

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Θερμοκρασιακές κατανομές και Υπολογισμός Ζώνης Μερικής Τήξης (ZMT)

και Θερμοεπηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ)

σε συγκολλήσεις Αλουμινίου

υπό

Πολυζωγοπούλου Γεωργία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2009



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

Αριθ. Εισ.: 7610/1
Ημερ. Εισ.: 05-11-2009
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ
2009
ΠΟΛ

© 2009 Πολυζωγοπούλου Γεωργία

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 (Επιβλέπων) Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Χασιώτης
Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Οφείλω ευχαριστίες στον Καθηγητή κ. Γ. Μπρέγιαννη, για την πολύτιμη βοήθειά του στον προγραμματισμό του *Mathematica*.

Ευχαριστώ τους φίλους(ες) μου Γιώτα, Πωλίνα, Αλέκο, Ιωάννα και Αναστασία για την ηθική υποστήριξή τους. Επίσης τους θείους μου Τασία, Αποστόλη και Χριστίνα.

Αλλά πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στην μητέρα μου Ροζαλία Πολυζωγοπούλου και στην αδελφή μου Αθανασία, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Καθώς επίσης και στον πατέρα μου Γεράσιμο Πολυζωγόπουλο που με τον δικό του τρόπο ήταν πάντα στο πλάι μου.

Γεωργία Πολυζωγοπούλου

Θερμοκρασιακές Κατανομές και Υπολογισμός Ζώνης Μερικής τήξης (ZMT) και Θερμοεπηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ)

σε συγκολλήσεις Αλουμινίου.

Πολυζωγοπούλου Γεωργία

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2009

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος,

Καθηγητής Φυσικής Μεταλλουργίας – Ανάπτυξης Κραμάτων & Σύγχρονων Κατεργασιών.

Περίληψη

Στη μηχανουργική τεχνολογία παρουσιάζεται αρκετές φορές η ανάγκη σύνδεσης διαφόρων τεμαχίων με σκοπό τη δημιουργία ενός σύνθετου αντικειμένου. Η συγκόλληση είναι μία από αυτές. Σε αυτή την διπλωματική θα παρουσιάσουμε και θα αναλύσουμε αρχικά τις ήδη υπάρχουσες εξισώσεις που περιγράφουν μία συγκόλληση, θα τις μοντελοποιήσουμε με την χρήση του Mathematica και στην συνέχεια θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε σε διάφορα ερωτήματα που απασχολούν Μηχανικούς και Συγκολλητές, όπως π.χ ποιο είναι το πλάτος της θερμοεπηρεασμένης ζώνης και πως οι παράμετροι μας επηρεάζουν το τελικό προϊόν.

5.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΙΣΧΥΣ (V , I).....	47
5.4.1 ΠΛΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ	48
5.4.2 ΠΛΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΜΕΡΙΚΗΣ ΤΗΞΗΣ.....	49
5.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ T ₀ (ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ).....	50
5.5.1 ΠΛΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ.....	51
5.5.2 ΠΛΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΜΕΡΙΚΗΣ ΤΗΞΗΣ.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	52
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	55

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Ενδεικτικές τιμές βαθμών αποδόσεων για διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης.....	4
-------------------------------------------------------------------------------------	---

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ.2.1. Διμερές διάγραμμα φάσεων συστατικών α, β	5
Σχ.2.2. μεγέθυνση της πάνω αριστερά γωνίας του Σχ.2.1	6
Σχ.2.3. Διμερές διάγραμμα φάσεων συστατικών Α και Β με ευτηκτική	7
Σχ.2.4 Διμερές διάγραμμα φάσεων των συστατικών Α και Β με ευτηκτική	8
Σχ.2.5 Απεικόνιση των ζωνών συγκόλλησης	9
Σχ.2.6 Διάγραμμα T (θερμοκρασίας) – t (χρόνου) [θερμικός κύκλος] των σημείων 1, 2, 3, 4, 5	10
Σχ.2.7 Διάγραμμα ισόθερμων μετασχηματισμών (IT) για ευτηκτοειδή χάλυβα (Fe-0.8 C)	12
Σχ.2.8 Διάγραμμα CCT (πλήρεις γραμμές) και διάγραμμα IT (διακεκομμένες γραμμές) για ευτηκτοειδή χάλυβα (Fe-0.8C)	12
Σχ.3.1 Σύστημα συντεταγμένων x,y,z που κινείται με την πηγή θερμότητας	14
Σχ.3.2 Χρονικές στιγμές μίας συγκόλλησης	15
Σχ.4.1. Απεικόνιση της ζώνης μερικής τήξης	29
Σχ.4.2 Διμερές διάγραμμα φάσεων των συστατικών Α, Β	30
Σχ.4.3. Διάγραμμα φάσεων Al-Mg	31
Σχ.4.4 Διάγραμμα των ζωνών συγκόλλησης	32
Σχ.4.5. Διάγραμμα φάσεων Al-4Cu	33
Σχ.4.6 Μεγέθυνση της πάνω αριστερά γωνίας του Σχ.4.5. για την εύρεση των T ₁ , T ₂ και T ₃	33
Σχ.4.7 Διάγραμμα των ζωνών συγκόλλησης	34
Σχ.5.1.a. κατανομή x,y αλουμινίου 1060 για u= 0.3 cm/s	37
Σχ.5.1.b. κατανομή x,y αλουμινίου 1060 για u= 0.5 cm/s	37
Σχ.5.1.c. κατανομή x,y αλουμινίου 1060 για u= 1 cm/s	37
Σχ.5.2.a Κατανομή x,y χάλυβα 1117 για u= 0.3 cm/s	38
Σχ.5.2.b Κατανομή x,y χάλυβα 1117 για u= 0.5 cm/s	38
Σχ.5.2.c Κατανομή x,y χάλυβα 1117 για u= 1 cm/s	38
Σχ.5.3.a Κατανομή x,y ανοξειδωτου χάλυβα S20100 για u=0.3 cm/s	39
Σχ.5.3.b Κατανομή x,y ανοξειδωτου χάλυβα S20100 για u=0.5 cm/s	39
Σχ.5.3.c Κατανομή x,y ανοξειδωτου χάλυβα S20100 για u=1 cm/s	39
Σχ.5.4.a. Μικρή ταχύτητα	40
Σχ.5.4.b. Μεγάλη ταχύτητα	40
Σχ.5.4.c. Μεγαλύτερη ταχύτητα	40
Σχ.5.5 Μεταβολή του σχήματος της λίμνης συγκόλλησης	40
Σχ.5.6. Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm)– ταχύτητας u (cm/s) για το Al-4Cu	41

Σχ.5.7. Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm)– ταχύτητας u (cm/s) για το Al-4Cu.....	42
Σχ.5.8. Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm)– ταχύτητας u (cm/s) για το Al-4Mg.....	43
Σχ.5.9. Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm)– ταχύτητας u (cm/s) για το Al-4Mg.....	43
Σχ.5.10 Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm) – πάχους H (cm) για το Al- 4Cu.....	45
Σχ.5.11 Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm) – πάχους H (cm) για το Al-4Mg.....	45
Σχ.5.12 Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm) – πάχους H (cm) για το Al-4Cu.....	46
Σχ.5.13 Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm) – πάχους H (cm) για το Al-4Mg.....	46
Σχ.5.14 Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm) – Έντασης I (A) για Al-4Mg και Al-4Cu.....	48
Σχ.5.15 Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm) – τάσης (v) για για Al-4Mg και Al-4Cu.....	48
Σχ.5.16 Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm) – Έντασης I (A).....	49
Σχ.5.17 Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm) – τάσης (v).....	49
Σχ.5.18 Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm) – θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$).....	51
Σχ.5.19 Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm) – θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$).....	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στη μηχανουργική τεχνολογία παρουσιάζεται αρκετές φορές η ανάγκη σύνδεσης διαφόρων τεμαχίων με σκοπό τη δημιουργία ενός σύνθετου αντικειμένου. Η συγκόλληση είναι μία από αυτές. Παρουσιάζονται συχνά αστοχίες στα τελικά προϊόντα μιας συγκόλλησης πράγμα που έχει προβληματίσει εδώ και πολλά χρόνια τους Μηχανικούς , τους Μεταλλειολόγους και τους Συγκολλητές για τον λόγο που εμφανίζονται, από που είναι η εκκίνηση τους και πως θα μπορούσαμε να τις αποφεύγαμε ή ακόμα καλύτερα να τις προβλέπαμε σε ένα ικανοποιητικό βαθμό γνωρίζοντας απλά τις συνθήκες συγκόλλησης..

Σκοπός λοιπόν αυτής της διπλωματικής είναι να συνδέσει τις εξισώσεις που υπάρχουν χρόνια σε ένα σύγχρονο μαθηματικό υπολογιστικό σύστημα και να απαντήσουμε σε διάφορα ερωτήματα. Θα δούμε πως η ταχύτητα, ο ρυθμός εισαγωγής θερμότητας, το πάχος του ελάσματος επηρεάζουν την συγκόλληση μας. Θα υπολογίσουμε ακριβώς το πλάτος της Θερμοεπηρεασμένης Ζώνης και της Ζώνης Μερικής τήξης και πως αυτά συμπεριφέρονται στις αλλαγές των μεταβλητών της συγκόλλησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη μηχανουργική τεχνολογία παρουσιάζεται αρκετές φορές η ανάγκη σύνδεσης διαφόρων τεμαχίων με σκοπό τη δημιουργία ενός σύνθετου αντικειμένου. Οι βασικότεροι τρόποι σύνδεσης των κομματιών είναι τρεις: η ήλωση , η κοχλιοσύνδεση και η συγκόλληση. Εμείς θα ασχοληθούμε με την μέθοδο της συγκόλλησης.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η συγκόλληση υπάρχει εδώ και αιώνες, εν τούτοις όχι στις μορφές που την γνωρίζουμε σήμερα. Εμφανίζονταν διαδικασίες που βασίζονταν κυρίως στην μέχρι τότε γνώση των υλικών. Μία από τις πρώτες διαδικασίες συγκόλλησης ήταν η σφυρήλατη συγκόλληση, όπου με θερμότητα και χτυπήματα προσπαθούσαν να ενώσουν δύο ή περισσότερα κομμάτια. Από τότε, έχουν υπάρξει φυσικά τεράστιοι πρόοδοι στον κόσμο της συγκόλλησης. Λέγοντας πλέον συγκόλληση εννοούμε την ένωση δύο ή και περισσότερων κομματιών από πολυκρυσταλλικά μέταλλα ή κράματα με θέρμανση ή με συμπίεση ή και με τα δύο έτσι ώστε, να δημιουργείται ένα τελικό τεμάχιο που να έχει την ίδια αντοχή με τα αρχικά κομμάτια στα οποία εμφανίζεται κρυσταλλική σύνδεση. Αν δηλαδή ξεκινήσουμε από το ένα οποιοδήποτε κομμάτι προς το άλλο, διατρέχοντας και την ζώνη συγκόλλησης συναντάμε συνεχή κρυσταλλική δομή.

Η λίστα με τα αντικείμενα ή προϊόντα, που έχουν συγκολλητά μέρη είναι ατελείωτη και περιλαμβάνει από στοιχεία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μέχρι πλοία, μηχανές αεριοθούμενων, αυτοκίνητα, γέφυρες, μεταλλικά έπιπλα, κτίρια με μεταλλικό σκελετό κ.τ.λ.

2.2.1 Κατηγορίες Συγκόλλησης

Μία κατηγοριοποίηση των συγκολλήσεων τις κατατάσσει σε δύο κατηγορίες, τις **αυτογενείς συγκολλήσεις** και τις **ετερογενείς συγκολλήσεις**. Στις αυτογενείς απαιτείται τοπικά λιώσιμο των προς συγκόλληση τεμαχίων και τοποθέτηση ή όχι ενός συγκολλητικού μέσου. Παραδείγματα τέτοιων συγκολλήσεων είναι η οξυγονοκόλληση, η ηλεκτροσυγκόλληση, η συγκόλληση με αντίσταση, με Laser κ.τ.λ. στις ετερογενείς συγκολλήσεις δε χρειάζεται τοπική τήξη των αντικειμένων, που θα συγκολληθούν, παρά μόνο θέρμανση και εναπόθεση λιωμένου συγκολλητικού υλικού. Παραδείγματα τέτοιων συγκολλήσεων είναι η κασιτεροκόλληση, η μπруντζοκόλληση κ.τ.λ.

2.2.2 Τρόπος και μέθοδοι συγκόλλησης

Η συγκόλληση τόξου ή ηλεκτροσυγκόλληση ή συγκόλληση τήξης είναι αυτή με την οποία θα ασχοληθούμε στην διπλωματική και η οποία στηρίζεται στην δημιουργία ηλεκτρικού τόξου ανάμεσα στο κομμάτι που θέλουμε να κολληθεί και σε ένα ηλεκτρόδιο, που είναι ταυτόχρονα και συγκολλητικό μέσο. Για να γίνει αυτό, το ηλεκτρόδιο και το κομμάτι συνδέονται με τους ακροδέκτες γεννήτριας ηλεκτρικού συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, τις μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης. Λόγω του ηλεκτρικού τόξου, αναπτύσσεται μεγάλη θερμοκρασία στην θέση κόλλησης, γύρω στους 4000° C. Στη θερμοκρασία αυτή το μέταλλο που συγκολλάται λιώνει, ενώ από πάνω του δημιουργείται ένα στρώμα αερίων, που προέρχονται από την επένδυση του ηλεκτροδίου. Ταυτόχρονα με την δημιουργία των αερίων, δημιουργείται πάνω από την ραφή μία πάστα, επίσης από την επένδυση του ηλεκτροδίου, η οποία βοηθάει την τήξη του μετάλλου αλλά και εμποδίζει τη γρήγορη απόψυξη, που θα είχε συνέπεια την βαφή της ραφής. Η ραφή συγκόλλησης προκύπτει από το λιωμένο μέταλλο που συγκολλάται και από λιωμένο μέταλλο του πυρήνα του ηλεκτροδίου.

Ο συγκολλητής για να ξεκινήσει τη διαδικασία χτυπά ή τρίβει το ηλεκτρόδιο πάνω στο προς συγκόλληση τεμάχιο και στη συνέχεια. Το σηκώνει, διατηρώντας από εκεί και πέρα μία σταθερή απόσταση.

Οι δύο κυριότερες μέθοδοι συγκόλλησης είναι:

Μέθοδος M.I.G

Στην M.I.G (Metal Inert Gas) το ηλεκτρόδιο αποτελεί και το συγκολλητικό υλικό. Το υλικό δηλαδή καταναλίσκεται και τροφοδοτείται στη συγκόλληση από μία κουλούρα σύρματος. Το αέριο που χρησιμοποιείται είναι αργό ή μείγμα αργού με άλλα αδρανή αέρια

Μέθοδος T.I.G

Στην T.I.G (Tungsten Inert Gas) το ηλεκτρόδιο είναι από Βολφράμιο και μερικές φορές προστίθενται Θόριο και Ζιρκόνιο. Το ηλεκτρόδιο δεν καταναλίσκεται, δηλαδή συμμετέχει στην συγκόλληση μόνο για να διατηρεί το ηλεκτρικό τόξο. Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ως αδρανές αέριο το αργό ή το ήλιο ή και μείγμα των δύο αερίων. Η μέθοδος T.I.G χρησιμοποιείται για συγκόλληση των περισσότερων μετάλλων.

Η Ισχύς της θερμικής πηγής (τόξου) υπολογίζεται από τον τύπο

$$Q = V \cdot I \cdot n \quad \text{[εξ.1]}$$

όπου n ο βαθμός απόδοσης της πηγής, ισχύει $0 < n < 1$ διότι έχουμε απώλειες και εξαρτάται από την μέθοδο της συγκόλλησης

Πίνακας 1. Ενδεικτικές τιμές βαθμών αποδόσεων για διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης.

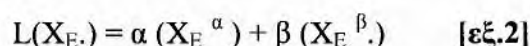
Μέθοδος	n
LBM	0.05
TIG/GTAW	0.6-0.8
SMAW	0.7-0.9
MIG/GMAW	0.7-0.9
SAW	0.8-0.95
EBM	0.8-0.95

2.3 ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ

Η στερεοποίηση είναι μία σημαντική μεταλλουργική διαδικασία στην οποία βασίζονται οι συγκολλήσεις τήξεως. Κατά την στερεοποίηση η μετάβαση από την υγρή στην στερεή φάση γίνεται μέσω της διεπιφάνειας. Στα κράματα η ταχύτητα στερεοποίησης εξαρτάται από την ταχύτητα διαχύσεως των κραματικών στοιχείων στη στερεά και την υγρή φάση.

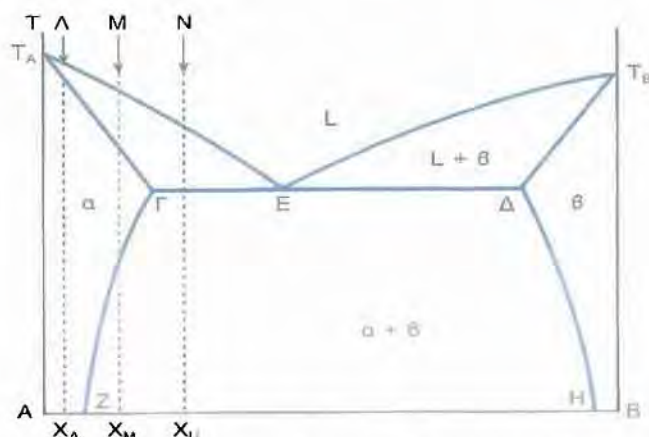
2.3.1 Στερεοποίηση ευτηκτικού κράματος.

Θα μελετήσουμε τώρα με τη βοήθεια του διαγράμματος φάσεων τη στερεοποίηση ενός διμερούς κράματος, σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας, με ευτηκτική σύσταση X_E . Όταν ψυχθεί από την υγρή φάση, το κράμα αρχίζει να στερεοποιείται με ευτηκτική θερμοκρασία T_E . Στη θερμοκρασία αυτή πραγματοποιείται η ευτηκτική αντίδραση



Όπου στις παρενθέσεις αναφερόμαστε στις χημικές συστάσεις των φάσεων.

Σύμφωνα με την ευτηκτική αντίδραση κατά τη στερεοποίηση του υγρού σχηματίζονται ταυτόχρονα στερεές φάσεις α και β . Τις περισσότερες φορές σχηματίζονται λαμέλες των φάσεων σε επάλληλες στρώσεις $\alpha, \beta, \alpha, \beta, \alpha \dots$. Η ευτηκτική αντίδραση συνεχίζεται στη θερμοκρασία T_E έως ότου αναλωθεί όλο το υγρό. Καθ' όλη τη διάρκεια οι τρεις φάσεις (L, α, β) συνυπάρχουν σε ισορροπία. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται περαιτέρω της T_E , οι συστάσεις των φάσεων α και β σε ισορροπία μεταβάλλονται σύμφωνα με τις γραμμές Solvus (ΓZ) και (ΔH).

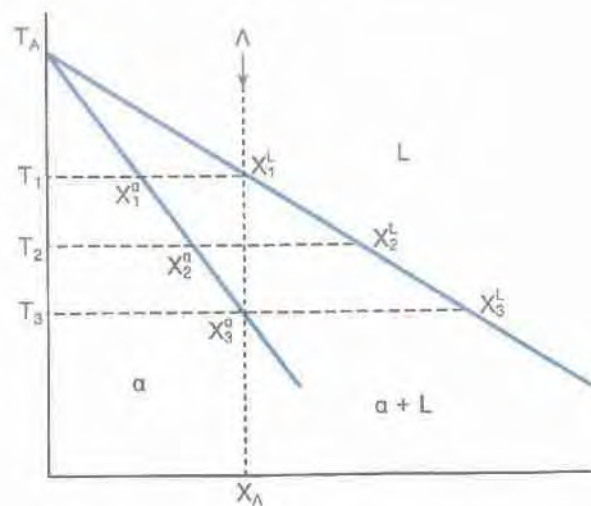


Σχ.2.1. Διμερές διάγραμμα φάσεων συστατικών α, β

2.3.2 Στερεοποίηση υποευθηκτικού κράματος.

