tpoint1));
rithmos1=ones(1,f);
for i=da1:f
    rithmos1(1,i)=(Tpoint1(1,i+1)-Tpoint1(1,i))/Dt;
end
da2=find(Tpoint2==max(Tpoint2));
rithmos2=ones(1,f);
for i=da2:f
    rithmos2(1,i)=(Tpoint2(1,i+1)-Tpoint2(1,i))/Dt;
end
da3=find(Tpoint3==max(Tpoint3));
rithmos3=ones(1,f);
for i=da3:f
    rithmos3(1,i)=(Tpoint3(1,i+1)-Tpoint3(1,i))/Dt;
end
da4=find(Tpoint4==max(Tpoint4));
rithmos4=ones(1,f);
for i=da4:f
    rithmos4(1,i)=(Tpoint4(1,i+1)-Tpoint4(1,i))/Dt;
end
da5=find(Tpoint5==max(Tpoint5));
rithmos5=ones(1,f);
for i=da5:f
    rithmos5(1,i)=(Tpoint5(1,i+1)-Tpoint5(1,i))/Dt;
end
da6=find(Tpoint6==max(Tpoint6));
rithmos6=ones(1,f);
for i=da6:f
    rithmos6(1,i)=(Tpoint6(1,i+1)-Tpoint6(1,i))/Dt;
end
da7=find(Tpoint7==max(Tpoint7));
rithmos7=ones(1,f);
for i=da7:f
    rithmos7(1,i)=(Tpoint7(1,i+1)-Tpoint7(1,i))/Dt;
end
figure(9)
hold on
plot(time(1,1:f),rithmos1,'r')
plot(time(1,1:f),rithmos2,'g')
plot(time(1,1:f),rithmos3,'b')
plot(time(1,1:f),rithmos4,'c')

```

```
hold off
figure(10)
hold on
plot(time(1,1:f),rithmos5,'r')
plot(time(1,1:f),rithmos6,'g')
plot(time(1,1:f),rithmos7,'b')
hold off
%           END           %
toc
```