

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία με θέμα:

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ LASER
ΣΕ ΕΠΙΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥΣ ΧΑΛΥΒΕΣ**

Φοιτήτρια : Γιακουμάκη Ιωάννα

Επιβλέπων καθηγητής : Γρ.Χαιδεμενόπουλος

Εξεταστική επιτροπή : Ν.Χασιώτης

Γ.Πετρόπουλος

ΒΟΛΟΣ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2001



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

Αριθ. Εισ.: 654/1
Ημερ. Εισ.:
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ
2001
ΓΙΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062976

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πραγματοποίηση συγκόλλησης συμβολής κυλίνδρου πάχους 6,1mm με την μέθοδο laser. Το υλικό του κυλίνδρου ήταν χάλυβας SAE8735. Η εργασία αποτελεί την συνέχεια και ολοκλήρωση μιας προηγούμενης μελέτης bead on plate στην ίδια περιοχή. Κρίθηκε αναγκαία η επανάληψη των συγκολλήσεων bead on plate για να επιτευχθεί μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης στις πειραματικές συγκολλήσεις και να είναι πλέον εφικτή η πραγματική συγκόλληση συμβολής ώστε να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη άποψη γύρω από το θέμα.

Εξ' αιτίας του γεγονότος ότι δεν υπάρχουν ορισμένες προδιαγραφές για την επιλογή των συνθηκών συγκόλλησης ακολούθησε μια εκτενής μελέτη bead on plate. Από τις πειραματικές συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκαν δύο σετ συνθηκών συγκόλλησης ως βέλτιστα και τελικά επιτεύχθηκε η συγκόλληση συμβολής με διπλή ραφή. Στα τελικά δοκίμια διενεργήθηκε ποιοτικός έλεγχος με στόχο να εξετασθεί η αξιοπιστία και ουσιαστικά η επιτυχία των συγκολλήσεων. Ο ποιοτικός έλεγχος περιελάμβανε καταστροφικές και μη καταστροφικές δοκιμές. Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης των συνθηκών συγκόλλησης, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη όπου μελετήθηκε η επιρροή των διαφόρων παραμέτρων της συγκόλλησης τόσο στο βάθος διείσδυσης όσο και στο εύρος της λίμνης συγκόλλησης.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την μελέτη είναι ότι η συγκόλληση με laser έχει τη δυνατότητα να υποκαταστήσει την συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, αφού από τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου προκύπτουν συγκρίσιμες τιμές αντοχών και μηχανικής συμπεριφοράς. Ωστόσο για πλήρη βιομηχανική εφαρμογή απαιτείται εξοπλισμός laser υψηλότερης ισχύος από αυτόν που διατέθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στους γονείς και τα αδέρφια μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτήν την σελίδα μου δίνεται η ευκαιρία ευχαριστήσω όλα εκείνα τα μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητας του τμήματός μας, καθηγητές, συναδέλφους και φίλους για την άμεση και έμμεση βοήθεια τους στην επίτευξη του τελικού στόχου.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο που με υπομονή με βοήθησε να κατανοήσω το θεωρητικό υπόβαθρο του θέματος. Τον ευχαριστώ για το αγχολυτικό χαμόγελο του και την αισιοδοξία του για την επιτυχία της εργασίας.

Ευχαριστώ την υποψήφια διδάκτορα Άννα Ζερβάκη για την συνεργασία μας στην διεξαγωγή των πειραμάτων και για την διάθεση τμημάτων από τον πολύτιμο χρόνο της. Ευχαριστώ επίσης τον Δδ. Νίκο Χασιώτη και αναπληρωτή Καθηγητή Γεώργιο Πετρόπουλο για την συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή. Ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστάω στον Νίκο Χασιώτη για μια σειρά πολύτιμων υποδείξεων και συμβουλών και την προθυμία του να με βοηθήσει σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυπτε. Ευχαριστώ επίσης τους υποψήφιους διδάκτορες Σπύρο Σαμαρά, Ελένη Καμούτση και την διδάκτορα Ελένη Αμνατιδίου για την βοήθεια που προσέφεραν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στους φίλους και συναδέλφους Όλγα Ελευθεριάδου και Κώστα Αχλαδιανάκη και την φίλη μου Μαρία Κουκουράκη για την αμέριστη ηθική συμπαράσταση.

Πολλά περισσότερα από ένα μεγάλο ευχαριστώ στον φίλο μου Μιχάλη Δαμουλάκη για την συμπαράσταση, την εμπιστοσύνη, την συνεχή παρότρυνση του. Τον ευχαριστώ που υπάρχει.

Τέλος το ελάχιστο ευχαριστώ που μπορώ να εκφράσω στους γονείς και τα αδέρφια μου είναι να τους αφιερώσω την διπλωματική μου εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ.1
2. ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	3
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2.2 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	6
2.2.1 Γενικά	6
2.2.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας	7
2.2.2.1 Η ισχύς της δέσμης	8
2.2.2.2 Η ταχύτητα συγκόλλησης	8
2.2.2.3 Η διάμετρος της δέσμης	9
2.2.2.4 Η θέση του σημείου εστίασης	9
2.2.2.5 Το προστατευτικό αέριο	10
2.2.2.6 Η απορροφητικότητα του υλικού	12
2.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER	13
2.3.1 Μηχανισμοί συγκόλλησης	13
2.3.2 Εναλλακτικές τεχνικές ελέγχου του πλάσματος	15
2.3.3 Η μορφή της keyhole	18
2.3.4 Αποτελεσματικότητα της μεθόδου	20
2.3.5 Παραμένουσες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης	22
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	27
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ-bead on plate	27
3.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ	30
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	33
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	33
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ	σελ.34

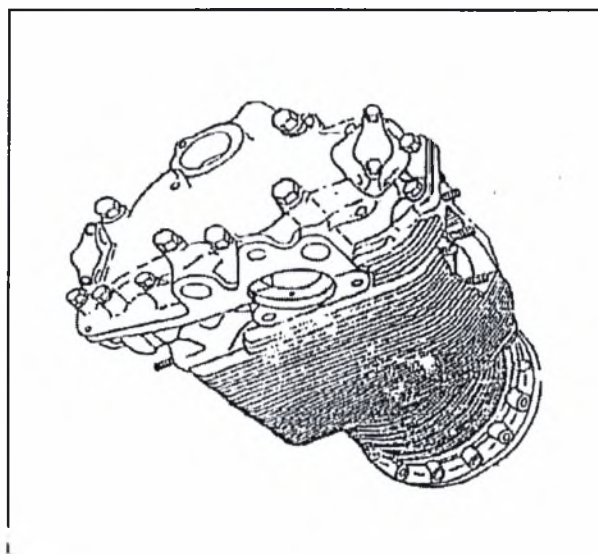
4.2.1	Μεταλλογραφία	34
4.2.1.1	Εξέταση της μακροδομής	34
4.2.1.2	Εξέταση της μικροδομής	36
4.2.2	Παραμετρική μελέτη	43
4.2.3	Μικροσκληρομετρήσεις	48
4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΣΥΜΒΟΛΗΣ	52
4.3.1	Έλεγχος με ραδιογραφία	52
4.3.2	Μεταλλογραφία	53
4.3.3	Έλεγχος μηχανικών ιδιοτήτων	55
4.3.3.1	Έλεγχος σκληρότητας	55
4.3.3.2	Έλεγχος αντοχής σε εφελκυσμό	60
4.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ LB και EB	62
4.4.1	Γενικά	62
4.4.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων	63
4.4.2.1	Σύγκριση γεωμετρικών χαρακτηριστικών	63
4.4.2.2	Σύγκριση ραδιογραφίας	63
4.4.2.3	Σύγκριση τιμών σκληρότητας	63
4.4.2.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμής εφελκυσμού	64
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	65
6.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	66
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι		
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

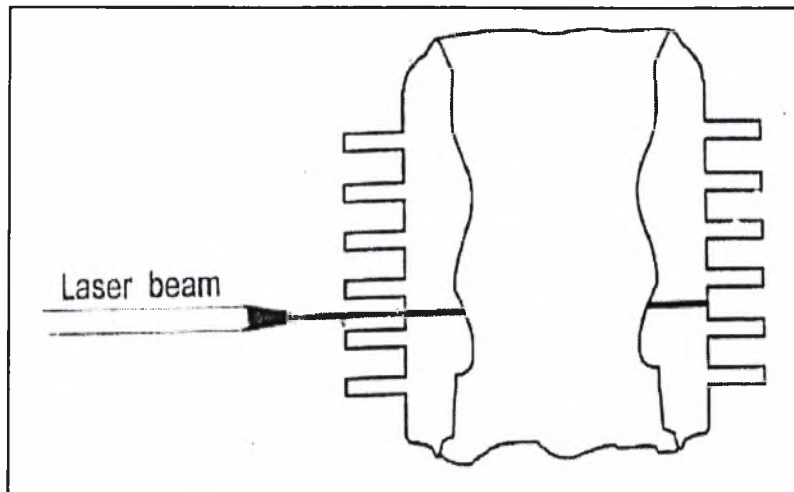
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ΠΑΒΕ 97 ΒΕ 274 με θέμα: «Ανάπτυξη και Εφαρμογή Συγκολλήσεων Laser σε Τμήματα κινητήρων αρμάτων». Στο πρόγραμμα αυτό συμμετείχαν οι βιομηχανίες SIELMAN A.E (ανάδοχος), η EBETAM A.E, καθώς και το Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Σκοπός του ερευνητικού προγράμματος ήταν αφενός η βελτιστοποίηση των συγκολλήσεων Laser για μηχανολογικές κατασκευές και η αφ'ετέρου η εφαρμογή της τεχνολογίας συγκολλήσεων laser υψηλής ισχύος, στις κατασκευαστικές διαδικασίες της SIELMAN A.E. Ουσιαστικά το αντικείμενο του έργου ήταν η πραγματοποίηση της συγκόλλησης με laser, κεφαλής άρματος μάχης M60 (σχήμα 1), έτσι ώστε να υπάρχει η προοπτική για την εξολοκλήρου κατασκευή του κινητήρα στην Ελλάδα, έναντι της εισαγωγής του από τις ΗΠΑ με ιδιαίτερο υψηλό κόστος.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής έχει ήδη αναπτυχθεί και εφαρμοστεί η συγκόλληση του κυλίνδρου με ηλεκτρονιάκη δέσμη. Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος επιχειρήθηκε η συγκόλληση του κυλίνδρου χρησιμοποιώντας δέσμη laser. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί την τελική φάση του προγράμματος εφόσον πραγματοποιήθηκε και αξιολογήθηκε η συγκόλληση συμβολής του κυλίνδρου με δέσμη laser. Το σημείο που επιθυμείται η συγκόλληση του κυλίνδρου φαίνεται στο σχήμα 2 που απεικονίζει μια κάθετη τομή του κυλίνδρου.



Σχήμα 1. Κεφαλή κυλίνδρου άρματος μάχης M60



Σχήμα 2. Σχηματική παράσταση του σημείου συγκόλλησης

Το δεύτερο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί τη βιβλιογραφική ανασκόπηση δηλαδή μια αναδρομή γύρω από την συγκόλληση με laser στην διεθνή βιβλιογραφία καθώς η μελέτη στον ελλαδικό χώρο είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Στα πλαίσια αυτής αναζητήθηκαν γενικές πληροφορίες για την μέθοδο συγκόλλησης με laser που περιλαμβάνουν αρχές και μεταβλητές λειτουργίας της συσκευής καθώς επίσης και επιστημονική εξήγηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην συγκόλληση υψηλής διείδυσης-τύπου keyhole που είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα κάθε συγκόλλησης laser, ενώ γίνεται και μια αναφορά στις παραμένουσες τάσεις που επικρατούν στην περιοχή της συγκόλλησης.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί το πειραματικό μέρος της εργασίας, το οποίο περιγράφει όλες τις μεθόδους και τις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν. Ταυτόχρονα, αναφέρει αναλυτικά τις συνθήκες συγκόλλησης των πειραματικών ραφών και γίνεται η επιλογή των βέλτιστων για την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων συμβολής. Το τέταρτο κεφάλαιο εκθέτει και αξιολογεί τα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους, δηλαδή τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου που διενεργήθηκε τόσο στα δοκίμια των πειραματικών συγκολλήσεων όσο και στα δοκίμια των συγκολλήσεων συμβολής. Τέλος, το πέμπτο κεφάλαιο εμπεριέχει τα συμπεράσματα που εξήχθησαν και προτείνει θέματα για περαιτέρω έρευνα

Κλείνοντας την εισαγωγή, αξίζει να αναφερθεί η σπουδαία δραστηριότητα που έχει αναπτύξει τα τελευταία χρόνια στον τομέα των κατεργασιών με δέσμη laser, το εργαστήριο υλικών με την EBETAM και μια ομάδα βιομηχανικών χρηστών. Είναι αξιοσημείωτο ότι ήδη έχουν πραγματοποιηθεί συγκολλήσεις ναυπηγικού χάλυβα με απόλυτη επιτυχία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκόλληση με δέσμη laser χρησιμοποιεί μια κινούμενη συνεκτική οπτική πηγή υψηλής πυκνότητας, 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 πηγή ή ακτινοβολία». Η συνεκτική φύση της ακτίνας του laser, της επιτρέπει να εστιάζεται σε πολύ μικρά σημεία οδηγώντας έτσι σε υψηλές τιμές πυκνότητας ενέργειας.

Τα laser σήμερα έχουν προωθηθεί στην αγορά και θεωρούνται χρήσιμα εργαλεία συγκόλλησης για μια πλειάδα εφαρμογών. Ωστόσο, μέχρι την δεκαετία του '70, είχαν περιοριστεί να συγκολλούν λεπτά υλικά και σε μικρές ταχύτητες εξαιτίας της περιορισμένης διαθέσιμης ισχύος. Τα τελευταία 20 χρόνια αυξήθηκε το ενδιαφέρον για μεγάλης διεισδυτικότητας συγκολλήσεις χρησιμοποιώντας συσκευές laser λόγω της ικανότητας παροχής υψηλής πυκνότητας ισχύος από τις συσκευές αυτές και φυσικά λόγω των περιορισμών της παλαιότερης τεχνολογίας. Τα κυριότερα laser που χρησιμοποιούνται σήμερα στην βιομηχανία για συγκολλήσεις είναι laser διοξειδίου του άνθρακα CO₂ και Nd:YAG (Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet) laser, συνεχούς και παλλόμενου κύματος.

Η ικανότητα του laser να δημιουργεί πυκνότητα ισχύος μεγαλύτερη από 10⁶W/cm² αποτέλεσε τον κυριότερο παράγοντα για την καθιέρωση του ως δυναμικό τρόπο συγκόλλησης. Μεγάλος αριθμός πειραμάτων έδειξε ότι το laser επιτρέπει ακριβείς συγκολλήσεις που μπορούν να συγκριθούν μόνον με αυτές που γίνονται με δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam).

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι πυκνότητες ισχύος για τις κυριότερες μεθόδους συγκόλλησης καθώς και το προφίλ της λίμνης συγκόλλησης. Επίσης δίδεται ο συντελεστής απόδοσης για κάθε μέθοδο συγκόλλησης. Ο συντελεστής απόδοσης (joining efficiency) είναι προσεγγιστικός και ορίζεται από τη σχέση u/P . Όπου u η εγκάρσια ταχύτητα σε mm/sec t το πάχος που κολλήθηκε σε mm και P η προσπίπτουσα ισχύς σε kW. Ουσιαστικά ο συντελεστής απόδοσης εκφράζει την επιφάνεια (σε mm²) που συγκολλήθηκε ανά μονάδα ενέργειας (σε kJ) που προσδόθηκε.

Πίνακας 1. Αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης με δέσμη laser και σύγκριση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης[1]

Μέθοδος συγκόλλησης	Πυκνότητα ισχύος W/cm ²	Συντελεστής απόδοσης mm ² /kJ	Προφίλ λίμνης συγκόλλησης
Οξυγονοκόλληση (OAW)	10 ² -10 ³	0,2-0,5	Μικρό βάθος διείσδυσης για μονό πέρασμα
Συγκόλληση τόξου gas tungsten arc (GTAW)	5x10 ² -10 ⁴	0,8-2	Μικρό βάθος διείσδυσης για μονό πέρασμα
Συγκόλληση τόξου gas metal arc (GMAW)	5x10 ² -10 ⁴	2-3	Μικρό βάθος διείσδυσης για μονό πέρασμα
Συγκόλληση βυθισμένου τόξου submerged arc (SAW)	5x10 ² -10 ⁴	4-10	Μικρό βάθος διείσδυσης για μονό πέρασμα
Συγκόλληση πλάσματος plasma arc (PAW)	10 ³ -10 ⁶	5-10	Μικρό βάθος διείσδυσης σε χαμηλές ενέργειες, υψηλή διείσδυση σε υψηλές ενέργειες
Laser Beam (LBW)	10 ⁵ -10 ⁷	15-25	Μικρό βάθος διείσδυσης σε χαμηλές ενέργειες, υψηλή διείσδυση σε υψηλές ενέργειες
Electron Beam (EBW)	10 ⁵ -10 ⁸	20-30	Υψηλή διείσδυση

Τα πλεονεκτήματα των συγκολλήσεων laser είναι αρκετά έναντι των άλλων μεθόδων συγκόλλησης, ενώ το κυριότερο μειονέκτημα είναι το αυξημένο κόστος του εξοπλισμού γεγονός το οποίο καθιστά την εφαρμογή της μεθόδου οικονομικά ασύμφορη σε πολλές περιπτώσεις. Μέχρι σήμερα πολλές έρευνες έδειξαν ότι η ακρίβεια των συγκολλήσεων laser κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα η ποιότητα των κατασκευών να είναι εξίσου υψηλή, το οποίο βέβαια είναι και το ζητούμενο.

Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Μη αδρανειακή φύση της δέσμης (επιτρέπει υψηλής ταχύτητας συγκόλληση με γρήγορο και απότομο ξεκίνημα-σταμάτημα).
- Η ικανότητα εστίασης της δέσμης παρέχει υψηλή πυκνότητα ενέργειας.
- Πραγματοποίηση της συγκόλλησης στην ατμόσφαιρα.
- Δύσκολα συγκολλησιμα υλικά όπως τιτάνιο μπορούν να συγκολληθούν.
- Τα προς κόλληση κομμάτια δεν απαιτούν σφιχτό κράτημα.
- Δεν απαιτούνται ηλεκτρόδια ούτε πρόσθεση υλικού (αυτογενής συγκόλληση).
- Πολύ στενή ραφή συγκόλλησης.
- Επίτευξη συγκολλήσεων μεγάλης ακριβείας (ως προς την διάμετρο, τη θέση και το βάθος διείσδυσης).
- Πολύ μικρή θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη.
- Δεν παράγονται ακτίνες-χ, επικίνδυνες για τον άνθρωπο.
- Περίπλοκα σχέδια μπορούν να συγκολληθούν χρησιμοποιώντας συστήματα ελέγχου της δέσμης
- Ικανότητα της δέσμης να μεταφέρεται σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις από το υλικό χωρίς σημαντική εξασθένιση ή υποβάθμιση, εξαιτίας της συνεκτικής της φύσης.
- Αμελητέα μόλυνση της συγκόλλησης με την χρησιμοποίηση κατάλληλου αδρανούς αερίου.
- Ικανότητα της δέσμης να μοιράζεται χρονικά
- Χαμηλός ρυθμός πρόσδωσης θερμότητας εξ' αιτίας ιων υψηλών ταχυτήτων.
- Υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου και του κόστους παραγωγής.

Τα μειονεκτήματα καθώς και οι περιορισμοί της μεθόδου συνοψίζονται στα εξής:

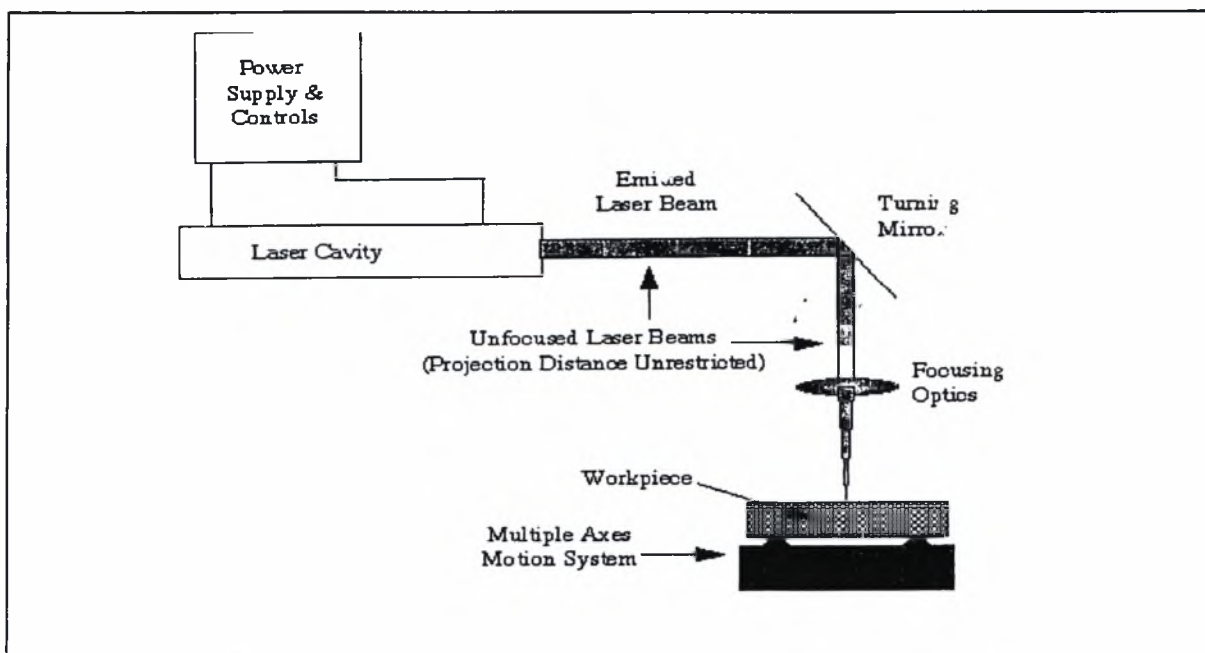
- Υψηλό κόστος εξοπλισμού το οποίο βέβαια σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αντισταθμιστεί τόσο από την υψηλή ποιότητα των παραγόμενων κατασκευών όσο και από την αυξημένη ταχύτητα παραγωγής. Σημειώνεται ότι το κόστος αρχικού κεφαλαίου επένδυσης είναι 10 φορές μεγαλύτερο από αυτό των μεθόδων συγκόλλησης με τόξο.
- Δυσκολία στην συγκόλληση υλικών υψηλής ανακλαστικότητας π.χ αλουμίνιο.
- Απαιτήση ακριβέστερης προετοιμασίας της ένωσης σε σχέση με άλλες κοινές μεθόδους
- Συγκόλληση περιορισμένης διείσδυσης σε χαμηλές πυκνότητες ενέργειας.

2.2 ΘΕΜΕΛΕΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

2.2.1 Γενικά

Πολλές φορές ένα εύλογο ερώτημα σχετικά με την λειτουργία των lasers είναι πως δημιουργείται η ακτίνα του laser. Η λειτουργία των lasers βασίζεται στην αρχή της διεγερμένης εκπομπής φωτονίων. Όταν μια εξωτερική πηγή ενέργειας, ηλεκτρική, χημική κ.α απορροφάται από ένα άτομο, τα ηλεκτρόνια του μεταπίπτουν σε ενεργειακά διεγερμένες καταστάσεις. Αυτά τα ηλεκτρόνια έχουν την τάση να επιστρέψουν στα χαμηλότερα αρχικά ενεργειακά επίπεδα, απελευθερώνουν ενέργεια ως φωτόνια.

Ο κρύσταλλος του laser περιέχει ένα στοιχείο όπως το νεοδύμιο (Nd) το οποίο είναι ικανό να απελευθερώσει φωτόνια. Όταν ένα φωτόνιο πλησιάσει ένα διεγερμένο ηλεκτρόνιο προκαλεί την αυθόρμητη επιστροφή του ηλεκτρονίου στο αρχικό ενεργειακό του επίπεδο και έτσι την ταυτόχρονη παραγωγή ενός δεύτερου φωτονίου. Τα δύο αυτά φωτόνια προκαλούν την μετάπτωση και άλλων ηλεκτρονίων στην αρχική τους τροχιά. Έτσι παράγονται τεράστιες ποσότητες φωτονίων που ταξιδεύουν ως δέσμη προς την ίδια κατεύθυνση. Στην συνέχεια η δέσμη εισέρχεται σε μια συσκευή παραλληλοποίησης, η οποία επεκτείνει τη δέσμη και βελτιώνει την συνοχή της. Τελικά προσπίπτει σε καθρέπτη όπου ανακλάται κάθετα και εισέρχεται στους τελικούς φακούς εστίασης από όπου προσπίπτει, εστιασμένη πια, στο προς συγκόλληση τεμάχιο (σχήμα 3).



Σχήμα 3. Γενική διάταξη της συγκόλλησης laser

2.2.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας

Η αποτελεσματικότητα και η επιτυχία μιας συγκόλλησης με laser οφείλονται εξολοκλήρου στην επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών της κατεργασίας οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν σε ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές.

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι:

- Η ισχύς της δέσμης.
- Η ταχύτητα συγκόλλησης.
- Η διάμετρος της δέσμης.
- Η θέση του σημείου εστίασης.
- Το προστατευτικό αέριο.
- Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.
- Η πόλωση.
- Το είδος της συγκόλλησης.
- Η απορροφητικότητα του υλικού.
- Διαστάσεις του διάκενου μεταξύ των προς συγκόλληση τεμαχίων (gap size).

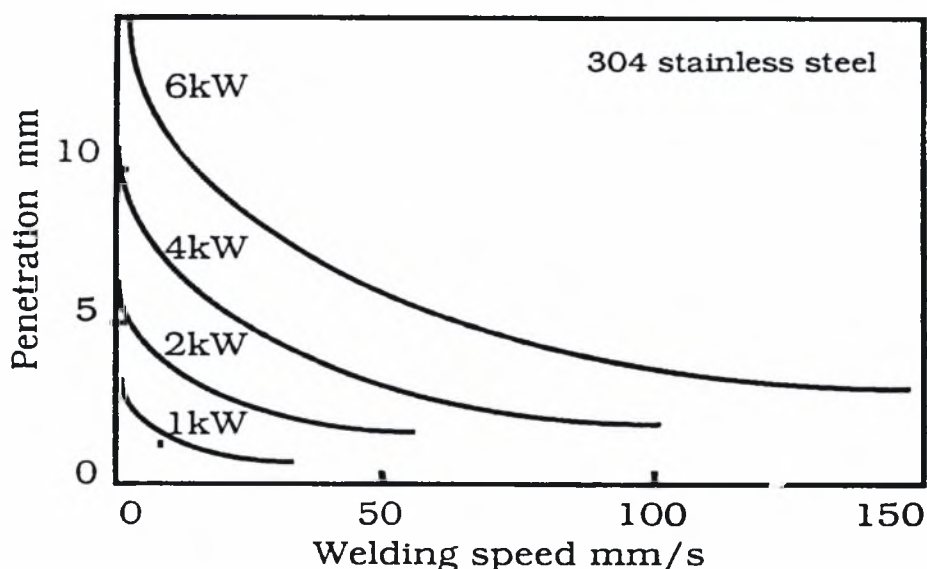
Οι εξαρτημένες μεταβλητές της συγκόλλησης είναι:

- Η γεωμετρία της λίμνης συγκόλλησης.
- Η μικροδομή της λίμνης συγκόλλησης.
- Οι μηχανικές ιδιότητες.

Παρακάτω αναλύονται οι κυριότερες μεταβλητές που επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της συγκόλλησης.