Στη συγκεκριμένη στερεοποίηση διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις, τα κράματα Λ, Μ, Ν όπως φαίνεται και στο Σχ.2.1

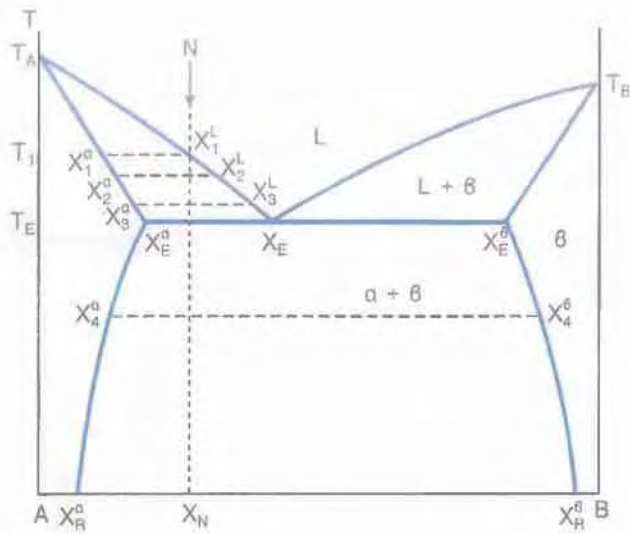
Για το κράμα Λ με σύσταση X_A η στερεοποίηση θα αρχίσει όταν η θερμοκρασία πέσει στην τιμή της liquidus T_1 . Το στερεό που δημιουργείται είναι φάση α με σύσταση X_1^a με την πτώση της θερμοκρασίας η στερεοποίηση συνεχίζεται και το ποσοστό της φάσεως α αυξάνεται. Στη θερμοκρασία T_3 το υγρό εξαφανίζεται και το κράμα είναι 100% φάση α με σύσταση X_A . Από την θερμοκρασία T_1 έως T_3 , η σύσταση του στερεού μεταβλήθηκε από X_1^a έως X_A και του υγρού από X_A έως X_3^L διατηρώντας πάντα θερμοδυναμική ισορροπία.



Σχ 2.2. μεγέθυνση της πάνω αριστερά γωνίας του Σχ.2.1

[2]

Για το κράμα Μ με σύσταση X_M η στερεοποίηση από την T_1 έως την T_3 γίνεται ακριβώς όπως για το κράμα Λ. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από την T_3 πραγματοποιείται μία αντίδραση στη στερεά κατάσταση, όπου έχουμε σχηματισμό ή καθίζηση φάσεως β από το στερεό διάλυμα της φάσεως α. Στην T_4 τέμνεται η γραμμή Solvus και σχηματίζεται φάση β με



Σχ.2.4 Διμερές διάγραμμα φάσεων των συστατικών A και B με ευτηκτική

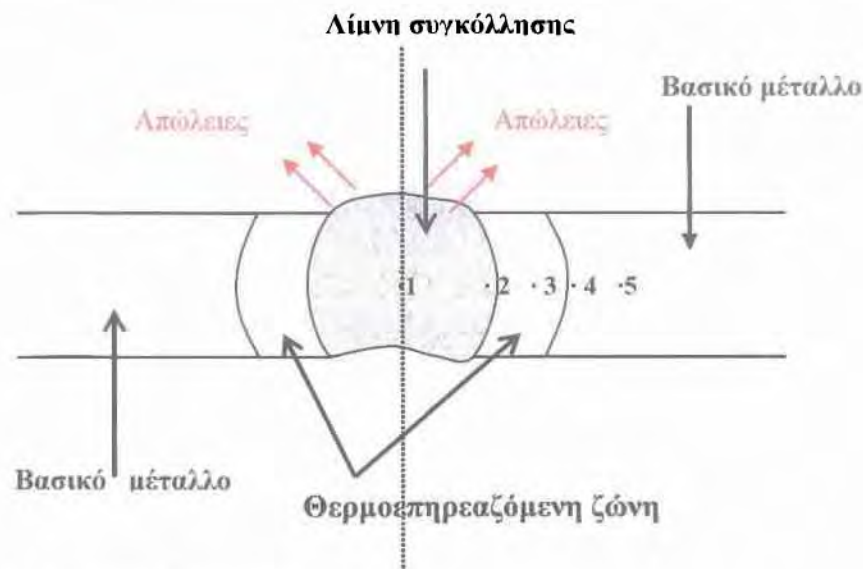
[2]

Κράματα με σύσταση μεγαλύτερη από την ευτηκτική σύσταση X_E (υπερευτηκτικά) στερεοποιούνται με τον ίδιο τρόπο με τα υποευτηκτικά με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή η πρώτη στερεά φάση που δημιουργείται είναι η φάση β.

2.4 ΖΩΝΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

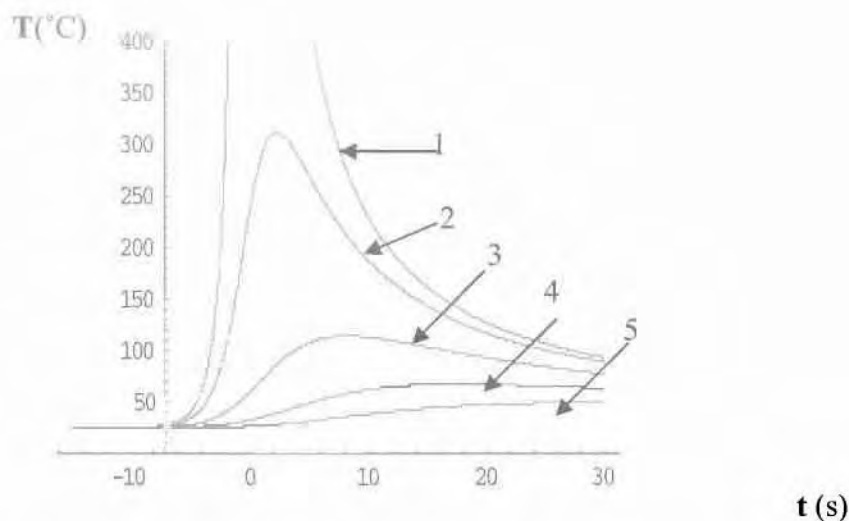
Η θερμική πηγή (τόξο) παρέχει υψηλές θερμοκρασίες στην συγκόλληση με συνέπεια την δημιουργία μίας 'λίμνης' λιωμένου μετάλλου. Ένα μέρος όλης αυτής της θερμότητας διοχετεύεται στο μέταλλο και ένα άλλο χάνεται στο περιβάλλον μέσω είτε του τόξου είτε μέσω της επιφάνειας του υλικού που συγκολλάται όπως φαίνεται στο Σχ.2.5.

Τρεις ζώνες εμφανίζονται μετά την συγκόλληση: το Βασικό μέταλλο (BM), η Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) και η Λίμνη συγκόλλησης (ΛΜ). Η μορφή και τα όρια των τριών αυτών ζωνών εξαρτώνται από την θερμοκρασία, τον ρυθμό ψύξης και τον ρυθμό στερεοποίησης.



Σχ.2.5 Απεικόνιση των ζωνών συγκόλλησης.

Κάθε ένα από τα σημεία 1, 2, 3, 4, 5, του Σχ.2.5 δέχονται διαφορετική θερμοκρασία κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, με συνέπεια να έχουν διαφορετικό θερμικό κύκλο (διάγραμμα T,t)



Σχ.2.6 Διάγραμμα T (θερμοκρασίας) – t (χρόνου) [θερμικός κύκλος] των σημείων 1, 2, 3, 4, 5.

2.4.1 Λίμνη Συγκόλλησης (ΛΜ)

Είναι η περιοχή στην οποία λαμβάνει χώρα η συγκόλληση δηλαδή είναι η περιοχή στην οποία παρουσιάζονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι ιδιότητες της συγκόλλησης εξαρτώνται από την δομή της λίμνης που προκύπτει μετά την στερεοποίησή της. Το πάχος του ελάσματος, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και ο ρυθμός προσδόσεως θερμότητας

$$h = n \cdot V \cdot I \cdot / u \quad (J / m) \quad [\text{εξ.3}]$$

είναι παράγοντες που επιδρούν στη στερεοποίηση της ΛΣ.

Στην ΛΣ παρατηρούνται τα εξής χαρακτηριστικά:

- τήξη (φάση L)
- Αντιδράσεις του τηγμένου μετάλλου με αέρια
- Εξάτμιση κραματικών στοιχείων
- Στερεοποίηση

2.4.2 Θερμοεπηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΕΖ)

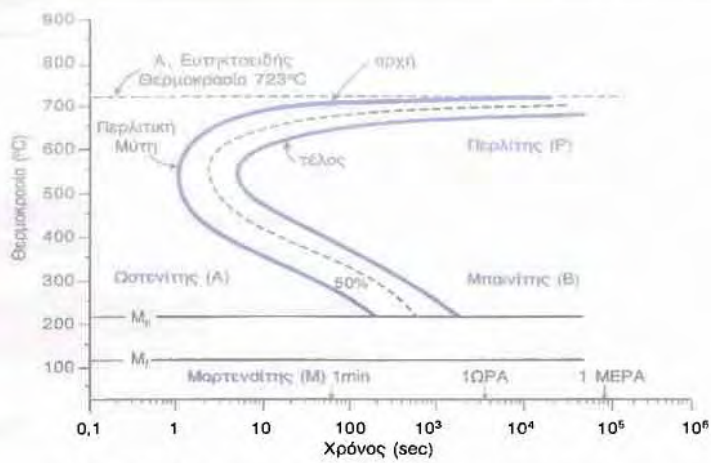
Η Θερμοεπηρεαζόμενη Ζώνη όπως φαίνεται και στο Σχ.2.5 είναι η περιοχή ανάμεσα στο βασικό μέταλλο (BM) και την λίμνη συγκόλλησης(ΛΣ).

Είναι εκείνη η περιοχή η οποία η μικροδομή της και οι φυσικές σταθερές της έχουν αλλάξει εξαιτίας της συγκόλλησης τόξου. Η υψηλή θερμότητα κατά την διάρκεια της συγκόλλησης τόξου και η γρήγορη ψύξη προκαλούν στο τελικό μας προϊόν αυτή την διαφορετική περιοχή. Οι ήδη υπάρχοντες σταθερές αλλάζουν αναλόγως με το υλικό, το είδος της συγκόλλησης και το ποσό της θερμότητας που παράγεται κατά τη διάρκεια.

Στα μέταλλα η ZMT είναι γενικότερα πιο σκληρή από εκείνη του αρχικού μας υλικού σε συνεργασία με το γεγονός ότι έχει χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα και είναι λιγότερη κατεργάσιμη.

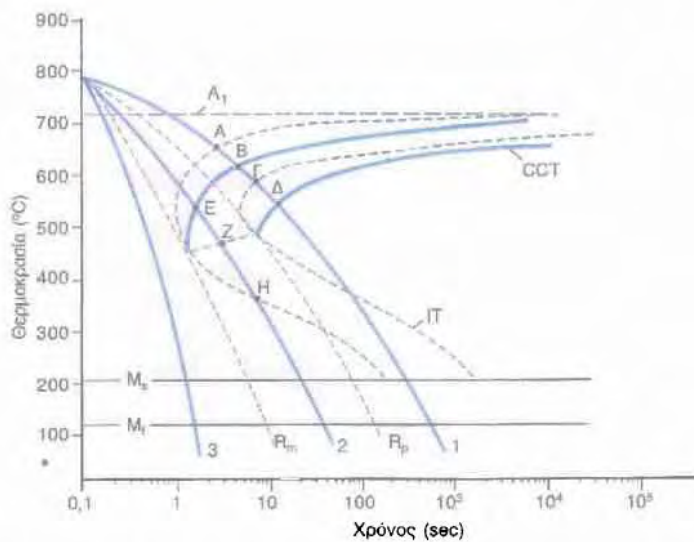
Η αστοχία μίας συγκόλλησης είναι συνάρτηση των θερμικών κύκλων που αναπτύσσονται, οι οποίοι οδηγούν σε ισχυρές παραμένουσες τάσεις και των φυσικών σταθερών της ΛΣ και ΘΕΖ οι οποίες διαφέρουν από αυτές του αρχικού υλικού. Οι περισσότερες αστοχίες μιας συγκόλλησης ξεκινούν από την ΘΕΖ και κατευθύνονται στη συγκολλημένη περιοχή. Για αυτόν το λόγο λοιπόν οι συγκολλητές καταβάλλουν προσπάθειες έτσι ώστε να μπορούν να ελέγχουν την μικροδομή και την θραύση της ΘΕΖ.

Τις περισσότερες φορές συνήθως περιγράφεται η εξέλιξη, η πορεία της μικροδομής της ΘΕΖ στους χάλυβες με την βοήθεια του διαγράμματος ισόθερμων μετασχηματισμών IT (Isothermal Transformation) βλ. Σχ.2.7 ή το διάγραμμα μετασχηματισμών συνεχούς ψύξεως CCT (Continuous Cooling Transformation) βλ Σχ.2.8.



Σχ.2.7 Διάγραμμα ισόθερων μετασχηματισμών (IT) για ευτηκτοειδή χάλυβα (Fe-0.8 C)

[2]



Σχ.2.8 Διάγραμμα CCT (πλήρεις γραμμές) και διάγραμμα IT (διακεκομμένες γραμμές) για ευτηκτοειδή χάλυβα (Fe-0.8C).

[2]

2.4.3 Βασικό Μέταλλο (BM)

Είναι η περιοχή που δεν υπέστη καμία μεταβολή στα χαρακτηριστικά της, στην δομή της και στις ιδιότητες της για αυτό και δεν την εξετάζουμε.

2.5 MATHEMATICA

Η *Mathematica* είναι ένα υπολογιστικό σύστημα που χρησιμεύει για την διεκπεραίωση αναλυτικών και αριθμητικών υπολογισμών καθώς και την δημιουργία γραφικών με χρήση ΗΥ. Περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό εσωτερικών συναρτήσεων και έτοιμων υποπρογραμμάτων που είναι ενσωματωμένα σε μια ευέλικτη γλώσσα προγραμματισμού. Η ακρίβεια των αριθμών στην *Mathematica* καθορίζεται αυθαίρετα από το χρήστη που μπορεί εύκολα να επεξεργάζεται αναλυτικά, αλγεβρικές παραστάσεις, ολοκληρώματα, διαφορικές εξισώσεις, πίνακες, γραφήματα (2d και 3d) κλπ. Το εύρος των εργασιών του έχει ως εξής :



- Αντιμέτωπη συναρτήσεων που συχνά περιέχουν εκατοντάδες ή ακόμα εκατομμύρια όρους
- Επιλύει, αναλύει και εικονογραφεί δεδομένα
- Υπολογίζει παραγώγους, ολοκληρώματα, αναπτύγματα σειρών, ρίζες συστημάτων εξισώσεων κ.τ.λ με μη αριθμητικά στοιχεία
- Μοντελοποιεί και προσομοιώνει από απλά συστήματα μέχρι σύνθετα βιολογικά συστήματα, χημικές αντιδράσεις, περιβαλλοντικές εργασίες και μαγνητικά πεδία
- Παράγει επαγγελματικής ποιότητας εξειδικευμένες αναφορές
- Μπορεί να αγοραστεί από διάφορες εταιρείες, επαγγελματίες αλλά επίσης μπορεί να γίνει και χρήση μέσω Internet από την διεύθυνση που υπάρχει στην βιβλιογραφία [10]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

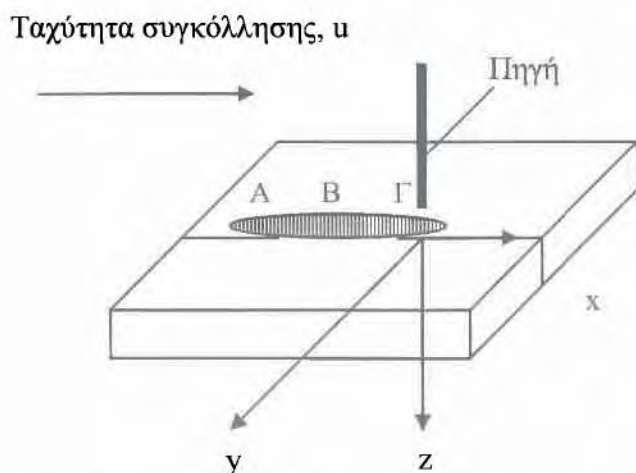
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

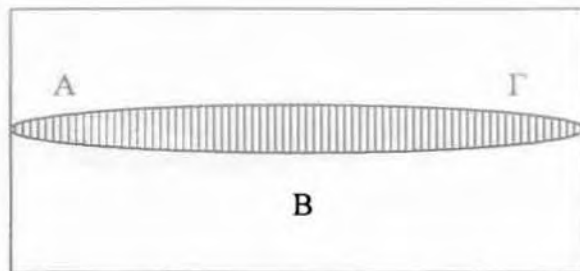
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βήματα που έχουν ακολουθηθεί για την τελική διαμόρφωση μαθηματικών σχέσεων, ικανές να περιγράψουν την μετάδοση θερμότητας κατά την διάρκεια συγκόλλησης τόξου, και η τελική μορφή των εξισώσεων αυτών κατά *Rosenthal*.

3.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Η πηγή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης τήξης κινείται με σταθερή ταχύτητα σε σταθερή διεύθυνση x όπως δείχνει το Σχ.3.1. Μετά την έναρξη (σημείο A) και πριν την λήξη (σημείο Γ) της συγκόλλησης [βλ. Σχ.3.2] η θερμοκρασιακή κατανομή είναι σταθερή και έχουμε ημιμόνιμες συνθήκες. Έχουν γίνει πολλές αναλυτικές, αριθμητικές και πειραματικές έρευνες πάνω στην θεωρία της συγκόλλησης τήξης. Οι περισσότερες των οποίων αφορούν την χρονική στιγμή B. Οι Lance και Martin, Rosenthal και Schmerber και ο Rykalin ανεξάρτητα μεταξύ τους δημιούργησαν μία αναλυτική λύση στην οποία ισχύουν ότι η αρχή των αξόνων συμπίπτει με το κέντρο της συγκόλλησης και ο παρατηρητής βρίσκεται ακριβώς πάνω από το τόξο και κινείται με ταχύτητα u μαζί με την πηγή.



