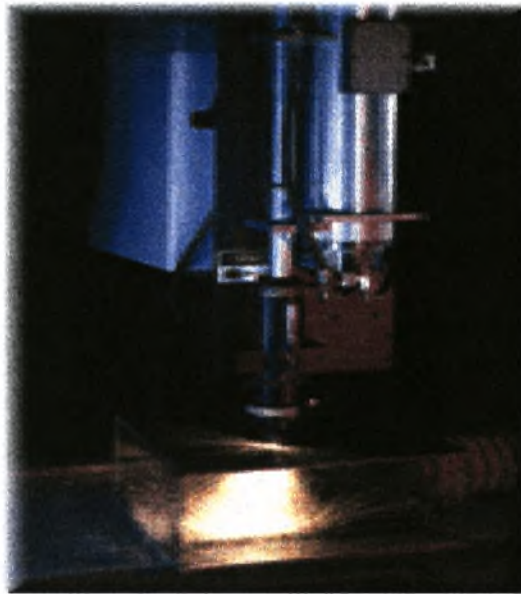


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ ΤΟΥ ΕΠΙΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΧΑΜΗΛΑ ΚΡΑΜΑΤΩΜΕΝΟΥ
ΧΑΛΥΒΑ 1.5919 ΜΕ ΔΕΣΜΗ CO₂ LASER »

ΕΚΠΟΝΗΣΗ :
ΜΙΚΡΩΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ :
ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΒΟΛΟΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1999

ερ ε.σ. 153/Π.Α.....



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

Αριθ. Εισ.: 1013/1
Ημερ. Εισ.: _____
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
1999
ΜΙΚ

Ευχαριστίες

Μιας και το παρόν έργο αποτελεί το πρώτο ουσιαστικό πόνημα του συγγραφέα, ο γράφων θα ήθελε να ευχαριστήσει όσους συνέβαλλαν σε αυτή την προσπάθεια.

Πιο αναλυτικά, απευθύνει τις θερμές ευχαριστίες του προς :

- Τον επιβλέποντα της εργασίας , Αναπληρωτή Καθηγητή Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλο χωρίς την βοήθεια και οδηγίες του οποίου δεν θα υπήρχε οποιοδήποτε ουσιαστικό αποτέλεσμα.
- Την Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ και το Κέντρο Καινοτομίας Laser (LIC/ITE) για τον εργαστηριακό εξοπλισμό και χρόνο που διέθεσαν προκειμένου να ολοκληρωθούν τα πειράματα.
- Τον υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Αντώνη Κατσαμά, για την διαρκή και συστηματική καθοδήγησή του μέσω των αλληπάλληλων συναντήσεων που πραγματοποιήθηκαν.
- Τον Νικόλαο Χασιώτη και Αποστόλη Βασιλάκο για την βοήθεια τους στον εγκλιματισμό με τις συσκευές του τμήματος και τις χρήσιμες συμβουλές τους.
- Τους συμφοιτητές Χαράλαμπο Νομίδα και Νικόλαο Μπεράτη για την αρμονική συνεργασία μας.

Περίληψη

Η διεργασία της ενανθράκωσης χρησιμοποιείται αρκετές δεκαετίες στην βιομηχανία, με την χρήση φούρνων και αερίων μιγμάτων πλούσιων σε άνθρακα. Τα τελευταία χρόνια, έχει αρχίσει να αναπτύσσεται η χρήση των LASER για βιομηχανικούς σκοπούς όπως η συγκόλληση, η διαμόρφωση, η κοπή και η επιφανειακή κατεργασία.

Η παρούσα εργασία μελετά την ενανθράκωση του επιβελτιωμένου χάλυβα 1.5919 με την χρήση δέσμης CO₂ LASER και την επικάλυψη της επιφάνειας με γραφίτη και πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στα πλαίσια του προγράμματος : « Κατεργασίες Βιομηχανικών Υλικών με Δέσμες Laser - LaserMat».

Ο στόχος της εργασίας ήταν να προσδιορίσει την συσχέτιση ανάμεσα στις παραμέτρους της κατεργασίας, του μέγιστου βάθους και της σκληρότητας της ενανθρακωμένης ζώνης. Οι παράμετροι της κατεργασίας ήταν η ισχύς, η ταχύτητα, η διάμετρος δέσμης και ο αριθμός περασμάτων. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά είδη επικάλυψης γραφίτη : ένα εμπορικό σπρέι γραφίτη (Graphit 33) και ένα αιώρημα γραφίτη σε αιθανόλη, που παρασκευάστηκε στο εργαστήριο.

Οι σημαντικότερες μικροδομές που παρατηρήθηκαν ήταν η μαρτενσιτική τύπου πλακιδίων και βελόνων (μικτή) στα δοκίμια που επικαλύφθηκαν με σπρέι και καρβίδια σεμεντίτη σε ευτηκτική μήτρα για όσα επικαλύφθηκαν με το αιώρημα.

Στην πλειοψηφία των δοκιμίων έγινε ενανθράκωση με τήξη της επιφάνειας. Σε μια περιοχή συνθηκών έγινε ενανθράκωση σε στερεά κατάσταση χρησιμοποιώντας το σπρέι. Στις συνθήκες αυτές σχηματίστηκε προευτηκτοειδής σεμεντίτης και μαρτενσιτικά πλακίδια που προήλθαν από ωστενίτη.

Επίσης παρατηρήθηκαν δενδριτικές και κυψελοειδείς μορφολογίες για πολλαπλά περάσματα εξαιτίας των χαμηλότερων κλίσεων της θερμοκρασίας κατά την στερεοποίηση.

Το θέμα της ενανθράκωσης παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον εξαιτίας του σχετικά απλού τρόπου με τον οποίο προσδίδονται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες στην επιφάνεια του υλικού. Με την ενανθράκωση με laser μπορούμε να προβλέψουμε με ακρίβεια το βάθος σκλήρυνσης χωρίς να απαιτούνται φούρνοι και μέσο βαφής. Έτσι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε τεμάχια με δύσκολη γεωμετρία και όπου οι ανοχές διαστατικής ακρίβειας και ποιότητας έχουν στενά όρια.

1. Βασικός μηχανισμός λειτουργίας του LASER	
1.1 Ιστορικά στοιχεία.....	2
1.2 Τεχνολογία LASER.....	3
1.3 Μορφές λειτουργίας της δέσμης.....	7
1.4 Το LASER CO ₂	8
2. Επιφανειακή κατεργασία υλικών με δέσμη laser	
2.1 Ο θερμικός κύκλος.....	13
2.2 Θερμικά - μεταλλουργικά φαινόμενα.....	15
2.3 Θερμικά επηρεασμένη ζώνη - ΘΕΖ.....	19
2.4 Μαρτενσιτικός μετασχηματισμός.....	20
2.5 Δενδριτική – κυψελοειδής μορφολογία.....	21
3.Μαθηματική περιγραφή της διεργασίας	
3.1 Ανάγκη μαθηματικής περιγραφής.....	23
3.2 Βασικές σχέσεις.....	23
3.3 Επεξεργασία των εξισώσεων.....	28
4. Πειραματική διαδικασία	
4.1 Γενικά.....	31
4.2 Υλικό κατεργασίας.....	32
4.3 Ιδιότητες του χάλυβα.....	33
4.4 Σχεδιαστικές παράμετροι της κατεργασίας.....	34
4.5 Συνθήκες πειραμάτων.....	35
5. Αποτελέσματα	
5.1 Πλάτη και βάθη της ζώνης ενανθράκωσης.....	40
5.2 Παρατηρούμενες μικροδομές.....	43
5.3 Διαγράμματα μικροσκληρότητας - βάθους.....	47
5.4 Φωτογραφικό υλικό.....	80
6. Συζήτηση των αποτελεσμάτων	
6.1 Παρατηρήσεις.....	85
6.2 Συμπεράσματα	86
6.3 Προτάσεις.....	87
7. Παραρτήματα	
7.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της δέσμης Laser έναντι συμβατικών κατεργασιών	88
7.2 Συμβατικές μέθοδοι ενανθράκωσης.....	89
8. Βιβλιογραφία	
Βιβλιογραφία - Αρθρογραφία.....	93

Βασικός μηχανισμός λειτουργίας του LASER

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Πριν αναφερθεί με λεπτομέρεια η τεχνολογία του laser, θα γίνει μια σύντομη εισαγωγή στην φωτεινή ακτινοβολία. Αρχικά πιστεύονταν ότι το φως ήταν ρεύμα σωματιδίων. Αργότερα τον 19^ο αιώνα τα πειράματα έδειχναν ότι το φως ήταν σύνθεση κυμάτων που όπως απεδείχθη ήταν εγκάρσια που ταλαντώνονταν κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης του. Μάλιστα σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell διατυπώθηκε ότι το φως οριζόνταν ως ταχείες μεταβολές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που οφείλονταν σε ταλαντώσεις φορτισμένων σωματιδίων. Το ορατό φως είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που το φάσμα της περιλαμβάνει από τα ραδιοκύματα ως τις ακτίνες -X.

Η κυματική θεώρηση του φωτός έφερε μεγάλες αλλαγές στην φυσική του 20ου αιώνα.

Το 1900 ο Planck άρχισε κάποια πειράματα για την ακτινοβολία θερμών σωμάτων. Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία η ένταση της ακτινοβολίας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας να ακτινοβολούνταν σε υψηλότερες συχνότητες κάτι όμως που δεν επιβεβαιώνονταν από τα πειράματα.

Αυτό οδήγησε τον Planck να θεωρήσει ότι η ενέργεια του φωτός είναι κβαντισμένη (ή ανταλλάσσεται σε καθορισμένα επίπεδα). Η ενέργεια κάθε επιπέδου σχετίζεται με την συχνότητα σύμφωνα με μια σταθερά ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ joule-sec) γνωστή ως σταθερά του Planck ($E = h\nu$). Έτσι λοιπόν το φως κατέχει συγκεκριμένες κυματικές ιδιότητες όπως η

συμβολή και η πόλωση όμως μπορεί να θεωρηθεί και ως δέσμη σωματιδίων γνωστά και ως φωτόνια. Τα φωτόνια έχουν κβαντισμένα ποσά ενέργειας.

Ο όρος LASER προέρχεται από τα αρχικά Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - ενίσχυση του φωτός από διεγερμένη εκπομπή ακτινοβολίας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας Laser που την διαφοροποιούν από την ορατή ακτινοβολία, είναι τα εξής :

⇒ μονοχρωματικότητα (δηλαδή σταθερό μήκος κύματος)

⇒ συνεκτικότητα (coherency - συνεχής κυματοσειρά)

⇒ κατευθυντικότητα (μεταδίδεται παράλληλα προς τον άξονα διάδοσής της , παρουσιάζοντας ελάχιστη απόκλιση από αυτόν, ακόμη και σε πολύ μεγάλες αποστάσεις διάδοσης).

1.2 Τεχνολογία LASER

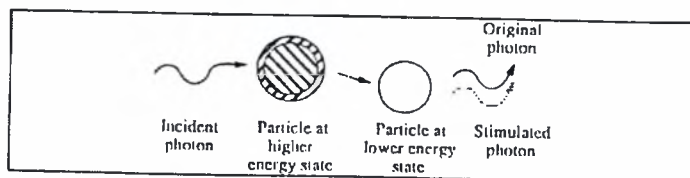
Τα laser μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε ενεργειακά υψηλής πυκνότητας φωτεινή ενέργεια. Η μετατροπή γίνεται μέσω των μηχανισμών :

1)διέγερση (stimulation)

2)ενίσχυση (amplification)

3)αντιστροφή πληθυσμού (population inversion)

Ας θεωρήσουμε μια κοιλότητα στις άκρες της οποίας βρίσκονται δυο κάτοπτρα που έχουν τοποθετηθεί παράλληλα. Μεταξύ των δυο κατόπτρων το φως δύναται να ταλαντωθεί επ' άπειρον, εκτός και αν διακοπεί από κάποιο μηχανισμό όπως η απορρόφηση. Στο εσωτερικό της κοιλότητας υπάρχει ένα ενεργό μέσο ώστε να ενισχύονται με αυτό τον τρόπο οι ταλαντώσεις του φωτός. Τα ηλεκτρόνια του ενεργού μέσου διεγείρονται από μια εξωτερική πηγή όπως μια ηλεκτρική εκκένωση και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων. (Βλέπε σχ.1.1)

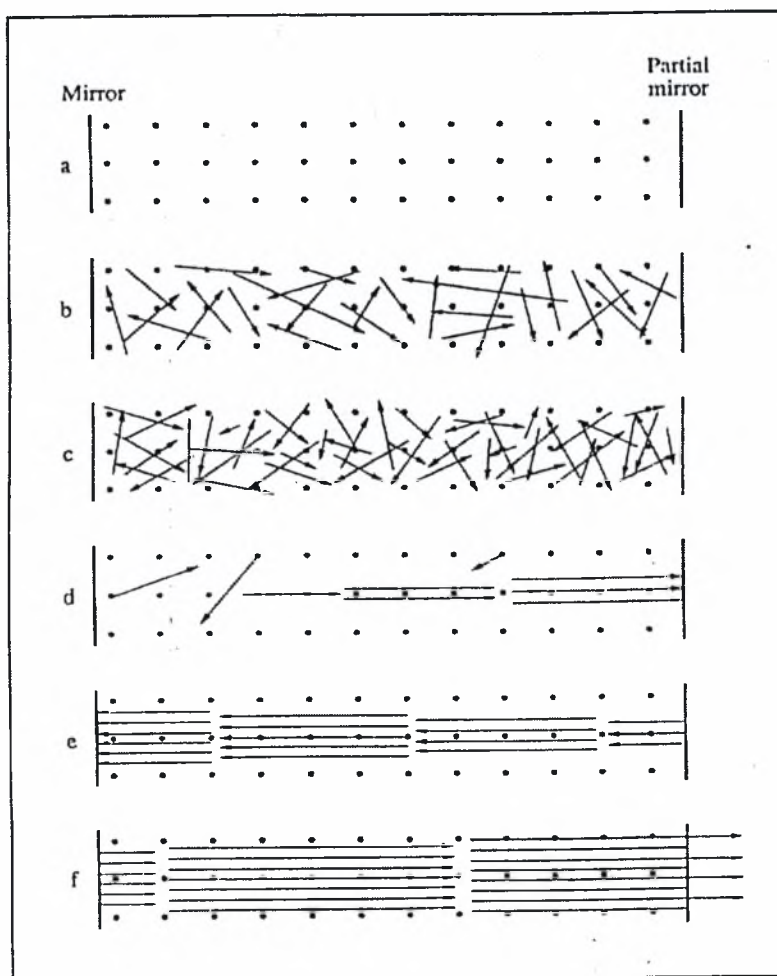


Σχ.1.1 Μηχανισμός διεγερμένης ακτινοβολίας

Χρησιμοποιείται επίσης κάποιο σύστημα για την «άντληση» του ενεργού μέσου ώστε η ενέργεια των ηλεκτρονίων να ανυψωθεί από την μια κατάσταση στην άλλη. Η ενέργεια αυτή παρέχεται από μηχανικές, χημικές, ηλεκτρικές και φωτεινές πηγές.

Συγκεκριμένα για τα LASER CO₂ χρησιμοποιείται πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ στα LASER Nd-YAG για την άντληση χρησιμοποιούνται εστιασμένοι παλμοί φωτός. Όσον αφορά το LASER ιωδίου η απαραίτητη ενέργεια δίδεται από χημική αντίδραση. Η προσδιδόμενη ισχύς για την «άντληση» του μέσου πρέπει να υπερβαίνει την ισχύ εξόδου του LASER μιας και υπάρχουν απώλειες.

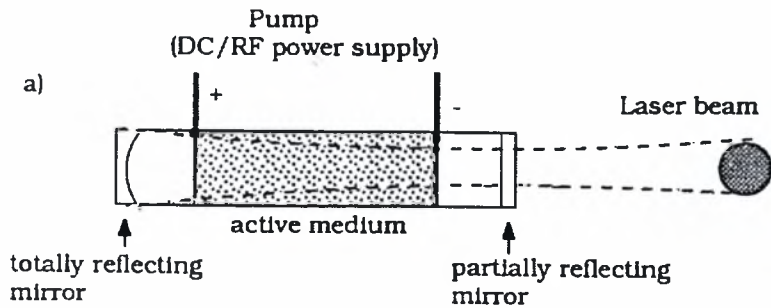
Όσον αφορά τα κάτοπτρα, το ένα είναι μερικώς διάφανο ώστε να επιτρέπει την έξοδο της δέσμης, ενώ το άλλο ανακλά πλήρως το φως στον μέγιστο βαθμό που μπορεί να επιτευχθεί (περίπου 99.999%). Τα φωτόνια που δεν είναι ευθυγραμμισμένα με τον ταλαντωτή δεν μπορούν να διεγερθούν και να ενισχυθούν. (Βλέπε σχ. 1.2)



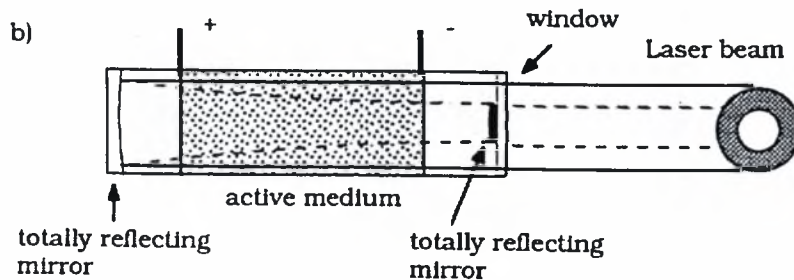
Σχ. 1.2 Διαδοχικές φάσεις διέγερσης και ταλάντωσης των φωτονίων

Η κοιλότητα κάποιου laser χαρακτηρίζεται ως «ευσταθής» ή «ασταθής». Ο χαρακτηρισμός αυτός αφορά το αν η δέσμη συγκλίνει μέσα στην κοιλότητα ή διασκορπίζεται έξω.

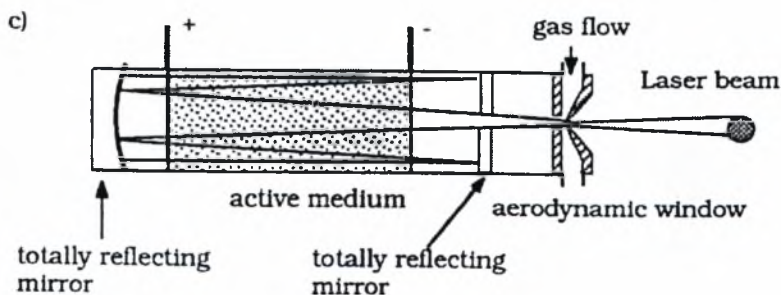
(Βλέπε σχ.1.3, 1.4 και 1.5)



Σχ.1.3 Ευσταθής κοιλότητα



Σχ.1.4 Ασταθής κοιλότητα



Σχ.1.5 Ευσταθής κοιλότητα με αεροδυναμική οπή

Συνήθως τα laser μέχρι 2 kW έχουν «ευσταθή» κοιλότητα, επειδή η ισχύς αυτή μπορεί να αποδοθεί με σχετική ασφάλεια χωρίς κίνδυνο αστοχίας του παραθύρου εξόδου. Το εξωτερικό κάτοπτρο (αυτό που επιτρέπει την διόδο στην δέσμη) είναι κατασκευασμένο από ZnSe

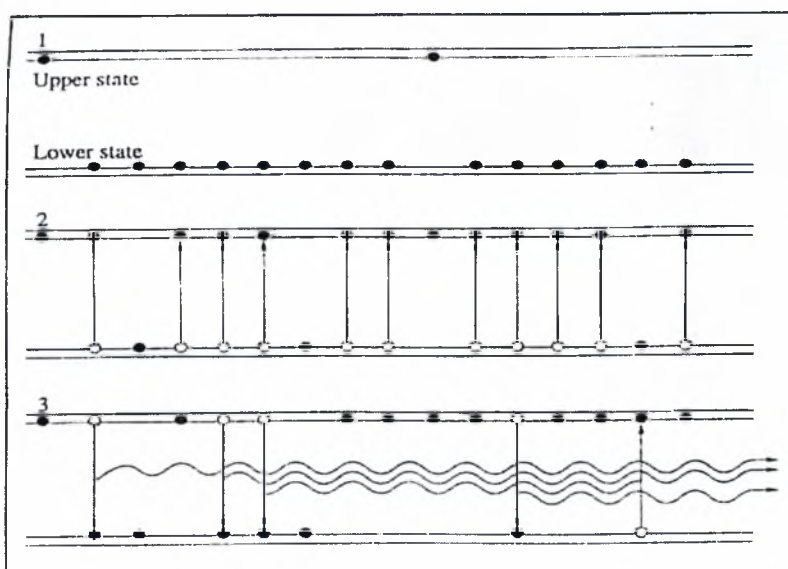
(σεληνιούχο ψευδάργυρο) ,GaAs (αρσενιούχο γάλλιο) ή CdTe (τελλουριούχο κάδμιο) για τα laser CO₂ και BK7 (τηγμένο οξείδιο πυριτίου) για τα Nd-YAG laser.

Σε περίπτωση αστοχίας του κατόπτρου υπάρχουν προβλήματα που σχετίζονται με την διακοπή της παραγωγής και επομένως κόστος. Η δέσμη έχει το ίδιο σχήμα με την οπή εξόδου του κατόπτρου όταν πρόκειται για «ευσταθή» και ίδια με τα άκρα του κατόπτρου όταν πρόκειται για «ασταθή» κοιλότητα. Συνήθως έχει κυκλικό ή δακτυλιοειδές, μπορεί όμως να λάβει και τετραγωνικό σχήμα.

Για να ολοκληρωθεί η διεργασία laser θα πρέπει να υπάρξει και αντιστροφή πληθυσμού. Όταν το ενεργό μέσο είναι σε ισορροπία ο αριθμός των ηλεκτρονίων που υπάρχουν σε κάθε ενεργειακό επίπεδο μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με την σχέση (σε περίπτωση ενεργού μέσου με δυο επίπεδα) :

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left\{\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)\right\}$$

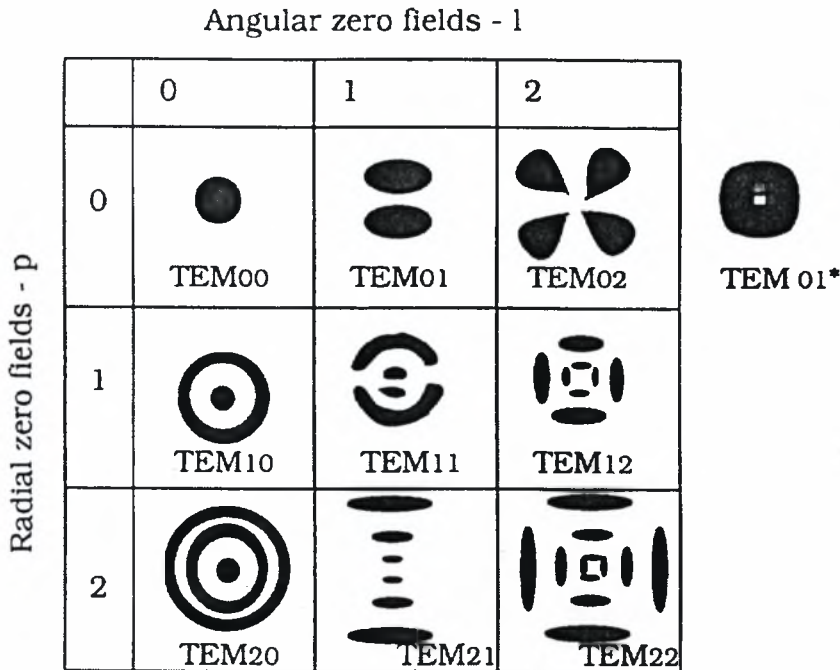
όπου N_1 , N_2 είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων στις καταστάσεις 1 και 2 , T είναι η απόλυτη θερμοκρασία, k η σταθερά του Boltzmann και E_1 , E_2 οι ενέργειες των επιπέδων 1 και 2. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση σε υψηλότερο επίπεδο ενέργειας υπάρχει μικρότερος αριθμός ηλεκτρονίων υπό συνθήκες ισορροπίας. Όταν προσδίδεται ισχύς στο «ενεργό» μέσο επικρατεί μια κατάσταση μη-ισορροπίας όπου υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός ηλεκτρονίων σε υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση απ' ότι σε χαμηλότερη. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχουν στατιστικά διαθέσιμα ηλεκτρόνια που δίνουν διεγερμένη ακτινοβολία.



Σχ.1.6 Μηχανισμός αντιστροφής πληθυσμού

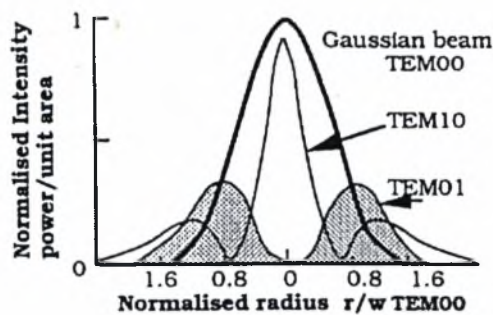
1.3 Μορφές κατανομής έντασης της δέσμης LASER

Η δέσμη laser που χρησιμοποιήθηκε έχει κυκλική διατομή. Η κατανομή έντασης της δέσμης μπορεί να λάβει τις ακόλουθες μορφές :



Σχ.1.7 Μορφές κατανομών εντάσεως της δέσμης laser

Σε καθένα από αυτά τα σχήματα αντιστοιχεί και μια κατανομή ισχύος. Μερικές από τις πιο γνωστές κατανομές απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα :



Σχ.1.8 Καμπύλες ισχύος για διάφορες κατανομές TEM

Η εξίσωση κατανομής της ισχύος για την κατάσταση TEM₀₀ είναι :

$$P_r = [4P/\pi r_{\text{beam}}^2] \times \exp(-2r^2/r_{\text{beam}}^2)$$

όπου :

P_r = ισχύς /επιφάνεια στην θέση r

P = ονομαστική ισχύς της δέσμης

r_{beam} = ακτίνα της δέσμης

r = μεταβολή της ακτίνας από [0 → r_{beam}]

Στην Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ χρησιμοποιήθηκε Laser CO₂ με ισχύ 1.7 kW με κατανομή TEM₀₀ , ενώ στο Κέντρο Καινοτομίας Laser (LIC) η ισχύς του Laser ήταν 3 kW με κατανομή TEM₀₁ * .

1.4 Το LASER CO₂

Τα laser μπορούν να χωριστούν σύμφωνα με το είδος του ενεργού μέσου που χρησιμοποιείται :

⇒ αέριο

⇒ υγρό

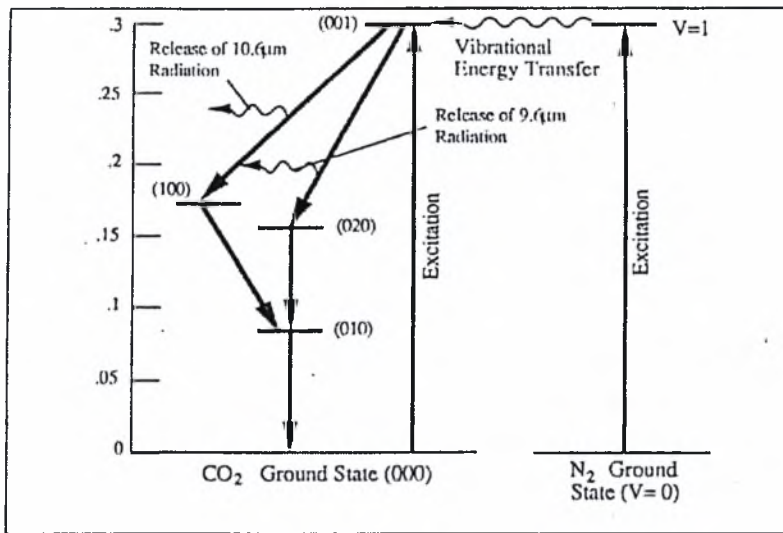
⇒ στερεό

Επίσης δύνανται να χωριστούν ανάλογα με τον τρόπο εκπομπής τους :

⇒ συνεχής (continuous wave - CW)

⇒ παλμικός (pulsed)

Το LASER CO₂ ανήκει στα αέριου τύπου και συνήθως έχει συνεχούς κύματος τρόπο εκπομπής. Το ενεργό μέσο περιέχει μόρια διοξειδίου του άνθρακα τα οποία μπορούν να βρεθούν σε διαφορετική ενεργειακή κατάσταση, ανάλογα με την ταλάντωση ή περιστροφή που εκτελούν. Οι καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί το μόριο του CO₂ είναι κβαντισμένες (υφίστανται σε διακριτά επίπεδα ενέργειας). Ακολούθως παρατίθεται εικόνα με τις καταστάσεις αυτές :



Σχ.1.9 Διέγερση και εκπομπή ακτινοβολίας από το μόριο του CO₂

Το μίγμα των αερίων αποτελείται από CO₂, He και Ne και βρίσκεται υπό συνθήκες χαμηλής πίεσης (35 - 50 torr) σχηματίζοντας πλάσμα. Το μόριο του διοξειδίου του άνθρακα δύναται να ταλαντωθεί με τρεις τρόπους: συμμετρικό, κυρτωμένο και ασύμμετρο. Οι καταστάσεις αυτές αντιστοιχούν στα επίπεδα ενέργειας (10⁰0), (01¹0) και (00⁰1). (βλέπε σχ.1.9)

Η διέγερση του μορίου CO₂ επιτυγχάνεται όταν αυξηθεί η ενέργεια ταλάντωσης του.

Γι' αυτό τον σκοπό χρησιμοποιείται πηγή AC/DC. Έτσι ορισμένα από τα μόρια που ταλαντεύονται στο επίπεδο (00⁰1) μπορεί να χάσουν ενέργεια εξαιτίας της σύγκρουσης τους με τα τοιχώματα ή από στιγμιαία ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μεταπέσουν στην κατάσταση (10⁰0) εκπέμποντας φωτόνια μήκους κύματος 10.6 μm. Τα φωτόνια είτε συγκρούονται με τα τοιχώματα, είτε ταλαντεύονται ανάμεσα στα δυο κάτοπτρα είτε συγκρούονται με άλλα μόρια στην κατάσταση (00⁰1). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή και άλλων φωτονίων ιδίου μήκους κύματος. Στις συγκρούσεις των φωτονίων με τις ενδιάμεσες καταστάσεις (10⁰0) → (010), (020) → (010) απελευθερώνεται ενέργεια υπό την μορφή θερμότητας αντί για φωτεινή. Για το LASER CO₂ ο ρυθμός μετατροπής ενέργειας σε θερμότητα είναι μικρότερος από την ενέργεια που μετατρέπεται σε φωτεινή. Επομένως ο μηχανισμός δημιουργίας της δέσμης έχει υψηλή απόδοση συγκρινόμενος με άλλα υλικά.

Η διέγερση των μορίων CO₂ μπορεί να γίνει είτε απευθείας από την κατάσταση ηρεμίας, είτε με την σύγκρουσή τους με μόρια αζώτου. Το αζωτο ταλαντεύεται με έναν συγκεκριμένο τρόπο επειδή το μόριο του είναι διατομικό (διμερές). Η πηγή AC/DC αυξάνει την ενέργεια

ταλάντωσης των μορίων και έπειτα αυτά συγκρούονται με τα μόρια CO₂ που βρίσκονται στην κατάσταση (00⁰1). Η διαφορά ενέργειας απέχει μόλις μερικά κβάντα ταλάντωσης.

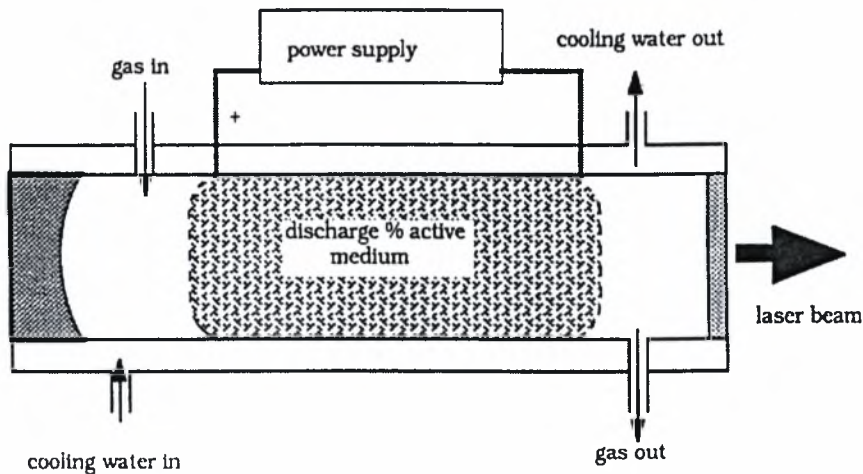
Η ενέργεια του N₂ χάνεται μόνο εξαιτίας της σύγκρουσής του με τα τοιχώματα ή με άλλα μόρια. Έτσι λοιπόν ο χρόνος είναι ικανοποιητικός και η απόδοση του LASER CO₂ σχετική υψηλή (15 - 20%) αλλά παραμένει συνάρτηση της θερμοκρασίας μιας και μόνο το κρύο CO₂ μπορεί να συγκρουσθεί με το N₂.

Η μοναδική απαίτηση που τίθεται είναι η ύπαρξη κρύου CO₂. Η σύσταση του ενεργού μέσου είναι 78 % He για σταθεροποίηση του πλάσματος αφού το ήλιο έχει υψηλή θερμική διαχυτότητα, 12% N₂ και 10% CO₂. Η απόδοση του LASER είναι ισχυρή εξάρτηση της θερμοκρασίας, εξαρτάται επίσης με το αν περιέχονται κάποιες ακαθαρσίες.

Για να εξασφαλίσουμε κρύο CO₂ το ενεργό μέσο ψύχεται είτε μέσω αγωγής με τα τοιχώματα για LASER βραδείας ροής, είτε μέσω συναγωγής για LASER ταχείας αξονικής και εγκάρσιας ροής. Οι κατηγορίες αυτές εξετάζονται ακολούθως :

1. βραδείας ροής (Slow Flow (SF- Lasers))

Όπως ειπώθηκε η ψύξη του αερίου μίγματος γίνεται με αγωγή μέσω των τοιχωμάτων της κοιλότητας.



