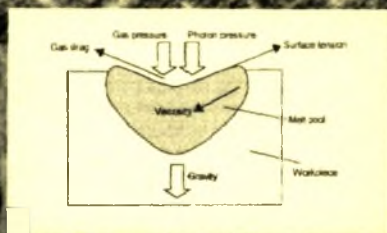
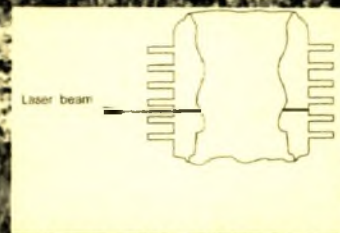


# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών Βιομηχανίας –  
Εργαστήριο Υλικών



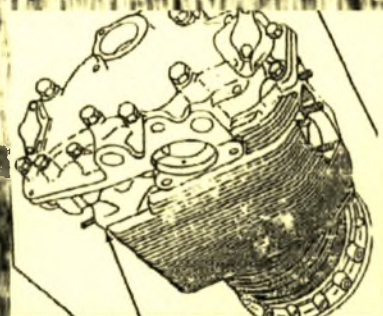
Διπλωματική Εργασία,



Συγκόλληση με *Lasér* Κατασκευαστικού χάλυβα  
και σύγκριση αυτής με την σύγκολληση  
ηλεκτρονιακής δέσμης

Επιβλέπων Καθηγητής :  
Δρ. Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόριος

Φοιτητής :  
Μπεράτης Νίκος



Βόλος





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

Αριθ. Εισ.: 2059/1  
Ημερ. Εισ.: \_\_\_\_\_  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
1999  
ΜΠΕ

*στους γονείς μου και σε όσους με βοήθησαν τα 5 χρόνια παραμονής μου  
στον Βόλο.*



αρ. βιβ 143 / Π.Α. ....

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000046563

## **Ευχαριστίες**

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γρ. Ν. Χαϊδεμενόπουλο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε.*

*Ιδιαίτερα ευχαριστώ την κ.Άννα Ζερβάκη, τον κ.Νίκο Χασιώτη, τους Αποστόλη Βασιλάκο και Αντώνη Κατσαμά για την βοήθεια τους καθ'όλη την διάρκεια εκτέλεσης της εργασίας μου.*

## **Περίληψη**

*Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΠΑΒΕ –Ανάπτυξη και Εφαρμογή Συγκολλήσεων Laser σε Τμήματα Κινητήρων Αρμάτων, στο οποίο συμμετέχουν οι SIELMAN A.E., EBETAM A.E., Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.*

*Αξιολογήθηκε η ήδη χρησιμοποιούμενη μέθοδος με δέσμη ηλεκτρονίου (EBW) για τη συγκόλληση κεφαλής άρματος μάχης M60. Διερευνήθηκε η κατάλληλη περιοχή συνθηκών για την μετέπειτα συγκόλληση -αναλογου ποιότητας- του εξαρτήματος με δέσμη Laser.*

*Έγινε το πρώτο βήμα για την εξολοκλήρου κατασκευή του στην Ελλάδα, αντί της εισαγωγής του από τις Η.Π.Α. -με ιδιαίτερα υψηλό κόστος αυτή τη στιγμή-. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι ετήσιες ανάγκες των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων είναι της τάξεως των 6.000 τεμαχίων, με διαμορφούμενο κόστος ανά τεμάχιο, 500.000 δρχ.*

## **Περιεχόμενα**

	<b>Σελίδα</b>
<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
<b>2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Εισαγωγή</b>	
<b>2.2 Laser</b>	
<b>2.2.1 Χαρακτηριστικά μεθόδου</b>	<b>4</b>
<b>2.2.1.1 Πυκνότητα ισχύος</b>	
<b>2.2.1.2 Ευελιξία μεταφερόμενης δέσμης</b>	
<b>2.2.1.3 Ικανότητα επιλογής προσδιδόμενης ενέργειας</b>	
<b>2.2.1.4 Παραγωγικότητα μεθόδου</b>	
<b>2.2.1.5 Ποιότητα συγκόλλησης</b>	<b>5</b>
<b>2.2.2 Τύποι συγκολλήσεων</b>	
<b>2.2.2.1 Συγκόλληση με αγωγή – conduction-mode welding-</b>	
<b>2.2.2.2 Συγκόλληση υψηλής διεξόδουσης – keyhole-</b>	<b>7</b>
<b>2.2.3 Κυριότερες παράμετροι συγκόλλησης με δέσμη Laser</b>	<b>8</b>
<b>2.2.3.1 Ισχύς Laser</b>	
<b>2.2.3.2 Διάμετρος δέσμης</b>	
<b>2.2.3.3 Απορροφητικότητα υλικού</b>	<b>9</b>
<b>2.2.3.4 Ταχύτητα μεταφοράς δέσμης</b>	
<b>2.2.4 Συγκόλληση χαλύβων με Laser</b>	
<b>2.2.5 Πλεονεκτήματα μεθόδου</b>	<b>10</b>
<b>2.2.6 Περιορισμοί μεθόδου</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Electron Beam</b>	<b>12</b>
<b>2.2.3 Χαρακτηριστικά μεθόδου</b>	
<b>2.2.3.1 Πυκνότητα ισχύος</b>	
<b>2.2.3.2 Παρουσία κενού-ποιότητα συγκόλλησης</b>	
<b>2.2.3.3 Υψηλή ταχύτητα – Παραγωγικότητα</b>	<b>13</b>
<b>2.2.3.4 Εξοικονόμηση ενέργειας</b>	
<b>2.2.4 Είδη EBW</b>	<b>14</b>
<b>2.2.4.1 High vacuum</b>	
<b>2.2.4.2 Medium vacuum</b>	
<b>2.2.4.3 Nonvacuum</b>	
<b>2.2.5 Πλεονεκτήματα μεθόδου</b>	<b>15</b>
<b>2.2.6 Περιορισμοί μεθόδου</b>	

<b>2.3</b>	<b>Σύγκριση EBW-LBW</b>	<b>16</b>
2.3.3	Πυκνότητα ισχύος	
2.3.4	Ποιότητα συγκόλλησης	
2.3.5	Μεταφορά δέσμης	
2.3.6	Παραγωγικότητα	
2.3.7	Βάθος διείσδυσης	
2.3.8	Κόστος	<b>17</b>
<b>2.4</b>	<b>Στερεοποίηση συγκολλήσεων τήξεως</b>	<b>18</b>
2.4.3	Επιρροή της ταχύτητας	
2.4.4	Γεωμετρία της ανάπτυξης των κρυστάλλων	<b>19</b>
2.4.5	Συστασιακή υπέρψυξη	<b>20</b>
2.4.6	Μικροδομή	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>Πειραματική διαδικασία</b>	<b>23</b>
3.1	Σκοπός-στόχος	
1 <sup>η</sup> ενότητα	– Υλικό βάσης	
2 <sup>η</sup> ενότητα	– Χαρακτηρισμός EB	<b>25</b>
3 <sup>η</sup> ενότητα	Διερεύνηση περιοχής συνθηκών	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>Αποτελέσματα – Συζήτηση</b>	<b>28</b>
4.1	Εισαγωγή	
4.2	Μέταλλο βάσης	
4.2.1	Μεταλλογραφία	
4.2.2	Μικροσκληρομετρήσεις	
4.3	Χαρακτηρισμός EBW	
4.3.1	Μεταλλογραφία	
4.3.2	Ραδιογραφία	<b>31</b>
4.3.3	Μικροσκληρομετρήσεις	
4.3.4	Συμπεράσματα	<b>33</b>
4.4	Πειραματικές συγκολλήσεις Laser	
4.4.1	Μεταλλογραφία	<b>34</b>
4.4.2	Μικροσκληρομετρήσεις	<b>38</b>
4.4.3	Συμπεράσματα	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>Προτεινόμενα Θέματα</b>	<b>50</b>

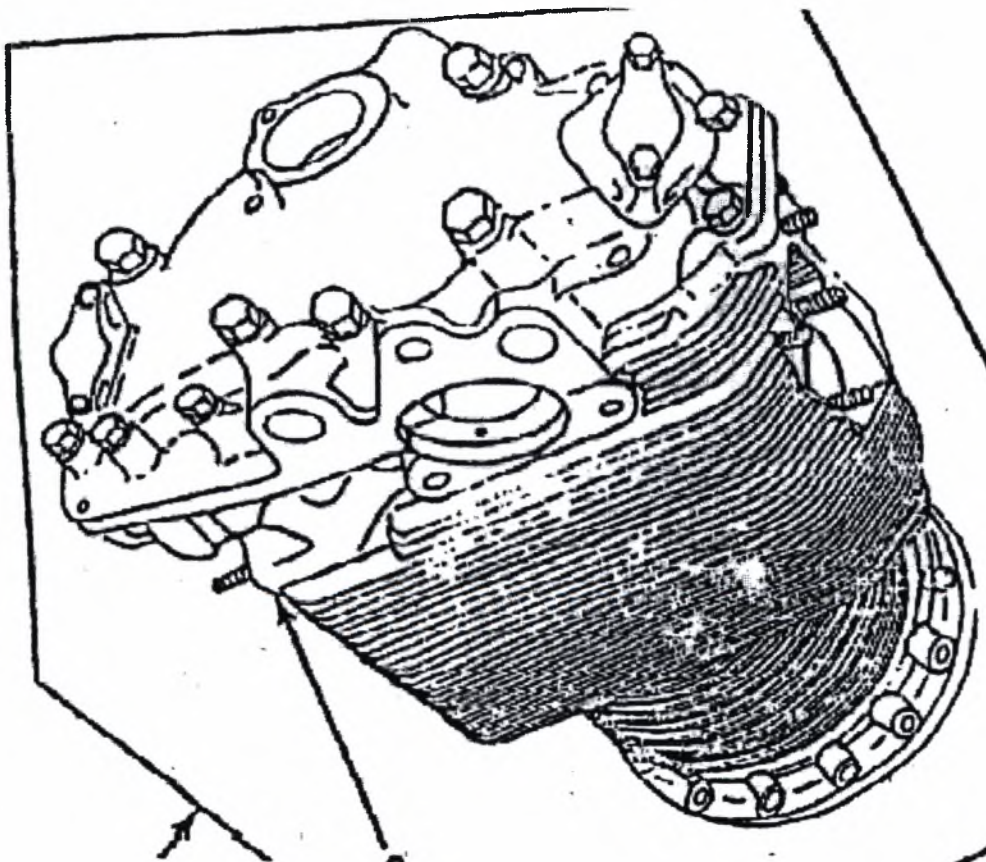
<b>6</b>	<b>Παράρτημα</b>	<b>51</b>
<b>6.3</b>	<b>Ασφάλεια μεθόδων</b>	
<b>6.3.1</b>	<b>EBW</b>	
<b>6.3.2</b>	<b>LBW</b>	
<b>6.4</b>	<b>Κατάλογος σχημάτων</b>	<b>53</b>
<b>6.5</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>55</b>
<b>6.6</b>	<b>Προδιαγραφές , αποτελέσματα ελέγχων EBETAM</b>	



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

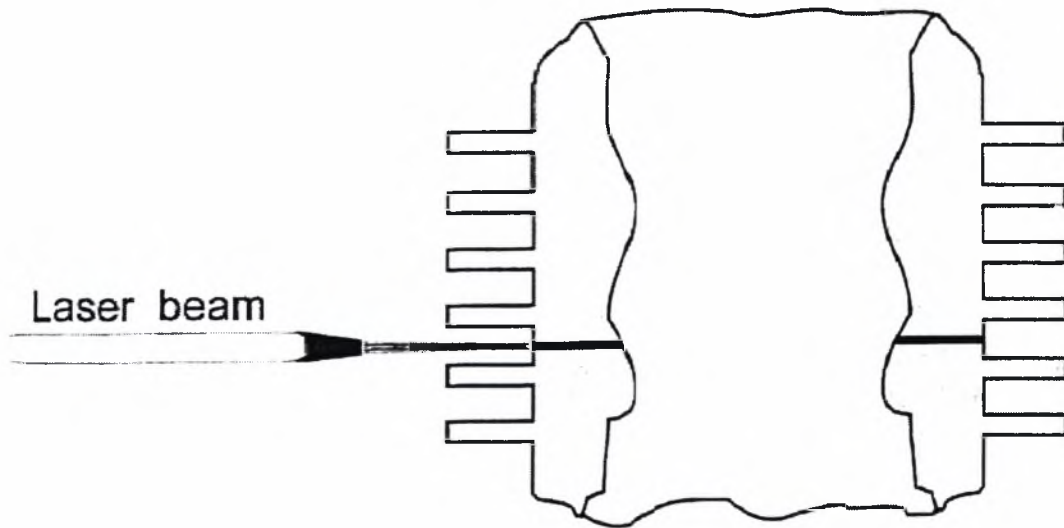
Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί την πρώτη φάση του προγράμματος ΠΑΒΕ -Ανάπτυξη και Εφαρμογή Συγκολλήσεων Laser σε Τμήματα Κινητήρων Αρμάτων-. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετέχουν ή SIELMAN A.E. , η EBETAM A.E. και το Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Σκοπός του προγράμματος είναι αφενός η βελτιστοποίηση των συγκολλήσεων laser για μηχανολογικές κατασκευές και αφ' ετέρου η μελέτη εφαρμογής της τεχνολογίας συγκολλήσεων laser υψηλής ισχύος στις κατασκευαστικές διαδικασίες της SIELMAN A.E.

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η αξιολόγηση της ήδη ανεπτυγμένης και εφαρμοζόμενης στις Η.Π.Α. , συγκόλλησης με ηλεκτρονιακή δέσμη της εμφανιζόμενης στην εικόνα 1[15] κεφαλής του κυλίνδρου του κινητήρα του άρματος M60 και η προσπάθεια καθορισμού της συμπεριφοράς του υλικού κατά την συγκόλληση με δέσμη laser.



**Εικόνα 1. Κεφαλή κυλίνδρου άρματος μάχης M60**

Στόχος είναι ο πλήρης χαρακτηρισμός της υπάρχουσας συγκόλλησης με ηλεκτρονιακή δέσμη και η προσέγγιση της περιοχής κατάλληλων συνθηκών για μετέπειτα συγκόλληση αναλόγου ποιότητας με δέσμη Laser. Το σημείο που επιθυμείται συγκόλληση του κυλίνδρου με δέσμη Laser παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 2.[15]



**Εικόνα 2. Σχηματική αναπαράσταση του σημείου συγκόλλησης**

Η πρώτη ενότητα αποτελεί την βιβλιογραφική ανασκόπηση. Στα πλαίσια αυτής αναζητήθηκαν γενικές πληροφορίες τόσο για την δέσμη laser, όσο και για την ηλεκτρονιακή δέσμη. Ακολουθεί μια γενική σύγκριση των δύο μεθόδων και τέλος ένα μέρος που αφορά την στερεοποίηση. Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει όλες τις πεπραγμένες ενέργειες που εξυπηρετούν τον στόχο της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, στην τρίτη ενότητα εμπεριέχονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν και τα προτεινόμενα θέματα διπλωματικών εργασιών.

Θα ήταν άδικο να κλείσουμε την Εισαγωγή χωρίς να αναφέρουμε την σπουδαία δραστηριότητα που έχει αναπτύξει τα τελευταία χρόνια στον τομέα των κατεργασιών με δέσμη Laser το Εργαστήριο Υλικών σε συνεργασία με την EBETAM, το LIC/ITE και μια ομάδα βιομηχανικών χρηστών. Είναι αξιοσημείωτο ότι ήδη έχουν πραγματοποιηθεί επιτυχείς συγκολλήσεις ναυπηγικού χάλυβα.

## 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ενότητα αυτή επιχειρήται μία μικρή αναδρομή στην βιβλιογραφία, που θα δίνει τόσο γενικές όσο και ειδικές πληροφορίες για την συγκόλληση με δέσμη laser και την συγκόλληση με ηλεκτρονιακή δέσμη. Παρατίθενται οι χαρακτηριστικές παράμετροι κάθε μεθόδου και σύντομα τα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα κάθε μιας. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση κλείνει με σύγκριση των 2 μεθόδων.

### 2.2 Laser

Η κατεργασία LASER BEAM WELDING χρησιμοποιεί μία κινούμενη υψηλής πυκνότητας ( $10^5$  to  $10^7$  W/cm<sup>2</sup>, or  $6 \cdot 10^5$  to  $6 \cdot 10^7$  W/in.<sup>2</sup>) συνεκτική οπτική πηγή ενέργειας, επονομαζόμενη δέσμη laser, σαν πηγή θερμότητας. Η λέξη laser προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων 'light amplification by stimulated emission or radiation' που σημαίνει 'οπτική ενίσχυση από διεγερμένη εκπομπή ή ακτινοβολία'. Η συνεκτική φύση του laser beam επιτρέπει την εστίαση της δέσμης σε μικρά σημεία, προκαλώντας έτσι υψηλή «πυκνότητα» ενέργειας. Τα Lasers έχουν προαχθεί σαν αρκετά χρήσιμα αντικείμενα συγκόλλησης για μία πλειάδα εφαρμογών. Μέχρι και την δεκαετία του 1970, παρόλα αυτά, οι συγκολλήσεις με Laser εφαρμόζονταν θα μπορούσαμε να πούμε αποκλειστικά για λεπτά ελάσματα παρόμοιας σύστασης και με χαμηλές ταχύτητες εξαιτίας της περιορισμένης συνεχούς παρεχόμενης ενέργειας. Από το 1965, μια ποικιλία συστημάτων Laser βελτιώθηκε με σκοπό την μικροσυγκόλληση ηλεκτρονικών πλακετών μέσα σε σωλήνες απαγωγής, ενώ άλλα συστήματα βελτιώθηκαν για να χρησιμοποιηθούν σε άλλες ειδικές εφαρμογές όπου οι συμβατικές τεχνολογίες δεν μπορούσαν να παρέχουν την προσδοκώμενη ποιότητα σύνδεσης. Η ικανότητα μεγάλης παροχής συνεχούς ρεύματος σε -CW- Lasers διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> ή σε Nd:YAG και οι περιορισμοί της τότε τεχνολογίας συγκόλλησης αύξησαν το ενδιαφέρον για μεγάλης διεισδυτικότητας συγκολλήσεις χρησιμοποιώντας τις νέες αυτές συσκευές τα τελευταία 20 χρόνια.

Η ικανότητα του Laser να δημιουργεί πυκνότητα ενέργειας μεγαλύτερη από  $10^6$  W/cm<sup>2</sup> ( $6 \cdot 10^6$  W/in.<sup>2</sup>) αποτέλεσε τον κυριότερο παράγοντα για την εγκαθίδρυση του ως δυναμικό τρόπο συγκόλλησης (Πίνακας 1[11]). Μεγάλος αριθμός πειραμάτων έδειξαν ότι το Laser επιτρέπει ακριβής συγκολλήσεις που μπορούν να συγκριθούν μόνο με αυτές που γίνονται με Electron Beam.

Πίνακας 1. Πυκνότητες Ισχύος διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης[11]

Διαδικασία συγκόλλησης	Πυκνότητα ισχύος πηγής		Αποτελεσματι- κότητα mm <sup>2</sup> /kJ	Προφίλ συγκ.	λίμνης
	W/cm <sup>2</sup>	W/in. <sup>3</sup>			
Οξυακετυλινική φλόγα (OAW)	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>	6*10 <sup>2</sup> -6*10 <sup>3</sup>	0.2-0.5	Ρηχή για ένα πέρασμα	
Συγκόλληση τόξου	5*10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup>	3*10 <sup>3</sup> -6*10 <sup>4</sup>	0.8-2(a) 2-3(b) 4-10(c)	Ρηχή για ένα πέρασμα	
Τόξο Plasma (PAW)	10 <sup>3</sup> -10 <sup>6</sup>	6*10 <sup>3</sup> -6*10 <sup>6</sup>	5-10	Ρηχή για χαμηλές ενέργειες - υψηλή για μεγάλες	
Δέσμη Laser (LBW)	10 <sup>5</sup> -10 <sup>7</sup>	6*10 <sup>5</sup> -6*10 <sup>7</sup>	15-25	Ρηχή για χαμηλές ενέργειες - υψηλή για μεγάλες	
Electron Beam (EBW)	10 <sup>5</sup> -10 <sup>8</sup>	6*10 <sup>5</sup> -6*10 <sup>8</sup>	20-30	Υψηλή	

(a) Gas-tungsten arc welding (GTAW). (b) Gas-metal arc welding (GMAW).  
(c) Submerged arc welding (SAW).

## 2.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

### 2.2.1.1 Πυκνότητα ισχύος

Οι πυκνότητες ισχύος που επιτυγχάνονται κατά την συγκόλληση με δέσμη Laser, κυρίως με CO<sub>2</sub> και Nd:Yag Lasers κυμαίνονται από 10<sup>4</sup>-10<sup>7</sup> W/cm<sup>2</sup>.

### 2.2.1.2 Ευελιξία της μεταφερόμενης δέσμης

Η δέσμη Laser μπορεί να μεταφέρεται εύκολα και γρήγορα από το ένα σημείο στο άλλο σε σχετικά μεγάλη απόσταση.

### 2.2.1.3 Ικανότητα επιλογής της προσδιδόμενης ενέργειας

Η ισχύς της δέσμης Laser καθώς επίσης και η διάμετρος αυτής, μπορούν να ελεγχθούν εύκολα με ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

### 2.2.1.4 Παραγωγικότητα

Η υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης, σε συνδυασμό με την ευελιξία της μεθόδου παρέχουν υψηλούς δείκτες παραγωγικότητας.

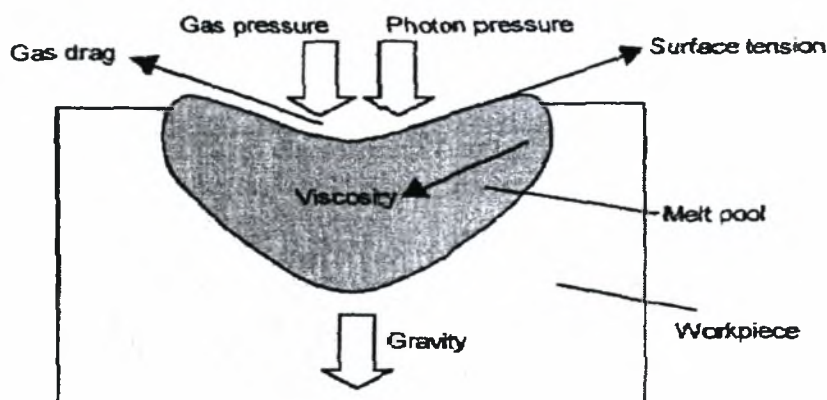
### 2.2.1.5 Ποιότητα συγκόλλησης

Η ικανότητα ελέγχου της διαδικασίας και το κατάλληλο προστατευτικό αέριο παρέχουν συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας. Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα προστατευτικά αέρια είναι He, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar.

### 2.2.2 ΤΥΠΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

#### 2.2.2.1 Συγκόλληση με αγωγή 'conduction mode welding'

Ορμητική εναλλαγή ή μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα στην συγκόλληση με αγωγή. Η υψηλή πυκνότητα ενέργειας του Laser ( $10^5$ - $10^7$  W/cm<sup>2</sup>) δημιουργεί ένα θερμοκρασιακό gradient της τάξης του  $10^6$  K/cm, που με την σειρά του οδηγεί σε μία τριχοειδή ροή θερμότητας εξαιτίας της επιφανειακής τάσης χαρακτηριστικό της οποίας είναι η επιφανειακές ταχύτητες της τάξης του 1m/sec. (Marangoni convection[2]).

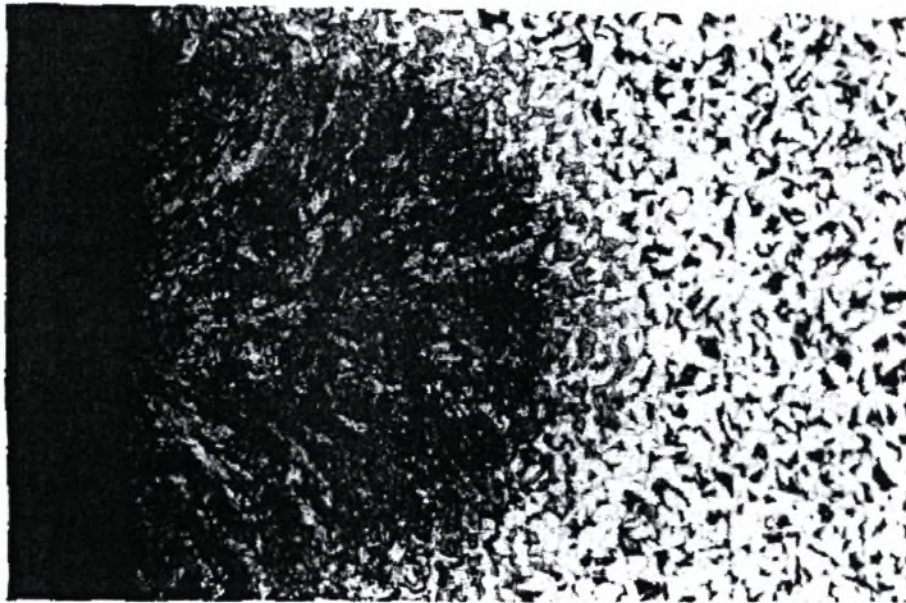


**Εικόνα 3. Δυνάμεις που επιδρούν κατά την συγκόλληση με αγωγή στην λίμνη αυτής[2]**

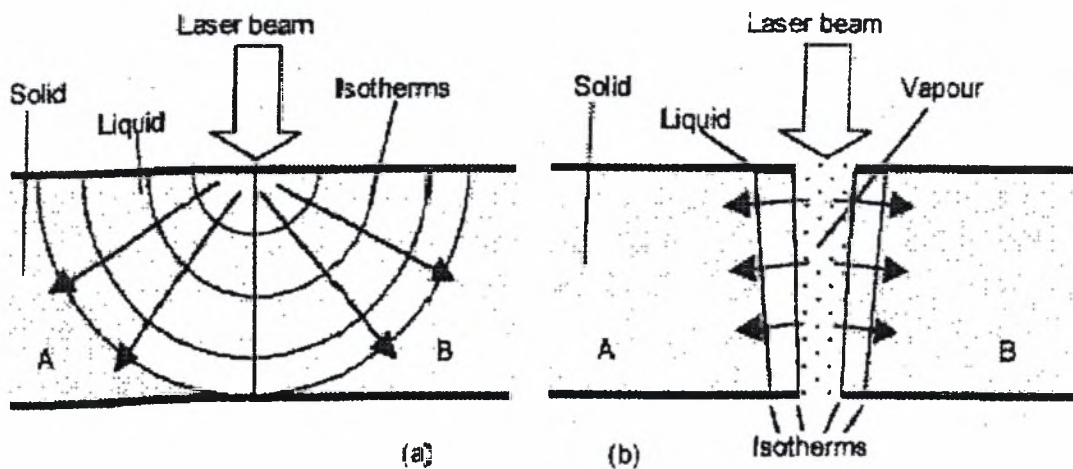
Η μεταφορά θερμότητας είναι ο μοναδικός σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την γεωμετρία της λίμνης συγκόλλησης και που μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα, όπως διαφορετική διείσδυση, πορώδες, έλλειψη τήξης. Η μεταφορά θερμότητας είναι επίσης υπεύθυνη για την ανάμιξη και συνεπώς την σύσταση της λίμνης συγκόλλησης. Η γεωμετρία της λίμνης συγκόλλησης στην συγκόλληση με αγωγή είναι συνάρτηση του αριθμού Prandtl. Σε υλικά με μικρό αριθμό Pr, όπως αλουμίνιο ( $Pr=0,02$ ), η λίμνη είναι περισσότερο σφαιρική και κυριαρχείται από μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής, ενώ σε υλικά με μεγαλύτερο Pr όπως ο χάλυβας ( $Pr=0,1$ ) η λίμνη εμφανίζεται ρηχή και πλατιά αφού κυριαρχείται από ροή θερμότητας εξαιτίας της επιφανειακής τάσης. Ανωμαλίες της ελεύθερης επιφάνειας



της συγκόλλησης, όπως υποσκάμματα, οφείλονται επίσης στον τρόπο μεταφοράς της θερμότητας. Μικρό ποσοστό στοιχείων που μπορούν να αντιδράσουν και βρίσκονται στην επιφάνεια, αλλάζουν την ροή θερμότητας. Στα περισσότερα μέταλλα, η τριχοειδής ροή θερμότητας οδηγεί το τηγμένο μέταλλο στην ψυχρότερη πλευρά. Η παρουσία όμως θείου αλλάζει την συνάρτηση μεταφοράς θερμότητας, οδηγώντας το τηγμένο μέταλλο στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης .



