



Μεταφορά θερμότητας στις συγκολλήσεις

ΔΙΑΛΕΞΗ 7

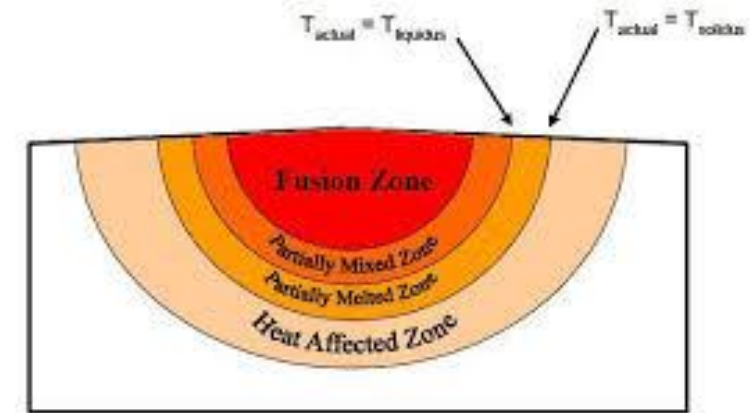
ΜΕΡΟΣ Α

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ
ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

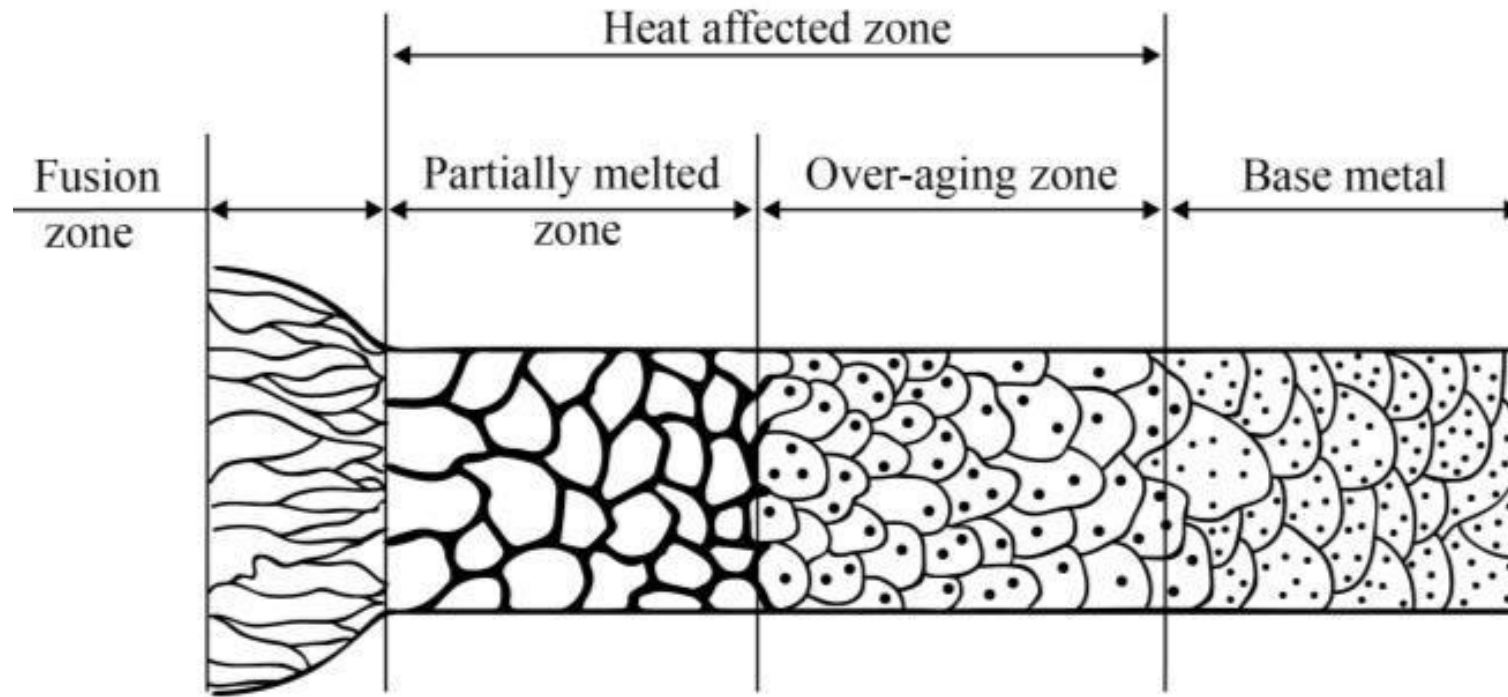
Μακρογραφική παρατήρηση ραφής συγκόλλησης τήξης

Σε συγκολλήσεις τήξης παρατηρούνται 4 Ζώνες:

- ❑ Μέταλλο συγκόλλησης (ΜΣ)
- ❑ Ζώνη μερικής τήξης (ZMT)
- ❑ Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)
- ❑ Βασικό μέταλλο (ΒΣ)



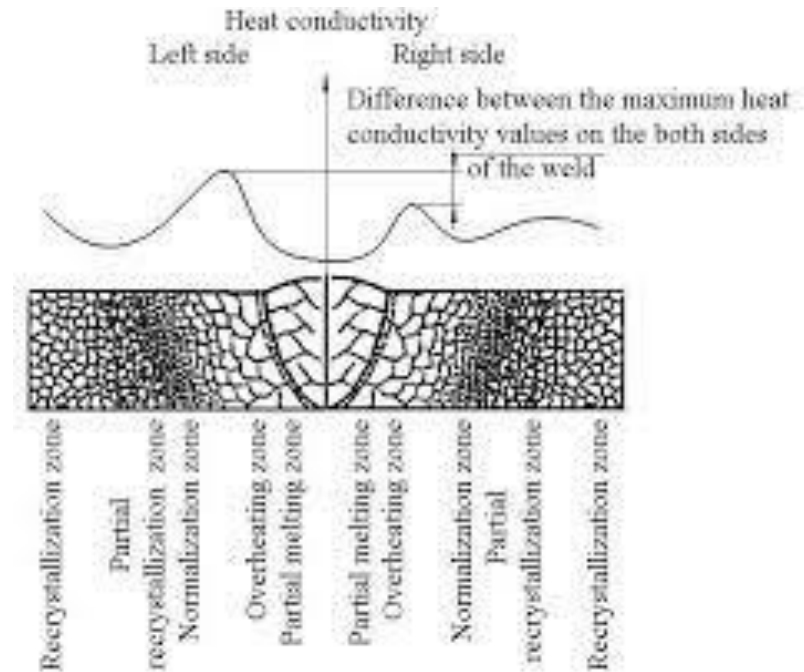
Μακρογραφική παρατήρηση ραφής συγκόλλησης τήξης



Μέταλλο συγκόλλησης (ΜΣ)

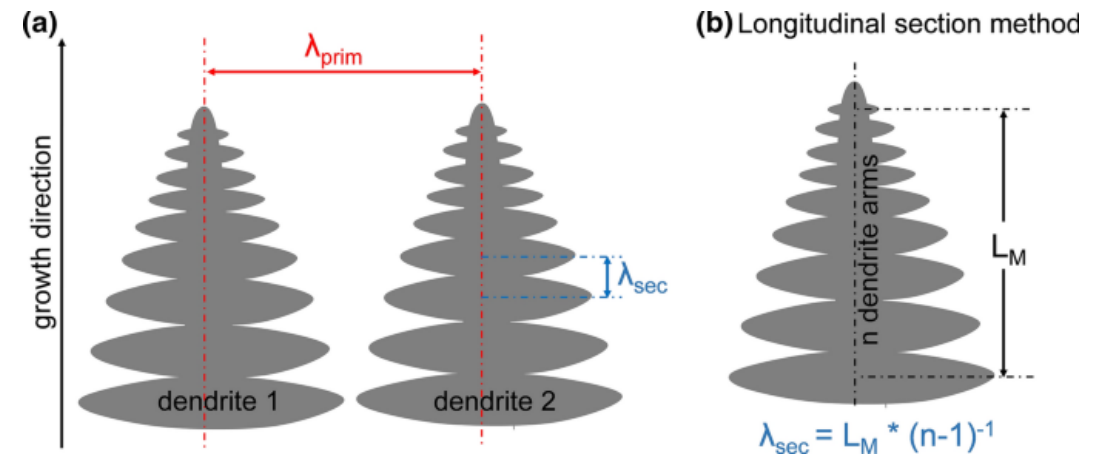
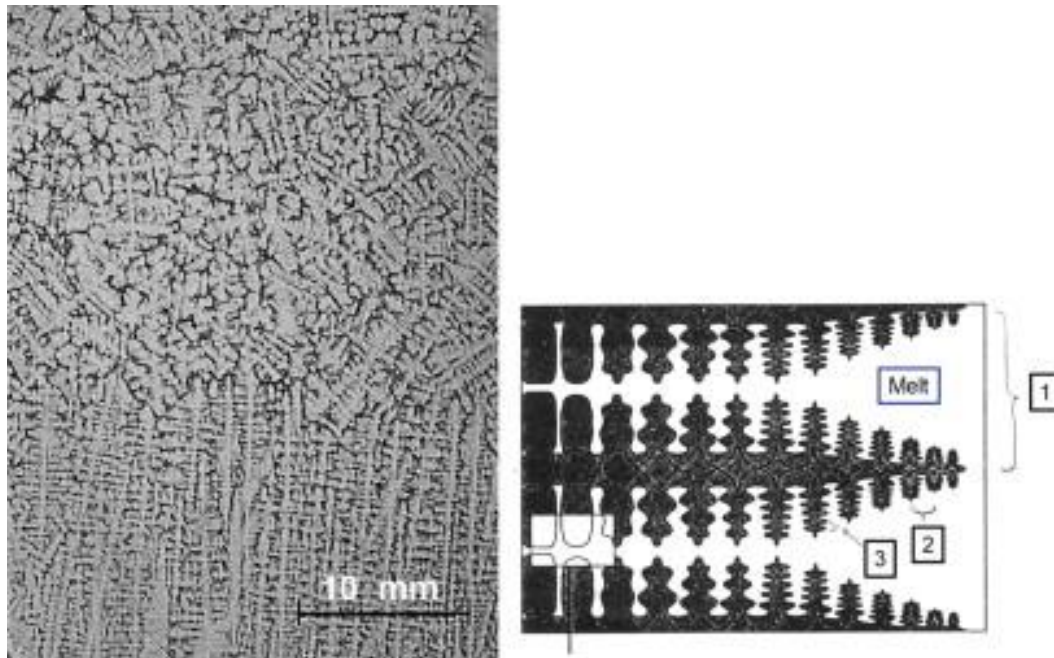
Σε συγκολλήσεις τήξης στο μέταλλο συγκόλλησης

- ❑ Σχηματίζονται δενδρίτες έντονα προσανατολισμένοι λόγω ταχεία στερεοποίησης
- ❑ Ο προσανατολισμός τους ακολουθεί τη διεύθυνση της των ισόθερμων καμπυλών
- ❑ Η ταχύτητα στερεοποίησης είναι ίδιας τάξης μεγέθους με την ταχύτητα συγκόλλησης δλδ mm/s



Δενδρίτες

Πυρήνες στερεού που μεγαλώνουν σε σχήμα κλαδιού



Ζώνη μερικής τήξης (ZMT)

Σε συγκολλήσεις τήξης η ζώνη μερικής τήξης

- ❑ Βρίσκεται μεταξύ ΘΕΖ και ΜΣ
- ❑ Δεν είναι ευδιάκριτη σε καθαρά μέταλλα, ενώ είναι περισσότερο διακριτή σε κράματα
- ❑ Παρατηρούνται μεταλλουργικοί δεσμοί με το τηγμένο μέταλλο
- ❑ Η υγροποίηση των ορίων των κόκκων μπορεί να προκαλέσει ρωγματώσεις
- ❑ Καθώς σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα υγρού μετάλλου, χωρίς μηχανική αντοχή
- ❑ Έτσι οι ρωγματώσεις οφείλονται στα φορτία της συγκόλλησης (μηχανικά, θερμικά)

Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΕΖ)

Σε συγκολλήσεις τήξης η ΘΕΖ

- ❑ Αποτελεί συνέπεια του θερμικού κύκλου
- ❑ Κάθε σημείο της μικροδομής «βιώνει» διαφορετικά τον θερμικό κύκλο επομένως δεν παρατηρείται ομοιογένεια στις μηχανικές ιδιότητες της
- ❑ Παράγονται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες για να προκαλέσουν μεταβολές στη μικροδομή σε στερεά κατάσταση
- ❑ Ταυτόχρονα και αρκετά χαμηλές για να προκαλέσουν τήξη
- ❑ Σε ΘΕΖ χωρίς αλλαγή φάσης παρατηρείται μεγέθυνση των κόκκων και άρα υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων

Βασικό Μέταλλο (BM)

Σε συγκολλήσεις τήξης στο BM

- ❑ Δεν παρατηρείται καμία μεταβολή φάσης ή μεταλλουργικός μετασχηματισμός
- ❑ Είναι φορέας παραμορφώσεων (διαμήκεις συστολές) και
- ❑ Παραμένουσων τάσεων (συγκράτηση τεμαχίων)

Φαινόμενα που επηρεάζουν τη δομή του υλικού

- ❑ Μεταφορά μάζας
- ❑ Χημικά φαινόμενα
- ❑ Θερμικά φαινόμενα, δλδ θέρμανση και ψύξη → στερεοποίηση

Μαθηματική διατύπωση

magnetohydrodynamic (MHD) model

Physical Process	Equation	Description / Remarks
Continuity of mass	$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$	Conservation of mass for the compressible plasma–gas mixture.
Momentum conservation	$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ $\boldsymbol{\tau} = \mu[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}]$	Navier–Stokes equation including the Lorentz body force responsible for the plasma constriction (Maecker effect).
Electron energy conservation	$\nabla \cdot \left(\frac{5}{2} n_e k_B T_e \mathbf{u} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_e - \mathbf{j}_e \cdot \mathbf{E} - Q_{\text{el}}^{e \rightarrow h} - Q_{\text{in}}^{e \rightarrow h} - Q_{\text{rad}}$	Non-LTE energy balance for electrons; includes Joule heating, conduction, inelastic/elastic energy exchange, and radiative losses.
Heavy-particle energy conservation	$\nabla \cdot \left(\frac{5}{2} (n_A + n_I) k_B T_h \mathbf{u} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_h + \mathbf{j}_I \cdot \mathbf{E} + Q_{\text{el}}^{h \rightarrow e}$	Energy equation for heavy species (atoms and ions) coupled with electron energy through elastic collisions.
Species continuity (general form)	$\nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{u}) + \nabla \cdot \mathbf{J}_i = S_i$	Transport equation for each species; Y_i denotes the mass fraction and S_i the source term due to ionization and recombination.