2.2.2.1. Η ισχύς της δέσμης

Το βάθος διείσδυσης μιας συγκόλλησης laser σχετίζεται άμεσα με την πυκνότητα ισχύος της δέσμης, η οποία είναι συνάρτηση της προσπίπτουσας ισχύος και της διαμέτρου της δέσμης. Το βάθος διείσδυσης της συγκόλλησης αυξάνει με την αύξηση της ισχύος του laser (σχήμα 4), όταν η διάμετρος της δέσμης διατηρείται σταθερή. Έχει αποδειχτεί [1] ότι το βάθος διείσδυσης και η ισχύς του laser σχετίζονται μεταξύ τους σχεδόν με γραμμική σχέση. Στην βιβλιογραφία απαντάται συχνά ο όρος πυκνότητα ισχύος που προαναφέρθηκε. Η πυκνότητα ισχύος I , ορίζεται από τη σχέση $I=P/A$, όπου P η ισχύς της δέσμης σε Watt και A η διατομή της σε cm^2 . Η πυκνότητα ισχύος επηρεάζεται άμεσα από το σημείο εστίασης της δέσμης, την απορροφητικότητα του υλικού και την διάθλαση των ακτινών ή την αλληλεπίδραση μεταξύ της δέσμης και του πλάσματος.



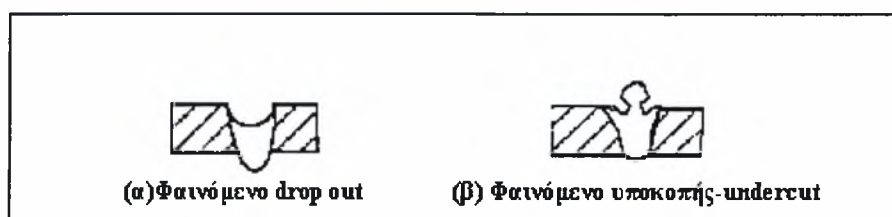
Σχήμα 4. Μεταβολή του βάθους διείσδυσης σε συνάρτηση με την ταχύτητα συγκόλλησης και την ισχύ ενός CO₂ laser.

2.2.2.2. Η ταχύτητα συγκόλλησης

Η γεωμετρία της λίκνης συγκόλλησης, η οποία καθορίζεται από το βάθος διείσδυσης και το εύρος της λίκνης συγκόλλησης, επηρεάζεται άμεσα από την ταχύτητα συγκόλλησης. Η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί μείωση του βάθους διείσδυσης με ταυτόχρονη μείωση στο εύρος της λίκνης συγκόλλησης. Το σχήμα 4 δείχνει την εξάρτηση του βάθους διείσδυσης από την ταχύτητα συγκόλλησης και την ισχύ ενός CO₂ laser. Παρατηρείται υψηλή διείσδυση σε χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης ενώ όταν η ισχύς του laser πάρει μεγαλύτερες τιμές το βάθος διείσδυσης αυξάνει ακόμη περισσότερο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το βάθος διείσδυσης σε μια συγκόλληση με laser είναι σταθερά μικρότερο από αυτό που επιτυγχάνεται με την

μέθοδο electron beam. Ωστόσο η διαφορά αυτή στα δυο βάθη διείσδυσης γίνεται μικρότερη καθώς η ταχύτητα συγκόλλησης αυξάνει. Σύμφωνα με τον Locke[1] αυτό μπορεί να αποδοθεί στον σχηματισμό του πλάσματος το οποία εξασθενίζει την δέσμη του laser.

Όπως προαναφέρθηκε σε χαμηλές ταχύτητες η λίμνη συγκόλλησης είναι μεγάλη και πλατιά. Η αδυναμία της επιφανειακής τάσης να συγκρατήσει την λίμνη συγκόλλησης στην θέση της μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενο drop out (σχήμα 5α). Επίσης σε μεγαλύτερες ταχύτητες συγκόλλησης το τηγμένο υλικό που ρέει προς το κέντρο της λίμνης συγκόλλησης δεν προλαβαίνει να υποστεί ανακατανομή και «παγώνει» σαν υποκοπή (undercut) στα άκρα της λίμνης (σχήμα 5β).



Σχήμα 5. Σχηματική αναπαράσταση α) φαινομένου drop out και β) φαινομένου υποκοπής (undercut) [2]

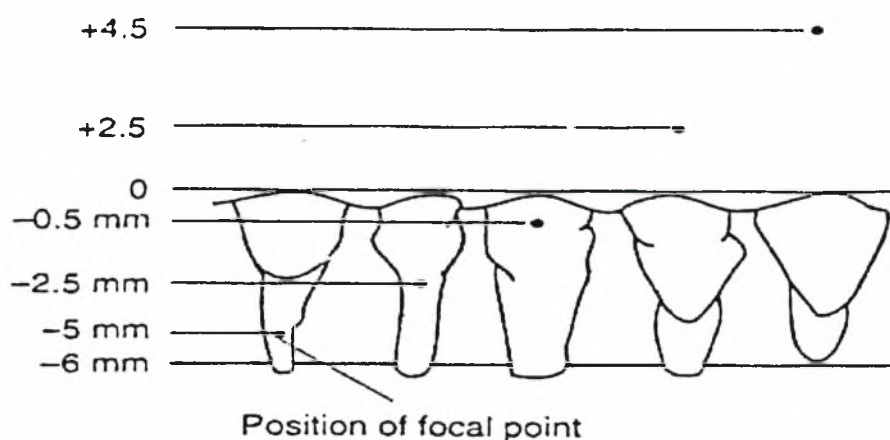
2.2.2.3 Η διάμετρος της δέσμης

Η διάμετρος της δέσμης είναι μια από τις σημαντικότερες μεταβλητές εφόσον καθορίζει την πυκνότητα ισχύος του laser. Αυξάνοντας την διάμετρο της δέσμης μειώνεται η πυκνότητα ενέργειας και αντίστροφα. Η διάμετρος μιας κανονικής (Gaussian) δέσμης καθορίζεται σαν τη διάμετρο όπου η ισχύς του laser πέφτει στο $1/e^2$ ή στο $1/e$ της ονομαστικής της τιμής. Η διάμετρος της δέσμης που καθορίζεται με βάση την τιμή $1/e^2$ της αρχικής ισχύος περιέχει περισσότερο από το 80% της αρχικής ενέργειας, ενώ αυτή που καθορίζεται με βάση την τιμή $1/e$ μόλις που υπερβαίνει το 60% της αρχικής ενέργειας. Έτσι προτιμάται η διάμετρος που ορίζεται από το $1/e^2$ της αρχικής ισχύος του laser.

2.2.2.4 Η θέση του σημείου εστίασης

Η θέση του σημείου εστίασης παίζει ουσιαστικό ρόλο στο βάθος διείσδυσης εφόσον επηρεάζει άμεσα την πυκνότητα ισχύος του laser. Όταν το σημείο εστίασης βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του υλικού, αυξάνει η επιφάνεια πρόσπτωσης της δέσμης με αποτέλεσμα να αυξάνει η διάμετρος της που συνεπάγεται μείωση της πυκνότητας ισχύος. Όταν το σημείο εστίασης βρίσκεται μέσα στο υλικό, υπεισέρχονται αυσομειώσεις στην τιμή του βάθους διείσδυσης. Εκτιμάται βέλτιστο σημείο εστίασης κοντά στο 1mm κάτω από την επιφάνεια του

υλικού[2]. Στο σχήμα 6 απεικονίζεται το προφίλ της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τη θέση του σημείου εστίασης της δέσμης. Γενικά η θέση του σημείου εστίασης δεν είναι προκαθορισμένη εφόσον εξαρτάται από το πάχος του προς συγκόλληση τεμαχίου και την ισχύ του laser. Έτσι απαιτούνται κάθε φορά αρκετές δοκιμές bead on plate για να προσδιοριστεί η βέλτιστη θέση του σημείου εστίασης.



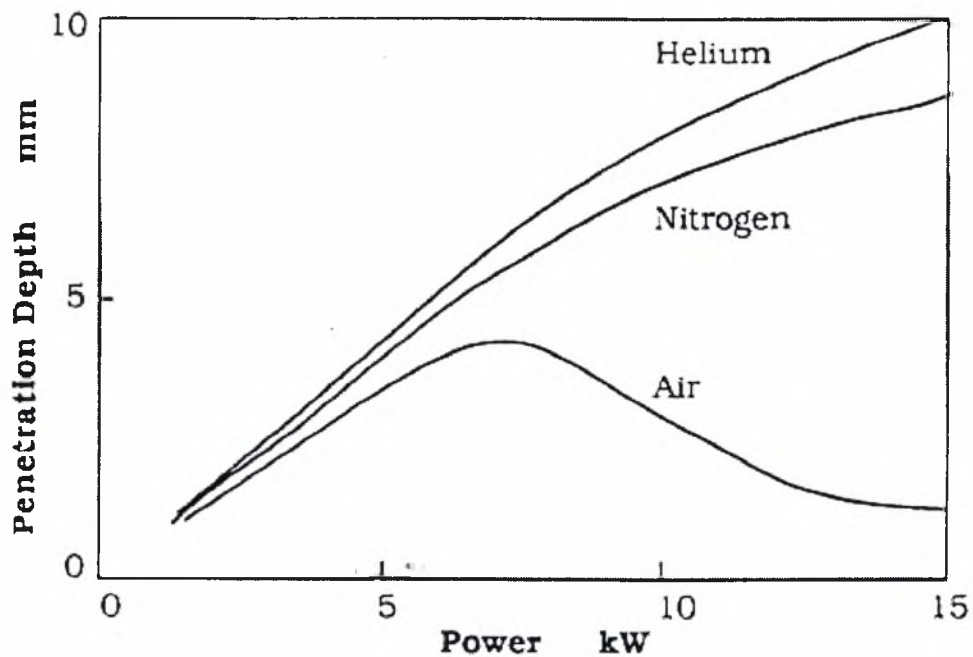
Σχήμα 6. Προφίλ της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τη θέση του σημείου εστίασης της δέσμης(CO₂ laser 5kW, 16mm/sec)[1]

2.2.2.5 Το προστατευτικό αέριο.

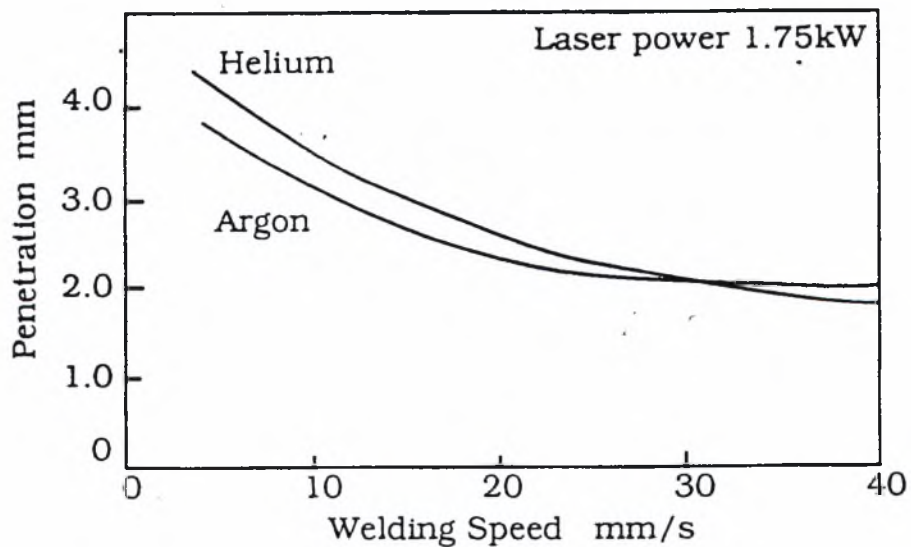
Σε πολλές συμβατικές μεθόδους συγκολλήσεων η χρήση του προστατευτικού αερίου είναι απαραίτητη και η συγκόλληση με laser δεν αποτελεί μια εξαίρεση. Το προστατευτικό αέριο χρησιμοποιείται αφενός στην εξουδετέρωση του πλάσματος που σχηματίζεται πάνω από την keyhole και αφετέρου συντελεί στην προστασία της συγκόλλησης από την οξείδωση. Το πλάσμα μπορεί να απορροφήσει μέρος της ακτινοβολίας του laser και ταυτόχρονα να διασκορπίσει τη δέσμη με αποτέλεσμα την αναπόφευκτη μείωση στο βάθος διείσδυσης.

Το αρνητικό αυτό αποτέλεσμα του πλάσματος περιορίζεται με την χρήση αδρανών αερίων που έχουν υψηλό δυναμικό ιονισμού. Έτσι το ήλιο (He) προτιμάται για συγκολλήσεις με laser ανεξάρτητα από την υψηλή τιμή του στην αγορά. Όπως φαίνεται από το σχήμα 7 η διαφορά που παρατηρείται στο βάθος διείσδυσης κατά την χρήση διαφορετικών προστατευτικών αερίων είναι σημαντική. Ωστόσο κατά τον Alexander[2] το αέριο αργό (Ar) παρέχει μεγαλύτερη προστασία από ότι το ήλιο, όταν η συγκόλληση πραγματοποιείται σε υψηλές ταχύτητες (σχήμα 8). Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι το πλάσμα έχει τόσο θετική όσο και αρνητική επίδραση στην απορρόφηση της ακτινοβολίας. Όταν το πλάσμα είναι κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου που συγκολλάται, ή ακόμα και μέσα στην keyhole, τότε η

επίδραση του είναι ευεργετική. Αντίθετα όταν αυτό απομακρύνεται από την επιφάνεια μπλοκάρει και διασκορπίζει τη δέσμη.



Σχήμα 7. Μεταβολή του βάθους διείσδυσης σε σχέση με την ισχύ του laser για διαφορετική σύσταση του προστατευτικού αερίου.



Σχήμα 8. Μεταβολή του βάθους διείσδυσης σε σχέση με την ταχύτητα συγκόλλησης για προστατευτικό αέριο He και Ar.

2.2.2.6 Η απορροφητικότητα του υλικού

Όπως έχει προαναφερθεί η επίτευξη ικανοποιητικού βάθους διείσδυσης εξαρτάται άμεσα από την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας του laser. Ωστόσο η ικανότητα του υλικού να απορροφήσει την ενέργεια της δέσμης πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Σύμφωνα με τον νόμο του Beer [3], η απορρόφηση της προσπίπτουσας ισχύος από το υλικό δίνεται από την σχέση:

$$I(z)=I_0\exp(-az)$$

Όπου $I(z)$ η πυκνότητα ισχύος σε βάθος z του υλικού, I_0 η ονομαστική πυκνότητα ισχύος της δέσμης και a η απορρόφηση ή ο συντελεστής εξασθένισης (10^4 cm^{-1}).

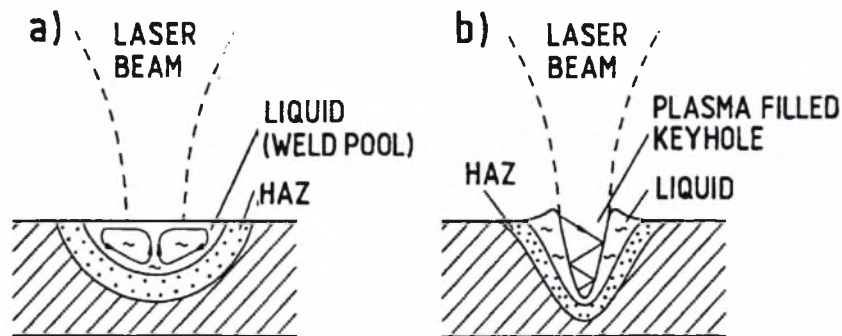
Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απορρόφηση της ακτινοβολίας από το υλικό είναι η θερμοκρασία του υλικού. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος το υλικό μπορεί να απορροφήσει περίπου το 4% της ενέργειας της δέσμης ενός CO_2 laser, σε θερμοκρασίες τήξης ο βαθμός απορρόφησης ανέρχεται στο 30%, ενώ σε θερμοκρασίες εξάτμισης φθάνει ακόμα και το 90%. Γι'αυτό το λόγο κατά την δημιουργία της keyhole, όπου το υλικό εξατμίζεται επιτυγχάνεται το μέγιστο βάθος διείσδυσης. Έτσι συνιστάται η προθέρμανση των υλικών πριν από κάθε κατεργασία συγκόλλησης με laser.

Σημειώνεται ότι ο βαθμός απορρόφησης της ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογος του μήκους κύματος αυτής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για το Nd:YAG laser με μήκος κύματος 1,06μm η απορρόφηση για τον ίδιο χάλυβα είναι 7,5 φορές μεγαλύτερη από ότι στο CO_2 laser όπου το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο ($\lambda=10,6 \text{ μm}$)[3].

2.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER

2.3.1 Μηχανισμοί συγκόλλησης

Ανάλογα με την πυκνότητα ισχύος που παραλαμβάνει το υλικό, οι συγκολλήσεις laser μπορούν να διαχωριστούν σε συγκολλήσεις με αγωγή (conduction limited welding) και σε συγκολλήσεις τύπου keyhole (σχήμα 9).



Σχήμα 9. Οι μορφές συγκόλλησης a)Conduction και b)Keyhole [11]

Η συγκόλληση με αγωγή λαμβάνει χώρα σε χαμηλές τιμές πυκνότητας ισχύος που κυμαίνονται περίπου στα 10^5W/cm^2 . Κατά τη πρόσπτωση της ακτινοβολίας του laser, η ενέργεια της δέσμης μετατρέπεται σε θερμότητα στην επιφάνεια του υλικού, η οποία θερμαίνεται πάνω από την θερμοκρασία τήξης, και μεταφέρεται στη μάζα του με αγωγή. Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή επιδρά σημαντικά στη μορφή της λίμνης συγκόλλησης, η οποία εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό Prandtl ($Pr = \text{κινηματικό ιξώδες} / \text{μοριακή διάχυση}$) του υλικού. Υλικά όπως το αλουμίνιο με μικρούς αριθμούς $Pr=0,02$ η λίμνη συγκόλλησης έχει ημισφαιρική μορφή και επίπεδη επιφάνεια, ενώ στους χάλυβες που χαρακτηρίζονται από υψηλότερους αριθμούς $Pr=0,1$ δημιουργείται ένα υπόσκαμα στην επιφάνεια και η λίμνη συγκόλλησης γίνεται πιο ρηχή[4].

Όταν η πυκνότητα ισχύος λάβει τιμές μεγαλύτερες από 10^6W/cm^2 και με την προϋπόθεση ότι η ισχύς του laser είναι μεγαλύτερη από 1kW τότε λαμβάνει χώρα η συγκόλληση τύπου keyhole κατά την οποία προκαλείται εξάτμιση του υλικού με συνέπεια την δημιουργία μιας οπής (keyhole) στην λίμνη συγκόλλησης. Η πίεση των δημιουργούμενων ατμών λόγω της εξάτμισης σταθεροποιούν την οπή αυτή η οποία έχει τις ιδιότητες μέλανος σώματος. Η οπή keyhole περιβάλλεται από τηγμένο υγρό μέταλλο και αυτό με την σειρά του από το στερεό υλικό. Η δέσμη του laser καθώς εισέρχεται στην οπή keyhole ανακλάται στα

τοιχώματα της πολλές φορές μέχρις ότου διαφύγει. Τελικά προσεγγίζοντας την οπή με το μοντέλο του μέλανος σώματος σχεδόν όλη η ενέργεια απορροφάται. Το γεγονός αυτό μπορεί να έχει και αρνητικά αποτελέσματα εφόσον σε υλικά με υψηλό δείκτη ανάκλασης με την έναρξη δημιουργίας της keyhole η απορροφητικότητα του υλικού αυξάνεται από 3% σε 98% με αποτέλεσμα πιθανή ζημιά στην δομή της συγκόλλησης [2].

Καθώς προχωράει η συγκόλληση, η keyhole μεταφέρεται εγκάρσια δια μέσου του υλικού, ενώ ωθεί το τηγμένο μέταλλο προς τα πίσω το οποίο στερεοποιείται προκαλώντας τη συνένωση των δύο υλικών. Στο εσωτερικό της keyhole υπάρχει σημαντική ποσότητα ατμού μέρος της οποίας θερμαίνεται και σχηματίζεται πλάσμα. Αυτός ο θερμός ατμός πλάσματος που αναδύεται από την keyhole μπορεί να οδηγήσει σε ιονισμό του προστατευτικού αερίου. Το ιονισμένο αέριο περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια. Όταν τα ιονισμένα είδη ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο αριθμό, το σχηματιζόμενο πλάσμα όχι μόνο απορροφά μέρος της ενέργειας του laser αλλά επίσης δημιουργεί προβλήματα στην εστίαση της δέσμης, με αποτέλεσμα τόσο η απόδοση όσο και η μορφή της συγκόλλησης να επηρεάζονται. Για να μειωθεί η αρνητική αυτή επίδραση του πλάσματος, χρησιμοποιείται αέριο ήλιο (He) σαν αέριο ελέγχου του πλάσματος.

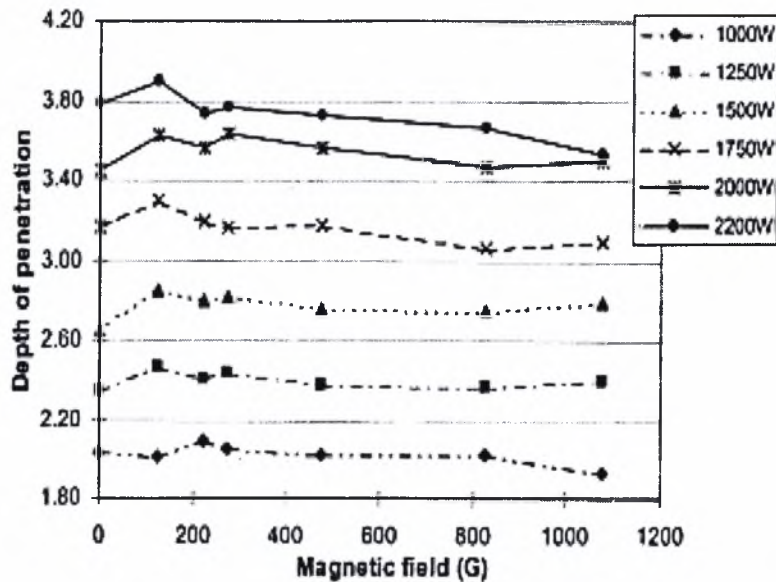
2.3.2 Εναλλακτικές τεχνικές ελέγχου του πλάσματος

Παρόλο που η χρήση του ηλίου είναι επιτυχής και αποτελεσματική το ιδιαίτερο υψηλό κόστος του αερίου στην Νοτιοανατολική Ασία και οι διάφοροι περιορισμοί της μεθόδου, όπως η αδυναμία πραγματοποίησης συγκόλλησης profile και ο επηρεασμός του σχήματος και συμπεριφοράς της keyhole από την ταχύτητα εμφύσησης του αερίου, οδήγησε στον εντοπισμό εναλλακτικών τεχνικών ελέγχου του πλάσματος

Οι Tse, Man και Yue μελέτησαν την επίδραση μαγνητικού[5] και ηλεκτρικού[6] πεδίου στον έλεγχο του πλάσματος κατά τη συγκόλληση με laser CO₂ του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 304. Η μέθοδος με χρήση μαγνητικού πεδίου βασίζεται στο γεγονός ότι το μαγνητικό πεδίο μπορεί να επιδράσει στην πυκνότητα των ηλεκτρονίων του πλάσματος. Σημειώνεται ότι ο ρυθμός απορρόφησης της ακτινοβολίας του laser από το πλάσμα και ο βαθμός αποπροσανατολισμού της δέσμης αυξάνει καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των ηλεκτρονίων του πλάσματος. Τα αποτελέσματα των ερευνών έδειξαν ότι σε μία βέλτιστη ένταση του μαγνητικού πεδίου το βάθος διείσδυσης αυξάνει σημαντικά (σχήμα 10). Αυτό μπορεί να οφείλεται στην μείωση της πυκνότητας των ηλεκτρονίων στο σύννεφό του πλάσματος. Το σχήμα 10 δείχνει επίσης την επίδραση του μαγνητικού πεδίου σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος σε ταχύτητα συγκόλλησης 750mm/min. Η ύπαρξη του μαγνητικού πεδίου δεν επιδρά σημαντικά στο βάθος διείσδυσης σε χαμηλά επίπεδα ισχύος λόγω του ότι ο σχηματισμός του πλάσματος περιορίζεται καθώς μειώνεται η ισχύς του laser. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ελέγχου του πλάσματος με χρήση μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη του μεγέθους του πλάσματος. Επιπλέον το μέγιστο βάθος διείσδυσης επιτυγχάνεται σε χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου παίρνει χαμηλές τιμές.

Η μέγιστη αύξηση στο βάθος διείσδυσης που παρατηρήθηκε ήταν κατά 7% ενώ δεν σημειώθηκε σημαντική διαφορά στο εύρος της λίμνης συγκόλλησης. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι διαφορές στη μορφή συγκολλήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές διευθύνσεις του μαγνητικού πεδίου ήταν πολύ μικρές.

Παρόλο που το βάθος διείσδυσης μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση μαγνητικού πεδίου, η βελτίωση αυτή είναι μικρή. Ωστόσο όπως προαναφέρθηκε δεν υπεισέρχεται μείωση στο εύρος της λίμνης συγκόλλησης. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη διερεύνηση της επίδρασης ηλεκτρικού πεδίου[6] για τον έλεγχο του πλάσματος.



Σχήμα 10. Επίδραση του μαγνητικού πεδίου στο βάθος διείσδυσης για διαφορετικές τιμές της ισχύος του laser (750mm/min)[5]

Τα αποτελέσματα των ερευνών έδειξαν ότι σε μια βέλτιστη παράμετρο του ηλεκτρικού πεδίου το βάθος διείσδυσης μπορεί να αυξηθεί κατά ένα ποσοστό μεγαλύτερο από 8% (σχήμα 11). Αυτό συμβαίνει γιατί αφενός τα ηλεκτρόνια απωθούνται λόγω της παρουσίας του αρνητικού ηλεκτροδίου και αφετέρου μερικά ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται στο θετικό ηλεκτρόδιο (ή το δοκίμιο). Η εξίσωση 1 δείχνει ότι η τοπική πυκνότητα πλάσματος μειώνεται σημαντικά όταν τα μόρια συγκεντρώνονται από ένα μεταλλικό άκρο κυκλώματος (probe) μεγάλων διαστάσεων.

$$\frac{nV}{\tau} = nuA \quad (1)$$

όπου n είναι η πυκνότητα του πλάσματος, V ο όγκος του πλάσματος, u η ταχύτητα του πλάσματος και A η επιφάνεια του μεταλλικού άκρου του κυκλώματος.

Επιπλέον ο αριθμός των ηλεκτρονίων που απομακρύνονται από το πλάσμα αυξάνεται με την αύξηση της επιφάνειας του μεταλλικού άκρου του κυκλώματος, όπως φαίνεται από την εξίσωση που ακολουθεί.

$$v = \frac{n_e c}{4} = \frac{n_0 c}{4} \exp\left(\frac{eV_p}{kT_c}\right) \quad (2)$$

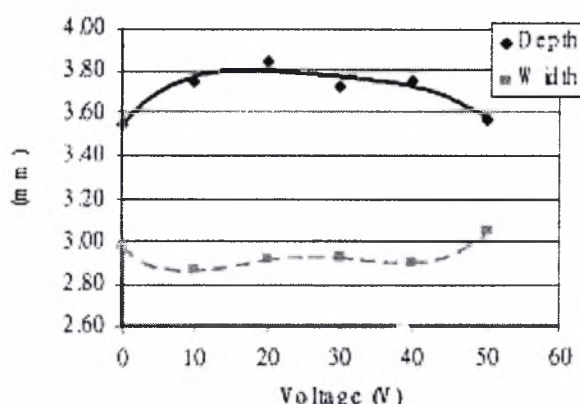
όπου v είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που χτυπούν την επιφάνεια του μεταλλικού άκρου του κυκλώματος ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου, n_0 είναι η πυκνότητα του πλάσματος, n_e η πυκνότητα των ηλεκτρονίων, e το φορτίο των ηλεκτρονίων, V_p το

εφαρμοζόμενο δυναμικό, k η σταθερά του Boltzmann, και T_e η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων.

