

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΙΤΛΟ:

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ  
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΧΑΛΥΒΑ ΜΕ LASER

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΜΑΡΙΟΣ ΛΙΑΤΣΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΡΗΓΟΡΗΣ

ΒΟΛΟΣ 2004



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 3362/1  
Ημερ. Εισ.: 17-10-2005  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2005  
ΛΙΑ

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δέσμη LASER δεν αποτελεί πρόσφατο επιστημονικό επίτευγμα, αφού η ύπαρξή της είναι γνωστή εδώ και δεκαετίες. Αυτό όμως που πραγματικά αποτελεί σχετικά πρόσφατο επίτευγμα, είναι η χρησιμοποίηση της σε πολλούς (και εντελώς διαφορετικούς μεταξύ τους) τομείς της επιστημονικής έρευνας και πρακτικής. Έτσι, η δέσμη LASER έχει κάνει αισθητή την παρουσία της στη βιομηχανία, χρησιμοποιούμενη για τη κοπή μετάλλων, διάτρηση, συγκολλήσεις, χημικές και φυσικές εναποθέσεις ατμού στην επιφάνεια μετάλλων, κ.λ.π. Επίσης πρέπει να αναφερθεί η τεραστία συνεισφορά της δέσμης LASER στην ιατρική, όπου έγινε εφικτή η διεξαγωγή πολύ λεπτών και δύσκολων χειρουργικών επεμβάσεων, με ομολογουμένως εκπληκτικά ποσοστά επιτυχίας. Ακόμη, σε ερευνητικό επίπεδο, έγινε δυνατή η καταγραφή και μέτρηση των χαρακτηριστικών διαφόρων φαινομένων, χάρη στη χρήση της δέσμης LASER (μετρήσεις ταχυτήτων ρευστών, μετρήσεις πάρα πολύ μικρών συγκεντρώσεων διάφορων ρύπων και μικροοργανισμών σε απόβλητα, κ.λ.π). Φυσικά, αυτό που πρωτίστως ενδιαφέρει τον τεχνικό κόσμο, είναι η επιτυχής και αποδοτική εφαρμογή του LASER σε θέματα βιομηχανικής παραγωγής. Είναι μάλιστα γεγονός, ότι η βιομηχανία έχει υιοθετήσει και επεκτείνει τη χρησιμοποίηση της δέσμης LASER σε πλήθος κατεργασιών. Μεταξύ των κατεργασιών αυτών βρίσκεται και η επιφανειακή σκλήρυνση.

## 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Λέγοντας μοντελοποίηση εννοούμε την ανάπτυξη και την εφαρμογή ενός μοντέλου το οποίο θα περιγράφει τα θερμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την επιφανειακή σκλήρυνση ενός χάλυβα καθώς αυτό θερμαίνεται επιφανειακά από μια δέσμη LASER. Στη παρούσα διπλωματική εργασία και για τον παραπάνω σκοπό έγινε χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Σαν αποτέλεσμα έχουμε τη πρόβλεψη των τιμών των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην επιφάνεια ενός συγκεκριμένου χάλυβα, η οποία με τη σειρά της συνεπάγεται την εκ των προτέρων γνώση του βάθους σκλήρυνσης. Αυτό γίνεται μιας και οι πειραματικές μετρήσεις είναι οικονομικά ασύμφορες και σχεδόν αδύνατες. Επίσης, η μελέτη της σκλήρυνσης με LASER είναι σε πολύ αρχικό στάδιο. Η διπλωματική αυτή θα βοηθήσει στη μεγαλύτερη γνώση του αντικειμένου.

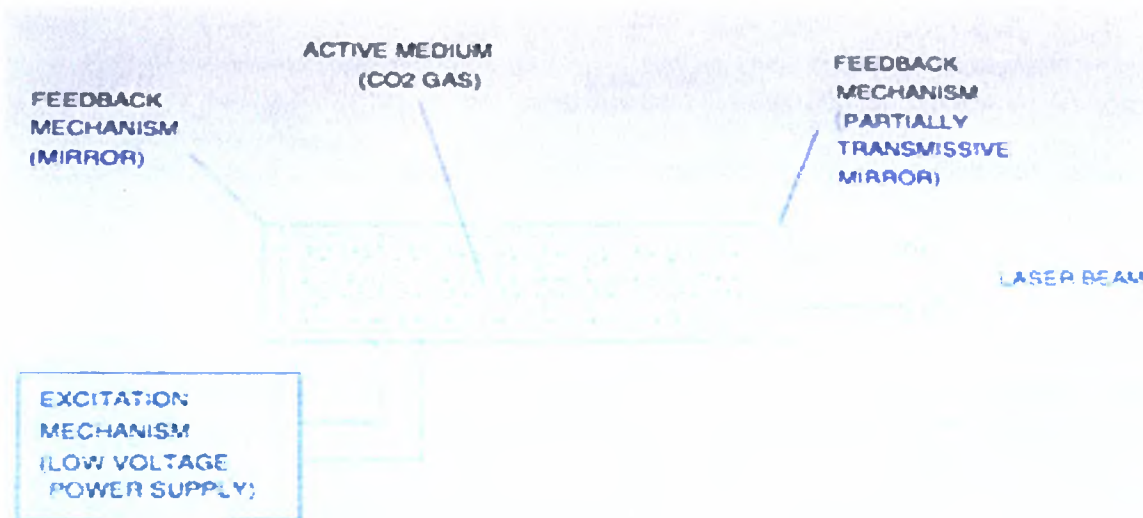
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ LASER

Το LASER , βασικά αποτελείται από δυο κάτοπτρα τα οποία είναι παράλληλα τοποθετημένα μεταξύ τους, σχηματίζοντας έτσι ένα οπτικό ταλαντωτή, δηλαδή έναν θάλαμο στον οποίο το φως μπορεί να ταλαντώνεται συνεχώς ανάμεσα στα δυο κάτοπτρα, εκτός εάν η διαρκής αυτή ταλάντωση διακοπεί από κάποιον μηχανισμό, όπως είναι η απορρόφηση. Μεταξύ των δύο κάτοπτρων παρεμβάλλεται ένα ενεργό μέσο, το οποίο έχει την ικανότητα να ενισχύει τις ταλαντώσεις του φωτός, μέσω του φαινομένου της προκλημένης ακτινοβολίας (stimulated emission). Από το φαινόμενο αυτό πήρε το όνομα του και το LASER (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation-ενίσχυση του φωτός από την προκλημένη εκπομπή ακτινοβολίας).

Το LASER επίσης περιλαμβάνει κάποιο σύστημα για την άντληση του ενεργού μέσου, ώστε αυτό να αποκτήσει την ενέργεια που απαιτείται για να καταστεί ενεργό. Συνήθως το σύστημα αυτό αποτελείται από μια πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, όταν πρόκειται για LASER CO<sub>2</sub> και He/Ne, ή από έναν εστιασμένο παλμό φωτός, όταν πρόκειται για LASER Nd-YAG. Ακόμη είναι δυνατόν η απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται το μέσο για να καταστεί ενεργό να προσδοθεί από κάποια χημική αντίδραση, όπως συμβαίνει στο LASER ΙΩΔΙΟΥ.

Η οπτική διάταξη μιας μονάδας LASER φαίνεται στο σχήμα 2.1



Σχ. 2.1 Η οπτική διάταξη μιας μονάδας LASER.

Το ένα από τα δύο κάτοπτρα είναι μερικώς διαφανές, έτσι ώστε να επιτραπεί η έξοδος από το σύστημα ενός μέρους της δέσμης του ταλαντωμένου φωτός με τη μορφή της δέσμης LASER. Το άλλο κάτοπτρο ανακλά ολικά το φως, στο βαθμό βέβαια που είναι δυνατόν να γίνει αυτό (ανάκλαση περίπου κατά 99.999%). Το κάτοπτρο αυτό συνήθως έχει κάποια καμπυλότητα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ισχύος της δέσμης του ταλαντωμένου φωτός λόγω διάθλασης. Η καμπυλότητα αυτή επίσης βοηθά στην ευθυγράμμιση των κάτοπτρων χωρίς σημαντικές δυσκολίες, κάτι που δεν θα συνέβαινε αν και τα δύο κάτοπτρα ήταν επίπεδα. Ο σχεδιασμός της κοιλότητας του LASER έγκειται στο μήκος της κοιλότητας και στο σχήμα των κατόπτρων.

## 2.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΡΟΚΛΗΜΕΝΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η αρχή λειτουργίας του LASER στηρίζεται στο φαινόμενο της προκλημένης ακτινοβολίας (stimulated emission phenomenon). Το φαινόμενο αυτό προβλέφθηκε από τον Einstein το 1917, ο οποίος το απέδειξε κατ' αρχήν μαθηματικά.

Ας θεωρηθεί το μόριο του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Το μόριο αυτό μπορεί να βρεθεί σε διάφορες ενεργειακές καταστάσεις, αναλόγως με τη μορφή της ταλάντωσης ή της περιστροφής που εκτελεί. Αυτές οι ενεργειακές καταστάσεις είναι κβαντισμένες, δηλαδή είτε υφίστανται σε συγκεκριμένα επίπεδα ενέργειας, είτε δεν υφίστανται καθόλου.

Το μίγμα αερίων, δηλαδή το ενεργό μέσο, σε ένα LASER CO<sub>2</sub> υφίσταται μια ηλεκτρική εκκένωση, η οποία προκαλεί το υπό χαμηλή πίεση αέριο να έλθει στη φυσική κατάσταση που ονομάζεται πλάσμα. Στη κατάσταση του πλάσματος τα μόρια καταλαμβάνουν διάφορες καταστάσεις διέγερσης, ακολουθώντας την κατανομή Boltzmann:

$$n_i = C \exp[-E_i/(kT)] \quad \text{όπου}$$

- $n_i$  : ο αριθμός των μορίων που βρίσκονται στην ενεργειακή κατάσταση  $i$
- $E_i$  : η ενέργεια της κατάστασης  $i$
- $k$  : η σταθερά Boltzmann
- $T$  : η απόλυτη θερμοκρασία
- $C$  : σταθερά



