

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧ/ΤΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ
ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ
ΔΕΣΜΗ LASER CO₂**

ΠΑΤΡΙΚΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. Γ. ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΒΟΛΟΣ 1998



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

Αριθ. Εισ.: 1599/1
Ημερ. Εισ.: 03-03-1998
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
1998
ΠΑΤ

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ
ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ
ΔΕΣΜΗ LASER CO₂**

ΠΑΤΡΙΚΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. Γ. ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΒΟΛΟΣ 1998



αρ. εισ 891 Π.Α.....

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

004000055240

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δρ. Γρηγόριο Χαϊδεμενόπουλο για την πολύτιμη καθοδήγηση, για τις εξίσου πολύτιμες συμβουλές του και κυρίως γιατί μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, τον μεταπτυχιακό Α. Βασιλάκο, καθώς και τον επίσης μεταπτυχιακό Α. Κατσαμά, για την βοήθειά τους και την υπομονή που έδειξαν καθ' όλη την διάρκεια της συγγραφής αυτής της εργασίας. Τέλος, τους φοιτητές Ν. Μάρα και Τ. Λιάπη, για την ηθική υποστήριξη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ:	
3.1. LASER CO₂	6
3.2. ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	7
3.3. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ	8
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ:	12
4.1. ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ	17
4.2. ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ	33
5. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	55
6. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	56
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και πιο συγκεκριμένα το Εργαστήριο Υλικών, συμμετέχει στο πρόγραμμα Lasermat που μελετάει την εφαρμογή της δέσμης laser στις κατεργασίες. Μία από τις κατεργασίες αυτές είναι και η μορφοποίηση με laser CO₂. Επιγραμματικά, ένα χαλύβδινο έλασμα θερμαίνεται γραμμικά από μια δέσμη, με τελικό αποτέλεσμα την δημιουργία μίας γωνίας κάμψης σε αυτό. Η δημιουργία της γωνίας δεν είναι όμως η μοναδική μεταβολή που υπέστη το έλασμα. Κατά την διάρκεια της κατεργασίας, αποδίδεται στο υλικό και ένα ποσό θερμότητας, αφού η δέσμη έχει θερμικά αποτελέσματα πάνω στο υλικό, το οποίο προκαλεί την διάχυση των κραματικών στοιχείων του σιδήρου, με άμεση συνέπεια κάποιες μεταβολές στην δομή του χάλυβα. Η εργασία αυτή μελετάει το μέγεθος των μεταβολών αυτών, μέσω της μεταλλογραφίας και της μικροσκληρομέτρησης και τους παράγοντες που τις μειώνουν ή τις αυξάνουν κατά την διάρκεια της κατεργασίας.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την μεταλλογραφία και την μικροσκληρομέτρηση είναι περίπου αναμενόμενα. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν σοβαρές μεταβολές της δομής που όμως είναι αντιστρέψιμες και ευτυχώς παρουσιάζονται σε πολύ μικρή έκταση της συνολικής μάζας των ελασμάτων. Το μέγιστο βάθος επηρεασμένης ζώνης που παρουσιάστηκε δεν ξεπερνάει τα 0.7mm, ενώ το πλάτος του στην επιφάνεια εξαρτάται από την διάμετρο της δέσμης. Η πιο σοβαρή μεταβολή στην δομή, είναι ο μετασχηματισμός της επιφάνειας του ελάσματος που ακτινοβολήθηκε σε μαρτενσίτη. Ο μαρτενσίτης είναι μια πολύ σκληρή φάση άρα και ψαθυρή και δημιουργεί προϋποθέσεις για την εμφάνιση επικίνδυνων μικρορωγμών στην περιοχή, που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού.

Μια γενική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν είναι τόσο σοβαρή η υποβάθμιση του υλικού και σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί τροχοπέδη για την περαιτέρω μελέτη της κατεργασίας. Προσοχή χρειάζεται μόνο στην αντιμετώπιση του μαρτενσίτη, η οποία μπορεί να αντιμετωπισθεί με την μερική ανακρυστάλλωση του υλικού.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη που ακολουθεί, εντάσσεται σε μία γενικότερη προσπάθεια που συντελείται, με σκοπό την εφαρμογή της μορφοποίησης με laser στην βιομηχανία. Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας εφαρμογής είναι πολλά και θα εξετασθούν εκτενέστερα στη συνέχεια.

Η προσπάθεια αυτή μεταφράζεται με το ερευνητικό πρόγραμμα Lasermat, που μελετά την μορφοποίηση χαλύβδινων ελασμάτων με δέσμη laser, με σκοπό την εφαρμογή του στην ναυπηγική. Η μελέτη επικεντρώνεται στον ναυπηγικό χάλυβα D36. Συντονιστής της προσπάθειας είναι το Πανεπιστήμιο Πατρών, ενώ συμμετέχουν και άλλοι φορείς όπως η EBETAM, το Ινστιτούτο Τεχνολογικών Ερευνών (LIC/ITE), τα Ελληνικά Ναυπηγεία και το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας έχει αναλάβει την μελέτη της υποβάθμισης του υλικού των ελασμάτων, αφού αυτά έχουν υποστεί γραμμική θέρμανση από την δέσμη. Συγκεκριμένα, το Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας παρέλαβε δύο σειρές δοκιμίων, με εννέα δοκίμια η κάθε μία. Τα δοκίμια αυτά μελετήθηκαν σε δύο συγκεκριμένους τομείς : στην μεταλλογραφία και στην μέτρηση της σκληρότητας του υλικού. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής περιγράφονται στην συνέχεια της εργασίας.

Αν και η μορφοποίηση με laser δεν έχει αναπτυχθεί όσο άλλες εφαρμογές του laser σε κατεργασίες (συγκόλληση, διάτρηση, επιφανειακή σκλήρυνση κ.τ.λ), υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον από τις βιομηχανίες λόγω των σοβαρών πλεονεκτημάτων που προσφέρει η μέθοδος.

3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

3.1. LASER CO₂^[1]

Μία δέσμη laser μπορεί να παραχθεί από μια μεγάλη ποικιλία στοιχείων και ενώσεων και κάθε τέτοιο στοιχείο ή ένωση δίνει ακτινοβολία σε διαφορετικό μήκος κύματος. Έτσι, μπορεί να δημιουργηθεί μία δέσμη laser από N₂, He-Ca, Cu, Ar, CO, CO₂ κ.τ.λ. Επίσης, μπορεί να γίνει διαχωρισμός σε laser στερεάς ή αέριας μορφής, ανάλογα με την φάση στην οποία βρίσκονται τα στοιχεία που παράγουν την δέσμη.

Οι κατεργασίες υλικών απαιτούνε laser με σχετικά μεγάλη ικανότητα παραγωγής ενέργειας και αυτό μας περιορίζει σε λίγες περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία για αυτό το σκοπό. Τα βιομηχανικά laser που χρησιμοποιούνται είναι αυτά με CO₂, ND - GLASS και ND - YAG. Για την μορφοποίηση των ελασμάτων αυτής της μελέτης, χρησιμοποιήθηκε laser CO₂, που εκπέμπει ακτίνα στο αόρατο φάσμα με μήκος κύματος 10μm. Η επίδραση που έχει στο υλικό αυτό το μήκος κύματος είναι θερμική.

Το laser CO₂ έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια. Οι προσπάθειες επικεντρώθηκαν στην αύξηση της ενέργειας της δέσμης και αυτό επιτεύχθηκε με χρήση μίγματος αερίου CO₂:N₂:He::0.8:1.7, που είχε ως αποτέλεσμα την αύξησή της σε 100 - 200W. Με την χρήση ψυκτικού κυκλώματος για το αέριο μίγμα και μικρής ροής του αερίου στο θάλαμο, η ενέργεια της δέσμης άγγιξε την τιμή των 25-100KW. Συγκριτικά με άλλα laser, το laser CO₂ είναι το πιο ισχυρό, όσο αφορά την ισχύ της δέσμης, με μικρό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.

Μία δέσμη laser έχει πολύ καλές ιδιότητες, που το μετατρέπουν σε ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο. Πρώτον, αποτελεί την μεγαλύτερη συγκέντρωση ενέργειας που είναι δυνατή σήμερα στην βιομηχανία. Δεύτερον, η συγκέντρωση αυτή είναι εύκολα ελεγχόμενη από τον χρήστη. Σε μία δέσμη μπορούμε να επιλέξουμε διάφορες παραμέτρους που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της, προκειμένου να πάρουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι παράμετροι αυτοί είναι : η ισχύς της δέσμης, η διάμετρός της, η ταχύτητα σάρωσης του υλικού. Με αυτές τις ρυθμίσεις ελέγχουμε έμμεσα την θερμότητα που προσδίδουμε κάθε φορά στο υλικό.

Με αυτές και μόνο τις ιδιότητες, η εφαρμογή του laser γίνεται όλο και πιο ευρύτερη στην βιομηχανία. Σήμερα, χρησιμοποιείται σε κάθε είδους επεξεργασία,

όπως : κοπή, κάμψη, συγκόλληση, επιφανειακές κατεργασίες, τήξη, χάραξη και πολλές άλλες.

3.2. ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ^{[2][3]}

Δυστυχώς, δεν υπάρχουν πολλές μελέτες που να αφορούν την μορφοποίηση ελασμάτων με χρήση δέσμης laser. Σε αυτό το κεφάλαιο όμως, θα παρατεθούν κάποια πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα από προηγούμενες μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με το θέμα.

Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η υποβάθμιση του χάλυβα HY-80, που προορίζεται επίσης για την ναυπηγική. Η γενική χημική του σύσταση είναι : **C:0.1-0.2%**,

Mn:0.1-0.45%,

Si:0.12-0.38%

Ni:1.93-3.32%,

Cr:0.94-1.86%

Mo:0.17-0.63%

Ο χάλυβας HY-80 είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, όμως παρουσιάζει αρκετά αυξημένη σκληρότητα που οφείλεται και στα άλλα κραμματικά στοιχεία καθώς και στην θερμική του κατεργασία. Επίσης, παρουσιάζει πολύ υψηλή δυσθραυστότητα που οφείλεται στο Ni και πολύ καλή αντοχή στην φθορά και διάβρωση που οφείλεται στο Cr.

Αρκετά ελάσματα από τον χάλυβα αυτό υπέστησαν γραμμική θέρμανση με δέσμη laser, με απλή ή πολλαπλή σάρωση και στην συνέχεια κατάλληλα δείγματα από τα ελάσματα αυτά υποβλήθηκαν σε δύο δοκιμές για να προσδιορισθούν πιθανές αλλαγές στο υλικό και σε ποιο βαθμό αυτές επηρεάζουν την συνολική συμπεριφορά του ελάσματος. Οι δοκιμές ήταν η μικροσκληρομέτρηση και ο προσδιορισμός της δυσθραυστότητας, ενώ φυσικά είχε προηγηθεί η μεταλλογραφική μελέτη του υλικού. Τα τελικά συμπεράσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά για περαιτέρω μελέτη της κατεργασίας, με απώτερο σκοπό την εφαρμογή της στην βιομηχανία.

Πιο συγκεκριμένα, οι μελέτες κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

- Η βλάβη που προκαλείται στο υλικό από την κατεργασία με laser είναι πολύ μικρής έκτασης και δεν επηρεάζει την συνολική συμπεριφορά του υλικού.

- Η απλή σάρωση προκαλεί μεταβολές στο υλικό σε μεγαλύτερο βάθος από ότι η πολλαπλή σάρωση, με δεδομένη την επίτευξη ίδιας γωνίας κάμψης.
- Κατά την απλή σάρωση, το επηρεασμένο βάθος αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία κάμψης που θέλουμε να επιτύχουμε, ενώ για την πολλαπλή σάρωση δεν υπάρχει τέτοια αναλογία και το αντίστοιχο βάθος σταθεροποιείται σε μια τιμή που δεν αυξάνει με περαιτέρω περάσματα.
- Στην απλή σάρωση, παρατηρείται αύξηση του μεγέθους του κόκκου, ενώ κατά την πολλαπλή το υλικό παραμένει λεπτόκοκκο.
- Η μεγαλύτερη μεταβολή, όσον αφορά τις ιδιότητες του υλικού, παρατηρείται στην δυσθραυστότητα. Λόγω της «καθίζησης» καρβιδίων του Ni και Cr, τα στοιχεία αυτά απομακρύνονται από την θερμαινόμενη περιοχή, μειώνοντας τοπικά την αντοχή σε δυσθραυστότητα και αυξάνοντας την πιθανότητα δημιουργίας μικρορωγμών. Η συγκεκριμένη μεταβολή, είναι η μοναδική από όσες αναφέρθηκαν, που δεν μπορεί να αποκατασταθεί.

Γενικά, παρατηρήθηκαν μικρές αλλαγές, πολλές από τις οποίες διορθώνονται με μερική ανακρυστάλλωση του υλικού. Συνιστάται η χρήση πολλών περασμάτων, γιατί έτσι μειώνεται η έκταση των μεταβολών.

3.3. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ LASER ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ^[4]

3.3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τεχνικές και οικονομικές απαιτήσεις στον σύγχρονο κόσμο, γίνονται ολοένα και μεγαλύτερες. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν μεγαλύτερη διαστατική ακρίβεια, ταχύτερη κατεργασία, καλύτερη ποιότητα των προϊόντων και όλα αυτά με το μικρότερο δυνατό κόστος. Όλα αυτά κάνουν πιο επιτακτική την ανάγκη για την εύρεση νέων τεχνολογικών λύσεων που να εξυπηρετούν τις απαιτήσεις αυτές.

Η χρήση της δέσμης laser σε κατεργασίες είναι η κατάληξη των παραπάνω λογικών βημάτων. Είναι μια μέθοδος με πολύ καλές προοπτικές για το μέλλον, σε μια εποχή όπου το laser βρίσκει όλο και περισσότερες εφαρμογές. Οι πιο συνηθισμένες κατεργασίες με laser που βρίσκουν εφαρμογή σήμερα είναι η κοπή, η συγκόλληση, η επικάλυψη και πολλές άλλες.

3.3.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ

Η μορφοποίηση με laser είναι μια μέθοδος άγνωστη ακόμα σε μεγάλο βαθμό. Συστηματική έρευνα ξεκίνησε από το 1986 και μετά. Αρχικά ξεκίνησε από την Ιαπωνία, που πρωτοστάτησε στην μελέτη της κάμψης ελασμάτων με laser, για την κατασκευή μελλοντικών διαστημικών σταθμών. Στη συνέχεια από τις Η.Π.Α., όπου μελετήθηκε η κάμψη ελασμάτων με σκοπό την κατασκευή πλοίων. Πιο πρόσφατες έρευνες, αφορούν την κάμψη σωλήνων και την ευθυγράμμιση δισκοειδών κοπτικών εργαλείων (αντίστροφη διαδικασία).

Για να μπορέσει μια κατεργασία να έχει εφαρμογή με ικανοποιητικά αποτελέσματα, πρέπει να γίνει πρώτα γνωστός ο μηχανισμός βάσει του οποίου πραγματοποιείται η κάμψη των μεταλλικών ελασμάτων. Ας θεωρήσουμε την πιο απλή περίπτωση, όπου καλούμαστε να κάμψουμε ένα μεταλλικό έλασμα κάποιου συγκεκριμένου πάχους. Μια δέσμη laser οδηγείται πάνω από το υπό μορφοποίηση υλικό και το θερμαίνει γραμμικά, προσδίδοντας ένα ποσό θερμότητας που εξαρτάται από το ποσοστό απορροφητικότητας του υλικού και τις παραμέτρους της δέσμης. Η ακτινοβολία της δέσμης κατά μήκος μιας συνεχόμενης πορείας πάνω στο υλικό, προκαλεί μια γωνία κάμψης με μηχανισμούς που θα δούμε παρακάτω. Ανάλογα με τις παραμέτρους της δέσμης, τις ιδιότητες του υλικού και τις διαστάσεις του, μπορούμε να επιτύχουμε μέγιστη γωνία κάμψης 10° σε κάθε βήμα της διαδικασίας.

Η κάμψη του μετάλλου που προκαλείται από την θέρμανση, πραγματοποιείται βάσει ενός βασικού μηχανισμού. Λόγω της θέρμανσης εισάγονται στο υλικό θερμικές τάσεις, που παραμένουν κατά την απόψυξη και προκαλούν τοπική πλαστική παραμόρφωση και εξαιτίας αυτής δημιουργείται στο έλασμα μια γωνία κάμψης. Οι θερμικές τάσεις που εισάγονται κατά την θέρμανση, προκαλούν κάμψη με διαφορετικούς μηχανισμούς, ανάλογα με την διαδικασία που θα ακολουθηθεί, οπότε παρατηρείται και διαφορετικό αποτέλεσμα κάθε φορά που αλλάζει ο μηχανισμός που προκαλεί την κάμψη. Εδώ θα παρουσιασθούν δύο από αυτούς.