Σχ.3.1 Σύστημα συντεταγμένων x,y,z που κινείται με την πηγή θερμότητας [3]



Σχ.3.2 Χρονικές στιγμές μίας συγκόλλησης
(A: Άναμμα τόξου, B: Κίνηση τόξου, Γ: σβήσιμο τόξου)

3.3 Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η βασική μαθηματική εξίσωση της μεταφοράς θερμότητας είναι η

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}_G + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad [\text{εξ.4}]$$

όπου ρ = πυκνότητα, kg/m^3

c = ειδική θερμότητα, J/kg

k = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, $\text{J/m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

\dot{Q} = ρυθμός παραγωγής θερμότητας από εσωτερικές πηγές

T = θερμοκρασία, $^\circ\text{C}$

t = χρόνος, s

x, y, z = Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (βλ Σχ.2.1)

Με παραδοχές ότι έχουμε :

- α) σταθερή μετάδοση θερμότητας
- β) σημειακή πηγή θερμότητας
- γ) αμελητέα έκλυση θερμότητας κατά την τήξη
- δ) σταθερές θερμικές ιδιότητες
- ε) μηδενικές απώλειες από την επιφάνεια του ελάσματος

και εάν εισάγω ένα κινητό σύστημα συντεταγμένων $w = x - u \cdot t$, $y = y$, $z = z$
παίρνω τελικώς μία εξίσωση της μορφής

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -\frac{u}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial w} \quad [\text{εξ.5}]$$

όπου $a = k / \rho \cdot c$, θερμοδιαχυτότητα [1]

3.4 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ROSENTHAL

Ο *Rosenthal* διακρίνει τρεις περιπτώσεις λύσεων

με τις παραδοχές ότι ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας από εσωτερικές πηγές είναι μηδέν

$$\dot{Q}_G = 0$$

Και ότι η θερμική αγωγιμότητα k είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας

$$\frac{\partial k}{\partial T} = 0$$

έχουμε τις λύσεις των εξισώσεων που ακολουθούν χωρισμένες σε τρεις κατηγορίες

1. Ημιάπειρης πλάκας

II Οριακές συνθήκες

1. Σημειακή πηγή

$$\lim_{R \rightarrow \infty} (-2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot k \cdot \frac{\partial T}{\partial R}) = Q \quad [\text{εξ.7}]$$

$$R = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2}$$

2. Απώλειες=0

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

3. $T=T_0$ για $R \rightarrow \infty$

Η λύση είναι της μορφής

$$T - T_0 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot e^{\frac{-u}{2 \cdot a} \cdot w} \cdot \frac{e^{\frac{-u}{2 \cdot a} \cdot R}}{R} \quad [\text{εξ.8}]$$

[1]

όπου

- T: Θερμοκρασία
- T_0 : Αρχική θερμοκρασία
- k: Θερμική αγωγιμότητα
- u: Ταχύτητα συγκόλλησης
- Q: Ισχύς θερμικής πηγής

2. Έλασμα πεπερασμένου πάχους

■ Οριακές συνθήκες

Ισχύουν και εδώ οι συνθήκες της ημιάπειρης πλάκας

Με την επιπλέον αδιαβατική οριακή συνθήκη στην κάτω επιφάνεια της πλάκας

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad \text{για} \quad z = H$$

■ Η λύση μας είναι πλέον της μορφής :

$$T - T_0 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot e^{\frac{-u}{2 \cdot a} \cdot w} \cdot \left[\frac{e^{\frac{-u}{2 \cdot a} \cdot R}}{R} + \sum_{B=1}^{\infty} \left(\frac{e^{\frac{-u}{2 \cdot a} \cdot R_1[B]}}{R_1[B]} + \frac{e^{\frac{-u}{2 \cdot a} \cdot R_2[B]}}{R_2[B]} \right) \right] \quad [\text{εξ.9}]$$

όπου

$$R_1[B] = \sqrt{w^2 + y^2 + (2 \cdot B \cdot H - z)^2}$$

$$R_2[B] = \sqrt{w^2 + y^2 + (2 \cdot B \cdot H + z)^2}$$

[1]

3. Λεπτό έλασμα

■ Οριακές συνθήκες

1. θεωρώ γραμμική πηγή 2 διαστάσεων με ισχύ $q = Q / H$

και έχω την λύση της μορφής :

$$T_i - T_o = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot e^{\frac{-u}{2 \cdot a} \cdot R} \cdot K_0 \cdot \left(\frac{u}{2 \cdot a} \cdot r \right) \quad [\text{εξ.10}]$$

όπου $K_0(z)$: συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους και μηδενικής τάξης.

3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Έχουμε τοποθετήσει τις εξισώσεις [εξ.10], [εξ.9] και [εξ.8] με δεδομένα

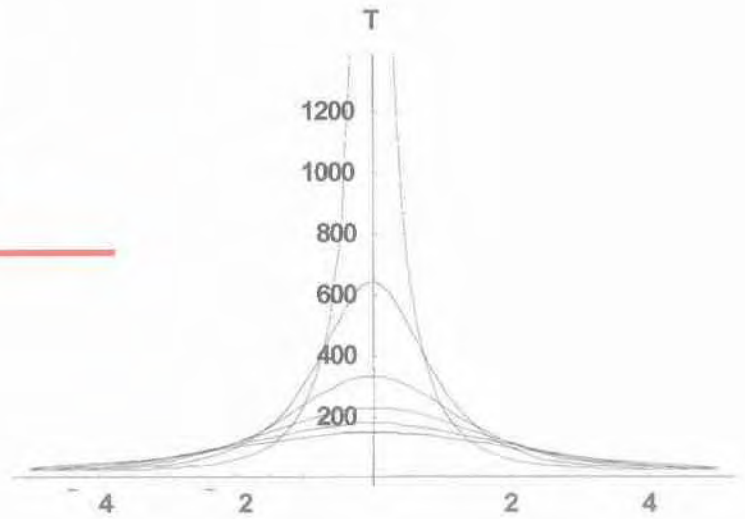
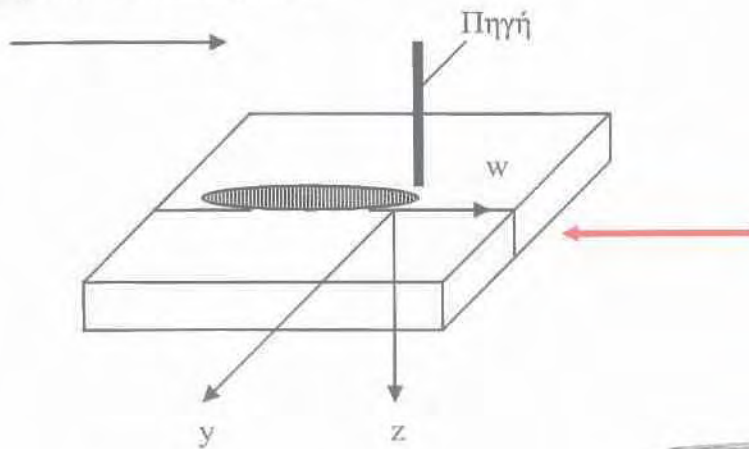
$T_o=25$	($^{\circ}\text{C}$)
$k=2.34$	($\text{w} / \text{cm} \cdot ^{\circ}\text{c}$)
$\rho=2.705$	(g / cm^3)
$c=0.9$	($\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$)
$u=1$	(cm / s)

σε κώδικα του Mathematica. Οι λύσεις που θα πάρουμε είναι η γραφική απεικόνιση των θερμοκρασιακών κατανομών συγκόλληση τήξης σε διάφορες κατευθύνσεις και για τις τρεις περιπτώσεις.

3.5.1 Ημιάπειρη πλάκα

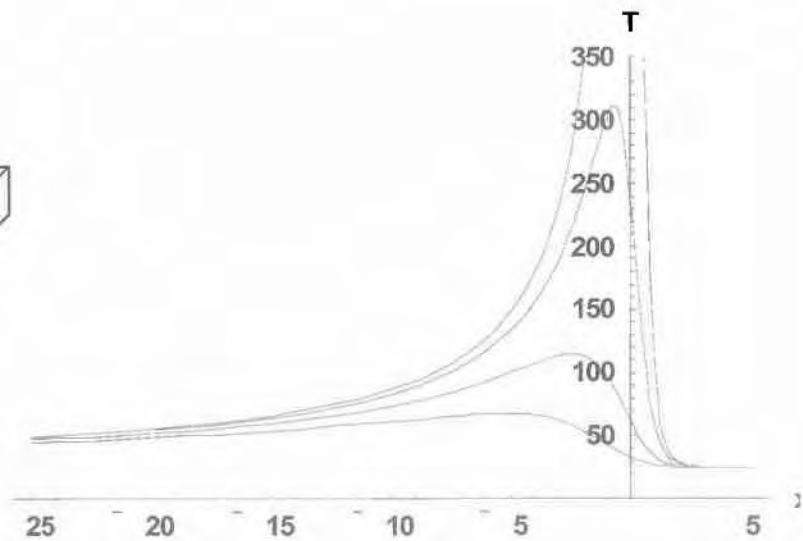
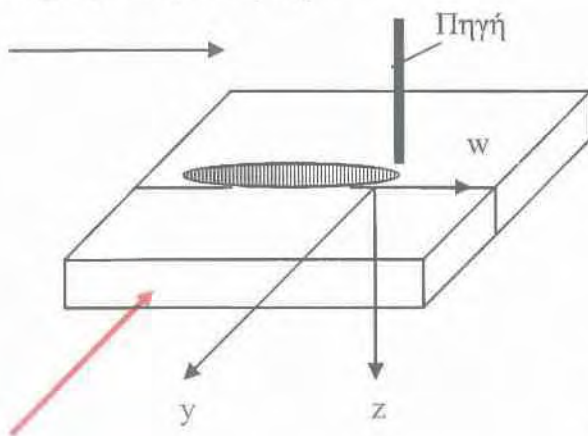
Κατανομή T,y

Ταχύτητα συγκόλλησης, u



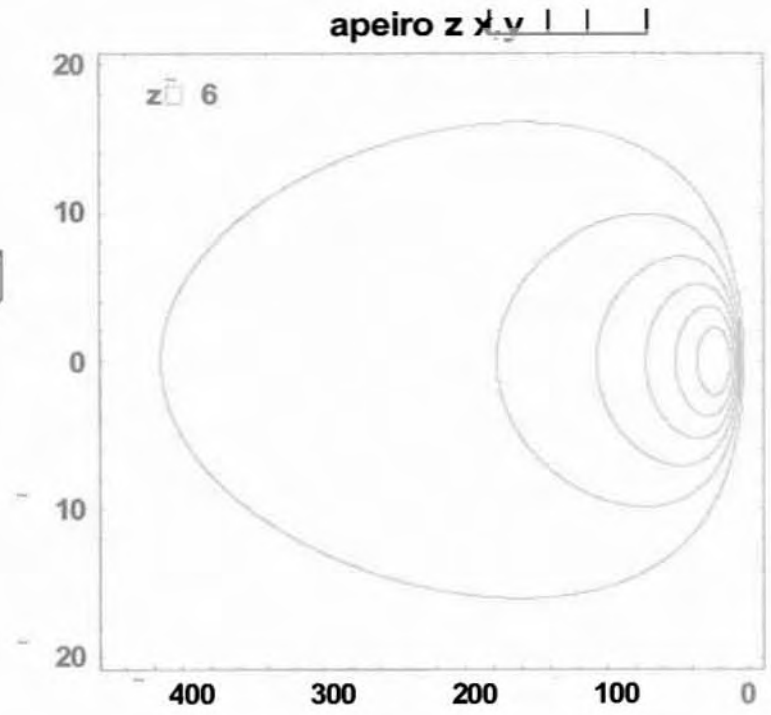
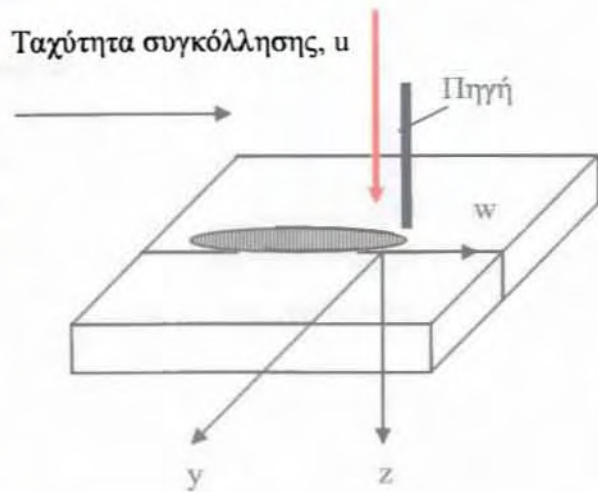
Κατανομή T,x

Ταχύτητα συγκόλλησης, u

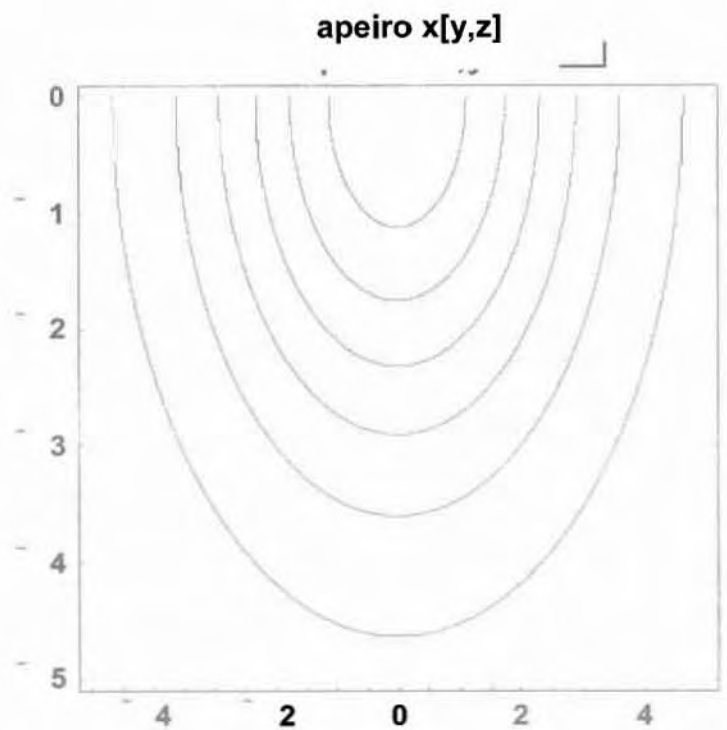
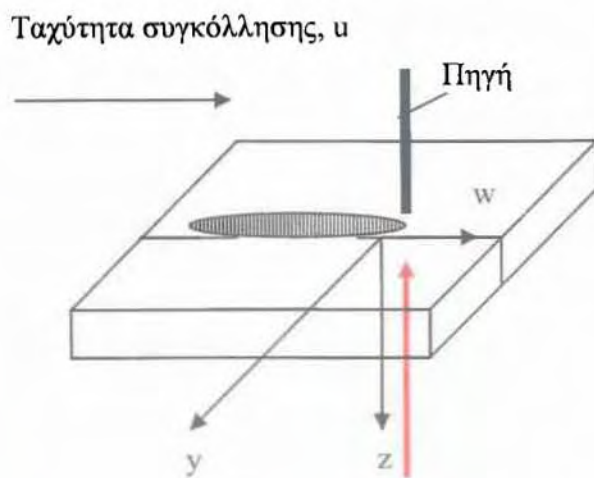


(σημείωση: το κόκκινο βελάκι μας δείχνει την πλευρά που βλέπει ο παρατηρητής)

Κατανομή x,y



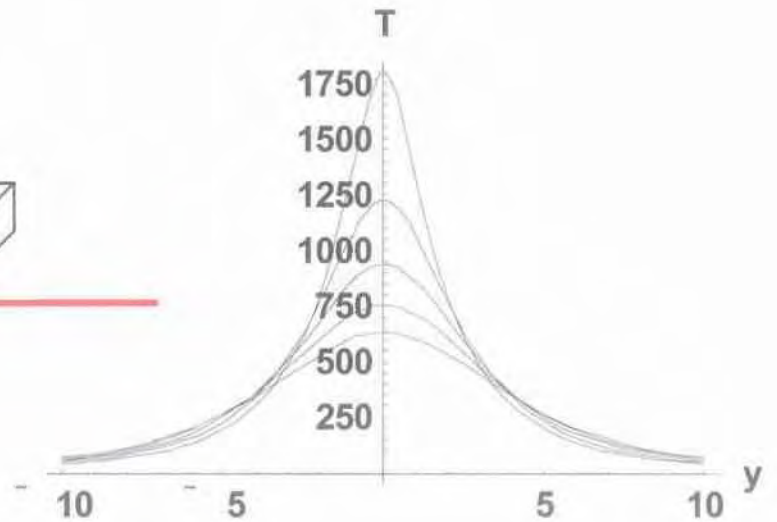
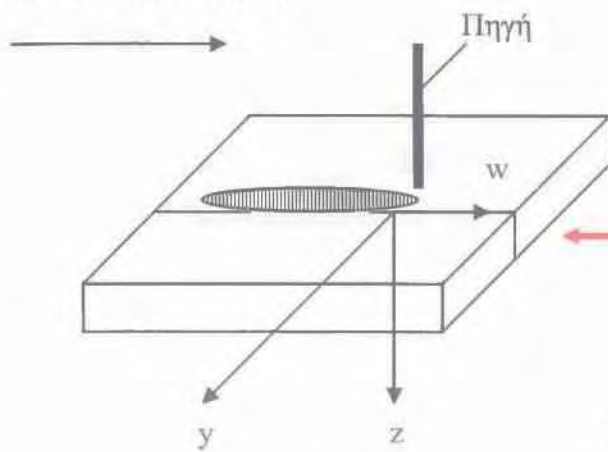
Κατανομή z,y



3.5. Σελασμα πεπερασμένου πάχους

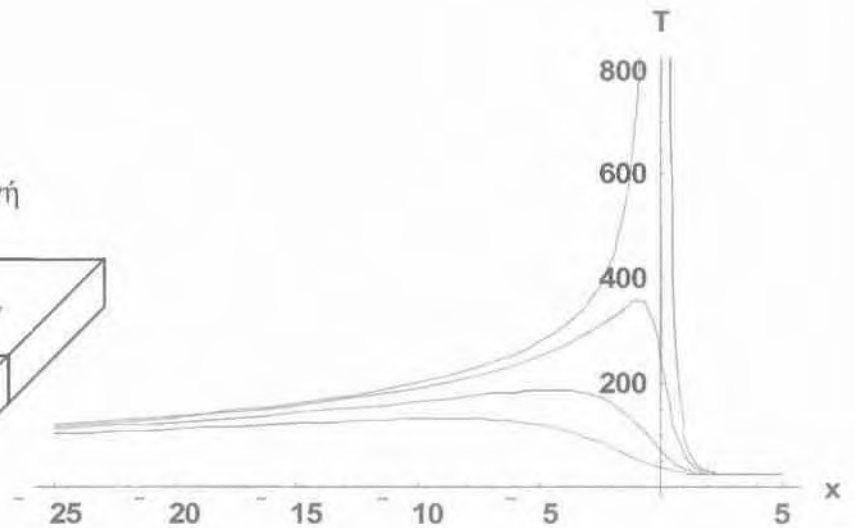
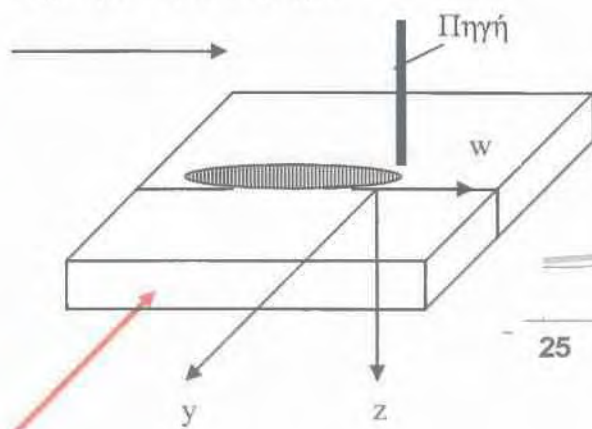
Κατανομή T,y