Μαθηματική διατύπωση

magnetohydrodynamic (MHD) model

Physical Process	Equation	Description / Remarks
Generalized Ohm's law	$\mathbf{j}_q = \sigma \mathbf{E} + \Delta \mathbf{j}_q$, with $\Delta \mathbf{j}_q = \sum_i q_i \mathbf{J}_i$	Constitutive relation for current density including drift and diffusion contributions.
Equation of state and quasi-neutrality	$p = n_h k_B T_h + n_e k_B T_e$, $n_e = n_I$	Two-temperature pressure formulation under quasi-neutrality assumption.
Magnetic induction and potential	$\mu_0 \Delta \mathbf{A} = -\mathbf{j}_q$, $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$	Magnetic field generated self-consistently by the current density.
Solid domains (electrodes,	$\nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + \sigma_s E^2 = 0$, $\nabla \cdot (\sigma_s \nabla \phi) = 0$	Joule heating and heat conduction within solid electrodes

Αριθμητικά αποτελέσματα

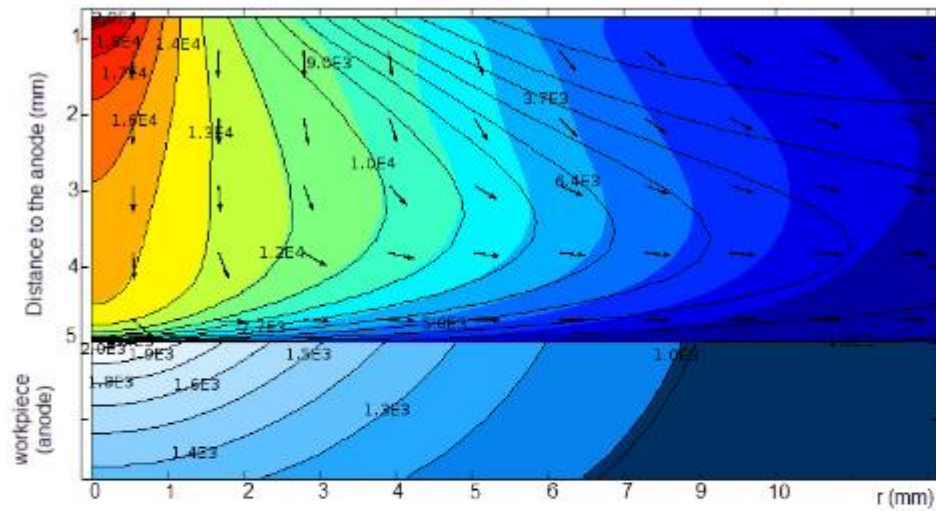
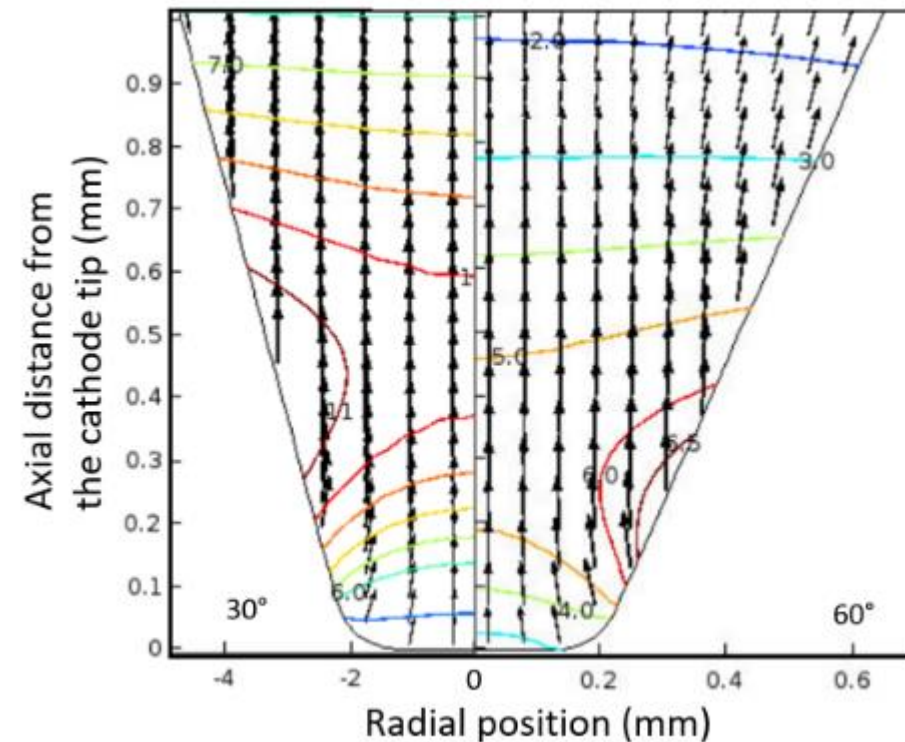


Figure 18. Temperature in kelvin of heavy particles (black lines) and electrons (filled coloured contours) in the arc region and in the workpiece. The flow field is presented by arrow indicators. Arc current 150 A, inter-electrode distance 5 mm.



Αριθμητικά αποτελέσματα

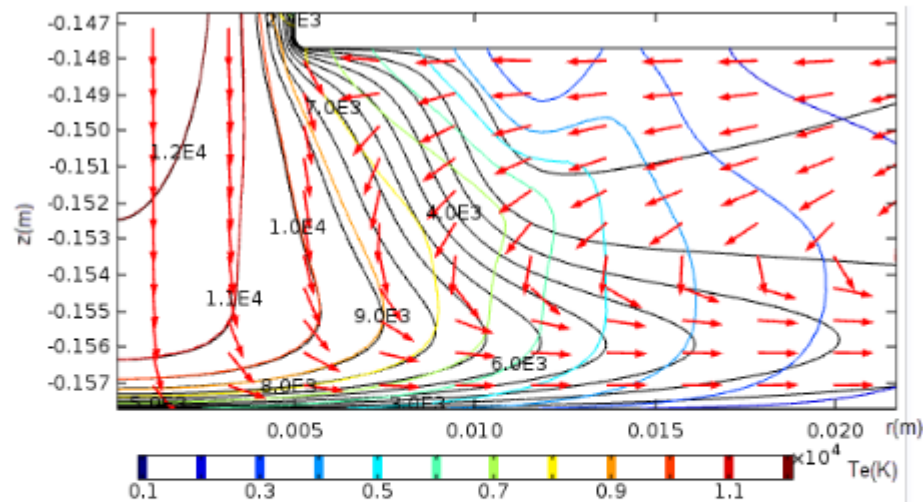


Figure 13. Iso-lines of temperatures in kelvin of heavy particles (black) and electrons (coloured) and normalized arrow indicators of the gas flow in the anode region of the arc at a gas flow rate of 4.5 slpm and an arc current of 200 A.

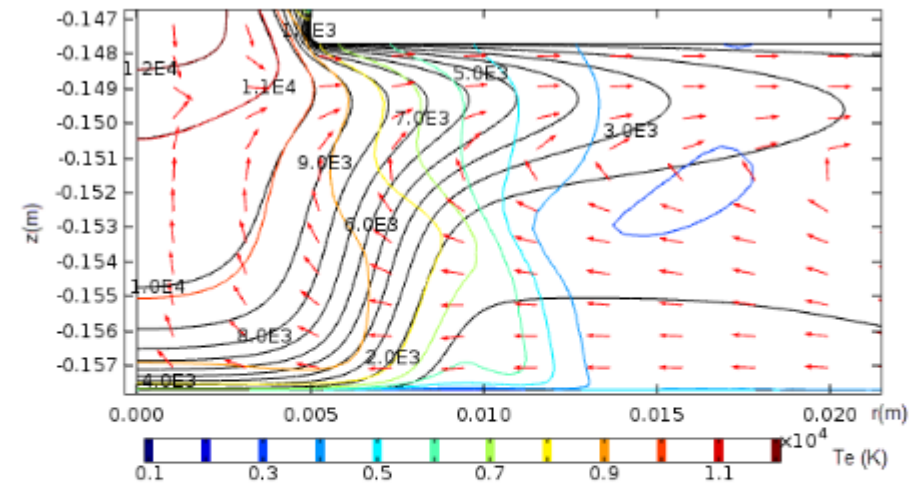
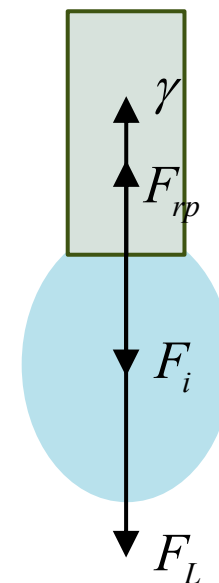


Figure 14. Iso-lines of temperatures in kelvin of heavy particles (black) and electrons (coloured) and normalized arrow indicators of the gas flow in the anode region of the arc at a gas flow rate of 1.3 slpm and an arc current of 200 A.

Δυνάμεις που ενεργούν στην μεταφορά μάζας από το ηλεκτρόδιο

Δύναμη	Κατεύθυνση
Επιφανειακή τάση γ	Αντιτίθεται
Δύναμη λόγω της ταχείας ατμοποίησης F_{rp}	Αντιτίθεται
Δύναμη Lorentz F_L	Ευνοϊκή
Βαρύτητα F_g	Ευνοϊκή
Δύναμη λόγω της κρούσης των ιόντων F_i	Ευνοϊκή
Αντίσταση τριβής πλάσματος F_D	Ουδέτερη ή ευνοϊκή σε υψηλές εντάσεις ρεύματος



Δυνάμεις που ενεργούν στην μεταφορά μάζας στο μέταλλο συγκόλλησης

Δύναμη

Επιφανειακή τάση γ

Δύναμη Lorentz F_L

Βαρύτητα - Άνωση F_g

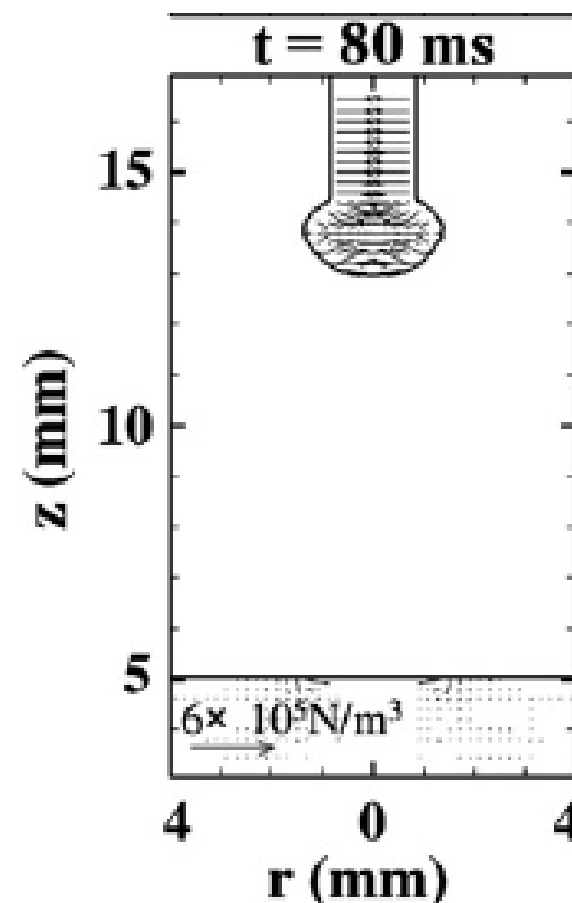
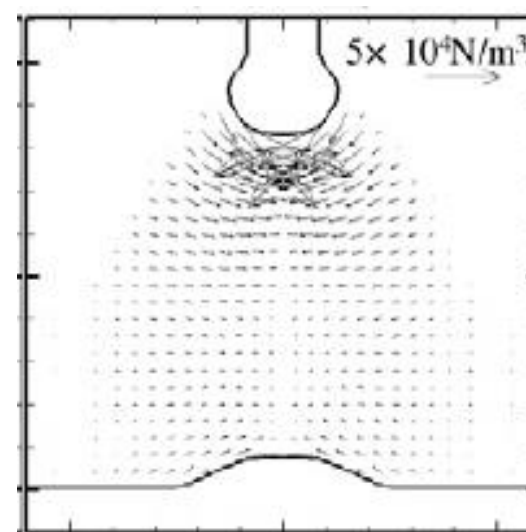
Αντίσταση τριβής πλάσματος - Διατμητική τάση στο μέταλλο
συγκόλλησης F_D

Επιφανειακή τάση

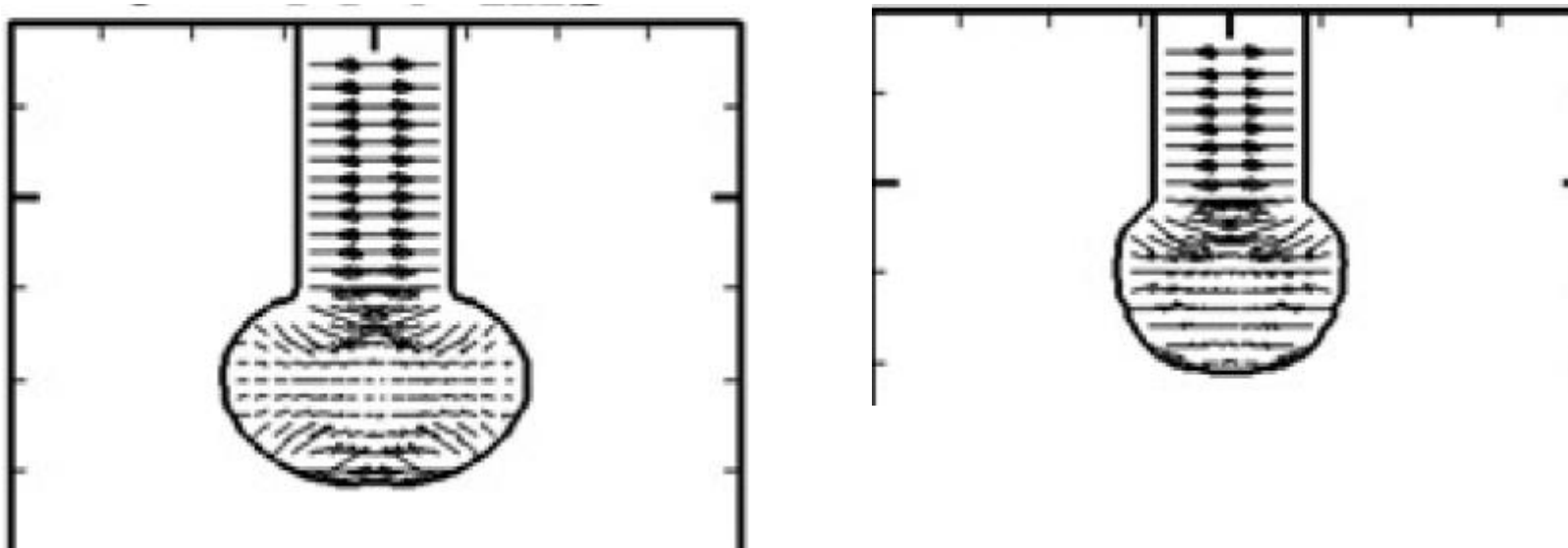
- ❑ Όταν ένα υγρό βρίσκεται σε επαφή με μια επιφάνεια
- ❑ Τα εσωτερικά μόρια του υγρού περιβάλλονται από ελκτικές δυνάμεις που αλληλοαναιρούνται
- ❑ Τα μόρια στο εξωτερικό σύνορο του υγρού δέχονται δυνάμεις αποκλειστικά από τα εσωτερικά
- ❑ Έτσι έλκονται προς τα μέσα
- ❑ Με αποτέλεσμα η επιφάνεια του υγρού να συμπιέζεται και τείνει να ελαχιστοποιείται
- ❑ Ως αποτέλεσμα της έλξης των μορίων στο εξωτερικό σύνορο από τα εσωτερικά μόρια
- ❑ Δηλαδή στην προσπάθειά τους να ελαχιστοποιήσουν την ενέργεια

Δύναμη Lorenz

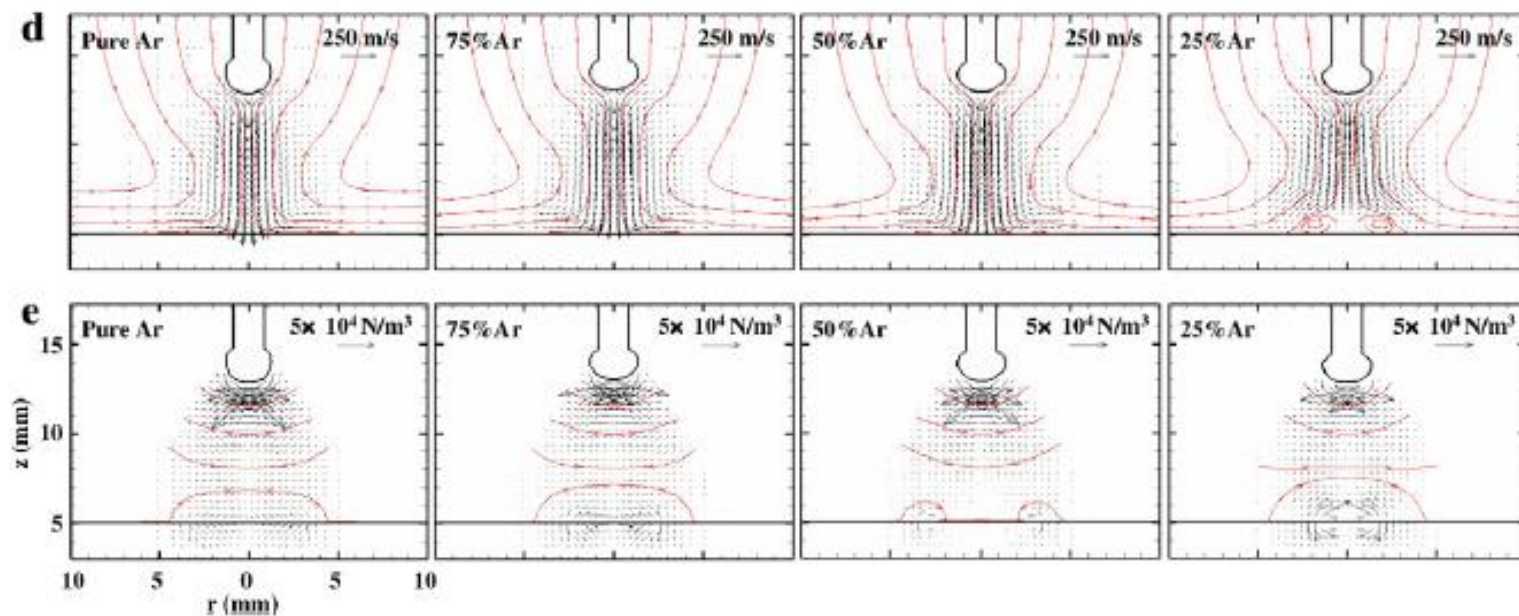
- Προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο
- Δημιουργεί δύναμη που τείνει να δημιουργήσει λαιμό στην σταγόνα, και να μειώσει την ακτίνα της
- Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται pinch effect
- Αλλά και δύναμη προς τα κάτω που ωθεί στην απόσπαση της σταγόνας από το ηλεκτρόδιο