Ο πρώτος λέγεται μηχανισμός θερμοκρασιακής διαβάθμισης (thermal gradient). Στην περίπτωση αυτή, οι παράμετροι της δέσμης επιλέγονται με τέτοιο τρόπο (μέτρια ισχύς, σχετικά υψηλές ταχύτητες σάρωσης) ώστε η ακτινοβολία της να προκαλέσει στο υλικό μια θερμοκρασιακή διαβάθμιση, όσο το δυνατόν πιο απότομη. Φυσικά, οι υψηλότερες θερμοκρασίες θα παρουσιάζονται στην επιφάνεια και οι χαμηλότερες βαθύτερα μέσα στο υλικό. Η μέγιστη θερμοκρασία

της επιφάνειας περιορίζεται από την θερμοκρασία τήξης του υλικού ή την θερμοκρασία μετασχηματισμού, όταν πρόκειται για χάλυβες. Το θερμοκρασιακό gradient προκαλεί ένα πεδίο θερμικών τάσεων, που οφείλεται στον διαφορετικό βαθμό διαστολής των τμημάτων του ελάσματος. Το πεδίο αυτό δημιουργεί με την σειρά του ένα gradient πλαστικής παραμόρφωσης, επειδή η κάμψη του ελάσματος προς την αντίθετη πλευρά από αυτή που ακτινοβολήθηκε, εμποδίζεται από την τρισδιάστατη εντατική κατάσταση του τεμαχίου κατά την διάρκεια της θέρμανσης. Έτσι, κατά την διάρκεια της ψύξης υπάρχει ένα θερμοκρασιακό πεδίο με σημαντικές διαφορές θερμοκρασίας και δημιουργείται μια γωνία κάμψης που κάμπτεται το έλασμα προς την πλευρά που ακτινοβολήθηκε. Παράλληλα, δημιουργείται μια μικρή διαστολή του κάτω μέρους του ελάσματος. Η γωνία κάμψης μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του ελάσματος, γιατί η αντίσταση σε κάμψη αυξάνεται με το τετράγωνο του πάχους του ελάσματος. Η επιλογή των παραμέτρων της δέσμης, όπως για παράδειγμα η ισχύς P, επιτρέπουν τον έλεγχο της γωνίας κάμψης.

Ο δεύτερος σημαντικός μηχανισμός ονομάζεται μηχανισμός θερμικής αναστάτωσης (upsetting mechanism). Για να επιτευχθεί ο μηχανισμός αυτός, επιλέγονται οι παράμετροι της δέσμης με τέτοιο τρόπο (μεγάλη ισχύς, μικρή ταχύτητα), ώστε η διεύθυνση της θερμότητας να είναι ομογενής και σε διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια του ελάσματος. Αν η ακτινοβολία και η διαδρομή της δέσμης επιλεγούν σωστά, το υλικό διαστέλλεται και παραμορφώνεται πλαστικά σε μεγάλη έκταση, κατά την διεύθυνση του πάχους του ελάσματος. Κατά την ψύξη του συστέλλεται και λόγω της αρχής διατήρησης του όγκου, μειώνεται το μήκος του. Τελικά παραμορφώνεται σχηματίζοντας μια γωνία κάμψης. Το μέγεθος της διαστολής εξαρτάται από τον συντελεστή θερμικής διαστολής του υλικού και από τις παραμέτρους της ακτινοβολίας (ταχύτητα σάρωσης, ισχύς δέσμης). Ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιείται για την δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων με καμπύλες, όπως κελύφη, τμήματα σφαίρας κ.τ.λ.

3.3.3. ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Ένα πολύ συχνό και σημαντικό ερώτημα που γεννάται κατά την εφαρμογή της μορφοποίησης με laser της, είναι το κατά πόσον επηρεάζεται η δομή του υλικού από την ακτινοβολία. Το ερώτημα αυτό έχουν γίνει προσπάθειες να απαντηθεί για κάθε υλικό ξεχωριστά.

Συγκεκριμένα, δεν έχει παρατηρηθεί μείωση της σκληρότητας του υλικού που να οφείλεται στην αύξηση του μεγέθους των κόκκων του. Παρόλα αυτά, έχει παρατηρηθεί αύξηση της σκληρότητας, που οφείλεται στην τοπική πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Η αύξηση όμως αυτή είναι παραπλήσια με αυτή που προκαλείται κατά την μηχανική διαμόρφωση (πρέσες), από το φαινόμενο της εργοσκληρύνσης. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι γενικά δεν παρατηρούνται εκτεταμένες μεταβολές στην δομή του υλικού, ιδίως μετά από χρήση σταδιακών βημάτων μορφοποίησης. Μόνο στην περίπτωση που η θερμοκρασία της επιφάνειας ξεπεράσει την θερμοκρασία μετασχηματισμού του χάλυβα, υπάρχει πιθανότητα να σχηματισθεί μαρτενσίτης που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην συμπεριφορά του υλικού. Παρομοίως, στα κράματα αλουμινίου μπορούν να σχηματισθούν ενδομεταλλικές φάσεις που υποβαθμίζουν σημαντικά την αντοχή του υλικού σε δυσθραυστότητα.

3.3.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Η μετατόπιση του ενδιαφέροντος του τεχνολογικού κόσμου προς την χρήση του laser σε όλο και περισσότερες εφαρμογές, οδηγεί στο εύλογο συμπέρασμα ότι η τεχνική αυτή πλεονεκτεί σε σχέση με τις παλιότερες μεθόδους μορφοποίησης και συγκεκριμένα σε σχέση με την πρέσα που είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος σήμερα. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα του laser σε σχέση με την πρέσα είναι επιγραμματικά τα εξής :

- Μια βασική ικανότητα της δέσμης είναι ότι μπορεί να μας δώσει πολύπλοκα σχήματα που δεν θα μπορούσαμε να τα επιτύχουμε εύκολα από την χρήση της πρέσας.
- Με την χρήση του laser δεν υπάρχει η ανάγκη οποιουδήποτε εργαλείου. Αυτό είναι σημαντικό γιατί τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην μορφοποίηση (καλούπια), κοστίζουν πολύ και η κατασκευή τους είναι χρονοβόρα. Επίσης, είναι πολύ εξειδικευμένη η χρήση τους, αφού είναι ικανά για την δημιουργία μίας συγκεκριμένης μόνο γεωμετρίας.
- Η απουσία εργαλείου συνεπάγεται και την απουσία επαφής εργαλείου-τεμαχίου. Μια τέτοια επαφή δημιουργεί προβλήματα γιατί εκτός από το γεγονός ότι καταστρέφεται η αρχική τραχύτητα του τεμαχίου, κατά την θερμή διαμόρφωση θα πρέπει να θερμάνουμε και το εργαλείο για να μην έχουμε απότομη ψύξη του τεμαχίου κατά την επαφή.

- Μια δέσμη laser, λόγω της ιδιότητας της να συγκεντρώνει πολύ μεγάλη ενέργεια σε ένα συγκεκριμένο σημείο, μας δίνει την δυνατότητα να εκτελούμε οποιαδήποτε εργασία σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Έτσι, μπορούμε να τήξουμε, να εξαχνώσουμε ή να επεξεργαστούμε επιφανειακά ένα τεμάχιο, μέσα σε χρόνο δευτερολέπτων και κυρίως χωρίς να το μετακινήσουμε σε άλλο χώρο το τεμάχιο που επεξεργαζόμαστε.
- Επίσης, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η μορφοποίηση με laser προκαλεί μόνο τοπικές μεταβολές στο υλικό, ενώ η μηχανική μορφοποίηση παραμορφώνει πλαστικά την μεγαλύτερη μάζα του υλικού, με τις ανάλογες επιπτώσεις που έχει αυτό.
- Τέλος, με την χρήση του laser αποφεύγονται οποιεσδήποτε δυσκολίες εγκατάστασης του εξοπλισμού, αφού απαιτείτε μικρότερος χώρος από αυτόν που χρειάζεται μια πρέσα και δεν χρειάζονται οι ειδικές στηρίξεις που απαιτούνται για την λειτουργία της.

Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η δέσμη ελέγχεται αυτόματα και με μεγάλη ακρίβεια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε θέση και κλίση, μας δίνουν ένα εργαλείο με τεράστιες δυνατότητες για παραγωγή υψηλής ποιότητας και ποσότητας.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1. ΓΕΝΙΚΑ

4.1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Επειδή η μορφοποίηση με laser είναι μια μέθοδος ελάχιστα ανεπτυγμένη, υπάρχει ανάγκη διεξαγωγής πειραμάτων που θα στηρίξουν το θεωρητικό υπόβαθρο. Ο βασικός σκοπός τους είναι να κάνουν δυνατή την πρόβλεψη της τελικής μορφής του τεμαχίου που μορφοποιείται βάσει θεωρητικών υπολογισμών, με μόνα δεδομένα τις παραμέτρους της δέσμης και τις διαστάσεις του τεμαχίου. Επίσης, και με αυτό ασχολείται αυτή η μελέτη, το πείραμα επιτρέπει τον εντοπισμό οποιασδήποτε μεταβολής που προκαλείται στην δομή του υλικού από την ακτινοβολία.

Το υλικό με το οποίο θα ασχοληθούμε είναι ο χάλυβας D36. Πρόκειται για ένα απλό ανθρακοχάλυβα φερρίτη - περλίτη με γενική χημική σύσταση :

C: 0.18%

Si: 0.15%

Mn:1.6-1.9%

Al: 0.018%

S: 0.04%

Ο χάλυβας δεν περιέχει κραμματικά στοιχεία που να βελτιώνουν δραματικά τις ιδιότητες του, όπως Cr, Ni, Mo. Χρησιμοποιείται δε στην ναυπηγική για την κατασκευή της γάστρας και της υπερκατασκευής των πλοίων.

4.1.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

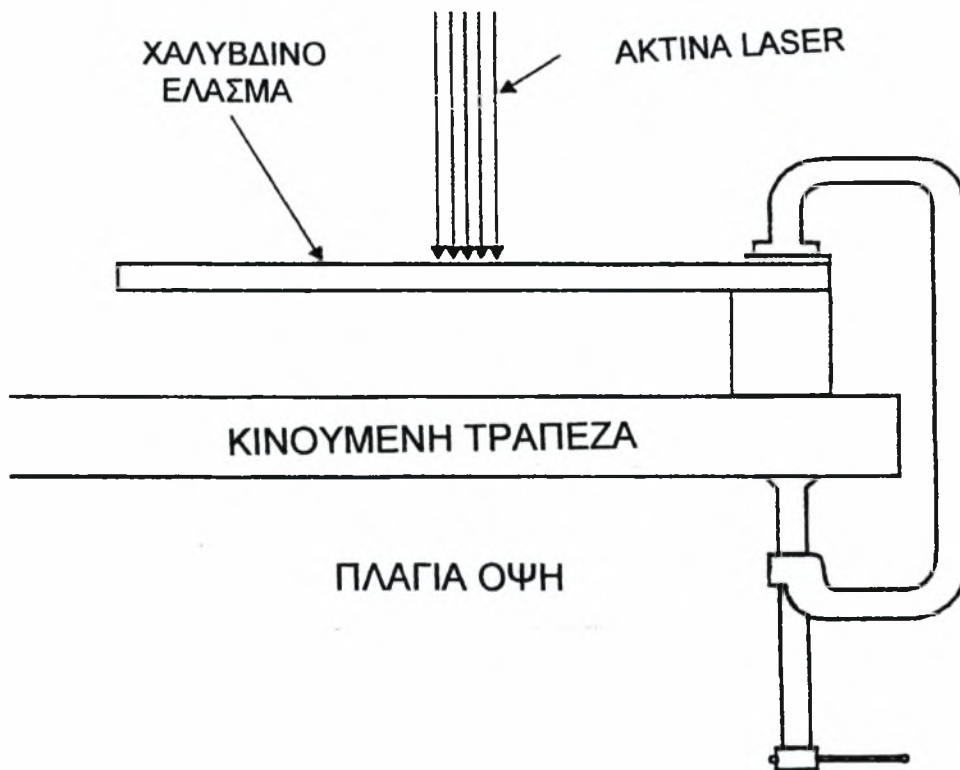
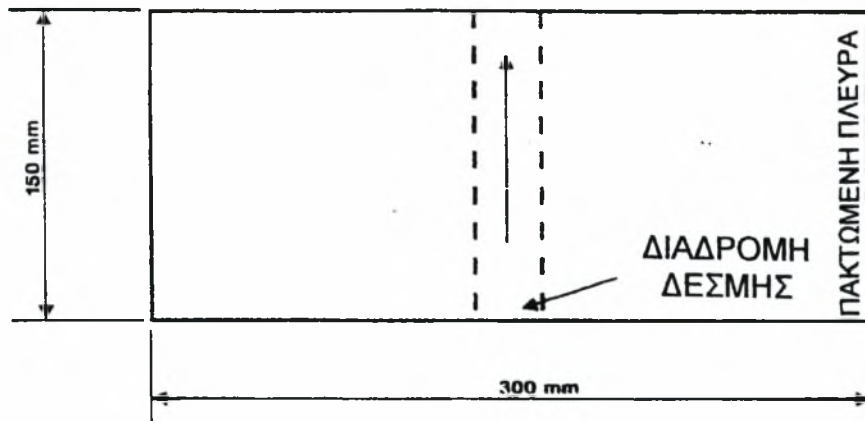
Η μελέτη αυτή αφορά την μορφοποίηση δύο σειρών τεμαχίων, που αποτελούνται από εννιά τεμάχια η κάθε μία. Η πρώτη σειρά μορφοποιήθηκε από την ΕΒΕΤΑΜ και η δεύτερη από το ΙΤΕ/LIC. Χρησιμοποιήθηκαν απλές γεωμετρίες, δηλαδή χαλύβδινα ελάσματα με διαστάσεις 300X150mm και δύο διαφορετικά πάχη : 4 και 6mm. Για την μορφοποίηση χρησιμοποιήθηκε LASER CO₂ με μέγιστη ισχύ 3KW. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα δοκίμια καθώς και για τις παραμέτρους της δέσμης που επιλέχθηκαν κάθε φορά, φαίνονται στους πίνακες 1 και 2. Το έλασμα που πρόκειται να μορφοποιηθεί, πακτώνεται από την μια του πλευρά πάνω σε κινούμενη τράπεζα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Στην συνέχεια, αφού επιλεγούν οι παράμετροι της δέσμης, σαρώνεται η επιφάνεια του ελάσματος από άκρη σε άκρη, οπότε και θερμαίνεται, με σκοπό την επιθυμητή μορφοποίησή του, δηλαδή την κάμψη του. Κατά την σάρωση, η δέσμη παραμένει ακίνητη ενώ κινείται η τράπεζα με το έλασμα. Οι παράμετροι της δέσμης που μπορούν να μεταβληθούν είναι η ισχύς, η ταχύτητα σάρωσης και η διάμετρος της. Κατά την διάρκεια της κατεργασίας, στην αρχή παρατηρείται μία μικρή αρνητική κάμψη του ελάσματος, η οποία στην συνέχεια γίνεται θετική και ολοκληρώνεται στο τέλος της διαδικασίας. Η τελική γωνία κάμψης, η οποία μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους, επιτυγχάνεται είτε με ένα είτε με πολλά διαδοχικά βήματα. Στο τέλος, το δοκίμιο αφήνεται να ψυχθεί στο περιβάλλον. Σε άλλες περιπτώσεις θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ψύξη με νερό ή κάποιο έλαιο. Μετά την μορφοποίηση, κάποια δοκίμια υπέστησαν και την δοκιμή του εφελκυσμού.