Ταχύτητα συγκόλλησης, u



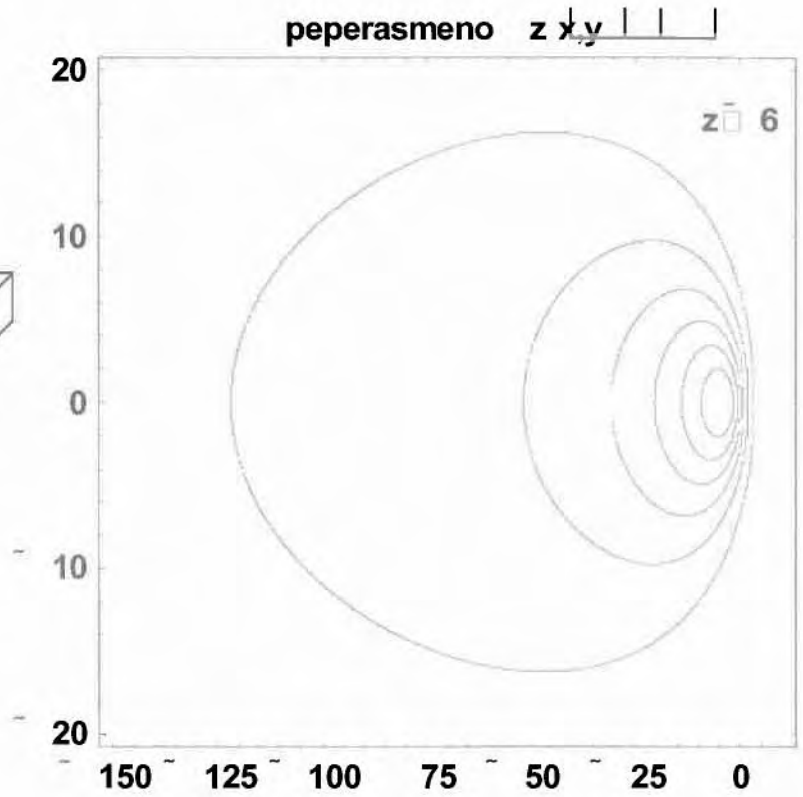
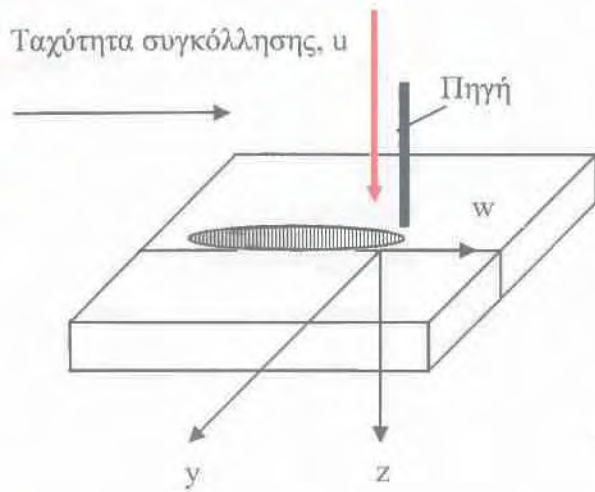
Κατανομή T,x

Ταχύτητα συγκόλλησης, u

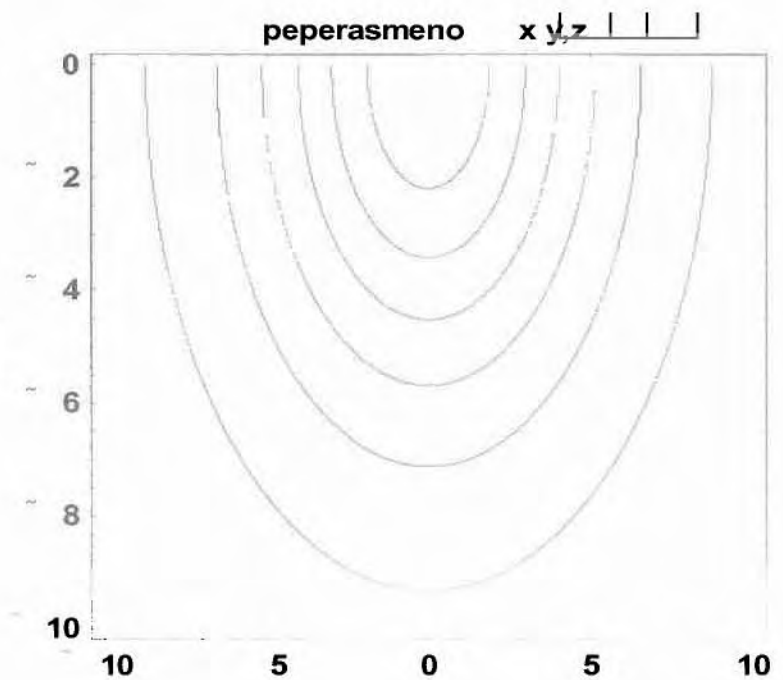
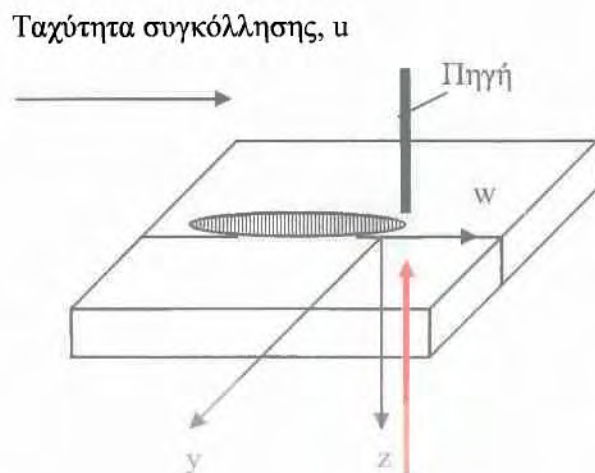


(σημείωση: το κόκκινο βελάκι μας δείχνει την πλευρά που βλέπει ο παρατηρητής)

Κατανομή x,y



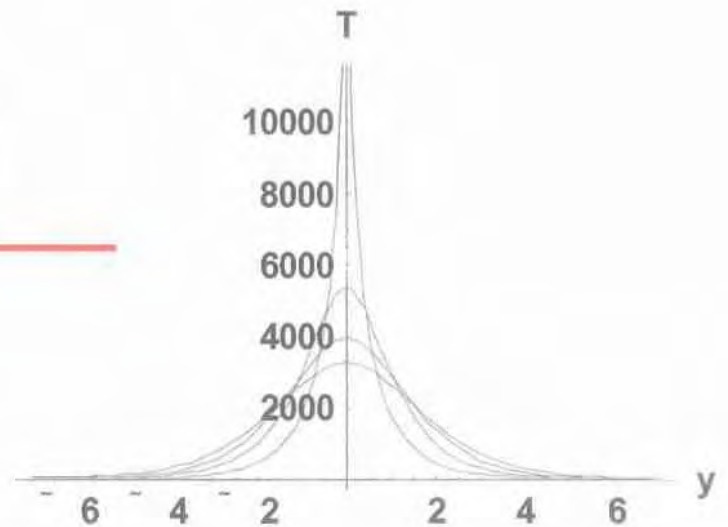
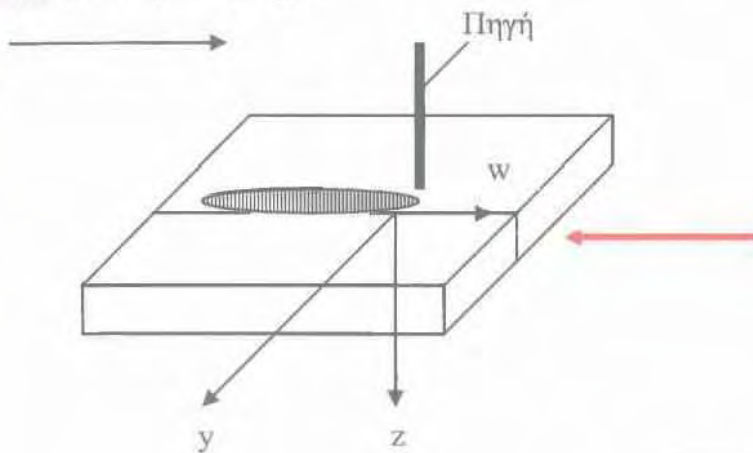
Κατανομή v,z



3.5.3 Λεπτό Έλασμα

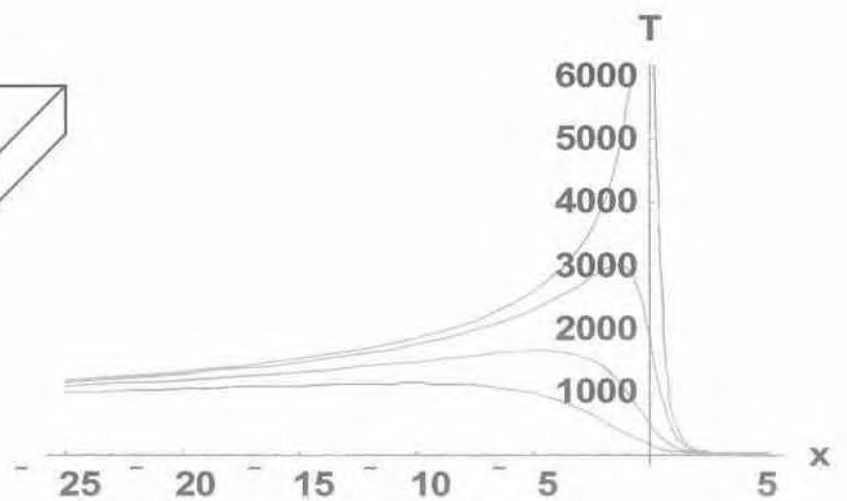
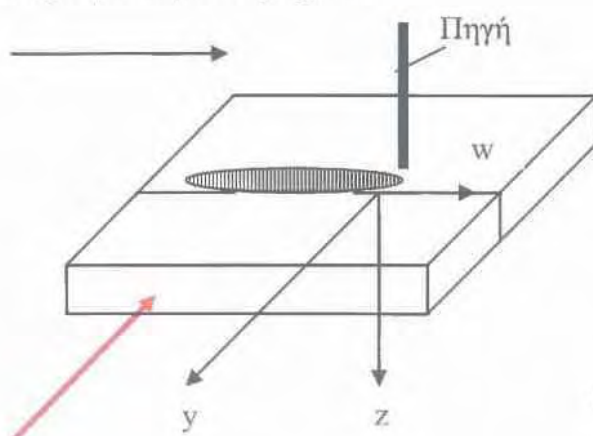
Κατανομή T,y

Ταχύτητα συγκόλλησης, u



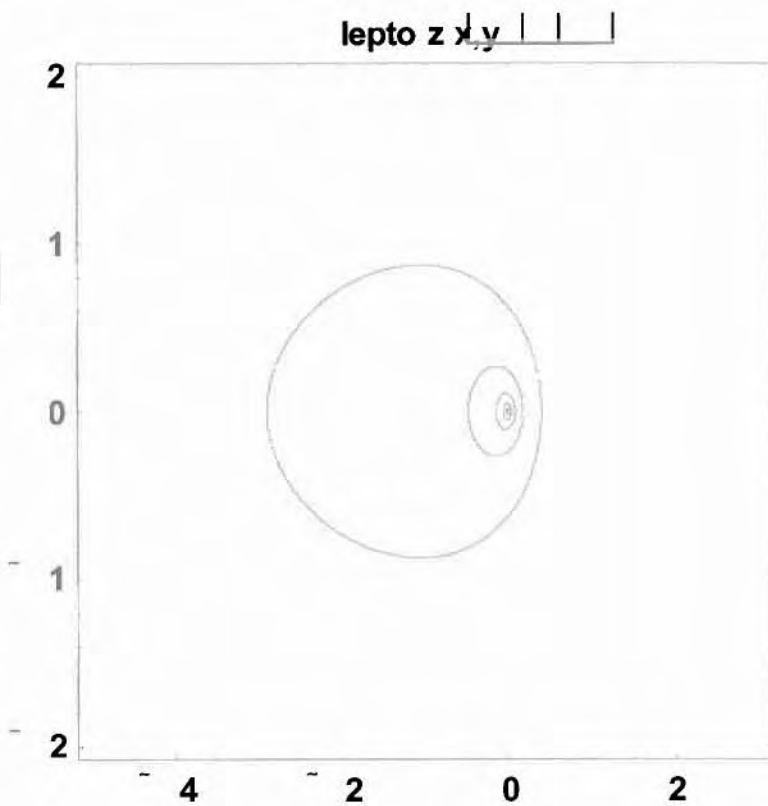
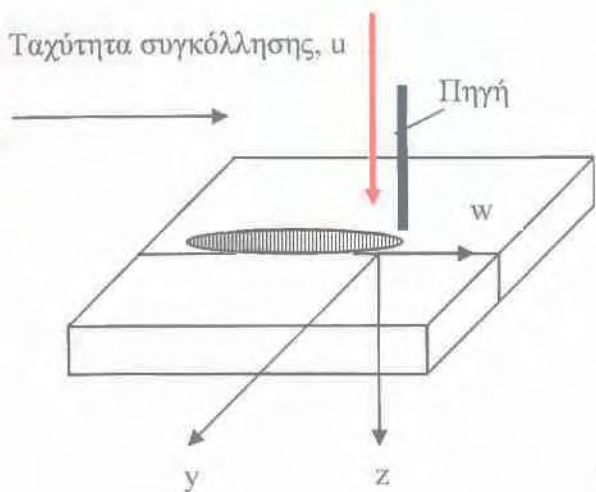
Κατανομή T,x

Ταχύτητα συγκόλλησης, u

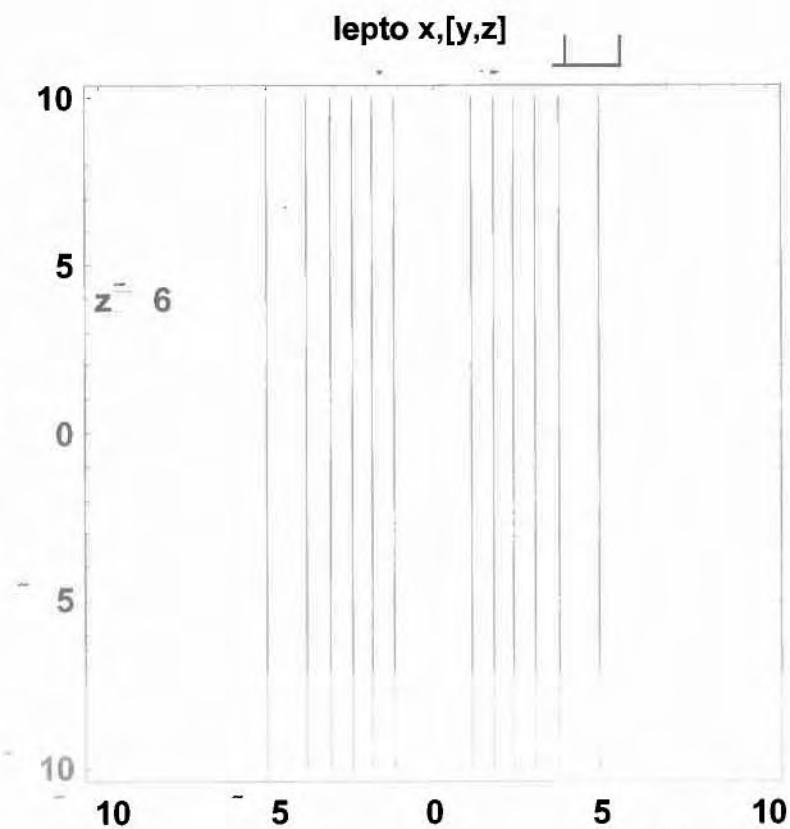
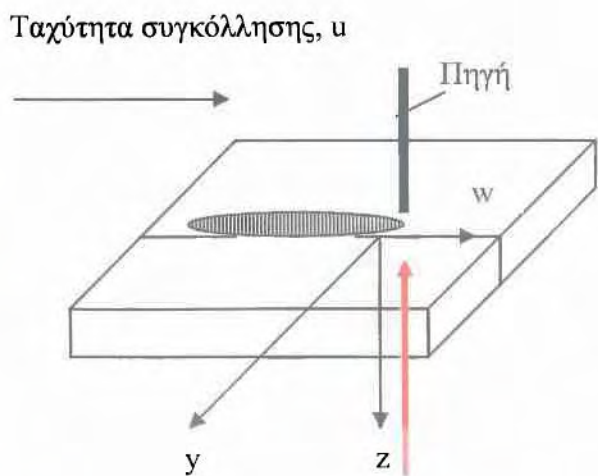


(σημείωση: το κόκκινο βελάκι μας δείχνει την πλευρά που βλέπει ο παρατηρητής)

Κατανομή x,y



Κατανομή y,z



3.6 ΦΥΣΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ (k, ρ, c)

Θα εξετάσουμε τώρα μια συγκόλληση τήξης υπό σταθερή ταχύτητα αλλά με διαφορετικά υλικά. Όπως και στην παράγραφο 5.2.1 θα χρησιμοποιήσω τα :

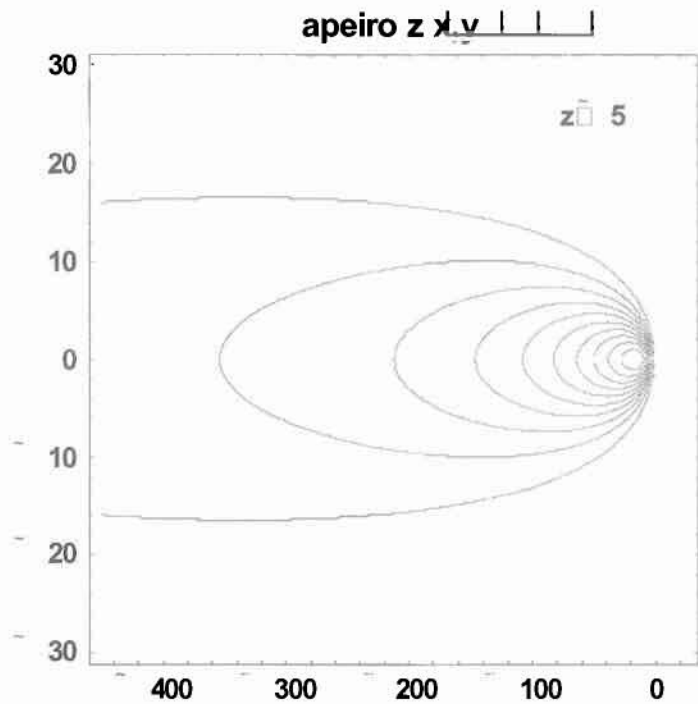
Αλουμίνιο (1060) : $k=2.34 \text{ w / cm} \cdot ^\circ\text{c}$, $\rho=2.705 \text{ g / cm}^3$, $c=0.9 \text{ J / kg}\cdot\text{K}$

Χάλυβας (1117) : $k=0.519 \text{ w / cm} \cdot ^\circ\text{c}$, $\rho=7.8 \text{ g / cm}^3$, $c=0.481 \text{ J / kg}\cdot\text{K}$

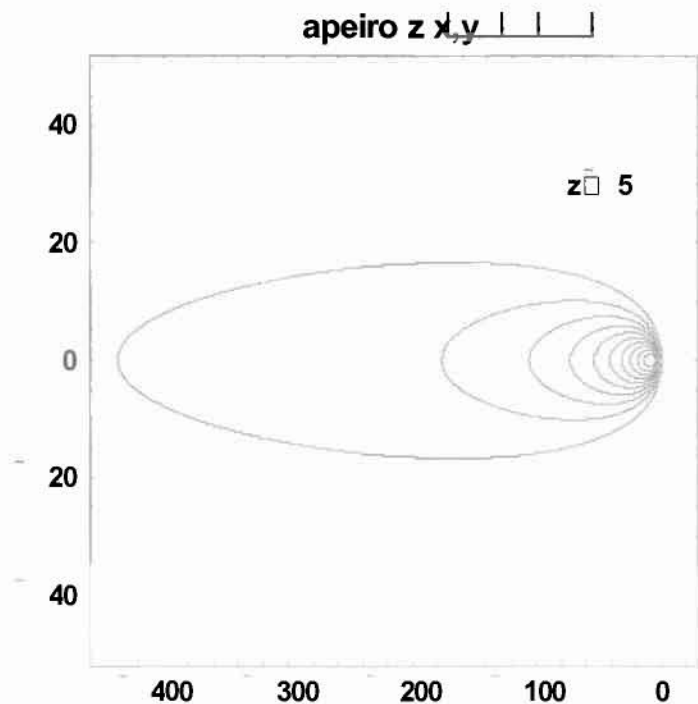
Ανοξείδωτος Χάλυβας(S20100) : $k=0.162 \text{ w / cm} \cdot ^\circ\text{c}$, $\rho=8 \text{ g / cm}^3$, $c=0.5 \text{ J / kg}\cdot\text{K}$ [5]