Σχ.1.10 Διάταξη τύπου laser βραδείας ροής

(Βλέπε σχήμα 1.10) Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του είναι :

⇒ ροή αερίου μίγματος : 20 lt/min

⇒ ροή υγρού ψύξης (συνήθως νερό) : 7 lt/min

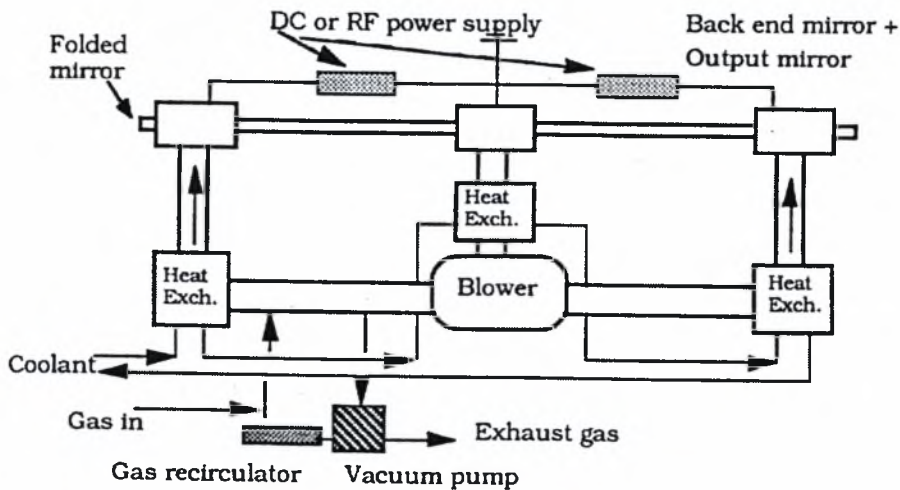
⇒ θερμοκρασία : T = 20 °C

⇒ ισχύς /μέτρο κοιλότητας : 50 W/m

Η μικρή τιμή ισχύος /μήκος περιορίζει την συνολική ισχύ των LASER αυτού του τύπου. Έτσι πρέπει να είναι είτε πολύ μακριά (π.χ 70 m στο Πανεπιστήμιο του Essex) ή να έχουν ισχύ μέχρι 2 kW. Για να αποφευχθούν τα μεγάλα μήκη, η κοιλότητα του οπτικού ταλαντωτή μπορεί να «διπλωθεί». Αυτό όμως έχει επίδραση στην εστίαση της δέσμης.

2. ταχείας αξονικής ροής (Fast Axial Flow (FAF - Lasers))

Ο τρόπος ψύξης επιτυγχάνεται με συναγωγή του μίγματος μέσω της ζώνης εκκένωσης. (Βλέπε σχ.1.11)

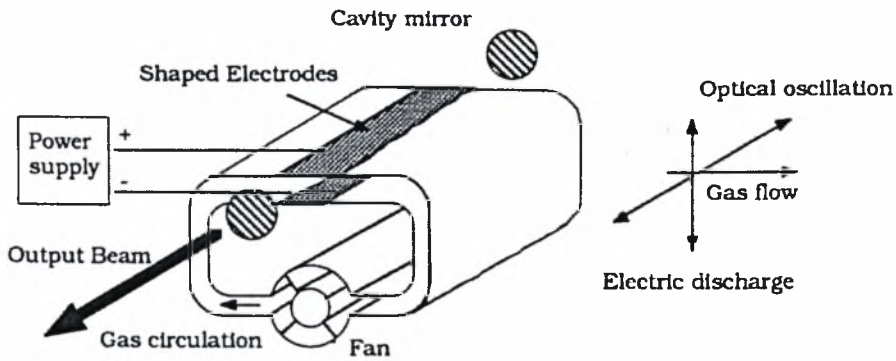


Σχ.1.11 Διάταξη τύπου laser ταχείας αξονικής ροής

Η ταχύτητα ροής στη ζώνη είναι 300 - 500 m/s. Ο έλεγχος του μίγματος και η αποφυγή των διαρροών επιτρέπουν την δημιουργία «ομαλού» πλάσματος. Η κατανομή ισχύος της δέσμης είναι συμμετρική. Η ισχύς ανά μέτρο κοιλότητας κυμαίνεται γύρω στα 500 W/m και αυτό επιτρέπει την δημιουργία συμπαγών μονάδων.

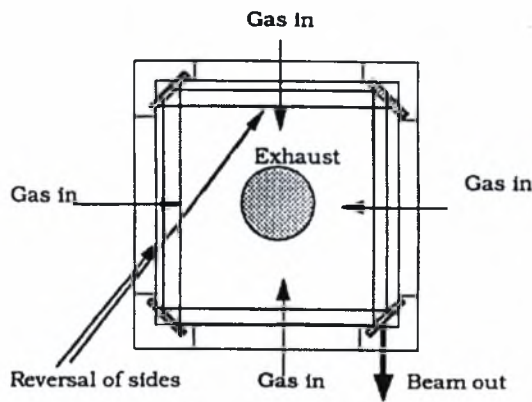
3. εγκάρσια ροής (Traverse Flow (TF - LASERS))

Ομοίως και εδώ η ψύξη γίνεται με συναγωγή αλλά η ροή είναι εγκάρσια προς την κοιλότητα που πραγματοποιούνται οι εκκενώσεις. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και επιτρέπει την κατασκευή πολύ συμπαγών μονάδων. (Βλέπε σχ.1.12)



Σχ.1.12 Διάταξη τύπου laser εγκάρσια ροής

Ως μειονέκτημα των διατάξεων μπορεί να χαρακτηριστεί η έλλειψη συμμετρίας στη ροή. Η ασυμμετρία της δέσμης οφείλεται στο ότι καθώς η ροή του αερίου ψύξης είναι εγκάρσια, ένα μέρος του ενεργού μέσου συμπαρασύρεται. Επιπρόσθετα, η ψύξη κατά εγκάρσιο τρόπο πιθανόν δημιουργεί διαφορές θερμοκρασίας (gradients) στο ενεργό μέσο κατά την εγκάρσια κατεύθυνση, γεγονός που οδηγεί σε μεταβολές της πυκνότητάς του, άρα και σε πρόσθετη ασυμμετρία. Έχουν αναπτυχθεί κάποιες τεχνικές που διορθώνουν το σχήμα της δέσμης μια από τις οποίες φαίνεται στο σχήμα (1.13).



Σχ.1.13 Τεχνική διόρθωσης της συμμετρίας της δέσμης

Επιφανειακή κατεργασία υλικών με δέσμη LASER

2.1 Ο θερμικός κύκλος

Οι μέθοδοι κατεργασίας υλικών με δέσμη LASER παρουσιάζουν ιδιαίτερη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια λόγω συγκεκριμένων πλεονεκτημάτων που προσφέρουν.

Μερικά από αυτά είναι :

- Χημική καθαρότητα
- Μικρή παραμόρφωση του δοκιμίου λόγω συγκεντρωμένης και ελεγχόμενης θερμικής επιρροής
- Ελάχιστη μηχανουργική κατεργασία μετά το πέρας της κατεργασίας
- Εφαρμογή της μεθόδου ακόμη και σε σχετικά δύσκολες γεωμετρίες

Η χρησιμότητα των επιφανειακών κατεργασιών έγκειται στ' ότι με αυτόν τον τρόπο γίνεται οικονομία στα ακριβά υλικά μιας και προσδίδονται οι επιθυμητές ιδιότητες όχι σε ολόκληρη τη μάζα αλλά σε μερικά χιλιοστά από την επιφάνεια του υλικού.

Η αντοχή σε τριβή, φθορά, διάβρωση, η αυξημένη σκληρότητα είναι μερικές μόνο από τις βελτιωμένες ιδιότητες που αποκτούν τα υλικά.

Ακολούθως παρατίθενται οι πιο σημαντικές χρήσεις της δέσμης LASER στις επιφανειακές κατεργασίες :

- επιφανειακή σκλήρυνση μετασχηματισμού
- επιφανειακή τήξη για δημιουργία λεπτόκοκκης δομής
- επιφανειακή κραματοποίηση με σκοπό την βελτίωση της αντοχής σε φθορά και διάβρωση.
- Χημική εναπόθεση ατμών LCVD - φυσική εναπόθεση ατμών LPVD

Η επιφανειακή σκλήρυνση μετασχηματισμού περιλαμβάνει θέρμανση μέχρι την ωστενιτική περιοχή της επιφάνειας του δοκιμίου μέσω φλόγας υψηλής θερμοκρασίας είτε μέσω επαγωγής πολύ υψηλής συχνότητας. Έπειτα χρησιμοποιείται το μέσο βαφής για να ψύξει την επιφάνεια σε ρυθμό που υπαγορεύεται από το διάγραμμα T-T-T.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται δέσμη LASER παρατηρούνται πολύ υψηλοί ρυθμοί θέρμανσης πάνω σε ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα χωρίς να επηρεάζεται η δομή του υπόλοιπου υλικού. Το στρώμα αυτό θερμαίνεται μέχρι την ωστενιτική περιοχή και κατόπιν η ψύξη λαμβάνει χώρα από το ίδιο το υλικό. Η απότομη ψύξη συμβαίνει επειδή το εσωτερικό του υλικού αποτελεί μια «ψυχρή δεξαμενή» ικανή να δεχθεί το ποσό θερμότητας της θερμής επιφάνειας με τέτοιους ρυθμούς μάλιστα ώστε να σχηματιστεί μαρτενσίτης. Επιπλέον χρησιμοποιούνται ειδικές επικαλύψεις προκειμένου να βελτιωθεί η απορροφητικότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας από το μέταλλο. Στο σημείο αυτό έχουν προταθεί εναλλακτικές πρακτικές στην Ευρώπη με την χρησιμοποίηση της γωνίας Brewster.

Εκτός από την επιφανειακή σκλήρυνση, έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα και η επιφανειακή κραμμάτωση. Στην περίπτωση αυτή εναποτίθεται ένα λεπτό στρώμα από το υλικό συστατικά όπως άνθρακας, νικέλιο, χρώμιο, μολυβδένιο) στην επιφάνεια του δοκιμίου. Κατόπιν το μέταλλο βάσης θερμαίνεται απότομα με το πέρασμα της δέσμης και σχηματίζεται μια λίμνη τήξης όπου τα συστατικά διαλύονται και κατόπιν κατά την στερεοποίηση εγκλωβίζονται στο πλέγμα του σιδήρου προσδίδοντας συγκεκριμένες ιδιότητες.

Το κύριο συστατικό που χρησιμοποιείται είναι ο άνθρακας που εναποτίθεται στην επιφάνεια του μετάλλου βάσης είτε με την μορφή διαλύματος είτε αιωρήματος γραφίτη. Ο γραφίτης έχει διπλό ρόλο μιας και αυξάνει και την απορροφητικότητα του μετάλλου βάσης στην προσπίπτουσα ακτινοβολία.

2.2 Θερμικά - μεταλλουργικά φαινόμενα

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ανήκει στους υποευθηκτοειδείς χαμηλά κραμματωμένους και επιβελτιωμένους χάλυβες.

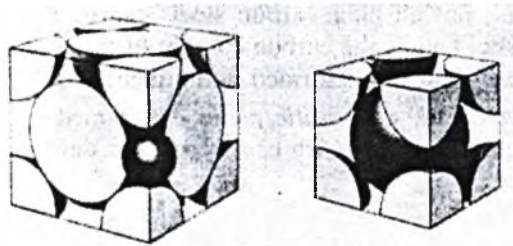
Κατά την διεργασία ενανθρακώσεως διακρίνονται οι φάσεις της ταχείας θέρμανσης, της δημιουργίας (ή όχι) της λίμνης τήξης και ο εγκλωβισμός των ατόμων του άνθρακα και τέλος η ταχεία στερεοποίηση.

1) Ταχεία θέρμανση

Σε αυτή την φάση η θερμοκρασία ανέρχεται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης μέσα σε κλάσματα δευτερολέπτου. Τα προβλήματα που ανακύπτουν με την περιγραφή του φαινομένου έχουν να κάνουν με την διαλυτοποίηση της αρχικής μικροδομής (συνήθως φερρίτης και κάποιο καρβίδιο) και την ανακατανομή του άνθρακα για την δημιουργία ομογενούς στερεού διαλύματος $\gamma\text{Fe} - \text{C}$ (ωστενίτη).

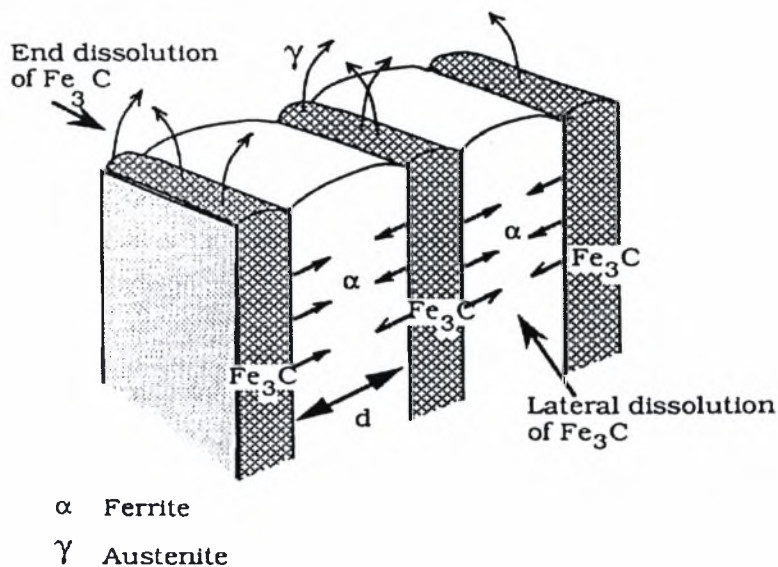
Η διάχυση του άνθρακα απαιτεί περισσότερο χρόνο από αυτόν που διατίθεται στην ταχεία θέρμανση. Ο μετασχηματισμός που λαμβάνει χώρα είναι η μεταβολή του φερρίτη (αFe) που έχει κυβική χωροκεντρωμένη δομή (BCC) σε ωστενίτη (γFe) που η δομή του είναι κυβική εδροκεντρωμένη (FCC). Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται οι κυψελίδες (BCC), (FCC):

(Σχ.2.1)



Σχ.2.1 Κυβική εδροκεντρωμένη δομή (FCC) και κυβική χωροκεντρωμένη δομή (BCC)

Η δομή του χάλυβα 1.5919 περιλαμβάνει φερρίτη και μπαινίτη και μικρά ποσοστά περλίτη. Ο περλίτης αποτελείται από εναλλασσόμενες πλάκες φερρίτη και σεμεντίτη. Η συγκέντρωση του άνθρακα είναι υψηλότερη στον σεμεντίτη. Η διάχυση του άνθρακα συντελείται από τον σεμεντίτη προς τον φερρίτη, όπως μπορεί να δειχθεί και στο παρακάτω σχήμα :



Σχ 2.2 Διάχυση των ατόμων άνθρακα ανάμεσα στα πλακίδια σεμεντίτη και φερρίτη

Η διεργασία αυτή λαμβάνει χώρα μέχρι που η θερμοκρασία φθάσει την A_{C3} .

2) Διάλυση των ατόμων άνθρακα στην λίμνη τήξης

Όταν η θερμοκρασία υπερβεί την liquidus, η υγρή φάση που δημιουργείται εμπλουτίζεται σε άνθρακα, που προέρχεται από την επίστρωση γραφίτη που έχει τοποθετηθεί αρχικά, στην επιφάνεια του υλικού. Κατά την στερεοποίηση της λίμνης τήξης, οι μικροδομές που προκύπτουν ποικίλουν ανάλογα με το ποσοστό % κ.β C που έχει εισαχθεί στην επιφάνεια και μπορεί να είναι οι εξής :

- υποευτηκτική (w.t %C < 4.3)
- ευτηκτική (w.t %C = 4.3)
- υπερευτηκτική (w.t %C > 4.3)

3) Όσον αφορά την τελευταία φάση της διεργασίας διακρίνουμε δυο υποπεριπτώσεις :

3.1) Απουσία ζώνης τήξης - στερεά ενανθράκωση

Οι θερμοκρασίες που επικρατούν δεν επιτρέπουν την τήξη της επιφάνειας του υλικού.

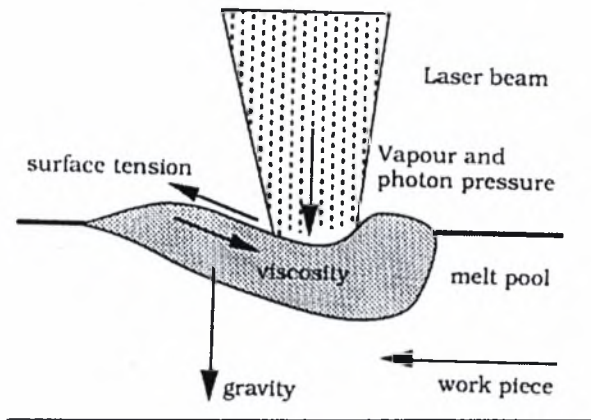
Η διάχυση των ατόμων του άνθρακα είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την αντίστοιχη της τήξης. Ωστόσο σχηματίζεται ωστενίτης. Κατά την απότομη ψύξη μετατρέπεται σε

μαρτενσίτη. Είναι δυνατόν όμως όταν το ποσοστό του άνθρακα ξεπεράσει το 0.8 % κ.β να σχηματιστεί καρβίδιο προευτηκτοειδούς σεμεντίτη.

3.2) Ταχεία στερεοποίηση

Η ζώνη τήξης κατά την στερεοποίηση αλλάζει σχήμα εξαιτίας του αερίου προστασίας που διώχνει εκατέρωθεν της λίμνης το τηγμένο μέταλλο προκειμένου να αποφευχθεί η οξείδωση. Το σχήμα της λίμνης προέρχεται και από την κατανομή ισχύος της δέσμης που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι τύπου Gaussian.

Όταν η ζώνη τήξης δεν έχει ακόμη στερεοποιηθεί τότε ασκούνται δυνάμεις όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 :



Σχ 2.3 Δυνάμεις που ασκούνται στην λίμνη τήξης κατά το πέρασμα της δέσμης laser

Η σημαντικότερη από τις δυνάμεις που ασκούνται είναι η επιφανειακή τάση σ εξαιτίας των μεγάλων θερμοκρασιακών κλίσεων και λόγω των περιορισμένων διαστάσεων της λίμνης τήξης. Η ταχεία στερεοποίηση λαμβάνει χώρα μέσα στην λίμνη τήξης και ανάλογα με την τελική σύσταση του χάλυβα διακρίνονται οι ανάλογες μικροδομές.

■ Για υποευτηκτική σύσταση

Με την ψύξη από την υγρή φάση, η πρώτη στερεή φάση που σχηματίζεται είναι ο ωστενίτης. Ο ωστενίτης που σχηματίζεται ονομάζεται προευτηκτικός ωστενίτης. Κατόπιν στην ευτηκτική θερμοκρασία μέσω της ευτηκτικής αντίδρασης το υπόλοιπο υγρό μετασχηματίζεται σε ωστενίτη (γ) και σεμεντίτη (Fe_3C).

Κατόπιν στην ευκτηκτοειδή θερμοκρασία ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε περλίτη.

Για πολύ υψηλούς ρυθμούς ο ωστενίτης μετατρέπεται σε μαρτενσίτη.

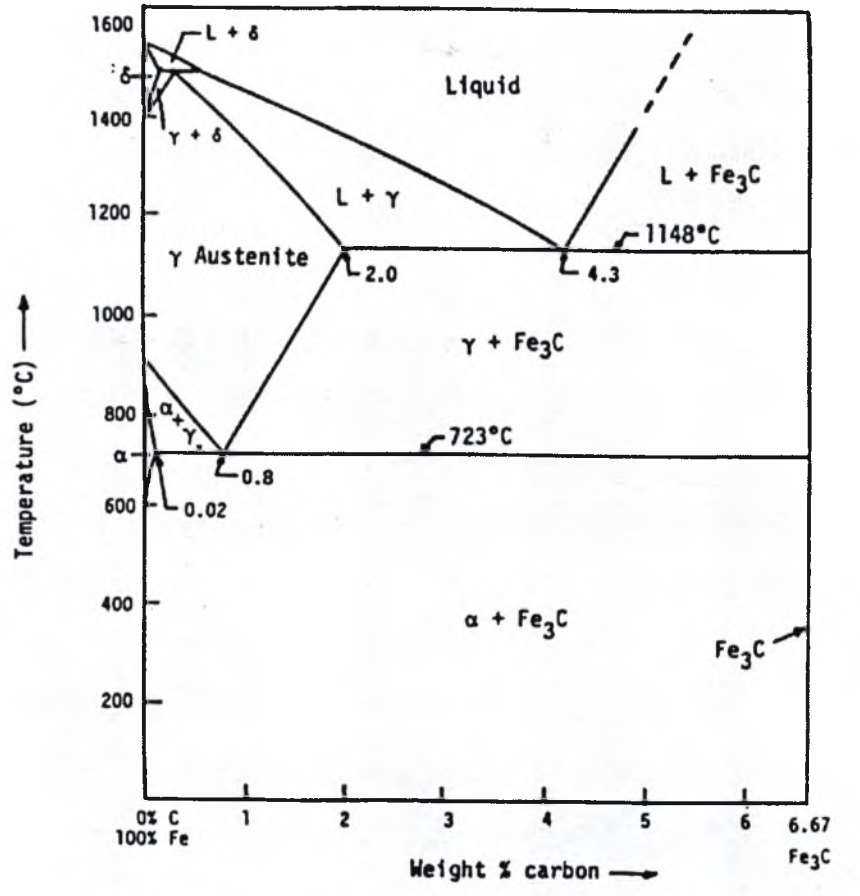
■ Για ευτηκτική σύσταση

Κατά την ψύξη ολόκληρη η υγρή φάση μετασχηματίζεται σε ευτηκτικό ωστενίτη και σεμεντίτη και ακολούθως ισχύουν όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.

■ Για υπερευθηκτική συσταση

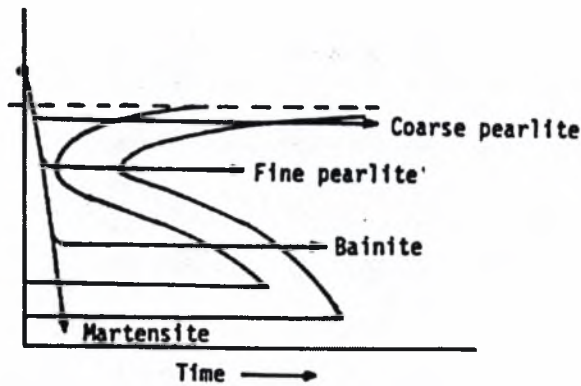
Κατά την ψύξη σχηματίζεται προευθηκτικός σεμενίτης και κατόπιν στην ευθηκτική θερμοκρασία μετασχηματίζεται σε ωστενίτη και σεμενίτη. Κατόπιν το μίγμα ωστενίτη - σεμενίτη μετασχηματίζεται με μίγμα φερρίτη - σεμενίτη όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Για όλους τους μετασχηματισμούς δεξ και διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-C.



Σχ 2.4 Διάγραμμα φάσεων σιδήρου - άνθρακα (Fe - C)

Εκτός από την λίμνη τήξης, υπάρχει και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ). Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται έχουν ως αποτέλεσμα την επαναφορά του μπαινίτη και αυτό οδηγεί σε μια δευτερογενή σκλήρυνση.



Σχ 2.5 Διάγραμμα T-T-T

2.3 Η Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Θ.Ε.Ζ)

Εκτός από την ζώνη σκλήρυνσης , όπου το υλικό τήκεται τις περισσότερες περιπτώσεις, υπάρχει και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ).

Στην περιοχή αυτή δεν παρατηρείται τήξη του υλικού και η σύσταση του δεν έχει αλλάξει.

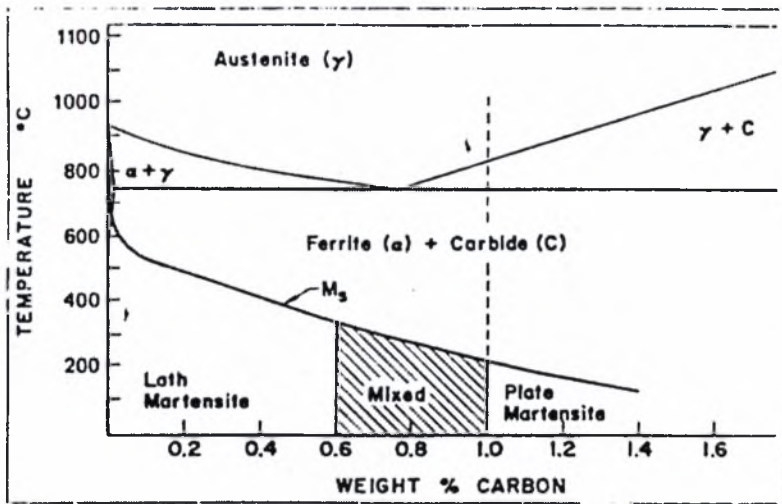
Στα δοκίμια που μελετήθηκαν, η δομή της ΘΕΖ αποτελούνταν από μπαινίτη που έχει υποστεί επαναφορά (tempered bainite) και αυτό οδηγούσε σε μια δευτερογενή σκλήρυνση.

Ο μπαινίτης, ως γνωστόν, αποτελείται από φερρίτη και σεμεντίτη. Σε θερμοκρασίες 300 - 500 °C ,όπου συμβαίνει η επαναφορά, σχηματίζονται καρβίδια του μολυβδενίου, χρωμίου, τιτανίου κ.ά που είναι θερμοδυναμικά σταθερότερα από τον σεμεντίτη.

Η δευτερογενής σκλήρυνση είναι πιο αργή συγκρινόμενη με τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Επειδή στον μπαινίτη ο άνθρακας βρίσκεται υπό μορφή καρβιδίων και όχι διαλυμένος, κατά την επαναφορά απομακρύνεται ο διαλυμένος άνθρακας και έτσι η τελική σκληρότητα δεν αλλάζει σημαντικά. Κάποιες αλλαγές στην σκληρότητα παρατηρούνται όταν τα καρβίδια του σεμεντίτη γίνονται πιο χονδρόκοκκα ή πραγματοποιείται αποκατάσταση (recovery) των γραμμοαταξιών.

2.4 Μαρτενσιτικός μετασχηματισμός

Η μορφολογία του μαρτενσίτη εξαρτάται από το ποσοστό του άνθρακα. Για χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα ($\% \kappa.\beta \text{ C} < 0.6$), σχηματίζεται βελονοειδής μαρτενσίτης (lath), για μεσαία περιεκτικότητα ($0.6 < \% \kappa.\beta \text{ C} < 1.0$) σχηματίζεται μαρτενσίτης μικτού τύπου (mixed) και για υψηλή περιεκτικότητα ($\% \kappa.\beta \text{ C} > 1.0$) σχηματίζεται μαρτενσίτης πλακιδίων (plate). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εξάρτηση της μορφολογίας του μαρτενσίτη από το ποσοστό του άνθρακα (σχ 2.6). Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός συμβαίνει όχι με διάχυση αλλά με ταυτόχρονη εφαρμογή διατμητικών τάσεων στο πλέγμα του μητρικού ωστενίτη. Το πλέγμα του μαρτενσίτη είναι τετραγωνικό χωροκεντρωμένο. (Βλέπε Σχ.2.7).



Σχ.2.7 Κυψελίδα BCT του πλέγματος του μαρτενσίτη

Σχ.2.6 Εξάρτηση της μορφολογίας και της θερμοκρασίας έναρξης του μαρτενσίτη από το % ποσοστό του άνθρακα

Η θερμοκρασία έναρξης του μετασχηματισμού, M_s , δίνεται από την σχέση ^[41]:

$$M_s = 539 - 423(\%C) - 30.4(\% \text{ Mn}) - 17.7(\% \text{ Ni}) - 12.1(\% \text{ Cr}) - 7.5(\% \text{ Mo}) \quad [^\circ\text{C}]$$

Επομένως στην περίπτωση του χάλυβα 1.5919 έχουμε :

$$M_s = 539 - 423 \times 0.152 - 30.4 \times 0.53 - 17.7 \times 1.51 - 12.1 \times 1.65 = 411.9 [^\circ\text{C}]$$

Η θερμοκρασία αυτή αντιστοιχεί στην αρχική σύσταση του χάλυβα. Όταν πραγματοποιείται ενανθράκωση, αυξάνεται το ποσοστό $\% \kappa.\beta$ σε άνθρακα, επομένως μειώνεται η M_s και κατά συνέπεια και η M_f .

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η πιο συχνά παρατηρούμενη μικροδομή ήταν η μικτή μαρτενσιτική με περιεκτικότητα $0.6 < \% \kappa.\beta \text{ C} < 1$. Όταν υπήρχαν μαρτενσιτικά πλακίδια,

υπήρχε και παραμένων ωστενίτης. Χρησιμοποιώντας τις συστάσεις αυτές, μπορούμε να επιβεβαιώσουμε την τιμή της M_s . Έτσι είναι :

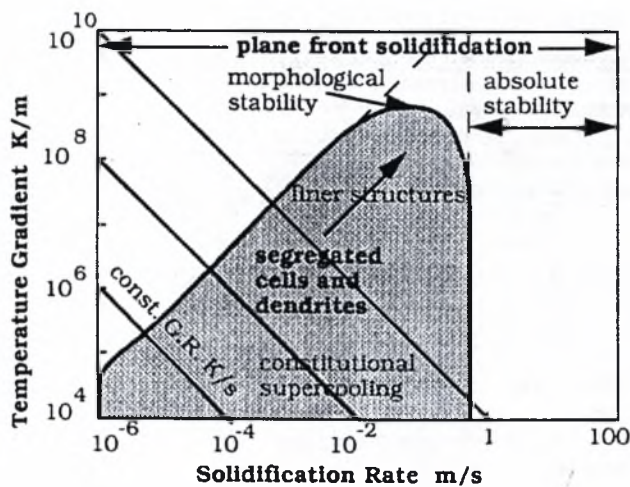
$M_s = 476.196 - 423 \times 0.8 = 137.796$ [$^{\circ}\text{C}$] , ενώ για ποσοστό % κ.β $C > 1.0$ είναι :

$M_s = 476.196 - 423 \times 1.1 = 10.896$ [$^{\circ}\text{C}$] που είναι πλησίον της θερμοκρασίας περιβάλλοντος οπότε ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός δεν ολοκληρώνεται 100% και υπάρχει και παραμένων ωστενίτης.

2.5 Δενδριτική - κυψελοειδής μορφολογία

Κατά την στερεοποίηση της λίμνης τήξης παρατηρήθηκαν μορφολογίες δενδριτών και κυψελών μέσα στις οποίες η δομή ήταν π.χ μαρτενσιτική.

Οι μορφολογίες αυτές εξαρτώνται από τον αντίστοιχο ρυθμό ψύξης (βλέπε σχ 2.8) :



Σχ 2.8 Διάγραμμα κλίσης θερμοκρασίας - ρυθμού ψύξης - μορφολογίας

Ο σχηματισμός δενδριτών και κυψελίδων οφείλεται στο φαινόμενο της συστασιακής υπέρψυξης. Κατά την στερεοποίηση, εξαιτίας της μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης εμπρός από το σύνορο υγρού - στερεού, μεταβάλλεται και η θερμοκρασία ισορροπίας της στερεοποίησης, T_e . Εκτός από την τοπική θερμοκρασία, T_e , η θερμοκρασία του υγρού μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή T_L .

Για να σχηματιστούν οι κυψελίδες και οι δενδρίτες, το υγρό θα πρέπει να ψυχθεί με βραδύτερο ρυθμό από τον κρίσιμο. Όταν η θερμοκρασία της προεξοχής του δενδρίτη είναι

χαμηλότερη από την T_e ο δενδρίτης θα αναπτυχθεί. Αν η κλίση της θερμοκρασίας είναι υψηλότερη από την κρίσιμη η προεξοχή του δενδρίτη θα λιώσει.

Η συνθήκη ώστε να έχουμε στερεοποίηση με επίπεδο μέτωπο είναι η εξής :

$$\frac{dT_L}{dx} > \frac{T_1 - T_3}{\left(\frac{D}{v}\right)}$$

όπου :

$\frac{dT_L}{dx}$, η κλίση θερμοκρασίας στην διεπιφάνεια υγρού - στερεού.

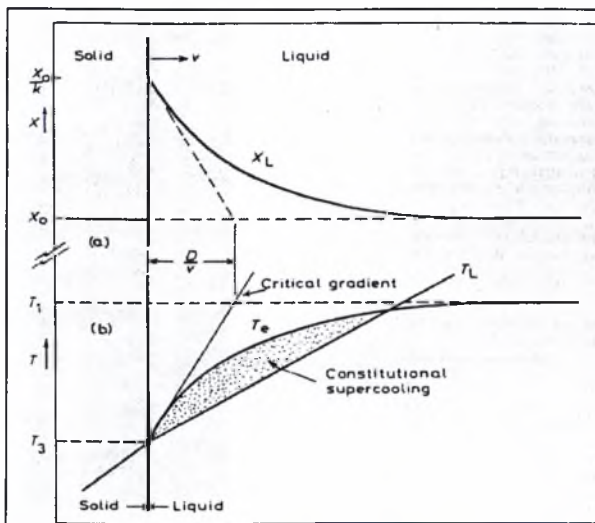
D , η διαχυτότητα της διαλυμένης ουσίας (π.χ άνθρακας) στο υγρό

v , η ταχύτητα στερεοποίησης

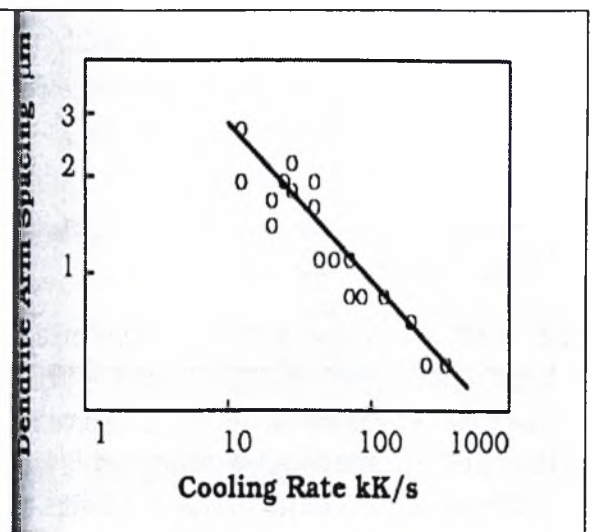
T_1 , η θερμοκρασία liquidus του κυρίως υγρού

T_3 , η θερμοκρασία solidus του κυρίως υγρού.