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ	ΙΣΧΥΣ [W]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ [mm/min]	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΕΣΜΗΣ [mm]	ΒΑΘΟΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ [mm]	ΣΧΟΛΙΑ
6	6	4	1500	320	16	0.7	ΤΗΞΗ
7	6	6	1500	200	16	0.7	ΤΗΞΗ
8	6	6	1500	320	16	0.4	ΤΗΞΗ
9	6	6	1500	200	16	0.6	ΤΗΞΗ
10	6	1	1500	120	31.8	-	ΤΗΞΗ
10	6	1	1500	100	31.8	-	ΤΗΞΗ
10	6	1	1500	80	31.8	-	ΤΗΞΗ
10	6	1	1500	40	31.8	ΣΥΝΟΛΟ: 0.0	ΤΗΞΗ
11	6	1	1500	1000	4	0.3	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΗΞΗ
12	6	1	1500	3200	4	0.3	ΚΑΘΟΛΟΥ ΤΗΞΗ
13	4	3	1500	400	16	0.5	-
13	4	3	1500	400	16	0.5	ΣΑΡΩΣΗ 8mm ΠΙΟ ΔΕΞΙΑ
13	4	3	1500	400	16	0.5	ΣΑΡΩΣΗ 8mm ΠΙΟ ΑΡΙΣΤΕΡΑ
14	4	3	1500	600	16	0.4	-

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Παράμετροι δέσμης- παρατηρήσεις για την πρώτη σειρά δοκιμών

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ	ΙΣΧΥΣ [W]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ [mm/min]	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΕΣΜΗΣ [mm]	ΒΑΘΟΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ [mm]	ΣΧΟΛΙΑ
Lic 4	6	1	2000	450	8	0.4	-
Lic 6	6	1	2000	450	8	-	ΚΑΜΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΥΛΙΚΟ
Lic 8	6	1	2000	450	8	-	ΚΑΜΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΥΛΙΚΟ
Lic 9	6	1	2000	450	8	0.4	-
Lic 10	6	1	2000	450	8	0.5	-
Lic 23	6	1	3000	900	16	0.3	-
Lic 24	6	1	3000	1200	16	0.2	-
Lic 25	6	1	1500	150	16	0.7	-
Lic 26	6	1	1500	600	16	-	ΚΑΜΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΥΛΙΚΟ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Παράμετροι δέσμης- παρατηρήσεις για την δεύτερη σειρά δοκιμών



ΣΧΗΜΑ 1: Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης, κατά την μορφοποίηση με laser.

4.2. ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ

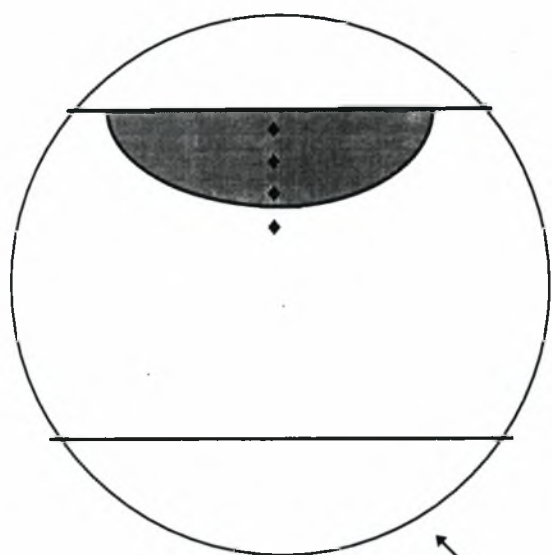
4.2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεταλλογραφική μελέτη είναι μια πολύ χρήσιμη μέθοδος που μας δίνει την δυνατότητα της οπτικής παρατήρησης της δομής του υλικού, σε μικροσκοπικό επίπεδο. Μια τέτοια δυνατότητα, είναι πολύ σημαντική γιατί μας επιτρέπει να αναγνωρίζουμε την δομή του υλικού (φάσεις, ενδομεταλλικές ενώσεις κ.τ.λ) ή να εντοπίζουμε στο υλικό περιοχές με ανεπιθύμητη δομή άρα και ανεπιθύμητες ιδιότητες, που πιθανόν να πρέπει να αλλάξουν. Φυσικά, για να φτάσουμε σε αυτό το επίπεδο της παρατήρησης, το δοκίμιο χρειάζεται μια προετοιμασία.

4.2.2. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ

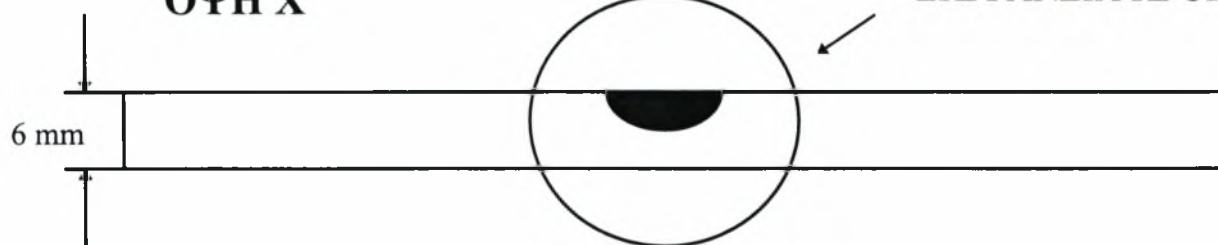
Η προετοιμασία του δοκιμίου περιλαμβάνει κάποια συγκεκριμένα στάδια, που γίνονται με την σειρά που θα περιγραφούν παρακάτω :

- Το πρώτο στάδιο είναι η κοπή από το αρχικό τεμάχιο, ενός δείγματος μικρού σε μέγεθος, για να είναι εύκολη η μετακίνηση και η περαιτέρω επεξεργασία του. Η κοπή γίνεται σε εργαστηριακό επίπεδο και δεν υπάρχει κίνδυνος «αλλοίωσης» της δομής του υλικού, είτε από πλαστική παραμόρφωση, είτε από ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών. Το τμήμα του ελάσματος που μας ενδιαφέρει βρίσκεται στην περιοχή που ακτινοβολήθηκε και περιγράφεται παραστατικά στο σχήμα 2. Η δε επιφάνεια που μελετάται, είναι η κάθετη σε αυτή που ακτινοβολήθηκε (σχήμα 2).
- Το επόμενο στάδιο, είναι το στάδιο του εγκιβωτισμού. Κατά το στάδιο αυτό, το δοκίμιο εγκλωβίζεται μέσα σε κάποιο σκληρό υλικό και μένει εκτεθειμένη μόνο η επιφάνεια που πρόκειται να μελετηθεί. Το υλικό του εγκιβωτισμού συνήθως είναι ρητίνη ή βακελίτης. Το στάδιο αυτό εκτελείται με σκοπό να καταστήσουμε το δοκίμιο πιο εύκολο στη συγκράτηση.
- Η συνέχεια αφορά το στάδιο της λείανσης και στίλβωσης του μετάλλου. Το στάδιο αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της εικόνας που θα εμφανιστεί στο μικροσκόπιο. Η λείανση της επιφάνειας γίνεται σε διαδοχικά στάδια.

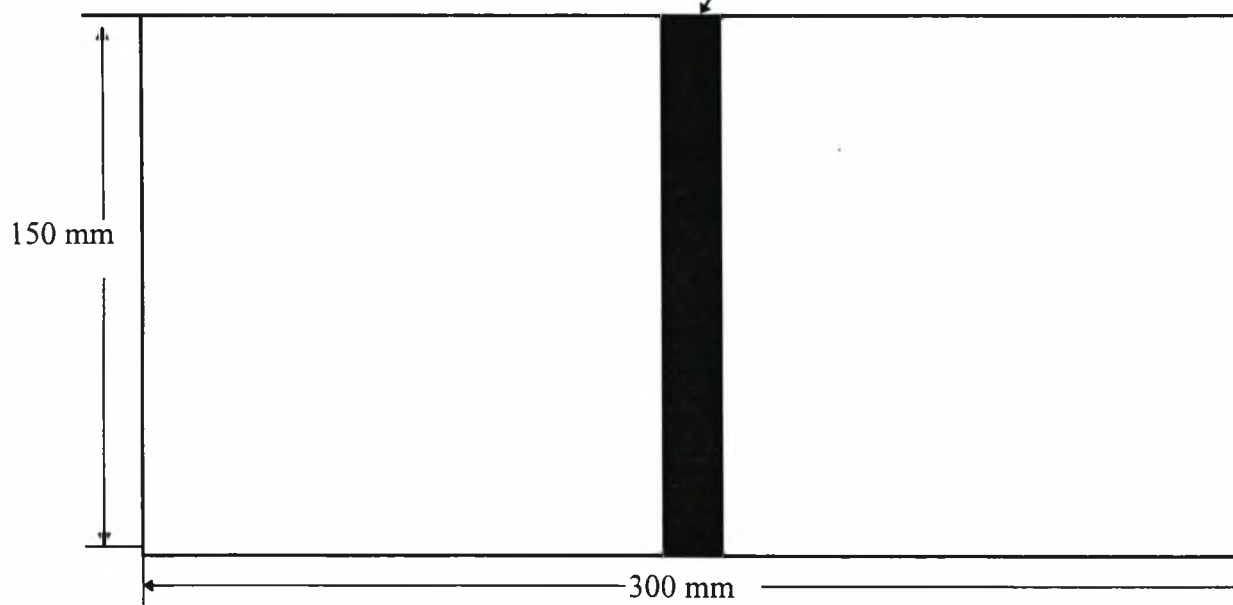


ΟΨΗ Χ

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ



ΑΠΟΤΥΠΙΩΜΑ ΔΕΣΜΗΣ



ΟΨΗ Χ

ΣΧΗΜΑ 2: Η επιφάνεια του ελάσματος που μελετήθηκε.

Αρχικά, γίνεται εκχόνδριση σε λειαντικούς τροχούς με μεγάλη διάμετρο. Στην αρχή, γίνεται εκχόνδριση του δοκιμίου, σε λειαντικό τροχό με μεγάλο μέγεθος κόκκου και στη συνέχεια αποπεράτωση σε άλλους τροχούς με ολοένα φθίνουσα διάμετρο κόκκου. Στο τελικό στάδιο, η στίλβωση της επιφάνειας γίνεται σε ειδικούς στιλβωτικούς τροχούς με διαμάντι, διαμέτρου κόκκου 1μm. Καθ'όλη την διάρκεια της λείανσης, το τεμάχιο ψύχεται διαρκώς με νερό.

- Αφού καθαρισθεί η επιφάνεια από το στάδιο της στίλβωσης, είναι έτοιμη για την χημική προσβολή. Αυτό είναι το στάδιο που θα κάνει δυνατή την παρατήρηση της δομής στο μικροσκόπιο, για αυτό πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή. Λούζεται η επιφάνεια του υλικού με διάλυμα Nitral 5% (διάλυμα 5% HNO_3 σε αλκοόλη) και αφήνεται να διαβρώσει την επιφάνεια για περίπου 10" και στην συνέχεια η επιφάνεια πλένεται διακόπτοντας την προσβολή. Επειδή το υλικό αποτελείται από διαφορετικές φάσεις που παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση στην διάβρωση από το χημικό διάλυμα, κάποιες περιοχές διαβρώνονται περισσότερο από κάποιες άλλες και αυτό επιτρέπει τον διαχωρισμό τους στο φως του μικροσκοπίου. Ο ρόλος της στίλβωσης είναι να επιτρέψει την διάβρωση να ξεκινήσει από το ίδιο επίπεδο για όλες τις περιοχές του υλικού.
- Το δοκίμιο είναι τώρα έτοιμο για παρατήρηση στο μικροσκόπιο. Αυτή η εργασία γίνεται σε ένα οπτικό μικροσκόπιο με δυνατότητα μεγένθυσης μέχρι 1000 φορές.
- Τέλος, τραβήχτηκαν και αρκετές φωτογραφίες της μικροδομής του υλικού, η εμφάνιση και εκτύπωση των οποίων έγινε επίσης στο εργαστήριο.

4.2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από την παρατήρηση των επιφανειών των δοκιμίων προκύπτουν κάποιες γενικές πληροφορίες που αφορούν όλα τα δοκίμια:

- Η θερμοεπηρεασμένη περιοχή έχει την μορφή τόξου (φωτογραφίες 1,2) και αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κάμψη όλων των ελασμάτων προκλήθηκε από τον μηχανισμό θερμοκρασιακής διαβάθμισης (thermal gradient, βλ. 3.3.2.).
- Παρατηρείται η ύπαρξη τριών ζωνών διαφορετικής μικροδομής (σχήμα 6), όπου το πλάτος κάθε μίας μεταβάλλεται από δοκίμιο σε δοκίμιο ανάλογα με τις συνθήκες μορφοποίησης (φωτογραφία 3):

ΖΩΝΗ 1: Η περιοχή αυτή βρίσκεται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια που ακτινοβολήθηκε και φαίνεται στο πάνω μέρος της φωτογραφίας 3. Το υλικό της περιοχής αυτής είναι μαρτενσίτης. Ο μαρτενσίτης είναι μια ιδιαίτερα σκληρή φάση του κράματος Fe-C, που βρίσκεται εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας.

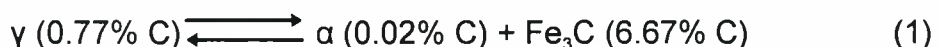
Για να πάρουμε αυτή την φάση πρέπει να γίνουν κάποια συγκεκριμένα βήματα κατά την θερμική κατεργασία του χάλυβα. Αρχικά, θερμαίνουμε το υλικό ώστε να περάσει στην φάση του ωστενίτη (Fe- γ) και αυτό γίνεται σε θερμοκρασία πάνω από 727 °C (σχήμα 3). Επιθυμούμε αυτή την φάση του σιδήρου γιατί το κρυσταλλικό του πλέγμα (fcc) αφήνει μεγαλύτερες θέσεις παρεμβολής και μπορεί να δεχτεί περισσότερο άνθρακα στο πλέγμα του. Στη συνέχεια, ψύχεται απότομα το υλικό (βαφή) σε θερμοκρασία που καθορίζεται από τις ιδιότητές του και είναι από 400 °C μέχρι και κάτω από το μηδέν. Η ψύξη γίνεται σε νερό ή σε ειδικά έλαια και πρέπει να γίνει με τέτοια ταχύτητα (>500 °C/sec) ώστε η καμπύλη ψύξης να μην περάσει από την περλιτική «μύτη» (σχήμα 4). Με την απότομη ψύξη, σχηματίζεται Fe- α , ο οποίος έχει κρυσταλλικό πλέγμα bcc, λιγότερων θέσεων παρεμβολής από το fcc, με αποτέλεσμα να εγκλωβιστεί ο επιπλέον άνθρακας μέσα στο πλέγμα, που παραμορφώνεται. Αυτή η φάση του σιδήρου με το παραμορφωμένο πλέγμα λόγω του πλεονάζοντος άνθρακα, λέγεται μαρτενσίτης (φωτογραφίες 4,5). Ο μαρτενσίτης οφείλει την μεγάλη σκληρότητά του σε αυτόν τον επιπλέον άνθρακα, που δεν μπορεί να αποβληθεί από το υλικό γιατί η διάχυσή του γίνεται με απειροελάχιστη ταχύτητα λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας.

Όλη αυτή η διαδικασία, που τις περισσότερες φορές γίνεται ηθελημένα για πάρουμε αυτή την δομή, στην περίπτωση της μορφοποίησης με laser είναι μια ανεπιθύμητη διαδικασία, σε περίπτωση που η θερμοκρασία της επιφάνειας πλησιάσει τέτοιες θερμοκρασίες, γιατί ο μαρτενσίτης είναι μια πολύ σκληρή φάση άρα και ψαθυρή και αυτό αποτελεί αιτία για την δημιουργία μικρορηγμάτων στο υλικό. Ο μαρτενσίτης δημιουργείται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που φτάνει η επιφάνεια, πολύ υψηλότερων από αυτές που φτάνει το υπόλοιπο υλικό. Μετά από την θέρμανση, η επιφάνεια ψύχεται με μεγάλη ταχύτητα (σχήμα 5), με την θερμότητα να ρέει προς την ψυχρή μάζα του υλικού, με αποτέλεσμα να πάρουμε τον μαρτενσίτη της ζώνης 1.

Κάτι άλλο που παρατηρείται στον μαρτενσίτη της ζώνης 1, είναι η ύπαρξη χονδρόκοκκου και λεπτόκοκκου υλικού. Αυτή η διαφορά φαίνεται στην φωτογραφία 6, όπου στο πάνω μέρος έχουμε χονδρόκοκκο μαρτενσίτη και στο

κάτω μέρος έχουμε λεπτόκοκκο. Το μέγεθος του κόκκου του μαρτενσίτη καθορίζεται από το μέγεθος του κόκκου του ωστενίτη από τον οποίο προέρχεται. Το μέγεθος του κόκκου του ωστενίτη καθορίζεται από τον χρόνο που θα παραμείνει το υλικό στην φάση του ωστενίτη. Έτσι, πολύ κοντά στην επιφάνεια το υλικό φτάνει σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλότερες της θερμοκρασίας μετασχηματισμού του ωστενίτη (σχήμα 3) και αυτό επιτρέπει στον κόκκο να αναπτυχθεί αρκετά κατά την παραμονή του στην φάση αυτή (φωτογραφίες 4,5). Λίγο πιο κάτω, οι θερμοκρασίες είναι τέτοιες που το υλικό μόλις περνά στην φάση του ωστενίτη και στην συνέχεια ψύχεται με την απομάκρυνση της δέσμης, οπότε δεν επιτρέπεται στο υλικό να αναπτύξει τους κόκκους σε μέγεθος (φωτογραφία 7). Έτσι εξηγείται η εικόνα που παρατηρείται στο μικροσκόπιο (φωτογραφία 6), όπου ο μαρτενσίτης παρουσιάζεται χονδρόκοκκος πολύ κοντά στην επιφάνεια και λεπτόκοκκος λίγο πιο κάτω.

