

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ LASER
ΣΕ ΠΛΑΚΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ
ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ANSYS Fluent

Υπό

ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΒΕΝΤΟΥΡΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2014

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 13213/1
Ημερ. Εισ.: 11-11-2014
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ
2014
ΒΕΝ

© 2014 Απόστολος Βεντούρας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαιδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Άννα Ζερβάκη
Ε.ΔΙ.Π., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αυτή η εργασία είναι το αποτέλεσμα μια μακρόχρονης προσπάθειας. Οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας μου, Καθηγητή κ. Νικόλαο Πελεκάση για την πολύτιμη καθοδήγηση του όλου αυτόν τον καιρό, καθώς και για την υπομονή του και την συνεργασία μας κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, τον Καθηγητή κκ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο και την κ. Άννα Ζερβάκη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας και τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες στην κ. Άννα Ζερβάκη για τις υπερπολύτιμες συμβουλές της και την βοήθεια της σε μια κρίσιμη προσωπική στιγμή κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη διδακτορική φοιτήτρια Αλκμήνη Λύτρα για τη βοήθεια της κατά τη συγγραφή της εργασίας καθώς και σε άλλα μικρότερα αλλά εξίσου σημαντικά θέματα.

Είμαι απείρως ευγνώμων στους γονείς μου, Γιώργο και Φρόσω, και στην αδελφή μου Μάγδα για την αγάπη, τη στήριξη τους και τη συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια. Τους αγαπώ και τους ευχαριστώ που με στηρίζουν σε ότι κάνω. Επίσης ευχαριστώ την γιαγιά μου Φαλνταΐνα, τις θείες και τα ξαδέρφια μου για την ηθική συμπαράσταση τους.

Η εργασία αυτή σηματοδοτεί το κλείσιμο ενός μεγάλου και πολύ σημαντικού κεφαλαίου της ζωής μου. Τα χρόνια που πέρασαν στο Βόλο ήταν τα καλύτερα έως τώρα, και για αυτό οφείλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου. Ένα τεράστιο ευχαριστώ επομένως στους Γιώργο, Γιάννη, Στέφανο, Άνθεμη, Θανάση και Αντρέα που με δέχονται όπως είμαι και με τους οποίους μοιραστήκαμε αξέχαστες εμπειρίες, και θα μοιραστούμε ακόμα περισσότερες.

Αφιερώνω την εργασία μου στις δύο οικογένειες μου: στους γονείς και την αδελφή μου, και στους φίλους μου.

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ LASER ΣΕ
ΠΛΑΚΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ
ANSYS Fluent**

ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ ΒΕΝΤΟΥΡΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2014

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης, Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι συγκολλήσεις Laser, αν και σχετικά νέα μέθοδος συγκόλλησης, χρησιμοποιείται κατά κόρον σε πολλές πρακτικές εφαρμογές και επομένως πρέπει να υπάρχει πλήρης κατανόηση της κατεργασίας. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να προσομοιωθεί η μεταφορά θερμότητας κατά τη σημειακή συγκόλληση Laser σε τρία βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, και κατ' επέκταση να αναπαρασταθεί η γεωμετρία της συγκόλλησης μέσα από την αναπαράσταση της λίμνης συγκόλλησης. Ταυτόχρονα, γίνεται μελέτη του τρόπου με τον οποίο επιδρούν στην γεωμετρία της συγκόλλησης οι αλλαγές των παραμέτρων της συγκόλλησης. Για την ανάλυση αυτή, χρησιμοποιήθηκε ένα μεταβατικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας ως εφαρμογή των εξισώσεων διατήρησης ενέργειας, μάζας και ορμής. Η γεωμετρία της λίμνης συγκόλλησης, οι θερμικοί κύκλοι σημείων της συγκόλλησης και κάποιες παράμετροι της κατεργασίας υπολογίστηκαν ενώ ταυτόχρονα εξετάστηκε η Ζώνη Μερικής Τήξης της συγκόλλησης. Τέλος, έγινε χρήση τριών αδιάστατων αριθμών ώστε να διαπιστωθεί ο τρόπος με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, καθώς και να διερευνηθεί ο μηχανισμός που υποκινεί την κίνηση του ρευστού στη λίμνη συγκόλλησης. Η προσομοίωση καθώς και η εξαγωγή διαγραμμάτων και εικόνων έγινε με χρήση της υπολογιστικής πλατφόρμας ANSYS Fluent.

Περιεχόμενα

| | | |
|-----|--|-----|
| 1. | Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 | Κίνητρο και υπόβαθρο | 1 |
| 1.2 | Βιβλιογραφική ανασκόπηση | 2 |
| 1.3 | Οργάνωση Πτυχιακής Εργασίας | 4 |
| 2. | Θεωρητικό Υπόβαθρο | 5 |
| 2.1 | Συγκολλήσεις Τήξεως και Συγκολλήσεις Laser..... | 5 |
| 2.2 | Διατήρηση Θερμότητας..... | 8 |
| 2.3 | Διατήρηση Μάζας και Ορμής | 12 |
| 2.4 | Τα Υλικά που Χρησιμοποιήθηκαν | 14 |
| 3. | Αριθμητική Ανάλυση | 17 |
| 3.1 | Ο βασισμένος στην πίεση επιλυτής (Pressure-based solver)..... | 17 |
| 3.2 | Γενική βαθμωτή εξίσωση μεταφοράς: Διακριτοποίηση και Λύση | 19 |
| 3.3 | Διακριτοποίηση | 20 |
| 3.4 | Το Πλέγμα | 24 |
| 3.5 | Διάγραμμα Μελέτης Συγκόλλησης | 28 |
| 4. | Αποτελέσματα | 29 |
| 4.1 | Μοντέλο I | 31 |
| 4.2 | Μοντέλο II..... | 90 |
| 5. | Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική εργασία..... | 115 |
| 6. | Βιβλιογραφία | 118 |

1. Εισαγωγή

Από την αρχή της ανθρωπότητας, η πρόοδος της ανθρώπινης κοινωνίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την πρόοδο της Μηχανικής. Συγκεκριμένα, τα μέταλλα έχουν βοηθήσει στην επιβίωση και την ανάπτυξη του ανθρώπινου είδους. Για να γίνει αυτό ωστόσο έπρεπε να καμφθούν κάποια εμπόδια, όπως είναι η αντοχή των υλικών και η κατεργασιμότητα τους. Μια από τις σημαντικότερες κατεργασίες είναι η συγκόλληση, αφού δίνει τη δυνατότητα στον άνθρωπο να δημιουργήσει μεγαλύτερες κατασκευές αποτελούμενες από μικρότερα κομμάτια. Τις τελευταίες δεκαετίες οι συγκολλήσεις παρουσιάζουν ραγδαία πρόοδο. Μία από τις πιο καινούργιες μεθόδους είναι οι συγκολλήσεις Laser.

1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο

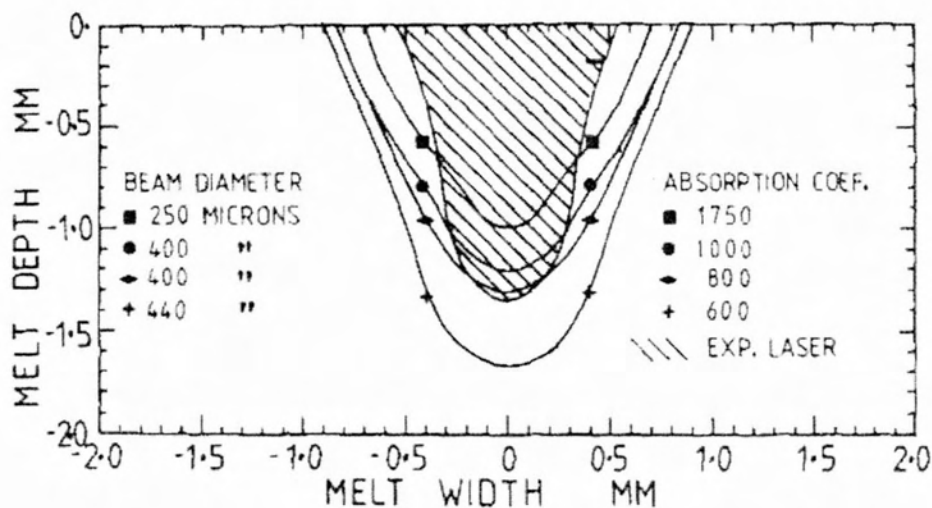
Οι συγκολλήσεις τήξεως είναι από τις πλέον διαδεδομένες κατεργασίες σύνδεσης. Συγκολλήσεις μπορούν να βρεθούν σε κάθε τεχνολογικό τομέα, από την εξόρυξη μετάλλων έως την ανέγερση μεγάλων κατασκευών όπως π.χ. η πλατφόρμα πετρελαίου Perdido, και από την κατασκευή ουρανοξυστών έως την ναυτοτεχνολογία. Ακριβώς επειδή το πεδίο εφαρμογής τους είναι τεράστιο, ανάλογα σημαντική έχει γίνει και η πλήρης κατανόηση του θεωρητικού υπόβαθρου τους, καθώς και η συνεχής εξέλιξη τους μέσα από την ανακάλυψη νέων μεθόδων συγκόλλησης.

Μία από τις πιο νέες μεθόδους συγκολλήσεων είναι οι συγκολλήσεις Laser, όπου το Laser λειτουργεί σαν πηγή θερμότητας ώστε να τηχθεί το μέταλλο του τεμαχίου προς συγκόλληση. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των συγκολλήσεων με δέσμη Laser είναι το γεγονός πως μεταφέρουν ένα μεγάλο ποσό ενέργειας σε ένα πολύ μικρό μέρος του υλικού, καθιστώντας τις ιδανικές για συγκολλήσεις μικρής κλίμακας με εξαιρετική ακρίβεια. Επίσης είναι κατάλληλες για μαζική παραγωγή αφού μπορούν να πραγματοποιηθούν από αυτοματοποιημένες μηχανές και για αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία.

Το θερμοκρασιακό πεδίο επηρεάζει σημαντικά τα μηχανικά και μεταλλουργικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης όπως το εύρος και τη δομή του μετάλλου συγκόλλησης, το εύρος και τη δομή της θερμοεπηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ) και τις παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις. Αυτά τα χαρακτηριστικά με τη σειρά τους επηρεάζουν την αντοχή, την ποιότητα και την μηχανική συμπεριφορά των συγκολλητών κατασκευών. Είναι επομένως σημαντικό να κατανοηθεί σε βάθος ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται το θερμοκρασιακό πεδίο στις συγκολλήσεις και να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης στις θερμοκρασιακές κατανομές.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η αρχή της έρευνας για το μαθηματικό μοντέλο μετάδοσης της θερμότητας σε συγκολλήσεις χρονολογείται στη δεκαετία του 1940, όταν ο Rosenthal [1] πρότεινε ένα μαθηματικό μοντέλο για κινούμενη πηγή θερμότητας υπό τις παραδοχές της ημιστατικής κατάστασης και της σημειακής πηγής θέρμανσης, σε ανάλυση τριών διαστάσεων. Από τότε έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα για να προβλέψουν την κατανομή θερμοκρασίας και το πεδίο ταχυτήτων στη λίμνη συγκόλλησης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Οι Cline και Anthony [2] μελέτησαν τις επιδράσεις που είχαν η ακτίνα συγκόλλησης, η ισχύς της δέσμης laser και η ταχύτητα της συγκόλλησης στο θερμοκρασιακό πεδίο, στο ρυθμό ψύξης και στο βάθος τήξης ενός ανοξειδωτού χάλυβα AISI 304, χωρίς ωστόσο να συνυπολογίζουν στο μοντέλο τους την επίδραση την συναγωγής στη λίμνη συγκόλλησης. Οι Mazumder και Steen [3] ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για να προσομοιώσουν την συνεχόμενη συγκόλληση λαμβάνοντας υπόψη και την μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής, και χρησιμοποιώντας την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.



Σχήμα 1.1: Παραμετρική μελέτη της λίμνης συγκόλλησης από τους Mazumder και Steen (1980)

Οι Frewin και Scott [4] χρησιμοποίησαν την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και δημιούργησαν ένα μοντέλο για τη ροή της θερμότητας κατά τη διακεκομμένη συγκόλληση Laser. Με αυτόν τον τρόπο υπολόγισαν τα μεταβατικά προφίλ κατανομής θερμοκρασίας καθώς και τις διαστάσεις της ζώνης τήξης και της θερμοεπηρασμένης ζώνης (ΘΕΖ). Μέχρι τότε οι περισσότεροι επιστήμονες προσπαθούσαν να υπολογίσουν την κατανομή θερμότητας σε μία steady state κατάσταση ή να προσομοιώσουν την συγκόλληση χρησιμοποιώντας μετάδοση θερμότητας σε ελεγχόμενο όγκο, μην υπολογίζοντας δηλαδή τα φαινόμενα μεταφοράς που δημιουργούνται στην λίμνη συγκόλλησης από το τηγμένο μέταλλο. Τα φαινόμενα αυτά ξεκίνησαν να μελετούνται πιο πρόσφατα. Τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης που λαμβάνουν υπόψη τους τα φαινόμενα μεταφοράς είχαν μεγάλη επιτυχία

στο να ξεκλειδώσουν πτυχές της διαδικασίας της συγκόλλησης που ως τότε παρέμεναν άγνωστες.

Η ρευστομηχανική που υπάρχει στη διαδικασία της συγκόλλησης είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και είναι ακόμα αντικείμενο μελετών. Πειραματική εργασία που έχει γίνει από τους Fabro et al [5] και Ki et al [6] δείχνουν ταχύτητες ροής μερικών μέτρων ανά δευτερόλεπτο. Δυο είναι οι μηχανισμοί που μπορούν να δημιουργήσουν τέτοιου είδους κίνηση, και αυτοί είναι η συναγωγή που δημιουργείται από την κλίση της επιφανειακής τάσης (φαινόμενο Marangoni) και την άνωση. Καθώς το τεμάχιο υπό κατεργασία λιώνει, η απορροφημένη ενέργεια δημιουργεί διάτμηση στην διεπιφάνεια του υγρού μετάλλου λόγω της μεταβολής της επιφανειακής τάσης με τη θερμοκρασία, και η οποία ανακατανέμει την ορμή του υγρού καθώς και την θερμική ενέργεια στη λίμνη συγκόλλησης. Επιπλέον, η δημιουργία θερμών περιοχών μέσα στο λειωμένο μέταλλο ευνοεί την εμφάνιση εστιών ανακυκλοφορίας λόγω μεταβολών της πυκνότητας και της εμφάνισης ελεύθερης συναγωγής.

Τα φυσικά φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης laser περιλαμβάνουν την μεταφορά θερμότητας στο υλικό, την ακτινοβολία και τη συναγωγή για τις συνοριακές συνθήκες, τη θερμοδυναμική της αλλαγής φάσεων, το κινούμενο σύνορο στη διεπιφάνεια υγρού και στερεού μετάλλου, τη ροή του ρευστού που δημιουργείται από την επιφανειακή τάση και την άνωση και την μεταφορά μάζας που υπάρχει μέσα στο τηγμένο υλικό. Οι Wu και Yan [7] συμπεριέλαβαν στο μοντέλο τους την ροή τόσο της θερμότητας όσο και ρευστού ώστε να προσομοιώσουν δυναμικά την ανάπτυξη της λίμνης συγκόλλησης με την πάροδο του χρόνου. Οι Srinivasan και Basu [8] μελέτησαν την επίδραση της επιφανειακής τάσης κατά την τήξη του μετάλλου μέσω πηγής laser και έδειξαν πως η επίδραση της άνωσης είναι αμελητέα σε σύγκριση με την δύναμη της επιφανειακής τάσης.

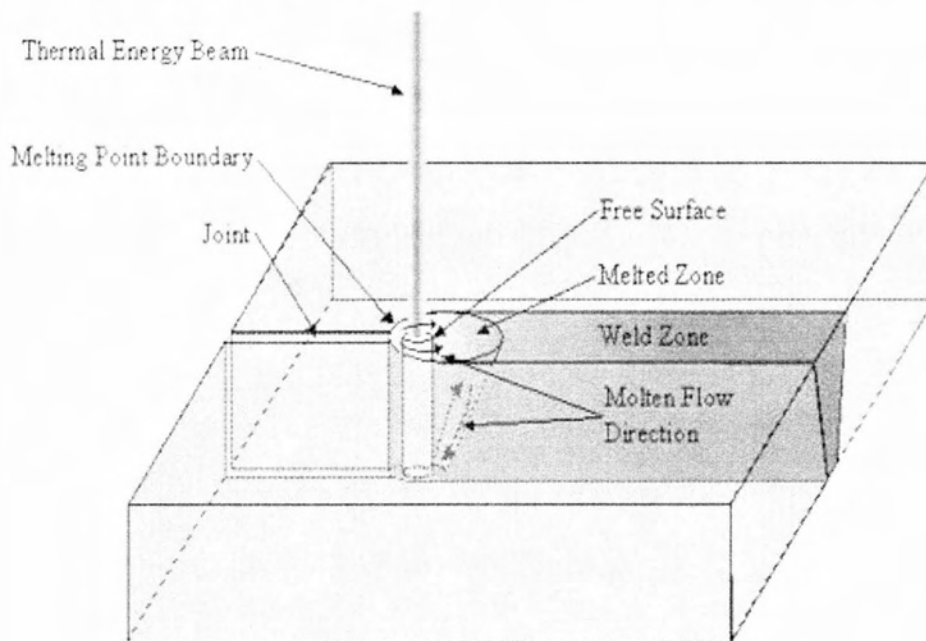
Εξαιρετικά σημαντική είναι η συμβολή των He et al, Sundar et al και Sanmugam et al. Οι He et al [9] μελέτησαν την μεταφορά θερμότητας και τη ροή ρευστού κατά τη σημειακή συγκόλληση Laser ανοξείδωτου χάλυβα 304. Οι Sundar et al [10] ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της τήξης και της στερεοποίησης κατά τη συγκόλληση laser ενός χαμηλά κραματωμένου χάλυβα. Τέλος, οι Sanmugam et al [11] εφάρμοσαν τα μοντέλα που είχαν αναπτυχθεί σε προηγούμενες μελέτες και προσομοίωσαν την διαδικασία σημειακής συγκόλλησης Laser με τη χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και με τη βοήθεια υπολογιστικών πακέτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η παρούσα εργασία στηρίχθηκε κυρίως στα αποτελέσματα αυτών των τριών μελετών.

Στην παρούσα εργασία, μελετάται παραμετρικά η επίδραση δέσμης Laser σε μια πλάκα σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου, η οποία είναι κατασκευασμένη από μεταλλικό υλικό. Στο πλαίσιο αυτό μελετάται η κατανομή θερμοκρασίας και γίνεται προσομοίωση της λίμνης συγκόλλησης για διαφορετικές τιμές δυο παραμέτρων της συγκόλλησης: της ισχύος της δέσμης Laser και της ακτίνας της δέσμης Laser. Η πλάκα σε κάθε περίπτωση είναι κατασκευασμένη από διαφορετικό υλικό. Τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στην εργασία είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας AISI 304 και το κράμα αλουμινίου 6061-T6, καθένα από τα

οποία χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία. Πέρα από την ροή θερμότητας μέσω της δέσμης Laser, συνυπολογίστηκαν η επιφανειακή τάση και η συναγωγή και ακτινοβολία για τις συνοριακές συνθήκες. Να τονισθεί πως, η εκπομπή της δέσμης Laser επιλέχθηκε ως σημειακή, έναντι της συνεχόμενης εκπομπής, ώστε υπάρξει πλήρης κατανόηση της κατεργασίας και να αξιολογηθούν οι δυνατότητες των διαθέσιμων ερευνητικών εργαλείων.

1.3 Οργάνωση Πτυγιακής Εργασίας

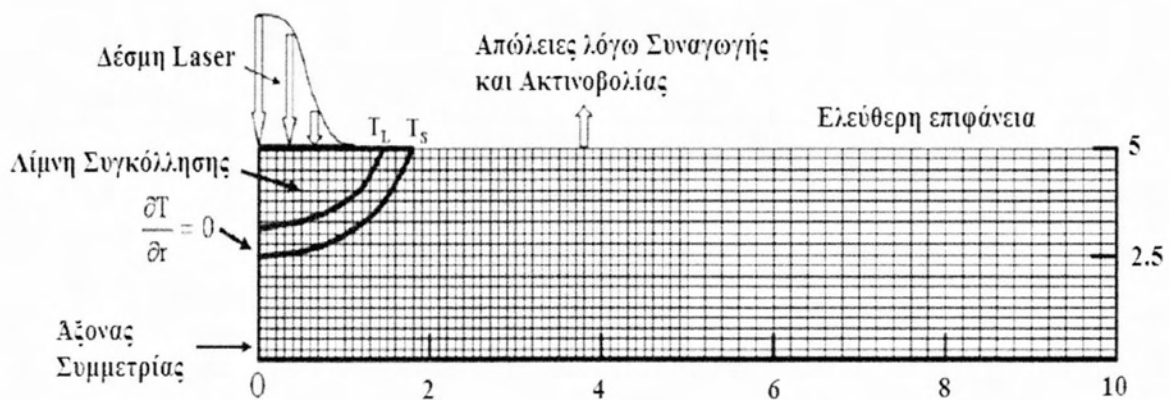
Το υπόλοιπο κομμάτι της εργασίας χωρίζεται σε τέσσερις ενότητες που καταλαμβάνουν οι ενότητες από 2 έως 5. Συγκεκριμένα στην ενότητα 2 (Θεωρητικό Υπόβαθρο) αναπτύσσεται η θεωρία στην οποία βασίζεται η παρούσα εργασία και γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την ταυτοποίηση της υπολογιστικής πλατφόρμας. Στην ενότητα 3 (Αριθμητική Ανάλυση) περιγράφεται η αριθμητική ανάλυση του προβλήματος. Στην ενότητα 4 (Αποτελέσματα) παρατίθενται τα αποτελέσματα της εργασίας σε κατάλληλα διαγράμματα καθώς και εικόνες σε διάφορες χρονικές στιγμές. Τέλος στην ενότητα 5 (Ανάλυση Αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα - Προτάσεις για μελλοντική εργασία) παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας, καθώς και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα στον τομέα αυτό.



Σχήμα 1.2: Σχηματική Αναπαράσταση Συγκόλλησης Laser

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται κατά κύριο λόγο τα φαινόμενα και οι εξισώσεις που διέπουν την κατεργασία της σημειακής συγκόλλησης Laser. Επίσης δίνονται οι συστάσεις των υλικών που συγκρίνονται. Η προσομοίωση που επιχειρεί η παρούσα εργασία περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα.



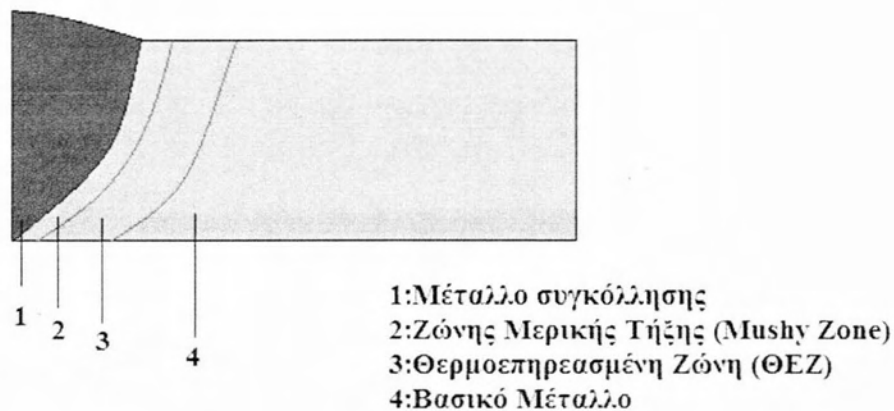
Σχήμα 2.1: Σχηματική Αναπαράσταση Προβλήματος Σημειακής Συγκόλλησης Laser

2.1 Συγκολλήσεις Τήξεως και Συγκολλήσεις Laser

Οι συγκολλήσεις τήξεως είναι κατεργασίες μέσω των οποίων επιτυγχάνεται μια συνεχής σύνδεση δύο μεταλλικών στοιχείων μέσω της τήξης τους από μία πηγή θερμότητας με ή χωρίς τη χρήση πρόσθετου συγκολλητικού υλικού [12]. Υπάρχουν διαφόρων τύπων συγκολλήσεις όπως συγκολλήσεις συμβολής, αυχενικές συγκολλήσεις, γωνιακές συγκολλήσεις, σημειακές συγκολλήσεις κ.α. Υπάρχουν αρκετά είδη συγκολλήσεων που διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος της πηγής θερμότητας που χρησιμοποιούν. Οι πιο διάσημες είναι οι συγκολλήσεις τόξου, που αποτελούν και την πλειοψηφία των μεθόδων συγκόλλησης, και χρησιμοποιούν το ηλεκτρικό τόξο ως πηγή θερμότητας για την τήξη των προς συγκόλληση μετάλλων. Μια σχετικά πιο πρόσφατη μέθοδος ωστόσο, και αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία, είναι η συγκόλληση Laser, στην οποία, όπως υποδηλώνει και το όνομα της, η πηγή θερμότητας είναι μια δέσμη Laser.

Μορφολογία Συγκολλήσεων

Μια συγκόλληση διακρίνεται σε κάποιες περιοχές, ανάλογα με το πόσο έχει επηρεάσει η θερμοκρασία το υλικό προς συγκόλληση. Οι περιοχές αυτές είναι τέσσερις και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2: Τα τμήματα που αποτελούν μια συγκόλληση

Το μέταλλο συγκόλλησης είναι η περιοχή της συγκόλλησης που έχει τηχθεί εντελώς, και στη συνέχεια έχει στερεοποιηθεί. Είναι το καθοριστικό κομμάτι μιας συγκόλλησης και η χημική σύσταση, η μικροδομή του και η διεύθυνση του επηρεάζουν την ποιότητα της σύνδεσης.

Η Ζώνη Μερικής Τήξης (ZMT ή mushy zone) είναι η περιοχή της συγκόλλησης μεταξύ του μετάλλου συγκόλλησης και της θερμοεπηρεασμένης ζώνης. Στην περιοχή αυτή, ο θερμικός κύκλος είναι τέτοιος ώστε η μεγαλύτερη θερμοκρασία της περιοχής είναι μεταξύ της θερμοκρασίας υγροποίησης (Liquidus) T_L και της θερμοκρασίας στερεοποίησης (solidus) T_S . Η Ζώνη Μερικής Τήξης είναι πηγή πολλών προβλημάτων που προκύπτουν στη συγκόλληση όπως η θερμή ρηγματώση και η μείωση της ολκιμότητας.

Η Θερμοεπηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ) είναι η περιοχή της συγκόλλησης που δεν τήκεται αλλά επηρεάζεται από τη θερμότητα της συγκόλλησης. Τοποθετείται μεταξύ της ZMT και του βασικού μετάλλου και στον θερμικό κύκλο η μέγιστη θερμοκρασία της περιοχής είναι μεταξύ της θερμοκρασίας solidus T_S και μια θερμοκρασίας T_0 πάνω από την οποία το μέταλλο υφίσταται κάποιας μορφής επιρροή.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η θερμοκρασιακή κατανομή. Με τη θερμοκρασιακή κατανομή μπορεί κανείς να προσδιορίσει τα όρια του μετάλλου συγκόλλησης και της Θερμοεπηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ). Εκτός από τις θερμοκρασιακές κατανομές, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο θερμικός κύκλος της συγκόλλησης. Πρόκειται για την χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας (T,t) σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο που μας ενδιαφέρει. Ο Θερμικός κύκλος χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη θερμοκρασία T_{max} και τον ρυθμό ψύξης, μεγέθη που επηρεάζουν τις μεταβολές της μικροδομής στη ΘΕΖ και επομένως την αντοχή της συγκόλλησης.

Συγκολλήσεις Laser

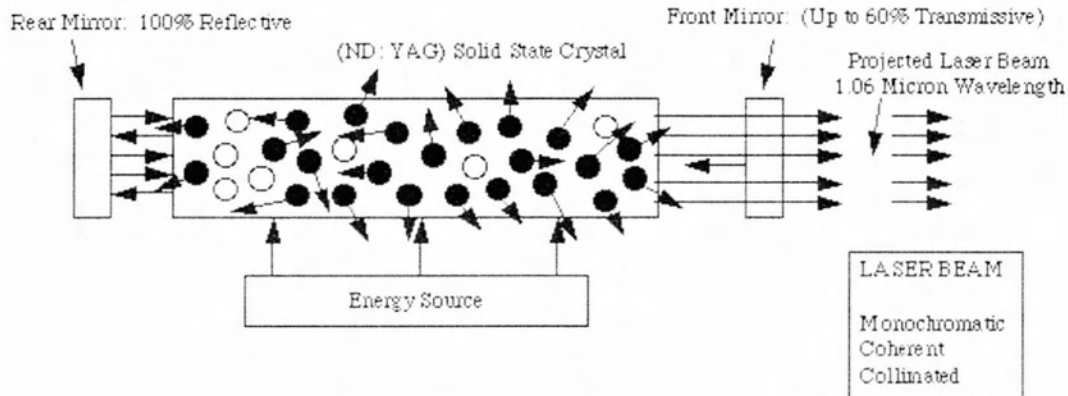
Η συγκόλληση με Laser είναι μια διαδικασία δέσμης υψηλής ενέργειας. Η πυκνότητα ενέργειας του Laser επιτυγχάνεται με την συγκέντρωση των κυμάτων φωτός. Η δέσμη Laser δεν σχετίζεται με τον ηλεκτρισμό, δεν επηρεάζεται από τον μαγνητισμό, δεν περιορίζεται σε ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά και στην πραγματικότητα μπορεί να αλληλεπιδράσει με οποιοδήποτε υλικό είτε είναι μέταλλο, πλαστικό, ξύλο, κεραμικό, κ.α. Τέλος η λειτουργία του δεν απαιτεί ύπαρξη κενού.

Το εστιακό σημείο (χιλιοστά της ίντσας σε διάμετρο) στοχεύει στην επιφάνεια συγκόλλησης ή από το εστιακό μήκος επιλογής πάνω ή κάτω από αυτήν. Στην επιφάνεια η τεράστια συγκέντρωση της ενέργειας του φωτός μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Η επιφάνεια λιώνει, και η τήξη μεταφέρεται προοδευτικά σε όλη τη συγκόλληση μέσω της θερμικής αγωγιμότητας. Για την κατεργασία συγκόλλησης, η ενέργεια της δέσμης διατηρείται κάτω από τη θερμοκρασία εξάτμισης του υλικού συγκόλλησης. Επειδή η διείδυση της συγκόλλησης εξαρτάται από τη θερμότητα, το πάχος των υλικών που πρόκειται να συγκολληθούν πρέπει να είναι μικρό. Τα οφέλη της κατεργασίας περιλαμβάνουν στενές συγκολλήσεις, ελάχιστες παραμορφώσεις, μικρή ΘΕΖ και άριστη μεταλλουργική ποιότητα.

Δεδομένου ότι η πραγματική συγκόλληση γίνεται με μία δέσμη φωτός, μόνο μια σαφής γραμμή όρασης απαιτείται και η άμεση επαφή με το τεμάχιο εργασίας δεν είναι απαραίτητη. Οι συγκολλήσεις Laser χρησιμοποιούνται για σημεία που είναι απρόσιτα από τις συμβατικές μεθόδους. Επίσης, δεδομένου ότι η ακτίνα είναι στο επίκεντρο μόνο σε μια στενή περιοχή, είναι δυνατόν να περάσει μέσα από το εξωτερικό ενός μεταλλικού περιέκτη και να συγκολλήσει από το εσωτερικό.

Η δέσμη φωτός μιας ακτίνας Laser είναι εξαιρετικά έντονη, στενή και εξαιρετικά συνεκτική. Και είναι αυτή ακριβώς η ιδιότητα της συνεκτικότητας που είναι σημαντική αφού επιτρέπει σε κάποιον την εστίαση της δέσμης laser σε μια εικόνα που είναι πιο φωτεινή από την αρχική. Έτσι, είναι δυνατόν να ληφθεί μια πηγή φωτός τόσο έντονη που μπορεί να λιώσει μια τρύπα σε οποιοδήποτε αδιαφανές υλικό. Είναι ενδιαφέρον αφού, επειδή το λέιζερ μπορεί και περνά μέσα από διαφανείς ουσίες, μπορεί να λιώσει μέταλλα που είναι σφραγισμένα σε γυάλινα δοχεία. Εκατό τοις εκατό της ακτίνας λέιζερ αντανακλάται από το πίσω κάτοπτρο, 60% θα περάσει μέσα από το εμπρόσθιο καθρέπτη, συνεχίζοντας μέσω του συγκροτήματος κλείστρου στο γωνιακό καθρέπτη και κατόπιν μέσω του φακού εστίασης στο τεμάχιο εργασίας.

SOLID STATE LASER CAVITY



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση μια διάταξης Laser Nd:YAG

Πρέπει να αναφέρουμε ότι αν και υπάρχουν πολλοί τύποι Laser, το Nd: YAG και το Laser διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) είναι τα πιο συχνά σε βιομηχανίες. Τα Laser διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό διοξειδίου του άνθρακα, η πρωταρχική πηγή λέιζερ, ήλιο και άζωτο. Το μήκος κύματος εξόδου είναι 10.6 μm. Έχουν δημιουργηθεί Laser διοξειδίου του άνθρακα που αναπτύσσουν ισχύ άνω των 25 KW. Αυτή η υψηλή απόδοση του λέιζερ CO₂ είναι δυνατή, δεδομένου ότι μπορεί να ψυχθεί αποτελεσματικά. Αντίθετα, η ψύξη του κρυστάλλου στερεάς κατάστασης στο Nd:YAG Laser είναι δύσκολη και κρίσιμη. Αυτό το Laser στερεάς κατάστασης πήρε το όνομα του από τα στοιχεία που τον αποτελούν: Νεδύμιο (Nd) διεσπαρμένο σε ένα κρύσταλλο από Ύτριο, Αργύλιο και Λυχνίτη. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτεί ο σχεδιασμός που απευθύνεται στην ψύξη, στις λάμπες διέγερσης, στους ανακλαστήρες, στο σχήμα κοιλότητας, στα υλικά, στην επιμετάλλωση των ανακλαστήρων κλπ. Η κατεργασία περιλαμβάνει παροχή ισχύς που μπορεί να είναι σχεδιασμένη για συνεχόμενη ή διακεκομμένη εκπομπή παλμών Laser. Ο ρυθμός επανάληψης των παλμών και η διαμόρφωση τους είναι προγραμματιζόμενα.

2.2 Διατήρηση Θερμότητας

Για την ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, το μεταβατικό θερμοκρασιακό πεδίο στην υπό κατεργασία πλάκα είναι συνάρτηση του χρόνου t και των χωρικών συντεταγμένων (x,y,z) και δίνεται από την μη-γραμμική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας:

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_v(r, \theta, z) \quad (2-1)$$

όπου Q_v είναι ο όρος ογκομετρικής παροχής θερμότητας και μεταβάλλεται ανάλογα με την ισχύ της δέσμης Laser και την ταχύτητα της συγκόλλησης. Οι όροι ρ, c, v και k είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα, η ταχύτητα και η θερμική αγωγιμότητα αντίστοιχα.

Καθότι η μελέτη που πραγματοποιείται στην συγκεκριμένη εργασία είναι αξονοσυμμετρική, επομένως η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας παίρνει τη μορφή:

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right] = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_v(r) \quad (2-2)$$

και ο όρος Q_v εξαρτάται πλέον από την ακτίνα της δέσμης Laser, από την γωνία πρόσπτωσης στην πλάκα και από τη διάρκεια του παλμού της δέσμης.

Αρχικές και Συνοριακές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες για τη συγκόλληση τη στιγμή $t=0$ είναι:

$$T(r, z, 0) = T_0(r, z) \quad (2-3)$$

Για την προσομοίωση της κατεργασίας, θεωρείται μόνο το μισό τεμάχιο καθώς για τη μελέτη της συγκόλλησης γίνεται η παραδοχή πως ισχύει αξονική συμμετρία. Οι συνοριακές συνθήκες δείχνουν ποιοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας επιδρούν σε κάθε τοίχωμα. Οι μηχανισμοί που υπάρχουν είναι η μεταφορά θερμότητας με αγωγή, με συναγωγή, με ακτινοβολία και η επιβολή ροής θερμότητας μέσω κάποιας εξωτερικής πηγής. Επομένως, η γενική σχέση που υπάρχει για τις συνοριακές συνθήκες είναι η εξής:

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} - Q + h(T - T_0) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) = 0 \quad (2-4)$$

όπου k_n είναι η θερμική αγωγιμότητα κάθετη στην επιφάνεια, q είναι η επιβαλλόμενη ροή θερμότητας λόγω της εξωτερικής πηγής θερμότητας, h είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για συναγωγή, σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann για την ακτινοβολία και ε είναι η δυνατότητα εκπομπής.

Πιο συγκεκριμένα για την παρούσα εργασία, στο πάνω τοίχωμα (ελεύθερη επιφάνεια) έχουμε εισαγωγή θερμότητας, από τη δέσμη laser, και ταυτόχρονα απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας και η συνοριακή συνθήκη δίνεται από τη σχέση:

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} = Q - h_c (T - T_0) \quad (2-5)$$

Η πηγή θερμότητας Q λόγω της δέσμης Laser αναλύεται παρακάτω. Ο νέος συντελεστής h_c συνδυάζει την συναγωγή και την ακτινοβολία και δίνεται από τη σχέση:

$$h_c = 24.1 * 10^{-4} \varepsilon T^{1.61} \quad (2-6)$$

Οι διατμητικές τάσεις που δημιουργούνται από τις μεταβολές της επιφανειακής τάσης λόγω θερμοκρασίας δίνονται από τη σχέση:

$$\tau = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \nabla_s T \quad (2-7)$$

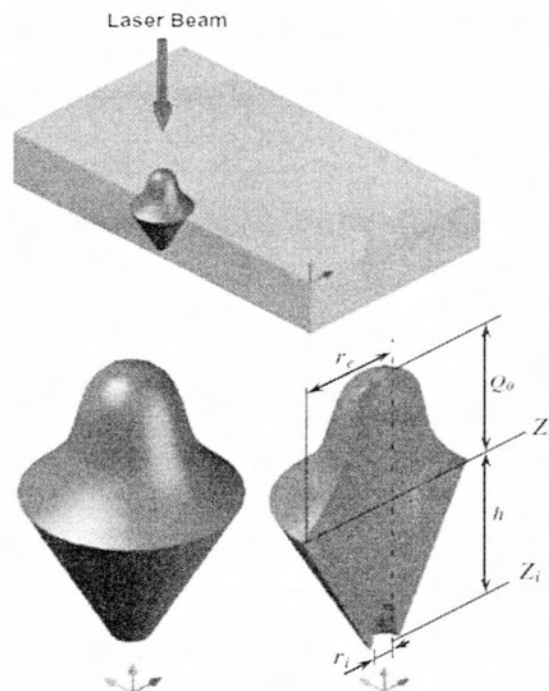
όπου $\partial \sigma / \partial T$ είναι η κλίση της επιφανειακής τάσης και $\nabla_s T$ είναι η κλίση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια.

Σε όλες τις υπόλοιπες επιφάνειες (πλην εκείνης που αντιστοιχεί στον άξονα συμμετρίας), οι απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας δίνονται από τη σχέση:

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T - T_0) \quad (2-8)$$

Το μοντέλο πηγής θερμότητας

Το μεγαλύτερο πρόβλημα για κάποιον που μελετάει σχετικά με τη σημειακή συγκόλληση Laser είναι η μοντελοποίηση της πηγής θερμότητας $Q_v(x, y)$. Για να προσομοιωθεί ακριβώς η θερμοκρασιακή κατανομή κατά τη διαδικασία σημειακής συγκόλλησης Laser, η δέσμη Laser μοντελοποιείται από έναν τρισδιάστατο όρο ογκομετρικής παροχής θερμότητας.



Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση του τρισδιάστατου μοντέλου πηγής θερμότητας (Shanmugam et al 2011)

Τα θερμοκρασιακά πεδία που λαμβάνονται χρησιμοποιούνται για να καθοριστούν οι διαστάσεις και η γεωμετρία της συγκόλλησης. Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα που να περιγράφουν την γεωμετρία της συγκόλλησης. Το πιο ρεαλιστικό, και αυτό που υιοθετείται στην παρούσα εργασία, είναι το σχήμα “Κλειδαρότρυπα” (Keyhole) ,στο οποίο η συγκόλληση είναι πιο πλατιά στην ελεύθερη επιφάνεια στην οποία προσπίπτει η δέσμη Laser ενώ στενεύει προχωρώντας προς το εσωτερικό του τεμαχίου. Η ενέργεια που παράγεται από τη δέσμη Laser (υψηλή ισχύς δέσμης και αρκετός χρόνος εκπομπής) μεταφέρεται στην κοιλότητα που έχει το σχήμα κλειδαρότρυπας είτε υπό τη μορφή πλάσματος είτε με απευθείας απορρόφηση. Το μοντέλο που υιοθετήθηκε για την προσομοίωση της παροχής θερμότητας κατά την κατεργασία της σημειακής συγκόλλησης με δέσμη Laser υποθέτει ότι η ροή θερμότητας από την πηγή ακολουθεί κατανομή κατά Gauss στη λίμνη συγκόλλησης. Για κάθε επίπεδο κάθετο στον άξονα z, η κατανομή Gauss για τη ροή θερμότητας μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$Q_v(r, z) = Q_0 \exp\left(\frac{-3r^2}{r_0^2}\right) \quad (2-9)$$

όπου Q_0 είναι η μέγιστη ένταση της θερμότητας, r_0 είναι ένας παράγοντας της κατανομής και r είναι η ακτινική συντεταγμένη. Το ύψος της κωνικής κατανομής Gauss είναι $H = z_e - z_i$ όπως φαίνεται στο αντίστοιχο σχήμα όπου οι συντεταγμένες στον άξονα z για την κορυφή και το τέλος της επιφάνειας της πηγής θερμότητας είναι z_e και z_i αντίστοιχα, ενώ η ακτίνα για την πάνω και κάτω επιφάνεια είναι r_e και r_i αντίστοιχα. Η παράμετρος r_0 της κατανομής μειώνεται γραμμικά από την κορυφή της επιφάνειας μέχρι τον πάτο της κωνικής περιοχής της πηγής θερμότητας και μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$r_0(z) = r_e - (r_e - r_i) \cdot \left(\frac{z_e - z}{z_e - z_i}\right) \quad (2-10)$$

όπου $r = r_e$ στην κορυφή της κωνικής περιοχής στο $z = z_e$ και δίνεται από την εξίσωση:

$$r = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2-11)$$

Στην κατεργασία της σημειακής συγκόλλησης Laser, ένα μέρος της ενέργειας που παράγεται από την πηγή της δέσμης χάνεται πριν προλάβει να απορροφηθεί από το τεμάχιο. Αυτή η απώλεια ενέργειας οφείλεται στην αντανάκλαση από την επιφάνεια του τεμαχίου, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια απορροφάται από το τεμάχιο. Για κάθε υλικό αυτή η απώλεια ενέργειας είναι διαφορετική και προσδιορίζεται πειραματικά. Για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία οι τιμές είναι κοντινές και δεν διαφέρουν σημαντικά. Έχει παρατηρηθεί πως η απώλεια ενέργειας για τον ανοξείδωτο χάλυβα 304 AISI είναι το 30.7% της ισχύος της δέσμης. Επομένως, μόνο το 69.3% της ενέργειας που προσδίδεται από την πηγή της δέσμης Laser απορροφάται τελικά από το τεμάχιο. Αυτές οι

τιμές ισχύουν για τον χάλυβα 304 AISI αλλά καθώς οι τιμές για το αλουμίνιο είναι κοντινές, αυτές είναι οι τιμές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση και για τα δύο υλικά της εργασίας.

Κατά την προσομοίωση, αρκετή σημασία έχει το γεγονός πως η πηγή θερμότητας αποτελείται από δύο κομμάτια. Το πρώτο κομμάτι είναι ένα επίπεδο που βρίσκεται στην επιφάνεια του σημείου που προσπίπτει η δέσμη και το δεύτερο κομμάτι είναι το κωνικό κομμάτι που διατρέχει σε βάθος τη συγκόλληση. Από το 69.3% της συνολικής ισχύος της δέσμης που απορροφάται από το τεμάχιο, το μέρος που απορροφάται στο επίπεδο της επιφάνειας αντιστοιχεί στο 17.3% της συνολικής ισχύος, ενώ το υπόλοιπο 52% είναι το μέρος που απορροφάται από το κωνικό κομμάτι (σχήμα Keyhole) της συγκόλλησης.

Στην συγκεκριμένη εργασία, επειδή η ανάλυση είναι αξονοσυμμετρική και σε δύο διαστάσεις, θεωρείται πως η ενέργεια που απορροφάται από την επιφάνεια του τεμαχίου δεν διαχωρίζεται και αποτελεί το 69.3% της συνολικής ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, το μοντέλο για την προσομοίωση της πηγής θερμότητας από τη δέσμη Laser είναι ως εξής:

$$Q(x, y) = \frac{f\eta Q}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{f(x^2 + y^2)}{R^2}\right) \quad (2-12)$$

όπου f είναι ο παράγοντας κατανομής της θερμότητας, Q είναι η ολική ισχύς της δέσμης Laser, η είναι ο συντελεστής απορρόφησης της θερμότητας που συζητήθηκε παραπάνω, και R είναι η ακτίνα της πηγής όπως εκείνη φτάνει στην επιφάνεια του τεμαχίου. Ο παράγοντας κατανομής της θερμότητας για τη σημειακή συγκόλληση Laser λαμβάνεται ίσος με 3.0. Ο συντελεστής απορρόφησης της θερμότητας είναι ίσος με 0.693. Η ακτίνα R που φτάνει στην επιφάνεια του τεμαχίου υπολογίζεται από το μήκος εστίασης και δίνεται από τον τύπο:

$$R = \frac{2M_0^2 \lambda f}{\pi D_0} \quad (2-13)$$

όπου M_0^2 είναι η τιμή για την ποιότητα της δέσμης Laser, λ είναι το μήκος κύματος της δέσμης, f είναι το μήκος εστίασης του φακού και D_0 είναι η ονομαστική διάμετρος της δέσμης Laser. Για την συγκεκριμένη μελέτη και την συγκεκριμένη κατεργασία, το μήκος κύματος είναι ίσο με 1.06 μm και η τιμή για την ποιότητα της δέσμης λαμβάνεται ίση με $M_0^2 = 1.04$. Το μήκος εστίασης του φακού είναι ίσο με 160 mm.

2.3 Διατήρηση Μάζας και Ορμής

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, λόγω της αξονοσυμμετρικής φύσης της σημειακής συγκόλλησης Laser, οι εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα μπορούν να λυθούν σε δύο

διαστάσεις ώστε να υπολογιστούν τα πεδία θερμοκρασιών και ταχυτήτων. Ωστόσο, αφού η μεταφορά θερμότητας και η ροή ρευστών χρησιμοποιούνται επίσης και για τους υπολογισμούς όταν η συγκόλληση γίνεται με κινούμενη πηγή θερμότητας, το οποίο είναι πρόβλημα τριών διαστάσεων, οι ίδιες μεταβατικές τρισδιάστατες εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας και ρευστομηχανικής χρησιμοποιήθηκαν και για τη σημειακή συγκόλληση. Για τη λίμνη συγκόλλησης η ροή θεωρήθηκε ως ασυμπιέστη, στρωτή και το υγρό Νευτωνικό.

Το ισοζύγιο μάζας ισχύει και έχει την εξής μορφή:

$$\nabla \cdot (V) = 0 \quad (2-14)$$

Το ισοζύγιο ορμής έχει την εξής μορφή:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = -\rho \nabla \cdot (V V) + \nabla \cdot (\mu \nabla V) - \nabla P + S_1 \quad (2-15)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα, t ο χρόνος, V η ταχύτητα, P η πίεση, μ το ιξώδες και S_1 είναι όρος παραγωγής που έχει τη μορφή:

$$S_1 = -C \frac{(1-f_L)^2}{f_L^3 + B} V + \rho g \beta (T - T_0) \quad (2-16)$$

όπου ο όρος $\nabla \cdot (\mu \nabla V)$ αντιπροσωπεύει την ιξώδη διάχυση που προκύπτει από την γενική μορφή έκφρασης των εξισώσεων ορμής. Για την συνιστώσα του άξονα x της εξίσωσης ορμής, ο όρος αυτός εκφράζεται ως εξής:

$$S_{diff} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \quad (2-17)$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης για το S_1 αντιπροσωπεύει την τριβώδη απαγωγή της ορμής στην ZMT σύμφωνα με την εξίσωση Carman-Kozeny για ροές μέσα από πορώδη υλικά. f_L είναι ο λόγος υγρού, B είναι ένας πολύ μικρός θετικός αριθμός ώστε να αποφευχθεί η διαίρεση με το μηδέν, ο C αντιπροσωπεύει την μορφολογία της mushy περιοχής και είναι συνήθως ένας πολύ μεγάλος αριθμός για να εξαναγκάσει την ταχύτητα στην περιοχή του στερεού να είναι ίση με μηδέν, β είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής, T είναι η θερμοκρασία και T_0 είναι η θερμοκρασία αναφοράς.

Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετοί αδιάστατοι αριθμοί για να περιγράψουν τις δυνάμεις που συμβάλλουν στην κίνηση του ρευστού στη λίμνη συγκόλλησης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τρεις: ο αριθμός Grashof, ο αριθμός Marangoni και ο αριθμός Prandtl.

$$Gr = \frac{g \beta L_B^3 \Delta T \rho^2}{\mu^2} = \frac{\text{Δυνάμεις Άνωσης}}{\text{Ιξώδεις Δυνάμεις}} \quad (2-18)$$

$$Ma = \frac{\rho L_R \Delta T (\partial \gamma / \partial T)}{\mu^2} = \frac{\text{Δυνάμεις Επιφανειακής Τάσης}}{\text{Ιξώδεις Δυνάμεις}} \quad (2-19)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, β είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής, L_R είναι η ακτίνα της συγκόλλησης στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης, L_B είναι ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που σχετίζεται με την άνωση στη λίμνη συγκόλλησης και είναι ίσο με το ένα τέταρτο του L_R , ΔT είναι η διαφορά μεταξύ της μέγιστης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην λίμνη συγκόλλησης και της θερμοκρασίας Solidus, ρ είναι η πυκνότητα, μ είναι το ιξώδες και $(\partial \gamma / \partial T)$ είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής της επιφανειακής τάσης. Ο αριθμός Gr επομένως εκφράζει την άνωση ενώ ο συντελεστής Ma εκφράζει την επιφανειακή τάση. Ο λόγος τους είναι δείκτης για το ποια από τις δύο δυνάμεις υποκινεί την κίνηση του ρευστού.

Ο αριθμός Prandtl εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του υλικού. Πιο συγκεκριμένα είναι ίσος με:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{\text{Ρυθμός Μεταφοράς Ορμής}}{\text{Ρυθμός Μεταφοράς Θερμότητας}} \quad (2-20)$$

όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες και α είναι η θερμική διαχυτότητα. Ο αριθμός Prandtl επομένως είναι ένας δείκτης του κατά πόσον υπερισχύει η μεταφορά θερμότητας ή η μεταφορά ορμής στο ρευστό.

2.4 Τα Υλικά που Χρησιμοποιήθηκαν

Στην εργασία γίνεται μελέτη δύο υλικών. Οι συστάσεις τους και οι ιδιότητες τους φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Χάλυβας AISI 304

Πρόκειται για έναν ανοξείδωτο χάλυβα, που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές. Η σύσταση του είναι η εξής:

| <u>Στοιχείο</u> | C | Cr | Ni | Fe | Mn | P | S | Si |
|-----------------|------|---------|----------|-------------|-------|--------|------|-------|
| <u>Σύσταση</u> | Max | 18 - 20 | 8 - 10.5 | 66.345 - 74 | Max 2 | Max | Max | Max 1 |
| <u>% κ.β.</u> | 0.08 | | | | | 0.0045 | 0.03 | |

Πίνακας 2.1: Σύσταση του χάλυβα AISI 304

Σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, ο χάλυβας AISI 304 έχει άριστη αντοχή στη σκουριά, ακόμα και με την παρουσία οξέων. Επίσης, σαν υλικό έχει άριστη αντοχή σε αλκαλικά διαλύματα όπως και σε οργανικά και ανόργανα άλατα. Γενικά, ο χάλυβας αυτός είναι εξαιρετικά ανθεκτικός στη διάβρωση, ενώ μόνο σε περιβάλλον με άλας σε μικρά σωματίδια, όπως τα θαλάσσια περιβάλλοντα, μπορεί να προκληθεί επιφανειακή βρωμιά που όμως μπορεί να αποφευχθεί με καθαρισμό.