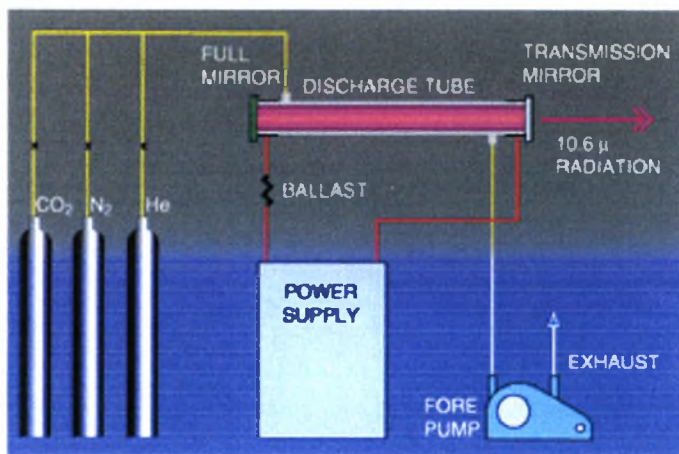
Κάποια από τα μόρια αυτά θα βρίσκονται στην ανώτερη κατάσταση ( $00^01$ ) η οποία αντιπροσωπεύει μια κατάσταση μη συμμετρικής ταλάντωσης. Ένα μόριο στην κατάσταση αυτή μπορεί να χάσει μέρος της ενέργειας του είτε από κάποια σύγκρουση με τα τοιχώματα της κοιλότητας, είτε εκπέμποντας αυτόματα ενέργεια. Εάν το μόριο εκπέμψει αυτόματα ενέργεια, τότε μεταπίπτει στην κατάσταση μιας συμμετρικής ταλάντωσης ( $10^00$ ), εκπέμποντας ένα φωτόνιο μήκους κύματος  $10.6 \mu\text{m}$ , το οποίο μπορεί να κινηθεί προς οποιαδήποτε τυχαία κατεύθυνση στο χώρο. Ένα τυχαίο από τα φωτόνια αυτά είναι δυνατόν να κινηθεί και επάνω στον οπτικό άξονα της κοιλότητας, αρχίζοντας έτσι να εκτελεί μια ταλάντωση μεταξύ των κατόπτρων. Κατά τη διάρκεια της κίνησης αυτής μεταξύ των κατόπτρων, το φωτόνιο μπορεί είτε να απορροφηθεί από ένα μόριο που βρίσκεται στην ενεργειακή κατάσταση ( $10^00$ ), είτε να διαθλασθεί και να εξέλθει από το σύστημα, είτε τέλος να συγκρουσθεί με ένα άλλο διεγερμένο μόριο που βρίσκεται στη κατάσταση ( $00^01$ ). Στην τελευταία αυτή περίπτωση θα προκαλέσει την απώλεια ενέργειας από το διεγερμένο μόριο, αναγκάζοντας το έτσι να μεταπέσει σε μια χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση και συνεπώς να εκπέμψει ένα ακόμη φωτόνιο με το ίδιο μήκος κύματος, το οποίο θα κινηθεί ακριβώς στην ίδια κατεύθυνση με το πρώτο. Τα δυο αυτά φωτόνια κινούνται συνεχώς μέσα στη κοιλότητα, έχοντας την ίδια κατεύθυνση, προκαλώντας έτσι την εκπομπή και νέων φωτονίων από άλλα διεγερμένα μόρια. Το LASER κάνει χρήση της εξαναγκασμένης εκπομπής και παράγει μια δέσμη που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό τέτοιων σύμφωνων φωτονίων.

## 2.3 ΤΥΠΟΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ LASERS

### 2.3.1 LASER ΑΕΡΙΩΝ ( $\text{CO}_2$ LASERS)

Τα LASER  $\text{CO}_2$  είναι τα πιο διαδεδομένα από τα βιομηχανικά LASERS. Μπορεί να έχουμε παραγωγή ισχύος από λίγα Watt μέχρι μερικές δεκάδες kilowatts. Για μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές είναι ουσιαστικά η μόνη πρόταση. Τα LASER διοξειδίου του άνθρακα  $\text{CO}_2$  εκπέμπουν στη περιοχή από 9 έως  $11 \mu\text{m}$ .

Το σύστημα του LASER διοξειδίου του άνθρακα  $\text{CO}_2$  φαίνεται στο σχήμα 2.2



Σχ. 2.2 Διάταξη του LASER αερίων

Τρία αέρια ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  και  $\text{He}$ ) αναμειγνύονται και τροφοδοτούνται στο ένα άκρο ενός σωλήνα εκκένωσης σε πίεση μερικών torr. Το αέριο φτάνει στο τέλος του σωλήνα μέσα σε 1 sec και αντλείται έξω με μια μηχανική αντλία. Μια ροή ρεύματος διατηρείται στα άκρα του σωλήνα. Με ένα πλήρως ανακλώμενο καθρέφτη από αριστερά και ένα μερικώς διαπεράσιμο από δεξιά έχουμε έτσι μια συσκευή LASER.

### 2.3.2 LASER ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (Nd-YAG LASERS)

Ένα laser στερεάς κατάστασης αποτελείται από μια κοιλότητα σε όρθια στήριξη με το ενεργό μέσο νεόδμιο σε μια κρυσταλλική ράβδο από γρανίτη υτρίου, αλουμινίου δεμένη σε μια από τις εστίες μιας ελλειπτικής κοιλότητας. Στην άλλη εστία βρίσκεται μια λάμπα κρύπτον. Επίσης μέσα στην οπτική κοιλότητα είναι ένα διάφραγμα για έλεγχο της κατάστασης του laser, και πιθανόν ένας διακόπτης Q για απανωτές φωτοφράξεις της κοιλότητας για να παράγει γρήγορα κύματα ενέργειας. Η διακοπή Q δεν είναι δυνατή με τα ισχυρά laser των 400W αλλά είναι χρήσιμη για ανθεκτικά κοπτικά laser ταξινομημένα σε ισχύ λίγων watt. Σ' αυτές τις περιπτώσεις η μέγιστη ισχύς ανά παλμό θα είναι γύρω στα 10kW περίπου όταν το Q είναι ενεργοποιημένο. Το υπόλοιπο laser αποτελείται από ευθυγράμμιση ακτινών και συστήματα κατεύθυνσης τα οποία είναι δεμένα έξω από την κοιλότητα.

## 2.4 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΜΕ LASER

Η επιφανειακή σκλήρυνση φερριτικών υλικών είναι μια κατεργασία, η οποία εμφανίστηκε για να προσδώσει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε στοιχεία μηχανών και εξαρτήματα, τα οποία δέχονται υψηλές καταπονήσεις, όπως είναι τα έδρανα κυλίσεως και ολισθήσεως, οι οδοντωτοί τροχοί, κ.α. Η επιφανειακή σκλήρυνση αυξάνει την αντοχή του υλικού σε φθορά και διάβρωση και υπό ευνοϊκές συνθήκες, αυξάνει την αντοχή του σε κόπωση, λόγω των παραμενουσών θλιπτικών τάσεων που επιβάλλονται στην επιφάνεια του τεμαχίου από την κατεργασία της σκληρύνσεως. Κατά την επιφανειακή σκλήρυνση με laser, η δέσμη σαρώνει την επιφάνεια του υλικού με αποτέλεσμα αυτή να θερμαίνεται πολύ γρήγορα ως την ωστενιτική περιοχή. Ο υπόλοιπος όγκος του τεμαχίου δρα σαν μια μεγάλη δεξαμενή θερμότητας με αποτέλεσμα να έχουμε απότομη ψύξη (βαφή) στην επιφάνεια του χάλυβα και τη δημιουργία σκληρού μαρτενσίτη. Αναλόγως με το υλικό μπορεί να επιτευχθεί σκληρότητα μέχρι 1,000 HV σε βάθος περίπου 1.5 mm πριν αρχίσει να λιώνει η επιφάνεια.

Τα πλεονεκτήματα της επιφανειακής σκλήρυνσης με laser σε σχέση με τις συνηθισμένες μορφές σκλήρυνσης είναι:

- Βελτιωμένες ιδιότητες σε επιφανειακή σκληρότητα, αντοχή, λίπανση, φθορά και κόπωση
- Μεγαλύτερη ευκολία στο χειρισμό της δέσμης μέσω λογισμικού
- Μεγαλύτερη ακρίβεια στη γεωμετρία
- Μικρότερη επίδραση στο περιβάλλον

Η επιφανειακή σκλήρυνση με laser όμως δεν χρησιμοποιείται αρκετά στη βιομηχανία λόγω:

- Των λίγων τύπων laser που είναι διαθέσιμοι για την επιφανειακή σκλήρυνση
  - Της διαδεδομένης χρησιμοποίησης περισσότερο γνωστών μεθόδων επιφανειακής σκλήρυνσης
  - Της ελλιπούς γνώσης των αρχών της επιφανειακής σκλήρυνσης
- Της περιορισμένης γνώσης της τεχνικής και οικονομικής ωφέλειας



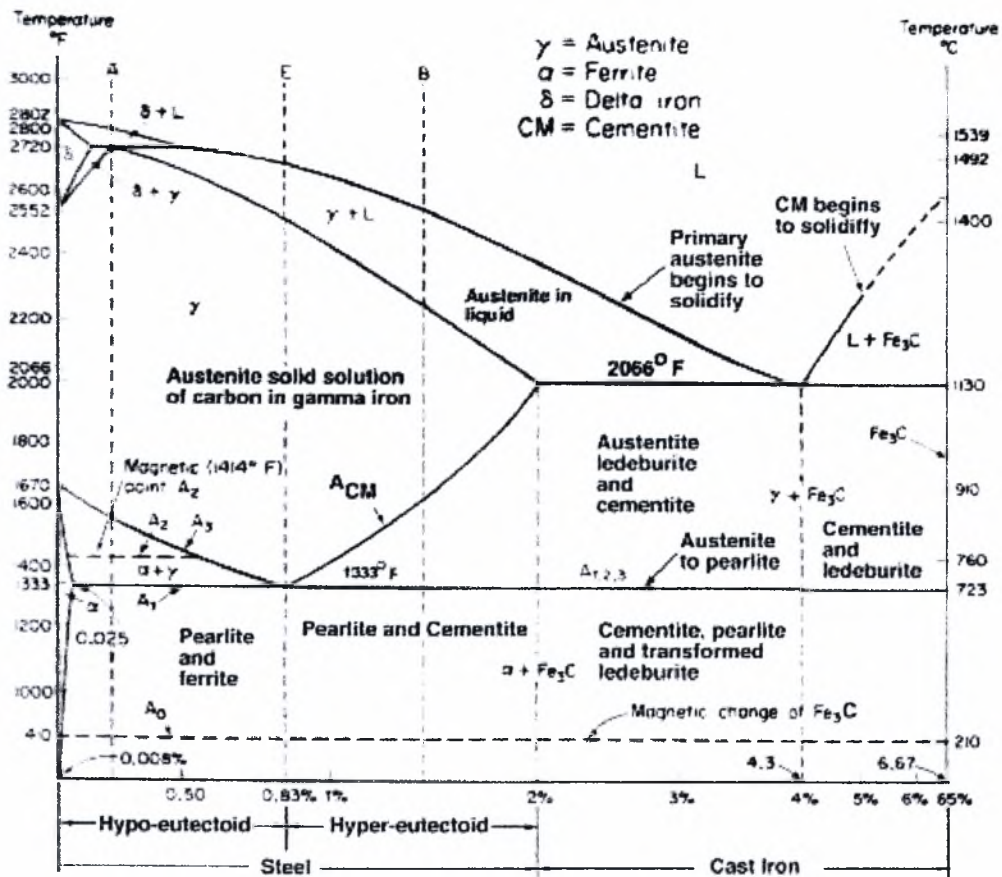
## 2.5 ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Η κατεργασία της επιφανειακής σκλήρυνσης βασίζεται στις ίδιες αρχές με τις συμβατικές κατεργασίες σκλήρυνσης, επειδή κατά την εκτέλεσή της λαμβάνουν χώρα ακριβώς οι ίδιες μεταλλουργικές αντιδράσεις με αυτές των συμβατικών κατεργασιών. Ωστόσο, στην επιφανειακή σκλήρυνση ο χρόνος θέρμανσης πρέπει αναγκαστικά να είναι πολύ μικρότερος απ' ό,τι στη συμβατική σκλήρυνση κάποιου υλικού. Το γεγονός αυτό ισχύει ακόμη περισσότερο στην επιφανειακή σκλήρυνση με τη χρήση δέσμης laser, αφού η θέρμανση μέχρι τις θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης συμβαίνει μέσα σε δευτερόλεπτα ή και κλάσματα του δευτερόλεπτου. Στη πραγματικότητα, κατά την επιφανειακή σκλήρυνση με laser, η περίοδος θέρμανσης είναι πολύ μικρότερη από τη περίοδο ψύξης.