ΖΩΝΗ 2: Βαθύτερα μέσα στο υλικό, παρουσιάζεται μια περιοχή που αποτελείται από μείγμα φάσεων μαρτενσίτη – περλίτη (φωτογραφίες 8,9). Ο περλίτης είναι ένα μίγμα φάσεων του κράματος Fe-C και ο κόκκος του αποτελείται από φύλλα φερρίτη και σεμεντίτη (λαμελική δομή) που είναι διευθετημένα εναλλάξ μέσα σε αυτόν. Αποτελεί τις σκούρες περιοχές στις φωτογραφίες. Ο φερρίτης είναι σχεδόν καθαρός σίδηρος-α με πολύ μικρό ποσοστό άνθρακα (0.0218%), ενώ ο σεμεντίτης είναι μία μεταλλική ένωση του σιδήρου με τύπο Fe₃C, που σχηματίζεται γιατί ο άνθρακας δεν μπορεί να μετασχηματισθεί εύκολα σε γραφίτη. Ο περλίτης σχηματίζεται κατά την αργή ψύξη του χάλυβα και περιγράφεται από μια εξίσωση μετασχηματισμού, που για να πραγματοποιηθεί χρειάζεται μία συγκεκριμένη θερμοκρασία (727 °C) και μία συγκεκριμένη σύσταση του χάλυβα σε άνθρακα (0.77%) και ονομάζεται ευτηκτοειδής αντίδραση. Η ευτηκτοειδής αντίδραση είναι :



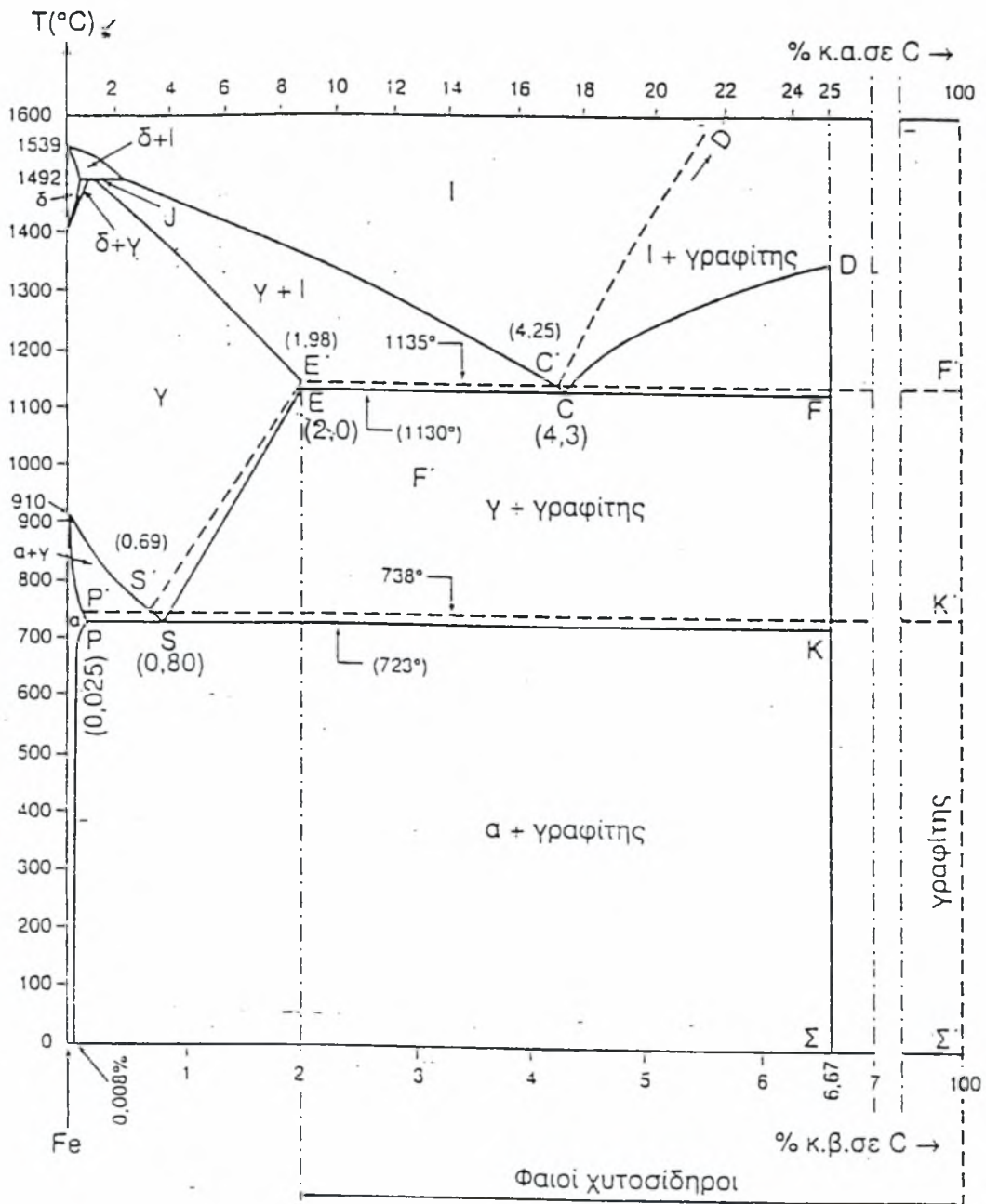
Μετά την θέρμανση από την δέσμη, η περιοχή της ζώνης 2 περνάει στην ωστενιτική φάση, όπως και η ζώνη 1, όμως ο ρυθμός ψύξης της είναι πιο αργός (σχήμα 5) λόγω της ροής θερμότητας από την επιφάνεια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η καμπύλη ψύξης της ζώνης 2 να έχει πιο μεγάλη κλίση και να περνάει μέσα από την περλιτική «μύτη» (σχήμα 4). Η καμπύλη του σχήματος 4

οριοθετεί την έναρξη του περλιτικού μετασχηματισμού, οπότε η διέλευση μέσα από αυτή επιτρέπει την πυρήνωση της φάσης του περλίτη σε κάποιες περιοχές, ενώ ο υπόλοιπος ωστενίτης μετατρέπεται σε μαρτενσίτη (ανοιχτόχρωμες περιοχές στις φωτογραφίες 8 και 9) και παίρνουμε τελικά την μικτή δομή της ζώνης 2.

Η δομή της ζώνης 2 παρουσιάζεται λεπτόκοκκη και για τις δύο φάσεις. Ο μαρτενσίτης είναι λεπτόκοκκος γιατί το υλικό δεν παραμένει πολύ μέσα στην ωστενιτική περιοχή, οπότε δεν αναπτύσσεται και ο κόκκος του ωστενίτη. Ο περλίτης πάλι, σχηματίζεται κατά την παραμονή του για μικρό χρονικό διάστημα πέρα από την καμπύλη έναρξης του περλιτικού μετασχηματισμού και αυτό επιτρέπει την πυρήνωση του αλλά όχι την περαιτέρω ανάπτυξη του κόκκου. Μια τελική παρατήρηση είναι ότι προς το τέλος της ζώνης 2 παρατηρείται διαφοροποίηση στις συσχετίσεις μεταξύ των δύο φάσεων. Δηλαδή, είναι εμφανής μια σταδιακή αύξηση του ποσοστού του περλίτη στο μίγμα και μία μείωση του αντίστοιχου ποσοστού του μαρτενσίτη. Αυτό δημιουργείται από τους διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης στρωμάτων διαφορετικού βάθους.

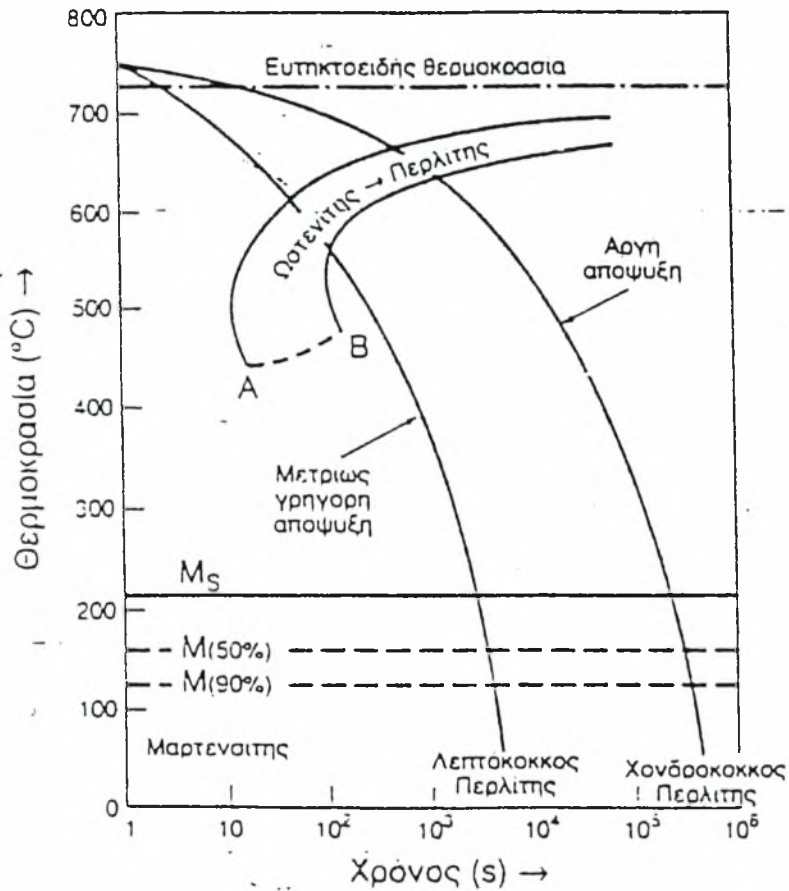
ΖΩΝΗ 3: Η ζώνη αυτή βρίσκεται έξω από την θερμοεπηρεασμένη περιοχή και αποτελεί το μητρικό υλικό με την γνωστή δομή φερρίτη-περλίτη (φωτογραφία 10). Η δομή αυτή αποτελείται από περιοχές με φερρίτη, που φαίνονται ανοιχτόχρωμες στην φωτογραφία και περιοχές με περλίτη, με την λαμελική διεύθυνση που περιγράφηκε παραπάνω, που φαίνονται σκουρόχρωμες.

- Τέλος, η μεταλλογραφική μελέτη έδειξε ότι τα δοκίμια 10, Lic 6, Lic 8 και Lic 26 δεν παρουσιάζουν καμία μεταβολή στην δομή τους, η οποία παραμένει όπως η αρχική δομή του D36. Το γεγονός αυτό οφείλεται συνήθως στις παραμέτρους της δέσμης που χρησιμοποιήθηκαν ή και σε άλλους παράγοντες όπως ο μειωμένος συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας του ελάσματος. Έτσι, μικρή ισχύς, μεγάλη διάμετρος δέσμης, μεγάλη ταχύτητα σάρωσης και γενικά τιμές των παραμέτρων που συντελούν στην μείωση της προσδιδόμενης θερμότητας, δεν επηρεάζουν σημαντικά το έλασμα ως προς την αλλαγή της δομής. Ειδικά στο δοκίμιο 10, υπήρξε το ίδιο αποτέλεσμα, παρά το γεγονός ότι προσδόθηκε μεγάλο ποσό θερμότητας. Αυτό συνέβη γιατί η πολύ χαμηλή ταχύτητα σάρωσης εμπόδισε το υλικό να ψυχθεί με μεγάλη ταχύτητα.

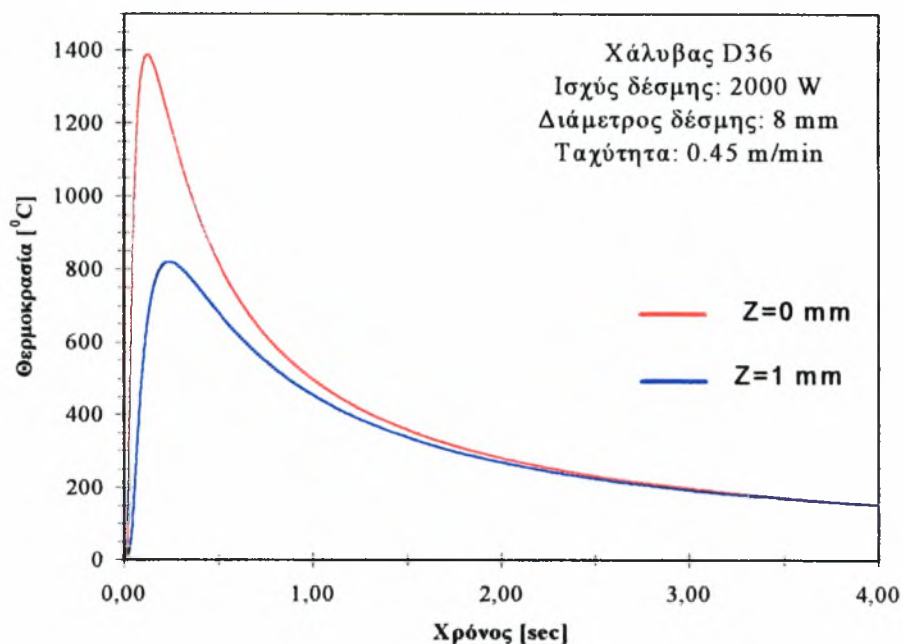


ΣΧΗΜΑ 3: Διμερές διάγραμμα φάσεων του κράματος Fe-C.

S: Ευτηκτοειδής αντίδραση

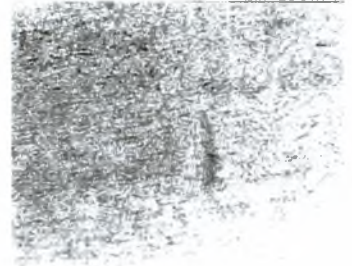


ΣΧΗΜΑ 4: Γενικό διάγραμμα T-T-T (Temperature-Time-Transformation). Η καμπύλη A οριοθετεί την έναρξη του περλιτικού μετασχηματισμού και η καμπύλη B το τέλος της. Μια καμπύλη ψύξης που θα αποφύγει την καμπύλη A δίνει δομή μαρτενσίτη.



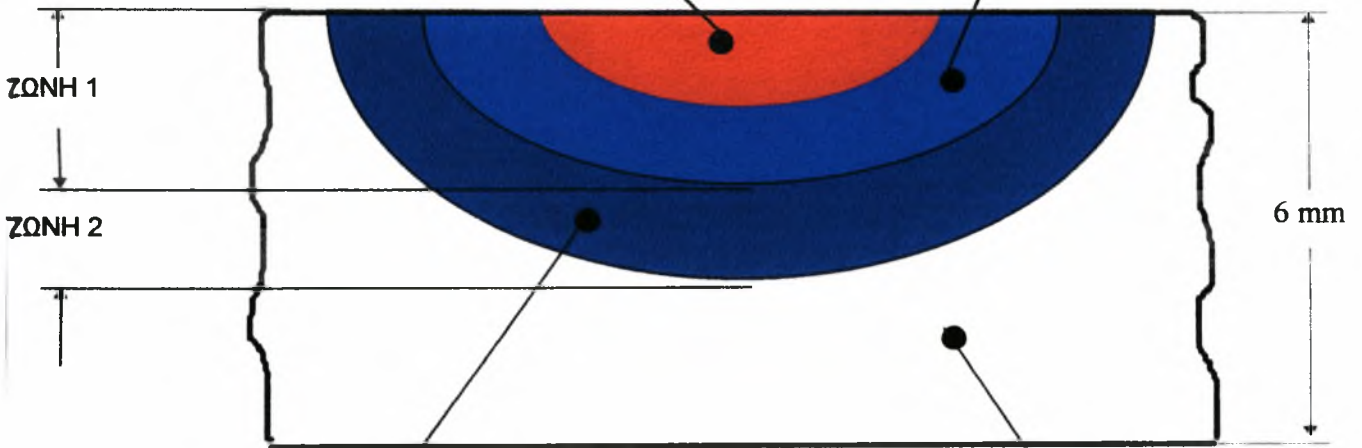
ΣΧΗΜΑ 5: Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται σε σύγκριση οι ρυθμοί ψύξης της επιφάνειας ($Z=0$ mm) και μίας περιοχής σε βάθος $Z=1$ mm, που αντιστοιχεί στην ζώνη 2. Από το διάγραμμα αυτό, είναι φανερό ότι η επιφάνεια φτάνει σε πολύ υψηλότερη θερμοκρασία από ότι τα βαθύτερα στρώματα και ψύχεται επίσης με πολύ υψηλότερη ταχύτητα, αφού σε 1'' οι θερμοκρασίες των δύο στρωμάτων έχουν σχεδόν εξομοιωθεί. Οι καμπύλες αυτές και οι παράμετροι της δέσμης αντιστοιχούν στο δοκίμιο Lic 9, όμως και τα υπόλοιπα δοκίμια παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.