Κράμα Αλουμινίου 6061-T6

Το 6061-T6 είναι ένα κράμα αλουμινίου που έχει υποστεί σκλήρυνση λόγω καθίζησης και περιέχει μαγνήσιο και πυρίτιο ως τα κυριότερα κραματικά στοιχεία του. Αναπτύχθηκε το 1935. Έχει καλές μηχανικές ιδιότητες και παρουσιάζει καλή συγκολλησιμότητα. Είναι ένα από τα πιο κοινά κράματα αλουμινίου για γενική χρήση. Το κράμα 6061-T6 έχει είναι ειδική κατηγορία του 6061, και έχει δημιουργηθεί από αυτό με διαλυτοποίηση και τεχνητή γήρανση. Η σύσταση του είναι η εξής:

| <u>Στοιχείο</u> | <u>Σύσταση % κ.β.</u> |
|-----------------|-----------------------|
| Al | 95.8 – 98.6 |
| Cr | 0.04 – 0.35 |
| Cu | 0.15 – 0.4 |
| Fe | Max 0.7 |
| Mg | 0.8 – 1.2 |
| Mn | Max 0.15 |

| <u>Στοιχείο</u> | <u>Σύσταση % κ.β.</u> |
|-------------------------------|-----------------------|
| Si | 0.4 – 0.8 |
| Ti | Max 0.15 |
| Zn | Max 0.25 |
| Λοιπά στοιχεία (ξεχωριστά) | Max 0.05 |
| Λοιπά στοιχεία (Συνολικά) | Max 0.15 |

Πίνακας 2.2: Σύσταση του αλουμινίου Al 6061-T6

Το κράμα αλουμινίου 6061-T6 βρίσκεται εφαρμογές σε κατασκευές όπως πλαίσια ποδηλάτων, αλλά και εξαρτήματα τους, σε αποβάθρες αλουμινίου και διαδρόμους που έχουν συνδεθεί με συγκολλήσεις κ.α.

Για την επίλυση των εξισώσεων κατά την προσομοίωση και την ανάκτηση των θερμοκρασιακών πεδίων, απαραίτητα δεδομένα ήταν κάποιες θερμικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών όπως η θερμική αγωγιμότητα κ.α. Συνοπτικά, αυτές οι ιδιότητες είναι συγκεντρωμένες και για τα δύο υλικά στον επόμενο πίνακα. Το Υλικό 3, είναι ένα υποθετικό τρίτο υλικό με ιδιότητες παρόμοιες με του χάλυβα, και χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση των αποτελεσμάτων.

| <u>Ιδιότητες (Μονάδες Μέτρησης)</u> | <u>AISI 304</u> | <u>Al 6061-T6</u> | <u>Υλικό 3</u> |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Πυκνότητα (Kg/m ³) | 7200 | 2700 | 7200 |
| Θερμοκρασία Solidus T _S (K) | 1697 | 855 | 1697 |
| Θερμοκρασία Liquidus T _L (K) | 1727 | 925 | 1727 |
| Ειδική Θερμότητα (J/Kg*K) | 711,75 | 896 | 711,75 |
| Θερμική Αγωγιμότητα (W/m*K) | 19.3 | 167 | 94 |
| Ιξώδες (Kg/m*s) | 0.1 | 0.02 | 0.1 |
| Λανθάνουσα Θερμότητα Τήξης (J/Kg) | 1256039 | 321000 | 1256039 |
| Συντελεστής επιφανειακής Τάσης (N/m*K) | -4.3x10 ⁻⁴ | -3.5x10 ⁻⁴ | -4.3x10 ⁻⁴ |
| Συντελεστής Θερμικής Διαστολής (K ⁻¹) | 18*10 ⁻⁶ | 23.4*10 ⁻⁶ | 18*10 ⁻⁶ |
| Αριθμός Prandtl | 3.68 | 0.1075 | 0.7571 |

Πίνακας 2.4: Χρήσιμες ιδιότητες των υλικών που μελετούνται

3. Αριθμητική Ανάλυση

Σε αυτήν την ενότητα επιχειρείται να δοθεί μία σύντομη περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης που χρησιμοποιεί το υπολογιστικό πακέτο Fluent.[13],[14]

3.1 Ο βασισμένος στην πίεση επιλυτής (Pressure-based solver)

Ο βασισμένος στην πίεση επιλυτής απασχολεί έναν αλγόριθμο, ο οποίος ανήκει σε μία γενική τάξη μεθόδων οι οποίες ονομάζονται μέθοδος προβολής (the projection method). Σε αυτή τη μέθοδο, ο περιορισμός της διατήρησης της μάζας του πεδίου ταχύτητας επιτυγχάνεται με την επίλυση της εξίσωσης πίεσης. Η εξίσωση πίεσης προέρχεται από τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής με τέτοιο τρόπο, ώστε το πεδίο ταχύτητας να διορθώνεται από την πίεση, ικανοποιώντας τη συνέχεια. Αφού οι κυρίαρχες εξισώσεις είναι μη γραμμικές και συνδυάζονται μεταξύ τους, η διαδικασία της λύσης περιλαμβάνει επαναλήψεις, όπου όλο το σετ των κυρίαρχων εξισώσεων λύνεται επανειλημμένα μέχρι να συγκλίνει η λύση.

Ο αποζευγμένος αλγόριθμος του επιλυτή βασισμένου στην πίεση

Ο βασισμένος στην πίεση επιλυτής χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο για τη λύση, όπου οι κυρίαρχες εξισώσεις λύνονται ξεχωριστά. Επειδή οι κυρίαρχες εξισώσεις είναι μη γραμμικές και συζευγμένες, ο βρόχος της λύσης πρέπει να γίνεται επαναληπτικά προκειμένου να ληφθεί μία συγκλίνουσα αριθμητική λύση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, οι ατομικές κυρίαρχες εξισώσεις για τις μεταβλητές που λύνονται, λύνονται η μία μετά την άλλη.

Στον αποζευγμένο αλγόριθμο, οι ατομικές κυρίαρχες εξισώσεις για τη λύση των μεταβλητών (για παράδειγμα $u, v, w, p, T, k, \epsilon$) λύνονται η μία μετά την άλλη. Κάθε κυρίαρχη εξίσωση, ενώ λύνεται, διαχωρίζεται από τις άλλες εξισώσεις, από όπου προέρχεται και το όνομα του αλγορίθμου. Ο αποζευγμένος αλγόριθμος είναι πολύ αποδοτικός όσον αφορά τη μνήμη, καθώς οι διακριτοποιημένες εξισώσεις είναι αναγκαίο να αποθηκευτούν στη μνήμη μόνο μία φορά. Έτσι, η λύση συγκλίνει σχετικά αργά, αφού οι εξισώσεις λύνονται με ξεχωριστό τρόπο.

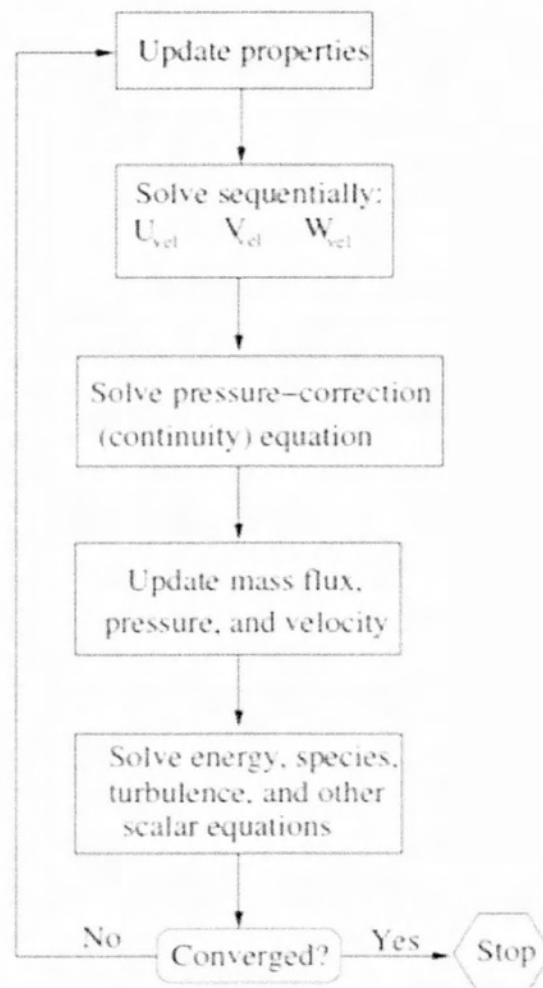
Με τον αποζευγμένο αλγόριθμο, κάθε επανάληψη αποτελείται από τα βήματα που φαίνονται στο Σχήμα 3.1 και περιγράφονται παρακάτω:

1. Ενημερώνονται οι ιδιότητες του ρευστού (για παράδειγμα, πυκνότητα, ιξώδες, ειδική θερμότητα).
2. Λύνονται οι εξισώσεις ορμής, η μία μετά την άλλη, χρησιμοποιώντας τις πρόσφατα ενημερωμένες τιμές της πίεσης και των μαζικών ροών των μετώπων.
3. Λύνει τη διόρθωση πίεσης εξίσωση χρησιμοποιώντας το πρόσφατο πεδίο ταχύτητας και μαζικής ροής.

4. Διορθώνει τις μαζικές ροές στα μέτωπα, πίεση και πεδίο ταχύτητας χρησιμοποιώντας τη διόρθωση πίεσης από το βήμα 3.
5. Λύνει τις εξισώσεις των επιπλέον βαθμωτών μεταβλητών όπως, ακτινοβολία ενέργεια, χρησιμοποιώντας τις τιμές των λύσεων των μεταβλητών.
6. Ενημερώνει τους όρους πηγής που προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις διαφορετικές φάσεις.
7. Ελέγχει για σύγκλιση των εξισώσεων.

Αυτά τα βήματα συνεχίζονται μέχρι τα κριτήρια σύγκλισης συναντηθούν.

Pressure-Based Segregated Algorithm



Σχήμα 3.1: Η διαδικασία σύγκλισης του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί το ANSYS Fluent

3.2 Γενική βαθμωτή εξίσωση μεταφοράς: Διακριτοποίηση και Λύση

Το ANSYS FLUENT χρησιμοποιεί μια τεχνική βασισμένη στον όγκο ελέγχου για να μετατρέψει μία γενική εξίσωση μεταφοράς σε μία αλγεβρική εξίσωση, ώστε να μπορεί να λυθεί αριθμητικά. Αυτή η τεχνική αποτελεί την ενσωμάτωση της εξίσωσης μεταφοράς σε κάθε όγκο ελέγχου, αποδίδοντας μια διακριτή εξίσωση που εκφράζει το νόμο της διατήρησης με βάση τον όγκο ελέγχου.

Η διακριτοποίηση των κυρίαρχων εξισώσεων μπορεί να απεικονιστεί εύκολα λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβατική εξίσωση διατήρησης για τη μεταφορά μιας κλιμακωτής ποσότητα ϕ . Αυτό αποδεικνύεται από την ακόλουθη εξίσωση γραμμένη σε ολοκληρωτική μορφή για έναν αυθαίρετο όγκο ελέγχου V :

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (3-1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα, \vec{v} είναι τα διανύσματα ταχυτήτων, \vec{A} το διάνυσμα επιφάνειας, Γ_ϕ ο συντελεστής διάχυσης για το ϕ , $\nabla \phi$ η κλίση του ϕ και S_ϕ ο όρος πηγής του ϕ ανά μονάδα όγκου.

Και με διαφορική μορφή, θεωρώντας ασυμπίεστη ροή και σταθερό ιξώδες:

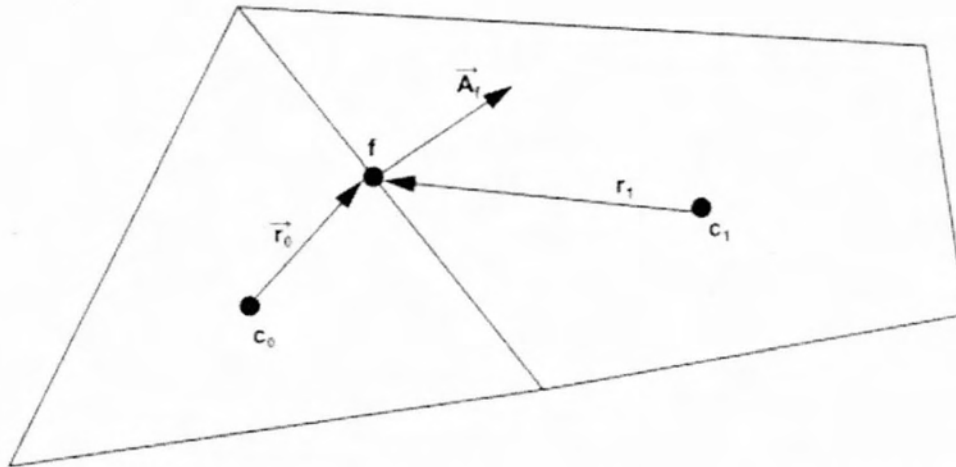
$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} + \rho \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (3-2)$$

Με σκοπό να γίνει ταύτιση της εξίσωσης του προβλήματος με αυτή που χρησιμοποιεί ο επιλυτής. Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται σε κάθε όγκο ελέγχου, ή κελί, στο υπολογιστικό χωρίο. Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα για το πώς εφαρμόζεται ο όγκος ελέγχου.

Η διακριτοποίηση της πρώτης εξίσωσης γίνεται ως εξής:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (3-3)$$

όπου N_{faces} είναι ο αριθμός των επιφανειών για κάθε κελί, ϕ_f η τιμή του ϕ που μεταφέρεται δια μέσω της επιφάνειας f , $\rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f$ η ροή μάζας δια μέσω της επιφάνειας f , \vec{A}_f η επιφάνεια του f , $\nabla \phi_f$ η κλίση του ϕ στην επιφάνεια f και V ο όγκος του κελιού. Το $\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V$ ορίζεται στη χρονική διακριτοποίηση.



Σχήμα 3.2: Ο όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της διακριτοποίησης της βαθμωτής εξίσωσης μεταφοράς.

Λύνοντας το γραμμικό σύστημα

Οι διακριτοποιημένες βαθμωτές εξισώσεις περιέχουν μία άγνωστη βαθμωτή μεταβλητή ϕ στο κέντρο του κελιού καθώς οι άγνωστες τιμές βρίσκονται στα γύρω γειτονικά κελιά. Αυτή η εξίσωση θα είναι γενικά μη γραμμική σε σχέση με αυτές τις μεταβλητές. Μία γραμμική μορφή αυτής της εξίσωσης μπορεί να γραφτεί:

$$a_p \phi = \sum_{NC} a_{NC} \phi_{NC} + b \quad (3-4)$$

όπου το NC αναφέρεται στα γειτονικά κελιά και a_p και a_{NC} είναι οι γραμμικοί συντελεστές για το ϕ και ϕ_{NC} .

Ο αριθμός των γειτονικών κελιών για κάθε κελί εξαρτάται από την τοπολογία του πλέγματος, αλλά τυπικά είναι ίσος με τον αριθμό των μετώπων που περικλείουν ένα κελί.

3.3 Διακριτοποίηση

Χωρική διακριτοποίηση

Το ANSYS Fluent αποθηκεύει διακριτές τιμές της βαθμωτής ποσότητας ϕ στα κέντρα των κελιών. Έτσι οι τιμές των μετώπων ϕ_f απαιτούνται για τους όρους μεταφοράς στην εξίσωση διακριτοποίησης και πρέπει να γίνει παρεμβολή με τις τιμές στα κέντρα των κελιών. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα ανάντη σχήμα.

Το συγκεκριμένο σχήμα σημαίνει ότι η τιμή του μετώπου ϕ_f προέρχεται από ποσότητες στο ανάντη του κελιού συσχετιζόμενο με τη διεύθυνση της κανονικής ταχύτητας v_n στην

εξίσωση διακριτοποίησης. Το ANSYS Fluent επιτρέπει να διαλέξει κάποιος ανάμεσα σε πολλά τέτοια σχήματα, όπως το πρώτης τάξης ανάντη σχήμα, το δεύτερης τάξης ανάντη σχήμα, power law, QUICK. Στη συγκεκριμένη εργασία περιγράφεται το δεύτερης τάξης, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε. Οι όροι διάχυσης στην εξίσωση διακριτοποίησης είναι με κεντρικές διαφορές και πάντα έχουν δεύτερης τάξης ακρίβεια. Με τη δεύτερης τάξης ακρίβεια, οι ποσότητες στα μέτωπα των κελιών υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μια πολυδιάστατη γραμμικής ανακατασκευής προσέγγιση. Σε αυτή την προσέγγιση, η μεγάλη τάξης ακρίβεια επιτυγχάνεται στα μέτωπα του κελιού δια μέσω μιας επέκτασης της σειράς Taylor της κεντροειδής λύσης του κελιού. Έτσι όταν επιλέγεται το δεύτερης τάξης σχήμα, η τιμή του φ υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$\varphi_f = \varphi + \nabla \varphi \cdot \vec{r} \quad (3-5)$$

όπου φ και $\nabla \varphi$ είναι η τιμή στο κέντρο του κελιού και η κλίση του, και r είναι το διάνυσμα μετατόπισης από το κέντρο του κελιού στο μέτωπο. Αυτή η μορφοποίηση απαιτεί τον προσδιορισμό της κλίσης $\nabla \varphi$ σε κάθε κελί, όπως θα συζητηθεί παρακάτω.

Χρονική Διακριτοποίηση

Για παροδικές προσομοιώσεις, οι κυρίαρχες εξισώσεις πρέπει να διακριτοποιηθούν και στο χώρο, αλλά και στο χρόνο. Η χωρική διακριτοποίηση για εξισώσεις εξαρτημένες από το χρόνο είναι ίδια και με τις περιπτώσεις όπου ο χρόνος είναι σταθερός. Η χρονική διακριτοποίηση περιλαμβάνει την ολοκλήρωση του κάθε όρου στις διαφορικές εξισώσεις σε ένα χρονικό βήμα Δt . Η ολοκλήρωση των παροδικών όρων είναι απλή, όπως φαίνεται παρακάτω. Η γενική έκφραση για την εξέλιξη του χρόνου της μεταβλητής φ δίνεται από:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = F(\varphi) \quad (3-6)$$

όπου η συνάρτηση F ενσωματώνει κάθε χωρική διακριτοποίηση. Αν η παράγωγος του χρόνου διακριτοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάντι διαφορές, η πρώτης τάξης ακρίβεια χρονικής διακριτοποίησης δίνεται από:

$$\frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\Delta t} = F(\varphi) \quad (3-7)$$

και η δεύτερης τάξης διακριτοποίηση δίνεται από:

$$\frac{3\varphi^{n+1} - 4\varphi^n + \varphi^{n-1}}{\Delta t} = F(\varphi) \quad (3-8)$$

όπου φ είναι μια βαθμωτή ποσότητα, $n+1$ η τιμή του επόμενου χρονικού βήματος, n η τιμή του παρόντος χρονικού βήματος και $n-1$ η τιμή του προηγούμενου χρονικού βήματος.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται πρώτης τάξης άρρητη παροδική μορφοποίηση. Στη μέθοδο αυτή γίνεται εκτίμηση της $F(\varphi)$ στο μελλοντικό επίπεδο του χρόνου:

$$\frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\Delta t} = F(\varphi) \quad (3-9)$$

Αυτό αναφέρεται ως άρρητη ολοκλήρωση μέχρι το φ^{n+1} σε ένα δεδομένο κελί και σχετίζεται φ^{n+1} με τα των γειτονικών κελιών δια μέσω του $F(\varphi^{n+1})$

$$\varphi^{n+1} = \varphi^n + \Delta t F(\varphi^{n+1}) \quad (3-10)$$

Αυτή η άρρητη εξίσωση μπορεί να λυθεί επαναληπτικά σε κάθε επίπεδο του χρόνου προτού πάει στο επόμενο χρονικό βήμα. Το πλεονέκτημα του πλήρως άρρητου σχήματος είναι ότι είναι άνευ όρων σταθερό σε σχέση με το μέγεθος του χρονικού βήματος.

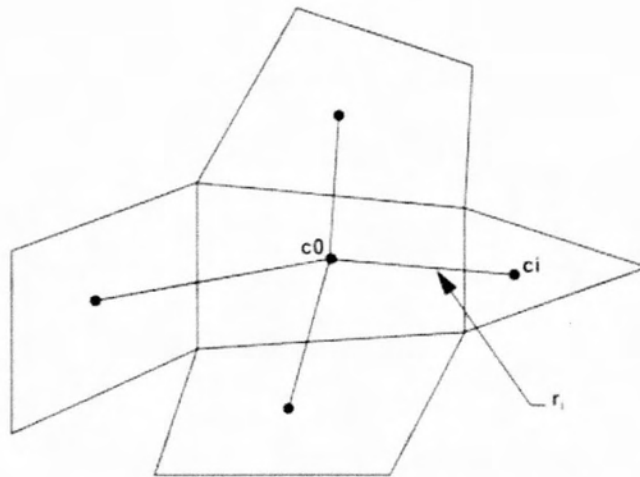
Εκτίμηση των κλίσεων και των παραγώγων

Οι κλίσεις δεν χρειάζονται μόνο για την κατασκευή τιμών ενός βαθμωτού στα μέτωπα των κελιών, αλλά επίσης και για τον υπολογισμό δευτεροβάθμιων όρων διάχυσης και κλίσεων ταχύτητας. Η κλίση $\nabla\varphi$ μιας δεδομένης μεταβλητής φ χρησιμοποιείται για να διακριτοποιήσει τους όρους μεταφοράς και διάχυσης στις εξισώσεις διατήρησης ροής. Οι κλίσεις στο ANSYS Fluent υπολογίζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες μεθόδους:

- Green-Gauss Cell-Based
- Green-Gauss Node-Based
- Least Squares Cell-Based (Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων)

Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός των κλίσεων έγινε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, η οποία και περιγράφεται παρακάτω. Σε αυτή τη μέθοδο υποτίθεται ότι η λύση μεταβάλλεται γραμμικά. Στο παρακάτω σχήμα, η αλλαγή στις τιμές του κελιού μεταξύ του c_0 και του c_i κατά μήκος του φορέα δr_i από το κέντρο βάρους του κελιού c_0 στο κελί c_i μπορεί να εκφραστεί ως:

$$(\nabla\varphi)_{c_0} \cdot \Delta r_i = (\varphi_{c_i} - \varphi_{c_0}) \quad (3-11)$$



Σχήμα 3.3: Εκτίμηση του Cell Centroid

Αν γραφτούν τώρα παρόμοιες εξισώσεις για κάθε κελί γύρω από το κελί c_0 , θα δημιουργηθεί το ακόλουθο σύστημα, το οποίο γράφεται σε σύντομη μορφή:

$$[J](\nabla\varphi)_{c_0} = \Delta\varphi \quad (3-12)$$

όπου $[J]$ είναι ο πίνακας συντελεστών, που είναι καθαρά συνάρτηση της γεωμετρίας.

Ο στόχος εδώ είναι να καθοριστεί η κλίση του κελιού $(\nabla\varphi_0 = \varphi_x\hat{i} + \varphi_y\hat{j} + \varphi_z\hat{k})$ λύνοντας το πρόβλημα ελαχιστοποίησης για το σύστημα του μη τετραγωνικού πίνακα συντελεστών.

Το παραπάνω γραμμικό σύστημα της εξίσωσης είναι υπερορισμένο και μπορεί να λυθεί αναλύοντας τον συντελεστή του πίνακα χρησιμοποιώντας τη διαδικασία Gram – Schmidt. Αυτή η ανάλυση αποδίδει ένα πίνακα από βάρη σε κάθε κελί. Με τη διαδικασία αυτή, γίνεται μια εύκολη προεπεξεργασία και αποθήκευση των βαρών, έτσι ώστε οι κλίσεις σε κάθε κόμβο να μπορεί να υπολογιστεί κάνοντας επαναληπτική διαδικασία σε όλες τις πλευρές στο πλέγμα και κατανέμουν τη συμβολή της κάθε πλευράς σε κάθε κόμβο. Έτσι για το συγκεκριμένο σχήμα σημαίνει ότι οι τρεις συνιστώσες των βαρών $(W_{i_0}^x, W_{i_0}^y, W_{i_0}^z)$ παράγονται για καθένα από τα μέτωπα του κελιού c_0 . Επομένως η κλίση στο κέντρο του κελιού μπορεί τότε να υπολογιστεί με τον πολλαπλασιασμό των συντελεστών βάρους με το διάνυσμα διαφοράς $\Delta\varphi = (\varphi_{c_i} - \varphi_{c_0})$.

$$(\varphi_x)_{c_0} = \sum_{i=1}^n W_{i_0}^x (\varphi_{c_i} - \varphi_{c_0}) \quad (3-13\alpha)$$

$$(\varphi_y)_{c_0} = \sum_{i=1}^n W_{i_0}^y (\varphi_{c_i} - \varphi_{c_0}) \quad (3-13\beta)$$

όπου το άθροισμα είναι από όλα τα άκρα τα οποία συνδέονται με τον κόμβο, όπως στο παραπάνω σχήμα και τα βάρη δίνονται από:

$$W_x^i = \frac{x_i - x_0}{r_{11}^2} - \frac{r_{12}}{r_{11}r_{12}^2} \left[(y_i - y_0) - (x_i - x_0) \frac{r_{12}}{r_{11}} \right] \quad (3-14)$$

και

$$W_x^i = \frac{1}{r_{22}^2} \left[(y_i - y_0) - (x_i - x_0) \frac{r_{12}}{r_{11}} \right] \quad (3-15)$$

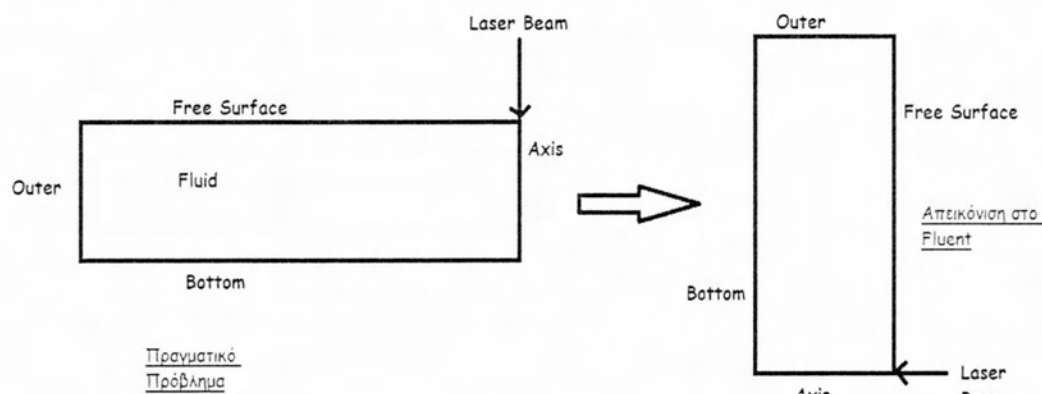
όπου

$$r_{11} = \left[\sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-16)$$

3.4 Το Πλέγμα

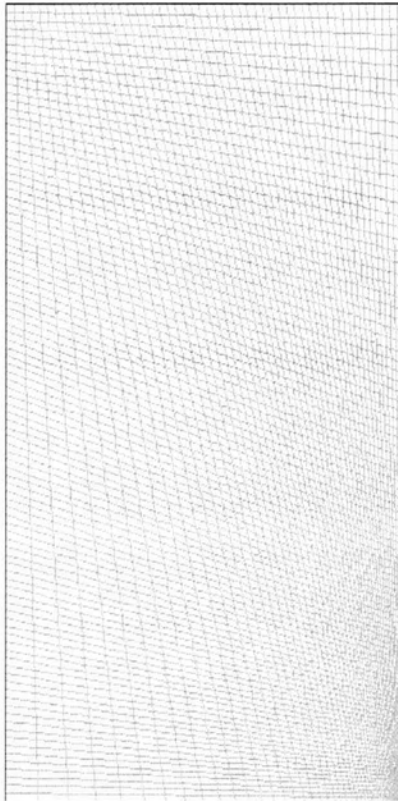
Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία ήταν πυκνό για καλύτερα αποτελέσματα. Το domain είχε διαστάσεις 10 mm σε μήκος και 5 mm σε πλάτος και με διαστήματα κάθε 0.01 mm. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε ήταν χωρικά μη-ομοιόμορφο για την καλύτερη επίλυση των μεταβλητών. Οι κόμβοι στην κάτω επιφάνεια και την αριστερή επιφάνεια απείχαν ίσες αποστάσεις ο ένας με τον άλλον. Στις υπόλοιπες δύο επιφάνειες ωστόσο, οι κόμβοι ήταν γεωμετρικά τοποθετημένοι έτσι ώστε το πλέγμα να είναι πιο πυκνό κοντά στην πηγή.

Μια ιδιομορφία του Fluent [15], είναι πως για να αναγνωρίσει αξονική συμμετρία, απαιτεί ο άξονας συμμετρίας να είναι ο άξονας x. Επομένως για την συγκεκριμένη εργασία, στην οποία ο άξονας συμμετρίας είναι ο y, έπρεπε το πλέγμα να περιστραφεί κατά 90°. Συνοπτικά αυτή η ιδιομορφία φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3.4: Μετατροπή του προβλήματος για εισαγωγή στο ANSYS Fluent

Και το τελικό πλέγμα έχει τη μορφή:



Grid (Time=0.0000e+00)

Sep 05, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 3.5: Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία

Η ποιότητα του πλέγματος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια και τη σταθερότητα των αριθμητικών υπολογισμών. Ανεξάρτητα από τον τύπο του πλέγματος που έχει χρησιμοποιηθεί, είναι απαραίτητος ο έλεγχος του πλέγματος. Τα χαρακτηριστικά που έχουν να κάνουν με την ποιότητα του πλέγματος είναι ο μέγιστος λόγος όγκων και η ορθογωνική ποιότητα.

Ορθογωνική ποιότητα πλέγματος (Orthogonal quality)

Ένας πολύ σημαντικός δείκτης που είναι δυνατό να ελεγχθεί με το Fluent είναι μια ποσότητα που αναφέρεται ως ορθογωνική ποιότητα. Για να καθοριστεί η ορθογωνική ποιότητα για ένα κελί, οι πιο κάτω τιμές υπολογίζονται για κάθε επιφάνεια i :

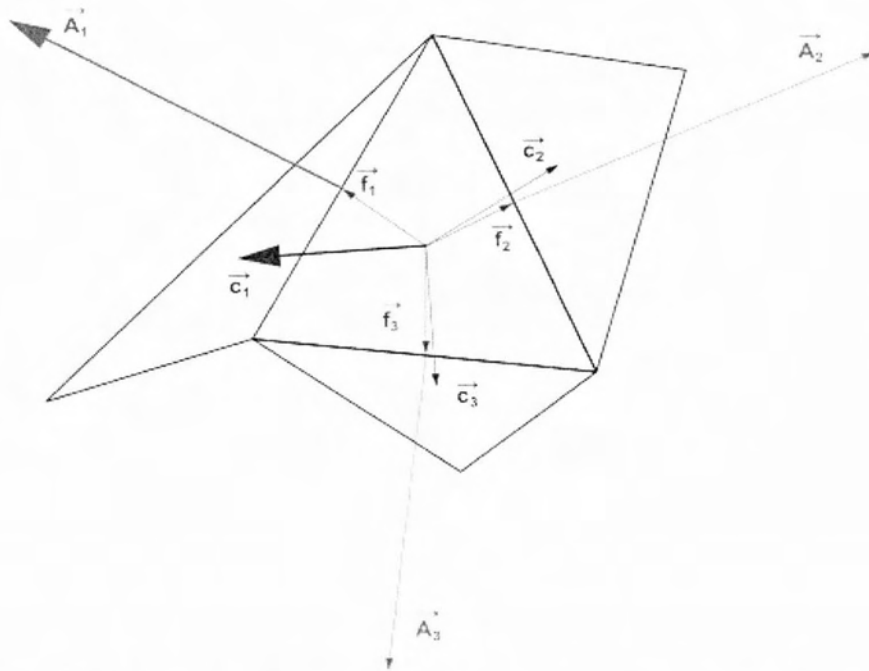
- Το κανονικοποιημένο εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος εμβαδού μιας επιφάνειας (\vec{A}_i) και του διανύσματος από το κέντρο του κελιού μέχρι το κέντρο της ίδιας επιφάνειας (\vec{f}_i):

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{f}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|} \quad (3-17)$$

- Το κανονικοποιημένο εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος εμβαδού μιας επιφάνειας (\vec{A}_i) και του διανύσματος από το κέντρο του κελιού έως το κέντρο του διπλανού κελιού με το οποίο μοιράζονται την επιφάνεια αυτή (\vec{c}_i):

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|} \quad (3-18)$$

Η χειρότερη από τις τιμές που υπολογίζονται από αυτές τις δύο εξισώσεις για κάθε επιφάνεια του κελιού είναι η ορθογωνική ποιότητα του κελιού. Κατά συνέπεια, τα χειρότερα κελιά θα έχουν ορθογωνική ποιότητα που θα τείνει προς το 0 ενώ η ποιότητα των καλύτερων κελιών θα τείνει προς το 1. Τα διανύσματα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ορθογωνικής ποιότητας φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

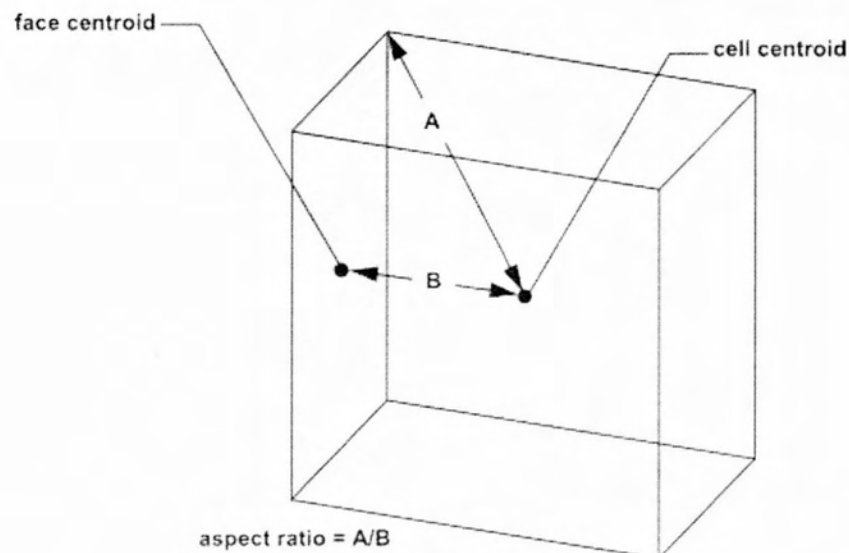


Σχήμα 3.6: Χρήσιμα διανύσματα για τον υπολογισμό της ορθογωνικής ποιότητας

Μέγιστος Λόγος Όγκων (Maximum Aspect ratio)

Ο λόγος aspect ratio είναι μια ποσοτικοποίηση της έκτασης (stretching) του κελιού. Υπολογίζεται ως ο λόγος του μέγιστου όγκου προς τον ελάχιστο όγκο για τις εξής αποστάσεις:

- Οι κάθετες αποστάσεις μεταξύ του κέντρου του κελιού και των κέντρων των επιφανειών και
- Οι αποστάσεις μεταξύ του κέντρου του κελιού και των κόμβων.



Σχήμα 3.7: Υπολογισμός Aspect ratio

Το Fluent βοηθάει στον έλεγχο της ποιότητας του πλέγματος. Μετά την εισαγωγή του πλέγματος στο πρόγραμμα. Πατώντας στην καρτέλα *Grid*→*Info*→*Quality*, το Fluent κάνει αυτόματα έλεγχο ποιότητας εμφανίζοντας ένα μήνυμα με τα αποτελέσματα. Για την παρούσα εργασία το μήνυμα του Fluent ήταν το εξής:

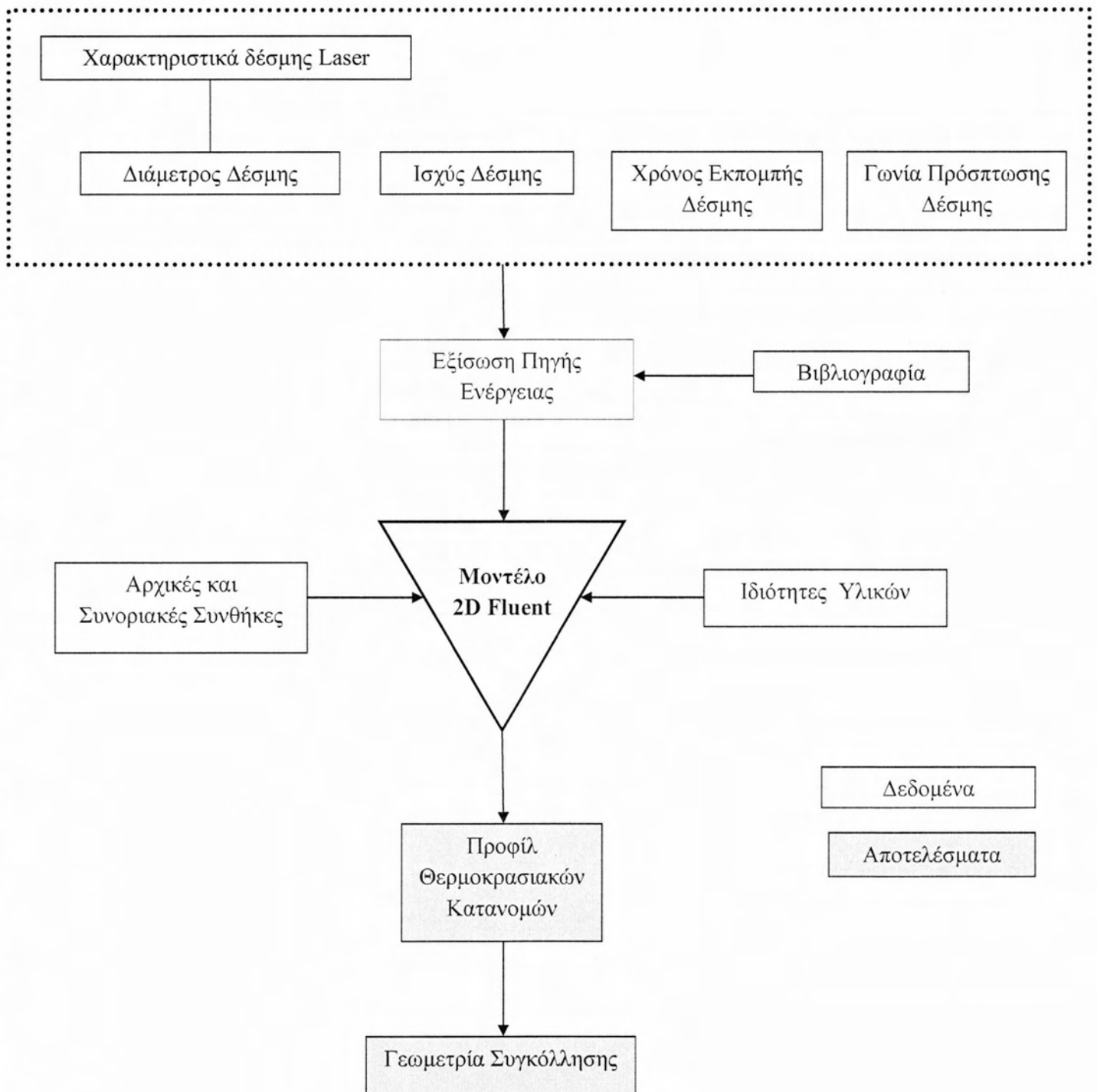
Mesh Quality:

Orthogonal Quality ranges from 0 to 1, where values close to 0 correspond to low quality.
Minimum Orthogonal Quality = 8.37620e-01
Maximum Aspect Ratio = 6.00163e+00

Σχήμα 3.8: Ποιότητα του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε.

3.5 Διάγραμμα Μελέτης Συγκόλλησης

Παρακάτω δίνεται σχηματικά το διάγραμμα για την μελέτη μιας περίπτωσης συγκόλλησης Laser με αξονική συμμετρία. Με γαλάζιο χρώμα είναι τα δεδομένα που δίνονται από το χρήστη ενώ με κόκκινο τα δεδομένα που επιστρέφει το πρόγραμμα.



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα προσομοίωσης σημειακής συγκόλλησης Laser

4. Αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για την παρούσα μελέτη γίνεται χρήση δύο μοντέλων και δύο υλικών, του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 304 και του κράματος αλουμινίου 6061-T6. Το πρώτο Μοντέλο (I) περιλαμβάνει την μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγή, ενώ το δεύτερο Μοντέλο (II) συμπεριλαμβάνει την ροή ρευστού λόγω των μεταβολών της επιφανειακής τάσης και της πυκνότητας με την θερμοκρασία. Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

| <u>Μοντέλο</u> | <u>Υλικό</u> | <u>Περίπτωση</u> | <u>Ισχύς Δέσμης</u> | <u>Διάμετρος Δέσμης</u> |
|-----------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| I | AISI 304 | 1 | 1000 W | 1 mm |
| | | 2 | 2000 W | 1 mm |
| | | 3 | 1000 W | 2 mm |
| | Al 6061 | 4 | 1000 W | 1 mm |
| | | 5 | 2000 W | 1 mm |
| | | 6 | 1000 W | 2 mm |
| II | AISI 304 | 7 | 1000 W | 1 mm |
| | Al 6061 | 8 | 1000 W | 1 mm |
| | Υλικό 3 | 9 | 1000 W | 1 mm |

Πίνακας 4.1: Σύνοψη των περιπτώσεων που υπάρχουν στην εργασία

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα για την προσομοίωση κάθε περίπτωσης. Για κάθε περίπτωση ο χρόνος εκπομπής ορίστηκε στα 0.3 δευτερόλεπτα και η συνολική προσομοίωση καλύπτει το φάσμα ενός δευτερολέπτου, ξεκινώντας από τη στιγμή που η δέσμη Laser προσπίπτει στο τεμάχιο. Για την προσομοίωση, το βήμα των επαναλήψεων ορίστηκε στα 0.01 sec για τα πρώτα 0.3 sec, την περίοδο που θερμαίνεται η πλάκα δηλαδή, ενώ στη συνέχεια ορίστηκε στο 0.005, αρκετά μικρό ώστε να καταγραφεί ο ρυθμός ψύξης.

Στα αποτελέσματα, περιλαμβάνονται εικόνες της μορφής που έχει η κατανομή της θερμότητας και η διεπιφάνεια υγρού-στερεού για χρόνο ίσο με 0.3 sec, ακριβώς δηλαδή τη στιγμή που σβήνει το Laser. Επίσης, για καλύτερα αποτελέσματα, ορίστηκαν τρία σημεία, το ένα πάνω στον άξονα συμμετρίας, το δεύτερο στην ελεύθερη επιφάνεια του τεμαχίου και το

τρίτο σε γωνία 45° σε σχέση με την πηγή, ώστε να παρασταθούν γραφικά οι θερμοκοί κύκλοι τους. Ένα τέταρτο σημείο ορίστηκε πάνω στην πηγή, για να παρασταθεί ο θερμοκοί κύκλος της ακριβώς μετά το σβήσιμο του Laser. Τα σημεία συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα και φαίνονται στην επόμενη εικόνα.

| Σημείο | Συντεταγμένες X στο πλέγμα | Συντεταγμένες Y στο πλέγμα |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|
| A) Πηγή | 0.005 | 0.00 |
| B) Άξονα | 0.004 | 0.00 |
| Γ) Επιφάνεια | 0.005 | 0.001 |
| Δ) 45° από Πηγή | 0.0045 | 0.0005 |

Πίνακας 4.2: Συντεταγμένες των τεσσάρων σημείων πάνω στο πλέγμα



| | |
|------------------------|---|
| Grid (Time=0.0000e+00) | Sep 11, 2014 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady) |
|------------------------|---|

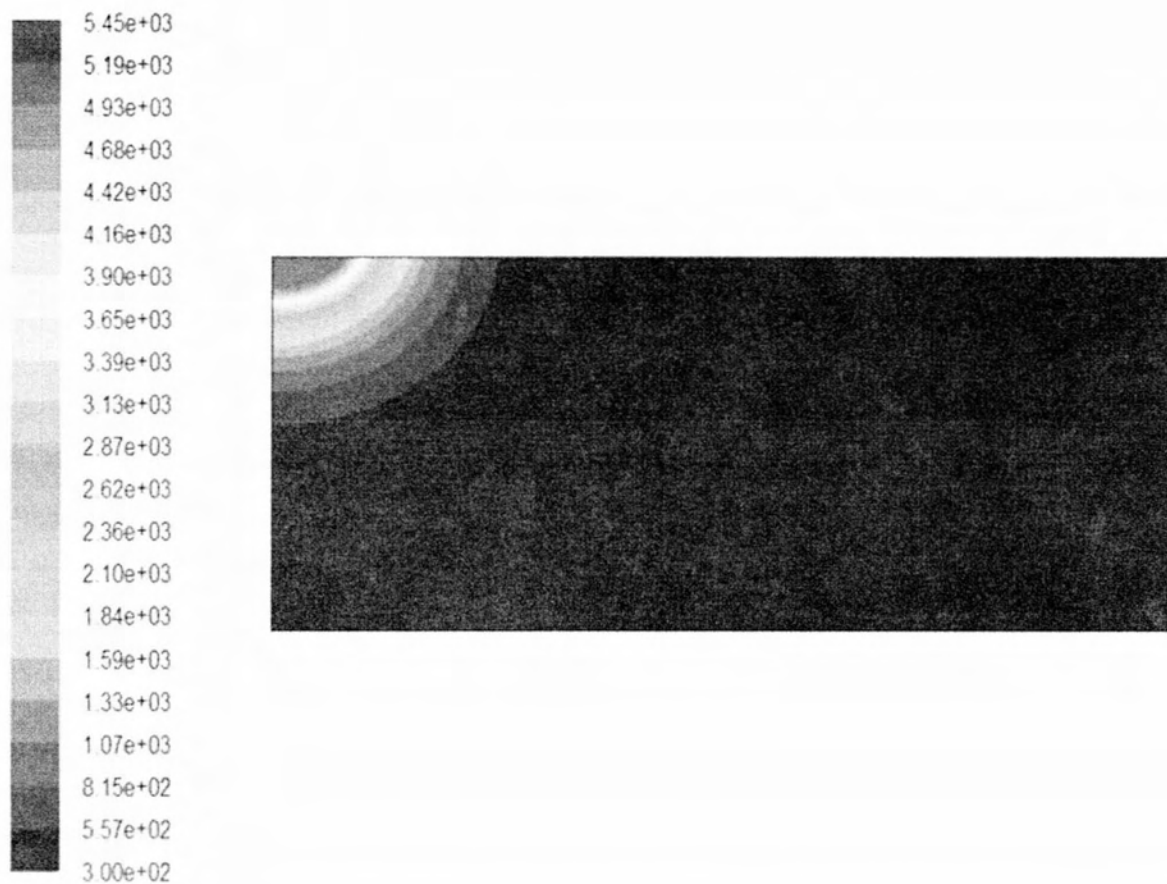
Σχήμα 4.1: Απεικόνιση των τεσσάρων σημείων πάνω στο πλέγμα

Επίσης για να αποτυπωθεί με αριθμούς η γεωμετρία της συγκόλλησης, δημιουργήθηκαν δύο γραμμές, η πρώτη στον άξονα του πλέγματος και η δεύτερη στην ελεύθερη επιφάνεια του τεμαχίου, όπου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των σημείων θα διαπιστωθεί σε τι βάθος έχει διεισδύσει η συγκόλληση και ποια είναι η ακτίνα της. Επίσης, παρακολουθώντας γραφικά σε συνάρτηση με το χρόνο τις θερμοκρασίες των σημείων της γραμμής που είναι στην επιφάνεια, μπορεί ο αναγνώστης να λάβει μια ιδέα για τον ρυθμό ψύξης του τεμαχίου.

4.1 Μοντέλο I

Περίπτωση 1

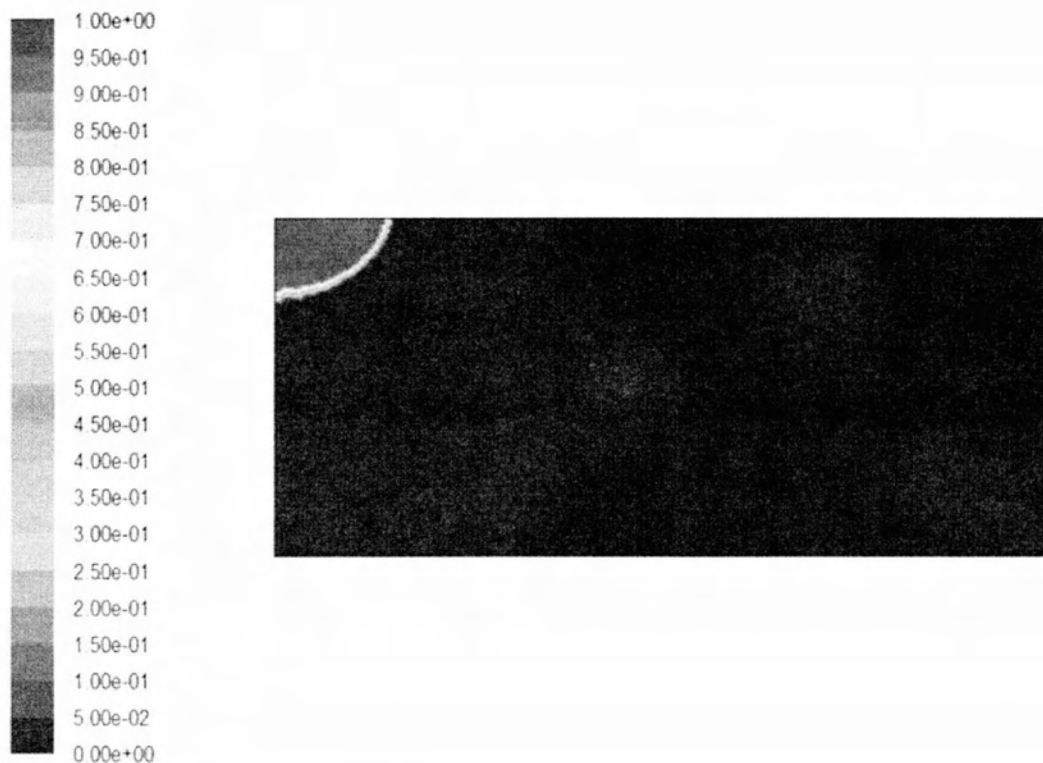
Η πλάκα σε αυτή την περίπτωση είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304, η δέσμη Laser έχει διάμετρο 1 mm, η ισχύς της είναι ίση με 1000 W και ο χρόνος εκπομπής είναι 0.3 sec. Τη στιγμή που σβήνει το Laser η κατανομή της θερμοκρασίας και ο λόγος υγρού στερεού είναι ως εξής:



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Sep 07, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.2: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 1

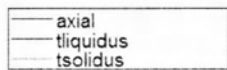


Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01)

Sep 07, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

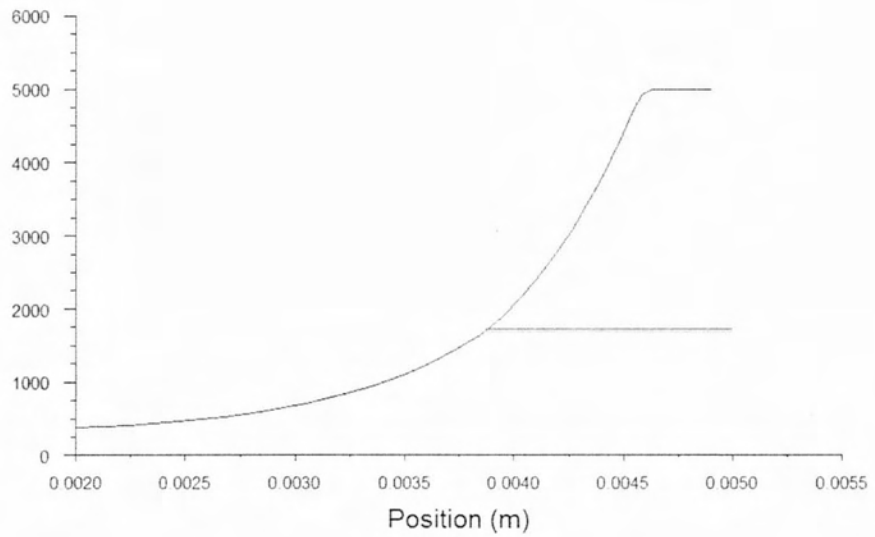
Σχήμα 4.3: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 1

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, η μέγιστη θερμοκρασία που έχει αναπτυχθεί στο τεμάχιο εκείνη τη στιγμή βρίσκεται όπως είναι αναμενόμενο στο σημείο που βρίσκεται το κέντρο της δέσμης Laser και αγγίζει τους 5449 K. Η λίμνη συγκόλλησης παρουσιάζει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 2, και είναι η περιοχή με κόκκινο χρώμα, η περιοχή δηλαδή που το στερεό έχει λιώσει πλήρως. Η περιοχή με μπλε χρώμα είναι η περιοχή που το στερεό δεν έχει υποστεί λιώσιμο. Στο ενδιάμεσο βρίσκεται η περιοχή που περιλαμβάνει τόσο υγρό όσο και στερεό σε διαφορετικές ποσότητες, η γνωστή δηλαδή Ζώνη Μερικής Τήξης. Για την ακριβή γεωμετρία της συγκόλλησης θα πρέπει κανείς να συμβουλευτεί τα επόμενα δύο διαγράμματα στα οποία φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας των σημείων που βρίσκονται πάνω στην γραμμή του άξονα και πάνω στην γραμμή της ελεύθερης επιφάνειας.



