

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ
ΥΠΟΕΥΤΗΚΤΟΕΙΔΟΥΣ ΧΑΛΥΒΑ Ck-60 ΜΕ ΔΕΣΜΗ
LASER

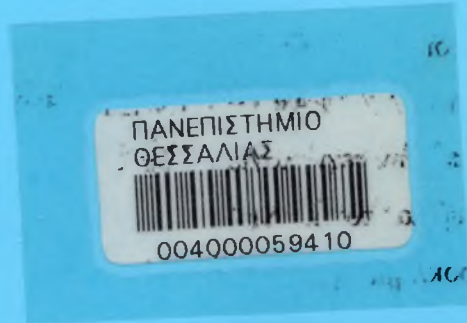
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΚΑΤΣΑΜΑΣ ΑΝΤΩΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΡΗΓΟΡΗΣ

ΒΟΛΟΣ 1996



30/10/02 Π.Α



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

Αριθ. Εισ.: 1108/1

Ημερ. Εισ.: 18-10-2002

Δωρεά: _____

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ

1996

ΚΑΤ



Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

Σελίδα

<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	1
1. Γενικά	2
2. Αντικείμενο και στόχοι της εργασίας	3
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</u>	6
<u>ΜΕΡΟΣ Α΄: Στοιχεία από την τεχνολογία LASER</u>	7
1. Βασικές αρχές λειτουργίας του LASER	8
2. Το φαινόμενο της προκλημένης ακτινοβολίας	10
3. Τύποι LASERS διοξειδίου του άνθρακα	13
<u>ΜΕΡΟΣ Β΄: Η επιφανειακή σκλήρυνση με τη χρήση δέσμης LASER</u>	17
4. Γενικά περί της επιφανειακής σκλήρυνσης με τη χρησιμοποίηση δέσμης LASER	18
5. Μεταλλουργικά φαινόμενα κατά την κατεργασία	19
6. Θερμικά φαινόμενα κατά την κατεργασία	25
7. Σχεδιαστικές παράμετροι της κατεργασίας	26
8. Κατανομή ισχύος της δέσμης LASER	27
9. Αέριο της κατεργασίας	30
10. Συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας	31
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ</u>	34
1. Μαθηματικό μοντέλο μετάδοσης θερμότητας κατά την κατεργασία	35
2. Κωδικοποίηση μαθηματικού μοντέλου σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN	39
3. Ο ρόλος της διάχυσης	40
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</u>	44
1. Γενικά	45
2. Ο χάλυβας Ck-60	47
3. Μέτρηση της σκληρότητας του χάλυβα Ck-60	50
4. Θερμικές ιδιότητες του χάλυβα Ck-60	51
5. Επιλογή των συνθηκών κατεργασίας με την χρησιμοποίηση του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας	55
6. LASER και χαρακτηρισμός του υλικού	64

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</u>	66
1. Μεταλλογραφική εξέταση των δοκιμίων	67
2. Εξέταση σκληρότητας	79
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</u>	121
1. Ανάλυση μικροδομής	122
2. Σκληρότητα	128
3. Σύγκριση με τα αποτελέσματα του μονοδιάστατου μοντέλου μετάδοσης θερμότητας	141
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ</u>	148
1. Συμπεράσματα	149
2. Προτάσεις	150
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ</u>	151
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Κωδικοποίηση του μοντέλου μετάδοσης θερμότητας</u>	152
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Συμβατικές μέθοδοι επιφανειακής σκλήρυνσης</u>	170

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<u>ΣΧΗΜΑ</u>	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ</u>	<u>ΣΕΛΙΔΑ</u>
1.1α	ΠΡΩΤΟ	8
1.1β	ΠΡΩΤΟ	9
2.1	ΠΡΩΤΟ	11
3.1	ΠΡΩΤΟ	14
3.2	ΠΡΩΤΟ	15
3.3	ΠΡΩΤΟ	16
5.1	ΠΡΩΤΟ	20
5.2	ΠΡΩΤΟ	21
5.3	ΠΡΩΤΟ	23
5.4	ΠΡΩΤΟ	24
8.1	ΠΡΩΤΟ	28
8.2	ΠΡΩΤΟ	28
8.3	ΠΡΩΤΟ	29
10.1	ΠΡΩΤΟ	32
1.1	ΔΕΥΤΕΡΟ	35
3.1	ΔΕΥΤΕΡΟ	40
3.2	ΔΕΥΤΕΡΟ	42
2.1	ΤΡΙΤΟ	48
2.2	ΤΡΙΤΟ	49
3.1	ΤΡΙΤΟ	50
4.1	ΤΡΙΤΟ	53
4.2	ΤΡΙΤΟ	54
5.1	ΤΡΙΤΟ	58
5.2	ΤΡΙΤΟ	59
5.3	ΤΡΙΤΟ	60
6.1	ΤΡΙΤΟ	64
1.1	ΤΕΤΑΡΤΟ	69
1.2	ΤΕΤΑΡΤΟ	69
1.3	ΤΕΤΑΡΤΟ	70

<u>ΣΧΗΜΑ</u>	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ</u>	<u>ΣΕΛΙΔΑ</u>
1.4	ΤΕΤΑΡΤΟ	70
1.5	ΤΕΤΑΡΤΟ	71
1.6	ΤΕΤΑΡΤΟ	71
1.7	ΤΕΤΑΡΤΟ	73
1.8	ΤΕΤΑΡΤΟ	77
2.1	ΤΕΤΑΡΤΟ	79
2.2	ΤΕΤΑΡΤΟ	81
2.3	ΤΕΤΑΡΤΟ	83
2.4	ΤΕΤΑΡΤΟ	85
2.5	ΤΕΤΑΡΤΟ	87
2.6	ΤΕΤΑΡΤΟ	89
2.7	ΤΕΤΑΡΤΟ	91
2.8	ΤΕΤΑΡΤΟ	93
2.9	ΤΕΤΑΡΤΟ	95
2.10	ΤΕΤΑΡΤΟ	96
2.11	ΤΕΤΑΡΤΟ	98
2.12	ΤΕΤΑΡΤΟ	99
2.13	ΤΕΤΑΡΤΟ	101
2.14	ΤΕΤΑΡΤΟ	102
2.15	ΤΕΤΑΡΤΟ	104
2.16	ΤΕΤΑΡΤΟ	106
2.17	ΤΕΤΑΡΤΟ	107
2.18	ΤΕΤΑΡΤΟ	109
2.19	ΤΕΤΑΡΤΟ	110
2.20	ΤΕΤΑΡΤΟ	112
2.21	ΤΕΤΑΡΤΟ	114
2.22	ΤΕΤΑΡΤΟ	116
2.23	ΤΕΤΑΡΤΟ	117
2.24	ΤΕΤΑΡΤΟ	119
2.25	ΤΕΤΑΡΤΟ	120
1.1	ΠΕΜΠΤΟ	123

<u>ΣΧΗΜΑ</u>	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ</u>	<u>ΣΕΛΙΔΑ</u>
1.2	ΠΕΜΠΤΟ	125
1.3	ΠΕΜΠΤΟ	127
2.1	ΠΕΜΠΤΟ	129
2.2	ΠΕΜΠΤΟ	130
2.3	ΠΕΜΠΤΟ	131
2.4	ΠΕΜΠΤΟ	132
2.5	ΠΕΜΠΤΟ	133
2.6	ΠΕΜΠΤΟ	135
2.7	ΠΕΜΠΤΟ	136
2.8	ΠΕΜΠΤΟ	137
2.9	ΠΕΜΠΤΟ	138
2.10	ΠΕΜΠΤΟ	139
2.11	ΠΕΜΠΤΟ	140
3.1	ΠΕΜΠΤΟ	143
3.2	ΠΕΜΠΤΟ	145
3.3	ΠΕΜΠΤΟ	147

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<u>ΠΙΝΑΚΑΣ</u>	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ</u>	<u>ΣΕΛΙΔΑ</u>
2.1	ΤΡΙΤΟ	47
5.1	ΤΡΙΤΟ	61
5.2	ΤΡΙΤΟ	62
5.3	ΤΡΙΤΟ	62
1.1	ΤΕΤΑΡΤΟ	74
1.2	ΤΕΤΑΡΤΟ	76
1.3	ΤΕΤΑΡΤΟ	78
3.1	ΠΕΜΠΤΟ	142
3.2	ΠΕΜΠΤΟ	144
3.3	ΠΕΜΠΤΟ	146

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο γράφων θα ήθελε να ευχαριστήσει θερμά τους παρακάτω:

- Τον επιβλέποντα την εργασία, καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο χωρίς την καθοδήγηση, επίβλεψη και βοήθεια του οποίου τίποτε, από τα όσα ελπίζει ότι πέτυχε η εργασία αυτή, δεν θα είχε πραγματοποιηθεί.

- Την κ. Άννα Ζερβάκη για τις πολύτιμες συμβουλές της, την βοήθειά της και την συνεργασία της, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

- Την Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ. Α.Ε. για την διάθεση της μονάδας LASER που κατέχει, καθώς και του υλικού που χρησιμοποιήθηκε, για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

- Τους συναδέλφους κ.κ. Μιχάλη Βλαχογιάννη και Αποστόλη Βασιλάκο για την άψογη συνεργασία και βοήθεια που προσέφεραν στα πλαίσια του Εργαστηρίου Υλικών.

- Τον κ. Νίκο Χασιώτη και την κ. Ελεάνα Παππά του Εργαστηρίου Υλικών για την υποστήριξη που παρείχαν, σε διάφορα θέματα που αφορούσαν την ολοκλήρωση της εργασίας.

- Τον κ. Σωτήρη Σχοινά για τον χρόνο που διέθεσε για την εκτέλεση των πειραμάτων της εργασίας.

- Τέλος, την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας η οποία υποστήριξε μερικώς την εργασία αυτή, μέσω του προγράμματος Ε.Π.Ε.Τ. ΙΙ/170 (Laser-Mat).

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί LASER CO₂ υψηλής ισχύος, για βιομηχανικές εφαρμογές, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε επιφανειακές κατεργασίες. Ανάμεσα στην πληθώρα των επιφανειακών κατεργασιών, η επιφανειακή σκλήρυνση με δέσμη LASER είναι μία από τις πιο πολλά υποσχόμενες κατεργασίες, σαν εναλλακτική λύση προς τις συμβατικές τεχνικές, όπως η φλογοβαφή και η σκλήρυνση με επαγωγή. Και αυτό διότι προκαλεί λιγότερες παραμορφώσεις στα κατεργαζόμενα τεμάχια και μπορεί να αυτοματοποιηθεί πολύ ευκολότερα.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να καθορίσει τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων της κατεργασίας και του βάθους σκλήρυνσης, καθώς και της μέγιστης σκληρότητας, τα οποία επιτυγχάνονται κατά την επιφανειακή σκλήρυνση με δέσμη LASER του χάλυβα Ck-60. Σε μία πρώτη προσέγγιση, οι πειραματικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν βασίστηκαν στις προβλέψεις ενός μαθηματικού μοντέλου, που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας κατά την κατεργασία, το οποίο αναπτύχθηκε από τον M.F.Ashby.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν ο υποευτηκτοειδής χάλυβας Ck-60. Ο Ck-60 είναι ένας απλός ανθρακοχάλυβας κατασκευών ευρείας χρήσης και η χημική του σύσταση είναι: 0.6 C - 0.4 Si - 0.75 Mn - 0.045 P - 0.045 S (% κ.β.). Πριν τη κατεργασία με το LASER, το υλικό είχε υποστεί κατεργασία ανακρυστάλλωσης, η οποία του προσέδωσε μία σκληρότητα της τάξης των 220 HV_{0.2}. Αρχικά, η δομή του υλικού ήταν φερριτο-περλιτική. Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα LASER CO₂, συνεχούς κύματος, με μήκος κύματος 10.6 μm και μέγιστη ισχύ εξόδου 1700 W. Για τους σκοπούς της εργασίας πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων.

Στην εργασία ορίστηκε το μέγεθος της πυκνότητας ισχύος ως εξής:

$$Q = q / (\pi \times r_b^2) \quad [W/mm^2]$$

, όπου q η ισχύς της δέσμης LASER και r_b η ακτίνα της. Τα δοκίμια του υλικού, αφού υποβλήθηκαν στην κατεργασία, εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη, λειάνθηκαν και στιλβώθηκαν. Στη συνέχεια, αφού προσβλήθηκαν χημικά με διάλυμα Nital 2 %, εξετάστηκαν σε μεταλλογραφικό οπτικό μικροσκόπιο. Τέλος, μετρήθηκε η μικροσκληρότητά τους, σε συνάρτηση με το βάθος κάτω από την επιφάνεια, χρησιμοποιώντας βάρος 0.2 Kgr.

Η μικροδομή των δοκιμίων εξετάσθηκε τόσο στη σκληρυμένη περιοχή, όσο και στη ζώνη μετάβασης από τη σκληρυμένη περιοχή προς το μέταλλο βάσης. Για κάθε μία από τις τρεις σειρές πειραμάτων, η οποία αντιστοιχεί σε διαφορετική πυκνότητα ισχύος, το βάθος της σκληρυμένης περιοχής κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου αυξανόταν, όσο μειωνόταν η χρησιμοποιούμενη ταχύτητα της κατεργασίας, δηλαδή η ταχύτητα με την οποία κινείται η δέσμη LASER ως προς το τεμάχιο.

Η μικροδομή της σκληρυμένης περιοχής εξαρτάται από την πυκνότητα ισχύος. Έτσι για υψηλή (306 W/mm^2) και μεσαία (76 W/mm^2) πυκνότητα ισχύος η σκληρυμένη περιοχή αποτελείται από σχετικά χονδρόκοκκο μαρτενσίτη. Αντίθετα για χαμηλή (19 W/mm^2) πυκνότητα ισχύος, η δομή της σκληρυμένης περιοχής αποτελείται από πιο λεπτόκοκκο μαρτενσίτη, ο οποίος έχει υποστεί αυτοεπαναφορά.

Η δομή της ζώνης μετάβασης αποτελείται από μαρτενσίτη και φερρίτη, κάτι που οφείλεται στην ατελή ωστενιτοποίηση του υλικού στην περιοχή αυτή, κυρίως λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται εκεί. Μάλιστα η ποσότητα του φερρίτη στη ζώνη μετάβασης αυξάνεται, όσο χαμηλότερη είναι η χρησιμοποιούμενη πυκνότητα ισχύος.

Έξω από τη ζώνη μετάβασης, δηλαδή στο μέταλλο βάσης, το υλικό δεν υπέστη μεταβολές της δομής, αποτελούμενο πάντα από φερρίτη και περλίτη. Στα δοκίμια που υποβλήθηκαν στην κατεργασία με την υψηλή πυκνότητα ισχύος και με την μεσαία πυκνότητα ισχύος αλλά με χαμηλές ταχύτητες, εμφανίσθηκε τήξη στην επιφάνεια. Αντίθετα τα δοκίμια που ακτινοβολήθηκαν με την χαμηλή πυκνότητα ισχύος δεν τήχθηκαν στην επιφάνεια.

Όσον αφορά τις μετρήσεις σκληρότητας, αυτές έδειξαν σημαντική αύξηση της σκληρότητας στην επιφάνεια, γεγονός που σχετίζεται με το σχηματισμό μαρτενσίτη. Έξω από τη σκληρυμένη περιοχή η σκληρότητα του υλικού δε μεταβλήθηκε. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σκληρότητα της επιφάνειας στις περισσότερες περιπτώσεις ξεπέρασε τα $700 \text{ HV}_{0.2}$, ενώ η αρχική σκληρότητα του υλικού, όπως προαναφέρθηκε, ήταν $220 \text{ HV}_{0.2}$.

Η μέγιστη σκληρότητα και το βάθος της σκληρυμένης περιοχής μεταβάλλονται σημαντικά με την πυκνότητα ισχύος. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος, τόσο αυξάνεται η μέγιστη σκληρότητα και το βάθος της σκληρυμένης περιοχής.

Το βάθος της σκληρυμένης περιοχής εξαρτάται επίσης πολύ από την ταχύτητα της κατεργασίας. Όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα της δέσμης LASER ως προς το τεμάχιο, τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος της σκληρυμένης περιοχής που επιτυγχάνεται. Φυσικά κάτω από κάποιο όριο ταχύτητας επέρχεται η ανεπιθύμητη τήξη της επιφάνειας του τεμαχίου.

Επίσης έγινε μια σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των προβλέψεων του μοντέλου. Για την υψηλή και τη μεσαία πυκνότητα ισχύος η συμφωνία μεταξύ των πειραματικών και των υπολογισμένων αποτελεσμάτων είναι αρκετά ικανοποιητική. Αντίθετα για την χαμηλή πυκνότητα ισχύος η απόκλιση είναι πολύ μεγάλη.

Τελικά, η πειραματική διαδικασία, ακολουθούμενη από την ανάλυση μικροδομής και τις μικροσκληρομετρήσεις, οδήγησαν στα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Η μικροδομή της σκληρυμένης περιοχής εξαρτάται από την πυκνότητα ισχύος και αποτελείται από χονδρόκοκκο μαρτενσίτη, για την υψηλή και τη μεσαία πυκνότητα ισχύος, και από μαρτενσίτη που έχει υποστεί αυτοεπαναφορά για την χαμηλή πυκνότητα ισχύος. Η ζώνη μετάβασης από τη σκληρυμένη περιοχή προς το μέταλλο βάσης αποτελείται από μαρτενσίτη και φερρίτη, λόγω της ατελούς ωστενιτοποίησης στην περιοχή αυτή.
2. Το βάθος της σκληρυμένης περιοχής και η μέγιστη σκληρότητα εξαρτώνται από την πυκνότητα ισχύος και την ταχύτητα της κατεργασίας. Το βάθος της σκληρυμένης περιοχής αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας ισχύος ή με μείωση της ταχύτητας της κατεργασίας, ενώ η μέγιστη σκληρότητα αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας ισχύος.
3. Υπάρχει σχετικά καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών και των υπολογισμένων από το μοντέλο αποτελεσμάτων για την υψηλή πυκνότητα ισχύος.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΓΕΝΙΚΑ

Η δέσμη LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) δεν αποτελεί πρόσφατο επιστημονικό επίτευγμα, αφού η ύπαρξή της είναι γνωστή εδώ και δεκαετίες. Αυτό όμως που πραγματικά αποτελεί σχετικά πρόσφατο επίτευγμα, είναι η χρησιμοποίησή 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 την κοπή μετάλλων, διάτρηση, συγκολλήσεις, χημικές και φυσικές εναποθέσεις ατμού στην επιφάνεια μετάλλων (LCVD και LPVD), στερεολιθογραφία, κ.λ.π. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί η τεράστια 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 η μέτρηση των χαρακτηριστικών διαφόρων φαινομένων, χάρη στη χρήση της δέσμης LASER (μετρήσεις ταχυτήτων ρευστών, μετρήσεις πάρα πολύ μικρών συγκεντρώσεων διαφόρων 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 στο εξωτερικό η βιομηχανία έχει υιοθετήσει και επεκτείνει τη χρησιμοποίηση της δέσμης LASER σε πλήθος κατεργασιών. Μεταξύ των κατεργασιών αυτών βρίσκονται και πολλές επιφανειακές κατεργασίες, στις οποίες η χρήση της δέσμης LASER παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων:

- Χημική καθαρότητα
- Ελεγχόμενη θερμική διείσδυση και συνεπώς παραμόρφωση
- Ελεγχόμενο θερμοκρασιακό προφίλ και επομένως ελεγχόμενο σχήμα, θέση και μέγεθος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης
- Λιγότερη, έως και καθόλου, περαιτέρω μηχανουργική κατεργασία
- Δυνατή, συνήθως, καθοδήγηση της κατεργασίας εξ' αποστάσεως

- Σχετικά εύκολη αυτοματοποίηση και ρύθμιση των παραμέτρων της κατεργασίας

Δυστυχώς στη χώρα μας λίγοι είναι προς το παρόν οι πρωτοπόροι, οι οποίοι αποφάσισαν να εντάξουν στο δυναμικό τους την τεχνολογία LASER. Για το μεγαλύτερο τμήμα της ελληνικής βιομηχανίας το LASER αποτελεί κάτι το άγνωστο και απρόσιτο. Αυτό συμβαίνει είτε επειδή το κόστος απόκτησης του απαραίτητου εξοπλισμού είναι σχετικά υψηλό, είτε επειδή η σχεδόν παντελής έλλειψη τεχνογνωσίας επάνω στο αντικείμενο δημιουργεί φόβους για μη ικανοποιητική και αποδοτική εκμετάλλευση από την παραγωγική διαδικασία (προβλήματα ρυθμίσεων, συντήρησης, επισκευών, κ.α.).

Μία προσπάθεια λοιπόν να ξεκαθαρίσει, έστω και λίγο, η θολή εικόνα που έχουν οι άνθρωποι της βιομηχανίας σχετικά με τη χρήση της δέσμης LASER σε βιομηχανικές εφαρμογές, επεχείρησε και η διπλωματική αυτή εργασία, η οποία ασχολήθηκε με μία μόνο από τις πολλές κατεργασίες που μπορούν να επιτευχθούν χάρη στη σύγχρονη αυτή τεχνολογία. Η κατεργασία αυτή είναι η επιφανειακή σκλήρυνση υποευτηκτοειδούς χάλυβα, φυσικά με τη χρησιμοποίηση δέσμης LASER.

Αμέσως παρακάτω όμως παρουσιάζονται πιο συγκεκριμένα το αντικείμενο και οι στόχοι της διπλωματικής εργασίας αυτής.

2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αντικείμενο της εργασίας, όπως ακριβώς δηλώνει και ο τίτλος της, είναι η μελέτη της επιφανειακής σκλήρυνσης υποευτηκτοειδούς χάλυβα, με τη χρησιμοποίηση δέσμης LASER. Μελετήθηκαν τα αποτελέσματα της κατεργασίας επάνω σε ένα συγκεκριμένο υποευτηκτοειδή χάλυβα. Πρόκειται για τον απλό ανθρακοχάλυβα Ck-60. Στοιχεία για τον συγκεκριμένο χάλυβα, καθώς και οι λόγοι για τους οποίους αυτός επελέγη για την εκτέλεση

των πειραμάτων, αναφέρονται εκτενέστερα σε ειδική ενότητα της εργασίας (βλ. Κεφάλαιο Τρίτο, σελίδα 47).

Περνώντας τώρα στον καθορισμό των στόχων της εργασίας, θα πρέπει να επισημανθεί ότι αυτή προσπάθησε να δώσει απάντηση στο βασικό ερώτημα, που αποτελεί το δεδομένο που κάθε μηχανικός πρέπει να γνωρίζει, ώστε να σχεδιάσει και να υλοποιήσει την οποιαδήποτε κατεργασία ή διεργασία. Το ερώτημα αυτό είναι, με ποιο τρόπο θα επιτευχθεί η ικανοποίηση των απαιτούμενων προδιαγραφών για το “προϊόν” της κατεργασίας.

Κινούμενη προς την κατεύθυνση αυτή, η εργασία προσπάθησε να επιτύχει τους εξής επιμέρους στόχους:

- θεωρητική προσέγγιση των αρχών που διέπουν την επιφανειακή σκλήρυνση με τη χρήση δέσμης LASER
- προσδιορισμός των παραμέτρων που επηρεάζουν την κατεργασία
- μελέτη της μεταβολής της σκληρότητας του υλικού, μετά την υποβολή του στην κατεργασία
- επισήμανση των αλλαγών της δομής που υφίσταται το υλικό λόγω της κατεργασίας και του εάν οι αλλαγές αυτές δικαιολογούν ή όχι τη μεταβολή της σκληρότητας
- μελέτη των θερμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεξαγωγή της κατεργασίας και του ποια είναι η συμβολή τους στη μεταβολή της δομής και συνεπώς των ιδιοτήτων του υλικού
- συγκέντρωση των παραπάνω στοιχείων και αποτελεσμάτων σε εύχρηστη μορφή (πίνακες, διαγράμματα, κ.τ.λ.), ώστε να υπάρχει πλήρης εικόνα για τη συμπεριφορά της κατεργασίας, μεταβαλλομένων των παραμέτρων της

Με την επίτευξη των στόχων αυτών δίδεται ουσιαστικά απάντηση στο βασικό ερώτημα που τέθηκε αρχικά. Δίδεται δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο πρέπει να ρυθμίζονται οι

παράμετροι της κατεργασίας, ώστε να λαμβάνονται τα ανά περίπτωση απαιτούμενα προφίλ σκληρότητας του υλικού.

Η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας που ακολουθεί είναι η εξής:

1. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση
2. Μοντελοποίηση της Κατεργασίας
3. Πειραματική Διαδικασία
4. Αποτελέσματα
5. Συζήτηση των Αποτελεσμάτων
6. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η διάρθρωση αυτή κρίθηκε η καλύτερη, ώστε ο αναγνώστης να περάσει ομαλά από το στάδιο των αρχών στις οποίες στηρίζεται η κατεργασία, κάτι που γίνεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, στο στάδιο της εκτέλεσης πειραμάτων, των αποτελεσμάτων που έδωσαν τα πειράματα αυτά, την εξήγηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και, τέλος, την εξαγωγή συμπερασμάτων από τη μελέτη της κατεργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

ΜΕΡΟΣ Α΄

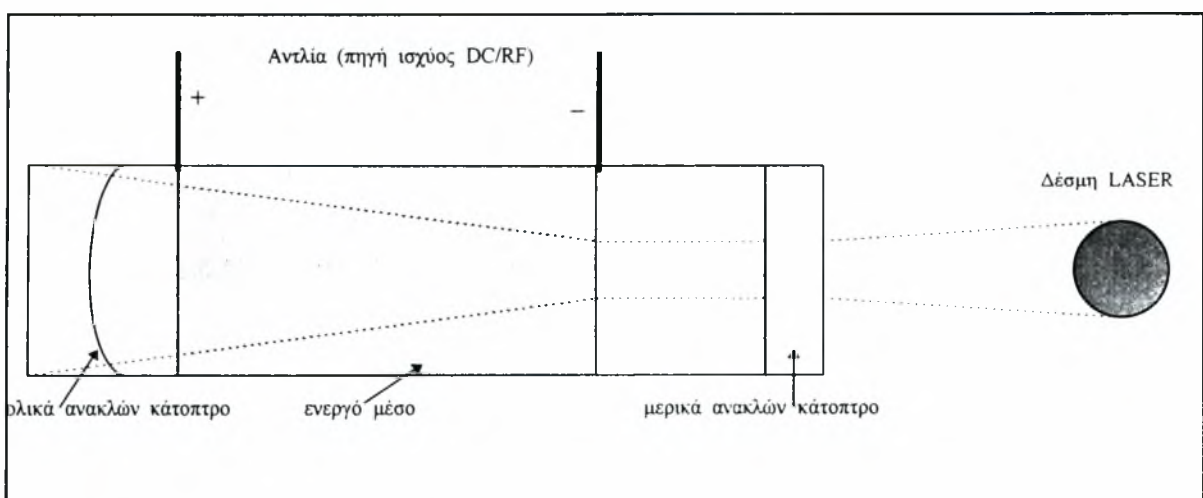
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LASER

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ LASER

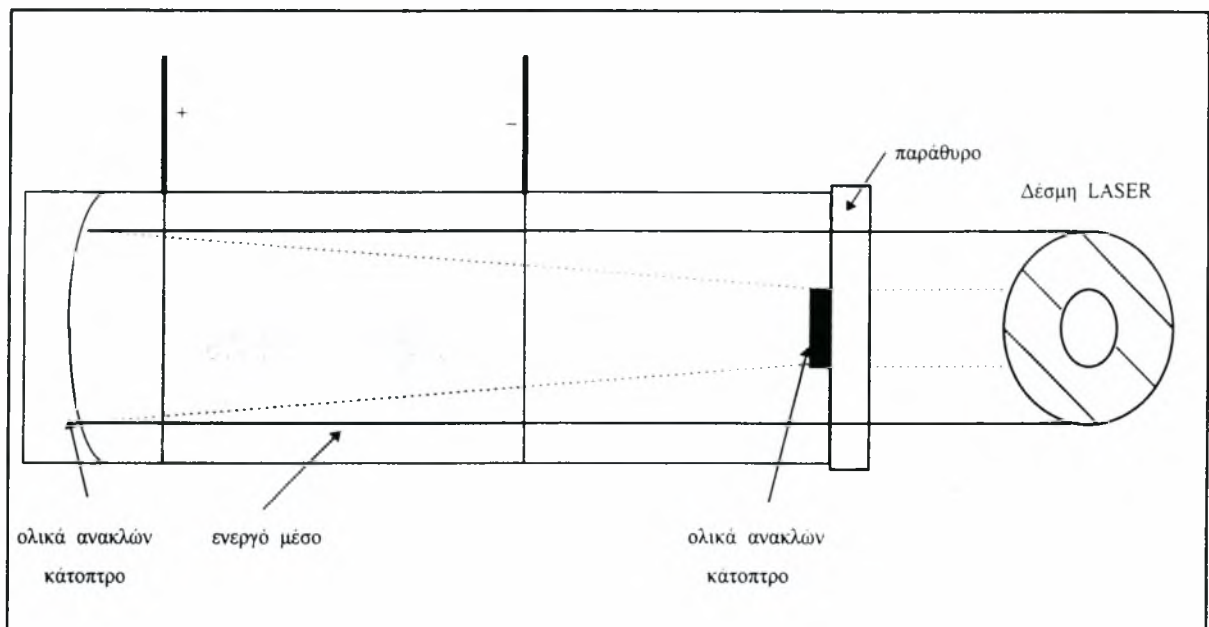
Το LASER, βασικά, αποτελείται από δύο κάτοπτρα τα οποία είναι παράλληλα τοποθετημένα μεταξύ τους, σχηματίζοντας έτσι έναν οπτικό ταλαντωτή, δηλαδή έναν θάλαμο στον οποίο το φως μπορεί να ταλαντώνεται συνεχώς ανάμεσα από τα δύο κάτοπτρα, εκτός εάν η διαρκής αυτή ταλάντωση διακοπεί από κάποιον μηχανισμό, όπως είναι η απορρόφηση. Μεταξύ των δύο κατόπτρων 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). Στο φαινόμενο όμως αυτό αναφέρεται εκτενέστερα η ενότητα 2 του κεφαλαίου.

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 CO₂ 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 ιωδίου.

Η οπτική διάταξη μιας μονάδας LASER φαίνεται στο σχήμα 1.1α,β:



α)



β)

Σχήμα 1.1: Βασική κατασκευή της κοιλότητας του LASER: α) Ευσταθής, β) Ασταθής.

Το ένα από τα δύο κάτοπτρα είναι μερικώς διαφανές, έτσι ώστε να επιτραπεί η έξοδος από το σύστημα ενός μέρους της δέσμης του ταλαντώμενου φωτός με την μορφή της δέσμης LASER. Το άλλο κάτοπτρο ανακλά ολικά το φως, στο βαθμό βέβαια που αυτό είναι δυνατόν να γίνει (ανάκλαση περίπου κατά 99.999%). Το κάτοπτρο αυτό συνήθως έχει κάποια καμπυλότητα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ισχύος της δέσμης του ταλαντώμενου φωτός λόγω διάθλασης. Η καμπυλότητα αυτή επίσης βοηθά στην ευθυγράμμιση των κατόπτρων 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.

Η κοιλότητα κάποιου LASER χαρακτηρίζεται ως "ευσταθής" ή "ασταθής", ανάλογα με το εάν αναγκάζει την ταλαντώμενη δέσμη φωτός να συγκλίνει μέσα στην κοιλότητα ή να διασκορπιστεί έξω από αυτήν. Τα περισσότερα LASER με ισχύ μέχρι 2 kW είναι σχεδιασμένα με ευσταθή κοιλότητα (Σχ. 1.1α). επειδή είναι πιο ασφαλές να μεταδίδεται αυτό το επίπεδο ισχύος μέσα από το κάτοπτρο της εξόδου, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος κάποιας αστοχίας του κατόπτρου. Το κάτοπτρο της εξόδου, το οποίο είναι μερικά διαφανές, είναι κατασκευασμένο από σελινιούχο ψευδάργυρο (ZnSe), αρσενιούχο γάλλιο (GaAs), ή

κατασκευασμένο από σελινιούχο ψευδάργυρο (ZnSe), αρσενιούχο γάλλιο (GaAs), ή τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) για τα LASER διοξειδίου του άνθρακα, και από BK7 (τηγμένο SiO₂) για τα LASER YAG. Τα κάτοπτρα εξόδου επικαλύπτονται πολύ προσεκτικά, ώστε να προσδώσουν στην κοιλότητα την απαιτούμενη ανακλαστικότητα.

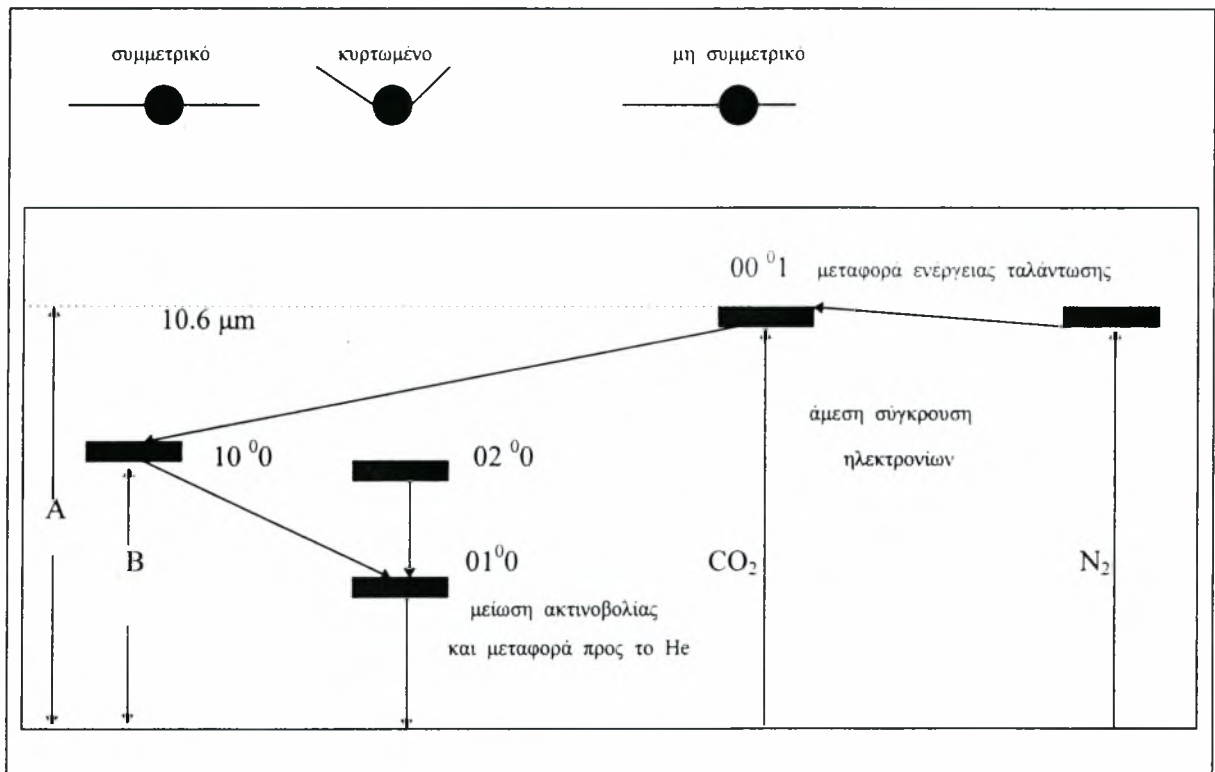
Η αστοχία του παραθύρου εξόδου είναι σημαντική, επειδή δημιουργεί προβλήματα διακοπών στην παραγωγή και επομένως κόστους. Συνεπώς, τα LASER υψηλότερης ισχύος, συνηθίζεται να σχεδιάζονται με ασταθή κοιλότητα (Σχ. 1.1β) και η δέσμη λαμβάνεται γύρω από το κάτοπτρο εξόδου, το οποίο στην περίπτωση αυτή είναι ένα κάτοπτρο που ανακλά όλη την ακτινοβολία που δέχεται. Όσο μεγαλύτερο λοιπόν είναι το μέγεθος της δακτυλιοειδούς δέσμης που προκύπτει, τόσο μικρότερη είναι η πυκνότητα ενέργειας που δέχεται το παράθυρο εξόδου, άρα και μικρότερος κίνδυνος υπάρχει να αστοχήσει.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, το σχήμα μιας "ευσταθούς" δέσμης καθορίζεται από το σχήμα της οπής εξόδου, ενώ το σχήμα μιας "ασταθούς" δέσμης έχει το ίδιο σχήμα με τα άκρα του κατόπτρου εξόδου. Το σχήμα αυτό συνήθως είναι κυκλικό ή δακτυλιοειδές, μπορεί όμως να γίνει και τετραγωνικό.

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. Γίνεται λοιπόν προφανές ότι δεν πρόκειται για ένα φαινόμενο της καθημερινής εμπειρίας.

Ας θεωρηθεί το μόριο του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). 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. Οι βασικές ενεργειακές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το μόριο του CO₂ φαίνονται στο σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1: Βασικές ενεργειακές καταστάσεις του μορίου του CO₂.

Το μίγμα αερίων, δηλαδή το ενεργό μέσο, σε ένα LASER διοξειδίου του άνθρακα υφίσταται μία ηλεκτρική εκκένωση, η οποία προκαλεί το υπό χαμηλή πίεση αέριο (συνήθως βρίσκεται σε πίεση 35-50 torr) να έλθει στην φυσική κατάσταση που ονομάζεται "πλάσμα". Στην κατάσταση του "πλάσματος" τα μόρια καταλαμβάνουν διάφορες καταστάσεις διέγερσης, ακολουθώντας την κατανομή Boltzmann:

$$n_i = C \exp[-E/(k T)]$$

, όπου

n_i ...ο αριθμός των μορίων που βρίσκονται στην ενεργειακή κατάσταση i

E ...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 ($00^0 1$) η οποία αντιπροσωπεύει μια κατάσταση μη συμμετρικής ταλάντωσης. Ένα μόριο στην κατάσταση

αυτή μπορεί να χάσει μέρος της ενέργειάς 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 (10^0), εκπέμποντας ένα φωτόνιο μήκους κύματος 10.6 μm, 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 μία ταλάντωση μεταξύ των κατόπτρων. Κατά την διάρκεια της κίνησης αυτής μεταξύ των κατόπτρων, το φωτόνιο μπορεί είτε να απορροφηθεί από ένα μόριο που βρίσκεται στην ενεργειακή κατάσταση (10^0), είτε να διαθλασθεί και να εξέλθει από το σύστημα, είτε, τέλος, να συγκρουσθεί με ένα άλλο διεγερμένο μόριο που βρίσκεται στην κατάσταση (00^0). Στην τελευταία αυτή περίπτωση θα προκαλέσει την απώλεια ενέργειας από το διεγερμένο μόριο, αναγκάζοντάς 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 δύο αυτά φωτόνια κινούνται συνεχώς μέσα στην κοιλότητα, έχοντας την ίδια κατεύθυνση, προκαλώντας έτσι την εκπομπή και νέων φωτονίων από άλλα διεγερμένα μόρια. Με τον τρόπο αυτό η διεγερμένη κατάσταση γίνεται ελλειπής, δηλαδή τα μόρια CO₂ τα οποία βρίσκονται στην ενεργειακή κατάσταση (00^0) λιγοστεύουν, και σύμφωνα με την κατανομή Boltzmann όλο και περισσότερη ενέργεια εγκαταλείπει την κατάσταση αυτή, δίνοντας έτσι μια ικανοποιητική μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτό το ανώτερο ενεργειακό επίπεδο. Είναι λοιπόν απαραίτητο μια άλλη ενεργειακή κατάσταση να διατηρηθεί, δηλαδή η διεγερμένη κατάσταση θα έπρεπε να καθυστερεί να υποστεί την αυτόματη εκπομπή, ενώ η κατώτερη ενεργειακή κατάσταση θα έπρεπε να μεταβάλλεται ταχύτερα. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την αντιστροφή του πληθυσμού των διεγερμένων ειδών, δημιουργώντας έτσι ένα μέσο πιο κατάλληλο για την διεργασία της προκλημένης ακτινοβολίας.

Στην πραγματικότητα εάν συνέβαινε αυτό, τότε το LASER διοξειδίου του άνθρακα δεν θα ήταν σήμερα το ισχυρότερο διαθέσιμο LASER. Το LASER διοξειδίου του άνθρακα γίνεται χρήσιμο χάρις σε μία "παραξενιά" της φύσης, δηλαδή από το άζωτο, το οποίο μπορεί να ταλαντωθεί μόνο κατά ένα τρόπο, αφού το μόριό του αποτελείται από δύο μόνο άτομα. Το άζωτο έχει μια διαφορά ενέργειας μεταξύ των διαφόρων κβάντα ταλάντωσης, η οποία απέχει μερικά μόλις Hertz από την ενέργεια που απαιτείται για να μετατοπισθεί το ψυχρό CO₂ και να φθάσει στην κατάσταση της μη συμμετρικής ταλάντωσης, δηλαδή στο ανώτερο ενεργειακό επίπεδο του LASER (00^0). Επομένως μέσω της σύγκρουσης με

διεγερμένα άτομα N_2 , μπορούν να διεγερθούν τα άτομα του ψυχρού CO_2 . Ο μόνος τρόπος με τον οποίο τα άτομα του N_2 μπορούν να χάσουν την ενέργειά τους είναι να συγκρουσθούν με τα τοιχώματα της κοιλότητας ή με κάποιο μόριο που θα απορροφήσει την ενέργεια αυτή. Συνεπώς η διάρκεια ζωής του αζώτου είναι μεγάλη και η απόδοση του LASER διοξειδίου του άνθρακα υψηλή (15-20%). Όμως η απόδοση είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας, καθώς μόνο ψυχρό CO_2 αντιδρά με το N_2 , με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.

Συνεπώς ο σχεδιασμός ενός LASER διοξειδίου του άνθρακα βασίζεται στην απαίτηση που υπάρχει για ψυχρό CO_2 . Αρχικά, το μίγμα αερίων που βρίσκεται μέσα στο LASER αποτελείται από περίπου 78% He, για καλύτερη αγωγή και σταθεροποίηση του "πλάσματος", 12% N_2 και 10% CO_2 . Η απόδοση του LASER δεν εξαρτάται ιδιαίτερα από την σύσταση του αερίου μίγματος, εκτός αν αυτό περιέχει συγκεκριμένες ακαθαρσίες. Στη συνέχεια το αέριο μίγμα ψύχεται, είτε μέσω αγωγής όπως στα LASER με βραδεία ροή (SF LASERS), είτε μέσω συναγωγής όπως συμβαίνει στα LASER με ταχεία αξονική ροή (FAF LASERS) και σε αυτά με εγκάρσια ροή (TF LASERS).

Αρκετά υλικά είναι σε θέση να επιδείξουν το φαινόμενο της προκλημένης ακτινοβολίας, ελάχιστα όμως το καταφέρνουν με σημαντική ικανότητα ισχύος της εξερχόμενης δέσμης. Τα κυριότερα LASER που χρησιμοποιούνται για κατεργασίες υλικών είναι τα εξής:

- CO_2
- CO
- Nd-YAG
- KrF, ArF, XeCl

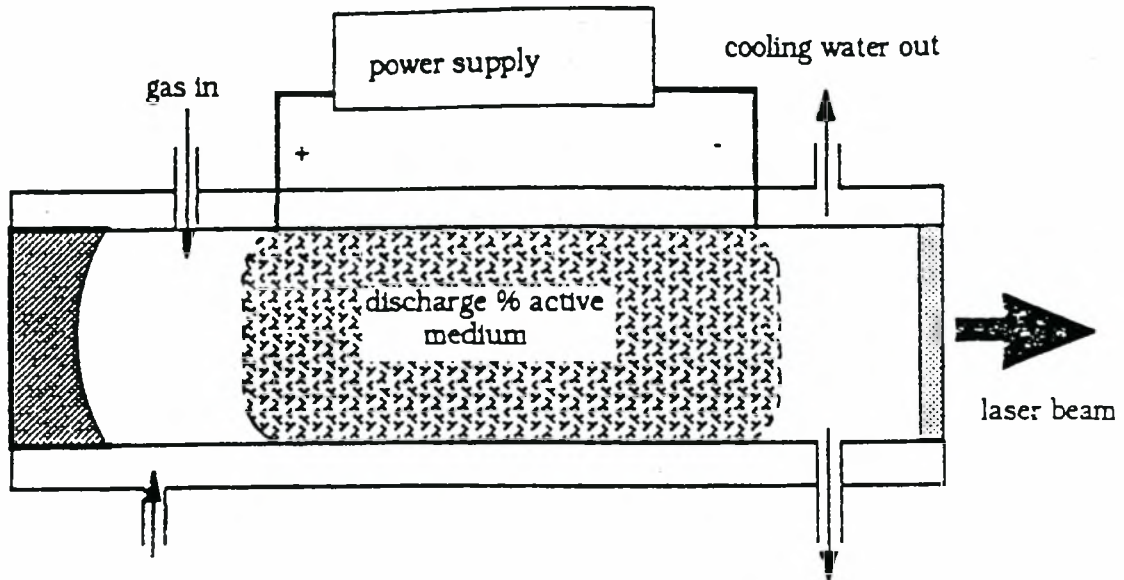
3. ΤΥΠΟΙ LASERS ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Επειδή τα πειράματα της κατεργασίας της επιφανειακής σκλήρυνσης με τη χρήση δέσμης LASER, τα οποία εκτελέστηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής, διεκπεραιώθηκαν από ένα LASER διοξειδίου του άνθρακα, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει στο σημείο αυτό μια σύντομη αναφορά στους διάφορους τύπους του LASER CO_2 που υπάρχουν. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ αυτών των τύπων LASER διοξειδίου του άνθρακα, έγκειται στον τρόπο με τον οποίο ψύχουν το ενεργό μέσο, δηλαδή το μίγμα του CO_2 με το He και το N_2 . Ο τρόπος

ψύξης του ενεργού μέσου αποτελεί και την ουσία του σχεδιασμού ενός LASER διοξειδίου του άνθρακα. Οι τύποι που υπάρχουν είναι οι εξής:

LASER Βραδείας Ροής (Slow Flow LASERS-SF):

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα LASER, στα οποία η ψύξη του ενεργού μέσου λαμβάνει χώρα μέσω των τοιχωμάτων της κοιλότητας. Η γενική διάταξή τους φαίνεται στο σχήμα 3.1:

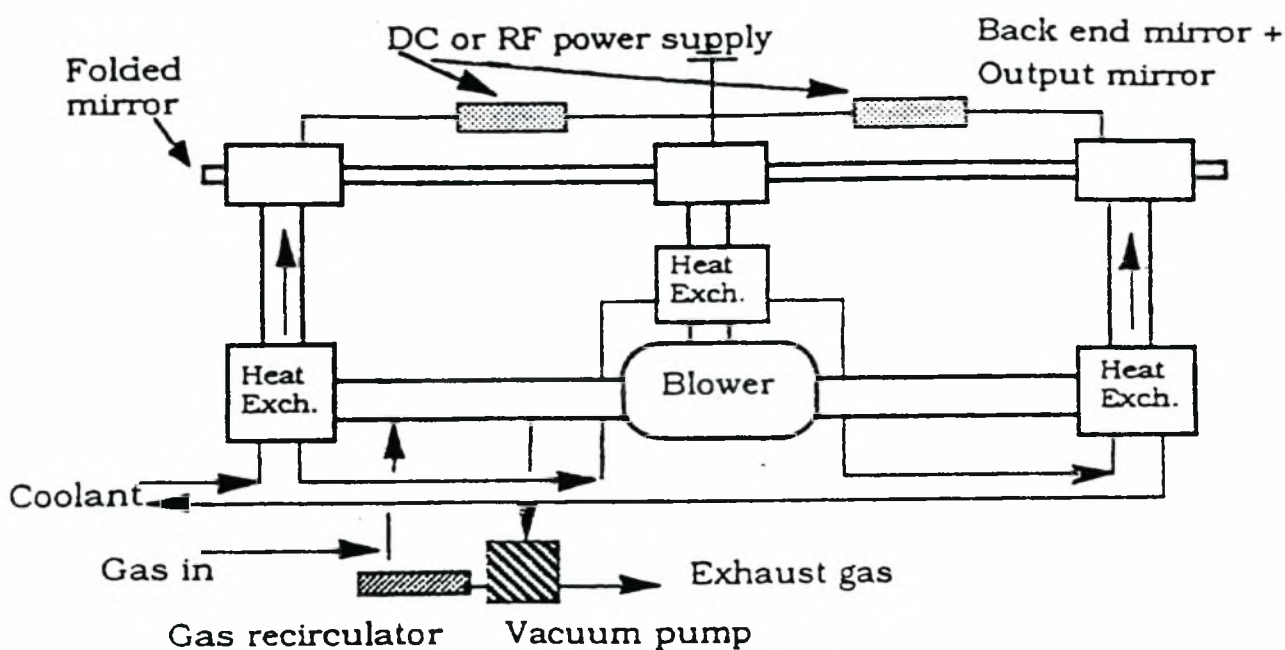


Σχήμα 3.1: Γενική διάταξη ενός LASER βραδείας ροής

Τυπικές συνθήκες λειτουργίας για ένα τέτοιο LASER είναι παροχή αερίου 20 lt/min, παροχή ψυκτικού μέσου 7 lt/min και θερμοκρασία στους 20 °C. Η ωφέλιμη ισχύς των LASER αυτών κυμαίνεται από 30-50 Watt ανά μέτρο μήκους της κοιλότητας. Η τιμή αυτή είναι σχετικά χαμηλή και συνεπώς τα LASER του τύπου αυτού είτε έχουν πολύ μεγάλο μήκος, ή αναγκαστικά περιορίζονται σε χαμηλή ισχύ, περίπου μέχρι τα 2 kW. Σαν πλεονέκτημα έχουν το ότι λόγω των χαμηλών ταχυτήτων ροής του αερίου, βελτιώνονται οι συνθήκες δημιουργίας του "πλάσματος".

LASER Ταχείας Αξονικής Ροής (Fast Axial Flow LASERS-FAF):

Τα LASER FAF επιτυγχάνουν την ψύξη του ενεργού μέσου με συναγωγή μέσω της ζώνης εκκένωσης. Η γενική διάταξή τους φαίνεται στο σχήμα 3.2:

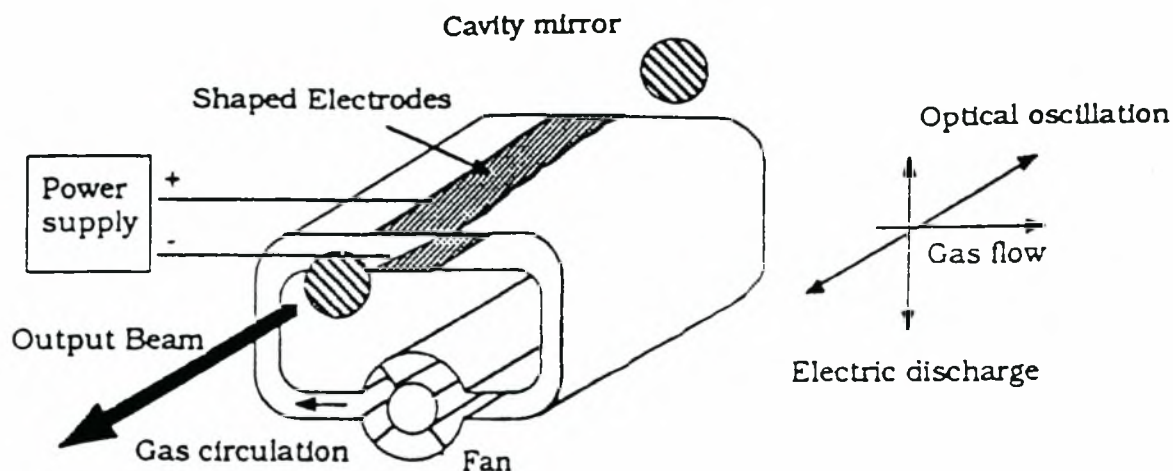


Σχήμα 3.2: Γενική διάταξη ενός LASER ταχείας αξονικής ροής

Οι τυπικές τιμές της ροής αερίου μέσα από τη ζώνη εκκένωσης κυμαίνονται μεταξύ 300-500 m/sec. Ο έλεγχος του αερίου μίγματος, καθώς και η μεγάλη προσοχή που δίδεται στην αποφυγή διαρροών, βελτιώνει τις συνθήκες δημιουργίας του "πλάσματος". Η αξονική κατεύθυνση της ροής, της εκκένωσης και της οπτικής ταλάντωσης ευνοούν συμμετρική κατανομή της ισχύος ως προς τον άξονα της εξερχόμενης δέσμης. Το όφελος σε ισχύ των LASER αυτών παίρνει τιμές γύρω στα 500 W ανά μέτρο μήκους της κοιλότητας και επομένως γίνεται εφικτή η κατασκευή μονάδων με μικρό μήκος και υψηλή ισχύ εξόδου.

LASER Εγκάρσιας Ροής (Transverse Flow LASERS-TF):

Τα LASER του τύπου αυτού επίσης ψύχονται με συναγωγή, όμως αυτή τη φορά η ροή κινείται εγκάρσια ως προς την εκκένωση του ενεργού μέσου. Συνεπώς η ψύξη είναι πολύ πιο αποτελεσματική, κάνοντας έτσι εφικτή την κατασκευή πολύ συμπαγών μονάδων με μεγάλη ισχύ εξόδου. Η γενική τους διάταξη φαίνεται στο σχήμα 3.3:



Σχήμα 3.3: Γενική διάταξη LASER εγκάρσιας ροής

Το κυριότερο μειονέκτημα των LASER αυτών έγκειται στην έλλειψη συμμετρίας στη ροή. Για παράδειγμα, το αέριο εισέρχεται στην κοιλότητα κρύο και σταδιακά θερμαίνεται, καθώς κινείται εγκάρσια μέσα σε αυτήν. Έτσι το όφελος σε ισχύ, το οποίο εξαρτάται πολύ από την θερμοκρασία, μειώνεται κατά την κατεύθυνση του πλάτους της κοιλότητας, με αποτέλεσμα να προκύπτει μια μη συμμετρική κατανομή ισχύος στην εξερχόμενη δέσμη.

ΜΕΡΟΣ Β΄

Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΔΕΣΜΗΣ LASER

4. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΣΜΗΣ LASER

Η επιφανειακή σκλήρυνση φερριτικών υλικών είναι μία 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, υπό ευνοϊκές συνθήκες, αυξάνει την αντοχή του και σε κόπωση, λόγω των παραμενουσών θλιπτικών τάσεων που επιβάλλονται στην επιφάνεια του τεμαχίου από την κατεργασία της σκληρύνσεως. Η επιφανειακή σκλήρυνση δεν διαφέρει, στα βασικά της σημεία, από την σκλήρυνση ολόκληρου του όγκου κάποιου τεμαχίου από φερριτικό υλικό. Και στα δύο αυτά είδη κατεργασιών η αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής επιτυγχάνονται με την απότομη ψύξη (βαφή) του υλικού από την ωστενιτική περιοχή, με σκοπό την δημιουργία σκληρού μαρτενσίτη. Η επιφανειακή σκλήρυνση διαφέρει από την συμβατική σκλήρυνση ολόκληρου του όγκου κάποιου τεμαχίου, μόνο στο γεγονός ότι κατά την πρώτη ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα θερμαίνεται μέχρι την ωστενιτική περιοχή προτού βαφεί, αφήνοντας έτσι το εσωτερικό του τεμαχίου ουσιαστικά ανεπηρέαστο.

Επειδή τα φερριτικά υλικά είναι πολύ καλοί αγωγοί της θερμότητας, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται πολύ υψηλές ροές θερμότητας, ώστε να θερμανθεί αυτό το λεπτό επιφανειακό στρώμα μέχρι τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, χωρίς να επηρεάζεται η θερμοκρασία του υπόλοιπου όγκου του τεμαχίου. Τέτοιες ροές θερμότητας συνήθως επιτυγχάνονται με τη χρήση κάποιας φλόγας πολύ υψηλής θερμοκρασίας, ή με θέρμανση μέσω επαγωγής πολύ υψηλής συχνότητας. Θερμαίνοντας λυιόν επιλεκτικά την επιφάνεια του τεμαχίου μέχρι τις θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης, η επιθυμητή σκλήρυνση της επιφάνειας γίνεται εφικτή με τη χρησιμοποίηση κάποιου ψυκτικού μέσου, ή με απότομη ψύξη από το ίδιο το υλικό. Η απότομη ψύξη από το ίδιο το υλικό λαμβάνει χώρα, όταν το ψυχρό εσωτερικό του τεμαχίου αποτελεί μια αρκετά μεγάλη "δεξαμενή" θερμότητας τέτοια, ώστε να ψύξει την θερμή επιφάνεια μέσω αγωγής και μάλιστα με πολύ υψηλό ρυθμό για να γίνει δυνατή η δημιουργία μαρτενσίτη στην επιφάνεια.