Η συμπεριφορά των φερριτικών υλικών κατά την ταχεία ψύξη από την ωστενιτική περιοχή έχει μελετηθεί λεπτομερώς εδώ και δεκαετίες και έχει γίνει απόλυτα κατανοητή. Δυστυχώς δεν μπορεί να ειπωθεί το ίδιο και για τη διαδικασία ταχείας θέρμανσης. Βασικά, τα προβλήματα που εμφανίζονται με τους πολύ υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης έχουν να κάνουν με το ότι ο ωστενιτικός μετασχηματισμός, καθώς και η ανακατανομή του άνθρακα, η οποία είναι απαραίτητη για τη δημιουργία ενός ομογενούς στέρεου διαλύματος  $\gamma\text{Fe-C}$ , είναι διεργασίες που απαιτούν μικρά αλλά πάντοτε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Η κινητική των διεργασιών αυτών, υπό συνθήκες πολύ υψηλών ρυθμών θέρμανσης δεν έχει ακόμη καθοριστεί με βεβαιότητα, κάνοντας έτσι τον σχεδιασμό της επιφανειακής σκλήρυνσης με τη χρήση δέσμης laser ακόμη δυσκολότερο.

Η βασική αντίδραση που λαμβάνει χώρα κατά την περίοδο θέρμανσης, είναι ο μετασχηματισμός του  $\alpha\text{Fe}$  (φερρίτης), που έχει δομή κυβική χωροκεντρομένη (bcc), σε  $\gamma\text{Fe}$  (ωστενίτης), του οποίου η δομή είναι η κυβική ενδοκεντρωμένη (fcc).

Ο μετασχηματισμός αυτός συντελείται με την πυρήνωση και ανάπτυξη της νέας φάσης (ωστενίτης) στη μήτρα της αρχικής φάσης (φερρίτης). Θερμαίνοντας αργά, δηλαδή διατηρώντας συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας, ο μετασχηματισμός θα αρχίσει στην χαρακτηριστική θερμοκρασία  $A_1$ , που για τους ανθρακοχάλυβες βρίσκεται στους  $723^\circ\text{C}$ , και θα ολοκληρωθεί στη θερμοκρασία  $A_3$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3



Σχ. 2.3 Διάγραμμα Fe-C

Ωστόσο, όταν ο ρυθμός θέρμανσης είναι υψηλός, τότε το σύστημα δεν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία και η γραμμή  $A_3$  τείνει να μετατοπισθεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Συνεπώς, αν και η θερμοκρασία μπορεί να είναι αρκετά υψηλή ώστε να σχηματισθεί ωστενίτης υπό συνθήκες αργής θέρμανσης, η ίδια θερμοκρασία πιθανόν να είναι ανεπαρκής ακόμη και για να ξεκινήσει την ωστενιτοποίηση κάτω από συνθήκες υψηλών ρυθμών θέρμανσης.

Η δομή ενός υποευκτοειδούς χάλυβα, σε θερμοκρασία δωματίου, περιέχει άνθρακα σε μορφή καρβιδίου του σιδηρού ( $Fe_3C$ ), το οποίο ονομάζεται σεμεντίτης, σαν ξεχωριστή φάση. Για να επέλθει σκλήρυνση μετά τη βαφή, θα πρέπει ο άνθρακας αυτός να διαλυθεί ομοιόμορφα στον ωστενίτη. Για το λόγο αυτό ο άνθρακας πρέπει να ανακατανομηθεί μέσω διάχυσης σε περιοχές που προήλθαν από φερρίτη και οι οποίες ουσιαστικά δεν περιέχουν καθόλου άνθρακα.

Η διαδικασία αυτή απαιτεί χρόνο, ακόμη και στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία με το laser. Είναι λοιπόν δυνατόν, κάτω

από συγκεκριμένες συνθήκες, ο θερμικός κύκλος της κατεργασίας laser να συμβαίνει πολύ γρήγορα, ώστε να μην προλαβαίνει να ολοκληρωθεί η διάχυση. Διαπιστώνεται λοιπόν το πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος της διάχυσης για την επιτυχή εκτέλεση της κατεργασίας.

Οι πραγματικά πολύ υψηλοί ρυθμοί θέρμανσης οι οποίοι εμφανίζονται κατά την επιφανειακή σκλήρυνση με τη χρήση της δέσμης laser, σε συνδυασμό με την ανάγκη να υπάρξει επαρκής χρόνος παραμονής πάνω από τη θερμοκρασία  $A_3$ , ώστε να σχηματισθεί ομογενής ωστενίτης, καθιστούν απαραίτητη την ανάπτυξη υψηλών μέγιστων θερμοκρασιών. Από την άλλη μεριά, έχει παρατηρηθεί με ανάλυση ακτινών X ότι εμφανίζεται παραμένον ωστενιτης μετά την βαφή το ποσό του οποίου αυξάνεται με την αύξηση των μέγιστων θερμοκρασιών της κατεργασίας. Επομένως, είναι δυνατό εάν αυξηθεί πολύ η προσδιδόμενη ενέργεια, με σκοπό να αυξηθεί το βάθος σκλήρυνσης, να προκύψει ανεπιθύμητη μεταβολή στη δομή της επιφάνειας του υλικού.

Το άνω όριο της θερμοκρασίας, που επιτρέπεται να αναπτυχθεί στην επιφάνεια του υλικού, το καθορίζει το σημείο τήξης του, επειδή για τη συγκεκριμένη κατεργασία η τήξη είναι ανεπιθύμητη και πρέπει να αποφεύγεται. Και αυτό διότι κατά την επαναστερεοποίηση του τήγματος δεν είναι δυνατόν να ελεγχθεί η δομή που θα προκύψει. Η τήξη της επιφάνειας όμως επιφέρει και αλλοίωση του σχήματός της, γεγονός που επίσης πρέπει να αποφεύγεται κατά την κατεργασία.

Μέχρι τώρα έχουν αναφερθεί στοιχεία που αφορούν κυρίως τον κύκλο θέρμανσης, δηλαδή ουσιαστικά την ομοιομορφη διάλυση των ατόμων του άνθρακα μέσω διάχυσης στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου, με σκοπό τον σχηματισμό ομογενούς ωστενίτη. Εξίσου όμως καταλυτικό ρόλο για την επιτυχή έκβαση της κατεργασίας παίζει και ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, δηλαδή η μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη μέσω πολύ απότομης ψύξης, διεργασία που ως γνωστόν ονομάζεται βαφή.

Ο μαρτενσίτης είναι μια μετασταθής φάση του χάλυβα που χαρακτηρίζεται από τη πολύ μεγάλη σκληρότητά του. Η δομή του είναι τετραγωνική χωροκεντρωμένη. Η παραμόρφωση προέρχεται από τα άτομα του άνθρακα που παγιδεύτηκαν σε ορισμένες θέσεις παρεμβολής στο πλέγμα, αφού τους απαγορεύτηκε η κίνηση προς τις πιο σταθερές θέσεις από την απότομη πτώση της θερμοκρασίας. Η δημιουργία μαρτενσίτη προκαλεί μια αύξηση του όγκου του κρυσταλλικού πλέγματος της τάξης του 2.5-4%.

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός δεν γίνεται με διάχυση, αλλά με μια ταυτόχρονη εφαρμογή διατμητικών τάσεων και διόγκωσης του πλέγματος του



ωστενίτη. Η ταχύτητα αυτού του μετασχηματισμού είναι τόσο μεγάλη, ώστε το σύνορο της νέας φάσης κινείται σχεδόν με τη ταχύτητα του ήχου και ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε απειροστό χρονικό διάστημα.

## 2.6 ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Κατά την κατεργασία της επιφανειακής σκλήρυνσης με τη χρήση δέσμης laser, απορροφάται θερμική ενέργεια από την ακτινοβολία της δέσμης στην επιφάνεια του υλικού. Η επακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού λαμβάνει χώρα μόνο λόγω της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή. Συνεπώς, εάν ο ρυθμός απορρόφησης της ισχύος της δέσμης καθώς και οι θερμικές ιδιότητες του υλικού είναι γνωστά, είναι δυνατόν, τουλάχιστον προσεγγιστικά, να υπολογισθεί η κατανομή των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο υπό κατεργασία υλικό. Το γεγονός αυτό έχει σημαντική αξία, επειδή τότε δίνεται η δυνατότητα να προβλεφθούν εκ των προτέρων τα αποτελέσματα της κατεργασίας, και να υπολογιστούν οι βέλτιστες παράμετροί της, όπως η ισχύς, η ακτίνα και η ταχύτητα της δέσμης.

Η μεγάλη μήκους κύματος ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (υπέρυθρη), την οποία δίνει ένα τυπικό laser διοξειδίου του άνθρακα, δεν απορροφάται επαρκώς από τα φερριτικά υλικά, σε θερμοκρασίες δωματίου. Είναι επομένως απαραίτητο να επικαλυφθεί η επιφάνεια του υλικού με κάποια ουσία, η οποία θα βοηθήσει στην απορρόφηση της ενέργειας της δέσμης laser. Οι περισσότερο συχνά χρησιμοποιούμενες επικαλύψεις είναι το φωσφορικό μαγγάνιο, ο γραφίτης και η αιθάλη. Η αιθάλη είναι με διαφορά η πιο εύχρηστη επικάλυψη. Τοποθετείται εύκολα και δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μεταβολές του πάχους της επικάλυψης.