Η ονοματολογία των μεγεθών αυτών καθώς και ο τρόπος σχηματισμού της συστασιακής υπέρψυξης φαίνεται στο σχήμα 2.9



Σχ.2.9 Συστασιακή υπέρψυξη στην διεπιφάνεια στερεού - υγρού



Σχ 2.10 Διάγραμμα ρυθμού ψύξης - μήκους δενδριτών

Όταν υπάρχουν κλίσεις θερμοκρασίας (gradients) κάθετα προς την διεύθυνση στερεοποίησης τότε αναπτύσσονται και δευτερόντες δενδρίτες κάθετα προς τον άξονα των πρωτευόντων δενδριτών. Ο σχηματισμός αυτός εννοείται σε ακόμα χαμηλότερους ρυθμούς στερεοποίησης όπως φαίνεται στο σχ.2.10 :

Μαθηματική περιγραφή της διεργασίας

3.1 Ανάγκη μαθηματικής περιγραφής

Στην μελέτη των κατεργασιών με laser, όπου η θερμοκρασία μεταβάλλεται με πολύ γρήγορο ρυθμό και οι σχεδιαστικές παράμετροι είναι πολλές είναι σχετικά δύσκολο να μοντελοποιηθεί η κατεργασία. Χρησιμοποιώντας ορισμένες από αυτές (αριθμός περασμάτων, ισχύς, διάμετρος και ταχύτητα δέσμης) είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε με αυτά μόνο τα μεγέθη την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του υλικού. Αυτό μας βοηθάει να γνωρίζουμε την μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο υλικό και αν αυτή είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία τήξης του, πόσο χρόνο βρίσκεται το υλικό στην ωστενιτική περιοχή - κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο αφού πρόκειται για τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό - καθώς επίσης και να υπολογίζουμε τις κλίσεις της θερμοκρασίας τόσο κατά την διάρκεια της θέρμανσης όσο και κατά την ψύξη. Επίσης ενδιαφέρει με ποιον ρυθμό μεταβάλλεται η θερμοκρασία με αλλαγή των σχεδιαστικών παραμέτρων.

3.2 Βασικές σχέσεις

Κατά την ενανθράκωση η διάχυση του άνθρακα, που εναποτίθεται αρχικά στην επιφάνεια, μέσα στο πλέγμα του σιδήρου - άνθρακα περιγράφεται από τους νόμους του Fick.

$$J_C = -D \frac{dC}{dz}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

όπου :

$D = \text{συντελεστής διάχυσης} = D_0 \times \exp(-E/RT)$ με $E = \text{ενέργεια ενεργοποίησης για διάχυση}$

$R = \text{σταθερά των αερίων}$

$T = \text{θερμοκρασία}$

$J_c = \text{ροή των ατόμων άνθρακα}$

$C = \text{συγκέντρωση του άνθρακα}$

$z = \text{απόσταση (βάθος) κάτω από την επιφάνεια}$

Η Δ.Ε πρέπει να ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες που ακολουθούν :

$$C(z=0) = C_{\text{SATURATED}}$$

$$C(z=z_{\text{max}}) = C_{\text{ΑΝΘΡΑΚΑ}}$$

Η συγκέντρωση $C_{\text{SATURATED}}$ αναφέρεται στην επιφάνεια του δοκιμίου και είναι ίση με την συγκέντρωση του διαλύματος αλλά ουσιαστικά δείχνει το ποσοστό του άνθρακα που μπορεί να διαλύσει ο χάλυβας. Είναι γνωστό ότι το μεγαλύτερο ποσοστό άνθρακα διαλύεται στον ωστενίτη και είναι περίπου 2.0 % κ.β.

Η συγκέντρωση $C_{\text{ΑΝΘΡΑΚΑ}}$ αναφέρεται στο μέγιστο βάθος όπου η κινούσα δύναμη (διαφορά συγκέντρωσης) για ενανθράκωση μηδενίζεται και άρα η συγκέντρωση σε εκείνο το σημείο ισούται με την αρχική συγκέντρωση του χάλυβα σε άνθρακα (0.152 % κ.β)

Όσον αφορά το θερμοκρασιακό πεδίο ισχύουν τα παρακάτω.

Η διαφορική εξίσωση κατά την κίνηση της δέσμης πάνω από την επιφάνεια :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Η εξίσωση αυτή υποθέτει μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή κατά τον άξονα z (βάθος) και απουσία φαινομένων συναγωγής και ακτινοβολίας.

με τις ακόλουθες συνοριακές συνθήκες :

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{F_0}{k} \quad \text{στο} \quad z = 0$$

$$T = T_{\text{room}} \quad \text{στο} \quad z = l$$

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Laplace έχω τα εξής :

$$(\text{υπενθύμιση : } L\{u(x,y,z,t)\} = u' = \int_0^{\infty} e^{-pt} u(x,y,z,t) dt)$$

$$L\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = L\left(\frac{1}{a} \times \frac{\partial T}{\partial t}\right) \quad (1)$$

καθώς επίσης και οι οριακές συνθήκες :

$$L\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = L\left(-\frac{F_0}{k}\right) \quad \text{στο } z = 0 \quad (2)$$

$$T' = T_{\text{ROOM}}/p \quad \text{στο } z = l \quad (3)$$

$$(1) \Rightarrow \frac{\partial^2 T'}{\partial z^2} - \frac{p}{a} * T' = -\frac{1}{a} T_0(z,t)$$

θεωρώ για ευκολία ότι $T_0 = 0$ και έτσι η δ.ε γίνεται :

$$y'' - q^2 y = 0 \quad (4)$$

με τις συνοριακές συνθήκες :

$$y' = -\frac{F_0}{kp} \quad \text{στο } z = 0$$

$$y = 0 \quad \text{στο } z = l$$

Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο της (4) είναι :

$$\rho^2 - q^2 = 0 \Rightarrow \rho_1 = q \quad \text{και} \quad \rho_2 = -q$$

άρα έχω :

$$y(z) = c_1 e^{qz} + c_2 e^{-qz} \quad (5)$$

Παραγωγίζοντας την σχέση (5) παίρνω :

$$y'(z) = c_1 q e^{qz} - c_2 q e^{-qz} \quad (6)$$

Εφαρμόζοντας στις (5) και (6) τις συνοριακές συνθήκες έχουμε :

$$y'(0) = -\frac{F_0}{kp} \Rightarrow c_1 - c_2 = -\frac{F_0}{kpq} \Rightarrow c_1 = c_2 - \frac{F_0}{kpq}$$

$$y(l) = 0 \Rightarrow c_1 q e^{ql} + c_2 q e^{-ql} = 0 \Rightarrow c_1 e^{ql} = -c_2 e^{-ql} \Rightarrow \frac{c_1}{c_2} = -\frac{e^{-ql}}{e^{ql}} \Rightarrow \frac{c_1}{c_2} = -\frac{1}{e^{2ql}} \Rightarrow c_2 = -c_1 e^{2ql}$$

και

$$c_1 = c_2 - \frac{F_0}{kpq} \Rightarrow c_1 + c_1 e^{2ql} = -\frac{F_0}{kpq} \Rightarrow c_1 = -\frac{F_0}{kpq(1+e^{2ql})} = -\frac{F_0 e^{ql}}{kpq(e^{ql} + e^{-ql})}$$

άρα είναι :

$$c_1 = -\frac{F_0 e^{ql}}{kpq(e^{ql} + e^{-ql})}$$

$$c_2 = \frac{F_0 e^{-ql}}{kpq(e^{ql} + e^{-ql})}$$

Οπότε έχουμε για την $y(z)$ τα εξής :

$$y(z) = -\frac{F_0 e^{ql}}{kpq(e^{ql} + e^{-ql})} e^{qz} + \frac{F_0 e^{-ql}}{kpq(e^{ql} + e^{-ql})} e^{-qz} =$$

$$\frac{F_0}{kpq(e^{ql} + e^{-ql})} (e^{-ql} e^{-qz} - e^{ql} e^{qz})$$

$$= \frac{2F_0}{kpq \cosh ql} (e^{-ql} e^{-qz} - e^{ql} e^{qz})$$

Η παραπάνω σχέση μας βοηθάει στην εύρεση μιας αναλυτικής εξίσωσης της θερμοκρασίας χωρίς να απαιτείται επαναληπτική μέθοδος.

Οι *Carshaw* και *Jaeger* ^[5] προτείνουν μια λύση για την διαφορική εξίσωση του θερμοκρασιακού πεδίου με παρόμοιες συνοριακές συνθήκες που έχει ως εξής :

$$T(x,t) = \frac{F_0 t}{\rho c l} + \frac{F_0 l}{k} \left\{ \frac{3x^2 - l^2}{6l^2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-an^2 \pi^2 t/l^2} \cos \frac{n\pi x}{l} \right\} \Rightarrow$$

$$T(z,t) = \frac{2F_0 \sqrt{at}}{k} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ ierfc \frac{(2n+1)l - z}{2\sqrt{at}} + ierfc \frac{(2n+1)l + z}{2\sqrt{at}} \right\} \quad (7)$$

Η παραπάνω λύση υποθέτει μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας κατά την διεύθυνση z (βάθος κάτω από την επιφάνεια).

Όμοια από τους *Canova* και *Ramous*^[2] προτείνεται η ακόλουθη εξίσωση :

$$T'(z,t) = T(z,t) + \frac{F_0 D}{k} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ ierfc\left(\frac{2nl+z}{D}\right) + ierfc\left(\frac{2nl-z}{D}\right) \right\} \quad (8)$$

με

α = συντελεστής θερμοδιαχυτότητας

t = χρόνος

$$D = 2\sqrt{\alpha t}$$

k = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

l = πάχος της πλάκας

F_0 = η απορροφούμενη πυκνότητα ισχύος

3.3 Επεξεργασία των εξισώσεων

Προκειμένου οι (7) και (8) να γίνουν ευκολότερες στον χειρισμό αλλά και για να μπορούν να κωδικοποιηθούν σε πρόγραμμα Η/Υ μετασχηματίζονται σύμφωνα με κάποιες σχέσεις που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα ο *Steen*^[2] έχει προτείνει τις παρακάτω απλουστεύσεις :

$$ierfc(u) = \frac{e^{-u^2}}{\sqrt{\pi}} - u[1 - erf(u)] \quad (9)$$

όσον αφορά για την συνάρτηση λάθους $erf(u)$ προτείνει :

$$erf(u) = 1 - (a_1 b + a_2 b^2 + a_3 b^3) e^{-u^2} \quad (10)$$

όπου :

$$b = (1+cu)^{-1}$$

$$a_1 = 0.3480242$$

$$a_2 = -0.0958798$$

$$a_3 = 0.7478556$$

$$c = 0.47047$$

Προτείνονται τα ακόλουθα βήματα για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας σε οποιοδήποτε (z,t). Έχουμε :

⇒ Βήμα 1

Εκλογή του χρόνου t (π.χ $t = 1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$)

⇒ Βήμα 2

Εκλογή του βάθους (π.χ $z = 50 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$)

⇒ Βήμα 3

Υπολογισμός του D

⇒ Βήμα 4

Εκλογή του n μέχρι η ακολουθία να συγκλίνει (συνήθως $n = 5 \sim 7$)

⇒ Βήμα 5

Υπολογισμός των αθροισμάτων.

Στις εξισώσεις (7) και (8) έχω :

$$u_1 = \frac{(2n+1)l-z}{D} \quad \text{και} \quad u_2 = \frac{(2n+1)l+z}{D} \quad (\text{π.χ για την (7))}$$

Αφού έχουμε επιλέξει τα n , l , z και D από τα προηγούμενα βήματα, υπολογίζουμε τα u_1 , u_2 Μέσω των (9), (10) μετατρέπουμε τις συναρτήσεις λάθους σε πολυωνυμικές.

Καθώς μεταβάλλεται ο όρος n (τα υπόλοιπα μεγέθη είναι σταθερά) προκύπτουν νέες τιμές για τα u_1 , $u_2 \rightarrow$ νέες τιμές $ierfc(u) \rightarrow$ νέες πολυωνυμικές συναρτήσεις \rightarrow νέο άθροισμα.

Αφού προσθέσουμε τα αθροίσματα από $n = 1 \rightarrow 7$, παίρνουμε μια τιμή για την θερμοκρασία σε ορισμένη χρονική στιγμή και καθορισμένο βάθος.

Για να κατασκευάσουμε την καμπύλη της θερμοκρασίας σε ένα ορισμένο βάθος ενός σημείου σε όλη την χρονική διάρκεια της διεργασίας πρέπει να μεταβάλλονται οι τιμές του χρόνου t .

Έτσι αν θέλουμε να απεικονίσουμε διαγραμματικά την μεταβολή της θερμοκρασίας πρέπει να προσθέσουμε τα εξής βήματα :

\Rightarrow Εκλογή χρονικού βήματος (π.χ 1 ms)

Αν η συνολική διάρκεια είναι 1 sec, τότε 1000 βήματα. Όμως οι τιμές του D θα αλλάζουν καθώς αλλάζει το t . ($D_1 = 2\sqrt{at_1}$, $D_2 = 2\sqrt{at_2}$, ..., $D_n = 2\sqrt{at_n}$ για $t_1 = 10^{-3}$ s, $t_2 = 2 \times 10^{-3}$ s ... $t_n = 1$ s). Τα αθροίσματα όμως θα μεταβάλλονται και ως προς τις τιμές του D σε κάθε βήμα. Είναι επομένως σχετικά δύσκολο και επίπονο να βρεθεί απευθείας λύση και απαιτείται η συγγραφή κώδικα σε H/Y.

Πειραματική διαδικασία

4.1 Γενικά

Το πείραμα είναι πάντοτε ένας έγκυρος και αντικειμενικός τρόπος για την αποδοχή ή την απόρριψη μιας οποιασδήποτε θεωρίας. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να ελεγχθούν οι πιθανές αποκλίσεις και τα επιμέρους πρακτικά προβλήματα που ανακύπτουν και δεν μπορούσαν να προβλεφθούν από το θεωρητικό μοντέλο. Με τις μετρήσεις κατασκευάστηκε μια σειρά από πίνακες και διαγράμματα για να ελεγχθεί η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων.

Η σειρά των μετρήσεων κρίθηκε αναγκαία ώστε να καλυφθούν κάποιοι στόχοι που τέθηκαν ως επιθυμητοί από την αρχή. Τέτοιοι είναι :

1) Μεταβολή της σκληρότητας από την δέσμη LASER.

Εφόσον η σκληρότητα έχει αυξηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό η μελέτη αυτή χρήζει σημασίας σε αντίθετη περίπτωση δεν έχει οποιοδήποτε πρακτικό αποτέλεσμα.

2) Μεταβολή της δομής της ζώνης σκλήρυνσης.

Παρατηρούνται οι αλλαγές στη μικροδομή της ζώνης σκλήρυνσης και η δημιουργία μαρτενσίτη.

3) Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της κατεργασίας.

Οι παράμετροι της κατεργασίας [Ισχύς - διάμετρος - ταχύτητα - αριθμός περασμάτων] έχουν επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Κυρίως πως επιδρούν στο βάθος σκλήρυνσης και τις τιμές της σκληρότητας.

4) Επιλογή του μέσου ενανθρακώσεως.

Στην σειρά των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν αιωρήματα και σπρέι γραφίτη με διαφορετική σύσταση. Εξετάζεται ποιο διάλυμα έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην EBETAM ΑΕ και το LIC/ΠΤΕ.

Η προετοιμασία των δοκιμών και οι μετρήσεις έγιναν στον εργαστηριακό εξοπλισμό του Τμήματος.

4.2 Υλικό κατεργασίας

Το υλικό που εξετάστηκε ήταν ο χάλυβας 15CrNi6 (1.5919). Η σύστασή του φαίνεται στον παρακάτω πίνακα :

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.152	0.37	0.53	0.014	0.028	1.65	1.51

Πίνακας 4.1 Σύσταση (% κ.β) του χάλυβα 1.5919

Από την σύσταση του χάλυβα διαπιστώνεται ότι πρόκειται για υποευτηκτοειδή χάλυβα με κυριότερα κραμματικά στοιχεία το χρώμιο (Cr) και το νικέλιο (Ni). Οι χάλυβες αυτού του είδους ονομάζονται επιβελτιωμένοι χάλυβες ενανθρακώσεως όπου το άθροισμα των κραμματικών στοιχείων (Cr,Ni,Mo,V) δεν ξεπερνά το 5%.

4.3 Ιδιότητες του χάλυβα

Οι ιδιότητες που ενδιαφέρουν την κατεργασία είναι περισσότερο οι θερμικές αλλά και η σύσταση του χάλυβα (κυρίως το % C). Ακολουθεί πίνακας με τις κυριότερα μεγέθη :

Ιδιότητα	Τιμή
θερμική αγωγιμότητα (λ)	35 - 50 W/m.K
πυκνότητα (ρ)	7800 - 7900 kg/m ³
ειδική θερμότητα (C_p)	440 - 520 J/kg.K
θερμοδιαχυτότητα (α)	8.519×10^{-6} - 1.456×10^{-5} m ² /sec

Πίνακας 4.2 Κυριότερες φυσικές ιδιότητες του 1.5919

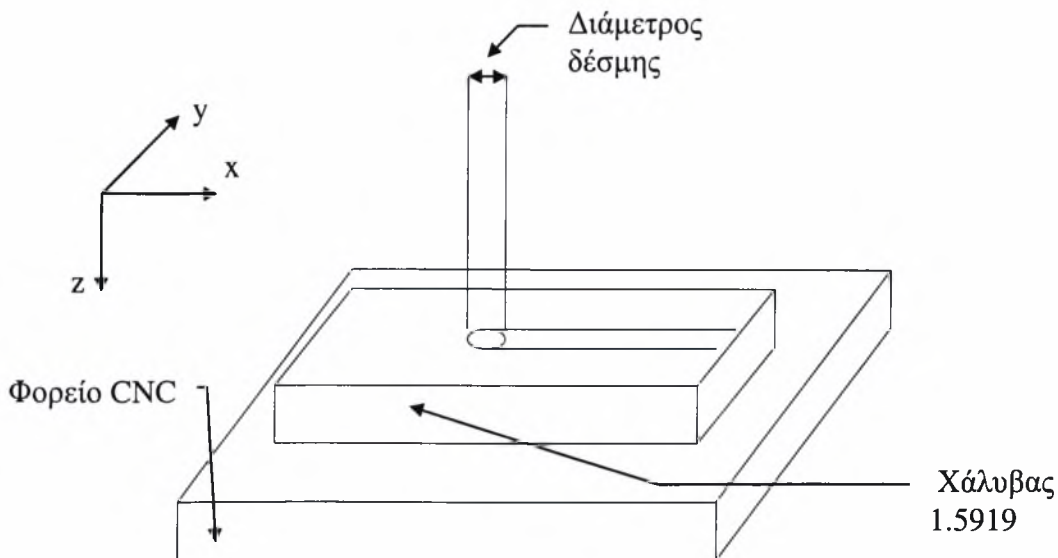
Για την κατεργασία πρέπει να είναι γνωστές κάποιες θερμοκρασίες από το διάγραμμα ισορροπίας Fe-C για τον συγκεκριμένο χάλυβα. Οι θερμοκρασίες αυτές έχουν υπολογιστεί από το πρόγραμμα ThermoCalc που βρίσκεται εγκατεστημένο στους Η/Υ του τμήματος.

- Ευκτηκτοειδής θερμοκρασία..... $A_1 = 699$ °C
- Θερμοκρασία έναρξης ωστενιτοποίησης..... $A_3 = 794$ °C
- Liquidus..... $T_M = 1476$ °C

4.4 Σχεδιαστικές παράμετροι της διεργασίας

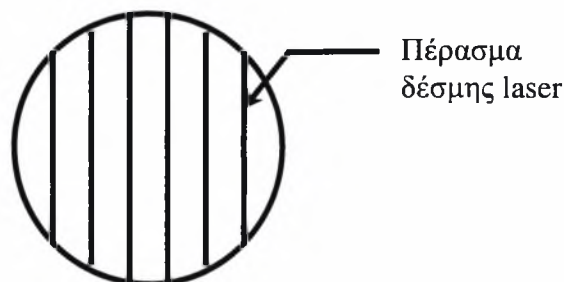
Η διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, ήταν ένα φορείο CNC που κινούνταν οριζόντια και επάνω του είχαν στερεωθεί οι δίσκοι προς ενανθράκωση. Η δέσμη ήταν ακίνητη και κατά την κίνηση του φορείου χάρασσε την διαδρομή.

Η παραπάνω διάταξη φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα :



Σχ.4.1 Διάταξη του εργαστηριακού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στην ενανθράκωση

Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ενανθράκωση με δέσμη LASER είχαν μορφή δίσκων με διάμετρο $D = 100 \text{ mm}$ και πάχος $t = 6 \text{ mm}$. Τα περάσματα της δέσμης έγιναν σε καθορισμένες διαδρομές επάνω στην επιφάνεια. Για να αποφευχθεί η μεταφορά θερμότητας (όσο αυτό είναι εφικτό) από την μια διαδρομή στην άλλη υπάρχουν καθορισμένες αποστάσεις μεταξύ τους (1.5 - 2 cm). Για να αποφευχθεί η οξείδωση της επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε άζωτο (N_2) ως αέριο προστασίας σε πίεση 2 bar. Για την μορφή των δοκιμίων βλέπε σχήμα :



Σχ.4.2 Πέρασματα της δέσμης Laser σε αρχικό δοκίμιο μορφής δίσκου

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την διεργασία είναι οι ακόλουθοι :

1) Οι θερμικές και φυσικές ιδιότητες του υλικού όπως η πυκνότητα ,θερμική αγωγιμότητα θερμοδιαχυτότητα , η απορροφητικότητα. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητοι της διεργασίας και θεωρούνται ως σταθερές. Η απορροφητικότητα όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.1 είναι αυξημένη σε σχέση με αυτήν του μετάλλου βάσης λόγω της επικάλυψης του γραφίτη.

2) Τα χαρακτηριστικά της δέσμης Laser. Τέτοια είναι :

- Η ισχύς της δέσμης [q] εκφρασμένη σε [W]
- Η ακτίνα της δέσμης [r] εκφρασμένη σε [mm]
- Η ταχύτητα της δέσμης [u] εκφρασμένη σε [m/min]
- Ο αριθμός περασμάτων
- Το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε (σπρέι γραφίτη ή αιώρημα)

4.5 Συνθήκες πειραμάτων

Οι συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν οι σειρές των πειραμάτων παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες :

Πίνακας 4.3 Συνθήκες κατεργασίας για δοκίμια B6 – B21 της E.B.E.T.A.M

ΑΡ.ΔΟΚ	ΙΣΧΥΣ [W]	ΔΙΑΜ.ΔΕΣΜΗΣ [mm]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ [m/min]	ΑΡ.ΠΑΣΣΩΝ
B6	1300	15	0,8	2
B7	1300	15	0,8	5
B8	1300	15	0,8	10
B13	1300	7	0,8	2
B14	1300	7	0,8	5
B15	1300	7	0,8	10
B16	1300	7	0,8	20
B18	1300	3	0,8	1
B19	1300	3	0,8	2

B20	1300	3	0,8	5
B21	1300	3	0,8	10

Χρησιμοποιήθηκε άζωτο ως αέριο προστασίας σε πίεση 4 bar, επικάλυψη με αιώρημα

Πίνακας 4.4 Συνθήκες κατεργασίας για δοκίμια B22 – B33B της E.B.E.T.A.M

ΑΡΙΘΜ ΔΟΚ	ΙΣΧΥΣ [W]	ΔΙΑΜ.ΔΕΣΜΗΣ [mm]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ [m/min]	ΑΡ.ΠΑΣΣΩΝ
B22	1300	10	0,2	5
B23	1300	10	0,2	10
B24	1300	10	0,2	15

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ = 16,55 W/mm²

ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ = 3 SEC/ΠΕΡΑΣΜΑ

B25	1300	10	0,08	1
B26	1300	10	0,08	5
B27	1300	10	0,08	3

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ = 16,55 W/mm²

ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ = 7.5 SEC/ΠΕΡΑΣΜΑ

B28	750	7	0,2	2
B29	750	7	0,2	5
B30A	750	7	0,4	3
B30B	750	7	0,4	5

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ = 19,5 W/mm²

ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ = 2,1 SEC/ΠΕΡΑΣΜΑ (B28,B29)

ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ = 1,05 SEC/ΠΕΡΑΣΜΑ (B30A,B30B)

B31	750	7	1,2	5
B32	750	7	1,2	10
B33A	750	7	1,2	20
B33B	750	7	1,2	40

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ = 19,5 W/mm²

ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ = 0,35 SEC/ΠΕΡΑΣΜΑ

Χρησιμοποιήθηκε αέριο προστασίας άζωτο σε πίεση 3 bar και επικάλυψη με σπρέι γραφίτη.

Πίνακας 4.5 Συνθήκες κατεργασίας δοκιμών A1 – A22 του LIC/ITE

ΑΡ.ΔΟΚ.	ΙΣΧΥΣ [W]	ΔΙΑΜ.ΔΕΣΜΗΣ [mm]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ [m/min]	ΑΡ.ΠΑΣΣΩΝ
A1	1500	4,8	0,6	1
A2	1500	4,8	0,6	2
A3	1500	4,8	0,6	5
A4	1500	4,8	0,6	10
A5	1630	6	0,6	1
A6	1690	6	0,6	2
A7	1650	6	0,6	5
A8	2880	6	3	1
A9	2830	6	3	2
A10	2730	6	3	5
A11	2730	6	3	10
A12	2720	6	1,5	1
A13	2700	6	1,5	2
A14	2710	6	1,5	5
A15	2710	6	1,5	10
A16	3000	6	3	2 [#]
A17	3000	6	3	5 [#]
A18	2640	6	1.5 + 4.5 [*]	5
A19	2740	6	1.5 + 4.5 ^{**}	10
A20	2700	6	6	10
A21	2700	6	9	10
A22	2700	6	9	5

Υποδηλώνει ότι μετά από κάθε πάσο ξαναψεκάζεται σπρέι γραφίτη δηλ. (2 πασ + γραφ + 1 πασ + γραφ ,κτλ)

* Υποδηλώνει ότι στο πρώτο πάσο u = 1.5 m/min και στα υπόλοιπα τέσσερα u = 4.5 m/min

** Υποδηλώνει ότι στο πρώτο πάσο u = 1.5 m/min και στα υπόλοιπα εννέα u = 4.5 m/min

Πίνακας 4.6 Συνθήκες κατεργασίας δοκιμίων A23 – A42 του LIC/ΛΤΕ

ΑΡ. ΔΟΚ	ΙΣΧΥΣ [W]	ΔΙΑΜ.ΔΕΣΜΗΣ [mm]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ [m/min]	ΑΡ.ΠΑΣΣΩΝ
A23	3000	6	12	1
A23B	3000	6	12 (O ₂)	1
A24	3000	6	6	1
A25	3000	6	4,5	1
A26	3000	6	1,95	1
A27	3000	6	2,55	1

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ = 106.1 W/mm²

ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ=0.12-0.72 SEC

ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ 1.5 ΚΑΙ 3 m/min ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΗΔΗ
(LIC CARB.A12 ΚΑΙ A8)

A28	3000	6	15	5
A29	3000	6	15	10
A30	3000	6	18	10
A31	3000	6	18	5

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ = 106.1 W/mm²

ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ=0.03-0.08 SEC /PASS

ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ 6 ΚΑΙ 9 m/min ΥΠΑΡΧΟΥΝ
ΗΔΗ (LIC CARB.A20 ΚΑΙ A21)

A32	900	6	4,5	5
A33	900	6	6	5
A34	900	6	6	10

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ = 31.85 W/mm²

ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ=0.048-0.08 SEC /PASS

ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΤΑΧΥΤΗΤΑ 9 m/min ΥΠΑΡΧΕΙ ΗΔΗ (LIC CARB.A22)

A35	900	3 [#]	0,3	1
A36	900	3 [#]	1,2	1
A37	900	3 [#]	2,1	1
A38	900	6 [*]	0,6	1

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ = 127.38 W/mm²

* ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ = 31.85 W/mm²

ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ=0.09-0.72 SEC/ΠΕΡΑΣΜΑ

A39	900	3 [*]	2,1	5
A40	900	3 [*]	2,1	10
A41	900	6 [#]	2,1	10
A42	900	6 [#]	2,1	20

*ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ =127.38 W/mm²

#ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ = 31.85 W/mm²

ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ = 0.09 SEC/ΠΕΡΑΣΜΑ

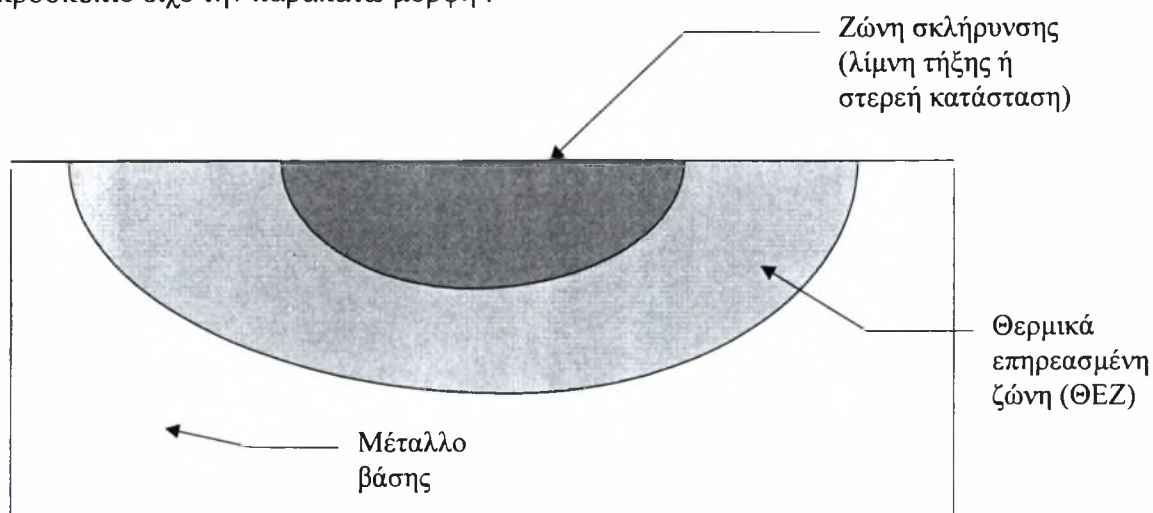
- ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- 1) Αμβολή των δίσκων
- 2) Επικάλυψη με σπρέι γραφίτη (graphit 33)
- 3) δυο ψεκασμοί και στέγνωμα στον αέρα (ενδιάμεσο και τελικό)
- 4) Προστατευτικό αέριο N₂ πίεσεως 2 bar

Αποτελέσματα

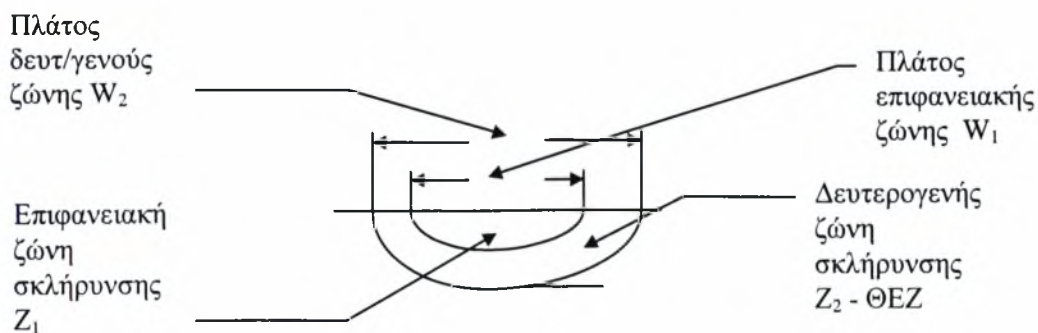
5.1 Πλάτη και βάθη της ζώνης ενανθράκωσης

Η μορφή της ζώνης ενανθράκωσης είχε σχεδόν ημιελλειπτικό σχήμα, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα κατά την εξέταση των δοκιμίων στο οπτικό μικροσκόπιο είχε την παρακάτω μορφή :



Σχ. 5.1 Μορφή ενανθρακωμένης ζώνης - ΘΕΖ στα δοκίμια της κατεργασίας

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται οι μετρήσεις του βάθους και του πλάτους της ζώνης σκλήρυνσης και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης. Στο σχήμα που ακολουθεί δίδεται η ονοματολογία των μεγεθών που μετρήθηκαν.



Σχ.5.2 Ονοματολογία των μεγεθών της ζώνης ενανθράκωσης και της ΘΕΖ

Ακολουθώς παρατίθενται οι πίνακες με τα μετρούμενα πλάτη και βάθη των δοκιμίων για τις σειρές του LIC/ΓΤΕ και της Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ.

Πίνακας 5.3 - Μεγέθη W_1 , W_2 , Z_1 , Z_2 για LIC/ΓΤΕ A1 - A22

A/A	W_1	W_2	Z_1	Z_2
A1	2130	3270	230	820
A2	2330	3380	480	1030
A3	2270	3450	500	960
A4	2460	3540	760	1310
A5	2340	3700	250	920
A6	2330	3630	500	1160
A7	2500	4300	660	1400
A8	1800	3200	130	450
A9	1750	3150	250	600
A10	1950	3600	250	630
A11	2300	3740	300	700
A12	3120	3830	140	720
A13	2700	4000	450	980
A14	2400	4200	550	1020
A15	2750	4450	780	1500
A16	1750	3250	130	550
A17	2050	3500	280	600
A18	1650	3650	200	700
A19	2120	3100	240	570
A20	1900	2670	180	450
A21	1850	2900	130	350
A22	1770	2700	100	300

Πίνακας 5.4 - Μεγέθη W_1 , W_2 , Z_1 , Z_2 για LIC/ΓΤΕ A23 - A42

A/A	W_1	W_2	Z_1	Z_2
A23	700	3000	30	120
A24	2800	3300	40	410
A25	3030	3350	140	430
A26	3550	4170	370	700
A27	2850	3850	260	630
A28	2560	3250	90	260
A29	3200	ΑΠΡΟΣΔ	180	ΑΠΡΟΣΔ
A30	2950	3800	70	240
A31	2700	3610	30	330
A32	1580	ΑΠΡΟΣΔ	180	ΑΠΡΟΣΔ
A33	1250	ΑΠΡΟΣΔ	140	ΑΠΡΟΣΔ
A34	1100	ΑΠΡΟΣΔ	80	ΑΠΡΟΣΔ
A35	2150	3070	700	1150
A36	1720	2270	170	580

A37	1550	1900	80	450
A38	2290	3180	130	820
A39	1650	2100	150	460
A40	1670	2130	250	510
A41	1190	2800	50	390
A42	1250	2500	30	400
A23B	2500	2920	40	300

Πίνακας 5.5 - Μεγέθη W_1, W_2, Z_1, Z_2 για B6 – B33B της E.B.E.T.A.M

A/A	W_1	W_2	Z_1	Z_2
B6	-	-	-	-
B7	-	-	-	-
B8	-	4090	-	650
B13	1240	2820	50	530
B14	1640	3330	110	650
B15	2100	4000	250	1100
B16	3400	5100	360	1600
B18	1490	2700	150	560
B19	2080	2660	160	630
B20	1980	2790	220	770
B21	2140	3390	380	1160
B22	Ολική επαν.			
B23	Ολική επαν.			
B24	Ολική επαν.			
B25	Ολική επαν.			
B26	Ολική επαν.			
B27	Ολική επαν.			
B28	750	4110	50	800
B29	1400	5650	70	1300
B30A	1700	4300	60	900
B30B	1900	3500	70	1100
B31	-	-	-	-
B32	-	-	-	-
B33A	-	-	-	-
B33B	-	3750	-	750

5.2 Παρατηρούμενες μικροδομές

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται στοιχεία για τα αποτελέσματα της ενανθράκωσης με laser επάνω στην δομή του υλικού και τις διαφορές που εμφανίστηκαν σε κάθε αλλαγή των παραμέτρων κατεργασίας. Στον πρώτο πίνακα αναφέρονται οι αλλαγές στην μικροδομή στα δοκίμια που κατεργάστηκαν στο LIC/ITE, ενώ στον δεύτερο πίνακα που ακολουθεί σε αυτά της E.B.E.T.A.M .