Κατά τα τελευταία χρόνια, τα βιομηχανικά LASER έχουν γίνει διαθέσιμα για χρήση σε μεταλλουργικές κατεργασίες, συμπεριλαμβανομένης και της επιφανειακής σκλήρυνσης. Μία δέσμη LASER μπορεί να αποδώσει πολύ υψηλές ροές ενέργειας στην επιφάνεια κάποιου τεμαχίου και τα θερμοκρασιακά προφίλ που προκύπτουν συνήθως έχουν αρκετά μεγάλες

κλίσεις, ώστε να περιττεύει η αναγκαιότητα χρήσης κάποιου εξωτερικού ψυκτικού μέσου. Η δέσμη LASER είναι μία δέσμη φωτός, η οποία είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, είναι εύκολα ελεγχόμενη, δεν απαιτεί την δημιουργία ειδικών συνθηκών (π.χ. κενό, κ.τ.λ.), και δεν παράγει προϊόντα καύσης. Ωστόσο, η επιφανειακή σκλήρυνση με τη χρήση δέσμης LASER έχει και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία μπορεί να περιορίσουν την πρακτική της χρησιμότητα σε κάποια μονάδα που ασχολείται με θερμικές κατεργασίες. Τα μειονεκτήματα αυτά περιλαμβάνουν τις απαιτήσεις της κατεργασίας σε πολύπλοκα οπτικά συστήματα, καθώς και την χρήση επικαλύψεων στην επιφάνεια, λόγω της χαμηλής απορροφητικότητας της υπέρυθρης ακτινοβολίας του LASER, χαρακτηριστικό των χαλύβων. Για να αντιμετωπιστεί το θέμα αυτό, στην Ευρώπη η έρευνα έχει επικεντρωθεί σε μια εναλλακτική τεχνική, με τη χρησιμοποίηση της γωνίας Brewster, τεχνική που αποφεύγει την προσθήκη επικαλύψεων στην επιφάνεια. Πιο αναλυτική αναφορά στο θέμα της απορροφητικότητας γίνεται στην ενότητα 10.

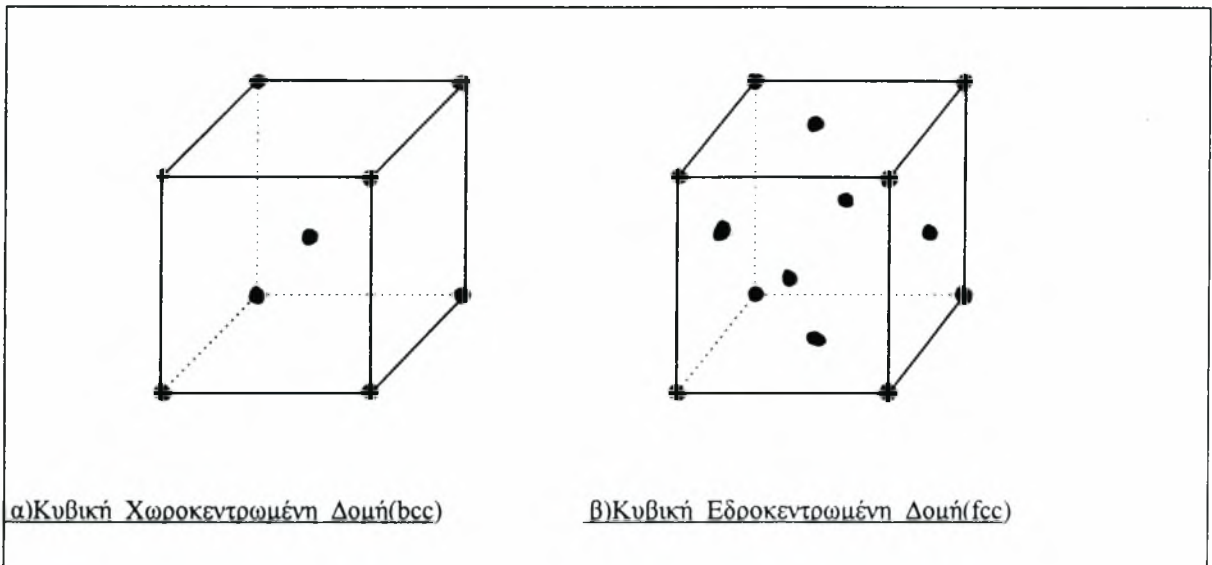
5. ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Η κατεργασία της επιφανειακής σκληρύνσεως βασίζεται στις ίδιες αρχές με τις συμβατικές κατεργασίες σκληρύνσεως, 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 στην 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 δευτερολέπτου. Στην πραγματικότητα, κατά την επιφανειακή σκλήρυνση με LASER, η περίοδος θέρμανσης είναι πολύ μικρότερη από την 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 την 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 την δημιουργία ενός ομογενούς στερεού 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 καθορισθεί 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 αFe (φερρίτης), που έχει δομή κυβική χωροκεντρωμένη (bcc), σε γFe (ωστενίτης), του οποίου η δομή είναι η κυβική εδροκεντρωμένη (fcc). Οι κυψελίδες των δύο δομών φαίνονται στο σχήμα 5.1:



Σχήμα 5.1: Οι κυψελίδες των δομών BCC και FCC.

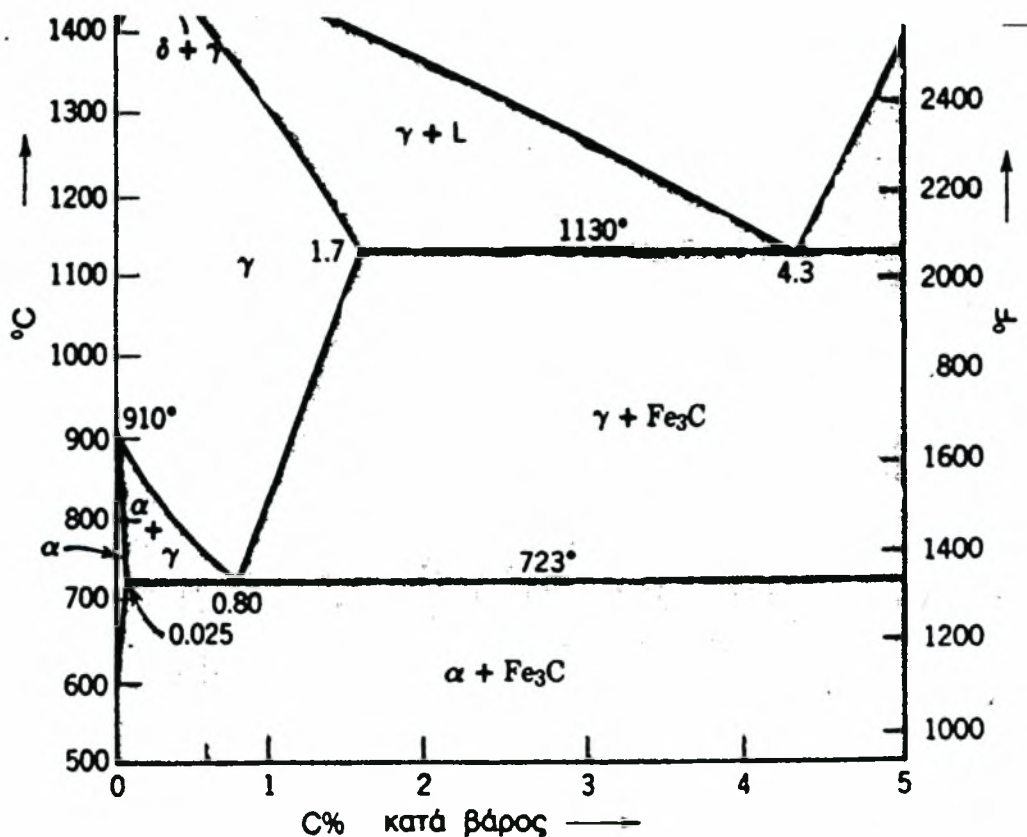
Ο μετασχηματισμός αυτός συντελείται με την πυρήνωση και ανάπτυξη της νέας φάσης (ωστενίτης) στη μήτρα της αρχικής φάσης (φερρίτης). Θερμαίνοντας αργά, δηλαδή διατηρώντας συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας, ο μετασχηματισμός θα αρχίσει στην χαρακτηριστική θερμοκρασία A_1 , που για τους ανθρακοχάλυβες βρίσκεται στους $723\text{ }^{\circ}\text{C}$, και θα ολοκληρωθεί στην θερμοκρασία A_3 , όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. 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 υποευθηκτοειδούς χάλυβα, σε θερμοκρασία δωματίου, περιέχει άνθρακα σε μορφή καρβιδίου του σιδήρου (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 ανακατανεμηθεί μέσω διάχυσης σε περιοχές που προήλθαν από φερρίτη και οι οποίες ουσιαστικά δεν περιέχουν καθόλου άνθρακα.

Η διαδικασία αυτή απαιτεί χρόνο, ακόμη και για τις 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. Για το λόγο αυτό εξετάζεται στην ενότητα 2 του δευτέρου κεφαλαίου αναλυτικότερα το φαινόμενο της διάχυσης.

Οι πραγματικά πολύ υψηλοί ρυθμοί θέρμανσης οι οποίοι εμφανίζονται κατά την επιφανειακή σκλήρυνση με τη χρήση δέσμης LASER, σε συνδυασμό με την ανάγκη να υπάρξει επαρκής χρόνος παραμονής πάνω από την θερμοκρασία A_3 , ώστε να σχηματισθεί ομογενής ωστενίτης, καθιστούν απαραίτητη την ανάπτυξη υψηλών μεγίστων θερμοκρασιών. Από την άλλη μεριά, έχει παρατηρηθεί με ανάλυση ακτίνων X ότι εμφανίζεται παραμένον ωστενίτης μετά την βαφή το ποσό



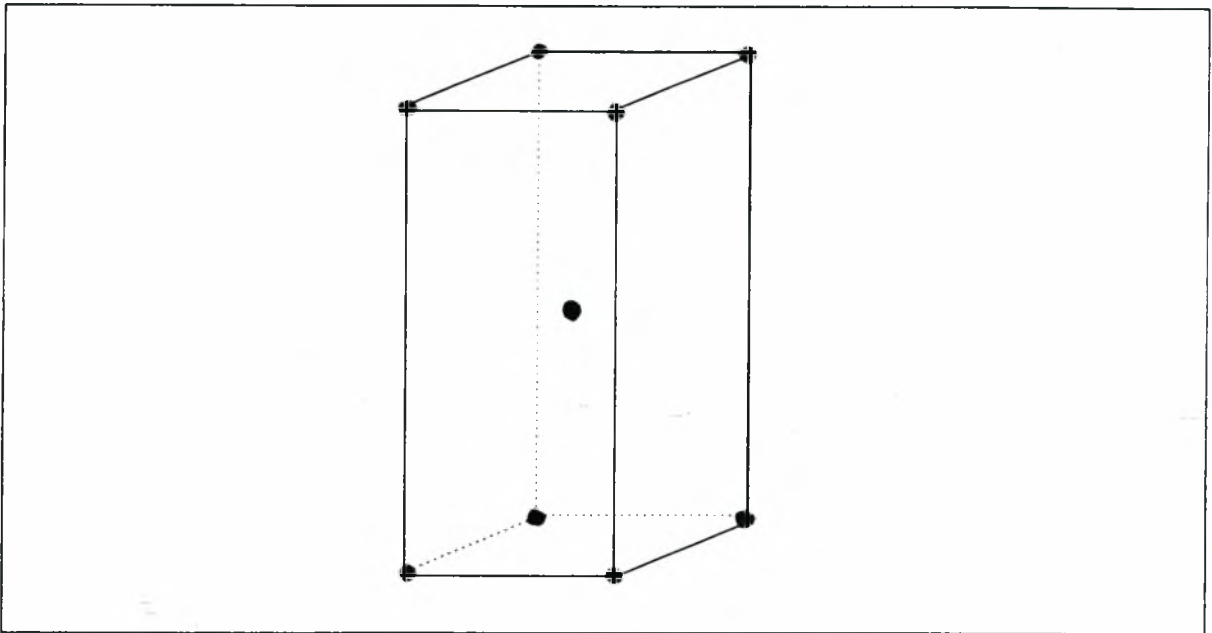
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου-άνθρακα.

του οποίου αυξάνεται με την αύξηση των μεγίστων θερμοκρασιών της κατεργασίας. Επομένως, είναι δυνατόν εάν αυξηθεί πολύ η προσδιδόμενη ενέργεια, με σκοπό να αυξηθεί το βάθος της σκληρυμένης περιοχής κάτω από την επιφάνεια, 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 την 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 ομοιόμορφη διάλυση των ατόμων του άνθρακα μέσω διάχυσης στο κρυσταλλικό πλέγμα του χάλυβα, 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.

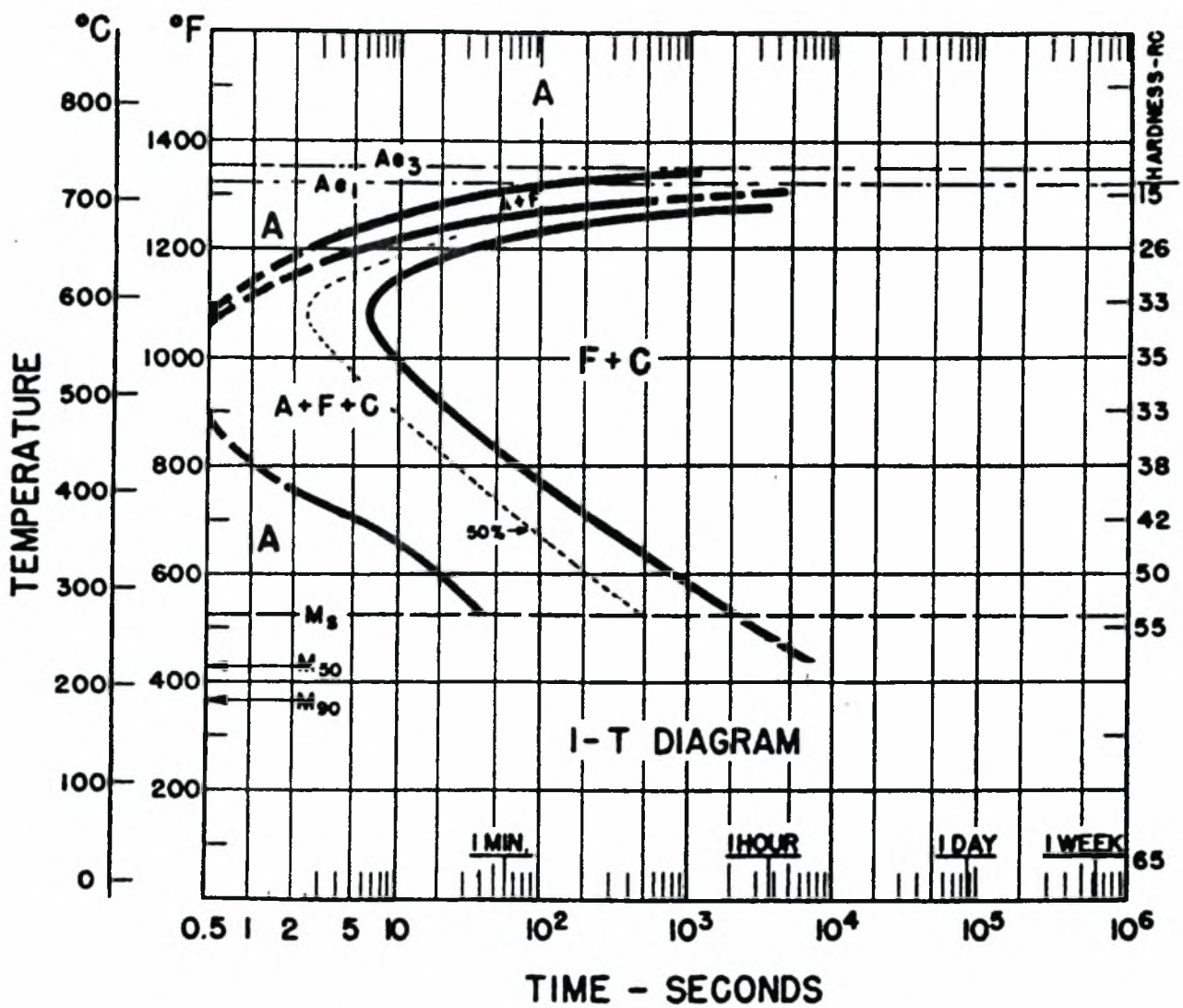
Ο μαρτενσίτης είναι μία μετασταθής φάση του χάλυβα που χαρακτηρίζεται από την πολύ μεγάλη σκληρότητά του. Η δομή του είναι τετραγωνική χωροκεντρωμένη και μπορεί να θεωρηθεί και σαν παραμορφωμένη φεριτική κυβική χωροκεντρωμένη. Η παραμόρφωση προέρχεται από τα άτομα του άνθρακα που παγιδεύτηκαν σε ορισμένες θέσεις παρεμβολής στο πλέγμα, αφού τους απαγορεύθηκε η κίνηση προς πιο σταθερές θέσεις από την απότομη πτώση της θερμοκρασίας. Η δημιουργία μαρτενσίτη προκαλεί μία αύξηση του όγκου του κρυσταλλικού πλέγματος της τάξης του 2.5-4 %. Η τετραγωνική χωροκεντρωμένη δομή του μαρτενσίτη φαίνεται στο σχήμα 5.3:



Σχήμα 5.3: Η κυψελίδα της τετραγωνικής χωροκεντρωμένης δομής.

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 την ταχύτητα του ήχου και ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε απειροστό χρονικό διάστημα.

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα T-T-T (Time-Temperature-Transformation) για τον χάλυβα Ck-60, που αποτελεί το υλικό που μελετά η εργασία αυτή. Από το διάγραμμα φαίνεται καθαρά ότι για να επιτευχθεί ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός θα πρέπει ο ρυθμός ψύξης να είναι πολύ μεγάλος. Έτσι παρατηρείται ότι η θερμοκρασία θα πρέπει να πέσει από τους 800 °C στους 400 °C σε διάστημα μικρότερο των 0.5 sec, δηλαδή χονδρικά απαιτείται ταχύτητα ψύξης μεγαλύτερη από 800 °C/sec. Εάν ο ρυθμός ψύξης δεν είναι ικανοποιητικός, τότε η δομή που θα προκύψει θα είναι περλίτης ή μπαινίτης, αναλόγως σε ποια θερμοκρασία και για πόσο χρονικό διάστημα θα παραμείνει σε αυτήν το υλικό. Επίσης θα πρέπει να επισημανθεί ότι όσο πιο υψηλός είναι ο ρυθμός ψύξης της κατεργασίας με τη χρήση LASER, επέρχονται μεταβολές στη μορφή του μαρτενσίτη, κυρίως στην λεπτότητα των κόκκων του, καθώς και στο ποσό του παραμένουω ωστενίτη μετά την βαφή.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα T-T-T για τον χάλυβα Ck-60.

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 μόνον λόγω της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή, καθώς δεν υπάρχουν άλλες πηγές θερμότητας κάτω από την επιφάνεια. 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 υπολογισθούν οι βέλτιστες παράμετροί της, όπως η ισχύς, η ακτίνα και η ταχύτητα της δέσμης.

Η μεγάλου μήκους κύματος ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (υπέρυθρη), την οποία δίδει 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 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 θερμοροή που εισέρχεται στο υλικό, τόσο γρηγορότερα αυξάνεται η θερμοκρασία του επιφανειακού στρώματος του υλικού, με αποτέλεσμα το θερμοκρασιακό gradient στο υπό κατεργασία τεμάχιο να αποκτά μεγαλύτερη κλίση. 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 την τιμή αυτή. Το γεγονός αυτό βάζει σαφώς περιορισμούς στο βάθος που μπορεί να σκληρυνθεί 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 την διαθέσιμη ισχύ για την κατεργασία.

7. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αποτέλεσμα της κατεργασίας της επιφανειακής σκλήρυνσης με την χρησιμοποίηση δέσμης LASER, δηλαδή το βάθος κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου μέχρι το οποίο θα επιτευχθεί σκλήρυνση καθώς και οι τιμές που θα λάβει η σκληρότητα στην περιοχή αυτή, καθορίζεται από διάφορους παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες:

1. Στους παράγοντες που εξαρτώνται από το υλικό του υπό κατεργασία τεμαχίου. Σε αυτούς ανήκουν οι φυσικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού, όπως η θερμική αγωγιμότητα λ , η θερμοδιαχυτότητα a , η πυκνότητα ρ , ο συντελεστής απορρόφησης της ακτινοβολίας από την επιφάνεια A , κ.τ.λ.
2. Στους παράγοντες που είναι ανεξάρτητοι από το υλικό του τεμαχίου και ουσιαστικά αφορούν τον καθορισμό κάποιων περιοχών λειτουργίας της μονάδας LASER στην οποία θα εκτελεσθεί η κατεργασία.

Η διπλωματική αυτή εργασία μελέτησε την επιφανειακή σκλήρυνση με τη χρησιμοποίηση δέσμης LASER επάνω σε ένα συγκεκριμένο υλικό, τον υποευτηκτοειδή χάλυβα Ck-60. Έτσι λοιπόν οι παράγοντες οι οποίοι κατατάχθηκαν στην πρώτη από τις δύο παραπάνω κατηγορίες απετέλεσαν κάποιες σταθερές για την κατεργασία, εάν και όσον αφορά τον συντελεστή απορρόφησης της ακτινοβολίας A πρέπει να γίνουν κάποιες ιδιαίτερες παρατηρήσεις (βλ. ενότητα 10).

Συνεπώς οι παράγοντες της δεύτερης κατηγορίας είναι αυτοί οι οποίοι επηρεάζουν το αποτέλεσμα της κατεργασίας. Οι παράγοντες αυτοί είναι οι εξής:

- 1) Η ισχύς της δέσμης LASER q , εκφρασμένη σε W .
- 2) Η ακτίνα της δέσμης LASER r_b , εκφρασμένη σε m .
- 3) Η ταχύτητα της δέσμης LASER u , εκφρασμένη σε m/sec .

Διαπιστώνεται ότι και οι τρεις αυτοί παράγοντες, ή καλύτερα παράμετροι της κατεργασίας, έχουν να κάνουν καθαρά και μόνον με την ρύθμιση των μεταβλητών λειτουργίας της μονάδας LASER. Για το λόγο αυτό ονομάζονται σχεδιαστικές παράμετροι της κατεργασίας, αφού οι τιμές τις οποίες θα λάβουν καθορίζονται μέσα από την διαδικασία σχεδιασμού της επιφανειακής σκλήρυνσης. Με απλά λόγια, αυτό που ενδιαφέρει τον μηχανικό που καλείται να εφαρμόσει την κατεργασία, με κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές για το προϊόν της, είναι να γνωρίζει ποιές τιμές θα δώσει σε κάθε μία από τις παραμέτρους αυτές, ώστε να πάρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τον στόχο αυτό ευελπιστεί ότι θα επιτύχει και η παρούσα εργασία.

Ωστόσο, μία περισσότερο συνολική εικόνα για τα μεγέθη που υπεισέρχονται στην κατεργασία μας δίδει μία άλλη μεταβλητή, η οποία αποτελεί συνδυασμό των σχεδιαστικών παραμέτρων. Η μεταβλητή ονομάζεται πυκνότητα ισχύος και ισούται με τον λόγο της ισχύος της δέσμης LASER q , προς την επιφάνεια της διατομής της δέσμης (πr_b^2):

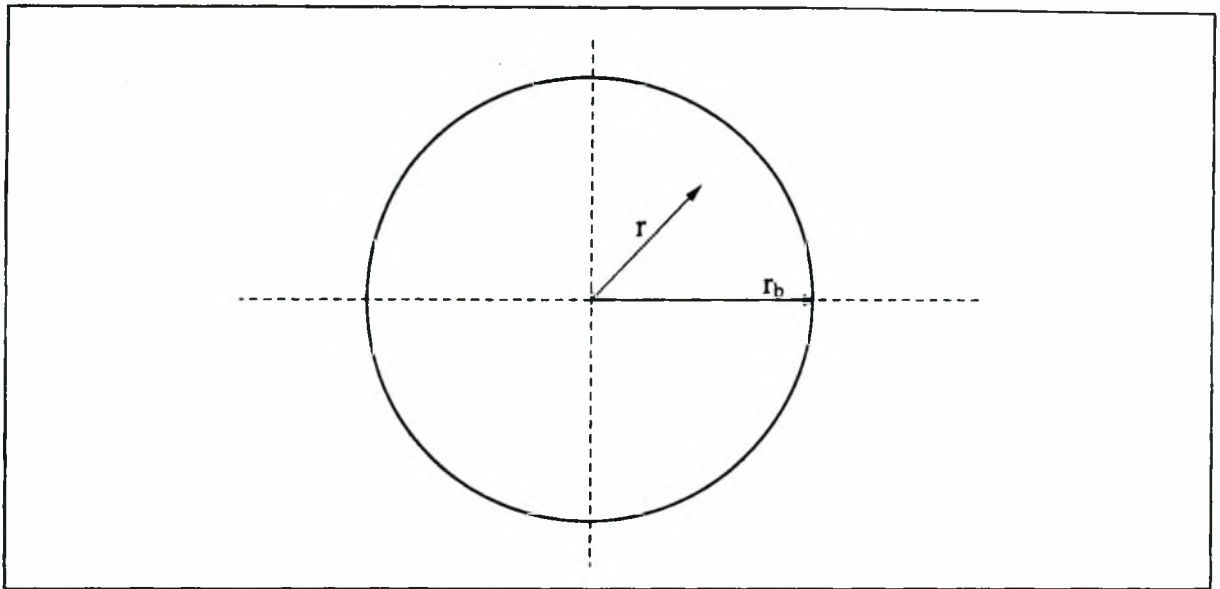
$$Q = q / (\pi \times r_b^2)$$

Η πυκνότητα ισχύος εκφράζει την ισχύ της δέσμης LASER η οποία προσπίπτει ανά μονάδα επιφάνειας της δέσμης και οι μονάδες που λαμβάνει είναι σε W/mm^2 .

Στο συνέχεια θα πρέπει να αναφερθούν και οι δύο άλλοι παράγοντες της κατεργασίας, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι από το υλικό του τεμαχίου και οι οποίοι αφορούν την κατανομή ενέργειας της δέσμης LASER και το αέριο που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της κατεργασίας.

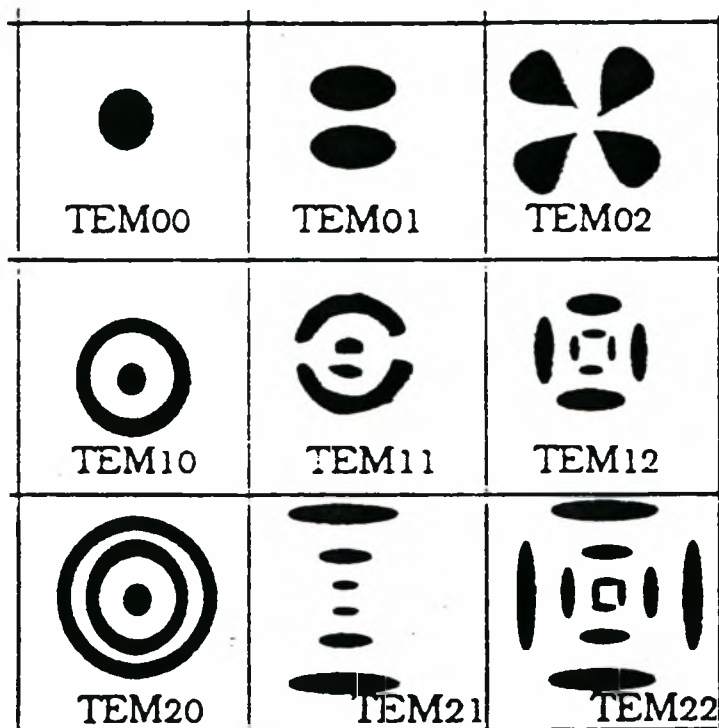
8. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ LASER

Ας υποθεθεί μια δέσμη LASER κυκλικής διατομής, με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο σχήμα 8.1:



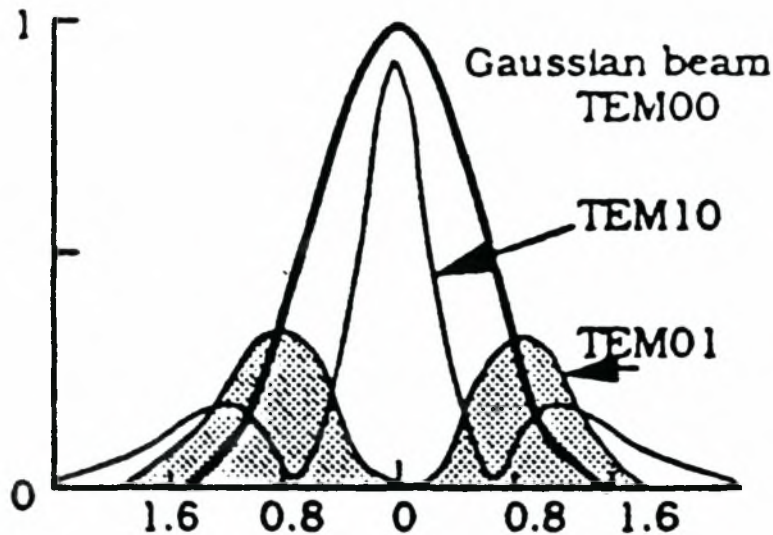
Σχήμα 8.1: Η κυκλική διατομή της δέσμης LASER.

Υπάρχουν διάφορες τυποποιημένες μορφές με τις οποίες η δέσμη LASER μπορεί να "εμφανισθεί" μέσα στην κυκλική διατομή που φαίνεται παραπάνω. Οι μορφές αυτές εμφανίζονται στο σχήμα 8.2:



Σχήμα 8.2: Τυποποιημένες μορφές της δέσμης LASER.

Σε κάθε μία από τις μορφές αυτές αντιστοιχεί και κάποια κατανομή ενέργειας της δέσμης. Μερικές από τις κατανομές αυτές, οι οποίες αντιστοιχούν σε κάποιες από τις παραπάνω μορφές, φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 8.3:



Σχήμα 8.3: Κατανομές ενέργειας της δέσμης LASER

Στο διάγραμμα αυτό ο άξονας των x παριστάνει τον λόγο r/r_b , δηλαδή μετράει την απόσταση από το κέντρο της δέσμης προς την περιφέρεια. Ο λόγος αυτός παίρνει, όπως φαίνεται, και τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Αυτό έχει να κάνει με τον τρόπο με τον οποίο ορίζεται η ακτίνα r_b , όπως θα φανεί στη συνέχεια. Ο άξονας των y παριστάνει την ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας της δέσμης.

Σαν ακτίνα r_b λαμβάνεται η τιμή εκείνη της ακτίνας της δέσμης, στην οποία η ισχύς της δέσμης έχει μειωθεί στο $1/e^2$ της ονομαστικής της τιμής, όπου το e είναι η βάση των φυσικών λογαρίθμων. Σύμφωνα λοιπόν με τον ορισμό αυτό, το r μπορεί να λάβει και τιμές μεγαλύτερες από το r_b , όπως εξάλλου φάνηκε και στο διάγραμμα του σχήματος 8.3. Όταν όμως $r > r_b$, τότε η ισχύς της δέσμης έχει φθάσει στο $1/e^2$ (13.53 %) της ονομαστικής ισχύος.

Η μορφή TEM_{00} συμβολίζει την Gaussian κατανομή ενέργειας, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση:

$$Pr(r) = [(4P)/(\pi r_b^2)] \times \exp[(-2r^2)/r_b^2]$$

, όπου

$P_r(r)$η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας της δέσμης στην θέση r

Pη ονομαστική ισχύς της δέσμης

r και r_bόπως ορίστηκαν στο σχήμα 8.1

Η Gaussian κατανομή ενέργειας είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη και αυτή χρησιμοποιήθηκε και στην εκτέλεση των πειραμάτων της επιφανειακής σκλήρυνσης που διεξήχθησαν στα πλαίσια της εργασίας.

9. ΑΕΡΙΟ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Όσον αφορά το αέριο της κατεργασίας, αυτό χρησιμοποιείται για να προστατευθεί η επιφάνεια του τεμαχίου από την οξείδωση. Η οξείδωση αυτή, θα προερχόταν από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, το οποίο λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην επιφάνεια, γεγονός που αυξάνει πολύ την ταχύτητα της αντίδρασης της οξείδωσης, θα οξείδωνε πολύ γρήγορα το υλικό στην επιφάνεια.

Τα αέρια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το άζωτο (N_2) και το ήλιο (He). Βεβαίως και το άζωτο δημιουργεί μια μικρή ζώνη στην επιφάνεια του υλικού, η οποία έχει υποστεί οξείδωση, όμως γενικά προστατεύει αρκετά καλά την επιφάνεια.

Στην εργασία αυτή το αέριο της κατεργασίας δεν αντιμετωπίστηκε σαν ξεχωριστή παράμετρος της κατεργασίας.

10. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Για τα αδιαφανή υλικά ισχύει ότι:

$$R + A = 1$$

, όπου

R...η ανακλαστικότητα της επιφάνειας

A...η απορροφητικότητα της επιφάνειας

Στα μέταλλα η ακτινοβολία απορροφάται κατά κύριο λόγο από το νέφος των ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα οποία βρίσκονται μέσα στο πλέγμα τους. Τα ηλεκτρόνια αυτά είναι ελεύθερα να ταλαντωθούν και να επανεκπέμψουν ακτινοβολία, χωρίς να διαταράζουν την κρυσταλλική δομή του στερεού. Συνεπώς η ανακλαστικότητα των μετάλλων είναι μεγάλη στην περιοχή του φάσματος που καλύπτει τις συχνότητες, από την ορατή έως την DC. Καθώς ένα κύμα ακτινοβολίας προσπίπτει στην επιφάνεια, όλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της επιφάνειας ταλαντώνονται συμφασικά μεταξύ τους, παράγοντας έτσι ένα ηλεκτρικό πεδίο που έχει διαφορά φάσης 180° με την προσπίπτουσα δέσμη. Το σύνολο του πεδίου αυτού αποτελεί μία δέσμη, η γωνία ανάκλασης της οποίας ισούται με την γωνία προσπτώσεως.

Αυτό το νέφος ηλεκτρονίων που βρίσκεται μέσα στην κρυσταλλική δομή του μετάλλου, έχει σαν συνέπεια ότι η ακτινοβολία δεν είναι ικανή να διεισδύσει σε σημαντικά βάθη, παρά μόνο μέχρι μία ή δύο ατομικές διαμέτρους. Για τον λόγο αυτό τα μέταλλα είναι αδιαφανή και έχουν τη χαρακτηριστική μεταλλική λάμψη.

Η απορροφητικότητα ενός υλικού επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων. Εδώ θα τους αναφέρουμε επιγραμματικά, χωρίς να επεκταθούμε περισσότερο:

- i. το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας
- ii. η θερμοκρασία του υλικού
- iii. η γωνία προσπτώσεως της ακτινοβολίας
- iv. οι επιφανειακές επικαλύψεις
- v. η τραχύτητα της επιφάνειας

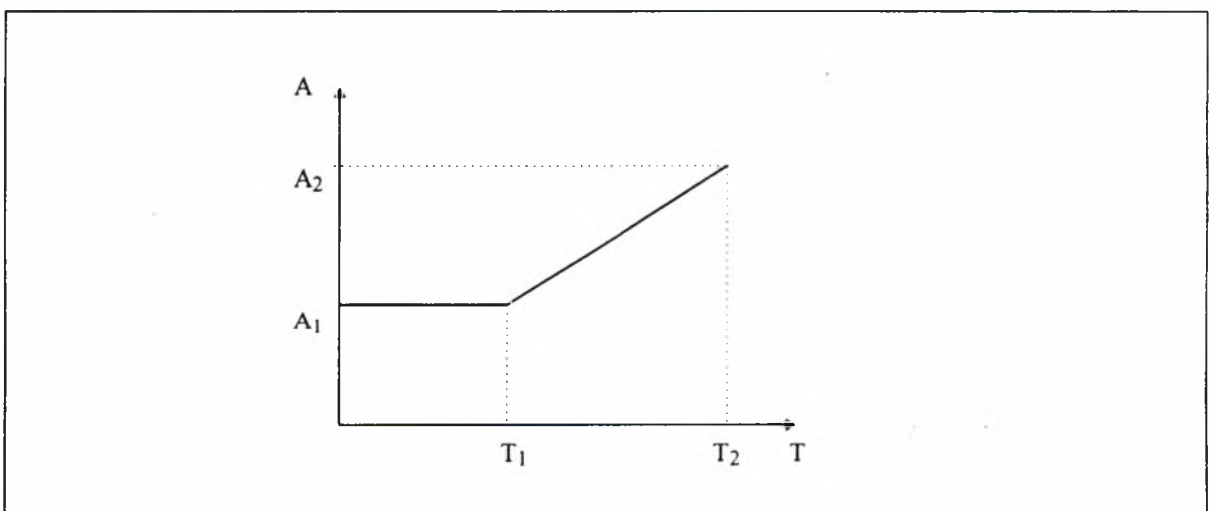
Τα πειράματα που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της εργασίας αυτής, εκτελέστηκαν σε μονάδα LASER διοξειδίου του άνθρακα. Επομένως, όπως σημειώθηκε στην ενότητα που αναφέρεται στο φαινόμενο της προκλημένης ακτινοβολίας (βλ. ενότητα 2), το μήκος κύματος

του LASER CO₂ είναι σταθερό και ίσο με 10.6 μm. Επίσης η γωνία προσπτώσεως της ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν σταθερή και ίση με 90°. Τέλος, τα δοκίμια του χάλυβα Ck-60 που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα είχαν την ίδια τραχύτητα και δεν επικαλύφθηκαν με κάποια ουσία, ώστε να αυξηθεί η απορροφητικότητά τους. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι ο μοναδικός από τους παραπάνω παράγοντες που παίζει κάποιο ρόλο, είναι ο παράγοντας της θερμοκρασίας.

Πράγματι, η απορροφητικότητα κάποιου υλικού αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του. Επειδή λοιπόν κατά την κατεργασία της επιφανειακής σκλήρυνσης με τη χρησιμοποίηση δέσμης LASER, η θερμοκρασία της επιφάνειας του τεμαχίου αυξάνεται σημαντικά, θα πρέπει να αναμένεται και ανάλογη αύξηση της απορροφητικότητας του υλικού.

Γεγονός είναι ότι θα πρέπει να είναι γνωστή αυτή η εξάρτηση της απορροφητικότητας από την θερμοκρασία, κάτι όμως που είναι εξαιρετικά δύσκολο. Εξαιρετικά δύσκολο εξάλλου είναι και απλώς να μετρηθεί η απορροφητικότητα κάποιου υλικού σε θερμοκρασία δωματίου, διαδικασία τεχνολογικά πολύπλοκη και δαπανηρή.

Παρ' όλα αυτά οι Sharkey, Steen και Brookfield προτείνουν το εξής απλοποιητικό μοντέλο, το οποίο απεικονίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 10.1:



Σχήμα 10.1: Θεωρητικό μοντέλο για την μεταβολή της απορροφητικότητας με την θερμοκρασία.

Το μοντέλο αυτό προτείνει ότι η απορροφητικότητα του υλικού έχει κάποια σταθερή τιμή A_1 μέχρις ότου η επιφάνεια φθάσει την θερμοκρασία T_1 . Από εκεί και πέρα η

απορροφητικότητα αυξάνει γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Βεβαίως η θερμοκρασία T_1 είναι διαφορετική για κάθε υλικό.

Θα πρέπει εδώ να τονισθεί το γεγονός ότι δεν είναι γνωστή η απορροφητικότητα του χάλυβα Ck-60 ούτε σε συνθήκες περιβάλλοντος και επειδή, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, η διαδικασία προσδιορισμού της απορροφητικότητας κάποιου υλικού είναι πολύ δαπανηρή και εκτελείται σε πολύ περιορισμένο αριθμό εργαστηρίων στην Ευρώπη, κρίθηκε σκόπιμο να μην κινηθεί η διαδικασία αυτή στα πλαίσια της εργασίας. Επομένως θα πρέπει να εκτιμηθεί η απορροφητικότητα του χάλυβα Ck-60. Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν στην κατεργασία έχουν φαιό χρώμα και εκτιμήθηκε ότι η απορροφητικότητά τους, σε συνθήκες περιβάλλοντος, πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.7 (70%) και 0.8 (80%).

Βιβλιογραφία

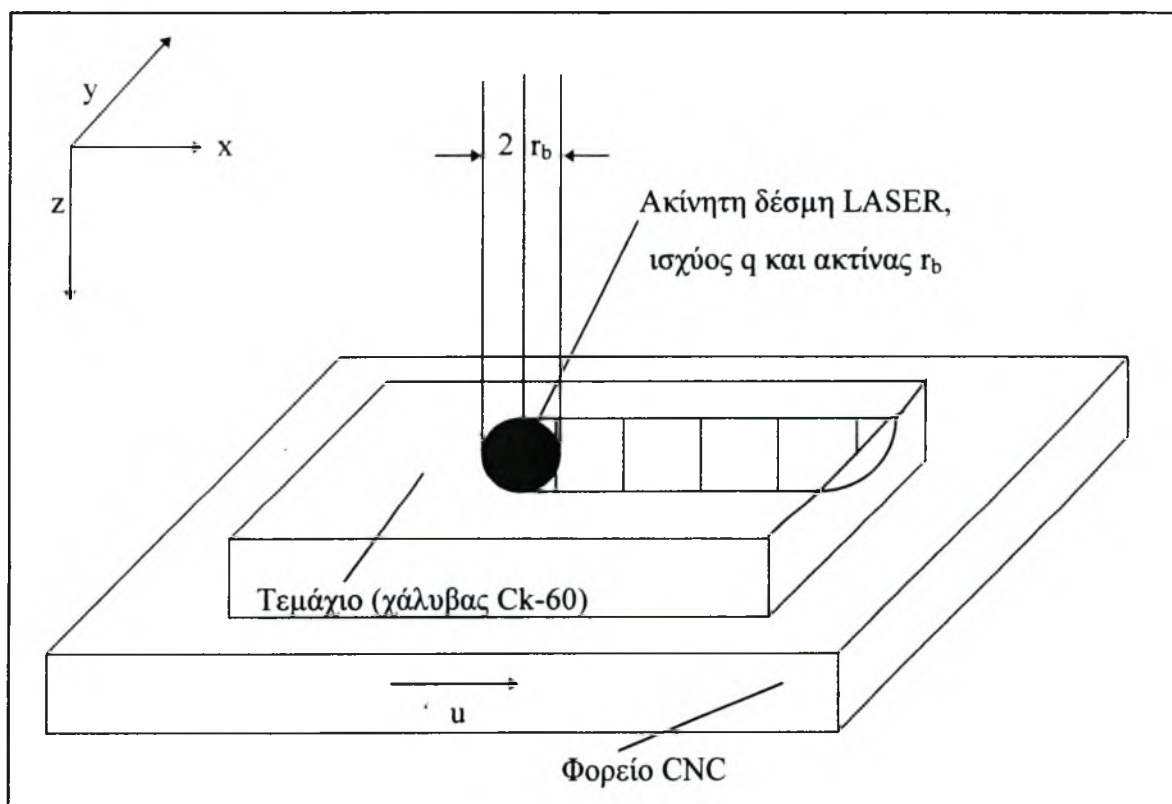
- 1) J.H.Brophy, R.M.Rose, J.Wulff, The Structure and Properties of Materials, vol. II.
- 2) M.F.Ashby, K.E.Easterling, The Transformation Hardening of Steel Surfaces by Laser Beams-I. Hypo-eutectoid Steels, Acta Metall., vol. 32, pp. 1935-1948.
- 3) S.J.Sharkey, W.M.Steen, D.J.Brookfield, Mathematical Modelling of Continuous Wave Carbon Dioxide Laser Processing of Materials Using Non-Dimensional Plots, ICALEO, vol. 55, pp. 441-450.
- 4) W.M.Steen, Laser Material Processing.
- 5) M.M.Ericsson, Laser Surface Hardening, ASM Handbook, vol. 6.
- 6) United States Steel, Atlas of Isothermal Transformation Diagramms.
- 7) R.K.Shine, C.Chen, Laser Transformation Hardening of Tempered 4340 Steel, Metall. Trans., A, pp. 163-170.
- 8) K.E.Thelning, Steel and its Heat Treatment.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Η επιφανειακή σκλήρυνση με τη χρησιμοποίηση δέσμης LASER είναι μία κατεργασία η οποία μπορεί να μοντελοποιηθεί σχετικά απλά. Και αυτό διότι δεν υπάρχει τήξη, συνεπώς εμφάνιση λανθάνουσας θερμότητας, ούτε φαινόμενα συναγωγής. Η μετάδοση θερμότητας λαμβάνει χώρα μόνο μέσω αγωγής προς το εσωτερικό του υλικού. Εάν λοιπόν οι θερμικές ιδιότητες του υλικού καθώς και η αποροφώμενη από αυτό ενέργεια είναι γνωστές, τότε είναι δυνατόν να υπολογισθεί η κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υπό κατεργασία τεμαχίου. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, αφού έτσι δίνεται η δυνατότητα να προβλεφθεί εκ των προτέρων το βάθος μέχρι το οποίο η θερμοκρασία που αναπτύσσεται ξεπερνά την θερμοκρασία A_3 , και επομένως να προβλεφθεί μέχρι ποιο βάθος θα επέλθει μετασχηματισμός του υλικού σε ωστενίτη. Το πέρασμα της δέσμης LASER πάνω από την επιφάνεια του υλικού, κατά την εκτέλεση της κατεργασίας, φαίνεται στο σχήμα 1.1:



Σχήμα 1.1: Το φορείο της μονάδας LASER κινούμενο με ταχύτητα u ως προς την ακίνητη δέσμη προς την κατεύθυνση του άξονα x .

Όταν μία δέσμη LASER ισχύος q και ακτίνας r_b κινείται προς την κατεύθυνση x , με ταχύτητα u , επάνω από την επιφάνεια ενός στερεού, ένα τυχαίο σημείο με συντεταγμένες (y,z) κάτω από την επιφάνεια, υπόκειται σε ένα θερμικό κύκλο $T(y,z,t)$, όπου t είναι ο χρόνος. Γίνεται η υπόθεση ότι το πάχος του στερεού είναι αρκετά μεγάλο, ώστε η μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του (T_0) να είναι αμελητέα. Η ενέργεια της δέσμης LASER η οποία προσπίπτει στο στερεό θερμαίνει την επιφάνεια, η οποία στη συνέχεια ψύχεται απότομα, καθώς η δέσμη συνεχίζει να κινείται.

Οι Ashby και Easterling προτείνουν το παρακάτω μαθηματικό μοντέλο, το οποίο υπολογίζει την κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού. Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στις εξής παραδοχές:

- 1) Η θερμότητα μεταδίδεται μόνο προς την κατεύθυνση του βάθους του υλικού (άξονας z).
- 2) Η κατανομή ενέργειας στην δέσμη LASER είναι Gaussian.
- 3) Οι φυσικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού δεν μεταβάλλονται με την θερμοκρασία.

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η κατανομή της θερμοκρασίας συναρτήσει του βάθους (z) και του χρόνου (t) δίνεται από την εξίσωση:

$$T(z,t) = T_0 + \frac{Aq}{2\pi\lambda u[(t+t_0)]^{1/2}} \times \exp\left[-\frac{(z+z_0)^2}{4at}\right] \quad (1)$$

, όπου:

T_0 η αρχική μέση θερμοκρασία του τεμαχίου

A συντελεστής απορροφητικότητας της επιφάνειας του τεμαχίου

q ισχύς της δέσμης LASER

u ταχύτητα της δέσμης LASER

λ συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του τεμαχίου

r_b ακτίνα της δέσμης LASER

α θερμοδιαχυτότητα του υλικού του τεμαχίου

$t_0 = (r_b^2)/(4\alpha)$

$e = 2.7182818$

Η σταθερά t_0 εκφράζει το χρόνο που απαιτείται ώστε η θερμότητα να διαχυθεί σε μία απόσταση ίση με την ακτίνα της δέσμης LASER. Όσον αφορά τη σταθερά z_0 , αυτή εκφράζει την απόσταση μέχρι την οποία προλαβαίνει να διαχυθεί η θερμότητα, κατά τη διάρκεια του χρόνου αλληλεπίδρασης της δέσμης LASER με το σημείο της επιφάνειας (x,y) , το οποίο εξετάζεται κάθε φορά. Ο χρόνος αλληλεπίδρασης ισούται με r_b/u .

Η σταθερά z_0 δίδεται από τις παρακάτω σχέσεις:

I. εάν $t \ll t_0$ τότε είναι

$$z_0^2 = \frac{\pi \alpha r_b}{2eu} \quad (2)$$

II. εάν $t \gg t_0$ τότε είναι

$$z_0^2 = \frac{\pi^{1/2} r_b}{e} \left(\frac{\alpha r_b}{u} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Το μαθηματικό μοντέλο των Ashby και Easterling λαμβάνει υπόψιν και την περίπτωση όπου ένα μέρος της επιφάνειας τήκεται. Όταν επέρχεται τήξη στην επιφάνεια του υλικού, ένα μέρος της ενέργειας του LASER απορροφάται σαν λανθάνουσα θερμότητα από το υγρό το οποίο σχηματίζεται. Αν και η ενέργεια αυτή απελευθερώνεται αργότερα, κατά την διάρκεια της στερεοποίησης του υλικού που έχει τηχθεί, προσωρινά αφαιρείται από την προσδιδόμενη ενέργεια και δεν είναι διαθέσιμη για να τήξει και άλλη ποσότητα υλικού. Ο όγκος του υλικού που τήκεται, ανά δευτερόλεπτο, ισούται με $2r_b z_m u$, όπου z_m είναι το βάθος μέχρι το οποίο φθάνει η τήξη. Επομένως η ενέργεια που απομένει διαθέσιμη για να ανεβάσει την θερμοκρασία του υπόλοιπου στερεού δίδεται από τη σχέση:

$$q^* = q - 2r_b z_m u L \quad (4)$$

, όπου L είναι η λανθάνουσα θερμότητα του υλικού ανά μονάδα όγκου. Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο βάθος z_m προκύπτει και πάλι χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (1) και (2) ή (3), αυτή τη φορά όμως αντικαθιστώντας το q με το q^* .

Επίσης, είναι χρήσιμο, για κάποια δεδομένη ισχύ δέσμης q και ακτίνα δέσμης r_b , να είναι γνωστή η ποσότητα της ενέργειας η οποία μόλις που θα προκαλέσει την τήξη της

επιφάνειας. Η ενέργεια αυτή δίδεται ανά μονάδα επιφάνειας του υλικού και καθορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{q}{ur_b} = \frac{\pi^3}{4} \left[\frac{(T_m - T_o)r_b}{A} \right]^2 \frac{\rho c \lambda}{q} \quad (5)$$

, όπου

T_mθερμοκρασία τήξης του υλικού

ρπυκνότητα του υλικού

cειδική θερμότητα του υλικού

Για μία σημειακή πηγή ενέργειας τα t_0 και z_0 της εξίσωσης (1) μηδενίζονται, με αποτέλεσμα το μοντέλο αυτό να καταλήγει ουσιαστικά στην εξίσωση Rosenthal. Όταν όμως το πλάτος της δέσμης ($2r_b$) είναι συγκρίσιμο ή ακόμη και μεγαλύτερο από το βάθος της σκληρυμένης ζώνης κάτω από την επιφάνεια του υλικού, τότε τα t_0 και z_0 είναι μη μηδενικά και συνεπώς πρέπει να χρησιμοποιείται η εξίσωση (1) του μαθηματικού μοντέλου, όπως δόθηκε παραπάνω.

Στην ουσία το μοντέλο των Ashby και Easterling θεωρεί ότι υπάρχει μετάδοση θερμότητας μόνο προς την κατεύθυνση του βάθους z του υλικού. Είναι δηλαδή ένα μονοδιάστατο μοντέλο μετάδοσης θερμότητας. Επίσης στην εξίσωση (1) του μοντέλου λαμβάνεται υπόψιν και ο χρόνος t . Σαν αρχή μέτρησης του χρόνου ορίζεται, για κάποιο τυχαίο σημείο της επιφάνειας με συντεταγμένες (x,y) , η στιγμή κατά την οποία το κέντρο της δέσμης LASER φτάνει πάνω στο σημείο αυτό.

Με απλά λόγια αυτό σημαίνει το εξής:

- 1) εάν θεωρηθεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο ($z=ct$) κάτω από την επιφάνεια του υλικού, τότε μπορεί να υπολογισθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας για το επίπεδο αυτό σε συνάρτηση με το χρόνο.
- 2) εάν θεωρηθεί μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ($t=ct$), τότε μπορεί να υπολογισθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας για τη χρονική στιγμή αυτή σε συνάρτηση με το βάθος κάτω από την επιφάνεια.

Βεβαίως στην πραγματικότητα υπάρχει μετάδοση θερμότητας και προς τις τρεις κατευθύνσεις του χώρου. Για το λόγο αυτό το μοντέλο των Ashby και Easterling είναι ένα

προσεγγιστικό μοντέλο. Υπάρχει όμως η πεποίθηση ότι τα αποτελέσματα που δίνει βρίσκονται πολύ κοντά στην πραγματικότητα, γεγονός που έγινε προσπάθεια να αποδειχθεί και με την εκτέλεση πειραμάτων. Πάντως εάν η απαιτούμενη ακρίβεια των υπολογισμών είναι μεγαλύτερη θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

2. ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ FORTRAN

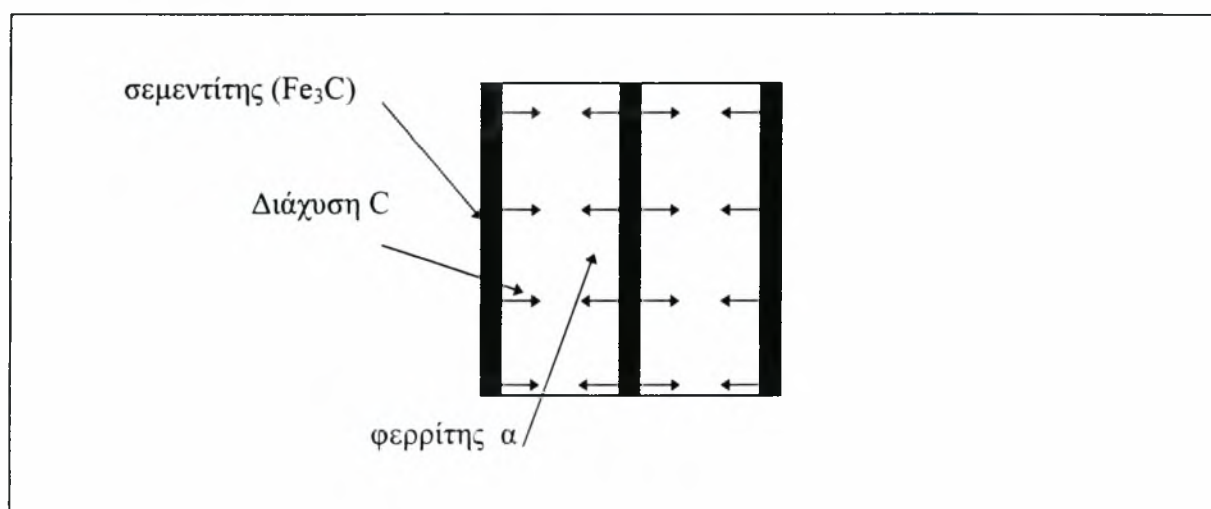
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το μοντέλο μετάδοσης θερμότητας που περιγράφηκε προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε, κυρίως, για την επιλογή των συνθηκών με τις οποίες εκτελέστηκαν τα πειράματα της κατεργασίας. Επίσης, μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας, επιχειρήθηκε μία σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του μοντέλου.

Για τους λόγους αυτούς κρίθηκε σκόπιμη η κωδικοποίηση του μοντέλου σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, ώστε να γίνει δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Στο παράρτημα I παρουσιάζονται το διάγραμμα ροής του προγράμματος, η λίστα του προγράμματος FORTRAN η οποία δημιουργήθηκε και κατόπιν επεξηγούνται οι βασικές μεταβλητές και οι υπορουτίνες του προγράμματος.

3. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Ο ρόλος της διάχυσης στην επιφανειακή σκλήρυνση με τη χρήση δέσμης LASER είναι σημαντικός, όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγούμενα. Και αυτό διότι ο ωστενιτικός μετασχηματισμός είναι μια διεργασία που επιτυγχάνεται με την διάχυση. Η αρχική δομή του υποευτηκτοειδούς χάλυβα αποτελείται από μία ανομοιογενή κατανομή του άνθρακα, δηλαδή από περλίτη και φερρίτη. Ο περλίτης είναι μια λεπτή δομή εναλασσομένων πλακών του χάλυβα, η οποία αποτελεί ουσιαστικά μίγμα φερρίτη και σεμεντίτη. Ένας κόκκος περλίτη μπορεί να παρασταθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1:



Σχήμα 3.1: Οι εναλλασσόμενες πλάκες σεμεντίτη και φερρίτη που αποτελούν τον περλίτη. Η διάχυση του άνθρακα λαμβάνει χώρα από τον σεμεντίτη (υψηλή συγκέντρωση) προς τον φερρίτη (χαμηλή συγκέντρωση).

Καθώς λοιπόν η θερμοκρασία αυξάνεται και μέχρι να φθάσει την χαρακτηριστική θερμοκρασία A_1 (723°C) υπάρχει διάχυση ατόμων άνθρακα από τις περιοχές του σεμεντίτη, ο οποίος έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα, προς τις περιοχές του φερρίτη, όπου η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι πρακτικά αμελητέα.