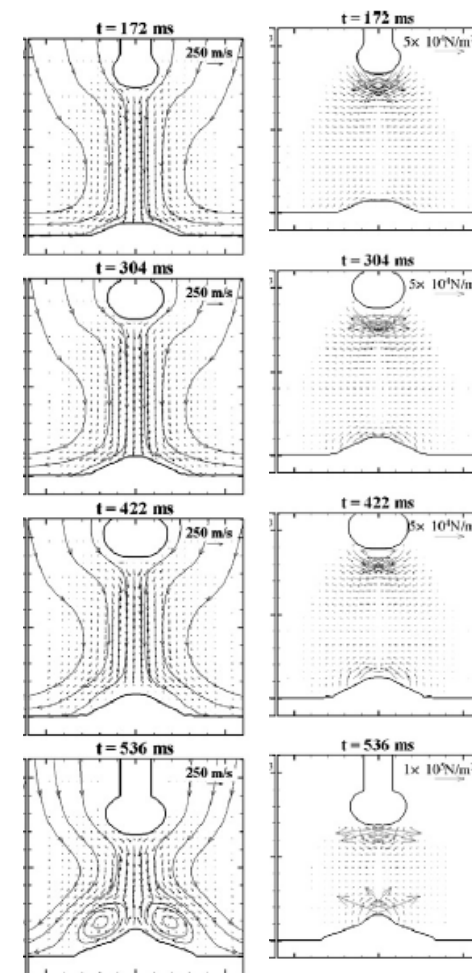
Μηχανισμός μεταφοράς υλικού – Δύναμη Lorenz



Μηχανισμός μεταφοράς μάζας– Δύναμη Lorenz



Κατεύθυνση
αύξησης
περιεκτικότητας
He



Χημικά φαινόμενα

Ο ρυθμός των χημικών φαινομένων και ειδικά των χημικών αντιδράσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία

- ❑ Εξάχνωση (π.χ. εξάχνωση Mg σε κράματα Al)
- ❑ Αλληλεπίδραση μετάλλου περιβάλλοντος, είτε στη διεπιφάνεια είτε με απορρόφηση (π.χ. διάλυση N_2 , O_2 , H_2)
- ❑ Χημικές αντιδράσεις στο τηγμένο μέταλλο (π.χ. αποθείωση , αποκραμάτωση)
- ❑ Αλληλεπίδραση σκωρίας τηγμένου μετάλλου

ΜΕΡΟΣ Β

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Μετάδοση θερμότητας στις συγκολλήσεις

Το θερμοκρασιακό πεδίο στις συγκολλήσεις επηρεάζει σημαντικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης όπως

- ❑ Το εύρος και τη δομή του μετάλλου συγκόλλησης
- ❑ Το εύρος και τη δομή της ΘΕΖ
- ❑ Τις παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις

Μετάδοση θερμότητας στις συγκολλήσεις τήξης

- Η κύρια πηγή θερμότητας προέρχεται από την ηλεκτρική ισχύ που επιβάλλουμε $P=VI$
- Άλλες πηγές θερμότητας αποτελούν εξώθερμες χημικές αντιδράσεις ή και μετασχηματισμοί
- Όμως σε σχέση με την προσφερόμενη θερμική ισχύ είναι πολύ μικρότερες

Μετάδοση θερμότητας στις συγκολλήσεις τήξης

Οι κύριες πηγές απώλειας θερμότητας είναι

- ❑ Ροή θερμότητας προς τα ελάσματα με αγωγή
- ❑ Προς το περιβάλλον με συναγωγή και ακτινοβολία είτε κατευθείαν απ' το τόξο ή απ' το μέταλλο
- ❑ Προς το ηλεκτρόδιο σε συγκόλληση τόξου με ΣΡΗΘ

Θερμικές απώλειες

$$Q = \eta VI$$

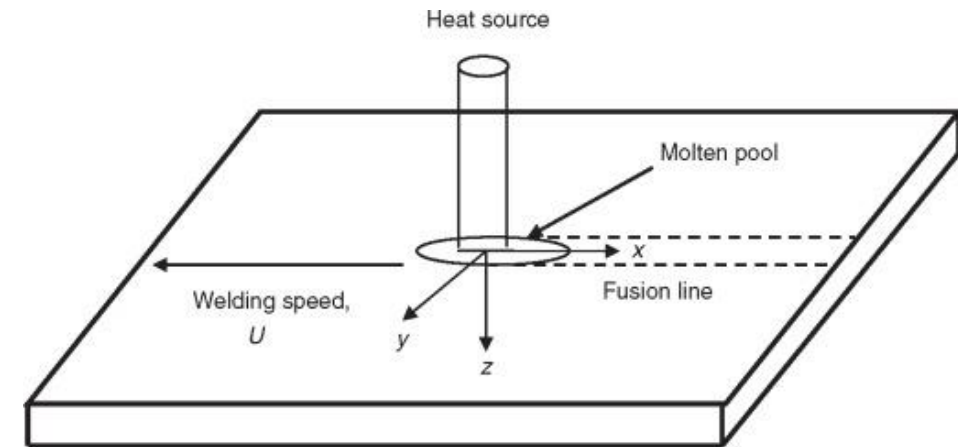
$$h = \frac{Q}{u}$$

Μέθοδος συγκόλλησης	Βαθμός απόδοσης η
SMAW	0.7 – 0.9
GMAW	0.7 – 0.9
GTAW ΣΡΗΑ	0.6 – 0.8
SAW	0.8 – 0.95
LBW	0.05
EBW	0.8 – 0.95

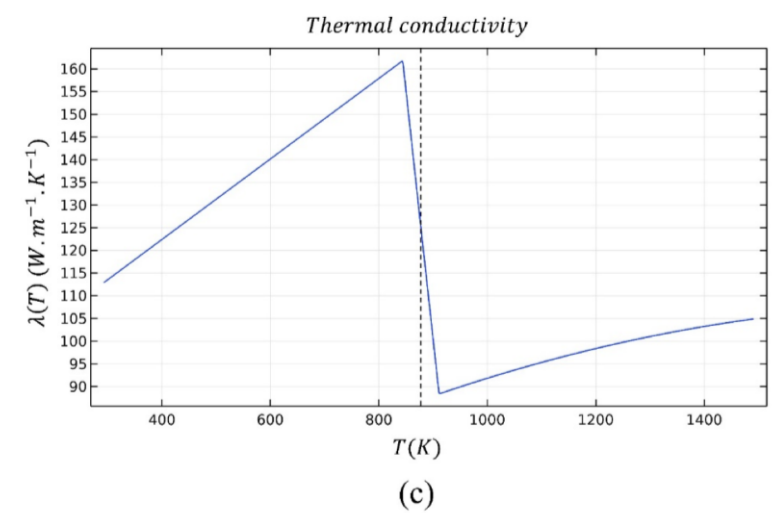
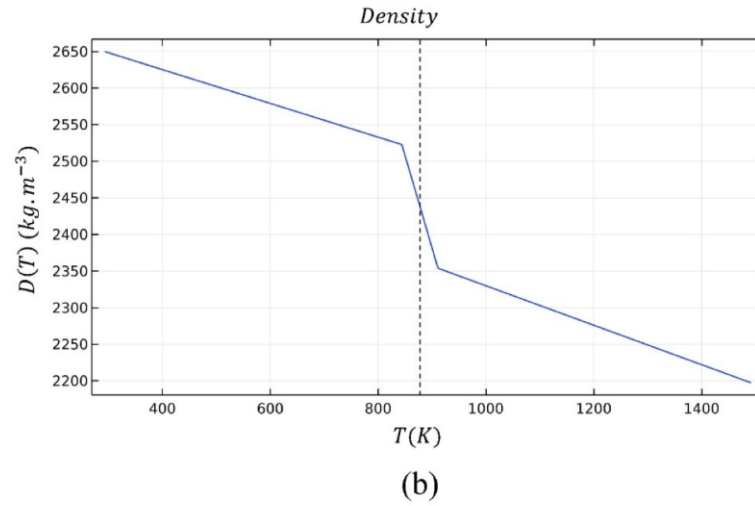
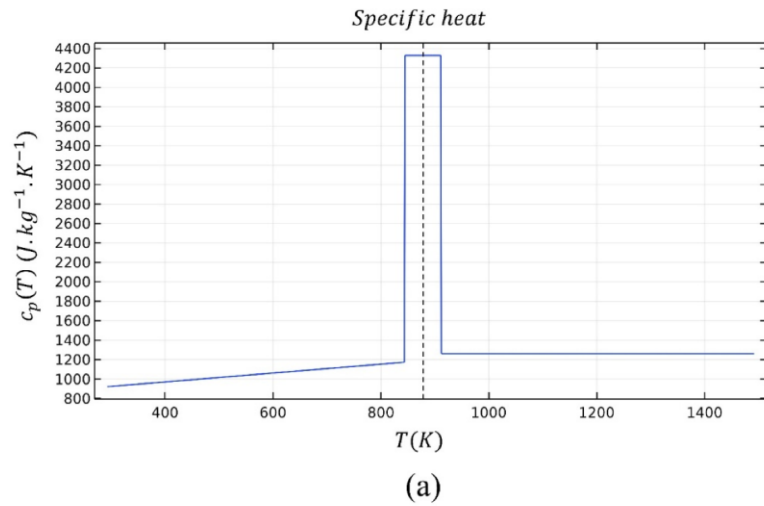
Μαθηματική διατύπωση μετάδοσης θερμότητας

□ Θεωρώντας μόνο μετάδοση με αγωγή

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q}_{in}$$



Μαθηματική διατύπωση μετάδοσης θερμότητας



Μαθηματική διατύπωση μετάδοσης θερμότητας

□ Θεωρώντας σταθερό την τιμή της πρόσδοσης θερμότητας $\dot{Q}_{in} = 0$

□ Και ότι η θερμική αγωγιμότητα δεν μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία $\frac{\partial k}{\partial T} = 0$

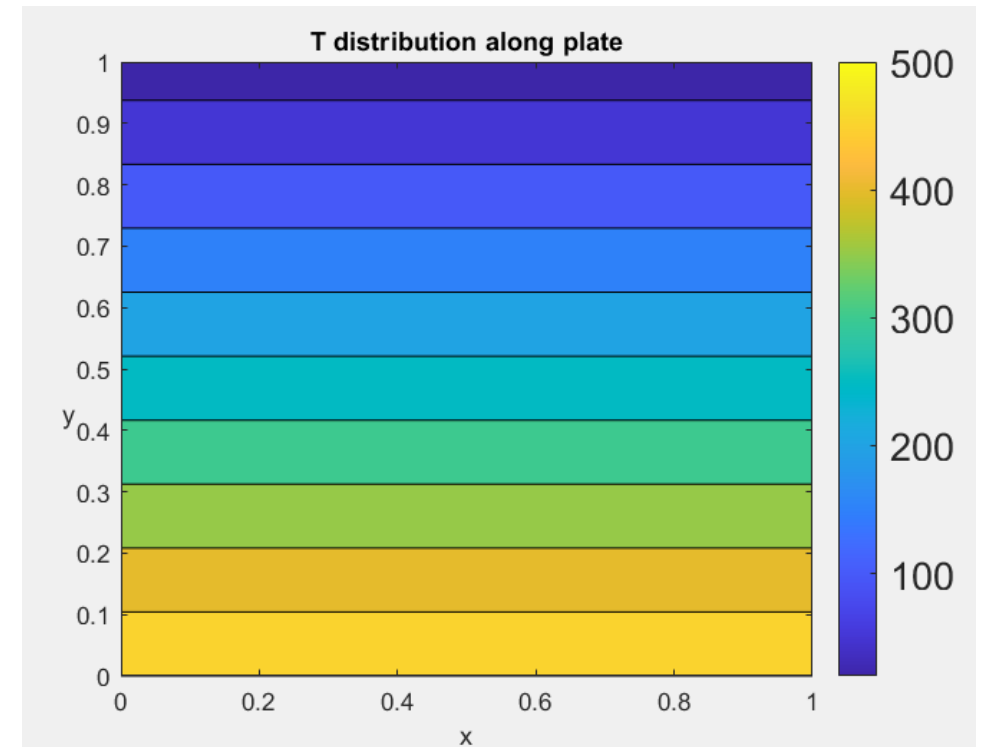
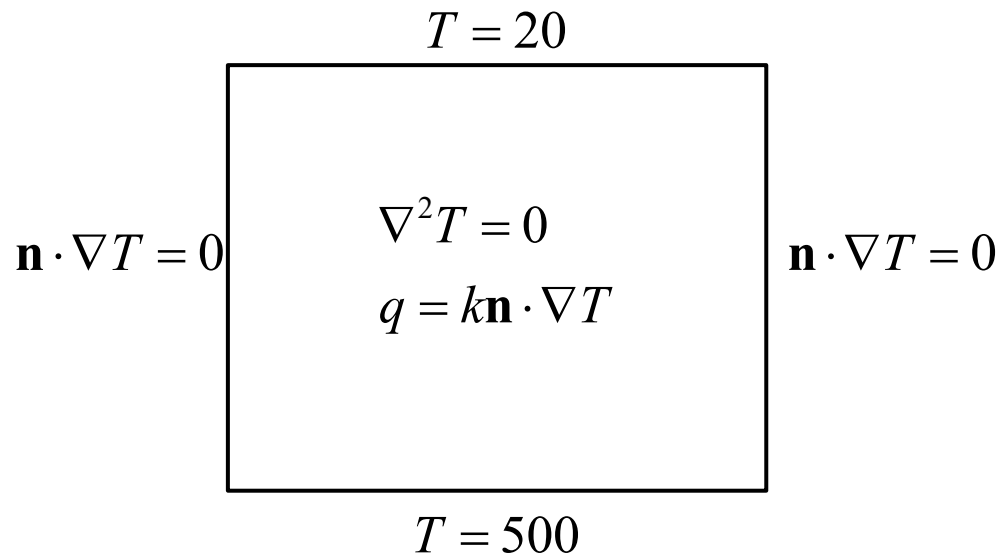
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T$$

$$a = \frac{k}{\rho c_p}$$

Καθαρή διάχυση!