Για $u=0.3 \text{ cm/s}$

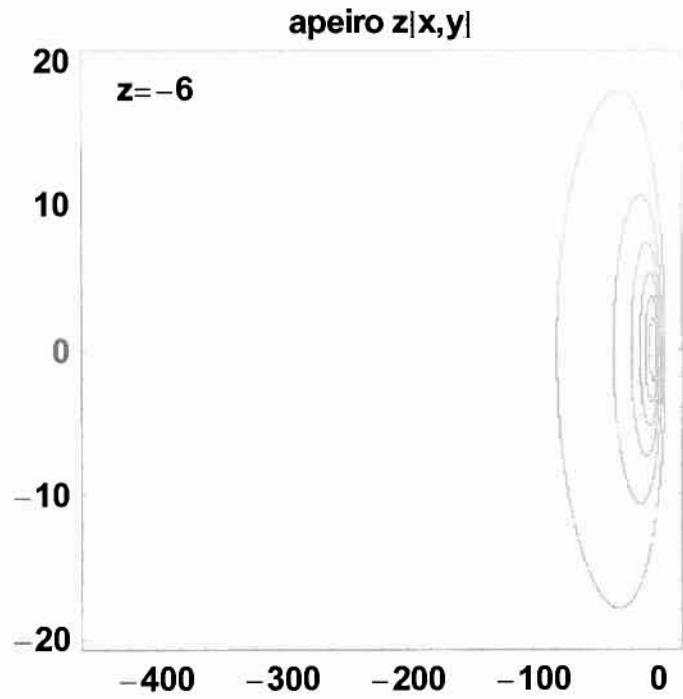
Ανοξείδωτος
Χάλυβας(S20100)



Χάλυβας (1117)

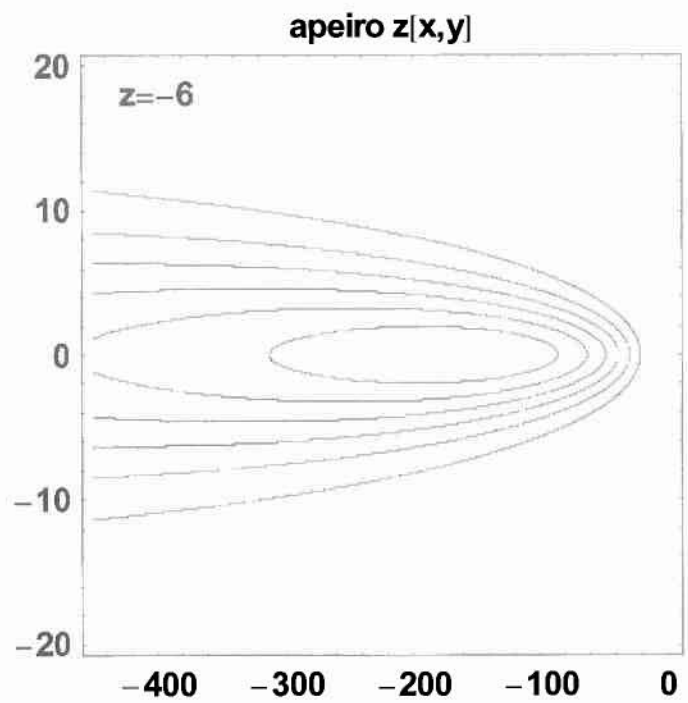


Αλουμίνιο (1060):

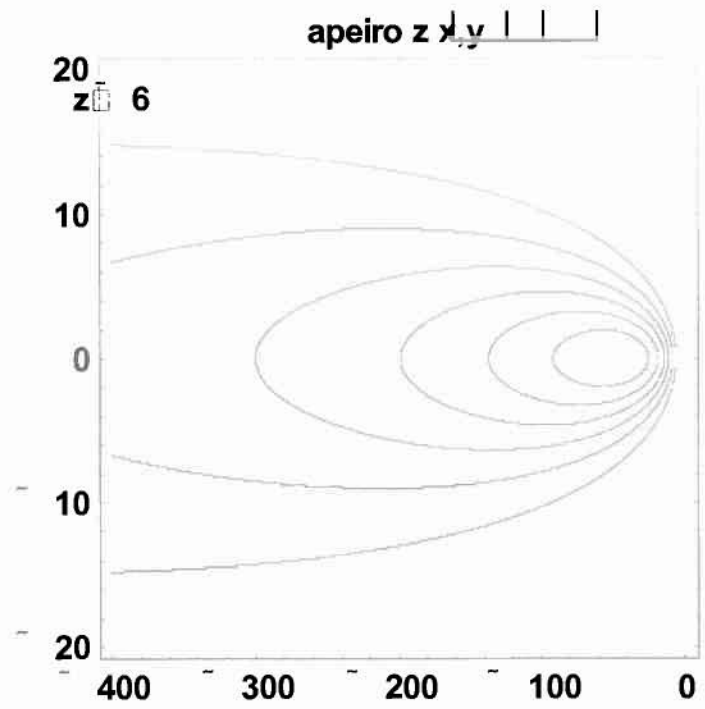


Για $u=1$ cm/s

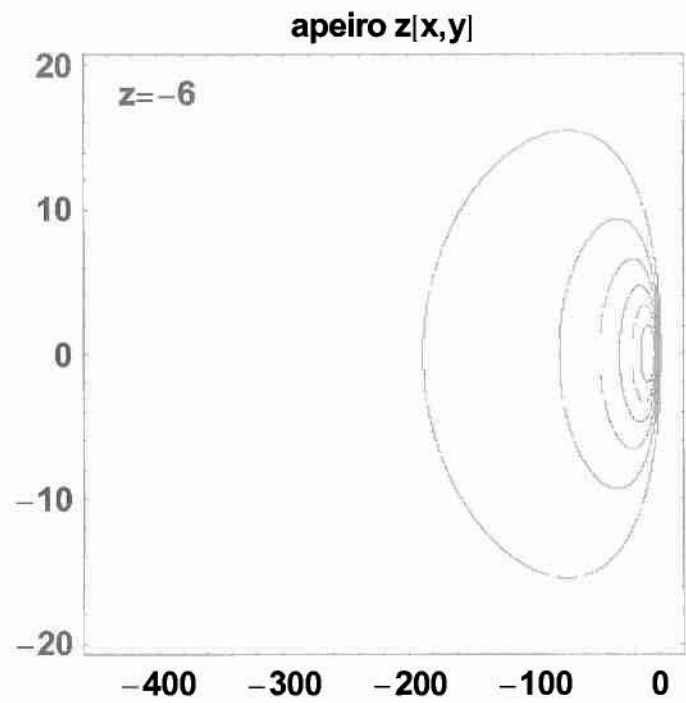
Ανοξείδωτος
Χάλυβας(S20100)



Χάλυβας (1117)



Αλουμίνιο (1060):



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

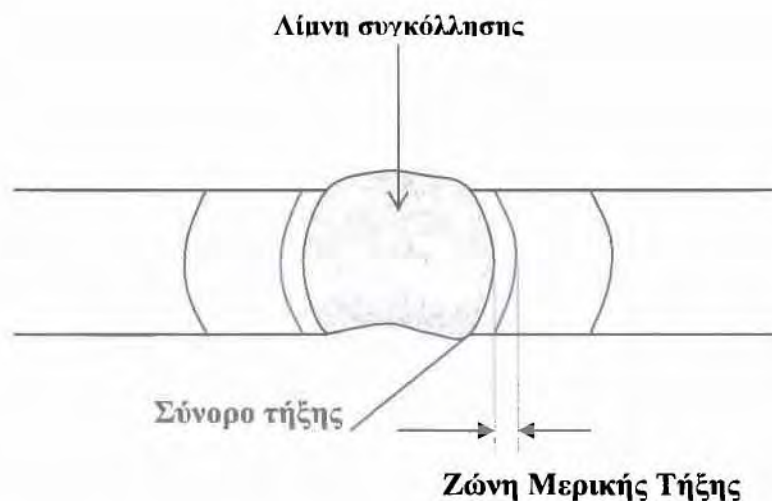
ΖΩΝΗ ΜΕΡΙΚΗΣ ΤΗΞΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είδαμε και στην παράγραφο 2.4 μετά το πέρας της συγκόλλησης εμφανίζονται τρεις βασικές ζώνες στο υλικό μας, το Βασικό μέταλλο (BM), η Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) και η Λίμνη συγκόλλησης (ΛΜ).

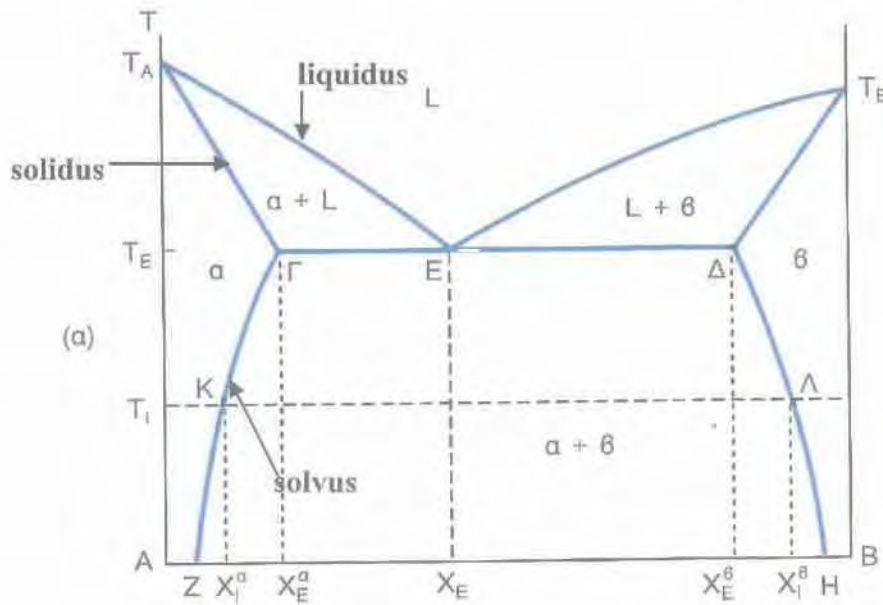
Και οι τρεις τους τις περισσότερες φορές είναι ευδιάκριτες και με 'γυμνό' μάτι. Ανάμεσα στην Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) και τη λίμνη Συγκόλλησης (ΛΜ) όμως εμφανίζεται και μια άλλη πολύ μικρή ζώνη η Ζώνη Μερικής τήξης (ZMT).

Έχει παρατηρηθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις αστοχιών σε συγκολλημένα υλικά η αιτία εντοπίζεται στην ZMT. Σκοπός μας λοιπόν είναι σε αυτό το κεφάλαιο να μελετήσουμε το πλάτος της ZMT και της ΘΕΖ με την χρήση των εξισώσεων *Rosenthal* για τα υλικά Al-4Cu (που ανήκει στην σειρά 2xxx) και Al-4Mg (που ανήκει στην σειρά 5xxx) που χρησιμοποιούνται περισσότερο στις μέρες μας.



Σχ.4.1. Απεικόνιση της ζώνης μερικής τήξης.

Η Ζώνη Μερικής Τήξης βρίσκεται κοντά στο σύνορο τήξης όπως φαίνεται και στο Σχ 4.1, καταλαμβάνει πολύ μικρή επιφάνεια και δημιουργείται στα σημεία όπου η θερμοκρασία κατά την διάρκεια της συγκόλλησης υπερβαίνει την θερμοκρασία στερεοποίησης (Solidus temperature) αλλά δεν ξεπερνά την θερμοκρασία υγροποίησης (Liquidus temperature).



Σχ.4.2 Διμερές διάγραμμα φάσεων των συστατικών A, B

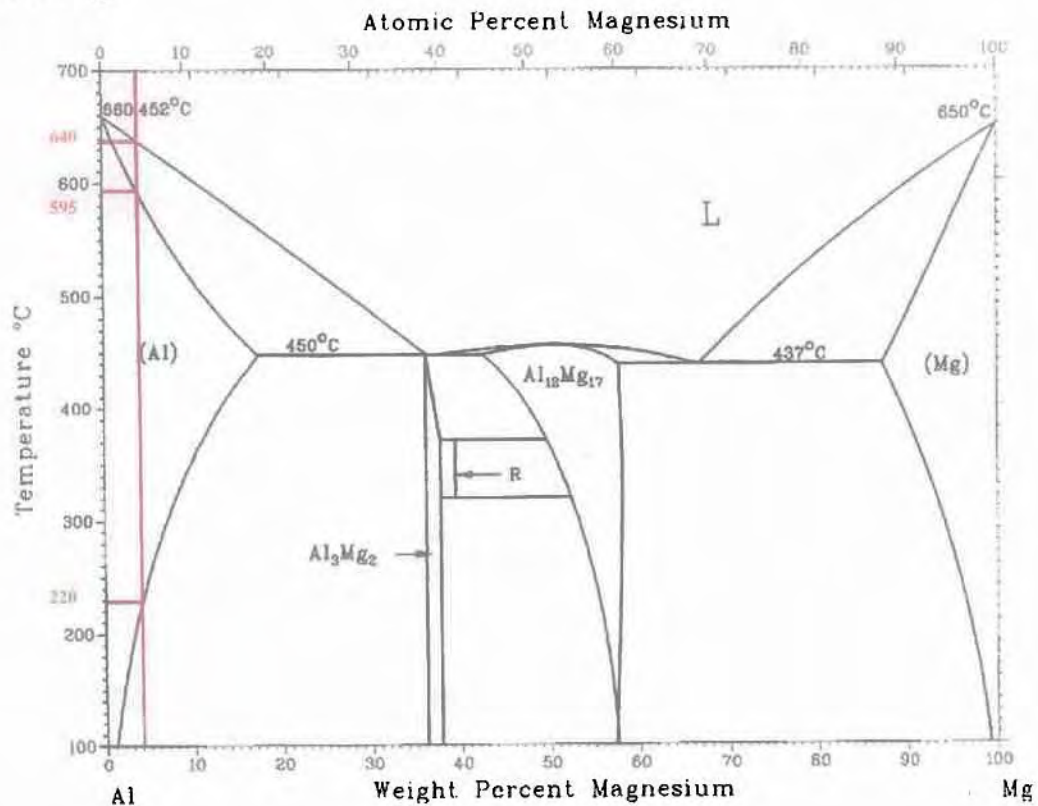
[2]

4.2 ΠΛΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΜΕΡΙΚΗΣ ΤΗΞΗΣ

Για να βρούμε το πλάτος της ζώνης μερικής τήξης εργαζόμαστε ως εξής :

Στο Σχ.4.3 έχουμε το διάγραμμα φάσεων του Al-Mg ,τραβάμε μια γραμμή κάθετη στο σημείο με σύσταση 4% σε Mg και ελέγχουμε σε ποια θερμοκρασία τέμνει την γραμμή υγροποίησης και την γραμμή στερεοποίησης.

Al-Mg



Σχ 4.3. Διάγραμμα φάσεων Al-Mg

Βρίσκουμε την θερμοκρασία Solidus $T_2=595^\circ\text{C}$.

Την θερμοκρασία Liquidus $T_1=640^\circ\text{C}$.

Υπάρχει και ένα άλλο σημείο με $T_3=220^\circ\text{C}$ το οποίο είναι το σημείο εκείνο που η κάθετη γραμμή τέμνει την γραμμή στερεάς διαλυτότητας (Solvus).

Όπως είδαμε και στην παράγραφο 2.4.2 τα σημεία που αποκτούν θερμοκρασίες άνω της T_3 και κάτω της T_2 μας ορίζουν το πλάτος της ΘΕΖ.

Με την χρήση της [εξ.9] και δεδομένα

$T_0=25$ ($^{\circ}\text{C}$)

$k=1,27$ ($\text{W} / \text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

$\rho=2,66$ (g / cm^3)

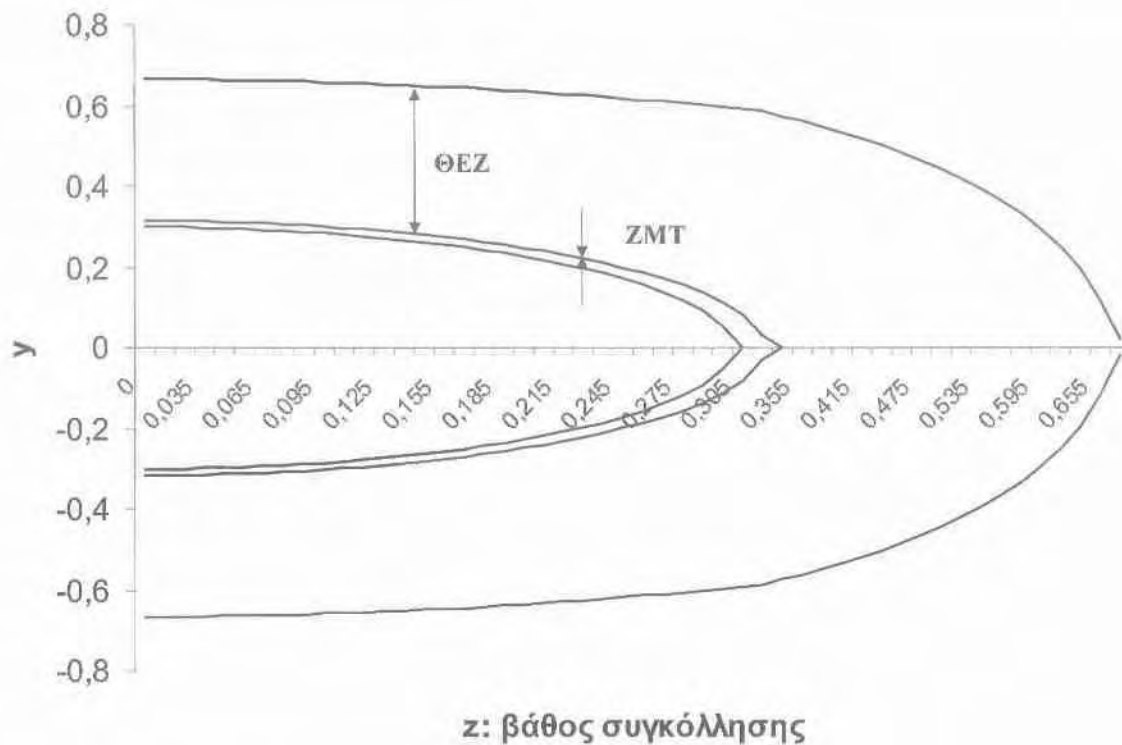
$c=0,900$ ($\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$)

$u=1$ (cm / s)

$n=0.8$

[5]

βρίσκουμε ποια είναι τα αντίστοιχα σημεία που αποκτούν θερμοκρασίες με αυτές τις τιμές.

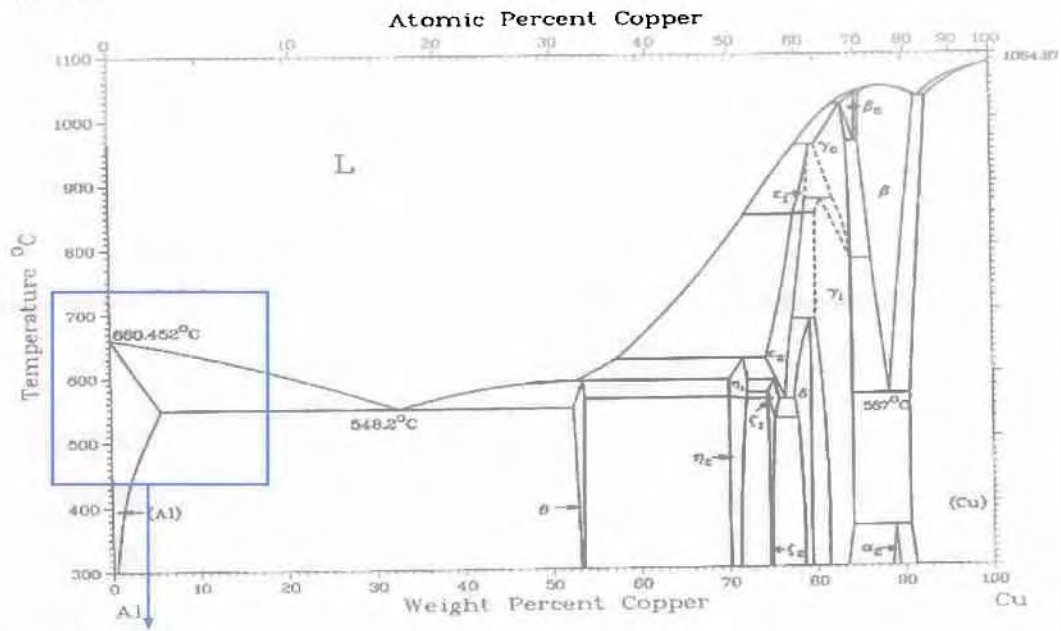


Σχ.4.4 Διάγραμμα των ζωνών συγκόλλησης.