ΣΧΗΜΑ 6: Σχηματική παράσταση των ζωνών διαφορετικής μικροδομής, μετά την γραμμική θέρμανση.



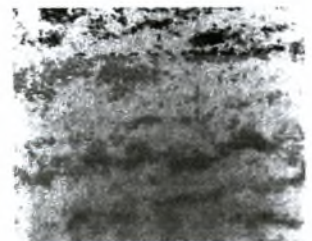
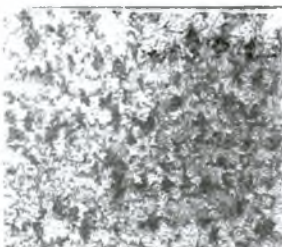
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟΣ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΗΣ
ΖΩΝΗ 1

ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟΣ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΗΣ
ΖΩΝΗ 1



ΜΙΓΜΑ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΗ-ΠΕΡΛΙΤΗ
ΖΩΝΗ 2

ΜΙΓΜΑ ΦΕΡΡΙΤΗ-ΠΕΡΛΙΤΗ
ΖΩΝΗ 3

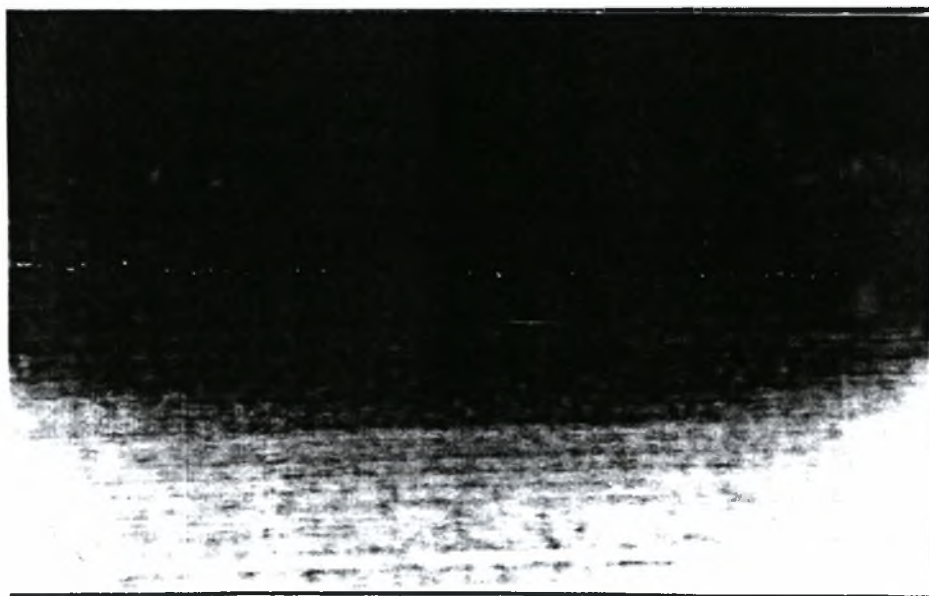


**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ D36
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ LASER.**

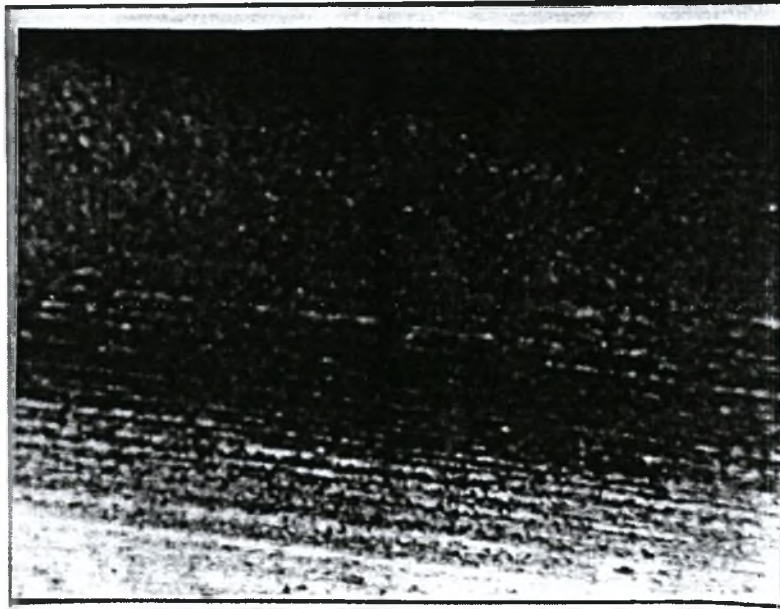
(Η επιφάνεια του ελάσματος που ακτινοβολήθηκε, παρουσιάζεται στο πάνω μέρος των φωτογραφιών)



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 1: Τοξοειδής μορφή της επηρεασμένης από το laser ζώνης.
Δοκίμιο Lic 24 (50x)



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 2: Τοξοειδής μορφή της επηρεασμένης ζώνης.
Δοκίμιο Lic 9 (100x)



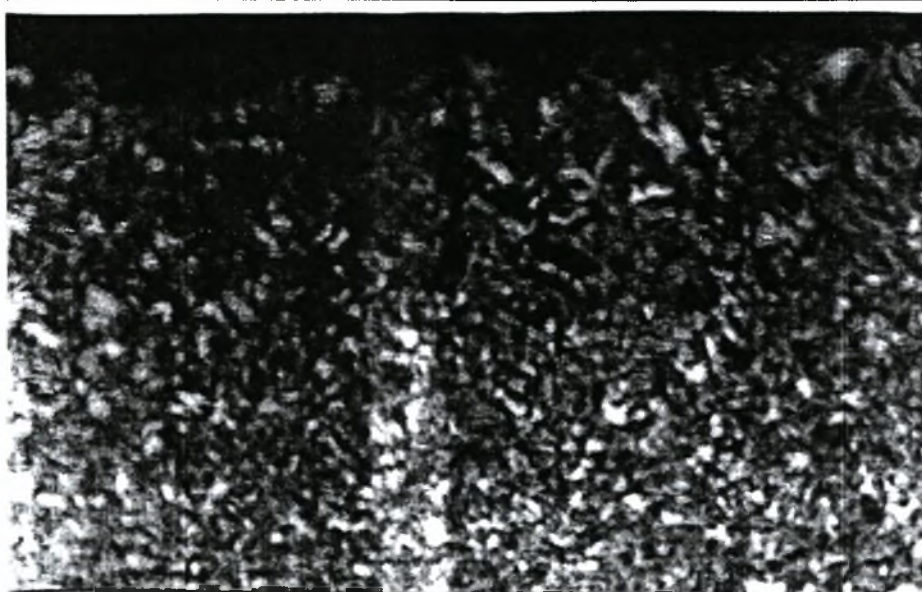
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 3: Δημιουργία ζωνών διαφορετικής μικροδομής. Από πάνω προς τα κάτω: ζώνη 1-μαρτενσίτης, ζώνη 2-μικτή δομή, ζώνη 3- μητρικό υλικό. Δοκίμιο Lic 25 (50x)



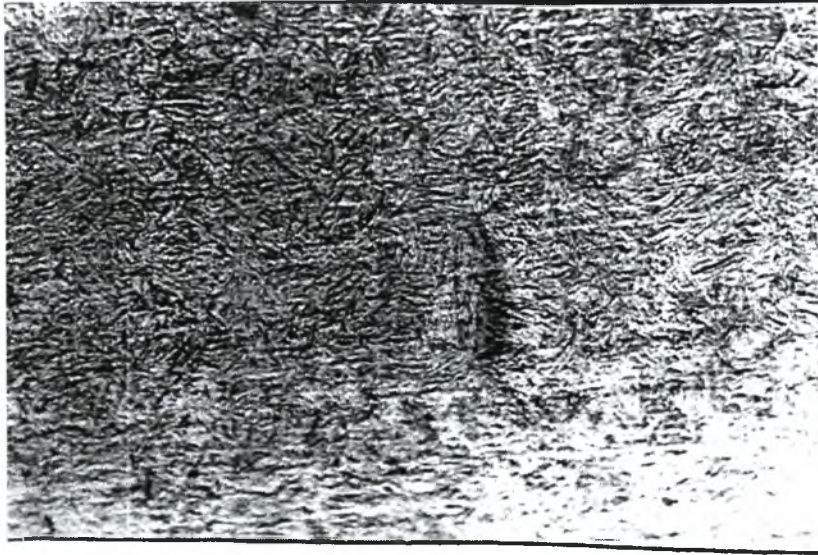
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 4: Χονδρόκοκκος μαρτενσίτης της ζώνης 1.
Δοκίμιο Lic 9 (500x)



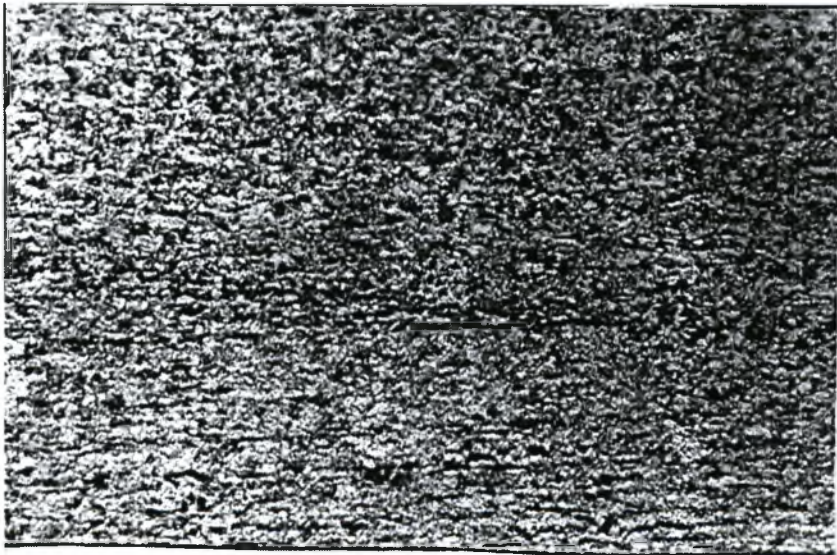
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 5: Χονδρόκοκκος μαρτενσίτης της ζώνης 1.
Δοκίμιο Lic 9 (1000x)



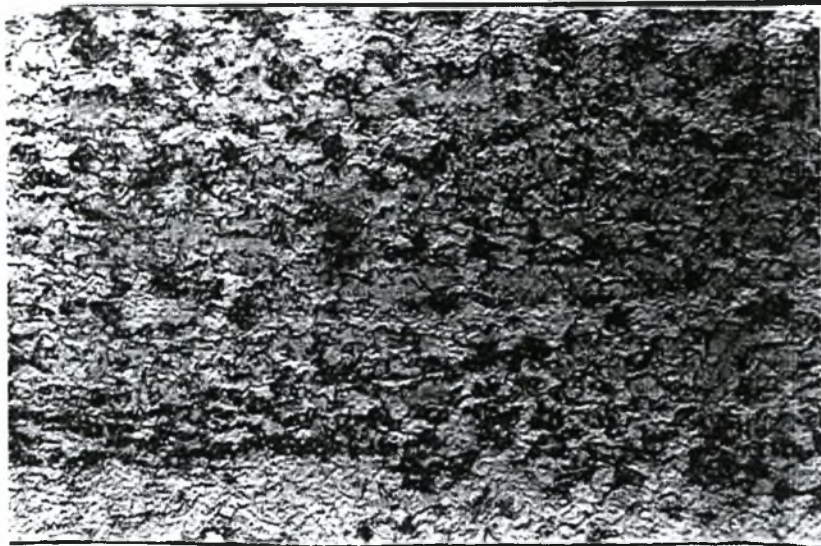
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 6: Μεταβολή του μαρτενσίτη από χονδρόκοκκο (πάνω) σε
λεπτόκοκκο (κάτω).
Δοκίμιο Lic 9 (200x)



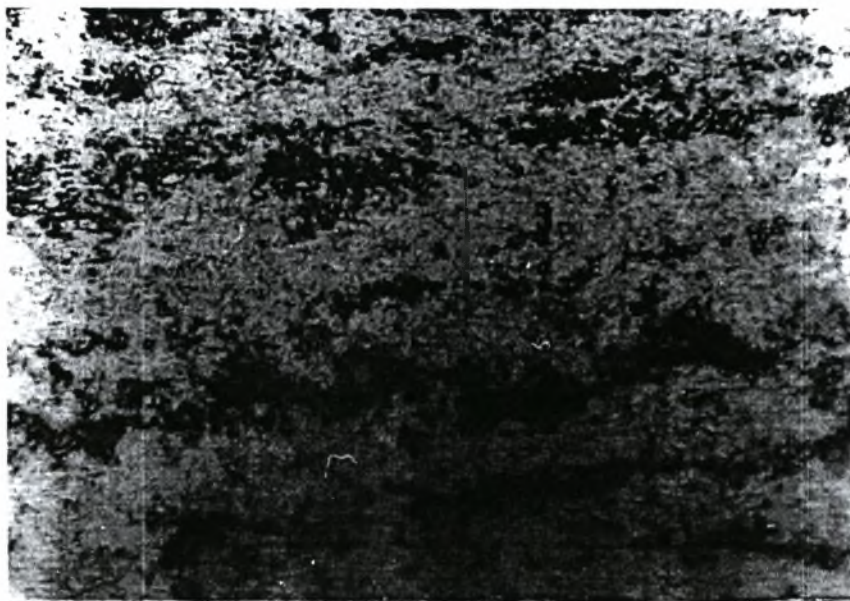
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 7: Λεπτόκοκκος μαρτενσίτης της ζώνης 1.
Δοκίμιο 8 (500x)



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 8: Ζώνη 2-μίγμα φάσεων μαρτενσίτη και περλίτη.
Δοκίμιο 11 (200x)



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 9: Ζώνη 2-μαρτενσίτης (ανοιχτές περιοχές) και περλίτης (σκούρες περιοχές).
Δοκίμιο 14 (500x)



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 10: Ζώνη 3-μητρικό υλικό. Φερρίτης (ανοιχτές περιοχές) και περλίτης (σκούρες περιοχές).
Δοκίμιο 8 (1000x)

4.3. ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ

4.3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μικροσκληρομέτρηση είναι μια δοκιμή που επιτρέπει την μέτρηση της σκληρότητας του υλικού σε ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειάς του, όπου μετράται ουσιαστικά η αντίσταση που παρουσιάζει το υλικό κατά την διείσδυση μέσα στην μάζα του ενός εντυπωτικού εργαλείου. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας του υλικού, όπως οι Knoop, Rockwell, Vickers. Στις μεθόδους αυτές, εφαρμόζεται ένα φορτίο κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου, που πιέζει αργά μέσα στην μάζα του ένα εντυπωτικό εργαλείο με σχήμα κώνου, σφαίρας ή πυραμίδας, κατασκευασμένο από υλικό σκληρότερο αυτού που δοκιμάζεται. Στην μελέτη αυτή θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Vickers.

4.3.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Στη μέθοδο Vickers χρησιμοποιείται εντυπωτής από διαμάντι, με σχήμα ισόπλευρης πυραμίδας και γωνία κορυφής 136° . Κατά την διαδικασία της μέτρησης, πιέζεται αργά η πυραμίδα από διαμάντι πάνω στο υλικό με ένα συγκεκριμένο βάρος που έχει προεπιλεγεί. Η διαδικασία της εντύπωσης (φόρτιση και αποφόρτιση), διαρκεί κάποιο χρονικό διάστημα που επίσης έχει προεπιλεγεί. Στο τέλος της διαδικασίας, παρατηρούμε πάνω στο υλικό το εντύπωμα του διαμαντιού, που είναι τετραγωνικού σχήματος. Τελικά, υπολογίζουμε την σκληρότητα του υλικού από μια εξίσωση που λαμβάνει υπ'όψιν τα μέτρα των διαγωνίων του τετραγωνικού εντύπωματος και το εφαρμοζόμενο βάρος. Η εξίσωση αυτή είναι :

$$VHN = 1.72P/d_1^2 \quad (2)$$

όπου P το φορτίο και d_1 η διάμετρος.