Σύμφωνα με τις παραπάνω εκφράσεις η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να μειώσει την πυκνότητα ηλεκτρονίων του πλάσματος που οδηγεί στη μείωση του προστατευτικού ρόλου του πλάσματος και κατά συνέπεια στην αύξηση του βάθους διείσδυσης. Ωστόσο ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Σύμφωνα με την εξίσωση 3, η κίνηση των μορίων αυξάνεται με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι, ένα θετικά φορτισμένο ιόν επιταχύνει στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου ενώ ένα αρνητικά φορτισμένο ιόν ή ηλεκτρόνιο, επιταχύνει στην αντίθετη κατεύθυνση.

$$m \frac{dv}{dt} = eE \quad (3)$$

όπου m είναι η μάζα του ηλεκτρονίου, v η ταχύτητα του ηλεκτρονίου, e το φορτίο του ηλεκτρονίου και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.



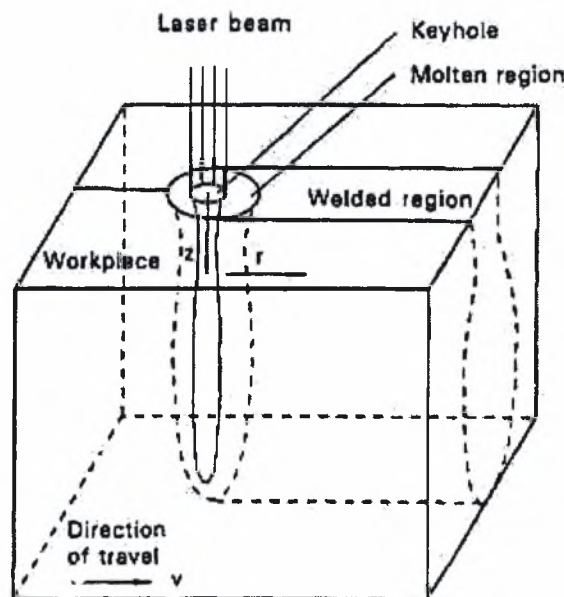
Σχήμα 11. Επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου στο βάθος διείσδυσης και στο εύρος της λίμνης συγκόλλησης (750mm/min, 2kW)

Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόδια απομακρύνουν ένα αριθμό φορτισμένων σωματιδίων. Παράλληλα όμως, η διαδικασία ιονισμού παράγει περισσότερα ηλεκτρόνια. Με άλλα λόγια όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι πάνω από μια κρίσιμη τιμή, η προστατευτική επίδραση του πλάσματος αυξάνει με άμεση συνέπεια τη μείωση του βάθους διείσδυσης (σχήμα 11). Στο σχήμα 11 φαίνεται ότι καθώς το βάθος διείσδυσης αυξάνεται σε χαμηλές τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ταυτόχρονα παρατηρείται μείωση του εύρους της λίμνης συγκόλλησης, αποτέλεσμα επιθυμητό για τις συγκολλήσεις γενικότερα.

2.3.3 Η μορφή της keyhole

Κατά την ακτινοβολία των ακτίνων laser, η κατανομή των θερμοκρασιών στο υλικό στο οποίο η ακτινοβολία προσπίπτει, εξαρτάται από τις συνθήκες αλληλεπίδρασης μεταξύ της ακτίνας του laser και του υλικού. Για κάθε υλικό υπάρχει μια τιμή της πυκνότητας ισχύος της δέσμης I_t [7], πέρα από την οποία αρχίζει να λαμβάνει χώρα εξάτμιση του υλικού. Συνεπώς αν η ένταση της ακτίνας του laser είναι μικρότερη από I_t , τότε η θερμοκρασία στην επιφάνεια του υλικού δε θα φτάσει στα επίπεδα εξάτμισης.

Στις συγκολλήσεις με laser η μετάβαση από τη συγκόλληση με αγωγή στη συγκόλληση υψηλής διεύθυνσης keyhole καθορίζεται από τη πυκνότητα ισχύος I_t . Η keyhole σχηματίζεται μέσω της εξάτμισης έτσι ώστε να διατηρείται υψηλή πίεση ατμού για υψηλή διεύθυνση στη συγκόλληση. Γύρω από την keyhole υπάρχει μια περιοχή τηγμένου μετάλλου το οποίο στερεοποιείται καθώς το δοκίμιο προωθείται με ειδική διάταξη (σχήμα 12).



Σχήμα 12. Σχηματική απεικόνιση συγκόλλησης υψηλής διεύθυνσης τύπου keyhole[8]

Εκτιμάται ότι η ακτινοβολία ενός Nd:YAG laser χαρακτηρίζεται από κατανομή πυκνότητα ισχύος σύμφωνα με τον Gauss, έτσι:

$$I(r, z) = I(0, z) \exp\left[-\frac{2r^2}{R^2(z)}\right] \quad (4)$$

όπου είναι r η απόσταση του άξονα της ακτίνας από το τοπικό σημείο, z η απόσταση του τοπικού επιπέδου από το επίπεδο εστίασης του laser, $I(0, z)$ η πυκνότητα ισχύος στο κέντρο της δέσμης και $r(z)$ είναι η ακτίνα της δέσμης στο z -επίπεδο.

Σε ένα αυθαίρετο z-επίπεδο κάθετο στον άξονα του laser, μόνο το υλικό μέσα στην περιοχή που προδιαγράφεται από την ακτίνα $r=r_i(z)$ μπορεί να φτάσει ή να υπερβεί την τιμή I_i . Συνεπώς τα όρια της οπής με ακτίνα $r=r_i(z)$ όπου έχει επιτευχθεί η πυκνότητα ισχύος I_i , σκιαγραφούν τη μορφή της keyhole ή της οπής της διάτρησης εφόσον και τα δύο φαινόμενα βασίζονται στις ίδιες φυσικές αρχές.

Για να υπολογιστεί η ακτίνα $r_i(z)$ πρέπει να ικανοποιείται η σχέση $I(r,z)= I_i$. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψιν και τους νόμους οπτικής του Gauss προκύπτει ότι

$$r_i(z) = \sqrt{\frac{[R^2(0) + (\theta z)^2]}{2} \ln \frac{2E}{\pi I_i [R^2(0) + (\theta z)^2]}} \quad (5)$$

όπου 2θ είναι η γωνία εστίασης της ακτίνας του laser, E είναι η ενέργεια ενός παλμού του laser και t_i είναι η διάρκεια του παλμού.

Η ένταση I_i της ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά ή πειραματικά[8]. Στην περίπτωση των συγκολλήσεων η μορφή της keyhole μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 5 όπου πλέον η πυκνότητα ισχύος δεν είναι αυτή που απαιτείται για να εξατμιστεί το υλικό αλλά η πυκνότητα ισχύος που επιτυγχάνεται στο κατώτατο άκρο του προφίλ και η τιμή της υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

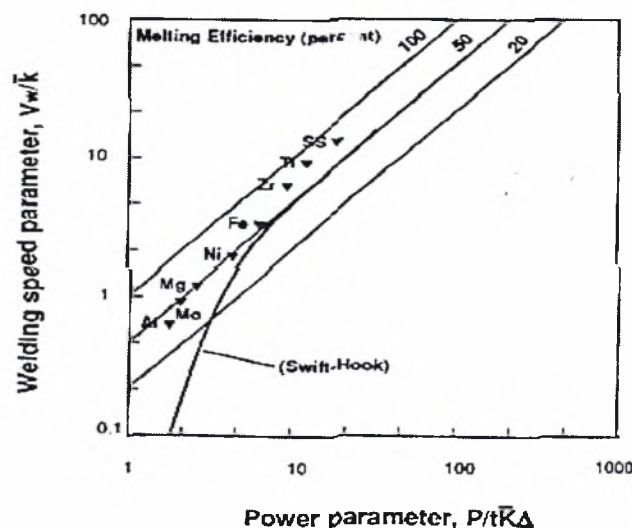
$$I(0, z) = \frac{2E}{\pi [R^2(0) + (\theta z)^2] t_i} \quad (6)$$

Επιπλέον, αν η θεομότητα απορροφάται από το υλικό με ομοιογενή τρόπο τότε η μορφή της συγκόλλησης που σχηματίζεται είναι όμοια με την μορφή της keyhole.

2.3.4 Αποτελεσματικότητα της μεθόδου συγκόλλησης με laser

Οι συγκολλήσεις τύπου keyhole χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλή διείδυση η οποία έχει επιτευχθεί μετά από αποτελεσματική αξιοποίηση της ενέργειας του laser. Ο συνήθης τρόπος ανάλυσης της απόδοσης είναι χρησιμοποιώντας όρους κανονικοποιημένων παραμέτρων. Ορίζεται λοιπόν κανονικοποιημένη παράμετρος της ταχύτητας της συγκόλλησης ο όρος Vw/k , όπου V είναι η ταχύτητα συγκόλλησης, w είναι το εύρος της λίμνης συγκόλλησης και k η θερμική διαχυτότητα, ενώ η κανονικοποιημένη παράμετρος της ισχύος είναι P/tK όπου P είναι η ισχύς του laser, t το βάθος διείδυσης και K η θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Αυτές οι δύο κανονικοποιημένες παράμετροι είναι σε αδιάστατη μορφή. Η συνάρτηση εισροής θερμότητας ορίζεται ως: $\Delta=T_f-T_0+L_f/C_p$ όπου T_f είναι η θερμοκρασία τήξης, T_0 η θερμοκρασία περιβάλλοντος, L_f η λανθάνουσα θερμότητα τήξης.

Το σχήμα 13 δείχνει αποτελέσματα από διαφορετικά υλικά που συγκολλήθηκαν με laser CO₂ ισχύος 5kW. Οι διαγώνιες ευθείες που υπάρχουν στο διάγραμμα καθορίζουν ποσοστά τήξης του υλικού (απόδοση τήξης-melting efficiency). Η «απόδοση τήξης» εκφράζει την θερμότητα που απαιτείται για να τηχθεί ο όγκος του υλικού και περιλαμβάνει τις απώλειες από ανάκλαση της ακτινοβολίας και τις απώλειες λόγω αγωγής της θερμότητας μακριά από τη λίμνη συγκόλλησης. Ουσιαστικά η «απόδοση τήξης» είναι ένα μέτρο που καθορίζει κατά πόσο η διαθέσιμη ενέργεια του laser χρησιμοποιείται για την τήξη του υλικού. Σε υλικά με χαμηλή θερμική διαχυτότητα όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας η «απόδοση τήξης» υπερβαίνει το 70%. Έτσι το 70% της ενέργειας χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση και τήξη του υλικού ενώ λιγότερο από 30% απωλέσθηκε. Έπομένως η συγκόλληση με laser μπορεί να θεωρηθεί σαν μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος.



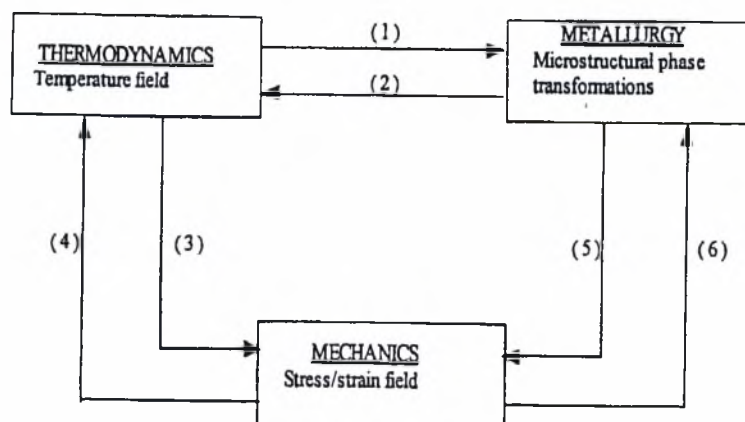
Σχήμα 13. Κανονικοποιημένη ταχύτητα συγκόλλησης συναρτήσει της κανονικοποιημένης ισχύος του laser[9]

Η καμπύλη Swift-Hook[9] του σχήματος υποδεικνύει εκτιμήσεις του μέγιστου βάθους διείσδυσης όπως περιορίζεται από απώλειες λόγω θερμικής αγωγής. Στο πάνω αριστερό άκρο του σχήματος η καμπύλη γίνεται παράλληλη στις διαγώνιες ευθείες σε μια απόδοση περίπου στο 48%. Η περιοχή αυτή αντιπροσωπεύει ένα «καθεστώς» γραμμικής μεταφοράς της θερμότητας με αγωγή. Αντίθετα στο κάτω αριστερό άκρο η θεωρητική καμπύλη πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα τιμών της «απόδοσης τήξης» σε μια περιοχή όπου η αγωγή της θερμότητας γίνεται εκθετικά. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι η απόδοση της διαδικασίας αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ισχύς του laser. Επειδή η «απόδοση τήξης» του laser είναι υψηλή, απαιτούνται χαμηλότεροι ρυθμοί πρόσδωσης θερμότητας από ότι σε άλλες μεθόδους συγκόλλησης, όπως οι συγκολλήσεις με τόξο. Η ενέργεια είναι χαμηλότερη κατά ένα παράγοντα 10. Αυτό έχει ένα ευεργετικό αποτέλεσμα στην διατήρηση των μικρών διαστάσεων της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό των συγκολλήσεων με laser.

2.3.5 Παραμένουσες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης

Στις συγκολλήσεις με laser, η παρουσία υψηλών θερμοκρασιακών gradient στη περιοχή της συγκόλλησης τόσο κατά τη διάρκεια της φάσης της θέρμανσης όσο και της ψύξης έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μόνιμων και παραμενουσών τάσεων μετά το πέρας της διαδικασίας. Η παρουσία παραμενουσών τάσεων στην ευρύτερη περιοχή της ραφής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την θραύση λόγω ψαθυροποίησης, την διάδοση ρηγμάτων λόγω κόπωσης του υλικού ή και δομική αστάθεια. Συχνά, όταν η θερμική κατεργασία σε συγκολλήσεις είναι ανέφικτη, λόγω έλλειψης πληροφοριών, γίνεται η υπόθεση ότι οι παραμένουσες τάσεις είναι εφελκυστικού τύπου και της τάξης του ορίου διαρροής. Η μέτρηση των παραμενουσών τάσεων έχει πειραματικούς και πρακτικούς περιορισμούς. Με μη καταστρεπτικές διαδικασίες μπορούν να υπολογιστούν μόνο οι επιφανειακές τάσεις ενώ χρησιμοποιώντας καταστρεπτικές μεθόδους δεν μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια το τρισδιάστατο πεδίο των τάσεων. Γι' αυτό το λόγο ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ίσως μπορεί να δώσει λύση στον υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων.

Όπως έχει προαναφερθεί όταν η πυκνότητα ισχύος του laser πάρει εξαιρετικά υψηλές τιμές λαμβάνει χώρα συγκόλληση τύπου keyhole. Οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό της keyhole μπορούν να φτάσουν τους 20000°C. Κατά την διάρκεια της συγκόλλησης υπάρχει ισορροπία μεταξύ της πίεσης του ατμοποιημένου μετάλλου, το οποίο τείνει να διευρύνει την οπή, και της υδροστατικής πίεσης του υγροποιημένου μετάλλου, το οποίο τείνει να κλείσει την οπή. Μια εξιδανίκευση του προβλήματος των παραμενουσών τάσεων εμπλέκει πολλούς επιστημονικές αρχές. Το σχήμα 14 δείχνει την αμοιβαία επιρροή στα πεδία των θερμοκρασιών, των τάσεων και της μικροδομής.



Σχήμα 14. Αμοιβαία επιρροή στα πεδία των θερμοκρασιών, των τάσεων και της μικροδομής[10].

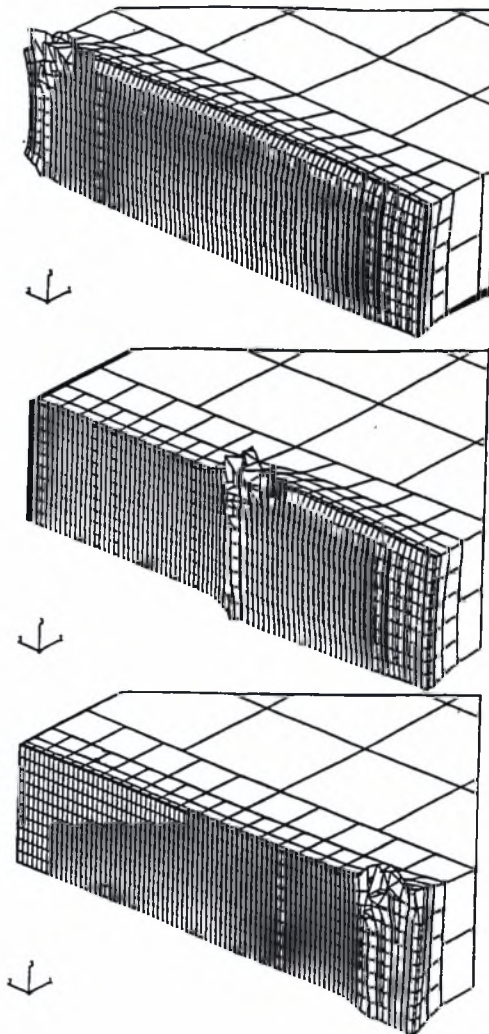
Η αρίθμηση των βελών έχει το εξής νόημα.:

1. Οι μετασχηματισμοί των φάσεων στους χάλυβες καθορίζονται από την θερμοκρασία. Αυτό είναι φανερό από τα διαγράμματα CCT και TTT τα οποία εμπεριέχουν τις αρχικές και τελικές γραμμές μετασχηματισμού, σε ένα επίπεδο χρόνου-θερμοκρασίας, από την ωστενιτική φάση στην περλιτική, μπαινιτική ή μαρτενσιτική φάση ανάλογα με τον ρυθμό ψύξης.
2. Κατά τη διάρκεια μετασχηματισμού των φάσεων η λανθάνουσα θερμότητα απελευθερώνεται.
3. Η θέρμανση και ψύξη του υλικού δημιουργούν θερμικές παραμορφώσεις με αποτέλεσμα την εμφάνιση παραμενουσών θερμικών τάσεων.
4. Η εξέλιξη στο πεδίο των τάσεων μπορεί να οδηγήσει σε θερμική διάχυση μέσα στο υλικό.
5. Κάθε φάση μετασχηματισμού είναι μια πηγή παραμόρφωσης μέσα στο υλικό. Αυτό οφείλεται κυρίως σε διαφορές στην πυκνότητα και σε αυτό που καλείται πλαστικότητα μετασχηματισμού δηλαδή την εμφάνιση μονίμων πλαστικών παραμορφώσεων μέσα στο υλικό κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού υποκείμενες σε τάσεις πολύ κάτω από το όριο διαρροής.
6. Η ύπαρξη μη μηδενικού πεδίου τάσεων επηρεάζει την κινητική του μετασχηματισμού των φάσεων αυξάνοντας ή μειώνοντας τον χρόνο «επάασης», π.χ την θέση των γραμμών μετασχηματισμού που έχουν προαναφερθεί και τους ρυθμούς μετασχηματισμού.

Λόγω του γεγονότος ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, τα μέταλλα εμφανίζουν μια προκαθορισμένου βαθμού εξάρτηση από την πλαστική συμπεριφορά, η εξιδανίκευση του προβλήματος υποθέτει ελαστοπλαστική συμπεριφορά για θερμοκρασίες κάτω από τα 2/3 της θερμοκρασίας τήξης και μια ιξωδο-ελαστοπλαστική (elastoviscoplastic) συμπεριφορά σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτήν την τιμή.

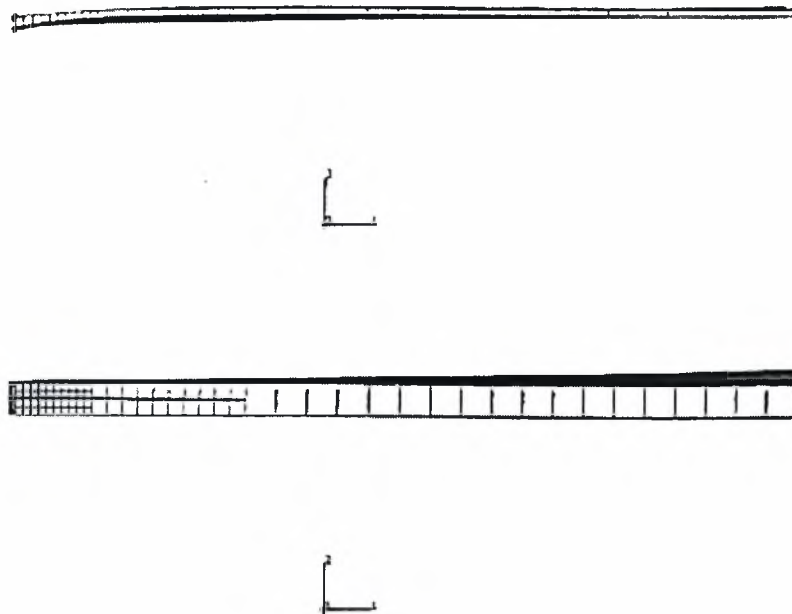
Ιταλοί επιστήμονες[10] επέλεξαν ένα βέλτιστο πλέγμα ισοπαραμετρικών στερεών στοιχείων κάτω από την κινούμενη δέσμη του ενός AVCO- EVERETT laser 12kW, ενώ καθόρισαν την αναπαράσταση της πηγής και τις σωστές συνοριακές συνθήκες. Λόγω της συμμετρίας ως προς την ραφή της συγκόλλησης μόνο το ένα κομμάτι του υλικού αναλύθηκε, πάντα με την προϋπόθεση ότι τα δύο κομμάτια του υλικού μπορούν να συγκολληθούν εντέλει. Η ταχύτητα συγκόλλησης ήταν 25mm/s. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν χάλυβας AISI304 και οι διαστάσεις του δοκιμίου 1000x40x10mm³. Το μεγάλο μήκος του δοκιμίου κατά την x-κατεύθυνση έγκειται στην ανάγκη να ληφθούν πληροφορίες που

αφορούν δομικές παραμορφώσεις του δοκιμίου, όπως μετατοπίσεις και περιστροφές του μετάλλου βάσης και να μπορούν να διαχωριστούν από τις αναπόφευκτες παραμορφώσεις κοντά στη ραφή. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου (θέρμανση-ψύξη) αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις στην περιοχή της συγκόλλησης. Στο σχήμα 15 φαίνεται η ακολουθία του παραμορφωμένου πλέγματος κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η χαρακτηριστική διαστολή του μετάλλου λόγω της ισχυρής θέρμανσης που παράγεται από την δέσμη του laser είναι φανερή κάτω από την πηγή θερμότητας, της οποίας η θέση βρίσκεται εκεί όπου τα πεπερασμένα στοιχεία του πλέγματος έχουν υποστεί μεγάλο βαθμού παραμόρφωση. Η ακολουθία του παραμορφωμένου πλέγματος δείχνει την μη ομοιόμορφη συστολή και διαστολή που οφείλεται στα υψηλά θερμοκρασιακά gradients σε μια μικρή περιοχή γύρω από το τηγμένο μέταλλο.



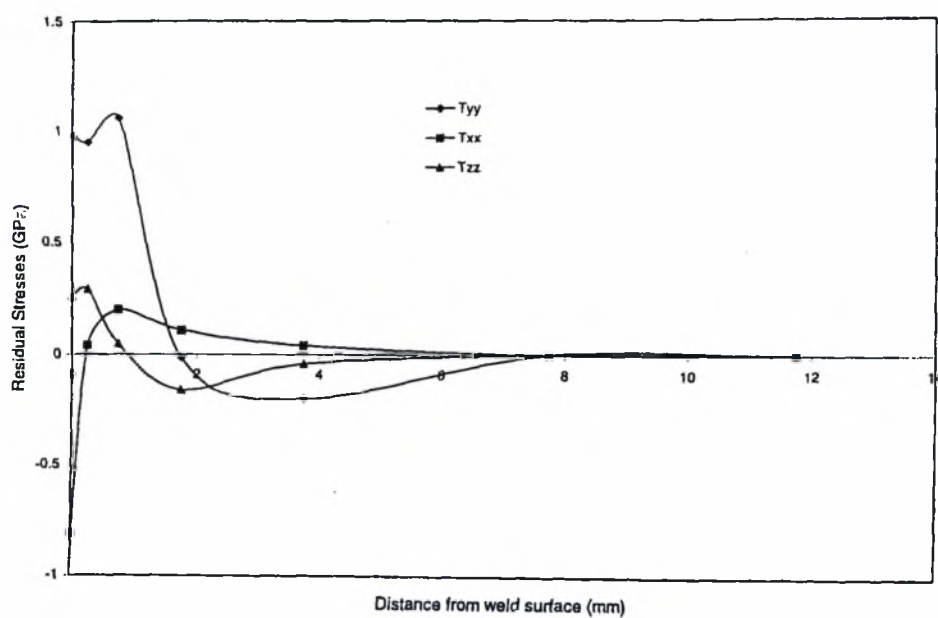
Σχήμα 15. Ακολουθία του παραμορφωμένου πλέγματος κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης[10].

Στο σχήμα 16 φαίνεται ότι υπάρχει συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου. Η παραμόρφωση αυτή συνίσταται από μια προσωρινή περιστροφή λόγω της θέρμανσης μπροστά από την κινούμενη πηγή θερμότητας του laser και από μία μετατόπιση κάθετα στο επίπεδο της συγκόλλησης. Η μετατόπιση έχει μεγεθυνθεί 100 φορές σε αυτό το σχήμα για να γίνει ορατή.



Σχήμα 16. Παραμορφώσεις του δοκιμίου[10].

Το σχήμα 17 απεικονίζει τις παραμένουσες τάσεις εγκάρσια στην γραμμή της συγκόλλησης. Οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις εμφανίζονται κοντά στα όρια της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης. Οι τιμές αυτές είναι υψηλές λόγω φαινομένων σκλήρυνσης (strain hardening phenomena) και λόγω των ισχυρών μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε. Παρόλο που η διαμήκης κάθετος συνιστώσα της τάσης υπερβαίνει το όριο ροής για σοβαρούς αυτοπεριορισμούς του ελάσματος κατά τη διεύθυνση αυτή, εξακολουθεί να βρίσκεται κάτω από το όριο θραύσης.



Σχήμα 17. Παραμένουσες τάσεις εγκάρσια στην γραμμή της συγκόλλησης[10].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ-bead on plate

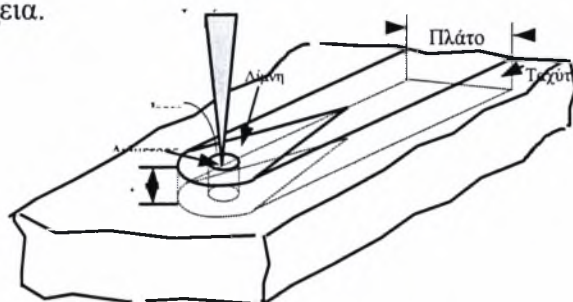
Ο σκοπός της παρούσας εργασίας, ήταν να προσδιοριστεί η επίδραση των συνθηκών συγκόλλησης με laser (ισχύς του laser, ταχύτητα σάρωσης, θέση σημείου εστίασης) στο βάθος διείσδυσης, το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης, της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης και της μικροδομής σε πειραματικές συγκολλήσεις laser που πραγματοποιήθηκαν στην επιφάνεια του ήδη υπάρχοντος κυλίνδρου. Έπειτα οι βέλτιστες πειραματικές συνθήκες εφαρμόστηκαν για την συγκόλληση συμβολής του κυλίνδρου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης, ο κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από υλικό SAE8735 (βλ.πίνακα 2). Το πάχος του είναι 6,1mm. Ο χάλυβας αυτός κατατάσσεται στην κατηγορία Ni-Cr-Mo Steels και θεωρείται επιβελτιωμένος χάλυβας. Ο ρόλος κάθε κραματικού στοιχείου είναι σημαντικός και καθορίζει την μηχανική συμπεριφορά και τις ιδιότητες του χάλυβα. Για παράδειγμα το Mo και το Cr βοηθούν στην αύξηση της εμβαπτότητας, το Ni στην αύξηση της δυσθραυστότητας, ενώ η ύπαρξη του Mn έγκειται στην ανάγκη δέσμευσης του S.