**Εικόνα 4. Συγκόλληση αγωγής μαλακού χάλυβα[4]**



**Εικόνα 5. Σχηματική παράσταση συγκολλήσεων conduction-keyhole[6]**

**2.2.2.2 Συγκόλληση υψηλής διείσδυσης (keyhole).**

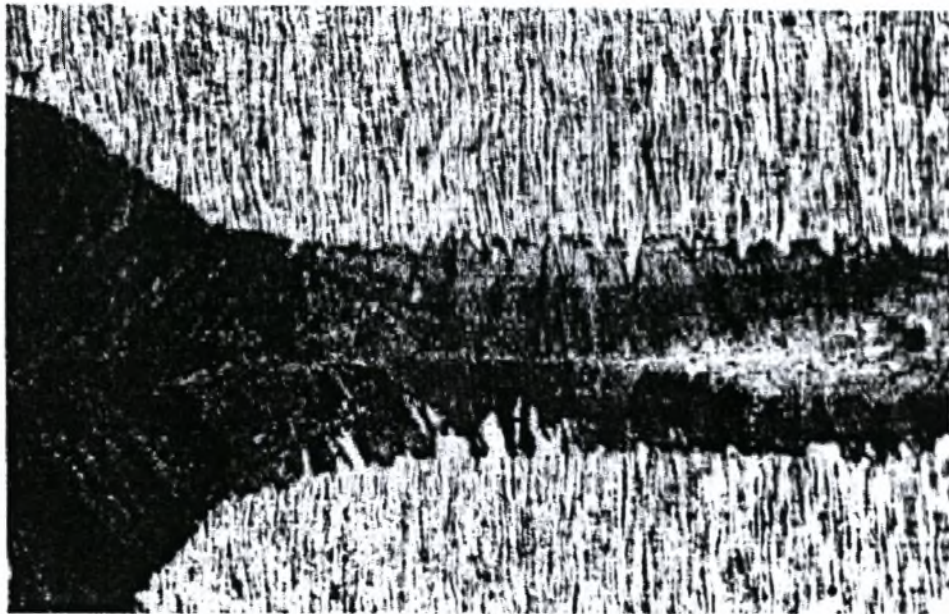
Ο μηχανισμός της υψηλής διείσδυσης συγκόλλησης από δέσμη Laser είναι παρόμοιος με αυτόν που λαμβάνει χώρα με ηλεκτρονιακή δέσμη. Η συγκόλληση keyhole μπορεί να παραχθεί, όταν μια δέσμη αρκετής πυκνότητας ισχύος προκαλεί εξάτμιση του υποστρώματος και η πίεση των ατμών στον κρατήρα οδηγεί σε μετατόπιση του τηγμένου μετάλλου από κάτω προς τα πάνω κατά μήκος της οπής. Αυτή η οπή αντιδρά όπως ένα μέλαν σώμα, βοηθώντας την απορρόφηση της δέσμης Laser και διανέμοντας την θερμότητα βαθιά μέσα στο μέταλλο.

Οι συνθήκες μεταφοράς ενέργειας και μετάλλου κατά την διάρκεια της συγκόλλησης διερευνήθηκαν από τον Klemens<sup>[44]</sup>. Σύμφωνα με τον Klemens, η συγκόλληση keyhole ή κοιλώματος πραγματοποιείται μόνον εάν η δέσμη έχει αρκετή πυκνότητα ισχύος. Η Keyhole γεμίζει με αέριο ή ατμούς που προκαλούνται από συνεχή εξάτμιση του πλευρικού υλικού εξαιτίας της δέσμης. Αυτή η κοιλότητα περιτριγυρίζεται από υγρό, που με την σειρά του περιτριγυρίζεται από στερεό.

Η ροή του υλικού και η επιφανειακή τάση τείνουν να εξαλείψουν την κοιλότητα την στιγμή που ο συνεχώς δημιουργούμενος ατμός τείνει να την διατηρήσει. Παρουσιάζεται μία συνεχής ροή υλικού έξω από την κοιλότητα, στο σημείο που εισέρχεται η δέσμη Laser. Για μετακινούμενη δέσμη, αυτή η keyhole υπεισέρχεται σε σταθερές συνθήκες. Το υλικό που χάνεται με την εξάτμιση εμφανίζεται σαν κατάθλιψη στο στερεοποιημένο υλικό, σαν πορώδες, σαν μια εσωτερική παραμόρφωση του κομματιού προς συγκόλληση ή πιθανότατα σε έναν συνδυασμό τέτοιων ατελειών. Η απαίτηση για παραγωγή αρκετής ποσότητας ατμού για να διατηρηθεί μια κατάσταση σταθερών συνθηκών, οδηγεί σε περιορισμό της ταχύτητας συγκόλλησης. Ενώ η κοιλότητα μεταφέρεται διαμέσου στερεού και τηγμένου μετάλλου με μία ταχύτητα που καθορίζεται από την ταχύτητα μεταφοράς της δέσμης ή του κομματιού, το υλικό πρέπει να μεταφέρεται συνεχώς από την περιοχή μπροστά από την κοιλότητα στην περιοχή πίσω από αυτήν.

Φωτογράφιση υψηλής ταχύτητας κατά την διάρκεια πειράματος με ρυθμό 8000 εικόνων το δευτερόλεπτο, έδειξε καθαρά την ροή τήξης και την κίνηση της κοιλότητας. Τηγμένο ρευστό που εμφανίζεται στο εμπρός μέρος της κοιλότητας, επιταχύνει με διεύθυνση παράλληλα στα τοιχώματα καθώς οδηγείται από δυνάμεις στροβιλισμού δημιουργούμενες από την εξάτμιση. Σε αυτήν την διαδικασία, μία μεγάλη δύνη εμφανίζεται πίσω από την κοιλότητα κοντά στην τηγμένη επιφάνεια. Αυτή η δύνη θεωρείται η αιτία των επονομαζόμενων 'wine-glass' σταγονιδίων που παράγονται κατά την διεργασία.

Η μεταφορά υλικού οφείλεται κυρίως στην ροή του υγρού. Παρ'όλα αυτά υλικό μεταφέρεται στην αέρια φάση και αυτός ο ατμός γεννά την υπερβολική πίεση που δημιουργεί την ροή του υγρού.



**Εικόνα 6. Συγκόλληση keyhole σε ανοξείδωτο χάλυβα 304[4]**

### **2.2.3 Κυριότερες παράμετροι της συγκόλλησης με δέσμη Laser**

*Οι κυριότερες ανεξάρτητες μεταβλητές που επηρεάζουν την διεργασία είναι*

#### **2.2.3.1 Ισχύς Laser**

#### **2.2.3.2 Διάμετρος δέσμης (σημείο εστίασης)**

#### **2.2.3.3 Απορροφητικότητα υλικού**

#### **2.2.3.4 Ταχύτητα μεταφοράς της δέσμης εγκάρσια στο κομμάτι**

#### **2.2.3.1 Ισχύς Laser**

Το βάθος διείσδυσης με συγκόλληση Laser σχετίζεται άμεσα με την πυκνότητα ενέργειας και είναι συνάρτηση της διαμέτρου και της ισχύος της δέσμης. Για σταθερή διάμετρο, αύξηση της ισχύος προκαλεί αύξηση του βάθους διείσδυσης. Οι Locke και Baardsen απέδειξαν ότι τα δύο αυτά μεγέθη σχετίζονται μεταξύ τους σχεδόν με γραμμική σχέση.

#### **2.2.3.2 Διάμετρος δέσμης**

Η παράμετρος αυτή είναι από τις σημαντικότερες, αφού καθορίζει την πυκνότητα ισχύος της δέσμης. Ωστόσο είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί για Laser



μεγάλης ισχύος. Η δυσκολία αυτή οφείλεται κατά ένα μέρος στην φύση της διαμέτρου και κατά άλλο στην διακρίβωση του τι πρέπει τελικά να μετρηθεί . Γενικά η διάμετρος μίας δέσμης Gaussian ορίζεται σαν η διάμετρος όπου η ενέργεια πέφτει στο  $1/e^2$  , όταν  $1/e$  είναι η κεντρική τιμή. Εμπειρικά, η διάμετρος βρίσκεται με την στιγμιαία εναπόθεση της δέσμης σε πλάκα από Plexiglas και μετρώντας το αποτύπωμα αυτής. Η διάμετρος της δέσμης είναι άμεσα εξαρτώμενη από το σημείο εστίασης.

### **2.2.3.3 Απορροφητικότητα**

Η καταλληλότητα της LBW (*laser beam welding*) εξαρτάται από την ικανότητα απορρόφησης υψηλής ενέργειας από το συγκολλούμενο κομμάτι. Οποιοσδήποτε υπολογισμός της μεταδιδόμενης ενέργειας βασίζεται στη απορροφητικότητα του κομματιού. Η απορροφητικότητα μπορεί να αυξηθεί με διάφορους τρόπους. Χαρακτηριστικά αναφέρονται η εναπόθεση απορροφητικής σκόνης στην επιφάνεια, η κάλυψη της επιφάνειας με οξειδωτικό φιλμ ανοδικής επεξεργασίας, η χρησιμοποίηση αλληλεπιδρώντων αερίων. Τέλος, το φαινόμενο *keyhole* αυξάνει σημαντικά την απορροφητικότητα του υλικού.

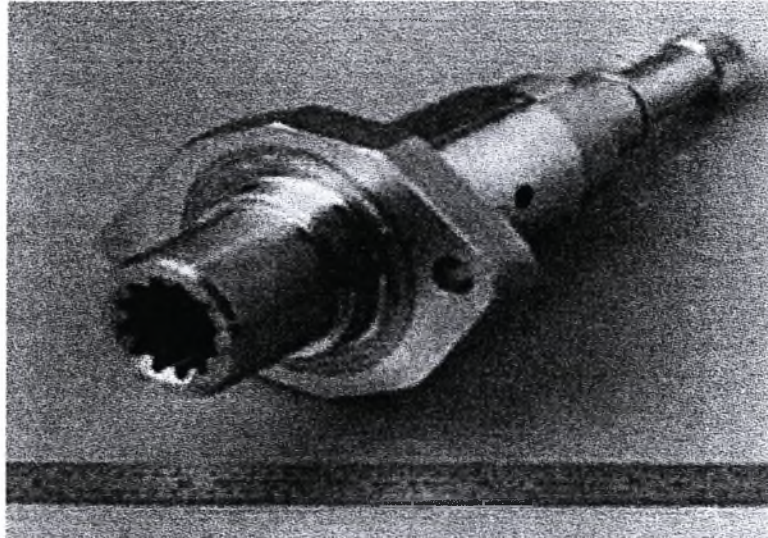
### **2.2.3.4 Ταχύτητα μεταφοράς της δέσμης**

Το βάθος διείσδυσης κατά την LBW γίνεται αρκετά αξιόλογο σε σχέση με την EBW καθώς αυξάνει η ταχύτητα συγκόλλησης.

### **2.2.4 Συγκόλληση χαλύβων με Laser**

Χάλυβες με χαμηλή σύσταση άνθρακα είναι άμεσα συγκολλήσιμοι με δέσμη Laser, αρκεί τα ποσοστά θείου και φωσφόρου να μην ξεπερνούν το ποσοστό 0.04%. Ένα υψηλότερο ποσοστό αυτών των στοιχείων μπορεί να ενισχύσει την δημιουργία ρωγμών κατά τη στερεοποίηση. Σε χάλυβες με χαμηλή σύσταση άνθρακα η περιοχή συγκόλλησης παρουσιάζει μαρτενσίτη και αυξημένη σκληρότητα, τα επίπεδα της οποίας εξαρτώνται από το ποσοστό του άνθρακα και των άλλων κραματικών στοιχείων. Η μικροδομή της ζώνης συγκόλλησης εξαρτάται από την αρχική φάση του υλικού. Στην περίπτωση ανοπτημένης κατάστασης, μαρτενσίτης αντικαθιστά τις αποικίες περλίτη ενώ διατηρούνται οι φερριτικοί κόκκοι. Αυτό οφείλεται κυρίως στον τυπικά μικρό θερμικό κύκλο της συγκόλλησης με δέσμη Laser και στην έλλειψη χρόνου για διάχυση άνθρακα σε όλο το υλικό. Ωστόσο, ο χρόνος είναι αρκετός για τον καταμερισμό του άνθρακα που οδηγεί σε περλίτη κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό με ευτυκτοειδή σύσταση σε άνθρακα. Στην επόμενη εικόνα 2.2.2 φαίνεται μία

συνδεσμολογία στράκτου-μοχλού διαφορετικών χαλύβων που έχει συγκολληθεί με δέσμη Laser.



**Εικόνα 7. Συγκολλημένη συνδεσμολογία άξονα-ατράκτου διαφορετικών χαλύβων [12]**

### **2.2.5 Πλεονεκτήματα μεθόδου**

Η συγκόλληση με Laser έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα

- α) μικρή αδράνεια και ως εκ τούτου μεγάλες ταχύτητες διεργασιών με απότομα σταματήματα και ξεκινήματα
- β) η εστιασμένη δέσμη Laser παρέχει υψηλές πυκνότητες ενέργειας
- γ) η συγκόλληση με δέσμη Laser μπορεί να γίνει σε ατμοσφαιρική πίεση
- δ) δύσκολα συγκολλησίμα υλικά μπορούν να συγκολληθούν
- ε) τα προς κόλληση κομμάτια δεν απαιτούν 'σφικτό' κράτημα
- στ) ηλεκτρόδια ή υλικά γεμίματος δεν απαιτούνται
- ζ) στενές συγκολλήσεις είναι εφικτές
- η) ακριβείς συγκολλήσεις σε ότι αφορά την θέση , την διάμετρο και την διείδυση πετυχαίνονται
- θ) συγκολλήσεις με μικρή ή καθόλου 'ρύπανση' παράγονται
- ι) η ζώνη θερμικής παραμόρφωσης είναι πολύ μικρή
- ια) περίπλοκα σχέδια μπορούν να συγκολληθούν σε μεγάλη ταχύτητα χρησιμοποιώντας συστήματα ελέγχου της δέσμης
- ιβ) η δέσμη Laser μπορεί επίσης να μοιράζεται χρονικά .



**2.2.6 Περιορισμοί μεθόδου**

Η συγκόλληση με δέσμη Laser απαιτεί ακριβέστερη προετοιμασία της ένωσης σε σχέση με άλλες κοινές μεθόδους. Το κόστος αρχικού κεφαλαίου επένδυσης της LBW είναι σχεδόν 10 φορές μεγαλύτερο από οποιασδήποτε άλλης μεθόδου συγκόλλησης. Τέλος το βάθος διείσδυσης που επιτυγχάνεται είναι μικρότερο από άλλες μεθόδους υψηλής πυκνότητας ισχύος.

**2.3 Electron Beam**

Η συγκόλληση με ηλεκτρονιακή δέσμη είναι επίσης μία υψηλής πυκνότητας ισχύος διεργασία, που πραγματοποιείται με τον βομβαρδισμό τον προς κόλληση κομματιών με μία εξαιρετικά εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν επιταχυνθεί, αποκτώντας ταχύτητες που κυμαίνονται από 0.3 έως 0.7 φορές της ταχύτητας του φωτός σε 25 έως 200kV κυριότερα. Η στιγμιαία μεταβολή της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων αυτών σε θερμική κατά την πρόσκρουση και διάτρηση του κομματιού προκαλεί την τήξη του μετάλλου και μετέπειτα την συγκόλληση του.

Επειδή η συνολική κινητική ενέργεια των μετάλλων μπορεί να συγκεντρωθεί σε μία πολύ μικρή περιοχή του κομματιού, η πυκνότητα ισχύος που λαμβάνεται είναι εξαιρετικά υψηλή, υψηλότερη από κάθε άλλη μέθοδο συμπεριλαμβανομένης και της συγκόλλησης με δέσμη Laser. Η πυκνότητα ισχύος φτάνει σε τιμές  $10^8 \text{W/cm}^2$ .

Η υψηλή πυκνότητα ισχύος, σε συνδυασμό με την πολύ μικρή διάτρηση του υλικού από τα ηλεκτρόνια προκαλεί σχεδόν ακαριαία τοπική τήξη και εξάτμιση του μετάλλου.

**2.3.1 Χαρακτηριστικά μεθόδου****2.3.1.1 Πυκνότητα ισχύος**

Η πυκνότητα ισχύος που παρουσιάζει η μέθοδος της συγκόλλησης με ηλεκτρονιακή είναι υψηλότερη από οποιαδήποτε άλλη. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων είναι η ικανότητά της να επιτυγχάνει συγκολλήσεις βαθύτερες και στενότερες από τις αντίστοιχες με τόξο, με μία συνολικά προσδιδόμενη ενέργεια στο κομμάτι πολύ μικρότερη από την απαιτούμενη με τόξο. Αυτή η ικανότητα επίτευξης μεγάλου λόγου βάθους διείσδυσης προς εύρος συγκόλλησης εκμηδενίζει την απαίτηση για συγκόλληση πολλαπλών περασμάτων. Η μικρότερη προσδιδόμενη ενέργεια έχει σαν αποτέλεσμα εξαιρετικά μικρές ζώνες θερμικής παραμόρφωσης και αισθητά λιγότερες θερμικές επιδράσεις στο κομμάτι.

**2.3.1.2 Παρουσία κενού – ποιότητα συγκόλλησης**

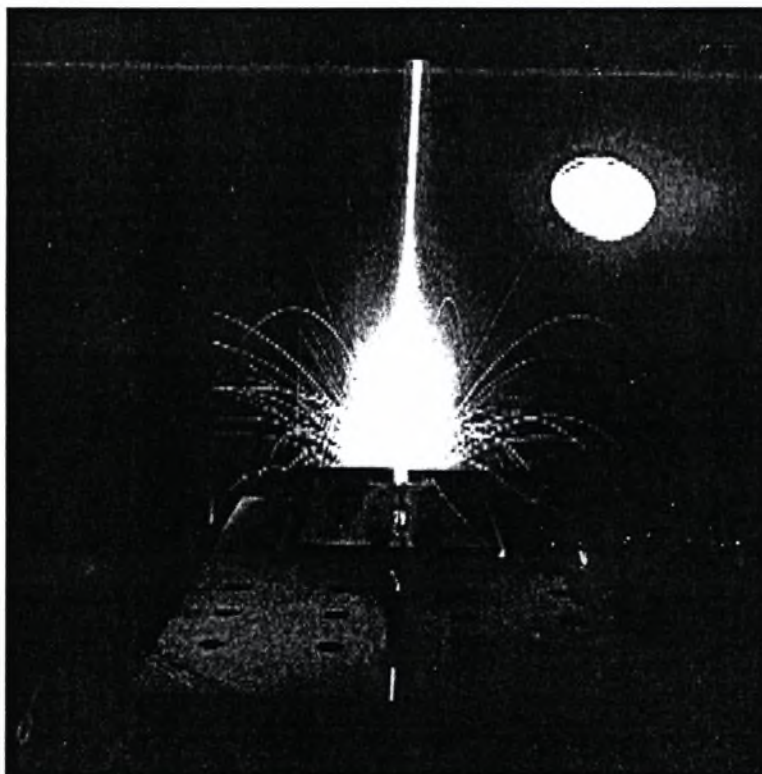
Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι επίσης η απαίτηση για συγκόλληση υπό συνθήκες κενού. Η παρουσία κενού είναι αναγκαία για την επίτευξη των επιθυμητών μεγάλων διεισδύσεων. Το γεγονός ότι η διεργασία πραγματοποιείται λοιπόν σε απόλυτα καθαρά περιβάλλον οδηγεί σε απόλυτα καθαρή συγκόλληση από εγκλείσματα, όπως είναι οξείδια και νιτρίδια.

**2.3.1.3 Υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης – παραγωγικότητα**

Η ικανότητα της EBW να επιτυγχάνει υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης οφείλεται στον υψηλό ρυθμό τήξης του μετάλλου που σχετίζεται με την συγκεντρωμένη πηγή θερμότητας. Η υψηλή ταχύτητα, ελαχιστοποιεί τον απαιτούμενο χρόνο συγκόλλησης και έτσι αυξάνει την παραγωγικότητα της μεθόδου. Σημειώνεται ότι η υψηλή παραγωγικότητα αφορά μόνο το στάδιο της συγκόλλησης και όχι τα υπόλοιπα στάδια της διεργασίας (προετοιμασία συγκόλλησης).

**2.3.1.4 Εξοικονόμηση ενέργειας**

Η συνολική ικανότητα μετατροπής ενέργειας της EBW είναι περίπου 65%, ελάχιστα υψηλότερο από τις συμβατικές μεθόδους και πολύ υψηλότερο από άλλες διεργασίες υψηλής πυκνότητας ενέργειας.



**Εικόνα 8. Συγκόλληση με Electron Beam σε πίεση 3 mPa[10]**

**2.3.2 Είδη EBW**

*Η electron beam μπορεί να χωριστεί στα τρία παρακάτω 'είδη'*

**2.3.2.1 High-vacuum( BW-HV),**

*όπου το κατεργαζόμενο κομμάτι βρίσκεται σε πίεση κυμαινόμενη από 0.13 έως 0.30 mPa.*

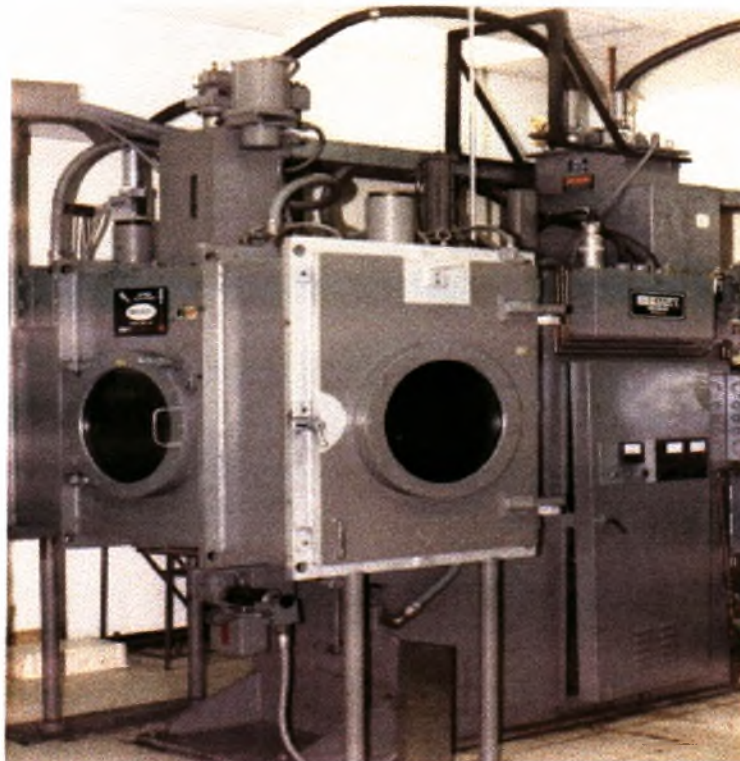
**2.3.2.2 Medium-vacuum(EBW-MV),**

*όπου το κατεργαζόμενο κομμάτι βρίσκεται σε πίεση κυμαινόμενη από 0.13 έως 3300Pa.*

**2.3.2.3 Nonvacuum(EBW-NV)**

*όπου το κατεργαζόμενο κομμάτι βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση στον αέρα ή σε προστατευτικό αέριο.*

*κάθε φορά η περιοχή της πηγής των ηλεκτρονίων βρίσκεται σε πίεση 13mPa ή χαμηλότερη.*



**Εικόνα 9. Θάλαμος κενού EBW[13]**

**2.3.3 Πλεονεκτήματα μεθόδου**

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά της μεθόδου :

- α) ελαχιστοποιούν την παραμόρφωση και την συστολή κατά την διάρκεια της συγκόλλησης,
- β) προωθούν την συγκόλληση ακόμα και των πιο σκληρών ή *work-strengthened* μετάλλων, συνήθως χωρίς υπολογίσιμη επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων της συγκόλλησης,
- γ) προωθούν την συγκόλληση σε περιορισμένες περιοχές θερμικά ευαίσθητων κομματιών προσαρμογών,
- δ) επιτρέπουν ερμητικές ζεύξεις εκκενωμένων *enclosures*, ενώ διατηρούν κενό μέσα στο κομμάτι,
- ε) επιτρέπουν την συγκόλληση συνδυασμών πολλών ανόμοιων μετάλλων που δεν συγκολλούνται με κοινές μεθόδους.

Τέλος η ικανότητα μεταφοράς της δέσμης ηλεκτρονίων σε μεγάλη απόσταση, πάνω από 510 mm, υπό συνθήκες μέσου, υψηλού ή χαμηλού κενού κάνει εφικτές τις κατά άλλες μεθόδους, απροσπέλαστες συγκολλήσεις.

**2.3.4 Περιορισμοί μεθόδου**

Το κόστος του εξοπλισμού της EBW είναι γενικά μεγαλύτερο σε σχέση με των κοινών μεθόδων συγκόλλησης. Ωστόσο το κόστος αυτό, όταν συγκρίνεται με το κόστος παραγωγής άλλων μεθόδων υψηλής πυκνότητας ισχύος (δέσμη *Laser*), δεν θεωρείται τόσο μεγάλο. Το κόστος προετοιμασίας της ένωσης και το κόστος των χρησιμοποιούμενων εργαλείων είναι μεγαλύτερο από οποιασδήποτε άλλης μεθόδου και αυτό γιατί το σχετικά μικρό αποτύπωμα της δέσμης ηλεκτρονίων που χρησιμοποιείται απαιτεί ακριβές κενό συνοχής και θέση.

Οι διαθέσιμες διαστάσεις του θαλάμου κενού και οι διαστάσεις του προς συγκόλληση κομματιού περιορίζονται από τις διαστάσεις του ίδιου του θαλάμου. Ο ρυθμός παραγωγής, όπως επίσης και το κόστος ανά μονάδα επηρεάζονται από την ανάγκη αφαίρεσης και πρόσδοσης αέρα για κάθε «φορτίο» παραγωγής.

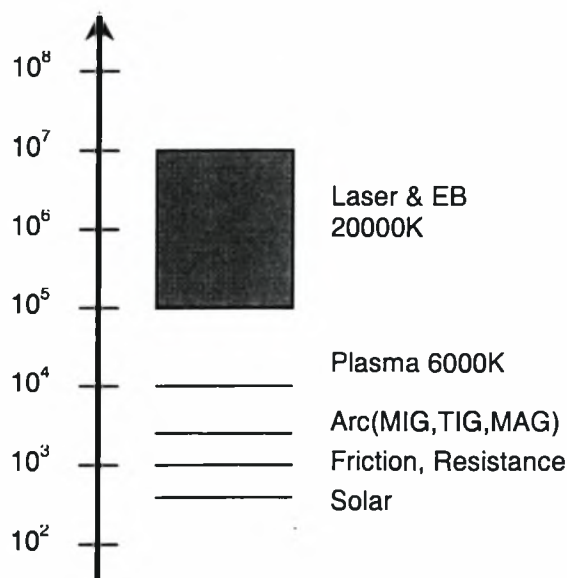
Επειδή η δέσμη ηλεκτρονίων αποκλίνει από μαγνητικά πεδία, μη μαγνητικά ή απομαγνητισμένα υλικά πρέπει να χρησιμοποιούνται για τα εργαλεία και το δέσιμο του κομματιού.



## 2.4 Σύγκριση EBW (συγκόλλησης με ηλεκτρονιακή δέσμη) LBW (συγκόλλησης με δέσμη Laser)

### 2.4.1 Πυκνότητα ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος που προσφέρει η EBW είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της LBW. Γενικά οι δύο μέθοδοι προσφέρουν την ίδια υψηλή πυκνότητα ισχύος (Σχήμα 2.4.1.1).



Εικόνα 10. «Περιοχές πυκνότητας ισχύος» διαφόρων μεθόδων[2]

### 2.4.2 Ποιότητα συγκόλλησης

Τόσο η EBW όσο και η LBW προσφέρουν συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας. Η EBW υπερτερεί επειδή πραγματοποιείται υπό κενό και τα εγκλείσματα εκλείπουν.