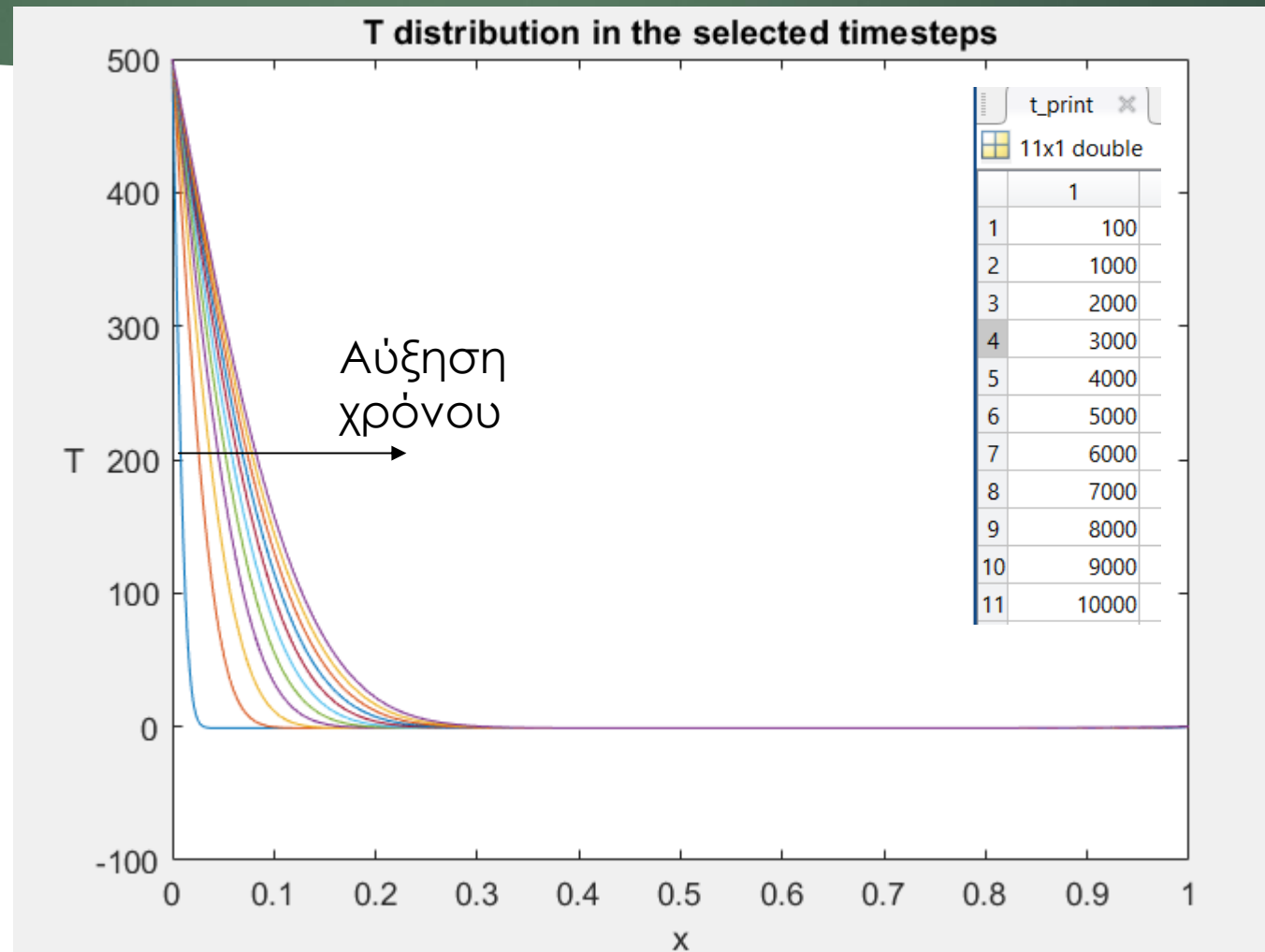
Δλδ χωρίς κατευθυντικότητα!

Εξίσωση Laplace



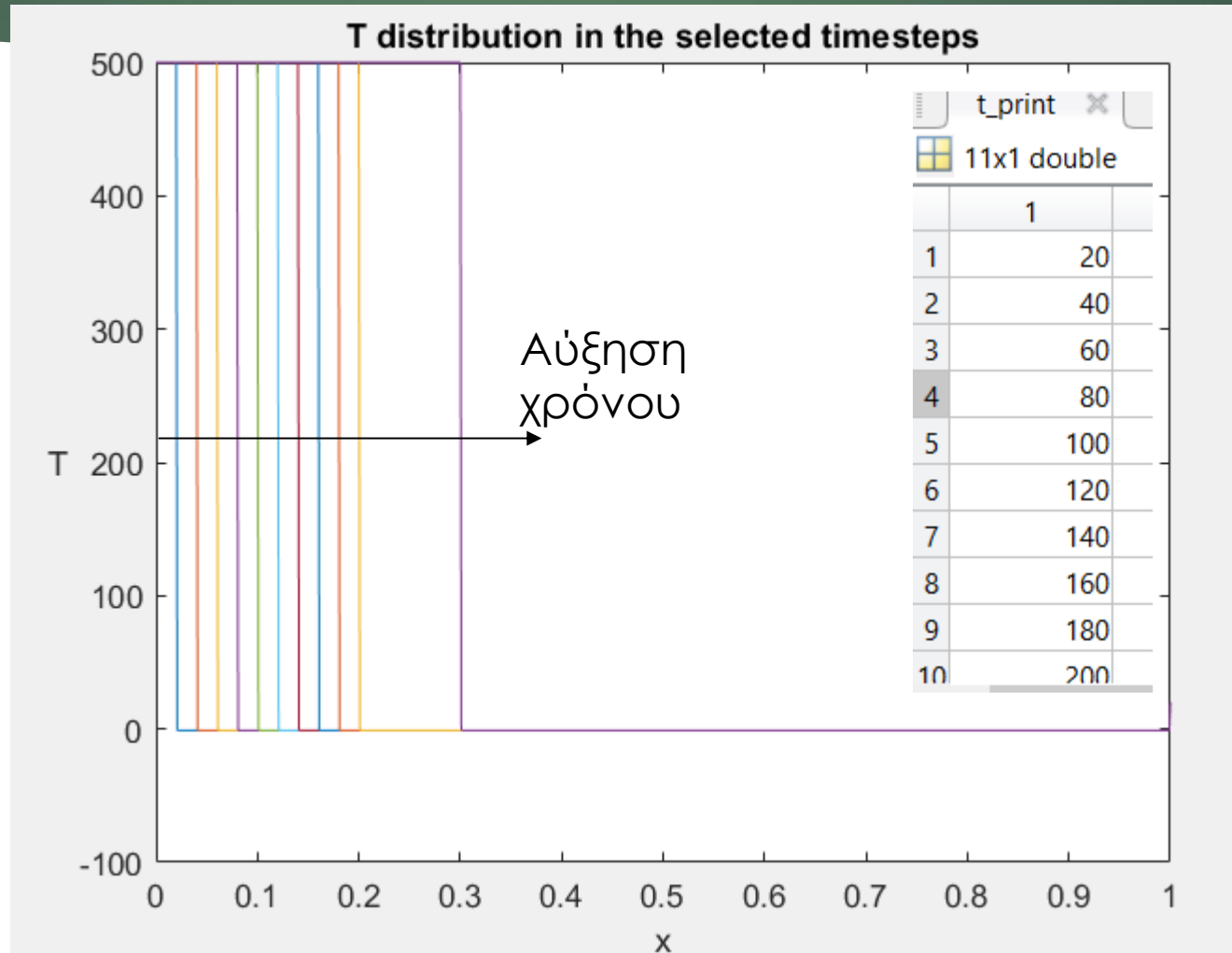
Διάχυση

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \nabla^2 T = 0$$
$$q = k \mathbf{n} \cdot \nabla T$$



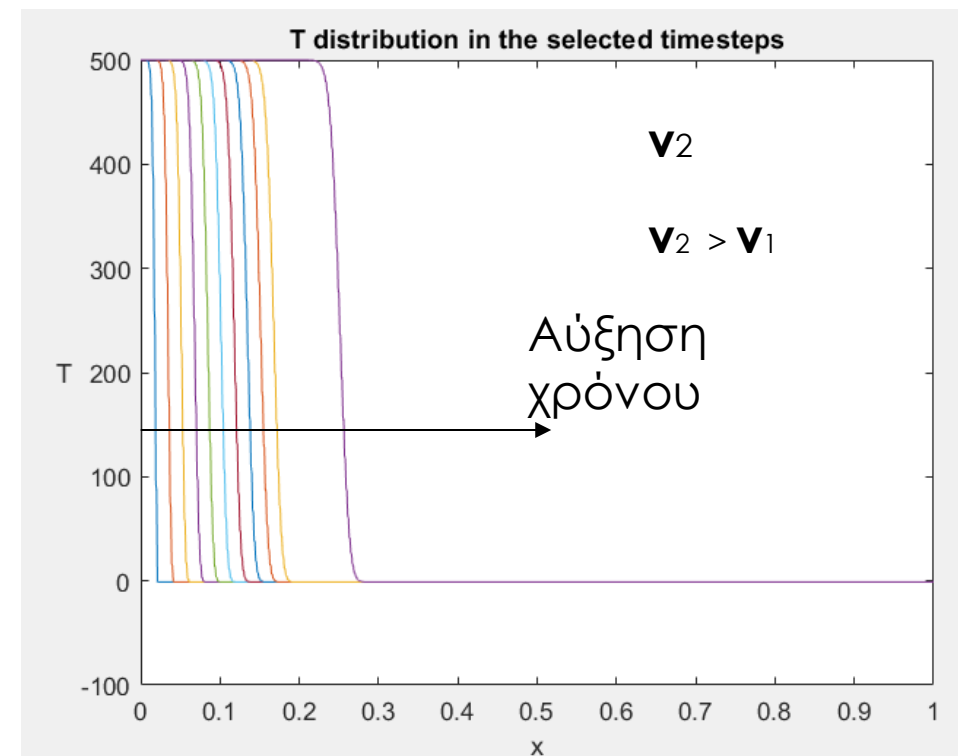
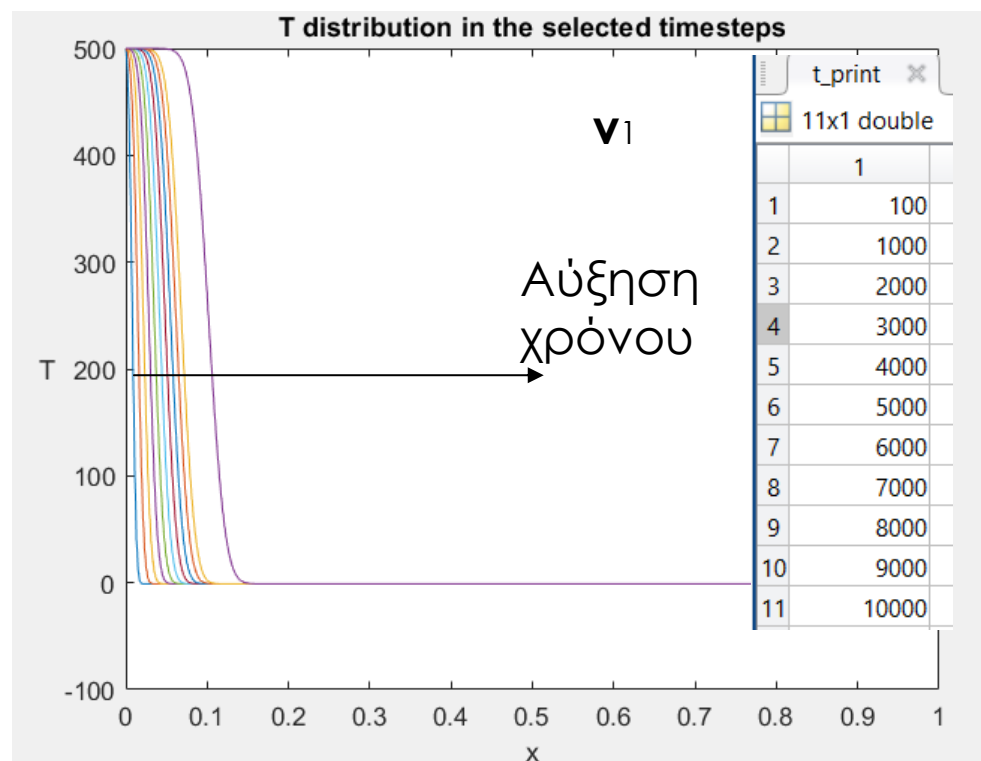
Μεταφορά

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \mathbf{v} \cdot \nabla T = 0$$



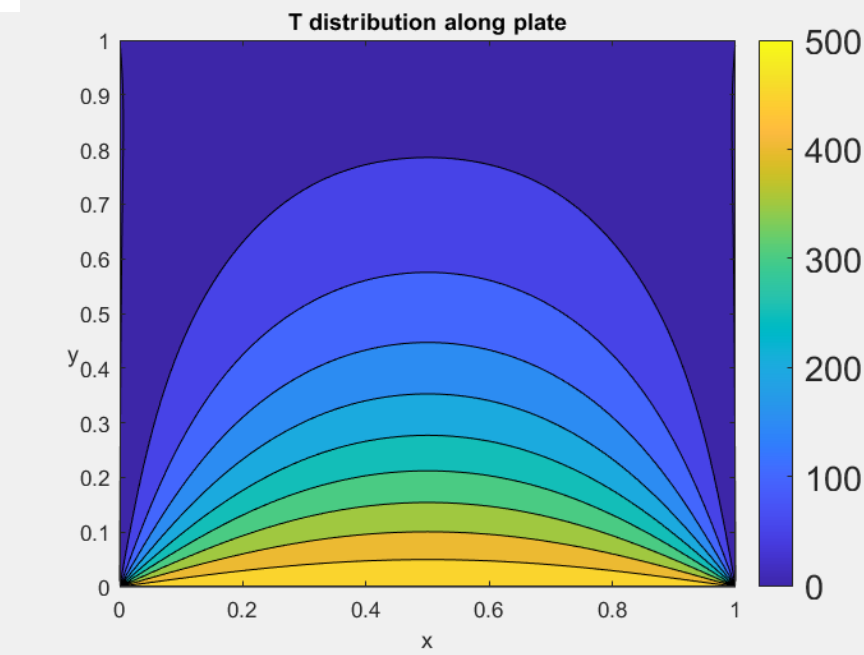
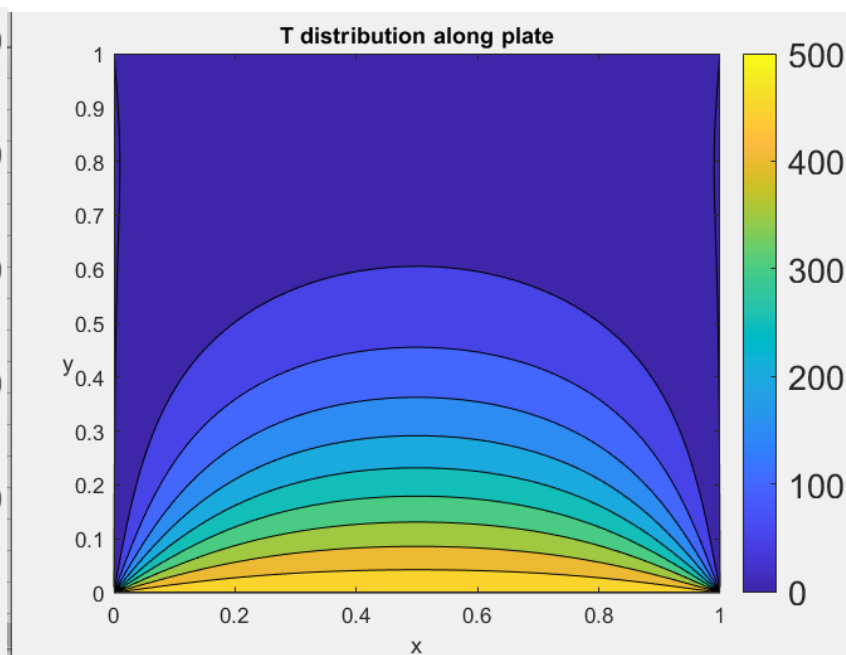
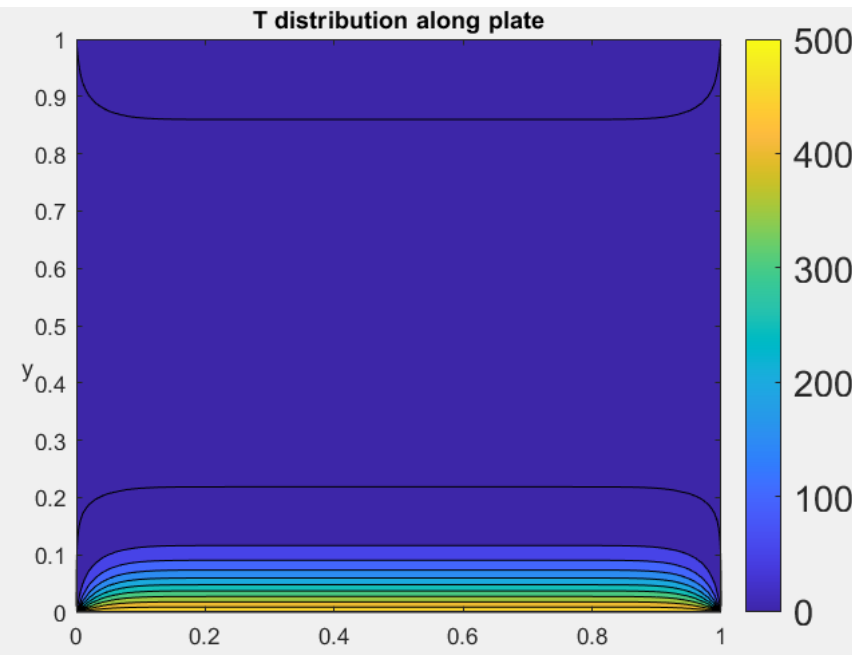
Μεταφορά και διάχυση