Πίνακας 2. Χημική σύσταση χάλυβα (%κ.β)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,34%	0,28%	0,78%	0,013%	0,005%	0,5%	0,48%	0,21%

Ήδη προηγούμενη μελέτη συναδέλφου [12] περιγράφει τα πρώτα πειράματα bead on plate που έγιναν για την συγκεκριμένη εφαρμογή, τα οποία πραγματοποιήθηκαν σε σημεία εστίασης +7mm έως +9mm από την επιφάνεια του υλικού. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν νέα πειράματα σε χαμηλότερα σημεία εστίασης τα οποία αναλύονται στην συνέχεια.



Σχήμα 18. Σχηματική αναπαράσταση συγκόλλησης bead on plate

Η πραγματοποίηση των νέων πειραμάτων έγινε στα εργαστήρια της EBETAM με την βοήθεια μιας δέσμης laser 1500 Watt, χρησιμοποιώντας προστατευτικό αέριο He και μεταβάλλοντας την ταχύτητα σάρωσης για διαφορετικές τιμές του σημείου εστίασης και της πίεσης του αερίου. Η σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης bead on plate φαίνεται στο σχήμα 18. Οι πειραματικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 4. Σημειώνεται ότι η ισχύς, παρέμεινε σταθερή στην τιμή των 1350 Watt σε όλες τις πειραματικές συγκολλήσεις..

Όπως φαίνεται και από την αρίθμηση του πίνακα 4 πραγματοποιήθηκαν 28 «ραφές» στην επιφάνεια του κυλίνδρου, μεταβάλλοντας κάθε φορά τις συνθήκες συγκόλλησης. Το επόμενο βήμα ήταν η εξαγωγή ισάριθμων μεταλλογραφικών δοκιμίων, η προετοιμασία και η μελέτη των οποίων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο των Υλικών, χρησιμοποιώντας διαδοχικά τον εξοπλισμό που φαίνεται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε

1. Κοπή δοκιμίων	Struers Labotom
2. Εγκιβωτισμός	Struers Prestopress-3
3. Λείανση	Struers Knuth-Rotor 3
4. Στίλβωση	Struers DAP-V
5. Χημική προσβολή	Nital 10% και 2%
6. Στερεοσκόπιο	Leica Wild M32Z
7. Μικροσκόπιο	Leica Aristomet

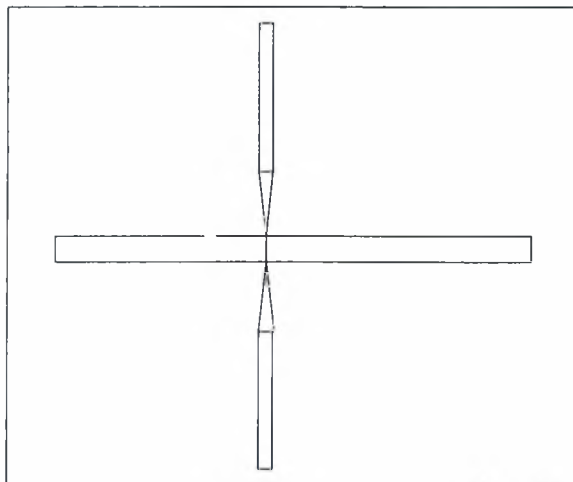
Πίνακας 4. Συνθήκες πειραματικών συγκολλήσεων

A/A συγκόλλησης	Ισχύς (Watt)	Ταχύτητα συγκόλλησης (mm/min)	Σημείο εστίασης (f.p) (mm)	Αέριο προστασίας He
1	1350	320	1	2 bar
2	1350	200	1	2 bar
3	1350	400	1	2 bar
4	1350	600	1	2 bar
5	1350	800	1	2 bar
6	1350			
7	1350	200	1	4 bar
8	1350	320	1	4 bar
9	1350	400	1	4 bar
10	1350	600	1	4 bar
11	1350	200	3	2 bar
12	1350	320	3	2 bar
13	1350	400	3	2 bar
14	1350	600	3	2 bar
15	1350	800	3	2 bar
16	1350	200	3	0.5 bar
17	1350	320	3	0.5 bar
18	1350	400	3	0.5 bar
19	1350	600	3	0.5 bar
20	1350	800	3	0.5 bar
21	1350	200	0	2 bar
22	1350	200	0,5	2 bar
23	1350	320	0,5	2 bar
24	1350	200	4	2 bar
25	1350	320	4	2 bar
26	1350	400	4	2 bar
27	1350	600	4	2 bar
28	1350	800	4	2 bar

3.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ

Ιδιαίτερα σημαντικό για την επιτυχή εκτέλεση της συγκόλλησης είναι η επίτευξη ικανοποιητικού βάθους διείσδυσης. Γι αυτό το λόγο έγινε πλήρης παραμετρική μελέτη, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο, όπου μετρήθηκαν τα βάθη διείσδυσης καθώς επίσης και το εύρος της λίμνης συγκόλλησης. Με βάση τα δύο αυτά μεγέθη προσδιορίστηκαν οι συνθήκες για την συγκόλληση συμβολής του κυλίνδρου. Από το σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, επιλέχθηκαν αυτά με το μεγαλύτερο δυνατό βάθος διείσδυσης για την συγκόλληση του κυλίνδρου πάχους 6,1 mm και το μικρότερο δυνατό εύρος.

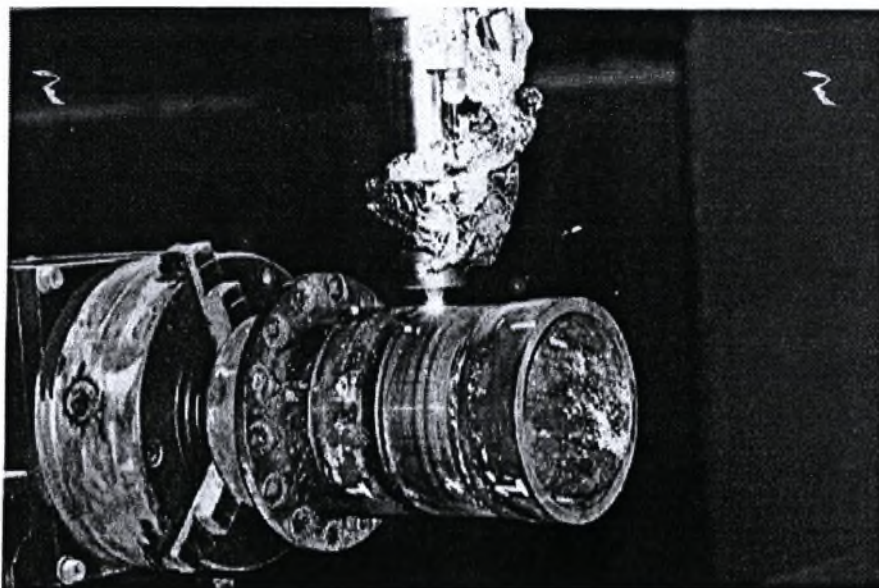
Με βάση λοιπόν αυτό το κριτήριο επιλέχθηκαν οι συνθήκες των δοκιμών 8 και 22 για την συγκόλληση συμβολής του κυλίνδρου. Επειδή η διαθέσιμη ισχύς δεν επέτρεψε τη δημιουργία συγκολλήσεων πλήρους διείσδυσης, όπως προέκυψε και από τα πειράματα bead on plate, αποφασίστηκε η εκτέλεση συγκολλήσεων συμβολής με δυο αντικριστά περάσματα της δέσμης από την εσωτερική και την εξωτερική πλευρά του κυλίνδρου όπως φαίνεται στο σχήμα 19 που αντιπροσωπεύει μια λεπτομέρεια στο σημείο συμβολής.



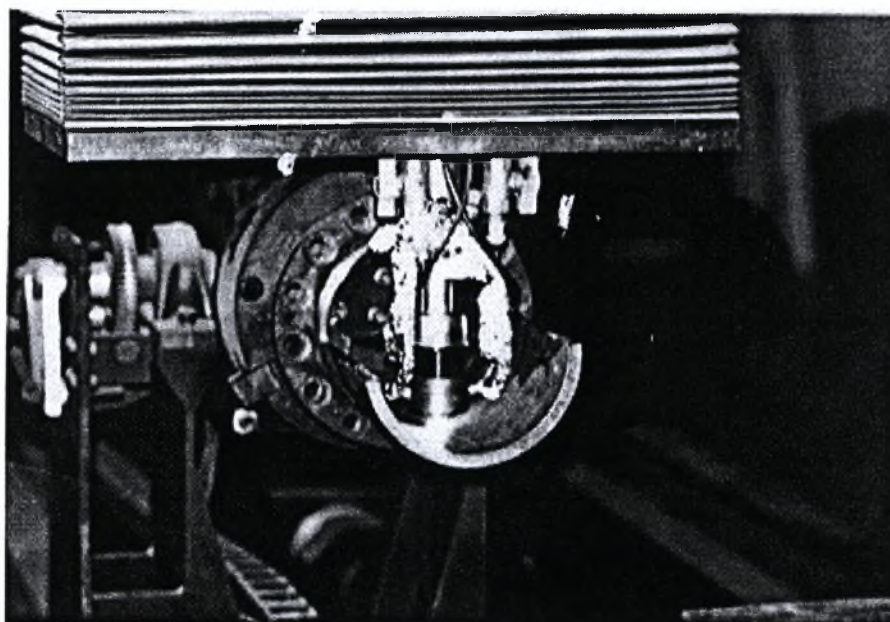
Σχήμα 19. Σχηματική αναπαράσταση συγκόλλησης συμβολής

Όπως προαναφέρθηκε, οι βέλτιστες συνθήκες για την συγκόλληση συμβολής είναι αυτές των δοκιμών bead on plate με αριθμό 8 και 22. Πραγματοποιήθηκαν λοιπόν δύο συγκολλήσεις συμβολής οι οποίες αξιολογήθηκαν με μη καταστρεπτικούς (ραδιογραφία) και καταστρεπτικούς ελέγχους (μακροσκοπική εξέταση, μικροσκληρομέτρηση, δοκιμή εφελ' υσμού). Οι συνθήκες των συγκολλήσεων συμβολής καταγράφονται στον πίνακα 5. Οι εικόνες που ακολουθούν δείχνουν τις λεπτομέρειες του πειράματος.

Για να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση συμβολής, κατασκευάστηκε ιδιοκατασκευή προκειμένου να μπορεί η κεφαλή του κυλίνδρου να στηριχτεί και να περιστραφεί κάθετα από τη δέσμη του laser με πλήρη ελεγχόμενη ταχύτητα. Στην εικόνα 1 φαίνεται το πέρασμα της δέσμης από την εξωτερική πλευρά του κυλίνδρου, ο οποίος περιστρέφεται με ταχύτητα 200mm/min σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 5. Αντίστοιχα στην εικόνα 2 φαίνεται το πέρασμα της δέσμης από την εσωτερική πλευρά του κυλίνδρου.



Εικόνα 1. Συγκόλληση συμβολής 1, από την εξωτερική πλευρά του κυλίνδρου.



Εικόνα 2. Συγκόλληση συμβολής 1, από την εσωτερική πλευρά του κυλίνδρου.

Πίνακας 5. Συνθήκες συγκολλήσεων συμβολής

A/A συγκόλλησης συμβολής	Ισχύς (Watt)	Ταχύτητα συγκόλλησης (mm/min)	Σημείο εστίασης (f.p) (mm)	Αέριο προστασίας He
1	1350	200	0,5	2 bar
2	1350	320	1	4 bar

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

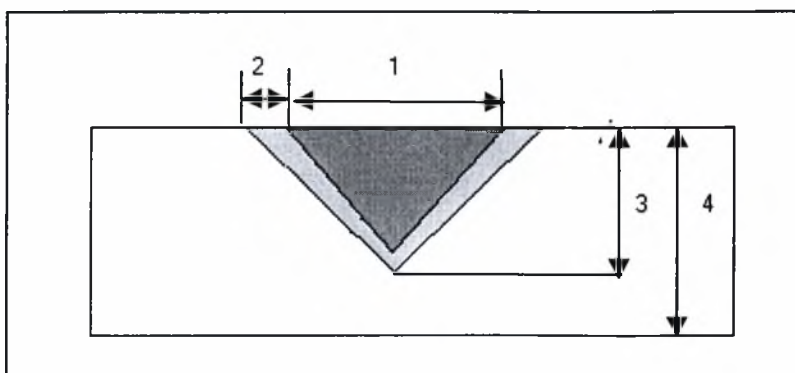
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ποιοτικός έλεγχος των συγκολλήσεων έχει σκοπό να προσδιορίσει τις εξαρτημένες μεταβλητές που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2.2. Οι εξαρτημένες μεταβλητές χαρακτηρίζουν τον βαθμό επιτυχίας μιας συγκόλλησης, το οποίο τελικά είναι και το ζητούμενο.

Προκειμένου να ελεγχθεί η ποιότητα μιας συγκολλητής κατασκευής χρησιμοποιούνται αρκετές μέθοδοι σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές (DIN, ISO κ.α). Η εφαρμογή της εκάστοτε μεθόδου εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος που επιθυμούμε να υπολογίσουμε ή την ιδιότητα που θέλουμε να ελέγξουμε, τα οποία και αποτελούν κριτήριο απόρριψης ή αποδοχής της κατασκευής.

Τα κυριότερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την ποιότητα και επομένως την επιτυχία μιας συγκόλλησης, είναι το βάθος διείσδυσης, το πλάτος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, η μορφή της λίμνης συγκόλλησης, η ύπαρξη τυχόν ατελειών ή σφαλμάτων όπως πόροι, ρήγματα, εγκλείσματα κτλ. καθώς επίσης οι μηχανικές ιδιότητες και η μικροδομή του υλικού. Για τον προσδιορισμό των παραπάνω μεγεθών και χαρακτηριστικών, χρησιμοποιούνται καταστροφικές και μη καταστροφικές δοκιμές, οι οποίες εξετάζονται στις επόμενες ενότητες.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ή αλλιώς οι κρίσιμες περιοχές της συγκόλλησης, τα οποία σφαιρούνται συχνά τις επόμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 20. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δημιουργούμενης συγκόλλησης laser (1.Ευρος της λίμνης συγκόλλησης, 2.Ευρος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, 3.Βάθος διείσδυσης, 4.Πάχος ελάσματος)

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

4.2.1 Μεταλλογραφία

4.2.1.1 Εξέταση της μακροδομής

Για την μακροσκοπική εξέταση των δοκιμίων bead on plate, το υλικό προσβλήθηκε χημικά με διάλυμα νιτρικού οξέος (HNO_3) σε αιθυλική αλκοόλη με αναλογία 10%. Αντιπροσωπευτικές μακροδομές φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν. Σε κανένα από τα δοκίμια δεν επιτεύχθηκε πλήρης διείδυση. Ωστόσο παρατηρείται διαφοροποίηση του βάθους διείδυσης για μικρές και μεγάλες ταχύτητες συγκόλλησης. Στο δοκίμιο της εικόνας 4 παρατηρείται ιδιαίτερα περιορισμένη διείδυση και αυτό οφείλεται στην υψηλή τιμή της ταχύτητας σάρωσης (800mm/min). Αντίθετα στο δοκίμιο της εικόνας 3, στο οποίο η ταχύτητα σάρωσης είναι μικρότερη (320mm/min) το βάθος διείδυσης έχει αυξηθεί σημαντικά..

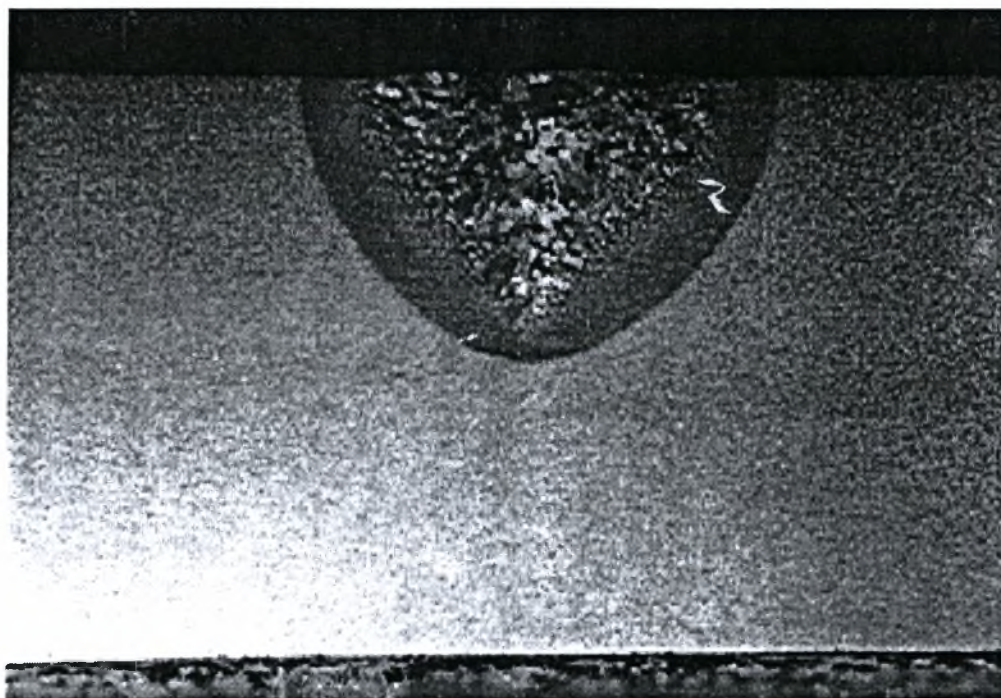
Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα. Η εξάρτηση αυτή του βάθους διείδυσης από την ταχύτητα συγκόλλησης μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα συγκόλλησης τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος αλληλεπίδρασης, ο οποίος ορίζεται από τη διάμετρο της δέσμης προς την ταχύτητα σάρωσης. Συνεπώς προσδίδεται υψηλότερο ποσό θερμότητας στο υλικό που έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών. Έτσι το υλικό επηρεάζεται θερμικά σε μεγαλύτερο βάθος.

Στην εικόνα 3, η μορφή της συγκόλλησης δεν παραπέμπει σε συγκόλληση keyhole αλλά σε συγκόλληση τύπου αγωγής, εφόσον το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με την διείδυση. Ωστόσο το δοκίμιο που συγκολλήθηκε με μεγαλύτερη ταχύτητα παρουσιάζει μια καλή σχέση εύρους-διείδυσης. Χαρακτηριστική είναι η δημιουργία «μύτης» στο κατώτερο σημείο της λίμνης, κάτι που υποδηλώνει την έναρξη του μηχανισμού συγκόλλησης keyhole. Το φαινόμενο θα μπορούσε να συνεχιστεί με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση του βάθους διείδυσης αν η διαθέσιμη ισχύς του laser ήταν μεγαλύτερη.

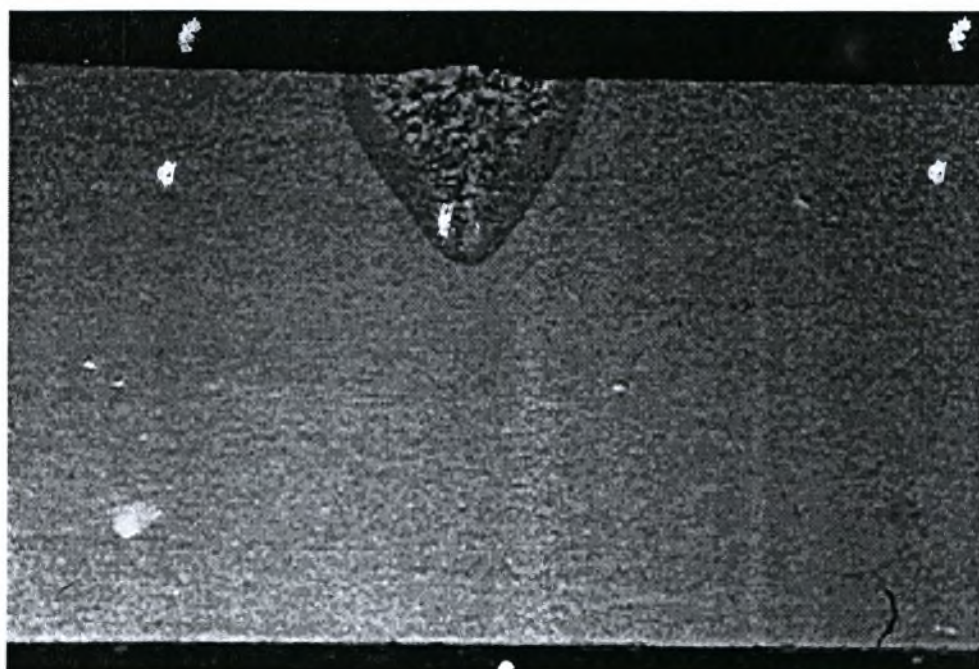
Μια σημαντική μεταβλητή που προσδιορίζει το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης και τους ρυθμούς θέρμανσης και ψύξης, είναι ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας που αναλύεται στην επόμενη ενότητα. Γενικά όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας τόσο χαμηλότερος είναι ο ρυθμός ψύξης και τόσο μεγαλύτερη η λίμνη συγκόλλησης.

Μια άλλη μεταλλουργική μεταβλητή που επηρεάζεται από τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας είναι και το μέγεθος των κόκκων στην περιοχή της συγκόλλησης. Όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός αυτός, τόσο μεγαλύτερος είναι ο θερμικός κύκλος με συνέπεια

την δημιουργία χονδρόκοκκης δομής. Χαρακτηριστικά φαίνεται στην εικόνα 3, όπου ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας είναι υψηλός (253J/mm), ότι το μέγεθος των κόκκων στη λίμνη συγκόλλησης είναι σαφώς μεγαλύτερο από το μέγεθος των κόκκων στο δοκίμιο 20 (εικόνα 4), το οποίο συγκολλήθηκε με χαμηλότερο ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας (101J/mm).



Εικόνα 3. Μακροδομή δοκιμίου 1: 320mm/min, f.p +1mm, He 2 bar



Εικόνα 4. Μακροδομή δοκιμίου 20: 800mm/min, f.p +3mm, He 0,5 bar

4.2.1.2 Εξέταση της μικροδομής

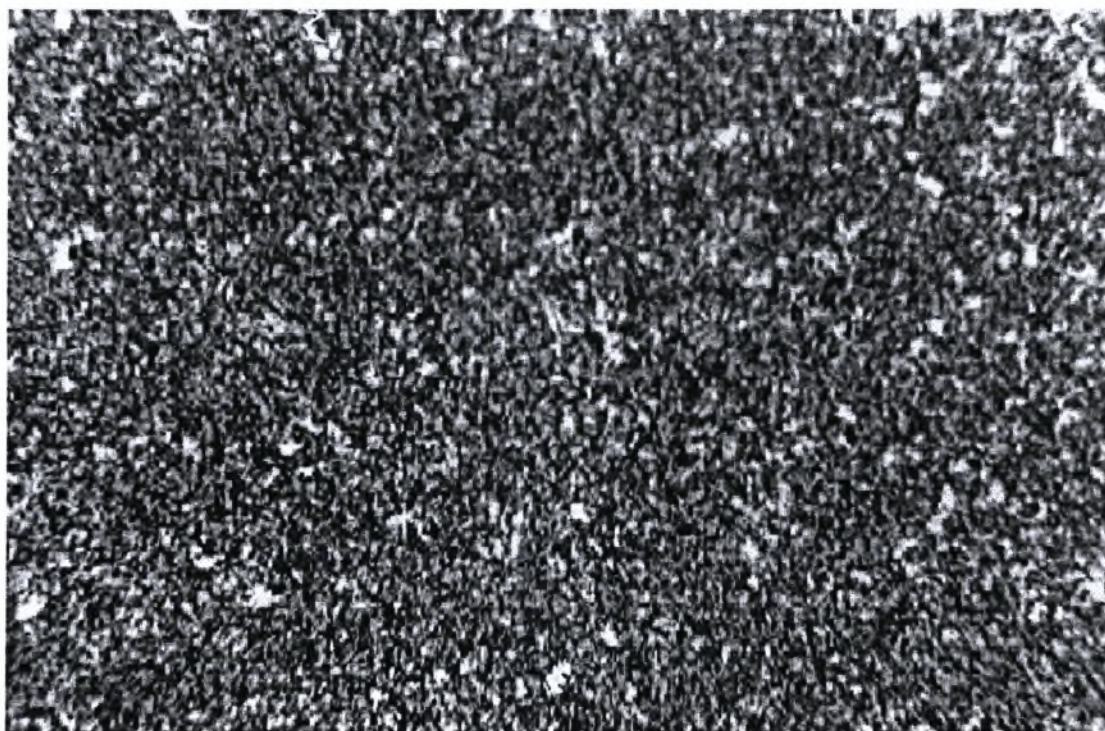
Για την μακροσκοπική εξέταση των δοκιμίων, το υλικό προσβλήθηκε χημικά με διάλυμα νιτρικού οξέος (HNO_3) σε αιθυλική αλκοόλη με αναλογία 2%. Η ανάλυση της μικροδομής εστιάστηκε στα δοκίμια που παρατηρήθηκε μεγαλύτερη διείδυση. Η δημιουργούμενη μικροδομή εξαρτάται από τον ρυθμό ψύξης και κατά συνέπεια από το ποσό εισροής θερμότητας. Συνοπτικά μπορεί να αναφερθεί ότι σε καθεμία από τις περιοχές της συγκόλλησης, όπως φαίνονται στο σχήμα 20 στην εισαγωγή του κεφαλαίου, παρατηρήθηκαν οι ακόλουθες μικροδομές:

Μέταλλο βάσης: Η μεταλλογραφία του μετάλλου βάσης (εικόνα 5), δείχνει φερρίτη (λευκές περιοχές) και λεπτόκοκκο περλίτη (σκούρες περιοχές), δομή αναμενόμενη για χάλυβα αυτής της κατηγορίας με ποσοστό άνθρακα 0,34%. Στο μέταλλο βάσης παρατηρείται το φαινόμενο της διαστρωμάτωσης (banding). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην έλαση που υπέστη το υλικό. Οι παρατηρούμενες γραμμές οφείλονται σε συσσώρευση των κραματικών στοιχείων λόγω της κατεργασίας.

Λίμνη συγκόλλησης: Στη λίμνη συγκόλλησης η δομές που επικρατούν είναι Widmanstätten φερρίτης (εικόνα 7), μαρτενσίτης (εικόνα 6) και σε μερικά δοκίμια μπαινίτης. Παρατηρείται χονδρόκοκκη δομή, ενώ οι κόκκοι είναι προσανατολισμένοι στην διεύθυνση μετάδοσης της θερμότητας (εικόνα 13). Πολύ συχνά στην «ρίζα» της λίμνης συγκόλλησης υπάρχουν πόροι (εικόνες 10 και 11). Ο σχηματισμός των πόρων οφείλεται σύμφωνα με τον Arata[4], σε απαλούς κυματισμούς στο κέντρο συγκόλλησης keyhole, στην οποία αρχικά «πέφτει» σχεδόν όλη η ισχύς του laser. Οι κυματισμοί αυτοί λειτουργούν σαν θέσεις εκρηκτικής ατμοποίησης, στέλνοντας ένα «σύννεφο» ατμού στην λίμνη συγκόλλησης το οποίο παγώνει με τη μορφή πόρων στη «ρίζα» της λίμνης.

Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη: Στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη παρατηρούνται δύο διαφορετικές περιοχές. Η πρώτη περιοχή που βρίσκεται σε επαφή με την λίμνη συγκόλλησης, γνωστή και ως μερική ζώνη τήξης, αποτελείται από πλήρη μαρτενσιτική δομή (εικόνα 9). Οι υψηλοί ρυθμοί ψύξης είναι η κύρια αιτία του φαινομένου αυτού. Η δεύτερη περιοχή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, που βρίσκεται σε επαφή με το μέταλλο βάσης, χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά λεπτόκοκκη δομή και αποτελείται από φερρίτη με τη μορφή διακρυσταλλικών πλακιδίων. Τα πλακίδια αυτά σχηματίζονται επειδή στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη η θερμοκρασία είναι μικρότερη από ότι στη λίμνη συγκόλλησης όπου ο φερρίτης είναι Widmanstätten. Στην εικόνα 12 φαίνεται η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη σε επαφή με το μέταλλο βάσης, όπου στο όριο των δύο περιοχών διακρίνουμε περλίτη και

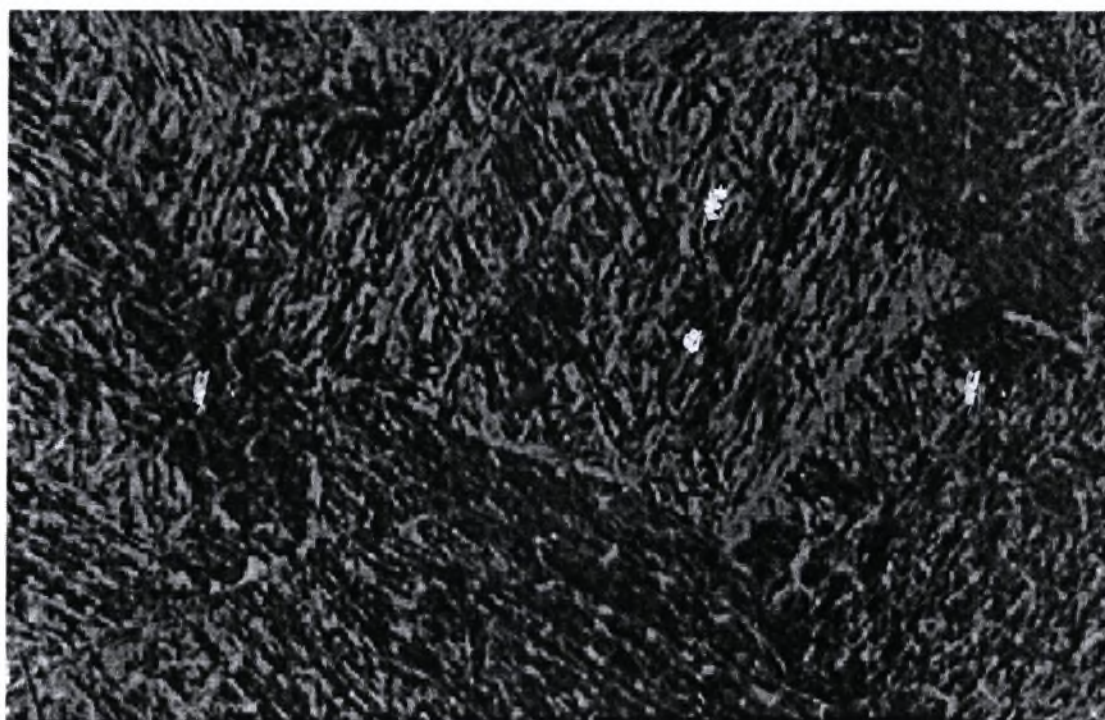
φερρίτη. Το φαινόμενο Banding που κυριαρχεί στο μέταλλο βάσης χαρακτηρίζει τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, μιας και αυτό φαίνεται εντονότερα όταν το υλικό θερμαίνεται (εικόνα 13). Στην εικόνα 14 διακρίνονται σουλφίδια στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Τα σουλφίδια είναι ενώσεις θείου και μαγγανίου για την απομάκρυνση του θείου από το μέταλλο. Έχουν σχήμα «φιδιού» λόγω της έλασης που υπέστη το υλικό.



Εικόνα 5. (x200). Μικροδομή μέταλλου βάσης, φερρίτης/περλίτης



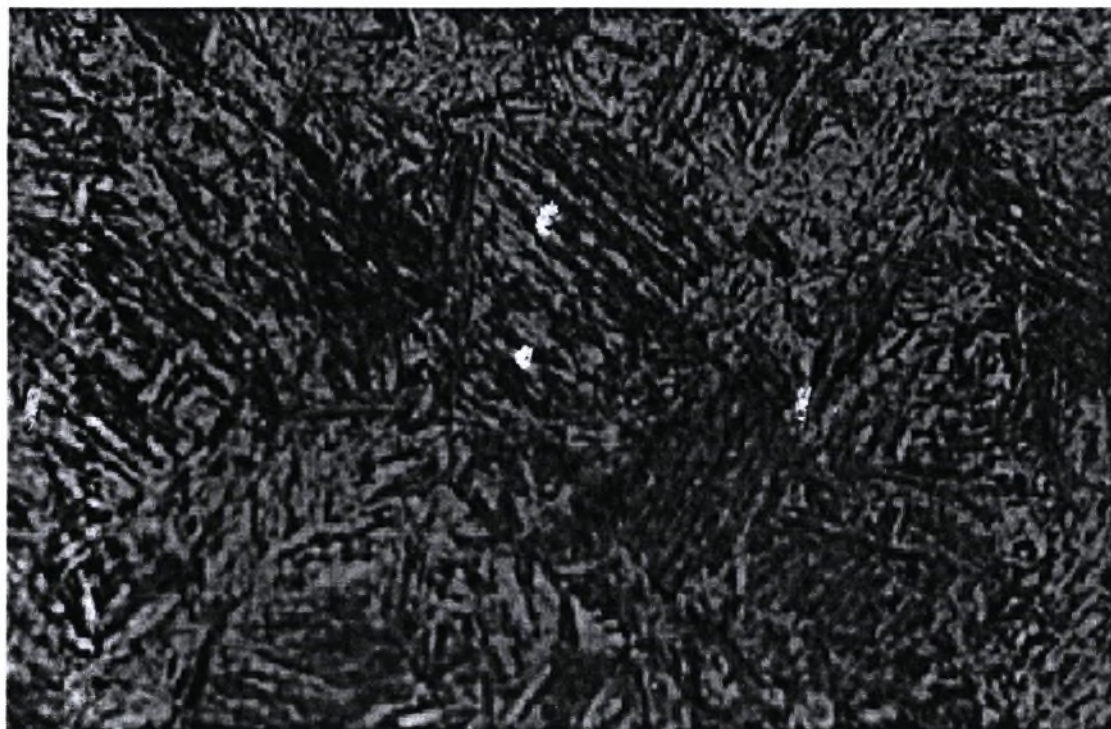
Εικόνα 6. (x500). Μαρτενσίτης στη λίμνη συγκόλλησης, δοκίμιο 1: 320mm/min, f.p +1mm, He 2 bar



Εικόνα 7. (x500). Widmanstätten φερρίτης στη λίμνη συγκόλλησης, δοκίμιο 16: 200mm/min, f.p +3mm, He 0,5 bar



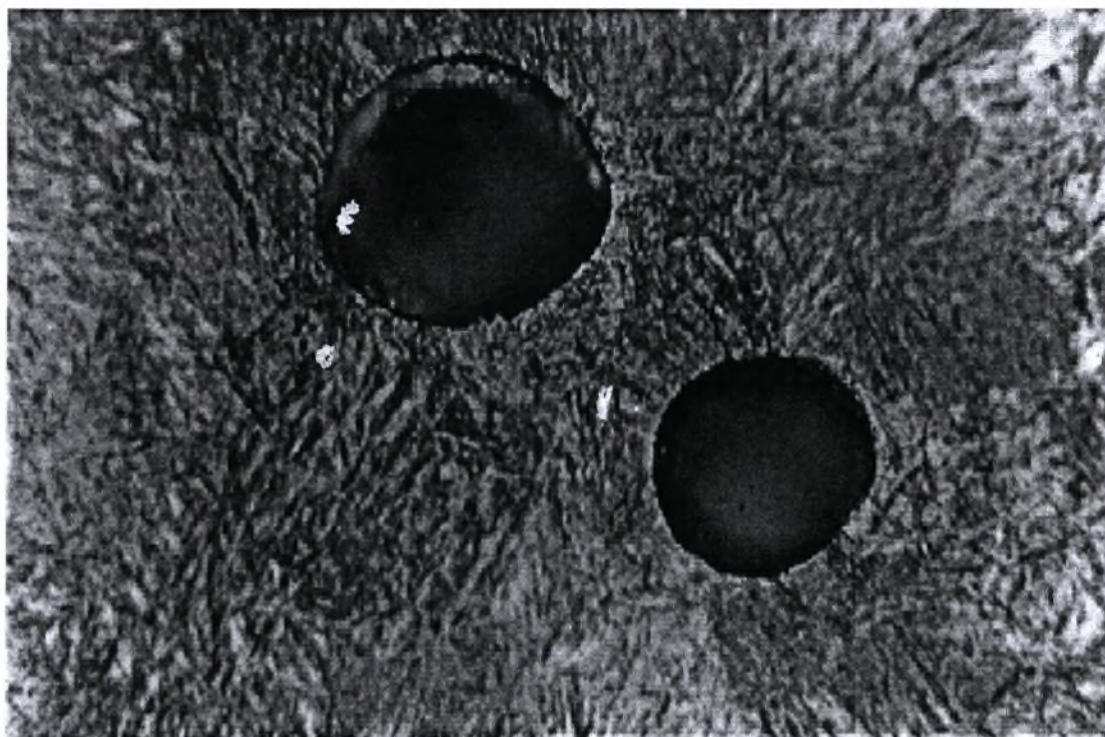
Εικόνα 8. (x200). Κυψέλες στη λίμνη συγκόλλησης, δοκίμιο 16: 200mm/min, f.p +3mm, He 0,5 bar



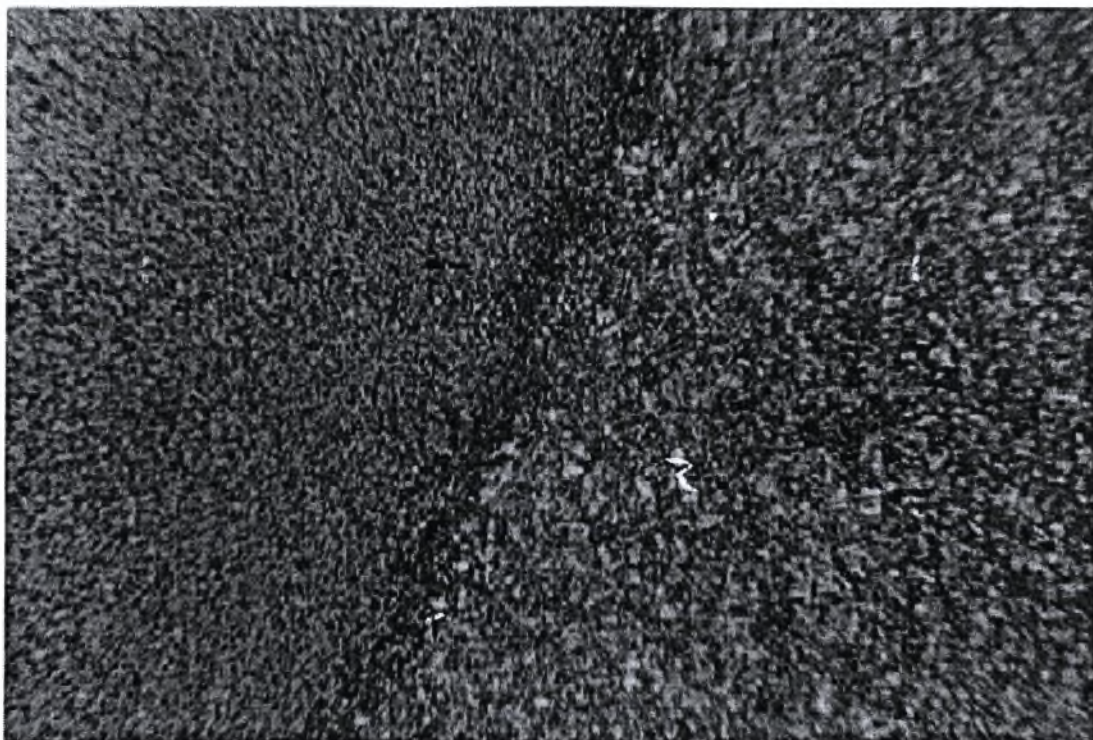
Εικόνα 9. (x500). Μαρτενσίτης στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη-μερική ζώνη τήξης, δοκίμιο 17: 320mm/min, f.p +3mm, He 0,5 bar



Εικόνα 10. (x50). «Ρίζα» της λίμνης συγκόλλησης, δοκίμιο 12: 320mm/min, f.p +3mm, He 2 bar



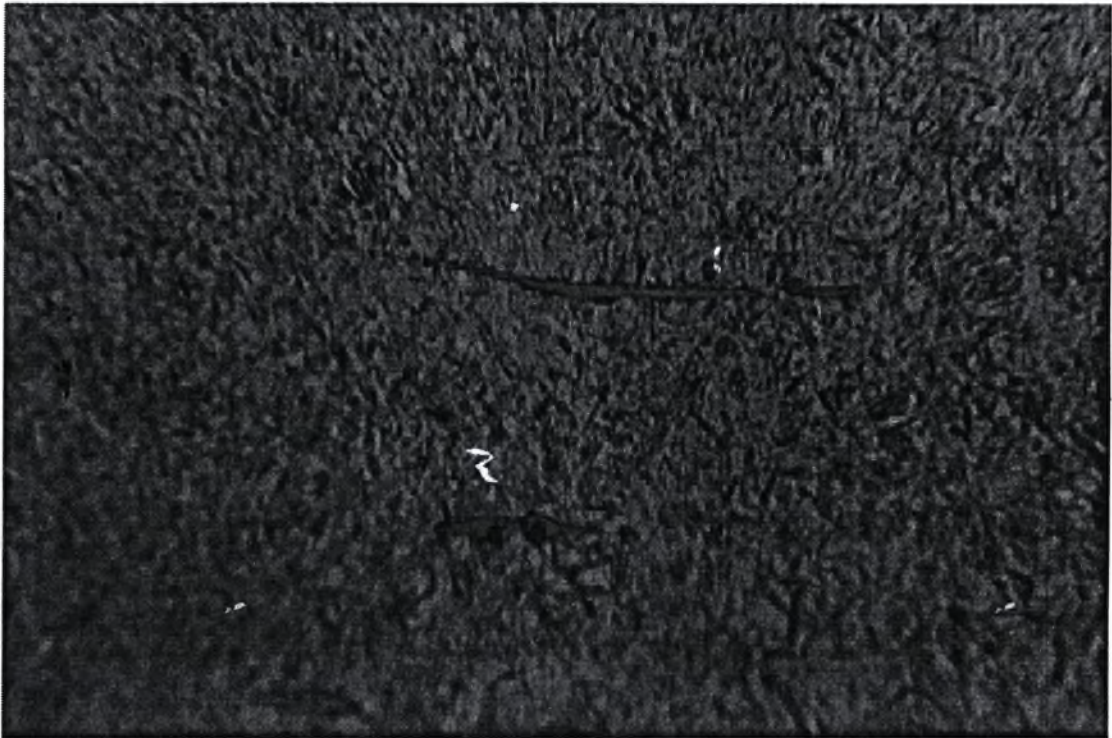
Εικόνα 11. (x500). Όπές στη λίμνη συγκόλλησης, δοκίμιο 18: 400mm/min, f.p +3mm, He 0,5 bar



Εικόνα 12. (x200). Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη σε επαφή με το μέταλλο βάσης, δοκίμιο 13: 400mm/min, f.p +3mm, He 2 bar



Εικόνα 13. (x200). Φαινόμενο banding στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, δοκίμιο 1: 320mm/min, f.p +1mm, He 2 bar



Εικόνα 14. (x500). Σουλφίδια του μαγγανίου (Mn) στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, δοκίμιο 1: 200mm/min, f.p +1mm, He 2 bar

4.2.2 Παραμετρική μελέτη

Ιδιαίτερα σημαντικό για την επιτυχή εκτέλεση της συγκόλλησης είναι η επίτευξη ικανοποιητικού βάθους διείσδυσης. Γι' αυτό το λόγο έγινε πλήρης παραμετρική μελέτη στην οποία μετρήθηκαν τα βάθη διείσδυσης καθώς επίσης και το εύρος της λίμνης συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.

Το βάθος διείσδυσης στις πειραματικές συγκολλήσεις beat on plate υπολογίστηκε σαν μια συνάρτηση της ταχύτητας σάρωσης του laser και της θέσης του σημείου εστίασης της δέσμης ως προς την επιφάνεια του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα δίδονται στο διάγραμμα 1 για δεδομένη ισχύ του laser 1350 Watt. Το βάθος διείσδυσης γενικά αυξάνει με την ταχύτητα σάρωσης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα συγκόλλησης τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος αλληλεπίδρασης, ο οποίος ορίζεται από τη διάμετρο της δέσμης προς την ταχύτητα σάρωσης. Συνεπώς προσδίδεται υψηλότερο ποσό θερμότητας στο υλικό που έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών. Έτσι το υλικό επηρεάζεται θερμικά σε μεγαλύτερο βάθος. Αντίθετα, όσον αφορά στο εύρος της λίμνης συγκόλλησης, αυτό παίρνει μεγαλύτερες τιμές, όταν η ταχύτητα συγκόλλησης πέφτει στα 200-320mm/min (διάγραμμα 2).

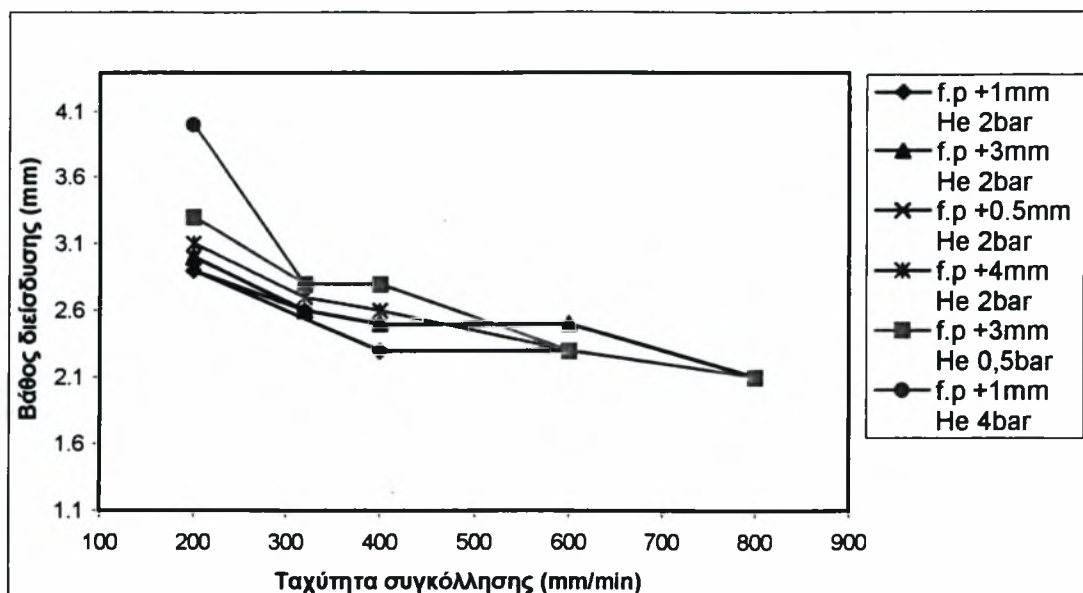
Με σκοπό να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα με έναν διαφορετικό τρόπο, η ισχύς του laser Q και η ταχύτητα σάρωσης u συνδυάστηκαν σε μια απλή μεταβλητή, τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας h, που ορίζεται από την σχέση : $h=Q/u$ σε [J/mm]. Η μεταβολή του βάθους διείσδυσης και του εύρους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τη θέση του σημείου εστίασης και τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας απεικονίζονται αντίστοιχα στα διαγράμματα 3 και 4, για πίεση αερίου 2 bar. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα όλες οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν σε σημεία εστίασης πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου.

Προηγούμενη μελέτη συναί ελφου[13] αναφέρει ότι όταν το σημείο εστίασης είναι μέσα στο υλικό ελάχιστα επηρεάζεται η διείσδυση. Αντίθετα, όταν το σημείο εστίασης είναι έξω από το υλικό, όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνειά του δοκιμίου τόσο αυξάνεται η διείσδυση. Αυτό οφείλεται στην μείωση της πυκνότητας θερμοροής. Πυκνότητα θερμοροής ορίζουμε την ποσότητα της θερμότητας η οποία μεταδίδεται στη μονάδα του χρόνου μέσα από μια στοιχειώδη επιφάνεια και είναι $q=Q/A$. Εξυπακούεται, με βάση τον παραπάνω ορισμό ότι όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του ελάσματος η επιφάνεια A αυξάνεται με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της πυκνότητας ενέργειας και κατά συνέπεια την μείωση της διείσδυσης. Βέβαια όταν το σημείο εστίασης είναι μέσα στο υλικό, σε οποιαδήποτε θέση, δεν επηρεάζει την επιφάνεια A, γι αυτό και η διείσδυση παραμένει σταθερή.

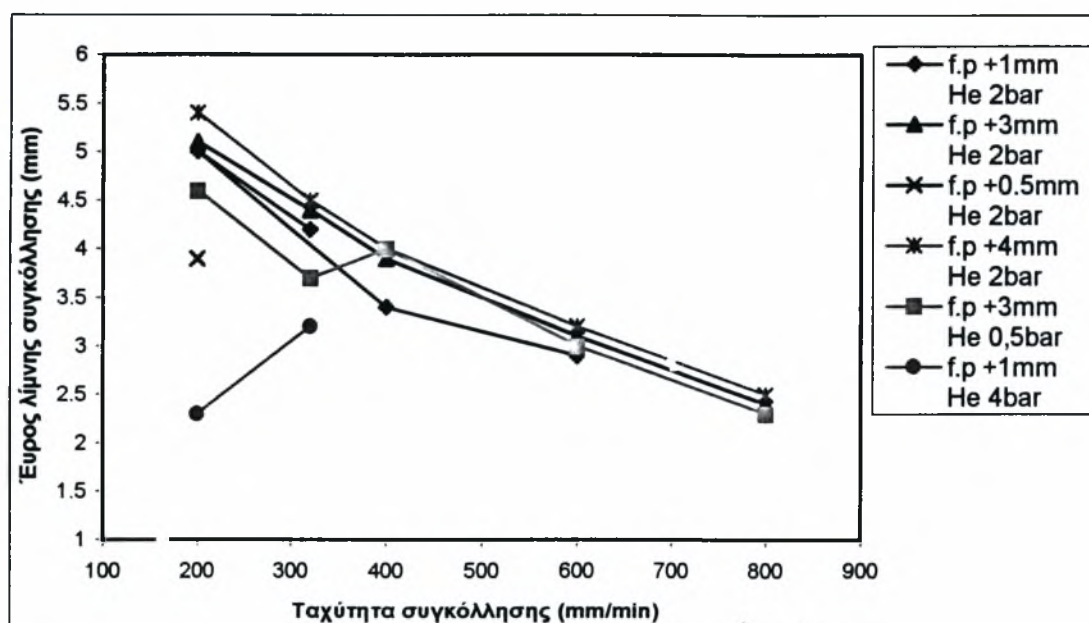
Για να καθοριστεί η επιρροή που έχει ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας στο βάθος διείσδυσης, υπολογίστηκε το μέσο βάθος διείσδυσης για τα σημεία εστίασης +0,5, +1, +3, και +4. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο διάγραμμα 5. Αρχικά το μέσο βάθος διείσδυσης αυξάνει απότομα με την εισροή θερμότητας, μέχρι τα 253J/mm όπου η επιπλέον αύξηση της διείσδυσης είναι πολύ πιο περιορισμένη. Σημειώνεται ότι η «ομαλή» περιοχή αυτή του διαγράμματος που αντιστοιχεί σε ρυθμούς πρόσδοσης θερμότητας από 253J/mm έως 405 J/mm αντιστοιχεί σε συνθήκες συγκολλήσεων με ικανοποιητικό βάθος διείσδυσης. Τα διαγράμματα 6 και 7 απεικονίζουν αντίστοιχα το μέσο πλάτος της λίμνης συγκόλλησης και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης ως συνάρτηση του ρυθμού εισροής θερμότητας.