Στους 723°C οι περλιτικές περιοχές μετασχηματίζονται σε ωστενίτη, περιεκτικότητας 0.8% κ.β. σε άνθρακα. Από την θερμοκρασία A_1 έως και την θερμοκρασία A_3 συνυπάρχουν φερρίτης και ωστενίτης. Η διάχυση τώρα εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα από τις περιοχές με υψηλή συγκέντρωση, δηλαδή από τον ωστενίτη, προς τις περιοχές με χαμηλή συγκέντρωση,

δηλαδή τον φερρίτη. Πάνω από την θερμοκρασία A_3 υπάρχει μόνον ωστενίτης, αφού ο άνθρακας έχει πλέον ομοιόμορφα διαλυθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα του χάλυβα.

Για να επιτευχθεί η διαδικασία της διάχυσης ολοκληρωμένα όμως, σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να δοθεί επαρκής χρόνος στα άτομα του άνθρακα να διαχυθούν. Θα πρέπει δηλαδή το υλικό να παραμείνει, για όσο χρόνο του χρειάζεται, πάνω από τις απαιτούμενες θερμοκρασίες, ώστε να επέλθει ομοιόμορφη διάλυση του άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα του ωστενίτη. Η προϋπόθεση αυτή, δηλαδή η δημιουργία ενός ομογενούς μίγματος $\gamma\text{Fe-C}$, είναι απαραίτητο να ικανοποιηθεί, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ομοιόμορφο στρώμα μαρτενσίτη μετά την βαφή.

Το ερώτημα λοιπόν που γεννάται είναι, εάν ο απαιτούμενος για την πλήρη διάχυση του άνθρακα χρόνος είναι διαθέσιμος κατά την κατεργασία της επιφανειακής σκλήρυνσης με τη χρήση δέσμης LASER. Και αυτό διότι όπως αναφέρθηκε, κατά την κατεργασία αυτή το υλικό αποκτά την χαρακτηριστική θερμοκρασία A_1 , αλλά και την θερμοκρασία A_3 , μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου. Είναι λοιπόν πολύ πιθανόν να μην προφταίνει ο άνθρακας να διαλυθεί ομοιόμορφα, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται η επιθυμητή δημιουργία του ομοιόμορφου στρώματος του μαρτενσίτη, ο οποίος θα επιφέρει και την αύξηση στη σκληρότητα.

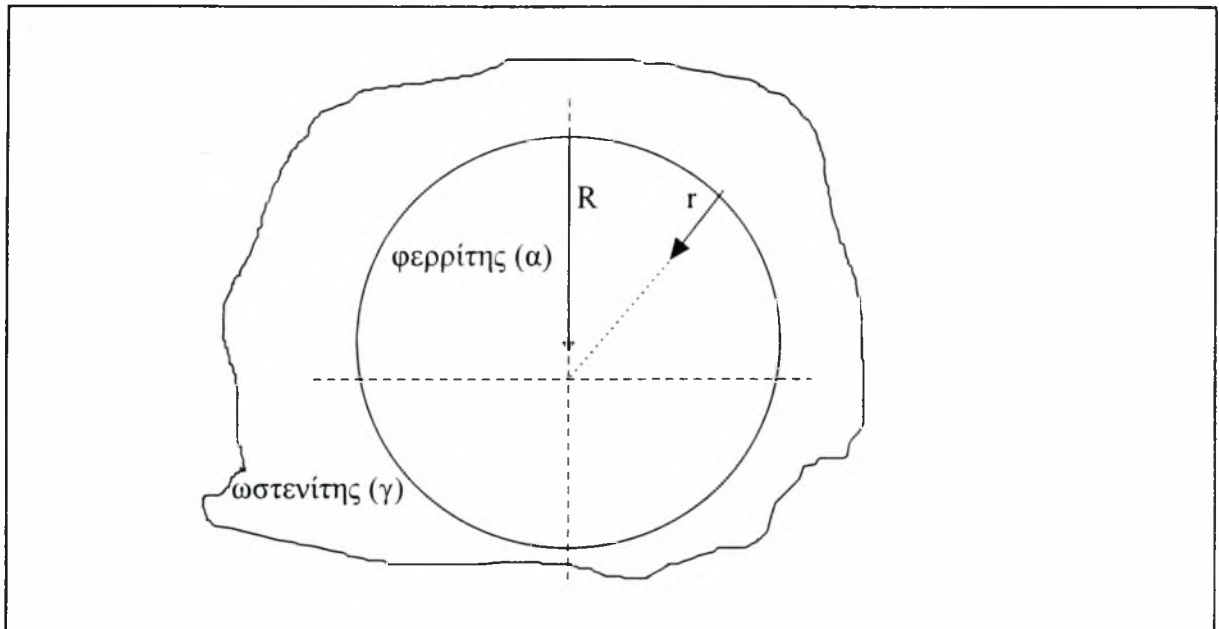
Μια απάντηση στο ερώτημα αυτό θα επιχειρηθεί ευθύς αμέσως. Αναπτύχθηκε, στην εργασία αυτή, ένας τρόπος για μία πρώτη προσέγγιση του θέματος αυτού, με τον οποίο γίνεται εφικτός ένας εντελώς προσεγγιστικός υπολογισμός του απαιτούμενου χρόνου, ώστε να επέλθει πλήρης διάλυση του άνθρακα.

Οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

1. Οι φερριτικοί κόκκοι είναι σφαιρικοί.
2. Η περιεκτικότητα στην διεπιφάνεια μεταξύ φερρίτη - ωστενίτη ($r=0$) είναι σταθερή και ίση με 0.8 % κ.β. σε άνθρακα.
3. Ο συντελεστής διάχυσης του άνθρακα μέσα στο φερρίτη είναι σταθερός και ίσος με την τιμή που λαμβάνει στην θερμοκρασία A_1 (723°C).

Ας θεωρηθεί λοιπόν ένας σφαιρικός κόκκος φερρίτη, με ακτίνα R . Για λόγους σύμβασης, έστω ότι η ακτίνα r "μετράει" από την εξωτερική επιφάνεια της σφαίρας και προς το κέντρο της. Στην θερμοκρασία A_1 (723°C) η περιεκτικότητα αυτού του σφαιρικού κόκκου φερρίτη είναι 0.025 % κ.β. σε άνθρακα, σύμφωνα με το διάγραμμα ισορροπίας Fe-C.

Αυτή είναι και η μέγιστη ποσότητα άνθρακα που μπορεί να διαλύσει ο φερρίτης στο πλέγμα του. Ας ονομασθεί η περιεκτικότητα αυτή C_0 . Είναι λοιπόν $C_0=0.00025$. Ο κόκκος του φερρίτη περιβάλλεται από ωστενίτη. Ο ωστενίτης στην θερμοκρασία A_1 έχει περιεκτικότητα 0.8 % κ.β. σε άνθρακα. Αν ονομασθεί η περιεκτικότητα αυτή C_1 , τότε θα είναι $C_1=0.008$. Εδώ δηλαδή γίνεται η παραδοχή ότι στη διεπιφάνεια φερρίτη - ωστενίτη η συγκέντρωση του άνθρακα είναι σταθερή και ίση με 0.8 % κ.β. Στο σχήμα 3.2 φαίνονται τα παραπάνω:



Σχήμα 3.2: Ένας σφαιρικός κόκκος φερρίτη που περιβάλλεται από ωστενίτη.

Ο σφαιρικός αυτός κόκκος φερρίτη θα έχει ωστενιτοποιηθεί πλήρως, μόνο όταν η συγκέντρωση του άνθρακα έχει πάρει την τιμή 0.6 % κ.β. ακόμη και στο κέντρο του, δηλαδή για $r=R$ να ισχύει ότι $C_R=0.006$. Η συγκέντρωση αυτή αποτελεί και την περιεκτικότητα του χάλυβα Ck-60 σε άνθρακα.

Σύμφωνα τώρα με τον δεύτερο νόμο του Fick για την διάχυση θα ισχύει η σχέση:

$$dC_r/dt = d[D \times (dC_r/dr)]/dr$$

όπου, dC_r/dt ...η μεταβολή της συγκέντρωσης κατά την ακτινική διεύθυνση

D ...συντελεστής διάχυσης

Εάν ο συντελεστής διάχυσης ληφθεί ανεξάρτητος της συγκέντρωσης, τότε η παραπάνω διαφορική εξίσωση γίνεται:

$$dC_r/dt = D \times (dC_r/dr)$$

Η μορφή αυτή του δεύτερου νόμου του Fick έχει σαν λύση την:

$$(C_r - C_0) / (C_i - C_0) = 1 - \operatorname{erf}[r / (4 \times D \times t)]$$

όπου erf...συνάρτηση σφάλματος

Έχοντας λοιπόν τις τιμές:

$$C_R = 0.006, C_0 = 0.00025, C_i = 0.008$$

και λαμβάνοντας ως συντελεστή διάχυσης για τον φερρίτη την τιμή:

$$D_\alpha = 8.3996 \times 10^{-11}$$

μπορεί να θεωρηθεί ότι:

$$(C_R - C_0) / (C_i - C_0) = 1 - \operatorname{erf}[R / (4 \times D \times t)] \Leftrightarrow \operatorname{erf}[R / (4 \times D \times t)] = 1 - [(0.006 - 0.00025) / (0.008 - 0.00025)]$$

$$\Leftrightarrow \operatorname{erf}\{[(2.976310^9) \times R] / t\} = 0.2580645 \Leftrightarrow [(2.976310^9) \times R] / t = 0.2330797 \Leftrightarrow$$

$$R/t = 7.8312 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$$

Όπως γίνεται φανερό, με τον τρόπο αυτό δίνονται οι εξής δυνατότητες:

- α) εάν είναι γνωστό το μέγεθος των φερριτικών κόκκων, δηλαδή κατά κάποιο τρόπο το μέγεθος R , τότε είναι δυνατόν να υπολογισθεί ο απαιτούμενος χρόνος για την διάχυση t .
- β) αντιστρόφως, εάν η κατεργασία έχει σχεδιασθεί ώστε να δίδει κάποιο χρόνο για την διάχυση t , τότε μπορεί να υπολογισθεί το απαιτούμενο μέγεθος κόκκων R , το οποίο να προφτάσει να ωστενιτοποιηθεί πλήρως.

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι σαν χρόνος t για την ολοκλήρωση της διάχυσης εκλαμβάνεται το χρονικό διάστημα από την στιγμή που η θερμοκρασία φθάνει την A_1 (723°C), μέχρι την στιγμή που η θερμοκρασία, κατά την ψύξη πλέον, κατεβαίνει στην θερμοκρασία A_3 .

Με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε παραπάνω, έγινε προσπάθεια να καλυφθεί η χειρότερη περίπτωση. Και αυτό επειδή στον υπολογισμό που προηγήθηκε λήφθηκε σαν συντελεστής διάχυσης η τιμή που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία A_1 . Επειδή όμως η θερμοκρασία ξεπερνά την A_1 , ο συντελεστής διάχυσης θα λαμβάνει και υψηλότερες τιμές, με συνέπεια οι συνθήκες να είναι στην πραγματικότητα ευνοϊκότερες για την διάχυση απ' ότι εμφανίζει ο υπολογισμός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

1. ΓΕΝΙΚΑ

Το πείραμα αποτελεί πάντοτε το μοναδικό και αδιαμφισβήτητο μέσο για την επαλήθευση ή την διάψευση οποιασδήποτε επιστημονικής θεωρίας και ανάλυσης. Μόνο μέσα από την πειραματική έρευνα καθίσταται δυνατή η ανακάλυψη των παραγόντων που πραγματικά επηρεάζουν την συμπεριφορά κάποιου φαινομένου, καθώς και του τρόπου με τον οποίο η συμπεριφορά αυτή μεταβάλλεται όταν μεταβάλλονται και τα αίτια που προκαλούν το φαινόμενο. Όσο κοντά λοιπόν και αν βρίσκονται στην πραγματικότητα τα διάφορα θεωρητικά ή προσομοιωτικά μοντέλα, τα οποία προσπαθούν να περιγράψουν την συμπεριφορά αυτή κάποιου φαινομένου, η ισχύς τους δεν μπορεί να γίνει εκ των προτέρων αποδεκτή, εάν πρώτα δεν υποστούν τον έλεγχο μέσω της πειραματικής διαδικασίας. Στα πλαίσια λοιπόν της διεξαγωγής μιας επαρκώς εμπεριστατωμένης επιστημονικής έρευνας, που επιδίωξε να φέρει σε πέρας η διπλωματική αυτή εργασία, η αναγκαιότητα εκτέλεσης πειραμάτων κρίθηκε επιτακτική.

Οι στόχοι που ετέθησαν και οι οποίοι έγινε προσπάθεια να επιτευχθούν με την εκτέλεση πειραμάτων επάνω στην επιφανειακή σκλήρυνση υποευτηκτοειδούς χάλυβα με τη χρήση δέσμης LASER, ήταν σαφείς και σημαντικοί:

- 1) Καθορισμός της επίδρασης της δέσμης LASER στην επιφάνεια του υλικού. Έπρεπε να διαπιστωθεί δηλαδή, κατ' αρχήν, εάν όντως επέρχεται σημαντική μεταβολή της σκληρότητας της επιφάνειας του υλικού λόγω της κατεργασίας με την δέσμη LASER, σύμφωνα με τα όσα υποστηρίζει η θεωρητική ανάλυση του θέματος. Ο στόχος αυτός έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς γίνεται αντιληπτό ότι στην περίπτωση που η δέσμη LASER δεν επιφέρει σημαντική αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειας του υλικού, τότε οποιαδήποτε περαιτέρω μελέτη της κατεργασίας θα ήταν άνευ πρακτικής σημασίας.
- 2) Προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο η μεταβολή των παραμέτρων που επηρεάζουν την κατεργασία, δηλαδή της ισχύος της δέσμης (q), της ακτίνας της (r_0) και της σχετικής ταχύτητας της δέσμης ως προς το τεμάχιο (u), επιδρά στο αποτέλεσμα της κατεργασίας, δηλαδή στο σκληρυμένο βάθος (z_s) κάτω από την επιφάνεια και στις τιμές που λαμβάνει η μέγιστη σκληρότητα του υλικού στην περιοχή αυτή.
- 3) Προσδιορισμός της δομής της σκληρυμένης ζώνης της επιφάνειας του υλικού, ώστε να εξακριβωθεί εάν η παρατηρούμενη αύξηση της σκληρότητας συνδέεται με αλλαγή στην

δομή του υλικού, δηλαδή με την δημιουργία μαρτενσίτη. Γενικότερα, ανάλυση της μικροδομής του υλικού μετά την υποβολή του στην κατεργασία.

4) Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων, που αφορούν το βάθος της σκληρυμένης ζώνης (z_t), με τα υπολογιστικά αποτελέσματα που δίνει το μαθηματικό μοντέλο μετάδοσης θερμότητας των Ashby και Easterling, το οποίο αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας. Εάν η σύγκριση αυτή έδιδε ικανοποιητικά μικρές αποκλίσεις, τότε οι δυνατότητες για εκ των προτέρων σχεδιασμό των παραμέτρων της κατεργασίας θα ήταν μεγάλες, αφού με τον τρόπο αυτό τα αποτελέσματα της κατεργασίας θα μπορούσαν να προβλέπονται, χωρίς να χρειάζεται η εκτέλεση κάποιων δοκιμών, ώστε να καθορίζονται κάθε φορά πειραματικά οι συνθήκες της κατεργασίας, γεγονός που αυξάνει το κόστος.

5) Τελικός στόχος της πειραματικής διαδικασίας ήταν ο καθορισμός μιας περιοχής τιμών που μπορούν να λάβουν οι παράμετροι της κατεργασίας, μέσα στην οποία να μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή σκλήρυνση της επιφάνειας του υλικού.

Το υλικό το οποίο υποβλήθηκε στα πειράματα της επιφανειακής σκλήρυνσης με τη χρήση δέσμης LASER ήταν ο υποευτηκτοειδής χάλυβας Ck-60. Πιο εκτενής αναφορά για το συγκεκριμένο υλικό γίνεται στην αμέσως επόμενη ενότητα.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι η εκτέλεση των πειραμάτων της κατεργασίας έλαβε χώρα στη μονάδα LASER CO₂ που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ. Α.Ε. και με την πολύτιμη συνδρομή της κ. Άννας Ζερβάκη και του κ. Σωτήρη Σχοινά, ενώ όλες οι υπόλοιπες πειραματικές εργασίες (σκληρομετρήσεις, μεταλλογραφίες) έγιναν στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

2. Ο ΧΑΛΥΒΑΣ Ck-60

Το υλικό το οποίο μελετήθηκε στην εργασία αυτή ήταν ο υποευτηκτοειδής χάλυβας κατασκευών Ck-60. Πρόκειται για έναν απλό ανθρακοχάλυβα, η σύσταση του οποίου δίδεται ευθύς αμέσως στον πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1: Η χημική σύσταση του χάλυβα Ck-60.

<u>ΧΗΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ</u>	<u>ΣΥΜΒΟΛΟ</u>	<u>ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ % κ.β.</u>
ΑΝΘΡΑΚΑΣ	C	0.57 - 0.65
ΠΥΡΙΤΙΟ	Si	μικρότερη από 0.4
ΜΑΓΓΑΝΙΟ	Mn	0.6 - 0.9
ΦΩΣΦΟΡΟΣ	P	0.045
ΘΕΙΟ	S	μικρότερη από 0.043

Η μικροδομή του χάλυβα αυτού αποτελείται από φερρίτη και περλίτη, γεγονός αναμενόμενο αφού πρόκειται για υποευτηκτοειδή χάλυβα. Ως γνωστόν ο φερρίτης είναι μια φάση του άνθρακα με κυβική χωροκεντρωμένη δομή (bcc), η οποία ακριβώς λόγω της δομής της μπορεί να διαλύσει ελάχιστες ποσότητες άνθρακα μέσα στο κρυσταλλικό της πλέγμα. Το γεγονός αυτό συμβαίνει διότι στην κυβική χωροκεντρωμένη δομή, οι χώροι παρεμβολής, δηλαδή οι κενοί χώροι μέσα στο πλέγμα στους οποίους μπορεί να διεισδύσει ένα άτομο άνθρακα, είναι πολύ περιορισμένοι. Έτσι λοιπόν, όπως μπορεί να φανεί στο διάγραμμα ισορροπίας Fe-C, η μέγιστη περιεκτικότητα σε άνθρακα που μπορεί να λάβει ο φερρίτης είναι 0.025 % κ.β. σε θερμοκρασία 723 °C, ποσότητα πρακτικά αμελητέα.

Ο περλίτης είναι ένα μίγμα του χάλυβα, το οποίο αποτελείται από εναλλασσόμενες πλάκες φερρίτη και σεμεντίτη. Ο σεμεντίτης είναι ουσιαστικά το καρβίδιο του σιδήρου (Fe₃C) και η δομή του είναι η ορθορομβική. Οι μεγαλύτερες ποσότητες άνθρακα βρίσκονται λοιπόν συγκεντρωμένες υπό τη μορφή του καρβιδίου του σιδήρου, ακριβώς διότι η ορθορομβική δομή προσφέρει στα άτομα του άνθρακα επαρκή χώρο ώστε να παρεμβληθούν στο πλέγμα του σιδήρου.

Η δομή του χάλυβα CK-60 φαίνεται στη φωτογραφία του σχήματος 2.1:

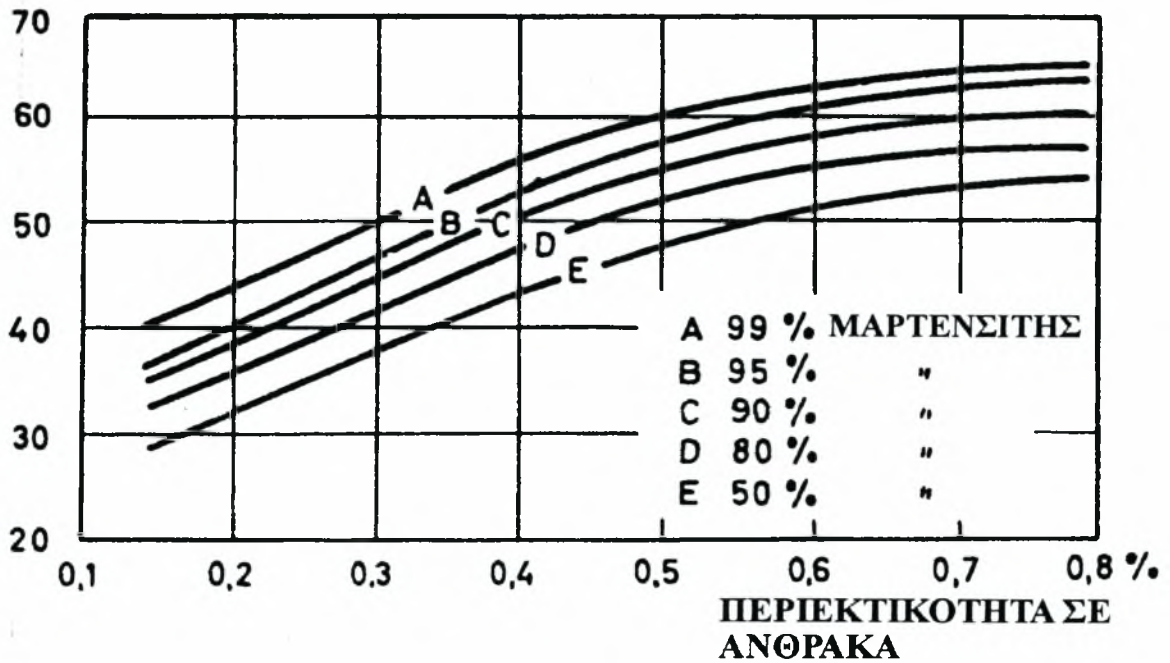


Σχήμα 2.1: Η φερριτο-περλιτική δομή του χάλυβα Ck-60.

Το συγκεκριμένο υλικό επελέγη για την μελέτη της επιφανειακής σκλήρυνσης υποευτηκτοειδούς χάλυβα με την χρήση δέσμης LASER, κατ' αρχήν επειδή είναι χάλυβας ο οποίος επιδέχεται σκλήρυνση. Αυτό σημαίνει ότι η περιεκτικότητά του σε άνθρακα είναι αρκετά υψηλή, ώστε να μπορεί να δώσει κάποια σημαντική αύξηση της σκληρότητας, μετά την υποβολή του στην κατεργασία. Η αύξηση της σκληρότητας είναι σημαντικό να μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί με την εκτέλεση σκληρομετρήσεων. Κάποιος άλλος υποευτηκτοειδής χάλυβας, με μικρότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα, θα έδινε και μικρότερη αύξηση της σκληρότητας, καθώς είναι γνωστό ότι η μέγιστη σκληρότητα που μπορεί να αποκτήσει ένας χάλυβας, λόγω του μετασχηματισμού της δομής του σε μαρτενσίτη, εξαρτάται άμεσα από την περιεκτικότητά του σε άνθρακα. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα του σχήματος 2.2:

ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

HRC



Σχήμα 2.2: Σχέση μεταξύ της σκληρότητας, της περιεκτικότητας σε άνθρακα και του ποσοστού σε μαρτενσίτη για τους υποευτηκτοειδείς χάλυβες (διάγραμμα κατασκευασμένο από τους Hodge και Orehoski).

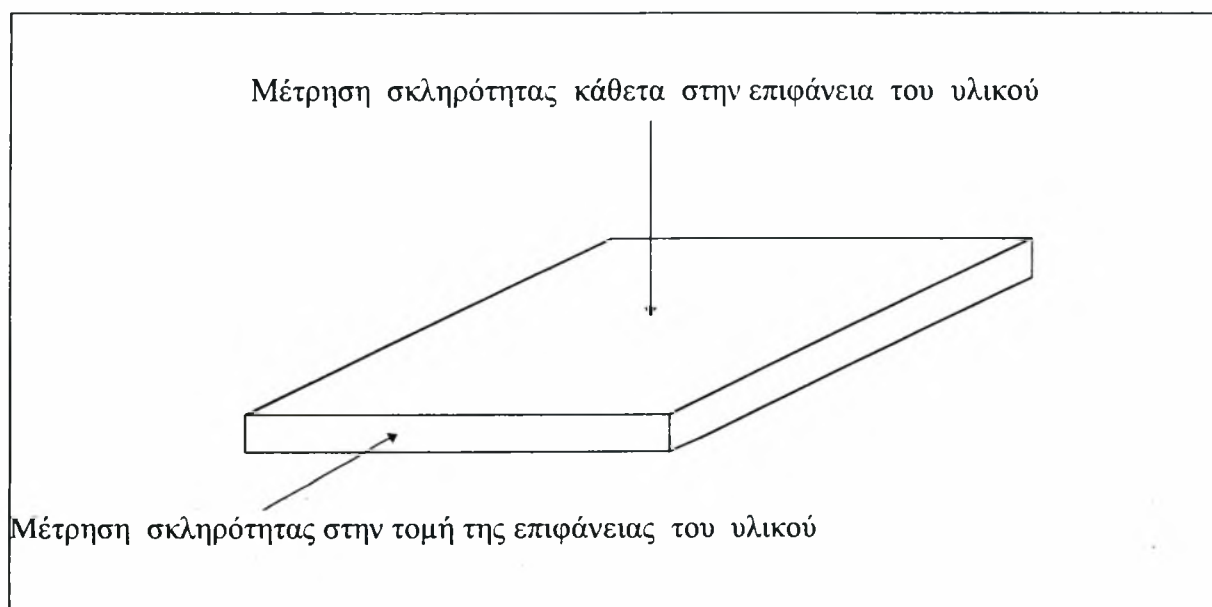
Εκτός από τον παραπάνω λόγο, που είναι και ο σημαντικότερος, ο χάλυβας Ck-60 επελέγη και λόγω της διαθεσιμότητάς του. Πρόκειται για ένα συνηθισμένο χάλυβα με χαμηλό κόστος απόκτησης και αρκετά ευρύ πεδίο χρησιμοποίησης σε κατασκευές.

3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ Ck-60

Η μηχανική ιδιότητα της σκληρότητας αποτελεί τον βασικότερο παράγοντα της κατεργασίας που μελέτησε η εργασία αυτή. Η επιφανειακή σκλήρυνση με την χρήση δέσμης LASER έχει σαν στόχο την αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειας του υλικού. Είναι λοιπόν πολύ σημαντικό να είναι γνωστή η σκληρότητα του υλικού, πριν αυτό υποβληθεί στην επιφανειακή σκλήρυνση, ώστε να είναι δυνατόν να διαπιστωθεί και να μετρηθεί η αύξηση της σκληρότητας που επιτεύχθηκε στην επιφάνεια του υλικού μετά την κατεργασία.

Για τον σκοπό αυτό εκτελέστηκαν μικροσκληρομετρήσεις σε δοκίμια του χάλυβα Ck-60. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε το μικροσκληρόμετρο SHIMADJU HVM 2000 το οποίο βρίσκεται στο Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ήταν 200 gr.

Μετρήθηκε η σκληρότητα του υλικού προς δύο κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1:



Σχήμα 3.1: Μέτρηση της σκληρότητας του χάλυβα Ck-60.

Από την εκτέλεση των μετρήσεων αυτών προέκυψαν οι παρακάτω τιμές:

Σκληρότητα κάθετα στην επιφάνεια του υλικού (σε HV):	221
Σκληρότητα στην τομή της επιφάνειας του υλικού (σε HV):	219

Οι τιμές αυτές προέκυψαν με τη συνήθη διαδικασία, δηλαδή εκτελέστηκαν μια σειρά από μικροσκληρομετρήσεις και η τιμή που καταχωρείται παραπάνω, μία για κάθε κατεύθυνση προς την οποία έγιναν μετρήσεις, είναι η μέση τιμή των μικροσκληρομετρήσεων.

Διαπιστώνεται ότι ο χάλυβας Ck-60 είναι ένας χάλυβας μέτριας σκληρότητας. Θα έπρεπε στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία, είχε προηγουμένως υποστεί θερμική κατεργασία ανακρυστάλλωσης (normalizing) και θερμή εξέλαση (hot-rolling), γεγονός στο οποίο οφείλεται και η σκληρότητα που είχε.

4. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ Ck-60

Οι θερμικές ιδιότητες του υλικού έχουν μεγάλη σημασία και χρησιμότητα, καθώς η επιφανειακή σκλήρυνση με τη χρήση δέσμης LASER είναι μια θερμική κατεργασία. Οι ιδιότητες αυτές ήταν απαραίτητο να είναι γνωστές, ούτως ώστε να προβλεφθεί, μέσω του μαθηματικού μοντέλου μετάδοσης θερμότητας, που χρησιμοποίησε η μελέτη αυτή, το βάθος μέχρι το οποίο θα επιτευχθεί αύξηση της σκληρότητας του υλικού.

Κάποιες από τις ιδιότητες αυτές λήφθηκαν απευθείας από την βιβλιογραφία, ενώ για την εύρεση των υπολοίπων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα υπολογιστικής θερμοδυναμικής THERMO-CALC, το οποίο διατίθεται από το Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Οι ιδιότητες που βρέθηκαν από την βιβλιογραφία είναι οι εξής:

- ◆ Θερμική αγωγιμότητα..... $\lambda=46.8 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$
- ◆ Θερμοδιαχυτότητα..... $\alpha=0.00001278 \text{ m}^2/\text{sec}$
- ◆ Πυκνότητα..... $\rho=7800 \text{ Kgr/m}^3$
- ◆ Ειδική θερμότητα..... $C=544 \text{ J/Kgr}^{\circ}\text{C}$

Οι ιδιότητες που καθορίστηκαν μέσω του προγράμματος THERMO-CALC είναι οι παρακάτω:

- ◆ Ευτηκτοειδής θερμοκρασία..... $A_1=723\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ◆ Θερμοκρασία ωστενιτοποίησης... $A_3=755\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ◆ Σημείο τήξης..... $T_m=1483\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ◆ Θερμοκρασία εμφάνισης διφασικού μίγματος υγρού-ωστενίτη... $T_1=1412\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ◆ Λανθάνουσα θερμότητα τήξης..... $H_L=402010000\text{ J/m}^3$

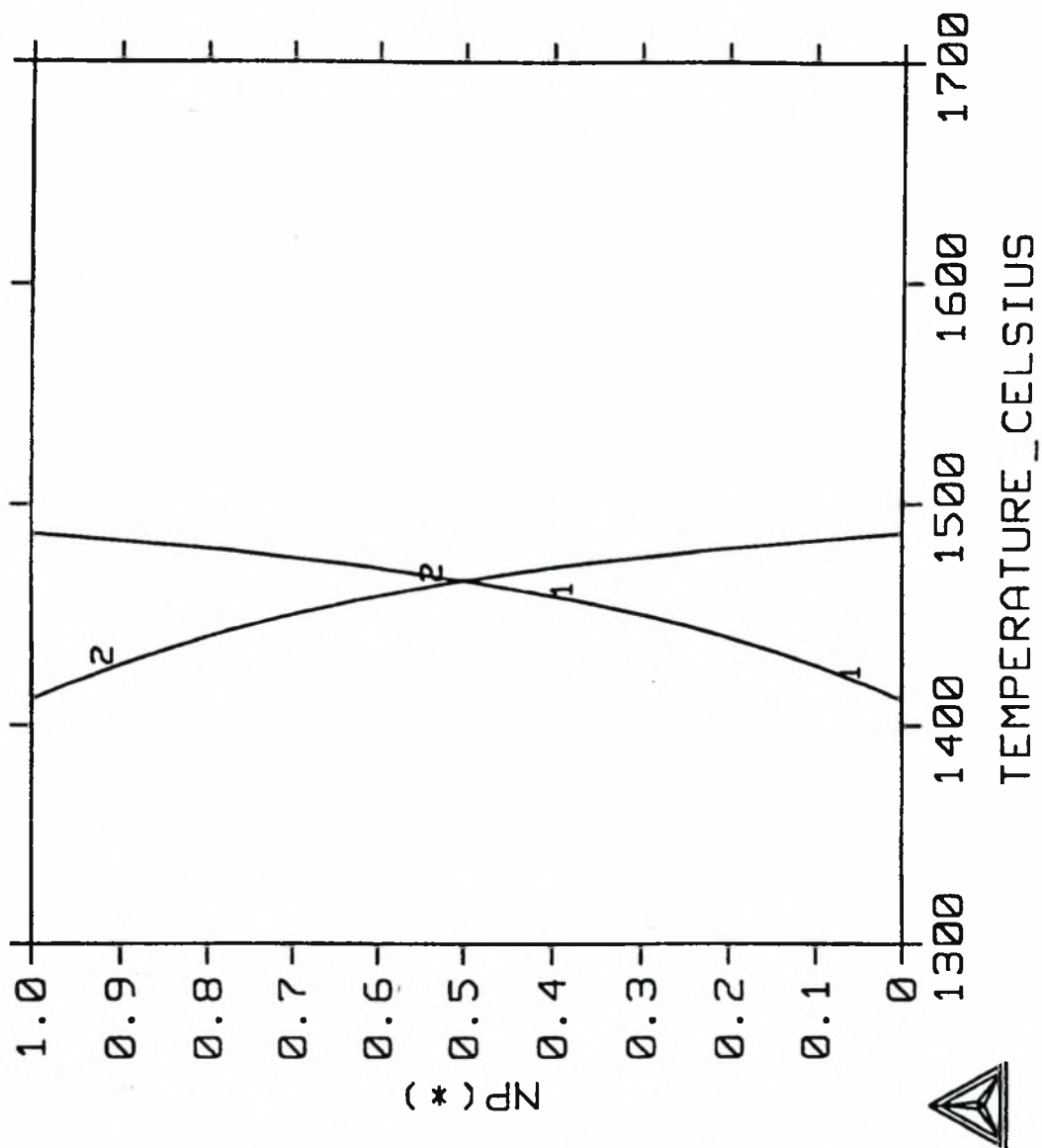
Ο καθορισμός των ιδιοτήτων αυτών, μέσω του προγράμματος THERMO-CALC, έγινε με τη χρησιμοποίηση των διαγραμμάτων που φαίνονται στα σχήματα 4.1 και 4.2.

Στο σχήμα 4.1, το οποίο είναι διάγραμμα του THERMO-CALC, εμφανίζεται το ποσοστό επί τοις εκατό κατά βάρος της κάθε φάσης σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Έτσι, εάν για παράδειγμα απαιτείται ο καθορισμός της θερμοκρασίας A_3 , δεν χρειάζεται παρά να παρατηρηθεί σε ποιά θερμοκρασία ο ωστενίτης (γραμμή 2) παίρνει την τιμή 100%. Παρομοίως, η θερμοκρασία όπου εμφανίζεται το διφασικό μίγμα υγρού-ωστενίτη βρίσκεται αν παρατηρηθεί σε ποιά θερμοκρασία αρχίζει να υπάρχει η υγρή φάση (γραμμή 1). Με τον ίδιο τρόπο καθορίζονται και οι υπόλοιπες θερμοκρασίες που αναφέρονται παραπάνω.

Το σχήμα 4.2, που και αυτό είναι διάγραμμα του THERMO-CALC, δείχνει την μεταβολή της ενθαλπίας της κάθε φάσης του χάλυβα, σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης υπολογίζεται από το διάγραμμα αυτό, και με τη βοήθεια του διαγράμματος του σχήματος 4.1, ως εξής: η μεταβολή της ενθαλπίας από την θερμοκρασία T_1 ($1412\text{ }^{\circ}\text{C}$) μέχρι το σημείο τήξης T_m ($1483\text{ }^{\circ}\text{C}$), δηλαδή από την θερμοκρασία όπου αρχίζει η τήξη μέχρι την θερμοκρασία που ολοκληρώνεται η τήξη, δίνει την ζητούμενη ποσότητα της λανθάνουσας θερμότητας τήξης.

THermo-CALC

1: T-273.15, NP(LIQUID)
2: T-273.15, NP(FCC_A1)



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ποσοστού κατά βάρος-θερμοκρασίας για τον ωστενίτη (γραμμή 2) και την υγρή φάση (γραμμή 1).

5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, κατά την κατεργασία της επιφανειακής σκλήρυνσης με τη χρήση δέσμης LASER, τίθενται δύο όρια, ένα κατώτερο και ένα ανώτερο, μέσα στα οποία πρέπει να διακυμανθεί η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του υλικού, ούτως ώστε να επιτευχθεί αύξηση της σκληρότητας. Το κατώτερο θερμοκρασιακό όριο τίθεται από την χαρακτηριστική θερμοκρασία A_3 , που για τον χάλυβα Ck-60 βρίσκεται στους $755\text{ }^{\circ}\text{C}$. Δηλαδή η θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί σε εκείνο το βάθος του υλικού, μέχρι το οποίο είναι επιθυμητή η αύξηση της σκληρότητας, θα πρέπει να ξεπεράσει τους $755\text{ }^{\circ}\text{C}$, ώστε να επέλθει πλήρης ωστενιτοποίηση και, επομένως, κατά την απότομη ψύξη που επακολουθεί, να σχηματισθεί μαρτενσίτης. Το ανώτερο θερμοκρασιακό όριο τίθεται από την θερμοκρασία εκείνη στην οποία εμφανίζεται τήξη στην επιφάνεια. Η θερμοκρασία αυτή για τον χάλυβα Ck-60 βρίσκεται στους $1412\text{ }^{\circ}\text{C}$. Δεν πρέπει λοιπόν σε καμία περίπτωση η θερμοκρασία αυτή να ξεπερασθεί, καθώς η εμφάνιση τήγματος κατά την κατεργασία της επιφανειακής σκλήρυνσης είναι, γενικά, ανεπιθύμητη.

Φυσικά, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο υλικό κατά την εκτέλεση της κατεργασίας εξαρτώνται από τις τιμές που λαμβάνει τόσο η πυκνότητα ισχύος η οποία προσδίδεται από τη δέσμη LASER στο υλικό, όσο και η σχετική ταχύτητα της δέσμης ως προς το τεμάχιο. Η πυκνότητα ισχύος, να υπενθυμισθεί εδώ ότι ισούται με τον λόγο της ισχύος της δέσμης LASER (q) προς την επιφάνεια της διατομής της δέσμης (πr_b^2):

$$Q = q / (\pi r_b^2) \quad [\text{W}/\text{mm}^2]$$

Οι συνθήκες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων της επιφανειακής σκλήρυνσης, επελέγησαν με την βοήθεια του μοντέλου μετάδοσης θερμότητας, που αναλύθηκε λεπτομερώς στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας. Το μοντέλο αυτό περιγράφει το θερμοκρασιακό πεδίο που αναπτύσσεται στο υλικό κατά την κατεργασία. Η χρησιμοποίησή του έδωσε την δυνατότητα να γίνει παραμετρική ανάλυση της κατεργασίας, προτού ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία. Με τον τρόπο αυτό καθορίστηκε σε πρώτη φάση το εύρος των συνθηκών κατεργασίας (q , u , r_b) οι οποίες θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν, ώστε, θεωρητικά τουλάχιστον, να επιτευχθεί σκλήρυνση της επιφάνειας. Το γεγονός αυτό

αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμο, καθώς έτσι αποφεύχθηκε η πραγματοποίηση κάποιων πρώτων πειραμάτων που σαν μοναδικό τους σκοπό θα είχαν τον καθορισμό του εύρους των συνθηκών κατεργασίας που αποφέρουν επιφανειακή σκλήρυνση. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η εξοικονόμηση χρόνου, υλικών και προσπάθειας, που επιτεύχθηκε χάρις στην χρησιμοποίηση του μοντέλου, ήταν μεγάλη. Αυτός ήταν και ο κύριος λόγος για τον οποίο το μοντέλο μετάδοσης θερμότητας ενσωματώθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Ένας δευτερεύων λόγος, ήταν για να επιχειρηθεί μια σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την ακρίβεια του μοντέλου και, επομένως, την χρησιμότητά του για πρακτικές εφαρμογές.

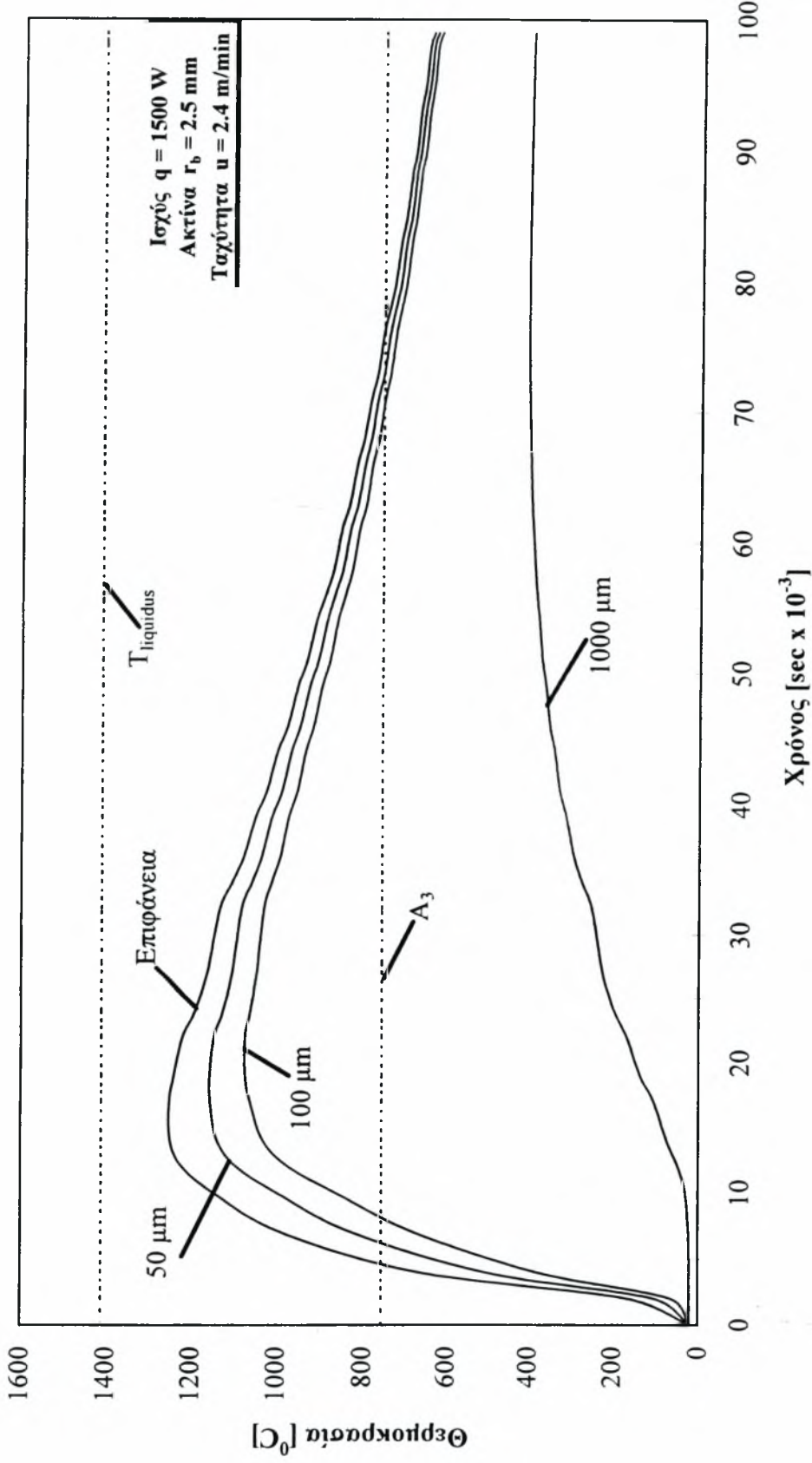
Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής ανάλυσης της κατεργασίας μέσω του μοντέλου, με σκοπό την επιλογή των πειραματικών συνθηκών, έγινε χρησιμοποιώντας διαγράμματα σαν αυτά που φαίνονται στα σχήματα 5.1, 5.2 και 5.3.

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι θερμοκοί κύκλοι που υφίσταται το υλικό, σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια και για συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας, όπως αυτοί υπολογίζονται από το μοντέλο. Στο σχήμα επίσης έχουν σημειωθεί με διακεκομμένη γραμμή, τόσο η χαρακτηριστική θερμοκρασία A_3 ($755\text{ }^{\circ}\text{C}$ για τον χάλυβα Ck-60) πάνω από την οποία το υλικό μετασχηματίζεται σε ωστενίτη, όσο και η θερμοκρασία T_{liquidus} ($1412\text{ }^{\circ}\text{C}$ για τον χάλυβα Ck-60) πάνω από την οποία εμφανίζεται διφασικό μίγμα υγρού και ωστενίτη. Σύμφωνα με το μοντέλο, το υλικό με τις συνθήκες αυτές θα σκληρυνθεί μέχρι το βάθος εκείνο, όπου η μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία ξεπερνά την A_3 . Ακόμη στο διάγραμμα μπορεί να φανεί εάν θα επέλθει τήξη και μέχρι ποιο βάθος, αφού τότε η μέγιστη θερμοκρασία θα ξεπερνά την T_{liquidus} . Με διαγράμματα αυτής της μορφής λοιπόν, έγινε δυνατή η πρόβλεψη του αποτελέσματος της κατεργασίας για διάφορες συνθήκες.

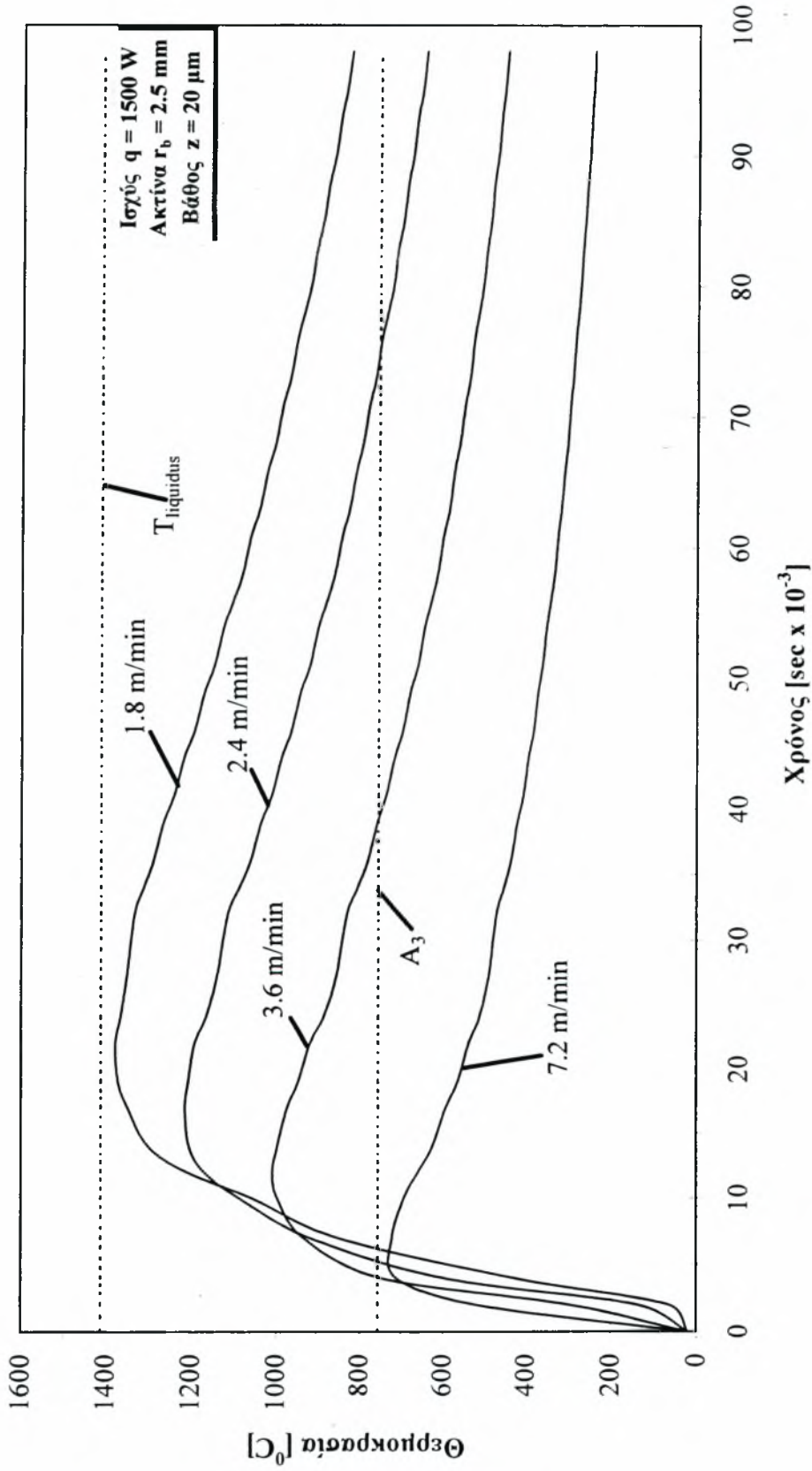
Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται και πάλι θερμοκοί κύκλοι κατά την κατεργασία, αυτή τη φορά όμως για συγκεκριμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια και για διάφορες συνθήκες κατεργασίας. Και πάλι με διακεκομμένη γραμμή σημειώνονται τόσο η A_3 όσο και η T_{liquidus} . Με διαγράμματα τέτοιας μορφής έγινε δυνατή η πρόβλεψη των συνθηκών κατεργασίας που ήταν ικανές να επιφέρουν, θεωρητικά τουλάχιστον, σκλήρυνση σε κάποιο συγκεκριμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του υλικού, χωρίς να εμφανίζεται τήξη στην επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες θα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ της A_3 και της T_{liquidus} .

Τέλος, στο σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε συνάρτηση με το βάθος κάτω από την επιφάνεια του υλικού, για συγκεκριμένες συνθήκες

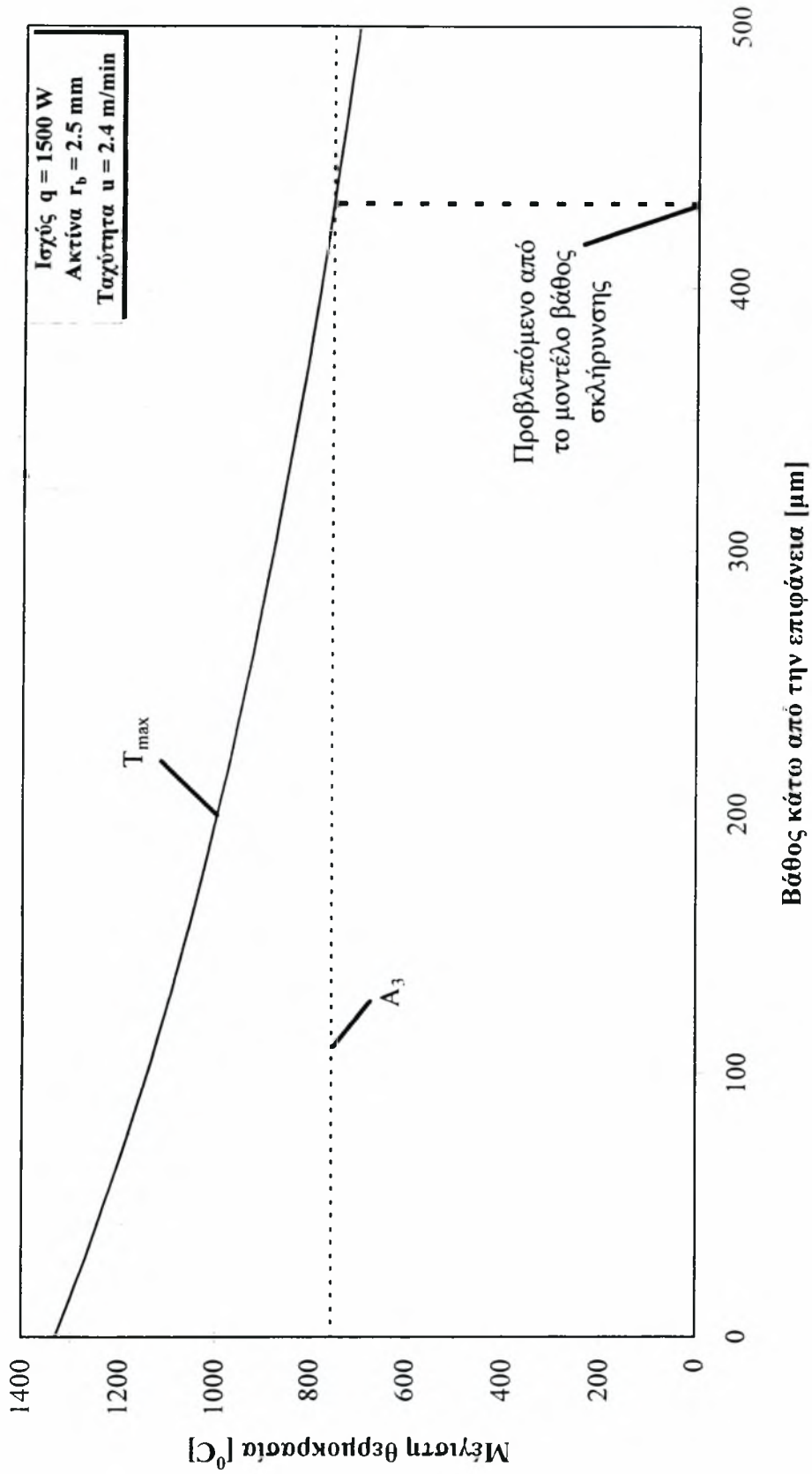
κατεργασίας. Ακόμη φαίνεται η θερμοκρασία A_3 και η T_{Liquidus} . Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται πιο καθαρά το βάθος μέχρι το οποίο προβλέπεται να επέλθει σκλήρυνση του υλικού. Δηλαδή, το υλικό θα σκληρυνθεί μέχρι το βάθος εκείνο όπου η μέγιστη θερμοκρασία ξεπερνά την A_3 .



Σχήμα 5.1: Θερμικοί κύκλοι κατά την καταργασία, για διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια και για τις συνθήκες που αναγράφονται. Το διάγραμμα έχει υπολογισθεί με τη χρήση του μοντέλου μετάδοσης θερμότητας.



Σχήμα 5.2: Θερμικοί κύκλοι κατά την καταργασία, υπολογισμένοι από το μοντέλο μετάδοσης θερμότητας, για διάφορες συνθήκες και για συγκεκριμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του υλικού.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών-βάθους κάτω από την επιφάνεια για συγκεκριμένες συνθήκες. Το διάγραμμα έχει υπολογισθεί από το μοντέλο μετάδοσης θερμότητας.

Με τη βοήθεια λοιπόν του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας επελέγησαν οι πειραματικές συνθήκες. Διεξήχθησαν τρεις σειρές πειραμάτων, με διαφορετικές πυκνότητες ισχύος, οι οποίες αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές ακτίνες της δέσμης LASER. Οι συνθήκες κατεργασίας για την κάθε σειρά πειραμάτων φαίνονται αναλυτικά στους πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3:

Πίνακας 5.1: Οι συνθήκες κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα της 1^{ης} σειράς.

ΙΣΧΥΣ ΔΕΣΜΗΣ [W]	ΑΚΤΙΝΑ ΔΕΣΜΗΣ [mm]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΕΣΜΗΣ [m/min]	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ [W/mm ²]
1500	2.5	8.4	76
1500	2.5	7.2	76
1500	2.5	6.0	76
1500	2.5	5.4	76
1500	2.5	4.8	76
1500	2.5	4.6	76
1500	2.5	4.2	76
1500	2.5	3.6	76
1500	2.5	3.2	76
1500	2.5	3.0	76
1500	2.5	2.8	76
1500	2.5	2.4	76
1500	2.5	2.0	76
1500	2.5	1.8	76
1500	2.5	1.6	76
1500	2.5	1.2	76

Πίνακας 5.2: Οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα της 2^{ης} σειράς.

ΙΣΧΥΣ ΔΕΣΜΗΣ [W]	ΑΚΤΙΝΑ ΔΕΣΜΗΣ [mm]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΕΣΜΗΣ [m/min]	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ [W/mm²]
1500	1.25	7.2	306
1500	1.25	6.4	306
1500	1.25	6.0	306
1500	1.25	4.8	306
1500	1.25	4.0	306

Πίνακας 5.3: Οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα της 3^{ης} σειράς.