### 2.4.3 Μεταφορά δέσμης

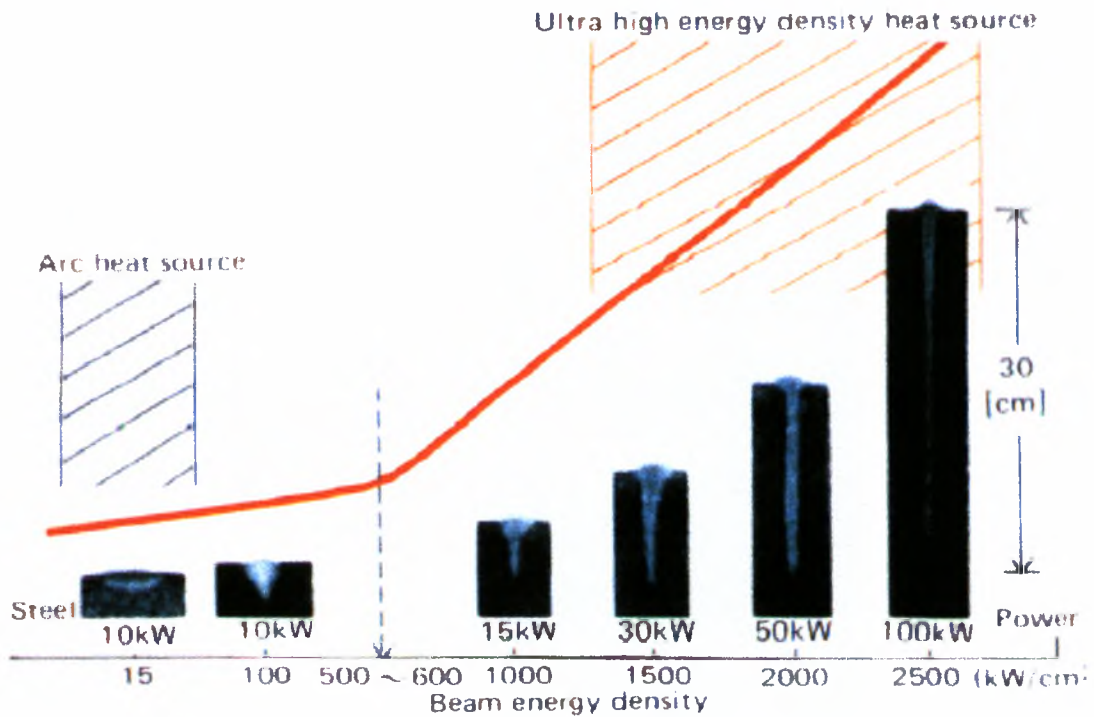
Η δέσμη Laser είναι περισσότερο εύχρηστη ενώ δεν επηρεάζεται από μαγνητικά πεδία.

### 2.4.4 Παραγωγικότητα

Η LBW παρουσιάζει την καλύτερη σχέση κόστους αποτελεσματικότητας. Αντίθετα, παρόλο που η EBW χρησιμοποιεί υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης, η ανάγκη για γέμισμα και άδειασμα του θαλάμου κενού μειώνει σημαντικά την παραγωγικότητα αυτής.

### 2.4.5 Βάθος διείσδυσης

Το βάθος διείσδυσης που επιτυγχάνεται με την ηλεκτρονιακή δέσμη είναι μεγαλύτερο από ότι με την δέσμη Laser.



Εικόνα 11. Επιτεύξιμο βάθος διείσδυσης διαφόρων μεθόδων[5]

2.4.6 Κόστος

Το συνολικό κόστος αρχικής επένδυσης, παραγωγής, χρησιμοποιούμενων εργαλείων , συντήρησης είναι μικρότερο για την συγκόλληση με δέσμη Laser.

Πίνακας 2. Σύγκριση EBW-LBW[5]

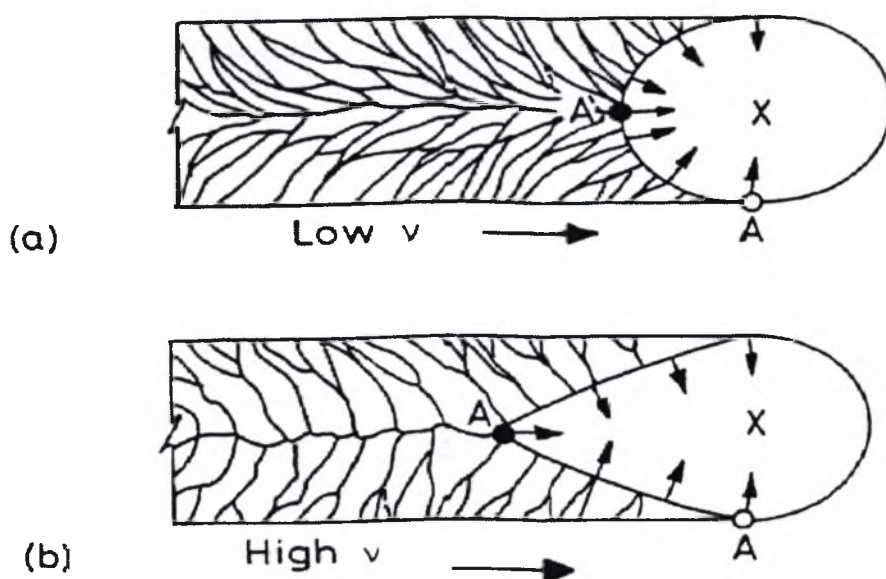
Laser	Electron Beam
<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:</b>	<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Συγκόλληση στον αέρα</li> <li>Πολλαπλούς σταθμούς εργασίας</li> <li>Αξιοπιστία</li> <li>Μαγνητικά Υλικά</li> <li>Υψηλότερη throughput</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Παχύτερα κομμάτια υλικού</li> <li>Ποιότητα συγκόλλησης</li> <li>Ανόμοια μέταλλα</li> <li>Μεγαλύτερη ισχύς</li> </ul>
<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Μικρότερο βάθος διείσδυσης</li> <li>Υψηλό κόστος εξοπλισμού</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Περιβάλλον κενού</li> <li>Μαγνητικά μέταλλα</li> <li>Μικρότερο throughput</li> <li>Υψηλό κόστος εξοπλισμού</li> <li>Μεγάλος χρόνος προετοιμασίας</li> </ul>

## 2.5 Στερεοποίηση συγκολλήσεων τήξεως

## 2.5.1 Επιρροή της ταχύτητας

Η συγκόλληση είναι μία δυναμική διεργασία στην οποία η πηγή θερμότητας κινείται συνεχώς. Αυτό σημαίνει ότι τα μέγιστα *gradients* θερμότητας συνεχώς αλλάζουν διεύθυνση καθώς η πηγή απομακρύνεται. Οι δημιουργούμενοι κιονοειδείς κρύσταλλοι χαρακτηρίζονται από την αναγκαιότητα ακολούθησης του μεγίστου θερμοκρασιακού *gradient* ενώ διατηρούν την προτεινόμενη διεύθυνση ανάπτυξης <100>. Αυτό προκαλεί πολλές φορές απότομη αλλαγή της κατεύθυνσης ανάπτυξης.

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα της αύξησης της ταχύτητας συγκόλλησης είναι η αλλαγή του σχήματος της συγκόλλησης. Το σχήμα αυτής μεταβάλλεται από ελλειπτικό σε ένα στενότερο σχήμα «αχλαδιού». Αφού οι αναπτυσσόμενοι κρύσταλλοι προσπαθούν να ακολουθήσουν τα πλέον απότομα θερμοκρασιακά *gradient*, η αλλαγή της ταχύτητας συγκόλλησης προκαλεί την αλλαγή στον τρόπο στερεοποίησης όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



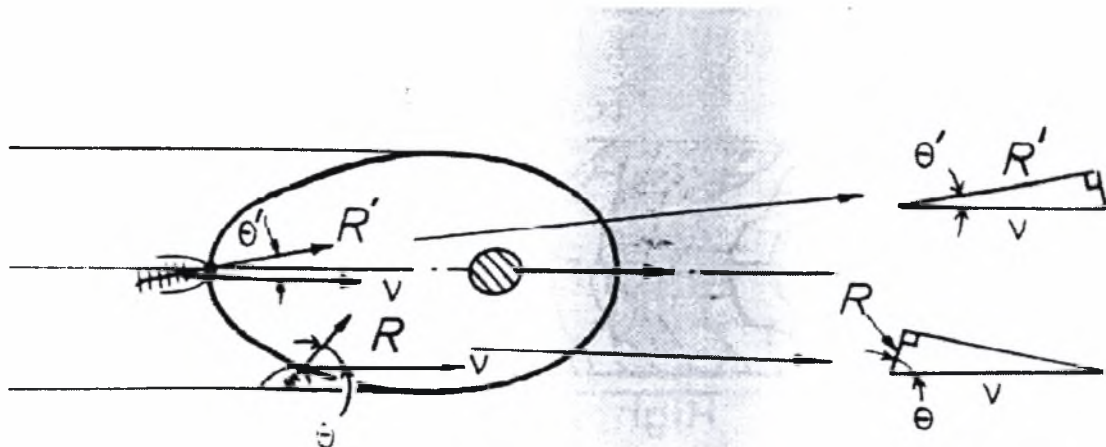
**Εικόνα 12. Μεταβολή σχήματος κρυστάλλων σε σχέση με την ταχύτητα συγκόλλησης[1]**

Όπως παρατηρείται στο b) η λίμνη συγκόλλησης μόλις που διατηρεί σταθερά θερμοκρασιακά *gradient* μέχρις και την κεντρική γραμμή της συγκόλλησης ανταποκρινόμενα στην μεγαλύτερου γωνιακού σχήματος λίμνη. Υπό αυτές τι συνθήκες, οι σχηματιζόμενοι κρύσταλλοι δεν χρειάζεται να αλλάξουν διεύθυνση όπως σε μικρότερες ταχύτητες. Αντ'αυτού, κατάλληλα

προσανατολισμένοι κρύσταλλοι σταθεροποιούνται και υποσκελίζουν άλλους με λιγότερο επιθυμητή διεύθυνση.

### 2.5.2 Γεωμετρία της ανάπτυξης των κρυστάλλων

Θεωρώντας μία διεργασία συγκόλλησης που πραγματοποιείται με ταχύτητα  $-v-$ , η ανάπτυξη των κρυστάλλων πρέπει να λαμβάνει χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται ρυθμός κίνησης ανάλογος της συγκόλλησης. Σύμφωνα με την εικόνα 13..



Εικόνα 13. Ρυθμός ανάπτυξης R-ταχύτητα συγκόλλησης[1]

Είναι φανερό, πως για ρυθμό ανάπτυξης κρυστάλλων  $R$ , έτσι ώστε να υπάρχει «συχρονισμός» με την ταχύτητα συγκόλλησης  $-v-$ , η συνθήκη που πρέπει να πληρείται είναι η :

$$R = v \cos.\theta$$

Στο σχήμα τα βέλη αναπαριστούν διανύσματα ταχύτητας. Το διάνυσμα που αντιπροσωπεύει την ταχύτητα συγκόλλησης ή την ταχύτητα κίνησης των ισόθερμων είναι σταθερό. Αντίθετα, το διάνυσμα του ρυθμού ανάπτυξης των κρυστάλλων πρέπει συνεχώς να αυτοπροσαρμόζεται καθώς η διεργασία συνεχίζεται, προς την κεντρική γραμμή. Σύμφωνα με αυτά, ο ρυθμός στερεοποίησης είναι μεγαλύτερος όταν  $\theta=0$  (π.χ. στην κεντρική γραμμή) και μικρότερος στην άκρη της συγκόλλησης όπου η γωνία  $\theta$  είναι μεγαλύτερη. Έτσι η ξαφνική αλλαγή της κατεύθυνσης των κρυστάλλων στην κεντρική γραμμή σχετίζεται με υψηλούς ρυθμούς. Μικρότεροι ρυθμοί ανάπτυξης των κρυστάλλων σχετίζονται με επίπεδη επιφάνεια στερεοποίησης και καθώς ο ρυθμός αυξάνεται η επιφάνεια αλλάζει σε κυψελοειδή και μετά κυψελοειδή δενδριτική.

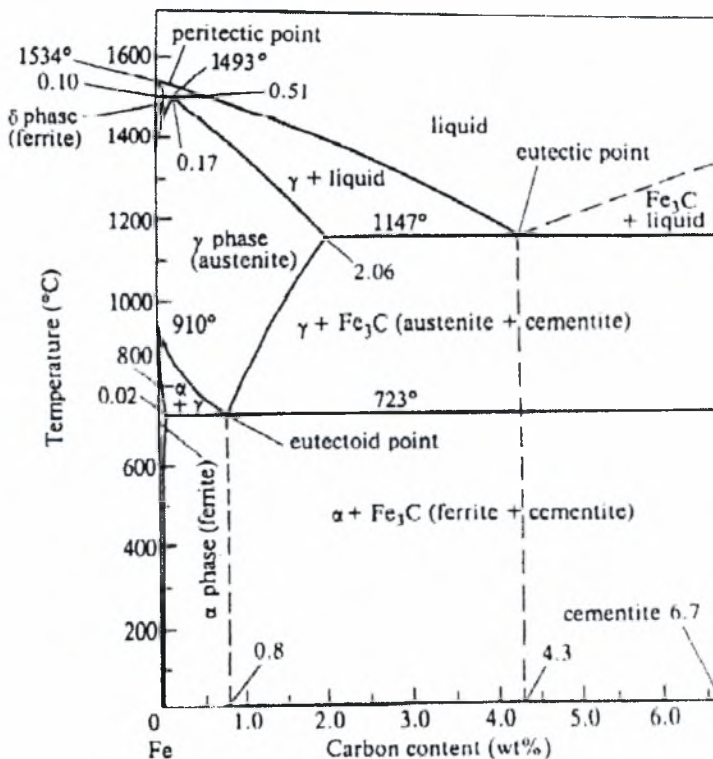
Καταλήγοντας, η στερεοποίηση κατά την συγκόλληση έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

1. Η στερεοποίηση αρχικά λαμβάνει χώρα στους πίσω-λιωμένους κόκκους του μετάλλου βάσης

2. Η αρχή δημιουργίας κρυστάλλων είναι σχετικά αργή , δημιουργώντας πρώτα ένα επίπεδο και μετά ένα άψογο κυψελοειδές «θεμέλιο»
3. Η μέση κατάσταση της κρυσταλλικής ανάπτυξης είναι η κυψελοειδής-δενδριτική που οδηγεί σε χονδροειδή ανάπτυξη των κρυστάλλων στην κατεύθυνση <100> στην περίπτωση των κυβικών κρυστάλλων
4. Η τελική στερεοποίηση που συντελείται στην κεντρική γραμμή σχετίζεται με γρήγορη ανάπτυξη κρυστάλλων και έντονο διαχωρισμό. Σε σχέση με τις συνθήκες συγκόλλησης, τελικά ισοαξονική δενδριτική μορφή μπορεί να εμφανιστεί.

### 2.5.3 Συστασιακή υπέρψυξη

Συστασιακή υπέρψυξη ονομάζεται το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο η υπέρψυξη μπροστά από την διεπιφάνεια S/L δεν οφείλεται στο gradient της θερμότητας αλλά στην μεταβολή της σύστασης του υγρού μέσα στο διαχυτικό οριακό στρώμα μπροστά από την S/L . Κατά την κίνηση της διεπιφάνειας από το στερεό προς το υγρό παρουσιάζεται μια τάση αποβολής των κραματικών στοιχείων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της σύστασης και σύμφωνα με το διάγραμμα φάσεων (εικόνα 14)

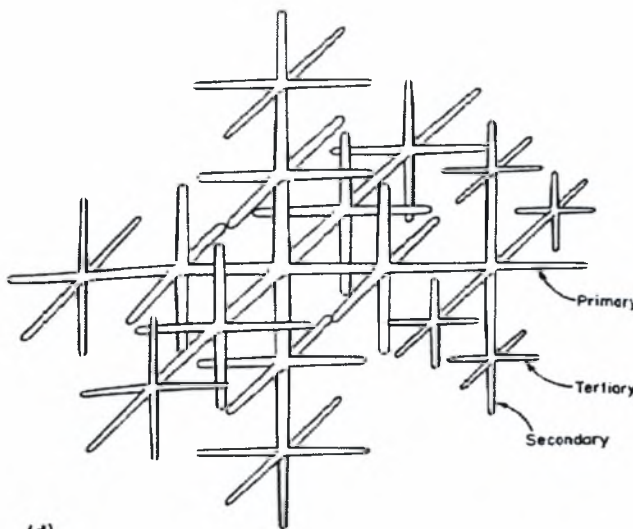


Εικόνα 14. Διάγραμμα φάσεων Fe-C[1]



την αύξηση της  $T_L$ . Έτσι εάν η πραγματική κατανομή στο υγρό μπροστά από την S/L είναι  $T_{R1}$ , τότε για την απόσταση από την διεπιφάνεια  $d_{sc}$ , το υγρό θα είναι υπέρψυχρο διότι  $T_{R1} < T_L$  για  $\chi < d_{sc}$ . Οποιαδήποτε αστάθεια της διεπιφάνειας με την μορφή προεξοχής θα εινσχυθεί και θα μεγαλώσει .

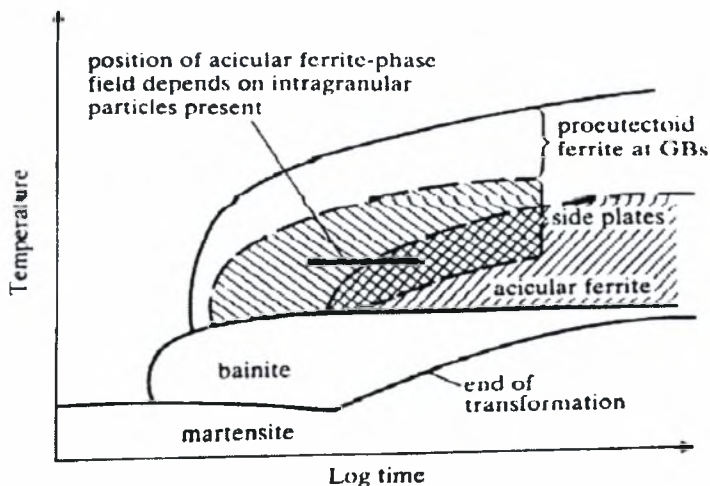
Η διεπιφάνεια S/L διασπάται με την συστασιακή υπέρψυξη σε κυψελίδες , οι οποίες επιμηκύνονται στην διεύθυνση αναπτύξεως. Η κυψελοειδής μορφή διατηρείται για περιορισμένο εύρος τιμών  $G_L$ . Για μεγαλύτερες τιμές αναπτύξεως R ή για χαμηλότερες  $G_L$  σχηματίζονται δενδρίτες με πρωτογενείς , δευτερογενείς ή και τριτογενείς κλάδους.



(d)  
**Εικόνα 15. Σχηματική παράσταση πρωτογενών , δευτερογενών και τριτογενών κλάδων δενδρίτη[1]**

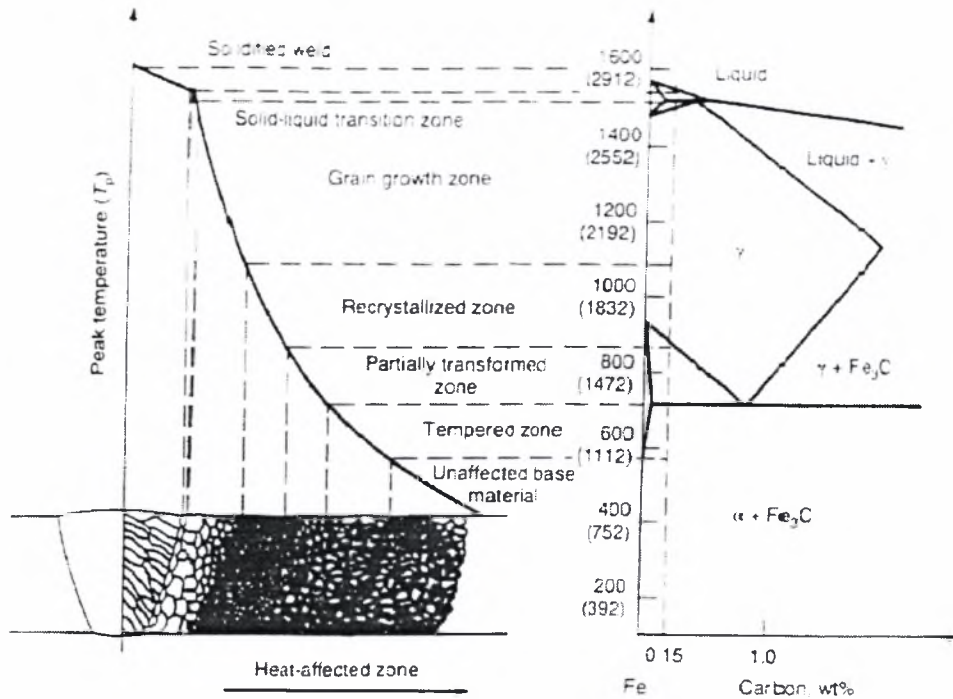
**2.5.4 Μικροδομή**

Οι δομές που μπορούν να παρουσιαστούν σε μία συγκόλληση είναι άμεσα συνδεδεμένες με τον τρόπο ψύξης του υλικού. Η σχέση ρυθμού ψύξη και εμφανιζόμενων δομών εμφανίζεται σε ένα διάγραμμα TTT, όπως το παρακάτω :



**Εικόνα 16. Διάγραμμα TTT[1]**

Οι μορφές αυτές σχετίζονται άμεσα με την θέση του υλικού ως προς το κέντρο της συγκόλλησης και μπορούν να ενσωματωθούν θεωρητικά σε «υποζώνες» σαν αυτές που παρουσιάζονται παρακάτω.



**Εικόνα 17. Διαφορετικές «υποζώνες» που δύναται να δημιουργηθούν κατά την στερεοποίηση χάλυβα 0.15%(w.t.) σε C[14]**

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### 3.1 Σκοπός-στόχος

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε ήταν αφενός η αξιολόγηση της συγκόλλησης με ηλεκτρονιακή δέσμη, αφετέρου η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του υλικού υπό την δέσμη Laser προκειμένου να βρεθεί περιοχή κατάλληλων συνθηκών για το επόμενο βήμα – συγκόλληση της κεφαλής του κυλίνδρου του άρματος μάχης. Η ενότητα «Πειραματική διαδικασία» χωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά την μεταλλογραφία του μετάλλου βάσης, το δεύτερο καταπιάνεται με τον χαρακτηρισμό της EB (electron beam), ενώ το τρίτο περιλαμβάνει την πειραματική προσπάθεια για τον χαρακτηρισμό της LB (laser beam).

#### 1<sup>η</sup> Ενότητα – Υλικό βάσης

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας χάλυβας κατασκευών με μέση περιεκτικότητα άνθρακα ( $C > 0.1 \%$ ) και χαμηλή περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία Cr, Ni, Mo. Η χημική του σύσταση εμφανίζεται παρακάτω

#### Πίνακας 3.

Χημική Σύσταση μετάλλου βάσης

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %
0.34	0.28	0.78	0.013	0.005	0.5	0.48	0.21

Χάλυβες με παρόμοια σύσταση σύμφωνα με την τυποποίηση SAE ονομάζονται 8735 (SAE) - J13442 (UNS) (πίνακας 3.1.2)

#### Πίνακας 4.

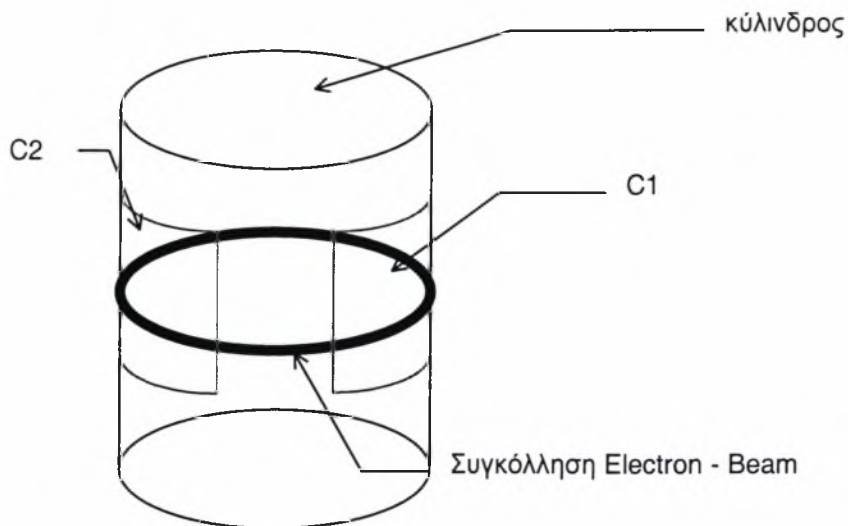
Προδιαγραφή SAE

	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %
Min	0.33	0.2	0.75	0	0	0.4	0.4	0.2
Max	0.38	0.35	1	0.04	0.04	0.6	0.7	0.3

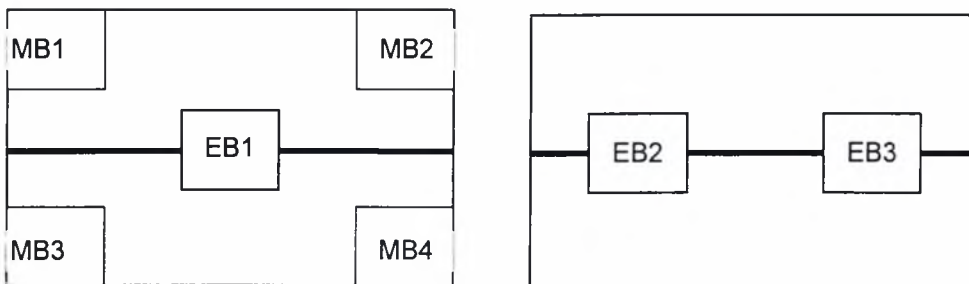
Για να υπάρχει σημείο αναφοράς ανάμεσα στις δύο συγκολλήσεις (EB-LB) και στις μεταβολές που αυτές επέφεραν στο μέταλλο βάσης το μέταλλο βάσης μεταλλογραφήθηκε και μικροσκοπηρομετρήθηκε.

Τα 4 δοκίμια MB1-MB4, καθώς και τα τρία δοκίμια EB1-EB3 προέκυψαν από τον αρχικό κύλινδρο με κοπή σύμφωνα με τις εικόνες 21 και 22.

Εικόνα 18. Αφαίρεση C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> από κύλινδρο



Εικόνα 19. Κοπή δοκιμίων MB1, MB2, MB3, MB4, EB1, EB2, EB3



Για την μεταλλογραφία του μετάλλου βάσης χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω υλικοτεχνική υποδομή του εργαστηρίου υλικών.

**Πίνακας 5.**

Υλικοτεχνική υποδομή που χρησιμοποιήθηκε

A. Κοπή δοκιμίων	Struers Labotom
B. Εγκιβωτισμός	Struers Prestopress-3
Γ. Λείανση	Struers Knuth-Rotor 3
Δ. Στίλβωση	Struers DAP-V
Ε. Χημική Προσβολή	Nital 2%
ΣΤ. Μικροσκόπιο	Leica Arostomet
Z. Στερεοσκόπιο	Leica Wild M32Z
Η. Μικροσκληρομετρήσεις	Shimadzu HMV-200

Οι μικροσκληρομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το μικροσκληρόμετρο του εργαστηρίου. Η περιοχή που μετρήθηκε κάθε φορά εμφανίζεται παρακάτω.

**Εικόνα 20.**

Σημεία μικροσκληρομέτρησης

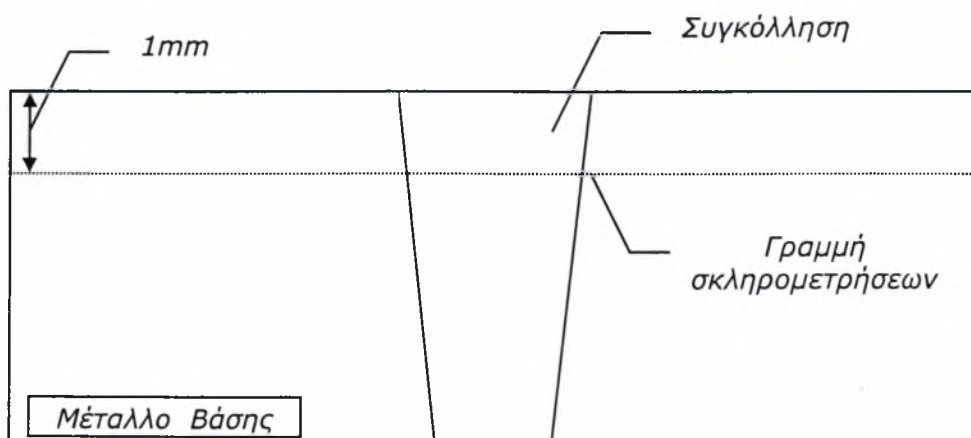
1.	2.	3.	4.	5.
6.	7.	8.	9.	10.
11.	12.	13.	14.	15.

**2<sup>η</sup> Ενότητα – Χαρακτηρισμός ΕΒ**

Ο χαρακτηρισμός της ήδη υπάρχουσας συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων περιελάμβανε ραδιογραφία, μεταλλογραφία και μικροσκληρομετρήσεις αυτής. Η ραδιογραφία πραγματοποιήθηκε από το ειδικευμένο προσωπικό της ΕΒΕΤΑΜ Α.Ε. Η περιοχή μικροσκληρομετρήσεων παρουσιάζεται

**Εικόνα 21.**

Περιοχή μικροσκληρομετρήσεων





**3<sup>η</sup> Ενότητα – Διερεύνηση περιοχής συνθηκών**

Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιώντας το CO<sub>2</sub>, ισχύος 1500W Laser της EBETAM Α.Ε. πραγματοποιήθηκαν δεκαπέντε δοκιμαστικά «κορδόνια» στην επιφάνεια του ήδη υπάρχοντος κυλίνδρου. Τα πρώτα πέντε πραγματοποιήθηκαν με την επιφάνεια του κυλίνδρου μη αμμοβολισμένη, ενώ στα υπόλοιπα δέκα, η επιφάνεια είχε υποστεί καθαρισμό με αμμοβολή.