Πίνακας 6. Τιμές γεωμετρικών χαρακτηριστικών πειραματικών συγκολλήσεων

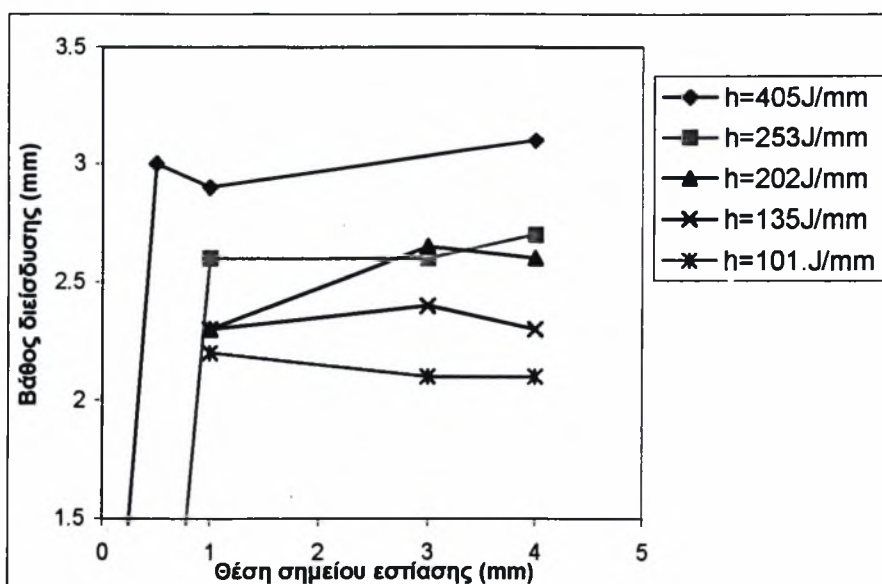
A/A δοκιμίου	Βάθος διείσδυσης (mm)	Εύρος λίμνης συγκόλλησης (mm)
1	2,6	4,2
2	2,9	5
3	2,3	3,4
4	2,3	2,9
5	2,2	2,9
6	~	~
7	4	2,3
8	2,8	3,2
9	~	~
10	~	~
11	3	5,1
12	2,6	4,4
13	2,5	3,9
14	2,5	3,1
15	2,1	2,4
16	3,3	4,6
17	2,8	4,5
18	2,8	4
19	2,3	3
20	2,1	2,3
21	~	~
22	3	3,9
23	~	~
24	3,1	5,4
25	2,7	4,5
26	2,6	4
27	2,3	3,2
28	2,1	2,5



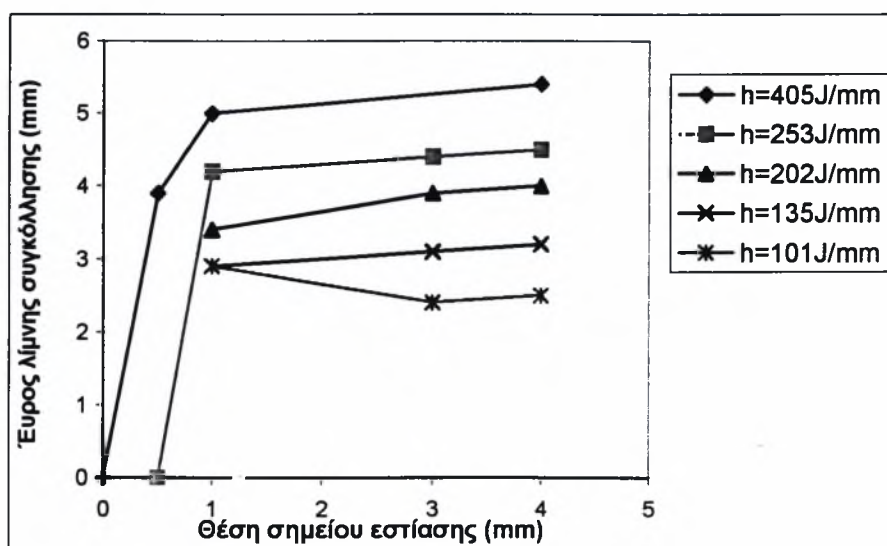
Διάγραμμα 1. Γράφημα συσχέτισης βάθους διείσδυσης και ταχύτητας



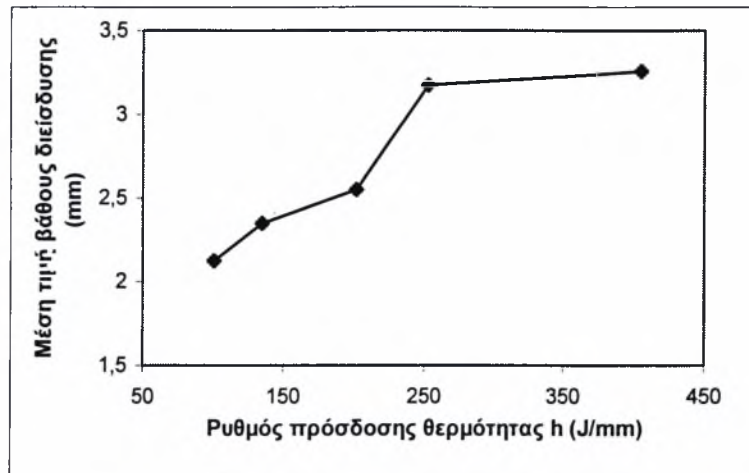
Διάγραμμα 2. Γράφημα συσχέτισης εύρους λίμνης συγκόλλησης και ταχύτητας



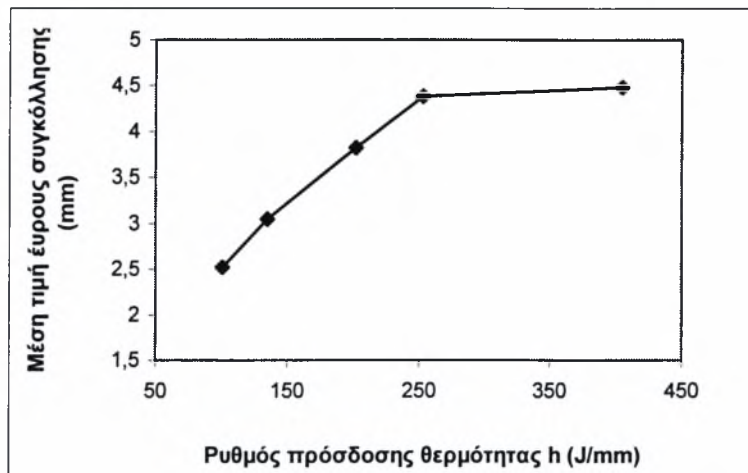
Διάγραμμα 3. Βάθος διείσδυσης ως συνάρτηση του σημείου εστίασης και του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας για πίεση αερίου He 2bar



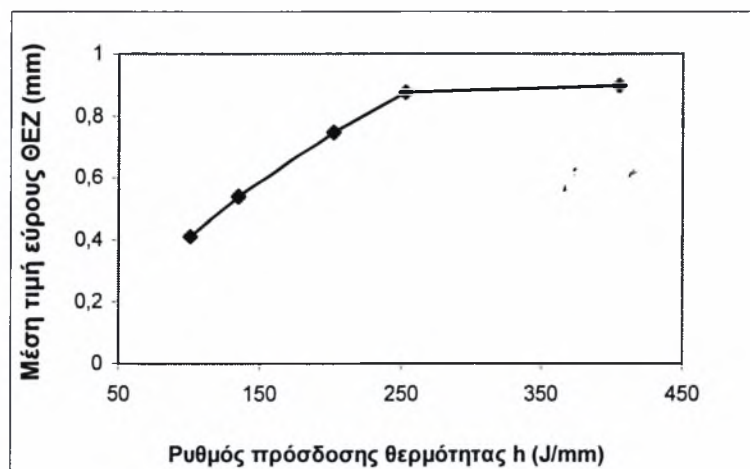
Διάγραμμα 4. Εύρος της λίμνης συγκόλλησης ως συνάρτηση του σημείου εστίασης και του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας για πίεση αερίου He 2bar



Διάγραμμα 5. Μέση τιμή του βάθους διείσδυσης ως συνάρτηση του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας



Διάγραμμα 6. Μέση τιμή του εύρους συγκόλλησης ως συνάρτηση του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας



Διάγραμμα 7. Μέση τιμή του εύρους της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης ως συνάρτηση του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας

4.2.3 Μικροσκληρομετρήσεις

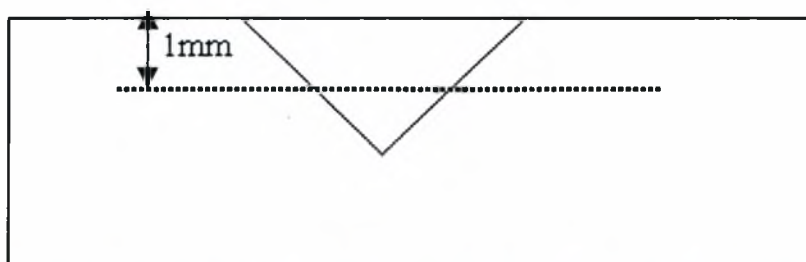
Η μικροσκληρομέτρηση έγινε με την μέθοδο Vickers. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ένας διεισδυτής από διαμάντι τετραγωνικής διατομής (βλ. σχήμα 21) πιέζεται πάνω στην μεταλλική επιφάνεια του δοκιμίου. Όσο βαθύτερα στο υλικό διεισδύσει ο διεισδυτής τόσο πιο μαλακό είναι και παρουσιάζει μικρό όριο ροής. Η «σκληρότητα» H , ορίζεται ως ο λόγος του επιβαλλόμενου φορτίου, δια της προβαλλόμενης επιφάνειας του διεισδυτή.



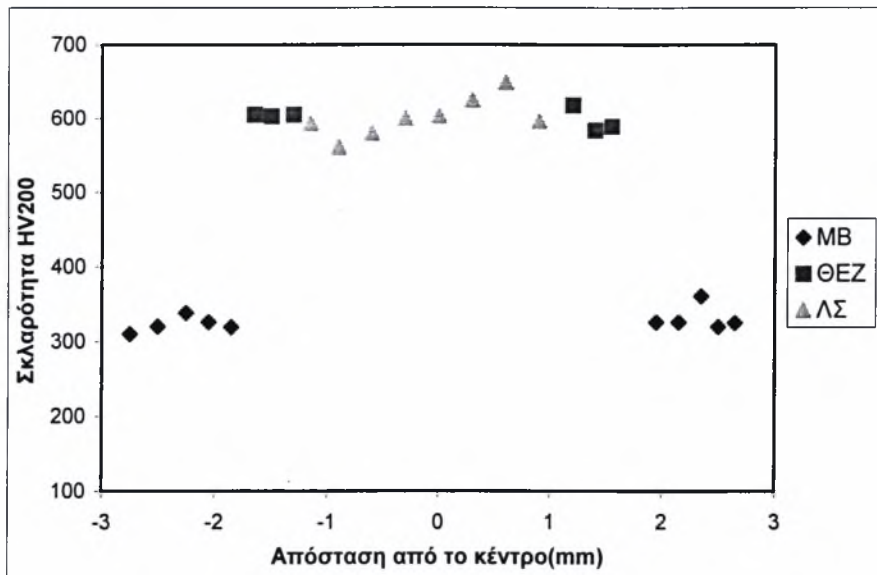
Σχήμα 21. Σχηματική παράσταση της δοκιμασίας σκληρότητας

Η διαδικασία της μικροσκληρομέτρησης των συγκολλήσεων-bead on plate πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια της EBETAM, χρησιμοποιώντας φορτίο 200gr. Όλες οι μικροσκληρομετρήσεις έγιναν σε βάθος 1mm από την επιφάνεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 22, το οποίο αναπαριστά μια κάθετη τομή της συγκόλλησης.

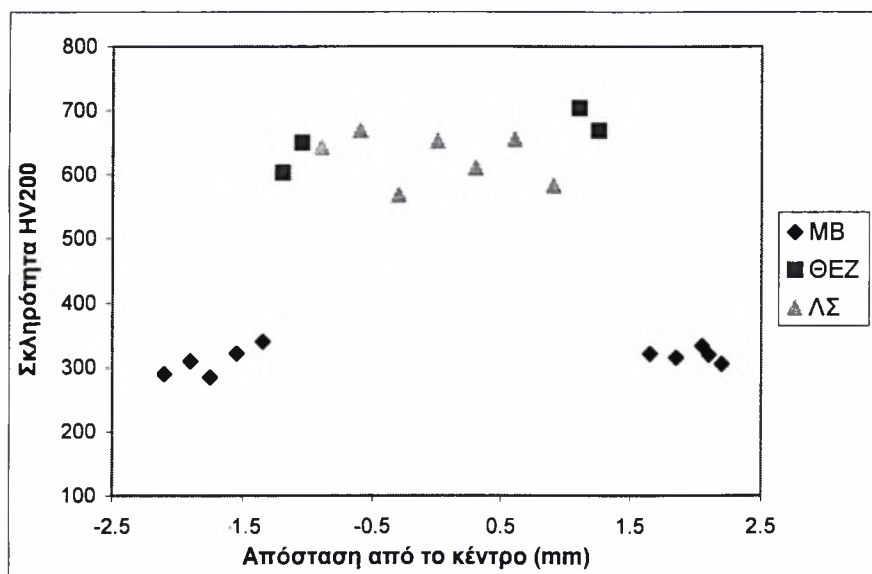
Για την πλειοψηφία των συγκολλήσεων, στα διάφορα προφίλ σκληρότητας, παρατηρούμε την απότομη αύξηση της σκληρότητας καθώς εισερχόμαστε στη λίκνη συγκόλλησης ενώ σε πολλές περιπτώσεις βλέπουμε την δημιουργία των χαρακτηριστικών «αυτιών», δηλαδή την απότομη αύξηση της σκληρότητας στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και την σταθεροποίηση της σε χαμηλότερες τιμές στην λίκνη συγκόλλησης. Η παρουσία των «αυτιών» οφείλεται στην δημιουργία μαρτενσίτη στην ζώνη τήξης λόγω του υψηλού ρυθμού τήξης. Όσον αφορά στην τιμή της σκληρότητας στο μέταλλο βάσης, αυτή κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα με μέση τιμή 305,52 HV 0,2 και τυπική απόκλιση 10,13. Αντιπροσωπευτικά δίνονται τα προφίλ μικροσκληρότητας για τα δοκίμια 1, 3, 5, 7, 8, 11 και 13, σύμφωνα με την αρίθμηση του πίνακα 4.



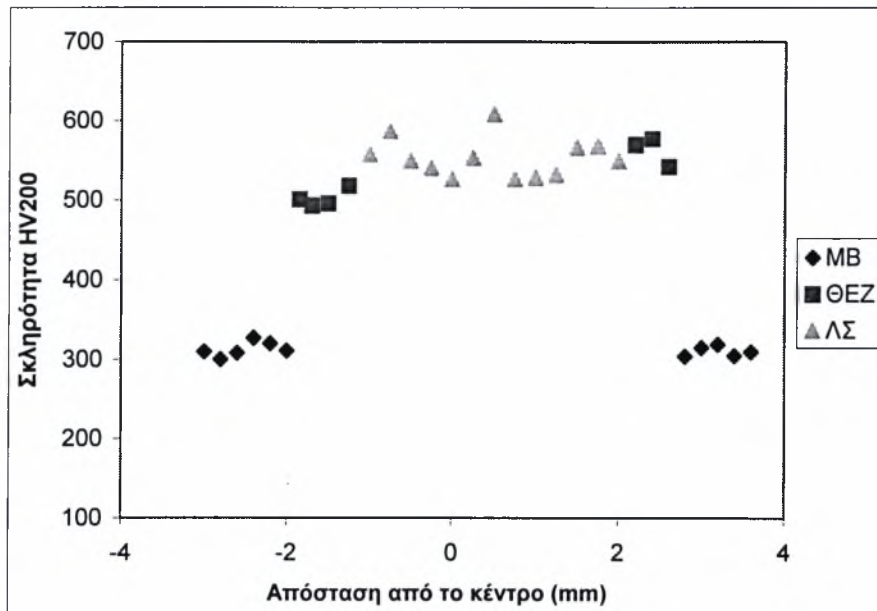
Σχήμα 22. Σχηματική αναπαράσταση περιοχής μικροσκληρομετρήσεων



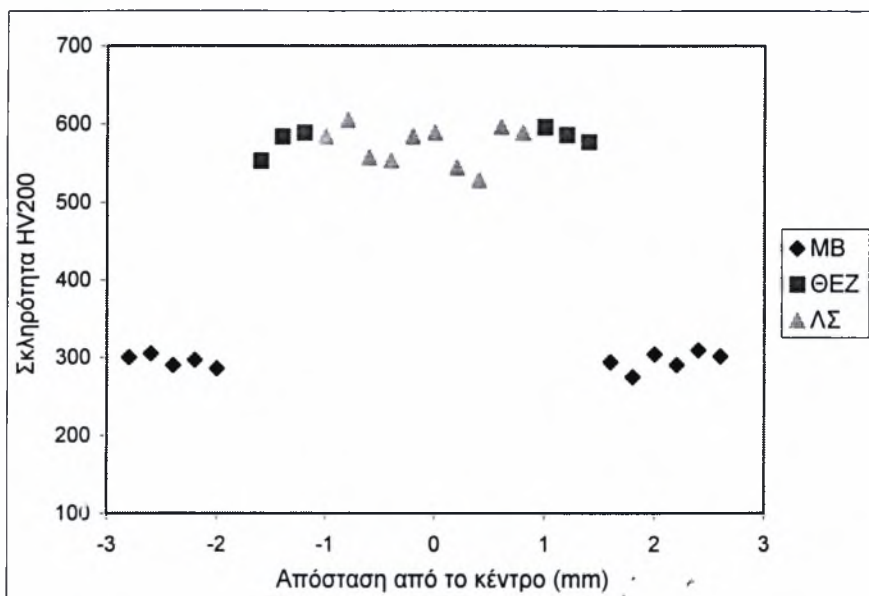
Διάγραμμα 8. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου 1 (320mm/min, f.p +1mm, He 2bar)



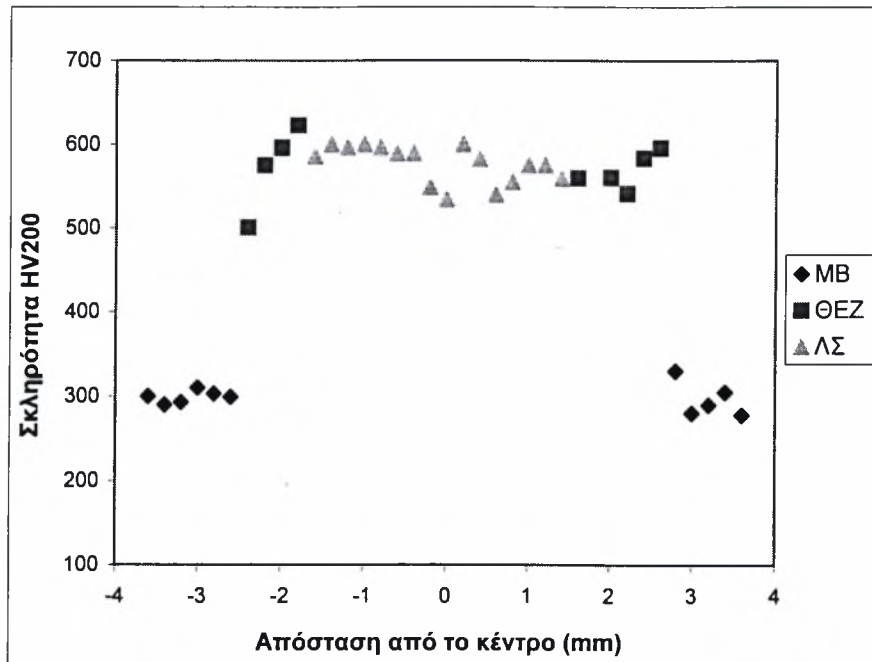
Διάγραμμα 9. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου 5 (800mm/min, f.p +1mm, He 2bar)



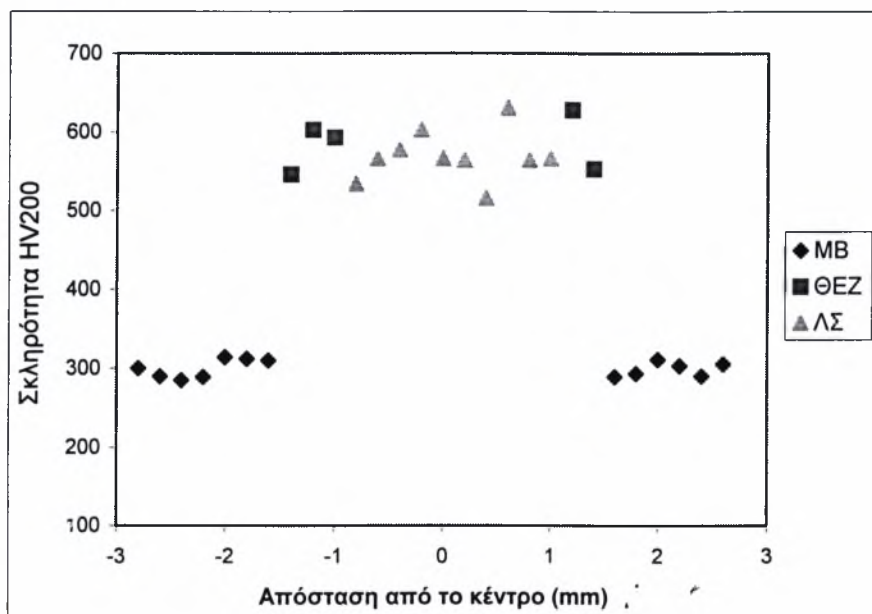
Διάγραμμα 10. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου 7,(200mm/min, f.p +1mm, He 4bar)



Διάγραμμα 11. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου 8(320mm/min, f.p +1mm, He 4bar)



Διάγραμμα 12. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου 11 (200mm/min, f.p +3mm, He 2bar)



Διάγραμμα 13. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου 13 (400mm/min, f.p +3mm, He 2bar)

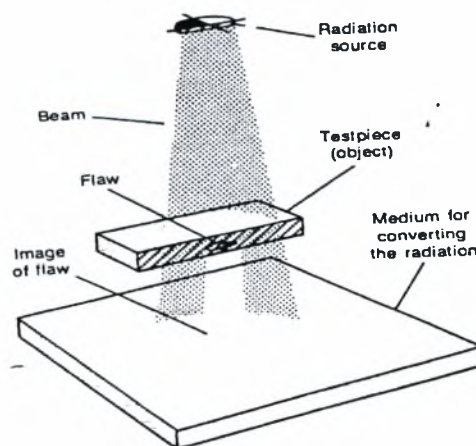
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΣΥΜΒΟΛΗΣ

4.3.1 Έλεγχος με ραδιογραφία

Η ραδιογραφία είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ποιότητας των υλικών. Οι μέθοδος αυτή στηρίζεται στην διαφορετική απορρόφηση διεισδυτικής ακτινοβολίας πολύ μικρού μήκους κύματος από το δοκίμιο το οποίο εξετάζεται. Λόγω των διαφορών στη πυκνότητα και την απορροφητικότητα του υλικού, που οφείλεται σε παραλλαγές στη σύστασή του, διαφορετικά τμήματα του υλικού απορροφούν διαφορετικές ποσότητες ακτινοβολίας. Μια δισδιάστατη απεικόνιση της ακτινοβολίας που διαπερνά το δοκίμιο και δεν απορροφάται από το υλικό, αναπαράγεται σε χαρτί ή φιλμ (σχήμα 23).

Η ραδιογραφία ανιχνεύει μόνον εκείνα τα χαρακτηριστικά τα οποία έχουν ένα αξιόλογο πάχος σε διεύθυνση παράλληλη με αυτήν της δέσμης της ακτινοβολίας. Έτσι μπορούν να ανιχνευτούν ασυνέχειες όπως πόροι και εγκλείσματα τα οποία όμως έχουν μετρήσιμο πάχος σε όλες τις διευθύνσεις και δεν είναι τόσο μικρά σε σχέση με το πάχος του δοκιμίου. Γενικά ανιχνεύονται χαρακτηριστικά όπου η μεταβολή στη απορρόφηση της ακτινοβολίας σε σχέση με το υλικό που τα περικλείει υπερβαίνει το 1%.

Ο ραδιογραφικός έλεγχος της συγκόλλησης με δέσμη laser πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη προδιαγραφή EN 25817:1992. Η ακτινοβολία στην οποία εκτέθηκε η συγκόλληση ήταν ακτίνες x (X-RAY), με μήκος κύματος 10^{-7} μm και η απόσταση της πηγής απέιχε 700mm από το δοκίμιο. Η ραδιογραφία έδειξε μια συγκόλληση καθαρή από εγκλείσματα και πόρους. Έτσι η συγκόλληση με laser κατατάσσεται σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 5817(βλ.παράρτημα II, No 3) στο υψηλότερο επίπεδο ποιότητας 'Stringent B'.



Σχήμα 23. Σχηματική αναπαράσταση ραδιογραφικού ελέγχου

4.3.2 Μεταλλογραφία

Από το υλικό του συγκολλημένου κυλίνδρου εξήχθησαν δυο μεταλλογραφικά δοκίμια που αντιστοιχούν στα δύο σετ συνθηκών του πίνακα 5. Μετά την προετοιμασία των δοκιμίων, χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό του εργαστηρίου των υλικών όπως φαίνεται στον πίνακα 3, πραγματοποιήθηκε μακροσκοπικός έλεγχος αφού τα δοκίμια προσβλήθηκαν χημικά με διάλυμα νιτρικού οξέος (HNO_3) σε αιθυλική αλκοόλη με αναλογία 10%. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται μακροσκοπικά οι συγκολλήσεις συμβολής 1 και 2. Παρατηρείται ατελής διείσδυση και στις δύο συγκολλήσεις, της τάξης του ενός χιλιοστού. Σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO5817 (βλ. παράρτημα II ,No 9, intermediate C), η συγκόλληση είναι αποδεκτή εφόσον η ατέλεια δεν υπερβαίνει τα 1,5mm.

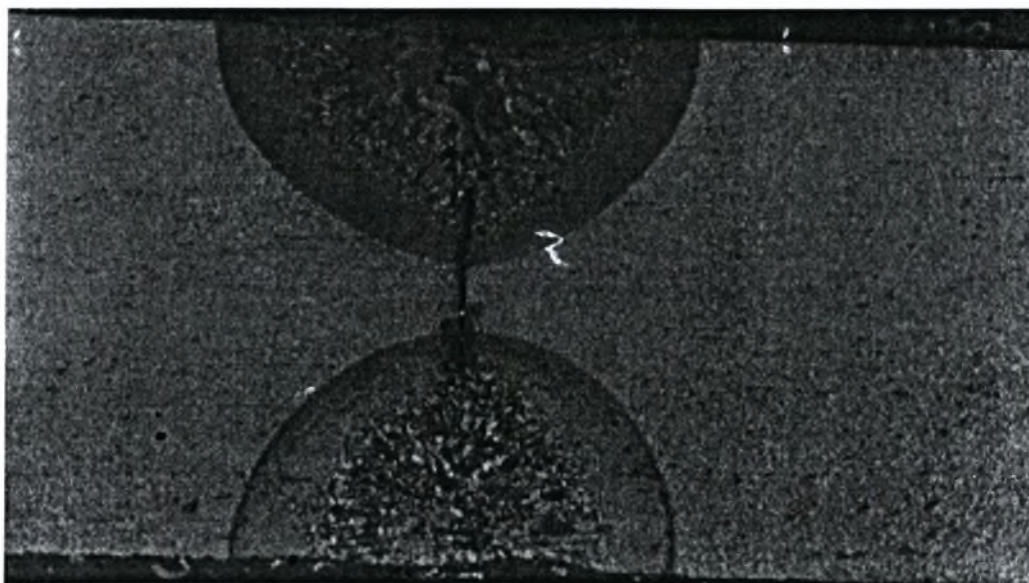
Το πρόβλημα της ατελούς διείσδυσης είναι σημαντικό για πολλούς λόγους. Καταρχήν όταν δεν υπάρχει πλήρης διείσδυση τότε η ροή θερμότητας είναι τρισδιάστατη και η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (περιοχή που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί) αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό. Επίσης η κατασκευή γίνεται πολύ ευαίσθητη σε διατμητικά φορτία αφού το διαφορετικό μέτρο διάτμησης που αποκτούν οι δύο περιοχές, (περιοχή μετάλλου που δεν συγκολλήθηκε και περιοχή συγκόλλησης) μετά την ψύξη δίνει στην κατασκευή μικρότερη αντοχή. Το συγκεκριμένο γεγονός έχει να κάνει με την αντοχή σε διάτμηση μιας διεπιφάνειας [13].

Η ατελής διείσδυση μπορεί να οφείλεται σε διαφόρους λόγους με κυριότερο αυτόν της ισχύος του laser και κατ' επέκταση της πυκνότητας ισχύος της δέσμης. Εκτιμάται πως αν η διαθέσιμη ισχύς του laser ήταν μεγαλύτερη, θα μπορούσε να επιτευχθεί πλήρης διείσδυση. Ακόμη τόσο η ακρίβεια επαφή των ελασμάτων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, όσο και η επιφανειακή του κατάσταση αποτελούν σημαντικούς παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά το βάθος, διείσδυσης.