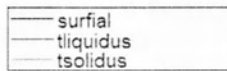
(a)

Static Temperature (k)



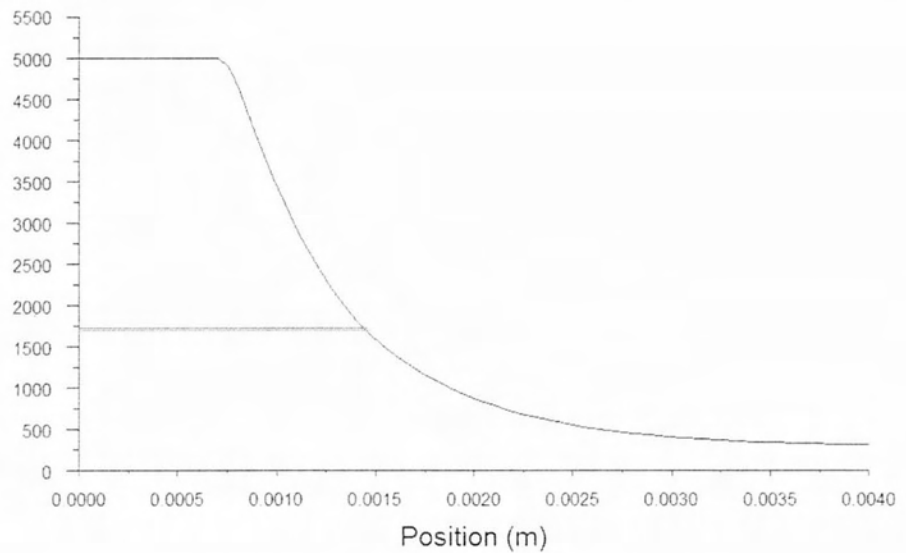
Static Temperature (Time=3.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)



(b)

Static Temperature (k)



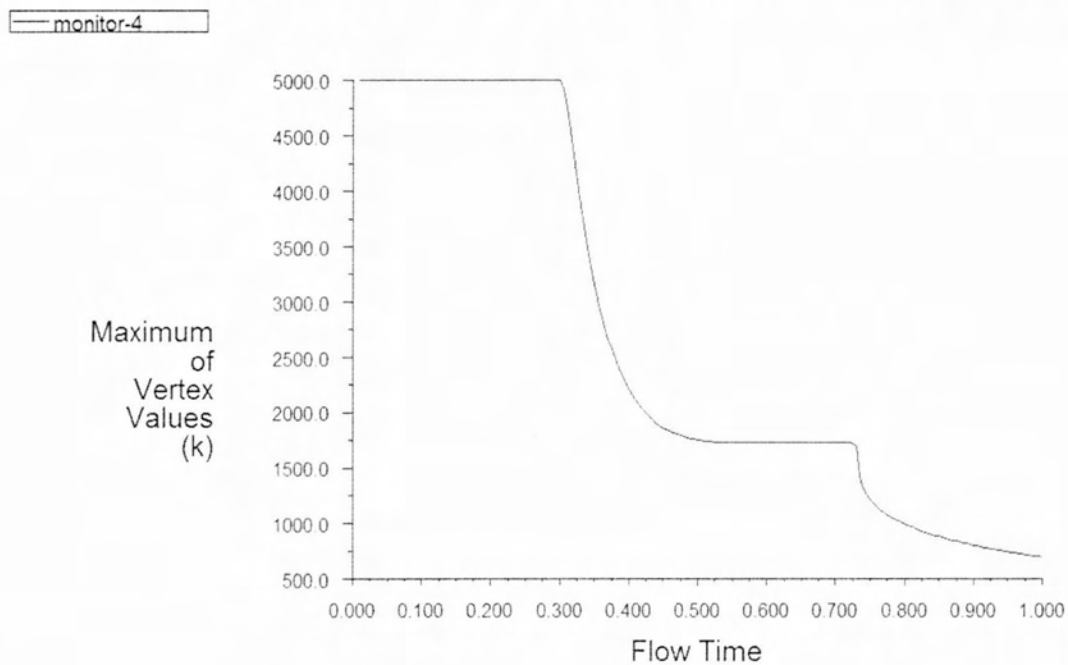
Static Temperature (Time=3.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.4: Διάγραμμα θερμοκρασίας την στιγμή $t=0.3$ sec, (a) των σημείων του άξονα και (b) των σημείων της επιφάνειας, Περίπτωση 1

Οι δύο ευθείες γραμμές δείχνουν τις θερμοκρασίες Liquidus και Solidus αντίστοιχα. Οποιοδήποτε σημείο έχει θερμοκρασία υψηλότερη από την θερμοκρασία Liquidus ανήκει στη λίμνη συγκόλλησης και είναι 100% υγρό. Τα σημεία που ανήκουν κάτω από την γραμμή Solidus παρέμειναν 100% στερεά για το σύνολο της διαδικασίας. Τα σημεία που βρίσκονται ανάμεσα από τις δύο αυτές γραμμές είναι τα σημεία που ανήκουν στη ZMT. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, η ZMT τήξης είναι μικρή, γεγονός αναμενόμενο αφού η διαφορά ανάμεσα στις θερμοκρασίες Liquidus και Solidus είναι το ίδιο μικρή. Από τα ανωτέρω διαγράμματα μπορεί κανείς να δει πως η λίμνη συγκόλλησης έχει βάθος 1,2 mm ενώ διάμετρο στην επιφάνεια ίση με 1,5 mm.

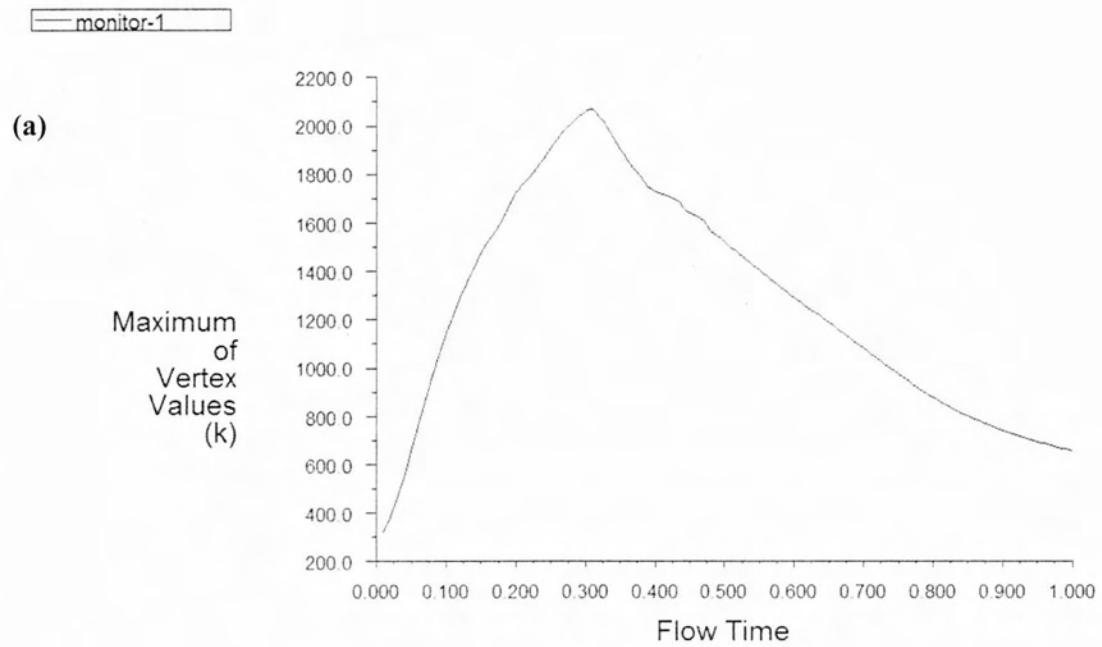
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι θερμικοί κύκλοι για τα 4 σημεία αναφοράς.



Convergence history of Static Temperature on source (Time=1.0000e+00)

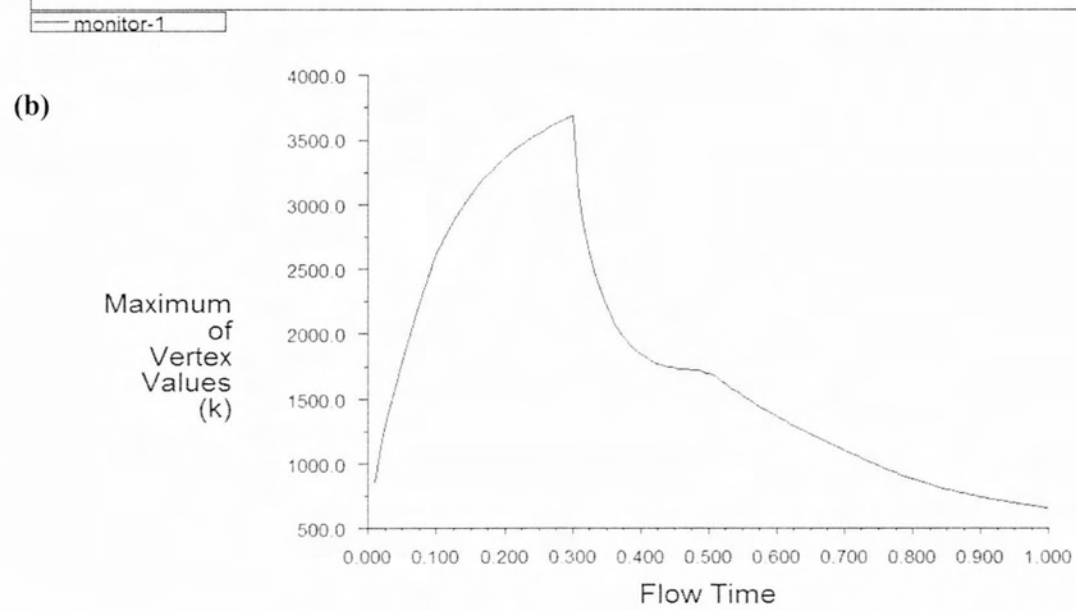
Sep 07, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.5: Θερμικός κύκλος του σημείου A, Περίπτωση 1



Convergence history of Static Temperature on axispoint (Time=1.0000e+00)

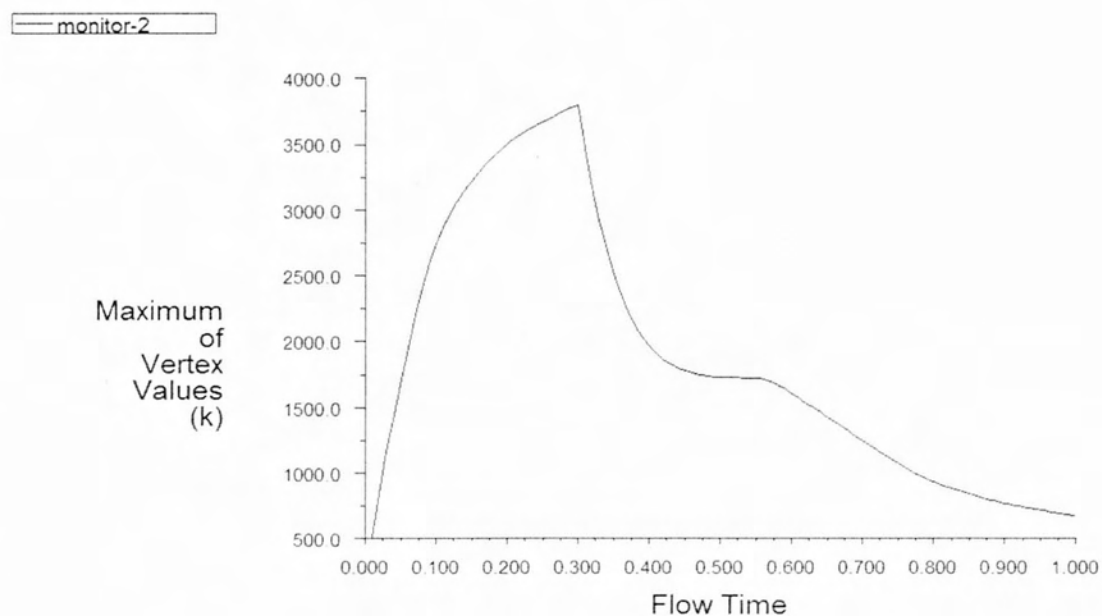
Sep 07, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)



Convergence history of Static Temperature on surfpoint (Time=1.0000e+00)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.6: Θερμικός κύκλος των σημείων (a) Β και (b) Γ, Περίπτωση 1



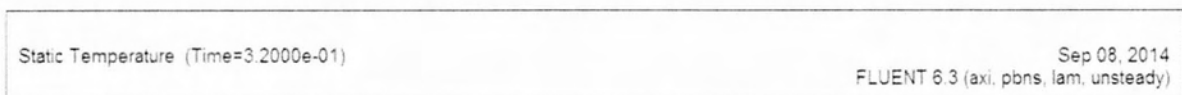
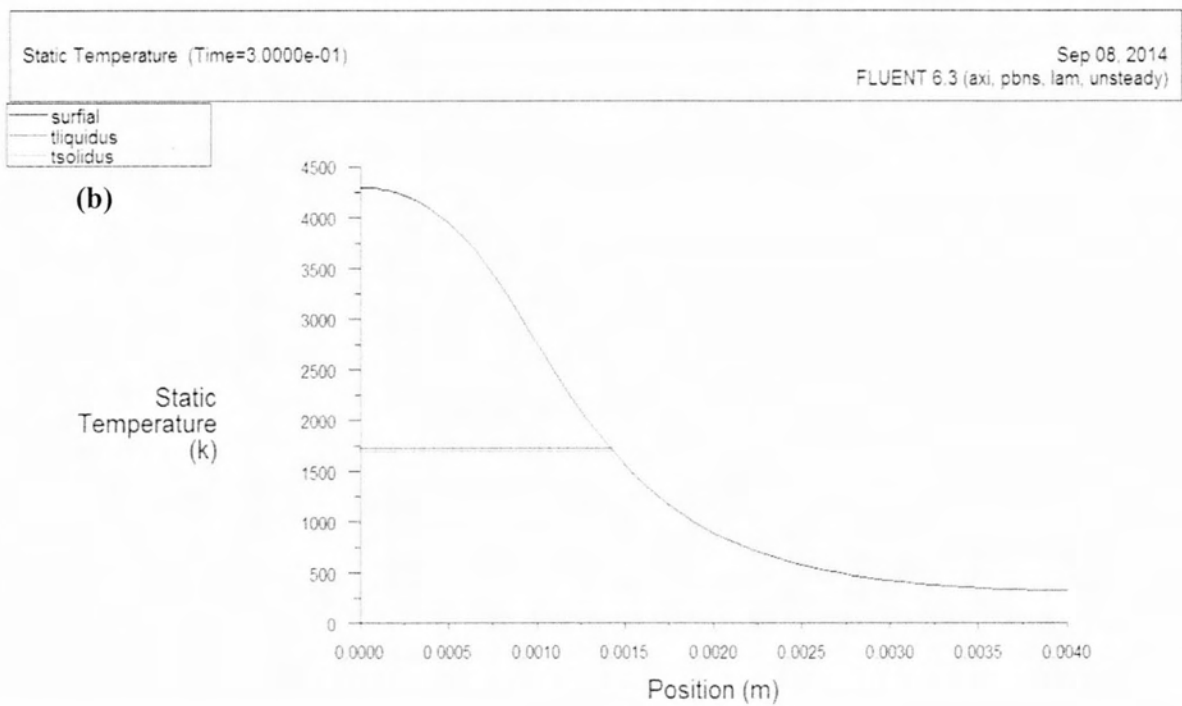
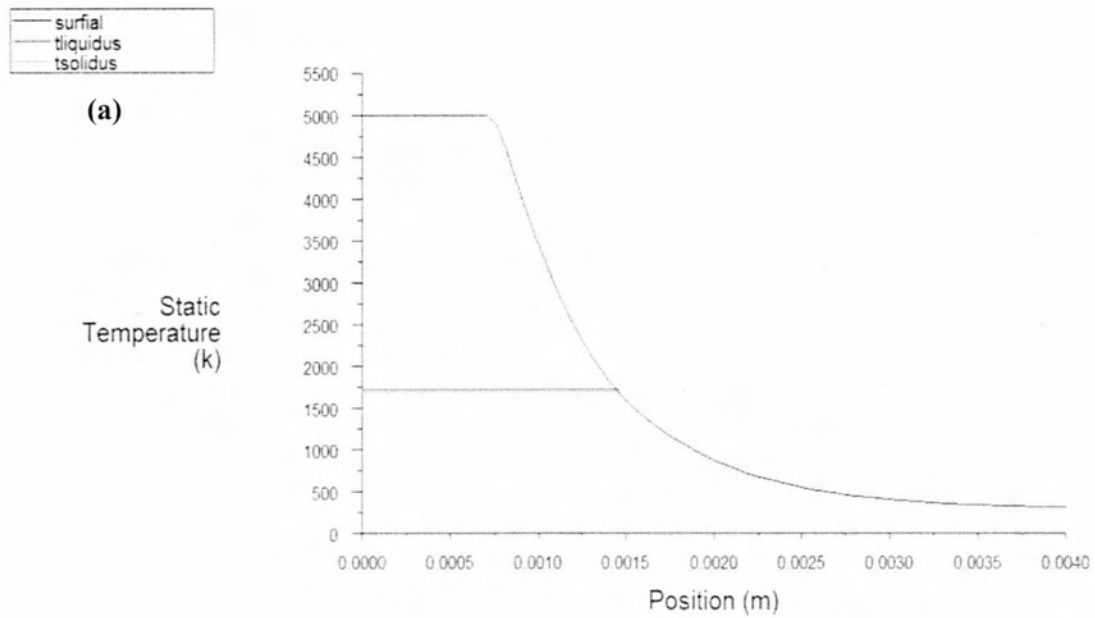
Convergence history of Static Temperature on midpoint (Time=1.0000e+00)

Sep 07, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.7: Θερμικός κύκλος του σημείου Δ, Περίπτωση 1

Από τους θερμικούς κύκλους ενός σημείου μπορεί να δει κανείς αν το συγκεκριμένο σημείο έχει επηρεαστεί από τη θερμοκρασία και σε τι βαθμό. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα όλα τα σημεία παρουσιάζουν μεγάλο ρυθμό ψύξης. Πιο ήπιο ρυθμό ψύξης παρουσιάζει το σημείο που βρίσκεται πάνω στον άξονα, ενώ τον μεγαλύτερο ρυθμό ψύξης τον έχει το σημείο στο οποίο προσπίπτει η ακτίνα της δέσμης Laser.

Στη συνέχεια, θεωρήθηκε απαραίτητο να μελετηθούν οι θερμοκρασιακές κατανομές σε διάφορες χρονικές στιγμές των σημείων που βρίσκονται πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια.

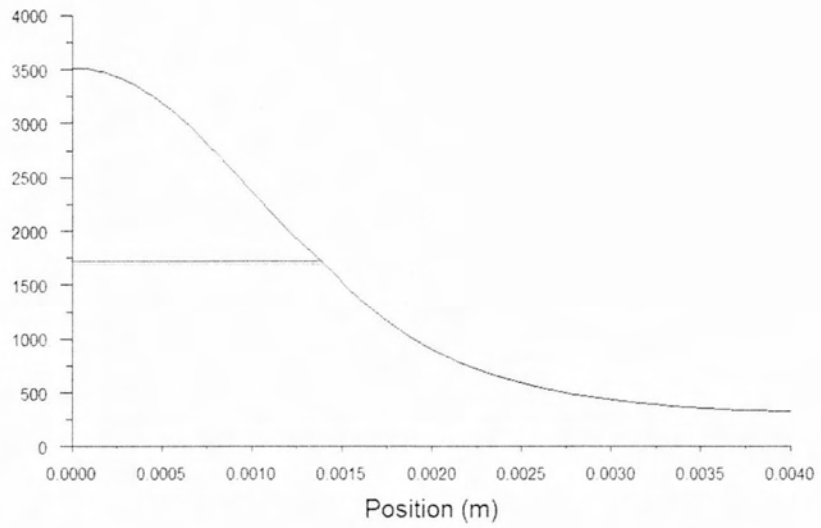


Σχήμα 4.8: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.3$ sec και (b) $t=0.32$ sec

— surfial
 — tliquidus
 — tsolidus

(a)

Static
 Temperature
 (k)



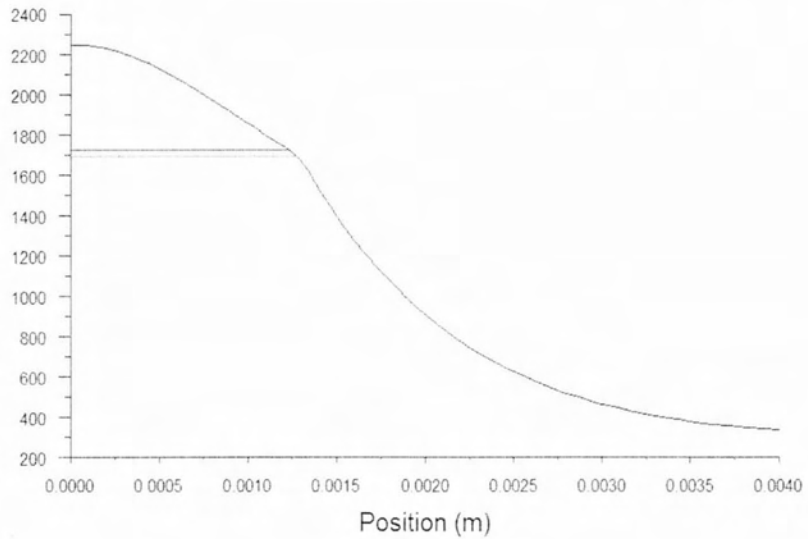
Static Temperature (Time=3.4000e-01)

Sep 08, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

— surfial
 — tliquidus
 — tsolidus

(b)

Static
 Temperature
 (k)



Static Temperature (Time=4.0000e-01)

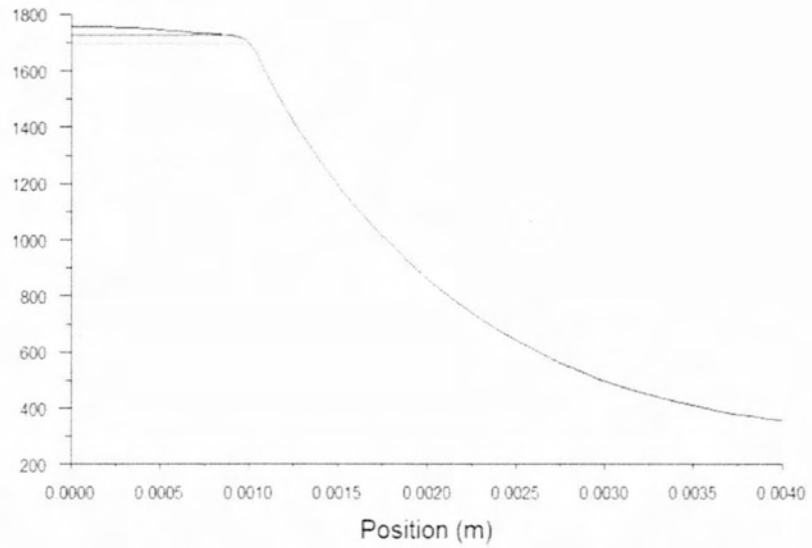
Sep 08, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.9: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.34$ sec και (b) $t=0.4$ sec

— surfial
 — tliquidus
 — tsolidus

(a)

Static
 Temperature
 (k)



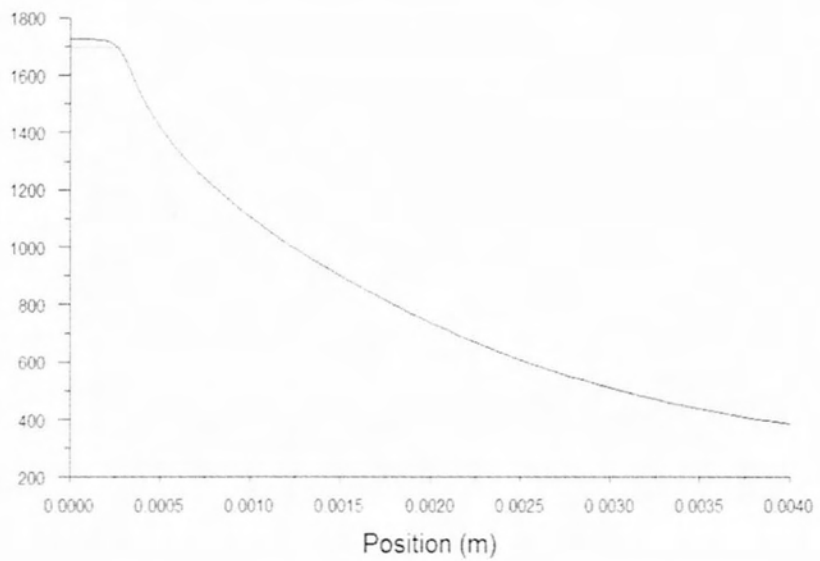
Static Temperature (Time=5.0000e-01)

Sep 08, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

— surfial
 — tliquidus
 — tsolidus

(b)

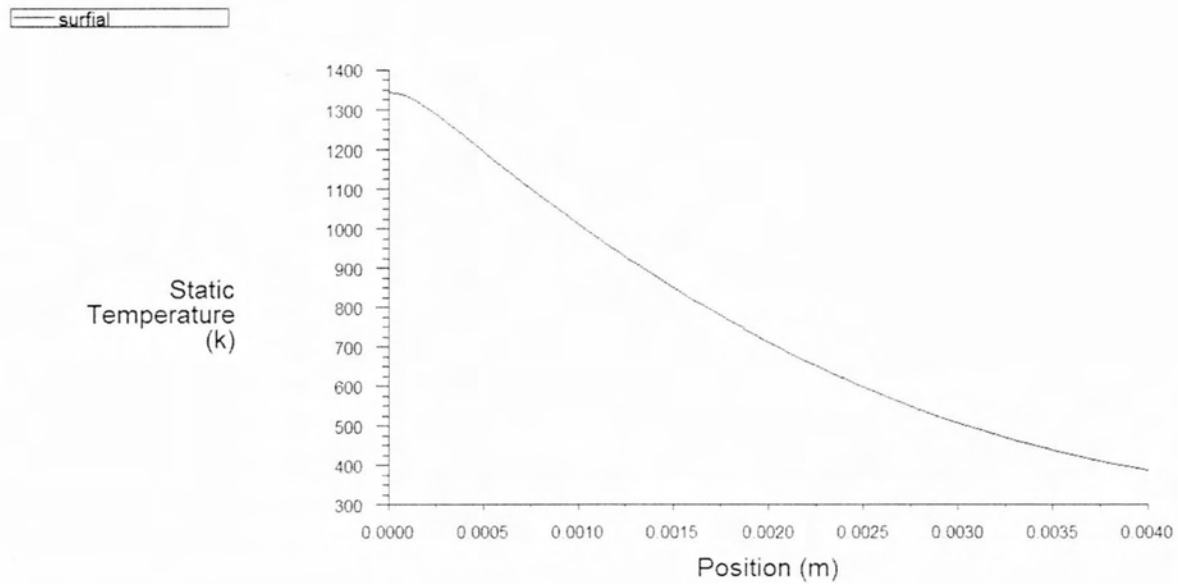
Static
 Temperature
 (k)



Static Temperature (Time=7.0000e-01)

Sep 08, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.10: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.5$ sec και (b) $t=0.7$ sec



Static Temperature (Time=7.4000e-01)

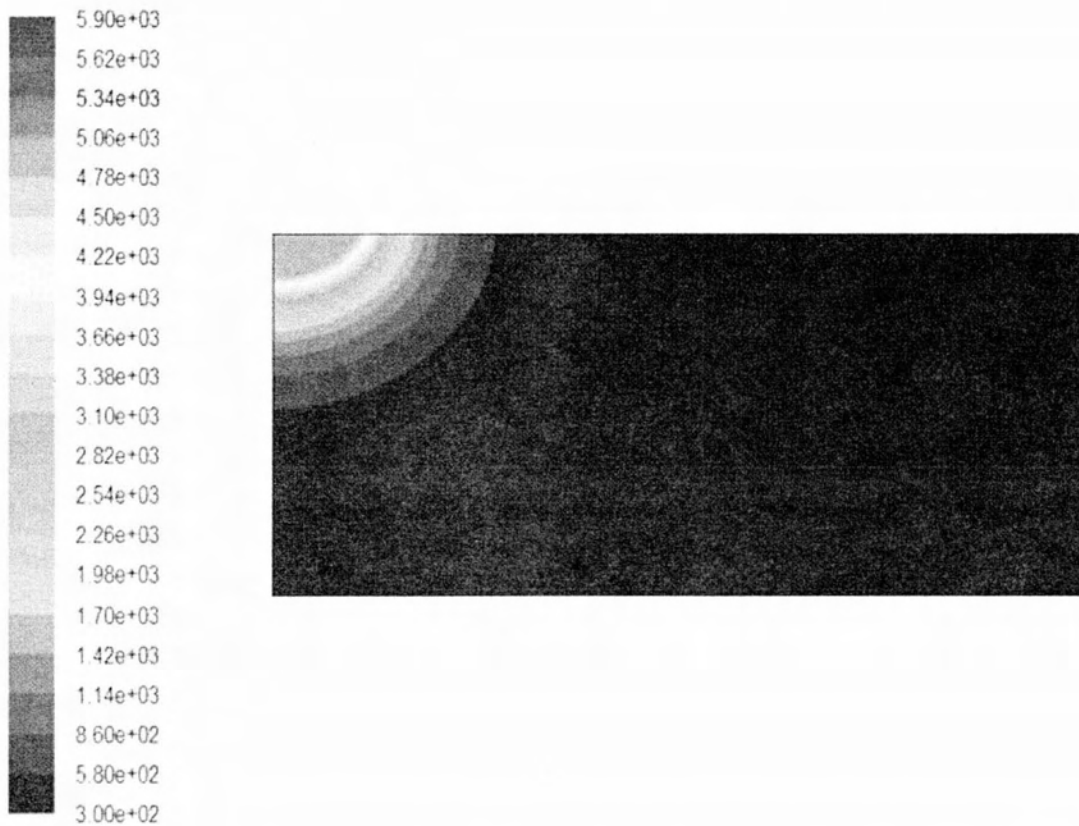
Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.11: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για $t=0.74$ sec

Η στιγμή που επέρχεται η πλήρης στερεοποίηση είναι στα 0.44 δευτερόλεπτα μετά την απενεργοποίηση της δέσμης Laser. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, το πιο κρίσιμο είναι το σημείο μεταξύ 0.3 και 0.32 δευτερολέπτων, όπου η ψύξη γίνεται με ταχύτατους ρυθμούς. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως, ενώ κατά τη θέρμανση η ZMT είχε μικρό μέγεθος, κατά την ψύξη το μέγεθος φαίνεται να αυξάνεται.

Περίπτωση 2

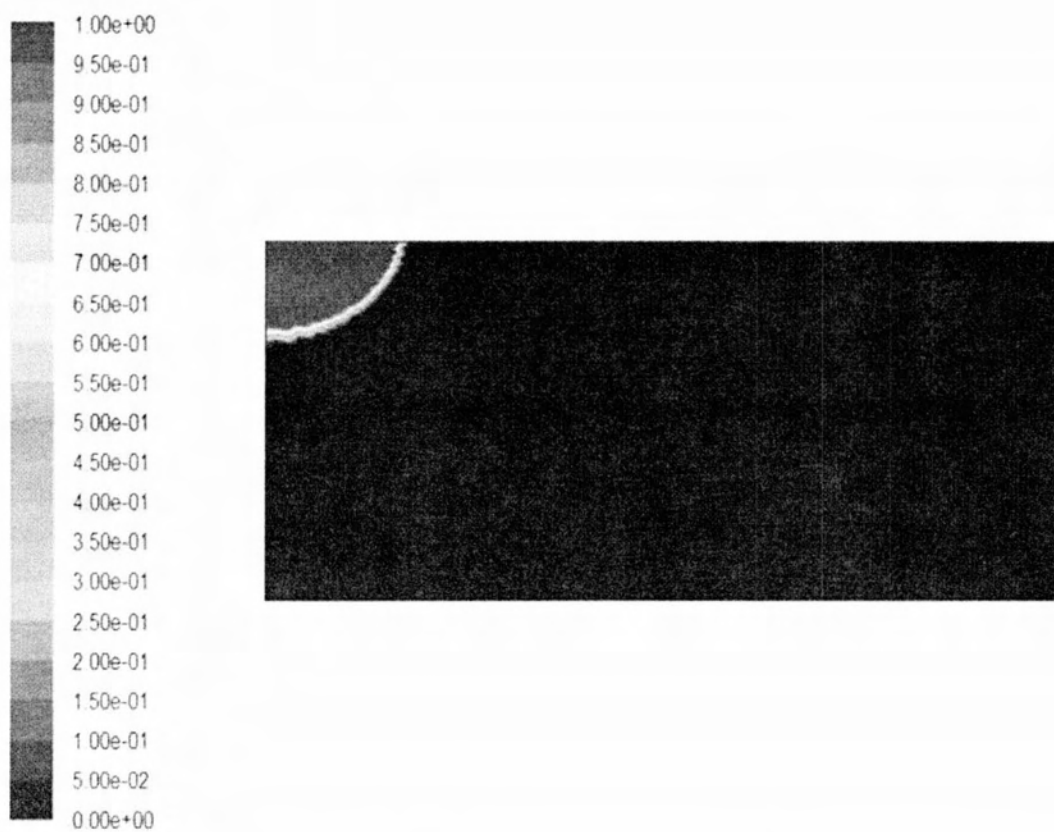
Η πλάκα σε αυτή την περίπτωση είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 όπως και στην πρώτη περίπτωση, και η δέσμη Laser έχει διάμετρο 1 mm αλλά η ισχύς διπλασιάζεται και γίνεται ίση με 2000 W .Τη στιγμή που σβήνει το Laser η κατανομή της θερμοκρασίας και ο λόγος υγρού στερεού είναι όπως απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες:



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.12: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 2

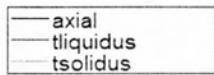


Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

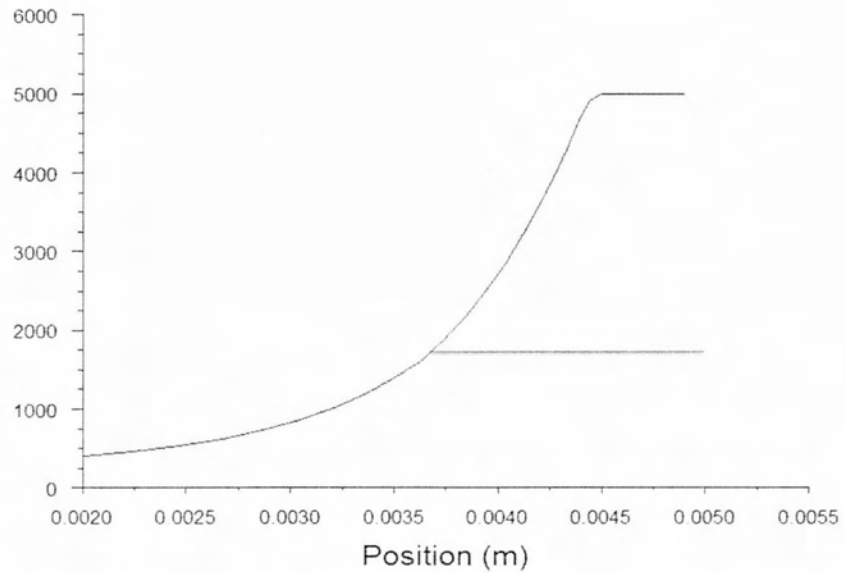
Σχήμα 4.13: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 2

Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς πως με την αύξηση της ισχύος της δέσμης Laser αυξάνονται όλα τα μεγέθη. Η μέγιστη θερμοκρασία που εμφανίζεται είναι 5890 K. Η λίμνη συγκόλλησης είναι εμφανώς μεγαλύτερη από εκείνη της περίπτωσης 1. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα των σημείων του άξονα και των σημείων της ελεύθερης επιφάνειας που ακολουθούν.



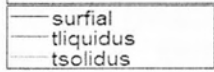
(b)

Static Temperature (k)

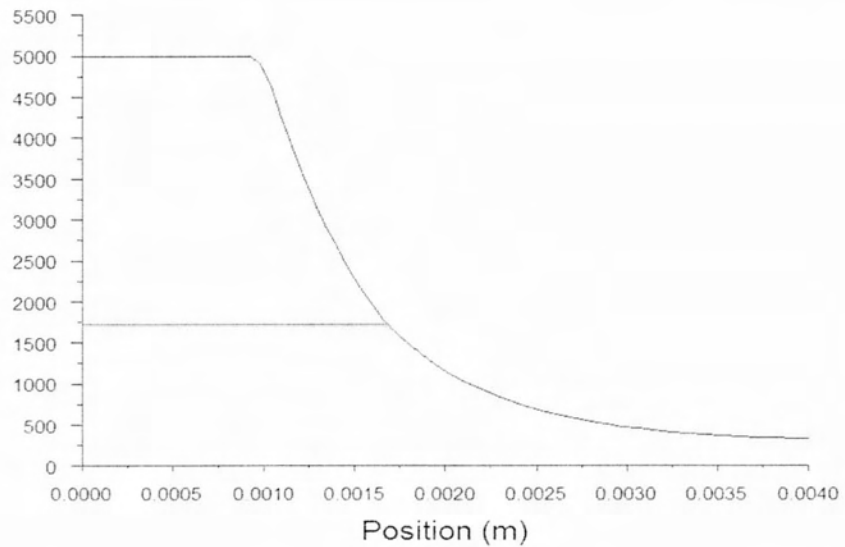


Static Temperature (Time=3.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)



Static Temperature (k)

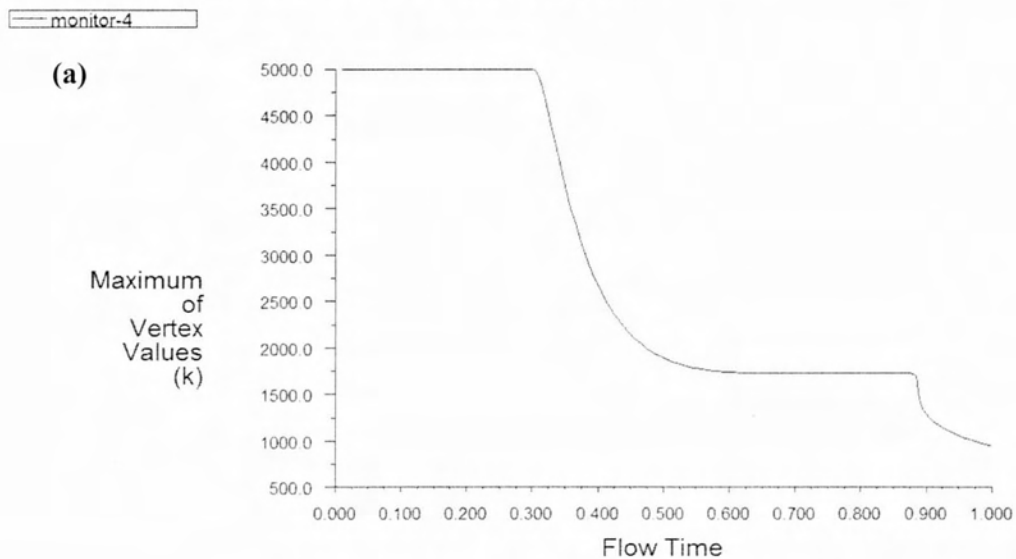


Static Temperature (Time=3.0000e-01)

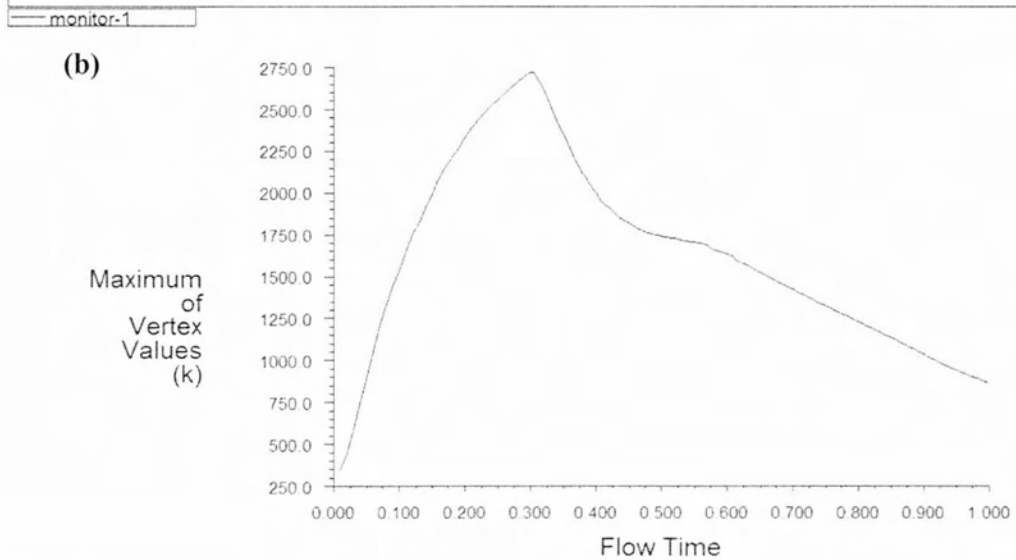
Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.14: Διάγραμμα θερμοκρασίας την στιγμή $t=0.3$ sec, (a) των σημείων του άξονα και (b) των σημείων της επιφάνειας, Περίπτωση 2

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.12, η λίμνη συγκόλλησης σε αυτή την περίπτωση έχει διαστάσεις 1.6 mm σε βάθος και 1.7 mm σε επιφανειακή ακτίνα. Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται λογικό, καθώς με την αύξηση της ισχύος περνάει περισσότερη ενέργεια στην συγκόλληση και επομένως τήκεται περισσότερο υλικό.

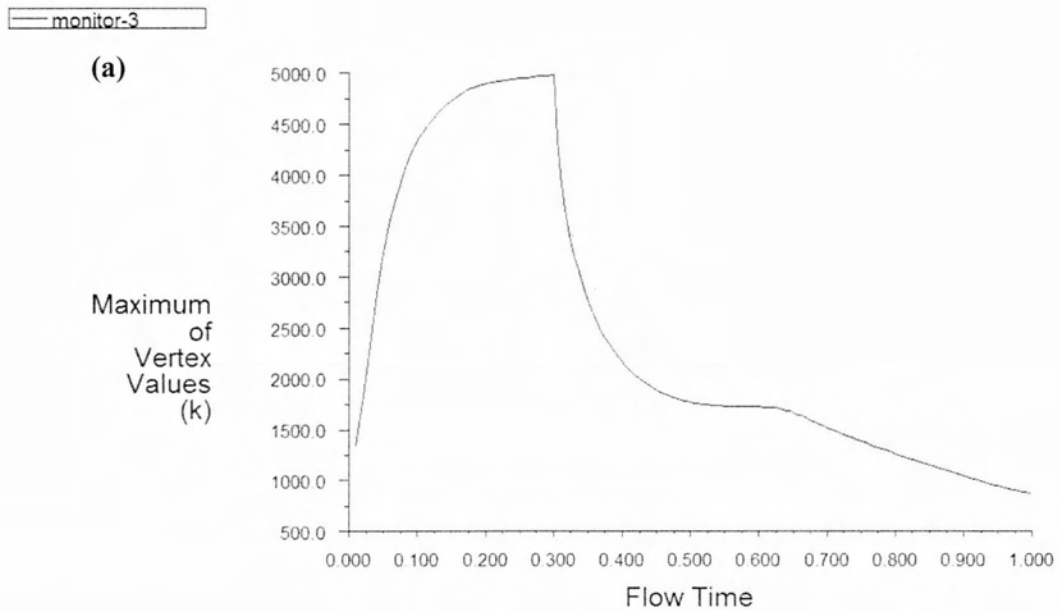


Convergence history of Static Temperature on source (Time=1.0000e+00) Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

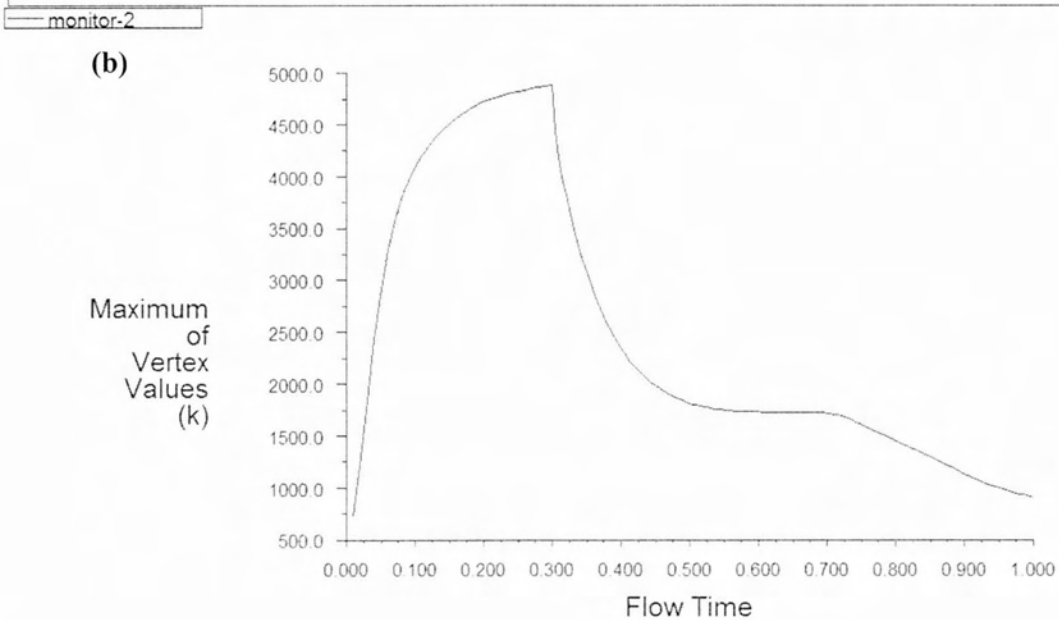


Convergence history of Static Temperature on axispoint (Time=1.0000e+00) Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.15: Θερμικός κύκλος των σημείων (a) A και (b) B, Περίπτωση 2



Convergence history of Static Temperature on surfpoint (Time=1.0000e+00) Sep 09, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

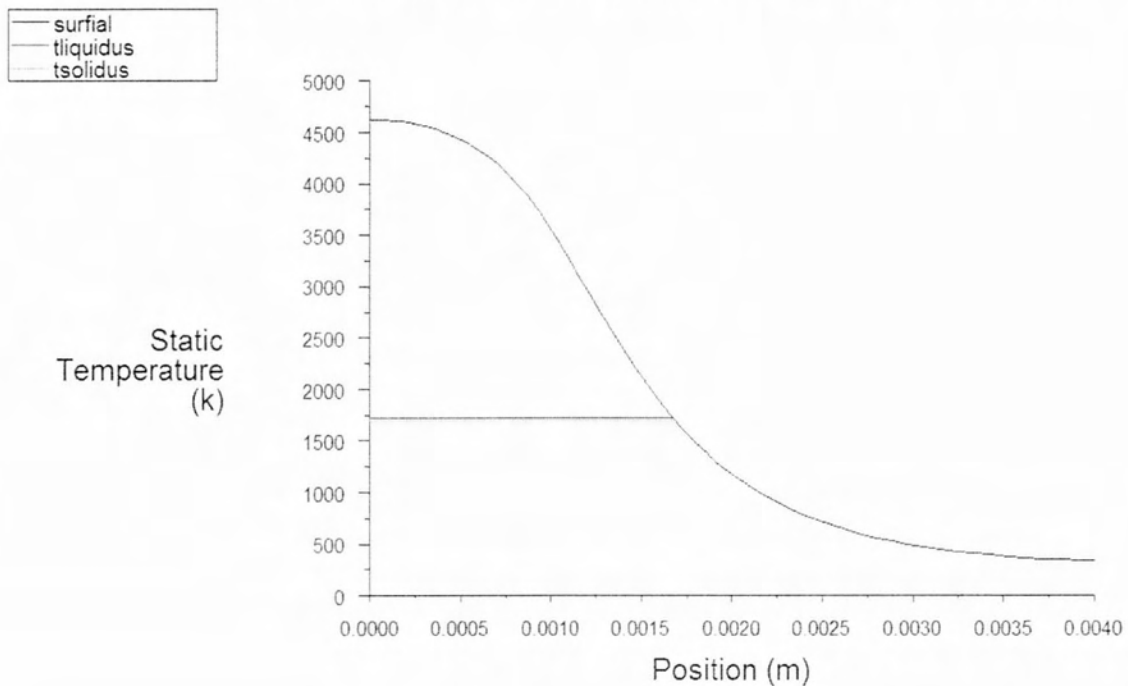


Convergence history of Static Temperature on midpoint (Time=1.0000e+00) Sep 08, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.16: Θερμικός κύκλος των σημείων (a) Γ και (b) Δ, Περίπτωση 2

Οι μέγιστες θερμοκρασίες που παρουσιάζονται στα διαγράμματα των θερμικών κύκλων των τεσσάρων σημείων είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της περίπτωσης 1, όπως είναι φυσικό. Η κλίση του διαγράμματος στο σημείο που βρίσκεται στον άξονα εμφανίζει την πιο ήπια κλίση σε σχέση με τα υπόλοιπα. Αυτό που διαφέρει ωστόσο σε σχέση με την περίπτωση 1 είναι πως κατά τη ψύξη, ενώ στην προηγούμενη περίπτωση η κλίση της θερμοκρασίας στο σημείο του άξονα ήταν συνεχώς φθίνουσα, στην παρούσα περίπτωση φαίνεται πως για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα λίγο μετά από τη στιγμή που η θερμοκρασία είναι πολύ κοντά με την θερμοκρασία Liquidus η κλίση της θερμοκρασίας μειώνεται, δηλαδή ο ρυθμός ψύξης μειώνεται. Αυτό το πλατό εμφανίζεται σε όλους τους υπόλοιπους κύκλους και έχει να κάνει με λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Περισσότερο το φαινόμενο θα αναλυθεί στα συμπεράσματα.

Ο ρυθμός ψύξης μπορεί να αποτυπωθεί και από τα επόμενα διαγράμματα που δείχνουν τις θερμοκρασιακές κατανομές των σημείων της επιφάνειας με την πάροδο του χρόνου.