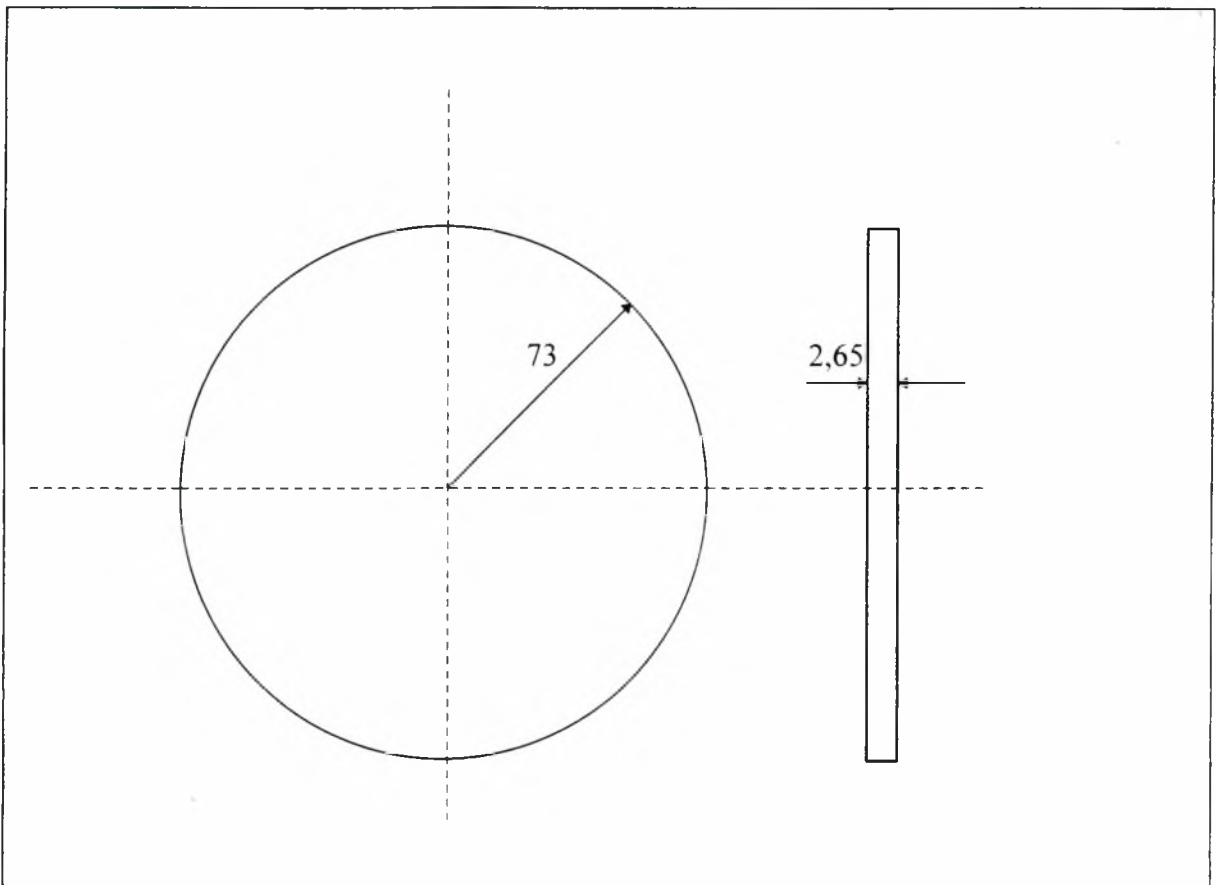
ΙΣΧΥΣ ΔΕΣΜΗΣ [W]	ΑΚΤΙΝΑ ΔΕΣΜΗΣ [mm]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΕΣΜΗΣ [m/min]	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [W/mm²]
1500	5	1.8	19
1500	5	1.6	19
1500	5	1.5	19
1500	5	1.2	19
1500	5	1.0	19

Όπως φαίνεται από τις πειραματικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν, έγινε προσπάθεια να μελετηθούν τα αποτελέσματα της κατεργασίας, δηλαδή το μέγιστο βάθος κάτω από την επιφάνεια του υλικού μέχρι το οποίο επέρχεται σκλήρυνση, καθώς και η μέγιστη σκληρότητα που επιτυγχάνεται, σε σχέση τόσο με την πυκνότητα ισχύος όσο και με την ταχύτητα της κατεργασίας. Η πυκνότητα ισχύος σχετίζεται άμεσα με την ακτίνα της δέσμης, δηλαδή με το μέγεθός της. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η δέσμη, τόσο λιγότερα περάσματα απαιτούνται ώστε να καλυφθεί μια επιφάνεια, γεγονός που επιδρά θετικά στο κόστος της κατεργασίας. Από την άλλη μεριά και η ταχύτητα παίζει ρόλο στο κόστος, αφού όσο μεγαλύτερη είναι τόσο λιγότερος χρόνος απαιτείται για την κατεργασία ενός τεμαχίου. Βεβαίως, αυτό δεν σημαίνει ότι μεγάλο μέγεθος δέσμης και υψηλή ταχύτητα κατεργασίας εξασφαλίζει και το βέλτιστο αποτέλεσμα. Και αυτό διότι, όπως αναφέρει η βιβλιογραφία, αλλά και όπως θα φανεί παρακάτω κατά την συζήτηση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας, η αύξηση του μεγέθους της δέσμης ή/και της ταχύτητας κατεργασίας επιδρά αρνητικά τόσο στο βάθος σκλήρυνσης όσο και στην μέγιστη σκληρότητα που επιτυγχάνεται. Πρέπει λοιπόν ανά περίπτωση να καθορίζονται οι βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας, που εξασφαλίζουν το χαμηλότερο δυνατό κόστος με το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα του προϊόντος.

6. LASER ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το LASER CO₂, συνεχούς κύματος με μήκος κύματος 10.6 μm και μέγιστη ισχύ 1700 W, το οποίο βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της E.B.E.T.A.M. A.E.

Στην κατεργασία υποβλήθηκαν δίσκοι του χάλυβα Ck-60, οι οποίοι βρέθηκαν διαθέσιμοι, μέσω της E.B.E.T.A.M. A.E. Οι δίσκοι αυτοί είχαν τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 6.1:



Σχήμα 6.1: Η γεωμετρία και οι διαστάσεις των δίσκων του Ck-60 που υποβλήθηκαν στα πειράματα.

Για κάθε ένα από τα σετ συνθηκών κατεργασίας που δόθηκαν παραπάνω, εκτελέστηκε ένα πέρασμα της δέσμης LASER επάνω από την επιφάνεια του δίσκου. Σε όλα τα πειράματα η δέσμη ήταν εστιασμένη. Για να αποφευχθεί η επίδραση της μεταδιδόμενης θερμότητας μεταξύ γειτονικών περασμάτων της δέσμης LASER, η απόσταση μεταξύ τους επελέγη να είναι αρκετά μεγαλύτερη από το πλάτος τους. Στη συνέχεια κόπηκαν δοκίμια από τους

δίσκους του υλικού, ώστε να υποβληθούν σε μεταλλογραφική εξέταση. Τα δοκίμια εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη, λειάνθηκαν και στιλβώθηκαν. Κατόπιν προσβλήθηκαν χημικά με διάλυμα Nital 2%. Η μεταλλογραφική εξέταση έλαβε χώρα στο οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Aristometz του Εργαστηρίου Υλικών. Οι μικροσκληρομετρήσεις έγιναν με το μικροσκληρόμετρο Shimadzu H MV-2000 του Εργαστηρίου Υλικών, χρησιμοποιώντας βάρος 200 gr. Η μικροσκληρότητα μετρήθηκε σαν συνάρτηση του βάθους από την επιφάνεια για όλα τα κατεργασμένα δοκίμια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

1. ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η μεταλλογραφική εξέταση των δοκιμίων, που υποβλήθηκαν στην κατεργασία της επιφανειακής σκλήρυνσης με τη χρήση δέσμης LASER, υπήρξε πολύ διαφωτιστική σχετικά με τις αλλαγές που επέρχονται στην δομή του χάλυβα Ck-60. Οι αλλαγές αυτές ήρθαν σε συμφωνία με την θεωρητική προσέγγιση της κατεργασίας, όπως αυτή περιγράφηκε κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση, είναι δε άρρηκτα συνδεδεμένες με την αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειας του υλικού.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι αναλύσεις της μικροδομής που έγιναν για κάθε μία από τις σειρές πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και οι οποίες αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές πυκνότητες ισχύος.

1^η Σειρά Πειραμάτων

Πυκνότητα Ισχύος $Q = 76 \text{ W/mm}^2$, Ισχύς $q = 1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_b = 2.5 \text{ mm}$

1) Ταχύτητα $u = 1.2 \text{ m/min}$ έως $u = 1.8 \text{ m/min}$:

Χαρακτηριστικό των δοκιμίων που υποβλήθηκαν στην κατεργασία μέσα στο προαναφερόμενο φάσμα ταχυτήτων, είναι η εμφάνιση σκληρυμένης (μαρτενσιτικής) περιοχής συνοδευόμενη όμως από τήξη στην επιφάνεια. Πιο αναλυτικά, η μεταλλογραφική εξέταση των δοκιμίων αυτών έδειξε τα εξής:

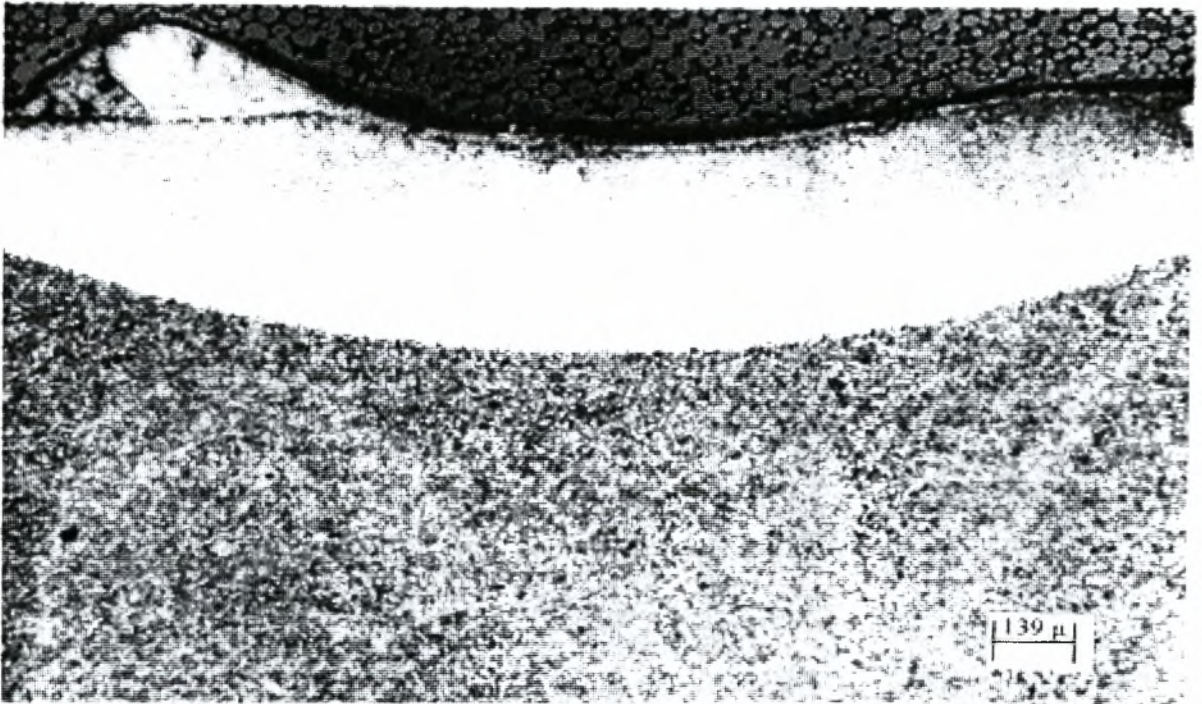
- i) Η σκληρυμένη περιοχή έχει τη γεωμετρική μορφή που φαίνεται στις φωτογραφίες των σχημάτων 1.1, 1.2 και 1.3. Αυτή η γεωμετρική μορφή είναι χαρακτηριστική της χρησιμοποίησης Gaussian κατανομής ισχύος στην δέσμη LASER.
- ii) Εμφανίζεται μία ζώνη, με βάθος το οποίο κυμαίνεται από 10 μm έως 20 μm κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου, η οποία έχει υποστεί οξείδωση, παρ' ότι κατά την διάρκεια της κατεργασίας χρησιμοποιήθηκε άζωτο (N_2) πίεσης 4 bar σαν προστατευτικό αέριο.
- iii) Κάτω από την οξειδωμένη αυτή ζώνη υπάρχει μια περιοχή, το βάθος της οποίας φθάνει από 100 μm έως 180 μm κάτω από την επιφάνεια, για τα δοκίμια που κατεργάστηκαν με ταχύτητες από 1.8 m/min έως 1.2 m/min αντίστοιχα, στην οποία έχει επέλθει τήξη του υλικού. Η τήξη διακρίνεται καθαρά στις φωτογραφίες των σχημάτων 1.1., 1.2 και 1.3. Η "κοιλιάδα" που έχει δημιουργηθεί, οφείλεται στην χρήση του προστατευτικού αερίου κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Το αέριο, καθώς πέφτει με πίεση 4 bar, απωθεί το σχηματισμένο υγρό προς τα πλάγια της δέσμης. Επειδή ο ρυθμός ψύξης είναι πάρα πολύ

υψηλός, το τηγμένο υλικό στερεοποιείται σχεδόν ακαριαία. προτού προλάβει να επανέλθει στην αρχική του θέση.

iv) Στη συνέχεια ακολουθεί η σκληρυμένη ζώνη του υλικού, της οποίας το μέγιστο βάθος κυμαίνεται από τα 650 μm έως τα 800 μm κάτω από την επιφάνεια, για τα δοκίμια που κατεργάστηκαν με ταχύτητες από 1.8 m/min έως 1.2 m/min αντίστοιχα. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι το μέγιστο σκληρυμένο βάθος εμφανίζεται στον άξονα που διέρχεται από το κέντρο της κυκλικής διατομής της δέσμης LASER. Το γεγονός αυτό βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με την Gaussian κατανομή ισχύος της δέσμης, αφού με την κατανομή αυτή η μέγιστη ισχύς υφίσταται στο κέντρο της διατομής της δέσμης. Η δομή της σκληρυμένης ζώνης είναι ξεκάθαρα μαρτενσιτική. Ο μαρτενσίτης αποτελείται από μεγάλα πλακίδια (coarse plates), ενώ γίνεται πιο λεπτόκοκκος όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου. Στην φωτογραφία του σχήματος 1.4 φαίνεται η μαρτενσιτική δομή της σκληρυμένης ζώνης.

v) Κοντά στην διεπιφάνεια μεταξύ της σκληρυμένης ζώνης και του μετάλλου βάσης, εμφανίζεται προευτηκτοειδής φερρίτης, στα όρια των κόκκων του μαρτενσίτη, ο οποίος συνυπάρχει με τον μαρτενσίτη. Η φωτογραφία του σχήματος 1.5 δείχνει την διεπιφάνεια, όπου μέσα στην σκληρυμένη ζώνη διακρίνεται ο φερρίτης που έχει σχηματισθεί.

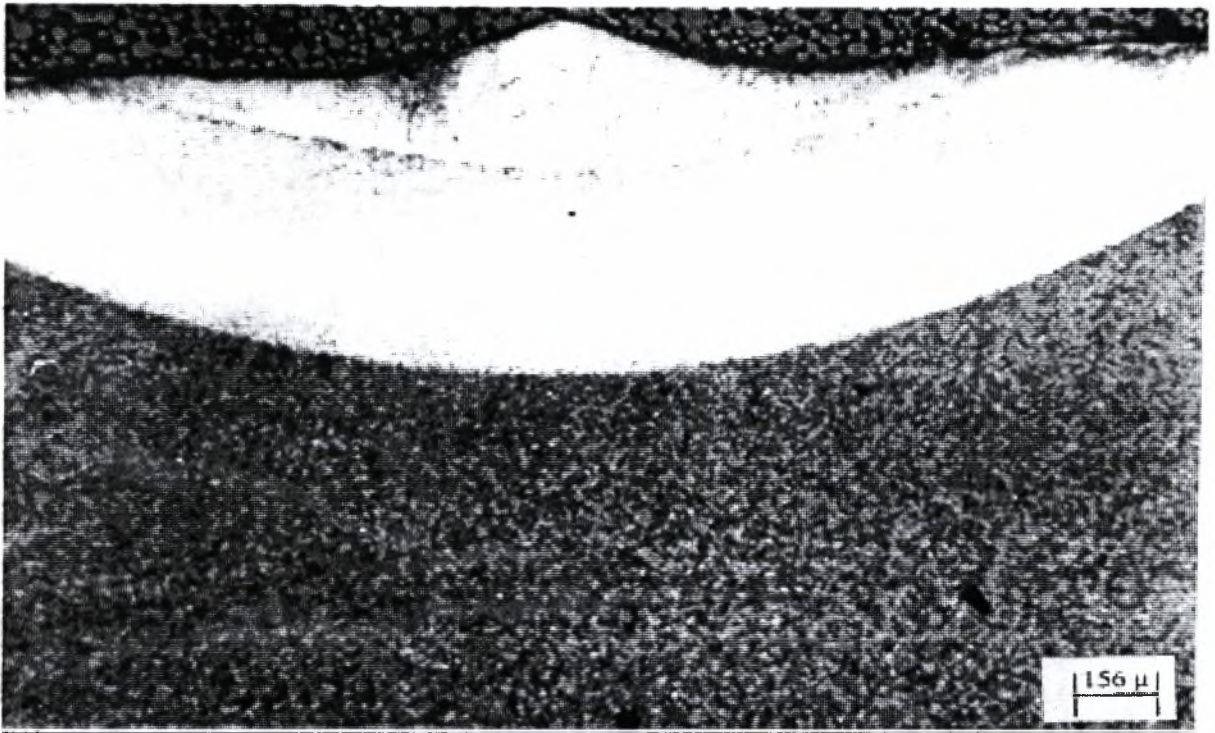
vi) Έξω από την σκληρυμένη ζώνη του υλικού, στο μέταλλο βάσης, η δομή που συναντάται είναι φερριτο-περλιτική. Το υλικό δηλαδή που βρίσκεται εκτός της σκληρυμένης ζώνης έμεινε απaráλλακτο και δεν επηρεάστηκε καθόλου από την κατεργασία. Αυτό εξάλλου φαίνεται και στην φωτογραφία του σχήματος 1.6.



Σχήμα 1.1: Η μορφή της σκληρυμένης ζώνης και η τήξη στην επιφάνεια, για το δοκίμιο που υποβλήθηκε στην κατεργασία με πυκνότητα ισχύος $Q=76 \text{ W/mm}^2$ και ταχύτητα δέσμης 1.8 m/min .



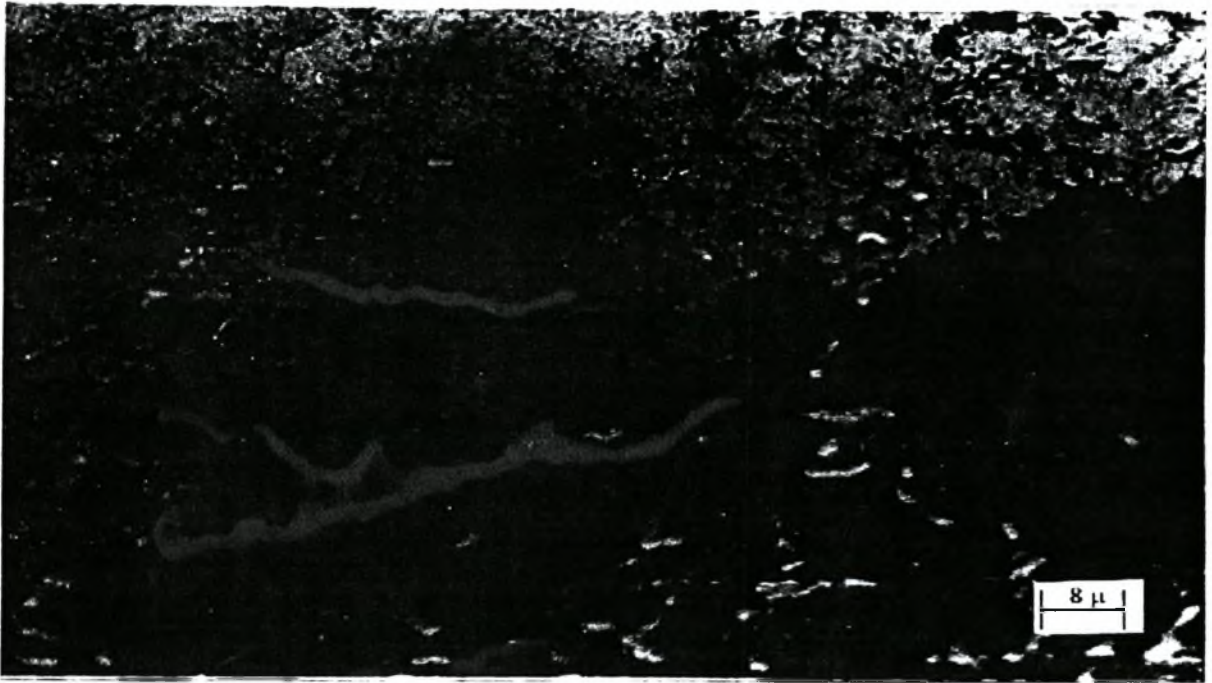
Σχήμα 1.2: Πυκνότητα ισχύος 76 W/mm^2 , ταχύτητα δέσμης 1.6 m/min . Η τήξη της επιφάνειας είναι εμφανής και στο δοκίμιο αυτό.



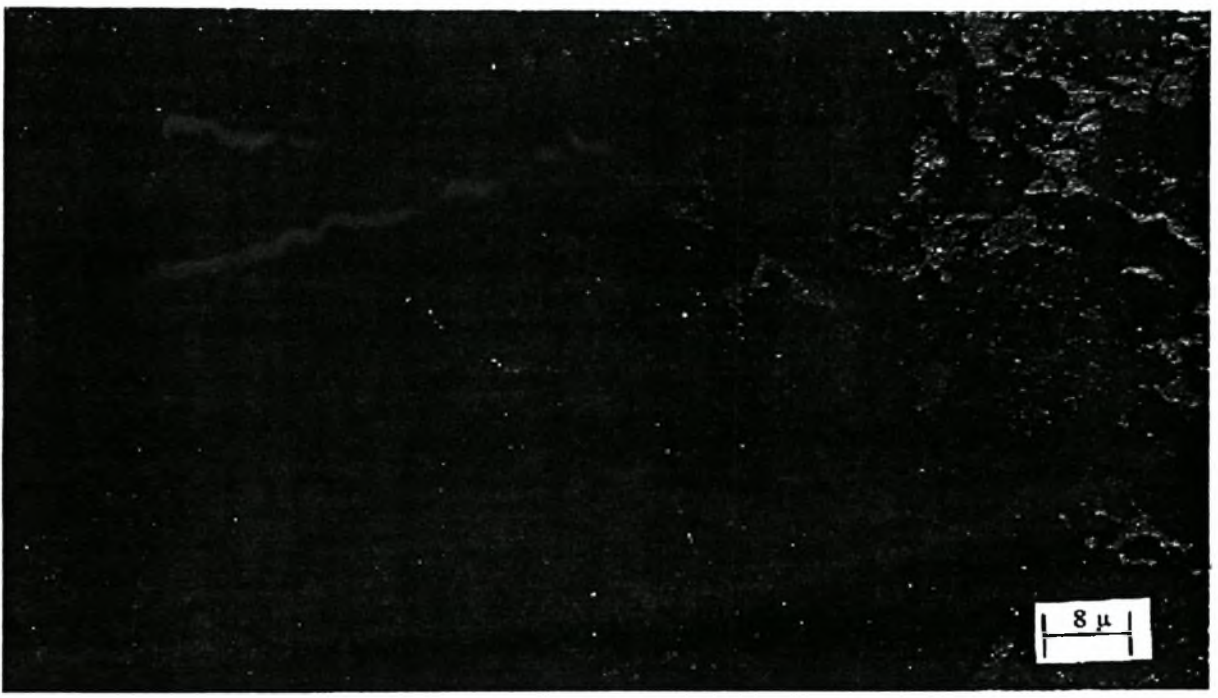
Σχήμα 1.3: Πυκνότητα ισχύος 76 W/mm^2 , ταχύτητα δέσμης 1.2 m/min . Και πάλι τήξη της επιφάνειας. Το επίπεδο σχήμα της επιφάνειας του υλικού έχει αισθητά αλλοιωθεί.



Σχήμα 1.4: Η μαρτενσιτική δομή της σκληρυμένης περιοχής.



Σχήμα 1.5: Η διεπιφάνεια μεταξύ της σκληρυμένης περιοχής (φωτεινή περιοχή) και του μετάλλου βάσης (σκούρα περιοχή). Μπορεί να διακριθεί ο φερρίτης που βρίσκεται από την πλευρά της σκληρυμένης περιοχής.

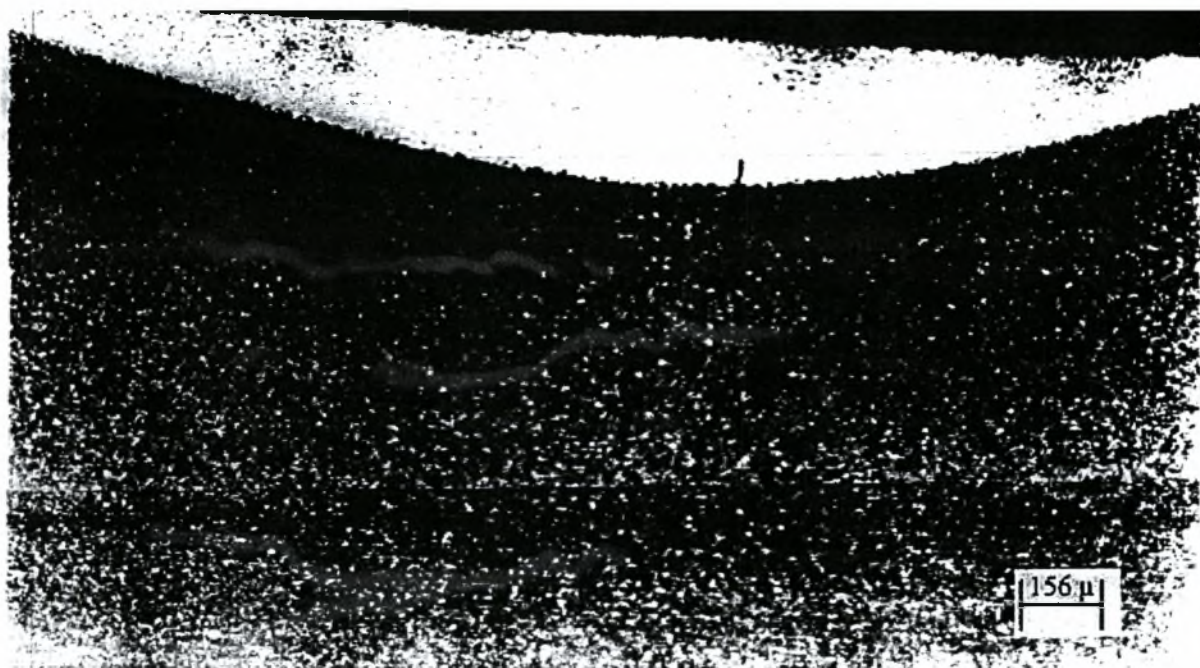


Σχήμα 1.6: Το μέταλλο βάσης παραμένει ανεπηρέαστο από την κατεργασία και αποτελείται από φερρίτη και περλίτη.

2) Ταχύτητα $u = 2$ m/min έως $u = 6$ m/min:

Σε αυτή την κατηγορία ταχυτήτων επιτεύχθηκε σχηματισμός σκληρυμένης (μαρτενσιτικής) περιοχής, χωρίς να προκληθεί τήξη στην επιφάνεια του υλικού. Η μεταλλογραφική εξέταση των δοκιμίων έδειξε τα εξής:

- i) Η σκληρυμένη ζώνη κάτω από την επιφάνεια έχει την χαρακτηριστική μορφή που φαίνεται στη φωτογραφία του σχήματος 1.7. Όπως προαναφέρθηκε η μορφή αυτή οφείλεται στην κατανομή Gauss που ακολουθεί η ισχύς της δέσμης LASER.
- ii) Παρατηρήθηκε και στα δοκίμια αυτά η ύπαρξη λεπτού στρώματος οξειδωμένου υλικού, το οποίο εκτείνεται σε βάθος $10\ \mu\text{m} - 15\ \mu\text{m}$ κάτω από την επιφάνεια.
- iii) Με τις συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στα δοκίμια αυτά δεν παρουσιάστηκε τήξη της επιφάνειας. Η επιφάνεια διατήρησε το επίπεδο σχήμα της, κάτι που μπορεί να φανεί και στη φωτογραφία του σχήματος 1.7.
- iv) Η σκληρυμένη ζώνη εκτείνεται σε βάθος από $80\ \mu\text{m}$, για το δοκίμιο που υποβλήθηκε στην κατεργασία με ταχύτητα $6\ \text{m/min}$, έως $500\ \mu\text{m}$, για το δοκίμιο που υποβλήθηκε στην κατεργασία με ταχύτητα $2\ \text{m/min}$. Η δομή της σκληρυμένης ζώνης αποτελείται από χονδρόκοκκο μαρτενσίτη, της μορφής δηλαδή που φαίνεται στην φωτογραφία του σχήματος 1.4.
- v) Στη διεπιφάνεια μεταξύ σκληρυμένης ζώνης και μετάλλου βάσης, προευτηκτοειδής φερρίτης έχει σχηματισθεί στα όρια των κόκκων του μαρτενσίτη.
- vi) Το μέταλλο βάσης διατηρεί την φερριτο-περλιτική δομή του.



Σχήμα 1.7: Η σκληρυμένη ζώνη κάτω από την επιφάνεια διακρίνεται καθαρά. Επίσης διακρίνεται ότι η επιφάνεια δεν έχει τηχθεί, διατηρώντας έτσι το επίπεδο σχήμα της.

3) Ταχύτητα $u \geq 7.2$ m/min:

Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν στην κατεργασία με τόσο μεγάλες ταχύτητες δεν παρουσίασαν καμμία σκλήρυνση. Το υλικό παρέμεινε στην μορφή που είχε και πριν υποβληθεί στην κατεργασία, δηλαδή αποτελείτο από φερρίτη και περλίτη.

Στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τόσο τα βάθη σκλήρυνσης, όσο και τα βάθη τήξης, για όλα τα δοκίμια της 1^{ης} σειράς των πειραμάτων.

Πίνακας 1.1: Τα βάθη σκλήρυνσης και τήξης για τα δοκίμια της 1^{ης} σειράς πειραμάτων
(Πυκνότητα ισχύος $Q = 76 \text{ W/mm}^2$).

Ισχύς $q=1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_b=2.5 \text{ mm}$, Πυκνότητα ισχύος $Q=76 \text{ W/mm}^2$			
Ταχύτητα [m/min]	Βάθος σκλήρυνσης z_h [μm]	Βάθος τήξης z_m [μm]	Σχόλια
1.2	800	180	Σκλήρυνση με τήξη στην επιφάνεια
1.6	770	απροσδιόριστο	
1.8	650	100	
2.0	500	0	Σκλήρυνση χωρίς τήξη στην επιφάνεια
2.4	400	0	
2.8	410	0	
3.0	380	0	
3.2	360	0	
3.6	250	0	
4.2	250	0	
4.6	250	0	
4.8	160	0	
5.4	170	0	
6.0	80	0	
7.2	0	0	Καμμία μεταβολή
8.4	0	0	

2^η Σειρά Πειραμάτων

Πυκνότητα Ισχύος $Q = 306 \text{ W/mm}^2$, Ισχύς $q = 1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_b = 1.25 \text{ mm}$

Βασικό χαρακτηριστικό των δοκιμών της δεύτερης σειράς πειραμάτων ήταν ότι όλα εμφάνισαν σκληρυμένη (μαρτενσιτική) περιοχή, συνοδευόμενη όμως από τήξη της επιφάνειας. Τα δοκίμια της σειράς αυτής υποβλήθηκαν στην κατεργασία με ένα εύρος ταχυτήτων από $u = 4 \text{ m/min}$ έως $u = 7.2 \text{ m/min}$. Η μεταλλογραφική εξέταση έδειξε τα εξής:

- i) Το σχήμα της σκληρυμένης περιοχής κάτω από την επιφάνεια του υλικού ήταν, όπως άλλωστε αναμενόταν, το χαρακτηριστικό σχήμα που προκύπτει λόγω της Gaussian κατανομής ισχύος της δέσμης LASER.
- ii) Ένα λεπτό στρώμα οξειδωμένου υλικού, πάχους περίπου $20 \mu\text{m}$, έχει δημιουργηθεί στην επιφάνεια.
- iii) Η επιφάνεια έχει υποστεί τήξη σε βάθος που κυμαίνεται από τα $15 \mu\text{m}$ έως τα $45 \mu\text{m}$, για τα δοκίμια που υποβλήθηκαν στην κατεργασία με ταχύτητες από 7.2 m/min έως 4 m/min αντιστοίχως.
- iv) Η σκληρυμένη περιοχή αποτελείται από χονδρόκοκκο μαρτενσίτη. Το βάθος της κυμαίνεται από τα $230 \mu\text{m}$, για το δοκίμιο που υποβλήθηκε στην κατεργασία με ταχύτητα 7.2 m/min , έως τα $350 \mu\text{m}$, για το δοκίμιο που υποβλήθηκε στην κατεργασία με ταχύτητα 4 m/min .
- v) Και πάλι η περιοχή κοντά στη διεπιφάνεια αποτελείται τόσο από μαρτενσίτη όσο και από προευτηκτοειδή φερρίτη. Η ποσότητα του φερρίτη όμως είναι πιο περιορισμένη από ότι στα δοκίμια της 1^{ης} σειράς.
- vi) Το μέταλλο βάσης δεν παρουσιάζει καμμία μεταβολή, διατηρώντας έτσι την φερριτο-περλιτική του δομή.

Στον πίνακα 1.2 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα βάθη σκλήρυνσης και τα βάθη τήξης, για όλα τα δοκίμια της 2^{ης} σειράς των πειραμάτων.

Πίνακας 1.2: Τα βάθη σκλήρυνσης και τήξης για τα δοκίμια της 2^{ης} σειράς πειραμάτων (Πυκνότητα ισχύος $Q = 306 \text{ W/mm}^2$).

Ισχύς $q=1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_b=1.25 \text{ mm}$, Πυκνότητα ισχύος $Q=306 \text{ W/mm}^2$			
Ταχύτητα [m/min]	Βάθος σκλήρυνσης z_h [μm]	Βάθος τήξης z_m [μm]	Σχόλια
4.0	350	45	Σκλήρυνση με τήξη στην επιφάνεια
4.8	300	25	
6.0	280	20	
6.4	260	20	
7.2	230	15	

3^η Σειρά Πειραμάτων

Πυκνότητα Ισχύος $Q = 19 \text{ W/mm}^2$, Ισχύς $q = 1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_b = 5 \text{ mm}$

Σε όλα τα δοκίμια της σειράς αυτής υπάρχει σκληρυμένη (μαρτενσιτική) περιοχή, χωρίς τήξη στην επιφάνεια. Τα χαρακτηριστικά της σειράς αυτής, από πλευράς μικροδομής, ήταν δύο. Πρώτον, ο μαρτενσίτης της σκληρυμένης περιοχής είχε υποστεί αυτοεπαναφορά (autotempering), ειδικά στα δοκίμια που κατεργάστηκαν με ταχύτητες από 1.5 m/min έως 1.8 m/min. Δεύτερον, η ύπαρξη προευθηκτοειδούς φερρίτη ήταν αρκετά εκτεταμένη μέσα στην σκληρυμένη περιοχή. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν στην 3^η σειρά πειραμάτων κυμάνθηκαν από τα 1 m/min έως τα 1.8 m/min. Η μεταλλογραφική εξέταση έδειξε τα παρακάτω:

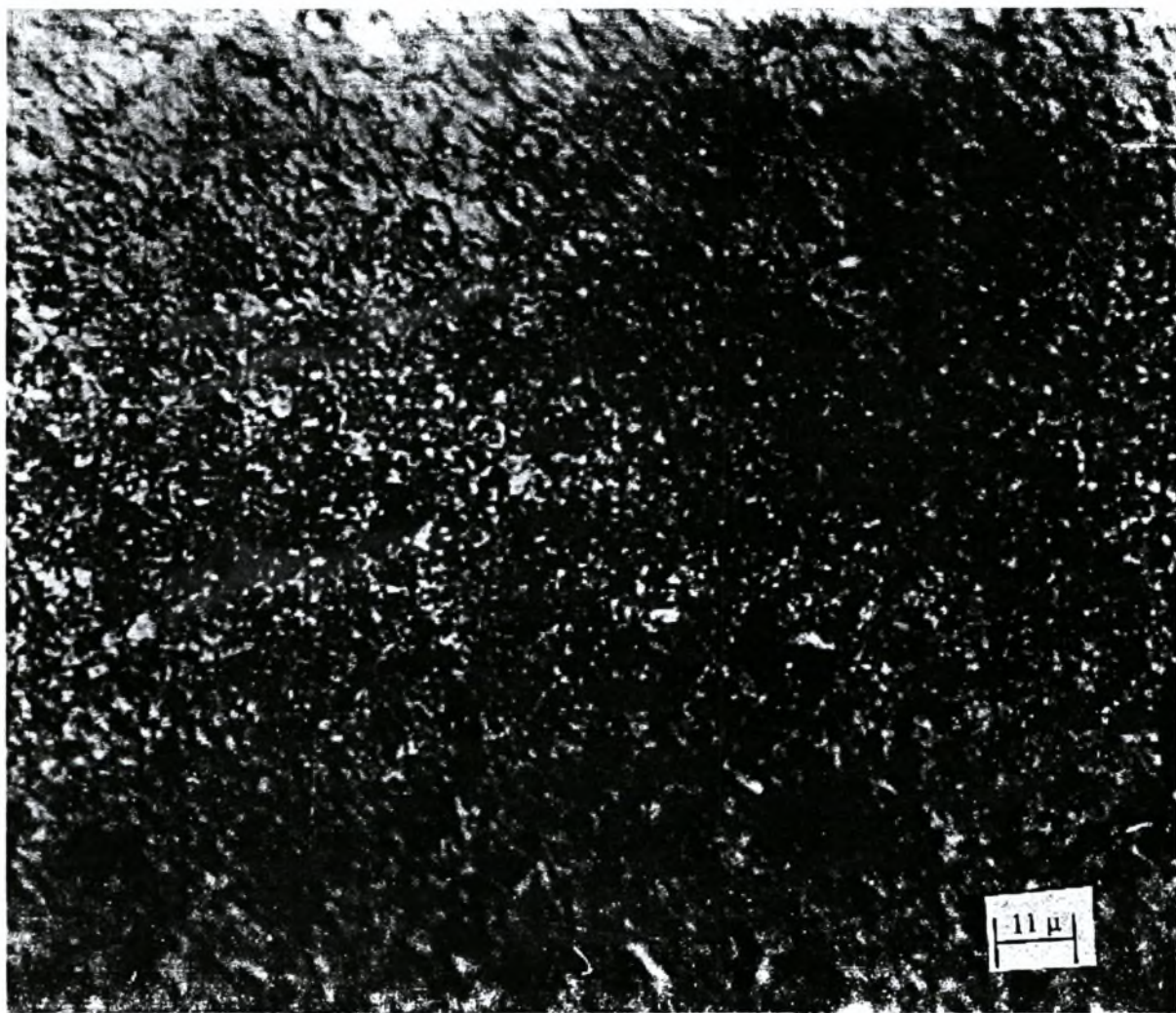
- i) Η σκληρυμένη περιοχή έχει το σχήμα που αναφέρθηκε και στις προηγούμενες σειρές πειραμάτων και τό οποίο οφείλεται στην Gaussian κατανομή ισχύος της δέσμης.
- ii) Η ζώνη οξείδωσης υπάρχει και στα δοκίμια της σειράς αυτής, με πάχος περίπου 20 μm με 25 μm.
- iii) Σε κανένα από τα δοκίμια δεν έχει παρουσιασθεί τήξη στην επιφάνεια.
- iv) Η σκληρυμένη περιοχή αποτελείται από λεπτόκοκκο μαρτενσίτη, ο οποίος έχει υποστεί αυτοεπαναφορά. Η μαρτενσιτική δομή της σκληρυμένης περιοχής φαίνεται στην φωτογραφία

του σχήματος 1.8. Τα βάθη μέχρι τα οποία φθάνει η σκληρυμένη περιοχή κυμαίνονται από 170 μm , για το δοκίμιο που υποβλήθηκε στην κατεργασία με ταχύτητα 1.8 m/min, έως 570 μm , για το δοκίμιο που υποβλήθηκε στην κατεργασία με ταχύτητα 1 m/min.

v) Η ύπαρξη προευνθηκτοειδούς φερρίτη είναι εντονότερη και επεκτείνεται και σε περιοχές αρκετά πιο ψηλά από την διεπιφάνεια.

vi) Όπως και σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, το μέταλλο βάσης δεν έχει επηρεασθεί καθόλου. Έτσι η δομή του παραμένει φερριτο-περλιτική.

Στον πίνακα 1.3 παρουσιάζονται αναλυτικά τα βάθη σκλήρυνσης και τα βάθη τήξης, για όλα τα δοκίμια της 3^{ης} σειράς των πειραμάτων.



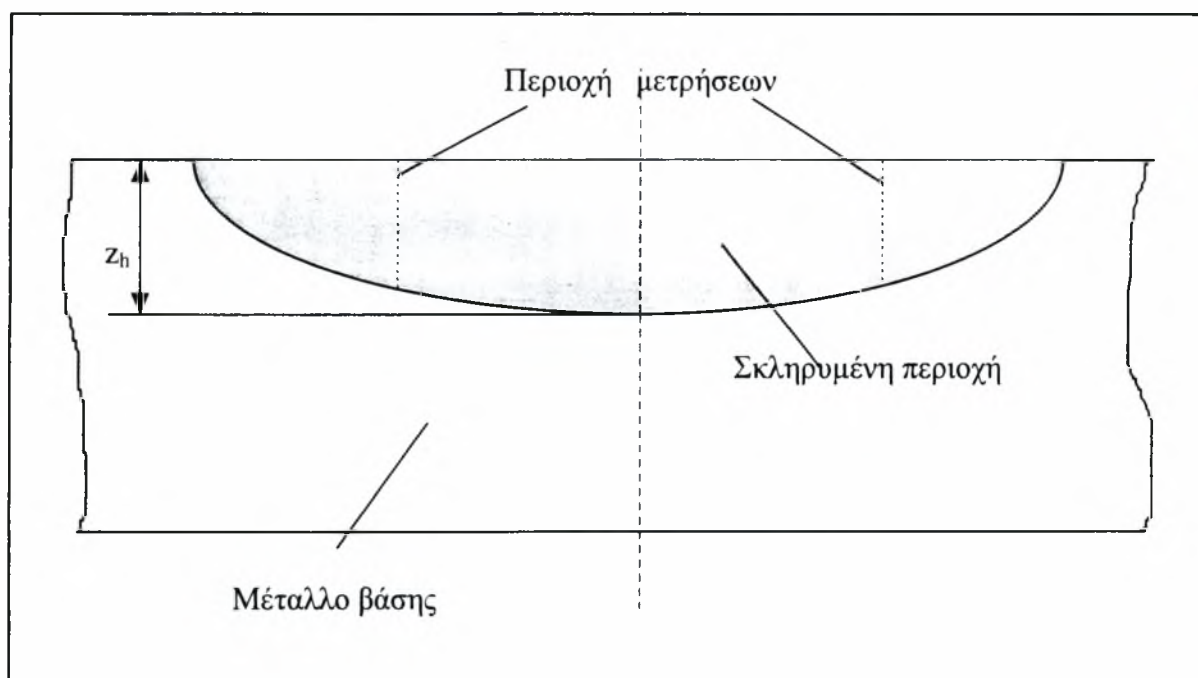
Σχήμα 1.8: Ο μαρτενσίτης έχει υποστεί αυτοεπαναφορά (autotempering). Πυκνότητα ισχύος $Q = 19 \text{ W/mm}^2$, ταχύτητα 1.2 m/min.

Πίνακας 1.3: Τα βάθη σκλήρυνσης και τήξης για τα δοκίμια της 3^{ης} σειράς πειραμάτων
(Πυκνότητα ισχύος $Q = 19 \text{ W/mm}^2$).

Ισχύς $q=1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_b=5 \text{ mm}$, Πυκνότητα ισχύος $Q=19 \text{ W/mm}^2$			
Ταχύτητα [m/min]	Βάθος σκλήρυνσης z_b [μm]	Βάθος τήξης z_m [μm]	Σχόλια
1.0	570	0	Καθόλου τήξη. Auto- tempered μαρτενσίτης.
1.2	390	0	
1.5	270	0	
1.6	220	0	
1.8	170	0	

2. ΕΞΕΤΑΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Σε όλα τα δοκίμια του υλικού, που υποβλήθηκαν στην κατεργασία της επιφανειακής σκλήρυνσης με δέσμη LASER, μετρήθηκε η μικροσκληρότητα σαν συνάρτηση του βάθους κάτω από την επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό προέκυψαν τα προφίλ σκληρότητας για ολόκληρο το φάσμα των συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε για τις μικροσκληρομετρήσεις ήταν 200 gr. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι η διαδικασία μέτρησης της σκληρότητας ήταν αρκετά δύσκολη και επίπονη. Και αυτό λόγω του μικρού μεγέθους της σκληρυμένης περιοχής των δοκιμίων. Έγινε πάντως προσπάθεια οι μετρήσεις να λαμβάνονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς το κέντρο της σκληρυμένης περιοχής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1: Η περιοχή μικροσκληρομετρήσεων έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί όσο πιο κοντά στο κέντρο της σκληρυμένης περιοχής, δηλαδή στον άξονα της δέσμης LASER.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται, για κάθε μία από τις σειρές πειραμάτων και για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων και τα προφίλ σκληρότητας.

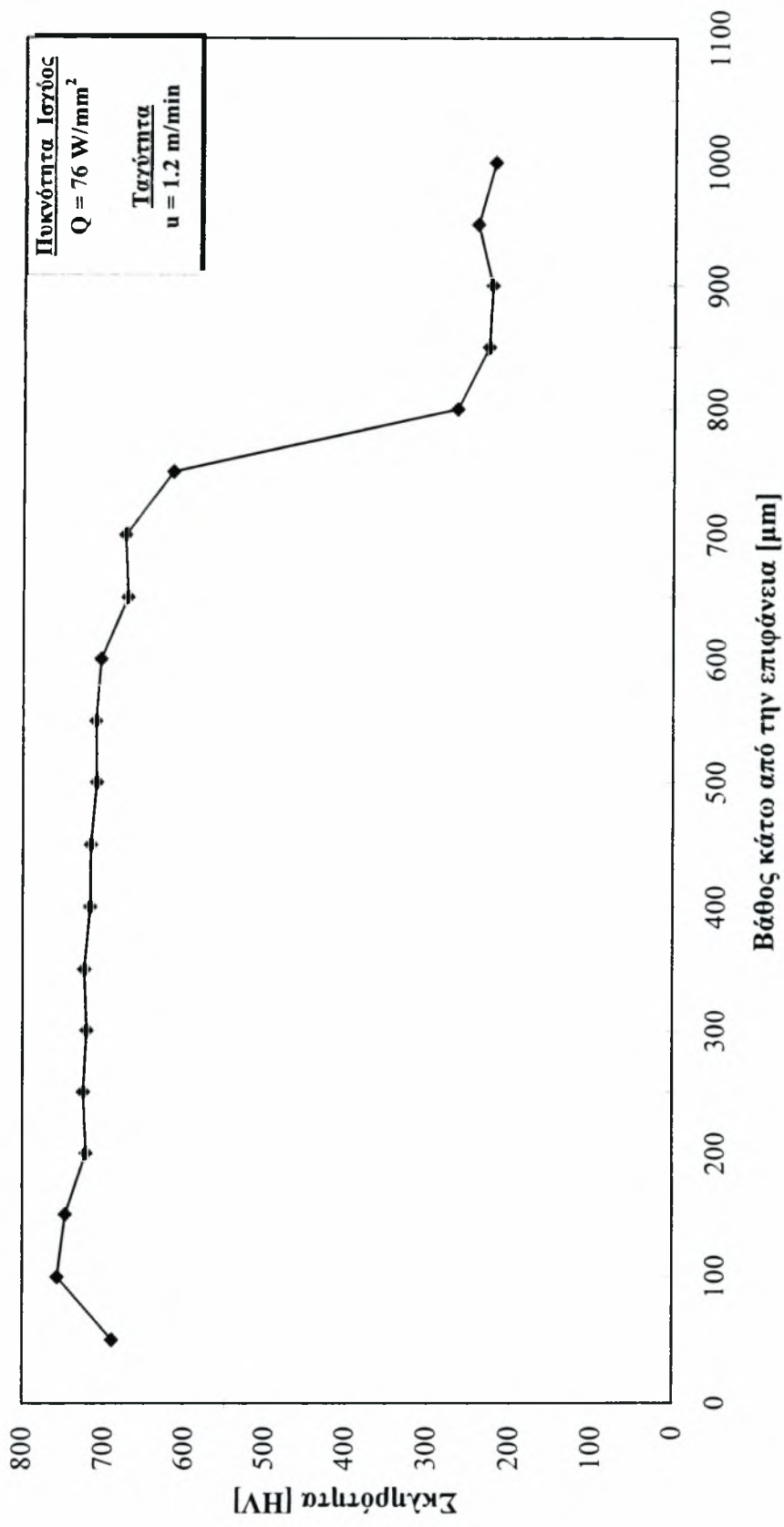
1^η Σειρά Πειραμάτων

Πυκνότητα Ισχύος $Q = 76 \text{ W/mm}^2$, Ισχύς $q = 1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_b = 2.5 \text{ mm}$

1) Ταχύτητα $u = 1.2 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	690
100	757
150	747
200	722
250	725
300	721
350	724
400	717
450	716
500	709
550	710
600	704
650	671
700	674
750	615
800	266
850	228
900	224
950	242
1000	221

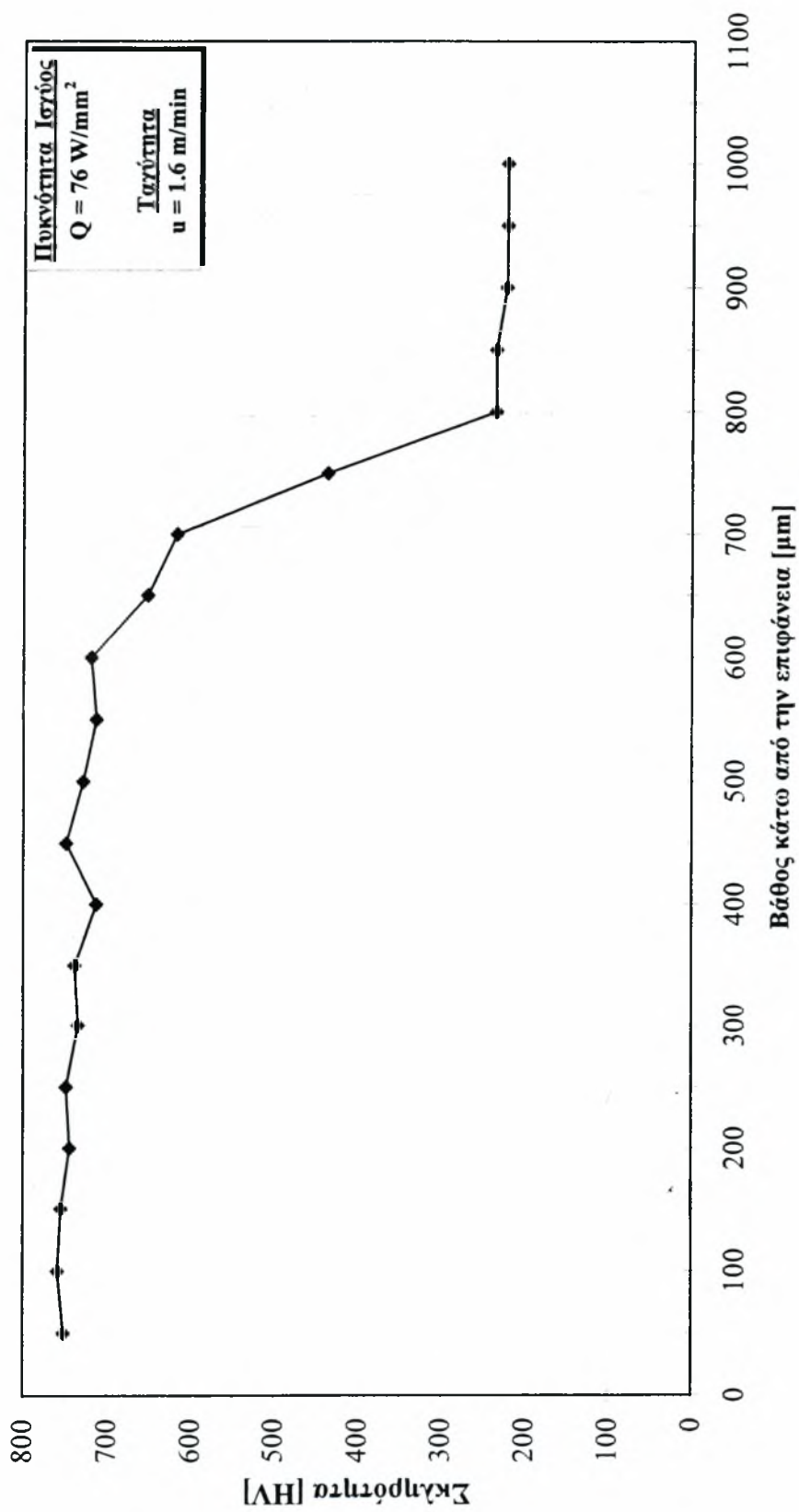
Στο σχήμα 2.2 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας του δοκιμίου.



2) Ταχύτητα $u = 1.6 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	752
100	759
150	755
200	745
250	749
300	735
350	739
400	713
450	749
500	729
550	713
600	719
650	652
700	617
750	436
800	235
850	235
900	223
950	222
1000	222

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας για αυτό το δοκίμιο.

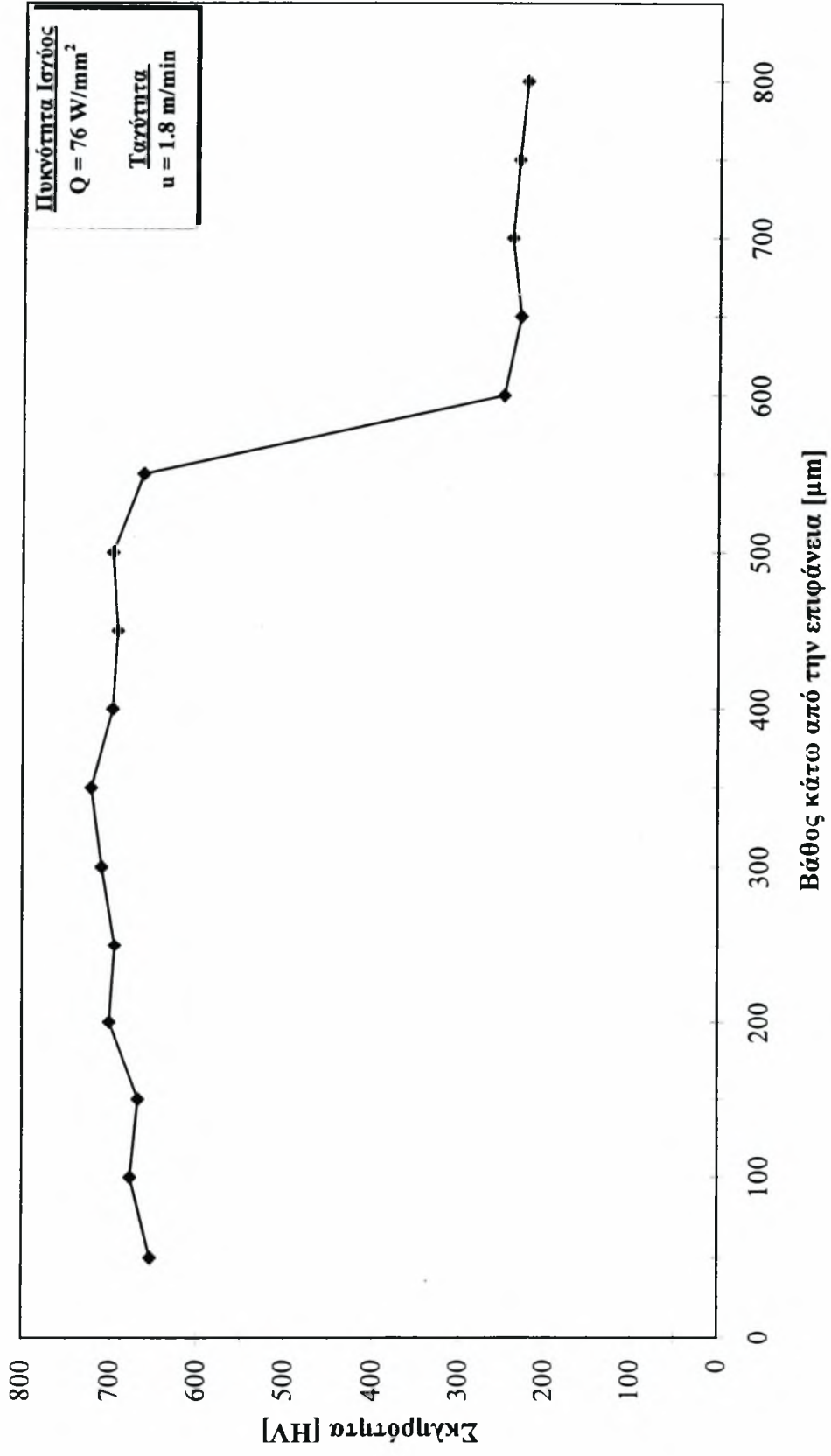


Σχήμα 2.3: Το προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 1.6 \text{ m/min}$.

3) Ταχύτητα $u = 1.8 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	654
100	677
150	668
200	701
250	695
300	710
350	722
400	698
450	692
500	698
550	663
600	248
650	229
700	239
750	231
800	222

Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται το προφίλ σκληρότητας για τις συνθήκες αυτές.