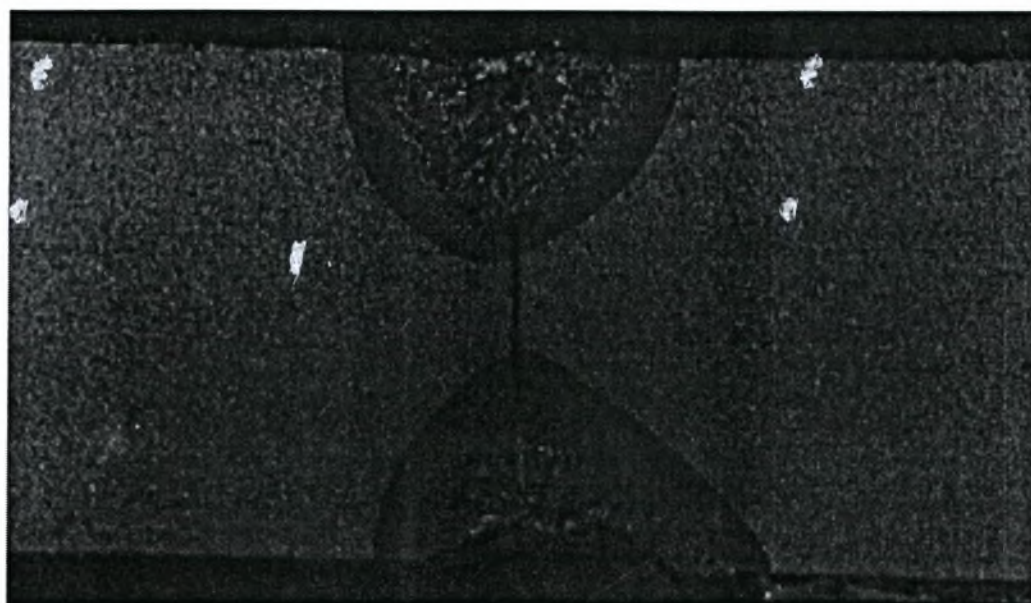
Στην εικόνα 15 είναι ευδιάκριτος ο μηχανισμός συγκόλλησης με αγωγή (conduction). Το χαρακτηριστικό μεγάλο πλάτος της λίμνης συγκόλλησης οφείλεται κατά κύριο λόγο στην μικρή ταχύτητα με την οποία συγκολλήθηκε το υλικό. Αντίθετα, στο δοκίμιο συμβολής 2 που φαίνεται στην εικόνα 16 δεν είναι ευδιάκριτος ο μηχανισμός συγκόλλησης, δηλαδή δεν μπορούμε να ισχυριστούμε με ασφάλεια ότι είναι conduction ή keyhole. Μπορεί όμως να ειπωθεί ότι βρισκόμαστε σε μία οριακή περιοχή των δύο μηχανισμών.

Λόγω του ότι η ισχύς και η ένταση της ακτινοβολίας της δέσμης δεν είναι υψηλές, ένα μέρος της ενέργειας μεταφέρεται στο υλικό με αγωγή. Στην εικόνα 16 παρατηρείται ότι στο επάνω μέρος του υλικού εμφανίζεται η μορφή conduction, ενώ στο κατώτερο άκρο της λίμνης συγκόλλησης εμφανίζεται η χαρακτηριστική «μύτη» που υποδηλώνει τον μηχανισμό keyhole.

Για να αποφευχθεί ο συνδυασμένος μηχανισμός conduction+keyhole και να οδηγηθούμε σε μία συγκόλληση καθαρής μορφής keyhole θα πρέπει κατά κύριο λόγο να αυξηθεί η ισχύς του laser.



Εικόνα 15. Μακροδομή συγκόλλησης συμβολής 1: 200mm/min, f.p +0.5mm, He 2bar

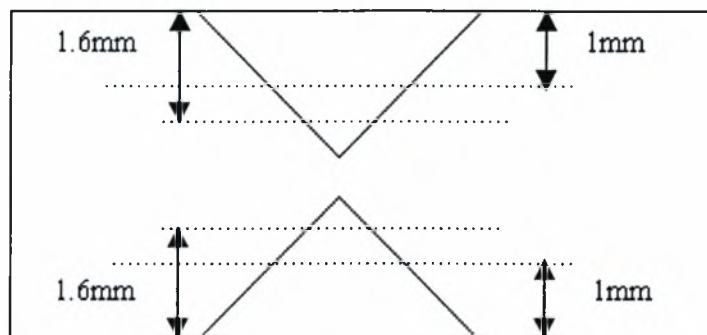


Εικόνα 16. Μακροδομή συγκόλλησης συμβολής 2: 320mm/min, f.p +1mm, He 4bar

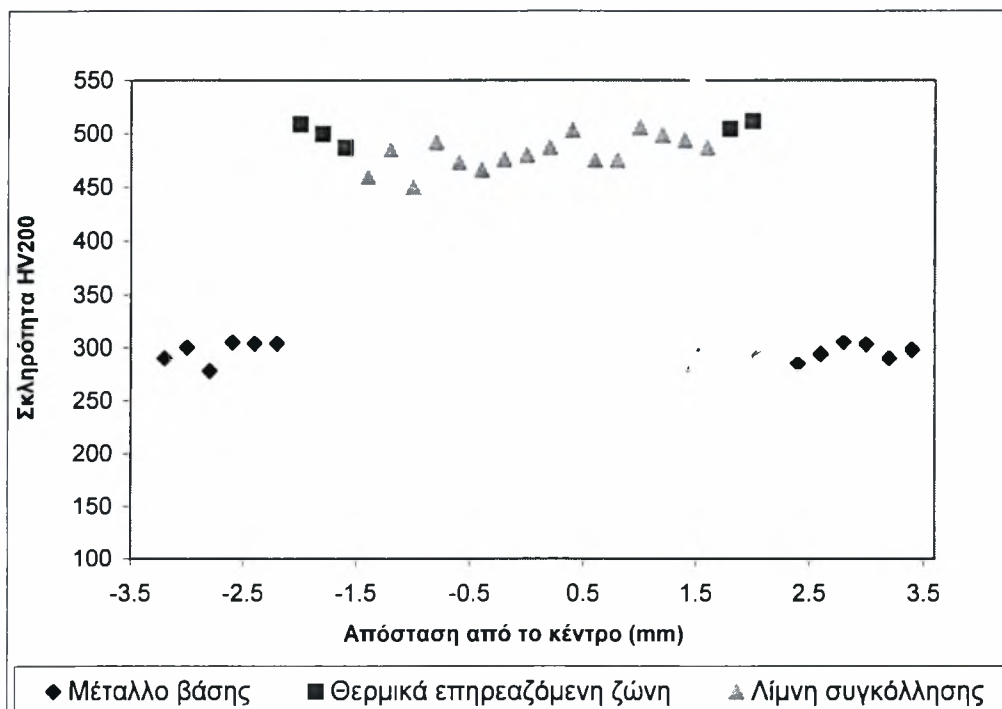
4.3.3 Έλεγχος μηχανικών ιδιοτήτων

4.3.3.1 Έλεγχος σκληρότητας

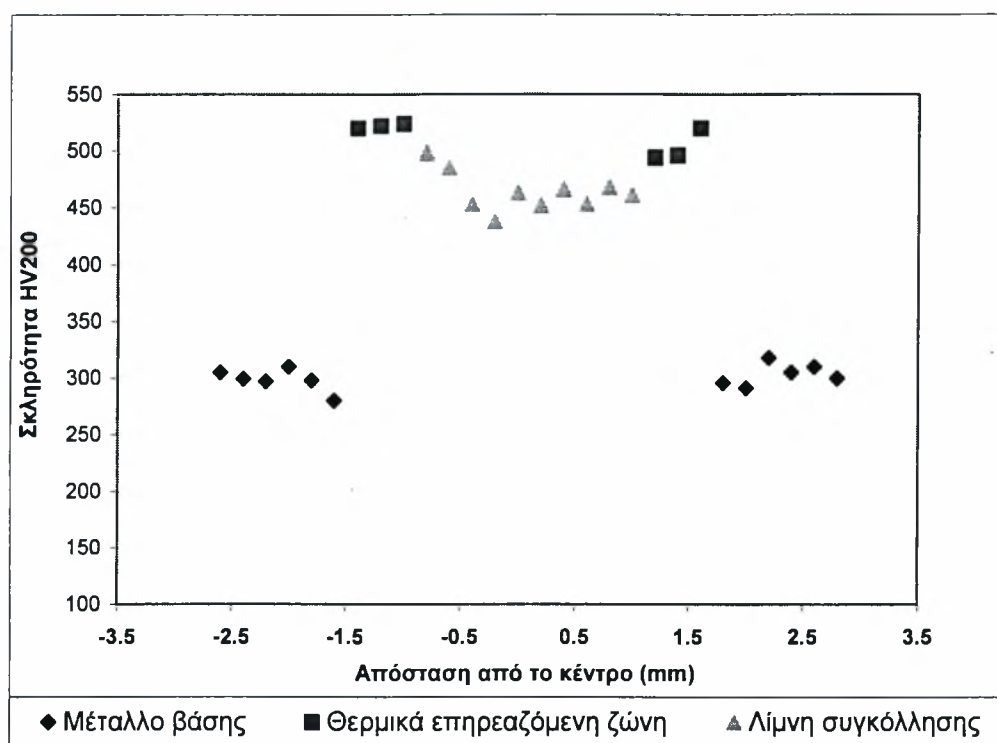
Η μικροσκληρομέτρηση των δοκιμίων butt weld, πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια της EBETAM και έγινε με την μέθοδο Vickers. Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε ήταν 200gr και ο χρόνος εντύπωσης 10sec. Στα δοκίμια με τις συγκελλήσεις συμβολής, όπου υπήρχε διπλή ραφή, πραγματοποιήθηκαν δυο σειρές μετρήσεων για κάθε πέρασμα σε αποστάσεις 1,6 και 1mm από την επιφάνεια του δοκιμίου. Οι περιοχές μικροσκληρομέτρησης φαίνονται στο σχήμα 24. Παρακάτω δίνονται τα προφίλ μικροσκληρότητας για τις συγκολλήσεις συμβολής.



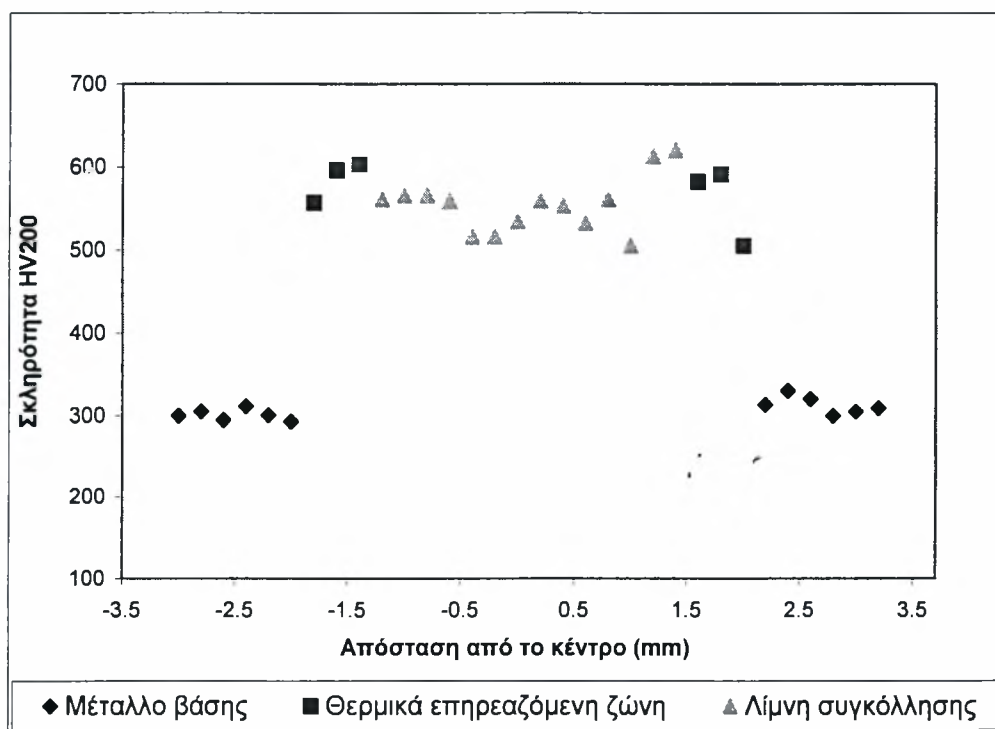
Σχήμα 24. Σχηματική αναπαράσταση περιοχής μικροσκληρομετρήσεων



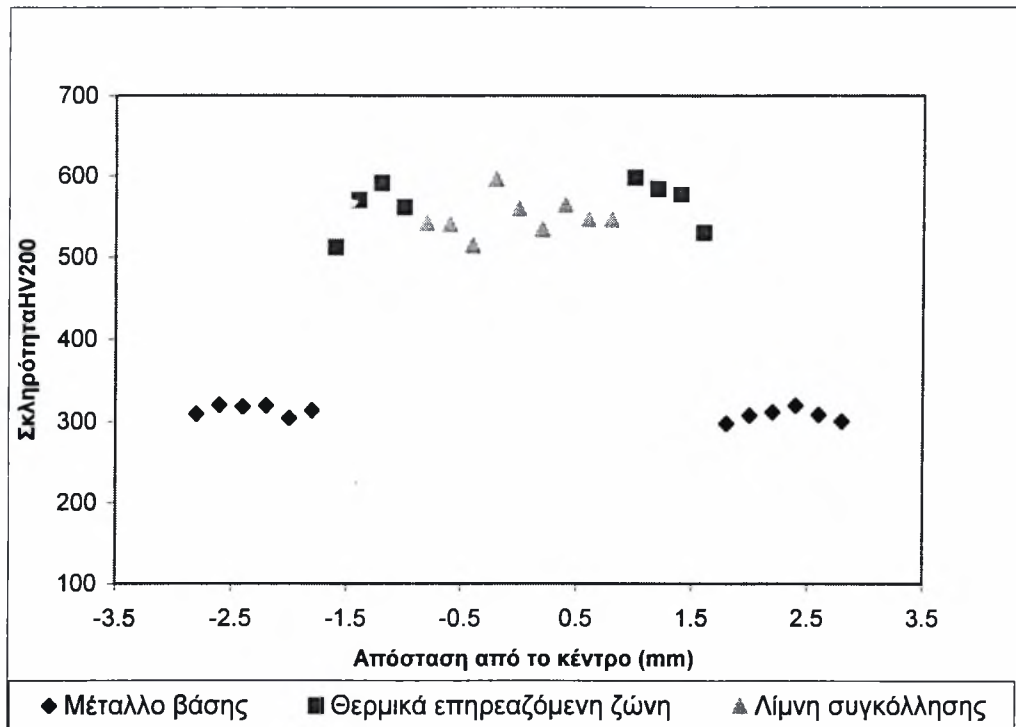
Διάγραμμα 14. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου συμβολής 1, βάθος μικροσκληρομέτρησης 1mm, (200mm/sec, f.p +0.5mm, He 2bar)



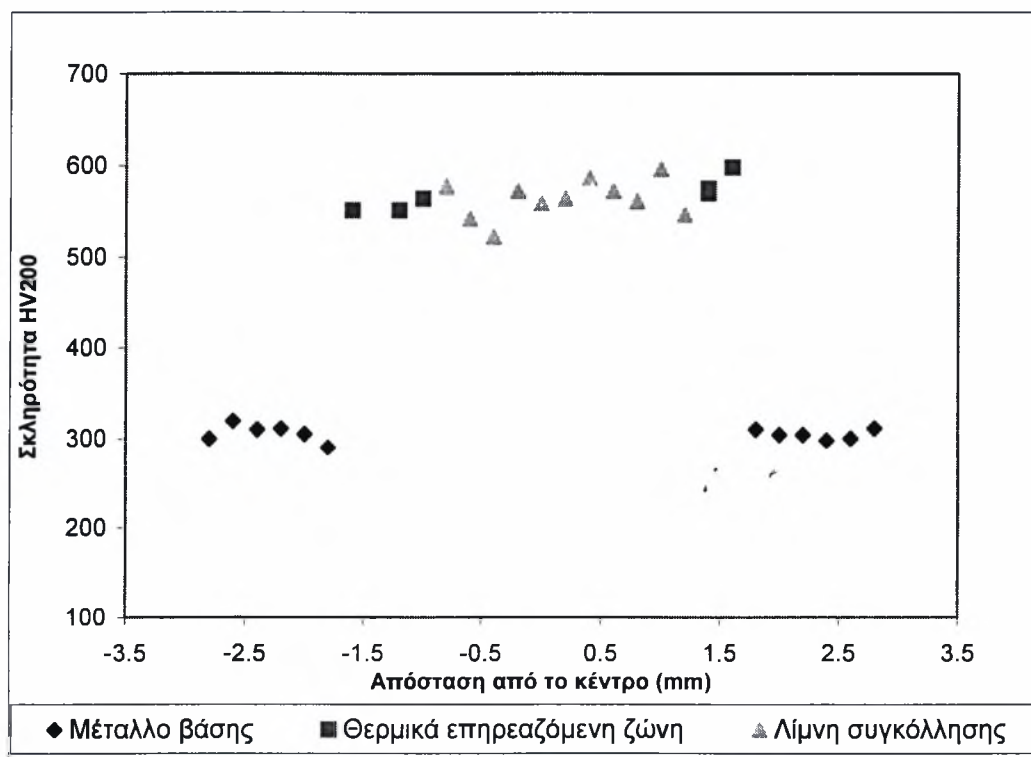
Διάγραμμα 15. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου συμβολής 1, βάθος μικροσκληρομέτρησης 1,6mm, (200mm/sec, f.p +0.5mm, He 2bar)



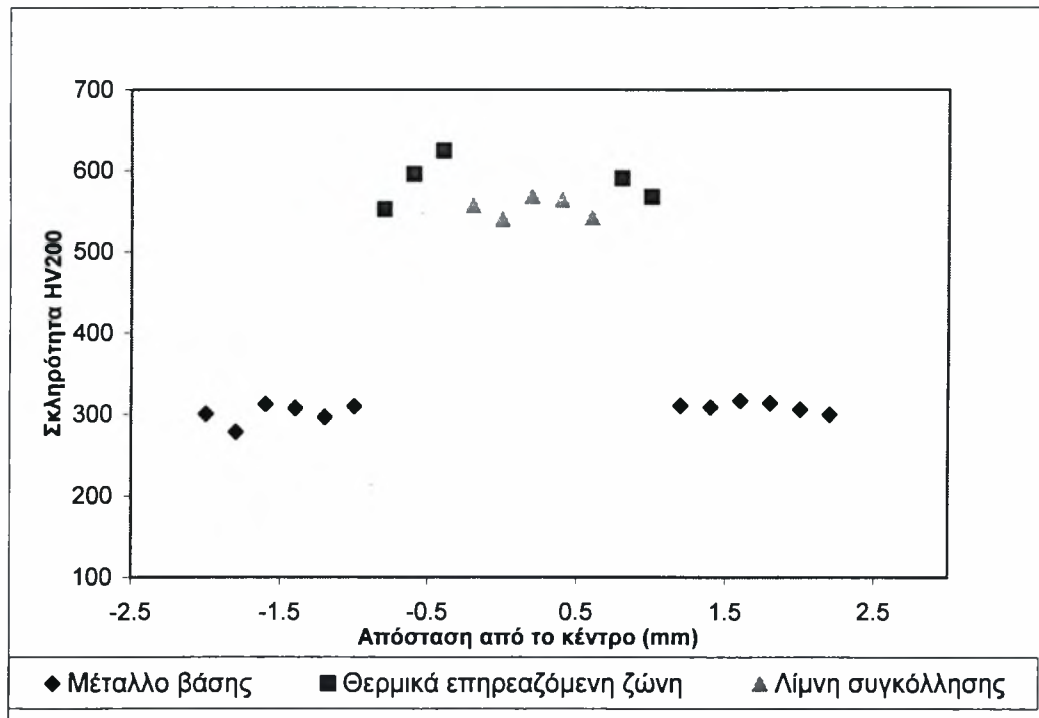
Διάγραμμα 16. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου συμβολής 1(δεύτερη πλευρά), βάθος μικροσκληρομέτρησης 1mm, (200mm/sec, f.p +0.5mm, He 2bar)



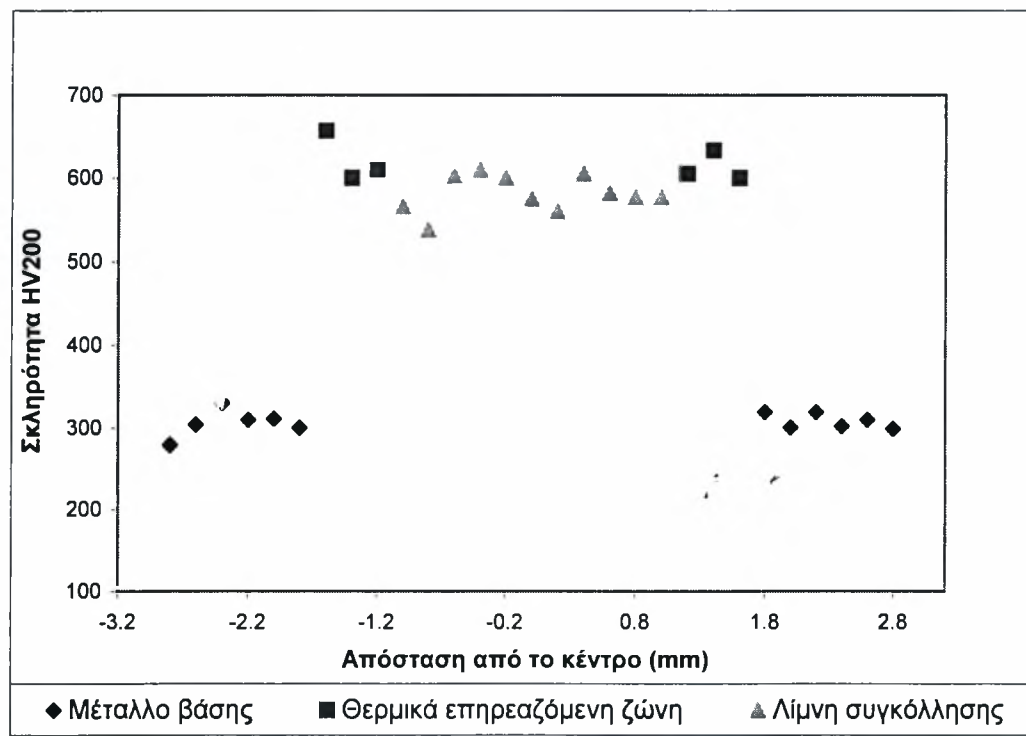
Διάγραμμα 17. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου συμβολής 1 (δεύτερη πλευρά), βάθος μικροσκληρομέτρησης 1,6mm, (200mm/sec, f.p +0.5mm, He 2bar)



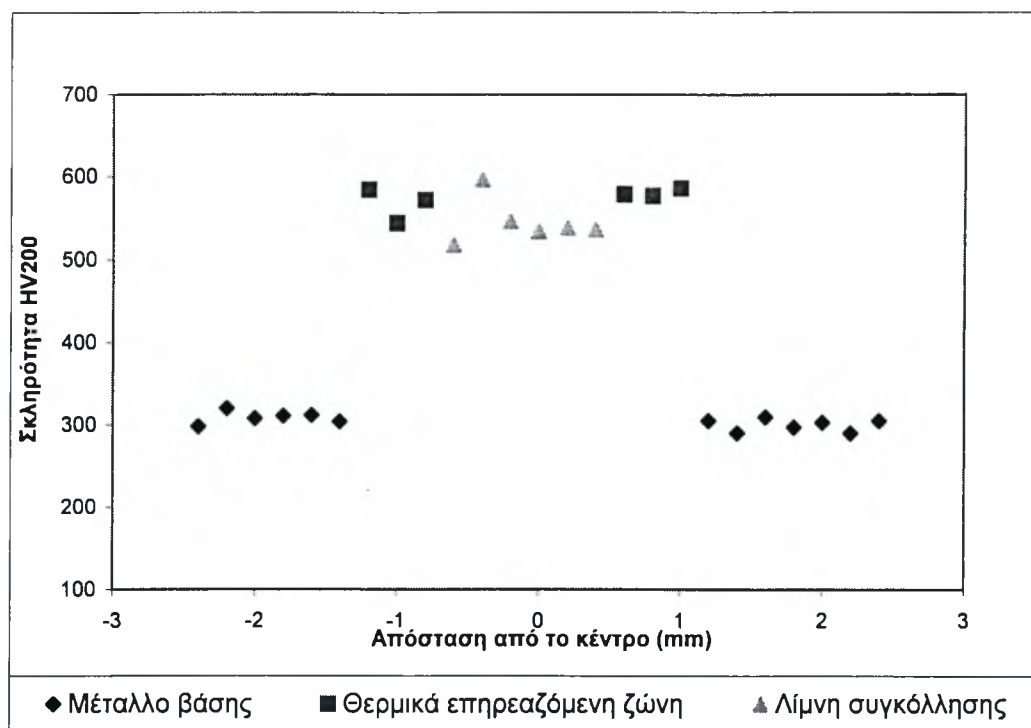
Διάγραμμα 18. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου συμβολής 2, βάθος μικροσκληρομέτρησης 1mm, (320mm/sec, f.p +1mm, He 4bar)



Διάγραμμα 19. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου συμβολής 2, βάθος μικροσκληρομέτρησης 1,6mm, (320mm/sec, f.p +1mm, He 4bar)



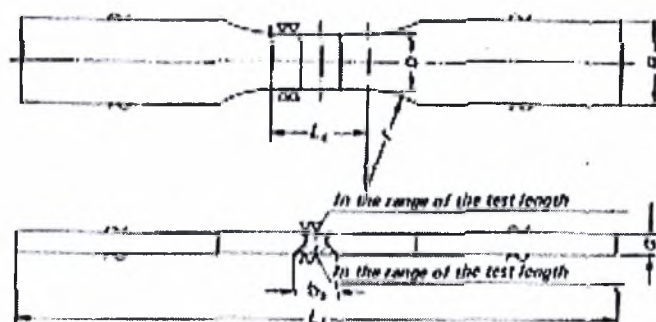
Διάγραμμα 20. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου συμβολής 2 (δεύτερη πλευρά), βάθος μικροσκληρομέτρησης 1mm, (320mm/sec, f.p +1mm, He 4bar)



Διάγραμμα 20. Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου συμβολής 2 (δεύτερη πλευρά), βάθος μικροσκληρομέτρησης 1,6mm, (320mm/sec, f.p +1mm, He 4bar)

4.3.3.1 Έλεγχος αντοχής σε εφελκυσμό

Η δοκιμή εφελκυσμού έγινε σύμφωνα με τη προδιαγραφή EN100021 ενώ η κατασκευή των δοκιμών σύμφωνα με τη προδιαγραφή DIN50120. Σύμφωνα με τη προδιαγραφή αυτή, χρησιμοποιούνται επίπεδα δείγματα όπως φαίνονται στο σχήμα 25. Οι διαστάσεις των δοκιμών καθορίζονται με βάση τον πίνακα 7. Η δοκιμή εφελκυσμού για συγκολλήσεις με επίπεδα δείγματα, χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση της αντοχής και της διαμορφωσιμότητας των συγκολλήσεων, υπολογίζοντας την αντοχή του εφελκυσμού, την θέση θραύσης και τον τύπο της θραύσης.