Όταν η θερμική ενέργεια της δέσμης laser απορροφάται από την επιφάνεια με ένα ρυθμό  $500 \text{ W/cm}^2$  ή και μεγαλύτερο, τότε η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού αυξάνεται ταχύτατα, επειδή ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας μέσω αγωγής προς το εσωτερικό του υλικού δεν μπορεί να αντεπεξέλθει τον ρυθμό με τον οποίο η ενέργεια προσπίπτει στην επιφάνεια. Μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η θερμορροή που εισέρχεται στο υλικό, τόσο γρηγορότερα αυξάνεται η θερμοκρασία του επιφανειακού στρώματος του υλικού. Η υψηλότερη θερμοκρασία που επιτρέπεται να λάβει η επιφάνεια του υλικού καθορίζεται από το σημείο τήξης του, εάν και συνήθως οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται πρέπει να βρίσκονται αρκετά χαμηλότερα από τη τιμή αυτή. Το γεγονός αυτό βάζει σαφώς περισσότερους περιορισμούς

στο βάθος σκλήρυνσης μέσω της κατεργασίας. Όμως και ο ρυθμός ψύξης, που επιτυγχάνεται με τη μετάδοση θερμότητας προς το εσωτερικό του υλικού, μπορεί να μην είναι επαρκής ώστε να παγιδευτούν τα άτομα του άνθρακα στο πλέγμα του μαρτενσίτη. Κάτι τέτοιο θα εμπόδιζε την επιφάνεια του υλικού να σκληρυνθεί πλήρως. Συνεπώς οι φυσικοί περιορισμοί που τίθενται από το σημείο τήξης και από τον απαραίτητο ρυθμό ψύξης, επιβάλλουν κάποιο όριο στο βάθος σκλήρυνσης που μπορεί να επιτευχθεί, ανεξάρτητα από τη διαθέσιμη ισχύ για την κατεργασία.

## 2.7 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος από την οποία παίρνουμε λύσεις για πολλά προβλήματα στη μηχανική. Έχει δύο υποδιαίρεσεις. Η πρώτη χρησιμοποιεί διακριτά στοιχεία για να υπολογίσει τις μετατοπίσεις αρθρώσεων και τις δυνάμεις των μελών ενός δομικού σκελετού. Η δεύτερη χρησιμοποιεί τα συνεχή στοιχεία για να βρούμε προσεγγιστικές λύσεις σε προβλήματα της μετάδοσης θερμότητας, στη μηχανική των ρευστών και των στερεών. Η πρώτη φόρμα αναφέρεται σαν μητρική ανάλυση των δομών και δίνει αποτελέσματα όμοια με αυτά της κλασικής ανάλυσης των δομικών υλικών. Η δεύτερη προσέγγιση είναι η πραγματική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Δίνει προσεγγιστικές τιμές από τις επιθυμητές παραμέτρους σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία ονομάζονται κόμβοι. Ένα γενικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων λύνει έτσι κι αλλιώς και τους δυο τύπους προβλημάτων και το όνομα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιείται για να ονομάσει και τις δυο παραπάνω φόρμες.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων συνδυάζει διάφορες μαθηματικές θεωρίες παράγοντας ένα σύστημα από γραμμικές και μη εξισώσεις. Ο αριθμός των εξισώσεων είναι συνήθως πολύ μεγάλος από 20 έως 20.000 ή και περισσότερες και απαιτείται για την επίλυσή τους η υπολογιστική δύναμη ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η μέθοδος έχει μικρή πρακτική αξία χωρίς τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

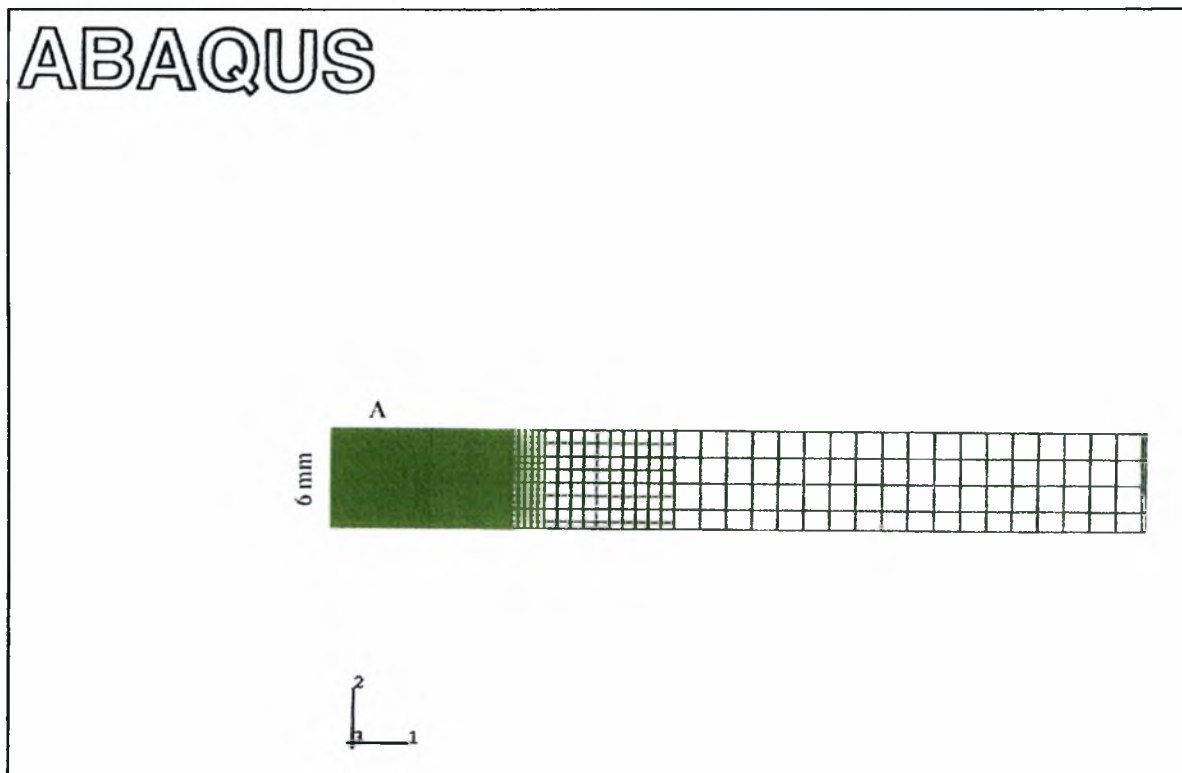
Αν και η γέννηση της μεθόδου είναι ακαθόριστη, τα πλεονεκτήματά της είναι πολύ σαφή. Η μέθοδος μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για αντικείμενα ακανόνιστου σχήματος αποτελούμενα από διάφορα και διαφορετικά υλικά τα οποία έχουν διάφορες συνοριακές συνθήκες. Μπορεί να εφαρμοσθεί σε προβλήματα σταθερού αλλά και μεταβαλλόμενου χρόνου αλλά όπως και σε προβλήματα με υλικά με μη γραμμικές ιδιότητες.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 3.1 ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΤΟΥ ΚΑΝΑΒΟΥ

Το σχήμα του κανάβου παρατίθεται παρακάτω (σχ. 3.1), οι διαστάσεις του είναι 6mm x 50mm και αποτελεί το μισό τμήμα του όλου, προς μελέτη κανάβου. Αυτό γίνεται, μιας και το πρόβλημα μας είναι συμμετρικό, η κατανομή των θερμοκρασιών θα είναι η ίδια και στα δυο μισά. Έτσι γλιτώνουμε και από τη μια τη κατασκευή του αλλού μισού στο *Abaqus* αλλά και από το συνολικό χρόνο υπολογισμού. Επίσης όπως βλέπουμε στο σχήμα ο κানাβος έχει διακριτοποιηθεί, έτσι ώστε να είναι πυκνός στην αρχή όπου έχουμε μεγάλη θερμοροή και χρειαζόμαστε μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των θερμοκρασιών και πιο αραιός στη συνέχεια όπου η θερμοροή μειώνεται. Αυτό γίνεται για τον ίδιο λόγο, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του χρόνου υπολογισμού.



Σχ. 3.1 Ο κানাβος στον οποίο έγιναν οι υπολογισμοί των θερμοκρασιών

### 3.2 ΘΕΡΜΟΡΟΗ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ (GAUSSIAN ΚΑΤΑΝΟΜΗ)

Το προφίλ της έντασης (θερμοροή) της δέσμης παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της κατανομής Gauss. Έτσι η θερμοροή δίνεται από τον τύπο  $q(\mathbf{r})=q_0e^{-c\mathbf{r}^2}$

όπου  $q_0=Pa/(\pi r_b^2)$  η μέγιστη θερμοροή στο σημείο  $r=0$  με  $P$  την ισχύ στο κέντρο της δέσμης

$a$  η απορροφητικότητα

$r_{ib}$  η ακτίνα της δέσμης

$c$  η λοξότητα της κατανομής ( $c=2$  για τις περισσότερες δέσμες)

Επειδή όμως η δέσμη κινείται, τότε σε ένα τυχαίο κόμβο ο οποίος θα αντιστοιχεί σε ένα τυχαίο σημείο  $(x,y)$  εντός της δέσμης η θερμοροή θα είναι

$$q_i(x) = q_{i,max}e^{-cx^2} \quad \text{με} \quad q_{i,max}=q_0e^{-cy^2}$$

$$\text{άρα} \quad q_{i(x)} = q_0e^{-cy^2}e^{-cx^2} \Rightarrow q_{i(x)} = q_0e^{-c(x^2+y^2)}$$

$$\Rightarrow \underline{q_{i(x)} = q_0e^{-c(x^2+y^2)}} \quad \text{με} \quad \chi=v.t$$

Επίσης για το λόγο ότι η κατανομή Gauss τείνει στο άπειρο, θεωρούμε ότι όλη η θερμοροή περιορίζεται στην επιφάνεια της δέσμης, δηλαδή εντός της διαμέτρου της. Τα αποτελέσματα έχουν υπολογιστεί με θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, αγωγιμότητα) να είναι σταθερές, αλλά και συναρτήσει της θερμοκρασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥΣ

### 4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες και τα διαγράμματά τους με τα αποτελέσματα των υπολογισμών που έγιναν με το υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Στη συγκεκριμένη διπλωματική το πρόγραμμα ABAQUS μας έδωσε τις τιμές των θερμοκρασιών στους κόμβους του καναβου (σχ. 3.1). Επίσης, έγιναν και μερικοί υπολογισμοί σε κানাβο με περισσότερους κόμβους των οποίων τα αποτελέσματα παρατίθενται επίσης στο κεφάλαιο αυτό. Τέλος, οι μεταβλητές του προβλήματος είναι  $P$  η ισχύς της δέσμης,  $rb$  η ακτίνα της δέσμης,  $v$  η ταχύτητα της δέσμης και  $\alpha$  η απορροφητικότητα του υλικού.