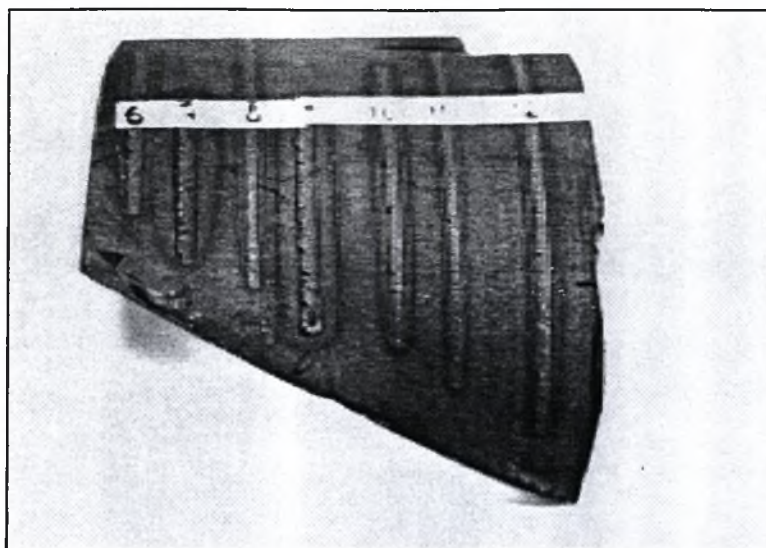
**Πίνακας 6.****Συνθήκες πειραματικών συγκολλήσεων –bead on plate - στα εργαστήρια της EBETAM-Συγκολλούμενη επιφάνεια μη αμμοβολισμένη**

α/α συγκόλλησης	Ισχύς	Σημείο Εστίασης	Ταχύτητα	Αέριο ( He )
<b>1</b>	1300	7mm	0,08m/min	2 bar
<b>2</b>	1300	7mm	0,04m/min	2 bar
<b>3</b>	1300	7mm	0,2m/min	2 bar
<b>4</b>	1300	8mm	0,08m/min	2 bar
<b>5</b>	1300	8mm	0,04m/min	2 bar

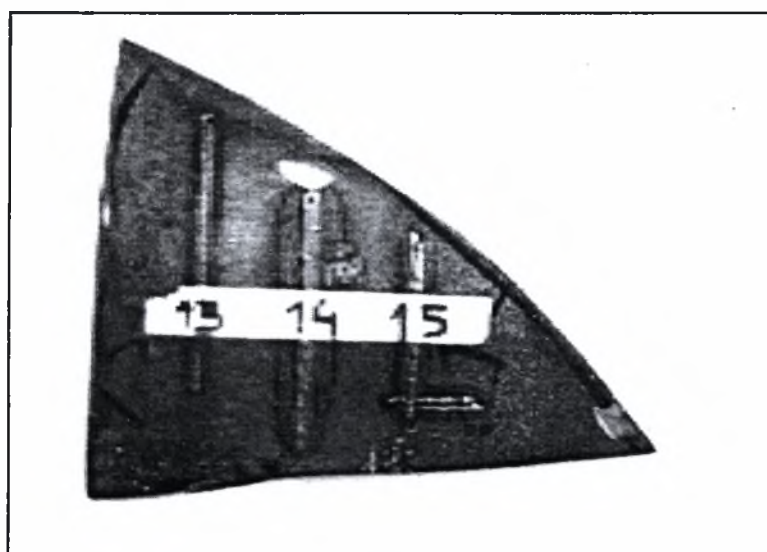
**Πίνακας 7.****Συνθήκες πειραματικών συγκολλήσεων –bead on plate - στα εργαστήρια της EBETAM-Συγκολλούμενη επιφάνεια αμμοβολισμένη**

α/α συγκόλλησης	Ισχύς	Σημείο Εστίασης	Ταχύτητα	Αέριο ( He )
<b>6</b>	1300	7mm	0,08m/min	2 bar
<b>7</b>	1300	7mm	0,04m/min	2 bar
<b>8</b>	1300	7mm	0,2m/min	2 bar
<b>9</b>	1300	8mm	0,08m/min	2 bar
<b>10</b>	1300	8mm	0,2m/min	2 bar
<b>11</b>	1300	8mm	0.32m/min	2 bar
<b>12</b>	1300	9mm	0,2m/min	2 bar
<b>13</b>	1300	9mm	0,32m/min	2 bar
<b>14</b>	1300	9mm	0,08m/min	2 bar
<b>15</b>	1300	9mm	0,2m, min	5 bar

Ακολούθησε μεταλλογραφία και μικροσληρομέτρηση των δεκαπέντε εξαγχθέντων δοκιμίων. Χαρακτηριστικές μακροφωτογραφίες από την επιφάνεια των 'κορδονιών' δίνονται στις εικόνες 27 και 28.



*Εικόνα 22. Πειραματικές συγκολλήσεις 6-12*



*Εικόνα 23. Πειραματικές συγκολλήσεις 13-15*

#### 4. Αποτελέσματα – Συζήτηση

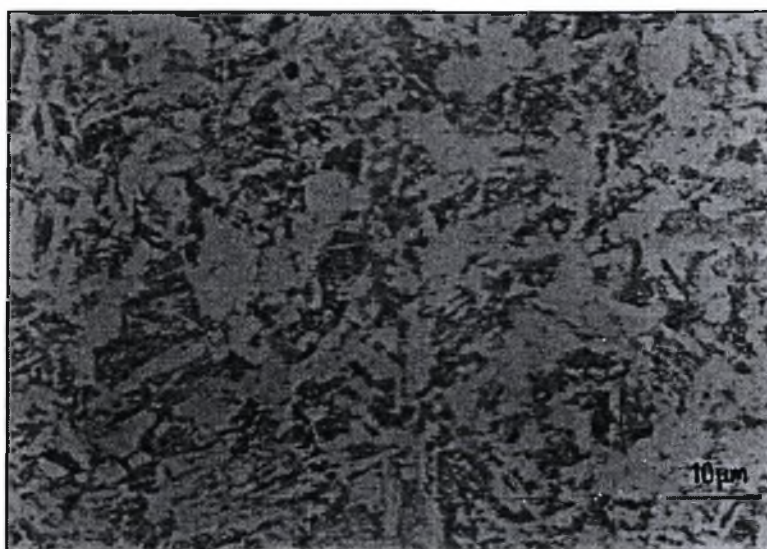
##### 4.1 Εισαγωγή

Όπως και η πειραματική διαδικασία, έτσι και η ενότητα «Αποτελέσματα συζήτηση» χωρίζεται σε τρία μέρη.

##### 4.2 Μέταλλο βάσης

###### 4.2.1 Μεταλλογραφία

Η μεταλλογραφία του μετάλλου βάσης (Εικόνα 29.) δείχνει φερρίτη (λευκές περιοχές) και περλίτη (μαύρες περιοχές), δομή αναμενόμενη για ένα χάλυβα αυτής της κατηγορίας.



Εικόνα 24. Μέταλλο Βάσης- EB3

###### 4.2.2 Μικροσκληρομετρήσεις

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων

Μέση τιμή σκληρότητας : 256,5 HV

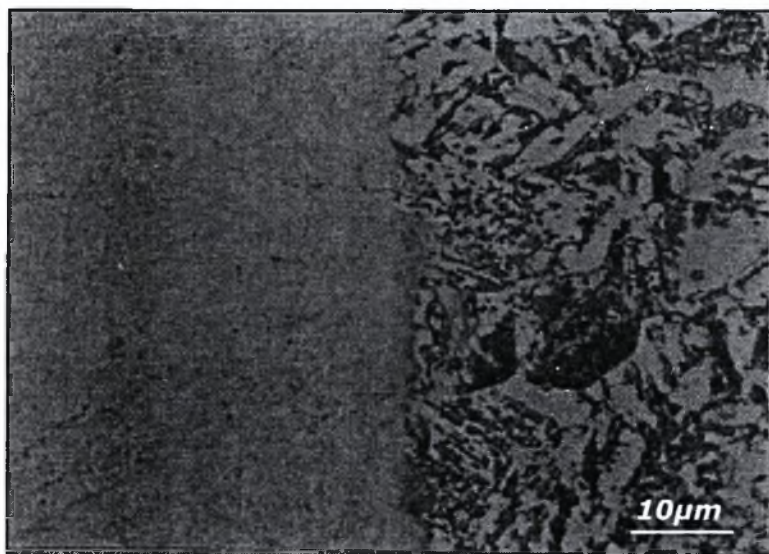
Τυπική απόκλιση : 13

#### 4.3. Χαρακτηρισμός συγκόλλησης με ηλεκτρονική δέσμη

##### 4.3.1 Μεταλλογραφία

Η εξέταση των τριών δοκιμών της συγκόλλησης με ηλεκτρονική δέσμη κατέδειξε με τον πιο εμφανή τρόπο τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής. Έτσι όπως φαίνεται και στην εικόνα 30. η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη του μετάλλου βάσης είναι εξαιρετικά μικρή της τάξης των 5μm. Στην λίμνη συγκόλλησης(εικόνα

31.) είναι ορατός μαρτενσίτης που οφείλεται στους ταχείς ρυθμούς ψύξης του κομματιού. Στις μακροφωτογραφίες των δοκιμίων φαίνεται ο χαρακτηριστικός κύλινδρος της συγκόλλησης keyhole, καθώς επίσης και γραμμές στερεοποίησης. Όπως παρατηρείτε οι γραμμές συγκόλλησης στην περιοχή του κυλίνδρου είναι σχεδόν οριζόντιες ( keyhole ).

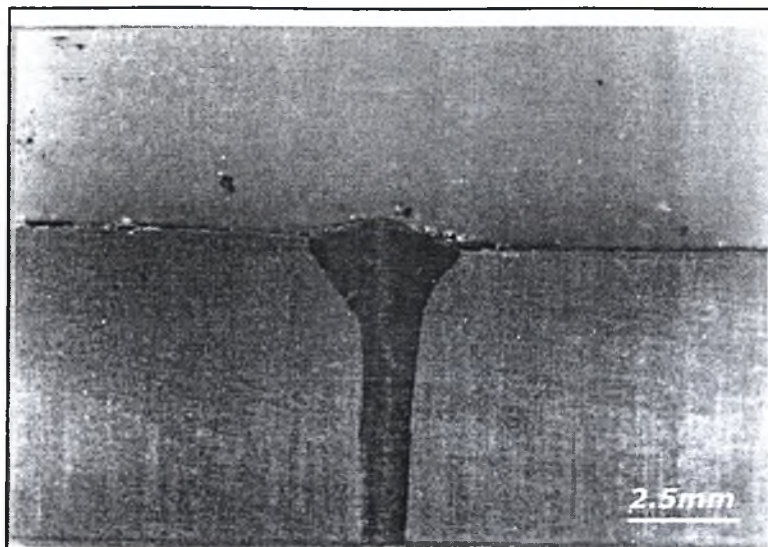


**Εικόνα 25. Μέταλλο Βάσης-ΘΕΖ EB2**

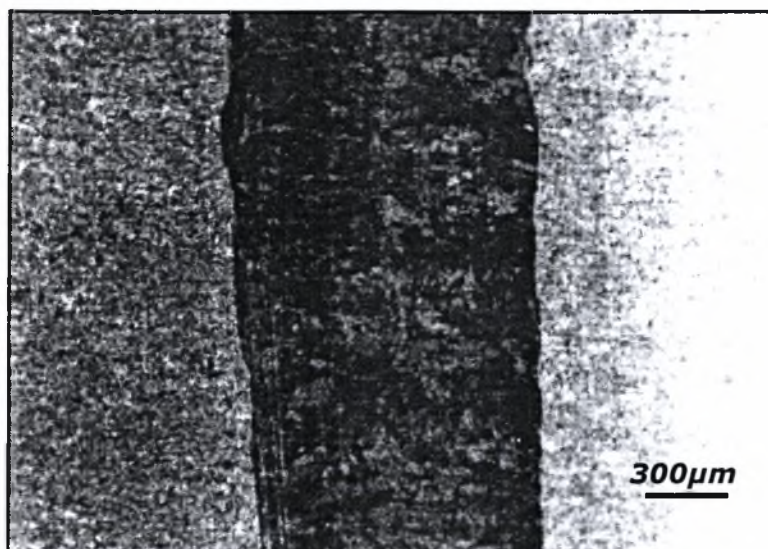


**Εικόνα 26. Λίμνη συγκόλλησης EB1**

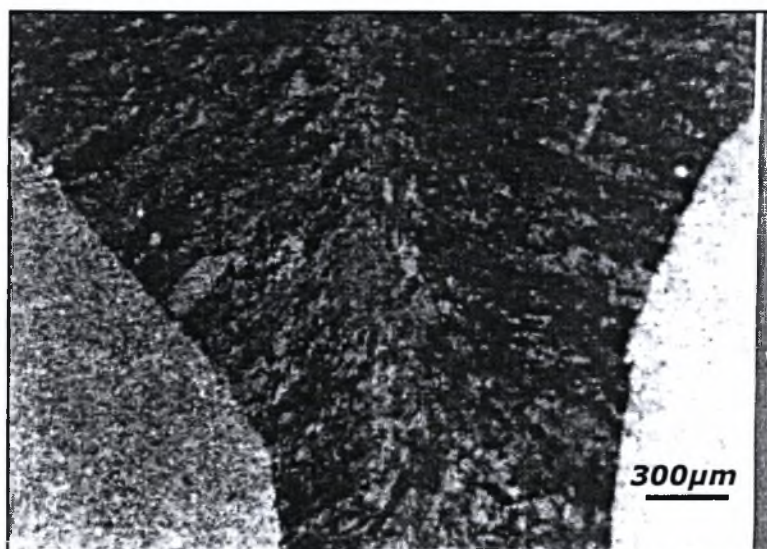




Εικόνα 27. EB1



Εικόνα 28. Κύλινδρος Συγκόλλησης EB2



Εικόνα 29. Λίμνη Συγκόλλησης EB3

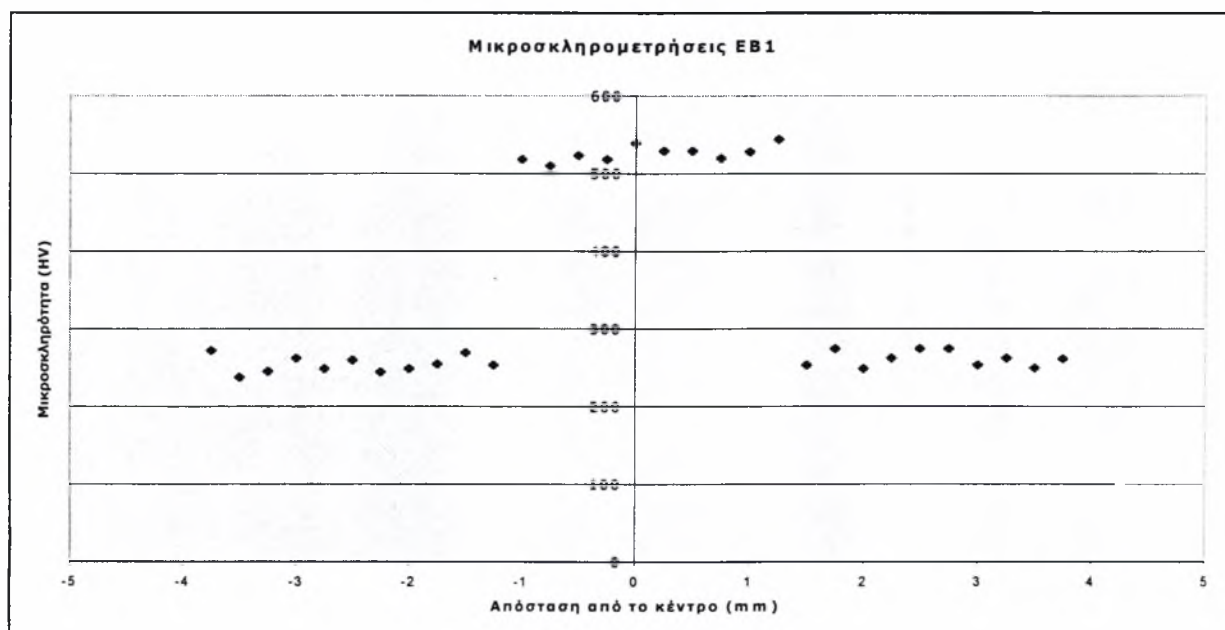


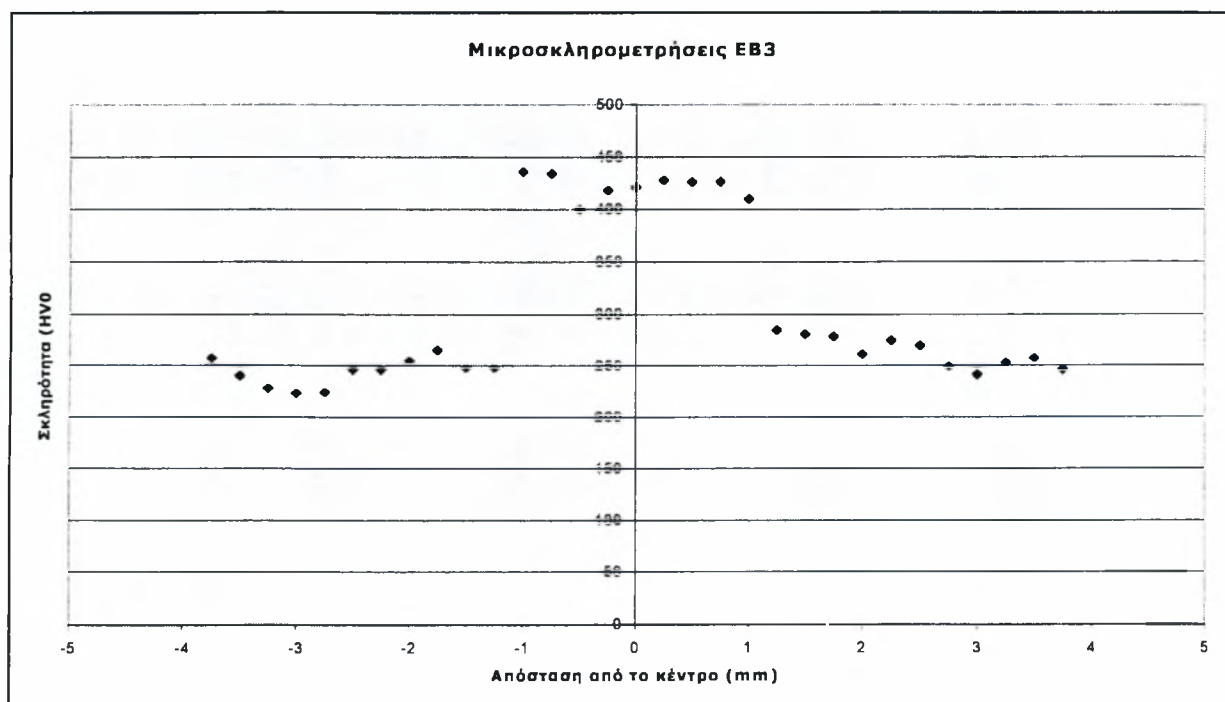
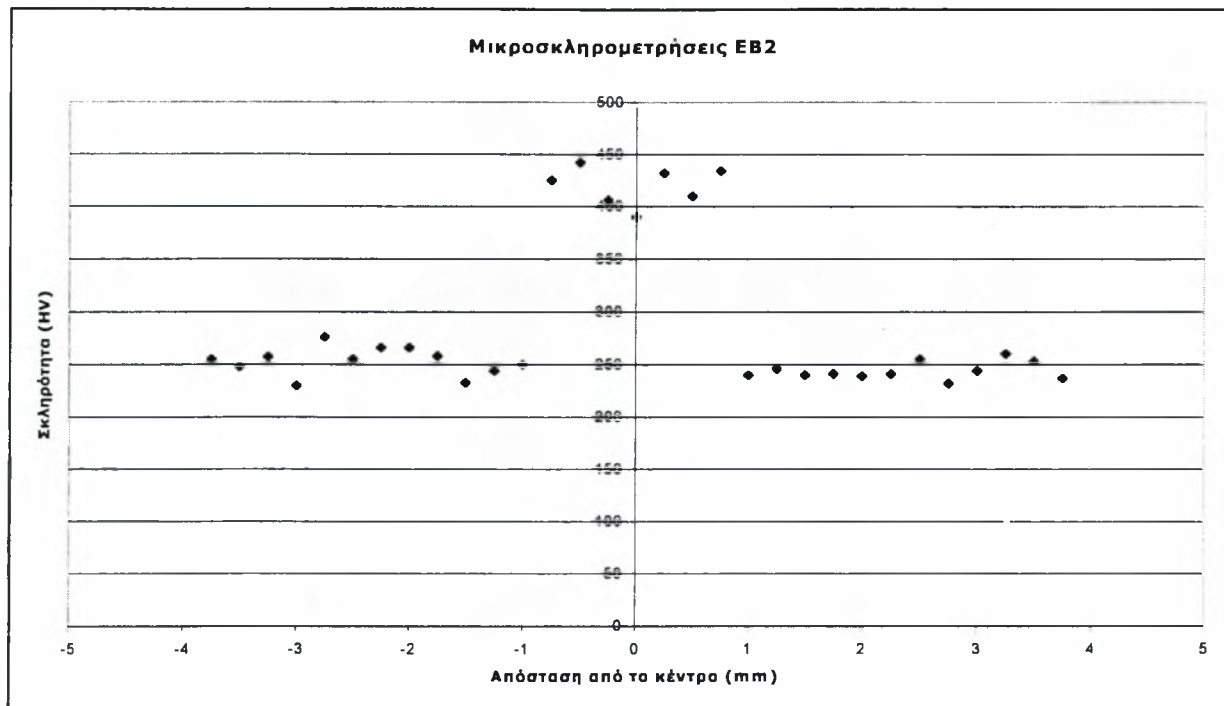
#### 4.3.2 Ραδιογραφία

Η ραδιογραφία μέρους της συγκόλλησης της ηλεκτρονιακής δέσμης κατέδειξε μία συγκόλληση καθαρή από εγκλείσματα και πόρους. Σύμφωνα λοιπόν με την προδιαγραφή EN 25817:1992 η EBW κατατάσσεται στο υψηλότερο επίπεδο ποιότητας 'Stringent B'.

#### 4.3.3 Μικροσκληρομετρήσεις

Τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων παρουσιάζονται στα επόμενα γραφήματα.





#### 4.3.4 Συμπεράσματα

Όπως φάνηκε από την μεταλλογραφία και από την ραδιογραφία σφάλματα και εγκλείσματα απουσιάζουν από την υπάρχουσα συγκόλληση με ηλεκτρονική δέσμη. Η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη είναι εξαιρετικά μικρή της τάξης των 5μm. Η σκληρότητα της λίμνης συγκόλλησης δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Ο λόγος εύρους προς βάθος διείσδυσης είναι περίπου ίσος με 4. Είναι φανερό λοιπόν πως η υπάρχουσα συγκόλληση είναι μία συγκόλληση εξαιρετικής ποιότητας.

#### 4.4 Πειραματικές συγκολλήσεις Laser

Μετά την αξιολόγηση της συγκόλλησης με ηλεκτρονική δέσμη, το επόμενο μέρος της εργασίας αφορούσε την διερεύνηση κατάλληλης περιοχής συνθηκών για την μετέπειτα συγκόλληση με δέσμη Laser. Επειδή αυτό που ενδιέφερε περισσότερο ήταν η επίτευξη ικανοποιητικού βάθους διείσδυσης παρουσιάζονται πρώτα οι αντίστοιχοι πίνακες.

**Πίνακας 8.**

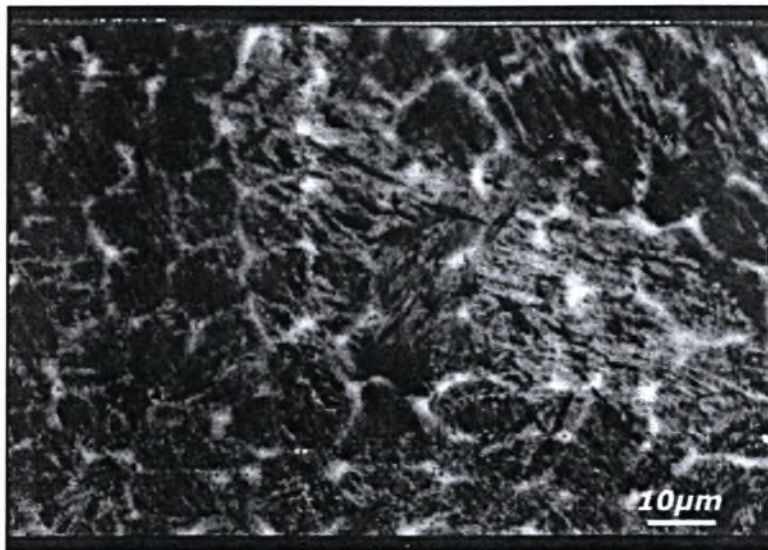
	<b>Βάθος διείσδυσης- H(mm)</b>	<b>Εύρος-W (mm)</b>	<b>H/W</b>
Lb1	2,7	3,8	0,71
Lb2	3,1	4,2	0,739
Lb3	0,5	0,8	0,625
Lb4	2,2	3,6	0,61
Lb5	2,4	3,7	0,649

**Πίνακας 9.**

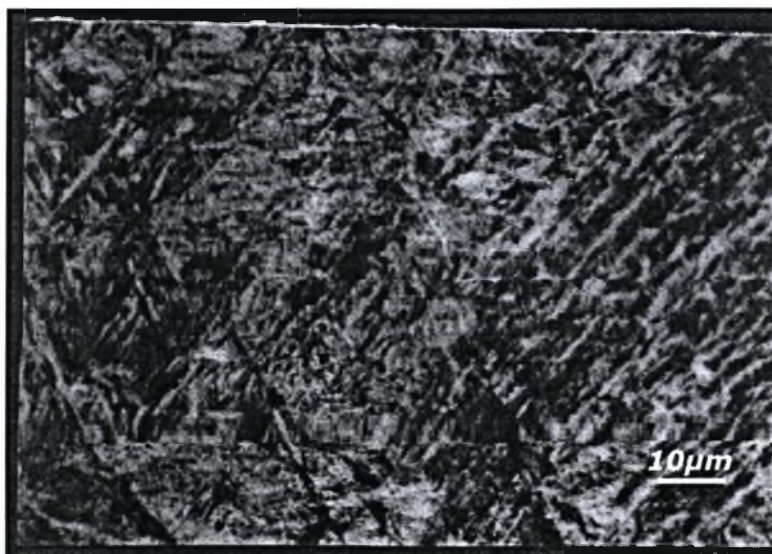
	<b>Βάθος διείσδυσης- H(mm)</b>	<b>Εύρος-W (mm)</b>	<b>H/W</b>
Lb6	2,5	3,2	0,781
Lb7	2,8	4	0,7
Lb8	2	2,5	0,8
Lb9	2,8	3,9	0,718
Lb10	1,9	2,3	0,826
Lb11	1,8	2	0,9
Lb12	2	2,6	0,769
Lb13	1,4	1,9	0,737
Lb14	2,4	3,4	0,706
Lb15	1,9	2,2	0,864

**4.4.1 Μεταλλογραφία**

Κατά την μεταλλογραφία των 15 δοκιμίων παρουσιάστηκαν αρκετές διαφορές μεταξύ τους, ειδικότερα στην λίμνη συγκόλλησης. Σημειώνεται πως σε όλα τα δοκίμια η συγκόλληση έγινε με αγωγή. Έτσι σε άλλα δοκίμια παρατηρείται στην Λ.Σ. κυψελοειδής μορφή, σε άλλα δενδριτική. Όλες οι παραπάνω μορφές αφορούν τον τρόπο στερεοποίησης. Στην ΘΕΖ παρουσιάζεται σε όλα τα δοκίμια μαρτενσίτης. Ωστόσο στην λίμνη συγκόλλησης παρατηρούνται άλλοτε μαρτενσίτης, άλλοτε μαρτενσίτης και μπαινίτης και άλλοτε μαρτενσίτης, μπαινίτης και Widmanstätten φερρίτης. Στο δοκίμιο LB5 ανάμεσα στον μαρτενσίτη της λίμνης παρουσιάζονται και καρβίδια. Σε μερικά δοκίμια παρουσιάστηκαν επίσης πόροι.