Σχήμα 25. Σχηματική αναπαράσταση δοκιμών εφελκυσμού

Πίνακας 7. Τυποποιημένες διαστάσεις δοκιμών εφελκυσμού

Πάχος δοκιμίου a	Πάνω από 5mm	Από 5 έως 10mm	Από 10 έως 20mm	Από 20 έως 30mm
Πλάτος δοκιμίου b	15	20	25	30
Ανηγγμένο μήκος L_c ($=b_s+2a \geq 20$)	20	35	60	85
Πλάτος στο άκρο B	≈ 25	≈ 30	≈ 35	≈ 40
Συνολικό μήκος L_t ($\geq L_c+180$)	≥ 200	≥ 215	≥ 250	≥ 265
Ακτίνα r	≥ 35	≥ 35	≥ 35	≥ 35

b_s πλάτος λίμνης συγκόλλησης

Στο εργαστήριο μηχανικών δοκιμών της EBETAM πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές εφελκυσμού, δύο για κάθε συγκόλληση συμβολής. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται στον πίνακα 8, όπου αναγράφεται το όριο διαρροής, το όριο θραύσης και η θέση θραύσης για κάθε δοκιμή. Παρά το γεγονός ότι και στα δύο δοκίμια η θραύση έγινε στην περιοχή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, οι εξαιρετικά υψηλές αντοχές που επέδειξε το υλικό, συμβάλουν στον χαρακτηρισμό και των δύο συγκολλήσεων συμβολής ως συγκολλήσεις καλής ποιότητας. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι το όριο θραύσης του μετάλλου βάσης είναι 695 N/mm^2 , τιμή που είναι πολύ κοντά στο όριο θραύσης των πραγματοποιούμενων συγκολλήσεων. Ωστόσο σημειώνεται ότι υπάρχει περιθώριο βελτίωσης εφόσον αυξηθεί η διείσδυση στη λίμνη συγκόλλησης

Πίνακας 8. Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού

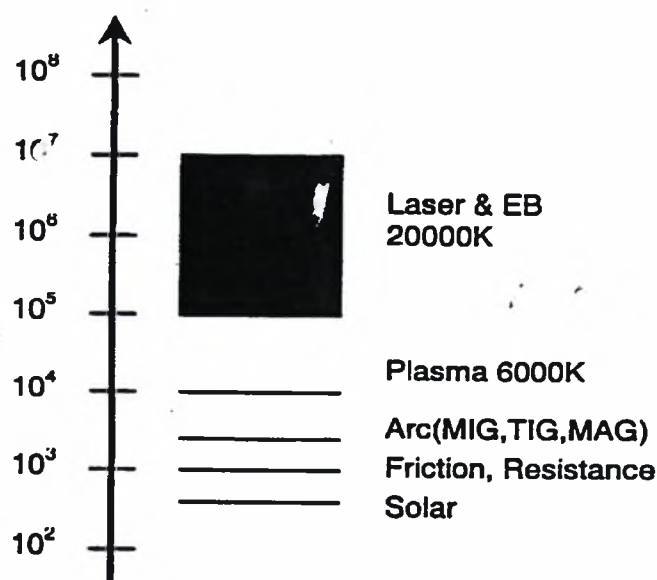
Αριθμός δοκιμής	A/A δοκιμίου	Όριο διαρροής (N/mm^2)	Όριο θραύσης (N/mm^2)	Θέση θραύσης
1η	1	489	612	θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη
2η	1	526	658	θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη
3η	2	498	622	θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη
4η	2	526	658	θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη

4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER ΚΑΙ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ (ELECTRON BEAM)

4.4.1 Γενικά

Η εστιασμένη δέσμη της ακτίνας laser είναι μια από τις υψηλότερες πηγές πυκνότητας ισχύος που είναι διαθέσιμες στη βιομηχανία σήμερα. Είναι αντίστοιχη, σε πυκνότητα ισχύος, με την δέσμη ηλεκτρονίων (βλ. σχήμα 26) αλλά διαφέρουν σε πολλά άλλα σημεία. Η πυκνότητα ενέργειας του laser επιτυγχάνεται με την συγκέντρωση κυμάτων φωτός και όχι ηλεκτρονίων. Η απόδοση του laser δεν περιορίζεται από ηλεκτρικά αγωγικά υλικά και δεν επηρεάζεται από τον μαγνητισμό. Στην πραγματικότητα μπορεί να αλληλεπιδράσει με ποικιλία υλικών, ανεξάρτητα αν αυτά είναι μεταλλικά, πλαστικά, κεραμικά ή άλλα. Ωστόσο, όσον αφορά στην ποιότητα της συγκόλλησης, αυτή υπερτερεί με την μέθοδο electron beam, εφόσον πραγματοποιείται σε κενό και τα εγκλείσματα εκλείπουν.

Το βάθος διείσδυσης που επιτυγχάνεται με τη δέσμη ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερο από ότι με τη δέσμη laser. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκόλληση με δέσμη laser πραγματοποιείται στον αέρα και δεν απαιτείται η δημιουργία κενού. Αντίθετα στην συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων, η απαίτηση του θαλάμου κενού και των ειδικών εξαρτημάτων κενού αυξάνει πολύ το κόστος και μειώνει σημαντικά την παραγωγικότητα της μεθόδου. Μπορεί λοιπόν να ειπωθεί ότι η συγκόλληση με δέσμη laser παρουσιάζει τη καλύτερη σχέση κόστους αποτελεσματικότητας.



Σχήμα 26. «Περιοχές πυκνότητας ισχύος» διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης

4.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών συγκολλήσεων laser και συγκολλήσεων με ηλεκτρονιακή δέσμη

Σε προηγούμενη μελέτη αξιολογήθηκαν πειραματικές συγκολλήσεις συμβολής με ηλεκτρονιακή δέσμη στον κύλινδρο που είναι το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

4.4.2.1 Σύγκριση γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Σε όλα τα δοκίμια των συγκολλήσεων laser η διείσδυση ήταν ατελής σε αντίθεση με την συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων όπου πραγματοποιήθηκε πλήρης διείσδυση. Στις πειραματικές συγκολλήσεις laser που πραγματοποιήθηκαν, το μέσο βάθος διείσδυσης ήταν 2,65mm και το μέγιστο βάθος διείσδυσης που παρατηρήθηκε ήταν 4mm. Πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο της ατελούς διείσδυσης οφείλεται στην χαμηλή ισχύ του laser διοξειδίου του άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε. Μια σημαντική διαφορά που παρατηρείται ανάμεσα στις δύο μεθόδους συγκόλλησης αφορά στο εύρος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης. Στην συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη είναι εξαιρετικά μικρή της τάξης των 0,005mm ενώ η μέση τιμή του εύρους της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης για τις πειραματικές συγκολλήσεις laser ήταν 0,35mm.

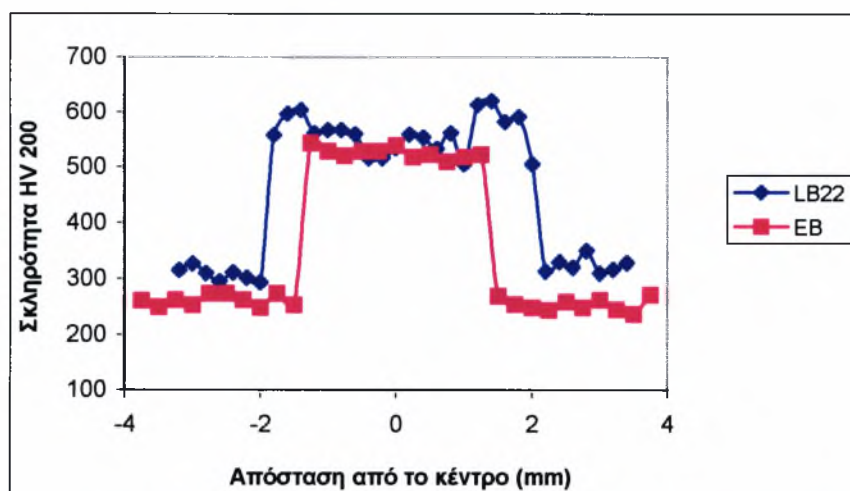
4.4.2.2 Σύγκριση ραδιογραφίας

Η ραδιογραφία των συγκολλήσεων με δέσμη laser και με δέσμη ηλεκτρονίων έδειξε και τις δυο συγκολλήσεις καθαρές από εγκλείσματα και πόρους. Σύμφωνα λοιπόν με τη προδιαγραφή EN 25817:1992 τόσο η συγκόλληση με δέσμη laser όσο και αυτή με δέσμη ηλεκτρονίων κατατάσσονται στο υψηλότερο επίπεδο 'Stringent B'.

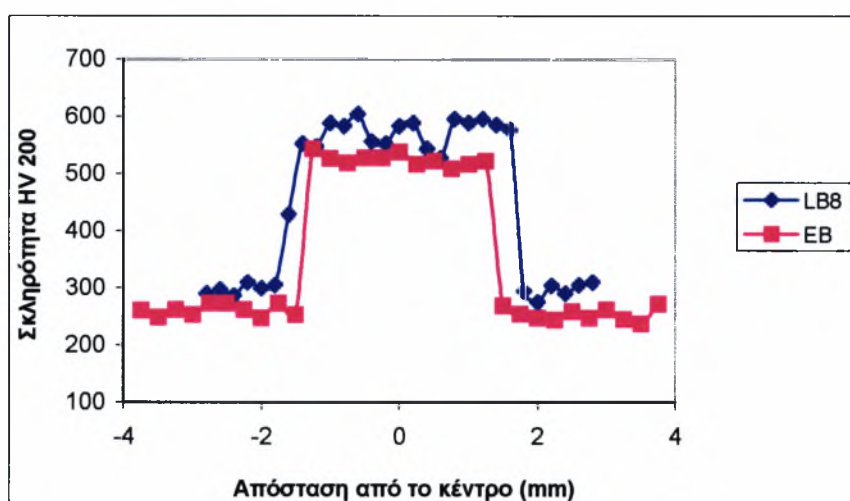
4.4.2.3 Σύγκριση τιμών σκληρότητας

Από τα δεδομένα των μικροσκληρομετρήσεων προκύπτει το ίδιο προφίλ σκληρότητας και στις δύο μεθόδους που χαρακτηρίζεται από αυξημένη σκληρότητα στην λίμνη συγκόλλησης και στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη σε σχέση με το μέταλλο βάση. Ωστόσο οι τιμές της σκληρότητας στη λίμνη συγκόλλησης για την συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα (400-450HV) για την πλειοψηφία των δοκιμίων, ενώ στις συγκολλήσεις με δέσμη laser η σκληρότητα στη λίμνη συγκόλλησης παίρνει υψηλότερες τιμές της τάξης των 600HV.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται αντιπροσωπευτικά προφίλ μικροσκληρότητας για συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν και με τις δύο μεθόδους. Σημειώνεται ότι δεν είναι γνωστό εάν είχε γίνει ανόπτηση στο υλικό, μετά τη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων.



Διάγραμμα 22. Σύγκριση προφίλ σκληρότητας συγκολλήσεων EB και LB22



Διάγραμμα 23. Σύγκριση προφίλ σκληρότητας συγκολλήσεων EB και LB8

4.4.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων από την δοκιμή του εφελκυσμού

Αμφότερα τα δοκίμια των συγκολλήσεων με δέσμη laser και με δέσμη ηλεκτρονίων υποβλήθηκαν στη δοκιμή του εφελκυσμού. Τα αποτελέσματα της δοκιμής για την συγκόλληση με δέσμη laser φαίνονται στον πίνακα 8. Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων επέδειξε αντοχή 750N/mm^2 και η θραύση έγινε στο μέταλλο βάσης σε αντίθεση με την συγκόλληση laser όπου η περιοχή της θραύσης ήταν η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκόλληση laser παρουσίασε ατελή διείσδυση της τάξης του ενός χιλιοστού σε αντίθεση με τη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων όπου η διείσδυση ήταν πλήρης. Εκτιμάται πως αν η διείσδυση ήταν πλήρης και στην συγκόλληση laser, οι αντοχές εφελκυσμού θα ήταν εξίσου υψηλές όπως αυτές που επέδειξε η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παράθεση των πειραματικών δεδομένων στις προηγούμενες ενότητες της εργασίας αυτής προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Με την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης περιορίζεται το βάθος διείσδυσης. Αντίθετα όταν η ταχύτητα πάρει μικρότερες τιμές η διείσδυση αυξάνει
- Με την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης περιορίζεται το εύρος της λίμνης συγκόλλησης ενώ όταν η ταχύτητα πάρει μικρότερες τιμές εύρος της λίμνης αυξάνεται.
- Η θέση του σημείου εστίασης δεν επιδρά σημαντικά στο εύρος της λίμνης συγκόλλησης. Αντίθετα παρατηρείται μείωση της διείσδυσης όταν το σημείο εστίασης είναι 3 με 4 χιλιοστά πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου για χαμηλές τιμές του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας.
- Αύξηση του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας οδηγεί σε αύξηση του βάθους διείσδυσης, του εύρους της λίμνης συγκόλλησης και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης
- Παρατηρήθηκε προφίλ μικροσκληρότητας των συγκολλήσεων που χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές σκληρότητας στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και στη λίμνη συγκόλλησης.
- Σε κανένα από τα δοκίμια των πειραματικών συγκολλήσεων δεν παρατηρήθηκε πλήρης διείσδυση.
- Οι συγκολλήσεις συμβολής χαρακτηρίζονται από ατελή διείσδυση της τάξης του ενός χιλιοστού.
- Η συγκόλληση με laser έχει τη δυνατότητα να υποκαταστήσει επιτυχώς την συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, αφού από τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου(καταστρεπτικού και μη καταστρεπτικού) προκύπτουν συγκρίσιμες τιμές αντοχών και μηχανικής συμπεριφοράς.
- Για πλήρη βιομηχανική εφαρμογή απαιτείται εξοπλισμός laser διοξειδίου του άνθρακα υψηλότερης ισχύος από αυτόν που διατέθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή.
- Οι ερευνητικοί φορείς (ΕΒΕΤΑΜ και Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας) που συμμετείχαν στην εκτέλεση του προγράμματος, στο οποίο εντάσσεται το πειραματικό μέρος της εργασίας, είχαν την ευκαιρία να συνεχίσουν την ερευνητική τους προσπάθεια με σημαντικά οφέλη τεχνογνωσίας πάνω στο αντικείμενο των συγκολλήσεων με τεχνολογίες laser.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Όπως είναι γνωστό οι συγκολλήσεις με δέσμη laser είναι μια αρκετά καινούρια μέθοδος η οποία προσφέρεται για εκτεταμένη μελέτη. Έτσι υπάρχουν αρκετές περιοχές στο πεδίο της έρευνας στις οποίες μπορεί να επεκταθεί κανείς. Παρακάτω προτείνονται κάποια θέματα για μελλοντική έρευνα.

- Συνέχιση των πειραμάτων χρησιμοποιώντας laser μεγαλύτερης ισχύος για την επίτευξη μεγαλύτερου βάθους διείσδυσης.
- Ανάπτυξη και κωδικοποίηση κατάλληλου θερμοκρασιακού μοντέλου για μια καλή και σίγουρη αρχική εκτίμηση των παραμέτρων της συγκόλλησης
- Μέτρηση των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων στις συγκολλήσεις συμβολής.
- Μελέτη του φαινομένου της στερεοποίησης
- Πραγματοποίηση κατάλληλης θερμικής κατεργασίας στις συγκολλήσεις συμβολής για την ανακούφιση των τάσεων και για την επίτευξη ενός βέλτιστου συνδυασμού σκληρότητας ολκιμότητας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ASM Handbook, Volume 6, Welding brazing and soldering
- [2] W.M.Steen, Laser Material Processing
- [3] Euro Laser Academy (ELA),ch.1-2
- [4] Λιάπης Τριαντάφυλλος, Συγκόλληση συμβολής ελασμάτων ναυπηγικού χάλυβαD36 laser CO₂, διπλωματική εργασία (1998)
- [5] H.C.Tse, H.C.Man, T.M.Yue, Effect of magnetic field on plasma control during CO₂ laser welding, OLT, 31 (1999), 363-368
- [6] H.C.Tse, H.C.Man, T.M.Yue, Effect of electric field on plasma control during CO₂ laser welding, OLE, 33 (2000), 181-189
- [7] C.Y.Jiang, W.S.Lau, T.M.Yue, L.Chiang, Ann. CIRP, 42 (1993) 223-226
- [8] T.M.Yue, C.Y.Jiang, J.H.Xu, W.S.Lau, Laser fantasy: from machining to welding, JMPT, 57 (1996), 316-319
- [9] Laser Institute of America, Guide to Laser Material Processing
- [10] C.Carmignani, R.Mares, G.Tselli, Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt welded thick steel plate, Comp.Meth.Appl.Mech.Eng, 179 (1999), 197-214
- [11] D.Bauele, Laser Processing and Chemistry
- [12] Μπεράτης Νίκος, Συγκόλληση με laser κατασκευαστικού χάλυβα και σύγκριση αυτής με τη συγκόλληση ηλεκτρονιακής δέσμης, διπλωματική εργασία (1998)

[13] Βλαχογιάννης Μιχάλης, Μελέτη συγκολλήσεων laser και σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους, διπλωματική εργασία (1996)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1	Κεφαλή κυλίνδρου άρματος μάχης M60
Σχήμα 2	Σχηματική παράσταση του σημείου συγκόλλησης
Σχήμα 3	Γενική διάταξη της συγκόλλησης laser
Σχήμα 4	Μεταβολή του βάθους διείσδυσης σε συνάρτηση με την ταχύτητα συγκόλλησης και την ισχύ ενός CO2 laser
Σχήμα 5	Σχηματική αναπαράσταση φαινομένων drop out και undercut
Σχήμα 6	Προφίλ της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με την θέση του σημείου εστίασης της δέσμης
Σχήμα 7	Μεταβολή του βάθους διείσδυσης σε σχέση με την ισχύ του laser για διαφορετική σύσταση του προστατευτικού αερίου
Σχήμα 8	Μεταβολή του βάθους διείσδυσης σε σχέση με την ταχύτητα συγκόλλησης για προστατευτικό αέριο He και Ar
Σχήμα 9	Οι μορφές συγκόλλησης a)Conduction και b)Keyhole
Σχήμα 10	Επίδραση του μαγνητικού πεδίου στο βάθος διείσδυσης για διαφορετικές τιμές ισχύος
Σχήμα 11	Επίδραση του μαγνητικού πεδίου στο βάθος διείσδυσης και στο εύρος της λίμνης συγκόλλησης
Σχήμα 12	Σχηματική απεικόνιση συγκόλλησης τύπου keyhole
Σχήμα 13	Κανονικοποιημένη ταχύτητα συγκόλλησης συνάρτηση της κανονικοποιημένης ισχύος του laser
Σχήμα 14	Αμοιβαία επιρροή στα πεδία των θερμοκρασιών, των τάσεων και της μικροδομής
Σχήμα 15	Ακολουθία του παραμορφωμένου πλέγματος κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης
Σχήμα 16	Παραμορφώσεις του δοκιμίου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ (συνέχεια)

Σχήμα 17	Παραμένουσες τάσεις εγκάρσια στην γραμμή της συγκόλλησης
Σχήμα 18	Σχηματική αναπαράσταση συγκόλλησης-bead on plate
Σχήμα 19	Σχηματική αναπαράσταση συγκόλλησης συμβολής
Σχήμα 20	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δημιουργούμενης συγκόλλησης laser
Σχήμα 21	Σχηματική παράσταση της δοκιμασίας σκληρότητας
Σχήμα 22	Σχηματική αναπαράσταση περιοχής μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίων bead on plate
Σχήμα 23	Σχηματική αναπαράσταση ραδιογραφικού ελέγχου
Σχήμα 24	Σχηματική αναπαράσταση περιοχής μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίων συμβολής
Σχήμα 25	Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίων εφελκυσμού
Σχήμα 26	Περιοχές πυκνότητας ισχύος διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1	Αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης με δέσμη laser και σύγκριση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης
Πίνακας 2	Χημική σύσταση χάλυβα (%κ.β)
Πίνακας 3	Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε
Πίνακας 4	Συνθήκες πειραματικών συγκολλήσεων
Πίνακας 5	Συνθήκες συγκολλήσεων συμβολής
Πίνακας 6	Τιμές γεωμετρικών χαρακτηριστικών πειραματικών συγκολλήσεων
Πίνακας 7	Τυποποιημένες διαστάσεις δοκιμίων εφελκυσμού
Πίνακας 8	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

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 • C. I-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 $z = a\sqrt{2}$)

5 Evaluation of welds

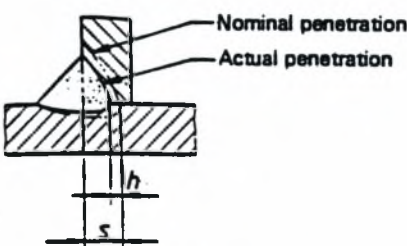
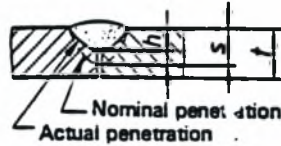
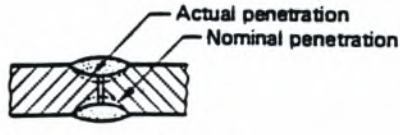
Limits for imperfections are given in table 1.

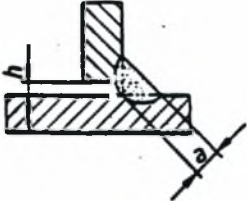
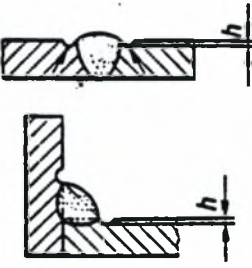
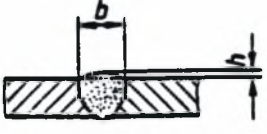
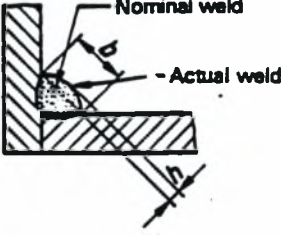
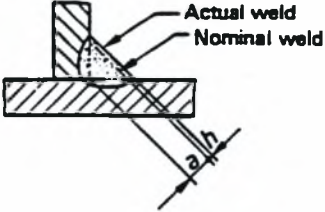
A welded joint should normally be evaluated separately for each individual type of imperfection (Nos. 1 to 25).

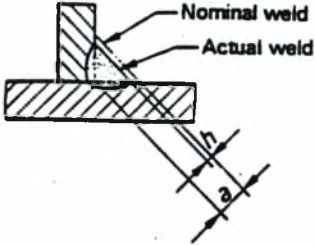
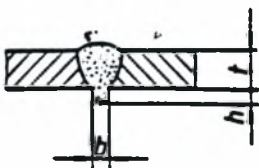
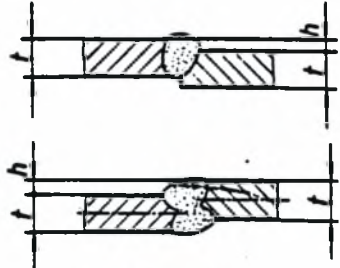
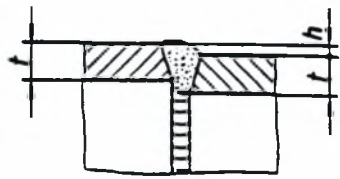
Different types of imperfection occurring at any cross-section of the joint may need special consideration (see No. 26).

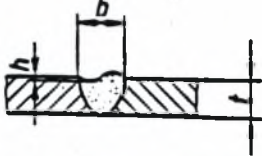
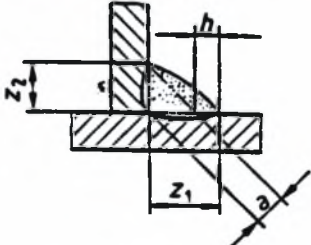
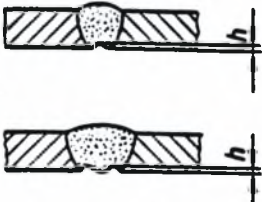

Table 1 — Limits for Imperfections

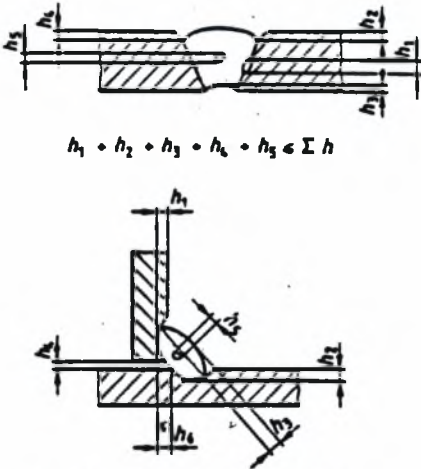
No.	Imperfection designation	ISO 6520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels		
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B
1	Cracks	100	All types of cracks except micro cracks ($h/l < 1 \text{ n.m}^2$), crater cracks, see No. 2	Not permitted		
2	Crater crack	104		Permitted	Not permitted	
3	Porosity and gas pores	2011 2012 2014 2017	<p>The following conditions and limits for imperfections shall be fulfilled:</p> <p>a) Maximum dimension of the summation of the projected or surface crack area of the imperfection</p> <p>b) Maximum dimension of a single pore for</p> <ul style="list-style-type: none"> — butt welds — fillet welds <p>c) Maximum dimension for a single pore</p>	<p>4 %</p> <p>$d < 0,5 s$ $d < 0,5 a$</p> <p>5 mm</p>	<p>2 %</p> <p>$d < 0,4 s$ $d < 0,4 a$</p> <p>4 mm</p>	<p>1 %</p> <p>$d < 0,3 s$ $d < 0,3 a$</p> <p>3 mm</p>
4	Localized (clustered) porosity	2013	<p>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.</p> <p>The permitted porous area should be local. The possibility of masking other imperfections should be taken into consideration.</p> <p>The following conditions and limits for imperfections shall be fulfilled:</p> <p>a) Maximum dimension of the summation of the projected or surface crack area of the imperfection</p> <p>b) Maximum dimension of a single pore for</p> <ul style="list-style-type: none"> — butt welds — fillet welds <p>c) Maximum dimension for localized clustered porosity</p>	<p>10 %</p> <p>$d < 0,5 s$ $d < 0,5 a$</p> <p>4 mm</p>	<p>8 %</p> <p>$d < 0,4 s$ $d < 0,4 a$</p> <p>3 mm</p>	<p>4 %</p> <p>$d < 0,3 s$ $d < 0,3 a$</p> <p>2 mm</p>
5	Elongated cavities, wormholes	2015 2016	<p>Long imperfections for</p> <ul style="list-style-type: none"> — butt welds — fillet welds <p>In any case, maximum dimension for elongated cavities, wormholes</p>	<p>$h < 0,5 s$ $h < 0,5 a$</p> <p>2 mm</p>	Not permitted	Not permitted
			<p>Short imperfections for</p> <ul style="list-style-type: none"> — butt welds — fillet welds <p>In any case, maximum dimension for elongated cavities, wormholes</p>	<p>$h < 0,5 s$ $h < 0,5 a$</p> <p>4 mm or Not Larger Than Thickness (NLTT)</p>	<p>$h < 0,4 s$ $h < 0,4 a$</p> <p>3 mm or NLTT</p>	<p>$h < 0,3 s$ $h < 0,3 a$</p> <p>2 mm or NLTT</p>

No.	Imperfection designation	ISO 8520 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 inclusion.	$h \leq 0,5 s$ $h \leq 0,5 a$ 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	<p>Nominal weld - Actual weld</p> 	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,25 b$, 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 6520 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		
				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	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,8 b$, 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>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>Figure B — Circumferential welds</p> $h \leq 0,5 t$ max. 4 mm max. 3 mm max. 2 mm		

No.	Imperfection designation	ISO 6520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels		
				Moderate D	Intermediate C	Stringent
19	Incompletely filled groove	511	Smooth transition is required. 	Long imperfections: Not permitted		
	Sagging	509		$h < 0,2 t$, max. 2 mm	$h < 0,1 t$, max. 1 mm	$h < 0,05 t$, max. 0,5 mm
20	Excessive asymmetry fillet weld	512	It is assumed that an asymmetric fillet weld has not been expressly prescribed. 	$h < 2 \text{ mm} + 0,2 a$	$h < 2 \text{ mm} + 0,15 a$	$h < 1,5 \text{ mm} + 0,15 a$
21	Root concavity Shrinkage groove	515 6013	Smooth transition is required. 	$h < 1,5 \text{ mm}$	$h < 1 \text{ mm}$	$h < 0,5 \text{ mm}$
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 ¹⁾	—	<p>For thicknesses $s < 10$ mm or $a < 10$ mm or less, special consideration may be necessary.</p>  <p>$h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 \leq \Sigma h$</p> <p>$h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 = \Sigma h$</p>	<p>Maximum total height of short imperfections Σh</p> <p>0,25 s or 0,25 a, max. 10 mm</p>	<p>0,2 s or 0,2 a, max. 10 mm</p>	<p>0,15 s or 0,15 a, 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 photomicrographs 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
28.11.01	ΝΥΧΘ
12/12/01	2011
6.6.02	Χουλιάρη
21.8.09	77

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

ΒΟΛΟΣ - ΤΗΛ. (0421) ~~69.781~~ 84