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΡΩΤΟ  
ΚΑΝΑΒΟ (ΚΥΡΙΟΣ ΚΑΝΑΒΟΣ)**

## ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για διαφορετικές απορροφητικότητες, σε °C.

Παράμετροι κατεργασίας

$$v=0.15m/s$$

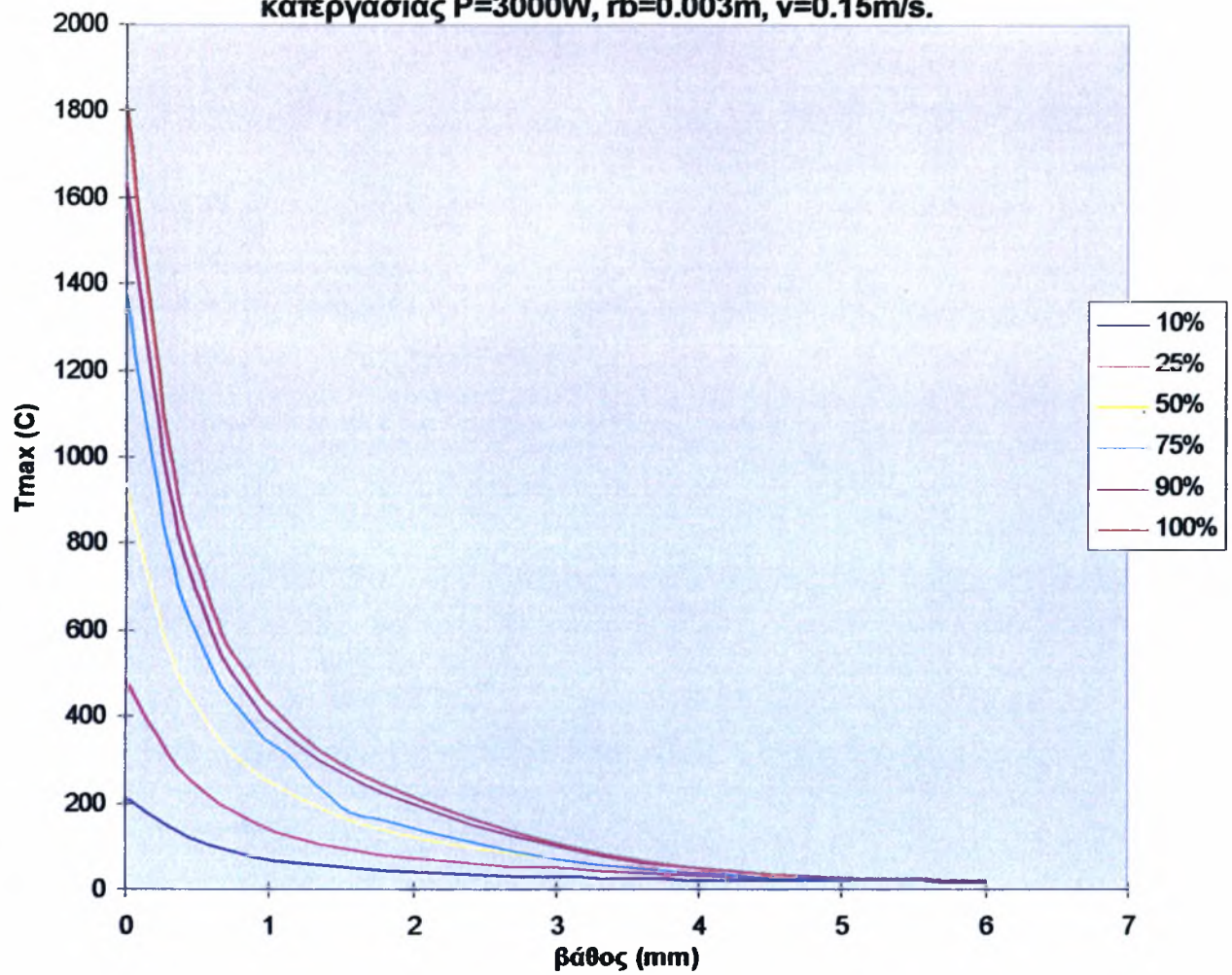
$$r=0.003m$$

$$P=3000W$$

βάθος	10%	25%	50%	75%	90%	100%
0	215	493	936	1383	1634	1817
0,3	148	316	558	791	932	1028
0,6	104	217	375	516	598	653
0,9	78	159	277	378	434	471
1,2	63	123	214	295	338	367
1,5	52	99	172	194	273	295
1,8	45	82	141	163	224	243
2,1	40	70	118	136	187	203
2,4	36	61	100	112	155	168
2,7	33	53	84	91	127	136
3	30	53	70	73	102	109
3,3	28	46	58	59	82	87
3,6	26	40	48	48	65	69
3,9	24	34	40	40	53	55
4,2	23	30	34	34	43	45
4,5	22	27	30	29	36	37
4,8	21	25	26	26	31	31
5,1	21	23	24	24	27	28
5,4	21	21	23	23	25	25
5,7	20	21	22	23	23	24
6	20	21	22	22	23	23



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΝΑΚΑ 1**  
Μέγιστες θερμοκρασίες συναρτήσει του βάθους  
για διαφορετικές πμές αποροφηκότητας, με παραμετρούς  
κατεργασίας  $P=3000W$ ,  $rb=0.003m$ ,  $v=0.15m/s$ .



## ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για διαφορετικές ταχύτητες σε, °C.

Παράμετροι κατεργασίας

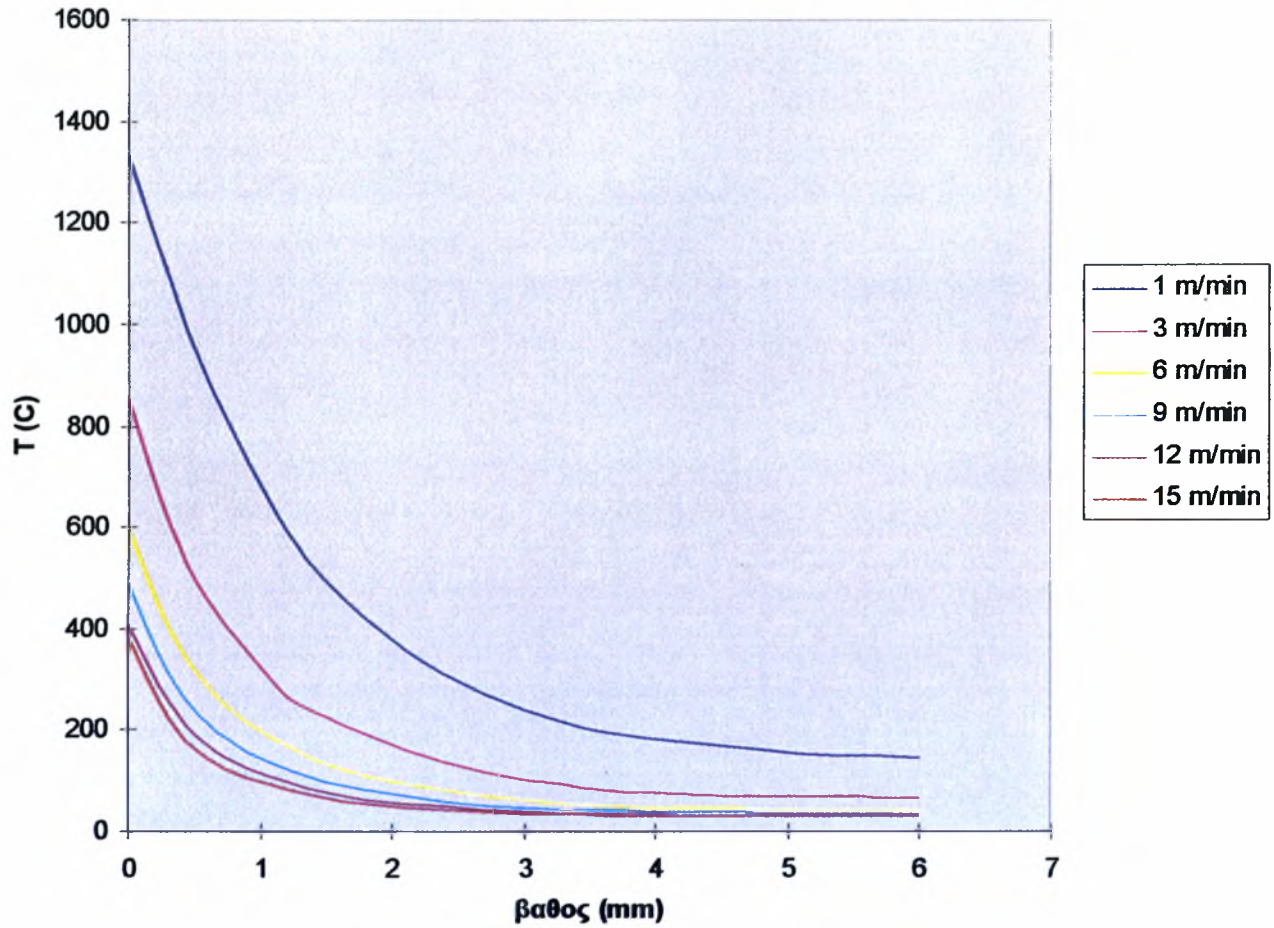
**απορ=25%**

**$r=0.003m$**

**$P=3000W$**

βάθος	1 m/min	3 m/min	6 m/min	9 m/min	12 m/min	15 m/min
0	1334	853	601	492	412	385
0,3	1097	613	406	316	260	225
0,6	897	461	291	216	174	146
0,9	733	360	217	157	127	106
1,2	600	287	169	122	97	82
1,5	499	253	134	99	80	68
1,8	421	193	112	81	64	55
2,1	361	161	94	70	57	48
2,4	312	137	81	61	51	44
2,7	273	119	70	53	45	40
3	242	104	62	46	40	37
3,3	217	93	57	44	36	34
3,6	198	84	52	42	34	31
3,9	185	79	48	40	34	31
4,2	176	75	47	38	33	31
4,5	168	73	46	38	33	30
4,8	161	72	45	37	33	30
5,1	156	71	45	37	33	30
5,4	152	70	45	37	32	30
5,7	149	69	45	36	32	30
6	148	69	45	36	32	30

**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΝΑΚΑ 2**  
**Μέγιστες θερμοκρασίες συναρτήσει του βάθους**  
**για διαφορετικές ταχύτητες, με παραμέτρους κατεργασίας  $\alpha=25\%$ ,**  
 **$r_b=0.003m$ ,  $P=3000W$ .**



### ΠΙΝΑΚΑΣ 3

Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για διαφορετικές τιμές της ισχύος της δέσμης, σε °C.