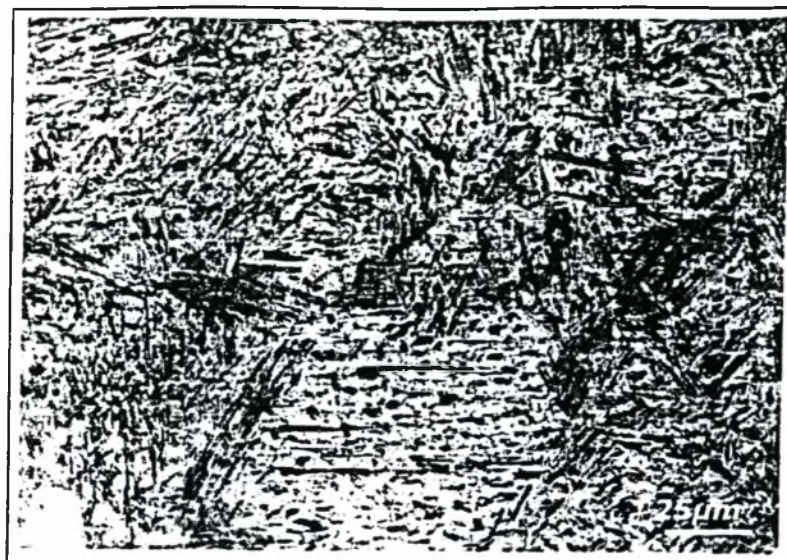


**Εικόνα 30. Λίμνη συγκόλλησης –Κυψελοειδής μορφή, Μπαινίτης&Μαρτενσίτης- LB1**

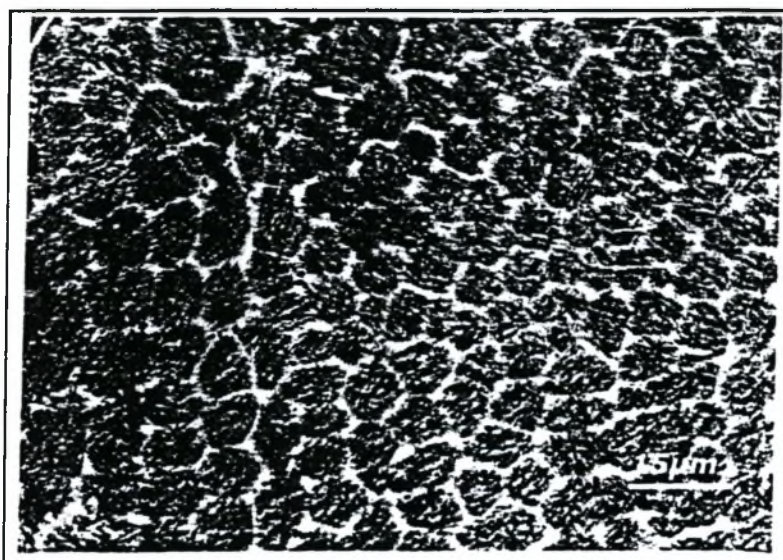


**Εικόνα 31. Λίμνη συγκόλλησης-Μαρτενσίτης- LB6**

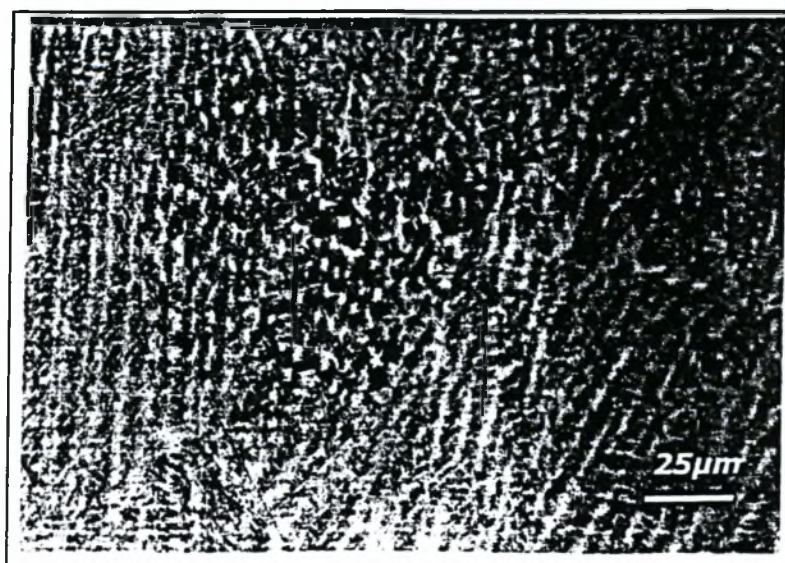




Εικόνα 32. Λίμνη συγκόλλησης LB5-Μαρτενσίτης, καρβίδια

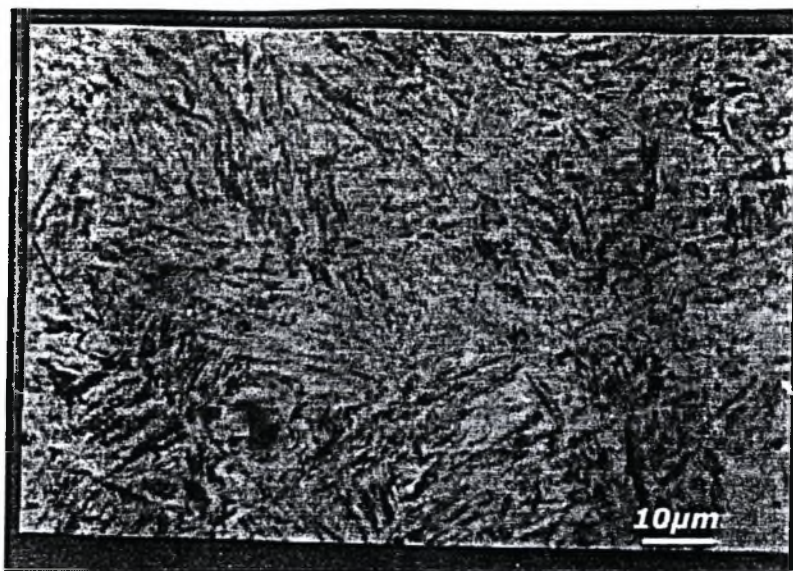


Εικόνα 33. Λίμνη συγκόλλησης LB1-κυφέλες



Εικόνα 34. Λίμνη συγκόλλησης LB4-δενδρίτες&κυφέλες





Εικόνα 35. Λίμνη συγκόλλησης LB9

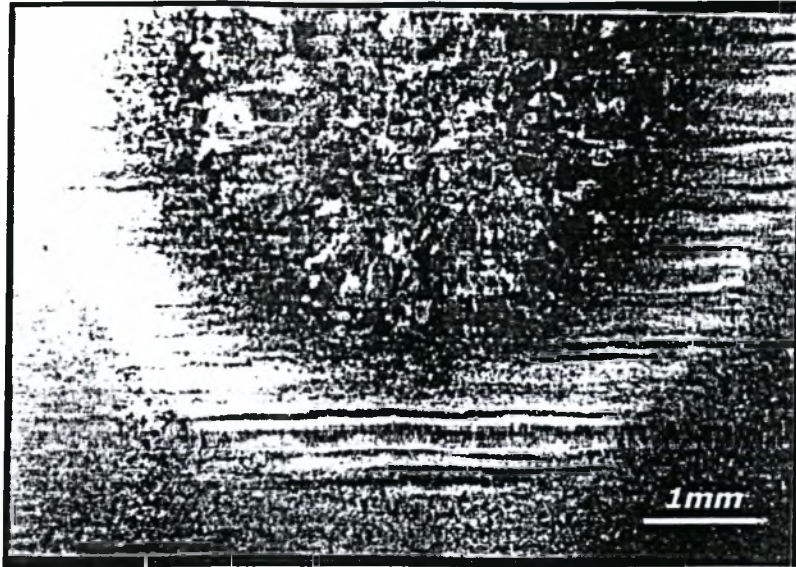


Εικόνα 36. LB1 - πόρος

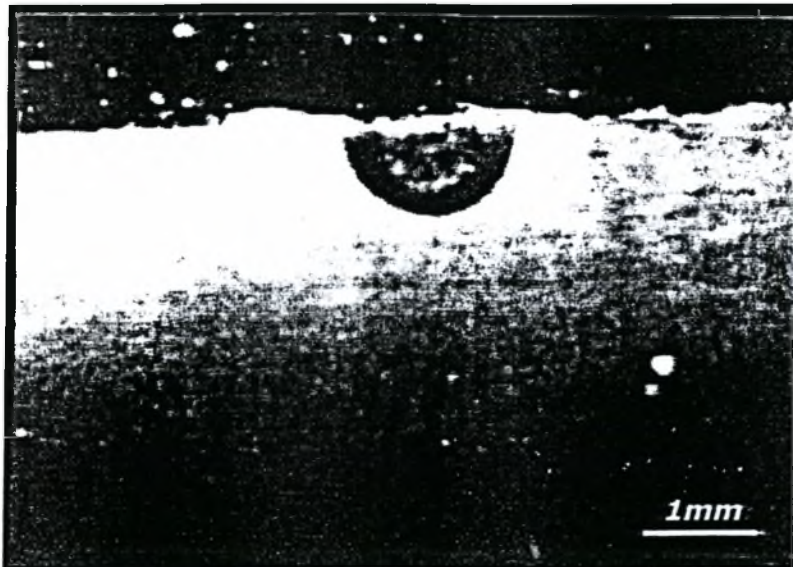


Εικόνα 37. Widmanstätten φερριτης-LB5

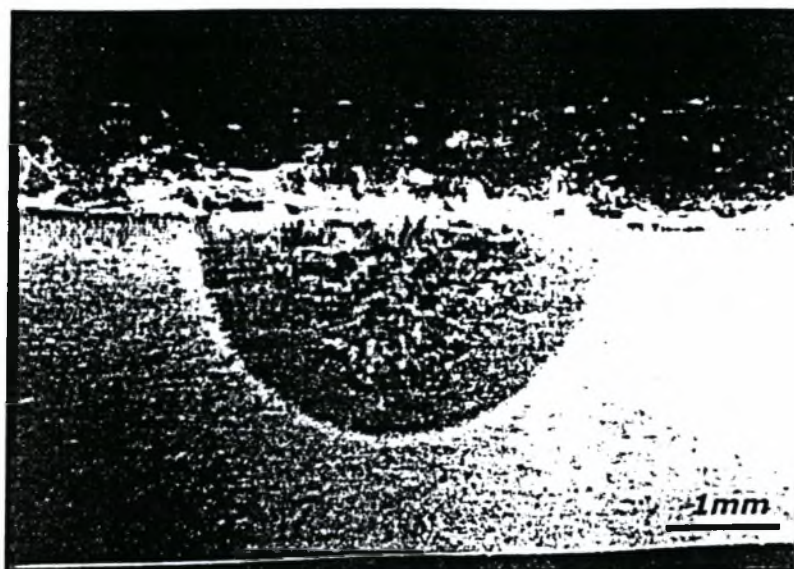




Εικόνα 38. LB2



Εικόνα 39. LB3

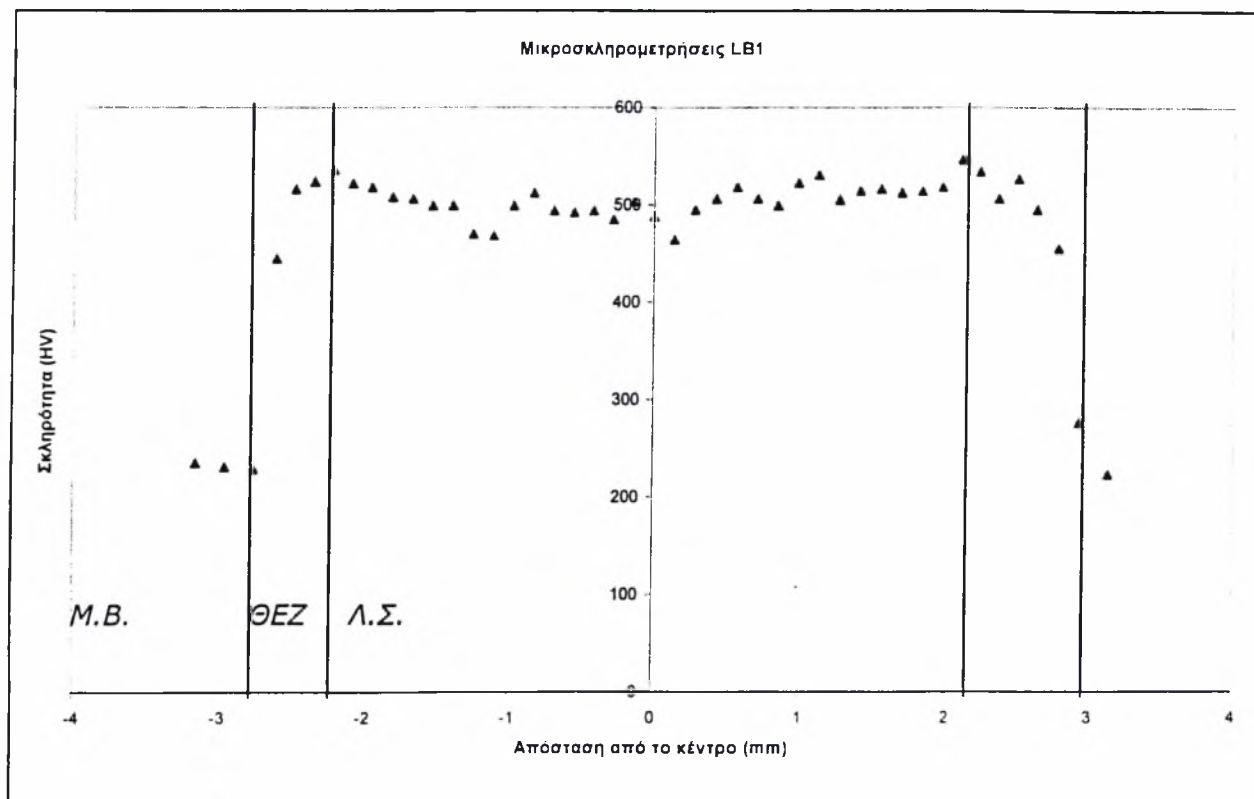


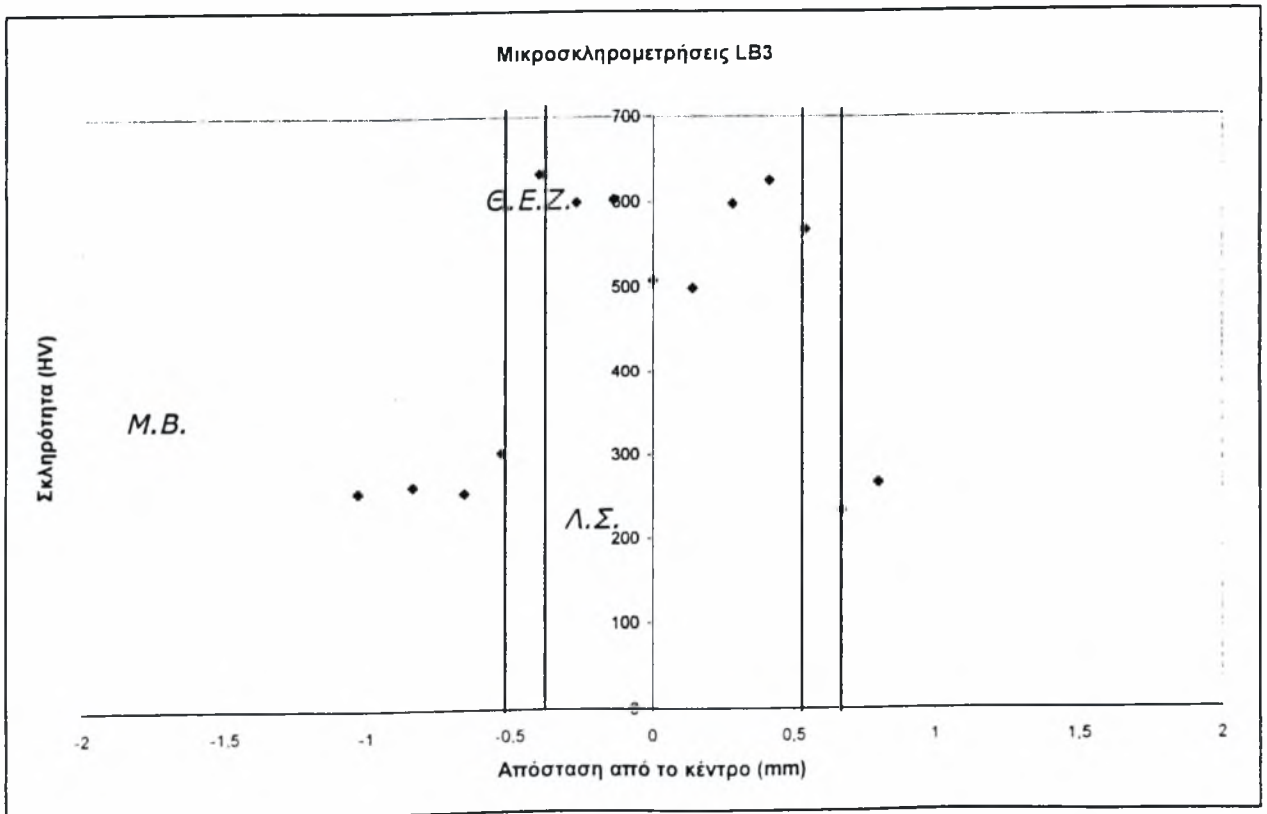
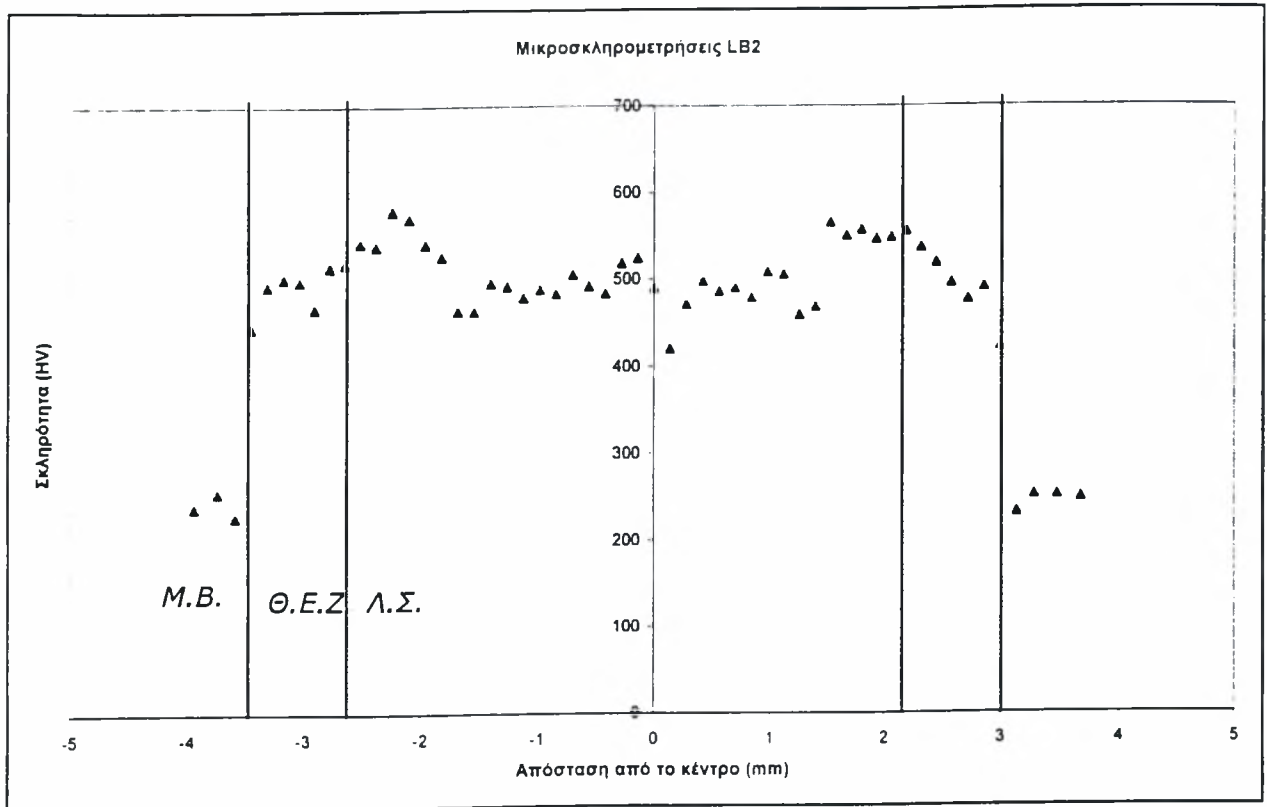
Εικόνα 40. LB11

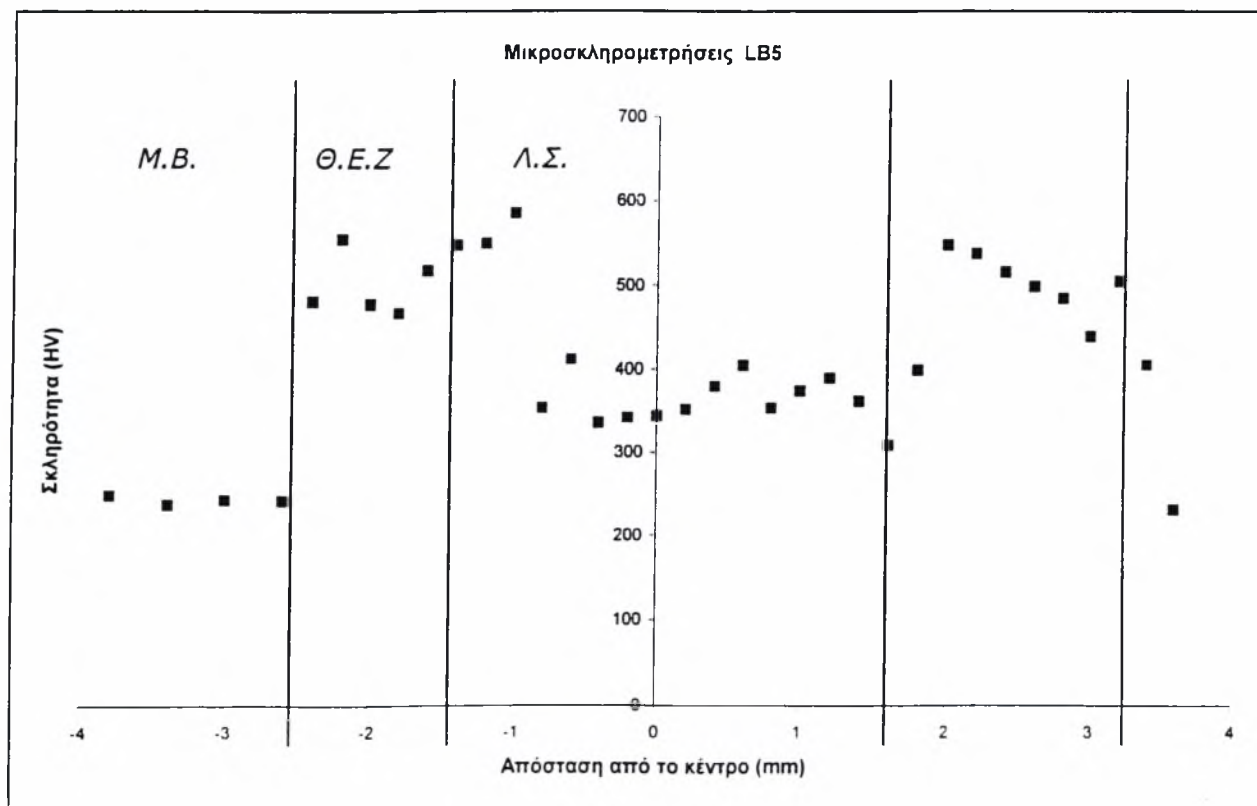
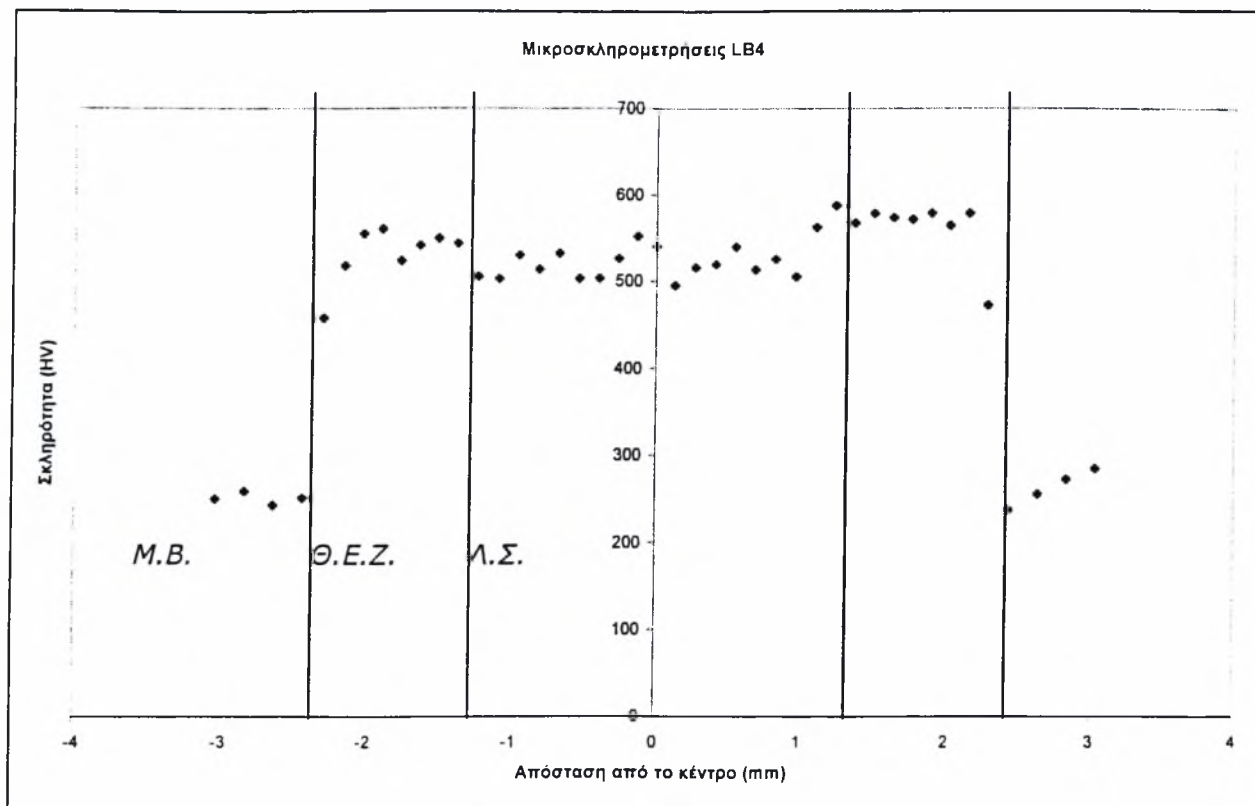
Στις προηγούμενες μακροφωτογραφίες παρουσιάζονται 3 δοκίμια με μέση , μικρή και υψηλή διείδυση . Είναι ορατές οι γραμμές στερεοποίησης που διακτινίζονται από το κέντρο της λίμνης συγκόλλησης προς τα άκρα , σημείο χαρακτηριστικό για συγκόλληση με αγωγή .