Static Temperature (Time=3.2000e-01)

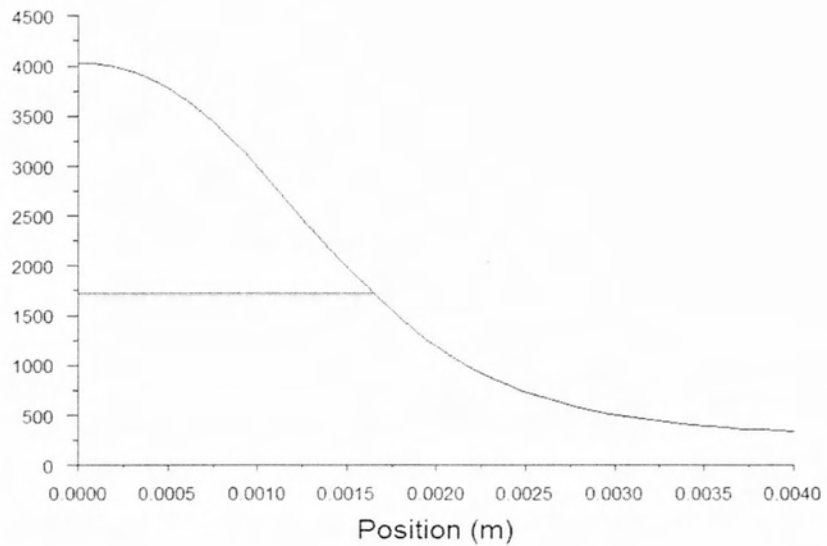
Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.17: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για $t=0.32$ sec

— surfial
 — tliquidus
 — tsolidus

(a)

Static Temperature (k)

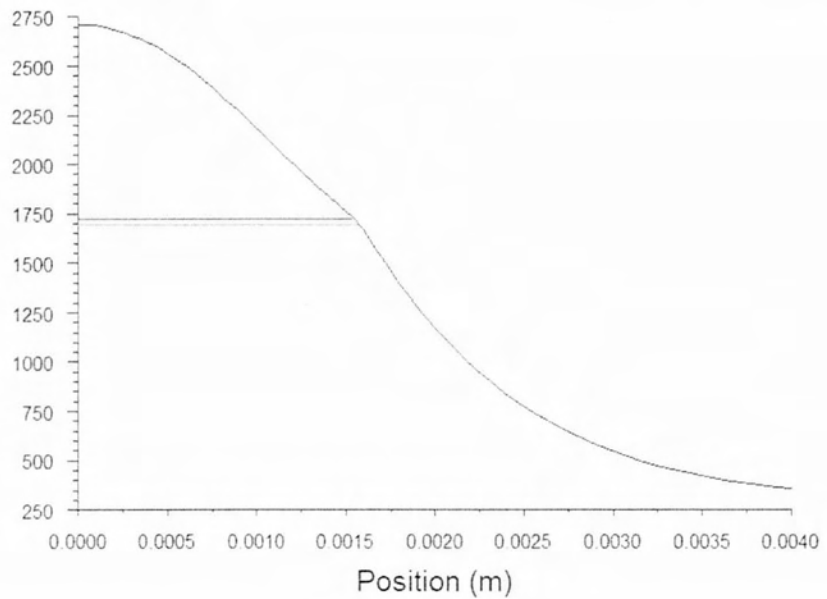


Static Temperature (Time=3.4000e-01) Sep 08, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

— surfial
 — tliquidus
 — tsolidus

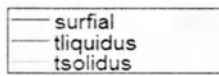
(b)

Static Temperature (k)



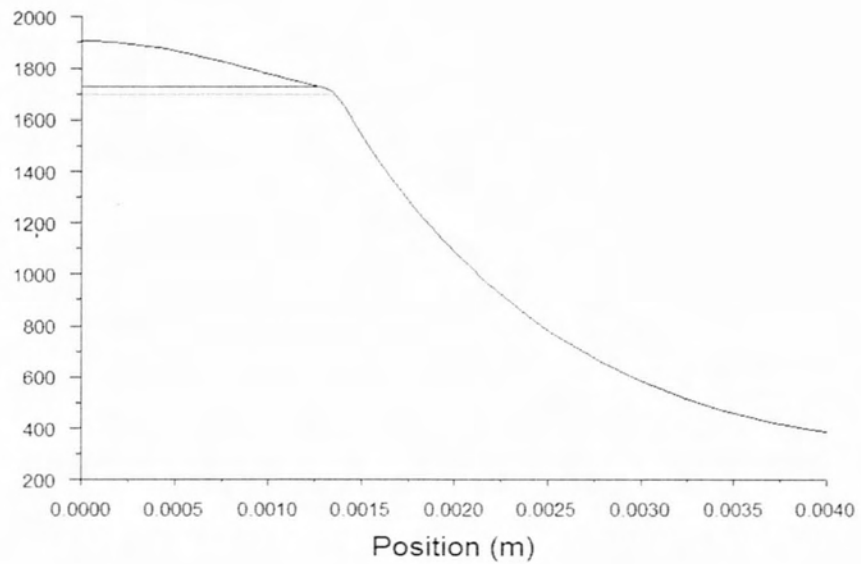
Static Temperature (Time=4.0000e-01) Sep 08, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.18: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.34$ sec και (b) $t=0.4$ sec



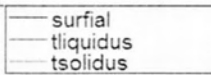
(a)

Static
Temperature
(k)



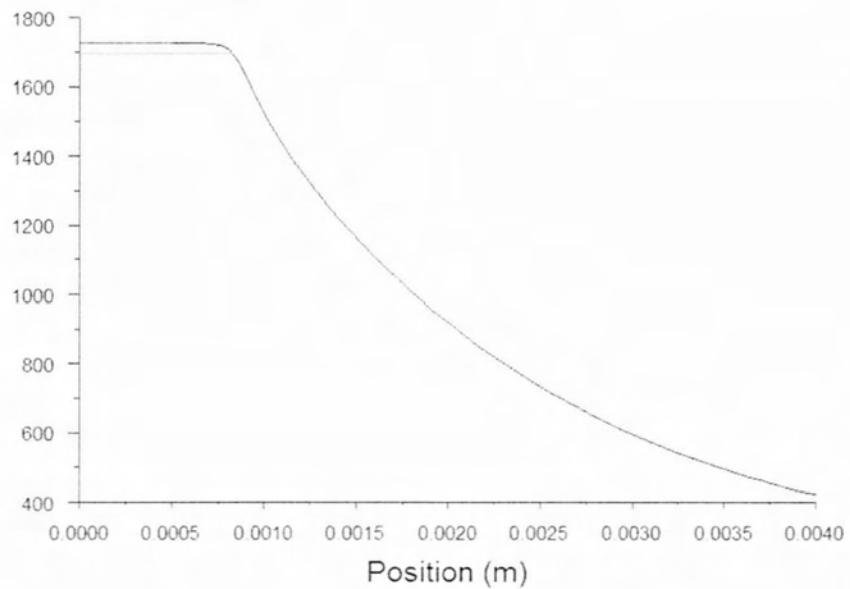
Static Temperature (Time=5.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)



(b)

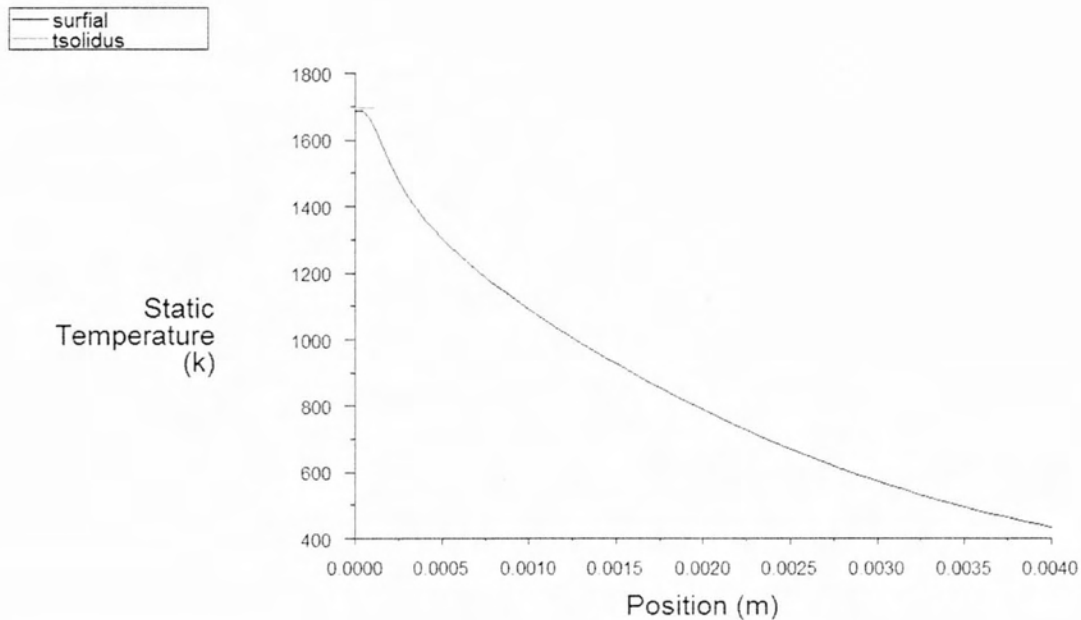
Static
Temperature
(k)



Static Temperature (Time=7.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.19: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.5$ sec και (b) $t=0.7$ sec



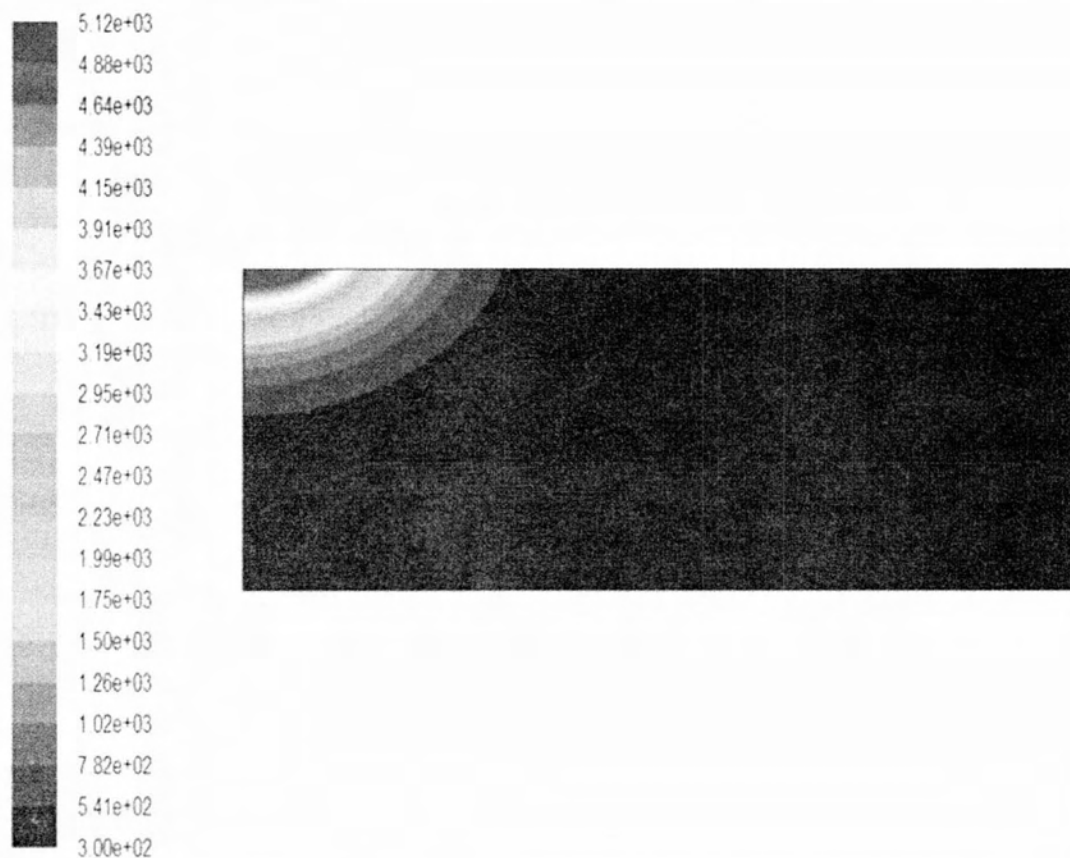
Static Temperature (Time=8.8000e-01) Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.20: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για $t=0.88$ sec

Όπως φαίνεται, για να επέλθει η πλήρης στερεοποίηση της λίμνης συγκόλλησης πρέπει να περάσουν 0.53 sec από τη στιγμή που σβήνει το Laser. Αρχικά ο ρυθμός ψύξης είναι μεγάλος, λίγο πριν η μέγιστη θερμοκρασία φτάσει τη θερμοκρασία Liquidus ωστόσο ο ρυθμός μειώνεται. Από τη στιγμή που περνάει τη Liquidus μέχρι τη στιγμή που στερεοποιείται πλήρως η λίμνη συγκόλλησης μεσολαβούν σχεδόν 0.3 sec. Σε όλο αυτό το διάστημα, τα σημεία που βρίσκονται στο ενδιάμεσο μεταξύ Liquidus και Solidus ανήκουν στη ZMT. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως η ZMT είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση και με πριν το σβήσιμο του Laser, αλλά και αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ZMT της πρώτης περίπτωσης.

Περίπτωση 3

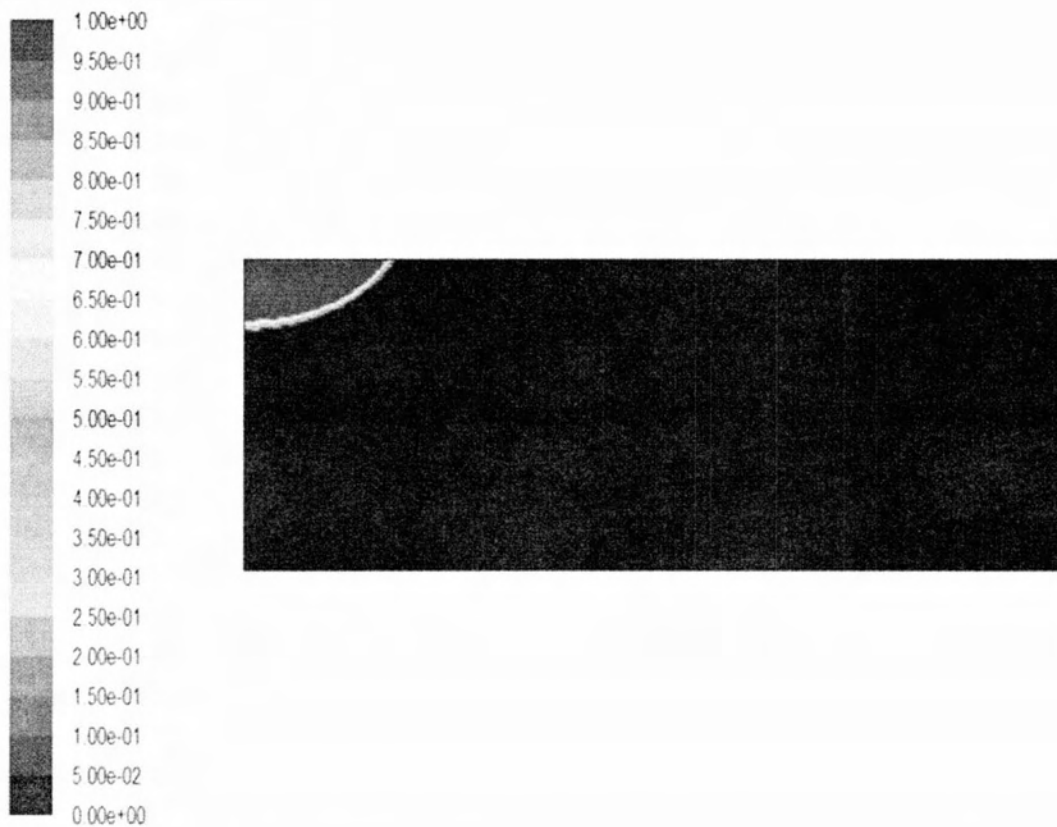
Στην τρίτη και τελευταία περίπτωση όπου η προς συγκόλληση πλάκα είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304, η ισχύς της δέσμης Laser παραμένει 1000 W αλλά διπλασιάζεται η διάμετρος στα 2 mm ώστε να μελετηθεί η επίδραση που έχει σαν παράμετρος της συγκόλλησης στο θερμοκρασιακό πεδίο και κατά συνέπεια στην ίδια τη συγκόλληση. Τη στιγμή που σβήνει το Laser η κατανομή της θερμοκρασίας και ο λόγος υγρού στερεού είναι ως εξής:



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.21: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec. Περίπτωση 3



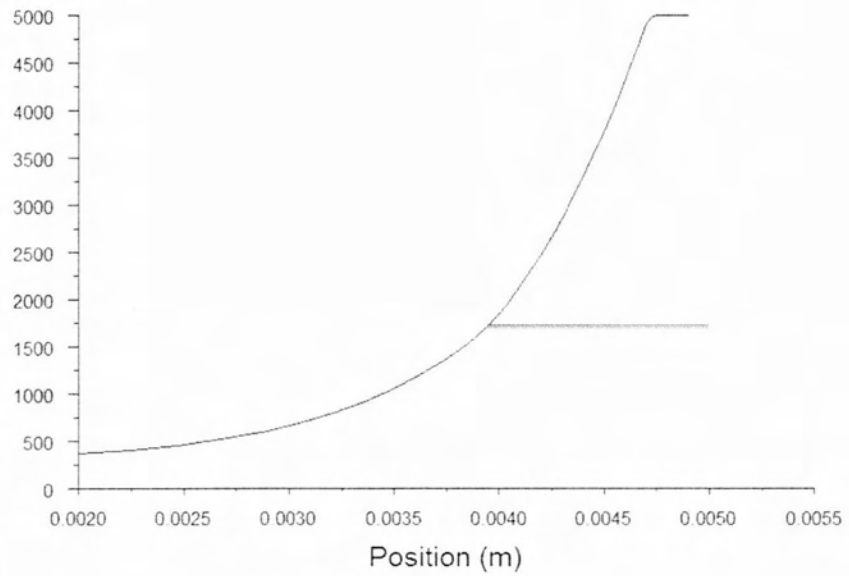
Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01) Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.22: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 3

Είναι προφανές πως τόσο η θερμοκρασιακή κατανομή όσο και η γεωμετρία της συγκόλλησης είναι διαφορετικά σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης περίπτωσης είναι πως η μέγιστη θερμοκρασία είναι πιο χαμηλή από την πρώτη περίπτωση και είναι ίση με 5120.1 K. Το πιο εμφανές χαρακτηριστικό ωστόσο είναι πως η κατανομή της θερμοκρασίας είναι διαφορετική από την πρώτη περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται πως οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες στην επιφάνεια, εκεί δηλαδή που πέφτει η δέσμη και λιγότερο ψηλές στο εσωτερικό του τεμαχίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η λίμνη συγκόλλησης να είναι πιο πλατιά στην επιφάνεια και να παρουσιάζει μικρότερη διείδυση, συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα γραφήματα των σημείων επιφάνειας και άξονα:

axial
tliquidus
tsolidus

Static
Temperature
(k)

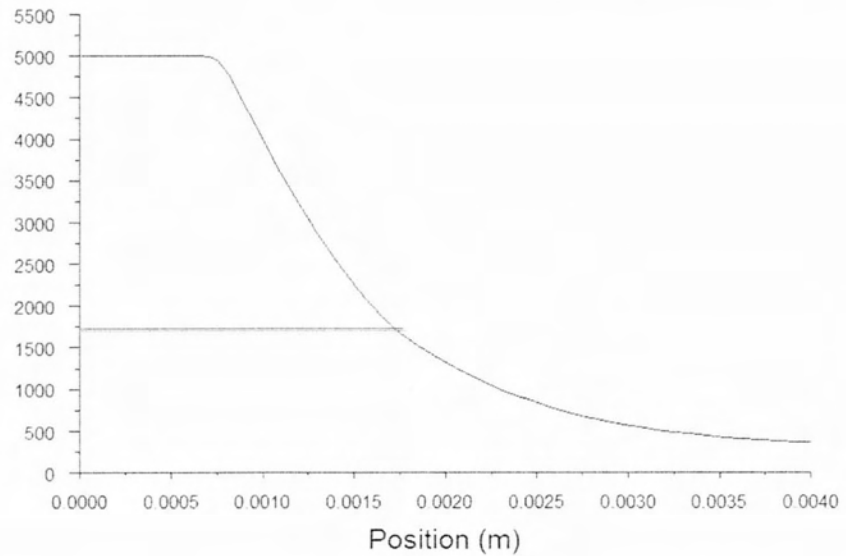


Static Temperature (Time=3.0000e-01)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

surfial
tliquidus
tsolidus

Static
Temperature
(k)



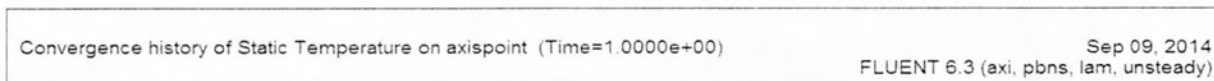
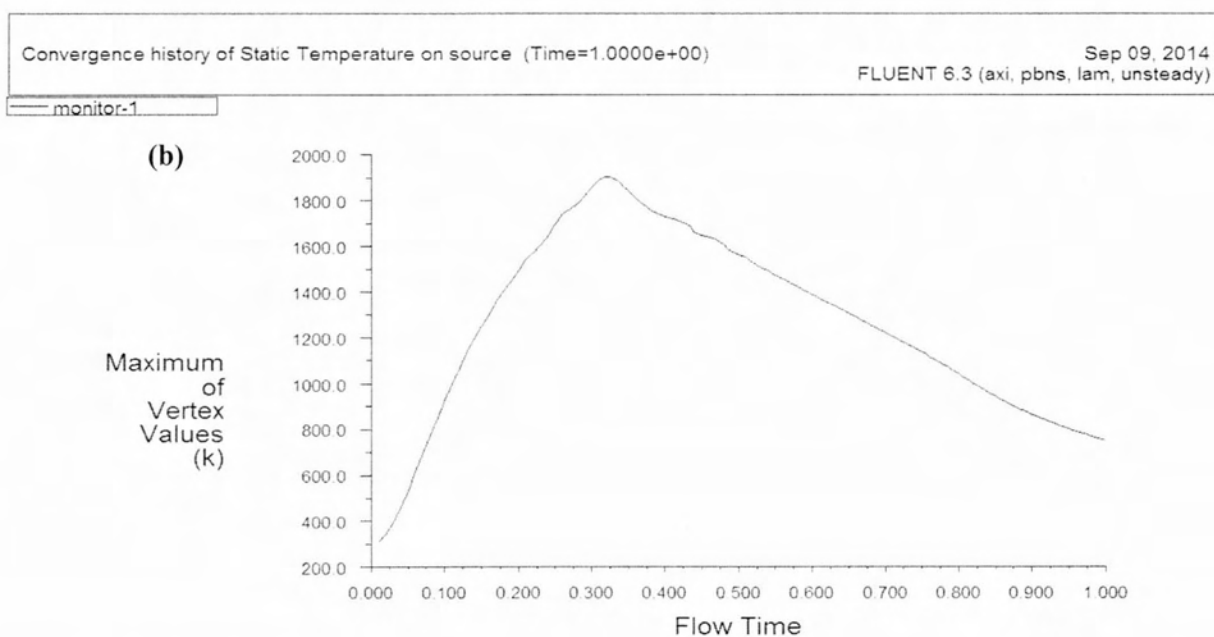
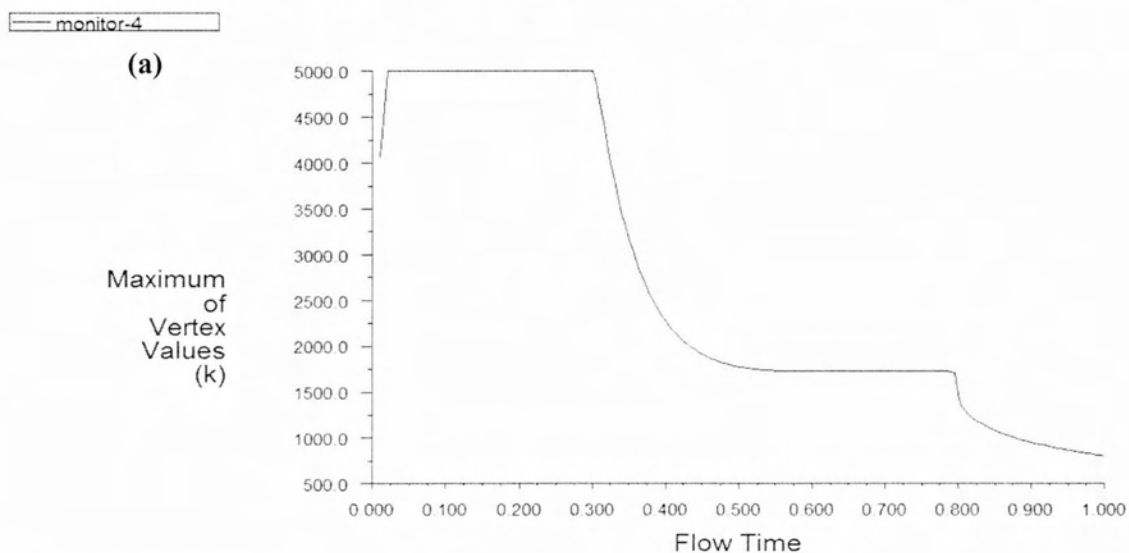
Static Temperature (Time=3.0000e-01)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

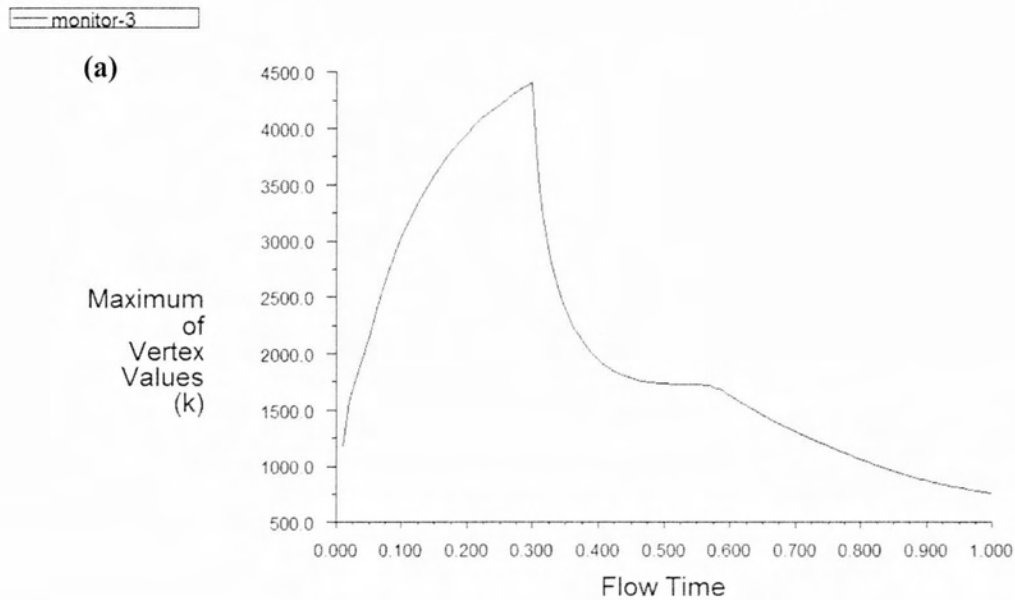
Σχήμα 4.23: Διάγραμμα θερμοκρασίας την στιγμή $t=0.3$ sec, (a) των σημείων του άξονα και (b) των σημείων της επιφάνειας, Περίπτωση 3

Στα διαγράμματα σημείων, βλέπουμε πως η διείδυση της συγκόλλησης φτάνει σε βάθος 1 mm από την επιφάνεια, ενώ η ακτίνα της συγκόλλησης στην επιφάνεια είναι ισούται με 1.75 mm.

Οι θερμικοί κύκλοι των τεσσάρων σημείων είναι οι εξής:

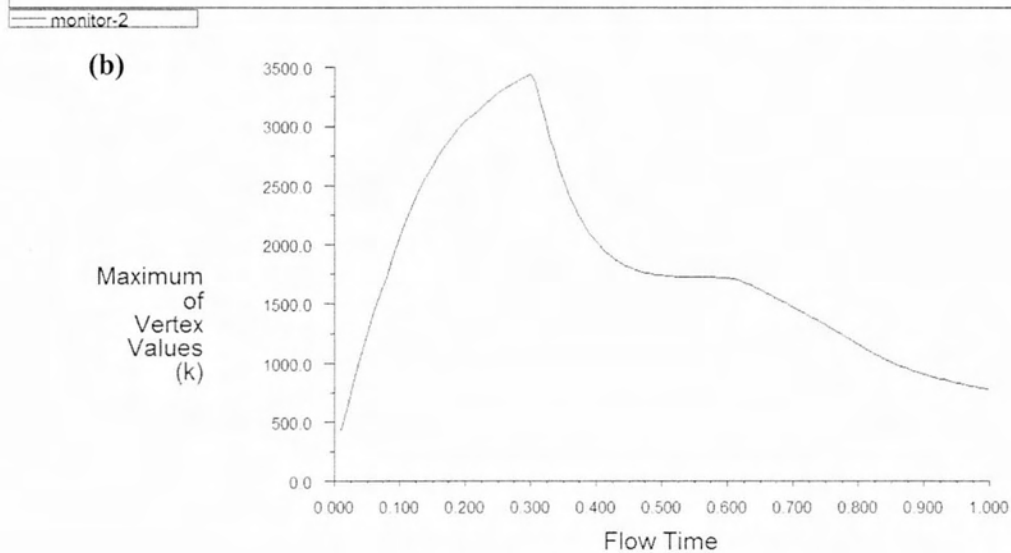


Σχήμα 4.24: Θερμικός κύκλος των σημείων (a) A και (b) B, Περίπτωση 3



Convergence history of Static Temperature on surfpoint (Time=1.0000e+00)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)



Convergence history of Static Temperature on midpoint (Time=1.0000e+00)

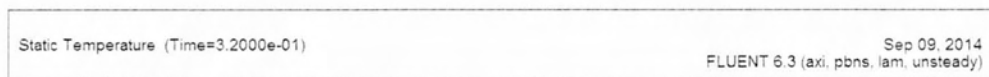
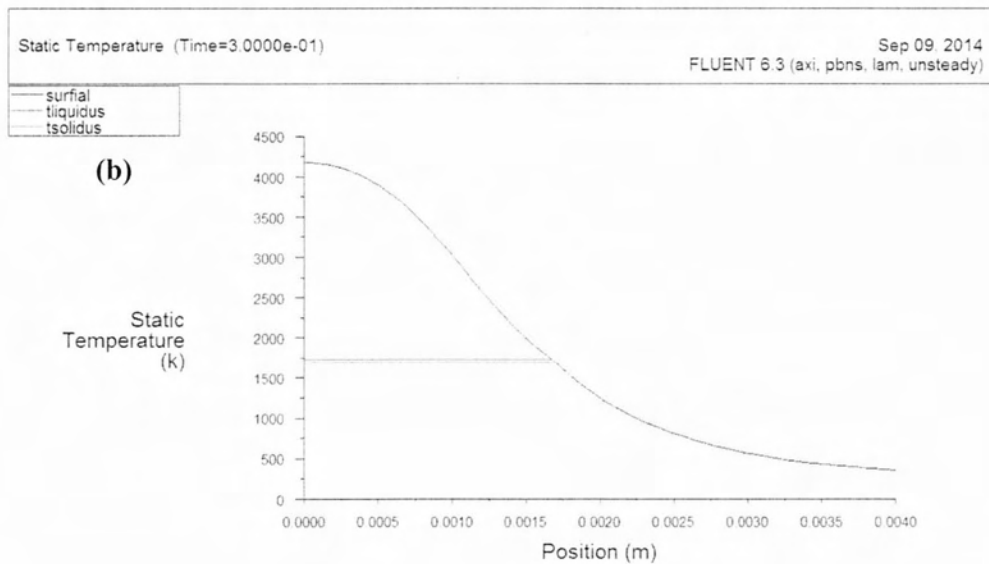
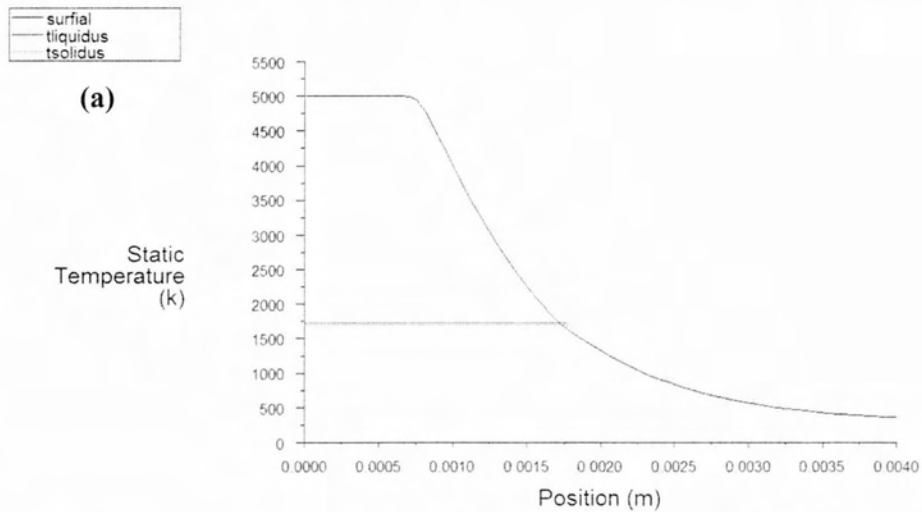
Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.25: Θερμικός κύκλος των σημείων (a) Γ και (b) Δ, Περίπτωση 3

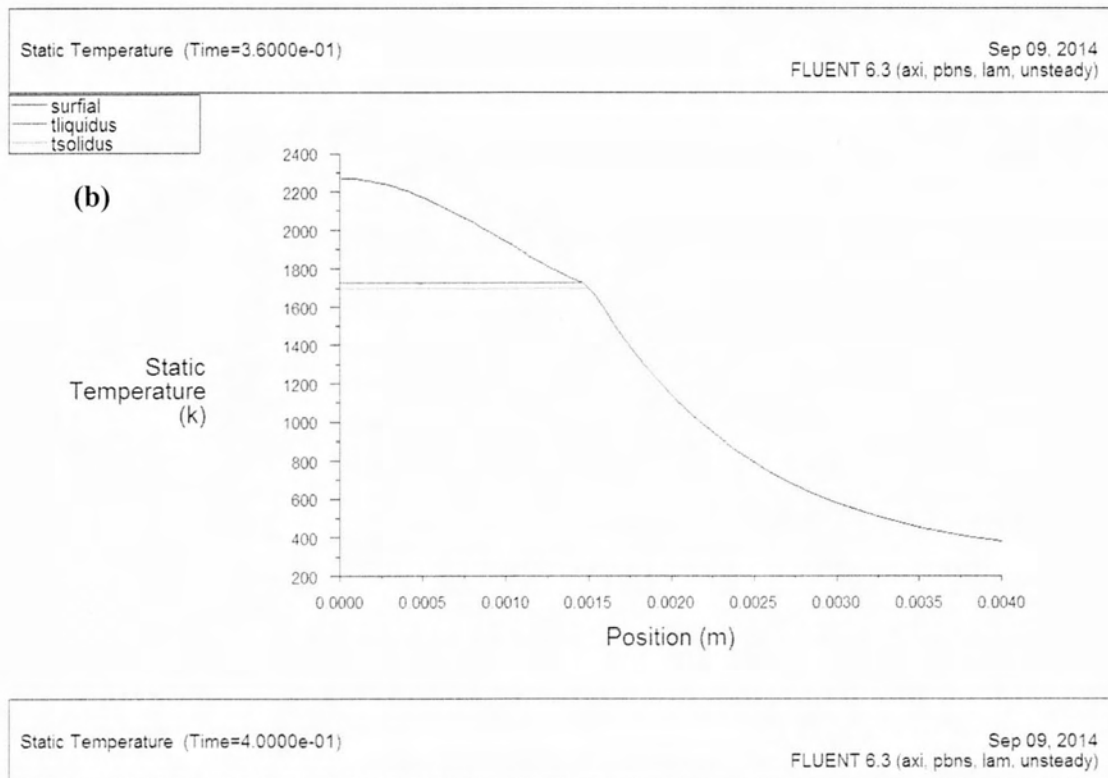
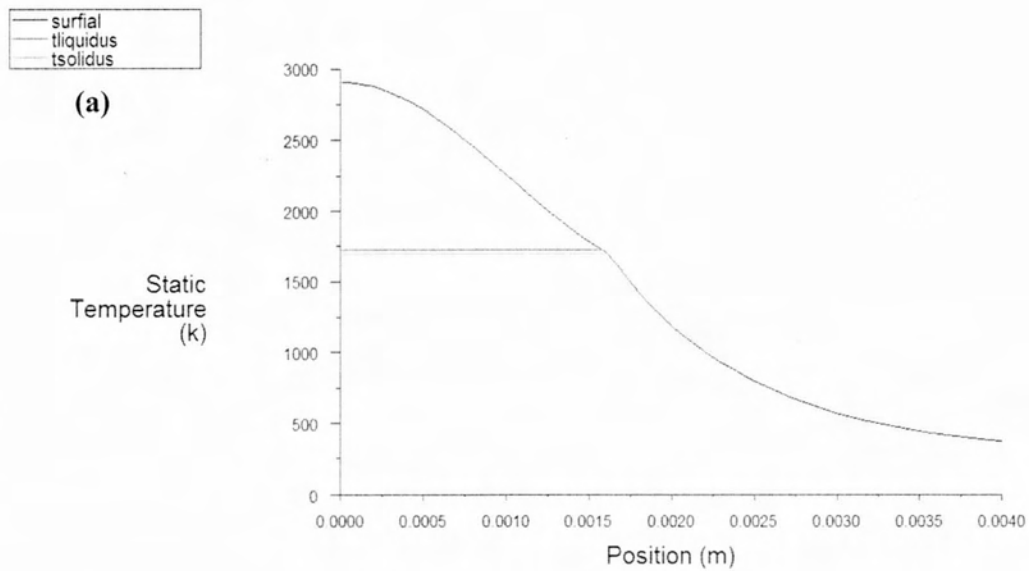
Τα διαγράμματα των θερμικών κύκλων είναι ακόμα ένα δείγμα της γεωμετρίας της συγκόλλησης στο σημείο που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια η μέγιστη θερμοκρασία είναι σχεδόν παραπάνω από διπλάσια σε σχέση με την μέγιστη θερμοκρασία του σημείου που

βρίσκεται πάνω στον άξονα. Και από τις τρεις αυτές πρώτες περιπτώσεις μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως δύο σημεία που ισαπέχουν από την πηγή, και το ένα βρίσκεται σε γωνία 0° από την πηγή και το άλλο κάθετο στην πηγή (γωνία 90°), εκείνο που βρίσκεται πάνω στον άξονα, δηλαδή κάθετο στην πηγή έχει μικρότερη θερμοκρασία. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

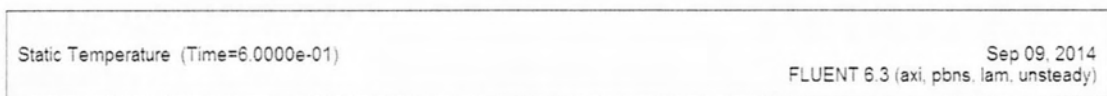
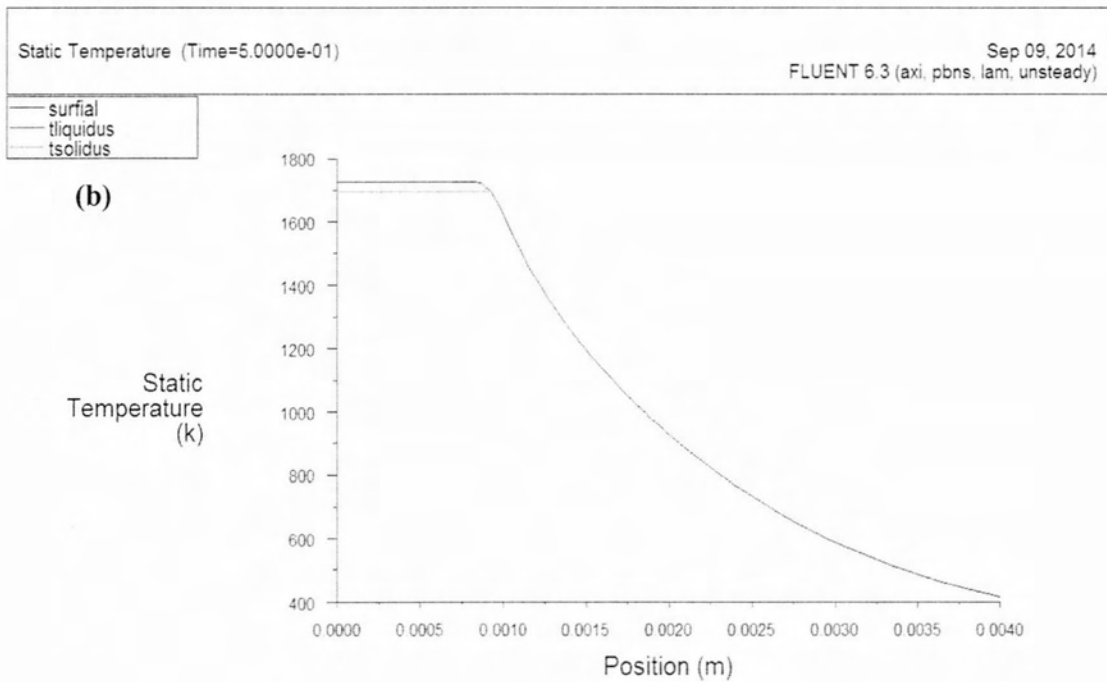
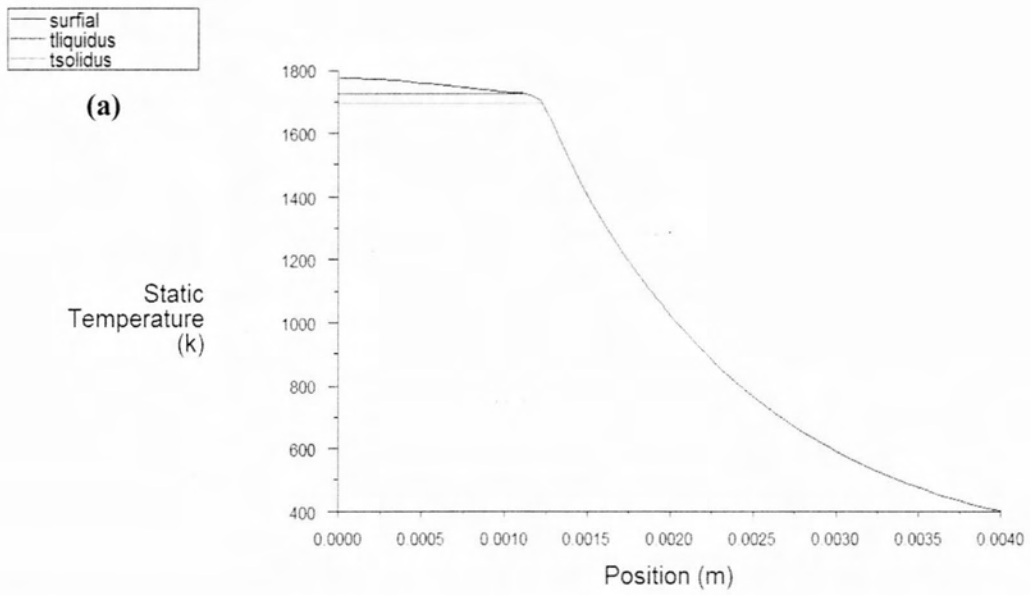
Ακολουθούν τα διαγράμματα των σημείων της επιφάνειας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους και τον χρόνο.



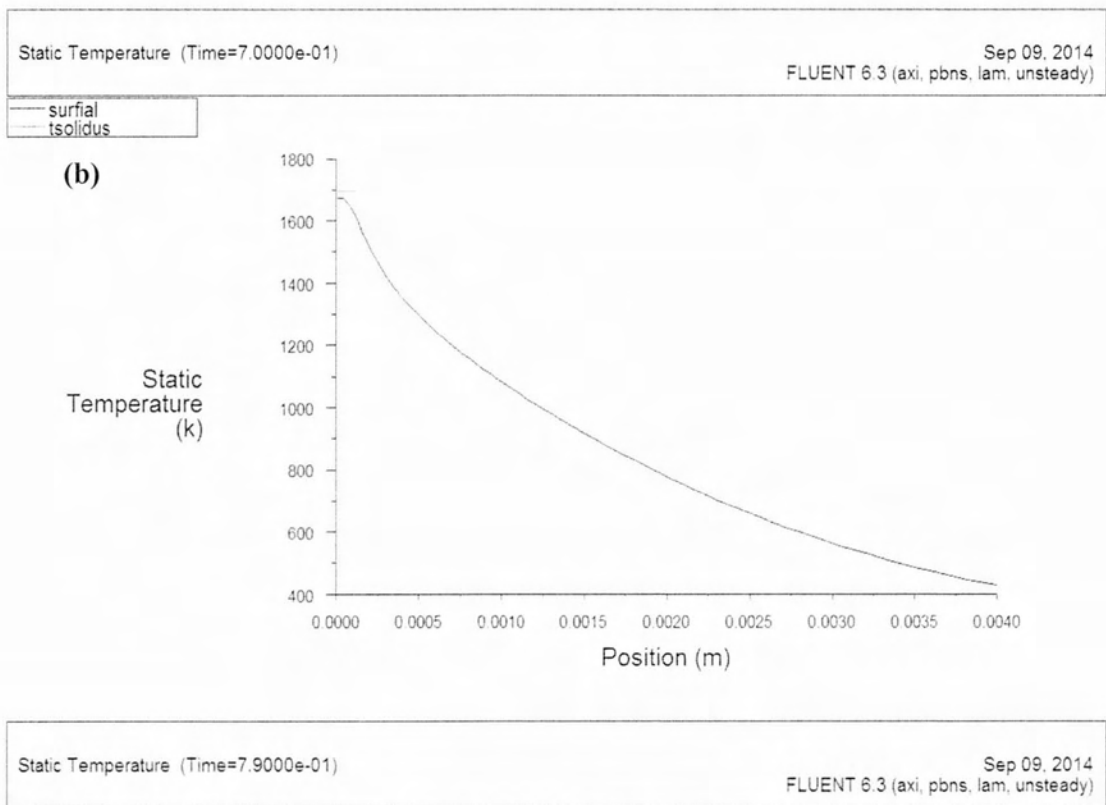
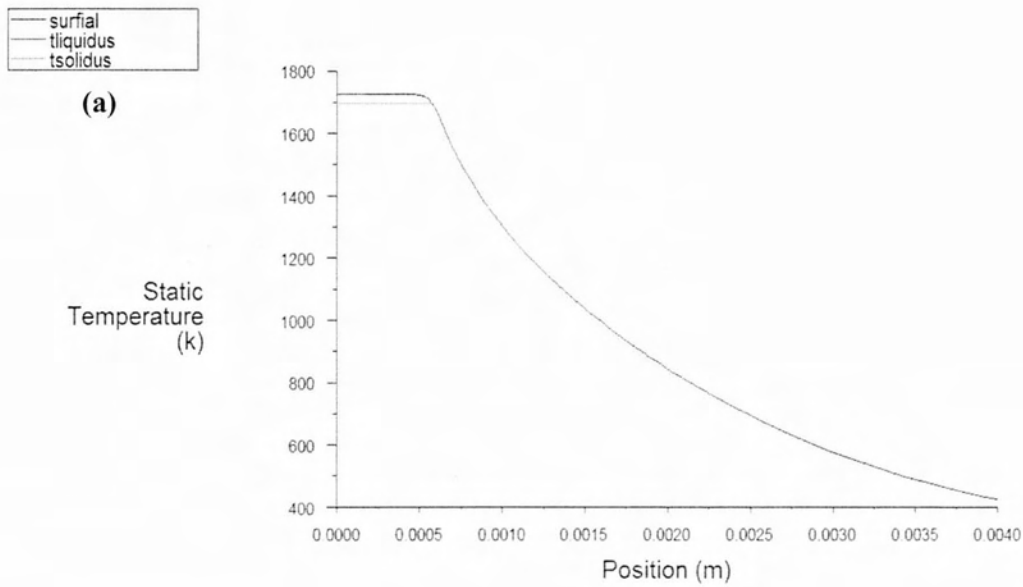
Σχήμα 4.26: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.3$ sec και (b) $t=0.32$ sec



Σχήμα 4.27: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.36$ sec και (b) $t=0.4$ sec



Σχήμα 4.28: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.5$ sec και (b) $t=0.6$ sec



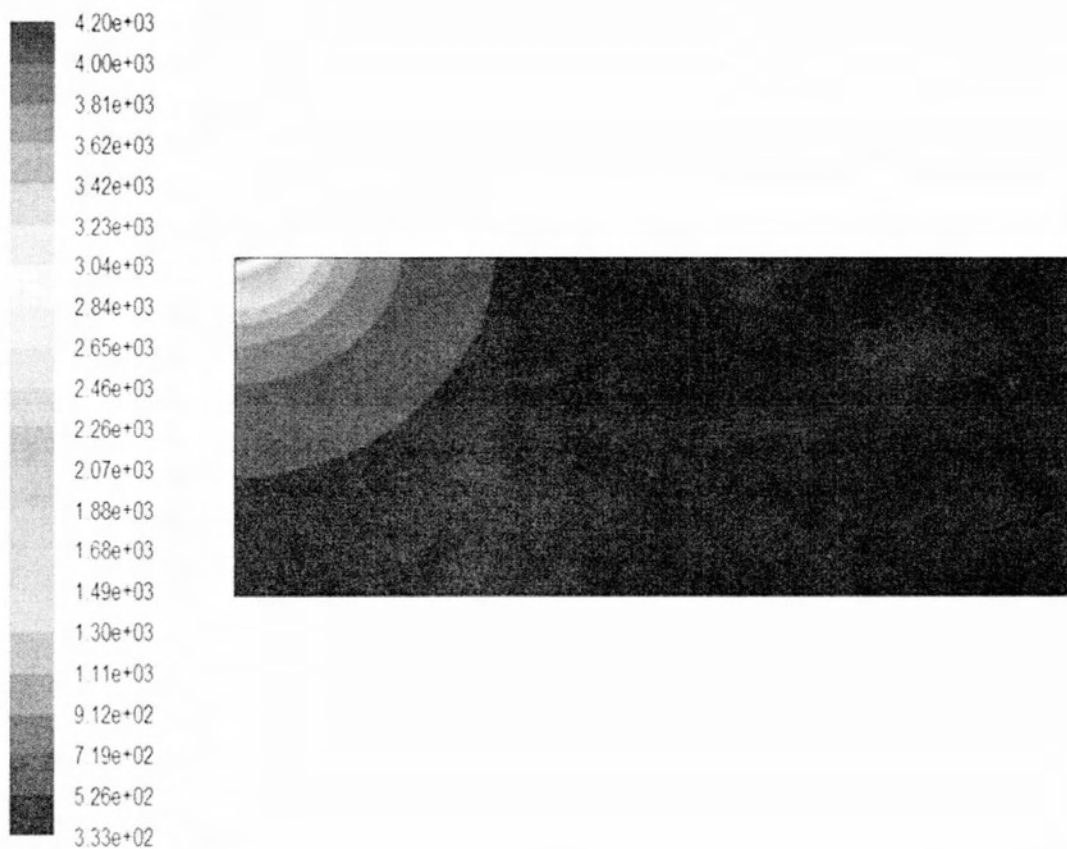
Σχήμα 4.29: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.7$ sec και (b) $t=0.79$ sec

Τα διαγράμματα επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τους θερμικούς κύκλους. Η ZMT είναι μεγάλη και σε αυτήν την περίπτωση, και φαίνεται να μεγαλώνει στο διάστημα που η μέγιστη θερμοκρασία είναι μεταξύ της Liquidus και της Solidus.

Περίπτωση 4

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται αλλαγή του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η πλάκα. Το δεύτερο υλικό που δοκιμάζεται είναι το κράμα αλουμινίου 6061-T6. Η πρώτη περίπτωση που προσομοιώνεται με αυτό το υλικό έχει σαν παραμέτρους την ισχύ ίση με 1000 W, την διάμετρο της δέσμης Laser ίση με 1 mm ενώ ο χρόνος εκπομπής του παλμού Laser είναι ίσος με 0.3 sec.