Για τις μετρήσεις που ακολουθούν, χρησιμοποιήθηκε μικροσκληρόμετρο HMV-2000, με την εξής διαδικασία:

- Αρχικά, επιλέγεται το βάρος που θα ασκηθεί πάνω στον εντυπωτή και ο χρόνος εντύπωσης. Για αυτές τις μετρήσεις επιλέχθηκε βάρος 100g και χρόνος εντύπωσης 10sec. Είναι προτιμότερο να γίνονται όλες οι μετρήσεις με τις ίδιες

παραμέτρους, γιατί είναι δυνατόν να επηρεασθούν οι τιμές σκληρότητας από κάποιες αλλαγές σε αυτές. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μετρήσεις συσχετίζονται με την πλαστική παραμόρφωση του υλικού και μία π.χ. αύξηση του βάρους εντύπωσης θα είχε ως αποτέλεσμα την περαιτέρω διείδυση του διαμαντιού στο υλικό, με φυσική συνέπεια την διαφορετική αντίδρασή του υλικού στην επιπλέον πλαστική παραμόρφωση και την πιθανή διαφοροποίηση των τιμών της σκληρότητας. Γενικά, όλες οι μεταβλητές που επηρεάζουν την πλαστική παραμόρφωση, επηρεάζουν και την μέτρηση της σκληρότητας. Έτσι, για να μην υπάρχουν αποκλίσεις στις μετρήσεις, πρέπει να ακολουθούνται ορισμένοι κανόνες : το πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι 10.5 φορές το βάθος της εντύπωσης, διαδοχικές μετρήσεις στο ίδιο δοκίμιο να απέχουν τουλάχιστον 3 διαγώνιους μιας εντύπωσης που έχει προηγηθεί, οι μετρήσεις να γίνονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 5mm από οποιαδήποτε ακμή του δοκιμίου.

- Τοποθετείται το δοκίμιο στην τράπεζα και με το μικροσκόπιο εντοπίζεται η περιοχή για την οποία θα γίνει μέτρηση της σκληρότητας, με βάση τους κανόνες που προαναφέρθηκαν. Λόγω του μικρού μεγέθους του διαμαντιού και της δυνατότητας επιλογής μικρού φορτίου εντύπωσης, μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια στην επιλογή της περιοχής που θα δικιμασθεί. Υπάρχει δυνατότητα μέτρησης μέχρι και συγκεκριμένου κόκκου του υλικού.
- Στη συνέχεια, τοποθετείται ο εντυπωτής πάνω από το δοκίμιο και ξεκινάει την διαδικασία της εντύπωσης.
- Μετά το τέλος της διαδικασίας, επαναφέρεται το μικροσκόπιο και ενημερώνεται το μικροσκληρόμετρο με δεδομένα για τις διαγώνιους του εντυπώματος. Αν και θεωρητικά οι διαγώνιες αυτές είναι ίσες, στην πραγματικότητα δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο και το μικροσκληρόμετρο υπολογίζει αυτομάτως την τιμή της σκληρότητας χρησιμοποιώντας τον μέσο όρο των τιμών των δύο διαγώνιων.

Για την συγκεκριμένη μελέτη, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές μετρήσεις για κάθε δοκίμιο, με βήμα 100μm (σχήμα 2), ξεκινώντας τις μετρήσεις από την επιφάνεια προς τα βαθύτερα στρώματα του υλικού.

4.3.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου, παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, με μορφή πινάκων και διαγραμμάτων, που δείχνουν την μεταβολή της σκληρότητας του υλικού από την επιφάνεια προς τα βαθύτερα στρώματα.

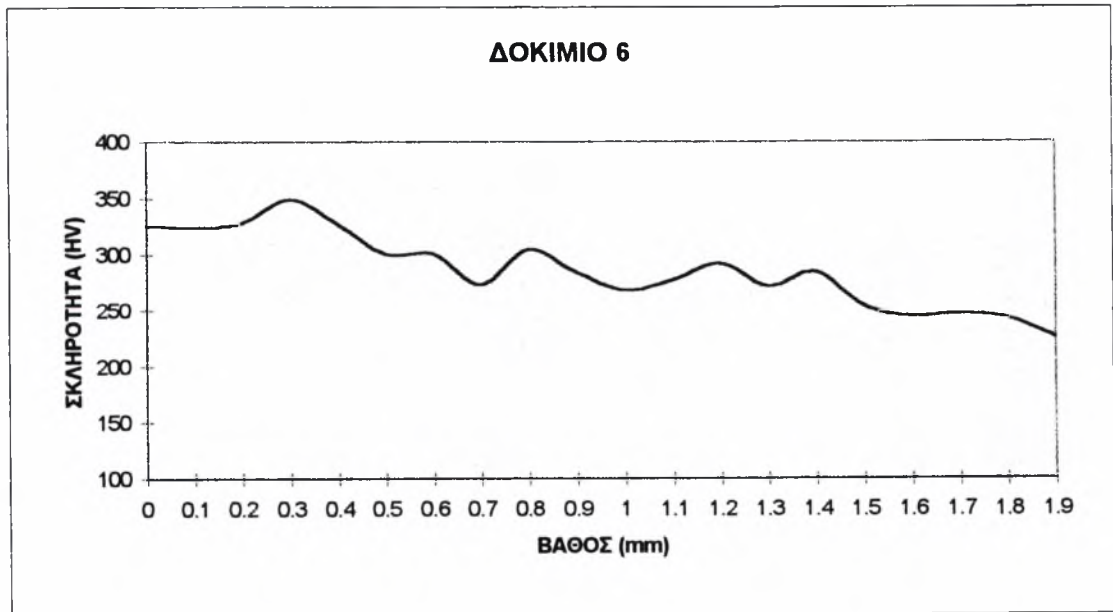
Τα περισσότερα διαγράμματα, παρουσιάζουν μια παρόμοια συμπεριφορά, που είναι αναμενόμενη με δεδομένη την μικροδομή των δοκιμίων. Κοντά στην επιφάνεια, το υλικό παρουσιάζει αυξημένη σκληρότητα σε σχέση με την σκληρότητα του μητρικού υλικού. Δηλαδή, ενώ η σκληρότητα του D36 είναι περίπου 225-230HV, οι μετρήσεις στην περιοχή αυτή μας δίνουν τιμές μέχρι και 492HV (δοκίμιο Lic 9). Αυτό οφείλεται στην παρουσία του μαρτενσίτη της ζώνης 1, που όπως έχει αναφερθεί είναι μια πολύ σκληρή φάση του χάλυβα. Αυτές οι τιμές εμφανίζονται μέχρι βάθος 0.1-0.2mm. Συνεχίζοντας τις μετρήσεις βαθύτερα μέσα στο υλικό – παραμένοντας πάντα στη ζώνη 1 – παρατηρείται μια περαιτέρω αύξηση της σκληρότητας, που φτάνει σε μερικά δοκίμια σε τιμές 510-516HV. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο μαρτενσίτης γίνεται πιο λεπτόκοκκος προς το τέλος της ζώνης 1. Προχωρώντας στη ζώνη 2, αρχίζει μια σταδιακή μείωση της σκληρότητας του υλικού. Η ζώνη 2 αποτελείται από μια μικτή φάση μαρτενσίτη-περλίτη. Η εμφάνιση του περλίτη οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην περιοχή αυτή έχει επιτραπεί κατά ένα μέρος η διάχυση του άνθρακα, με σκοπό την πυρήνωση της φάσης του αυτής. Άμεση συνέπεια είναι η απανθράκωση των περιοχών αυτών από τον επιπλέον άνθρακα, στον οποίο οφείλει ο μαρτενσίτης την αυξημένη σκληρότητά του. Τελικό αποτέλεσμα είναι να μετρούνται τιμές σκληρότητας που είναι μικρότερες από αυτές του καθαρού μαρτενσίτη, αλλά μεγαλύτερες του καθαρού περλίτη. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται μέχρι το τέλος της ζώνης 2, σε βάθος που φτάνει και τα 0.7mm για μερικά δοκίμια. Οι τιμές της σκληρότητας δεν παραμένουν σταθερές σε όλο το πλάτος της ζώνης 2, αλλά μειώνονται συνεχώς και κυμαίνονται σε ένα φάσμα 300-400HV. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα βαθύτερα στρώματα της ζώνης 2, ενώ έχουμε τις ίδιες φάσεις, αλλάζουν οι μεταξύ τους συσχετίσεις. Δηλαδή, αυξάνεται το ποσοστό της φάσης του περλίτη και μειώνεται το ποσοστό της φάσης του μαρτενσίτη, οπότε και οι τιμές της σκληρότητας πλησιάζουν αυτές του καθαρού περλίτη. Η μείωση της σκληρότητας συνεχίζεται κατά αυτόν τον τρόπο και όταν περάσουμε στην ζώνη 3, που αποτελείται από φερρίτη και περλίτη, μετρούνται τιμές πολύ κοντά στην τιμή του μητρικού υλικού, περίπου 225HV.

Μια τελική παρατήρηση είναι ότι δεν έχουν μετρηθεί αλλαγές στην σκληρότητα των δοκιμίων 10, Lic 6, Lic 8 και Lic 26, κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού σε αυτά τα δοκίμια δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές ούτε στην μικροδομή.

**ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ
ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΠΡΟΣ ΤΑ
ΒΑΘΥΤΕΡΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.**

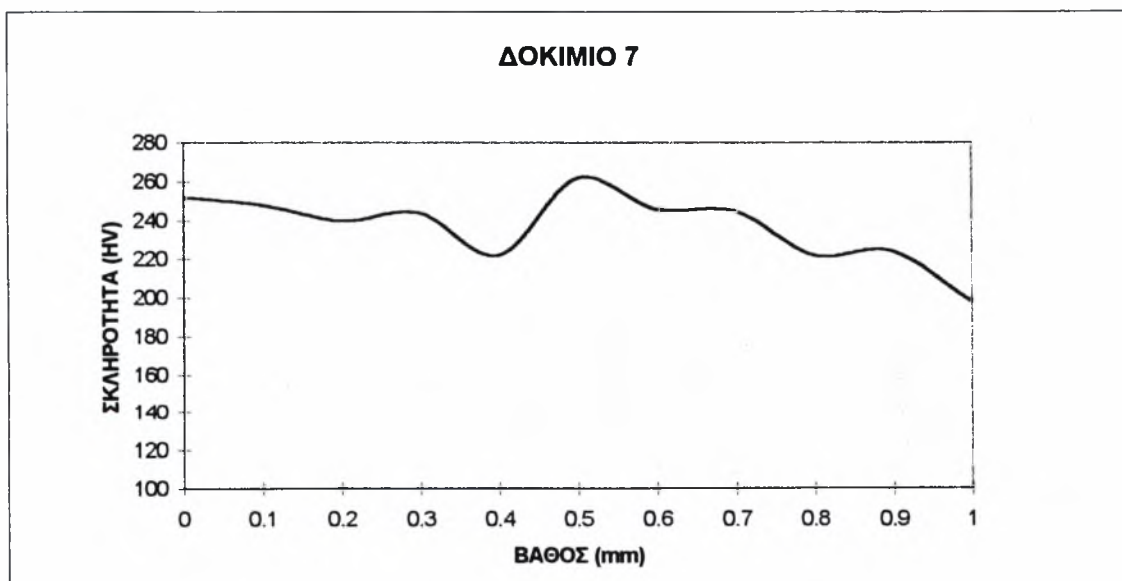
ΔΟΚΙΜΙΟ 6

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	326
0.1	324
0.2	328
0.3	349
0.4	327
0.5	301
0.6	301
0.7	274
0.8	305
0.9	284
1	269
1.1	278
1.2	292
1.3	272
1.4	285
1.5	254
1.6	245
1.7	248
1.8	243
1.9	226



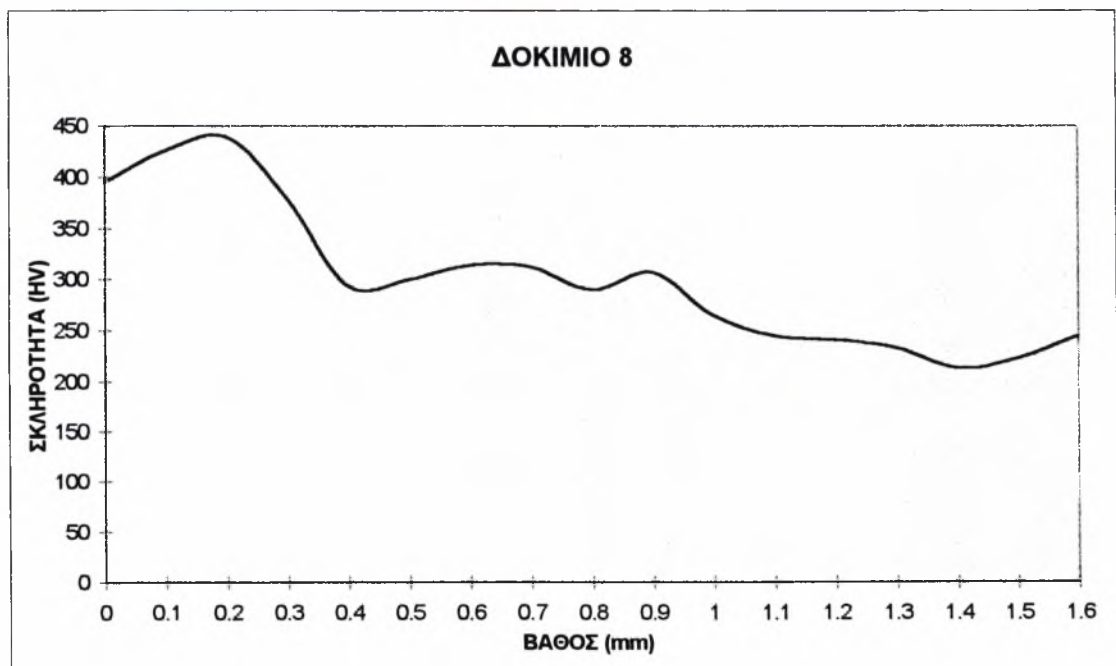
ΔΟΚΙΜΙΟ 7

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	252
0.1	248
0.2	240
0.3	244
0.4	222
0.5	262
0.6	246
0.7	245
0.8	222
0.9	224
1	198



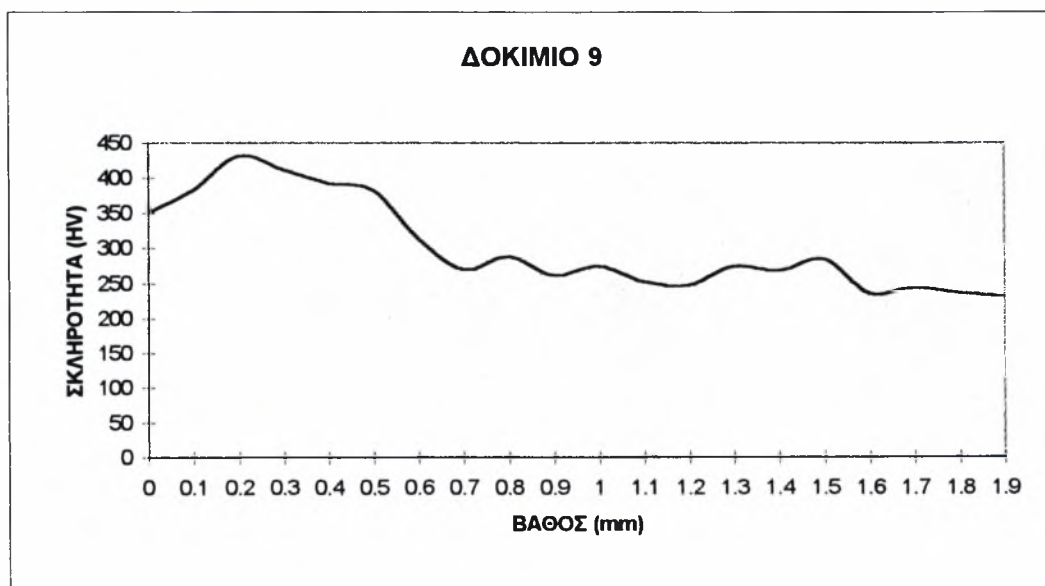
ΔΟΚΙΜΙΟ 8

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	395
0.1	426
0.2	439
0.3	379
0.4	294
0.5	300
0.6	314
0.7	312
0.8	290
0.9	307
1	265
1.1	245
1.2	241
1.3	233
1.4	213
1.5	223
1.6	245