Παράμετροι κατεργασίας

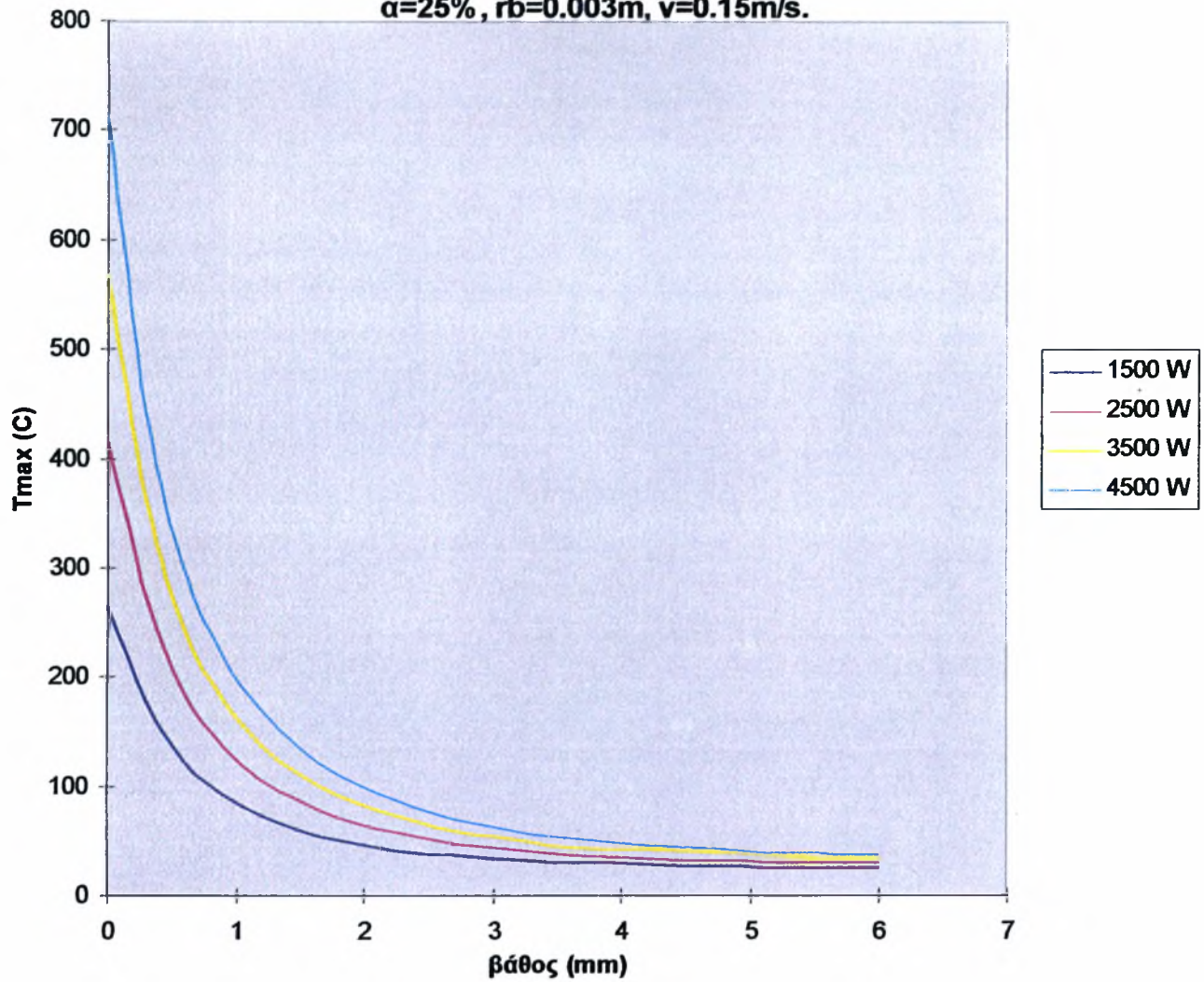
$v=0.15 \text{ m/min}$

$\text{απορ}=25\%$

$r=0.003 \text{ mm}$

βάθος	1500 W	2500 W	3500 W	4500 W
0	265	417	568	713
0,3	178	272	359	440
0,6	123	187	245	300
0,9	92	137	180	220
1,2	73	107	139	171
1,5	60	87	112	136
1,8	52	72	92	112
2,1	45	61	79	95
2,4	39	55	68	81
2,7	37	48	60	71
3	34	44	54	63
3,3	32	41	49	57
3,6	31	38	45	53
3,9	30	36	43	49
4,2	29	35	42	46
4,5	28	33	41	44
4,8	27	32	39	42
5,1	26	31	37	40
5,4	26	30	36	39
5,7	26	30	35	38
6	26	30	34	38

**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΝΑΚΑ 3**  
**Μέγιστες θερμοκρασίες συναρτήσει του βάθους**  
**για διαφορετικές πμές της ισχύος, με παραμέτρους κατεργασίας**  
 **$\alpha=25\%$ ,  $r_b=0.003m$ ,  $v=0.15m/s$ .**





## ΠΙΝΑΚΑΣ 4

Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για διαφορετικές ακτίνες της δέσμης, σε °C.

Παράμετροι κατεργασίας

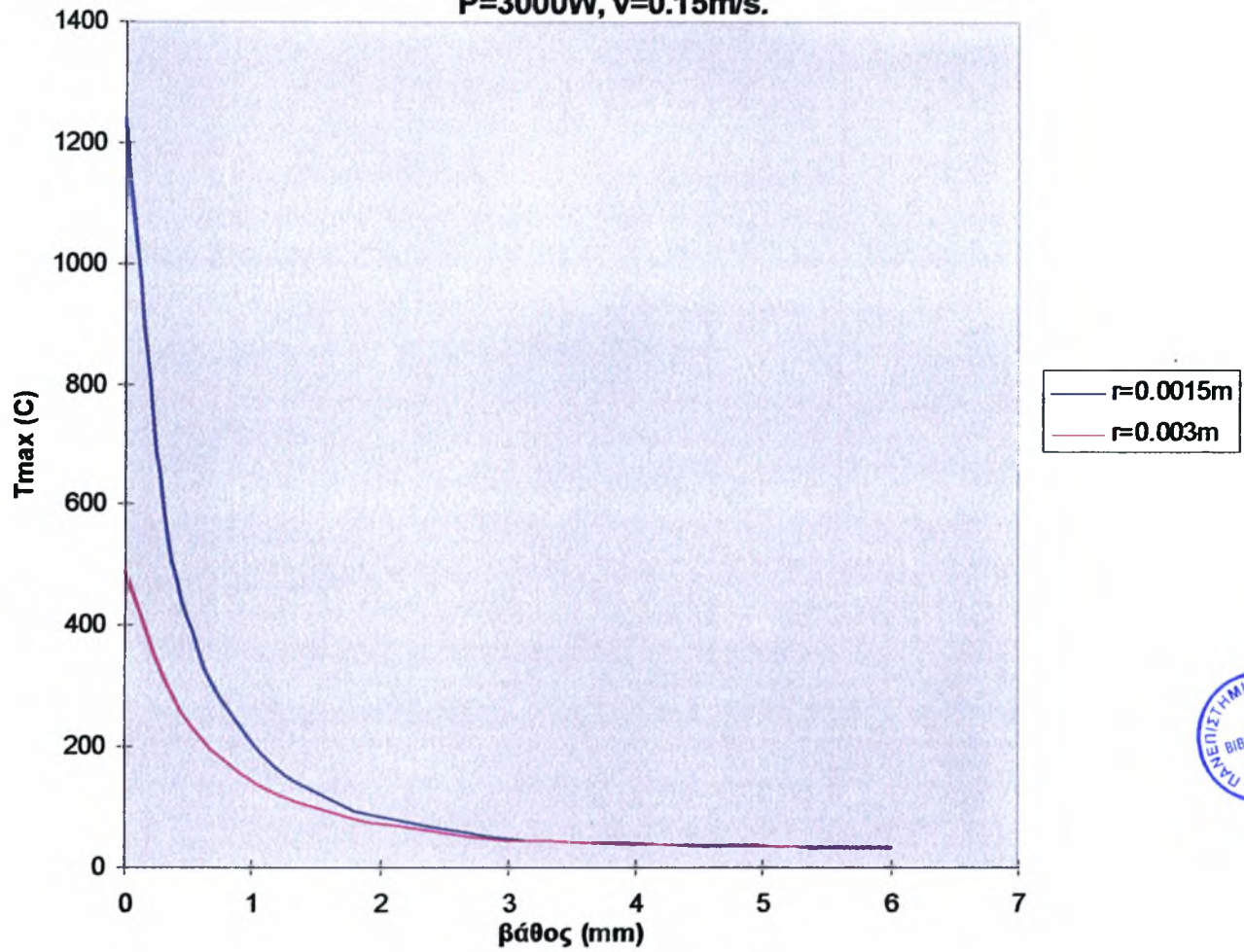
$v=0.15 \text{ m/min}$

$\text{απορ}=25\%$

$P=3000W$

βάθος(mm)	$r=0.0015m$	$r=0.003m$
0	1243	492
0,3	593	316
0,6	349	216
0,9	236	157
1,2	166	122
1,5	127	99
1,8	95	81
2,1	81	70
2,4	69	61
2,7	57	53
3	48	46
3,3	45	44
3,6	43	42
3,9	41	40
4,2	39	38
4,5	37	38
4,8	35	38
5,1	34	37
5,4	33	37
5,7	33	37
6	32	36

**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΝΑΚΑ 4**  
**Μέγιστες θερμοκρασίες συναρτήσει του βάθους**  
**για διαφορετικές ακτίνες, με παραμέτρους κατεργασίας  $\alpha=25\%$ ,**  
 **$P=3000W$ ,  $v=0.15m/s$ .**



## ΠΙΝΑΚΑΣ 5

Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για  $\alpha$ (απορροφητικότητα του υλικού),  $k$ (συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού) στις μέσες τιμές τους, συναρτήσει της θερμοκρασίας και στους 20 °C αντίστοιχα, σε °C.