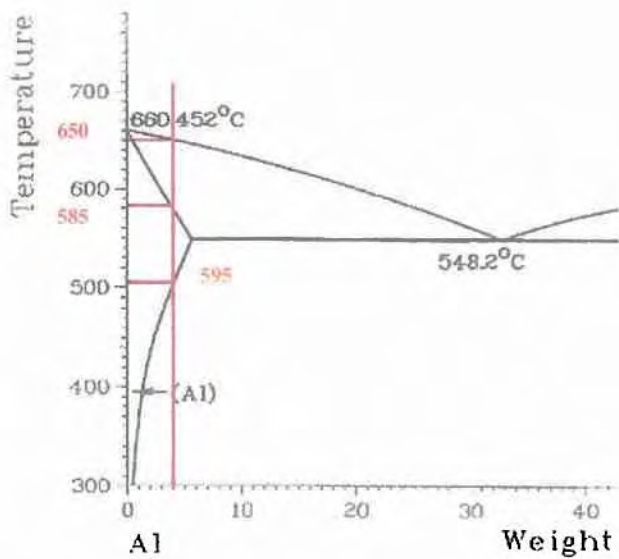
Ομοίως εργαζόμαστε και για το υλικό Al-4Cu για το οποίο βρίσκουμε

$T_1=650^{\circ}\text{C}$, $T_2=585^{\circ}\text{C}$ και $T_3=505^{\circ}\text{C}$ από Σχ.4 .5, Σχ.4.6

Al-Cu



Σχ.4.5. Διάγραμμα φάσεων Al-Cu



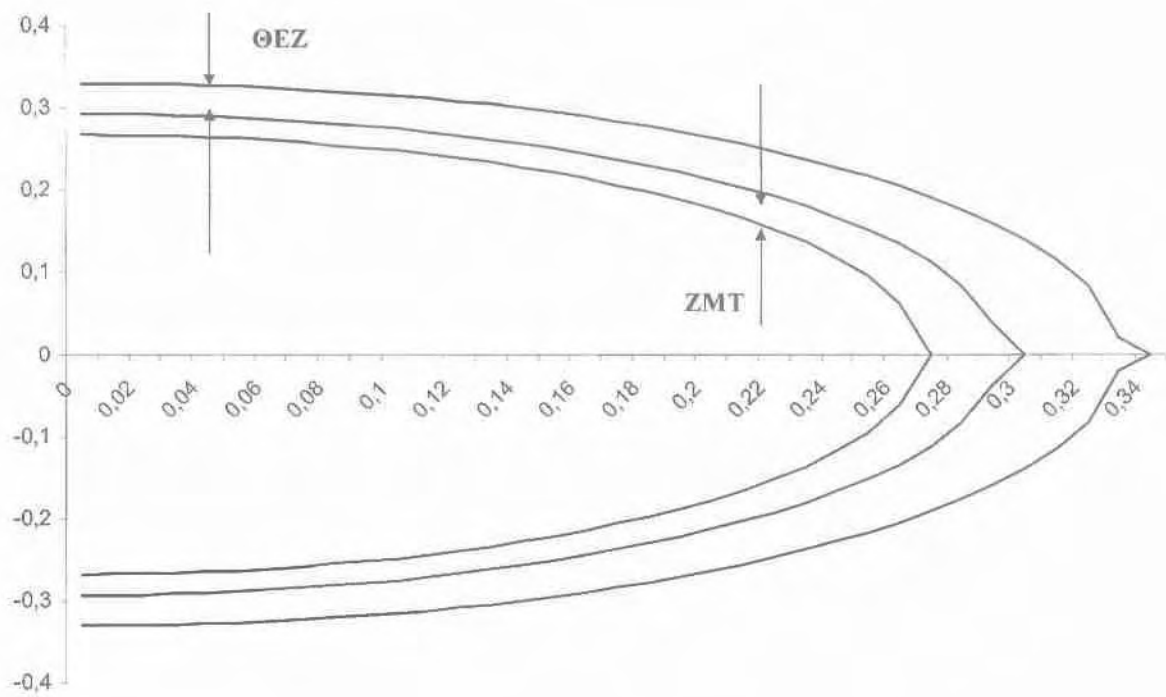
Σχ.4.6 Μεγέθυνση της πάνω αριστερά γωνίας του Σχ.4.5. για την εύρεση των T_1 , T_2 και T_3

Με δεδομένα

$T_0=25$ ($^{\circ}\text{C}$)
 $k=1,48$ ($\text{W} / \text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 $\rho=2,8$ (g / cm^3)
 $c=0,871$ ($\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$)
 $u=1$ (cm / s)
 $n=0.8$

[5]

καταλήγουμε στο Σχ.4.7



Σχ.4.7 Διάγραμμα των ζωνών συγκόλλησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια είδαμε την γραφική απεικόνιση της θερμοκρασιακής κατανομής σε διάφορες διευθύνσεις και υπολογίσαμε το πλάτος των ζωνών συγκόλλησης. Τι γίνεται όμως εάν ‘πειράξουμε’ κάποια από τις βασικότερες παραμέτρους όπως εάν μεταβάλλουμε την ταχύτητα; εάν αλλάξουμε το πάχος του ελάσματος; ή την θερμική ισχύ της μηχανής συγκόλλησης;

Σκοπός λοιπόν αυτού του κεφαλαίου είναι να μελετήσουμε τις μεταβολές που επιφέρουν οι αλλαγές σε διάφορες παραμέτρους που υπάρχουν στις σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση.

5.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑ u (cm/s)

Η συγκόλληση τήξης πραγματοποιείται με κινούμενη πηγή θερμότητας. Η ταχύτητα της πηγής είναι και η ταχύτητα της συγκόλλησης (u) και η οποία επιδρά σημαντικά στο θερμοκρασιακό πεδίο που αναπτύσσεται.

5.2.1 Αλουμίνιο – Χάλυβας – Ανοξειδωτος Χάλυβας

Με την χρήση της (εξ.8) και δεδομένα

Αλουμίνιο (1060) : $k= 2.34 \text{ w / cm} \cdot ^\circ\text{c}$, $\rho= 2.705 \text{ g / cm}^3$, $c= 0.9 \text{ J / kg}\cdot\text{K}$

Χάλυβας (1117) : $k= 0.519 \text{ w / cm} \cdot ^\circ\text{c}$, $\rho= 7.8 \text{ g / cm}^3$, $c= 0.481 \text{ J / kg}\cdot\text{K}$

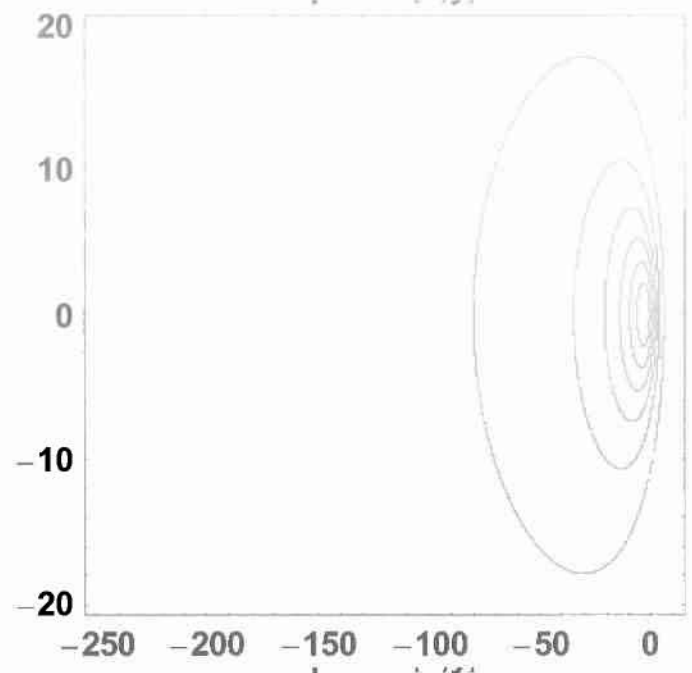
Ανοξειδωτος Χάλυβας(S20100) : $k= 0.162 \text{ w / cm} \cdot ^\circ\text{c}$, $\rho= 8 \text{ g / cm}^3$, $c= 0.5 \text{ J / kg}\cdot\text{K}$

[5]

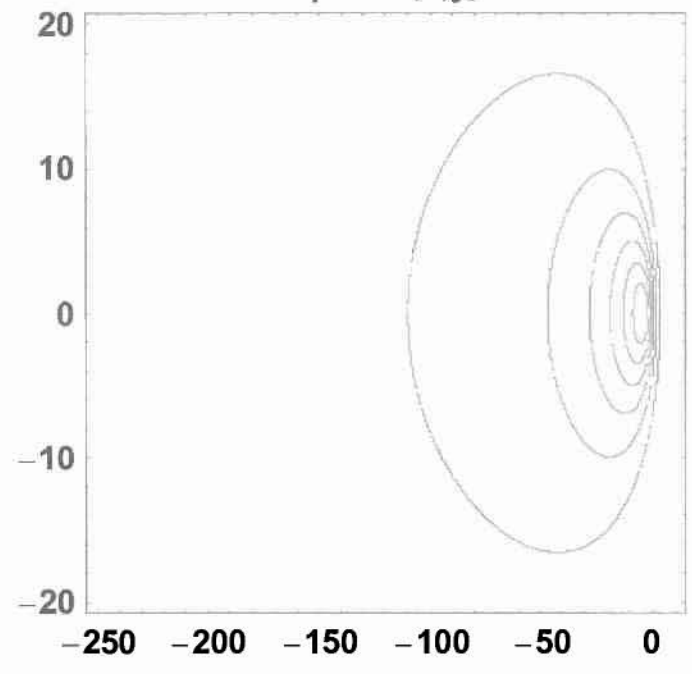
Θα μεταβάλλουμε την ταχύτητα από $u= 0.3 \text{ cm / s}$ σε $u= 0.5 \text{ cm / s}$ και $u= 1 \text{ cm / s}$

Στις συγκολλήσεις αλουμινίου πρέπει από τον συγκολλητή να έχουμε μια εκτέλεση γρήγορη και με μεγάλη ισχύ. Και αυτό γιατί αντίθετα με τους χάλυβες το αλουμίνιο εξαιτίας της υψηλής του θερμικής αγωγιμότητας απαιτεί μεγάλη θερμική ισχύ σε ένταση-τάση και υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης. Εάν η ταχύτητα συγκόλλησης είναι πολύ μικρή έχουμε κίνδυνο υπερθέρμανσης και “καταστροφής” ποιοτικώς του τελικού προϊόντος.

Σχ.5.1.a. κατανομή x,y αλουμινίου 1060 για $u= 0.3 \text{ cm/s}$

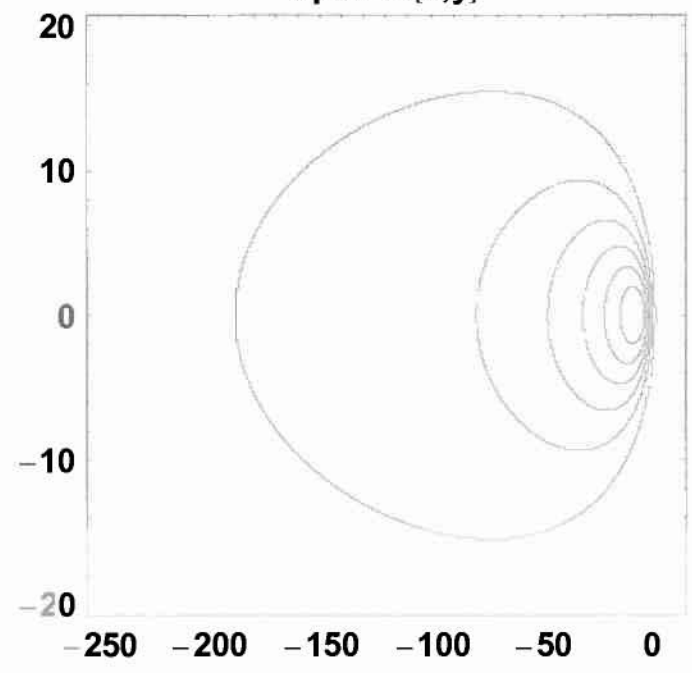


Σχ.5.1.b. κατανομή x,y αλουμινίου 1060 για $u= 0.5 \text{ cm/s}$

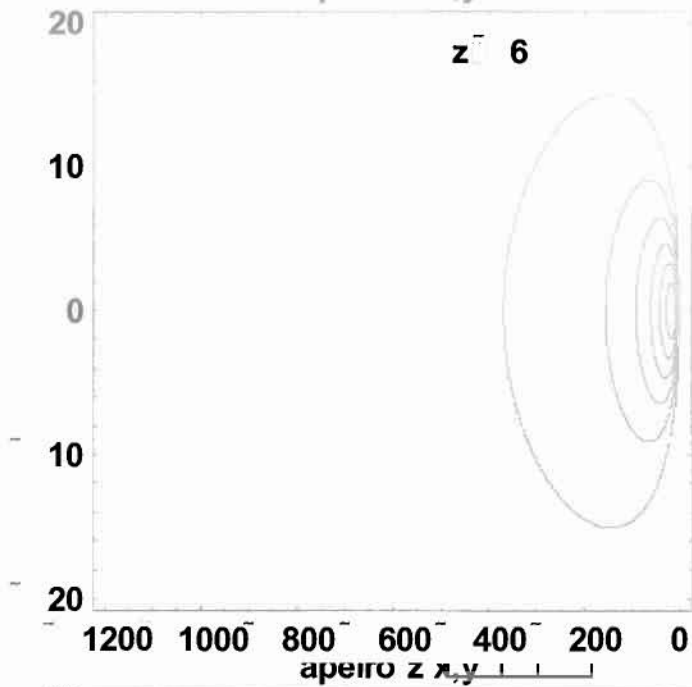


apeiro z[x,y]

Σχ.5.1.c. κατανομή x,y αλουμινίου 1060 για $u= 1 \text{ cm/s}$

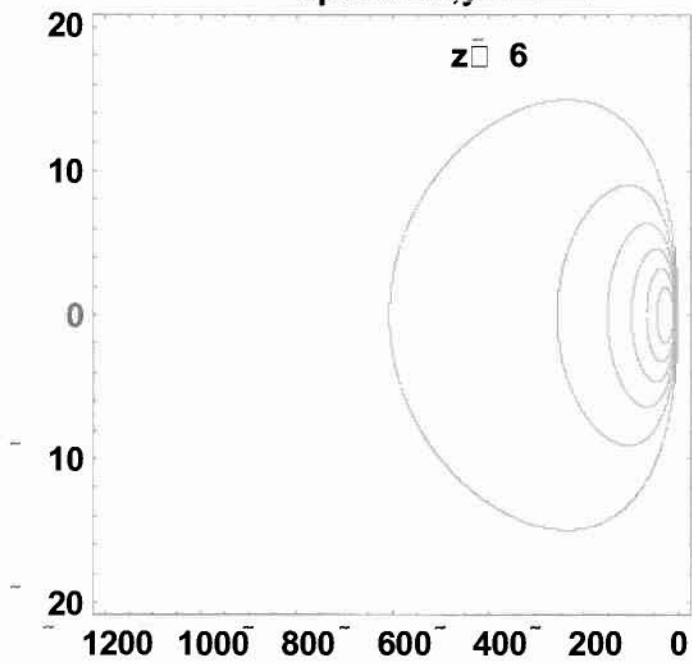


Σχ.5.2.a Κατανομή x,y χάλυβα 1117 για $u=0.3$ cm/s



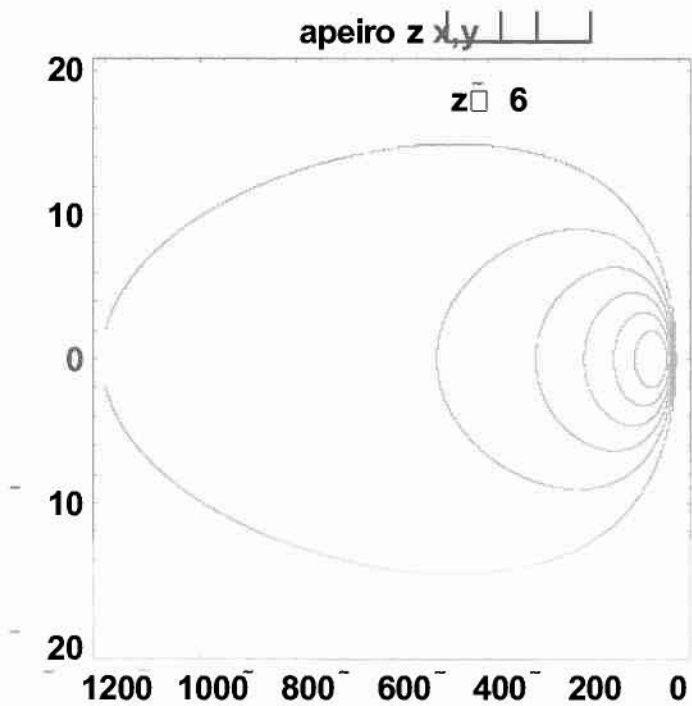
X
A

Σχ.5.2.b Κατανομή x,y χάλυβα 1117 για $u=0.5$ cm/s



Λ
Y

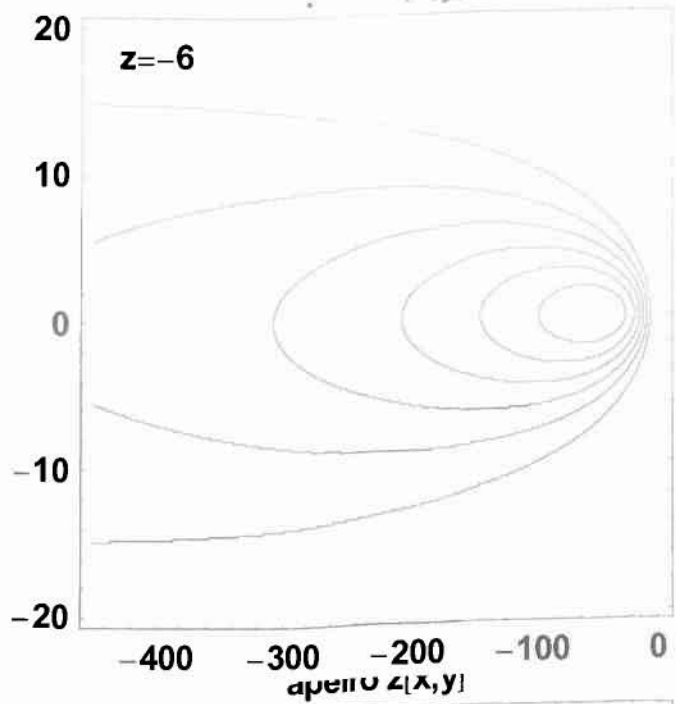
Σχ.5.2.c Κατανομή x,y χάλυβα 1117 για $u=1$ cm/s