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \mathbf{v} \cdot \nabla T - a \nabla^2 T = 0$$



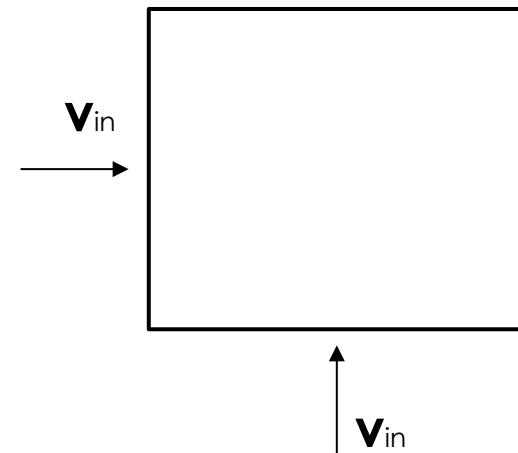
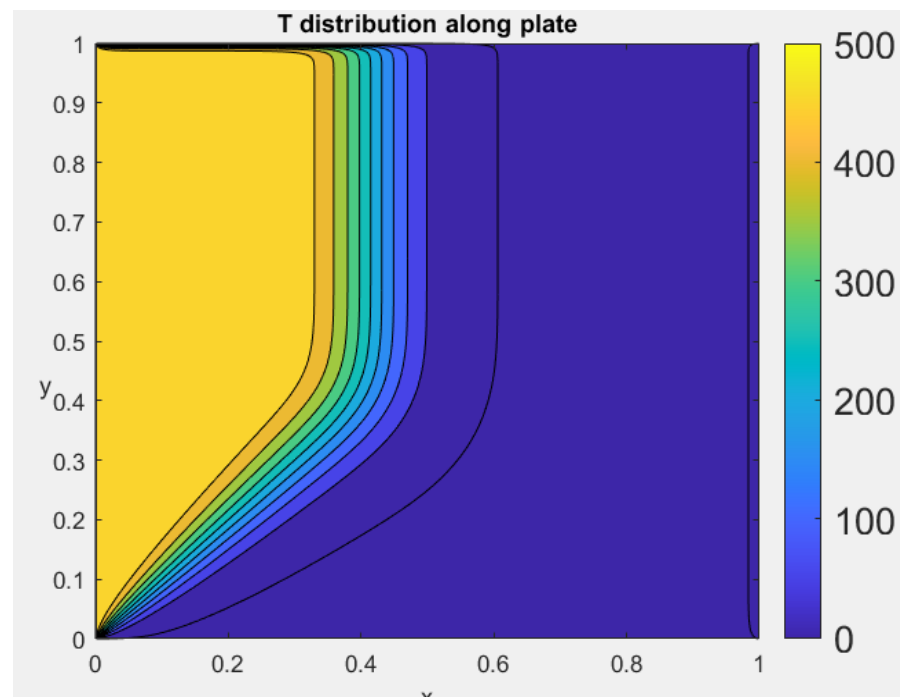
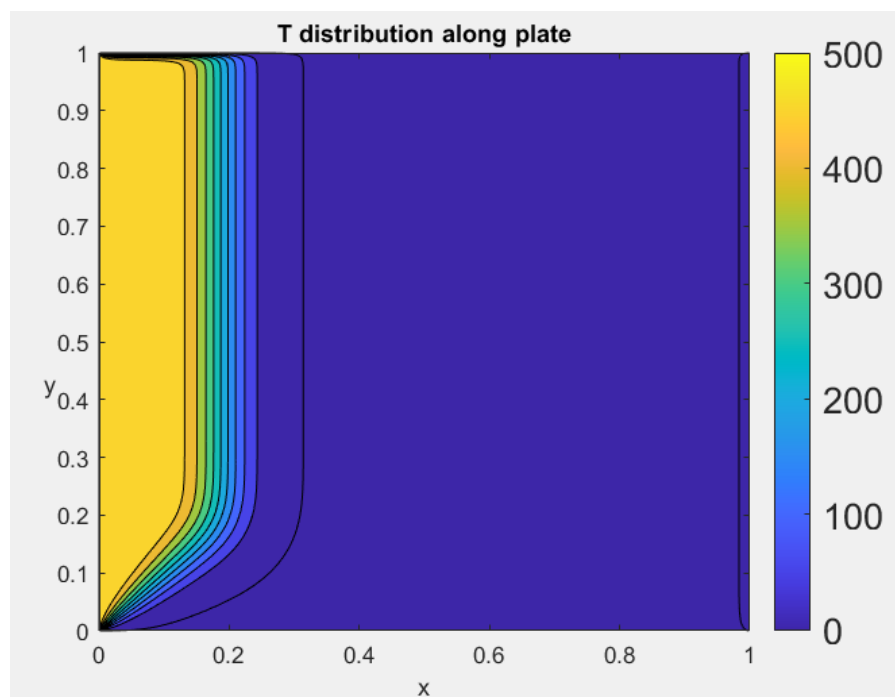
Διάχυση σε 2D

Αύξηση
χρόνου



Μεταφορά και διάχυση σε 2D

Αύξηση
χρόνου



Ανάλυση Μετάδοση Θερμότητας στις συγκολλήσεις τόξου

Το πρόβλημα μπορεί να χωριστεί σε 3 φάσεις

- ❑ Έναυση του τόξου
- ❑ Μετακίνηση του τόξου κατά μήκους των τεμαχίων
- ❑ Σβήσιμο του τόξου

Ανάλυση Μετάδοση Θερμότητας στις συγκολλήσεις τόξου

- ❑ Στις φάσεις έναυσης και σβησίματος του τόξου
- ❑ Επικρατούν ισχυρά μη-μόνιμες συνθήκες
- ❑ Και το πρόβλημα μετάδοσης θερμότητας είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο

Ανάλυση Μετάδοση Θερμότητας στις συγκολλήσεις τόξου

- Στην φάση της μετακίνησης του τόξου κατά μήκους των τεμαχίων
- Θεωρούμε μόνιμες συνθήκες
- Σε σύστημα αναφοράς που κινείται μαζί με το τόξο
- Δηλαδή με την ταχύτητα συγκόλλησης

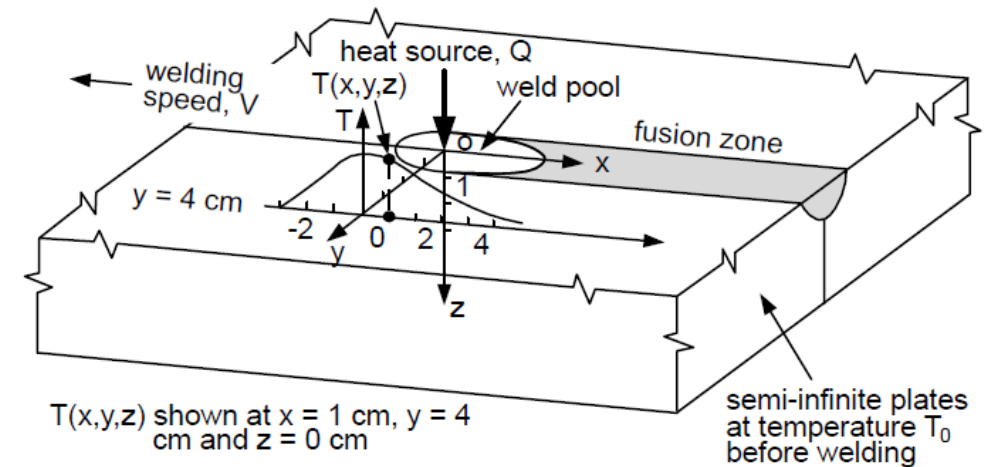


Figure 2.17 Three-dimensional heat flow during welding of semi-infinite workpiece.

Ανάλυση Μετάδοση Θερμότητας στις συγκολλήσεις τόξου

- Επομένως με κατάλληλο μετασχηματισμό θεωρούμε ημι-μόνιμες συνθήκες (quasi-stationary state)

$$w = x - ut$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial w}{\partial t} = -u$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial w}$$

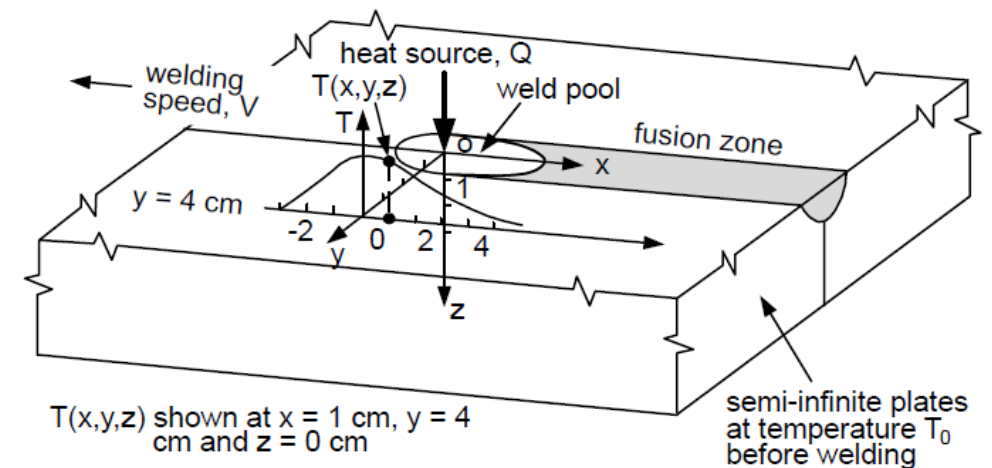


Figure 2.17 Three-dimensional heat flow during welding of semi-infinite workpiece.

Ανάλυση Μετάδοση Θερμότητας στις συγκολλήσεις τόξου

- Επομένως με κατάλληλο μετασχηματισμό θεωρούμε ημι-μόνιμες συνθήκες (quasi-stationary state)

$$w = x - ut$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial w}{\partial t} = -u$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{A\Sigma} = \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{K\Sigma}^0 + \frac{\partial T}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial t} \Rightarrow$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{A\Sigma} = -u \frac{\partial T}{\partial w}$$

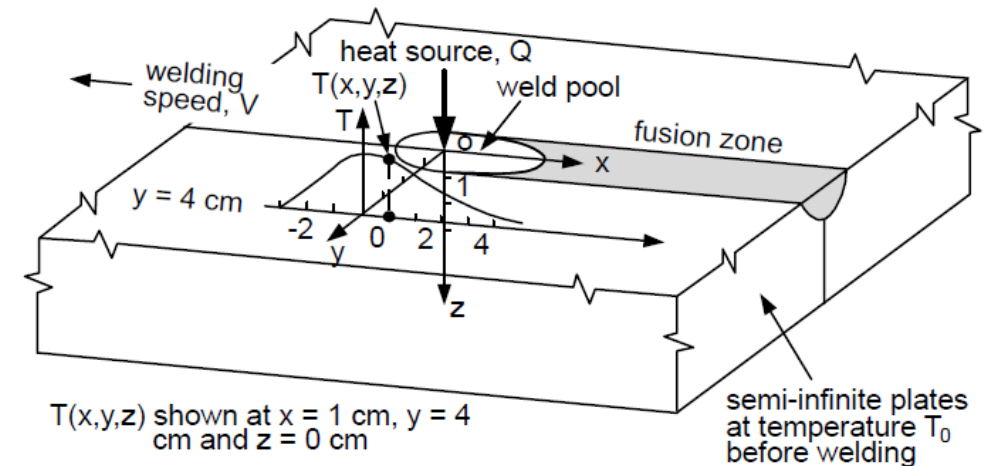


Figure 2.17 Three-dimensional heat flow during welding of semi-infinite workpiece.

Ανάλυση Μετάδοση Θερμότητας στις συγκολλήσεις τόξου

- Επομένως με κατάλληλο μετασχηματισμό θεωρούμε ημι-μόνιμες συνθήκες (quasi-stationary state)

$$w = x - ut$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{-u}{a} \frac{\partial T}{\partial w}$$

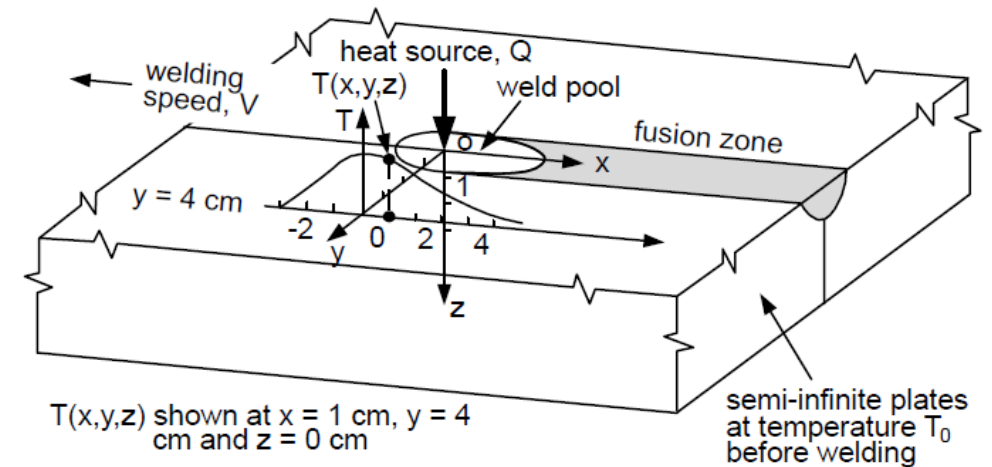


Figure 2.17 Three-dimensional heat flow during welding of semi-infinite workpiece.

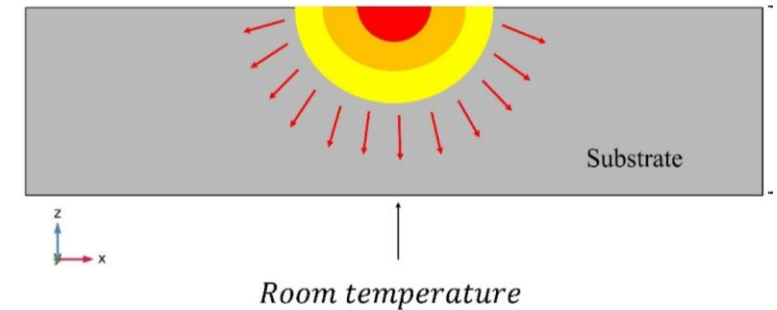
Συνοριακές συνθήκες – Λύσεις Rosenthal

- Θεωρούμε ημιάπειρη επίπεδη πλάκα άπειρου πάχους

$$T = T_0, R \rightarrow \infty$$

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

$$Q = \lim_{R \rightarrow \infty} -2\pi R^2 k \frac{\partial T}{\partial R}$$

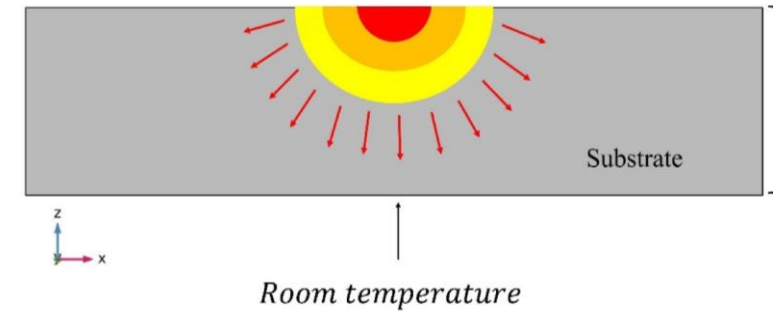


Συνοριακές συνθήκες – Λύσεις Rosenthal

- Θεωρούμε ημιάπειρη επίπεδη πλάκα περασμένου πάχους

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, z = 0 \text{ και } z = H$$

$$Q = \lim_{R \rightarrow \infty} -2\pi R^2 k \frac{\partial T}{\partial R}$$



Λύσεις Rosenthal

- Έλασμα άπειρου πάχους

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{u}{2a}w} \frac{e^{-\frac{u}{2a}R}}{R}$$

- Έλασμα πεπερασμένου πάχους

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{u}{2a}w} \left[\frac{e^{-\frac{u}{2a}R}}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{e^{-\frac{u}{2a}R_n}}{R_n} + \frac{e^{-\frac{u}{2a}R'_n}}{R'_n} \right) \right]$$