**4.4.2 Μικροσκληρομετρήσεις**

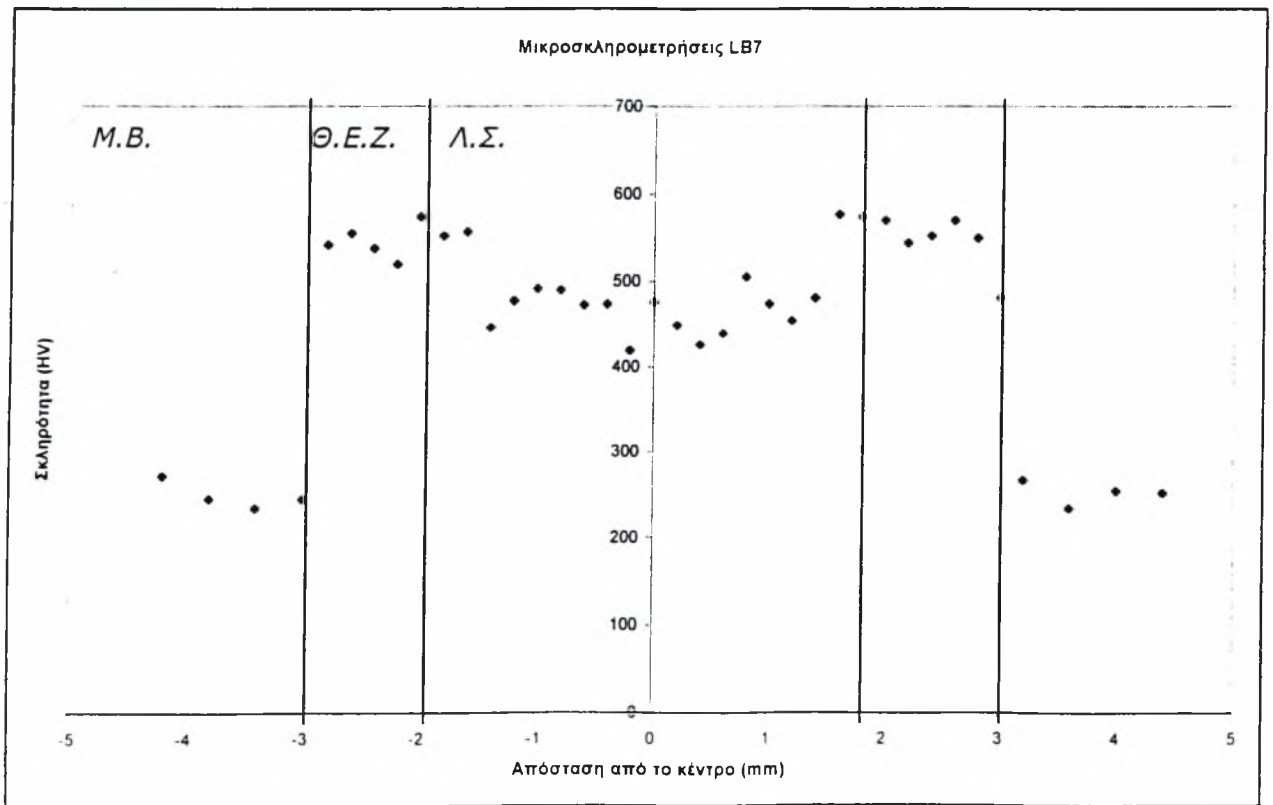
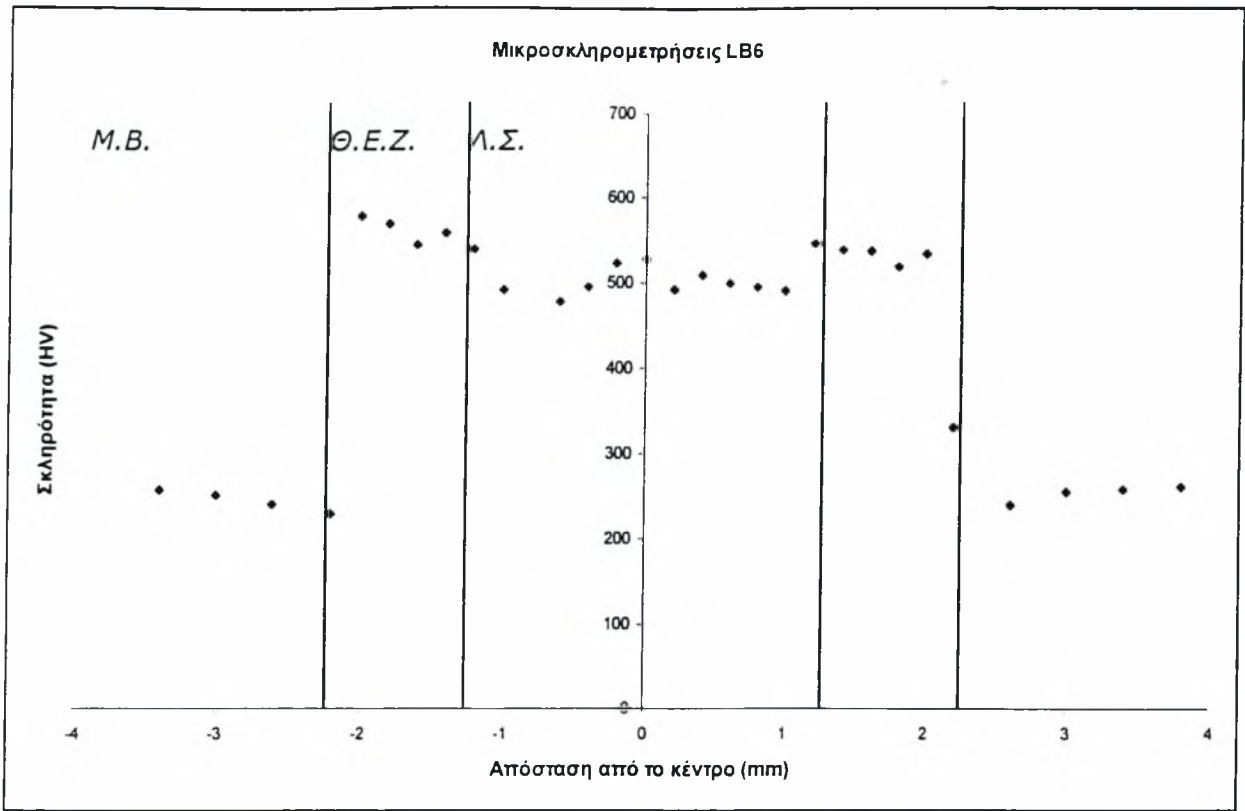
Ακολουθούν τα διαγράμματα των μικροσκληρομετρήσεων των 15 δοκιμίων

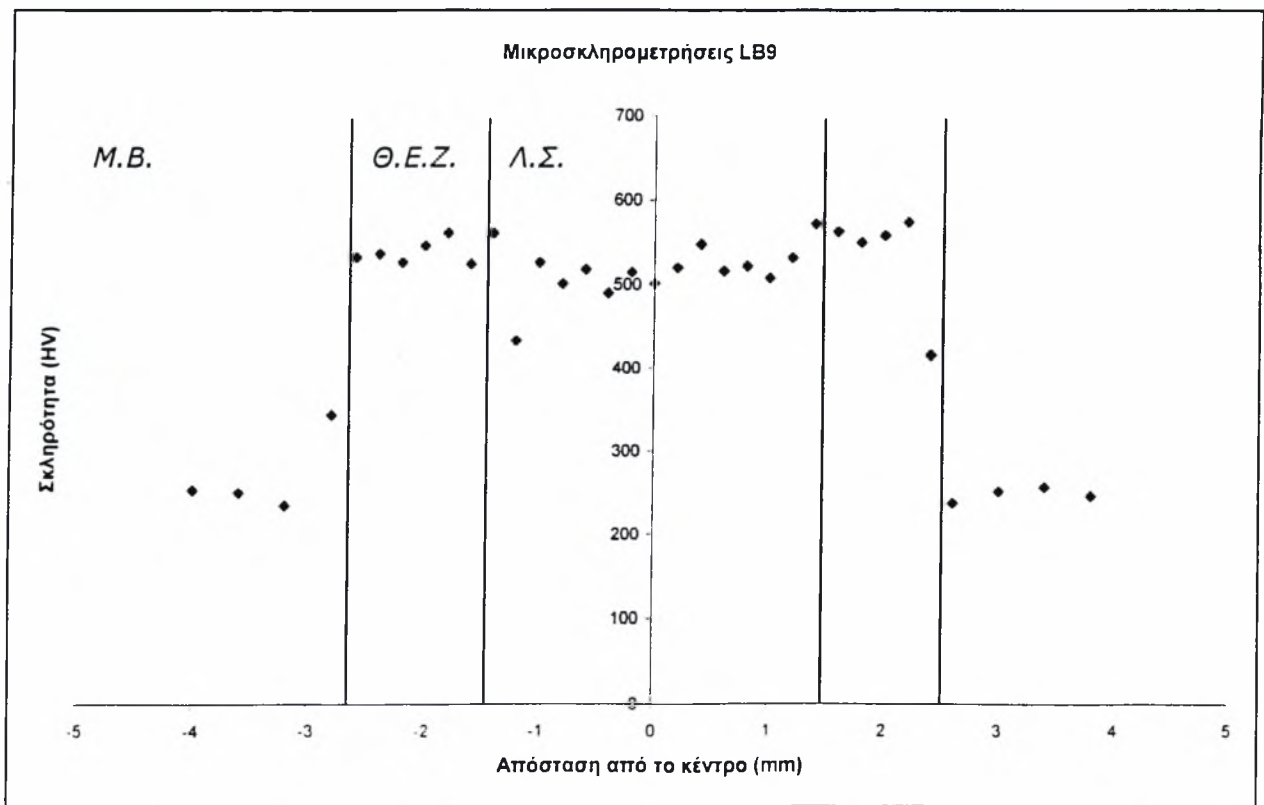
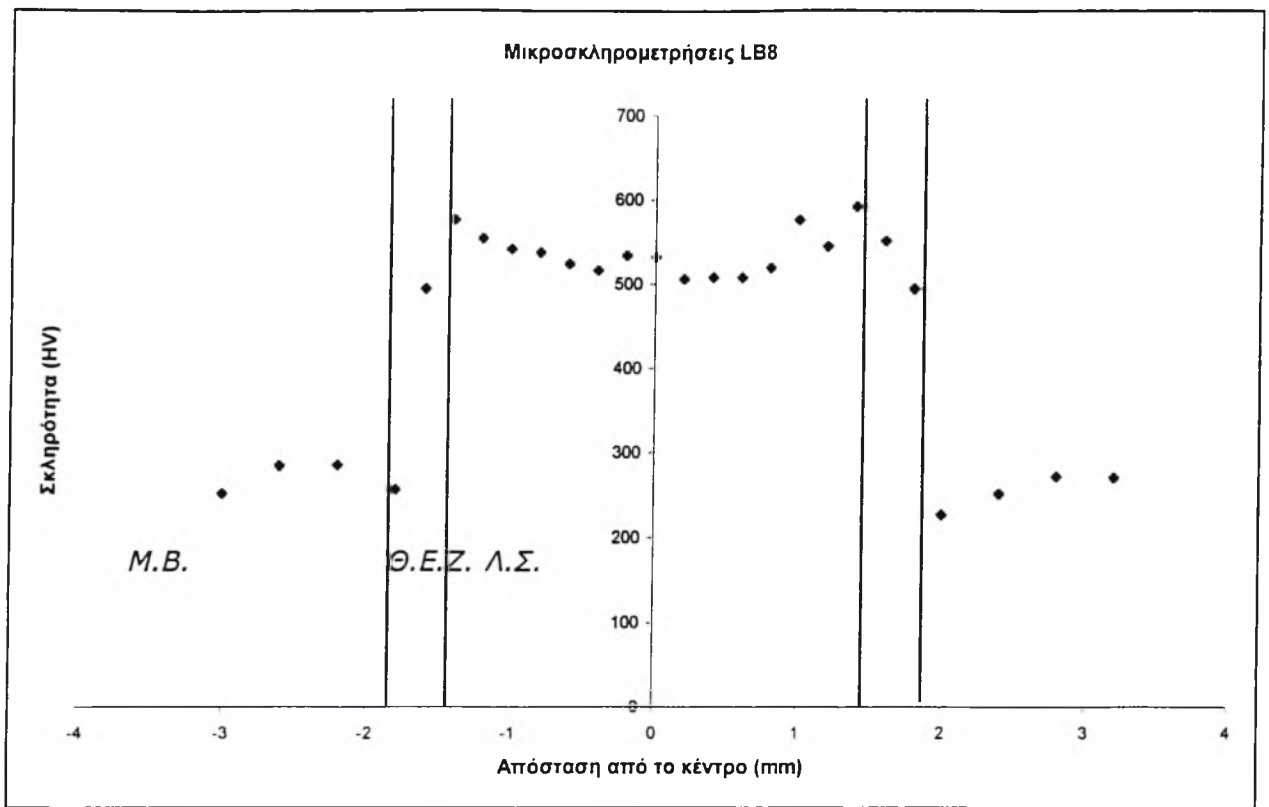


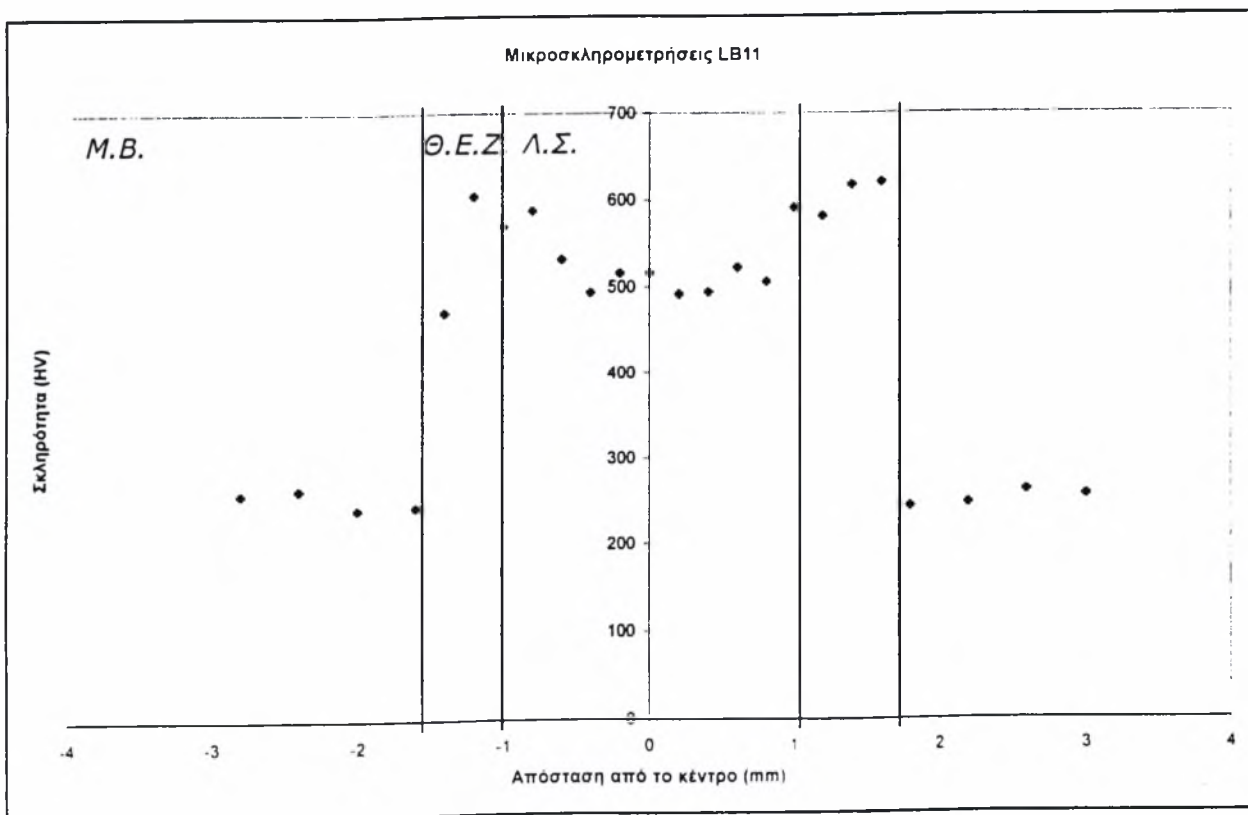
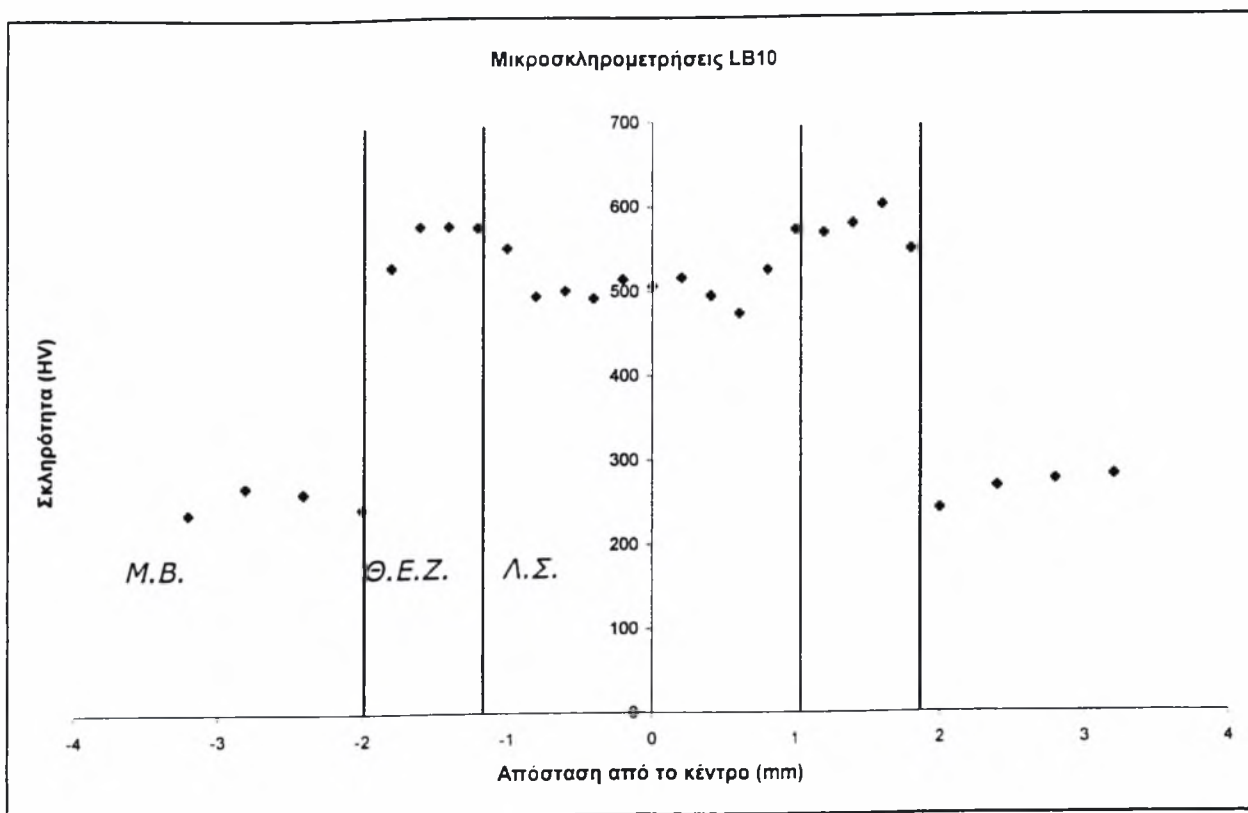


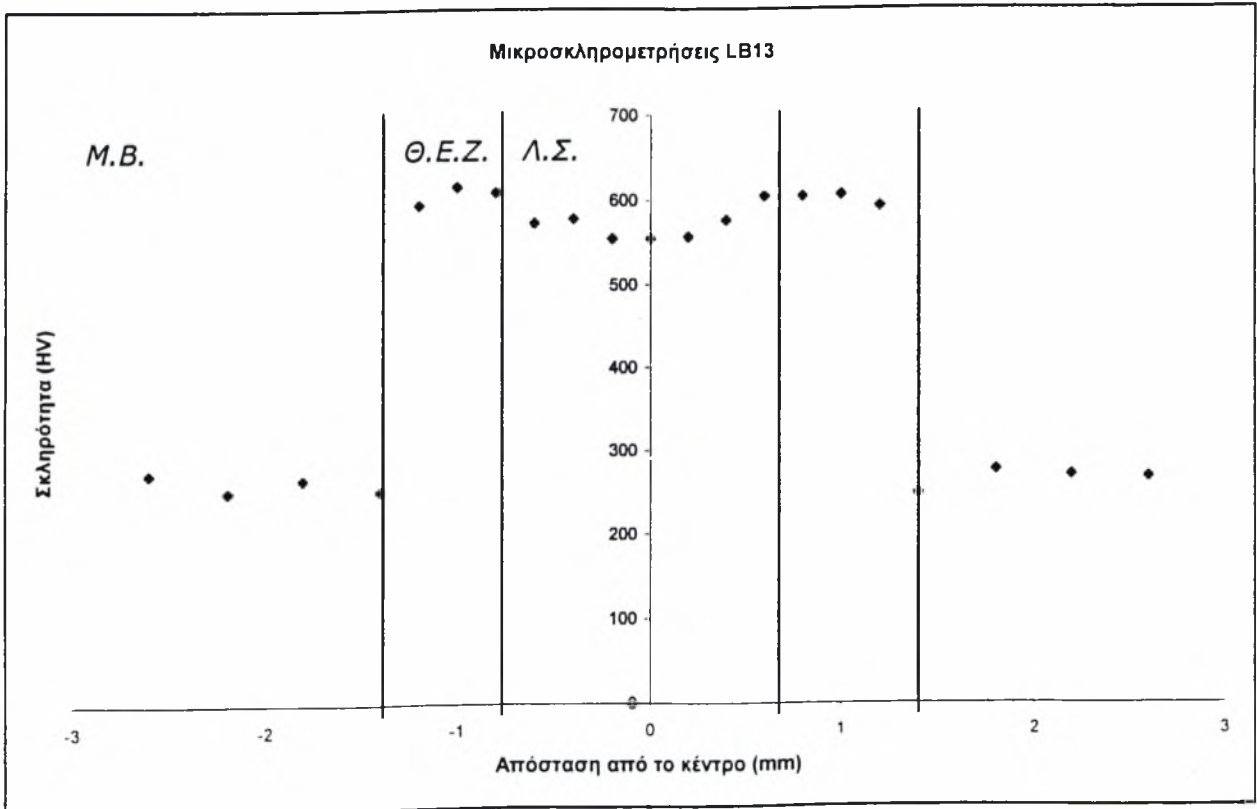
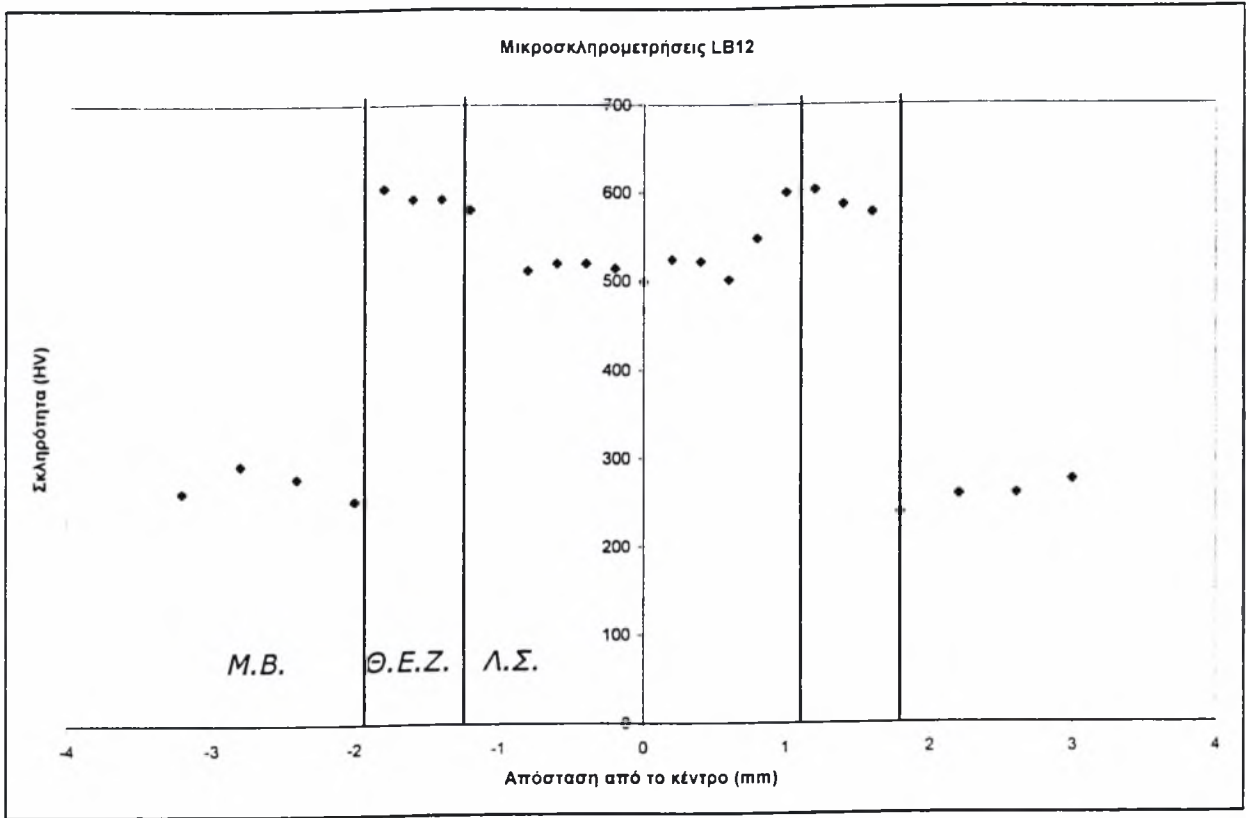




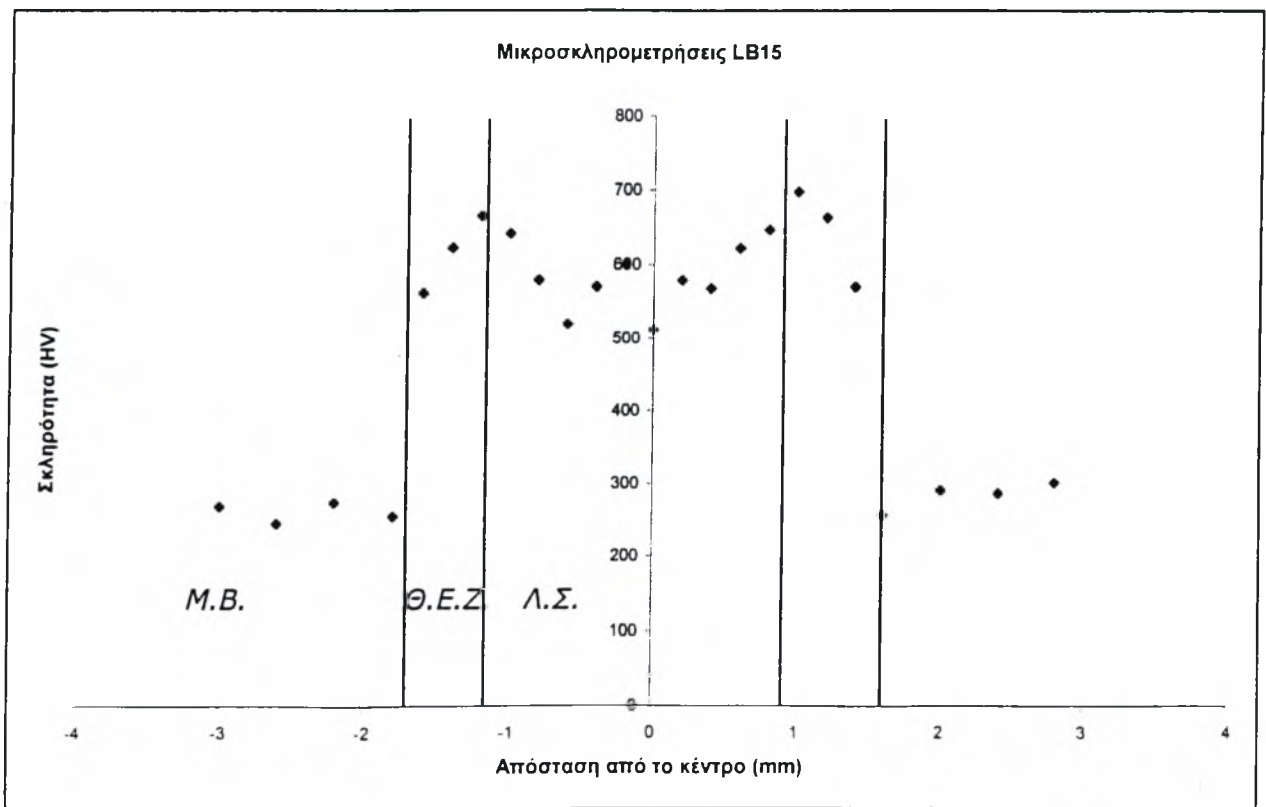
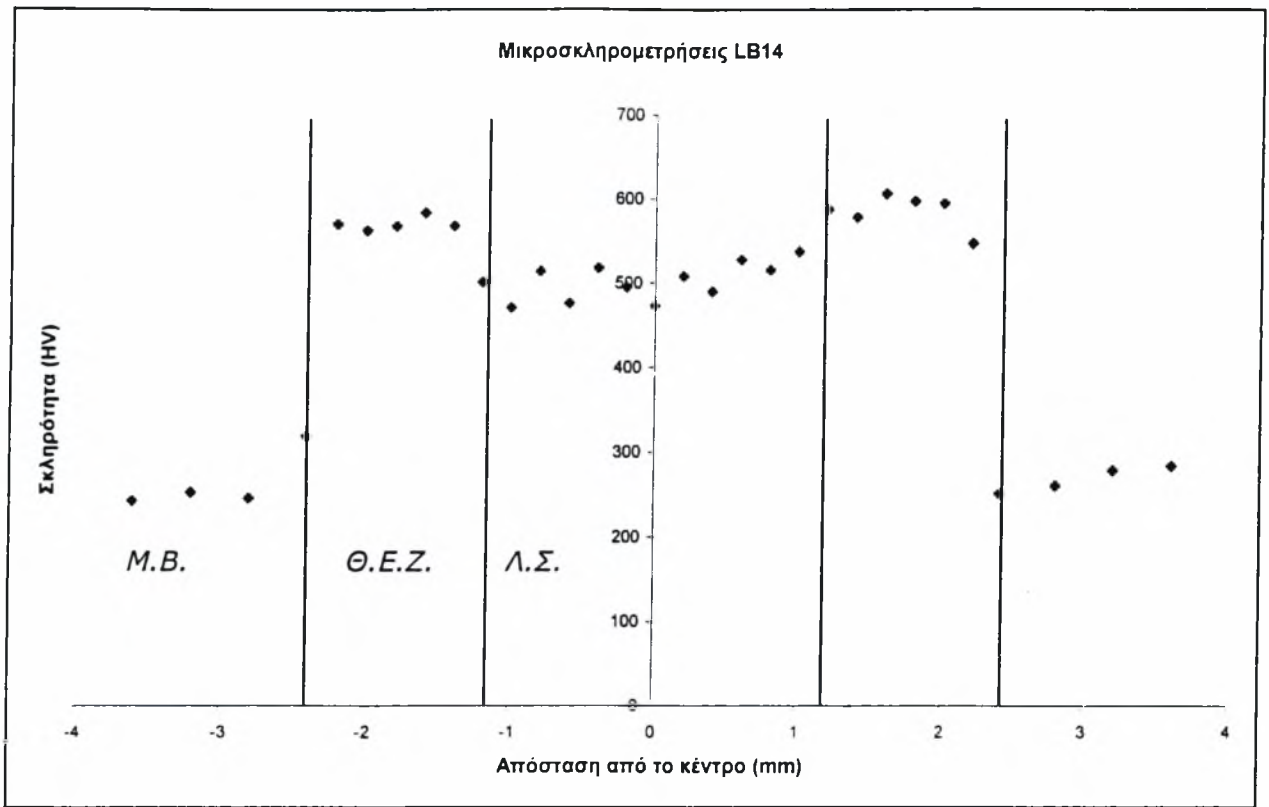