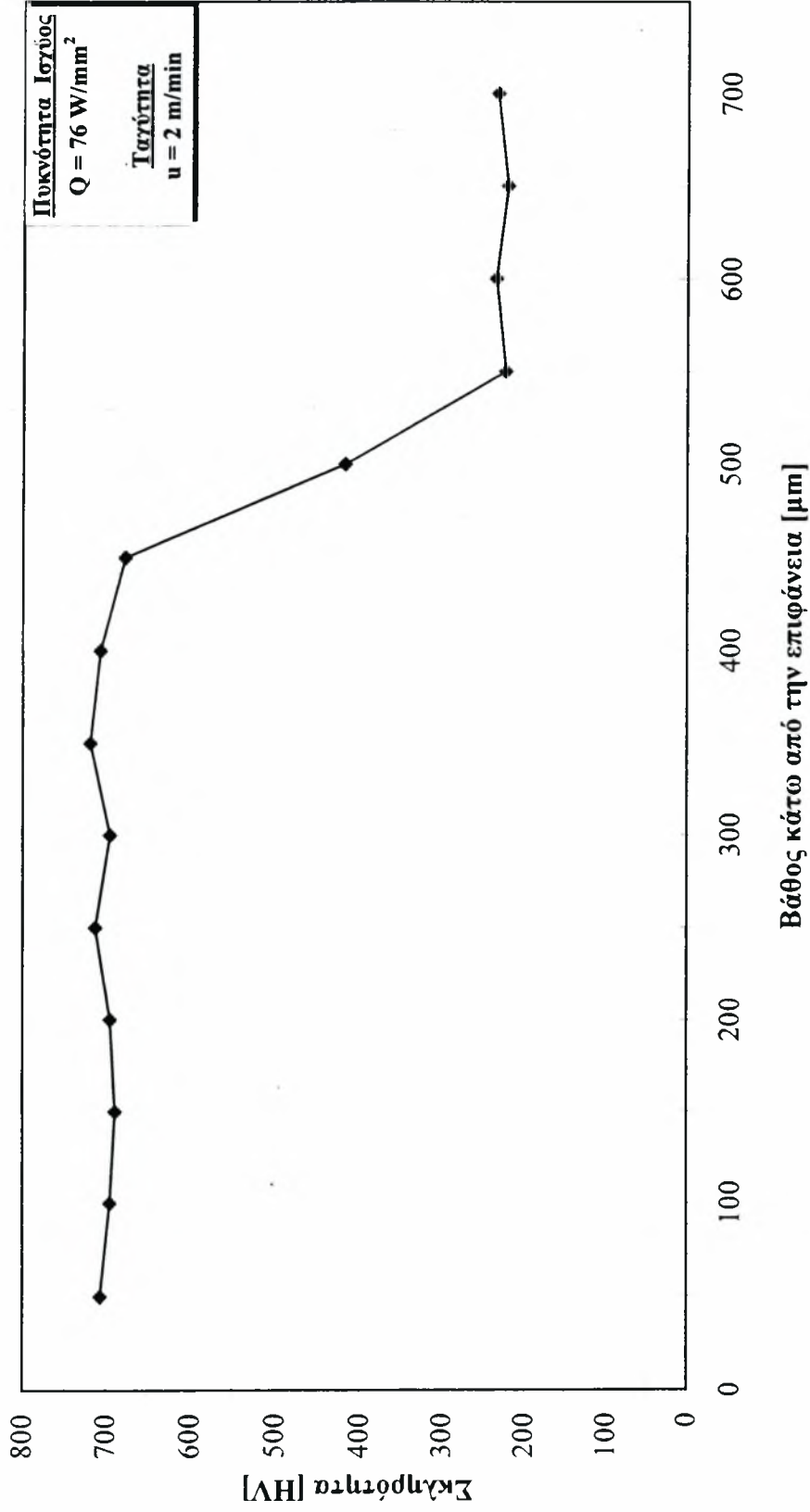


Σχήμα 2.4: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 1.8 \text{ m/min}$.

4) Ταχύτητα $u = 2 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	707
100	695
150	689
200	695
250	713
300	695
350	719
400	707
450	677
500	416
550	222
600	234
650	220
700	232

Στο σχήμα 2.5 εμφανίζεται το προφίλ σκληρότητας που αντιστοιχεί στις συνθήκες αυτές.

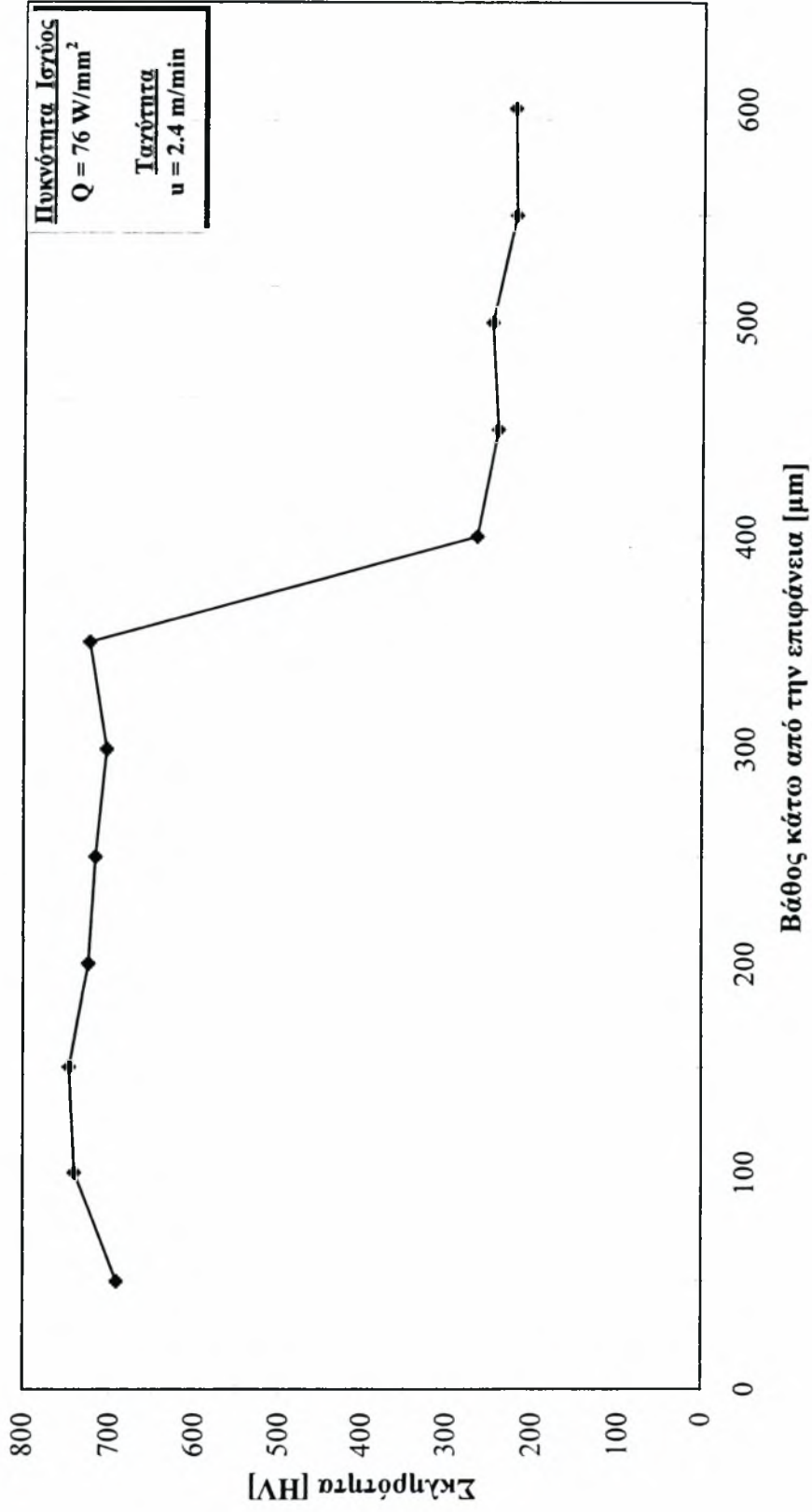


Σχήμα 2.5: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 2 \text{ m/min}$.

5) Ταχύτητα $u = 2.4 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	692
100	741
150	747
200	725
250	717
300	704
350	724
400	265
450	241
500	248
550	220
600	222

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται το προφίλ σκληρότητας για το δοκίμιο αυτό.

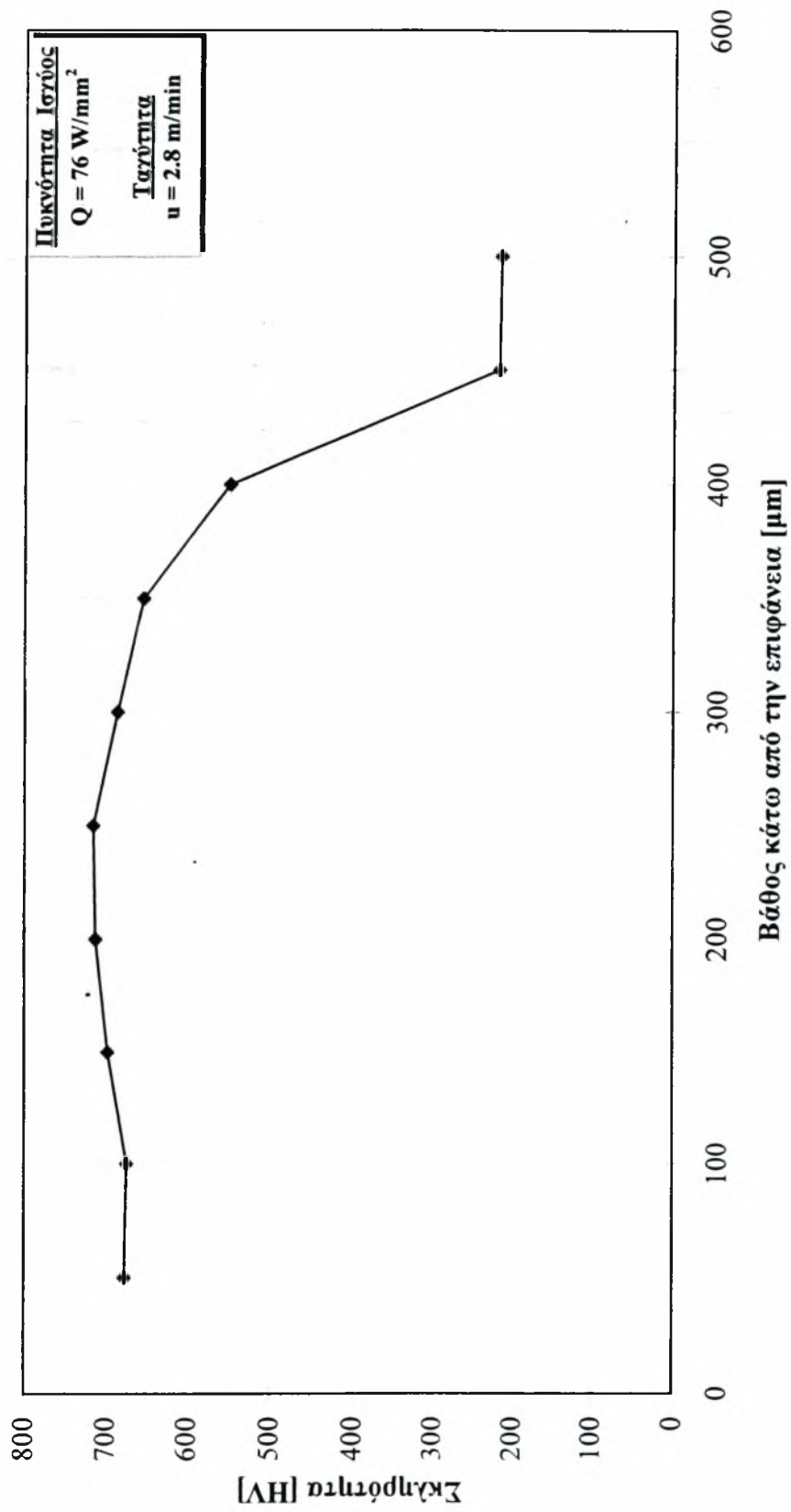


Σχήμα 2.6: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 2.4 \text{ m/min}$.

6) Ταχύτητα $u = 2.8 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	677
100	674
150	698
200	713
250	716
300	686
350	654
400	548
450	216
500	214

Στο σχήμα 2.7 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας για το δοκίμιο αυτό.

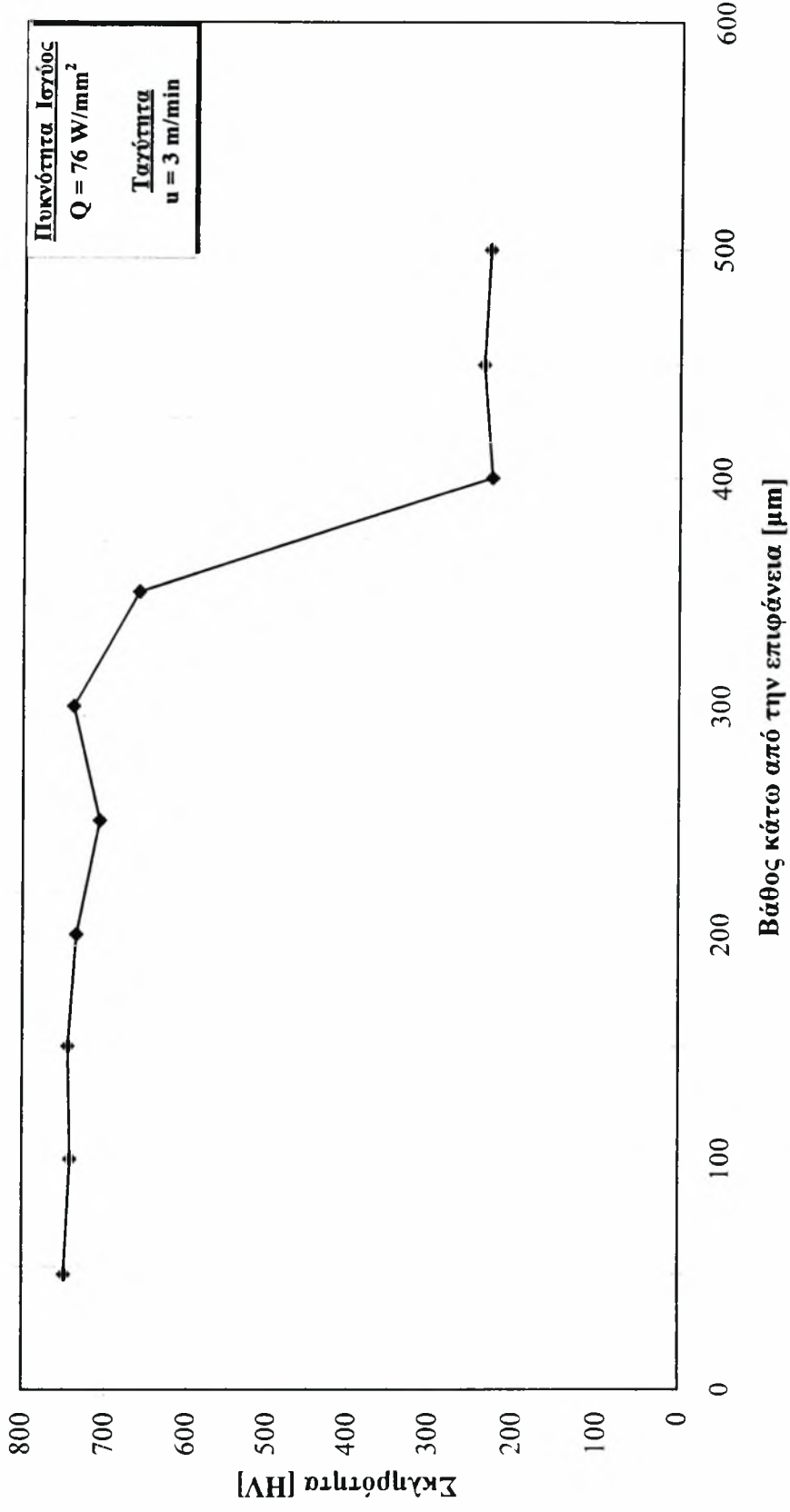


Σχήμα 2.7: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 2.8 \text{ m/min}$.

7) Ταχύτητα $u = 3 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	749
100	742
150	745
200	735
250	707
300	739
350	660
400	226
450	236
500	229

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το προφίλ σκληρότητας του δοκιμίου.



Σχήμα 2.8: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 3 \text{ m/min}$.

8) Ταχύτητα $u = 3.2 \text{ m/min}$

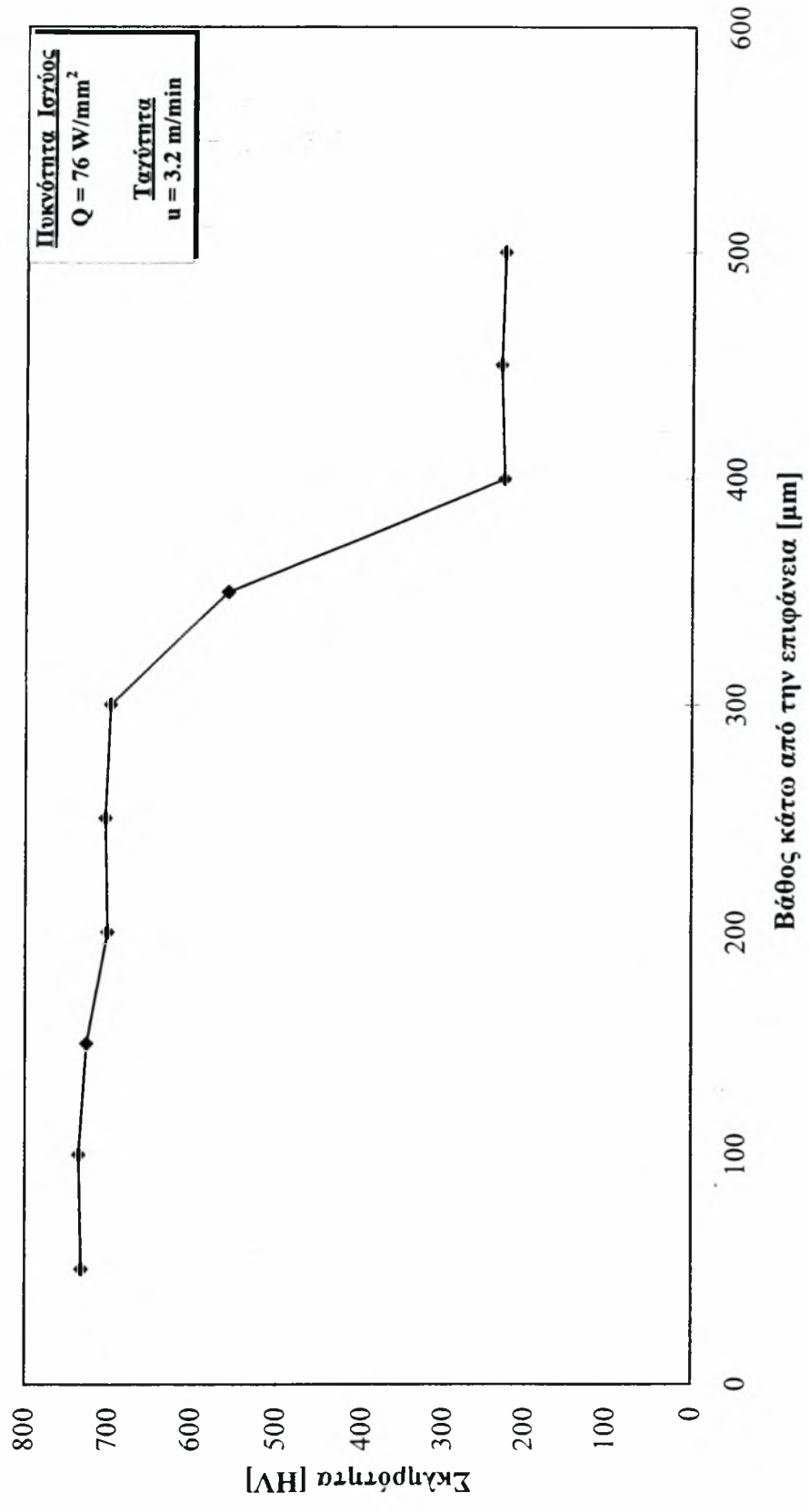
Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	732
100	735
150	726
200	701
250	704
300	698
350	557
400	226
450	230
500	226

Στο σχήμα 2.9 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας για τις συνθήκες αυτές.

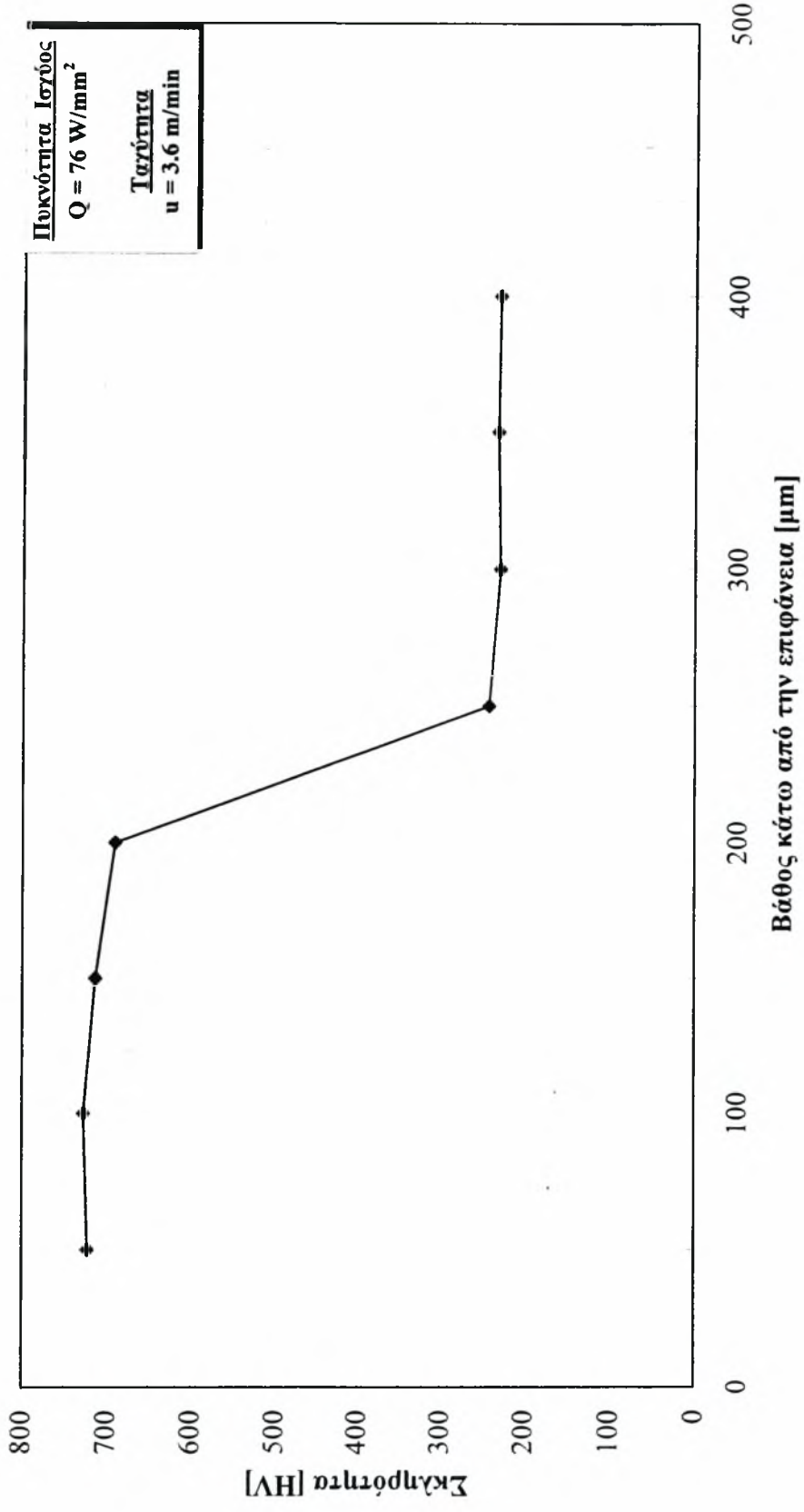
9) Ταχύτητα $u = 3.6 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	722
100	727
150	713
200	690
250	243
300	230
350	233
400	231

Το προφίλ σκληρότητας του δοκιμίου αυτού παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.9: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 3.2 \text{ m/min}$.



Σχήμα 2.10: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 3.6 \text{ m/min}$.

10) Ταχύτητα $u = 4.2 \text{ m/min}$

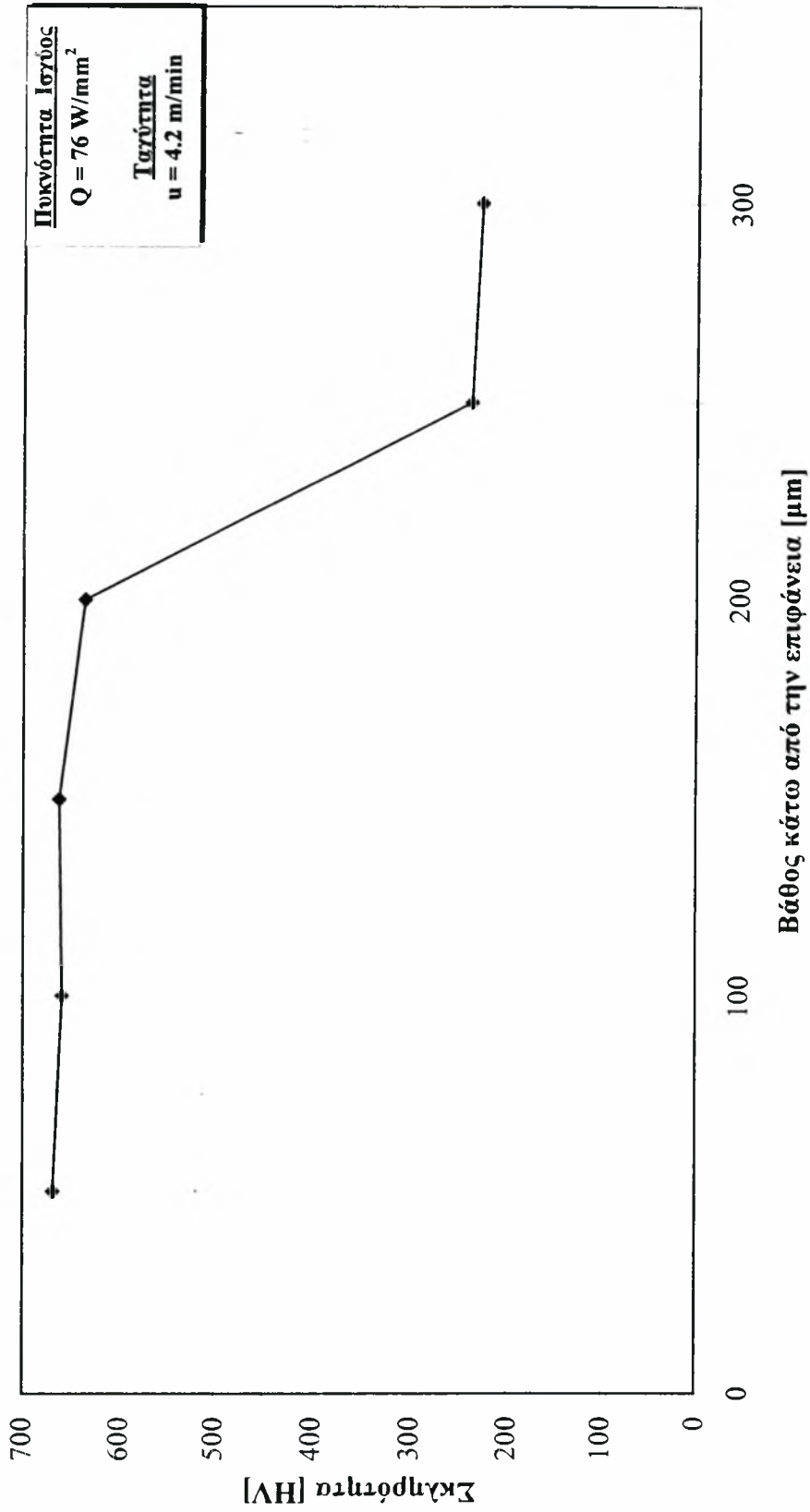
Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	669
100	660
150	663
200	637
250	237
300	227

Στο σχήμα 2.11 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας για τις συνθήκες αυτές.

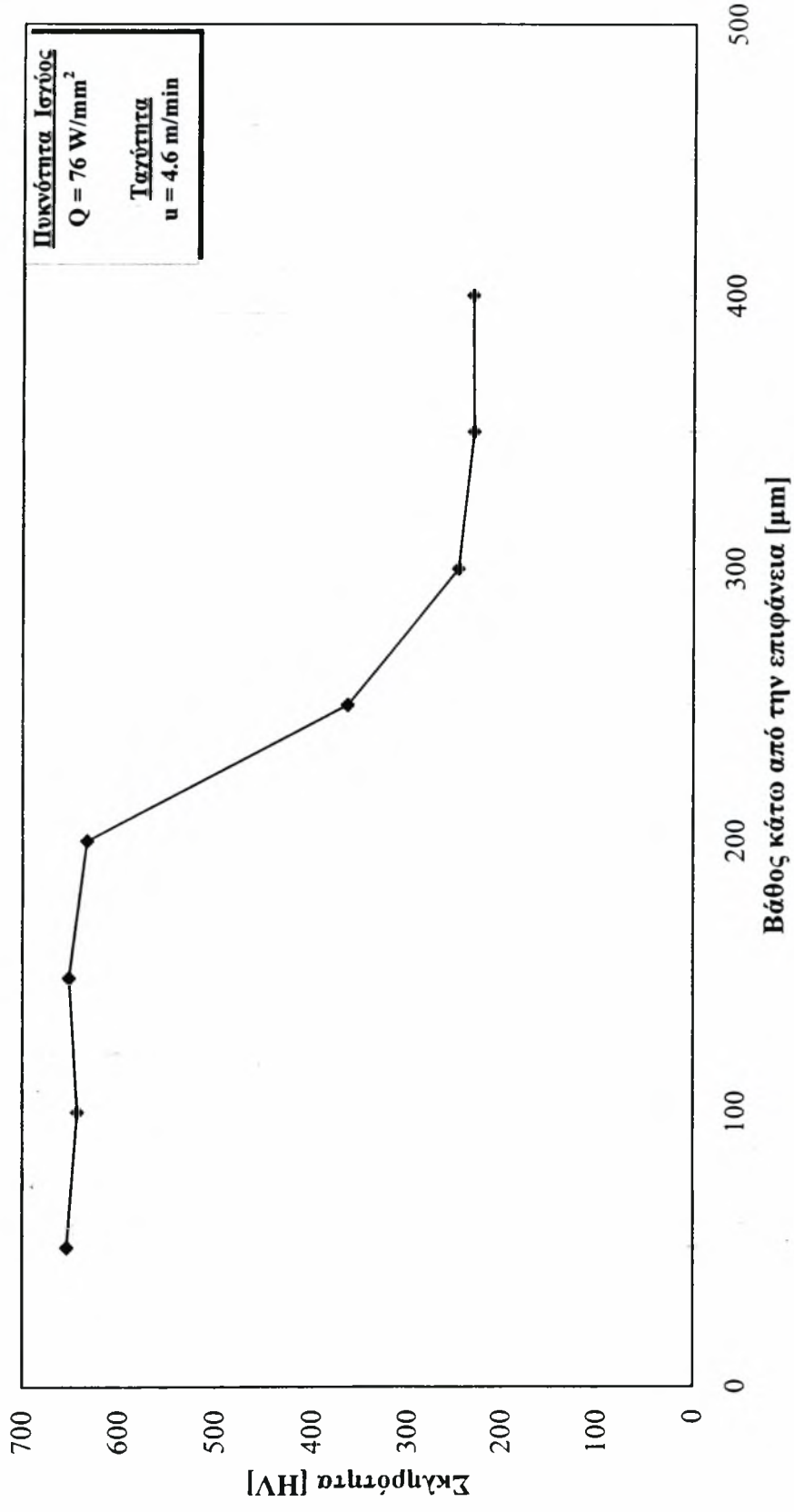
11) Ταχύτητα $u = 4.6 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	654
100	643
150	652
200	633
250	363
300	246
350	230
400	231

Στο σχήμα 2.12 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας του δοκιμίου.



Σχήμα 2.11: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 4.2 \text{ m/min}$.



Σχήμα 2.12: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 4.6 \text{ m/min}$.

12) Ταχύτητα $u = 4.8 \text{ m/min}$

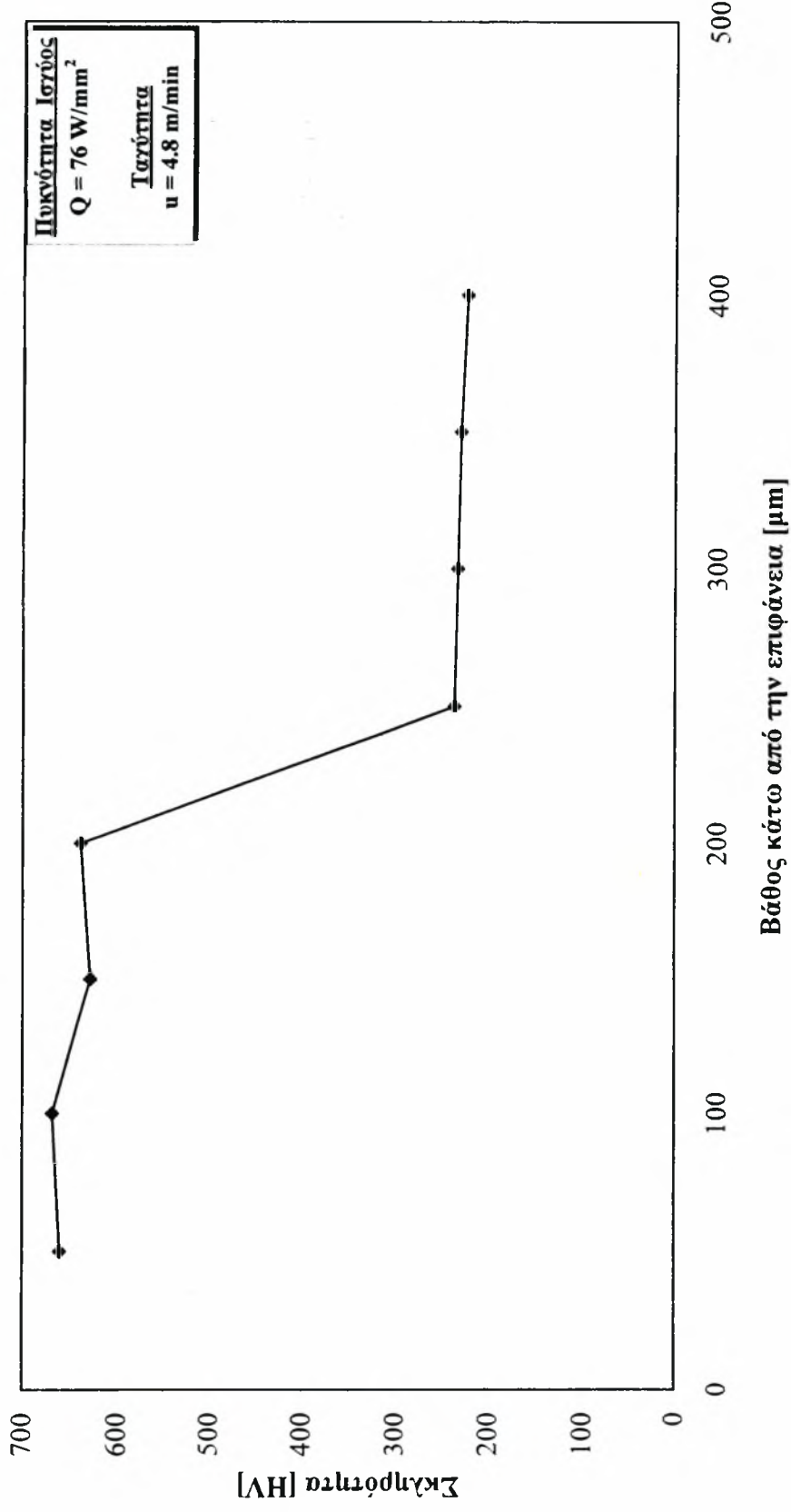
Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	660
100	668
150	628
200	638
250	237
300	234
350	231
400	224

Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζεται το προφίλ σκληρότητας του δοκιμίου.

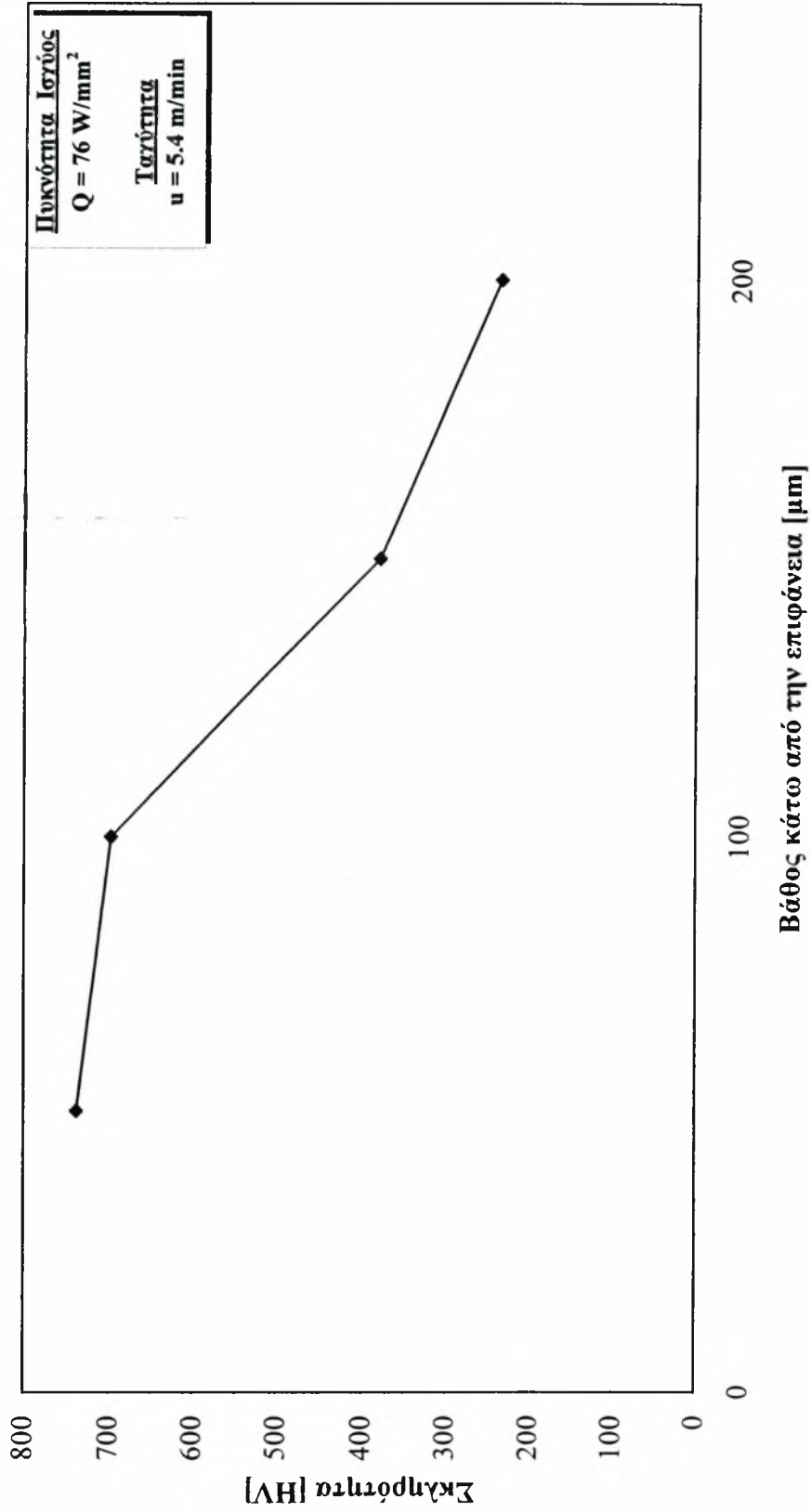
13) Ταχύτητα $u = 5.4 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	738
100	698
150	379
200	234

Το προφίλ σκληρότητας για τις συνθήκες αυτές φαίνεται στο σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.13: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 4.8 \text{ m/min}$.



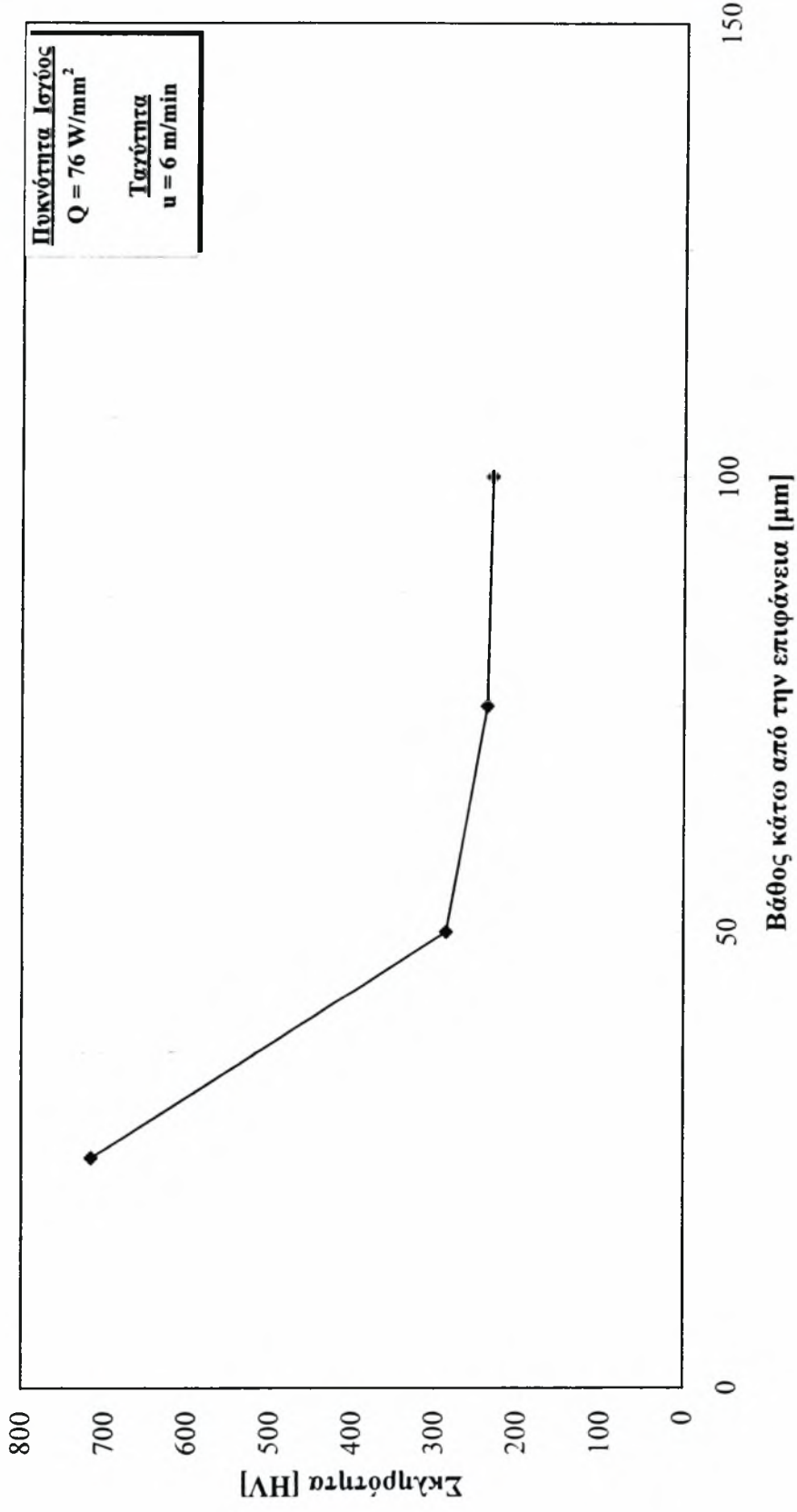
Σχήμα 2.14: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 5.4 \text{ m/min}$.

14) Ταχύτητα $u = 6 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
25	716
50	286
75	236

Για το δοκίμιο αυτό το προφίλ σκληρότητας φαίνεται στο σχήμα 2.15.

Τα δοκίμια που υπεβλήθησαν στην κατεργασία με ταχύτητες 7.2 και 8.4 δεν παρουσίασαν καθόλου αύξηση της σκληρότητας. Για το λόγο αυτό δεν κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιασθούν προφίλ σκληρότητας των δύο αυτών δοκιμίων.



Σχήμα 2.15: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 76 \text{ W/mm}^2$ και $u = 6 \text{ m/min}$.

2^η Σειρά Πειραμάτων

Πυκνότητα Ισχύος $Q = 306 \text{ W/mm}^2$, Ισχύς $a = 1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_h = 1.25 \text{ mm}$

1) Ταχύτητα $u = 4 \text{ m/min}$

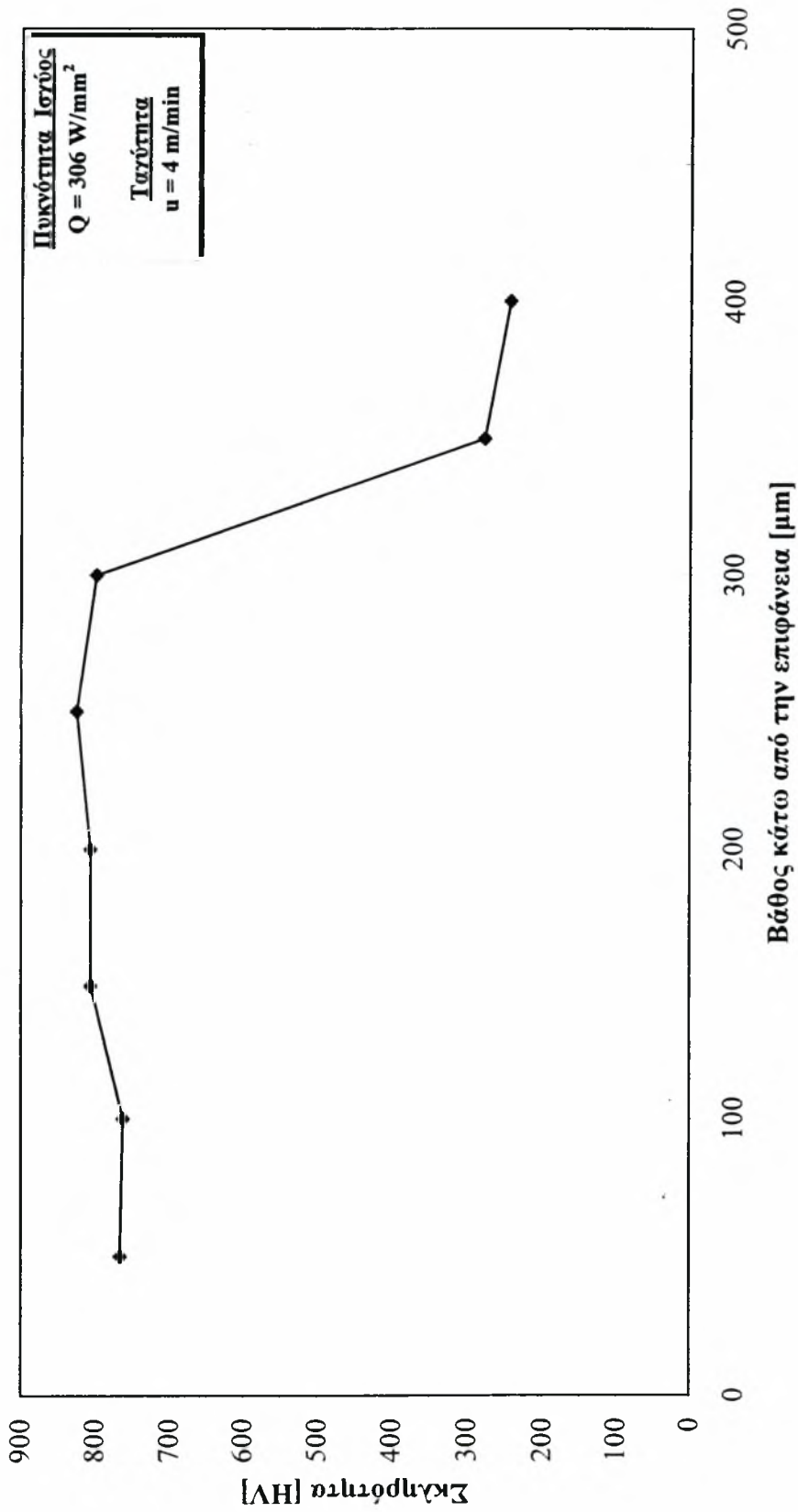
Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	766
100	762
150	806
200	806
250	825
300	798
350	277
400	243

Στο σχήμα 2.16 παρουσιάζεται το προφίλ σκληρότητας για τις συνθήκες αυτές.

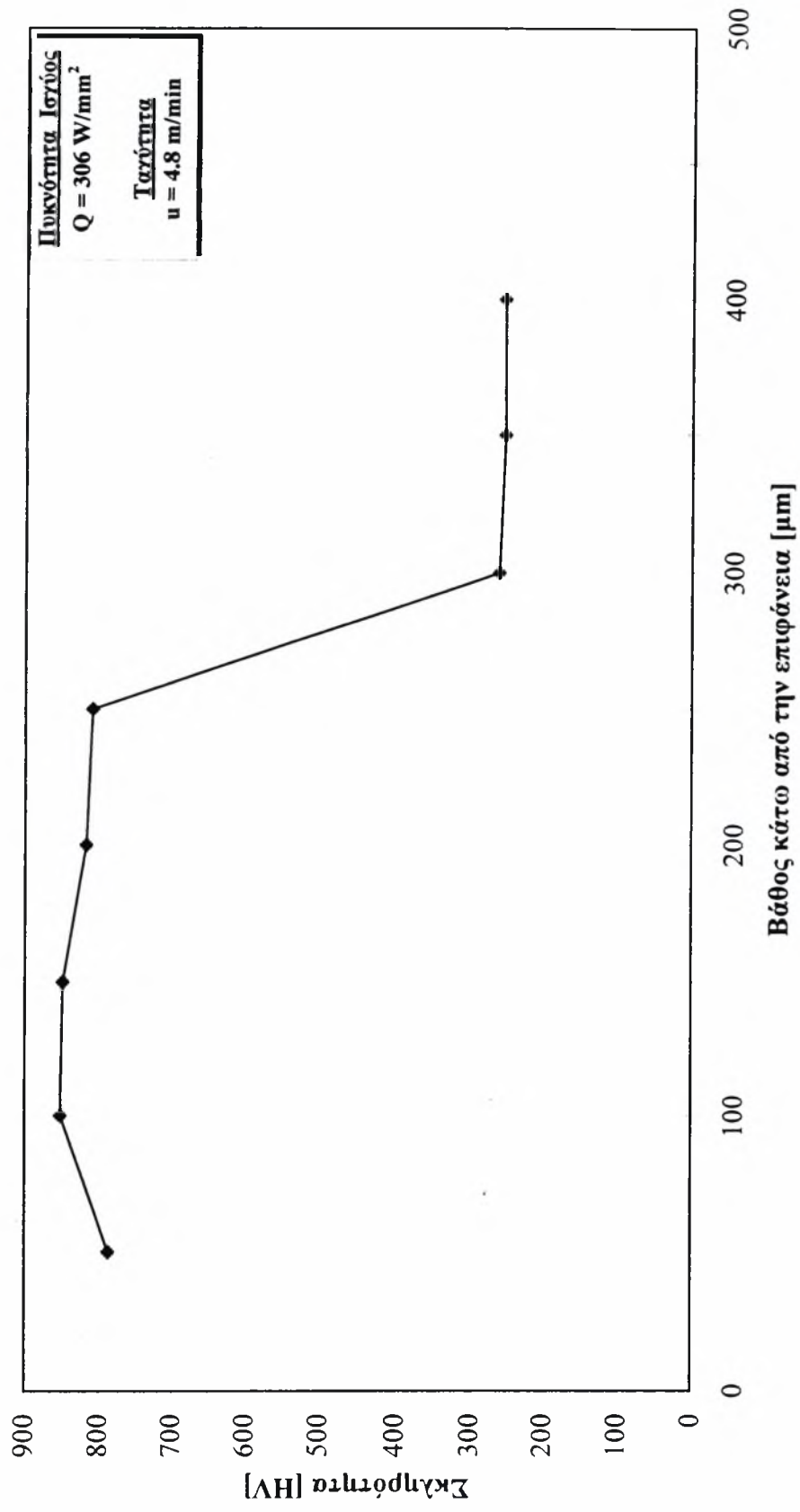
2) Ταχύτητα $u = 4.8 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	787
100	852
150	849
200	817
250	809
300	261
350	253
400	254

Στο σχήμα 2.17 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας για το δοκίμιο αυτό.



Σχήμα 2.16: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 306 \text{ W/mm}^2$ και $u = 4 \text{ m/min}$.



Σχήμα 2.17: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 306 \text{ W/mm}^2$ και $u = 4.8 \text{ m/min}$.

3) Ταχύτητα $u = 6 \text{ m/min}$

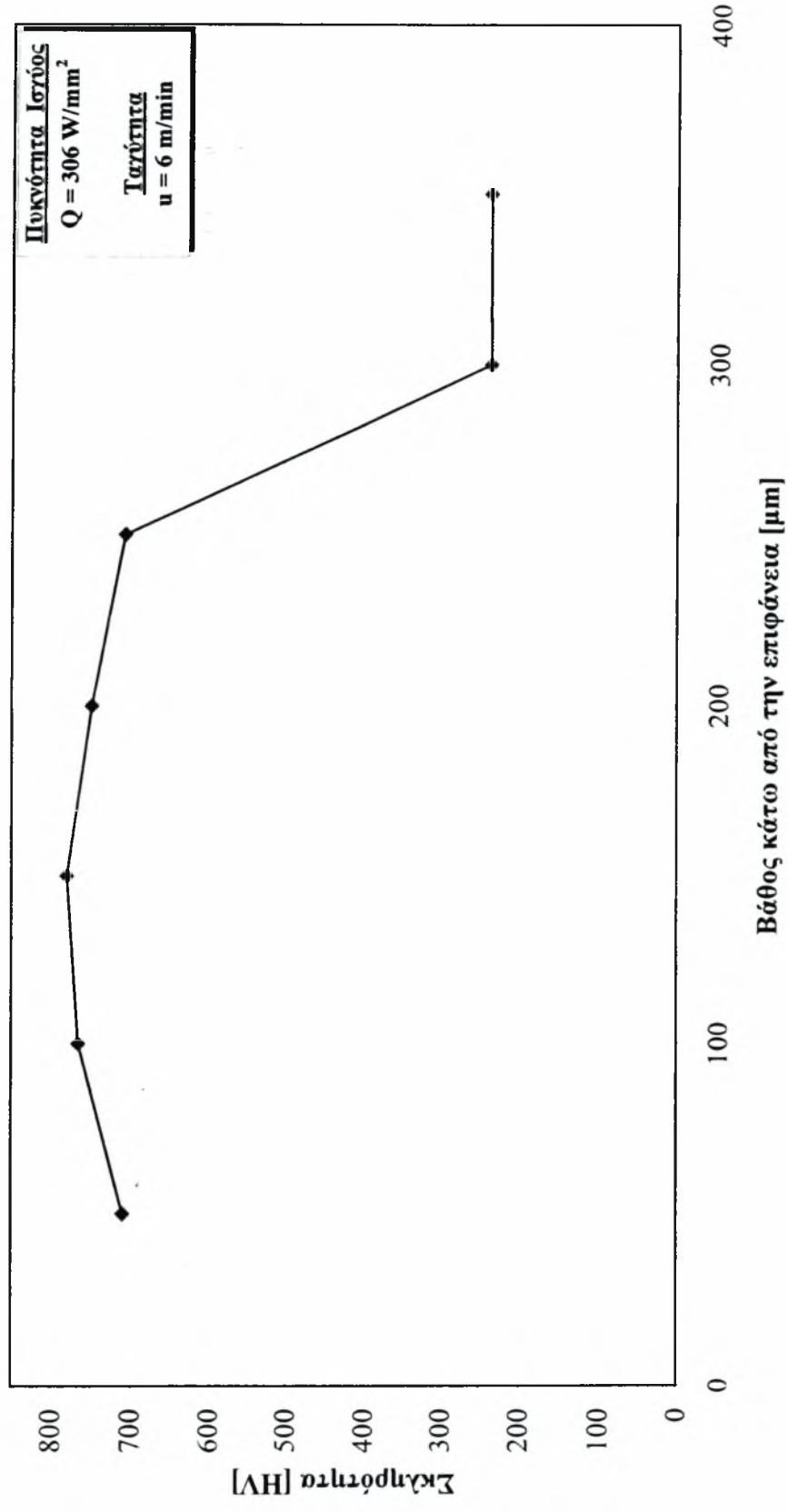
Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	710
100	766
150	780
200	749
250	707
300	237
350	238

Στο σχήμα 2.18 παρουσιάζεται το προφίλ σκληρότητας του δοκιμίου.