Πίνακας 5.6 Μικροδομές των δοκιμίων του LIC/ITE

Αριθμός δοκιμίου	ζώνη ενανθράκωσης	ΘΕΖ
A1	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A2	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type) ρήγμα στην ζώνη ενανθράκωσης	μπαινίτης σε επαναφορά
A3	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type) ύπαρξη δενδριτικής και κυψελοειδούς μορφολογίας σε μικρό βαθμό	μπαινίτης σε επαναφορά
A4	υπάρχει έντονη τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type) δενδριτική μορφολογία	μπαινίτης σε επαναφορά
A5	κυψελοειδής - δενδριτική μαρτενσίτης σε μήτρα ευτηκτικού υπάρχει τήξη	μπαινίτης σε επαναφορά
A6	κυψελοειδής - Δενδριτική μορφολογία βελονοειδής μαρτενσίτης σε μήτρα ευτηκτικού υπάρχει τήξη , υπάρχει ρήγμα	μπαινίτης σε επαναφορά
A7	Δενδριτική δομή βελονοειδής μαρτενσίτης σε μήτρα ευτηκτικού , υπάρχει τήξη	μπαινίτης σε επαναφορά
A8	ελάχιστη τήξη μαρτενσίτης πλακιδίων (plate-type) υποπεριοχές παραμένοντα ωστενίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
A9	Δενδριτική δομή (κύριοι βραχίονες) βελονοειδής μαρτενσίτης ((lath) και πλακιδίων (plate-type) υπάρχει τήξη	μπαινίτης σε επαναφορά
A10	υπάρχει τήξη	μπαινίτης

	βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type)	σε επαναφορά
A11	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A12	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type) σε μήτρα παραμένοντα ωστενίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
A13	υπάρχει έντονη τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A14	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type) ύπαρξη ρήγματος και πόρου	μπαινίτης σε επαναφορά
A15	υπάρχει έντονη τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και μπαινίτης	μπαινίτης σε επαναφορά
A16	υπάρχει ελάχιστη τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A17	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A18	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A19	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A20	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A21	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A22	ελάχιστη τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A23	ελάχιστη τήξη δενδριτική μορφολογία μαρτενσίτης πλακιδίων (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A23 (O ₂)	ελάχιστη τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A24	ελάχιστη τήξη δενδριτική μορφολογία μαρτενσίτης πλακιδίων (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A25	έχουμε τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης - παραμένων	μπαινίτης σε επαναφορά

	ωστενίτης	
A26	υπάρχει τήξη πλακίδια (plate) μαρτενσίτη σε μήτρα παραμένοντα ωστενίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
A27	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης	μπαινίτης σε επαναφορά
A28	ελάχιστη τήξη – ευτηκτική μικροδομή δενδριτική - κυψελοειδής μορφολογία	μπαινίτης σε επαναφορά
A29	Διασπορά καρβιδίων και σφαιροποίησή τους σε ευτηκτικό μίγμα	μπαινίτης σε επαναφορά
A30	ελάχιστη τήξη - φιλμ υγρού που στερεοποιήθηκε - παραμένων ωστενίτης και πλακίδια μαρτενσίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
A31	λωρίδα παραμένοντα ωστενίτη, προευτηκτοειδής σεμεντίτης και μαρτενσιτικά πλακίδια - στερεά κατάσταση	μπαινίτης σε επαναφορά
A32	-	μπαινίτης σε επαναφορά
A33	-	μπαινίτης σε επαναφορά
A34	-	μπαινίτης σε επαναφορά
A35	έντονη τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης	μπαινίτης σε επαναφορά
A36	υπάρχει τήξη μαρτενσίτης πλακιδίων (plate-type) και βελονοειδής (lath type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A37	ελάχιστη τήξη δενδριτική μορφολογία βελονοειδής μαρτενσίτης	μπαινίτης σε επαναφορά
A38	πλακίδια μαρτενσίτη - υπάρχει τήξη	μπαινίτης σε επαναφορά
A39	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type) σε μήτρα παραμένοντα ωστενίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
A40	υπάρχει τήξη βελονοειδής μαρτενσίτης (lath type) και λίγα πλακίδια (plate-type)	μπαινίτης σε επαναφορά
A41	ελάχιστη τήξη μαρτενσίτης πλακιδίων (plate- type) παραμένοντα ωστενίτης	μπαινίτης σε επαναφορά
A42	ελάχιστη τήξη μαρτενσίτης πλακιδίων (plate- type) παραμένοντα ωστενίτης	μπαινίτης σε επαναφορά

Πίνακας 5.7 Μικροδομές των δοκιμίων της E.B.E.T.A.M

Αριθμός δοκιμίου	ζώνη ενανθράκωσης	ΘΕΖ
B6	κανένα ίχνος ενανθράκωσης	-
B7	κανένα ίχνος ενανθράκωσης	-
B8	-	μπαινίτης σε επαναφορά
B13	υπάρχει τήξη ευτηκτική μικροδομή (λεπτόκοκκη) λωρίδα παραμένοντα ωστενίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
B14	υπάρχει τήξη δενδρίτες προευτηκτικού σεμεντίτη ευτηκτική μικροδομή στην λίμνη τήξης	μπαινίτης σε επαναφορά
B15	υπάρχει τήξη δενδριτική μορφολογία με επαναφορά μαρτενσίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
B16	υπάρχει τήξη επαναφορά μαρτενσίτη - παραμένων ωστενίτης με πλακίδια μαρτενσίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
B18	υπάρχει τήξη ευτηκτική μικροδομή - δενδρίτες προευτηκτικού σεμεντίτη - παραμένων ωστενίτης	μπαινίτης σε επαναφορά
B19	υπάρχει τήξη δενδρίτες προευτηκτικού σεμεντίτη (σε υψηλότερο ποσοστό) - ευτηκτική μικροδομή - παραμένων ωστενίτης	μπαινίτης σε επαναφορά
B20	υπάρχει τήξη δενδρίτες προευτηκτικού σεμεντίτη - ευτηκτική μικροδομή - ζώνη με πλακίδια μαρτενσίτη, παραμένων ωστενίτης	μπαινίτης σε επαναφορά
B21	μαρτενσίτης plate-type σε μήτρα παραμένοντα ωστενίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
B22	-	μπαινίτης σε επαναφορά (ολική)
B23	-	μπαινίτης σε επαναφορά (ολική)
B24	-	μπαινίτης σε επαναφορά (ολική)
B25	-	μπαινίτης σε επαναφορά (ολική)

B26	-	μπαινίτης σε επαναφορά (ολική)
B27	-	μπαινίτης σε επαναφορά (ολική)
B28	στερεά κατάσταση Δημιουργείται προευτηκτοειδής σεμεντίτης και πλακίδια μαρτενσίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
B29	στερεά κατάσταση πλακίδια μαρτενσίτη σε μήτρα παραμένοντα ωστενίτη	μπαινίτης σε επαναφορά
B30A	ελάχιστη τήξη δενδρίτες μαρτενσίτη , προευτηκτοειδής σεμεντίτης	μπαινίτης σε επαναφορά
B30B	στερεά κατάσταση μαρτενσίτης - προευτηκτοειδής σεμεντίτης	μπαινίτης σε επαναφορά
B31	κανένα ίχνος ενανθράκωσης	
B32	κανένα ίχνος ενανθράκωσης	
B33A	κανένα ίχνος ενανθράκωσης	
B33B	-	μπαινίτης σε επαναφορά

5.3 Μετρήσεις μικροσκληρότητας

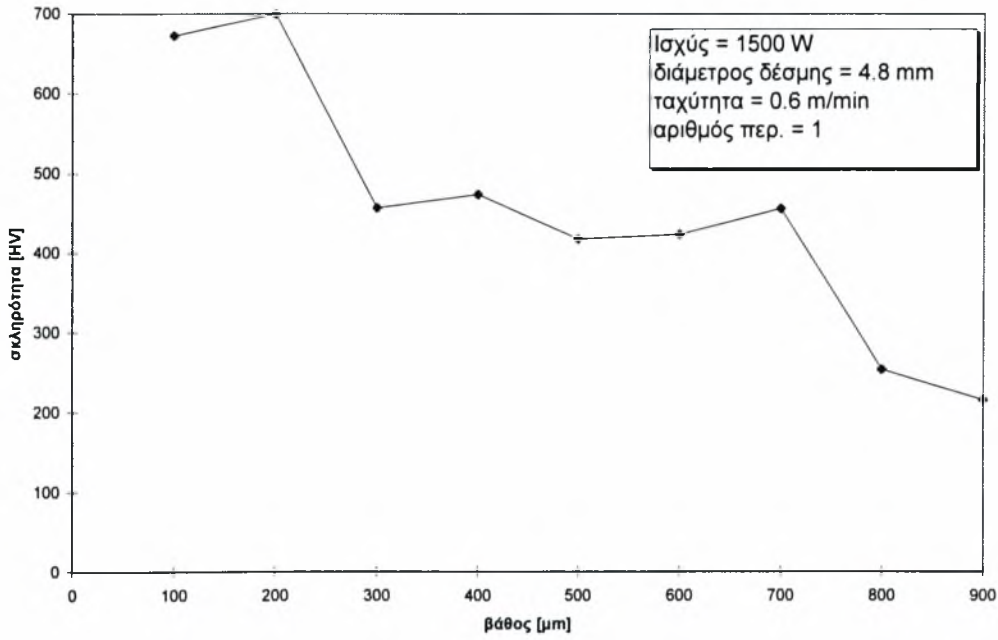
Τα παρακάτω διαγράμματα αναπαριστούν τις μετρήσεις μικροσκληρότητας που έγιναν στα δοκίμια του LIC/ITE και της E.B.E.T.A.M , χρησιμοποιώντας το μικροσκληρόμετρο Simadzu HMV – 2000.

Το φορτίο του εντυπωτή καθορίστηκε στα 200 gr και ο χρόνος εντύπωσης στα 15 sec.

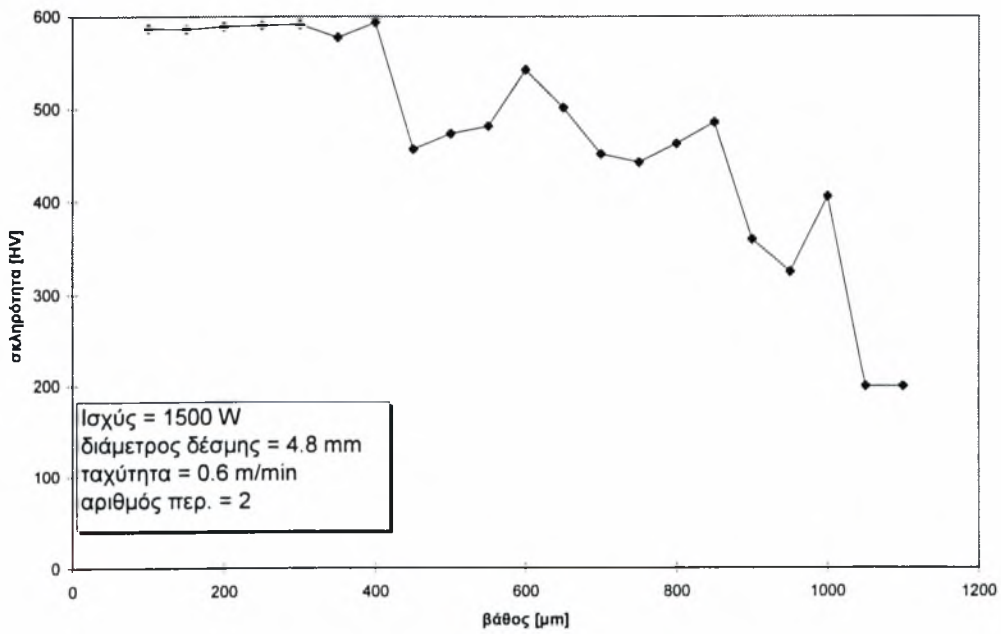
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο στην ζώνη ενανθράκωσης όσο και στην ΘΕΖ. Εξαιτίας των περιορισμένων διαστάσεων της ζώνης, χρησιμοποιήθηκε μικρό βήμα ίσο με 50 μm ή 100 μm στην διεύθυνση του βάθους. Λόγω της κατανομής έντασης της δέσμης ένα μεγάλο ποσοστό της προσπίπτει στο κέντρο της ενανθρακωμένης ζώνης. Γι' αυτό τον λόγο καταβλήθηκε προσπάθεια οι μετρήσεις να είναι όσο το δυνατόν στο κέντρο συμμετρίας της ζώνης ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο ρεαλιστικά.

Η σκληρότητα μετρήθηκε στην εγκάρσια διεύθυνση της διαδρομής του Laser.

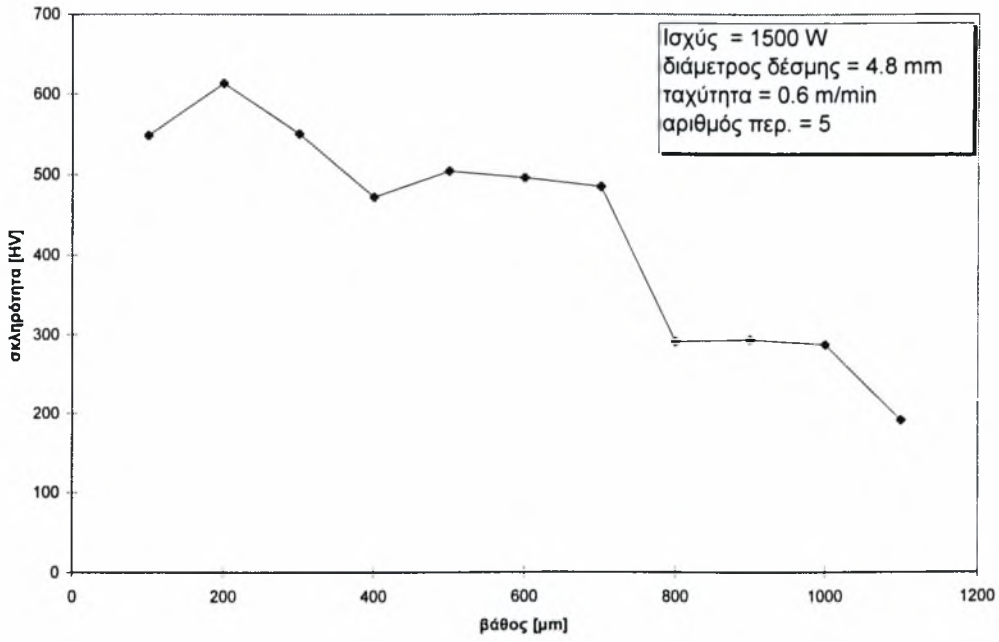
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α1



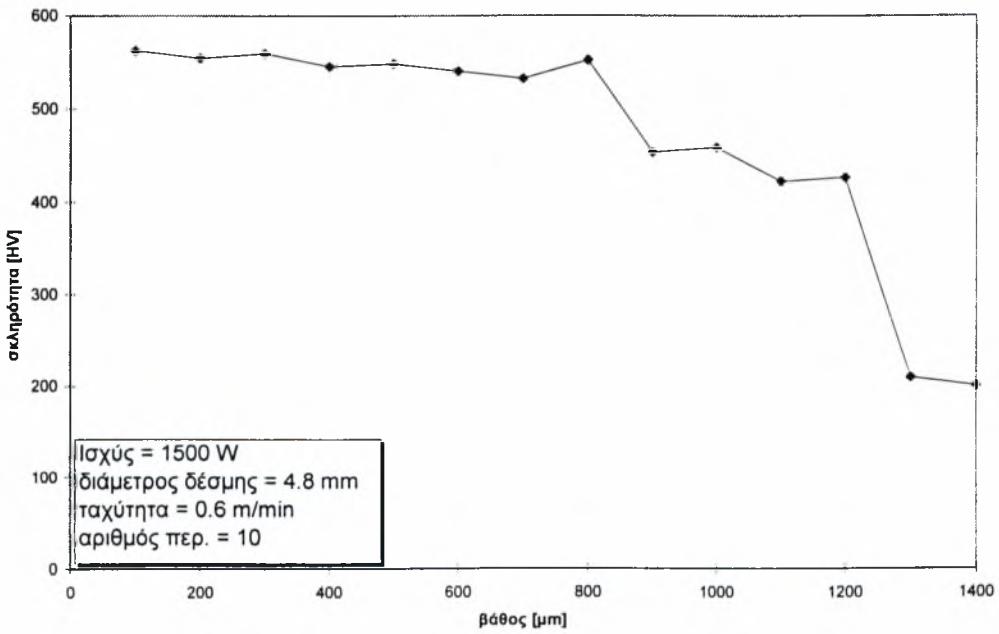
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α2



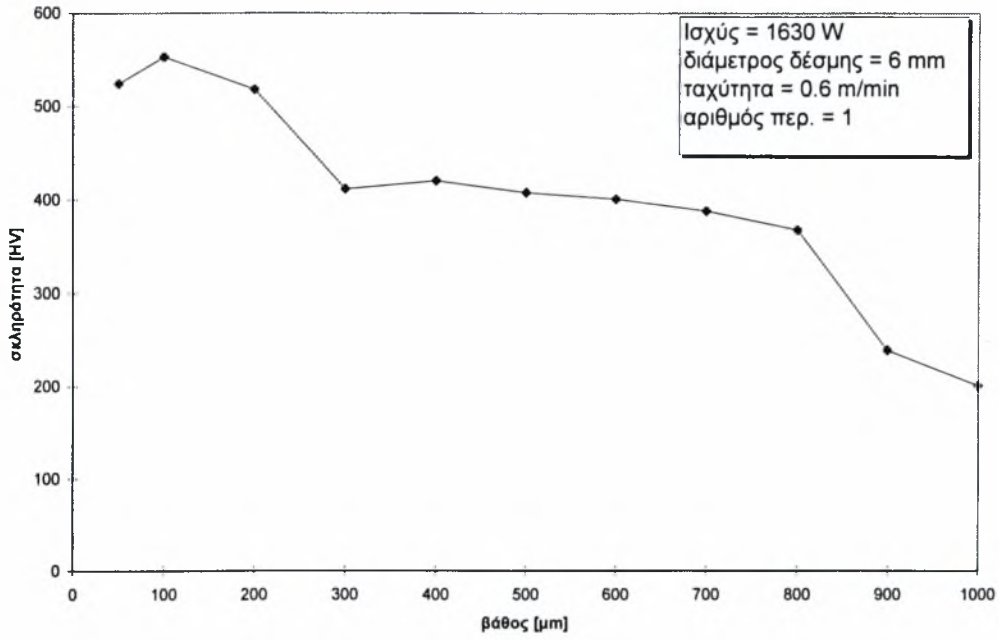
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α3



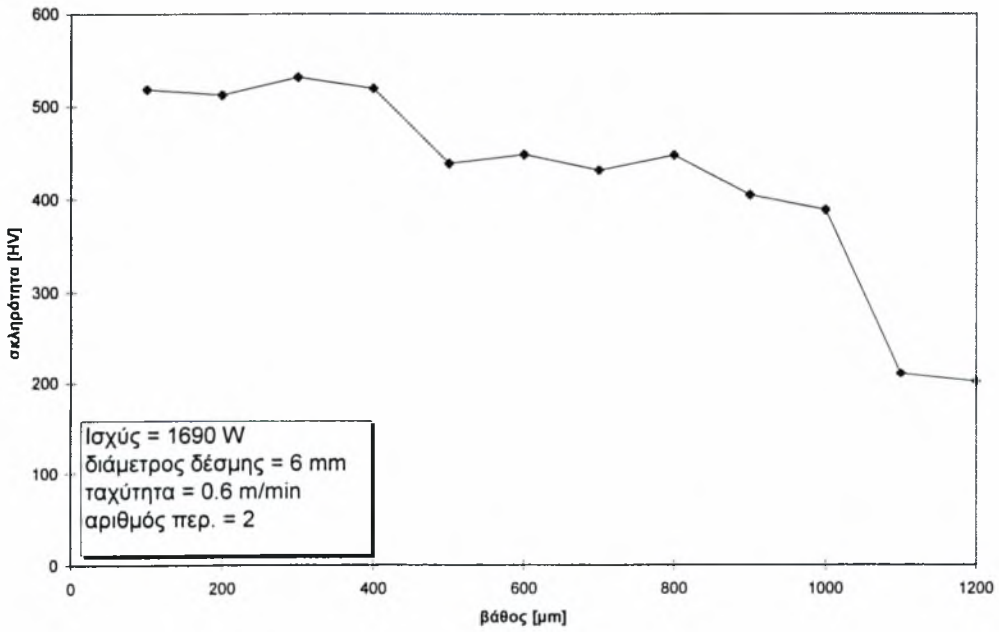
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α4



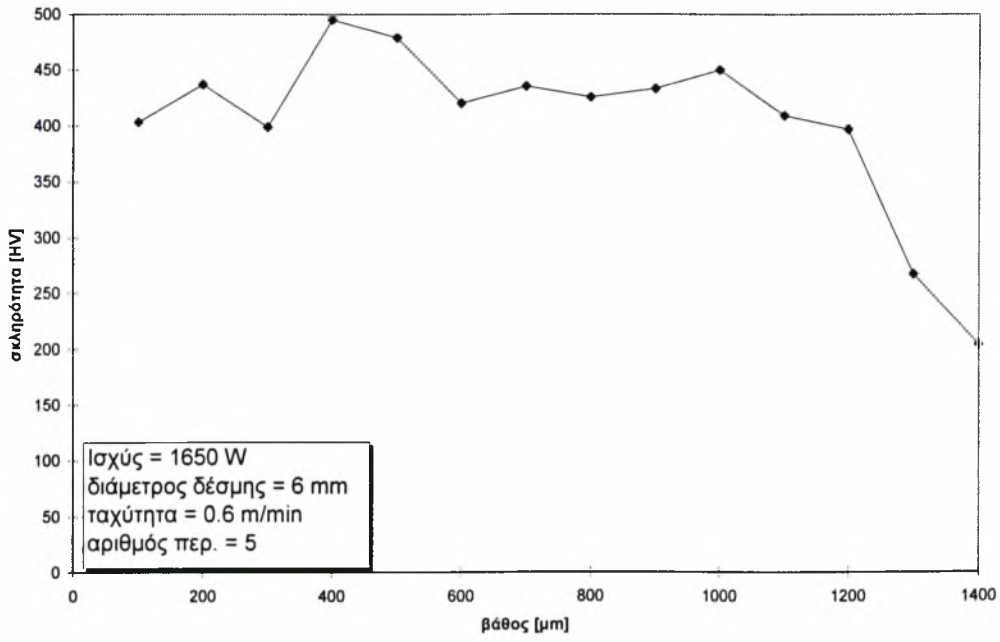
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α5



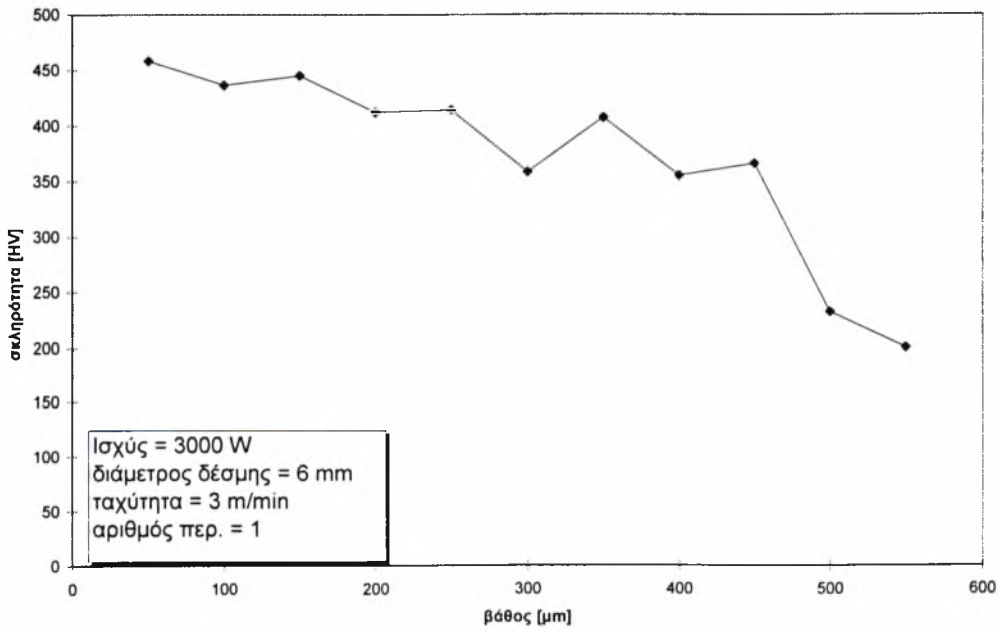
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α6



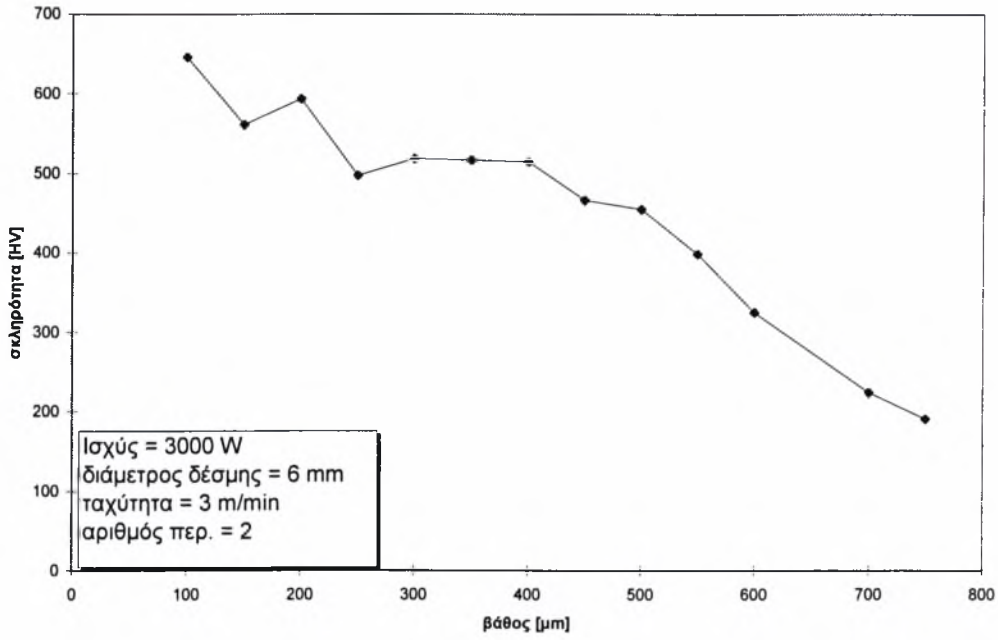
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α7



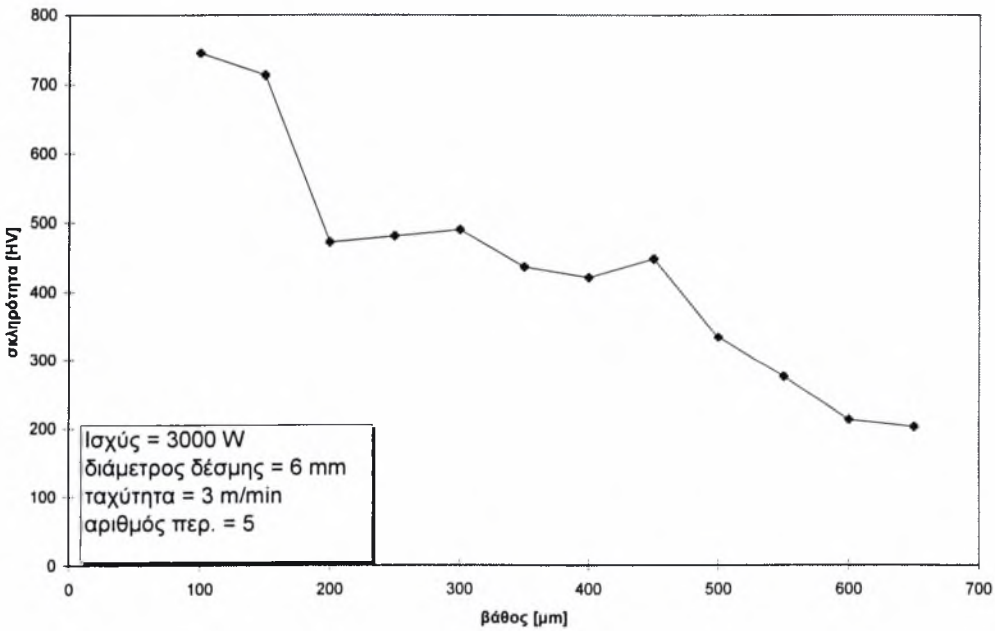
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α8



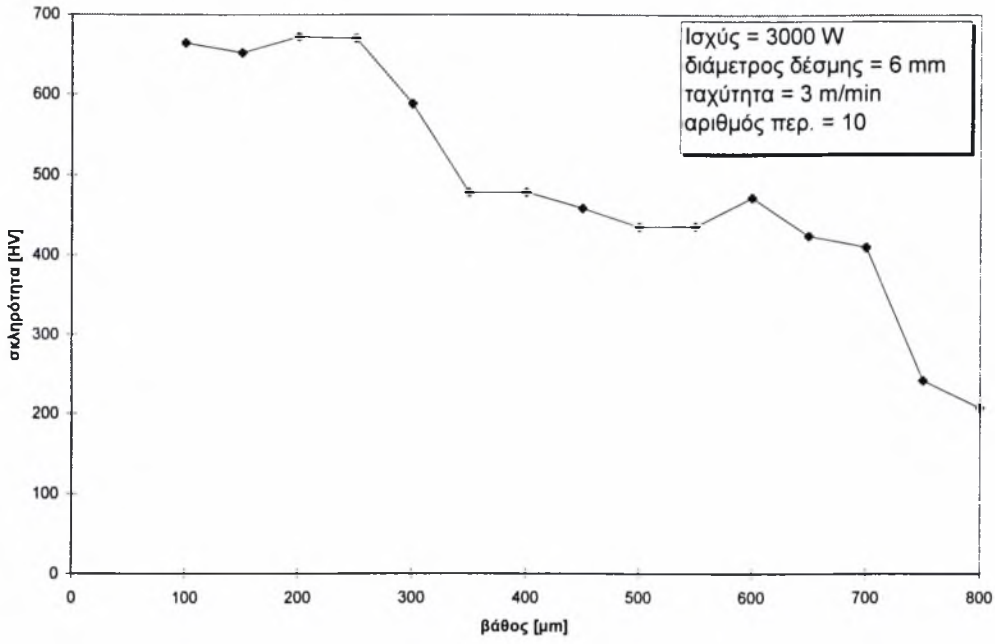
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α9



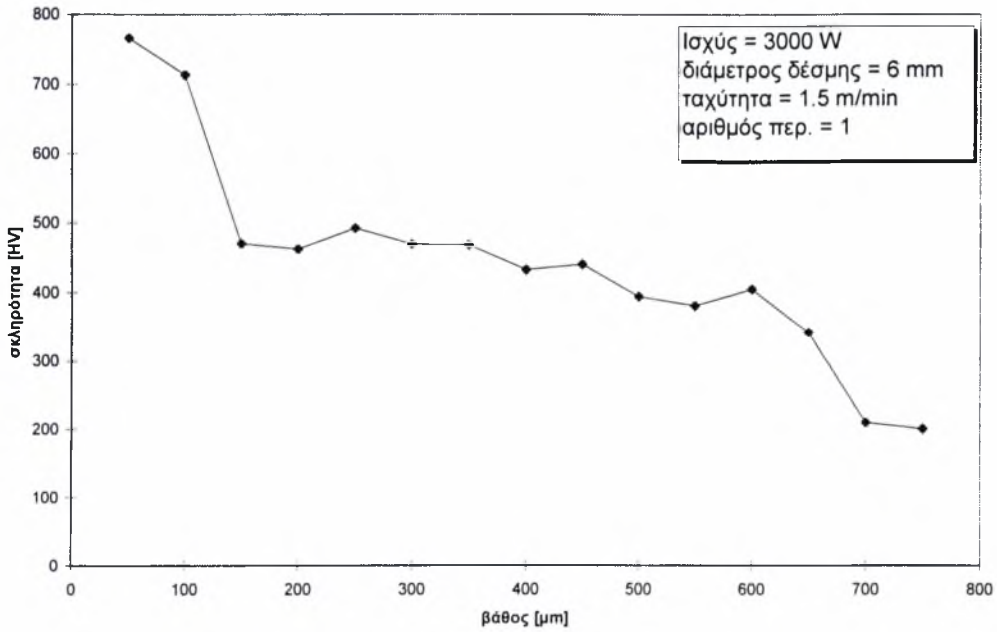
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α10



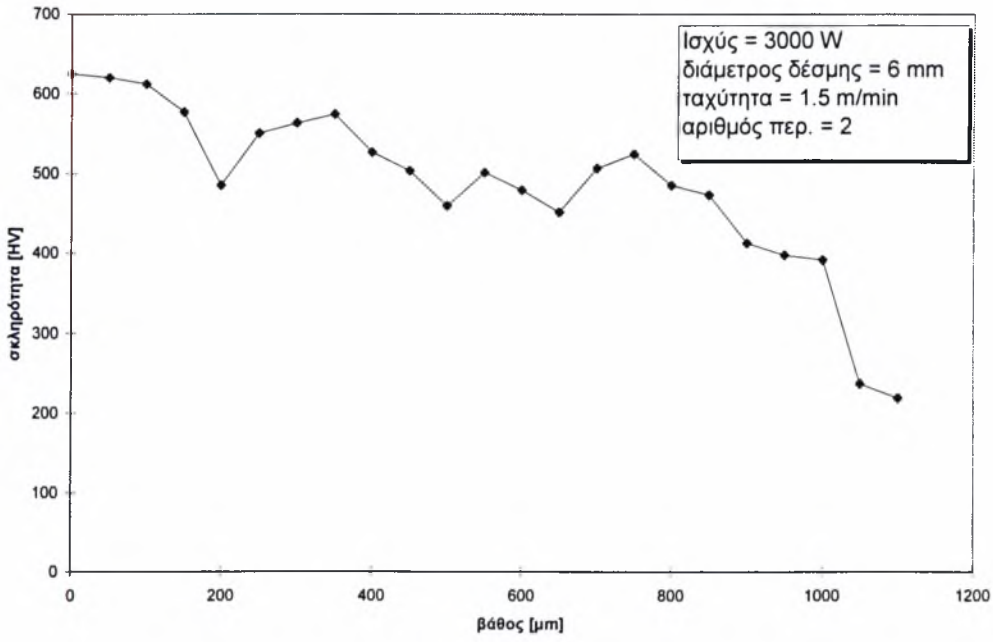
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α11