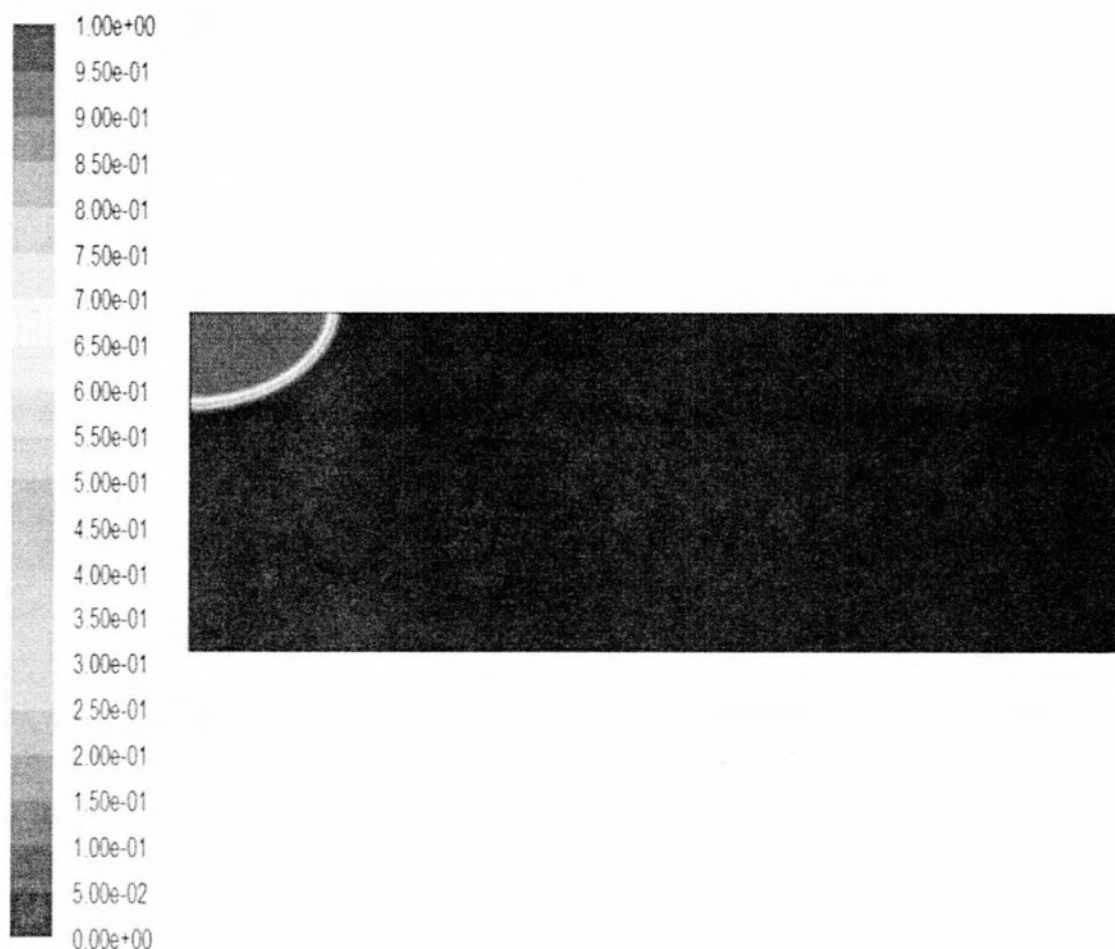
Τη στιγμή που σβήνει ο παλμός του Laser, η κατανομή της θερμοκρασίας στην πλάκα, καθώς και η κατανομή του λόγου υγρού-στερεού είναι ως εξής:



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.30: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 4



Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01)

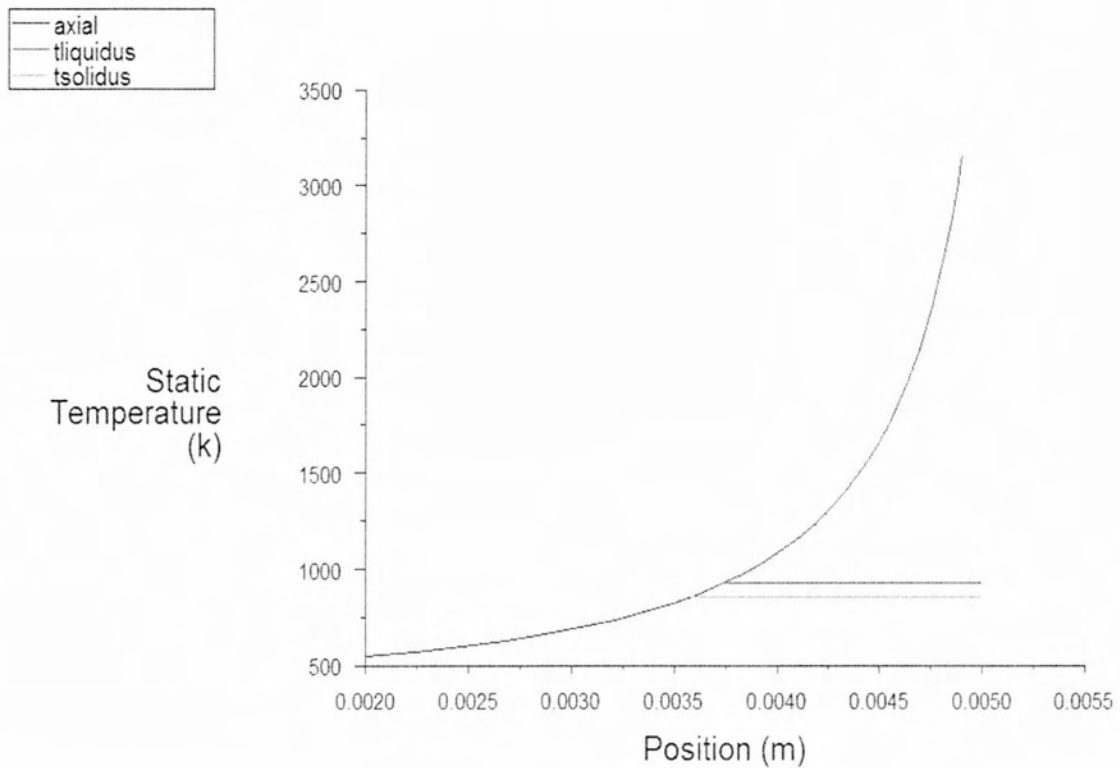
Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.31: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 4

Το πρώτο πράγμα που παρατηρεί κανείς βλέποντας τα παραπάνω στιγμιότυπα είναι πως η μέγιστη θερμοκρασία για το κράμα αλουμινίου είναι μικρότερη από την αντίστοιχη περίπτωση για τον ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη θερμοκρασία είναι ίση με 4195,8 K, δηλαδή παραπάνω από 1000 K μικρότερη από την περίπτωση του χάλυβα. Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό που φαίνεται από τα στιγμιότυπα είναι πως αν και η λίμνη συγκόλλησης για το αλουμίνιο είναι ελάχιστα μικρότερη από την αντίστοιχη περίπτωση για τον AISI 304, καθιστώντας τις πρακτικά ίσες, η ZMT κατά την θέρμανση είναι μεγαλύτερη για το αλουμίνιο. Αυτό συμβαίνει διότι η διαφορά μεταξύ των

θερμοκρασιών Liquidus και Solidus είναι μεγαλύτερη για το αλουμίνιο από ότι για τον ανοξείδωτο χάλυβα.

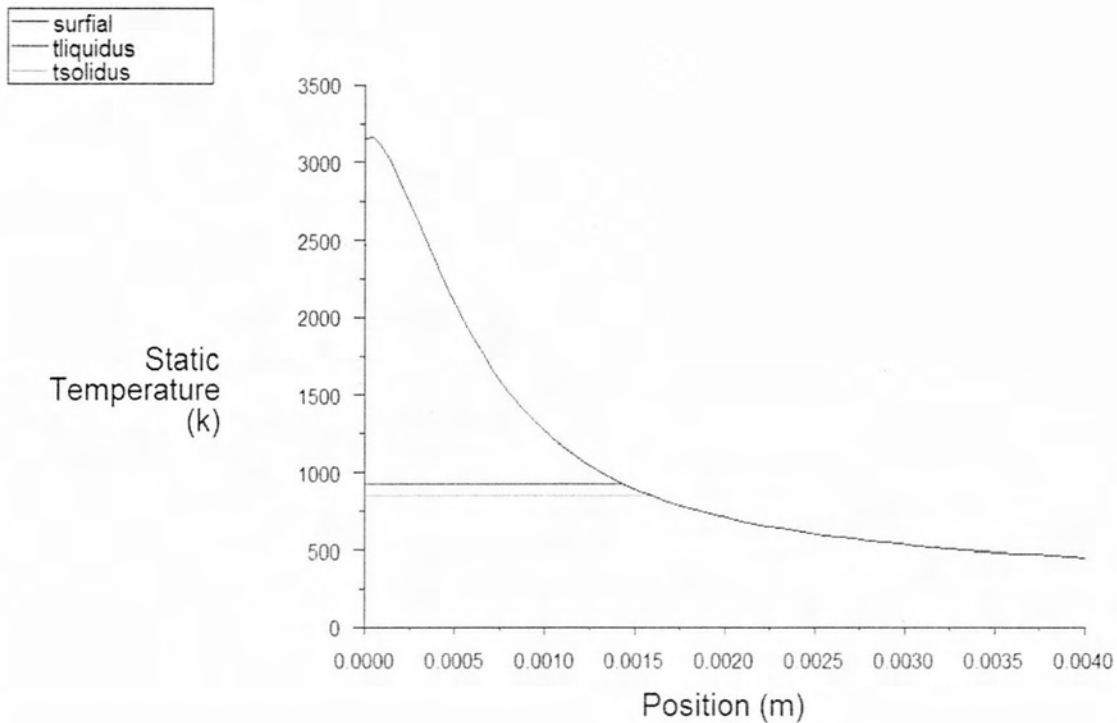
Η γεωμετρία της συγκόλλησης για αυτή την περίπτωση επαληθεύεται εύκολα και από τα γραφήματα για τα σημεία που βρίσκονται στην επιφάνεια του τεμαχίου και στον άξονα συμμετρίας συναρτήσει της θερμοκρασίας τους, τα οποία αντιπροσωπεύουν την ακτίνα της συγκόλλησης και το βάθος διείσδυσης της αντίστοιχα.



Static Temperature (Time=3.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.32: Διάγραμμα θερμοκρασίας την στιγμή $t=0.3$ sec των σημείων του άξονα, Περίπτωση 4



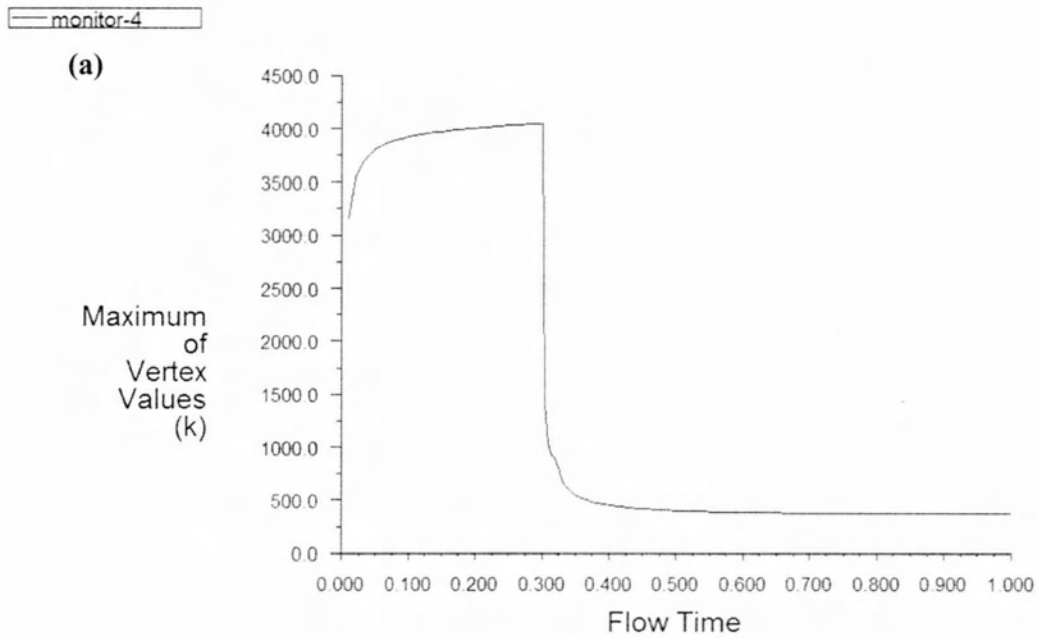
Static Temperature (Time=3.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

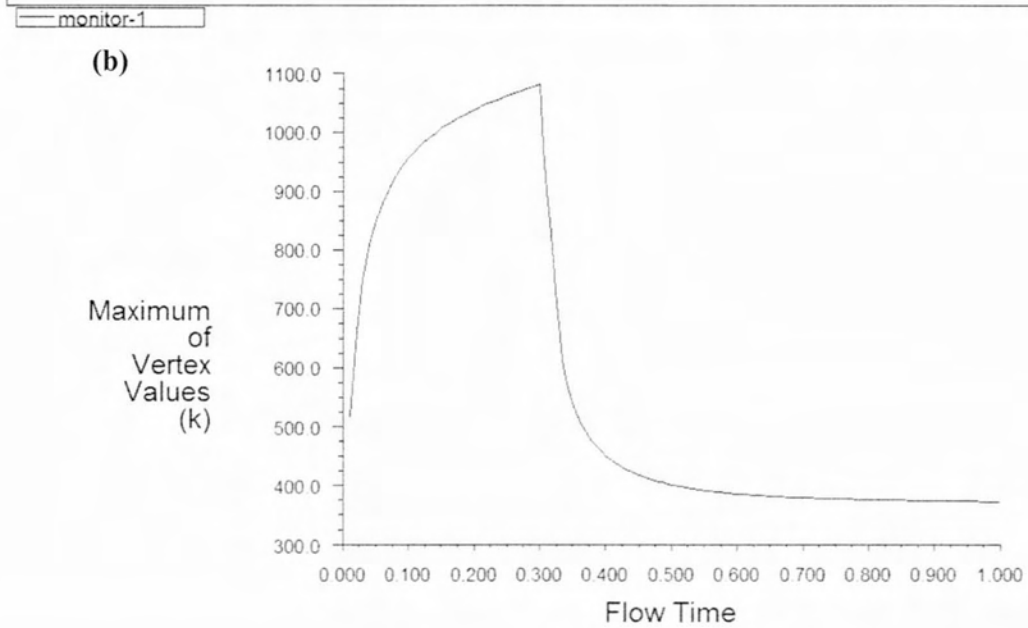
Σχήμα 4.33: Διάγραμμα θερμοκρασίας την στιγμή $t=0.3$ sec των σημείων της επιφάνειας, Περίπτωση 4

Όπως φαίνεται, το βάθος διείσδυσης της συγκόλλησης είναι 1.5 mm από την επιφάνεια του τεμαχίου, ενώ η ακτίνα της συγκόλλησης είναι στα 1.55 mm από το σημείο πρόσπτωσης της ακτίνας. Επομένως, μπορεί η θερμοκρασία στην παρούσα περίπτωση να είναι 1000 K μικρότερη από την αντίστοιχη με υλικό το AISI 304, ωστόσο η συγκόλληση έχει μεγαλύτερη διείσδυση. Αυτό έχει να κάνει με το γεγονός πως το αλουμίνιο έχει χαμηλότερες θερμοκρασίες Solidus και Liquidus από τον χάλυβα.

Οι θερμοκοί κύκλοι των τεσσάρων σημείων που έχουν οριστεί για να παρακολουθούν τη διαδικασία είναι οι παρακάτω.



Convergence history of Static Temperature on source (Time=1.0000e+00) Sep 08, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

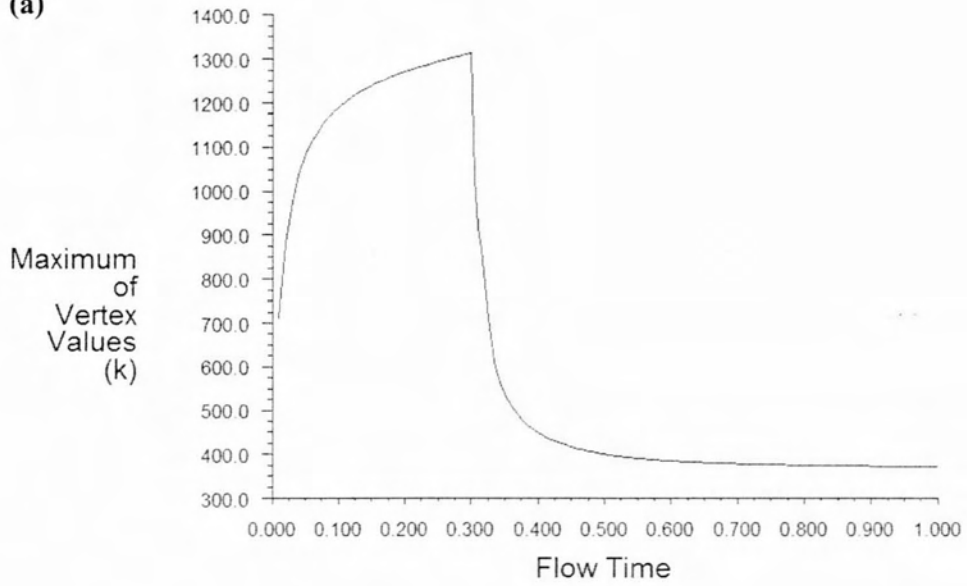


Convergence history of Static Temperature on axispoint (Time=1.0000e+00) Sep 08, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.34: Θερμικός κύκλος των σημείων (a) A και (b) B, Περίπτωση 4

monitor-3

(a)



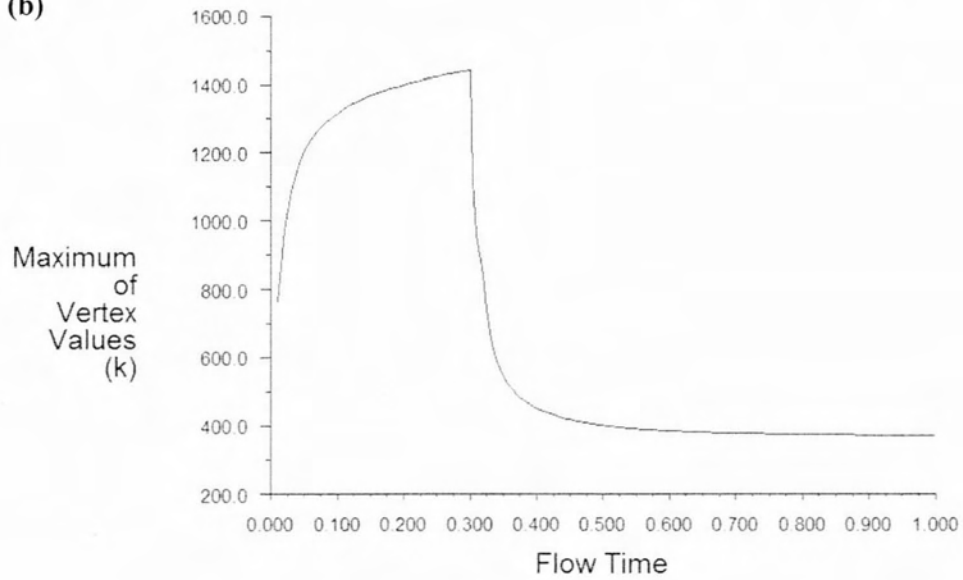
Convergence history of Static Temperature on surfpoint (Time=1.0000e+00)

Sep 08, 2014

FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

monitor-2

(b)



Convergence history of Static Temperature on midpoint (Time=1.0000e+00)

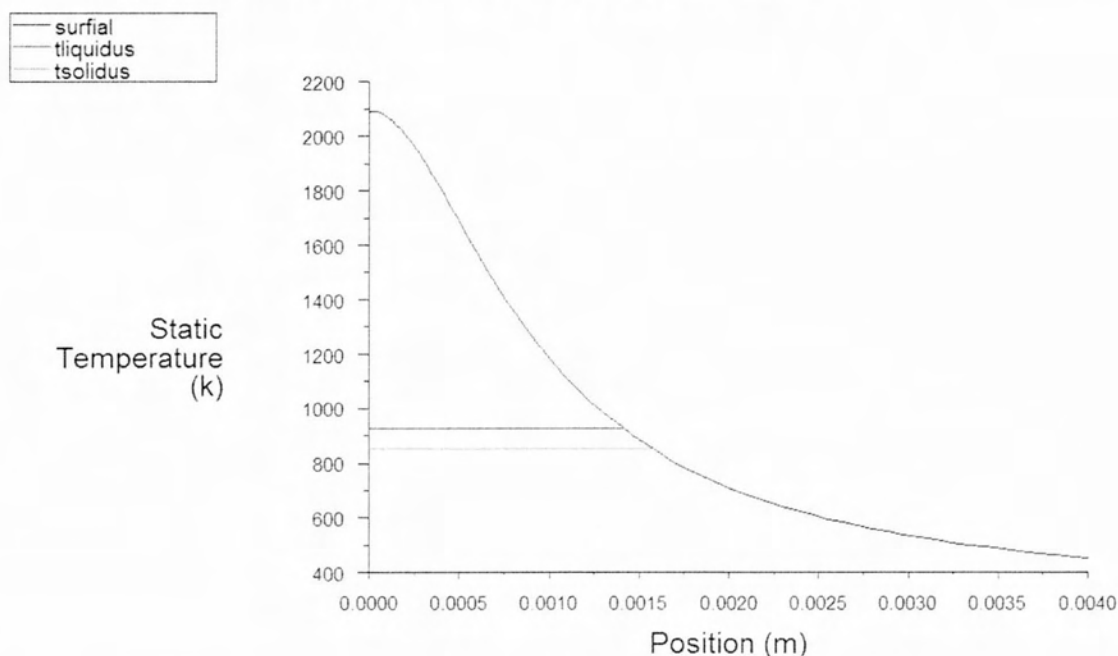
Sep 08, 2014

FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.35: Θερμικός κύκλος των σημείων (a) Γ και (b) Δ, Περίπτωση 4

Το πρώτο πράγμα που παρατηρεί κανείς βλέποντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι η σχεδόν ακαριαία ψύξη του τεμαχίου τη στιγμή που σβήνει το Laser. Το σημείο στο οποίο προσπίπτει η ακτίνα, το οποίο έχει τη μέγιστη θερμοκρασία, φτάνει από τους 4200 K στους 800 K σε λιγότερο από 0.03 sec. Αυτό συμβαίνει επειδή η θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι αρκετά μεγαλύτερη από πολλά άλλα υλικά με αποτέλεσμα να μεταδίδει την θερμότητα πολύ γρήγορα. Αυτή είναι και μία από τις κυριότερες ιδιότητες του αλουμινίου που το κάνουν ιδιαίτερα δυνατό υποψήφιο για τη σχεδίαση συστημάτων μετάδοσης θερμότητας.

Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα των σημείων της επιφάνειας συναρτήσεως του χρόνου και της θερμοκρασίας τους σε κάθε χρονική στιγμή. Για να μπορέσει να αναπαρασταθεί επαρκώς ο ρυθμός ψύξης, το χρονικό βήμα μειώθηκε στα 0.001 sec.

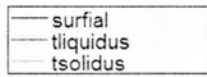


Static Temperature (Time=3.0100e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

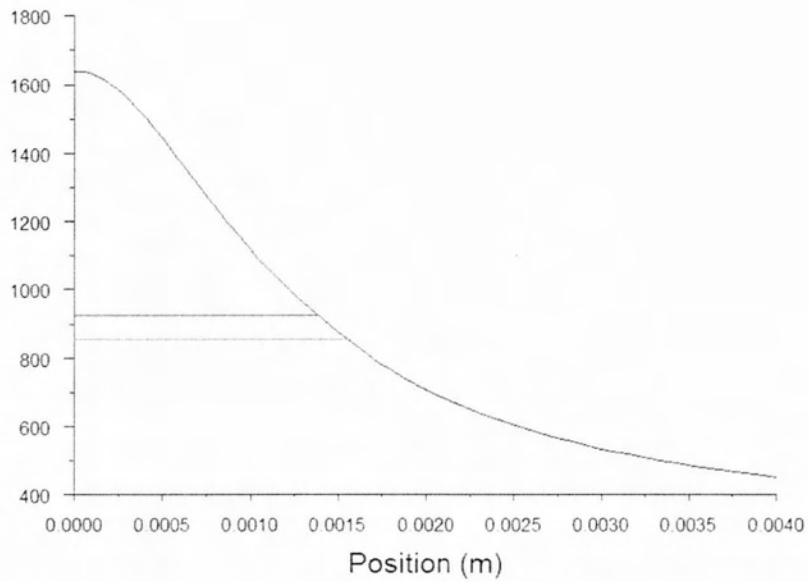
Σχήμα 4.36: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για $t=0.301$ sec

Παρατηρεί κανείς πως από την πρώτη κιάλας στιγμή, μετά από μόλις 1 msec, η μέγιστη θερμοκρασία έχει πέσει από τους 4200 K στους 2080 K. Ταυτόχρονα η ZMT φαίνεται να μεγαλώνει αμυδρά.



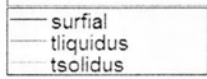
(a)

Static Temperature (k)



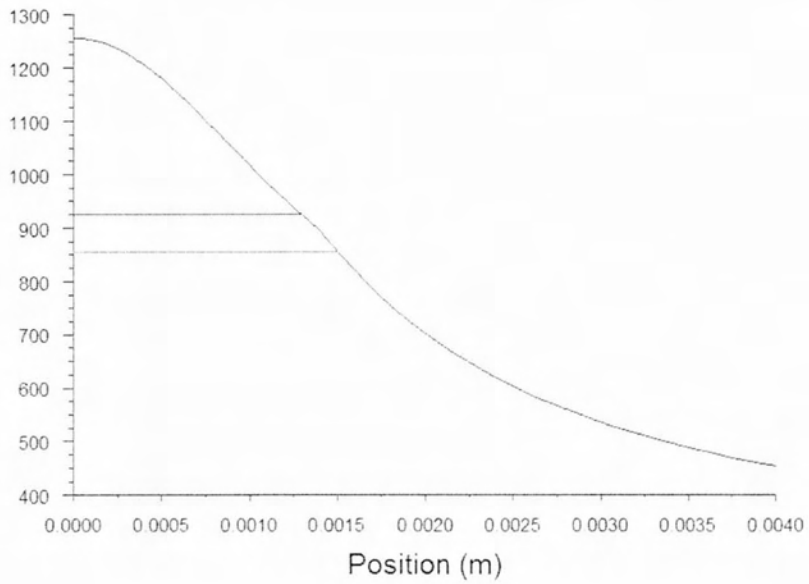
Static Temperature (Time=3.0200e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)



(b)

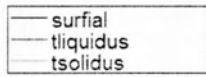
Static Temperature (k)



Static Temperature (Time=3.0400e-01)

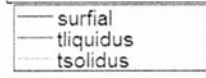
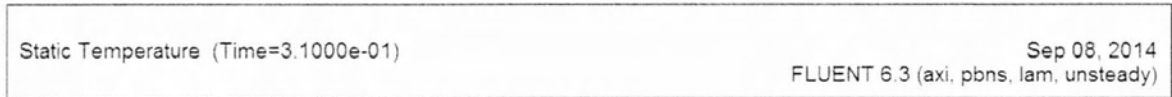
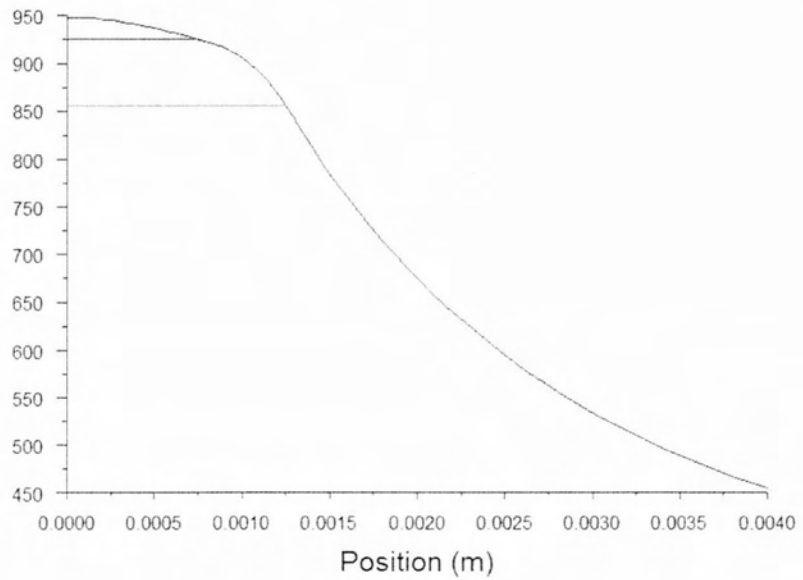
Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.37: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.302$ sec και (b) $t=0.304$ sec

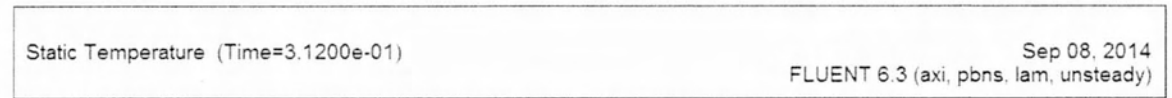
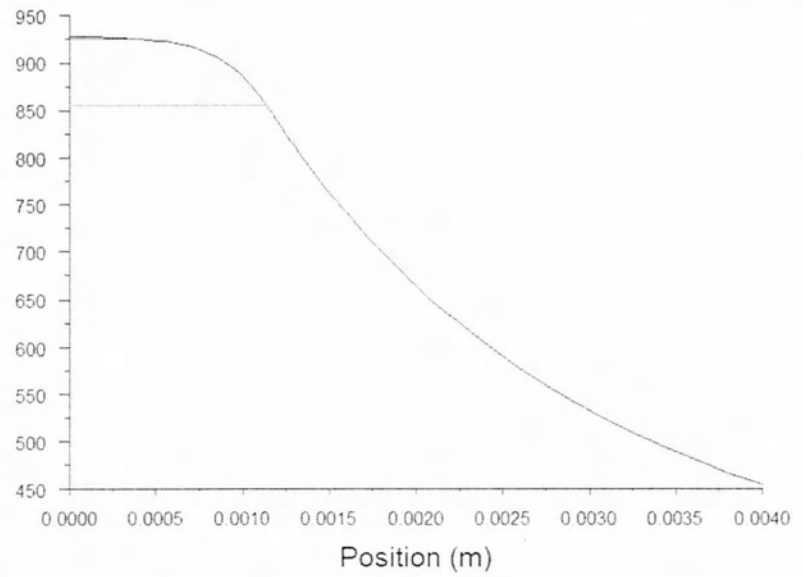


(b)

Static Temperature (k)



Static Temperature (k)

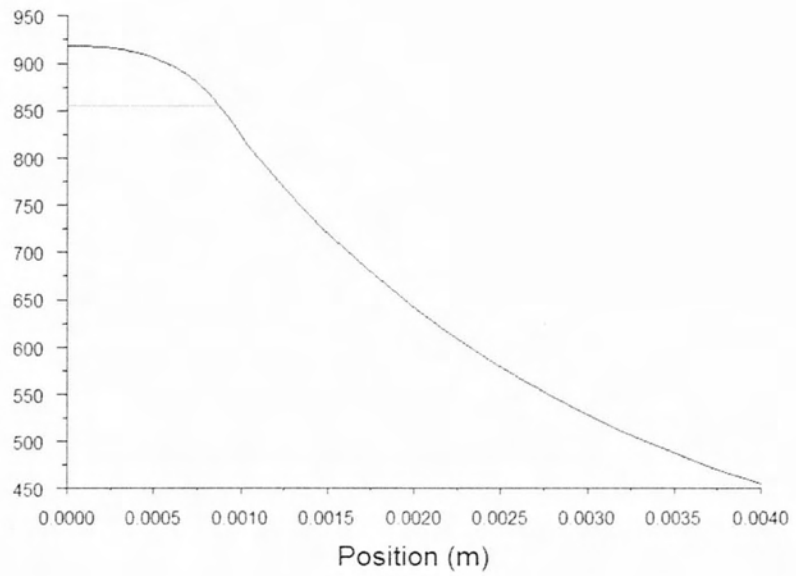


Σχήμα 4.38: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.31$ sec και (b) $t=0.312$ sec

— surfial
— tsolidus

(a)

Static
Temperature
(k)



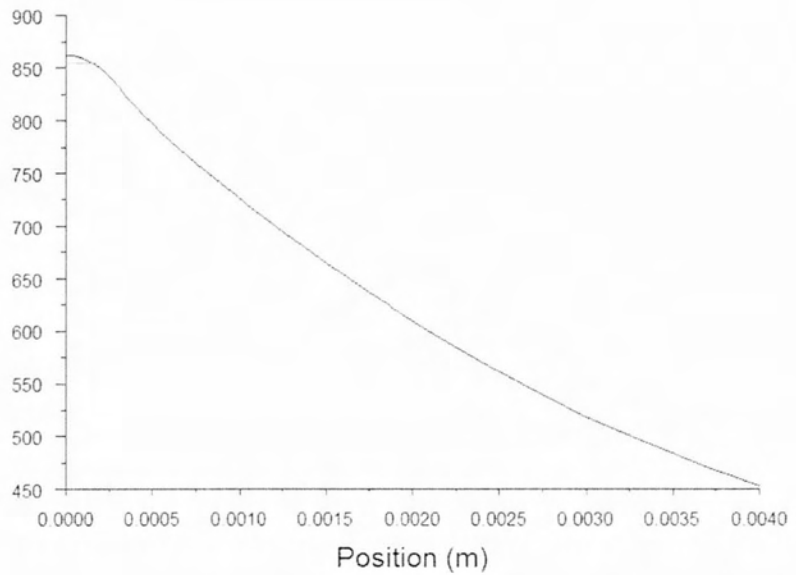
Static Temperature (Time=3.1600e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

— surfial
— tsolidus

(b)

Static
Temperature
(k)

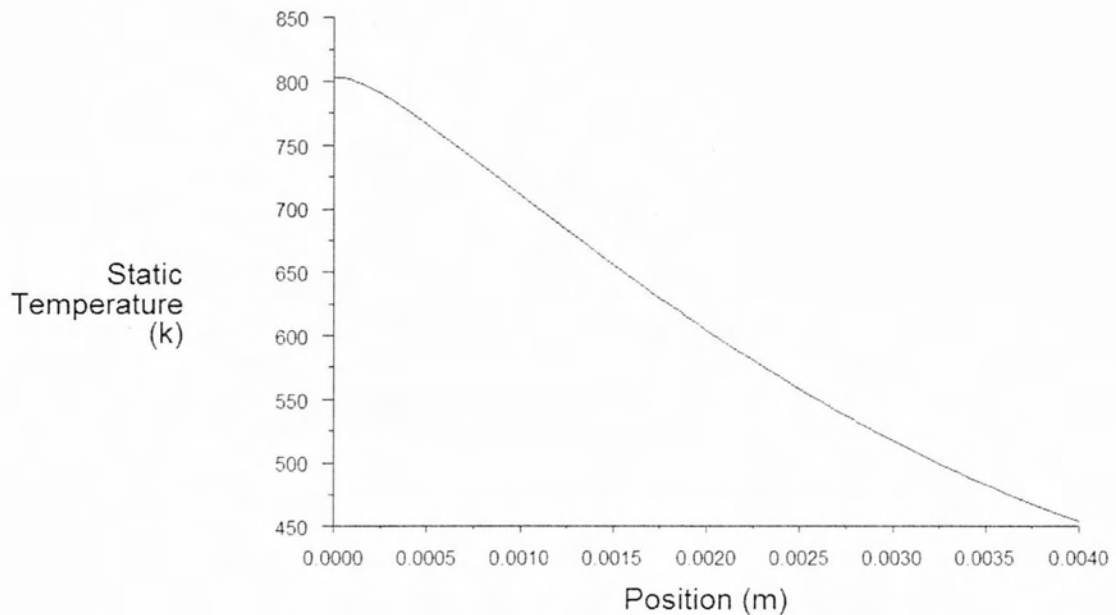


Static Temperature (Time=3.2200e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.39: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.316$ sec και (b) $t=0.322$ sec

— surfial



Static Temperature (Time=3.2300e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

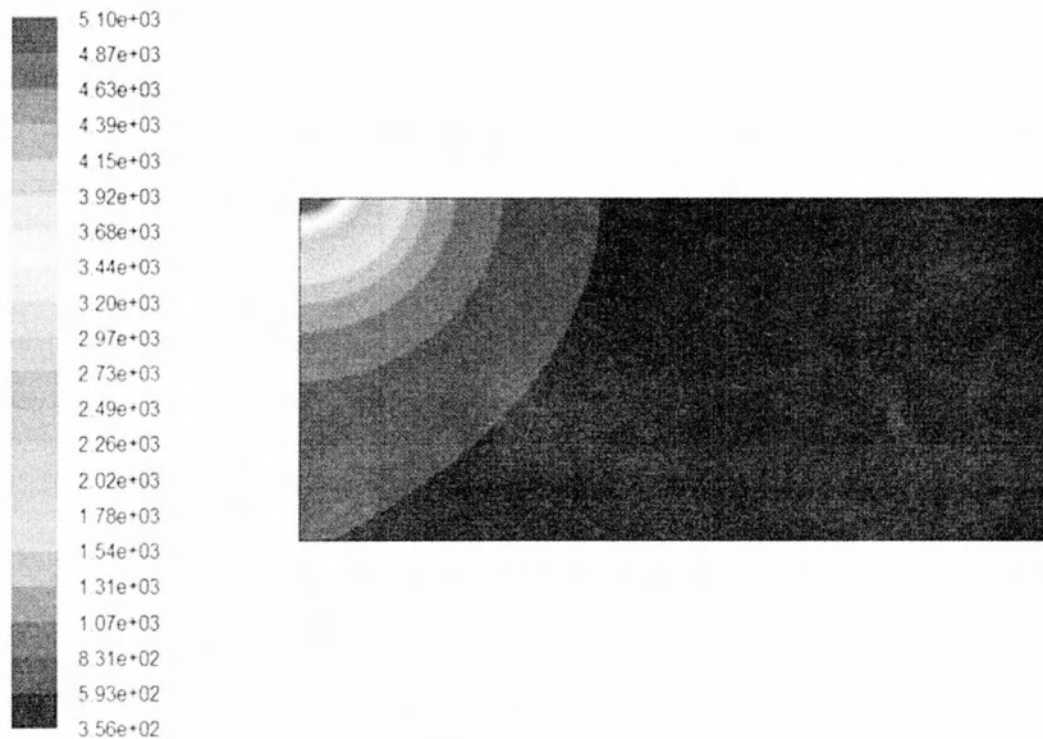
Σχήμα 4.40: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για $t=0.323$ sec

Χρειάζεται επομένως 0.23 sec για να στερεοποιηθεί πλήρως η λίμνη συγκόλλησης. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στο μέγεθος της ZMT. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το μέγεθος της ZMT φαίνεται να αυξάνεται τη στιγμή που σβήνει το Laser. Αυτό το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα εμφανές από τα παραπάνω στιγμιότυπα τα οποία δείχνουν τη λίμνη συγκόλλησης να τριπλασιάζεται σχεδόν σε μέγεθος. Η ZMT φτάνει στο μέγιστο σημείο της τη στιγμή $t= 0.312$ sec. Από εκείνο το σημείο και έπειτα μειώνεται σταδιακά έως ότου μηδενιστεί εντελώς.

Περίπτωση 5

Η συγκεκριμένη και η επόμενη περίπτωση μελετούν το πώς επιδρά στη συγκόλληση η αλλαγή των δύο βασικών παραμέτρων της διαδικασίας, η ισχύς της δέσμης Laser και η ακτίνα της αντίστοιχα. Η ισχύς γίνεται ίση με 2000 W, ενώ η διάμετρος της δέσμης Laser παραμένει ίση με 1 mm και ο χρόνος εκπομπής του παλμού Laser είναι ίσος με 0.3 sec.

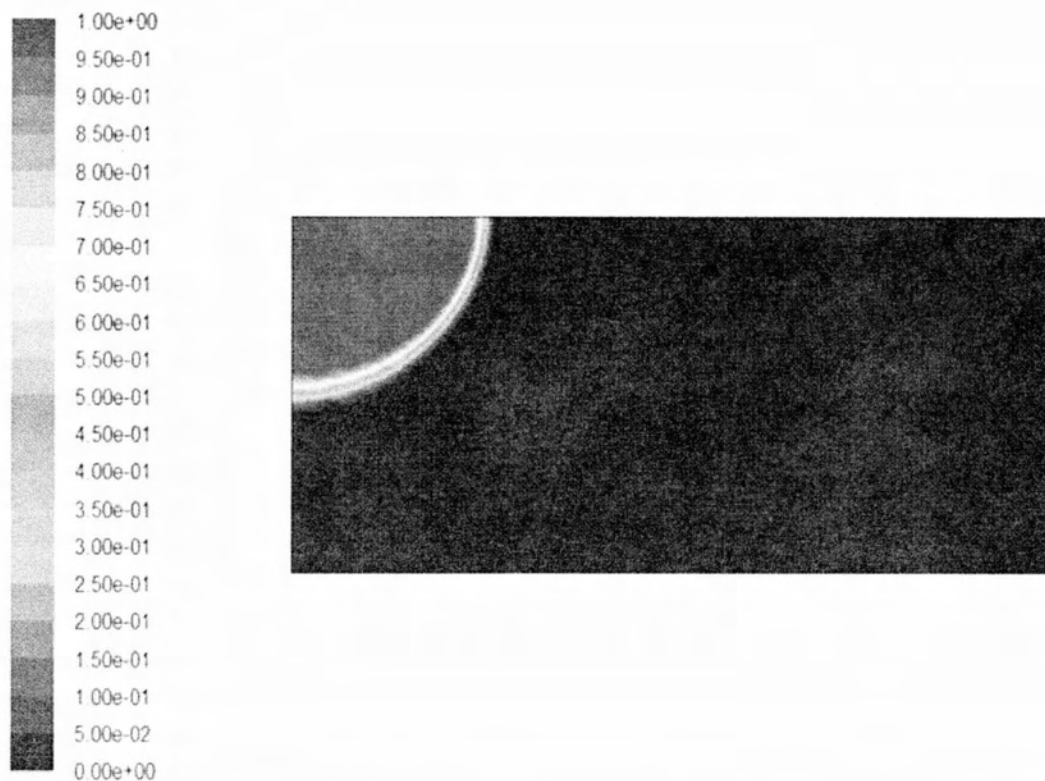
Η κατανομή της θερμοκρασίας στην πλάκα, και η γεωμετρία της συγκόλλησης τη στιγμή που σβήνει το Laser φαίνονται στις επόμενες εικόνες.



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01) Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.41: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 5

Η κατανομή της θερμοκρασίας στην πλάκα είναι ομαλή και περίπου ίδια με την προηγούμενη περίπτωση. Αυτό που αλλάζει ωστόσο είναι η μέγιστη θερμοκρασία στην πλάκα, η οποία στην συγκεκριμένη περίπτωση αγγίζει τους 5104 K, λίγο λιγότερο από 1000 K παραπάνω από την προηγούμενη περίπτωση δηλαδή.

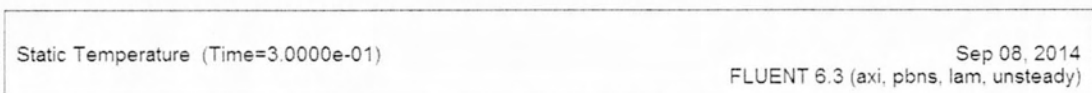
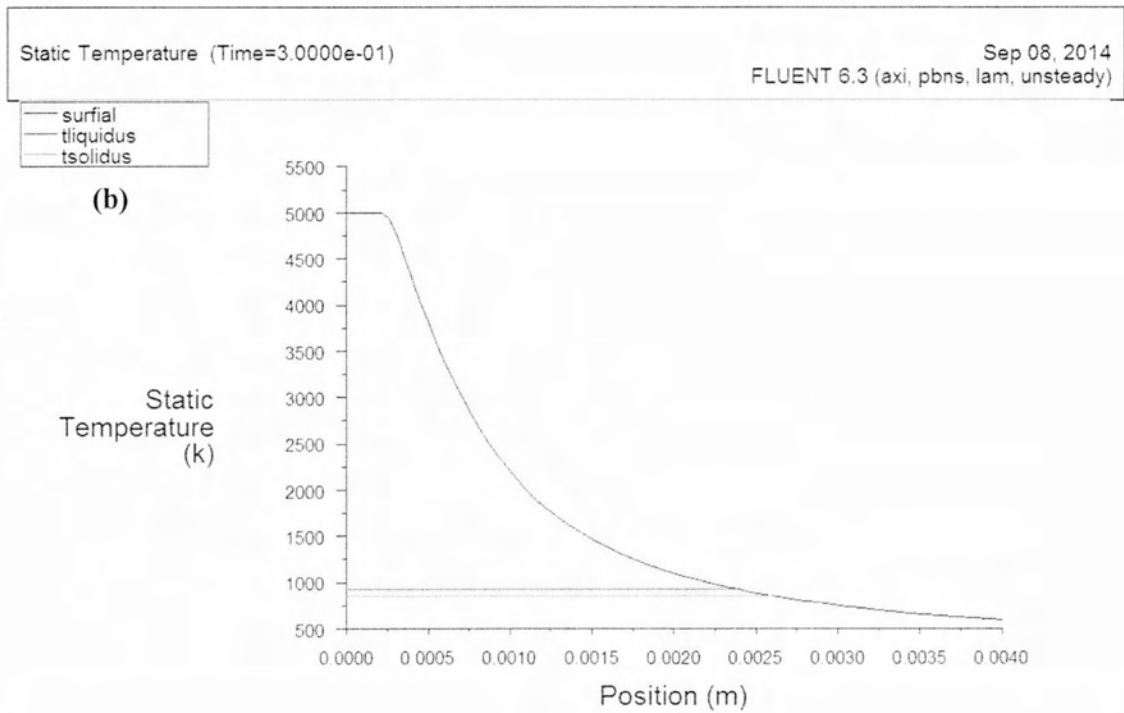
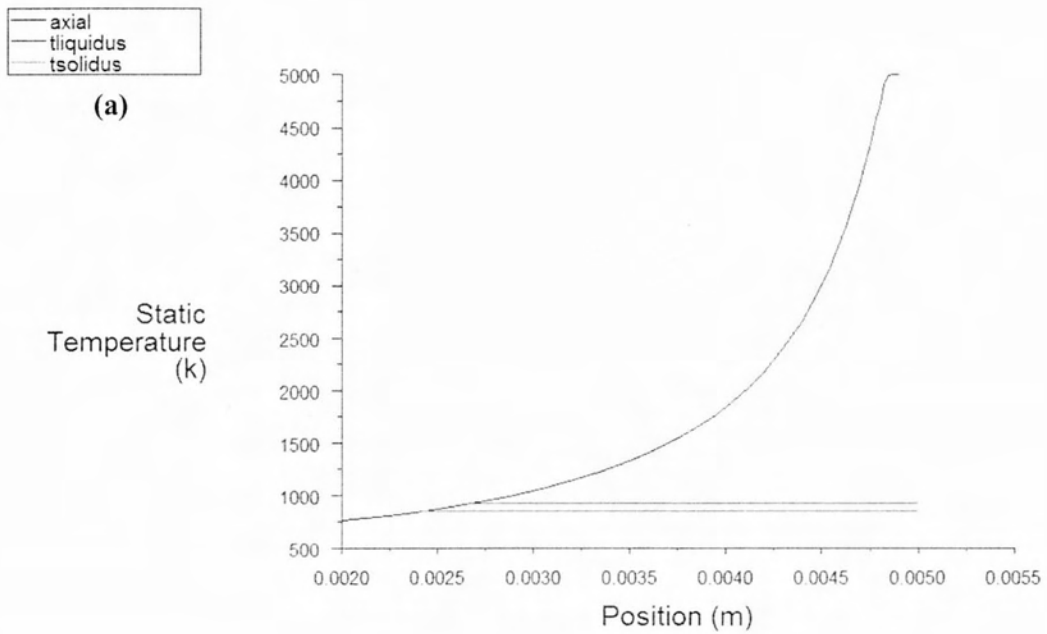


Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.42: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 5

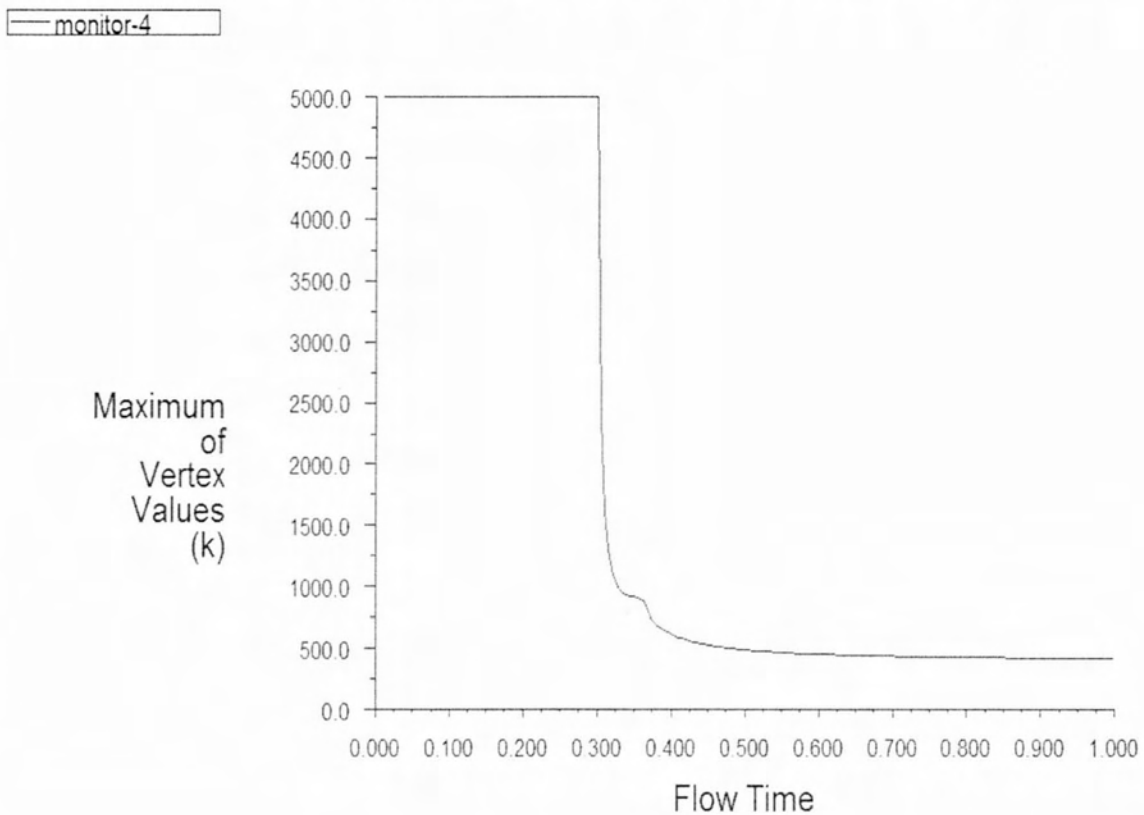
Στην εικόνα κατανομής του λόγου υγρού-ρευστού ωστόσο η διαφορά είναι κραυγαλέα. Η λίμνη συγκόλλησης φαίνεται να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την λίμνη συγκόλλησης της προηγούμενης περίπτωσης. Η διείσδυση είναι αρκετά μεγαλύτερη από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, φτάνοντας σχεδόν στο μέσο της πλάκας. Περισσότερα δεδομένα και πιο ακριβή δεδομένα σχετικά με το βάθος της διείσδυσης και τη γεωμετρία της συγκόλλησης δίνουν τα ακόλουθα διαγράμματα των σημείων του άξονα και της επιφάνειας σε σχέση με τη θερμοκρασία τους τη στιγμή που σβήνει το Laser, δηλαδή για $t=0.3$ sec.



Σχήμα 4.43: Διάγραμμα θερμοκρασίας την στιγμή $t=0.3$ sec, (a) των σημείων του άξονα και (b) των σημείων της επιφάνειας, Περίπτωση 5

Εδώ αποτυπώνεται ξεκάθαρα πως η λίμνη συγκόλλησης είναι εξαιρετικά μεγαλύτερη από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Το βάθος διείσδυσης αγγίζει τα 2.6 mm ενώ η ακτίνα της συγκόλλησης είναι ίση με 2.38 mm. Το γεγονός πως διπλασιάστηκε η ισχύς είχε μεγάλη επίδραση στη γεωμετρία της συγκόλλησης, εξαιτίας του ότι το αλουμίνιο έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των σημείων που έχουν οριστεί για την παρακολούθηση της διαδικασίας συναρτήσεως του χρόνου, για ένα δευτερόλεπτο.