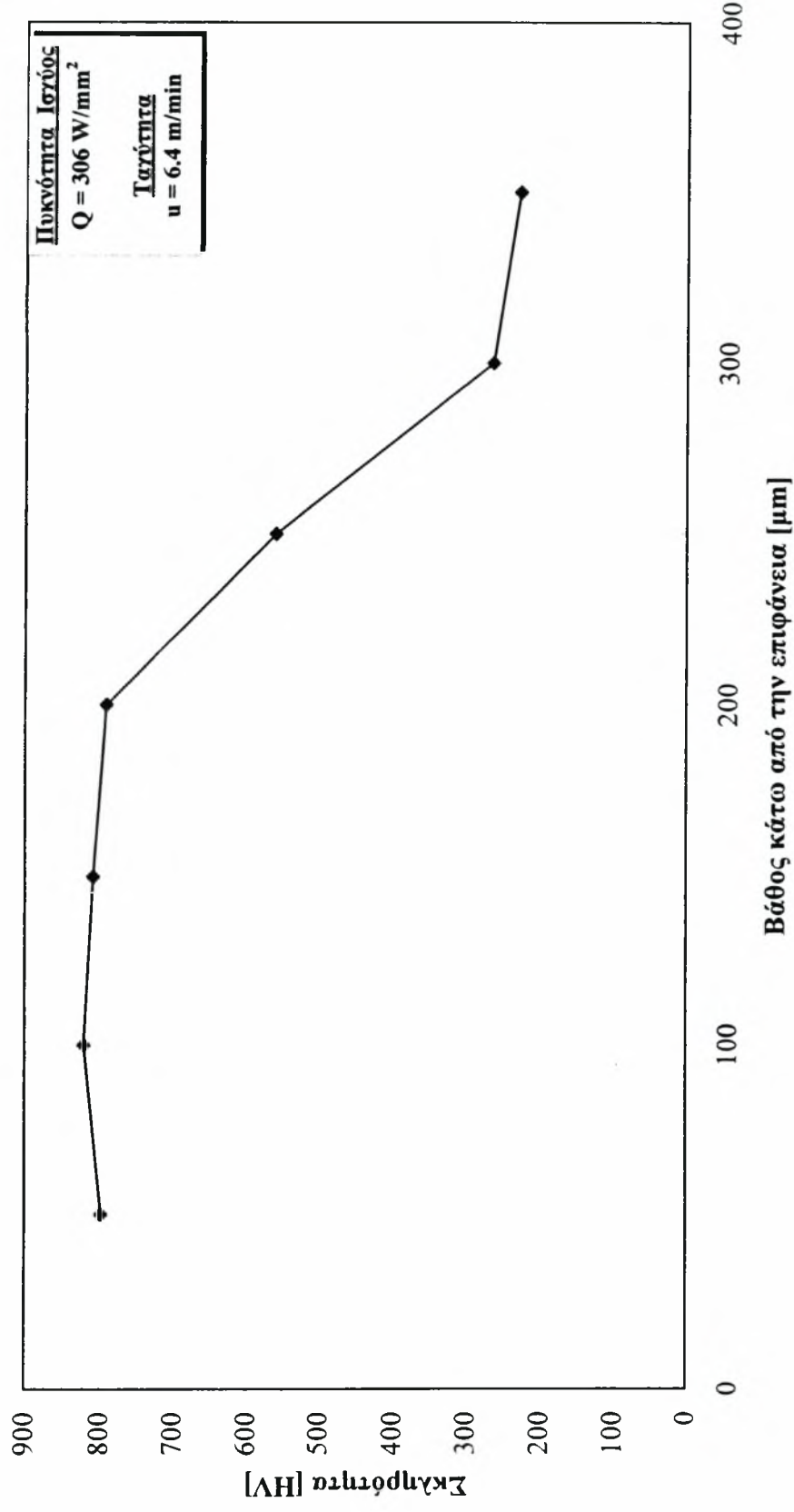
4) Ταχύτητα $u = 6.4 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	798
100	821
150	809
200	791
250	561
300	264
350	227

Στο σχήμα 2.19 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας για τις συνθήκες αυτές.



Σχήμα 2.18: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 306 \text{ W/mm}^2$ και $u = 6 \text{ m/min}$.

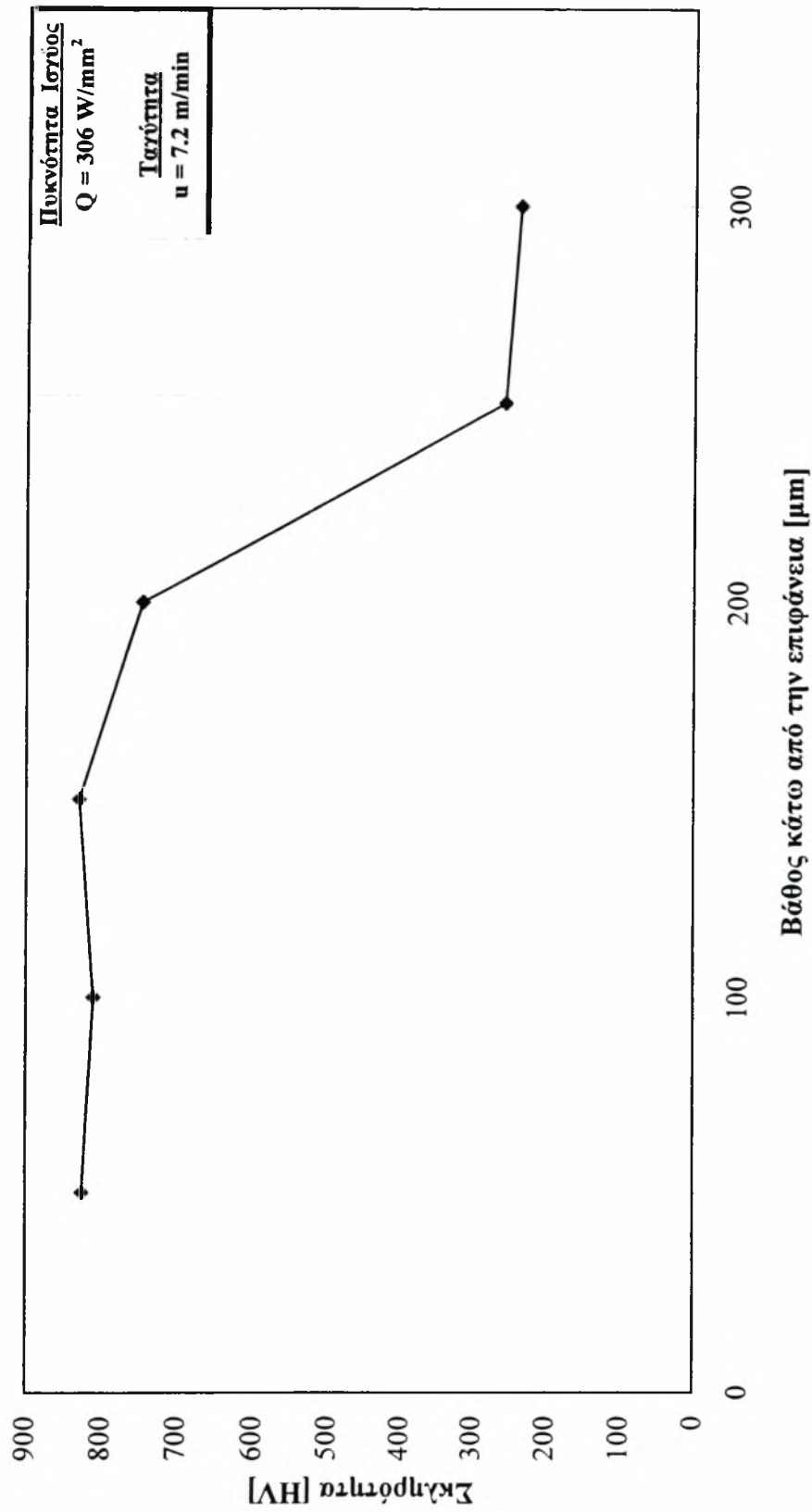


Σχήμα 2.19: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 306 \text{ W/mm}^2$ και $u = 6.4 \text{ m/min}$.

5) Ταχύτητα $u = 7.2 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	825
100	810
150	829
200	745
250	257
300	237

Στο σχήμα 2.20 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας του δοκιμίου αυτού.



Σχήμα 2.20: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 306 \text{ W/mm}^2$ και $u = 7.2 \text{ m/min}$.

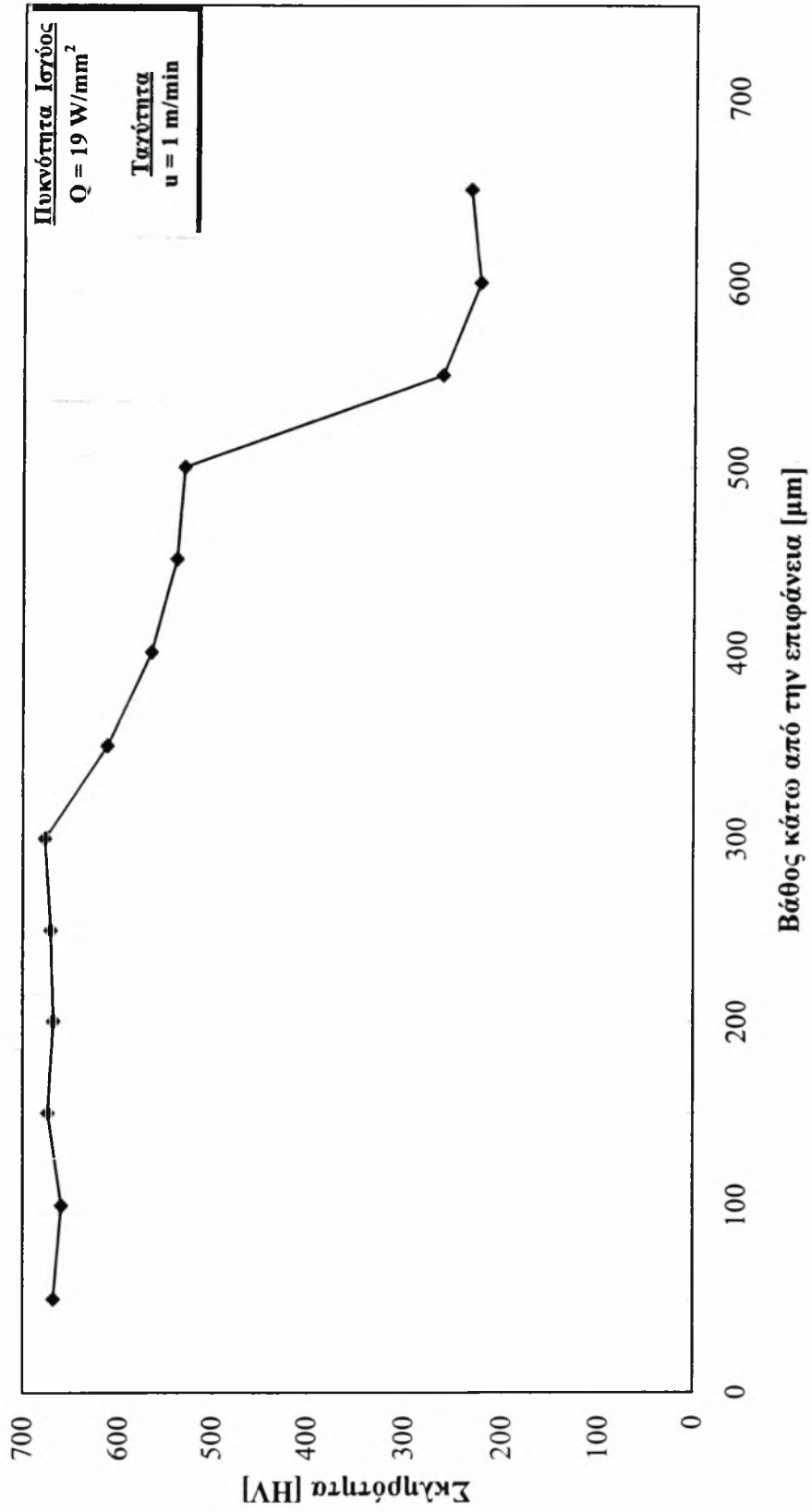
3^η Σειρά Πειραμάτων

Πυκνότητα Ισχύος $Q = 19 \text{ W/mm}^2$, Ισχύς $a = 1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_h = 5 \text{ mm}$

1) Ταχύτητα $u = 1 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	668
100	660
150	674
200	668
250	671
300	677
350	612
400	565
450	538
500	530
550	262
600	224
650	234

Το προφίλ σκληρότητας για τις συνθήκες αυτές παρουσιάζεται στο σχήμα 2.21.



Σχήμα 2.2.1: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 19 \text{ W/mm}^2$ και $u = 1 \text{ m/min}$.

2) Ταχύτητα $u = 1.2 \text{ m/min}$

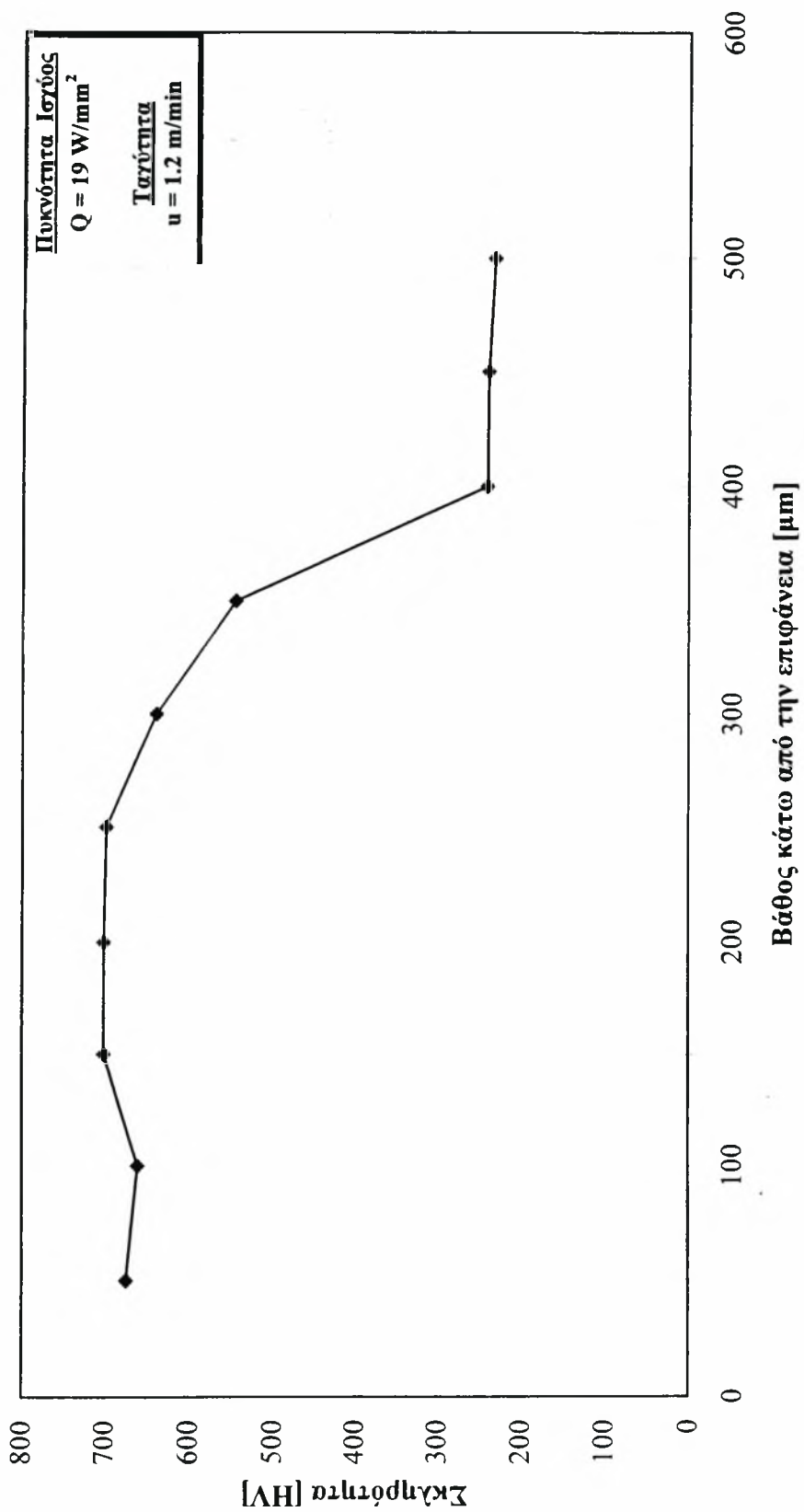
Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	674
100	660
150	701
200	701
250	698
300	638
350	544
400	241
450	240
500	233

Στο σχήμα 2.22 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας του δοκιμίου αυτού.

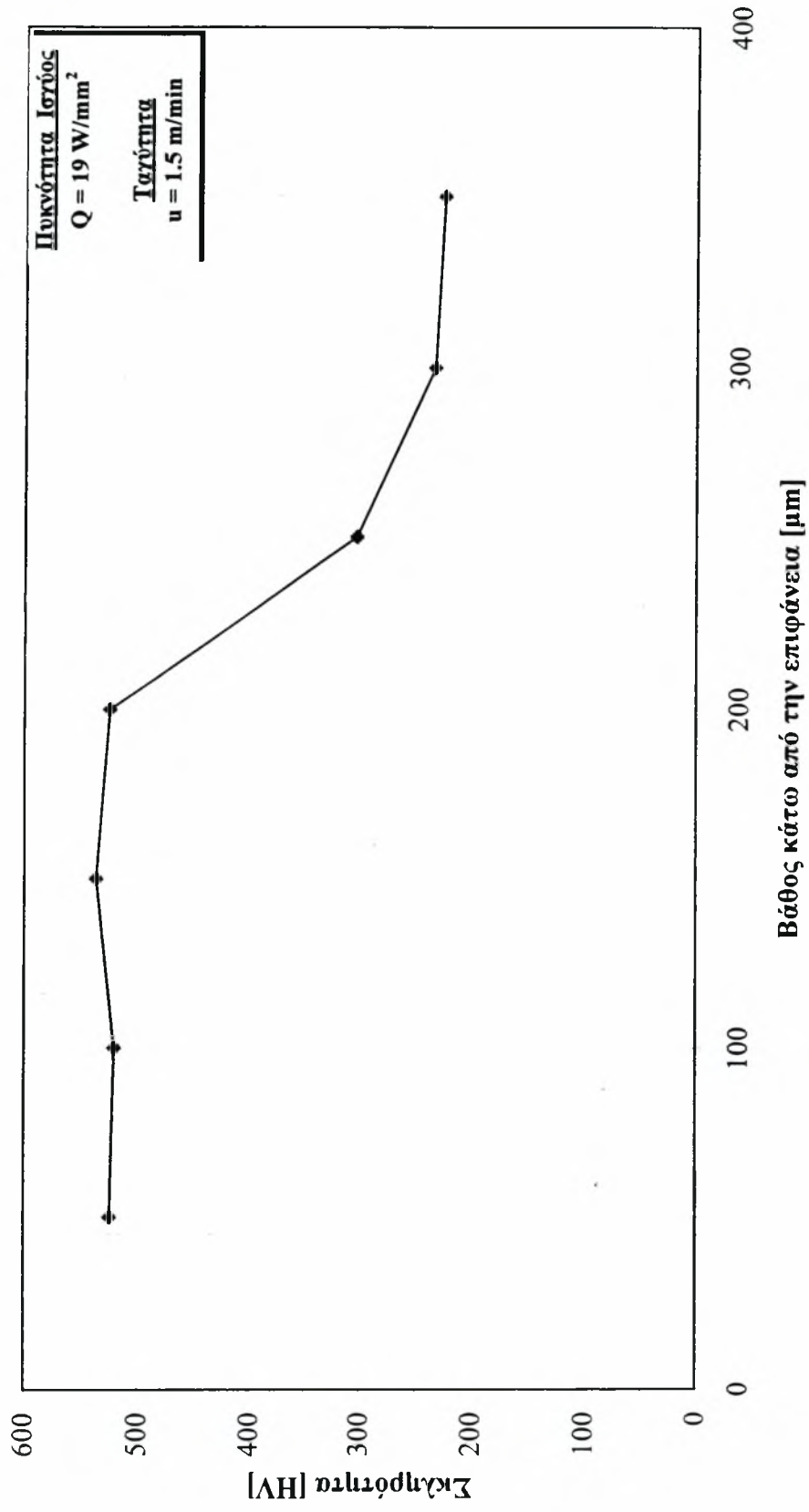
3) Ταχύτητα $u = 1.5 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	524
100	520
150	536
200	524
250	303
300	233
350	225

Στο σχήμα 2.23 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας του δοκιμίου αυτού.



Σχήμα 2.22: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 19 \text{ W/mm}^2$ και $u = 1.2 \text{ m/min}$.



Σχήμα 2.23: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 19 \text{ W/mm}^2$ και $u = 1.5 \text{ m/min}$.

4) Ταχύτητα $u = 1.6 \text{ m/min}$

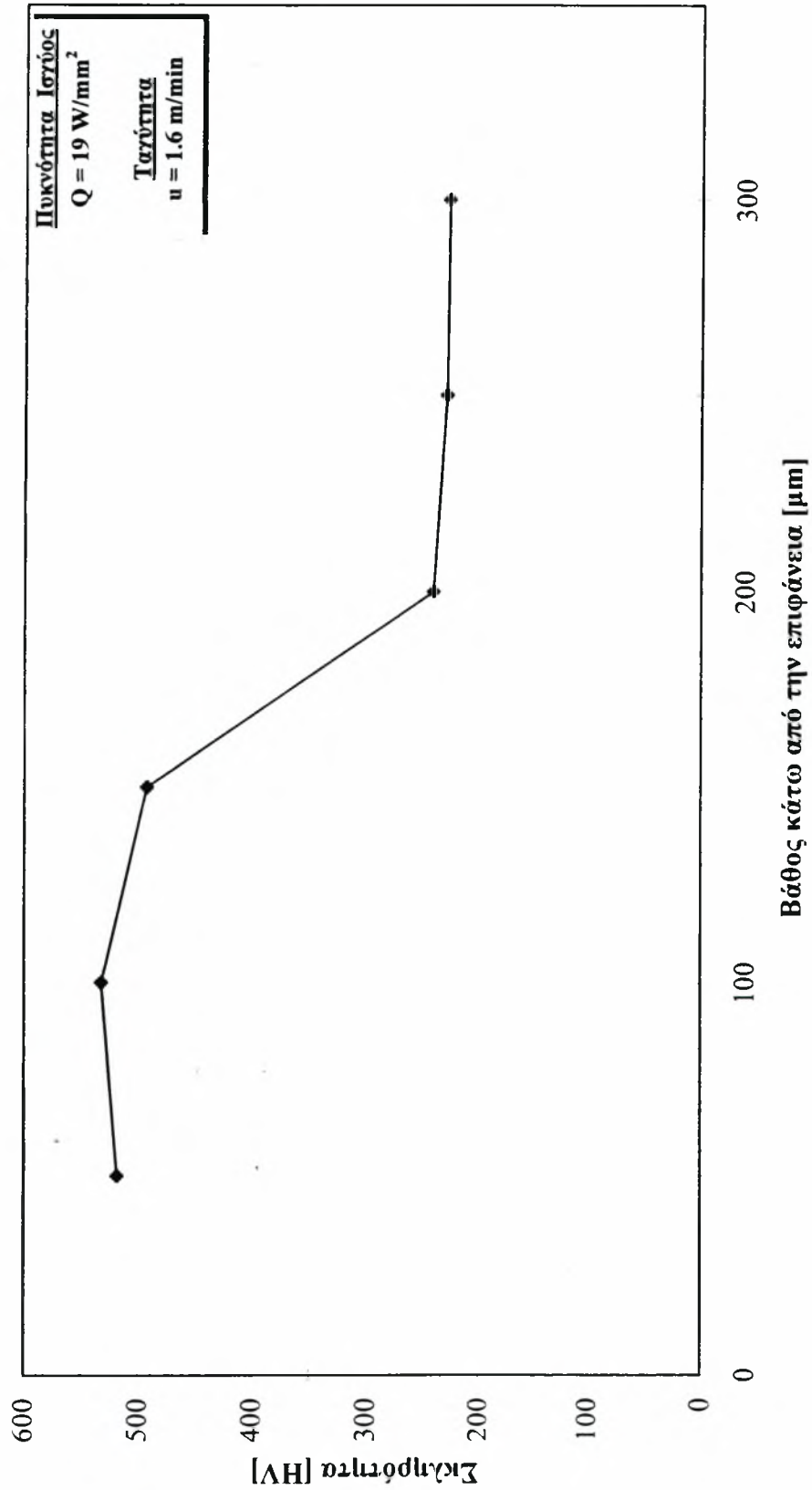
Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	518
100	532
150	492
200	240
250	228
300	226

Στο σχήμα 2.24 παρουσιάζεται το προφίλ σκληρότητας για τις συνθήκες αυτές.

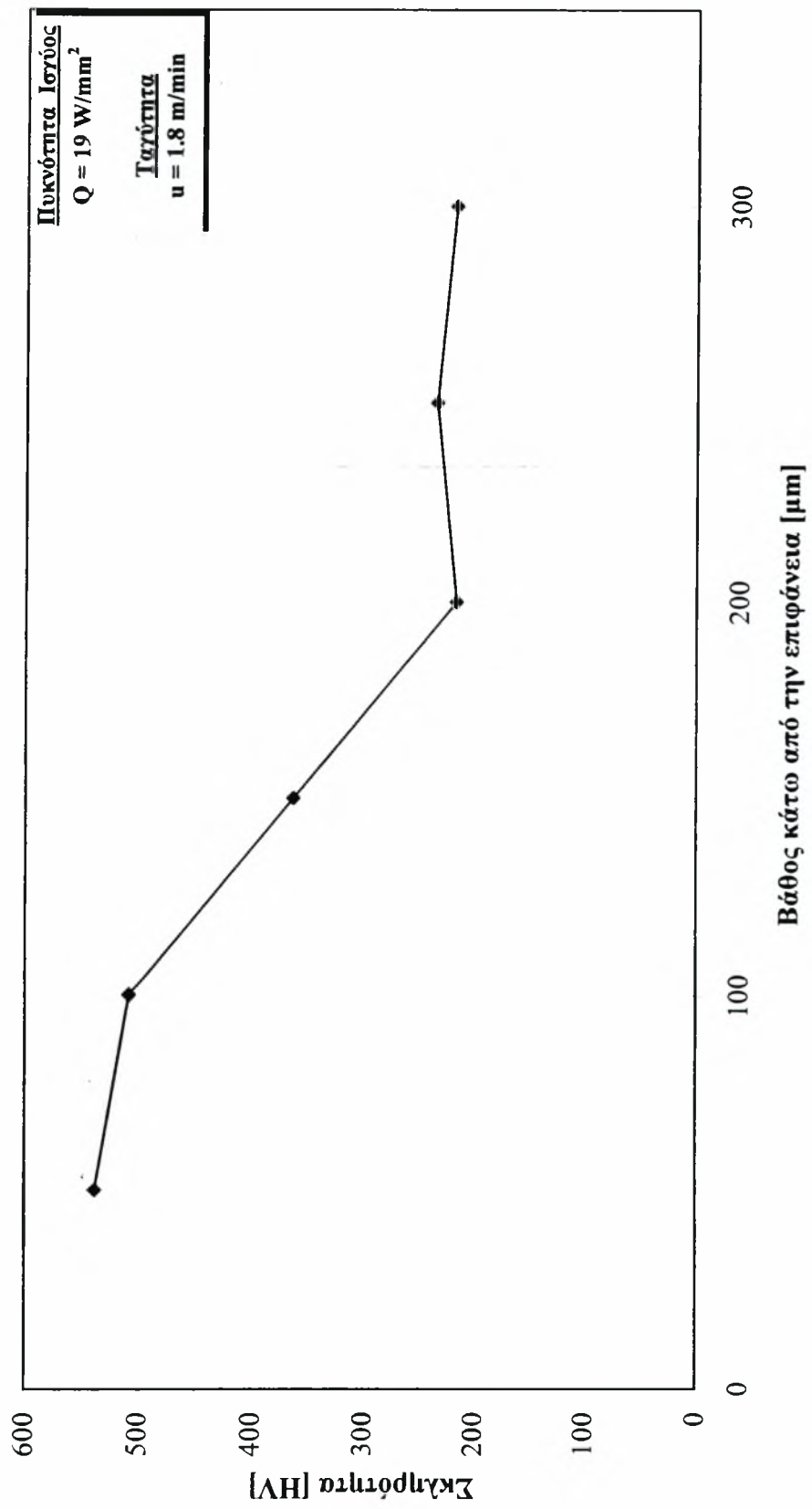
5) Ταχύτητα $u = 1.8 \text{ m/min}$

Βάθος κάτω από την επιφάνεια [μm]	Σκληρότητα [HV]
50	538
100	508
150	363
200	217
250	235
300	218

Στο σχήμα 2.25 φαίνεται το προφίλ σκληρότητας του δοκιμίου αυτού.



Σχήμα 2.24: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 19 \text{ W/mm}^2$ και $u = 1.6 \text{ m/min}$.



Σχήμα 2.25: Προφίλ σκληρότητας για $Q = 19 \text{ W/mm}^2$ και $u = 1.8 \text{ m/min}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

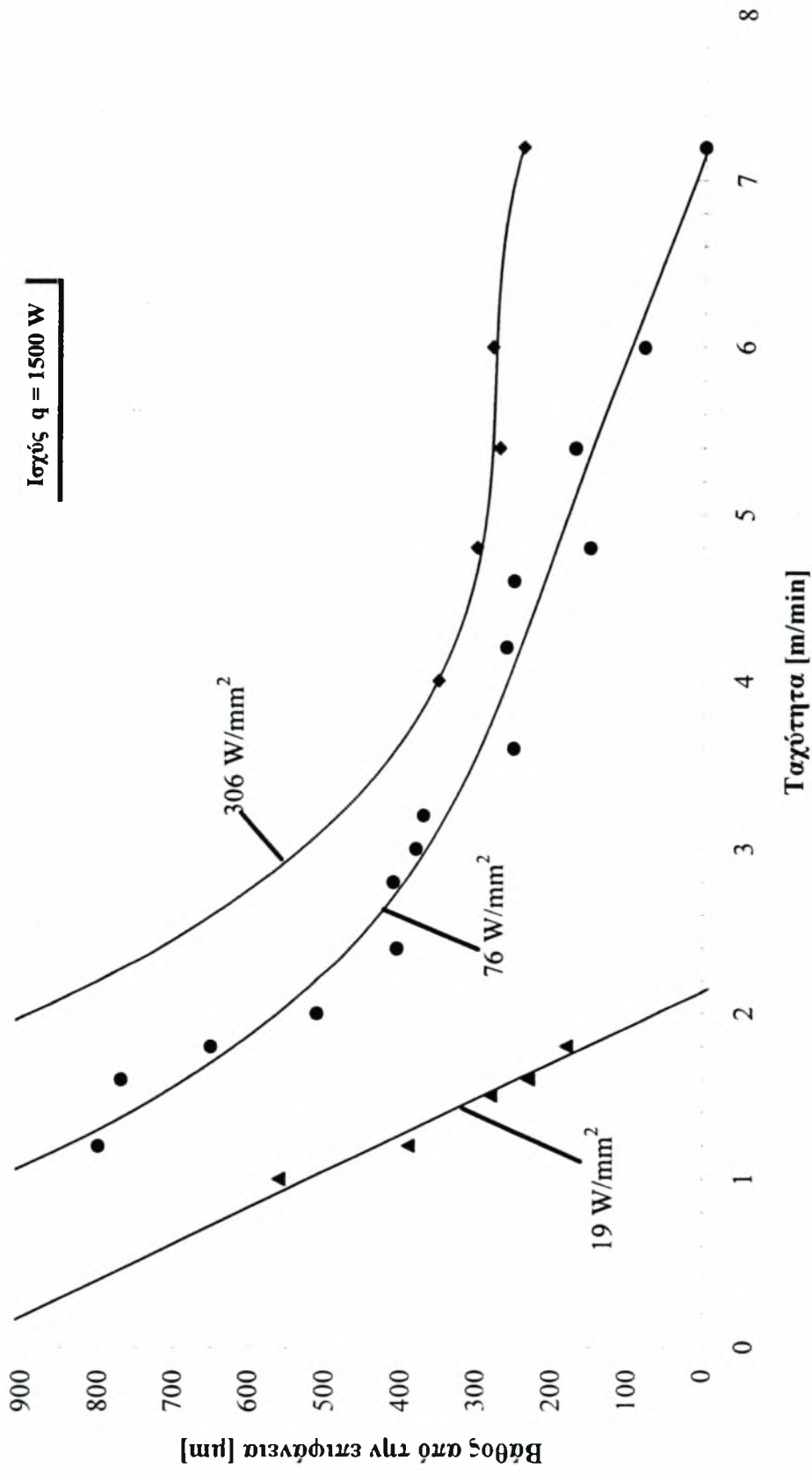
Οι παράγοντες ως προς τους οποίους μελετήθηκε η κατεργασία της επιφανειακής σκλήρυνσης υποευτηκτοειδούς χάλυβα με τη χρήση δέσμης LASER, στην παρούσα εργασία, ήταν βασικά δύο: η πυκνότητα ισχύος (Q) και η σχετική ταχύτητα του τεμαχίου ως προς την δέσμη LASER (u). Η πυκνότητα ισχύος δίδει την ισχύ που προσπίπτει στο τεμάχιο ανά μονάδα επιφάνειας της δέσμης. Συσχετίζει δηλαδή την ισχύ του LASER με το μέγεθος της χρησιμοποιούμενης δέσμης. Η ταχύτητα της κατεργασίας έχει να κάνει με τον χρόνο αλληλεπίδρασης (beam interaction time) της δέσμης και του τεμαχίου. Ο χρόνος αλληλεπίδρασης ορίζεται ως το πηλίκο της ακτίνας της δέσμης (r_b) προς την ταχύτητα (u):

$$t_b = r_b / u \quad [\text{sec}]$$

Στην εργασία αυτή, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3, η ισχύς διατηρήθηκε σταθερή στα 1500 W, ενώ χρησιμοποιήθηκαν τρεις ακτίνες της δέσμης, 2.5 mm, 1.25 mm και 5 mm, για την 1^η, 2^η και 3^η σειρά πειραμάτων αντίστοιχα. Επομένως σε κάθε μία από τις σειρές πειραμάτων ο χρόνος αλληλεπίδρασης μεταβάλλεται με την ταχύτητα: αυξανόμενης της ταχύτητας μειώνεται ο χρόνος αλληλεπίδρασης.

Μετά από τις παραπάνω προκαταρκτικές παρατηρήσεις, είναι δυνατόν να διεξαχθεί μια σύντομη συζήτηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εξέταση της μικροδομής.

Η πρώτη διαπίστωση που μπορεί να γίνει, είναι ότι για σταθερή πυκνότητα ισχύος, που σε αυτή την περίπτωση σημαίνει σταθερή ακτίνα της δέσμης, η σκληρυμένη περιοχή φθάνει σε μεγαλύτερο βάθος κάτω από την επιφάνεια όσο μειώνεται η ταχύτητα της κατεργασίας. Αυτό φαίνεται πολύ χαρακτηριστικά στο διάγραμμα του σχήματος 1.1. Το γεγονός μπορεί να αποδοθεί στο ότι, καθώς μειώνεται η ταχύτητα ο χρόνος αλληλεπίδρασης της δέσμης με το τεμάχιο αυξάνεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες και σε μεγαλύτερο βάθος κάτω από την επιφάνεια.

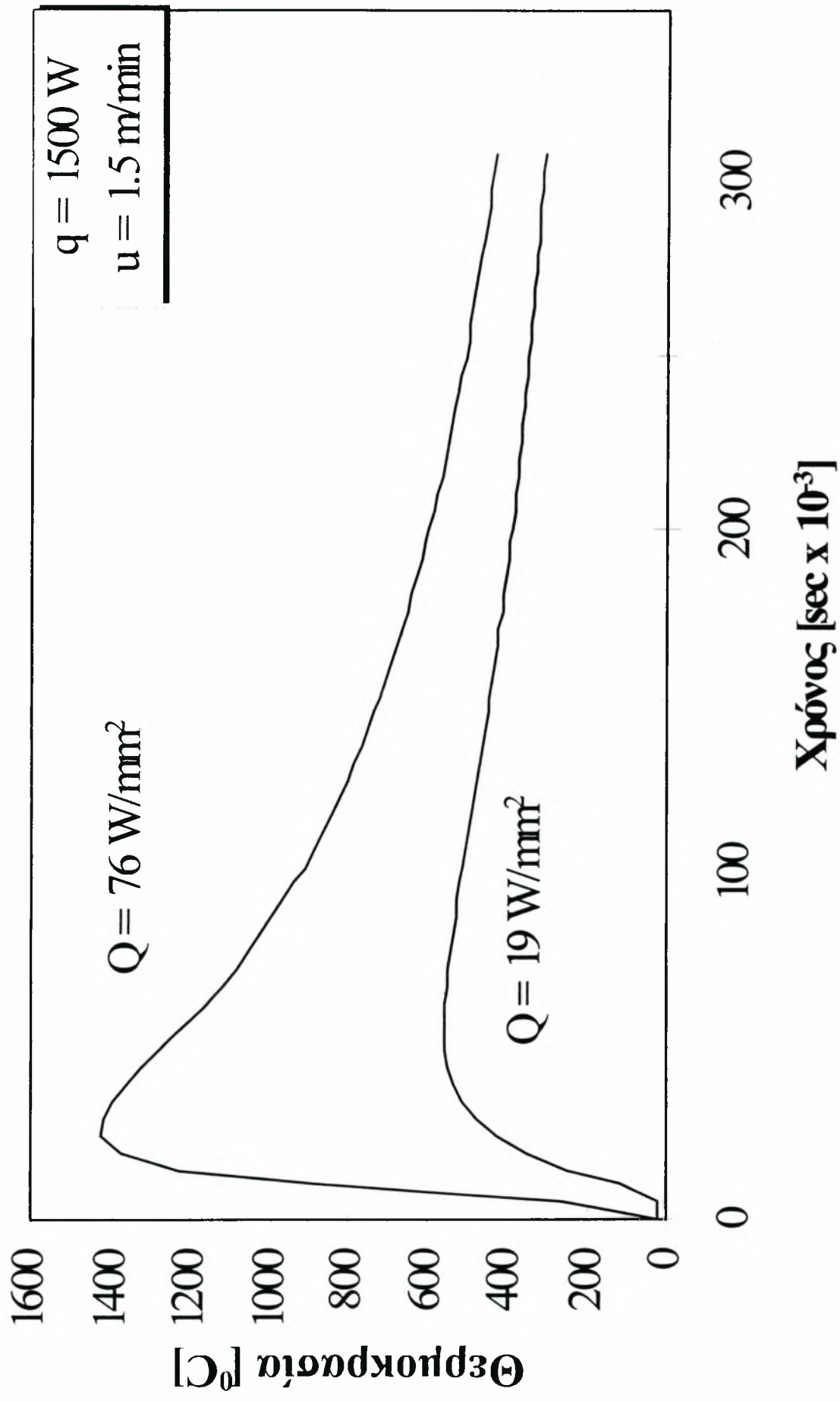


Σχήμα 1.1: Βάθος σκλήρυνσης σε συνάρτηση με την ταχύτητα της κατεργασίας για τις πυκνότητες ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν.

Το ίδιο ισχύει και για τα βάθη μέχρι τα οποία εμφανίστηκε τήξη της επιφάνειας, σε όσα δοκίμια βεβαίως υπήρξε τήξη. Η εξήγηση είναι η ίδια και έχει να κάνει με τις υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται όσο αυξάνεται ο χρόνος αλληλεπίδρασης, δηλαδή όσο μειώνεται η ταχύτητα της κατεργασίας.

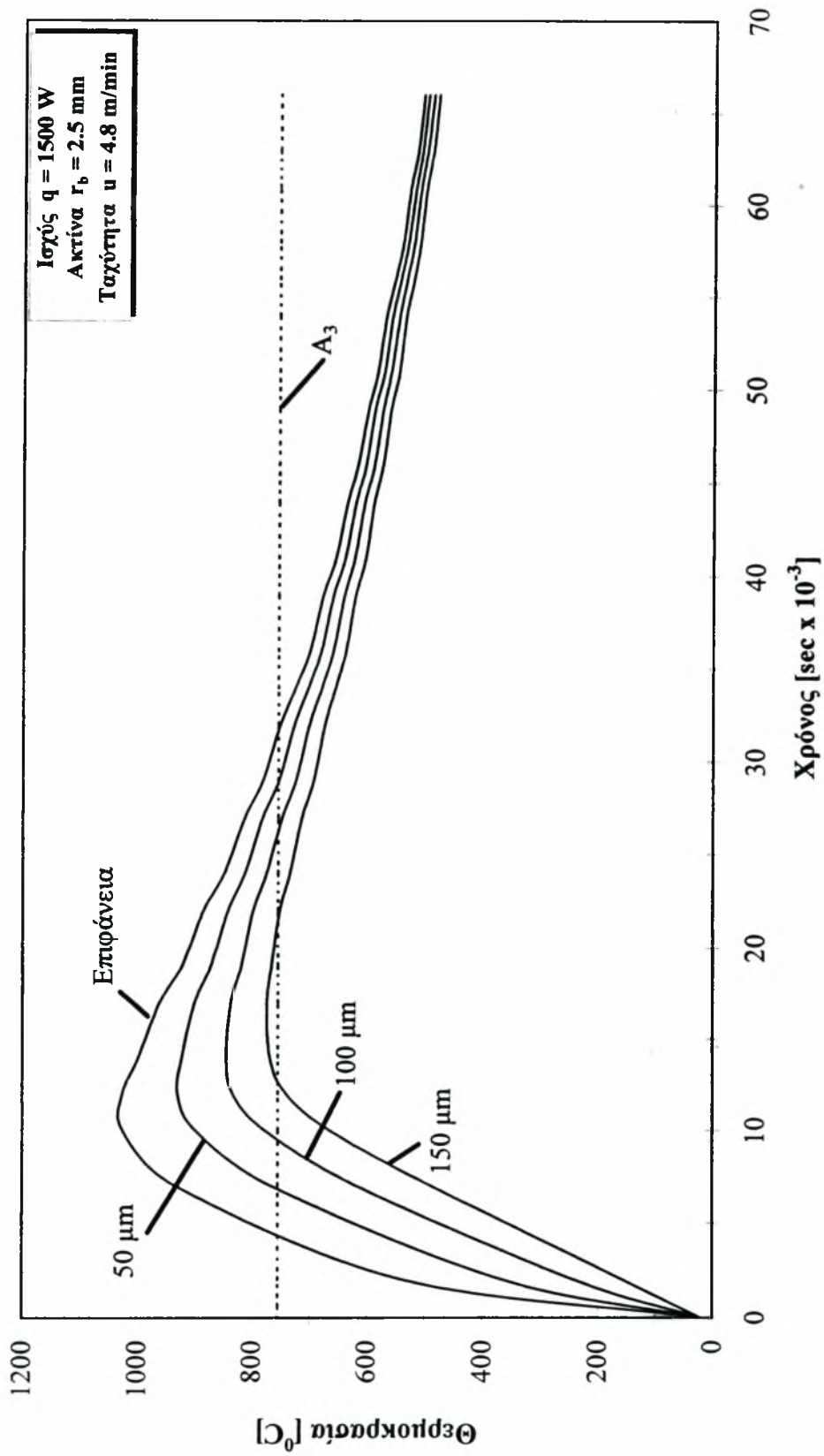
Επίσης από το διάγραμμα του σχήματος 1.1, μπορεί να διαπιστωθεί και το εξής: για μια συγκεκριμένη ταχύτητα, όσο αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος, τόσο αυξάνεται και το βάθος της σκληρυμένης περιοχής κάτω από την επιφάνεια. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού στο τεμάχιο προσπίπτει περισσότερη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας της δέσμης και άρα οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι υψηλότερες και φθάνουν σε μεγαλύτερο βάθος.

Από την πυκνότητα ισχύος όμως εξαρτάται και η μικροδομή της σκληρυμένης περιοχής. Στα δοκίμια που υποβλήθηκαν στην κατεργασία με πυκνότητες ισχύος 76 W/mm^2 και 306 W/mm^2 η σκληρυμένη περιοχή αποτελείτο από σχετικά χονδρόκοκκο μαρτενσίτη (coarse plate martensite). Αντιθέτως, στα δοκίμια που κατεργάστηκαν με την χαμηλή πυκνότητα ισχύος, δηλαδή τα 19 W/mm^2 , η σκληρυμένη περιοχή αποτελείτο από μαρτενσίτη που είχε υποστεί αυτοεπαναφορά (autotempered martensite). Αυτό σημαίνει ότι στα δοκίμια των 19 W/mm^2 ο ρυθμός ψύξης θα πρέπει να ήταν αρκετά χαμηλός, ώστε ο μαρτενσίτης που έχει σχηματισθεί να υφίσταται επαναφορά. Στο διάγραμμα του σχήματος 1.2 παρουσιάζεται ο θερμικός κύκλος, για βάθος $50 \mu\text{m}$ κάτω από την επιφάνεια και για ταχύτητα 1.5 m/min , τόσο για τα 19 W/mm^2 όσο και για τα 76 W/mm^2 . Το διάγραμμα αυτό έχει υπολογισθεί από το μονοδιάστατο μοντέλο μετάδοσης θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία. Εάν και ποσοτικά το διάγραμμα, τουλάχιστον όσον αφορά τα 19 W/mm^2 ($t_b = 5 \text{ mm}$), δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, για λόγους που θα εξηγηθούν στη συνέχεια, μπορεί να ειπωθεί ότι ποιοτικά αυτή είναι η θερμική συμπεριφορά κατά την κατεργασία. Διαπιστώνεται ότι με την χαμηλή πυκνότητα ισχύος ο ρυθμός ψύξης είναι αρκετά χαμηλός, ώστε να δικαιολογεί την δημιουργία μαρτενσίτη που έχει υποστεί αυτοεπαναφορά. Η παρουσία αυτού του είδους μαρτενσίτη αναφέρεται και από τους Shine και Chen, στην εργασία τους για την επιφανειακή σκλήρυνση με LASER του χάλυβα 4340.



Σχήμα 1.2: Θερμικοί κύκλοι σε βάθος 50 μm και για ταχύτητα 1.5 m/min, για πυκνότητες ισχύος 19 W/mm² και 76 W/mm².

Όσον αφορά τον φερρίτη, ο οποίος παρατηρήθηκε κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ της σκληρυμένης περιοχής και του μετάλλου βάσης, μπορεί να δοθεί η εξήγηση ότι στις περιοχές αυτές δεν πρόλαβε να ολοκληρωθεί η ωστενιτοποίηση του υλικού. Πράγματι, μελετώντας το διάγραμμα του σχήματος 1.3, όπου εμφανίζονται θερμικοί κύκλοι υπολογισμένοι από το μοντέλο μετάδοσης θερμότητας για διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια, μπορεί να διαπιστωθεί ότι το χρονικό διάστημα που η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία βρίσκεται υψηλότερα από την κρίσιμη θερμοκρασία A_3 , μειώνεται όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος κάτω από την επιφάνεια. Έτσι λοιπόν, καθώς ούτως ή άλλως ο θερμικός κύκλος κατά την κατεργασία με τη δέσμη LASER διαρκεί κλάσματα του δευτερολέπτου, η πιθανότητα να μην προλαβαίνει ο άνθρακας να διαχυθεί πλήρως είναι πολύ μεγάλη, με επακόλουθο την ύπαρξη του φερρίτη που διαπιστώθηκε κατά την ανάλυση της μικροδομής.



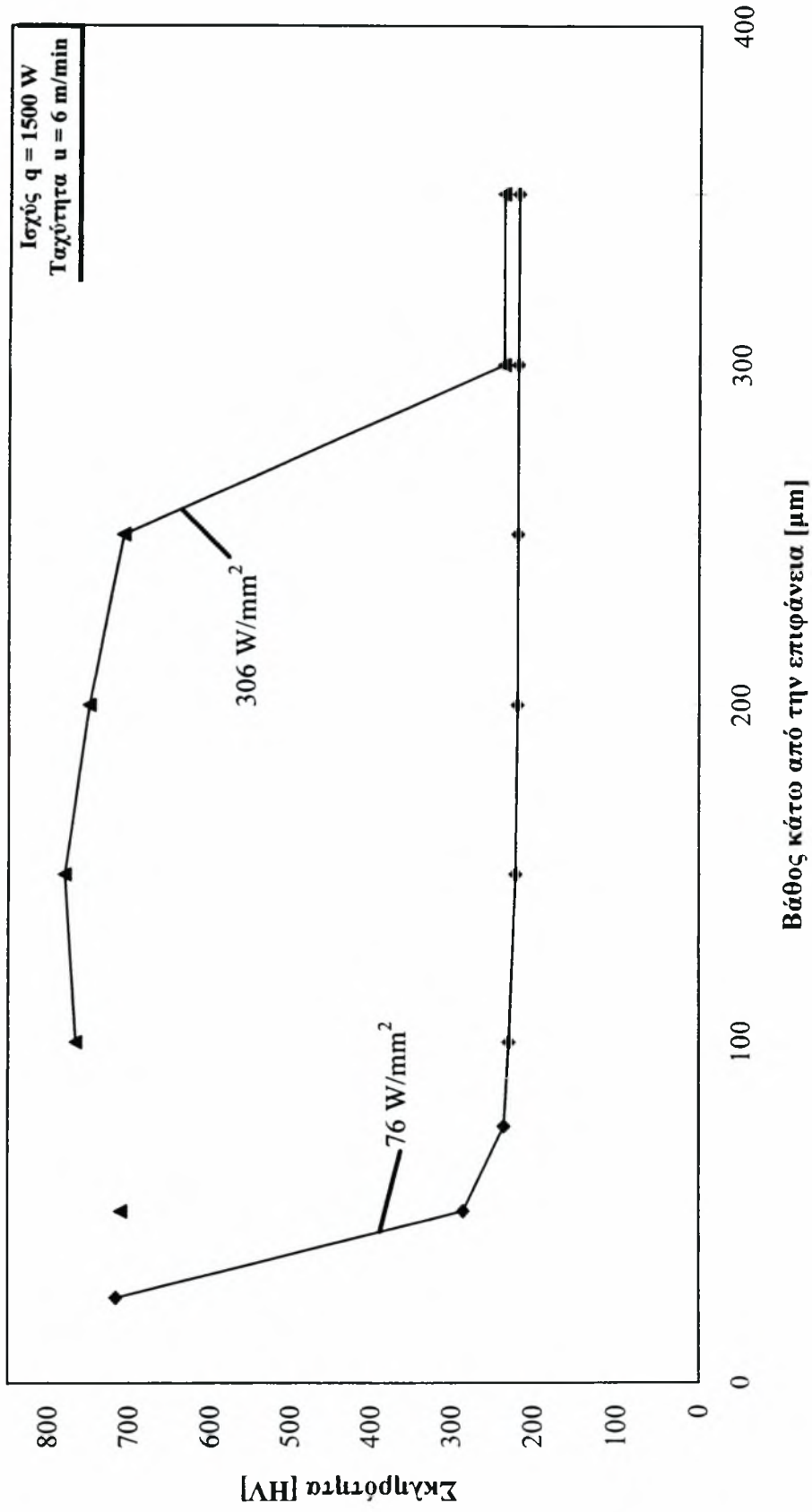
Σχήμα 1.3: Το χρονικό διάστημα που η θερμοκρασία ξεπερνά την A_3 είναι μεγαλύτερο πλησιέστερα στην επιφάνεια.

2. ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

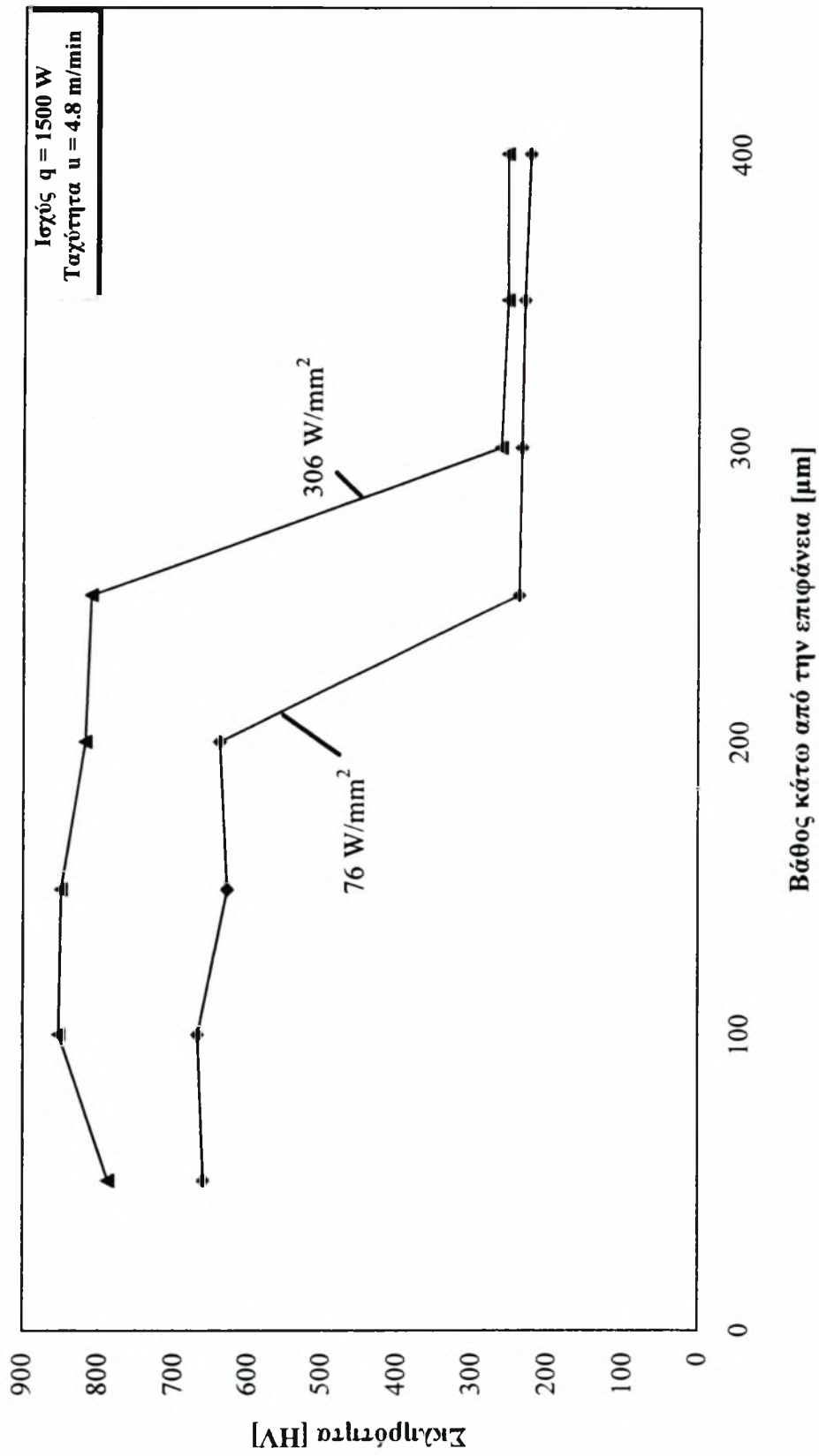
Η πρώτη γενική παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι, οι μικροσκληρομετρήσεις έδειξαν σημαντική αύξηση της σκληρότητας, η οποία οφείλεται στον σχηματισμό μαρτενσίτη στην επιφάνεια του υλικού. Έξω από την σκληρυμένη περιοχή του υλικού, η σκληρότητα δεν μεταβλήθηκε. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων η σκληρότητα ξεπέρασε τα 700 HV, ενώ η σκληρότητα του υλικού πριν την κατεργασία ήταν 220 HV.

Η μέγιστη σκληρότητα εξαρτάται από την πυκνότητα ισχύος που χρησιμοποιήθηκε. Όσο μεγαλύτερη ήταν η πυκνότητα ισχύος, τόσο μεγαλύτερη ήταν και η μέγιστη επιτυγχανόμενη σκληρότητα. Αυτό μπορεί να φανεί στα διαγράμματα 2.1, 2.2, 2.3 και 2.4, όπου γίνεται σύγκριση μεταξύ των προφίλ σκληρότητας για τις ίδιες ταχύτητες κατεργασίας, αλλά για διαφορετικές πυκνότητες ισχύος. Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ακόμη και κάτι που αναφέρθηκε και στην ενότητα 1 αυτού του κεφαλαίου, δηλαδή ότι για σταθερή ταχύτητα, όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα ισχύος, τόσο μεγαλύτερο είναι και το βάθος που φθάνει η σκληρυμένη περιοχή κάτω από την επιφάνεια.