Παράμετροι κατεργασίας

$P=3000W$

$\alpha=25\%$

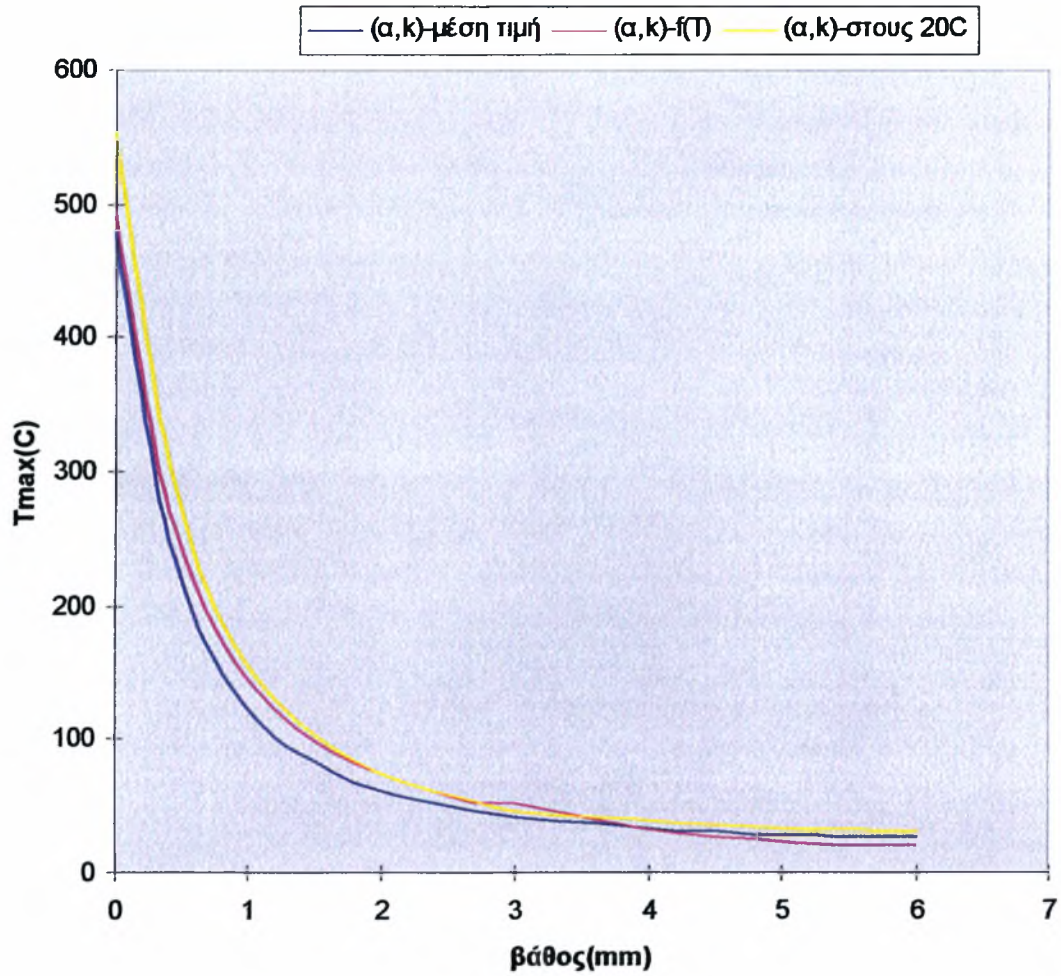
$r=0.003m$

$v=0.15m/s$

βάθος	( $\alpha,k$ )-μέση τιμή	( $\alpha,k$ )-f(T)	( $\alpha,k$ )-στοιχ. 20C
0	482	493	554
0,3	297	316	360
0,6	192	217	239
0,9	136	159	171
1,2	102	123	130
1,5	84	99	103
1,8	68	82	84
2,1	59	70	71
2,4	52	61	62
2,7	46	53	54
3	42	53	47
3,3	39	46	44
3,6	37	40	42
3,9	34	34	40
4,2	32	30	38
4,5	31	27	36
4,8	29	25	35
5,1	28	23	33
5,4	27	21	33
5,7	27	21	32
6	27	21	32

### ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΝΑΚΑ 5

Μέγιστες θερμοκρασίες για  $\alpha, k$  στις μέσες πιεες,  $f(T)$  και στους 20C,  
με παραμέτρους κατεργασίας  $\alpha=25\%$ ,  $P=3000W$ ,  $r_b=0.003m$ ,  
 $v=0.15m/s$ .



**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟ  
ΚΑΝΑΒΟ (ΚΑΝΑΒΟΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΟΥΣ  
ΚΟΜΒΟΥΣ)**

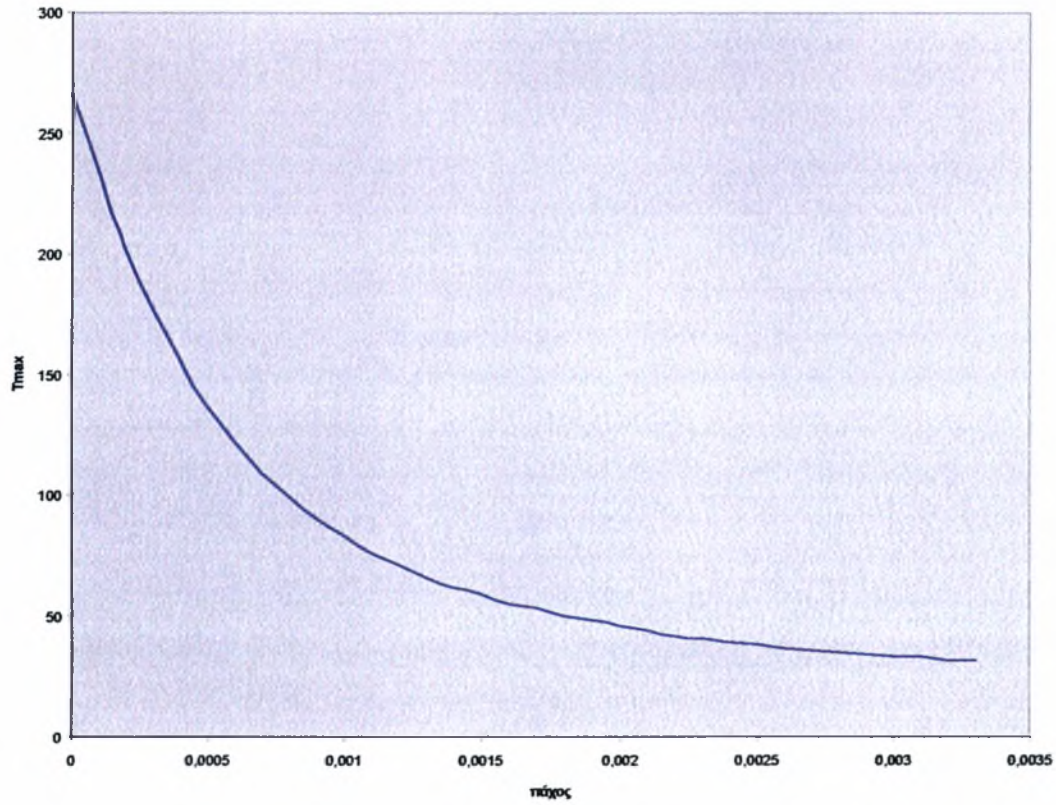


## ΠΙΝΑΚΑΣ 6

πάχος(m)	T <sub>max</sub>
0	267
0,0001	233
0,0002	202
0,0003	177
0,0004	156
0,0005	137
0,0006	122
0,0007	109
0,0008	99
0,0009	90
0,001	83
0,0011	76
0,0012	71
0,0013	66
0,0014	62
0,0015	59
0,0016	55
0,0017	53
0,0018	50
0,0019	48
0,002	46
0,0021	44
0,0022	42
0,0023	41
0,0024	39
0,0025	38
0,0026	37
0,0027	36
0,0028	35
0,0029	34
0,003	33
0,0031	33
0,0032	32
0,0033	32

**Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για παραμέτρους κατεργασίας: P=1500W, r<sub>b</sub>=0,003m, v=0,15m/sec, α=50%.**

## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΝΑΚΑ 6



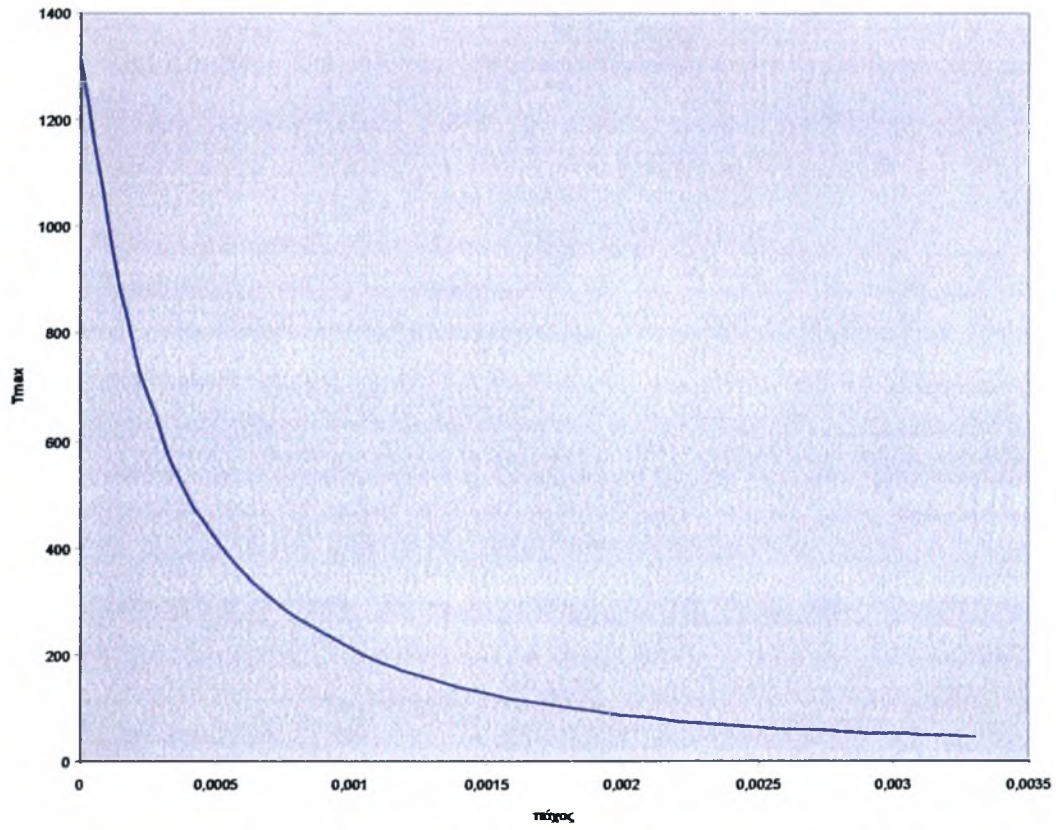
Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους με παραμέτρους κατεργασίας,  $\alpha=50\%$ ,  $P=1500W$ ,  $r_b=0.003m$ ,  $v=0.15m/s$ .  
Σημείωση (το πάχος είναι σε μέτρα).

## ΠΙΝΑΚΑΣ 7

Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για παραμέτρους κατεργασίας:  $P=3000W$ ,  $r_b=0,0015m$ ,  $v=0,15m/sec$ ,  $\alpha=25\%$ .

πάχος(m)	$T_{max}$
0	1316
0,0001	1009
0,0002	777
0,0003	611
0,0004	498
0,0005	418
0,0006	358
0,0007	310
0,0008	271
0,0009	239
0,001	213
0,0011	190
0,0012	171
0,0013	154
0,0014	140
0,0015	128
0,0016	118
0,0017	109
0,0018	101
0,0019	94
0,002	87
0,0021	82
0,0022	77
0,0023	73
0,0024	69
0,0025	65
0,0026	62
0,0027	59
0,0028	57
0,0029	54
0,003	52
0,0031	50
0,0032	49
0,0033	47

## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΝΑΚΑ 7



Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους με παραμέτρους κατεργασίας,  $\alpha=50\%$ ,  $P=3000W$ ,  $v_b=0.15m/s$ ,  $v=0.15m/s$ .  
Σημείωση (το πάχος είναι σε μέτρα).