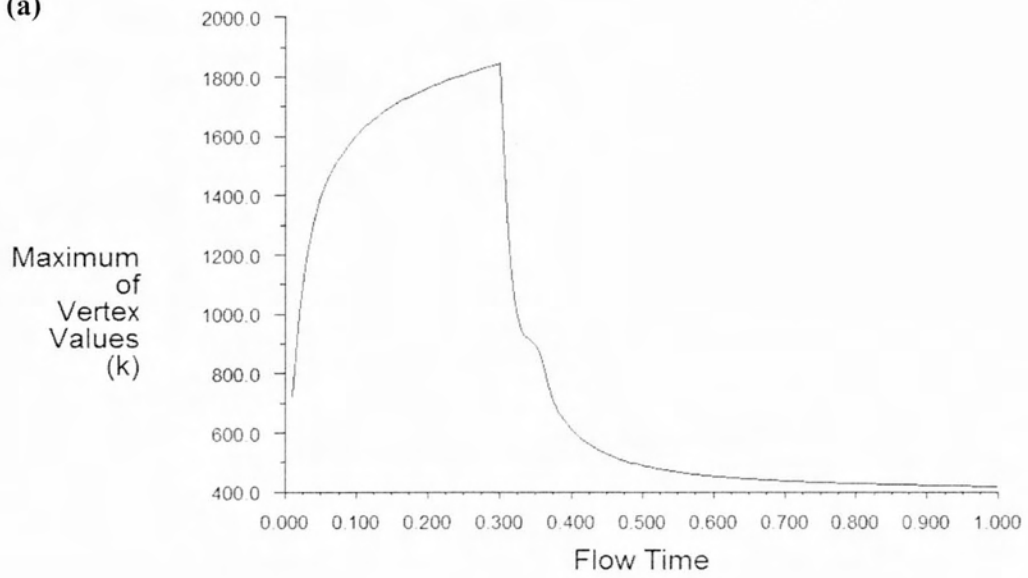
Convergence history of Static Temperature on source (Time=1.0000e+00)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.44: Θερμικός κύκλος του σημείου A, Περίπτωση 5

monitor-1

(a)

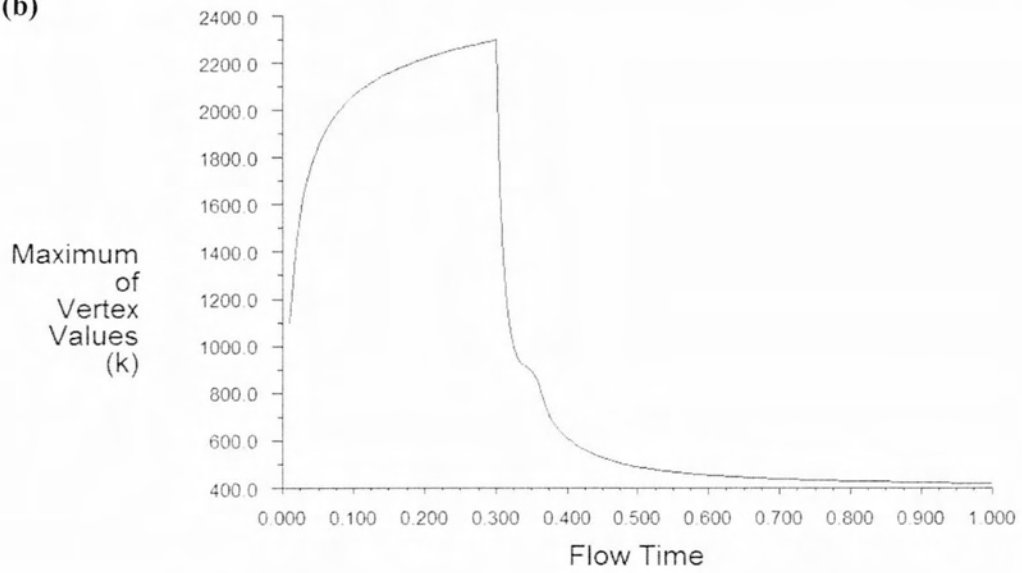


Convergence history of Static Temperature on axispoint (Time=1.0000e+00)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

monitor-3

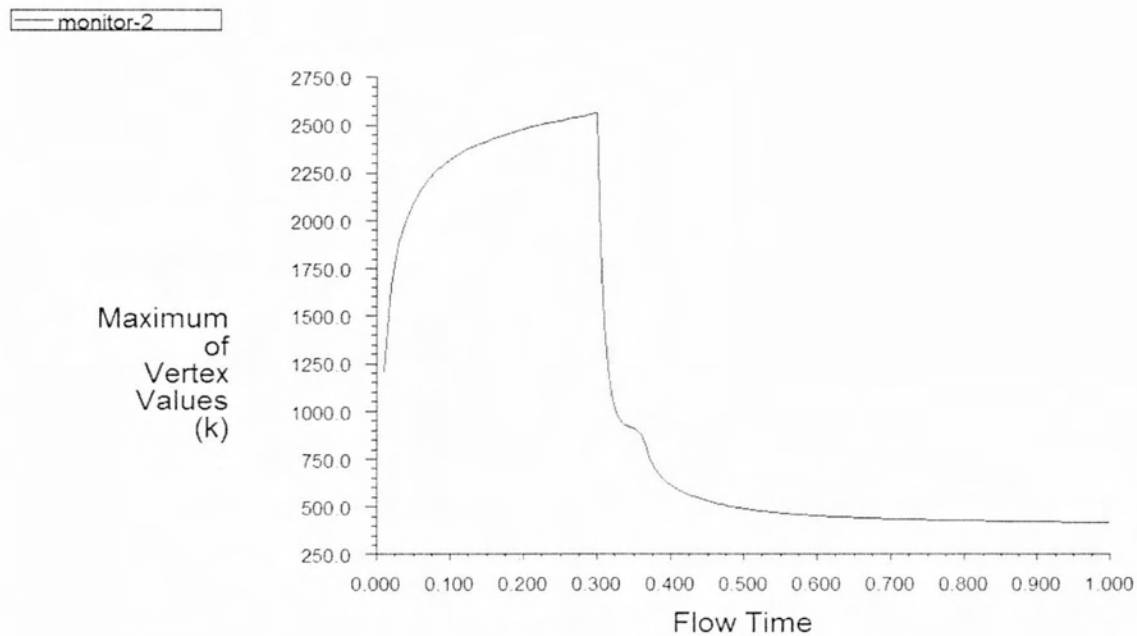
(b)



Convergence history of Static Temperature on surfpoint (Time=1.0000e+00)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.45: Θερμικός κύκλος των σημείων (a) Β και (b) Γ, Περίπτωση 5



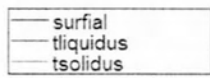
Convergence history of Static Temperature on midpoint (Time=1.0000e+00)

Sep 08, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.46: Θερμικός κύκλος του σημείου Δ, Περίπτωση 5

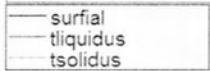
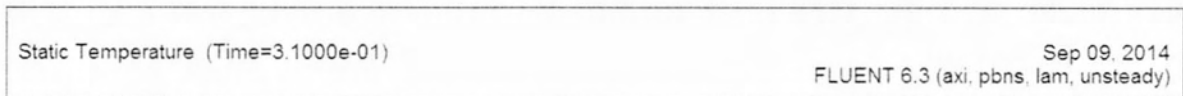
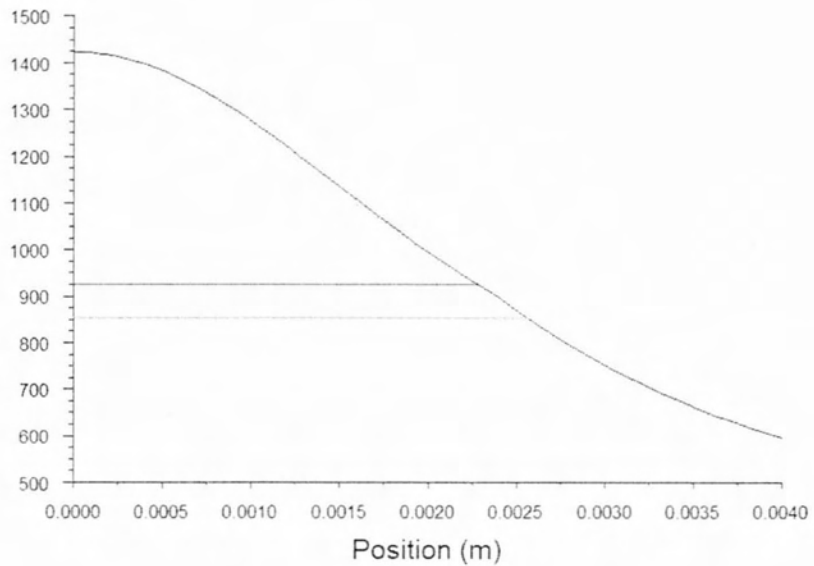
Για ακόμα μια φορά, με το που σβήνει το Laser η θερμοκρασία και των τεσσάρων σημείων φαίνεται να μειώνεται ακαριαία σχεδόν. Στη συνέχεια, οι καμπύλες και για τα τέσσερα σημεία, σχεδόν ταυτόχρονα, για δέκατα του δευτερολέπτου σχηματίζουν μια μικρή ευθεία λίγο πάνω από τη γραμμή Liquidus. Έπειτα η θερμοκρασία συνεχίζει να μειώνεται σταδιακά έως ότου φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η μικρή ευθεία που σχηματίζουν τα διαγράμματα, και η οποία σημαίνει πως σε εκείνο για εκείνο το χρονικό διάστημα ο ρυθμός ψύξης μειώνεται λίγο, έχει να κάνει με τη λανθάνουσα θερμότητα της τήξης.

Παρακάτω είναι τα διαγράμματα των θερμοκρασιών των σημείων της επιφάνειας συναρτήσεως του χρόνου.



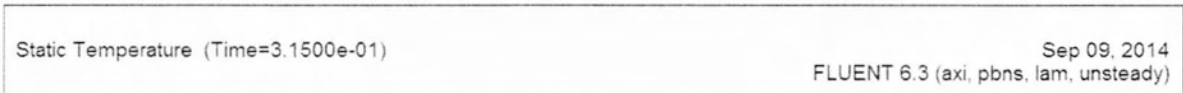
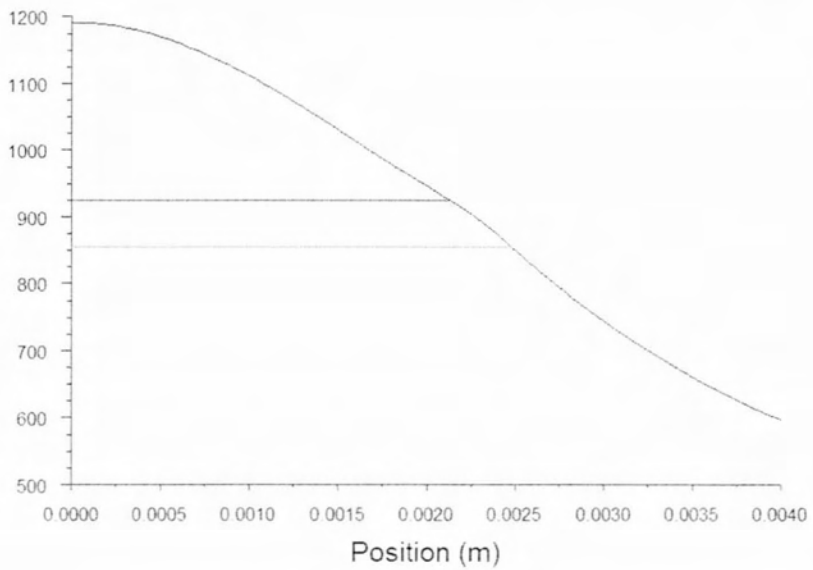
(a)

Static Temperature (k)

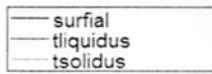


(b)

Static Temperature (k)

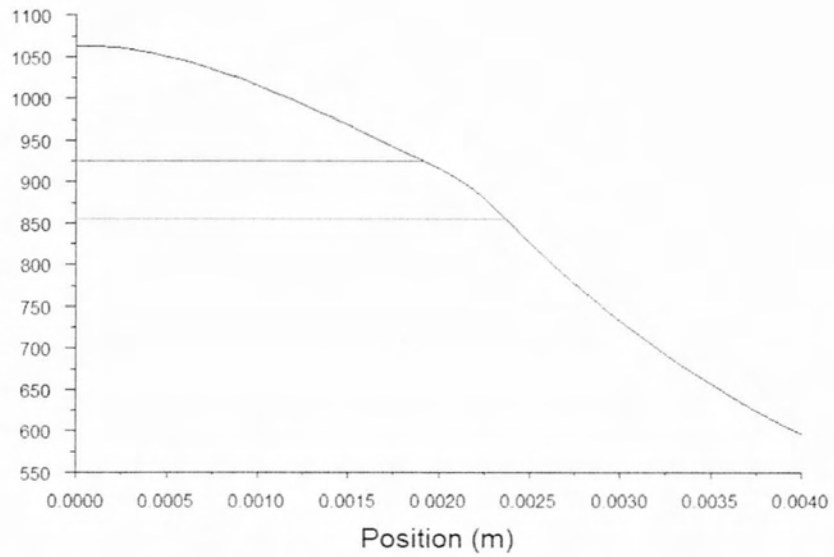


Σχήμα 4.47: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.31$ sec και (b) $t=0.315$ sec



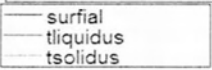
(a)

Static Temperature (k)



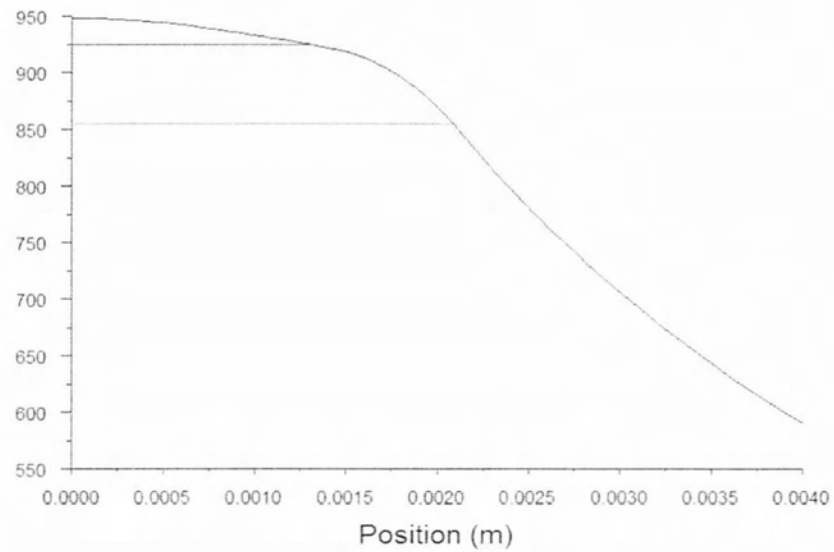
Static Temperature (Time=3.2000e-01)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)



(b)

Static Temperature (k)



Static Temperature (Time=3.3000e-01)

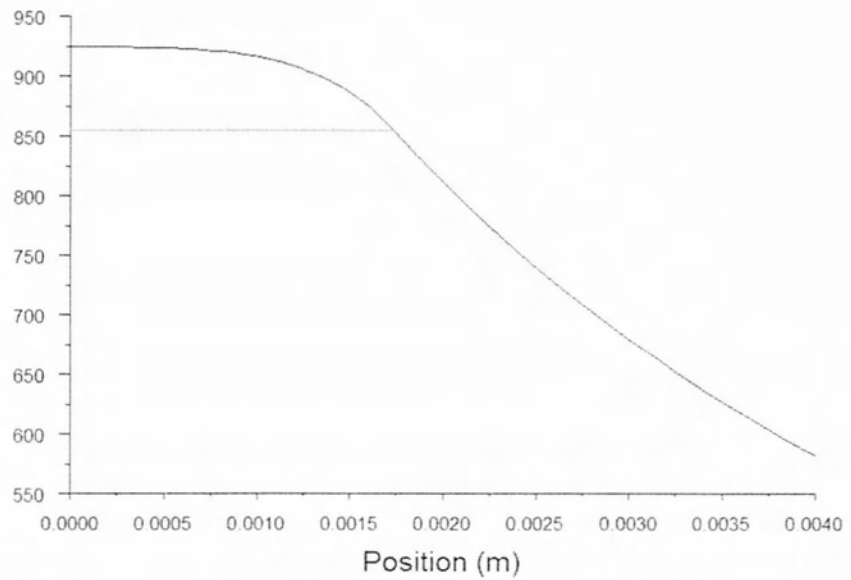
Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.48: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.32$ sec και (b) $t=0.33$ sec

— surfial
— tsolidus

(a)

Static
Temperature
(k)



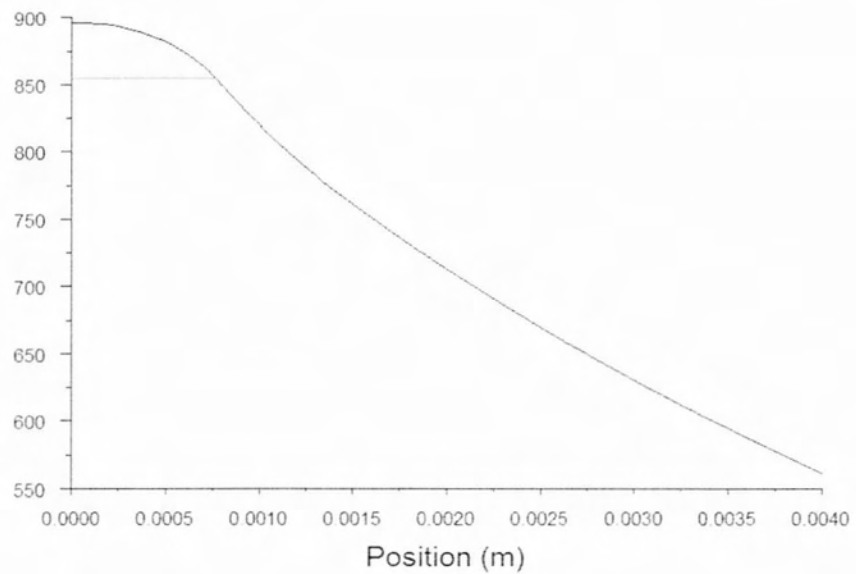
Static Temperature (Time=3.4000e-01)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

— surfial
— tsolidus

(b)

Static
Temperature
(k)

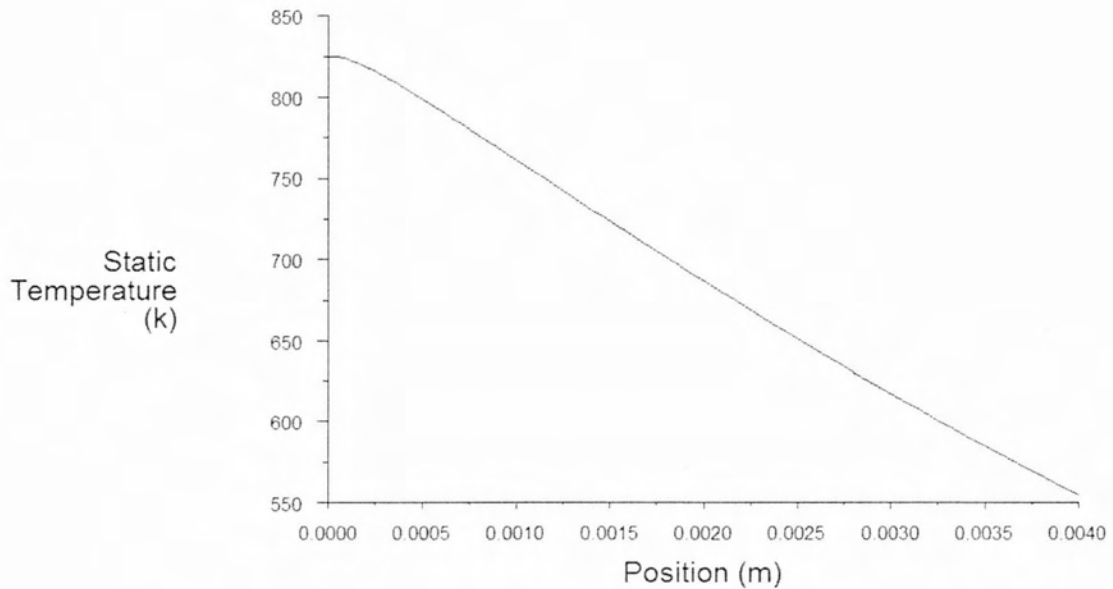


Static Temperature (Time=3.6000e-01)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.49: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.34$ sec και (b) $t=0.36$ sec

— surfial



Static Temperature (Time=3.6600e-01)

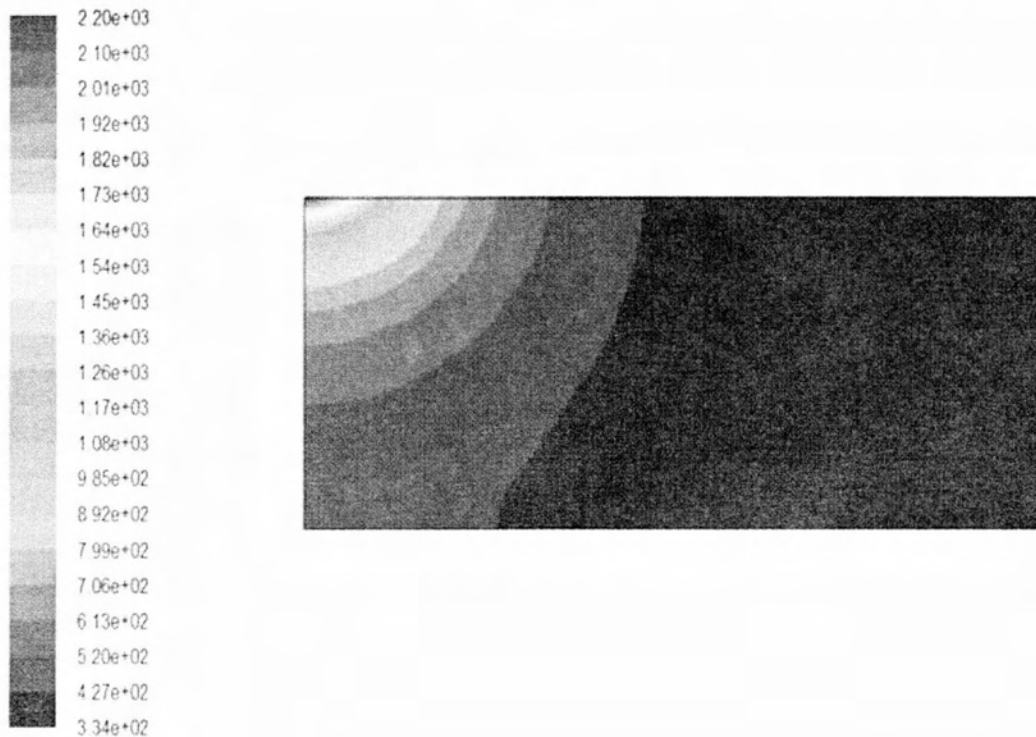
Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.50: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για $t=0.366$ sec

Η πλήρης στερεοποίηση της λίμνης συγκόλλησης επέρχεται επομένως μετά από 0.066 sec. Στα πρώτα 0.01 sec μετά το σβήσιμο του Laser, η θερμοκρασία μειώνεται κατά 3500 K περίπου, ενώ έπειτα ο ρυθμός ψύξης δεν είναι το ίδιο μεγάλος. Η ZMT είναι και σε αυτή τη περίπτωση αρκετά μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της ψύξης σε σχέση με το μέγεθος της κατά τη διάρκεια της θέρμανσης παρουσιάζοντας ένα μέγιστο τη στιγμή που η μέγιστη θερμοκρασία γίνεται ελαφρώς μικρότερη από της θερμοκρασία Liquidus.

Περίπτωση 6

Στην τελευταία περίπτωση όπου το υλικό της πλάκας είναι το κράμα αλουμινίου 6061-T6, η ισχύς παραμένει στα 1000 W όπως ήταν στην περίπτωση 4, αλλά αυτή τη φορά διπλασιάζεται η διάμετρος της δέσμης Laser ώστε να διερευνηθεί ποιά θα είναι η επίδραση αυτής της αλλαγής στην κατανομή της θερμοκρασίας και τη γεωμετρία της συγκόλλησης.



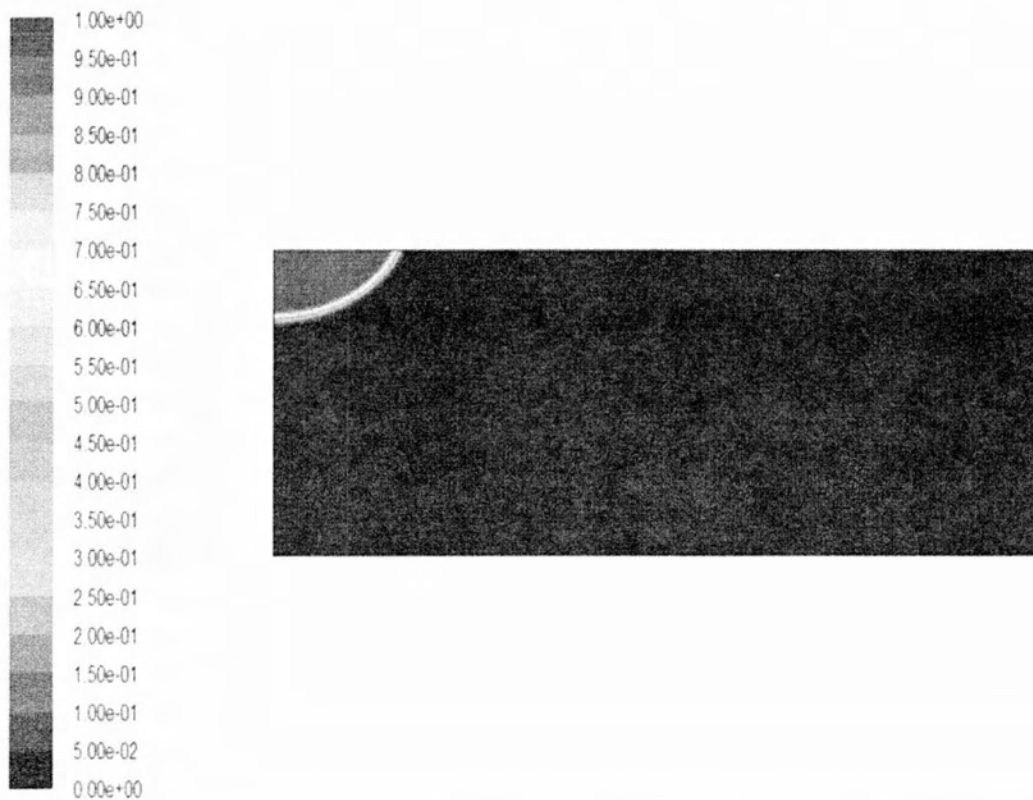
Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.51: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 6

Η κατανομή της θερμοκρασίας στην πλάκα είναι περισσότερο ομαλή από πριν. Το μέγιστο της θερμοκρασίας μπορεί να είναι πολύ μικρότερο και από τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις που αφορούσαν το ίδιο υλικό, και μετά βίας αγγίζει τους 2196 K και να περιορίζεται στο σημείο που προσπίπτει η ακτίνα Laser, η θερμοκρασία ωστόσο είναι κατανεμημένη με τέτοιο τρόπο που η λίμνη συγκόλλησης θα είναι αρκετά μεγάλη, αν και όχι όσο στην περίπτωση 5. Όλα αυτά επαληθεύονται και από την κατανομή του λόγου υγρού-στερεού που φαίνεται παρακάτω. Η λίμνη συγκόλλησης, όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση 3, δεν έχει μεγάλη διεύδυση, παρά φαίνεται να περιορίζεται στην επιφάνεια

περισσότερο. Η διάμετρος στην επιφάνεια δεν ξεπερνάει κατά πολύ την ακτίνα της δέσμης Laser.

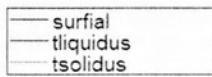


Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01) Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.52: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 6

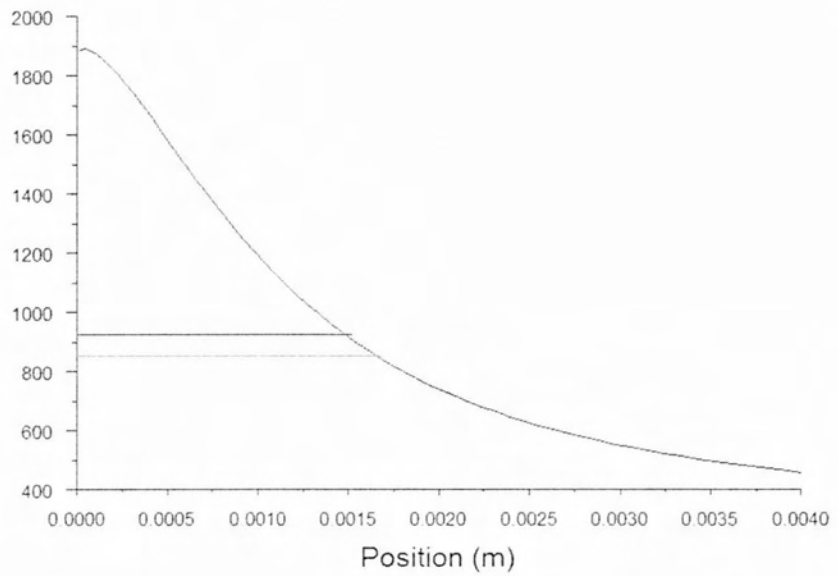
Η ZMT φαίνεται να διατηρείται στα ίδια επίπεδα με τις περιπτώσεις 4 και 5. Η γεωμετρία της συγκόλλησης και το μέγεθος της ZMT επαληθεύεται και από τα διαγράμματα των θερμοκρασιών των σημείων που βρίσκονται πάνω στον άξονα συμμετρίας και πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια για τη στιγμή $t=0.3$ sec που σβήνει το Laser.

Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν πως η λίμνη συγκόλλησης έχει διεύθυνση 1.25 mm σε βάθος, ενώ η ακτίνα της λίμνης συγκόλλησης ισούται με 1.55 mm, δηλαδή η συγκόλληση είναι πιο ρηχή και λιγότερο βαθιά.



(a)

Static Temperature (k)



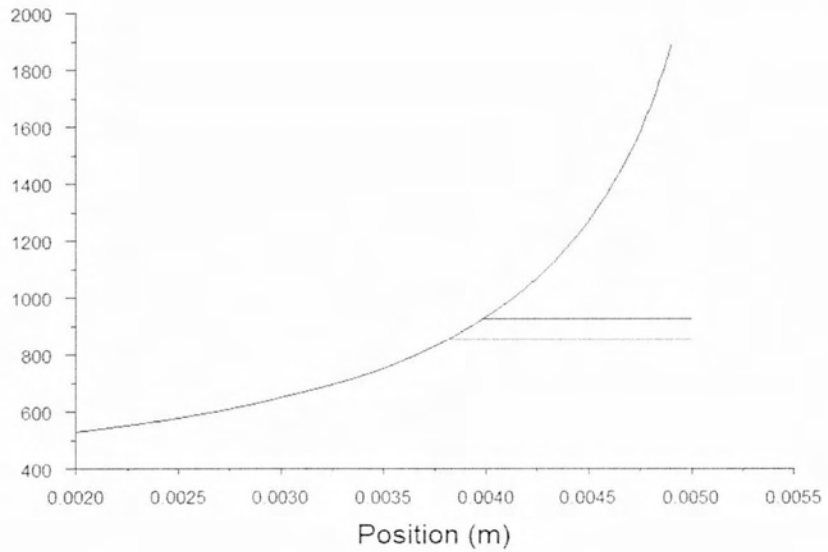
Static Temperature (Time=3.0000e-01)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)



(b)

Static Temperature (k)

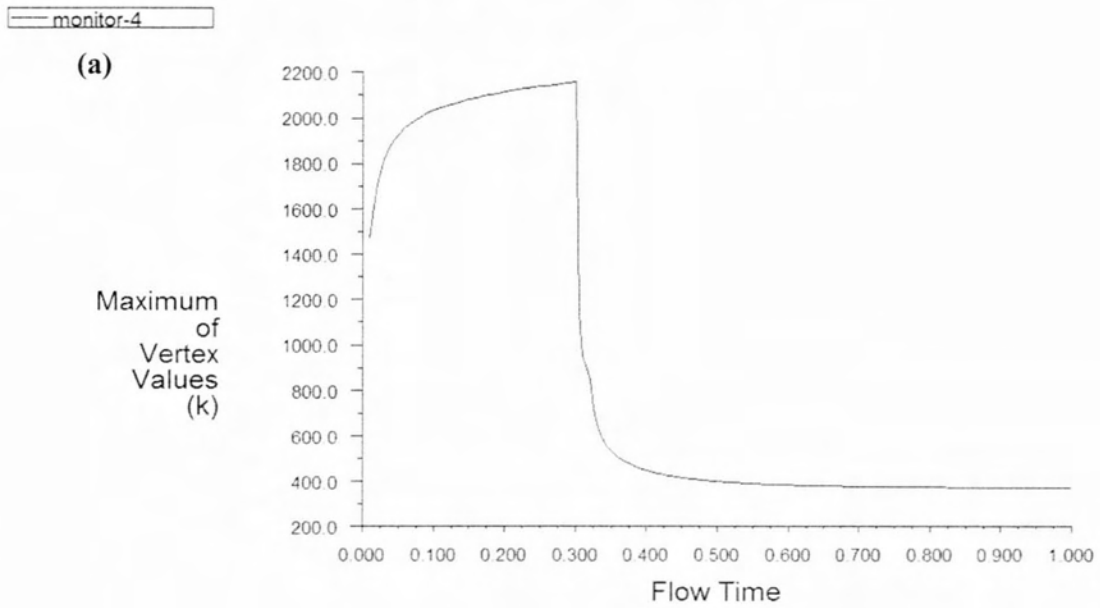


Static Temperature (Time=3.0000e-01)

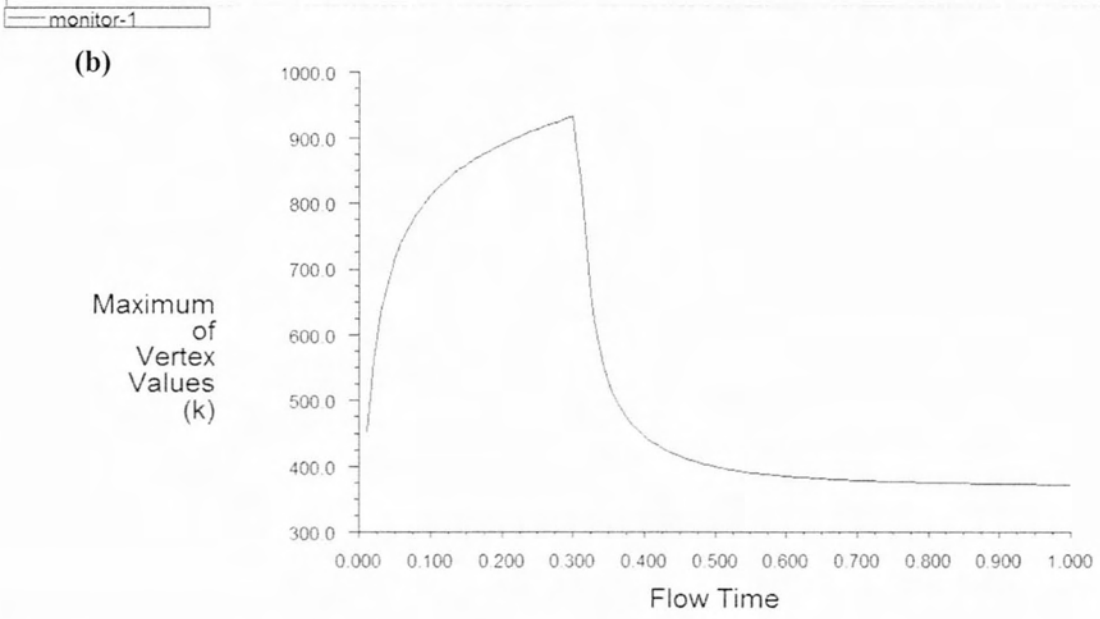
Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.53: Διάγραμμα θερμοκρασίας την στιγμή $t=0.3$ sec, (a) των σημείων του άξονα και (b) των σημείων της επιφάνειας, Περίπτωση 6

Οι θερμικοί κύκλοι για τα τέσσερα σημεία είναι ως εξής:



Convergence history of Static Temperature on source (Time=1.0000e+00) Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

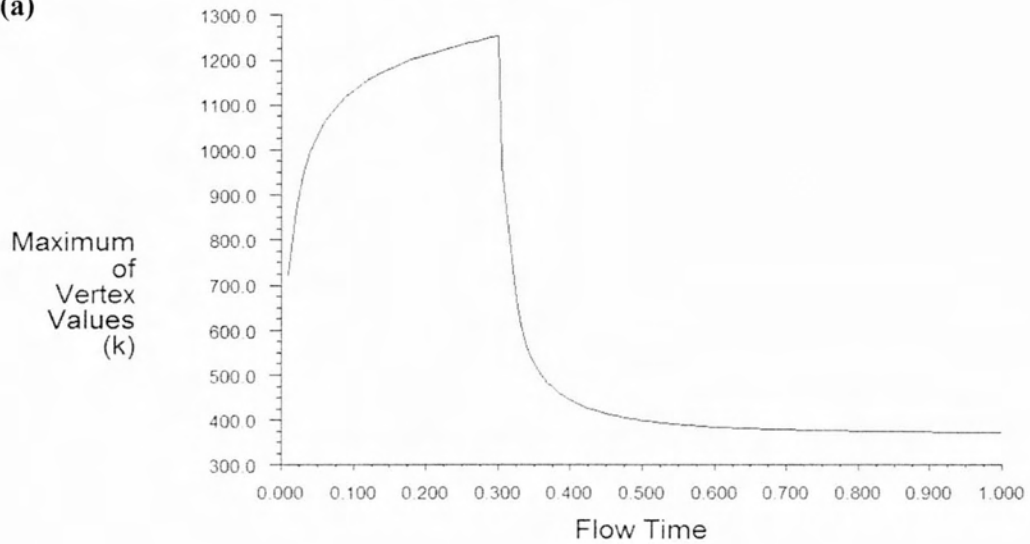


Convergence history of Static Temperature on axispoint (Time=1.0000e+00) Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.54: Θερμικός κύκλος των σημείων (a) A και (b) B, Περίπτωση 6

monitor-3

(a)

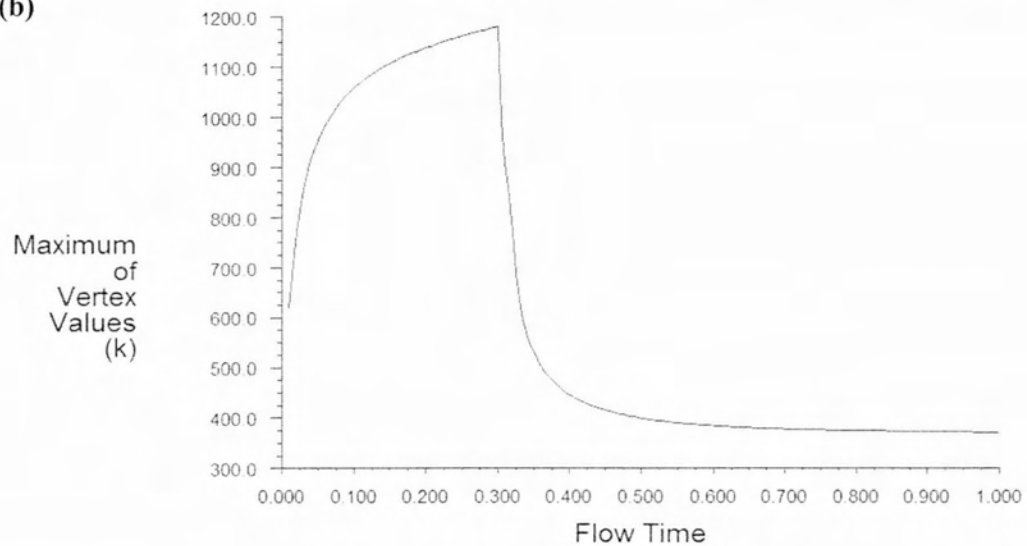


Convergence history of Static Temperature on surfpoint (Time=1.0000e+00)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

monitor-2

(b)



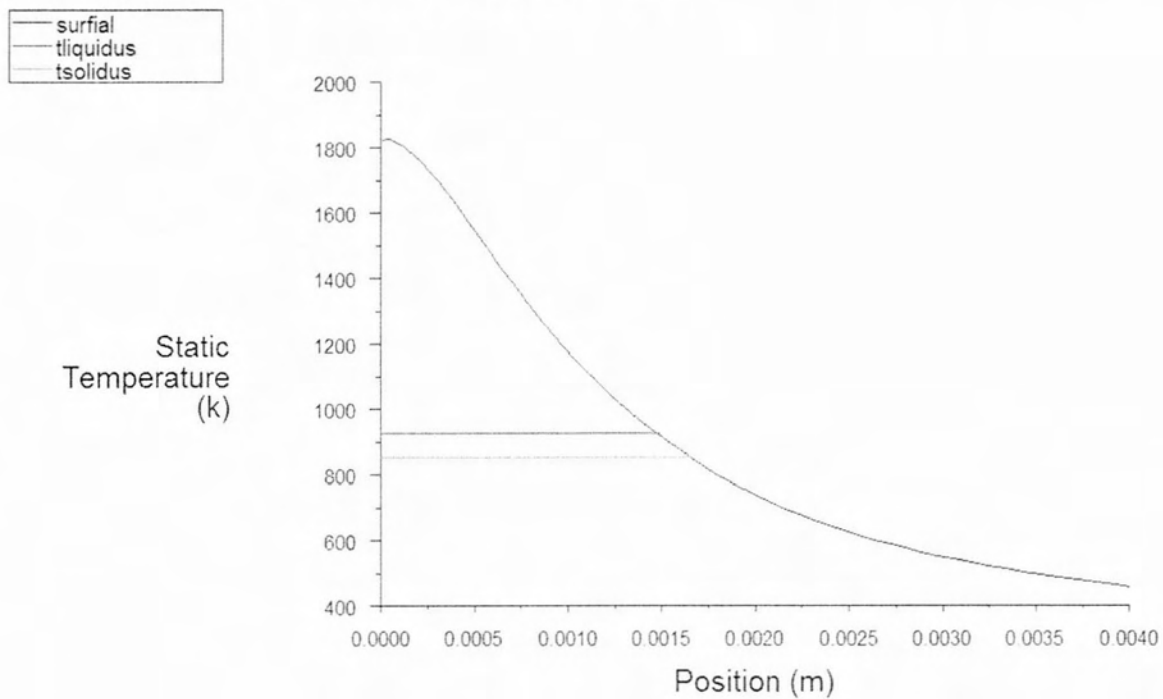
Convergence history of Static Temperature on midpoint (Time=1.0000e+00)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.55: Θερμικός κύκλος των σημείων (a) Γ και (b) Δ, Περίπτωση 6

Για ακόμα μια φορά, οι κύκλοι επιβεβαιώνουν πως ο ρυθμός ψύξης είναι πολύ μεγάλος την ώρα που σβήνει το Laser, και το τεμάχιο ψύχεται ακαριαία. Αξιοπρόσεχτο είναι το γεγονός πως το σημείο που βρίσκεται πάνω στον άξονα έχει για ακόμα μια φορά την χαμηλότερη θερμοκρασία από τα τέσσερα σημεία. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή τη περίπτωση το σημείο ίσα που προλαβαίνει να περάσει τη γραμμή Liquidus προτού σβήσει το Laser και μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου στερεοποιηθεί ξανά.

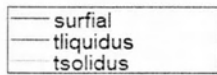
Τα διαγράμματα των θερμοκρασιών των σημείων της επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου ήταν πιο περίπλοκα για την συγκεκριμένη περίπτωση. Όπως αναφέρθηκε ήδη, ο ρυθμός ψύξης ήταν εξαιρετικά μεγάλος, και σε συνδυασμό με το ότι η μέγιστη θερμοκρασία για την περίπτωση ήταν ήδη χαμηλότερη από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, το χρονικό βήμα των 0.005 sec που χρησιμοποιούνταν για την προσομοίωση δεν ήταν αρκετό για να απαθανάτισει το γρήγορο ρυθμό ψύξης. Παρόλα αυτά, ούτε το χρονικό βήμα των 0.001 sec που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση 4 ήταν αρκετό. Για το λόγο αυτό σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε χρονικό βήμα της τάξεως του 0.1 msec, το οποίο αποδείχτηκε επαρκές για την σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων.



Static Temperature (Time=3.0010e-01)

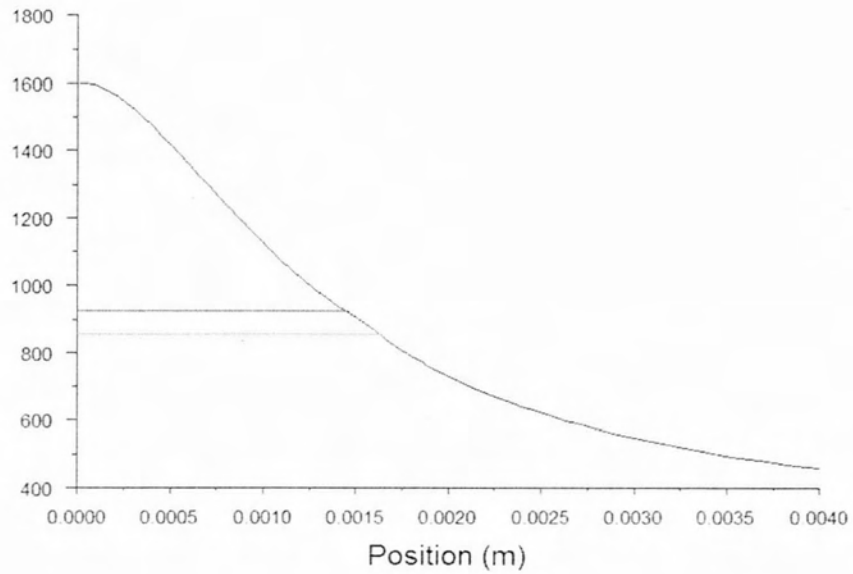
Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.56: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για $t=0.3001$ sec



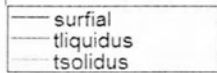
(a)

Static Temperature (k)



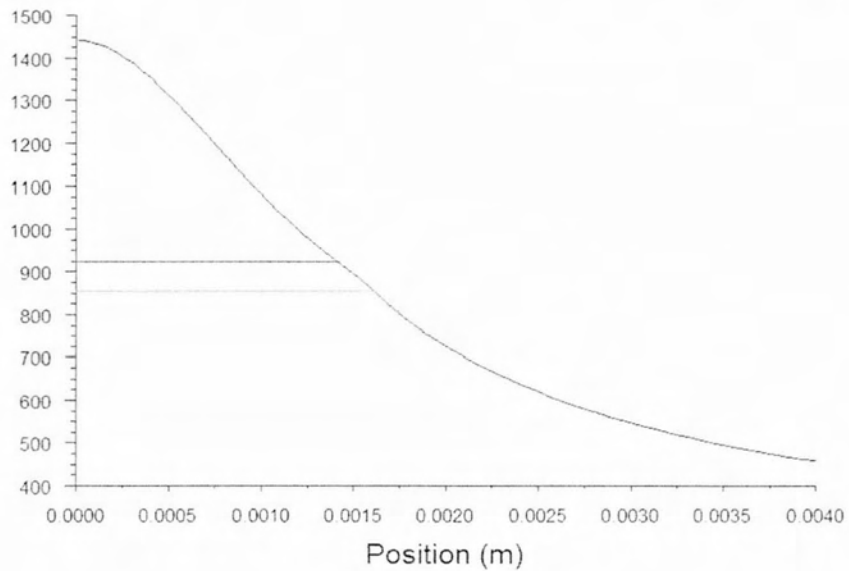
Static Temperature (Time=3.0050e-01)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)



(b)

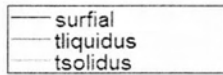
Static Temperature (k)



Static Temperature (Time=3.0100e-01)

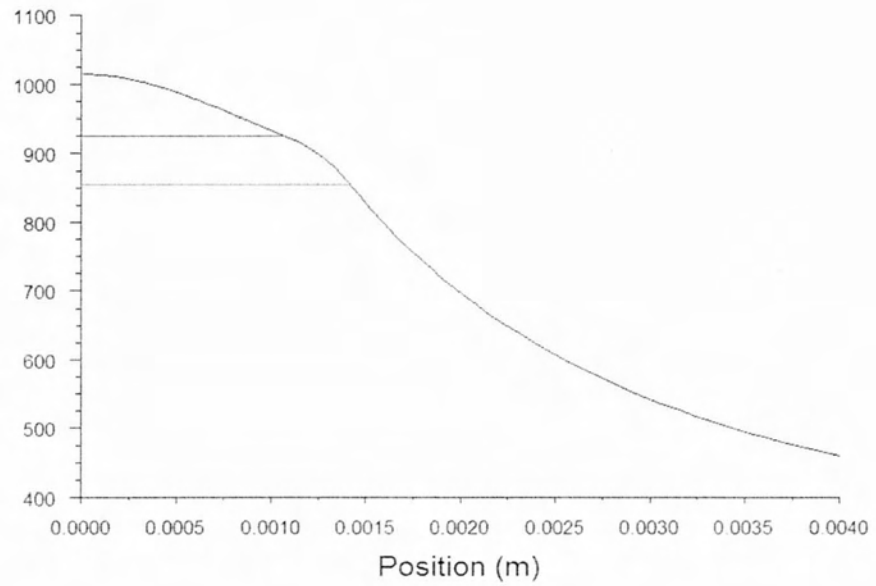
Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.57: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.3005$ sec και (b) $t=0.301$ sec



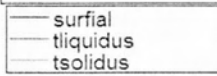
(a)

Static Temperature (k)



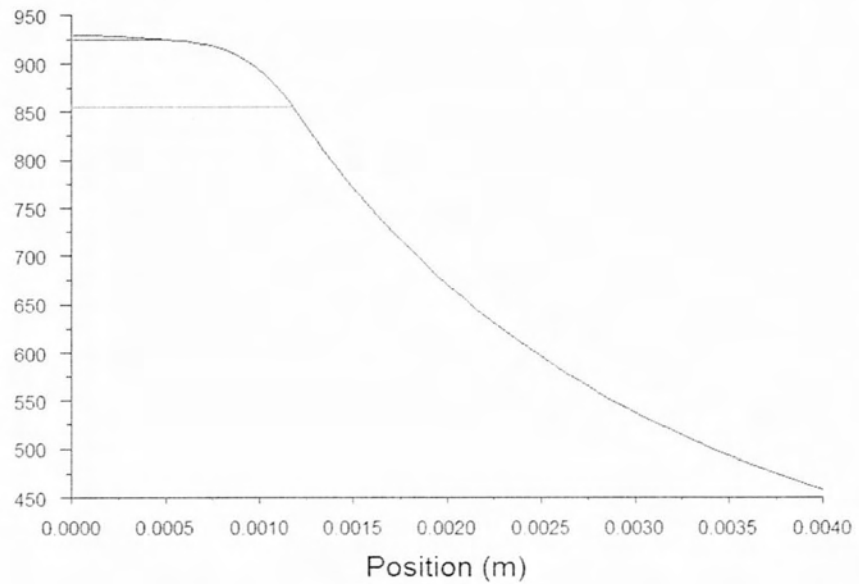
Static Temperature (Time=3.0500e-01)

Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)



(b)

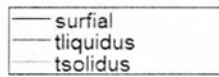
Static Temperature (k)



Static Temperature (Time=3.0900e-01)

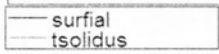
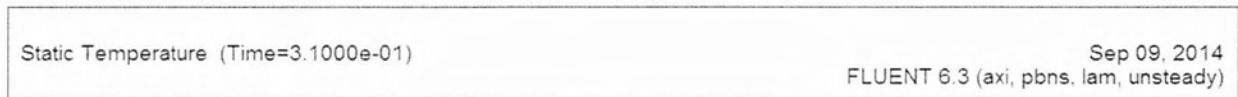
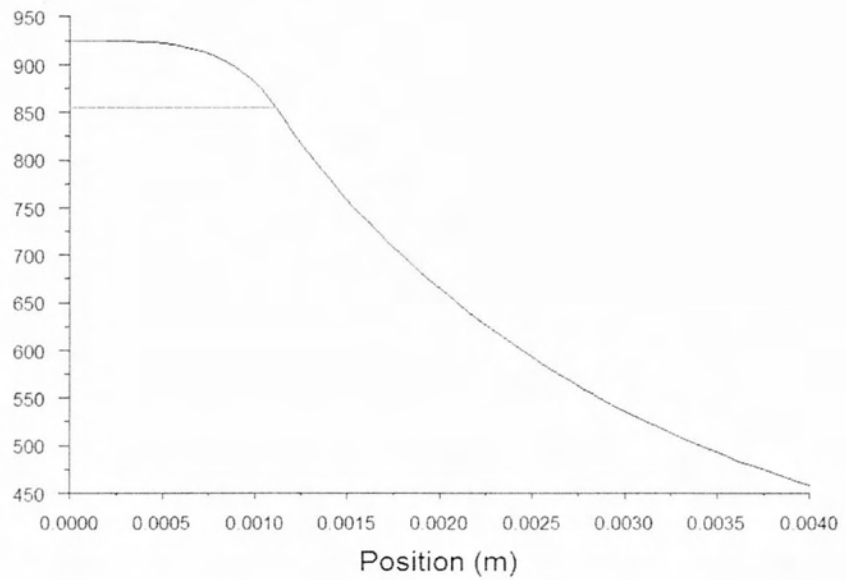
Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.58: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.305$ sec και (b) $t=0.309$ sec



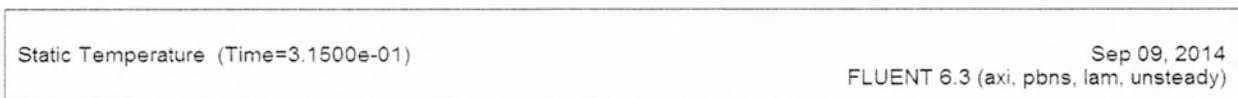
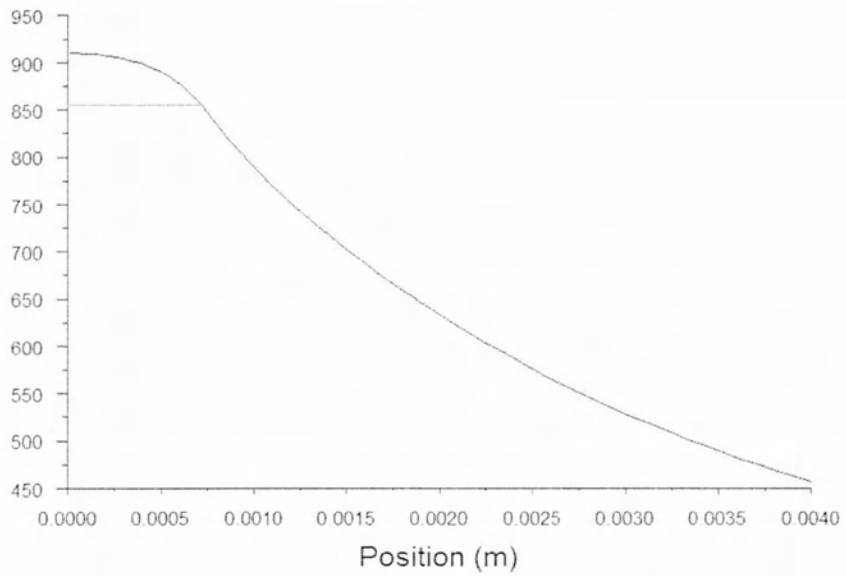
(a)

Static Temperature (k)

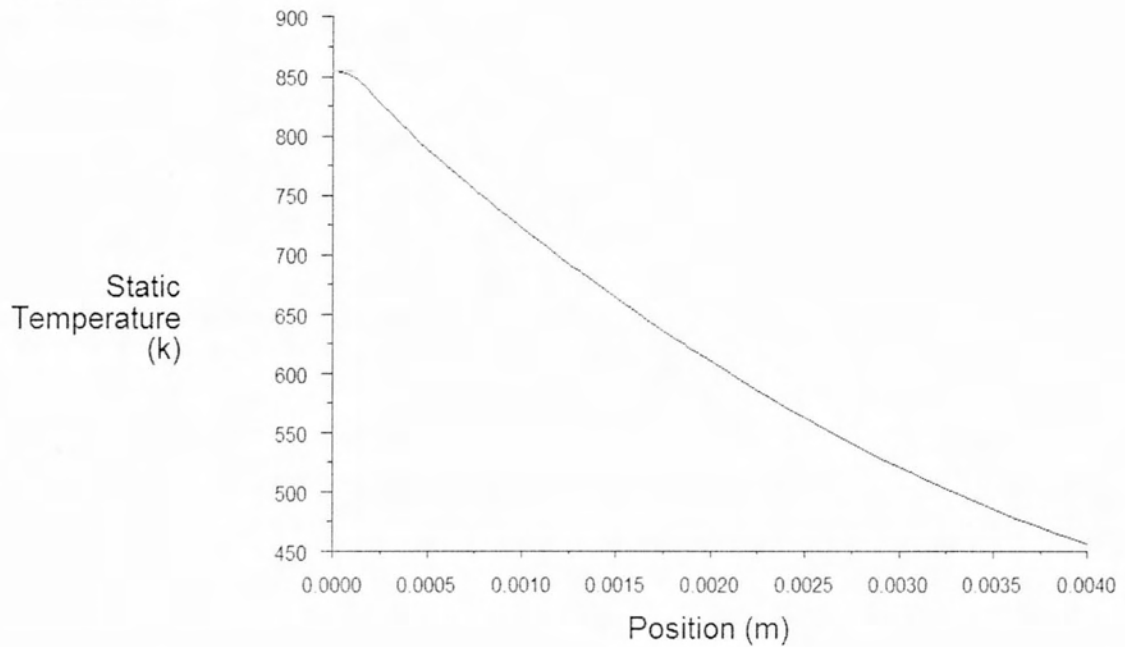
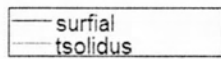


(b)

Static Temperature (k)



Σχήμα 4.59: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για (a) $t=0.31$ sec και (b) $t=0.315$ sec



Static Temperature (Time=3.1900e-01) Sep 09, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.60: Θερμοκρασίες των σημείων της επιφάνειας για $t=0.74 \text{ sec}$

Η πλήρης στερεοποίηση της συγκόλλησης έρχεται μετά από 0.019 sec από τη στιγμή που σβήνει το Laser. Ένα χαρακτηριστικό στο οποίο πρέπει να δοθεί προσοχή είναι το γεγονός πως όσο χρόνο χρειάζεται η θερμοκρασία για να πέσει από τη μέγιστη θερμοκρασία των 2196 K στη θερμοκρασία Liquidus 925 K, να μειωθεί δηλαδή κατά 1271 K, περίπου άλλο τόσο χρειάζεται για να φτάσει από τη θερμοκρασία Liquidus στη θερμοκρασία Solidus, οι οποίες έχουν διαφορά μόλις 70 K. Σε όλο αυτό το διάστημα που μεσολαβεί από τη μία θερμοκρασία στην άλλη, τα σημεία που βρίσκονται στο ενδιάμεσο ανήκουν στη ZMT η οποία και πάλι είναι αρκετά μεγάλη παρά τη μικρότερη μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται κατά τη διαδικασία.