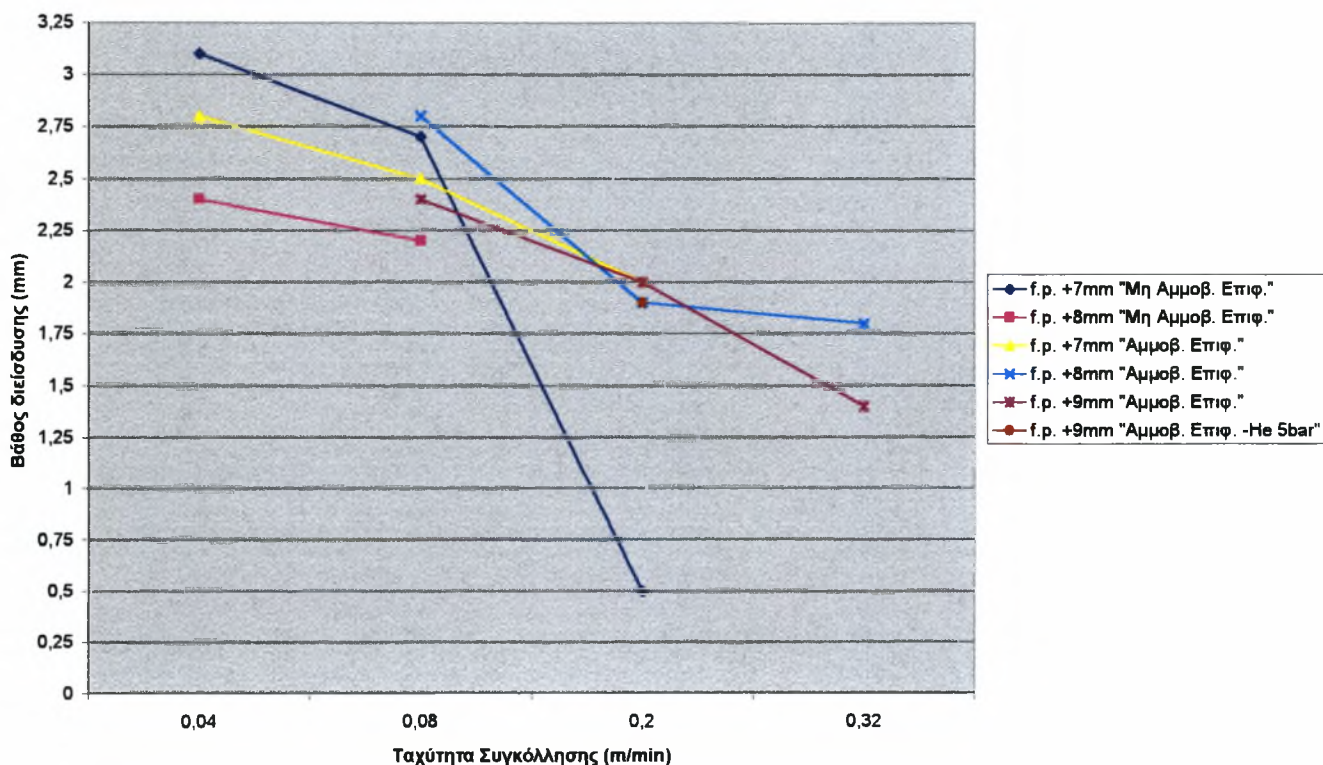




## 4.4.3 Συμπεράσματα

Σε καμία από τις συγκολλήσεις δεν επετεύχθη πλήρης διείσδυση. Η σχετικά μικρή παρεχόμενη ισχύς(1300W), σε συνδυασμό με το αρκετά μεγάλο σημείο εστίασης(+7mm,+8mm,+9mm) δεν παρέχουν συγκόλληση υψηλής διείσδυσης. Μέγιστο βάθος διείσδυσης παρατηρείται για τις συνθήκες συγκόλλησης που αντιπροσωπεύει το δοκίμιο LB2(ταχύτητα 0,04m/min, f.p. +7mm,επιφάνεια μη αμμοβολισμένη, He 2bar) και ισούται με 3.2mm. Σημειώνεται πως το πάχος του κυλίνδρου είναι 8mm. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 41, μείωση της ταχύτητας οδηγεί σε αύξηση του βάθους διείσδυσης. Όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα συγκόλλησης, τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος αλληλεπίδρασης, ο οποίος ορίζεται σαν την διάμετρο της δέσμης προς την ταχύτητα σάρωσης, κάτι που οδηγεί στην πρόσδοση υψηλότερων ποσών θερμότητας στο υλικό και κατά συνέπεια στην ανάπτυξη υψηλότερων μέγιστων θερμοκρασιών. Έτσι το υλικό επηρεάζεται θερμικά σε μεγαλύτερο βάθος.

Συσχέτιση ταχύτητας συγκόλλησης και βάθους διείσδυσης

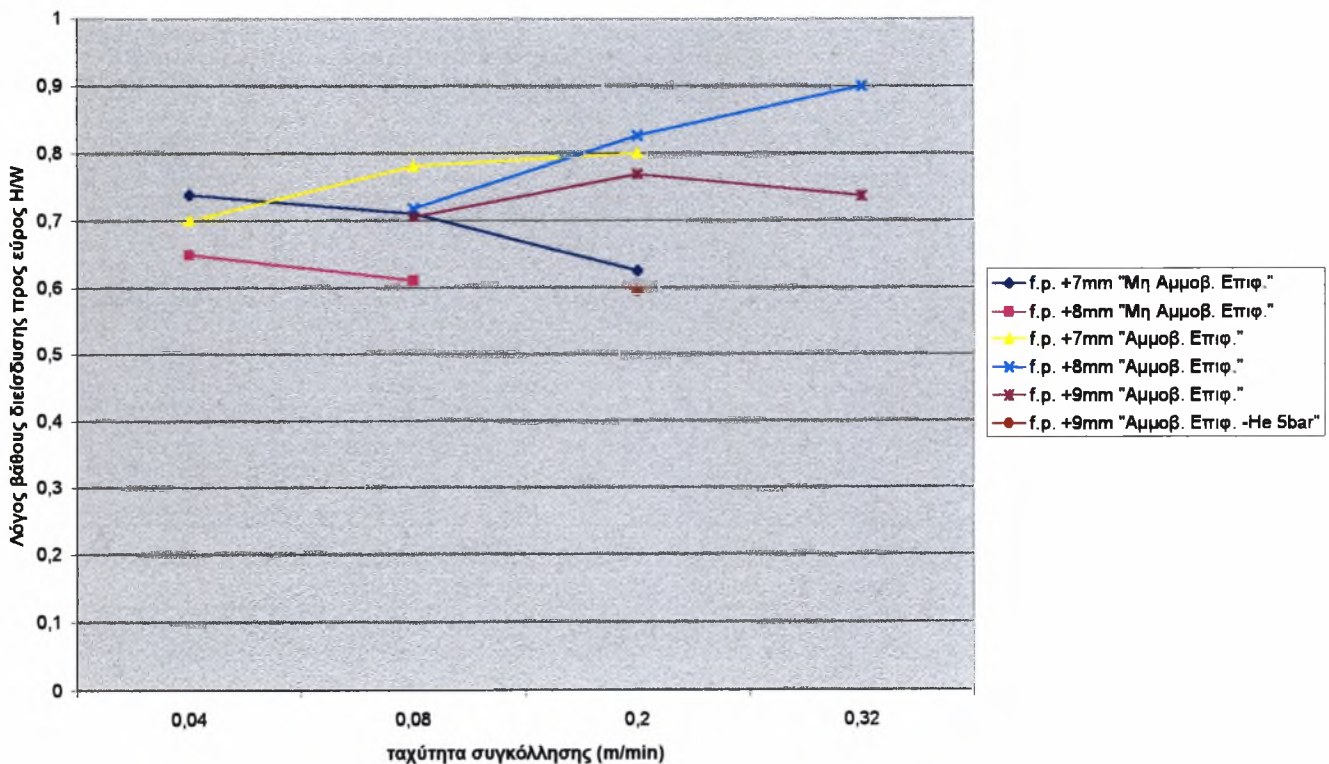


Εικόνα 41. Γράφημα συσχέτισης βάθους διείσδυσης και ταχύτητας

Σε όλα τα δοκίμια η συγκόλληση ήταν *conduction mode* (συγκόλληση με αγωγή) και συνεπώς ο μεγαλύτερος θερμικός κύκλος (μικρότερη ταχύτητα), εξασφαλίζει μεγαλύτερη πρόσδοση θερμότητας και φυσικά βάθος διείσδυσης. Η γενική τάση αυξήσεως του βάθους διείσδυσης με την μείωση της ταχύτητας, οδηγεί στο συμπέρασμα, πως το σημείο εστίασης +8mm, για αμμοβολισμένη επιφάνεια και ταχύτητα 0,04m/min θα παρείχε το μέγιστο βάθος, περίπου ίσο με 3.4mm.

Ο λόγος H/W, σε όλη την σειρά των πειραμάτων δεν ξεπέρασε την μονάδα αφού, όπως προαναφέρθηκε, δεν επιτεύχθηκε συγκόλληση *keyhole*. Αύξηση της ταχύτητας, σύμφωνα με την εικόνα 42, προκαλεί αύξηση του λόγου H/W. Η μεγαλύτερη τιμή είναι 0,9 πολύ κοντά στο 1, που σημαίνει ότι το ξεκίνημα του σταδίου εμφάνισης *keyhole*. Στην χαμηλή ταχύτητα (0,04m/min) η μη αμμοβολισμένη επιφάνεια παρουσιάζει τον μέγιστο λόγο, κάτι που σημαίνει πως η «αποτελεσματικότητα» της δέσμης είναι μεγαλύτερη. Τον μικρότερο λόγο, εμφανίζει το δοκίμιο LB15. Η μοναδικότητα του πειράματος όμως για τέτοια πίεση αερίου, δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Θα μπορούσε με επιφυλακτικότητα να ειπωθεί πως η αύξηση του προστατευτικού αερίου δεν οδηγεί σε αύξηση τόσο του H/W όσο και του βάθους διείσδυσης όπως παρατηρούμε στην προηγούμενη εικόνα.

Συσχέτιση ταχύτητας συγκόλλησης και H/W

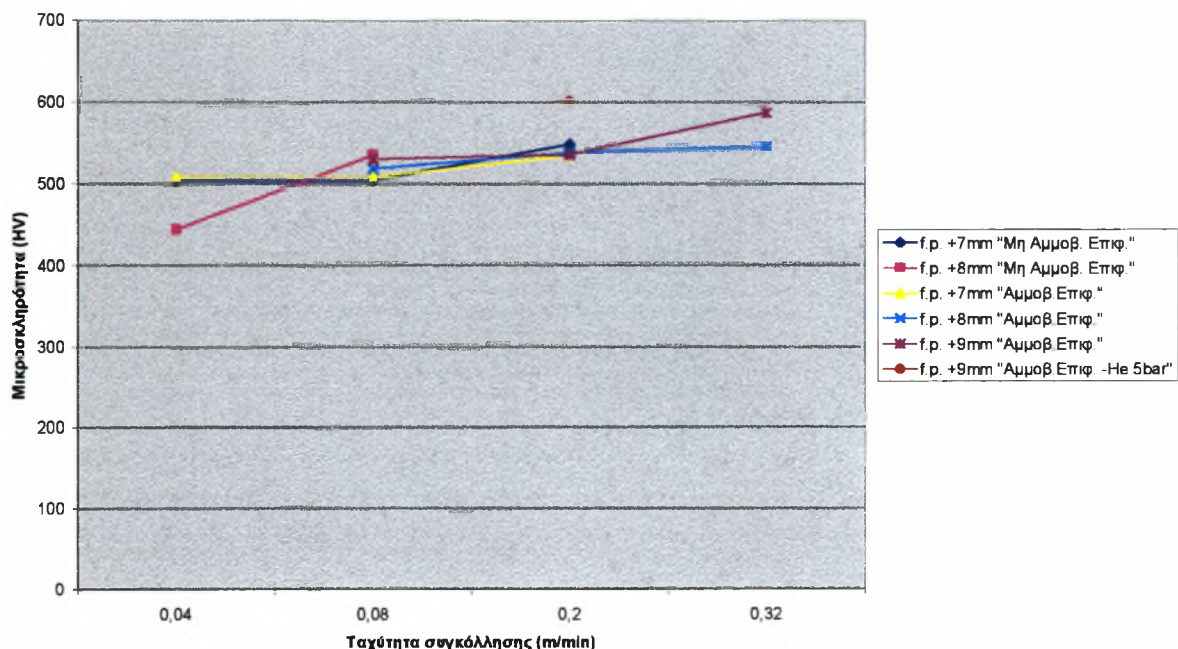


Εικόνα 42. Διάγραμμα ταχύτητας διεργασίας και λόγου H/W



Η μέση σκληρότητα της συγκόλλησης (λίμνης συγκόλλησης και θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη) αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Αύξηση της ταχύτητας, για τα συγκεκριμένα πειράματα, όπως προαναφέρθηκε οδηγεί σε μείωση της «αποτελεσματικότητας» της συγκόλλησης με αγωγή. Είναι αναμενόμενο λοιπόν η μέγιστη σκληρότητα να εμφανίζεται σε δοκίμια με ταχύτητες μεγαλύτερες. Παρατηρείται, πως το δοκίμιο LB15 χαρακτηρίζεται από την μεγαλύτερη μέση σκληρότητα. Σε συνδυασμό με την μεταλλογραφία, την εικόνα 44 και την εικόνα 45, το φαινόμενο εξηγείται από την ύπαρξη αποκλειστικά και μόνο μαρτενσίτη τόσο στην λίμνη, όσο και στην ΘΕΖ αυτού. Η ελάχιστη τιμή αφορά το δοκίμιο LB5, στην λίμνη συγκόλλησης του οποίου εμφανίζονται μαρτενσίτης, μπαινίτης, Widmantätten φερρίτης, ενώ το διάγραμμα μικροσκληρομετρήσεων αυτού παρουσιάζει έντονα τα λεγόμενα «αυτιά». Το δοκίμιο LB5 εκπροσωπεί συγκόλληση με ταχύτητα χαμηλή και μέσο σημείο εστίασης (0,04m/min, f.p. +8mm, επιφάνεια μη αμμοβολισμένη). Η δέσμη, συνεπώς δεν είναι ισχυρά εστιασμένη και ο χρόνος αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτής και του υλικού μεγάλος. Έτσι οδηγούμαστε σε αργότερους ρυθμούς ψύξης και συνεπώς σε μικρότερη σκληρότητα.

Μέση μικροσκληρότητα συγκόλλησης ως προς ταχύτητα

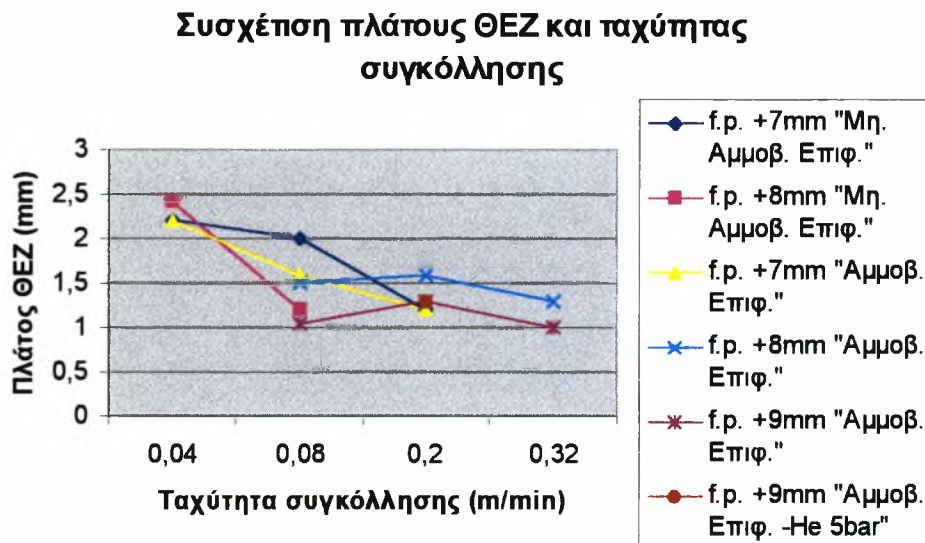


**.Εικόνα 43. Διάγραμμα συσχέτισης μέσης σκληρότητας συγκόλλησης και ταχύτητας συγκόλλησης**

Στην εικόνα 43 παρατηρείται επίσης μία ταύτιση, όσων αφορά την σκληρότητα των δοκιμίων που συγκολλήθηκαν με σημείο εστίασης +7mm, η φύση, δηλαδή της



επιφάνειας δεν δείχνει να επηρεάζει την σκληρότητα για το δεδομένο σημείο εστίασης. Σε γενικές γραμμές, πέραν του LB5 και LB15, η σκληρότητα των δοκιμών κυμαίνεται από 500-570HV.



**Εικόνα 44. Διάγραμμα συσχέτισης πλάτους ΘΕΖ και ταχύτητας συγκόλλησης**

#### 4.4.3.3 Βέλτιστες συνθήκες

Συγκόλληση με ένα μόνο «πέρασμα» θεωρείται ανέφικτη για την δεδομένη ισχύ Laser. Σύμφωνα με την εικόνα και την γενική τάση που παρουσιάζει κάθε γραμμή κατά την μετάβαση από την ταχύτητα 0,08m/min στην ταχύτητα 0,04m/min συγκόλληση με διπλό πέρασμα με ταχύτητα 0,04m/min, επιφάνεια αμμοβολισμένη και πίεση αερίου He 2bar διαφαίνεται να συγκολλεί πλήρως το κομμάτι.

Απαραίτητη κρίνεται η συνέχιση των πειραμάτων με Laser μεγαλύτερης ισχύος

**5. Προτεινόμενα θέματα**

- ⇒ *Πραγματοποίηση πειραματικών συγκολλήσεων σύμφωνα με τις βέλτιστες συνθήκες με διπλό πέρασμα και αξιολόγηση αυτών με καταστρεπτικούς και μη ελέγχους.*
- ⇒ *Πραγματοποίηση συγκόλλησης keyhole χρησιμοποιώντας Laser μεγαλύτερης ισχύος .*
- ⇒ *Μελέτη του φαινομένου της στερεοποίησης και στις δύο μεθόδους .*
- ⇒ *Μελέτη επίδρασης των κραματικών στοιχείων στην συγκόλληση.*
- ⇒ *Βελτιστοποίηση της υφής της επιφάνειας για μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος.*

**6. Παράρτημα****6.1 Ασφάλεια μεθόδων****6.1.1 EBW**

Προστασία πρέπει να παρέχεται από την σχεδίαση του ίδιου του εξοπλισμού και από την τοποθέτησή του στον χώρο. Μέτρα προστασίας πρέπει να λαμβάνονται επίσης στην EBW όπως και σε άλλες διεργασίες, απέναντι στους συνήθεις κινδύνους της συγκόλλησης και στους ειδικούς «τραυματισμούς» που μπορούν να προκαλέσουν:

1. Η υψηλή τάση που απαιτείται για την παραγωγή ηλεκτρονίων
2. Η ίδια η δέσμη (παρακολούθηση με γυμνό μάτι της δέσμης και της ακτινοβολίας που προκαλείται από το τηγμένο μέταλλο μπορεί να είναι επώδυνη για την όραση και για αυτό πρέπει να παρακολουθείτε μόνο χρησιμοποιώντας κοινούς φακούς που χρησιμοποιούνται και για την συγκόλληση τόξου.)
3. Η ακτινοβολία ακτινών  $\chi$  που παράγονται από την πρόσκρουση της δέσμης στο κομμάτι προς κατεργασία ή σε άλλο υλικό. Η προστασία είναι περισσότερο αναγκαία απέναντι στην ακτινοβολία καθώς αυξάνεται η τάση που χρησιμοποιείτε για την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων.

**6.1.2 LBW**

Οι κίνδυνοι που εγκυμονεί η δέσμη Laser διαφέρουν από του κινδύνους άλλων μεθόδων συγκόλλησης. Τα τραύματα που δημιουργούνται δεν είναι άμεσα ορατά και έτσι ανεκπαιδευτο προσωπικό μπορεί να υποστεί βλάβες πριν ακόμα η ύπαρξη συμπτωμάτων διαφανεί.

Βλάβες εξαιτίας υψηλής τάσης. Όλα τα είδη Laser χρησιμοποιούν υψηλή τάση, ικανή να προκαλέσει θανατηφόρα ηλεκτροσόκ. Γι'αυτό η συντήρηση θα πρέπει να πραγματοποιείται από προσωπικό εξειδικευμένο με εγκαταστάσεις υψηλής τάσης.

*Βλάβες της όρασης*

Οποιαδήποτε δέσμη Laser ικανή να συγκολλά μέταλλα, είναι επίσης ικανή να προκαλέσει σοβαρές βλάβες της όρασης. Η έκθεση κάποιου στην δέσμη και σε οποιαδήποτε ανάκλαση αυτής πρέπει να αποφεύγεται με κάθε τρόπο. Μερικά Laser μπορούν να προκαλέσουν διαχεόμενες ανακλάσεις που προκαλούν μέχρι και απώλεια όρασης.

*Έκθεση του δέρματος*

Η έκθεση του δέρματος στην αρχική δέσμη μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα. Είναι απαραίτητο λοιπόν, να αποτρέπεται μέσω ολικής κάλυψης της δέσμης και σωστή εκπαίδευση του χειριστή. Ακόμα και σε κατεργασίες παρουσία του χειριστή, όπου αυτός επιτρέπεται να παρακολουθεί, πρόληψη για τυχόν αποφυγή επαφής μέρους του σώματος χρησιμοποιώντας προστατευτικό εξοπλισμοί που μετακινείται πρέπει να λαμβάνεται.

*Βλάβες εξαιτίας χημικών*

Η συγκόλληση Laser δημιουργεί καπνούς μετάλλου συναφείς με άλλων διεργασιών. Η βλάβη που μπορεί να υποστεί κάποιος εξαρτάται στο μεγαλύτερο ποσοστό από την χημική σύσταση του υλικού. Εξαερισμός στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι αναγκαίος.

Καπνοί που μπορεί να προκαλέσουν βλάβες είναι δυνατόν να δημιουργηθούν κατά την εναπόθεση της δέσμης σε ανεπιθύμητα υλικά, όπως π.χ. τους φακούς που χρησιμοποιούνται και ίσως καταστραφούν από διαφυγή θερμότητας. Τέτοιες καταστάσεις μπορούν εύκολά να αποφευχθούν με την κατάλληλη εκλογή των υλικών και παρακολούθηση μέσω monitor της κατεργασίας.

Τέλος τα χημικά που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό του συστήματος φακών της δέσμης είναι τοξικά και επιβλαβή και πρέπει να χειρίζονται ανάλογα.