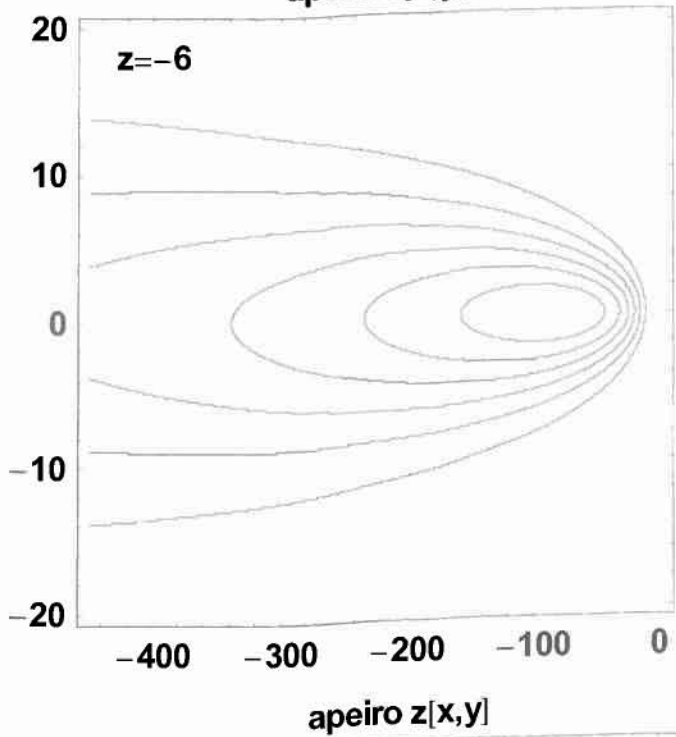
B
A

Σ
1
1
1
7

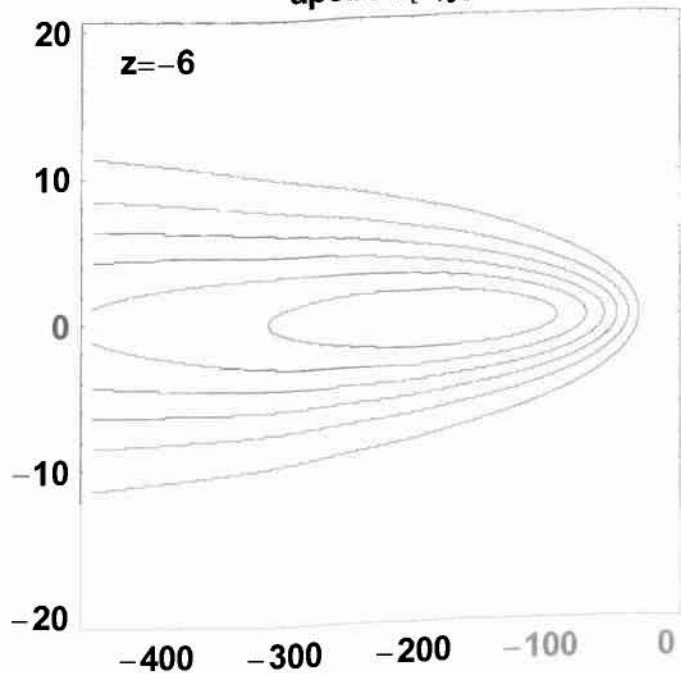
Σχ.5.3.a Κατανομή x,y ανοξειδωτου χάλυβα S20100 για $u=0.3$ cm/s



Σχ.5.3.b Κατανομή x,y ανοξειδωτου χάλυβα S20100 για $u=0.5$ cm/s

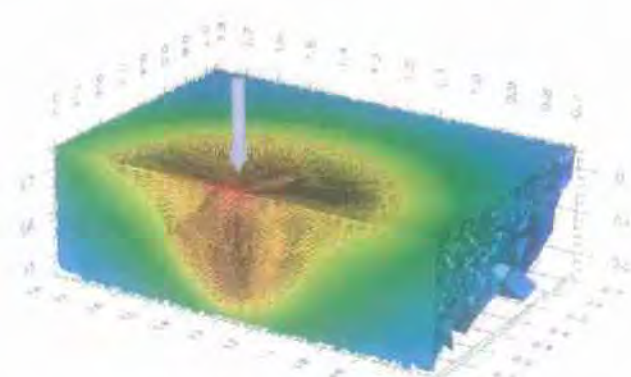


Σχ.5.3.c Κατανομή x,y ανοξειδωτου χάλυβα S20100 για $u=1$ cm/s

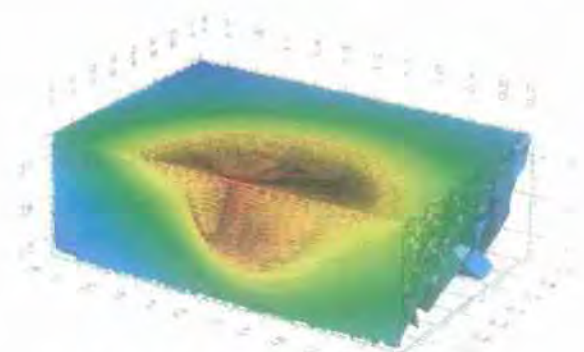


5.2.2 Λίμνη συγκόλλησης

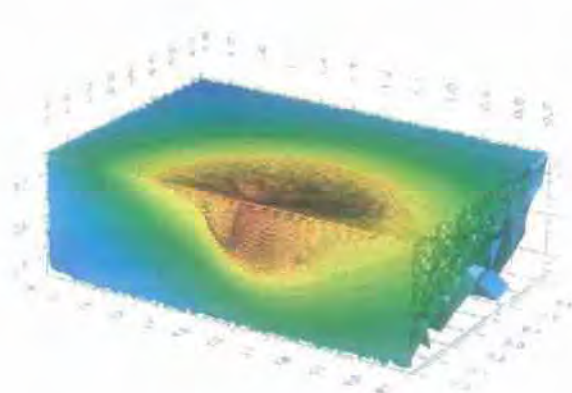
Για μικρές ταχύτητες η ΛΣ είναι σχεδόν κυκλική. Η μεταβολή της ταχύτητας επιφέρει μεταβολές στην γεωμετρία της ΛΣ καθώς και στην μορφολογία της στερεοποίησης. Όπως παρατηρούμε και απο το Σχ. με την αύξηση της ταχύτητας η ΛΣ αποκτά σχήμα σταγόνας και το βάθος της μικραίνει.



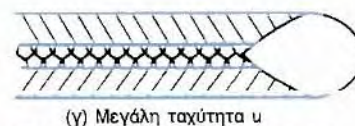
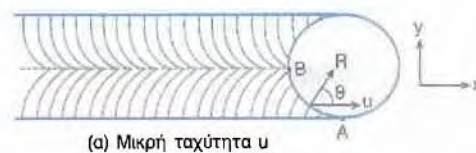
Σχ.5.4.a. Μικρή ταχύτητα



Σχ.5.4.b. Μεγάλη ταχύτητα



Σχ.5.4.c. Μεγαλύτερη ταχύτητα



Σχ.5.5 Μεταβολή του σχήματος της λίμνης συγκόλλησης

5.2.3 Πλάτος Θερμοεπηρεαζόμενης Ζώνης (ΘΕΖ) Ζώνης Μερικής Τήξης (ZMT)

Στο κεφάλαιο 4.2 είδαμε τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζουμε το πλάτος ΘΕΖ και της ZMT.

Για το Al-4Cu με φυσικές σταθερές :

$$k = 1,48 \quad (\text{w} / \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\rho = 2,8 \quad (\text{g} / \text{cm}^3)$$

$$c = 0,871 \quad (\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}) \quad [5]$$

έχουμε βρει $T_1 = 650^\circ\text{C}$, $T_2 = 585^\circ\text{C}$ και $T_3 = 505^\circ\text{C}$ και διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές και ίσες με

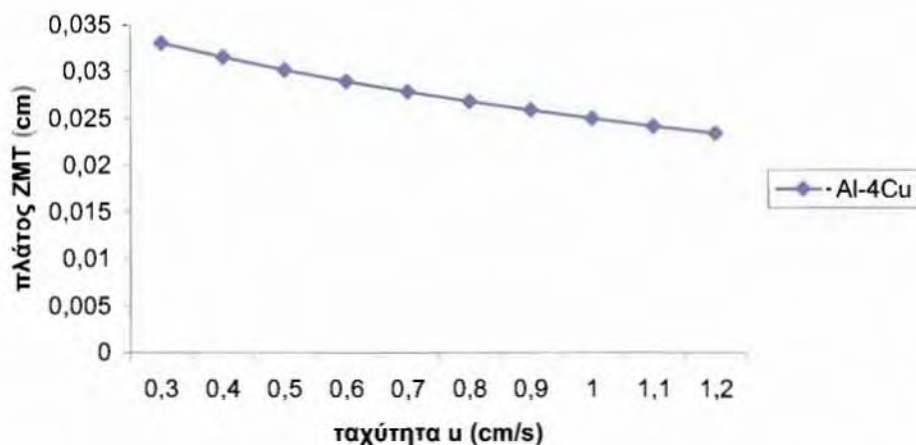
$$T_0 = 25 \quad (^\circ\text{C})$$

$$n = 0,8$$

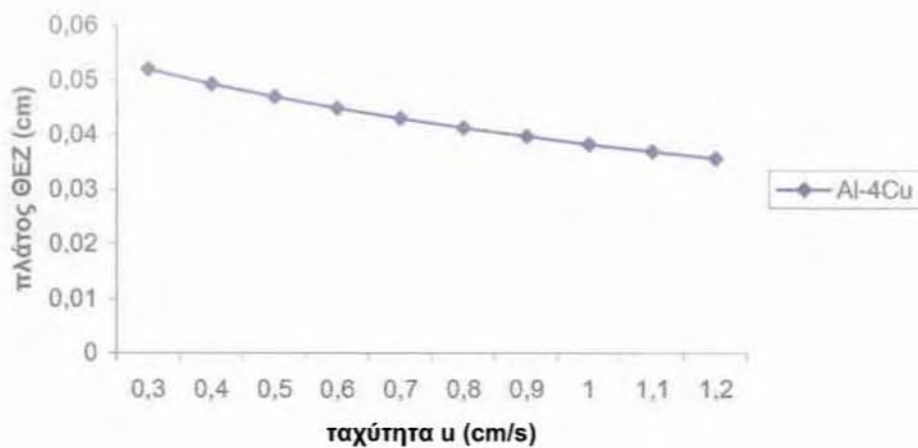
$$V = 22 \quad (\text{v})$$

$$I = 110 \quad (\text{A})$$

ανατρέχουμε στο πρόγραμμα του Mathematica βρίσκουμε τις τιμές από την [εξ.8] για κάθε ταχύτητα και καταλήγουμε στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχ.5.6. Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm)– ταχύτητας u (cm/s) για το Al-4Cu



Σχ.5.7. Διάγραμμα πλάτους ΘEZ (cm)– ταχύτητας u (cm/s) για το Al-4Cu

Ομοίως εργαζόμαστε και για το υλικό Al-4Mg με φυσικές σταθερές:

$$k = 1,27 \quad (\text{w} / \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\rho = 2,66 \quad (\text{g} / \text{cm}^3)$$

$$c = 0,900 \quad (\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K})$$

[5]

και θερμοκρασίες (βλ.4.2) $T_1=640^\circ\text{C}$, $T_2=595^\circ\text{C}$ και $T_3=220^\circ\text{C}$

διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές και ίσες με

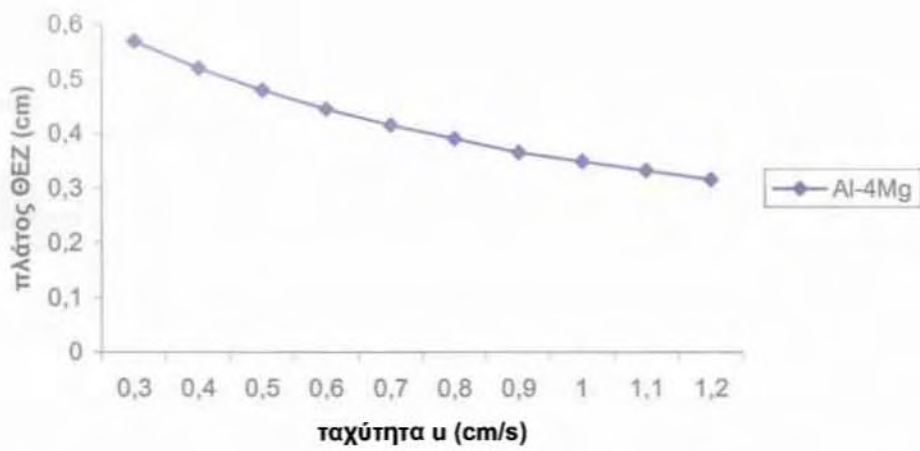
$$T_0 = 25 \quad (^\circ\text{C})$$

$$n = 0.8$$

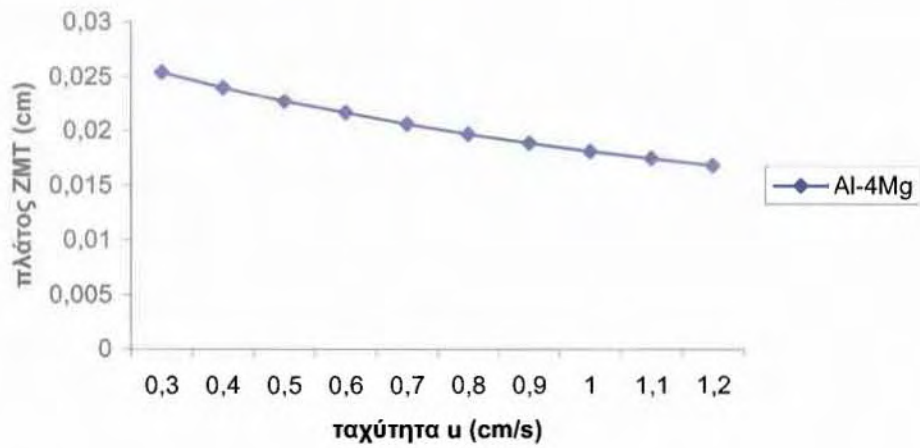
$$V = 22 \quad (\text{v})$$

$$I = 110 \quad (\text{A})$$

Καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα



Σχ.5.8. Διάγραμμα πλάτους ΘEZ (cm)– ταχύτητας u (cm/s) για το Al-4Mg



Σχ.5.9. Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm)– ταχύτητας u (cm/s) για το Al-4Mg

5.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ H (cm)

Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 3 ο *Rosenthal* διακρίνει τρεις περιπτώσεις λύσεων. Εμείς θα ασχοληθούμε με την περίπτωση του ελάσματος πεπερασμένου πάχους. Θα χρησιμοποιήσουμε την [εξ.9] και διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές και ίσες με

$$T_0 = 25 \quad (^\circ\text{C})$$

$$n = 0.8$$

$$V = 22 \quad (\text{v})$$

$$I = 110 \quad (\text{A})$$

$$u = 1 \quad (\text{cm/s})$$

θα μεταβάλλουμε το πάχος H

- σε έλασμα Al-4Cu με φυσικές σταθερές

$$k = 1,48 \quad (\text{w} / \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\rho = 2,8 \quad (\text{g} / \text{cm}^3)$$

$$c = 0,871 \quad (\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}) \quad [5]$$

- και σε έλασμα Al-4Mg με φυσικές σταθερές

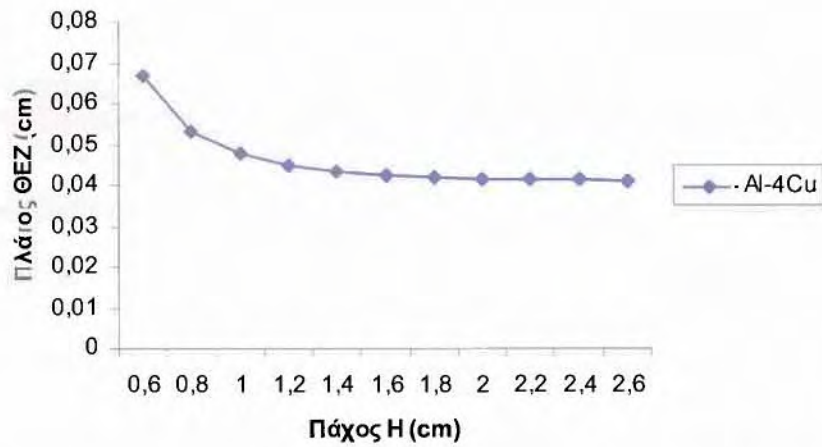
$$k = 1,27 \quad (\text{w} / \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\rho = 2,66 \quad (\text{g} / \text{cm}^3)$$

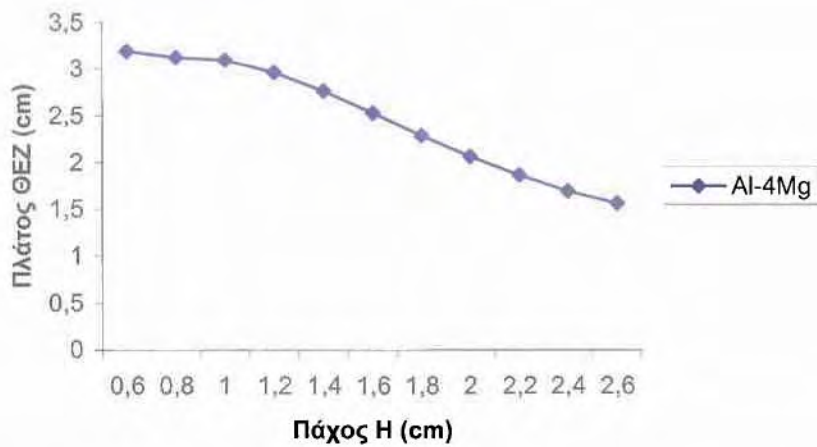
$$c = 0,900 \quad (\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}) \quad [5]$$

και θα καταλήξουμε στα αποτελέσματα που ακολουθούν.

5.3.1 Πλάτος Θερμοεπηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ)

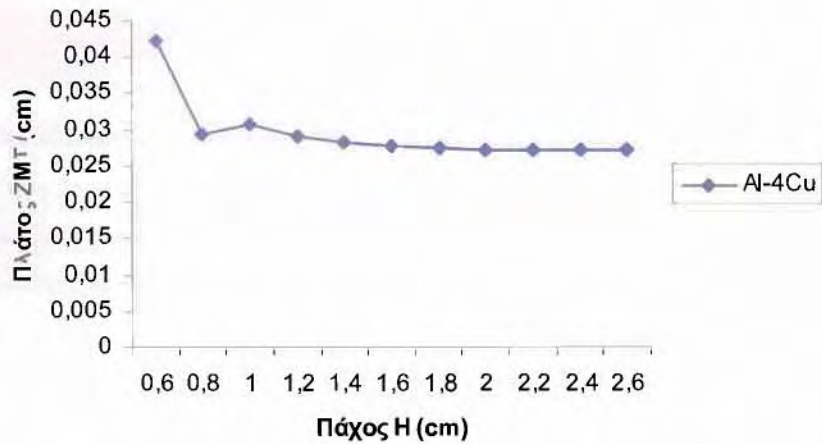


Σχ.5.10 Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm) – πάχους H (cm) για το Al- 4Cu

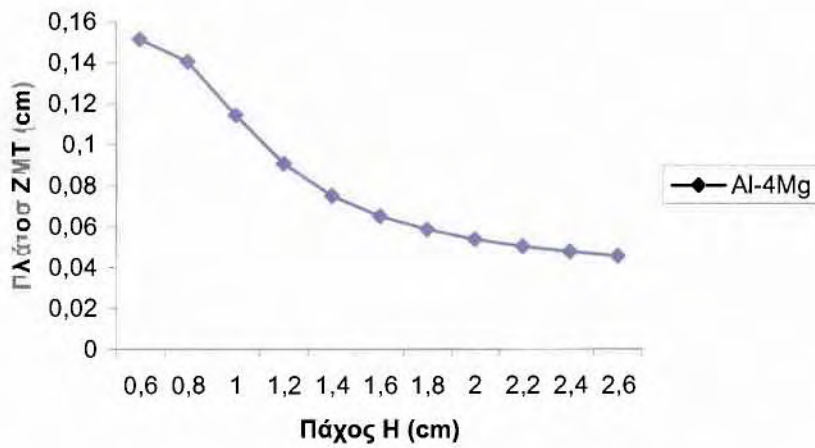


Σχ.5.11 Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm) – πάχους H (cm) για το Al-4Mg

5.3.2. Πλάτος Ζώνης Μερικής Τήξης (ZMT)



Σχ.5.12 Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm) – πάχους H (cm) για το Al-4Cu



Σχ.5.13 Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm) – πάχους H (cm) για το Al-4Mg

5.4 Παράμετρος Θερμική Ισχύς (I , V)

Είδαμε στο κεφάλαιο 2 ότι η θερμική ισχύς μια συγκόλλησης τόξου υπολογίζεται από την

$$Q = V \cdot I \cdot n \quad [\text{εξ.1}]$$

Θα χρησιμοποιήσουμε την [εξ.8] και διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές και ίσες με:

$$T_0 = 25 \quad (^\circ\text{C})$$

$$n = 0.8$$

$$u = 1 \quad (\text{cm/s})$$

θα μεταβάλλουμε τα I (A) και V (v)

- σε έλασμα Al-4Cu με φυσικές σταθερές

$$k = 1,48 \quad (\text{w} / \text{cm} \cdot ^\circ\text{c})$$

$$p = 2,8 \quad (\text{g} / \text{cm}^3)$$

$$c = 0,871 \quad (\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}) \quad [5]$$

- και σε έλασμα Al-4Mg με φυσικές σταθερές

$$k = 1,27 \quad (\text{w} / \text{cm} \cdot ^\circ\text{c})$$

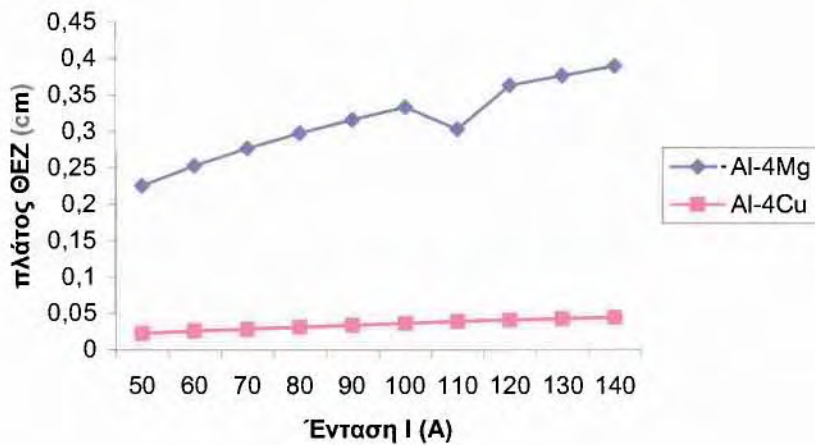
$$p = 2,66 \quad (\text{g} / \text{cm}^3)$$

$$c = 0,900 \quad (\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}) \quad [5]$$

και θα καταλήξουμε στα αποτελέσματα που ακολουθούν.