4.2 Μοντέλο II

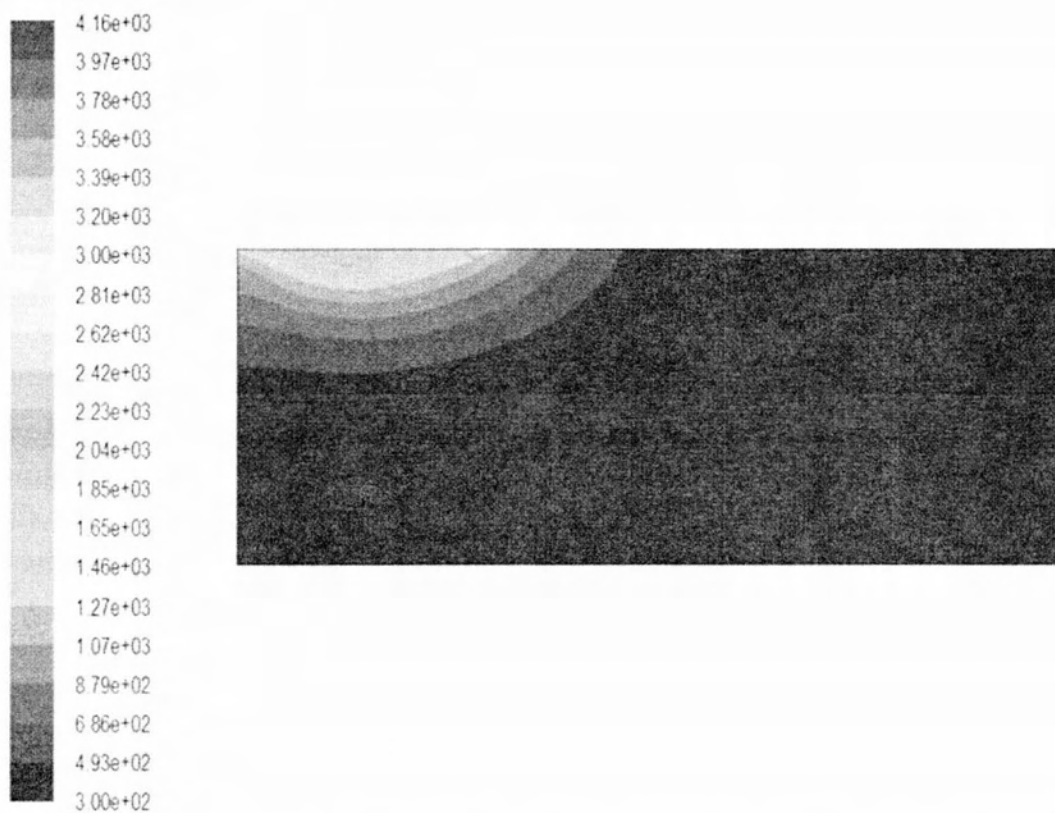
Στο δεύτερο Μοντέλο προσομοίωσης, συνυπολογίζεται η ροή ρευστού στην λίμνη συγκόλλησης και κατ' επέκταση η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Η ροή του ρευστού συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο εισάγοντας τον θερμοκρασιακό συντελεστή της επιφανειακής τάσης, ο οποίος στο μοντέλο I είναι μηδενικός και για αυτό δεν υπάρχει κίνηση του υγρού. Στο παρόν μοντέλο όμως, εφόσον ο συντελεστής δεν είναι μηδέν, η κίνηση του ρευστού περιλαμβάνεται στον υπολογισμό των θερμοκρασιακών πεδίων, γεγονός που προσδίδει ένα πιο ρεαλιστικό τόνο στην προσομοίωση.

Οι δυνάμεις που επηρεάζουν τη δυναμική της λίμνης συγκόλλησης είναι κυρίως οι ιξώδεις δυνάμεις, οι δυνάμεις επιφανειακής τάσης και οι δυνάμεις άνωσης. Από αυτές, κυρίαρχη επιρροή στην κίνηση που υπάρχει στη λίμνη έχουν οι δυνάμεις επιφανειακής τάσης, που είναι και αυτές που οφείλονται για την εκκίνηση της κίνησης στη μικρή λίμνη συγκόλλησης.

Οι δύο περιπτώσεις που εξετάζονται έχουν τις ίδιες παραμέτρους με τις περιπτώσεις 1 και 4 αντίστοιχα του Μοντέλου I, με τη διαφορά ότι συμπεριλήφθηκε ο θερμικός συντελεστής επιφανειακής τάσης. Η τρίτη και τελευταία περίπτωση εξετάζει ένα υποθετικό τρίτο υλικό με παρόμοιες ιδιότητες με του χάλυβα AISI 304.

Περίπτωση 7

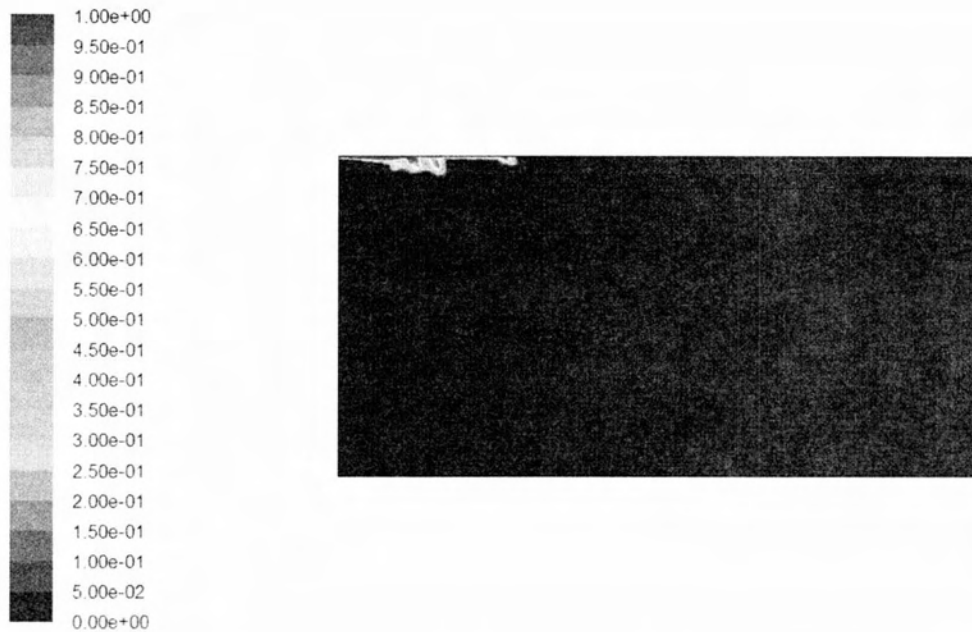
Στη συγκεκριμένη περίπτωση το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η πλάκα προς συγκόλληση είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας AISI 304. Η ισχύς της δέσμης Laser είναι ίση με 1000 W, ενώ η διάμετρος της δέσμης Laser ισούται με 1 mm. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής επιφανειακής τάσης για το συγκεκριμένο υλικό βρέθηκε από τη βιβλιογραφία ίσος με 4.3×10^{-4} . Παρακάτω φαίνεται το θερμοκρασιακό πεδίο και η κατανομή του λόγου υγρού-στερεού για τη στιγμή 0.3 sec που απενεργοποιείται το Laser.



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Oct 02, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.61: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 7



Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01)

Oct 02, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.62: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 7

Όπως είναι προφανές, το μοντέλο παρουσιάζει αστάθειες για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Η θερμοκρασιακή κατανομή ήταν ασυνεχής, και το ίδιο και η λίμνη συγκόλλησης. Αρχικά υποθέσαμε πως πρόκειται για υπολογιστική αστάθεια, και για να λυθεί το πρόβλημα δημιουργήθηκε ένα πλέγμα με πιο πυκνούς κόμβους. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα ήταν ακριβώς τα ίδια. Η επόμενη υπόθεση ήταν πως η υπολογιστική αστάθεια μπορούσε να λυθεί με τη χρήση μικρότερου χρονικού βήματος και για αυτό το λόγο υιοθετήθηκε το χρονικό βήμα των 0.001 sec, χωρίς κάποια πρόοδο ωστόσο αφού τα αποτελέσματα ήταν ακριβώς τα ίδια. Το επόμενο λογικό συμπέρασμα ήταν ότι η αστάθεια δεν οφείλεται σε υπολογιστικό πρόβλημα, αλλά πρόκειται για φυσική αστάθεια, η οποία προκύπτει λόγω κάποιας παραμέτρου τις διεργασίας.

Για την περαιτέρω διερεύνηση της φυσικής αστάθειας, καταφύγαμε στη χρήση των αδιάστατων αριθμών Prandtl, Marangoni και Grashof. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, ο αριθμός Prandtl εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του υλικού και πιο συγκεκριμένα από το ιξώδες, την θερμική αγωγιμότητα και την ειδική θερμότητα. Οι αριθμοί Marangoni και Grashof όμως εξαρτώνται και από το υλικό και από τις παραμέτρους τις διεργασίας. Συγκεκριμένα, ο αριθμός Marangoni, πέρα από τις υπόλοιπες ιδιότητες του υλικού, εξαρτάται άμεσα από τον θερμοκρασιακό συντελεστή επιφανειακής τάσης, ενώ αντίστοιχα ο αριθμός Grashof εξαρτάται άμεσα από τον συντελεστή θερμικής διαστολής, αλλά και οι δυο εξαρτώνται από τις

παραμέτρους της κατεργασίας υπό τη μορφή της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης θερμοκρασίας στη λίμνη συγκόλλησης και της θερμοκρασίας Liquidus του υλικού.

Για τον ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 και για τις συνθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι αδιάστατοι αριθμοί έχουν τις εξής τιμές:

$$Pr_{AISI304} = \frac{0.1 \frac{Kg}{m \cdot s} \cdot 711.75 \frac{J}{Kg \cdot K}}{19.3 \frac{W}{m \cdot K}} = 3.68$$

$$Ma_{AISI304} = \frac{7200 \frac{Kg}{m^3} \cdot 0.0015 m \cdot 3721 K \cdot 0.00043 \frac{N}{m \cdot K}}{0.1^2 \frac{Kg}{m \cdot s}} = 1129.89$$

$$Gr_{AISI304} = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 18 \times 10^{-6} K^{-1} \cdot \left(\frac{0.0015 m}{4}\right)^3 \cdot 3721 K \cdot \left(7200 \frac{Kg}{m^3}\right)^2}{0.1^2 \frac{Kg}{m \cdot s}} = 0.1174$$

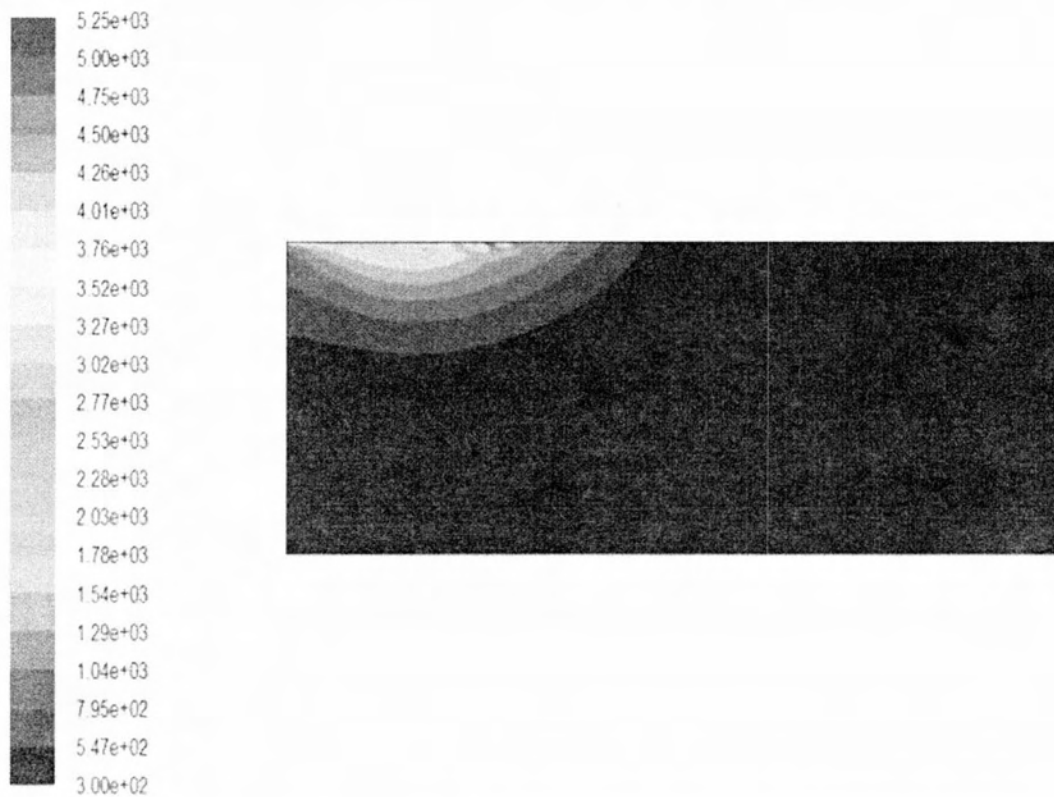
Όπως παρατηρεί κανείς, ο αριθμός Prandtl είναι μεγαλύτερος της μονάδας, γεγονός που δείχνει πως η διάχυση της ορμής συντελείται πολύ γρηγορότερα σε σχέση με την διάχυση της θερμότητας. Αυτό, σε συνδυασμό με τον υψηλό αριθμό Marangoni και τον χαμηλό αριθμό Grashof δείχνει ότι αυτός είναι και ο λόγος που δημιουργεί την φυσική αστάθεια. Η πολύ μεγάλη διατμητική τάση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης έχει σαν αποτέλεσμα να μεταδίδεται πιο γρήγορα το συνοριακό στρώμα ταχυτήτων σε σχέση με το θερμικό στρώμα και κατά συνέπεια να δημιουργούνται οι κατανομές που φαίνονται στα Σχήματα 4.61 και 4.62. Καθότι ο αριθμός Prandtl εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του υλικού, δεν είναι δυνατό να αλλάξει. Αυτό που μπορεί να αλλάξει, αλλάζοντας τις παραμέτρους της κατεργασίας, είναι ο αριθμός Marangoni και το μέγεθος της επιφανειακής τάσης. Για αυτό το λόγο, γίνεται μελέτη του τρόπου που επιδρά η ισχύς στον αριθμό Marangoni και στην κατανομή θερμοκρασίας και κατ' επέκταση στη λίμνη συγκόλλησης.

Για τη μελέτη αυτή αλλάξαμε τις τιμές της ισχύος, της πιο ισχυρής παραμέτρου της κατεργασίας. Συγκεντρωτικά οι τιμές που δόθηκαν στην ισχύ και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

| <u>Περίπτωση</u> | <u>Ισχύς</u> | <u>T_{max}</u> | <u>Αριθμός Marangoni</u> | <u>Αριθμός Grashof</u> |
|------------------|--------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| 7β | 1500 W | 5250 K | 1636 | 0.170 |
| 7γ | 500 W | 2981 K | 582.35 | 0.060 |
| 7δ | 250 W | 2370 K | 298.6 | 0.031 |

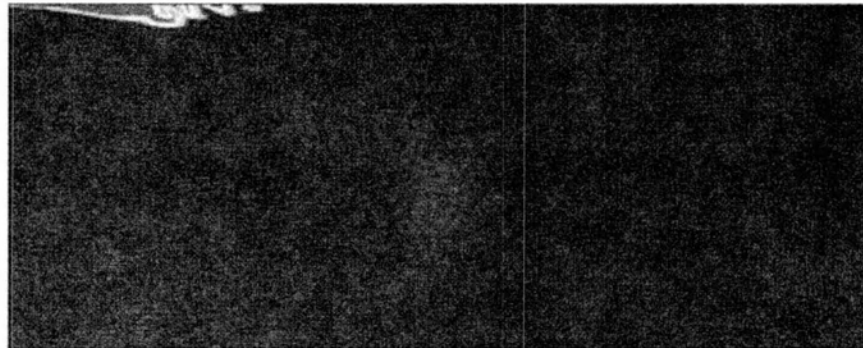
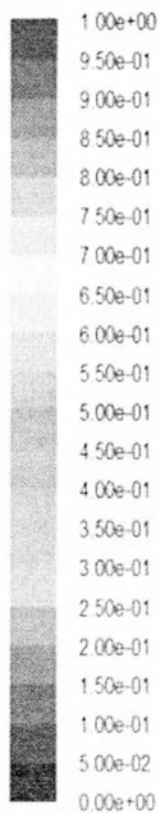
Πίνακας 4.2: Σύνοψη των αποτελεσμάτων για τις υποπεριπτώσεις της Περίπτωσης 7

Πιο αναλυτικά, για ισχύ ίση με 1500 W, η μέγιστη θερμοκρασία στη λίμνη συγκόλλησης είναι ίση με 5250 K και επομένως ο αριθμός Marangoni είναι ίσος με 1636. Όπως φαίνεται, αυξάνοντας την ισχύ αυξάνεται και ο αριθμός Marangoni, που όμως είναι το αντίθετο από αυτό που επιθυμούμε. Πρακτικά, αυτό επιβεβαιώνεται και από τις κατανομές θερμοκρασιών και λόγου υγρού-στερεού που φαίνονται στα παρακάτω σχήματα, στα οποία εμφανίζονται αστάθειες μεγαλύτερες από την περίπτωση 7 όπου η ισχύς ήταν 1000 W.



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01) Oct 02, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.63: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 7β

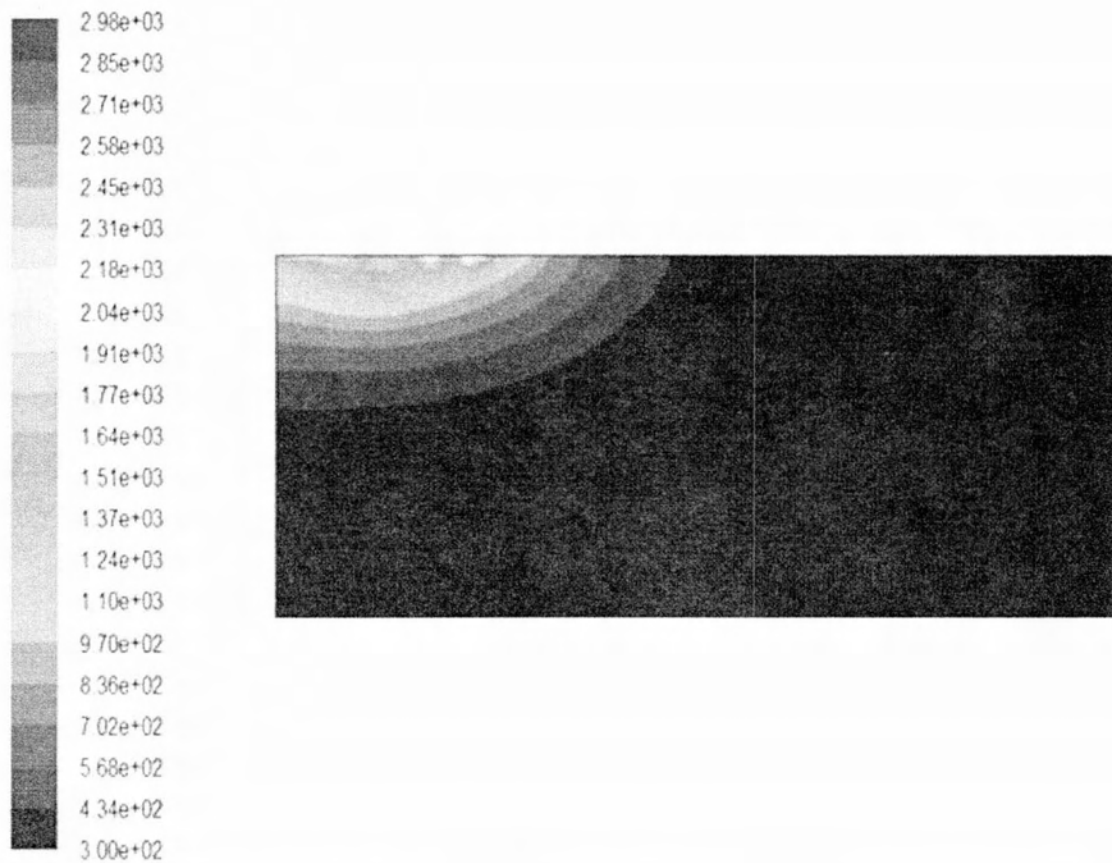


Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01)

Oct 02, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.64: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 7β

Εφόσον με μεγαλύτερη ισχύ οι αστάθειες παραμένουν, το επόμενο βήμα είναι να μειωθεί η ισχύς σε σχέση με την αρχική περίπτωση. Για αυτό το λόγο, στη δεύτερη υποπερίπτωση (7β) η ισχύς είναι ίση με 500 W. Με το τέλος της προσομοίωσης, η μέγιστη θερμοκρασία στη λίμνη συγκόλλησης υπολογίζεται ίση με 2981 K και κατ' επέκταση ο αριθμός Marangoni είναι ίσος με 582.35. Για αυτή την περίπτωση οι κατανομές θερμοκρασίας και λόγου υγρού-στερεού φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

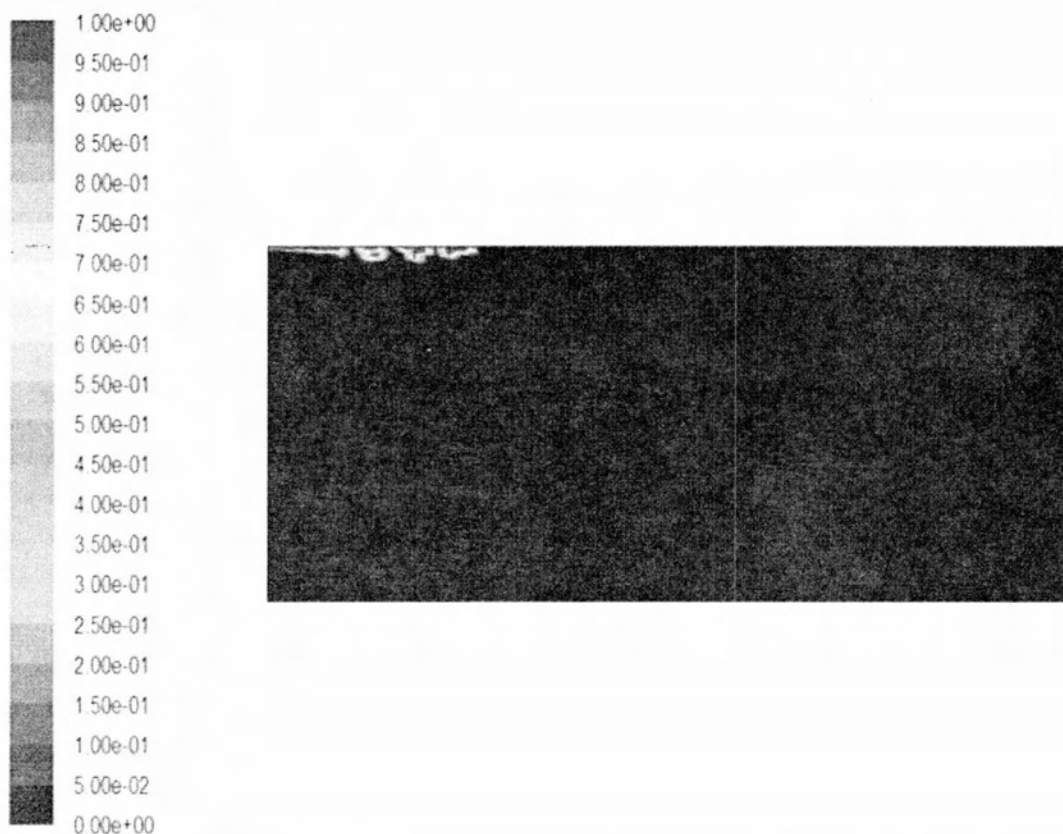


Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Oct 02, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.65: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 7γ

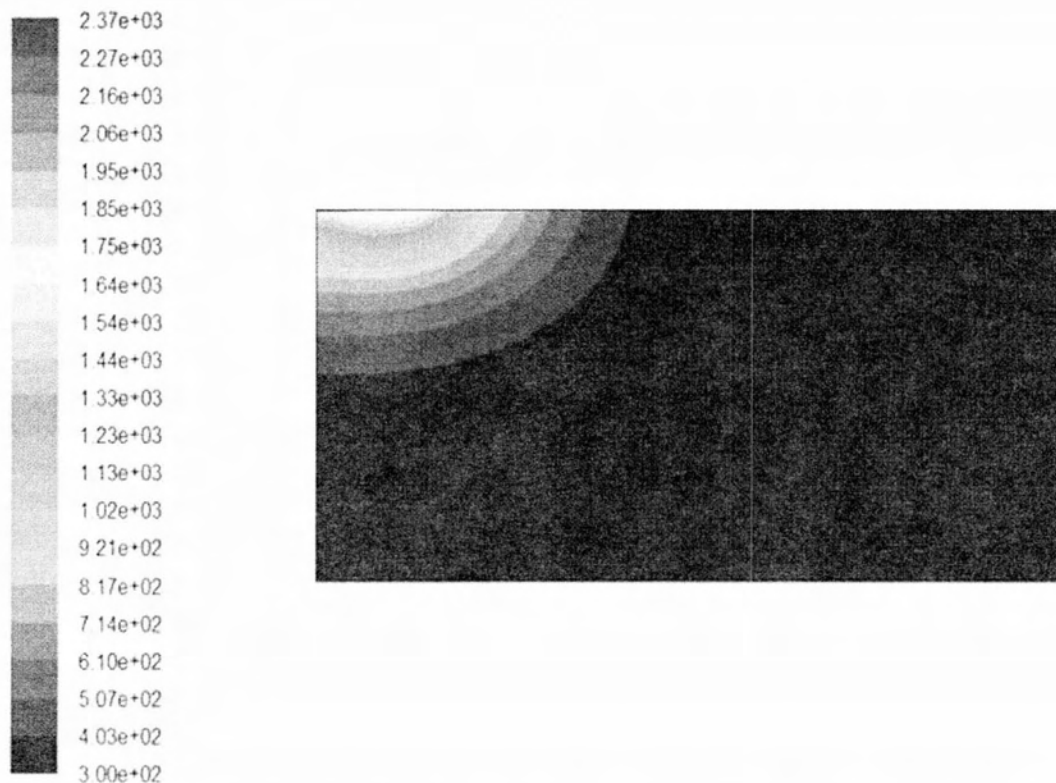
Όπως φαίνεται από την κατανομή θερμοκρασιών, οι αστάθειες παραμένουν, αν και σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με την αρχική περίπτωση. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την κατανομή του λόγου υγρού-στερεού.



Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01) Oct 02, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.66: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 7γ

Οι αστάθειες έχουν μειωθεί και αρχίζει να σχηματίζεται κανονική λίμνη συγκόλλησης, αλλά ακόμα αυτό δεν είναι αρκετό καθώς το υλικό είναι ασυνεχές. Για αυτό, έπειτα η ισχύς μειώνεται στα 250 W στην επόμενη υποπερίπτωση (7γ). Με το τέλος της προσομοίωσης η μέγιστη θερμοκρασία στη λίμνη συγκόλλησης υπολογίζεται ίση με 2370 K και ο αριθμός Marangoni είναι ίσος με 298,6.

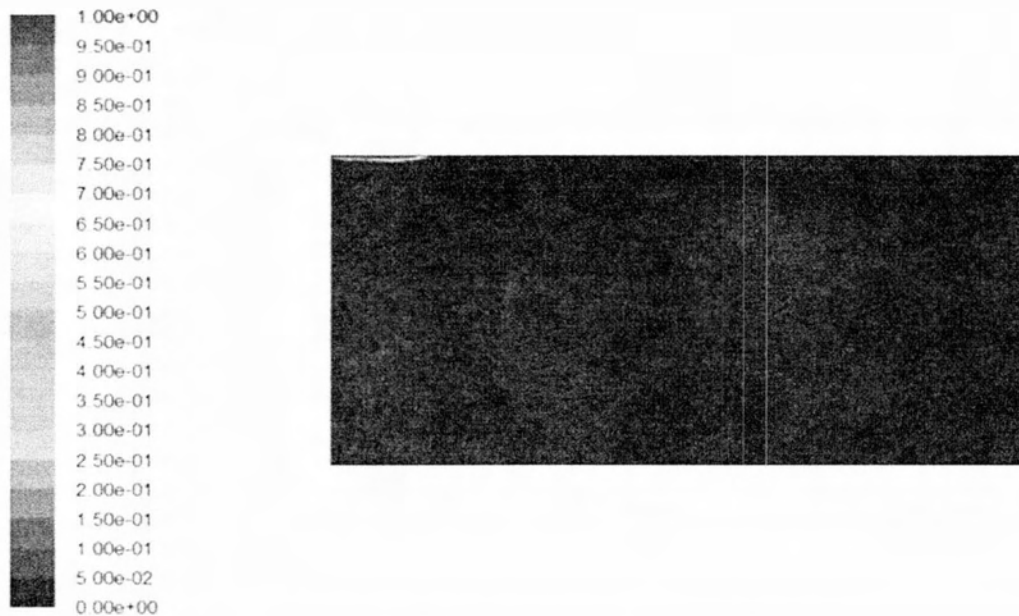


Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Oct 02, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.67: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 7δ

Σε αυτή πλέον την περίπτωση η κατανομή θερμοκρασίας είναι η αναμενόμενη. Οι αστάθειες έχουν πάψει να υπάρχουν. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι ίση με 2370 K όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και η κλίση της είναι ομαλή. Η διαφορά σε σχέση με τα διαγράμματα του Μοντέλου I είναι εμφανής, αφού η κατανομή είναι λιγότερη κυκλική και περισσότερο μακρόστενη. Το δεδομένο αυτό ενισχύεται και από την κατανομή του λόγου υγρού-στερεού που παρουσιάζεται παρακάτω.

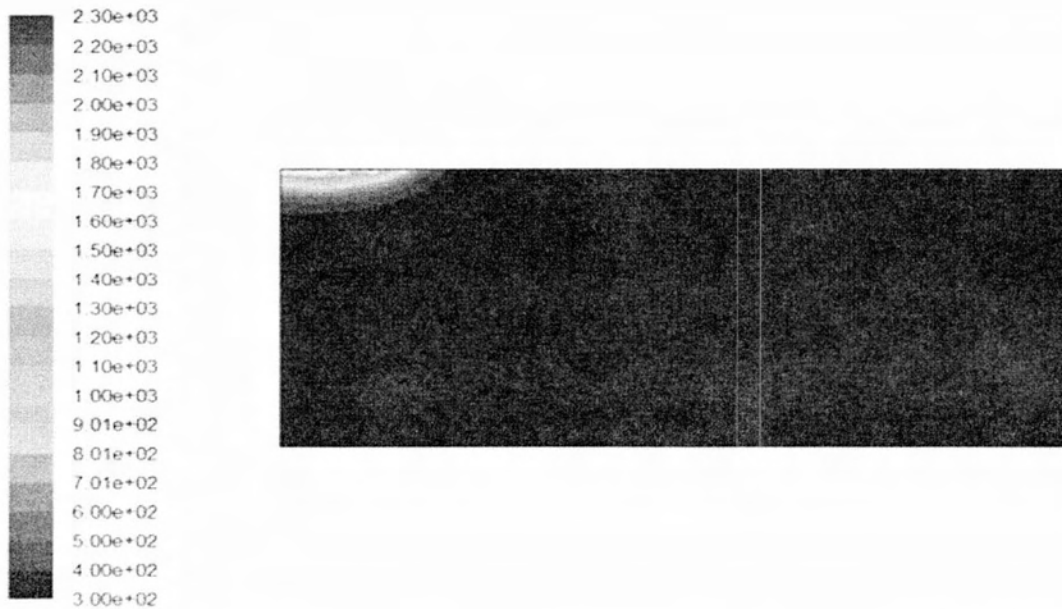


Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01)

Oct 02, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.68: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 7δ

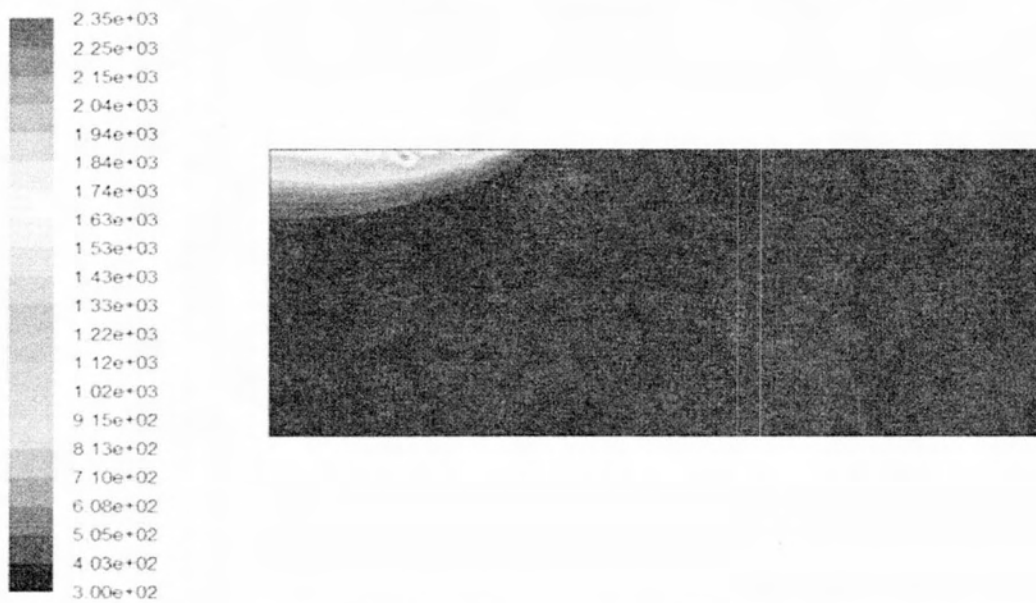
Από την κατανομή του λόγου υγρού-στερεού ενισχύεται η άποψη πως οι αστάθειες έχουν πάψει να υπάρχουν πλέον. Η άποψη αυτή δεν είναι ακριβώς σωστή όμως και αυτό φαίνεται από τις κατανομές της θερμοκρασίας σε διάφορες χρονικές στιγμές. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι εμφανίζονται αστάθειες οι οποίες όμως από τη μέση της προσομοίωσης και μετά εξομαλύνονται αφήνοντας τη θερμότητα να διαδοθεί κανονικά. Αυτό είναι εμφανές από τα σχήματα κατανομής της θερμοκρασίας που ακολουθούν και στα οποία φαίνεται πως στην αρχή οι αστάθειες υπήρχαν αλλά με την πάροδο του χρόνου εξαφανίστηκαν. Το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που εξαφανίζονται οι αστάθειες μέχρι τη στιγμή που σβήνει η δέσμη Laser είναι μικρό και για αυτό δεν προλαβαίνει να αναπτυχθεί πολύ η θερμοκρασία με αποτέλεσμα η λίμνη συγκόλλησης να έχει το μικρό σχήμα που φαίνεται στο Σχήμα 4.68.



Contours of Static Temperature (k) (Time=5.0000e-02)

Oct 04, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

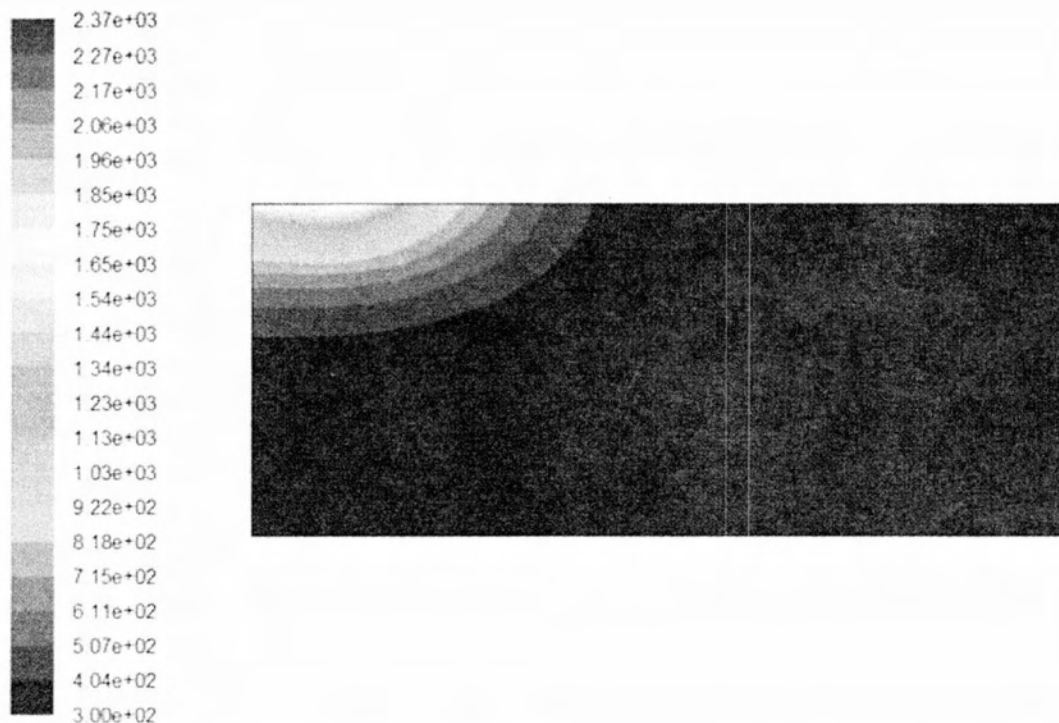
Σχήμα 4.69: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.05$ sec, Περίπτωση 7δ



Contours of Static Temperature (k) (Time=1.0000e-01)

Oct 04, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.70: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.1$ sec, Περίπτωση 7δ



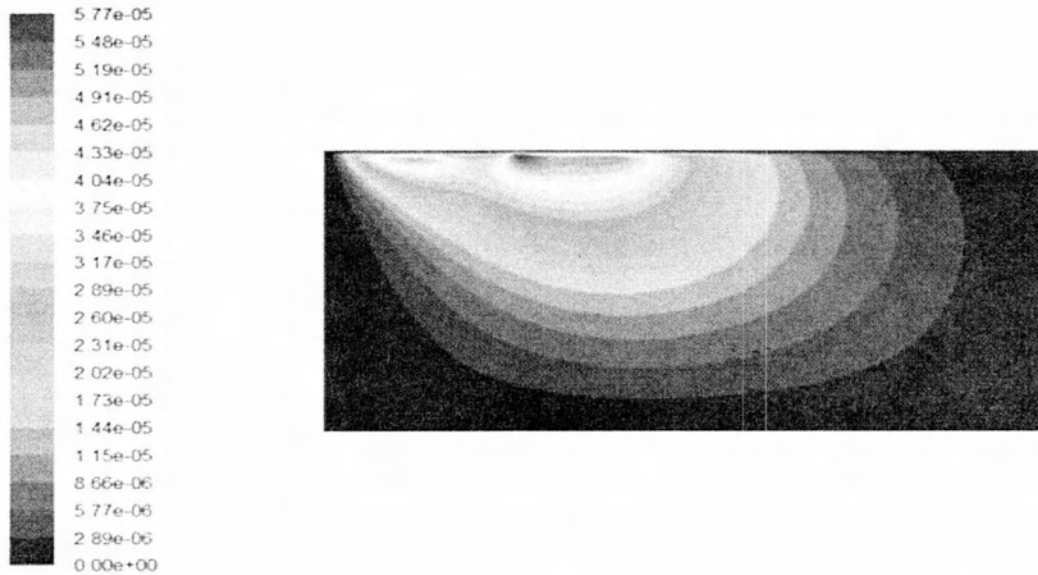
Contours of Static Temperature (k) (Time=2.5000e-01)

Oct 04, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.71: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.25$ sec, Περίπτωση 7δ

Η λίμνη συγκόλλησης μοιάζει με την μορφή που έχει το θερμοκρασιακό πεδίο στο Σχήμα 4.67, είναι δηλαδή μακρόστενη και με μικρό βάθος και το υλικό είναι συνεχές. Το πρόβλημα με αυτή την υποπερίπτωση είναι πως η ισχύς πλέον είναι τόσο χαμηλή που δεν λιώνει αρκετό υλικό. Η λίμνη συγκόλλησης έχει ακτίνα 1.9 mm αλλά βάθος διείσδυσης μόλις μερικά δέκατα του χιλιοστού.

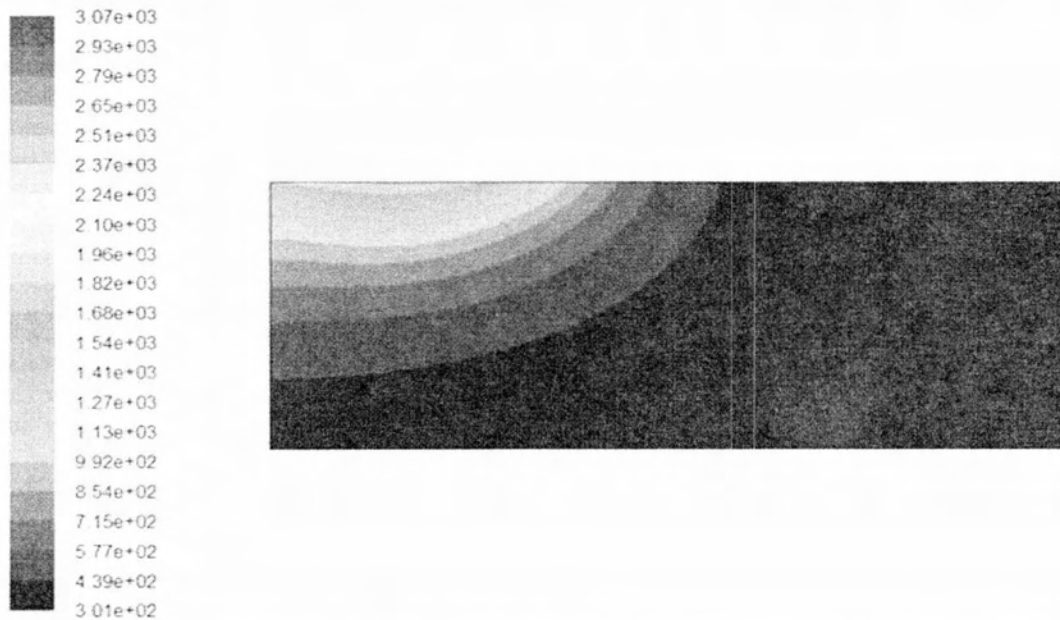
Το αποτέλεσμα της υποπερίπτωσης 7δ μας οδηγεί στην υπόθεση πως, θεωρητικά, αν αυξηθεί ο χρόνος εκπομπής της δέσμης Laser οι αστάθειες θα εξομαλυνθούν και στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Η αντίστοιχη προσομοίωση διεξήχθη για την υποπερίπτωση 7γ με ισχύ ίση με 500 W για χρόνο εκπομπής ίσο με 1 sec, και το αποτέλεσμα ήταν πως όντως οι αστάθειες είχαν εξαφανιστεί και είχε δημιουργηθεί συνεχής λίμνη συγκόλλησης. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα δεν θεωρούνται εντελώς αξιόπιστα γιατί αν και το θερμοκρασιακό πεδίο ήταν σωστό, η προσομοίωση εμφάνισε μη μηδενικές τιμές της ροϊκής συνάρτησης σε σημεία που το υλικό ήταν στερεό και επομένως δεν υπήρχε κίνηση. Πιθανολογείται πως αυτό οφείλεται σε ανεπάρκεια της μοντελοποίησης που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα Fluent και χρειάζεται περισσότερη ανάλυση.



Contours of Stream Function (kg/s) (Time=1.0000e+00)

Oct 04, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

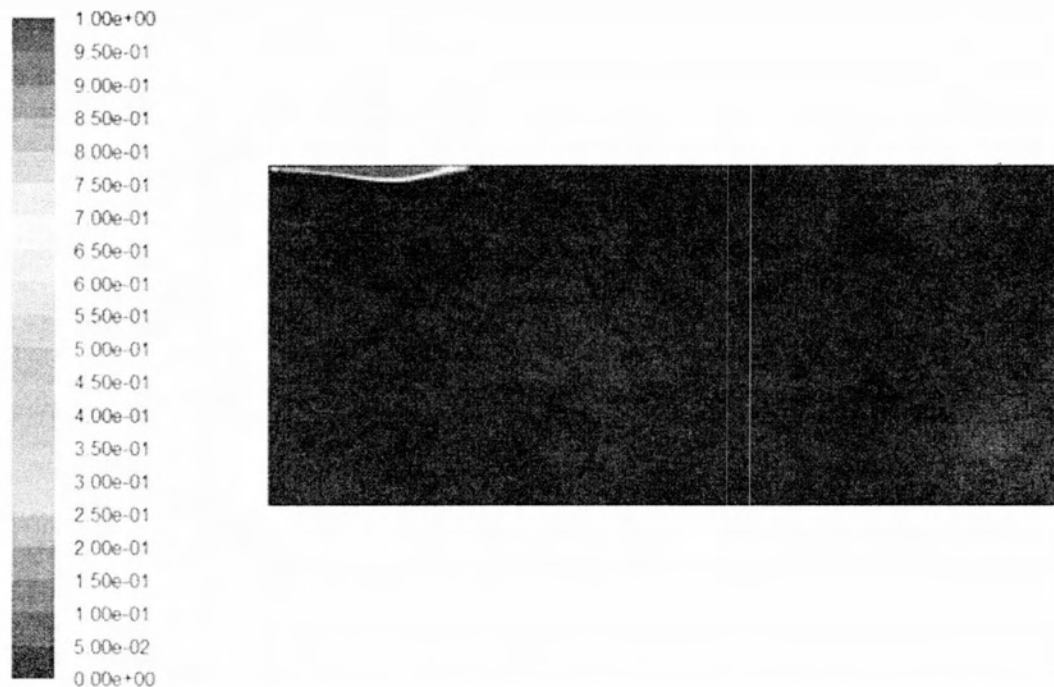
Σχήμα 4.72: Κατανομή Ροϊκής Συνάρτησης για χρόνο εκπομπής 1 sec, Ισχύς 500 W



Contours of Static Temperature (k) (Time=1.0000e+00)

Oct 04, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.73: Θερμοκρασιακή Κατανομή για χρόνο εκπομπής 1 sec, Ισχύς 500 W



Contours of Liquid Fraction (Time=1.0000e+00)

Oct 04, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

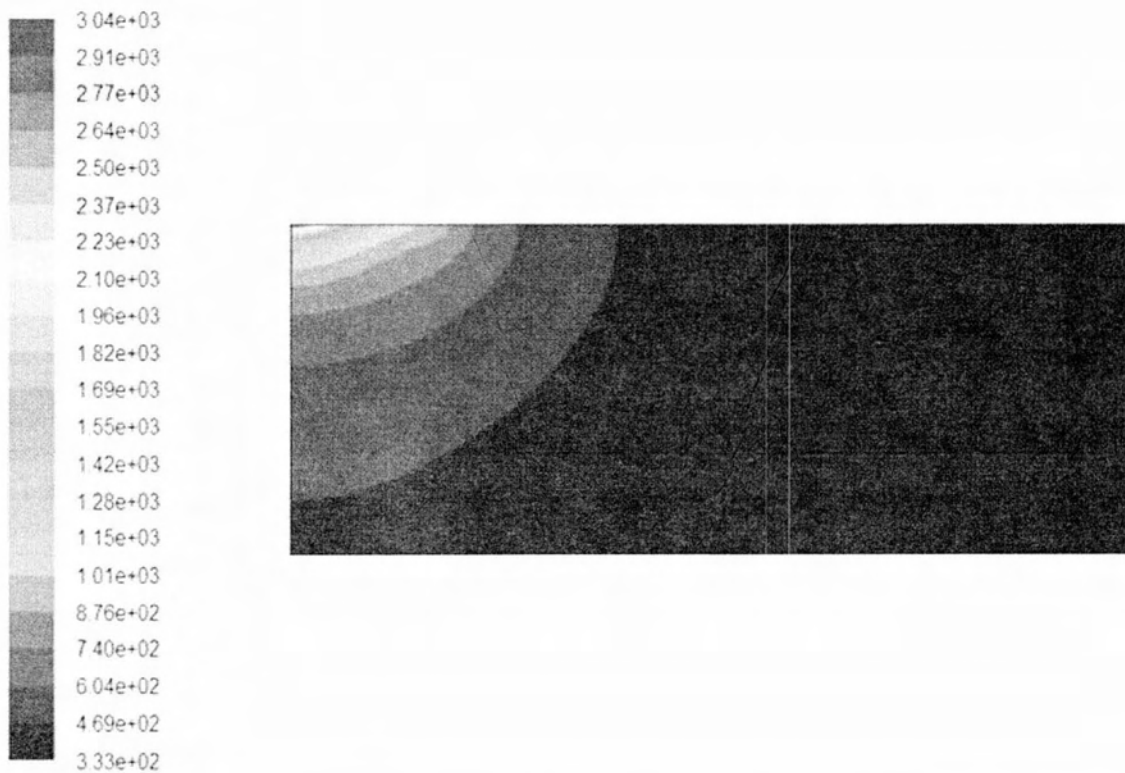
Σχήμα 4.74: Λόγος υγρού-στερεού για χρόνο εκπομπής 1 sec, Ισχύς 500 W

Ένα αποτέλεσμα της προσομοίωσης με χρόνο εκπομπής 1 sec, ήταν πως η θερμοκρασία από κάποια χρονική στιγμή και έπειτα φτάνει σε ισορροπία. Αυτό σημαίνει πως από εκείνη τη στιγμή και μετά, οι απώλειες προς το περιβάλλον και το στερεό υλικό είναι ίσες με την ενέργεια που προσδίδεται, γεγονός που δεν αφήνει την θερμοκρασία να αυξηθεί παραπάνω και η κατανομή της είναι ίδια από αυτό το σημείο και έπειτα.