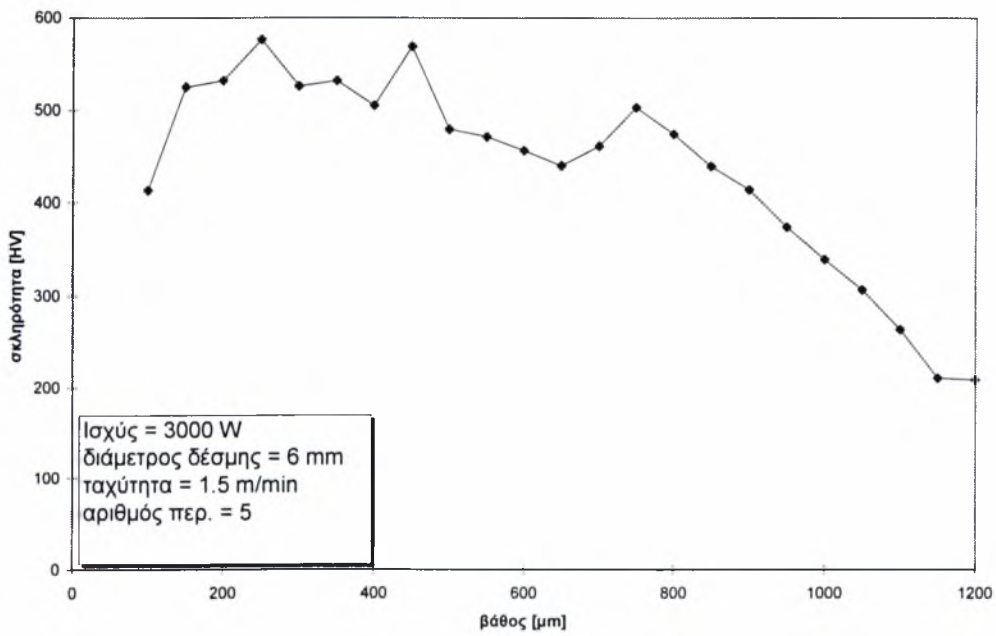
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α12



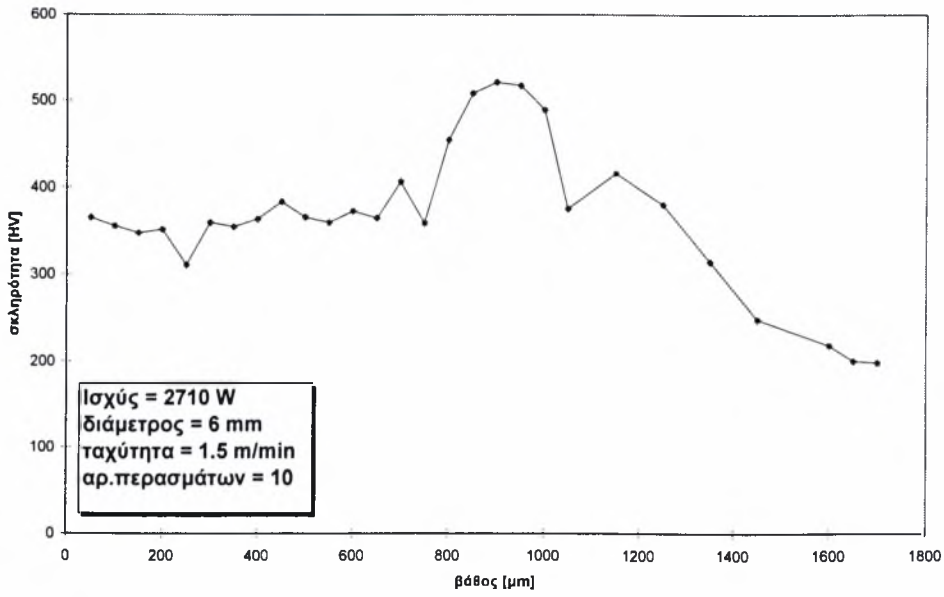
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α13



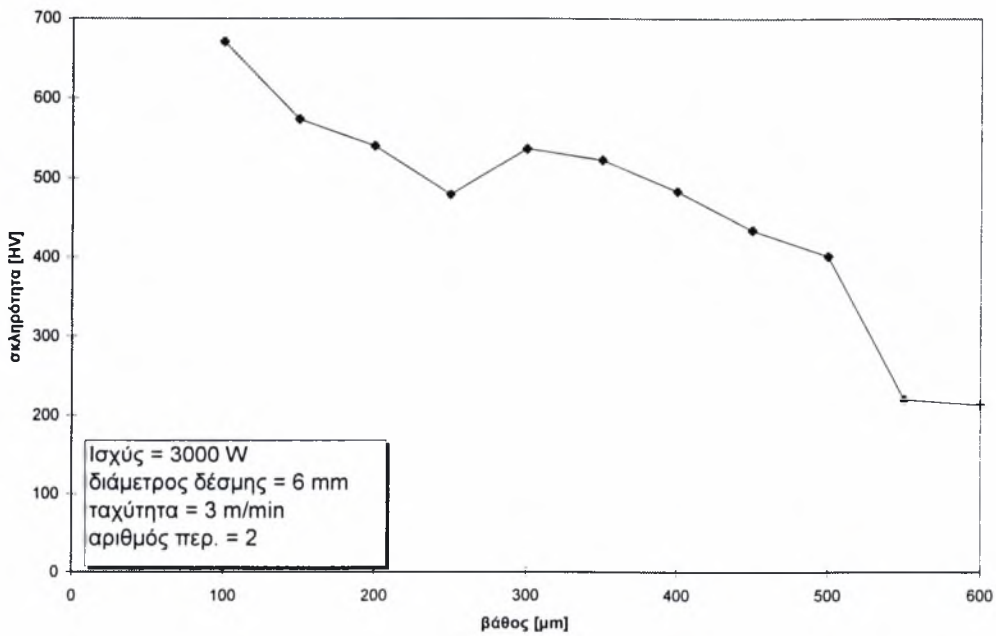
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α14



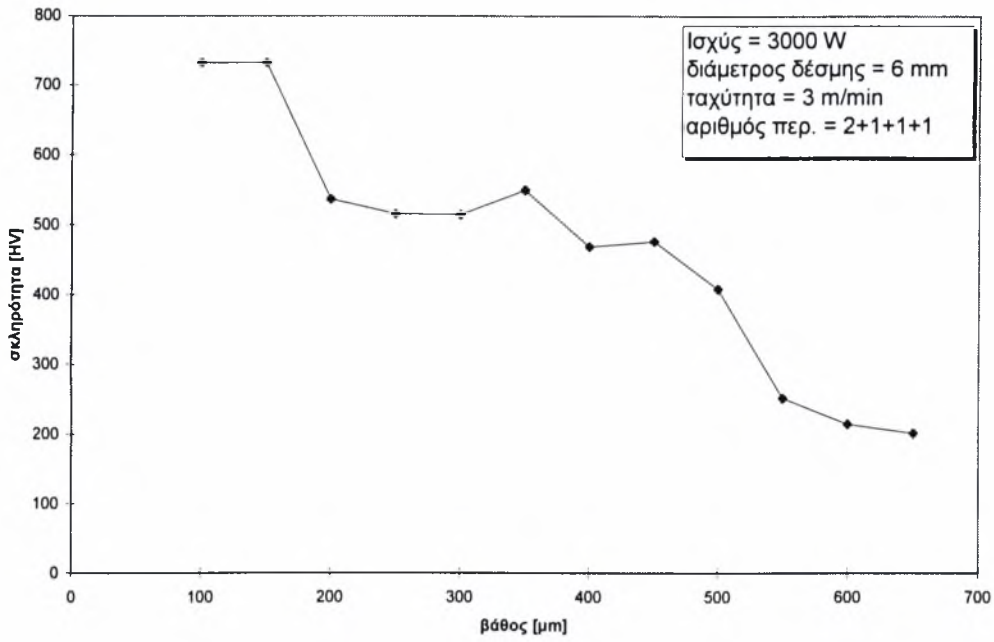
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α15



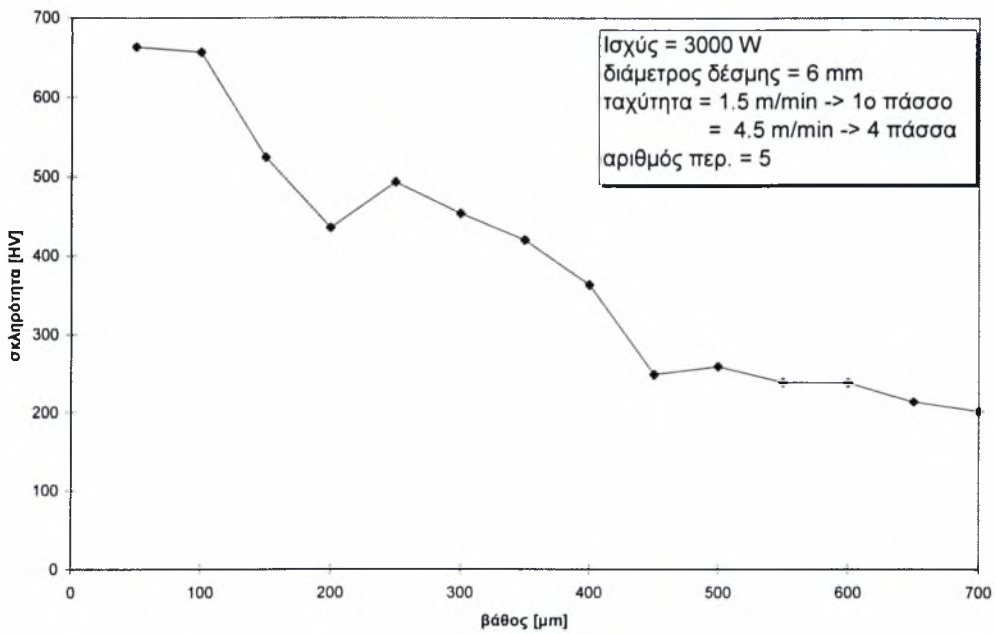
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α16



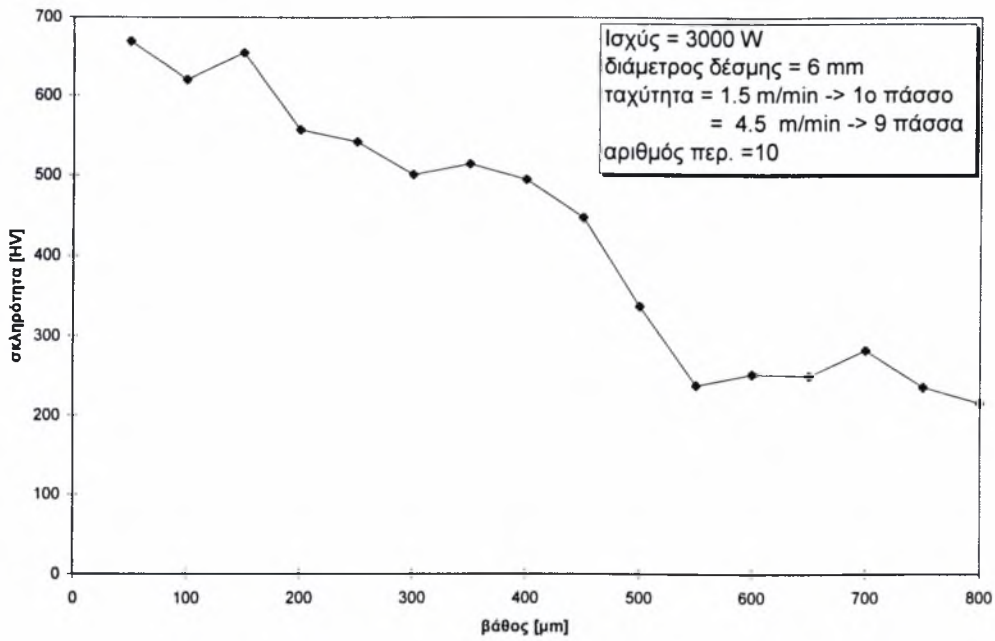
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α17



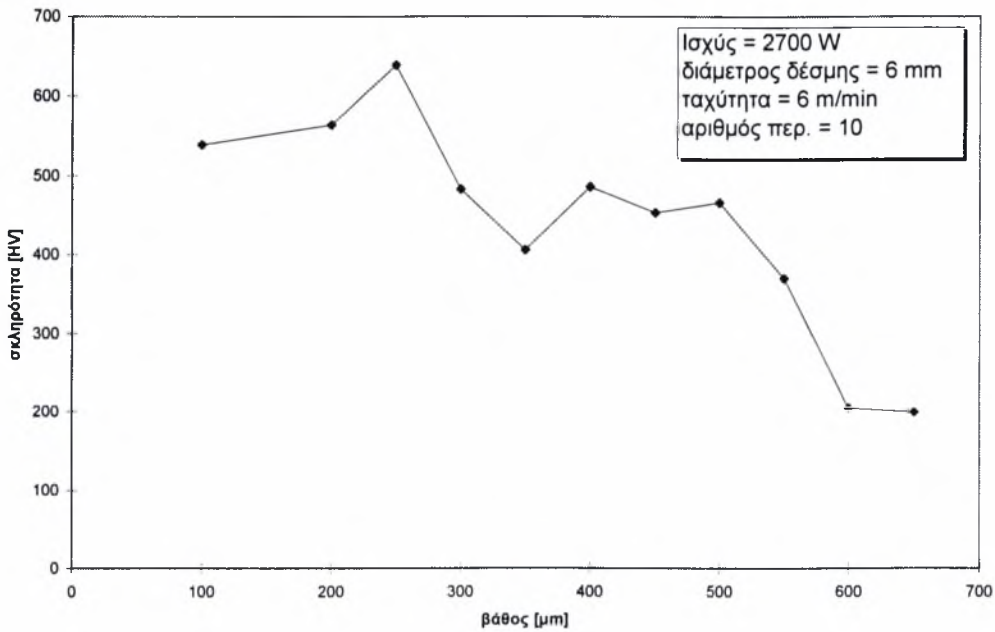
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α18



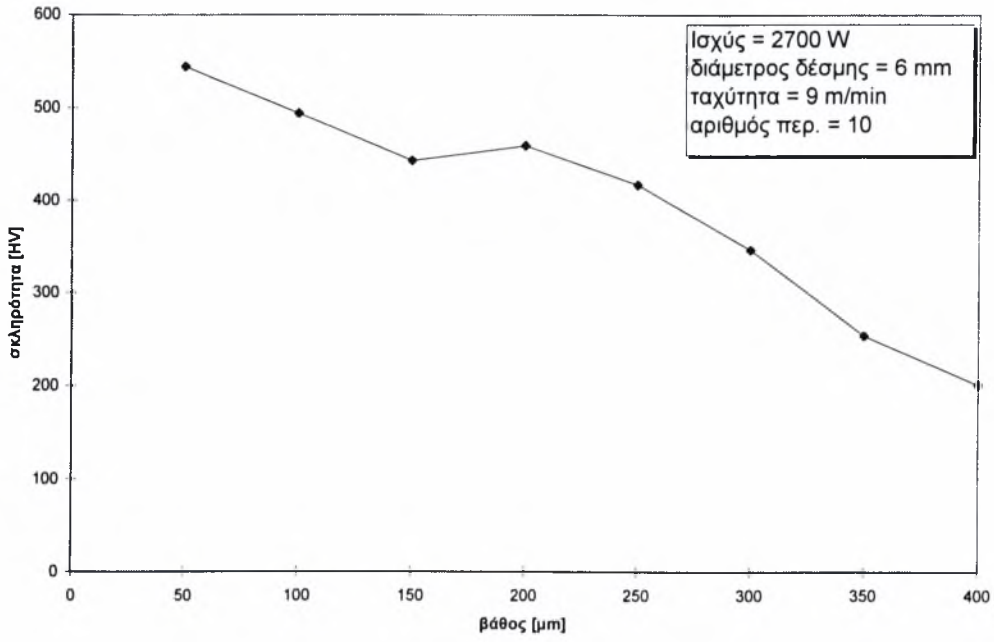
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α19



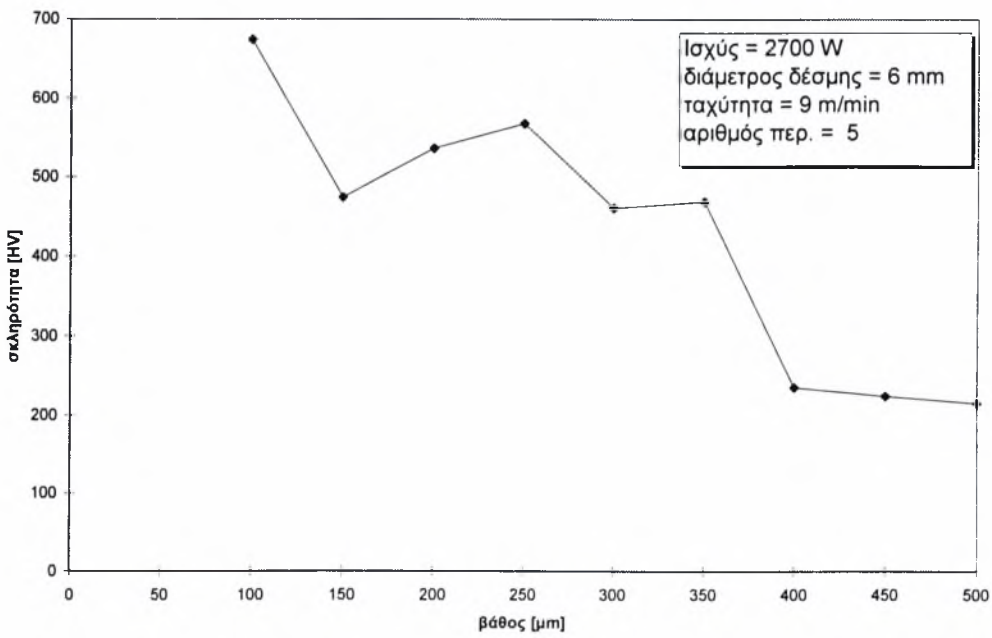
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α20



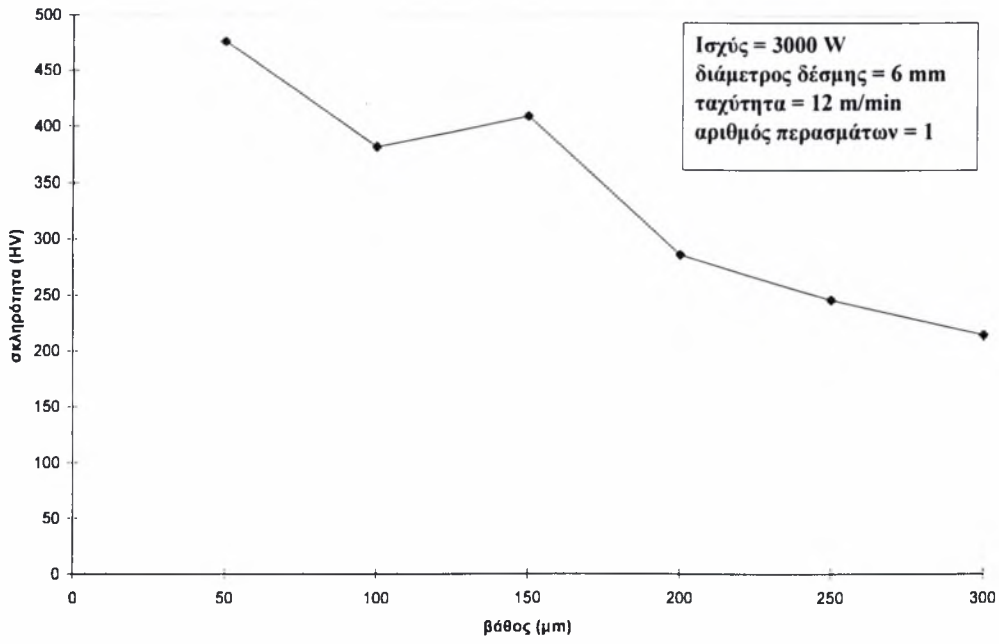
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α21



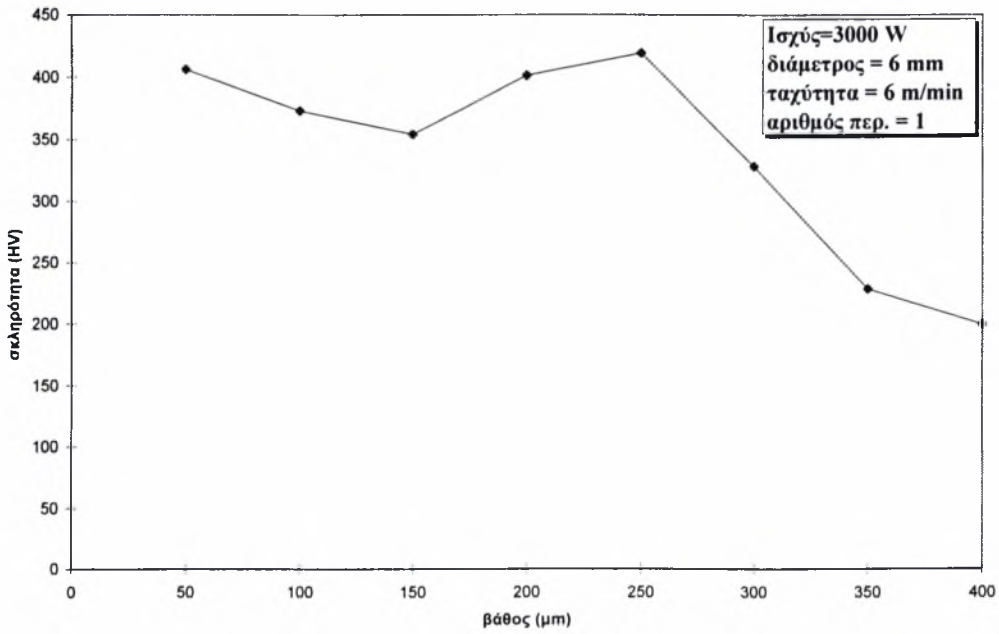
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α22



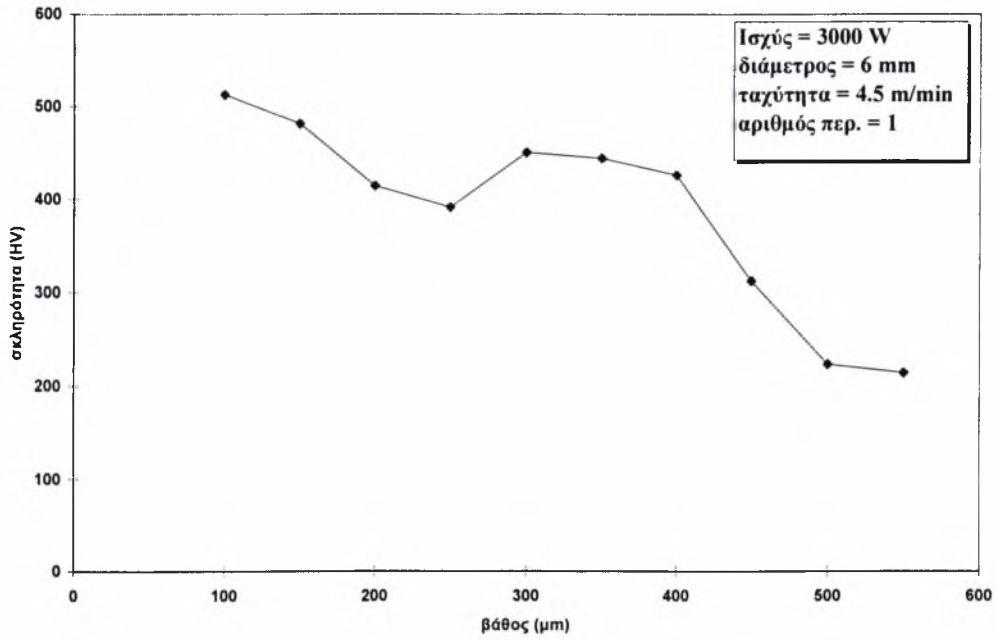
Διαγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α23



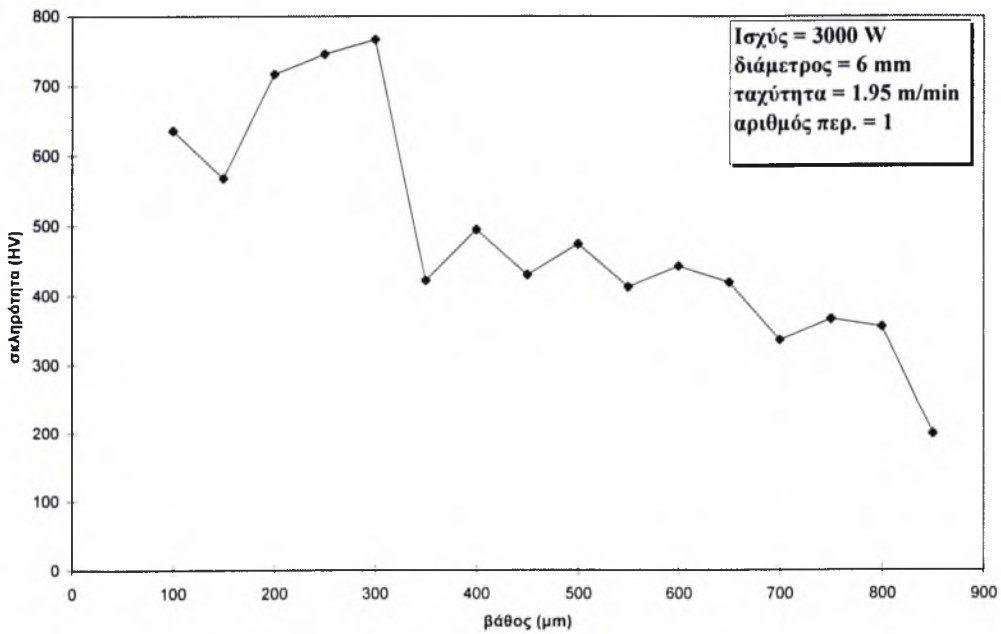
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α24



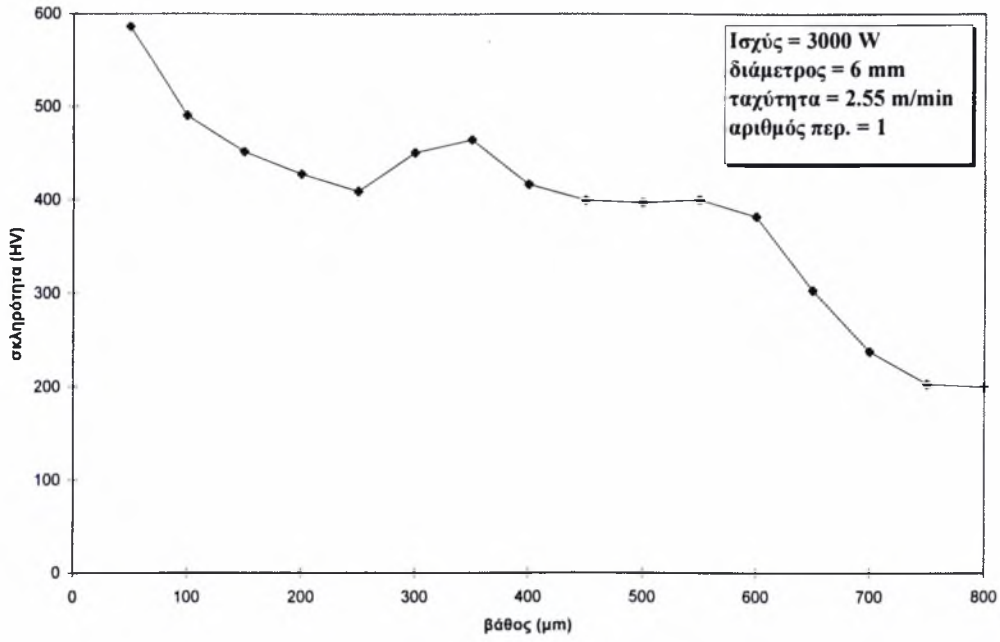
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α25



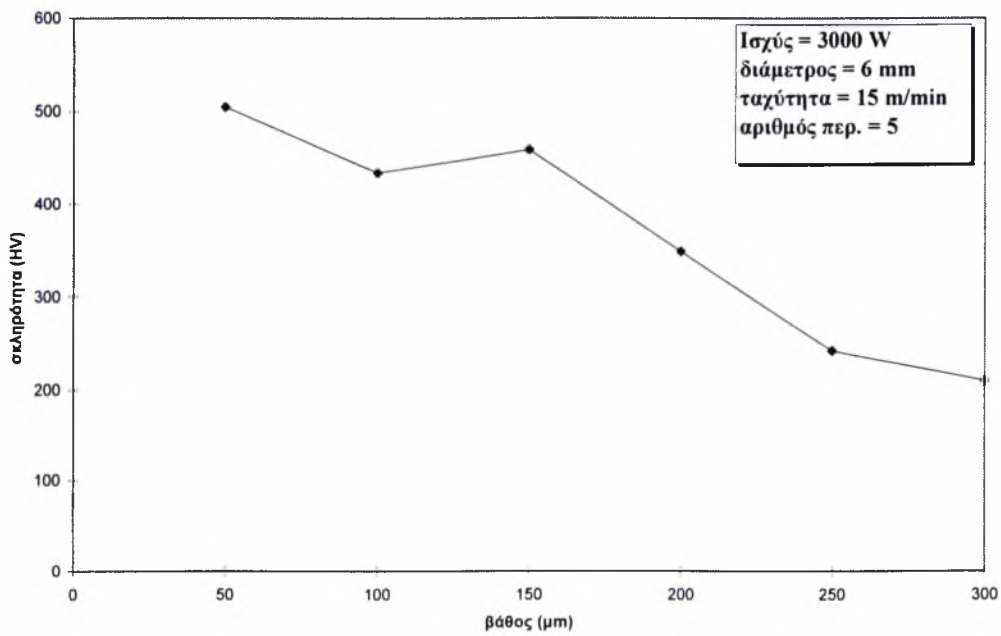
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α26



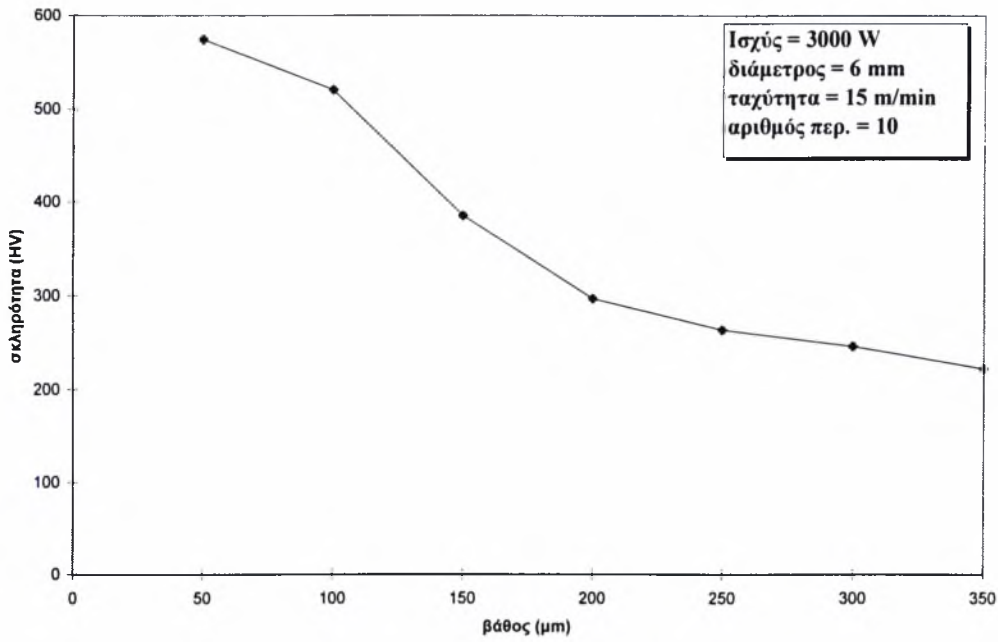
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α27



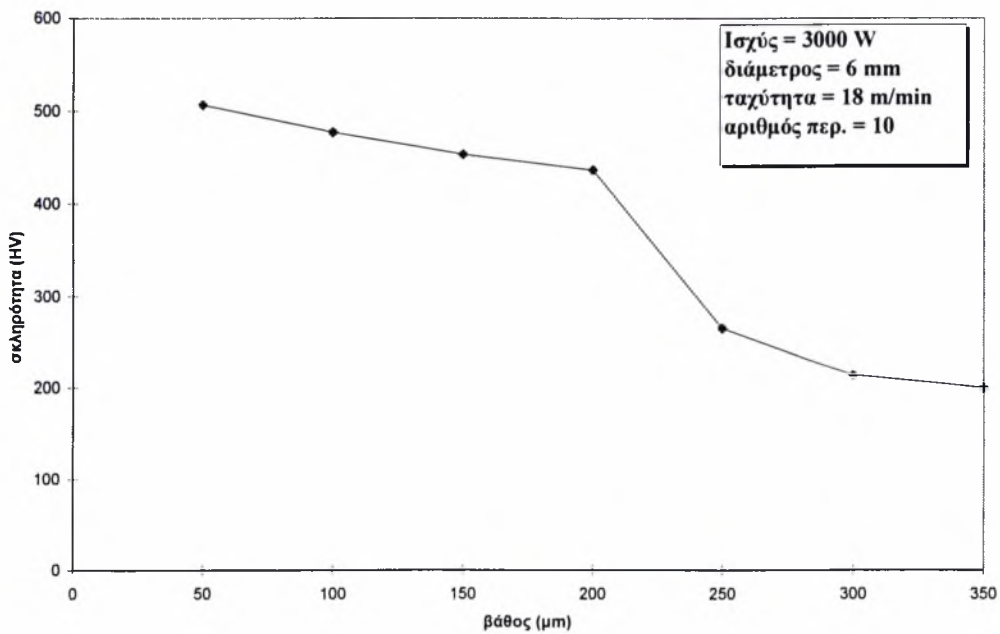
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α28