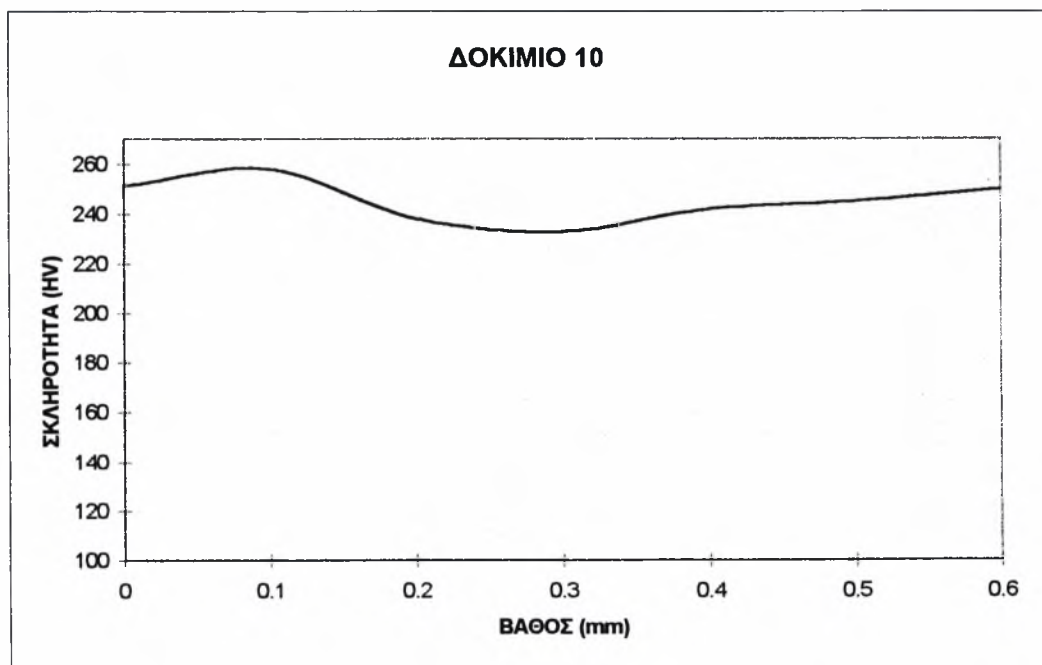
ΔΟΚΙΜΙΟ 9

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	350
0.1	383
0.2	432
0.3	412
0.4	393
0.5	383
0.6	314
0.7	270
0.8	288
0.9	262
1	275
1.1	253
1.2	248
1.3	275
1.4	268
1.5	285
1.6	236
1.7	244
1.8	237
1.9	231



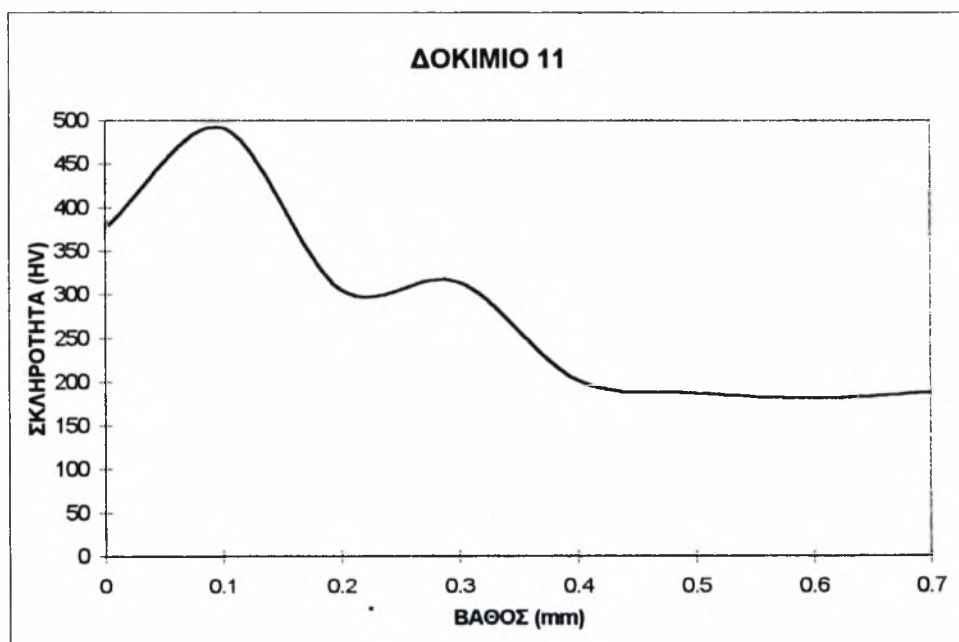
ΔΟΚΙΜΙΟ 10

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	251
0.1	258
0.2	238
0.3	233
0.4	242
0.5	245
0.6	250



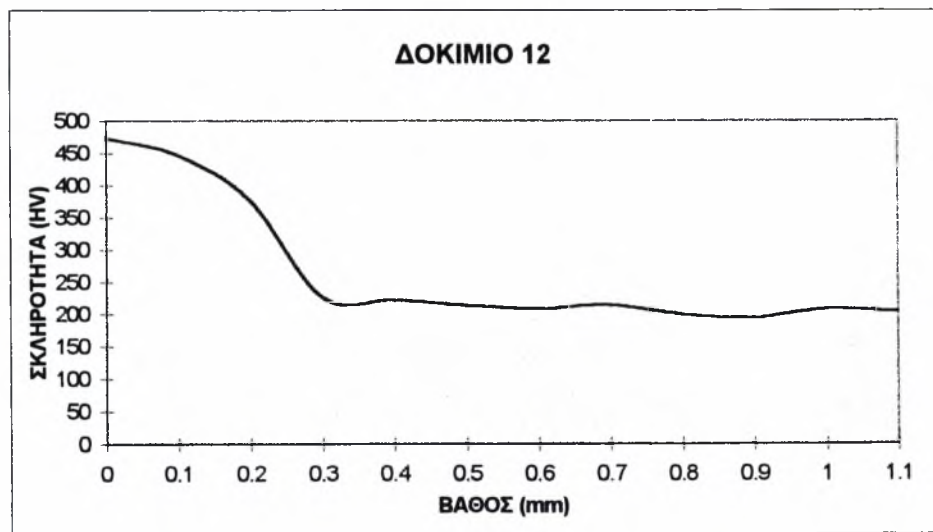
ΔΟΚΙΜΙΟ 11

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	376
0.1	492
0.2	306
0.3	314
0.4	202
0.5	187
0.6	181
0.7	188



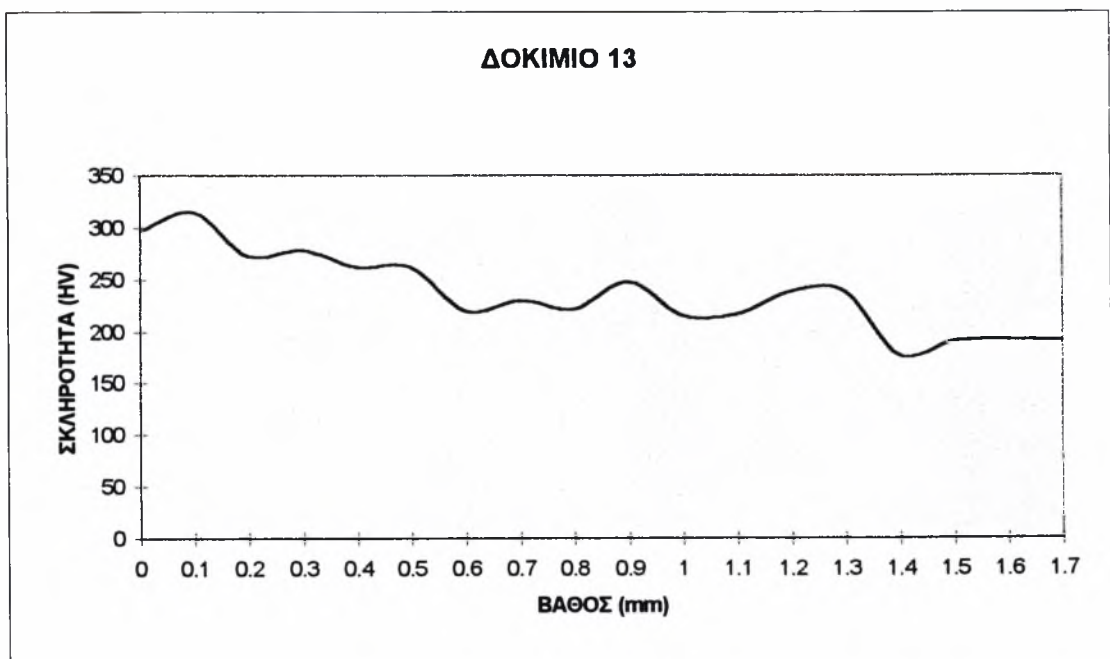
ΔΟΚΙΜΙΟ 12

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	473
0.1	447
0.2	377
0.3	226
0.4	222
0.5	213
0.6	208
0.7	214
0.8	199
0.9	194
1	208
1.1	204



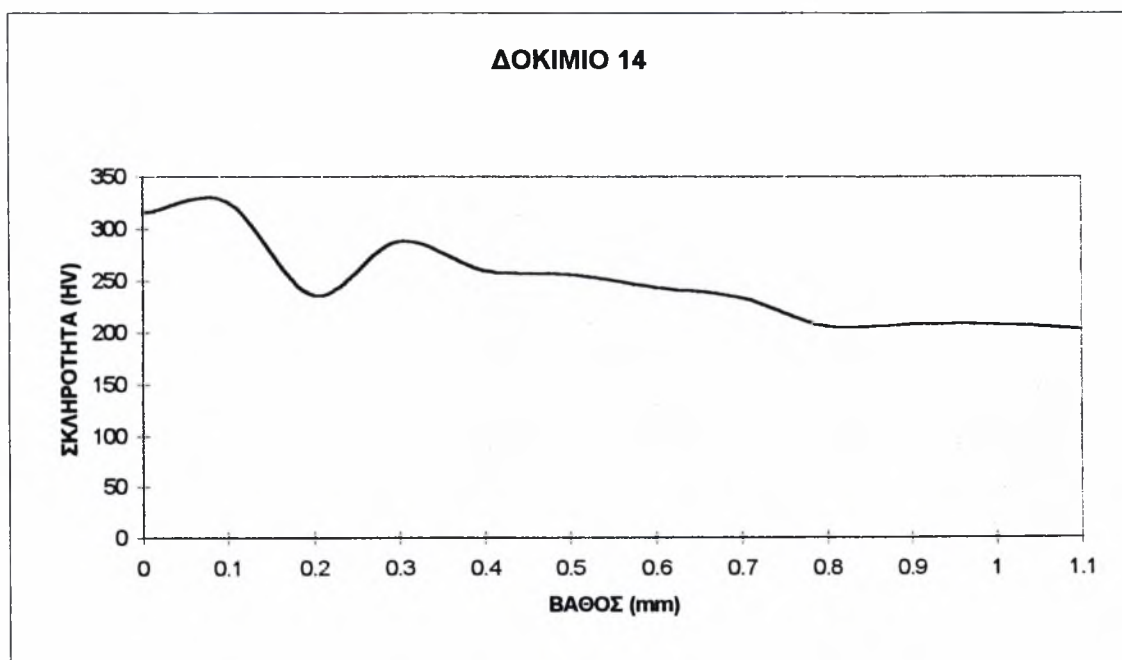
ΔΟΚΙΜΙΟ 13

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	297
0.1	315
0.2	273
0.3	278
0.4	262
0.5	262
0.6	220
0.7	230
0.8	222
0.9	248
1	216
1.1	217
1.2	239
1.3	239
1.4	177
1.5	191
1.6	193
1.7	192



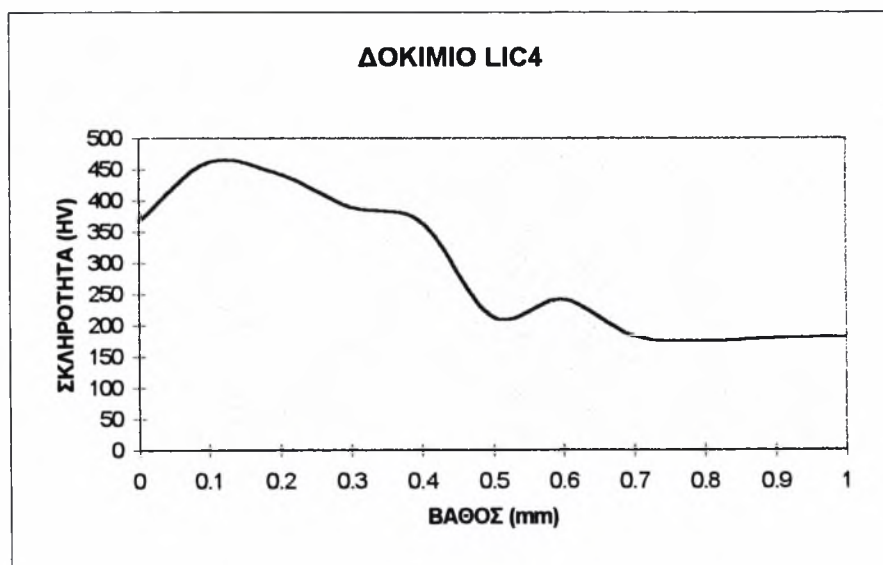
ΔΟΚΙΜΙΟ 14

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	315
0.1	326
0.2	236
0.3	288
0.4	260
0.5	256
0.6	244
0.7	234
0.8	206
0.9	208
1	208
1.1	203



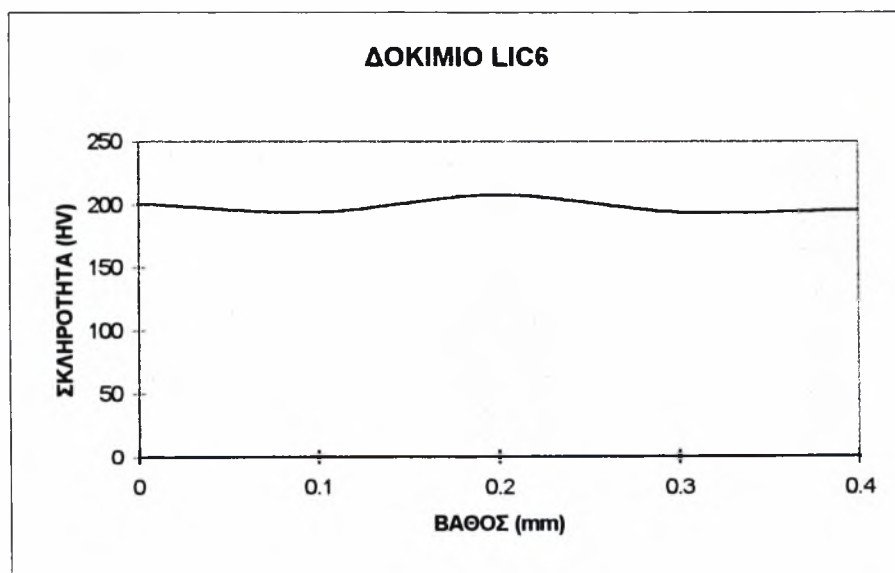
ΔΟΚΙΜΙΟ LIC4

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	367
0.1	461
0.2	443
0.3	390
0.4	366
0.5	214
0.6	242
0.7	183
0.8	175
0.9	180
1	181



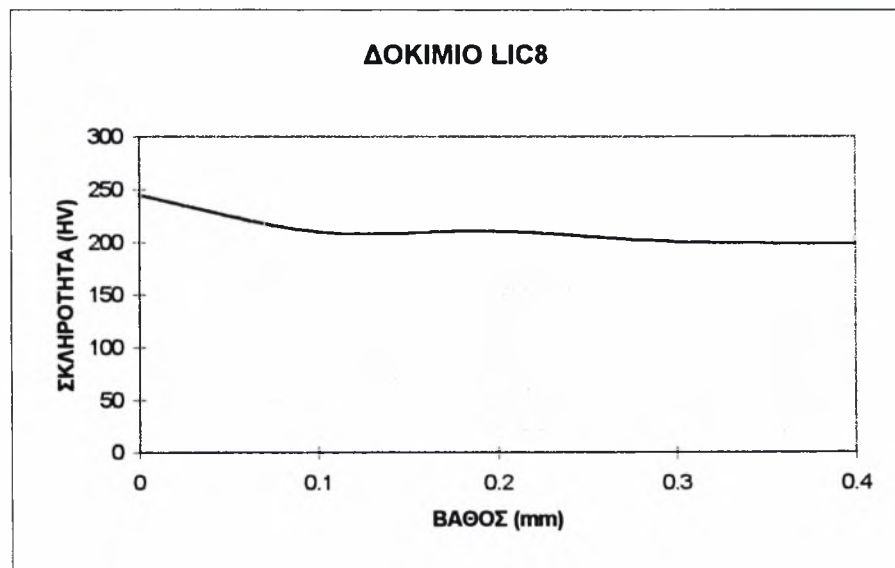
ΔΟΚΙΜΙΟ LIC6

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	201
0.1	194
0.2	208
0.3	194
0.4	196