Καταλήγουμε επομένως στο συμπέρασμα πως, μειώνοντας την ισχύ της κατεργασίας, μειώνεται ο αριθμός Marangoni που εκφράζει την επίδραση της μεταβολής της επιφανειακής τάσης, μειώνεται η διατμητική τάση που ασκείται στο τηγμένο μέταλλο και επομένως μειώνονται οι φυσικές αστάθειες που υπάρχουν. Παρόλα αυτά, μειώνοντας την ισχύ μειώνεται και η μέγιστη θερμοκρασία που προσδίδεται στο υλικό, με αποτέλεσμα να μην λιώνει αρκετό μέταλλο και η λίμνη συγκόλλησης να είναι πολύ μικρή. Ένας δεύτερος τρόπος για να εξαφανιστούν οι αστάθειες είναι η αύξηση του χρόνου εκπομπής της δέσμης Laser, αν και τα αποτελέσματα περιείχαν ασάφειες και μένει να διερευνηθούν περαιτέρω.

Περίπτωση 8

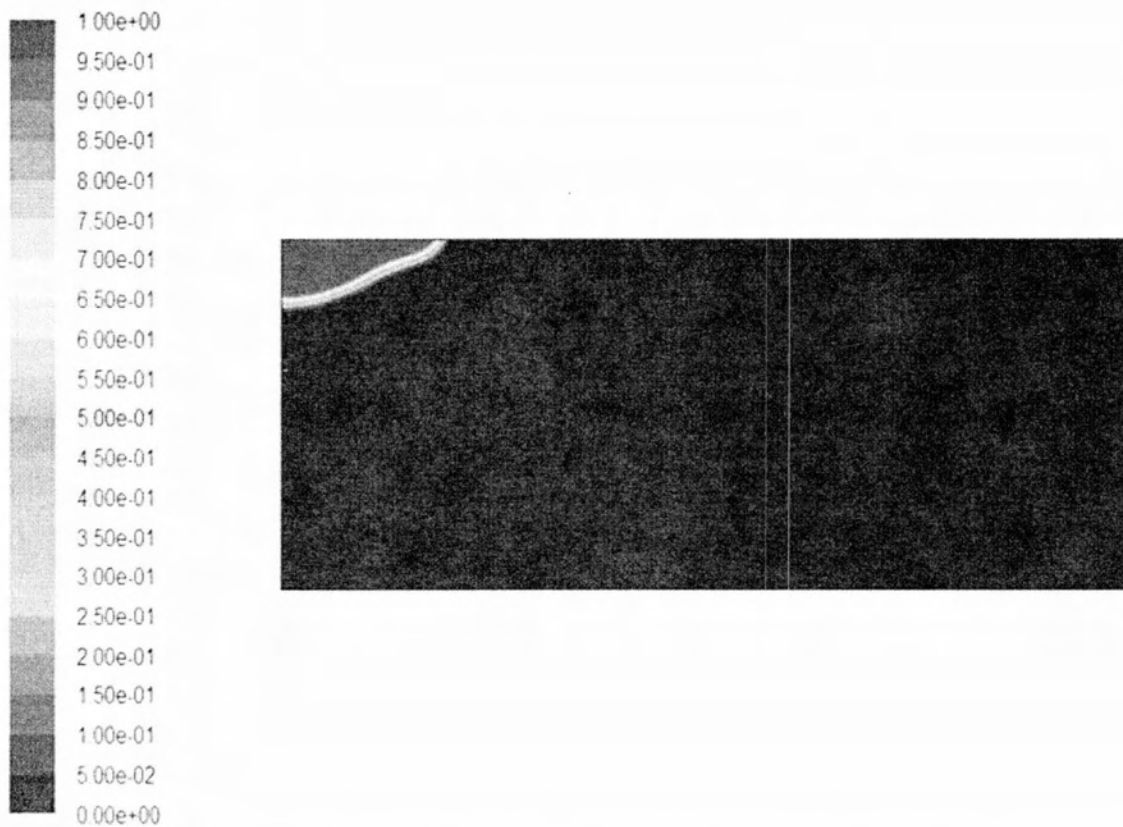
Στη συγκεκριμένη περίπτωση το υλικό που χρησιμοποιείται για την πλάκα που συγκολλείται είναι το κράμα αλουμινίου 6061-T6. Η ισχύς της δέσμης Laser είναι ίση με 1000 W, ενώ η διάμετρος της δέσμης Laser ισούται με 1 mm. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής επιφανειακής τάσης για το συγκεκριμένο κράμα βρέθηκε από τη βιβλιογραφία ίσος με 3.5×10^{-4} . Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται το θερμοκρασιακό πεδίο και η κατανομή του λόγου υγρού-στερεού για τη στιγμή 0.3 sec που απενεργοποιείται το Laser.



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Oct 03, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.75: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 8



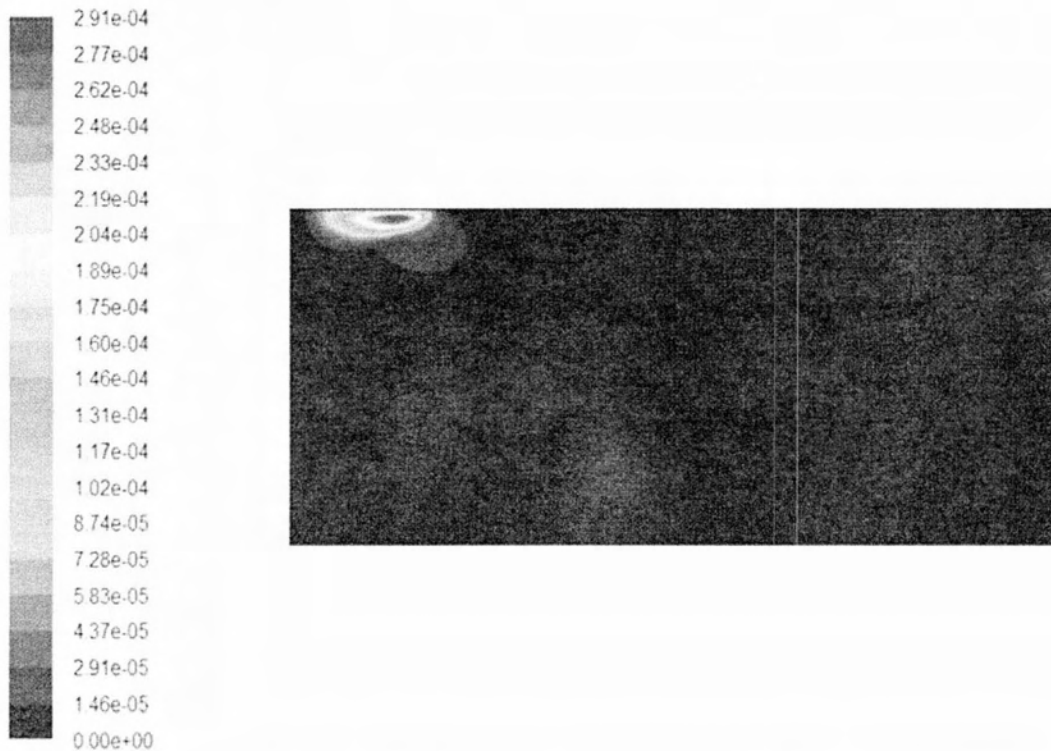
Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01)

Oct 03, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.76: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec. Περίπτωση 8

Όπως φαίνεται, το κράμα αλουμινίου 6061-T6 αντιδρά πολύ καλύτερα συγκριτικά με τον ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 όταν συμπεριλάβουμε την κίνηση του ρευστού στη μελέτη. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας ακριβώς ίδιες παραμέτρους για την κατεργασία, το αλουμίνιο δεν παρουσιάζει αστάθειες. Η λίμνη συγκόλλησης έχει μικρότερο βάθος διείδυσης σε σχέση με την περίπτωση 4, όπου δεν συμπεριλήφθηκε η ροή του ρευστού στο εσωτερικό της λίμνης, είναι όμως πιο πλατιά στην επιφάνεια. Ο αριθμός Prandtl είναι μικρός για το αλουμίνιο, ίσος με 0.1073 πράγμα που σημαίνει πως η ανάπτυξη του θερμικού οριακού στρώματος, η οποία γίνεται στην επιφάνεια, γίνεται πιο γρήγορα σε σχέση με την ανάπτυξη του συνοριακού στρώματος, το οποίο προσπαθεί να κινηθεί το υλικό προς το βάθος της πλάκας. Αυτός είναι και ο λόγος που η συγκόλληση έχει μικρότερο βάθος από ότι πλάτος. Ένας καλός δείκτης σχετικά με τον τρόπο που αναπτύσσονται οι ταχύτητες στο εσωτερικό της λίμνης συγκόλλησης είναι το παρακάτω σχήμα που δείχνει την κατανομή της

ροϊκής συνάρτησης για τη στιγμή που ο χρόνος είναι ίσος με 0.3 sec, ακριβώς δηλαδή προτού σβήσει το Laser.



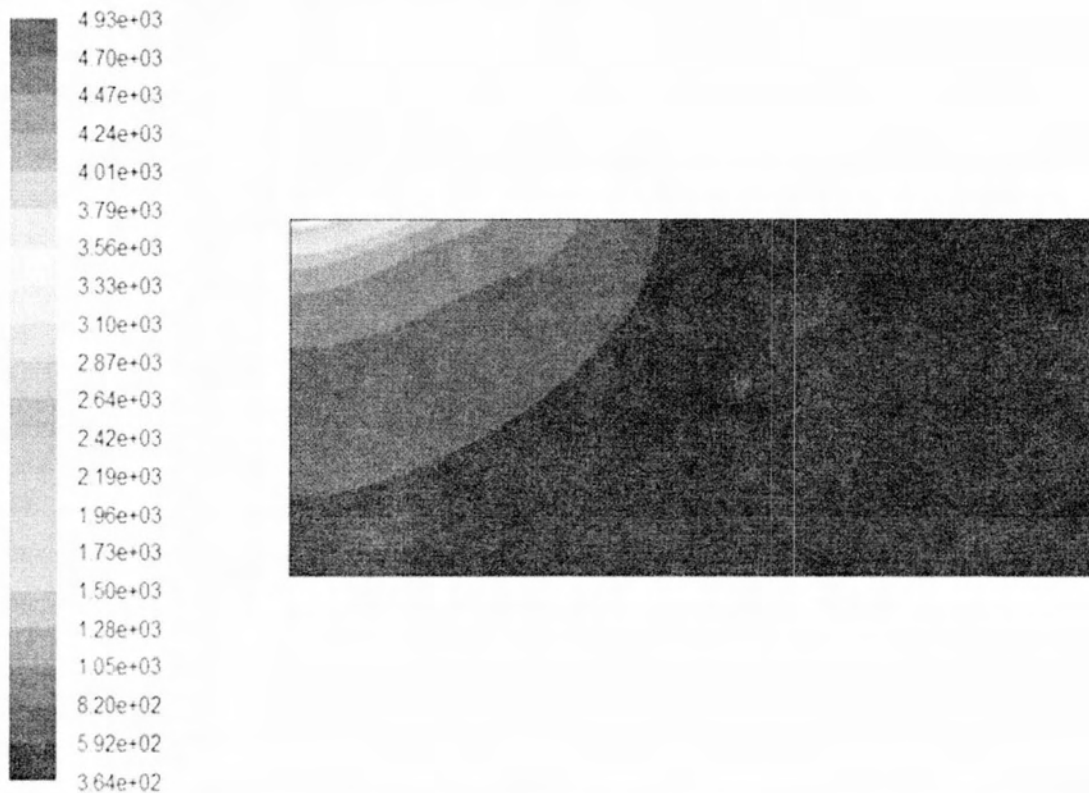
Contours of Stream Function (kg/s) (Time=3.0000e-01)

Oct 03, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.77: Ροϊκή συνάρτηση για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 8

Όπως μπορεί να συμπεράνει κανείς, μετά από 0.3 sec η κίνηση του ρευστού έχει μετατοπιστεί προς τα δεξιά, στην περιοχή που έχει μόλις λιώσει. Εκεί που είναι πιο πυκνές οι μεταβολές είναι μεγαλύτερες οι ταχύτητες. Επομένως, καθώς η δέσμη χτυπάει την πλάκα και ξεκινάει να λιώνει το μέταλλο, αρχίζει και δημιουργείται η λίμνη συγκόλλησης. Στη λίμνη οι ταχύτητες αρχίζουν να μεγαλώνουν. Καθώς περνάει ο χρόνος και λιώνει περισσότερο υλικό, η λίμνη μεγαλώνει και οι ταχύτητες στο αρχικό σημείο μικραίνουν αφού επέρχεται ισορροπία, ενώ στη διεπιφάνεια μεταξύ υγρού και στερεού, που όσο περνάει ο χρόνος μετατοπίζεται δεξιά, οι ταχύτητες παραμένουν μεγάλες, φτάνοντας στο στιγμιότυπο που φαίνεται στο Σχήμα 4.70. Να σημειωθεί πως η μέγιστη ταχύτητα στη λίμνη συγκόλλησης τη στιγμή 0.3 sec είναι ίση με 1.49 m/s και ο αριθμός Marangoni είναι ίσος με 6995.

Έχοντας αυτά τα δεδομένα, και συγκρίνοντας τα με τα δεδομένα για τον ανοξειδωτο χάλυβα, θελήσαμε στη συνέχεια να μελετήσουμε τι θα γίνει αν αυξήσουμε την ισχύ, με σκοπό να δούμε αν θα αναπτυχθούν αστάθειες. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκαν δύο υποπερίπτώσεις, στην πρώτη (8β) θέσαμε την ισχύ ίση με 2000 W ενώ στη δεύτερη υποπερίπτωση (8γ) την θέσαμε ίση με 4000 W. Το θερμοκρασιακό πεδίο και η κατανομή του λόγου υγρού-στερεού φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

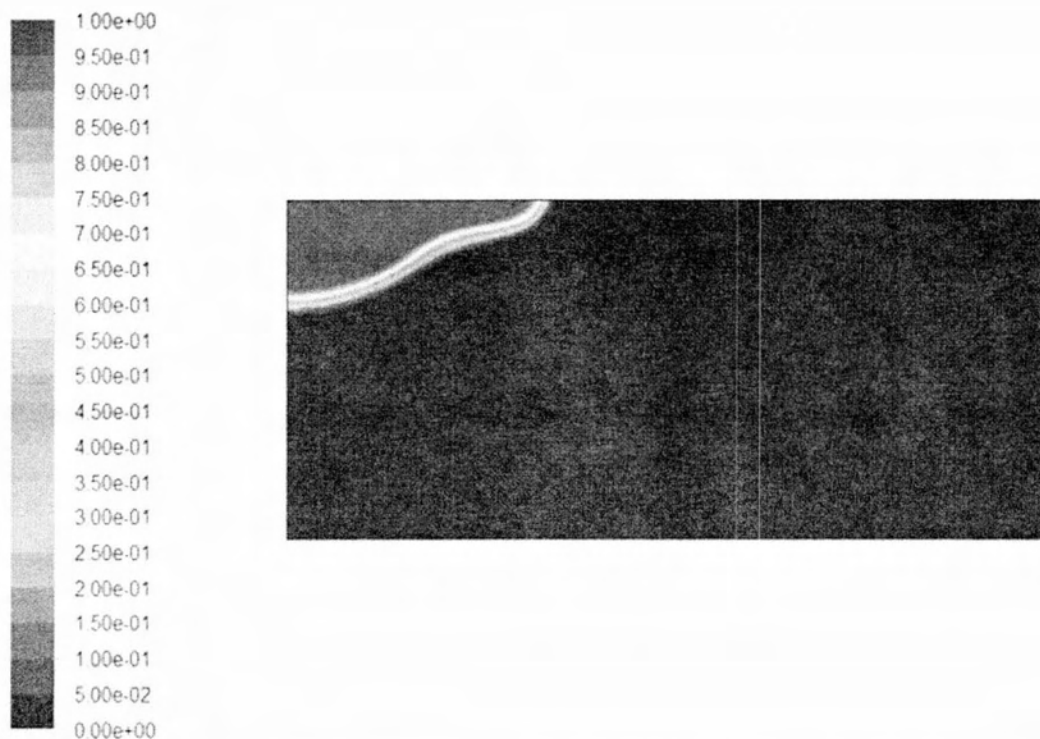


Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Oct 03, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.78: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 8β

Με μια πρώτη ματιά, φαίνεται πως και πάλι δεν εμφανίζονται αστάθειες στη λίμνη συγκόλλησης. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι ίση με 4930 K, σχεδόν 2000 K μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση. Ο αριθμός Marangoni είναι ίσος με 22685.



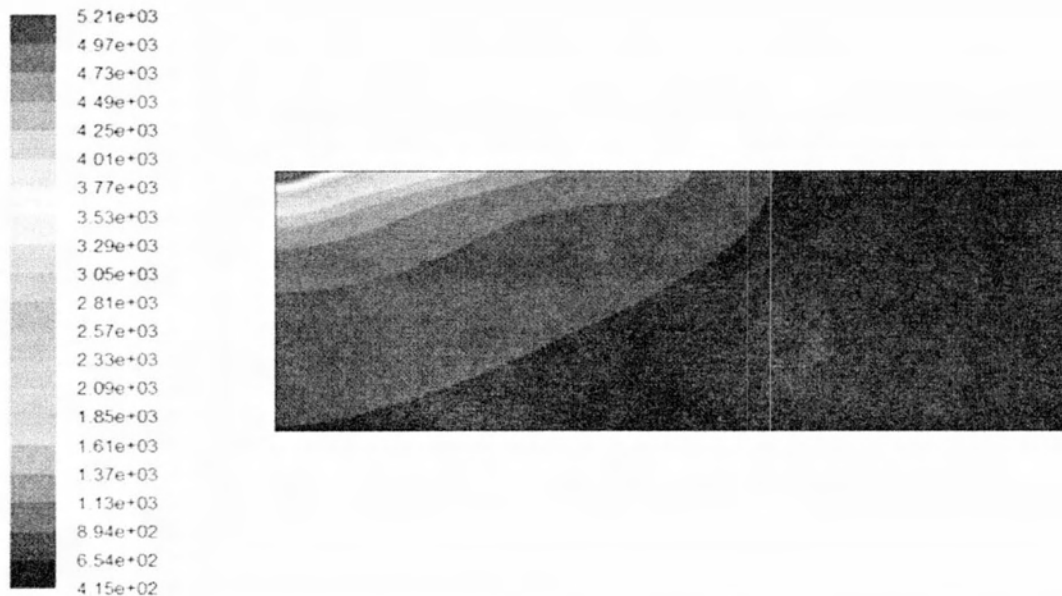
Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01)

Oct 03, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.79: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 8β

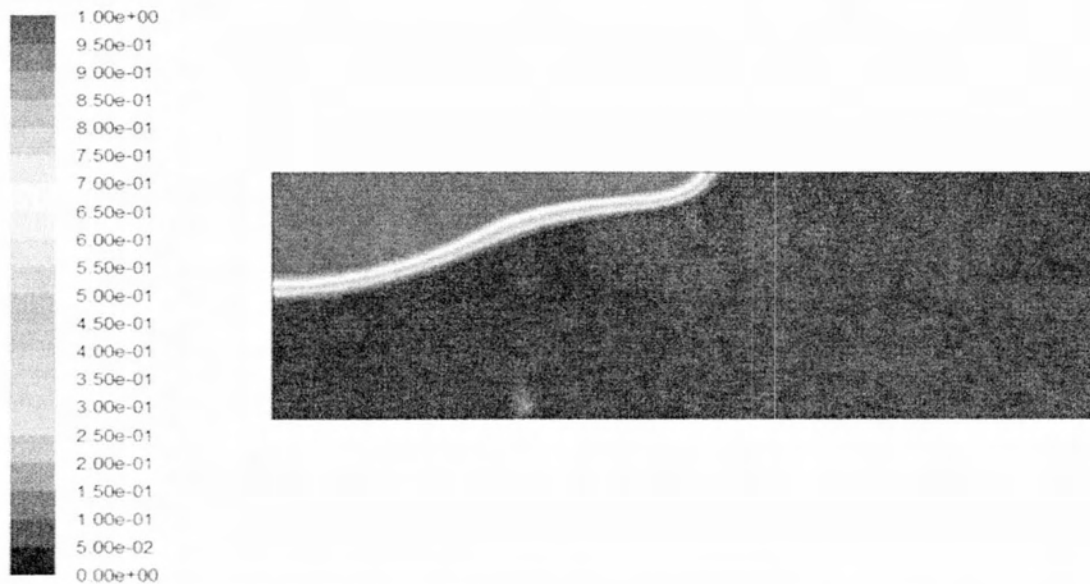
Η κατανομή του λόγου υγρού-στερεού επιβεβαιώνει το συμπέρασμα πως για ισχύ ίση με 2000 W δεν δημιουργούνται αστάθειες. Η λίμνη συγκόλλησης είναι σχηματικά σχεδόν ίδια με την κύρια περίπτωση 8 και απλά είναι μεγαλύτερη.

Στη συνέχεια διπλασιάστηκε για ακόμα μια φορά η ισχύς της δέσμης Laser και τέθηκε ίση με 4000 W. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Όπως παρατηρεί κανείς ούτε και αυτή η μεταβολή δημιούργησε αστάθειες στη συγκόλληση. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι ίση με 5207 K και η λίμνη συγκόλλησης έχει παρόμοιο σχήμα με τις προηγούμενες δύο προσομοιώσεις και απλά έχει μεγαλύτερο μέγεθος. Ο αριθμός Marangoni είναι ίσος με 45523. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως επειδή ο Prandtl στο αλουμίνιο είναι αρκετά χαμηλότερος της μονάδας, το θερμικό στρώμα διαχέεται πιο γρήγορα από το στρώμα της ταχύτητας και εξομαλύνει άμεσα τις όποιες αστάθειες υπάρχει πιθανότητα να δημιουργηθούν.



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01) Oct 03, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

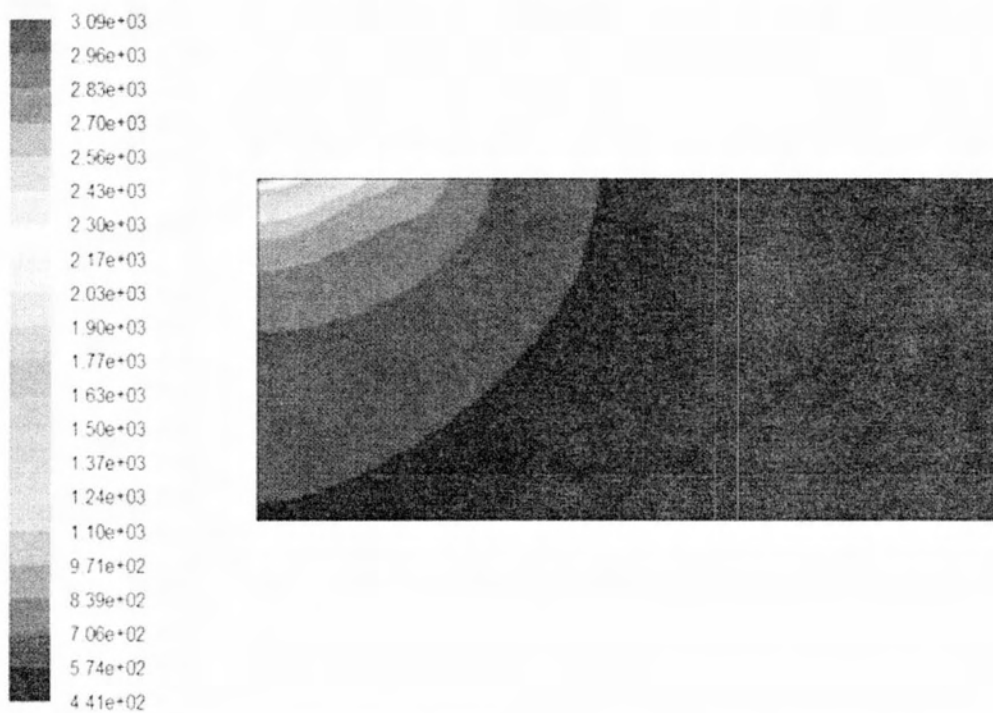
Σχήμα 4.80: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Περίπτωση 8γ



Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01) Oct 03, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.81: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 8γ

Να σημειωθεί πως και για την περίπτωση 8 δοκιμάστηκε προσομοίωση με χρόνο εκπομπής ίσο με 1 sec. Το αποτέλεσμα ήταν ότι δεν παρουσιάστηκαν αστάθειες και απλά η λίμνη συγκόλλησης ήταν λίγο μεγαλύτερη από την περίπτωση 8. Επίσης, όπως και στην περίπτωση 7γ με χρόνο εκπομπής 1 sec, έτσι και εδώ, διαπιστώθηκε πως η θερμοκρασία από ένα σημείο και έπειτα φτάνει σε ισορροπία και δεν αυξάνεται παραπάνω. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο ότι καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία της επιφάνειας, αυξάνονται και οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την τελική διαμόρφωση μόνιμης κατάστασης.

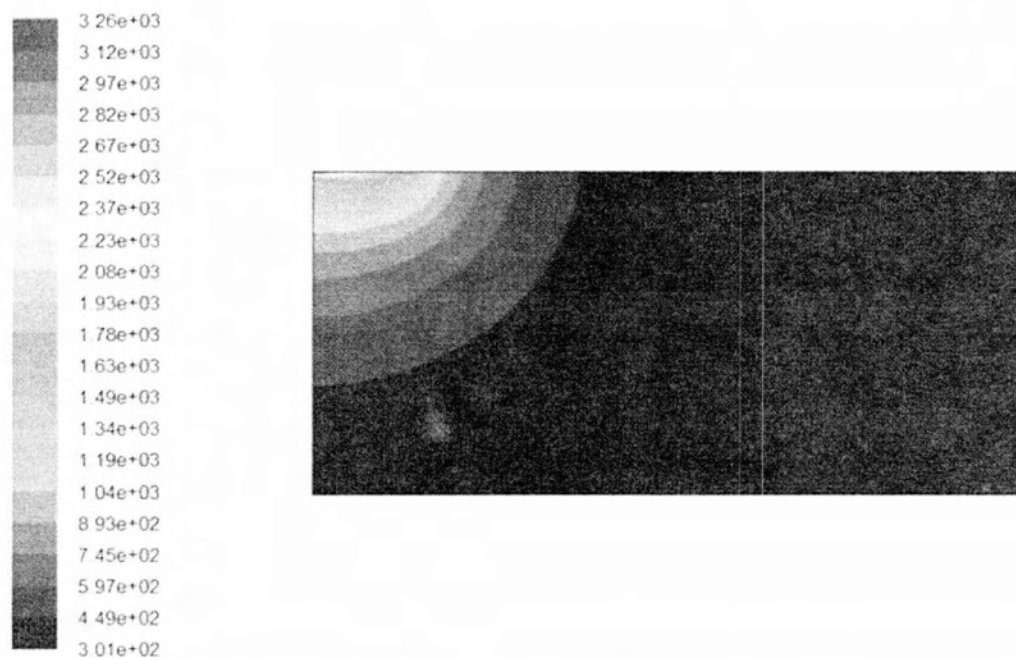


Contours of Static Temperature (k) (Time=1.0000e+00) Oct 04, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.82: Θερμοκρασιακή Κατανομή για Χρόνο εκπομπής 1 sec, Ισχύς 1000 W

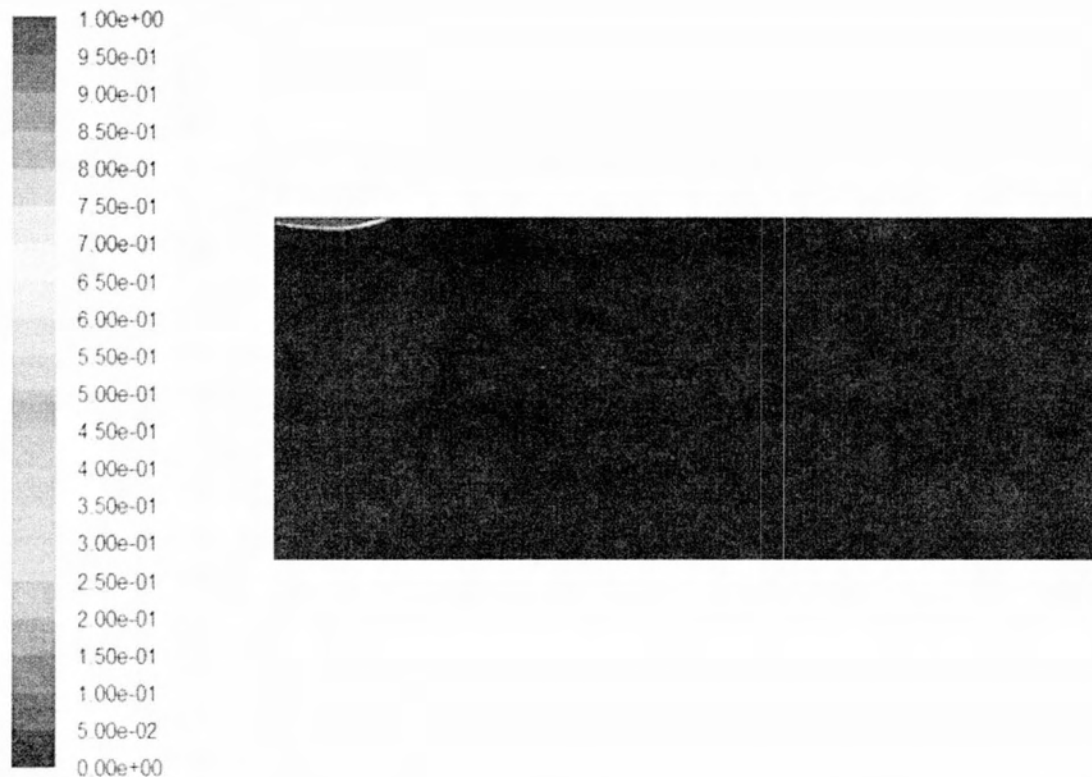
Περίπτωση 9

Στη τελευταία περίπτωση που προσομοιώνεται στην εργασία, θελήσαμε να μελετήσουμε τον τρόπο που επηρεάζει η θερμική αγωγιμότητα τους αδιάστατους αριθμούς και κατά συνέπεια το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό θεωρούμε πως η πλάκα είναι κατασκευασμένη από ένα υποθετικό υλικό με το όνομα Υλικό 3. Το υλικό αυτό έχει όλες τις ιδιότητες του ίδιες ακριβώς με εκείνες του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 304 με μόνη διαφορά τη θερμική αγωγιμότητα, η οποία για τον χάλυβα ήταν 19.3 W/m-K ενώ για το Υλικό 3 ορίστηκε στα 94 W/m-K, στη μέση δηλαδή μεταξύ των τιμών του χάλυβα και του αλουμινίου. Ο αριθμός Prandtl για αυτό το υλικό είναι ίσος με 0.7571. Η ισχύς της δέσμης Laser για την περίπτωση που εξετάζεται είναι ίση με 1000 W, ενώ η διάμετρος της δέσμης Laser ισούται με 1 mm. Ακολουθούν τα αποτελέσματα για την προσομοίωση.



Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01) Oct 03, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.82: Θερμοκρασιακή Κατανομή για t=0.3 sec, Περίπτωση 9



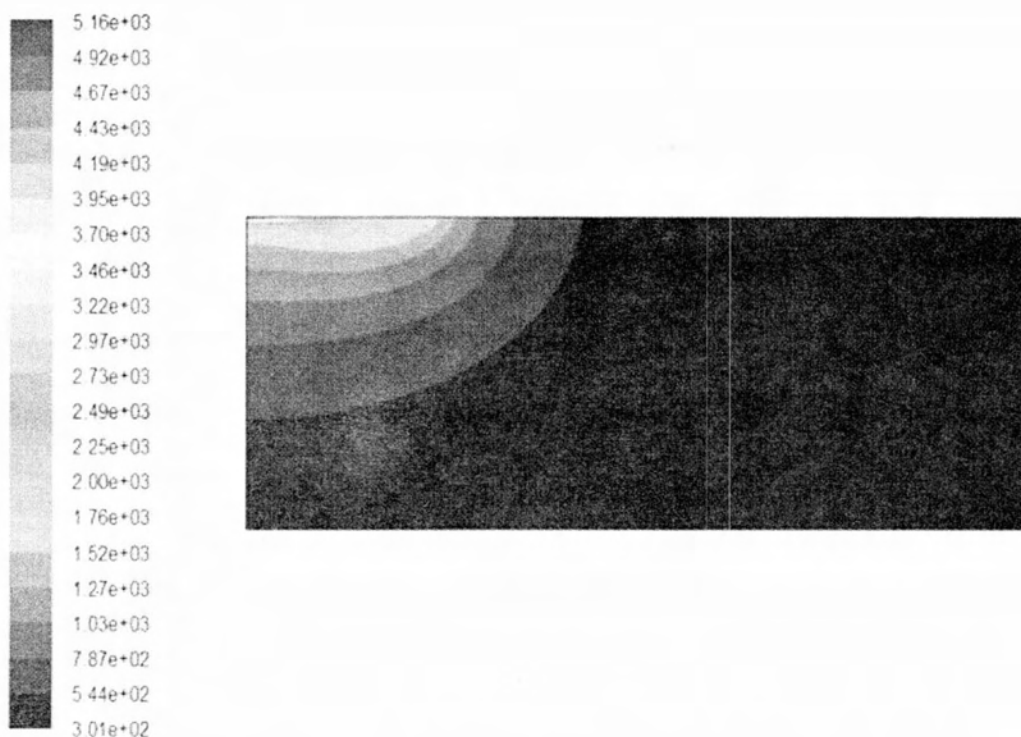
Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01)

Oct 03, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.83: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Περίπτωση 9

Όπως φαίνεται, και εδώ το τελικό αποτέλεσμα δεν περιλαμβάνει αστάθειες. Στην αρχή της διεργασίας δημιουργήθηκαν αστάθειες οι οποίες ωστόσο εξομαλύνθηκαν και από εκείνο το σημείο και έπειτα η μεταφορά της θερμότητας διεξήχθη ομαλά και το τελικό αποτέλεσμα είναι κανονικό. Το υλικό στη λίμνη συγκόλλησης είναι συνεχές και η λίμνη συγκόλλησης είναι μικρή και η μέγιστη θερμοκρασία είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της περίπτωσης 7. Ο αριθμός Marangoni για αυτή τη περίπτωση είναι 714.61.

Στη συνέχεια, διπλασιάσαμε τη θερμοκρασία με σκοπό να διερευνηθεί αν αυτή τη φορά οι αστάθειες θα παραμείνουν ή όχι. Για την υποπερίπτωση 9β επομένως, με ισχύ 2000 W, τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

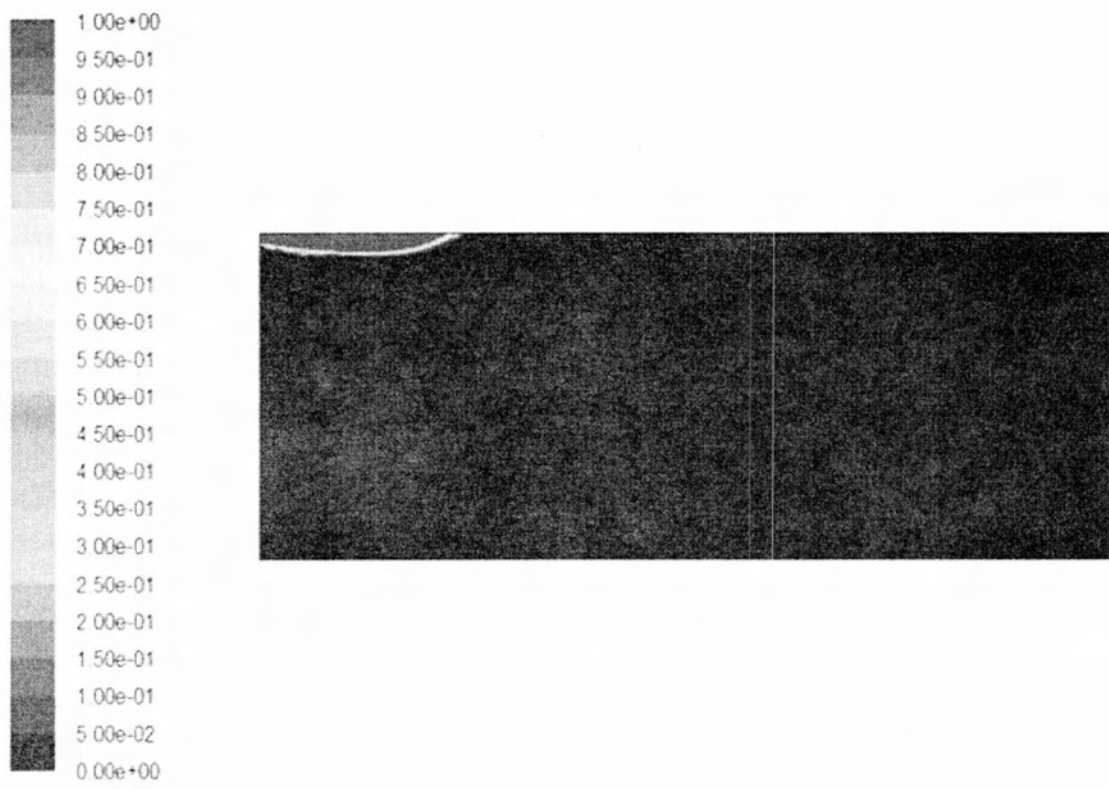


Contours of Static Temperature (k) (Time=3.0000e-01)

Oct 03, 2014
FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.84: Θερμοκρασιακή Κατανομή για $t=0.3$ sec, Ισχύς 2000 W

Όπως φαίνεται οι όποιες αστάθειες μπορεί να δημιουργήθηκαν στην αρχή της κατεργασίας έχουν εξαφανιστεί και η κατανομή της θερμοκρασίας είναι συνεχής. Η περιοχή όπου η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία Liquidus είναι μικρή και επομένως και η λίμνη συγκόλλησης είναι σχετικά μικρή. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα και στο παρακάτω σχήμα το οποίο δείχνει την κατανομή του λόγου υγρού-στερεού για τη στιγμή όπου σβήνει το Laser. Τέλος, σε αυτή την περίπτωση ο Marangoni είναι ίσος με 2444.57.



Contours of Liquid Fraction (Time=3.0000e-01) Oct 03, 2014
 FLUENT 6.3 (axi, pbns, lam, unsteady)

Σχήμα 4.85: Λόγος υγρού-στερεού για $t=0,3$ sec, Ισχύς 2000 W

5. Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα συνοψίζονται παρακάτω.

Στο Μοντέλο I, που περιλαμβάνει μόνο την αγωγή θερμότητας και όχι τη ροή ρευστού, κάποια πράγματα είναι κοινά για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν ενώ κάποια άλλα διαφέρουν:

- Οι θερμοκοί κύκλοι των τεσσάρων σημείων που είναι τοποθετημένα στην πηγή, τον άξονα, την επιφάνεια του τεμαχίου και σε γωνία 45° από την πηγή αντίστοιχα, φαίνεται να είναι όμοιοι και για τις εννέα περιπτώσεις. Αναμφισβήτητα οι μέγιστες θερμοκρασίες διαφέρουν για κάθε περίπτωση και για κάθε σημείο, πράγμα φυσικό αν σκεφτεί κανείς πως αλλάζουν οι παράμετροι από περίπτωση σε περίπτωση. Τα γραφήματα αυτά καθαυτά ωστόσο είναι παρόμοια για κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα, σε κάθε περίπτωση, το σημείο που βρίσκεται πάνω στον άξονα έχει μικρότερη μέγιστη θερμοκρασία και πιο μικρό ρυθμό θέρμανσης και ψύξης από τα υπόλοιπα σημεία, παρότι το σημείο που βρίσκεται σε γωνία 45° και το σημείο που βρίσκεται στην επιφάνεια του τεμαχίου απέχουν από την πηγή απόσταση ίση με την απόσταση που απέχει το σημείο που βρίσκεται στον άξονα. Αυτή η διαφορά υπάρχει κυρίως λόγω του ότι η λίμνη συγκόλλησης είναι σχετικά ρηχή, γεγονός που αυξάνει την κλίση της θερμοκρασίας για τη διεύθυνση κάθετα στην πηγή (άξονα) σε σύγκριση με την κλίση της θερμοκρασίας στη διεύθυνση παράλληλα στην πηγή (επιφάνεια). Για σημεία που απέχουν ίση απόσταση από την κέντρο της πηγής, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της θερμοκρασίας, τόσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία. Άρα για περιοχές που ισαπέχουν από την πηγή, οι θερμοκρασίες αναμένονται να είναι υψηλότερες για περιοχές παράλληλες στην πηγή και χαμηλότερες όσο η περιοχή γίνεται πιο κάθετη στην πηγή. Να σημειωθεί πως παρόμοια παρατήρηση έχει γίνει και για τη συγκόλληση TIG.

- Ένα δεύτερο σημείο που είναι κοινό σε όλες τις περιπτώσεις είναι η ZMT. Η εξέλιξη της ZMT προκύπτει από τα διαγράμματα που δείχνουν την θερμοκρασία των σημείων της επιφάνειας σε συνάρτηση με το χρόνο. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, οι ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες Solidus και Liquidus είναι πολύ κοντά, σχεδόν συμπίπτουν, με αποτέλεσμα το μέγεθος της ZMT να είναι πολύ μικρό. Από τη στιγμή που σβήνει ο παλμός Laser, η ZMT επεκτείνεται και το μεγαλύτερο μέγεθος το έχει όταν η αμιγώς υγρή περιοχή εξαλείφεται. Το μέγεθος της ZMT από εκεί και έπειτα μειώνεται καθώς η στερεοποίηση συνεχίζει.

Η αρχική μεγέθυνση της ZMT μπορεί να εξηγηθεί αν αναλογιστεί κανείς την επίδραση που έχει η λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία Liquidus, η απώλεια θερμότητας συνοδεύεται από απώλεια στη θερμοκρασία. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται και φτάνει ανάμεσα στις θερμοκρασίες Liquidus και Solidus, η απώλεια θερμότητας προέρχεται κυρίως από το ότι απελευθερώνεται η λανθάνουσα θερμότητα τήξης και η πτώση της θερμοκρασίας είναι αρκετά μικρή. Σαν

αποτέλεσμα η ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια της Liquidus κινείται γρηγορότερα από της ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια της Solidus μέχρι τη στιγμή που η περιοχή που είναι 100% υγρό εξαφανίζεται και ολόκληρη η λίμνη συγκόλλησης έχει μετατραπεί σε ZMT. Για παράδειγμα, στην περίπτωση 4, η περιοχή που είναι 100% υγρή εξαφανίζεται μετά από 0.0125 sec από τη στιγμή που σβήνει το Laser, ενώ η ZMT συνεχίζει να υπάρχει για ακόμα 0.01 sec προτού η λίμνη συγκόλλησης στερεοποιηθεί ολόκληρη. Να σημειωθεί πως η ύπαρξη μεγάλης ZMT είναι μοναδικό χαρακτηριστικό της στερεοποίησης κατά τη σημειακή συγκόλληση Laser.

- Ανεξαρτήτως υλικού, με την αύξηση της ισχύος αυξάνεται η μέγιστη θερμοκρασία στη λίμνη συγκόλλησης αλλά και η λίμνη συγκόλλησης καθεαυτή. Αντίστοιχα, με τον διπλασιασμό της ακτίνας της δέσμης Laser η λίμνη συγκόλλησης γίνεται περισσότερο ρηχή και πιο πλατιά.

- Στις διαφορές μεταξύ των περιπτώσεων, το κράμα αλουμινίου 6061-T6, κυρίως λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας που έχει, παρουσιάζει το μεγαλύτερο εύρος στη θερμοκρασιακή συμπεριφορά του. Αρκεί να δει κανείς το πώς μεταβλήθηκαν οι μέγιστες θερμοκρασίες στις τρεις περιπτώσεις με την αλλαγή των παραμέτρων. Ο χάλυβας AISI 304 αντιθέτως παρουσιάζει πιο σταθερή συμπεριφορά με την αλλαγή των παραμέτρων και οι μέγιστες θερμοκρασίες δεν μεταβάλλονται πολύ.

- Άλλη μια πολύ σημαντική διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων είναι ο ρυθμός ψύξης. Στο αλουμίνιο, ο ρυθμός ψύξης γίνεται σχεδόν ακαριαία, αφού η πτώση από τη μέγιστη θερμοκρασία σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία Solidus γίνεται σε κλάσματα δευτερολέπτου. Ο χάλυβας AISI 304 αντιθέτως ψύχεται αρκετά πιο αργά και αυτό αντικατοπτρίζεται στη μικροδομή του μετά τη στερεοποίηση. Η στερεοποίηση είναι τύπου F (Ferritic), ο χάλυβας δεν υφίσταται δηλαδή ευτηκτική αντίδραση και σχηματίζει μόνο πρωτογενή φερρίτη, ο οποίος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μετασχηματίζεται σε ωστενίτη.

- Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των υλικών είναι η ZMT. Για τον ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 η ZMT είναι πολύ μικρή ενώ η αντίστοιχη ZMT του κράματος αλουμινίου 6061-T6 είναι κατά πολύ μεγαλύτερη. Κατά την ψύξη η ZMT του αλουμινίου αυξάνεται αρκετά, αλλά η ZMT του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 304 παρουσιάζει ελάχιστη αύξηση.

Στο Μοντέλο II, μελετάται και η επίδραση της ροής του ρευστού στο εσωτερικό της λίμνης συγκόλλησης στη μεταφορά της θερμότητας.

- Εισάγοντας την ροή στη λίμνη συγκόλλησης, για τον ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 το πρώτο πράγμα που παρατηρεί κανείς είναι πως παρουσιάζονται αστάθειες. Οι αστάθειες αυτές δεν οφείλονται σε κάποιο υπολογιστικό σφάλμα, αλλά πρόκειται για φυσικές αστάθειες οι οποίες προκύπτουν λόγω των υψηλών αριθμών Prandtl και Marangoni του υλικού, που συνεπάγεται ταχύτερη ανάπτυξη του συνοριακού στρώματος ταχυτήτων έναντι του θερμικού στρώματος. Αυξάνοντας την ισχύ οι αστάθειες παραμένουν, ενώ μειώνοντας την ισχύ μειώνεται ο αριθμός Marangoni και επομένως το θερμικό οριακό στρώμα

αναπτύσσεται καλύτερα. Το πρόβλημα με την μείωση της ισχύος είναι πως μειώνεται το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται στο τεμάχιο καθιστώντας την τήξη σχεδόν αδύνατη. Ένας δεύτερος τρόπος για να εξαφανιστούν οι αστάθειες είναι η αύξηση του χρόνου εκπομπής της δέσμης Laser αν και τα αποτελέσματα για αυτή την περίπτωση ήταν ασαφή και επίσης η αύξηση του χρόνου εκπομπής δεν είναι αποδοτική για εφαρμογές της μεθόδου στη βιομηχανία.

- Το κράμα αλουμινίου Al 6061-T6 συμπεριφέρεται πολύ καλύτερα από τον χάλυβα όταν συνυπολογίζεται η κίνηση του ρευστού στη μελέτη. Δεν παρουσιάζονται αστάθειες όσο και αν αυξηθεί η ισχύς, γεγονός που αποδίδεται στον μικρό αριθμό Prandtl του υλικού, ο οποίος διευκολύνει την εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διαφορών. Συγκριτικά με το Μοντέλο I, η μέγιστη θερμοκρασία είναι μικρότερη, και το ίδιο ισχύει για το βάθος διείσδυσης. Το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης ωστόσο είναι μεγαλύτερο. Αυξάνοντας την ισχύ, αυξάνεται η λίμνη συγκόλλησης.

- Τέλος, για το Μοντέλο II δοκιμάστηκε ένα τρίτο, υποθετικό, υλικό το οποίο είχε ίδιες ιδιότητες με τον χάλυβα AISI 304 αλλά μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και άρα μικρότερο αριθμό Prandtl. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως και εδώ παρουσιάζονται αστάθειες, οι οποίες ωστόσο εξαφανίζονται γρήγορα και δίνουν την θέση τους στην ομαλή μεταφορά θερμότητας. Ο αριθμός Prandtl του υλικού είναι επομένως καθοριστικός για το αποτέλεσμα της κατεργασίας και θα πρέπει να του δίνεται αρκετή σημασία στο σχεδιασμό της κατεργασίας.

Σαν μελλοντική εργασία, θα μπορούσε κανείς να διερευνήσει τις αστάθειες που παρατηρήθηκαν στον ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 με βελτίωση του μοντέλου επίλυσης, ενδεχομένως επιτρέποντας κατακόρυφες μετατοπίσεις της διεπιφάνειας. Επίσης θα μπορούσε κανείς να μεταφέρει το παρόν πρόβλημα σε τρεις διαστάσεις και να δει ποια θα είναι τότε η γεωμετρία συγκόλλησης, ιδιαίτερα όταν η σημειακή πηγή Laser μετακινείται προκειμένου να επιτευχθεί σταθερή παροχή τήγματος. Εδώ παρουσιάζει ενδιαφέρον η χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση του φαινομένου, με στόχο την ακριβέστερη αποτύπωση των τάσεων Marangoni.

Επίσης θα μπορούσε να γίνει χρήση του ANSYS Fluent και να προσομοιωθεί η κατεργασία της σημειακής συγκόλλησης Laser όταν υπάρχουν δύο υλικά και συγκολλούνται μεταξύ τους, ώστε να ελεγχθεί η σύσταση του τελικού μίγματος.

6. Βιβλιογραφία

1. Rosenthal, D., *Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting*. Welding Journal, 1941. **20**(5): p. 220-234.
2. Anthony, T.R. and H.E. Cline, *Surface rippling induced by surface tension gradients during laser surface melting and alloying*. Journal of Applied Physics, 1977. **48**(9): p. 3888-3894.
3. Mazumder, J. and W.M. Steen, *Heat transfer model for cw laser material processing*. Journal of Applied Physics, 1980. **51**(2): p. 941-947.
4. Frewin, M.R. and D.A. Scott, *Finite element model of pulsed laser welding*. Vol. 78. 1999: American Welding Society.
5. Fabbro, R. and K. Chouf. *Dynamical interpretation of deep penetration of CW laser welding*. in *Proceedings of ICALEO*. 1998. Orlando.
6. Ki, H., J. Mazumder, and P. Mohanty, *Modeling of laser keyhole welding: Part I. mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002. **33**(6): p. 1817-1830.
7. Wu, C.S. and F. Yan, *Numerical simulation of transient development and diminution of weld pool in gas tungsten arc welding* Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004. **12**: p. 13-20.
8. Srinivasan, J. and B. Basu, *A numerical study of thermocapillary flow in a rectangular cavity during laser melting*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1986. **29**(4): p. 563-572.
9. He, X., P.W. Fuerschbach, and T. DebRoy, *Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003. **36**(12): p. 1389-1399.
10. Sundar, M., et al., *Numerical simulation of melting and solidification in laser welding of mild steel*. International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering, 2007. **1**(6): p. 717-733.
11. Siva Shanmugam, N., G. Buvanashakaran, and K. Sankaranarayanan, *Some studies on weld bead geometries for laser spot welding process using finite element analysis*. Materials & Design, 2012. **34**(0): p. 412-426.
12. Χαϊδεμενόπουλος, Γ.Ν., *Εισαγωγή στις Συγκολλήσεις*. 2010: Εκδόσεις TZIOΛΑ.
13. Ρωμανός, Δ., *Μελέτη δυναμικής αλληλεπίδρασης μικροφουσαλίδας με γειτονικό στερεό τοίχωμα υπό την επίδραση ακουστικών διαταραχών με τη χρήση υπολογιστικής πλατφόρμας ANSYS Fluent*, in *Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών*. 2013, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
14. Πελεκάσης, Ν., *Διδακτικές Σημειώσεις:Υπολογιστικές Μέθοδοι στην Ενεργειακή Περιοχή*. 2011.
15. *Fluent 6.3 User Guide*: Fluent Inc.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000123945