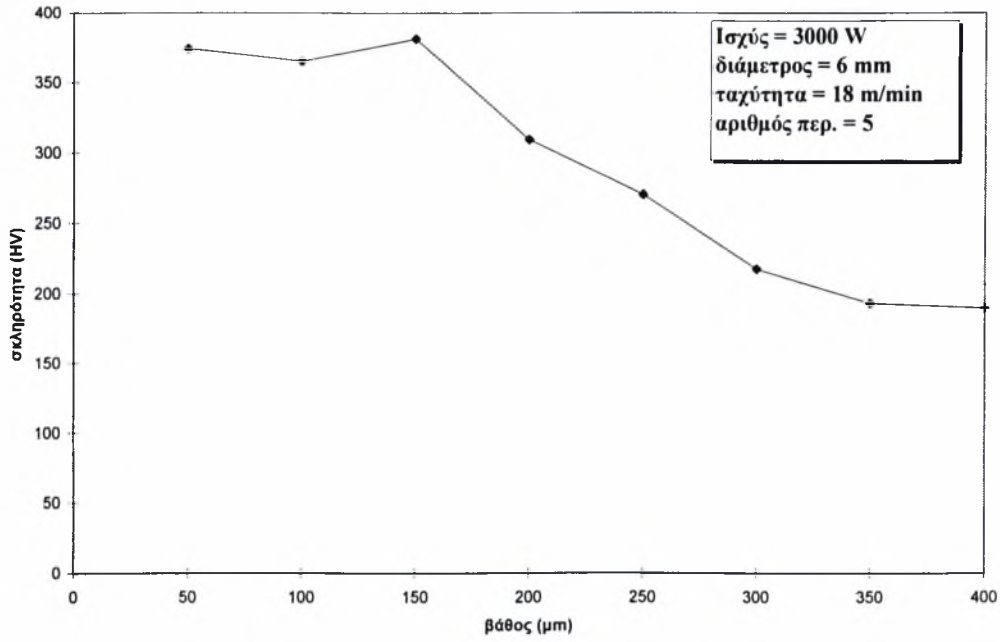
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α29



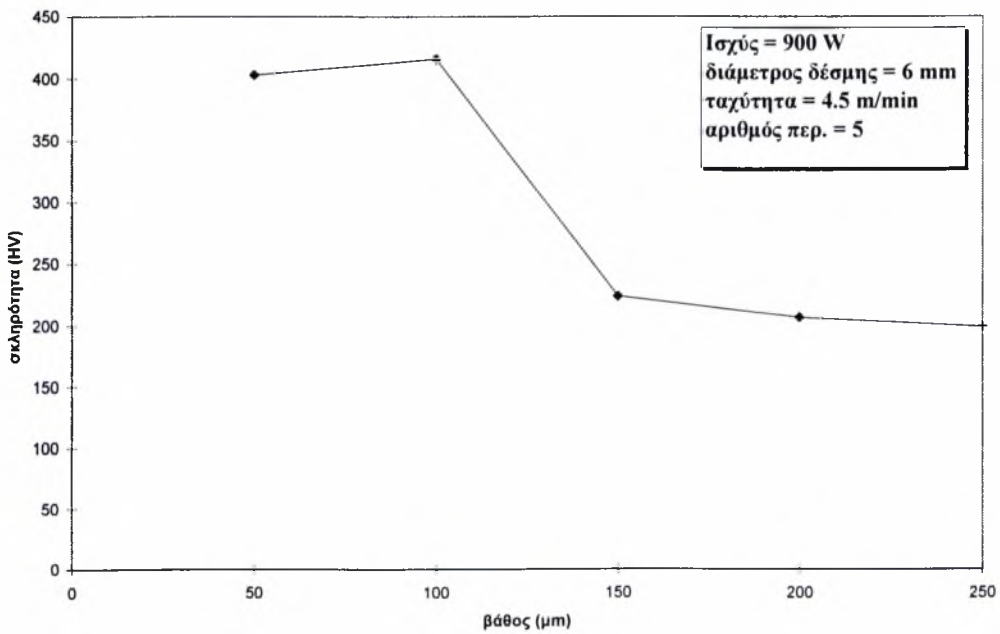
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α30



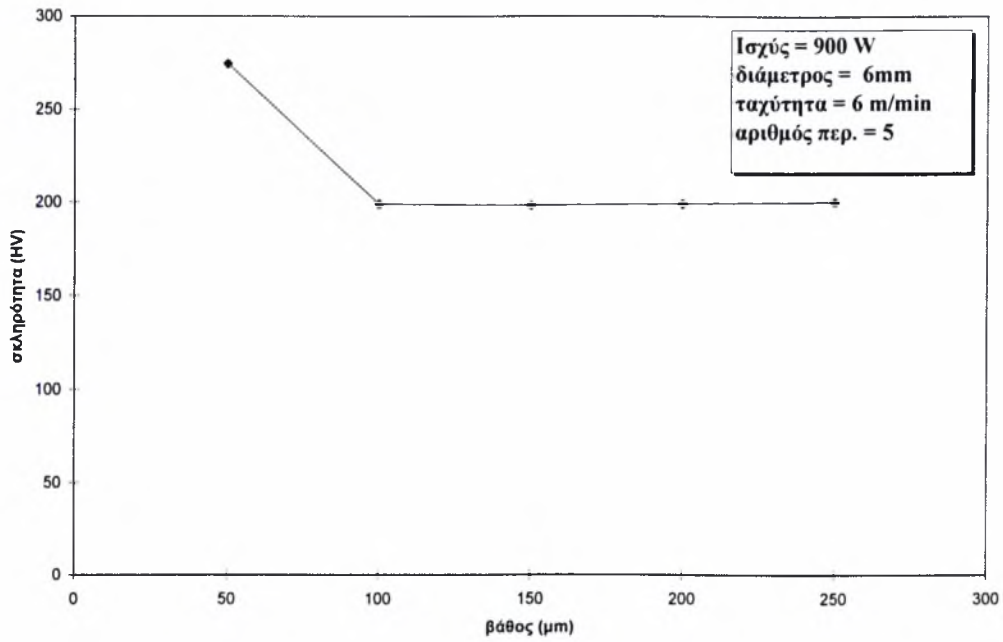
Διάγραμμα βάθους-σκληρότητας για δοκ.Α31



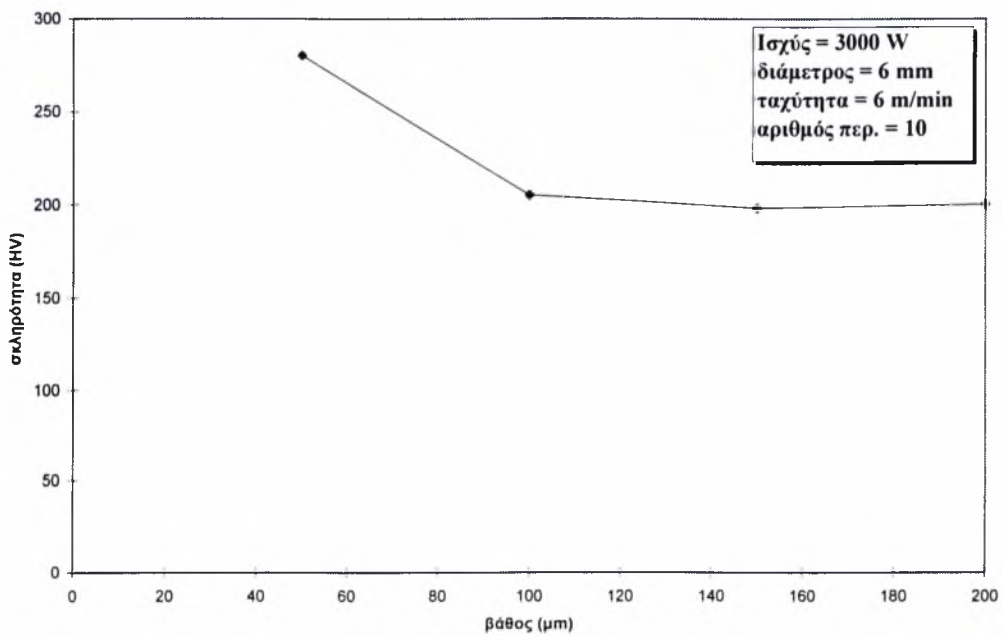
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α32



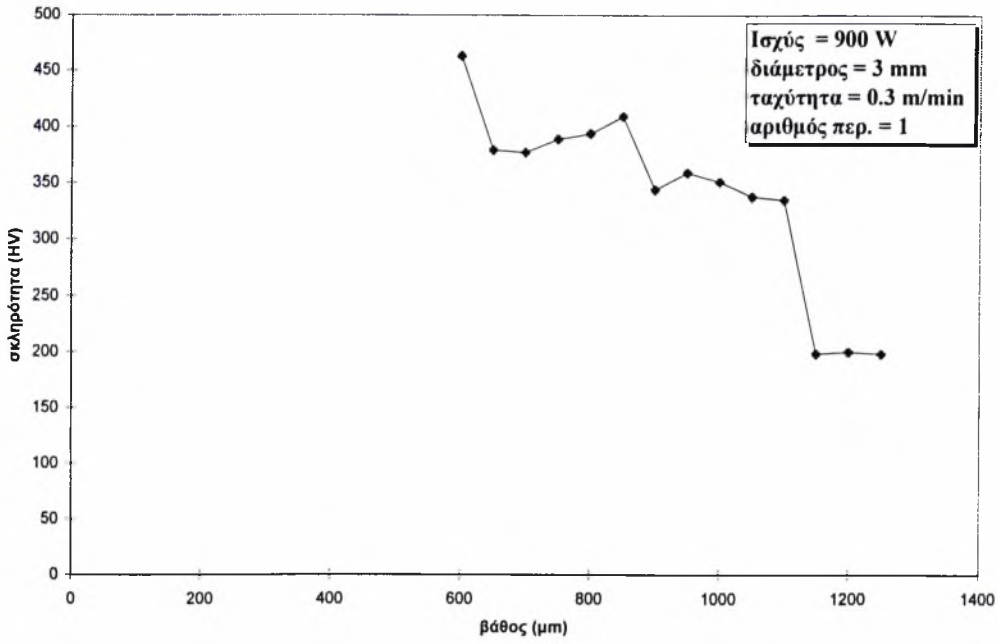
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α33



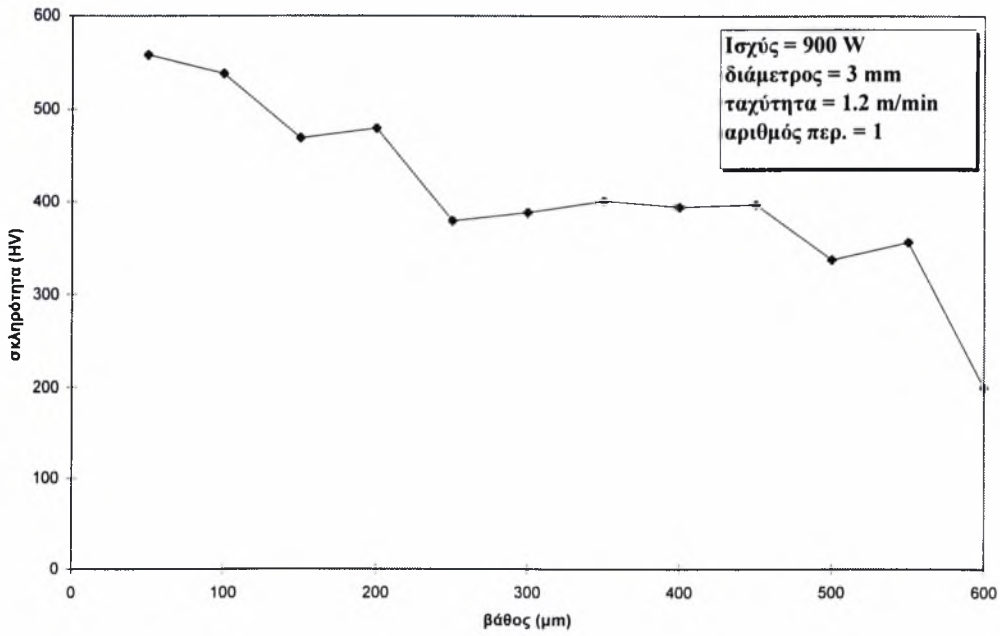
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α34



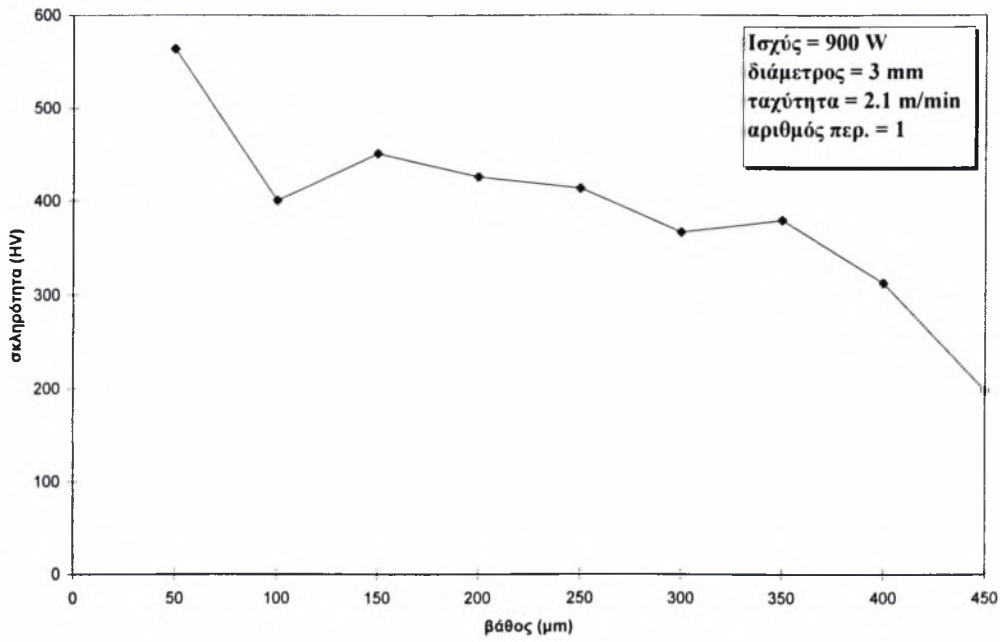
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α35



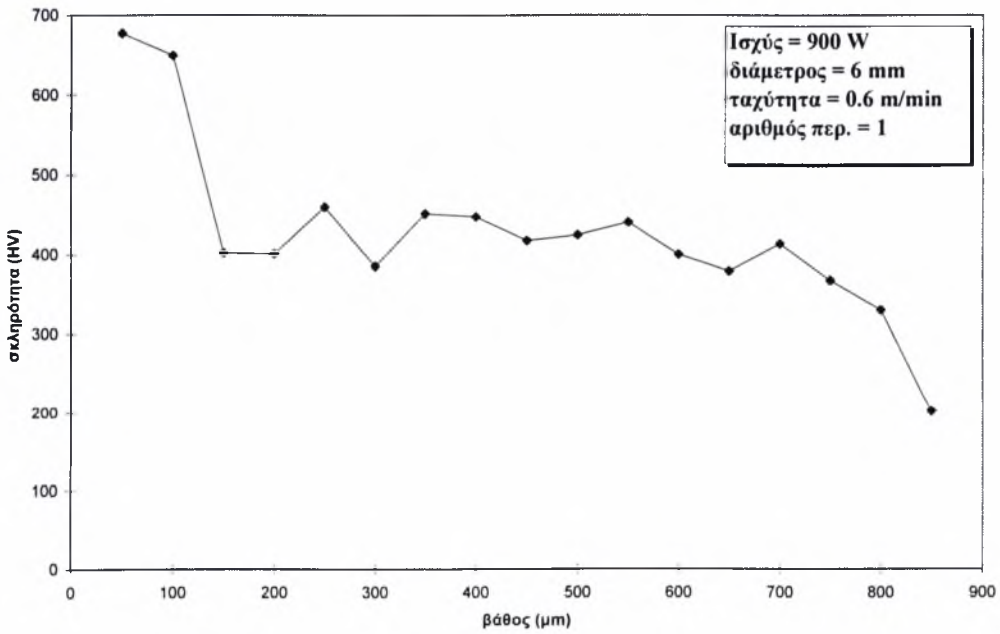
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α36



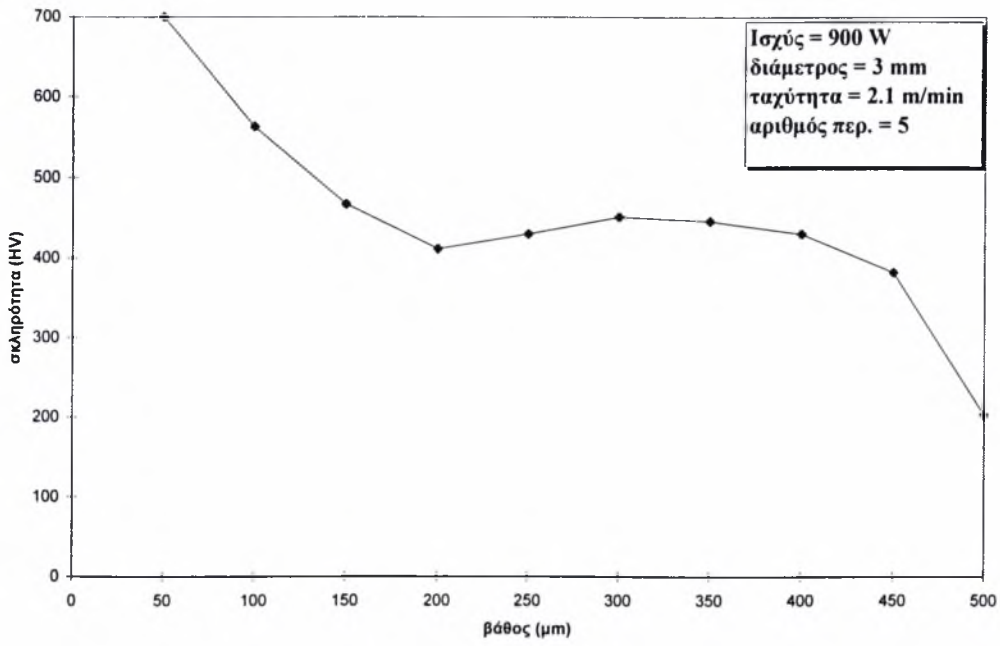
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α37



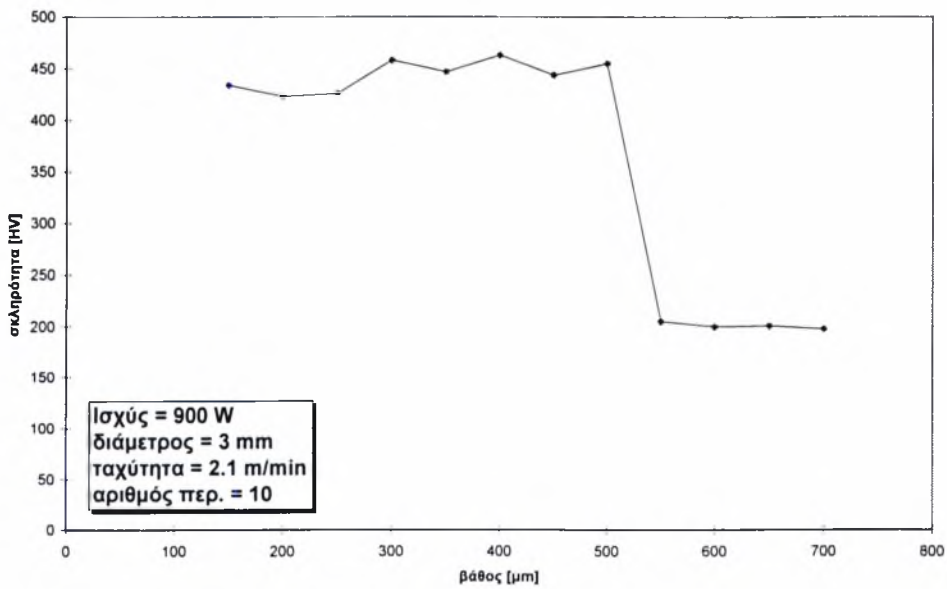
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α38



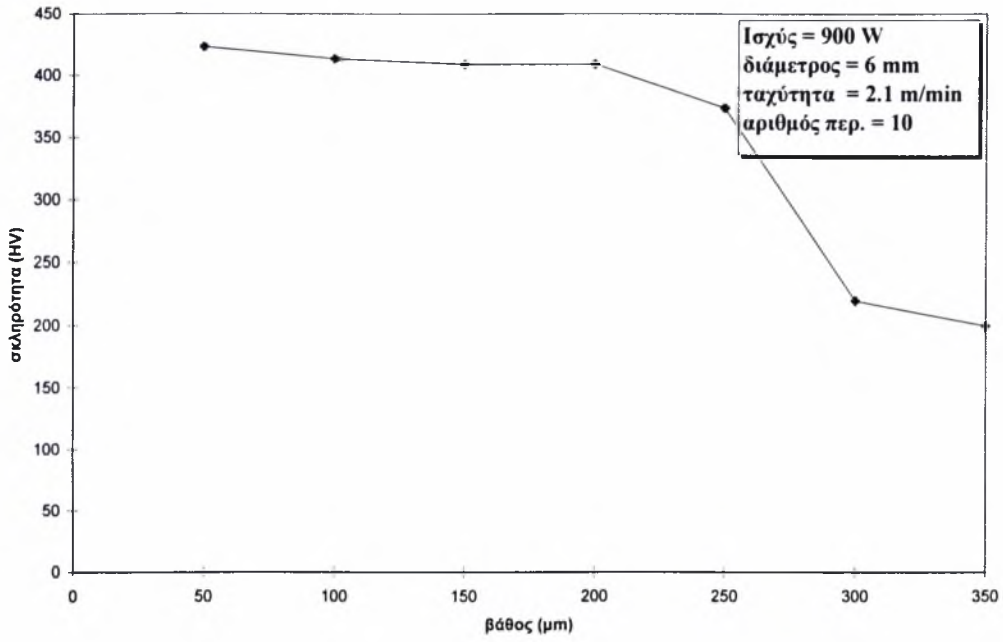
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ. A39



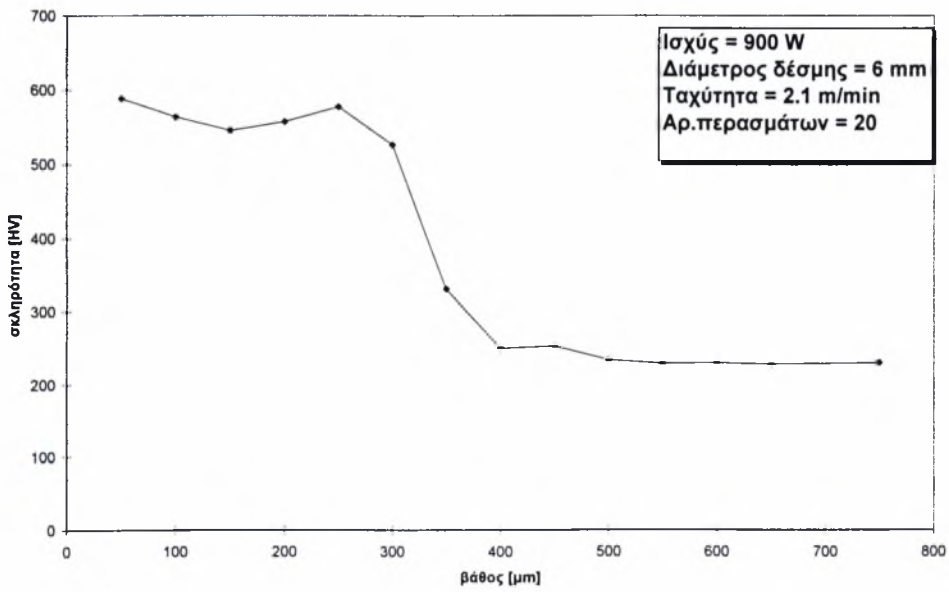
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ. A40



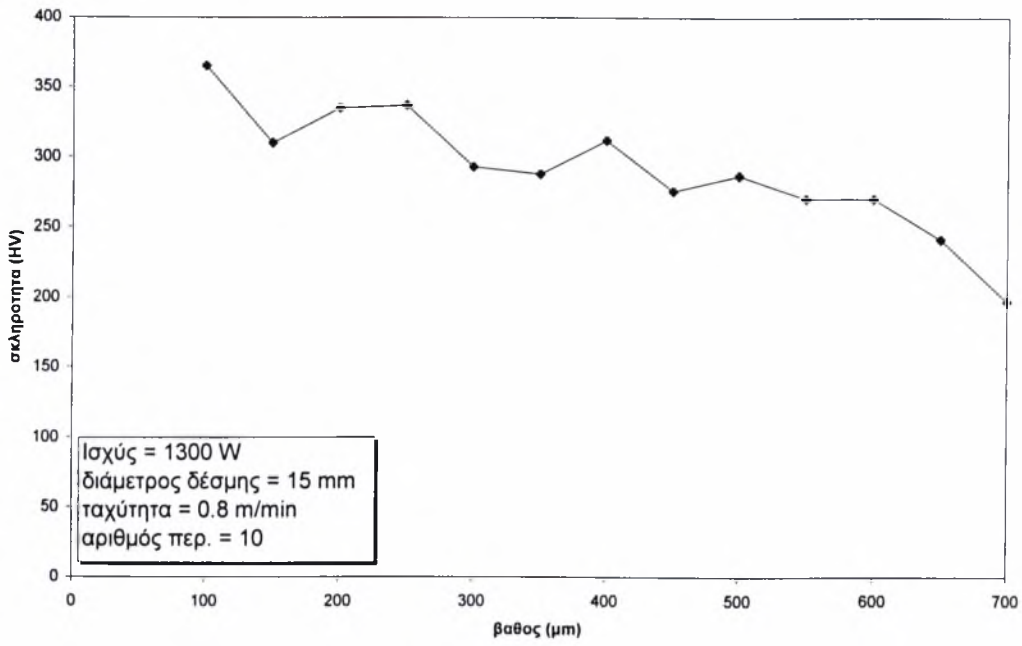
Διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α41



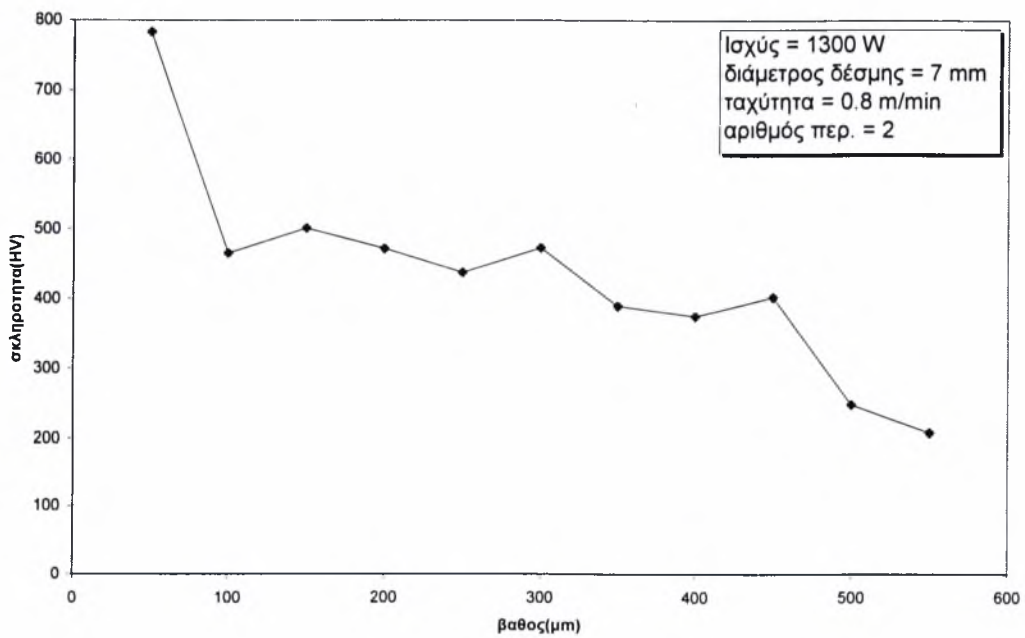
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Α42



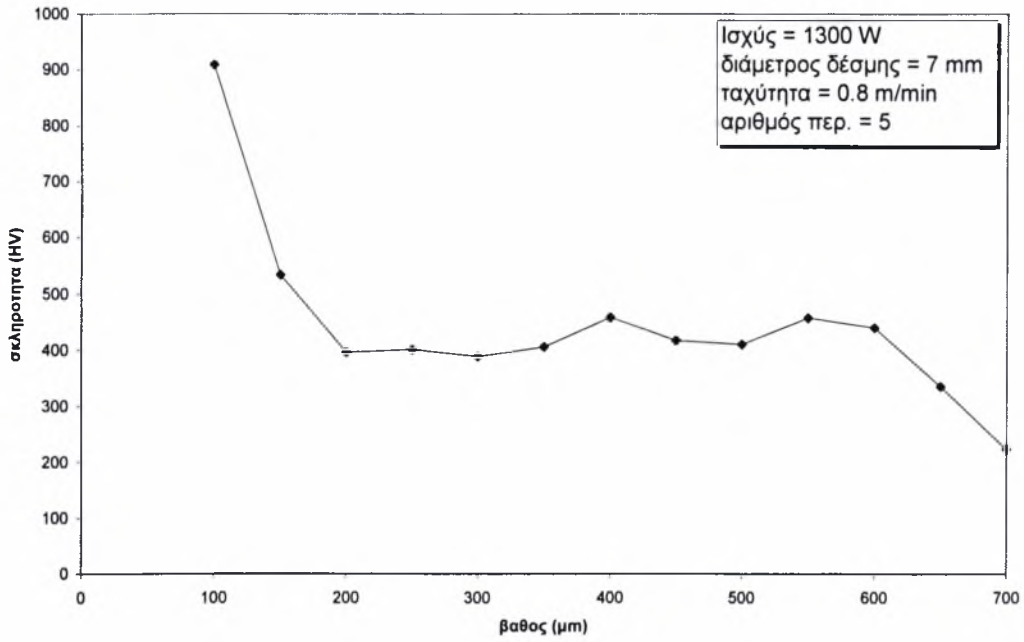
διαγραμμα βαθους-σκληροτητας για δοκ.Β8



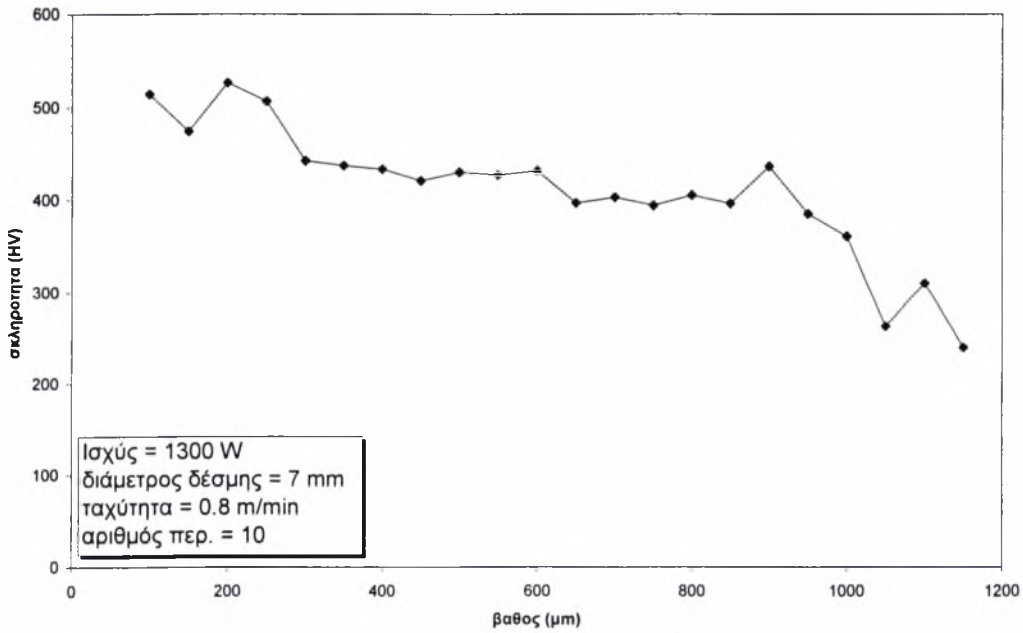
διαγραμμα βαθους σκληροτητας για δοκ.Β13



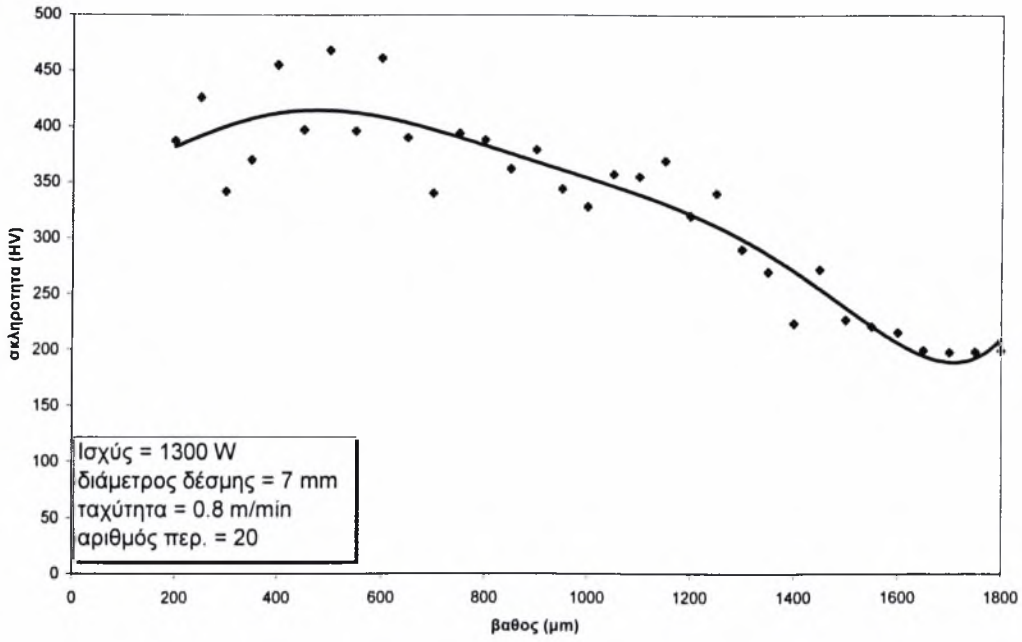
διαγραμμα βαθους - σκληροτητας για δοκ.Β14