## 4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με μια πρώτη ματιά στα αποτελέσματα βλέπουμε ότι έχουμε ένα ευρύ φάσμα μεγίστων θερμοκρασιών, που αναπτύσσεται σε ένα δοκίμιο το οποίο υφίσταται κατεργασία με δέσμη laser, συναρτήσει των μεταβλητών του. Συναρτήσει δηλαδή της απορροφητικότητας του υλικού, της ακτίνας της δέσμης, της ταχύτητας με την οποία κινείται η δέσμη και της ισχύος της δέσμης.

Δηλαδή, μεταβάλλοντας τις μεταβλητές έχουμε ένα φάσμα θερμοκρασιών από 200 °C έως 1600 °C. Μόνο στην περίπτωση της ισχύος της δέσμης έχουμε μεταβολή από 200 °C έως 600 °C. Επίσης μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι η μεγάλη μεταβολή θερμοκρασιών συναρτήσει των μεταβλητών γίνεται σε βάθος από 0 έως 1mm.

Το πιο απλό που επίσης παρατηρεί κανείς το οποίο είναι και ευρέως γνωστό είναι ότι αναπτύσσονται πολύ μεγάλες θερμοκρασίες στην επιφάνεια του μετάλλου. Για παράδειγμα για τιμή της  $\alpha=100\%$ ,  $v=0.15\text{m/sec}$ ,  $r_b=0.003\text{m}$  και  $P=3000\text{W}$  αναπτύσσεται μέγιστη θερμοκρασία 1800 °C. Αλλά επίσης το άλλο καλό είναι ότι μπορούν να αναπτυχθούν και πολύ μικρές θερμοκρασίες. Τέλος, παρατηρεί κανείς ότι μπορεί να επιτευχθεί οποιαδήποτε επιθυμητή θερμοκρασία στην επιφάνεια του μετάλλου.

Έγιναν και κάποιοι υπολογισμοί σε κάναβο περισσότερων στοιχείων (κάναβος με περισσότερους κόμβους) στα αποτελέσματα των οποίων βλέπουμε κάποια διάφορα σε σχέση με τα αποτελέσματα του πρώτου καναβου. Τα δεύτερα αποτελέσματα είναι σίγουρα πιο πραγματικά αλλά αυτή η διαφορά θερμοκρασιών είναι πολύ μικρή.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών που παρατίθενται είναι στους κόμβους της πλευράς AB του κανάβου της οποίας η διεύθυνση περνά από το κέντρο της δέσμης και όπου λογικά θα έχουμε τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες και το μέγιστο βάθος σκλήρυνσης.

Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα με τις θερμοκρασίες για διαφορετικές αποροφικότητες, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η απορροφητικότητα, αυξάνεται και η  $T_{max}$  στο αντίστοιχο βάθος. Λογικό μιας και  $q_0 = P \cdot a / \pi \cdot r_b^2$

Βέβαια για να παρουσιάσει το μέταλλο την επιθυμητή επιφανειακή σκλήρυνση, δεν μας ενδιαφέρει μόνο η  $T_{max}$  αλλά και ο συνολικός χρόνος για τον οποίο παραμένει ο χάλυβας σ' αυτή, ώστε να πάρουμε πλήρη ωστενιτική δομή και μετά με απότομη ψύξη μαρτενσιτική, αλλά αυτό θα αποτελέσει αντικείμενο μελέτης επόμενης διπλωματικής, όπως επίσης και το πόσο ακριβώς επηρεάζει η απορροφητικότητα την  $T_{max}$ .

Στο διάγραμμα των ταχυτήτων, βλέπουμε ότι μικρές μεταβολές της τάξης των 2 m/min, αντιστοιχούν σε αύξηση της  $T_{max}$  έως και 450 °C στην επιφάνεια, ενώ αντίθετα, στις σχετικά μεγάλες (9-15 m/min) παρατηρείται μια μικρή μεταβολή της  $T_{max}$ . Θα μπορούσαμε λοιπόν να πούμε ότι η ταχύτητα είναι μια από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους του προβλήματος, αφού μικρές ταχύτητες αντιστοιχούν σε μεγάλες θερμοκρασίες, μεγάλους χρόνους παραμονής της δέσμης πάνω από ένα σημείο, τα οποία συνεπάγονται πλήρης ωστενιτοποίηση της επιφάνειας και σε αρκετά μεγάλο βάθος.

Η μέγιστη ισχύς στο κέντρο της δέσμης (P) συνήθως αποτελεί και ταυτότητα για μια συσκευή Laser. Όπως βλέπουμε η θερμοκρασία αυξάνεται σχεδόν ανάλογα με την P. Έτσι όσο πιο <<ισχυρή>> συσκευή Laser έχουμε, τόσο μεγαλύτερες θερμοκρασίες μπορούμε να πετύχουμε. Αυτό όμως σημαίνει ότι η P σαν μεταβλητή δεν είναι και τόσο πρακτική, αφού για να πετύχουμε μια επιθυμητή σκλήρυνση μπορεί να χρειαστεί αρκετά μεγάλη P, το οποίο σημαίνει πιο ακριβή συσκευή Laser, την οποία σκλήρυνση μπορούμε να πετύχουμε και με μια συσκευή μικρότερης ισχύος μεταβάλλοντας κάποια άλλη μεταβλητή όπως π.χ την ταχύτητα της δέσμης.

Όσον αφορά την μεταβολή της ακτίνας, δεδομένου ότι η ισχύς P δεν μεταβάλλεται, όσο μικρότερη είναι, τόσο μεγαλύτερες θερμοκρασίες παίρνουμε.

Αυτό συμβαίνει, μιας και η επιφάνεια συγκέντρωση της ίδιας ισχύος μειώνεται, θα έχουμε μεγαλύτερη θερμοροή. Επίσης και η ακτίνα  $r_{ib}$  μια μεταβλητή με μεγάλο συντελεστή βαρύτητας, μιας και όπως βλέπουμε στο διάγραμμα, νιώσει της κατά 15 mm συνεπάγεται αύξηση της  $T_{max}$  κατά 700 °C .

Έτσι λοιπόν αν θέλαμε να ξεχωρίσουμε δυο σημαντικές μεταβλητές, αυτές είναι η ταχύτητα της δέσμης και η ακτίνα, των οποίων μικρές μεταβολές οδηγούν σε μεγάλες μεταβολές θερμοκρασιών.

Επίσης πρέπει να τονίσουμε ότι έγιναν και υπολογισμοί με τις θερμικές ιδιότητες του μετάλλου συντελεστή αγωγιμότητας και ειδική θερμότητα (dependencies στα διαγράμματα) :

1. Συναρτήσει της θερμοκρασίας (τιμές από πίνακα)
2. τις μέσες τιμές τους
3. σε θερμοκρασία δωματίου (20 °C)

για δυο διαφορετικές ταχύτητες δέσμης ( $v=0,15$  m/min ,  $v=0,05$  m/min).

Παρατηρήθηκε μια απόκλιση στις θερμοκρασίες της τάξης των 100 °C για τις τιμές σε θερμοκρασίες δωματίου, το οποίο αποτελεί πρόβλημα για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αναπόφευκτο όμως αφού δεν υπάρχουν πίνακες για όλα τα κράματα.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, μεταβάλλοντας τη λοξότητα  $c$  της κατανομής Gauss και το συντελεστή συναγωγής  $h$  δεν παρατηρήθηκε καμία μεταβολή των θερμοκρασιών.

Τέλος το πιο σημαντικό είναι ότι μιας και το φάσμα των θερμοκρασιών που αναπτύσσεται είναι πολύ μεγάλο, αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να επιτύχουμε την οποιαδήποτε επιθυμητή δομή σε ένα χάλυβα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μπορούμε να δημιουργήσουμε μηχανολογικά εξαρτήματα τα οποία θα έχουν την οποιαδήποτε επιθυμητή ιδιότητα.

Η εργασία αυτή βοηθάει επίσης και στην περαιτέρω έρευνα του αντικειμένου της επιφανειακής σκλήρυνσης του χάλυβα. Για παράδειγμα θα μπορούσε να βοηθήσει στην μελέτη επιφανειακής σκλήρυνσης μεγαλύτερου βάθους σκλήρυνσης αλλά και στη μελέτη των προϊόντων χάλυβα που προσφέρει αυτή η κατεργασία.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ:**

1. Αντώνης Κατσαμάς, Διπλωματική εργασία με θέμα: Επιφανειακή σκλήρυνση υποευτηκτοειδούς χάλυβα Ck-60 με δέσμη LASER.
2. W. M. Steen, Laser Materials Processing.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

- 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ σελ. 1
- 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ σελ. 1

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

- 2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ LASER σελ. 2
- 2.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΡΟΚΛΗΜΕΝΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ σελ. 3
- 2.3 ΤΥΠΟΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ LASERS σελ. 4
- 2.3.1 LASER ΑΕΡΙΩΝ (CO<sub>2</sub> LASERS) σελ. 4
- 2.3.2 LASER ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (Nd-YAG LASERS) σελ. 5
- 2.4 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΜΕ LASER σελ. 6
- 2.5 ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ σελ. 7
- 2.6 ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ σελ. 10
- 2.7 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ σελ. 11

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ**

- 3.1 ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΤΟΥ ΚΑΝΑΒΟΥ σελ. 12
- 3.2 ΘΕΡΜΟΡΟΗ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ (GAUSSIAN ΚΑΤΑΝΟΜΗ) σελ. 13

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥΣ**

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ σελ. 14

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ σελ. 31

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ σελ. 32

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ** σελ. 34

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

Σχ.2.1 Η οπτική διάταξη μιας μονάδας LASER σελ. 2

Σχ. 2.2 Διάταξη του LASER αερίων σελ. 5

Σχ. 2.3 Διάγραμμα Fe-C σελ. 8

Σχ. 3.1 Ο κánaβος σελ. 12

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΡΩΤΟ ΚΑΝΑΒΟ (ΚΥΡΙΟΣ ΚΑΝΑΒΟΣ)** σελ. 15

ΠΙΝΑΚΑΣ 1- Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για διαφορετικές απορροφητικότητες σελ. 16

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 1 σελ. 17

ΠΙΝΑΚΑΣ 2- Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για διαφορετικές ταχύτητες σελ. 18

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 2 σελ. 19



ΠΙΝΑΚΑΣ 3- Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για διαφορετικές τιμές της ισχύος της δέσμης	σελ. 20
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 3	σελ. 21
ΠΙΝΑΚΑΣ 4- Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για διαφορετικές ακτίνες της δέσμης	σελ. 22
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 4	σελ. 23
ΠΙΝΑΚΑΣ 5- Μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους κόμβους για α(απορροφητικότητα του υλικού), κ(συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού) στις μέσες τιμές τους, συναρτήσει της θερμοκρασίας και στους 20 °C	σελ. 24
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 5	σελ. 25
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΚΑΝΑΒΟ (ΚΑΝΑΒΟΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ)</b>	σελ. 26
ΠΙΝΑΚΑΣ 6	σελ. 27
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΝΑΚΑ 6	σελ. 28
ΠΙΝΑΚΑΣ 7	σελ. 29
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΝΑΚΑ 7	σελ. 30



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074770