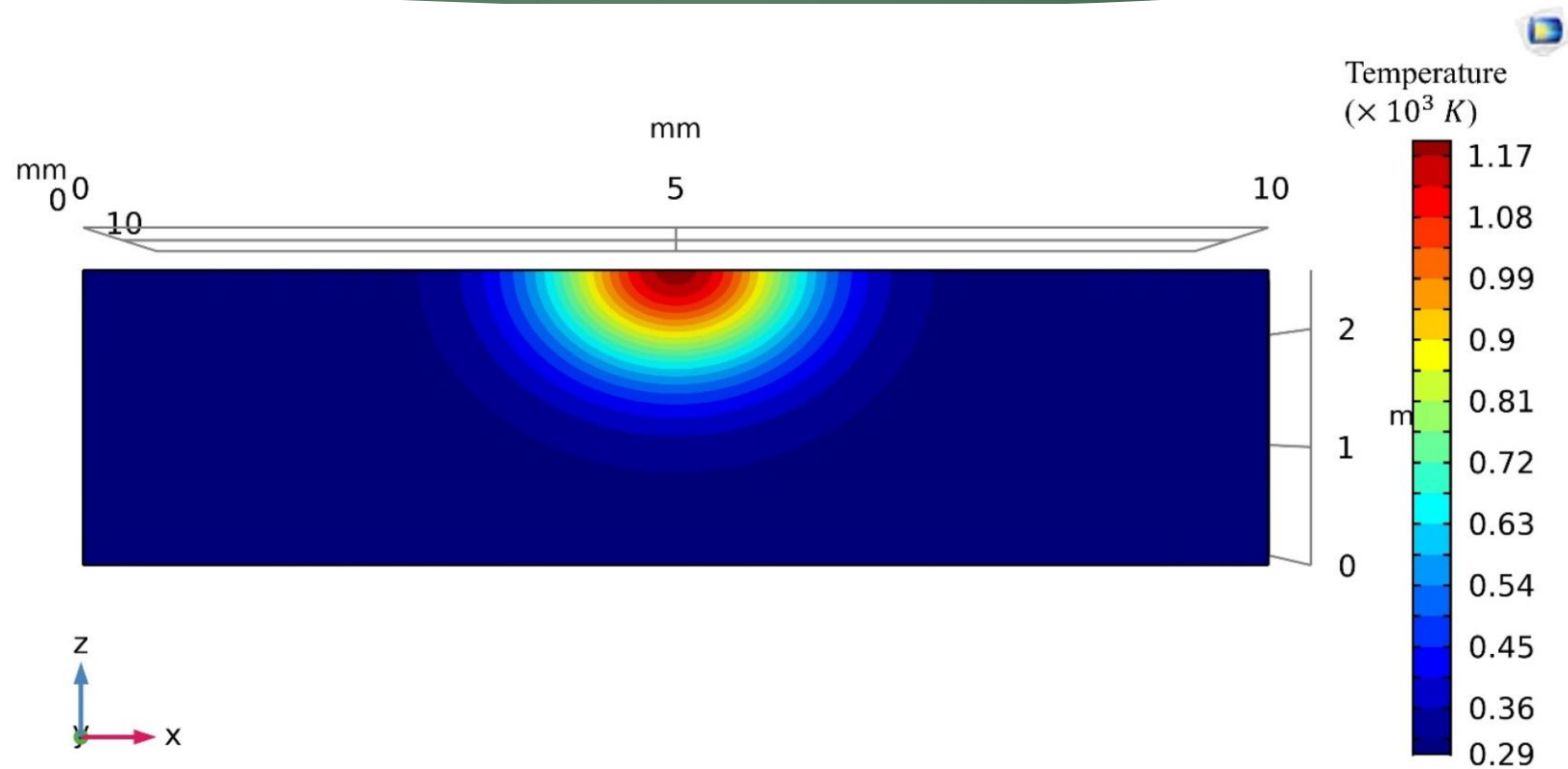
$$R_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nH - z)^2}$$

$$R'_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nH + z)^2}$$

Λύσεις Rosenthal

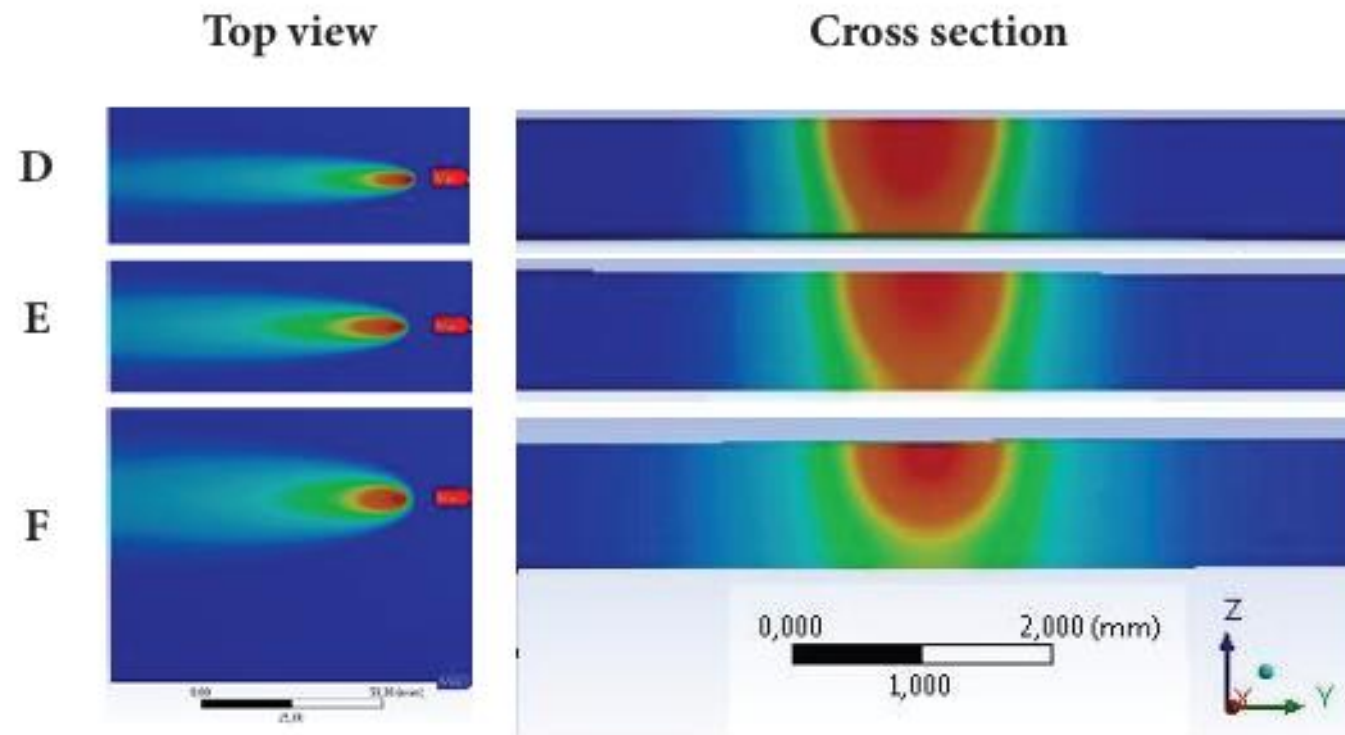
- ❑ Στο $x=0$ η θερμοκρασία απειρίζεται λόγω της παραδοχής σημειακής θερμικής πηγής
- ❑ Ημι-απειρη επίπεδη πλάκα, αγνόηση φαινομένων στις άκρες της
- ❑ Συγκέντρωση ισόθερμων αμέσως μπροστά από την πηγή
- ❑ Όσο πιο μεγάλη είναι η Q ή/και k τόσο πιο ομοιόμορφο πεδίο
- ❑ Όταν η ταχύτητα συγκόλλησης ξεπεράσει την ταχύτητα μεταφοράς μάζας το πεδίο από ομόκεντροι κύκλοι γίνεται πεδίο με πυρά κομήτη

Θερμοκρασιακές κατανομές

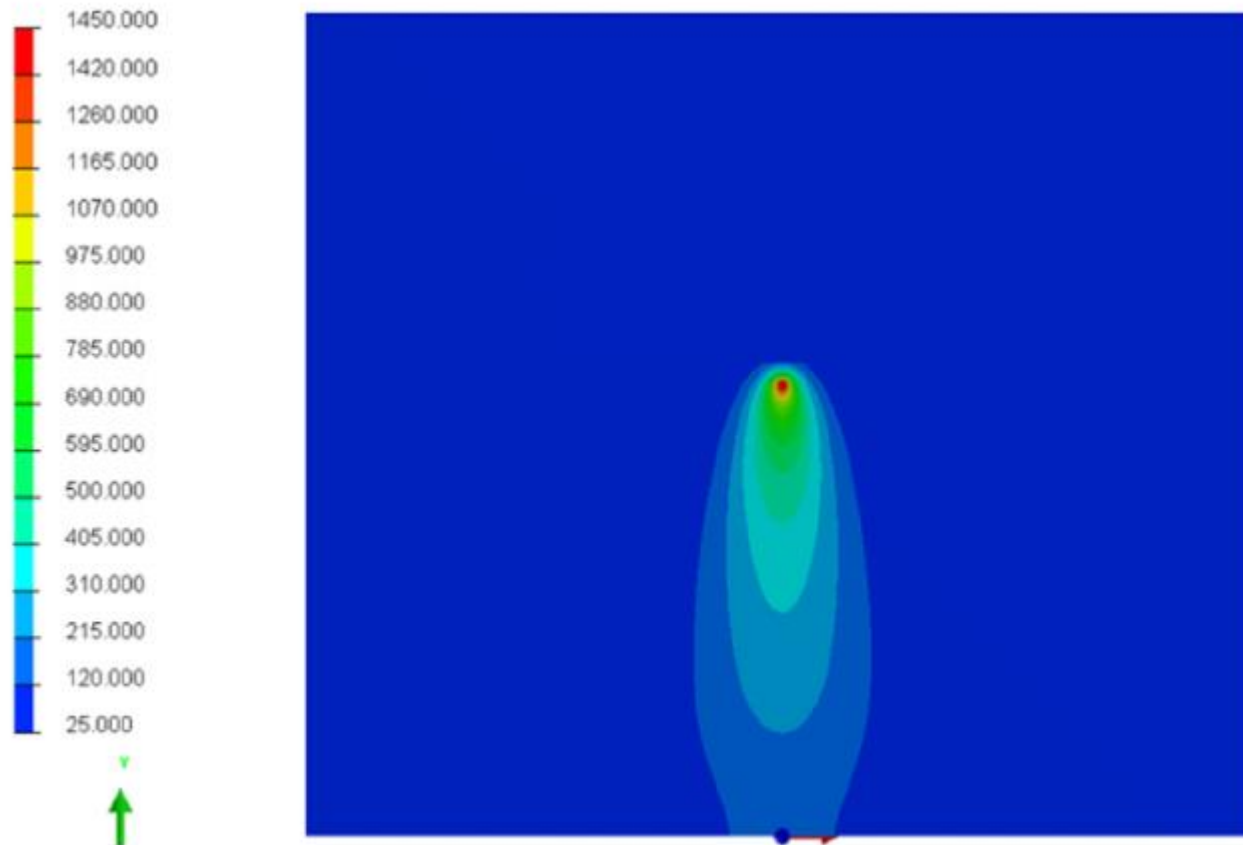


(a)

Θερμοκρασιακές κατανομές



Θερμοκρασιακές κατανομές



Θερμικός κύκλος

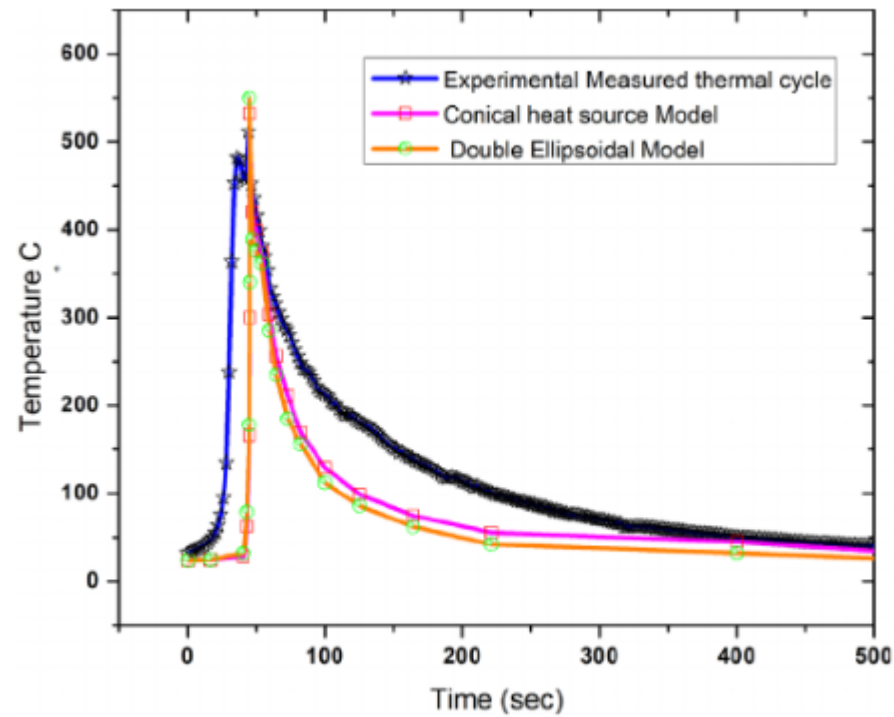


Fig. 6. Thermal Analysis of Laser welding.

Ρυθμός ψύξης – Λύσεις Adams

□ Έλασμα άπειρου πάχους $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2\pi k(T - T_0)}{h}$

$$w = x - ut$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{\text{ΑΣ}} = -u \frac{\partial T}{\partial w}$$

□ Έλασμα πεπερασμένου πάχους $\frac{\partial T}{\partial t} = 2\pi k \rho c_p \left(\frac{H}{h}\right)^2 (T - T_0)^2$

□ «Σχετικό πάχος» ελάσματος $H_0 = H \sqrt{\frac{\rho c_p (T - T_0)}{h}}$

$H_0 < 0.75$
πεπερασμένο πάχος

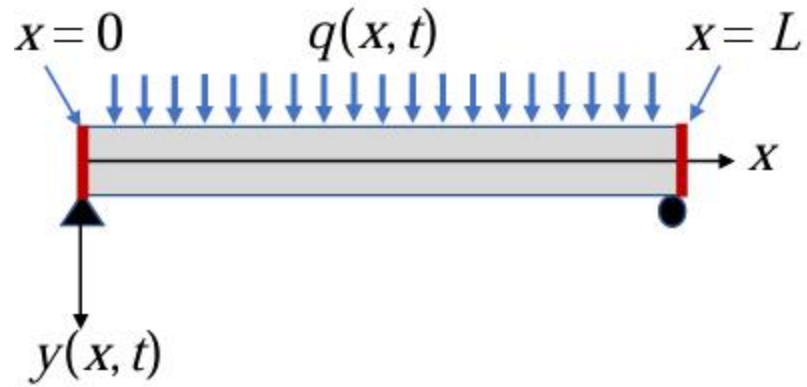
Παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό ψύξης

- ❑ Η προθέρμανση μειώνει το ρυθμό ψύξης
- ❑ Έτσι ώστε να αποφύγουμε ανεπιθύμητες ιδιότητες στη ΘΕΖ
- ❑ Ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η τάση του υλικού για ρωγμάτωση
- ❑ Μείωση ρυθμού ψύξης επιτυγχάνεται και με την αύξηση του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας h
- ❑ Όμως πρέπει να γίνεται με προσοχή διότι επιφέρει παραμορφώσεις