## 6.2 Κατάλογος σχημάτων

	Σελίδα
<b>Εικόνα 1.</b> Κεφαλή κυλίνδρου άρματος μάχης M60	1
<b>Εικόνα 2.</b> Σχηματική αναπαράσταση του σημείου συγκόλλησης	2
<b>Εικόνα 3.</b> Δυνάμεις που επιδρούν κατά την συγκόλληση με αγωγή στην λίμνη αυτής	5
<b>Εικόνα 4.</b> Συγκόλληση αγωγής μαλακού χάλυβα	6
<b>Εικόνα 5.</b> Σχηματική παράσταση συγκολλήσεων <i>conduction-keyhole</i>	6
<b>Εικόνα 6.</b> Συγκόλληση <i>keyhole</i> σε ανοξειδωτο χάλυβα 304	8
<b>Εικόνα 7.</b> Συγκολλημένη συνδεσμολογία άξονα-ατράκτου διαφορετικών χαλύβων	10
<b>Εικόνα 8.</b> Συγκόλληση με <i>Electron Beam</i> υπό κενό 3mPa	13
<b>Εικόνα 9.</b> Θάλαμος κενού EBW	14
<b>Εικόνα 10.</b> «Περιοχές» πυκνότητας ισχύος διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης	16
<b>Εικόνα 11.</b> Επιτεύξιμο βάθος διείσδυσης διαφόρων μεθόδων	17
<b>Εικόνα 12.</b> Μεταβολή σχήματος κρυστάλλων σε σχέση με την ταχύτητα συγκόλλησης	18
<b>Εικόνα 13.</b> Ρυθμός ανάπτυξης κρυστάλλων R για δεδομένη ταχύτητας συγκόλλησης v	19
<b>Εικόνα 14.</b> Διάγραμμα φάσεων Fe - C	20
<b>Εικόνα 15.</b> Σχηματική παράσταση πρωτογενών, δευτερογενών και τριτογενών κλάδων δένδριτη	21
<b>Εικόνα 16.</b> Διάγραμμα TTT	21
<b>Εικόνα 17.</b> Διαφορετικές «υποζώνες» που δύνανται να δημιουργηθούν κατά την στερεοποίηση χάλυβα 0.15%(w.t.) σε C	22
<b>Εικόνα 18.</b> Αφαίρεση C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> από τον αρχικό κύλινδρο	24
<b>Εικόνα 19.</b> Κοπή δοκιμίων Mβ1, Mβ2, Mβ3, Mβ4, Eβ1, Eβ2, Eβ3	24
<b>Εικόνα 20.</b> Σημεία μικροσκληρομέτρησης Mβ1, Mβ2, Mβ3, Mβ4	25
<b>Εικόνα 21.</b> Περιοχή μικροσκληρομετρήσεων Eβ1, Eβ2, Eβ3	27
<b>Εικόνα 22.</b> Πειραματικά συγκολλήσεις 6 - 12	27
<b>Εικόνα 23.</b> Πειραματικά συγκολλήσεις 13 - 15	28
<b>Εικόνα 24.</b> Μέταλλο βάσης EB3	29
<b>Εικόνα 25.</b> Μέταλλο βάσης-ΘΕΖ EB2	29
<b>Εικόνα 26.</b> Λίμνη Συγκόλλησης EB1	30

<i>Εικόνα 27.</i>	<i>EB1</i>	<i>30</i>
<i>Εικόνα 28.</i>	<i>Κύλινδρος Συγκόλλησης EB2</i>	<i>30</i>
<i>Εικόνα 29.</i>	<i>Λίμνη Συγκόλλησης EB3</i>	<i>30</i>
<i>Εικόνα 30.</i>	<i>Λίμνη συγκόλλησης-Κυψελοειδής μορφή, Μπαινίτης&amp;Μαρτενσίτης-LB1</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 31.</i>	<i>Λίμνη συγκόλλησης-Μαρτενσίτης-LB6</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 32.</i>	<i>Λίμνη συγκόλλησης LB5-Μαρτενσίτης, καρβίδια</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 33.</i>	<i>Λίμνη συγκόλλησης LB1-κυψέλες</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 34.</i>	<i>Λίμνη συγκόλλησης LB4-δενδρίτες&amp;κυψέλες</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 35.</i>	<i>Λίμνη συγκόλλησης LB9</i>	<i>36</i>
<i>Εικόνα 36.</i>	<i>LB1-πόρος</i>	<i>36</i>
<i>Εικόνα 37.</i>	<i>Widmattäten φερριτικής-LB5</i>	<i>36</i>
<i>Εικόνα 38.</i>	<i>LB2</i>	<i>37</i>
<i>Εικόνα 39.</i>	<i>LB3</i>	<i>37</i>
<i>Εικόνα 40.</i>	<i>LB11</i>	<i>37</i>
<i>Εικόνα 41.</i>	<i>Γράφημα συσχέτισης βάθους διείδυσης Και ταχύτητας</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 42.</i>	<i>Διάγραμμα ταχύτητας διεργασίας και λόγου H/W</i>	<i>47</i>
<i>Εικόνα 43.</i>	<i>Διάγραμμα συσχέτισης μέσης σκληρότητας συγκόλλησης και ταχύτητα διεργασίας</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 44.</i>	<i>Διάγραμμα συσχέτισης πλάτους ΘΕΖ και Ταχύτητα συγκόλλησης</i>	<i>49</i>
<i>Πίνακας 1.</i>	<i>Πυκνότητες ισχύος διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης</i>	<i>4</i>
<i>Πίνακας 2.</i>	<i>Σύγκριση EBW-LBW</i>	<i>17</i>
<i>Πίνακας 3.</i>	<i>Χημική Σύσταση μετάλλου βάσης</i>	<i>23</i>
<i>Πίνακας 4.</i>	<i>Προδιαγραφή SAE</i>	<i>23</i>
<i>Πίνακας 5.</i>	<i>Υλικοτεχνική υποδομή που χρησιμοποιήθηκε</i>	<i>24</i>
<i>Πίνακας 6-7.</i>	<i>Συνθήκες πειραματικών συγκολλήσεων</i>	<i>26</i>

## 6.3 Βιβλιογραφία

- [1] D.A. Porter and K.E. Easterling , " Phase Transformtions in Metals and Alloys"- second edition, Chapman & Hall 1992.
- [2] "Handbook of the EuroLaser Academy", edited by D.Schuocker, Chapman & Hall, Volume 2, 1998.
- [3] J.F. Lancaster, "Metallurgy of Welding"-fifth edition, Chapman & Hall, 1993.
- [4] David Belforte-Morriw Levitt, "The Industrial Laser Annual Handbook" -1986 edition.
- [5] Y. Arata, "Plasma, Electron & Laser Beam Technology», ASM, 1987.
- [6] "Electron and Laser Beam Welding», published on behalf of International Institute of Welding, Pergamon Press, 1989.
- [7] Γρ. Χαϊδεμενόπουλος, «Φυσική Μεταλλουργία», σημειώσεις μαθήματος, 1999.
- [8] Λιάπης Τρ. «Συγκόλληση συμβολής ελασμάτων ναυπηγικού χάλυβα D36 με Laser CO<sub>2</sub>», διπλωματική εργασία, 1998.
- [9] Βλαχογιάννης Μιχ. «Μελέτη συγκολλήσεων Laser και σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους», διπλωματική εργασία, 1996.
- [10] ASM Handbook – Welding, "Electron beam welding"
- [11] ASM Handbook – Welding, "Laser beam welding"
- [12] Application Experiences with Laser Beam Welding,  
[www.alspi.com/Irsweld.html](http://www.alspi.com/Irsweld.html)
- [13] Welding Metallurgical Equipment Inc. , [www.wme-inc.com](http://www.wme-inc.com)
- [14] ASM Handbook-Welding, "Weld solidification"
- [15] Τεχνικό δελτίο έργου ΠΑΒΕ-Ανάπτυξη και Εφαρμογή Συγκολλήσεων Laser σε Τμήματα Κινητήρων Αρμάτων



18.

<b>Εργαστήριο Χημικών Ελέγχων</b>	<b>ΔΕΛΤΙΟ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ</b>	<b>Αρ.θμ.</b>
---------------------------------------	------------------------------------	---------------

Υλικό :

A/A Δοκιμίου	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %		
1	0,34	0,28	0,78	0,013	0,005	0,50	0,48	0,21		
2										
3										
4										

## 19. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

A/A 1 :

A/A 2 :

A/A 3 :

A/A 4 :

Ο Υπεύθυνος του Εργαστηρίου Χημείου

Σ. Κατσαλής  
Χημικός Μηχ/κός

Σελ. 2 από 2





## 18. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΤΥΠΟΣ ΠΗΓΗΣ : SOURCE TYPE : <b>X-RAY</b>	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ : TEST PARAMETERS : <b>140Kv 4mA 1min</b>
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΗΓΗΣ : FOCAL DISTANCE : <b>750 mm</b>	ΕΙΔΟΣ ΦΙΛΜ : <b>AGFA STRUCTURIX</b> FILM TYPE : <b>D7 Pb</b>
ΥΛΙΚΟ : MATERIAL : <b>STEEL</b>	ΕΙΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ : WELDING PROCEDURE : <b>BUTT WELD</b>

## 19. RADIOGRAPHIC RESULTS ACCORDING TO EN 25817 : 1992

WELD No.	POSITION OR DIMENSION	DEFECTS DESCRIPTION	QUALITY LEVEL		
			MODERATE D	INTERMEDIATE C	STRINGENT B
1	--	--	--	--	X

## 20. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

ΗΜ/ΝΙΑ-DATE

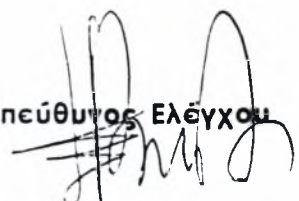
ΤΟΠΟΣ/PLACE

Ο Υπεύθυνος Ελέγχου

Ελέγχθηκε

14.12.98

ΒΟΛΟΣ

  
Π. ΚΩΤΟΥΛΑΣ  
LEVEL II ASNT,  
RT,RI,UT,PT,MT



## ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ LABORATORY TEST REPORT

Σχετικά πρότυπα για σύνταξη Εκθέσης EN 45001- ISO GUIDE 25/Relevant standards for the composition of the report : EN 45001 - ISO GUIDE 25

01. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ/ TESTING LABORATORY : ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ
02. ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ/ TESTING LABORATORY ADDRESS : Α' ΒΙ.ΠΕ. ΒΟΛΟΥ
03. ΗΜΕΡ.ΠΑΡΑΛΑΒΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ/ TEST ITEM DELIVERY DATE : 01/12/98--
04. ΟΝΟΜΑ ΠΕΛΑΤΗ/ CLIENT NAME : -
05. ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΕΛΑΤΗ/ CLIENT ADDRESS : -
06. ΚΩΔ. ΕΡΓΟΥ/ PROJECT CODE : ΠΑΒΕ 97 ΒΕ 274
07. ΚΩΔ. ΕΙΣΕΡΧΟΜ. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ/ ITEM IDENTIFICATION NUMBER : 5015

### ΔΗΛΩΣΗ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ/STATEMENT OF VALIDITY OF THE TEST RESULTS

Τα αποτελέσματα του παρόντος ελέγχου αφορούν αποκλειστικά και ΜΟΝΟΝ τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε αυτόν τον έλεγχο. / The results of this test relate ONLY to the items that have been subjected to this test.

### ΔΗΛΩΣΗ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ/STATEMENT OF VALIDITY FOR THE REPRODUCTION OF THIS REPORT

Η παρούσα έκθεση επιτρέπεται να αναπαραχθεί ΜΟΝΟΝ στο σύνολο των σελίδων της, χωρίς την έγκριση του εργαστηρίου. Επιμέρους αναπαραγωγή του παρόντος ενιαίου εγγράφου δεν έχει την ισχύ έγκυρης έκθεσης. / This report shall not be reproduced except in full without the written approval of the testing laboratory

08. ΑΡΙΘΜ. ΕΚΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ/ TEST REPORT SERIAL NUMBER : 057
09. ΗΜΕΡ. ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ/ DATE OF PERFORMANCE OF TEST : 08/12/98
10. ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ/ SPECIMEN IDENTIFICATION : -
11. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΟΥ/ TEST DESCRIPTION : ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ
12. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ/ ITEM DESCRIPTION : -
13. ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ/ PERSON ACCEPTING TECHNICAL RESPONSIBILITY : Π. ΚΩΤΟΥΛΑΣ
14. ΕΙΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ/ΔΟΚΙΜΗΣ/ TEST TYPE : X-RAY TESTING
15. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ/ EQUIPMENT USED : ANDREX SMART 225
16. ΠΡΟΤΥΠΑ/ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ/ STANDARDS/SPECIFICATIONS : EN 25817 <sup>1</sup>/<sub>~</sub>
17. ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΜΗ ΤΥΠΟΠ. ΔΙΑΔΙΚ./ NON-STANDARDISED PROCEDURE IDENTIFICATION :

Σελ. 1 από 3

# INTERNATIONAL STANDARD

# ISO 5817

First edition  
1992-06-01

Corrected and reprinted  
1992-12-01



---

## Arc-welded joints in steel — Guidance on quality levels for imperfections

*Assemblages en acier soudés à l'arc — Guide des niveaux d'acceptation  
des défauts*



Reference number  
ISO 5817:1992(E)

## Foreword

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for voting. Publication as an International Standard requires approval by at least 75% of the member bodies casting a vote.

International Standard ISO 5817 was prepared by Technical Committee ISO/TC 44, *Welding and allied processes*, Sub-Committee SC 10, *Unification of requirements in the field of metal welding*.

Annex A of this International Standard is for information only.

© ISO 1992

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Organization for Standardization  
Case Postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Switzerland

Printed in Switzerland



## Introduction

This International Standard should be used as a reference in the drafting of application codes and/or other application standards. It may be used within a total quality system for the production of satisfactory welded joints. It provides three sets of dimensional values from which a selection can be made for a particular application. The quality level necessary in each case should be defined by the application standard or the responsible designer in conjunction with the manufacturer, user and/or other parties concerned. The level shall be prescribed before the start of production, preferably at the inquiry or order stage. For special purposes, additional details may need to be prescribed.

The quality levels given in this International Standard are intended to provide basic reference data and are not specifically related to any particular application. They refer to the types of welded joints in a fabrication and not to the complete product or component itself. It is possible, therefore, for different quality levels to be applied to individual welded joints in the same product or component.

Quality levels are listed in table 0.1.

**Table 0.1 — Quality levels for weld imperfections**

Level symbol	Quality level
D	Moderate
C	Intermediate
B	Stringent

The three quality levels are arbitrarily identified as D, C and B and are intended to cover the majority of practical applications.

It would normally be hoped that for a particular welded joint the dimensional limits for imperfections could all be covered by specifying one quality level. In some cases, however, e.g. for certain type of steels and structures as well as for fatigue loading or leak tightness applications, it may be necessary to specify different quality levels for different imperfections in the same welded joint or to include additional requirements.

The choice of quality level for any application should take account of design considerations, subsequent processing, e.g. surfacing, mode of stressing (e.g. static, dynamic), service conditions (e.g. temperature, environment), and consequences of failure. Economic factors are also important and should include not only the cost of welding but also that of inspection, test and repair.

Although this International Standard includes types of imperfections relevant to the arc welding processes given in clause 1, only those which are applicable to the process and application in question need to be considered.

Imperfections are quoted in terms of their actual dimensions, and their detection and evaluation may require the use of one or more methods of non-destructive testing. The detection and sizing of imperfections is dependent on the inspection methods and the extent of testing specified in the application standard or contract.

This International Standard does not include details of recommended methods of detection and sizing and, therefore, it needs to be supplemented by requirements for examination, inspection and testing. It should be appreciated that methods of non-destructive examination may not be able to give the detection, characterization and sizing necessary for use within certain types of imperfections shown in table 1.

Although this International Standard covers a material thickness range of 3 mm to 63 mm, it may well be applicable to thicker or thinner joints provided consideration is given to those technical factors which may influence the situation.

# Arc-welded joints in steel — Guidance on quality levels for imperfections

## 1 Scope

This International Standard provides guidance on levels of imperfections in arc-welded joints in steel. Three levels are given in such a way as to permit application for a wide range of welded fabrications. The levels refer to production quality and not to the fitness-for-purpose (see 3.1) of the product manufactured.

This International Standard applies to

- unalloyed and alloyed steels;
- the following welding processes and their defined sub-processes in accordance with ISO 4063:
  - 11 metal-arc welding without gas protection;
  - 12 submerged-arc welding;
  - 13 gas-shielded metal-arc welding;
  - 14 gas-shielded welding with non-consumable electrode;
  - 15 plasma arc welding;
- manual, mechanized and automatic processes;
- all welding positions;
- butt welds, fillet welds and branch connections;
- materials in the thickness range 3 mm to 63 mm.

When significant deviations from the joint geometries and dimensions described in this International Standard are present in the welded product, it is necessary to evaluate to what extent the provisions of this standard can apply.

Metallurgical aspects, e.g. grain size, hardness, are not covered by this International Standard.

## 2 Normative references

The following standards contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All standards are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the standards indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

ISO 2553:1992, *Welded, brazed and soldered joints — Symbolic representation on drawings*.

ISO 4063:1990, *Welding, brazing, soldering and braze welding of metals — Nomenclature of processes and reference numbers for symbolic representation on drawings*.

ISO 6520:1982, *Classification of imperfections in metallic fusion welds, with explanations*.

## 3 Definitions

For the purposes of this International Standard, the following definitions apply.

**3.1 fitness-for-purpose:** A product is fit for its intended purpose when it functions satisfactorily in service during its stipulated lifetime. The product may deteriorate in service, but not to such a degree that fracture and subsequent failure occurs. Products may, of course, be misused or overloaded; it is presumed that the actual conditions during service correspond to the intended conditions, including statistical variations, e.g. live loads.

## 3.2 Weld thickness

**3.2.1 fillet weld thickness,  $a$ ; nominal throat thickness:** Height of the largest isosceles triangle that can be inscribed in the weld section (see ISO 2553).

NOTE 1 In countries in which the leg length,  $z$ , is used as the dimension of a fillet weld, the limits for imperfections may be reformulated so that they refer to the leg length.

**3.2.2 butt weld thickness,  $s$ :** Minimum distance from the surface of the part to the bottom of the penetration, which cannot be greater than the thickness of the thinner of the parts (see ISO 2553).

**3.3 short imperfections:** One or more imperfections of total length not greater than 25 mm in any 100 mm length of the weld or a maximum of 25 % of the weld length for a weld shorter than 100 mm.

**3.4 long imperfection:** One or more imperfections of total length greater than 25 mm in any 100 mm length of the weld or a minimum of 25 % of the weld length for a weld shorter than 100 mm.

**3.5 projected area:** Area given by length of weld examined multiplied by the maximum width of weld.

**3.6 surface crack area:** Area to be considered after fracture.

## 4 Symbols

The following symbols are used in table 1.

- $a$  nominal fillet weld throat thickness (fillet thickness)
- $b$  width of weld reinforcement
- $d$  diameter of pore
- $h$  size (height or width) of imperfection
- $l$  length of imperfection
- $s$  nominal butt weld thickness or, in the case of partial penetration, the prescribed depth of penetration
- $t$  wall or plate thickness
- $z$  leg length of fillet welds (in case of isosceles right angle triangular section  $z = a \cdot \sqrt{2}$ )

## 5 Evaluation of welds

Limits for imperfections are given in table 1.

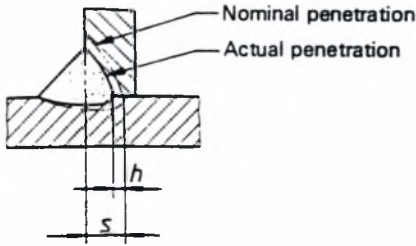
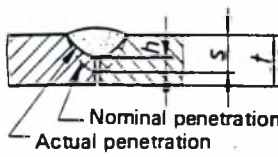
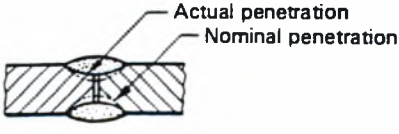
A welded joint should normally be evaluated separately for each individual type of imperfection (Nos. 1 to 25).

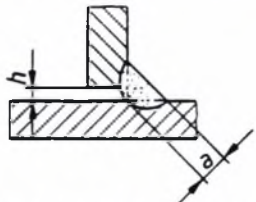
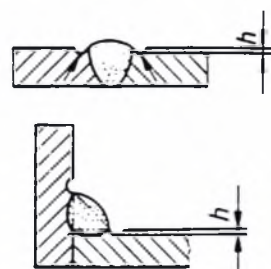
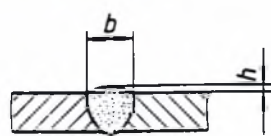
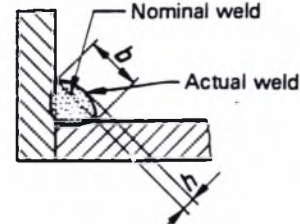
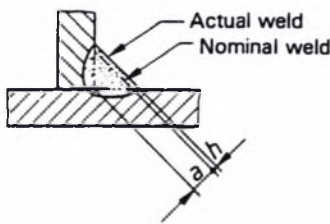
Different types of imperfection occurring at any cross-section of the joint may need special consideration (see No. 26).

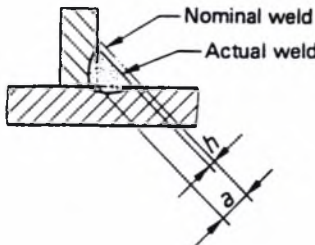
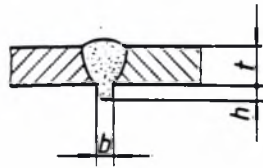
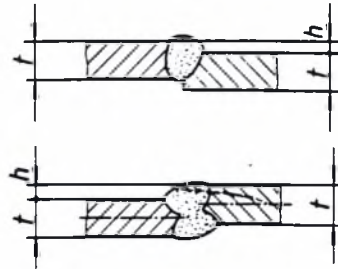
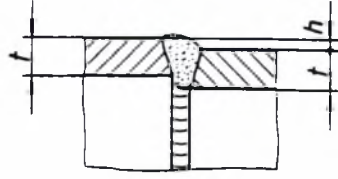


Table 1 — Limits for Imperfections

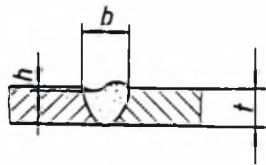
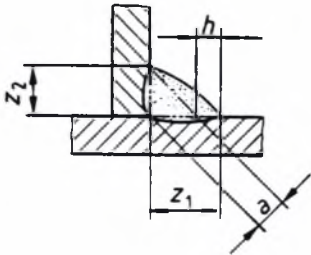
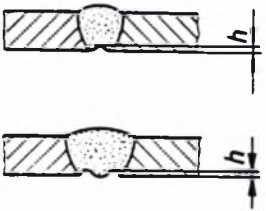

No.	Imperfection designation	ISO 6520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels		
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B
1	Cracks	100	All types of cracks except micro cracks ( $h/l < 1 \text{ mm}^2$ ), crater cracks, see No. 2	Not permitted		
2	Crater crack	104		Permitted	Not permitted	
3	Porosity and gas pores	2011 2012 2014 2017	The following conditions and limits for imperfections shall be fulfilled: a) Maximum dimension of the summation of the projected or surface crack area of the imperfection b) Maximum dimension of a single pore for — butt welds — fillet welds c) Maximum dimension for a single pore	4 %  $d \leq 0,5 s$ $d \leq 0,5 a$ 5 mm	2 %  $d \leq 0,4 s$ $d \leq 0,4 a$ 4 mm	1 %  $d \leq 0,3 s$ $d \leq 0,3 a$ 3 mm
4	Localized (clustered) porosity	2013	The total pore area within the cluster should be summed and calculated as a percentage of the greater of the two areas: an envelope surrounding all the pores or a circle with a diameter corresponding to the weld width.  The permitted porous area should be local. The possibility of masking other imperfections should be taken into consideration.  The following conditions and limits for imperfections shall be fulfilled: a) Maximum dimension of the summation of the projected or surface crack area of the imperfection b) Maximum dimension of a single pore for — butt welds — fillet welds c) Maximum dimension for localized clustered porosity	16 %  $d \leq 0,5 s$ $d \leq 0,5 a$ 4 mm	8 %  $d \leq 0,4 s$ $d \leq 0,4 a$ 3 mm	4 %  $d \leq 0,3 s$ $d \leq 0,3 a$ 2 mm
5	Elongated cavities, wormholes	2015 2016	Long imperfections for — butt welds — fillet welds  In any case, maximum dimension for elongated cavities, wormholes	$h \leq 0,5 s$ $h \leq 0,5 a$ 2 mm	Not permitted	Not permitted
			Short imperfections for — butt welds — fillet welds  In any case, maximum dimension for elongated cavities, wormholes	$h \leq 0,5 s$ $h \leq 0,5 a$ 4 mm or Not Larger Than Thickness (NLTT)	$h \leq 0,4 s$ $h \leq 0,4 a$ 3 mm or NLTT	$h \leq 0,3 s$ $h \leq 0,3 a$ 2 mm or NLTT

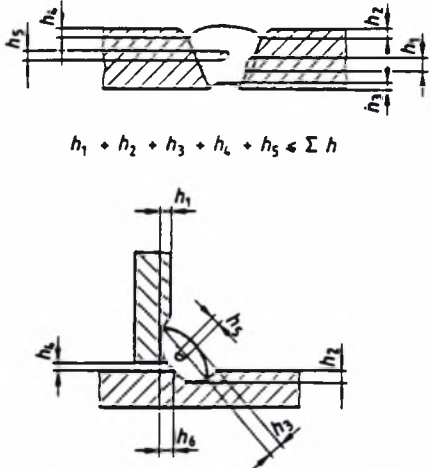
No.	Imperfection designation	ISO 6520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels		
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B
6	Solid inclusions (other than copper)	300	Long imperfections for — butt welds — fillet welds In any case, maximum dimension for solid inclusions	$h \leq 0,5 s$ $h \leq 0,5 a$ 2 mm	Not permitted	Not permitted
			Short imperfections for — butt welds — fillet welds In any case, maximum dimension for solid inclusions	$h \leq 0,5 s$ $h \leq 0,5 a$ 4 mm or Not Larger Than Thickness (NLTT)	$h \leq 0,4 s$ $h \leq 0,4 a$ 3 mm or NLTT	$h \leq 0,3 s$ $h \leq 0,3 a$ 2 mm or NLTT
7	Copper inclusions	3042		Not permitted		
8	Lack of fusion (incomplete fusion)	401		Permitted, but only intermittently and not breaking the surfaces	Not permitted	
9	Lack of penetration (incomplete penetration)	402	 <p>Figure A</p>  <p>Figure B</p>  <p>Figure C</p>	Long imperfections: Not permitted	Not permitted	
				Short imperfections: $h \leq 0,2 s$ , max. 2 mm	$h \leq 0,1 s$ , max. 1,5 mm	

No.	Imperfection designation	ISO 6520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels		
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B
10	Bad fit-up, fillet welds		<p>An excessive or insufficient gap between the parts to be joined</p>  <p>Gaps exceeding the appropriate limit may in certain cases be compensated for by a corresponding increase in the throat</p>	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,3 a$ , max. 4 mm	$h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,2 a$ , max. 3 mm	$h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,1 a$ , max. 2 mm
11	Undercut	5011 5012	<p>Smooth transition is required</p> 	$h \leq 1,5 \text{ mm}$	$h \leq 1,0 \text{ mm}$	$h \leq 0,5 \text{ mm}$
12	Excess weld metal	502	<p>Smooth transition is required</p> 	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,25 b$ , max. 10 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 b$ , max. 7 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 b$ , max. 5 mm
13	Excessive convexity	503		$h \leq 1 \text{ mm} + 0,25 b$ , max. 5 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 b$ , max. 4 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 b$ , max. 3 mm
14	Fillet weld having a throat thickness greater than the nominal value	—	<p>For many applications a throat thickness greater than the nominal one may not be a reason for rejection</p> 	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,3 a$ , max. 5 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,2 a$ , max. 4 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 a$ , max. 3 mm

No.	Imperfection designation	ISO 8520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels				
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B		
15	Fillet weld having a throat thickness smaller than the nominal value	—	<p>A fillet weld with an apparent throat thickness smaller than that prescribed should not be regarded as being imperfect if the actual throat thickness with a compensating greater depth of penetration complies with the nominal value</p> 	Long imperfections: Not permitted		Not permitted		
				Short imperfections: $h \leq 0,3 \text{ mm} + 0,1 a$ max. 2 mm	max. 1 mm			
16	Excessive penetration	504		$h \leq 1 \text{ mm} + 1,2 b$ , max. 5 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,6 b$ , max. 4 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,3 b$ , max. 3 mm		
17	Local protrusion	5041		Permitted	Occasional local excess permitted			
18	Linear misalignment	507	<p>The limits relate to deviations from the correct position. Unless otherwise specified, the correct position is that when the centrelines coincide (see also clause 1).</p> <p><i>t</i> refers to the smaller thickness</p>  <p style="text-align: center;">Figure A</p>  <p style="text-align: center;">Figure B</p>	<p style="text-align: center;">Figure A — Plates and longitudinal welds</p> $h \leq 0,25 t$ , max. 5 mm			$h \leq 0,15 t$ , max. 4 mm	$h \leq 0,1 t$ , max. 3 mm
				<p style="text-align: center;">Figure B — Circumferential welds</p> $h \leq 0,5 t$			max. 4 mm	max. 3 mm



No.	Imperfection designation	ISO 6520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels		
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B
19	Incompletely filled groove	511	Smooth transition is required.  	Long imperfections: Not permitted		
	Sagging	509		$h \leq 0,2 t$ max. 2 mm	$h \leq 0,1 t$ max. 1 mm	$h \leq 0,05 t$ max. 0,5 mm
20	Excessive asymmetry fillet weld	512	It is assumed that an asymmetric fillet weld has not been expressly prescribed.  	$h \leq 2 \text{ mm} + 0,2 a$	$h \leq 2 \text{ mm} + 0,15 a$	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,15 a$
21	Root concavity Shrinkage groove	515 5013	Smooth transition is required.  	$h \leq 1,5 \text{ mm}$	$h \leq 1 \text{ mm}$	$h \leq 0,5 \text{ mm}$
22	Overlap	506		Short imperfections are permitted	Not permitted	
23	Poor restart	517		Permitted	Not permitted	
24	Stray flash or arc strike	601		Acceptance may be influenced by post treatment. Acceptance depends on type of parent metal, with particular reference to crack sensitivity.		
25	Spatter	602		Acceptance depends on applications.		

No.	Imperfection designation	ISO 6520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels		
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B
26	Multiple imperfections in any cross-section <sup>1)</sup>	—	<p>For thicknesses <math>s \leq 10</math> mm or <math>a \leq 10</math> mm or less, special consideration may be necessary.</p>  <p><math>h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 \leq \Sigma h</math></p> <p><math>h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 = \Sigma h</math></p>	<p>Maximum total height of short imperfections <math>\Sigma h</math></p> <p>0,25 <math>s</math> or 0,25 <math>a</math>, max. 10 mm</p>	<p>0,2 <math>s</math> or 0,2 <math>a</math>, max. 10 mm</p>	<p>0,15 <math>s</math> or 0,15 <math>a</math>, max. 10 mm</p>
1) See annex A.						

## Annex A (informative)

### Additional information and guidelines for use of this International Standard

This International Standard specifies requirements for three levels of acceptance for imperfections in welded joints of steel for arc welding processes according to the scope and for weld thickness 3 mm to 63 mm. It may be used — where applicable — for other fusion welding processes or weld thicknesses.

Different parts are very often produced for different applications but to similar requirements. The same requirements should, however, apply to identical parts produced in different workshops to ensure that work is carried out using the same criteria. The consistent application of this International Standard is one of the fundamental cornerstones of a quality assurance system for use in the production of welded structures.

In table 1, figures for multiple imperfections (No. 26), show a theoretical possibility of superimposed indi-

vidual imperfections. In such a case the total summation of all permitted deviations should be restricted by the stipulated values for the different quality levels. However, the value of a single imperfection may exceed  $> h$ , e.g. for a single pore.

This International Standard may be used in conjunction with a catalogue of realistic illustrations showing the size of the permissible imperfections for the various acceptance levels by means of photographs showing the face and root side and/or reproductions of radiographs and of photomacrographs showing the cross-section of the weld. This catalogue may be used with reference cards to assess the various imperfections and may be employed when opinions differ as to the permissible size of imperfections.

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ

ΤΙΤΛΟΣ

ΛΗΞΗ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ

20.6.02 ΝΥΧΑ

2019104

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

Τηλ.: 74.760 -61