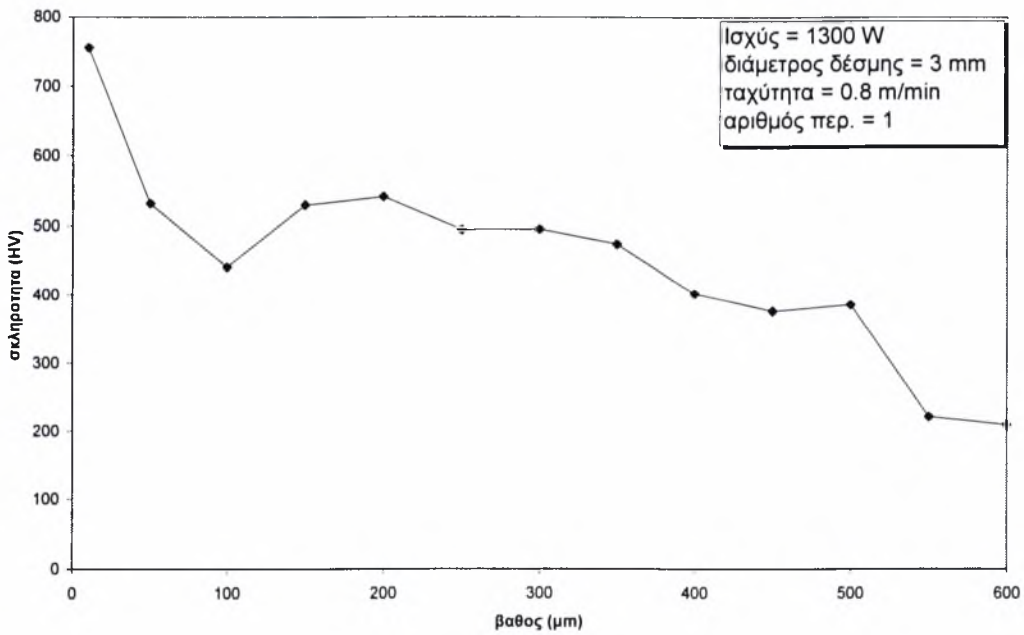
διαγραμμα βαθους - σκληροτητας για δοκ.Β15



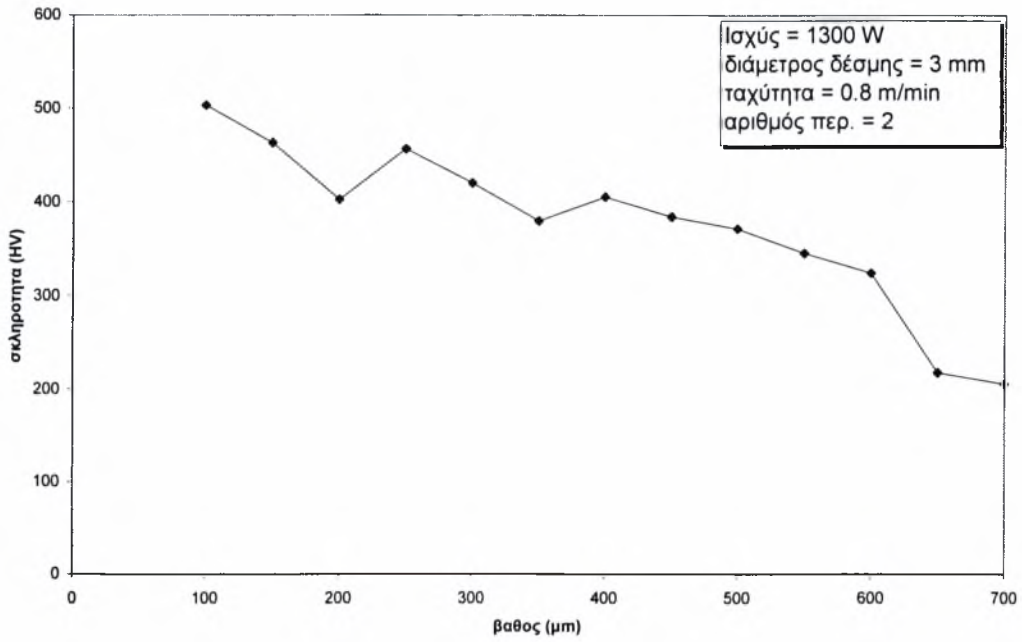
διαγραμμα βαθους σκληροτητας για δοκ.Β16



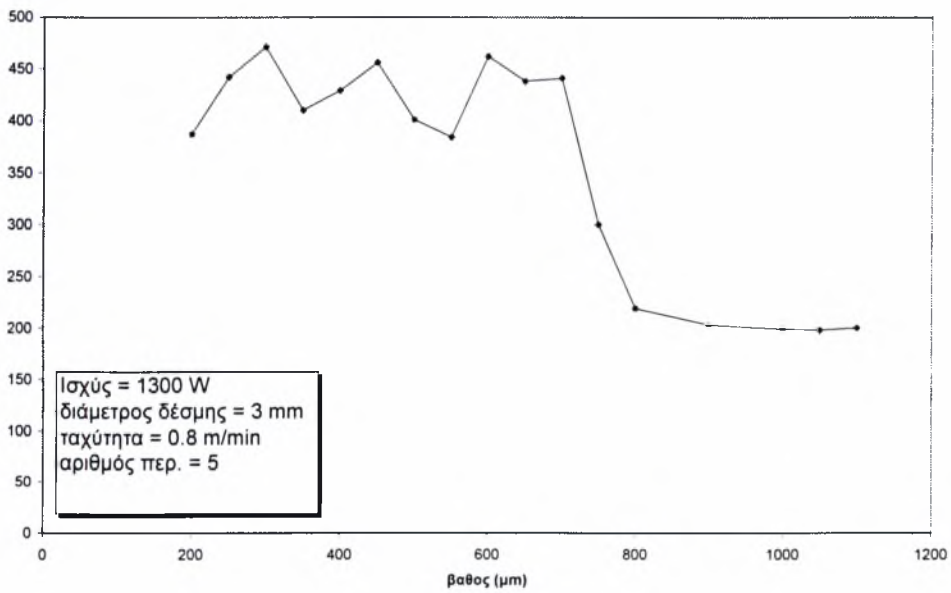
διαγραμμα βαθους σκληροτητας για δοκ.Β18



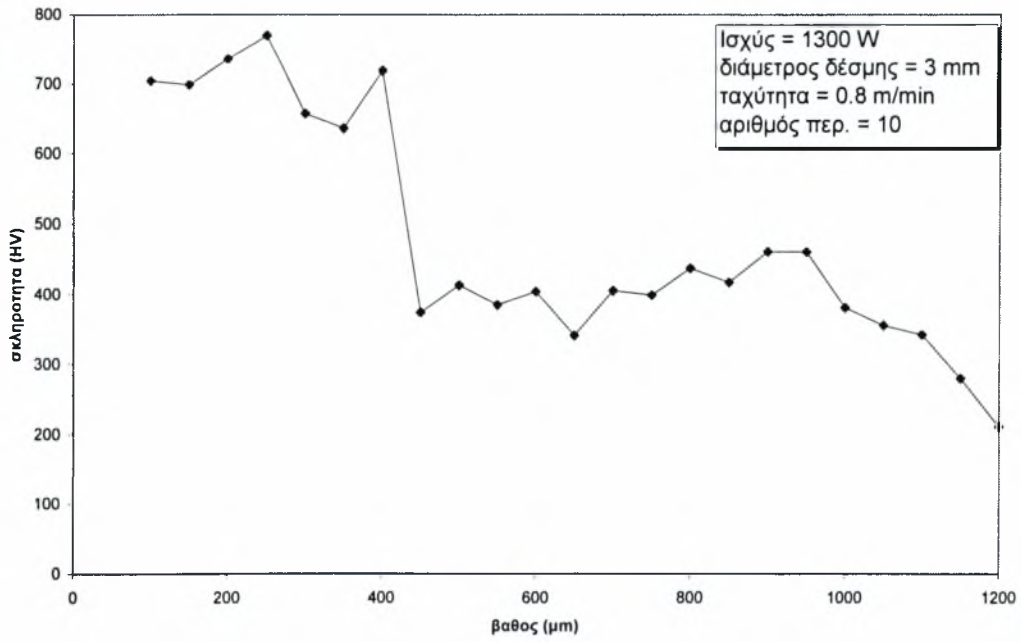
διαγραμμα βαθους-σκληροτητας για δοκ.Β19



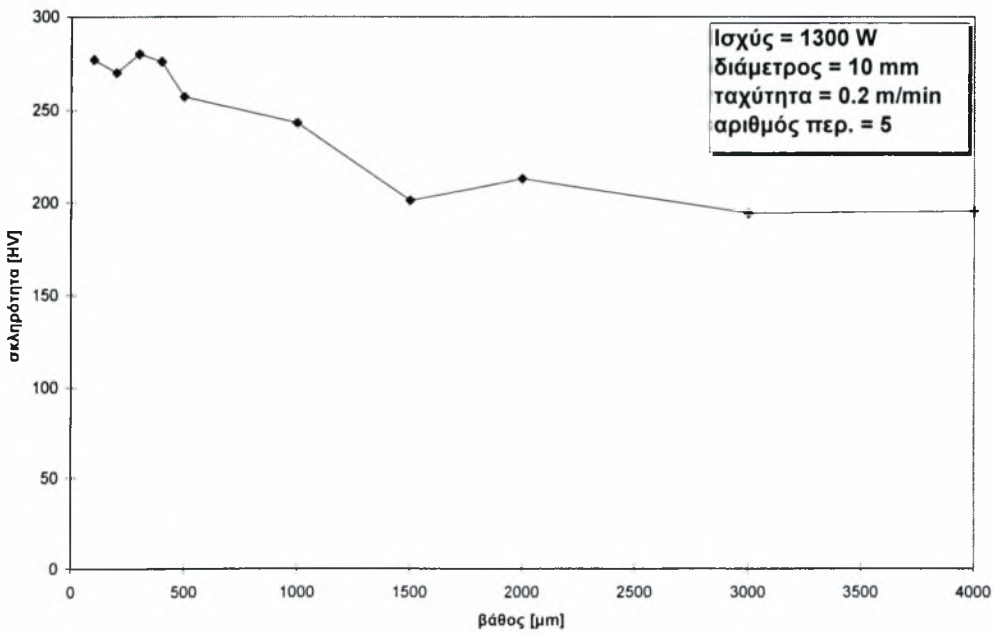
διαγραμμα βαθους σκληροτητας για δοκ.Β20



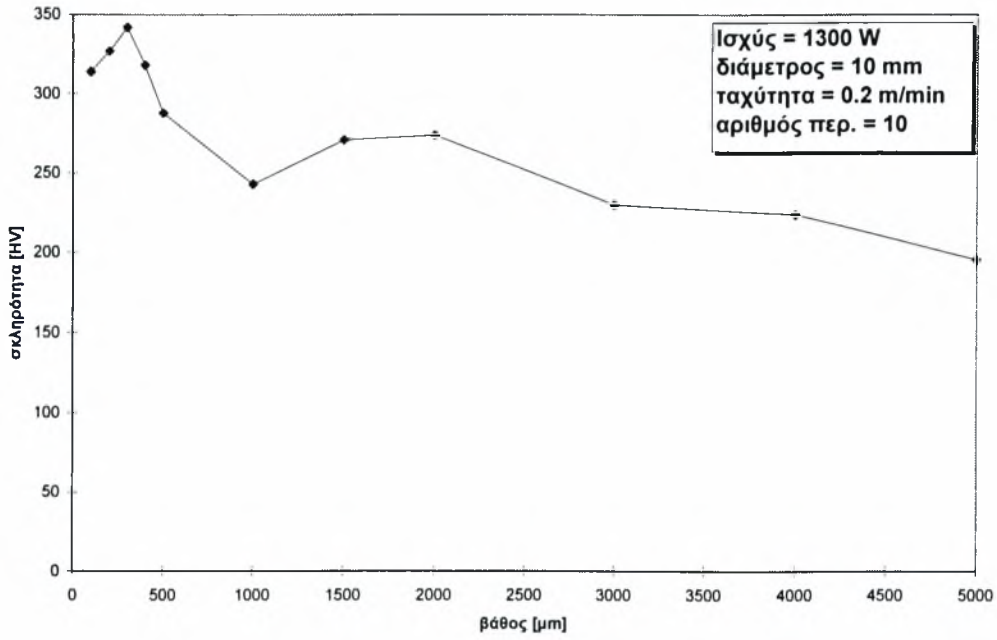
διαγραμμα βαθους-σκληροτητας για δοκ.Β21



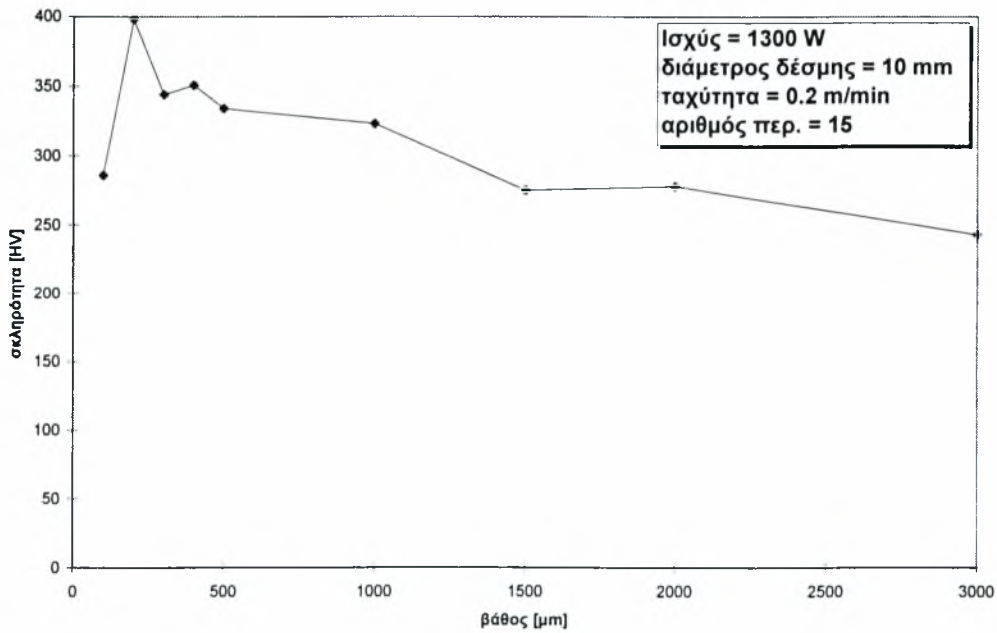
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Β22



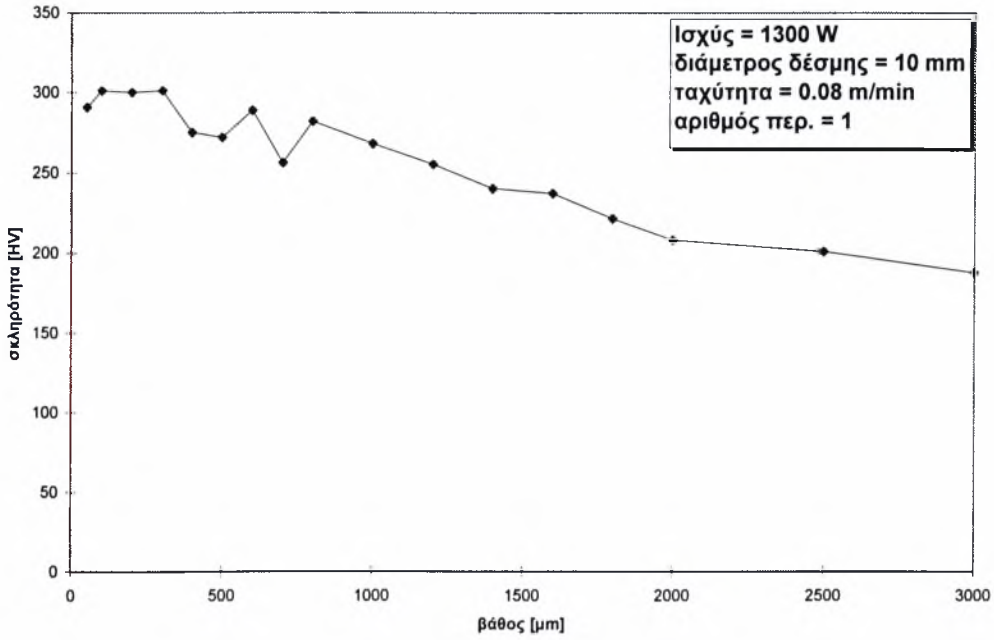
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ. B23



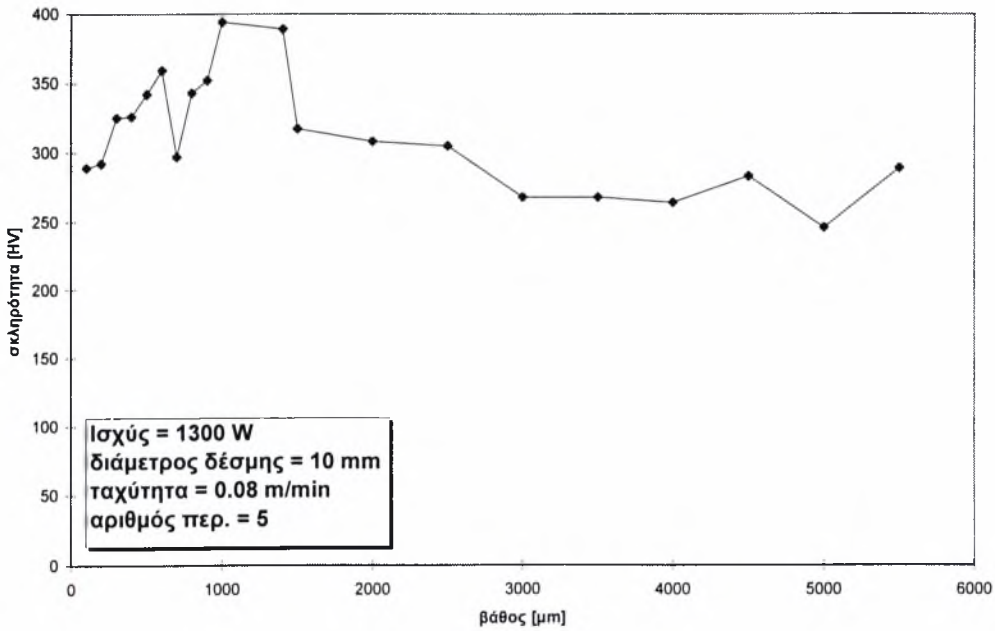
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ. B24



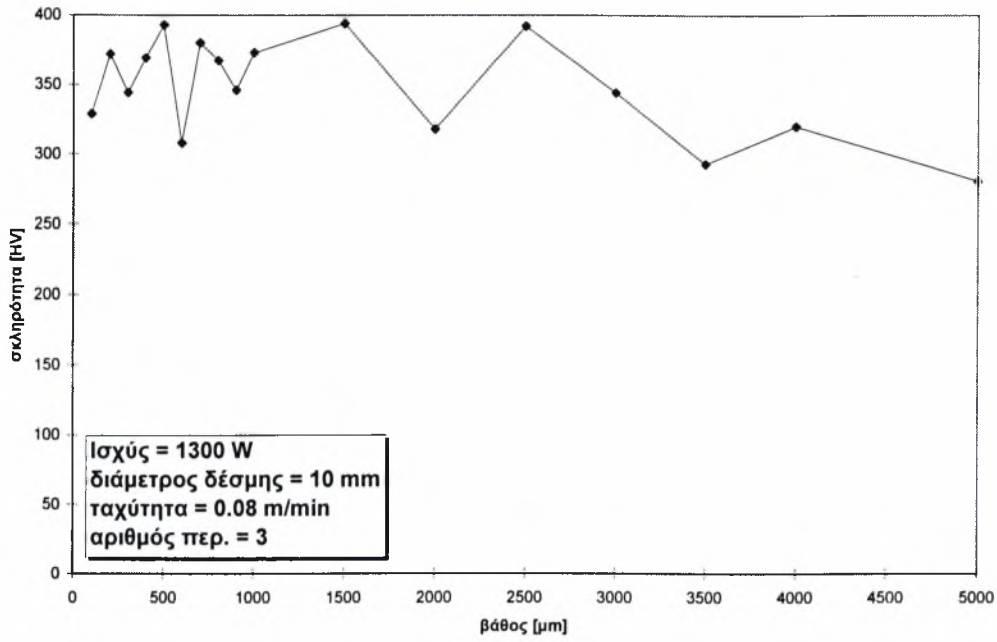
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Β25



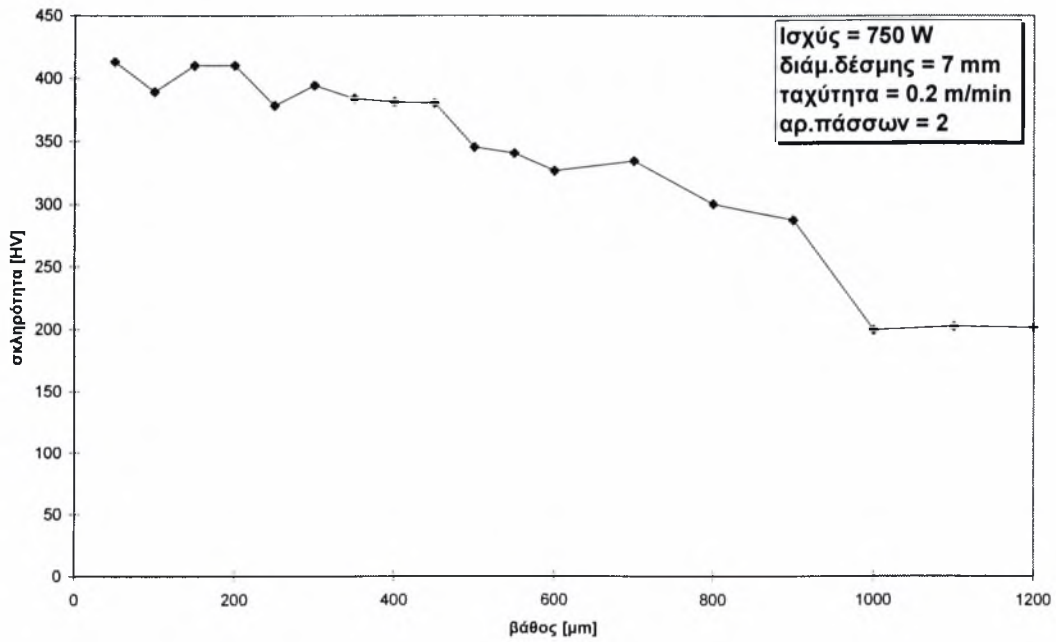
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Β26



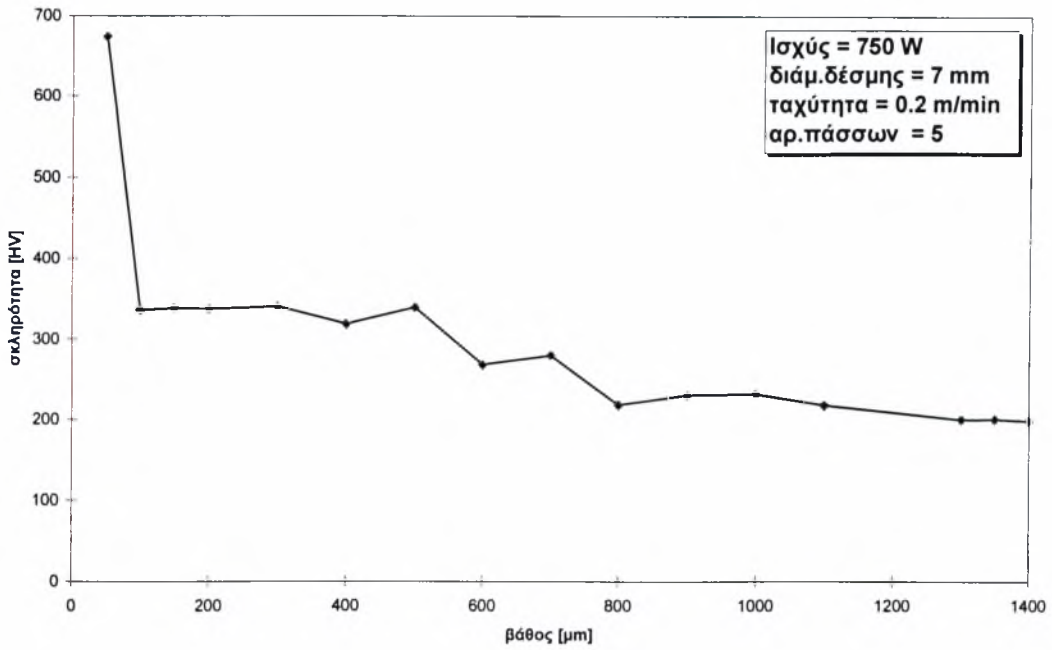
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Β27



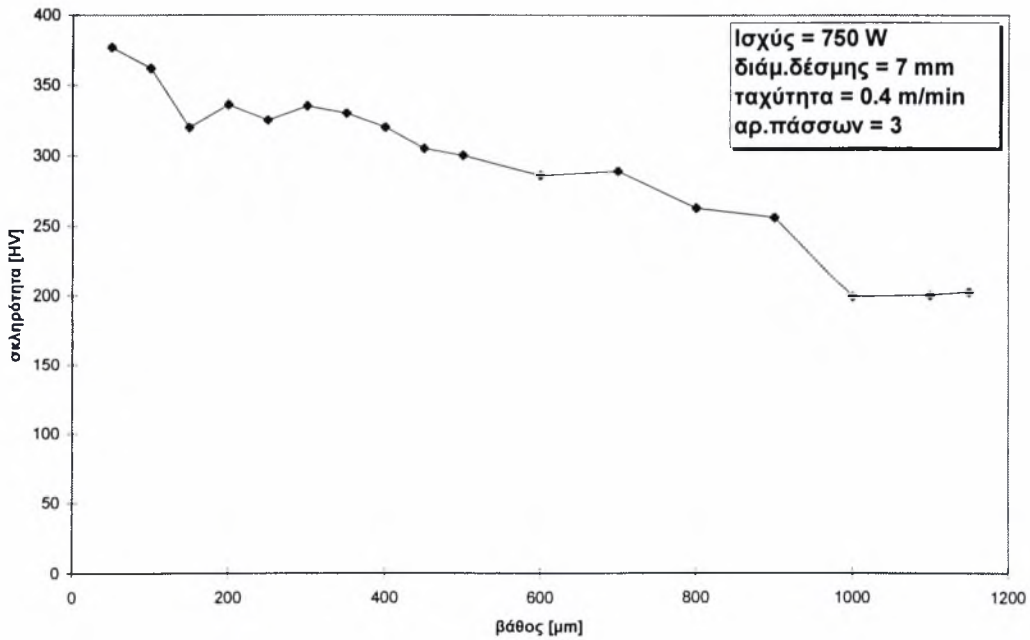
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Β28



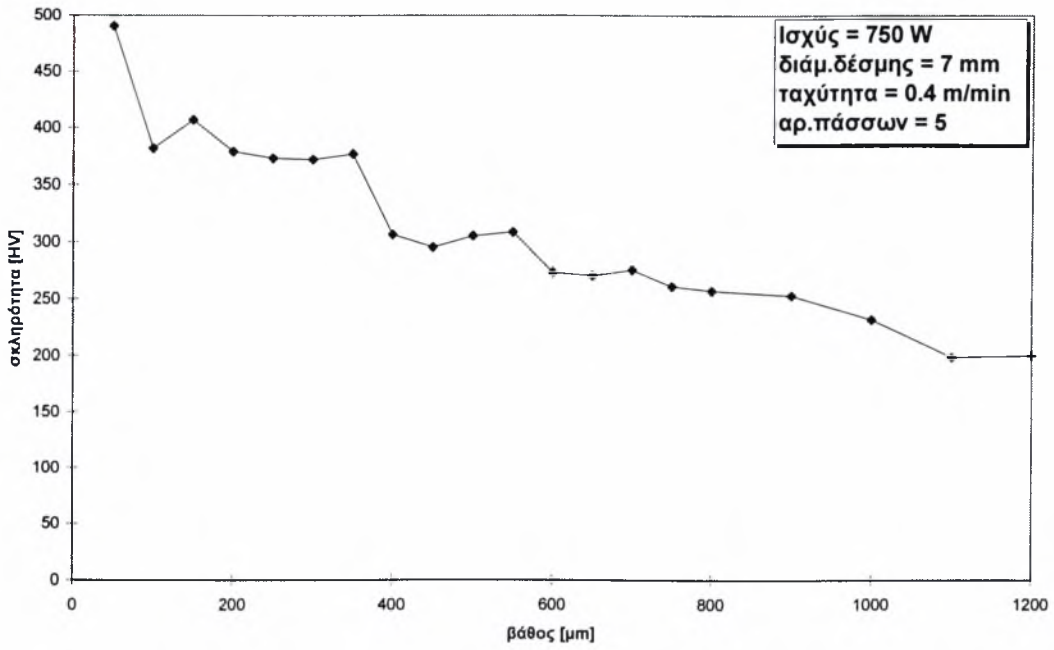
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Β29



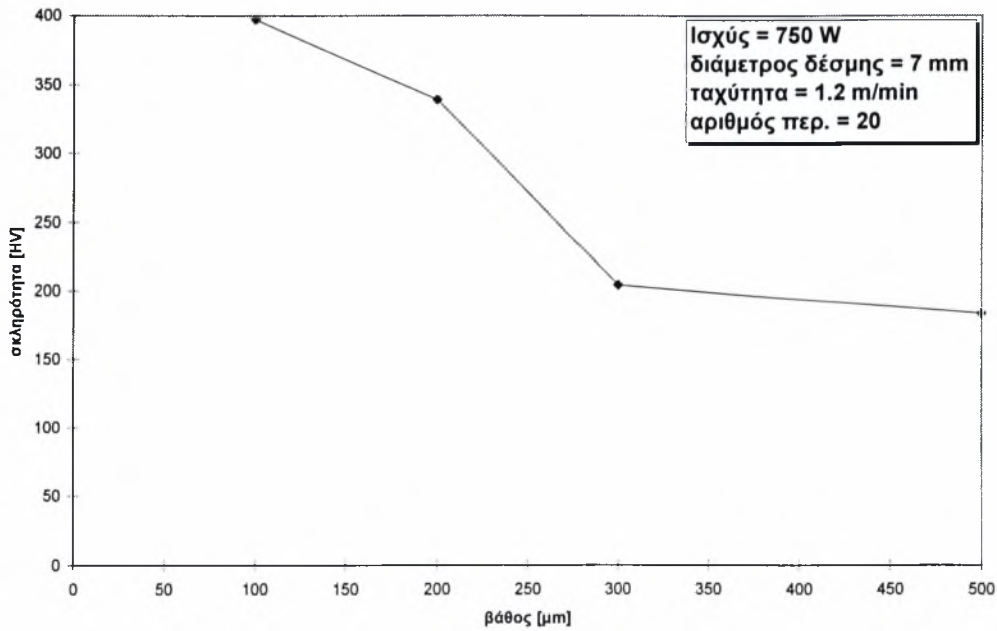
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Β30Α



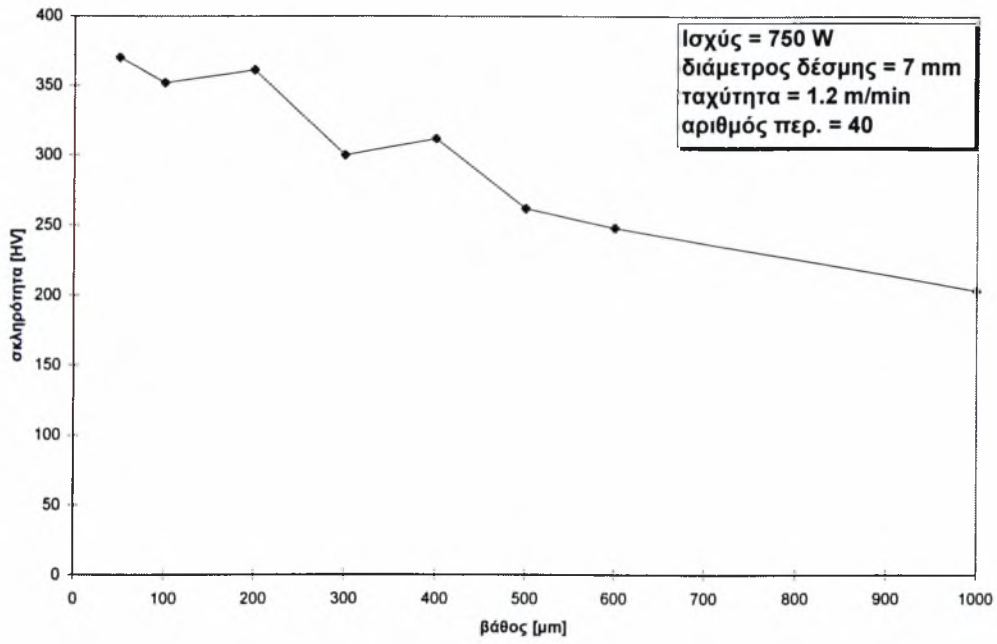
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Β30Β



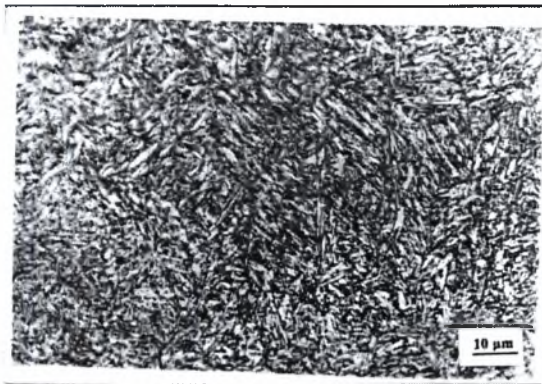
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Β33Α



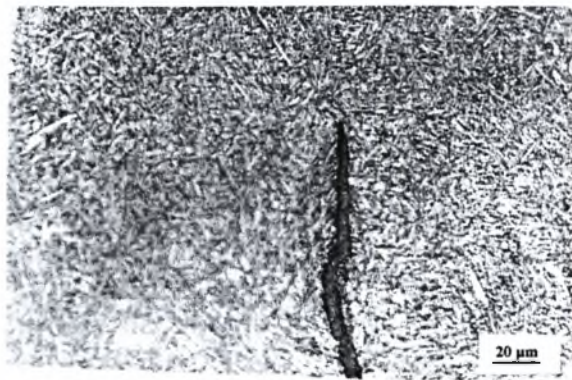
διάγραμμα βάθους - σκληρότητας για δοκ.Β33Β



5.4 Φωτογραφικό υλικό



Εικόνα 5.1 Δοκίμιο A1
Διακρίνεται η μορφολογία του βελονοειδούς μαρτενσίτη, αλλά και ορισμένα πλακίδια



Εικόνα 5.2 Δοκίμιο A2
Διακρίνεται το ρήγμα στην ζώνη ενανθράκωσης μέσα στην λίμνη τήξης