ΜΕΡΟΣ Γ

TUTORIALS ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΠΣ

Analytical solutions & Numerical simulations



Newton's Law

Mathematics

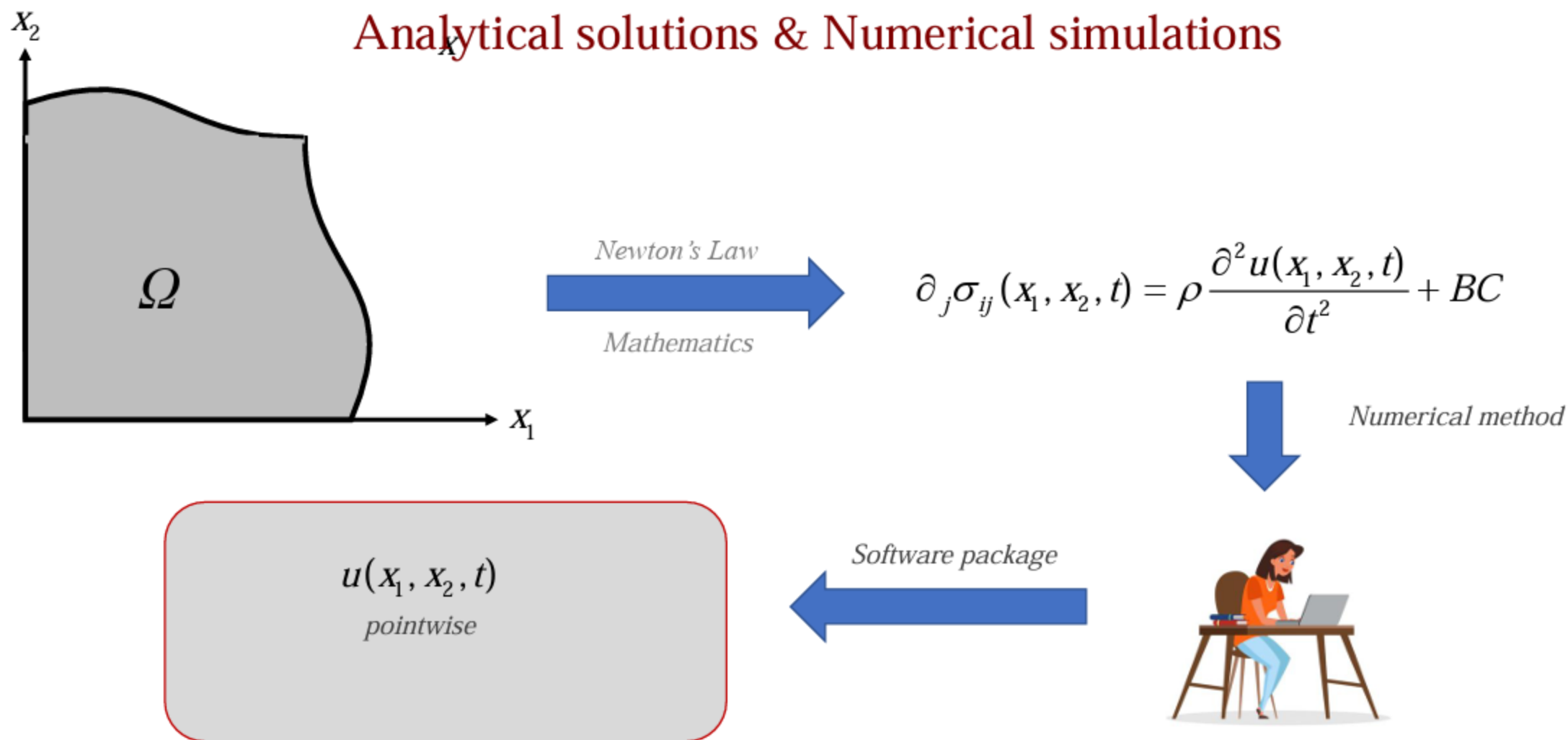
$$-\frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + q(x, t) = \frac{1}{\gamma^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + BC$$



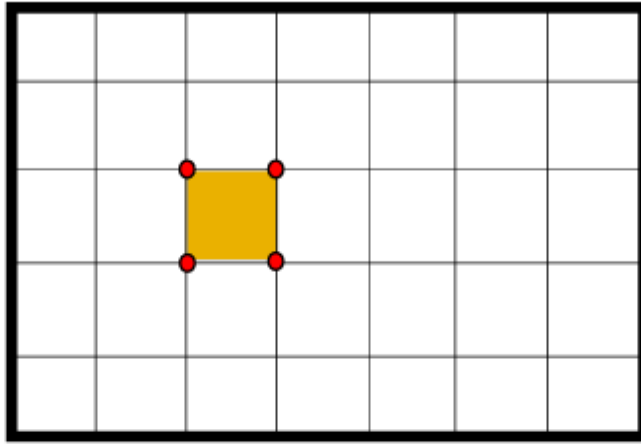
Algebra

$y(x, t)$
in
closed form

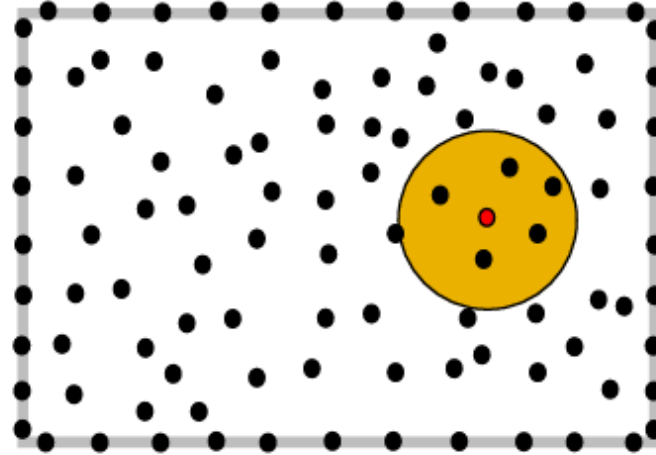
Analytical solutions & Numerical simulations



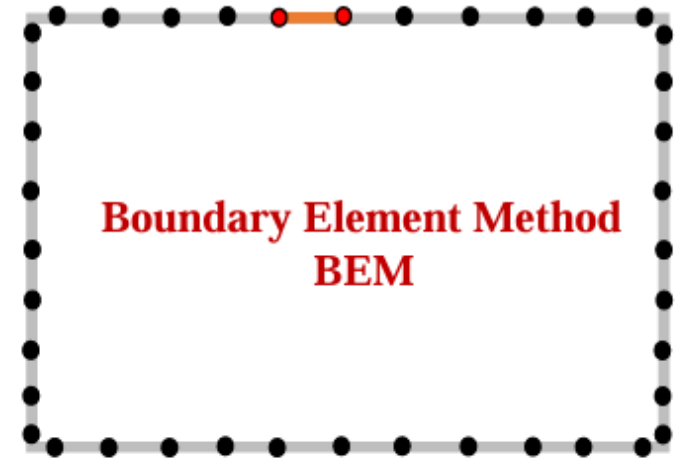
Finite Element Method FEM



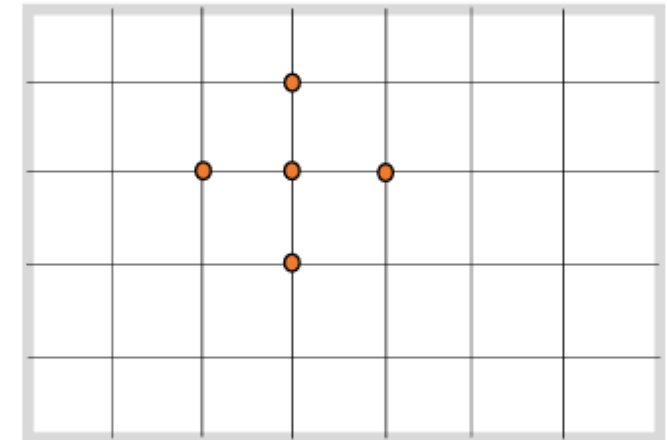
Meshless & Meshfree Methods



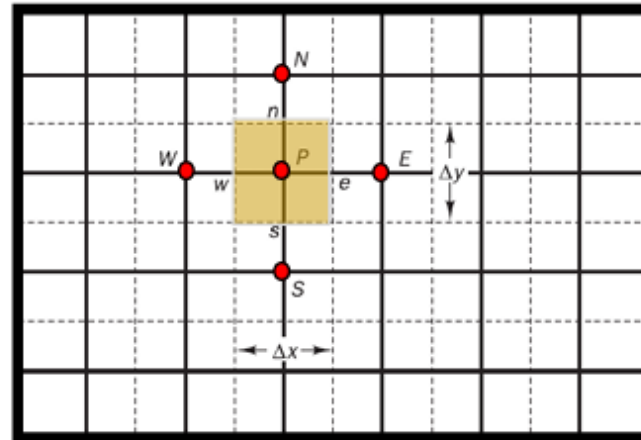
Boundary Element Method BEM



Finite Differences Method FDM

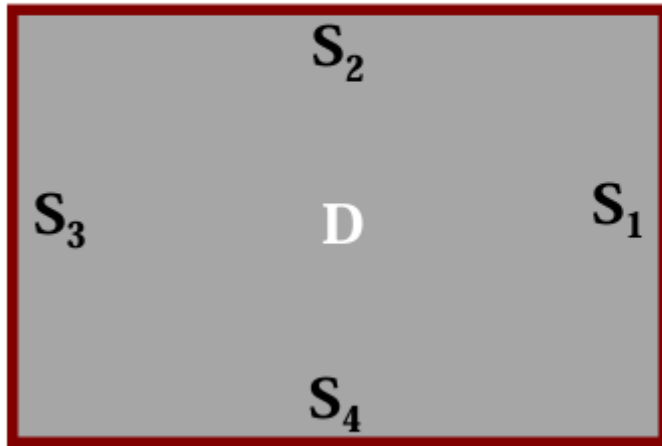


Finite Volumes Method FVM



Μαθηματική Διατύπωση προβλήματος

$$\nabla^2 \varphi(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in D$$



Boundary Conditions

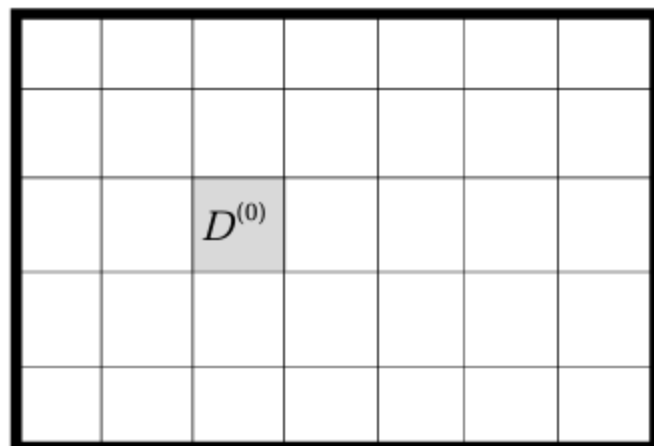
$$\partial_n \varphi(\mathbf{x}) = q_0, \quad \mathbf{x} \in S_1$$

$$\partial_n \varphi(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in S_2 \cup S_4$$

$$\varphi(\mathbf{x}) = \varphi_0, \quad \mathbf{x} \in S_3$$

$$S = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4$$

The Finite Element Method



Weak Formulation: $\int_{D^{(0)}} w(\mathbf{x}) [\nabla^2 \varphi(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x})] dV(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in D$

1st Green Identity

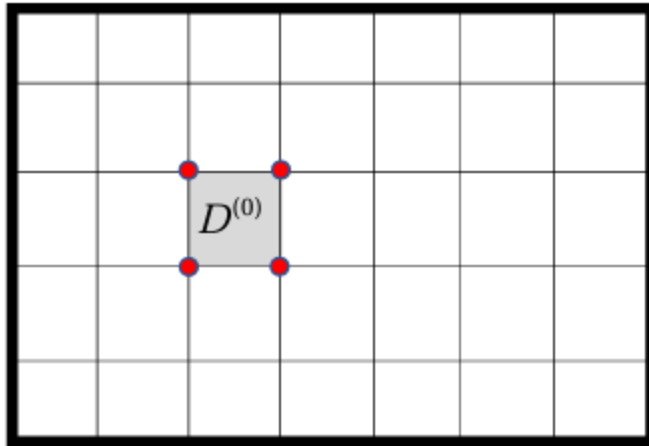
$$\int_{D^{(0)}} w(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}) dV(\mathbf{x}) + \int_{D^{(0)}} \nabla w(\mathbf{x}) \cdot \nabla \varphi(\mathbf{x}) dV(\mathbf{x}) = \int_{S^{(0)}} w(\mathbf{x}) q_0(\mathbf{x}) dS(\mathbf{x})$$

For all the internal elements

$$\int_{D^{(0)}} w(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}) dV(\mathbf{x}) + \int_{D^{(0)}} \nabla w(\mathbf{x}) \cdot \nabla \varphi(\mathbf{x}) dV(\mathbf{x}) = 0$$

$$\int_{D^{(0)}} \nabla w(\mathbf{x}) \cdot \nabla \varphi(\mathbf{x}) dV(\mathbf{x}) = - \int_{D^{(0)}} w(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}) dV(\mathbf{x})$$

The Finite Element Method



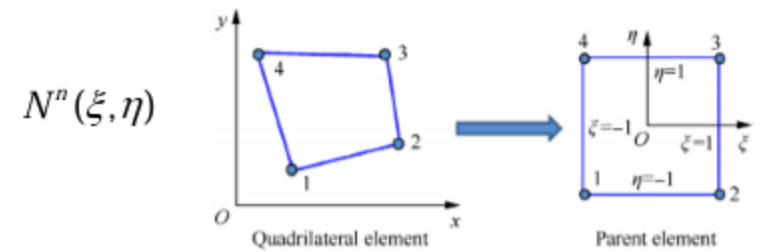
$$\int_{D^{(0)}} \nabla w(\mathbf{x}) \cdot \nabla \varphi(\mathbf{x}) dV(\mathbf{x}) = - \int_{D^{(0)}} w(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}) dV(\mathbf{x})$$

$$w = \sum_{n=1}^4 N^n \cdot w_n$$

$$\varphi = \sum_{m=1}^4 N^m \cdot \varphi_m$$

$$\nabla w = \sum_{n=1}^4 \nabla N^n \cdot w_n$$

$$\nabla \varphi = \sum_{m=1}^4 \nabla N^m \cdot \varphi_m$$



vector 4×1

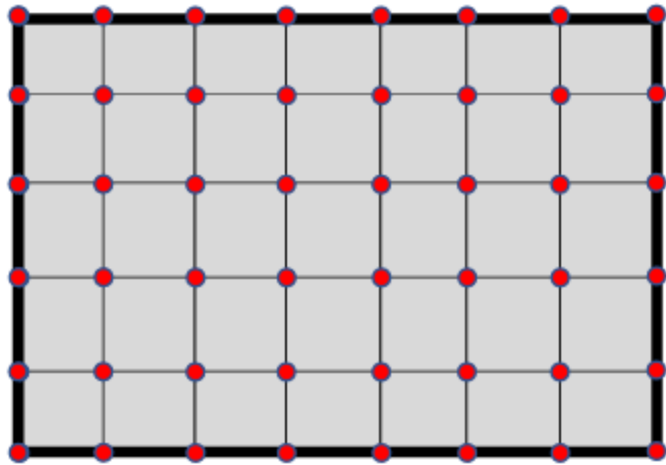
vector 1×4

$$\mathbf{w}^{(0)} \cdot [\mathbf{k}^{(0)}] \cdot \boldsymbol{\varphi}^{(0)} = \mathbf{w}^{(0)} \cdot \mathbf{f}^{(0)}$$

$$\mathbf{w}^{(0)} \cdot \left[\int_{D^{(0)}} \nabla N^n \nabla N^m dV(\mathbf{x}) \right] \cdot \boldsymbol{\varphi}^{(0)} = \mathbf{w}^{(0)} \cdot \left[- \int_{D^{(0)}} N^n f_n dV(\mathbf{x}) \right]$$

$[\mathbf{k}^{(0)}]$, matrix 4×4

$\mathbf{f}^{(0)}$, vector 1×4



The vector Φ contains all the unknown nodal potentials of the problem

The assembly of all equations, produced for each element, provides the following equation valid for any arbitrary vector $\mathbf{W}$:

$$\mathbf{W} \cdot [\mathbf{K}] \cdot \Phi = \mathbf{W} \cdot \mathbf{F}$$

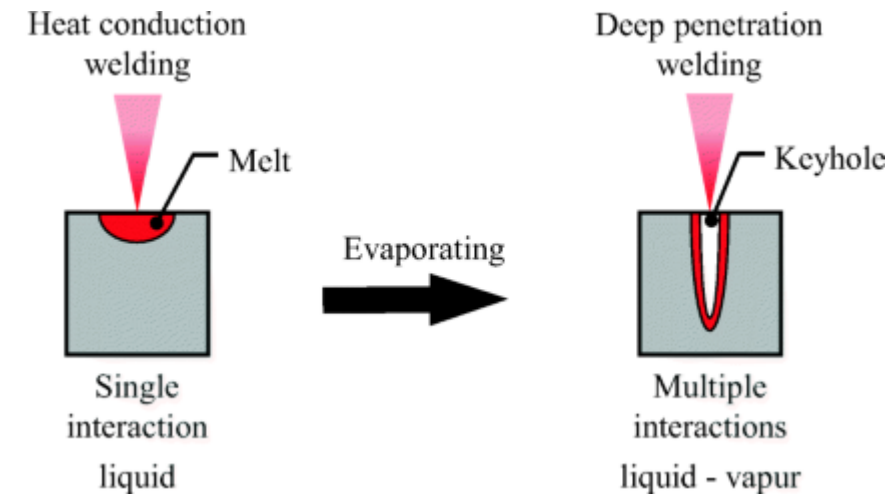


$$[\mathbf{K}] \cdot \Phi = \mathbf{F}$$

Τύποι συγκόλλησης Laser

Ανάλογα με την ισχύ και με το μήκος κύματος 2 τύποι συγκόλλησης παρατηρούνται

- Με αγωγή
- Με τη δημιουργία κλειδαρότρυπας



Συγκόλληση επίπεδων πλακών Ti

Το παράδειγμα είναι διαθέσιμο στον σύνδεσμο:
<https://www.comsol.com/model/welding-of-a-titanium-plate-110151>

- ❑ Ένα πέρασμα
- ❑ Εμπορικά άλφα-βήτα κράματα αλουμινίου
- ❑ α-φάση: στερεό διάλυμα Al με μικρή διαλυτότητα κραματικών στοιχείων
- ❑ β-φάση: ενδομεταλλική ένωση (intermetallic), συνήθως σκληρή και ψαθυρή
- ❑ Η συσχέτιση της διάλυσης της α-φάσης με τη θερμοκρασία δίνεται

$$\alpha_{1,H,SS}(T) = 2.20655 \times 10^{-31} \times T^{9.88821}$$

TABLE 1: TEMPERATURE-DEPENDENT THERMAL MATERIAL PROPERTIES.