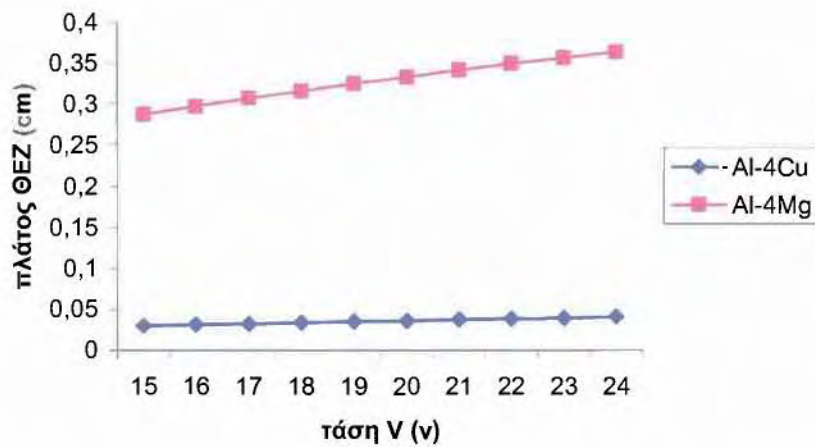
5.4.1 Πλάτος Θερμοεπιρρασμένης Ζώνης (ΘΕΖ)

α) ένταση



Σχ.5.14 Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm) – Έντασης I (A) για Al-4Mg και Al-4Cu

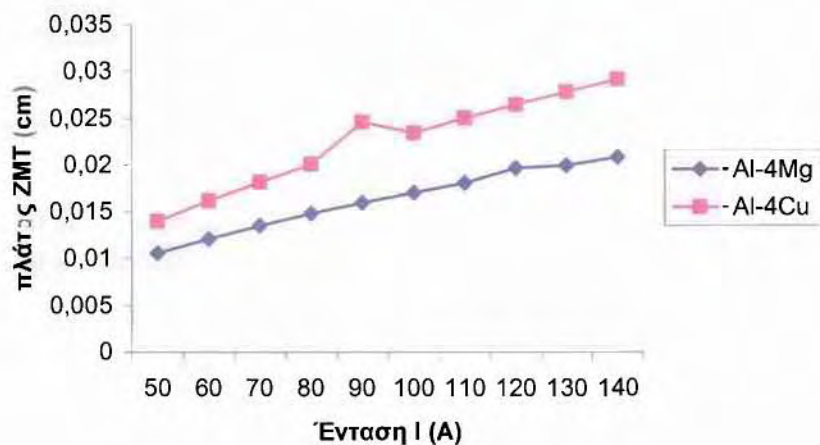
β) τάση



Σχ.5.15 Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm) – τάσης (v) για για Al-4Mg και Al-4Cu

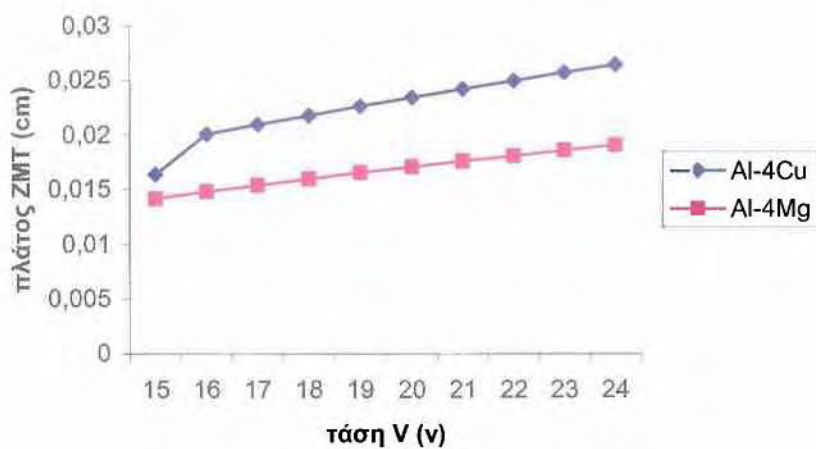
5.4.2 Πλάτος Ζώνης Μερικής Τήξης (ZMT)

a) ένταση



Σχ.5.16 Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm) – Έντασης I (A)

b) τάση



Σχ.5.17 Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm) – τάσης (v)

5.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ T_0 (ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ)

Η προθέρμανση των ως προς συγκόλληση ελασμάτων είναι η πιο συνηθισμένη μορφή πρόληψης δημιουργίας ρωγμών. Και αυτό γιατί ένα από τα αποτελέσματα της προθέρμανσης είναι ότι μειώνει τον ρυθμό ψύξης με συνέπεια να ελαχιστοποιεί τον βαθμό ισχυροποίησης κοντά στην γραμμή συγκόλλησης.

Στις συγκολλήσεις αλουμινίου θα πρέπει να προσέξουμε να μην ξεπερνάμε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία έτσι ώστε να μην έχουμε υπερθέρμανση.

Θα χρησιμοποιήσουμε την [εξ.8] και διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές και ίσες με:

$$I=110 \quad (\text{A})$$

$$n=0.8$$

$$u=1 \quad (\text{cm/s})$$

$$V=22 \quad (\text{v})$$

θα μεταβάλλουμε το T_0

- σε έλασμα Al-4Cu με φυσικές σταθερές

$$k= 1,48 \quad (\text{w / cm} \cdot ^\circ\text{c})$$

$$p= 2,8 \quad (\text{g / cm}^3)$$

$$c=0,871 \quad (\text{J / kg} \cdot \text{K}) \quad [5]$$

- και σε έλασμα Al-4Mg με φυσικές σταθερές

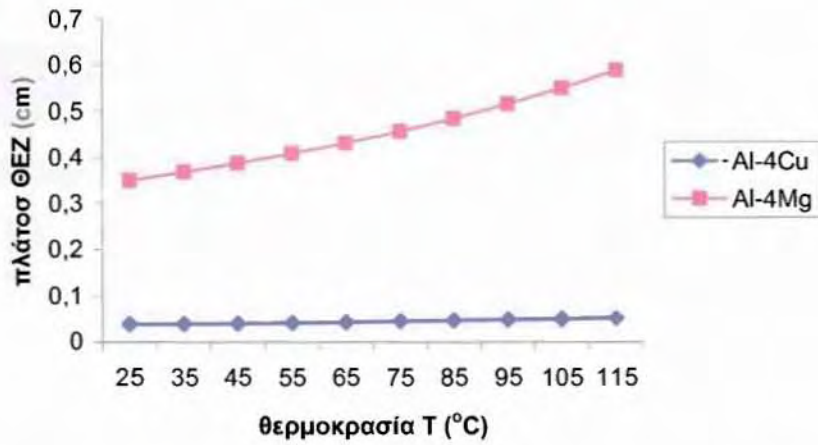
$$k= 1,27 \quad (\text{w / cm} \cdot ^\circ\text{c})$$

$$p= 2,66 \quad (\text{g / cm}^3)$$

$$c=0,900 \quad (\text{J / kg} \cdot \text{K}) \quad [5]$$

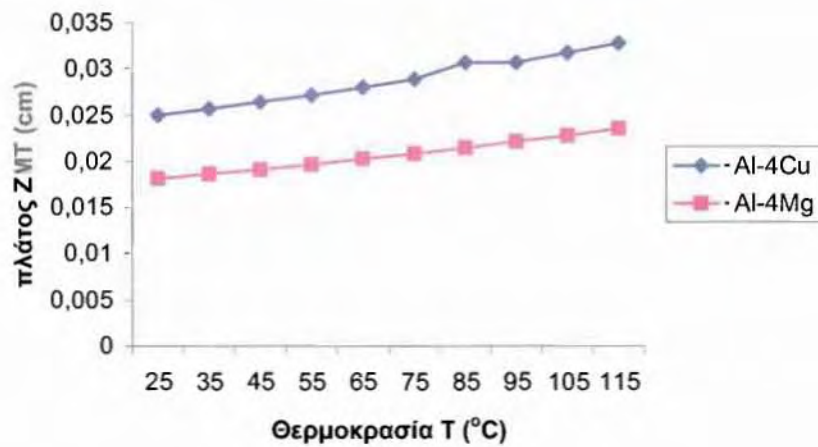
και θα καταλήξουμε στα αποτελέσματα που ακολουθούν.

5.5.1 Πλάτος Θερμοεπηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ)



Σχ.5.18 Διάγραμμα πλάτους ΘΕΖ (cm) – θερμοκρασίας T (°C)

5.5.2 Πλάτος Ζώνης Μερικής Τήξης (ZMT)



Σχ.5.19 Διάγραμμα πλάτους ZMT (cm) – θερμοκρασίας T (°C)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης μειώνει το πλάτος της ΘΕΖ
- Με ίδια μέθοδο συγκόλλησης και ίδια ταχύτητα διαφορετικά υλικά παρουσιάζουν διαφορετικές κατανομές με αξιοσημείωτες αυτές του Αλουμινίου (1060) όπου οι ισόθερμες καμπύλες τις ήταν πιο κοντά, από τα άλλα υλικά, στην αρχή των αξόνων. Αυτό φυσικά το γνωρίζαμε και μόνο από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.
- Η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης μειώνει το πλάτος της ZMT
- Η μεταβολή της ταχύτητας επηρεάζει πολύ την ΛΣ σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας παρατηρείται μείωση του βάθους της και αποκτά την μορφή σταγόνας. Καθώς επίσης επιδρά και στην μορφολογία της στερεοποίησης.
- Η αύξηση του πάχους ελάσματος για την περίπτωση του πεπερασμένου πάχους μας οδηγεί στην μείωση του πλάτους της ΘΕΖ
- Η αύξηση του πάχους ελάσματος για την περίπτωση του πεπερασμένου πάχους μας οδηγεί στην μείωση του πλάτους και της ZMT
- Η αύξηση της θερμικής ισχύος προκαλεί αύξηση του πλάτους της ΘΕΖ
- Η αύξηση της θερμικής ισχύος προκαλεί αύξηση του πλάτους και της ZMT
- Η προθέρμανση του ως προς συγκόλληση υλικού μας δίνει μεγαλύτερο πλάτος ΘΕΖ στο τελικό μας προϊόν
- Η προθέρμανση του ως προς συγκόλληση υλικού μας δίνει και μεγαλύτερο πλάτος ZMT στο τελικό μας προϊόν.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η πρόταση μου για μελλοντική εργασία είναι να γίνει σύγκριση όλων αυτών των θεωρητικών αποτελεσμάτων με πραγματικές συγκολλήσεις που έχουν γίνει ή πρόκειται να γίνουν ,κάτω από τις δικές μας συνθήκες, με σκοπό να επαληθεύσουμε όλα όσα έχουμε βρει στην παρούσα διπλωματική και να αξιολογήσουμε την απόκλιση, που σίγουρα θα υπάρχει, ανάμεσά τους. Με τον τρόπο αυτό θα ξέρουμε εάν κατέχουμε ένα μαθηματικό εργαλείο που μπορεί να μας δείξει τα αποτελέσματα μιας συγκόλλησης χωρίς την εφαρμογή κάποιου ίσως είδους καταστρεπτικού ελέγχου και το οποίο να μπορούμε να το συμβουλευτούμε, πριν πραγματοποιηθεί η συγκόλληση, όσο αφορά την μέθοδο που θα χρησιμοποιήσουμε, το μέτρο της ταχύτητας και το ποσό του ρυθμού εισαγωγής θερμότητας.

Να γίνει εφαρμογή του προγράμματος και σε συγκολλήσεις άλλων κραμάτων.

Και επίσης θα μπορούσε να γίνει και χρήση ενός διαφορετικού μαθηματικού προγράμματος από αυτού του Mathematica, το οποίο δεν μπορεί να κάνει αναστροφή σε μία μεγάλη εξίσωση όπως π.χ η εξ.9. Και από το οποίο να προσπαθήσουμε να πάρουμε μια 3-D εικόνα για το πώς ακριβώς δημιουργούνται οι θερμικοί κύκλοι μέσα στην συγκόλληση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σημειώσεις μαθήματος “Χύτευση – Συγκολλήσεις”, Διδάσκων Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος , 2006
- [2] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Φυσική Μεταλλουργία*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2007
- [3] C. Tsai & C. Tsao, “*Heat flow in welding*”, ASM Handbook, 9th edition.
- [4] J.L Murray, “*Alloy phase diagrams*”, ASM Handbook, Vol 3, pages (2·48, 2·44), 1988
- [5] ASM Handbook, “*Properties and Selection: Irons, steels, and High- Performance Alloys*”, Vol 1, 1990
- [6] Κων/νος Παπαδάκης, *Εισαγωγή στο Mathematica*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2003

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- <http://el.wikipedia.org> [7]
- <http://books.google.gr> [8]
- www.lincolnelectric.com [9]
- <http://www.wolfram.com> [10]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ
ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ

a) κώδικας απείρου ελάσματος

Clear "@"

To 25

25

V 22

22

A 110

110

u 0.3

0.3

k 0.5

0.5

p 7.8

7.8

c 0.465

0.465

a $\frac{k}{p+c}$

0.137855

n 0.8

0.8

Q n*V*A

1936.

w x-u*t

-0.3*t*x

z 0

0

R $\sqrt{w^2 \cdot y^2 \cdot z^2}$

$\sqrt{(-0.3t \cdot x)^2 \cdot y^2}$

T To $\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot e^{-\frac{u}{2 \cdot a} \cdot w} \cdot \frac{e^{-\frac{u}{2 \cdot a} \cdot R}}{R}$

25 $\frac{616.248 e^{-1.0881(-0.3t \cdot x)} - 1.0881 \sqrt{(-0.3t \cdot x)^2 \cdot y^2}}{\sqrt{(-0.3t \cdot x)^2 \cdot y^2}}$

Do y 0-i;

Εντολή 1 για το διάγραμμα T,t

Do x 0-j;

m i, j Plot T, t, -15, 30, , i, 0, 3, , j, 0, 3.

Do y 0-i;

Εντολή 2 για το διάγραμμα T,x

m i Plot T, x, -25, 5, AxesLabel -> x, "T", ,

i, 0, 3.

Εντολή 3 για το διάγραμμα T,y

```
Do x = 0 - i;  
m i = Plot T, y, -5, 5, AxesLabel -> y, "T", , i, 0, 5
```

```
Do z = 0 - i;
```

```
m i = ContourPlot T, x, -50, 5, y, -20, 20, PlotRange -> All,  
ImageSize -> 400, Automatic, PlotPoints -> 300,  
ContourShading -> False, , i, 0, 5
```

Εντολή 4 για το διάγραμμα
(z[x,y].)

```
Do
```

```
x = 0 - i;
```

```
m i = ContourPlot T, y, -1, 1, z, -1, 1, PlotRange -> All,  
PlotPoints -> 300, ContourShading -> False ;  
, i, 0, 3
```

Εντολή 5 για το διάγραμμα
(x[y,z].)

b)Κώδικας λεπτού ελάσματος

```
Clear "@"
```

```
To = 25
```

```
25
```

```
V = 22
```

```
22
```

```
A = 110
```

```
110
```

```
u = 0.3
```

```
0.3
```

```
k = 0.5
```

```
0.5
```

```
p = 7.8
```

```
7.8
```

```
c = 0.465
```

```
0.465
```

```
a =  $\frac{k}{p \cdot c}$ 
```

```
0.137855
```

```
n = 0.8
```

```
0.8
```

```
Q = n * V * A
```

```
1936.
```

```
H = 0.127
```

```
0.127
```

```

q = Q / H
15244.1
w = x - u * t
-0.3 * t * x
r = sqrt(w^2 + y^2)
sqrt((-0.3 * t * x)^2 + y^2)
hh = (u * r) / (2 * a);
zz = BesselK(0, hh);
T = To * (Q / (2 * pi * k) * Exp(-u / (2 * a) * w * zz)
25 * 4852.35 * e^(-1.0881 * (-0.3 * t * x)
BesselK[0, 1.0881 * sqrt((-0.3 * t * x)^2 + y^2)]

```

εντολή 1 για T,t

εντολή 2 για T,x

εντολή 3 για T,y

εντολή 4 για (z[x,y],)

εντολή 5 για (χ[y,z],)

ε) κώδικας για πεπερασμένου πάχους έλασμα

```

Clear "@"
To = 25

V = 22

A = 110

u = 0.3

k = 0.5

p = 7.8

c = 0.465

a = k / (p * c)

n = 0.8

Q = n * V * A

```

$$z = 0$$

$$w = x - u + t$$

$$H = 1.27$$

$$B = 1$$

$$R = \sqrt{w^2 \cdot y^2 \cdot z^2}$$

$$R1 \cdot B = \sqrt{w^2 \cdot y^2 \cdot 2 \cdot B \cdot H - z^2}$$

$$R2 \cdot B = \sqrt{w^2 \cdot y^2 \cdot 2 \cdot B \cdot H \cdot z^2}$$

T

To

$$\int \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot e^{-\frac{u}{2 \cdot a} \cdot w} \cdot$$

$$\int \frac{e^{-\frac{u}{2 \cdot a} \cdot R}}{R} \cdot \text{Sum} \left(\frac{e^{-\frac{u}{2 \cdot a} \cdot R1 \cdot B}}{R1 \cdot B}, \frac{e^{-\frac{u}{2 \cdot a} \cdot R2 \cdot B}}{R2 \cdot B}, \cdot B, 1, 2 \right) \cdot \text{||};$$

εντολή 1 για T,t

εντολή 2 για T,x

εντολή 3 για T,y

εντολή 4 για (z[x,y],)

εντολή 5 για (χ[y,z],)

όπου A=I (Ένταση)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000100707