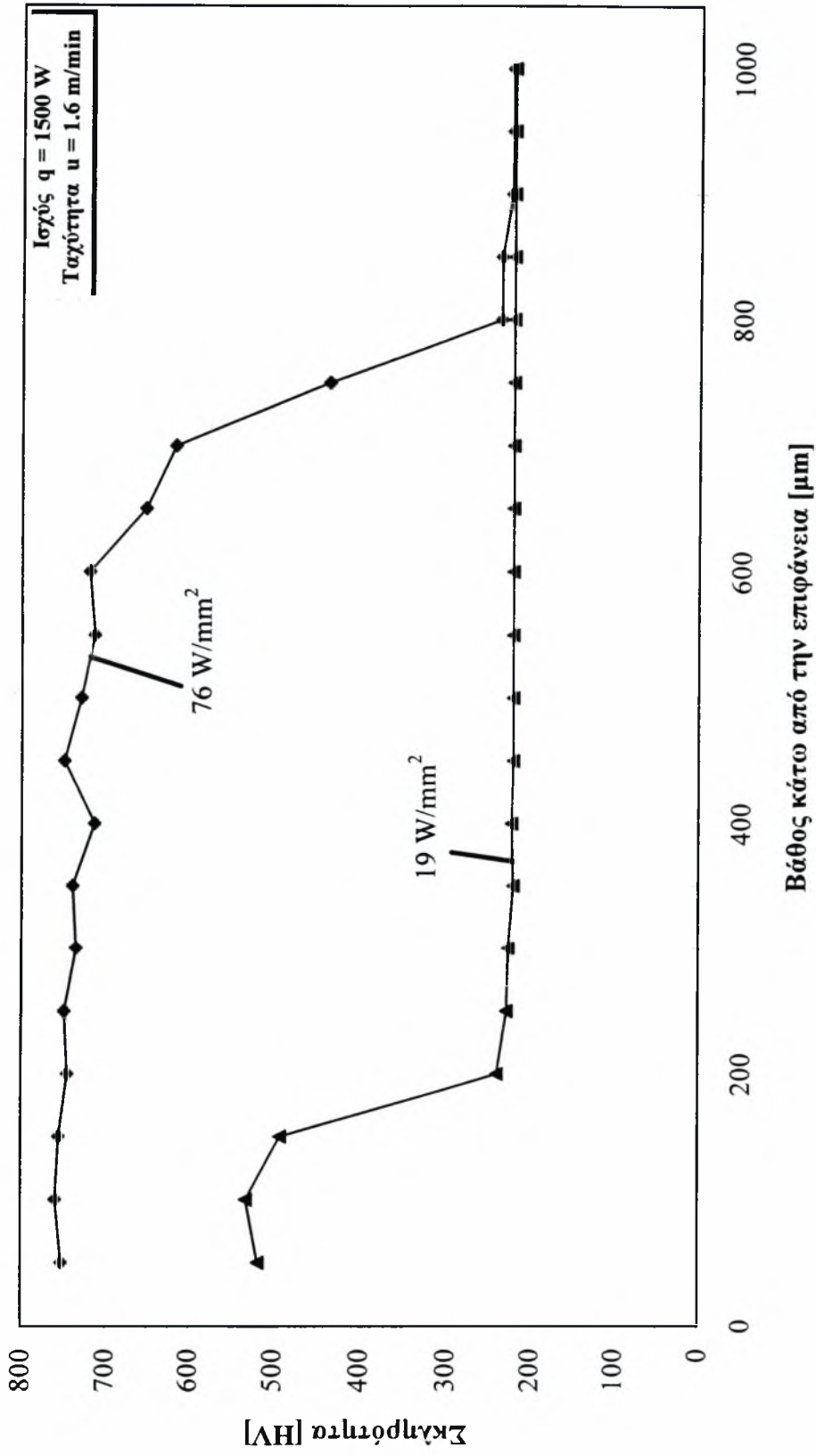
Το γεγονός ότι αυξανόμενης της πυκνότητας ισχύος, αυξάνεται η μέγιστη επιτυγχανόμενη σκληρότητα κατά την κατεργασία, οφείλεται στους υψηλότερους ρυθμούς ψύξης που παρουσιάζουν οι μεγάλες πυκνότητες ισχύος. Αυτό μπορεί να φανεί χαρακτηριστικά στο, υπολογισμένο από το μοντέλο μετάδοσης θερμότητας, διάγραμμα του σχήματος 2.5, όπου ο ρυθμός ψύξης για τα 306 W/mm^2 είναι δραματικά μεγαλύτερος από τους ρυθμούς ψύξης των μικρότερων πυκνοτήτων ισχύος.



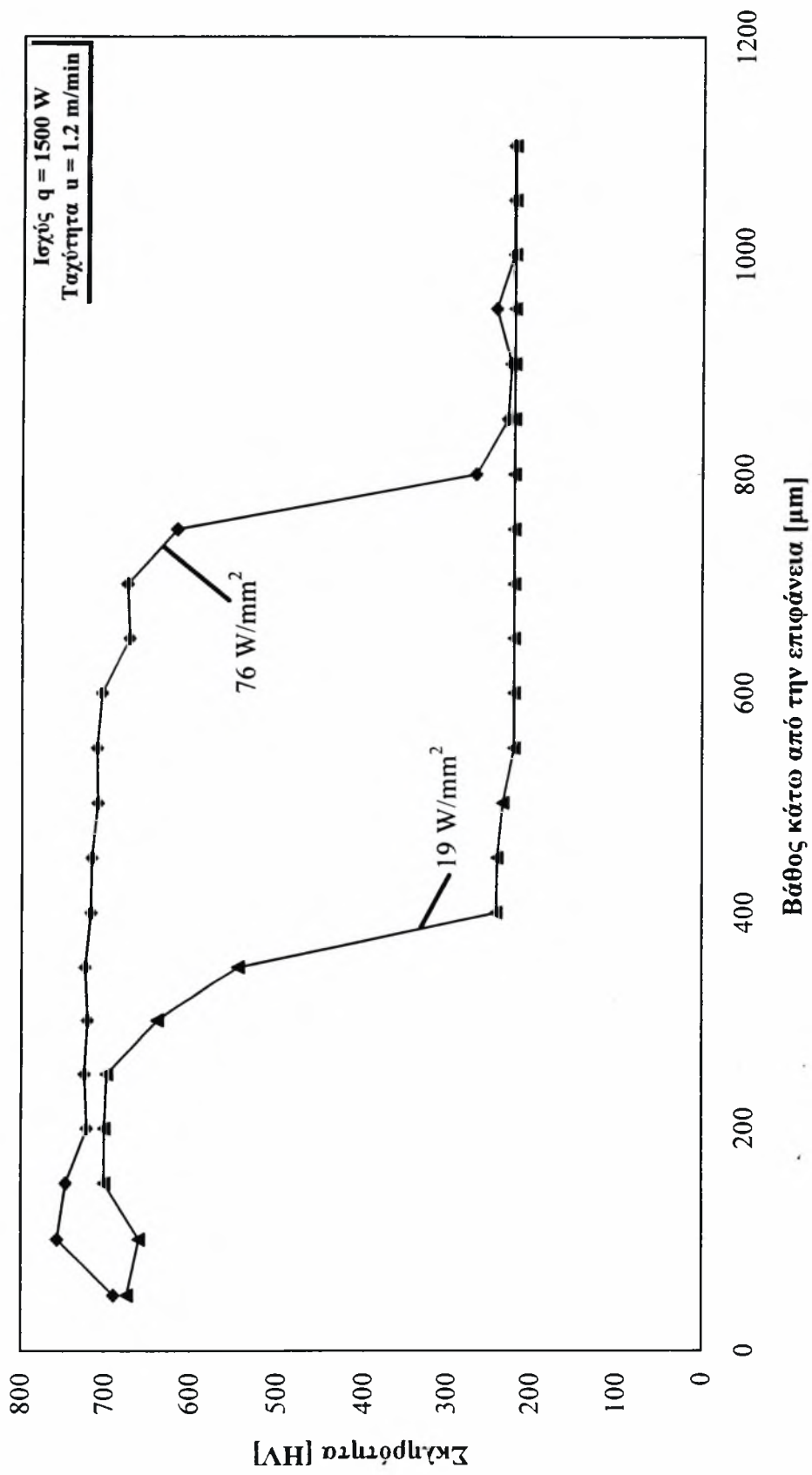
Σχήμα 2.1: Σύγκριση των προφίλ σκληρότητας για τα 76 W/mm^2 και τα 306 W/mm^2 και τα 6 m/min . Ταχύτητα 6 m/min .



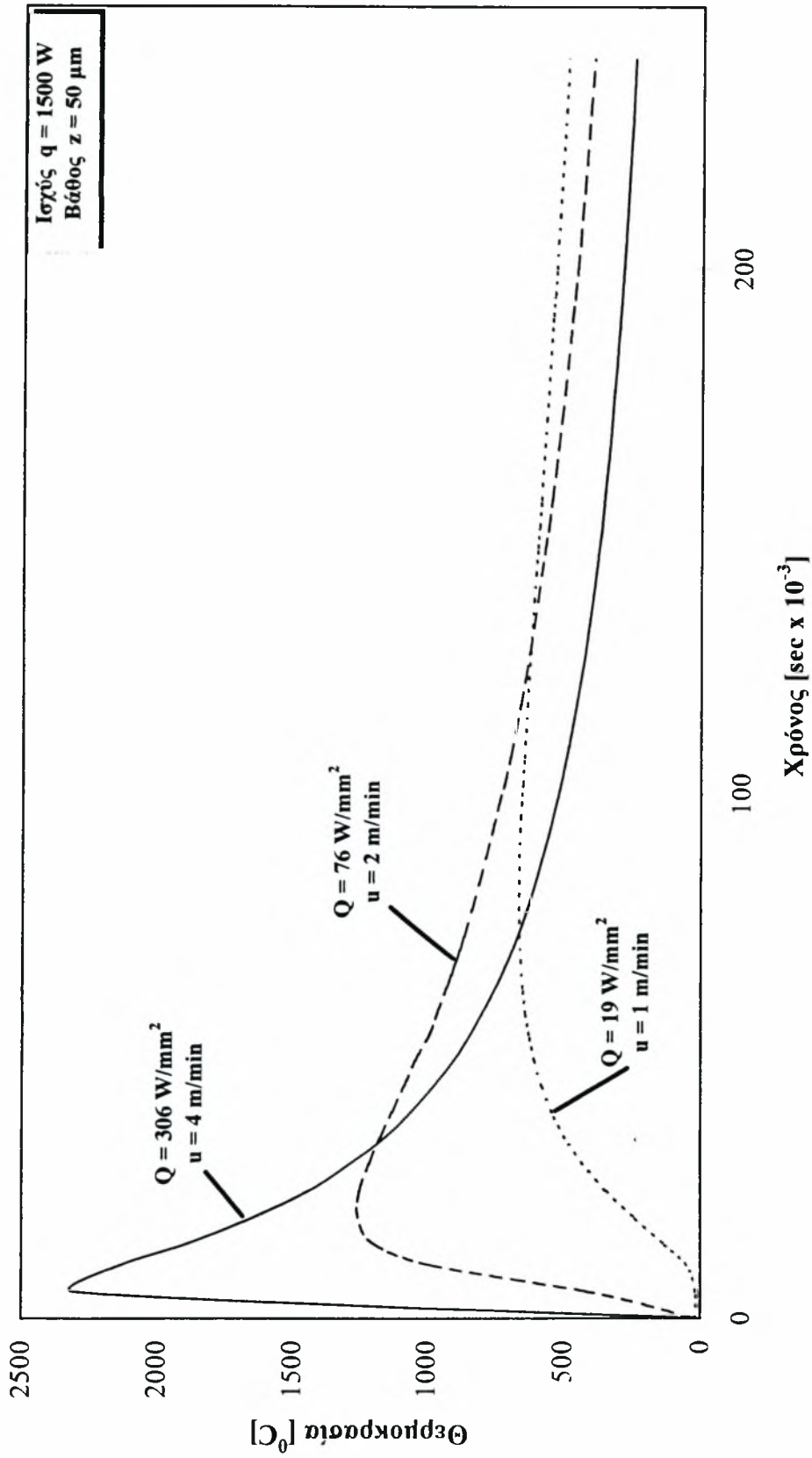
Σχήμα 2.2: Σύγκριση των προφίλ σκληρότητας για τα 76 W/mm^2 και τα 306 W/mm^2 . Ταχύτητα 4.8 m/min .



Σχήμα 2.3: Σύγκριση των προφίλ σκληρότητας για τα 19 W/mm^2 και τα 76 W/mm^2 . Ταχύτητα 1.6 m/min .



Σχήμα 2.4: Σύγκριση των προφίλ σκληρότητας για τα 19 W/mm^2 και τα 76 W/mm^2 . Ταχύτητα 1.2 m/min .

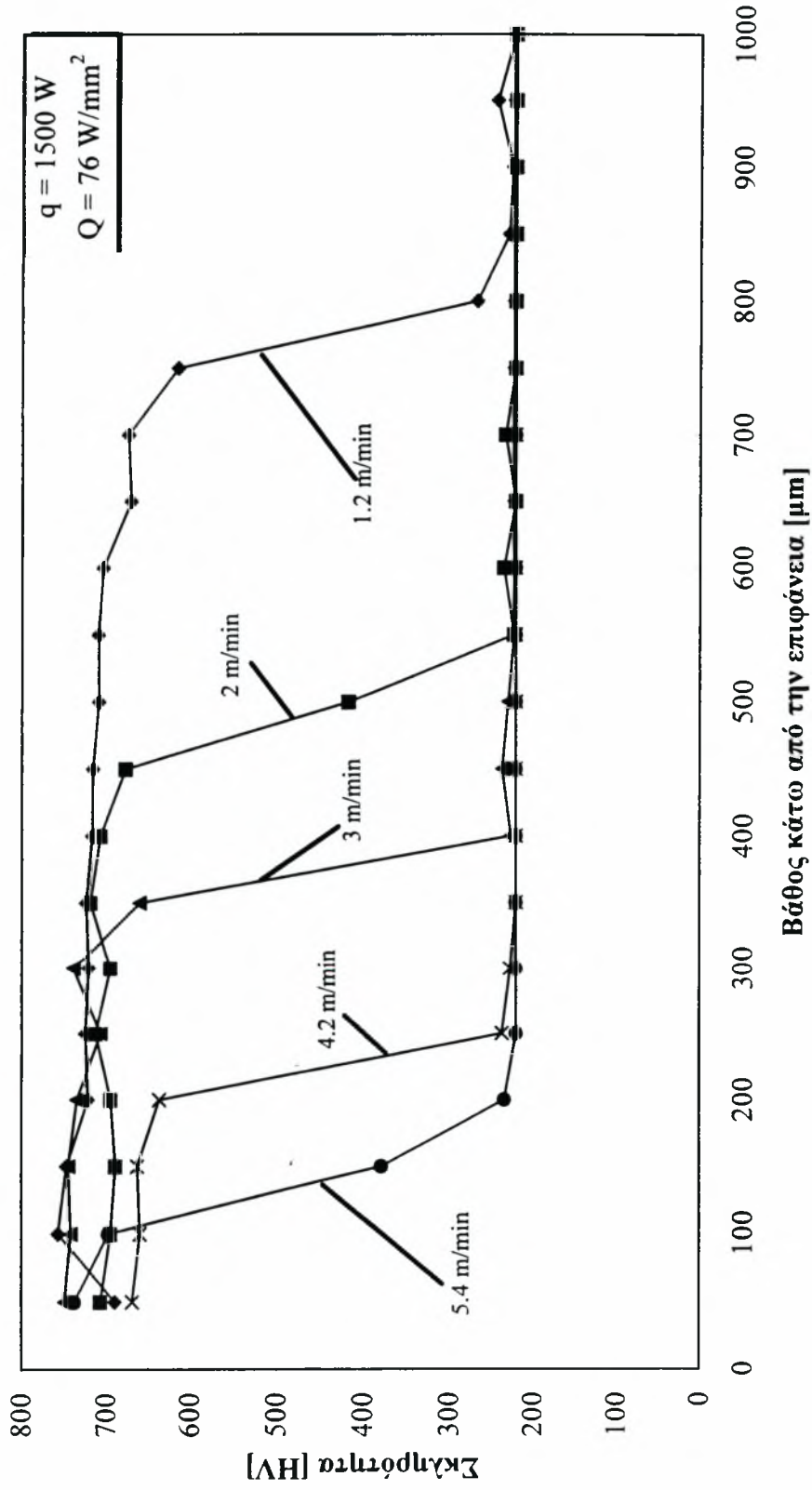


Σχήμα 2.5: Οι ρυθμοί ψύξης της υψηλής πυκνότητας ισχύος ($Q = 306 \text{ W/mm}^2$, $r_b = 1.25 \text{ mm}$) υπερτερούν των ρυθμών ψύξης των μικροτέρων πυκνοτήτων ισχύος.

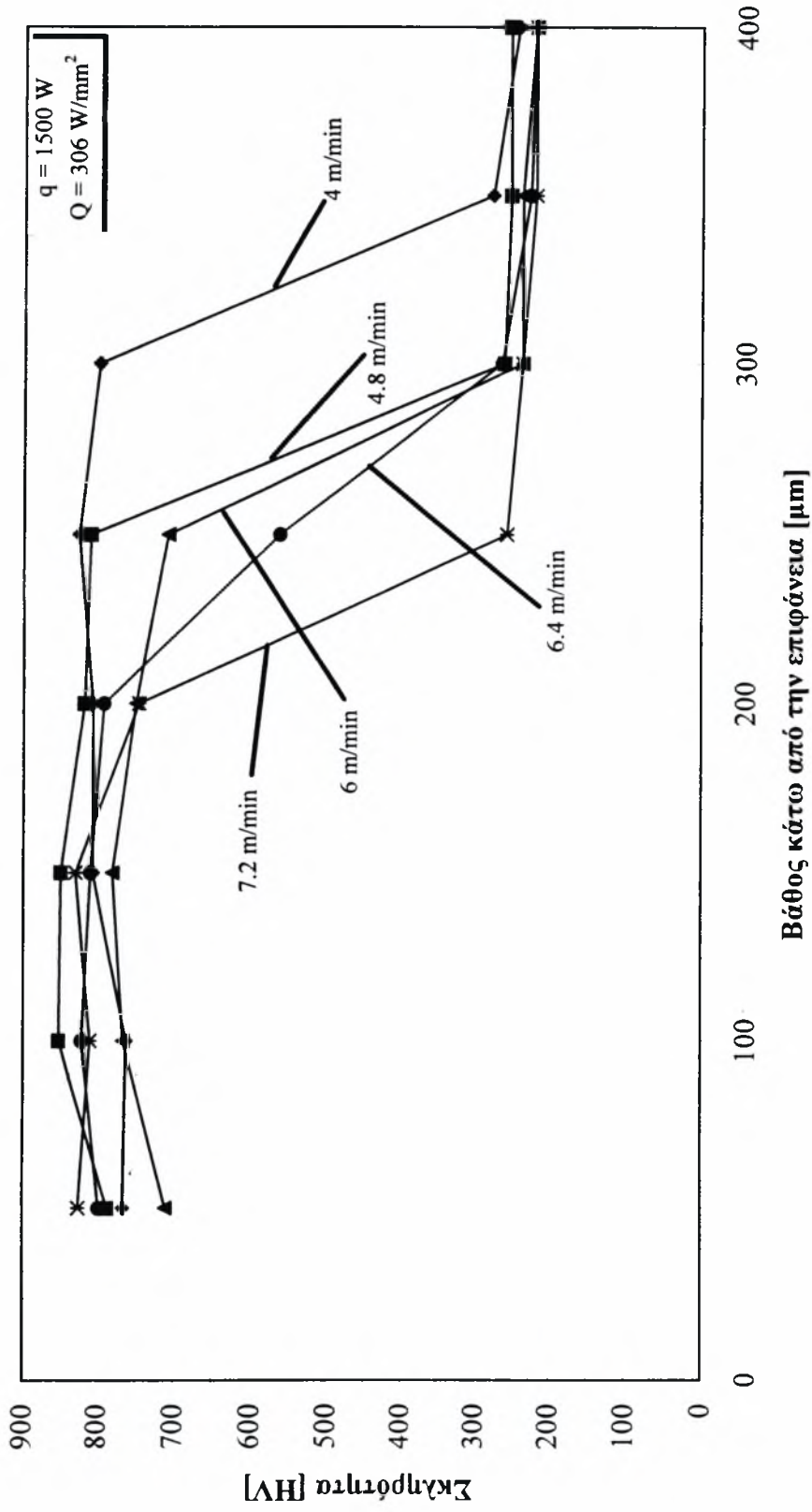
Από την άλλη πλευρά, η ταχύτητα της κατεργασίας δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στη μέγιστη σκληρότητα, στις μεγάλες και μεσαίες πυκνότητες ισχύος (306 W/mm^2 και 76 W/mm^2 αντίστοιχα). Αυτό δείχνουν χαρακτηριστικά και τα διαγράμματα των σχημάτων 2.6 και 2.7, όπου φαίνεται ότι οι μέγιστες σκληρότητες, όταν οι πυκνότητες ισχύος παραμένουν σταθερές, δεν μεταβάλλονται σημαντικά με την ταχύτητα, αλλά εξαρτώνται κυρίως από την περιεκτικότητα του υλικού σε άνθρακα.

Αυτό όμως δεν συμβαίνει και με την μικρή πυκνότητα ισχύος (19 W/mm^2), όπου από τα 1.5 m/min και πάνω η μέγιστη σκληρότητα μειώνεται σημαντικά, λόγω του φαινομένου της αυτοεπαναφοράς του μαρτενσίτη, όπως εξηγήθηκε και στην προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου αυτού. Το διάγραμμα του σχήματος 2.8 απεικονίζει ακριβώς αυτό το φαινόμενο.

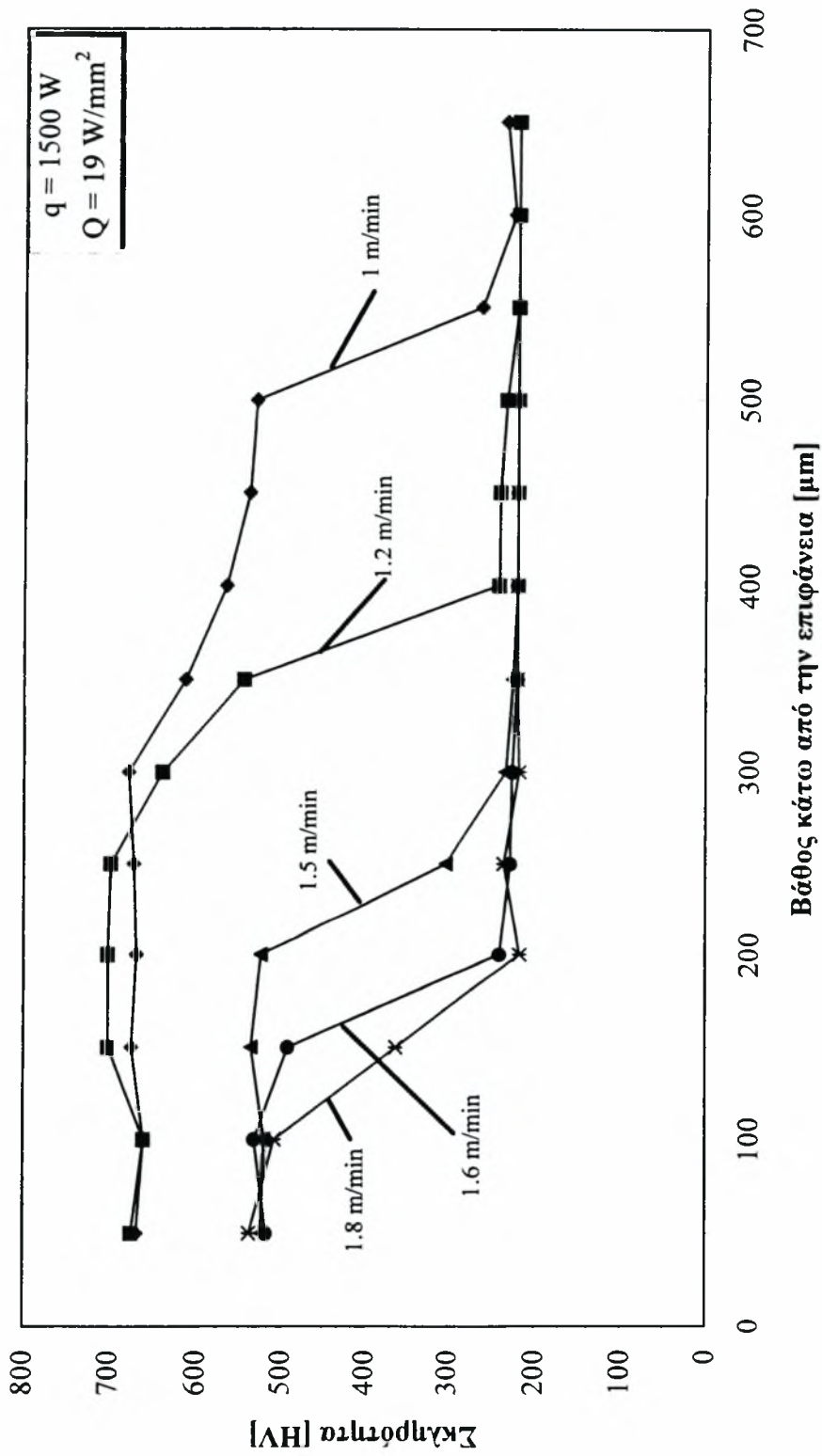
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων της κατεργασίας, δηλαδή το βάθος σκλήρυνσης, η μέγιστη σκληρότητα και το βάθος τήξης, σε όποια δοκίμια αυτή εμφανίσθηκε, τοποθετήθηκαν σε διαγράμματα της μορφής που φαίνεται στα σχήματα 2.9, 2.10 και 2.11, ένα για κάθε πυκνότητα ισχύος που χρησιμοποιήθηκε (76 W/mm^2 , 306 W/mm^2 και 19 W/mm^2 αντίστοιχα). Τέτοια διαγράμματα-χάρτες αποτελούν έναν αρκετά χρήσιμο οδηγό για την κατεργασία της επιφανειακής σκλήρυνσης του χάλυβα Ck-60 με την χρησιμοποίηση δέσμης LASER.



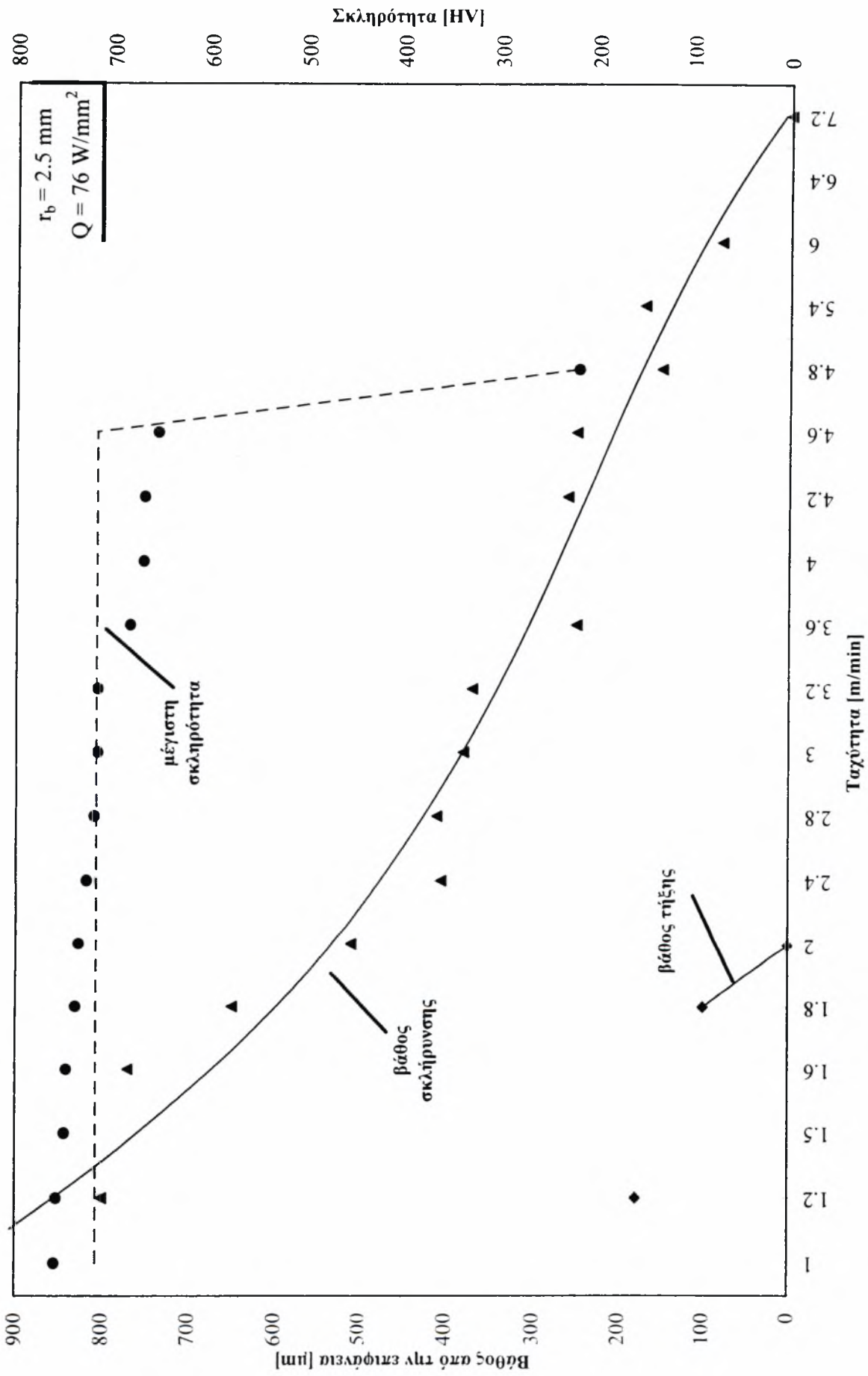
Σχήμα 2.6: Μερικά από τα προφίλ σκληρότητας για την πυκνότητα ισχύος των 76 W/mm^2 . Η μέγιστη σκληρότητα δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την ταχύτητα κατεργασίας.



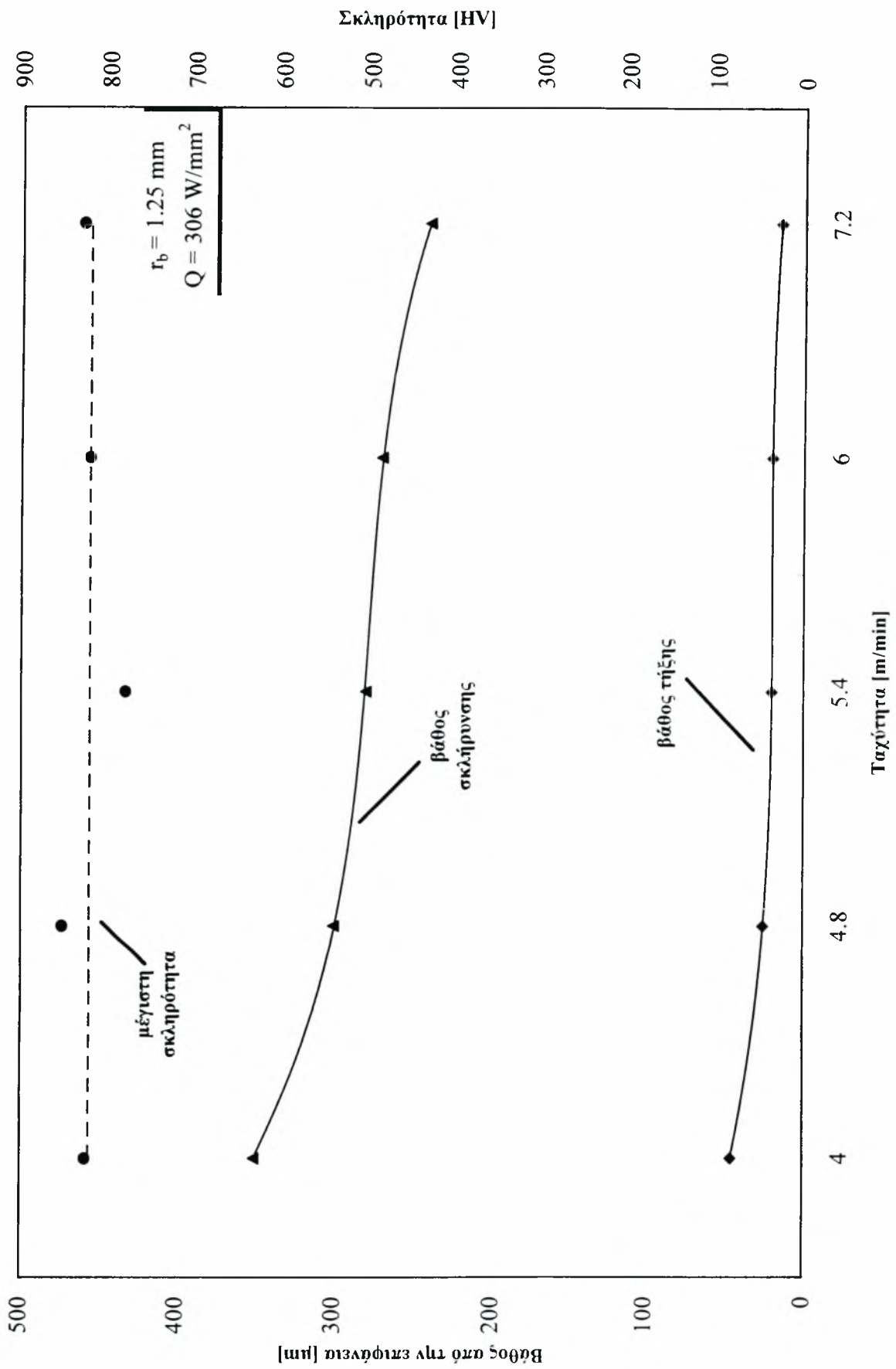
Σχήμα 2.7: Τα προφίλ σκληρότητας για την πυκνότητα ισχύος των 306 W/mm². Ούτε εδώ η μέγιστη σκληρότητα μεταβάλλεται σημαντικά με την ταχύτητα κατεργασίας.



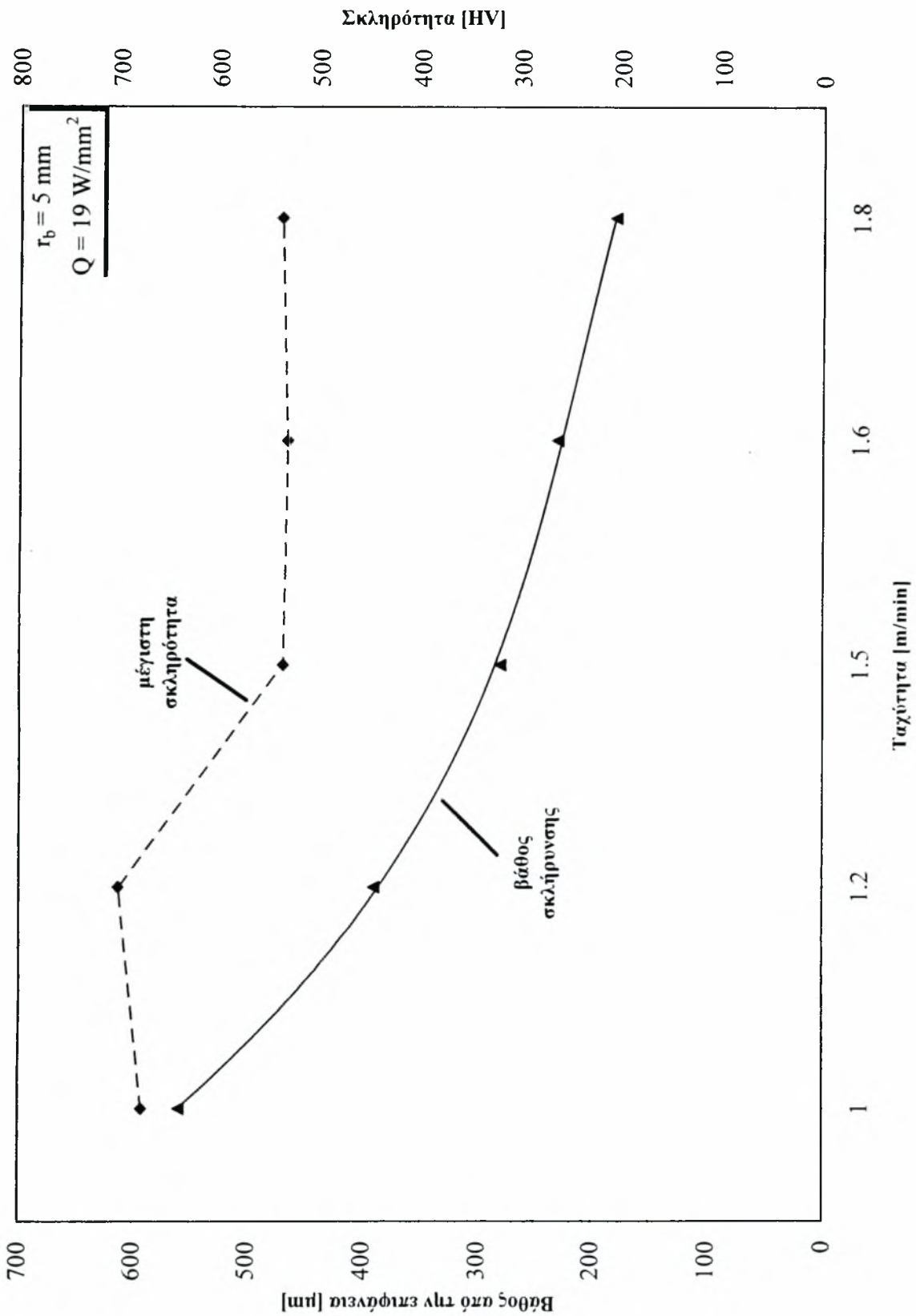
Σχήμα 2.8: Τα προφύλ σκληρότητας για την πυκνότητα ισχύος των 19 W/mm^2 . Για ταχύτερες κατεργασίες μεγαλύτερες ή ίσες των 1.5 m/min , η μέγιστη σκληρότητα μειώνεται σημαντικά.



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα-χάρτης της κατεργασίας, για πυκνότητα ισχύος 76 W/mm².



Σχήμα 2.10: Διάγραμμα-χάρτης της κατεργασίας, για πυκνότητα ισχύος 306 W/mm².



Σχήμα 2.1.1: Διάγραμμα-χάρτης της κατεργασίας, για πυκνότητα ισχύος 19 W/mm².

3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Το μονοδιάστατο μοντέλο μετάδοσης θερμότητας, το οποίο αναλύθηκε λεπτομερώς στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε, όπως αναφέρθηκε εξάλλου και στο κεφάλαιο της πειραματικής διαδικασίας (βλ. κεφάλαιο 3), με κύριο σκοπό την επιλογή των πειραματικών συνθηκών της κατεργασίας. Ο σκοπός αυτός εκπληρώθηκε με επιτυχία, αφού μέσω του μοντέλου καθορίστηκε κάποιο λογικό εύρος συνθηκών, οι οποίες τελικά και χρησιμοποιήθηκαν. Το γεγονός αυτό ήταν ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς σε περίπτωση που δεν είχαν χρησιμοποιηθεί τα αποτελέσματα του μοντέλου, έστω και για έναν προσεγγιστικό καθορισμό των συνθηκών, η πειραματική διαδικασία θα ξεκινούσε χωρίς να υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο πλαίσιο συνθηκών κατεργασίας. Θα έπρεπε οι συνθήκες αυτές να καθορισθούν επίσης πειραματικά, κάτι που θα επιβάρυνε την εργασία πάρα πολύ από πλευράς χρόνου.

Αφού λοιπόν ο κύριος στόχος του μοντέλου στα πλαίσια της εργασίας αυτής εκπληρώθηκε, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει και μία σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων, με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Το στοιχείο με το οποίο μπόρεσε να γίνει δυνατή η σύγκριση αυτή ήταν το βάθος της σκληρυμένης περιοχής (z_h), το οποίο προβλέπεται από το μοντέλο σαν το οριακό βάθος όπου η μέγιστη θερμοκρασία υπερβαίνει την κρίσιμη θερμοκρασία A_3 . Βεβαίως μόνο η μέγιστη θερμοκρασία δεν αποτελεί κριτήριο ότι θα επέλθει σκλήρυνση μέχρι το βάθος εκείνο, αφού πρωτεύοντα ρόλο παίζουν και οι ρυθμοί ψύξης. Έτσι λοιπόν η σύγκριση που έγινε περιέλαβε και τους ρυθμούς ψύξης. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι σαν ρυθμός ψύξης υπολογίστηκε το χρονικό διάστημα που η θερμοκρασία χρειάζεται για να πέσει από την A_3 ($755\text{ }^{\circ}\text{C}$) στους $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, όπου ο Ck-60 έχει πλήρως αποφύγει την περιλιπτική μύτη, σύμφωνα με το διάγραμμα T-T-T.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύγκριση ανά σειρά πειραμάτων.

1^η Σειρά Πειραμάτων

Πυκνότητα Ισχύος $Q = 76 \text{ W/mm}^2$, Ισχύς $q = 1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_b = 2.5 \text{ mm}$,

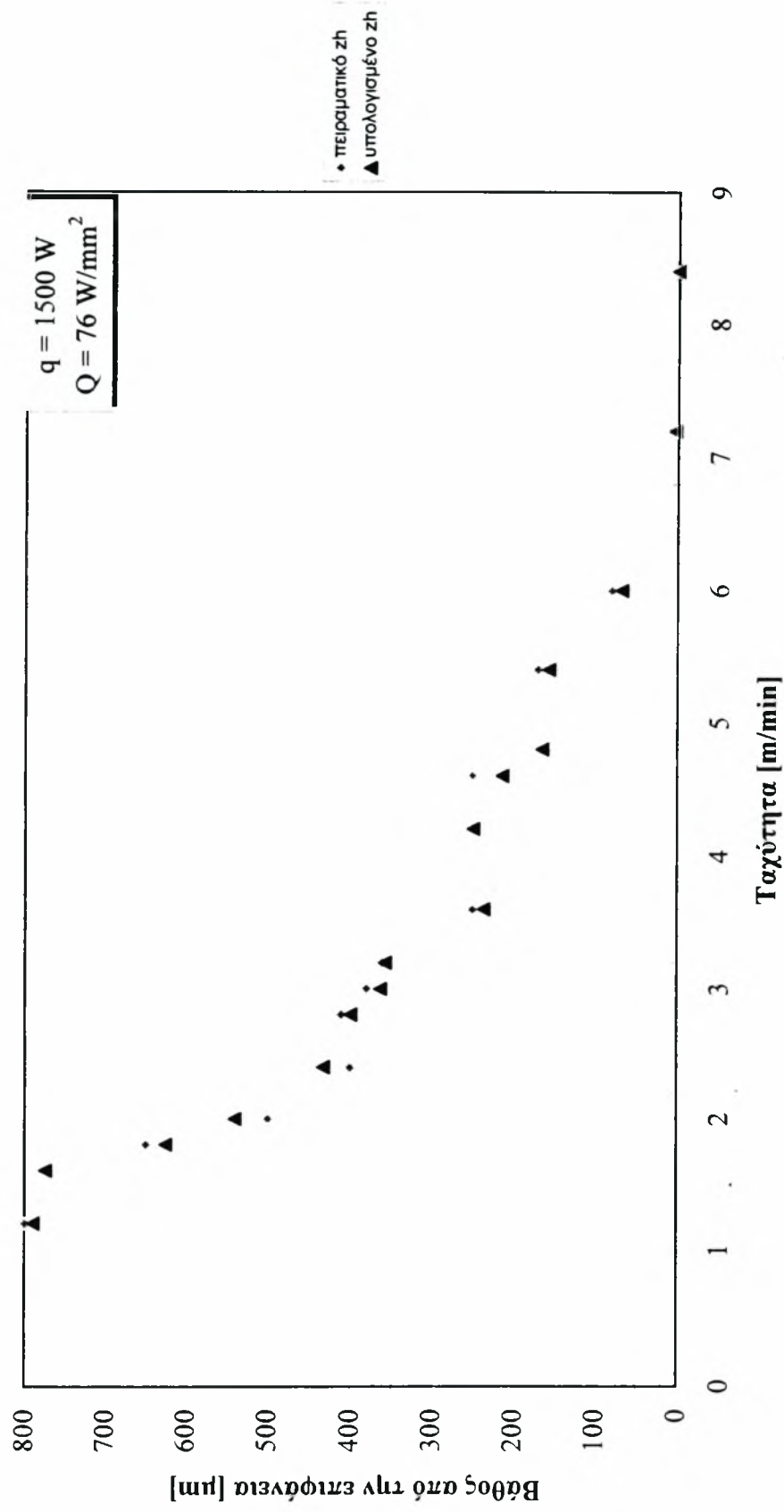
Ταχύτητες $u = 1.2 \text{ m/min}$ έως 8.4 m/min

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα βάθη σκλήρυνσης z_h που βρέθηκαν από τα πειράματα, τα υπολογισμένα από το μοντέλο z_h και οι ρυθμοί ψύξης για τα υπολογισμένα z_h , επίσης υπολογισμένοι με το μοντέλο.

Πίνακας 3.1: Σύγκριση των πειραματικών με τα υπολογισμένα από το μοντέλο βάθη σκλήρυνσης για την 1η σειρά πειραμάτων. Φαίνονται επίσης οι υπολογισμένοι από το μοντέλο ρυθμοί ψύξης, που αναφέρονται στο υπολογισμένο z_h .

Ταχύτητα [m/min]	Πειραματικό z_h [μm]	Υπολογισμένο z_h [μm]	Ρυθμός ψύξης [$^{\circ}\text{C}/\text{sec}$]
1.2	800	789	1345
1.6	770	774	1512
1.8	650	625	1868
2.0	500	540	2038
2.4	400	432	2513
2.8	410	399	2815
3.0	380	363	3047
3.2	360	357	3124
3.6	250	236	4158
4.2	250	249	4315
4.6	250	213	4859
4.8	160	164	5459
5.4	170	156	5970
6.0	80	68	8047
7.2	0	3	11377
8.4	0	0	-----

Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1 η σύγκλιση των πειραματικών με τα υπολογισμένα αποτελέσματα είναι αρκετά καλή. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 3.1.



Σχήμα 3.1: Η σύμπτωση των πειραματικών με τα υπολογισμένα βάθη της σκληρυμένης περιοχής είναι αρκετά ικανοποιητική.

2^η Σειρά Πειραμάτων

Πυκνότητα Ισχύος $Q = 306 \text{ W/mm}^2$, Ισχύς $q = 1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_b = 1.25 \text{ mm}$,

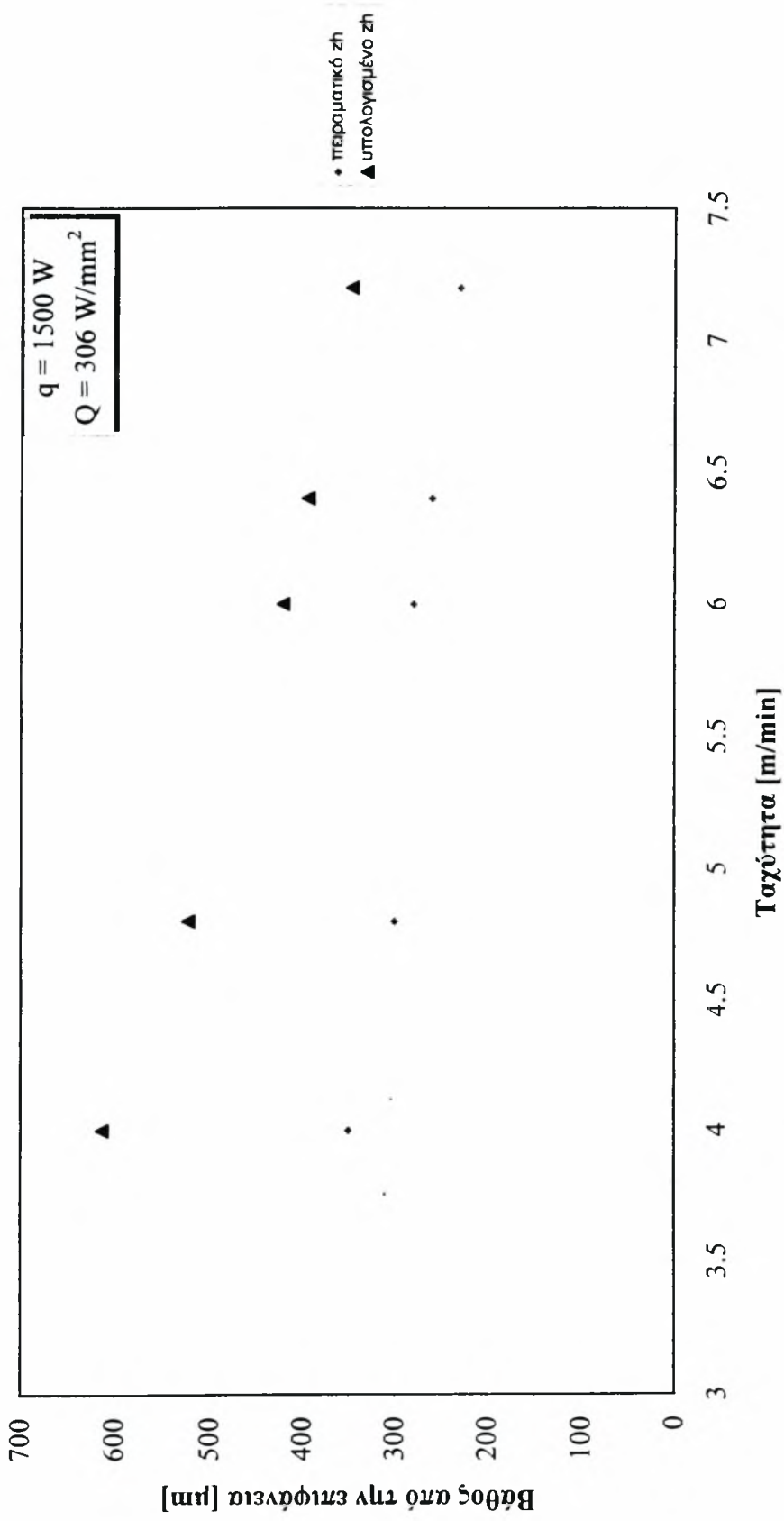
Ταχύτητες $u = 4 \text{ m/min}$ έως 7.2 m/min

Στον πίνακα 3.2 γίνεται η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των προβλέψεων του μοντέλου για την 2^η σειρά πειραμάτων. Δίδονται επίσης οι υπολογισμένοι με το μοντέλο ρυθμοί ψύξης για το z_h που έχει προβλεφθεί.

Πίνακας 3.2: Σύγκριση των πειραματικών και των υπολογισμένων από το μοντέλο αποτελεσμάτων, για την 2^η σειρά πειραμάτων.

Ταχύτητα [m/min]	Πειραματικό z_h [μm]	Υπολογισμένο z_h [μm]	Ρυθμός ψύξης [$^{\circ}\text{C}/\text{sec}$]
4.0	350	613	4436
4.8	300	522	5606
6.0	280	420	7283
6.4	260	393	7847
7.2	230	346	8960

Η απόκλιση των αποτελεσμάτων είναι πολύ μεγάλη, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 3.2. Η αποτυχία του μοντέλου οφείλεται, κατά πάσα πιθανότητα στο εξής: το βάθος μέχρι το οποίο θα σκληρυνθεί το υλικό (z_h) προβλέπεται από το μοντέλο σαν το οριακό βάθος όπου η μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία υπερβαίνει την κρίσιμη θερμοκρασία A_3 . Επειδή όμως όσο μικραίνει η διάμετρος της δέσμης LASER, τόσο πιο γρήγορα λαμβάνει χώρα ο κύκλος θέρμανσης της επιφάνειας, είναι πολύ πιθανό η διάχυση του άνθρακα να μην προλαβαίνει όχι μόνο να ολοκληρωθεί, αλλά ούτε καν να ξεκινήσει, ιδιαίτερα όσο αυξάνεται το βάθος κάτω από την επιφάνεια. Έτσι το υλικό δεν προλαβαίνει στην πραγματικότητα να μετασηματισθεί σε ωστενίτη και συνεπώς, κατά την ταχεία ψύξη, σε μαρτενσίτη.



Σχήμα 3.2: Η απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αποτελέσματα του μοντέλου, για την 2^η σειρά πειραμάτων, είναι πολύ μεγάλη.

3^η Σειρά Πειραμάτων

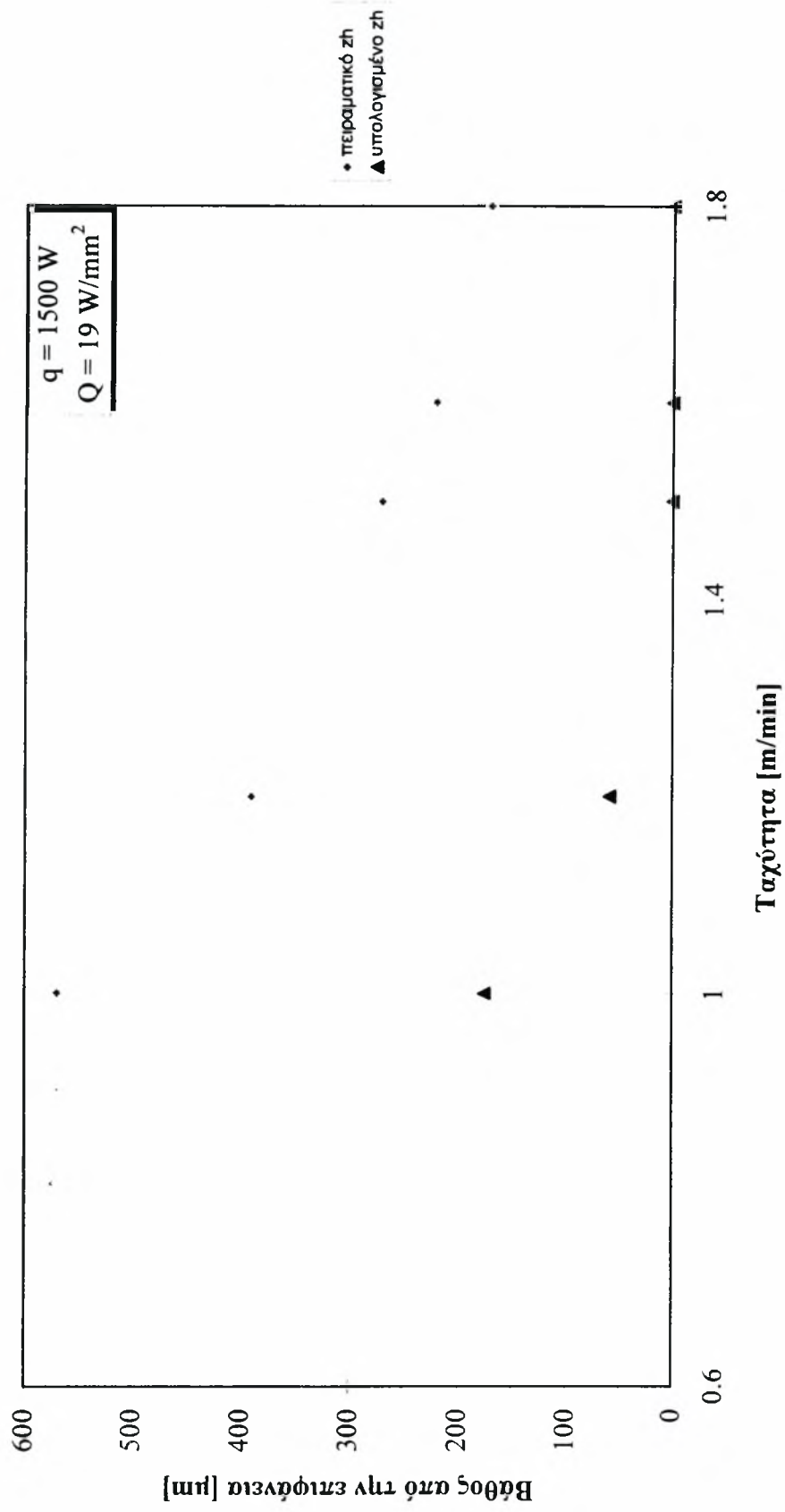
Πυκνότητα Ισχύος $Q = 19 \text{ W/mm}^2$, Ισχύς $q = 1500 \text{ W}$, Ακτίνα δέσμης $r_h = 5 \text{ mm}$, Ταχύτητες $u = 1 \text{ m/min}$ έως 1.8 m/min

Στον πίνακα 3.3 γίνεται η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των προβλέψεων του μοντέλου για την 3^η σειρά πειραμάτων. Δίδονται επίσης οι υπολογισμένοι με το μοντέλο ρυθμοί ψύξης για το z_h που έχει προβλεφθεί.

Πίνακας 3.3: Σύγκριση των πειραματικών και των υπολογισμένων από το μοντέλο αποτελεσμάτων, για την 3^η σειρά πειραμάτων.

Ταχύτητα [m/min]	Πειραματικό z_h [μm]	Υπολογισμένο z_h [μm]	Ρυθμός ψύξης [$^{\circ}\text{C/sec}$]
1.0	570	175	962
1.2	390	59	1195
1.5	270	0	-----
1.6	220	0	-----
1.8	170	0	-----

Και εδώ η αποτυχία του μοντέλου να προβλέψει τα βάθη σκλήρυνσης είναι πάρα πολύ μεγάλη, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 3.3. Αυτό οφείλεται στο ότι το μέγεθος της δέσμης είναι πλέον αρκετά μεγάλο και έτσι η υπόθεση ότι υπάρχει μετάδοση θερμότητας μόνο προς μία κατεύθυνση (1-D) δεν ισχύει πλέον.



Σχήμα 3.3: Η απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αποτελέσματα του μοντέλου, για την 3^η σειρά πειραμάτων, είναι πάρα πολύ μεγάλη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, τα οποία προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση της κατεργασίας μέσω του μονοδιάστατου μοντέλου μετάδοσης θερμότητας, την πειραματική διαδικασία, την ανάλυση της μικροδομής και τις μετρήσεις σκληρότητας, μπορούν να συνοψισθούν στα παρακάτω:

I. Η μικροδομή της σκληρυμένης περιοχής εξαρτάται από την χρησιμοποιούμενη πυκνότητα ισχύος και αποτελείται από χονδρόκοκκο μαρτενσίτη, για υψηλές (306 W/mm^2) και μέσες (76 W/mm^2) πυκνότητες ισχύος, ενώ για χαμηλές πυκνότητες ισχύος (19 W/mm^2) αποτελείται από μαρτενσίτη που έχει υποστεί αυτοεπαναφορά.