Phase	ρ	C_p	k
Beta	4700kg/m ³	480J/(kg·K) + 0.24m/W · T	0.3W/(m·K) + 0.021m/W · T
Widmanstätten Alpha	4400kg/m ³	480J/(kg·K) + 0.24m/W · T	0.1W/(m·K) + 0.016m/W · T
Martensitic Alpha	4400kg/m ³	480J/(kg·K) + 0.24m/W · T	0.1W/(m·K) + 0.016m/W · T

Συγκόλληση επίπεδων πλακών Ti

$$Q = \begin{cases} q_0 \exp\left(-3\left(\left(\frac{X-X_0}{c_f}\right)^2 + \left(\frac{Y}{a}\right)^2 + \left(\frac{Z}{b}\right)^2\right)\right) & X \geq X_0 \\ q_0 \exp\left(-3\left(\left(\frac{X-X_0}{c_r}\right)^2 + \left(\frac{Y}{a}\right)^2 + \left(\frac{Z}{b}\right)^2\right)\right) & X < X_0 \end{cases}$$

where q_0 is the power density of the weld, given by

$$q_0 = Q_w \frac{6\sqrt{3} \cdot f_r}{a \cdot b \cdot c_r \cdot \pi\sqrt{\pi}} = Q_w \frac{6\sqrt{3} \cdot f_f}{a \cdot b \cdot c_f \cdot \pi\sqrt{\pi}}$$

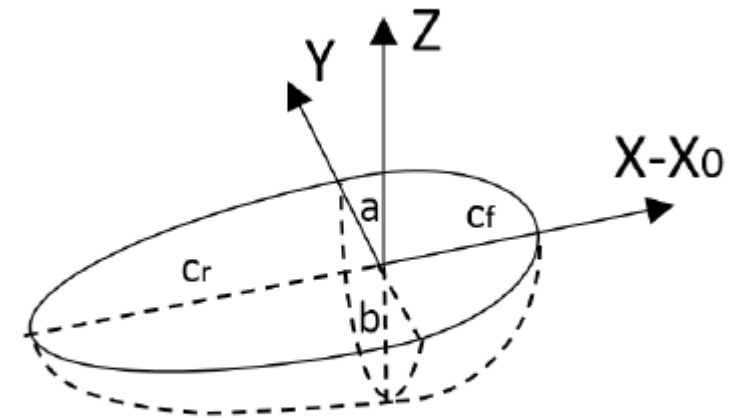
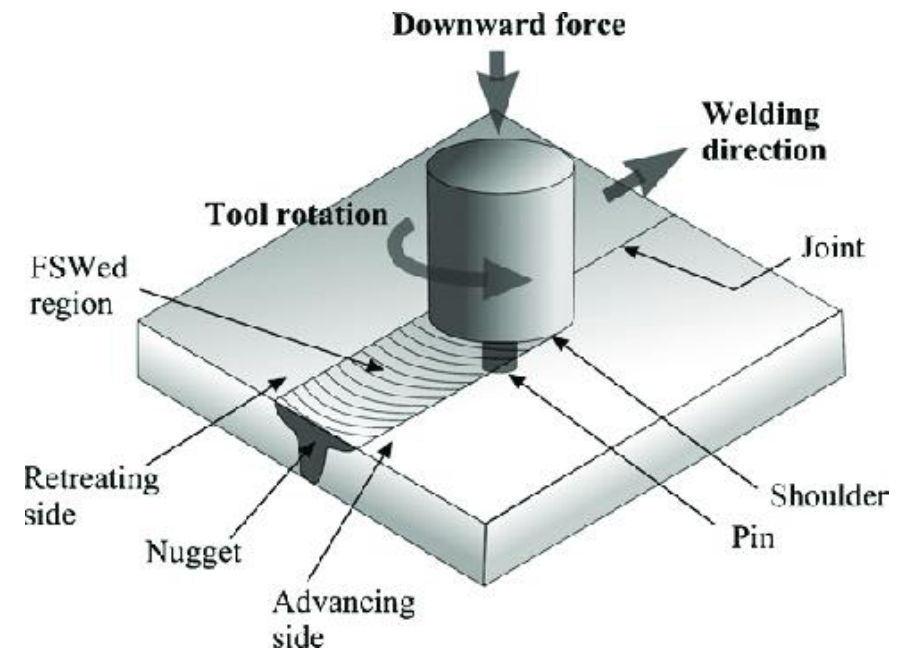


Figure 4: The Goldak double-ellipsoid.

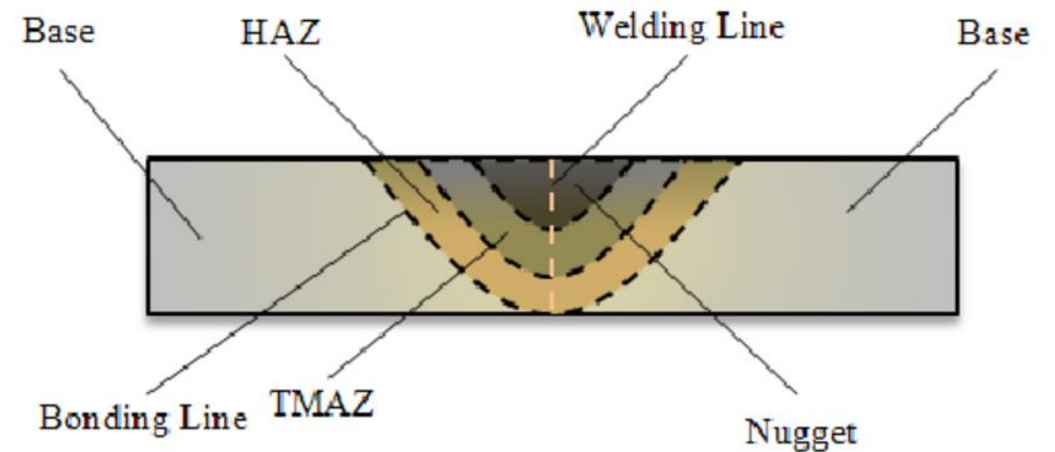
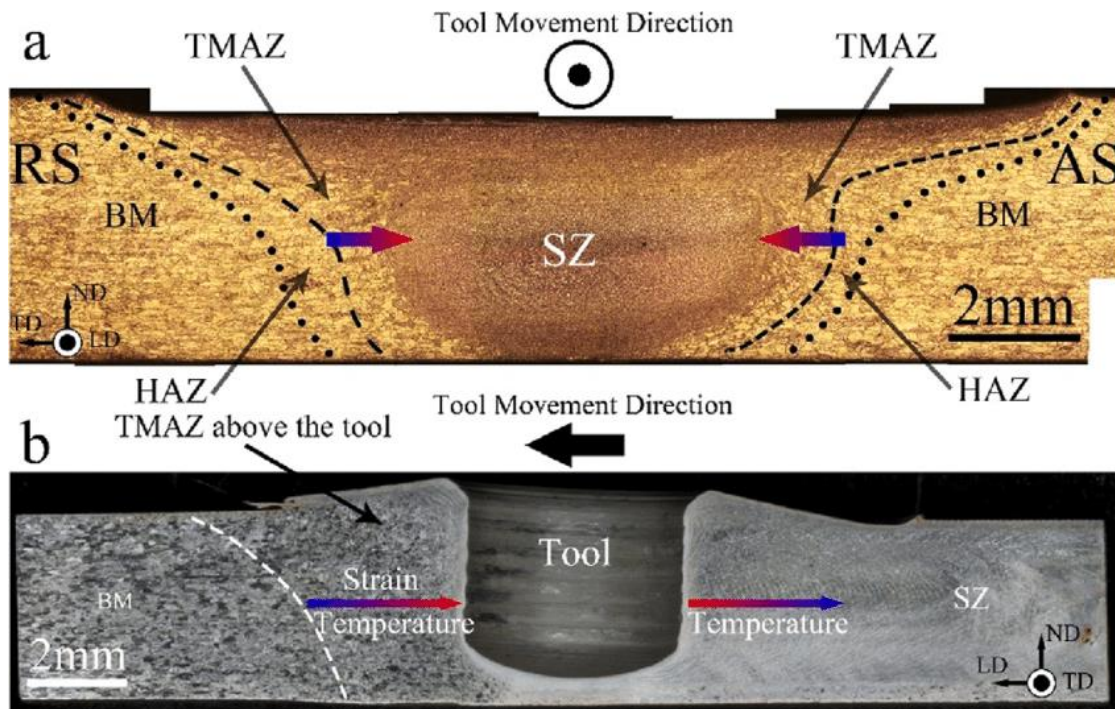
Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW)

- ❑ Ανάπτυξη θερμοκρασίας δια τριβής
- ❑ Το εργαλείο της συγκόλλησης θερμαίνει τα τεμάχια και βοηθά στη ροή υλικού
- ❑ Από αυτό εξαρτάται:
 - ❑ Η ποιότητα της συγκόλλησης
 - ❑ Η μέγιστη δυνατή ταχύτητα συγκόλλησης
 - ❑ Η παραγωγή θερμότητας



Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW)

64



Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση

- ❑ Χρήση κινούμενου συστήματος συντεταγμένων στο κέντρο του εργαλείου → quasi-stationary state
- ❑ Ημι-άπειρες επίπεδες πλάκες
- ❑ Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη τη διαδικασία ανάδευσης στο αλουμίνιο,
- ❑ η οποία είναι πολύ περίπλοκη,
- ❑ καθώς περιλαμβάνει αλλαγές φάσης και
- ❑ ροή υλικού από το μπροστινό προς το πίσω μέρος του περιστρεφόμενου εργαλείου

Το παράδειγμα είναι διαθέσιμο στον σύνδεσμο:

<https://www.comsol.com/model/friction-stir-welding-of-an-aluminum-plate-461>

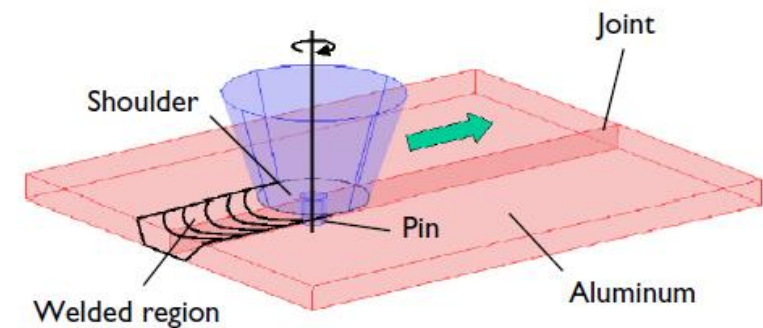
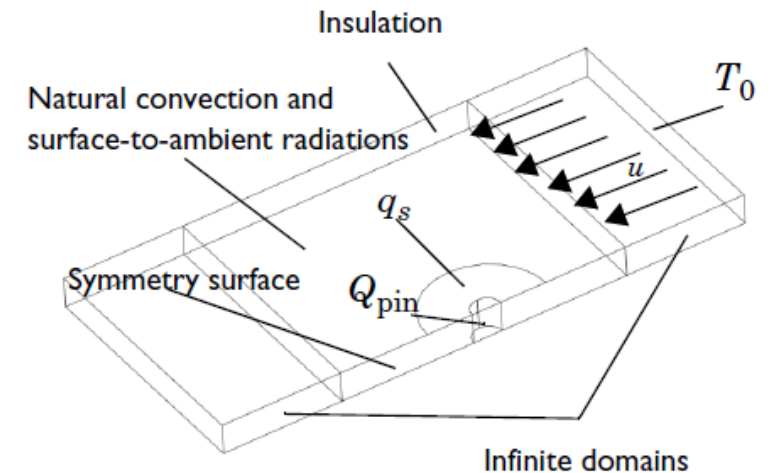


Figure 1: Two aluminum plates being joined by friction stir welding.

Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση

Ως αποτέλεσμα της σταθεροποίησης του συστήματος συντεταγμένων στο εργαλείο συγκόλλησης, η εξίσωση περιλαμβάνει έναν όρο μεταφοράς που εξαρτάται από την ταχύτητα της συγκόλλησης εκτός από τον όρο αγωγής

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$



Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση

- ❑ Το μοντέλο προσομοιώνει τη θερμότητα που παράγεται στη διεπαφή μεταξύ του πείρου του εργαλείου και του τεμαχίου
- ❑ ως επιφανειακή πηγή θερμότητας που εξαρτάται από
- ❑ την γωνιακή ταχύτητα του πείρου και
- ❑ την μέση διατμητική τάση που υλικού, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία

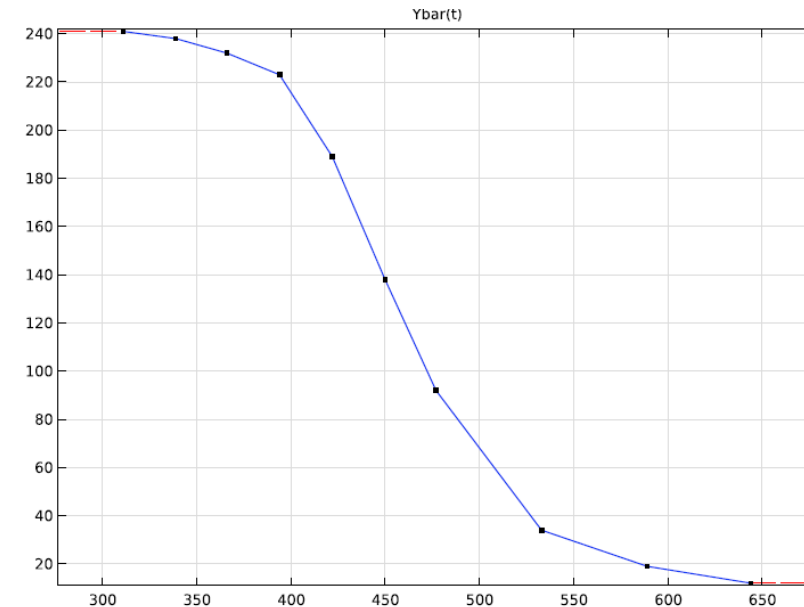


Figure 3: Yield stress (MPa) vs. temperature (K) for 6061-T6 aluminum.

Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση

- ❑ Επιπλέον, θερμότητα παράγεται στη διεπαφή μεταξύ του βραχίονα του εργαλείου και του τεμαχίου προς κατεργασία.
- ❑ Η τοπική ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας σε απόσταση r από τον κεντρικό άξονα του εργαλείου
- ❑ εξαρτάται από την επιβαλλόμενη δύναμη και την γωνιακή ταχύτητα του πείρου

Επίδραση των παραμέτρων DC παλμού στη θερμοκρασία σε συγκολλήσεις τόξου

Το παράδειγμα είναι διαθέσιμο στον σύνδεσμο:

<https://www.comsol.com/model/plasma-pulsed-arc-100551>

<https://downloadlynet.ir/2020/09/1217/03/comsol-multiphysics/14/?#/1217-comsol-m-132510113719.html>

Ερωτήσεις - απορίες