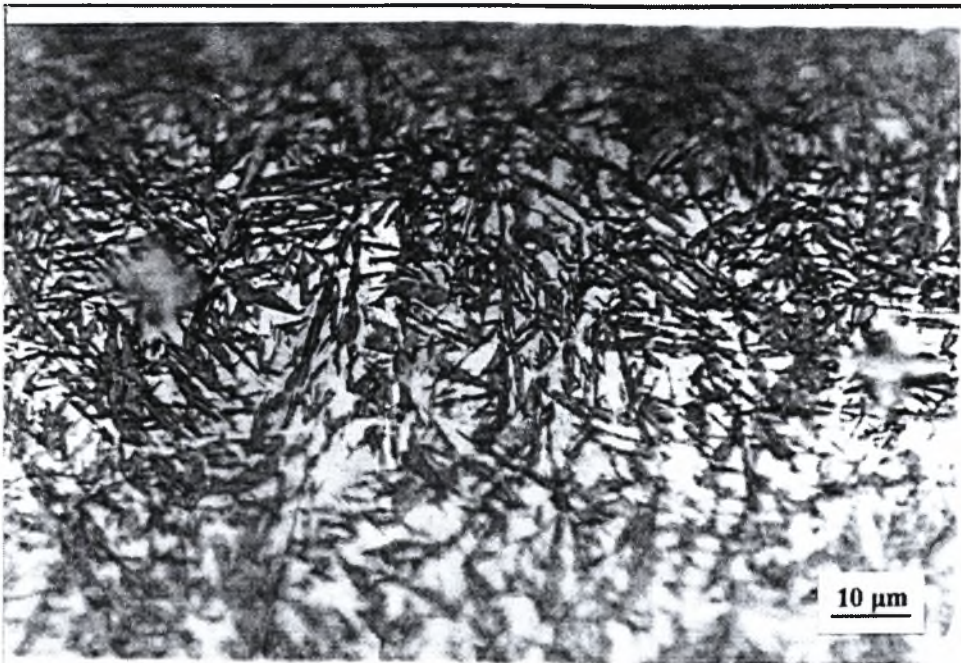
Εικόνα 5.3 Δοκίμιο A3
Διακρίνονται οι δενδρίτες (πρωτεύοντες βραχίονες) μέσα στους οποίους η δομή είναι μαρτενσιτική



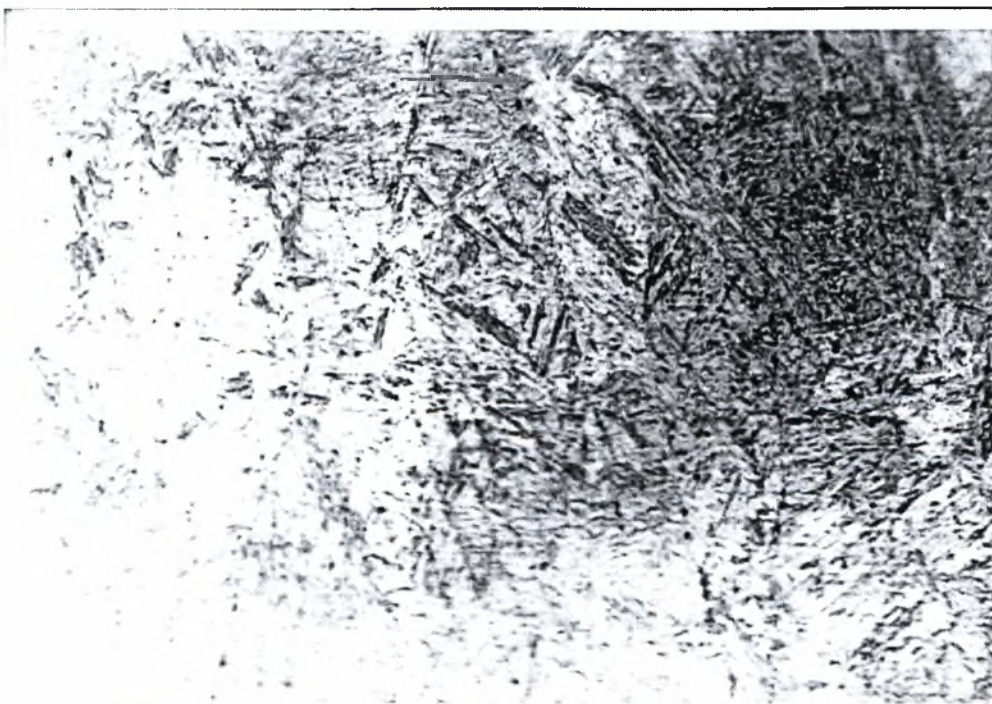
Εικόνα 5.4 Δοκίμιο A7
Βελονοειδής μαρτενσίτης (Lath type)



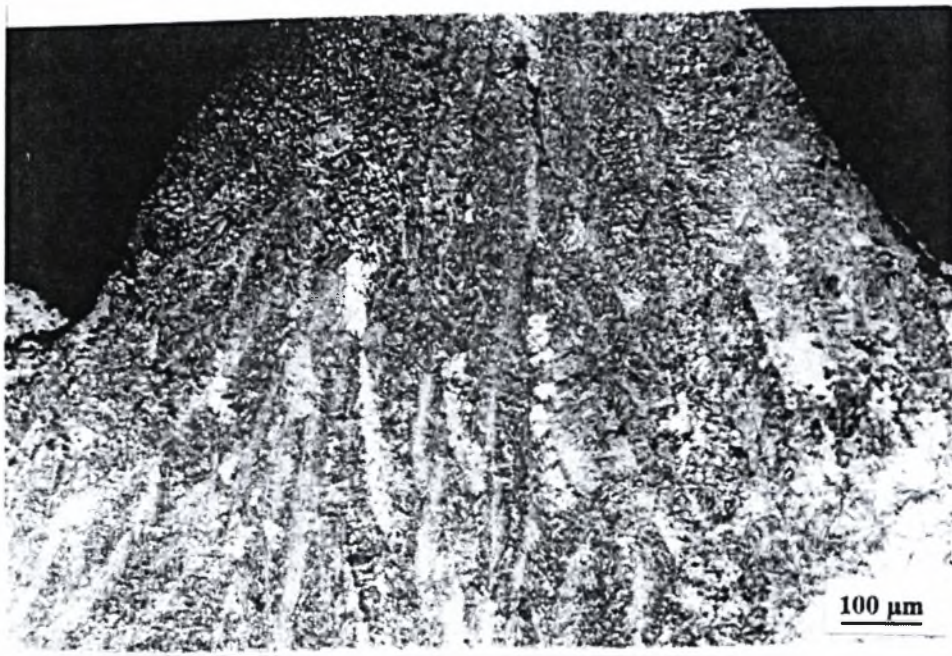
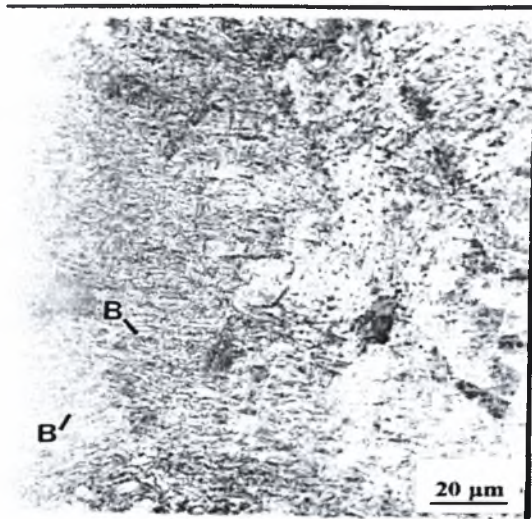
Εικόνα 5.5 Δοκίμιο A9
*Διακρίνεται και πάλι η δενδριτική μορφολογία
ενώ η δομή είναι μικτή μαρτενσιτική (plate και lath type)*



Εικόνα 5.6 Δοκίμιο A12
Η μοναδική περίπτωση όπου η δομή ήταν εξ'ολοκλήρου
μαρτενσιτική σε πλακίδια (plate type)

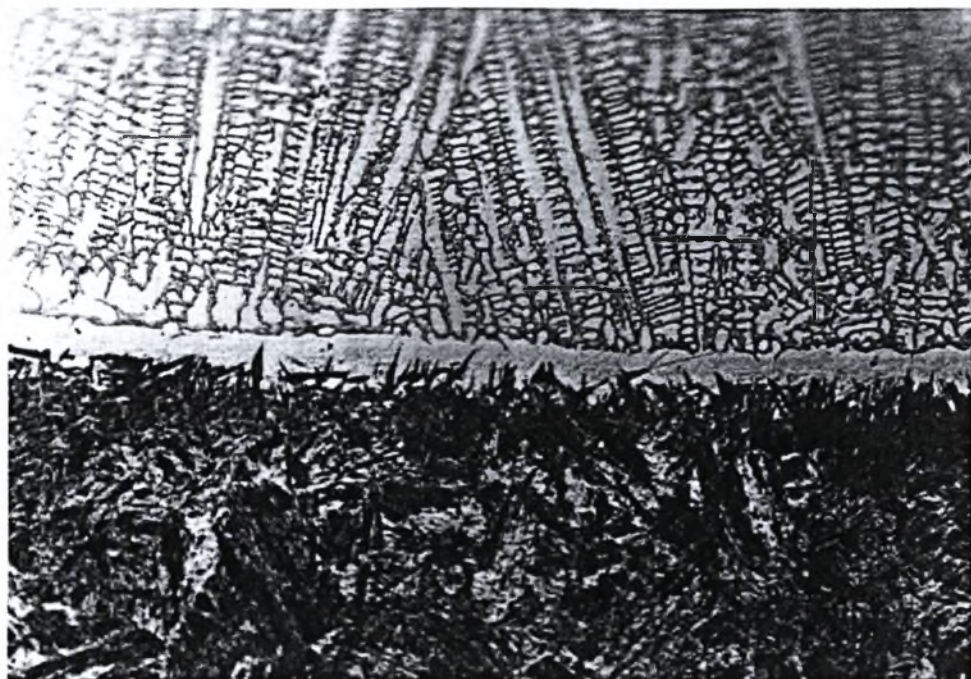


Εικόνα 4.7 Δοκίμιο A13
Βελονοειδής μαρτενσίτης(lath) με λίγα πλακίδια (plate)

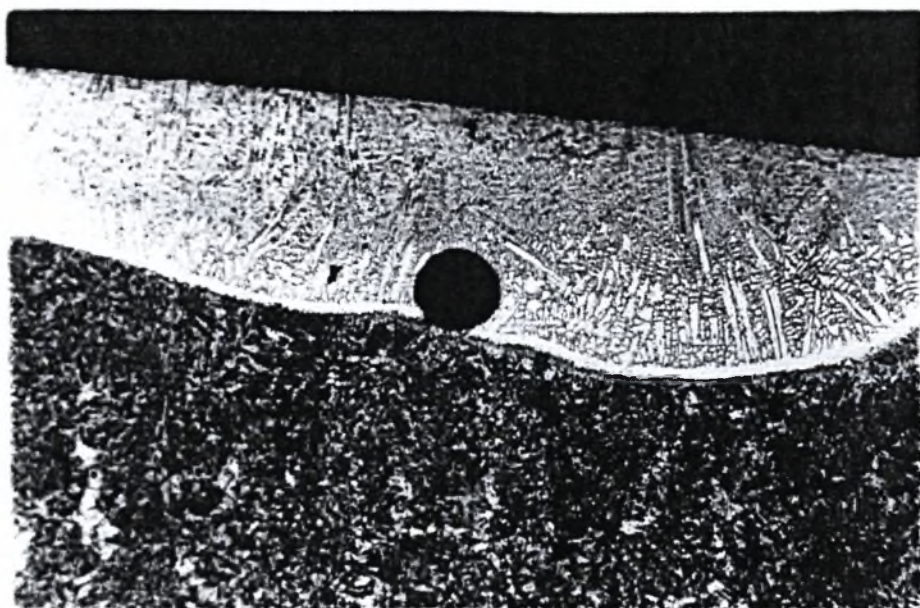


Εικόνα 4.8 Δοκίμιο A15 (α , β)

Στην περίπτωση αυτή φαίνεται η έντονη τήξη που έχει υποστεί η επιφάνεια του δοκίμιου, αλλά και η δομή του που είναι μπαινιτική και μαρτενσιτική



Εικόνα 4.9 δοκίμιο B19
*Χαρακτηριστική περίπτωση δενδριτικής μορφολογίας
Στο κάτω μέρος της λωρίδας διακρίνονται μαρτενσιτικά πλακίδια*



Εικόνα 4.10 Δοκίμιο B20
*Χαρακτηριστική η ύπαρξη δενδριτικής μορφολογίας
Διακρίνεται σφαιρικός πόρος*

Συζήτηση των αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα

6.1 Παρατηρήσεις

- 1) Στην πλειοψηφία των δοκιμών του LIC/ITE, η δομή ήταν βελονοειδής μαρτενσίτης με ορισμένα πλακίδια (μικτή - mixed). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το Σχ.2.8, το ποσοστό του άνθρακα είναι μεταξύ 0.6 - 0.8 % κ.β , άρα η ενανθράκωση πέτυχε να ανεβάσει το ποσοστό του άνθρακα σε σημαντικό βαθμό (η αρχική σύσταση του χάλυβα σε άνθρακα ήταν 0.15 % κ.β).
- 2) Όσον αφορά την μορφολογία, παρατηρήθηκε ότι με πολλά περάσματα άρχισαν να σχηματίζονται κυψέλες και δενδρίτες. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί διότι με τα πολλαπλά περάσματα, το κάθε πέραςμα προθερμαίνει την επιφάνεια σε σχέση με το επόμενο του. Έτσι μειώνονται οι θερμοκρασιακές κλίσεις (gradients) στο εσωτερικό του υλικού, γεγονός που ευνοεί τον σχηματισμό δενδριτών.
- 3) Σε αρκετά δοκίμια, στις άκρες της λίμνης τήξης υπήρχαν περιοχές με δενδριτική μορφολογία. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην κατανομή έντασης της δέσμης που χρησιμοποιήθηκε, αφού ήταν τύπου TEM₀₁* (doughnut). Αυτό σημαίνει ότι οι “άκρες” δέχονται μεγαλύτερα ποσά θερμότητας.
- 4) Σε μερικές περιπτώσεις παρατηρήθηκαν ρήγματα και πόροι στην λίμνη τήξης. Αυτά οφείλονται σε διαφορές θερμοκρασίας κατά την στερεοποίηση μιας και τα σημεία στο εσωτερικό της λίμνης τήξης ακολουθούν διαφορετικό θερμικό κύκλο σε σχέση με αυτά της επιφάνειας. Ο πόρος οφείλεται στον εγκλωβισμό αερίων κατά την στερεοποίηση.
- 5) Το σπρέι γραφίτη (Graphit 33) έδωσε χαμηλότερες τιμές από το αιώρημα, όσον αφορά την σκληρότητα.
- 6) Όσον αφορά τα δοκίμια της δεύτερης σειράς (E.B.E.T.A.M) είδαμε ότι σχηματίστηκε προευτηκτικός σεμεντίτης υπό μορφή δενδριτών. Αυτό σημαίνει ότι το ποσοστό του άνθρακα ξεπέρασε την ευτηκτική σύσταση (4.3 %).
- 7) Ορισμένα δοκίμια ενανθρακώθηκαν χωρίς να λιώσουν. Η δομή τους ήταν προευτηκτοειδής σεμεντίτης και πλακίδια μαρτενσίτη που προήλθαν από ωστενίτη. Επόμενως η σύσταση τους σε άνθρακα ήταν υψηλότερη από 0.8 % κ.β .
- 8) Ομοίως και σε αυτά τα δοκίμια όταν έγιναν πολλαπλά περάσματα, δημιουργήθηκε δενδριτική μορφολογία.
- 9) Εξαιτίας της υπερβολικής ποσότητας άνθρακα στο αιώρημα, η λίμνη τήξης των δοκιμών της δεύτερης σειράς εμπλουτίστηκε πολύ σε άνθρακα και αυτό είχε ως αποτέλεσμα την υπερευτηκτική σύσταση ορισμένων φορές.
- 10) Σε περιπτώσεις όπου σχηματίστηκε λωρίδα παραμένοντα ωστενίτη, στο κάτω μέρος της σχηματίστηκαν μαρτενσιτικά πλακίδια ενώ στο επάνω μέρος που βρισκόταν σε επαφή με την λίμνη τήξης δεν σχηματίστηκαν τέτοια πλακίδια. Αυτό οφείλεται στο ότι η συγκέντρωση του άνθρακα στο επάνω μέρος είναι υψηλότερη από αυτήν στο κάτω ,άρα ο επιπλέον άνθρακας σταθεροποιεί τον ωστενίτη σε θερμοκρασία δωματίου στο άνω μέρος.

6.2 Συμπεράσματα

Με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- 1) Αξιολογήθηκαν και οι δυο τύποι ενανθράκωσης (τήξη – στερεά κατάσταση).
- 2) Με μεταβολή των συνθηκών κατεργασίας αναπτύχθηκε ποικιλία μικροδομών.

Όσον αφορά τα δοκίμια της σειράς B που έγιναν στην E.B.E.T.A.M τα καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά την επιθυμητή μικροδομή λαμβάνονται με την στερεά ενανθράκωση μιας και οι δενδριτικές μορφολογίες θα πρέπει να αποφεύγονται. Η παραπάνω μικροδομή λαμβάνεται με ισχύ = 750 W, διάμετρο δέσμης = 7 mm και ταχύτητα [0.2 → 0.4 m/min]. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις τα αποτελέσματα έδειξαν είτε δενδριτική μορφολογία με δενδρίτες προετηκτικού σεμεντίτη – που είναι ιδιαίτερα σκληρός αλλά ψαθυρός - επαναφορά μαρτενσίτη στην ζώνη ενανθράκωσης, είτε επαναφορά του μπαινίτη στην Θ.Ε.Ζ ή και καθόλου ενανθράκωση όταν η διάμετρος της δέσμης ήταν αρκετά μεγάλη ($Q = 1300 \text{ W}$, $d = 15 \text{ mm}$, $u = 0.8 \text{ m/min}$).

Για τα δοκίμια της σειράς A (LIC/ITE) τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την επιθυμητή μικροδομή είναι όσα παρουσιάζουν μικροδομή είτε με βελονοειδή μαρτενσίτη (*lath*) και τύπου πλακιδίων (*plate*) είτε με μαρτενσίτη πλακιδίων σε μήτρα παραμένοντα ωστενίτη. Επίσης θα πρέπει να αποφεύγεται η έντονη τήξη της επιφάνειας και η δημιουργία πόρων και ρηγμάτων.

- 3) Η σκληρότητα της ενανθρακωμένης ζώνης μερικές φορές ήταν τέσσερις φορές υψηλότερη του μετάλλου βάσης. (ιδιαίτερα σε δοκίμια της σειράς B με χρήση αιωρήματος)
- 4) Η μικροδομή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης αποτελείται από μπαινίτη που έχει υποστεί επαναφορά.
- 5) Το μέγιστο βάθος της ζώνης ενανθράκωσης αυξάνεται με το αριθμό των περασμάτων όταν τα υπόλοιπα μεγέθη είναι σταθερά. Αυτό όμως πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς τα πολλαπλά περάσματα είχαν ως αποτέλεσμα και την έντονη τήξη σε ορισμένες περιπτώσεις.

6.3 Προτάσεις

Εξαιτίας της αυξημένης σημασίας των κατεργασιών LASER προτείνονται τα παρακάτω :

- 1) Συγγραφή κώδικα σε Η/Υ που να υπολογίζει την κατανομή της θερμοκρασίας σε οποιαδήποτε βάθος καθώς επίσης την διάχυση του άνθρακα που ακολουθεί του νόμους του Fick.
- 2) Τεχνικοοικονομική ανάλυση της κατεργασίας LASER σε σχέση με συμβατικές κατεργασίες για ορισμένο μέγεθος παρτίδας.
- 3) Η μέτρηση και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων όπως του ορίου διαρροής και της δυσθραυστότητας μετά την κατεργασία.
- 4) Ο υπολογισμός των τάσεων που αναπτύσσονται με πεπερασμένα στοιχεία ενός κομματιού που έχει υποστεί επιφανειακή κατεργασία με δέσμη Laser είτε σε κυκλική είτε σε επιφανειακή φόρτιση.
- 5) Η επιφανειακή κραμμάτωση με στοιχεία όπως το χρώμιο, το νικέλιο ή το μολυβδένιο για την πρόσδωση συγκεκριμένων π.χ αντιδιαβρωτικών ή αντιτριβικών ιδιοτήτων.

Η σημασία της ενανθράκωσης είναι πολύ σημαντική σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Με την βοήθεια του LASER, οι βιομηχανικές μονάδες αποκτούν ένα πολύ ισχυρό εργαλείο στην κατεύθυνση αυτή, το οποίο μπορεί να συμπεριλάβει και άλλες κατεργασίες (κοπή , συγκόλληση, διάτρηση, διαμόρφωση).

Στην ενανθράκωση με LASER, ο χρόνος που απαιτείται είναι μικρός σε σχέση με τις ώρες που απαιτούνται στην αέρια ενανθράκωση σε φούρνους.

Βεβαίως το θέμα δεν εξαντλείται μέσα από αυτήν την εργασία. Θα πρέπει να γίνουν παραπέρα μελέτες όσον αφορά το κόστος της μονάδας που αποτελεί σημαντική τροχοπέδη ώστε η μέθοδος να διαδοθεί περισσότερο.

Παραρτήματα

7.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της δέσμης LASER έναντι συμβατικών κατεργασιών.

Διεργασίες θέρμανσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
- LASER	ελάχιστη παραμόρφωση στο κομμάτι, επιλεκτική σκλήρυνση, δεν απαιτείται μέσο βαφής, μπορεί να προβλεφθεί το βάθος σκλήρυνσης, ελάχιστη μηχανουργική κατεργασία μετά τη διεργασία	υψηλό κόστος εξοπλισμού χρήση επικαλύψεων προκειμένου να βελτιωθεί η απορροφητικότητα του βασικού μετάλλου Τα πολλαπλά περάσματα προκαλούν τοπική επαναφορά.
- Επαγωγή	υψηλός ρυθμός παραγωγής μεγάλο βάθος σκλήρυνσης μικρότερο κόστος εξοπλισμού καλύπτει όλη την επιφάνεια	νεκρός χρόνος για την αντικατάσταση πηνίου απαιτείται μέσο βαφής παραμόρφωση κομματιού μεγάλη θερμική διεύθυνση Η/Μ δυνάμεις αφήνουν στίγματα στην επιφάνεια
- Φλογοβαφή	φθηνή και ευέλικτη διεργασία	Περιβαλλοντικά προβλήματα , χαμηλή παραγωγικότητα, αδυναμία υψηλών ρυθμών ψύξης
- Ηλεκτρικό τόξο [TiG]	ομοίως με φλογοβαφή	περιορισμένο βάθος σκλήρυνσης ,αδυναμία ελέγχου δημιουργίας ή όχι της τήξης
- δέσμη ηλεκτρονίων	ελάχιστη παραμόρφωση δεν απαιτείται μέσο βαφής	υψηλό κόστος εξοπλισμού απαιτείται κενό χαμηλός ρυθμός παραγωγής υψηλό κόστος / κομμάτι

7.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ

Εκτός από την μέθοδο ενανθράκωσης με CO₂ Laser που περιγράφηκε ανωτέρω, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ενανθράκωσης στην βιομηχανία είναι η αέρια και η στερεά ενανθράκωση (κύρια σε χαμηλά κραμματωμένου χάλυβα) .

7.2.1 Αέρια ενανθράκωση

Με την διεργασία αυτή επιτυγχάνεται επιφανειακή ενανθράκωση (τυπικά βάθη 2 ~ 3 mm) .

Τα δοκίμια του χάλυβα εισάγονται σε κλίβανο μεταφερόμενα επάνω σε φορεία , όπου δημιουργείται ατμόσφαιρα πλούσια σε άνθρακα που παράγεται από αέριους υδρογονάνθρακες (μεθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο) ή από ατμούς βαρύτερων υγρών υδρογονανθράκων. Έπειτα ο άνθρακας μέσω μιας σειράς αντιδράσεων διαχέεται στην επιφάνεια. Ακολούθως γίνεται βαφή με υγρό ψύξης προκειμένου να δημιουργηθεί μαρτενσίτης και να υπάρξει αλλαγή στη σκληρότητα. Επίσης γίνεται και επαναφορά για αποκατάσταση των παραμένουσων τάσεων και βελτίωση της ολκιμότητας .

Οι κύριες παράμετροι της διεργασίας είναι :

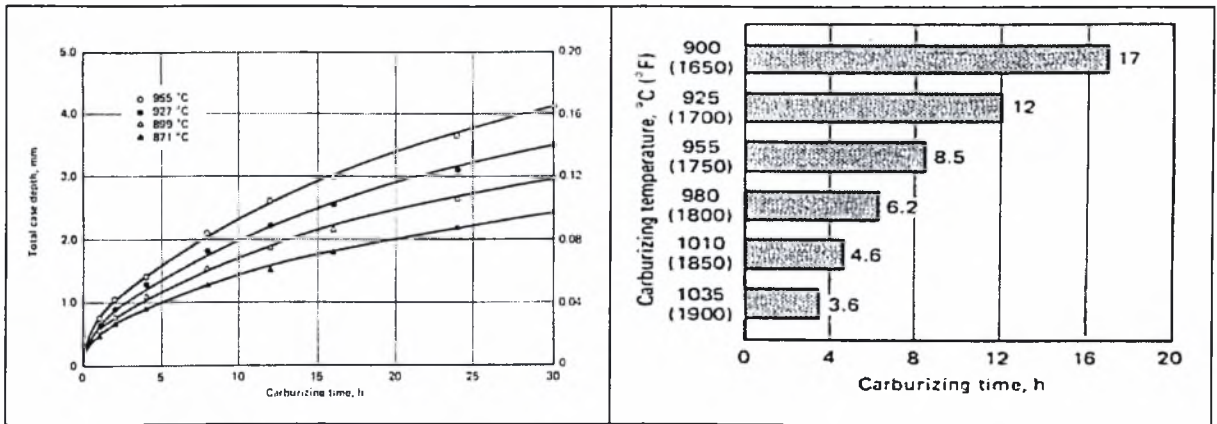
- 1) θερμοκρασία
- 2) χρόνος παραμονής
- 3) σύσταση ατμόσφαιρας

Η θερμοκρασία πρέπει να είναι τέτοια ώστε να δημιουργηθεί ωστενίτης αλλά περιορίζεται από τον μέγιστο ρυθμό διαχύσεως του άνθρακα στον ωστενίτη. Ο ρυθμός αυτός είναι ισχυρά συνάρτηση της θερμοκρασίας, ενδεικτικά αναφέρεται ότι στους 925 °C ο ρυθμός διάχυσης είναι 40% υψηλότερος από αυτόν στους 870 °C. Ένας άλλος περιορισμός που τίθεται αφορά στην παραμόρφωση των δοκιμίων και στην αντοχή του εξοπλισμού λόγω της θερμοκρασίας.

Όταν επιθυμείται μικρό βάθος σκλήρυνσης τότε η διεργασία πραγματοποιείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (<925 °C) γιατί ο έλεγχος του βάθους γίνεται ευκολότερα.

Αντίθετα όταν απαιτείται μεγάλο βάθος σκλήρυνσης είναι δυνατόν να ανέβει η θερμοκρασία στους 955 °C ή 980 °C για να μειωθεί ο χρόνος παραμονής.

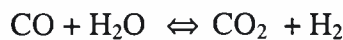
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η επίδραση του χρόνου παραμονής στο συνολικό βάθος σκλήρυνσης καθώς και η σχέση T - t για συγκεκριμένο βάθος. Στα διαγράμματα υποτίθεται ότι στην επιφάνεια υπάρχει κορεσμένος ωστενίτης αλλιώς οι τιμές θα ήταν μικρότερες.



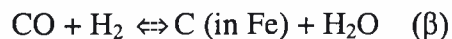
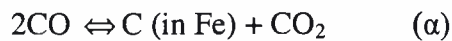
Εικόνα 7.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στο βάθος σκλήρυνσης σε ενανθράκωση
Συσχέτιση θερμοκρασίας – χρόνου ενανθράκωσης για ορισμένο βάθος

-Σύσταση της ατμόσφαιρας

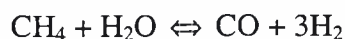
Τα κύρια συστατικά της ατμόσφαιρας είναι : CO, N₂, H₂, CO₂, H₂O και CH₄. Από αυτά το άζωτο είναι αδρανές και χρησιμοποιείται ως αραιωτικό. Τα ποσοστά των CO, CO₂, H₂, H₂O είναι πολύ κοντά στην σύσταση ισορροπίας που προκύπτει από την αντίδραση :



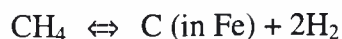
Αν και η σειρά των αντιδράσεων δεν είναι πλήρως γνωστή ο άνθρακας προστίθεται στην επιφάνεια του χάλυβα σύμφωνα με τις αντιδράσεις :



Όμως αν διεργασία στηριζόταν αποκλειστικά στην διάσπαση του CO για την διάχυση του άνθρακα στην επιφάνεια, αυτό θα απαιτούσε υψηλές παροχές CO για την δημιουργία ενός στοιχειώδους βάθους. Έτσι το μεθάνιο χρησιμεύει ώστε να παράγονται και να αναπληρώνονται ποσά CO ώστε οι αντιδράσεις (α), (β) να οδηγούνται προς τα δεξιά μειώνοντας παράλληλα τα ποσά των CO₂, H₂O.



Προσθέτοντας τις αντιδράσεις :



Σε περιπτώσεις που τα δοκίμια έχουν μεγάλη επιφάνεια υπάρχει μια πτώση 1 ~ 3% στην συγκέντρωση του CO, μιας και οι απαιτήσεις σε άνθρακα στην αρχή του κύκλου της διεργασίας είναι μεγαλύτερες. Το ποσοστό του άνθρακα (κινούσα δύναμη) ελέγχεται μεταβάλλοντας την παροχή του αερίου εμπλουτισμού (CO, CO₂, H₂, H₂O) ενώ διατηρείται σταθερή η παροχή του φέροντος ενδοθερμικού αερίου.

- Είδη κλιβάνων

Οι κλίβανοι χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες :

- 1) συνεχούς ροής
- 2) παρτίδας (batch furnace)

Οι κλίβανοι συνεχούς ροής χρησιμοποιούνται για κομμάτια που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες σε συνεχή τρόπο. Τα δοκίμια φέρονται με ιμάντες, ταινίες μέσα στον θάλαμο ενανθράκωσης. Οι περισσότεροι από τους κλιβάνους είναι ερμητικά κλεισμένοι ώστε να μην μπαίνει αέρας που θα οξειδώσει την επιφάνεια. Επίσης υπάρχουν και ανοικτού τύπου που όμως η σύσταση τους δεν μπορεί να ελεγχθεί εύκολα.

Αντίθετα οι κλίβανοι παρτίδας χρησιμοποιούνται για ογκώδη τεμάχια και με σχετικά δύσκολη γεωμετρία. Επικρατεί υπερπίεση μερικών Pa (12 ~ 37 Pa) ώστε να μην εισέρχεται αέρας. Επίσης χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες για την καλή κυκλοφορία ώστε να διεισδύει ο άνθρακας και σε απρόσιτα σημεία. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η σχετική διεύθυνση εισαγωγής των κομματιών αλλά και η αρχική τους θερμοκρασία. Τα τεμάχια που υπόκεινται σε αυτήν την κατεργασία είναι γρανάζια, ρουλεμάν και άλλα στοιχεία μηχανών.

7.2.2 Στερεά ενανθράκωση

Στην διεργασία αυτή, αρχικά παράγεται μονοξείδιο του άνθρακα (CO) που παράγεται από μια στερεά ένωση και ακολούθως διασπάται σε στοιχειακό άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).

Ο στοιχειακός άνθρακας διαχέεται στην επιφάνεια του τεμαχίου και το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με ανθρακούχα συστατικά που βρίσκονται στην στερεά ένωση με σκοπό τον σχηματισμό μονοξειδίου. Ο σχηματισμός αυτός επιταχύνεται από την παρουσία καταλυτών όπως του BaCO₃ (ανθρακικό βάριο), CaCO₃ (ανθρακικό ασβέστιο), K₂CO₃ (ανθρακικό κάλιο), Na₂CO₃ (ανθρακικό νάτριο).

Η στερεά ενανθράκωση δεν έχει γνωρίσει ιδιαίτερη εμπορική επιτυχία. Έχει σχεδόν αντικατασταθεί από διεργασίες που είναι πιο εύκολα ελέγξιμες και με λιγότερα περιβαλλοντικά προβλήματα όπως η αέρια και υγρή ενανθράκωση. Παρόλα αυτά διατηρεί κάποια πλεονεκτήματα που αναφέρονται παρακάτω :

- 1) Είναι ιδανική διεργασία για την αργή απόψυξη του δοκιμίου, κάτι που είναι σημαντικό για τεμάχια που πρόκειται να υποστούν μηχανουργική κατεργασία.
- 2) Συγκρινόμενη με την αέρια ενανθράκωση προσφέρει πιο πολλές επιλογές για κατεργασίες επιλεκτικής σκλήρυνσης.

Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής :

- 1) Είναι λιγότερο καθαρή από τις υπόλοιπες.
- 2) Δεν ενδείκνυται για ενανθράκωση χαμηλού βάθους όπου απαιτείται στενό εύρος ανοχών.
- 3) Δεν μπορεί να ελεγχθεί πλήρως το ποσοστό του άνθρακα στην επιφάνεια του δοκιμίου.
- 4) Ο χρόνος κατεργασίας είναι υψηλότερος μιας και εκτός από το τεμάχιο πρέπει να θερμανθεί και η στερεά ένωση όπου περιέχονται τα C, CO, CO₂ που είναι απαραίτητα. Όσον αφορά τις συνθήκες κατεργασίας (θερμοκρασία , χρόνος παραμονής , βάθη σκλήρυνσης) ισχύουν γενικά τα όσα αναφέρθηκαν και στην αέρια ενανθράκωση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1./ *Foundation of Materials - Science and Engineering*/W.Smith /McGraw Hill
- 2./ *Laser Material Processing*/W.M.Steen/Springer – Verlag
- 3./ *Laser Machining - Theory and Practice*/G.Chryssolouris/Springer – Verlag
- 4./ *Steels - Microstructure and Properties*/R.Honeycombe - H.Bhadeshia/Edward Arnold
- 5./ *Conduction of Heat in Solids*/H.Carslaw - J.Jaeger/Oxford
- 6./ *Επιφανειακή σκλήρυνση υποευτηκτοειδούς χάλυβα με δέσμη laser - διπλ.εργασία*
Κατσαμάς Αντώνιος

ΑΡΘΡΟΓΡΑΦΙΑ

- 1./ *The laser surface-alloying of iron with carbon*/A.Walker-H.Flower-D.West/J.of Mat.Sci.
- 2./ *Carburization of iron surface induced by laser heating*/P.Canova-E.Ramous/J.of Mat.Sci.
- 3./ *Selective area carburizing of low carbon steel using an Nd:YAG laser*
M.Tayal - K.Mukherjee/Mat.Sci. and Eng.
- 4./ *Laser Surface Hardening*/Ole A.Sandven /ASM Handbook
- 5./ *Gas Carburizing*/C.A.Stickels/ASM Handbook
- 6./ *Pack Carburizing*/Robert W.Foreman/ASM Handbook
- 7./ *Laser transformation Hardening of steel-II*
W.B Li - K.E.Easterling - M.F.Ashby/Acta Metall.