II. Η μικροδομή της διεπιφάνειας αποτελείται από μαρτενσίτη και φερρίτη, λόγω της μη ολοκλήρωσης του ωστενιτικού μετασχηματισμού στην περιοχή εκείνη.

III. Το βάθος της σκληρυμένης περιοχής εξαρτάται τόσο από την χρησιμοποιούμενη πυκνότητα ισχύος, όσο και από την σχετική ταχύτητα της δέσμης ως προς το τεμάχιο (ταχύτητα κατεργασίας). Το βάθος της σκληρυμένης περιοχής αυξάνεται είτε αυξάνοντας την πυκνότητα ισχύος, είτε μειώνοντας την ταχύτητα της κατεργασίας.

IV. Η μέγιστη σκληρότητα εξαρτάται από την πυκνότητα ισχύος. Αυξάνοντας την πυκνότητα ισχύος, αυξάνεται και η μέγιστη σκληρότητα που αποκτά η σκληρυμένη περιοχή της επιφάνειας. Η ταχύτητα της κατεργασίας, στις υψηλές και μέσες πυκνότητες ισχύος, δεν επηρεάζει σημαντικά την μέγιστη σκληρότητα, αφού τότε αυτή καθορίζεται από την περιεκτικότητα του υλικού σε άνθρακα. Αντίθετα στις χαμηλές πυκνότητες ισχύος, υπάρχει κάποια οριακή ταχύτητα, πάνω από την οποία ο μαρτενσίτης υφίσταται αυτοεπαναφορά, με αποτέλεσμα η μέγιστη σκληρότητα να μειώνεται σημαντικά.

V. Το μονοδιάστατο μοντέλο μετάδοσης θερμότητας δίδει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα στις μέσες πυκνότητες ισχύος, δηλαδή σε μεσαία μεγέθη της δέσμης LASER. Αντιθέτως δεν δίδει ικανοποιητική σύγκλιση τόσο σε μεγάλα μεγέθη της δέσμης, επειδή η παραδοχή της 1-D μετάδοσης θερμότητας παύει να ισχύει, όσο και σε μικρά μεγέθη της δέσμης, επειδή δεν λαμβάνει υπόψιν την κινητική των μετασχηματισμών (διάχυση).

2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το θέμα της επιφανειακής σκλήρυνσης με δέσμη LASER είναι τεράστιο και η παρούσα εργασία ήταν ένα πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση της διερεύνησης του θέματος αυτού. Υπάρχουν ακόμη πολλά πράγματα που πρέπει να γίνουν, ώστε η κατεργασία να περάσει στο στάδιο της εφαρμογής σε βιομηχανική κλίμακα. Έτσι λοιπόν προτείνεται να ερευνηθούν περαιτέρω τα εξής θέματα:

- 1) Ο ρόλος της ποιότητας της επιφάνειας πριν την κατεργασία. Θα πρέπει δηλαδή να εξετασθεί η επιροή της τραχύτητας και των διαφόρων επικαλύψεων, με στόχο την βελτίωση της απορροφητικότητας της επιφάνειας στην ακτινοβολία της δέσμης LASER.
- 2) Μελέτη των κινητικών φαινομένων (διάχυση) που λαμβάνουν χώρα κατά την διαδικασία ταχείας θέρμανσης της επιφάνειας του υλικού.
- 3) Ανάπτυξη και χρησιμοποίηση τρισδιάστου μοντέλου μετάδοσης θερμότητας, αναλυτικού ή πεπερασμένων στοιχείων, για όσο το δυνατόν καλύτερη πρόβλεψη των αποτελεσμάτων της κατεργασίας.
- 4) Επιφανειακή σκλήρυνση ολόκληρης επιφάνειας και μελέτη του προβλήματος των διαδοχικών αλληλοεπικαλύψεων των περασμάτων της δέσμης (over-lapping).
- 5) Μελέτη της συμπεριφοράς της κατεργασίας σε κυλινδρικές επιφάνειες και σε επιφάνειες με πολυπλοκότερες γεωμετρίες.
- 6) Μελέτη των αποτελεσμάτων της κατεργασίας σε διάφορα υλικά που παρουσιάζουν τεχνολογικό ενδιαφέρον.
- 7) Τεχνικο-οικονομική ανάλυση της κατεργασίας και σύγκριση με τις συμβατικές κατεργασίες επιφανειακής σκλήρυνσης από άποψη κόστους-ωφέλειας-ποιότητας τελικού προϊόντος.
- 8) Ολοκληρωμένη εφαρμογή της κατεργασίας σε στοιχεία μηχανών (γρανάζια, άξονες, ρουλεμάν) και μελέτη των αποτελεσμάτων.

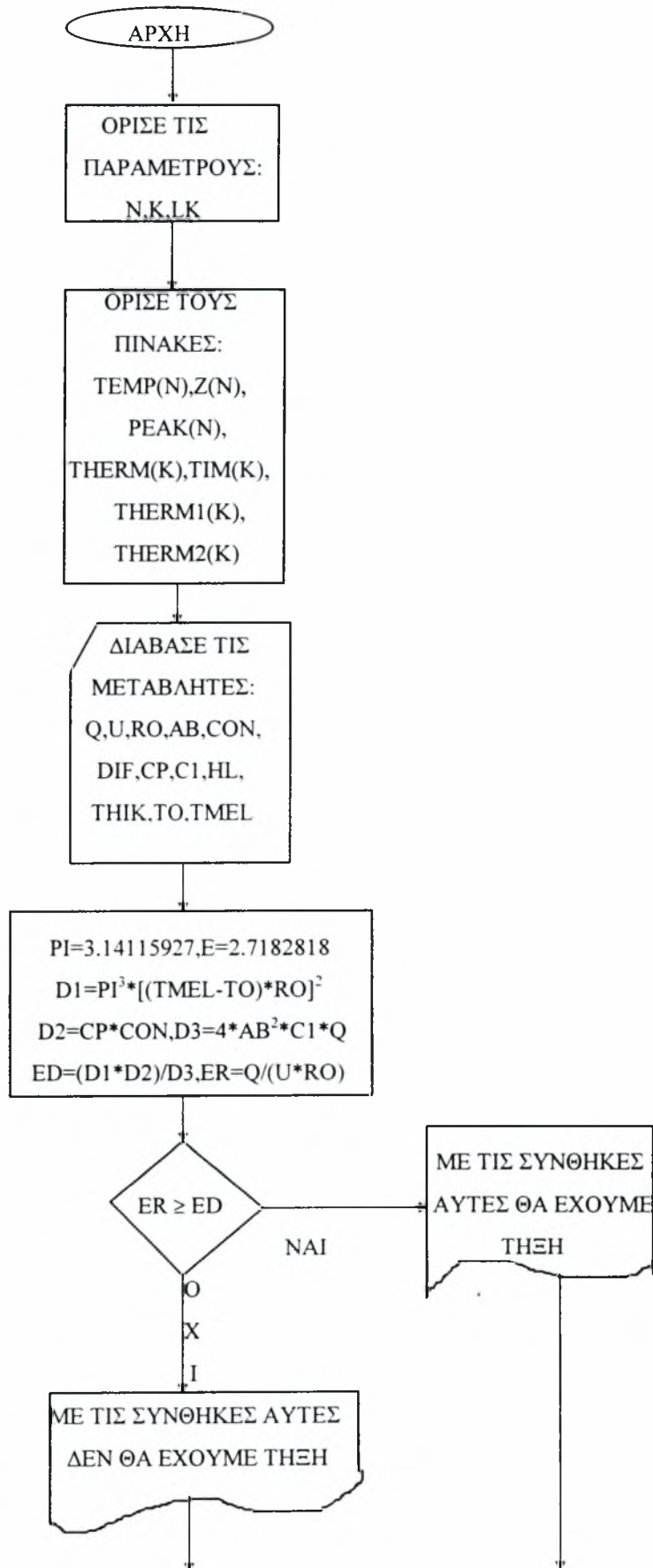
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

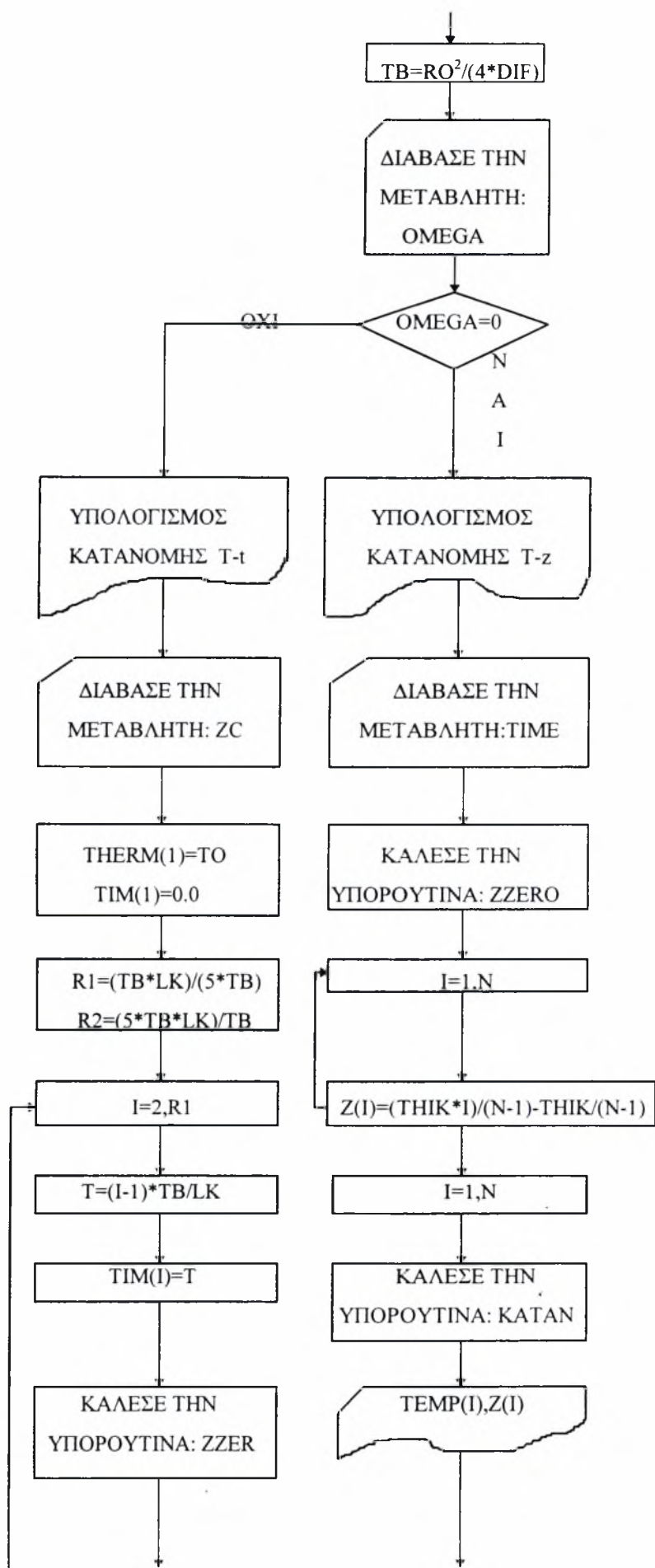
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

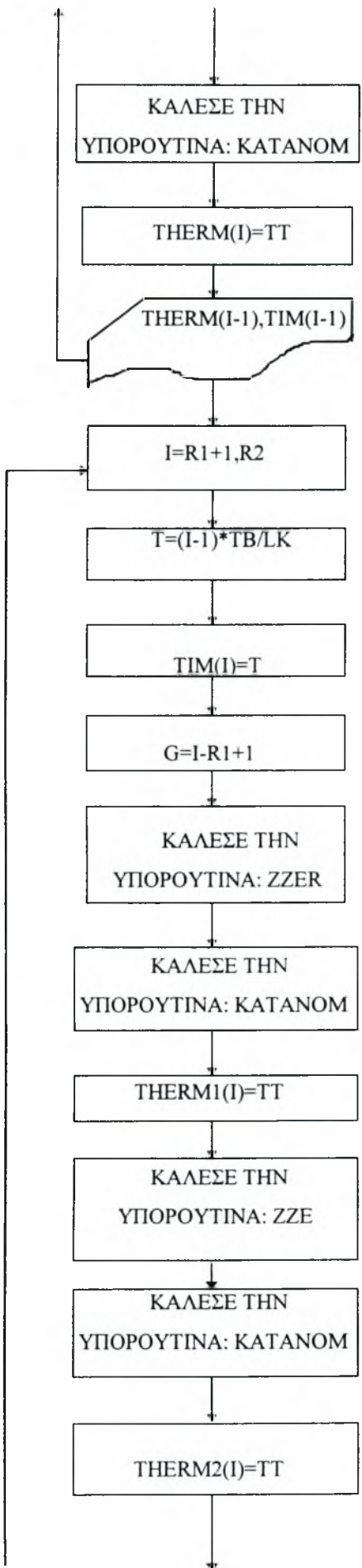
**ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

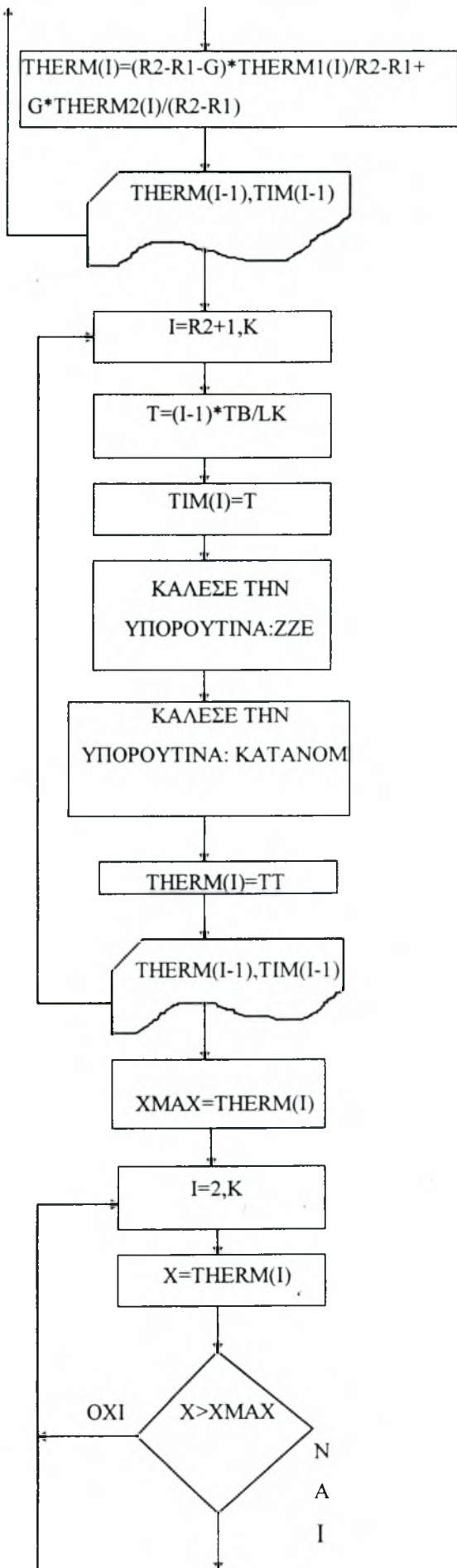
1. ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
2. ΛΙΣΤΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
3. ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ
4. ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΩΝ

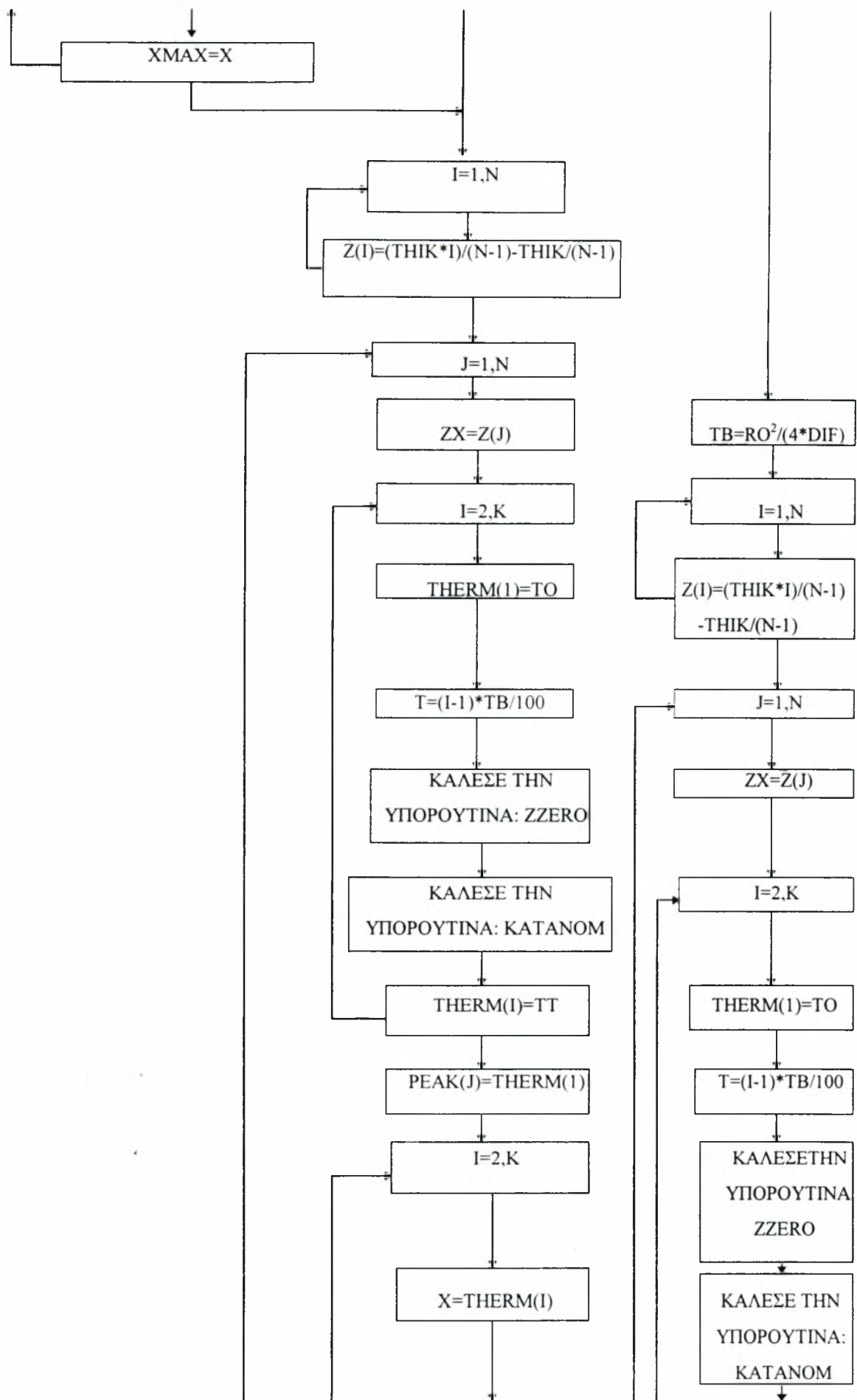
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

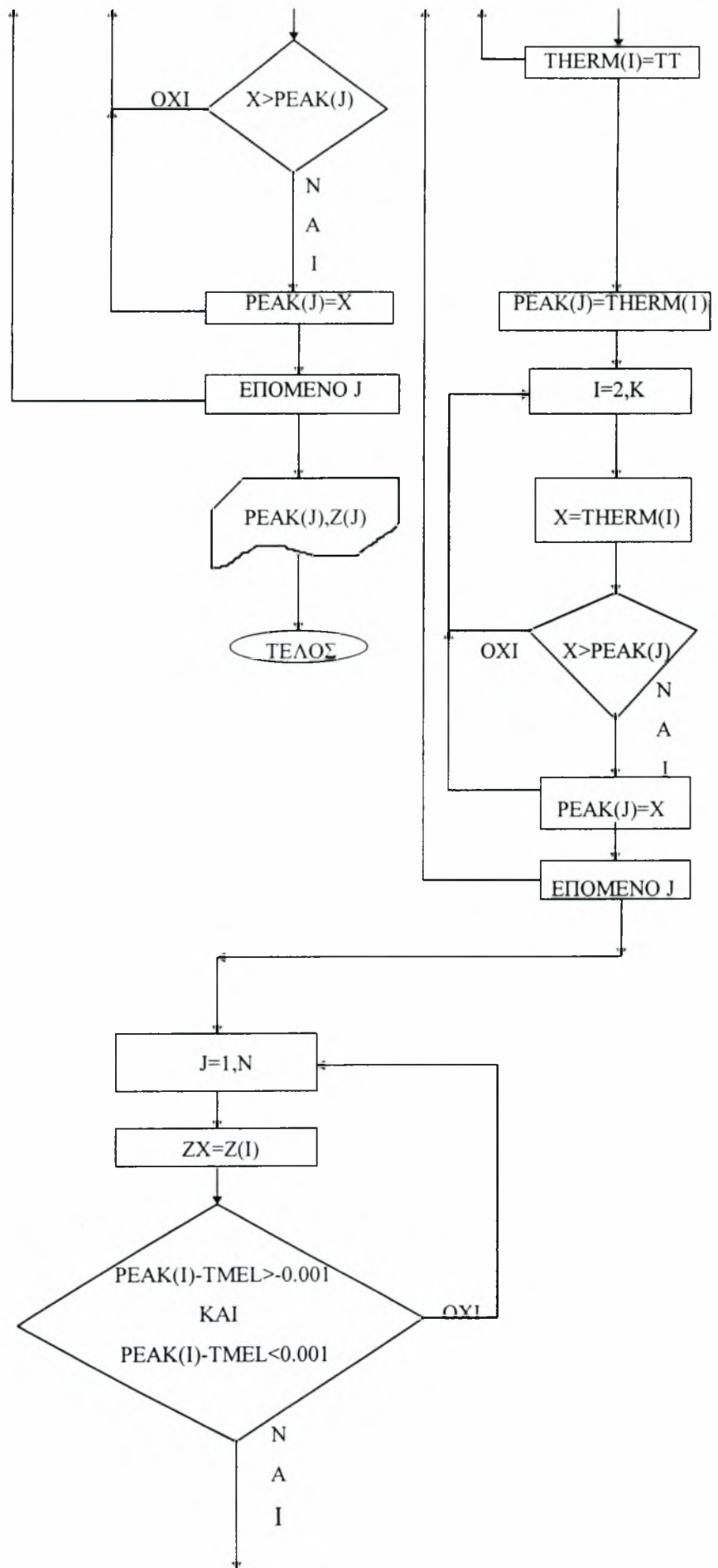


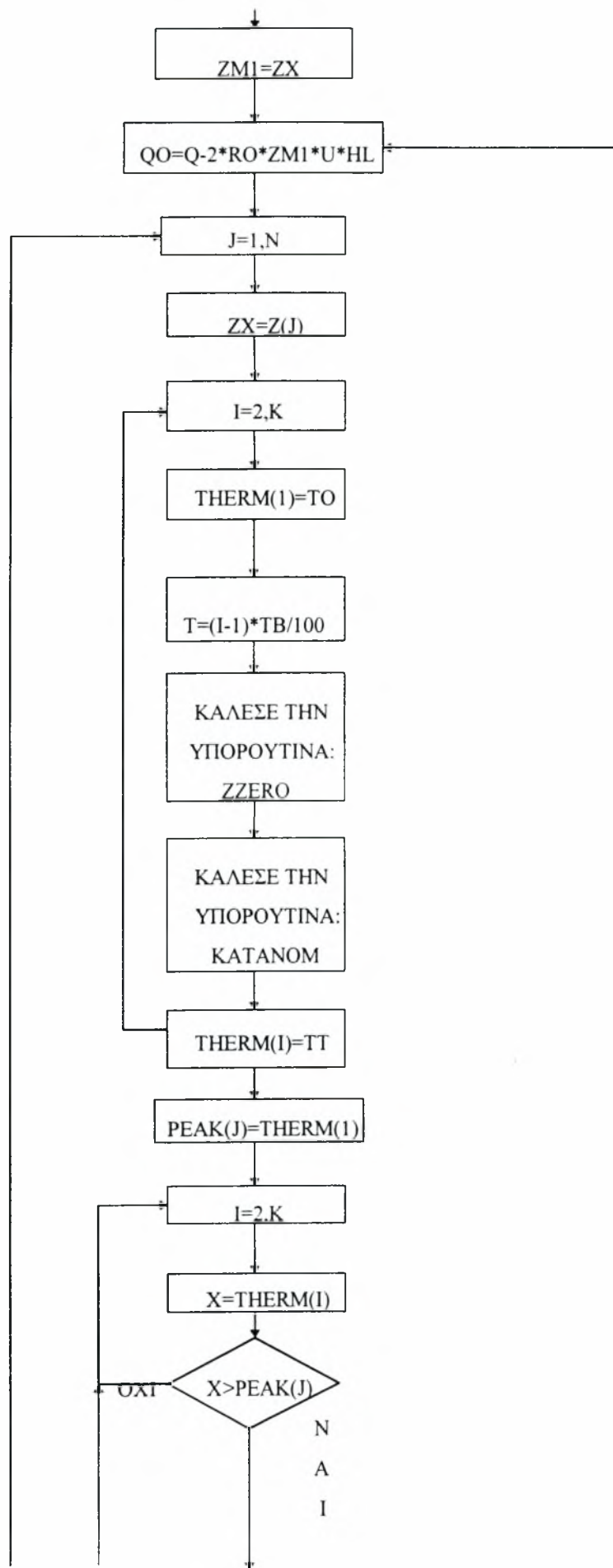


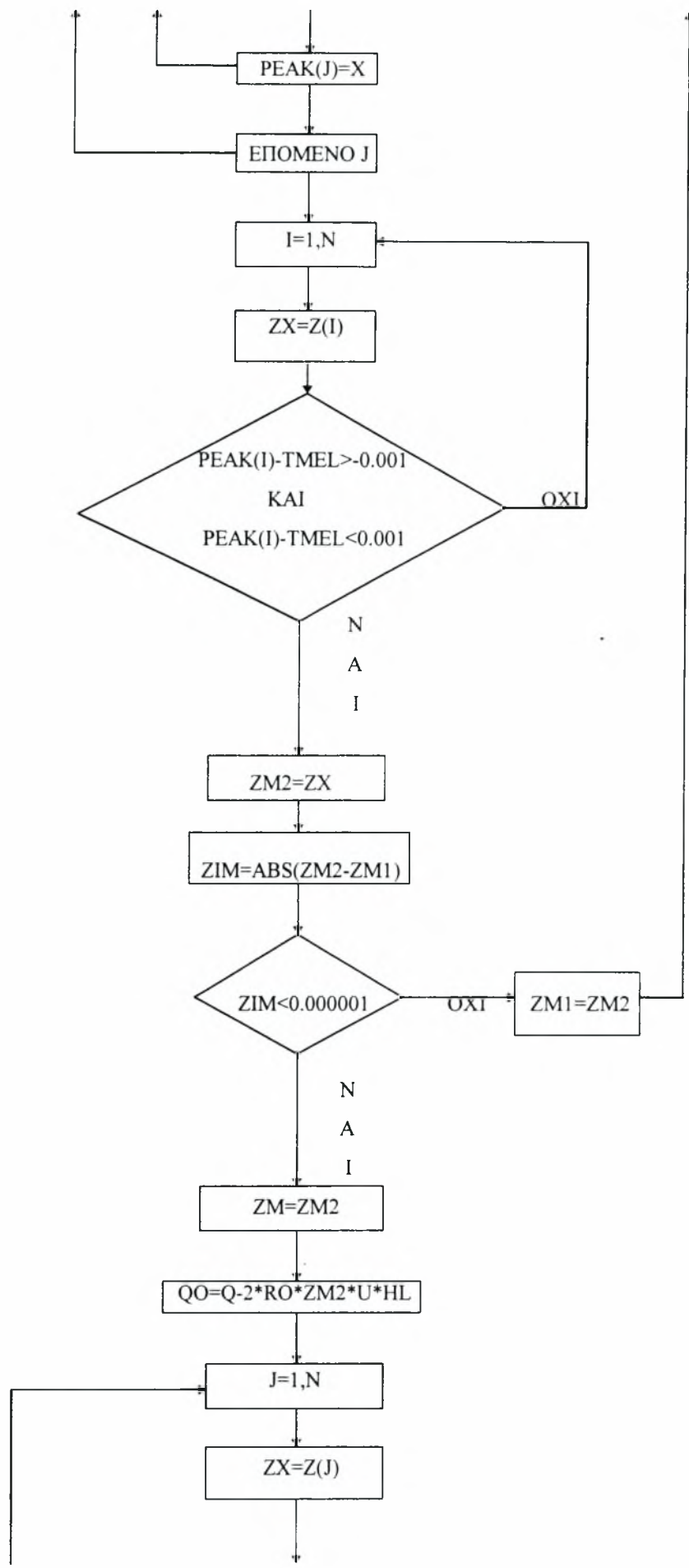


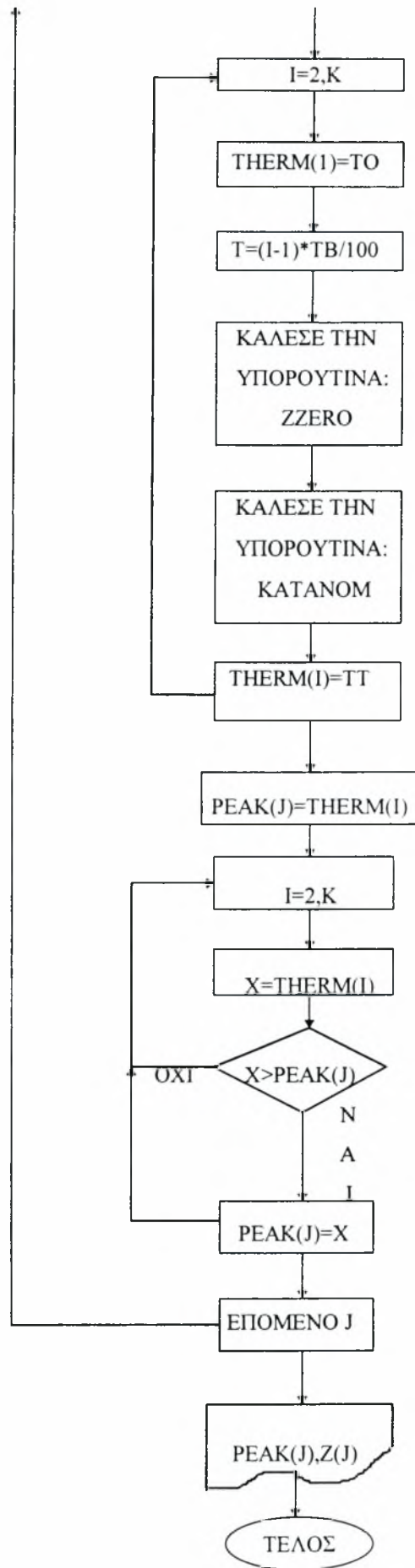












```

program diplo
PARAMETER (n=11,K=300,LK=50)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION TEMP(n),Z(n),THERM(K),PEAK(N),TIM(K),THERM1(K)
DIMENSION THERM2(K)
C   *** ΔΩΣΕ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ   ***
PRINT *, 'ΔΩΣΕ : ΙΣΧΥΣ ΔΕΣΜΗΣ (WATTS) , ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΕΣΜΗΣ (M/SEC)
3, ΑΚΤΙΝΑ ΔΕΣΜΗΣ (M) , ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ'
READ (*,495) Q,U,RO,AB
PRINT *, 'ΔΩΣΕ:ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mC),ΘΕΡΜΟΔΙΑΧΥΤΟΤΗΤΑ (M.M/SEC)
3,ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ x ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (J/m.m.m.C) , ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ C1, ΛΑΝΘΑ
3ΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΟΓΚΟΥ (J/m.m.m) '
READ (*,500) CON,DIF,CP,C1,HL
PRINT *, 'ΔΩΣΕ:ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ (m),ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (C),ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
3 ΤΗΣΗΣ (C) '
READ (*,510) THIK,TO,TMEL
495 FORMAT (4F14.7)
500 FORMAT (5F18.7)
510 FORMAT (3F14.7,4I3)
WRITE (8,1050)
WRITE (8,1100) Q,U,RO,AB
WRITE (8,1150) CON,DIF,CP,C1,HL
WRITE (8,1200) THIK,TO,TMEL
1000 FORMAT ('1',21('****')/1H,'* ',80X,' */
11H , '* ',20A4,' */1H , '* ',80X,' */
21H ,21('****'))
1050 FORMAT('0','*****ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ,ΣΕ ΣΥΝΑ
1ΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ(t) Η ΜΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ(Z) *****'///)
1100 FORMAT ('0',' ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ'/
1/6X,'ΙΣΧΥΣ ΔΕΣΜΗΣ (WATTS) -----',F14.7/
2/6X,'ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΕΣΜΗΣ (M/SEC)-----',F14.7/
3/6X,'ΑΚΤΙΝΑ ΔΕΣΜΗΣ (M) -----',F14.7/
4/6X,'ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ -----',F14.7///)
1150 FORMAT ('0','ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ'/
1/6X,'ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (Watt/mC) -----'F18.7/
2/6X,'ΘΕΡΜΟΔΙΑΧΥΤΟΤΗΤΑ (M.M/SEC)-----'F18.7/
3/6X,'ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ x ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (J/m.m.m.C)-----'F18.7/
4/6X,'ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ C1-----'F18.7/
5/6X,'ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΟΓΚΟΥ (J/m.m.m) ---'F18.7///)
1200 FORMAT ('0','ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ (m)-----',F14.7///
12X,'ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (C) -----',F14.7///
22X,'ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣΗΣ (C) -----',F14.7///)
q=170
u=0.2/60.
ro=0.001
ab=0.5
con=20.
dif=.00001278
cp=4500000.
c1=1.
hl=4.
thik=.004
to=25.
tmel=1473.
PI=3.1415927
E=2.7182818
D1=(PI**3)*((TMEL-TO)*RO)**2
D2=CP*CON
D3=4.*(AB**2)*C1*Q
ED=(D1*D2)/D3
ER=Q/(U*RO)
IF (ER.GE.ED) THEN
WRITE(8,*) 'ΜΕ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΥΤΕΣ ΘΑ ΕΧΟΥΜΕ ΤΗΣΗ: '
GOTO 333

```

```

ELSE
WRITE(8,*) 'ΜΕ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΥΤΕΣ ΔΕΝ ΘΑ ΕΧΟΥΜΕ ΤΗΞΗ! '
ENDIF
TB=RO**2/(4.*DIF)
PRINT *, ' ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΙΝΕΙ ΤΗΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚ
3ΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ, ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ(z), ΚΡΑΤΩΝΤΑΣ ΣΤΑΘΕΡΟ ΤΟ ΧΡΟ
3ΝΟ, ή ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ(t) ΚΡΑΤΩΝΤΑΣ ΣΤΑΘΕΡΟ ΤΟ ΒΑΘΟΣ.'
PRINT *, ' ΔΩΣΕ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ, ΒΑΘΟΣ(z) ή ΧΡΟΝ
3ΟΣ(t) '
PRINT *, ' ΩΣΤΕ ΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙ Η ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ '
PRINT *, ' ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΒΑΘΟΥΣ(T-z) ή ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΧΡΟΝΟΥ(T-t). '
PRINT *, ' ΠΙΕΣΕ ΤΟ 0 ΓΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ (T-z) ή ΟΠΟΙΟΔΗΠΟΤΕ ΑΛΛΟ ΝΟΥΜΕΡΟ
&ΓΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ (T-t): '
READ *, OMEGA
IF (OMEGA.EQ.0.0) THEN
PRINT *, ' ΕΠΙΛΕΞΑΤΕ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (T-z). '
PRINT *, ' ΔΩΣΕ ΤΗΝ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ t ΠΟΥ ΘΕΛΕΙΣ ΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΕΙΣ ΤΗΝ
&ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ(σε sec): '
READ *, TIME
CALL ZZERO(DIF, C1, RO, U, TIME, TB, ZO)
WRITE (8,*) ' ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ t=', TIME
WRITE (8,*) '
WRITE (8,*) ' ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΒΑΘΟΣ'
WRITE (8,*) '-----'
DO 20 I=1, n
20 Z(I)=(THIK/(N-1))*I-THIK/(N-1)
DO 24 I=1, n
CALL KATAN(TEMP, Z, TO, AB, Q, U, CON, TIME, TB, ZO, DIF, n)
24 WRITE (8,*) TEMP(I), Z(I)
ELSE
PRINT *, ' ΕΠΙΛΕΞΑΤΕ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (T-t). '
PRINT *, ' ΔΩΣΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ z ΓΙΑ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΘΕΛΕΙΣ ΝΑ ΥΠΟ
&ΛΟΓΙΣΕΙΣ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (σε m): '
READ *, ZC
WRITE (8,*) ' ΓΙΑ ΤΟ ΒΑΘΟΣ z=', ZC
WRITE (8,*) '
WRITE (8,*) ' ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ'
WRITE (8,*) '-----'
THERM(1)=TO
TIM(1)=0.0
R1=(TB/5.)/(TB/LK)
R2=(5.*TB)/(TB/LK)
DO 111 I=2, R1
T=(I-1)*TB/LK
TIM(I)=T
CALL ZZER(DIF, C1, RO, U, ZO)
CALL KATANOM(TT, ZC, T, TO, AB, Q, U, CON, TB, ZO, DIF)
THERM(I)=TT
WRITE (8,*) THERM(I-1), TIM(I-1)
111 CONTINUE
DO 112 I=R1+1, R2
T=(I-1)*TB/LK
TIM(I)=T
G=I-R1+1
CALL ZZER(DIF, C1, RO, U, ZO)
CALL KATANOM(TT, ZC, T, TO, AB, Q, U, CON, TB, ZO, DIF)
THERM1(I)=TT
CALL ZZE(DIF, C1, RO, U, ZO)
CALL KATANOM(TT, ZC, T, TO, AB, Q, U, CON, TB, ZO, DIF)
THERM2(I)=TT
THERM(I)=((R2-R1)-G)/(R2-R1)*THERM1(I)+G/(R2-R1)*THERM2(I)
WRITE (8,*) THERM(I-1), TIM(I-1)
112 CONTINUE
DO 113 I=R2+1, K

```



```

T=(I-1)*TB/LK
TIM(I)=T
CALL ZZE(DIF,C1,RO,U,ZO)
CALL KATANOM(TT,ZC,T,TO,AB,Q,U,CON,TB,ZO,DIF)
THERM(I)=TT
WRITE(8,*) THERM(I-1),TIM(I-1)
113 CONTINUE
XMAX=THERM(1)
DO 13 I=2,K
X=THERM(I)
IF(X.GT.XMAX) THEN
XMAX=X
ENDIF
13 CONTINUE
ENDIF
DO 22 I=1,n
22 Z(I)=(THIK/(N-1))*I-THIK/(N-1)
DO 60 J=1,N
ZX=Z(J)
DO 50 I=2,K
THERM(1)=TO
T=(I-1)*TB/100.
CALL ZZERO(DIF,C1,RO,U,T,TB,ZO)
CALL KATANOM(TT,ZX,T,TO,AB,Q,U,CON,TB,ZO,DIF)
THERM(I)=TT
50 CONTINUE
PEAK(J)=THERM(1)
DO 15 I=2,K
X=THERM(I)
IF(X.GT.PEAK(J)) THEN
PEAK(J)=X
ENDIF
15 CONTINUE
60 CONTINUE
WRITE(8,*) '*****'
WRITE(8,*) '          ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ          ΒΑΘΟΣ'
WRITE(8,*) '-----'
DO 45 J=1,N
45 WRITE(8,*) PEAK(J),Z(J)
GOTO 1111
C
----- ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΗΞΗ -----
333 TB=RO**2/(4.*DIF)
DO 21 I=1,n
21 Z(I)=(THIK/(N-1))*I-THIK/(N-1)
DO 61 J=1,N
ZX=Z(J)
DO 51 I=2,K
THERM(1)=TO
T=(I-1)*TB/100.
CALL ZZERO(DIF,C1,RO,U,T,TB,ZO)
CALL KATANOM(TT,ZX,T,TO,AB,Q,U,CON,TB,ZO,DIF)
THERM(I)=TT
51 CONTINUE
PEAK(J)=THERM(1)
DO 16 I=2,K
X=THERM(I)
IF(X.GT.PEAK(J)) THEN
PEAK(J)=X
ENDIF
16 CONTINUE
61 CONTINUE
DO 100 I=1,N
ZX=Z(I)
IF((PEAK(I)-TMEL).GT.-0.001.AND.(PEAK(I)-TMEL).LT.0.001) THEN

```

```

GOTO 33
ELSE
ENDIF
100 CONTINUE
33 ZM1=ZX
222 QO=Q-2*RO*ZM1*U*HL
DO 62 J=1,N
ZX=Z(J)
DO 52 I=2,K
THERM(1)=TO
T=(I-1)*TB/100.
CALL ZZERO(DIF,C1,RO,U,T,TB,ZO)
CALL KATANOM(TT,ZX,T,TO,AB,QO,U,CON,TB,ZO,DIF)
THERM(I)=TT
52 CONTINUE
PEAK(J)=THERM(1)
DO 17 I=2,K
X=THERM(I)
IF (X.GT.PEAK(J)) THEN
PEAK(J)=X
ENDIF
17 CONTINUE
62 CONTINUE
DO 102 I=1,N
ZX=Z(I)
IF ((PEAK(I)-TMEL).GT.-0.001.AND.(PEAK(I)-TMEL).LT.0.001) THEN
GOTO 32
ELSE
ENDIF
102 CONTINUE
32 ZM2=ZX
442 ZIM=ABS(ZM2-ZM1)
IF (ZIM.LT.0.0001) THEN
ZM=ZM2
goto 221
ELSE ZM1=ZM2
goto 222
ENDIF
221 QO=Q-2*RO*ZM2*U*HL
DO 63 J=1,N
ZX=Z(J)
DO 53 I=2,K
THERM(1)=TO
T=(I-1)*TB/100.
CALL ZZERO(DIF,C1,RO,U,T,TB,ZO)
CALL KATANOM(TT,ZX,T,TO,AB,QO,U,CON,TB,ZO,DIF)
THERM(I)=TT
53 CONTINUE
PEAK(J)=THERM(1)
DO 18 I=2,K
X=THERM(I)
IF (X.GT.PEAK(J)) THEN
PEAK(J)=X
ENDIF
18 CONTINUE
63 CONTINUE
WRITE (8,*) '*****'
WRITE (8,*) '          ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ          ΒΑΘΟΣ'
WRITE (8,*) '-----'
DO 42 J=1,N
42 WRITE (8,*) PEAK(J),Z(J)
1111 END

```

```

SUBROUTINE KATANOM(TT,Z1,TIME,TO,AB,Q,U,CON,TB,ZO,DIF)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
PI=3.1415927
E=2.7182818
A1=((Z1+ZO)**2)/(4.*(DIF)*(TIME))
A2=SQRT(TIME*(TIME+TB))
A3=(AB*Q)/(U*2.*PI*CON)
TT=TO+(A3/A2)*EXP(-A1)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE ZZERO(DIF,C1,RO,U,TIME,TB,ZO)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
PI=3.1415927
E=2.7182818
A1=SQRT(PI)/E
A2=SQRT((DIF*RO)/(C1*U))
TB1=1.00000000000000001*TB
TB2=0.9999999999999999*TB
IF(TIME.GT.TB1) THEN
ZO=SQRT(A1*A2*RO)
ENDIF
IF(TIME.LT.TB2) THEN
ZO=SQRT((PI*DIF*RO)/(2.*E*C1*U))
ENDIF
IF(TIME.EQ.TB) THEN
ZO=(SQRT(A1*A2*RO)+SQRT((PI*DIF*RO)/(2.*E*C1*U)))/2.
ENDIF
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE KATAN(TT,Z1,TO,AB,Q,U,CON,TIME,TB,ZO,DIF,n)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION Z1(n),TT(n)
PI=3.1415927
E=2.7182818
DO 23 I=1,n
A1=((Z1(I)+ZO)**2)/(4.*(DIF)*(TIME))
A2=SQRT(TIME*(TIME+TB))
A3=(AB*Q)/(U*2.*PI*CON)
TT(I)=TO+(A3/A2)*EXP(-A1)
23 CONTINUE
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE ZZER(DIF,C1,RO,U,ZO)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
PI=3.1415927
E=2.7182818
ZO=SQRT((PI*DIF*RO)/(2.*E*C1*U))
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE ZZE(DIF,C1,RO,U,ZO)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
PI=3.1415927
E=2.7182818
A1=SQRT(PI)/E
A2=SQRT((DIF*RO)/(C1*U))
ZO=SQRT(A1*A2*RO)
RETURN
END

```

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FORTRAN ΓΙΑ ΤΟ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για τις ανάγκες του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε μία πληθώρα μεταβλητών. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να παρουσιασθούν οι βασικότερες από τις μεταβλητές αυτές:

Q.....ισχύς της δέσμης LASER

U.....ταχύτητα της δέσμης LASER

RO.....ακτίνα της δέσμης LASER

AB.....συντελεστής απορροφητικότητας της επιφάνειας του τεμαχίου

CON.....συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του τεμαχίου

DIF.....συντελεστής θερμοδιαχυτότητας του υλικού του τεμαχίου

CP.....ειδική θερμότητα επί πυκνότητα του υλικού του τεμαχίου

HL.....λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου του υλικού του τεμαχίου

THIK...πάχος ελάσματος

TO.....αρχική θερμοκρασία του τεμαχίου

TMEL..θερμοκρασία τήξης του υλικού του τεμαχίου

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Στο πρόγραμμα FORTRAN που παρουσιάστηκε παραπάνω, χρησιμοποιούνται πέντε υπορουτίνες. Στο σημείο αυτό θα εξηγηθεί η λειτουργία και ο ρόλος που επιτελεί η κάθε μία από τις υπορουτίνες αυτές.

1) Υπορουτίνα ZZERO: Η υπορουτίνα αυτή καλείται από το πρόγραμμα, όταν έχει επιλεγεί από τον χρήστη ο υπολογισμός της κατανομής θερμοκρασίας-βάθους κάτω από την επιφάνεια (T-z), για μία καθορισμένη χρονική στιγμή t, η οποία έχει επίσης επιλεγεί από τον χρήστη. Ο ρόλος της ZZERO είναι να υπολογίζει την σταθερά z₀, βλ. εξισώσεις (2) και (3) της ενότητας I του κεφαλαίου 2. Κατ' αρχήν η υπορουτίνα εξετάζει εάν η επιλεγείσα χρονική στιγμή t είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την χρονική σταθερά $t_0 = (\tau_b)^2 / (4\alpha)$. Εάν $t < t_0$, τότε χρησιμοποιεί την εξίσωση (2) για να υπολογίσει το z₀. Αντιθέτως, εάν $t > t_0$, τότε υπολογίζει το z₀ από την εξίσωση (3). Στην περίπτωση που $t = t_0$, τότε υπολογίζει το z₀ από την εξίσωση (2) και από την εξίσωση (3) και λαμβάνει σαν z₀ τον μέσο όρο τους.

2) Υπορουτίνα KATANOM: Και η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται όταν έχει επιλεγεί ο υπολογισμός της κατανομής T-z. Ο ρόλος της KATANOM είναι να υπολογίζει την θερμοκρασία για ένα συγκεκριμένο βάθος z κάτω από την επιφάνεια, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1), βλ. ενότητα 1 του κεφαλαίου 2. Για να εκτελέσει τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιεί την τιμή του z_0 , η οποία υπολογίσθηκε προηγούμενα από την ZZERO. Η υπορουτίνα KATANOM καλείται από το κυρίως πρόγραμμα μέσα από ένα DO-LOOP και έτσι υπολογίζει διαδοχικά την θερμοκρασία για κάθε σημείο z κάτω από την επιφάνεια, για την επιλεγείσα χρονική στιγμή t, δίνοντας έτσι την κατανομή T-z.

3) Υπορουτίνα ZZER: Η υπορουτίνα αυτή καλείται από το πρόγραμμα, όταν έχει επιλεγεί από τον χρήστη ο υπολογισμός της κατανομής θερμοκρασίας-χρόνου (T-t), για ένα συγκεκριμένο βάθος z κάτω από την επιφάνεια. Ο ρόλος της ZZER είναι να υπολογίζει την σταθερά z_0 , για τις χρονικές στιγμές $t < t_0$, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2), βλ. ενότητα 1 του κεφαλαίου 2.

4) Υπορουτίνα ZZE: Η υπορουτίνα αυτή είναι συμπληρωματική της ZZER, καθώς υπολογίζει την σταθερά z_0 , αλλά για τις χρονικές στιγμές $t > t_0$. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιεί την εξίσωση (3), βλ. ενότητα 1 του κεφαλαίου 2. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι για τις χρονικές στιγμές όπου $t > t_0$, τότε το πρόγραμμα υπολογίζει τα z_0 από τις υπορουτίνες ZZER και ZZE και στην συνέχεια, σαν z_0 λαμβάνει ένα σταθμισμένο μέσο όρο των δύο τιμών.

5) Υπορουτίνα KATAN: Η υπορουτίνα αυτή καλείται από το πρόγραμμα, όταν έχει επιλεγεί από τον χρήστη ο υπολογισμός της κατανομής T-t. Ο ρόλος της είναι να υπολογίζει την θερμοκρασία για κάποια χρονική στιγμή t, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1), βλ. ενότητα 1 του κεφαλαίου 2. Σαν z_0 λαμβάνει τις τιμές που δίνουν οι υπορουτίνες ZZER και ZZE. Η υπορουτίνα KATAN καλείται από το κυρίως πρόγραμμα μέσα από ένα DO-LOOP και έτσι υπολογίζει διαδοχικά την θερμοκρασία για κάθε χρονική στιγμή t, για το επιλεγέν βάθος κάτω από την επιφάνεια z, δίνοντας έτσι την κατανομή T-t.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

**ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ
ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ**

Μία αρκετά συνηθισμένη μέθοδος, με την οποία αυξάνεται η μηχανική αντοχή της επιφάνειας ενός υλικού, είναι η πλαστική διαμόρφωσή της με αμμοβολή, σφυρηλάτηση ή υπερκύλιση. Μετά από αυτές τις κατεργασίες πλαστικής διαμόρφωσης το υλικό από την επιφάνεια της ατράκτου και μέχρι ένα συγκεκριμένο βάθος βρίσκεται σε κατάσταση σκλήρυνσης, οπότε αυξάνεται το επιτρεπόμενο όριο στατικής και δυναμικής του αντοχής. Προϋπόθεση για την εφαρμογή και αποτελεσματικότητα αυτών των κατεργασιών είναι η ολκιμότητα του υλικού. Η προϋπόθεση αυτή υπάρχει, κυρίως στους κοινούς χάλυβες κατασκευών St 37, St 42, St 50 και σε όλα τα υλικά, στα οποία το όριο ροής ή μηκύνσεως είναι αρκετά χαμηλότερο από το όριο θραύσης τους.

Η επιφανειακή σκληρότητα των κοινών χαλύβων κατασκευών, προτού υποστούν μία κατεργασία, είναι κατά μέσο όρο 130 HB. Όταν η σκληρότητα αυτή δεν είναι αρκετή, για να αντιμετωπισθεί η φθορά μιας επιφάνειας, τότε πρέπει να εκλεγεί ένας χάλυβας του οποίου η επιφάνεια να μπορεί να βαφεί, π.χ. St 60, St 70 ή ένας χάλυβας ενανθρακώσεως κ.λ.π.

Ο συνηθέστερος και αποτελεσματικότερος τρόπος, με τον οποίο αντιμετωπίζεται η φθορά μιας επιφάνειας, είναι να χρησιμοποιηθεί ένας χάλυβας ενανθρακώσεως κατά DIN 17 210. Η επιφανειακή σκληρότητα αυτών των χαλύβων μετά τη θερμική κατεργασία βαφής τους κυμαίνεται μεταξύ 630 HB και 720 HB. Ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των χαλύβων ενανθρακώσεως και των θερμικών κατεργασιών της ενανθρακώσεως και της βαφής είναι τα εξής:

1. Οι ειδικοί χάλυβες ενανθρακώσεως έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 0.25 % κ.β. Όσοι δεν περιέχουν άλλες αξιόλογες προσθήκες εκτός από τον άνθρακα αποκτούν μετά την βαφή τους πολύ υψηλή επιφανειακή σκληρότητα, σε αντίθεση με τους χάλυβες ενανθρακώσεως που περιέχουν προσθήκες και των οποίων η επιφανειακή σκληρότητα μετά την βαφή δεν αποκτά υψηλές τιμές.
2. Ο χρόνος ενανθρακώσεως αυξάνεται εκθετικά με το απαιτούμενο βάθος ενανθρακώσεως και βαφής. Έτσι τα μεγάλα βάθη ενανθρακώσεως είναι αντισυμβατικά.
3. Μετά την ενανθράκωση η επιφάνεια του υλικού έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα περίπου 0.8 % κ.β., ενώ το ποσοστό αυτό πέφτει γρήγορα προχωρώντας προς το βάθος του υλικού. Η περιεκτικότητα του μετάλλου βάσης του υλικού σε άνθρακα δεν αλλοιώνεται με την ενανθράκωση.
4. Όταν ορισμένες επιφάνειες του υλικού δεν πρέπει να ενανθρακωθούν, τότε πριν τη θερμική κατεργασία ενανθρακώσεως καλύπτονται με ειδικά πηλώδη υλικά, που δεν επιτρέπουν τη διείσδυση και τη διάχυση του άνθρακα στο χάλυβα.

5. Η ενανθράκωση και η βαφή αλλάζουν τη δομή των κρυστάλλων ενός χάλυβα και αυξάνουν, κατά κανόνα, τον όγκο τους. Με την επιφανειακή βαφή ενός εξαρτήματος αναπτύσσονται έτσι θλιπτικές τάσεις στο βαμμένο στρώμα της επιφάνειας του υλικού, το οποίο διογκώνεται, ενώ στον άβαφο πυρήνα του εξαρτήματος αναπτύσσονται παράλληλα εφελκυστικές τάσεις. Όταν οι εσωτερικές θλιπτικές τάσεις της βαμμένης επιφάνειας είναι μεγαλύτερες από το όριο θραύσης του υλικού (όριο ροής ή μυκήσεως δεν έχει ο βαμμένος χάλυβας επειδή είναι ψαθυρό υλικό), τότε εμφανίζονται ρήγματα, οπότε το εξάρτημα αχρηστεύεται.

Η εναζώτωση είναι επίσης μία μέθοδος επιφανειακής βαφής των χαλύβων, που αυξάνει την αντοχή τους σε φθορά. Η μηχανική αντοχή του μετάλλου βάσης των ειδικών χαλύβων εναζωτώσεως είναι αρκετά υψηλότερη από την αντίστοιχη αντοχή των χαλύβων ενανθρακώσεως. Ο χρόνος εναζωτώσεως είναι πάρα πολύ μεγάλος. Το βάθος του επιφανειακού στρώματος εναζωτώσεως κυμαίνεται συνήθως από μερικά εκατοστά του χιλιοστού, μέχρι λίγα δέκατα του χιλιοστού. Η επιφανειακή σκληρότητα των χαλύβων εναζωτώσεως μπορεί να φθάσει από 500 HB έως 1100 HB. Με την εναζώτωση παρατηρείται επίσης διόγκωση του υλικού και δημιουργία ρηγμάτων στην επιφάνειά του.

Ορισμένοι χάλυβες, που έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη από 0.4 % κ.β., μπορούν να σκληρυνθούν επιφανειακά με φλογοβαφή. Τέτοιοι χάλυβες είναι π.χ. οι St 45, St 60, St 70, 42 CrMo 4 κ.α. Η μέθοδος αυτή δίνει ένα βάθος βαφής 2 mm έως 5 mm και επιφανειακή σκληρότητα από 550 HB έως 650 HB. Η φλογοβαφή μπορεί με τη βοήθεια ιδιοσυσκευών να ολοκληρωθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα και συνιστάται ιδιαίτερα σε περίπτωση μαζικής παραγωγής τεμαχίων.

Παρόμοια μέθοδος είναι και η επαγωγική βαφή, κατά την οποία η θέρμανση της επιφάνειας γίνεται με υψίσυχνα επαγωγικά δινορεύματα.

Για την αύξηση της αντοχής σε φθορά των χαλύβων εφαρμόζεται επίσης και η σκληρή επιχρωμίωση, με την οποία η επιφανειακή σκληρότητα φθάνει από 700 HB έως και 1000 HB. Το στρώμα του χρωμίου, που προστίθεται ηλεκτρολυτικά στην επιφάνεια των χαλύβων, χάνει τη σκληρότητά του σε θερμοκρασία πάνω από 450 0C και είναι επίσης ευαίσθητο σε κρουστικά και σε διατμητικά φορτία. Η αντοχή του επιφανειακού στρώματος της σκληρής επιχρωμίωσης σε επιφανειακή πίεση εξαρτάται βασικά από την επιφανειακή σκληρότητα ενός χάλυβα πριν την επιχρωμίωσή του, γιατί αν αυτός παραμορφωθεί υπερβολικά, τότε στο ψαθυρό επιφανειακό στρώμα του χρωμίου δημιουργούνται ρωγμές.

Βιβλιογραφία

Ρ.Γραικούση, Στοιχεία Μηχανών, II: Στοιχεία περιστροφικής κινήσεως, εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη.



ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	
ΤΙΤΛΟΣ	
ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
19/12/01	2011
23-10-02	1728

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
 ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
 Τηλ.: 74.760-61