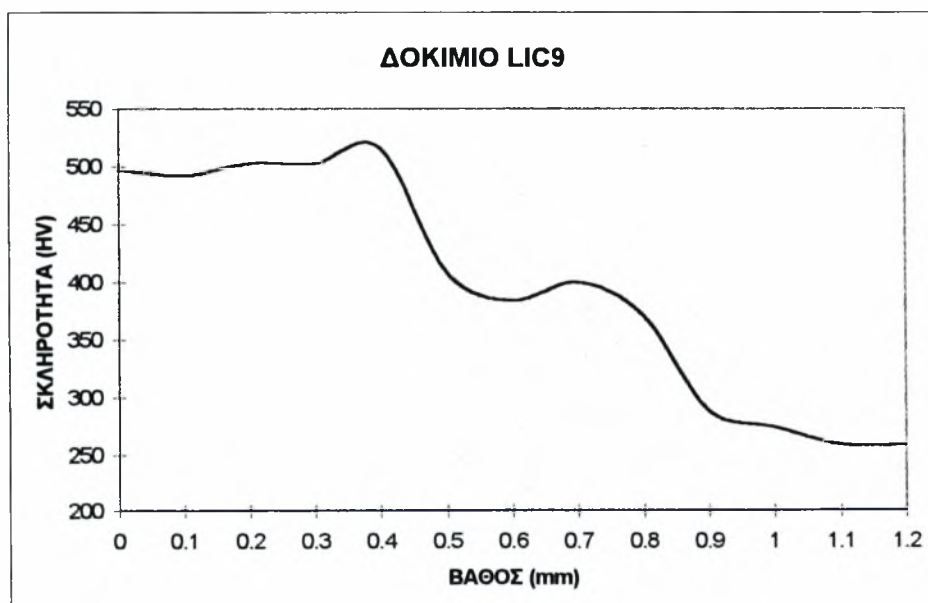
ΔΟΚΙΜΙΟ LIC8

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	245
0.1	210
0.2	211
0.3	201
0.4	199



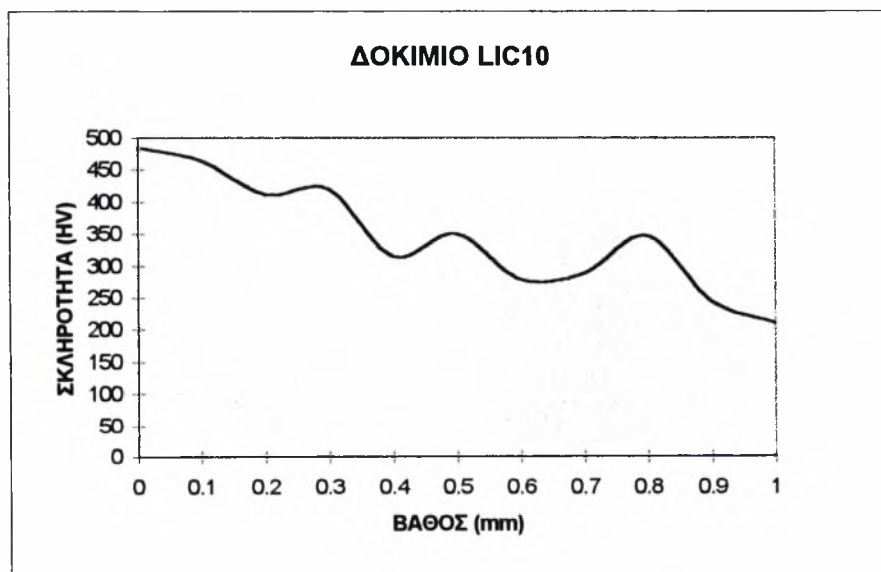
ΔΟΚΙΜΙΟ LIC9

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	497
0.1	492
0.2	503
0.3	503
0.4	516
0.5	408
0.6	384
0.7	400
0.8	371
0.9	289
1	274
1.1	259
1.2	259



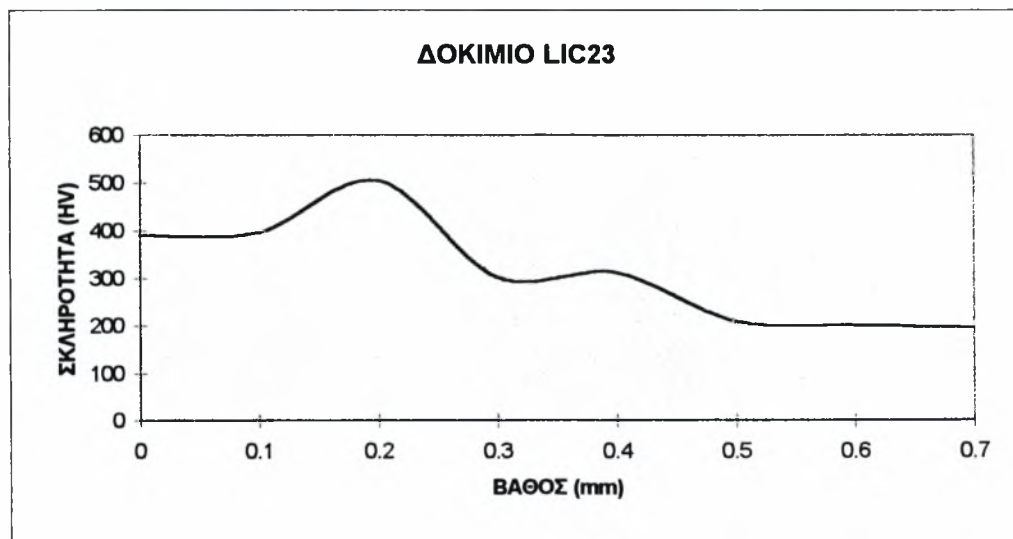
ΔΟΚΙΜΙΟ LIC10

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	485
0.1	465
0.2	412
0.3	420
0.4	316
0.5	350
0.6	279
0.7	288
0.8	347
0.9	245
1	211



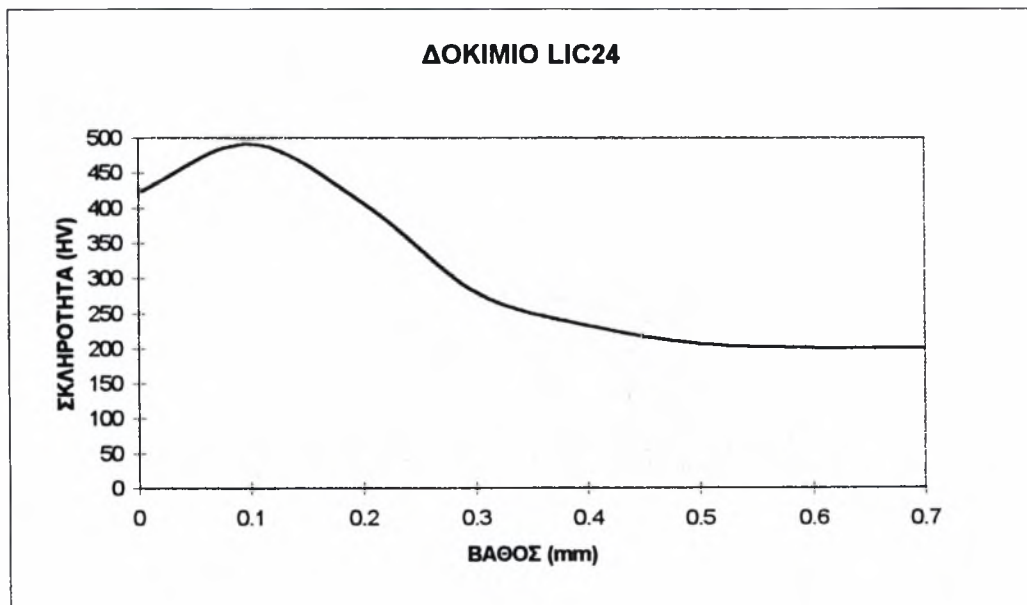
ΔΟΚΙΜΙΟ LIC23

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	390
0.1	397
0.2	505
0.3	302
0.4	311
0.5	210
0.6	202
0.7	196



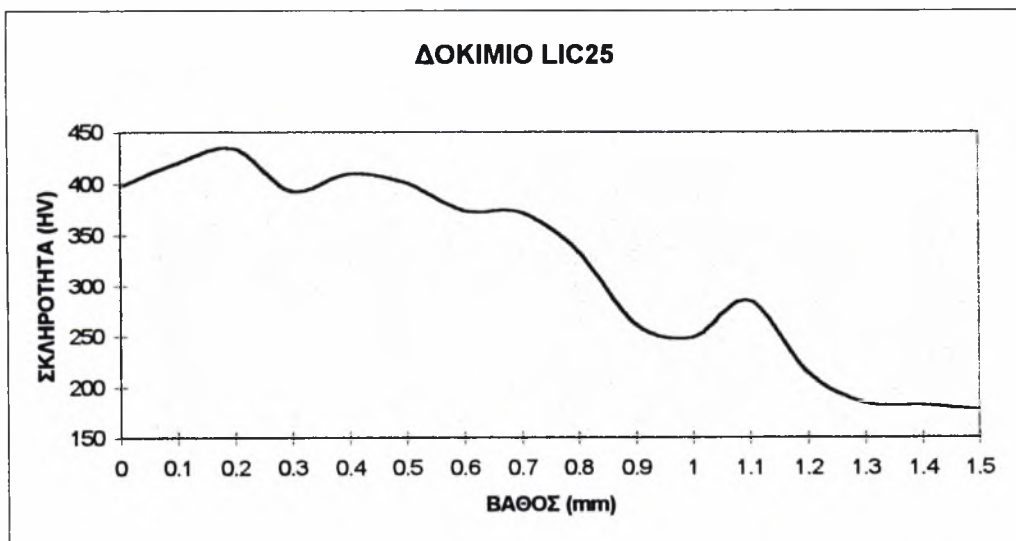
ΔΟΚΙΜΙΟ LIC24

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	422
0.1	492
0.2	408
0.3	281
0.4	233
0.5	207
0.6	202
0.7	201



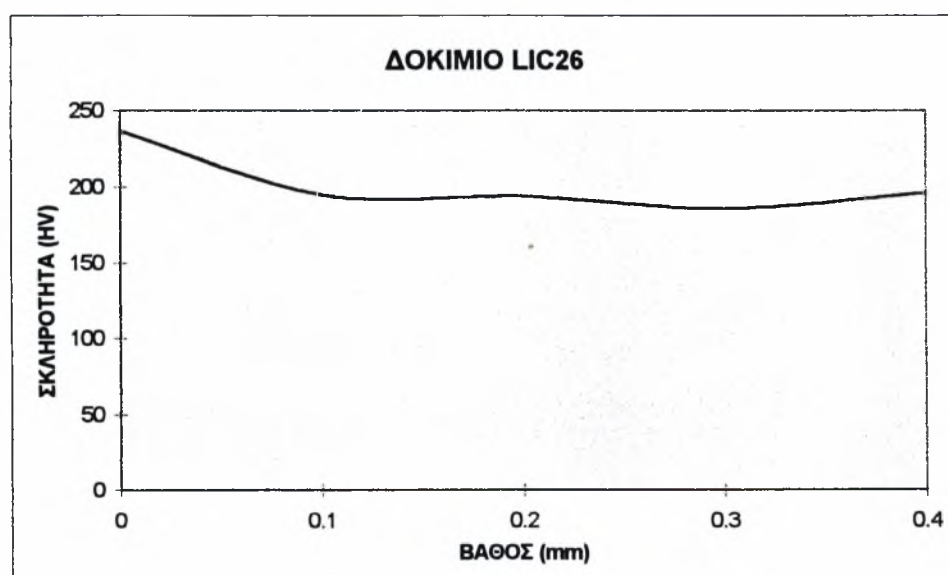
ΔΟΚΙΜΙΟ LIC25

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	397
0.1	420
0.2	434
0.3	393
0.4	410
0.5	401
0.6	374
0.7	372
0.8	334
0.9	262
1	249
1.1	285
1.2	214
1.3	184
1.4	182
1.5	177



ΔΟΚΙΜΙΟ LIC26

ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)
0	237
0.1	195
0.2	194
0.3	186
0.4	196



5. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης, προκύπτουν κάποια πολύ σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο που επηρεάζεται το υλικό από την δέσμη laser και παράλληλα κάποιες προτάσεις για το πώς μπορούν να αποφευχθούν ή να μειωθούν αλλαγές αυτές στην δομή του υλικού, αφού είναι δυνατόν να οδηγήσουν ένα εξάρτημα σε αστοχία. Συγκεκριμένα:

- Αν εξετασθεί μακροσκοπικά το υλικό, εύκολα να παρατηρείται ότι οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στην μικροδομή του δεν ήταν καθόλου εκτεταμένες. Με άλλα λόγια, το μεγαλύτερο βάθος επηρεασμένης ζώνης που παρατηρήθηκε δεν ξεπερνούσε τα 0.7mm.
- Μελετώντας την μικροδομή του χάλυβα, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι η αρχική δομή φερρίτη-περλίτη έχει μεταβληθεί στην περιοχή που ακτινοβολήθηκε και δημιουργήθηκε μαρτενσίτης.
- Η σκληρότητα του υλικού αυξάνεται δραματικά σε πολύ μικρές περιοχές του υλικού, όπου εμφανίζεται και ο μαρτενσίτης, κάνοντας τις περιοχές αυτές ψαθυρές.
- Είναι προτιμότερο να προκύπτει η τελική γωνία κάμψης με την χρήση πολλών διαδοχικών περασμάτων της δέσμης από το έλασμα. Με αυτόν τον τρόπο προσδίδονται στο υλικό μικρά ποσά θερμότητας που δεν είναι ικανά να προκαλέσουν σοβαρές μεταβολές στην δομή του υλικού.
- Η διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα δεν επιτρέπει την αύξηση του κόκκου του υλικού, άρα και την μείωση της αντοχής του.
- Η χαμηλή ταχύτητα σάρωσης επιτρέπει την αργή απόψυξη του υλικού, εμποδίζοντας την δημιουργία μαρτενσίτη, όμως σε αυτές τις ταχύτητες εξαφανίζεται σχεδόν το φαινόμενο της μορφοποίησης.
- Είναι προτιμότερο να αποφεύγεται η τήξη του υλικού κατά την διάρκεια της κατεργασίας και αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση της διαμέτρου της δέσμης και την διατήρηση της ταχύτητας σάρωσης σε υψηλά επίπεδα.

6. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Κάποια από τα αποτελέσματα της μελέτης ήταν ικανοποιητικά, ενώ κάποια άλλα προτρέπουν στην αναζήτηση λύσεων για την αποφυγή τους. Έτσι προτείνεται η διεξαγωγή πειραμάτων, με σκοπό :

- να λαμβάνεται η τελική γωνία κάμψης σε διαδοχικά στάδια, ώστε να αποφεύγονται θερμοκρασίες παραπλήσιες των θερμοκρασιών μετασχηματισμού του σιδήρου σε ωστενίτη. Οι χαμηλές θερμοκρασίες δεν ευνοούν και την αύξηση του κόκκου του υλικού.
- σε περίπτωση που δημιουργείται μαρτενσίτης, τον προσδιορισμό της επίδρασης μίας τελικής σάρωσης της δέσμης, που να έχει χαρακτήρα ανακρυστάλλωσης του υλικού. Δηλαδή, να θερμαίνεται ο μαρτενσίτης σε θερμοκρασίες 400-500 °C, ώστε να επιτραπεί η διάχυση του πλεονάζοντος άνθρακα προς σχηματισμό περλίτη, με άμεση συνέπεια την μείωση της σκληρότητας στην περιοχή αυτή.

Το τελικό ζητούμενο αυτής της μελέτης είναι η κάμψη του ελάσματος στην μεγαλύτερη δυνατή γωνία κάμψης ανά σάρωση και με τις μικρότερες δυνατές μεταβολές στην δομή του υλικού. Έτσι, όλες οι μελέτες πρέπει να έχουν σαν σκοπό τον εντοπισμό των παραμέτρων της δέσμης, σε συνάρτηση με τις διαστάσεις του ελάσματος, που να δίνουν τον παραπάνω συνδυασμό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]** "Laser Material Processing" by William M. Steen
- [2]** "Heat Flow and Material Degradation During Laser Metal Forming"
by G.N. Haidemenopoulos
- [3]** "Material degradation in Heavy Steel Plates caused by Bending with a Laser"
by Debra Lee Deacon
- [4]** "Synergy of Laser Material Processing and Metal Forming" by M. Geiger